

令和3年度重要技術管理体制強化事業
(量子計測・センシング技術に係る重要技術等の動向調査)
調査報告書

令和4年3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

目 次

はじめに	1
第1部 技術概要（技術俯瞰等）	2
第1章 スピン量子センシング技術	3
第1節 固体量子センサ	3
第2節 量子スピントロニクスセンサ	9
第2章 光量子センシング技術	14
第1節 量子もつれ光センサ	14
第2節 光子検出器	20
第3章 冷却原子を用いた量子センシング技術	23
第1節 量子慣性センサ	23
第2節 光格子時計	29
第4章 その他の量子センシング技術	32
第1節 その他	32
第5章 技術の概要一覧表	35
第2部 市場環境調査	36
第1章 量子計測・センシング市場環境調査内容／調査方法	36
第1節 調査内容	36
第2節 調査方法	36
第2章 量子計測・センシング全体市場	37
第1節 量子磁気センサ市場	38
第2節 慣性センサ市場	40
第3節 原子時計市場	42
第3章 用途に関する市場調査	44
第1節 脳磁計	44
第2節 電池モニタリング	47
第3節 エナジーハーベスト	49
第4節 細胞分析	51
第5節 赤外分光装置	52
第6節 車載カメラ／レーダー	53
第7節 ナビゲーション	55
第8節 用途に関する市場調査まとめ（参考）	56
第3部 政策動向調査	57
第1章 日本の政策動向	57
第1節 内閣府	57
第2節 文部科学省	60
第3節 経済産業省	64
第2章 諸外国・地域の政策動向	65
第1節 米国の政策動向	65

第2節	EUの政策動向	70
第3節	英国の政策動向	73
第4節	ドイツの政策動向	76
第5節	フランスの政策動向	77
第6節	中国の政策動向	79
第7節	韓国の政策動向	81
第4部	特許動向調査	84
第1章	調査対象と調査方法	84
第1節	調査対象	84
第2節	調査方法	84
第2章	全体動向調査	85
第1節	出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率	85
第2節	[出願先：日米欧中韓] 出願先国別出願件数推移及び出願件数比率	95
第3節	[出願先：日米欧中韓] 出願先国別登録件数推移及び登録件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）	105
第4節	[出願先：日米欧中韓] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率	115
第5節	[出願先：日米欧中韓] 出願人別ファミリー件数推移	125
第3章	パテントマップ解析による調査	135
第4章	技術区分別動向調査	144
第1節	技術区分	144
第2節	[出願先：日米欧中韓] 技術区分別ファミリー件数推移	147
第3節	[出願先：日米欧中韓] 技術区分別一出願人国籍別ファミリー件数	154
第4節	[出願先：日米欧中韓] [技術区分別] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率	161
第5節	[出願先：日米欧中韓] [技術区分別] 出願人別ファミリー件数推移	180
第5部	論文動向調査	201
第1章	調査対象と調査方法	201
第1節	調査対象	201
第2節	調査方法	201
第2章	全体動向調査	202
第1節	研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率	202
第2節	研究者所属機関別論文発表件数推移	212
第3節	研究者別論文発表件数上位ランキング	222
第3章	マップ解析による調査	227
第4章	技術区分別動向調査	236
第1節	技術区分	236
第2節	技術区分別論文発表件数推移	239
第3節	技術区分別一研究者所属機関国籍別論文発表件数	246
第4節	[技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率	253
第5節	[技術区分別] 研究者所属機関別論文発表件数推移	276

第6部	グラント動向調査	295
第1章	調査対象と調査方法	295
第1節	調査対象	295
第2節	調査方法	295
第2章	全体動向調査	301
第1節	研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額及びグラント件数	301
第2節	研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率	303
第3節	研究者所属機関別資金流入額推移（資金流入額上位機関）	312
第4節	研究者所属機関別資金流入額上位ランキング	320
第3章	技術区分別動向調査	325
第1節	技術区分	325
第2節	技術区分別資金流入額推移	328
第3節	技術区分別－研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額	335
第4節	〔技術区分別〕研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率	342
第5節	〔技術区分別〕研究者所属機関別資金流入額推移（資金流入額上位機関）	365
第7部	総合分析	381
資料		391
資料1	特許検索式	391
資料2	論文検索式	395

はじめに

安全保障分野のすそ野は経済・技術分野に急速に拡大している。また、感染症の世界的拡大により、サプライチェーンの特定国への依存という脆弱性がもたらすリスクが浮き彫りになるなど、経済安全保障の重要性がこれまで以上に高まっている。

このような背景に鑑み、産業競争力や安全保障上の観点における重要技術については、その生産基盤や国内外の研究開発動向等の実態を調査することにより、我が国の優位性や脆弱性を把握し、当該技術の流出防止や研究開発促進等を実施することが望まれる。

量子技術は、我が国の経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる可能性を持つ重要技術として注目されている。次世代の基盤技術として「量子計測・センシング技術」に対しては、民生用途への期待が高だけでなく、軍事転用への懸念も強いため、当該技術の研究開発動向等の最新事情を把握・整理する必要がある。

本調査では「量子計測・センシング技術」として、「固体量子センサ」、「量子スピントロニクスセンサ」、「量子もつれ光センサ」、「光子検出器」、「量子慣性センサ」、「光格子時計」、「その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID）、超核偏極技術、フォノンセンシング）」の7つの技術を対象とし、「技術の概要」、「市場環境」、「政策動向」、「特許動向」、「論文動向」、「グラント動向」の調査をすることで、我が国の優位性（競争力）や脆弱性を分析・評価し、外国為替及び外国貿易法の運用の強化と執行体制の整備に役立つ基礎資料を得ることを目的としている。

第1部 技術概要（技術俯瞰等）

「量子計測・センシング技術」を7区分に分け、調査を行った。

表 1-1-1 量子計測・センシング技術（7区分）

分類	スピン量子センシング技術		光量子センシング技術		冷却原子を用いた量子センシング技術		その他の量子センシング技術
	① 固体量子センサ	② 量子スピントロニクスセンサ	③ 量子もつれ光センサ	④ 光子検出器	⑤ 量子慣性センサ	⑥ 光格子時計	⑦ その他
具体例	・NVセンサを用いたセンサ	・トンネル磁気抵抗(TMR)センサ ・スピン熱流センサ	・イメージングセンサ（量子もつれ顕微鏡・量OCT・量子レーダー等）	・単一光子検出器（TES・SSPD等）	・加速度センサ ・角速度センサ ・重力勾配センサ	・次世代原子時計（重力変化計測）	・超伝導量子干渉素子（SQUID） ・超核偏極技術 ・フォノンセンシング

技術の概要は、「量子計測・センシング技術」の7区分について以下の内容を調査しまとめている。

技術に関してはできるだけ俯瞰して整理する。デバイス本体に加え、重要な要素技術や周辺技術については、プレイヤー間の技術／市場上の優位性も分析・評価した。

<1>定義（動作原理・種類等）

<2>構造・構成要素

<3>課題

<4>用途

<5>主要プレイヤー情報

また、これらの技術を俯瞰して把握するため、調査のまとめとして7区分の技術を含んでいる4つの大区分の概要一覧表を作成する。

第1章 スピン量子センシング技術

第1節 固体量子センサ

〈固体量子デバイスによる超高感度磁場・電場・温度・圧力センシング。〉

〈1〉定義（動作原理・種類等）

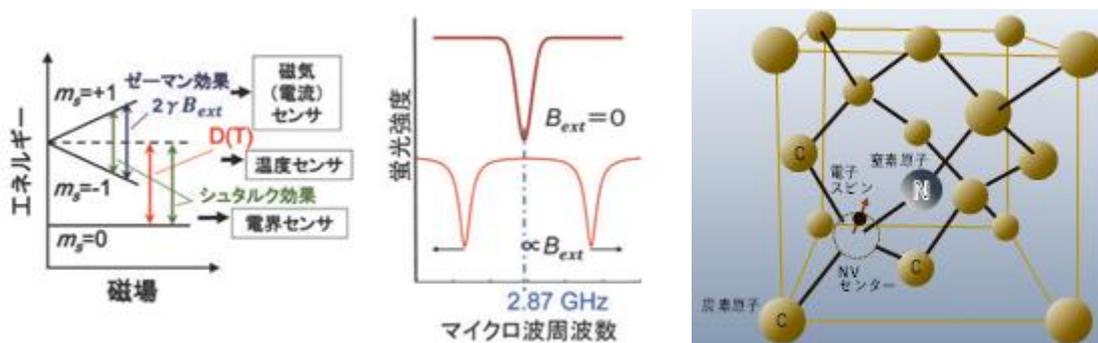
ダイヤモンド結晶構造は、共有結合が4本で物理的に強固な物質である。ダイヤモンド結晶構造ができる過程で、結合手を3本しかもっていない窒素原子(N)が炭素原子に置き換わると、図1-1-1のように炭素の結合手が1本余り、空孔(Vacancy)ができる。この複合不純物欠陥の空孔に電子を閉じ込めて(ダイヤモンド NV センタ)、当該電子の「スピン」と呼ばれる量子状態を制御することにより、室温で磁場・電場・温度・圧力を高感度に計測するセンサとして使用できる。

NV センタのエネルギー準位 m_s (3重項状態) は“0”と“±1”の状態を取る。ここで、“0”は緑色光で励起すると、赤色蛍光を発生して“0”の状態に戻るが、“±1”は緑色光で励起しても、赤色蛍光は発生されない。また、“0”に共鳴周波数(2.87GHz)のマイクロ波を照射すると、電子スピン共鳴により、“1”に遷移させることができる。

そして、 m_s “1”の状態の NV センタに「磁場」を印加すると、図1-1-1のようにゼーマン効果¹により、当該磁場の大きさに対応するエネルギー差を有する $m_s=+1$ と $m_s=-1$ に分割される。その際、当該エネルギー差に対応してマイクロ波の吸収周波数が分離し、マイクロ波の周波数を変化させながら照射して光検出磁気共鳴 (Optically Detected Magnetic Resonance: ODMR) による当該吸収周波数の分離を計測することで、磁場を高感度で計測できる。また、「電場」を印加すると、シュタルク効果²により、同様にマイクロ波の吸収周波数が分離するので、マイクロ波の周波数を変化させながら照射すると、ODMR による当該吸収周波数の分離を計測することで、電場を高感度で計測できる。更に、「温度」によってエネルギー準位 $m_s=0$ と $m_s=\pm 1$ とのエネルギー差が変動するので、マイクロ波の周波数を変化させながら照射して当該吸収周波数のシフトを計測することで、温度を高感度で計測できる。また、「圧力」でも同様の現象が起き、圧力のセンシングも可能である。

したがって、磁場・電場・温度・圧力を同時に計測することができる。

図1-1-1 固体量子センサと磁場、電場、温度の計測原理



(出典：左図 株式会社エヌ・ティー・エス「量子センシングハンドブック」P.15 図3、右図 三菱ケミカルリサーチで作成)

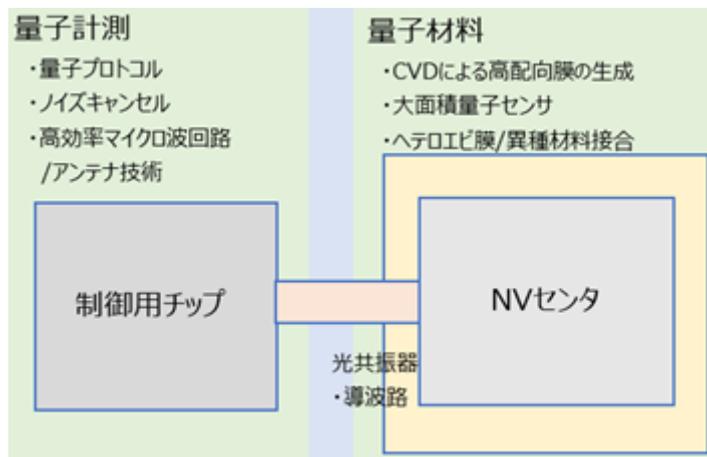
¹ ゼーマン効果: 原子から放出される電磁波のスペクトルにおいて、磁場が無いときには単一波長であったスペクトル線が、原子を磁場中においた場合には複数のスペクトル線に分裂する現象

² シュタルク効果: 原子や分子に一樣な外部電場をかけた時に、スペクトルが変化する現象

< 2 > 構造・構成要素

固体量子センサシステムの構成要素は、量子材料（NV センタ形成）と量子計測による読み出し制御である。（図 1-1-2）

図 1-1-2 固体量子センサシステムの構成技術



(出典：三菱ケミカルリサーチで作成)

(1) 量子材料

量子材料での NV センタ生成方法は、以下の 3 つの方法がある。窒素イオン注入法（ダイヤモンド結晶中への窒素イオン注入）、量子線照射法（窒素を含むダイヤモンドに電子などを量子線照射）、CVD 法 (Chemical Vapor Deposition: 化学気相成長法) である。

(2) 量子計測

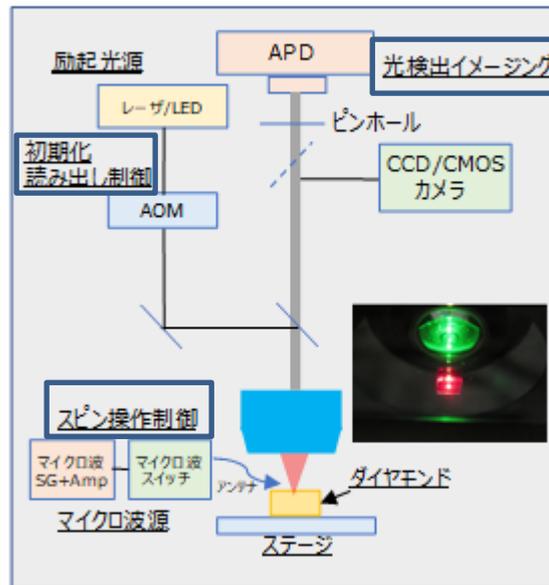
量子計測では、光検出磁気共鳴 (ODMR : Optically Detected Magnetic Resonance) により NV センタの電子スピンのコヒーレンス制御が行われる。ODMR は、蛍光検出器イメージセンサまたはフォトダイオード (APD)、励起光源 (レーザまたは LED)、及びマイクロ波源により計測される。音響光学素子 (AOM : Acoustic-Optic Modulator) により励起光をパルス化してダイヤモンド NV センタに照射し、電子スピンの初期化と読み出し制御を行う。

スピン操作には、パルス化したマイクロ波を照射する。

量子計測では、位相が直交する 2 種類のマイクロ波を用い、位相の違いによってどちら周りに回転されるかを制御できる。この 2 種類のマイクロ波より、位相補償が可能となる。位相を補償することでスピンエコーの現象が起こり、データが保持しやすい状態となる。これは、ダイナミカルデカップリング法といわれ、信号帯域の圧縮が可能で、AC 磁場で高感度に測定することが可能になる。

量子計測システム例を図 1-1-3 に示す。

図 1-1-3 量子計測システム例（APD、励起光源、マイクロ波光源などで構成）



(出典：三菱ケミカルリサーチで作成)

< 3 > 課題

(1) 感度向上

固体量子センサの感度を向上するためには、電子スピンの NV センタ生成率とコヒーレンス時間を向上させる必要がある。NV センタを生成する際、CVD 法では、必要な窒素の量に対する NV センタの生成率が悪く、過剰な置換窒素 (P1 センタ) がスピノイズになるため、時間量子的に重ね合わせられた 2 つの状態の間でスピンに保存された量子情報がノイズにより消失してしまい (コヒーレンス時間が短くなる) 感度が悪くなる。NV センタ生成率向上と、コヒーレンス時間の伸長が課題である。

(2) 量子計測/小型化

ダイナミカルデカップリング法では、位相補償によりスピネコーが起き、高感度で測定することが可能になるので AC 磁場では高い効果があるが、DC 磁場では自由誘導減衰³に基づいて、感度は 1~2 桁以上低く、課題となっている。用途により測定環境や磁場の種類やレベルも違うので、用途に合わせ込んだ最適な計測システムが必要となる。センサ感度は一度に計測する NV 中心の数を増やすことにより、更に高めることができる。数を増やすと空間分解能が下がるという課題もあるが、これまで多数の NV 中心を一度に計測することにより、0.9 ピコテスラ/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の交流磁場感度が報告されている。多数の NV 中心を一度に計測できる試料を合成することにより、さらなる感度向上も期待され、空間分解能が高くなくてもよい応用で、高い感度が要求される核磁気共鳴、心磁計、脳磁計などへの適用も期待される。Handy Type の固体量子センサも開発されている。位置及び量を制御した均一な固体量子センサを形成する技術開発も必要である。核磁気共鳴、心磁計、脳磁計への応用には小型化も重要である。

³ 自由誘導減衰: 磁場中の (通常 z 軸に沿った) 非平衡核スピン磁化歳差運動によって生成する可観測の NMR シグナルである。

< 4 >用途

量子状態の利用や制御のために極低温状態が必要な素子が多いが、ダイヤモンド NV センタは、**常温・室温で動作する点が大きな特徴**である。そのため、実験室ではない実際の社会環境での利用はもちろん、生きた生体の観察に適し、磁場・電場・温度等を高感度に、また空間分解能をナノメートルからミリメートルまでスケラブルに計測することができる。感度の面では、例えば心臓の鼓動に伴う心磁や脳の電氣的な活動に伴う脳磁といった、非常に微弱な磁気（ピコテスラ（10 のマイナス 12 乗 T）からフェムトテスラ（10 のマイナス 15 乗 T）領域の磁気であり、地球の磁気が数 10 マイクロテスラ（10 のマイナス 6 乗 T）であることに対して最大 10 乗分の 1 にもなる微弱な磁気）が、従来の SQUID と呼ばれる超伝導技術を用いた特殊な大型機器を用いなくとも計測可能と期待されている。また、TMR を用いた磁気センサに比べて、**ダイナミックレンジが大きく、線形性が高い**ことも特徴である。空間分解能と磁気感度から見た固体量子センサの応用の可能性を図 1-1-4 に示す。以下に個々の応用用途を説明する。

更に、最近では、SiC などパワーデバイスに隣接や埋め込みで、デバイス内の磁気や温度の計測し、SiC パワーデバイスの解析応用が進展している。

また、生体応用として、局所温度の計測により、癌、生体内代謝、ミトコンドリアの分析などの成果が出てきている。

図 1-1-4 固体量子センサの応用の可能性（空間分解能 vs 磁気感度）



(出典：東京工業大学波多野先生/酒井先生ご提供)

(1) 生体計測

I. 細胞ネットワーク計測 (ニューロン)

細胞計測では、神経細胞内や神経ネットワークの電流計測を目指している。

II. 細胞タンパク質/DNA 計測

細胞内に固体量子センサを置くことで、タンパク質やDNAの磁場や電場の計測を行う。その活動と周囲の環境との関係、タンパク質の生体の中での変化を捉えることにより、細胞のがん化や老化のメカニズムの解明が期待されている。

III. 脳磁計測

脳磁計測では頭蓋外部で計測される磁場から、頭部内部の神経の活動を推定する。

(2) エネルギー磁場計測

電動車 (EV)搭載の電池の磁場を計測する。東京工業大学は、矢崎総業と共同で EV 電池残量をモニタリングする技術を開発し、EVの走行距離を10%改善できる可能性を示した。

< 5 > 主要プレイヤー情報 (デバイス、重要な要素技術、周辺技術のプレイヤー間の技術/市場上の優位性分析・評価)

< 日本国内 >

国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の「**光・量子飛躍フラッグシップ・プログラム (Q-LEAP)**」にて、「量子計測・センシング」が技術領域として取り上げられ、二つの「**Flagship プロジェクト**」と7つの「**基礎基盤研究**」(「高感度重力勾配センサによる地震早期アラート手法の確立」、「光子数識別量子ナノフォトニクス」の創成、「2重に量子雑音を圧搾した量子原子磁力計の開発」、「複雑分子系としての光合成機能の解明に向けた多次元量子もつれ分光技術の開発」、「量子もつれ光子対を利用した量子計測デバイスの研究」、「量子センシング高感度化への複合欠陥材料科学」、「次世代高性能量子慣性センサーの開発」)が行われている。プログラムの期間は平成30年度～令和11年度である。

「Flagship プロジェクト」の一つは、「**固体量子センサの高度制御による革新的センサシステムの創出**」(研究代表者:東京工業大学 波多野睦子教授)で、ダイヤモンド NV センサを活用した量子計測・センシングデバイスのプロトタイプを開発し、社会実装を目指している。具体的には二つのグループを立ち上げ、実用化に向けた研究開発を行っている。量子固体センサの基礎研究から応用研究までバランスよく、10年の長期スパンで計画を立てて研究開発を実施している。(詳細は、第3部政策動向を参照)

「Flagship プロジェクト」のもう一つは、「**量子生命技術の創製と医学・生命科学の革新**」(研究代表者:量子科学技術研究開発機構(QST)馬場嘉信領域長)で、医学・生命科学研究に利活用される計測技術のプロトタイプの実現を目指している。

具体的には、「生体ナノ量子センサシステムの開発」、「超高感度 MRI/NMR 装置」、「超偏極プローブ分子の開発」、「生物機能の量子論的機能の解明」である。マイルストーンとして、2026年に各標的臓器内の温度 pH 等3項目の計測、2031年に小動物内の温度 pH 等3項目の同時計測・イメージングの実現をし、また長寿命センサ分子の臨床試験準備を目標に置いている。(詳細は、第3部政策動向を参照)

<海外>

米国防総省高等研究計画局（**DARPA**）が「**DRINQS**」と呼ぶ量子技術研究プログラムを開始した。米航空機製造のロッキード・マーティンなどが参画している。ロッキードは、NV センタを使って地磁気をセンシングし、GPS に頼らず航空機のアビエーションに活用することが目的と言われている。

また、欧州では「**Quantum Flagship**」という量子技術の大規模プロジェクトが進み、その中に NV センタもターゲットの一つに含まれていて(**ASTERIQS**)、Bosch（ドイツ）や大手電機企業である Thales（フランス）といった企業との連携が実行された。2020 年からは、Horizon Europe Quantum の「**Quantum Technologies Flagship**」（2021 年～2027 年）や、ドイツでは「**Quantentechnologien**」プログラムが進んでいる。

中国では、中国科学院、北京航空航天大学、中北大学、南京大学、浙江工商大学などが活動している。

第2節 量子スピントロニクスセンサ

<量子スピントロニクスデバイスによる高感度磁気・熱流センシング。>

< 1 > 定義（動作原理・種類等）

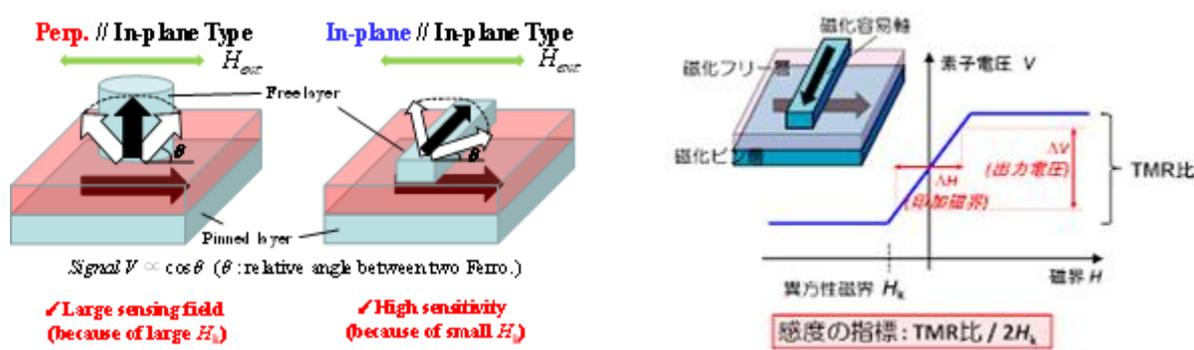
(1) トンネル磁気抵抗素子 TMR:

トンネル磁気抵抗効果 (Tunnel Magneto Resistance Effect: TMR 効果) とは、磁気トンネル接合(MTJ)素子において絶縁体を挟んでいる二層の強磁性体の磁化の向きによって電気抵抗が変化する現象で、これをセンサに利用している。

二層の強磁性体の磁化が同じ方向を向いている場合(平行状態)に抵抗は低く、お互いに反対の方向を向いている場合(反平行状態)には抵抗が高い。磁場が印加されると、磁場の大きさによって抵抗が変化し、素子に一定の電圧を印加することによる出力電圧を測定することで超高感度の磁気センシングが可能である。

磁化フリー層に垂直スピンを用いると広ダイナミックレンジ、面内スピンを用いると高感度の磁気センサが実現できる (図 1-1-5)。

図 1-1-5 TMR MTJ のスピン方向依存性と磁気抵抗の磁界依存性



(出典：東北大学安藤先生ご提供)

(2) スピン熱流素子:

温度差を電子のスピン流⁴に変え、これを電流に変える。スピンゼーベック効果⁵により熱流から電流に変換する。スピン流を仲介することで熱流の垂直方向に電力を取り出せる。スピンペルチェ効果⁶により、スピン流を温度に変換することもでき、スピン流の可視化も可能である。

素子の両端に温度差を付けると素子内部に熱流（熱の流れ）が発生する。一般的なゼーベック素子の場合、素子中に熱流を発生させると、その熱流の一部が、ある一定の割合で同じ方向に流れる電流に変換される。しかし、半導体中では、電子の量が熱の流れやすさも決めてしまうため、ゼーベック素子の性能向上を妨げる大きな壁であった。スピン流熱電変換の大きな魅力は、スピンゼーベック素子では、素子に発生させた熱流の一部が、磁性絶縁体の中の局在スピンを介したスピン角運動量の流れ、すなわちスピン流を生じさせるスピンゼーベック効果が起きることである。発生した

⁴ 電子のスピン流：電子スピン角運動量の流れ

⁵ スピンゼーベック効果：温度勾配のある磁性体において生じるスピン流によって電圧を生じる現象。

⁶ スピンペルチェ効果：スピン流注によって温度変化を引き起こす現象であり、磁性体と金属の接合構造に電流を流すことによって発現する。

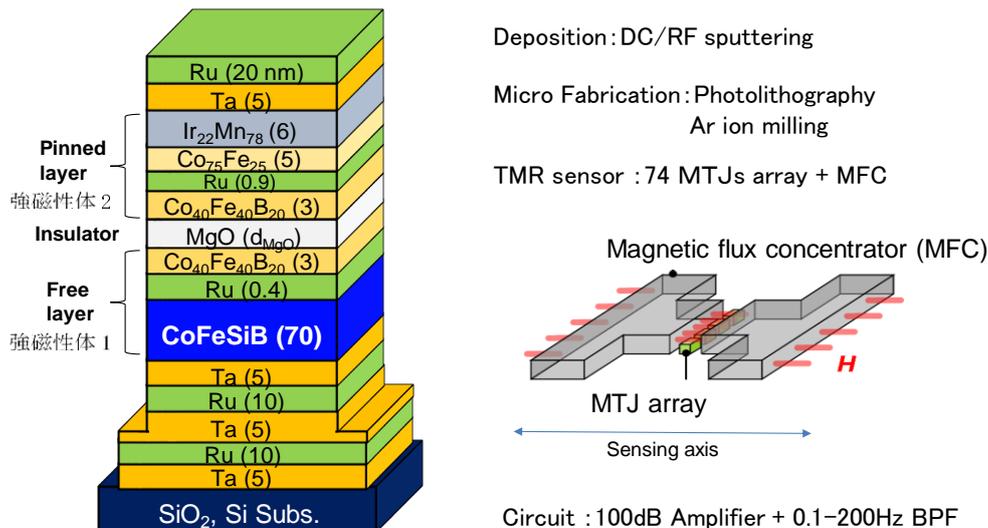
スピン流は、常磁性の伝導体の中で、逆スピンホール効果と呼ばれるスピン流と電流を変換する現象によって、熱流の向きとスピンの配向する向きの両方に直交する方向の電流に変換され、電力として取り出すことができる。これが、ゼーベック素子にはない特徴であり、スピンゼーベック素子に大きな性能向上の可能性が期待される理由である。

< 2 > 構造・構成要素

(1) トンネル磁気抵抗素子 TMR:

強磁性層の間に膜厚 1nm 程度の絶縁体層を挟み込む構造をしている。強磁性体 1 と強磁性体 2 が非常に薄い絶縁膜を挟んでおり、初期状態では電流が流れないが、この接合面に対して垂直に磁場を印加するとトンネル効果によって絶縁体層にトンネル電流が流れる。高感度 TMR 比 (トンネル磁気抵抗変化比) は 100~100,000%/T である。超伝導量子干渉素子(SQUID)と比較して、TMR 素子は磁場のダイナミックレンジが 3 桁以上高い mT オーダーであるのが最大の利点である。TMR 素子の低抵抗化、フリー層の厚膜化、Magnetic Flux Concentrator (MFC)などにより、感度を高められる (図 1-1-6)。

図 1-1-6 TMR 素子の断面構造と感度向上構造



(出典：東北大学安藤先生ご提供)

(2) スピン熱流素子:

YIG(イットリウム鉄酸化物)と強磁性体で構成される。スピン流を利用して、常磁性体から強磁性体に転移する温度付近で電圧信号に異常が現れる。

< 3 > 課題

(1) トンネル磁気抵抗素子 TMR:

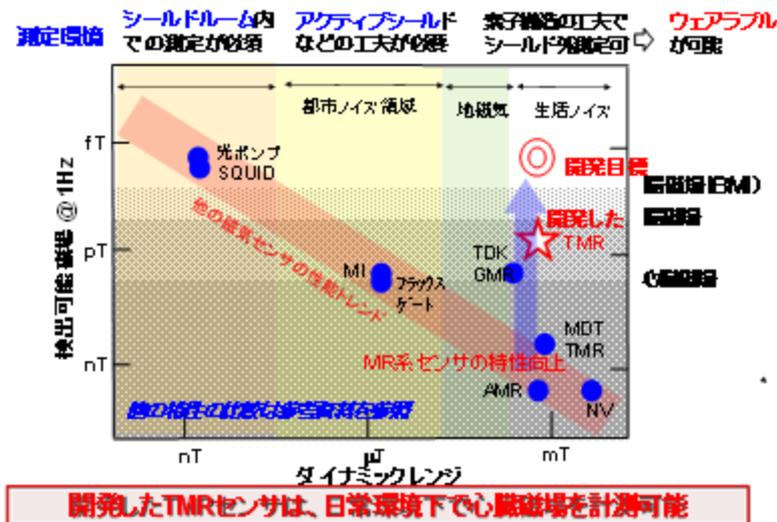
垂直磁化 TMR 素子の構成材料である垂直磁化薄膜材料には、磁性材料の典型であり古くからよく知られている鉄コバルト合金がこれまで用いられてきた。鉄コバルト

合金は飽和磁化が大きく、垂直磁気異方性が十分に大きくはないためスピン反転に必要な駆動電流が大きく、TMR比が小さい、更なる感度向上(pT→fT)、などの課題がある。鉄コバルト合金を代替する新材料として、コバルトマンガン合金をナノマンガンガリウム層上に積層した技術などが検討されている。

また、応用として生体磁気計測、地磁気計測があり、生活ノイズ等に対応するため、感度の向上が必要である（図 1-1-7）。

また、TMR比が小さいため、駆動電流を増大するため、素子が大きくなり、特に生体磁気計測の応用などでは、小型化(~5cm²)が必要である。また、貴金属を多用しているため、低コスト化が求められている。

図 1-1-7 TMR の応用毎の検出可能磁場感度とダイナミックレンジ



(出典：東北大学安藤先生ご提供)

(2) スピン熱流素子:

“低消費電力動作”と“熱擾乱耐性”の両立(磁化反転)が課題である。スピン流は、強磁性体中に侵入すると急速に減衰する(スピン侵入長:~5nm)。極微細化による磁化不安定性が発生し、また、純スピン流の生成効率が小さい。非電流スピン流構造、極薄反転層構造、電極、材料の最適化による生成効率の向上が必要である。

< 4 > 用途

(1) トンネル磁気抵抗素子 TMR:

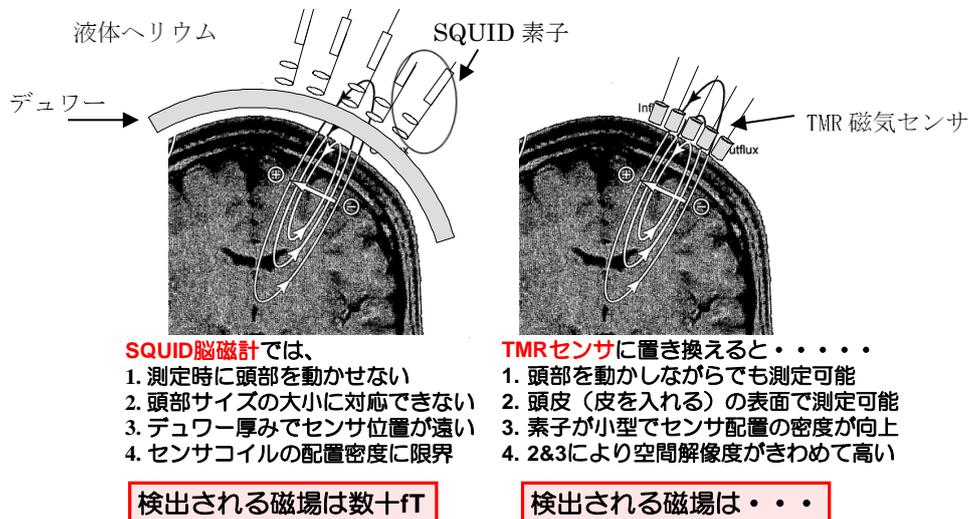
・ 高感度局所磁場センサ

磁気センサは、磁場の大きさや方向を測定するための素子であり、様々な用途で使用されている。例えば、電子コンパス(地磁気センサ)、電化製品などの開閉検出、モータの回転検出、電流の計測、生体(脳や心臓)磁場の計測など、多岐にわたる。非常に高い信頼性が求められる車載磁場が印加されて磁気センサのダイナミックレンジを超えてしまうような環境では、ダイナミックレンジと非線形性が大変重要になる。突発的に大きな磁場が発生すると、誤動作が生じてしまい、また、非線形性が大きければ、誤差が大きくなって、回転角や電流値を精密に制御することができない。

・小型・省エネルギーセンサ

心磁計、脳磁計などがある。脳内の活動を知るためには電気測定による脳波計測が一般的だが、これは頭皮の表面を測定しているだけで、脳内のどこで活動が起きているかを直接的に知ることはできない。一方、脳内活動により発生する磁場を測定すれば、脳内のどこでどのような活動が起きているかの詳細を知ることができるが、現在の脳磁場計測装置は巨大でかつ非常に高価なものである。室温動作かつ小型で身体に密着して測定ができるセンサの実現が望まれてきた。TMR素子を用いた生体磁場検出用センサの飛躍的な高感度化と低ノイズ化に成功し、脳からのα波に相当する磁場信号(脳磁図)の検出にTMR磁気センサが成功した。既存の脳磁計では、高価な液体ヘリウムを用いた冷却が必要であったが、非線形性を抑制し、世界で初めて室温で簡便に動作するTMR素子で脳磁場をとらえた。(図1-1-8)

図1-1-8 SQUID脳磁計とTMR磁気センサ脳磁計の比較



(出典：東北大学安藤先生ご提供)

(2) スピン熱流素子:

高感度熱流センサとともにエナジハーベストにも期待できる。スピントラッキング素子は、磁性絶縁体と伝導体の二層膜だけで構成され、素子の面積を広くすると、これに比例して取り出し電力が増大し、シンプルな構造で簡単にスケールアップが可能であることが特徴である。

<5> 主要プレイヤー情報 (デバイス、重要な要素技術、周辺技術のプレイヤー間の技術/市場上の優位性分析・評価)

<日本国内>

東北大学、東京工業大学、京都大学、東北大学、九州大学、大阪大学、理化学研究所、産業技術総合研究所(AIST)、物質・材料研究機構(NIMS)、NTT、TDK、デンソーなどが参入している。

プロジェクトとしては、JST 戦略的イノベーション創出推進プログラム「スピン流を用いた新機能デバイス実現に向けた技術開発」(S-イノベ、2021年採択)などがある。

<海外>

中国 MDT 社、imec、TSMC、三星、SK Hynix、QUALCOMM、ナノエレクトロニクス研究イニシアチブ(NRI)、英国 STARnet (Semiconductor Technology Advanced Research network)(FAME、C-SPIN、LEAST 含む)、ポルトガル Institute for Systems and Computer Engineering, Technology and Science (INESC TEC)、Bielefeld University などがある。

第2章 光量子センシング技術

量子もつれ光センサとは、量子もつれを用いショットノイズ（光子の統計的雑音）限界以上の感度で計測を可能にするセンサ技術である。量子もつれ顕微鏡、量子OCT(Optical Coherence Tomography)、量子レーダーなどがある。

第1節 量子もつれ光センサ

＜量子もつれ光子を活用した低ノイズの高感度センシング。超高感度顕微鏡、高感度断層測定、高 Security な量子レーダーなどへの応用が期待される。＞

＜1＞定義（動作原理・種類等）

(1) 量子もつれ顕微鏡：

量子もつれ光の2光子量子干渉を利用した顕微鏡である。「量子もつれ」とは、2個以上の粒子が量子的に相関関係にある状態である。既存のレーザー顕微鏡は、ヒトの髪の毛の太さの1万分の1のレベルまで細密に観察できるが、太陽光の何十億倍も明るいレーザーを用いるため、ヒト細胞のように壊れやすい生体試料に損傷を与えてしまう。「量子もつれ」の特性を活用することでこの課題の解消が可能となる。レーザーを構成する光子の「量子もつれ」を用いることで、量子の粒子性を相殺し、波動性を活用することによりショットノイズ限界を突破し、レーザー強度を上げることなくノイズを減少できる。

(2) 量子OCT(Optical Coherence Tomography)：

周波数もつれ光子対の二光子量子干渉(Hong-Ou-Mandel干渉、HOM干渉)⁷を用いる量子光コヒーレンストモグラフィ(量子OCT)は、偶数次の分散に耐性をもつ断層イメージング法として注目されている。低いコヒーレンス干渉を利用し、深さ分解能～10 μ mが実現できる。

(3) 量子レーダー：

量子もつれ光(可視～近赤外)のステルス性を活用する。量子もつれと出力量子検出に基づいた新たなリモートセンシング技術である。理論的には、バックグラウンドノイズの影響を回避して機能、ステルス性の物体を検出し、電子的な妨害を避け、高いバックグラウンドノイズの領域で動作する。悪天候下でのレーダー性能の向上も期待されている。

(4) 量子赤外分光計測：

2010年以降、遠赤外領域を含む赤外領域（波長1.5 μ m以上）の光検出器として注目され、各国で研究開発が進んでいる。フーリエ変換型赤外量子分光法(QFTIR)により、シリコン光検出器によって赤外吸収スペクトル等が取得でき、分析装置の小型化・高感度化が可能となってきた。

⁷ 光子量子干渉(Hong-Ou-Mandel干渉、HOM干渉)：1987年にHong, Ou, Mandelの3氏によって提案され、観測された干渉効果。光ビームスプリッターは一般に二つの経路の入力に対して二つの経路の出力があります。一つの経路に光を入れると、その光は二つの経路に分かれます。このビームスプリッターの各経路に一つずつ、計二つの光子を同時に入力すると、二つの光子はどちらか一方の経路に二つ揃って出力される。このとき、別々の経路に出力される事象は量子力学的な干渉効果で消失する。これがHOM干渉である。

< 2 > 構造・構成要素

(1) 量子もつれ顕微鏡：

数十億分の1秒の長さのレーザーパルスに光子を集中させることによって、従来用いられてきたものよりも1兆倍明るい「量子もつれ」を生成する。生体試料に損傷をもたらすことなく、写像性、感度が向上する。量子もつれ光子を微分干渉顕微鏡の照明光として利用している。量子もつれ光源、偏光子、偏光ビームスプリッタなどで構成される。(図 1-2-1)

(2) 量子 OCT (Optical Coherence Tomography)：

量子もつれ光源、非線形光学結晶、ビームスプリッタなどで構成される。(図 1-2-2)

(3) 量子レーダー：

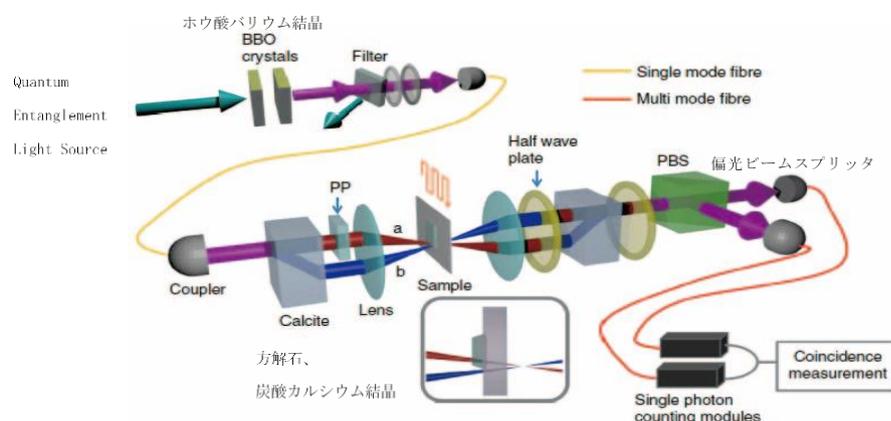
量子もつれ光源、レーダーカメラ、イメージ合成装置などで構成される。

(4) 量子赤外分光計測：

量子もつれ現象を活用した、遠赤外領域を含む赤外領域(波長 $1.5 \mu\text{m}$ 以上)の光検出器である。量子赤外分光の原理を図 1-2-3 に示す。可視レーザー光を非線形光学結晶へ入射し、可視光子と赤外光子の量子もつれ光子対を発生させる。可視光子は波長フィルターで反射した後、凹面ミラーで再度非線形光学結晶へ集光される。波長フィルターを透過した赤外光子は、被測定試料を透過した後、ミラーで反射して非線形光学結晶へと集光する。被測定試料で赤外光子が吸収されると、再入射した非線形光学結晶で元の可視レーザー光には戻らず、可視光子だけ残ることになる。この可視光子をシリコン光子検出器で測定することで、吸収された赤外光子を計測することができる。

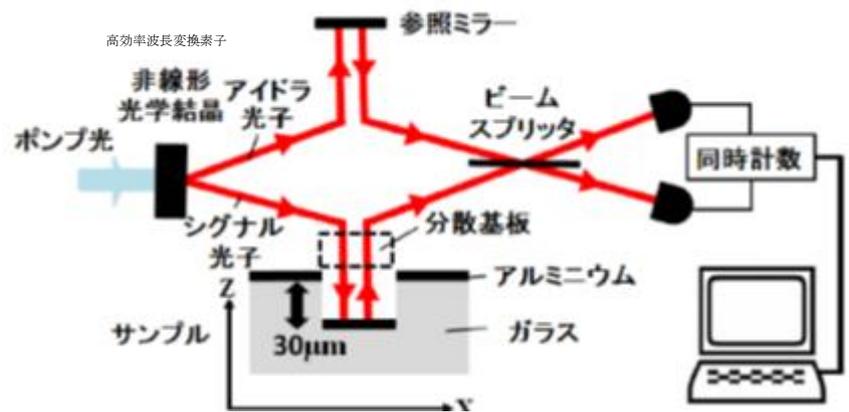
赤外光子の伝搬距離は稼働ステージ上に配置したミラーの位置を変えることで調整が可能である。上記ミラー位置を掃引しながら可視光子の発生数をシリコン光検出器と光子計数装置を用いて記録すると、二回の光子対発生事象の干渉効果により光子発生数の増減(量子干渉信号)が観測でき、シリコン光検出器により赤外領域の光を検出することが出来る。

図 1-2-1 量子もつれ顕微鏡の構成



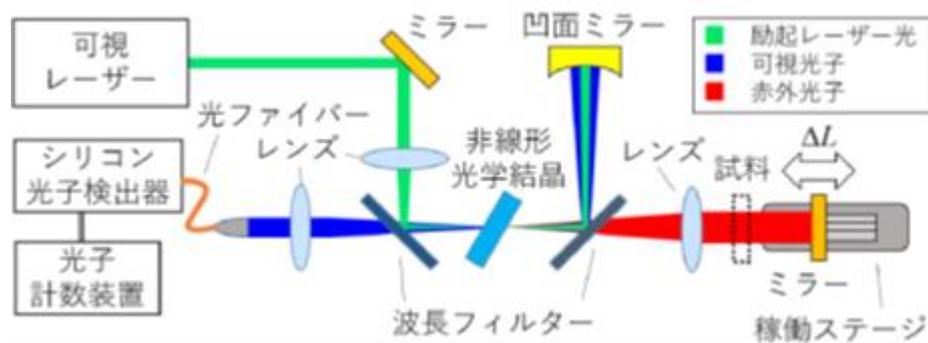
(出典：京都大学竹内先生ご提供)

図 1-2-2 量子 OCT の構成



(出典：京都大学竹内先生ご提供)

図 1-2-3 量子赤外分光計測の原理

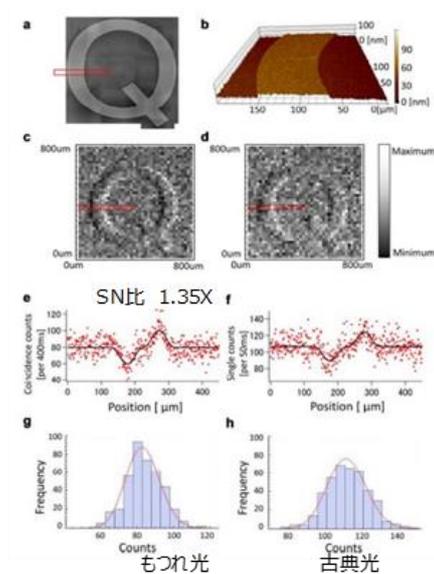


(出典：京都大学竹内先生ご提供)

< 3 > 課題

- (1) 量子もつれ顕微鏡：
更なる感度向上や、広帯域光源が必要である。

図 1-2-4 量子もつれ顕微鏡



(出典：京都大学竹内先生ご提供)

(2) 量子 OCT (Optical Coherence Tomography) :

横方向分解能向上、量子もつれ光源の大光量化、量子光断層撮影装置の実現、応用開拓、量子もつれ光源の大光量化、量子光断層撮影装置の実現、ショットノイズを超える S/N 比の達成等が課題である。

具体的には、計測に時間がかかり過ぎている、光源の光量（光子対数）が少ないので、光子検出器、光子計数システムの高速度が必要である。検出システム技術も重要（帯域、スピード、価格）である。

(3) 量子レーダー :

高強度光源、高速化(1 秒→1m 秒)、小型化、応用開拓等が必要である。

(4) 量子赤外分光計測 :

量子もつれ現象を活用した遠赤外領域を含む赤外領域（波長 $1.5\mu\text{m}$ 以上）の損失低減制御技術の開発を進めるとともに、実用化に向けてより長波長域での赤外量子分光測定の実証や装置の小型化が必要である。

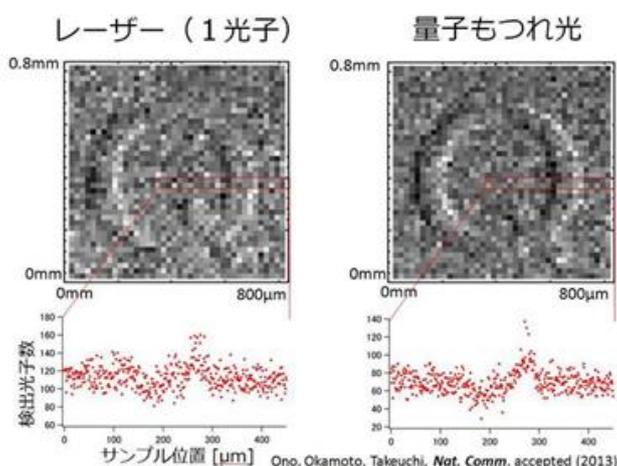
< 4 > 用途

(1) 量子もつれ顕微鏡 :

弱光観察下超高感度($0.54\mu\text{m}$ の分解能)の観察ができることが特徴である。

センシングの様々な領域でその活用が見込まれている。豪クイーズランド大学と独ロストック大学の共同研究チームは、「量子もつれ」光子を用いて、従来見るができなかった生物学的構造を明らかにする新たな顕微鏡の開発に成功した。その研究成果は、2021 年 6 月 9 日、学術雑誌「ネイチャー」で公開されている。既存のレーザー顕微鏡は、太陽光の何十億倍も明るいレーザーを用いるため、ヒト細胞のように壊れやすい生体試料に損傷を与えてしまう。「量子もつれ」の特性を活用することでこの課題を解消している。レーザーを構成する光子の「量子もつれ」を用いることで、レーザー強度を上げることなくノイズを減少できる。(図 1-2-5)

図 1-2-5 量子顕微鏡の高感度効果



(出典：京都大学竹内先生ご提供)

(2) 量子 OCT(Optical Coherence Tomography) :

生体細胞内部のわずかな物質分布の変化や、蛋白質結晶の結晶化過程の解明など**超高分解能光断層撮影、生体眼底観察**ができる。高分解能量子 OCT の実用化は、2030～2035 年頃を予想している。

(3) 量子レーダー :

悪天候下の低ノイズレーダー、ADAS、軍事などに応用することが想定されている。

(4) 量子赤外分光計測 :

量子もつれ現象を活用した、遠赤外領域を含む赤外領域 (波長 1.5 μ m 以上) の薬品検出、分子構造検出ができる。コンパクトで高性能な赤外分光装置の実現により、医療、薬品製造管理、ガソリン等燃料のオクタン価計測、環境モニタリング、セキュリティ等様々な分野への応用が想定される。

< 5 > 主要プレイヤー情報 (デバイス、重要な要素技術、周辺技術のプレイヤー間の技術/市場上の優位性分析・評価)

< 日本国内 >

(1) 量子もつれ顕微鏡 :

京都大学、北海道大学、名古屋大学、香川大学、国立研究開発法人・科学技術振興機構 (JST)、国立研究開発法人物質・材料研究機構 (NIMS)、産業技術総合研究所 (AIST) などが挙げられる。

(2) 量子 OCT (Optical Coherence Tomography) :

京都大学、国立情報学研究所 (NII) などが挙げられる。

(3) 量子レーダー :

量子科学技術研究開発機構 (QST)、東京大学、京都大学、理化学研究所、国立情報学研究所 (NII)、情報通信研究機構 (NICT)、NTT、玉川大学、日立製作所などが挙げられる。

(4) 量子赤外分光計測 :

京都大学、島津製作所など、光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) が挙げられる。

< 海外 >

(1) 量子もつれ顕微鏡 :

MIT、オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO)、豪州クイーンズランド大学、独ロストック大学、豪州クイーンズランド大学などが挙げられる。

(2) 量子 OCT (Optical Coherence Tomography) :

Boston 大学、日本医療研究開発機構 ARO (Academic Research Organization)、Illinois 大学、Maryland 大学、MIT、ルイジアナ州立大学、英国 Oxford 大学、ブリストル大学、デンマーク工科大学、ドイツ Max-Planck-Institute for Quantum Optics (MPQ)、イタリア国立計量研究所 (INRIM)、Pavia 大学、韓国 Pohang University of Science

and Technology(POSTECH)、オーストラリア Australian National University(ANU)、Griffith 大学などが挙げられる。

(3) 量子レーダー：

Northwestern 大学、国防高等研究計画局(DARPA)、MIT などが挙げられる。

(4) 量子赤外分光計測：

シンガポール大学、ドイツベルリン大学、Fraunhofer 研究機構など。

第2節 光子検出器

<超伝導ナノ配線や多層膜の光子による超伝導状態の遷移を活用した超高感度光子センシング。量子通信、医療/バイオ応用で期待される。>

<1>定義（動作原理・種類等）

(1) SSPD :

SSPD(Superconducting Nano Strip Photon Detector)の光子検出原理は、光子1個のエネルギーで超伝導状態を壊すということである。そのためには超伝導体の容積を極限まで小さくする必要があり、厚さ5nm程度の超伝導薄膜を、幅100nm以下に加工した超伝導ナノワイヤが用いられている。この超伝導ナノワイヤが光子を吸収すると、ホットスポットと呼ばれる局所的に超伝導状態が壊れた領域ができる。壊れた領域が形成されることで、電気抵抗が上昇するため、それを計測することで光子を検出できる。エネルギー分解能を持つ計数型検出器では、暗電流が少なく、露光時間を長くすると感度も向上する。

(2) TES :

超伝導転移端センサ (TES : superconducting transition edgesensor) による光子数識別器は、入射光パルスのエネルギーによる温度変化を超伝導体の抵抗変化で測定することで、パルス中の光子数を同定する検出器である。TESを正しく動作させるためには、初期平衡温度を数mK以内の極めて狭い転移温度領域に制御することが必要である。TES検出器では、この問題を電熱フィードバック (electrothermal feedback; ETF) とよばれる方法で解決している。

<2>構造・構成要素

(1) SSPD :

超伝導ナノ配線とレーザー光源で構成される。超伝導ナノワイヤ単一光子検出器は、深紫外から中赤外という広い波長帯域に感度を持ち、特に通信波長帯である1,550nmにおいて半導体を用いた光子検出器であるアバランシェフォトダイオード(Avalanche Photo Diode: APD)よりも、検出効率(出力カウント数を入力光子数で割った値)、最大計数率(一定時間にカウントできる光子数)、暗計数率(光入力のない状態での出力カウント数、つまりノイズ)、ジッタ(出力信号の時間揺らぎ)など、多くの点で優れている。超伝導ナノワイヤにバイアス電流を十分に印加した状態では、このホットスポットの発生をトリガーとして、ホットスポット周辺の超伝導電流密度がある臨界値(これを上回ると超伝導状態が壊れるという値)を超え、ナノワイヤ断面全体の超伝導状態が壊れる。これによりナノワイヤの両端に数kΩの抵抗が発生する。

(2) TES :

光パルスを吸収してフォノンの温度変化へと変換する吸収体、その温度上昇を測定するための温度計であるTES、吸収体と温度一定の熱浴を適当な熱コンダクタンスで結ぶ熱リンクの3つが基本構造となっている。

< 3 > 課題

(1) SSPD :

SSPD の動作原理は至ってシンプルで、高い検出効率を実現するためには、いくつかの技術的なハードルがあった。SSPD の検出効率を決める 3 つの要素として、**光ファイバとの結合効率、ナノワイヤの光吸収効率、パルス生成効率**がある。近年 100% 近い検出効率が得られた報告があった。

ダブルサイドキャビティ構造では、シリコン基板の裏面から光を照射するため、シリコンのバンドギャップよりもエネルギーの大きい $1\mu\text{m}$ 以下の光は基板に吸収されてしまう。そこで、 $1\mu\text{m}$ 以下の光波長にも対応でき、より柔軟な設計が可能なデバイス構造として、**誘電体多層膜を用いたデバイス構造が必要となる**。異なる屈折率を持つ 2 種類の誘電体 (SiO_2 と TiO_2) の膜厚や周期を変えることで、超伝導ナノワイヤに吸収される光波長を自在に設計することができる。

(2) TES :

素子の**薄膜化、面積縮小化、超伝導転移温度 T_c 向上**などの最適化や、**TES 素子のエネルギー分解能の更なる向上**などがある。

< 4 > 用途

主に量子情報分野での応用を想定して $1,550\text{nm}$ の光波長に対して光吸収効率が最大となるよう SSPD のデバイス構造を最適化されてきたが、光子検出器の応用範囲は、**通信・計測から、バイオ・医療まで多岐**にわたっている。使われる光波長は応用によって異なるため、今後 SSPD をより幅広い分野に応用していくためには、 $1,550\text{nm}$ だけでなく様々な波長の光を検出できることが重要となる。光子のエネルギーで超伝導状態を壊すという SSPD の光子検出原理を考えると、よりエネルギーの高い短波長の光ほど高いパルス生成効率を実現するうえで有利である。

マルチピクセル SSPD のモノリシック集積化であるが、16 ピクセル SSPD と SFQ 多重化回路のモノリシック集積化し、マルチピクセル SSPD と同一基板上に集積化した SFQ 回路を介して SSPD からの光検出信号を読み出すことに成功している。しかし、現状の検出効率は 0.25% 程度と、シングルピクセルの SSPD で得られている 80% の検出効率に比べて著しく低い。SFQ 回路の作製プロセスで、薄膜のストレスにより SSPD の光キャビティを構成する SiO 薄膜の一部に剥離が発生するなど、**作製プロセス上の課題がまだ数多く残っており、膜の付着性の向上、薄膜のストレス緩和等、今後改善する必要がある**。

< 5 > 主要プレイヤー情報 (デバイス、重要な要素技術、周辺技術のプレイヤー間の技術/市場上の優位性分析・評価)

< 日本国内 >

情報通信研究機構(NICT)、科学技術振興機構(JST)、産業技術総合研究所(AIST)、NTT、北海道大学、大阪大学、奈良先端科学技術大学(NAIST)、東京大学、北見工業大学、浜松フォトンクス、コニカミノルタ、日亜化学、JSR、AGC、などが参入している。

文部科学省 光・量子飛躍フラグシッププログラム Q-LEAP「光子数識別量子ナノフォ

トニクスの創成」、内閣府・JST ムーンショット研究開発事業目標 6「2050 年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」における QCNQC プロジェクト(ネットワーク型量子コンピュータによる量子サイバースペース)などがある。

<海外>

中国科学院、南京大学、Huawei、米国標準技術研究所 (NIST)、IBM、ロスアラモス国立研究所、John Hopkins 大学、British Telecom(BT)、Geneva 大学、Oxford 大学、Physics Frontier Center(PFC)、Stanford 大学、UK National Quantum Technology Hub in Sensors and Metrology (バーミンガム、グラスゴー、ノッティンガム、サウサンプトン、ストラスクライド、サセックス各大学)、Joint Quantum Institute (JQI) などが参入している。

第3章 冷却原子を用いた量子センシング技術

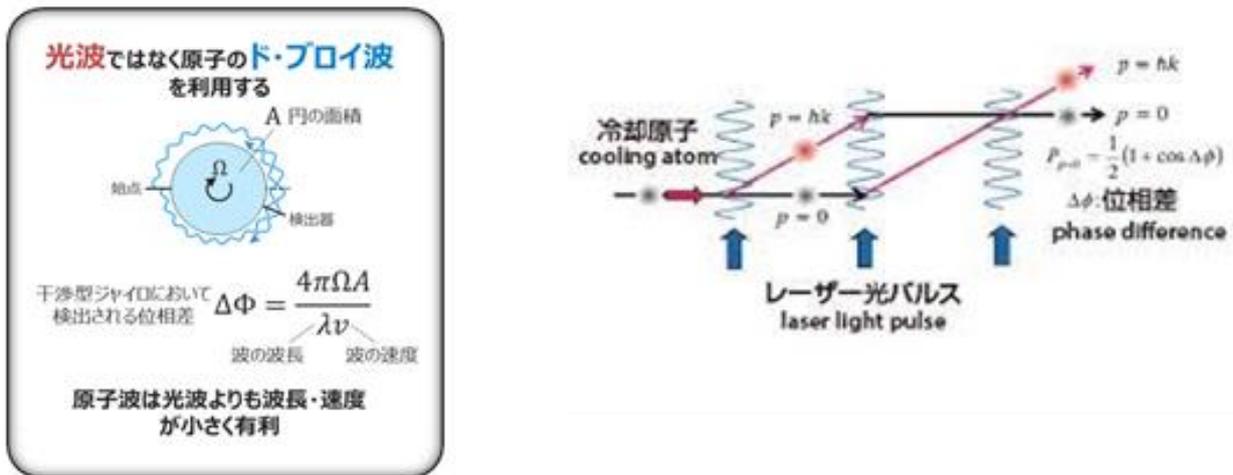
第1節 量子慣性センサ

<光パルスを用いた極低温原子の干渉計による超高感度な加速度センシング、角速度センシング、重力勾配センシング。>

<1>定義（動作原理・種類等）

極低温原子のド・ブroy波⁸を干渉させることで、加速度、角速度、重力勾配などによって発生する位相差を検出する。冷却 Rb (ルビジウム) 原子にレーザー光パルスを照射して、その光の吸収・放出に伴う反跳効果を用いて、原子波を空間的に分割・反射・合波し、干渉計を構成する。量子慣性センサの性能は、定角速度下における出力のアラン偏差⁹で評価できる。可搬型（移動体に搭載可能な形式）で、世界最高性能のファイバeroptik ジャイロ (Fiber Optic Gyroscope : FOG) と AI ジャイロ (原子のド・ブroy波を用いた干渉計 (Atom Interferometry Gyroscope: AI gyro)) を比較すると、現状では後者が劣るが、今後の予測では、AI ジャイロに伸びしろがあり、アラン偏差を数桁改善できると見込まれている (図 1-3-1)。

図 1-3-1 量子慣性センサの原理

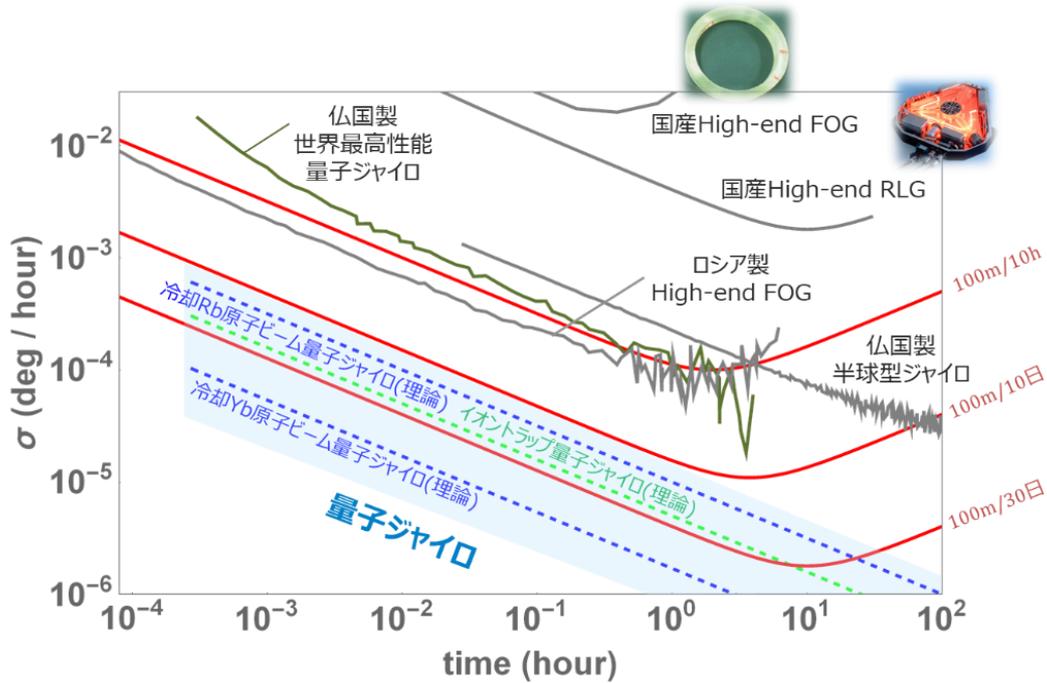


(出典：東京工業大学上妻先生ご提供)

⁸ ド・ブroy波：量子力学では、古典的な粒が波として、古典的な波が粒として振舞う。前者における波をド・ブroy波と呼ぶ。原子のド・ブroy波を原子波と称することもある。

⁹ アラン偏差：加速度計、ジャイロ、周波数発振器などの特性評価の指標。測定時間間隔 τ と、その時間間隔で平均したデータの分散 σ の関係を示したもので、センサなどのノイズ特性を評価することができる。

図 1-3-2 ジャイロに関する要求感度



(出典：東京工業大学上妻先生ご提供)

物体の角度（姿勢）や角速度あるいは角加速度を検出する計測器であるジャイロに関する要求感度（アラン偏差 σ と測定時間間隔）を図 1-3-2 に示す。国産の光ファイバーオプティックジャイロ(FOG)やリングレーザージャイロ(Ring Laser Gyro、RLG)と比較し、フランス製やロシア製のジャイロは、1桁から2桁の感度の向上がある。現状、最高性能の量子ジャイロはそれらに対して劣った状態にあるが、理論計算上は、破線で示したような桁での感度向上が見込める。

また、図 1-3-3 に示すように、GPS の使えない電波の届かない所での非 GPS 航法を提供できるのが特徴である。

図 1-3-3 量子慣性センサの将来応用例



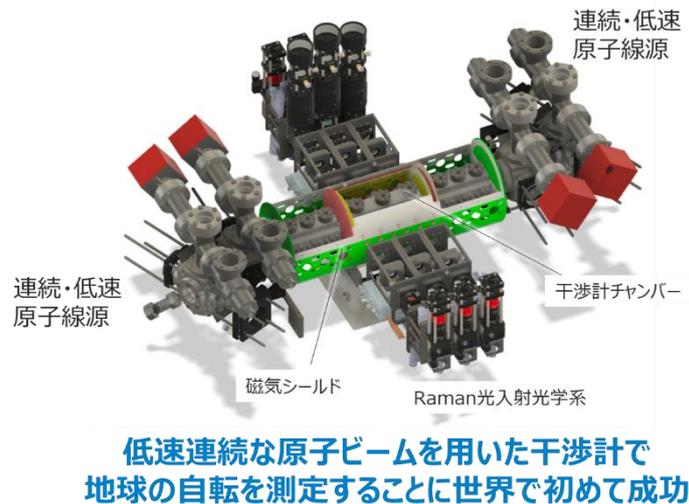
(出典：東京工業大学上妻先生ご提供)

図 1-3-1 の量子慣性センサの原理の右図により動作原理を説明する。冷却原子にレーザー光 $\pi/2$ パルスを照射し波束を量子重ね合わせ状態にすることで、二つの経路に分けて伝搬させ、次にレーザー光 π パルスを照射して二つの波束を反射させる。二つの波束が重なったところでレーザー光 $\pi/2$ を照射して波束を干渉させる。当該干渉計において、レーザーの伝搬方向に加速度が印加されると、二つの経路に差が生じ（位相差が生じ）、それが干渉計の出力変化となって現れる。加速度を印加せずとも、系が回転している場合、原子の速度と角速度の積に比例するコリオリ力がレーザーの伝搬方向に働くため、同様に干渉計の出力が変化する。すなわち原子干渉計は、加速度と角速度の双方に敏感なセンサとして機能する。

< 2 > 構造・構成要素

極低温原子にレーザー光を照射し、原子の位相差を検出する（図 1-3-4）。
連続低速原子線源、真空槽、能動防振機構などから構成されている。

図 1-3-4 量子慣性センサの構成



(出典：東京工業大学上妻先生ご提供)

図 1-3-5 量子慣性センサ装置



(出典：東京工業大学上妻先生ご提供)

< 3 > 課題

- ・量子慣性センサは、加速度計、角速度系、重力勾配計のいずれについても実験室環境下での動作が確認されている。しかしこれらを各種ビークルに搭載して使用するためには、振動や加速への対処も含めた小型化可搬化に関する基礎研究が必須と言える。
- ・小型で可搬な量子慣性センサを実現するためには、まだまだ多くの研究課題が残されている。光を用いたジャイロスコープの場合、単一モードのファイバが存在するため、ファイバを何重にも巻くことで小型でありながら感度の高いジャイロスコープを実装することに成功している。一方、原子波に対する単一モードの導波路は実現されていないため、原子波を空間的に何度も周回させることができず、小型化が阻まれているとも言える。この問題に対する世界的なアプローチは2種類であり、一つは原子波の速度を、レーザー冷却を使って下げることで感度を増大させる方法である。この方法は、国内では東京工業大学の上妻研究室が活用している。もう一つは単一のイオンを電磁気力によって閉じ込め、何度も周回させるという方法である。現在、大阪大学向山研究室が世界で初めて単一のイオンを重ね合わせ状態にして、円軌道を描かせたあと干渉させる実験に成功したが、ジャイロ動作の実証には至っていない。2021年度内の実現を目指している。
- ・小型ポータブルな装置化や応答速度などの課題があり、ADAS等への搭載は可能性が低いかもしれない。
- ・量子慣性センサは、原子のド・ブロイ波を使用しているため、応答速度が遅く（100ms～1s）、クォーツペンデュラム加速度計・MEMS加速度計と量子加速度計とのハイブリッドや、ファイバーオプティクジャイロ（FOG）と量子ジャイロとのハイブリッドなどの方式が研究開発されている。

< 4 > 用途

(1) 加速度/角加速度/重力の高精度計測

海洋資源探査などへの用途が有望である。

量子慣性センサは、加速度計、角速度計、重力勾配計の3つの動作が可能である。原子干渉やレーザー冷却等の要素技術の向上とともにそれらを組み合わせる技術や、機器の大きさを抑えつつ高感度を得るためのシステム化技術等を、実用化が可能であることを見極められる段階まで研究開発し、幅広い分野における汎用基盤技術に発展させることが目標とされている。

現在最高性能を有するファイバーオプティクジャイロ（FOG）に比べ、アラン偏差を低減することができれば、「海洋資源探索の効率化」、「自動運転船舶を用いた物流における安全性確保」等が期待できる。超高性能の非GPS航法装置を開発し、Autonomous Underwater Vehicle(AUV)への提供を予定している。ファイバーオプティクジャイロ（FOG）は、今後2～3年後にかなり性能向上し、5年後に社会実装、10年後には普及する可能性がある。一方、量子慣性センサは10年後に「社会実装が見えてくる」イメージを持っている。FOGに置き換わりうる技術として、量子慣性センサを継続研究していくべきである。

図 1-3-6 量子慣性センサの応用例

海洋資源探査



国内消費100年分の資源

<https://business.nikkei.com/article/NBD/20121105/239053/>



自律型無人潜水艇 (AUV)

**現状 10km/10h の精度を 100m/10hにすれば
発見した資源と緯度・経度を紐づけられる！**

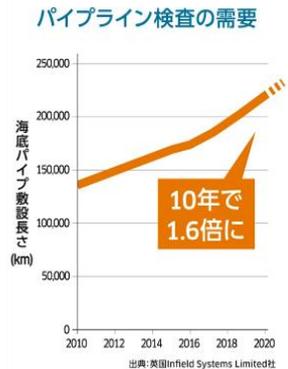
(出典：東京工業大学上妻先生ご提供)

超高精度非GPS航法は応用満載 パイプラインの保守点検 (320億円市場)

川崎重工社様のプロジェクト：AUVを使った保守点検



パイプラインは「海水で腐食」、「海底に埋没」、「海底が削られて宙づり」等の問題が起こるため
定期保守点検が必要



**実現すれば、海底ケーブル・洋上風力発電ケーブルなど
あらゆる海底設備の検査に展開可能！**

(出典：東京工業大学上妻先生ご提供)

< 5 > 主要プレイヤー情報 (デバイス、重要な要素技術、周辺技術のプレイヤー間の技術/市場上の優位性分析・評価)

< 日本国内 >

東京工業大学、大阪大学、京都大学、東京理科大学、情報通信研究機構(NICT)、NTT、三菱重工業、日本航空電子工業などが参入している。

プロジェクトとしては、「冷却原子・イオンを用いた高性能ジャイロスコープの開発」(PM：上妻幹旺 (東京工業大学)、研究期間：2017~2026年)、JST 共創の場形成支援プログラム 本格型・政策重点分野 (量子技術分野)「量子航法科学技術拠点」(PL：上妻

幹旺（東京工業大学）、研究期間：2020～2030年）などがある。

<海外>

米国 AO Sense、NASA、UCB、スタンフォード大学、Honeywell フランスパリ大学、パリ天文台 LNE-SYRT 研究所、フランス航空宇宙研究所、MUQUANS 社、オックスフォード大学、バーミンガム大学、中国科学技術大学、北京航空航天大学、復旦大学、上海交通大学などが研究開発している。

第2節 光格子時計

<レーザー光で形成された光格子に束縛された多数の原子にレーザー光を照射・分光し、超高感度な光時計を実現。高精度な重力ポテンシャル計測、3D測地、GPS、地下資源探索、地震・火山などの災害対策などへの応用が期待される。>

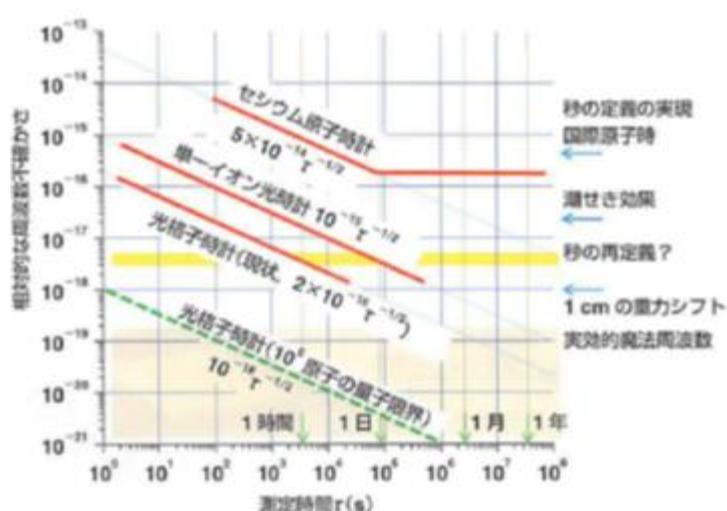
<1>定義（動作原理・種類等）：

光格子時計とは、レーザー光を原子に照射し、時計の基準となる電子遷移（時計遷移）に常に共鳴するようにレーザー光の周波数を制御することによって、原子固有の周波数・時間を実現している。特別な波長のレーザー光で作ったごく小さな格子の入れ物に、100万個ものストロンチウム原子を入れ、それぞれの原子の振りの振動数を同時に観測することで、驚異的な精度を実現する時計である。ストロンチウム原子等の光吸収を活用している。ストロンチウム原子は、アルカリ土類金属で、最外殻電子がなく、光格子（813nm）や時計遷移（698nm）、レーザー冷却（461nm、689nm）のスペクトルが可視光領域で扱い易い。

<2>構造・構成要素：

光格子レーザー、観測用レーザー、磁気光学トラップ(MOT)で構成される。光格子時計ではまず、レーザーを使って卵のパックのような原子の入れ物（＝光格子）を用意、入れ物の存在を原子に気づかれないようにするのがポイントである。香取教授（東京大学）が見つけた「魔法波長」と名付けた特別な波長のレーザーを使用し、次に、絶対零度近くまで冷やしたストロンチウム原子を入れ物の中に一つずつ収まるように入れる。そうしたうえで、すべての原子を同時に計測する。従来のセシウム原子時計は、3,000万～2億年に1秒くらいのズレを生じ、現時点で、10のマイナス16乗の精度である。香取教授の光格子時計は、さらに2ケタ高い、10のマイナス18乗の精度を可能にする。（図1-3-7）

図1-3-7 光格子時計の精度



(出典：東京大学香取先生ご提供)

< 3 > 課題

(1) 光格子光シフト低減(電気四重極子/磁気双極子効果による光シフト)

光格子光シフトの低減は、光格子時計の高精度化における最重要課題であり、実効的魔法波長条件の決定は、19桁精度の光格子時計の実現に向けた重要なステップである。セシウム原子時計の精度を3桁上回る19桁精度の光格子時計の実現は、新しい秒の定義へと移行するための大きな推進力となる。

更に、19桁精度の時計は、既存の技術では到達不能なミリメートル精度の相対論的測地を可能とし、時間/周波数標準技術としての枠を超えて、火山学、地震学への光格子時計の応用が期待できる。また、高精度な時計は、基礎物理定数の恒常性の検証など、基礎物理学の検証においても重要な計測ツールであり、新しい物理を切り拓く高精度センサとして、今後重要な役割を担っていくことにも期待されている。

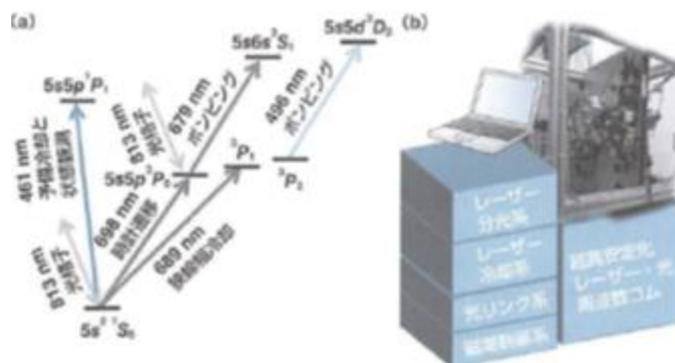
(2) レーザー光源の長寿命化

光格子時計の高精度化に向けたレーザー光源の長寿命化が課題である。狭帯域レーザーの精度、698nm 時計レーザーダイオード光源、461nm 冷却レーザーなど含めたシステムの長寿命化が大事である。長寿命化を可能にするクロックレーザー安定化システムは、予備安定化共振器 (Prestabilization 共振器)、ULE (Ultra Low Expansion) 共振器、ファイバーノイズキャンセル機構 (FNC) などで構成されている。

(3) 光格子時計の小型化

波長の異なる6台の可視半導体レーザーを駆使して原子状態にアクセスするが、レーザー技術が成熟すれば、多数レーザーで高精度な原子制御ができることが利点に変わる。光格子時計の運転に必要なストロンチウム原子のエネルギー準位図を示す(図1-3-8)。約10台の半導体レーザーとその周波数制御のエレクトロニクスを箱に詰め込み、大型冷蔵庫程度のサイズをめざす。

図1-3-8 半導体レーザーを多用する光格子時計の小型化



(出典：東京大学香取先生ご提供)

< 4 > 用途

(1) 高精度時間計測 (周波数精度 10^{-18}):

- ・10年ほど先に控えている国際度量衡委員会による「秒の再定義」において、我が国

がこれまで為し得なかったような積極的な国際貢献が期待できる。(我が国発でアジア初の積極貢献による「秒の再定義」)。

- ・相対性理論により、時間遅れから重力ポテンシャルエネルギー差を検出する。
- ・物理定数の検証・検出が実験的に可能になり、プランク定数等の「物理定数が定数である」との物理学の暗黙の仮定を覆すような発見に至る可能性がある。
- ・光格子時計の設置場所における「時空のゆがみ」や高低差、及び微少な重力ポテンシャルの変化が計測可能になり、将来社会の安全・安心に貢献する全く新しい時空間計測インフラとなる可能性がある。

(2) 時空間計測インフラの応用例：

現在の水準測量より迅速で高精度な標高の決定等の測地分野、GPS 高度利用、地下資源探査、マグマだまりの変化検知や GPS の届かない海底の地殻変動など地震・火山に関わる防災研究などがある。

< 5 > 主要プレイヤー情報 (デバイス、重要な要素技術、周辺技術のプレイヤー間の技術/市場上の優位性分析・評価)

< 日本国内 >

東京大学、情報通信研究機構(NICT)、理化学研究所、産業技術総合研究所 (AIST)、などが研究開発している。

< 海外 >

米国：宇宙物理学複合研究所(JILA) (コロラロ大学と NIST の共同研究)、米国国立標準技術研究所 (NIST)、

欧州：ドイツ国立物理工学研究所 (PTB)、イタリア国立計量研究所 (INRiM)、イギリス物理学研究所 (NPL)、フランス国立標準技術研究所 (SYRTE)、ドイツハインリヒ・ハイネ大学 (HHU)、ポーランドトルン大学、EU 非線形分光学研究所 (LENS)、EU Quantum Technology Flagship-iqClock Project、ロシア計量試験科学研究所(VNIIMS)、全ロシア物理技術・無線計測科学研究所 (VNIIFTRI)、

中国：中国計量化学研究院 (NIM)、華東師範大学 (ECNU)、

韓国：韓国標準科学研究院 (KRISS) などが研究開発している。

第4章 その他の量子センシング技術

第1節 その他

＜超伝導量子干渉素子(*superconducting quantum interference device ; SQUID*)技術、超核偏極技術、フォノンセンシング技術等その他量子センシングデバイスを活用した超高感度磁気・温度センシング。＞

＜1＞定義（動作原理・種類等）

（1）超伝導量子干渉素子(SQUID)：

ジョセフソン接合を含む環状超伝導体で、極めて弱い磁場の検出に用いられる非常に感度の高い磁気センサの一種である。SQUID は数日かけて平均しながら計測すれば、5aT(5×10^{-18} T)もの弱い磁場も検出できるほどの感度である。

（2）超核偏極技術：

核スピンの整列度「核偏極」は、核スピン数の差を活用する。電子スピンの共鳴周波数近傍のマイクロ波を照射することにより、核スピンの偏極率を向上できるトリプレット DNP(Dynamic Nuclear Polarization)が発見された。これにより核磁気共鳴や磁気共鳴イメージングの感度を千倍にすることが可能となった。従来技術より経済的で普及の可能性が高い。偏極源分子の少量添加とマイクロ波照射により電子スピンの核スピンの偏極率が交換する。

（3）フォノンセンシング：

時間的なフォノン圧縮法である。フォノンバンド分散の人工的制御が可能なフォノンニック結晶導波路を用いて、分散制御によるフォノンパルスの圧縮を実現する。

＜2＞構造・構成要素

（1）超伝導量子干渉素子(SQUID)：

従来は Nb または Al 系 SQUID 環状超伝導体構造。性能向上のため高温超伝導体を用いた SQUID 技術が研究開発中である。高温超伝導体 SQUID には、バイクリスタル型、ランプエッジ型などがある。

（2）超核偏極技術：

ペントセンを用いた DNP (トリプレット DNP)材料、レーザー光源、電磁石などで構成される。

（3）フォノンセンシング：

極低温においてギガヘルツ (10^9 Hz) 帯で振動する百ナノメートルスケールの共振器を製作すると、フォノンを1個の単位で検出 (10^{-17} m 以下のオーダーの変位) できるが、それを自在に操作することで新しい物理や応用が広がると考えられている。フォノンニック結晶導波路は、GaAs/Al_{0.27}Ga_{0.73}As/n-GaAs ヘテロ構造や Si/SiO₂/Si 基板の多重シリンダ構造を有する非線形 MEMS 素子によって構成される。

< 3 > 課題

(1) 超伝導量子干渉素子(SQUID) :

高温超伝導体の可能性の検証と性能ばらつきによる歩留り改善、クライオプローブなどの実現が必要である。

生体磁場計測では 1Hz 程度の低周波雑音、 $1/f$ 雑音が課題である。低周波雑音の原因は、ジョセフソン接合の I_c の揺らぎと、超伝導薄膜にトラップした磁束の揺らぎの二つがある。また、**高感度化、装置の小型化が必要である。**

(2) 超核偏極技術 :

分子核スピンを揃える量子技術(トリプレット:DNP)の検証が必要である。現在、安息香酸などを粉末で高偏極化したのち溶解して NMR を 800 倍高感度化するところまで開発が進んでいる。試料分子の種類拡大が必要である。今後、代謝イメージングに適用していく場合の条件設定が必要である。実用化に向けて、マウスについて MRI 実験データを取得し、ヒト用にマウスの 3 千倍の量の試料を**高偏極化**することは実証済み、**低コスト光源の開発、NMR 分光システムや MRI 装置への実装が必要である。**

(3) フォノンセンシング :

フォニック結晶加工(<26nm)、時間的なフォノン圧縮法の高精度化が必要である。

< 4 > 用途

(1) 超伝導量子干渉素子(SQUID) :

高感度磁気センサ($5 \times 10^{-18} \text{T}$)、脳磁計、MRI、異物検査、資源探査などの応用がある。

SQUID の極めて高い感度は、生物学における研究向けに理想的である。例えば脳磁図(MEG : Magnetoencephalography) は SQUID アレイを用いて脳内のニューロン活性について推定を行う。SQUID は脳から発せられる最も高い時間周波数(kHz)よりもずっと速く測定を行えるので、良好な時間分解能を持つ脳磁図を作成できる。

(2) 超核偏極技術 :

高感度 NMR/MRI(感度 1000 倍)、材料開発、生化学研究などの応用がある。癌治療効果判定を検証済み。

(3) フォノンセンシング :

音波や超音波を含む弾性波(フォノン)は、**非破壊検査、ソナー、医療用の超音波検査**など様々な分野で観測・利用されている。このようなフォノンを用いたセンシングの更なる高性能化のためには、**空間・時間分解能の向上**が重要である。その分散効果を利用した時間的なフォノン圧縮法は、フォノンバンド分散の人工的制御が可能なフォニック結晶導波路を実現した。熱電エネルギーハーベスタ(3.6W/mK)への応用もある。

2021 年 4 月 16 日、パナソニックは一般的な Si (シリコン) の断熱性能を示す物性

値限界を大きく上回ることができる「フォノンニック結晶構造」を Si ウエハー上に量産適用可能な作製方法で形成し、デバイス性能を飛躍的に向上させる技術を開発したと発表した。遠赤外線センサの受光部に適用した場合、受光部からの熱の漏れを約 10 分の 1 に抑制し、従来の Si ベースの遠赤外線センサに比べて約 10 倍の感度向上が可能になるという画期的な技術である。

< 5 > 主要プレイヤー情報（デバイス、重要な要素技術、周辺技術のプレイヤー間の技術／市場上の優位性分析・評価

< 日本国内 >

(1) 超伝導量子干渉素子(SQUID)：

北海道大学、AIST、室蘭工業大学、中央大学、北陸先端科学技術大学、超伝導センサテクノロジー(株)などが研究開発、JOGMEC プロジェクトが応用開発している。

(2) 超核偏極技術：

理化学研究所、大阪大学、九州大学、徳島大学、量子科学技術研究開発機構(QST)、光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)などが研究開発している。

(3) フォノンセンシング：

東京大学、凸版印刷(株)、パナソニックなどが研究開発している。

< 海外 >

(1) 超伝導量子干渉素子(SQUID)：

IBM、North Grumman、MIT、Quantum Design、CSIRO（オーストラリア）、中国科学院、南京大などが研究開発、PTTEP(タイ国有石油会社)、シュルンベルジェ、ペトロレアムジオサービスなどが応用開発している。

(2) 超核偏極技術：

米国 MIT、California Univ.、Goethe Univ. Russia Academy of Science、Swiss Federal Institute of Technology Science、イスラエル Weizmann Institute of Science Research Circle Technology、：オランダ・デルフト工科大学 (QuTech)、ドイツ ウルム大学、NVision Imaging Tech、カナダ・トロント大学、オーストラリア メルボルン大学、欧州「Quantum Technology Flagship—MetaboliQs」などが研究開発している。

(3) フォノンセンシング：

ドイツ アーヘン工科大学(RWTH)、英国 バース大学、米国 ドレクセル大学、フランス Centre national de la recherche scientifique (CNRS)、国立航空宇宙研究所(ONERA) などが研究開発している。

第5章 技術の概要一覧表

量子計測・センシング技術を俯瞰して把握するために、表 1-5-1 に調査した 4 つの大区別の技術の概要を一覧表にまとめた。

量子計測・センシング技術の方式・原理及び構造は多岐にわたっており、ナノメートルからミリメートルまでスケラブルに計測できるので、用途も DNA、磁場、弱光、レーザー、高精度センサ、エネルギー関連等、広範囲に及んでいる。

プレイヤーは量子計測・センシング技術が全般的に研究開発段階であるため、大学や研究機関がほとんどである。その中でも日本の大学／研究機関が多く、それぞれの量子計測・センシング技術の研究開発に積極的に取り組んでいることが分かる。

課題は、精度／感度／分解能／光吸収率等の向上、安定性、小型化、低コスト化等があげられている。

表 1-5-1 4 つの大区別の技術の概要一覧表

	スピン量子 センシング技術	光子量子 センシング技術	冷却原子を用いた 量子センシング技術	その他の量子 センシング技術
方式・原理	<ul style="list-style-type: none"> 固体量子センサ 量子ビットを用いた磁場/電界/温度/圧力センシング、偏光マイクロ波やレーザー光を入射赤色蛍光活用 量子スピントロニクスセンサ TMRやスピン熱流活用 	<ul style="list-style-type: none"> 量子もつれ顕微鏡/OCT: 量子もつれ弱光下観察 量子レーダー: 量子もつれステルス性活用 単一光子検出器: 光子による超電導破壊 量子赤外分光計測: 赤外検出 	<ul style="list-style-type: none"> 量子慣性センサ 極低温原子の位相差検出 光格子時計 ストロンチウム原子等の光吸収 	<ul style="list-style-type: none"> 超電導量子干渉素子 (SQUID) 超核偏極技術 分子核スピンをそろえる量子技術 (トリプレットDNP) フォノンセンシング 時間的なフォノン圧縮法
構造	<ul style="list-style-type: none"> 固体量子センサ DiamondのNVセンサ 量子スピントロニクスセンサ TMR、スピン熱流素子 	<ul style="list-style-type: none"> 量子もつれ顕微鏡/OCT: 2光子量子干渉を利用 量子レーダー: 量子もつれ光源と像合成 単一光子検出器: 超電導ナノ配線 量子赤外分光計測: 赤外領域非線形光学結晶 	<ul style="list-style-type: none"> 量子慣性センサ 極低温原子ジャイロスコープ 光格子時計 光格子/ストロンチウム 	<ul style="list-style-type: none"> 超電導量子干渉素子 Nb/A₂O₃ SQUID、Au、In、CNT 超核偏極技術 高温超電導体/クライオプローブ フォノンセンシング フォノン結晶導波路
用途	<ul style="list-style-type: none"> 固体量子センサ 超高感度磁気・電界・温度・圧力センシング 量子スピントロニクスセンサ 高感度局所磁場センサ、高感度・小型・省エネルギーセンサ 	<ul style="list-style-type: none"> 量子もつれ顕微鏡/OCT: 弱光観察超高感度断層撮影 量子レーダー: 悪天候下レーダー等 単一光子検出器: 通信、計測、医療等 量子赤外分光計測: 遠赤外の薬品検出、分子構造検出 	<ul style="list-style-type: none"> 量子慣性センサ 加速度/角加速度/重力の高精度計測、資源探索、ADAS 光格子時計 高精度時間計測 (精度 10⁻¹⁸秒) 	<ul style="list-style-type: none"> 超電導量子干渉素子 高感度磁気センサ (5 × 10⁻¹⁸ T) MRI等 超核偏極技術 高感度NMR、MRI フォノンセンシング 熱電エネルギーハーベスタ
プレイヤー	<ul style="list-style-type: none"> 固体量子センサ: 東工大、京大、阪大、DARPA等 量子スピントロニクスセンサ: 東北大、AIST、京大、imec等 	<ul style="list-style-type: none"> 量子もつれ顕微鏡/OCT: 京大 量子レーダー: QST、MIT等 単一光子検出器: NICT、IBM等 量子赤外分光計測: 京大等 	<ul style="list-style-type: none"> 量子慣性センサ: 東工大、阪大、NICT等 光格子時計: NICT、東大、理研等 	<ul style="list-style-type: none"> 超電導量子干渉素子: 北大、室蘭工大等 超核偏極技術: 理研、阪大等 フォノンセンシング: 東大等
課題	<ul style="list-style-type: none"> 固体量子センサ: 感度 (pT→fT) 向上、小型化 量子スピントロニクスセンサ: TMR比向上、熱的安定性、スピン流生成効率向上 	<ul style="list-style-type: none"> 量子もつれ顕微鏡/OCT: 更なる感度分解能向上 量子レーダー: 小型化高速化 単一光子検出器: 光ソフト低減 量子赤外分光計測: 損失低減制御技術 	<ul style="list-style-type: none"> 量子慣性センサ: 応用開拓、ハイブリッド化、高感度化 光格子時計: 光格子光シフト低減、光吸収効率向上、小型化 	<ul style="list-style-type: none"> 超電導量子干渉: 高感度化、小型化 超核偏極技術: 高偏極化、低コスト光源、応用開拓 フォノンセンシング: 結晶加工、高精度圧縮法

第2部 市場環境調査

第1章 量子計測・センシング市場環境調査内容／調査方法

量子計測・センシング技術は、量子状態のもろさを逆手にとり量子物理学の原理を使用して、従来のセンサでは達成できない感度と精度を実現するセンサ技術である。この技術は、生命・医療技術の向上による健康長寿社会、防災等の安全安心な社会の構築に貢献することが期待されている。量子センサには、原子時計、重力、磁気、回転、イメージング、温度センサなど、幾つかの種類がある。これらの市場の動向を明らかにし、量子計測・センシング技術の開発の方向性を確認する。

第1節 調査内容

量子計測・センシング技術に関する以下の七つの技術分野を調査対象として、市場環境の全体動向調査、以下の技術分野別動向調査を行った。

調査対象となる「固体量子センサ」「量子もつれ光センサ」「光子検出器」「量子慣性センサ」「光格子時計」については、研究開発段階で市場が形成されていない。よって、関連する市場として、「量子磁気センサ」、「慣性センサ」、「原子時計」の三つの市場動向を分析した。

表 2-1-1 量子計測・センシング技術（7区分）

分類	スピン量子センシング技術		光子量子センシング技術		冷却原子を用いた量子センシング技術		その他の量子センシング技術
	① 固体量子センサ	② 量子スピントロニクスセンサ	③ 量子もつれ光センサ	④ 光子検出器	⑤ 量子慣性センサ	⑥ 光格子時計	⑦ その他
具体例	・NV センサを用いたセンサ	・トンネル磁気抵抗 (TMR) センサ ・スピン熱流センサ	・イメージングセンサ (量子もつれ顕微鏡・量子OCT・量子レーダー等)	・単一光子検出器 (TES・SSPD 等)	・加速度センサ ・角速度センサ ・量子重力計	・次世代原子時計 (重力変化計測)	・超伝導量子干渉素子 (SQUID) ・超核偏極技術 ・フォノンセンシング等
市場環境調査 (関連)	—	量子磁気センサ	—	—	慣性センサ	原子時計	—

第2節 調査方法

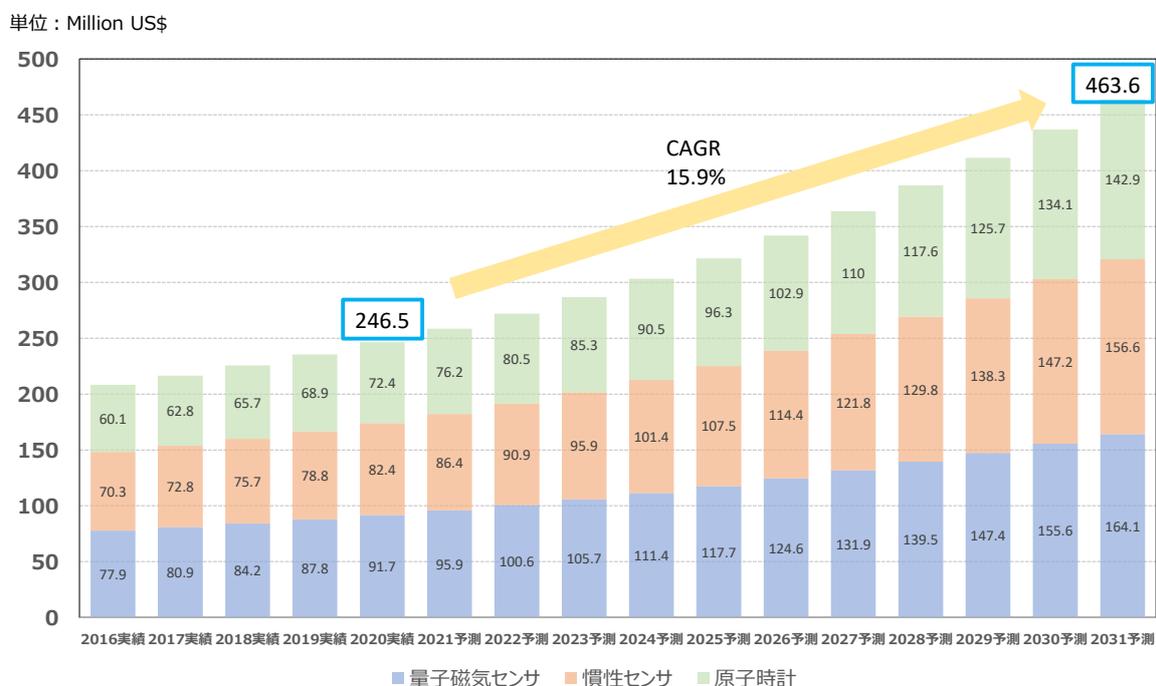
調査は、オープンソース（有料の市場レポート等を含む）からの情報収集と、アドバイザー及び有識者等へのヒアリングにより行った。諸外国については必要に応じて現地語の情報ソースを活用するとともに、調査対象技術に関わるプレーヤーのホームページ等を適宜参照して効率的・効果的な調査を実施した。市場動向把握は、市場レポートによって数値が異なるケースもあるため、偏った内容にならないよう、複数の調査資料を併用している。市場が形成されていないものについては、予測可能な範囲で市場調査を行った。具体的には「第1部 技術の概要」の用途で示された各用途のターゲット市場を調査し、競合する技術や製品との比較を行い普及の可能性を分析した。

第2章 量子計測・センシング全体市場

調査対象となる「固体量子センサ」「量子もつれ光センサ」「光子検出器」「量子慣性センサ」「光格子時計」については、研究開発段階で市場が形成されていない。よって、関連する市場として、量子スピンセンサを含む「量子磁気センサ」、ファイバーオプティックジャイロ (Fiber Optic Gyroscope:FOG)やAI ジャイロ (原子のド・ブロイ波を用いた干渉計(Atom Interferometry Gyroscope:AI gyro)) を含む「慣性センサ」、光格子時計を含む「原子時計」の三つの市場動向を分析することにより、表 2-1-1 で示した今回の調査対象の市場の将来性を調査した。

この量子計測・センシングに関連する市場の年次推移 (実績・予測) を図 2-2-1 に示す。全体動向としては、2020 年実績 246.5MUS\$から 2031 年予測 463.6MUS\$となっており、CAGR15.9%と高い成長率が予測されている。個別の分野でも量子磁気センサ、慣性センサ、原子時計は市場規模が 1.7 倍から 1.9 倍となり、それぞれ成長が期待されていることが分かる。

図 2-2-1 量子計測・センシングに関連する市場の年次推移 (実績・予測)

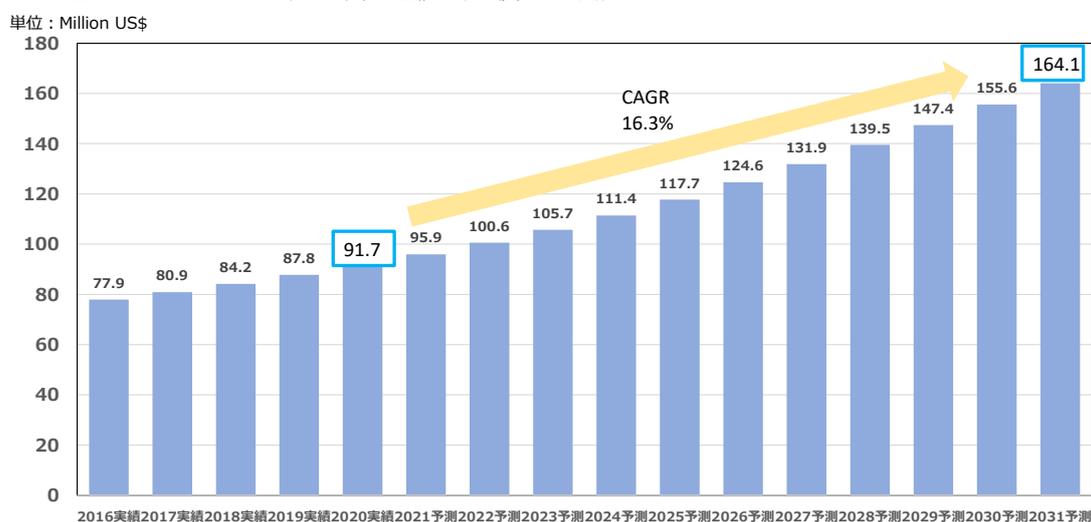


出典: Persistence Market Research 「Quantum Sensors Market Global Industry Analysis 2016 – 2020 and Opportunity Assessment 2021 – 2031」を基に調査会社が作成

第1節 量子磁気センサ市場

量子磁気センサ市場の年次推移（実績・予測）を図 2-2-2 に示す。2020 年実績 91.7MUS\$から 2031 年予測 164.1MUS\$となっており、CAGR16.3%と高い成長率が予測されており成長が期待されていることが分かる。

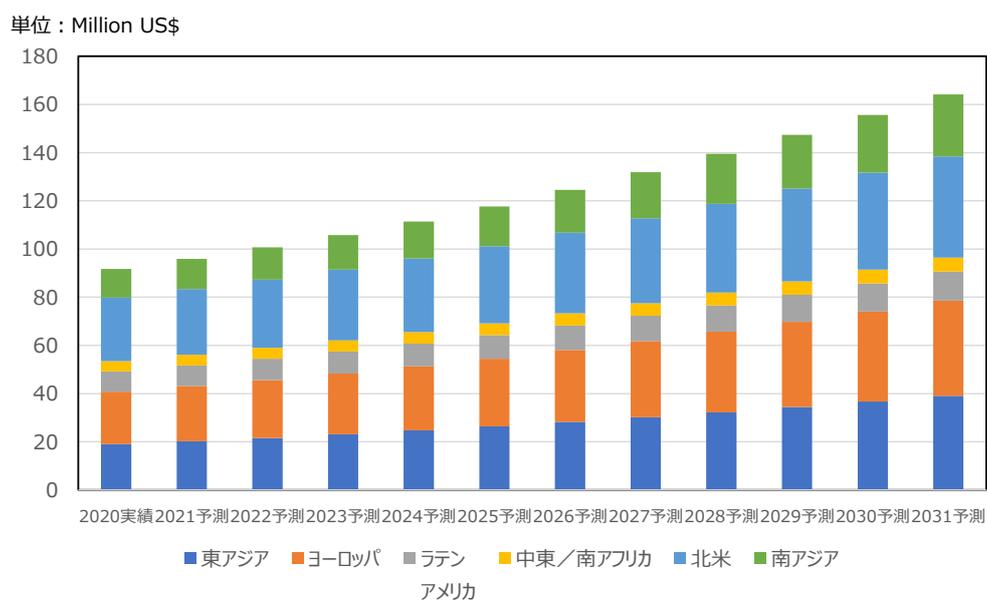
図 2-2-2 量子磁気センサ市場の年次推移（実績・予測）



出典：Persistence Market Research 「Quantum Sensors Market Global Industry Analysis 2016 – 2020 and Opportunity Assessment 2021 – 2031」を基に調査会社が作成

量子磁気センサ市場の地域別年次推移（実績・予測）を図 2-2-3 に示す。どの地域でも年々成長し、ワールドワイドで普及していくと予想されている。

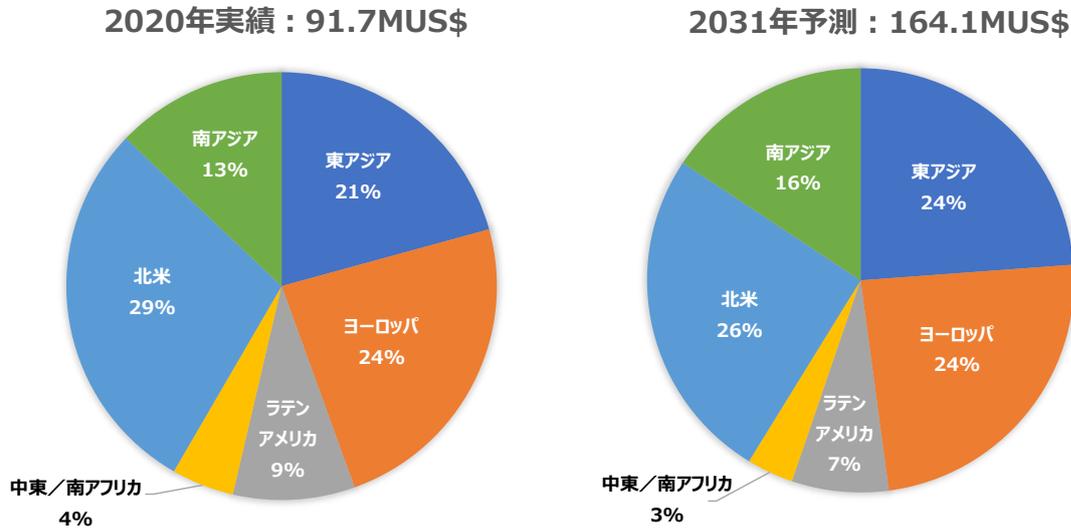
図 2-2-3 量子磁気センサ市場の地域別年次推移（実績・予測）



出典：Persistence Market Research 「Quantum Sensors Market Global Industry Analysis 2016 – 2020 and Opportunity Assessment 2021 – 2031」を基に調査会社が作成

量子磁気センサ市場の地域別割合（2020年実績・2031年予測）を図2-2-4に示す。2020年実績に対し2031年では、東アジアが3%ほど増えると予想されている。

図2-2-4 量子磁気センサ市場の地域別割合（2020年実績・2031年予測）

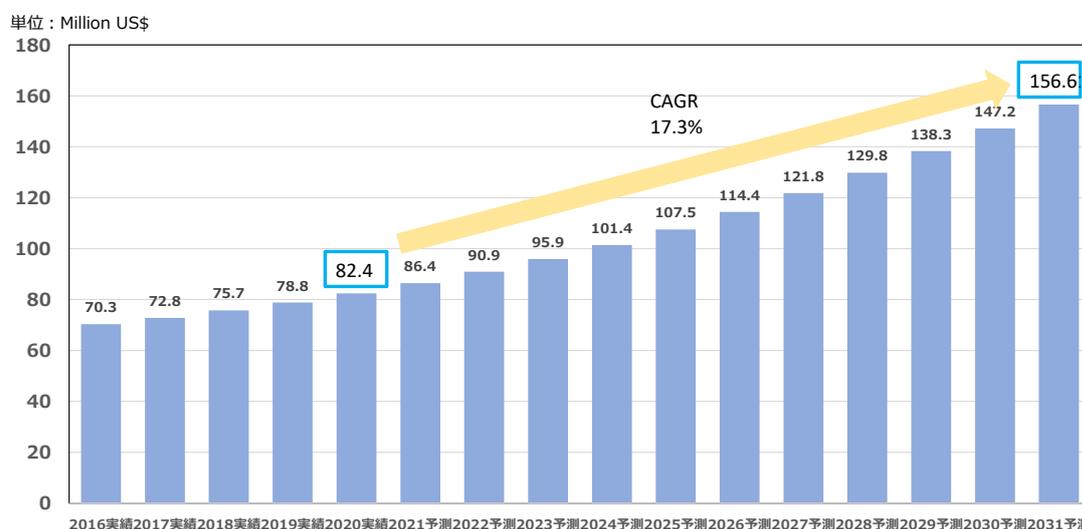


出典：Persistence Market Research 「Quantum Sensors Market Global Industry Analysis 2016 – 2020 and Opportunity Assessment 2021 – 2031」を基に調査会社が作成

第2節 慣性センサ市場

慣性センサ市場の年次推移（実績・予測）を図 2-2-5 に示す。2020 年実績 82.4MUS\$から2031 年予測 156.6MUS\$となっており、CAGR17.3%と高い成長率が予測されており成長が期待されていることが分かる。

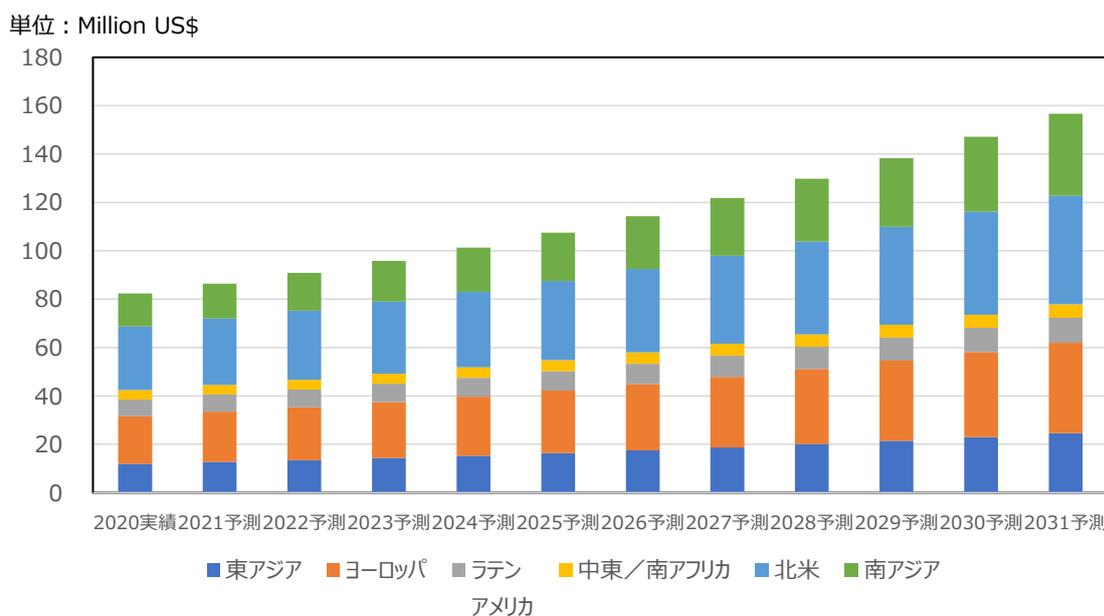
図 2-2-5 慣性センサ市場の年次推移（実績・予測）



出典：Persistence Market Research 「Quantum Sensors Market Global Industry Analysis 2016 – 2020 and Opportunity Assessment 2021 – 2031」を基に調査会社が作成

慣性センサ市場の地域別年次推移（実績・予測）を図 2-2-6 に示す。どの地域でも年々成長し、ワールドワイドで普及していくと予想されている。

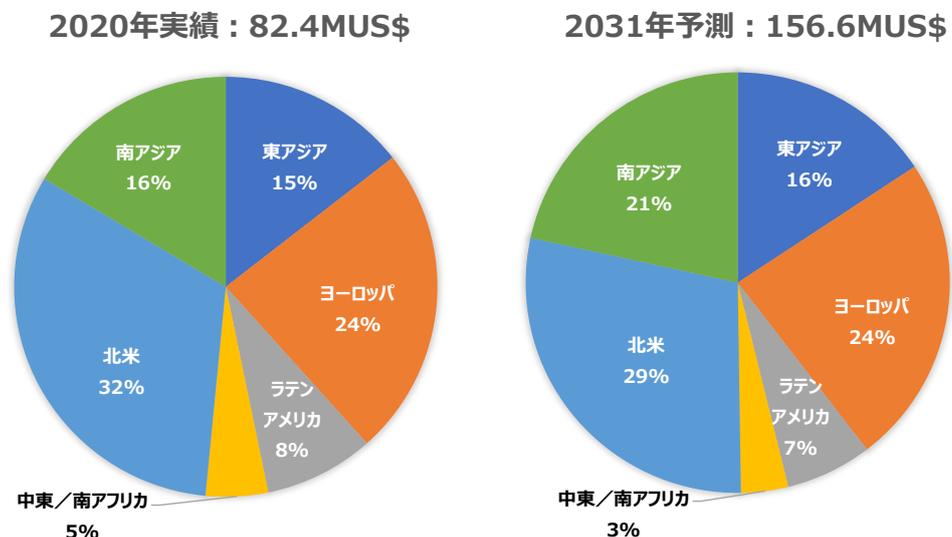
図 2-2-6 慣性センサ市場の地域別年次推移（実績・予測）



出典：Persistence Market Research 「Quantum Sensors Market Global Industry Analysis 2016 – 2020 and Opportunity Assessment 2021 – 2031」を基に調査会社が作成

慣性センサ市場の地域別割合（2020年実績・2031年予測）を図2-2-7に示す。2020年実績に対し2031年では、南アジアが5%ほど増えると予想されている。

図2-2-7 慣性センサ市場の地域別割合（2020年実績・2031年予測）

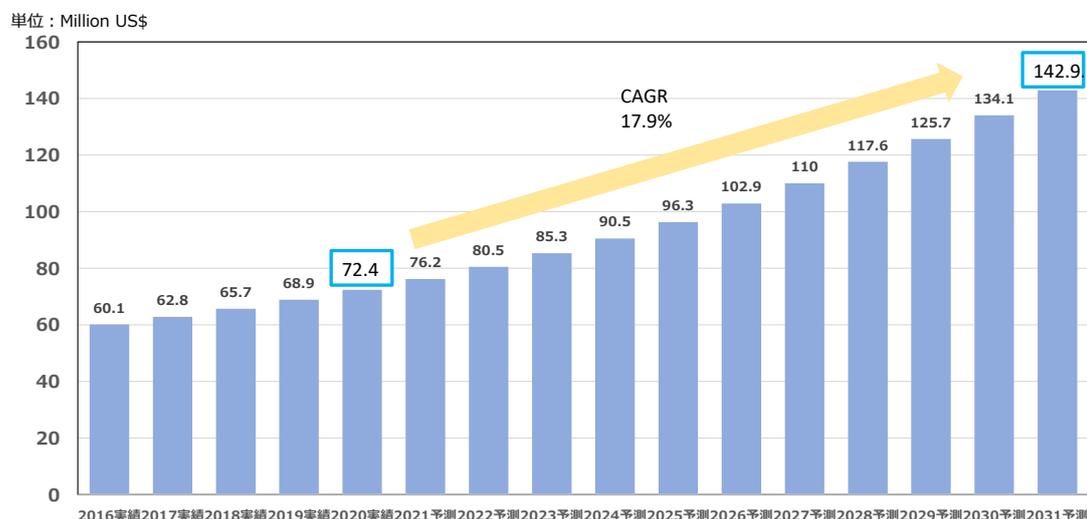


出典：Persistence Market Research 「Quantum Sensors Market Global Industry Analysis 2016 – 2020 and Opportunity Assessment 2021 – 2031」を基に調査会社が作成

第3節 原子時計市場

原子時計市場の年次推移（実績・予測）を図2-2-8に示す。2020年実績72.4MUS\$から2031年予測142.9MUS\$となっており、CAGR17.9%と高い成長率が予測されており成長が期待されていることが分かる。

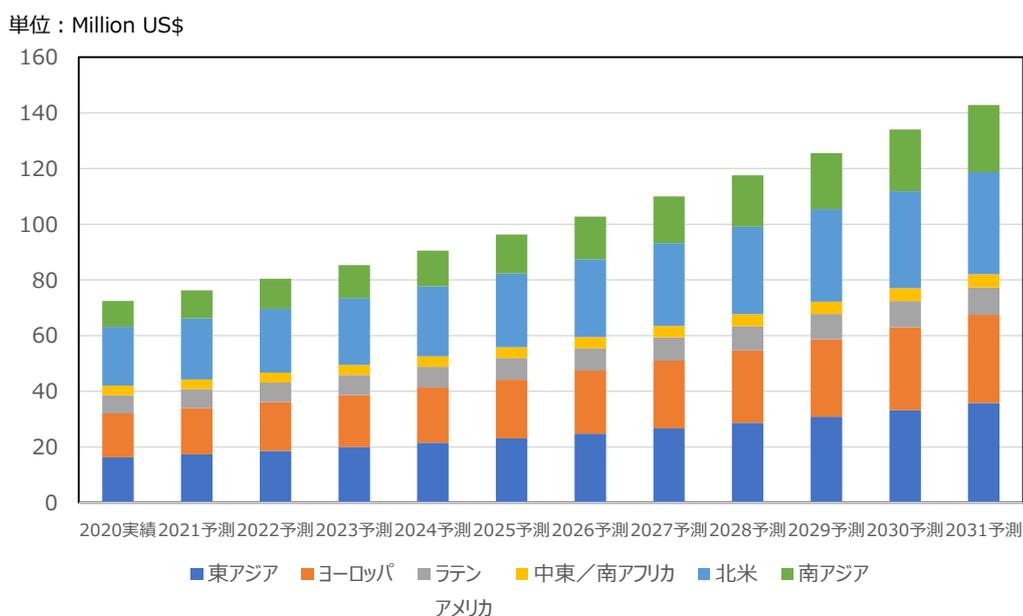
図2-2-8 原子時計市場の年次推移（実績・予測）



出典：Persistence Market Research 「Quantum Sensors Market Global Industry Analysis 2016 – 2020 and Opportunity Assessment 2021 – 2031」を基に調査会社が作成

原子時計市場の地域別年次推移（実績・予測）を図2-2-9に示す。どの地域でも年々成長し、ワールドワイドで普及していくと予想されている。

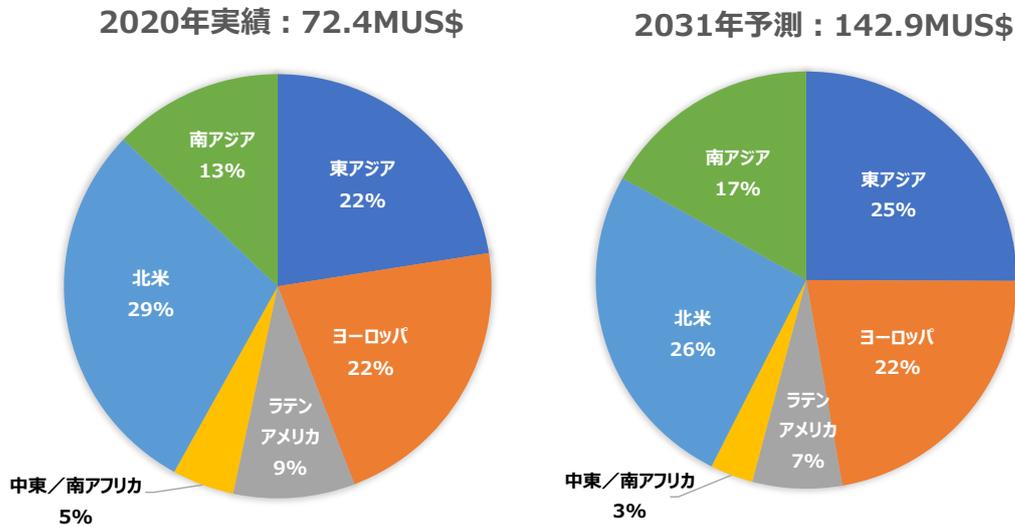
図2-2-9 原子時計市場の地域別年次推移（実績・予測）



出典：Persistence Market Research 「Quantum Sensors Market Global Industry Analysis 2016 – 2020 and Opportunity Assessment 2021 – 2031」を基に調査会社が作成

原子時計市場の地域別割合（2020年実績・2031年予測）を図2-2-10に示す。2020年実績に対し2031年では、東アジアが3%、南アジアが4%増えると予想されている。

図2-2-10 原子時計市場の地域別割合（2020年実績・2031年予測）



出典：Persistence Market Research 「Quantum Sensors Market Global Industry Analysis 2016 – 2020 and Opportunity Assessment 2021 – 2031」を基に調査会社が作成

第3章 用途に関する市場調査

量子センシング技術の応用が期待される用途の市場状況を整理するべく、当該用途の量子センシング技術に限定しない市場状況を参考情報として掲載する。

対象とした用途と当該用途に対応する可能性がある量子センシング技術を以下に示す。

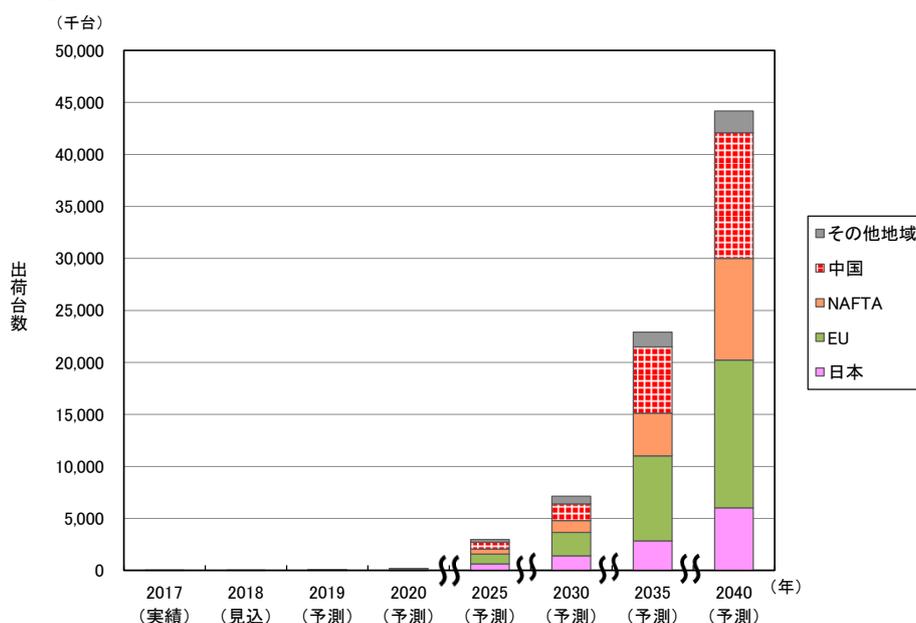
・脳磁計	固体量子センサ 量子スピントロニクスセンサ (TMR 磁気センサ) SQUID
・電池モニタリング	固体量子センサ
・エネルギーハーベスト	量子スピントロニクスセンサ (スピン熱流センサ)
・細胞分析	量子もつれ光センサ
・赤外分光装置	量子もつれ光センサ
・車載カメラ／レーダー	量子もつれ光センサ
・ナビゲーション	量子慣性センサ

第1節 脳磁計

脳磁計測では頭蓋外部で計測される磁場から、頭部内部の神経の活動を推定する。固体量子センサや量子スピントロニクスセンサを使用した脳磁計はまだ上市されていないが、有望な市場として自動運転における運転者の生体モニタがある。

2021年3月ホンダより世界初の自動運転レベル3の型式認定を受けた自動車の販売が開始された。自動運転のレベル3以上は、自動運行装置の国際基準の主な要件としてドライバのモニタリングが義務付けられている。自動運転レベル3以上の世界市場推移（実績と予測）を図2-3-1に示す。このように自動運転レベル3以上の車の台数は2035年に世界で2,000万台を超えると予想されている。

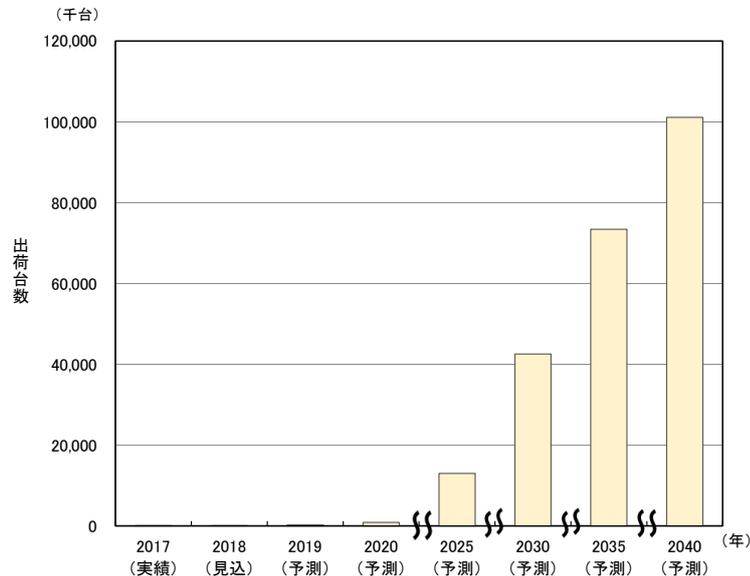
図2-3-1 自動運転レベル3以上の世界市場推移（実績と予測）



出典：富士カメラ総研 「2019 自動運転・AI カー市場の将来展望」より三菱ケミカルリサーチがグラフを作成

ドライバモニタリングシステムの市場推移（実績と予測）を図 2-3-2 に示す。自動運転のレベル 3 以上では、走行時の状態を監視するドライバモニタリングシステムの車への搭載は法律で義務付けられており、自動運転の普及に伴い、ドライバモニタリングシステムの需要も急増すると考えられる。2035 年には 73,000 万台システム以上となると予測されている。

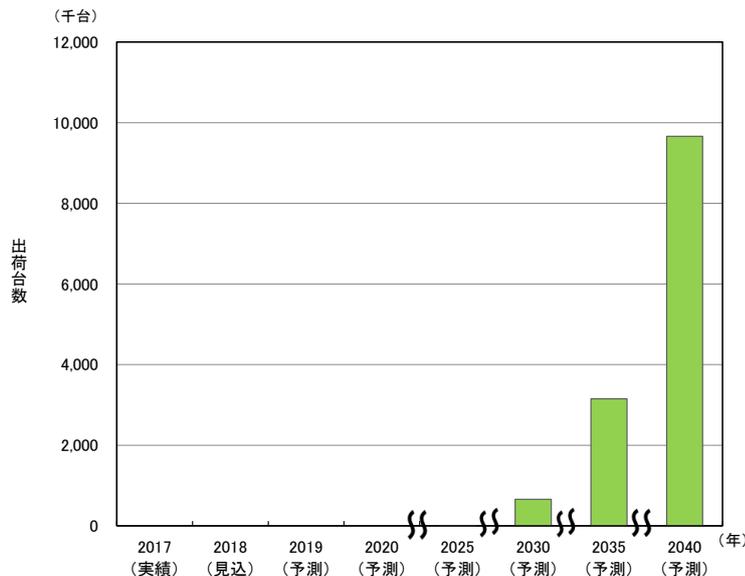
図 2-3-2 ドライバモニタリングシステムの市場推移（実績と予測）



出典：富士キメラ総研 「2019 自動運転・AI 車市場の将来展望」より三菱ケミカルリサーチがグラフを作成

車載生体センサの市場推移（実績と予測）を図 2-3-3 に示す。ドライバモニタリングは、顔の表情を監視するカメラ等があるが、将来はドライバの状態を直接感知できる生体センサが主流となると思われる。車載生体センサの市場は 2030 年以降に急拡大すると考えられている。

図 2-3-3 車載生体センサの市場推移（実績と予測）



出典：富士キメラ総研 「2019 自動運転・AI 車市場の将来展望」より三菱ケミカルリサーチがグラフを作成

車載生体センサ市場では、複数のセンサを体に張り付け心拍や呼吸、視線などを分析、異常を感知する製品を Faurecia（フランス）が上市している。また、アルプス電気はドイツの完成車メーカーと共同で、車載用生体センサモジュールを製品化している。これは加速度センサ、ガスセンサ、音波センサやドライバの瞳孔と視線で、眠気やアルコールを検知するものである。

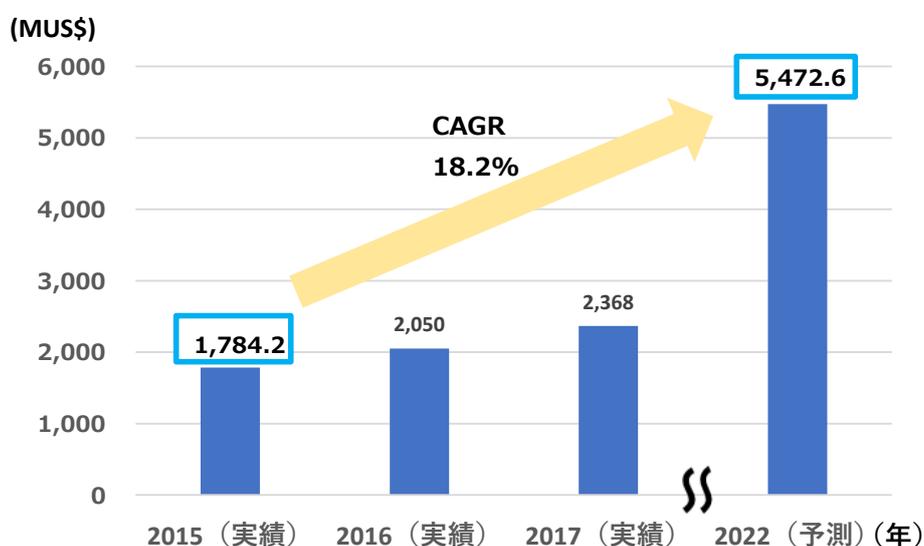
しかしながら、固体量子センサやスピントロニクスが目指している脳磁計は脳の外から直接脳の状態を常に確認できるものであり、ドライバの脳内の様子をリアルタイムにモニタすることで、運転中の眠気やその他の異常を察知し、警報を出すなどの仕組みが作れる。製品化できれば現行の製品あるいは開発中の製品に対し、格段にドライバの状態の検知の精度が増すと思われ、2030年以降一気に普及する可能性が高い。

第2節 電池モニタリング

固体量子センサの応用用途の一つとして、エネルギー磁場計測がある。具体的な応用例としては、電動車の電池の磁場を計測することができる。この技術を使用して東京工業大学は、矢崎総業と共同でEV 電池残量をモニタリングする技術を開発し、EV の走行距離を10%改善できる可能性を示していることから、固体量子センサにとって電池モニタリング市場は有望な市場の一つである。

電池モニタリングの市場推移（実績と予測）を図2-3-4に示す。電池モニタリングシステムの世界市場規模は2017年から2022年にかけて平均年成長率18.23%の急拡大で推移すると見込まれている。2015年17億8,420万ドルから、2022年には54億7,260万ドルに達しCAGRは18.2%と予測され、高い成長率が見込まれている。

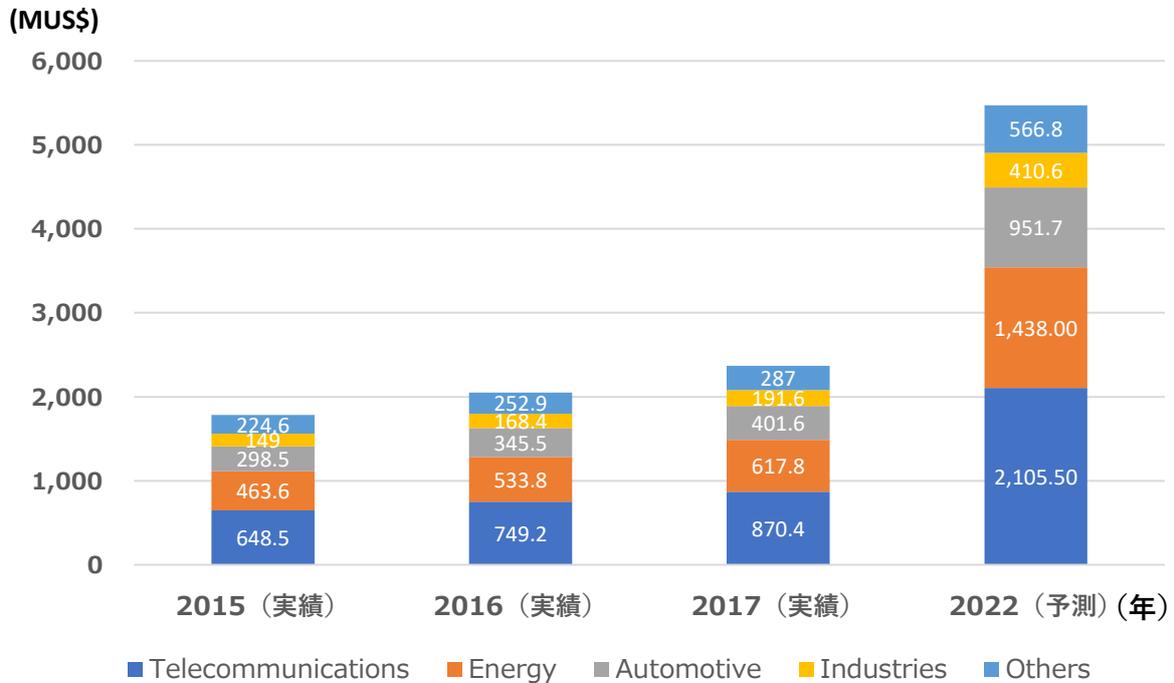
図2-3-4 電池モニタリングの市場推移（実績と予測）



出典：Markets&Markets 「BATTERY MONITORING SYSTEM MARKET - GLOBAL FORECAST TO 2022」を基に調査会社が作成

電池モニタリングのアプリケーション別市場推移（実績と予測）を、図 2-3-5 に示す。アプリケーション別では Telecommunications（通信）、Energy（社会インフラエネルギー）、Automotive（自動車）、Industries（産業）などでそれぞれ、高い成長が予測されている。エネルギー効率を高めるためこの市場は有望視されており、重要であることが分かる。

図 2-3-5 電池モニタリングのアプリケーション別市場推移（実績と予測）

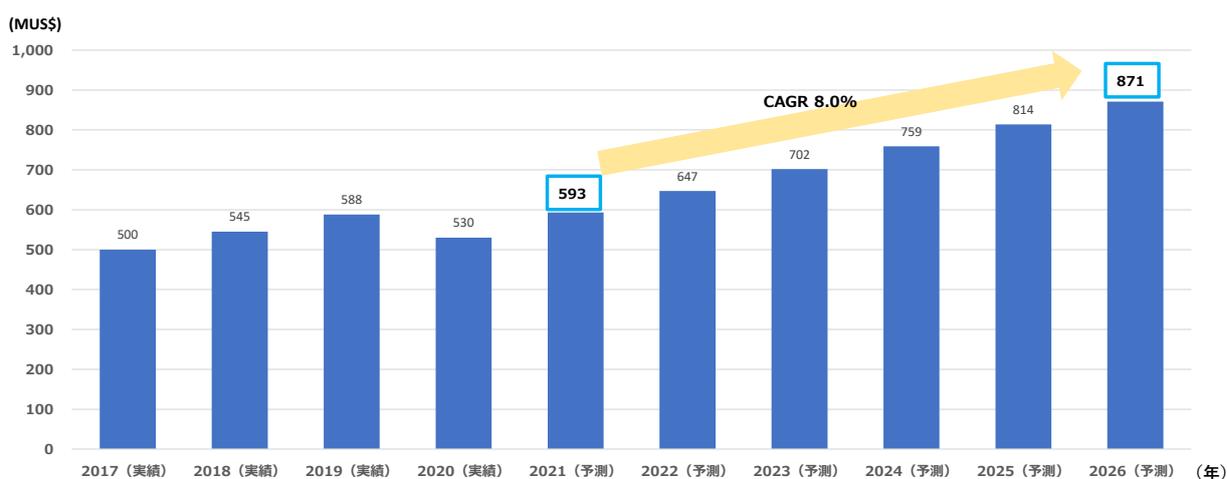


出典：Markets&Markets 「BATTERY MONITORING SYSTEM MARKET - GLOBAL FORECAST TO 2022」を基に調査会社が作成

第3節 エナジーハーベスト

量子スピントロニクスセンサのスピントロニクス素子であるスピントロニクス素子は、磁性絶縁体と伝導体の二層膜だけで構成され、素子の面積を広くすると、これに比例して取り出し電力が増大し、シンプルな構造で簡単にスケールアップが可能であることが特長である。この特長をいかすことができるエナジーハーベストの代表例として熱電変換モジュール市場の推移（実績と予測）を図 2-3-6 に示す。COVID-19 の影響により 2020 年は市場規模が縮小しているが、2021 年から再び市場は拡大し、2021 年から 2026 年の予測では CAGR8.0%で成長すると予測されている。

図 2-3-6 熱電変換モジュールの市場推移（実績と予測）

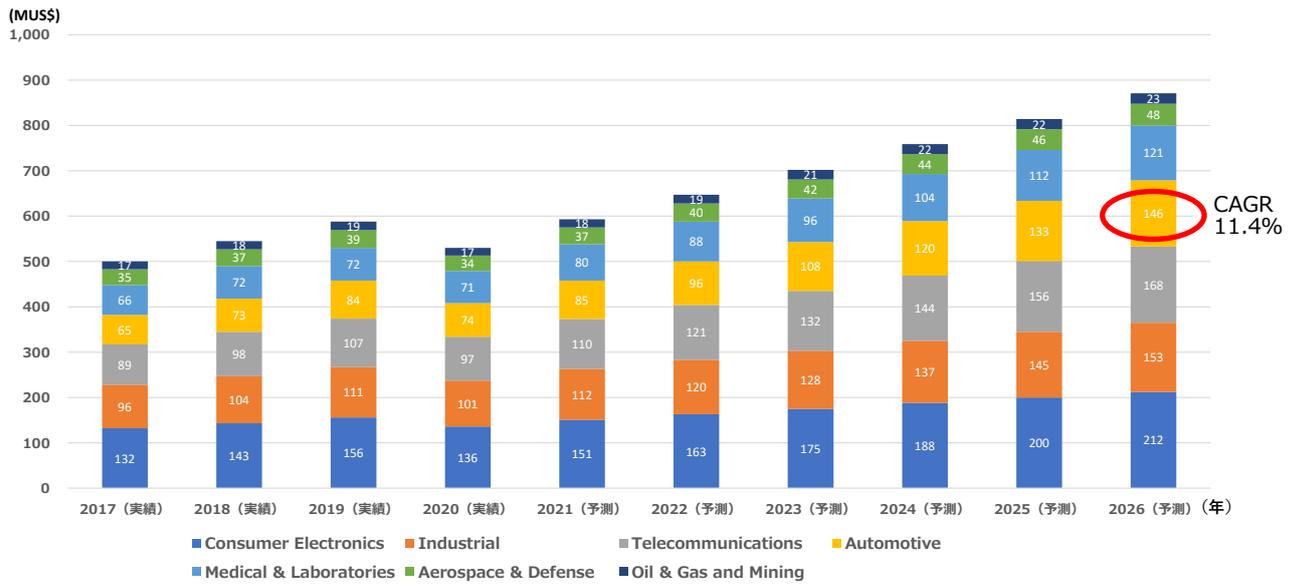


出典：Markets&Markets 「THERMOELECTRIC MODULES MARKET WITH COVID-19 IMPACT ANALYSIS - GLOBAL FORECAST TO 2026」を基に調査会社が作成

熱電変換モジュールのアプリケーション別市場推移（実績と予測）を図 2-3-7 に示す。各アプリケーションで市場拡大が予測されており、特に Automotive では 2021 年から 2026 年の CAGR が 11.4%と最も高い。（図中赤枠）

シンプルな構造でスケールアップの可能性がある量子スピントロニクスセンサは、研究開発と生産技術が進めば熱電変換器としての可能性がある。

図 2-3-7 熱電変換モジュールのアプリケーション別市場推移（実績と予測）

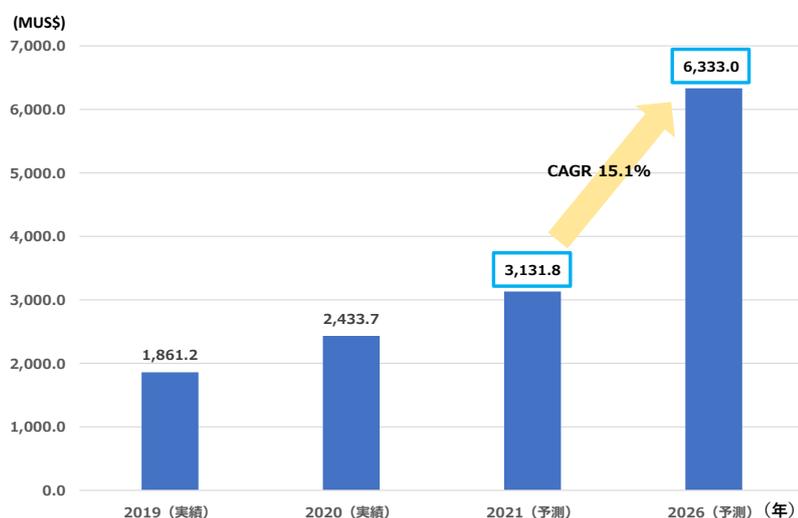


出典：Markets&Markets 「THERMOELECTRIC MODULES MARKET WITH COVID-19 IMPACT ANALYSIS - GLOBAL FORECAST TO 2026」を基に調査会社が作成

第4節 細胞分析

量子もつれ光センサの応用用途の一つとして細胞分析が挙げられているが、その市場推移（実績と予測）を図 2-3-8 に示す。2021 年から 2026 年の CAGR は 15.1% と高い成長率が見込まれている。

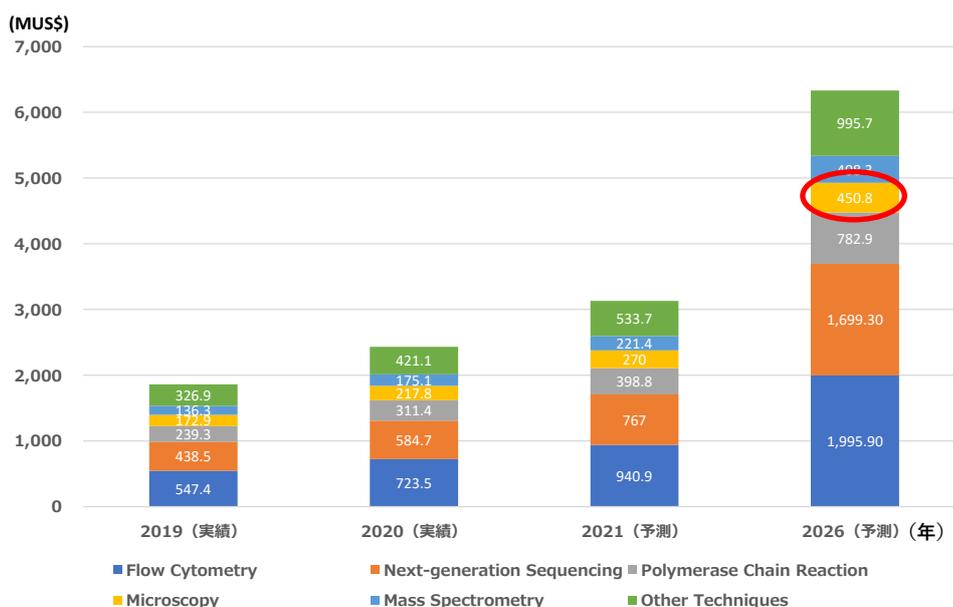
図 2-3-8 細胞分析の市場推移（実績と予測）



出典：Markets&Markets 「SINGLE CELL ANALYSIS MARKET - GLOBAL FORECAST TO 2026」を基に調査会社が作成

細胞分析の技術別市場推移（実績と予測）を図 2-3-9 に示す。量子もつれ光センサの応用としては、Microscopy（顕微鏡検査）がある。2021 年では 270 百万 US\$ の市場規模の予測であるが、2026 年には 450.8 百万 US\$ に拡大すると予測されている。（図中赤丸）

図 2-3-9 細胞分析の技術別市場推移（実績と予測）



出典：Markets&Markets 「SINGLE CELL ANALYSIS MARKET - GLOBAL FORECAST TO 2026」を基に調査会社が作成

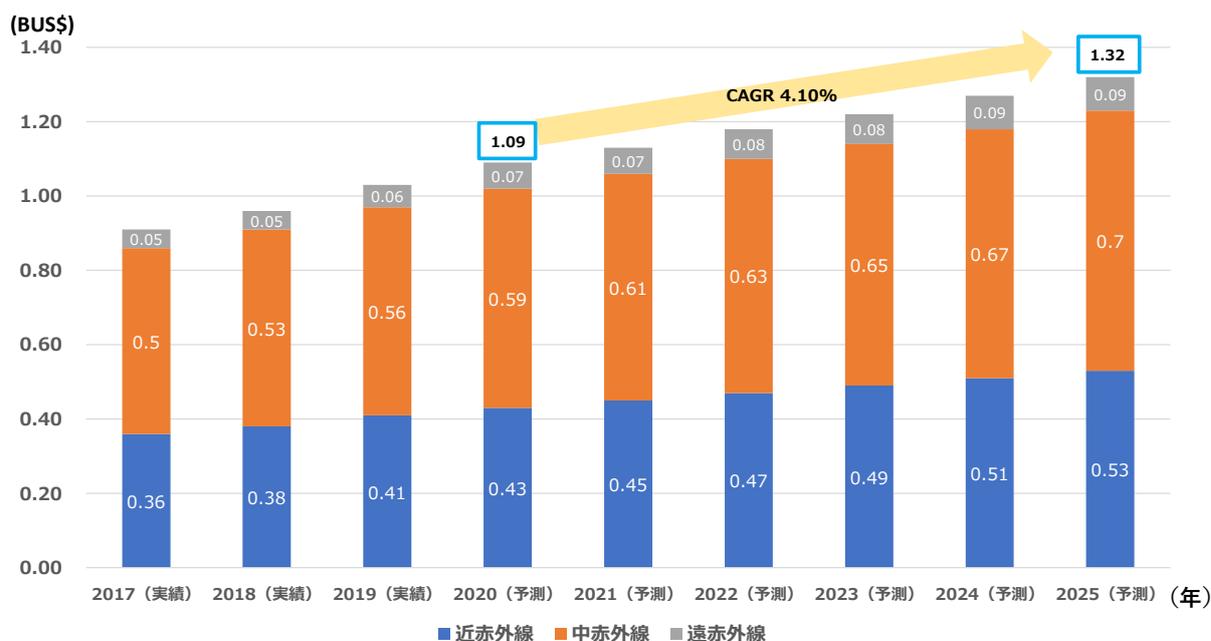
既存のレーザー顕微鏡は、太陽光の何十億倍も明るいレーザーを用いるため、ヒト細胞のように壊れやすい生体試料に損傷を与えてしまうが、レーザーを構成する光子の「量子もつれ」を用いることでレーザー強度を上げることなくノイズを減少でき、この課題の解消が可能となる。図 2-3-9 で示したように細胞の Microscopy（顕微鏡検査）市場は拡大することから、将来「量子もつれ」を用いた顕微鏡の市場も拡大することが期待できる。

第5節 赤外分光装置

量子もつれ現象を活用して、遠赤外領域を含む赤外領域（波長 $1.5\mu\text{m}$ 以上）の薬品検出、分子構造検出ができる。コンパクトで高性能な赤外分光装置の実現により、医療、薬品製造管理、ガソリン等燃料のオクタン価計測、環境モニタリング、セキュリティ等様々な分野への応用が想定されている。

赤外分光装置の市場推移（実績と予測）を図 2-3-10 に示す。赤外分光装置は 2019 年に 10.3 億 US\$ の実績があり、2025 年までに 13.2 億 US\$ に達すると予測され、2020 年から 2025 年にかけて 4.10% の CAGR で成長すると見込まれている。

図 2-3-10 赤外分光装置の市場推移（実績と予測）

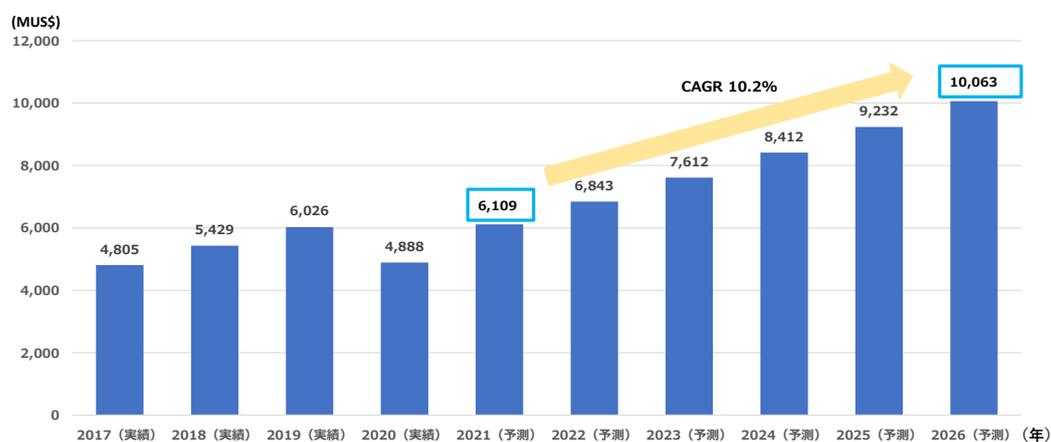


出典：Markets&Markets 「IR SPECTROSCOPY MARKET - GLOBAL FORECAST TO 2025」を基に調査会社が作成

第6節 車載カメラ／レーダー

量子光センサの用途の一つとなる可能性がある車載カメラ／レーダーの市場推移（実績と予測）を図2-3-11に示す。自動運転の普及が進むと、車載カメラ／レーダーの需要が増加することが分かる。

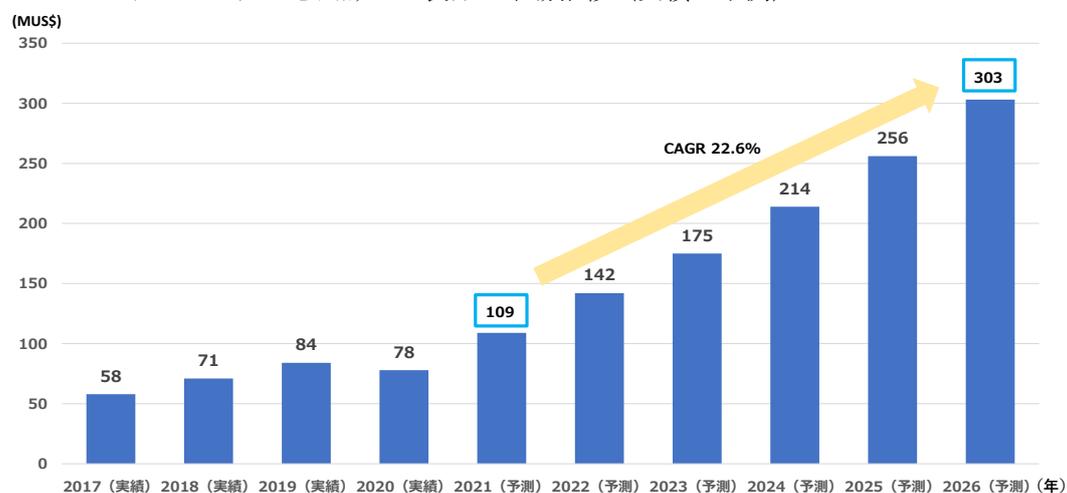
図2-3-11 車載カメラ／レーダーの市場推移（実績と予測）



出典：Markets&Markets 「AUTOMOTIVE CAMERA AND INTEGRATED RADAR AND CAMERA MARKET - GLOBAL FORECAST TO 2026」を基に調査会社が作成

図2-3-11のうち、カメラとレーダーを内蔵した製品の市場推移を図2-3-12に示す。

図2-3-12 カメラとレーダーを内蔵した製品の市場推移（実績と予測）



出典：Markets&Markets 「AUTOMOTIVE CAMERA AND INTEGRATED RADAR AND CAMERA MARKET - GLOBAL FORECAST TO 2026」を基に調査会社が作成

ADAS (Advanced Driver-Assistance Systems: 先進運転支援システム) や自動運転において、車の前方、後方、周辺を監視するためにカメラやレーダー等が使用されている。自動運転を普及させるためには安全の担保が必要で、これらのカメラやレーダーの特長を組み合わせることで人や物体の認識精度を上げている。ところが、悪天候や晴天時の逆光に対して、その影響を受けることなく自動車の周辺の画像を認識することは難しく課題の一つである。例えばステレオカメラでは、霧の中での自動運転の実験からカメラでは歩行者の検出が難しい。そこで、量子レーダーを含めた各種レーダーのデータと人工知能を融合して、全天候対応の自

動運転車の実現や超高感度監視カメラ実現に向けて研究開発が進んでいる。図 2-3-12 に示すように、カメラとレーダーを内蔵した製品の市場規模は 2026 年に 303 百万 US\$ になり、2021 年からの CAGR では 22.6% と高い伸び率が予測されており、より性能の良い量子レーダーの導入が期待されている。

第7節 ナビゲーション

量子慣性センサは、重力計、重力勾配計測、角速度/角加速度計測の三つの動作が可能である。量子慣性センサは図 2-3-13 に示すように、GPS の使えない電波の届かない所での非 GPS 航法を提供できるのが特長である。

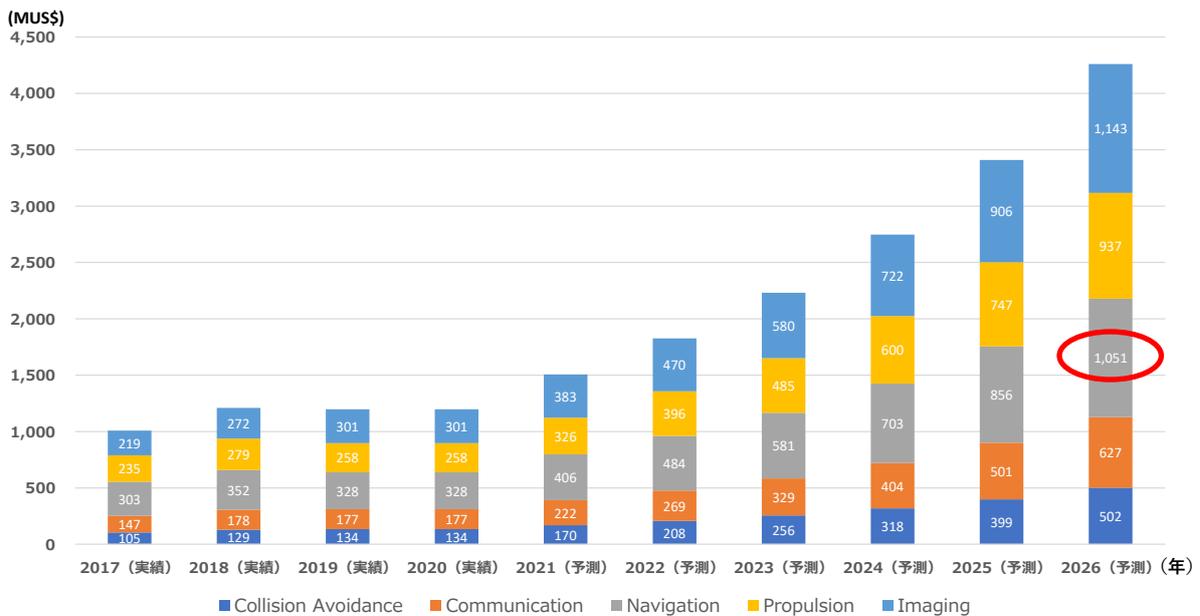
図 2-3-13 量子慣性センサの特長例



出典：令和 3 年 11 月内閣府総合海洋政策本部参与会議「第 1 回科学技術・イノベーションについて検討するスタディグループ 量子が拓く明日の海洋科学」

量子慣性センサは、衛星を使用する GPS 等の GNSS がほとんど使用できない自律型無人潜水機 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) に搭載することが可能である。これにより、「海洋資源探索の効率化」、「自動運転船舶を用いた物流における安全性確保」等が期待できる。自律型無人潜水機のコンポーネント別市場推移 (実績と予測) を図 2-3-14 に示す。Navigation の市場規模は 2026 年に 1,051 百万 US\$になると予想され、成長が見込まれている。(図中赤丸)

図 2-3-14 自律型無人潜水機のコンポーネント別市場推移 (実績と予測)



出典：Markets&Markets 「AUTONOMOUS SHIPS MARKET - GLOBAL FORECAST TO 2030」を基に調査会社が作成

第8節 用途に関する市場調査まとめ（参考）

本章で取り上げたアプリケーションの市場規模及びCAGRを表2-3-1に整理する。

脳磁計の車載生体センサはまだ市場が存在しないので、対象となるであろうと予測される機器の台数で予測している。いずれの対象市場のCAGRも大きく、成長が見込まれ市場規模も拡大傾向である。

表 2-3-1 量子計測・センシング技術のアプリケーションの市場規模及びCAGR

アプリケーション	対象市場	市場規模	CAGR
脳磁計	車載生体センサ	2035年 315万台	—
電池モニタリング	通信、社会インフラエネルギー 自動車、産業	2022年 54億7260万ドル	2015年～2022年 18.2%
エネルギーハーベスト	熱電変換モジュール	2026年 8億7100万ドル	2021年～2026年 8.0%
細胞分析	顕微鏡検査	2026年 4億5080万ドル	2021年～2026年 8.0%
赤外分光装置	医療、薬品製造管理、ガソリン等のオクタン価計測、環境モニタリング、セキュリティ	2025年 13.2億ドル	2020年～2025年 4.10%
車載カメラ/レーダー	車載カメラ/レーダー	2026年 3億300万ドル	2021年～2026年 22.6%
ナビゲーション	自律型無人潜水機	2026年 10億5100万ドル	2021年～2026年 12.2%

第3部 政策動向調査

日本及び諸外国・地域における量子計測・センシングに関わる科学技術政策、産業政策や研究支援策の動向を以下に記す。

第1章 日本の政策動向

1995年に施行された「科学技術基本法」を基に、政府は「科学技術基本計画」を策定している。これは、内閣総理大臣からの諮問を受けた総合科学技術会議（現 総合科学技術・イノベーション会議）による、10年先を見通した5年間の科学技術の振興に関する施策の総合的な計画であり、5年ごとに科学技術基本計画を策定すること、年次報告を行うことが規定されている。また、複数年度を含む政府研究開発投資目標、重点研究開発分野、重点施策を設定することが規定されており、長期的視野に立って体系的かつ一貫した科学技術政策が実行されている。

第1節 内閣府

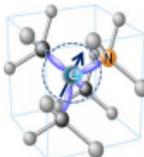
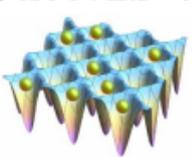
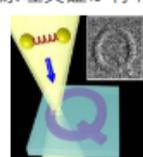
2016年に、内閣府に設置された「総合科学技術・イノベーション会議」が「第5期科学技術基本計画」（2016年度～2020年度）を策定したが、この中では、「量子技術イノベーション戦略」が、「AI戦略」、「バイオ戦略」と並んで新たな価値創出への基盤技術戦略の一つとして初めて明確に位置付けられている。これは、我が国の基盤的な力が弱体化しており、中長期的な視点で目標を設定し強化推進を図るという認識の基に策定されたものである。2019年2月に、この量子技術を含む統合イノベーション戦略の強化推進のために、統合イノベーション戦略推進会議の下に、有識者による量子技術イノベーション会議が内閣府に設置された。

2020年1月、統合イノベーション戦略推進会議が、量子技術イノベーションの創出のために、今後の産業・ビジネス構造の変化等を見据えて、技術開発のみならず産業・イノベーションを念頭に置いた国家戦略「量子技術イノベーション戦略（最終報告）」を策定し、技術開発戦略、国際戦略、産業・イノベーション戦略、知的財産・国際標準化戦略、人材戦略の重点戦略5項目に関して取りまとめている。この量子技術イノベーション戦略における主要研究領域としては、①量子情報処理、②量子計測・センシング、③量子通信・暗号、④量子マテリアルが挙げられている。図3-1-1に量子技術イノベーション戦略における主要研究領域の量子計測・センシングの例を示す。②の量子計測・センシングは、従来技術を凌駕する感度・精度を実現し得る技術であり、将来の産業競争力の向上、医療技術の向上による健康長寿社会の形成、防災及び国家の安全保障のために、極めて重要なコア技術と考えられている。

図 3-1-1 量子技術イノベーション戦略における主要研究領域 量子計測・センシングの例

主要技術領域② 量子計測・センシング

○量子計測・センシングは、量子状態のもろさを逆手にとり、従来技術を凌駕する感度・精度を実現する技術。生命・医療技術の向上による健康・長寿社会、防災等の安全・安心な社会の構築に貢献

<h4 style="background-color: #006633; color: white; padding: 2px;">固体量子センサ</h4> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 電子スピン状態を利用した高感度の磁場センサ。従来の磁場計測法（ホール素子）に比べ、高感度（10万倍）、高空間分解能（100倍程度）を室温下で実現 ✓ 日本は材料作製技術に強みを有している。基礎からデバイス開発まで一気通貫な研究開発が必要 ✓ 脳磁・神経磁場の計測の高度化によりヘルスケア、安全走行、脳疾患の予防・治療などへ期待 	<h4 style="background-color: #006633; color: white; padding: 2px;">量子慣性センサ</h4> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 原子の波としての性質を利用した加速度や回転速度を測るセンサ。現在広く利用されているリングレーザージャイロより2桁の精度向上が期待 ✓ 日本は光技術のレベルが高い一方で、原理実証に留まっており、実用に向けた小型化・可搬化が重要 ✓ GPS信号が無くても自分の位置を確認して目的地に到達できる、例えば、完全自動運転車、自律型無人潜水機（AUV）が実現可能  <p style="text-align: right; font-size: small;">(出典：JAMSTEC)</p>
<h4 style="background-color: #006633; color: white; padding: 2px;">光格子時計</h4> <ul style="list-style-type: none"> ✓ レーザー光を活用し、従来の原子時計に比べて、数桁高い精度で時間を測定できる時計 ✓ 日本の研究者が原理を提案。日本の光格子時計の精度・連続稼働時間は世界をリード。更なる小型化・可搬化・耐環境性向上が重要 ✓ 新しい秒の定義の候補 ✓ 微弱な重力変化の計測による地震・火山に関わる防災や物理定数の恒常性の検証等に役立つことに期待 	<h4 style="background-color: #006633; color: white; padding: 2px;">もつれ光センサ</h4> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 2つの光子が離れていても影響を与える量子もつれ状態を利用した高感度センサ ✓ 日本は高品質で大強度のもつれ光子源を実現しており、実用化に向けたアプリケーションの原理実証が行われている。 ✓ 細胞の非侵襲観察や網膜などの組織厚みの精密計測装置、化学プラントでの薬品製造管理などに必要な高感度の小型赤外分光装置が実現可能 

出典：量子技術イノベーション戦略（最終報告）（2020年1月）統合イノベーション戦略推進会議
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-nnovation/pdf/ryoushisenryaku2020.pdf>

その後、2020年以降の新型コロナ禍もあって社会が急速にデジタル・トランスフォーメーション（DX: Digital Transformation）化していく中で、次世代通信の高速・大容量化が進展し、将来のデータ量・通信量の爆発的な増大が見込まれており、DXの先には、計算量・秘匿性に優れる量子・トランスフォーメーション（QX: Quantum Transformation）が不可欠と認識されてきている。あるべきQX社会のビジョンを描き、未来社会におけるQXの位置付けを明確にして、量子技術の社会実装や量子産業の在り方（出口戦略）を示すべきとの判断から、「量子技術イノベーション戦略（最終報告）」を見直し中¹⁰である。

今後は、中間報告を経て量子技術イノベーション会議で見直しを決定し、2022年4月から2022年6月にかけて、統合イノベーション戦略推進会議において決定の予定である。

また、量子技術は、「第6期科学技術・イノベーション基本計画」（2021年度～2025年度）においても、経済、産業、安全保障に大きな変革をもたらす可能性を秘めた革新的な技術の一つと認識されており、上記の重点戦略5項目に加えて、産業・社会での利活用の促進、基礎基盤的な研究開発から社会実装に至る幅広い取組を、産学官の総力を結集して推進している。（図 3-1-2）

¹⁰ 量子技術イノベーション戦略の見直しに向けて（2021年10月7日）内閣府
<https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/9kai/siryol.pdf>

図 3-1-2 科学技術・イノベーション基本計画



出典：科学技術・イノベーション基本計画について（2021年11月）内閣府

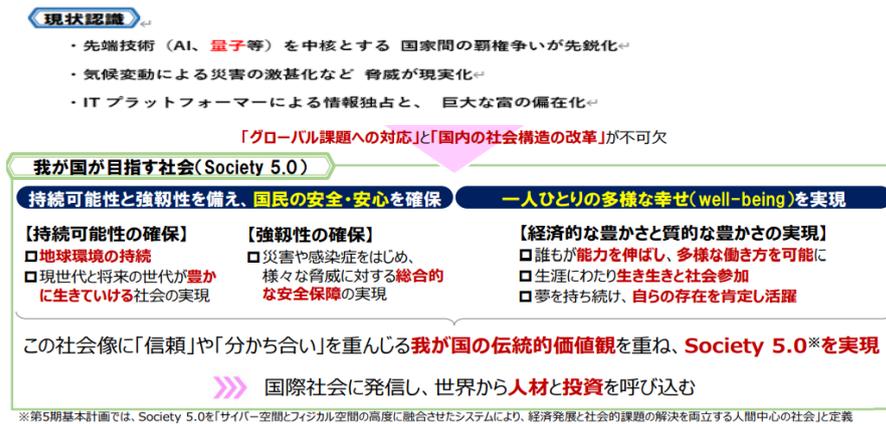
https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/special/reform/wg7/20211117/shiryout2_1.pdf

なお、第6期科学技術・イノベーション基本計画では、図 3-1-3 に示すように、現状認識として、①先端技術（AI、量子等）を中核とする国家間の覇権争いが先鋭化している、②気候変動による災害の激甚化などの脅威が現実化している、③ITプラットフォームによる情報独占と巨大な富の偏在化が進んでいるとしており、これらを踏まえて、我が国が目指す社会「Society 5.0¹¹」を、持続可能性と強靱性を備え、国民の安全・安心を確保し、一人ひとりの多様な幸せ（well-being）を実現していこうとしている。そして、この具体的取り組みとして、図 3-1-4 に示すように、サイバー空間とフィジカル空間の融合による持続可能で強靱な社会への変革が挙げられている。

この中で、量子技術は、政府のデジタル化、Beyond 5G、スパコン、宇宙システム、半導体等の次世代インフラ、データ・人工知能（AI）利活用技術の整備・研究開発等と並んで挙げられている。なお、量子技術については、第5期から引き続いて強化促進していくべき項目として明示されている。

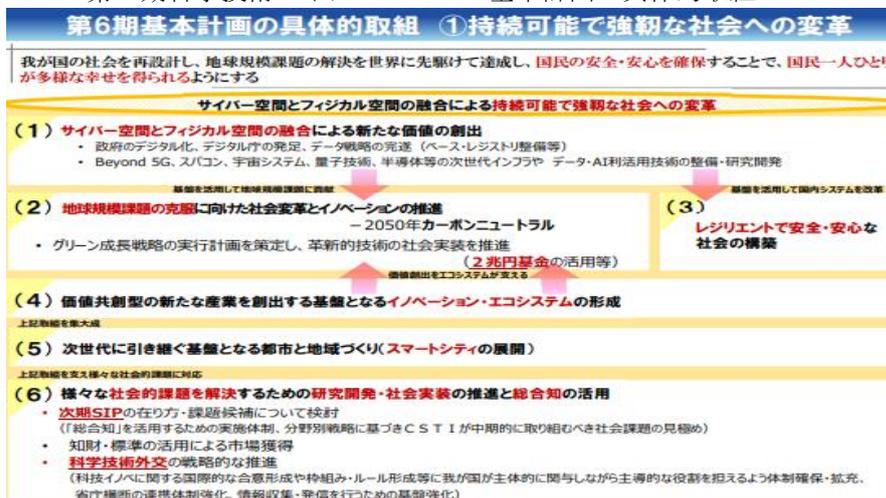
¹¹ Society 5.0：サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会課題の解決を両立する、人間中心の社会（Society）。

図 3-1-3 第 6 期科学技術・イノベーション基本計画のポイント



出典：第 6 期科学技術・イノベーション計画（2021 年 3 月）内閣府
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/6gaiyo.pdf>

図 3-1-4 第 6 期科学技術・イノベーション基本計画の具体的取組



出典：第 6 期基本計画の具体的取組①持続可能で強靱な社会への変革（2021 年 3 月）内閣府
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ryoshigijutsu_innovation/dail/siryou2.pdf

第 2 節 文部科学省

文部科学省は、我が国競争力の根源となり得る量子技術を実確なものにしていくために、2017 年に「量子科学技術（光・量子技術）の新たな推進方策」¹²を策定し、①量子情報処理、②量子計測・センシング、③次世代レーザーの 3 領域を重点領域と位置付けて、新たなフラッグシップ・プロジェクトの「光・量子飛躍フラッグシップ・プログラム」（Q-LEAP）（2018 年度～2027 年度）を開始した。Q-LEAP とは、経済・社会的な重要課題に対し、量子科学技術を駆使して、非連続的な解決（Quantum leap）を目指す研究開発プログラムであって、各領域に年間で 7 億円から 9 億円の支援を行っている。図 3-1-5 に「光・量子飛躍フラッグシップ・プログラム」（Q-LEAP）の背景・課題及び事業概要¹³を示す。

¹² 量子科学技術（光・量子技術）の新たな推進方策（2017 年 8 月 16 日）科学技術・学術審議会 量子科学技術委員会
https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2017/09/12/1394887_1.pdf

¹³ 「光・量子飛躍フラッグシップ・プログラム」（Q-LEAP）の背景・課題及び事業概要（2018 年 1 月）文部科学省
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/025/gijiroku/_icsFiles/afieldfile/2018/02/28/1401097_13.pdf

図 3-1-5 光・量子飛躍フラッグシップ・プログラム (Q-LEAP) の背景・課題及び事業概要

背景・課題

✓ 量子科学技術は、近年の技術進展により、**超スマート社会 (Society5.0)** 実現に向けた社会課題の解決と産業応用を視野に入れた**新しい技術体系**が発展する兆し。
 ✓ 欧米等では「第2次量子革命」とうたい、**世界的に産学官の研究開発競争が激化**^{※1}。我が国の**官民研究開発投資を拡大し**、量子科学技術の研究開発を強化し、他国の追従に対し、**簡単にコモディティ化できない知識集約度の高い技術体系を構築することが重要**。
 ✓ 光拠点プログラム^{※2}等で培われた**日本の優れた量子科学技術の基礎研究をいち早くイノベーションにつなげ、「生産性革命」の実現に貢献することが必要**。

※1 Google Quantum AI研究所を設立 (2019-)、米国 5年間で750億ドルの研究インシテチブ (2018-)、EU 418億ユーロの量子技術Flagship事業を予定 (2019-) 等
 ※2 東北大学の光子を駆使したネットワーク研究拠点プログラム (2008~2017年度)

事業概要

【事業の目的】

✓ Q-LEAPは、**経済・社会的な重要課題に対し、量子科学技術を駆使して、非連続的な解決 (Quantum leap) を目指す研究開発プログラム**

【事業概要・イメージ】

✓ 異分野融合、産学連携の**ネットワーク型研究拠点**による研究開発を推進
 ✓ 技術領域毎に**PDを任命し、適確なベンチマーク**のもと、実施方針策定、予算配分等、**きめ細かな運営管理**を実施
 ✓ ネットワーク型研究拠点の中核となる**Flagshipプロジェクト**は、**HQを置き研究拠点全体の研究マネジメント**を行い、事業期間を通じて**TRL6 (プロトタイプ機による実証)**まで行い、企業等へ橋渡し
 ✓ **基礎基盤研究**はFlagshipプロジェクトと**相補的かつ挑戦的な研究課題**を選定

【対象技術領域】

① 量子情報処理 (主に量子シミュレータ・量子コンピュータ)

・**電子の相互作用等のシミュレーション**により、物性や化学反応を支配する電子状態を解明し、超低消費電力デバイス等の開発や創薬への応用を実現。大規模データの高速処理・計算へ発展

② 量子計測・センシング

・**従来技術を凌駕する精度・感度**により、自動走行やIoTはもとより、生命・医療、省エネ等の様々な分野でこれまでなかった情報と応用を実現

③ 次世代レーザー

・**電子の動きの計測・制御**を実現するアト秒スケールの極短パルスレーザーの開発・活用により、化学反応メカニズム解明や電子状態制御による高性能電子デバイス等を実現
 ・加工学理や機械学習を活用し、ワンストップで最終形状に仕上げが可能な高精度・低コストの**CPS (サイバー・フィジカル・システム) 型次世代レーザー加工技術**を実現



量子シミュレーション
 固体量子センサ (ダイヤモンドNVセンター)
 アト秒パルスによる電子状態の観測
 CPS型次世代レーザー加工

【事業スキーム】

✓ 事業規模：7~9億円程度/ネットワーク型研究拠点・年
 ✓ 事業期間：原則5年間とし、ステージゲート評価の結果を踏まえ、**最長10年間**まで延長可。
 ✓ 早い段階での民間投資が見込まれる研究開発課題について、**府省連携で推進し、民間研究開発投資を拡大**する。



国 → 委託 → 幹事機関 (大学・国立研究開発法人等) → ネットワーク型研究拠点 (x3拠点)

知識集約度の高い技術体系の構築・社会実装の加速



Flagshipプロジェクト
 HQ: ネットワーク型研究拠点全体の研究マネジメント

基礎基盤研究 (理論を含む)
 Flagshipプロジェクトと連携し、相補的かつ様々な挑戦的課題に取組むことで持続的にサイエンスエクセレンスを創出

想定ユーザーとの共同研究・産学連携
 経済・社会の多様なニーズへの対応、ユーザーの拡大のため、想定ユーザーとの共同研究や産学連携を推進

出典：光・量子飛躍フラッグシップ・プログラム (Q-LEAP) (2018年1月) 文部科学省
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/033/shiryo/_icsFiles/afieldfile/2018/11/14/1403605_1.pdf

重点領域の一つである量子計測・センシングにおいては、従来技術を凌駕する精度・感度により、自動走行やIoTはもとより、生命・医療、省エネ等の様々な分野でこれまでなかった情報と応用を実現できる技術を対象としている。

このQ-LEAPにおける量子計測・センシング分野の、重点技術課題の2テーマと、このQ-LEAPと相補的・相乗的効果が期待される基礎基盤研究の7テーマとが採択され研究開発が進められている。表3-1-1にQ-LEAPの重点技術課題の2テーマ、及び表3-1-2にQ-LEAPの基礎基盤研究の7テーマを示す。

またQ-LEAP以外でも、科学技術振興機構 (JST) 事業の未来社会創造事業として量子センシングに関する大規模プロジェクト型のテーマが二つ進行している。一つは、「通信・タイムビジネスの市場獲得等につながる超高精度時間計測」で、開発代表者は香取秀俊東京大学教授であり、もう一つは、「自己位置推定機器の革新的な高精度化及び小型化につながる量子慣性センサ技術」で、開発代表者は上妻幹旺東京工業大学教授である。

表 3-1-1 「光・量子飛躍フラッグシップ・プログラム (Q-LEAP)」の重点技術課題 2 テーマ

名称	目的	代表者 研究機関 予算 (億円) 期間	研究開発目標	マイルストーン
固体量子センサの高度制御による革新的センサシステムの創出	固体量子センサの応用から物理まで一貫通した研究開発を実施する「固体量子センサ協創拠点」を構築。室温・大気中でスピニコヒーレンス性を持ち、量子状態の初期化と読み出しを光で行えるダイヤモンドNVセンタを活用した量子計測・センシングデバイスのプロトタイプを開発。	波多野睦子 東京工業大学 工学 院 電気電子系教授 30~40 10年間 (総額)	・高い感度と高い空間分解能を持つ脳磁計測システムに関するプロトタイプの開発。 ・電池やパワーデバイスの電流・温度をモニタリングするシステムに関するプロトタイプの開発。	・脳磁計測システム 4~5年目 感度5pT,神経組織の磁気計測,小動物の脳磁計測 10年目 感度10fT,ヒトの脳磁計測 ・電池やパワーデバイスのモニタリングシステム 4~5年目 電池やパワーデバイス内部への量子センサの実装,電流・温度の同時計測 10年目 電流・温度をダイナミカルに計測する小型プロトタイプ
量子生命技術の創成と医学・生命科学の革新	生体ナノ量子センサ、超高感度MRI/NMR及び量子論的生命現象の解明・模倣に関する研究開発を実施し、医学・生命科学研究に活用される計測技術のプロトタイプを実現	馬場義信 量子科学技術研究開発機構 (QST) 領域長 35 10年間 (最大)	・広視野、高解像度、多項目同時計測可能な生体ナノシステムの開発。 ・超偏極化、量子符号化等の量子技術による超高感度MRI/NMR装置及び長寿命・低毒性超偏極プローブ分子の開発。 ・生体の量子コヒーレンス高精度測定技術及び生物光合成や磁気受容等における量子効果の分光学的解析技術の開発により、生物機能の量子論的機構を解明。	5年後 ・各標的臓器内の温度やpH等の3項目の計測、室温超偏極ピルビン酸の代謝イメージングの実現及び室温超偏極装置の開発、超短パルスレーザー等を利用の光合成タンパク質の量子コヒーレンスの観測実現及び室温超偏極装置の開発。 10年後 ・小動物内の温度、pH等の3項目の同時計測やイメージングの実現、大型動物での室温超核偏極代謝イメージングの実現及び新規診断可能な長寿命センサ分子の臨床試験準備、超短パルスレーザーの短パルス化等、開発した測定系の人工光合成光受容タンパク質の機能を解明し研究等へ活用。

出典：【Flagship プロジェクト】「量子計測・センシング」の採択課題（国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST)）

<https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/sensing/pdf/measurement.pdf>

表 3-1-2 「光・量子飛躍フラッグシップ・プログラム (Q-LEAP)」の基礎基盤研究 7 テーマ

	名称	目的	代表者 研究機関 予算 (億円) 期間	狙い
1	高感度重力勾配センサによる地震早期アラート手法の確立	大規模地震の断層破壊時の重力場変化を高感度重力勾配計ネットワークで検知し、社会に対して早期にアラートを流すシステムを構築	安藤正樹 東京大学大学院理学系研究科 准教授 2~3 2018~2027	ねじれ振り子型センサの発展により、量子計測・センシングのプラットフォームに貢献
2	光子数識別量子ナノフォトニクスの創成	光子状態が確定かつ高い量子干渉性を有する量子光源と、極めて高い精度・量子効率で光子数を識別し検出する光子数識別検出器を開発し、光子の量子性を駆使した量子計測を高度化	枝松圭一 東北大学 電気通信研究所 教授 2~3 2018~2027	量子光源・検出技術の高度化により、光子を用いた量子計測・センシングの発展に貢献
3	2重に量子雑音を圧搾した量子電子磁力計の開発	ボース・アインシュタイン凝縮体を用いた磁力計において、原子スピン量子雑音と光量子雑音の圧搾を同時に達成し、従来の限界を上回る磁場感度を実現	柴田康介 学習院大学 理学部物理学 助教 2~3 2018~2027	量子磁気センサに関する基礎的知見により、固体量子センサの性能向上に貢献
4	複雑分子系としての光合成機能の解明に向けた多次元量子もつれ分光技術の開発	2つの分子間の時間-周波数領域における量子もつれの情報を抽出する二次元量子分光法の提案と原理実証を行うとともに、光合成など有用な複雑分子系の物理機能を解明	清水亮介 電気通信大学 大学院情報理工学研究所 准教授 2~3 2018~2027	新しい量子計測技術である二次元量子分光法を実証し、量子計測・センシングのプラットフォームに貢献
5	量子もつれ光子対を利用した量子計測デバイスの研究	周波数相関をもつ量子もつれ光子対を利用した量子計測デバイスを開発。特に、量子もつれ光を用いた赤外量子吸収分光装置の開発を実施し、可視光検出器による高感度赤外吸収分光測定を実現	竹内繁樹 京都大学 大学院工学研究科 2~3 2018~2027	量子もつれ光を用いた新しいセンサ技術の開発により、量子計測・センシングのプラットフォームに貢献
6	量子センシング高度化への複合欠陥材料科学	量子センシングに資するダイヤモンド単結晶作製法の開拓及び、複合欠陥を高濃度・高品質に形成するための欠陥形成学理を構成し、磁気感度の高いダイヤモンドNVセンタを作製	寺地徳之 物質・材料研究機構機能性材料研究拠点 主席研究員 2~3 2018~2027	高度な結晶成長・評価技術を駆使してダイヤモンドNVセンタの高性能化を行い、固体量子センサの作製技術を向上
7	次世代高性能量子慣性センサの開発	原子の運動状態や量子状態の高度な制御技術を用いて原子干渉計の検出感度を大きく向上するための基盤技術を開発し、既存の量子慣性センサの装置の大幅な小型化を実現	中川賢一 電気通信大学 レーザ新世代研究センター 教授 2~3 2018~2027	量子慣性センサの高感度化に関する知見により、量子計測・センシングのプラットフォームに貢献

出典：【Flagship プロジェクト】「量子計測・センシング」の採択課題（国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST)）

<https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/sensing/pdf/measurement.pdf>

第3節 経済産業省

経済産業省は、産業技術総合研究所が有する研究開発基盤を強化して形成した量子デバイス開発拠点を中核に、量子デバイスについて、企業、大学、研究機関等と連携して研究開発を推進している。

第2章 諸外国・地域の政策動向

諸外国・地域の量子計測・センシング技術を含んだ量子技術に対する政策をまとめた。

第1節 米国の政策動向

米国においては、2001年に国防高等研究計画局（DARPA）が量子コンピュータ、量子通信技術等の量子情報科学の研究開発を開始して以降、毎年核技術の一つとして継続的に投資を行っている。

2009年1月、大統領府科学技術政策局（OSTP）の国家科学技術会議（NSTC）が、報告書「量子情報科学のための連邦ビジョン」を公表し、量子情報科学に関する合衆国の初の政策指針を示している。この中で、量子の制御・利用、及び量子情報処理システムの物理的・数理的・機械的な可能性と限界に関する知的基盤の構築を政府が目指すよう提言されている。これを受け、全米科学財団（NSF）が「量子情報科学における学際的研究プログラム」を設置しており、このプログラムの設置以降に、NSFから支援を受けた量子情報科学関連の研究チームが現れている。

さらに、量子情報科学に関して2018年9月に、「量子科学における米国リーダーシップ強化」サミットが開催され、並行して、国家科学技術会議（NSTC）の量子情報科学小委員会（SCQIS）から「量子情報科学に関する国家戦略概要」¹⁴が発表されている。この中で、①量子情報科学に対する科学ファースト・アプローチ、②量子に精通した（quantum-smart）労働力の確保（量子技術専門家の確保）、③量子産業との共同の取り組み、④重要インフラストラクチャーの提供、⑤国家安全保障と経済成長の維持、⑥国際協力の推進の重点6項目が発表されている。これらが2018年12月の量子情報科学に関する政府の重点施策として、「国家量子イニシアティブ法」の成立へと繋がっており、量子情報科学分野での継続的な米国のリーダーシップを確保するための取り組みを加速させている。

併せて、量子情報科学とこの技術応用の発展を加速するための10年計画の目標と優先順位の策定が進められ、この10年計画の前半の5年間に約13億\$を、エネルギー省（DOE）に最大25M\$/年、全米科学財団（NSF）に最大10M\$/年、全米国立標準技術研究所（NIST）に最大80M\$/年の投資権限が与えられている。これらを、図3-2-1に米国における科学技術政策・施策の動向として示す。

¹ 量子技術分野の研究動向について（2019年3月29日）JST 研究開発戦略センター（CRDS）
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ryoshigijutsu_innovation/dail/siryou3.pdf

図 3-2-1 米国における科学技術政策・施策の動向

科学技術政策・施策の動向 (1)

CRDS AI

1. 「未来の産業」に焦点を当てた先端技術への投資

- 「未来の産業」としてAI、量子、5G/次世代通信、先進製造、バイオテクノロジーの研究開発を優先化
- 特に米国AIイニシアチブや国家量子イニシアチブ法を政策基盤としてAI、量子分野の投資を加速

 <p>大統領科学技術諮問会議 (PCAST) 「未来の産業における米国リーダーシップ強化のための提言」(2020.6) ・米国の優位が揺らぐ中、マルチセクター(産・官・学・非営利)で包括的に研究開発、環境整備、人材育成を推進</p>	 <p>国家科学技術会議 (NSTC) 「未来の先端コンピューティングエコシステム開拓戦略計画」(2020.11) ・AI、量子等「未来の産業」の基盤としてHPCからエッジまで広範なコンピューティングとソフト/データのエコシステムを構築</p>
 <p>米国AIイニシアチブ(2019.2) ・国防/非国防合わせ約20億ドル/年投資→倍増を指示</p>	 <p>国家量子イニシアチブ法(2018.12) ・5年で約13億ドル投資 (DOE, NSF, NIST)</p>

連邦政府機関の取組例 (AI、量子)

<p>国防総省 (DOD)</p> <ul style="list-style-type: none"> 統合AIセンター (JAIC) (2.6億ドル(FY21)) <p>国防高等研究計画局 (DARPA)</p> <ul style="list-style-type: none"> 「AI NEXT」キャンペーン (文脈対応、説明可能AI) (5年、20億ドル) <p>エネルギー省 (DOE)</p> <ul style="list-style-type: none"> 「AI for Science」イニシアチブ (AIデータ駆動科学) <p>国立科学財団 (NSF)</p> <ul style="list-style-type: none"> 「国立AI研究所」プログラム (最大5年、1.2億ドル) コンパニオン加速支援「AI主導イノベーション」* 	<p>エネルギー省 (DOE)</p> <ul style="list-style-type: none"> 量子インターネットの基幹ネットワーク構築 量子情報科学 (QIS) 研究センター (5年、5拠点で6.3億ドル) <p>国立科学財団 (NSF)</p> <ul style="list-style-type: none"> 「量子飛躍チャレンジ研究所」プログラム (5年、3拠点で7,500万ドル) コンパニオン加速支援「量子技術」* 量子情報関係の大学教育コース支援 (総額675万ドル) 全米Q-12教育「トランプ」(産学と協力して中等教育段階から量子人材育成、約100万ドル) <p>国立標準技術研究所 (NIST)</p> <ul style="list-style-type: none"> 量子経済開発コンソーシアム (QED-C) の設立
--	---

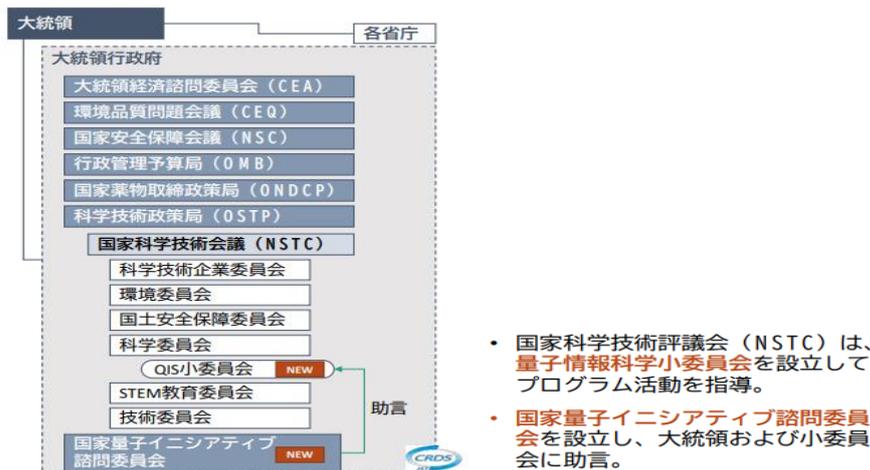
*2領域合わせ2,700万ドル

Copyright © 2020 CRDS All Rights Reserved. 3

出典：米国の科学技術政策動向とバイデン新政権 (2020年12月3日) CRDS
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/FU/US20201203.pdf>

また、「国家量子イニシアチブ法」に基づいて、大統領府の科学技術政策局 (OSTP) は、量子情報科学小委員会 (SCQIS) を科学技術委員会内に設立して、連邦省庁全体における量子技術イニシアチブを調整している。さらに、科学技術政策局と同格に国家量子イニシアチブ諮問委員会を設立して、大統領、エネルギー長官と SCQIS への助言を行っている。図 3-2-2 に、この新規に設立された国家量子イニシアチブ諮問委員会及び SCQIS を含めた大統領府の量子関連の組織図を示す。

図 3-2-2 大統領府の量子関連の組織図



出典：「米国「National Quantum Initiative Act」 H.R. 6227」(2019年3月29日) CRDS
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ryoshigijutsu_innovation/dai1/siryoushi.pdf

量子計測・センシング関連において、表 3-2-1 に全米科学財団 (NSF) から支援を受けている機関名とプロジェクト名及びその内容、表 3-2-2 に全米衛生研究所 (NIH) から支援を受けている機関名とプロジェクト名及びその内容、表 3-2-3 に国防総省 (DOD) から支援を受けている機関名とプロジェクト名及びその内容をそれぞれ金額上位順に示す。

表 3-2-1 全米科学財団 (NSF) から支援を受けている主な機関名と内容

No.	プロジェクト名	要約	代表者 (PI) 機関名 開始日 終了日	金額 \$ (億円)
1	統合量子材料センター (C-IQM)	統合量子材料センター (C-IQM) は、ハーバード大学と4研究機関間のパートナーシップであり、量子材料等を利用して統合アプローチを通じ信号処理、計算、Thz エレクトロニクスへの新しいアプローチを提供。C-IQMのメリットは(1)グラフェン、(2)トポロジカル絶縁体、(3)ダイヤモンドNVセンタの重点3項目を設定し、物性物理学の最前線の3研究分野を相乗的に統合し研究する。	Robert, Westervelt Harvard University 2013/10/1 2024/3/31	30,993,328 (33.4)
2	材料研究科学光学センター	シカゴ大学の材料研究科学光学センター(MRSEC)は、11研究機関と次世代の材料設計を原則を生み出すための革新的研究をサポートし、3つの学際的研究グループで構成する。広範囲のスケールの材料の量子コヒーレンスを操作及び活用を目的として、個々の量子システムと集合モードの量子システムの両方における制御とコヒーレンスの重要な問題を解明する。量子センシングにおけるアプリケーションの進歩、量子情報用の材料の製造、及び次世代の特性評価ツールの作製が目標。	John, Doyle Massachusetts Institute of Technology 2014/11/1 2020/10/31	21,100,000 (15.4)
3	相関量子状態を使用したセンシングと NSF 量子飛躍チャレンジ研究所	コロラド大学ボルダー校が主導するNSF量子リープチャレンジ施設。基礎科学、技術統合、量子技術の実用化を共に進める3つの課題の研究トピックを追求。(量子センシング、シミュレーションやSrの特定の原子種に共通のプラットフォームの構築を含む)	Mark, Kasevich University of Colorado at Boulder 2020/9/1 2026/8/31	7,700,000 (8.29)
4	創発的な量子材料と技術	ネブラスカ大は、複数大学の創発量子材料及び技術 (EQUATE) に関する学際的、部門間、マルチキャンパスの研究と教育クラスタを立ち上げて第2の量子革命に参加。量子センシングのための固体スピン量子ビット、および超高速、コンパクト、低電力の量子通信ナノフォトニックデバイスを含む。	(記載なし) University of Nebraska 2021/6/1 2026/5/31	4,564,068 (4.92)
5	量子材料の空間的及び時間的に分解された超高感度磁気センシング	量子材料の表面に発生する超弱磁場の空間的及び時間的イメージングのための量子力学的磁気カメラ (QMMC) の開発。磁気トンネリングジャンクションセンサ (量子スピントロニクスセンサ) と統合センサアレイの磁場感度の向上を目的とする。	Gang, Xiao Brown University 2020/1/1 2022/12/31	2,000,000 (2.15)
6	宇宙用途の慣性センシングにおける極低温原子の量子制御	このプロジェクトは、量子物理学者、航空宇宙エンジニア及び制御システムエンジニアのコラボレーションであり、宇宙船の加速度と回転を測定する非常に正確な量子慣性センサを開発する。具体的には、子言う制度の原子時計 (光格子時計) と組み合わせることで、量子慣性センサは、位置情報を提供するために無線信号や画像などの外部参照を必要としないナビゲーションシステムのコアとして機能する。	Dana, Anderson University of Colorado at Boulder 2019/9/1 2022/8/31	1,928,242 (2.08)
7	OBSIC艦隊用の広帯域海洋底部地震計の構築とフィールドテスト	海底地震計観測センタ (OBSIC) は、現在124基のOcean-Bottom-Seismographs (OBS) を運用しており、その内30基は短周期で残り94基は広帯域ユニットである。OBSICフリートの総数を増やし、新しい広帯域海底地震計の建設をサポートして、OBSにはチップスケール光格子時計により低電力のSeascanクロックが装備され、過度の電力なしにタイミング精度を向上。OSBICの能力を高め、より多くの危機を備えたOBSアレイをフィールド化し、追加の同時実験をサポートする。	John, Collins Woods Hole Oceanographic Institution 2019/9/15 2021/8/31	1,844,383 (1.99)

出典：NSF Awards Search を基に調査会社が作成

<https://www.nsf.gov/awardsearch/advancedSearch.jsp>

なお、表 3-2-1 の全米科学財団 (NSF) から支援を受けている機関のうち、No. 3、No. 6 のコロラド大学の研究所は、「物理フロンティアセンター」(PFC) として NSF から指定され、4.37M\$～13.1M\$/5年規模の支援を受けている量子拠点である。

No. 3 のコロラド大学の「相関量子状態を使用したセンシングと NSF 量子跳躍チャレンジ研究所」は、2020年7月、大統領府科学技術政策局 (OSTP) と NSF とのパートナーシップを基に、2020年からの5年間で量子情報科学工学関連の解決に挑む3研究所のうちの一つであり、量子計測・センシングに取り組む、言わば肝いりの研究プロジェクトである。

表 3-2-2 全米衛生研究所 (NIH) から支援を受けている主な機関名と内容

No.	プロジェクト名	要約	代表者 機関名 開始日 終了日	金額 \$ (億円)
1	エアロゾル中のSARS-CoV-2をリアルタイムで監視および定量化するためのハンドヘルド高速空気検知システムの開発	SARS-CoV-2を検出及び定量化する新空気モニタリングシステム (AMS) の開発に、ウイルス培養プロトコル、空気サンプリング技術、および 単一光子検出 機能を用いて共同研究。	MANCEBO, RICARDO GENENDEAVOR, LLC 2021/9/20 2024/8/31	2,723,214 (2.93)
2	ネイティブコンテキストでの高感度NMRによる神経変性疾患関連タンパク質凝集体の構造解析	生体分子の構造研究を、従来のin vitroシステム (試験管内) から 超核偏極 技術を用いて、自然界や病気に関連した凝集性タンパク質構造 (アルツハイマー病、パーキンソン病等) の知識を深める。	FREDERICK, KENDRA KING UT SOUTHWESTERN MEDICAL CENTER 2018/9/30 2023/5/31	2,430,000 (2.62)
3	分子構造とダイナミクスのための室温での高感度NMR	NMR信号増強を達成するために 超核偏極 を開発のために、新高速周波数調整マイクロ波源を使用し室温で実装することを提案。	BARNES, ALEXANDER BENJAMIN WASHINGTON UNIVERSITY 2015/9/30 2019/8/31	2,287,500 (2.46)
4	初期のタンパク質凝集メカニズムとそれらの疾患との関係の調査	疾患関連の影響におけるタンパク質オリゴマーと凝集体の役割解明に焦点をあて、神経変性疾患の治療法開発と早期診断に取り組む。 磁気共鳴 検出の感度と選択性を2桁以上向上の革新的装置と新アプローチの開発。	HAN, SONG-I UNIVERSITY OF CALIFORNIA SANTA BARBARA 2011/9/30 2016/6/30	2,272,500 (2.45)
5	超核偏極炭素13を画像化するための臨床MRスキャナー	齧歯動物や大型動物の心臓と肝臓の 超核偏極 炭素13Cを画像化して、ヒトでの臨床試験の基礎を確立する。	MALLOY, CRAIG R UT SOUTHWESTERN MEDICAL CENTER 2011/9/16 2014/3/15	2,237,277 (2.41)
6	ダイヤモンド量子センサーに基づく核磁気共鳴顕微鏡	非誘導 ダイヤモンド量子センサー を用いて、単一細胞 (ピコリットル) スケールでのNMR分光法とイメージング開発。高磁場用に最適化されたダイヤモンド量子センシングプロトコルの開発を含む。	ACOSTA, VICTOR MARCEL UNIVERSITY OF NEW MEXICO 2020/9/30 2025/5/31	2,115,491 (2.28)
7	統合メタボロミクスのための南東リソースセンター (SECIM)	SECIMは、既存の強みを統合し、基礎及び臨床科学者が最先端のメタボロミクスデータと分析を取得するための統合リソースを作成。SECIMユーザーに、生体動物の代謝監視の 超核偏極 (DNP) 基質のサービスを含む。	EDISON, ARTHUR S UNIVERSITY OF FLORIDA 2013/9/11 2014/8/31	2,091,492 (2.25)
8	リアルタイム代謝イメージングのための ダイヤモンドシステム	ヒト被験者の最先端の生体内代謝研究に、 超核偏極 13C MRIが必要であり、GE製ダイヤモンド超核偏極 (DNP) システムの購入を提案。	UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA	2,000,000 (2.15)
9	統合メタボロミクスのための南東リソースセンター (SECIM)	SECIMは、既存の強みを統合して、基礎及び臨床科学者が最先端のメタボロミクスデータと分析を取得するための統合リソースを作成。SECIMユーザーに、生体動物の代謝監視の 超核偏極 (DNP) 基質のサービスを含む。	YOST, RICHARD A UNIVERSITY OF FLORIDA 2015/9/1 2016/8/31	1,995,778 (2.15)
10	統合メタボロミクスのための南東リソースセンター (SECIM)	SECIMは、既存の強みを統合して、基礎及び臨床科学者が最先端のメタボロミクスデータと分析を取得するための統合リソースを作成。SECIMユーザーに、生体動物の代謝監視の 超核偏極 (DNP) 基質のサービスを含む。	EDISON, ARTHUR S UNIVERSITY OF FLORIDA 2014/9/1 2015/8/31	1,991,608 (2.15)

出典 : NIH ReReporter を基に調査会社が作成

https://reporter.nih.gov/search/HnGa-o2WdE20_aHzM0rZPg/projects

表 3-2-2 から、全米衛生研究所 (NIH) から支援を受けている金額上位のプロジェクトは、「超核偏極」関連が多い。「超核偏極」には、室温の「超核偏極」とともに低温の「超核偏極」が含まれていると思われる。

表 3-2-3 国防総省 (DOD) から支援を受けている主な機関名と内容

No.	タイトル	要約	代表者 研究機関 開始日	金額 \$ (億円)
1	安定性が向上した原子時計 (ACES)	安定性が向上した 原子時計 (ACES)	Michael Blackstone Honeywell International Inc 2016/9/16	3,611,168 (3.89)
2	安定性が向上した原子時計 (ACES)	安定性が向上した 原子時計 (ACES)	Michael Blackstone Microsemi Frequency and Time Corporation 2016/9/16	3,210,052 (3.46)
3	安定性が向上した原子時計 (ACES)	安定性が向上した 原子時計 (ACES)	Michael Blackstone The Charles Stark Draper Laboratory, Inc. 2016/9/9	2,816,707 (3.04)
4	安定性が向上した原子時計 (ACES)	安定性が向上した 原子時計 (ACES)	Michael Blackstone ColdQuanta, Inc. 2016/9/12	2,625,291 (3.28)
5	安定性が向上した原子時計 (ACES)	安定性が向上した 原子時計 (ACES)	Michael Blackstone OEwaves, Inc. 2016/8/23	1,706,484 (1.84)
6	安定性が向上した原子時計 (ACES)	安定性が向上した 原子時計 (ACES)	Michael Blackstone SRI International 2016/9/22	1,482,857 (1.60)
7	軍事ミッションのための量子計測 イノベーション	軍事ミッションのための量子計測 イノベーション	Ornette Adams Boeing Company 2014/8/7	975,287 (1.05)
8	安定性が向上した原子時計 (ACES)	安定性が向上した 原子時計 (ACES)	Michael Blackstone HRL Laboratories 2016/8/23	775,159 (0.84)
9	量子極低温SQUID磁力計	量子極低温SQUID磁力計	Zun Z. Lin Quantum Design, Inc. 2016/8/23	677,430 (0.73)

出典：SAM★GOV (DoD) を基に調査会社が作成
<https://sam.gov/content/home>

表 3-2-3 から、国防総省 (DOD) から支援を受けている金額上位のプロジェクトは、「原子時計」が 7 件で最多であるが、軍事関連情報のためか詳細は公表されていない。

量子技術は、「未来の産業」の一つとして AI、5G/次世代通信等と並んでトランプ政権下で研究開発を優先化させてきており、バイデン政権下でも米中間の技術摩擦が続く中で、量子

技術はAI、5Gと並んで引き続き重要な課題であり、研究開発投資の維持・拡大方針は継続されると推察されている¹⁵。

一方、2021年6月、「米国イノベーション・競争法」が上院で可決されている。これは、米国内の技術発展のための投資や量子科学技術を含む研究開発を推進する「エンドレスフロンティア法」や「半導体製造支援法」等とともに、「中国の挑戦対抗法」を含む複数法案で構成されており、経済安全保障の強化に向けた具体的な取組が加速されている。

第2節 EUの政策動向

EUでは、研究・イノベーションの計画として、1984年の第一次の枠組み計画の立ち上げ以降、多年次財政枠組みのフレームワーク・プログラムFP1～FP7（5年～7年ごと）を作成して、継続的に規模が拡充されている。このうちのFP5（1998年～2002年）において量子技術が初めて採り上げられており、FP7（2007年～2013年）を経て、FP8（2014年～2020年）は「Horizon2020」へ名称変更され、FP9（2021年～2027年）は「Horizon Europe」へ名称変更されて、現在進められている。図3-2-3にEUの研究・イノベーション計画の変遷を示す。

図3-2-3 EUの研究・イノベーション計画の変遷



出典：欧州の研究・イノベーション動向（2020年1月）経済産業省

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/kenkyu_innovation/pdf/015_02_00.pdf

2016年に、EU各国の大学や有力企業が署名した量子科学技術の研究開発戦略「量子マニフェスト」が発表され、EU各国とEUの行政執行機関に当たる欧州委員会に対して10億€規模の研究開発プログラムの立ち上げが要請されている。これを受けて欧州委員会は、2018年10月から原則3年間にわたる量子技術の研究イニシアティブ「量子フラッグシップ」として、「野心的だが達成できる目標」を定めて開始させている。

量子科学技術の採択された研究開発プログラムに総計10億€が投入されており、対象は以下の6分野で、①基礎科学、②量子通信、③量子シミュレータ、④量子計測・センシング、⑤量子コンピュータと⑥調整と支援分野の合計20課題である。このうち、④量子計測・センシングとしては、ダイヤモンドNVセンサ、光格子時計、小型ガスセルセンサ、超核偏極センサの4項目が挙げられている。表3-2-4にEU「量子フラッグシップ」の量子計測・センシ

¹⁵ 海外の最新科学技術政策動向（2021年1月13日）CRDS

https://www.mext.go.jp/content/20210112-mxt_chousei01-000011740_3.pdf

グ項目を示す。

表 3-2-4 EU「量子フラッグシップ」の量子計測・センシング項目

プロジェクト名	タイトル	要約	代表者期間	研究機関	金額 € (億円)
macQsimal	小型ガスセルセンサ	原子蒸気セルを選択し、 コヒーレントな量子プロセス 应用到。先進的セルベース センサー は、単一粒子のコヒーレンスを利用。原子蒸気セルをMEMSで作製し、高信頼性と低コスト可能。 エンタングルメント にも取り組み、科学的ブレークスルーの基盤形成も目指す。	Jacques Haesler 2018.10~ 2021.9	Swiss Center for Electronics and Microtechnology (CEEM), Switzerland	10,209,943.75 (12.8)
iqClock	光格子時計	主要2課題は、①既存の 光格子時計 をより小さく、より堅牢にして、持ち運び可能サイズを目指す。②時計自体の複雑さを改善して、新しい原理に従って動作し、シンプルで堅牢になる光格子時計開発を目指す。	Florian Schreck 2018.10~ 2022.3	Universiteit van Amsterdam, Netherlands	10,092,468.75 (12.6)
ASTERIQS	ダイヤモンドNVセンサ	ダイヤモンドNVセンタ を用いて、①EVバッテリー制御用の高ダイナミクス範囲の磁場センサ、早期診断用ラポオンチップNMR検出器等、②セル内温度を検知と高圧下で電界検知、③創薬向け等、スピントロニクスデバイスの構造解明の新しい測定ツール等を開発。	Thierry Debuisschert 2018.10~ 2022.3	Thales SA, France	9,747,888.75 (12.2)
MetaboliQs	超核偏極センサ	超核偏極MRI は、体に毒性のない基質の核スピンの過分極を介して、心臓等の主要な代謝基質のイメージングと視覚化が可能になり、代謝反応を非侵襲的に追跡できる。高感度の代謝活動の定量化が可能になり、心血管疾患等の診断で適切な個別化治療への道が開ける。高量子コヒーレンスや量子制御などの ダイヤモンドNVセンタ の変換機能を活用して、心臓超核偏極MRIのブレークスルーを提供する。	Christoph Nebel 2018.10~ 2021.9	Fraunhofer Gesellschaft zur Foerderung der Angewandten Forschung eV, Germany	6,667,801.25 (8.33)

出典：量子技術分野の研究動向について（2019年3月29日）CRDS

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ryoshigi/jutsu_innovation/dai1/siryou3.pdf

「量子フラッグシップ」（2018年～2027年）は、「Horizon2020」（FP8）（2014年～2020年）から、次の「Horizon Europe」（FP9）（2021年～2027年）においても継続して進められている。「Horizon Europe」では、気候変動対策とデジタルトランスフォーメーション（DX）を最優先課題と位置付けており、このDXにおいて量子科学技術を含む最先端研究支援を継続・拡充していくとしている。このように、EUでは「Horizon Europe」や「Horizon2020」が示すとおり、多年度研究開発の投資戦略に基づいて支援が進められている。

また、EUの「量子フラッグシップ」以外で、EUから支援を受けている量子計測・センシングの研究開発プロジェクトの機関名と内容を、データベースCORDIS（Community Research & Development Information Service）から金額上位順に10プロジェクトを抽出し、表3-2-5

に示す。

表 3-2-5 EU から支援されている量子計測・センシング関連の主な機関名と内容

No.	タイトル	要約	代表者 開始日 終了日	機関名	金額 € (億円)
1	物理学の基本的なテストのためのトリウム核時計	Th-229は、非常に低エネルギーの励起核異性体状態を持ち、励起エネルギーは数電子ボルトであるため、レーザー操作でアクセスできる。1e-19の予測相対放射線幅により、最先端の 光原子時計に匹敵する可能性のあるトリウム核時計 の構築を目指す。	TECHNISCHE UNIVERSITAET WIEN 2020/2/1 2026/1/31	LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITAET MUENCHEN;PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT;UNIVERSITY OF DELAWARE;MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT ZUR FORDERUNG DER WISSENSCHAFTEN EV	13,789,990 (17.2)
2	シミュレータと量子システムとのインターフェース	包括的な目標は、個々の量子エンティティ間の直接かつ決定論的な相互作用に基づくシステムを開発する。大規模な エンタングルメント を含むことにより、一連の関連アプリケーションで優れたパフォーマンスを発揮させる。光子-フォノン相互作用、光子-光子相互作用、 ダイヤモンドNVセンタ におけるスピン-光子相互作用等を探求し、量子シミュレータと量子インターフェースの実験的に機能する実装を構築する。	UNIVERSITAET ULM 2013/5/1 2016/4/30	UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE - PARIS 6;TECHNISCHE UNIVERSITAET WIEN; UNIWERSYTET WARSZAWSKI; COLLEGE DE FRANCE;JOHANNES GUTENBERG-UNIVERSITAT MAINZ; STICHTING CENTRUM VOOR WISKUNDE EN INFORMATICA;UNIVERSITE DE GENEVE; UNIVERSITAT BASEL;FUNDACIO INSTITUT D	11,754,144 (14.7)
3	ミニチュア原子蒸気セル量子デバイスの計測と計測機器応用	量子技術は、現実世界とデジタル世界の間のインターフェースに革命を起こす準備ができています。ナビゲーションや医療画像等のセンサー主導の産業を備える。 量子センサ 業界でヨーロッパのリーダーシップを確固たるものにするブレークスルーを目指す。	CSEM CENTRE SUISSE D'ELECTRONIQUE ET DE MICROTECHNIQUE SA - RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT 2018/10/1 2021/9/30	MEGIN OY;ROBERT BOSCH GMBH; UNIVERSITAT BASEL;FUNDACIO INSTITUT DE CIENCIES FOTONIQUES;TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY;UNIVERSITY OF DURHAM;KOBENHAVNS UNIVERSITET; OROLIA SWITZERLAND SA;AALTO KORKEAKOULUSAATIO SR;UNIVERSITE DE NEUCHATEL;UNIVERSITAET STUTT	10,209,944 (12.8)
4	ダイヤモンド量子センシングによる科学と技術の進歩	NVセンタ による 量子センシング を活用して以下を開発する。1) 磁場測定に基づく高度なアプリケーション。(走査型ダイヤモンド磁力計機器、EV用高ダイナミクス範囲磁場センサ等)。2) セル内の温度を感知し、高圧下で究極感度で電界感知センサ。3) 製薬業界向けNMRによる単一分子の化学構造、または電子デバイス向けのナノスケールでのスピントロニクスデバイスの構造を解明するための新しい測定ツール。	THALES 2018/10/1 2021/9/30	ATTOCUBE SYSTEMS AG;JOHANNES GUTENBERG-UNIVERSITAT MAINZ;ROBERT BOSCH GMBH;FORSCHUNGSZENTRUM JULICH GMBH;UNIVERSITAT BASEL; UNIVERSITAET ULM;FRAUNHOFER GESELLSCHAFT ZUR FOERDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.; TECHNISCHE UNIVERSITAET MUENCHEN; INTERUNIVERS	9,747,889 (12.2)
5	超高感度核磁気共鳴およびイメージングのための超核偏極	量子の医療応用であり、携帯型磁気共鳴量子センサーと組み合わせ動作するように設計されたチップ統合 超核偏極デバイス 、ナノスケールでのバイオNMRの例のない感度、および乱れた細胞代謝のバイオマーカーを含む、磁気共鳴の分野における主要なブレークスルーを目指す。	UNIVERSITAET ULM 2020/7/1 2026/6/30	DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET	9,374,860 (11.7)
6	ダイヤモンドデバイス対応のセンシングと計測機器	超高純度単結晶CVD ダイヤモンドNVセンタ を活用して、感度1nTの広視野磁気イメージャ、感度10nT及び空間分解能10nmの走査型プローブ磁力計、解像度1pTのセンサーヘッドの開発、5nmより高精度で単一窒素注入を制御の超高純度ダイヤモンド材料の開発。NVをフォトニックキャビティ及びフォトニック導波路と結合しNVの発光特性改善。神経回路網の非侵襲的調査-医療用の単一タンパク質イメージング用単一スピンの磁気共鳴イメージングの研究等。	THALES 2013/9/1 2017/8/31	ATTOCUBE SYSTEMS AG;UNIVERSITE PARIS 13;UNIVERSITAT BASEL;UNIVERSITAET ULM;FRAUNHOFER GESELLSCHAFT ZUR FOERDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.;INTERUNIVERSITAIR MICRO-ELECTRONICA CENTRUM;UNIVERSITAET LEIPZIG;ELEMENT SIX LIMITED;EIDGENOESSISCHE TECHNISCHE	8,265,991 (10.3)
7	室温のダイヤモンドの量子力学を活用し、安全で世界初のも様な心臓イメージングを実現	NVセンタ の量子力学に基づき、新開発の磁気共鳴画像法(MRI)の 超偏極 を用いて、高感度の代謝活性の定量化を可能にし、心血管及びその他の代謝性疾患の正確な診断とより適切な個別化治療への道を拓く。	FRAUNHOFER GESELLSCHAFT ZUR FOERDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. 2018/10/1 2021/9/30	NVISION IMAGING TECHNOLOGIES GMBH;BRUKER BIOSPIN GMBH; EIDGENOESSISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE ZUERICH;KLINIKUM RECHTS DER ISAR DER TECHNISCHEM UNIVERSITAT MUNCHEN;THE HEBREW UNIVERSITY OF JERUSALEM;ELEMENT SIX (UK) LIMITED	6,667,801 (8.33)

8	超偏極MRIイメージングにおけるダイヤモンド革命 – 新しいプラットフォームとナノ粒子標的プローブ	NVセンターによる高感度診断と治療モニタリング用の新分子イメージング技術の開発と商業化。ダイヤモンド超偏極器は、現在のMRIレイアウトに適合し、5分以内に過分極して臨床的生存率を向上させる、費用対効果と時間効率の高い超偏極ソリューションを提供する。ナノダイヤモンドプローブは、MRIシステムで陽電子放出断層撮影に匹敵する分子感度を達成し、長い超偏極持続時間（～1時間）を示し、非代謝性過分極イメージングを可能にするMRIプローブを導入する。	UNIVERSITAET ULM 2016/1/1 2020/6/30	AIT AUSTRIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY GMBH;KANFIT LTD;LM VAN MOPPE AND SONS SA;NVISION IMAGING TECHNOLOGIES GMBH;KARLSRUHER INSTITUT FUER TECHNOLOGIE;RESEARCH FUND OF THE HADASSAH MEDICAL ORGANIZATION (R.A);ARTTIC;UNIVERSITE DE TOURS;THE HEBREW UNIVERSITY	5,073,550 (634)
9	量子センサーの技術と応用	このトレーニングネットワークは、慣性力、電磁場、および時間の正確な測定に基づく最新の量子センサーの開発に焦点を当てる。重力探査、回転センシング、フィールドプローブ、および原子時計であり、基礎科学から地質探査、ナビゲーション、および医療診断に至るまでの潜在的なアプリケーション。	THE UNIVERSITY OF NOTTINGHAM 2012/10/1 2016/9/30	JOHANNES GUTENBERG-UNIVERSITAT MAINZ;UNIVERSITAET HAMBURG;IBM RESEARCH GMBH;THE UNIVERSITY OF BIRMINGHAM;NKT PHOTONICS A/S;IDRYMA TECHNOLOGIAS KAI EREVNAS;DANSK FUNDAMENTAL METROLOGI;ARKEK LIMITED;CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS;TOPTICA	4,179,498 (522)
10	高度な統合量子時計用のモジュラーステム	光格子時計は驚異的に安定した周波数標準であり、持ち運び可能な形式にすることは、電気通信、地質学、天文学に大きな影響を与える。高度に持ち運び可能な形式と、これまで実現されていない有望なタイプのクロックである超放射クロックの観点から、クロック技術の限界を押し広げる。	UNIVERSITEIT VAN AMSTERDAM 2020/3/1 2024/2/29	TECHNISCHE UNIVERSITAET WIEN;THE UNIVERSITY OF BIRMINGHAM;NKT PHOTONICS A/S;KOBENHAVNS UNIVERSITET;TELEDYNE E2V (UK) LIMITED;BRITISH TELECOMMUNICATIONS PUBLIC LIMITED COMPANY;UNIVERSITAET INNSBRUCK;UNIVERSYTET MIKOLAJA KOPERNIKA W TORUNIU;TOPTICA PHOTONIC	4,138,276 (517)

出典：データベース CORDIS を基に調査会社が作成
<https://cordis.europa.eu/search/en>

表 3-2-5 から、EU から支援された金額上位のプロジェクトとしては、固体量子センサ関連が 5 件で最多で、次いで光格子時計が 3 件となっている。

第 3 節 英国の政策動向

英国は、基本的な科学技術政策は 1993 年に発表の「科学・工学・技術白書」に基づき進められており、この技術白書はそれ以降の 20 年間の科学技術政策の方針を示した政策大綱である。また、これに関連の「科学・工学・技術に関する展望」が、政府の具体的な科学技術政策のレビュー及びその後の戦略として、2 年ごとに改定されている。

2001 年に発表された「卓越性と機会」白書において、「量子コンピュータ科学」が「重点科学投資分野」の 5 分野に挙げられている。

2014 年に、量子科学と技術において世界をリードするべく、「国家量子技術プログラム」(UKNQTP) が発表され、2015 年に開始されている。この UKNQTP を、英国の量子技術開発と商業化の「頼りになる」ものにするために、舵取り役として「量子技術戦略アドバイザーボード」(QT SAB) が新規に設立されている。また、UKNQTP にはビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS)、工学・物理科学研究会議 (EPSRC)、Innovate UK、国立物理研究所 (NPL)、国防科学技術研究所 (Dstl) 等の関係機関による投資・支援策も含まれている。

2017 年 11 月に、BEIS は産業戦略を発表し、2030 年までに英国を世界最大のイノベーション国家にするために、①人工知能 (AI) とデータ経済 (量子技術を含む)、②クリーンな経済成長、③モビリティの未来、④高齢化社会を最重要課題と位置付けている。さらに 2018 年 5 月に、その産業戦略の具体的なミッションを設定している。図 3-2-4 に英国の産業戦略を示す。

図 3-2-4 英国の産業戦略

英の産業戦略(2017年11月)

○①AIとデータ経済、②クリーンな経済成長、③モビリティの未来、④高齢化社会を最重要課題と位置付け。
以下の5点を生産性向上のための重要基盤とする。

- ①アイデア：2027年までに研究投資額をGDP比2.4%に引き上げ、チャレンジ基金に総額7億2,500万ポンド投資
- ②人材：世界最高峰の技術教育制度を確立、STEM教育に4.6億ポンド追加投資
- ③インフラ：EV充電インフラ整備(4億ポンド)、デジタルインフラ整備(10億ポンド)、5G展開(1.8億ポンド)
- ④事業環境：セクター別の生産性向上を図る「セクターディール」を官民で締結。新規事業向け融資基金(25億ポンド)
- ⑤地域：地域産業政策の策定

○2018年5月、英国政府は、上記産業戦略に関する具体的なミッションを設定。

- ①AI・データ：15年以内に5万人以上のがんの早期発見を可能に
- ②クリーン成長：新築建物における熱・電気利用を2030年までに半減
- ③モビリティ未来：2040年までに乗用車・商用車の新車をゼロエミッション化
- ④高齢化社会：2035年までに健康寿命を5年延長

出典：欧州の研究・イノベーション動向（2020年1月）経済産業省
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/kenkyu_innovation/pdf/015_02_00.pdf

2018年11月、政府は量子情報技術に対して、2015年から5年間実施してきたUKNQTPを、更に5年間、2024年まで延長する投資計画を発表している。これにより、合計10年間で総額3.15億£（440億円）が、英国研究・イノベーション機構（UKRI）から支援されている。このUKRIから支援された量子計測・センシングの機関と内容を金額上位順に8項目を表3-2-6に示す。

表 3-2-6 英国のUKRIから支援された量子計測・センシングの主な機関と内容

No.	タイトル	要約	代表者 機関名 開始日 終了日	金額 £ (億円)
1	QuantIC-量子イメージングにおける英国の量子技術ハブ	量子イメージングセンターは、独自イメージング機能を備えたカメラに量子技術を適用するために設立され、人体内部を直接見る能力、霧や煙を透視する能力、量子レーダー等のイメージングシステムを推進する。単一光子カメラ、新素材に基づく検出器、中赤外線スペクトル領域での単一光子感度などの新技術を目指す。	Miles, Padgett University of Glasgow 2019/12/ 2024/11/301	21,586,672 (30.1)
2	層別医療・実験医療のための革新的な技術	分子イメージングセンター(MIC)の新放射化学施設により、PETイメージングより、はるかに広範囲と量の放射性標識分子を生成できるようになる。MICは、超核偏極をサポートする。患者を放射能リスクなしで標識分子を検出できる。	Patrick, Maxwell University of Cambridge 2015/4/1 2016/3/31	14,621,436 (20.4)
3	1.0GHzの固体NMR：化学、生物学、材料科学の進歩をもたらす英国の世界最先端の施設	固体NMRは、特定原子核の周りの局所的化学構造に敏感なので、周期的秩序を欠く多くのシステム特性評価に適し、確立された回折技術を補完する。新1.0GHz超高磁場固体NMR施設は、生物学のプロセスの新しい理解、触媒作用、放射性廃棄物のカプセル化、電池、薬物送達等、科学のアプリケーションの提供を目指す。	Steven, Brown University of Warwick 2018/5/1 2021/4/30	7,889,144 (11.0)

4	ピーター・マンスフィールド卿イメージングセンター (SPMIC)	SPMICを設立し医用画像の開発と応用を推進する。MRの感度向上において、過分極(HP)不活性ガスと 超核偏極 の技術開発をした。これは、MRの臨床的使用方法に変化をもたらす。肺疾患の研究でHP不活性ガスの感度向上を活用し、筋肉や脳の代謝研究に超核偏極を使用していく。	Peter, Morris University of Nottingham 2015/4/1 2016/3/31	7,712,000 (10.8)
5	単一光子-スペクトルの拡大 (SPECS)	単一光子計数は、低光センシング応用及び多数のフォトニック量子技術に重要な機能。Siの1000nmの波長限界をはるかに超えて、1400nm~3000nmの短波赤外線 (SWIR) 領域、中波長赤外線 (MWIR) 領域へ 単一光子検出器 の動作領域拡大が目的。SWIR、MWIR半導体及び超伝導体単一光子検出器を大面積焦点面アレイにスケールアップで、自動車のLIDARでの霧の確認や、環境モニタリング、ヘルスケア、セキュリティ等のイメージングとセンシングを目指す。	Gerald, Buller Heriot-Watt University 2020/2/1 2025/1/31	5,265,567 (7.36)
6	エンジニアリング・フォトニック量子技術	量子通信、量子センシング、多重化単一光子源の構築、及び情報処理システムの技術にフォーカスする。所定デバイスを 単一光子検出器 及び単一光子源と統合して、光源+回路+検出器機能を作成。光学素子を多重光子源やクラスタ状態の生成と計算等の検出、フィードフォワード方式に必要な低遅延の従来の電子制御システムと統合。	John, Rarity University of Bristol 2014/6/16 2019/6/15	5,062,359 (7.07)
7	半導体集積量子光回路	量子情報処理の実現に必要な基本構成要素を含む回路を構築。光子量子ビットを生成する単一光子源、量子ビット間の通信チャンネル、量子論理ゲート、スピン量子ビットで構成のメモリ、及びオンチップ 単一光子検出器 。ナノスケールIII-V構造の量子物理学を活用し、量子通信、暗号化及び精密測定とセンサー分野で新世代を拓く。	Maurice, Skolnick University of Sheffield 2012/1/16 2017/7/15	5,040,713 (7.04)
8	KAIROS	高信頼性エネルギー供給、安全な輸送リンク、モバイル通信、データネットワーク、電子金融取引等、重要なインフラストラクチャサービスに正確なタイミングを提供するための小型 光格子時計 のプロトタイプを開発。高性能コンパクト時計は、民間及び軍用途に対応し、英国に技術的、経済的利益をもたらす。	James, McCarthy Teledyne UK Limited 2018/11/1 2021/12/31	4,450,252 (6.22)

出典：データベース UKRI を基に調査会社が作成
https://gtr.ukri.org/search/project?term=*

表 3-2-6 から、UKRI から支援された金額上位のプロジェクトとしては、光子検出器関連が 4 件で、次いで超核偏極関連が 3 件となっている。特に超核偏極関連は、図 3-2-4 の英国の産業戦略の中の「具体的ミッションを設定」における、①AI・データの「15 年以内にがんの早期発見を可能に」というミッションにも対応していると思われる。

このように英国においては、長期ビジョンに基づいた産業政策と、具体的ミッションとが

リンクして、ミッションの目標年次を掲げて、産業化を強く意識した戦略を進めていると思われる。

第4節 ドイツの政策動向

ドイツは、科学技術イノベーションに関する基本政策は、憲法に相当する「連邦基本法」と、2006年に発表の科学技術イノベーションの包括的戦略の「ハイテク戦略」とに基づいている。ドイツの公立大学はほとんどが州立大学であり、教育と大学における研究政策の権限は州にあり、2014年の連邦基本法の改正前まで、連邦政府は大学に対し、施設建設と期間限定のプロジェクトファンディングのみ助成可能であった。「連邦基本法」の改正後は、州の同意があれば運営費交付金の交付も可能になり、ドイツの科学技術政策における変革の一つになっている。

2010年の第二次「ハイテク戦略2020」、2014年の第三次「新ハイテク戦略」を経て、2018年に第四次「ハイテク戦略2025」が発表されている。高い科学技術力でイノベーションを起こし成長を続けるために、産官学が連携して優先度の高い二つの目標とその重点技術領域を設定している。図3-2-5に第一次「ハイテク戦略」から第四次「ハイテク戦略2025」までの特徴と重点領域を示す。

図3-2-5 ドイツの「ハイテク戦略」の特徴と重点領域

ドイツ

ハイテク戦略における基盤的な未来技術

- 社会的実装や応用を見据えた研究：人工知能分野、ITセキュリティ・ユーザーフレンドリーなIT技術、マイクロエレクトロニクス分野、材料分野
- 世界トップへ飛躍させるべき技術：量子、ライフ・バイオ、航空宇宙

名称(期間)	特徴
ハイテク戦略(2006-09)	<ul style="list-style-type: none"> ドイツ初の包括的なSTI政策 ドイツの産業を支える17の基幹技術を同定 イノベーション環境の整備を促進
ハイテク戦略2020(2010-13)	<ul style="list-style-type: none"> シーズ型からニーズ型のSTI政策に方向転換 5の課題領域/10のアクションプランを策定 うち一つが「インダストリ4.0」
新ハイテク戦略(2014-17)	<ul style="list-style-type: none"> ニーズ型のSTI政策を維持 5の課題領域→6の課題領域に 「デジタル化」を最重要課題と位置づけ
ハイテク戦略2025(2018-)	<ul style="list-style-type: none"> ニーズ型のSTI政策を維持 未来技術(AI・次世代電池・量子)等に言及 社会的課題解決のための具体的なミッション

量子研究枠組プログラム(2018年9月発表)

- 基礎研究から実用化までを重点的に助成
- 基盤的経費/プロジェクトファンディング 総額6.5億€/2018~2022年。これまでは年に約1億€程度投資されてきたが、1.5倍程度となる見込み。2022年に追加投資の是非を判断し2028年まで助成延長を予定
- 所管は、主管庁として教育研究省(BMBF)、経済エネルギー省(BMWi)、その他、内務省(BMI)、防衛省(BMVG)

重点領域：量子コンピューティング(コンピューター、シミュレーションなど)、量子コミュニケーション(通信、セキュリティ技術など)、計測(精密計測技術、衛星、ナビゲーション技術など)、量子分野の技術移転と産業の参画推進



出典：量子技術分野の研究動向について (2019年3月29日) CRDS
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ryoshigijutsu_innovation/dail/siryous3.pdf

図3-2-5に示すように、量子科学技術を、AI、次世代電池とともに次世代の産業の核となる技術分野として集中投資を進めている。

具体的な目標として、①社会的実装や応用を見据えた研究、及び②世界トップへ飛躍させるべき技術として、量子技術(シミュレーション、計測、画像化)を、バイオテクノロジー

及びバイオインフォマティクス、航空宇宙衛星及び材料と並んで挙げている。

技術シーズ型の 2006 年の重点化戦略だった（第一次）「ハイテク戦略」が、2018 年の（第四次）「ハイテク戦略 2025」では、ドイツが次世代の技術革新の中心であるために、重点技術領域を設定して、高度技術者の人材を育成し、ニーズ型の科学技術イノベーション政策へと変化して社会的課題解決のための具体的なミッションを挙げるなど、内容に変容が見られる。

2018 年 9 月、「ハイテク戦略 2025」の重点技術領域の「量子戦略」に関して、量子研究枠組みプログラムが発表されており、量子計測・センシングが、量子コンピューティング（量子計算）、量子コミュニケーション（量子通信）、量子分野の技術移転と産業の参画推進とともに挙げられている。また、基盤的経費/プロジェクトファンディングとして総額 6.5 億€の投資がされている。2022 年に追加投資の是非の判断がされた上で、2028 年までに総額 10 億€の助成が予定されている。また 2019 年に、ドイツの付加価値を上げ、破壊的な新産業創出の支援のために、主管庁の教育研究省の下に「飛躍的イノベーション機構」（SPRING-D）が創設されている。これは、米国の国防高等研究計画局（DARPA）型の飛躍的イノベーション創出型スキームであり、ドイツの新しいファンディングの仕組みとなっている。

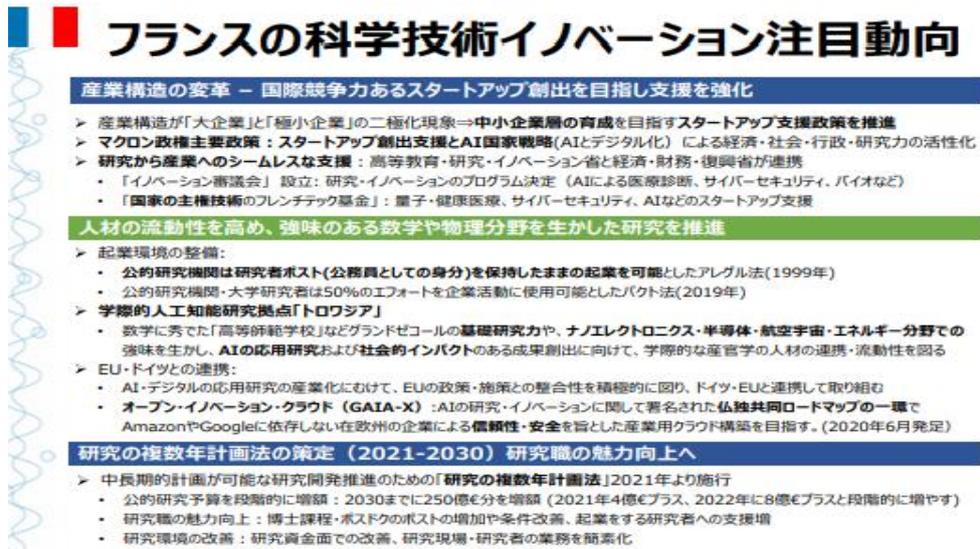
このようにドイツは、従来の主力産業の自動車、機械や化学を更に支える、又は代わるイノベーションの創出を、量子技術を含めた「ハイテク戦略 2025」を基に産業化していくことを推進している。

第 5 節 フランスの政策動向

フランスは、2009 年に国の研究・イノベーションの方向性を規定する、「国の研究・イノベーション戦略（SNRI 42）（2009 年～2012 年）」で、初めての統一的な国家戦略の策定と優先分野の設定をまとめている。この戦略で、三つの優先分野として、①保健・福祉・食糧・バイオテクノロジー、②環境への緊急対策とエコテクノロジー、③情報・通信・ナノテクノロジーを挙げている。その後「France Europe 2020」を経て、2015 年に「SNR France Europe 2020」（2015 年～2020 年）が発表されている。

量子技術に関して、国家として注力する戦略までに挙げられてはいないが、2019 年に「国家の主権技術のフレンチテック基金」として、量子技術を、健康医療、サイバーセキュリティ、人工知能（AI）とともに企業への支援として、量子関連企業へスタートアップ支援が行われている。国際競争力のあるスタートアップ創出の支援を強化する目的としている。図 3-2-6 にフランスの科学技術イノベーション注目動向を示す。

図 3-2-6 フランスの科学技術イノベーション注目動向

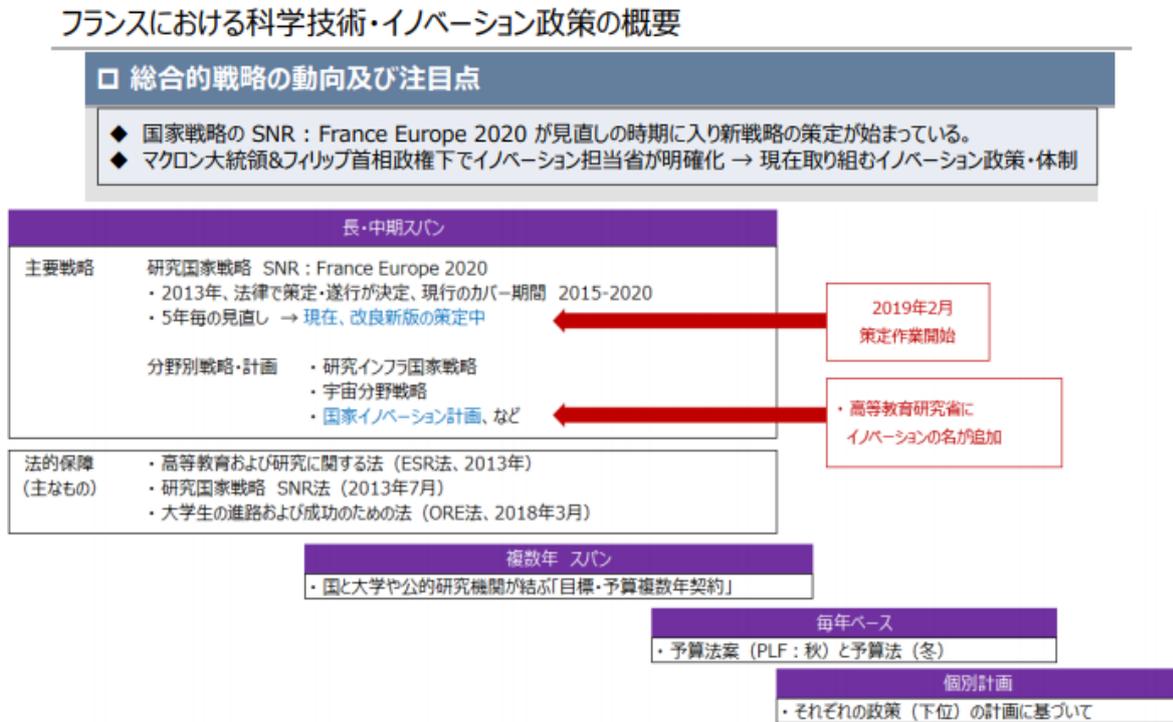


出典：海外の最新科学技術政策動向 (2021年1月13日) CRDS

https://www.mext.go.jp/content/20210112-mxt_chousei01-000011740_3.pdf

2017年5月にマクロン政権が発足し、イノベーション部門は組織横断的な運営から、高等教育・研究・イノベーション省 (MESRI) が中心となって国家イノベーション政策を進めるように変わっている。図 3-2-7 にフランスにおける科学技術・イノベーション政策の概要を示す。

図 3-2-7 フランスにおける科学技術・イノベーション政策の概要



出典：フランスにおける科学技術・イノベーション政策の概要 (2020年6月) (第6回基本計画専門調査会配布資料) 内閣府

<https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/kihon6/6kai/sanko3-9.pdf>

2020年1月に、下院の国民議会にフォルテーザ議員から、量子戦略に関する報告書「量子技術：フランスは技術的転換点を逃さない」が政府に提出されている。この中で量子技術が、経済成長の革新的発展と国家の安全保障に関わる重要課題として挙げられている。

2021年1月にマクロン大統領は、この報告書を基にフランスの量子国家戦略「将来への投資戦略」(PAI4) (2021年～2025年)を発表し、併せて5年間で18億€の投資計画も発表している。目的は、フランスを量子技術において、欧州・国際レベルで主要プレーヤーにするとともに、産業のバリューチェーンを強化し、人材育成、科学研究を強化することとしている。

このために、量子戦略の七つの柱が設定されており、①NISQ¹⁶シミュレータ・アクセラレータの用法開発と普及、②LSQ スケールに移行する量子コンピュータの開発、③量子センサの技術とアプリケーションの開発、④ポスト量子暗号化提案の作成、⑤量子通信システムの開発、⑥競争力のある実現技術の提案の作成、⑦エコ・システムの横断的構築を挙げている。

量子戦略の中心テーマは量子コンピューティング分野であるが、③量子センサの技術とアプリケーションの開発に、18億€のうちの2.58億€/5年間で充てられている。量子センサとして想定される応用分野は、高解像度な位置計測、ナビゲーション技術関連の磁力測定、電磁スペクトル解析、重量分析等が挙げられている。

このように、フランスは「AI 国家戦略」を基軸としながら、量子技術を含む各戦略分野で研究/産業力の再興を図るとしている。

第6節 中国の政策動向

中国では、科学技術の中長期計画が二つ推進されている。「国家中長期科学技術発展計画綱要(2006年～2020年)」と、「国家イノベーション駆動発展戦略綱要(2016年～2030年)」である。

科学技術に関する中長期計画の最上位に位置付けられるのは「国家中長期科学技術発展計画綱要(2006年～2020年)」(以下、計画綱要と略す)であり、2006年に国务院(他国の内閣に近い組織)から発表されている。中国を2020年までに世界トップレベルの科学技術力を持つイノベーション型国家とすることを目標に掲げ、研究開発投資の拡充と以下の四つの重点分野の強化を通じて目標の実現を目指すとしている。重点分野とは、①重点領域(経済・社会発展、国防安全で重点的発展が必要な分野を設定し、この分野の科学技術を支援)、②重要特定プロジェクト(戦略的製品、基盤技術を科学技術発展の最重要課題として資源を集中)、③先端技術(次世代ハイテク及び新興産業の発展の基礎となる重要技術を選定)、④重要科学研究計画(科学技術動向と戦略上のニーズからイノベーションを起こせる研究を選定)である。なお、④重要科学研究計画の4項目の一つに、「量子制御」が指定されている。

2021年に、この計画綱要の後続の「2035年長期目標綱要(2021年～2035年)」(以下、目標綱要と略す)が発表されている。この目標綱要では、技術的なブレークスルーを果たし、イノベーション型国家として前列に立ち、文化強国、人材強国、教育強国を造り上げることを目標としている。ポイントとして、中国近代化の全ての局面においてイノベーションの革新的地位の堅持が挙げられており、①国の戦略的科学技術力を強化する、イノベーションチェーンの全体的効力を高める、②企業の技術イノベーション能力を向上する、③人材のイノベーションの活力を引き出す、④科学技術イノベーションの体制とメカニズムを強化することが

¹⁶ NISQ : Noisy Intermediate-Scale Quantum の略で、小～中規模の量子コンピュータの総称。
https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/FR/CRDS-FY2020-FR-05/CRDS-FY2020-FR-05_60300.pdf

挙げられている。

この科学技術に関する基本方針を踏まえて、五か年間ごとの実施計画となる「国家科学技術発展第11次五か年計画（2006年～2010年）」（以下、11・五と略す。他の五か年計画も同様に略す）が発表されている。2006年以降の5年ごとに順次策定されており、12・五、13・五を経て、2021年に14・五（「国家科学技術イノベーション第14次五か年計画（2021年～2025年）」）が発表されている。

一方、イノベーション戦略の最上位に位置付けられる「国家イノベーション駆動発展戦略綱要（2016年～2030年）」（以下、戦略綱要と略す）は、2016年5月に国務院から発表されている。この戦略綱要は、2050年を見据えて2030年までの15年間の中長期戦略であって、ロードマップは以下のように設定されている。2020年までの第一段階は、イノベーション型国家の仲間入りを果たし、小康社会（ややゆとりのある社会）の建設を目標としている。2030年までの第二段階は、イノベーション型国家の上位の地位を確立し、経済及び社会を発展、国際競争力を大幅に向上させ、経済強国及び共同富裕社会の基礎の強化を目標としている。2050年までの第三段階は、世界のトップクラスのイノベーション強国となり、中華民族の復興という中国の夢の実現を目標としている。あわせて2030年までに、国際競争力の向上に重要な要素、社会発展のための差し迫った需要、安全保障の問題を認識して、関連する重点領域を強化することを目標としている。

図3-2-8に中国における科学技術・イノベーション政策の概要を示す。

図3-2-8 中国における科学技術・イノベーション政策の概要

中国における科学技術・イノベーション政策の概要

中国の科学技術政策の概要
<ul style="list-style-type: none">◆ 長期計画と5か年計画からなる（下図参照）。◆ 長期計画のうち、科学技術政策の最上位に位置づけられるのは「国家中長期科学・技術発展規画綱要（2006～2020）」。イノベーション戦略の最上位は「国家イノベーション駆動発展戦略綱要（2016～2030年）」◆ 五か年計画は「国民経済と社会発展五か年計画」を最上位とし、それに基づき各行政レベル、各分野で五か年計画が作られる。
中長期計画
<ul style="list-style-type: none">・ 国家中長期科学・技術発展規画綱要（2006～2020年）・ 国家イノベーション駆動発展戦略綱要（2016～2030年）<ul style="list-style-type: none">➢ 中国製造2025（製造業）➢ 次世代人工知能発展計画（AI）（～2030年）
五か年計画
<ul style="list-style-type: none">・ 国民経済と社会発展第十三次五か年規画（第13次五か年計画）・ 科学技術イノベーション第13次五か年計画 <p>※その他、インターネット+、ロボット等に関する五か年計画も発表。</p>

出典：第5期科学技術基本計画レビューに関するデータ集（2020年3月）内閣府
<https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/kihon6/4kai/siryoy1-2-1.pdf>

14・五において「最先端の科学技術研究の強化」が挙げられている。この戦略的重要分野は、AI、量子情報、集積回路、臨床医学・ヘルスケア、脳科学・脳型知能、遺伝子・バイオテクノロジー、宇宙・地球深部・深海探査・極地観測の七つである。このうちの量子情報技術に関する具体的項目としては、①市域・都市間、自由空間の量子通信技術の研究開発、②汎用量子計算原型機と実用化量子シミュレーション機の開発、③量子精密測定技術のブレークスルーが挙げられており、量子計測・センシングが戦略的重要分野の具体的項目の一つと

して挙げられている。すなわち中国における量子情報技術は、13・五で「量子通信・量子計算」が重点指定されていたが、14・五では、量子通信、量子計算、量子計測・センシングの3点セットとなった戦略的な研究開発の推進が明確にされており、14・五と13・五との違いの一つとなっている。

また、14・五において「基礎研究の強化を促進」が挙げられており、五か年計画で初めて言及された「基礎研究」経費について、研究開発に占める割合を8%以上に増加するとしている。科学技術研究について、基礎研究からより重視していくことを「基礎研究」経費割合で明確にしたことが注目されている。

さらに、14・五における量子情報技術（量子通信、量子計算、量子計測・センシング）が「軍民の科学技術協力において」と記述されており、14・五で実質的に追加された量子計測・センシングの応用展開が注目される。

量子情報技術も含めた科学技術イノベーションで注目されるのは2015年に発表の「中国製造2025」である。国家戦略として、2025年までに製造強国への仲間入りし、2049年（建国100周年）までに製造強国のトップグループに仲間入りを果たして、イノベーション主導型の「製造大国」から「製造強国」への転換を目指している。次世代情報技術産業を含む10の指定重点産業の向上を、イノベーションによる技術強化を中心に、品質の向上、構造の最適化、人材本位、環境に優しいグリーン製造の推進などにより実現を目指している。

表3-2-7に量子計測・センシング関連のグラント情報を金額上位順に示す。

表3-2-7 量子計測・センシング関連のグラント情報

No.	タイトル名	要約	代表者 機関名 開始年 終了年	金額 百万元 (億円)
1	マルチチャネル超伝導 単一光子検出器	マルチゲート超伝導ナノワイヤーエンコーダーで構成される超伝導ナノワイヤー3端子ロジックデバイスへの超伝導ナノワイヤー 単一光子検出器 を含む、マルチチャンネル超伝導ナノワイヤー 単一光子検出器 または検出器アレイの低温読み出し方法。	吴培亨 南京大学 2013 2017	4,900 (7.84)
2	超高真空その場走査 超伝導量子干渉顕微鏡	不記載	王熠华 复旦大学 2019 2023	688 (1.1)
3	高精度 Yb光格子時計	Python言語サポートに基づくフィールドプログラマブルゲートアレイ（FPGA）制御システムを提案。Pythonプログラムパッケージをコンパイルおよび呼び出して、 光格子時計 の動作に必要な制御信号を生成しPGA上で実行。	吕宝龙 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 2014 2015	540 (0.86)

出典：現地調査会社より取得データを基に調査会社が作成

第7節 韓国の政策動向

韓国は、1997年の通貨危機を乗り越えた1999年に「2025年に向けた科学技術発展長期ビジョン」を策定している。この中で、世界のトップレベルの科学技術競争力の確保を目指し、研究開発投資の拡大と科学技術人材の育成をポイントとして挙げている。

2001年に「科学技術基本法」が制定され、金大中大統領（1998年～2003年在任）により「科学技術革新5か年計画」（2002年～2006年）から移行する形で第1次「科学技術基本計画」（2002年～2006年）が策定されている。しかし盧武鉉大統領（2003年～2008年在任）は、

大統領の在任期間に合わせた計画として「科学技術基本計画」（2003年～2007年）を改めて第1次「科学技術基本計画」としている。

次の李明博大統領（2008年～2013年在任）になって第2次「科学技術基本計画」（2008年～2012年）が策定され、さらに朴槿恵大統領（2014年～2017年在任）の第3次「科学技術基本計画」（2013年～2017年）となったが、大統領が弾劾・解任された後、文在寅大統領（2017年～2022年在任）が第4次「科学技術基本計画」（2018年～2022年）を定めている。

この第4次「科学技術基本計画」の重点課題として、①未来への挑戦のための科学技術力の拡充、②革新が活発に行われる科学技術の体系づくり、③科学技術が先導する新産業・雇用の創出、④科学技術で皆が幸せな生活の実装の四つが挙げられている。図3-2-9に第4次「科学技術基本計画」における情報科学技術分野の重点科学技術を示す。

図3-2-9 第4次「科学技術基本計画」における情報科学技術分野の重点科学技術

大分類	中分類	重点科学技術
ICT・SW	ビッグデータ・人工知能	インテリジェントビッグデータ分析と活用技術、超高速・大容量のデータプラットフォーム技術、複数の人工知能共通プラットフォーム技術⑨
	コンピューティング・ソフトウェア	量子情報通信技術、新概念コンピューティング技術、システムSW操作と基盤技術⑨
	コンテンツ	仮想・複合パーチャル技術、インテリジェントコンテンツ制作技術⑨、NUI (Natural User Interface)・NUX技術
	情報セキュリティ	知識情報セキュリティ技術
	通信・放送、ネットワーク	高速・大容量・超低遅延通信ネットワーク技術、超接続物事インターネット技術、インテリジェント実感放送・メディアサービス技術

出典：第4次科学技術基本計画を基に CRDS 作成

出典：研究開発の俯瞰報告書 主要国の研究開発戦略（2019年）CRDS
https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2018/FR/CRDS-FY2018-FR-05/CRDS-FY2018-FR-05_10.pdf

図3-2-9の第4次「科学技術基本計画」の情報科学技術分野の重点科学技術として、量子情報通信技術が挙げられているが、量子計測・センシングは挙げられていない。なお、大統領直属の統合「国家科学技術諮問会議」が、科学技術政策の調整・諮問機関として、科学技術の中長期政策と主要政策の方向と制度改善等に関する諮問を担っている。

一方、量子情報科学については、特に量子暗号通信の分野で米国と協力して進められており、今後とも米国の研究機関との「未来の量子融合公開フォーラム」等を通じて進めていくことが明らかになっている。

また科学技術情報通信部から、情報通信技術分野で有望な八つの大学の研究室に各課題が選定されている。その一つが高麗大学の量子情報通信技術であり、最長8年間に毎年8億ウォンの研究費が支援されることが公表されている。

量子情報通信以外の分野では散発的な開発は進められているが、国家レベルで注力して推進している分野は見受けられない。2021年6月に、「情報通信の振興及び融合活性化等に関する特別法」が施行され、量子技術の定義、研究開発、人材育成、国際協力と標準化に関する支援等に関し追加して規定されている。今後、量子技術の基盤が確立され、研究環境と産業環境が活性化の方向に向かうと思われる。

表 3-2-8 に、量子計測・センシング関連のグラント情報を示す。

表 3-2-8 量子計測・センシング関連のグラント情報

No.	プロジェクト名	要約	代表者 機関名 開始年 終了年	金額 百万ウォン (億円)
1	時空間測定研究	原子分数時計 - マイクロ波スイッチ影響分析システムの開発 - マイクロ波干渉スイッチの最適化とマイクロ波漏れ不確かさの評価 - レーザーシステムの改善と短期安定性影響評価 - 共振器マイクロ波位相勾配評価のための噴水時計精密傾斜装置の開発と不確かさの評価 光格子時計 開発 - 光格子時計1号機等	유대혁 韓国標準科学研究院 2012 2017	20,389 (20.4)
2	量子暗号通信網構築による信頼性検証技術及びQKD高度化のための核心要素技術の開発	・半導体ベースのInGaAs / InP 単一光子検出器 構造設計と製造 * MQWベースのAPD作成/評価 *高効率SPAD製作 (≥30%) *TEC内蔵モジュール製作 結晶欠陥最小化研究 ・InGaAs (P) / InP MQW 単一光子検出器 構造エピ成長 ・InGaAs / InP 単一光子検出器 エピ成長 提案された四元膜を用いた吸収層の格子整合条件設計による吸収層と増倍層の厚さによる暗電流計算のためのプログラム作成と特性解析等	곽승환 아이데온컨タंक 株式会社 2015 2018	15,034 (15.0)
3	設計基盤Spin-Obitoics 素材開発	・垂直磁化SOT素材開発 - 理論と計算科学を利用してSOT効率を向上できる材料組合予測と実験による検証 - 材料物性の最終値を微小磁気計算に組み込むことによるスイッチング時間の予測と分析 磁気トンネル接合 により実用化が可能な構造を目指し、垂直磁化SOT素材の無磁場スイッチング技術開発 - SOTスイッチング効率を向上させることができる材料界面構造と微細構造制御方式の導出等	김영근 高麗大学 2015 2016	6,624 (6.6)
4	量子技術を用いた高感度 重力計センサー 技術の開発	・高感度 量子重力計 の使用絶対重力値の測定と不確かさの評価 ・二光子遷移周波数シフトによる重力値オフセット測定と不確かさの評価 ・コリオリ力による重力値の変動と不確かさの測定 ラマンレーザー波面歪みによる重力値オフセット測定と不確かさの評価 ・ラマンレーザーの周波数測定と不確かさの評価 ・絶対周波数に遡及したマイクロ波発生	권택용 韓国標準科学研究院 2014 2015	4,786 (4.8)

出典：データベース NTIS を基に調査会社が作成

第4部 特許動向調査

量子計測・センシング技術に関する研究開発動向について特許動向より調査を行った。

第1章 調査対象と調査方法

第1節 調査対象

量子計測・センシング技術に関する以下の7区分を調査対象として、特許動向について全体動向調査、技術区分別調査を行った。

- ・固体量子センサ
- ・量子スピントロニクスセンサ
- ・量子もつれ光センサ
- ・光子検出器
- ・量子慣性センサ
- ・光格子時計
- ・その他（超伝導量子干渉素子（SQUID）、超核偏極技術、フォノンセンシング）

第2節 調査方法

1. 調査対象文献

- ・PCT 出願
- ・日本、米国、欧州、中国、韓国への特許出願
- ・日本、米国、欧州、中国、韓国での特許登録

欧州への出願については、欧州特許条約（EPC）に基づく欧州特許庁への出願だけでなく、EPC 加盟国のうちで下記の使用したデータベースに収録された出願先国への出願を対象とした。

2. 使用したデータベース

特許文献の検索に使用したデータベースは、Derwent Innovation である。

3. 調査時期範囲

調査した特許文献は、出願年（優先権主張年）を基準に、2010年から2019年に出願されているものを調査対象とした。登録についても同様に、出願年（優先権主張年）を基準に、2010年から2019年に出願されたものを対象とした。

4. 調査対象母集団の抽出

7区分について、IPCとキーワードを用いた資料1の検索式により、調査対象母集団を抽出した。

第2章 全体動向調査

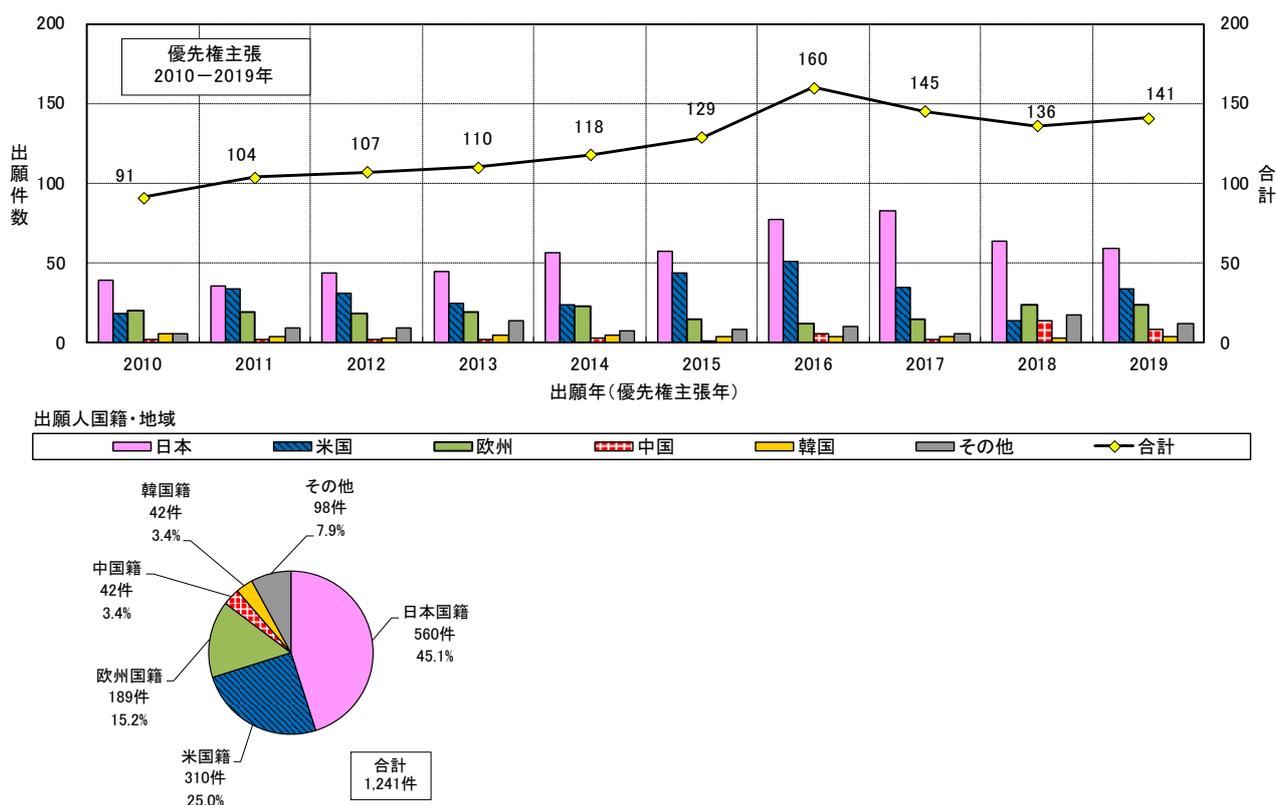
第1節 出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率

PCT 出願は、国際特許協力条約に基づく出願で、一つの出願願書により PCT 加盟国の全ての国に同時に出願したことになるもので、優先日を早く確保しようとする場合に使用される。優先日から 30 か月の期限が満了する前に権利を取りたい PCT 加盟国の特許庁に出願する必要がある。各国の出願特許より早くデータベースに収録されるため近年の状況を見るのに適している。

1. 全体

図 4-2-1 に量子計測・センシング技術全体の出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率を示す。PCT 出願の出願件数（2010－2019 年）の合計は 1,241 件で、出願人国籍別で最も多いのは日本国籍の 560 件で全体の 45.1% を占めている。次いで、米国籍の 310 件（25.0%）、欧州国籍が 189 件（15.2%）、その他が 98 件（7.9%）、中国籍が 42 件（3.4%）、韓国籍が 42 件（3.4%）である。全体としては日本が積極的に PCT 出願を活用している。

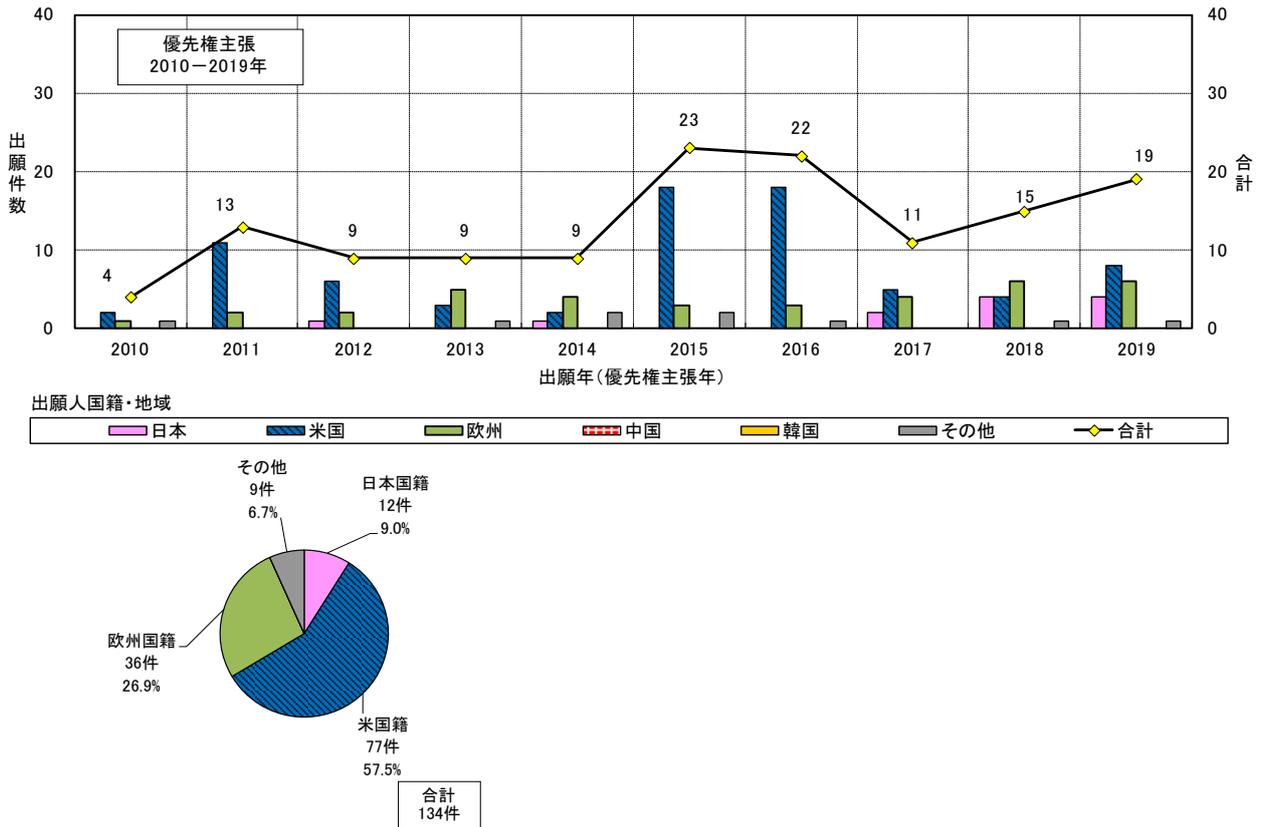
図 4-2-1 出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



2. 固体量子センサ

図 4-2-2 に固体量子センサー出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率を示す。PCT 出願の出願件数（2010～2019 年）の合計は 134 件で、出願人国籍別で最も多いのは米国籍の 77 件で全体の 57.5%を占めている。次いで、欧州国籍の 36 件(26.9%)、日本国籍が 12 件(9.0%)、その他が 9 件(6.7%)である。米国籍の出願が半数以上を占めている。2017～2019 年にかけて件数が増えている。

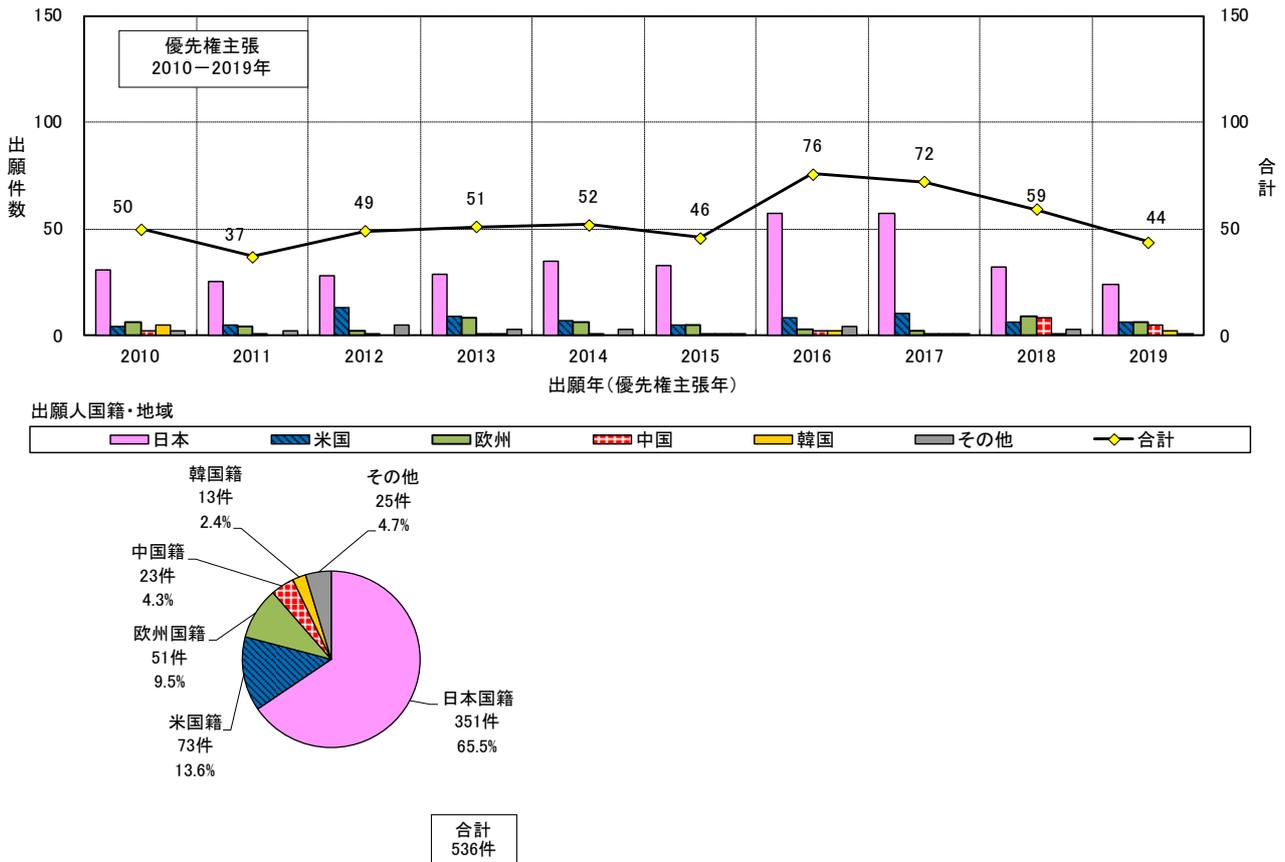
図 4-2-2 固体量子センサー出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



3. 量子スピントロニクスセンサ

図 4-2-3 に量子スピントロニクスセンサー出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率を示す。PCT 出願の出願件数（2010－2019 年）の合計は 536 件で、出願人国籍別で最も多いのは日本国籍の 351 件で全体の 65.5%を占めている。次いで、米国籍の 73 件(13.6%)、欧州国籍が 51 件(9.5%)、その他が 25 件(4.7%)、中国籍が 23 件(4.3%)、韓国籍が 13 件(2.4%)である。

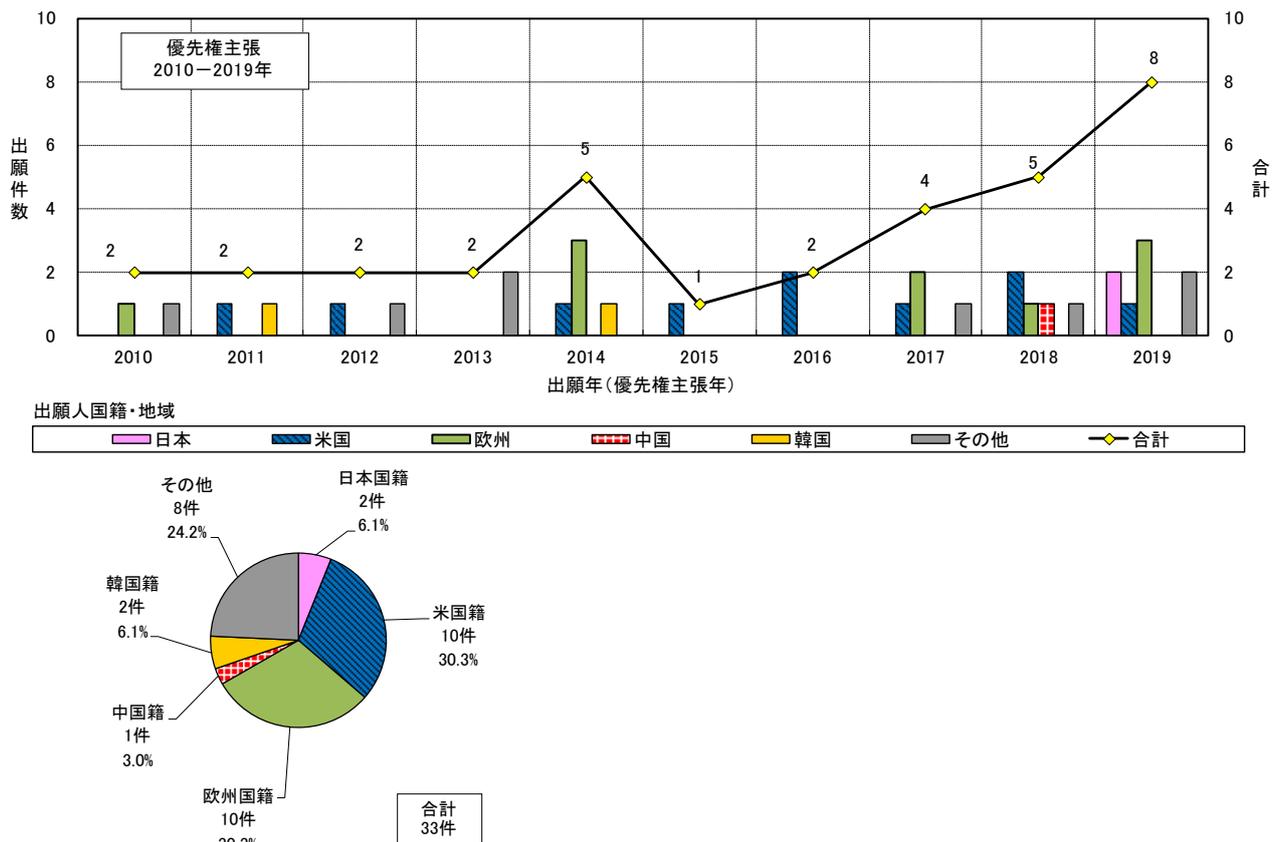
図 4-2-3 量子スピントロニクスセンサー出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



4. 量子もつれ光センサ

図4-2-4に量子もつれ光センサー出願人国籍別PCT出願件数推移及び出願件数比率を示す。PCT出願の出願件数（2010～2019年）の合計は33件で、出願人国籍別で最も多いのは欧州国籍と米国籍の10件でそれぞれ全体の30.3%を占めている。次いで、その他が8件（24.2%）、日本国籍が2件（6.1%）、韓国籍が2件（6.1%）、中国籍が1件（3.0%）である。2015～2019年にかけて出願件数が増えている。

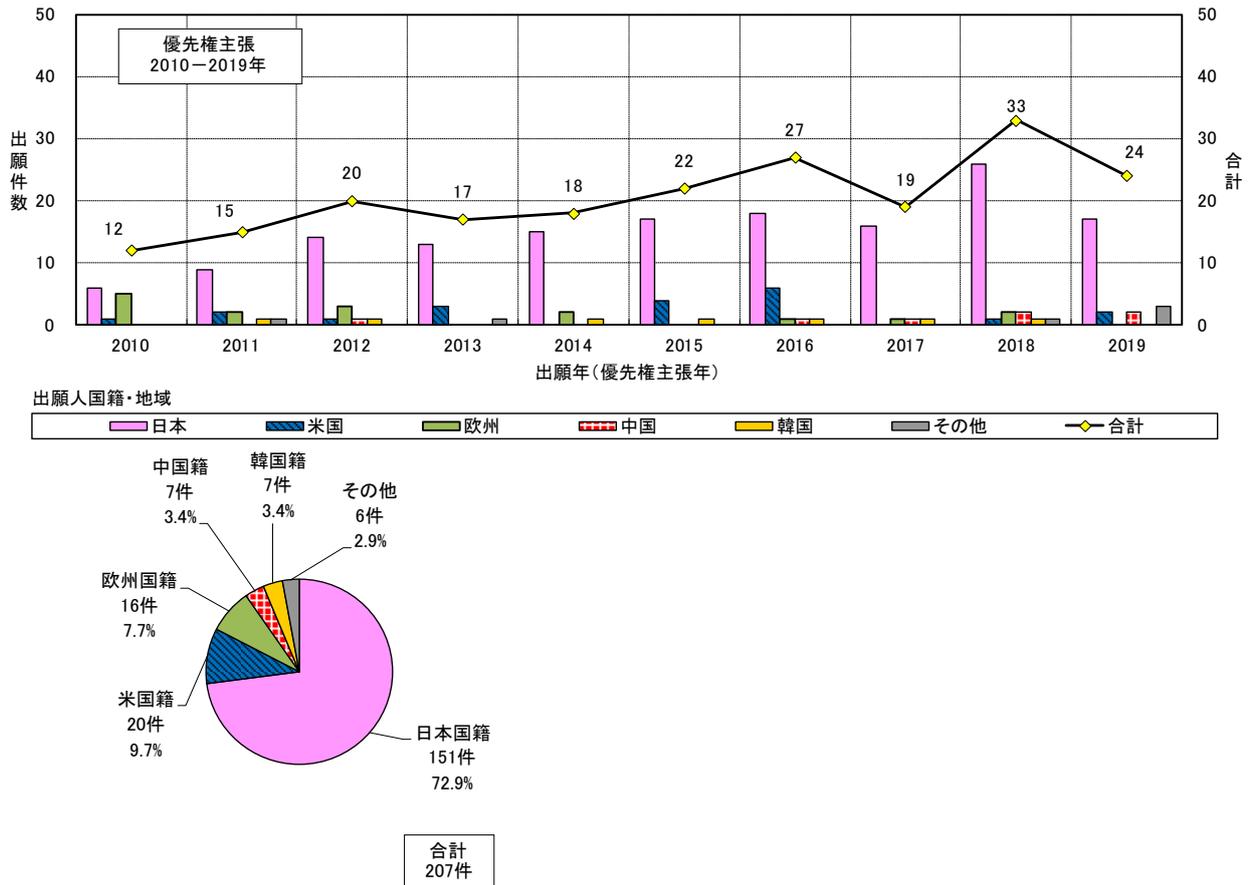
図4-2-4 量子もつれ光センサー出願人国籍別PCT出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010～2019年）



5. 光子検出器

図 4-2-5 に光子検出器—出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率を示す。PCT 出願の出願件数（2010—2019 年）の合計は 207 件で、出願人国籍別で最も多いのは日本国籍の 151 件で全体の 72.9%を占めている。次いで、米国籍の 20 件(9.7%)、欧州国籍が 16 件(7.7%)、中国籍が 7 件(3.4%)、韓国籍が 7 件(3.4%)、その他が 6 件(2.9%)である。

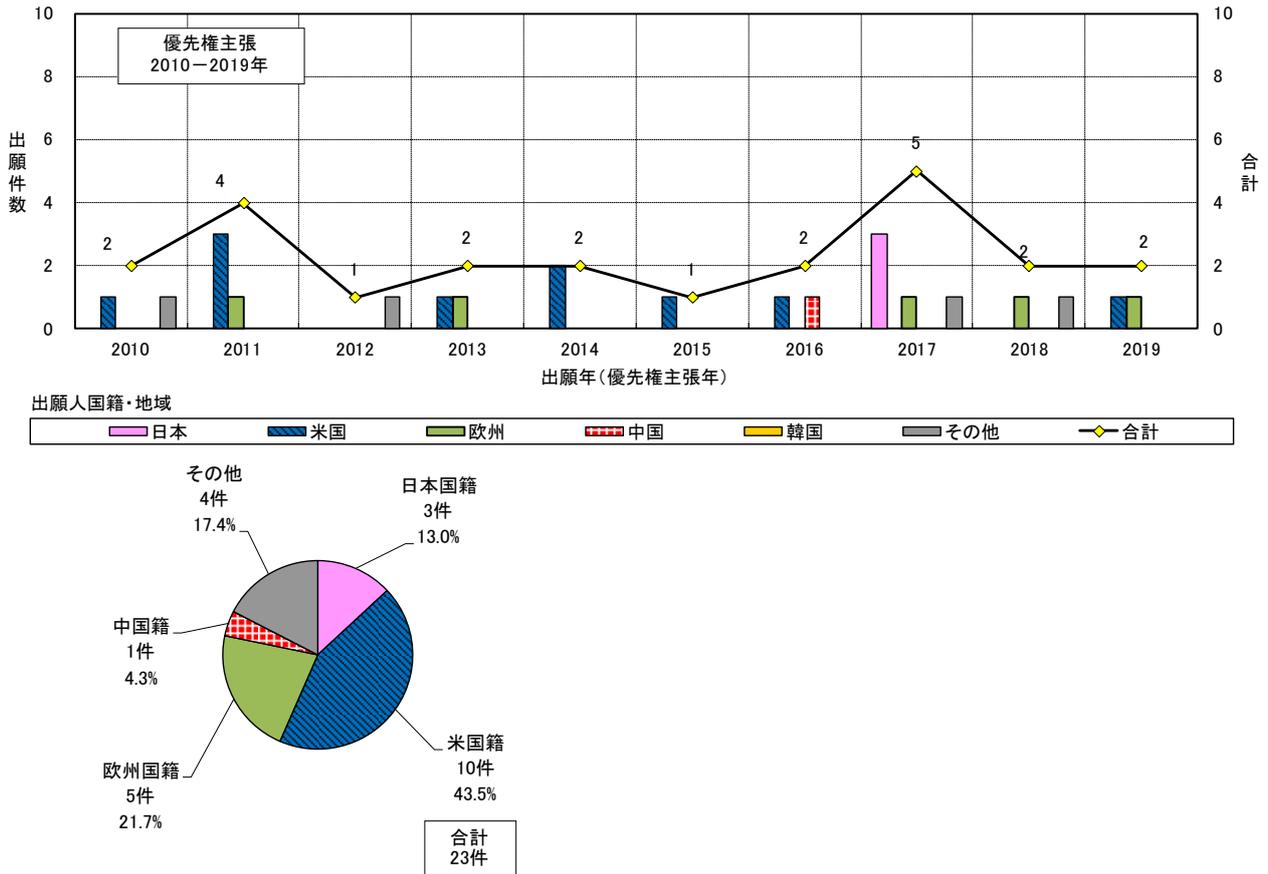
図 4-2-5 光子検出器—出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



6. 量子慣性センサ

図 4-2-6 に量子慣性センサー出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率を示す。PCT 出願の出願件数（2010－2019 年）の合計は 23 件で、出願人国籍別で最も多いのは米国籍の 10 件で全体の 43.5%を占めている。次いで、欧州国籍の 5 件(21.7%)、その他が 4 件(17.4%)、日本国籍が 3 件(13.0%)、中国籍が 1 件(4.3%)である。

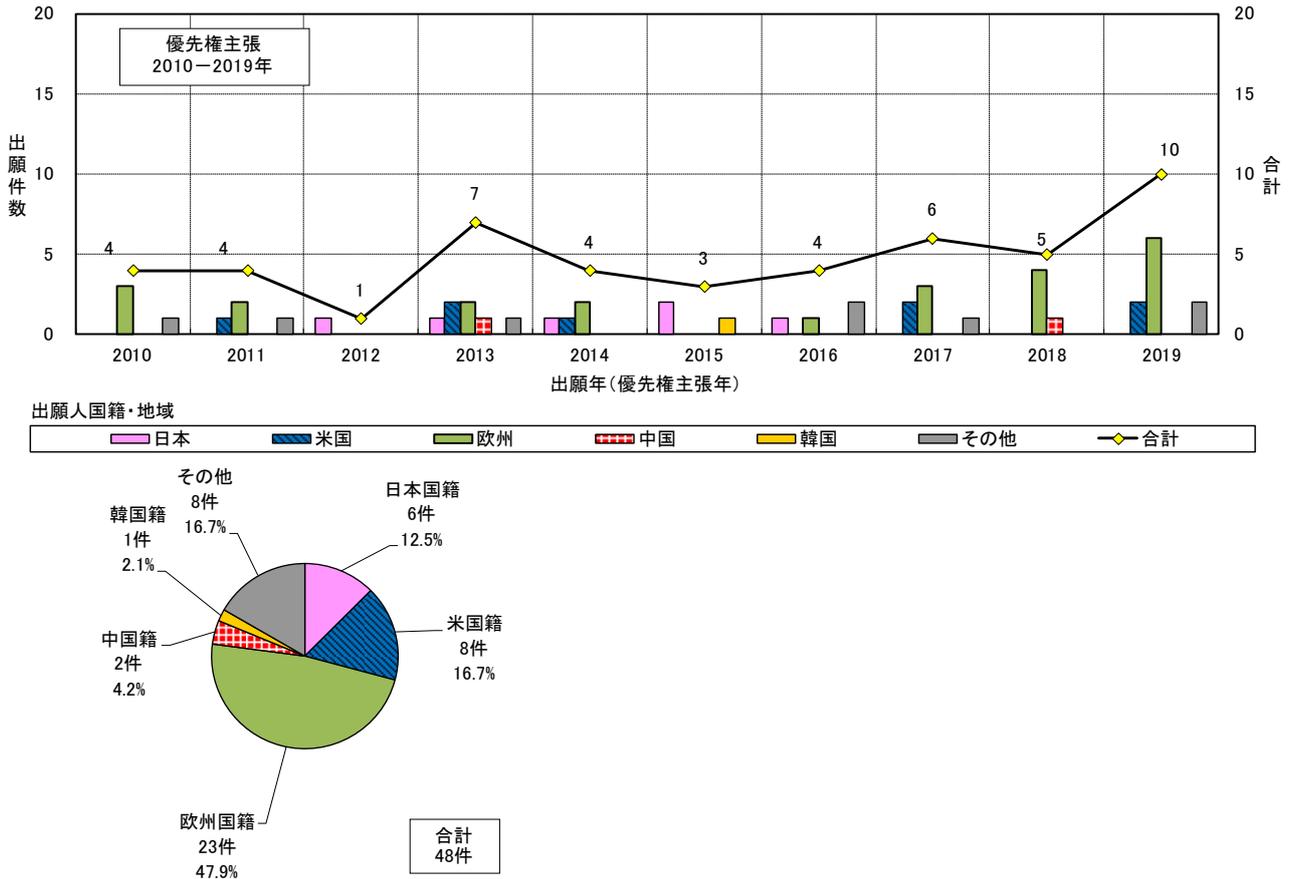
図 4-2-6 量子慣性センサー出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



7. 光格子時計

図 4-2-7 に光格子時計－出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率を示す。PCT 出願の出願件数（2010－2019 年）の合計は 48 件で、出願人国籍別で最も多いのは欧州国籍の 23 件で全体の 47.9%を占めている。次いで、米国籍の 8 件（16.7%）、その他が 8 件（16.7%）、日本国籍が 6 件（12.5%）、中国籍が 2 件（4.2%）、韓国籍が 1 件（2.1%）である。2019 年の出願件数が 10 件と多い。

図 4-2-7 光格子時計－出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



8. その他技術

図 4-2-8 にその他技術（SQUID）－出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率を示す。PCT 出願の出願件数（2010－2019 年）の合計は 143 件で、出願人国籍別で最も多いのは米国籍の 67 件で全体の 46.9%を占めている。次いで、日本国籍の 26 件(18.2%)、その他が 25 件(17.5%)、欧州国籍が 16 件(11.2%)、韓国籍が 7 件(4.9%)、中国籍が 2 件(1.4%)である。2019 年の出願件数が 28 件と多い。

図 4-2-8 その他技術（SQUID）－出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

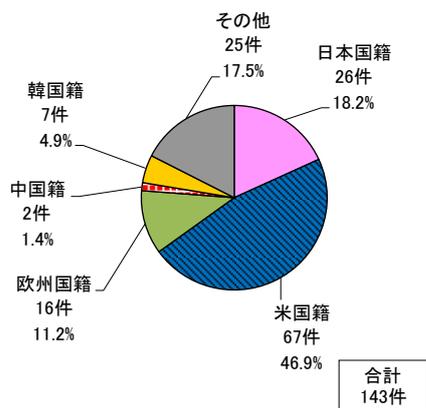
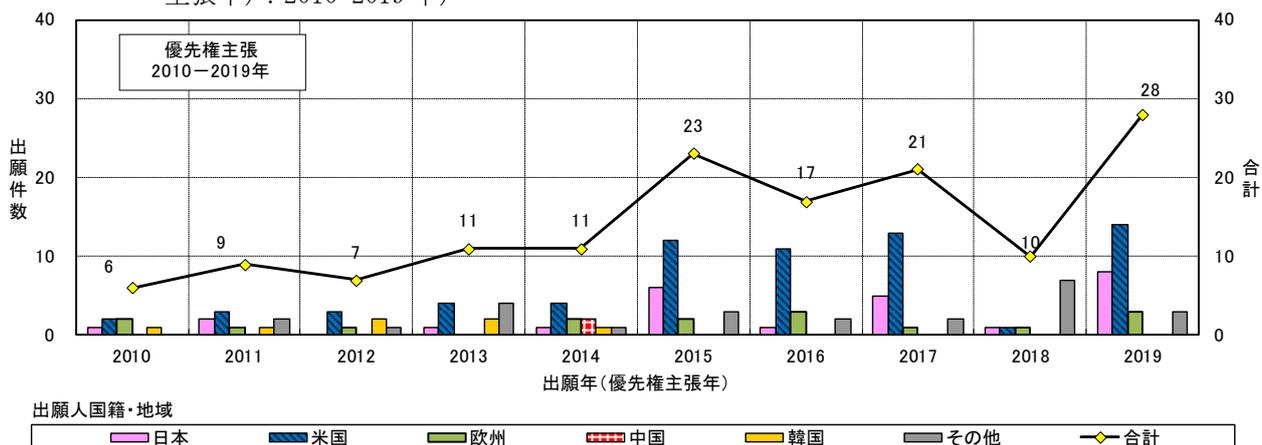


図 4-2-9 にその他技術（超核偏極技術）－出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率を示す。PCT 出願の出願件数（2010－2019 年）の合計は 126 件で、出願人国籍別で最も多いのは米国籍の 42 件で全体の 33.3%を占めている。次いで、欧州国籍の 39 件（31.0%）、その他が 18 件（14.3%）、韓国籍が 12 件（9.5%）、日本国籍が 10 件（7.9%）、中国籍が 5 件（4.0%）である。

図 4-2-9 その他技術（超核偏極技術）－出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

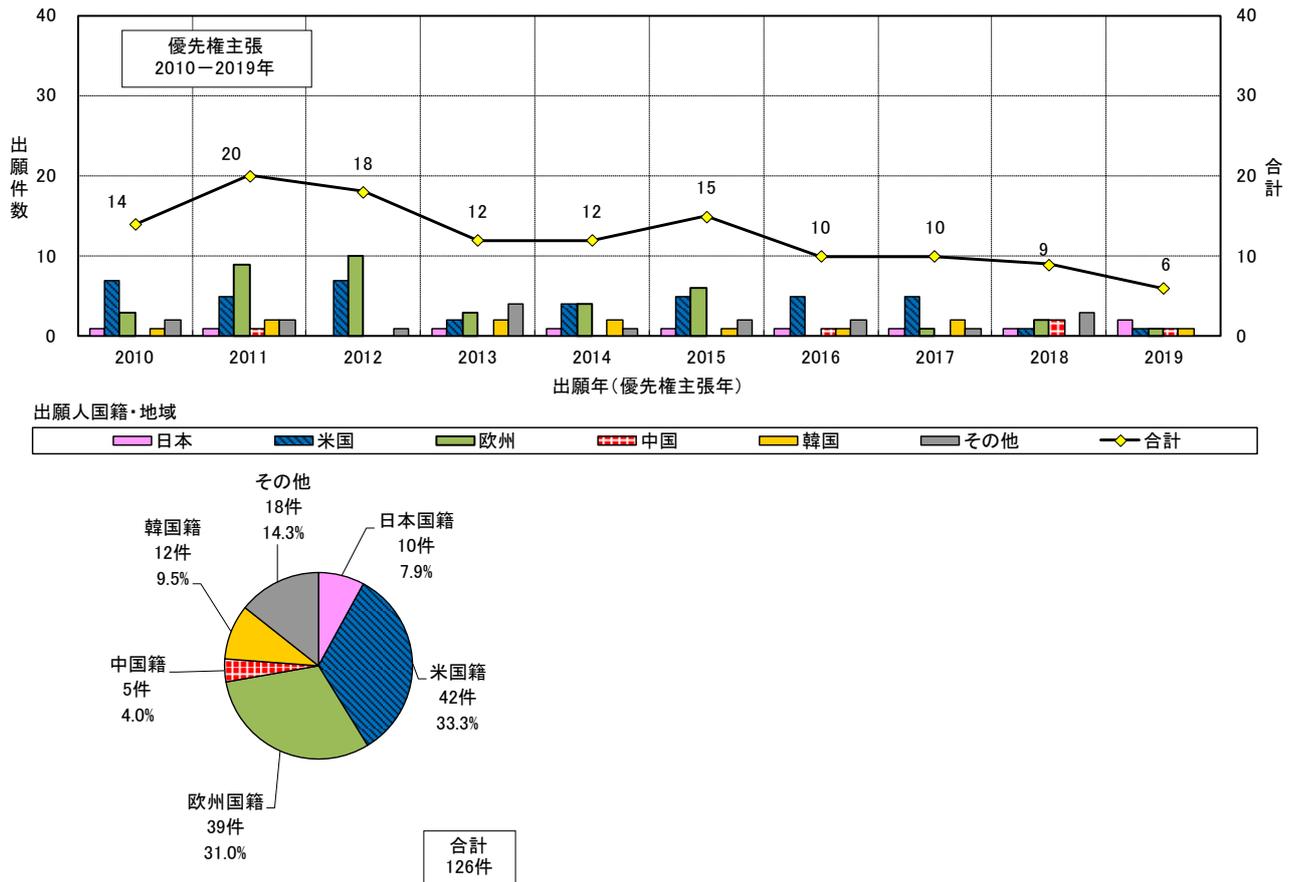
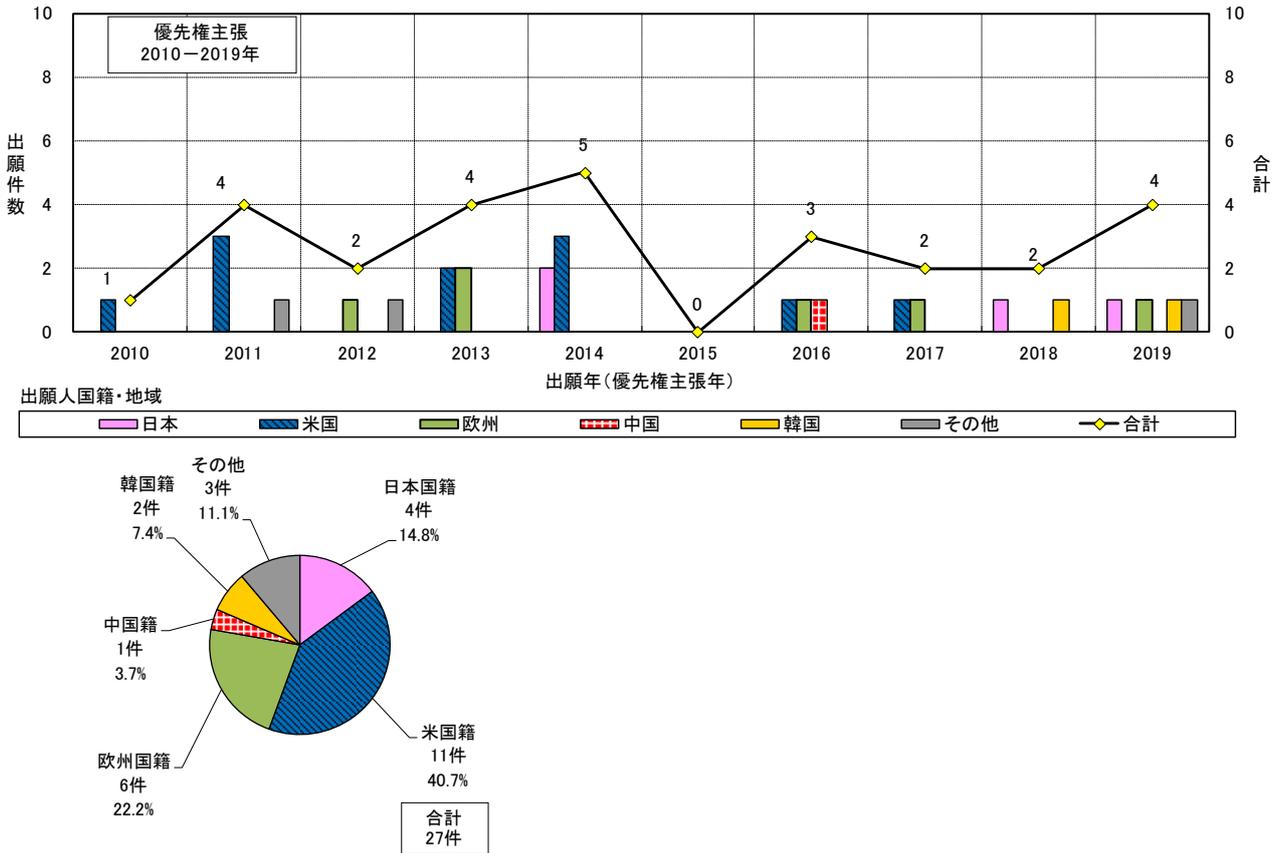


図 4-2-10 にその他技術（フォノンセンシング）－出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率を示す。PCT 出願の出願件数（2010－2019 年）の合計は 27 件で、出願人国籍別で最も多いのは米国籍の 11 件で全体の 40.7%を占めている。次いで、欧州国籍の 6 件（22.2%）、日本国籍が 4 件（14.8%）、その他が 3 件（11.1%）、韓国籍が 2 件（7.4%）、中国籍が 1 件（3.7%）である。

図 4-2-10 その他技術（フォノンセンシング）－出願人国籍別 PCT 出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



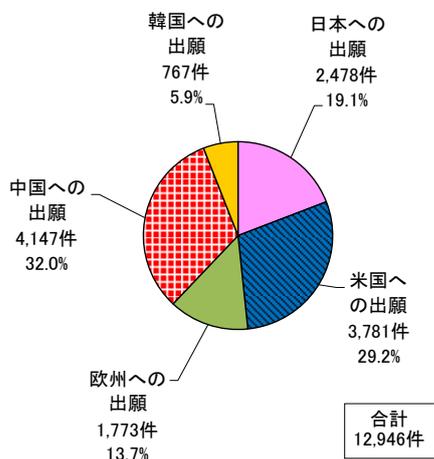
第2節 「出願先：日米欧中韓」出願先国別出願件数推移及び出願件数比率

量子計測・センシング技術の出願先国別の出願件数推移及び出願件数比率を示す。出願先国でどこを重視しているか見ることができる。

1. 全体

量子計測・センシング技術全体の出願先国別出願件数推移及び出願件数比率を図4-2-11に示す。出願件数（2010-2019年）の合計は12,946件で、出願先国別で最も多いのは中国への出願の4,147件で全体の32.0%を占めている。次いで、米国への出願が3,781件(29.2%)、日本への出願が2,478件(19.1%)、欧州への出願が1,773件(13.7%)、韓国への出願が767件(5.9%)である。中国への出願が近年増加している。

図4-2-11 「出願先：日米欧中韓」出願先国別出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

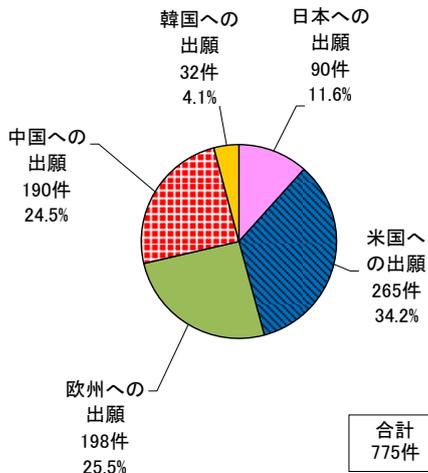
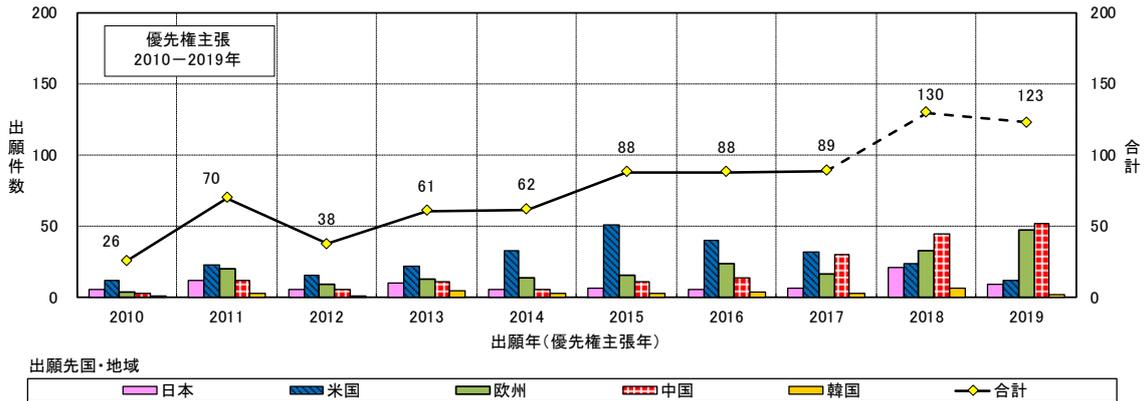


注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

2. 固体量子センサ

固体量子センサの出願先国別出願件数推移及び出願件数比率を図 4-2-12 に示す。出願件数（2010－2019 年）の合計は 775 件で、出願先国別で最も多いのは米国への出願の 265 件で全体の 34.2%を占めている。次いで、欧州への出願が 198 件(25.5%)、中国への出願が 190 件(24.5%)、日本への出願が 90 件(11.6%)、韓国への出願が 32 件(4.1%)である。中国への出願が近年増加している。

図 4-2-12 固体量子センサー [出願先：日米欧中韓] 出願先国別出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

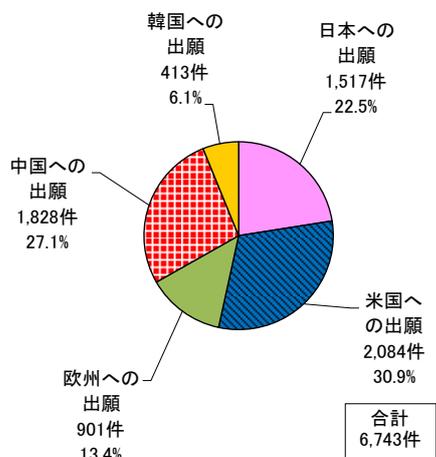
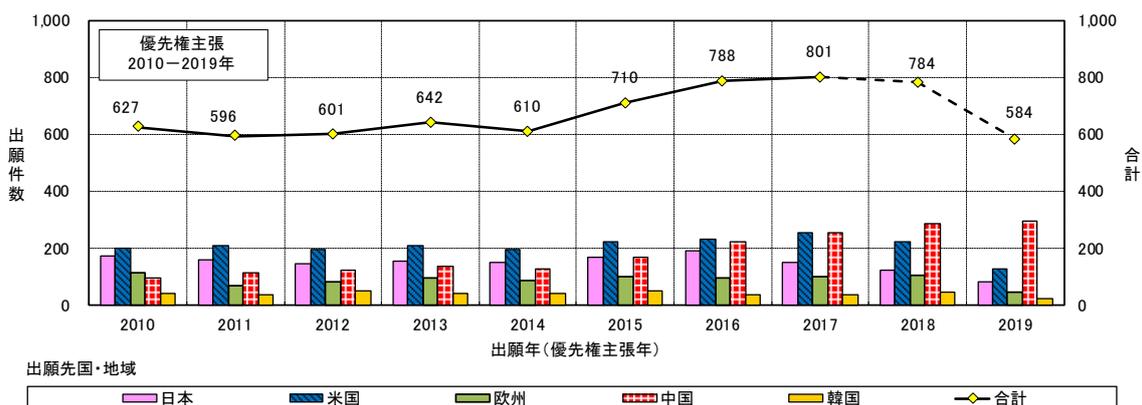


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

3. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサの出願先国別出願件数推移及び出願件数比率を図 4-2-13 に示す。出願件数（2010～2019年）の合計は6,743件で、磁気ヘッド、MRAMへの応用が進んでおり他の区分と比較して件数が多い。出願先国別で最も多いのは米国への出願の2,084件で全体の30.9%を占めている。次いで、中国への出願が1,828件(27.1%)、日本への出願が1,517件(22.5%)、欧州への出願が901件(13.4%)、韓国への出願が413件(6.1%)である。中国への出願が近年増加している。

図 4-2-13 量子スピントロニクスセンサー [出願先：日米欧中韓] 出願先国別出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

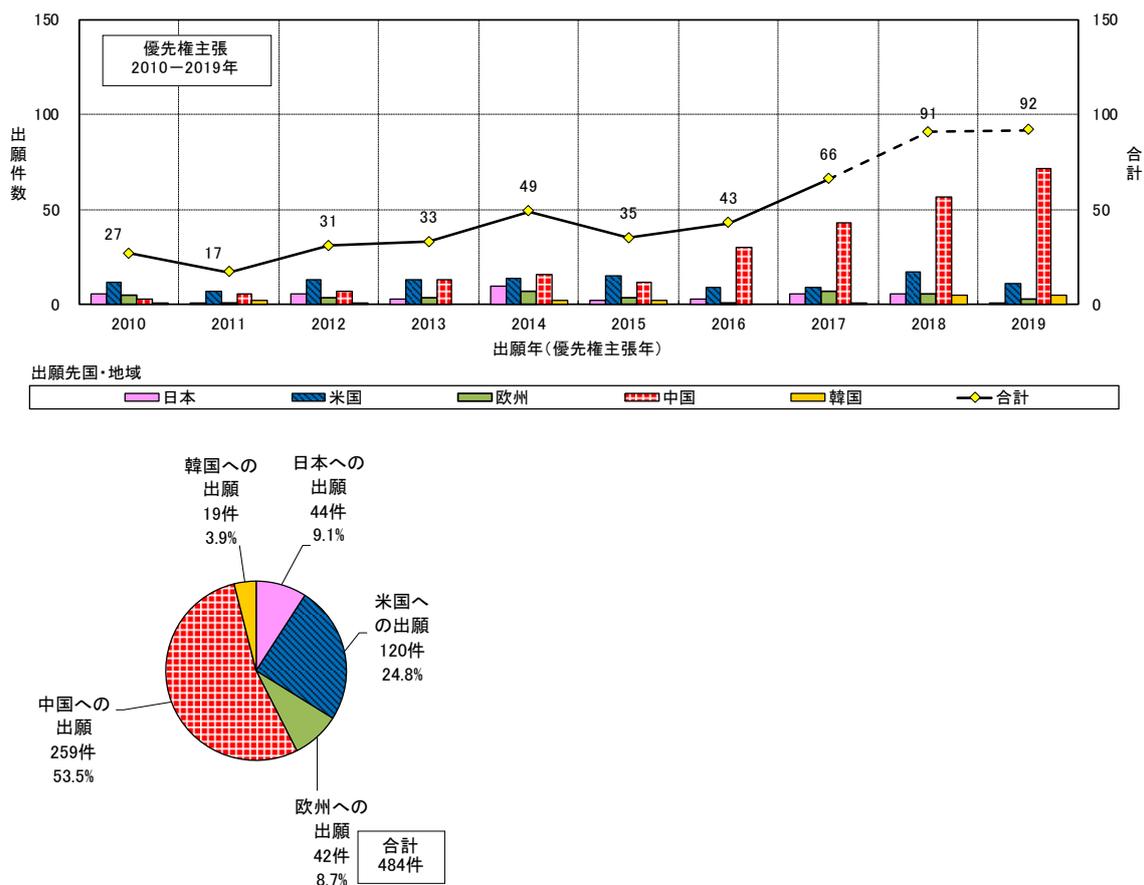


注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

4. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサの出願先国別出願件数推移及び出願件数比率を図 4-2-14 に示す。出願件数（2010－2019 年）の合計は 484 件で、出願先国別で最も多いのは中国への出願の 259 件で全体の 53.5%を占めている。次いで、米国への出願が 120 件(24.8%)、日本への出願が 44 件(9.1%)、欧州への出願が 42 件(8.7%)、韓国への出願が 19 件(3.9%)である。中国への出願が近年増加している。

図 4-2-14 量子もつれ光センサー [出願先：日米欧中韓] 出願先国別出願件数推移及び出願件数比率
（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

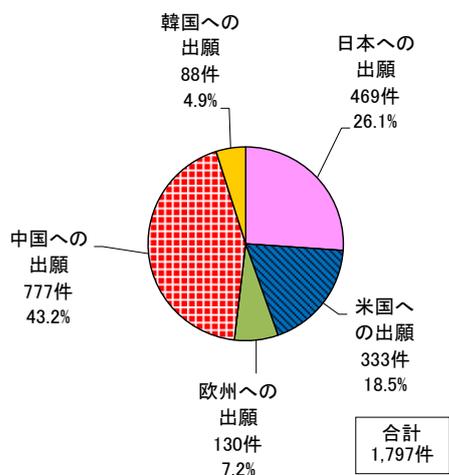
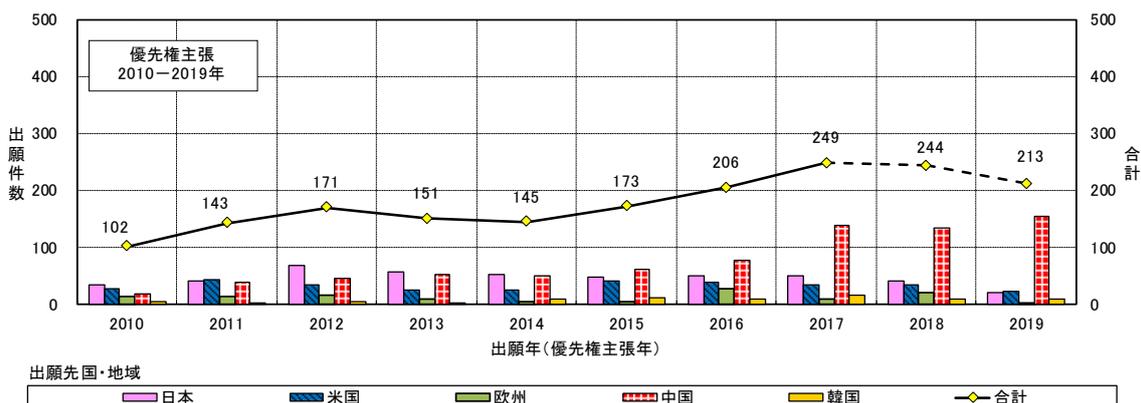


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

5. 光子検出器

光子検出器の出願先国別出願件数推移及び出願件数比率を図 4-2-15 に示す。出願件数（2010－2019 年）の合計は 1,797 件で、出願先国別で最も多いのは中国への出願の 777 件で全体の 43.2%を占めている。次いで、日本への出願が 469 件(26.1%)、米国への出願が 333 件(18.5%)、欧州への出願が 130 件(7.2%)、韓国への出願が 88 件(4.9%)である。中国への出願が近年増加している。

図 4-2-15 光子検出器－〔出願先：日米欧中韓〕出願先国別出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

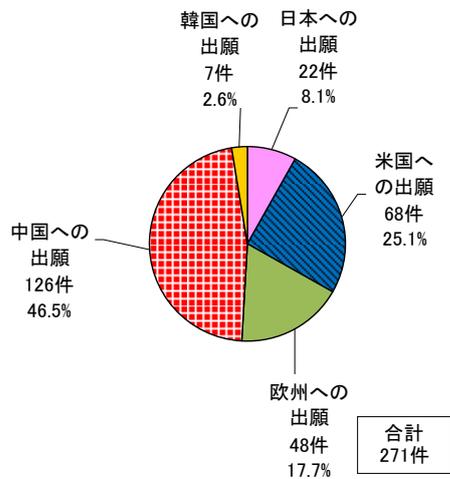
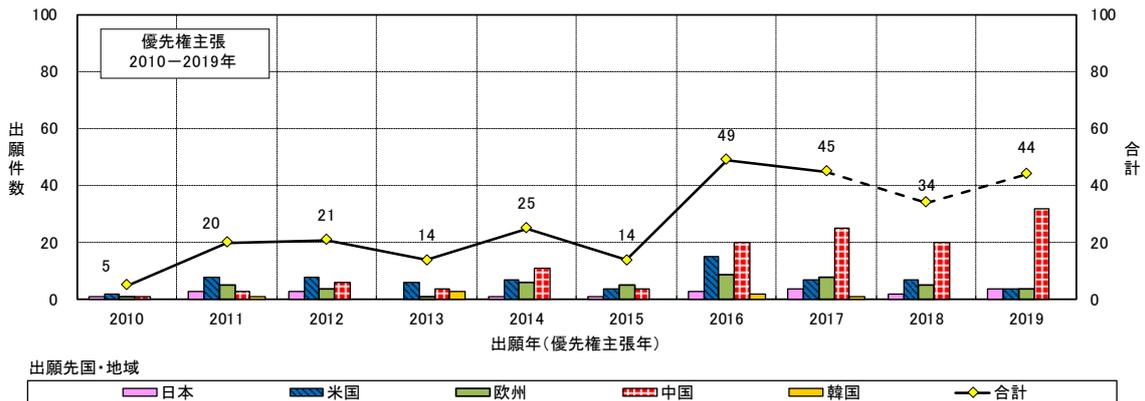


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

6. 量子慣性センサ

量子慣性センサの出願先国別出願件数推移及び出願件数比率を図 4-2-16 に示す。出願件数（2010～2019 年）の合計は 271 件で、出願先国別で最も多いのは中国への出願の 126 件で全体の 46.5%を占めている。次いで、米国への出願が 68 件(25.1%)、欧州への出願が 48 件(17.7%)、日本への出願が 22 件(8.1%)、韓国への出願が 7 件(2.6%)である。中国への出願が近年増加している。

図 4-2-16 量子慣性センサー [出願先：日米欧中韓] 出願先国別出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

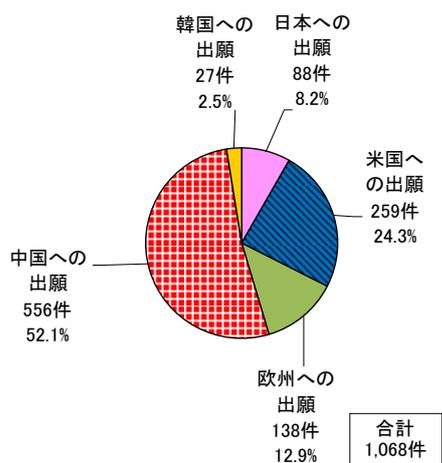
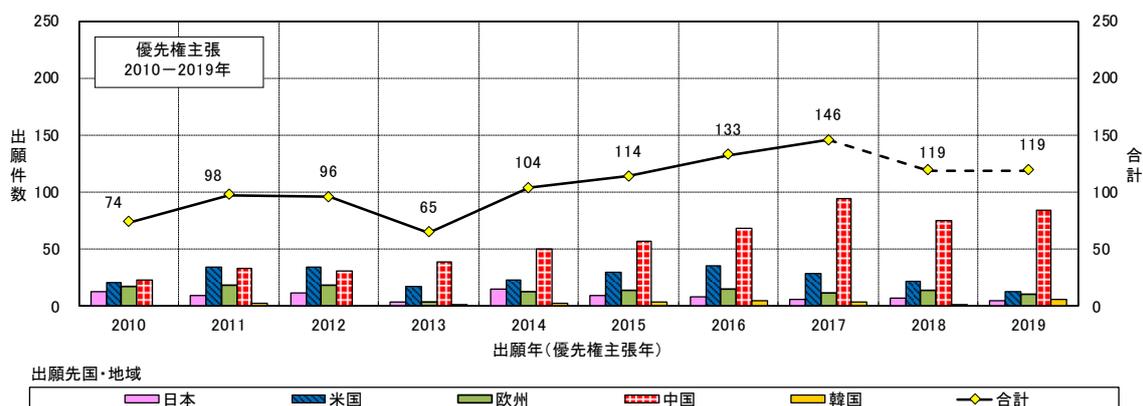


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

7. 光格子時計

光格子時計の出願先国別出願件数推移及び出願件数比率を図 4-2-17 に示す。出願件数（2010－2019年）の合計は1,068件で、出願先国別で最も多いのは中国への出願の556件で全体の52.1%を占めている。次いで、米国への出願が259件(24.3%)、欧州への出願が138件(12.9%)、日本への出願が88件(8.2%)、韓国への出願が27件(2.5%)である。

図 4-2-17 光格子時計－〔出願先：日米欧中韓〕出願先国別出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）



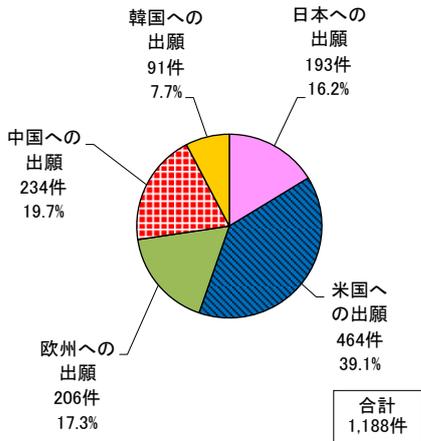
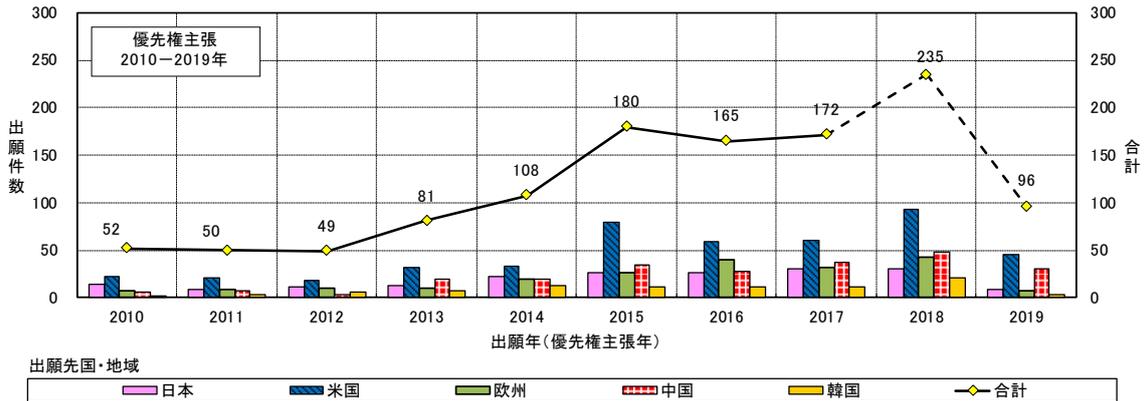
注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

8. その他技術

その他技術（SQUID）の出願先国別出願件数推移及び出願件数比率を図 4-2-18 に示す。

出願件数（2010－2019 年）の合計は 1,188 件で、出願先国別で最も多いのは米国への出願の 464 件で全体の 39.1% を占めている。次いで、中国への出願が 234 件（19.7%）、欧州への出願が 206 件（17.3%）、日本への出願が 193 件（16.2%）、韓国への出願が 91 件（7.7%）である。

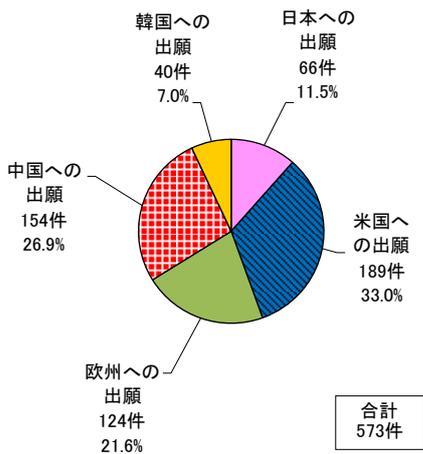
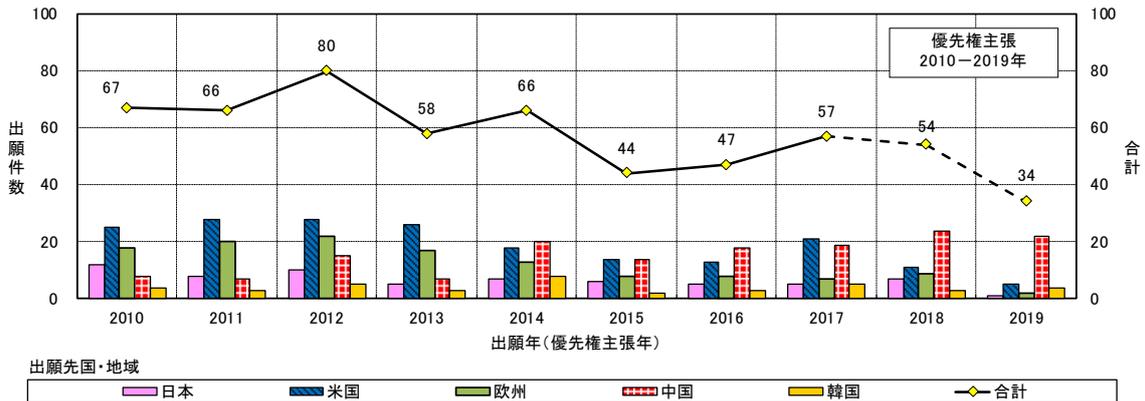
図 4-2-18 その他技術（SQUID）－ [出願先：日米欧中韓] 出願先国別出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

その他技術（超核偏極技術）の出願先国別出願件数推移及び出願件数比率を図 4-2-19 に示す。出願件数（2010－2019 年）の合計は 573 件で、出願先国別で最も多いのは米国への出願の 189 件で全体の 33.0%を占めている。次いで、中国への出願が 154 件(26.9%)、欧州への出願が 124 件(21.6%)、日本への出願が 66 件(11.5%)、韓国への出願が 40 件(7.0%)である。

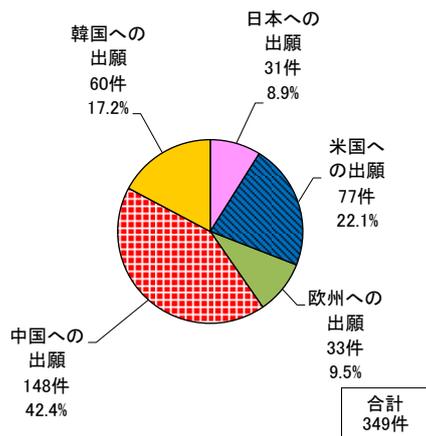
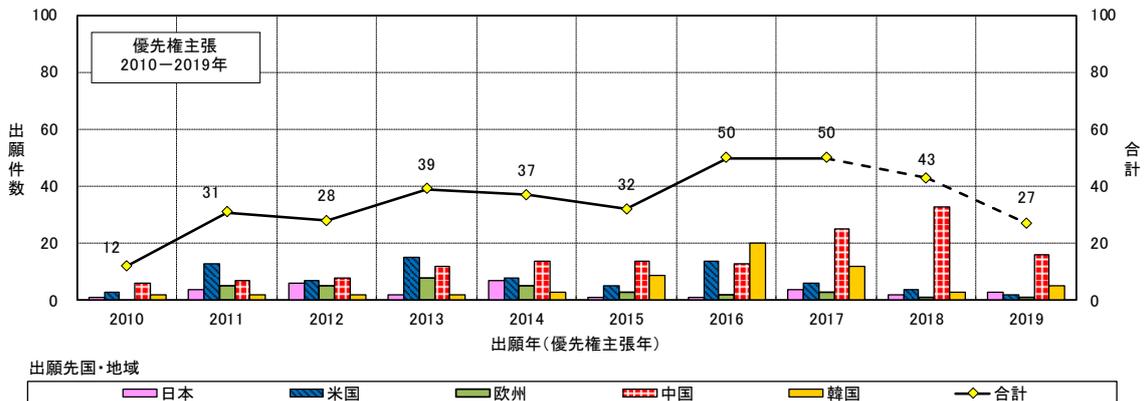
図 4-2-19 その他技術（超核偏極技術）－ [出願先：日米欧中韓] 出願先国別出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

その他技術（フォノンセンシング）の出願先国別出願件数推移及び出願件数比率を図 4-2-20 に示す。出願件数（2010－2019 年）の合計は 349 件で、出願先国別で最も多いのは中国への出願の 148 件で全体の 42.4%を占めている。次いで、米国への出願が 77 件（22.1%）、韓国への出願が 60 件（17.2%）、欧州への出願が 33 件（9.5%）、日本への出願が 31 件（8.9%）である。中国への出願が近年増加している。

図 4-2-20 その他技術（フォノンセンシング）－ [出願先：日米欧中韓] 出願先国別出願件数推移及び出願件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

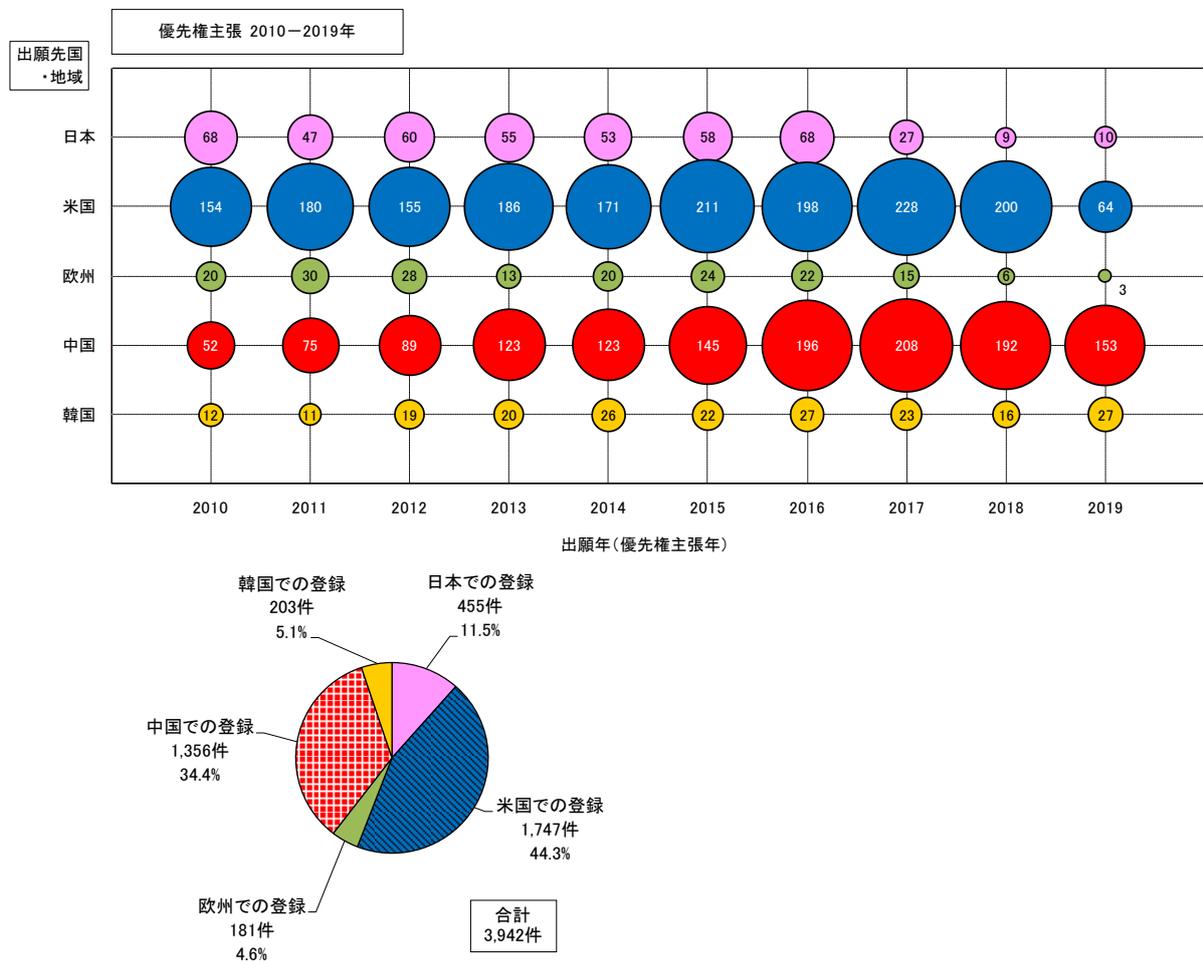
第3節 [出願先：日米欧中韓] 出願先国別登録件数推移及び登録件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

量子計測・センシング技術の出願先国別登録件数推移及び登録件数比率を示す。出願先国でどこを重視しているかを見ることができる。

1. 全体

量子計測・センシング技術全体の出願先国別登録件数推移及び登録件数比率を図4-2-21に示す。登録件数（2010～2019年）の合計は3,942件で、登録先国別で最も多いのは米国での登録の1,747件で全体の44.3%を占めている。次いで、中国での登録が1,356件(34.4%)、日本での登録が455件(11.5%)、韓国での登録が203件(5.1%)、欧州での登録が181件(4.6%)である。米国が重視されていることが分かる。

図4-2-21 [出願先：日米欧中韓] 出願先国別登録件数推移及び登録件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

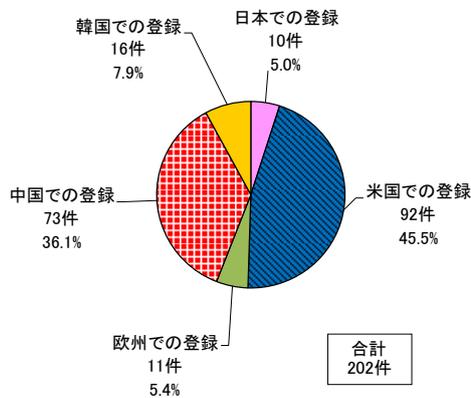
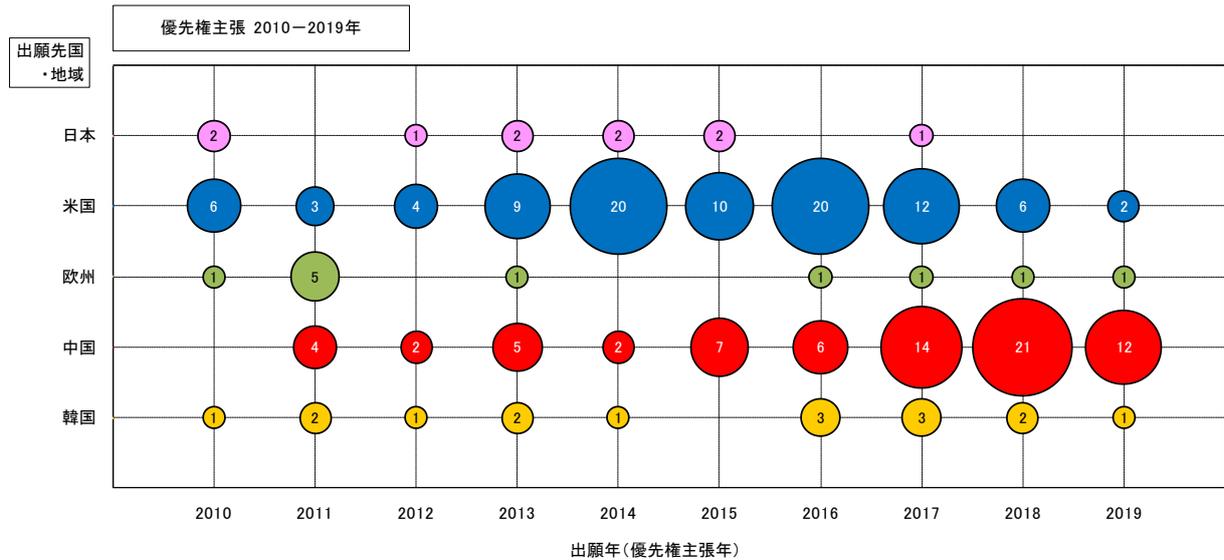


注) 調査時点で審査請求前や審査中の出願が存在するため、2019年に近づくにつれて件数が減少することに注意すること。

2. 固体量子センサ

固体量子センサの出願先国別登録件数推移及び登録件数比率を図 4-2-22 に示す。登録件数（2010～2019 年）の合計は 202 件で、登録先国別で最も多いのは米国での登録の 92 件で全体の 45.5%を占めている。次いで、中国での登録が 73 件(36.1%)、韓国での登録が 16 件(7.9%)、欧州での登録が 11 件(5.4%)、日本での登録が 10 件(5.0%)である。米国が重視されていることが分かる。2016～2018 年にかけて中国の登録件数が増加している。

図 4-2-22 固体量子センサー [出願先：日米欧中韓] 出願先国別登録件数推移及び登録件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

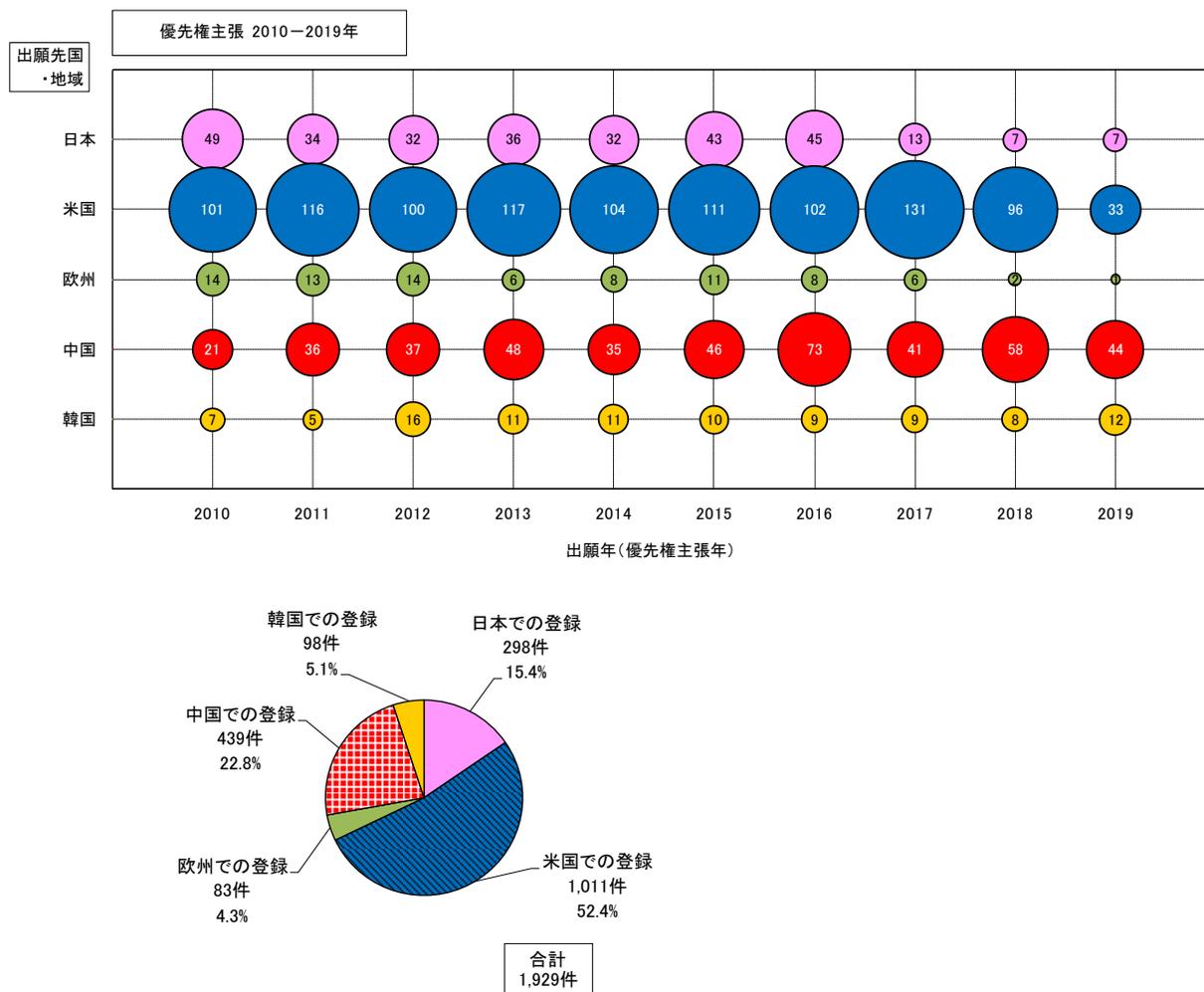


注) 調査時点で審査請求前や審査中の出願が存在するため、2019 年に近づくにつれて件数が減少することに注意すること。

3. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサの出願先国別登録件数推移及び登録件数比率を図 4-2-23 に示す。登録件数（2010～2019年）の合計は1,929件で、登録先国別で最も多いのは米国での登録の1,011件で全体の52.4%を占めている。次いで、中国での登録が439件(22.8%)、日本での登録が298件(15.4%)、韓国での登録が98件(5.1%)、欧州での登録が83件(4.3%)である。米国が重視されていることが分かる。

図 4-2-23 量子スピントロニクスセンサー [出願先：日米欧中韓] 出願先国別登録件数推移及び登録件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

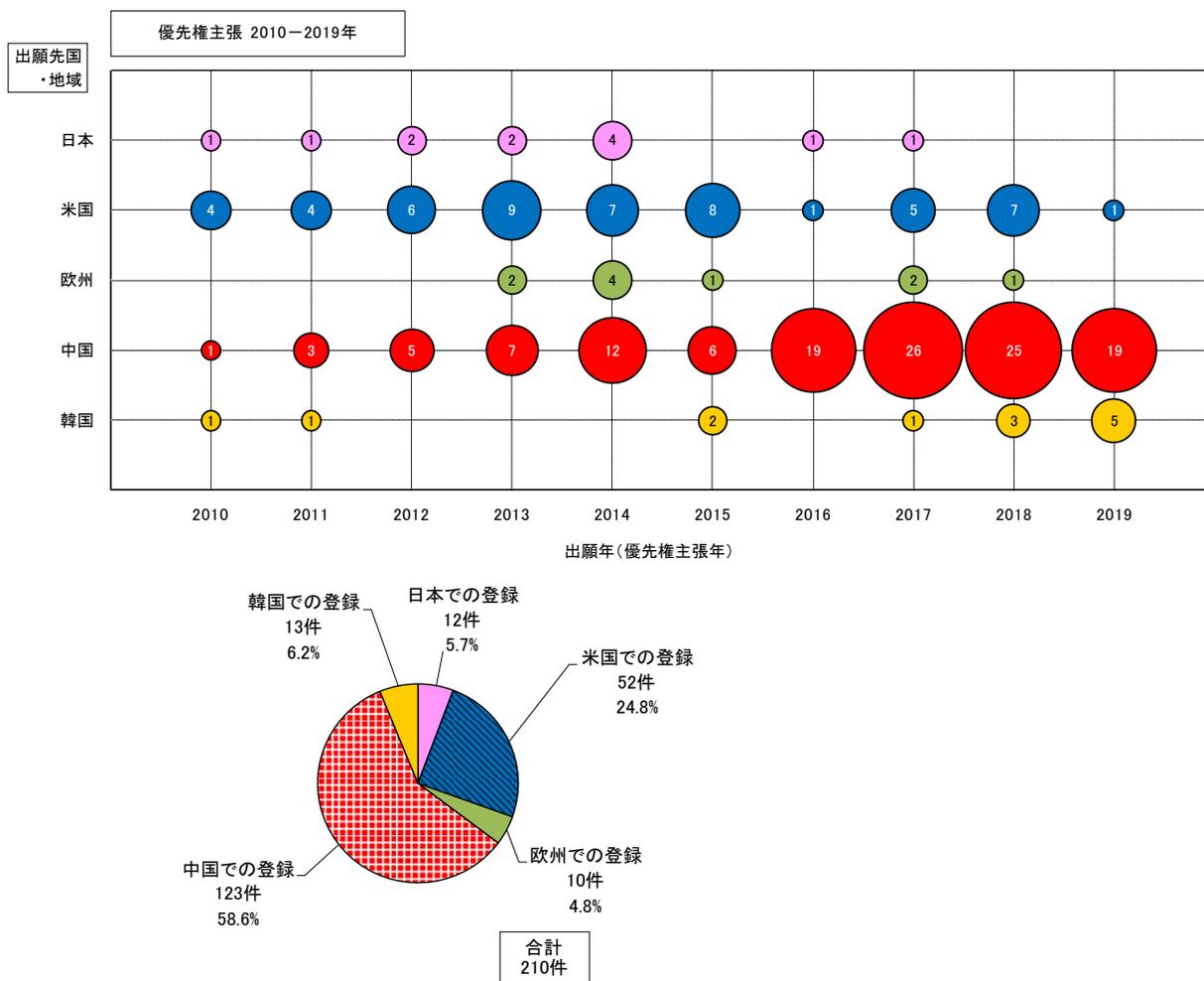


注) 調査時点で審査請求前や審査中の出願が存在するため、2019年に近づくにつれて件数が減少することに注意すること。

4. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサの出願先国別登録件数推移及び登録件数比率を図 4-2-24 に示す。登録件数（2010～2019 年）の合計は 210 件で、登録先国別で最も多いのは中国での登録の 123 件で全体の 58.6%を占めている。次いで、米国での登録が 52 件（24.8%）、韓国での登録が 13 件（6.2%）、日本での登録が 12 件（5.7%）、欧州での登録が 10 件（4.8%）である。中国が重視されていることが分かる。2016～2019 年の中国での登録が多い。

図 4-2-24 量子もつれ光センサー [出願先：日米欧中韓] 出願先国別登録件数推移及び登録件数比率
（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

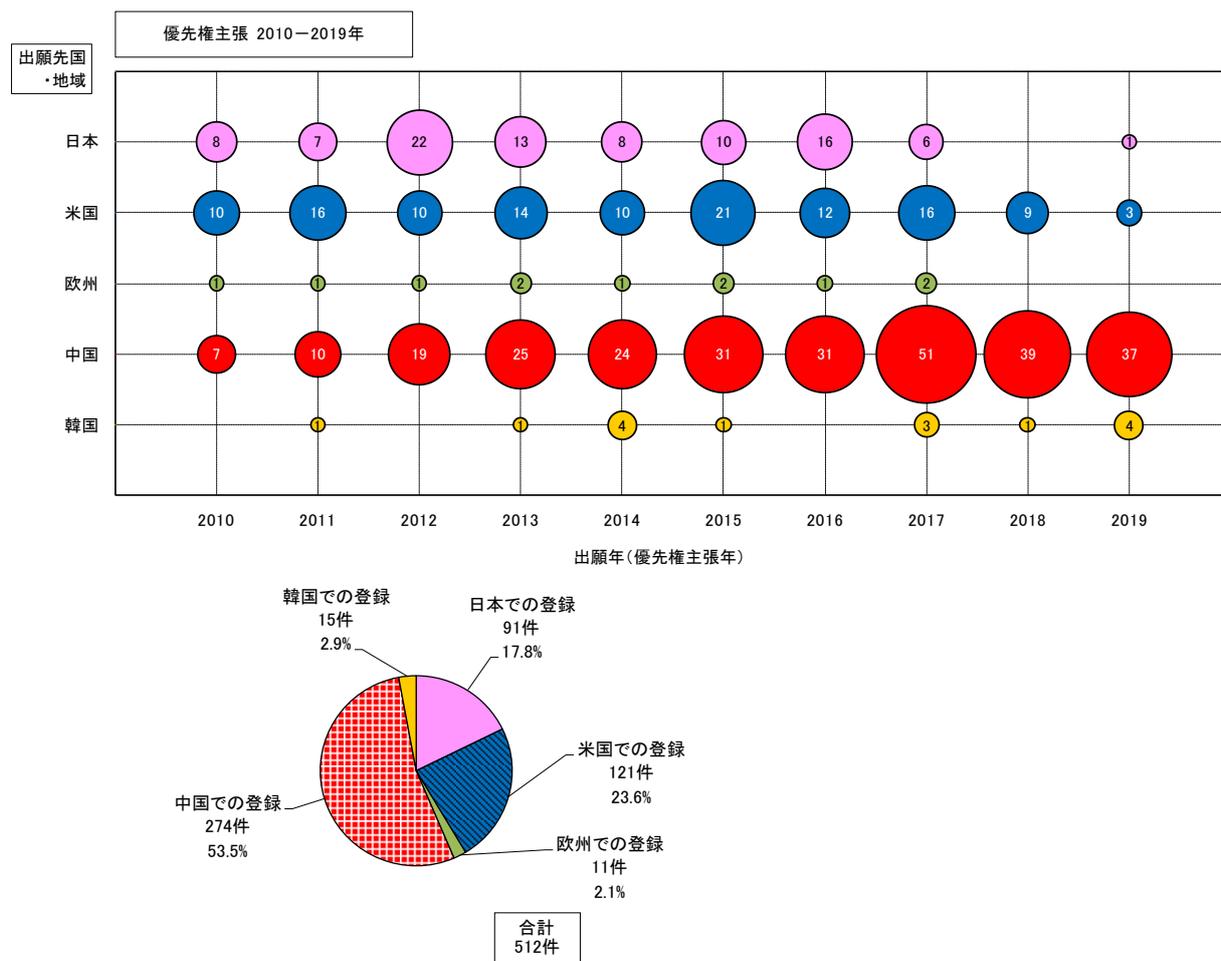


注) 調査時点で審査請求前や審査中の出願が存在するため、2019 年に近づくにつれて件数が減少することに注意すること。

5. 光子検出器

光子検出器の出願先国別登録件数推移及び登録件数比率を図 4-2-25 に示す。登録件数(2010～2019年)の合計は512件で、登録先国別で最も多いのは中国での登録の274件で全体の53.5%を占めている。次いで、米国での登録が121件(23.6%)、日本での登録が91件(17.8%)、韓国での登録が15件(2.9%)、欧州での登録が11件(2.1%)である。中国が重視されていることが分かる。2013～2019年の中国での登録が多い。

図 4-2-25 光子検出器－[出願先：日米欧中韓] 出願先国別登録件数推移及び登録件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

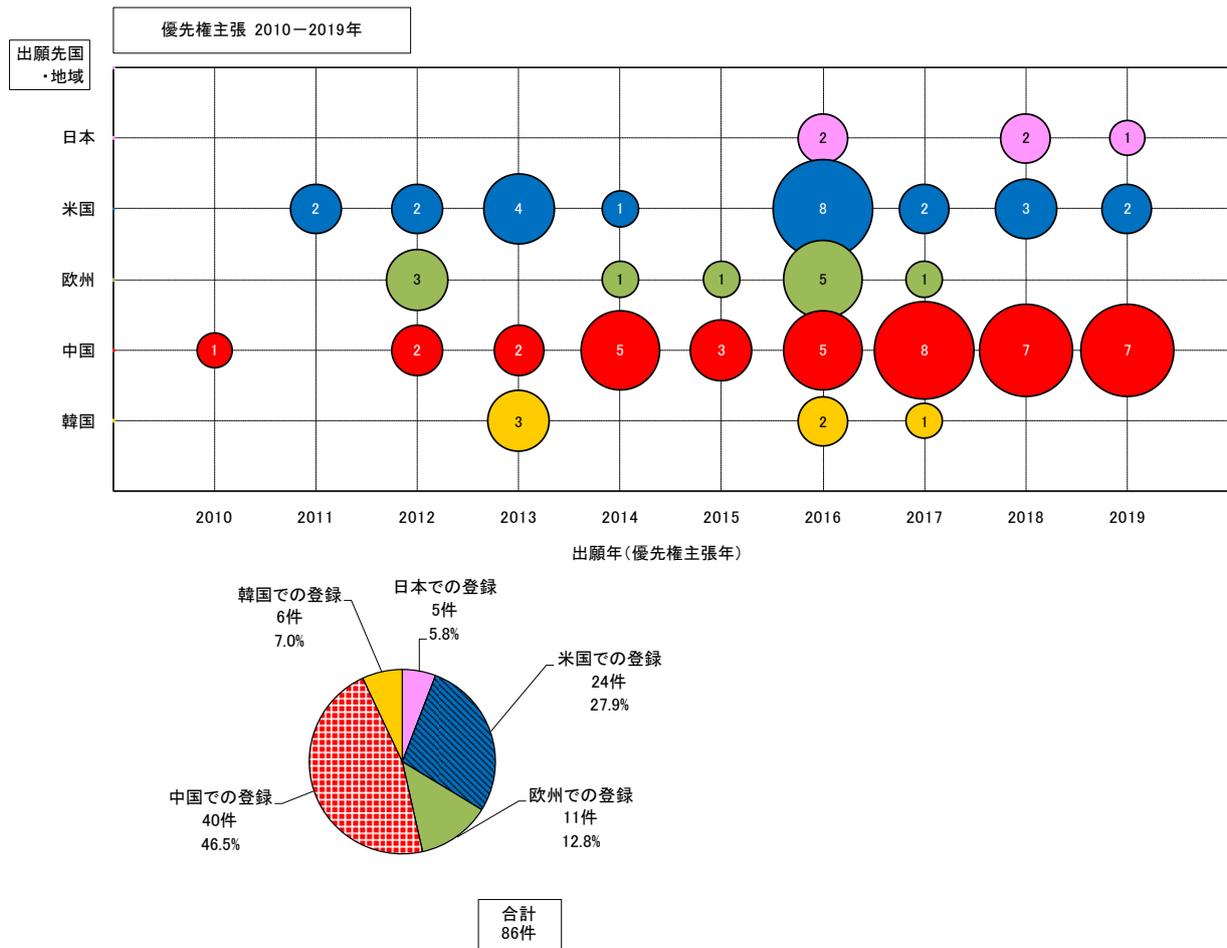


注) 調査時点で審査請求前や審査中の出願が存在するため、2019年に近づくにつれて件数が減少することに注意すること。

6. 量子慣性センサ

量子慣性センサの出願先国別登録件数推移及び登録件数比率を図 4-2-26 に示す。登録件数（2010～2019 年）の合計は 86 件で、登録先国別で最も多いのは中国での登録の 40 件で全体の 46.5%を占めている。次いで、米国での登録が 24 件（27.9%）、欧州での登録が 11 件（12.8%）、韓国での登録が 6 件（7.0%）、日本での登録が 5 件（5.8%）である。中国が重視されていることが分かる。2017～2019 年の中国での登録が多い。

図 4-2-26 量子慣性センサー [出願先：日米欧中韓] 出願先国別登録件数推移及び登録件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

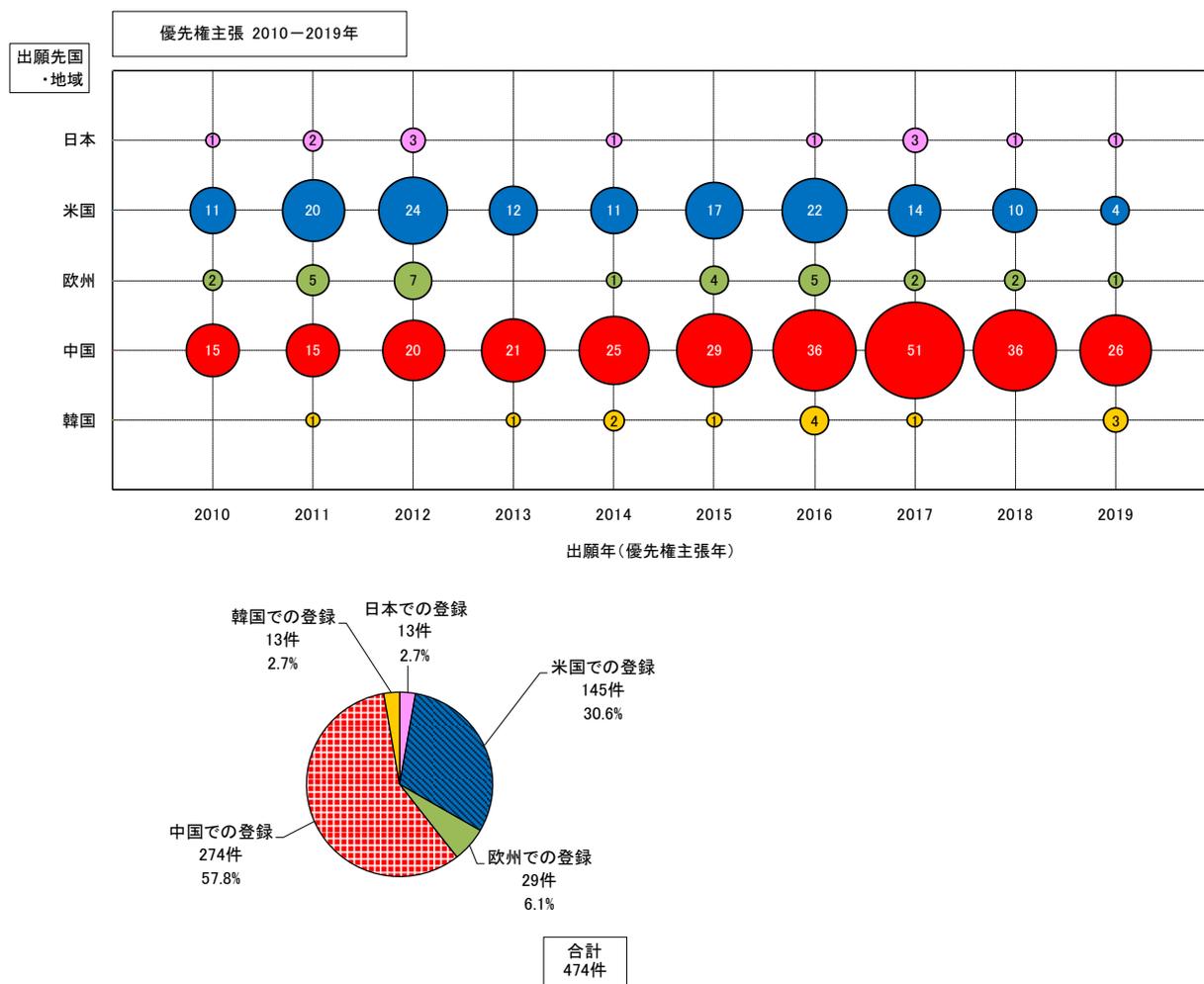


注) 調査時点で審査請求前や審査中の出願が存在するため、2019 年に近づくにつれて件数が減少することに注意すること。

7. 光格子時計

光格子時計の出願先国別登録件数推移及び登録件数比率を図 4-2-27 に示す。登録件数(2010～2019年)の合計は474件で、登録先国別で最も多いのは中国での登録の274件で全体の57.8%を占めている。次いで、米国での登録が145件(30.6%)、欧州での登録が29件(6.1%)、日本での登録が13件(2.7%)、韓国での登録が13件(2.7%)である。中国が重視されていることが分かる。2013～2019年の中国での登録が多い。

図 4-2-27 光格子時計－[出願先：日米欧中韓] 出願先国別登録件数推移及び登録件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

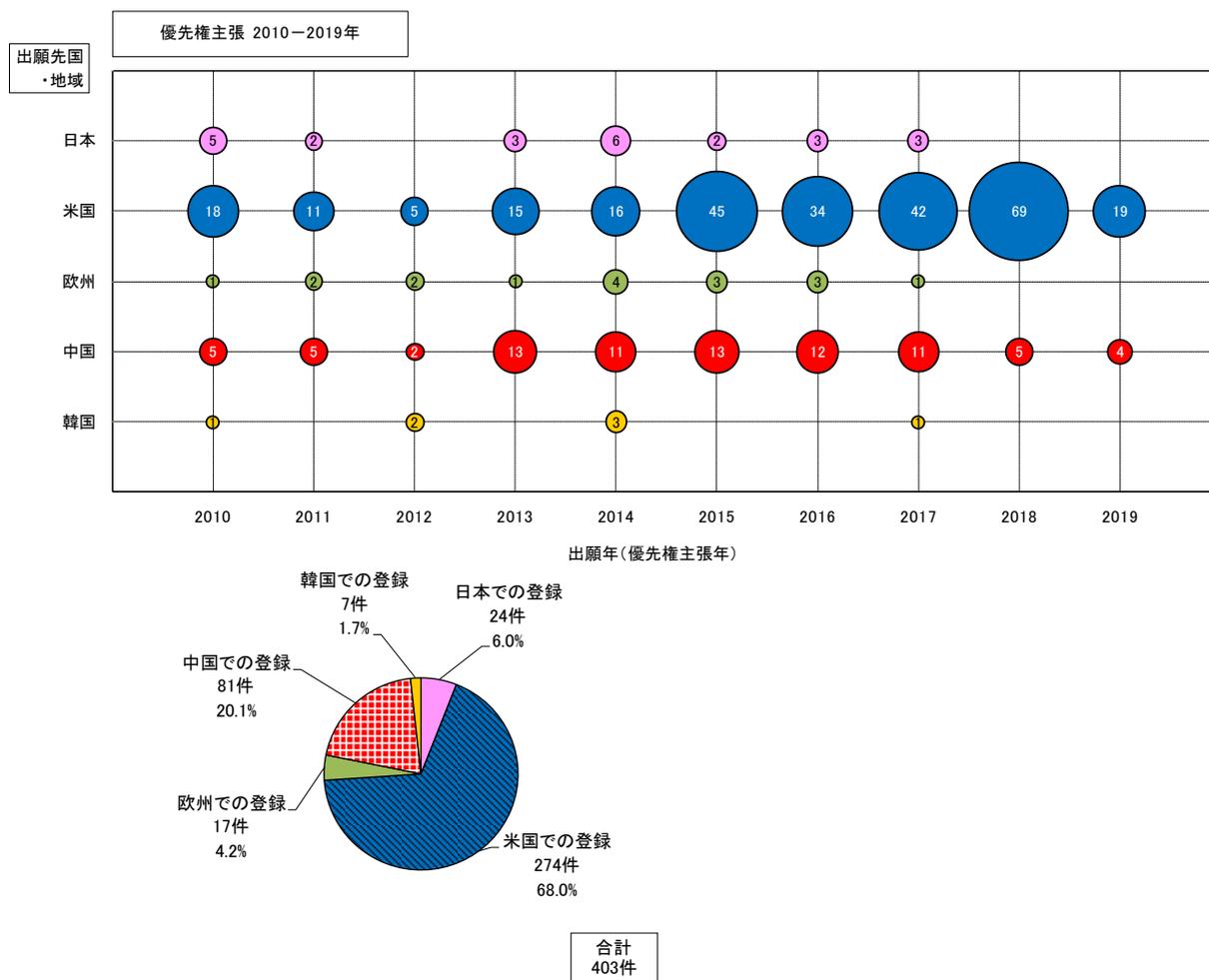


注) 調査時点で審査請求前や審査中の出願が存在するため、2019年に近づくにつれて件数が減少することに注意すること。

8. その他技術

その他技術（SQUID）の出願先国別登録件数推移及び登録件数比率を図 4-2-28 に示す。登録件数（2010～2019 年）の合計は 403 件で、登録先国別で最も多いのは米国での登録の 274 件で全体の 68.0%を占めている。次いで、中国での登録が 81 件(20.1%)、日本での登録が 24 件(6.0%)、欧州での登録が 17 件(4.2%)、韓国での登録が 7 件(1.7%)である。米国が重視されていることが分かる。

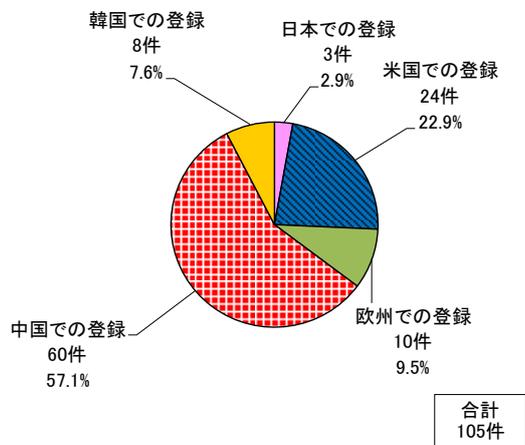
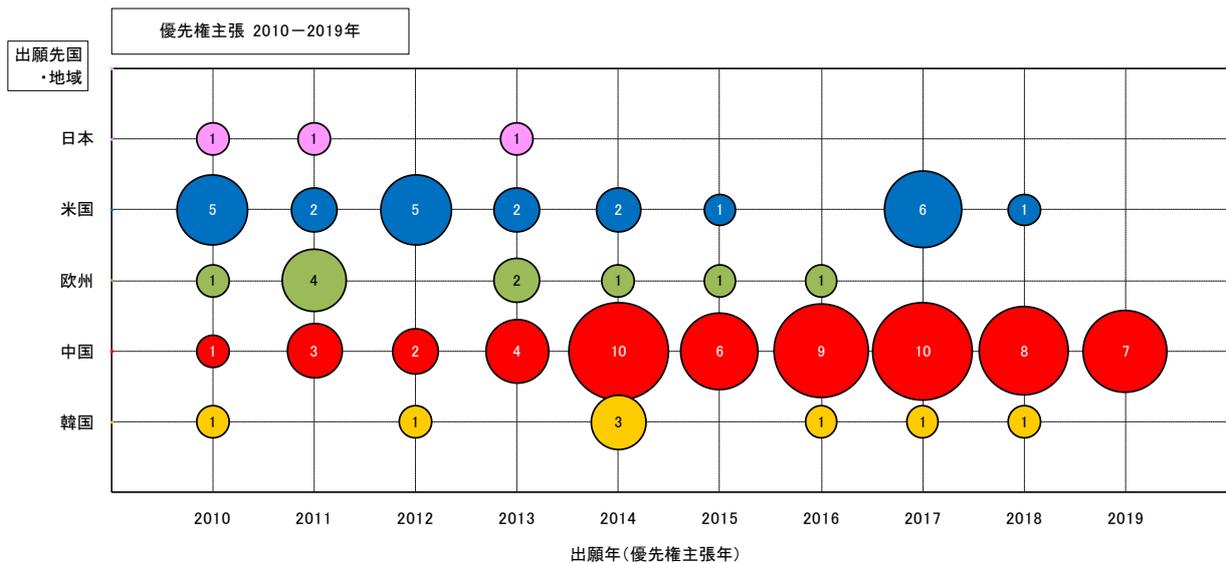
図 4-2-28 その他技術（SQUID）－ [出願先：日米欧中韓] 出願先国別登録件数推移及び登録件数比率
（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



注) 調査時点で審査請求前や審査中の出願が存在するため、2019 年に近づくにつれて件数が減少することに注意すること。

その他技術（超核偏極技術）の出願先国別登録件数推移及び登録件数比率を図 4-2-29 に示す。登録件数（2010～2019 年）の合計は 105 件で、登録先国別で最も多いのは中国での登録の 60 件で全体の 57.1%を占めている。次いで、米国での登録が 24 件(22.9%)、欧州での登録が 10 件(9.5%)、韓国での登録が 8 件(7.6%)、日本での登録が 3 件(2.9%)である。中国が重視されていることが分かる。2013～2019 年の中国での登録が多い。

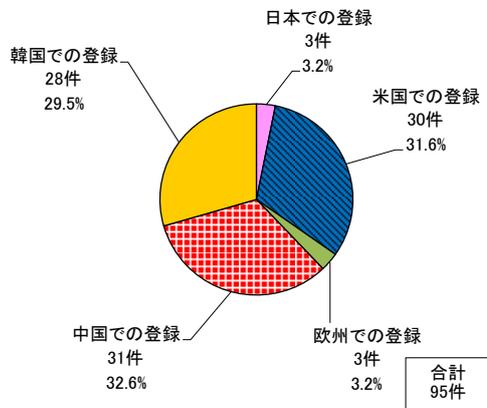
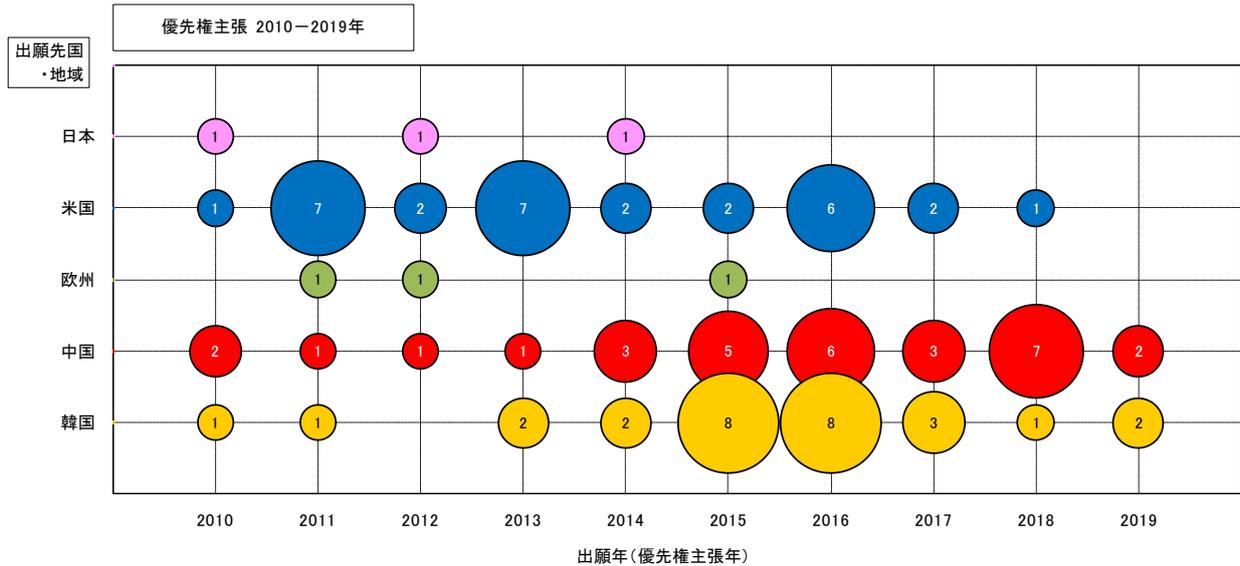
図 4-2-29 その他技術（超核偏極技術）－ [出願先：日米欧中韩] 出願先国別登録件数推移及び登録件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



注) 調査時点で審査請求前や審査中の出願が存在するため、2019 年に近づくにつれて件数が減少することに注意すること。

その他技術（フォノンセンシング）の出願先国別登録件数推移及び登録件数比率を図 4-2-30 に示す。登録件数（2010～2019 年）の合計は 95 件で、登録先国別で最も多いのは中国での登録の 31 件で全体の 32.6%を占めている。次いで、米国での登録が 30 件(31.6%)、韓国での登録が 28 件(29.5%)、欧州での登録が 3 件(3.2%)、日本での登録が 3 件(3.2%)である。

図 4-2-30 その他技術（フォノンセンシング）－ [出願先：日米欧中韓] 出願先国別登録件数推移及び登録件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



注) 調査時点で審査請求前や審査中の出願が存在するため、2019 年に近づくにつれて件数が減少することに注意すること。

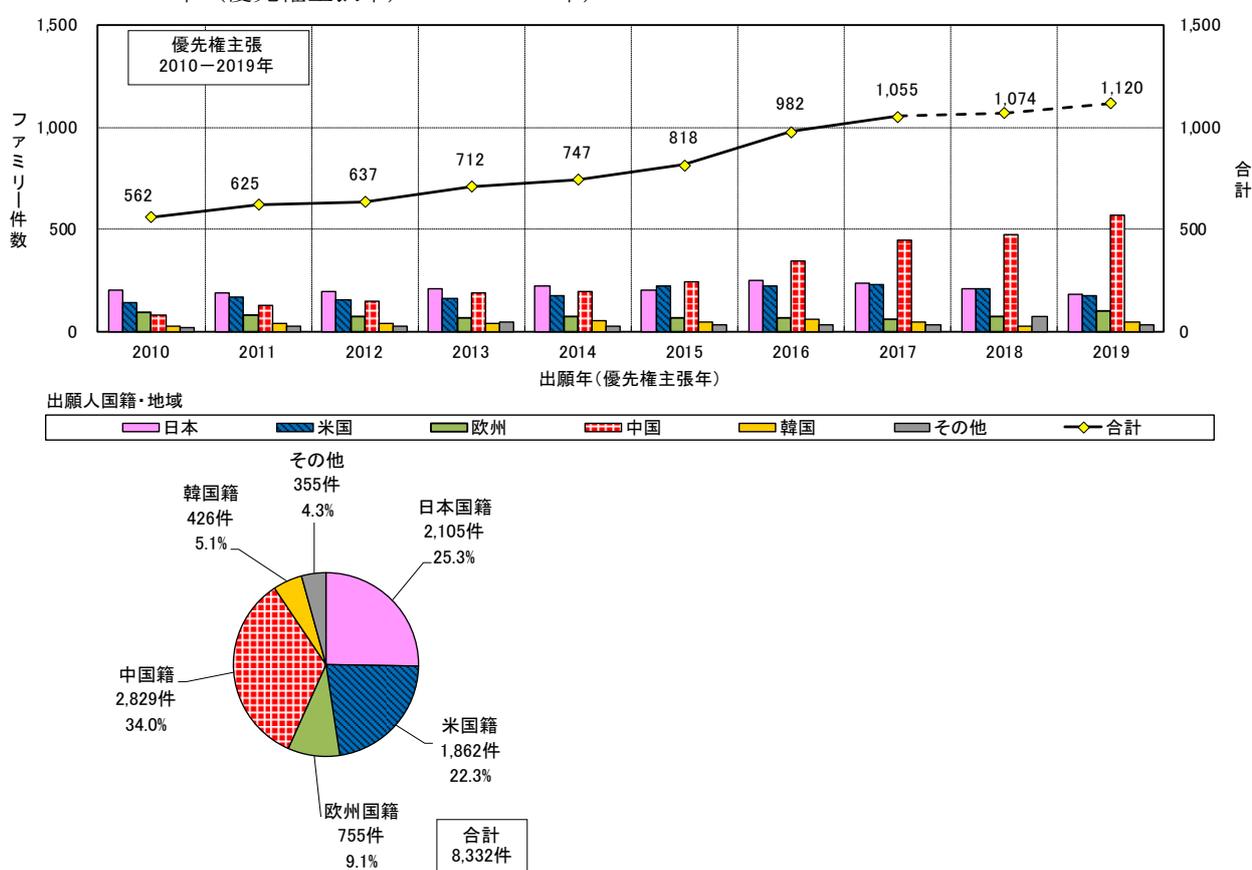
第4節 [出願先：日米欧中韓] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率

量子計測・センシング技術の出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を示す。国ごとの状況を見ることができる。

1. 全体

図4-2-31に量子計測・センシング技術全体の出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を示す。ファミリー件数（2010～2019年）の合計は8,332件で、出願人国籍別で最も多いのは中国籍の2,829件で全体の34.0%を占めている。次いで、日本国籍の2,105件（25.3%）、米国籍が1,862件（22.3%）、欧州国籍が755件（9.1%）、韓国籍が426件（5.1%）、その他が355件（4.3%）である。2014～2019年にかけて中国籍が増加している。

図4-2-31 [出願先：日米欧中韓] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

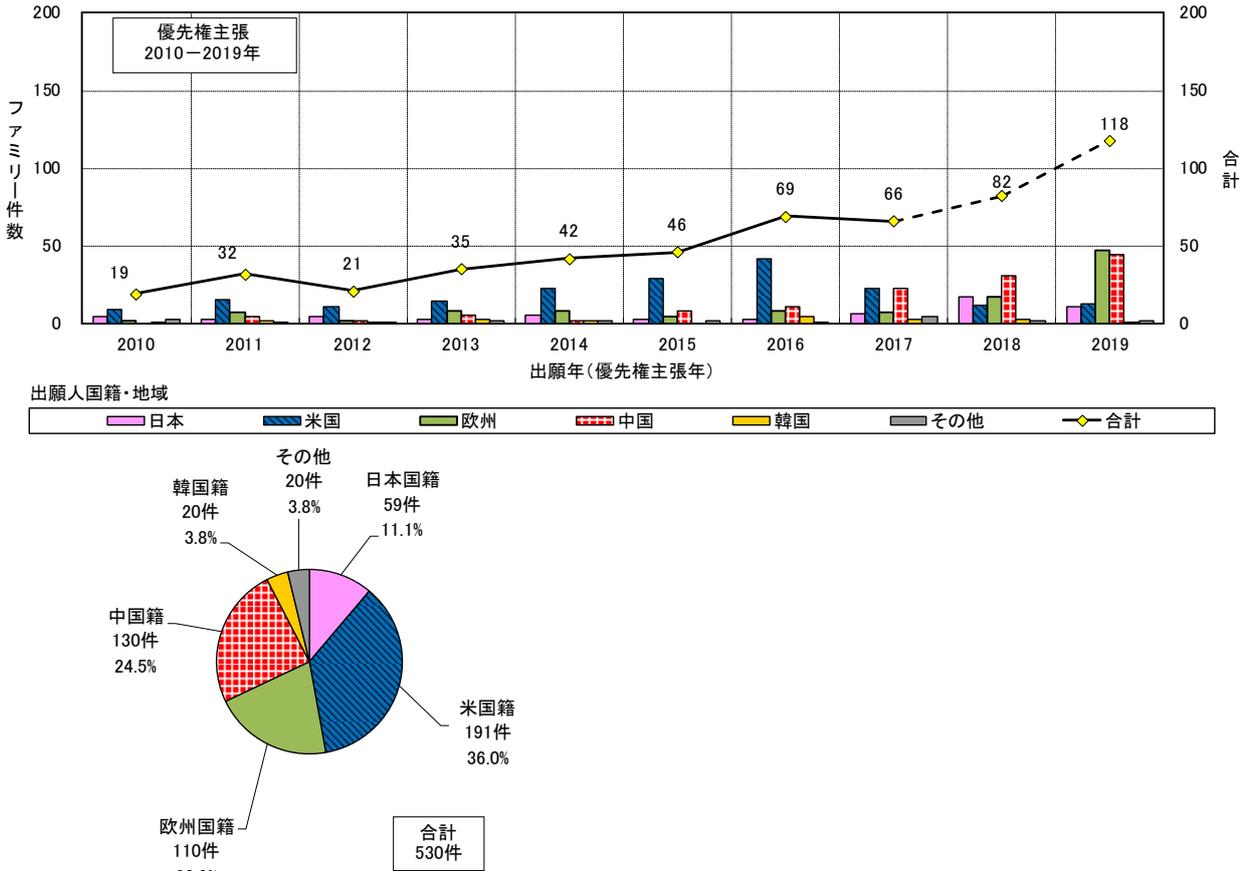


注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

2. 固体量子センサ

図 4-2-32 に固体量子センサー出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を示す。ファミリー件数（2010～2019年）の合計は530件で、出願人国籍別で最も多いのは米国籍の191件で全体の36.0%を占めている。次いで、中国籍の130件(24.5%)、欧州国籍が110件(20.8%)、日本国籍が59件(11.1%)、韓国籍が20件(3.8%)、その他が20件(3.8%)である。2015～2019年にかけて中国籍が増加している。

図 4-2-32 固体量子センサー [出願先：日米欧中韓] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

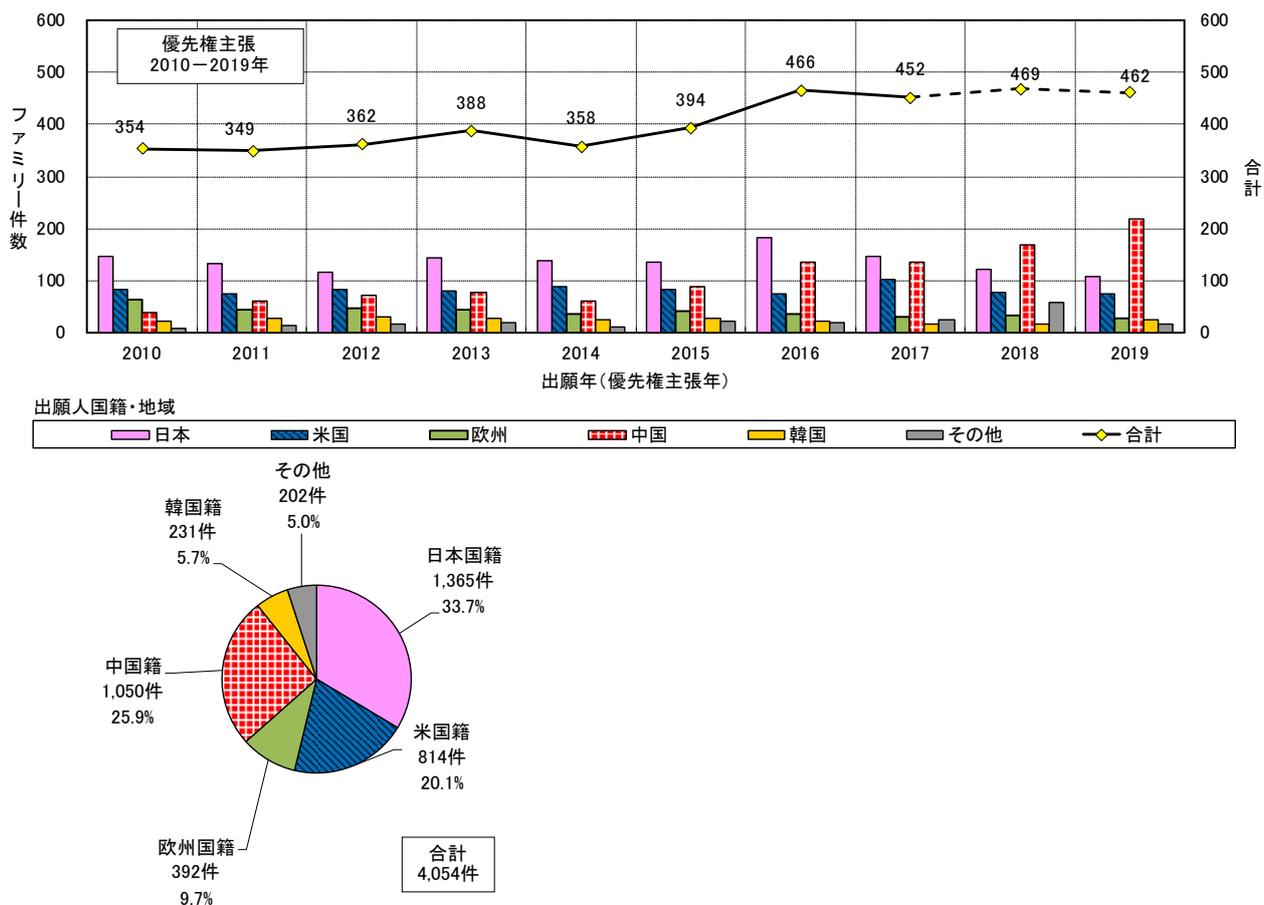


注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

3. 量子スピントロニクスセンサ

図 4-2-33 に量子スピントロニクスセンサー出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を示す。ファミリー件数（2010～2019年）の合計は4,054件で、出願人国籍別で最も多いのは日本国籍の1,365件で全体の33.7%を占めている。次いで、中国籍の1,050件(25.9%)、米国籍が814件(20.1%)、欧州国籍が392件(9.7%)、韓国籍が231件(5.7%)、その他が202件(5.0%)である。2014～2019年にかけて中国籍が増加している。

図 4-2-33 量子スピントロニクスセンサー [出願先：日米欧中韓] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率（出願年（優先権主張年）：2010～2019年）

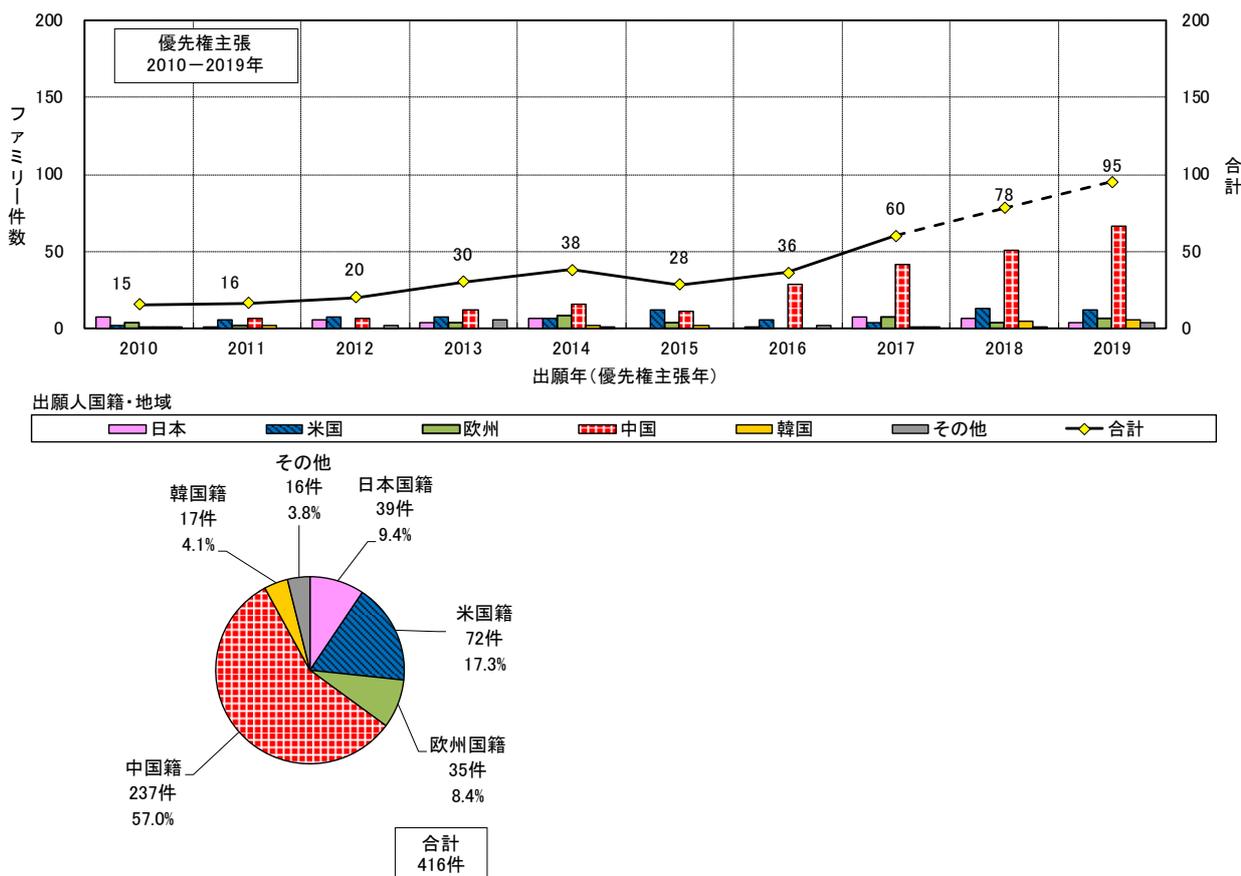


注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

4. 量子もつれ光センサ

図 4-2-34 に量子もつれ光センサー出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を示す。ファミリー件数（2010～2019年）の合計は416件で、出願人国籍別で最も多いのは中国籍の237件で全体の57.0%を占めている。次いで、米国籍の72件(17.3%)、日本国籍が39件(9.4%)、欧州国籍が35件(8.4%)、韓国籍が17件(4.1%)、その他が16件(3.8%)である。2015～2019年にかけて中国籍が増加している。

図 4-2-34 量子もつれ光センサー [出願先：日米欧中韓] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

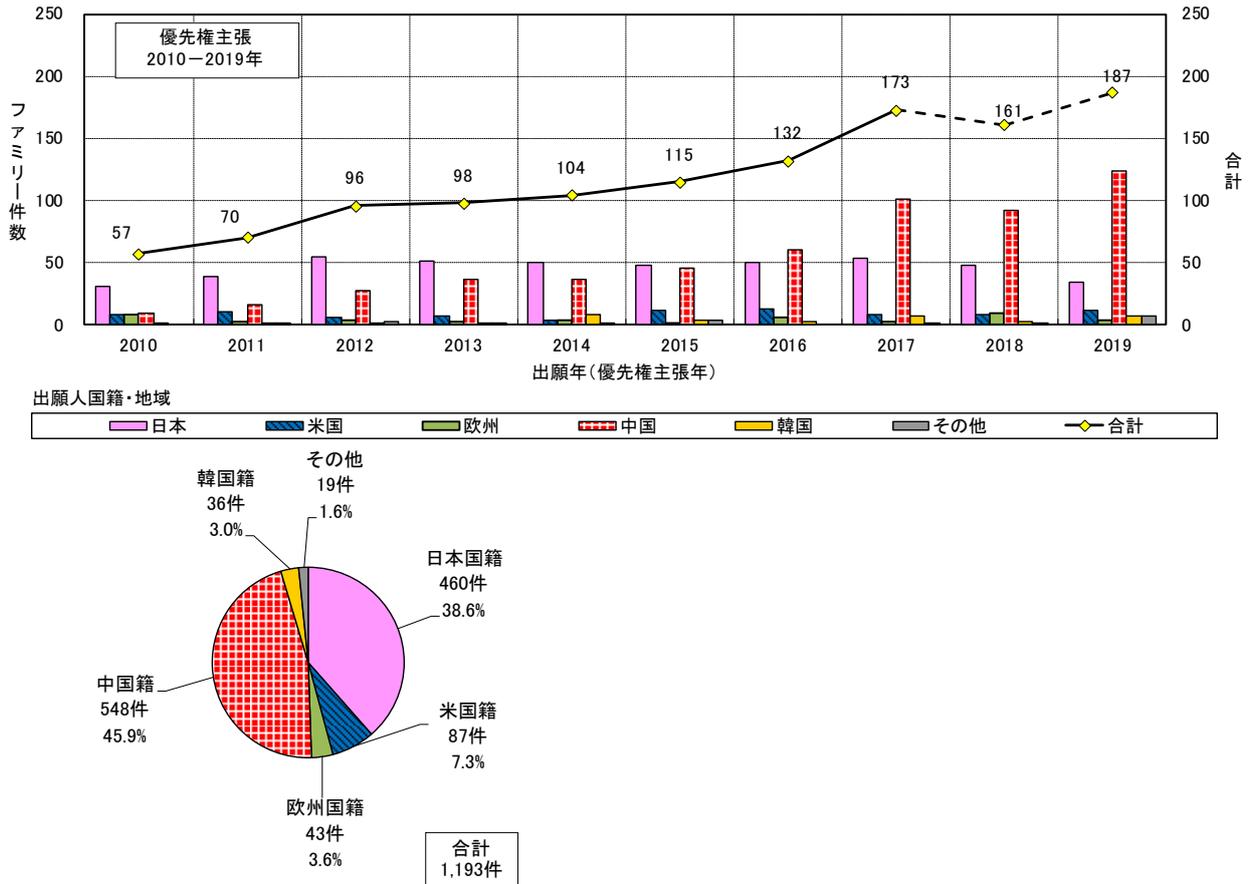


注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

5. 光子検出器

図 4-2-35 に光子検出器－出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を示す。ファミリー件数（2010－2019年）の合計は1,193件で、出願人国籍別で最も多いのは中国籍の548件で全体の45.9%を占めている。次いで、日本国籍の460件(38.6%)、米国籍が87件(7.3%)、欧州国籍が43件(3.6%)、韓国籍が36件(3.0%)、その他が19件(1.6%)である。2010～2019年にかけて中国籍が増加傾向である。

図 4-2-35 光子検出器－〔出願先：日米欧中韓〕出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

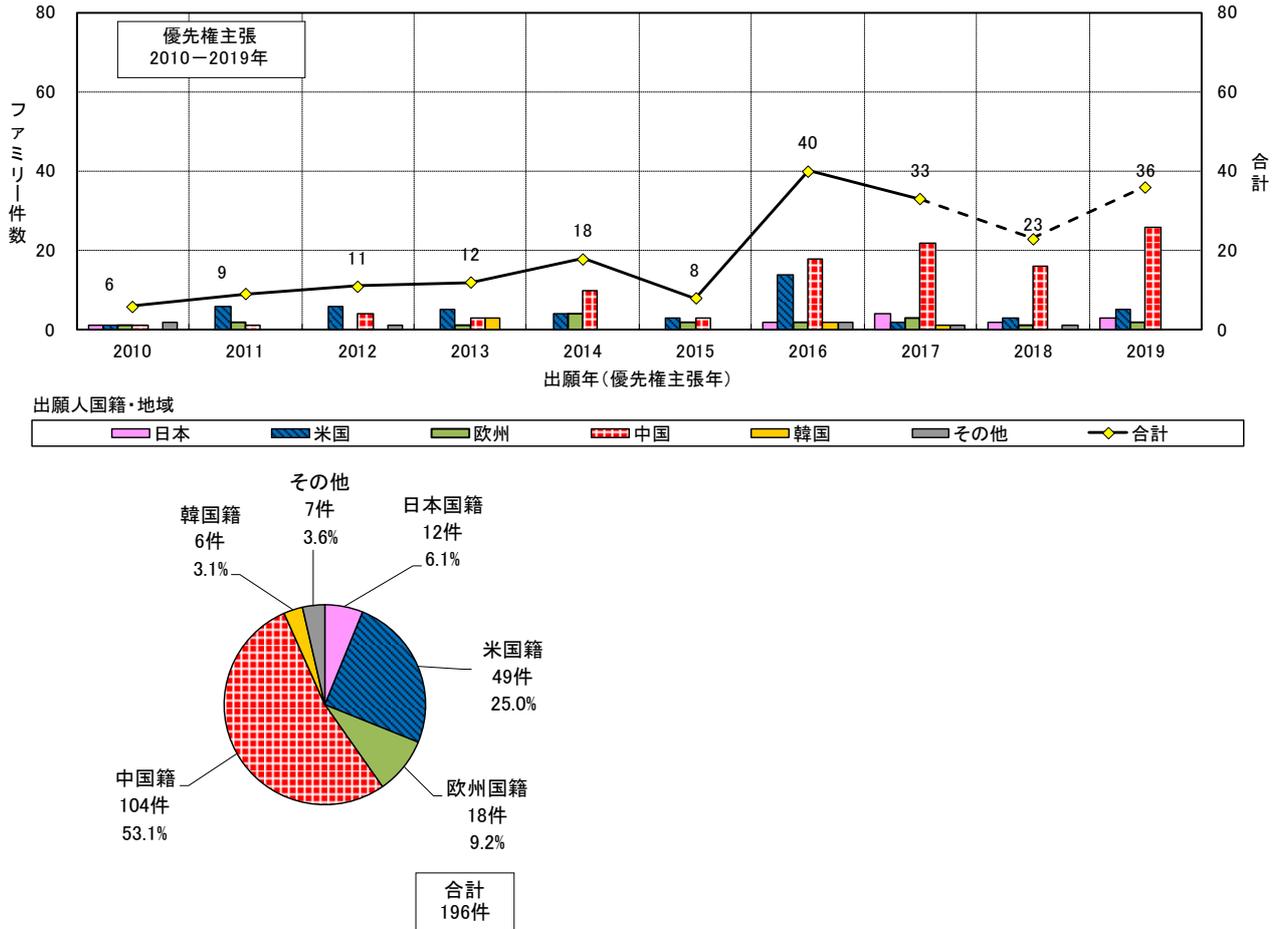


注)2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

6. 量子慣性センサ

図 4-2-36 に量子慣性センサー出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を示す。ファミリー件数（2010～2019年）の合計は196件で、出願人国籍別で最も多いのは中国籍の104件で全体の53.1%を占めている。次いで、米国籍の49件(25.0%)、欧州国籍が18件(9.2%)、日本国籍が12件(6.1%)、その他が7件(3.6%)、韓国籍が6件(3.1%)である。2015～2019年にかけて中国籍が増加傾向である。

図 4-2-36 量子慣性センサー[出願先：日米欧中韓] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

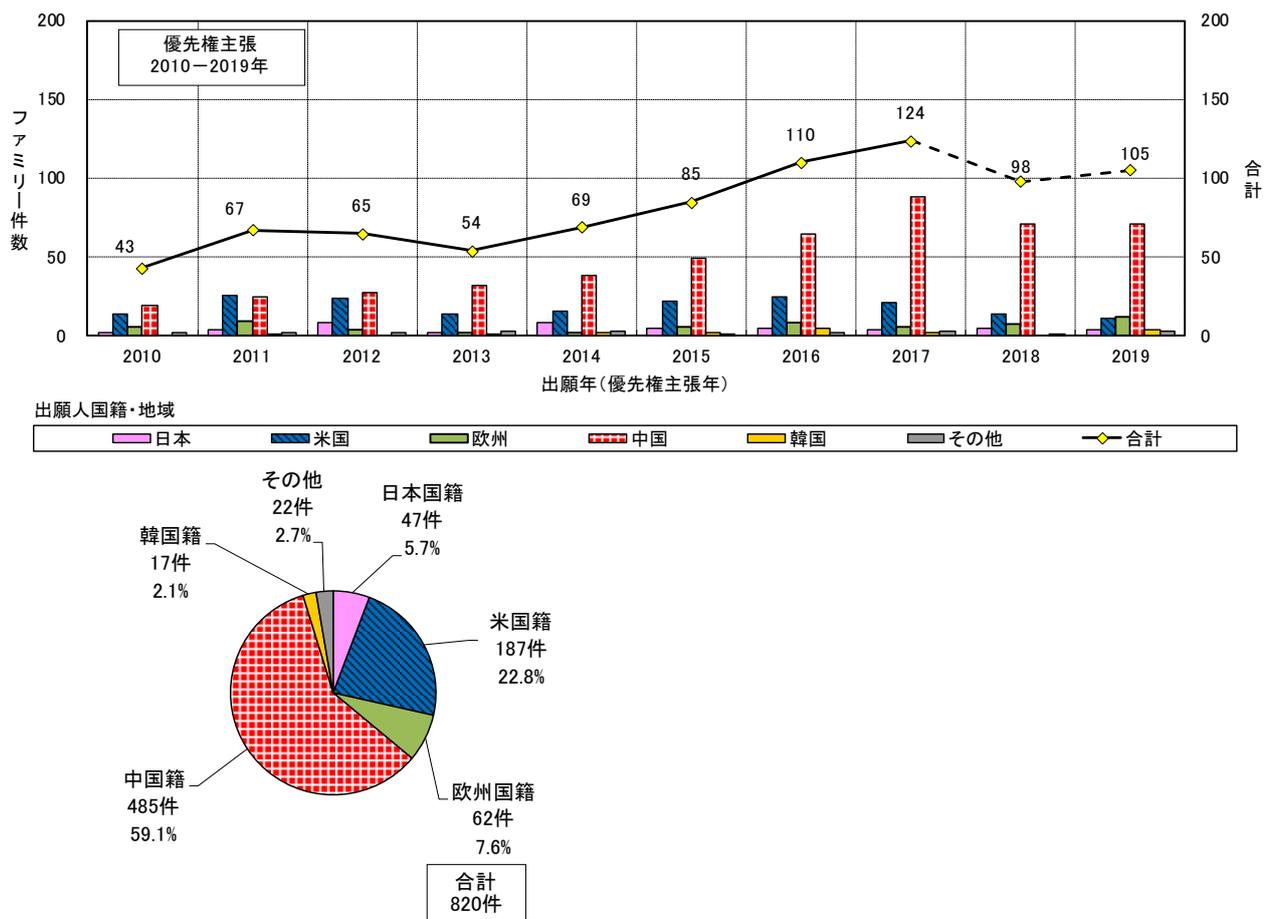


注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

7. 光格子時計

図 4-2-37 に光格子時計－出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を示す。ファミリー件数（2010－2019年）の合計は820件で、出願人国籍別で最も多いのは中国籍の485件で全体の59.1%を占めている。次いで、米国籍の187件(22.8%)、欧州国籍が62件(7.6%)、日本国籍が47件(5.7%)、その他が22件(2.7%)、韓国籍が17件(2.1%)である。中国籍の件数が多く2010～2017年にかけて増加している。

図 4-2-37 光格子時計－〔出願先：日米欧中韓〕出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

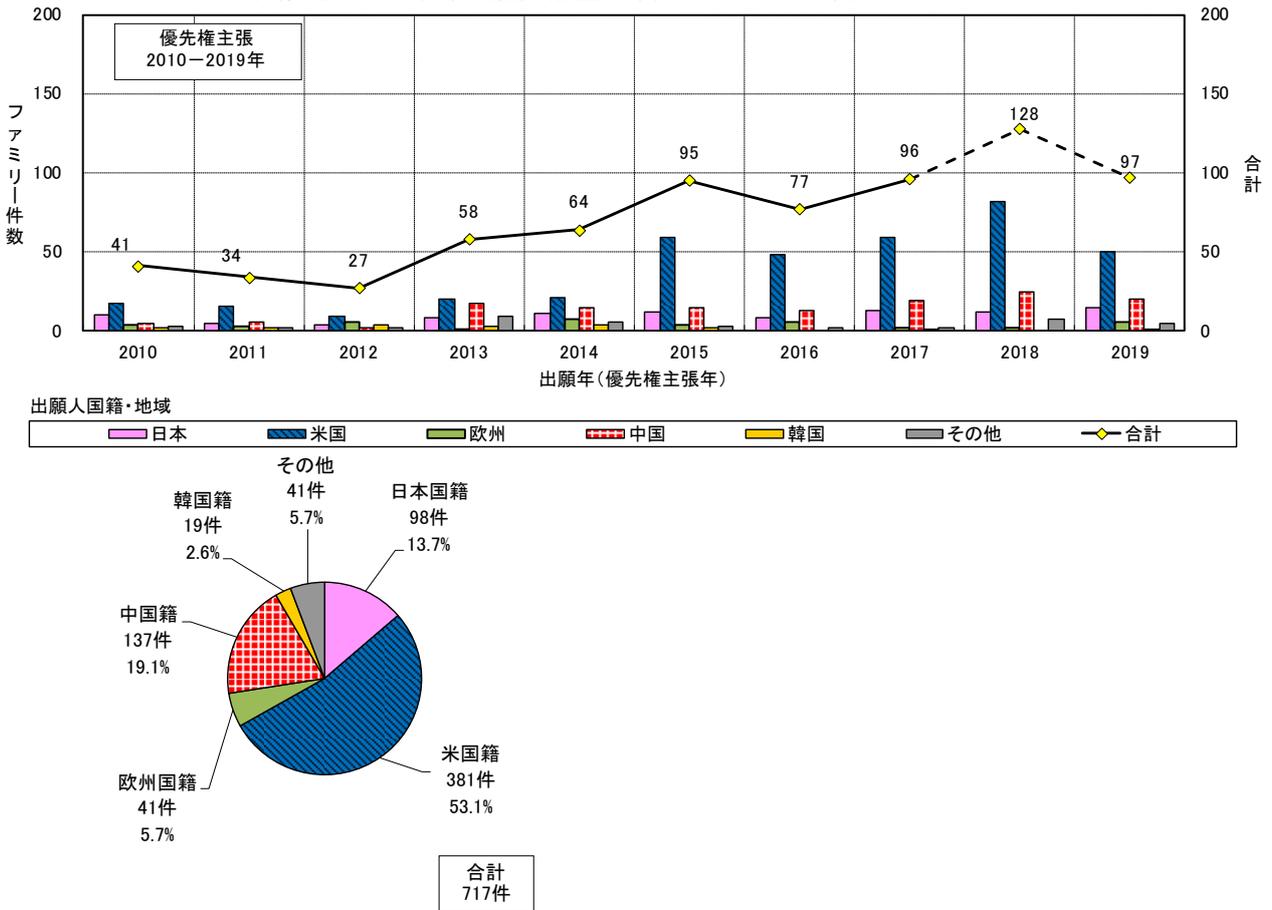


注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

8. その他技術

図 4-2-38 にその他技術（SQUID）－出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を示す。ファミリー件数（2010－2019年）の合計は717件で、出願人国籍別で最も多いのは米国籍の381件で全体の53.1%を占めている。次いで、中国籍の137件(19.1%)、日本国籍が98件(13.7%)、欧州国籍が41件(5.7%)、その他が41件(5.7%)、韓国籍が19件(2.6%)である。米国籍の件数が多く、2012～2018年にかけて増加傾向である。

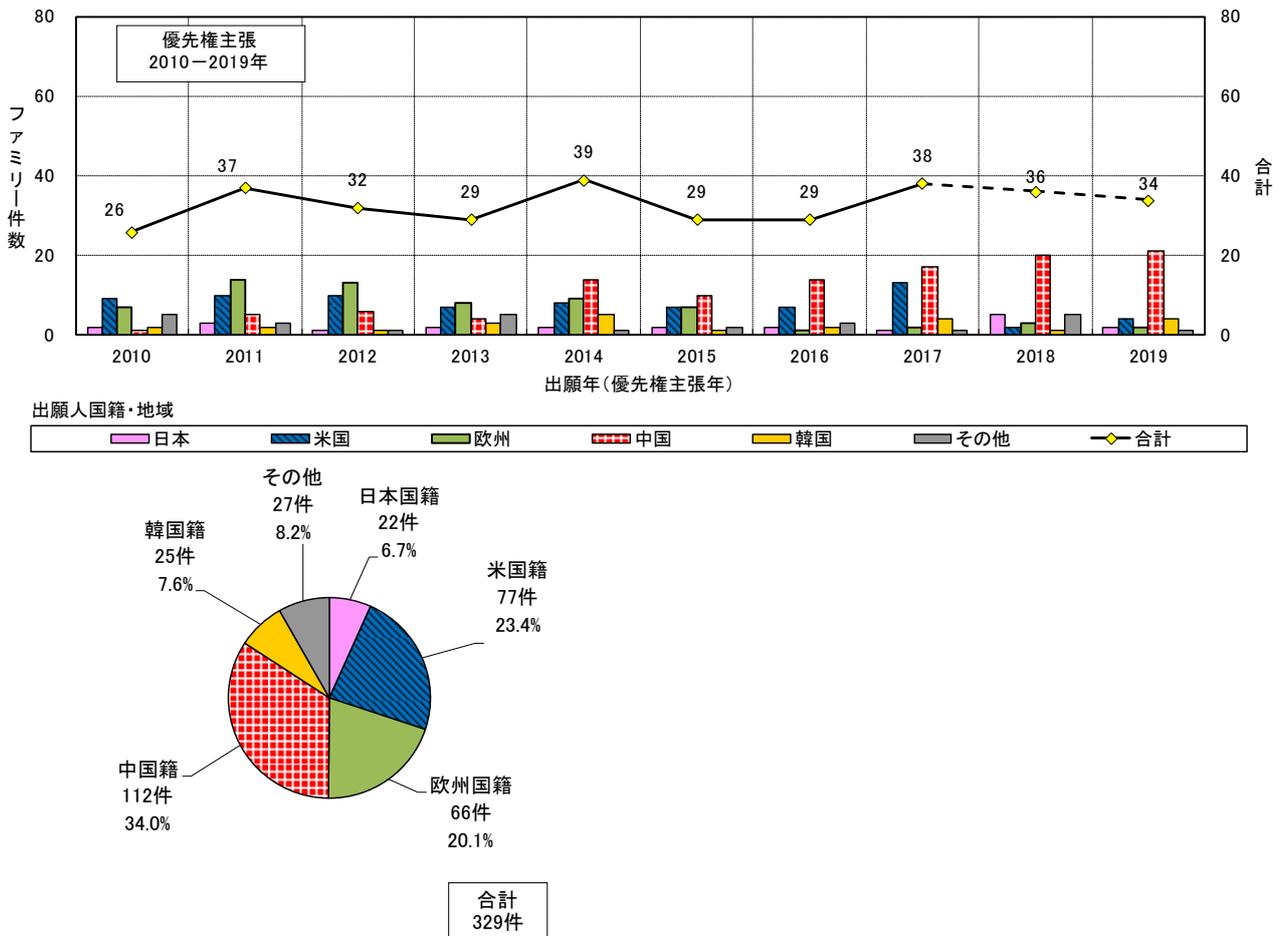
図 4-2-38 その他技術（SQUID）－〔出願先：日米欧中韓〕出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）



注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

図 4-2-39 にその他技術（超核偏極技術）一出願人国籍別ファミリー一件数推移及びファミリー一件数比率を示す。ファミリー一件数（2010-2019年）の合計は329件で、出願人国籍別で最も多いのは中国籍の112件で全体の34.0%を占めている。次いで、米国籍の77件(23.4%)、欧州国籍が66件(20.1%)、その他が27件(8.2%)、韓国籍が25件(7.6%)、日本国籍が22件(6.7%)である。

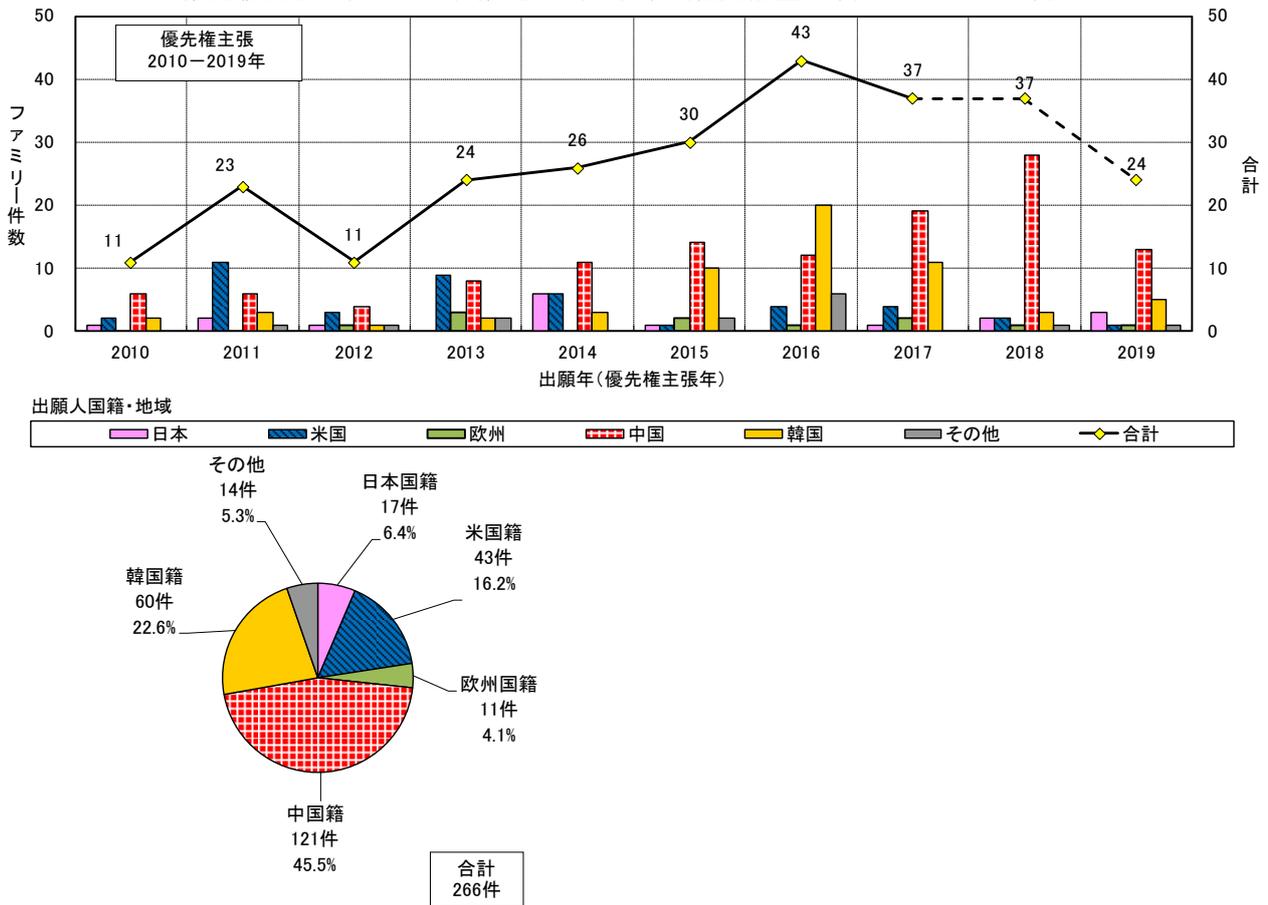
図 4-2-39 その他技術（超核偏極技術）－[出願先：日米欧中韓] 出願人国籍別ファミリー一件数推移及びファミリー一件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）



注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

図 4-2-40 にその他技術（フォノンセンシング）－出願人国籍別ファミリー一件数推移及びファミリー一件数比率を示す。ファミリー一件数（2010－2019年）の合計は266件で、出願人国籍別で最も多いのは中国籍の121件で全体の45.5%を占めている。次いで、韓国籍の60件（22.6%）、米国籍が43件（16.2%）、日本国籍が17件（6.4%）、欧州国籍が11件（4.1%）、その他が14件（5.3%）である。中国籍の件数が多く、2012～2018年にかけて増加している。

図 4-2-40 その他技術（フォノンセンシング）－ [出願先：日米欧中韓] 出願人国籍別ファミリー一件数推移及びファミリー一件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）



注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

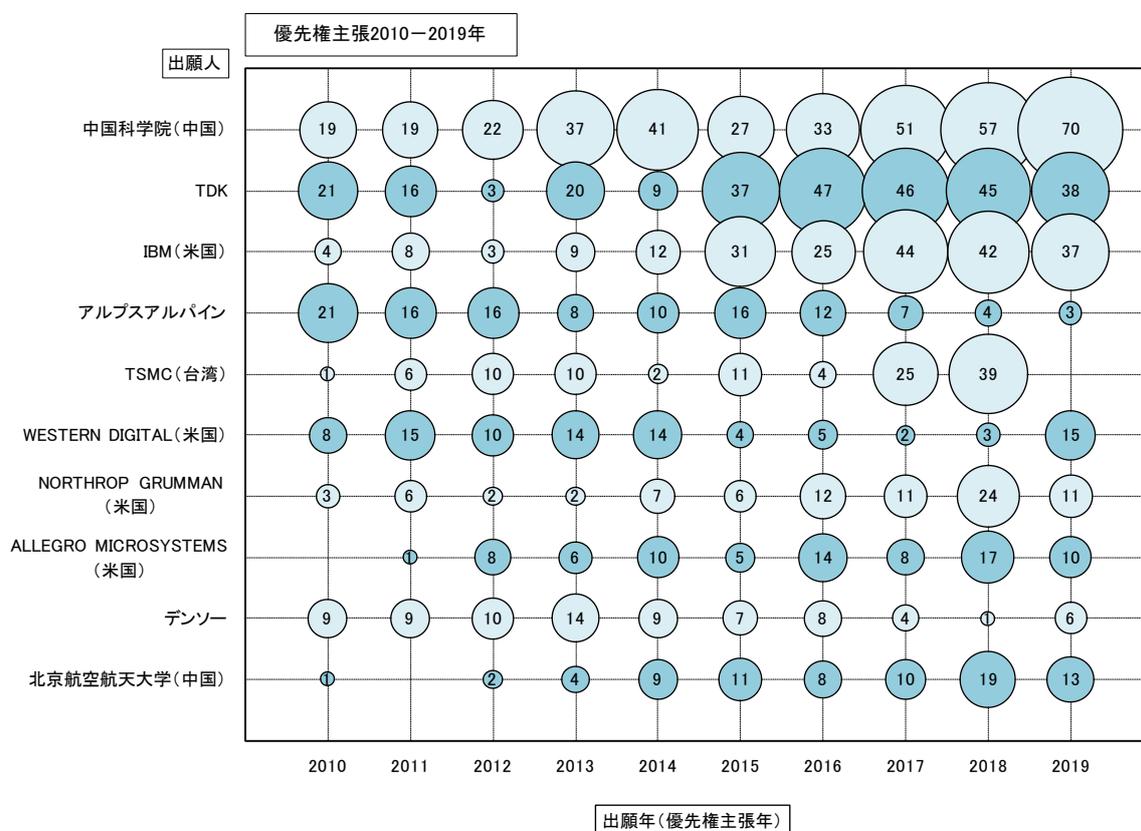
第5節 [出願先：日米欧中韓] 出願人別ファミリー一件数推移

量子計測・センシング技術の出願件数が上位の出願人について、出願人別ファミリー一件数推移を示す。上位の出願人の動向を見ることができる。

1. 全体

量子計測・センシング技術全体の上位の出願人別ファミリー一件数推移を図 4-2-41 に示す。中国科学院（中国）、TDK、IBM（米国）は、2015～2019 年にかけて出願が多い。TSMC は、2017、2018 年の出願が多い。

図 4-2-41 [出願先：日米欧中韓] 出願人別ファミリー一件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

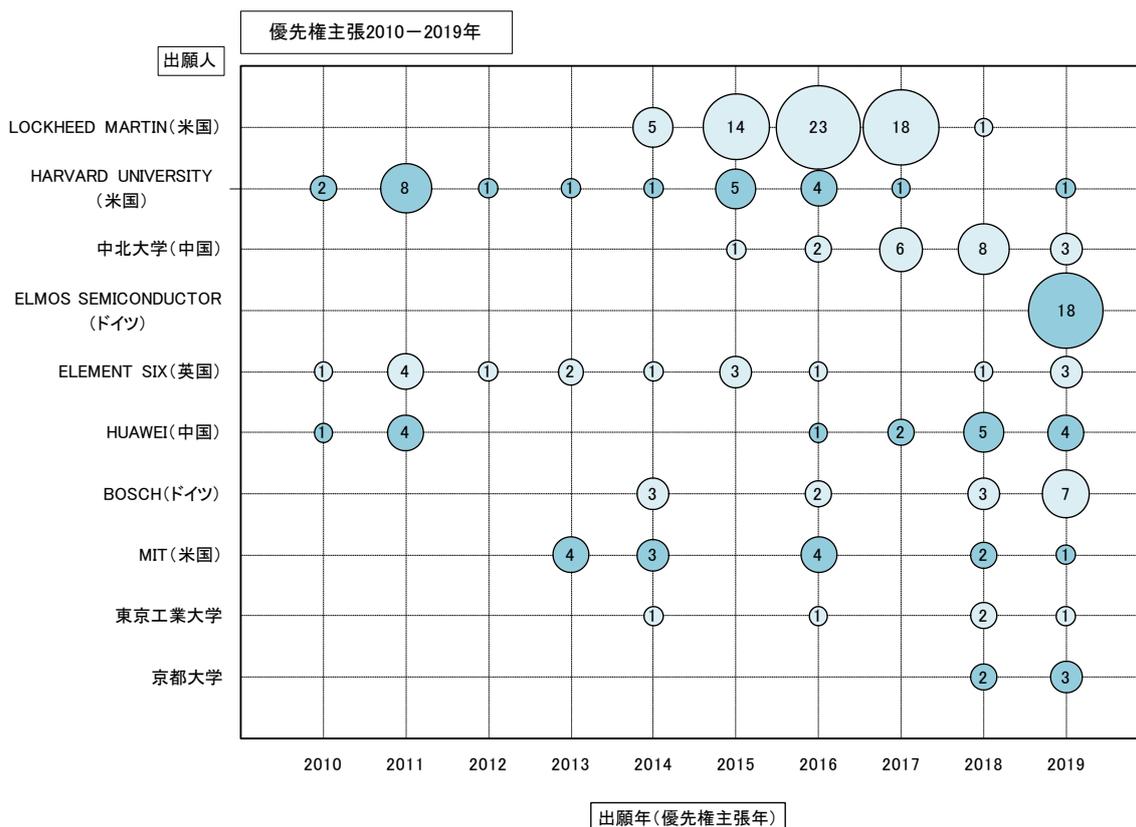


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

2. 固体量子センサ

固体量子センサの上位の出願人別ファミリー件数推移を図 4-2-42 に示す。Lockheed Martin (米国) は、2014～2017 年にかけて件数が多い。Harvard University (米国) は、2011、2015、2016 年の件数が多い。中北大学 (中国) は、2015～2018 年にかけて増加している。Elmos Semiconductor (ドイツ) は、2019 年に 18 件と多い。東京工業大学は、2014、2016、2018、2019 年に出願がある。

図 4-2-42 固体量子センサー [出願先：日米欧中韓] 出願人別ファミリー件数推移 (出願年 (優先権主張年)：2010-2019 年)

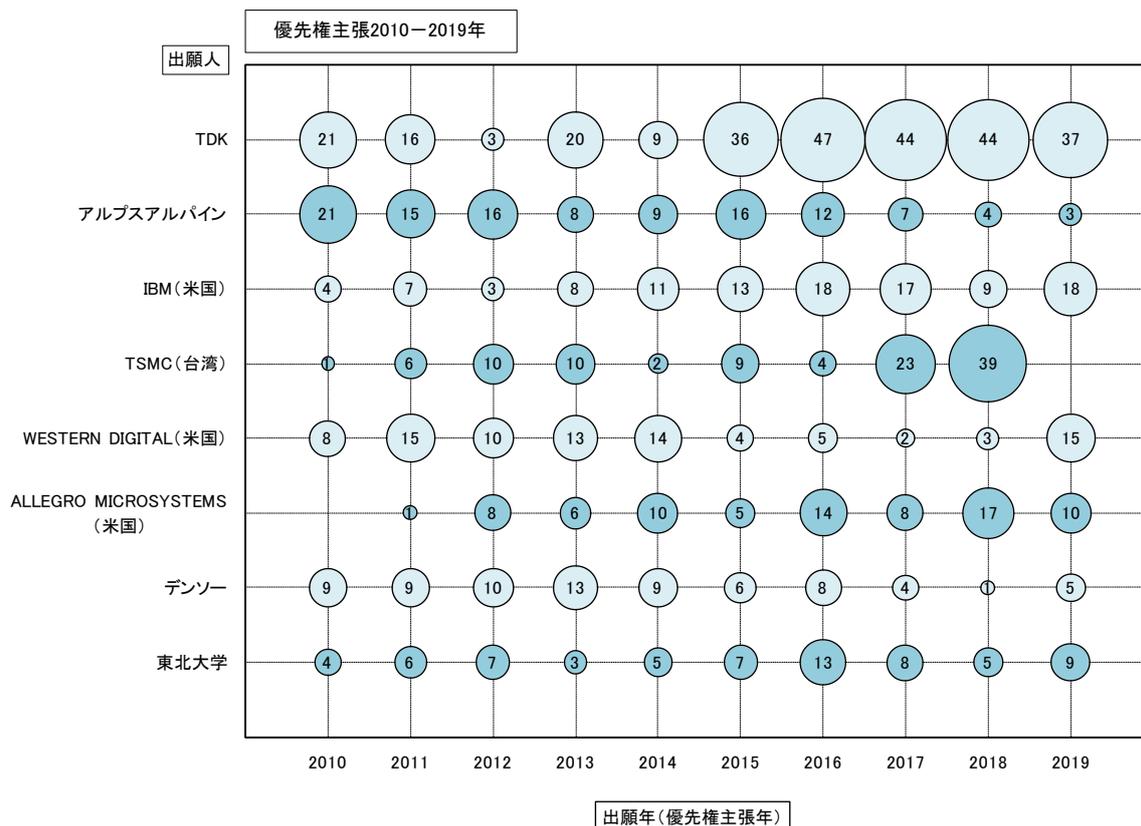


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

3. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサの上位の出願人別ファミリー件数推移を図 4-2-43 に示す。TDK は、2015～2019 年にかけて多い。アルプスアルパインは、2010～2016 年にかけて多い。IBM (米国) は、2014～2019 年にかけて多い。TSMC (台湾) は、2017、2018 年が多い。東北大学は、期間中コンスタントに出願がある。

図 4-2-43 量子スピントロニクスセンサー [出願先：日米欧中韓] 出願人別ファミリー件数推移 (出願年 (優先権主張年)：2010-2019 年)

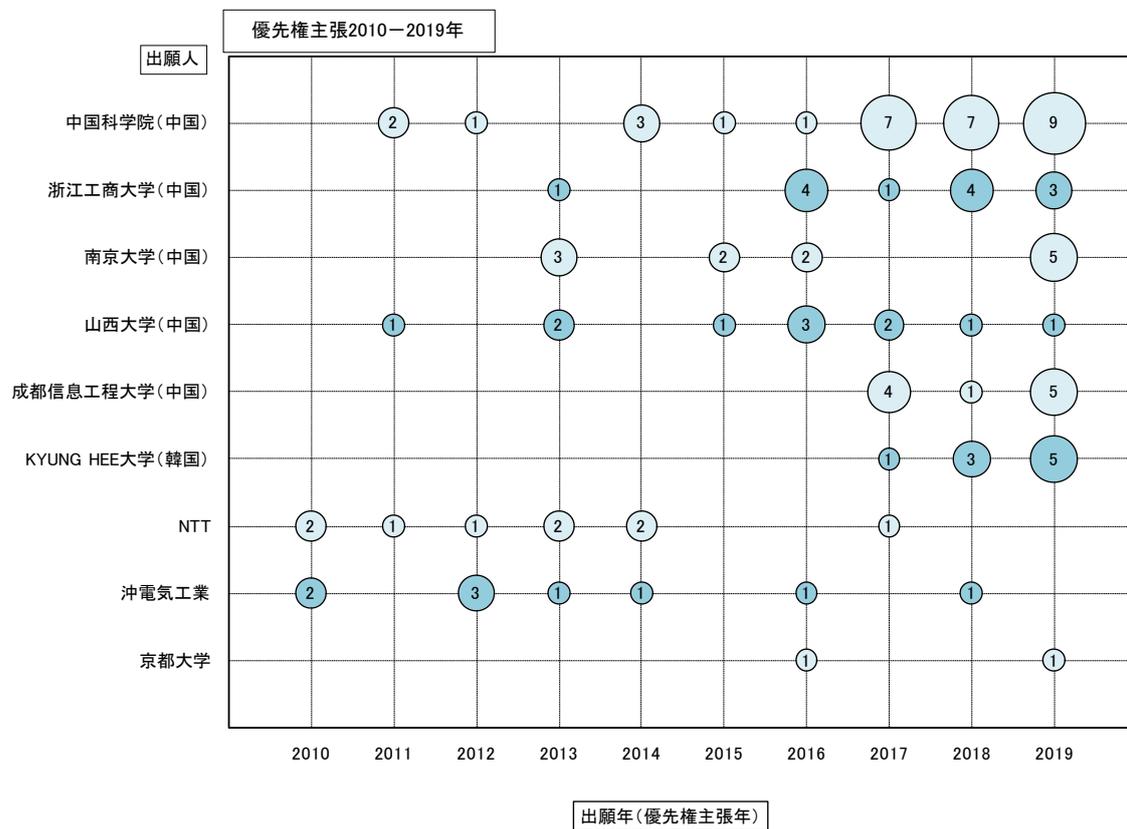


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

4. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサの上位の出願人別ファミリー件数推移を図 4-2-44 に示す。中国科学院（中国）、浙江工商大学（中国）、南京大学（中国）、山西大学（中国）、成都信息工程大学（中国）と上位は中国の大学である。

図 4-2-44 量子もつれ光センサー [出願先：日米欧中韓] 出願人別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

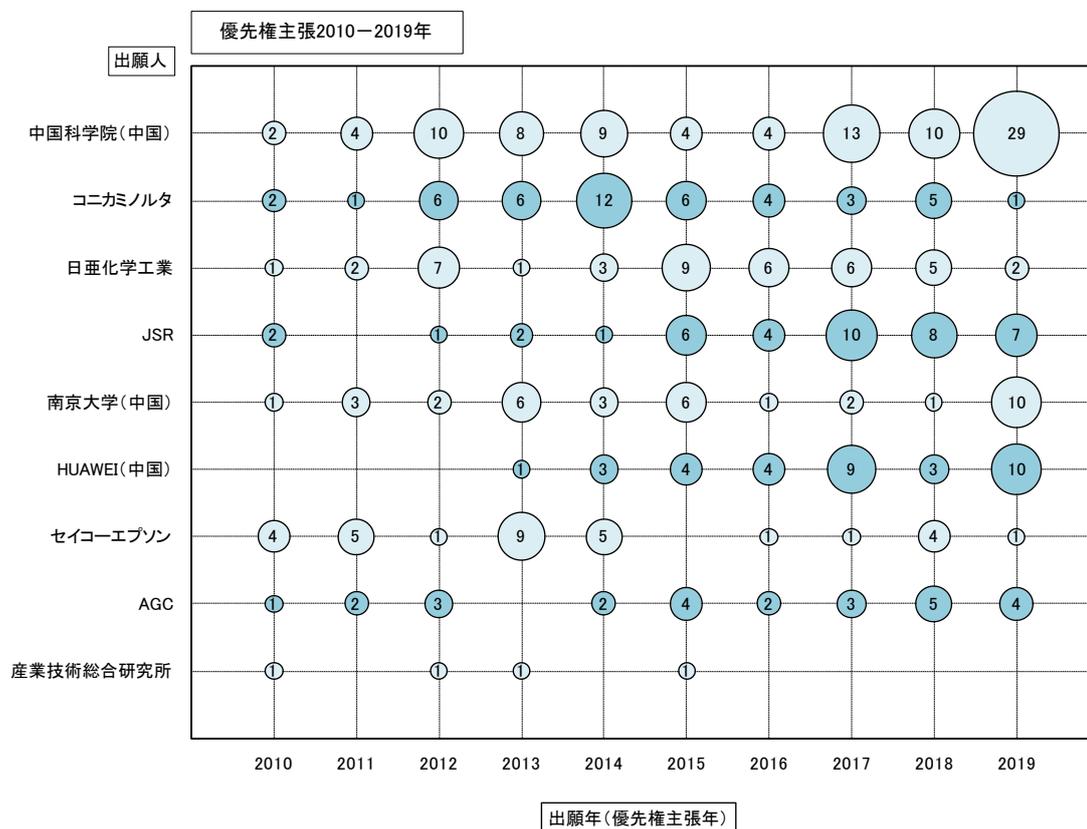


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

5. 光子検出器

光子検出器の上位の出願人別ファミリー一件数推移を図 4-2-45 に示す。中国科学院(中国)、コニカミノルタがコンスタントに出願しており、中国科学院(中国)は 2019 年の件数が多く、コニカミノルタは 2014 年が多い。

図 4-2-45 光子検出器－[出願先：日米欧中韓] 出願人別ファミリー一件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

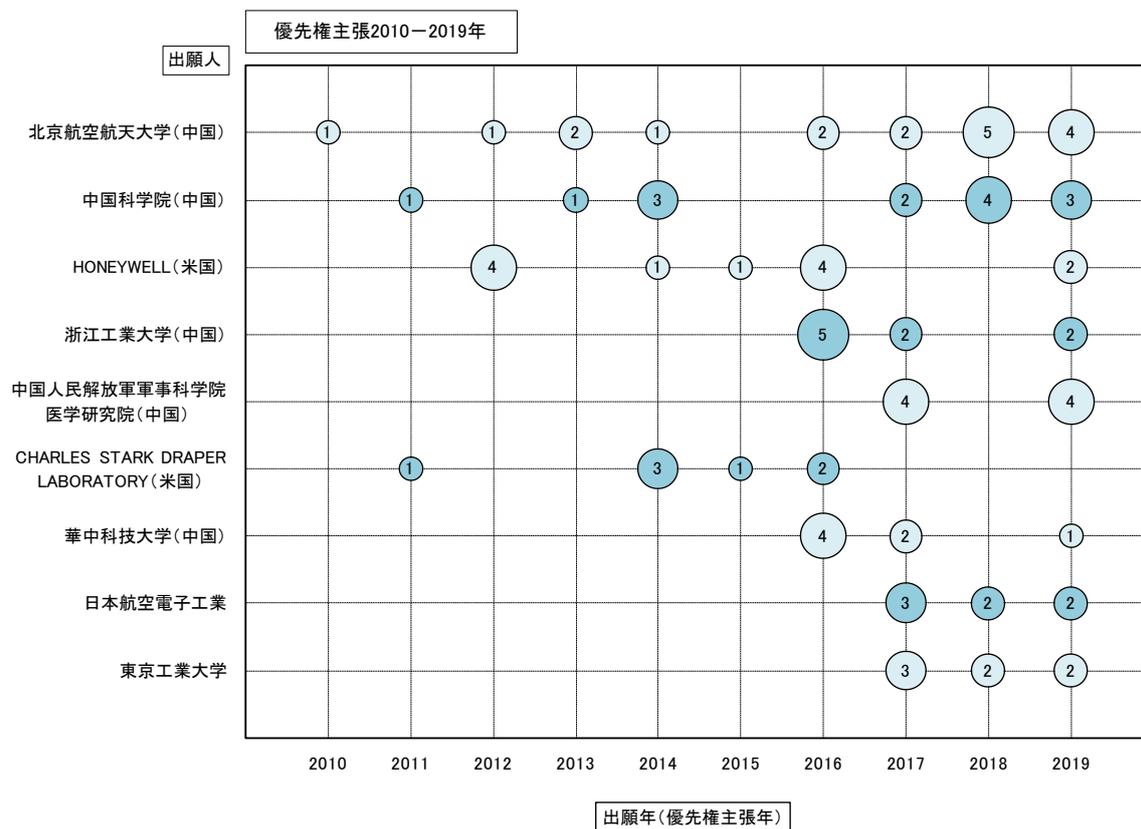


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

6. 量子慣性センサ

量子慣性センサの上位の出願人別ファミリー件数推移を図 4-2-46 に示す。北京航空航天大学（中国）が 2016～2019 年にかけて多い。中国科学院（中国）は 2017～2019 年にかけて多い。東京工業大学は、2017～2019 年にかけて出願がある。

図 4-2-46 量子慣性センサー [出願先：日米欧中韓] 出願人別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

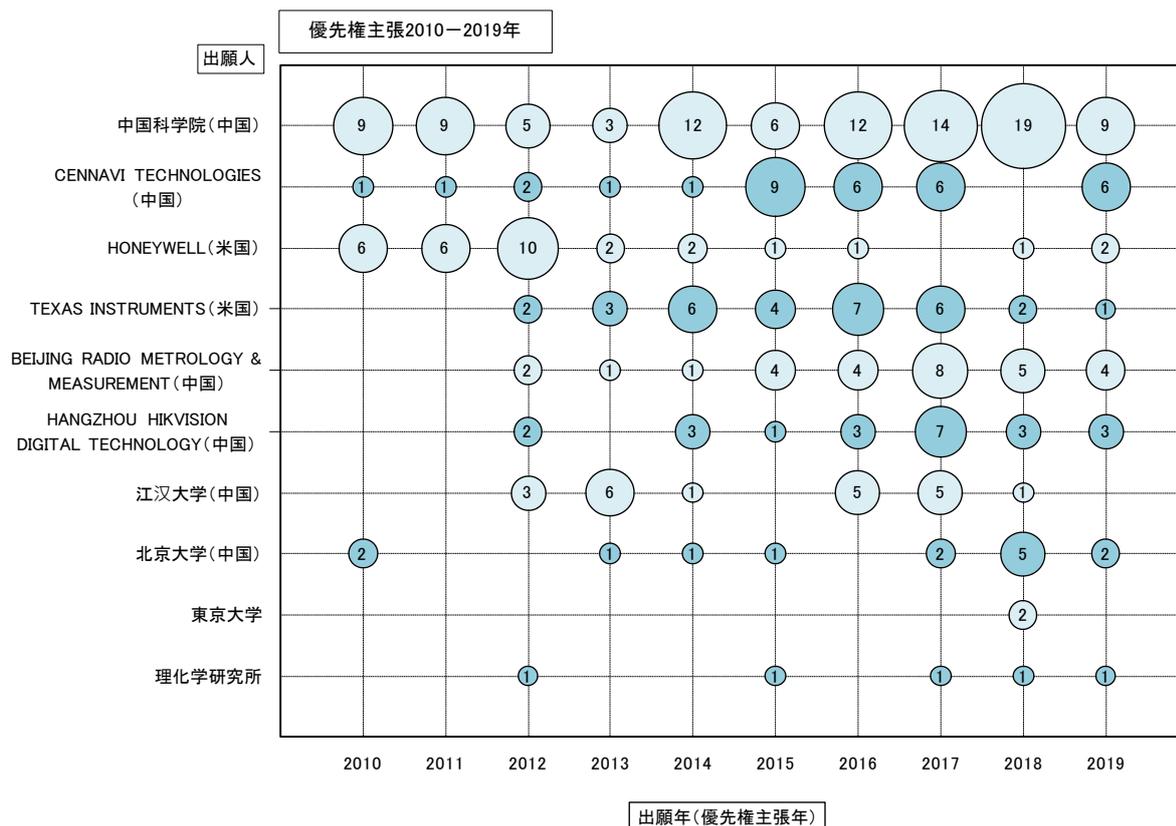


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

7. 光格子時計

光格子時計の上位の出願人別ファミリー一件数推移を図 4-2-47 に示す。中国科学院（中国）が 2010～2019 年の期間を通して多い。Cennavi Technologies（中国）は 2015～2019 年にかけて多い。Honeywell（米国）は 2010～2012 年にかけて多い。理化学研究所の 5 件は、東京大学、香取教授との共願である。

図 4-2-47 光格子時計－〔出願先：日米欧中韓〕出願人別ファミリー一件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

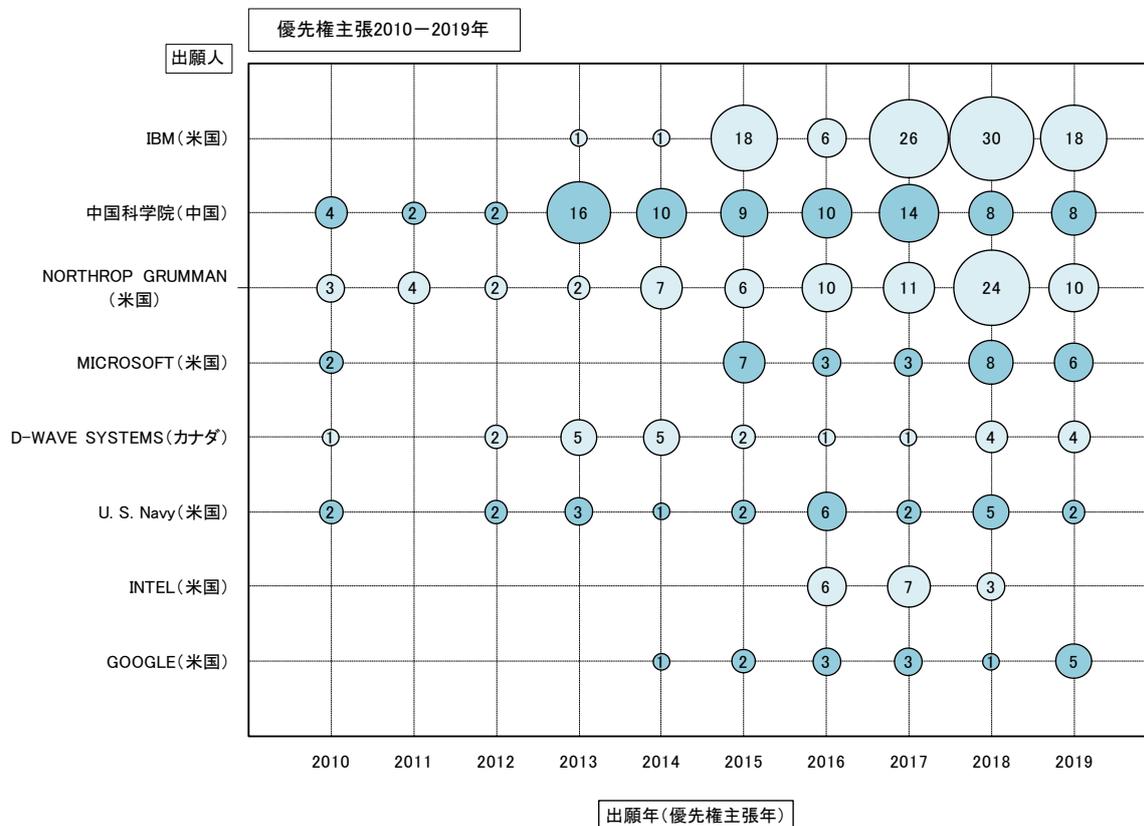


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

8. その他技術

その他技術 (SQUID) の上位の出願人別ファミリー件数推移を図 4-2-48 に示す。IBM (米国) が 2015~2019 年にかけて多い。中国科学院 (中国) は 2013~2019 年にかけて多い。

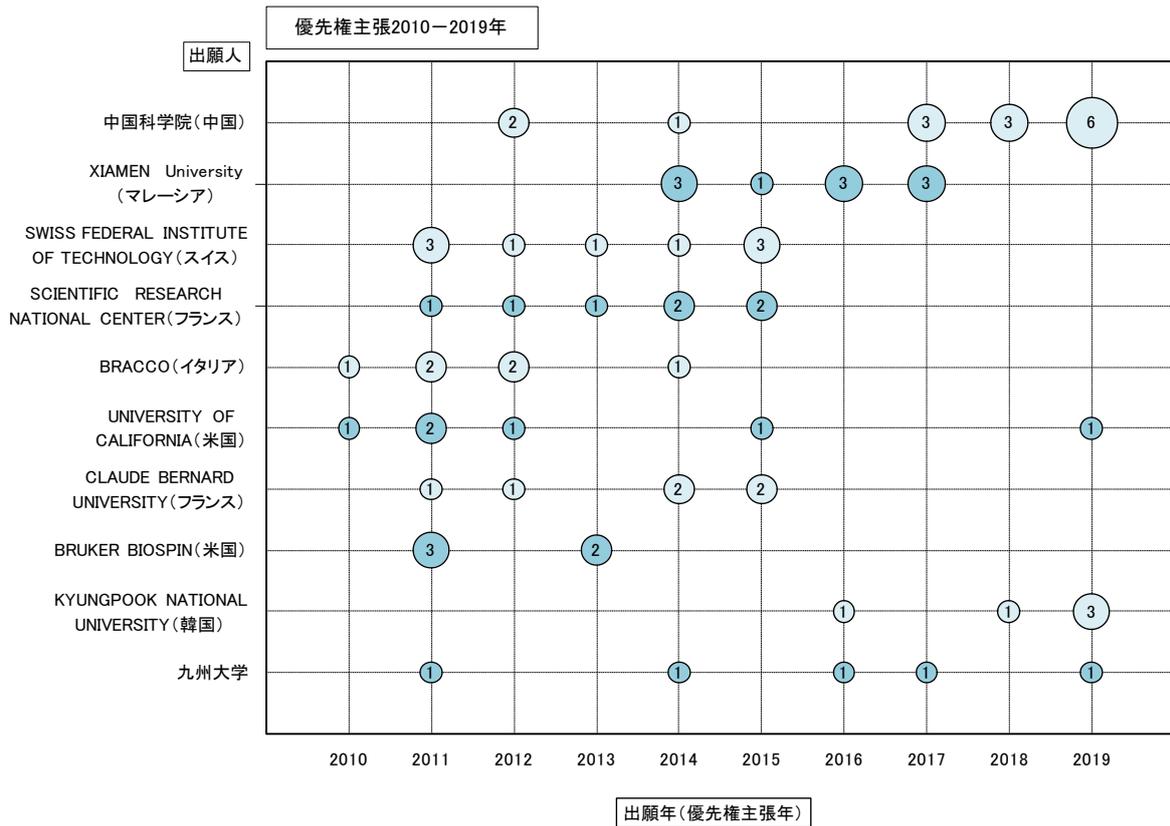
図 4-2-48 その他技術 (SQUID) - [出願先: 日米欧中韓] 出願人別ファミリー件数推移 (出願年 (優先権主張年): 2010-2019 年)



注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

その他技術（超核偏極技術）の上位の出願人別ファミリー一件数推移を図 4-2-49 に示す。中国科学院（中国）は 2017～2019 年にかけて多い。XIAMEN University（マレーシア）が 2014～2017 年にかけて多い。超核偏極技術は、低温の超核偏極技術から始まり、近年、室温の超核偏極技術に移りつつある。室温の超核偏極技術に関する出願はこれから出てくるものと思われる。

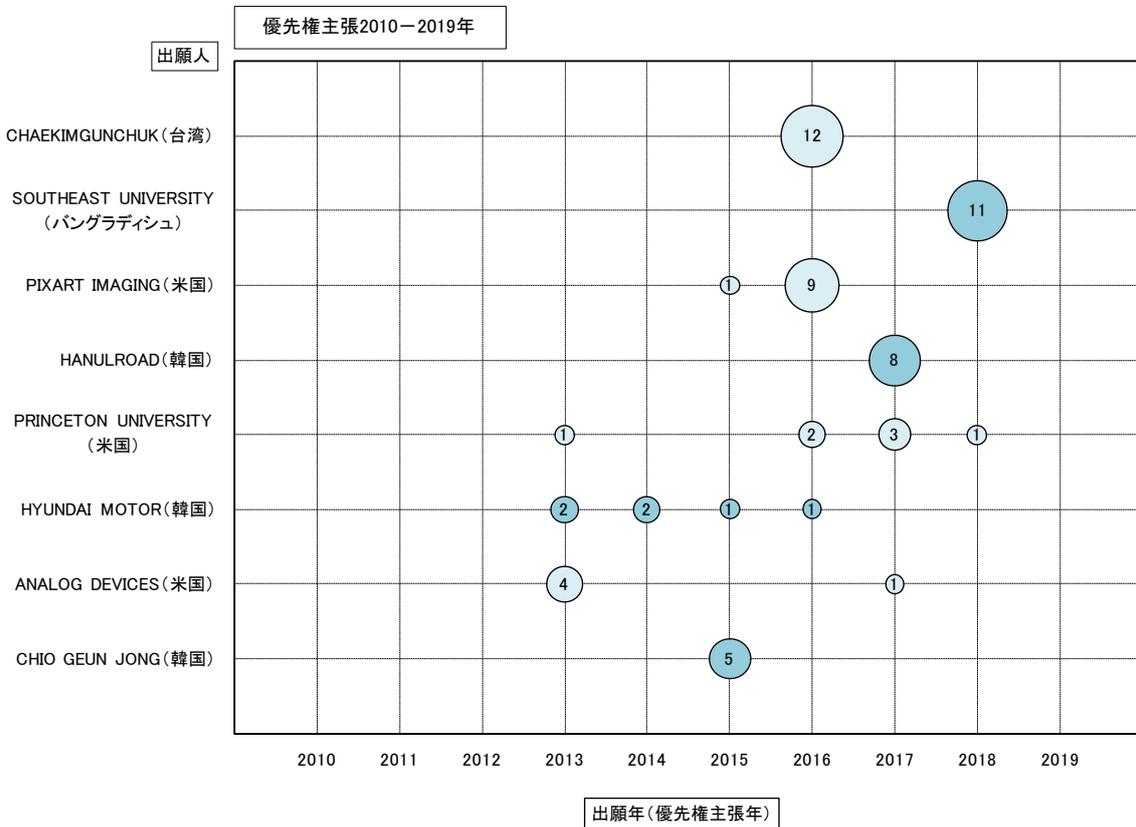
図 4-2-49 その他技術（超核偏極技術）－ [出願先：日米欧中韓] 出願人別ファミリー一件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

その他技術（フォノンセンシング）の上位の出願人別ファミリー件数推移を図 4-2-50 に示す。CHAEKIMGUNCHUK（台湾）の 2016 年、SOUTHEAST University（バングラディシュ）の 2018 年が多い。

図 4-2-50 その他技術（フォノンセンシング）－ [出願先：日米欧中韓] 出願人別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

第3章 パテントマップ解析による調査

Derwent Innovation のパテントマップ解析ツール ThemeScope により、量子計測・センシング技術の七つの区分について解析した。ThemeScope のテキストマイニング機能で対象特許をマップ上にプロットすることでキーワード関連技術の集積状況を調べ、対象特許の技術動向を把握する。

1. 固体量子センサ

固体量子センサのパテントマップ解析結果を図 4-3-1 に示す。原理・要素技術として①NV センタ、④励起光、⑪蛍光ナノダイヤモンドが抽出されている。構造・材料として③磁気欠陥センタ物質、⑤ダイヤモンド粒子、⑥結晶配向、⑦ダイヤモンド材料、⑧ダイヤモンドフィルム、⑨ダイヤモンド基板が抽出されている。課題として②スピントイムが抽出されている。応用用途として⑩NV センタ顕微鏡が抽出されている。

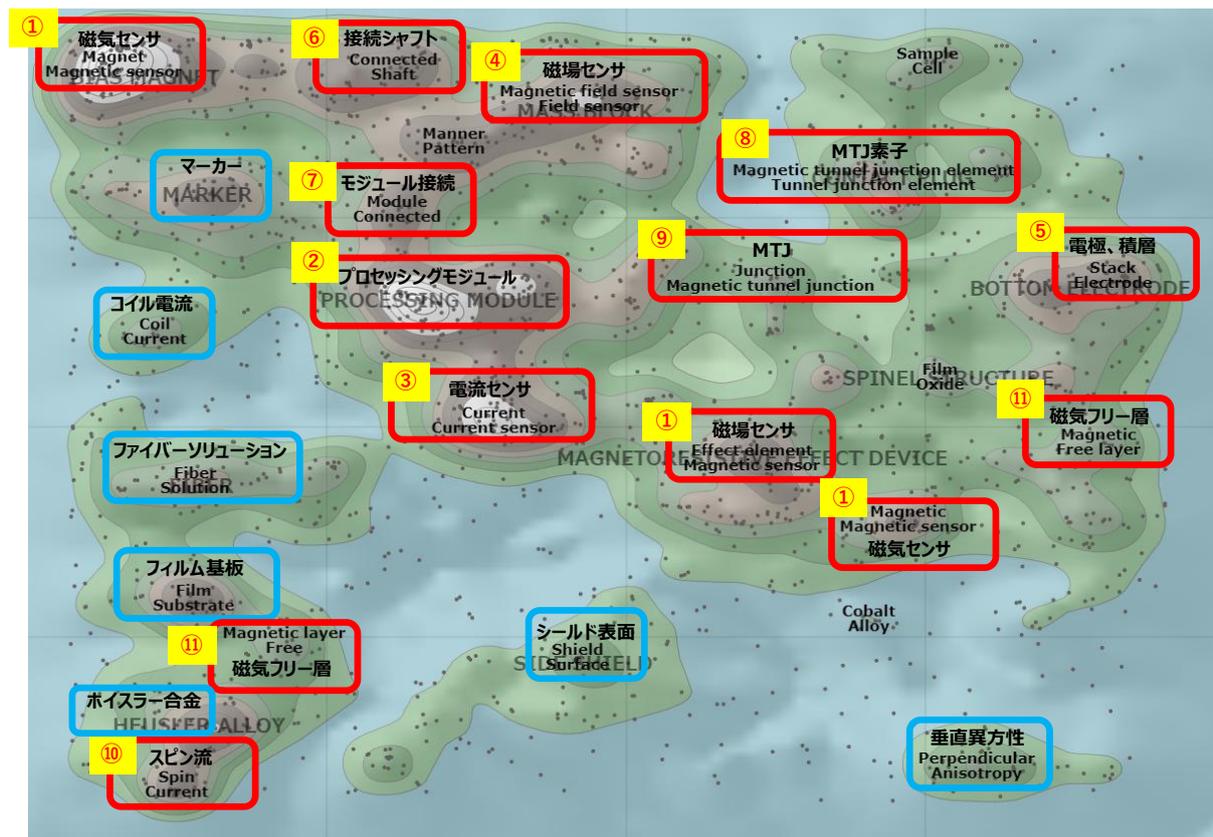
図 4-3-1 パテントマップ解析—固体量子センサ



2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサのpatentマップ解析結果を図4-3-2に示す。トンネル磁気抵抗素子の原理・要素技術として⑧MTJ素子、⑨MTJ、⑩スピン流、⑪磁気フリー層が抽出されている。構造・材料として②プロセッシングモジュール、⑤電極、積層、⑥接続シャフト、⑦モジュール接続が抽出されている。応用用途として①磁気センサ、③電流センサ、④磁場センサが抽出されている。

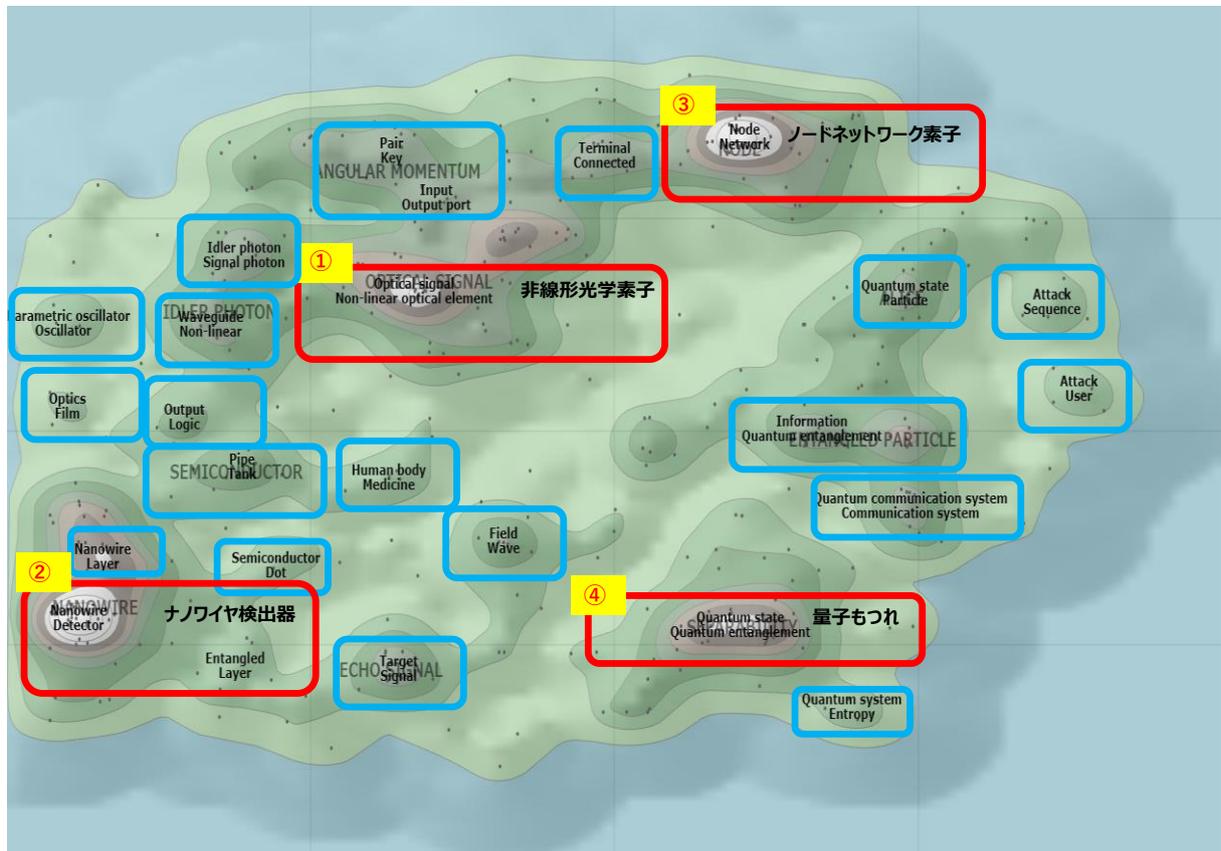
図4-3-2 パテントマップ解析－量子スピントロニクスセンサ



3. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサのpatentマップ解析結果を図 4-3-3 に示す。原理・要素技術として①非線形光学素子、④量子もつれが抽出されている。構造・材料として②ナノワイヤ検出器、③ノードネットワーク素子が抽出されている。

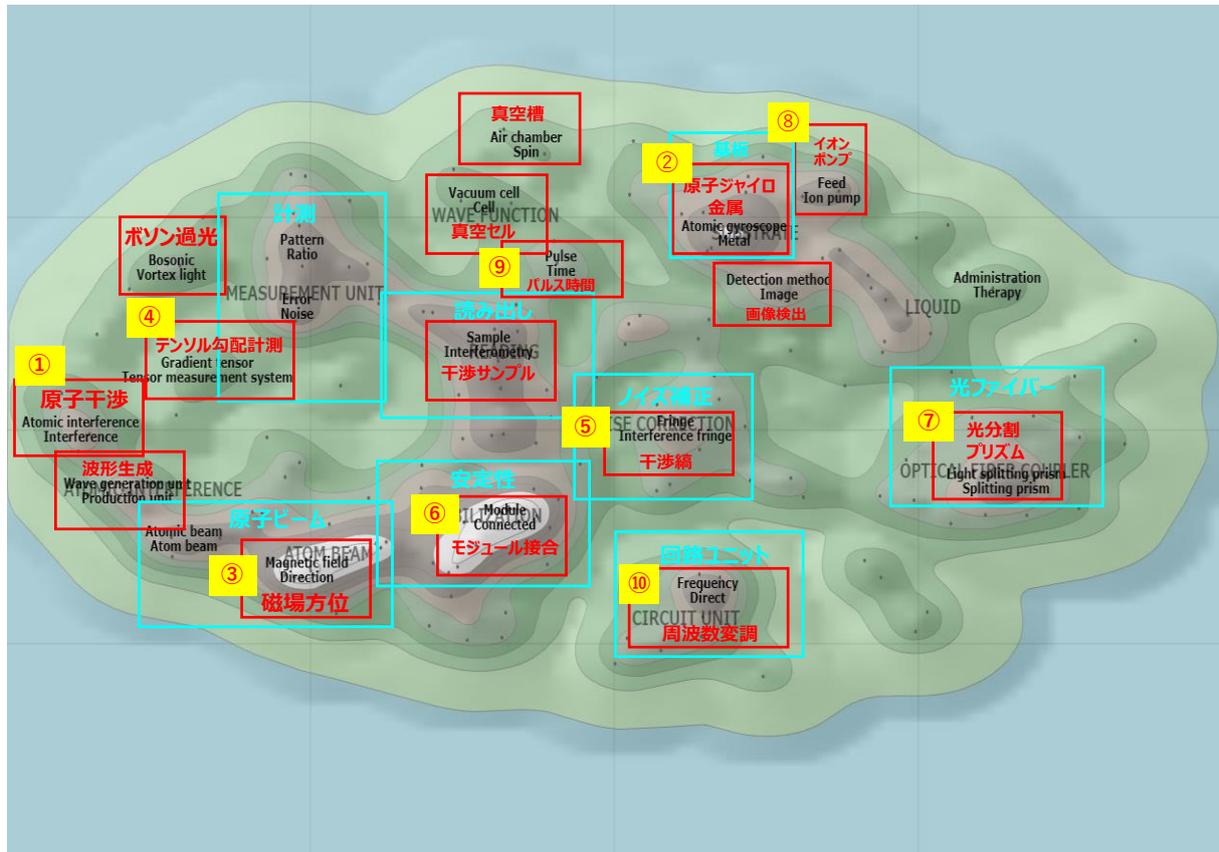
図 4-3-3 パテントマップ解析—量子もつれ光センサ



5. 量子慣性センサ

量子慣性センサのпатентマップ解析結果を図 4-3-5 に示す。原理・要素技術として①原子干渉、③磁場方位、④テンソル勾配計測、⑤干渉縞、⑨パルス時間、⑩周波数変調が抽出されている。構造・材料として②原子ジャイロ金属、⑥モジュール接合、⑦光分割プリズム、⑧イオンポンプが抽出されている。

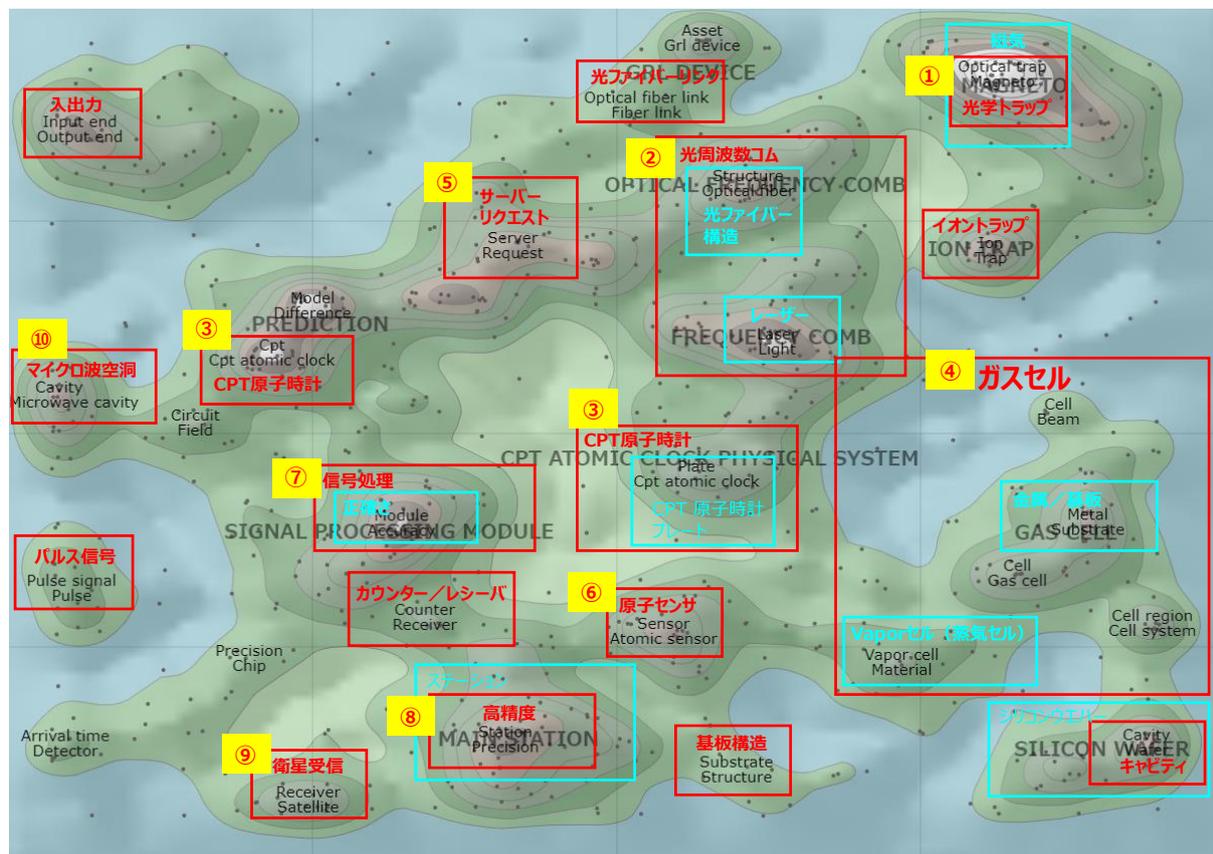
図 4-3-5 патентマップ解析—量子慣性センサ



6. 光格子時計

光格子時計のpatentマップ解析結果を図4-3-6に示す。原理・要素技術として①光学トラップ、②光周波数コム、③CPT原子時計が抽出されている。構造・材料として④ガスセル、⑤サーバーリクエスト、⑥原子センサ、⑦信号処理、⑩マイクロ波空洞が抽出されている。課題として⑧高精度が抽出されている。応用用途として⑨衛星受信が抽出されている。

図4-3-6 パテントマップ解析—光格子時計



その他技術（超核偏極技術）のпатентマップ解析結果を図 4-3-8 に示す。原理・要素技術として③核磁気共鳴、④画像処理アルゴリズム、⑤スペクトラムサンプル、⑥乾燥化が抽出されている。構造・材料として②量子ドットが抽出されている。応用用途として①細胞薬が抽出されている。

図 4-3-8 патентマップ解析—その他技術（超核偏極技術）



その他技術（フォノンセンシング）のpatentマップ解析結果を図4-3-9に示す。構造・材料として②基板、③変換モジュール、④層状粒子、⑤機構、⑥半導体積層構造が抽出されている。課題として①輸送効率が抽出されている。

図4-3-9 Patentマップ解析—その他技術（フォノンセンシング）



第4章 技術区分別動向調査

第1節 技術区分

第1章第2節4. 調査対象母集団の抽出で使用した検索式と第3章の Patent Map 解析による調査の結果を基に、各アドバイザーに助言を頂き、以下の7区分のそれぞれの技術区分を選定した。なおその他については、件数の多い SQUID について技術区分を選定した。

表 4-4-1 量子計測・センシングの7区分の技術区分

・ 固体量子センサ

区分1	区分2	英文
原理・要素技術	NV センタ	NV center, vacancy center
	ODMR	ODMR
構造・材料	磁気欠陥センタ物質	magnet defect center material
	ダイヤモンド	diamond
課題	スピン緩和時間、コヒーレント時間	spin coherent time, spin relaxation time
	感度	sensitivity
応用用途	磁気、磁場センサ	magnet sensor, magnet field sensor
	電流センサ	current sensor
	温度センサ	temperature sensor
	圧力センサ	pressure sensor
	電場センサ	electric field sensor
	NMR, MRI	NMR, MRI

・ 量子スピントロニクスセンサ

ー トンネル磁気抵抗素子

区分1	区分2	英文
原理・要素技術	MTJ	MTJ, magnetic tunnel junction, TMR, tunnel magnetoresistive
	磁気フリー層	magnetic free layer
構造・材料	電極、積層	stack, electrode
課題	感度	sensitivity
	小型化、分解能	small size, resolution
	ダイナミックレンジ	dynamic range
応用用途	磁気センサ	magnet sensor
	電流センサ	current sensor

－熱流素子

区分1	区分2	英文
原理・要素技術	スピンゼーベック効果	spin seebeck effect
	スピン流	spin flow
課題	スピン流生成効率向上	spin flow increase
応用用途	熱流センサ	heat flow sensor
	環境発電、エナジーハーベスト	energy harvest

・量子もつれ光センサ

区分1	区分2	英文
原理・要素技術	量子もつれ、もつれ光子	quantum entanglement、entangle photon
	非線形光学素子	non-line optical element
	アイドラー光子	idler photon
構造・材料	ナノワイヤ検出器	nanowire detector
課題	感度向上	highsensitivity、sensitivity
	分解能向上	resolution、optical resolution
応用用途	量子もつれ顕微鏡	quantum entanglement microscope
	量子 OCT	quantum optical coherence tomography、 quantum OCT
	量子レーダー	quantum rader
	量子赤外吸収分光	IRQAS、Infrared Quantum Absorption Spectroscopy

・光子検出器

区分1	区分2	英文
原理・要素技術	単一光子検出器	single photon detector
	超伝導ナノワイヤ単一光子光検出器 (SSPD)	Superconducting Nano Strip Photon Detector、 Superconducting Nanowire Single Photon Detector
	超伝導転移端センサ	superconducting transition edge sensor(TES)
構造・材料	誘電体多層膜	multi dielectric layer film
	ダブルサイドキャビティ	double side cavity
課題	光吸収効率向上、感度	sensitivity
応用用途	量子鍵送受信システム	quantum key distribution system
	量子通信	quantum communication
	量子コンピュータ	quantum computer

・量子慣性センサ

区分 1	区分 2	英文
原理・要素技術	原子干渉計	atom interferometer
	原子ジャイロ	atomic gyroscope
	ド・ブロイ波センサ	de Broglie wave sensor
	量子慣性センサ	quantum inertial sensor
	原子重力計	atomic gravimeter
	テンソル勾配計測、重力勾配計	tensor measurement system
	アルカリ土類金属	alkaline earth metal
課題	環境耐性向上	environmental immunity
	小型化	downsizing
応用用途	資源探索	resource search
	潜水艦、AUV、UUV、ドローン	submarine、AUV(Autonomous underwater vehicle)、UUV(Unmanned underwater vehicle)、drone

・光格子時計

区分 1	区分 2	英文
原理・要素技術	磁気光学トラップ	magneto optical trap
	高精度時間計測	high precision time measurement
	光格子時計	optical lattice clock
	光学トラップ	optical trap
	光周波数コム	optical frequency comb
	原子センサ	atomic sensor
	信号処理	signal processing
課題	光シフト	light shift
	レーザー長寿命化	photostable、long operational lifetime、lifetime
応用用途	時刻同期	time synchronization
	時計ベース標高測定	chronometric measurement、chronometric elevation measurement
	相対論的測地	relativistic geodesy

・その他 (SQUID)

区分 1	区分 2	英文
原理・要素技術	超伝導量子干渉計	superconducting quantum interference device
	ジョセフソン接合	josephson junction
	膜、ビーム	film、beam
	量子ビットカップラー	coupler qubit
課題	低コスト化	cost reduction
応用用途	高感度局所磁場センサ	high sensitive magneto

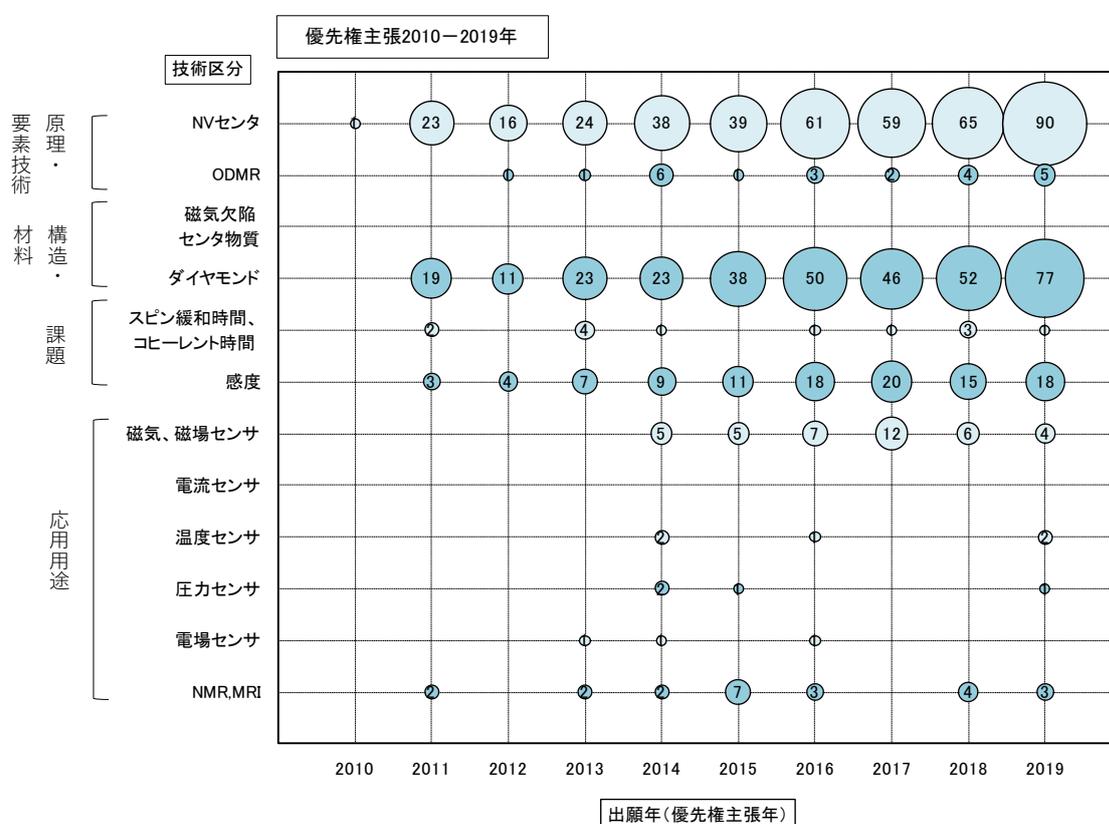
第2節 [出願先：日米欧中韓] 技術区分別ファミリー件数推移

量子計測・センシング技術の技術区分別ファミリー件数推移を示す。各区分の技術動向を見ることができる。

1. 固体量子センサ

固体量子センサの技術区分別ファミリー件数推移を図 4-4-1 に示す。原理・要素技術では、NV センタが 2012～2019 年にかけて増加傾向である。構造・材料では、ダイヤモンドが 2012～2019 年にかけて増加傾向である。課題では感度が 2011～2017 年にかけて増加している。応用用途では、磁気、磁場センサが多く、NMR、MRI は 2015 年が 7 件と多い。

図 4-4-1 固体量子センサ [出願先：日米欧中韓] 技術区分別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

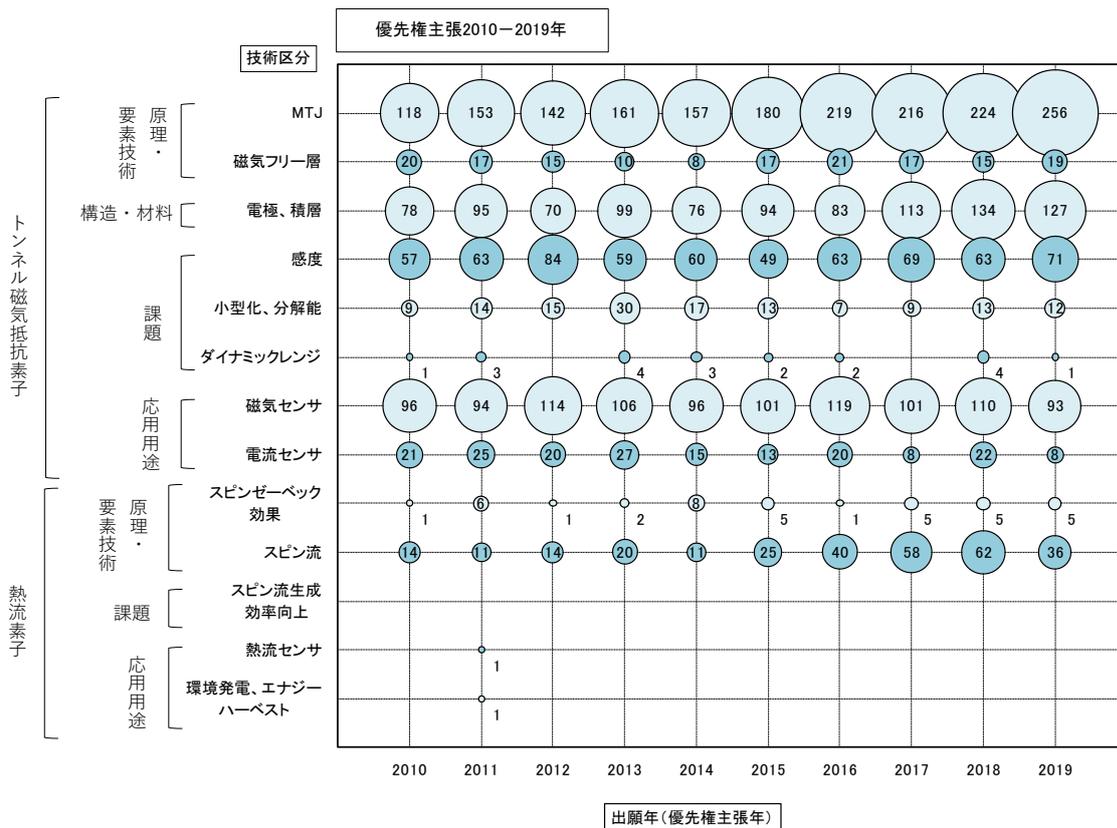
2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサの技術区分別ファミリー件数推移を図 4-4-2 に示す。

トンネル磁気抵抗素子では、原理・要素技術の MTJ が期間中コンスタントにあり、2016～2019 年にかけて多い。構造・材料の電極、積層が期間中コンスタントにある。課題では、感度が期間中コンスタントにある。応用用途は、磁気センサが多い。

熱流素子では、原理・要素技術のスピンの流が、2014～2018 年にかけて増加している。

図 4-4-2 量子スピントロニクスセンサ [出願先：日米欧中韓] 技術区分別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

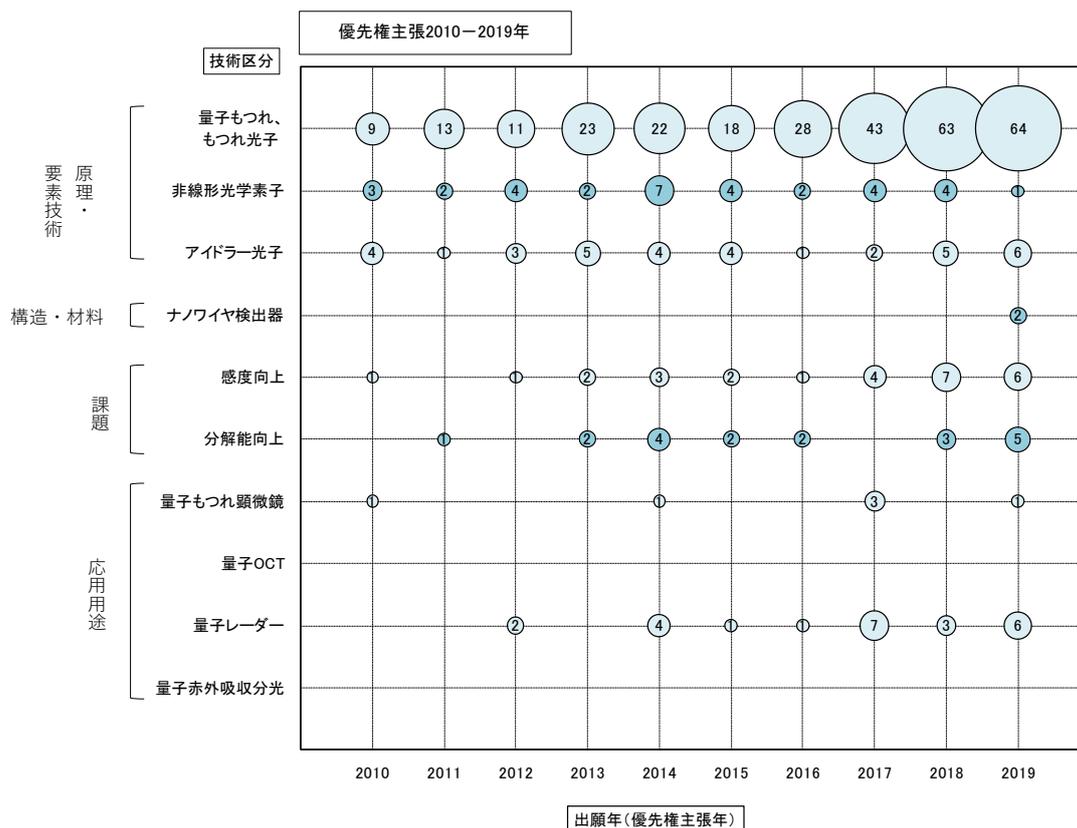


注)2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

3. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサの技術区分別ファミリー件数推移を図 4-4-3 に示す。原理・要素技術では、量子もつれ、もつれ光子が 2015～2019 年にかけて増加している。課題では感度向上と分解能向上が期間後半に件数が多い。応用用途では、量子レーダーが 2012～2019 年にかけてある。

図 4-4-3 量子もつれ光センサ [出願先：日米欧中韓] 技術区分別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

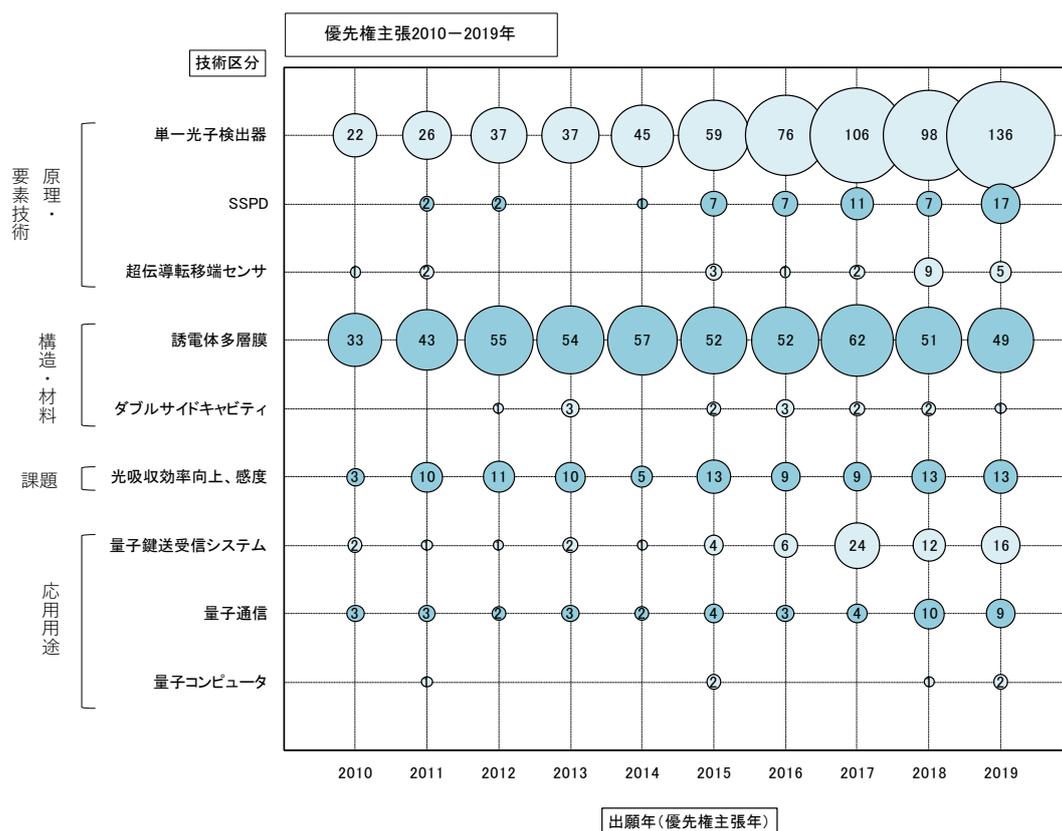


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

4. 光子検出器

光子検出器の技術区分別ファミリー件数推移を図 4-4-4 に示す。原理・要素技術では、単一光子検出器が 2010～2019 年にかけて増加傾向である。SSPD が 2014～2019 年にかけて増加傾向である。構造・材料では、誘電体多層膜が 2010～2019 年にかけてコンスタントにある。課題では光吸収効率向上、感度が期間中コンスタントにある。応用用途では、量子鍵送受信システムが 2017～2019 年にかけて多い。

図 4-4-4 光子検出器 [出願先：日米欧中韓] 技術区分別ファミリー件数推移 (出願年 (優先権主張年)：2010-2019 年)

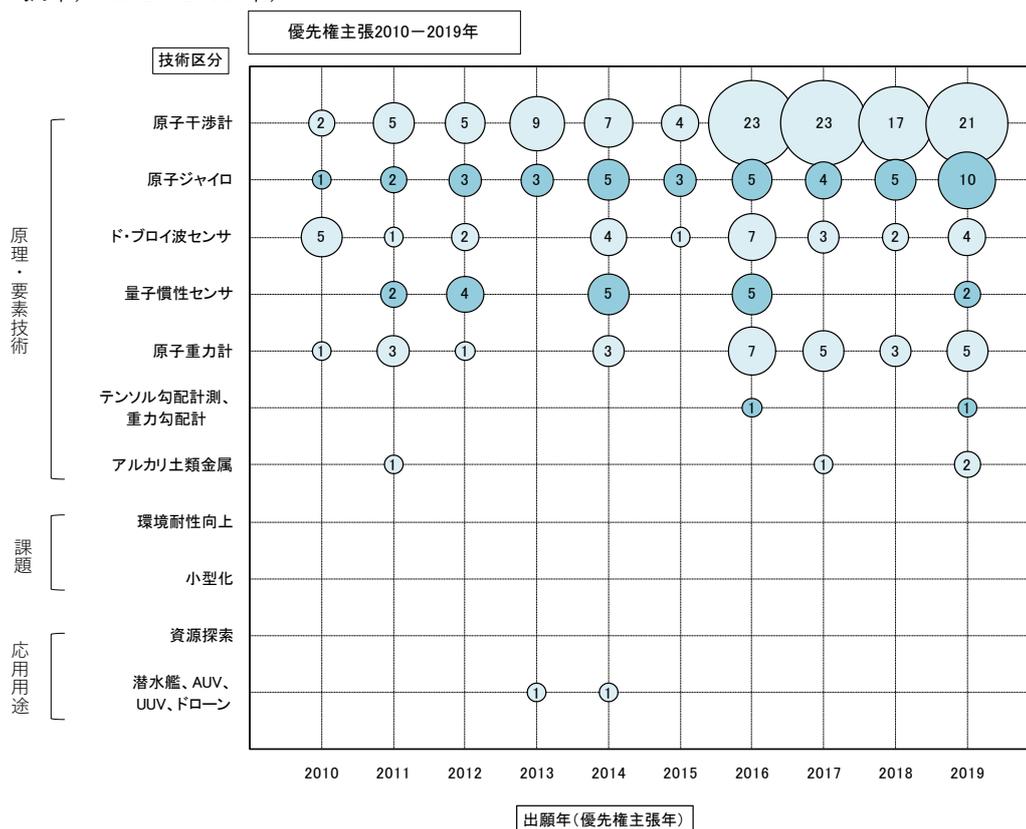


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

5. 量子慣性センサ

量子慣性センサの技術区分別ファミリー件数推移を図 4-4-5 に示す。原理・要素技術では、原子干渉計が 2016～2019 年にかけて多い。原子ジャイロは期間中コンスタントにある。原子重力計は、2016～2019 年にかけて多い。応用用途では、潜水艦、AUV、UUV、ドローンが、2013、2014 年にそれぞれ 1 件ある。

図 4-4-5 量子慣性センサ [出願先：日米欧中韓] 技術区分別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

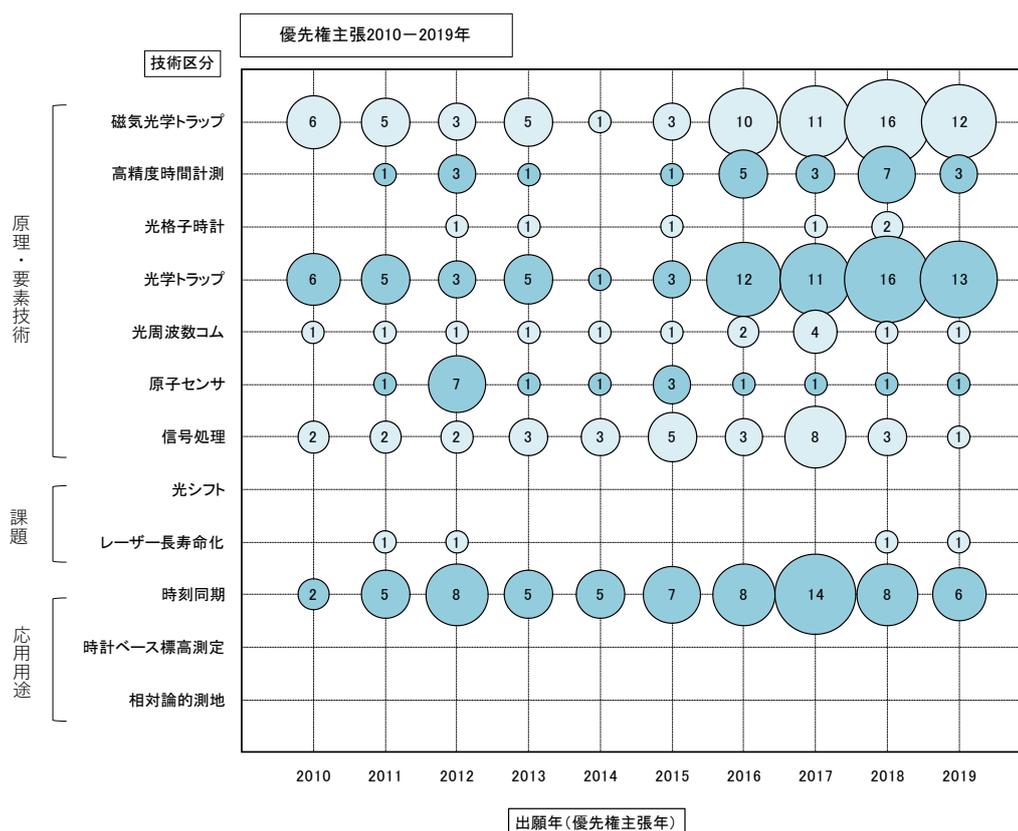


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

6. 光格子時計

光格子時計の技術区分別ファミリー件数推移を図 4-4-6 に示す。原理・要素技術では、磁気光学トラップと光学トラップが、2016～2019 年にかけて多い。信号処理は、期間中コンスタントにある。課題ではレーザー長寿命化が、2011、2012、2018、2019 年にそれぞれ 1 件ある。応用用途では、時刻同期が多く期間中コンスタントにある。

図 4-4-6 光格子時計 [出願先：日米欧中韓] 技術区分別ファミリー件数推移 (出願年 (優先権主張年)：2010-2019 年)

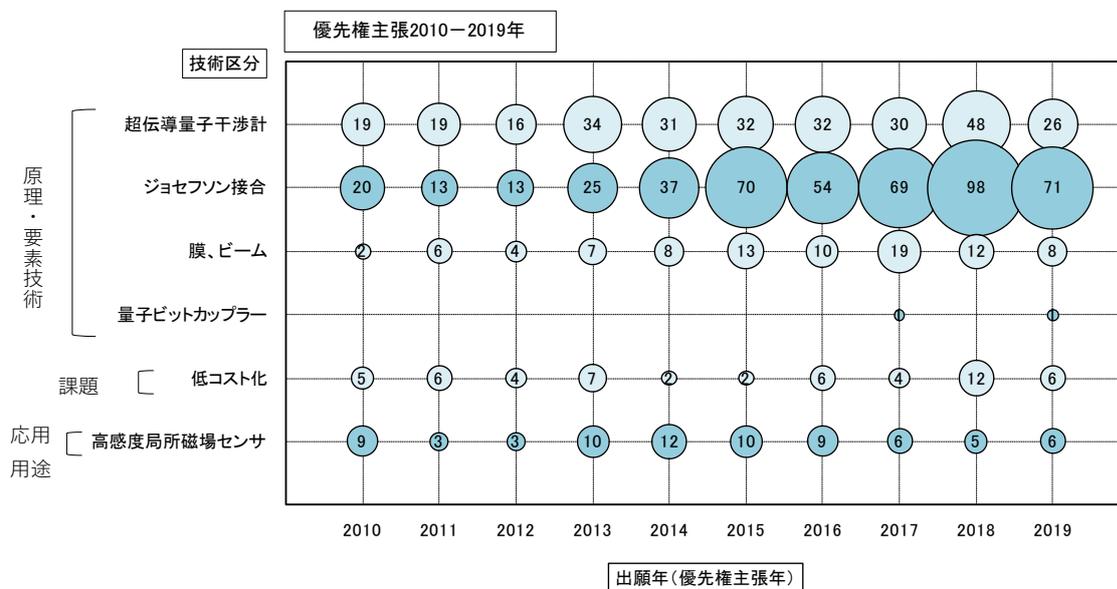


注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

7. その他技術

その他技術（SQUID）の技術区分別ファミリー件数推移を図 4-4-7 に示す。原理・要素技術では、ジョセフソン接合が、2015～2019 年にかけて多い。超伝導量子干渉計が、2013～2018 年にかけて多い。応用用途では、高感度局所磁場センサが 2013～2016 年にかけて多い。

図 4-4-7 その他技術（SQUID）〔出願先：日米欧中韓〕技術区分別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

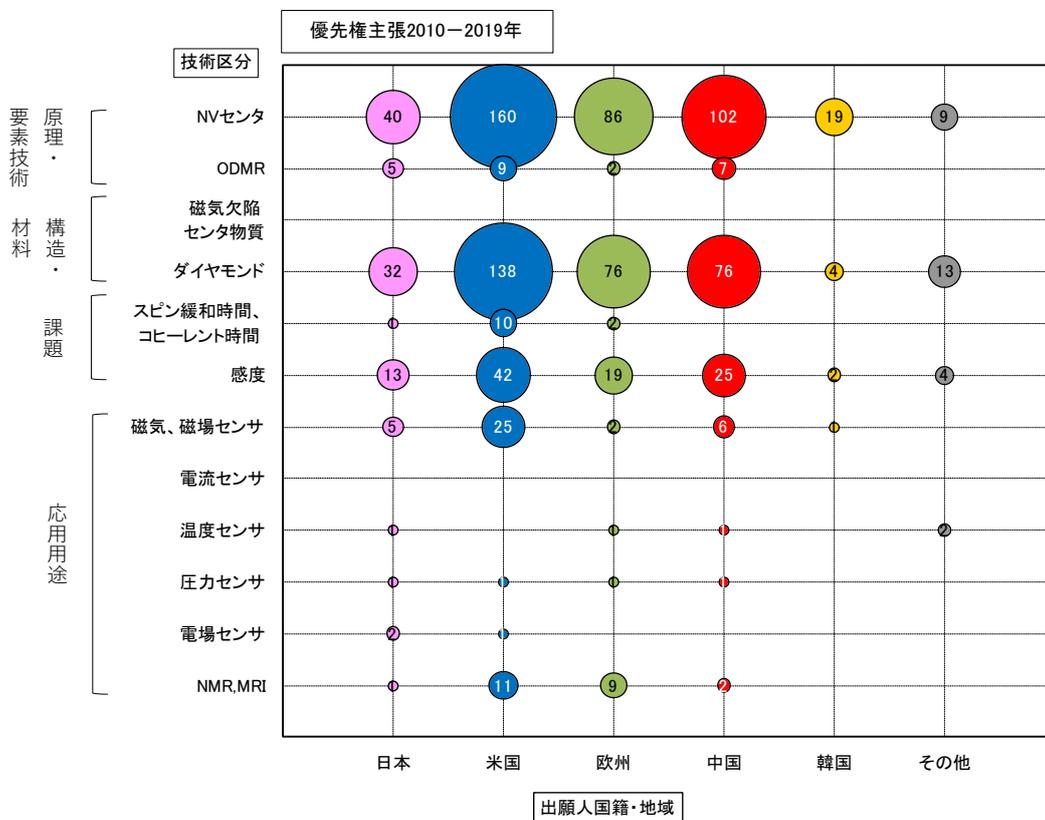
第3節 [出願先：日米欧中韓] 技術区分別—出願人国籍別ファミリー件数

量子計測・センシング技術の技術区分別—出願人国籍別ファミリー件数を示す。各区分の国籍別の技術動向を見ることができる。

1. 固体量子センサ

固体量子センサの技術区分別—出願人国籍別ファミリー件数を図4-4-8に示す。原理・要素技術では、NVセンタで米国が多く、中国、欧州が続いている。構造・材料では、ダイヤモンドで米国が多く、中国、欧州が同数が続いている。課題では、感度で米国が多く、中国、欧州が続いている。応用用途では、磁気、磁場センサで米国が多く、NMR、MRIは米国、欧州が多い。

図4-4-8 固体量子センサ [出願先：日米欧中韓] 技術区分別—出願人国籍別ファミリー件数（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）



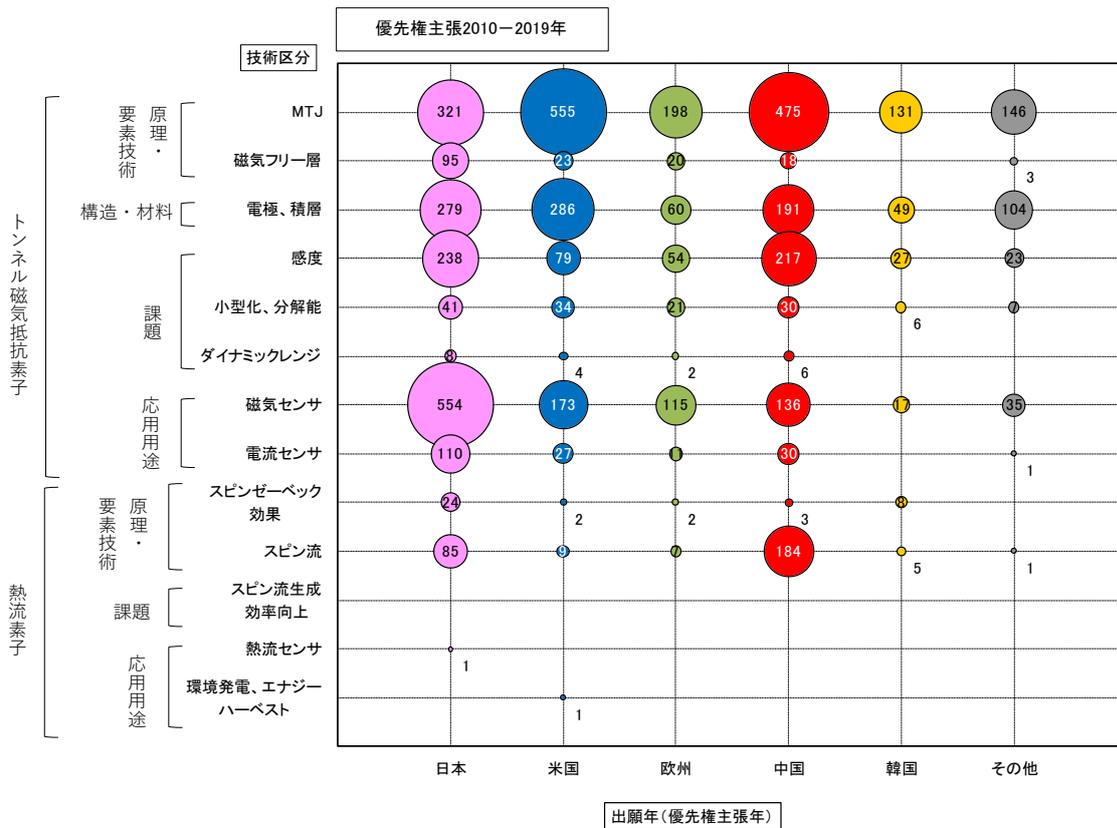
2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサの技術区分別－出願人国籍別ファミリー件数を図 4-4-9 に示す。

トンネル磁気抵抗素子の原理・要素技術では、MTJ で米国が多く、中国、日本が続いている。構造・材料では、電極、積層で米国、日本が多く、中国が続いている。課題では、感度で日本、中国が多い。応用用途では、磁気センサの日本が多い。

熱流素子の原理・要素技術では、スピン流の中国が多く次いで日本が多い。

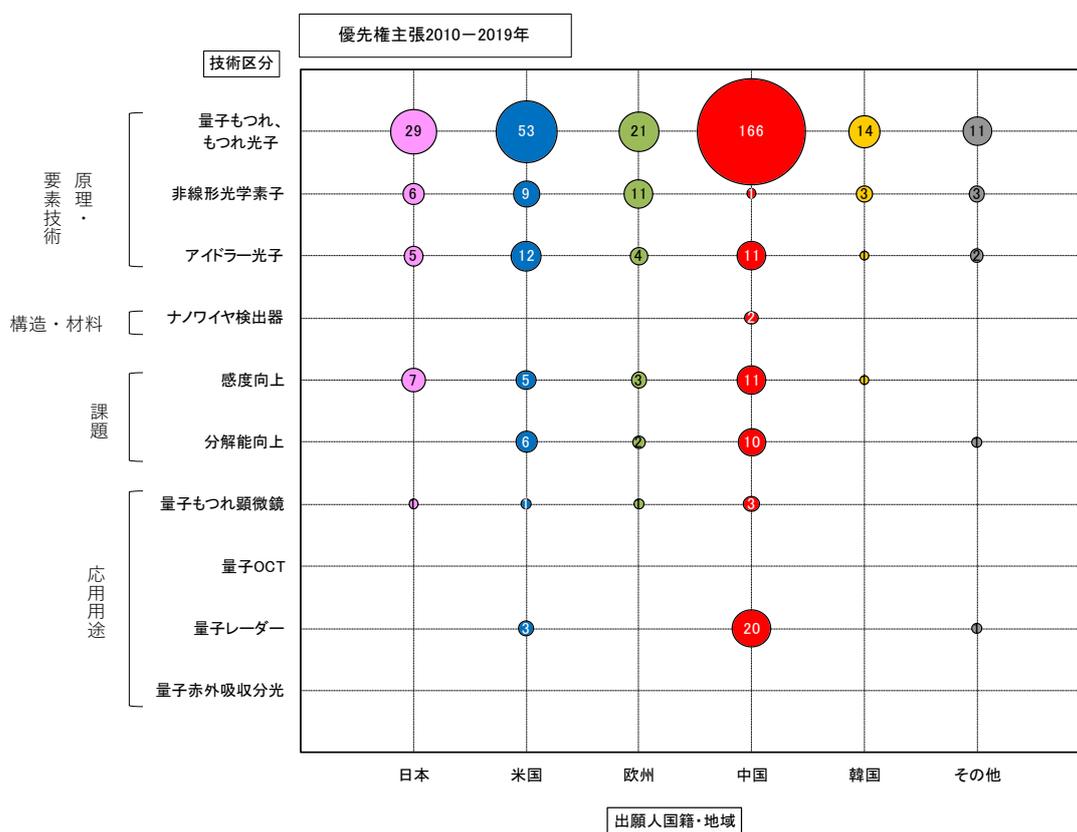
図 4-4-9 量子スピントロニクスセンサ [出願先：日米欧中韓] 技術区分別－出願人国籍別ファミリー件数（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



3. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサの技術区分別一出願人国籍別ファミリー件数を図 4-4-10 に示す。原理・要素技術では、量子もつれ、もつれ光子で中国が多く、米国、日本、欧州が続いている。課題では、感度向上、分解能向上で中国が多い。応用用途では、量子レーダーの中国が多い。

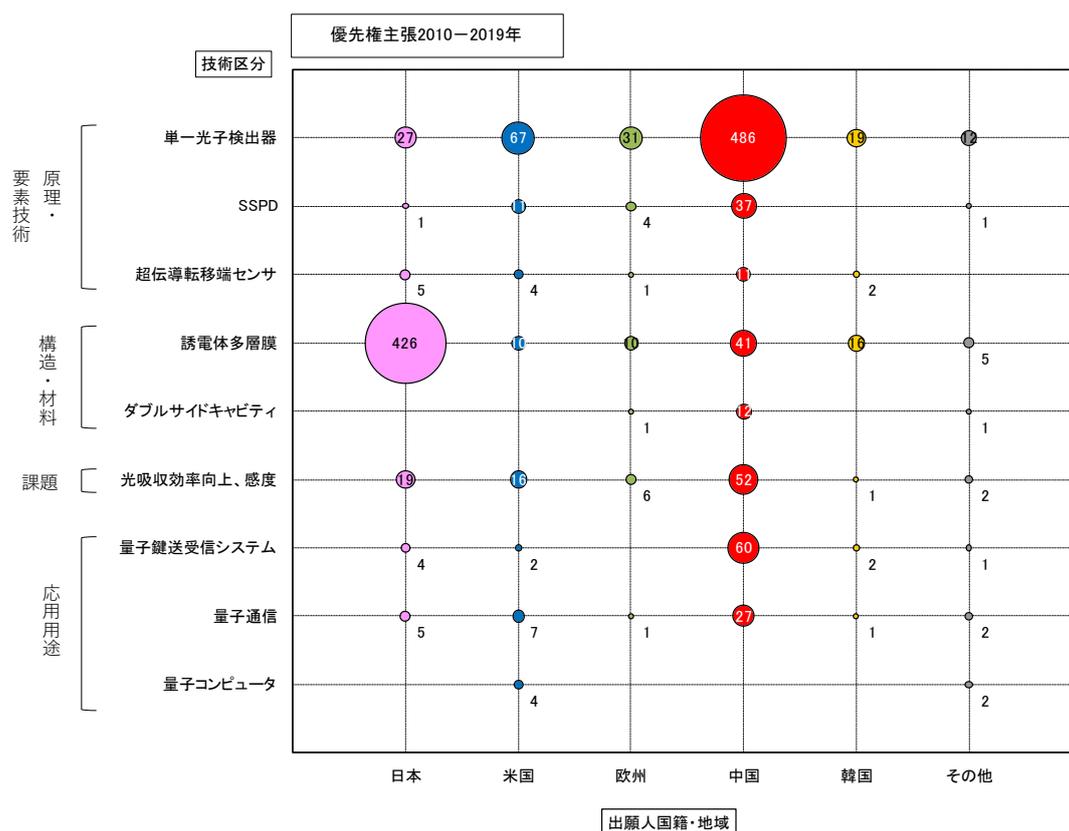
図 4-4-10 量子もつれ光センサ [出願先：日米欧中韓] 技術区分別一出願人国籍別ファミリー件数 (出願年 (優先権主張年)：2010-2019 年)



4. 光子検出器

光子検出器の技術区分別－出願人国籍別ファミリー件数を図 4-4-11 に示す。原理・要素技術では、単一光子検出器で中国が多い。SSPD でも中国が多い。構造・材料では、誘電体多層膜で日本が多い。課題では、光吸収効率向上、感度で中国が多い。応用用途では、量子鍵送受信システム、量子通信で中国が多い。

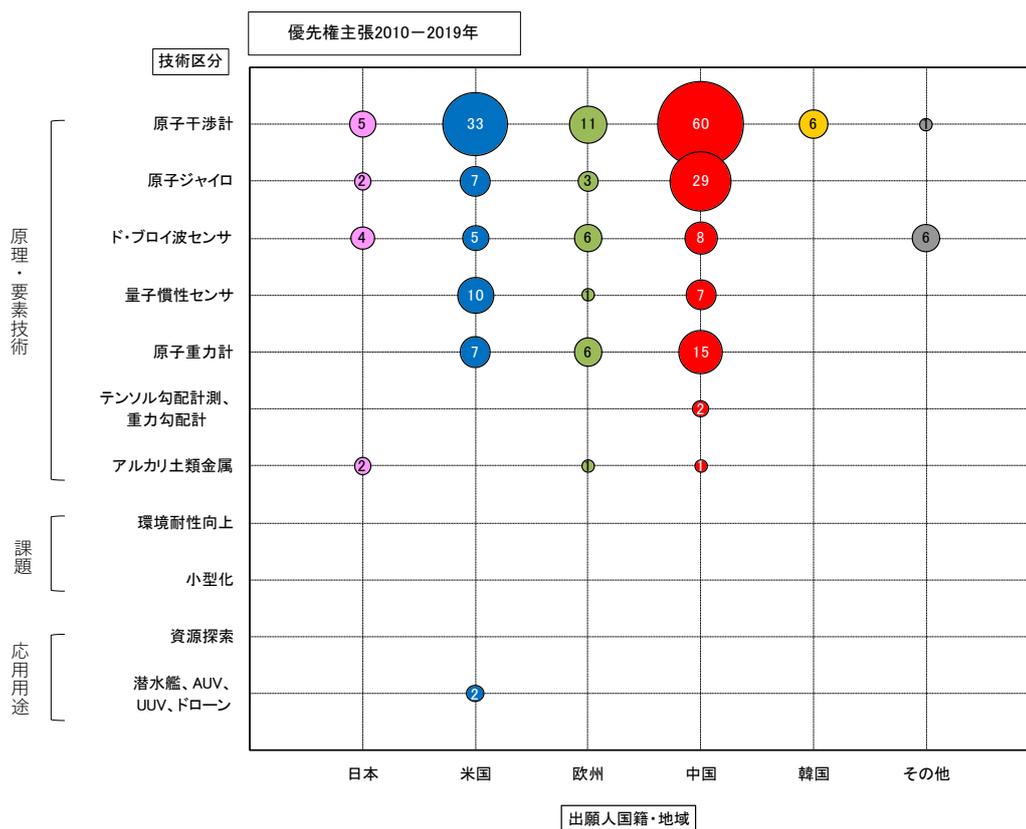
図 4-4-11 光子検出器 [出願先：日米欧中韓] 技術区分別－出願人国籍別ファミリー件数（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



5. 量子慣性センサ

量子慣性センサの技術区分別－出願人国籍別ファミリー件数を図 4-4-12 に示す。原理・要素技術では、原子干渉計で中国が多く次いで米国が多い。原子ジャイロ、原子重力計で中国が多い。量子慣性センサで米国が多い。応用用途では、潜水艦、AUV、UUV、ドローンが米国から出ている。

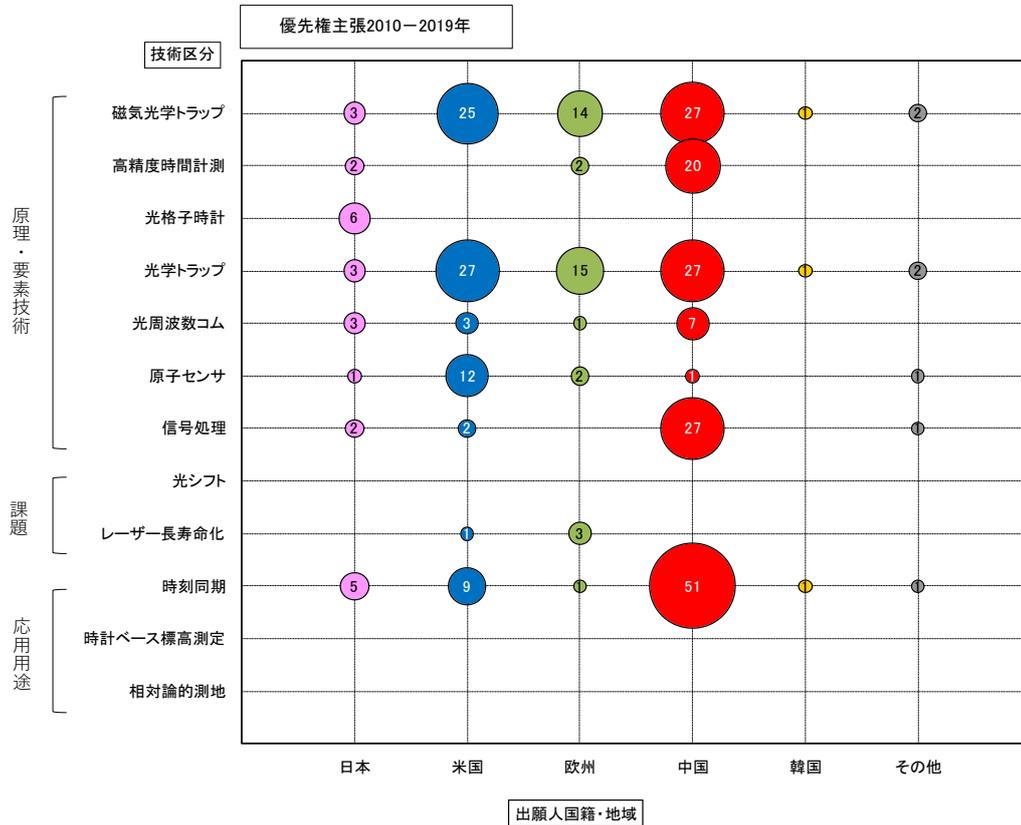
図 4-4-12 量子慣性センサ [出願先：日米欧中韓] 技術区分別－出願人国籍別ファミリー件数（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



6. 光格子時計

光格子時計の技術区分別－出願人国籍別ファミリー件数を図 4-4-13 に示す。原理・要素技術では、磁気光学トラップ、光学トラップで、中国、米国が多い。原子センサでは米国が多い。応用用途では、時刻同期で中国が多く、米国、日本と続いている。

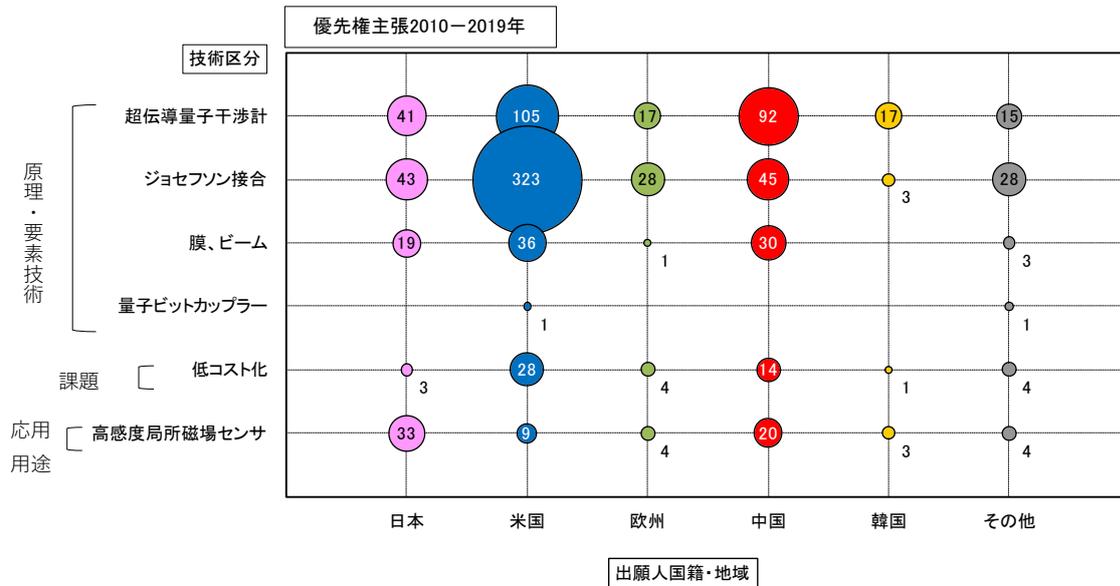
図 4-4-13 光格子時計 [出願先：日米欧中韓] 技術区分別－出願人国籍別ファミリー件数（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



7. その他技術

その他技術（SQUID）の技術区分別－出願人国籍別ファミリー件数を図 4-4-14 に示す。原理・要素技術では、ジョセフソン接合で米国が多い。超伝導量子干渉計は米国、中国が多い。応用用途では、高感度局所磁場センサで日本が多い。

図 4-4-14 その他技術（SQUID）〔出願先：日米欧中韓〕技術区分別－出願人国籍別ファミリー件数（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）



第4節 [出願先：日米欧中韓] [技術区分別] 出願人国籍別ファミリー一件数推移及びファミリー一件数比率

量子計測・センシング技術の[技術区分別] 出願人国籍別ファミリー一件数推移及びファミリー一件数比率を示す。各区分の主な技術区分の国籍別のファミリー一件数推移を見ることができる。

1. 固体量子センサ

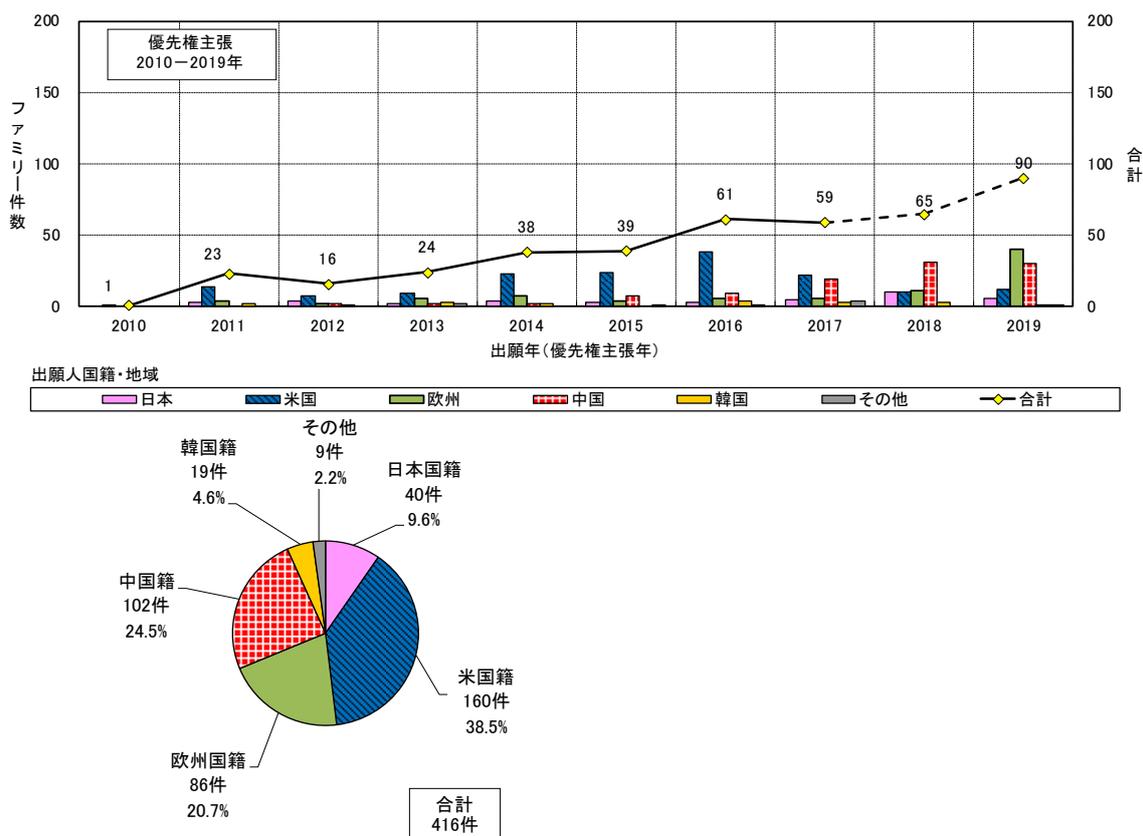
固体量子センサの主な技術区分の出願人国籍別ファミリー一件数推移及びファミリー一件数比率を図4-4-15に示す。原理・要素技術のNVセンタでは、米国籍が2012～2016年にかけて増加している。中国籍が2015～2019年にかけて増加している。

構造・材料のダイヤモンドでは、米国籍が2014～2016年にかけて増加している。中国籍が2015～2019年にかけて増加している。

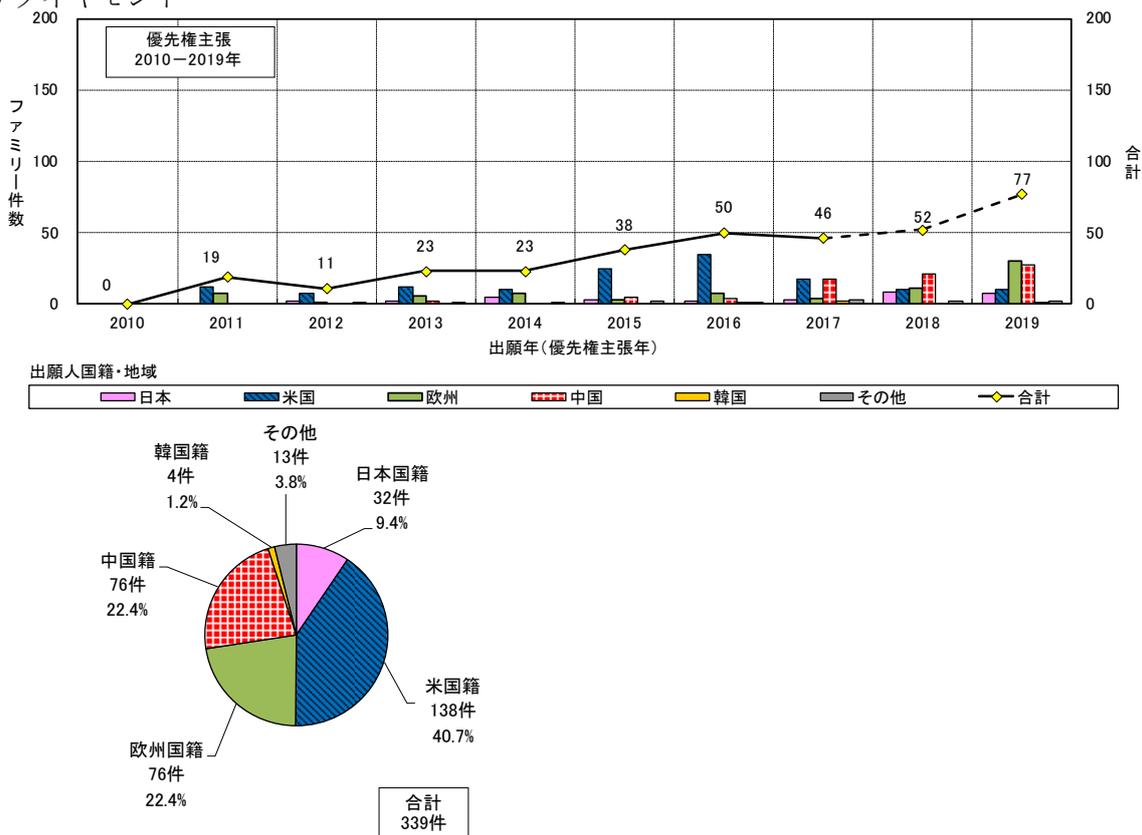
課題の感度では、米国籍が2014～2016年にかけて増加している。中国籍が2016～2019年にかけて増加している。

図4-4-15 固体量子センサ [出願先：日米欧中韓] [技術区分別] 出願人国籍別ファミリー一件数推移及びファミリー一件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

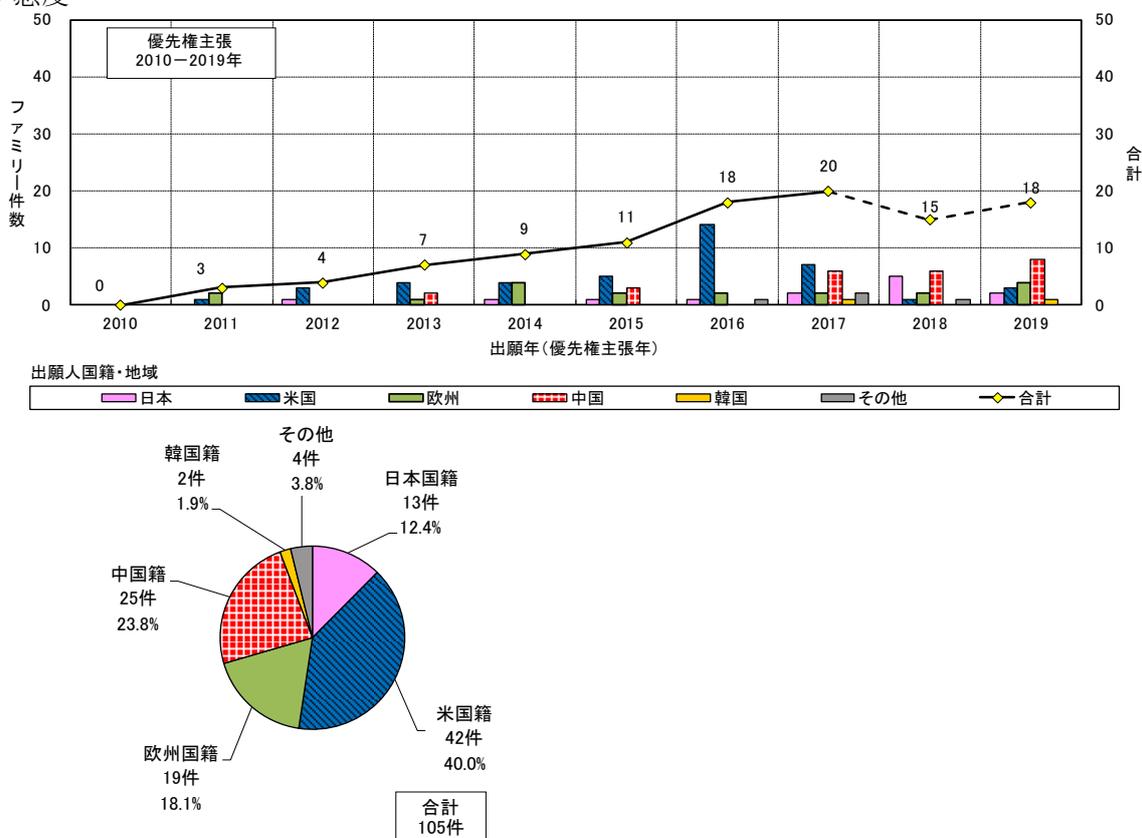
(a) NVセンタ



(b) ダイヤモンド



(c) 感度



注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサの主な技術区分の出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を図 4-4-16 に示す。

・トンネル磁気抵抗素子

原理・要素技術の MTJ では、米国籍は期間中コンスタントにある。中国籍は 2017～2019 年にかけて増加している。原理・要素技術の磁気フリー層では、日本国籍が多く、その中でも 2016 年が多い。

構造・材料の電極、積層では、米国、日本国籍が多く期間中コンスタントにある。中国籍が 2017～2019 年にかけて増加している。

課題の感度では、日本、米国籍が多く期間中コンスタントにある。課題の小型化、分解能では、日本、米国籍が多く、2013 年の出願が多い。

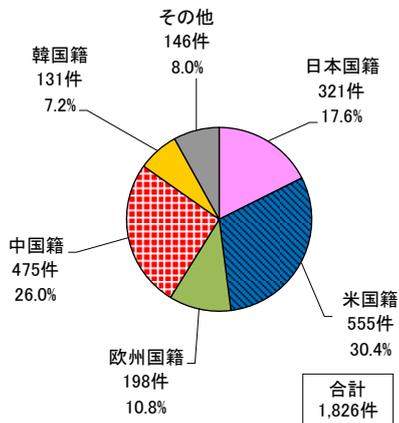
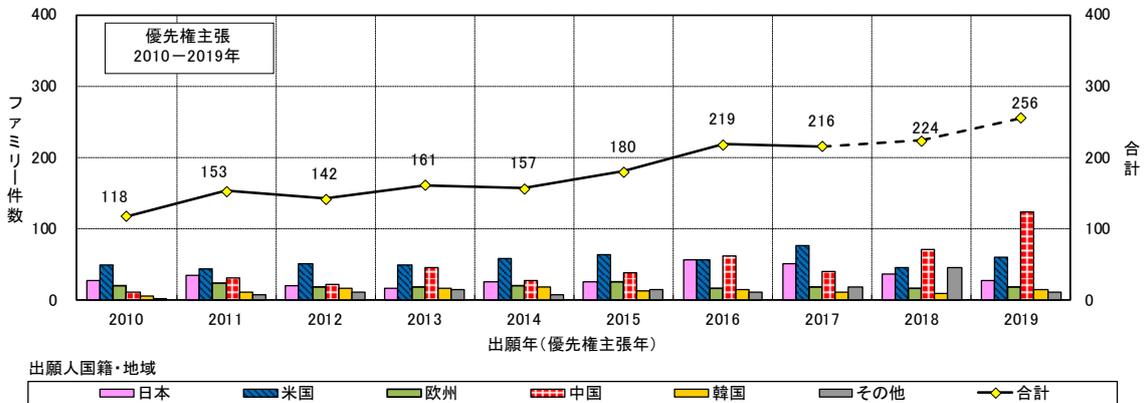
応用用途の磁気センサでは、日本国籍が多く期間中コンスタントにある。応用用途の電流センサでは、日本国籍が多く期間中減少傾向である。

・熱流素子

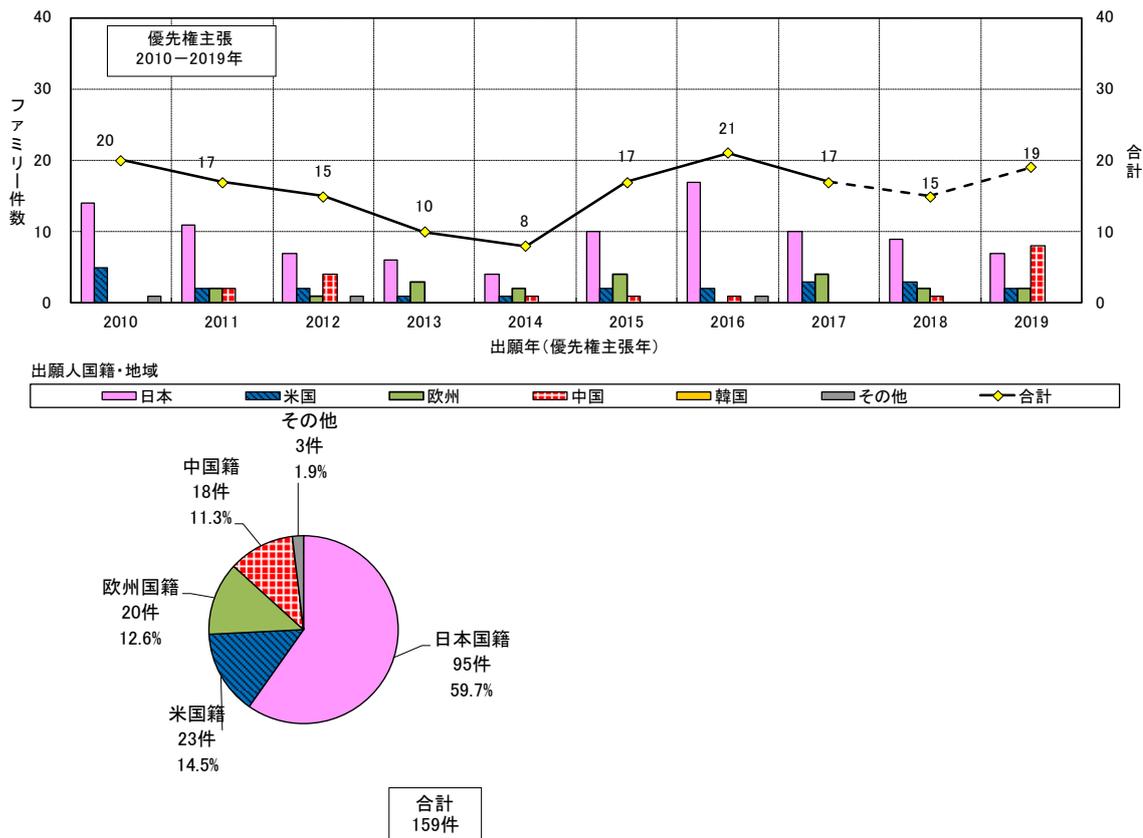
原理・要素技術のスピン流では、中国籍が多く 2014～2017 年にかけて増加している。

図 4-4-16 量子スピントロニクスセンサ [出願先: 日米欧中韓] [技術区分別] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率 (出願年 (優先権主張年): 2010-2019 年)

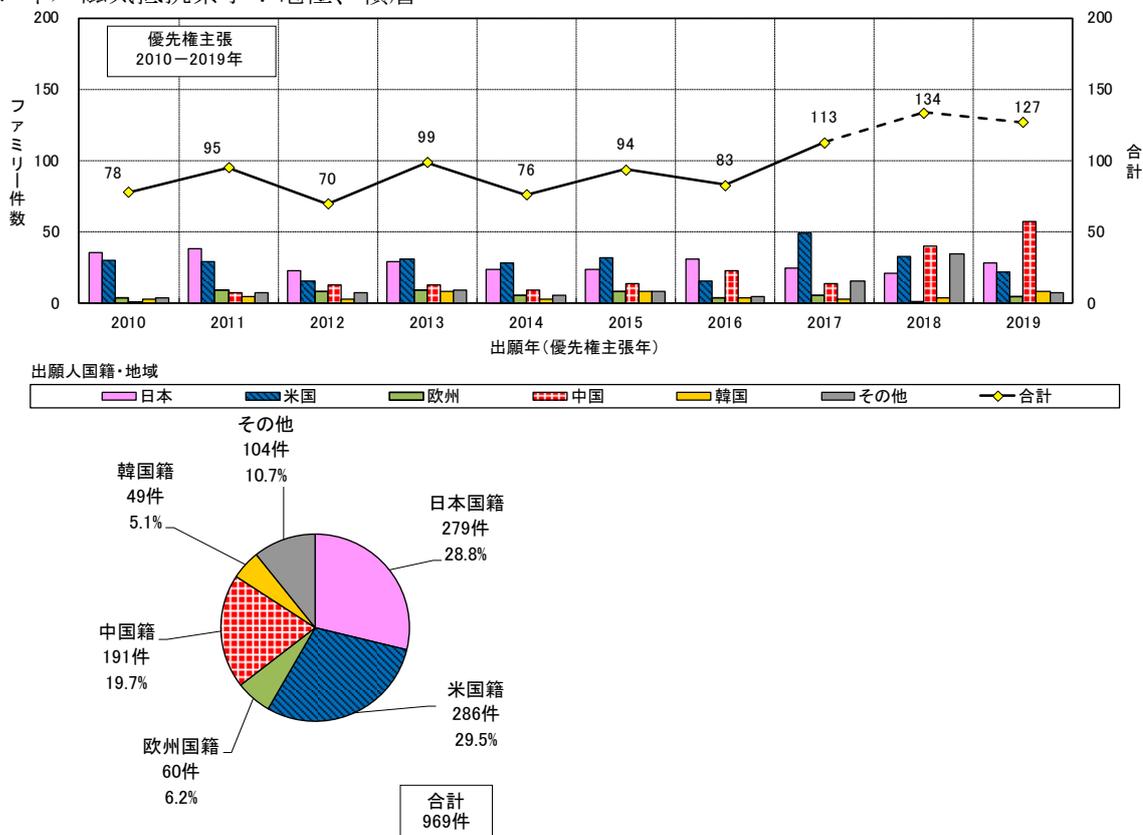
(a) トンネル磁気抵抗素子: MTJ



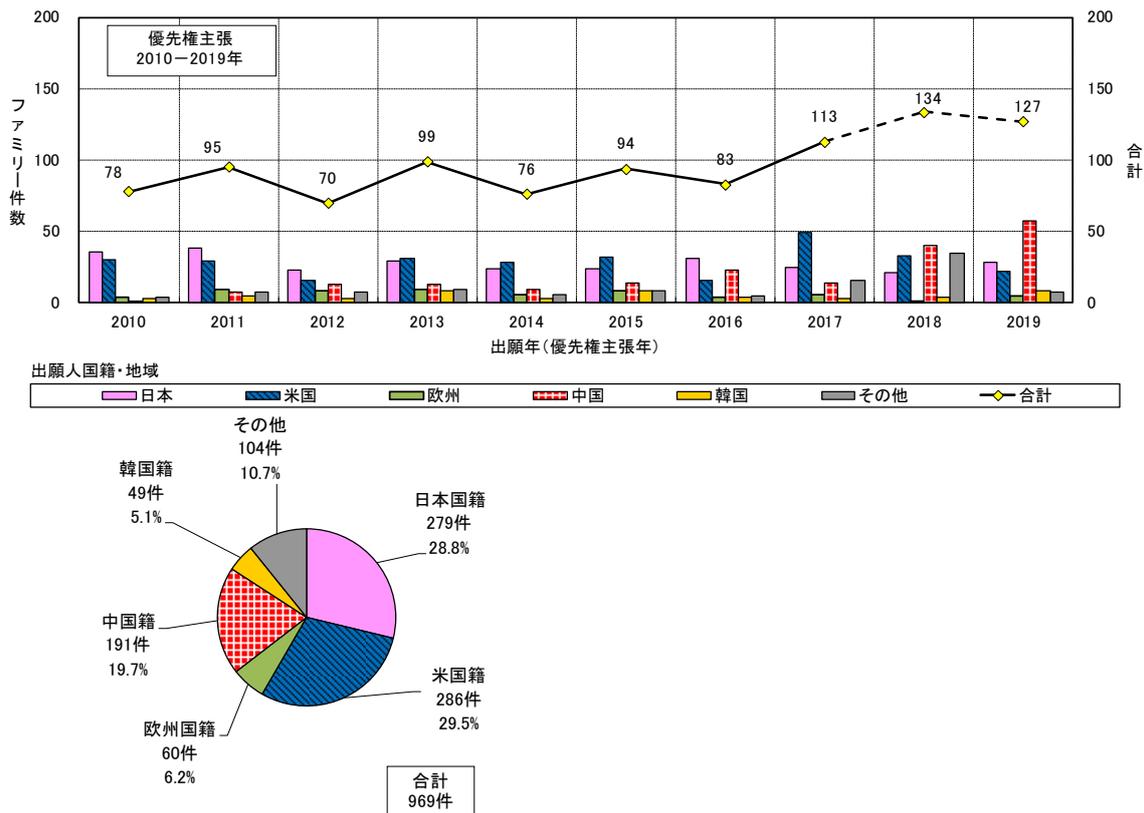
(b) トンネル磁気抵抗素子：磁気フリー層



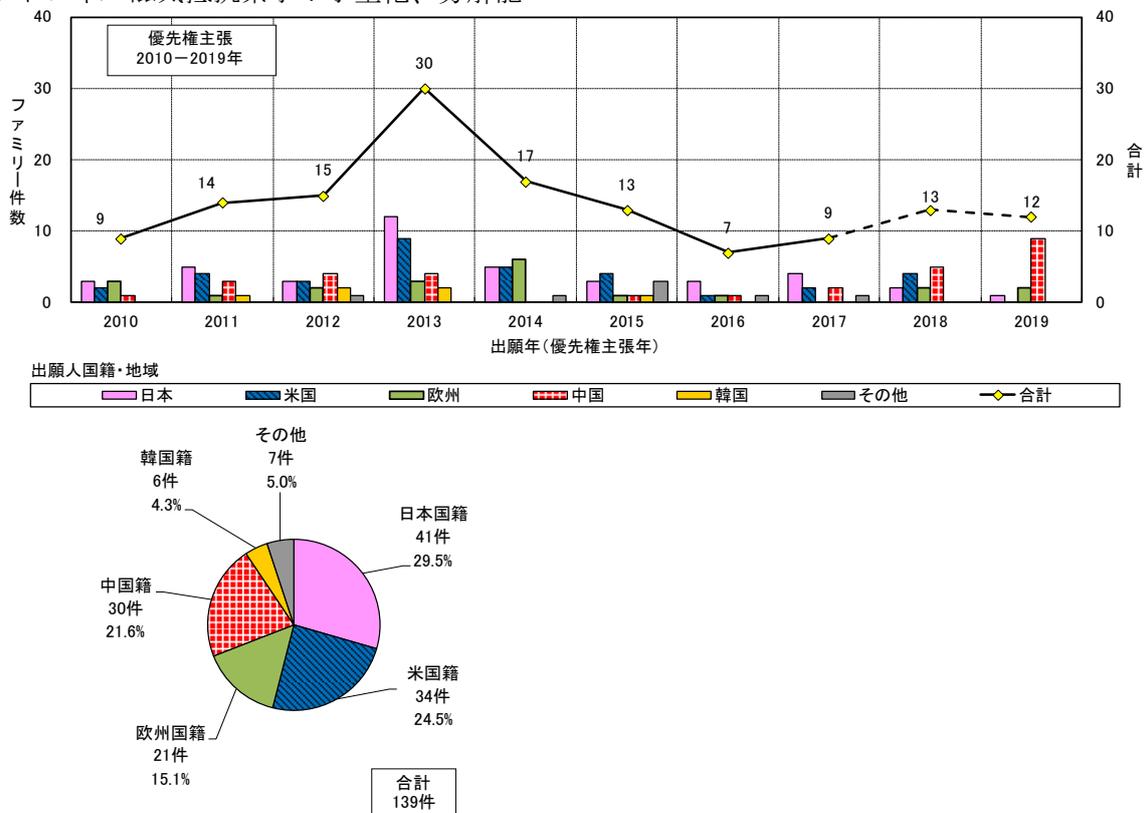
(c) トンネル磁気抵抗素子：電極、積層



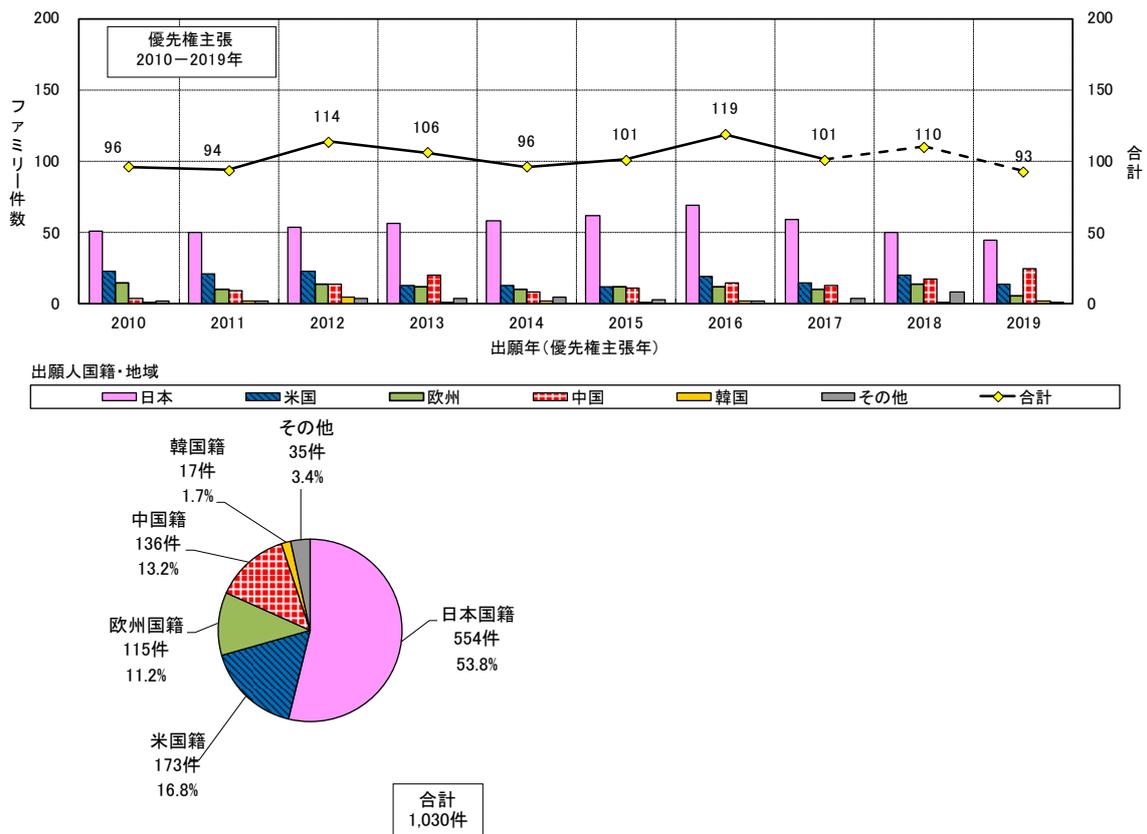
(d) トンネル磁気抵抗素子：感度



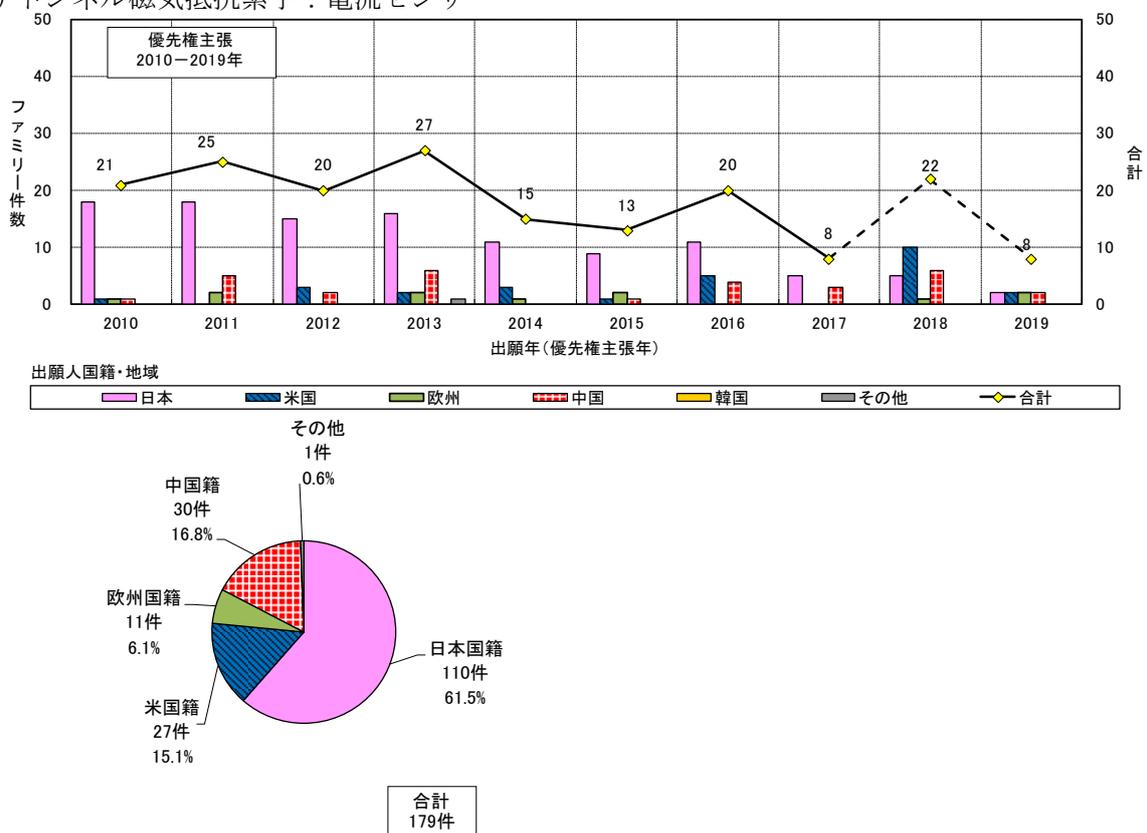
(e) トンネル磁気抵抗素子：小型化、分解能



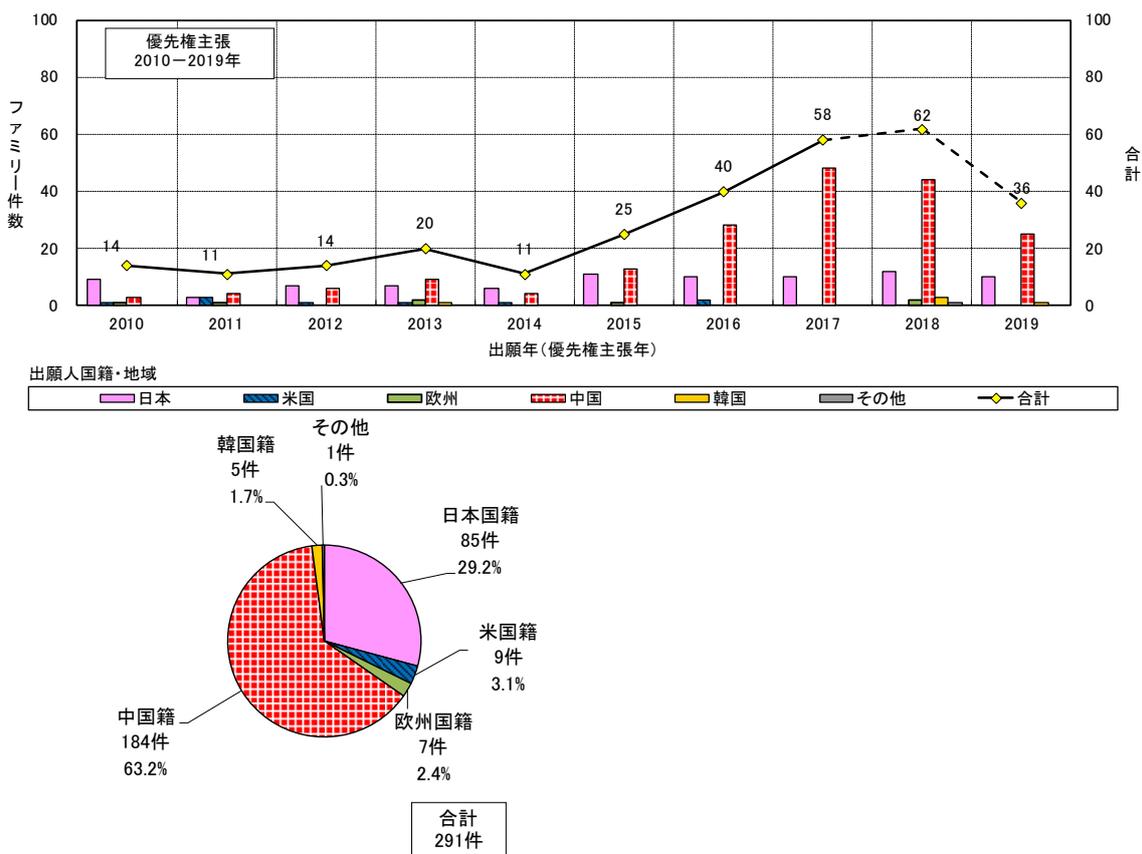
(f) トンネル磁気抵抗素子：磁気センサ



(g) トンネル磁気抵抗素子：電流センサ



(h) 熱流素子：スピンドル



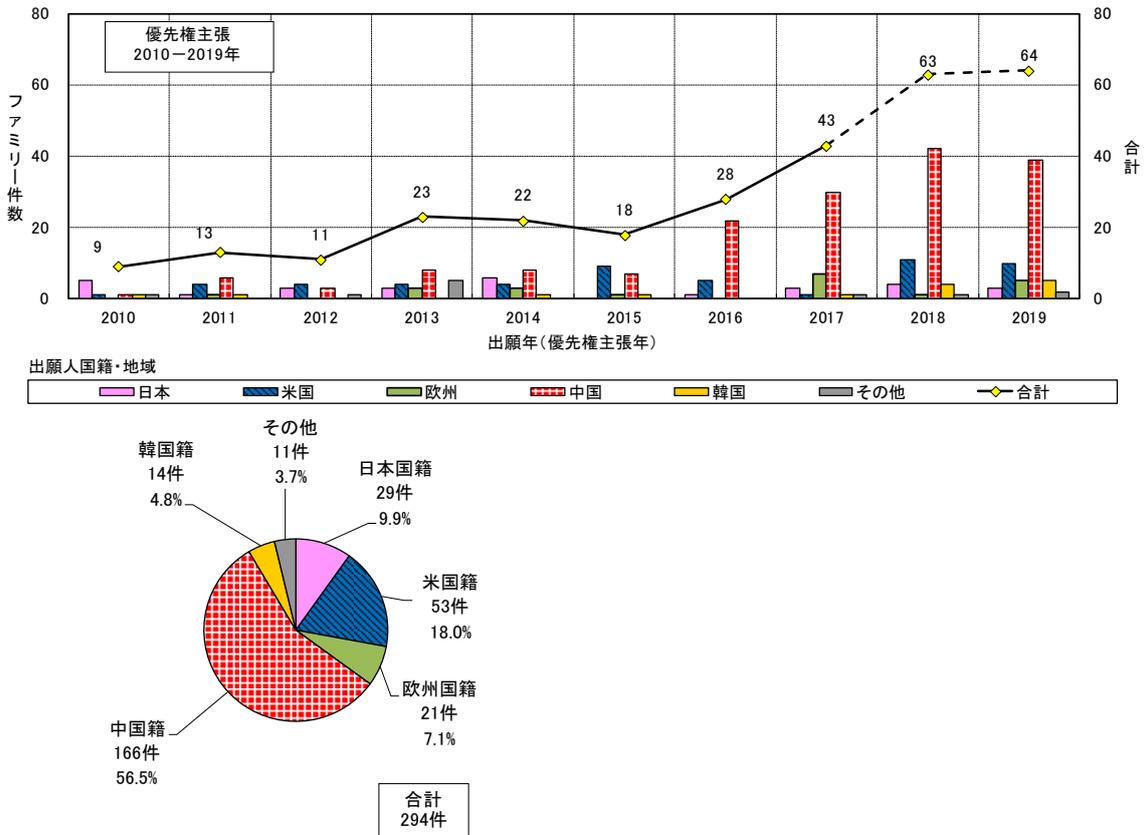
注)2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

3. 量子もつれ光センサ

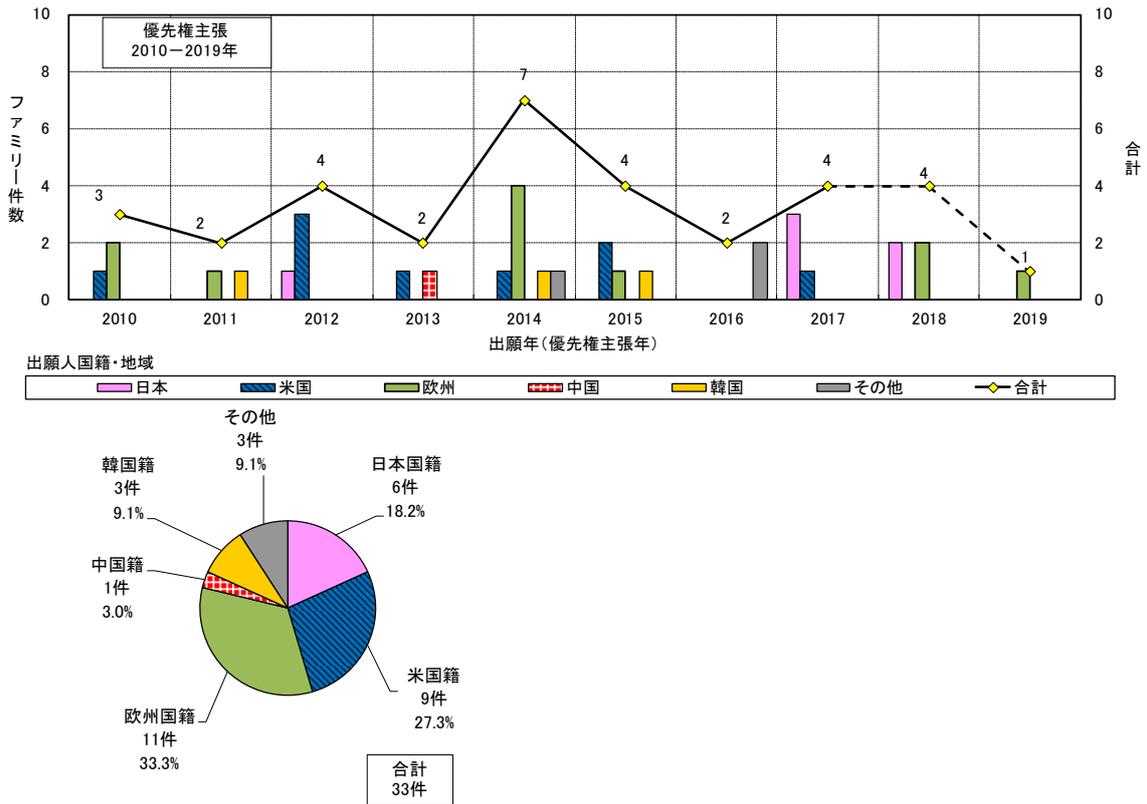
量子もつれ光センサの主な技術区分の出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を図4-4-17に示す。原理・要素技術の量子もつれ、もつれ光子では、中国籍が多く、2015～2018年にかけて増加している。非線形光学素子では、総数は33件と少ないが欧州国籍が多い。アイドラー光子では、総数が35件と少ないが、中国籍が2017～2019年にかけて増加している。

図4-4-17 量子もつれ光センサ [出願先：日米欧中韓] [技術区分別] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

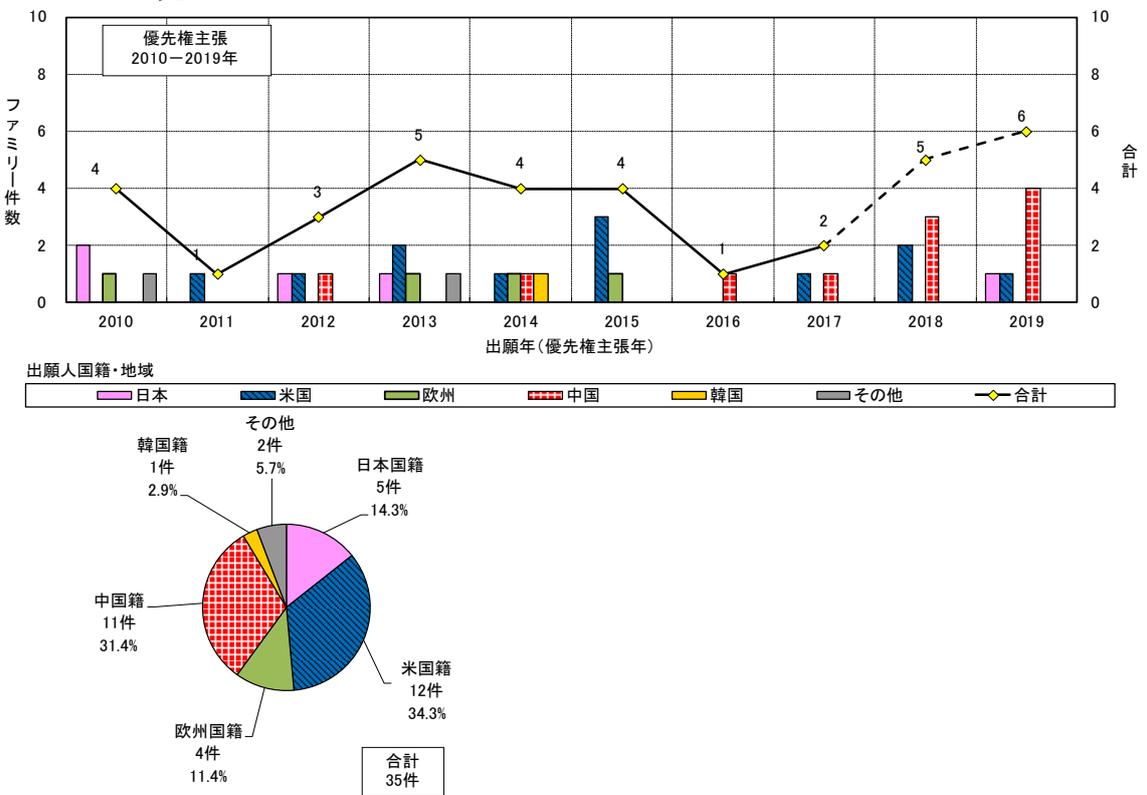
(a) 量子もつれ、もつれ光子



(b) 非線形光学素子



(c) アイドラー光子



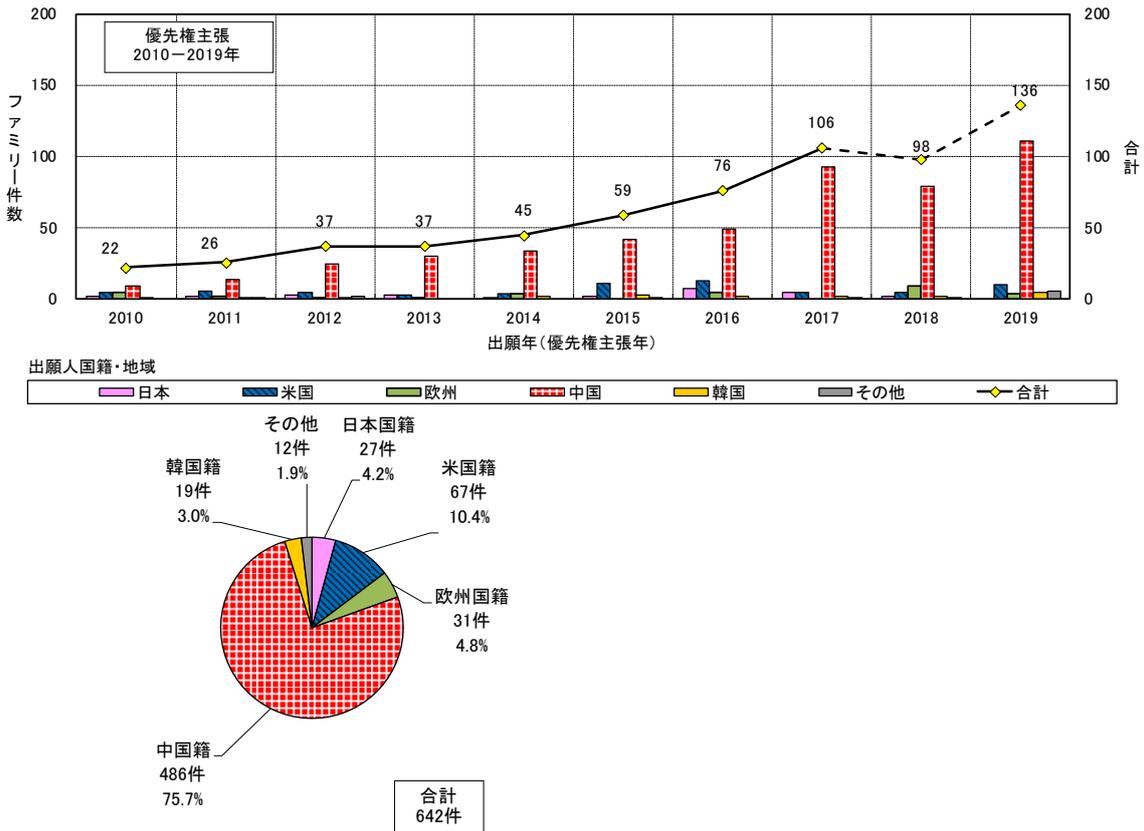
注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

4. 光子検出器

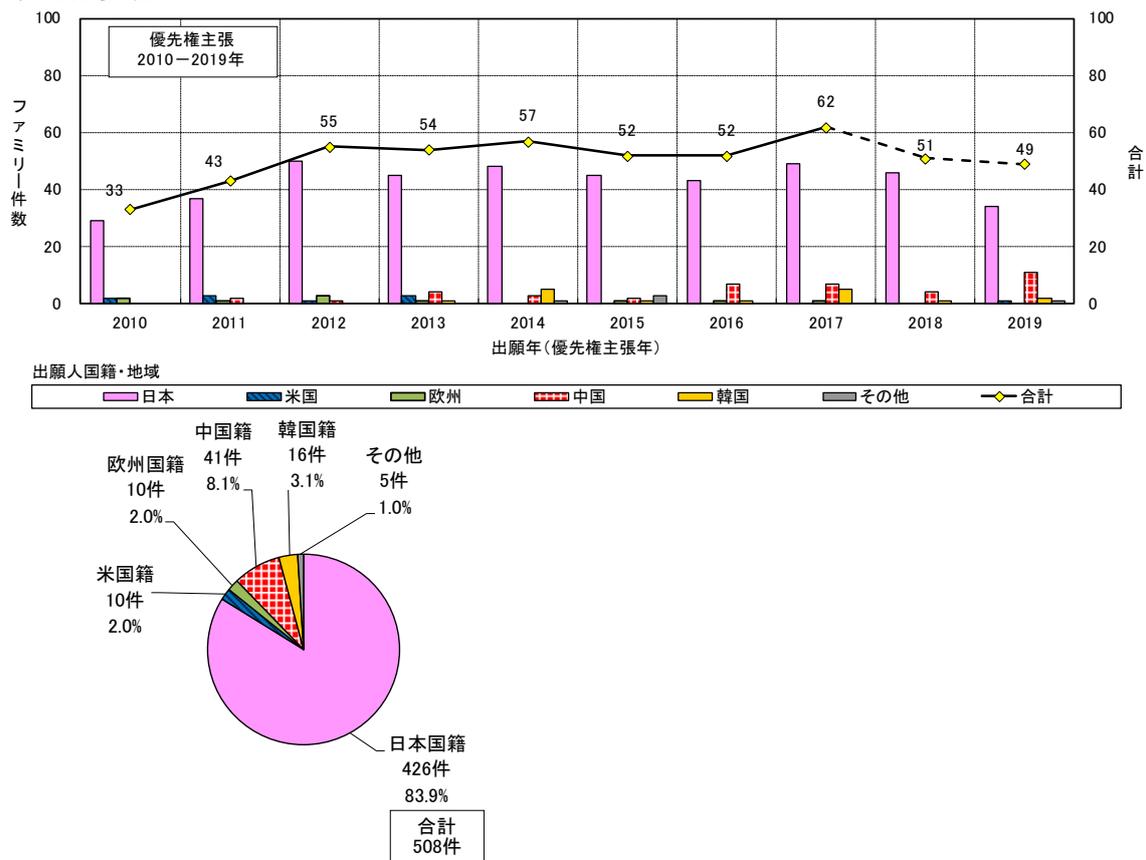
光子検出器の主な技術区分の出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を図 4-4-18 に示す。原理・要素技術の単一光子検出器では、中国籍が多く期間中増加している。構造・材料の誘電体多層膜では、日本国籍が多く期間中コンスタントにある。

図 4-4-18 光子検出器 [出願先: 日米欧中韓] [技術区分別] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率 (出願年 (優先権主張年): 2010-2019 年)

(a) 単一光子検出器



(b) 誘電体多層膜



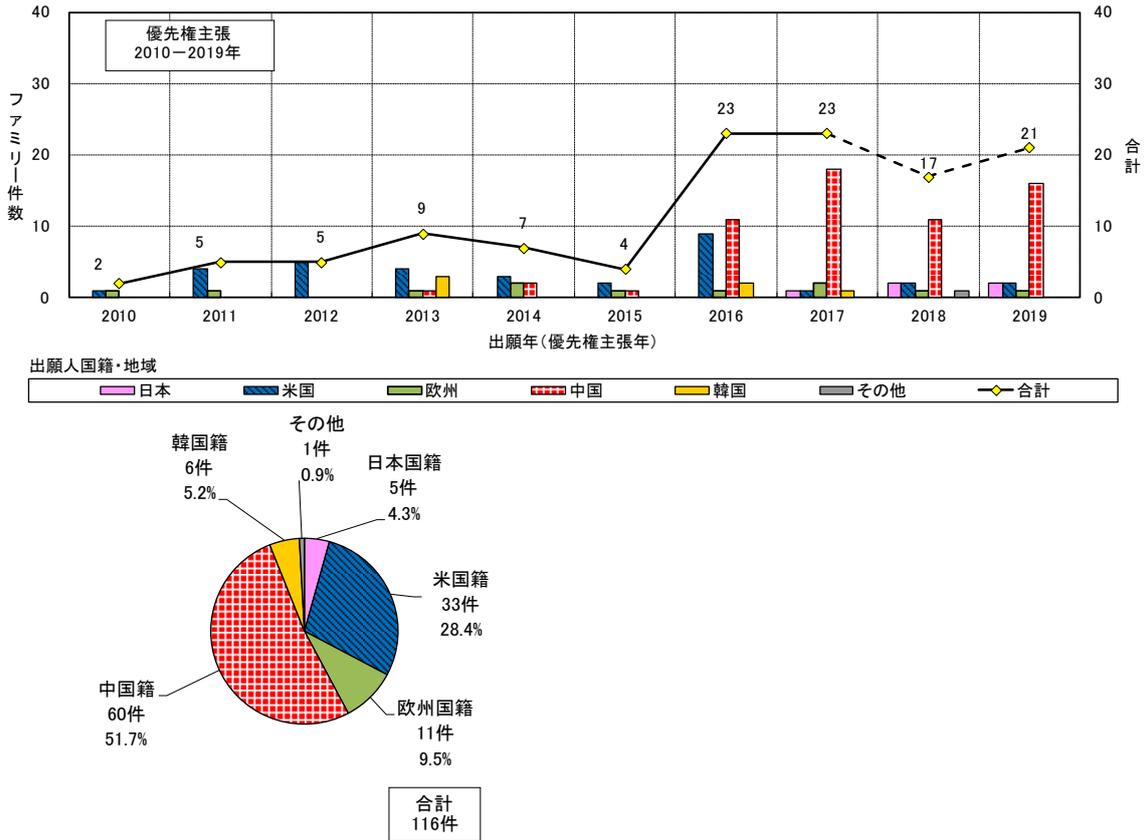
注)2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

5. 量子慣性センサ

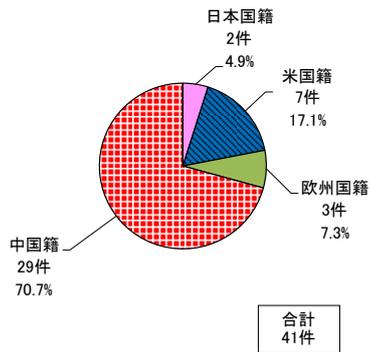
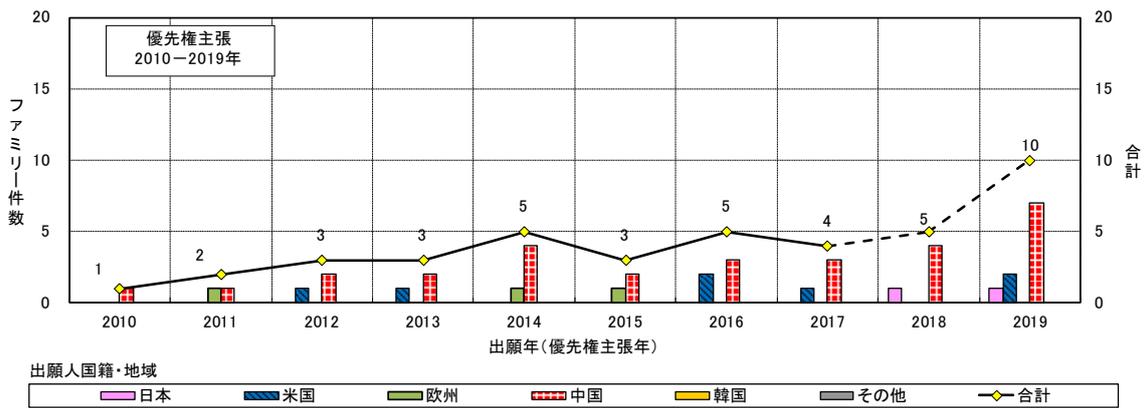
量子慣性センサの主な技術区分の出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を図4-4-19に示す。原理・要素技術の原子干渉計では、中国籍が多く、2016～2019年が多い。原子ジャイロでは、中国籍が多く。2015～2019年にかけて増加している。

図4-4-19 量子慣性センサ [出願先：日米欧中韓] [技術区分別] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

(a) 原子干渉計



(b) 原子ジャイロ



注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

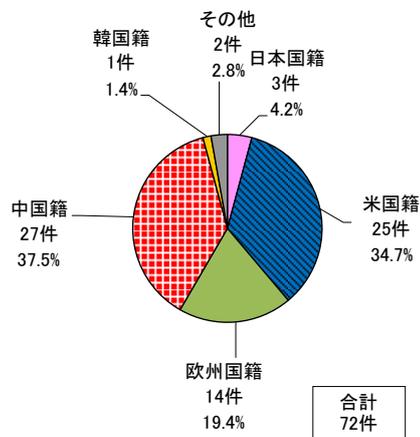
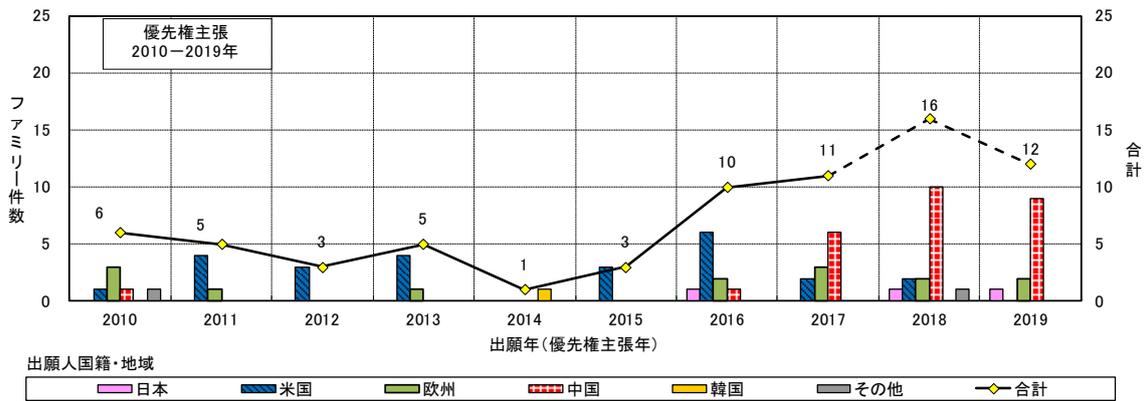
6. 光格子時計

光格子時計の主な技術区分の出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を図 4-4-20 に示す。原理・要素技術の磁気光学トラップと光学トラップでは、米国籍と中国籍が多いが、中国籍は、2017～2019 年が多い。信号処理では、中国籍が多く 2012～2017 年にかけて増加傾向である。

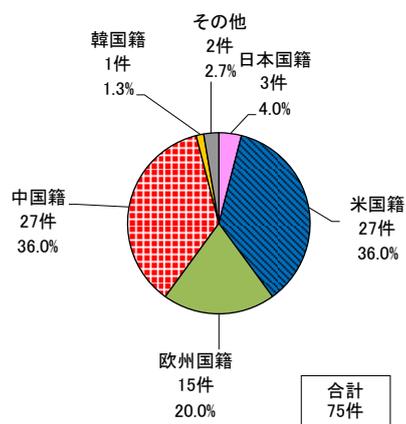
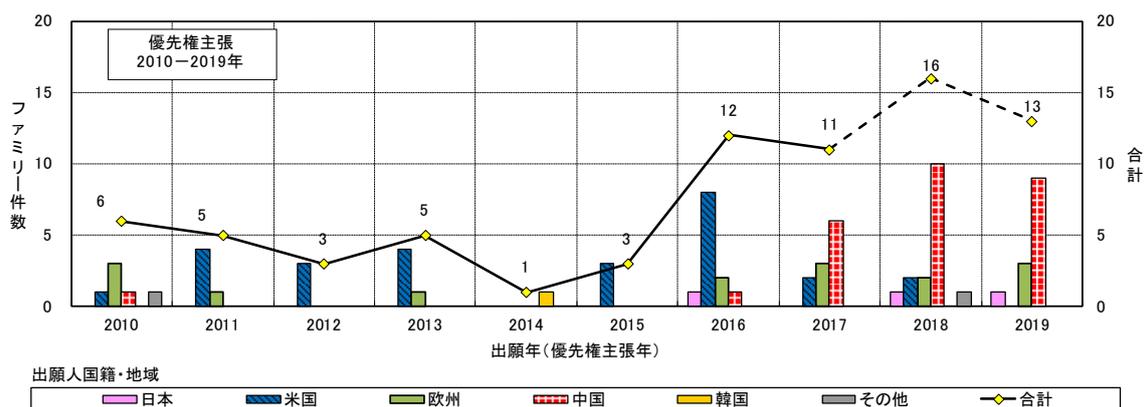
応用用途の時刻同期では、中国籍が多く 2015～2017 年にかけて増加している。

図 4-4-20 光格子時計 [出願先: 日米欧中韓] [技術区分別] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率 (出願年 (優先権主張年): 2010-2019 年)

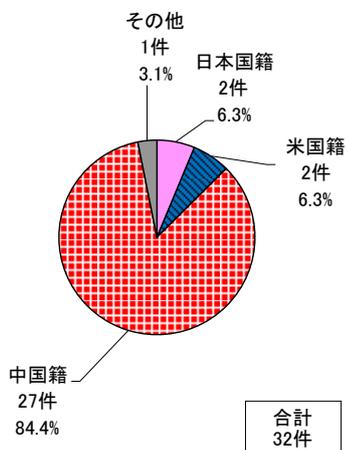
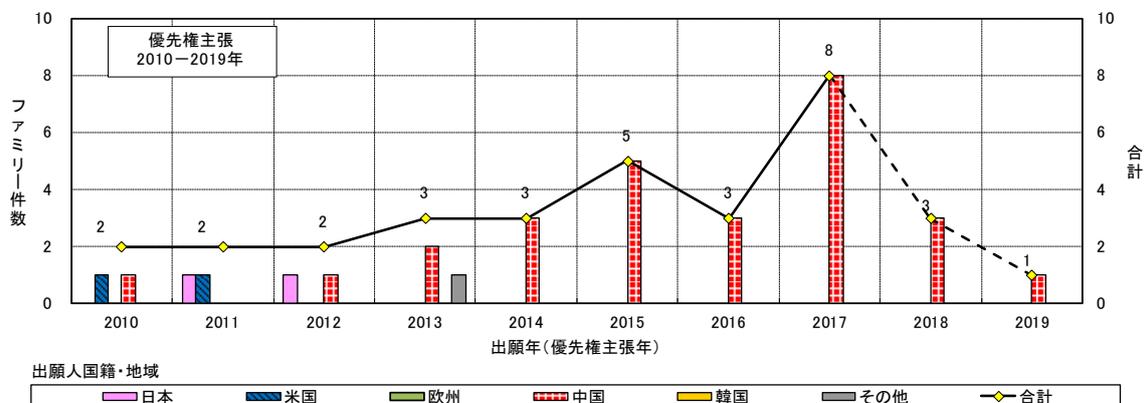
(a) 磁気光学トラップ



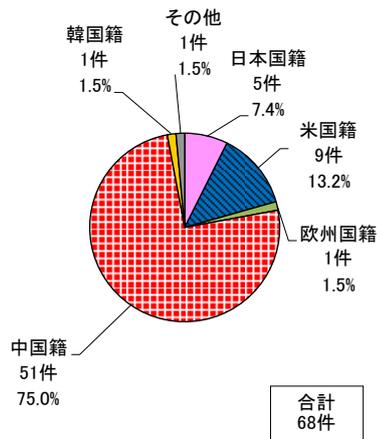
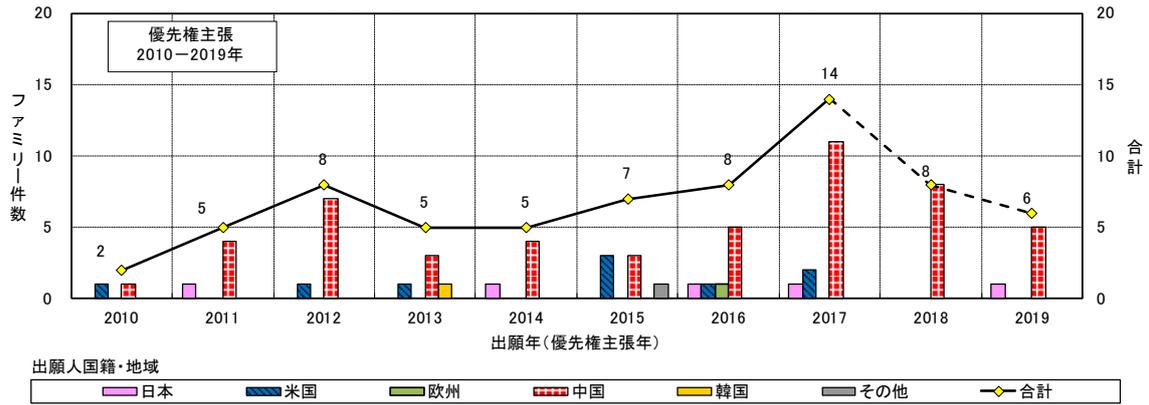
(b) 光学トラップ



(c) 信号処理



(d) 時刻同期



注)2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

7. その他技術

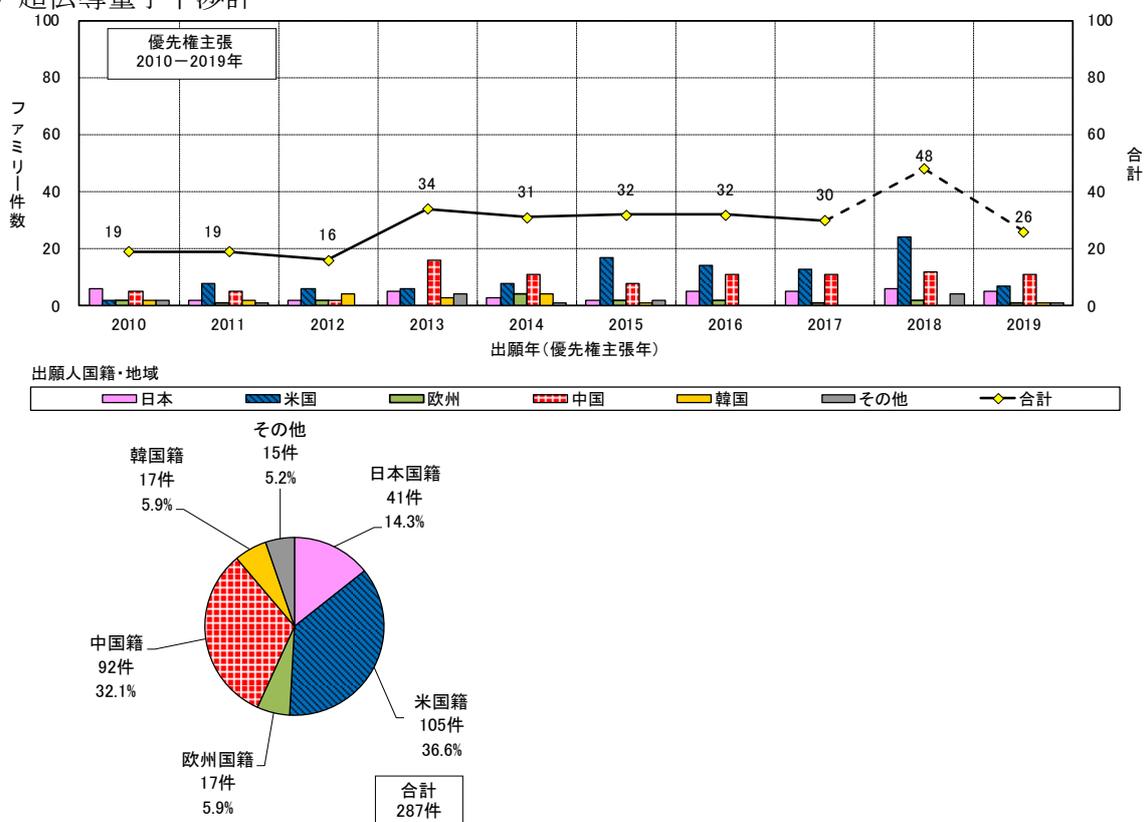
その他技術（SQUID）の主な技術区分の出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率を図 4-4-21 に示す。原理・要素技術の超伝導量子干渉計では、米国籍と中国籍が多く、中国籍は 2013 年が多く、米国籍は 2018 年が多い。原理・要素技術のジョセフソン接合では、米国籍が多く、2013～2018 年にかけて増加傾向である。原理・要素技術の膜、ビームでは、米国籍、中国籍が多く、どちらも 2013 年から 2017 年にかけて増加傾向である。

課題の低コスト化では、米国籍が多く、2018 年が多い。

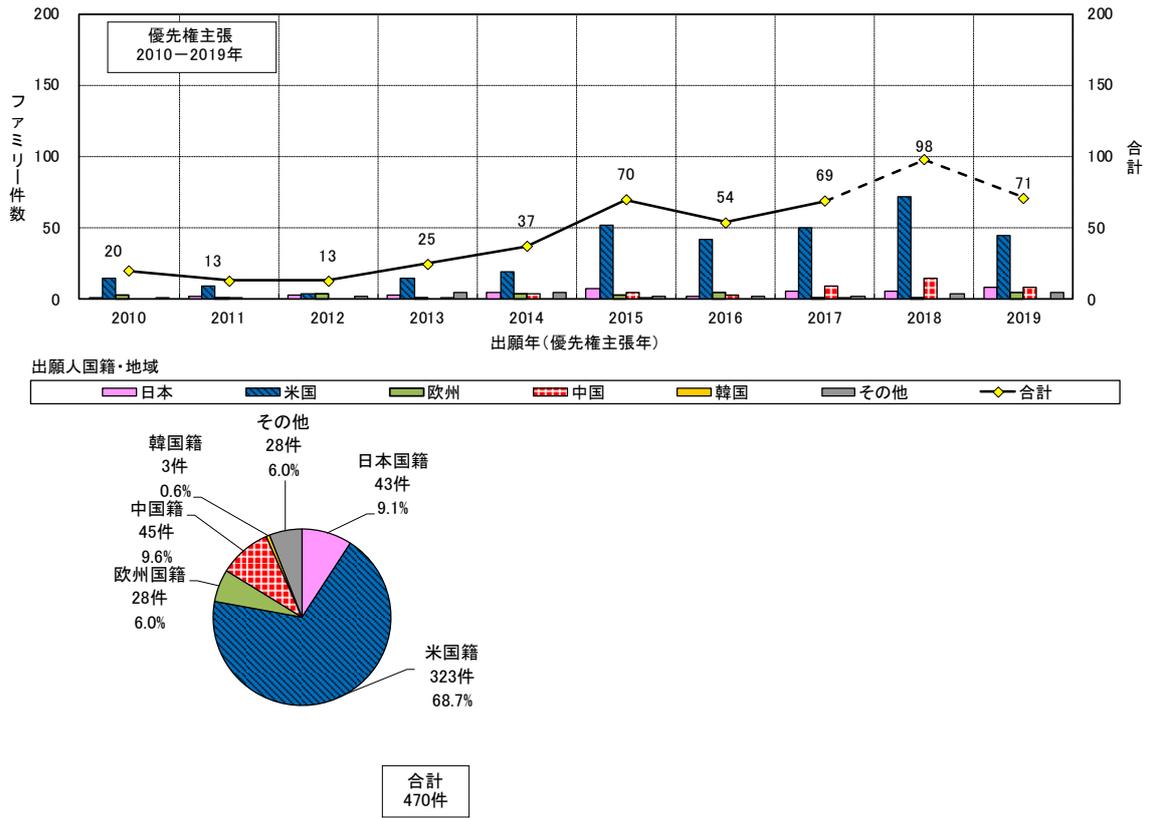
応用用途の高感度局所磁場センサでは、日本国籍が多く、2013 年以降が多い。

図 4-4-21 その他技術（SQUID）[出願先：日米欧中韓] [技術区分別] 出願人国籍別ファミリー件数推移及びファミリー件数比率（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

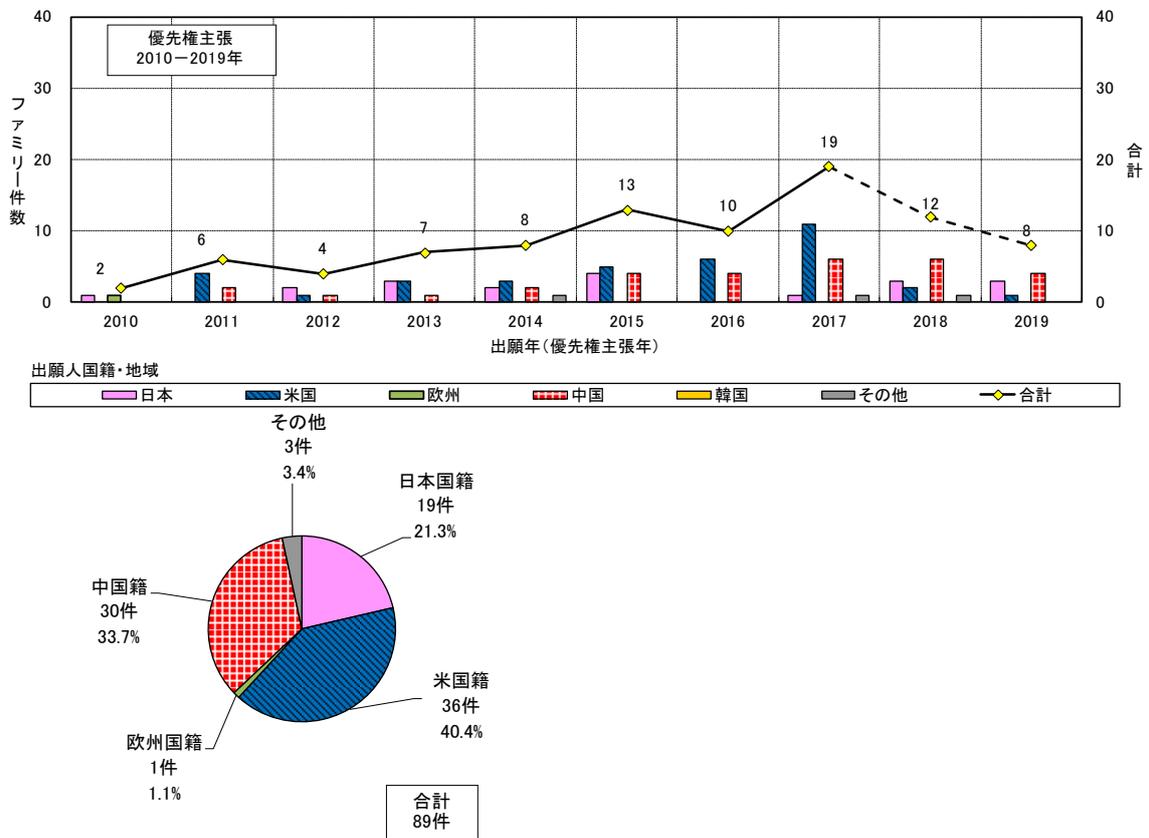
(a) 超伝導量子干渉計



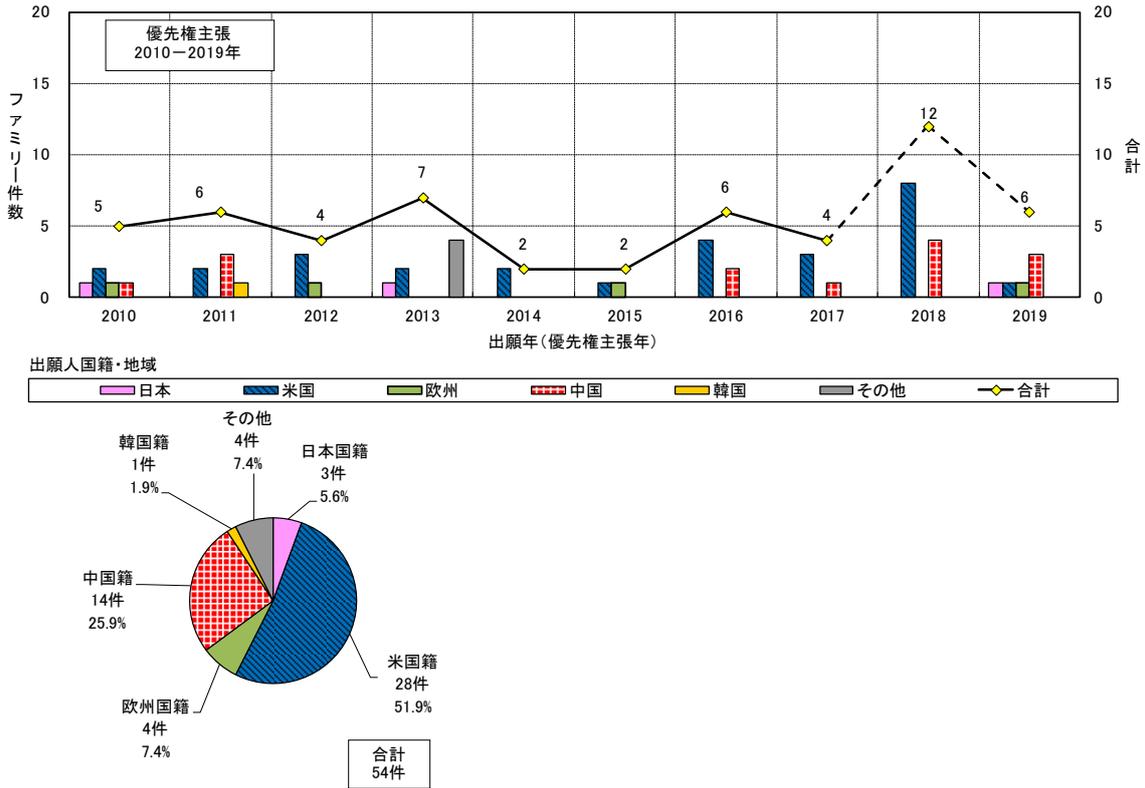
(b) ジョセフソン接合



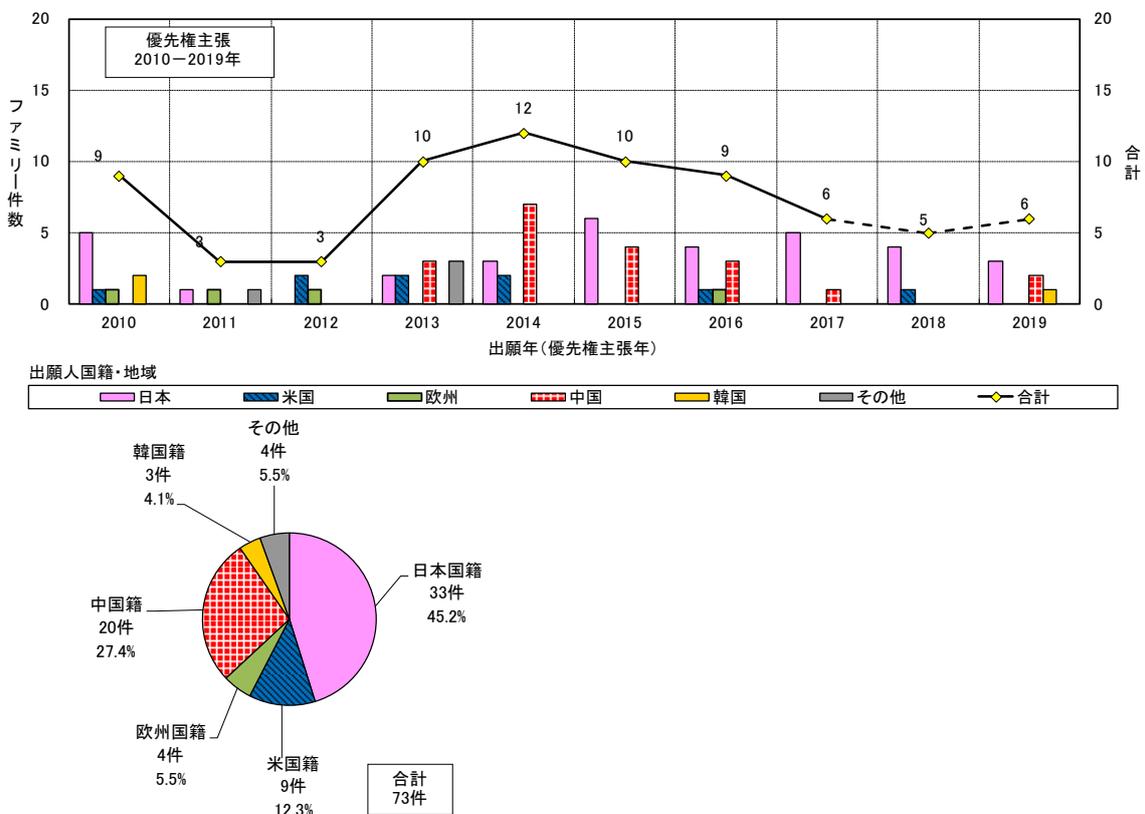
(c) 膜、ビーム



(d) 低コスト化



(e) 高感度局所磁場センサ



注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

第5節 [出願先：日米欧中韓] [技術区分別] 出願人別ファミリー一件数推移

量子計測・センシング技術の [技術区分別] 出願人別ファミリー一件数推移を示す。各区分の主要出願人の技術区分動向を見ることができる。

1. 固体量子センサ

固体量子センサの [技術区分別] 出願人別ファミリー一件数推移を図 4-4-22 に示す。

Lockheed Martin (米国) は、2014～2017 年が多く、原理・要素技術の NV センタ、構造・材料のダイヤモンド、課題の感度、応用用途の磁気、磁場センサの出願が多い。

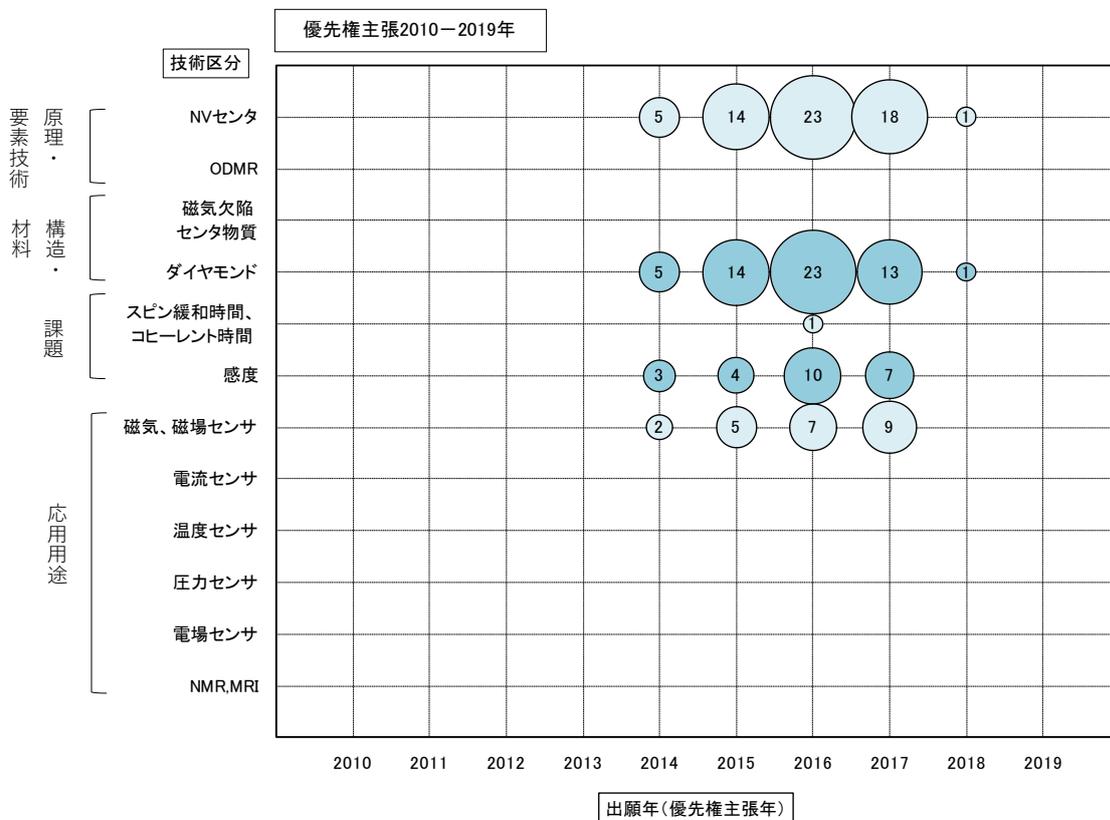
Harvard University (米国) は、2011 年と 2015 年が多い。原理・要素技術の NV センタと構造・材料のダイヤモンドが多い。

中北大学 (中国) は、2015～2018 年にかけて増加しており、原理・要素技術の NV センタ、構造・材料のダイヤモンド、課題の感度が多い。

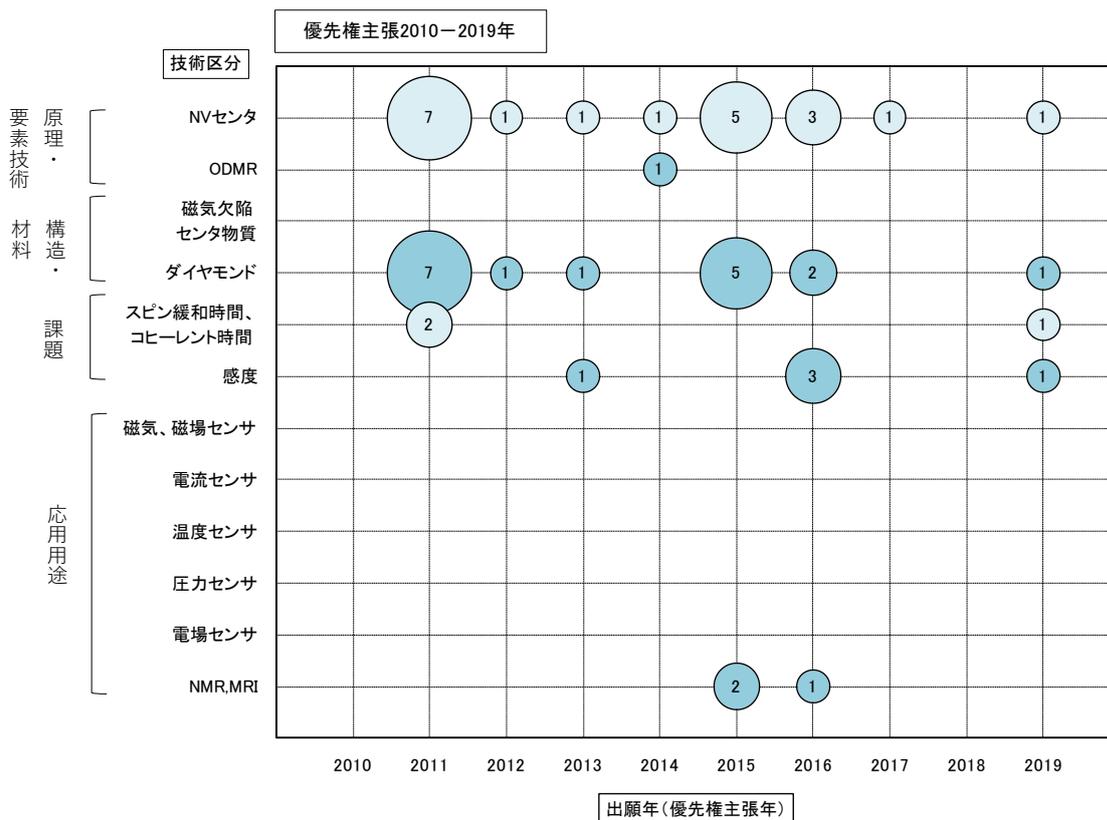
東京工業大学は、2014～2019 年にかけて出願している。原理・要素技術の NV センタ、構造・材料のダイヤモンド、課題の感度、応用用途の磁気、磁場センサ、温度センサ、圧力センサ、電場センサの出願がある。

図 4-4-22 固体量子センサ [出願先：日米欧中韓] 技術区分別—出願人別ファミリー一件数推移 (出願年 (優先権主張年)：2010-2019 年)

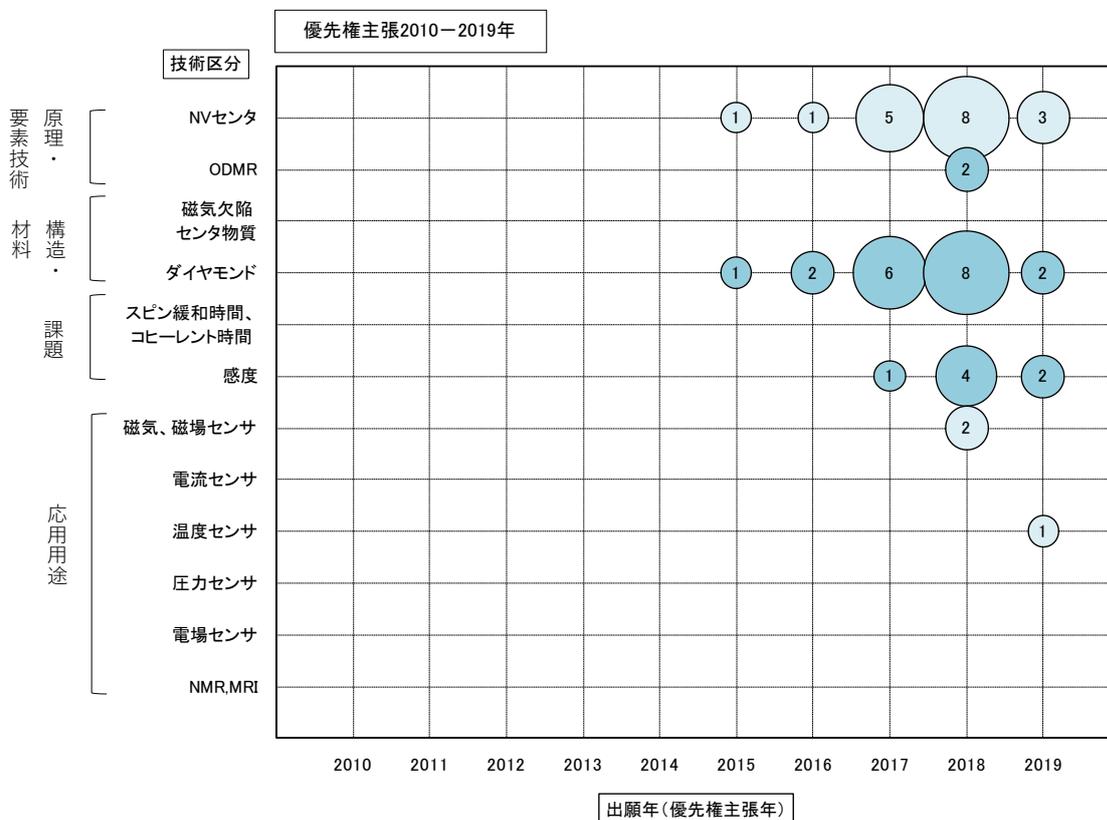
(a) Lockheed Martin (米国)



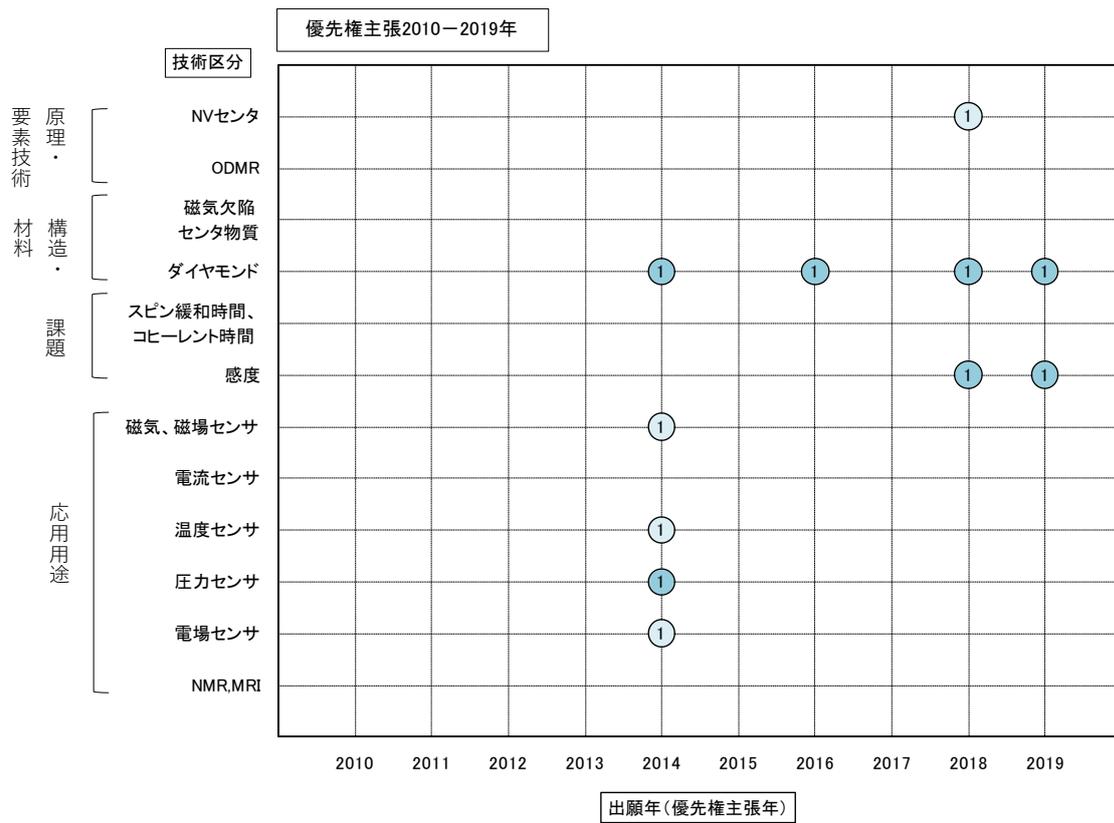
(b) Harvard University (米国)



(c) 中北大学 (中国)



(d) 東京工業大学



注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサの〔技術区分別〕出願人別ファミリー件数推移を図 4-4-23 に示す。

・トンネル磁気抵抗素子

TDK は、2015～2019 年が多い。原理・要素技術の磁気フリー層、構造・材料の電極、積層、応用用途の磁気センサが多い。

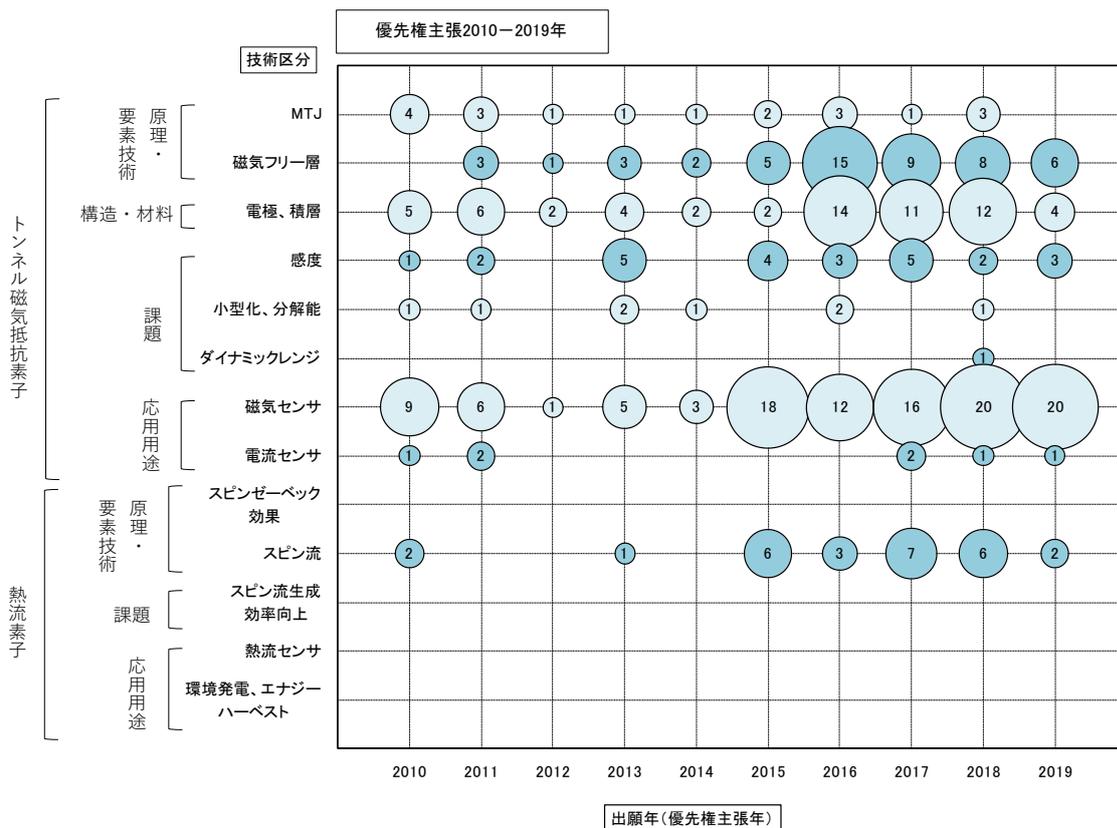
アルプスアルパインは、2010～2016 年が多い。課題の感度、応用用途の磁気センサ、電流センサが多い。

IBM（米国）は、2014～2019 年が多い。原理・要素技術の MTJ、構造・材料の電極、積層が多い。

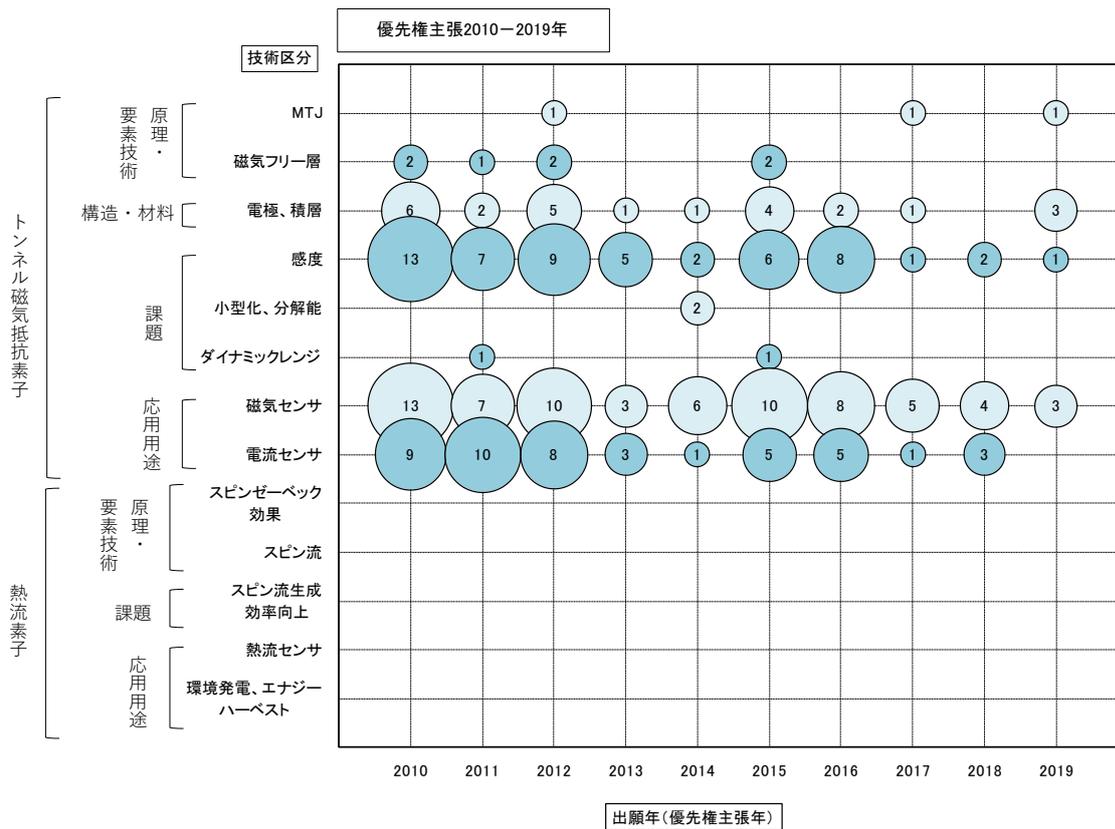
東北大学は、期間中コンスタントにある。原理・要素技術の MTJ、構造・材料の電極、積層、課題の感度、応用用途の磁気センサが多い。

図 4-4-23 量子スピントロニクスセンサ〔出願先：日米欧中韓〕技術区分別—出願人別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

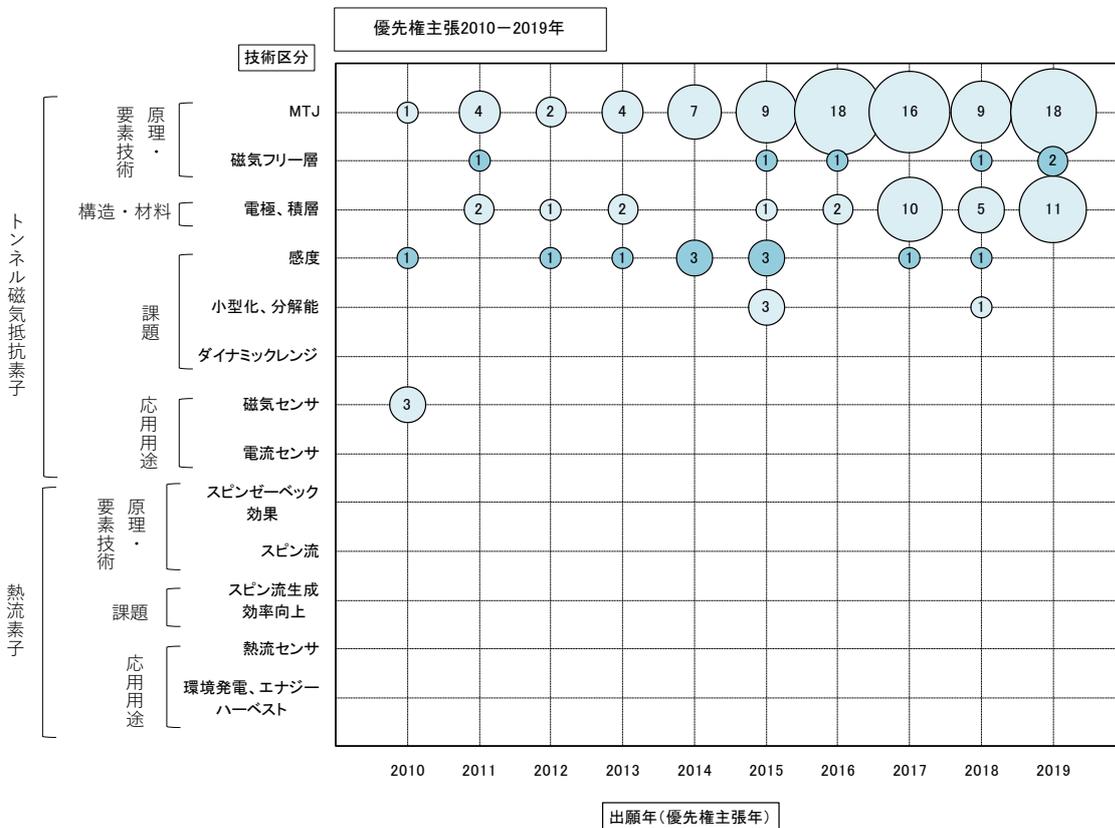
(a) TDK



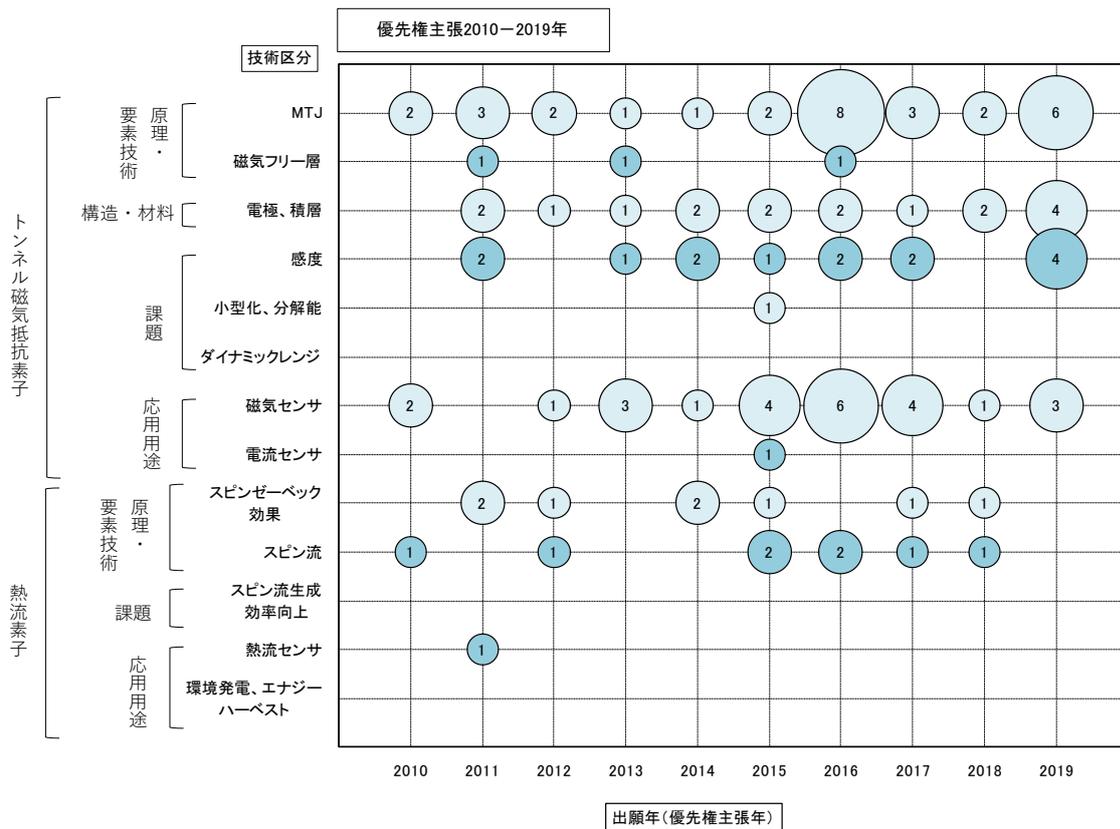
(b) アルプスアルパイン



(c) IBM (米国)



(d) 東北大学



注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

3. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサの〔技術区分別〕出願人別ファミリー件数推移を図4-4-24に示す。

中国科学院（中国）は、原理・要素技術の量子もつれ、もつれ光子、課題の感度向上、分解能向上、応用用途の量子もつれ顕微鏡、量子レーダーがある。

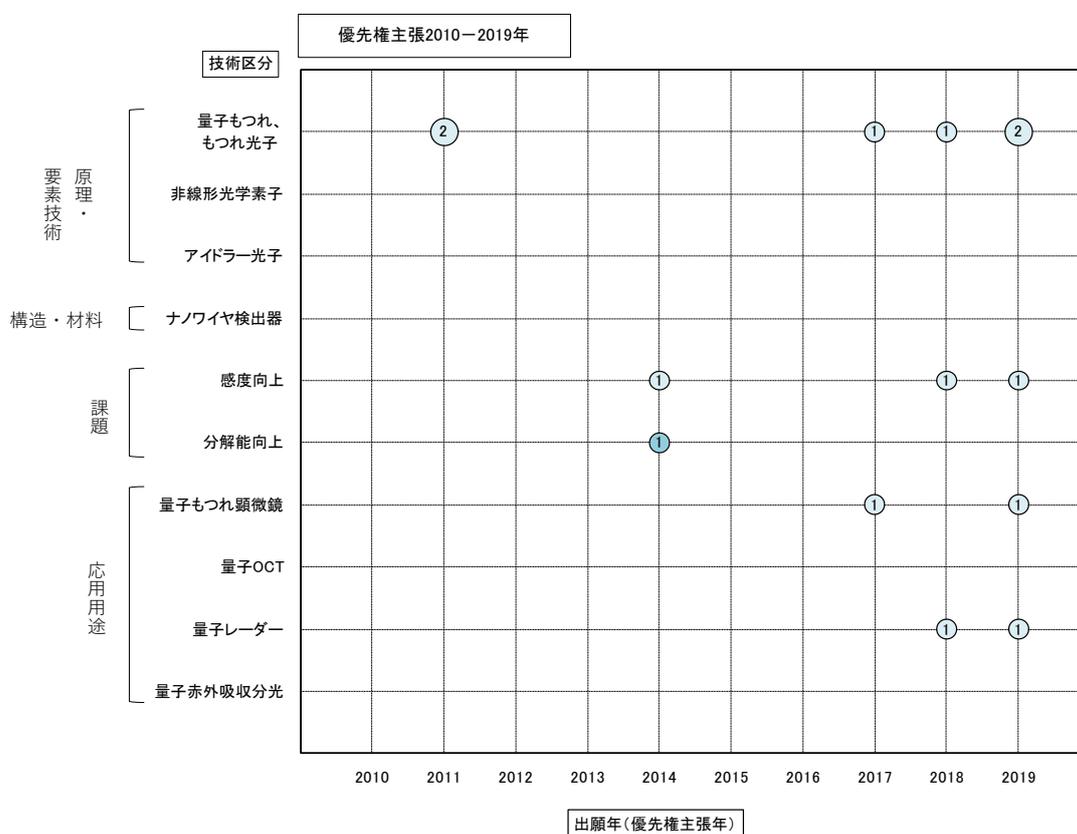
浙江工商大学（中国）は、原理・要素技術の量子もつれ、もつれ光子がある。

南京大学（中国）は、原理・要素技術のアイドラー光子、構造・材料のナノワイヤ検出器、課題の感度向上、分解能向上がある。

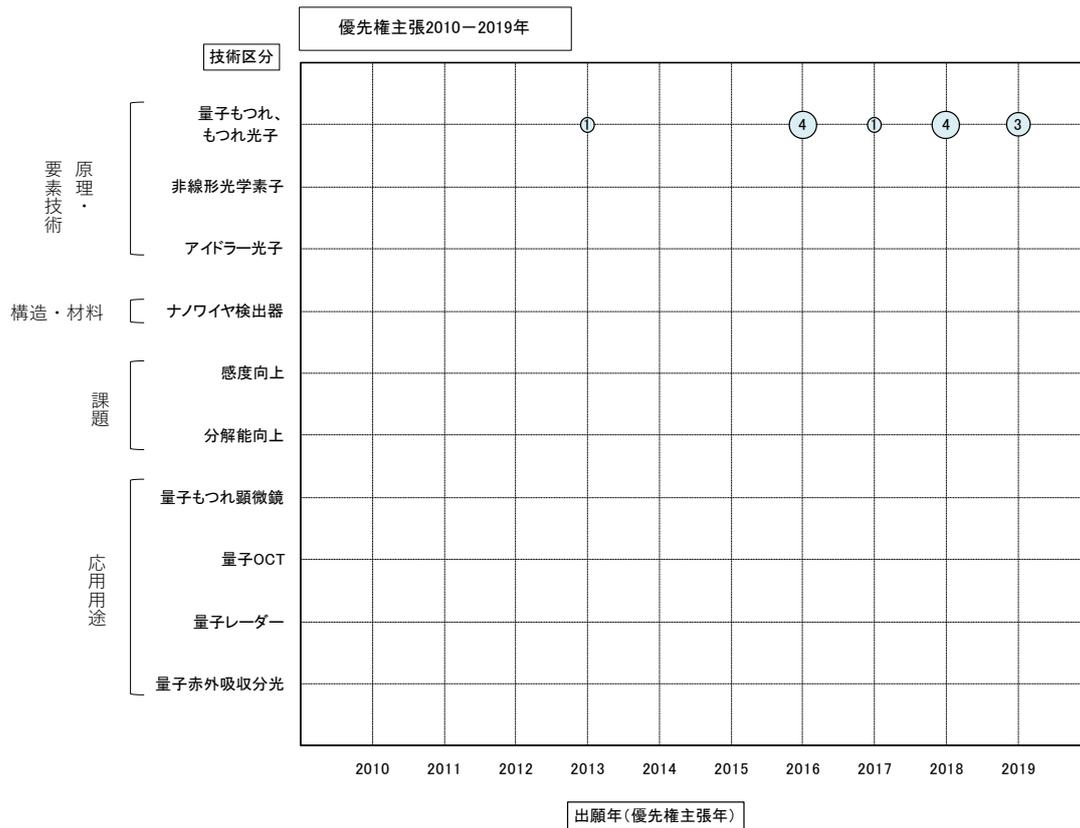
京都大学は、原理・要素技術の量子もつれ、もつれ光子、アイドラー光子、課題の感度向上がある。

図4-4-24 量子もつれ光センサ〔出願先：日米欧中韓〕技術区分別－出願人別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019年）

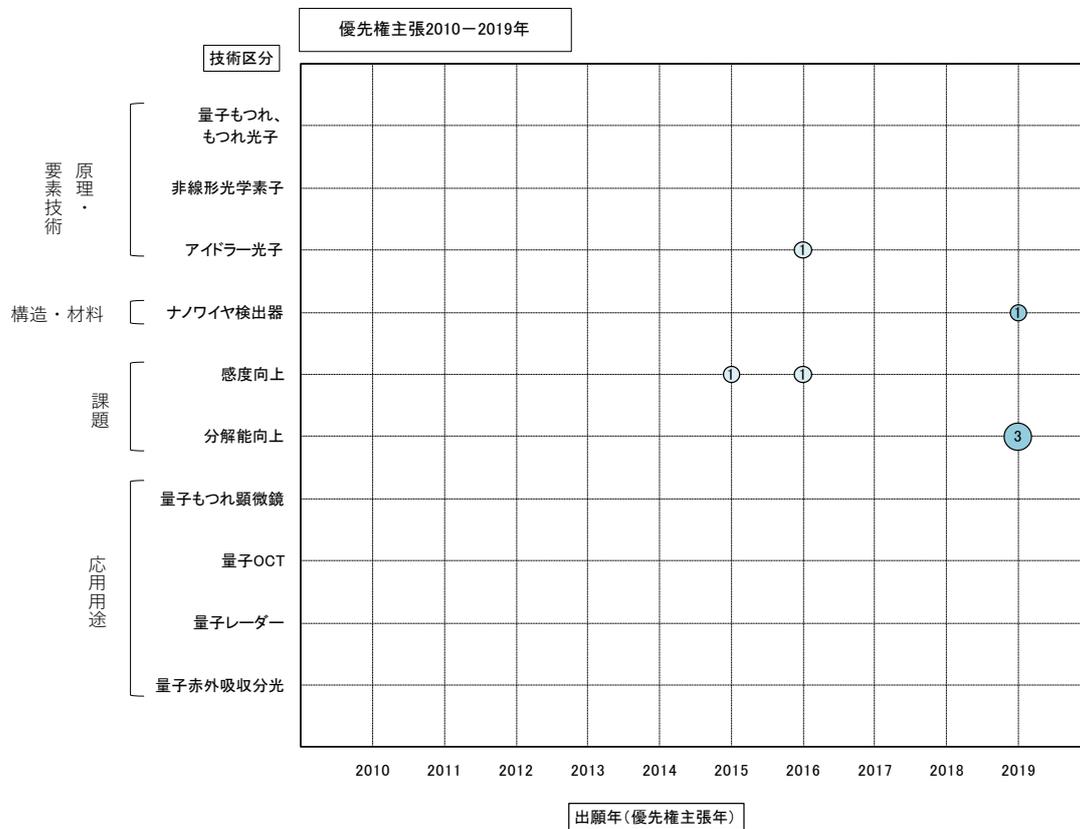
(a) 中国科学院（中国）



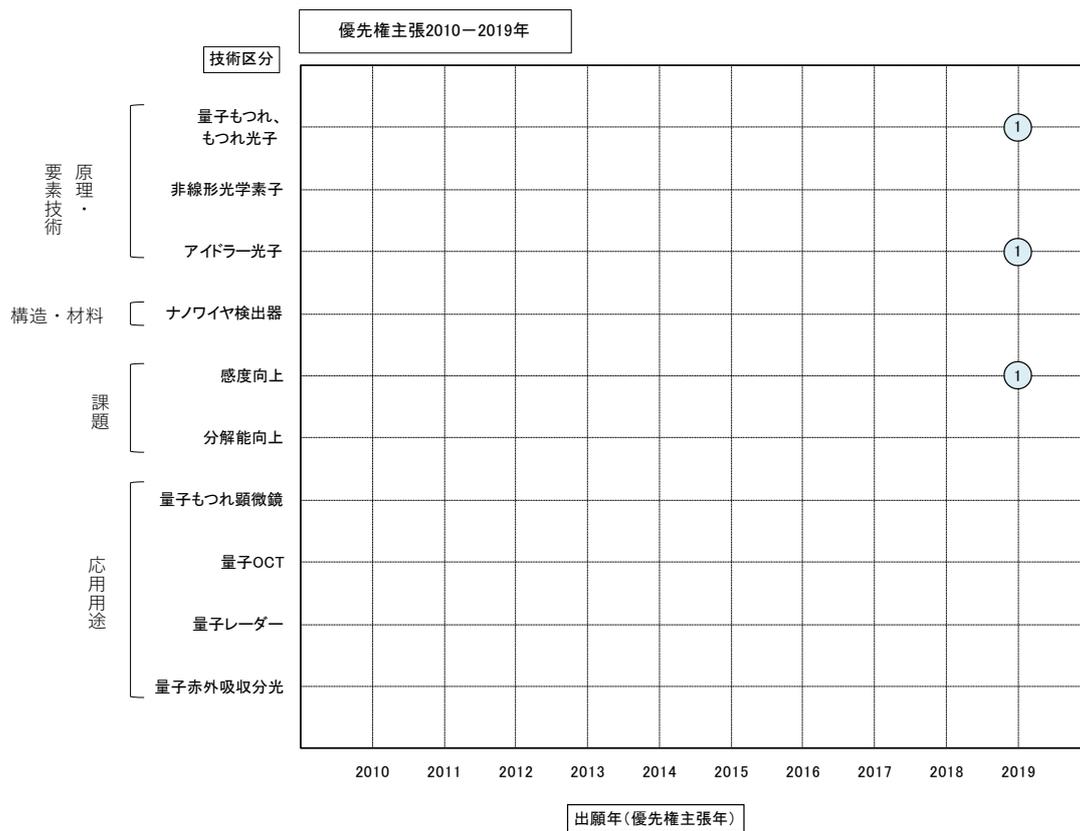
(b) 浙江工商大学 (中国)



(c) 南京大学 (中国)



(d) 京都大学



注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

4. 光子検出器

光子検出器の〔技術区分別〕出願人別ファミリー件数推移を図 4-4-25 に示す。

中国科学院(中国)は、期間中増加傾向であるが、原理・要素技術の単一光子検出器、SSPD、課題の光吸収効率向上、感度が多い。

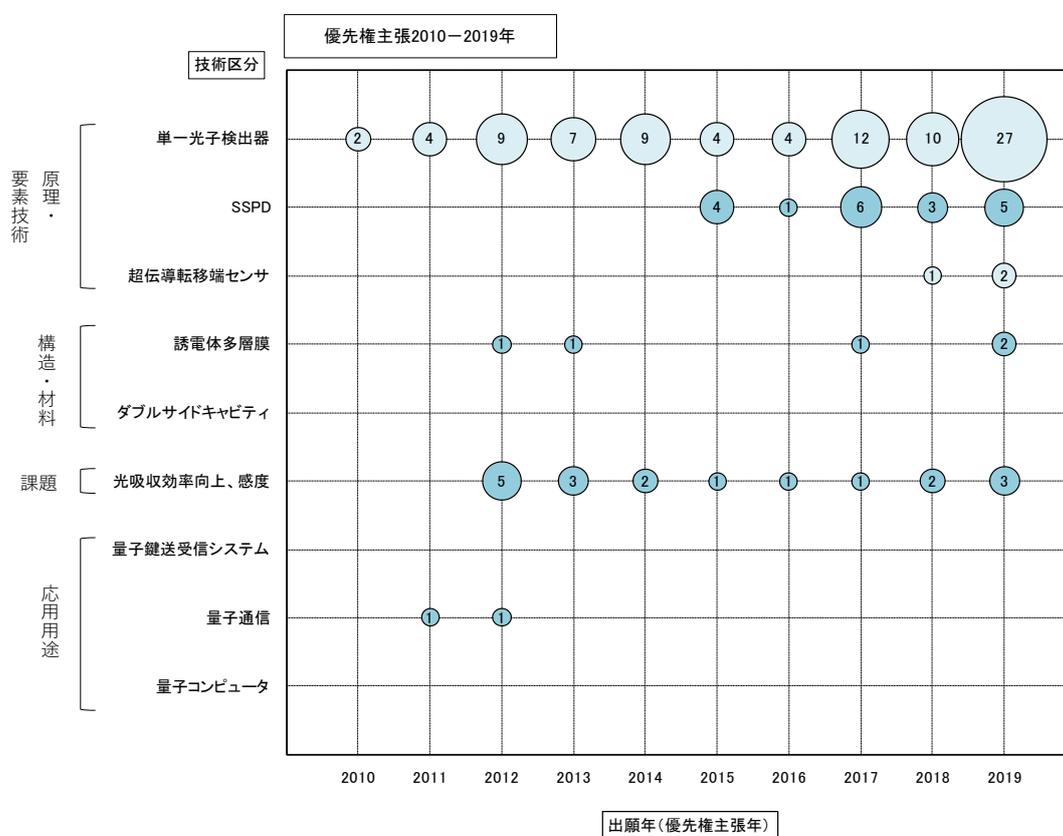
コニカミノルタは、構造・材料の誘電体多層膜が多い。

日亜化学工業は、構造・材料の誘電体多層膜が多い。

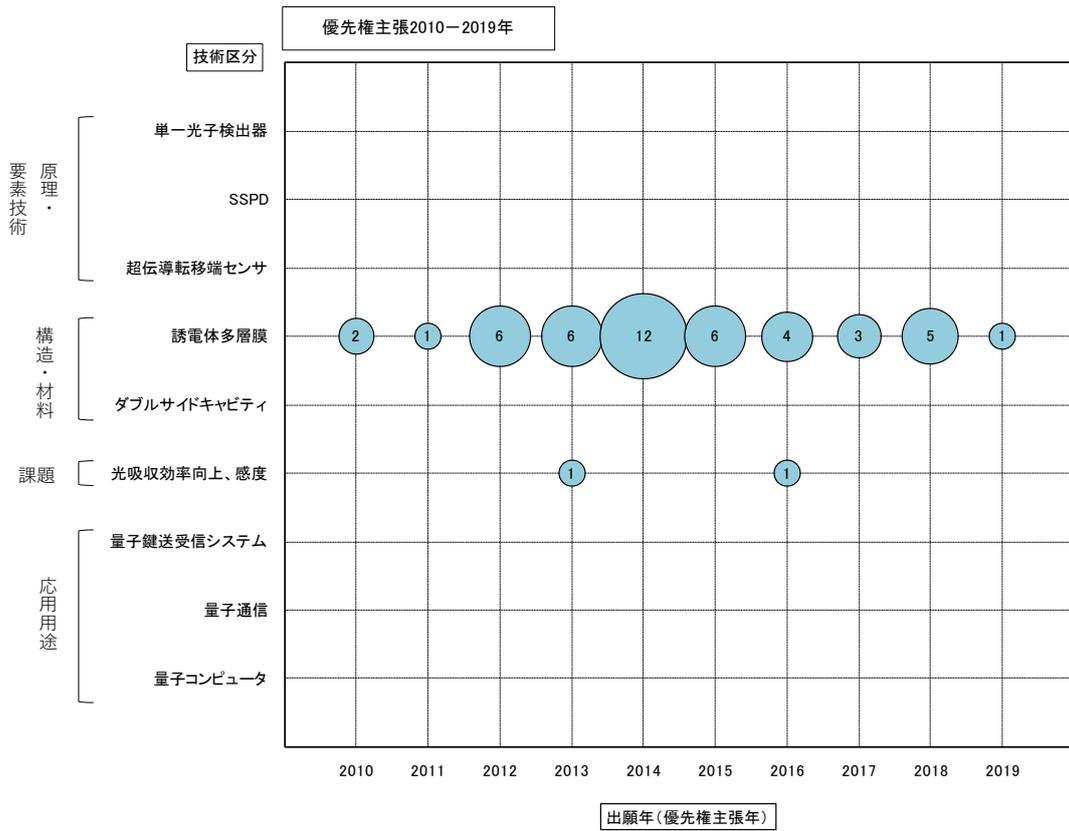
産業技術総合研究所は、構造・材料の誘電体多層膜と課題の光吸収効率向上、感度がある。

図 4-4-25 光子検出器〔出願先：日米欧中韓〕技術区分別－出願人別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

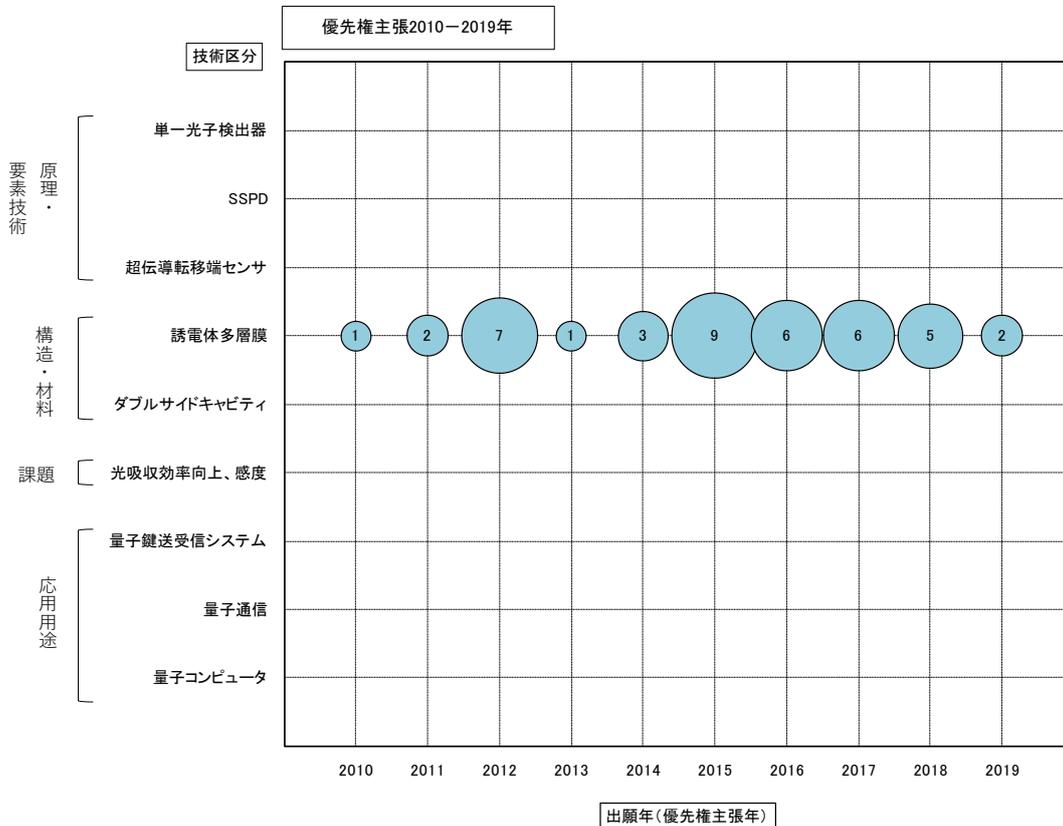
(a) 中国科学院（中国）



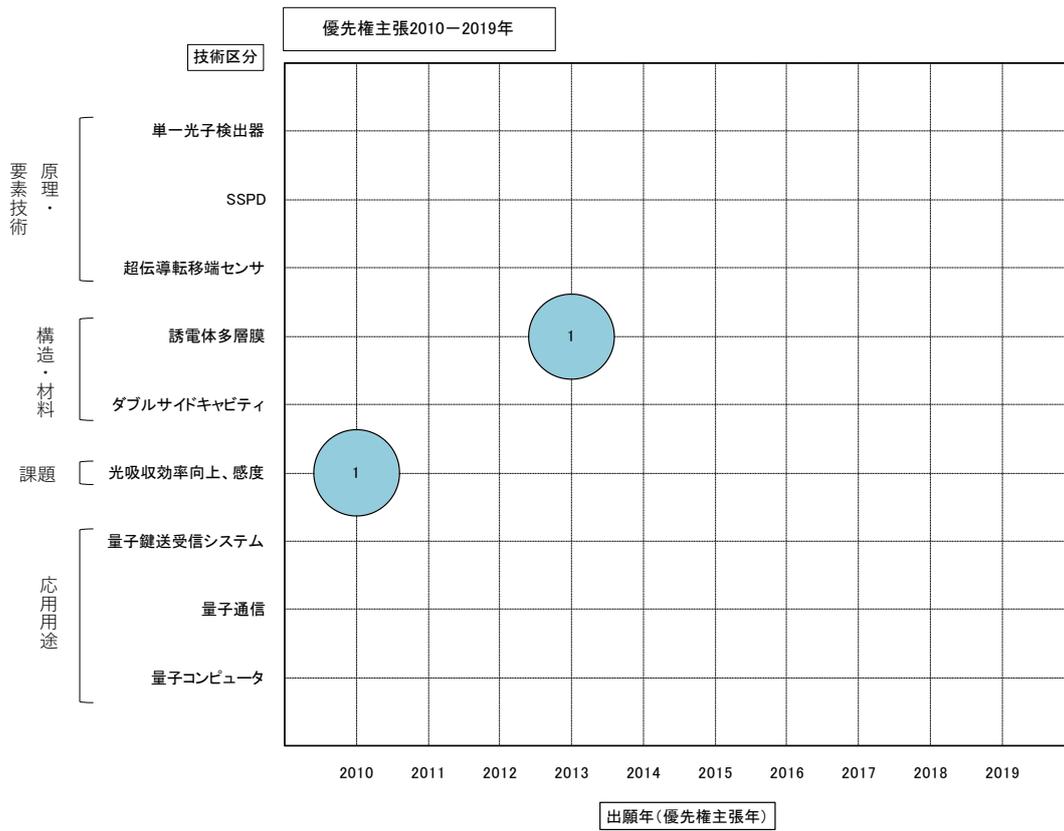
(b) コニカミノルタ



(c) 日亜化学工業



(d) 産業技術総合研究所



注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

5. 量子慣性センサ

量子慣性センサの〔技術区分別〕出願人別ファミリー件数推移を図 4-4-26 に示す。

北京航空航天大学（中国）は、原理・要素技術の原子ジャイロ、原子干渉計が多い。

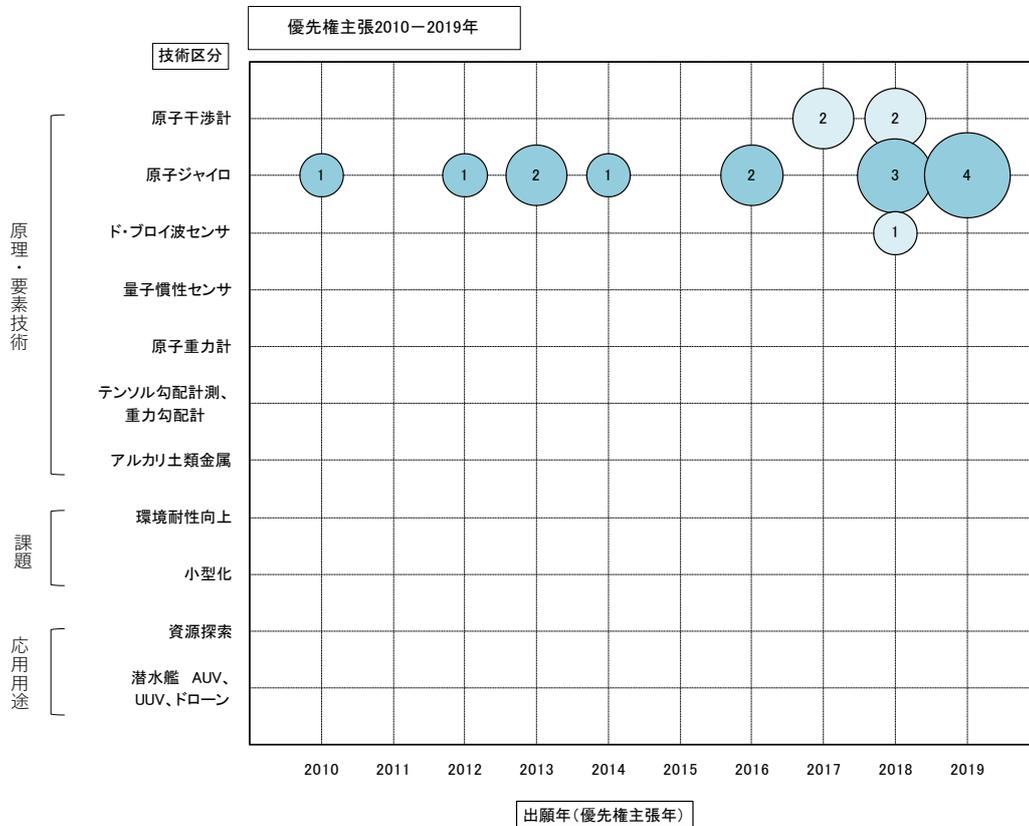
中国科学院（中国）は、原理・要素技術の原子干渉計が多く、原子ジャイロ、量子慣性センサ、原子重力計がある。

Honeywell（米国）は、原理・要素技術の原子干渉計、量子慣性センサが多く、原子ジャイロがある。

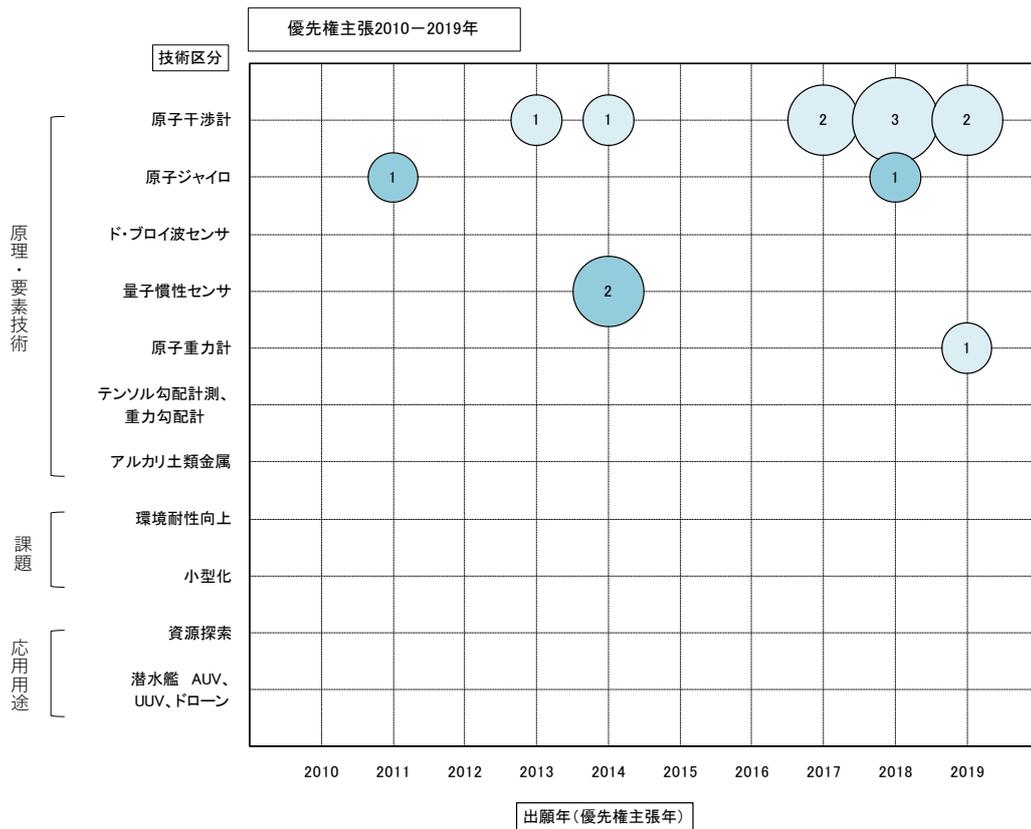
東京工業大学は、原理・要素技術の原子干渉計、原子ジャイロ、アルカリ土類金属がある。

図 4-4-26 量子慣性センサ〔出願先：日米欧中韓〕技術区分別－出願人別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

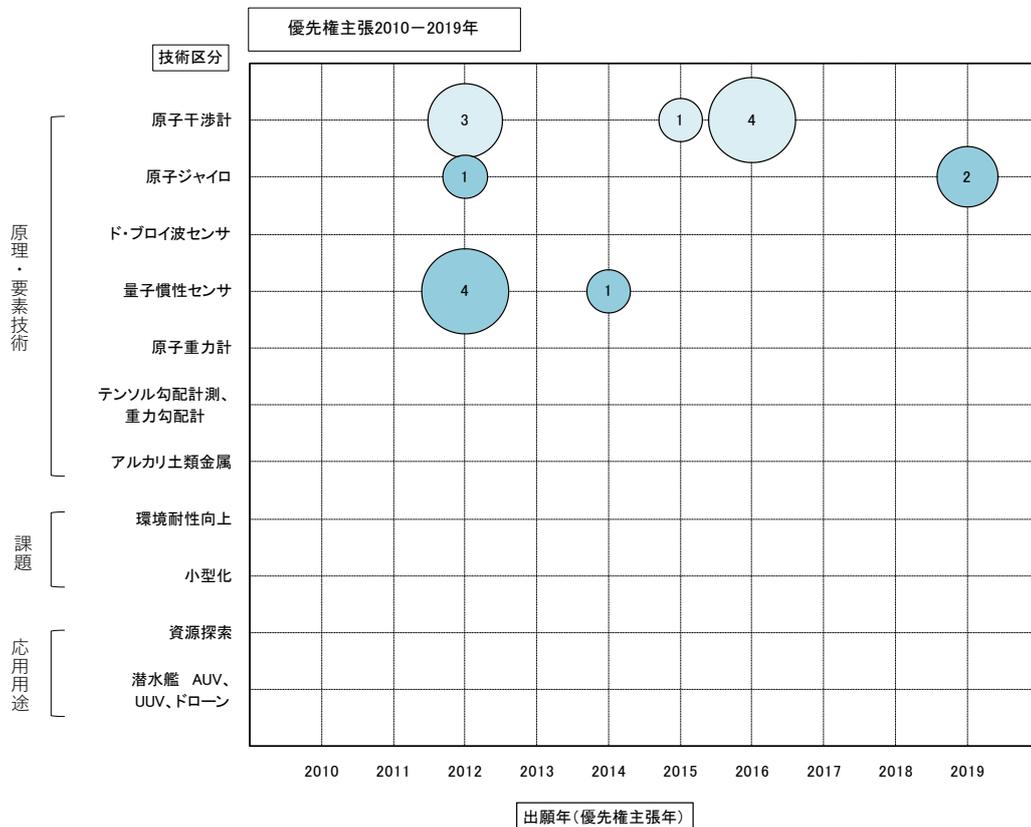
(a) 北京航空航天大学（中国）



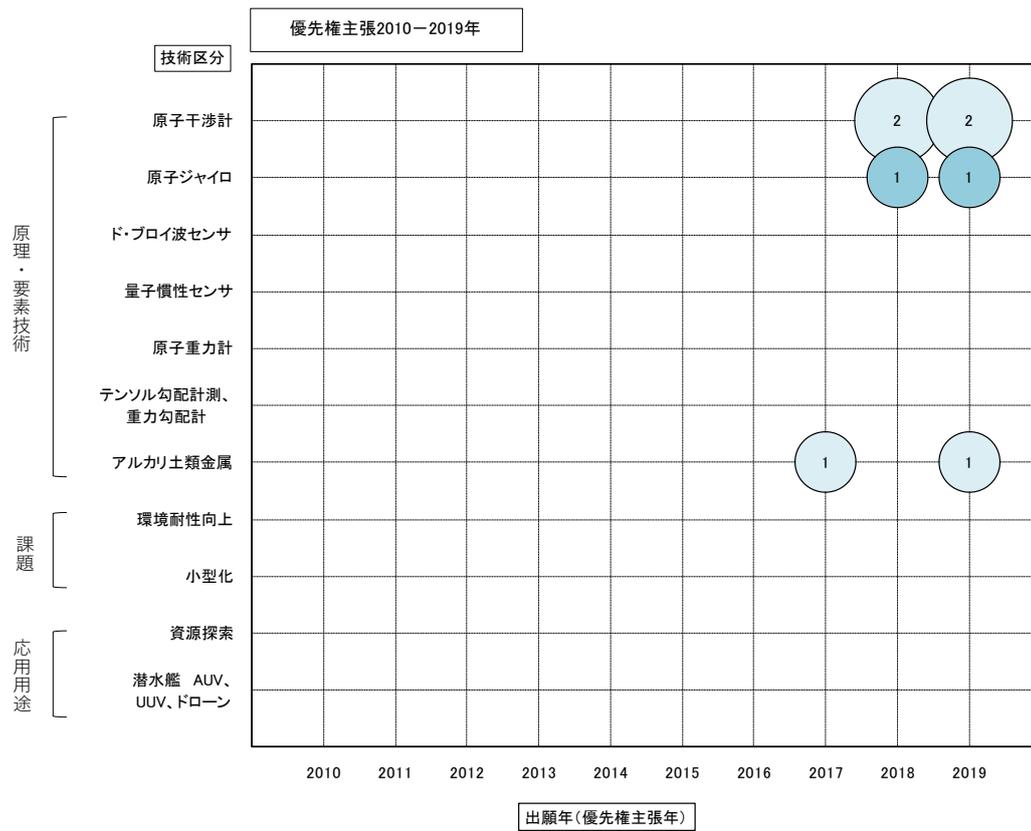
(b) 中国科学院 (中国)



(c) Honeywell (米国)



(d) 東京工業大学



注) 2018 年以降はデータベース収録の遅れ、PCT 出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

6. 光格子時計

光格子時計の〔技術区分別〕出願人別ファミリー件数推移を図 4-4-27 に示す。

中国科学院（中国）は、原理・要素技術の磁気光学トラップ、光学トラップが多い。原理・要素技術の高精度時間計測、信号処理、応用用途の時刻同期がある。

Cennavi Technologies（中国）は、原理・要素技術の磁気光学トラップ、光学トラップ、信号処理、応用用途の時刻同期がある。

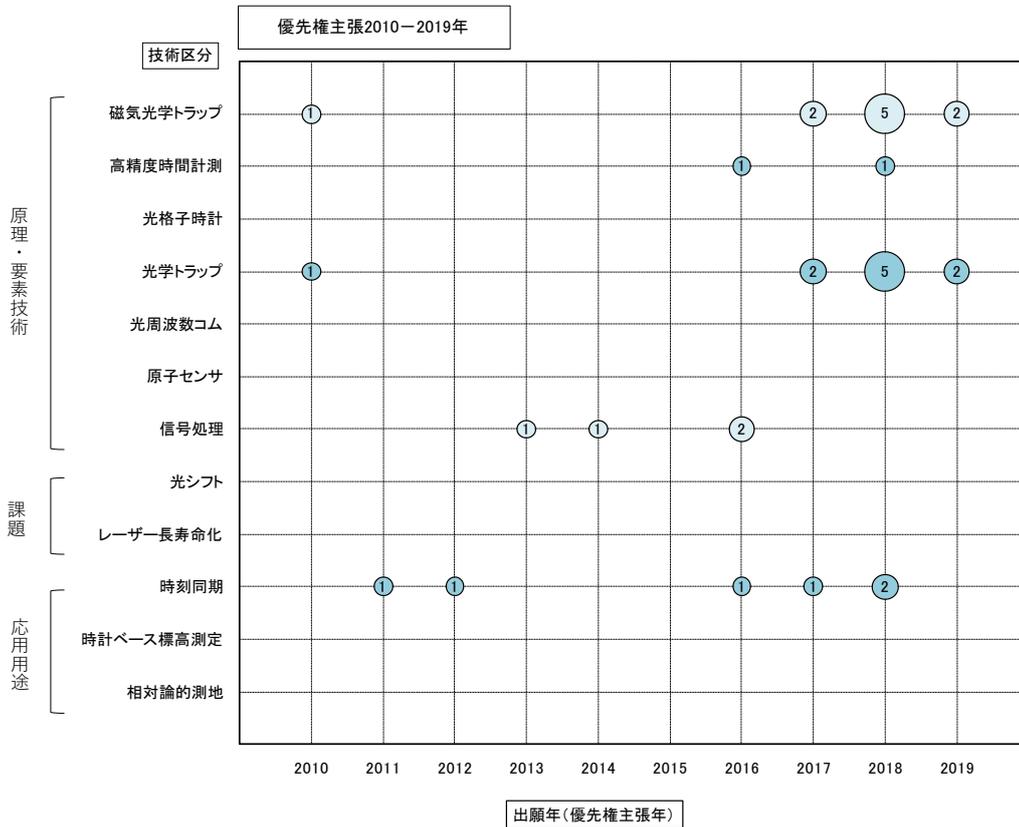
Honeywell（米国）は、原理・要素技術の磁気光学トラップ、光学トラップ、光周波数コム、原子センサー、課題のレーザー長寿命化がある。

東京大学は、原理・要素技術の光格子時計がある。

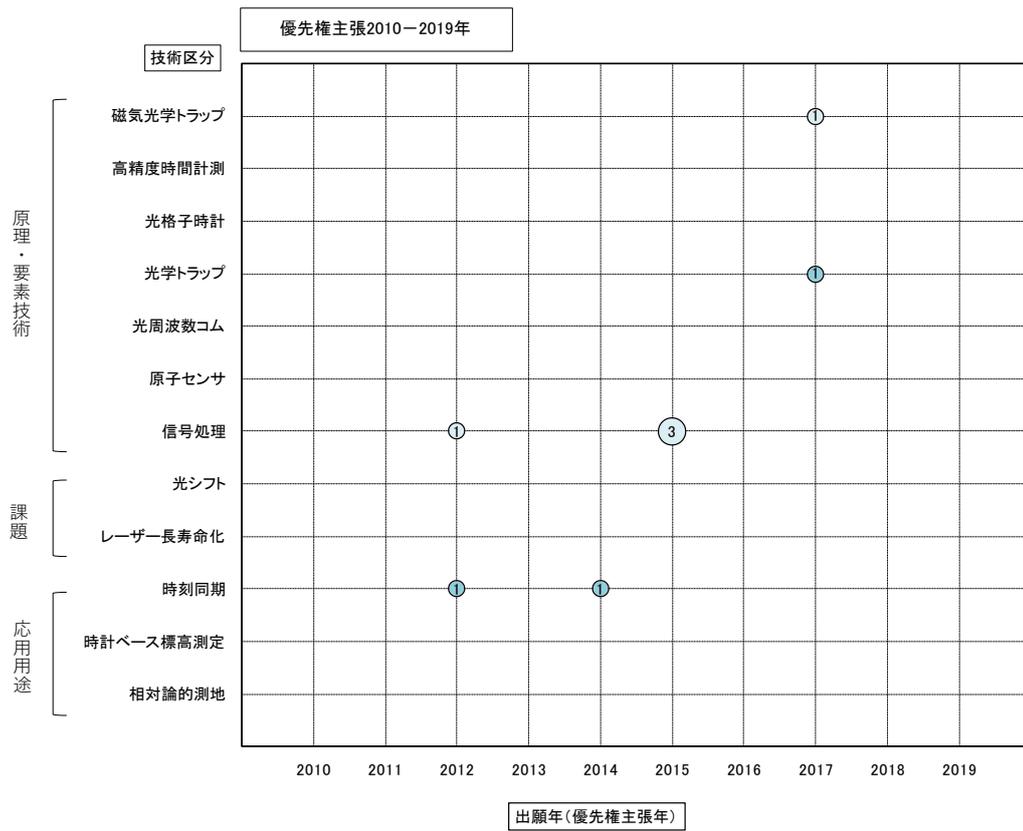
理化学研究所は、原理・要素技術の磁気光学トラップ、光格子時計、光学トラップがある。

図 4-4-27 光格子時計〔出願先：日米欧中韓〕技術区分別一出願人別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

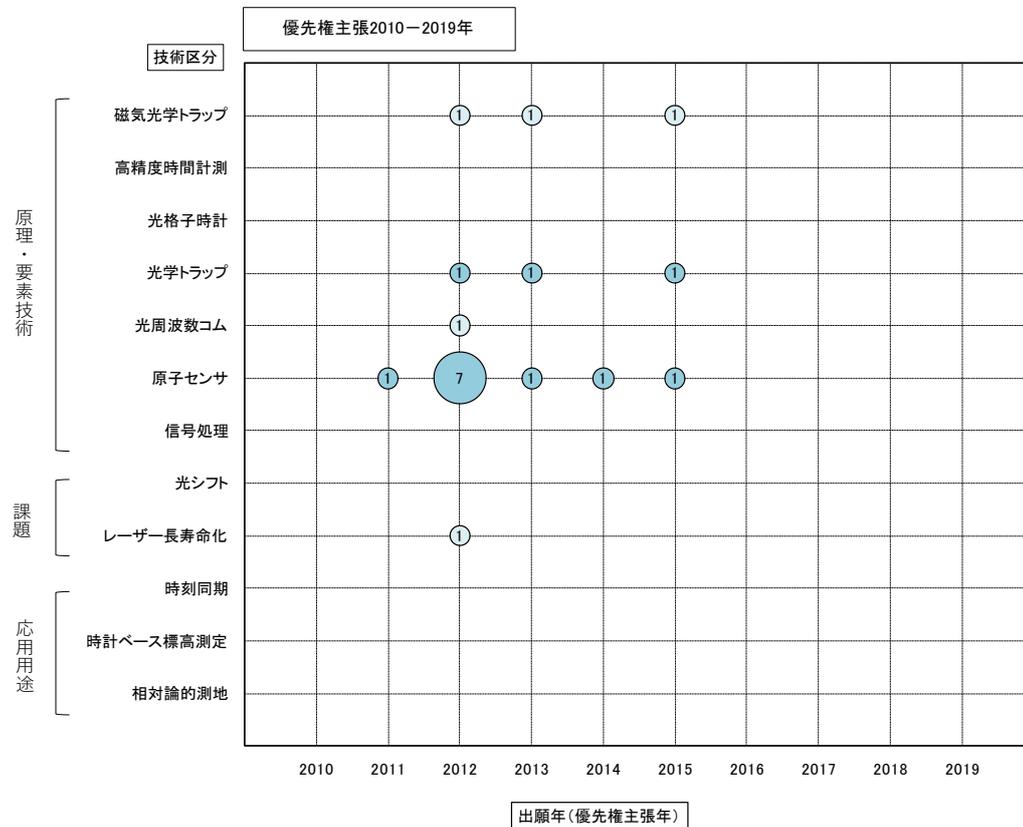
(a) 中国科学院（中国）



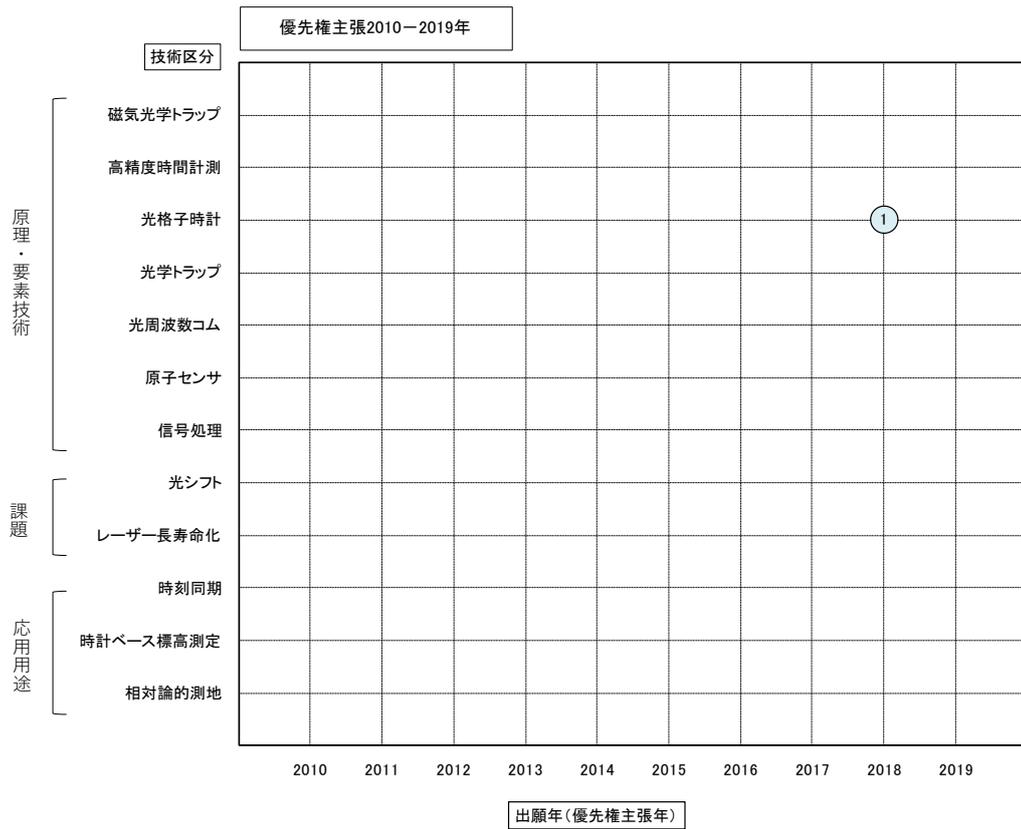
(b) Cennavi Technologies (中国)



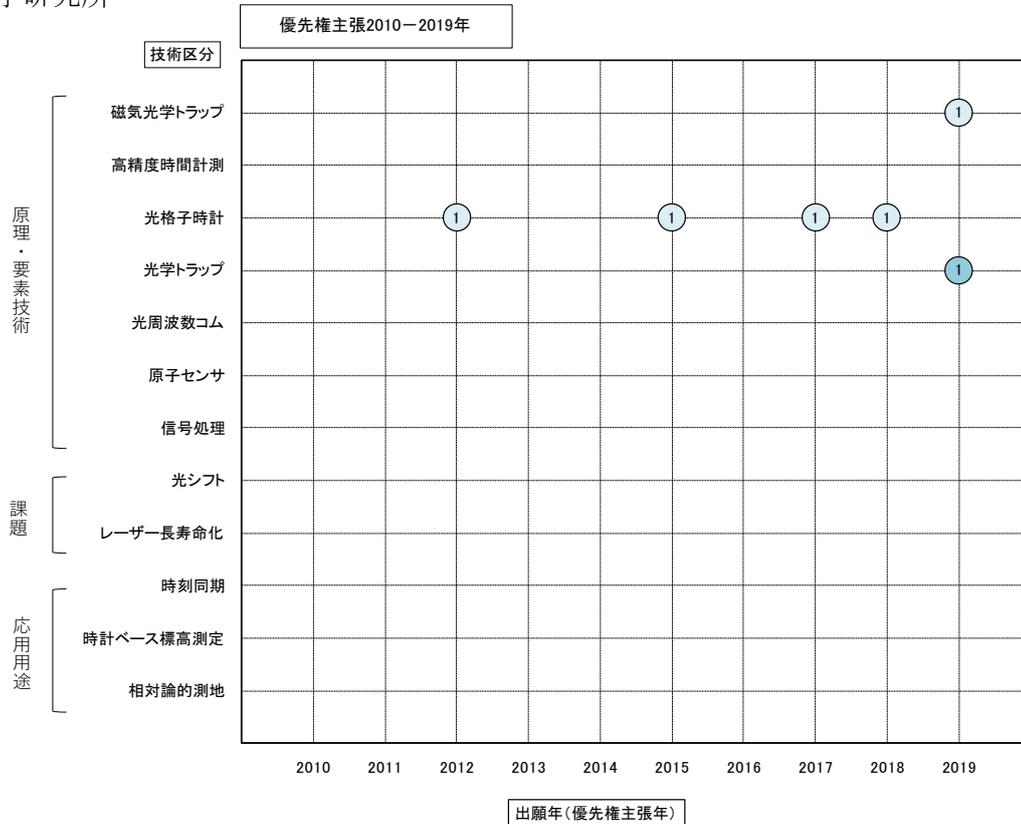
(c) Honeywell (米国)



(d) 東京大学



(e) 理化学研究所



注)2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

7. その他技術

その他技術（SQUID）の〔技術区分別〕出願人別ファミリー件数推移を図 4-4-28 に示す。

IBM（米国）は、原理・要素技術のジョセフソン接合が多く、2015～2019 年にかけて多い。

中国科学院（中国）は、原理・要素技術の超伝導量子干渉計が多く、2013～2017 年にかけて多い。原理・要素技術のジョセフソン接合と膜、ビームも多く、2017、2018 年が多い。応用用途の高感度局所磁場センサは、2014 年が多い。

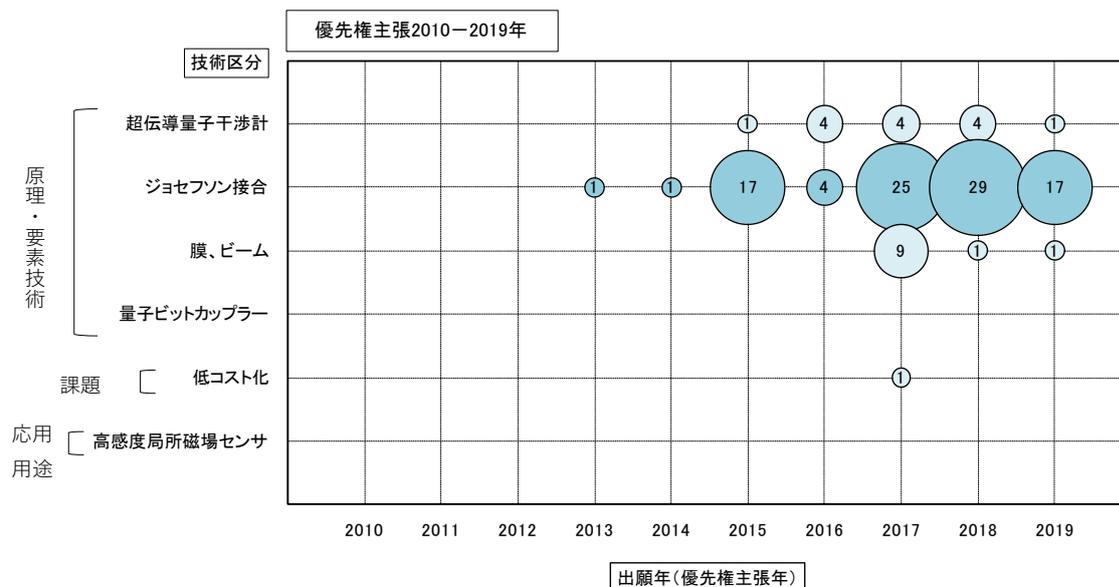
Northrop Grumman（米国）は、原理・要素技術のジョセフソン接合が多く 2014～2018 年にかけて増加傾向である。

Microsoft（米国）は、原理・要素技術のジョセフソン接合が 2015～2019 年にかけて多い。

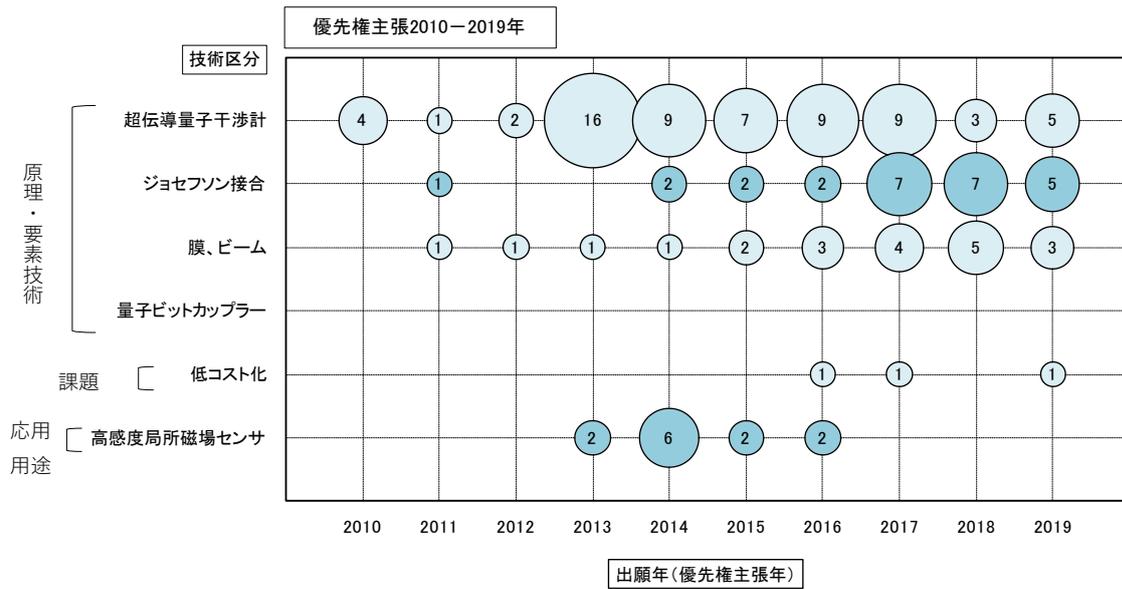
D-Wave Systems（カナダ）は、原理・要素技術のジョセフソン接合が多く、2013、2014 年が多い。

図 4-4-28 その他技術（SQUID）〔出願先：日米欧中韓〕技術区分別—出願人別ファミリー件数推移（出願年（優先権主張年）：2010-2019 年）

(a) IBM（米国）



(b) 中国科学院 (中国)



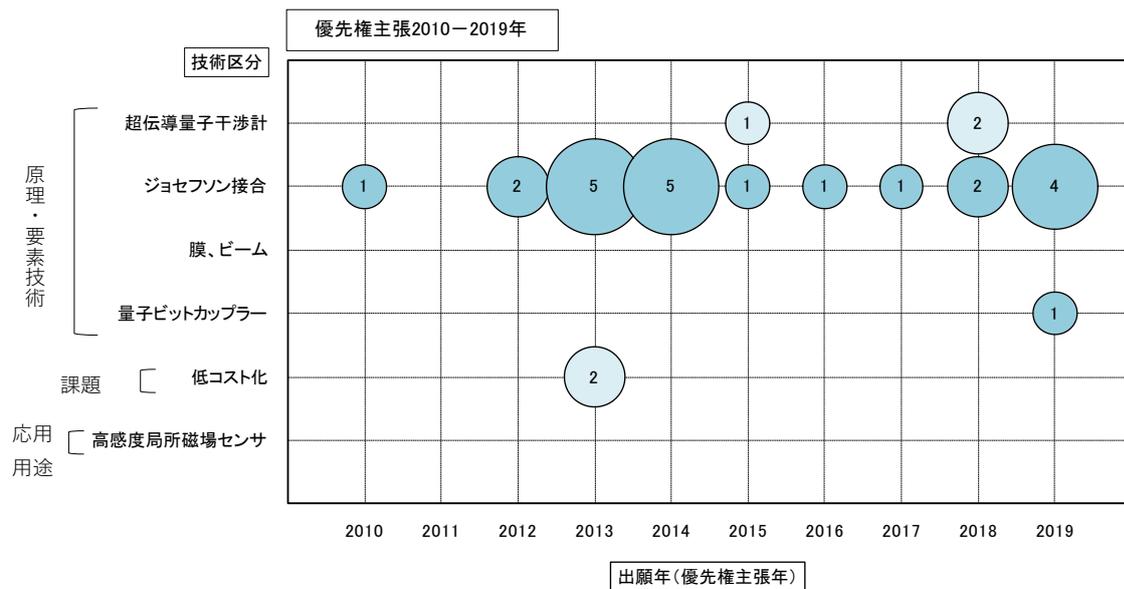
(c) Northrop Grumman (米国)



(d) Microsoft (米国)



(e) D-Wave Systems (カナダ)



注) 2018年以降はデータベース収録の遅れ、PCT出願の各国移行のずれ等で全出願データを反映していない可能性がある。

第5部 論文動向調査

量子計測・センシング技術に関する研究開発動向について論文動向より調査を行った。

第1章 調査対象と調査方法

第1節 調査対象

量子計測・センシング技術に関する以下の7区分を調査対象として、論文動向について全体動向調査、技術区分別調査を行った。

- ・固体量子センサ
- ・量子スピントロニクスセンサ
- ・量子もつれ光センサ
- ・光子検出器
- ・量子慣性センサ
- ・光格子時計
- ・その他（超伝導量子干渉素子（SQUID）、超核偏極技術、フォノンセンシング）

第2節 調査方法

1. 調査対象文献

国際的な主要な論文誌に限定した。

2. 使用したデータベース

論文文献の検索に使用したデータベースは、Web of Science である。

3. 調査時期範囲

調査した論文は、発表年を基準に、2011年から2020年に発行された論文誌のものを対象とした。

4. 調査対象母集団の抽出

7区分について、キーワードを用いた資料2の検索式により、調査対象母集団を抽出した。

第2章 全体動向調査

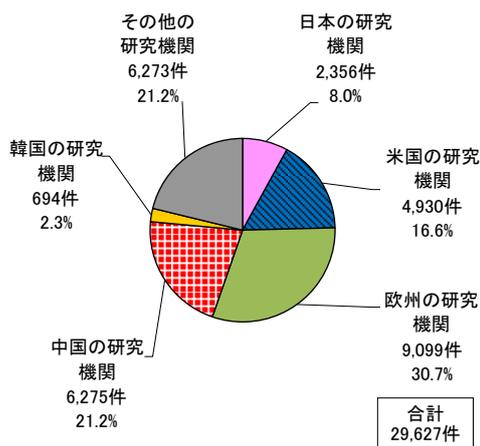
第1節 研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率

量子計測・センシング技術の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を示す。研究者所属機関国籍の動向を見ることができる。

1. 全体

図5-2-1に量子計測・センシング技術全体の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を示す。論文件数(2011-2020年)の合計は29,627件で、研究者所属機関国籍・地域別で最も多いのは欧州の研究機関の9,099件で全体の30.7%を占めている。次いで、中国の研究機関の6,275件(21.2%)、米国の研究機関が4,930件(16.6%)、日本の研究機関が2,356件(8.0%)、韓国の研究機関が694件(2.3%)である。

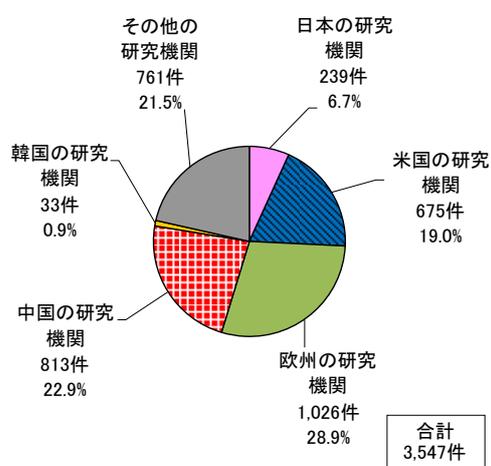
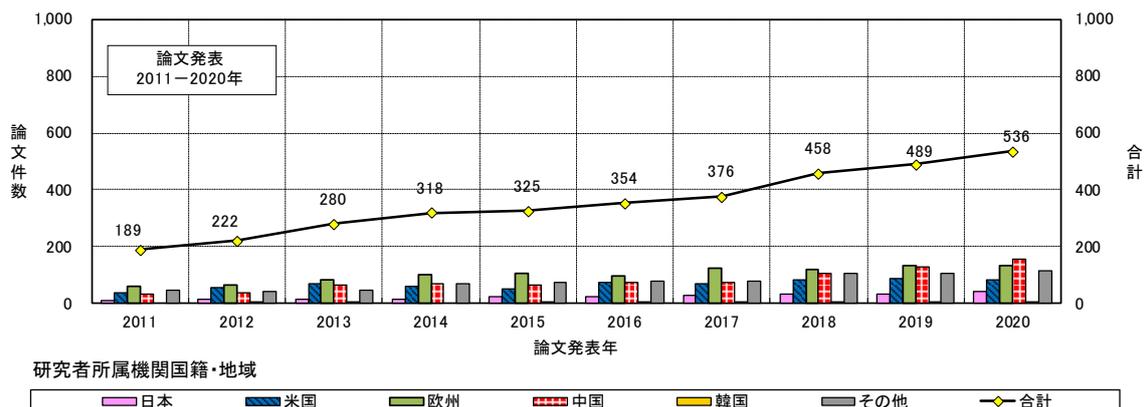
図5-2-1 研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率(論文誌発行年:2011-2020年)



2. 固体量子センサ

図 5-2-2 に固体量子センサの研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を示す。論文件数（2011-2020 年）の合計は 3,547 件で、研究者所属機関国籍・地域別で最も多いのは欧州の研究機関の 1,026 件で全体の 28.9%を占めている。次いで、中国の研究機関の 813 件(22.9%)、米国の研究機関が 675 件(19.0%)、日本の研究機関が 239 件(6.7%)、韓国の研究機関が 33 件(0.9%)である。

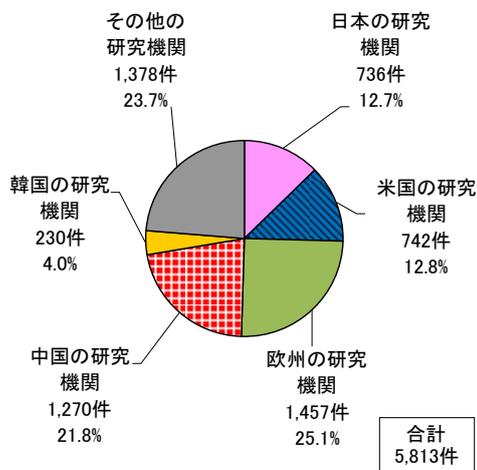
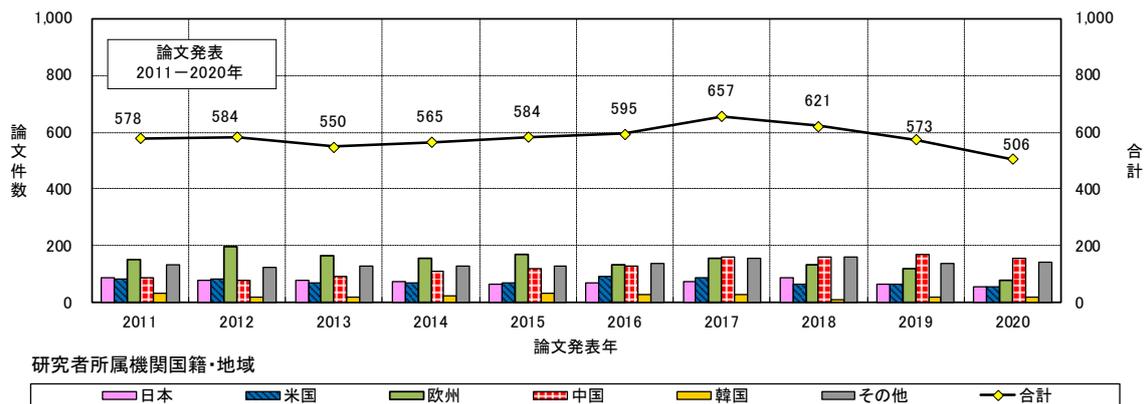
図 5-2-2 固体量子センサー研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率（論文誌発行年：2011-2020 年）



3. 量子スピントロニクスセンサ

図 5-2-3 に量子スピントロニクスセンサの研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を示す。論文件数（2011－2020 年）の合計は 5,813 件で、研究者所属機関国籍・地域別で最も多いのは欧州の研究機関の 1,457 件で全体の 25.1%を占めている。次いで、中国の研究機関が 1,270 件(21.8%)、米国の研究機関が 742 件(12.8%)、日本の研究機関が 736 件(12.7%)、韓国の研究機関が 230 件(4.0%)である。

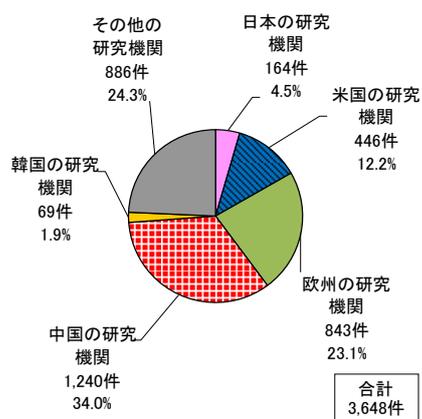
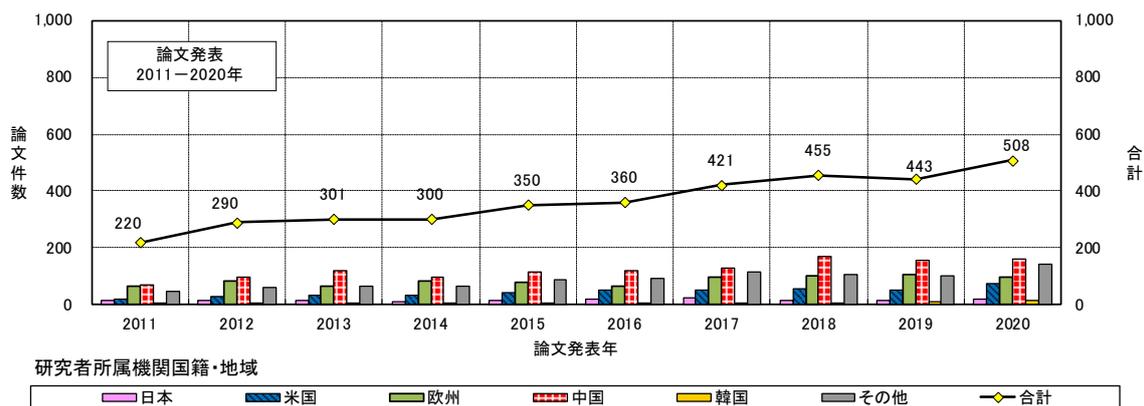
図 5-2-3 量子スピントロニクスセンサー研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率（論文誌発行年：2011-2020 年）



4. 量子もつれ光センサ

図 5-2-4 に量子もつれ光センサの研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を示す。論文件数（2011－2020 年）の合計は 3,648 件で、研究者所属機関国籍・地域別で最も多いのは中国の研究機関の 1,240 件で全体の 34.0%を占めている。次いで、欧州の研究機関が 843 件(23.1%)、米国の研究機関が 446 件(12.2%)、日本の研究機関が 164 件(4.5%)、韓国の研究機関が 69 件(1.9%)である。

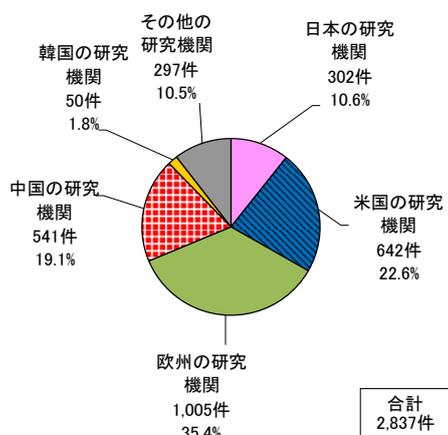
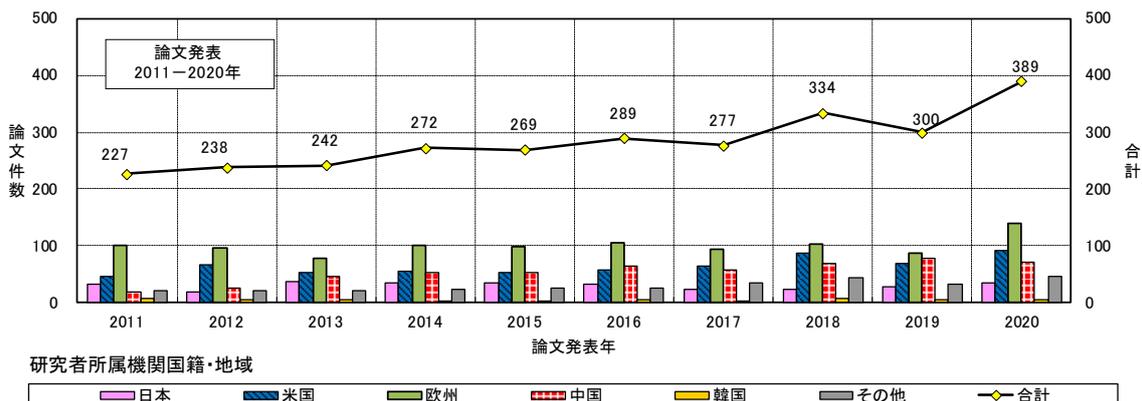
図 5-2-4 量子もつれ光センサー研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率（論文誌発行年：2011-2020 年）



5. 光子検出器

図 5-2-5 に光子検出器の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を示す。論文件数（2011－2020 年）の合計は 2,837 件で、研究者所属機関国籍・地域別で最も多いのは欧州の研究機関の 1,005 件で全体の 35.4%を占めている。次いで、米国の研究機関の 642 件(22.6%)、中国の研究機関が 541 件(19.1%)、日本の研究機関が 302 件(10.6%)、韓国の研究機関が 50 件(1.8%)である。

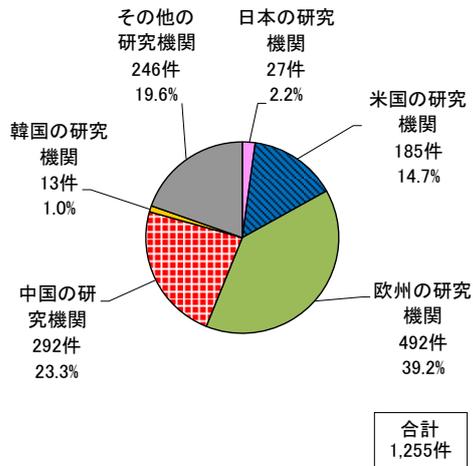
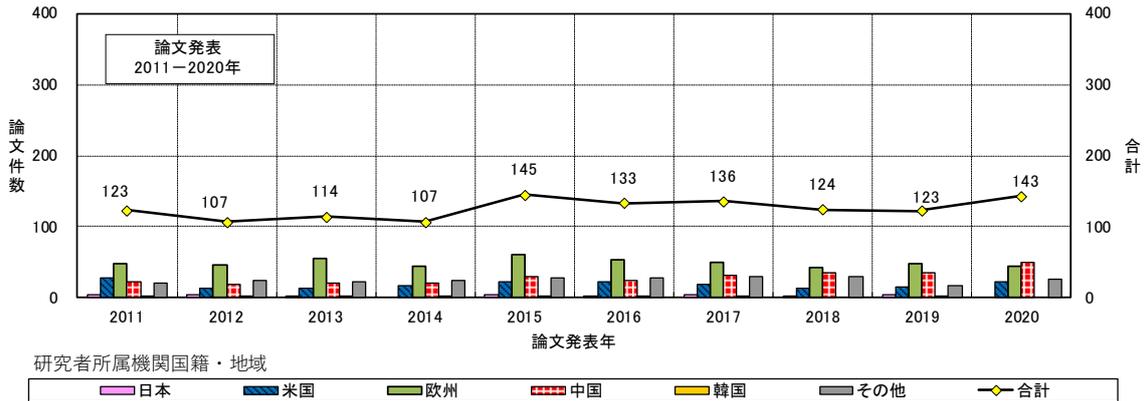
図 5-2-5 光子検出器－研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率（論文誌発行年：2011-2020 年）



6. 量子慣性センサ

図 5-2-6 に量子慣性センサの研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を示す。論文件数（2011-2020 年）の合計は 1,255 件で、研究者所属機関国籍・地域別で最も多いのは欧州の研究機関の 492 件で全体の 39.2%を占めている。次いで、中国の研究機関の 292 件(23.3%)、米国の研究機関が 185 件(14.7%)、日本の研究機関が 27 件(2.2%)、韓国の研究機関が 13 件(1.0%)である。

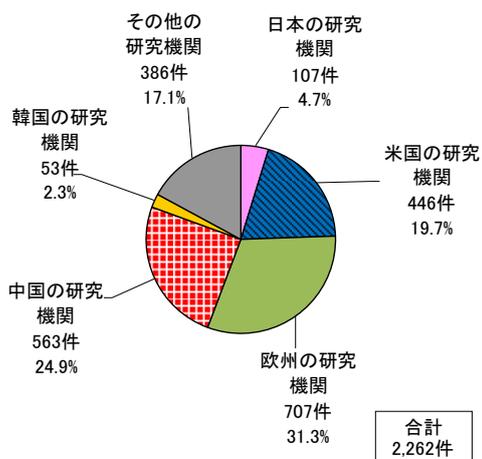
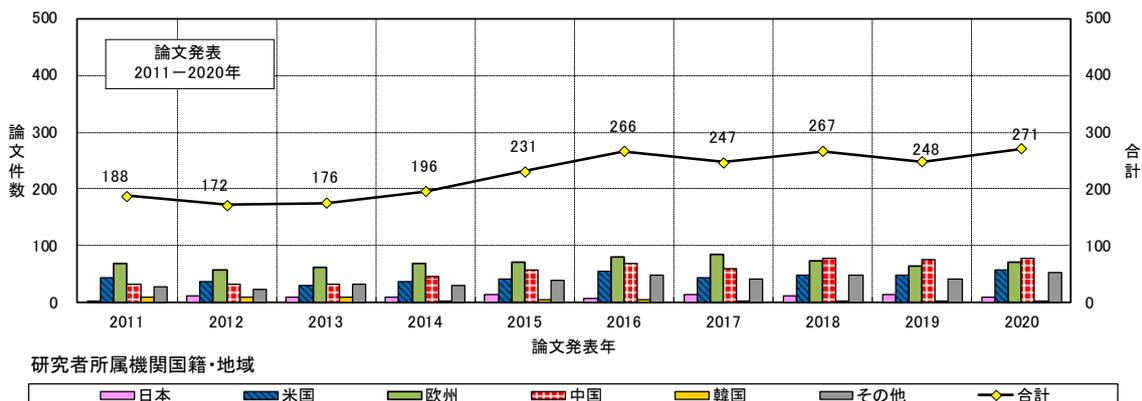
図 5-2-6 量子慣性センサー研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率（論文誌発行年：2011-2020 年）



7. 光格子時計

図 5-2-7 に光格子時計の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を示す。論文件数（2011～2020年）の合計は2,262件で、研究者所属機関国籍・地域別で最も多いのは欧州の研究機関の707件で全体の31.3%を占めている。次いで、中国の研究機関の563件(24.9%)、米国の研究機関が446件(19.7%)、日本の研究機関が107件(4.7%)、韓国の研究機関が53件(2.3%)である。

図 5-2-7 光格子時計—研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率（論文誌発行年：2011～2020年）



8. その他技術

図 5-2-8 にその他技術 (SQUID) の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を示す。論文件数 (2011-2020 年) の合計は 5,429 件で、研究者所属機関国籍・地域別で最も多いのは欧州の研究機関の 1,884 件で全体の 34.7% を占めている。次いで、中国の研究機関が 825 件 (15.2%)、米国の研究機関が 805 件 (14.8%)、日本の研究機関が 575 件 (10.6%)、韓国の研究機関が 140 件 (2.6%) である。

図 5-2-8 その他技術 (SQUID) - 研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率 (論文誌発行年: 2011-2020 年)

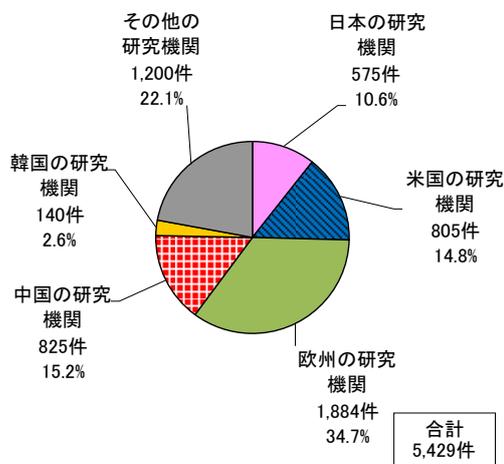
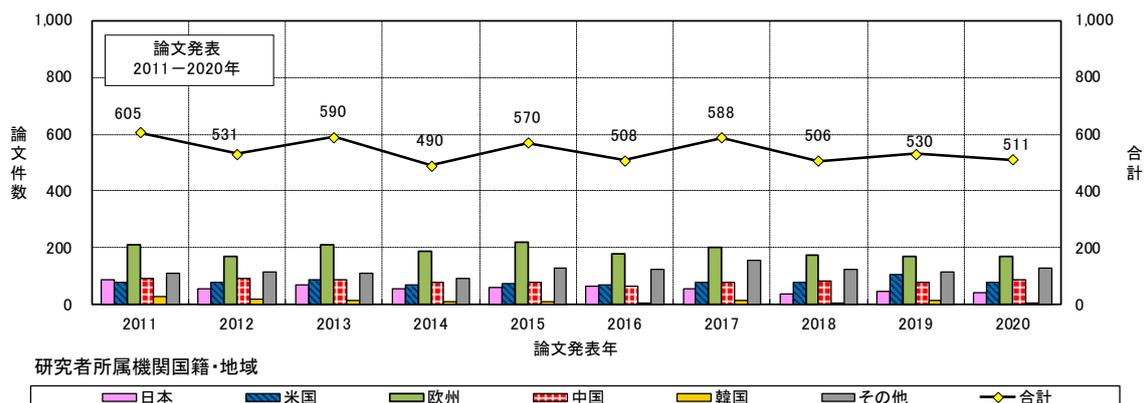


図 5-2-9 にその他技術（超核偏極技術）の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を示す。論文件数（2011－2020 年）の合計は 5,227 件で、研究者所属機関国籍・地域別で最も多いのは欧州の研究機関の 1,798 件で全体の 34.4%を占めている。次いで、米国の研究機関が 1,111 件(21.3%)、中国の研究機関が 773 件(14.8%)、日本の研究機関が 293 件(5.6%)、韓国の研究機関が 113 件(2.2%)である。

図 5-2-9 その他技術（超核偏極技術）－研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率（論文誌発行年：2011-2020 年）

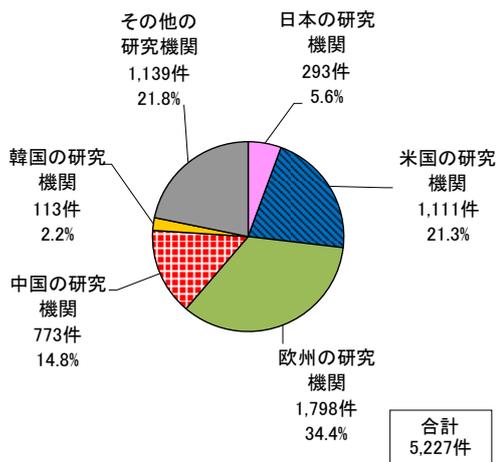
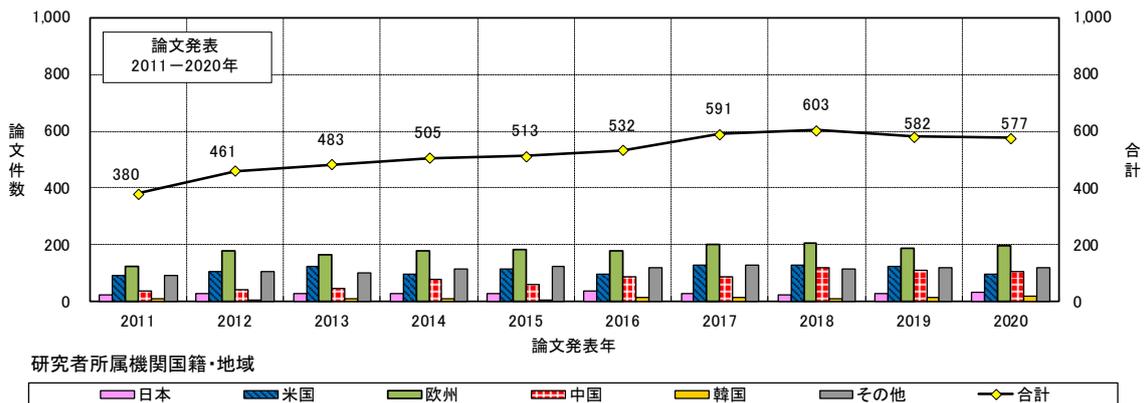
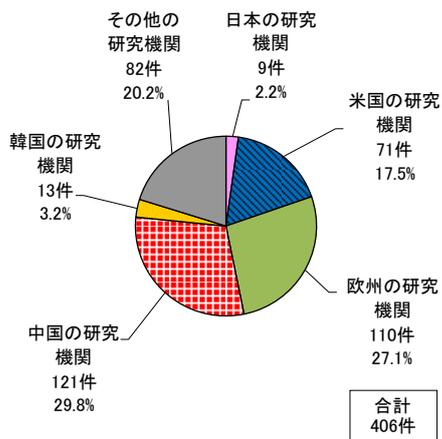
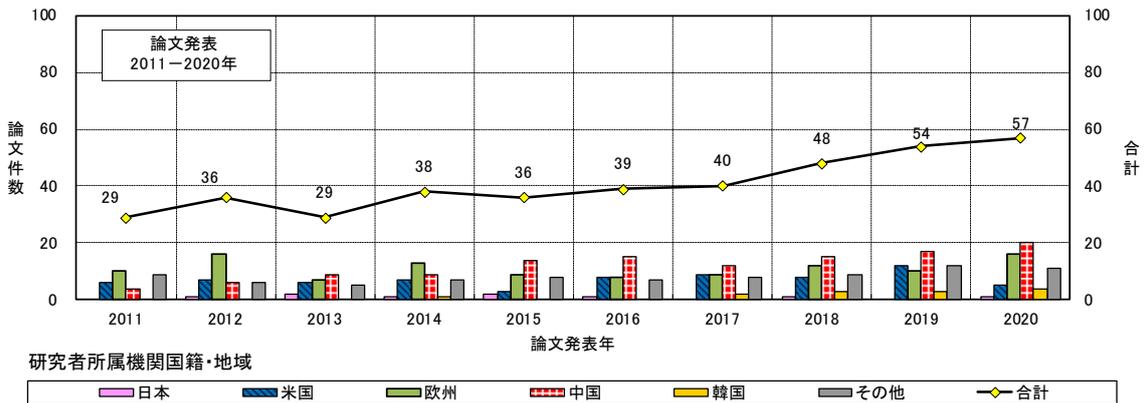


図 5-2-10 にその他技術（フォノンセンシング）の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を示す。論文件数（2011－2020 年）の合計は 406 件で、研究者所属機関国籍・地域別で最も多いのは中国の研究機関の 121 件で全体の 29.8%を占めている。次いで、欧州の研究機関の 110 件(27.1%)、米国の研究機関が 71 件(17.5%)、韓国の研究機関が 13 件(3.2%)、日本の研究機関が 9 件(2.2%)である。

図 5-2-10 その他技術（フォノンセンシング）－研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率（論文誌発行年：2011-2020 年）



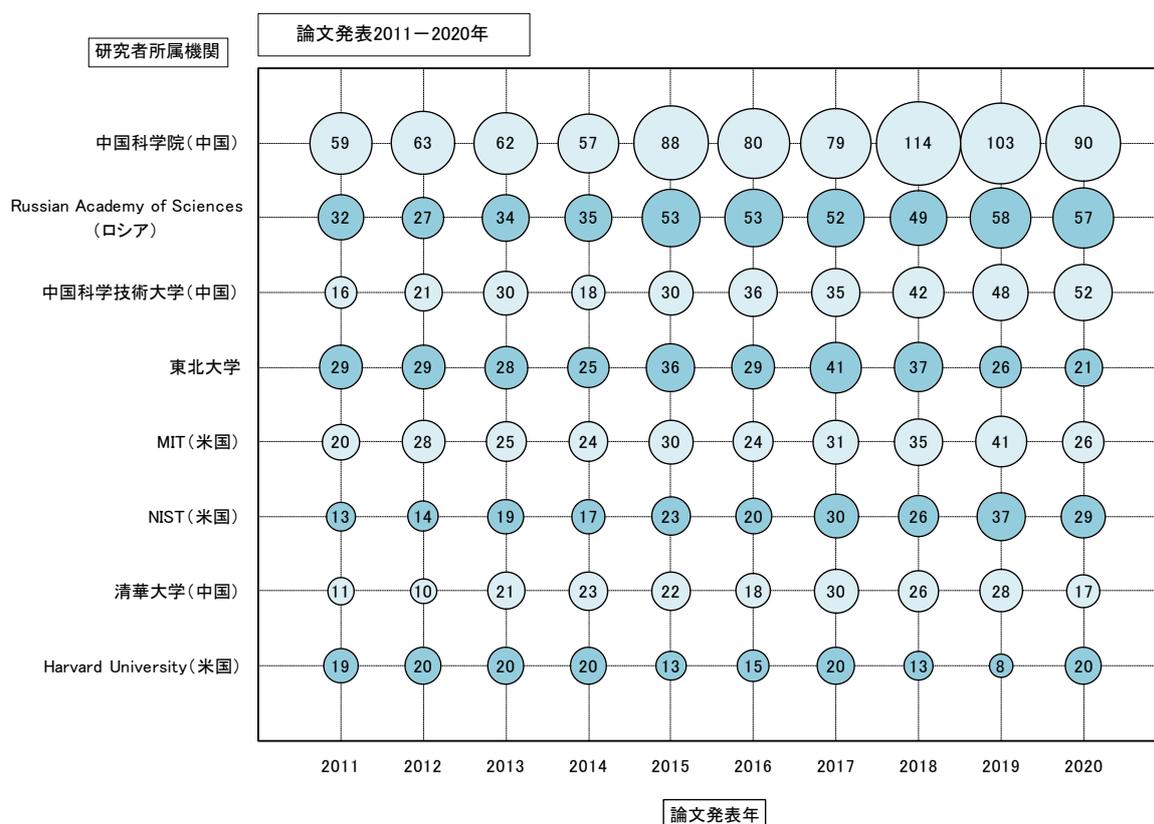
第2節 研究者所属機関別論文発表件数推移

量子計測・センシング技術の論文発表件数が上位の研究者所属機関について、研究者所属機関別の発表件数推移を示す。上位の研究者所属機関の動向を見ることができる。

1. 全体

量子計測・センシング技術全体の上位の研究者所属機関別論文発表件数推移を図5-2-11に示す。中国科学院（中国）、Russian Academy of Sciences（ロシア）が、2015～2020年にかけて多い。

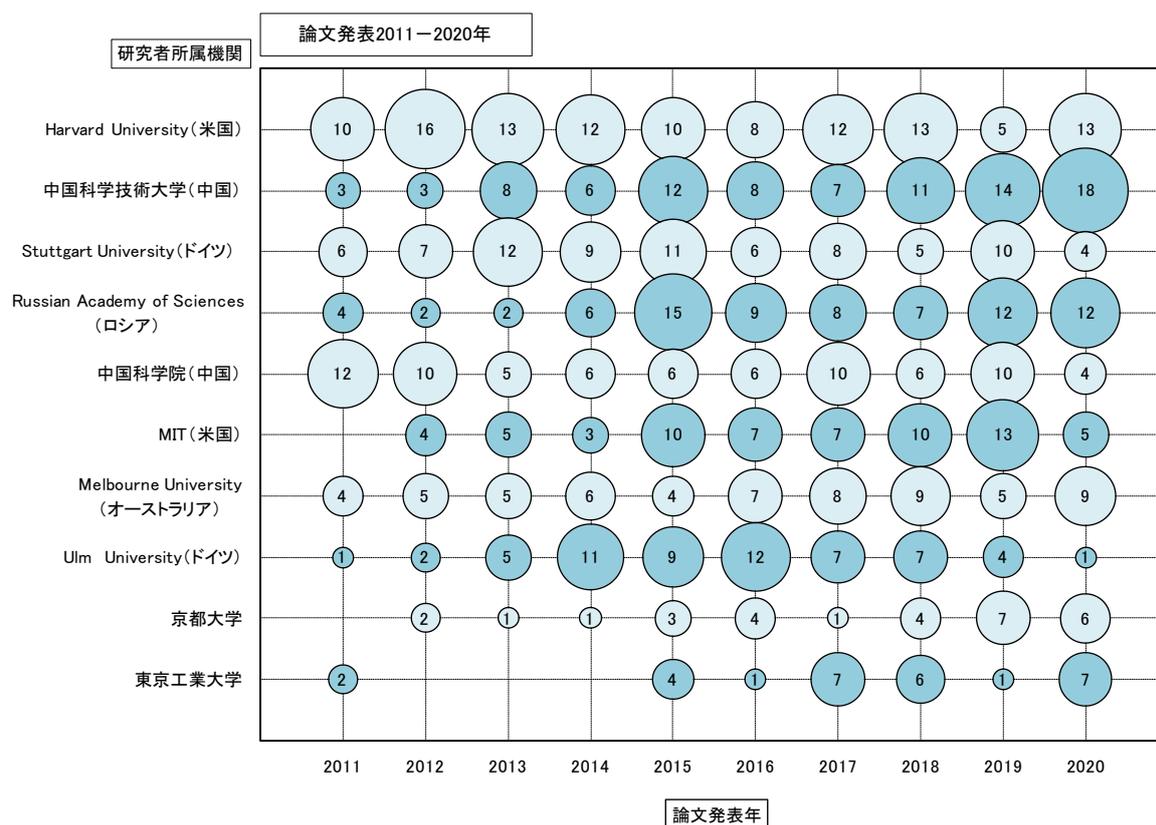
図5-2-11 研究者所属機関別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020年）



2. 固体量子センサ

固体量子センサの上位の研究者所属機関別論文発表件数推移を図 5-2-12 に示す。Harvard University (米国) が期間中コンスタントに発表している。中国科学技術大学 (中国)、Russian Academy of Sciences (ロシア) は 2015~2020 年にかけて多い。京都大学と東京工業大学は、2015 年以降発表が多い。

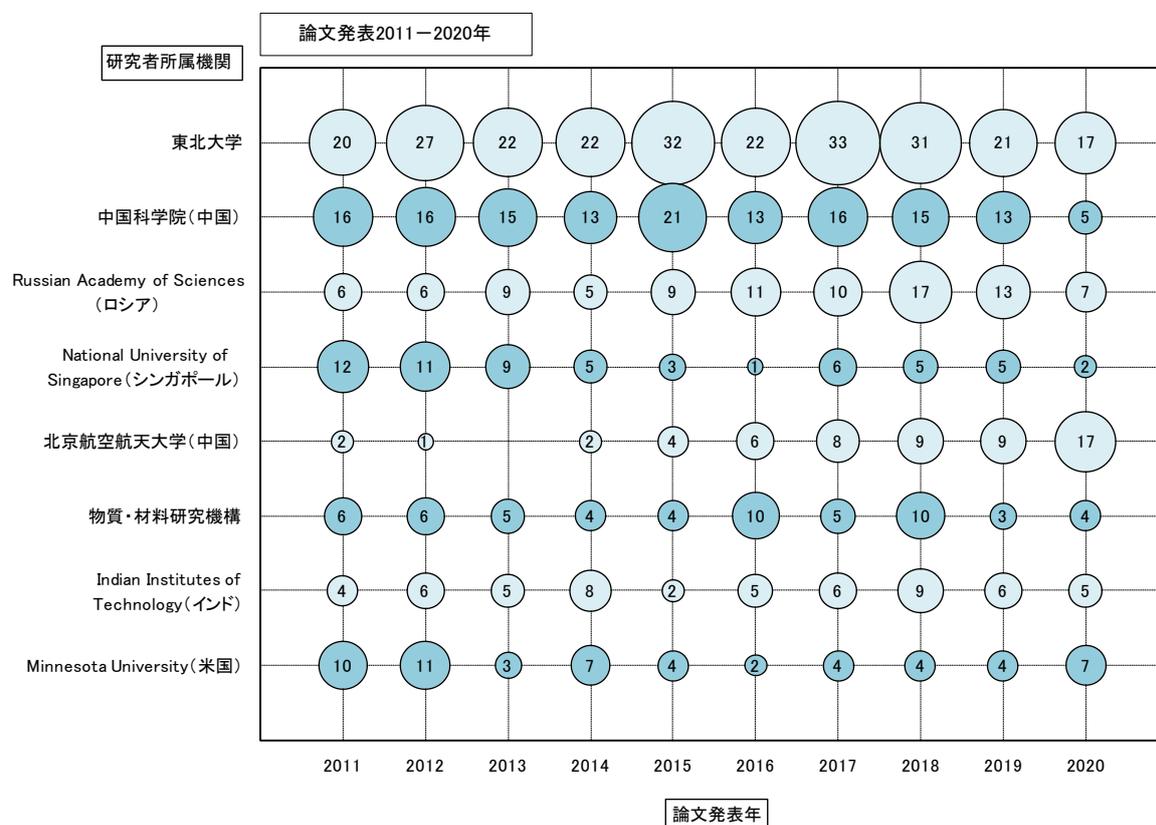
図 5-2-12 固体量子センサー研究者所属機関別論文発表件数推移 (論文誌発行年: 2011-2020 年)



3. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサの上位の研究者所属機関別論文発表件数推移を図 5-2-13 に示す。東北大学、中国科学院（中国）が期間中コンスタントに発表している。

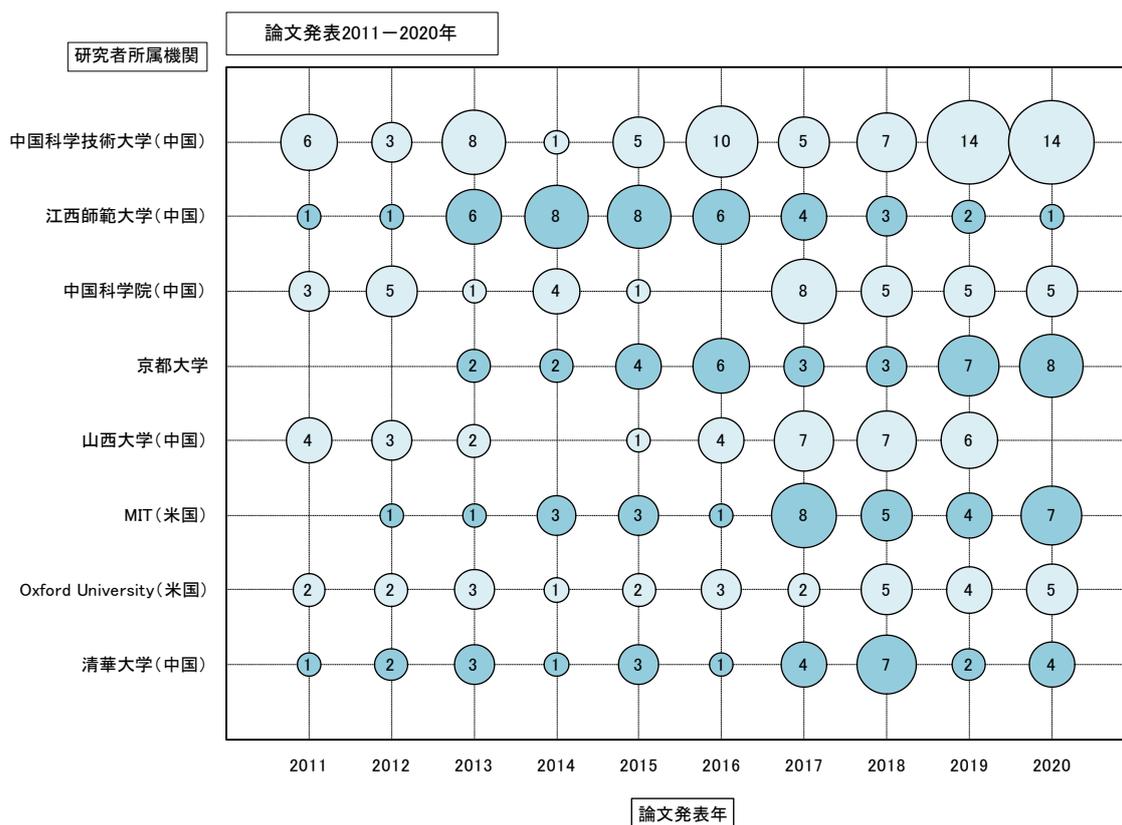
図 5-2-13 量子スピントロニクスセンサー研究者所属機関別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）



4. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサの上位の研究者所属機関別論文発表件数推移を図 5-2-14 に示す。中国科学技術大学（中国）が期間中コンスタントに発表している。江西師範大学（中国）は 2013～2016 年にかけて発表が多い。京都大学は 2015 年以降、MIT（米国）と清華大学（中国）は 2017 年以降発表が多い。

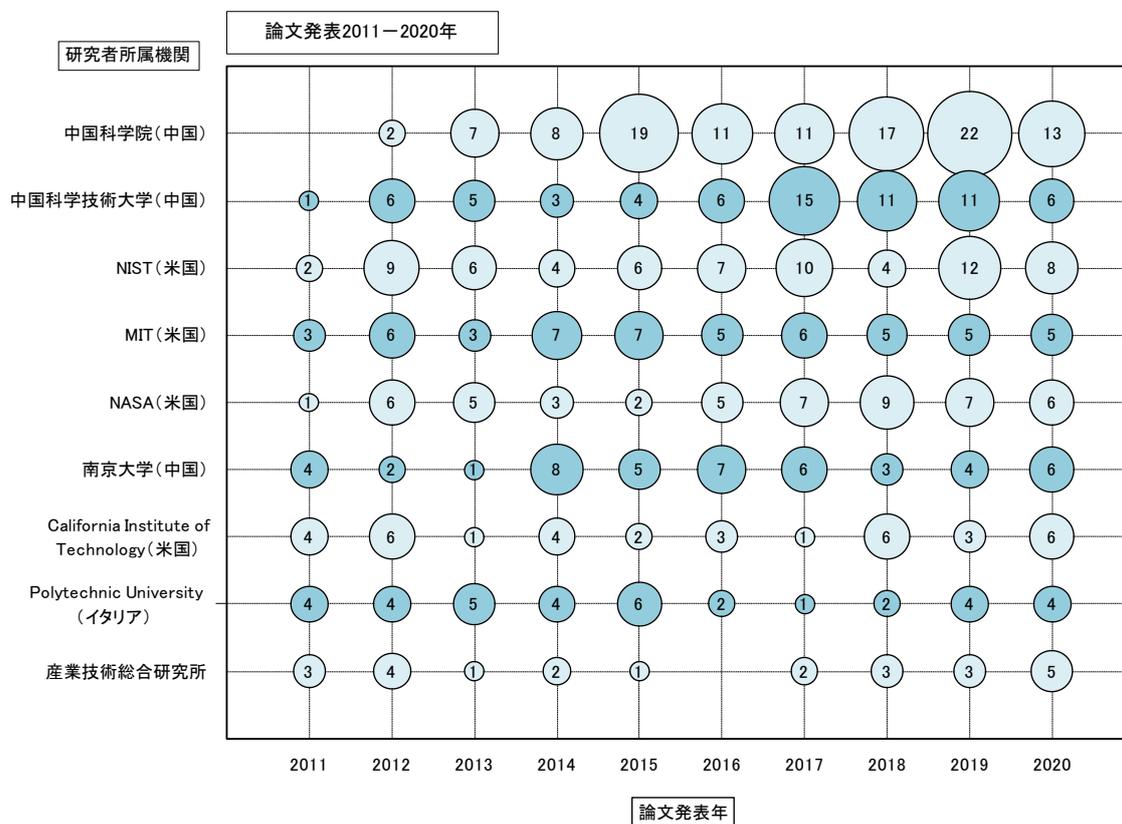
図 5-2-14 量子もつれ光センサー研究者所属機関別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）



5. 光子検出器

光子検出器の上位の研究者所属機関別論文発表件数推移を図 5-2-15 に示す。中国科学院（中国）は、2013 年以降発表が多い。中国科学技術大学（中国）、NIST（米国）、MIT（米国）、NASA（米国）は 2012 年以降発表が多い。

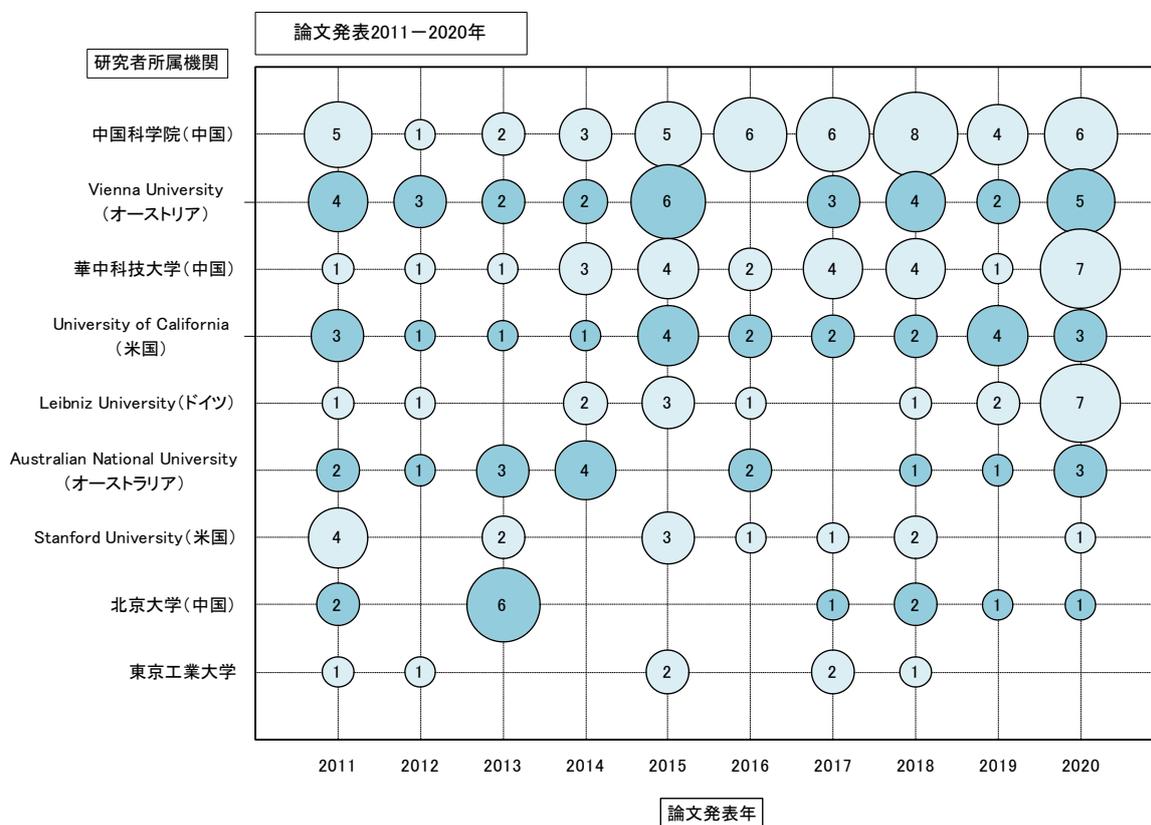
図 5-2-15 光子検出器—研究者所属機関別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）



6. 量子慣性センサ

量子慣性センサの上位の研究者所属機関別論文発表件数推移を図 5-2-16 に示す。中国科学院（中国）、Vienna University（オーストリア）は期間中発表件数が多い。北京大学（中国）は 2013 年に発表件数が多い。

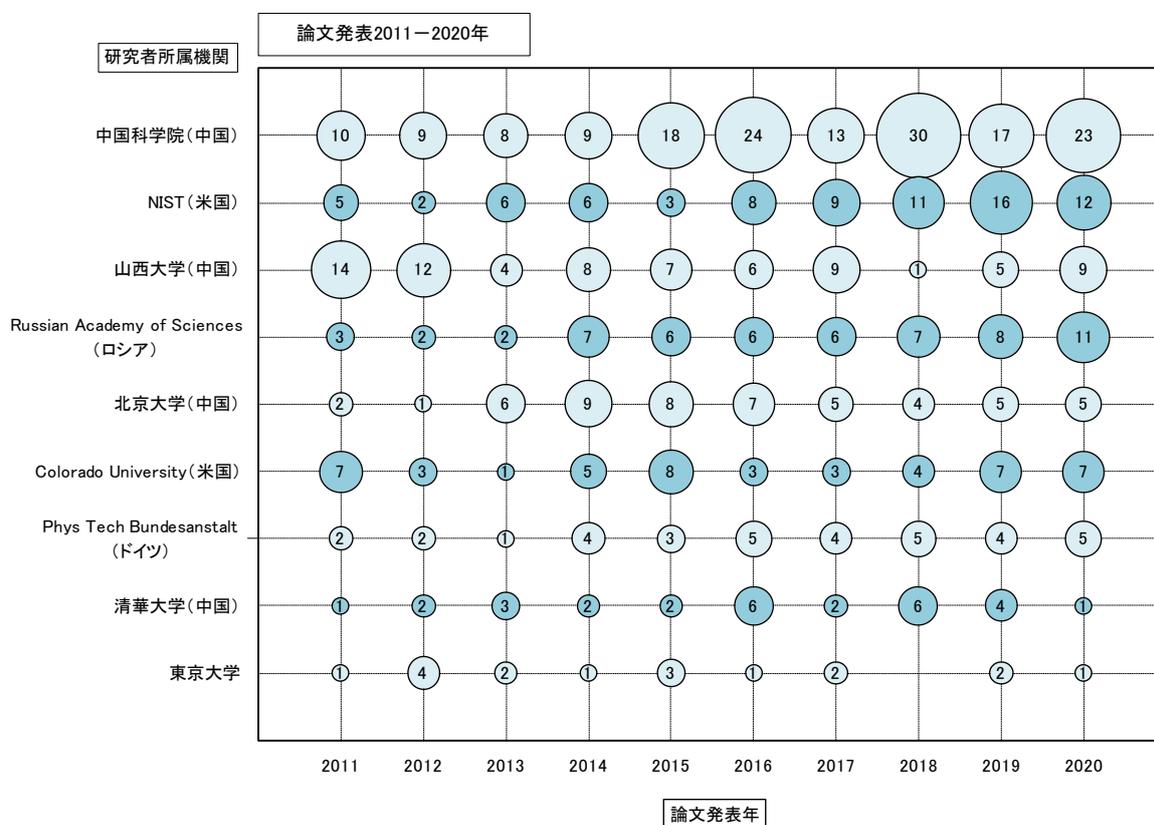
図 5-2-16 量子慣性センサー研究者所属機関別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）



7. 光格子時計

光格子時計の上位の研究者所属機関別論文発表件数推移を図 5-2-17 に示す。中国科学院(中国)、NIST(米国)、山西大学(中国)、東京大学は期間中コンスタントに発表している。

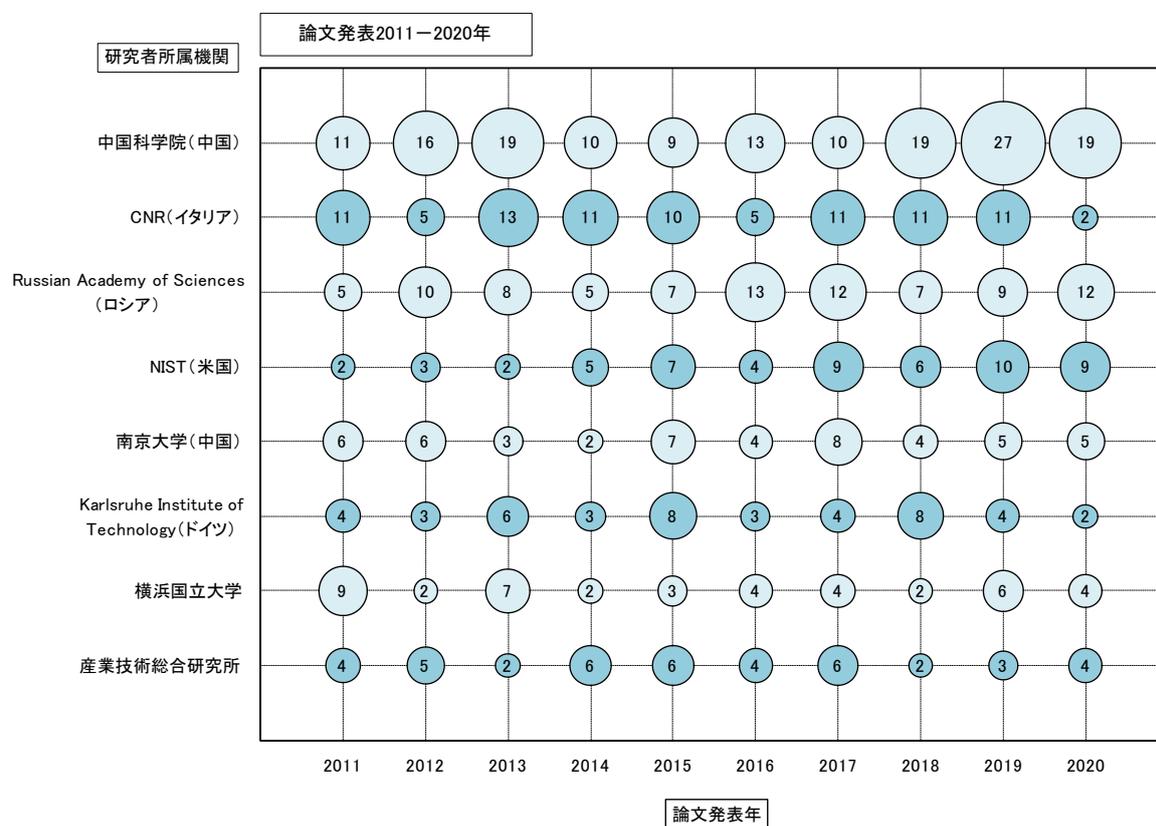
図 5-2-17 光格子時計—研究者所属機関別論文発表件数推移(論文誌発行年:2011-2020年)



8. その他技術

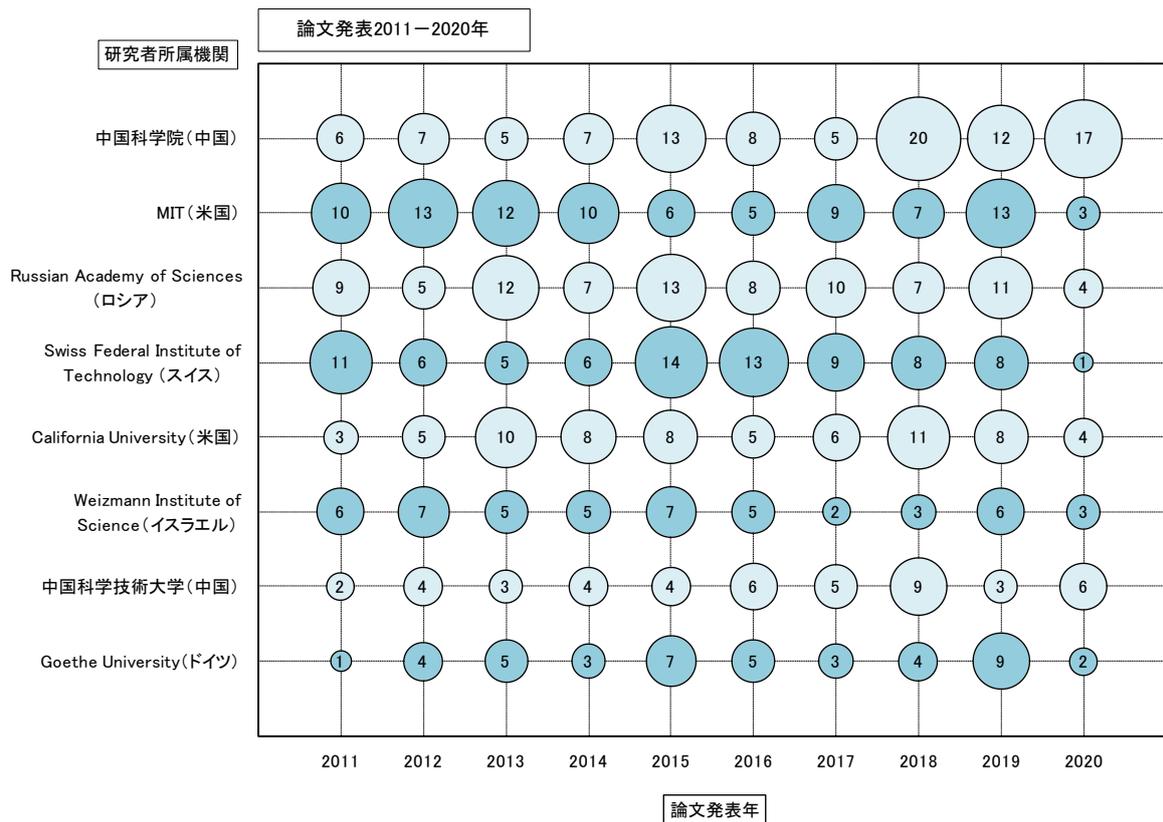
その他技術（SQUID）の上位の研究者所属機関別論文発表件数推移を図 5-2-18 に示す。中国科学院（中国）、CNR（イタリア）は期間中コンスタントに発表している。

図 5-2-18 その他技術（SQUID）－研究者所属機関別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）



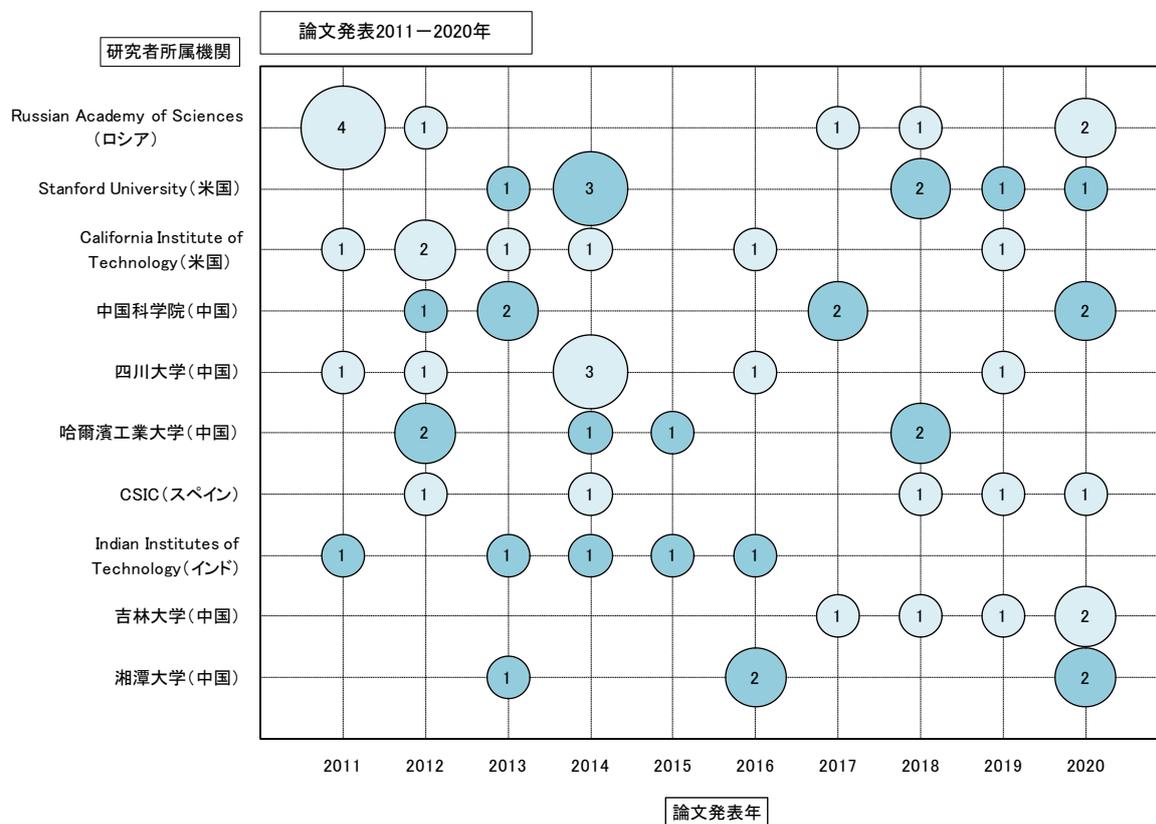
その他技術（超核偏極技術）の上位の研究者所属機関別論文発表件数推移を図 5-2-19 に示す。中国科学院（中国）は、2015 年以降発表が多い。MIT（米国）、Russian Academy of Sciences（ロシア）、Swiss Federal Institute of Technology（スイス）は期間中コンスタントに発表がある。超核偏極技術は、低温の超核偏極技術から始まり、近年、室温の超核偏極技術に移りつつある。室温の超核偏極技術に関する論文数の反映はこれからと思われる。

図 5-2-19 その他技術（超核偏極技術）－研究者所属機関別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）



その他技術（フォノンセンシング）の上位の研究者所属機関別論文発表件数推移を図 5-2-20 に示す。

図 5-2-20 その他技術（フォノンセンシング）－研究者所属機関別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）



第3節 研究者別論文発表件数上位ランキング

研究者別の論文発表件数上位ランキングを示す。上位の研究者を見ることができる。

1. 全体

上位10位内に欧州の研究者が4名、米国の研究者が3名、中国の研究者が2名、日本の研究者が1名入っている。

表 5-2-1 研究者別論文発表件数上位ランキング（論文誌発行年：2011-2020年）

順位	研究者名	所属機関	件数
1	JELEZKO F	ULM UNIVERSITY (ドイツ)	169
2	WRACHTRUP J	UNIVERSITY OF STUTTGART (ドイツ)	138
3	WANG Z	中国科学院 (中国)	115
4	HAN XF	中国科学院 (中国)	95
5	ULLOM JN	NIST (米国)	94
6	LUKIN MD	HARVARD UNIVERSITY (米国)	89
7	FREITAS PP	INTERNATIONAL IBERIAN NANOTECHNOLOGY LABORATORY (ポルトガル)	88
8	EMSLEY L	ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE (スイス)	87
9	YUASA S	産業技術総合研究所	86
10	NAM SW	NIST (米国)	84

2. 固体量子センサ

上位10位内に欧州の研究者が5名、日本の研究者が2名、米国、中国、台湾、オーストラリアの研究者が各1名入っている。

表 5-2-2 固体量子センサー研究者別論文発表件数上位ランキング（論文誌発行年：2011-2020年）

順位	研究者名	所属機関	件数
1	JELEZKO F	ULM UNIVERSITY (ドイツ)	169
2	WRACHTRUP J	UNIVERSITY OF STUTTGART (ドイツ)	138
3	LUKIN MD	HARVARD UNIVERSITY (米国)	89
4	CHANG HC	ACADEMIA SINICA TAIWAN (台湾)	71
5	MEIJER J	LEIPZIG UNIVERSITY (ドイツ)	66
6	DU JF	中国科学技術大学 (中国)	65
7	NAYDENOV B	HELMHOLTZ-ZENTRUM BERLIN FÜR MATERIALIEN UND ENERGIE (ドイツ)	62
8	OHSHIMA T	量子科学技術研究開発機構	59
9	ISOYA J	筑波大学	57
10	HOLLENBERG LCL	UNIVERSITY OF MELBOURNE (オーストラリア)	55
10	PLENIO MB	ULM UNIVERSITY (ドイツ)	55
39	HATANO M	東京工業大学	34

3. 量子スピントロニクスセンサ

上位 10 位内に日本の研究者が 6 名、欧州の研究者が 3 名、中国の研究者が 1 名入っている。

表 5-2-3 量子スピントロニクスセンサー研究者別論文発表件数上位ランキング(論文誌発行年:2011-2020 年)

順位	研究者名	所属機関	件数
1	HAN XF	中国科学院 (中国)	95
2	FREITAS PP	INTERNATIONAL IBERIAN NANOTECHNOLOGY LABORATORY (ポルトガル)	88
3	YUASA S	産業技術総合研究所	86
4	SAITOH E	日本原子力研究開発機構	79
5	OHNO H	東北大学	75
6	KUBOTA H	産業技術総合研究所	69
7	HONO K	物質・材料研究機構	68
8	CARDOSO S	INESC (ポルトガル)	67
9	REISS G	UNIVERSITY OF BIELEFELD (ドイツ)	66
10	FUKUSHIMA A	産業技術総合研究所	65
13	ANDO Y	東北大学	56

4. 量子もつれ光センサ

上位 9 位内に中国の研究者が 5 名、日本の研究者が 3 名、欧州の研究者が 2 名入っている。京都大学の TAKEUCHI S が 57 件でトップである。

表 5-2-4 量子もつれ光センサー研究者別論文発表件数上位ランキング(論文誌発行年:2011-2020 年)

順位	研究者名	所属機関	件数
1	TAKEUCHI S	京都大学	57
2	GUO GC	中国科学技術大学 (中国)	41
3	FEI SM	首都師範大学 (中国)	36
4	OKAMOTO R	京都大学	27
5	FUJIWARA M	情報通信研究機構	25
5	ZEILINGER A	UNIVERSITY OF VIENNA (オーストリア)	25
7	JI YH	江西師範大学 (中国)	23
8	LI CF	中国科学技術大学 (中国)	22
9	ABDEL-KHALEK S	SOHAG UNIVERSITY (エジプト)	21
9	ISAR A	HORIA HULUBEI NATIONAL INSTITUTE OF PHYSICS NUCLEAR ENGINEERING (ルーマニア)	21
9	LI XY	天津大学 (中国)	21

5. 光子検出器

上位 10 位内に米国の NIST の研究者が 6 名、中国の研究者が 2 名、日本の研究者が 1 名入っている。2 位の ULLOM JN、4 位の HILTON GC、6 位の IRWIN KD は、宇宙マイクロ波背景放射観測宇宙線物理学に関する論文が多い。

表 5-2-5 光子検出器－研究者別論文発表件数上位ランキング（論文誌発行年：2011-2020 年）

順位	研究者名	所属機関	件数
1	WANG Z	中国科学院（中国）	115
2	ULLOM JN	NIST（米国）	94
3	NAM SW	NIST（米国）	84
4	HILTON GC	NIST（米国）	81
5	YOU LX	中国科学院（中国）	67
6	IRWIN KD	STANFORD UNIVERSITY（米国）	64
6	MIKI S	情報通信研究機構	64
8	SCHMIDT DR	NIST（米国）	63
9	SWETZ DS	NIST（米国）	59
10	REINTSEMA CD	NIST（米国）	56

6. 量子慣性センサ

上位 9 位内に欧州の研究者が 5 名、中国の研究者が 3 名、米国の研究者が 1 名入っている。

表 5-2-6 量子慣性センサ－研究者別論文発表件数上位ランキング（論文誌発行年：2011-2020 年）

順位	研究者名	所属機関	件数
1	MALOMED BA	TEL AVIV UNIVERSITY（イスラエル）	38
2	ARNDT M	UNIVERSITY OF VIENNA（オーストリア）	31
2	RASEL EM	UNIVERSITY OF HANNOVER（ドイツ）	31
4	ZHAN MS	中国科学院（中国）	30
5	LANDRAGIN A	PSL RESEARCH UNIVERSITY PARIS COMUE（フランス）	27
6	ERTMER W	UNIVERSITY OF HANNOVER（ドイツ）	25
6	HU ZK	華中科技大学（中国）	25
6	WANG J	中国科学院（中国）	25
9	BOUYER P	UNIVERSITE DE BORDEAUX（フランス）	24
9	KEVREKIDIS PG	UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS AMHERST（米国）	24
67	KOZUMA M	東京工業大学	10

7. 光格子時計

上位9位内に中国の研究者が5名、米国の研究者が3名、ロシアの研究者が2名、フランス、日本の研究者が各1名入っている。

表 5-2-7 光格子時計－研究者別論文発表件数上位ランキング（論文誌発行年：2011-2020年）

順位	研究者名	所属機関	件数
1	YE J	UNIVERSITY OF COLORADO BOULDER (米国)	54
2	JIA ST	山西大学 (中国)	49
3	BOUDOT R	CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS (フランス)	39
4	TAICHENACHEV AV	NOVOSIBIRSK STATE UNIVERSITY (ロシア)	36
4	YUDIN VI	NOVOSIBIRSK STATE UNIVERSITY (ロシア)	36
6	LIU L	中国科学院 (中国)	32
6	SAFRONOVA MS	UNIVERSITY OF DELAWARE (米国)	32
6	XIAO LT	山西大学 (中国)	32
9	KATORI H	東京大学	31
9	MA J	山西大学 (中国)	31
9	REY AM	UNIVERSITY OF COLORADO BOULDER (米国)	31
9	WANG YZ	中国科学院 (中国)	31

8. その他技術

その他技術 (SQUID) の上位10位内に、欧州の研究者が5名、日本、中国、ロシアの研究者が各2名入っている。

表 5-2-8 その他技術 (SQUID)－研究者別論文発表件数上位ランキング（論文誌発行年：2011-2020年）

順位	研究者名	所属機関	件数
1	KLEINER R	EBERHARD KARLS UNIVERSITY OF TUBINGEN (ドイツ)	78
2	KOELLE D	EBERHARD KARLS UNIVERSITY OF TUBINGEN (ドイツ)	75
3	GIAZOTTO F	CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE CNR (イタリア)	67
4	WANG Z	中国科学院 (中国)	61
5	KADOWAKI K	筑波大学	60
6	XIE XM	中国科学院 (中国)	53
7	SHUKRINOV YM	JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH RUSSIA (ロシア)	51
8	ZHANG Y	RESEARCH CENTER JULICH (ドイツ)	49
9	YAMAMOTO T	TU DELFT (オランダ)	45
10	KOSHELETS VP	RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES (ロシア)	44
10	YOSHIKAWA N	横浜国立大学	44

その他技術（超核偏極技術）の上位 10 位内に、欧州の研究者が 7 名、米国の研究者が 2 名、中国、ロシアの研究者が各 1 名入っている。

表 5-2-9 その他技術（超核偏極技術）－研究者別論文発表件数上位ランキング（論文誌発行年：2011-2020 年）

順位	研究者名	所属機関	件数
1	EMSLEY L	ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE (スイス)	87
2	GRIFFIN RG	MIT (米国)	75
3	BODENHAUSEN G	SORBONNE UNIVERSITE (フランス)	71
4	LESAGE A	UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1 (フランス)	63
5	COPERET C	ETH ZURICH (スイス)	59
6	ROSSINI AJ	IOWA STATE UNIVERSITY (米国)	56
7	JANNIN S	UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1 (フランス)	54
8	OUARI O	AIX MARSEILLE UNIVERSITE (フランス)	51
9	PENG XH	中国科学技術大学 (中国)	48
10	ARDENKJAER-LARSEN JH	TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK (デンマーク)	45
10	YURKOVSKAYA AV	RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES (ロシア)	45

その他技術（フォノンセンシング）の上位 6 位内に、米国の研究者が 7 名、中国の研究者が 2 名、シンガポールの研究者が 1 名入っている。

表 5-2-10 その他技術（フォノンセンシング）－研究者別論文発表件数上位ランキング（論文誌発行年：2011-2020 年）

順位	研究者名	所属機関	件数
1	CABRERA B	STANFORD UNIVERSITY (米国)	12
2	BRINK PL	STANFORD UNIVERSITY (米国)	11
3	ZHANG X	深圳大学 (中国)	10
4	SUN CQ	NANYANG TECHNOLOGICAL UNIVERSITY (シンガポール)	9
4	YOUNG BA	SANTA CLARA UNIVERSITY (米国)	9
6	CAI LC	中国工程物理研究院 (中国)	8
6	CHERRY M	SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY (米国)	8
6	PYLE M	UNIVERSITY OF CALIFORNIA BERKELEY (米国)	8
6	SADOULET B	UNIVERSITY OF CALIFORNIA BERKELEY (米国)	8
6	TOMADA A	SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY (米国)	8

第3章 マップ解析による調査

Derwent Innovation のマップ解析ツール ThemeScape により、量子計測・センシング技術の七つの区分について解析した。ThemeScape のテキストマイニング機能で対象論文をマップ上にプロットすることでキーワード関連技術の集積状況を調べ、対象論文の技術動向を把握する。

1. 固体量子センサ

固体量子センサのマップ解析結果を図 5-3-1 に示す。原理・要素技術として①NV センタ、構造・材料として②蛍光ナノダイヤモンド、④フィルム基板、課題として③コヒーレントタイム、⑤エミッションレート、応用用途として⑥NMR が抽出されている。

図 5-3-1 マップ解析－固体量子センサ



3. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサのマップ解析結果を図 5-3-3 に示す。原理・要素技術として①量子もつれ、②アイドラー光子、③光子干渉、④量子ゲート、⑤量子チャネル、⑥量子相関、応用用途として⑦量子レーダーが抽出されている。

図 5-3-3 マップ解析－量子もつれ光センサ



4. 光子検出器

光子検出器のマップ解析結果を図 5-3-4 に示す。原理・要素技術として①検出器、②超伝導転移端センサ、④量子回路、構造・材料として③誘電体層、応用用途として⑤量子鍵送受信システム、⑥量子通信が抽出されている。

図 5-3-4 マップ解析－光子検出器



7. その他技術

その他技術 (SQUID) のマップ解析結果を図 5-3-7 に示す。原理・要素技術として①超伝導体、②超伝導体、電流、③超伝導体、スピン、応用用途として④電子顕微鏡が抽出されている。

図 5-3-7 マップ解析—その他技術 (SQUID)



その他技術（超核偏極技術）のマップ解析結果を図 5-3-8 に示す。原理・要素技術として①超核偏極、②量子ドット、応用用途として③MRI が抽出されている。

図 5-3-8 マップ解析—その他技術（超核偏極技術）



その他技術（フォノンセンシング）のマップ解析結果を図 5-3-9 に示す。原理・要素技術として①導波管、②ディテクタ、応用用途として③熱電エネルギーハーベスタが抽出されている。

図 5-3-9 マップ解析—その他技術（フォノンセンシング）



第4章 技術区分別動向調査

第1節 技術区分

第1章第2節4. 調査対象母集団の抽出で使用した検索式と第3章のマップ解析による調査の結果を基に、特許の技術区分と整合を取り、以下の7区分のそれぞれの技術区分を選定した。なおその他については、件数の多いSQUIDについて技術区分を選定した。

表 5-4-1 量子計測・センシングの7区分の技術区分

・ 固体量子センサ

区分1	区分2	英文
原理・要素技術	NV センタ	NV center、vacancy center
	ODMR	ODMR
構造・材料	磁気欠陥センタ物質	magnet defect center material
	ダイヤモンド	diamond
課題	スピン緩和時間、コヒーレント時間	spin coherent time、spin relaxation time
	感度	sensitivity
応用用途	磁気、磁場センサ	magnet sensor、magnet field sensor
	電流センサ	current sensor
	温度センサ	temperature sensor
	圧力センサ	pressure sensor
	電場センサ	electric field sensor
	NMR、MRI	NMR、MRI

・ 量子スピントロニクスセンサ

ー トンネル磁気抵抗素子

区分1	区分2	英文
原理・要素技術	MTJ	MTJ、magnetic tunnel junction、TMR、tunnel magnetoresistive
	磁気フリー層	magnetic free layer
構造・材料	電極、積層	stack、electrode
課題	感度	sensitivity
	小型化、分解能	small size、resolution
	ダイナミックレンジ	dynamic range
応用用途	磁気センサ	magnet sensor
	電流センサ	current sensor

－熱流素子

区分1	区分2	英文
原理・要素技術	スピンゼーベック効果	spin seebeck effect
	スピン流	spin flow
課題	スピン流生成効率向上	spin flow increase
応用用途	熱流センサ	heat flow sensor
	環境発電、エナジーハーベスト	energy harvest

・量子もつれ光センサ

区分1	区分2	英文
原理・要素技術	量子もつれ、もつれ光子	quantum entanglement、entangle photon
	非線形光学素子	non-line optical element
	アイドラー光子	idler photon
構造・材料	ナノワイヤ検出器	nanowire detector
課題	感度向上	highsensitivity、sensitivity
	分解能向上	resolution、optical resolution
応用用途	量子もつれ顕微鏡	quantum entanglement microscope
	量子 OCT	quantum optical coherence tomography、 quantum OCT
	量子レーダー	quantum rader
	量子赤外吸収分光	IRQAS、Infrared Quantum Absorption Spectroscopy

・光子検出器

区分1	区分2	英文
原理・要素技術	単一光子検出器	single photon detector
	超伝導ナノワイヤ単一光子光検出器 (SSPD)	Superconducting Nano Strip Photon Detector、 Superconducting Nanowire Single Photon Detector
	超伝導転移端センサ	superconducting transition edge sensor(TES)
構造・材料	誘電体多層膜	multi dielectric layer film
	ダブルサイドキャビティ	double side cavity
課題	光吸収効率向上、感度	sensitivity
応用用途	量子鍵送受信システム	quantum key distribution system
	量子通信	quantum communication
	量子コンピュータ	quantum computer

・量子慣性センサ

区分 1	区分 2	英文
原理・要素技術	原子干渉計	atom interferometer
	原子ジャイロ	atomic gyroscope
	ド・ブロイ波センサ	de Broglie wave sensor
	量子慣性センサ	quantum inertial sensor
	原子重力計	atomic gravimeter
	テンソル勾配計測、重力勾配計	tensor measurement system
	アルカリ土類金属	alkaline earth metal
課題	環境耐性向上	environmental immunity
	小型化	downsizing
応用用途	資源探索	resource search
	潜水艦、AUV、UUV、ドローン	submarine、AUV(Autonomous underwater vehicle)、UUV(Unmanned underwater vehicle)、drone

・光格子時計

区分 1	区分 2	英文
原理・要素技術	磁気光学トラップ	magneto optical trap
	高精度時間計測	high precision time measurement
	光格子時計	optical lattice clock
	光学トラップ	optical trap
	光周波数コム	optical frequency comb
	原子センサ	atomic sensor
	信号処理	signal processing
課題	光シフト	light shift
	レーザー長寿命化	Photostable、long operational lifetime、lifetime
応用用途	時刻同期	time synchronization
	時計ベース標高測定	chronometric measurement、chronometric elevation measurement
	相対論的測地	relativistic geodesy

・その他 (SQUID)

区分 1	区分 2	英文
原理・要素技術	超伝導量子干渉計	superconducting quantum interference device
	ジョセフソン接合	Josephson junction
	膜、ビーム	film、beam
	量子ビットカップラー	coupler qubit
課題	低コスト化	cost reduction
応用用途	高感度局所磁場センサ	high sensitive magneto

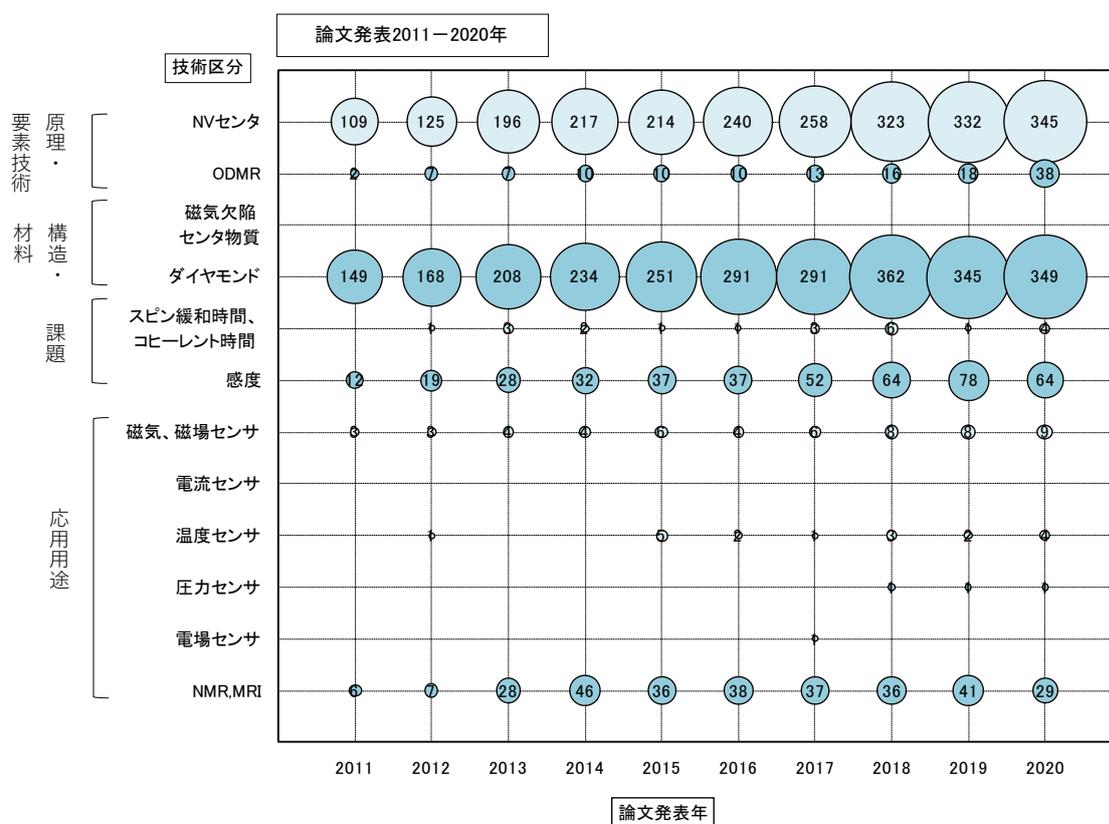
第2節 技術区別論文発表件数推移

量子計測・センシング技術の技術区別論文発表件数推移を示す。各区分の技術研究開発動向を見ることができる。

1. 固体量子センサ

固体量子センサの技術区別論文発表件数推移を図5-4-1に示す。原理・要素技術では、NVセンタが2011～2020年にかけて増加傾向である。構造・材料では、ダイヤモンドが2011～2020年にかけて増加傾向である。課題では感度が2010～2019年にかけて増加している。応用用途では、NMR、MRIが期間中に多い。

図5-4-1 固体量子センサー技術区別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020年）



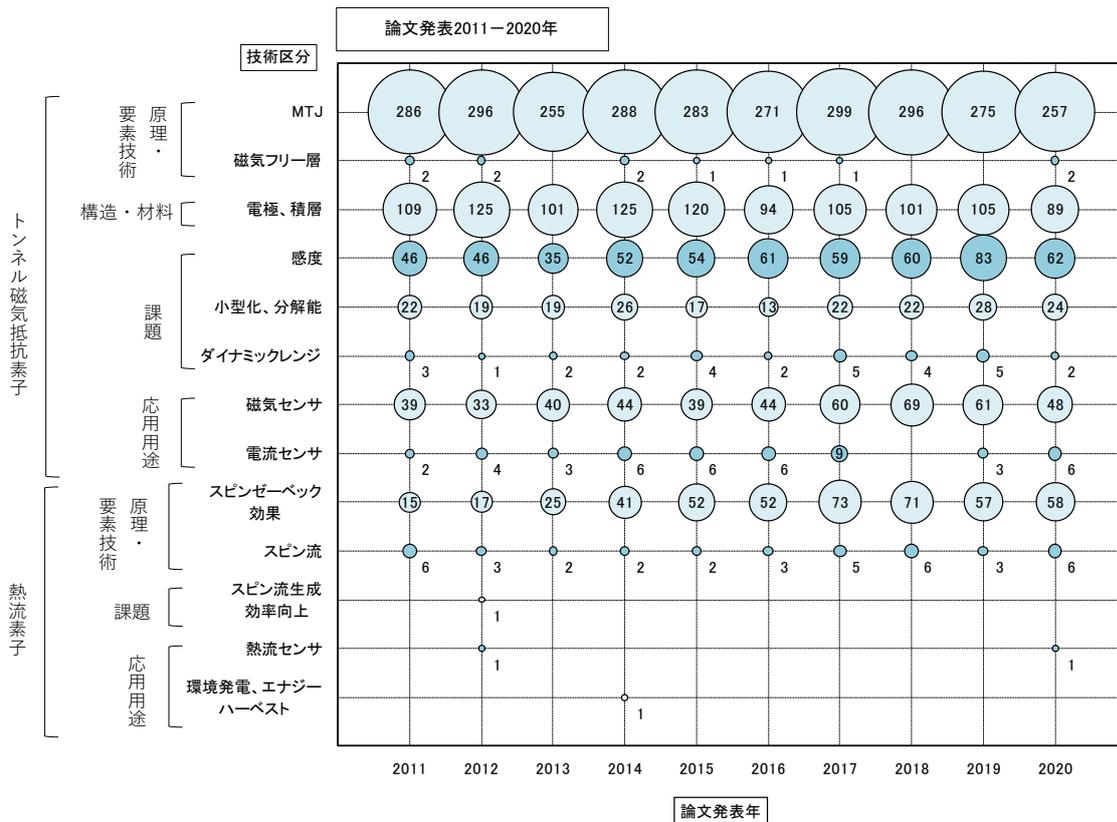
2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサの技術区別論文発表件数推移を図5-4-2に示す。

トンネル磁気抵抗素子では、原理・要素技術のMTJが期間中コンスタントにある。構造・材料の電極、積層が期間中コンスタントにある。課題では感度が期間中コンスタントにある。応用用途は、磁気センサが多い。

熱流素子では、原理・要素技術のスピンゼーベック効果が、2011～2017年にかけて増加している。

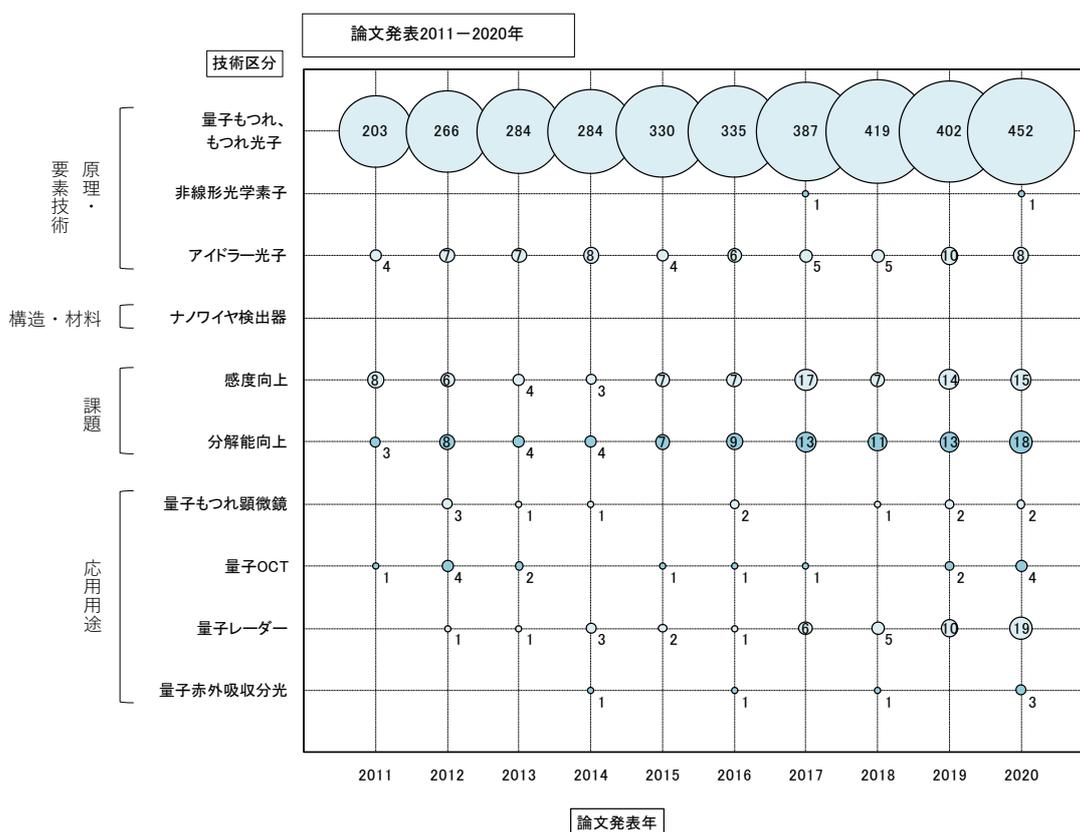
図5-4-2 量子スピントロニクスセンサー技術区別論文発表件数推移(論文誌発行年:2011-2020年)



3. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサの技術区分別論文発表件数推移を図 5-4-3 に示す。原理・要素技術では、量子もつれ、もつれ光子が 2011～2020 年にかけて増加している。課題では感度向上と分解能向上が期間中コンスタントにある。応用用途では、量子レーダーが多いが、量子もつれ顕微鏡、量子 OCT、量子赤外吸収分光も期間中にある。

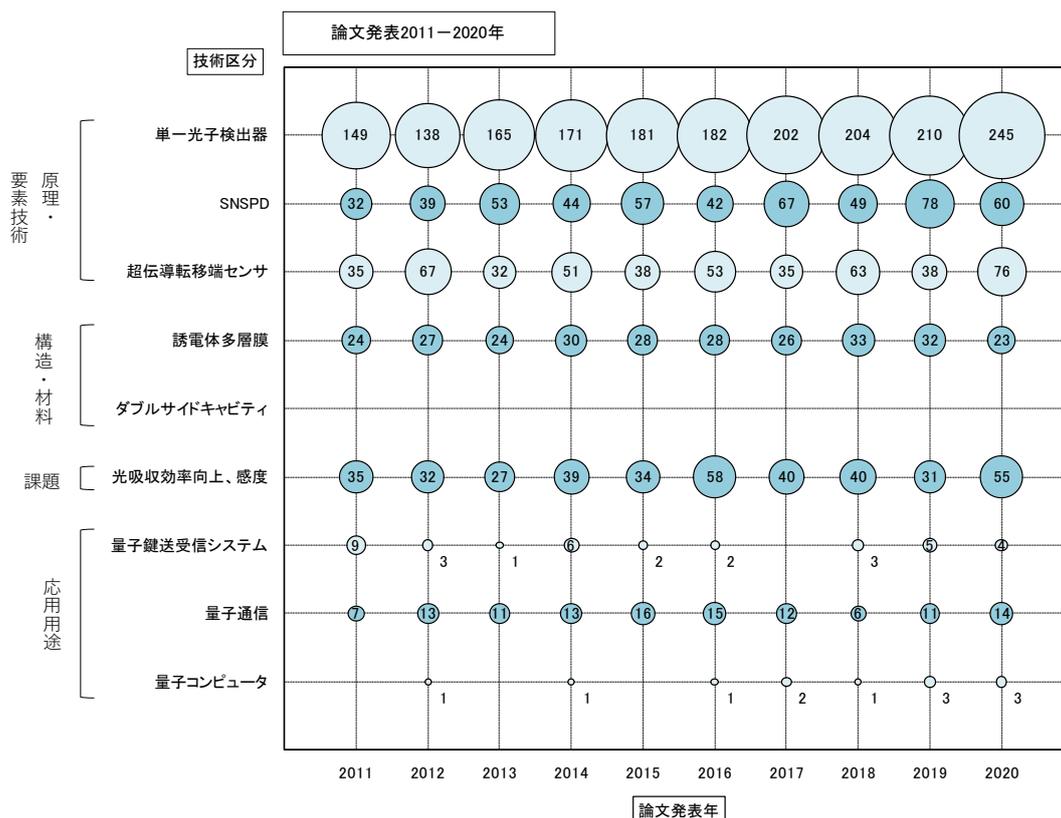
図 5-4-3 量子もつれ光センサー技術区分別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）



4. 光子検出器

光子検出器の技術区分別論文発表件数推移を図 5-4-4 に示す。原理・要素技術では、単一光子検出器が多く期間中コンスタントにある。SSPD と超伝導転移端センサも期間中コンスタントにある。構造・材料では、誘電体多層膜が期間中コンスタントにある。課題では光吸収効率向上、感度が期間中コンスタントにある。応用用途では、量子通信が多く期間中コンスタントにある。

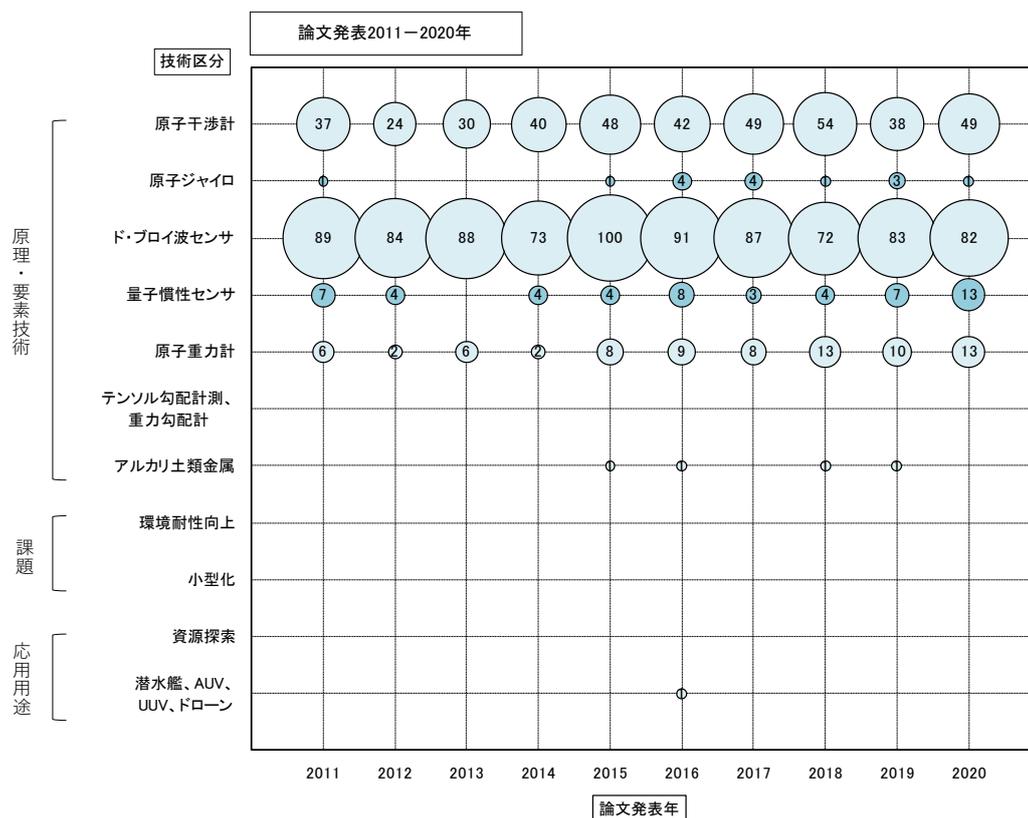
図 5-4-4 光子検出器－技術区分別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）



5. 量子慣性センサ

量子慣性センサの技術区分別論文発表件数推移を図 5-4-5 に示す。原理・要素技術では、ド・ブroy波センサが多く、期間中コンスタントにある。原子干渉計が期間中コンスタントにある。量子慣性センサは、2011、2012 年、2014～2020 年にかけてある。応用用途では、潜水艦、AUV、UUV、ドローンが、2016 年に 1 件ある。

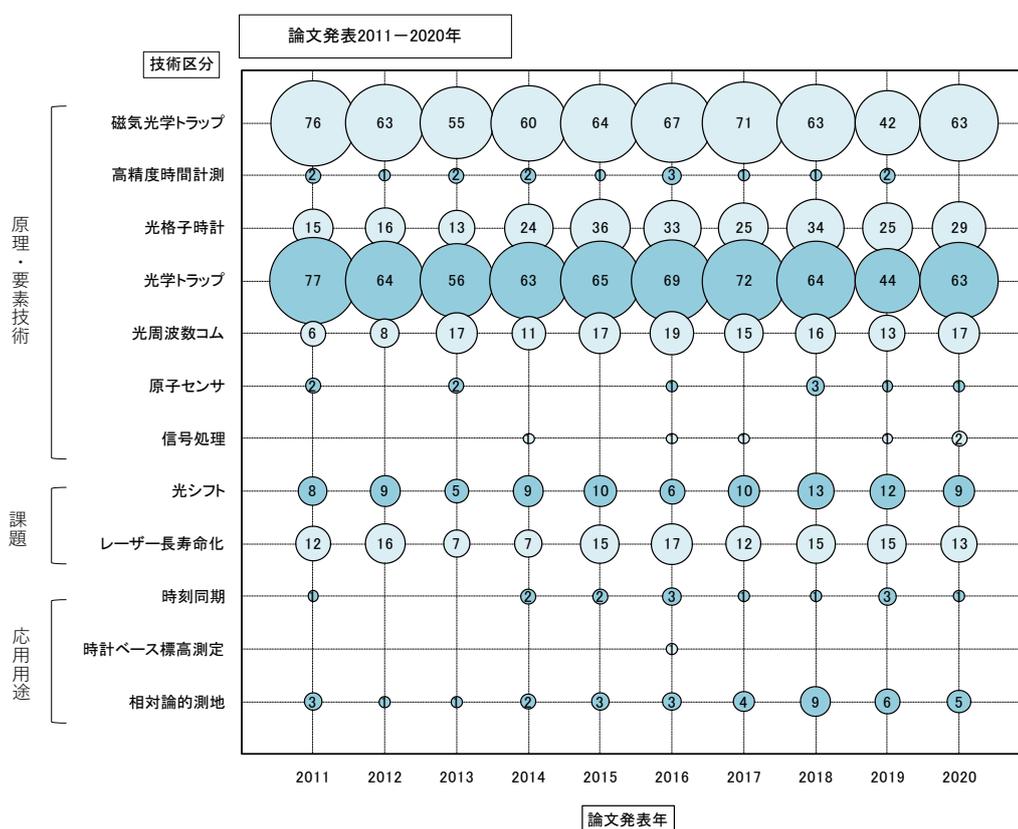
図 5-4-5 量子慣性センサー技術区分別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）



6. 光格子時計

光格子時計の技術区分別論文発表件数推移を図 5-4-6 に示す。原理・要素技術では、磁気光学トラップと光学トラップが多く、期間中コンスタントにある。光格子時計と光周波数コムは期間中コンスタントにある。課題では光シフトとレーザー長寿命化が、期間中コンスタントにある。応用用途では、相対論的測地が期間中コンスタントにある。

図 5-4-6 光格子時計—技術区分別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）



7. その他技術

その他技術（SQUID）の技術区分別論文発表件数推移を図 5-4-7 に示す。原理・要素技術では、ジョセフソン接合、超伝導量子干渉計、膜、ビームが、期間中コンスタントに多い。

図 5-4-7 その他技術（SQUID）－技術区分別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）



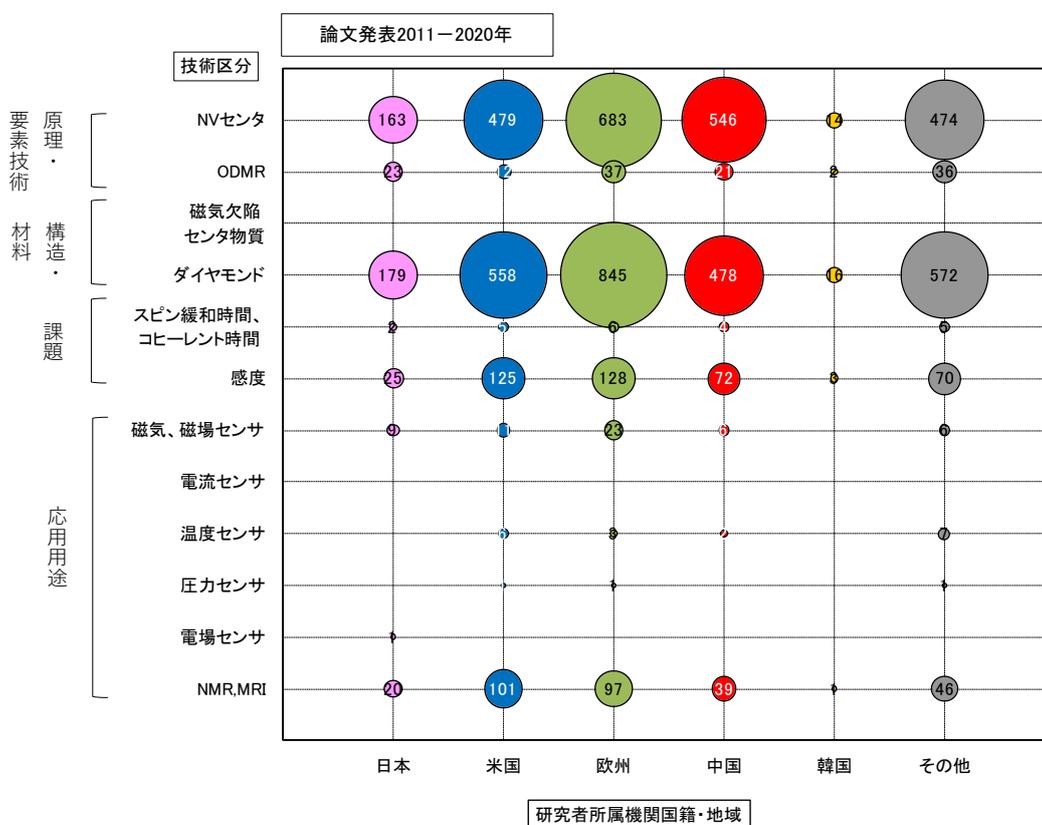
第3節 技術区分別—研究者所属機関国籍別論文発表件数

量子計測・センシング技術の技術区分別—研究者所属機関国籍別論文発表件数を示す。各区分の国籍別の技術研究開発動向を見ることができる。

1. 固体量子センサ

固体量子センサの技術区分別—研究者所属機関国籍別論文発表件数を、図5-4-8に示す。原理・要素技術では、NVセンタで欧州が多く、中国、米国が続いている。構造・材料では、ダイヤモンドで欧州が多く、米国、中国が続いている。課題では、感度で欧州が多く、米国、中国が続いている。応用用途では、NMR、MRIで米国が多く、次いで欧州が多い。

図5-4-8 固体量子センサー [技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数 (論文誌発行年: 2011-2020年)



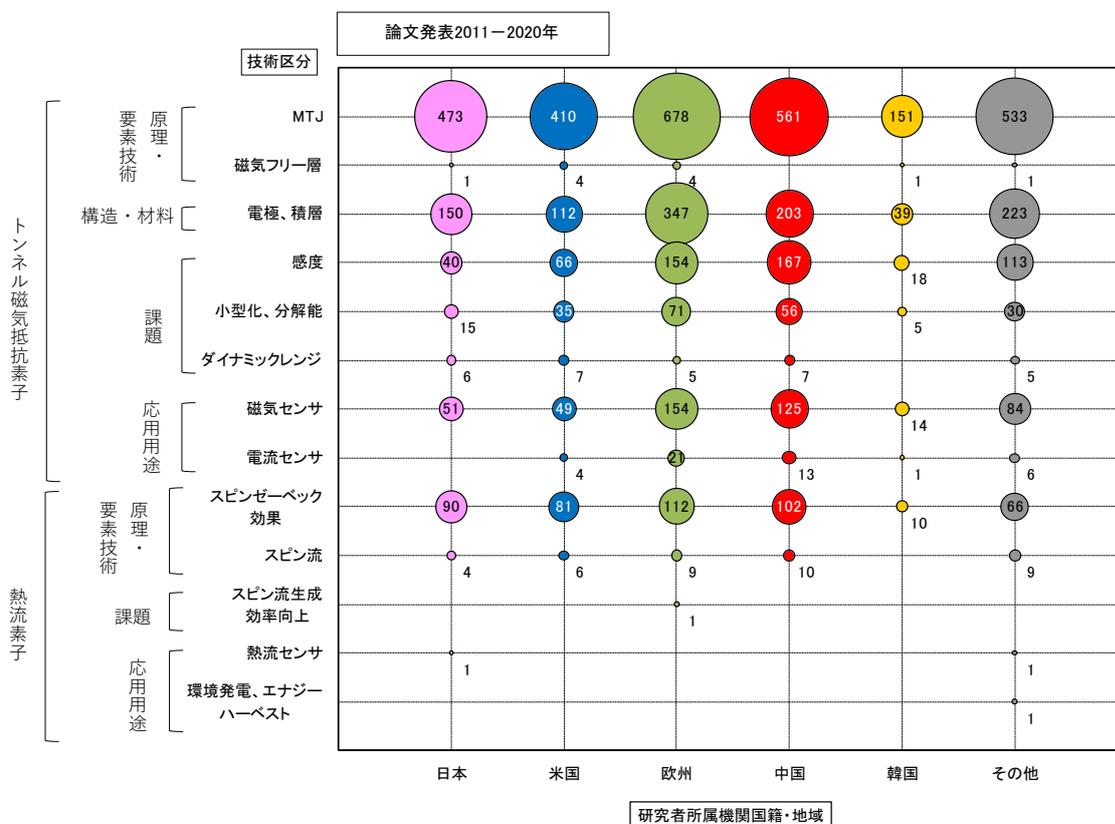
2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサの技術区分別—研究者所属機関国籍別論文発表件数を図 5-4-9 に示す。

トンネル磁気抵抗素子の原理・要素技術では、MTJ で欧州が多く、中国、日本、米国が続いている。構造・材料では、電極、積層で欧州が多く、中国が次いで多い。課題では、感度と小型化、分解能で、欧州、中国が多い。応用用途では、磁気センサで欧州が多く次いで中国が多い。

熱流素子の原理・要素技術では、スピンゼーベック効果で、欧州、中国が多い。

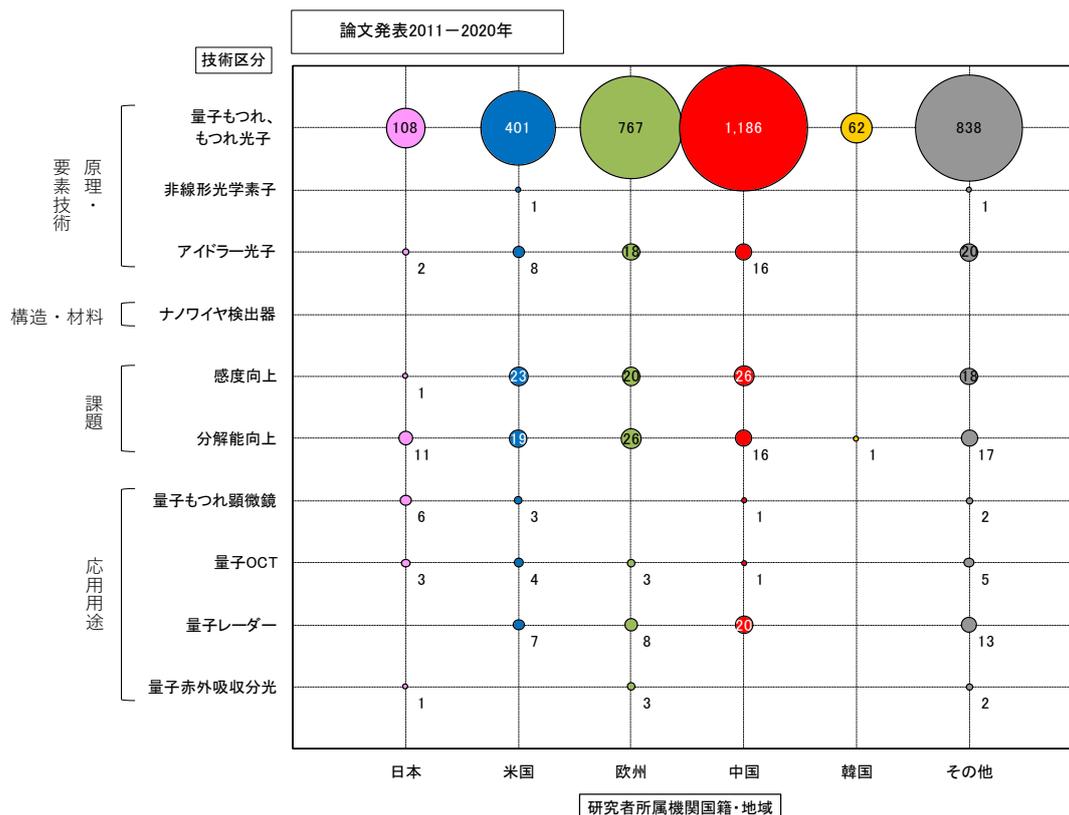
図 5-4-9 量子スピントロニクスセンサー [技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数 (論文誌発行年: 2011-2020 年)



3. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサの技術区分別—研究者所属機関国籍別論文発表件数を図 5-4-10 に示す。原理・要素技術では、量子もつれ、もつれ光子で中国が多く、欧州、米国が続いている。課題では、感度向上、分解能向上で米国、欧州、中国が多い。応用用途では、量子レーダーの中国が多い。量子赤外吸収分光は、日本、欧州、その他がある。

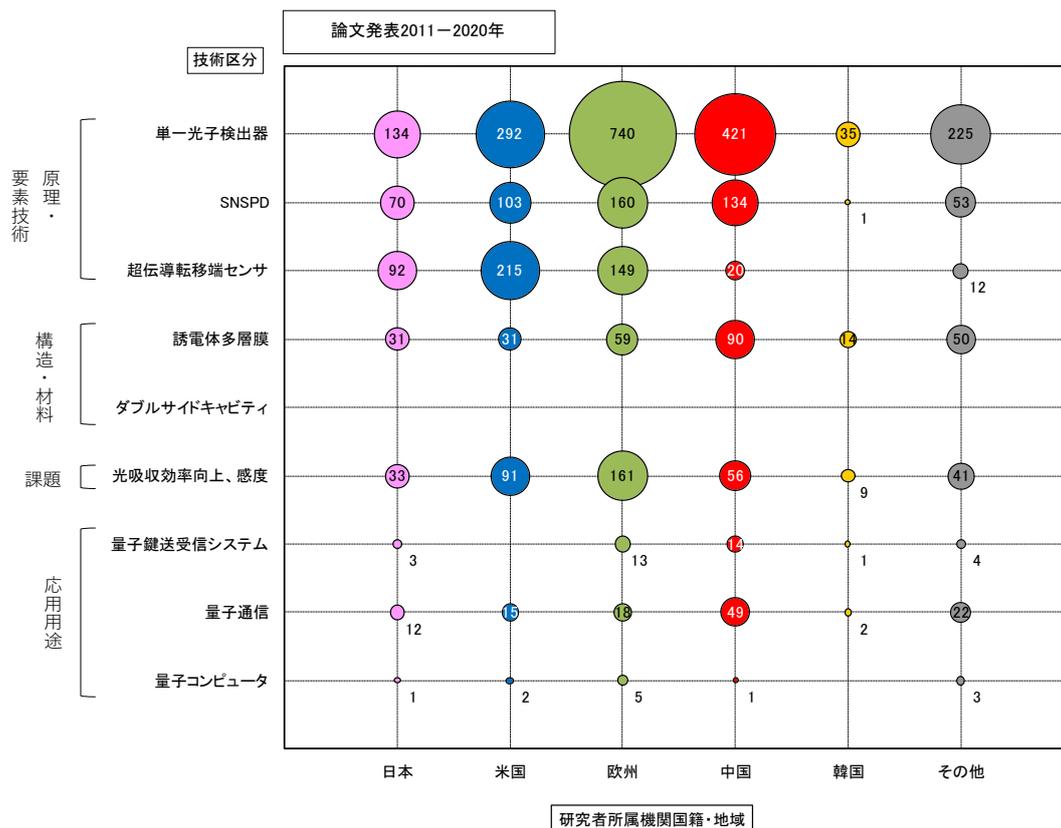
図 5-4-10 量子もつれ光センサー [技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数 (論文誌発行年: 2011-2020 年)



4. 光子検出器

光子検出器の技術区分別—研究者所属機関国籍別論文発表件数を図 5-4-11 に示す。原理・要素技術では、単一光子検出器で欧州が多く、中国、米国が続いている。SNSPD で欧州が多く、中国、米国が続いている。超伝導転移端センサで米国が多く、欧州、日本が続いている。構造・材料では、誘電体多層膜で中国が多く、欧州が次いで多い。課題では、光吸収効率向上、感度で欧州が多く、次いで米国が多い。応用用途では、量子通信で中国が多い。

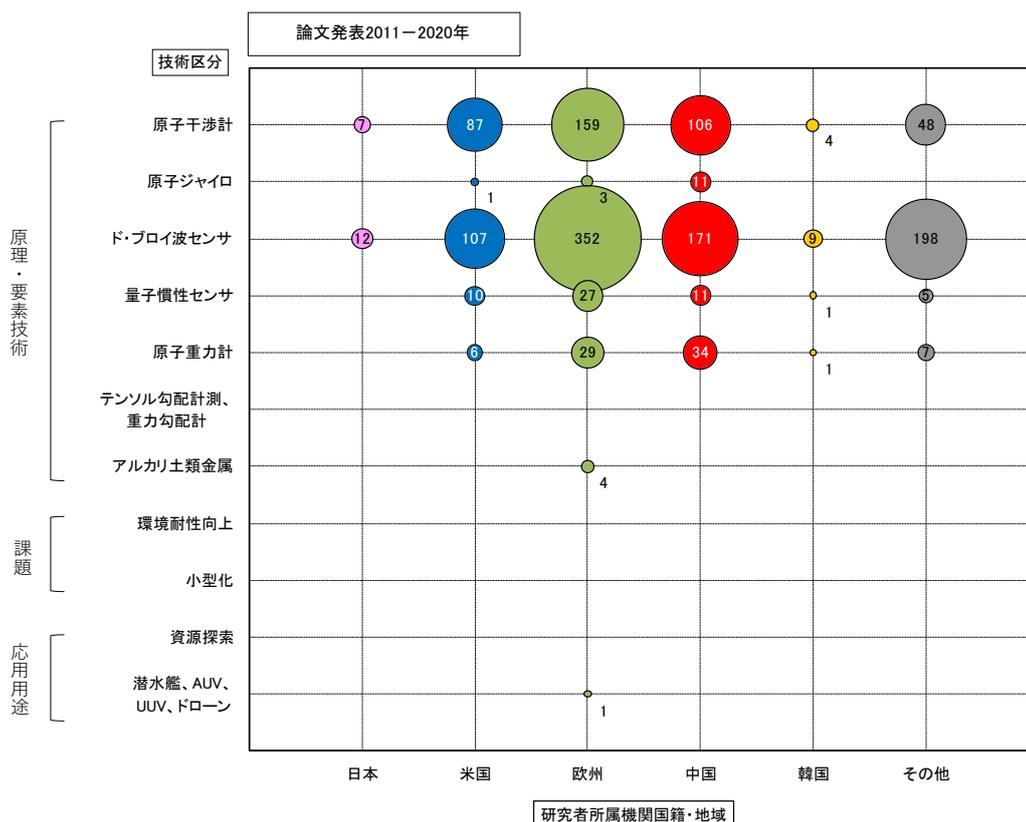
図 5-4-11 光子検出器—[技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数 (論文誌発行年: 2011-2020 年)



5. 量子慣性センサ

量子慣性センサの技術区分別—研究者所属機関国籍別論文発表件数を図 5-4-12 に示す。原理・要素技術では、ド・ブroy波センサと原子干渉計で欧州が多く、次いで中国、米国が多い。原子重力計で中国が多い。応用用途では、潜水艦、AUV、UUV、ドローンが欧州から出ている。

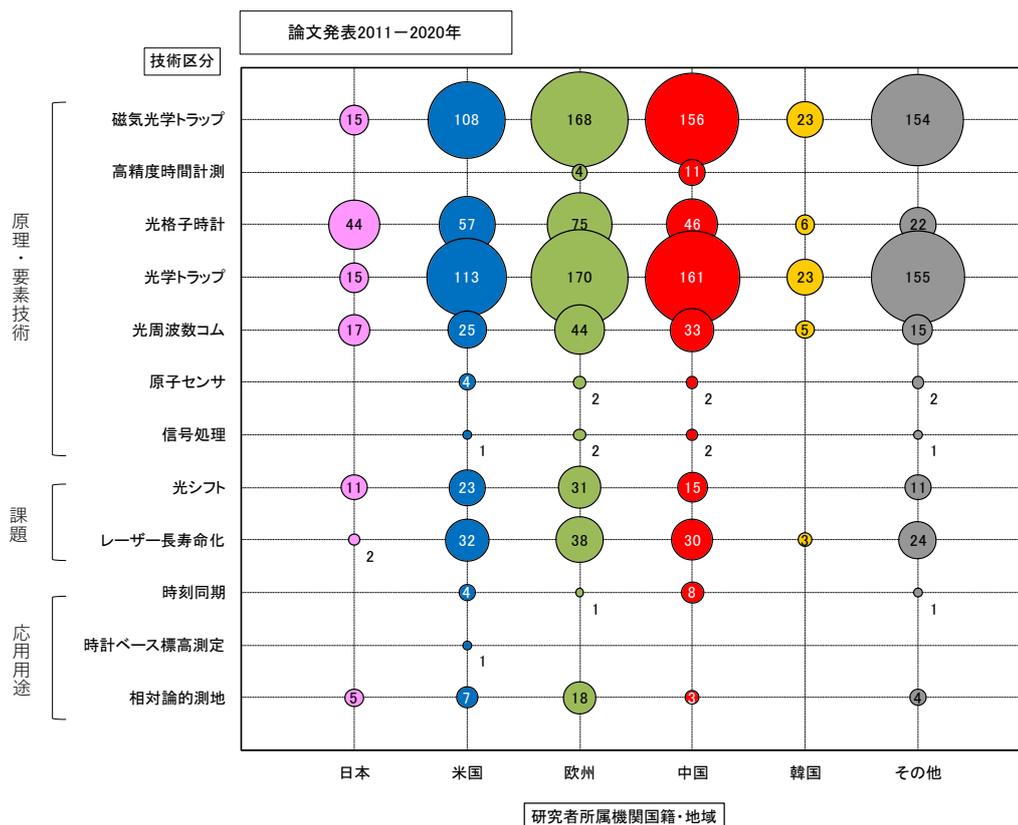
図 5-4-12 量子慣性センサー [技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数 (論文誌発行年: 2011-2020 年)



6. 光格子時計

光格子時計の技術区分別—研究者所属機関国籍別論文発表件数を図 5-4-13 に示す。原理・要素技術では、磁気光学トラップ、光学トラップで、欧州が多く次いで中国、米国が多い。光格子時計で、欧州が多く、次いで米国、中国、日本が多い。課題では、光シフト、レーザー長寿命化で欧州が多く、次いで米国、中国が多い。応用用途では、相対論的測地で欧州が多い。

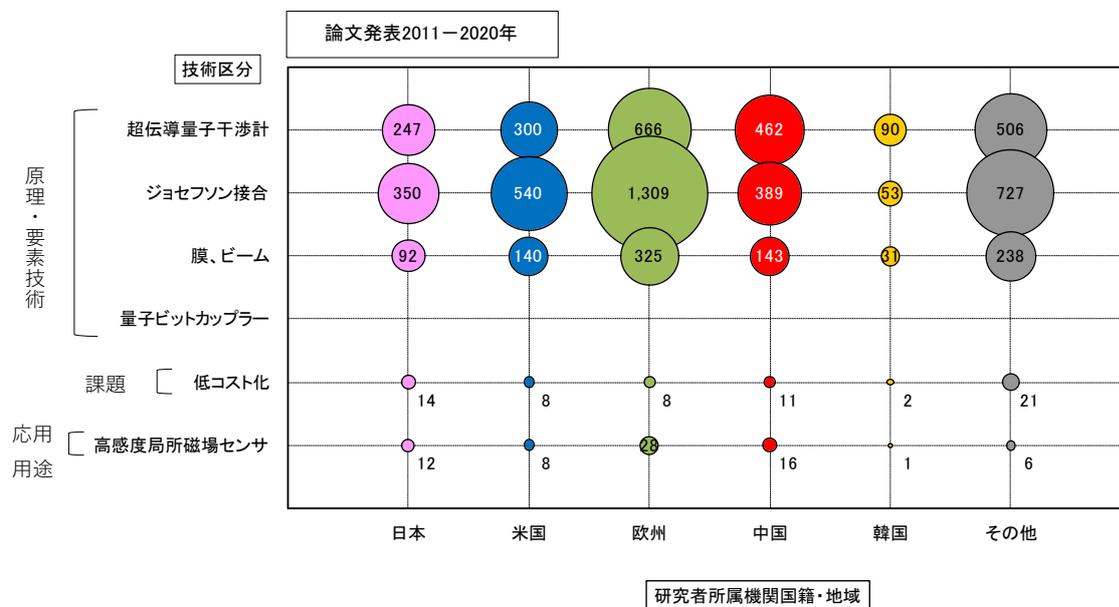
図 5-4-13 光格子時計—[技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数 (論文誌発行年: 2011-2020 年)



7. その他技術

その他（SQUID）の技術区分別－研究者所属機関国籍別論文発表件数を図 5-4-14 に示す。原理・要素技術では、ジョセフソン接合で欧州が多く、次いで米国が多い。超伝導量子干渉計は欧州が多く次いで中国が多い。膜、ビームは欧州が多い。

図 5-4-14 その他技術 (SQUID) - [技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数 (論文誌発行年: 2011-2020 年)



第4節 [技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率

量子計測・センシング技術の[技術区分別]研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を示す。各区分の主な技術区分の国籍別の論文発表件数推移を見ることができる。

1. 固体量子センサ

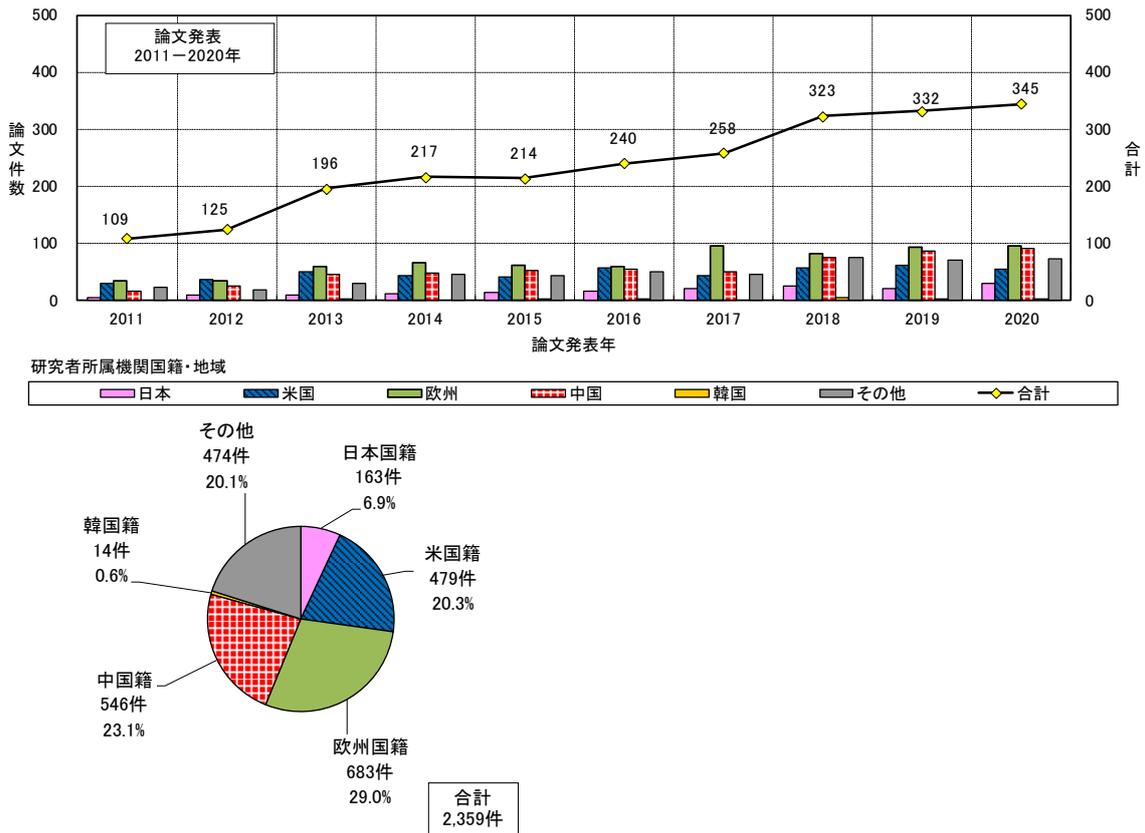
固体量子センサの主な技術区分の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を図5-4-15に示す。原理・要素技術のNVセンタでは、米国籍が2012～2016年にかけて増加している。中国籍が2015～2019年にかけて増加している。

構造・材料のダイヤモンドでは、米国籍が2014～2016年にかけて増加している。中国籍が2015～2019年にかけて増加している。

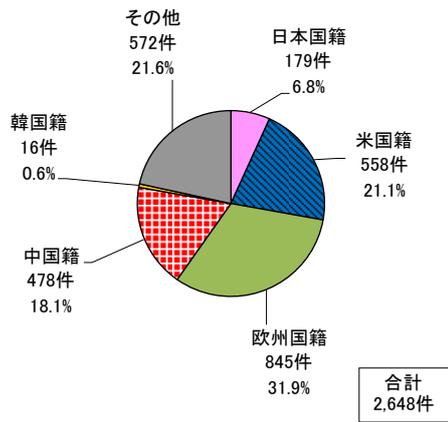
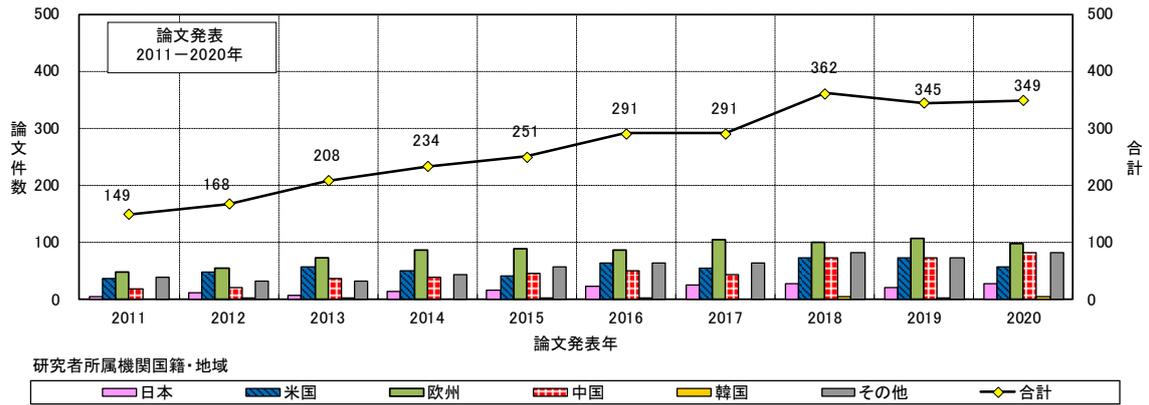
課題の感度では、中国籍が2016～2019年にかけて増加している。

図5-4-15 固体量子センサー [技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率（論文誌発行年：2011-2020年）

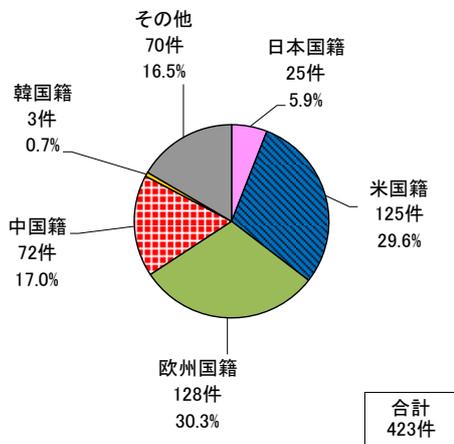
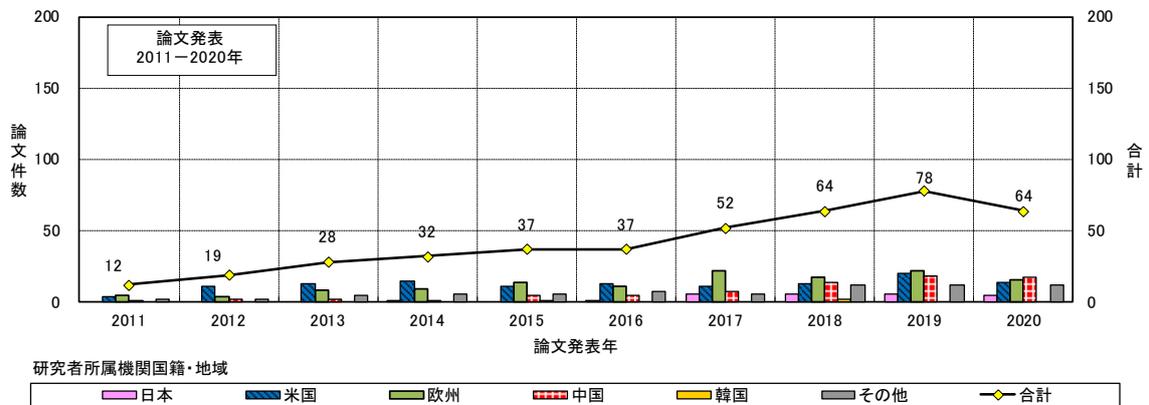
(d) NV センタ



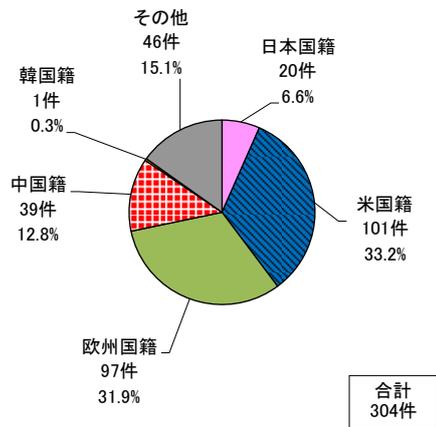
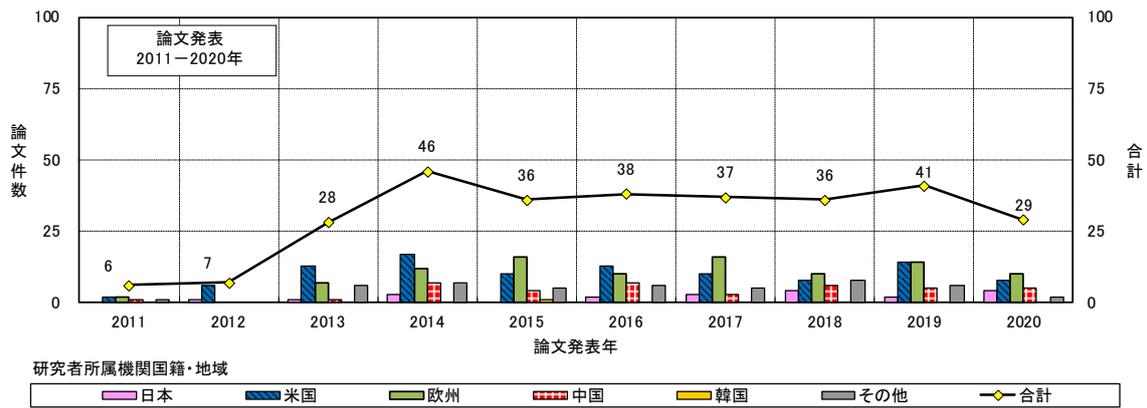
(e) ダイヤモンド



(f) 感度



(g) NMR、MRI



2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサの主な技術区分の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を図 5-4-16 に示す。

・トンネル磁気抵抗素子

原理・要素技術の MTJ では、欧州国籍、中国籍、日本国籍、米国籍の順に多いが、いずれも期間中コンスタントにある。

構造・材料の電極、積層では、欧州国籍が多く、2011～2015 年が多い。

課題の感度では、中国籍、欧州国籍が多く、中国籍は 2016～2019 年にかけて増加している。課題の小型化、分解能では、欧州国籍、中国籍が多いが、中国籍は 2016～2019 年にかけて増加している。

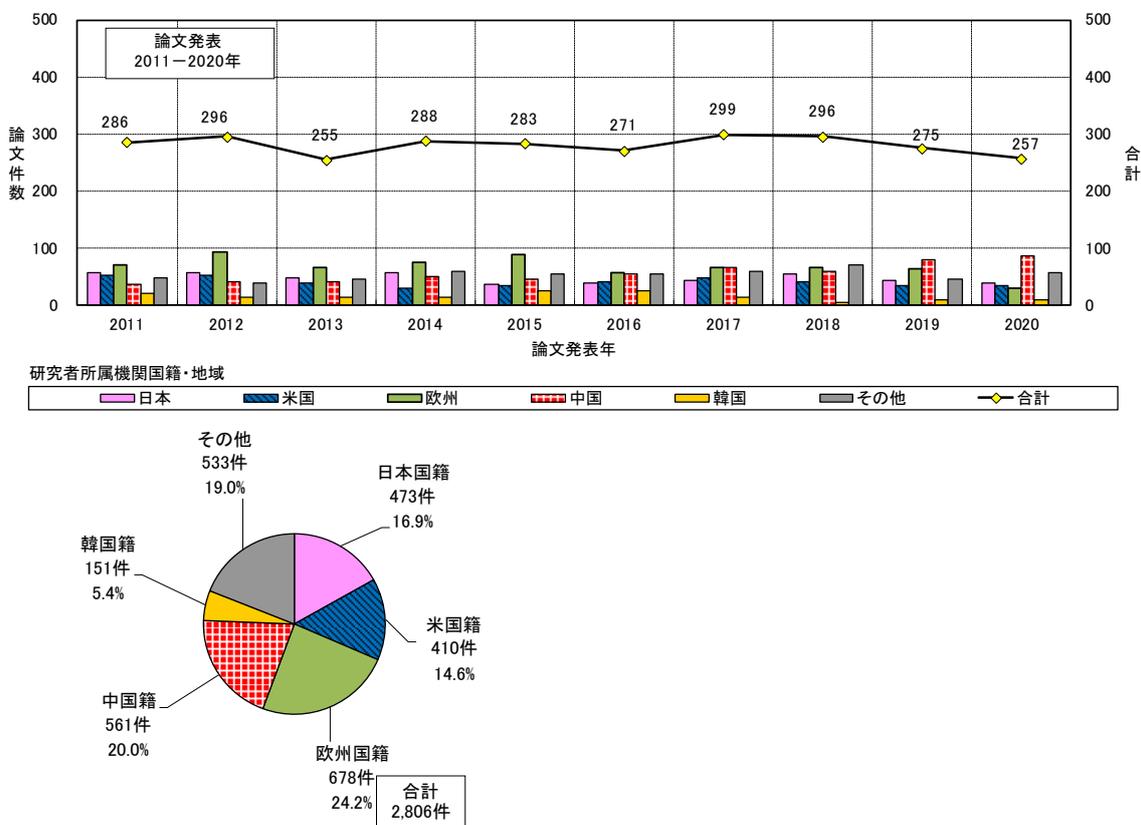
応用用途の磁気センサでは、欧州国籍、中国籍が多いが、中国籍は 2015～2019 年にかけて増加傾向である。

・熱流素子

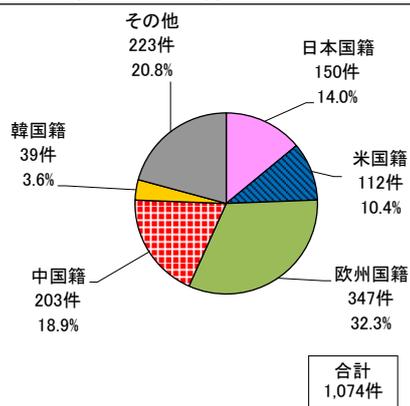
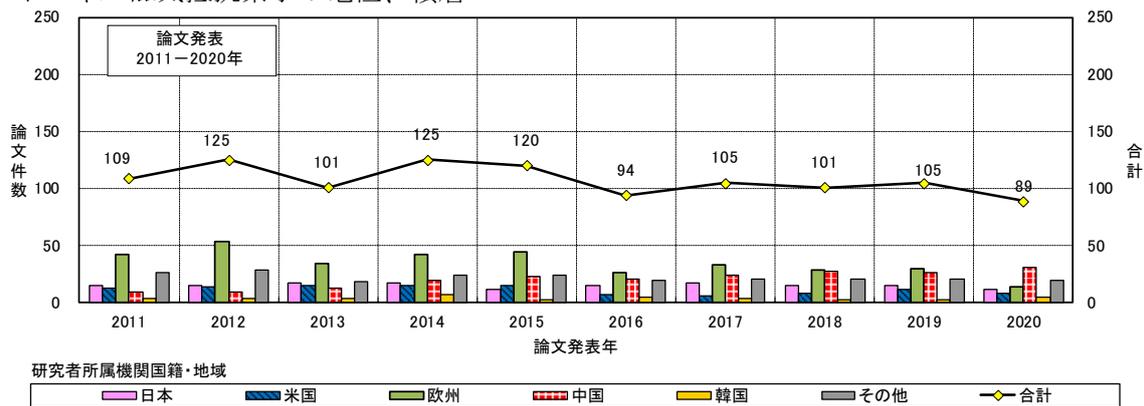
原理・要素技術のスピンゼーベック効果では、欧州、中国、日本、米国籍の順に多い。

図 5-4-16 量子スピントロニクスセンサー [技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率 (論文誌発行年：2011～2020 年)

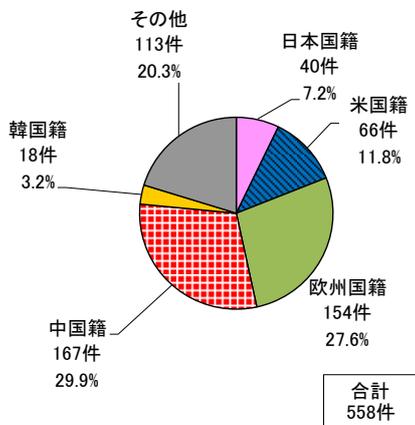
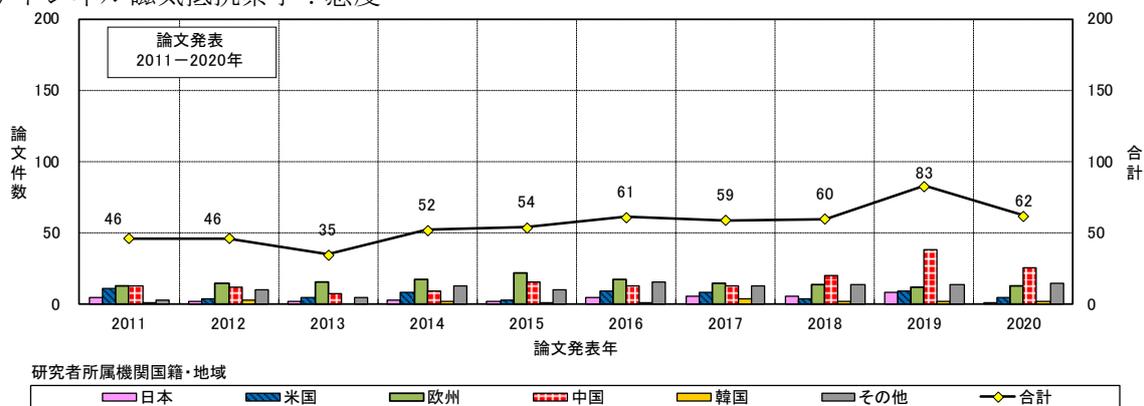
(a) トンネル磁気抵抗素子：MTJ



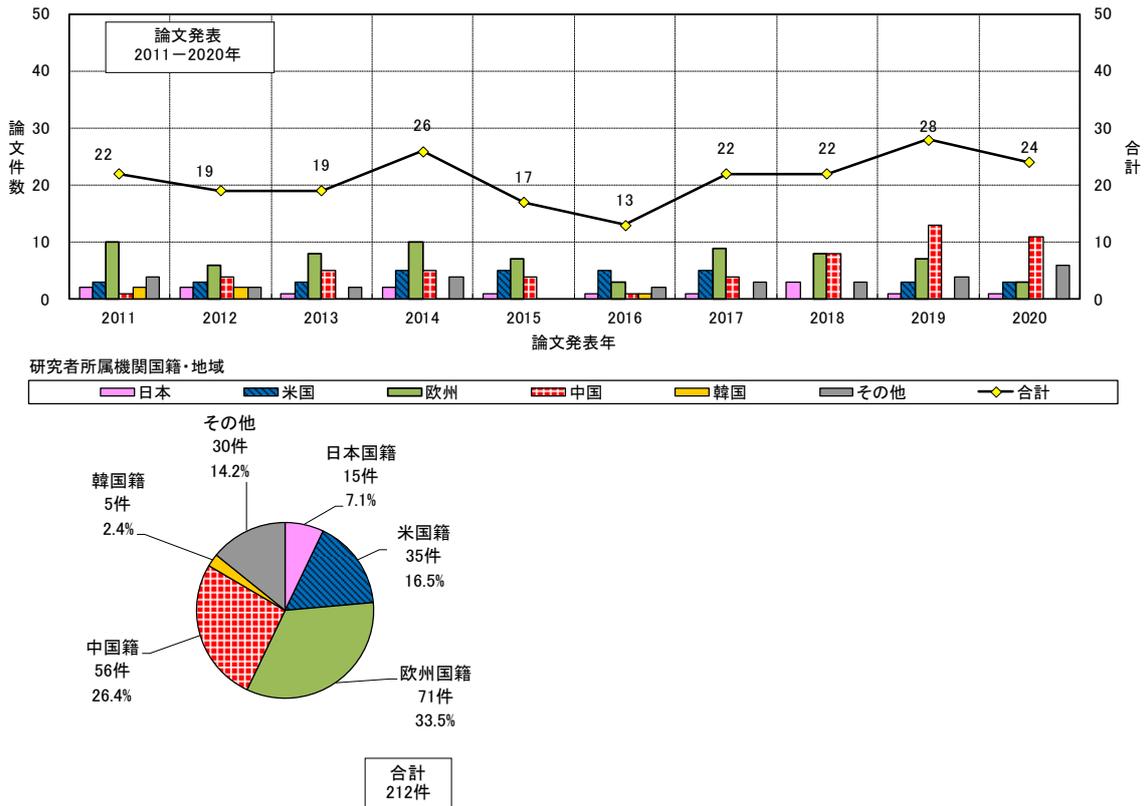
(b) トンネル磁気抵抗素子：電極、積層



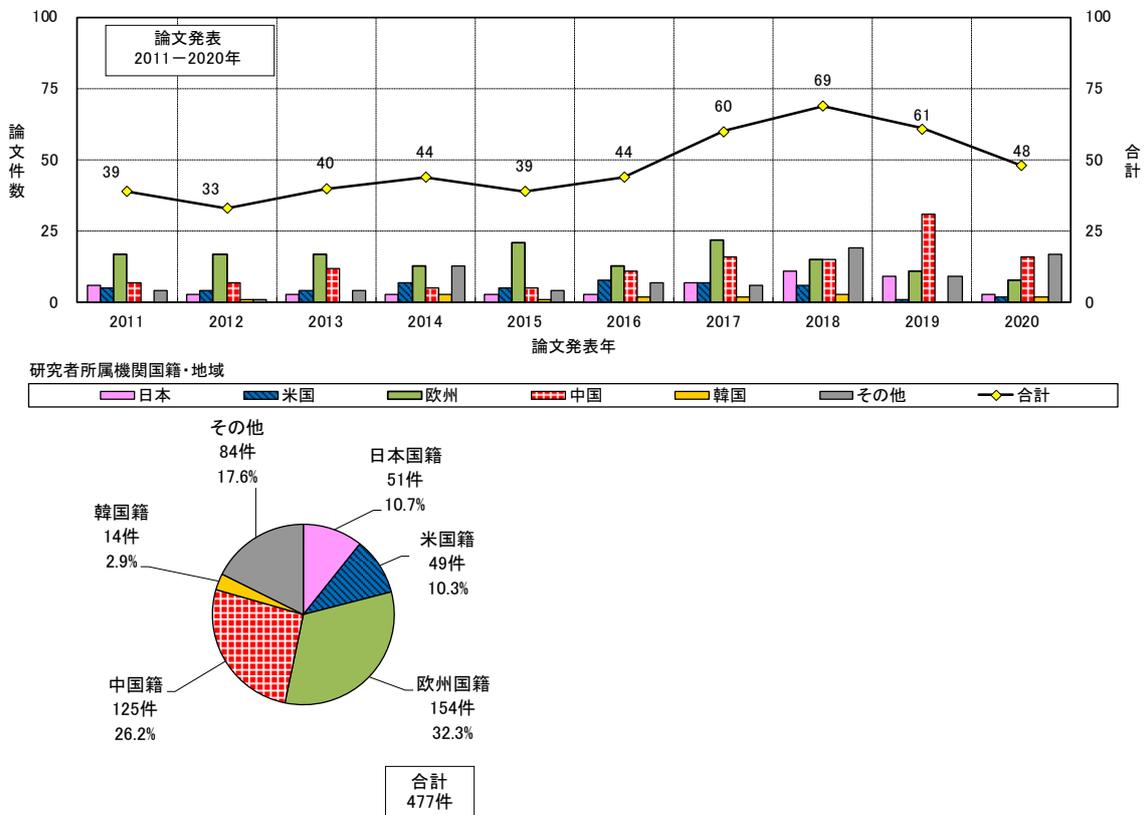
(c) トンネル磁気抵抗素子：感度



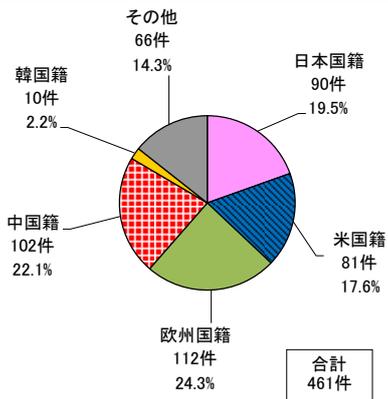
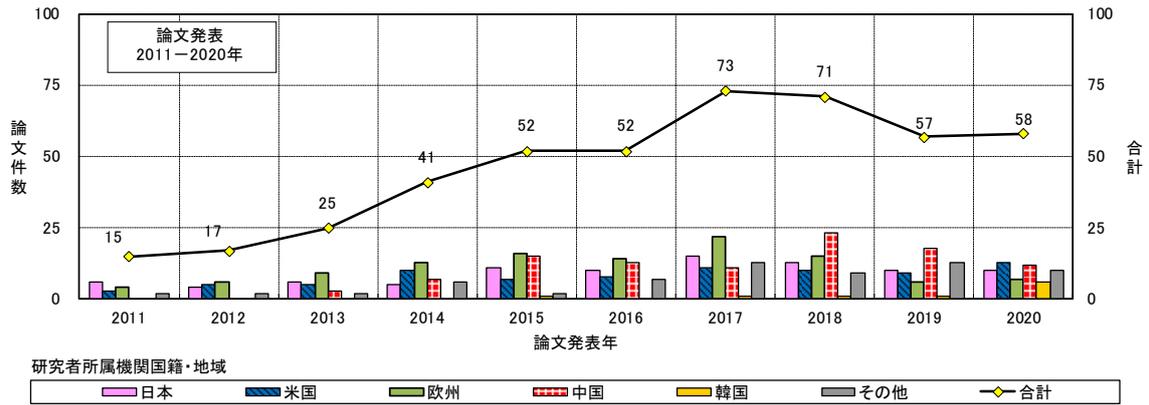
(d) トンネル磁気抵抗素子：小型化、分解能



(e) トンネル磁気抵抗素子：磁気センサ



(f) 熱流素子：スピンゼーベック効果



3. 量子もつれ光センサ

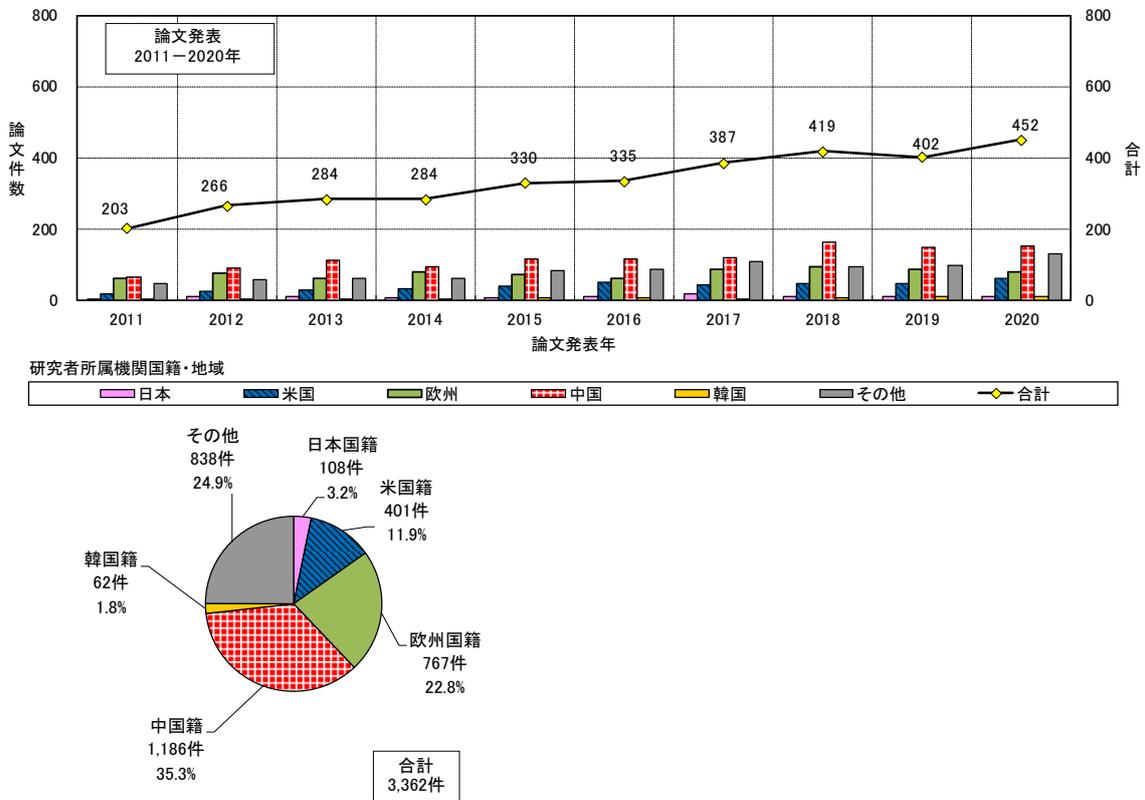
量子もつれ光センサの主な技術区分の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を図 5-4-17 に示す。原理・要素技術の量子もつれ、もつれ光子では、期間中増加傾向であり、中国籍、欧州国籍が多い。原理・要素技術のアイドラー光子では、欧州国籍、中国籍が多い。

課題の感度向上では、中国籍、米国籍、欧州国籍が多く、期間の後半で中国籍が多い。課題の分解能向上では、期間中増加傾向であり、欧州国籍が多い。

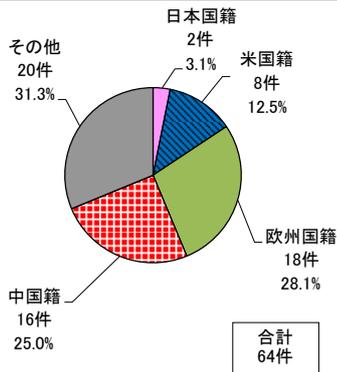
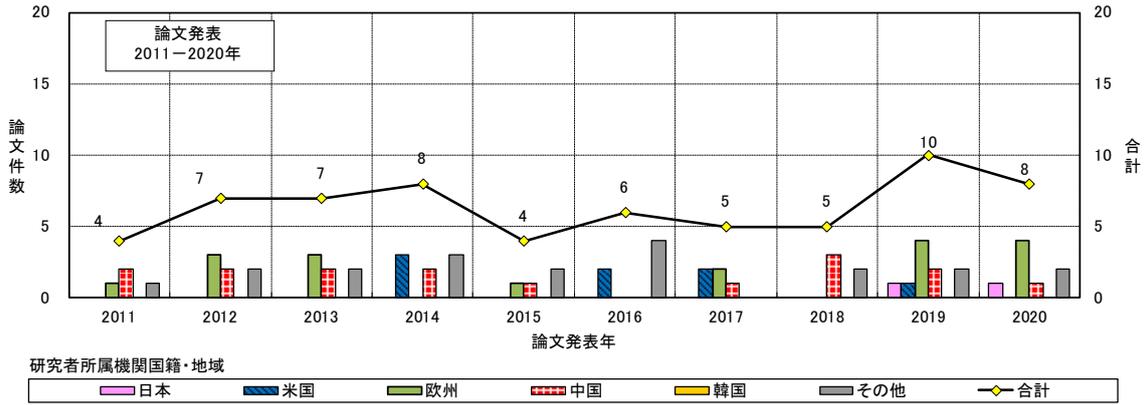
応用用途の量子レーダーでは、期間中増加傾向であり、中国籍が多い。

図 5-4-17 量子もつれ光センサー [技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率 (論文誌発行年：2011-2020 年)

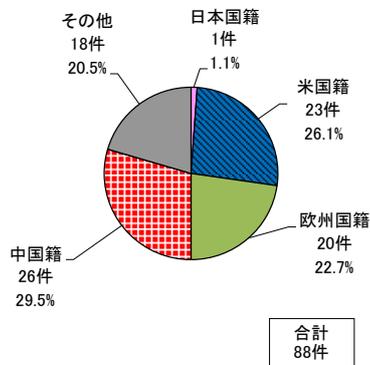
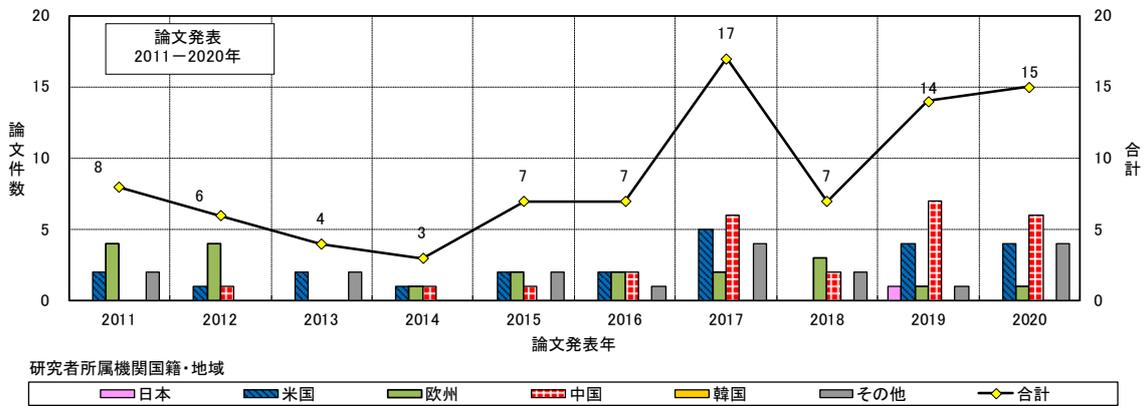
(a) 量子もつれ、もつれ光子



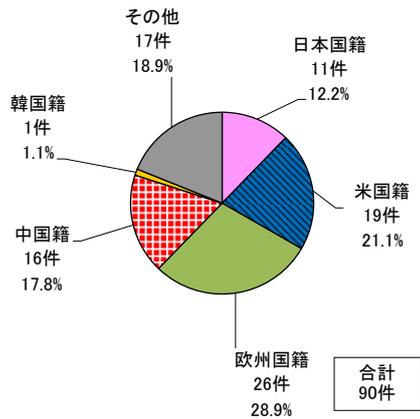
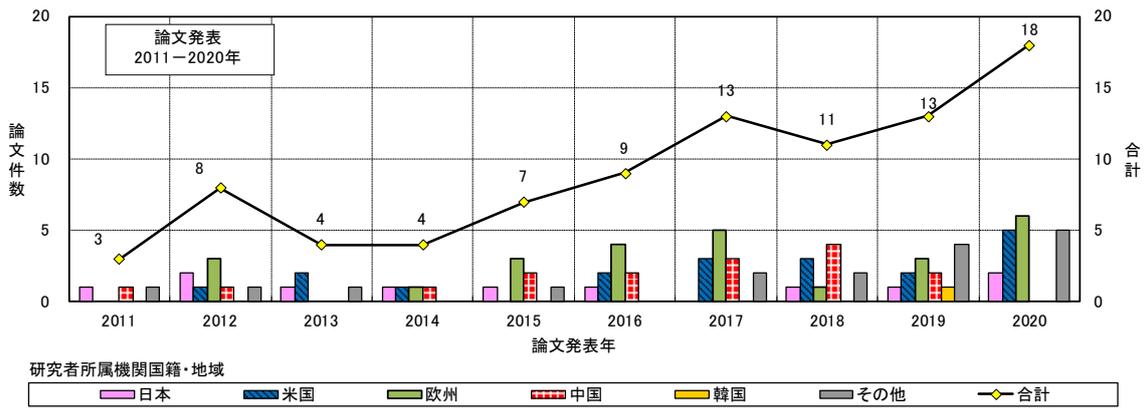
(b) アイドラー光子



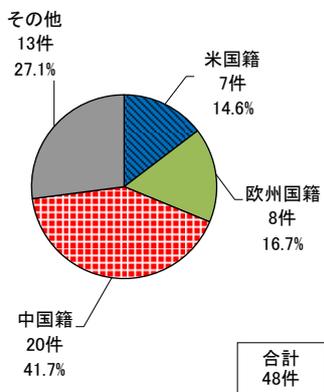
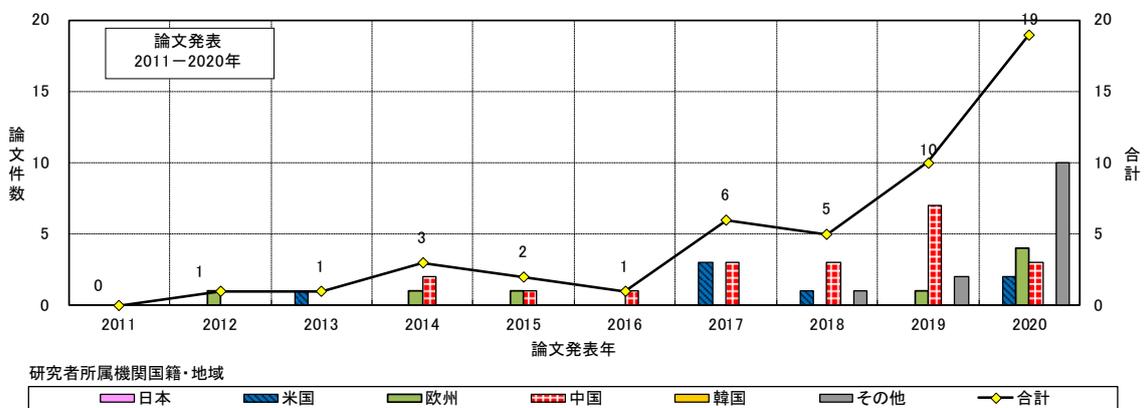
(c) 感度向上



(d) 分解能向上



(e) 量子レーダー



4. 光子検出器

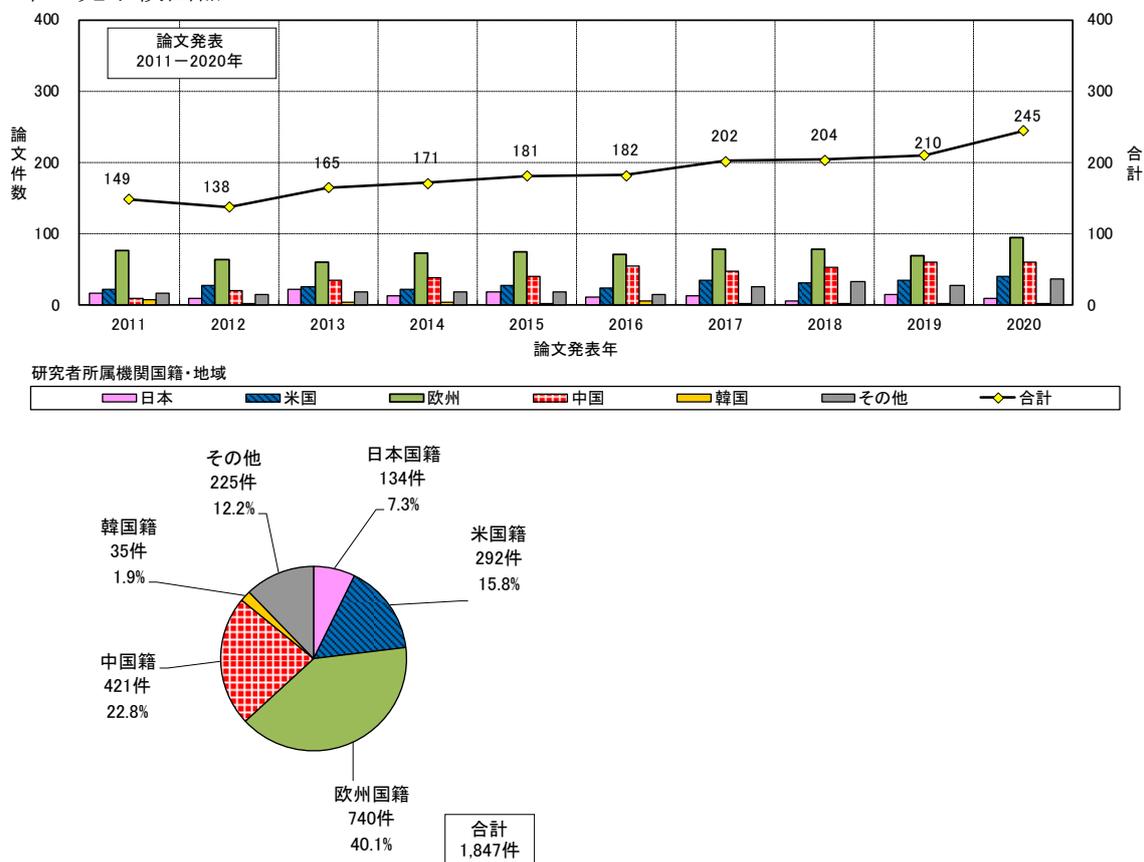
光子検出器の主な技術区分の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を図 5-4-18 に示す。原理・要素技術の単一光子検出器では、欧州国籍が多く、期間中コンスタントにある。原理・要素技術の SSPD では、期間中増加傾向であり、欧州国籍、中国国籍が多い。原理・要素技術の超伝導転移端センサでは、期間中コンスタントにあり、米国籍、欧州国籍が多い。

構造・材料の誘電体多層膜では、期間中コンスタントにあり、中国国籍、欧州国籍が多い。課題の光吸収効率向上、感度では、欧州国籍、米国籍が多い。

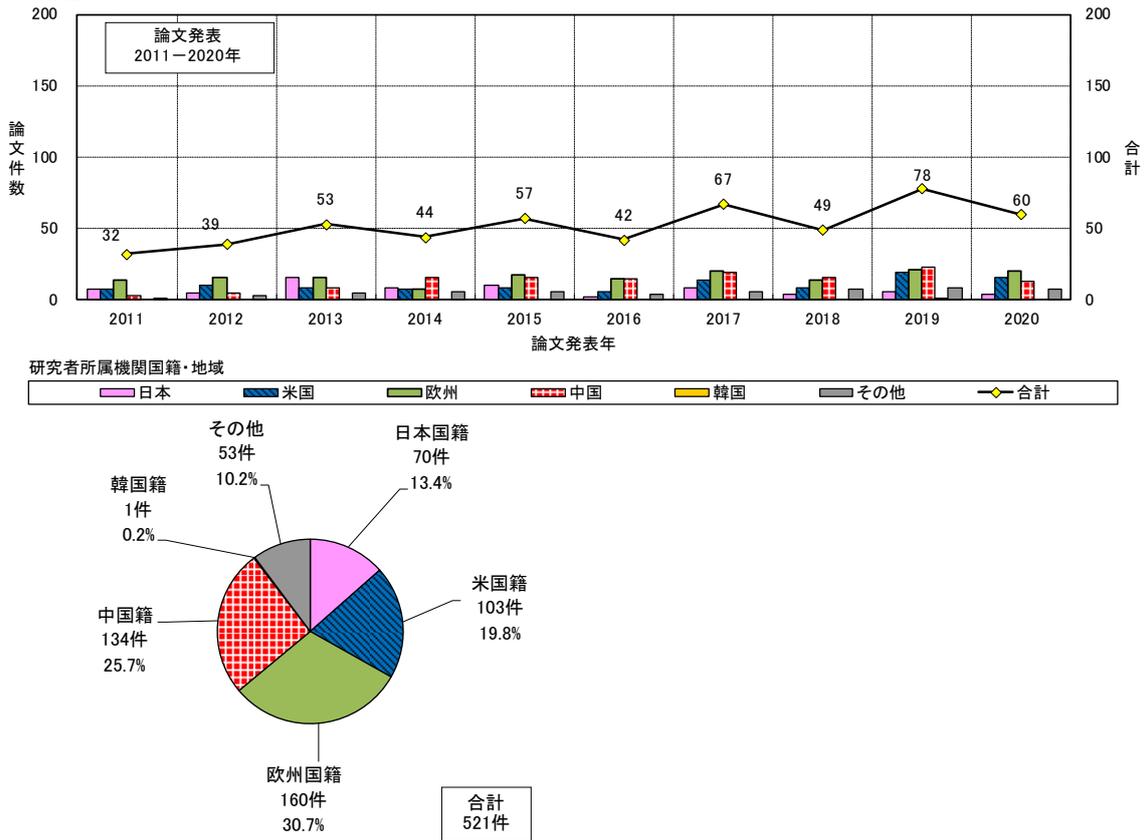
応用用途の量子通信では、中国国籍が多い。

図 5-4-18 光子検出器－[技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率（論文誌発行年：2011-2020年）

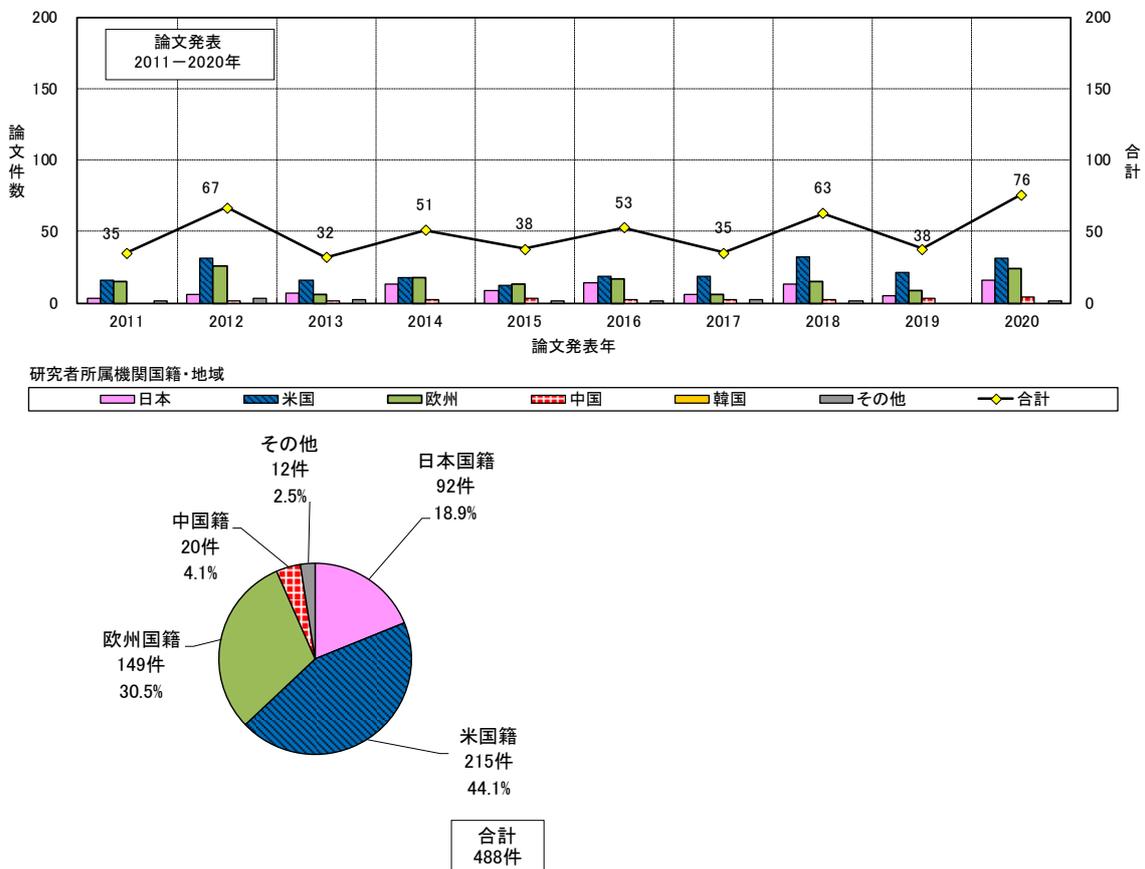
(a) 単一光子検出器



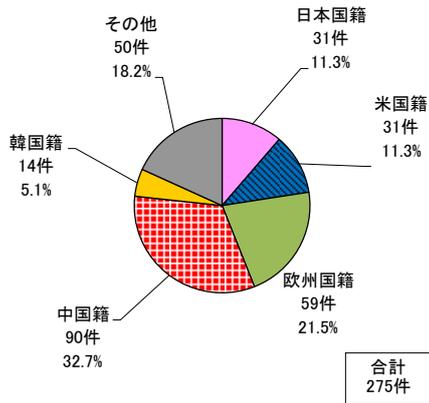
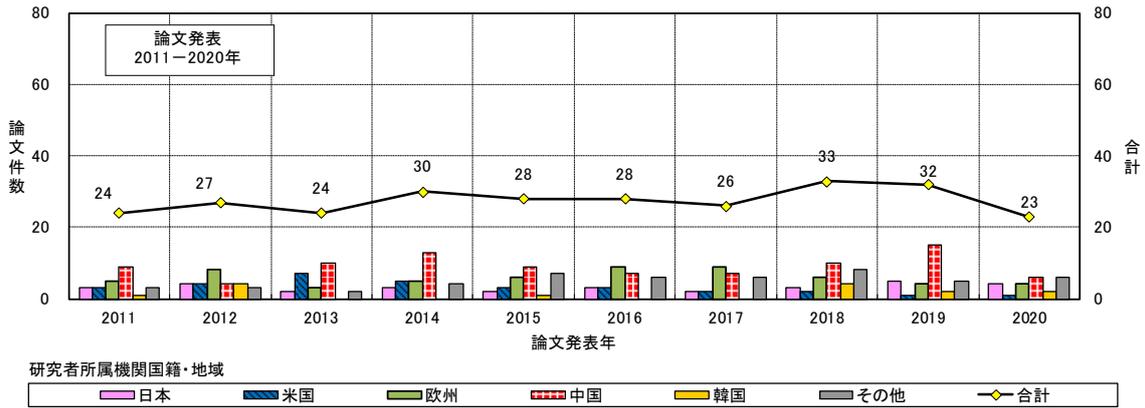
(b) SSPD



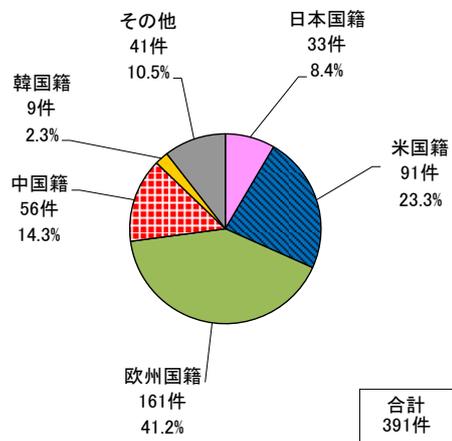
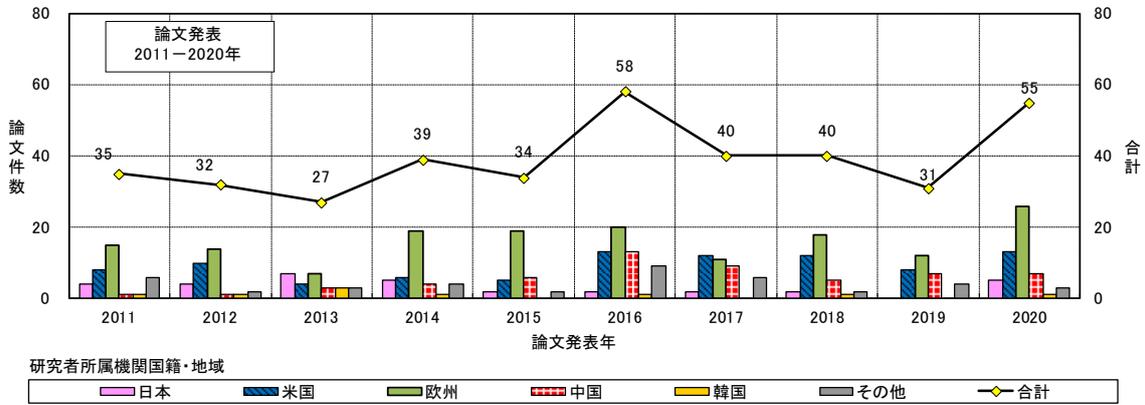
(c) 超伝導転移端センサ



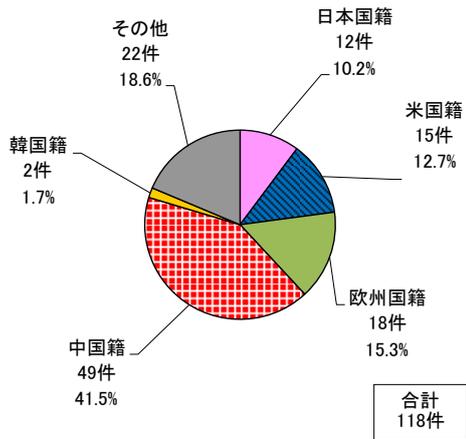
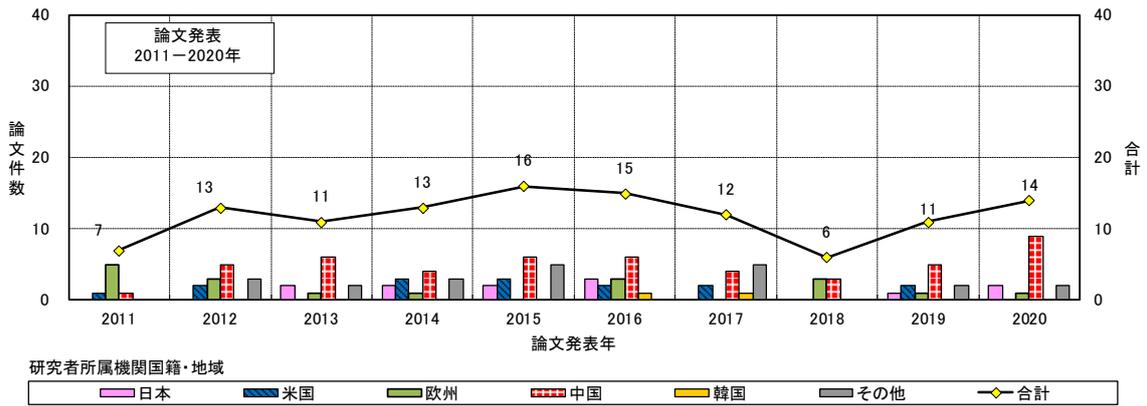
(d) 誘電体多層膜



(e) 光吸収率向上、感度



(f) 量子通信

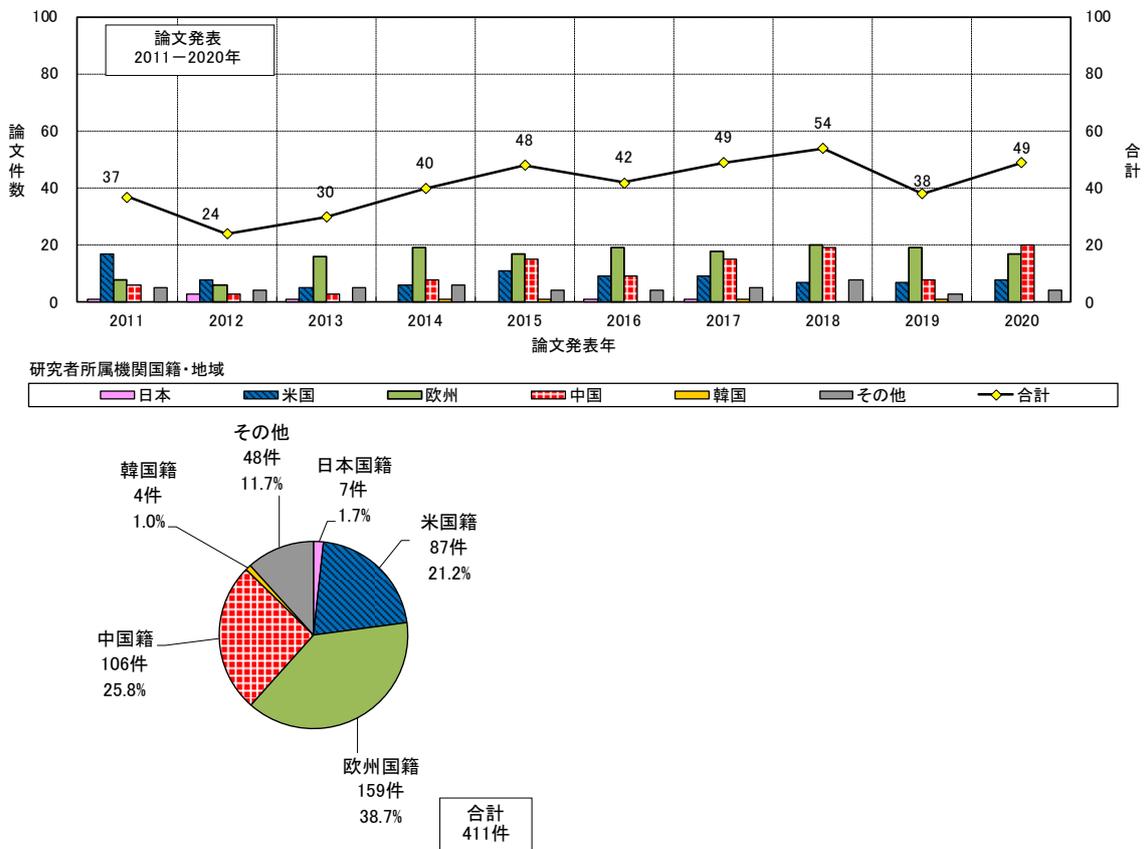


5. 量子慣性センサ

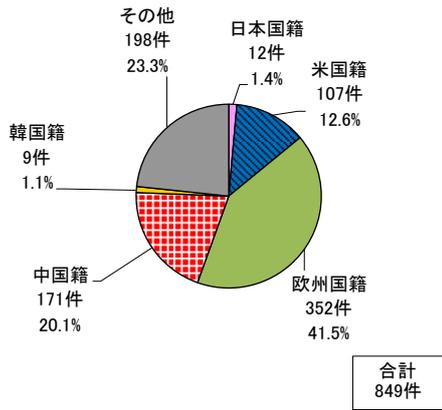
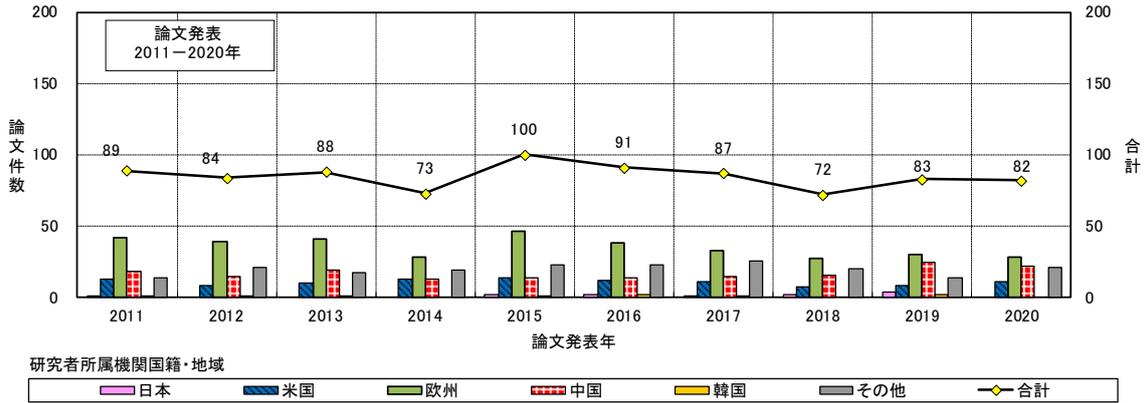
量子慣性センサの主な技術区分の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を図 5-4-19 に示す。原理・要素技術の原子干渉計では、欧州国籍、米国籍、中国籍が多い。原理・要素技術のド・ブロイ波センサでは、期間中コンスタントにあり、欧州国籍が多い。原理・要素技術の量子慣性センサでは、2017～2020 年にかけて増加しており、欧州国籍が多い。原理・要素技術の原子重力計では、2014～2018 年にかけて増加傾向であり、中国籍、欧州国籍が多い。

図 5-4-19 量子慣性センサー〔技術区分別〕研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率（論文誌発行年：2011-2020 年）

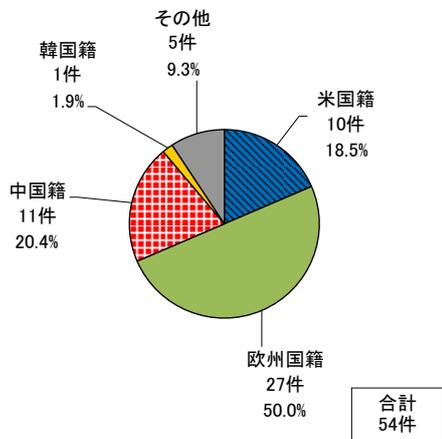
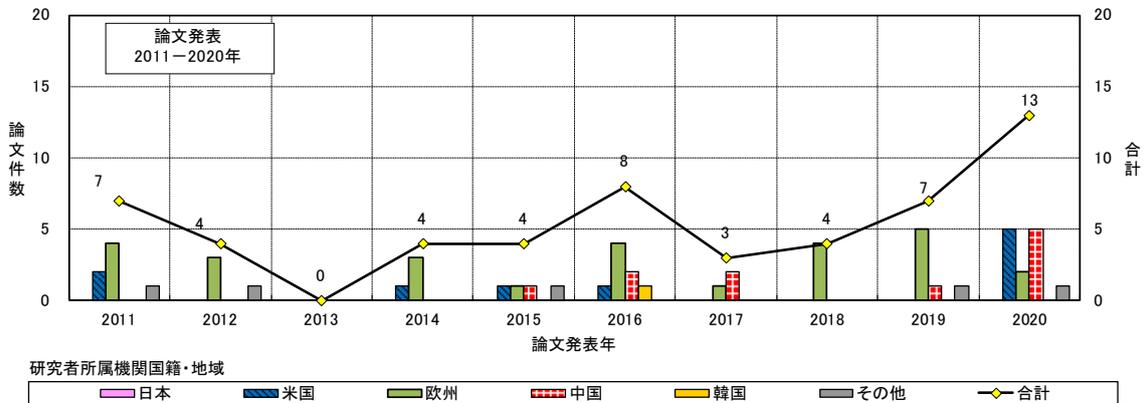
(a) 原子干渉計



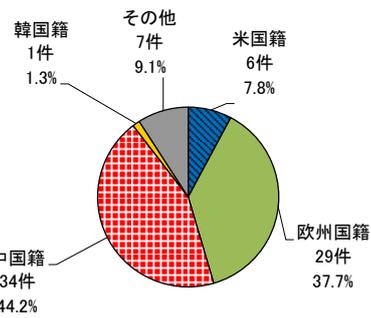
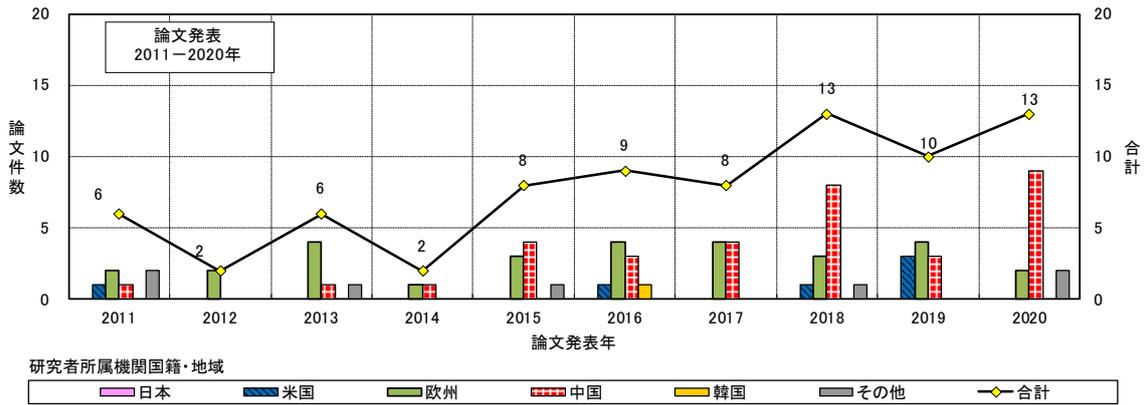
(b) ド・ブroy波センサ



(c) 量子慣性センサ



(d) 原子重力計



合計
77件

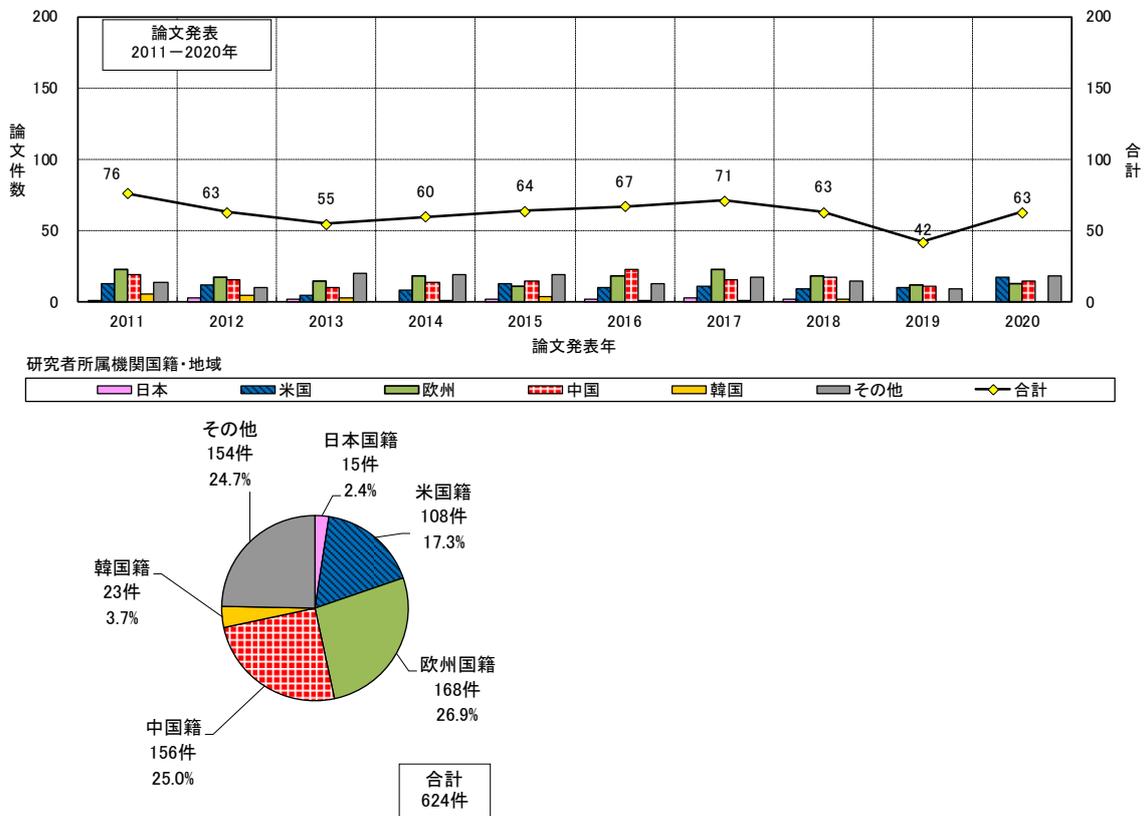
6. 光格子時計

光格子時計の主な技術区分の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を図 5-4-20 に示す。原理・要素技術の磁気光学トラップでは、期間中コンスタントにあり、欧州国籍、中国籍が多い。原理・要素技術の光格子時計では、2013～2015 年にかけて増加し、その後コンスタントにある。欧州国籍、米国籍、中国籍、日本国籍の順である。原理・要素技術の光学トラップでは、期間中コンスタントにあり、欧州国籍、中国籍、米国籍の順である。原理・要素技術の光周波数コムでは、2013～2020 年にかけてコンスタントにあり、欧州国籍、中国籍、米国籍の順である。

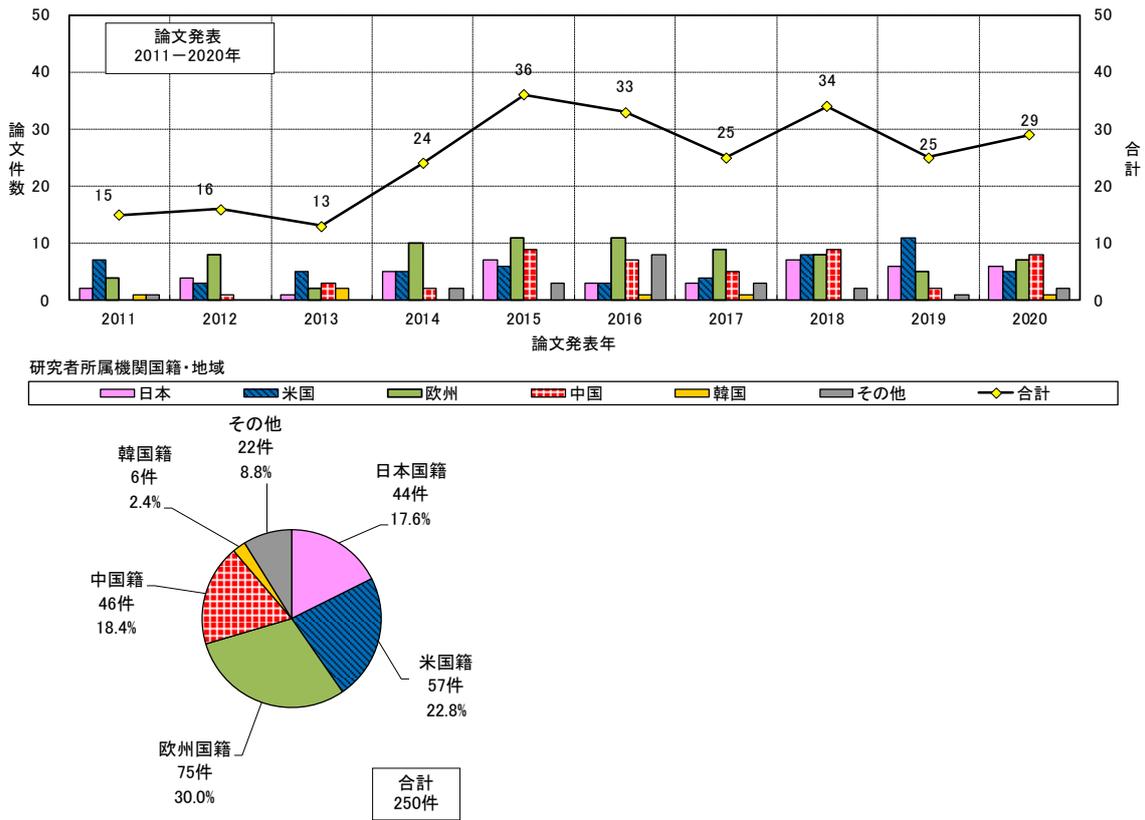
課題のレーザー長寿命化では、欧州国籍、米国籍、中国籍の順である。

図 5-4-20 光格子時計－[技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率（論文誌発行年：2011-2020 年）

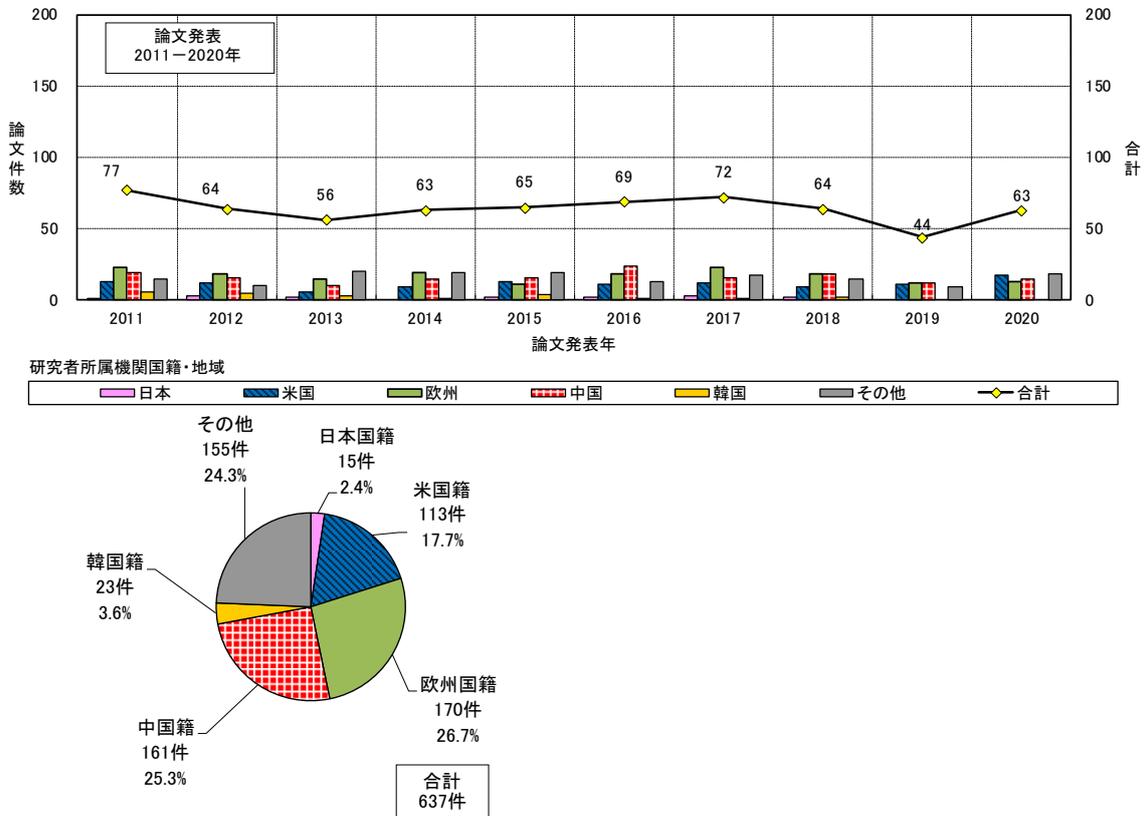
(a) 磁気光学トラップ



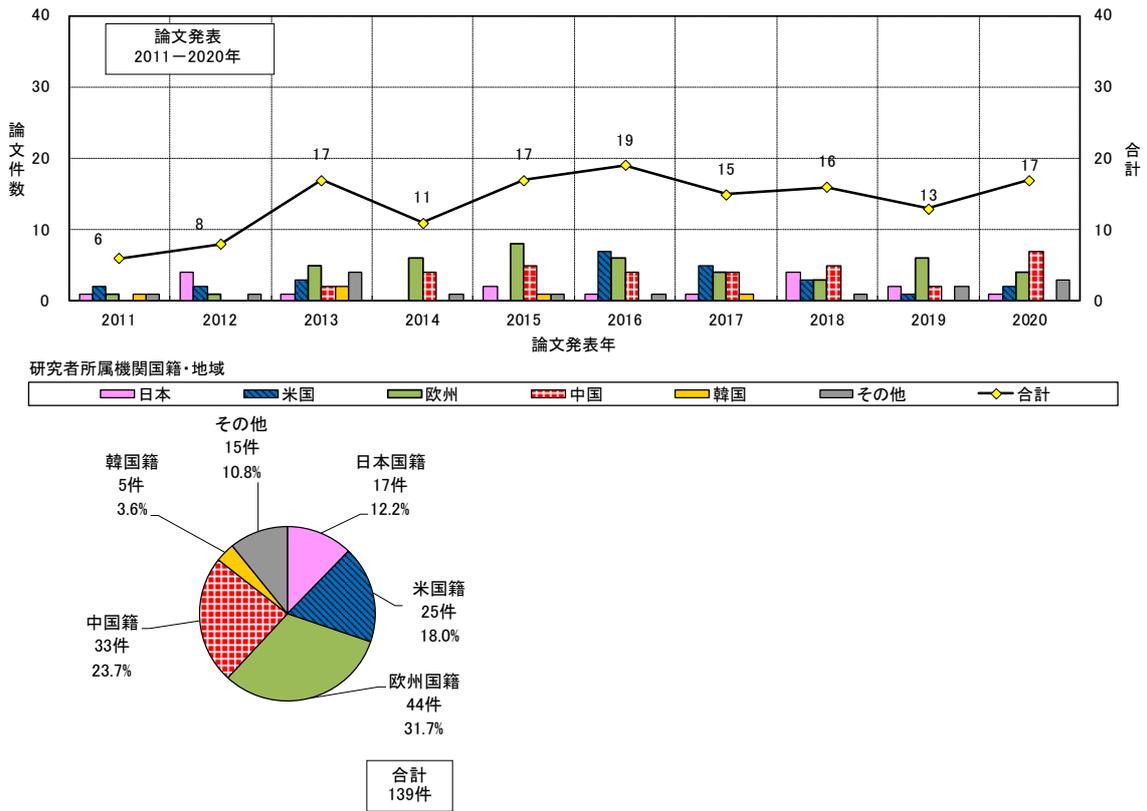
(b) 光格子時計



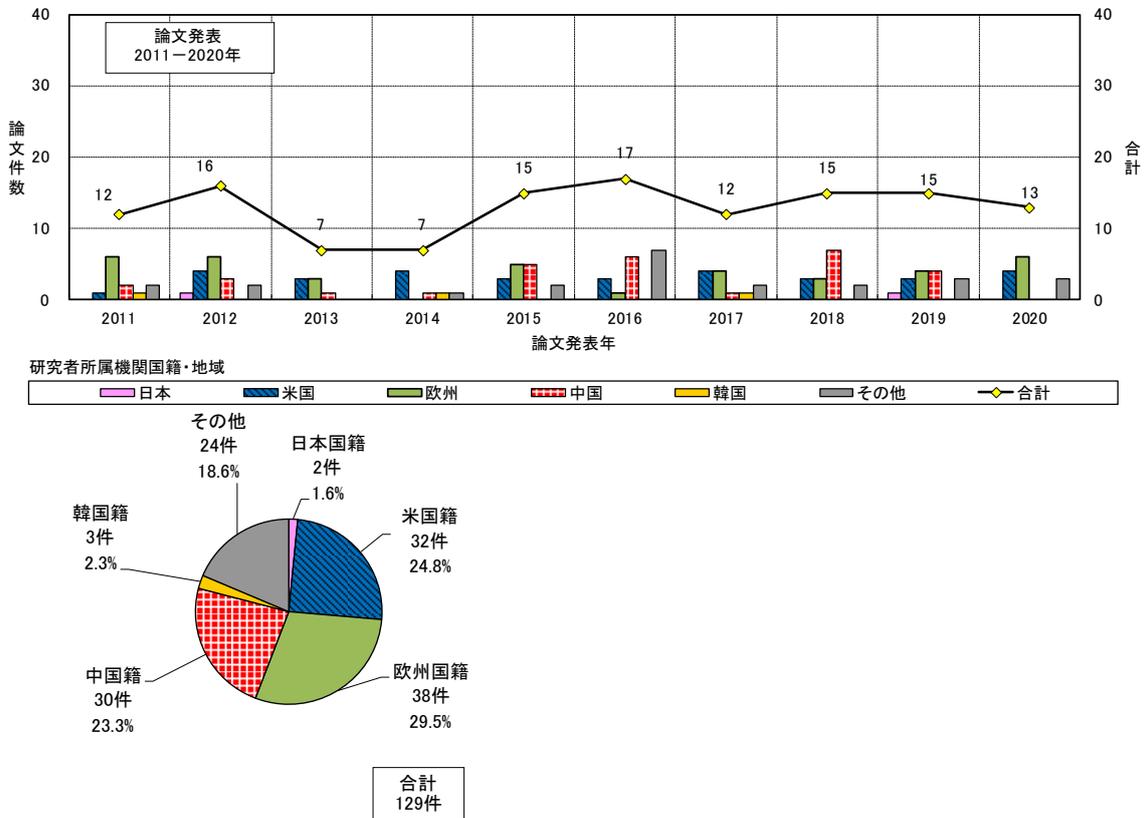
(c) 光学トラップ



(d) 光周波数コム



(e) レーザー長寿命化



7. その他技術

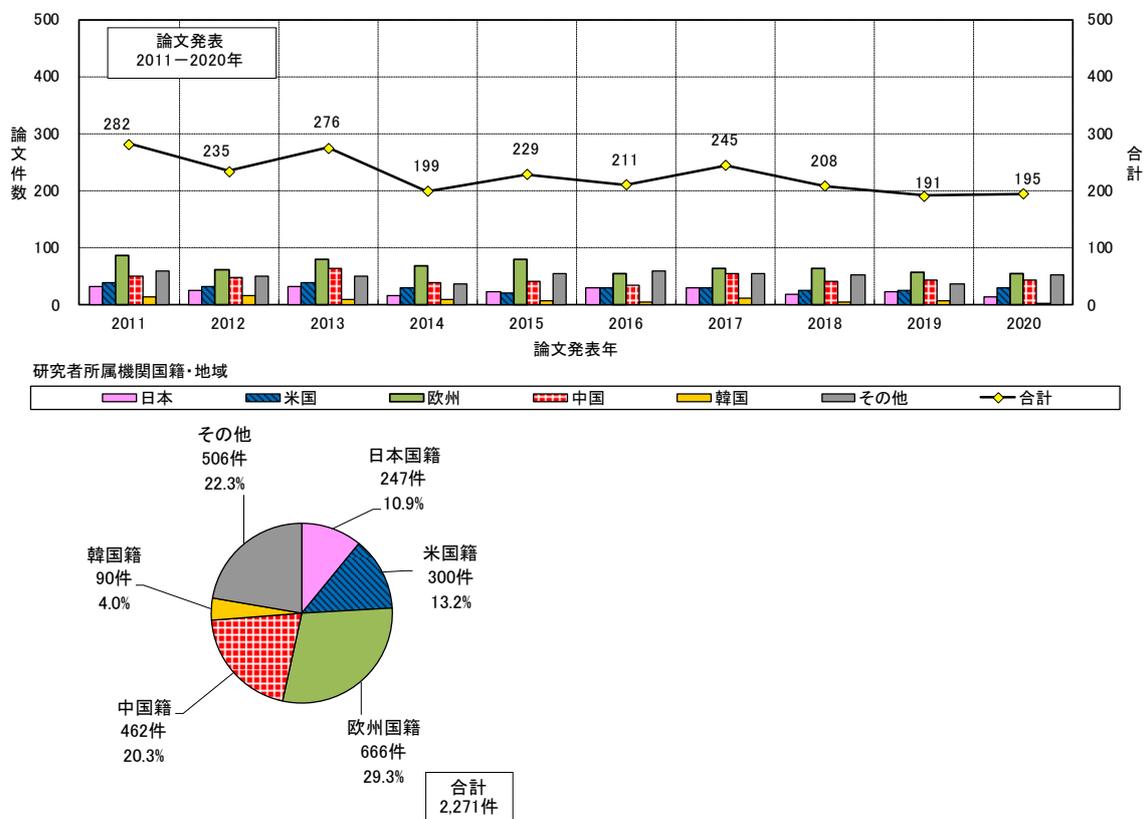
その他技術（SQUID）の主な技術区分の研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率を図 5-4-21 に示す。原理・要素技術の超伝導量子干渉計では、欧州国籍と中国国籍が多く、期間中減少傾向である。原理・要素技術のジョセフソン接合では、欧州国籍が多く期間中コンスタントにある。原理・要素技術の膜、ビームでは、欧州国籍が多く期間中コンスタントにある。

課題の低コスト化では、日本国籍が多く、2016 年が多い。

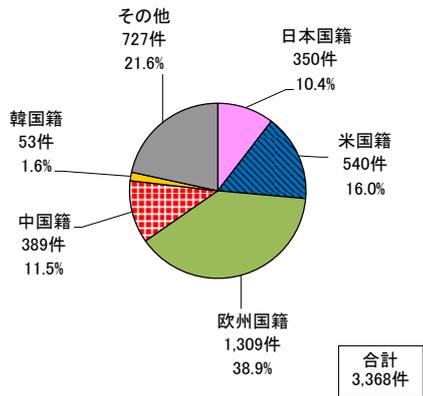
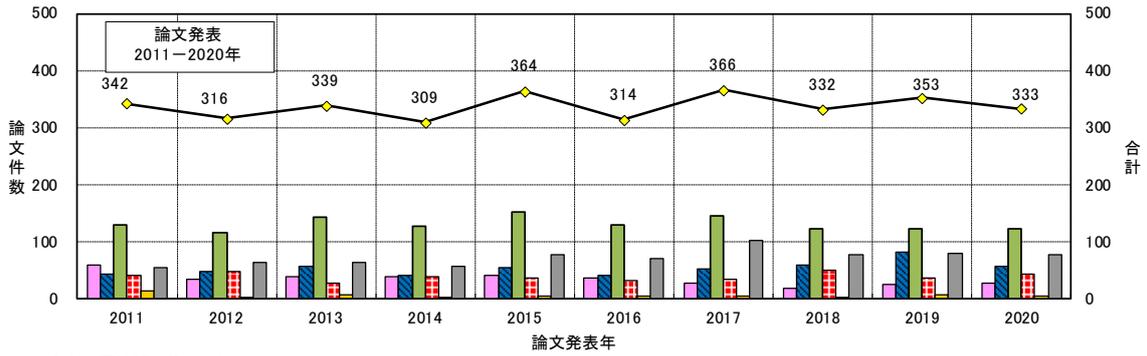
応用用途の高感度局所磁場センサでは、欧州国籍が多い。

図 5-4-21 その他技術（SQUID）－ [技術区分別] 研究者所属機関国籍別論文発表件数推移及び論文発表件数比率（論文誌発行年：2011-2020 年）

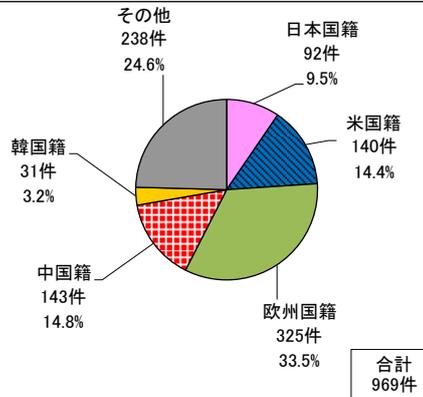
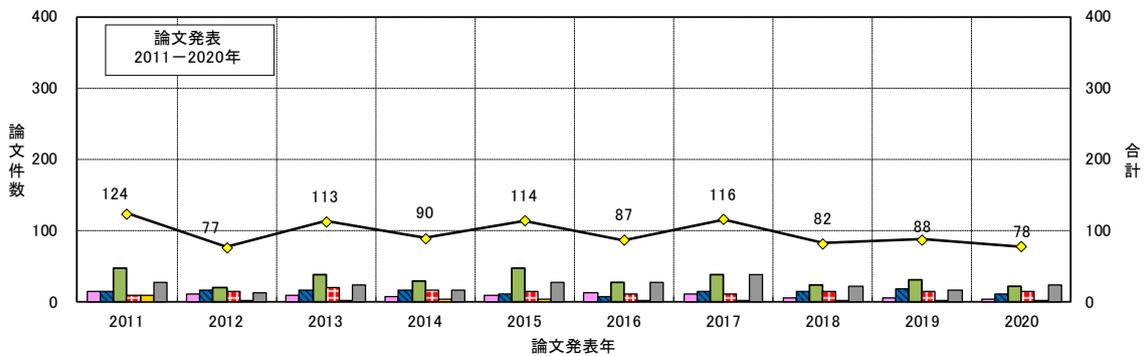
(a) 超伝導量子干渉計



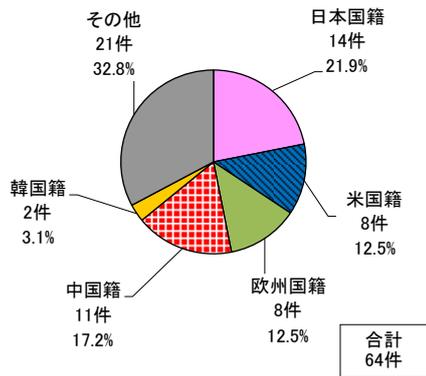
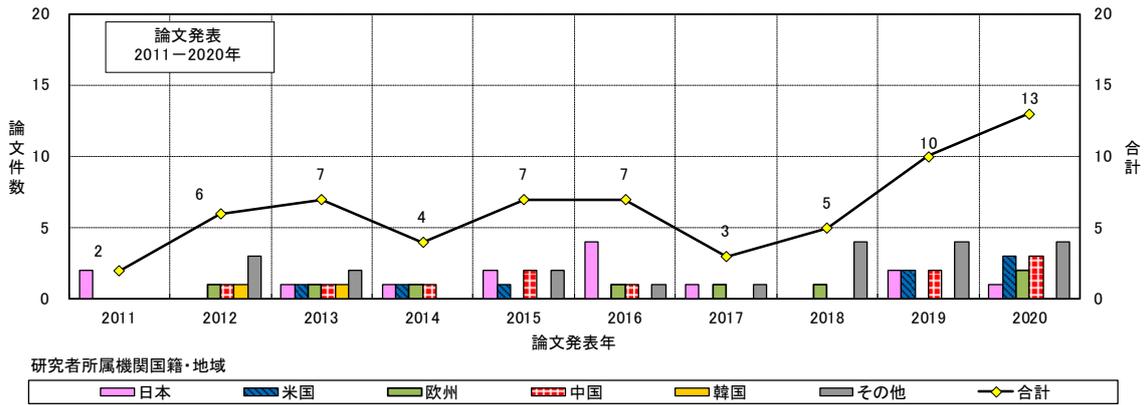
(b) ジョセフソン接合



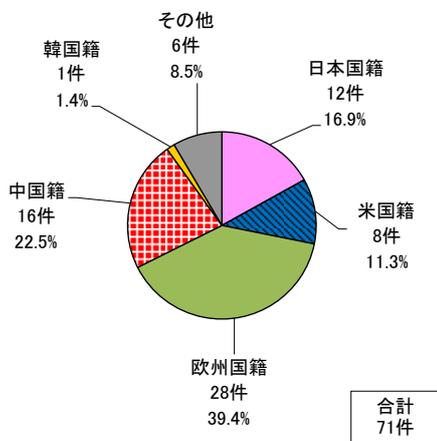
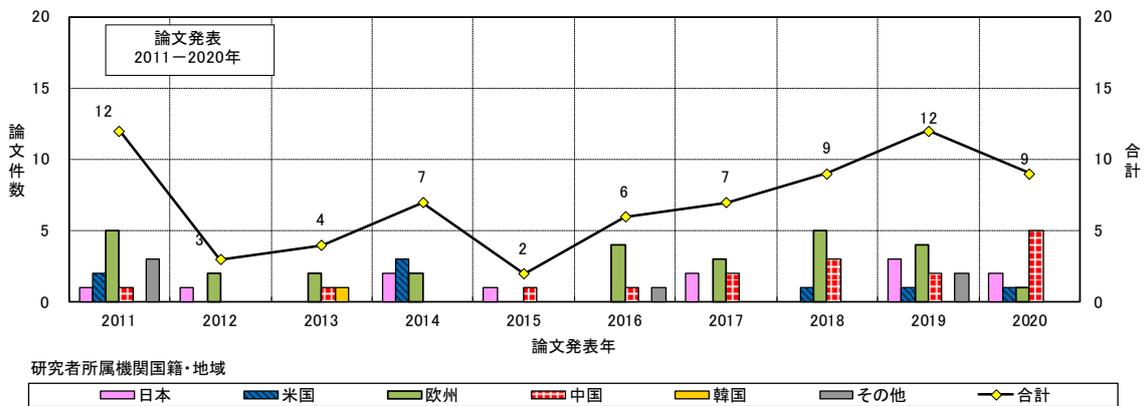
(c) 膜、ビーム



(d) 低コスト化



(e) 高感度局所磁場センサ



第5節 [技術区分別] 研究者所属機関別論文発表件数推移

量子計測・センシング技術の[技術区分別] 研究者所属機関別論文発表件数推移を示す。各区分の主な研究者所属機関の技術区分動向を見ることができる。

1. 固体量子センサ

固体量子センサの主な研究者所属機関の[技術区分別] 論文発表件数推移を図 5-4-22 に示す。

Harvard University (米国) は、原理・要素技術の NV センタ、構造・材料のダイヤモンド、課題の感度、応用用途の NMR、MRI が多い。

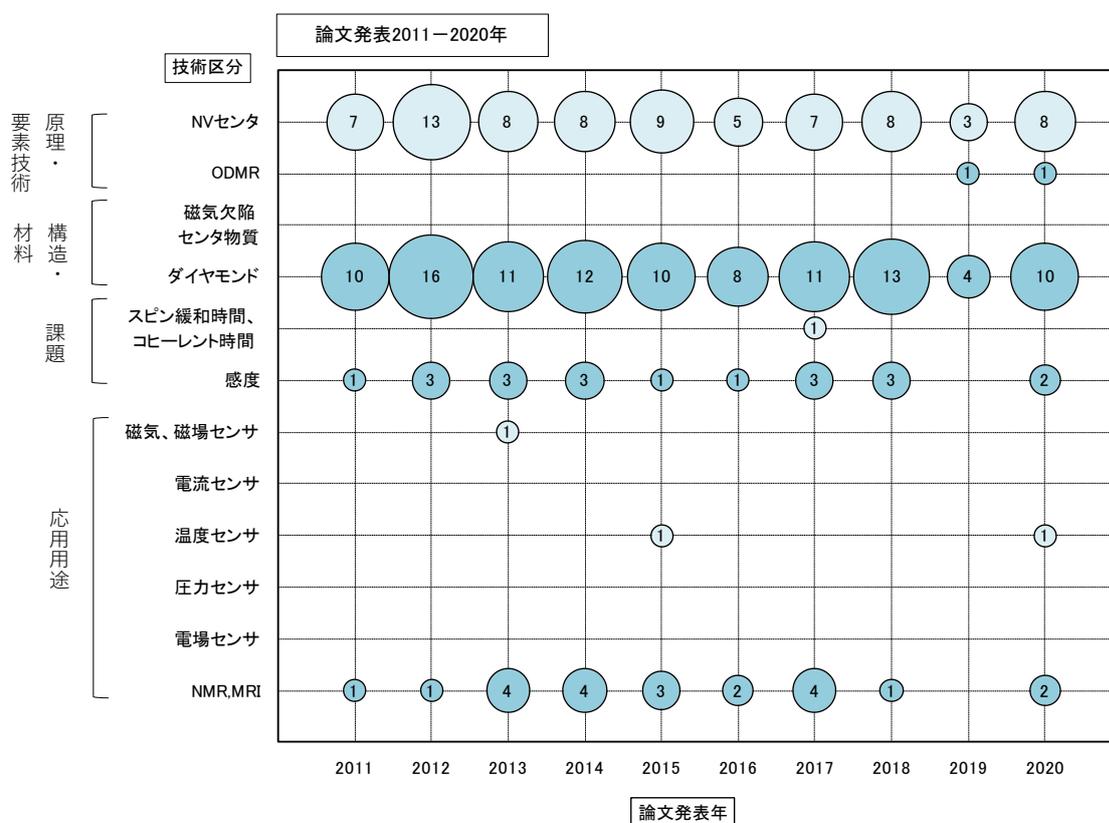
中国科学技術大学 (中国) は、原理・要素技術の NV センタと構造・材料のダイヤモンド、課題の感度が多い。

Stuttgart University (ドイツ) は、原理・要素技術の NV センタと構造・材料のダイヤモンド、課題の感度、応用用途の NMR、MRI が多い。

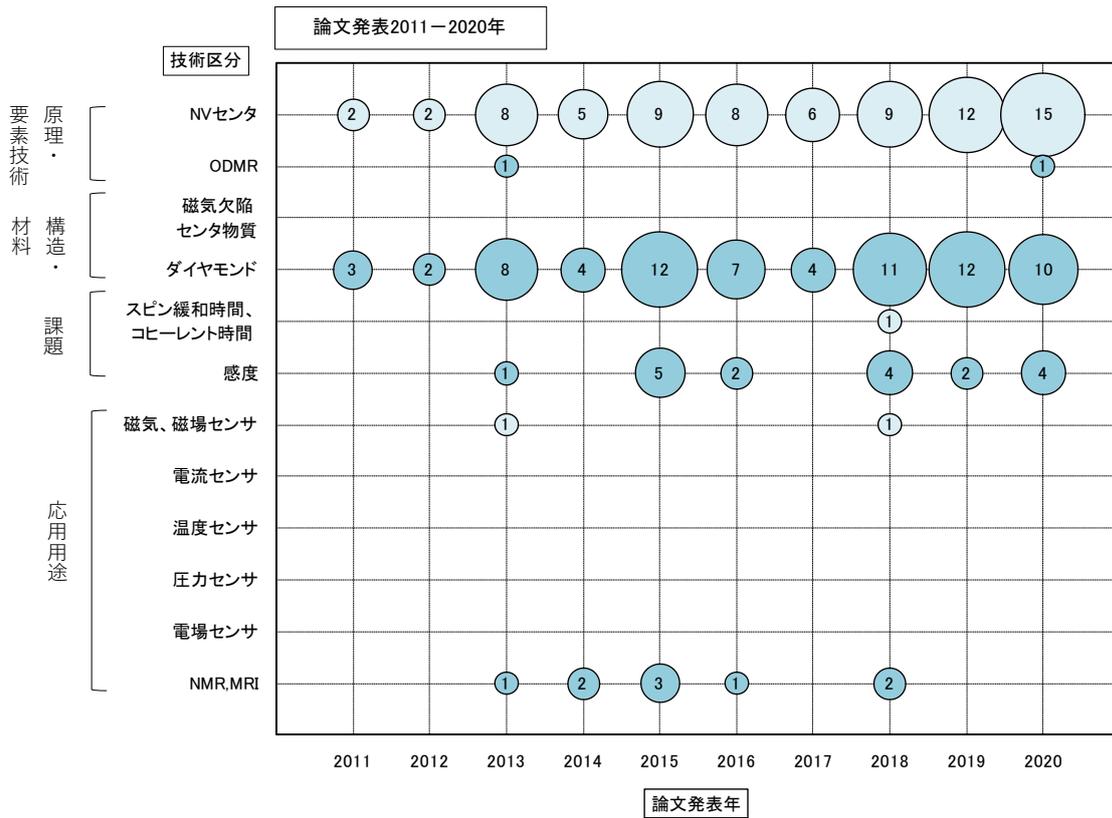
東京工業大学は、2015～2020 年が多い。原理・要素技術の NV センタ、構造・材料のダイヤモンド、課題の感度、応用用途の NMR、MRI が多い。

図 5-4-22 固体量子センサー [技術区分別] 研究者所属機関別論文発表件数推移 (論文誌発行年: 2011-2020 年)

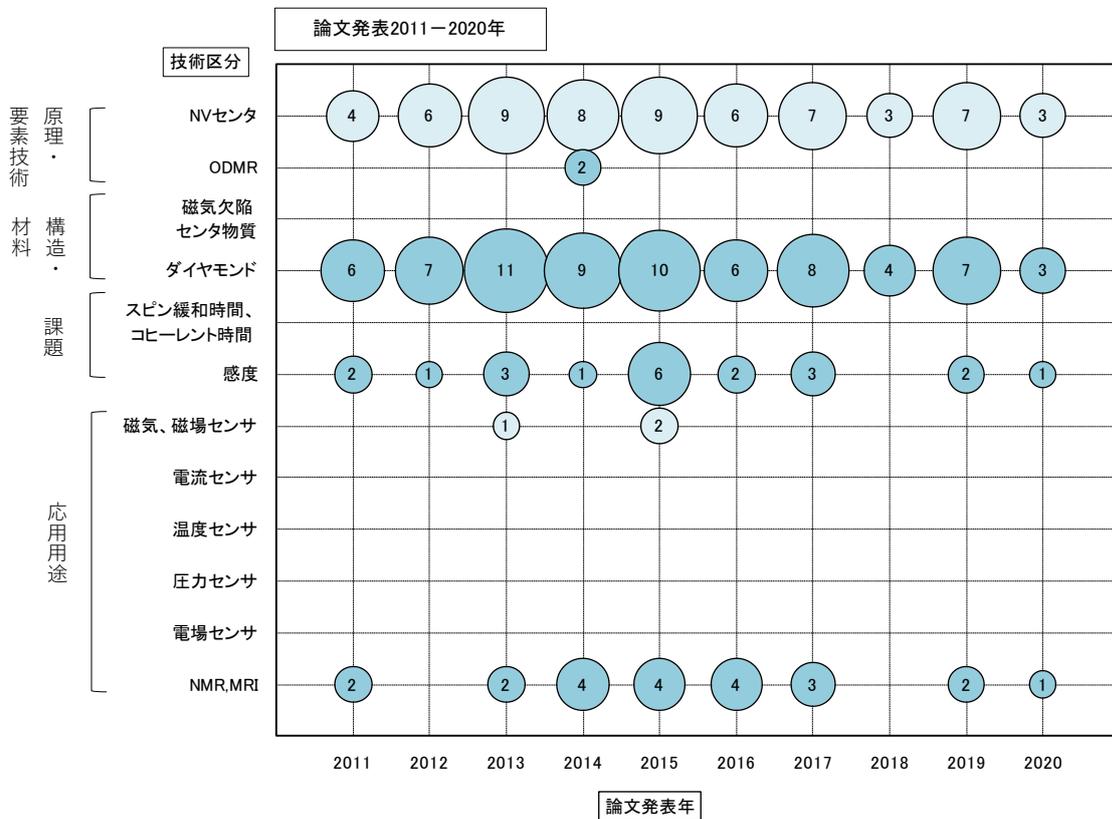
(a) Harvard University (米国)



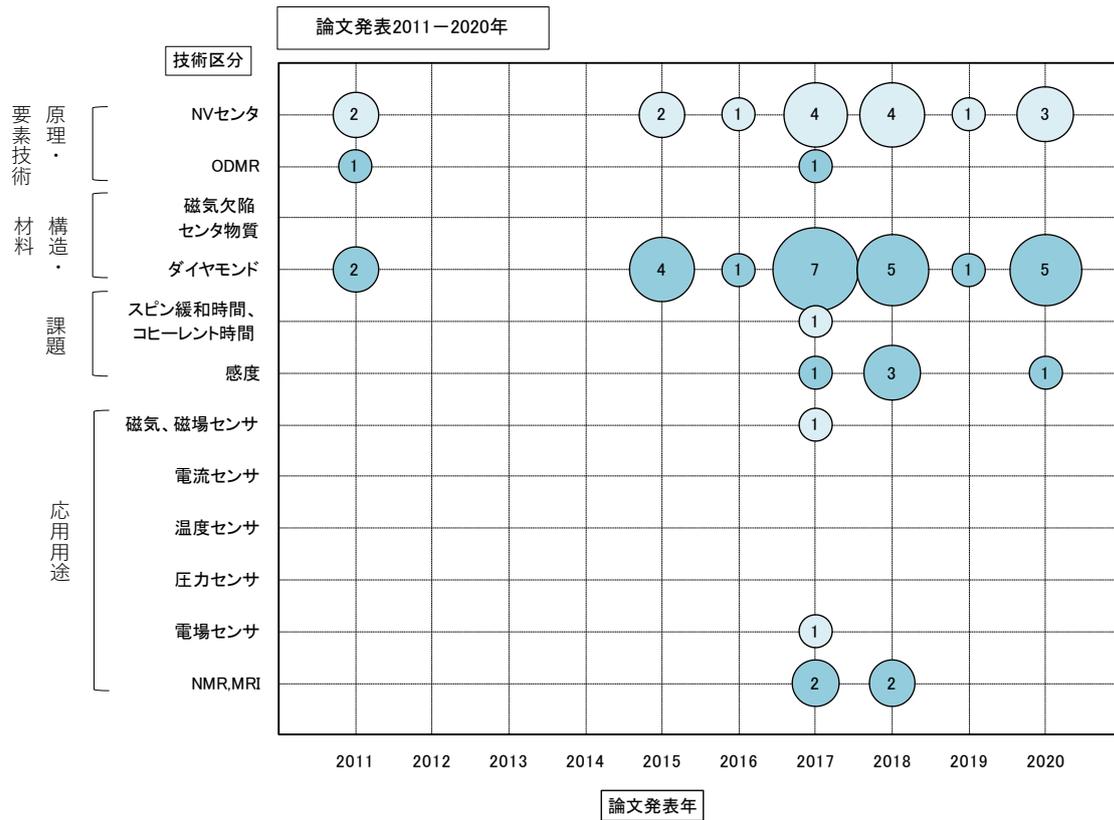
(b) 中国科学技術大学 (中国)



(c) Stuttgart University (ドイツ)



(d) 東京工業大学



2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサの主な研究者所属機関の〔技術区分別〕論文発表件数推移を
図 5-4-23 に示す。

・トンネル磁気抵抗素子

東北大学は、期間中コンスタントにある。原理・要素技術の MTJ、構造・材料の電極、積層、課題の感度、応用用途の磁気センサが多い。

中国科学院（中国）は、期間中コンスタントにある。原理・要素技術の MTJ、課題の感度が
多い。

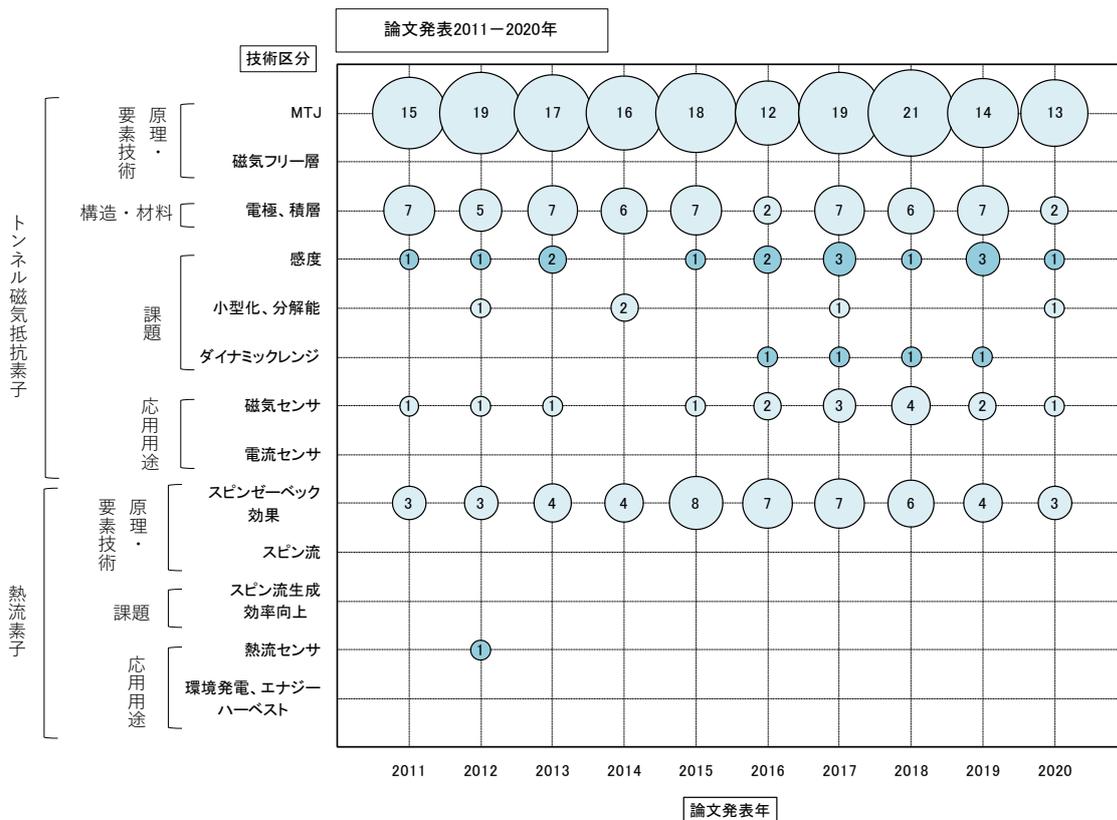
Russian Academy of Sciences（ロシア）は、2015～2019 年が多い。原理・要素技術の MTJ
と課題の感度が多い。

・熱流素子

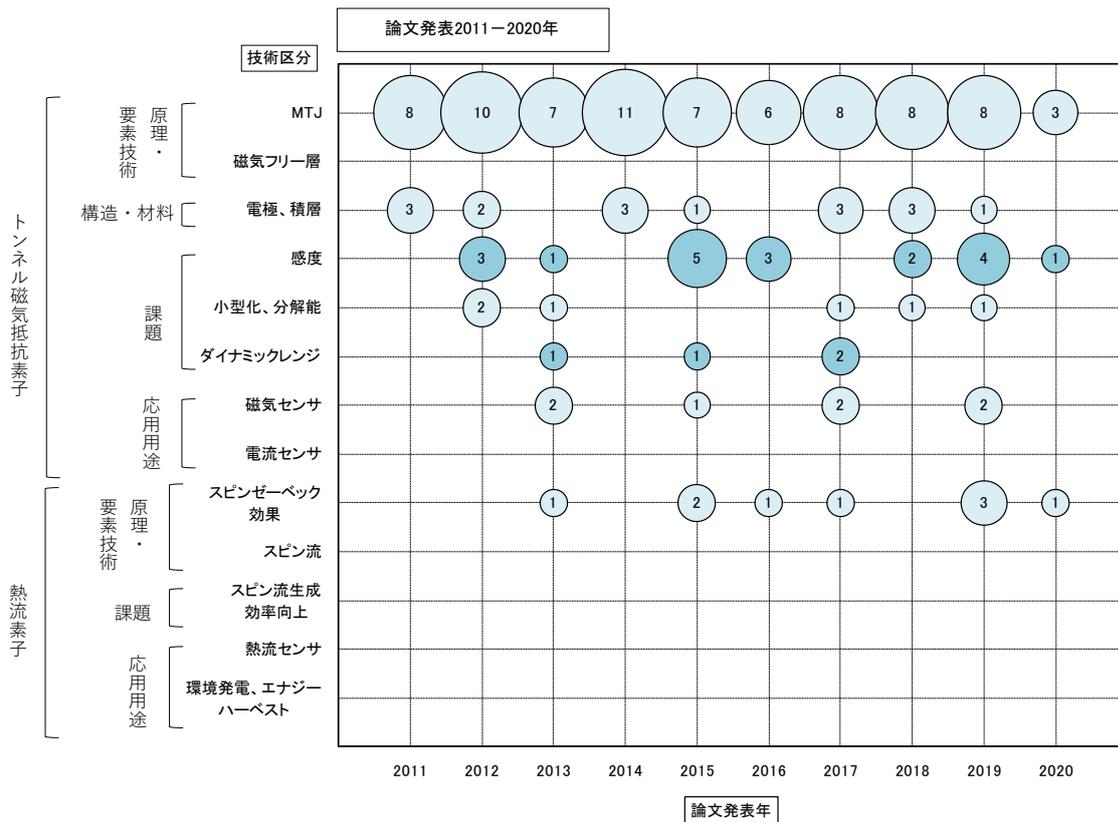
東北大学は、原理・要素技術のスピンゼーベック効果が期間中コンスタントにある。

図 5-4-23 量子スピントロニクスセンサー〔技術区分別〕研究者所属機関別論文発表件数推移（論文
誌発行年：2011-2020 年）

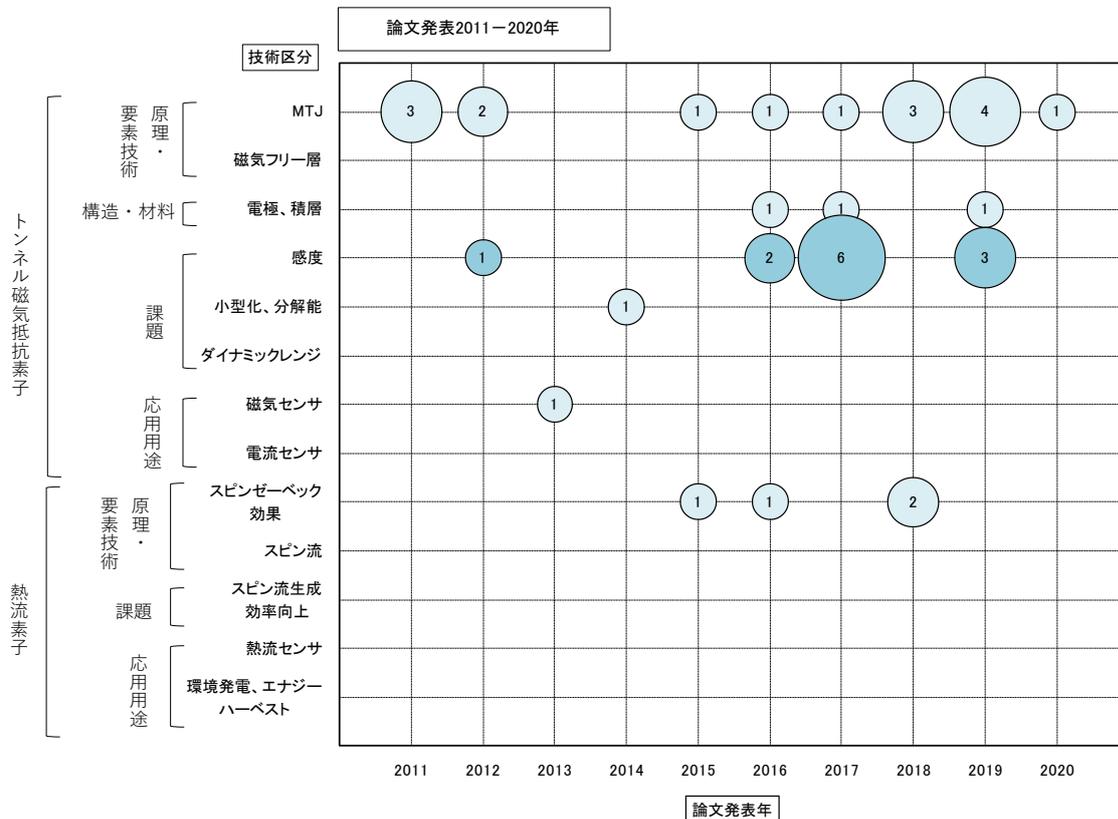
(a) 東北大学



(b) 中国科学院 (中国)



(c) Russian Academy of Sciences (ロシア)



3. 量子もつれ光センサ

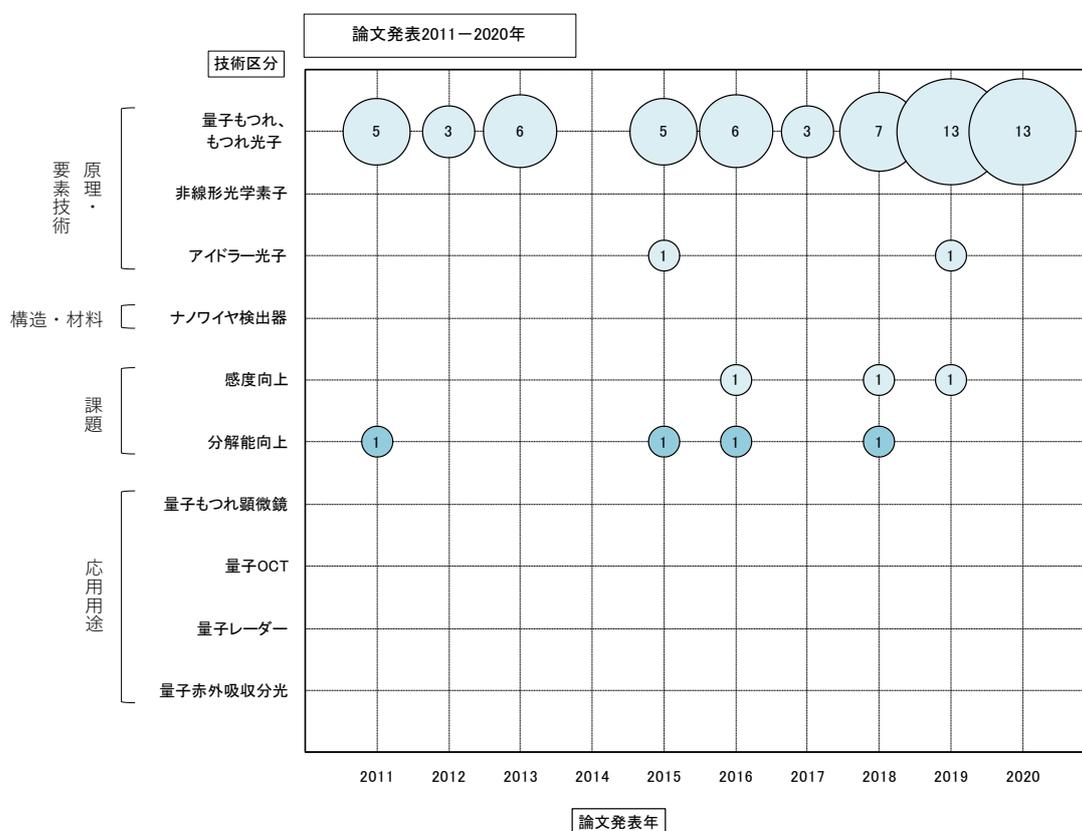
量子もつれ光センサの主な研究者所属機関の〔技術区分別〕論文発表件数推移を図 5-4-24 に示す。

中国科学技術大学（中国）、江西師範大学（中国）、中国科学院（中国）は、原理・要素技術の量子もつれ、もつれ光子が多い。

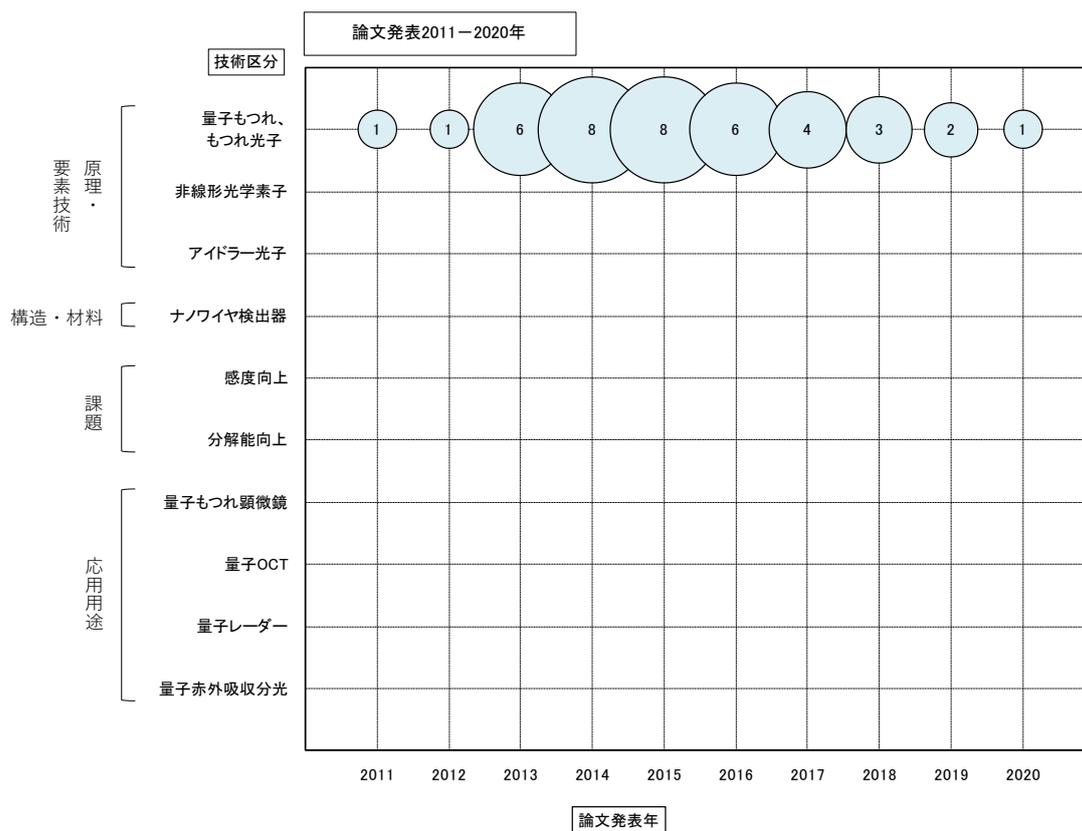
京都大学は、原理・要素技術の量子もつれ、もつれ光センサが多く、応用用途では、量子もつれ顕微鏡、量子 OCT がある。

図 5-4-24 量子もつれ光センサー〔技術区分別〕研究者所属機関別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）

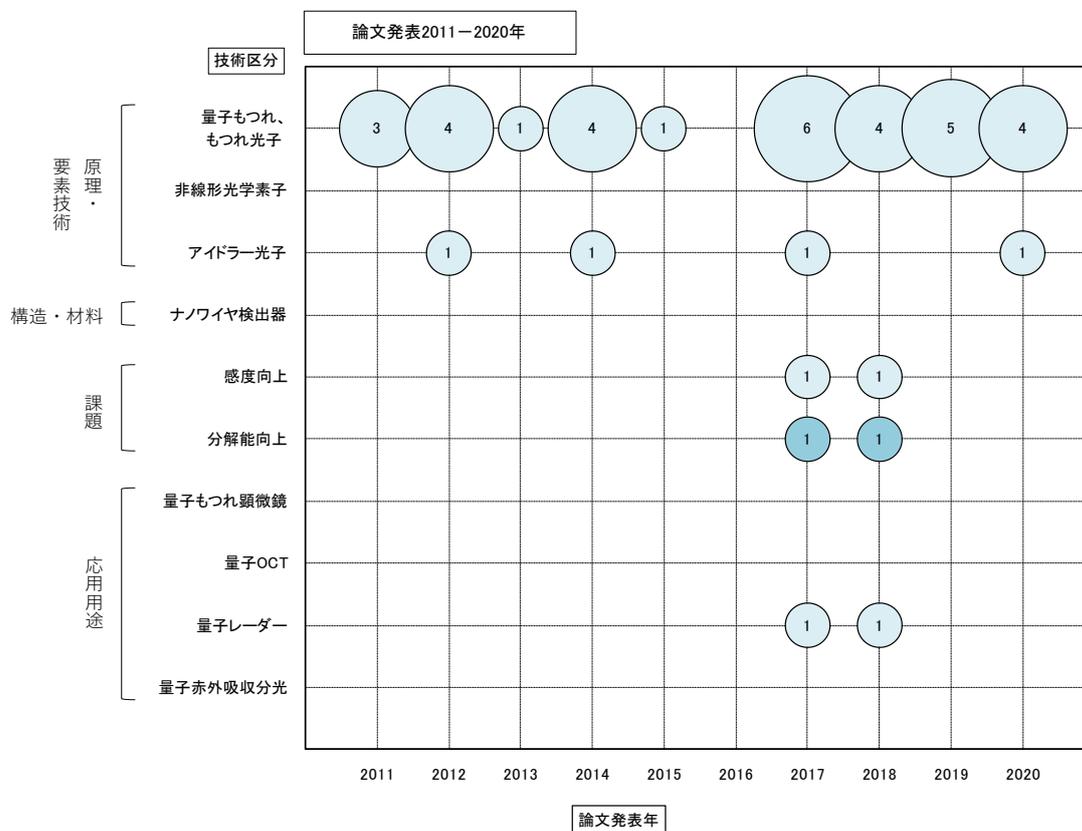
(a) 中国科学技術大学（中国）



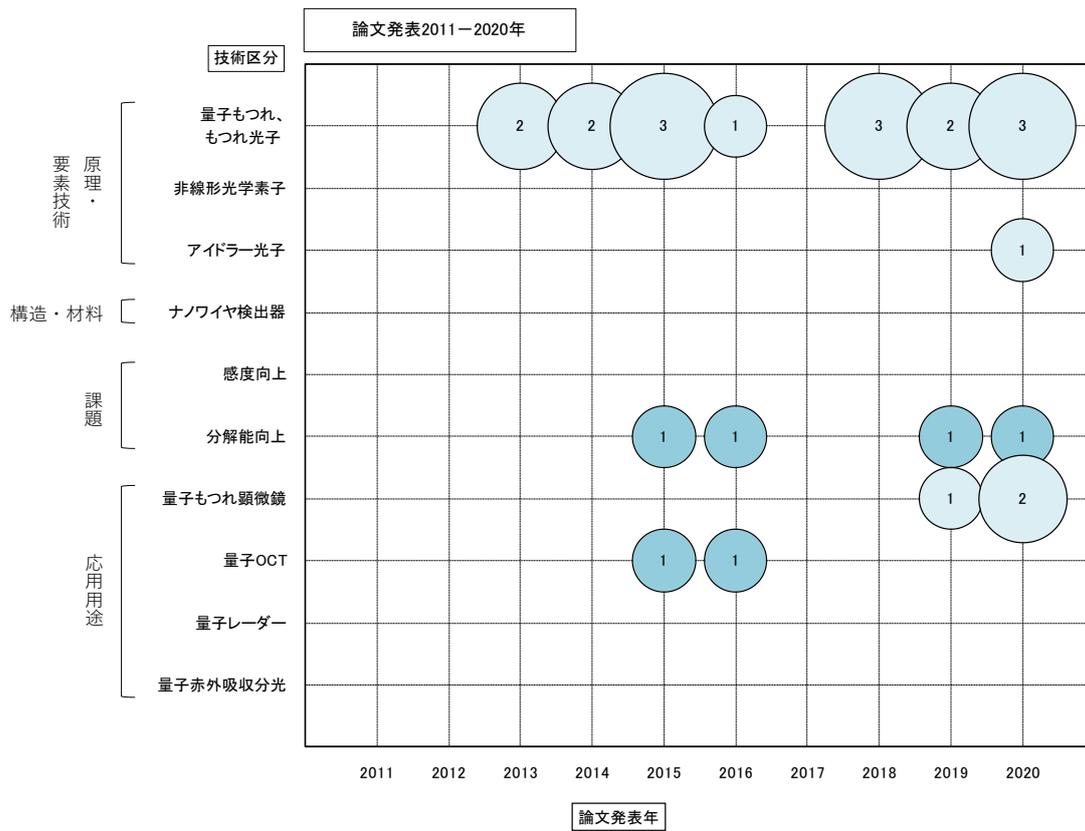
(b) 江西師範大学 (中国)



(c) 中国科学院 (中国)



(d) 京都大学



4. 光子検出器

光子検出器の主な研究者所属機関の[技術区分別]論文発表件数推移を図 5-4-25 に示す。

中国科学院（中国）は、2012 年以降が多く、原理・要素技術の単一光子検出器、原理・要素技術の SSPD、構造・材料の誘電体多層膜、課題の光吸収効率向上、感度、応用用途の量子通信が多い。

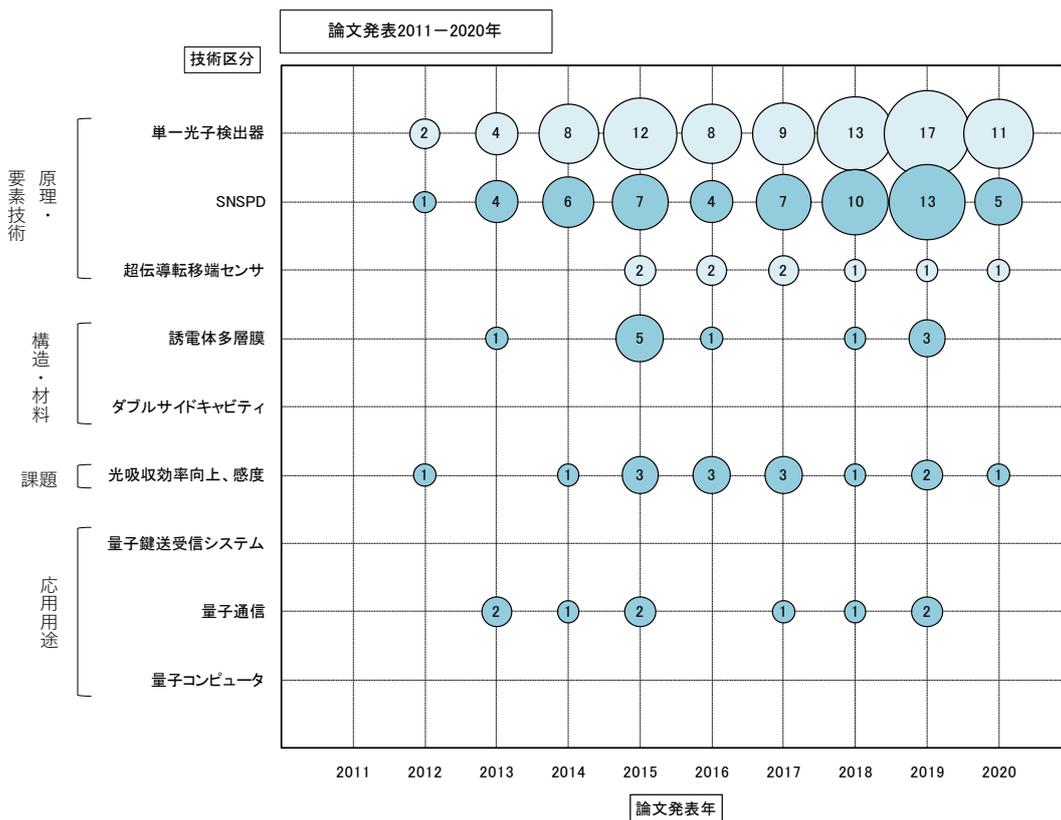
中国科学技術大学（中国）は、2011 年以降が多く、原理・要素技術の単一光子検出器、構造・材料の誘電体多層膜、応用用途の量子通信が多い。応用用途では、量子鍵送受信システムもある。

NIST（米国）は、2011 年以降が多く、原理・要素技術の単一光子検出器、SSPD、超伝導転移端センサ、課題の光吸収効率向上、感度が多い。

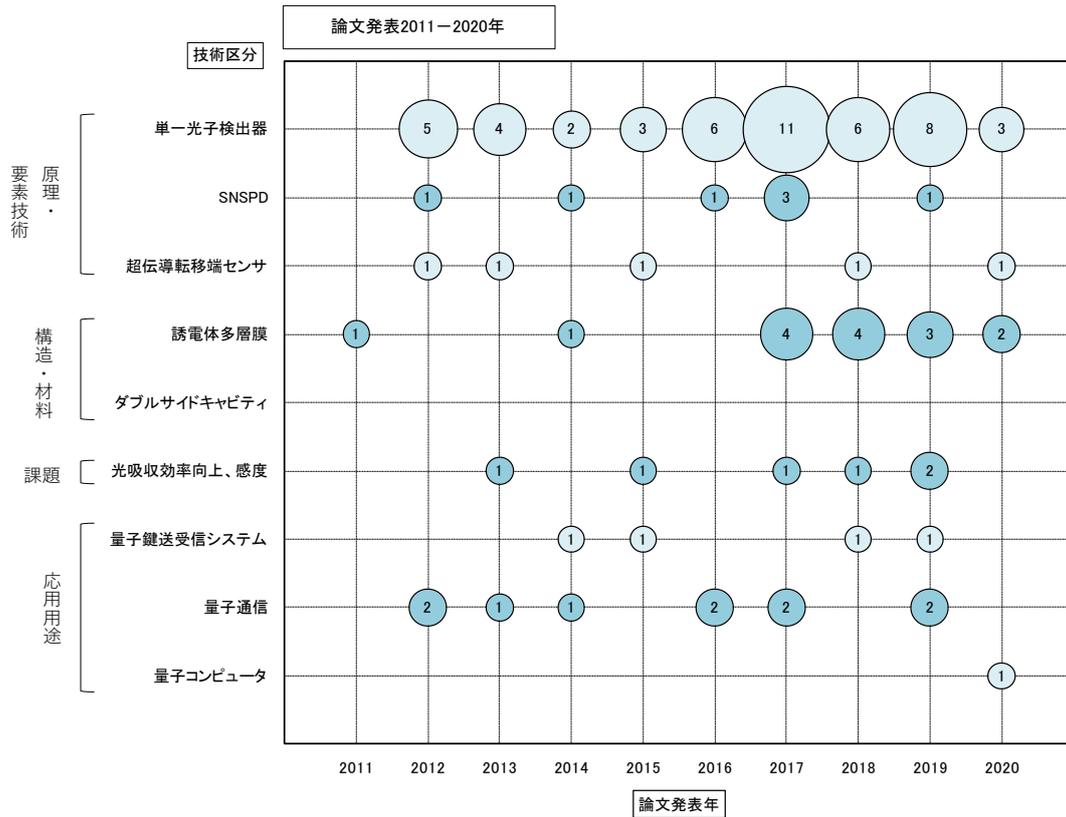
産業技術総合研究所は、原理・要素技術の単一光子検出器と超伝導転移端センサが多い。

図 5-4-25 光子検出器－[技術区分別] 研究者所属機関別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）

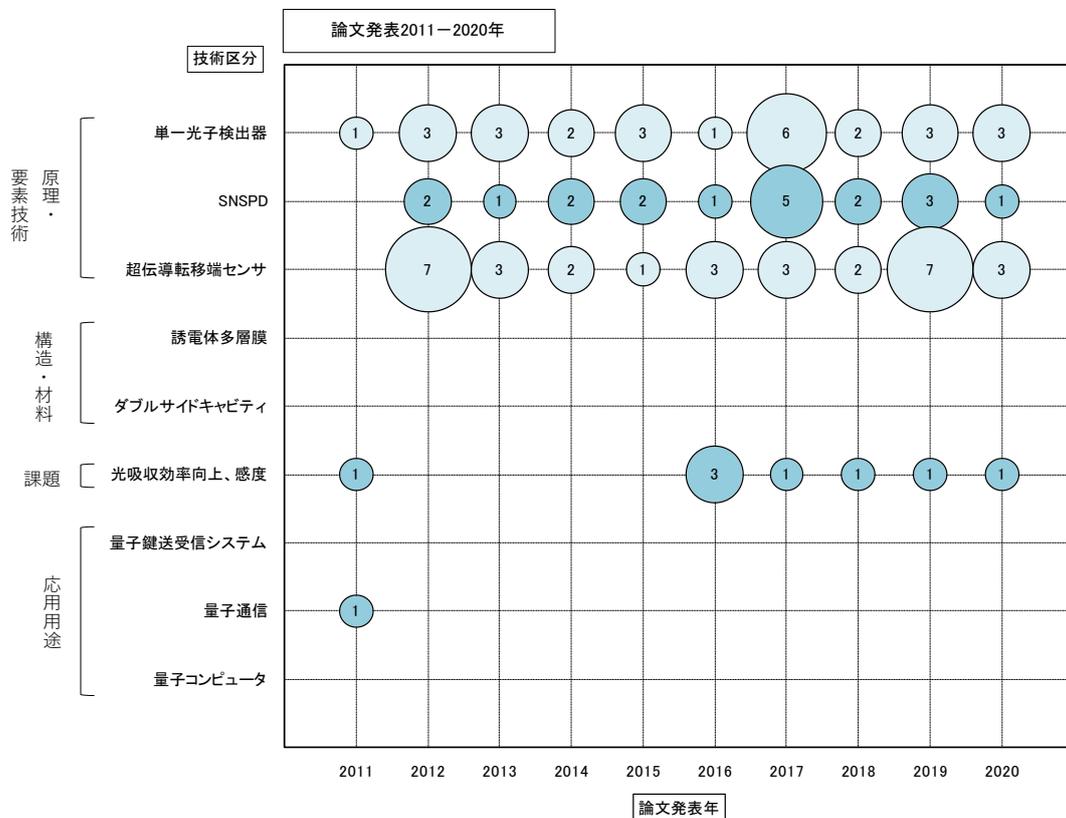
(a) 中国科学院（中国）



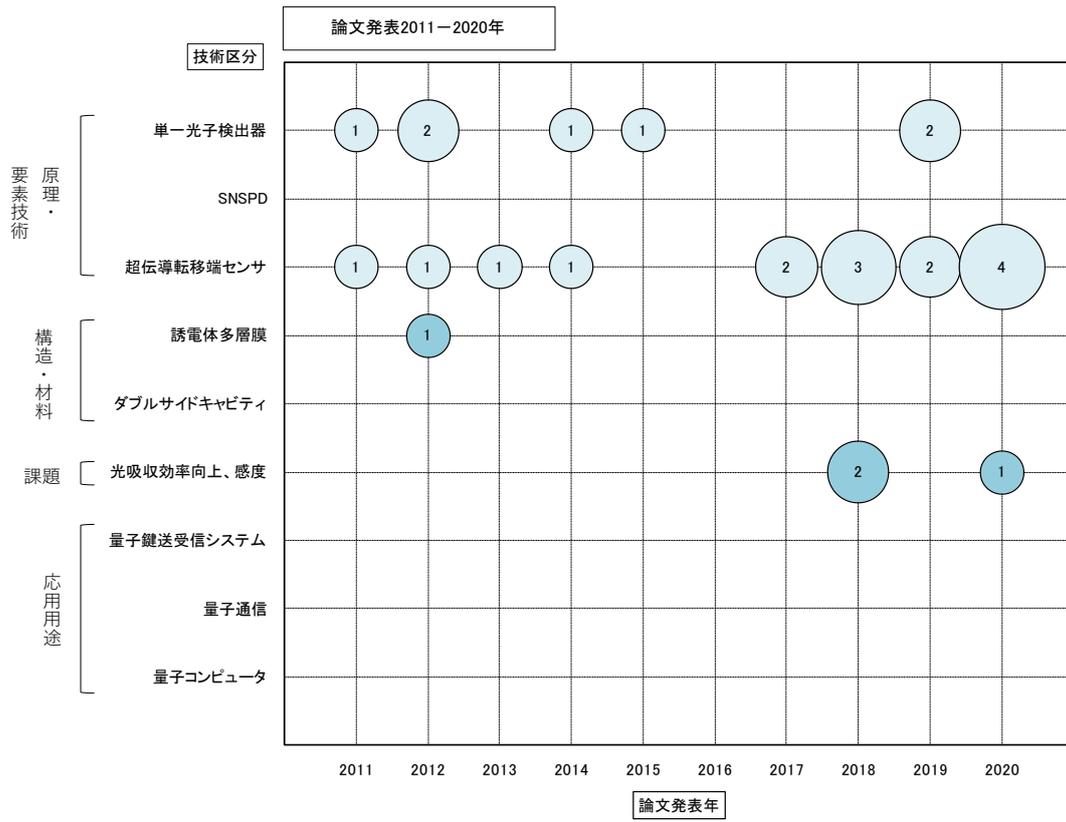
(b) 中国科学技術大学（中国）



(c) NIST（米国）



(d) 産業技術総合研究所



5. 量子慣性センサ

量子慣性センサの主な研究者所属機関の〔技術区分別〕論文発表件数推移を図 5-4-26 に示す。

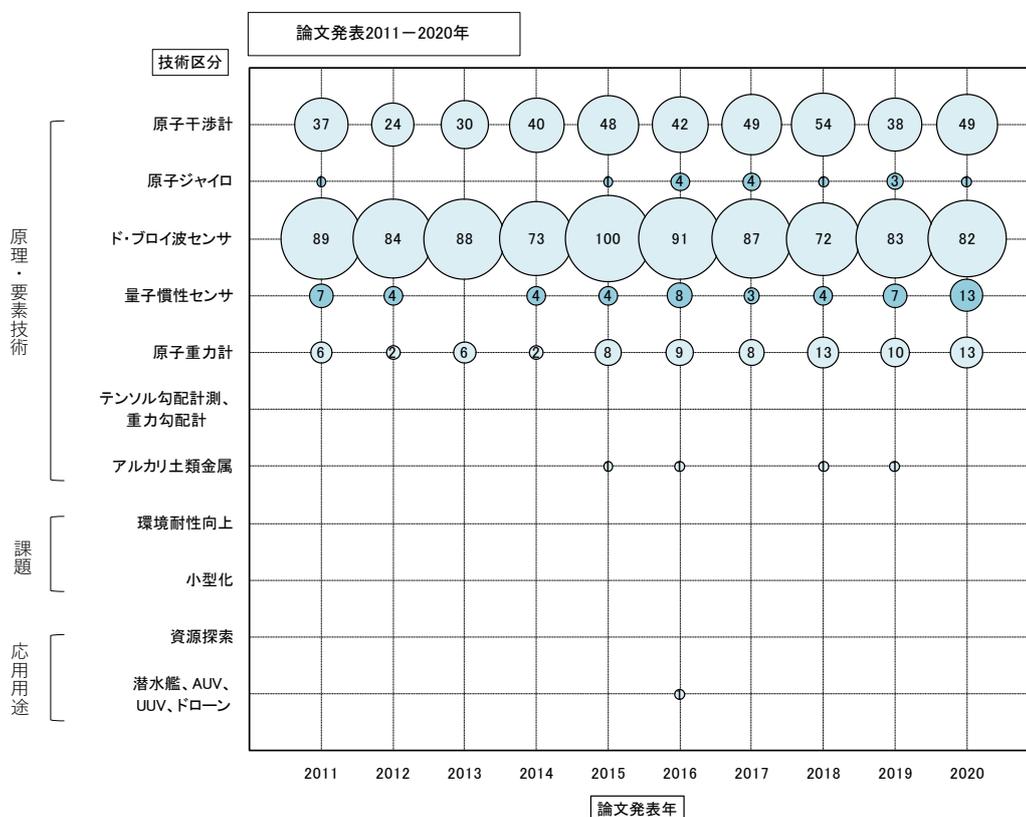
中国科学院（中国）は、期間中コンスタントにあり、原理・要素技術の原子干渉計、原理・要素技術のド・ブroy波センサが多い。

Vienna University（オーストリア）は、原理・要素技術のド・ブroy波センサが多い。

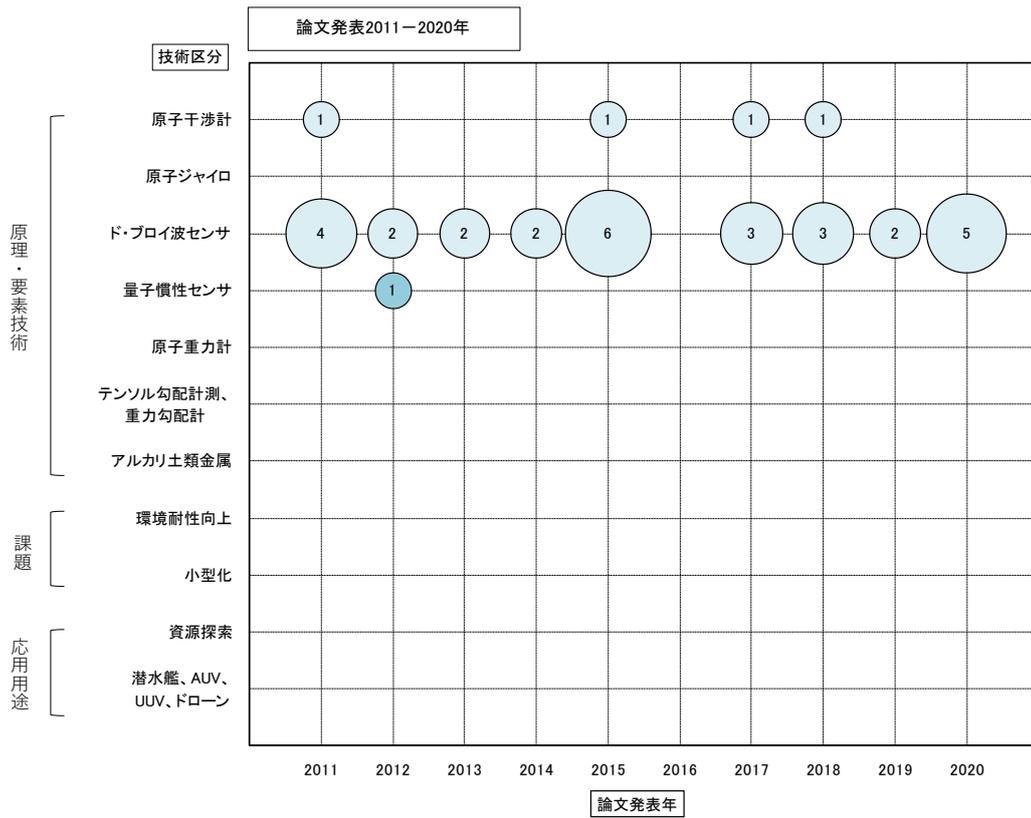
華中科技大学（中国）は、2015 年以降が多く、原理・要素技術の原子干渉計、原理・要素技術の原子重力計が多い。

図 5-4-26 量子慣性センサー〔技術区分別〕研究者所属機関別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）

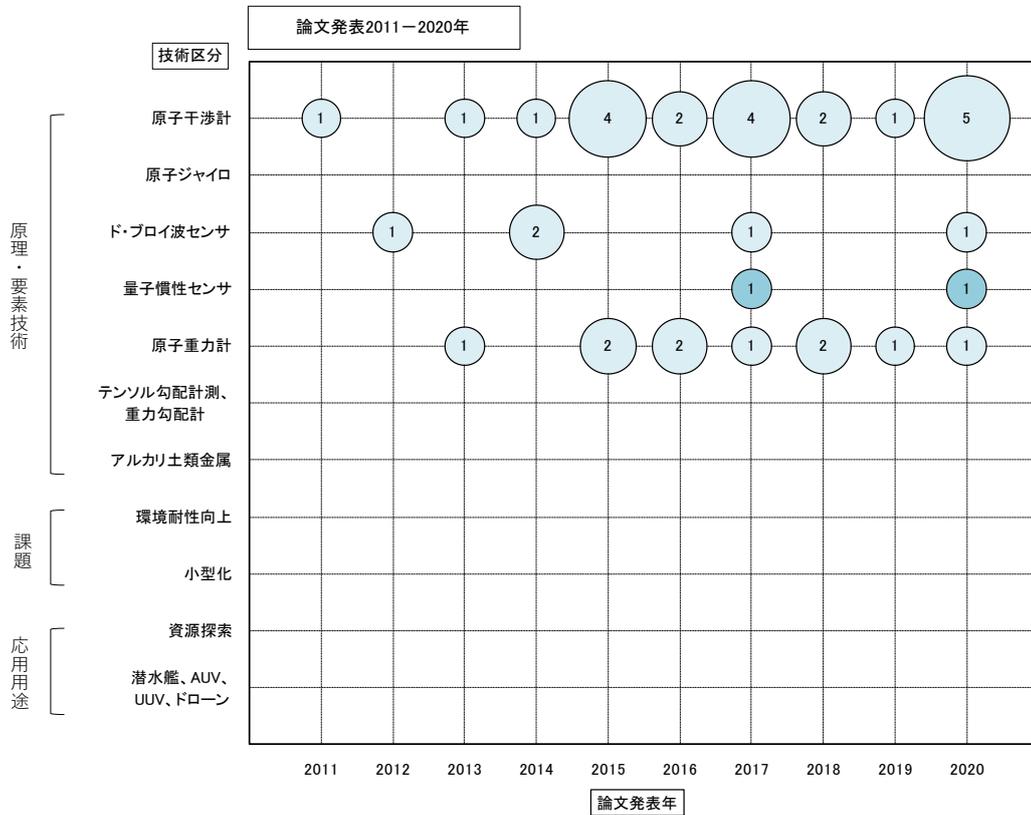
(a) 中国科学院（中国）



(b) Vienna University (オーストリア)



(c) 華中科技大学 (中国)



6. 光格子時計

光格子時計の主な研究者所属機関の[技術区分別]論文発表件数推移を図5-4-27に示す。

中国科学院(中国)は、2012～2018年にかけて増加傾向であり、原理・要素技術の磁気光学トラップ、光学トラップ、光格子時計、課題のレーザー長寿命化が多い。

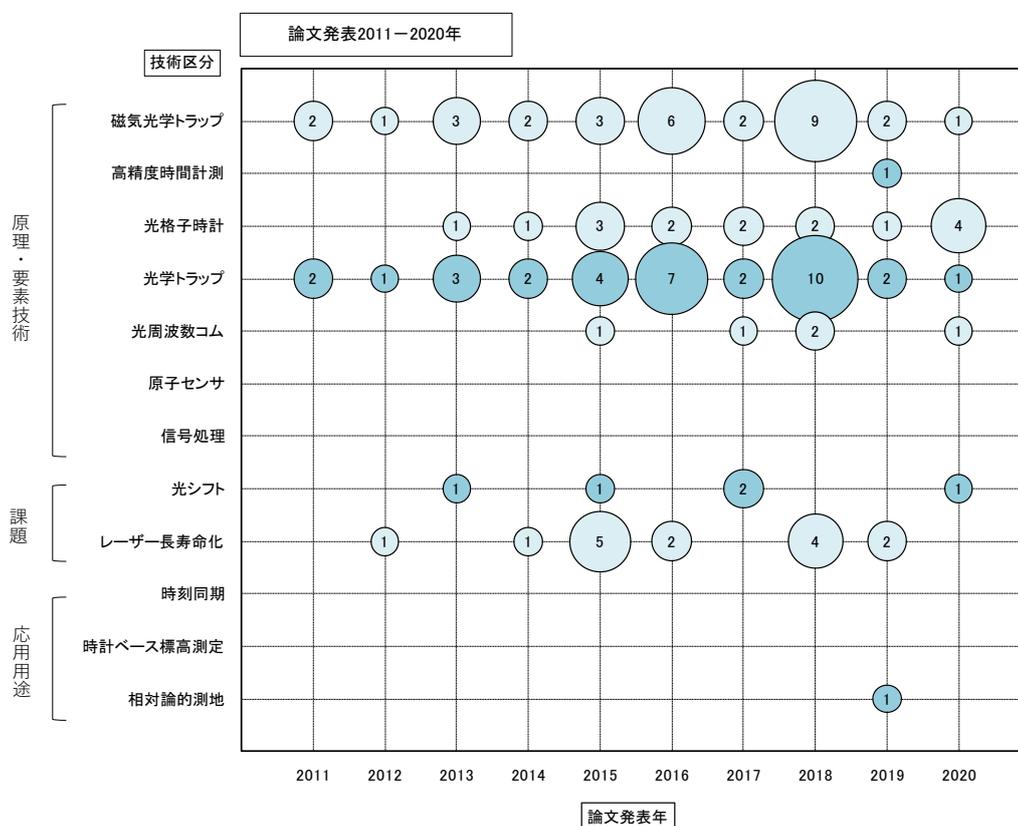
NIST(米国)は、原理・要素技術の磁気光学トラップ、光格子時計、光学トラップ、課題の光シフトが多い。

山西大学(中国)は、2011、2012年が多く、原理・要素技術の磁気光学トラップ、光学トラップが多い。

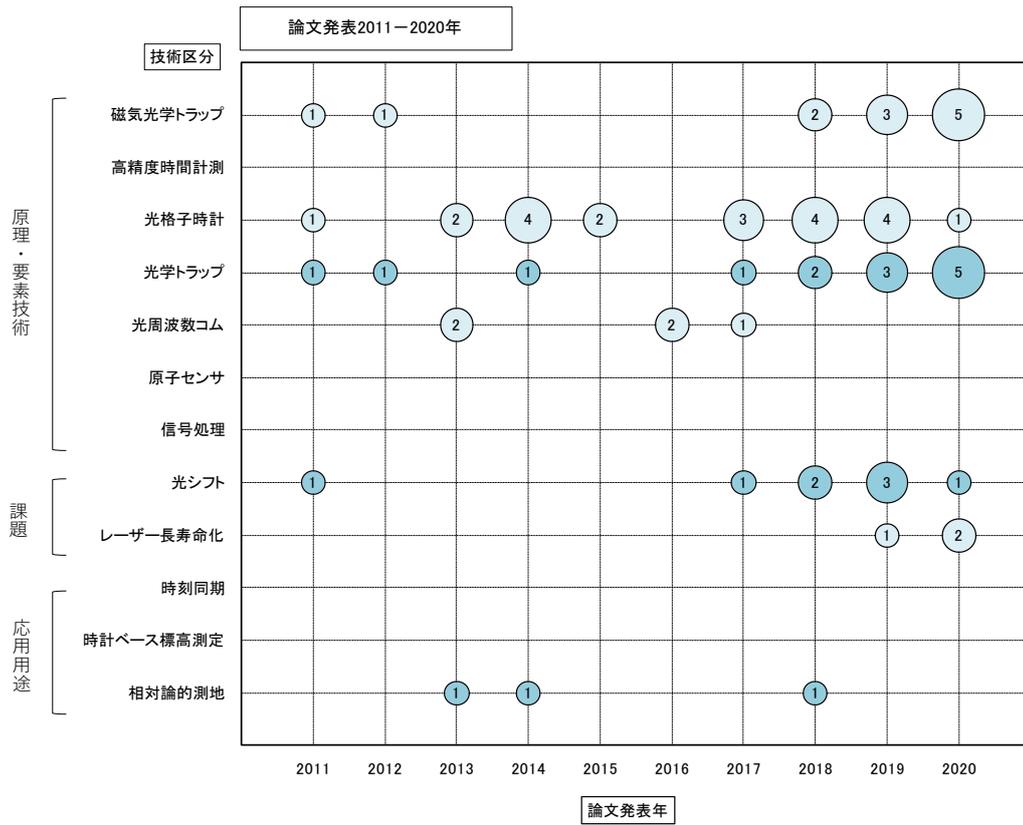
東京大学は、原理・要素技術の光格子時計と応用用途の相対論的測地が多い。

図5-4-27 光格子時計－[技術区分別]研究者所属機関別論文発表件数推移(論文誌発行年:2011-2020年)

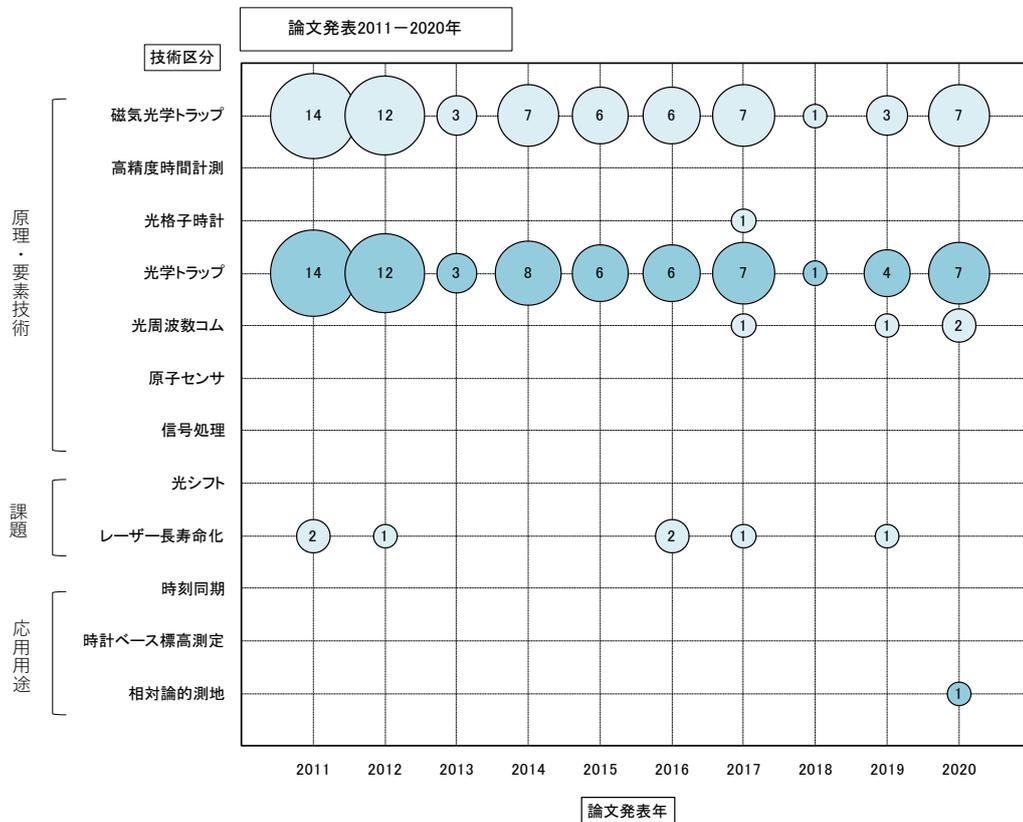
(a) 中国科学院(中国)



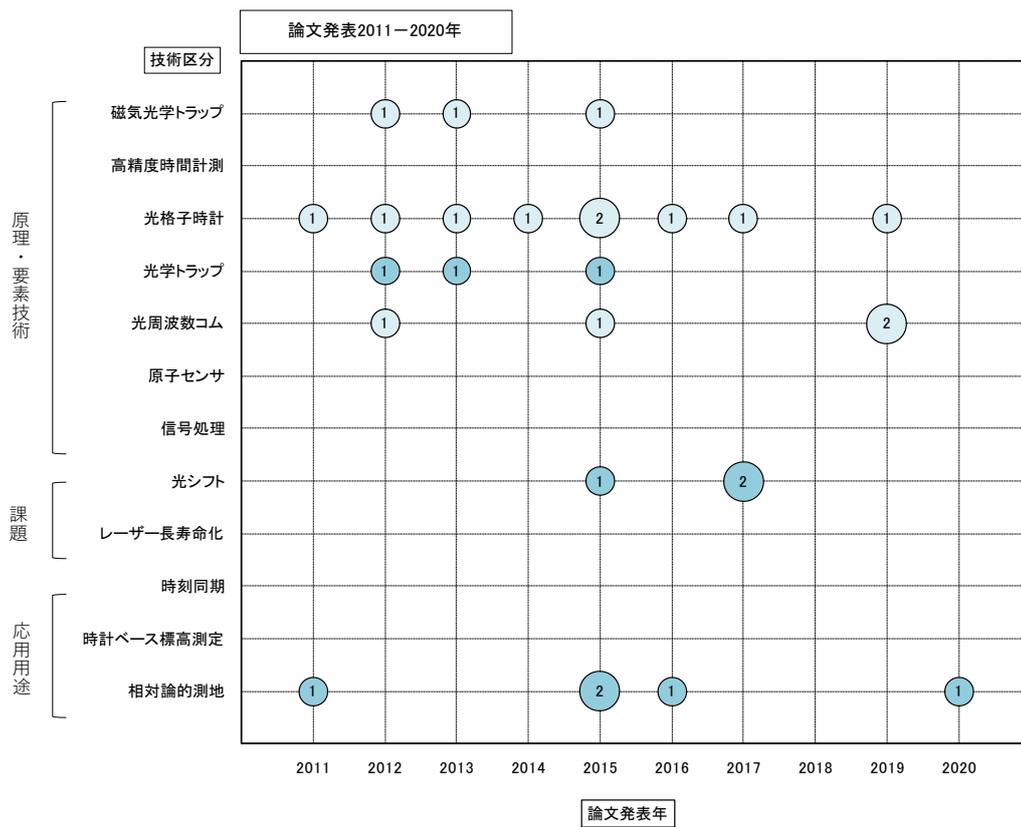
(b) NIST (米国)



(c) 山西大学 (中国)



(d) 東京大学



7. その他技術

その他技術（SQUID）の主な研究者所属機関の〔技術区分別〕論文発表件数推移を図 5-4-28 に示す。

中国科学院（中国）は、原理・要素技術の超伝導量子干渉計とジョセフソン接合が多く、2012～2013 年にかけてと 2016～2020 年にかけてが多い。

CNR（イタリア）は、原理・要素技術の超伝導量子干渉計が期間前半に多く、ジョセフソン接合が 2011～2019 年にかけて多い。

Russian Academy of Sciences（ロシア）は、原理・要素技術のジョセフソン接合が期間中コンスタントにある。

NIST（米国）は、原理・要素技術のジョセフソン接合が、2015～2020 年にかけて多い。

南京大学（中国）は、原理・要素技術のジョセフソン接合が期間中コンスタントにある。

図 5-4-28 その他技術（SQUID）－〔技術区分別〕研究者所属機関別論文発表件数推移（論文誌発行年：2011-2020 年）

(a) 中国科学院（中国）



(b) CNR (イタリア)



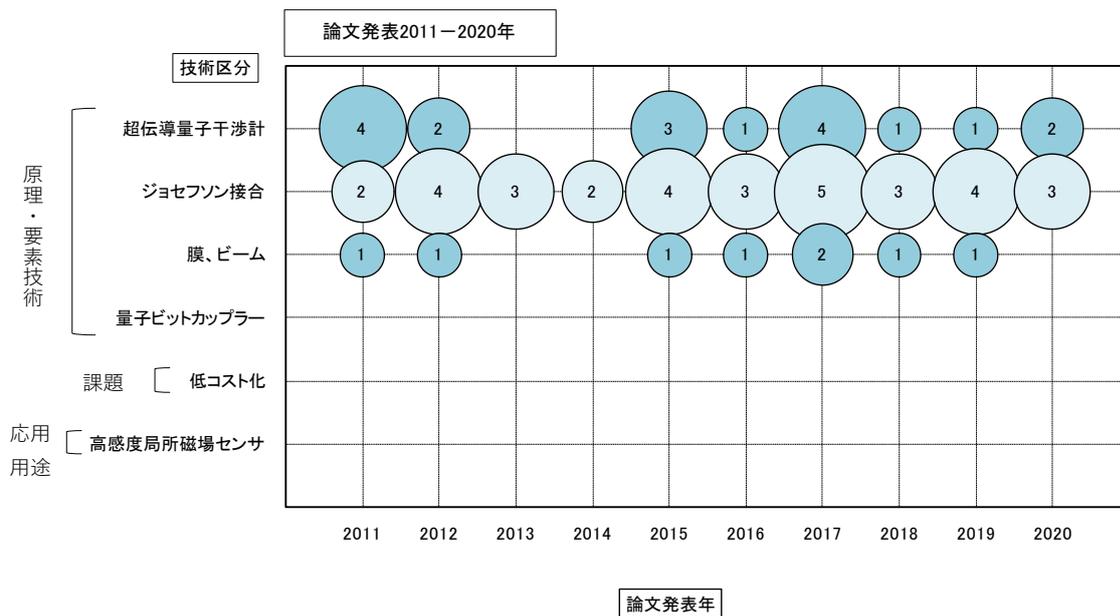
(c) Russian Academy of Sciences (ロシア)



(d) NIST (米国)



(e) 南京大学 (中国)



第6部 グラント動向調査

量子計測・センシング技術への注力動向をグラント動向より調査した。

第1章 調査対象と調査方法

第1節 調査対象

量子計測・センシング技術に関する以下の七つの区分を調査対象として、グラント動向調査を行った。

- ・ 固体量子センサ
- ・ 量子スピントロニクスセンサ
- ・ 量子もつれ光センサ
- ・ 光子検出器
- ・ 量子慣性センサ
- ・ 光格子時計
- ・ その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID）、超核偏極技術、フォノンセンシング）

第2節 調査方法

1. 調査対象グラント

- ・ 日本： 科学研究費助成事業
- ・ 米国： アメリカ国立科学財団（NSF）
アメリカ国立衛生研究所（NIH）
アメリカ国防総省（DoD）
- ・ 欧州： FP7 及び Horizon2020
- ・ イギリス： 英国研究・イノベーション機構（UKRI）
- ・ 中国： 国家自然科学基金
- ・ 韓国： 韓国研究財団

2. 使用したデータベース

- ・ 日本： KAKEN ; <https://kaken.nii.ac.jp/ja/>
- ・ 米国： NSF Awards Search ;
<https://www.nsf.gov/awardsearch/advancedSearch.jsp>
NIH RePorter ; https://reporter.nih.gov/search/HnGa-o2WdE2O_aHzM0rZPg/projects
SAM★GOV (DoD) ; <https://sam.gov/content/home>
- ・ 欧州： CORDIS ; <https://cordis.europa.eu/search/en>
- ・ イギリス： GtR ; https://gtr.ukri.org/search/project?term=*
- ・ 中国： 現地調査会社よりデータ取得
- ・ 韓国： NTIS ; <https://www.ntis.go.kr/>

3. 調査時期範囲

2011年から2021年に開始されたプロジェクトを対象とした。

4. 調査対象母集団の抽出

七つの区分について、表 6-1-1 に記載のキーワードを用いた検索式により、調査対象母集団を抽出した。

表 6-1-1 グラント検索に用いたキーワード

< 固体量子センサ >

No.	キーワード(英語)	キーワード(日本語)
1	solid state quantum sensor	固体量子センサ
2	vacancy center*	空孔センタ
	vacancy centre*	
3	nanoscale diamond	ナノスケールダイヤモンド/ナノスケールダイアモンド
	nanoscale diamonds	
4	diamond magnetometry	ダイヤモンド磁力計
	diamonds magnetometry	
5	heteroepitaxial diamond*	ヘテロエピタキシャルダイヤモンド/ヘテロエピタキシャルダイアモンド
6	nano magnetometry	ナノ磁力計
7	NV center*	NV センタ
	NV centre*	
8	optical detected magnetic resonance	光検出磁気共鳴
9	fluorescent diamond*	蛍光ダイヤモンド/蛍光ダイアモンド
10	diamond lithography center	ダイヤモンド発光センタ/ダイヤモンド発光センタ
	diamond lithography centre	
11	nitrogen vacancy center*	NV 中心
	nitrogen vacancy centre*	
	nitrogen vacancy	
	NV center*	
	NV centre*	
12	nitrogen vacancy complex center*	窒素-空孔複合体
	nitrogen vacancy complex centre*	
13	diamond quantum magnetometry	ダイヤモンド量子磁力計/ダイヤモンド量子磁力計
	diamond quantum sensor*	ダイヤモンド量子センサ/ダイヤモンド量子センサ
	fluorescent nanodiamond*	蛍光ナノダイヤモンド/蛍光ナノダイアモンド
14	solid quantum sensor*	固体量子センサ
15	diamond color center	ダイヤモンドカラーセンタ/ダイヤモンドカラーセンタ
	diamond color centre	
16	ODMR	光検出磁気共鳴

<量子スピントロニクスセンサ>

No.	キーワード(英語)	キーワード(日本語)
1	quantum spintronics sensor	量子スピントロニクスセンサ
2	tunnel magneto resistance	TMR/トンネル磁気抵抗効果
	tunneling magnetoresistance	
	tunnel magnetoresistance	
	tunneling magneto resistance	
3	magnetic tunnel junction*	MTJ/磁気トンネル接合
4	spin flow device*	スピン熱流素子
5	spin seebeck effect*	スピンゼーベック効果
6	spin peltier effect*	スピンペルチェ効果
7	tunneling magneto resistive sensor*	トンネル磁気抵抗素子/TMR 素子
	tunneling magneto resistive	
	TMR sensor*	
	TMR device*	
	tunnel magnetoresistance effect*	
8	tunneling magneto resistance	
9	magneto resistive sensor*	巨大磁気抵抗素子/磁気抵抗効果素子
	giant magneto resistive effect*	
	giant magneto resistive effect sensor*	
	GMR sensor*	
10	GMR device*	
11	giant magneto resistance	巨大磁気抵抗効果
12	spin flow	スピン流
	giant magnetoresistance	
	giant magneto impedance	
13	giant magnetoresistance	巨大磁気抵抗
	tunnel magnetoresistive	
14	tunnel magnetoresistive	トンネル磁気抵抗
	tunnel magnetro resistive	
15	magnetoresistive element*	磁気抵抗素子
	magneto resistive element*	
16	magnetoresistive effect element*	磁気抵抗効果素子
17	tunnel magneto resistive	トンネル磁気抵抗

<量子もつれ光センサ>

No.	キーワード(英語)	キーワード(日本語)
1	quantum entanglement sens*	量子もつれ光センサ
2	quantum entanglement microscope*	量子もつれ顕微鏡
	quantum optical coherence tomography	量子光コヒーレンス断層撮影法
	entanglement enhanced microscope*	量子強化顕微鏡
3	quantum optical coherence tomography	量子 OCT
4	hong ou mandel interference	HOM 干渉
5	quantum radar	量子レーダ
6	quantum entanglement light source*	量子もつれ光源
7	superconducting nano wire*	超伝導ナノワイヤ
8	non linear optical element*	非線形光学素子
	NLOE	NLOE
9	idler photon	アイドラー光子
10	quantum entanglement	量子もつれ
	quantum absorption spectroscopy	量子吸収スペクトラム
11	flux quantum voltage pulse	磁束量子電圧
	pulse multiplication device*	パルス増倍装置

<光子検出器>

No.	キーワード(英語)	キーワード(日本語)
1	quantum sens*	光子検出器
2	single photon detector*	単一光子検出器
3	superconductor nano strip photon detector*	SNSPD/超伝導ナノストリップ光子検出器/超伝導ナノストリップ光子検出器
	superconductor nanostrip photon detector*	
	superconductor single photon optical detector*	SSPD/超伝導ナノストリップ光子検出器/超伝導ナノストリップ光子検出器
	superconductor single photon detector*	
4	superconductor nanowire single photon detector*	超伝導ナノワイヤー単一光子光検出器/超伝導ナノワイヤー単一光子光検出器
	SNSPD	SNSPD/超伝導ナノストリップ光子検出器/超伝導ナノストリップ光子検出器
5	transition edge sensor*	TES/超伝導転移端センサ/超伝導転移端センサ
6	superconducting transition edge sensor*	超伝導転移端センサ/超伝導転移端センサ
	transition edge microcalorimeter*	超伝導転移端熱量計/超伝導転移端熱量計
7	double side cavity	ダブルサイドキャビティ
8	dielectric multi layer	誘電体多層膜
	dielectric multilayer	
9	multi pixel superconductor nano strip photon detector*	マルチピクセル SSPD
	multipixel superconductor nanostrip photon detector*	
	multi pixel superconductor nano strip photon detector*	
	multipixel superconductor nanostrip photon detector*	
10	single flux quantum circuit*	磁束量子論理回路/SFQ 論理回路
11	flux quantum voltage pulse	磁束量子電圧パルス
	pulse multiplication device*	パルス増幅素子

<量子慣性センサ>

No.	キーワード(英語)	キーワード(日本語)
1	quantum inertial sensor*	量子慣性センサ
2	atom interferometer*	原子干渉計
3	optical pulse atom interferometer*	光パルス型原子干渉計
4	atomic gravimeter	原子重力計
5	atomic gyroscope	原子ジャイロ
6	matter wave	ド・ブロイ波
	de broglie wave sensor	ド・ブロイ波センサ
7	quantum inertial measurement	量子慣性計測
8	atomic beam gyro	原子ビームジャイロ
9	mach zehnder atomic interference	マツハ・ツェンダー型原子干渉
10	atomic interference gyroscope	原子干渉ジャイロスコープ
11	ion trap angle measure	イオントラップ角度計測
12	ion trap angle gyroscope	イオントラップ角度ジャイロスコープ
	ion trap gyroscope	イオントラップジャイロスコープ
13	matter wav gyro	ド・ブロイ波ジャイロ
14	ytterbium atom spin	イットリウム原子スピン
	ytterbium atom optical trap	イットリウム原子光学トラップ
	yb atom spin	yb 原子スピン
	yb atom optical trap	yb 原子光学トラップ
15	europium magneto optical	ユーロピウム磁気光学

<光格子時計>

No.	キーワード(英語)	キーワード(日本語)
1	optical lattice clock*	光格子時計
	optical lattices clock*	
2	optical lattice laser clock*	光格子レーザ時計
	optical lattices laser clock*	
3	Laser for observation	観測用レーザ
4	magneto optical trap*	磁気光学トラップ
5	high precision time measurement*	高精度時間計測
6	light source atom clock	原子時計用光源
7	Ion watch*	イオン時計
8	atom microwave clock*	マイクロ波原子時計
9	atom frequency comb	原子周波数コム
	atomic frequency comb	
	atom optical comb	原子光学コム
	atomic optical comb	
10	atom clock*"	原子時計
	atomic clock*"	
11	atom optical clock*	原子光時計
	atomic optical clock*	

<その他（超伝導量子干渉素子（SQUID）、超核偏極技術、フォノンセンシング）>

No.	キーワード(英語)	キーワード(日本語)
超伝導量子干渉素子(SQUID)		
1	superconducting quantum interference device	SQUID／超電導量子干渉計／超伝導量子干渉計
	superconducting quantum Interferometer	
2	Josephson junction	ジョセフソン接合
3	high sensitivity magnetic sensor	高感度磁気センサ
	high sensitivity magnetic sensing	
超核偏極技術		
4	nuclear polarization	超核偏極技術
5	triplet dynamic nuclear polarizat*	トリプレット DNP
6	nuclear magnet resonance	核磁気共鳴
		NMR
フォノンセンシング		
7	phonon sens*	フォノンセンシング
8	phonon compress*	フォノン圧縮
9	phononic crystal waveguide	フォノンニック結晶導波路
10	thermoelectric energy harvester	熱電エネルギーハーベスタ
11	far infrared sensor	遠赤外線センサ
	far infrared sensing	

第2章 全体動向調査

第1節 研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額及びグラント件数

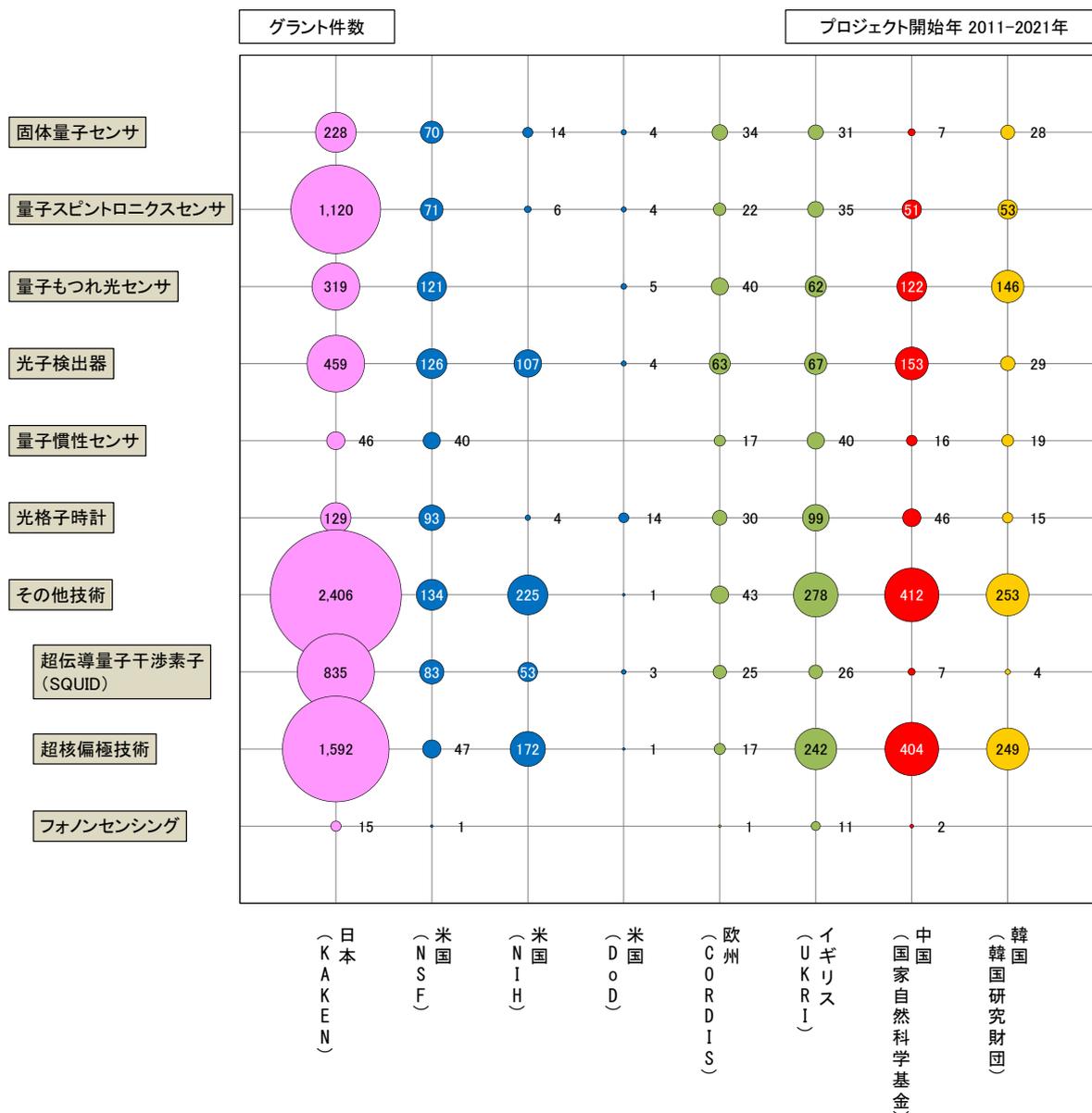
研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額及びグラント件数を、それぞれ図6-2-1(a)及び図6-2-1(b)に示す。資金流入額では、量子スピントロニクスセンサ、超核偏極技術、超伝導量子干渉素子が多く、日本が多い。固体量子センサ、量子もつれ光センサでは、米国が多く次いで日本が多い。光子検出器では、米国が多く次いで日本、欧州が多い。グラント件数ではいずれも日本の件数が多い。ただし安全保障に関するグラントについては、オープンになっていない可能性もあり注意を要する。

図6-2-1(a) 研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年12月の平均値を採用した。ただし、2021年は10月1日～21日の平均値を採用した。
https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx

図 6-2-1 (b) 研究者所属機関国籍 (助成金給付国・地域) 別 Grant 件数 (プロジェクト開始年: 2011-2021 年)



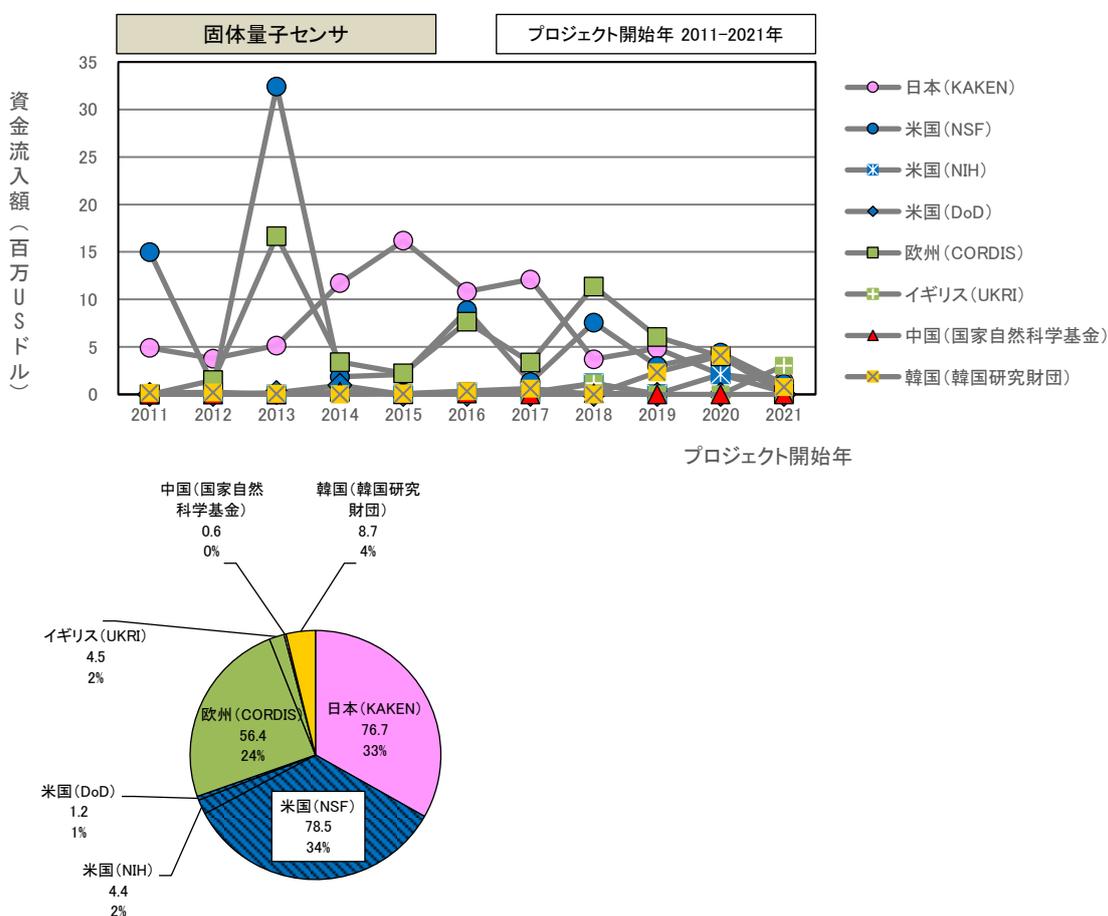
第2節 研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率

量子計測・センシング技術の研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を示す。研究者所属機関国籍の動向を見ることができる。

1. 固体量子センサ

固体量子センサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図6-2-2(1)に示す。米国が84.1百万USドルと多く、日本の76.7百万USドル、欧州の60.9百万USドルと続いている。米国、欧州は2013年が多く、日本は2014～2017年が多い。

図6-2-2(1) 固体量子センサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注1) 2021年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

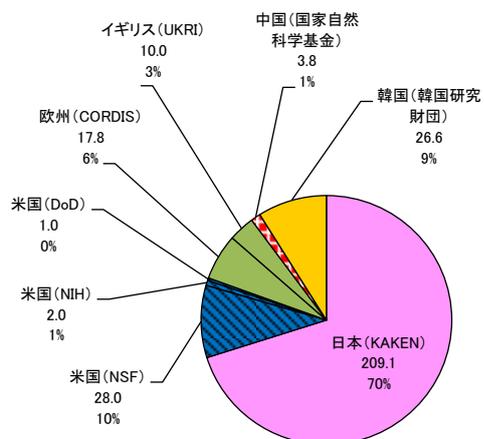
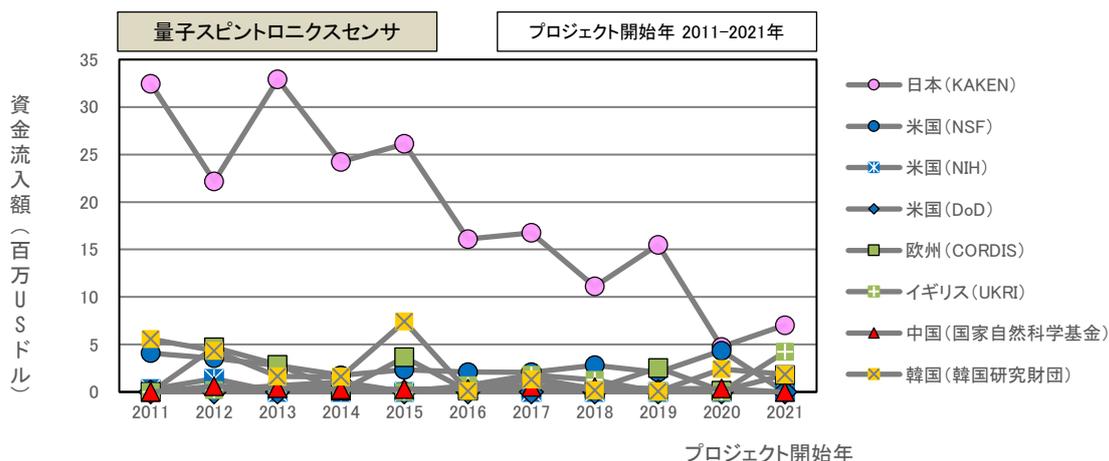
注2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年12月の平均値を採用した。ただし、2021年は10月1日～21日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図 6-2-2(2) に示す。日本が 209.1 百万 US ドルと最も多く、米国の 31.0 百万 US ドル、欧州の 27.8 百万 US ドルと続いている。日本は近年減少傾向である。

図 6-2-2(2) 量子スピントロニクスセンサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

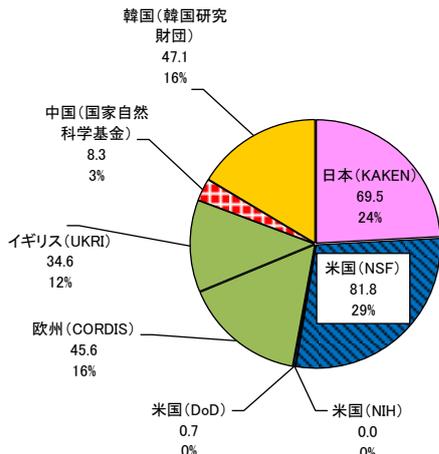
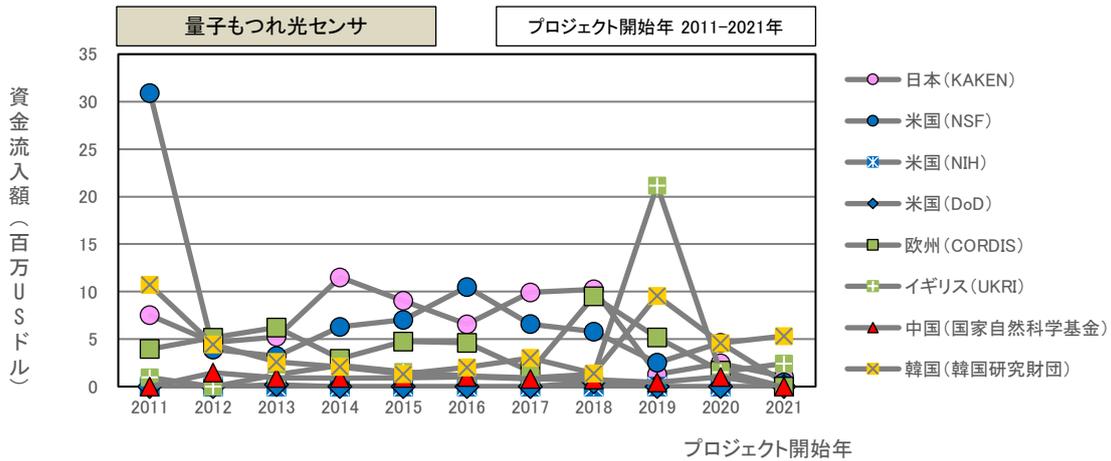
注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

3. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図 6-2-2(3) に示す。米国の 82.5 百万 US ドル、欧州の 80.2 百万 US ドル、日本の 69.5 百万 US ドルと続いている。2011 年の米国と 2019 年の欧州が多い。

図 6-2-2(3) 量子もつれ光センサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

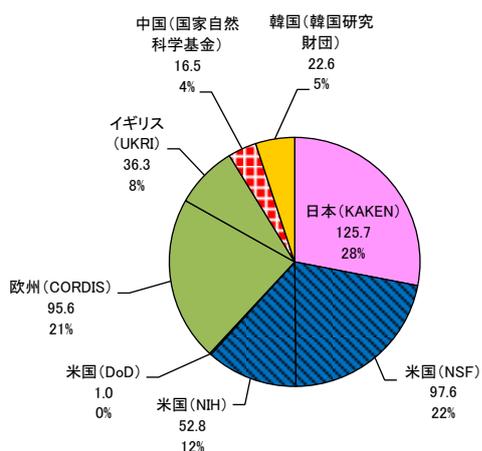
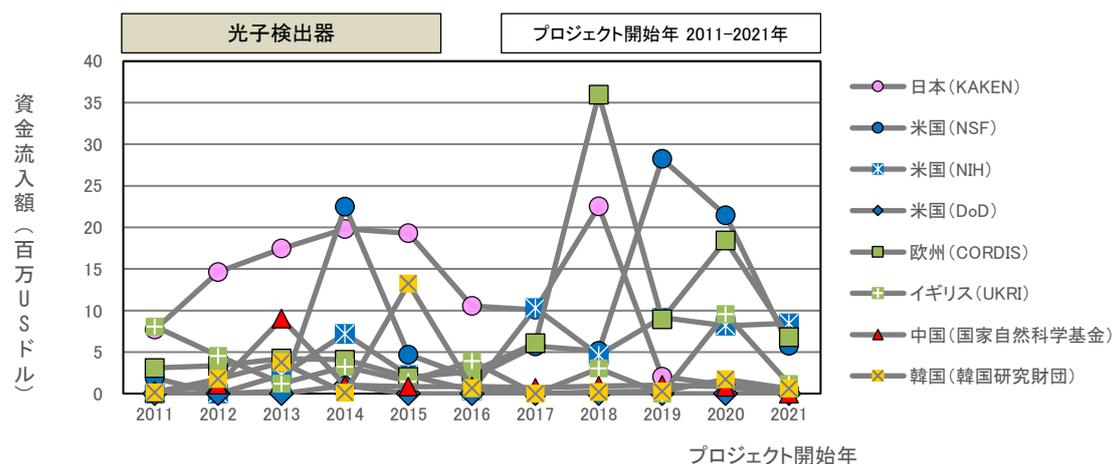
注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

4. 光子検出器

光子検出器における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図 6-2-2(4)に示す。米国が 151.4 百万 US ドルと最も多く、欧州の 131.9 百万 US ドル、日本の 125.7 百万 US ドルと続いている。2018 年の欧州と 2019 年の米国が多い。

図 6-2-2(4) 光子検出器における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

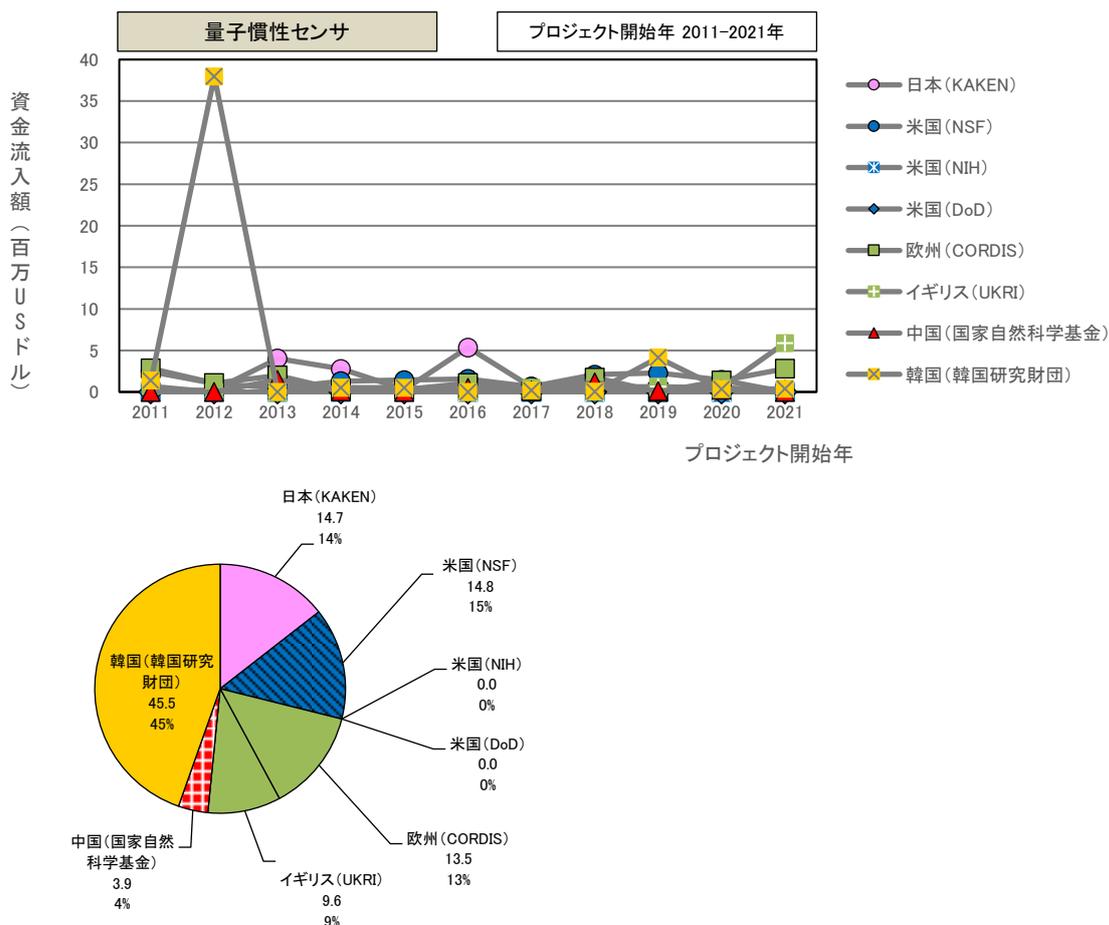


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

5. 量子慣性センサ

量子慣性センサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図 6-2-2(5)に示す。韓国の 45.5 百万 US ドルが最も多く、欧州の 23.1 百万 US ドル、米国の 14.8 百万 US ドル、日本の 14.7 百万 US ドルと続いている。2012 年の韓国が多い。

図 6-2-2(5) 量子慣性センサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

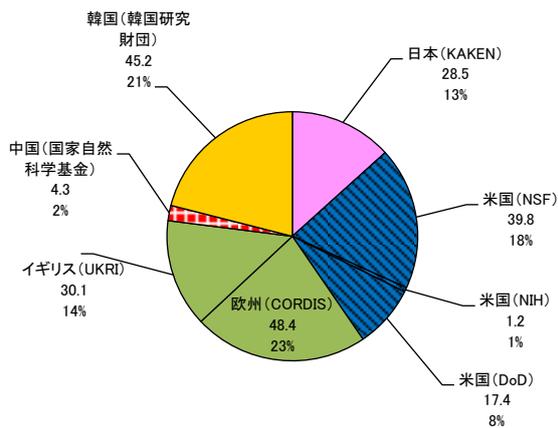
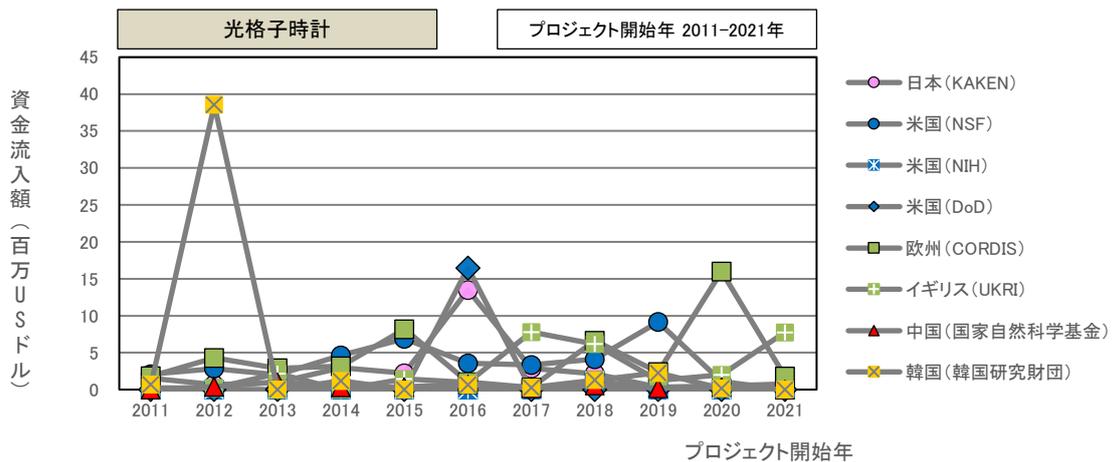
注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

6. 光格子時計

光格子時計における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図 6-2-2(6) に示す。欧州が 78.5 百万 US ドルと最も多く、米国の 58.4 百万 US ドル、韓国の 45.2 百万 US ドルと続いている。2012 年の韓国が多い。

図 6-2-2(6) 光格子時計における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

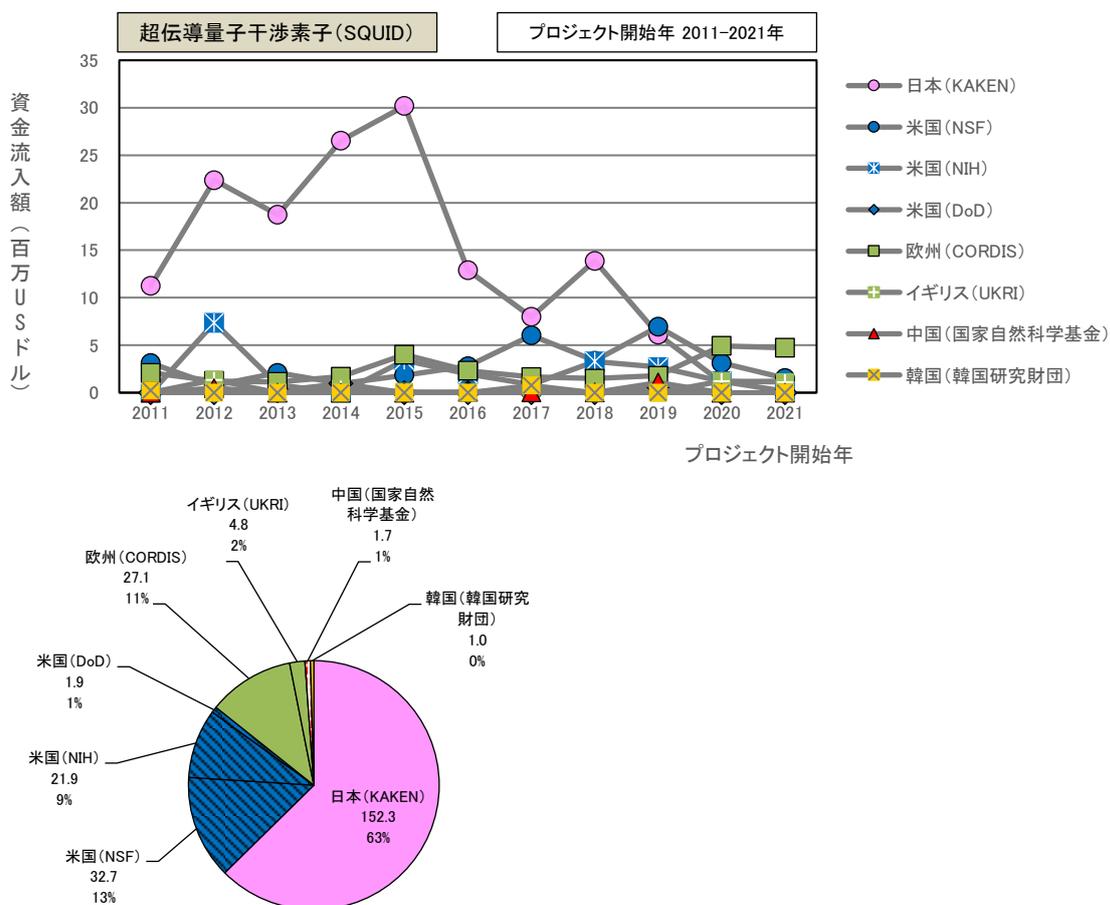
7. その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID）、超核偏極技術、フォノンセンシング）

その他技術における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図 6-2-2(7a)～(7c)に示す。

(1) 超伝導量子干渉素子（SQUID）

超伝導量子干渉素子（SQUID）では、日本が 152.3 百万 US ドルと最も多く、米国の 56.5 百万 US ドル、欧州の 31.9 百万 US ドルと続いている。2011～2018 年の日本が多い。

図 6-2-2(7a) 超伝導量子干渉素子（SQUID）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

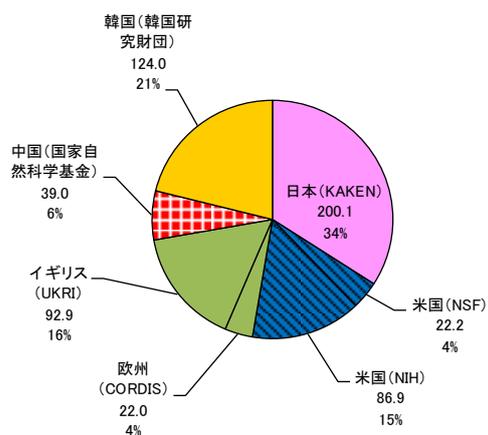
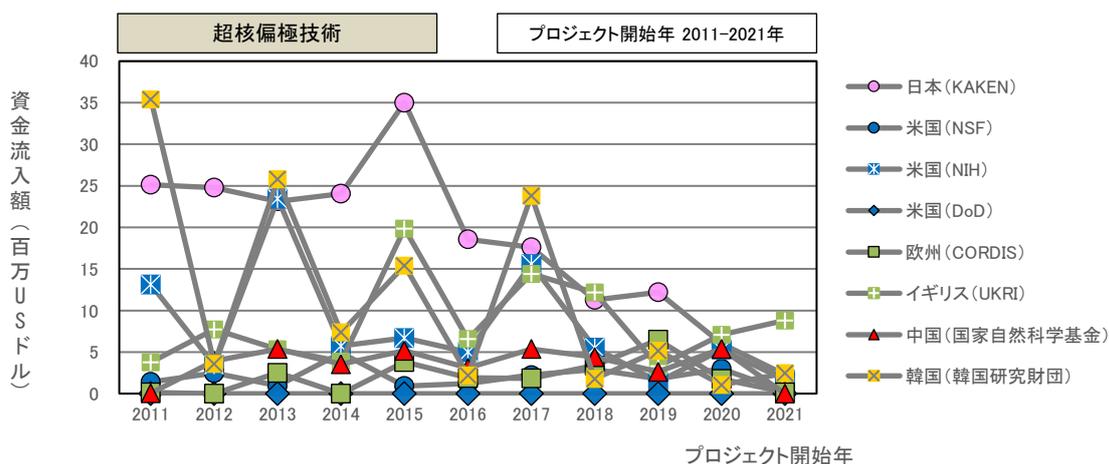


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

(2) 超核偏極技術

超核偏極技術では、日本が 200.1 百万 US ドルと最も多く、韓国の 124.0 百万 US ドル、欧州の 114.9 百万 US ドル、米国の 109.1 百万 US ドルと続いている。2015 年の日本が多い。

図 6-2-2(7b) 超核偏極技術における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

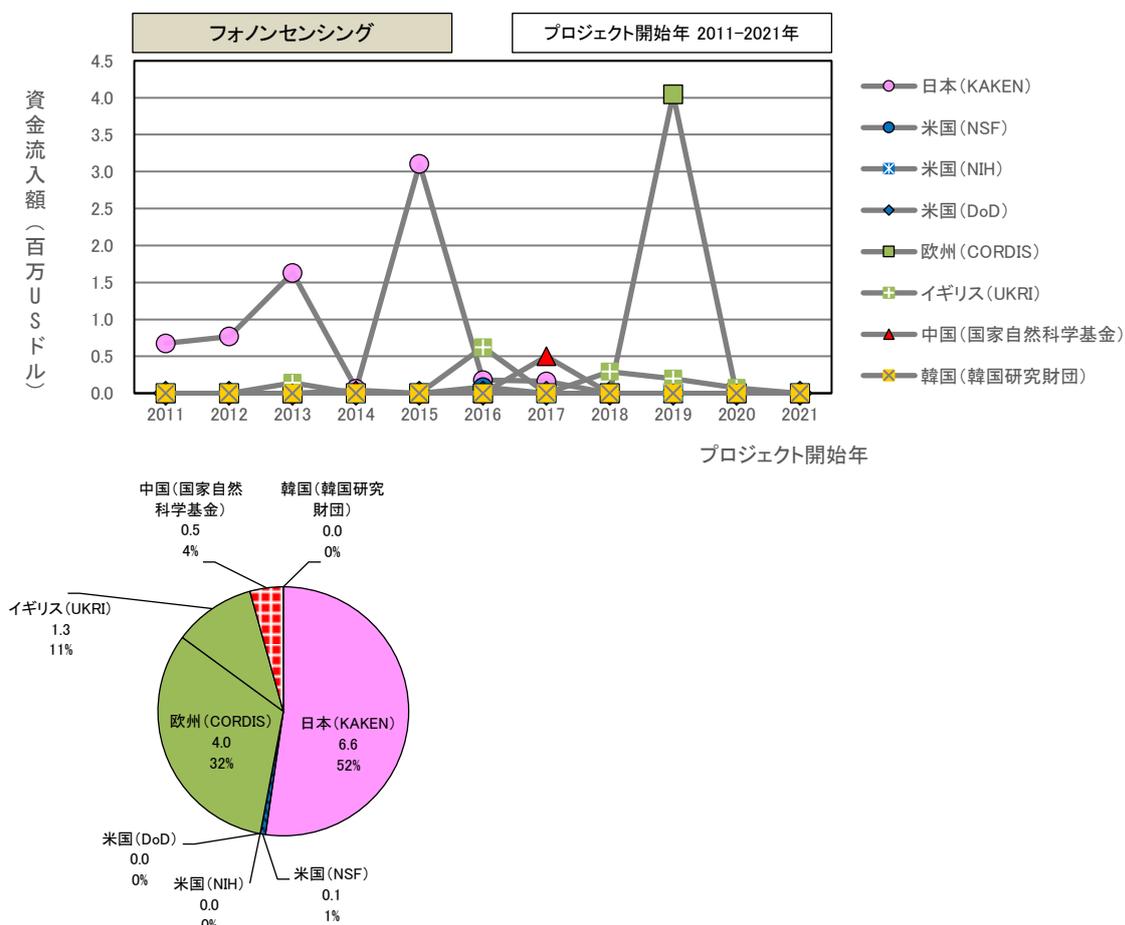


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

(3) フォノンセンシング

フォノンセンシングでは、日本が 6.6 百万 US ドルと多く、欧州の 5.3 百万 US ドルが続いている。

図 6-2-2(7c) フォノンセンシングにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

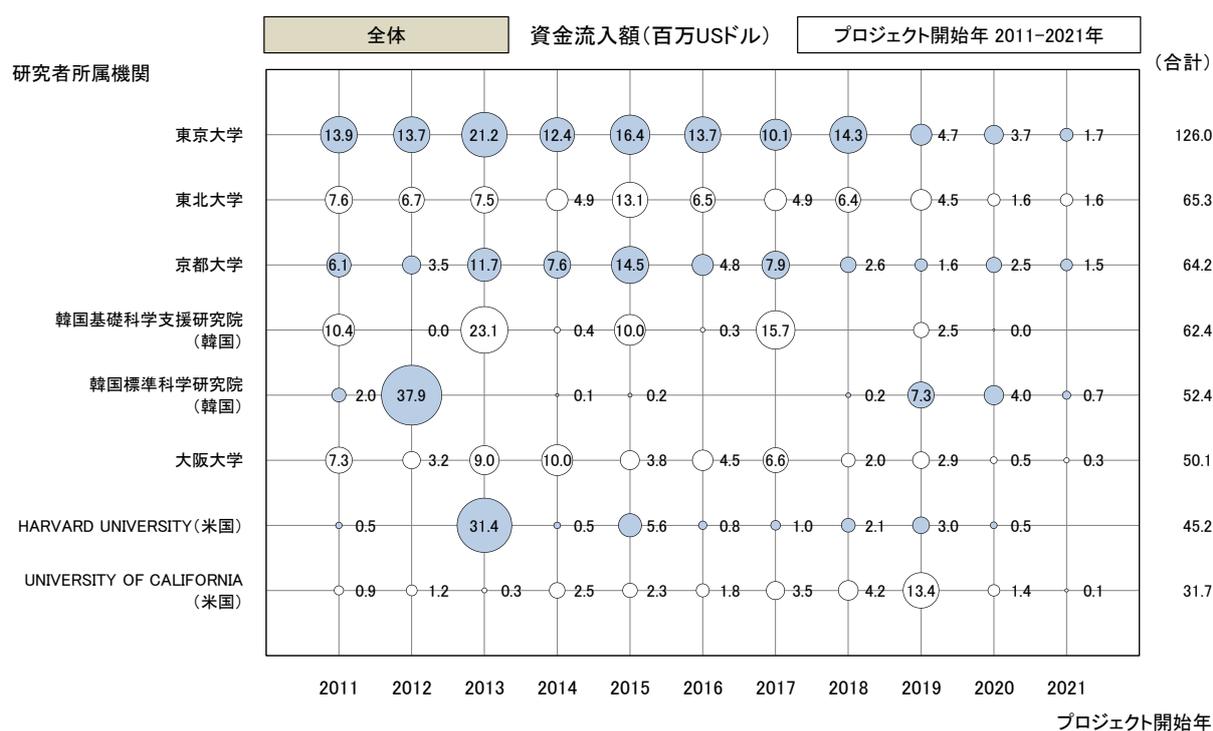
第3節 研究者所属機関別資金流入額推移（資金流入額上位機関）

量子計測・センシング技術の研究者所属機関別資金流入額推移（資金流入額上位機関）を示す。研究者所属機関別の動向を見ることができる。

1. 全体

量子計測・センシング技術全体の研究者所属機関別資金流入額推移を図 6-2-3(1)に示す。東京大学が最も多く、東北大学、京都大学と続いている。

図 6-2-3(1) 研究者所属機関別資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

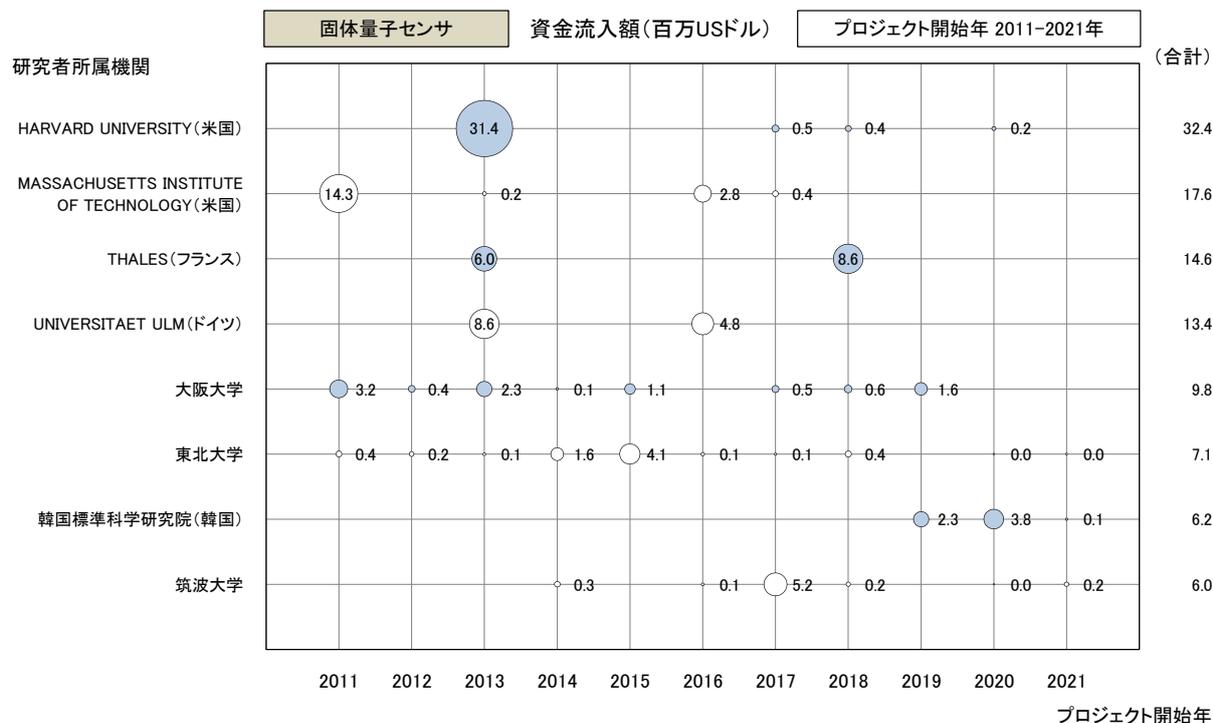
注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

2. 固体量子センサ

固体量子センサにおける研究者所属機関別資金流入額推移を図 6-2-3(2)に示す。Harvard University (米国) が多くその中で 2013 年が多い。次いで Massachusetts Institute of Technology (米国)、Thales (フランス) と続いている。

図 6-2-3(2) 固体量子センサにおける研究者所属機関別資金流入額推移 (プロジェクト開始年：2011-2021 年)



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

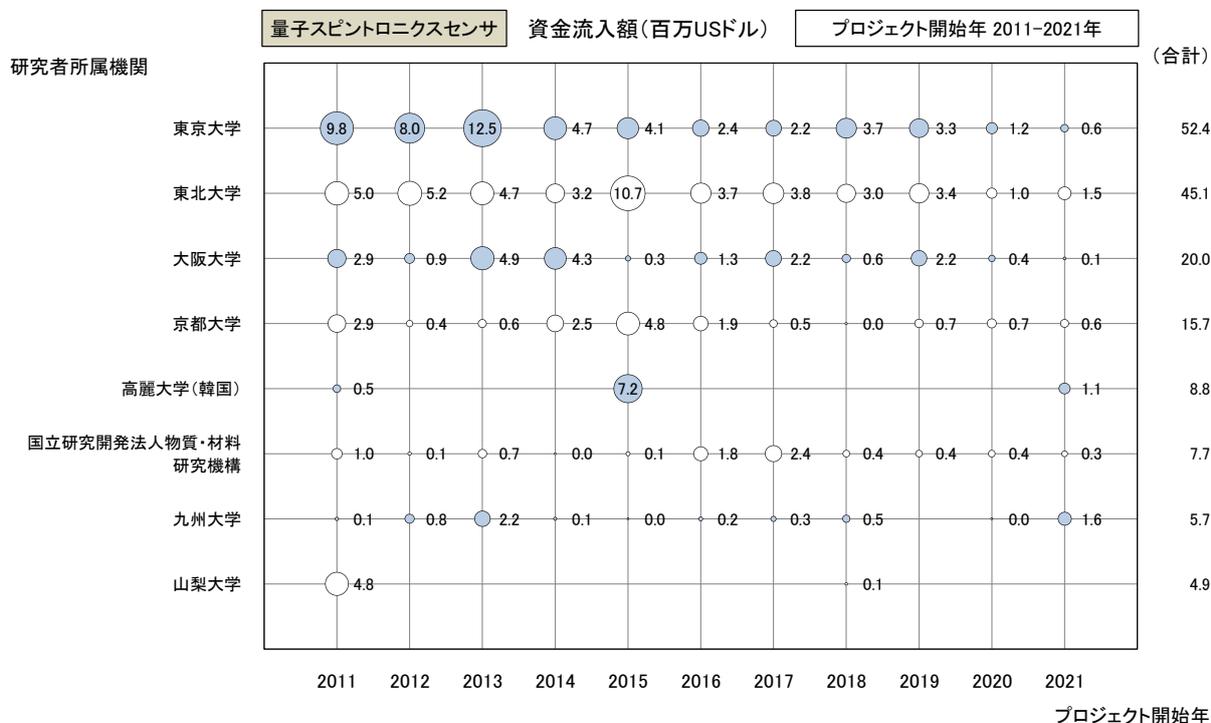
注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

3. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサにおける研究者所属機関別資金流入額推移を図 6-2-3(3)に示す。東京大学が多く 2011～2013 年にかけて多い。次いで東北大学、大阪大学が多い。

図 6-2-3(3) 量子スピントロニクスセンサにおける研究者所属機関別資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

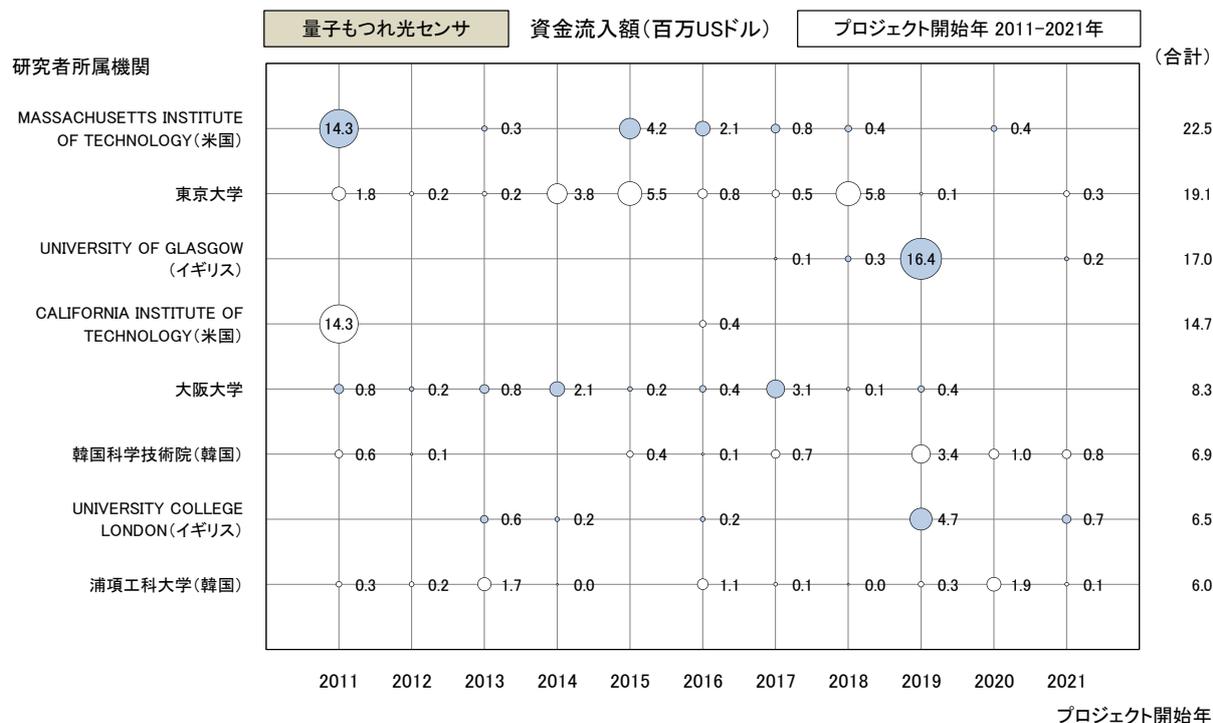


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

4. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサにおける研究者所属機関別資金流入額推移を図 6-2-3(4)に示す。Massachusetts Institute of Technology (米国) が多くその中で2011年が多い。次いで東京大学、University of Glasgow (イギリス) と続いている。

図 6-2-3(4) 量子もつれ光センサにおける研究者所属機関別資金流入額推移 (プロジェクト開始年: 2011-2021年)

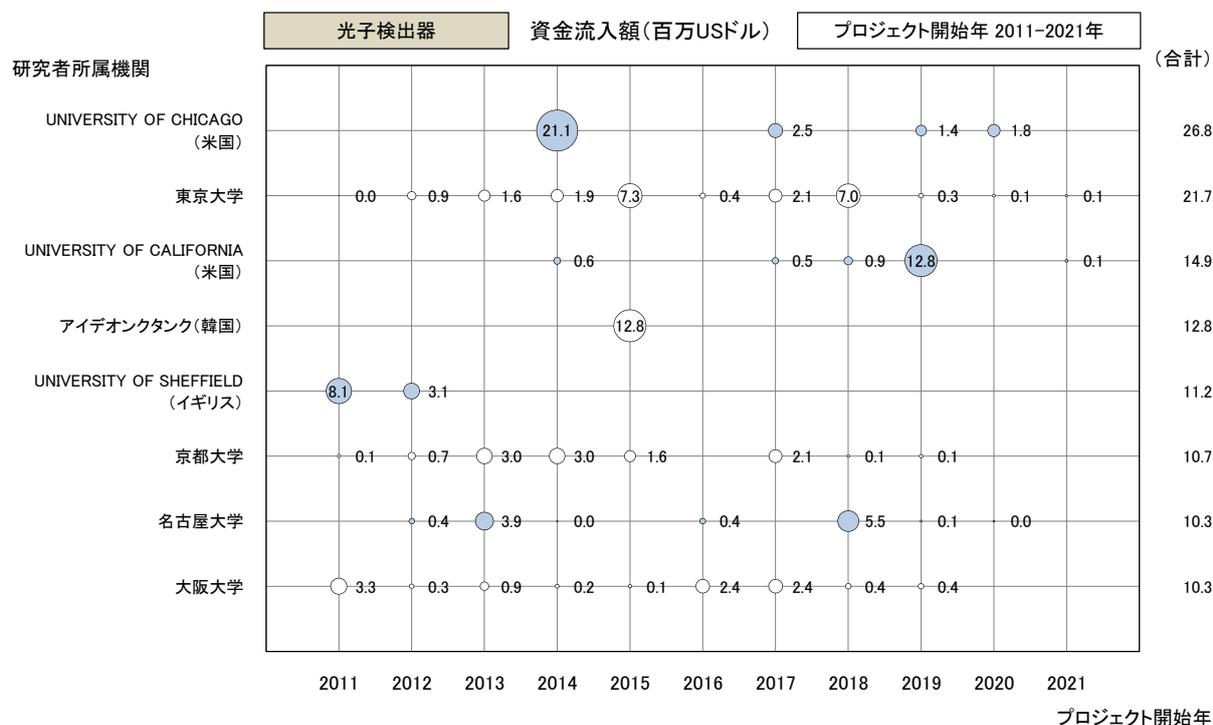


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

5. 光子検出器

光子検出器における研究者所属機関別資金流入額推移を図 6-2-3(5)に示す。University of Chicago (米国) が多くその中で 2014 年が多い。次いで東京大学、University of California (米国) と続いている。

図 6-2-3(5) 光子検出器における研究者所属機関別資金流入額推移 (プロジェクト開始年：2011-2021年)



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

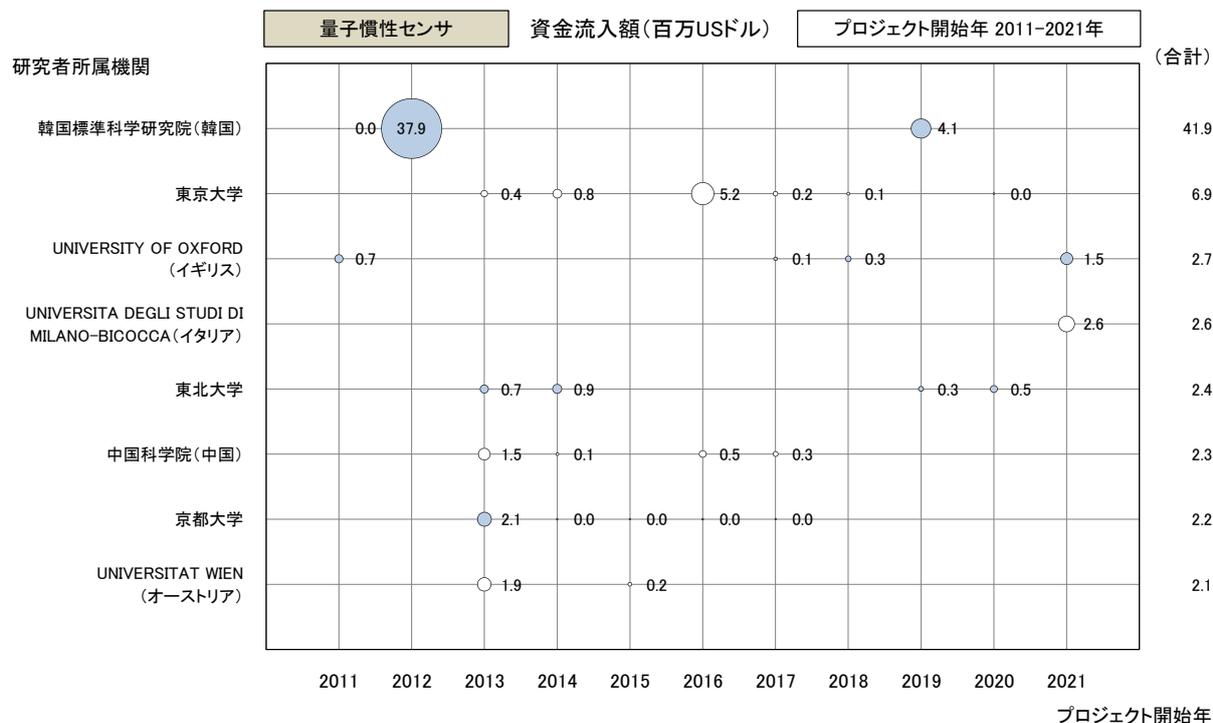
注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

6. 量子慣性センサ

量子慣性センサにおける研究者所属機関別資金流入額推移を図 6-2-3(6)に示す。韓国標準科学研究院（韓国）が多くその中で 2012 年が多い。次いで東京大学、University of Oxford（イギリス）と続いている。

図 6-2-3(6) 量子慣性センサにおける研究者所属機関別資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021 年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

7. 光格子時計

光格子時計における研究者所属機関別資金流入額推移を図 6-2-3(7)に示す。韓国標準科学研究院（韓国）が多くその中で2012年が多い。次いでTechnische Universitaet Wien（オーストリア）が続いている。

図 6-2-3(7) 光格子時計における研究者所属機関別資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

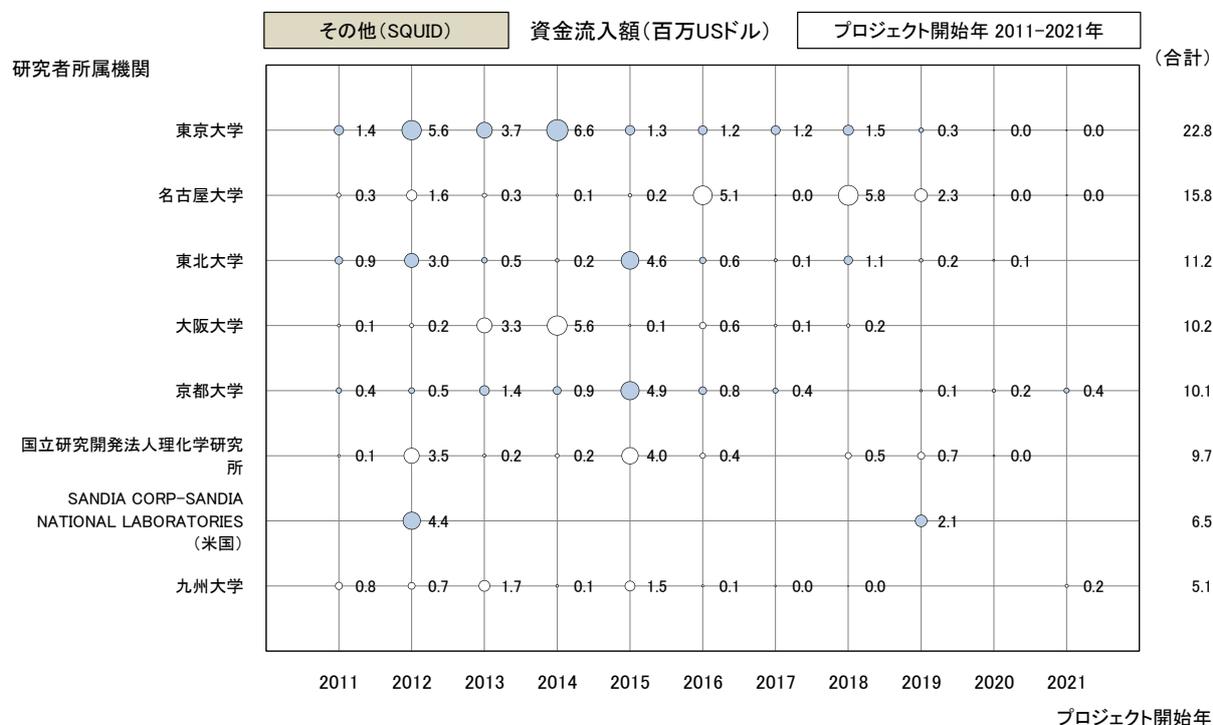
注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

8. その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID））

その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID））における研究者所属機関別資金流入額推移を
図 6-2-4(8)に示す。東京大学が多く、次いで名古屋大学、東北大学と続いている。

図 6-2-3(8) その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID））における研究者所属機関別資金流入額推移
（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

第4節 研究者所属機関別資金流入額上位ランキング

研究者所属機関別資金流入額上位ランキング及び技術区分別の研究者所属機関別資金流入額上位ランキングを、それぞれ表 6-2-1(a)及び(b)に示す。資金流入額上位の研究機関を見ることができる。

1. 全体

上位 20 位内に日本の研究機関が 9 者、米国の研究機関が 5 者、ヨーロッパの研究機関が 3 者入っている。

表 6-2-1(a) 研究者所属機関別資金流入額上位ランキング (プロジェクト開始年：2011-2021 年)

順位	研究者所属機関(国籍)	資金流入額 (百万 USドル)
1	東京大学	125.973
2	東北大学	65.345
3	京都大学	64.170
4	韓国基礎科学支援研究院(韓国)	62.380
5	韓国標準科学研究院(韓国)	52.407
6	大阪大学	50.063
7	HARVARD UNIVERSITY(米国)	45.195
8	UNIVERSITY OF CALIFORNIA(米国)	31.651
9	MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY(米国)	30.755
10	名古屋大学	30.226
11	UNIVERSITY OF CHICAGO(米国)	27.474
12	国立研究開発法人理化学研究所	27.454
13	九州大学	25.778
14	UNIVERSITY OF CALIFORNIA(米国)	24.957
15	中国科学院(中国)	23.953
16	北海道大学	22.285
17	東京工業大学	21.397
18	UNIVERSITY OF GLASGOW(イギリス)	21.343
19	UNIVERSITAET ULM(ドイツ)	21.110
20	UNIVERSITY OF CAMBRIDGE(イギリス)	20.318

2. 固体量子センサ

上位 10 位内に日本の研究機関が 5 者、米国の研究機関が 2 者、欧州の研究機関が 2 者入っている。

表 6-2-1(b) 各技術区分における研究者所属機関別資金流入額上位ランキング (プロジェクト開始年: 2011-2021 年)

<固体量子センサ>

順位	研究者所属機関(国籍)	資金流入額 (百万 US ドル)
1	HARVARD UNIVERSITY (米国)	32.41
2	MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (米国)	17.64
3	THALES (フランス)	14.60
4	UNIVERSITAET ULM (ドイツ)	13.39
5	大阪大学	9.81
6	東北大学	7.05
7	韓国標準科学研究院 (韓国)	6.22
8	筑波大学	6.04
9	京都大学	5.89
10	大阪府立大学	3.76

3. 量子スピントロニクスセンサ

上位 10 位内に日本の研究機関が 9 者入っている。

<量子スピントロニクスセンサ>

順位	研究者所属機関(国籍)	資金流入額 (百万 US ドル)
1	東京大学	52.35
2	東北大学	45.06
3	大阪大学	20.02
4	京都大学	15.71
5	高麗大学 (韓国)	8.76
6	国立研究開発法人物質・材料研究機構	7.74
7	九州大学	5.67
8	山梨大学	4.90
9	北海道大学	4.80
10	国立研究開発法人理化学研究所	4.72

4. 量子もつれ光センサ

上位 10 位内に日本の研究機関が 3 者、韓国の研究機関が 3 者、米国の研究機関が 2 者、欧州の研究機関が 2 者入っている。

<量子もつれ光センサ>

順位	研究者所属機関(国籍)	資金流入額 (百万 USドル)
1	MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY(米国)	22.50
2	東京大学	19.07
3	UNIVERSITY OF GLASGOW(イギリス)	16.99
4	CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY(米国)	14.68
5	大阪大学	8.27
6	韓国科学技術院(韓国)	6.93
7	UNIVERSITY COLLEGE LONDON(イギリス)	6.47
8	浦項工科大学(韓国)	5.96
9	ソウル大学(韓国)	5.81
10	京都大学	5.51

5. 光子検出器

上位 10 位内に日本の研究機関が 4 者、米国の研究機関が 3 者、欧州の研究機関が 2 者入っている。

<光子検出器>

順位	研究者所属機関(国籍)	資金流入額 (百万 USドル)
1	UNIVERSITY OF CHICAGO(米国)	26.84
2	東京大学	21.70
3	UNIVERSITY OF CALIFORNIA(米国)	14.94
4	アイデオクタンク(株)(韓国)	12.83
5	UNIVERSITY OF SHEFFIELD(イギリス)	11.20
6	京都大学	10.69
7	名古屋大学	10.30
8	大阪大学	10.25
9	CSEM CENTRE SUISSE DELECTRONIQUE ET DE MICROTECHNIQUE SA - RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT(スイス)	8.97
10	STANFORD UNIVERSITY(米国)	8.93

6. 量子慣性センサ

上位 10 位内に欧州の研究機関が 4 者、日本の研究機関が 3 者入っている。

<量子慣性センサ>

順位	研究者所属機関(国籍)	資金流入額 (百万 USドル)
1	韓国標準科学研究院(韓国)	41.93
2	東京大学	6.85
3	UNIVERSITY OF OXFORD(イギリス)	2.71
4	UNIVERSITA DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA(イタリア)	2.62
5	東北大学	2.38
6	中国科学院(中国)	2.32
7	京都大学	2.19
8	UNIVERSITAT WIEN(オーストリア)	2.07
9	UNIVERSITY OF MINNESOTA(米国)	1.80
10	UNIVERSITA DEGLI STUDI DI FIRENZE(イタリア)	1.76

7. 光格子時計

上位 10 位内に欧州の研究機関が 4 者、日本の研究機関が 3 者、米国の研究機関が 2 者入っている。

<光格子時計>

順位	研究者所属機関(国籍)	資金流入額 (百万 USドル)
1	韓国標準科学研究院(韓国)	38.28
2	TECHNISCHE UNIVERSITAT WIEN(オーストリア)	15.00
3	東京大学	8.51
4	分子科学研究所	4.94
5	TELEDYNE UK, LTD(イギリス)	4.42
6	IMPERIAL COLLEGE LONDON(イギリス)	4.29
7	京都大学	3.86
8	CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS) (フランス)	3.82
9	HARVARD UNIVERSITY(米国)	3.79
10	UNIVERSITY OF COLORADO(米国)	3.61

8. その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID））
 上位 10 位内に日本の研究機関が 9 者入っている。

<その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID））>

順位	研究者所属機関(国籍)	資金流入額 (百万 USドル)
1	東京大学	22.84
2	名古屋大学	15.76
3	東北大学	11.19
4	大阪大学	10.21
5	京都大学	10.07
6	国立研究開発法人理化学研究所	9.72
7	SANDIA CORP-SANDIA NATIONAL LABORATORIES (米国)	6.49
8	九州大学	5.06
9	東京工業大学	5.00
10	国立研究開発法人物質・材料研究機構	4.39

第3章 技術区分別動向調査

第1節 技術区分

第1章第2節4. 調査対象母集団の抽出で使用した検索式を基に、特許と論文の技術区分と整合を取り、以下の7区分のそれぞれの技術区分を選定した。なおその他については、件数の多いSQUIDについて技術区分を選定した。

表 6-3-1 量子計測・センシングの7区分の技術区分（グラント）

<固体量子センサ>

区分1	区分2	英文
原理・要素技術	NV センタ	NV cent vacancy cent
原理・要素技術	ODMR	ODMR
構造・材料	ダイヤモンド	diamond
課題	スピン緩和時間、コヒーレント時間	spin coherent time spin relaxation time
課題	感度	sensitivity
応用用途	磁気、磁場センサ	magnet sensor magnet field sensor
応用用途	電流センサ	current sensor
応用用途	温度センサ	temperature sensor
応用用途	NMR、MRI	NMR MRI

<量子スピントロニクスセンサ>

[トンネル磁気抵抗素子 TMR]

区分1	区分2	英文
原理・要素技術	MTJ	MTJ magnetic tunnel junction TMR tunnel magnetoresist
構造・材料	電極、積層	stack electrode
課題	感度	sensitivity
課題	小型化、分解能	small size resolution
課題	ダイナミックレンジ	dynamic range
応用用途	磁気センサ	magnet sensor
応用用途	電流センサ	current sensor

[熱流素子]

区分1	区分2	英文
原理・要素技術	スピンゼーベック効果	spin seebeck effect
原理・要素技術	スピン流	spin flow
応用用途	環境発電、エネルギーハーベスト	energy harvest

<量子もつれ光センサ>

区分 1	区分 2	英文
原理・要素技術	量子もつれ、もつれ光子	quantum entanglement entangle photon
原理・要素技術	非線形光学素子	non-line optical element
原理・要素技術	アイドラー光子	idler photon
課題	感度向上	highsensitivity sensitivity
課題	分解能向上	resolution optical resolution
応用用途	量子 OCT	quantum optical coherence tomography quantum OCT
応用用途	量子レーダ	quantum radar

<光子検出器>

区分 1	区分 2	英文
原理・要素技術	単一光子検出器	single photon detector
原理・要素技術	SNSPD	SNSPD Superconducting Nano Strip Photon Detector Superconducting Nanowire Single Photon Detector
原理・要素技術	超伝導転移端センサ	superconducting transition edge sensor TES
構造・材料	誘電体多層膜	multi dielectric layer film
課題	光吸収効率向上、感度	sensitivity
応用用途	量子通信	quantum communication
応用用途	量子コンピュータ	quantum computer

<量子慣性センサ>

区分 1	区分 2	英文
原理・要素技術	原子干渉計	atom interferomet
原理・要素技術	量子慣性センサ	quantum inertial sensor
原理・要素技術	原子重力計	atomic gravimeter
課題	小型化	downsizing
応用用途	潜水艦、AUV、UUV、ドローン	AUV UUV submarine Autonomous underwater vehicle Unmanned underwater vehicle drone

<光格子時計>

区分 1	区分 2	英文
原理・要素技術	磁気光学トラップ	magneto optical trap
原理・要素技術	光格子時計	optical lattice clock
原理・要素技術	光学トラップ	optical trap
原理・要素技術	光周波数コム	optical frequency comb
原理・要素技術	原子センサ	atomic sensor
原理・要素技術	信号処理	signal processing
課題	光シフト	light shift
課題	レーザー長寿命化	photostable long operational lifetime lifetime
応用用途	時刻同期	time synchronization
応用用途	相対論的測地	relativistic geodesy

<その他技術(超伝導量子干渉素子(SQUID))>

区分 1	区分 2	英文
原理・要素	超伝導量子干渉計	superconducting quantum interference device
原理・要素	ジョセフソン接合	Josephson junction
原理・要素	膜、ビーム	film beam
課題	低コスト化	cost reduction

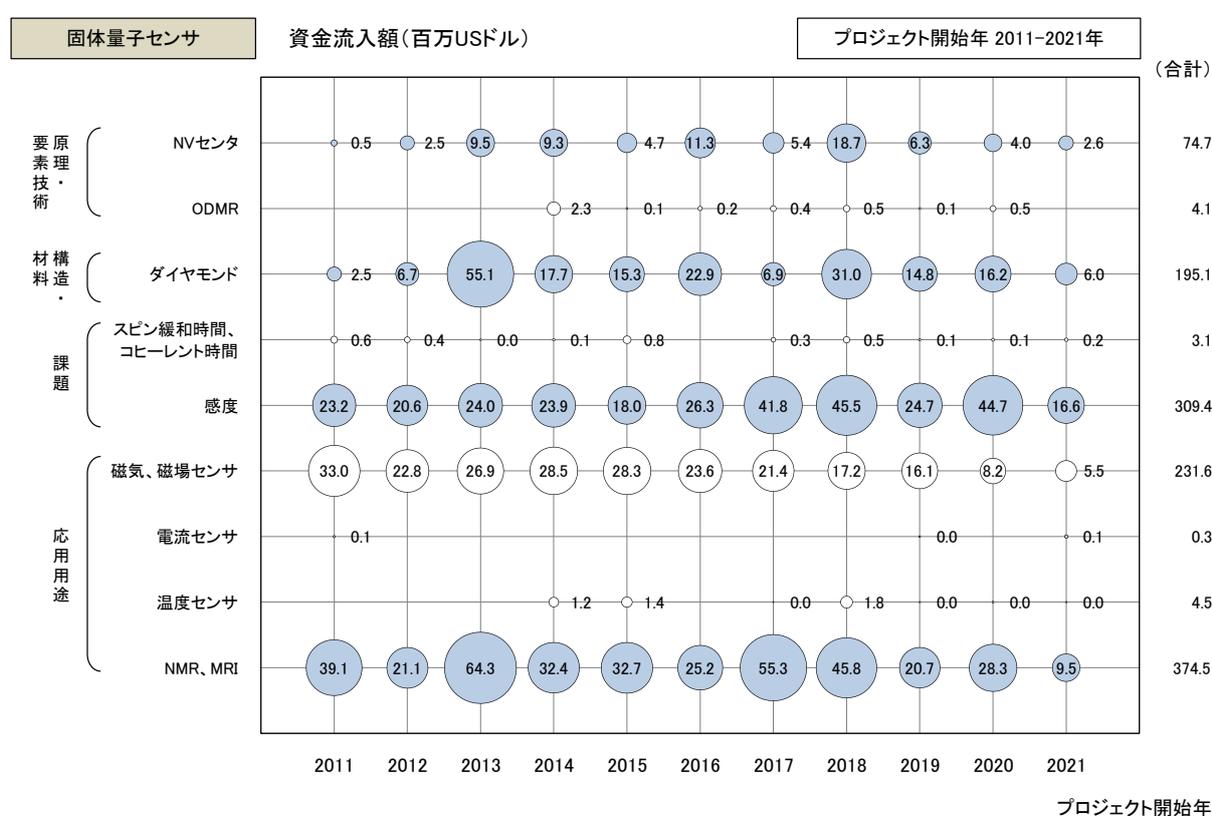
第2節 技術区別資金流入額推移

量子計測・センシング技術の技術区別資金流入額推移を示す。各区分の技術区別流入額推移を見ることができる。

1. 固体量子センサ

固体量子センサにおける技術区別資金流入額推移を図6-3-1(1)に示す。原理・要素技術では、NVセンタは2018年が多い。構造・材料では、ダイヤモンドは2013、2018年が多い。課題では、感度が期間中を通して多い。応用用途では、磁気、磁場センサとNMR、MRIが期間中を通して多い。

図6-3-1(1) 固体量子センサにおける技術区別資金流入額推移(プロジェクト開始年:2011-2021年)



注1) 2021年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注2) 米ドルへの換算レートは、IMF(国際通貨基金)の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年12月の平均値を採用した。ただし、2021年は10月1日～21日の平均値を採用した。

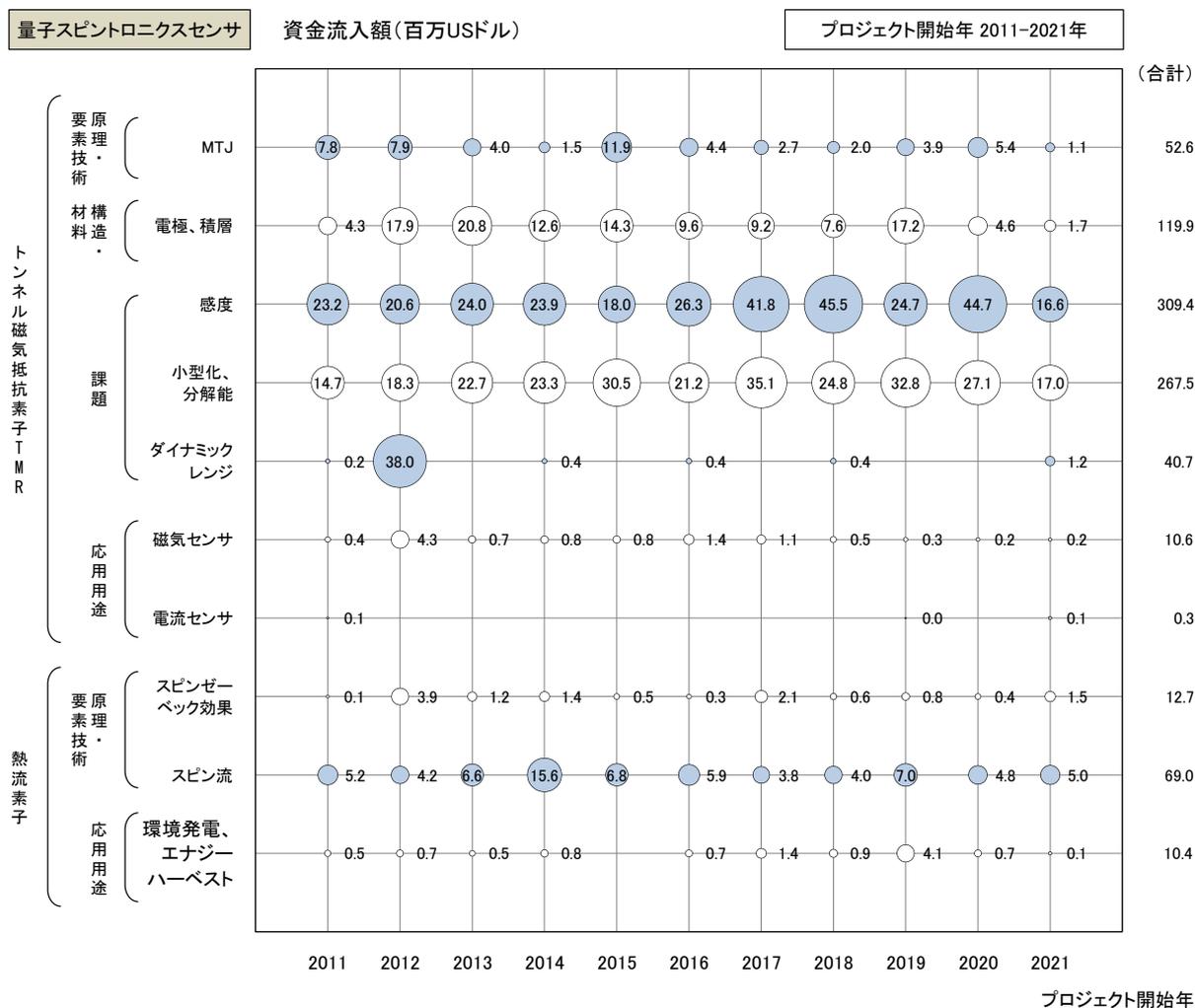
(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサにおける技術区別資金流入額推移を図 6-3-1(2)に示す。

トンネル磁気抵抗素子 TMR では、構造・材料の電極、積層が 2012～2019 年にかけて多い。課題の感度と小型化、分解能が期間中を通して多い。ダイナミックレンジは 2012 年が多い。熱流素子では、原理・要素技術のスピン流は 2014 年が多い。

図 6-3-1(2) 量子スピントロニクスセンサにおける技術区別資金流入額推移 (プロジェクト開始年: 2011-2021 年)



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

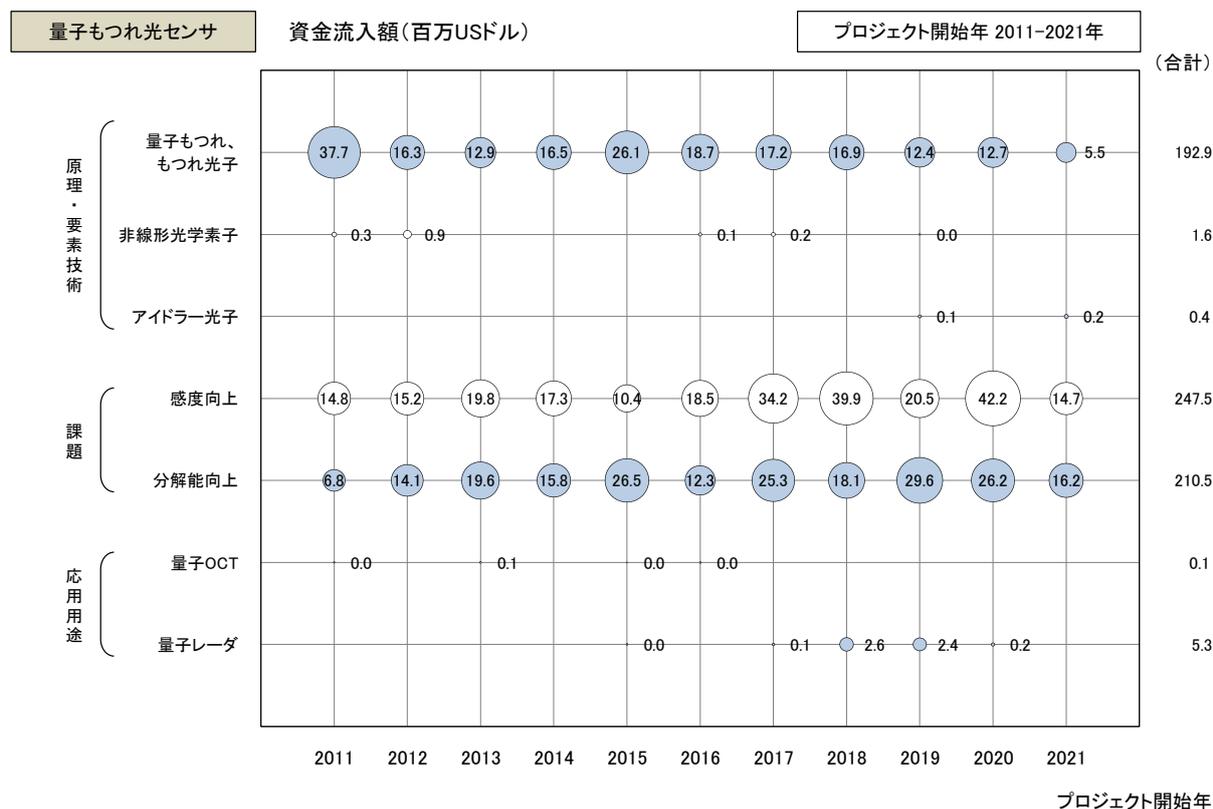
注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

3. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサにおける技術区分別資金流入額推移を図 6-3-1(3)に示す。原理・要素技術では、量子もつれ、もつれ光子が期間を通して多い。課題では、感度向上、分解能向上が期間を通して多い。

図 6-3-1(3) 量子もつれ光センサにおける技術区分別資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021年）

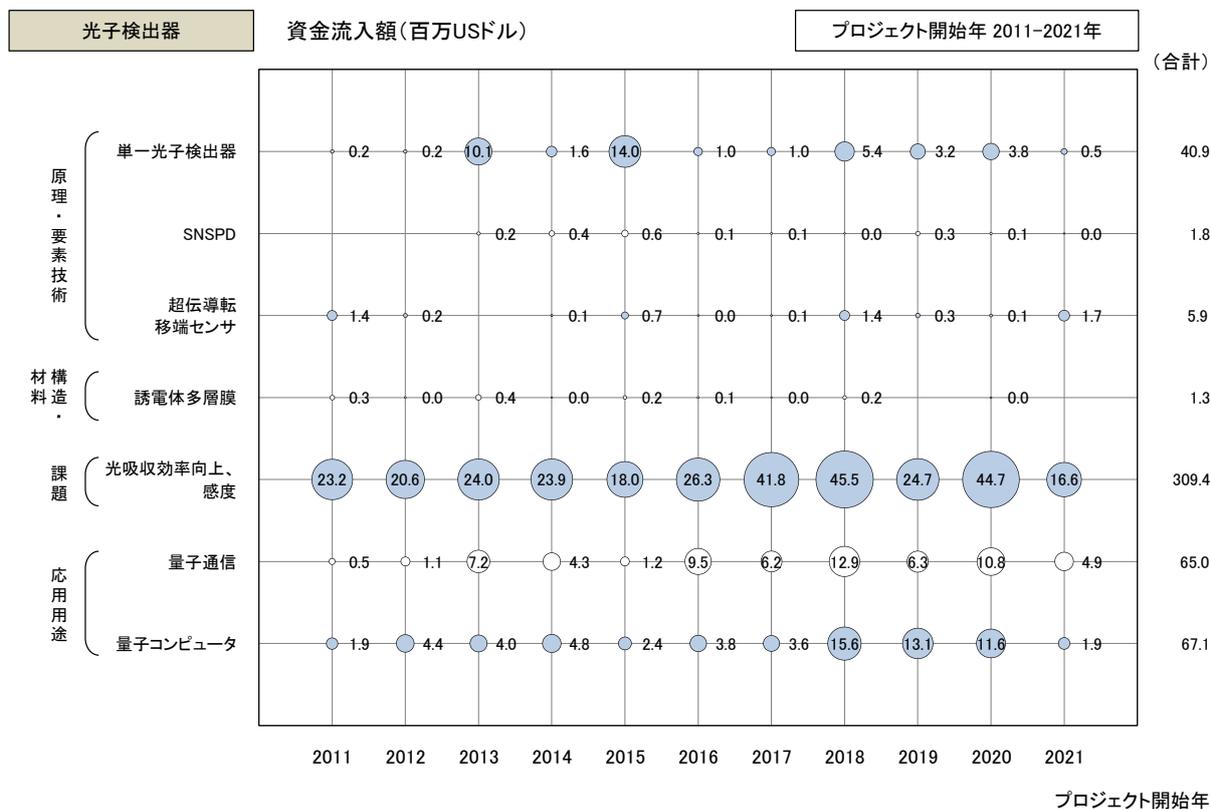


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx

4. 光子検出器

光子検出器における技術区別資金流入額推移を図 6-3-1(4)に示す。原理・要素技術の単一光子検出器は 2013 年と 2015 年が多い。応用用途では、量子通信と量子コンピュータが期間後半に多い。

図 6-3-1(4) 光子検出器における技術区別資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

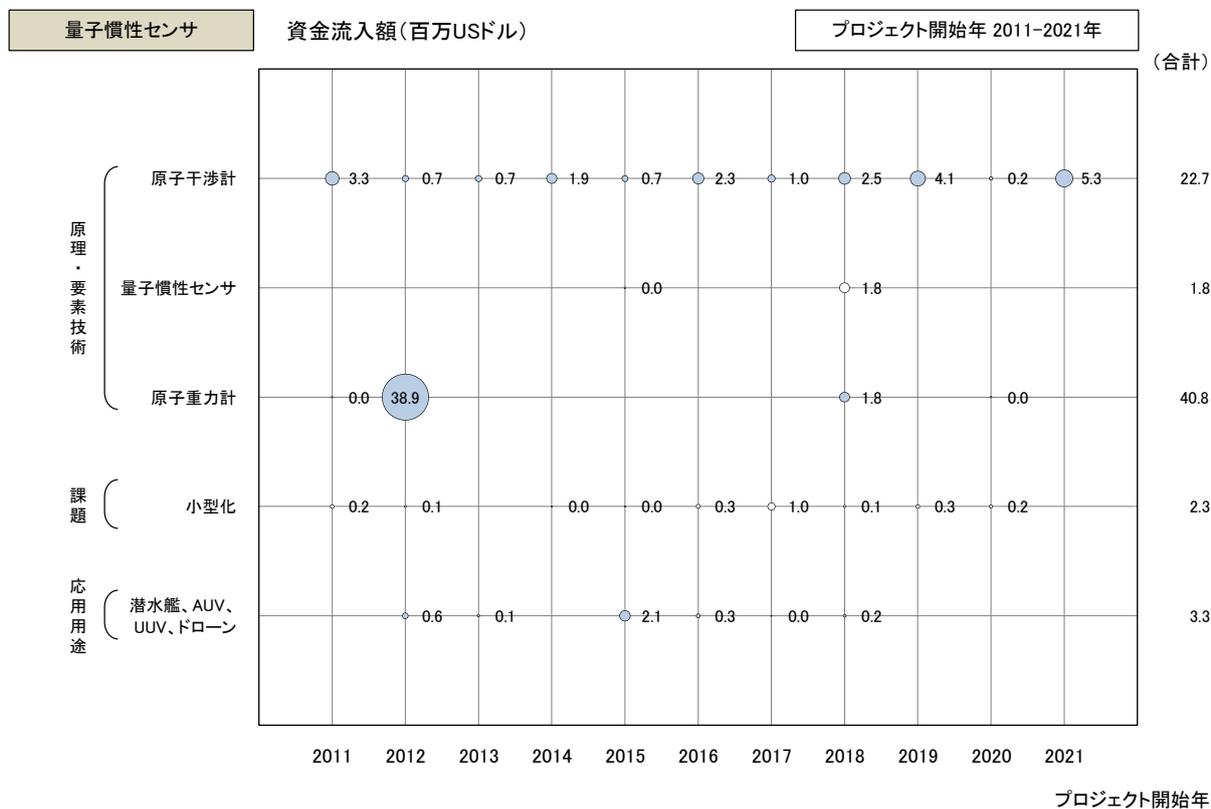


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

5. 量子慣性センサ

量子慣性センサにおける技術区別資金流入額推移を図 6-3-1(5)に示す。原理・要素技術の原子重力計が 2012 年に多い。

図 6-3-1(5) 量子慣性センサにおける技術区別資金流入額推移(プロジェクト開始年:2011-2021年)

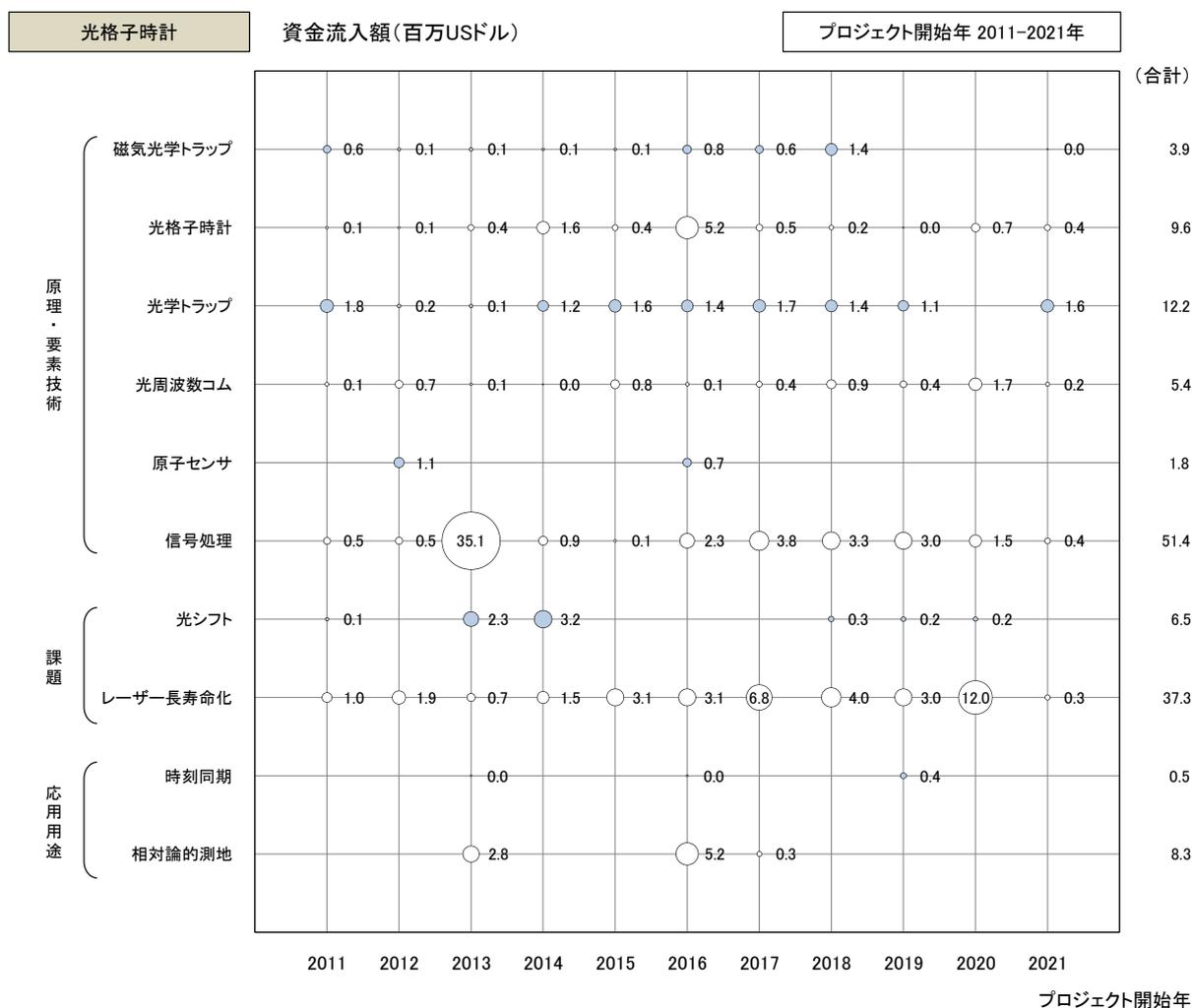


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

6. 光格子時計

光格子時計における技術区別資金流入額推移を図 6-3-1(6)に示す。原理・要素技術の信号処理が 2013 年に多い。

図 6-3-1(6) 光格子時計における技術区別資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021 年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

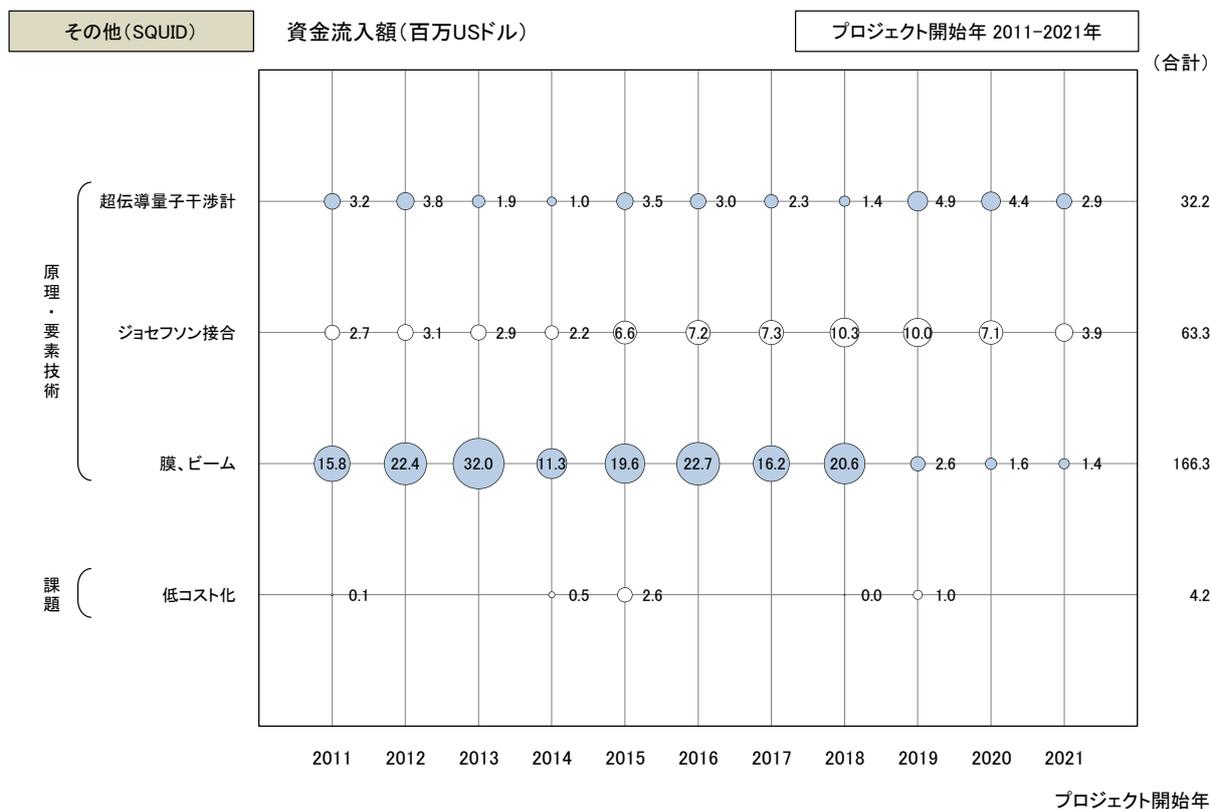
注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

7. その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID））

その他技術における技術区別資金流入額推移を図 6-3-1(7)に示す。原理・要素技術の膜、ビームが 2011～2018 年にかけて多い。

図 6-3-1(7) 超伝導量子干渉素子（SQUID）における技術区別資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021 年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

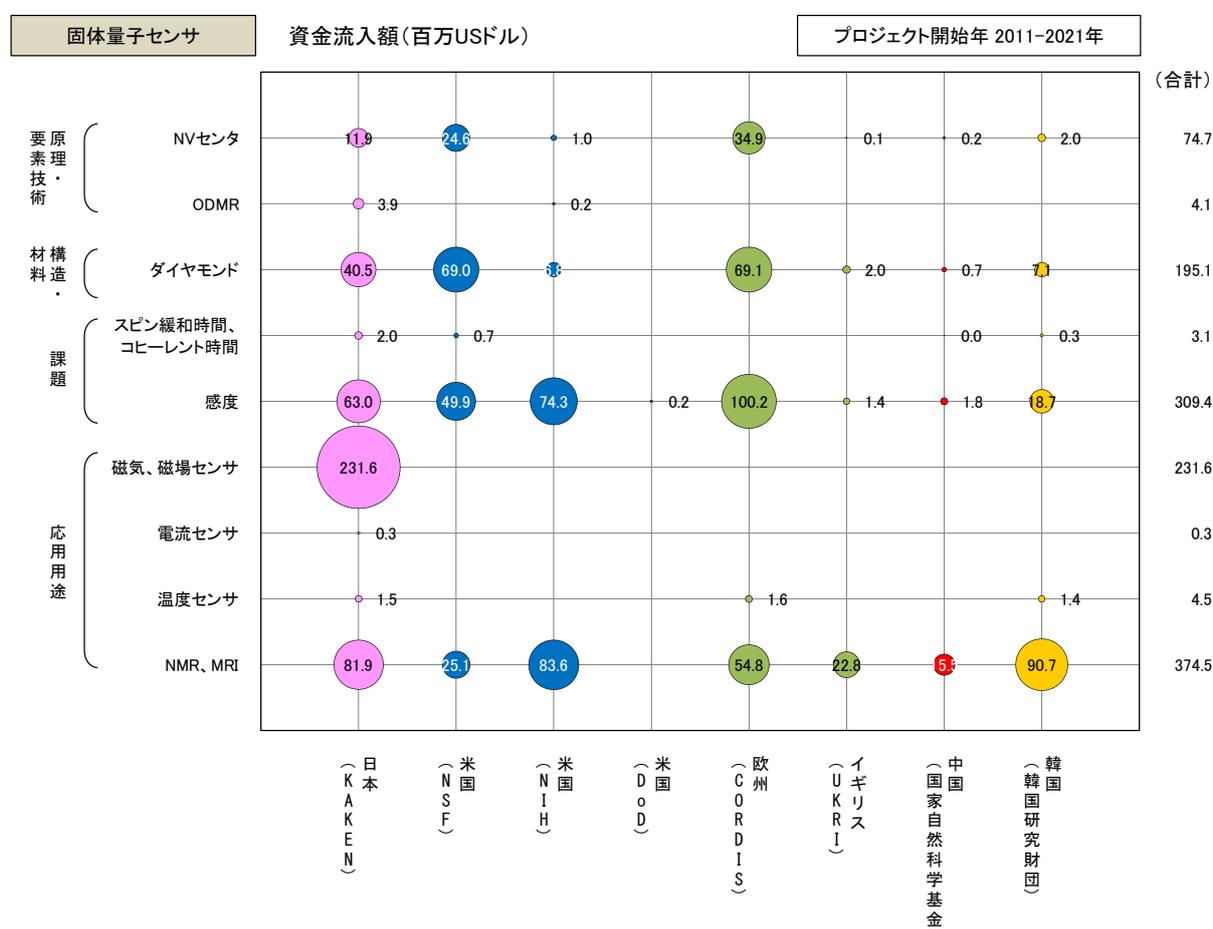
第3節 技術区分別—研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額

量子計測・センシング技術の技術区分別—研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額を示す。各区分の技術区分別の国籍別の動向を見ることができる。

1. 固体量子センサ

固体量子センサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額を図6-3-2(1)に示す。原理・要素技術では、NVセンタで欧州が多く、米国、日本が続いている。構造・材料では、ダイヤモンドで欧州が多く、米国、日本が続いている。課題では、感度で米国が多く、欧州、日本が続いている。応用用途では、磁気、磁場センサで日本が多い。NMR、MRIで米国が多く、韓国、日本、欧州が続いている。

図6-3-2(1) 固体量子センサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年12月の平均値を採用した。ただし、2021年は10月1日～21日の平均値を採用した。
https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx

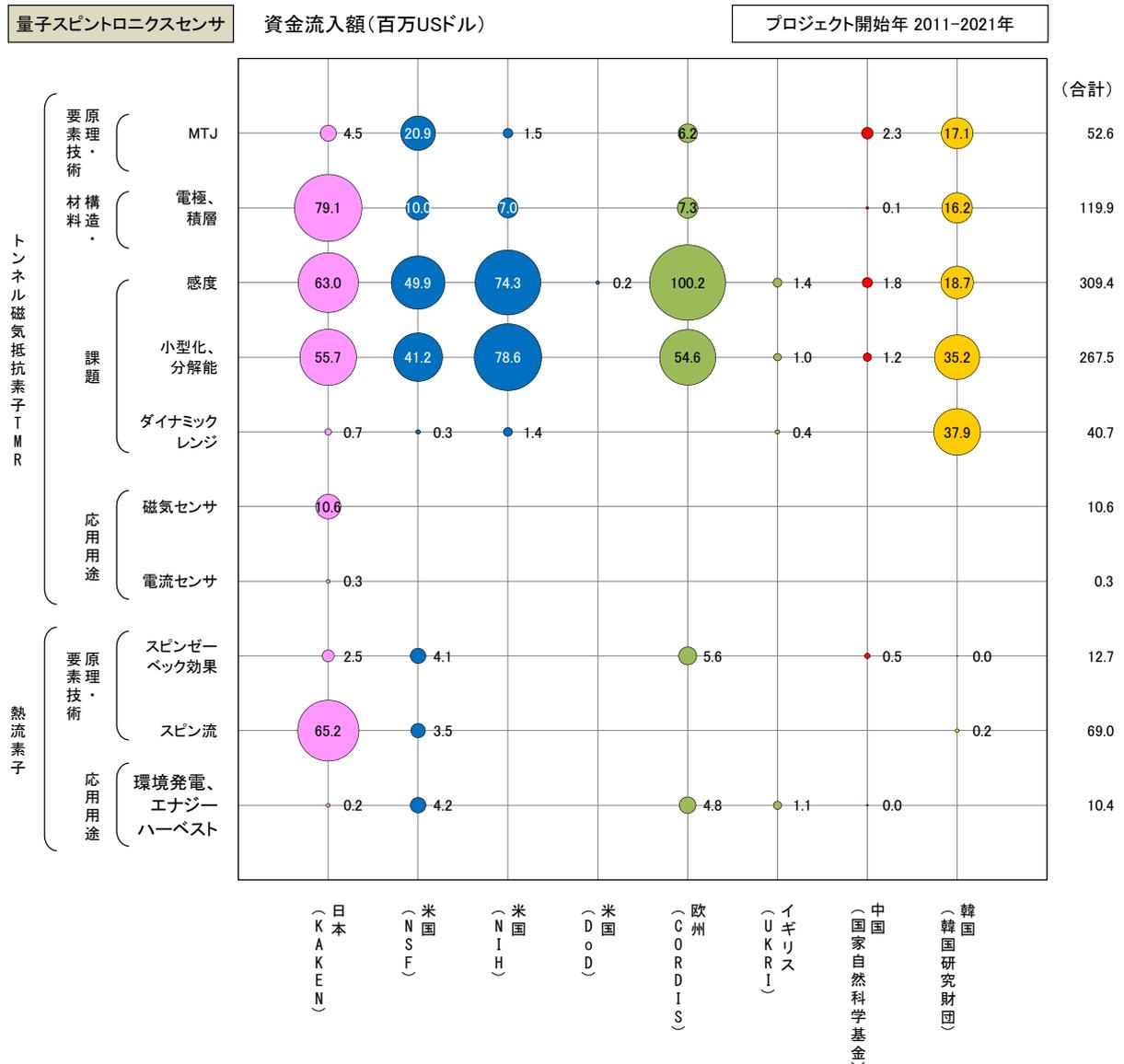
2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額を図 6-3-2(2)に示す。

トンネル磁気抵抗素子 TMR の原理・要素技術の MTJ では、米国が多く次いで韓国が多い。構造・材料の電極、積層では日本が多い。課題では、感度で米国が多く、次いで欧州、日本と続いている。小型化、分解能では、米国が多く、次いで日本、欧州と続いている。応用用途の磁気センサでは日本が多い。

熱流素子の原理・要素技術のスピンドロニクスでは、日本が多い。

図 6-3-2(2) 量子スピントロニクスセンサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

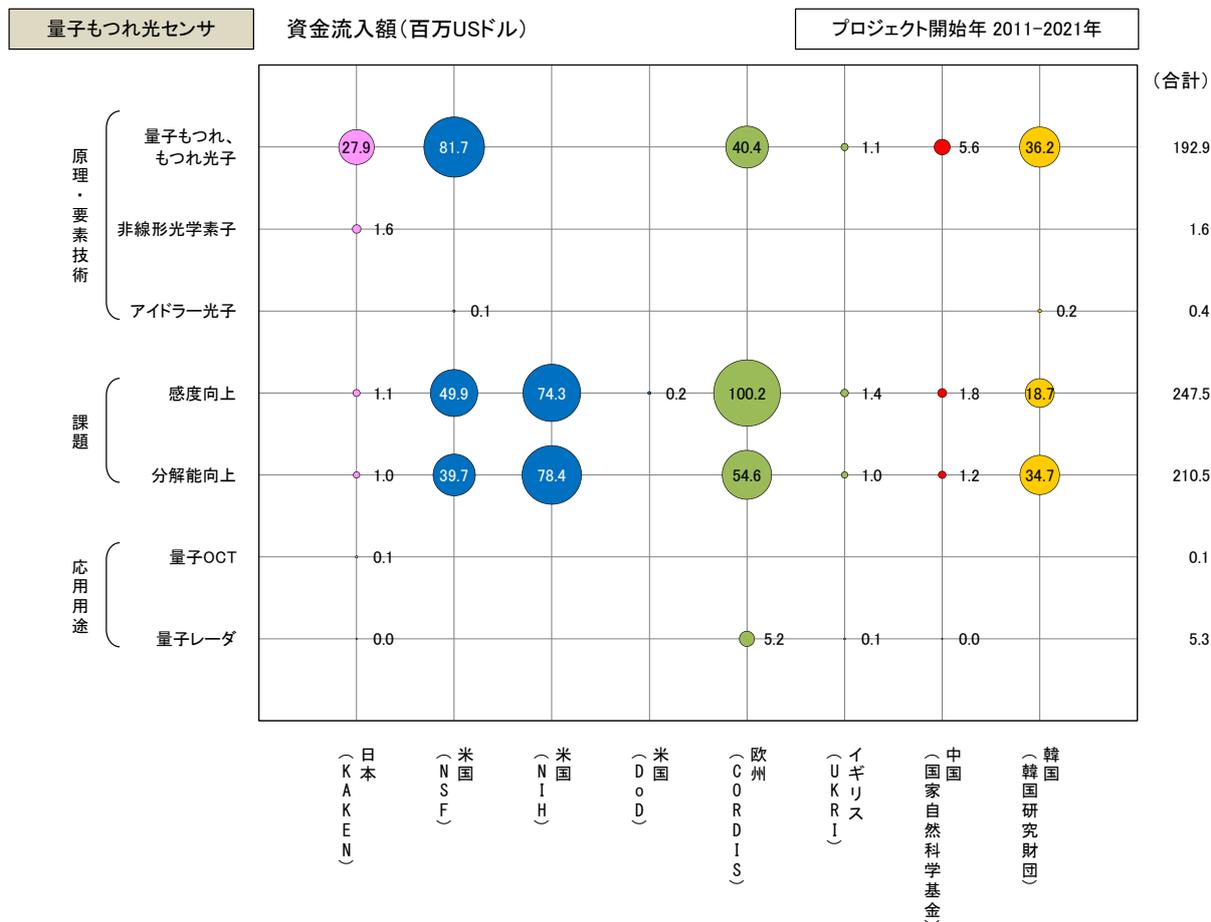


注) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx

3. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額を図 6-3-2(3)に示す。原理・要素技術では、量子もつれ、もつれ光子で米国が多く、欧州、日本と続いている。課題では、感度向上と分解能向上で、米国が多く次いで欧州が多い。

図 6-3-2(3) 量子もつれ光センサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額（プロジェクト開始年：2011-2021年）



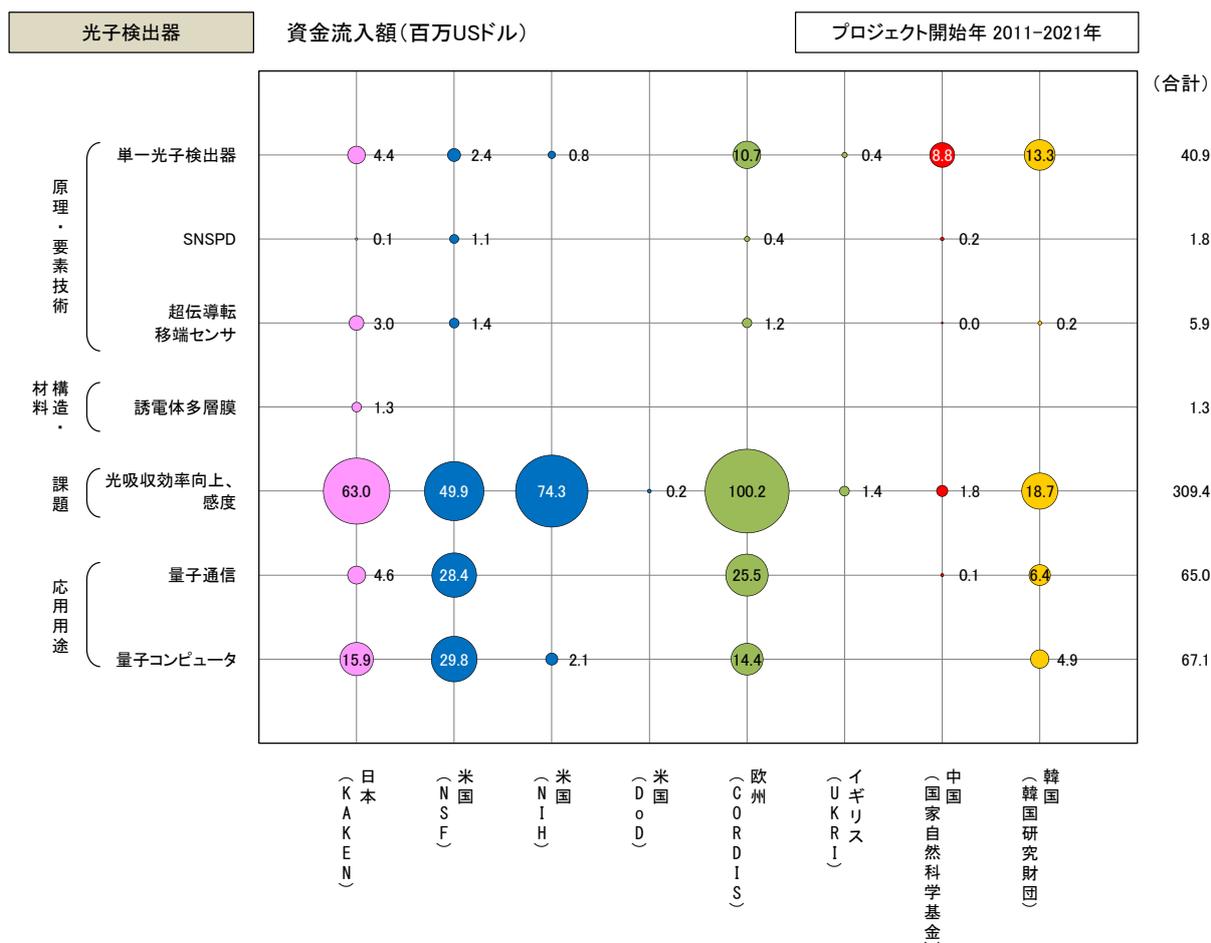
注) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

4. 光子検出器

光子検出器における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額を図 6-3-2(4) に示す。原理・要素技術の単一光子検出器で韓国が多く次いで欧州、中国が多い。課題では、光吸収効率向上、感度で米国が多く、欧州、日本と続いている。応用用途では、量子通信で米国が多く次いで欧州が多い。量子コンピュータは米国が多く次いで日本が多い。

図 6-3-2(4) 光子検出器における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

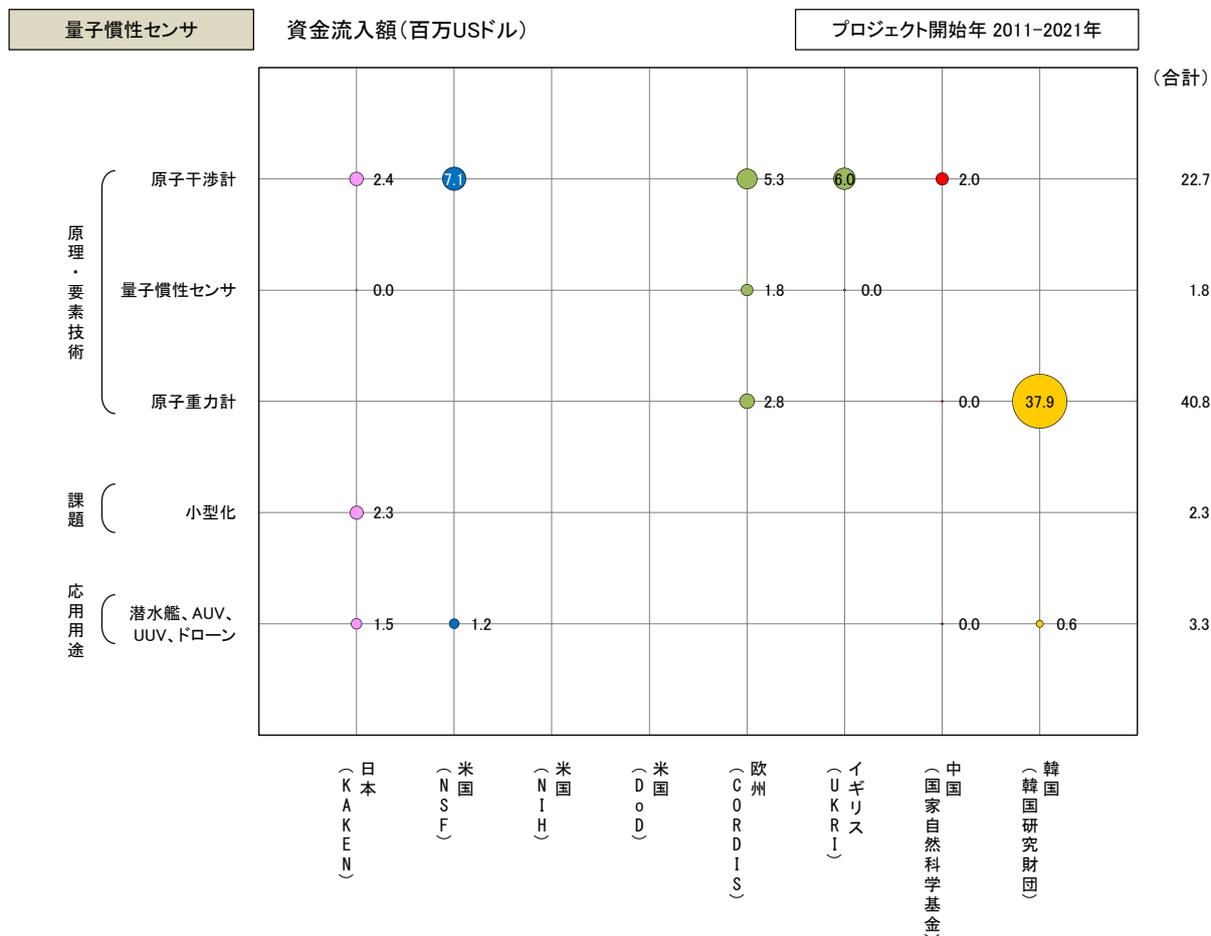


注) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx

5. 量子慣性センサ

量子慣性センサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額を図 6-3-2(5)に示す。原理・要素技術では、原子重力計で韓国が多い。

図 6-3-2(5) 量子慣性センサにおける研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額（プロジェクト開始年：2011-2021年）



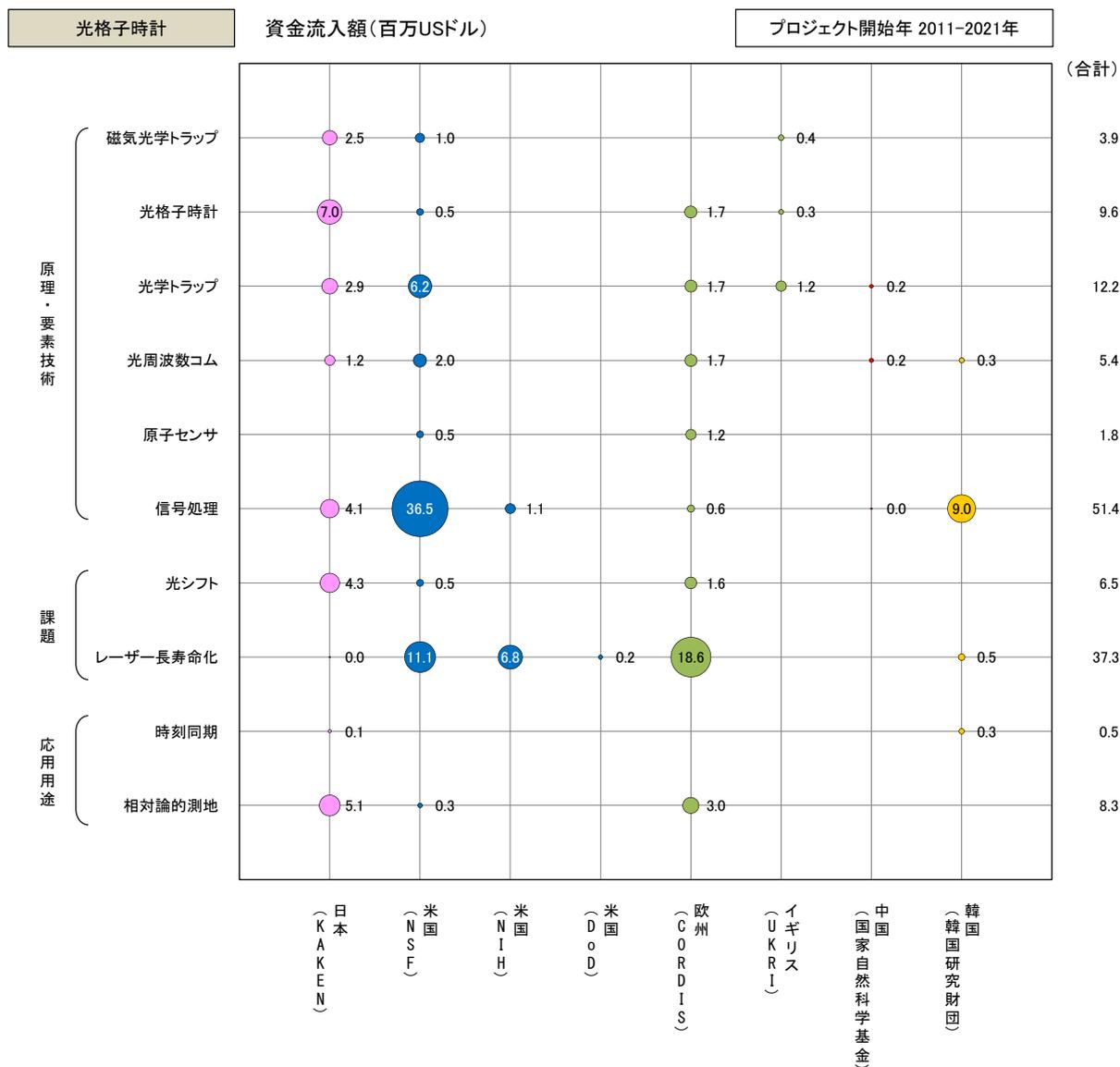
注) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

6. 光格子時計

光格子時計における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額を図 6-3-2(6) に示す。原理・要素技術では、信号処理で米国が多い。課題では、レーザー長寿命化で欧州が多く、次いで米国が多い。応用用途では、相対論的測地で日本が多い。

図 6-3-2(6) 光格子時計における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額（プロジェクト開始年：2011-2021 年）



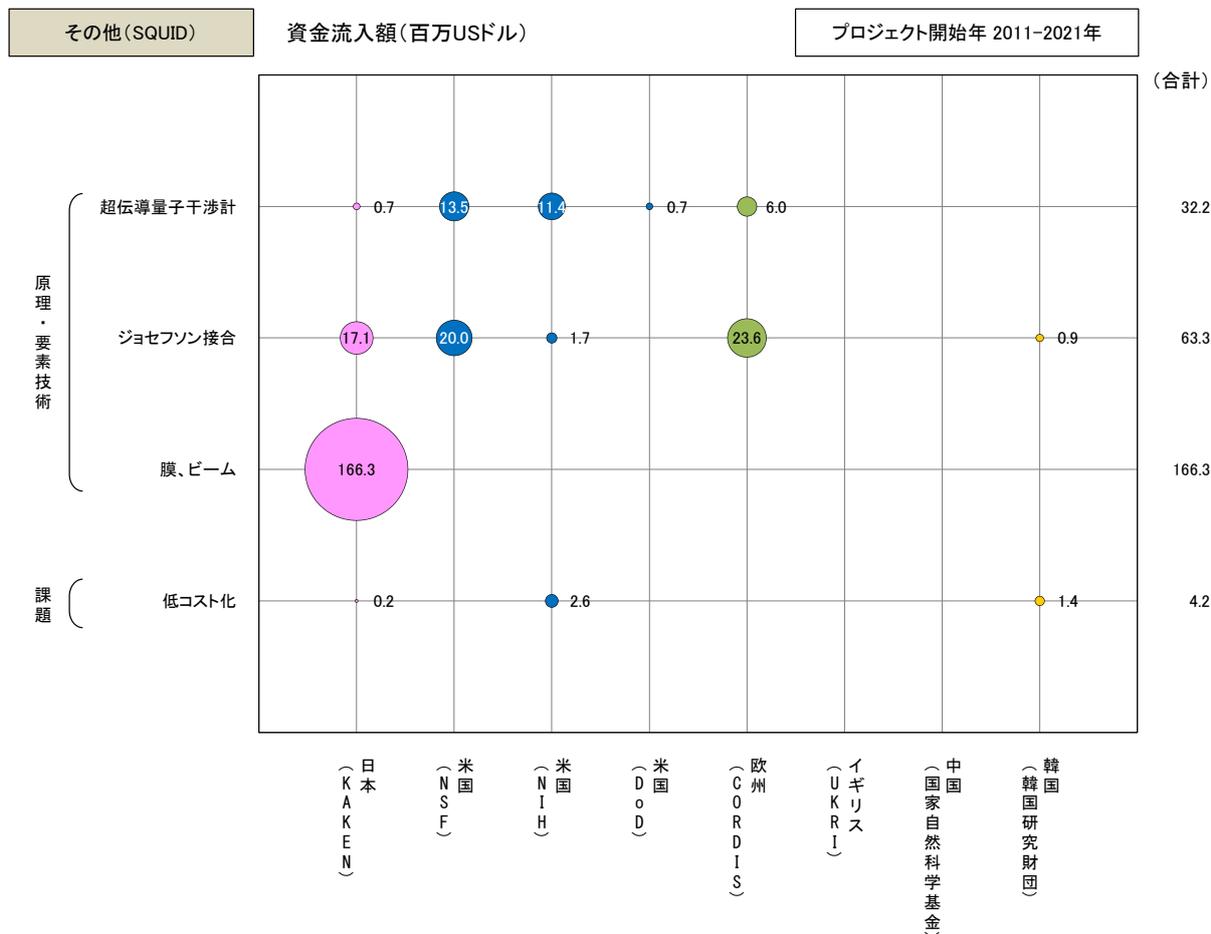
注) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

7. その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID））

その他技術における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額を図 6-3-2(7) に示す。原理・要素技術では、膜、ビームで日本が多い。ジョセフソン接合では、欧州が多く、米国、日本と続いている。

図 6-3-2(7) 超伝導量子干渉素子（SQUID）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

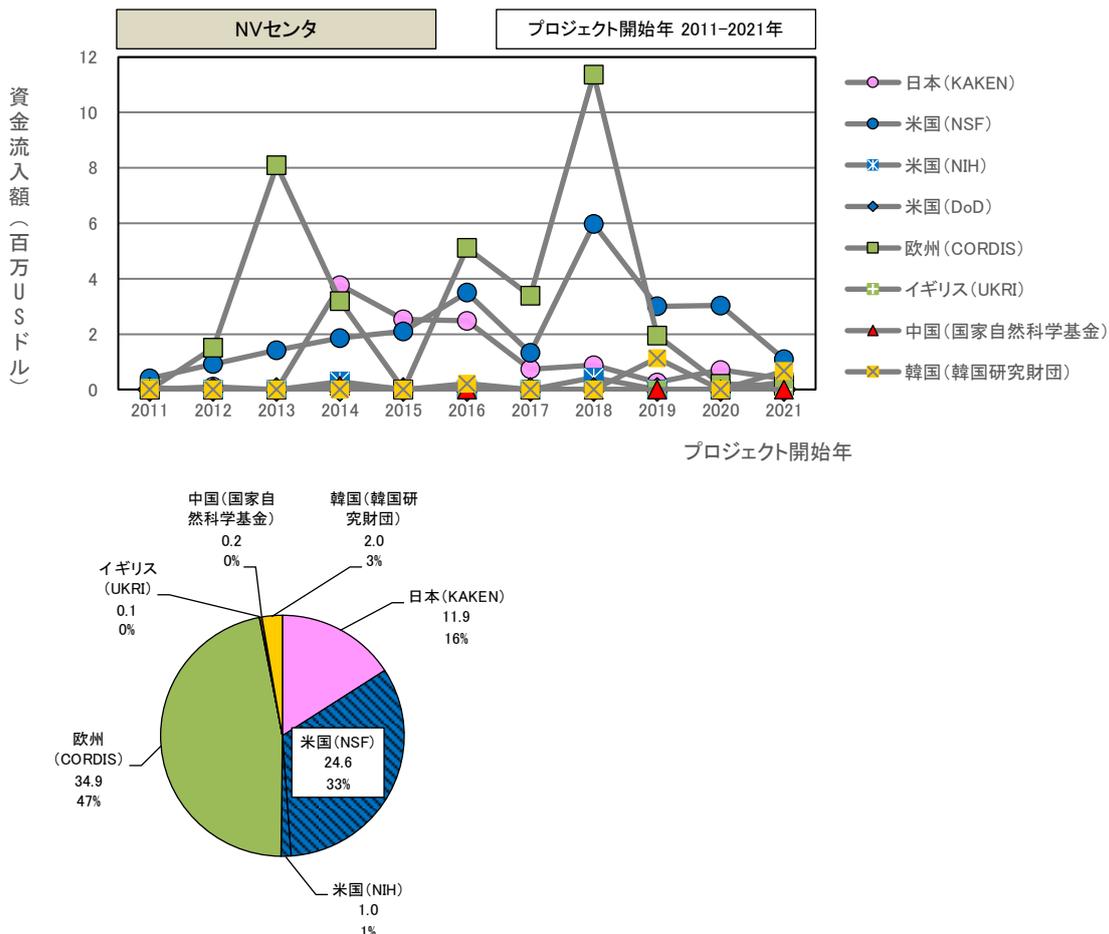
第4節 [技術区分別] 研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率

量子計測・センシング技術の[技術区分別] 研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を示す。各区分の主な技術区分の国籍別の動向を見ることができる。

1. 固体量子センサ

固体量子センサにおける各技術区分の研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図 6-3-3(1)に示す。原理・要素技術の NV センタでは、欧州が 2013 年と 2018 年に多い。構造・材料のダイヤモンドでは、米国の 2013 年が多い。欧州の 2013 年、2018 年が多い。課題の感度では、米国、欧州が多く、期間後半が多い。応用用途の磁気、磁場センサでは日本が多い。NMR、MRI では、米国、韓国、欧州、日本共に多い。

図 6-3-3(1a) NV センタ（固体量子センサ）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

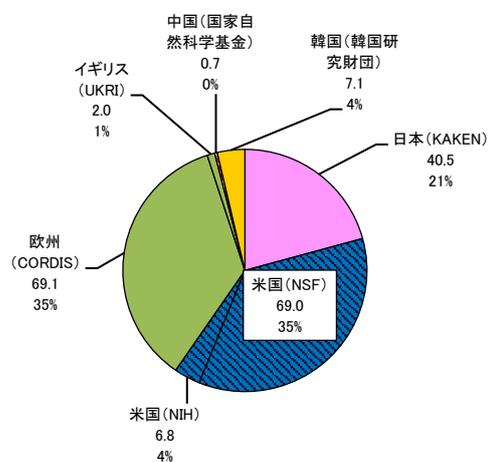
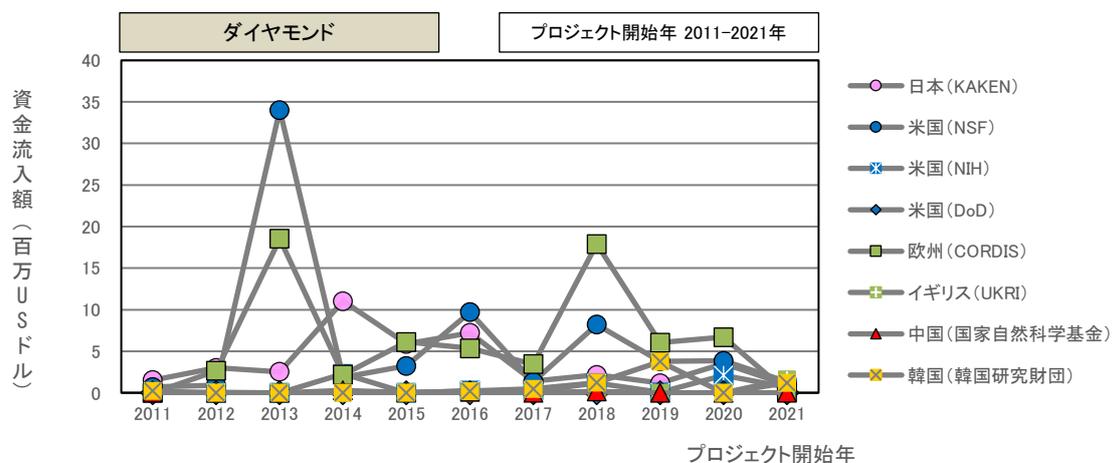


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3(1b) ダイヤモンド（固体量子センサ）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）

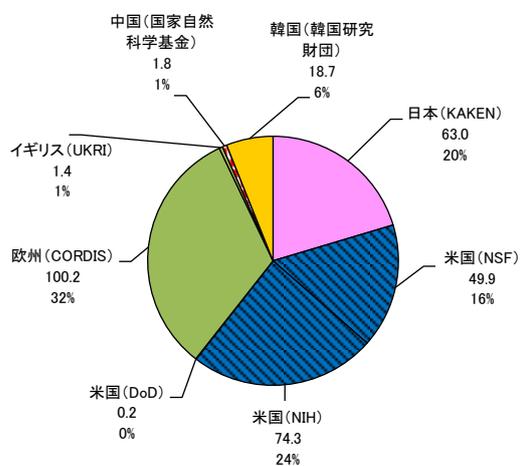
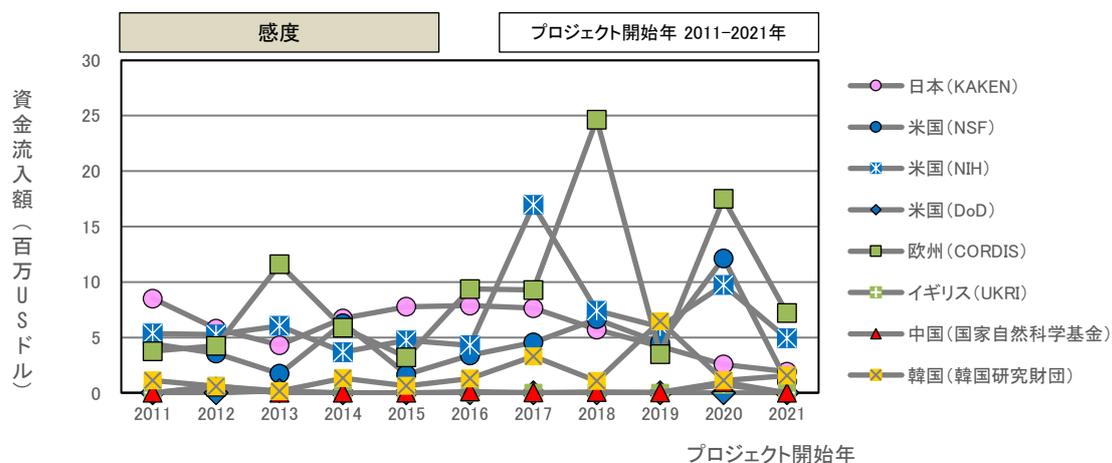


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3(1c) 感度（固体量子センサ）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）

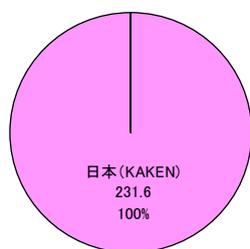
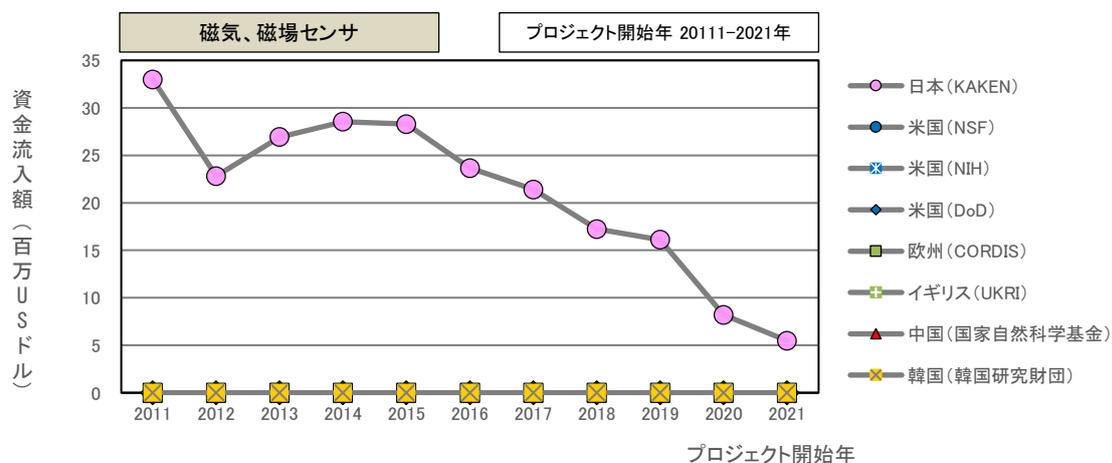


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

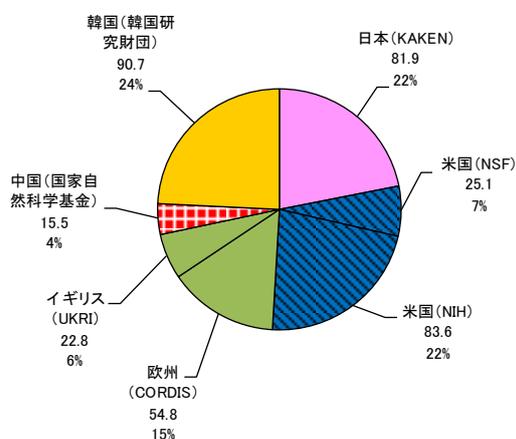
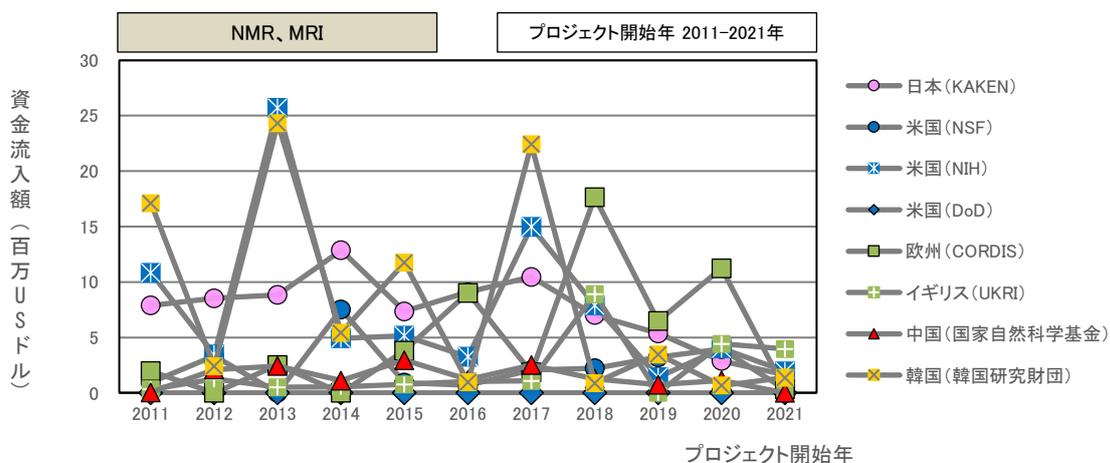
(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3(1d) 磁気、磁場センサ（固体量子センサ）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3(1e) NMR、MRI（固体量子センサ）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx

2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサにおける各技術区分の研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図 6-3-3(2)に示す。

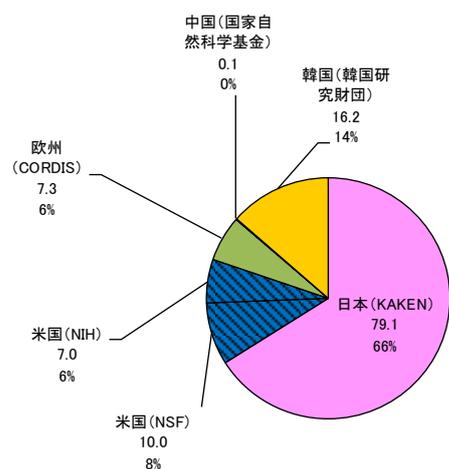
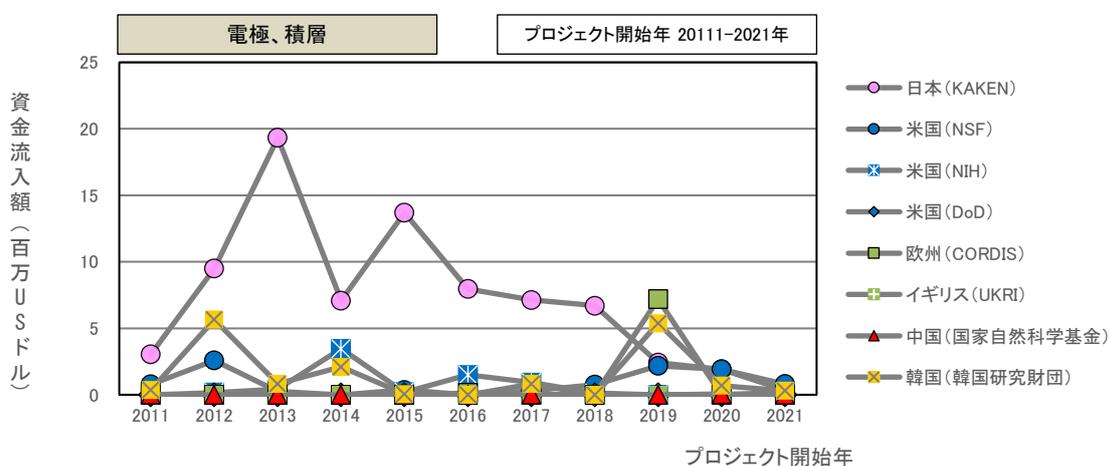
・トンネル磁気抵抗素子 TMR

構造・材料の電極、積層では、日本の 2013 年が多い。課題の感度では、米国、欧州が多く、欧州の 2018 年が多い。課題の小型化、分解能では米国の 2017 年が多い。

・熱流素子

原理・要素技術のスピンドロニクスでは、日本の 2014 年が多い。

図 6-3-3(2a) 電極、積層（量子スピントロニクスセンサ）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

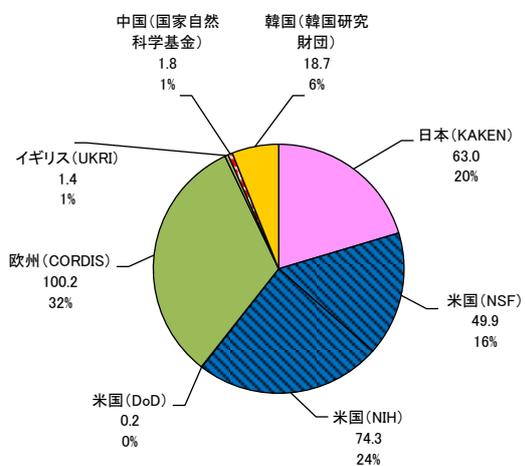
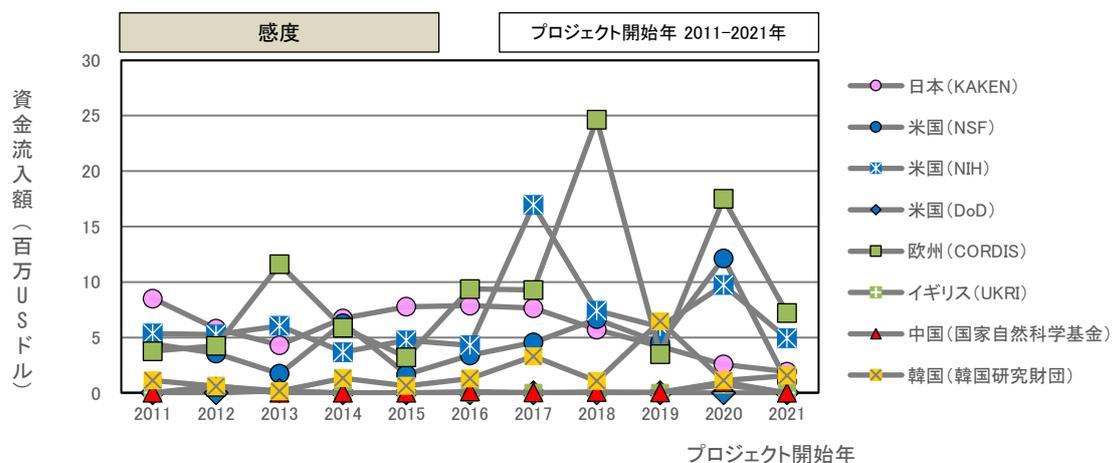


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

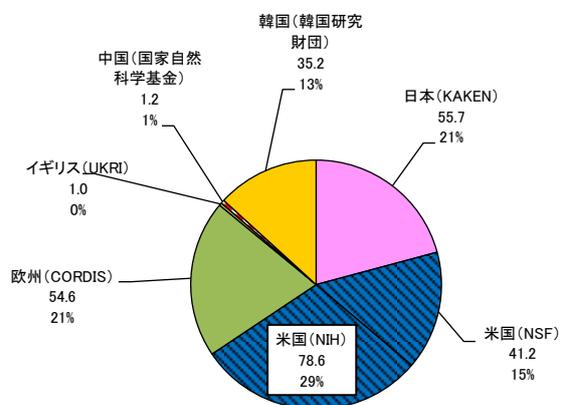
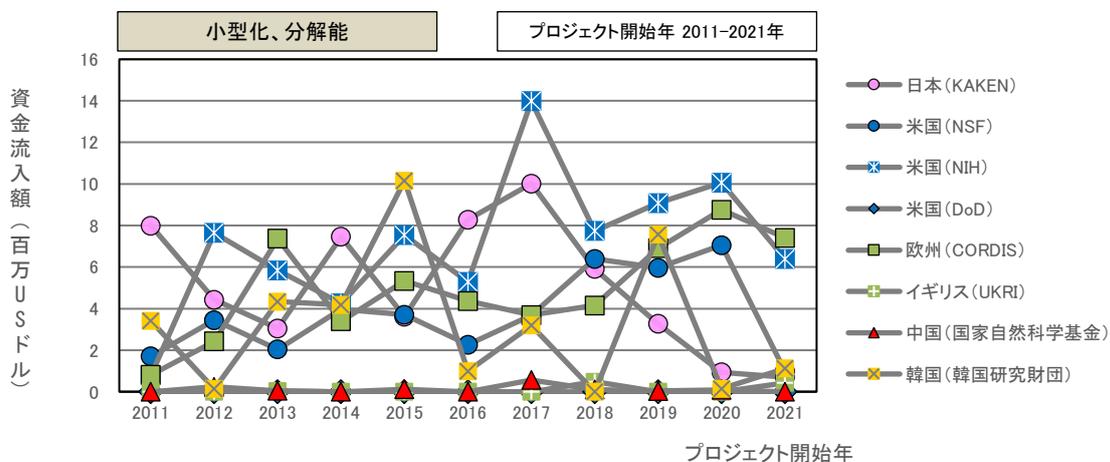
(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3 (2b) 感度（量子スピントロニクスセンサ）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）



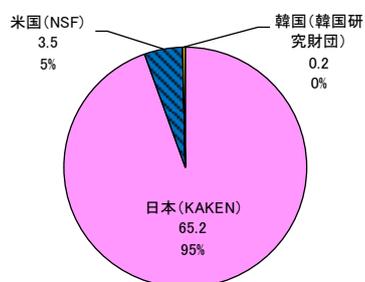
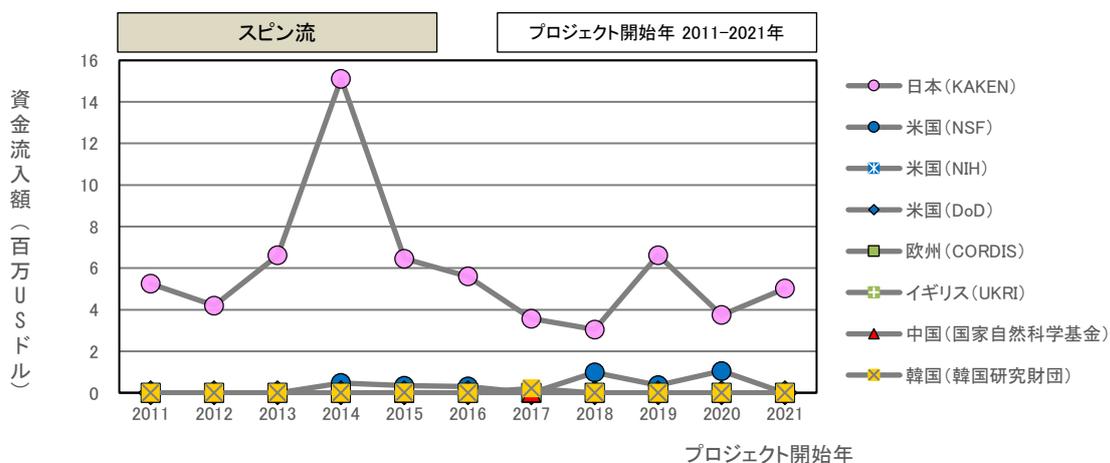
注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3(2c) 小型化、分解能（量子スピントロニクスセンサ）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3 (2d) スピン流 (量子スピントロニクスセンサ) における研究者所属機関国籍 (助成金給付国・地域) 別資金流入額推移及び資金流入額比率 (プロジェクト開始年: 2011-2021 年)

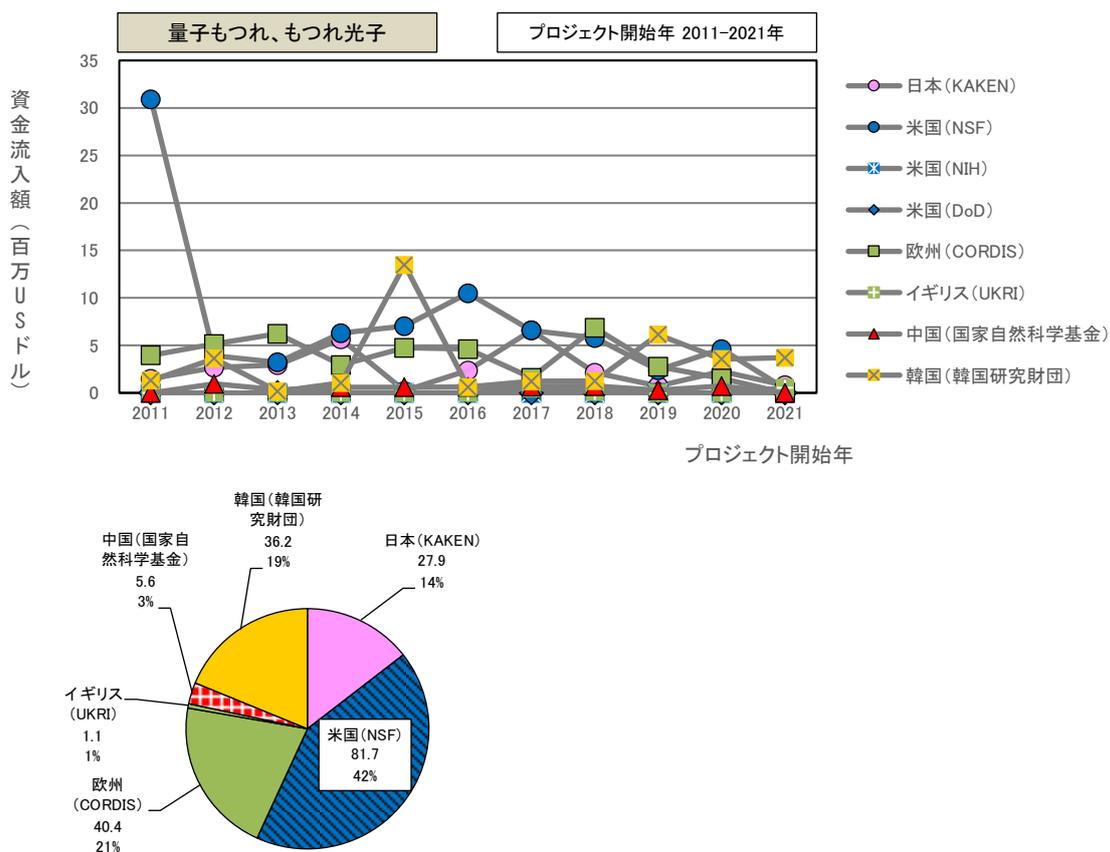


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

3. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサにおける各技術区分の研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図 6-3-3(3)に示す。原理・要素技術の量子もつれ、もつれ光子では、米国が 2011 年に多い。課題の感度向上では、米国と欧州が多く欧州の 2018 年が多い。分解能向上では、米国が多く、2017 年が多い。

図 6-3-3(3a) 量子もつれ、もつれ光子（量子もつれ光センサ）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

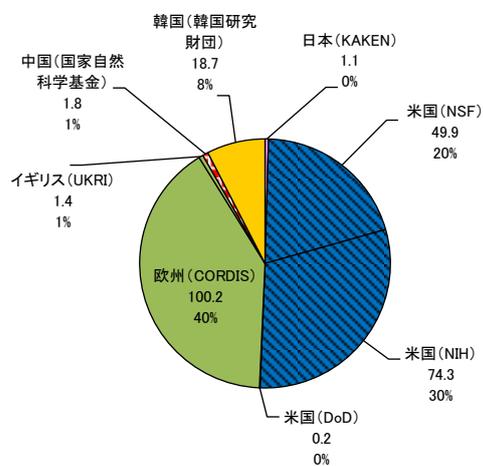
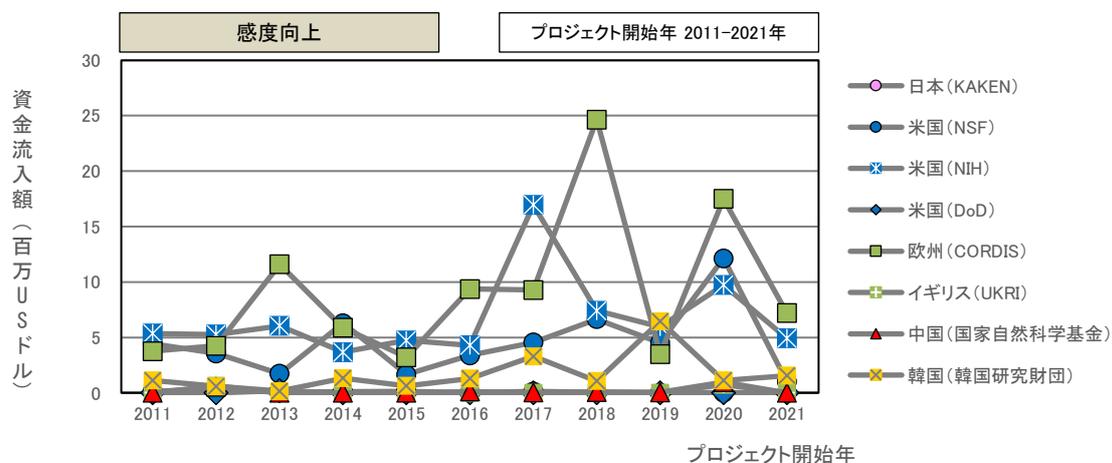


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3 (3b) 感度向上（量子もつれ光センサ）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）

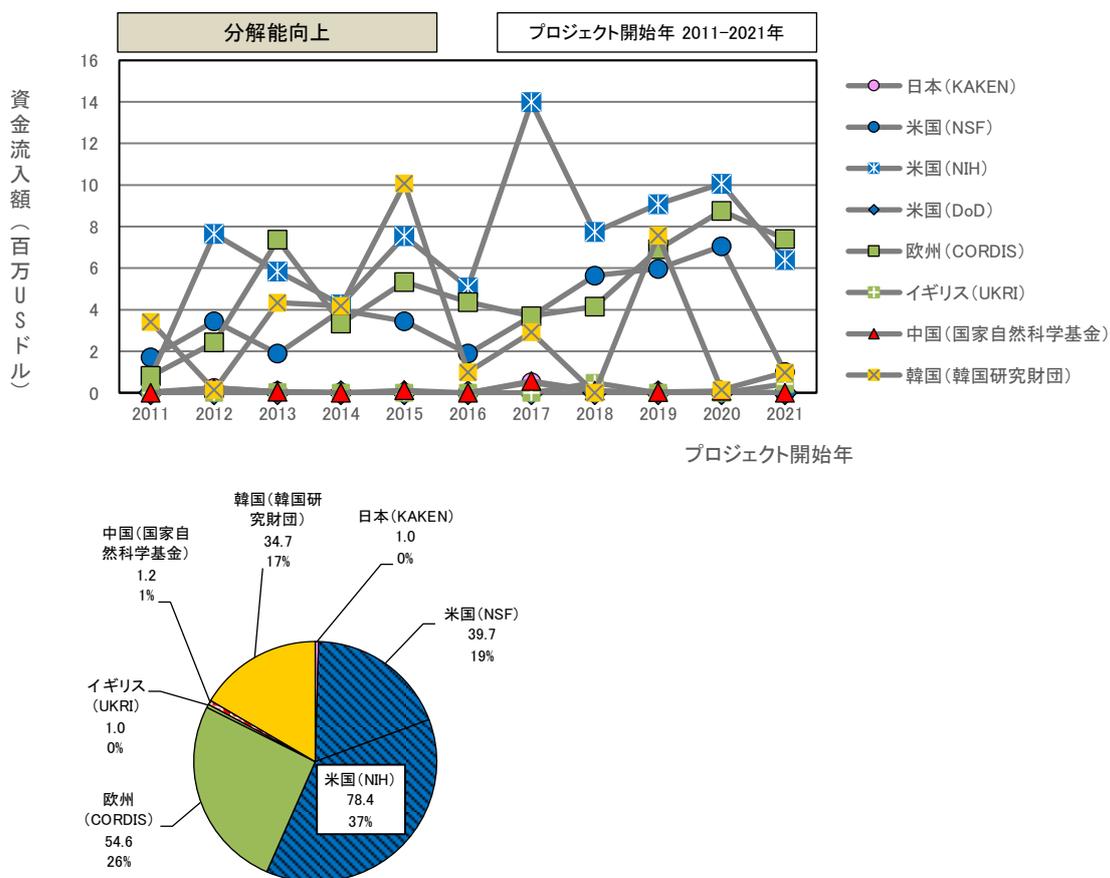


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3(3c) 分解能向上（量子もつれ光センサ）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）

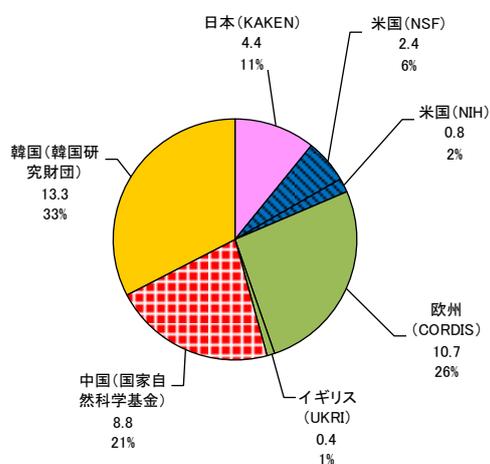
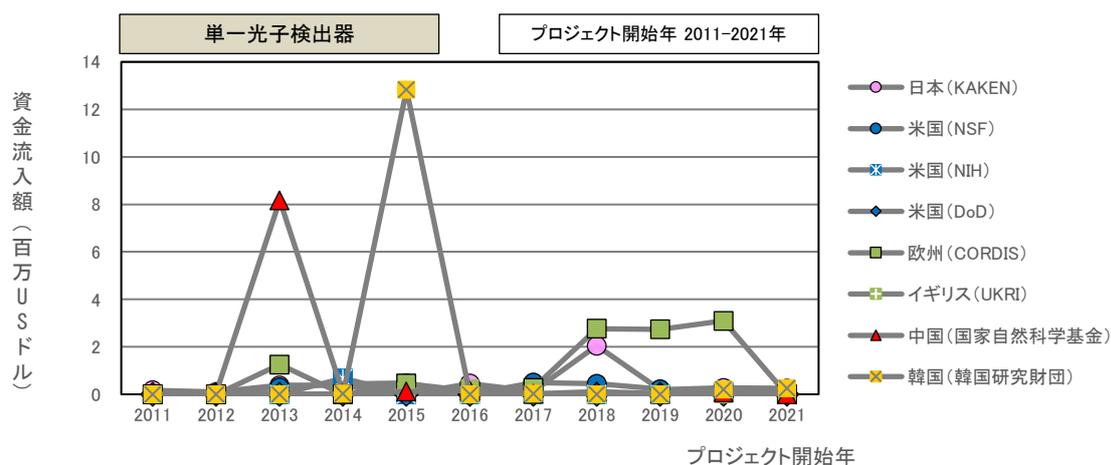


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

4. 光子検出器

光子検出器における各技術区分の研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図 6-3-3(4) に示す。原理・要素技術の単一光子検出器では、韓国が 2015 年に多い。課題の光吸収効率向上、感度では、米国、欧州が多く、欧州の 2018 年が多い。応用用途の量子通信では、米国、欧州が多い。量子コンピュータでは米国が期間後半に多い。

図 6-3-3(4a) 単一光子検出器（光子検出器）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

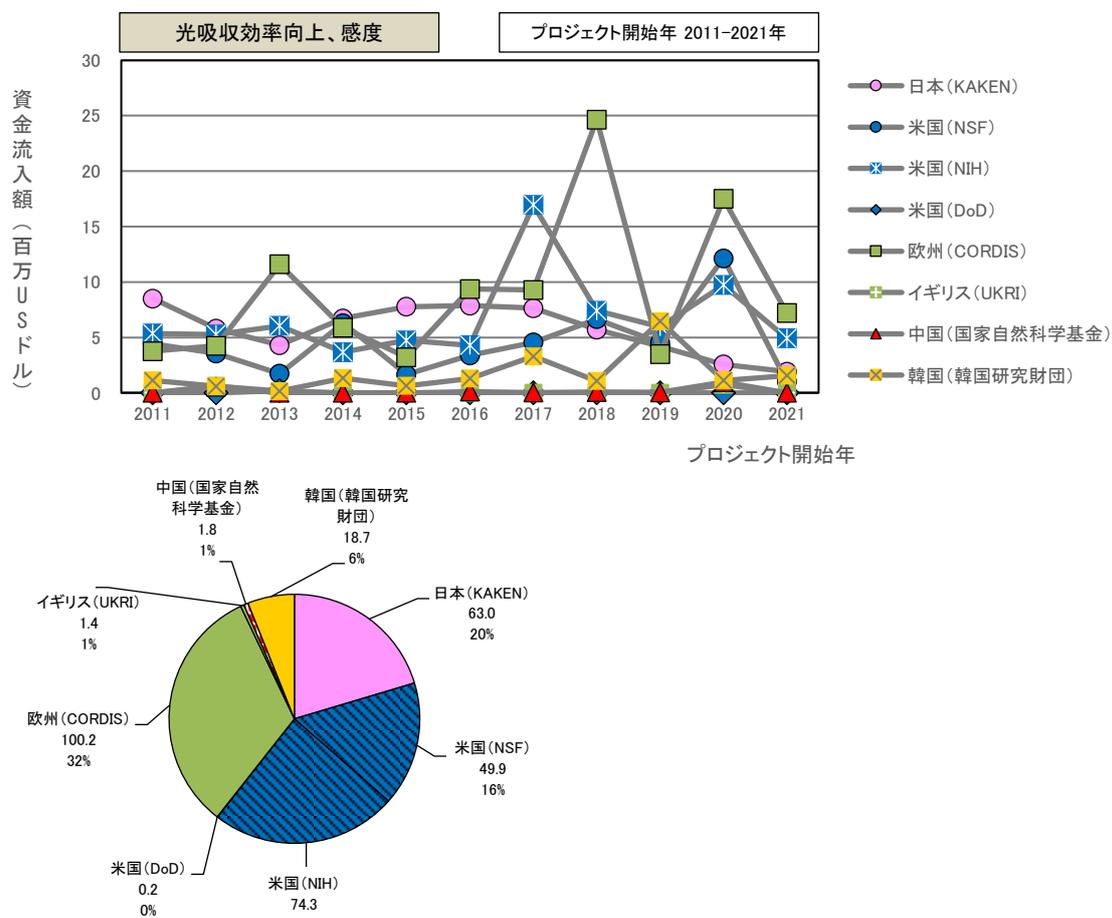


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3 (4b) 光吸収効率向上、感度（光子検出器）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）

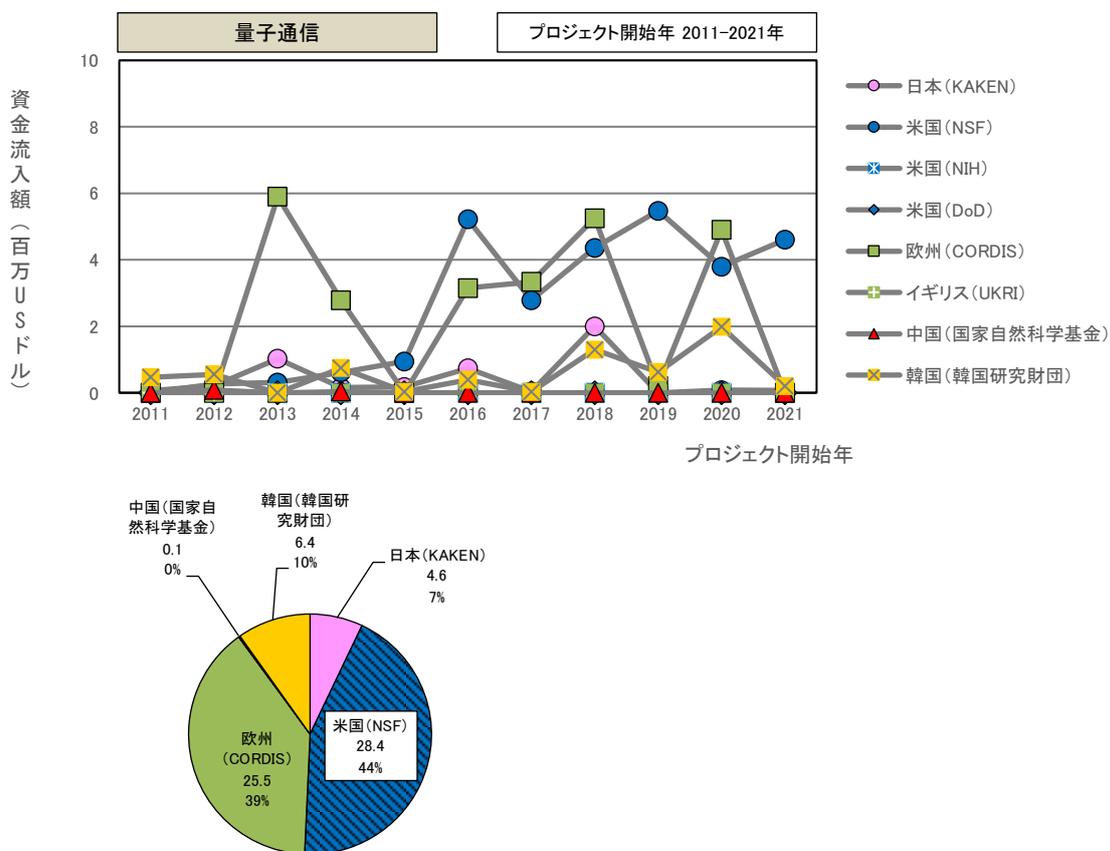


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3(4c) 量子通信（光子検出器）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）

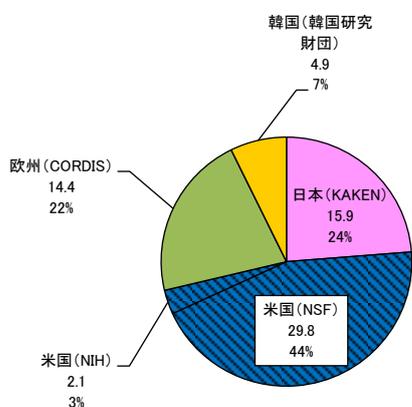
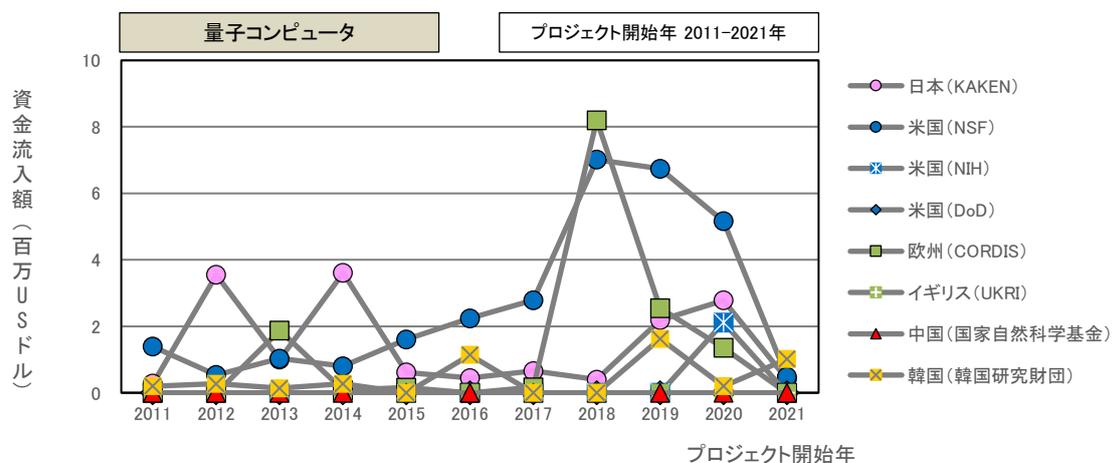


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3(4d) 量子コンピュータ（光子検出器）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

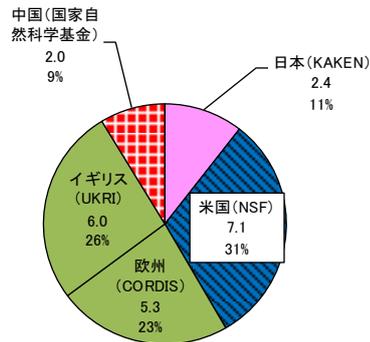
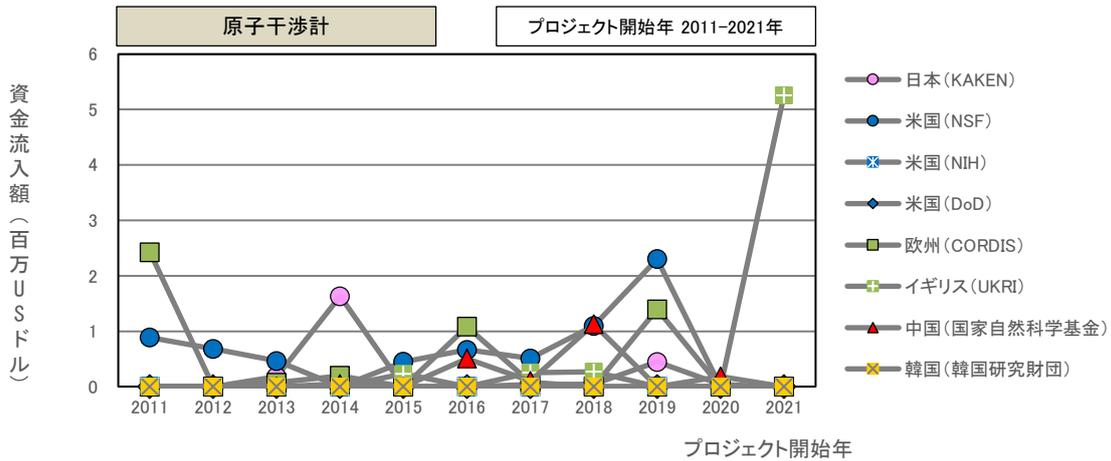
注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

5. 量子慣性センサ

量子慣性センサにおける技術区分の研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図 6-3-3(5)に示す。原理・要素技術の原子干渉計で、欧州（イギリス含む）が多く 2021 年にイギリスが多い。

図 6-3-3(5) 原子干渉計（量子慣性センサ）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

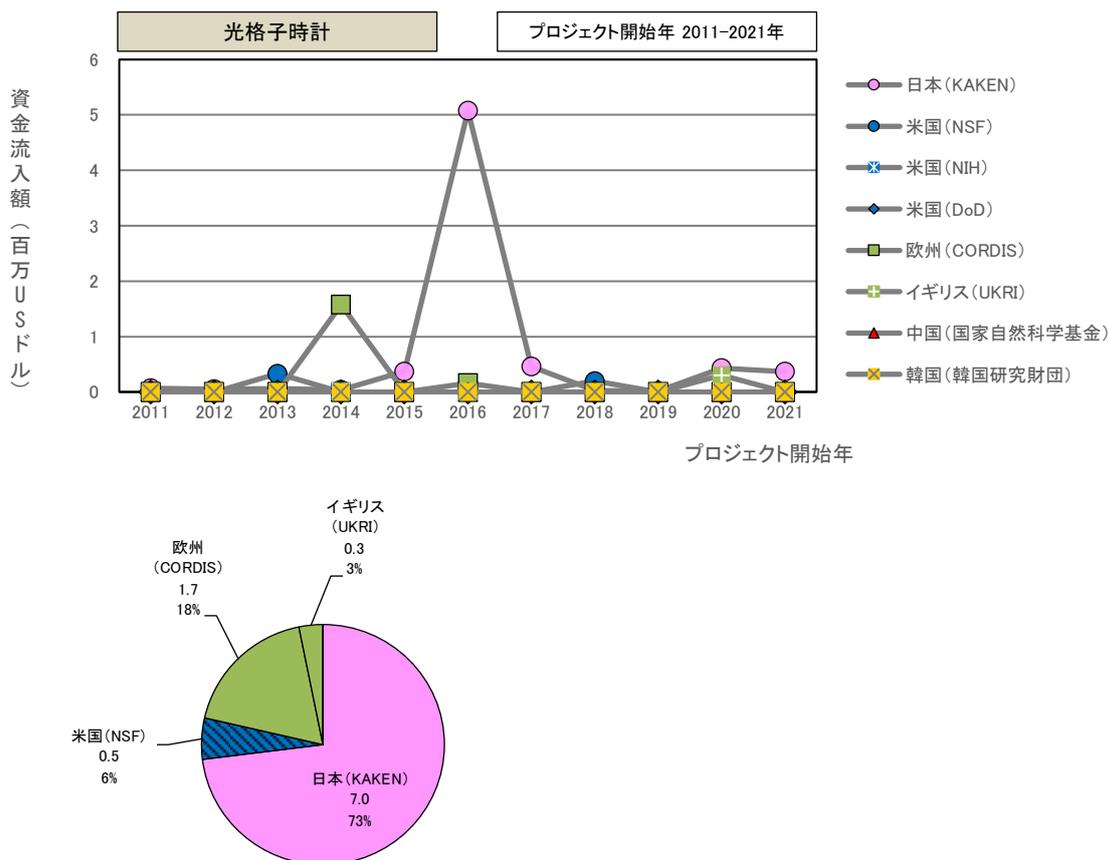
注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

6. 光格子時計

光格子時計における各技術区分の研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図 6-3-3(6) に示す。原理・要素技術の光格子時計では、日本の 2016 年が多い。信号処理では、米国の 2013 年が多い。課題のレーザー長寿命化では、欧州の 2020 年が多い。応用用途の相対論的測地では、日本の 2016 年が多い。

図 6-3-3(6a) 光格子時計（光格子時計）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

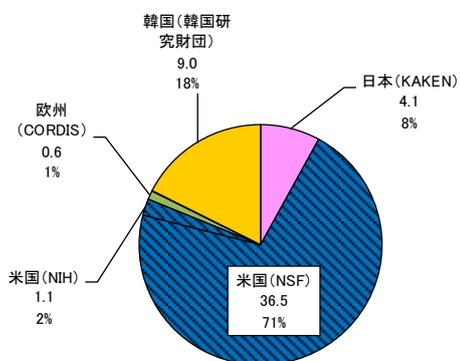
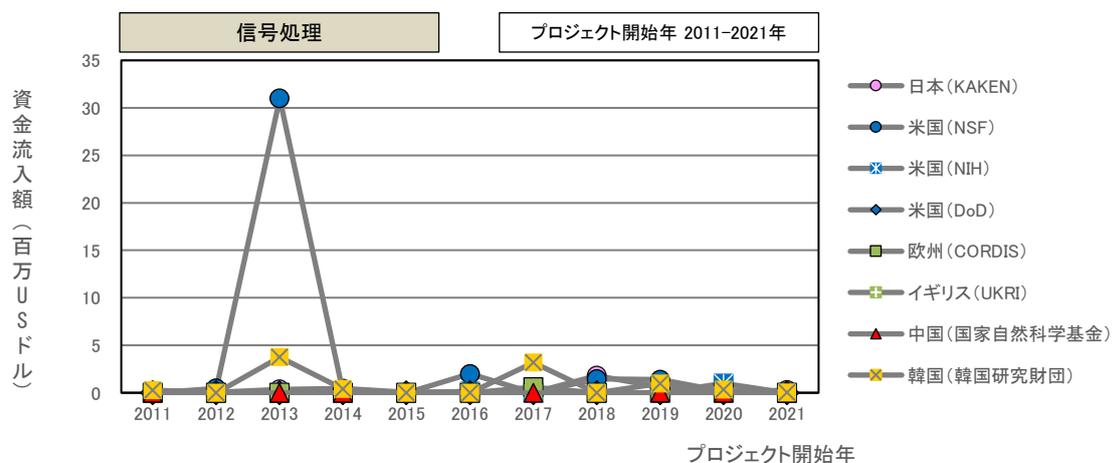


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3 (6b) 信号処理（光格子時計）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）

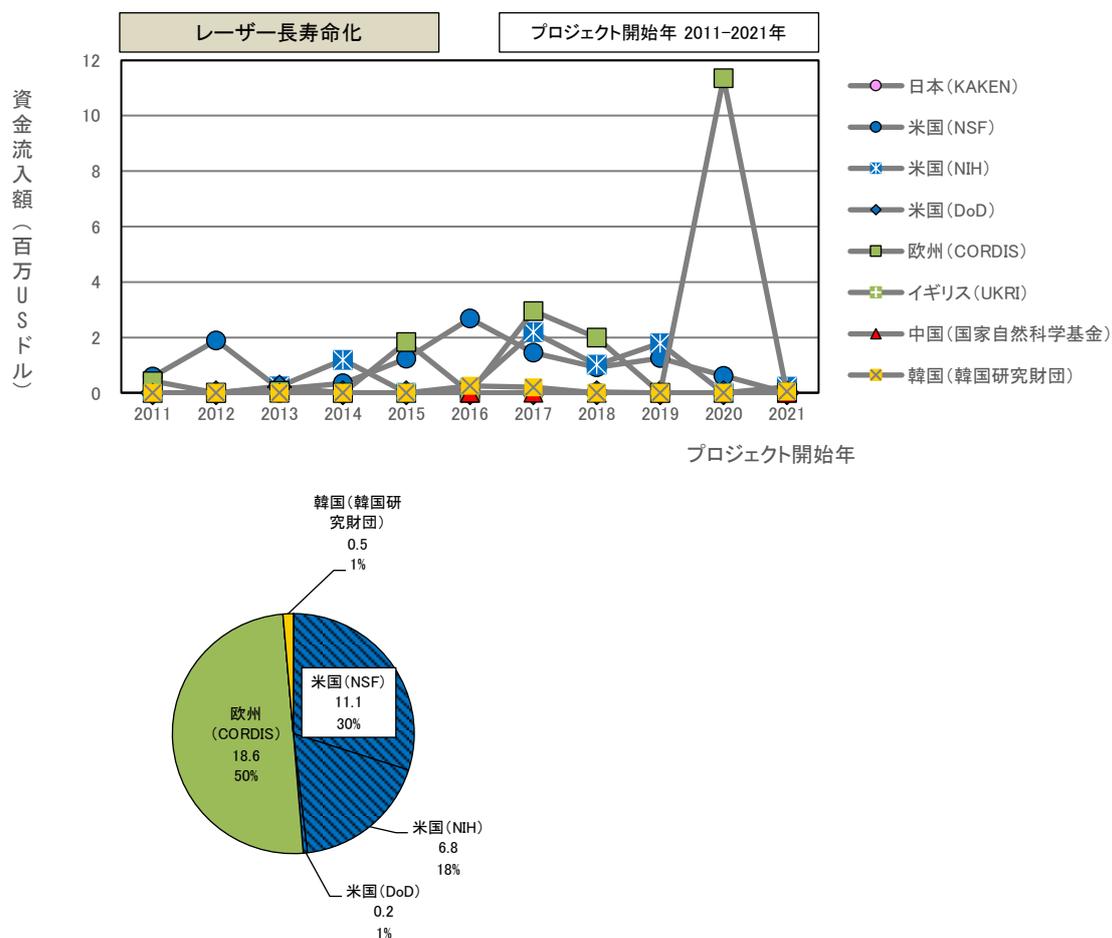


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3(6c) レーザー長寿命化（光格子時計）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）

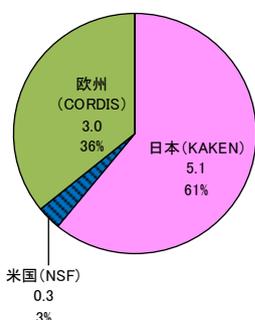
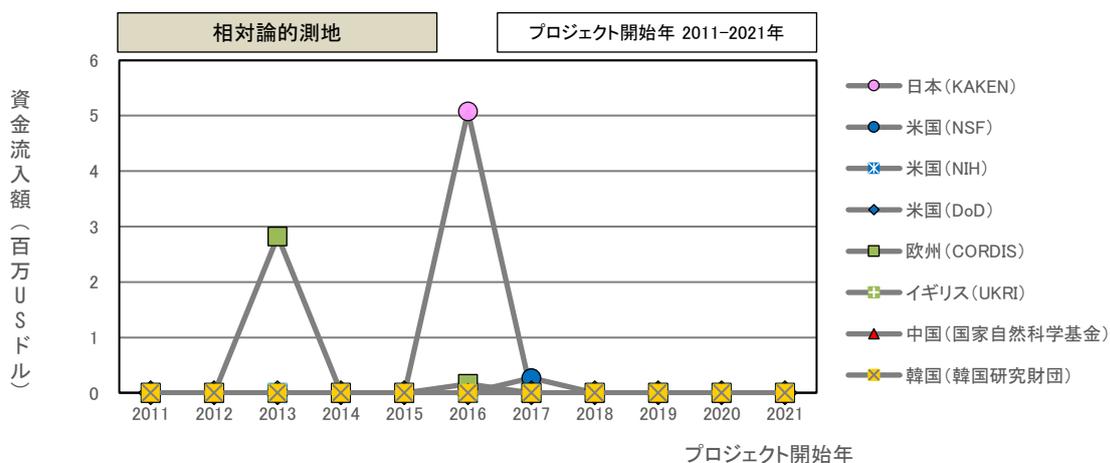


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3(6d) 相対論的測地（光格子時計）における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

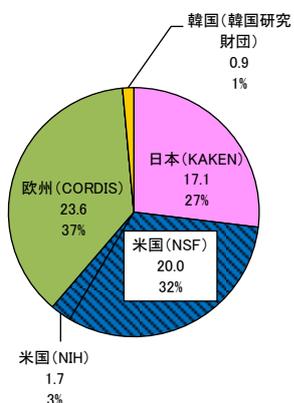
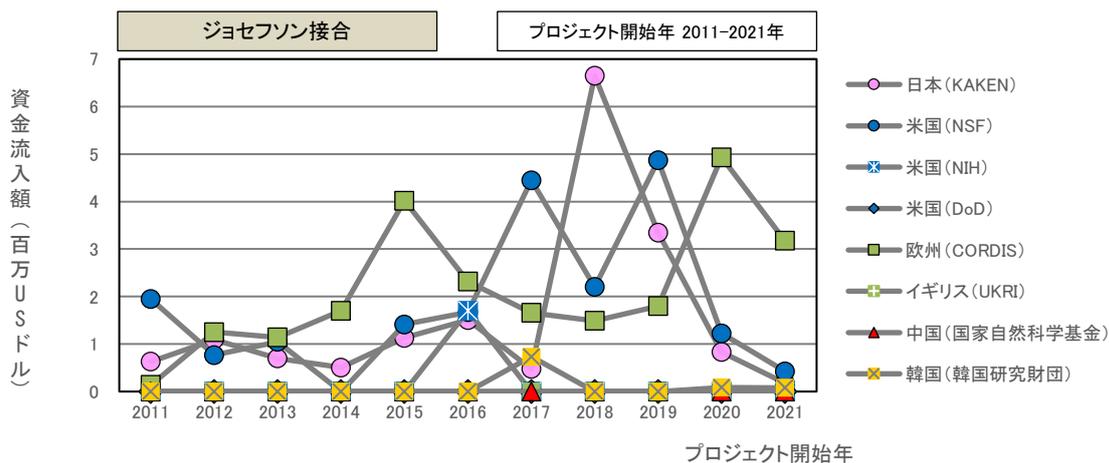
注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

7. その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID））

その他技術における各技術区分の研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率を図 6-3-3(7)に示す。原理・要素技術のジョセフソン接合では、欧州、米国が多い。日本は 2018 年が多い。膜、ビームでは、日本が多く、期間前半が多い。

図 6-3-3(7a) ジョセフソン接合（超伝導量子干渉素子（SQUID））における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

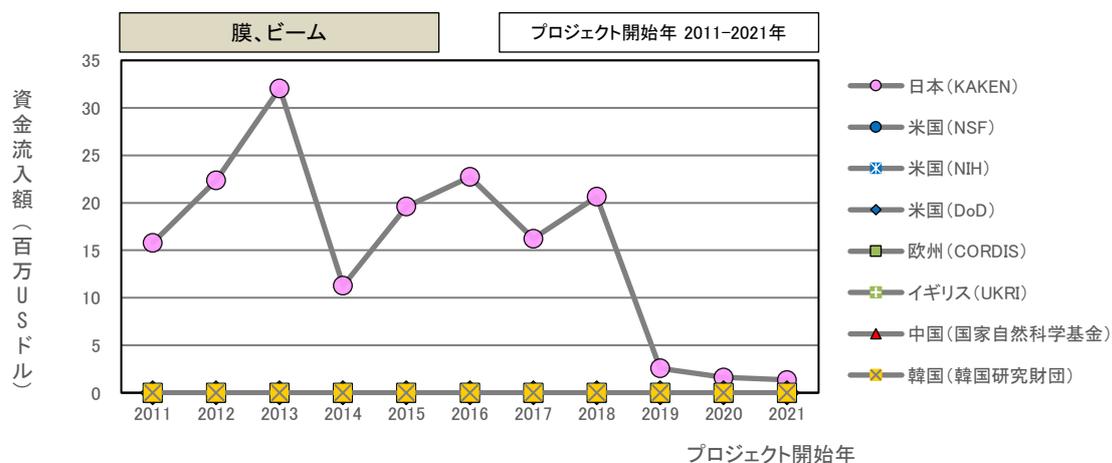


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-3 (7b) 膜、ビーム（超伝導量子干渉素子（SQUID））における研究者所属機関国籍（助成金給付国・地域）別資金流入額推移及び資金流入額比率（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

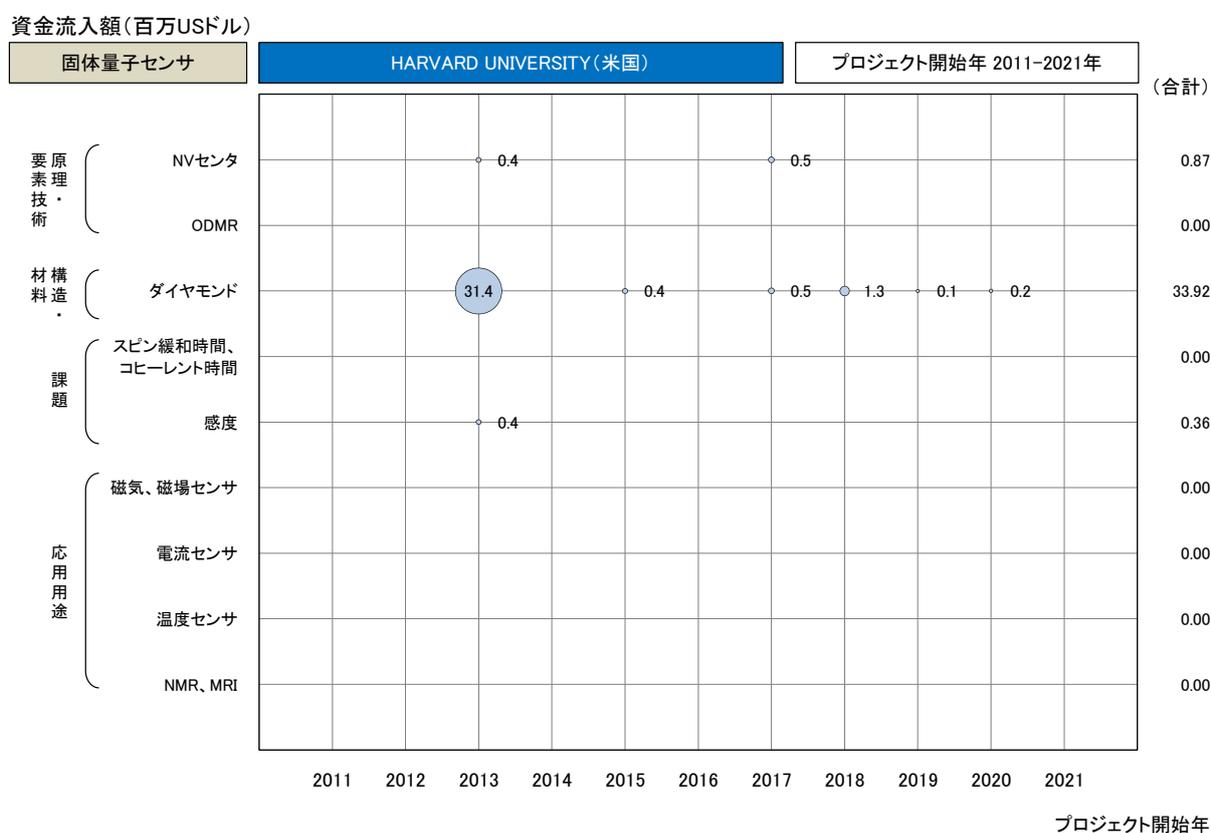
第5節 [技術区分別] 研究者所属機関別資金流入額推移（資金流入額上位機関）

量子計測・センシング技術の[技術区分別] 研究者所属機関別資金流入額推移（資金流入額上位機関）を示す。各区分の主な研究機関の技術区分動向を見ることができる。

1. 固体量子センサ

固体量子センサにおける各技術区分の研究者所属機関別資金流入額推移を図 6-3-4(1)に示す。Harvard University（米国）は、構造・材料のダイヤモンドの2013年が多い。Massachusetts Institute of Technology（米国）は、構造・材料のダイヤモンドの2016年、課題の感度の2011年、応用用途のNMR、MRIの2011年が多い。Thales（フランス）は、原理・要素技術のNVセンサ、構造・材料のダイヤモンド、課題の感度の2013年と2018年が多い。応用用途のNMR、MRIの2018年が多い。

図 6-3-4(1a) 固体量子センサにおける「HARVARD UNIVERSITY（米国）」の資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021年）



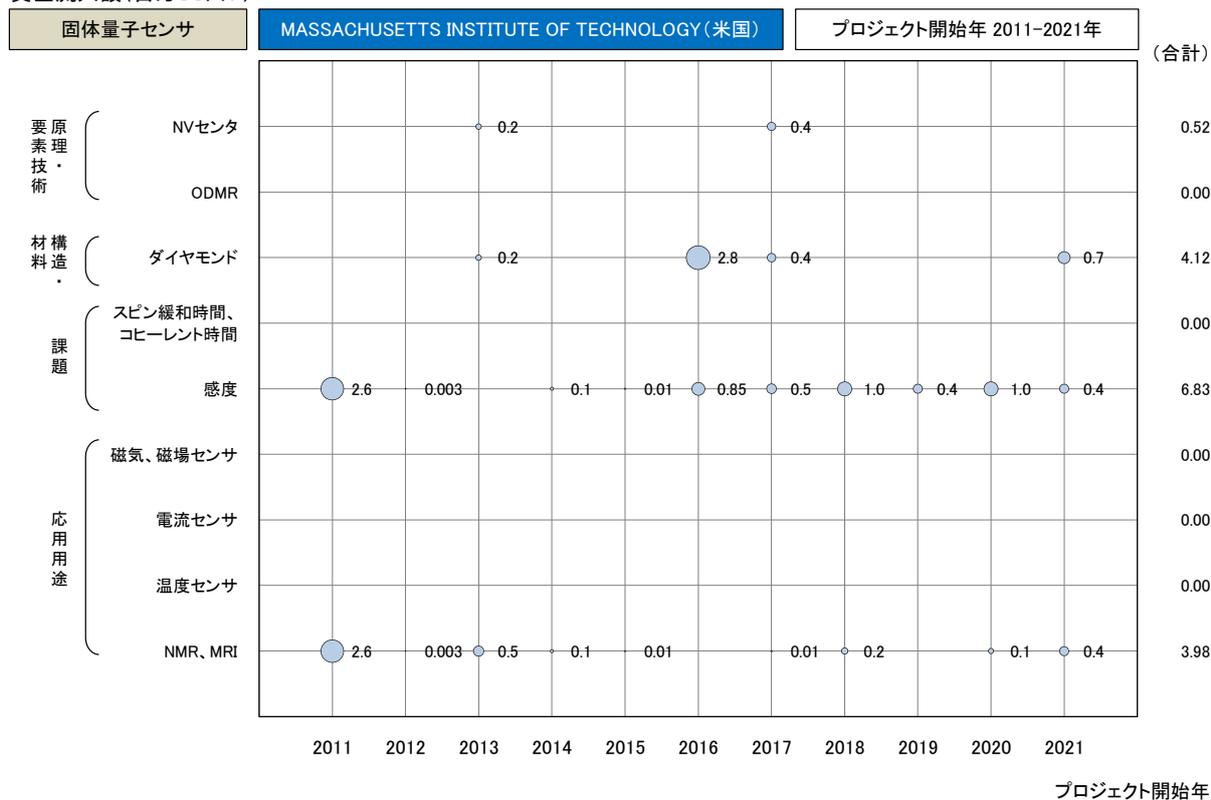
注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

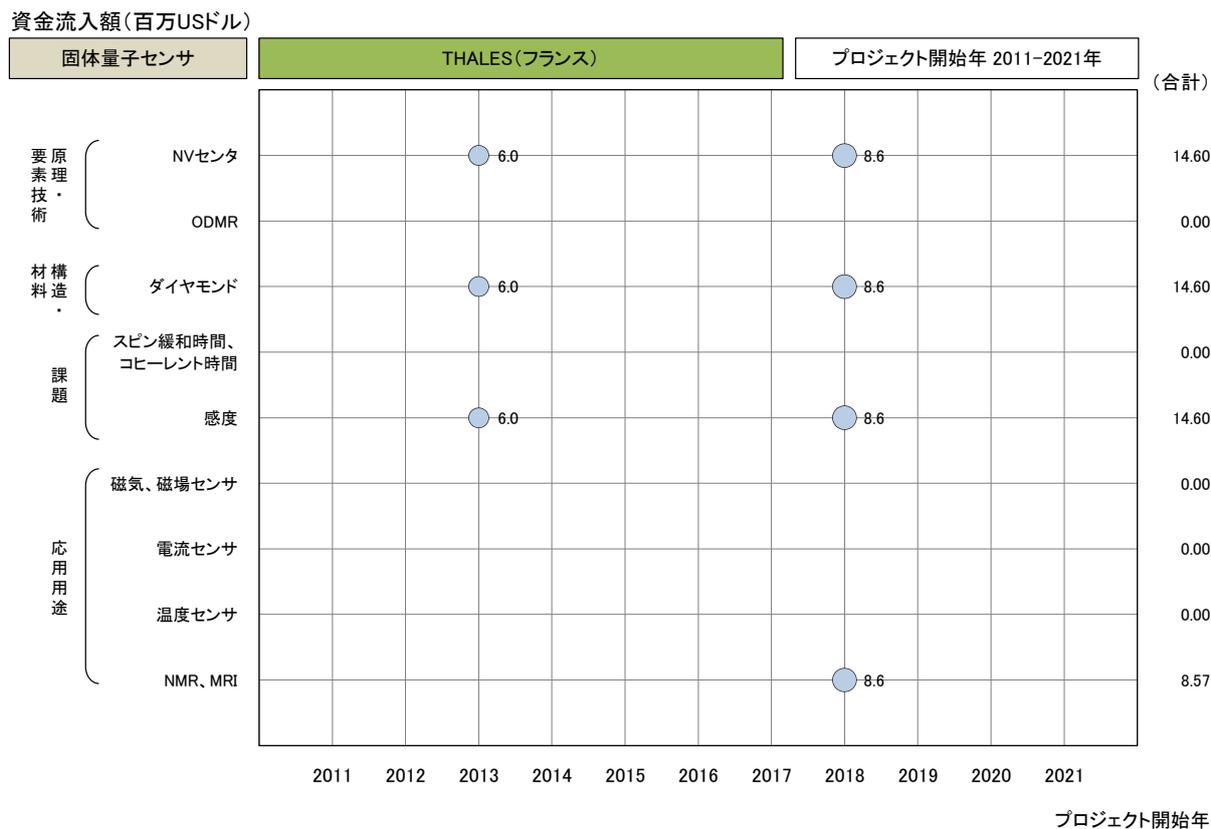
図 6-3-4(1b) 固体量子センサにおける「MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (米国)」の資金流入額推移 (プロジェクト開始年：2011-2021年)

資金流入額(百万USD)



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-4(1c) 固体量子センサにおける「THALES (フランス)」の資金流入額推移 (プロジェクト開始年：2011-2021年)

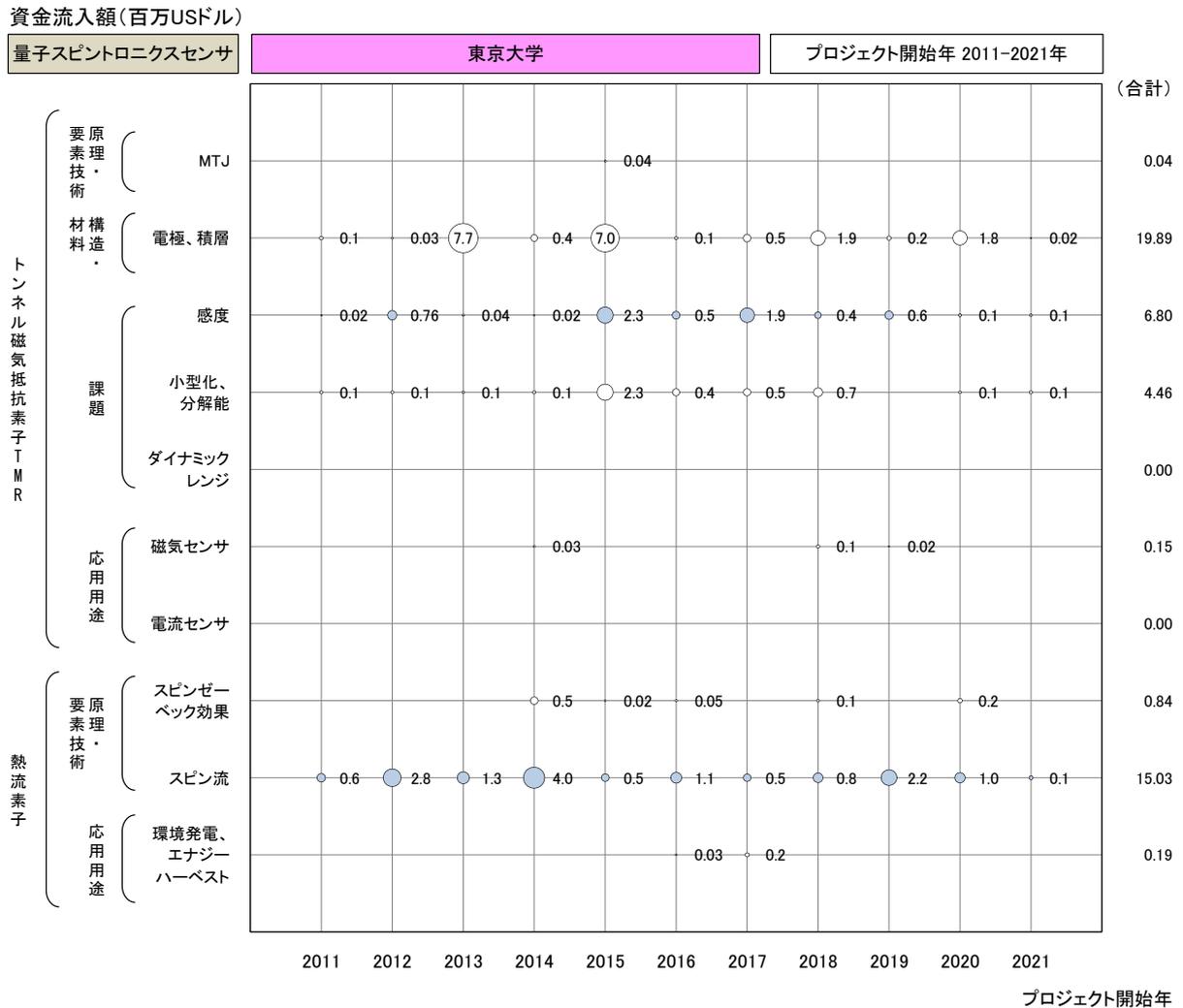


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

2. 量子スピントロニクスセンサ

量子スピントロニクスセンサにおける各技術区分の研究者所属機関別資金流入額推移を図6-3-4(2)に示す。東京大学は、トンネル磁気抵抗素子 TMR では、構造・材料の2013年と2015年が多い。熱流素子では、原理・要素技術のスピンの2014年が多い。東北大学は、トンネル磁気抵抗素子 TMR では、構造・材料の電極、積層が多い。熱流素子ではスピンの2014年が多い。大阪大学は、トンネル磁気抵抗素子 TMR では、構造・材料の電極、積層と課題の感度が多い。熱流素子では、原理・要素技術のスピンの2014年が多い。

図 6-3-4(2a) 量子スピントロニクスセンサにおける「東京大学」の資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021年）



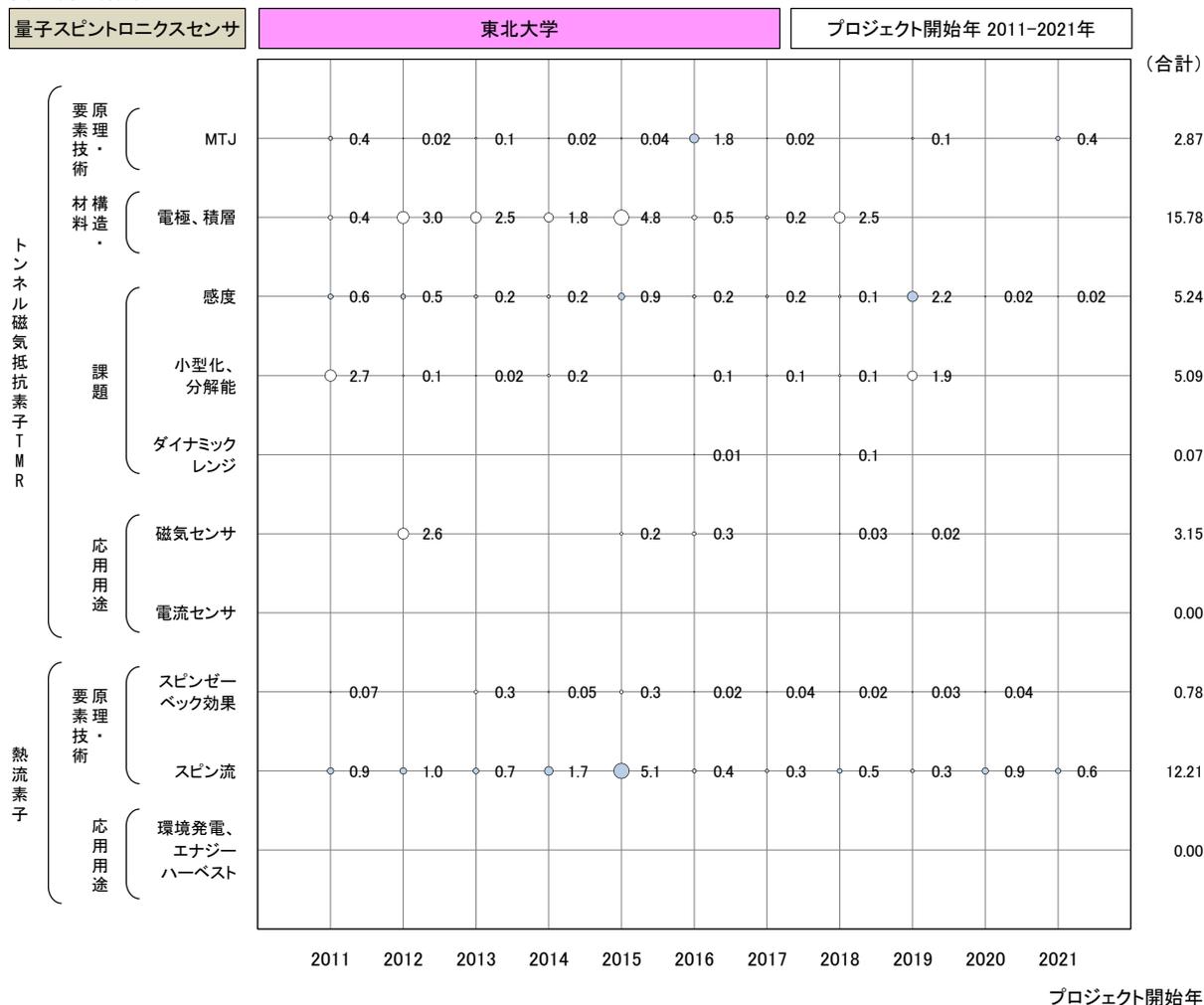
注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-4(2b) 量子スピントロニクスセンサにおける「東北大学」の資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021年）

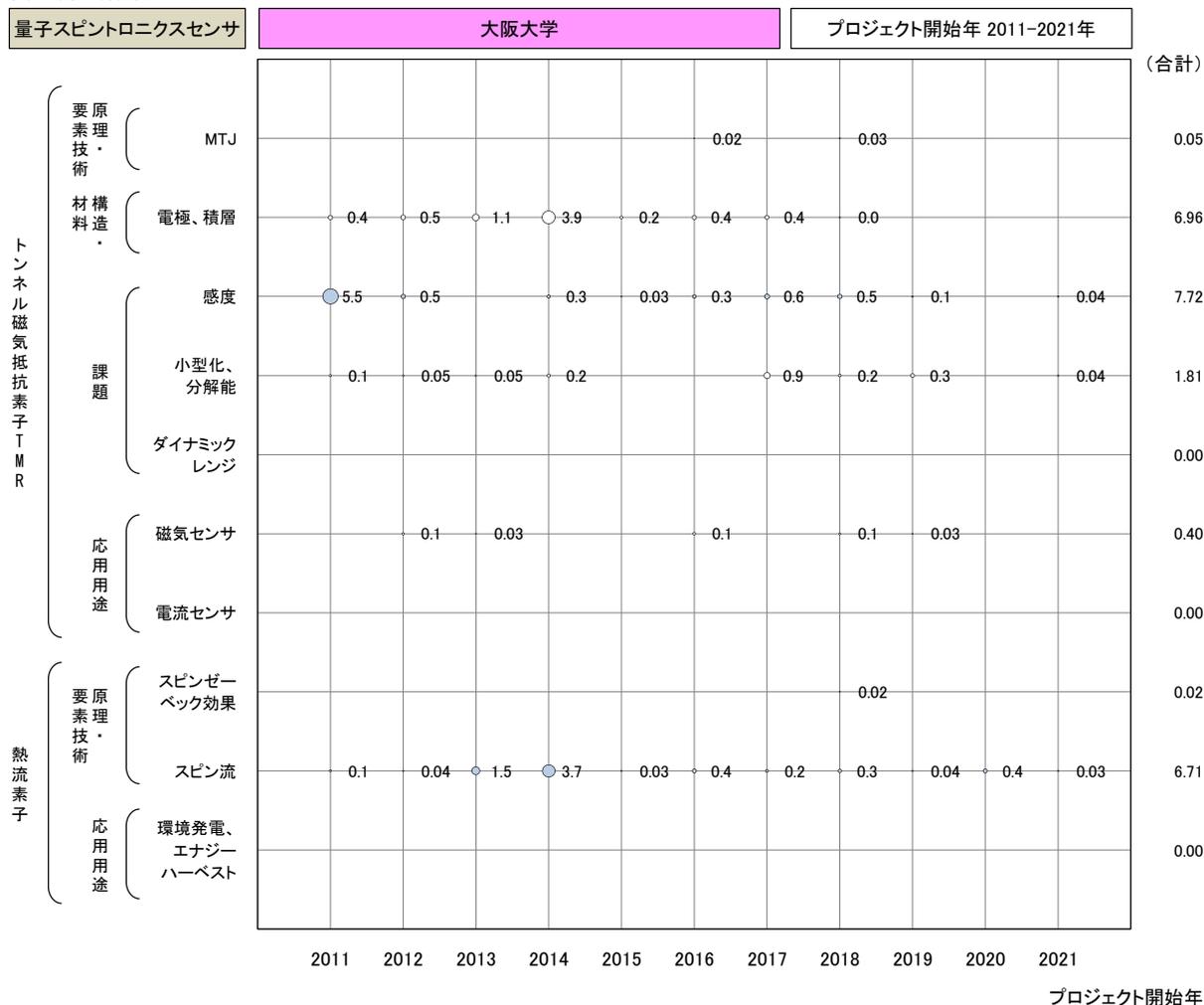
資金流入額(百万USD)



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-4(2c) 量子スピントロニクスセンサにおける「大阪大学」の資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021年）

資金流入額(百万USD)

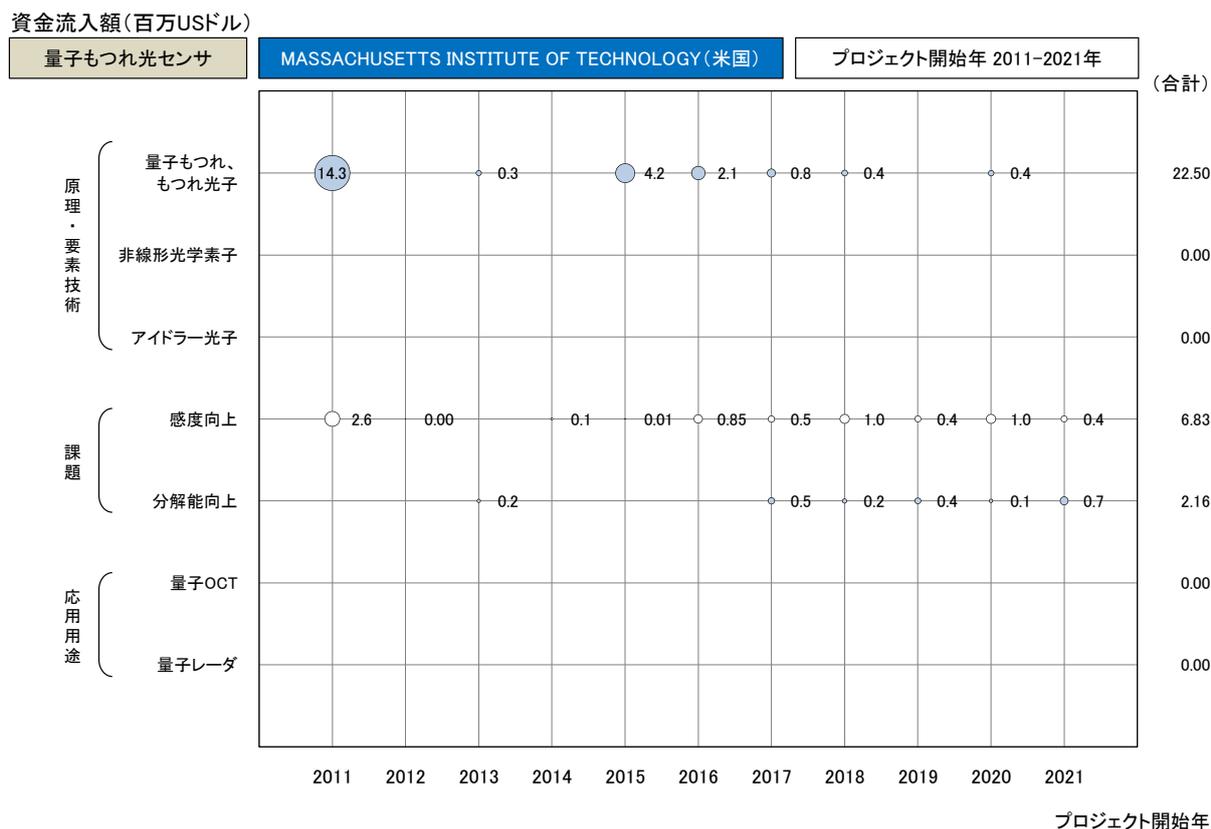


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

3. 量子もつれ光センサ

量子もつれ光センサにおける各技術区分の研究者所属機関別資金流入額推移を図 6-3-4(3)に示す。Massachusetts Institute of Technology (米国) では、原理・要素技術の量子もつれ、もつれ光子の 2011 年が多い。東京大学は、原理・要素技術の量子もつれ、もつれ光子が継続的にある。

図 6-3-4(3a) 量子もつれ光センサにおける「MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (米国)」の資金流入額推移 (プロジェクト開始年：2011-2021 年)



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-4 (3b) 量子もつれ光センサにおける「東京大学」の資金流入額推移(プロジェクト開始年:2011-2021年)

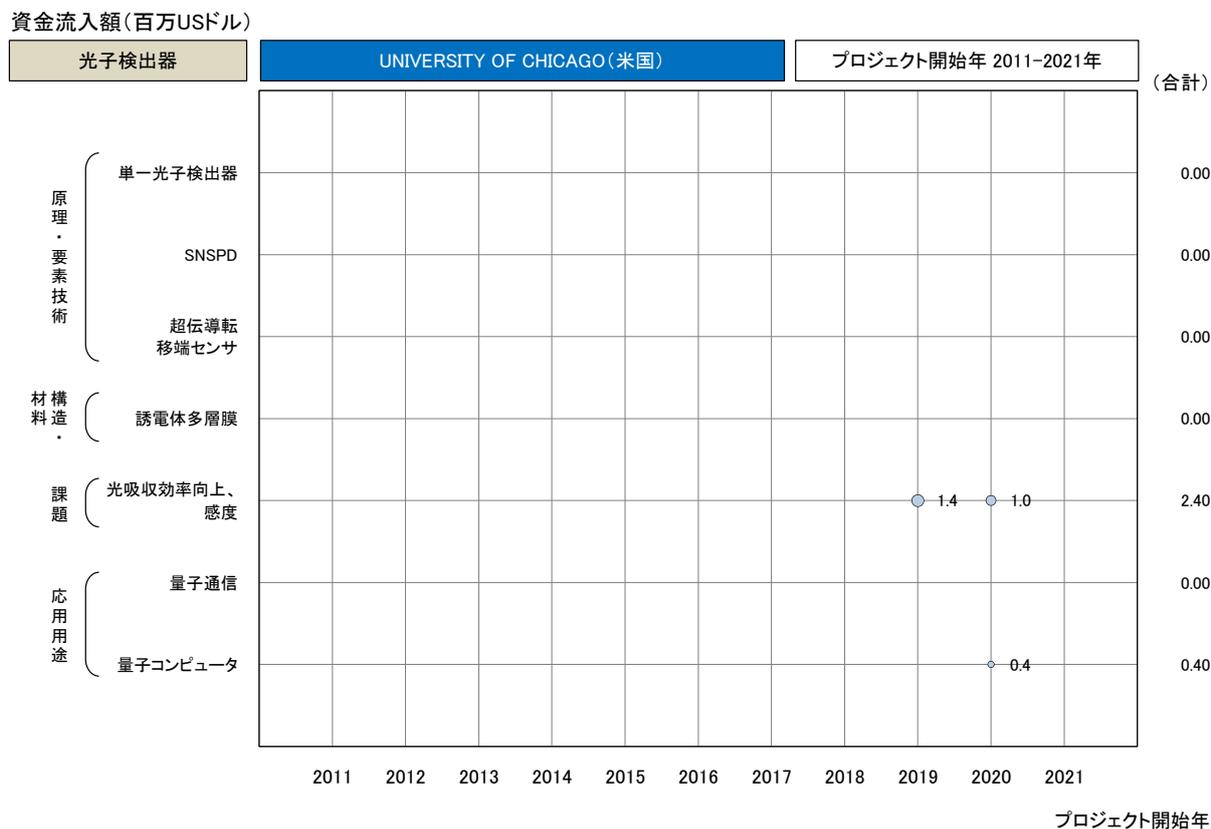


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

4. 光子検出器

光子検出器における各技術区分の研究者所属機関別資金流入額推移を図 6-3-4(4)に示す。University of Chicago (米国) は、課題の光吸収効率向上、感度が 2019 年、2020 年にある。東京大学は、課題の光吸収効率向上、感度が期間中コンスタントにある。

図 6-3-4(4a) 光子検出器における「UNIVERSITY OF CHICAGO (米国)」の資金流入額推移 (プロジェクト開始年：2011-2021 年)



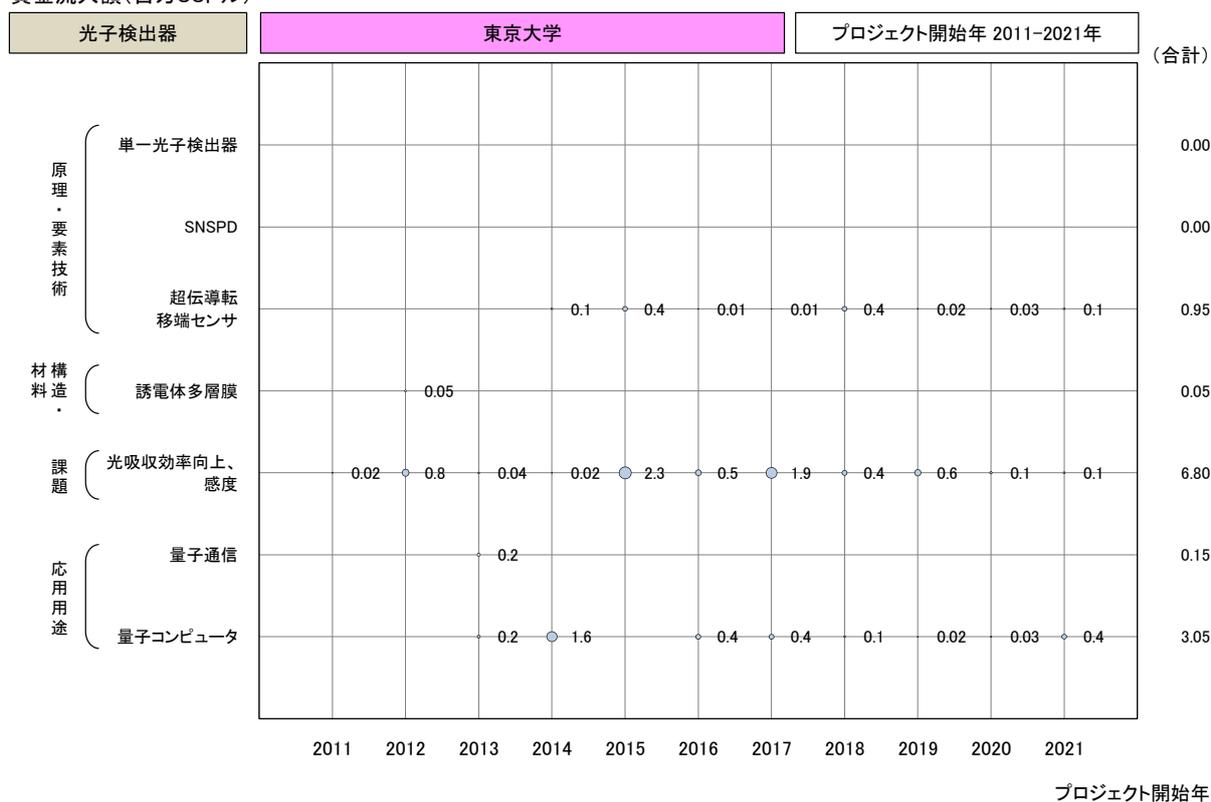
注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-4(4b) 光子検出器における「東京大学」の資金流入額推移(プロジェクト開始年:2011-2021年)

資金流入額(百万USD)

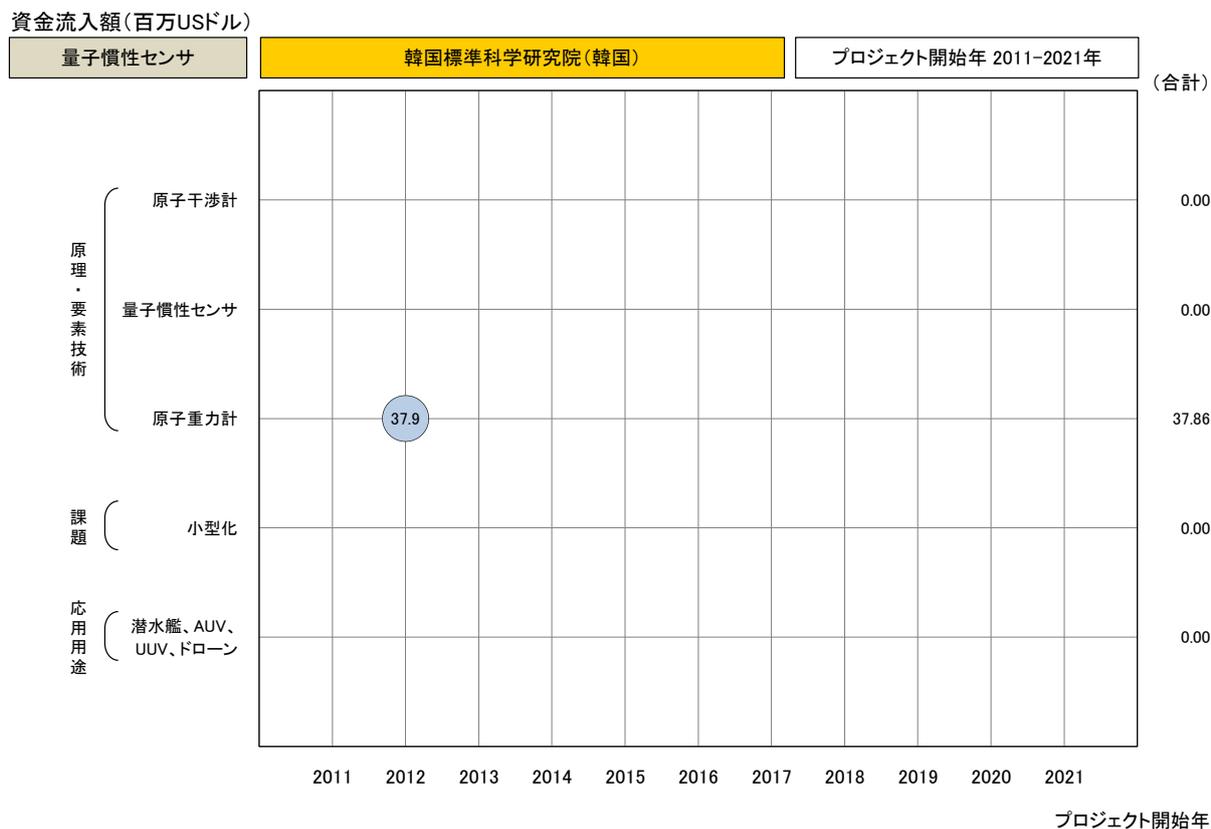


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

5. 量子慣性センサ

量子慣性センサにおける各技術区分の研究者所属機関別資金流入額推移を図 6-3-4(5)に示す。韓国標準科学研究院（韓国）は、原理・要素技術の原子重力計が 2012 年にある。東京大学は、原理・要素技術の原子干渉計が、2014、2018、2020 年にある。

図 6-3-4(5a) 量子慣性センサにおける「韓国標準科学研究院（韓国）」の資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

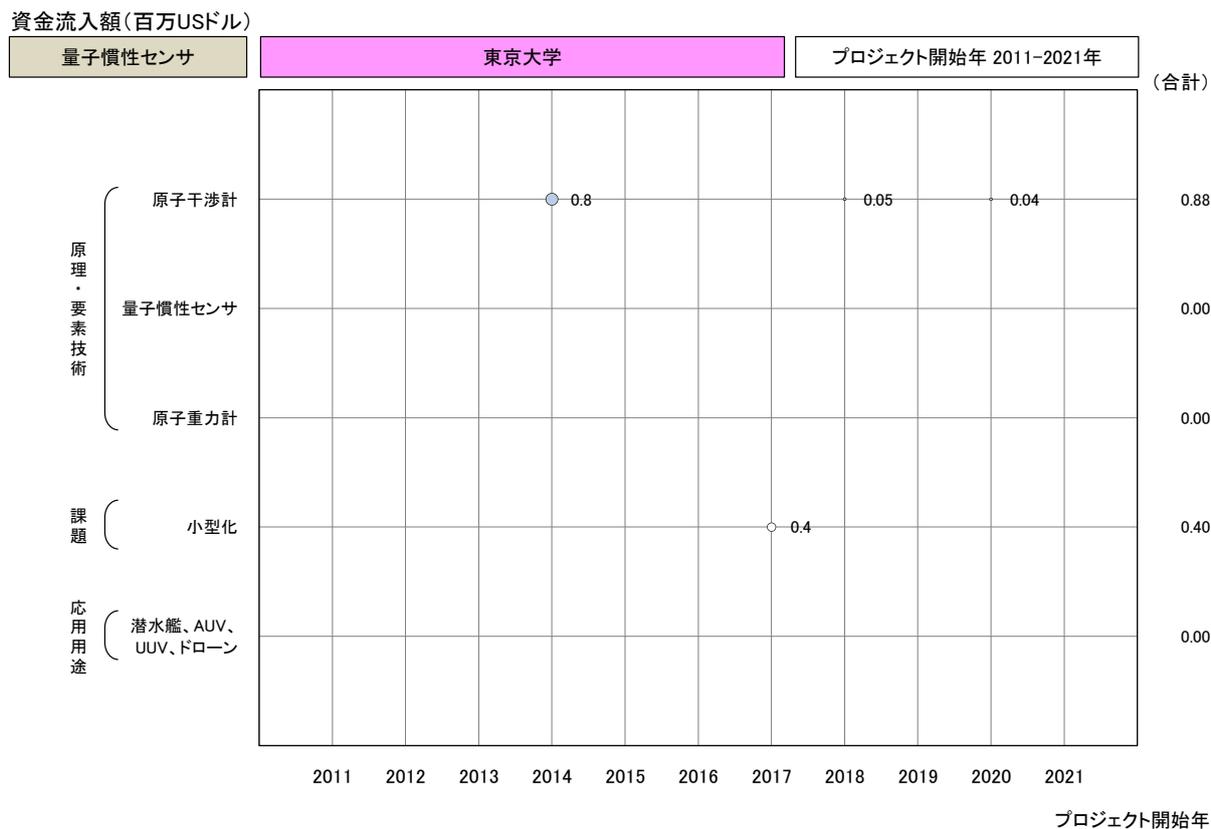


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-4 (5b) 量子慣性センサにおける「東京大学」の資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021年）

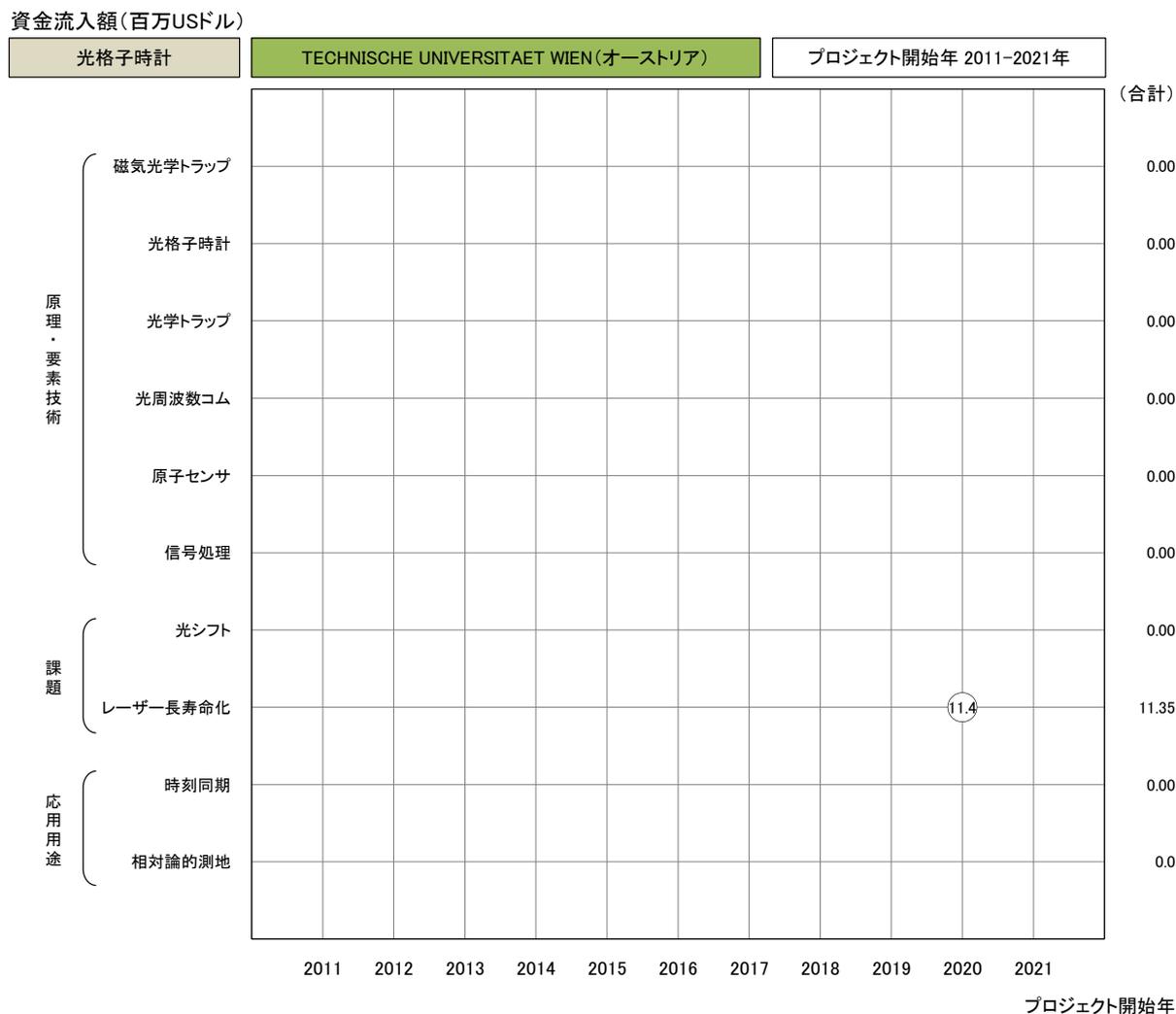


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

6. 光格子時計

光格子時計における各技術区分の研究者所属機関別資金流入額推移を図 6-3-4(6)に示す。Technische Universitaet Wien (オーストリア) は、課題のレーザー長寿命化が 2020 年にある。東京大学は、原理・要素技術の磁気光学トラップ、光格子時計、光学トラップ、光周波数コム、信号処理が期間中にある。

図 6-3-4(6a) 光格子時計における「TECHNISCHE UNIVERSITAT WIEN (オーストリア)」の資金流入額推移 (プロジェクト開始年：2011-2021 年)



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-4 (6b) 光格子時計における「東京大学」の資金流入額推移(プロジェクト開始年:2011-2021 年)

資金流入額(百万USD)

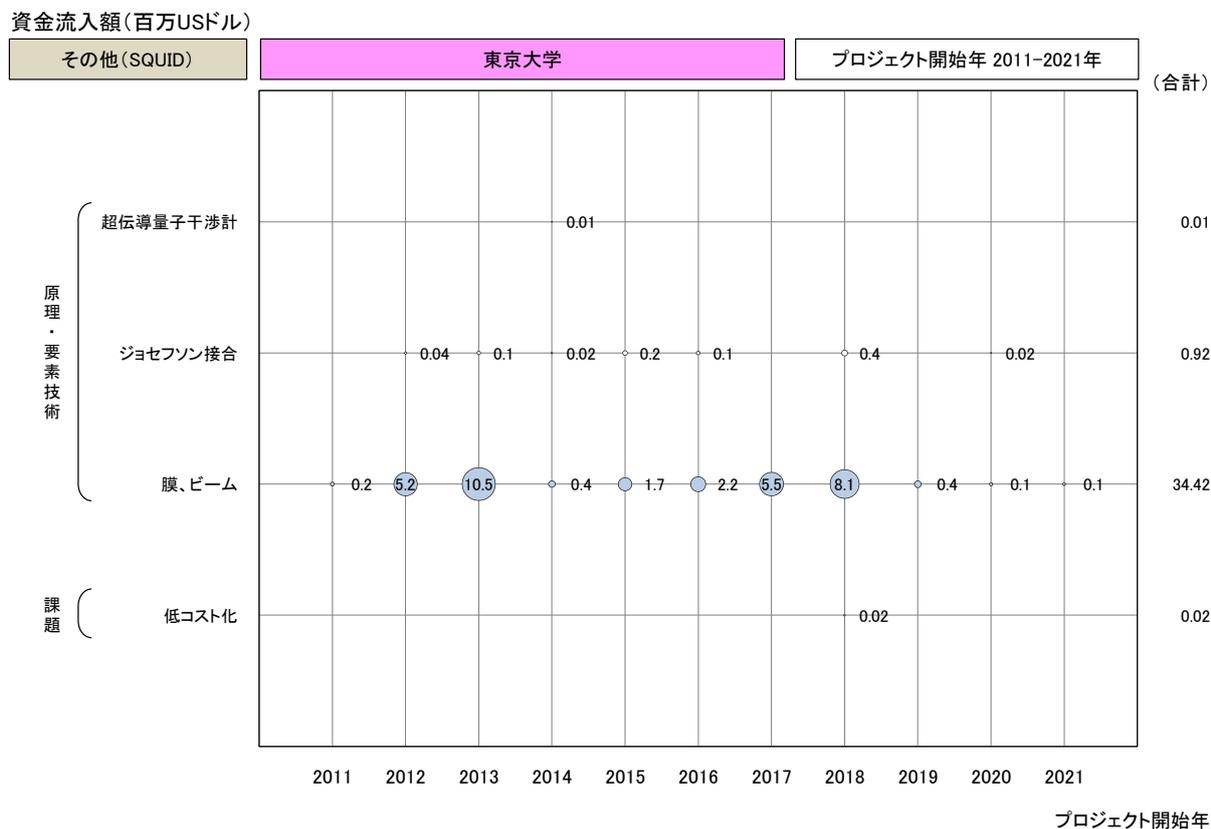


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF (国際通貨基金) の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

7. その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID））

その他技術における各技術区分の研究者所属機関別資金流入額推移を図 6-3-4(7a) 及び (7b) に示す。東京大学は、原理・要素技術の膜、ビームが期間中多く 2013 年が多い。名古屋大学は、原理・要素技術の膜、ビームが期間中にある。

図 6-3-4(7a) その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID））における「東京大学」の資金流入額推移（プロジェクト開始年：2011-2021 年）

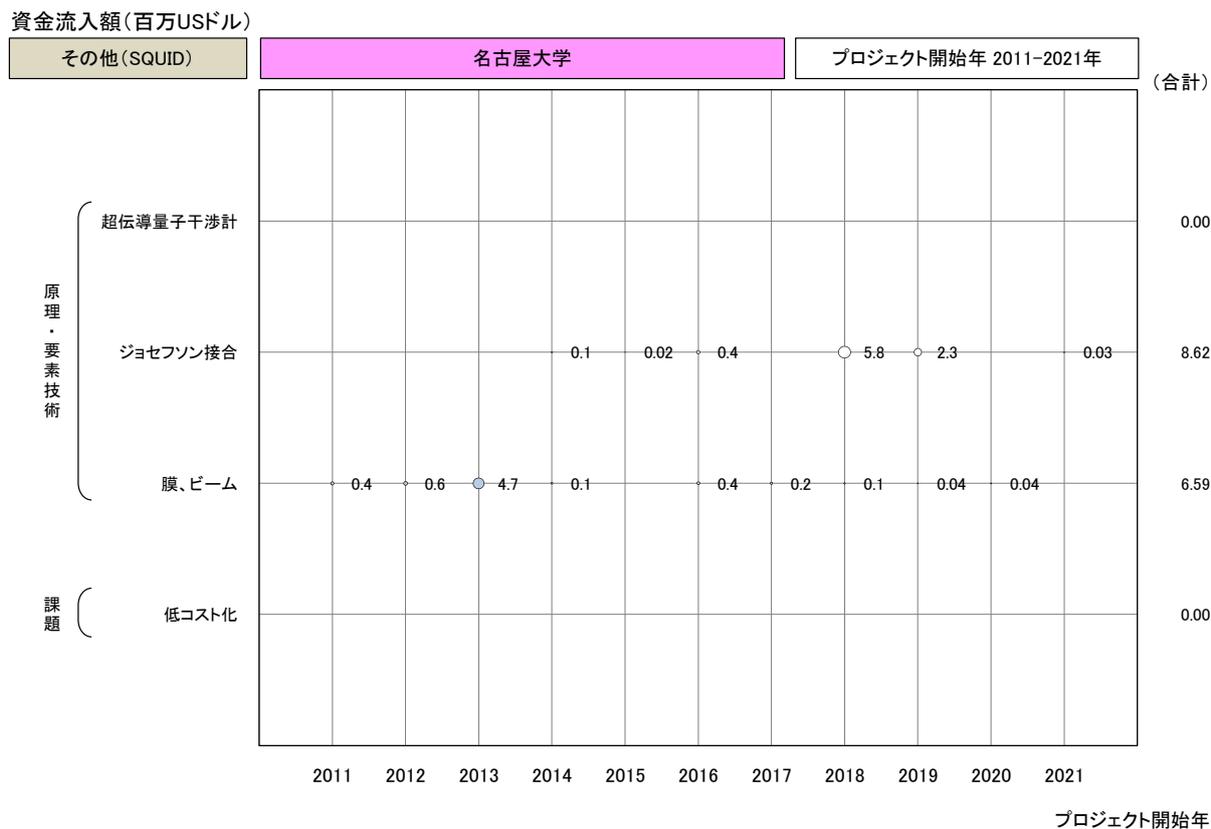


注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。

注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。

(https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

図 6-3-4(7b) その他技術（超伝導量子干渉素子（SQUID））における「名古屋大学」の資金流入額推移
（プロジェクト開始年：2011-2021年）



注 1) 2021 年は、各国・地域によってグラントデータベースの収録状況が異なるので注意が必要である。
 注 2) 米ドルへの換算レートは、IMF（国際通貨基金）の提供する「Exchange Rate Archives by Month」を用いて各年 12 月の平均値を採用した。ただし、2021 年は 10 月 1 日～21 日の平均値を採用した。
 (https://www.imf.org/external/np/fin/data/param_rms_mth.aspx)

第7部 総合分析

量子計測・センシング技術に関する以下の7区分について調査した、第1部技術概要、第2部市場環境調査、第3部政策動向調査、第4部特許動向調査、第5部論文動向調査、第6部グラント動向調査の結果をもとに、それぞれ有識者に意見を頂き、総合分析として開発状況を7区分ごとにまとめた。次ページ以降に記載する。

- ・固体量子センサ
- ・量子スピントロニクスセンサ
- ・量子もつれ光センサ
- ・光子検出器
- ・量子慣性センサ
- ・光格子時計
- ・その他（超伝導量子干渉素子（SQUID）、超核偏極技術、フォノンセンシング）

固体量子センサ技術の開発状況

<固体量子デバイスによる超高感度磁気・電界・温度・圧力センシング>

固体量子センサ	
開発状況	<ul style="list-style-type: none"> ・固体量子デバイスによる超高感度磁気・電界・温度・圧力センシング技術。 ・ダイヤモンドNVセンタ等に、励起レーザー光を照射、ゼーマン効果やシュタルク効果を偏光マイクロ波で検出する。 ・基礎研究では国際協力している。International Forum on Quantum Metrology and Sensing (IFQMS)などで連携している。 ・小型化開発も進行中。今後、応用技術探索が重要となる。 ・研究開発フェーズ。
応用分野	<ul style="list-style-type: none"> ・応用は、自動車搭載のパワーデバイスの高精度温度・電流計測、生体の電場・磁気・温度・pH計測など、自動車、医療(創薬、免疫用途、非侵襲生体計測等)、ヘルスケア、軍事まで幅広い可能性がある。企業を取り込んだ応用開発が今後重要になる。 ・Multi NVセンタは、応答速度が遅く高速通信には不向きだが、Single NVセンタは、量子通信の中継器応用も想定している。
装置・部品・材料・SW	<ul style="list-style-type: none"> ・材料としては、ダイヤモンドが主流であるが、SiC、h-BNなども研究されている。電子線やイオン注入などによる欠陥導入技術も重要。マイクロ波やレーザー光源等の量子操作技術、ノイズキャンセリングや画像生成のソフトウェア技術が重要。
製造/測定/分析装置	<ul style="list-style-type: none"> ・製造装置は、CVD装置や高温高圧装置など開発段階である。 ・測定/分析装置は、単機能の装置を組み合わせ使用している。

量子スピントロニクスセンサ技術の開発状況

<量子スピントロニクスデバイスによる高感度磁気・熱流センシング>

量子スピントロニクスセンサ	
開発状況	<ul style="list-style-type: none"> 量子スピントロニクスデバイスによる高感度磁気・熱流センシング。TMR効果やスピンゼンバーベック効果を活用。 感度、コスト、ダイナミックレンジ、生産性のバランスは、他量子センシング技術に比し有利。 TMR素子は、製品開発フェーズ。スピン熱流素子は、基礎研究フェーズ。
応用分野	<ul style="list-style-type: none"> 応用毎に仕様が変わり、少量多品種応用が重要。ユーズの要求性能を取り込んだ製品開発が必須。高感度センサは、車、医療、ヘルスケアなどで広く普及する可能性がある。企業を取込み、応用開拓と製品グルーピングが必要。 スピン熱流素子は、まだ基礎研究段階でキラーアプリがまだない。
装置・部品・材料・SW	<ul style="list-style-type: none"> トンネル磁気抵抗効果を用いた磁気トンネル接合(MTJ)素子で構成。成膜、後工程が重要。 高感度に測定するノウハウが重要。 イットリウム鉄酸化物(YIG)と強磁性体配線でスピン熱流素子を構成。
製造/測定/分析装置	<ul style="list-style-type: none"> 国内外の大手メーカーの半導体製造装置が活用されている。

量子もつれセンサ技術の開発状況

<量子もつれ光子を活用した低ノイズの高感度センシング>

量子もつれセンサ	
開発状況	<ul style="list-style-type: none"> 量子もつれ光子を活用した低ノイズの高感度センシング。量子もつれ顕微鏡、量子OCT、量子レーザー、量子赤外分光などの応用が提案され検証中。 量子赤外分光が2016年以降注目され、最近研究開発が盛んである。市場があり、5年以内の小型商品化を目指している。 研究開発フェーズ。
応用分野	<ul style="list-style-type: none"> 量子顕微鏡、量子OCT(Optical Coherent Tomography)、量子レーザー、量子赤外分光など。 量子赤外分光は、ハンディタイプが実現できれば応用範囲が広がる。更に小型化できれば、組み込み応用にも適用できる。 量子OCTは、3Dイメージングが可能で、評価装置メーカーに注目されている。
装置・部品・材料・SW	<ul style="list-style-type: none"> 励起レーザー、次世代材料技術(InSb検出器など)、非線形光学素子、光子検出器、周辺光学機器など。 センサ画像データ処理は、重要なノウハウである。
製造/測定/分析装置	<ul style="list-style-type: none"> 検出器、非線形光学素子、周辺光学機器など。 フォトンカウンティングは海外勢が強いが、国内には単一光子検出器などで先行している企業がいる。

光子検出器技術の開発状況

<超伝導ナノ配線や多層膜の光子による超伝導状態の遷移を活用した超高感度光子センシング>

光子検出器	
開発状況	<ul style="list-style-type: none"> ・超伝導ナノ配線や多層膜の光子による超伝導状態の遷移を活用した超高感度光子センシング。実証実験完了。 ・SSPDは、量子通信、量子暗号のKey部品で、製品化もされている。製品開発フェーズ。 ・TESは、可視光や近赤外光に感度がある。研究開発フェーズ。
応用分野	<ul style="list-style-type: none"> ・SSPDは応答速度が速く(1M～数100MHz)、量子コンピュータ/量子通信/量子インターネットなどに応用可能。 ・TESは応答速度が遅く(数10kHz～100kHz)、量子コンピュータ/量子通信には不向き。APDに比し、低光子Dark Count、広波長レンジ(可視光、赤外光)に優れていて、感度重視の応用に適している。
装置・部品・材料・SW	<ul style="list-style-type: none"> ・SSPDは、NICT、AISTが重要部品技術を継続的に研究開発し、米国と共に先行。 ・TESは、成膜、後処理技術、ノウハウ、波長分解能で、日本が先行。冷凍器は温度安定性から海外製が多い。高品質のSQUID材料が手に入り難い。
製造/測定/分析装置	<ul style="list-style-type: none"> ・製造装置は、半導体製造装置の流用である。

量子慣性センサ技術の開発状況

＜光パルスを用いた極低温原子の干渉計による超高感度な加速度センシング、角速度センシング、重力勾配センシング＞

量子慣性センサ	
開発状況	<ul style="list-style-type: none"> ・極低温原子のド・ブロイ波を干渉を利用し、加速度、角速度、重力勾配などを検出。 ・振動や加速を伴う実用環境下でも機能するセンサとして実装開発。 ・経済原理に則ると小型化/低コスト化技術の醸成が必須だが、安全保障上は性能重視となる。 ・研究開発フェーズ。
応用分野	<ul style="list-style-type: none"> ・量子慣性センサによる超高性能の非GPS航法装置を開発し、Autonomous Underwater Vehicle (AUV)を使った海洋資源探査や、自動運転船舶などへの応用を想定している。
装置・部品・材料・SW	<ul style="list-style-type: none"> ・量子慣性センサは、原子のド・ブロイ波を使用しているため、応答速度が遅く(100ms～1s)、クオーツペンデulum加速度計・MEMS加速度計と量子加速度計とのハイブリッドや、ファイバーオプティクジャイロ(FOG)と量子ジャイロとのハイブリッドなどの方式が研究開発されている。ハイブリッド・エレクトロニクス部品が重要であるが、日本は一部欠落している(市場規模、光バブルが原因で撤退)。ハイブリット化する技術とノウハウが重要。
製造/測定/分析装置	<ul style="list-style-type: none"> ・センサの応答をモーションシミュレーターを使って評価している。

光格子時計技術の開発状況

<レーザー光で形成された光格子に束縛された多数の原子にレーザー光を照射・分光し、超高感度な光時計を実現。高精度な重力ポテンシャルセンシング>

光格子時計	
開発状況	<ul style="list-style-type: none"> ・特別な波長のレーザー光で作った光格子に、100万個ものストロンチウム原子を入れ、それぞれの原子の振動数を同時に観測、原子固有の周波数・時間測定を実現。 ・時計の精度としては、日本が10^{-18}の精度で先行しているが、米国JILAやドイツPTBなども追っかけて来ている。 ・研究開発フェーズ。
応用分野	<ul style="list-style-type: none"> ・高精度時刻測定、高精度な標高測地、GPS高度利用、地下資源探査、地殻変動など地震・火山に関わる防災等。地下資源探査は、重力差で検出。応用の実証はこれから。
装置・部品・材料・SW	<ul style="list-style-type: none"> ・メイン部品であるレーザー光源は、ドイツのトプティカが主流。中国が大量に購入。日本は光冷却レーザーの青色(461nm)、原子遷移レーザーの赤色(689nm)の国内調達では有利。 ・光周波数コムは、ドイツMenlo Systemsが独占。 ・すり合わせ技術が重要。
製造/測定/分析装置	<ul style="list-style-type: none"> ・汎用装置を使用しやすり合わせ技術で構築しておりノウハウの蓄積が必要。

超伝導量子干渉素子(SQUID)技術の開発状況

<超伝導量子干渉素子(SQUID)による超高感度磁気センシング>

超伝導量子干渉素子(SQUID)	
開発状況	<ul style="list-style-type: none"> ・ジョセフソン接合を含む環状超伝導体で、極めて弱い磁場の検出に用いられる非常に感度の高い磁気センサー。 ・基礎技術開発はほぼ完了し製品化フェーズ。 ・高温超伝導SQUIDは、性能改善、冷却器の負担軽減のため研究開発中。 ・製品開発フェーズ。
応用分野	<ul style="list-style-type: none"> ・高感度磁気センサー(5×10^{-18} T)、脳磁計、心磁計、MRI、地震観測、鉱物探査、異物検査などの応用。
装置・部品・材料・SW	<ul style="list-style-type: none"> ・超伝導体材料と積層化は、特性向上中。Nb、Al系はAISTが強みを持っている。加工精度はμmオーダーで半導体装置で可。 ・高温超伝導体SQUIDは、高性能であるが、再現性がなく歩留りが課題。 ・装置の小型化、感度向上が必要。
製造/測定/分析装置	<ul style="list-style-type: none"> ・スパッタ装置、MBE装置などの成膜装置。リングラファイ加工はμmオーダーでLegend露光装置で充分対応可。

超核偏極技術の開発状況

<核スピンの偏極率を向上するトリプレットDNPによる超高感度磁気センシング>

超核偏極	
開発状況	<ul style="list-style-type: none"> 核スピンの偏極率を向上できるトリプレットDNP(Dynamic Nuclear Polarization)が発見され、核磁気共鳴や磁気共鳴イメージングの感度を千倍にすることが可能となった。 従来の低温超核偏極に対し、室温超核偏極の開発は始まったばかり。 低温超核偏極は製品開発フェーズ、室温超核偏極は、研究開発フェーズ。
応用分野	<ul style="list-style-type: none"> 高感度NMR/MRI(感度1000倍)、材料開発、生化学研究などの応用。 NMR応用はBruker Biospin社、JEOL Resonance、MRI応用はCanon、富士フイルム。低温超核偏極は、Bruker、GE Healthcare、JEOL Resonanceが先行している。
装置・部品・材料・SW	<ul style="list-style-type: none"> 高偏極源分子、プローブ分子、レーザー光源、超伝導電磁石で構成される。
製造/測定/分析装置	<ul style="list-style-type: none"> レーザー装置、マイクロ波回路、電磁石、DNP材料分析装置など。

フォノンセンシング技術の開発状況

<時間的なフォノン圧縮法によるフォノンセンシング>

フォノンセンシング	
開発状況	<ul style="list-style-type: none"> ・時間的なフォノン圧縮法によるセンシングである。フォノンバンド分散の人工的制御が可能なフォノンニック結晶導波路を用いて、分散制御によるフォノンパルスの圧縮を実現する。 ・研究開発フェーズ。
応用分野	<ul style="list-style-type: none"> ・高感度非破壊検査、ソナー、医療用の超音波検査、遠赤外線センサなどの応用。
装置・部品・材料・SW	<ul style="list-style-type: none"> ・極低温においてギガヘルツ帯で振動する百ナノメートルスケールの共振器を製作、フォノンを1個の単位で検出(10^{-17}m以下)のオーダーの変位)できる。フォノンニック結晶導波路は、GaAs/Al_{0.27}Ga_{0.73}As/n-GaAsヘテロ構造やSi/SiO₂/Si基板の多重シリンダ構造を有する非線形MEMS素子。フォノンニック結晶加工(<26nm)、時間的なフォノン圧縮法の高精度化が必要。
製造/測定/分析装置	<ul style="list-style-type: none"> ・半導体装置を流用。

資料

資料 1 特許検索式

		Derwent Innovation DWPI	検索日 2021/9/15
番号	検索結果	検索クエリ	
1	2587843	CKF=(JP same (A or B or B2 or B1 or X)) and DPRY>=(2010) and DPRY<=(2019);	日本への出願
2	3282406	CC=(US) and DPRY>=(2010) and DPRY<=(2019);	米国への出願
3	1601059	(CC=(EP or BE or CH or CZ or DK or FI or GB or HU or IE or IT or LU or NL or NO or PT or RO or SE or SK) or CKF=(FR same (A or A1 or A2 or B1 or B2 or E or M) or AT same (A or A1 or A2 or A4 or B or B1 or B2) or ES same (A or A1 or A2 or A6 or B or B1 or B2 or T1 or T3 or T4 or T5 or T OR 7 or T8 or T9) or PL same (A1 or A3 or B1 or B3) OR TR same (A or T3 or T4))) and DPRY>=(2010) and DPRY<=(2019);	欧州への出願
4	561397	CKF=(DE same (A or A1 or A5 or A8 or A9 or B or B3 or B4 or B8 or B9 or C or C1 or C2 or C5 or C8 or C9 or T or T5 or T2 or T8 or T9 or T0 or E or G)) and DPRY>=(2010) and DPRY<=(2019);	ドイツへの出願
5	9395668	CKF=(CN same (A or B or C)) and DPRY>=(2010) and DPRY<=(2019);	中国への出願
6	1653362	CKF=(KR same (A or B1 or B)) and DPRY>=(2010) and DPRY<=(2019);	韓国への出願
7	2162604	CC=(WO) and DPRY>=(2010) and DPRY<=(2019);	PCTへの出願
8	15192473	1 or 2 or 3 or 4 or 5 or 6 or 7	国限定用母集団
9	37	ALLD=(quantum ADJ3 (sensor* OR sensing) AND (solid ADJ state* OR diamond)) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	固体量子センサ
10	122	ALLD=(vacancy ADJ (center* OR centre*)) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	空孔センタ
11	0	ALLD=(nanoscale ADJ diamond ADJ magnetometry) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	ナノスケール ダイヤモンド
12	0	ALLD=(diamond ADJ magnetometry) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	ダイヤモンド 磁力計
13	4	ALLD=(heteroepitaxial ADJ diamond) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	ヘテロエピタキシャル ダイヤモンド
14	1	ALLD=(nano* adj2 microdiamonds) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	ナノ 磁力計
15	154	ALLD=(NV ADJ (center OR centre)) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	NVセンタ
16	27	ALLD=(optical ADJ detected ADJ magnetic ADJ resonance) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	磁気共鳴 光検出磁
17	20	ALLD=(fluorescent ADJ diamond) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	蛍光ダイヤモンド
18	0	ALLD=(diamond AND lithography ADJ (center OR centre)) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	ダイヤモンド&発光センタ
19	438	ALLD=(nitrogen ADJ vacancy ADJ (center OR centre) OR nitrogen ADJ vacancy OR NV ADJ (center OR centre) OR NVC) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	N V 中心
20	0	ALLD=(nitrogen ADJ vacancy ADJ complex ADJ (center OR centre)) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	窒素-空孔複合体中心、窒素-空孔複合体
21	9	ALLD=(diamond ADJ quantum ADJ magnetometry OR diamond ADJ quantum ADJ sensor OR fluorescent ADJ nanodiamonds) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	追加
22	1	ALLD=(solid ADJ quantum ADJ sensor) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	solid quantum sensor
23	96	ALLD=(color ADJ (center OR centre) AND diamond) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	color center & diamond
24	25	ALLD=(ODMR AND magnetic) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	ODMR & magnetic
25	1	ALLD=(forming ADJ void ADJ defect AND diamond) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	forming void defect & diamond
26	10	ALLD=(image ADJ device AND magnetic AND diamond) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	
27	530	(9 OR 10 OR 11 OR 12 OR 13 OR 14 OR 15 OR 16 OR 17 OR 18 OR 19 OR 20 OR 21 OR 22 OR 23 OR 24 OR 25 OR 26) AND 8	1.固体量子センサ

28	6	ALLD=(Quantum adj2 (spin* near5 (sensor OR Sensing))) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	量子スピントロクスセンサ
29	447	ALLD=(Tunnel ADJ Magneto ADJ Resistance) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	TMR
30	3472	ALLD=(magnetic ADJ tunnel ADJ junction) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	MTJ
31	19	ALLD=(Tunneling ADJ Magneto ADJ Resistance near ratio) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	TMR比
32	2	ALLD=(spin ADJ flow ADJ device) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	スピン熱流素子
33	39	ALLD=(spin ADJ seebeck ADJ effect) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	スピンゼーベック効果
34	0	ALLD=(spin ADJ pelche ADJ effect) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	スピンペルチェ効果
35	680	ALLD=(tunneling ADJ magneto ADJ resistive ADJ sensor OR tunneling ADJ magneto ADJ resistive OR TMR ADJ sensor OR TMR ADJ device OR Tunnel ADJ magnetoresistance ADJ effect OR tunneling ADJ magneto ADJ resistance) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	トンネル磁気抵抗素子 (T M R 素子)
36	587	ALLD=(magneto ADJ resistive ADJ sensor) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	磁気抵抗素子、磁気抵抗効果素子
37	303	ALLD=(giant ADJ magneto ADJ resistive ADJ effect OR giant ADJ magneto ADJ resistive ADJ effect ADJ sensor OR GMR ADJ sensor OR GMR ADJ device) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	巨大磁気抵抗効果素子
38	418	ALLD=(giant ADJ magneto ADJ resistance) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	巨大磁気抵抗効果
39	348	ALLD=(spin ADJ flow) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	スピン流
40	414	ALLD=(giant ADJ magnetoresistance OR giant ADJ magneto ADJ impedance) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	巨大磁気抵抗 (効果)
41	312	ALLD=(tunnel ADJ (magnetoresistive OR magnetro ADJ resistiv)) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	tunnel magnetoresistive
42	1216	ALLD=((magnetoresistive OR magneto ADJ resistive) ADJ element) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	magneto-resistive element
43	14	ALLD=(magnetic ADJ sensor AND tunnel ADJ layer) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	magnetic sensor & tunnel layer
44	576	ALLD=(magnetoresistive ADJ effect ADJ element) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	magnetoresistive effect element
45	898	ALLD=(tunnel ADJ magneto ADJ resistive OR magnetic ADJ marker) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	tunnel magneto-resistive、magnetic marker
46	737093	ALLD=(memory OR MRAM) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	(memory OR MRAM)を除く
47	1932655	ALLD=(sensor OR detector OR biosensor) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	ただし(memory OR MRAM)でも (Sensor, detector,biosensor) があるものは残す
48	966	30 not 46 or 30 and 46 and 47	MTJ
49	566	35 not 46 or 35 and 46 and 47	トンネル磁気抵抗素子 (T M R 素子)
50	587	36 not 46 or 36 and 46 and 47	磁気抵抗素子、磁気抵抗効果素子
51	294	37 not 46 or 37 and 46 and 47	巨大磁気抵抗効果素子
52	402	38 not 46 or 38 and 46 and 47	巨大磁気抵抗効果
53	401	40 not 46 or 40 and 46 and 47	巨大磁気抵抗 (効果)
54	262	41 not 46 or 41 and 46 and 47	tunnel magnetoresistive
55	883	42 not 46 or 42 and 46 and 47	magneto-resistive element
56	392	44 not 46 or 44 and 46 and 47	magnetoresistive effect
57	784	45 not 46 or 45 and 46 and 47	tunnel magneto-resistive、magnetic marker
58	4054	(28 OR 29 OR 48 OR 31 OR 32 OR 33 OR 34 OR 49 OR 50 OR 51 OR 52 OR 39 OR 53 OR 54 OR 55 OR 43 OR 56 OR 57) AND 8	2.量子スピントロクスセンサ

59	7	ALLD=(quantum NEAR entangl* AND optical AND (sensor OR sensing)) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	量子もつれ光センサ
60	0	ALLD=(quantum ADJ entangl* ADJ microscope) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	量子もつれ顕微鏡
61	2	ALLD=(quantum ADJ optical ADJ coherence ADJ tomography) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	量子OCT
62	2	ALLD=(hong ADJ ou ADJ mandel ADJ interference) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	HOM干渉
63	32	ALLD=(quantum adj2 radar) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	量子レーダー
64	7	ALLD=(quantum ADJ entanglement ADJ light ADJ source) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	量子もつれ光源
65	51	ALLD=(superconducting ADJ nano ADJ wire) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	超伝導ナノワイヤ
66	36	ALLD=(non ADJ linear ADJ optical ADJ element OR NLOE) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	非線形光学素子
67	36	ALLD=(idler ADJ photon) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	アイドラー光子
68	297	ALLD=(quantum near entangl*) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	量子もつれ
69	3	ALLD=(flux ADJ quantum ADJ voltage ADJ pulse OR pulse ADJ multiplication ADJ device) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	磁束量子電圧パルス増倍装置
70	416	(59 OR 60 OR 61 OR 62 OR 63 OR 64 OR 65 OR 66 OR 67 OR 68 OR 69) AND 8	3.量子もつれ光センサ
71	8	ALLD=(quantum NEAR3 (sensor OR sensing) AND photon ADJ detector) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	光子検出器
72	791	ALLD=(single ADJ photon near detector) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	単一光子検出器
73	0	ALLD=(superconduct* ADJ (nano ADJ strip OR nanostrip) ADJ photon ADJ detector) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	SSPD
74	59	ALLD=(superconducting ADJ nanowire ADJ single ADJ photon ADJ (detector OR photodetector)) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	超伝導ナノワイヤ単一光子光検出器 (SNSPD)
75	24	ALLD=(transition ADJ edge ADJ sensor) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	TES
76	3	ALLD=(superconducting ADJ transition ADJ edge ADJ sensor) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	超伝導転移端センサ
77	26	ALLD=(double ADJ side ADJ cavity) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	ダブルサイドキャビティ
78	529	ALLD=(dielectric ADJ (multi ADJ layer OR multilayer)) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	誘電体多層膜
79	0	ALLD=((multi ADJ pixel OR multipixel) ADJ superconduct* ADJ (nano ADJ strip OR nanostrip) ADJ photon near detector) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	マルチピクセルSSPD
80	7	ALLD=(single ADJ flux ADJ quantum ADJ Circuit) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	磁束量子SFQ論理回路
81	3	ALLD=(flux ADJ quantum ADJ voltage ADJ pulse OR pulse ADJ multiplication ADJ device) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	flux-quantum voltage pulse, pulse multiplication device
82	1193	(71 OR 72 OR 73 OR 74 OR 75 OR 76 OR 77 OR 78 OR 79 OR 80 OR 81) AND 8	4.光子検出器
83	9	ALLD=(quantum AND inertial ADJ sensor) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	量子慣性センサ
84	129	ALLD=(atom ADJ interferometer) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	原子干渉計
85	5	ALLD=(optical ADJ pulse AND atom ADJ interferometer) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	光パルス型原子干渉計
86	6	ALLD=(atomic ADJ gravimeter) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	原子重力計
87	43	ALLD=(atomic ADJ gyroscope) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	原子ジャイロ
88	33	ALLD=(matter ADJ wave OR de ADJ broglie ADJ wave ADJ sensor) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	ド・ブロイ波 センサー
89	3	ALLD=(quantum AND inertial ADJ measurement) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	慣性計測
90	1	ALLD=(atomic ADJ beam ADJ gyro) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	原子ビームジャイロ
91	0	ALLD=(mach ADJ zehnder ADJ atomic ADJ interference) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	マッハツェンダー型原子干渉
92	5	ALLD=(atomic ADJ interference ADJ gyroscope) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	原子干渉 ジャイロスコープ
93	0	ALLD=(ion ADJ trap ADJ angle near measure) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	イオントラップ 角度計測 ジャイロスコープ
94	0	ALLD=(ion ADJ trap ADJ angle ADJ gyroscope) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	イオントラップ 角度計測 ジャイロスコープ
95	0	ALLD=(matter ADJ wav ADJ gyro) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	ド・ブロイ波 ジャイロ
96	1	ALLD=(gyroscope ADJ based NEAR2 atomic ADJ interference) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	Gyroscope based on atomic interference
97	1	ALLD=(gyroscope ADJ based NEAR2 mach ADJ zehnder ADJ type NEAR atom ADJ interference) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	Gyroscope based on Mach Zehnder type atom
98	196	(83 OR 84 OR 85 OR 86 OR 87 OR 88 OR 89 OR 90 OR 91 OR 92 OR 93 OR 94 OR 95 OR 96 OR 97) AND 8	5.量子慣性センサ

99	7	ALLD=(optical ADJ lattice* ADJ clock) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	光格子時計
100	0	ALLD=(optical ADJ lattice ADJ laser ADJ clock) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	光格子レーザー時計
101	1	ALLD=("Laser for observation") AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	観測用レーザー
102	77	ALLD=(magneto ADJ optical ADJ trap) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	磁気光学トラップ
103	32	ALLD=(high ADJ precision ADJ time ADJ measurement) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	高精度時間計測
104	2	ALLD=(light ADJ source ADJ2 atomic ADJ clock) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	原子時計用光源
105	4	ALLD=(Ion ADJ watch) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	イオン時計
106	0	ALLD=(atom ADJ microwave ADJ clock) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	マイクロ波原子時計
107	77	ALLD=(magneto ADJ optical ADJ trap) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	磁気光学トラップ
108	848	ALLD=(atom ADJ clock) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	原子時計
109	820	(99 OR 100 OR 101 OR 102 OR 103 OR 104 OR 105 OR 106 OR 107 OR 108) AND 8	6.光格子時計
110	315	ALLD=(superconducting ADJ quantum ADJ (interference ADJ device OR Interferometer)) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	超伝導量子干渉計 SQUID
111	485	ALLD=(Josephson ADJ junction) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	ジョセフソン接合
112	42	ALLD=(high ADJ sensitivity ADJ magnetic ADJ (sensor or sensing)) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	高感度磁気センサ
113	717	(110 OR 111 OR 112) AND 8	7a.SQUID
114	108	ALLD=(nuclear ADJ polarization) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	超核偏極技術
115	1	ALLD=(triplet ADJ dynamic ADJ nuclear ADJ polarizat*) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	トリプレットDNP
116	121	(ALLD=(nuclear ADJ magnet ADJ resonance) OR ICR=(G01N002408 OR G01R003344 OR G01R003346 OR G01R0033465 OR G01R003348 OR G01R0033483 OR G01R0033485 OR G01R003350 OR G01R003354 OR G01R003356 OR G01R0033561 OR G01R0033563 OR G01R0033565 OR G01R0033567 OR G01R003358 OR A61K004906)) AND ALLD=(quantum) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	磁気共鳴断層撮影装置NMR
117	144	(ALLD=(magnetic ADJ resonance ADJ imaging) OR ICR=(A61K004906)) AND ALLD=(quantum) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	磁気共鳴断層撮影装置MRI
118	329	(114 OR 115 OR 116 OR 117) AND 8	7b.超核偏極
119	64	ALLD=(phonon AND sensing) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	フォノンセンシング
120	0	ALLD=(phonon NEAR compress*) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	フォノン圧縮
121	2	ALLD=(phononic ADJ crystal ADJ waveguide) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	フォノン結晶導波路
122	45	ALLD=(thermoelectric ADJ energy ADJ harvester) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	熱電エネルギーハーベスタ
123	303	ALLD=(far ADJ infrared ADJ (sensor OR sensing)) AND DPRY>=(2010) AND DPRY<=(2019);	遠赤外線センサ
124	266	(119 OR 120 OR 121 OR 122 OR 123) AND 8	7c.フォノンセンシング

資料2 論文検索式

Web of Science

検索日: 2021/10/12

番号	検索結果	検索クエリ	備考
1	268	ALL=(("quantum sensor*" OR "quantum sensing") AND ("solid state*" OR diamond*)) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article") AND DT=("Article");	固体量子センサ
2	1856	ALL=(("vacancy center*" OR "vacancy centre*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	空孔センタ
3	0	ALL=(("nanoscale diamond* magnetometry") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	ナノスケール ダイヤモンド
4	14	ALL=(("diamond* magnetometry") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	ダイヤモンド 磁力計
5	43	ALL=(("heteroepitaxial diamond*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	ヘテロエピタキシャル ダイヤモンド
6	18	ALL=(nano* adj2 microdiamond*) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	ナノ 磁力計
7	1193	ALL=(("NV center*" OR "NV centre*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	NVセンタ
8	2	ALL=(("optical detected magnetic resonance") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	磁気共鳴 光検出磁
9	20	ALL=(("fluorescent diamond*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	蛍光ダイヤモンド
10	0	ALL=(diamond* and ("lithography center*" OR "lithography centre*")) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	ダイヤモンド & 発光センタ
11	2674	ALL=(("nitrogen vacancy center*" OR "nitrogen vacancy centre*" OR "nitrogen vacancy" OR "NV center*" OR "NV centre*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	NV中心
12	0	ALL=(("nitrogen vacancy complex center*" OR "nitrogen vacancy complex centre*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	窒素-空孔複合体中心、窒素-空孔複合体
13	483	ALL=(("diamond quantum magnetometry" OR "diamond quantum sensor*" OR "fluorescent nanodiamond*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	追加
14	1	ALL=(("solid quantum sensor*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	solid quantum sensor
15	633	ALL=(("color center*" OR "color centre*") AND diamond* NOT "diamond color") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	color center & diamond
16	130	ALL=(ODMR AND magnetic) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	ODMR & magnetic
17	0	ALL=(("forming void defect*" AND diamond*) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	forming void defect & diamond
18	0	ALL=(("image device*" AND magnetic AND diamond*) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	
19	3547	1 OR 2 OR 3 OR 4 OR 5 OR 6 OR 7 OR 8 OR 9 OR 10 OR 11 OR 12 OR 13 OR 14 OR 15 OR 16 OR 17 OR 18	1.固体量子センサ
20	2	ALL=(("quantum sensor*" OR "quantum sensing") NEAR5 spintro*) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	量子スピントロニクスセンサ
21	1411	ALL=(("tunnel magneto resistance" OR "tunneling magnetoresistance" OR "tunnel magnetoresistance" OR "tunneling magneto resistance") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	TMR
22	2640	ALL=(("magnetic tunnel junction*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	MTJ
23	14	ALL=(("tunneling magneto resistance" NEAR ratio) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	TMR比
24	0	ALL=(("spin flow device*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	スピン熱流素子
25	461	ALL=(("spin seebeck effect*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	スピンゼーベック効果
26	0	ALL=(("spin pelche effect*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	スピネルチェ効果
27	193	ALL=(("tunneling magneto resistive sensor*" OR "tunneling magneto resistive" OR "TMR sensor*" OR "TMR device*" OR "Tunnel magnetoresistance effect*" OR "tunneling magneto resistance") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	トンネル磁気抵抗素子 (TMR 素子)
28	32	ALL=(("magneto resistive sensor*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	磁気抵抗素子、磁気抵抗効果素子
29	306	ALL=(("giant magneto resistive effect*" OR "giant magneto resistive effect sensor*" OR "GMR sensor*" OR "GMR device*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	巨大磁気抵抗効果素子
30	92	ALL=(("giant magneto resistance") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	巨大磁気抵抗効果
31	40	ALL=(("spin flow") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	スピン流
32	2514	ALL=(("giant magnetoresistance" OR "giant magneto impedance" OR "giant magnetoresistance") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	巨大磁気抵抗 (効果)
33	29	ALL=(("tunnel magnetoresistive" OR "tunnel magneto resistiv") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	tunnel magnetoresistive
34	20	ALL=(("magnetoresistive element*" OR "magneto resistive element*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	magneto-resistive element
35	0	ALL=(("magnetic sensor*" AND "tunnel layer*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	magnetic sensor & tunnel layer
36	0	ALL=(("magnetoresistive effect element*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	magnetoresistive effect element
37	86	ALL=(("tunnel magneto resistive" OR "magnetic marker*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	tunnel magneto-resistive、magnetic marker
38	272361	ALL=(memory OR MRAM) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	(memory OR MRAM)を除く
39	580101	ALL=(sensor* OR detector* OR biosensor*) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	ただし(memory OR MRAM)あっても (Sensor, detector,biosensor)があるものは残す
40	1820	22 not 38 or 22 and 38 and 39	MTJ
41	173	27 not 38 or 27 and 38 and 39	トンネル磁気抵抗素子 (TMR 素子)
42	32	28 not 38 or 28 and 38 and 39	磁気抵抗素子、磁気抵抗効果素子
43	301	29 not 38 or 29 and 38 and 39	巨大磁気抵抗効果素子
44	87	30 not 38 or 30 and 38 and 39	巨大磁気抵抗効果
45	2419	32 not 38 or 32 and 38 and 39	巨大磁気抵抗 (効果)
46	27	33 not 38 or 33 and 38 and 39	tunnel magnetoresistive
47	18	34 not 38 or 34 and 38 and 39	magneto-resistive element
48	0	36 not 38 or 36 and 38 and 39	magnetoresistive effect element
49	86	37 not 38 or 37 and 38 and 39	tunnel magneto-resistive、magnetic marker
50	5813	20 OR 21 OR 40 OR 23 OR 24 OR 25 OR 26 OR 41 OR 42 OR 43 OR 44 OR 31 OR 45 OR 46 OR 47 OR 35 OR 48 OR 49	2.量子スピントロニクスセンサ

51	109	ALL=(quantum NEAR entangl* AND optical adj (sensor* OR sensing)) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	量子もつれ光センサ
52	15	ALL=(“quantum entangl* microscope*” OR “quantum optical coherence tomography” OR “entanglement enhanced microscope*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	量子もつれ顕微鏡
53	14	ALL=(“quantum optical coherence tomography”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	量子OCT
54	135	ALL=(“hong ou mandel interference”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	HOM干渉
55	48	ALL=(quantum adj2 radar*) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	量子レーダー
56	0	ALL=(“quantum entanglement light source*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	量子もつれ光源
57	5	ALL=(“superconducting nano wire*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	超伝導ナノワイヤ
58	2	ALL=(“non linear optical element*” OR NLOE) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	非線形光学素子
59	52	ALL=(“idler photon”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	アイドラー光子
60	3326	ALL=(“quantum entangl*” OR “entangl* quantum” OR “quantum absorption spectroscopy”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	量子もつれ、量子吸収スペクトラム
61	0	ALL=(“flux quantum voltage pulse” OR “pulse multiplication device*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	磁束量子電圧パルス増倍装置
64	3648	51 OR 52 OR 53 OR 54 OR 55 OR 56 OR 57 OR 58 OR 59 OR 60 OR 61	3.量子もつれ光センサ
65	24	ALL=(quantum NEAR3 (sensor* OR sensing) AND “photon detector*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	光子検出器
66	1853	ALL=(“single photon” near detector*) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	単一光子検出器
67	138	ALL=(“superconduct* nano strip photon detector*” OR “superconduct* nanostrip photon detector*” OR “superconduct* single photon optical detector*” OR “superconduct* single photon detector*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	SSPD
68	418	ALL=(“superconduct* nanowire single photon detector*” OR SNSPD) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	超伝導ナノワイヤー単一光子光検出器 (SNSPD)
69	663	ALL=(“transition edge sensor*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	TES
70	129	ALL=(“superconducting transition edge sensor*” OR “transition edge microcalorimeter*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	超伝導転移端センサ
71	1	ALL=(“double side cavity”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	ダブルサイドキャビティ
72	276	ALL=(“dielectric multi layer” OR “dielectric multilayer”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	誘電体多層膜
73	0	ALL=(“multi pixel superconduct* nano strip photon” near detector* OR “multipixel superconduct* nanostrip photon” near detector* OR “multi pixel superconduct* nano strip photon” near detector* OR “multipixel superconduct* nanostrip photon” near detector*) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	マルチピクセルSSPD
74	73	ALL=(“single flux quantum Circuit*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	磁束量子SFQ論理回路
75	0	ALL=(“flux quantum voltage pulse” OR “pulse multiplication device*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	flux-quantum voltage pulse, pulse multiplication device
76	2837	65 OR 66 OR 67 OR 68 OR 69 OR 70 OR 71 OR 72 OR 73 OR 74 OR 75	4.光子検出器
77	29	ALL=(quantum AND “inertial sensor*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	量子慣性センサ
78	412	ALL=(“atom interferometer*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	原子干渉計
79	0	ALL=(“optical pulse atom interferometer*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	光パルス型原子干渉計
80	30	ALL=(“atomic gravimeter*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	原子重力計
81	15	ALL=(“atomic gyroscope*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	原子ジャイロ
82	850	ALL=(“matter wave” OR “de broglie wave sensor*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	ド・ブロイ波 センサー
83	2	ALL=(quantum AND “inertial measurement*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	慣性計測
84	0	ALL=(“atomic beam gyro”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	原子ビームジャイロ
85	0	ALL=(“mach zehnder atomic interference”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	マッハ・ツェンダー型原子干渉
86	0	ALL=(“atomic interference gyroscope*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	原子干渉 ジャイロスコープ
87	0	ALL=(“ion trap angle” near measure) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	イオントラップ 角度計測 ジャイロスコープ
88	0	ALL=(“ion trap angle gyroscope*”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	イオントラップ 角度計測 ジャイロスコープ
89	0	ALL=(“matter wav gyro”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	ド・ブロイ波 ジャイロ
90	0	ALL=(“gyroscope based” NEAR2 “atomic interference”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	Gyroscope based on atomic interference
91	0	ALL=(“gyroscope based” NEAR2 “mach zehnder type” NEAR “atom interference”) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=(“Article”);	Gyroscope based on Mach Zehnder type atom interference
98	1255	77 OR 78 OR 79 OR 80 OR 81 OR 82 OR 83 OR 84 OR 85 OR 86 OR 87 OR 88 OR 89 OR 90 OR 91 OR 97	5.量子慣性センサ

99	250	ALL=("optical lattice* clock*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	光格子時計
100	0	ALL=("optical lattice laser clock*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	光格子レーザー時計
101	0	ALL=("Laser for observation") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	観測用レーザー
102	624	ALL=("magneto optical trap*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	磁気光学トラップ
103	15	ALL=("high precision time measurement*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	高精度時間計測
104	1	ALL=("light source" ADJ2 "atom* clock*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	原子時計用光源
105	0	ALL=("Ion watch*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	イオン時計
106	1	ALL=("atom microwave clock*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	マイクロ波原子時計
107	131	ALL=(atom* and "optical frequency comb*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	追加
108	1063	ALL=("atom* clock*") AND PY > (2009) AND PY < (2021) AND DT=(Article);	原子時計
109	1003	ALL=(atom* AND optical AND clock*) AND PY > (2009) AND PY < (2021) AND DT=(Article);	「atom」「clock」「optical」キーワード対応
110	2262	99 OR 100 OR 101 OR 102 OR 103 OR 104 OR 105 OR 106 OR 107 OR 108 OR 109	6.光格子時計
111	2278	ALL=("superconducting quantum interference device*" OR "superconducting quantum Interferometer*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	超伝導量子干渉計 SQUID
112	3377	ALL=("Josephson junction*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	ジョセフソン接合
113	18	ALL=("high sensitivity magnetic sensor*" OR "high sensitivity magnetic sensing") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	高感度磁気センサ
114	5429	111 OR 112 OR 113	7a.SQUID
115	1968	ALL=("nuclear polarization*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	超核偏極技術
116	7	ALL=("triplet dynamic nuclear polarizat*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	トリプレットDNP
117	2801	ALL=("nuclear magnet* resonance" AND quantum) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	磁気共鳴断層撮影装置NMR
118	610	ALL=("magnetic resonance imaging" AND quantum) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	磁気共鳴断層撮影装置MRI
119	5227	115 OR 116 OR 117 OR 118	7b.超核偏極
120	59	ALL=(phonon NEAR5 (sensing OR sensor*)) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	フォノンセンシング
121	266	ALL=(phonon NEAR compress*) AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	フォノン圧縮
122	25	ALL=("phononic crystal waveguide*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	フォノンニック結晶導波路
123	51	ALL=("thermoelectric energy harvester*") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	熱電エネルギーハーベスタ
124	10	ALL=("far infrared sensor*" OR "far infrared sensing") AND PY > (2010) AND PY < (2021) AND DT=("Article");	遠赤外線センサ
125	406	120 OR 121 OR 122 OR 123 OR 124	7c.フォノンセンシング