

産業技術ビジョン 2020

Old and New Issues Call for Transformation

2020.5.29

経済産業省

目 次

はじめに – Toward Society5.0

I. 2050 年の世界 避けられない潮流

II. 世界の動向

知的資本主義経済への移行

価値軸の転換

III. 日本の現状（ことの本質）

IV. 対応の方向性

もはや分岐点は超えた

中長期的に目指す姿

レイヤー1 「個」の解放によるイノベーション力の強化

レイヤー2 技術シーズを競争力につなげる研究開発・ビジネス戦略の重視

レイヤー3 知的資本主義経済を見据えた研究開発投資の重点化

V. Society5.0 を実現する Intelligence of Things とそれらを 支えるデジタルテクノロジー

VI. 政府の役割

政策手法にもイノベーション

根源的な課題への対応

産業技術ビジョンのレビュー

はじめに — Toward Society5.0



本質的な問題に「中長期の視点」と「スピード感」を持って挑戦し続ける。

少子高齢化が進展する中、日本は産業競争力の強化、SDGs の達成やサーキュラーエコノミーへの移行、災害・感染症対策等の課題に対応しなければならず、一層のイノベーション創出が不可欠となっている。しかしながら、米中がテクノロジーを梃子にイノベーション力を高めている一方で、日本の科学技術・イノベーションを巡る状況は芳しくない¹。第5期科学技術基本計画において、第4次産業革命による Society5.0 実現を打ち出したが、Society5.0 への準備がまだできていないのではないかと懸念されている。

「自前主義を脱却し、オープンイノベーションを重視すべき」、「産学連携を深め、国立研究機関は民間資金の獲得を」、「スタートアップへの投資が重要」、「企業の IT 化への取り組みが必要」...といった指摘がなされて久しい。いずれも重要だが十分実現できていないのではないかと懸念されている。その理由も含め、日本のイノベーションシステムが抱える本質的な問題は何なのか。我々はそれに向き合っているだろうか。

イノベーションの最大の担い手である企業²をはじめ、多くの組織が厳しい競争の下で短期的な成果・利益を意識せざるを得ない。他方、イノベーションは短期間では実現しない場合が多く、持続的に競争力を高める観点からも、中長期的な視点で本質的な問題に取り組む必要がある。こうした問題意識の下、この「産業技術ビジョン 2020」（以下、産業技術ビジョン）を策定した。産業技術ビジョンは、新産業構造ビジョン（2017 年 5 月）を踏まえ、産業技術という切り口から日本の課題を見つめ直し、2050 年に向けて日本の産業技術の方向性を示したものである。そして、それを基に、2025 年までに実現すべきことも記した。

今般の新型コロナウイルスによって、我々は戦後最大の危機に直面している。今回の事態は、一過性の事象にとどまらず、人類の経済社会活動やシステムに不可逆の変化をもたらすことになる。労働、商流・物流、医療、学校教育など、あらゆる分野においてこれまで以上にサイバー空間を通じた遠隔・非接触・非対面での価値の提供が鍵となり、これを支えるデジタル技術とインフラは重要性を増す。同時に、リ

¹ 2005 年以降、日本の論文数及び被引用論文数は停滞・減少傾向にあり、2015-2017 年（平均値）の日本の論文数は米、中、独に次いで 4 位となっている。また、被引用論文のうち上位 10% のいわゆる Top 10% 補正論文数は 9 位であり、質の面でもむしろ悪化している。トレンドとしても、多くの諸外国がその数を大きく伸ばしている（2015-2017 年の中国は 2005-2007 年比で 400% 以上の増加）一方で、日本のみがネガティブ（同 13% の低下）。[NISTEP, 2019] また、日本の AI 等先端技術 10 分野での国別特許出願件数は年々低下しており、中国・米国が台頭（日本：2000 年には 10 分野中 5 分野で 1 位だったが、2017 年には 2 分野で 2 位を獲得するのみ）。[日本経済新聞社, 2020] スタートアップに関しては、2010 年から 2018 年の世界のユニコーン企業数は、米国企業が計 151 社に対し、日本企業は 1 社のみ。[NISTEP, 2019]

² 企業は、2018 年度の日本の科学技術研究費総額 19.5 兆円のうち 73%、また研究者数（実数）87 万人のうち 58% を占める。[総務省, 2019]

アル空間においては、これまでのような経済効率性を優先したグローバル・サプライチェーンは持続可能ではない。サプライチェーン網の柔軟性・強靱性を平時から意識したリスク管理・ポートフォリオ組成が求められる。世界が求める価値観は、単純な経済的繁栄ではなくなる可能性もある。非常事態は、デジタル化への対応、IT インフラ、自動化・ロボット導入、強靱なサプライチェーン、非常時に柔軟に機能する制度など、日本が取り組まなければならない喫緊の課題を浮き彫りにした。「サイバー」と「リアル」の双方において、外生的ショックに柔軟かつ迅速に対応する「しなやかな経済・社会システム」への転換が不可欠である。日本は率先してそれを実現し、世界に貢献していかなければならない。

この転換を支えるのは、Intelligence of Things や次世代コンピューティング等の IT を中心としたデジタル技術である。これらは、今後の知的資本主義経済において、あらゆる分野の基盤となり、鍵を握る。産業技術ビジョンではここに焦点を当て、総合科学技術・イノベーション会議等が直近にとりまとめている分野（AI、量子、バイオ、エネルギー・環境、材料）については詳述を割愛した。

産業技術ビジョンには、古くから言われていることであっても改めて指摘すべきことを記載したため、デジャヴ（既視感）があるかもしれない。しかし、どんなに良い指摘も、問題が解決されない限り問い続けなければならない。解決されない真の理由を問い、解決後の姿を描き、覚悟をもって解決まで具体的に努力を続けなければならない。

イノベーションは、発想する人、支援する人、実行する人、伝える人、教える人、活用する人など、様々な人が関わることで生まれる。企業、大学、国研、官公庁等のすべての方がイノベーションの当事者でありパートナーである。状況は常に変化し、多様化も進み、「正解のない時代」かもしれないが、産業技術ビジョンは、日本のイノベーションの停滞という難題に対して一つの方向性を示すことで議論を喚起する。資源に乏しく、課題は山積し、「課題先進国」と言われる日本が、Society5.0 を世界に先駆けて実現できるか、イノベーションを他国から輸入する国になってしまうかは、当事者のイノベーション力にかかっている。産業技術ビジョンを1つの契機として、当事者が各々の状況を踏まえて行動を起こすべく働きかけ、日本のエンジニア、サイエンティスト、その協力者は大きな価値を創造し、評価され、その後継者が次々と登場する、イノベーションの好循環を生み出していく。

I. 2050 年の世界 避けられない潮流

歴史は、繰り返してではなく、新たに創られる。求められる価値は変わる。



2050 年に向けて、地球規模で、①世界人口のピークアウト³、②資源・環境制約が経済社会に転換をもたらす。これに、③第 4 次産業革命を通じたデジタルエコノミーへの移行、④地政学的リスクの高まり、⑤レジリエンスの重要性の高まりを加えた 5 つが、今後を展望する上で不可欠な世界の潮流である。

- 1 点目は、世界人口の増加とそれに伴う経済成長を前提としたゲームが終了するという。多くの国では高齢化も続く。規模の経済の追求がより困難となる。
- 2 点目は、地球環境のバランスの崩壊により、これまでのような外部不経済を無視した経済活動は持続不可能となること。サーキュラーエコノミーを含む持続可能な地球環境の実現に向けて、経済活動の急激な転換が不可避。
- 3 点目は、こうしたパラダイムシフトは、広義のソフトウェア化、ユーザーエクスペリエンス重視、所有から利用へ（サービス、シェアリング、サブスクリプション）といった流れを加速するという。この中核を担うのはデジタルデータエコシステムであり、それを支え、動かす基盤となるのは Intelligence of Things⁴をはじめとするデジタルテクノロジーである。
- 4 点目は、新たなイノベーションに係る競争において、グローバル・バリューチェーンの形成が一層不可欠になっていく一方で、地政学的・保護主義的なリスクが高まっていること。
- 5 点目は、深刻な自然災害の発生や、感染症の流行などに対応し、レジリエンス強化のための技術やインフラ、サプライチェーン構築が一層重要となっていくこと。

産業技術ビジョンにおいては、これらを避けられないトレンドとして考慮する。

³ 国連のレポート（“World Population Prospects 2019”）によれば、世界の人口は 2050 年に 97 億人となり、今世紀末には約 110 億人でピークに達すると予測している。[United Nations, 2019] 他方、国連の予測モデルでは考慮されていない女子教育の普及の要素等を考慮することにより、今後 30 年でピークアウトし減少に転じるとの分析もある。[Bricker Ibbitson, 2019]

⁴ CES の主催者団体である米 CTA（Consumer Technology Association）は、CES 2020 において、過去 10 年間は Internet of Things（モノのインターネット）であったのに対し、2020 年代は AI と 5G を根幹として、新たな IoT、すなわち“Intelligence” of Things の時代となると指摘している。[Jorgensen, 2020]

II. 世界の動向

多くの国が、国を挙げて変化に戦略的に対応しようとしている。



知的資本主義経済への移行

過去 30 年のグローバル化×デジタル化によってイノベーションメカニズムは激変した（垂直統合→モジュール化・レイヤー構造化、モノを中心とした価値軸→あらゆる産業のソフトウェア化、マス・プロダクション→マス・カスタマイゼーション→パーソナライゼーション⁵等）。米国、中国を中心に、知的資本⁶によって市場競争における価値を創造する知的資本主義⁷経済へと移行が進んでいる。そして、「イノベーション産業⁸」が生まれ、企業利益の伸びは IT・ハイテク分野に集中している（2012→2018 年のすべての産業分野の利益の伸び 5,300 億ドルのうち 40%を占める。自動車・自動車部品の伸びは 15%）⁹。

イノベーション産業は経済学上の資本（生産設備等）を持たないことが多く、利益率が高く¹⁰、競争力の源泉となる人材にかかる賃金レベルも高い¹¹。知的資本は IT・ハイテク産業以外の分野の競争力等にも影響力を持つ。パテントは制度によって国境を超えた権利侵害を防ぐことができるが、人そのものの移動を止めることは難しく、世界は、知的資本のグローバルな争奪戦に突入している。オープンな米国は海

⁵ 経済同友会は、産業構造の変化の背景にある需要と供給の関係に着目し、第二次産業革命後の期間を大衆による大量消費の時代、1980～2000 年頃をマス・カスタマイゼーションの時代、現在を個々の顧客に個別化された製品・サービスを提供するパーソナライゼーションの時代と分析。[経済同友会, 2019]

⁶ 知的資本（intellectual capital）とは、資本、労働以外の無形の生産要素を指し、知識やスキル、経験などが個人に帰着した人的資本（human capital）、顧客のロイヤリティや取引先等との関係性の蓄積等の関係資本（relational capital）、個人の能力を発揮するために必要な組織やシステムなどの構造的資本（structural capital）の 3 つからなる。

⁷ D.Bell（ハーバード大学名誉教授）は、1973 年の著書“*The Coming of Post-Industrial Society: A Venture in Social Forecasting*”の中で、脱工業化社会（後に「情報社会」と改称）は、財の生産からサービス（高度情報サービスなど）に経済活動の重心が移行し、その主要な源泉が知識やテクノロジー、情報となることを予測。[ベル, 1975]

⁸ E. Morreti（カリフォルニア大学バークレー校教授）は、新しいアイデアと新しい製品を生み出していることを「イノベーション産業」の要件として定義しており、IT、ソフトウェア、オンラインサービス、ナノテクノロジー、クリーンテクノロジー、バイオテクノロジーを含むライフサイエンスのほか、エンターテインメント、環境、マーケティング、金融サービスも含まれる場合があるとしている。[Moretti, 2013]

⁹ Bloomberg のデータを元に Deloitte Tohmatsu Consulting が分析。

¹⁰ 世界の公開会社 2000 社をランキングした“*Forbes Global 2000*”の企業データに係る分析によるもの。

¹¹ Glassdoor による調査（2019 年）によれば、給与水準上位 25 種のうちいわゆるテック系が 13 職種ランクインしている。[Glassdoor, 2019]

外からの人材受入れによって¹²、また、中国は政策的に高度人材を獲得¹³するとともに巨大な国内人材プールも育成し、イノベーション力¹⁴を強化している。

上記の傾向は当面続く。加えて、世界各国の経済成長、競争力の向上（競合する企業等の増加）、市場の多様化・複雑化などが急速に広がる。

価値軸の転換

一方で、資源・環境制約が急速に強まっていることなどから SDGs の重要性が増大。サーキュラーエコノミーを含む持続可能な地球環境の実現のためにはイノベーションが不可欠であり、イノベーションの在り方もサーキュラーエコノミーを前提としたものになっていくことが求められる（外部不経済の内部化）。

この動きに対応し、先んじて転換を図り、ルール形成を目指しているのが欧州であろう。タクソノミー（持続可能な経済活動の類型）¹⁵や欧州グリーン・ディール（持続可能な経済発展に向けたロードマップ）¹⁶などを通じ、規範的な政策を対外的に展開して価値軸の転換を図っている。この価値軸に整合しない製品やサービスを市場から排除するような規制の導入や標準化の動きが予想される。

¹² JD. Brownらは、米国勢調査局のデータ（起業家 N=11,000）を用いた計量経済分析により、分析可能なほぼすべてのイノベーション指標において、移民によるイノベーション活動が高い傾向を示した。教育レベルや企業年齢をコントロールした場合であっても移民の優位性が示される結果となっている。[Brown, Earle, Kim, Lee, 2019]

¹³ 「海外ハイレベル人材招致計画」（いわゆる千人計画）は、海外からの人材招致に特化した全国レベルの計画であり、2008年から5～10年間で2千人のイノベーション人材を招致するという目標を掲げて開始された。[中津, 2018]

¹⁴ ここでは、知識やアイデアを新たな製品やプロセス、システムに落とし込み新たな価値を創出する能力（innovation capability）を意味するものとして用いる。[Lawson Samson, 2001]

¹⁵ タクソノミーとは、EUとして環境上サステナブルな経済活動を分類・定義した経済活動のいわばグリーン・リスト。

¹⁶ 2019年12月に公表された欧州グリーン・ディールは、8つの環境政策分野とそれを支えるファイナンス政策で構成され、主には①温暖化対策目標の引き上げ、②クリーン・サーキュラー・エコノミーに向けた産業政策、③グリーンファイナンス・投資の加速等を内容としている。[European Commission, 2019]

Ⅲ. 日本の現状（この本質）



変化を遅らせているのは、かつての日本の強みかもしれない。

問題の所在は、日本がこうしたグローバルな変化と技術の進展（主としてデジタル化による広義のソフトウェアへの価値の重点のシフト：“software is eating the world”¹⁷）に対応できていないことではないか。グローバルに見て利益の伸びや市場価値が大きいイノベーション産業が日本では成長せず、辛うじて競争力を維持している製造業と比較的大きい内需によりギリギリ踏みとどまっていると見られる（自動車一本足打法 & 多数のニッチトップ¹⁸）。この原因として、一般的には以下が指摘される。

- アントレプレナーシップが弱い¹⁹、安定志向が強い²⁰（失敗すると再チャレンジが困難）
- イノベーションへの投資が不十分²¹、リスク許容度が低い
- 過去の成功体験の呪縛²²
- 自前主義（自分の問題は自分で解決するのが美德）、弱いオープンイノベーション、国内に閉じた連携²³

¹⁷ ここでのソフトウェアとはいわゆるコンピュータプログラムではなく、より広義な定義を意図したもの。Netscapeを開発した M. Andreessen は、ウォールストリートジャーナル紙への寄稿文：“Why Software Is Eating The World”の中で、ソフトウェアはあらゆる世界に入り込んで世界を変えようとしていると予測している。[Andreessen, 2011] 栄藤稔（大阪大学教授）は、ソフトウェア化を「製品やサービスをソフトウェアが支配している状態」と定義し、「最適化が自社に閉じず、さまざまな製品やサービスを組み合わせることで最適化され、生産価値の最大化を図る動き」を指すとしている。[栄藤, 2015]

¹⁸ 売上高 10 兆円以上の製品・サービスにおいて、売上高の約 71%を自動車産業が占めている（米国は 39%、欧州は 59%、中国は 39%）。他方、シェア 60%以上の製品・サービスの数は 230（米国は 114、欧州 49、中国 51）。[NEDO, 2019]

¹⁹ GEDI が発表している Global Entrepreneurship Index によると、日本は対象 137 か国中 53.3 ポイントで 26 位（OECD では 35 か国中 23 位）。1 位は米国で 86.8 ポイント。[GEDI, 2020]

²⁰ 株式会社マイナビによる大学生就職意識調査によれば、学生の企業選択のポイントとして、「安定している会社」が 39.6%でトップ。2012 年まで概ね 20%前後で推移していたが、近年右肩上がりに上昇している。[マイナビ, 2019]

²¹ 例えば、日本の研究費は他国と比べ伸び悩んでおり、研究者 1 人当たり研究費は OECD 平均を下回り、中国、台湾に抜かれた状況。[OECD, 2020] また、ベンチャーキャピタルへの投資額についても、日本は諸外国に比べて低い水準（ベンチャーキャピタル投資額対 GDP 比は、米国が 0.36%に対し、日本は 0.02%）。[内閣府, 2018]

²² 例えば、「日本のビジネス慣行と企業文化の『成功』そのものによって、ビジネスリーダーたちは一種の『呪い』をかけられていたのだ。1990 年代に突如かつ急速にビジネス環境が変化し始めた時には、この心理的足かせから逃れるのはなおさら難しかった。」との指摘がある。[船橋, 2015]

²³ 欧米企業と比べて、日本企業のオープンイノベーション活動への取組は相対的に活発ではない。[米山, 渡部, 山内, 真鍋, 岩田, 2017] また、研究環境についても、2000～2015 年にかけて、主要国の論文の国際共著比率は大きく増加しているのに対し、日本は微増。また、国家間の研究コミュニティのつながりも相対的に希薄化。[NISTEP, 2019]

- 特殊でそれなりの規模の国内市場を前提としたビジネス展開を志向²⁴（グローバルに展開しない）
- ソフトウェア力（デザインや設計を含めた広義のソフトウェア力）が弱い²⁵、新たなコンセプト提案やシステム思考が弱い、ものづくりへの執着が強い²⁶
- 男女の役割分担意識が固定的²⁷

これらの更に根本的な原因として、一つの仮説は、以下に記すような個人よりも組織を重んじる日本の慣行。知的資本は個人に帰属し、知的資本主義経済においては個人の知識・ノウハウ・能力が最も重要である。日本は組織中心の考え方が根深く²⁸（＝慣性力が強い）、個人の力を十分に活かせていないのではないか。また、自らの組織が思考の中心にあり、他の組織との連携や共栄が進まないのではない。なお、「個」の重視は、組織やチームワークの軽視ではない。むしろ、個を活かすために、チーム・組織やこれらの連携が重要となる。

- 戦後日本型の労働慣行（ものづくりやサービスでは経験が有効な場合もある）
 - 給与の弾力性が低い²⁹
 - 年功序列³⁰制により、突出した個が生まれにくい、外部からも受け入れられない
 - 硬直的な組織支配構造
 - 組織中心であるがゆえの低い人材流動性³¹

²⁴ 例えば、「日本企業は明らかにリスクを冒すのを避け、2010年に中国に追い抜かれるまで、GDPベースで世界第2位の経済大国だった自国市場に大きく依存した。」との指摘がある。[船橋, 2015]

²⁵ R.Cole（カリフォルニア大学バークレー校名誉教授）は、日本の産学官のリーダーはソフトウェアがあらゆる産業分野に波及する競争力上の重要性を低く見積もっていたと指摘している。[Cole, 2014]

²⁶ 木村英紀（東京大学名誉教授）は、日本は、その技術文化の象徴である「ものづくり」に足を引っ張られる形で世界が押し進めるシステム化に乗り遅れてしまったと指摘している。[木村, 2015]

²⁷ 各国の男女平等の度合いを調査した Global Gender Gap Index 2020 において日本は121位であり、教育ではほぼ不均衡が無いにもかかわらず、政治や経済活動への参画の面で大きな不均衡が生じている。[World Economic Forum, 2019] 女性の労働参加率が男性並みになれば、2030年までの労働力はほとんど減少せず、日本のGDPは今後20年で20%近く増加すると予測されている。[OECD, 2012]

²⁸ 中根千枝（東京大学名誉教授）は、日本では個人の属性（「資格」）よりも所属等により定まる枠（「場」）が主体的なものとされ、自己の存在を示すより所となっている、また、日本の社会構造の根底には能力平等主義があり、これが組織内での厳格な序列の形成や終身雇用制と密接な関係があると論じている。[中根, 1967]

²⁹ 人材紹介・派遣サービス会社による調査レポートによれば、高スキル産業での賃金圧力は、日本が1.1ptであるのに対し米国9.6pt、中国4.4pt、英国5.1ptなど、海外ではスキルレベルに応じた賃金の弾性が高い。[HAYS, 2019]

³⁰ 勤続年数に応じてどの程度給与が伸びるかを示す勤続年数別賃金格差を見ると、日本は主要国トップであり、勤続年数30年以上で170%以上の伸びとなっている。[独立行政法人労働政策研究・研修機構, 2019]

³¹ 企業における勤続年数が10年以上の雇用者の割合は、例えば米国で28.8%、カナダで29.7%、英国で31.6%、ドイツで40.3%。これらの国と比較して日本は45.8%と非常に高い。[独立行政法人労働政策研究・研修機構, 2019]

- 知的資本主義経済に対応できる人的基盤が不十分（大学・大学院改革だけで解決する問題ではなく、初等中等教育等も重要）
 - 画一的な人材を育てがちな教育システム³²により、突出した個が生まれにくい
 - STEAM 人材の量・質の圧倒的不足³³
 - 女性研究者数が極端に少ないなど、ポテンシャルを活かせていない³⁴
 - 与えられた環境・ルールの中で一つの専門性を深める姿勢が強く、新たな環境・ルールを作ること、複数の専門性を組み合わせることが苦手
- 英語力不足³⁵と内向き志向³⁶（国際感覚の欠如）
 - オープンイノベーションに不可欠なコミュニケーション力の欠如（国際共同研究やビジネスのグローバル展開、国内への知的資本の呼び込みの際に不利）
 - 暮らしやすい国内を志向（日本は暮らしやすく、少子化の中で活躍場所も国内に多々ある。グローバルに活躍してほしい人材が内向き志向になっている）

上記に加えて、政府の政策（例えば、規制緩和／ルール整備のための制度、税制、補助事業等）が十分に活用されていない可能性がある。

結果としてイノベーション産業は米中に大きく水を開けられた展開となっている。

- イノベーション産業は「複数均衡」をもたらす³⁷ため、人材の集中がさらなる集中を呼ぶ（人的資本の集積の経済）。既にグローバルな人的資本争奪戦の様相。
- 皮肉なことに、かつての日本の強みが改革を阻んでいる可能性がある。日本の組織の多くは今も年功序列の下で知的資本主義経済に対応できないでいる。技術が優れてさえいれば市場が獲得で

³² 1991 年の第 14 期中央教育審議会答申や 1997 年の中央教育審議会「21 世紀を展望した我が国の教育の在り方について（第 2 次答申）」などでは「教育の画一性」が、また、教育再生実行会議第 9 次提言（2016 年）では「これまでの教育では子供たちの能力を必ずしも十分伸ばし切れていない」「一人一人に応じた教育を提供すべき」といった問題点が指摘されている。安宅和人（慶応大学教授）は、「日本の初等・中等教育は、意識するとしないとにかかわらず、総じて“マシン（機械）”として子どもを育成している」と指摘している。[安宅, 2020]

³³ 21 世紀に入り主要国は軒並み理工系大学の卒業生数を増加させた（韓国、ドイツ、英国は 30 万人前後、米国は約 90 万人）のに対し、日本は横ばいで約 15 万人（2012 年）。[OECD, 2020]

³⁴ 2017 年度の日本の女性研究者割合は、15.7%で、主要 36 か国中で最下位。[総務省, 2017]

³⁵ EF（Educational First）によれば、非英語圏での国別英語能力ランキングで日本は 53 位（シンガポール 5 位、韓国 37 位、中国 40 位、台湾 38 位）であり英語能力は“低い”と評価されている。[EF, 2019]

³⁶ 例えば、日本は研究者の国際的な流動性が低く、2016 年中の海外からの流入者が研究者全体に占める割合は、英国（7%）、ドイツ（4%）、アメリカ（4%）に比べ、日本は 1%と極端に低い。また、海外への流出者が研究者全体に占める割合についても、英国（9%）、ドイツ（7%）、アメリカ（5%）に比べ、日本は 3%と比べて低い。また、研究開発における国際連携の割合も諸外国の中でかなり低い水準にある。[内閣府, 2018]

³⁷ E. Moretti は、イノベーションエコシステムの集積地には更なるリソースやネットワークの集積が進行する一方で、逆に集積されない地域にはますます人的資本が集まらない複数均衡をもたらすと指摘している。[Moretti, 2013]

きる³⁸という、顧客中心主義から乖離した技術至上主義が蔓延。ものづくりへのこだわり・憧憬が、本来はものづくりと両立すべきデジタル化への対応を遅らせている可能性もある（製造業等の実業に対し、デジタル産業は実態を伴わない虚業であるという意識）。

³⁸ 妹尾は、優れた技術を開発すれば自ずとイノベーションが起きるというテクノロジープッシュモデルからの卒業が必要であると論じている。[妹尾, 2009]

IV. 対応の方向性

Society5.0-ready への鍵は知的資本主義経済への移行。



もはや分岐点は超えた

高いすり合わせ技術やものづくりへのこだわり、リアルデータの活用といった日本の強みや特質を活かした産業技術ビジョン、すなわち、従来型産業の維持・強化という方向性も考えられるが、それでは、今後も日本はイノベーション産業で存在感を発揮できない。日本の製造業は他国の産業政策等の影響もあって厳しい状況にあり³⁹、世界シェアの維持は容易ではない。

Society5.0 実現のための我々自身の変革という観点からも、知的資本主義経済への移行は避けられない。また、知的資本を活用するイノベーション産業は、製造業の競争力も向上させる。更に、今般の新型コロナウイルス危機によって、「サイバー」と「リアル」のいずれにおいても、外生的ショックに柔軟かつ迅速に対応する「しなやかな経済・社会システム」に転換しなければならないことが明白となった。日本は世界に率先して Society5.0 の実現に挑戦していかなければならない。

日本の対応が遅れる原因が今の日本の慣行にあるとすれば、論点は科学技術のみならず、組織、雇用・労働、教育・人材、都市と地方の関係など、広範にわたる。また、これまでも問題意識は共有されてきたものの、抜本的な改革に至っていない最大の要因は、かつての成功体験にあるのかもしれない。しかしながら、今の日本の慣行や一時の成功体験は戦後数十年の間に形成されたものに過ぎない。知的資本主義経済への移行は容易ではないが、変革は必ずできる。

中長期的に目指す姿

2050 年に向けた 5 つのグローバルメガトレンド（①人口のピークアウト、②サステナブルエコノミーへの移行に向けた価値軸の転換、③デジタルエコノミーへのトランスフォーメーション、④地政学的リスクへの対応、⑤レジリエンスの重要性の高まり）に適応し、Society5.0 実現に向けて変化にダイナミックに対応していくための鍵は、多様かつ有機的なイノベーションであり、知的資本の活用がその基盤となる。知的資本主義経済には正負両面ある（利益を生み、雇用の乗数効果も大きい一方で、エネルギー消費を増大させ⁴⁰、

³⁹ 近年、中国の産業補助金の規模が拡大しており、上場企業 3683 社に限っても 2018 年の補助金総額は 1,551 億元（約 24 兆円）に達する（2013 年の 810 億元から倍増）。[関, 2019]

⁴⁰ JST/LCS は、省エネルギー化が進まなかった場合、IT 関連のグローバルの電力消費は 2030 年には 2016 年比で 36 倍（42,300TWh）に増加すると予測。[LCS, 2019]

格差を拡大させるおそれ等⁴¹⁾が、世界的に不可逆の変化である。

他方、単純な規模の経済を中心とした国際競争は持続可能ではなく、最終的には人類の幸福に貢献しない。サイバー空間、リアル空間双方における人類の共有資産（グローバル・コモンズ）の持続可能性が不可欠となる中で、日本は信頼性の高い製造業、きめ細やかな質の高いサービス業等を有し、かつ、他の強国との関係で中立的な立場も取り得ることから、グローバル・コモンズの安定利用を推進する旗手となって、拡張主義的な資本主義を、持続可能かつ多くの国・地域が参加可能な形に変えられる。安全・安心、省エネルギー、リサイクル、格差の解消、多様性、インクルーシブなど、新たな価値軸を日本からも提案することで新たなフィールドを創出する。

また、産業競争力、経済安全保障の観点に加え、今般のパンデミック問題でも明らかとなったように、柔軟・強靱なサプライチェーンやインフラを持つことが求められる。

2050 年に向けて、日本は、製造業・サービス業等における強みは当然活かしつつ、グローバル・コモンズを意識した価値観を内外に提示しながら、知的資本主義経済へと移行することで、イノベーション産業の創出、すなわち技術や人材等の集積とネットワーク化、エコシステム形成において存在感を発揮し、国際貢献を果たしていくのが一つの姿ではないか（「修正知的資本主義経済」の実現）。

この中長期的な姿を見据え、2025 年というタイムフレームも意識し、以下 3 つのレイヤーに分けて対応の方向性を示す。まずレイヤー 1 は、土台となる知的資本を生み出す「人」を中心とした投資及び知的資本の集積に向けた仕組み・インフラづくり。次にレイヤー 2 は、生み出されるシーズを実用化し、社会的な価値に昇華させるため、研究開発—ビジネス展開を一気通貫でつなぐ戦略の重視。自前主義や技術至上主義からの脱却、オープンイノベーションの推進等がここに含まれる。レイヤー 3 は、Society5.0 実現に向けてリソースを集中すべき分野。日本のイノベーションの停滞は、根深く複雑な課題であり、単一の特効薬は存在しない。下記の取組を一体的・総合的に推進し、イノベーションの歯車を動かしていく。

レイヤー 1 「個」の解放によるイノベーション力の強化【基盤づくり】

中長期的に目指す姿を実現するため、日本の強みを生かしつつ、イノベーションメカニズムを進化させる。その鍵は知的資本の集積であり、そのための方策は、①スタートアップエコシステムの形成（短期）、②海外からの人材や知見、ネットワークの吸収（高度人材呼び込み&留学）（短中期）、③教育（イノベーション人材供給）（中長期）の 3 つに大別される。

日本は、研究者における女性比率が低いなど、イノベーションへの女性の参画が遅れており、改善が急

⁴¹⁾ 米国では 1990 年代以降、中スキル（製造職、事務省、販売職）の雇用の割合が大きく減少し、医療・対個人サービス業等の低スキルの職業、専門職、技術職といった高スキルの職業の割合が増大。[Autor, 2019], [内閣府, 2018] 結果として、1980 年から 2016 年にかけて、米国、カナダの所得は全体で 63%伸びたが、上位 10%の伸びが 123%、中位 40%が 44%、低位 50%が 5%の成長にとどまる。[F.Alvaredo, 2017] 上位 1%所得者が全体の所得に占める割合は、1980 年代の約 10%から 2015 年は約 23.5%まで上昇（主要国最高水準）。[Wolff, 2017] ジニ係数で見ても、米中は 50 前後との分析。[United Nations, 2018] [United States Census Bureau, 2019]

務である。これは、逆に言うと日本の潜在力でもある。女性の参加によって、人材の増大だけでなく、新たな課題の発見・解決等が実現する。

①スタートアップエコシステムの形成、投資環境の改善（短期）

リスクをとって知的資本をビジネス化する担い手とチャレンジの数を増やすことが不可欠である。「個」の力を伸ばすことや「個」の力が評価される環境の形成によって成功モデルを創出する。それが若手のキャリア形成や教育システムにも伝搬し、日本の文化的慣性を動かす。

スタートアップを中心としたイノベーションエコシステムの形成は、人材や技術・ビジネスの集積の打ち手として即効性が高く、市場の多様性・スピードにも対応可能。高度人材を呼び込む引力にもなる。近年、CVCの勃興もあり、日本のスタートアップ投資額は増加傾向にあるが、スタートアップエコシステムの形成は道半ば。日本こそ、早急なエコシステム形成が必要。今般の新型コロナウイルス危機による景気減速によって、これまで築いてきたスタートアップ投資の好循環を止めてはならない。

- ビジネスの性質上、引き続き設備に係る初期投資が比較的小さく、収益性の高いデジタル、バイオ分野を中心として成功事例を創出、ロールモデルを確立。
- 単独で事業規模を拡大することが難しいディープテック系等は、スタートアップ発のコア技術を事業会社が引き継ぐ exit ルートも確立。
- スタートアップを取り巻く情報の非対称性を解消し、優れた技術やビジネスの芽に対しタイムリーに投資が回るよう、スタートアップに関する動向や事業評価等の情報が流通するよう促す。
- エコシステム形成のため、VC や CVC の育成・活性化、シーズの移転や人材供給の観点から大学と産業界の融合を推進。
- 「個の解放」の観点から、大企業に潜在するイノベーター層のスピントウトによる起業や大企業とスタートアップとの協業。
- 企業や大学等組織における突出した個を活かすため、人的資源活用に主眼を置いた柔軟なマネジメントポリシー／体制への刷新。

②高度人材の呼び込みと留学・在外派遣、リカレント教育（短中期）

世界は、国内のみではなくグローバルに高度人材とそのネットワークを呼び込む競争となっている。日本は高度外国人材の受入れが十分とは言えず⁴²、国際流動性も低く、国内の知的資本（比較的

⁴² 学士・修士・博士課程いずれにおいても、留学生の占める割合は OECD 平均を下回る（それぞれ 3%/4%、8%/13%、18%/22%）。[OECD, 2019] 企業においても、例えば外国人役員比率は欧州諸国より低く（2011 年）[内閣府, 2011]、高度ポイント制度の活用により、着実に高度人材の受入れは進んでいる（2013 年末の 779 人から 2018 年末の 11,641 人と大幅に増加）[出入国在留管理庁, 2018]が、依然として高度人材の就労先としての魅

均質な人材と国内ネットワーク）だけで対応している閉塞的な状況。デジタル化で遅れている日本は、人材の国内供給システムの更新（下記③）だけではパラダイムシフトのスピードについていけない。

このため、企業や大学における高度外国人材の積極的な呼び込みと受入れ環境の整備が不可欠。また、日本人は、留学や海外勤務を通じた国内では得難い知識・スキルの吸収、リカレント教育等による専門分野の拡大や分野横断的知識の修得等が必要⁴³。歴史的に日本は、海外から専門家を受け入れ、海外で学び、人材の底上げを図ってきたが、21世紀においてもこれは有効である。

- 世界最速レベルで発行される「日本版高度外国人材グリーンカード」（高度人材ポイント制度⁴⁴）の活用や生活環境の整備など、「内なる国際化」を進め、高度外国人材受入れを促進。
- デジタル分野等の専門知識・スキルやスタートアップに必要なビジネススキル・経験など、国内では得難い知的資本を獲得するため、留学や在外派遣等を奨励。日本のイノベーションシステムの弱点とも言える国際経験や言語スキルを補うことにもつながる。
- AIと5Gの普及により、数理・データサイエンスとAIリテラシーの活用の範囲が更に広がり、かつ高度になる。デジタル分野のリカレント教育は特に重要。

③知的資本の国内供給システムのアップデート（中長期）

イノベーションの担い手であり、知的資本の最大の要素である人材は、国力の根幹そのもの⁴⁵であり、その供給システム（教育・人材育成）の更新が不可欠⁴⁶。イノベーションに自ら挑戦する者とそれを支える者、そして、そういった人材を育てる者が多数必要である。

これからのイノベーションには「個」の力が必要であり、多様性の許容が基本。集団による基礎的な教育は必要ではあるが、画一的な教育システムに終始すると時代の要請に応えられない⁴⁷。ITも活用

力は高い評価を得られていない（OECD(2019)によれば、高学歴（修士・博士の学位を持つ）労働者の就労先としての魅力はOECD加盟国35カ国中25位）。[OECD, 2019]

⁴³ また、リカレント教育に関しては、例えば、高等教育機関への25歳以上の入学者の割合では、日本は2.5%に過ぎず、OECD平均の16.6%を大きく下回る（トップはスイスの29.7%）。[文部科学省, 2018]

⁴⁴ 高度外国人材の活動内容を、「高度学術研究活動」、「高度専門・技術活動」、「高度経営・管理活動」の3つに分類し、それぞれの特性に応じて、「学歴」、「職歴」、「年収」などの項目ごとにポイントを設け、ポイントの合計が一定点数（70点）に達した場合に出入国在留管理上の優遇措置を与えることにより、高度外国人材の我が国への受入れ促進を図ることを目的とした制度。

⁴⁵ 米国で2004年に産学官の有識者により発表された「Innovate America（通称：パルミサーノ・レポート）」において、「技術の発明が経済価値につながってこそイノベーションである」とするとともに、「人材」「投資」「インフラストラクチャー」の3つの重要性を提言するとともに、次世代のイノベーター育成に初等・中等教育段階から取り組むことが提言されている。[Council on Competitiveness, 2004]

⁴⁶ 下村博文（衆議院議員、元文部科学大臣）は、現在の学校制度は、明治時代に導入した義務教育法をベースとしており、1990年代を境に情報化社会になってからは教育に求められる質が変わり、当時から教育改革の必要性が叫ばれていたが、うまくいかなかったと指摘している。[毎日新聞, 2015]

⁴⁷ 安宅和人は、日本の初等・中等教育は、総じて「マシン（機械）」として子どもを育成しており、結果としてこれからの時代にもっとも大切な「意思」「自分らしさ」「憧れ」のない子どもが普通になっていると指摘している。[安宅, 2020]

し、個性を活かす個別化教育が必要。更に、全課程的にデジタルリテラシー、国際感覚（言語能力）、創造力、起業力を高めるなど、実社会で求められることからバックキャストしてプログラムを進化させ続ける必要がある。初等・中等教育においては、国際的にもレベルが高い基礎学力⁴⁸をイノベーションにつなげられるようにするとともに、高等教育においては、産業界でも活躍する博士人材等の育成が必要。これらの取組は既に始まってはいるが、与えられた同じ問題を解く教育だけではなく、自ら問題を見つけ、様々なリテラシーを投入して解決していくような教育が、より一層必要なのではないか。

- 性別や国籍等を含めた多様性を許容し、一人一人の「個」の力を最大限伸ばすための個々の習熟度・理解度に合わせた教育プログラムの提供。
- 将来のイノベーションの担い手を育てる初等・中等レベルからの起業家教育の普及。
- デジタル社会に適応するためのリテラシーを身につけられるよう STEAM 教育の推進。高等教育段階では文理問わずデータ、AI リテラシーを強化。
- 優れた知見や思考力等を有する博士人材の待遇の改善、教育課程の充実。無意識の差別⁴⁹に関する教育・研修等を通じた女性の研究者、博士人材の増大。

レイヤー 2 技術シーズを競争力につなげる研究開発・ビジネス戦略の重視 [技術至上主義からの脱却]

科学技術が競争力に直結した時代や、科学技術と市場の間に距離があった時代は終わり、特に IT が関わるイノベーションの最前線では、新たな技術シーズを市場にアジャイル型で迅速に投入し、フィードバックを受けながらビジネスモデルを修正している。イノベーションは計画的に起こせるわけではなく、大学等の研究者による、出口にとらわれない自由かつ大胆な発想に基づく基礎研究の充実が極めて重要であるが、同時に、研究開発に関わる者は、実用化までのシナリオやビジネスアーキテクチャを早くからイメージすることも重要。イノベーションは計画的・短期間には起こせない場合が多く、短期的な出口・成果だけではなく、中長期的な出口・方向性が重要。ともすれば、基礎研究重視か実用化志向かの二分論に陥りがちだが、基礎研究が生んだシーズを社会に出すことが大切であり、これらはトレードオフではない。

米国や中国に比して研究開発費が少ない日本としては、総額を増やす努力とともに、研究開発の質の向上、研究開発費の効率的な活用が不可欠となる。そのため、研究開発と国の制度や標準化等との協調、重複排除、キーパーソン同士の連携、事務負担軽減等を進める。限られたリソースを効果的に活用し、成果の最大化を図る観点から、政策当局も含めた関係機関の技術インテリジェンス機能の強化が一層不可欠となる。

⁴⁸ OECD（経済協力開発機構）の生徒の学習到達度調査（PISA）は、義務教育修了段階の 15 歳児を対象に、2000 年から 3 年ごとに、読解力、数学的リテラシー、科学的リテラシーの 3 分野で実施（2018 年調査は読解力が中心分野）。OECD37 ヶ国中、日本は読解力 11 位、数学的リテラシー 1 位、科学的リテラシー 2 位。全参加国・地域の 1 位は全領域で中国（北京・上海・江蘇・浙江）。[OECD, 2019]

⁴⁹ 「アンコンシャス・バイアス」については、GAFA やコンサルティングファーム等でも研修が義務化されている。

①イノベーション産業におけるレイヤーマスターを目指す研究開発

産業技術を競争上の中心に置く戦略は、事業の成長段階やバリューチェーンのポジショニングによって異なり、従来のセクター別のアプローチよりも解像度を上げた戦略が必要となる。

グローバル化とモジュール化、国際分業等が進展する中で、売れる商品の開発という発想に留まらず、新たな技術がバリューチェーンにもたらす価値、事業のポジションや利益など、技術のみならずビジネスアーキテクチャも含む戦略を研究開発フェーズから描き、研究開発に取り組む必要がある。

- 垂直統合・自前主義を脱却し、最適なプレーヤーと組みつつ特定市場（レイヤー）を支配し、グローバルに事業を拡大。加えて、バリューチェーンにおいてエコシステムを形成（他のプレーヤーのレイヤーへの誘因の仕掛け、知財・データ戦略等）。
- 特にスタートアップはファブレス（設計に特化）など特定領域に照準、あるいは技術シーズを事業化する大企業と連携。
- データが競争力の源泉になっていく中で、製造 & 売切だけでなく、データ収集・分析、メンテナンス・バージョンアップ等を伴うストックビジネス、プラットフォームビジネス等を指向。その際、データの精度、取扱い等に関する日本企業の信頼性を維持・強化。
- 国の研究開発プロジェクト等においては研究開発フェーズを超えた戦略をもって技術開発を推進（バリューチェーン、サプライチェーン上の技術の位置づけ）。
- 「All Japan」よりも「Global Japan」という視点。グローバルなエコシステムの中での最適な協力・連携体制、Win-win の関係構築。

②ものづくり・部素材分野におけるグローバルニッチトップ 2.0

産業政策・雇用政策の観点からは、日本の製造業の品質を強みとして、厚みのある中間層の活躍は引き続き重要。他には真似できない技術・ノウハウを根子に利益率の高い製造業を目指す。

- 日本の強みである多数のニッチトップ（市場シェア 60%以上のアイテム数は日米中欧 4 極の中で日本が突出）の競争力を高め、引き続き日本に残し、雇用にも貢献。
- 地政学的な観点からサプライチェーン上重要なアイテムの確保（製品だけでなく、部品・素材、製造装置・検査装置等の上流、販路等の下流の競争力にも注意）。
- AI×データによるものづくりや部素材産業における匠の技の継承・発展。
- 自動化・省人力化、テレワーキング・遠隔操作等による労働力不足への対応、感染症対策等。

③不確実性を考慮したリスク管理・ポートフォリオのための研究開発戦略

高度に管理された現在のグローバル・サプライチェーンは IT 革命によって発達した⁵⁰。このグローバル・サプライチェーンは効率的ではあったが、2018 年以降に顕在化した米中貿易戦争や、今般の新型コロナウイルス危機によって、その脆弱性が露呈した。効率性のみを追求したグローバル・サプライチェーンではなく、レジリエンスにも配慮したビジネス展開が求められる。部素材の一国依存等のサプライチェーン上のリスク⁵¹も考慮しながらポートフォリオを組む必要がある。

- ・ 特定国への依存度の高い部素材の使用量を低減あるいは代替する技術開発の推進。
- ・ サプライチェーン上重要なアイテムの確保（製品だけでなく、部品・素材、製造装置・検査装置等の上流、販路等の下流の競争力にも注意）。【再掲】
- ・ ダイナミック・ケイパビリティ⁵²を身につけるべく、製造業のデジタル化による変種変量生産やマス・カスタマイゼーション、パーソナライゼーションへの対応力の強化。

レイヤー 3 知的資本主義経済を見据えた研究開発投資の重点化 [リソースの戦略的集中]

日本がグローバルなデジタルエコノミーの中で活躍し、地球環境問題などで世界に貢献していく新たな産業構造は容易には構築できない。技術力だけの問題ではなく、ガバメント・リーチ外のことも多い。政府の限られたリソースで最大の効果を発揮するため、どの領域にどのような手法でリソースを投じていくべきか。

5つのグローバルメガトレンドに適応し、持続可能な経済社会を築いていくためには、エネルギー・環境、健康・医療、レジリエンス・セキュリティ等が重要な課題である。そして、ネットワーク接続と AI によってあらゆるデバイスが知性を宿す Intelligence of Things が人とモノをシームレスにつなげ、様々な知識や情報の共有を可能とし、過去にない新たな価値を生み、課題解決に資する。この構図は当面変わらない。IT が、あらゆる分野に影響を与える汎用技術（General Purpose Technology）として今後も重要性を増す。この流れは、新型コロナウイルス危機がもたらした不可逆の変化により、加速する。

グローバルな競争環境という観点からも、IT は引き続きゲームチェンジを起こす。国際最適なアライアンスの形成とバリューチェーンの構築というこれまでのトレンドは、対面コスト（ヒトの移動コスト、トランザクションコ

⁵⁰ 1980 年代末から、情報革命によってアイデアの移動・貯蔵・加工に関する技術革新が起こり、コミュニケーションコストが劇的に低下することによって、サプライチェーンに変化。従来は、複数工程が物理的に一箇所で行われなければ非効率であった。それが、1980 年代末以降になると、企業は各工程を細分化し、複数国に分散して、最適なサプライチェーンを構築することになった。[Baldwin, 2018]

⁵¹ 日本の製造業のサプライチェーンにおいて、2019 年の製造業の輸出額のうち 19.1%、輸入額のうち 23.5%を中国が占める。[財務省, 2020]

⁵² ダイナミック・ケイパビリティ論は、D.Teece（カリフォルニア大学バークレー校ハース・ビジネススクール教授）によって提唱され、近年、注目を浴びている戦略経営論。ダイナミック・ケイパビリティとは、環境や状況が激しく変化する中で、企業が、その変化に対応して自己を変革する能力を指す。[Teece, 2019]

スト) の低減に向かい⁵³、IT インフラの更なる発達とともにロボティクス、センシング、XR⁵⁴、ニューラル機械翻訳⁵⁵等がキーテクノロジーとなって人間拡張（人間の認知能力・身体能力の拡張）をもたらすと考えられる。2025 年に向けて、これらの技術群の競争力強化が重要である。

産業技術ビジョンでは、今後日本が実力を発揮し、世界に貢献する技術群として（A）知的資本主義経済を動かす Intelligence of Things・人間拡張、それらを支えるキーテクノロジー、（B）イノベーション産業としての潜在性も大きいバイオテクノロジー、（C）あらゆる分野の基盤であるマテリアルテクノロジーを掲げる。また、重点ミッションとして、（D）経済の負の側面を解決するエネルギー・環境テクノロジーを掲げる。これらの技術群においてグローバルな競争力や持続可能性を高めていくためには、多様性や多様な価値観を包括するインクルーシブな形で技術開発を進めなければならない。

A) Society5.0 を実現する Intelligence of Things とそれらを支えるデジタルテクノロジー

デジタル分野のこれまでのトレンドは、あらゆるモノやサービスがネットワークにつながる IoT 化、情報通信・処理量の爆発的増加、エネルギー消費の増大、セキュリティの重要性の高まり等。このトレンドの根源は、デジタルテクノロジーが汎用技術としてあらゆる分野に影響を与え、人材、技術、知識、組織、価値創造プロセス等を根底から変革する点にあり、当面この傾向は続く（AI、IoT、量子の次も注目技術は IT）。あらゆるものがソフトウェア化する世界の中で、クラウド、エッジのいずれにおいても、経済安全保障の面からも、これを支える技術の重要性が増大する。

あらゆる分野でリアルがサイバーと融合する Society5.0 は、AI、5G 等によって進む Intelligence of Things・人間拡張（自動運転、スマートファクトリー、ロボット、遠隔医療、XR、ブレイン・マシン・インターフェース等）など IT・ハイテク分野の技術なしには成立しない。こうした重要技術群におけるレイヤーやバリューチェーンのコアの獲得が不可欠である。

産業技術ビジョンでは、知的資本主義経済を動かす Intelligence of Things・人間拡張と、それを支える次世代コンピューティング技術の研究開発の方向性を提示した（V 章）。

B) バイオテクノロジー [参考：バイオ戦略 2019]

⁵³ R. Baldwin（ジュネーブ国際開発高等研究所教授）は、これまでのグローバリゼーションは動力（蒸気機関）の発明によるモノの移動コストの低減（生産と消費の分離）、ICT 革命による通信コストの低減（高度なノウハウと労働力の分離）によりもたらされ、今後は残されたコストである対面コストの低減（人の実体と機能の分離）に向かうと指摘。[Baldwin, 2018]

⁵⁴ XR とは、一般に AR（拡張現実）、VR（仮想現実）、MR（複合現実）を含む多様な「新しい現実」を実現するテクノロジー群を指す。

⁵⁵ 従来の機械翻訳の方式であるルールベース機械翻訳（RMT）、統計的機械翻訳（SMT）に次ぐ機械翻訳技術であり、ディープニューラルネットワーク（RNN: Recurrent Neural Networks）を用いることにより文章全体の流ちょうさを評価する。

ゲノム解析技術の発展は国際ヒトゲノム計画により加速し、2000 年代以降に飛躍的に進歩。バイオテクノロジー分野への投資は、抗体医薬をはじめとしたゲノム創薬が Exit となって牽引。米国を中心に極めて高い収益性を有する企業が生まれ⁵⁶、知的資本を集約する引力となっており、イノベーション産業としての潜在性が大きい。

コンピューティングとディープラーニング等の AI の進化が相まって、膨大なゲノム情報を分析するバイオインフォマティクスが進展。更に、2012 年の CRISPR/Cas9 の発明は、こうした潮流を加速するとともに農業や工業等他分野に波及するゲームチェンジテクノロジーとして開発競争が激化している。

当該技術分野においては、これまでの医療を中心とした高付加価値な市場（レッドバイオ）から段階的に他分野（グリーンバイオ、ホワイトバイオ等）へと知的資本のスピルオーバーが生じると考えられる（仮説）。現状、GAFA 等による巨額の投資もあり、米国におけるエコシステム形成が世界をリードしている中、日本としてどのレイヤーを獲りにいくかの研究開発戦略の方向性が求められている。

- 医療分野においては、例えば①中分子創薬（ペプチド、核酸医薬）⁵⁷や②エピジェネティクス⁵⁸、③マイクロバイオームが重要な技術群として挙げられる。日本の強みを活かしたバリューチェーンを構築していくことが求められる。
- 分野横断的には、③DNA 解析⁵⁹、④バイオインフォマティクス⁶⁰、⑤ゲノム編集・合成生物学⁶¹、⑥バイオ生産・分析⁶²といった、DBTL サイクルに係る一連の技術群がセットで求められる。特にレッドバイオ以外の分野においては、具体的なアプリケーションの開発・実用化を進め、投資や人材を引きつけていくことが必要である（バイオコミュニティ圏の形成）。

C) マテリアルテクノロジー

実社会が仮想空間でなく、人やモノが動く現実空間である以上、デジタルとマテリアルの両技術が揃って初めて社会が駆動。近年、デジタル技術が急速に進展する中、改めてハードウェアの重要性が認

⁵⁶ 1 人当たり利益（粗利益）の高いトップ企業として、例えば Gilead Sciences（\$2.2M）、Celgene（\$1.7M）、Biogen（\$1.5M）、Amgen（\$0.9M）等が存在。[Craft, 2020]

⁵⁷ 低分子、抗体に次ぐ新たなモダリティとして近年研究開発投資が拡大。新薬の早期実用化を実現し、日本の強みを活かしたバリューチェーンを構築していくことが重要。

⁵⁸ 超個別化医療へと向かうメガトレンドの中で、遺伝子の発現をコントロールするエピジェネティクス研究を通じたメカニズムの解明が医療に革新をもたらす可能性。良質かつ大量のオミックスデータを収集・分析する仕組みの構築が必要。

⁵⁹ 第二世代シーケンサは米企業が独占。単分子・ロングリードシーケンスを可能とする第三世代シーケンサの開発競争が激化。当該領域での技術優位性の確保と市場化が必要。

⁶⁰ ゲノム情報そのものが付加価値の源泉となり、ゲノム解析サービスがプラットフォーム化（世界最大手は中国 BGI 社）。ゲノムを含めたオミックス情報を国内で集積し、価値創造につなげる仕組みの構築が必要。

⁶¹ ゲノム編集等のツールや活用法に係る研究が活発に進行。今後は ELSI や安全性にも配慮しつつ、具体的なアプリケーションの開発を進め、投資や人材を引きつけていくことが必要（バイオコミュニティ圏の形成）。

⁶² 高付加価値品以外の化学品、素材、エネルギー等のホワイトバイオを中心に、製造工程を請け負うファウンドリに必要となる安定・大量培養技術がプラットフォームテクノロジーとなる可能性。日本が当該レイヤーを押さえるためにはファウンドリのコアとなる技術の開発やノウハウの蓄積が必要。

識されている。IT 企業がハードウェア企業を買収し、ハード開発に注力する事例が続出する⁶³など、世界的にもデジタルを支えるマテリアル・イノベーションが強く志向されている。

マテリアルの革新は、AI、バイオ、量子等の先端技術分野の強化、SDGs やパリ協定の長期目標の達成、環境・資源制約の克服等の社会課題解決においても重要。米中貿易摩擦や感染症の世界的流行等に伴うサプライチェーン断絶のリスクが顕在化する中で、経済安全保障の観点からも不可欠である。

足下では、マテリアルは日本の輸出産業の要⁶⁴となっており、また、リチウムイオン電池、青色 LED に代表されるように、日本発のマテリアルが社会変革を牽引し、世界の経済・社会に大きく貢献してきた実績があり、産学ともに世界的に強みを有する技術領域。他方、組み合わせ型製品である蓄電池等では国際市場シェアを落とす傾向にあるなど、近年その強みを失いつつある危機にも直面している。

こうした状況の中、研究開発から産業化までの期間が長いマテリアル分野においても、デジタル技術を駆使したデータ駆動型の研究開発手法（マテリアルズ・インフォマティクス）が登場し、これまでのアナログベースの競争のルールを変える可能性がある。産学官の良質なマテリアルデータを活かし、先手を打ってデータを戦略的に収集、利活用できる仕組みを構築することで、マテリアルから世界の産業・イノベーションを大きくリードしていくことを目指す。

- 産学官のマテリアル研究開発の圧倒的な効率化・高速化・高度化を実現するため、産学官の良質・豊富なマテリアルデータと人材、先端設備・機器を最大限活用した、日本全体としてのデータ基軸型の研究開発プラットフォームを整備する。
- 超低消費電力で駆動する Eco-Society5.0 の実現、資源の海外依存国から資源産出国への実質的転換等、今後マテリアル分野で日本が注力すべき重要技術領域を抽出特定し、戦略的に研究開発を推進する。
- ベンチャー企業等の新しいプレーヤーが次々と生まれるような多様な産学官のステークホルダーが参画・融合する新たなイノベーションエコシステムを構築。我が国企業が国際市場を戦略的に獲得可能な環境整備を推進する。
- 産学官の協力の下、「研究力強化・若手研究者支援総合パッケージ（CSTI 決定）」を実行しつつ、「マテリアル×デジタル」融合人材をはじめ、産学官におけるマテリアル分野の研究者・技術者を持続的に育成・確保する。

D) エネルギー・環境 [参考：革新的環境イノベーション戦略]

⁶³ 例えば、Google は 2010 年代に入りモトローラや Nest、HTC（一部）などの買収を行っている。

⁶⁴ 自動車と並び輸出総額の 2 割（※化学製品及び原料別製品の合計）を占めているほか、世界市場の過半シェアを占めるマテリアル製品も多数存在。[財務省, 2020]

エネルギー・環境問題は、21 世紀に人類が直面する最大の課題の 1 つ。資源・環境制約が急速に強まる中で、今後、グローバル・コモンズを持続可能とするテクノロジー群への投資の重要性は高まり、外部不経済を内部化する取組が促されるよう価値軸の転換を図っていく必要がある。

気候変動問題に対しては、1995 年以降毎年 COP（国連気候変動枠組条約締約国会議）において精力的な議論が継続されている。一方、IPCC が示すいわゆる 2℃シナリオ⁶⁵に相当する GHG の大幅削減は、従来の取組の延長では実現困難。新興国・途上国を含めた世界全体で技術が導入されるためには、社会実装可能なコストのクリーンテクノロジーを早期に実現することが必要であり、非連続なイノベーションが不可欠である。

エネルギー・環境分野の技術開発は、一般的に社会実装までに長期間を要し、投資リスクが大きい。しかしながら、気候変動問題への対応の重要性・緊急性の高まりを受け、ここに来て各国は技術開発や市場創出に向けた投資を拡大している。

日本としても、技術開発及び社会実装までに長期間を要することを踏まえ、世界のカーボンニュートラル、更には、過去のストックベースでの CO₂ 削減（ビヨンド・ゼロ）を可能とする革新的技術を 2050 年までに確立することを目指し、粘り強く開発を進めていく必要がある。バイオエコノミーやサーキュラーエコノミーといった社会イノベーションを意識しながら、GHG の削減インパクトが大きく日本が強みを有する分野⁶⁶に投資を集中させ、世界に貢献していく。

- 重点分野に対する技術開発は、社会的なインパクト（GHG 削減量）や実施体制、シナリオ等を示しながら、具体的なコスト目標等の実現に向けた開発を計画的に実行することが重要。技術領域としては、①電力供給に加え、水素・カーボンリサイクルを通じて全ての分野で貢献する非化石エネルギー、②再生可能エネルギー導入に不可欠な蓄電池を含むエネルギーネットワーク、③運輸、産業、発電など様々な分野で活用可能な水素、④CO₂ の大幅削減に不可欠なカーボンリサイクル、CCUS、⑤世界 GHG 排出量の 1 / 4 を占める農林水産分野、の 5 つを重点領域とする。
- これらの革新的技術の早期実現と社会実装をするためには、個別の研究開発事業の着実な実施に加え、横断的な推進施策が必要。司令塔による計画的な推進や検証、国内外の叡智を結集した研究開発・実証の展開により、最先端の研究開発や取組に切れ目なく支援を進めることが必要。また、ポテンシャルの高い技術や事業に対し資金が流れる仕組みを構築することも併せて重要。
- 世界全体で革新的技術が社会実装されていくため、産業界、金融界、研究者のグローバルリーダーと共創し国際的なエンゲージメントを強化することも、気候変動という世界全体の課題に対しては重要。

⁶⁵ 世界全体の平均気温の上昇を 2℃未満に抑えるというパリ協定で定められた目標と整合的なシナリオを指す。

⁶⁶ 革新的環境イノベーション戦略においては、エネルギー供給とエネルギー需要（運輸、産業、業務・家庭・その他・横断領域）、農林水産業・吸収源の全 5 分野について、39 テーマを設定。[統合イノベーション戦略推進会議, 2020]

V. Society5.0 を実現する Intelligence of Things とそれらを支えるデジタルテクノロジー



AI、5G、次世代コンピューティングや人間拡張等が、かつてない新たな価値を創出。

A-1) Intelligence of Things・人間拡張を支えるロボティクス、センシング、XR、ブレイン・マシン・インターフェース、機械翻訳等

Society5.0 では、AI を搭載したデバイスなど、Intelligence of Things によって人間の活動は飛躍的に拡張される。この人間拡張（Human Augmentation）を支える技術群として、ロボティクス（自動走行、ドローン、スマートファクトリー、遠隔医療福祉機器等）、センシング、XR（テレプレゼンス、遠隔操作等）、ブレイン・マシン・インターフェース、言語の壁を取り払うニューラル機械翻訳等の重要性が高まる。

また、新型コロナウイルスによって顕在化したリスク及びニーズを踏まえ、サービスの遠隔・非接触化や生産の自動化・省人力化は加速する。例えば、医療現場のみならず、食品の製造工程も人手による作業工程が多く、密閉・密集・密接環境も少なくない。短中期的には、このような工程における人と人、人と製品等の接触を無くすロボットや製造ラインの自動化・遠隔制御技術の導入が重要である。これは同時に、日本の社会課題である高齢化や人手不足のソリューションとしても役割を発揮する。

日本は産業分野のロボティクスが強く、依然として世界トップのロボット生産国⁶⁷。また、人間拡張分野でも高い研究力を有する⁶⁸。このアドバンテージを活かし、重要性を増すこの分野のキーテクノロジーの研究開発を進める。以下、重要な技術の概要、今後注目される点、内外の研究動向等を例示する。

ロボティクス

近年、産業用ロボットの導入が加速⁶⁹。ロボットは自動車産業や電機電子産業等の定型・大量生産に導入されてきたが、今後は、自動化・省人力化の観点から、非定型・多品種・少量生産の現場への導入も進む。ただし、その実現に当たっては、多様な不定形物に対応可能なハンドリング技術

⁶⁷ 2018 年現在、世界のロボットの 6 割弱が日本メーカー製。[International Federation of Robotics, 2018]

⁶⁸ 日本はソフトロボティクス、ハプティクス、テレイグジスタンス等の技術領域において相対的に強みを持っている。[土井, 2019]

⁶⁹ 全世界のロボット出荷台数は 2013-2017 年の 5 年間で倍以上の伸び（381 万台）。[International Federation of Robotics, 2018]

や、抽象的な指示でも動けるティーチングレスのロボット、物体に係るデータベースと認識技術など、基礎・応用研究のレベルからの研究開発が必要。

- 「物をつかむ」等のハンドリング動作は、単純なようで極めて高度な認知及び制御に関する技術を要する。各国において、様々な形状、質量、重心の物体を把持する技術開発が進められている。
- 例えば米国では、AIを活用した物体の把持に関する研究が進んでいる。米国企業等は、物体の三次元構造モデルといったデータを事前に取得することなく、視覚情報から自己学習することでピッキングとトスに関する動作を研究⁷⁰。米国の大学では、未知の物体を把持するDNN（ディープニューラルネットワーク）の学習を自動化する研究を進めている⁷¹。
- 他方、これらの研究は物体の機能や役割を認識した上での把持を目指したものではない。今後、大規模製造業にとどまらず中小製造業やサービス業へのロボット導入を進めるためには、非定型・少量多品種生産に対応できるよう、都度の動作プログラミングや条件の設定を省く技術（ティーチングレス化）がゲームチェンジャーとなり得る。日本としては、①導入・運用を容易にするティーチングレス化、②多様な不定形物に対応可能なハンドリング技術、③遠隔地からでも現場と同等のオペレーション・保守が可能な遠隔制御技術、④省エネ化や導入コスト低減に繋がる筐体等の軽量化（省エネ化）等の広範な領域で世界に先駆けた技術の確立を目指す。

センシング

価値を創出するリアルデータを、高精度かつ自動的に大量取得できるセンシング技術の重要性が高まる。低コスト化・小型化・省エネ化に加え、既存技術では計測困難な超微小量信号の検出や、過酷環境下や非接触・非破壊でのセンシング技術の研究開発が世界的潮流。日本としても、①生物機能等を利用した高選択識別可能なセンシング（ウィルスや細菌等の検出にも応用可能）、②圧倒的な小型化を実現する超薄膜形成等の製造プロセス技術、③ノイズの超低減のための信号処理技術、④電源の制約を克服するエネルギーハーベスティング技術、⑤長期間のメンテナンスを不要とする高精度時刻同期技術等の要素技術を重視。

- 生物機能等を利用したセンシング技術（上記①）のポテンシャルは大きい。例えば、匂いに対する昆虫の感度はサブppbで、半導体センサよりも数桁高いなど、依然として生物の感覚が半導体センサよりも優れている分野がある。また、小型・軽量かつ省エネといった有用な特性を持つ。
- この分野では、日本も論文・特許において一定のポジションを保ち、競争力を有しているが、中国の特許出願件数の伸びが大きく、米中がリードする状況。
- 先進的な研究開発の例として、米国では、生物機能融合研究が急速に活性化。特定分子や核酸と特異的に結合する酵素等を用いたセンサ研究に加えて、膜タンパク質等の生体分子を用

⁷⁰ Google、MIT、プリンストン大学、コロンビア大学による“TossingBot”プロジェクト。[Zeng, 2019]

⁷¹ UCバークレーMahler教授とGoldberg教授が立ち上げた“Dex-Net”プロジェクト。[BerkeleyAutomation, 2019]

いた化学物質センシングの研究が進展。また各種基板への細胞の配置・転写技術など、要素技術の開発も多数行われている。

- 生化学的な反応プロセスには、多くの利点と可能性がある一方で、反応が不安定で反応環境が限られる。このため、非生物素材と融合させてデバイス化することによる、安定性の強化、反応に適した環境の維持、耐久性の向上・可搬性の付与などが必要。日本としては、生物機能素子の改良やデバイス上での立体構造の構築手法等の開発のほか、低コストでの安定生産や、生物機能素子からの微小なシグナルを捕捉する各種検出技術、ノイズリダクション技術の開発等に取り組む。

XR（テレプレゼンスや遠隔操作）を含めた次世代インターフェース

XR 関連技術として、遠隔・非接触化の更なる進展を支えるテレプレゼンスや遠隔操作（テレグジステンス）は、5G の普及によって本格化する。これらを支える技術として、アクチュエーション（人工筋肉・ソフトアクチュエーター）や視覚・触覚表現（ハプティクス、スマートグラス）、ブレイン・マシン・インターフェース等が重要。今後は、サイバー空間を通じた遠隔・非接触・非対面での価値の提供が鍵となるため、これらの技術の重要性が増す。エンターテインメント向けを中心に民間での研究開発も進んでおり、官民が協調して当該分野でのイニシアティブを取っていく。

- 今後、人間の五感（視覚、聴覚、味覚、嗅覚、触覚）をバーチャルに再現する MR（Mixed Reality）技術がますます普及すると考えられる。当初はゲーム等のエンターテインメント用途から導入が進むと考えられるが、技術が成熟すれば、テレグジステンス等により遠隔医療等への発展も期待でき、その潜在市場は極めて大きい。具体的には、海外や洋上等の遠隔地における装置・設備のメンテナンス・緊急対応、人の侵入を避けたい食品加工工場やクリーンルームや病棟等における人でなければならない作業、接客業やコンビニのバックヤード等の自動化が困難な作業などの遠隔操作による実施、更に、触覚も含むフィードバックによるリアリティの高いバーチャルな観光旅行などが実現する。
- 市場では、例えば、サイバー空間との新たなインターフェースとなるスマートグラスに関しては、材料（高屈折率ガラス）では日本企業の存在感は大きいですが、最終製品は米国の IT 系大企業が中心。日本は、触力覚を再現するハプティクス等に関して、多くのベンチャーが起業し、注目を集めているが、本格的な実用化、普及には至っていない。
- 個別の要素技術の進展を踏まえつつ、遠隔操作の操作性や効率を高めるため、触力覚を精緻に再現できるハプティクスデバイス、視覚情報と触覚情報の同期性を高める技術、通信に遅延を生じる遠隔地で正確な操作を実現する制御技術、システム化のための統合技術などの開発に取り組む。

A-2) ポストムーア時代の次世代コンピューティング技術

Society5.0を支えるハイテクが大きな変革期を迎えている。半世紀以上にわたってデータトラフィックの爆発的な増加⁷²を支えてきたムーアの法則⁷³が終焉を迎えつつある中、既に、従来の微細化の進展に依拠したCPU中心のコンピューティングアーキテクチャが見直されつつある。一方、5Gから6Gへと向かうモバイル技術の進展に伴い、クラウドに加えてエッジコンピューティングの重要性が増している。これらはコンピューティングとネットワークを融合したシステム全体で最適化する方向。今後のアーキテクチャの抜本的変革（仮説）を想定し、このゲームチェンジを日本がマーケットを獲得する契機としていく。以下、重要な技術の概要、今後注目される点、内外の研究動向等を例示する。

コンピューティング（ノイマン型）

近い将来直面する技術的限界は、①汎用CPUによる計算能力の限界、②プロセッサ-メモリ間の通信帯域の限界⁷⁴、③スイッチングに係る消費電力の爆発的な増加⁷⁵。一方、計算能力は、デジタルエコノミーの中であらゆる科学技術や産業に影響するため、国内の高性能コンピュータ設計技術や計算機資源の維持・強化が不可欠。

①への対応として、エッジ側を中心にビッグデータ処理やディープラーニング等に特化した、ドメインスペシフィック・コンピューティング技術が発展。同時に、クラウド側を中心にCPUにGPU、FPGA、更に上記のようなドメイン・スペシフィックなコンピューティングユニット等、各種の計算アクセラレータを適材適所で組み合わせるヘテロジニアス・コンピューティング⁷⁶が進展。

上記のトレンドは、CPUの限界（①）を補う一方で、コンピューティング／メモリユニット間の通信量を更に増加させ、近い将来、ユニット間の通信帯域（②）とその消費電力（③）の制約が重大な問

⁷² 2000年に84PB/月だったIPトラフィックは122EB/月となり（1,450倍）、2022年には約400EB/月に増加すると予測されている。[Cisco, 2018]

⁷³ Intel創始者の1人であるG. Mooreが唱えた「半導体の集積率は18か月で2倍になる」という経験則。シリコンウエハ単位面積あたりのトランジスタの数の指数関数的増加を予測した。[Moore, 1965]

⁷⁴ 基板配線（銅配線）での、チップとその外部とのデータ伝送は信号周波数と配線長に比例して生じる損失及び配線間の電氣的干渉が律速となり、伝送容量が大きくなるほど光通信の優位性が高まる。現在標準化されているインターコネクトの伝送速度は56Gbpsだが、現時点でレーン当たりTbps級の伝送速度の実現は電気配線では見通しは立っていない。IMECの光インターコネクトに関するロードマップでは、50cm未満の短距離であっても先端プロセスを用いた高伝送密度の回路においてシリコンフォトニクスを適用するとしている。[IMEC, 2017]

⁷⁵ データセンターでの情報処理に係る電力消費は、大きく冷却、スイッチング、トランシーバ、コンピューティングによって構成されるが、このうちスイッチASICの技術的限界により、スイッチングに係る電力消費が指数関数的に増加する見通し。[Popoola Pranggono, 2017]

⁷⁶ 異なる種類のプロセッサを組み合わせる構築したコンピュータシステムによるコンピューティング手法を指す。IBMが2008年に開発したHPC、“Broadrunner”は、異なるプロセッサを組み合わせたアーキテクチャを採用し、1PFLOPS以上を達成。その後、HPCにおいてヘテロジニアス・コンピューティングアーキテクチャを採用する方式が増加。2011年にはAMDがCPUとGPUとを合成・統合させたAPU（Accelerated Processing Unit）を発表し、以降コンシューマ向けにも展開されていく。

題となる。そこで、これを打破するデバイス技術、有限のリソースを最大限有効活用するネットワークも含めた全体最適化技術、更にはシステムアーキテクチャの抜本的な再構築が必要となる可能性が高い。

上記の課題に対し、米国を中心に様々なアプローチがある⁷⁷が、フォトニクス技術を活用した光電融合の新たなコンピューティングアーキテクチャが一つの解となり得る。フォトニクス固有の優位性（高い帯域密度、長い伝送距離、低遅延）により、従来技術の制約が除去されれば、エッジ・クラウド全般の制約も払拭される。すなわち、広域からデータセンター内のラック間データ伝送までにしか使われていないフォトニクス技術・光エレクトロニクス技術を、サーバー間データ伝送やコンピュータの内部のデータ伝送（チップ間接続）にも適用することで、コンピューティングとネットワークを融合した大きなシステムの最適化が可能となる。フォトニクスは単なる伝送手段を超え、コンピューティングアーキテクチャの転換を図るゲームチェンジング・テクノロジーとなり得る。

日本は、高性能光デバイス技術や光通信機器技術等、フォトニクス分野で強みを有する。国内での量産が難しいとしても、部材、製造装置、検査装置等のコア技術での優位性・非代替性を発揮すべきである。デジタルエコノミーにおいては、高度な最先端デバイス・機器技術をスピーディに量産化・低コスト化し、付加価値の高いシステムを構築することが市場獲得の最重要条件。特定レイヤーを狙った戦略的な研究開発を進めるとともに、技術を効率良く市場化につなげるエコシステムの構築が重要。エコシステムは、グローバル化と国家主権の両面を考慮する必要がある。

- 日本企業は、ハイエンドの光トランシーバ及び光通信機器、光トランシーバの心臓部である光エレクトロニクスデバイス（III-V 族光半導体デバイス、シリコンフォトニクスデバイス）では世界トップクラスの強みを持つ。また、国のプロジェクトによって加速された光トランシーバ用 DSP（信号処理）の競争力も高い。光通信技術の研究では、主に日本の企業、国研が世界をリード（産総研スーパークリーンルームのシリコンフォトニクス製造技術は世界最高との評価⁷⁸）。
- 他方、コンピューティング全体は北米が大きくリードし、製造は台湾、韓国。HPC（High Performance Computing）では、2019 年 11 月、Green500 において富士通の富岳の試作機が世界 1 位を獲得するも、Top500 では上位を米中が占める（かつその構成要素であるコンピューティングユニットは米国企業が独占）。フォトニクスについても、米国企業がシリコンフォトニクスとロジックチップの集積実装技術で先行。DARPA 等の軍事関係予算により、北米のスタートアップや大企業、大学における開発を加速。近年では、民間主導のグローバルなオープン化団体が、

⁷⁷ 例えば、米 Hewlett Packard を中心とした業界団体である Gen-Z コンソーシアムは、通信の広帯域と低遅延性、高いソフトウェア効率、エネルギー消費の最適化等を実現するため、コンピュータの様々な構成要素（SoC、アクセラレータ、メモリ、ストレージ、GPU、ネットワークなど）を、すべてメモリにアクセスするように扱う接続方式として、次世代インターコネクト方式“Gen-Z”を提案し、標準化を進めている。[藤川、2019]

また、米 Apple 社によって提案された Open CL（Open Computing Language）は、マルチコア CPU や GPU、Cell プロセッサ、DSP などによる異種混在の計算資源（ヘテロジニアス環境、ヘテロジニアス・コンピューティング）を利用した並列コンピューティングを実現するためのフレームワークであり、標準化団体 Khronos Group の作業部会 OpenCL Working Group によって仕様が策定されている。[KHRONOS OpenCL Working Group, 2019]

⁷⁸ 産総研が保有する 45nm 相当のシリコンフォトニクス製造プロセスはファウンドリの能力として世界トップとの評価がある。[Goodwill, 2017]

様々な技術階層でマルチベンダーによるオープンシステムの構築を促進（Linux Foundation、Telecom Infra Project (TIP)⁷⁹、Open Compute Project (OCP)⁸⁰など）。

- 日本の強みであるハイエンドのフォトニクス技術をコンピューティングに適用していくのが一つの方向性。北米主導のコンピューティング産業のエコシステムに適合しつつ、フォトニクスによる次世代アーキテクチャを見据えたデバイス・実装技術を中心に、特定レイヤーを狙ったビジネス展開が必要。そのため、シリコンフォトニクスの国内ファウンドリを育成・活用するエコシステムを活性化。

メモリ

上記の技術的限界を突破する技術として、メモリ技術への期待も大きい。SRAM（Static Random Access Memory）を代替するスピントロニクスによる微細化・省電力化に適した不揮発性メモリ等、新たなメモリ技術や、これまでにない新しいメカニズムによる革新的な技術が既存のメモリ市場や今後のコンピューティングのあり方を大きく変えていく可能性がある。

- AI・ディープラーニングや 5G・6G の発展には、CPU、GPU、システム LSI のさらなる高性能化と省電力化が不可欠。他方、CPU やシステム LSI チップの面積の半分以上を占める SRAM キャッシュメモリは、リーク電流や品質のバラツキのために微細化限界や消費電力の限界を迎えつつある。このため、SRAM を代替できる高性能な不揮発性メモリの開発が現状を打開する鍵。
- 日本の半導体メーカー、半導体製造装置メーカーでも高い技術レベルと国際競争力を持つ企業がある。日本の大学や国研の技術レベルも世界的に見て高い。近年、メモリなどの半導体製品のみならず、半導体製品の製造に不可欠な製造装置・材料に対する関心が高まる中、こうした製造基盤の維持・強化に向けた取組が必要である。
- 世界的には米国、韓国、台湾の企業がリード。これら海外大手はシステム LSI やメモリのデファクトスタンダードを握っており、更に半導体の微細化技術、製造コスト、投資能力等の点で他の追随を許さない。このため、国内メーカーが新型メモリ開発で海外大手と同レベルでは事業化の段階で勝負にならない。これらの主要プレーヤーと同じフェーズでの研究開発ではなく、より早い段階（基礎研究段階）から産官学連携を推進し、知財や基本技術を先行して取得する必要がある。

量子コンピューティング

⁷⁹ TIP は、通信ネットワーク構築に係るコスト削減を実現するため、オープン化やディスアグリゲーションという潮流をテレコムネットワークに適用することで、この分野のハードウェア・ソフトウェアやオペレーションに革新をもたらすことを目標とし、Facebook が中心となって 2016 年 2 月に活動を開始。

⁷⁵ OCP は、スケーラブルなコンピューティングにとって、最も効率の良いサーバー／ストレージ／データセンターなどのハードウェアを設計し、また、提供していくためのエンジニアコミュニティとして、Facebook が提唱し、2011 年 4 月に設立。[Open Compute Project Japan, 2015]

量子コンピュータについては、一部の計算処理には古典コンピュータを凌駕する性能が期待されている。一方、現在主流の超伝導量子コンピュータを動作させるためには大型の冷凍機が必要であり、室温エレクトロニクス制御装置から冷凍機内への膨大な配線を介した熱流入が極めて深刻な問題となっている。極低温や磁場のシールドなど、極限環境を維持することがボトルネックの一つであることから、極低温環境への大量の配線導入を解決するクライオ CMOS や超伝導理論回路等の周辺制御回路、動作温度の向上と高集積化が期待されるシリコン量子コンピュータ、光量子技術やスピントロニクス等を用いた常温稼働の量子コンピュータ等もキーテクノロジーとなり得る。

量子コンピュータが優位となる応用分野の探索には、アルゴリズムの開発が不可欠であり、数学、化学、物理学、情報工学など、学際的な人材育成や異分野連携、研究開発拠点等でのハードからソフト、基礎から応用までの一貫した取組を並行して進める必要がある。

- Google による「量子超越」に代表されるように、革新的情報処理能力を持つ量子コンピュータは、Society5.0 におけるクラウドコンピューターとして、従来型のコンピューティングでは処理できなかった様々なビックデータ処理を通じて、物流、創薬、製造、AI、自動運転、農業など様々な産業分野において破壊的技術革新をもたらすポテンシャルを有する。一方、実用に資する量子コンピュータを実現するためには、周辺制御回路技術や大規模集積化技術が必要。
- 汎用量子コンピュータの基盤技術は日本で誕生した。超伝導方式、シリコン方式、光方式の基礎研究では日本の国研・大学が世界をリードしている。他方、実用化研究では欧米より大きく遅れている。量子アニーリングマシンに関しは、日本において、世界で最大規模のプロジェクトが進行中。NEDO の事業において、日本の強みである超伝導集積回路の実装技術や大規模集積化技術を活かしつつ、産総研と日本企業が独自の高性能超伝導量子アニーリングマシンの研究開発を展開するとともに、ソフトウェア開発やアプリケーションの開拓、アニーリングマシンの汎用化に向けた開発も実施。
- 世界的には、超伝導方式、イオントラップ方式、シリコン方式のいずれも米国企業が世界をリード。量子コンピュータのソフトウェアやプログラム言語も米国企業がリード。量子アニーリングマシンに関しては、カナダの企業が既に超伝導量子アニーリングマシンを商用化。また、同社は、量子アニーリングマシンクラウドサービスを世界的に展開し多くのユーザーを獲得。米 IARPA と欧 Horizon 2020 において、コヒーレント超伝導量子アニーリングマシンのプロジェクトが進行中。
- 日本は、量子コンピュータ開発のための量子回路製造プロセスや実装技術、量子コンピュータ制御のための周辺エレクトロニクス設計・製造・評価技術（クライオ CMOS、超伝導デジタル回路）、室温動作量子コンピュータに向けたシリコン方式や光方式、スピントロニクスを用いた全く新しい原理等に注力。また、日米欧の連携による量子コンピュータ技術の国際標準化も並行して進める。

VI. 政府の役割

組織内外のリソースの最大活用によるイノベーション力の強化。



政策手法にもイノベーション

どんなに良い政策も、施策レベルで実装されなければ意味がない。政策の立案時には、考えられる政策を比較検証するとともにその政策の目標や政策を誰がどのように使うかを具体的にイメージし、政策実施時には政策ユーザー（企業、大学、国研等）の声を聴き、改善を続ける必要がある。

- 内外の情勢変化を鋭敏に捉え、政策判断の材料を提供する技術インテリジェンスが重要であり、NEDO/TSC の機能を強化。政策当局は「公募制」に甘えて待ちの姿勢にならず、有望な研究開発課題や政策ユーザーを自ら探す「スカウト型」、「プッシュ型」も意識。国の研究開発事業等の審査が「公平性」を建前に外部審査員への丸投げ（無責任）にならないよう注意。
- 研究や技術を実用化につなげるプロデューサー／アクセラレータ等は、研究段階から実用化を意識。なお、出口や成果を意識し過ぎて、近くの低い目標を設定するなどということがないよう注意が必要。中長期的な競争力の確保を目指した出口が重要。
- ファンディングエージェンシーのミッションの明確化、進化。
- 競争的資金⁸¹の提案競争が激化し、研究者の事務負担が増加。優れた案件に対して効率的にファンディングし、研究者が研究に打ち込める環境を構築。手続きの合理化・電子化、web 会議等の IT ツールの活用も推進。
- 産学官連携コーディネーターやリサーチ・アドミニストレータ（URA）など、研究者と企業・大学・国研や政府・ファンディングエージェンシー等との間を取り持つ人材を国等の事業の中でも積極的に活用。
- ピッチイベントや公募審査においては、審査員が正解を求め過ぎて未来の芽を摘むようなことがないよう留意（応募者を質問攻めにした挙句、何の支援もしなかったという事例も聞くところ）。
- スタートアップのニーズは多様。資金支援だけでなく多様な政策メニューを組み合わせ柔軟に対応。
- 大学、国研、スタートアップ、そして海外企業や従来のライバル企業もイノベーションのパートナーとして再定義できる可能性があり、オープンイノベーション（産産連携、産学連携、スタートアップの起

⁸¹ 第3期科学技術基本計画において、「資源配分主体が広く研究開発課題等を募り、提案された課題の中から、専門家を含む複数の者による科学的・技術的な観点を中心とした評価に基づいて実施すべき課題を採択し、研究者等に配分する研究開発資金」と定義されている。

用、国際的な連携、官民協調等による新たなファンディング手法等）を考慮すべき。国の研究開発事業等の審査の際にもオープンイノベーションを重視。

根源的な課題への対応

知的資本の集積とネットワーク化、エコシステム形成に係る競争は更に激化が予想される。イノベーション創出においては関係者間の距離も重要だと言われ、その点、日本は世界有数の人的・経済的集積を持つ都市圏を擁し、知的資本を呼び込む環境として優位性がある（良好な治安、社会インフラ、法的安定性、民主主義）。また、日本は世界に類を見ないほど、あらゆる分野の産業技術をフルセットで有している（日本は 34 年連続で経済複雑性指標で 1 位⁸²⁾）。

ただし、海外の人材から見ると、日本は言語のみならず慣行等の観点からも特殊で障壁が高いという声もあり、言語や慣習の壁の打破、教育・人材育成の見直し、女性の活躍、労働慣行の改革など、内なるグローバル化が必要。IT インフラ等の研究・ビジネス環境も増強が必要。過去の歴史が証明するように、日本人は本来、他国に合わせて自己変革するのは得意なはず（日本人の謙虚さと器用さ）。知的資本主義経済を前提とした労働環境、教育・人材育成システムへの転換が必要であり、政府の役割は大きい。

産業技術ビジョンのレビュー

産業技術ビジョンに基づく戦略や政策は、情勢の変化に応じて随時更新する。また、ビジョンそのものも、科学技術基本計画（5 か年計画。2021 年度から「科学技術・イノベーション基本計画」への名称変更を含む法案を国会提出済）のスケジュール等を念頭に置きつつも、環境や技術の変化等を踏まえ、必要に応じてレビューと改訂を行う。

今般の新型コロナウイルス危機は、1990 年代以来拡大を続けてきたグローバリゼーションの流れに大きな転換をもたらす可能性がある。国際分業や労働力の国際的移動等を通じて世界経済を成長させてきたグローバリゼーションの役割は引き続き大きいと考えられる。一方で、今回の非常事態は、国や企業のガバナンスの在り方にも影響を与え、控え目に見てもグローバリゼーションの質は変容する。地球の持続可能性、人類の安全・安心などの価値観も一気に変わっていく可能性がある。このような世界の変化を見通し、日本は如何に活躍し、如何に世界に貢献するか。こうした点を踏まえつつ、産業技術ビジョンのレビューを臨機応変に行う。

⁸²⁾ 経済複雑性指標（ECI: Economic Complexity Index）とは、国の経済システムにおける生産力の特徴を測るための指標であり、他国への輸出品目の多様性・希少性等を考慮することで、その国の経済の複雑性を数値化。経済複雑性指標の各国データベースを擁する Observatory of Economic Complexity によれば、日本は 1984 年以降現在に至るまで ECI が 1 位。[OEC, 2020]

参考文献

はじめに

- 科学技術・学術政策研究所（2019）「科学研究のベンチマーキング 2019—論文分析でみる世界の研究活動の変化と日本の状況—」,
https://nistep.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=6653&item_no=1&page_id=13&block_id=21
- 小高航, 京塚環, 藤本秀文, 小河愛実（2020, Feb 12）, 「特許ウォーズ 総集編」, 日本経済新聞, <https://vdata.nikkei.com/newsgraphics/patent-wars/>
- 科学技術・学術政策研究所（2019）「科学技術指標 2019」,
https://www.nistep.go.jp/sti_indicator/2019/RM283_56.html
- 総務省（2019）「2019 年（令和元年）科学技術研究調査結果」,
<http://www.stat.go.jp/data/kagaku/kekka/index.html>

I. 2050 年の世界 避けられない潮流

- United Nations (2019), World Population Prospects 2019 Highlights,
https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf
- Bricker, D. and Ibbitson, J. (2019), *The Shock of Global Population Decline*, Robinson
- Jorgensen, B. (2020), CES Tech Trends: Prepare for the 'Intelligence of Things',

II. 世界の動向

- 経済同友会（2019）, 「先進技術による新事業創造委員会 報告書」
<https://www.doyukai.or.jp/policyproposals/articles/2018/190304a.html>
- ダニエル・ベル（1975）, 「脱工業社会の到来 — 社会予測の一つの試み」, ダイヤモンド社
- Moretti, E. (2013), *The New Geography of Jobs*, Mariner Books
- Glassdoor (2019), Searching for a Career Paying Top Dollar? These are the Highest Paying Jobs and Highest Paying Companies in 2019,
<https://www.glassdoor.com/research/jobs-companies-2019/>
- JD Brown, et al. (2019), *Immigrant Entrepreneurs and Innovation in the U.S. High-Tech Sector*, IZA DP, No.12190, <http://ftp.iza.org/dp12190.pdf>
- 中津純子（2018）, 「中国の高度人材呼び戻し政策」
https://www-overseas-news.jsps.go.jp/wp/wp-content/uploads/2018/04/2017kenshu_16pek_nakatsu.pdf
- Lawson, B. and Samson, D. (2001), *Developing Innovation Capability in Organizations:*

A Dynamic Capabilities Approach, International Journal of Innovation Management, Vol. 5, No. 3, 377– 400

- European Commission (2019), A European Green Deal - Striving to be the first climate-neutral continent,
https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

Ⅲ. 日本の現状（ことの本質）

- Andreessen, M. (2011), Why Software Is Eating The World, *The Wall Street Journal*,
<https://www.wsj.com/articles/SB10001424053111903480904576512250915629460>
- 栄藤稔（2015）『イノベーションの源泉「産業のソフトウェア化」とは？』, *VERISERVENAVIGATION*, 4, 3-7,
<https://www.veriserve.co.jp/asset/pdf/tim-verinavi-vol4-2.pdf>
- NEDO（2019）「平成 30 年度 日系企業のモノ、サービス及びソフトウェアの国際競争ポジションに関する情報収集」
- The Global Entrepreneurship and Development Institute（2019）, Global Entrepreneurship Index 2019
- 株式会社マイナビ（2019）「2020 年卒マイナビ大学生就職意識調査」
http://mcs.mynavi.jp/enq/ishiki/data/ishiki_2020.pdf
- OECD（2020）Main Science and Technology Indicators
- 内閣府（2018）「平成 30 年度 年次経済財政報告」―「白書」：今、Society 5.0 の経済へ―
https://www5.cao.go.jp/j-j/wp/wp-je18/index_pdf.html
- 船橋洋一（2015）,『検証 日本の「失われた 20 年」』, 東洋経済新報社
- 米山茂美、渡辺俊也、山内勇、真鍋誠司、岩田智（2017）,「日米欧企業におけるオープン・イノベーション活動の比較研究」, 学習院大学 経済論集, 54(1), 35-52
- 科学技術・学術政策研究所（2019）,「科学研究のベンチマーキング 2019―論文分析でみる世界の研究活動の変化と日本の状況―」,
https://nistep.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=6653&item_no=1&page_id=13&block_id=21
- Cole, R. E., and Nakata, Y. (2014), The Japanese Software Industry: What went wrong and what can we learn from it?, *California Management Review*, 57(1), 16-43
- 木村英紀（2015）,「世界を動かす技術志向 要素からシステムへ」, 講談社
- World Economic Forum (2019), Global Gender Gap Report 2020,
http://www3.weforum.org/docs/WEF_GGGR_2020.pdf
- OECD (2012), Closing the Gender Gap: Act Now Japan,
<http://www.oecd.org/gender/Closing%20the%20Gender%20Gap%20-%20Japan%20FINAL.pdf>
- 中根千枝（1967）,「タテ社会の人間関係」, 講談社現代文書
- HAYS（2019）, The Hays Global Skills Index 2019/20
https://www.hays-index.com/wp-content/uploads/2019/09/HAYS_GLOBAL_SKILLS_INDEX_2019-20_FINAL.pdf

- 独立行政法人労働政策研究・研修機構（2019）「データブック国際労働比較 2019」,
<https://www.jil.go.jp/kokunai/statistics/databook/2019/documents/Databook2019.pdf>
- 安宅和人（2020）,「シン・ニホン」, NewsPicks パブリッシング
- OECD（2020）, Main Science and Technology Indicators
- 総務省（2017）,「過去最多を更新し続ける我が国の女性研究者」,
<http://www.stat.go.jp/data/kagaku/kekka/topics/topics100.html>
- Education First（2019）,「EF EPI 英語能力指数」
https://www.efjapan.co.jp/_/_/~/media/centraleftcom/epi/downloads/full-reports/v9/ef-epi-2019-japanese.pdf
- 内閣府（2018）「平成 30 年度 年次経済財政報告」―「白書」：今、Society 5.0 の経済へ―
https://www5.cao.go.jp/j-j/wp/wp-je18/index_pdf.html
- Moretti, E.（2013）, *The New Geography of Jobs*, Mariner Books
- 妹尾堅一郎（2009）,「技術力で勝る日本が、なぜ事業で負けるのか」, ダイヤモンド社

IV. 対応の方向性

- 関辰一（2019）,「増加する中国の産業補助金」―日本総研アジア・マンスリー2019 年 10 月号―,
<https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=35098>
- 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター（2019）,「情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響（Vol.1）」, <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2018-pp-15.pdf>
- Autor, D.（2019）, Work of the Past, Work of the Future, *NBER Working Paper*, No. 25588,
<https://www.nber.org/papers/w25588>
- 内閣府（2018）「平成 30 年度 年次経済財政報告」―「白書」：今、Society 5.0 の経済へ―
https://www5.cao.go.jp/j-j/wp/wp-je18/index_pdf.html
- Alvaredo, F., Chancel, L., Piketty, T., Saez, E., Zucman, G.（2017）, The elephant curve of global inequality and growth, *WID.worldWORKING PAPERS SERIES*, No. 2017/20
<https://wid.world/document/elephant-curve-global-inequality-growth-wid-world-working-paper-2017-20/>
- Wolff, E. N.（2017）, Household Wealth Trends in the United States, 1962 to 2016: Has Middle Class Wealth Recovered?, *NBER Working Paper*, No. 24085
<https://www.nber.org/papers/w24085>
- United Nations（2018）, Note on Income Inequality Data,
<https://www.un.org/development/desa/dspd/wp-content/uploads/sites/22/2018/11/Note-Income-Inequality-Data.pdf>
- Guzman, G. G.（2019）, Household Income: 2018 American Community Survey Briefs, United States Census Bureau,
<https://www.census.gov/content/dam/Census/library/publications/2019/acs/acsbr18-01.pdf>
- OECD（2019）, Education at a Glance 2019,
<https://www.oecd.org/education/education-at-a-glance/>
- 内閣府（2011）「平成 23 年度 年次経済財政報告」―日本経済の本質的な力を高める―

- <https://www5.cao.go.jp/j-j/wp/wp-je11/11p00000.html>
- 出入国在留管理庁（2018）「国籍・地域別高度外国人材の在留者数の推移」,
<http://www.moj.go.jp/content/001244280.pdf>
 - OECD（2019）, The OECD Indicators of Talent Attractiveness,
<https://www.oecd.org/migration/talent-attractiveness/>
 - 文部科学省（2018）「高等教育の将来構想に関する参考資料」,
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo4/042/siryo/_icsFiles/afieldfile/2018/02/23/1401754_07.pdf
 - Council on Competitiveness（2004）, Innovate America,
https://www.compete.org/storage/images/uploads/File/PDF%20Files/NII_Innovate_America.pdf
 - 柳澤一男, 中根正義（2015, May 8）, 『下村博文文科相インタビュー 明治以来の改革で「入試」が変わる』, 毎日新聞, <https://mainichi.jp/articles/20150508/org/00m/100/026000c>
 - 安宅和人（2020）, 「シン・ニホン」, NewsPicks パブリッシング
 - World Economic Forum（2019）, Global Gender Gap Report 2020,
<http://reports.weforum.org/global-gender-gap-report-2020/the-global-gender-gap-index-2020/>
 - OECD（2019）, Key Features of OECD Programme for International Student Assessment 2018, https://www.nier.go.jp/kokusai/pisa/pdf/2018/01_point-eng.pdf
 - Baldwin, R.（2018）, 「世界経済 大いなる収斂—IT がもたらす新次元のグローバル化—」（原著：The Great Convergence: Information Technology and the New Globalization）, 日本経済新聞出版
 - 財務省（2020）, 「貿易統計」,
https://www.customs.go.jp/toukei/shinbun/trade-st/2019/2019_117.pdf
 - ティース, D. J.（2019）, 「ダイナミック・ケイバリティの企業理論」, 中央経済社
 - Baldwin, Richard（2018）, 「世界経済 大いなる収斂—IT がもたらす新次元のグローバル化—」（原著：The Great Convergence: Information Technology and the New Globalization）, 日本経済新聞出版
 - Craft（2020）, What Industry Has The Highest Gross Profit Per Employee?,
<https://craft.co/reports/gross-profit-per-employee-analysis>
 - 財務省（2020）, 「貿易統計」,
https://www.customs.go.jp/toukei/shinbun/trade-st/2019/2019_117.pdf
 - 統合イノベーション戦略推進会議（2020）, 「革新的環境イノベーション戦略」
 - International Federation of Robotics（2018）, World Robotics,
https://ifr.org/downloads/press2018/Executive_Summary_WR_2018_Industrial_Robots.pdf
 - 土井美和子（2019）, 「人の持つ能力の向上・拡張等による『誰もが夢を追求できる社会の実現』」（ムーンショットプログラム国際シンポジウム分科会資料）,
<https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/yusikisha/20191031/siryo3.pdf>
 - International Federation of Robotics（2018）, World Robotics,

https://ifr.org/downloads/press2018/Executive_Summary_WR_2018_Industrial_Robots.pdf

- Zeng, A. (2019) , Unifying Physics and Deep Learning with TossingBot, <https://ai.googleblog.com/2019/03/unifying-physics-and-deep-learning-with.html>
- Berkeley Automation (2019), Dex-Net by Berkeley Automation, <https://berkeleyautomation.github.io/dex-net/>
- Cisco (2018)「Cisco Visual Networking Index (VNI) : 予測とトレンド、2017～2022 年」, https://www.cisco.com/c/ja_jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html
- Moore, E. R. (1965), Cramming more components onto integrated circuits, <https://newsroom.intel.com/wp-content/uploads/sites/11/2018/05/moores-law-electronics.pdf>
- Absil, P. (2017), Imec's silicon photonics platform enabling 100Gb/s OOK optical links, IMEC, http://www1.semi.org/eu/sites/semi.org/files/events/presentations/05_philippe%20absil_imec.pdf
- Popoola, O., and Pranggno, B., (2017), On energy consumption of switch-centric data center networks, *The Journal of Supercomputing*, 74, 334–369, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11227-017-2132-5>
- 藤川 智博 (2019), 「ついに見えてきたメモリ主導型コンピューティングの「カタチ」！ チップセットからエクサスケール・スパコンまで HPE の製品戦略」, <https://h50146.www5.hpe.com/events/seminars/info/pdfs/hp-cast2019/A-6-HPE-HPC-AI-Forum-HPE.pdf>
- Khronos OpenCL Working Group (2019), The OpenCL™ Specification, https://www.khronos.org/registry/OpenCL/specs/2.2/pdf/OpenCL_API.pdf
- Goodwill , D. J. (2017), Technology for ultra-large silicon photonic optical switches
- Open Compute Project Japan (2015), Open Compute project Japan, http://opencomputejapan.org/wp-content/uploads/2015/04/20150401-OCPJ-overview-16_91.pdf
- The Observatory of Economic Complexity (2020), Economic Complexity Rankings, <https://oec.world/en/>