

経済産業省 御中

令和 3 年度重要技術管理体制強化事業(宇宙分野に
おける重要技術の実態調査及び情報収集)
調査報告書

目次

1. はじめに.....	1
1.1 背景・目的.....	1
1.2 調査の概要.....	1
1.2.1 衛星コンステレーション関連技術に関する調査.....	1
1.2.2 人工衛星の製造ビジネスに関する法的課題の整理.....	1
1.2.3 衛星データ等地理空間情報活用技術に関する調査.....	1
1.2.4 宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術に関する調査.....	1
2. 衛星コンステレーション関連技術に関する調査.....	3
2.1 分光技術調査.....	3
2.1.1 調査概要.....	3
2.1.2 ハイパースペクトルビジネス調査.....	3
2.1.3 航空機ハイパースペクトルセンサ事例調査.....	18
2.1.4 ポスト ASTER・HISUI 検討.....	19
2.2 GHG 観測技術調査.....	25
2.3 通信技術調査.....	27
2.3.1 調査概要.....	27
2.3.2 通信技術調査.....	28
3. 人工衛星の製造ビジネスに関する法的課題の整理.....	51
3.1 本調査の概要.....	51
3.1.1 本調査の概要・目的.....	51
3.1.2 調査の手順.....	51
3.2 人工衛星の製造ビジネスの基本的な考え方.....	52
3.2.1 人工衛星の製造ビジネスにおける契約実務の特徴.....	52
3.2.2 人工衛星製造ビジネスの当事者と取引構造.....	52
3.2.3 本調査で取り上げる法的論点.....	53
3.3 人工衛星の製造ビジネスにおける部品供給契約上の留意事項.....	55
3.3.1 部品発注/納入の条件.....	55
3.3.2 検査・検収.....	57
3.3.3 支払.....	59
3.3.4 損害賠償.....	60
3.3.5 契約不適合責任.....	61
3.3.6 第三者の権利処理.....	63
3.4 まとめ.....	64

4. 衛星データ等地理空間情報活用技術に関する調査	65
4.1 地理空間情報活用のための技術及びビジネスモデル(プラットフォーム)調査	65
4.1.1 技術動向調査	65
4.1.2 ビジネスモデル等調査.....	74
4.1.3 アジア展開調査	79
4.1.4 まとめ.....	82
4.2 官民連携動向調査	83
4.2.1 欧米動向調査(官による民データ調達・利用連携)	83
4.2.2 まとめ.....	95
5. 宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術に関する調査	96
5.1 宇宙太陽光発電システムに関する調査.....	96
5.1.1 諸外国における SSPS の研究開発動向	96
5.1.2 まとめ.....	106
5.2 無線エネルギー伝送技術(WPT:Wireless Power Transfer)に関する調査	116
5.2.1 地上における無線エネルギー伝送(WPT)技術を取巻く動向	116
5.2.2 諸外国における無線エネルギー伝送技術の開発動向.....	119
5.2.3 まとめ.....	124
5.3 開発課題・体制等の検討	125
5.3.1 SSPS のアプリケーション例と技術的・運用的な課題	125
5.3.2 WPT の実用化に向けての課題.....	128
5.3.3 我が国が行うべき SSPS 技術開発の方向性の検討.....	129
5.3.4 他国との連携の可能性等	131
6. まとめと今後の課題.....	132
添付資料.....	134

図 目次

図 2-1	Orbital Sidekick 社の衛星 Aurora.....	4
図 2-2	Orbital Sidekick 社のサービスイメージ.....	5
図 2-3	Pixxel 社の衛星 Pixxel.....	6
図 2-4	Pixxel 社のデータ分析サービスイメージ.....	6
図 2-5	HySpecIQ 社の衛星 HySpecIQ.....	7
図 2-6	HySpecIQ 画像(右)と分析(左)イメージ.....	8
図 2-7	Kuva Space 社の衛星 HelloWorld.....	8
図 2-8	Satellogic 社の衛星 Aleph-1.....	9
図 2-9	NorthStar Earth and Space 社のコンステレーションイメージ.....	10
図 2-10	ASTRO DIGITAL 社の衛星 Palisade	11
図 2-11	VTT Technical Research Centre of Finland 社のハイパースペクトルセンサ活用イメージ ..	12
図 2-12	長春光学精密機械与物理研究所が開発したハイパースペクトルビデオカメラ	12
図 2-13	長光衛星技術有限公司の衛星 Jilin-1GP01/02	13
図 2-14	珠海欧比特宇航科技股份有限公司.....	15
図 2-15	ハイパースペクトルビジネスモデルの類型	16
図 2-16	UAV への AOTF センサの搭載概観.....	18
図 2-17	DC-8-AFRC 概観	19
図 2-18	SWIR 帯における観測幅と空間分解能のスペックのプロット結果.....	21
図 2-19	SWIR 帯における空間分解能と観測頻度のスペックのプロット結果	22
図 2-20	TIR 帯における観測幅と空間分解能のスペックのプロット結果.....	22
図 2-21	TIR 帯における空間分解能と観測頻度のスペックのプロット結果.....	23
図 2-22	GHG 観測衛星の観測幅と空間分解能のスペックの分析結果	27
図 2-23	小型 IoT 衛星 SpaceBee の外観.....	29
図 2-24	通信端末 Swarm Tile.....	29
図 2-25	通信端末 Swarm Eval Kit	30
図 2-26	OG2 コンステレーション用地上端末 OG2 Modem	31
図 2-27	IsatData Pro サービス用地上端末 ST 6100	31
図 2-28	Iridium 社の Iridium Next 衛星.....	32
図 2-29	Iridium 社の地上 IoT 端末 Iridium Edge	32
図 2-30	Spire 社の小型衛星 Lemur.....	33
図 2-31	Spire 社の海洋サービスの強み.....	33
図 2-32	移動通信事業者の地上ネットワークと衛星ネットワークを組み合わせた Omnispace 社のハイブリッドネットワークのイメージ	34
図 2-33	Omnispace 社のハイブリッドネットワークの IoT サービス向け利用のメリット	34
図 2-34	Lynk Global 社による、衛星に対して衛星電話のみが接続できる現在(左)と一般の携帯電話から接続できる将来(右)のイメージ	35

図 2-35 Kepler 社の小型 IoT 衛星 GEN1	35
図 2-36 Kepler 社の衛星 IOT サービス EverywherIoT の特徴	36
図 2-37 Kinesis 社の地上チップセットのイメージ	36
図 2-38 Kinesis 社の IoT 衛星が想定する利用分野	36
図 2-39 Astrocast 社が開発する 5kg 級ナノサットのイメージ	37
図 2-40 Astrocast 社の IoT モジュール Astronode S	37
図 2-41 Myriota 社の Myriota 7 衛星	38
図 2-42 Myriota 社の地上端末 Myriota Module	38
図 2-43 Fleet 社の衛星イメージ	39
図 2-44 エッジサーバ、LoRaWAN ゲートウェイ、衛星モデムの機能を統合した Fleet 社の The Portal デバイス	39
図 2-45 Lacuna Space 社の地上端末	40
図 2-46 Lacuna Space 社の LS-3 衛星	40
図 2-47 国電高科の天啓(Apocalypse)衛星	41
図 2-48 国電高科の地上端末 TQZD-01	41
図 2-49 Geespace 社の GSP100 衛星プラットフォーム	42
図 2-50 Geespace 社の車載測位端末 GEETRACKER	42
図 2-51 NOSA の Norsat-2 衛星	43
図 2-52 NOSA の Norsat-TD 衛星	43
図 2-53 VESTA 衛星	44
図 2-54 VESTA 衛星の展開時のイメージ	44
図 2-55 AAC Clyde Space 社の衛星バス Epic 3U	45
図 2-56 船舶搭載 VDES パイロード R60 VDES Base Station	45
図 2-57 MARIOT プログラムによる VDES 衛星と船舶の通信イメージ	46
図 2-58 Sternula 社のコンステレーションの整備タイムライン	46
図 2-59 Skylo 社の地上端末 Skylo Hub	47
図 2-60 Skylo 社の専用アプリ Skylo Apps	47
図 4-1 Copernicus DIAS の概観	66
図 4-2 Destination Earth の主要構成要素	68
図 4-3 Destination Earth のデータレイク	68
図 4-4 Destination Earth のロードマップ	69
図 4-5 Open Data Cube (ODC)の各階層の責任範囲と具体活動内容	70
図 4-6 Azure で提供されている解析ツール	72
図 4-7 エッジ処理デバイス Azure Stack Edge を搭載した車両	72
図 4-8 Azure Stack Edge Pro の外観	73
図 4-9 MS Azure Space の自社地上局ネットワークの展開予定図	74
図 4-10 衛星データ等プラットフォームのステークホルダ・構成要素(技術・サービス)・価値交換	75
図 4-11 Copernicus DIAS(CREODIAS)のビジネスモデル	76
図 4-12 AWS のビジネスモデル	77

図 4-13 Azure Space のビジネスモデル.....	78
図 4-14 ODC のビジネスモデル	78
図 4-15 The Copernicus Australasia Regional Data Hub の関心領域(ROI).....	79
図 4-16 SIWEI earth(四維地球)の機能.....	82
図 4-17 米国 NRO 及び NGA における民間活用戦略と主要プログラム	84
図 4-18 G-EGD のシステムアーキテクチャ	87
図 4-19 G-EGD のウェブインターフェース.....	88
図 4-20 TPM プログラム概要	94
図 4-21 VtCryoSat のウェブインターフェース	94
図 4-22 SMOS Global Mapping Tool を利用したサンプル図	94
図 5-1 NRL の PRAM-FX 装置(左)と ISS 内において実施したレクテナ装置の実演デモ(右)	99
図 5-2 軌道上での Arachne の実験イメージ (Credit : AFRL)	99
図 5-3 SPS-ALPHA Various Versions (Credit : John Mankins)	100
図 5-4 CASSIOPeiA SBSP システムイメージ図 (Credit : Frazer-Nash Consultancy).....	102
図 5-5 CAST のマルチロータリージョイント-SPS と西安電子科技大学の SSPS-OMEGA.....	104
図 5-6 璧山宇宙太陽光発電実験基地イメージ	105
図 5-7 西安電子科技大キャンパス内に設置された試験タワー	105
図 5-8 SPS-ALPHA Mark III の主要構成セグメントとシステム諸元	108
図 5-9 CASSIOPeiA の主要構成セグメントとシステム諸元	109
図 5-10 均等化発電原価(LCOE: Levelized Cost of Electricity)の比較.....	110
図 5-11 1GW MR-SPS	111
図 5-12 1GW MR-SPS の仕様.....	111
図 5-13 K-SSPS の仕様	112
図 5-14 SPS-ALPHA の実用化までのロードマップ.....	113
図 5-15 英国(CASSIOPeiA)の実用化までのロードマップ.....	114
図 5-16 中国の SSPS ロードマップ	115
図 5-17 中国の SSPS マイルストーンミッション	115
図 5-18 電波方式 WPT の伝送方式の違いによる伝送距離・送電電力・伝送効率.....	117
図 5-19 レーザー方式 WPT の適用範囲	117
図 5-20 Wireless Charging 2.0 Ecosystem Roadmap (Credit: Energous).....	119
図 5-21 実用化に向けて開発が行われている WPT システム	125
図 5-22 SSPS 各国のキーパーソン	131

表 目次

表 2-1 分光技術調査概要	3
表 2-2 HS ビジネス調査の調査対象一覧	4
表 2-3 Orbital Sidekick 社の衛星 Aurora スペック	5
表 2-4 Pixxel 社の衛星 Pixxel スペック	6
表 2-5 HySpecIQ 社の衛星 HySpecIQ スペック	7
表 2-6 Kuva Space 社の衛星コンステレーションスペック	9
表 2-7 Satellogic 社の衛星 Aleph-1	10
表 2-8 長光衛星技術有限公司の衛星 Jilin-1GP01/02 スペック	13
表 2-9 長光衛星技術有限公司の衛星 Jilin-1GP01/02 の各バンドにおける観測波長帯	14
表 2-10 珠海欧比特宇航科技股份有限公司の衛星 OHS-2,3 スペック	15
表 2-11 調査対象毎のビジネスモデル類型	16
表 2-12 ハイパースペクトルセンサの分光方式	18
表 2-13 SWIR 帯および TIR 帯を有する静止衛星センサ	19
表 2-14 SWIR 帯および TIR 帯を有するグローバル観測用センサ	20
表 2-15 SWIR 帯および TIR 帯を有するハイパースペクトルセンサ	20
表 2-16 その他の SWIR 帯、TIR 帯を有するセンサ	20
表 2-17 ポスト ASTER・HISUI の方向性	24
表 2-18 回折格子を用いた GHG 観測衛星/センサの調査結果	25
表 2-19 FTS を用いた GHG 観測衛星/センサの調査結果	26
表 2-20 新方式を用いた GHG 観測衛星/センサの調査結果	26
表 2-21 通信技術調査で対象とした IoT 衛星事業者	28
表 2-22 通信技術調査で対象とした VDES 衛星事業者	28
表 2-23 Norsat-2 の諸元	42
表 2-24 Lynk Global 社の ITU におけるファイリング状況	48
表 2-25 Lynk Global 社の打上げに関する情報	48
表 2-26 Lacuna Space 社の ITU におけるファイリング状況	48
表 2-27 Lynk Global 社の打上げに関する情報	49
表 2-28 ITU ファイリングにおける BEESAT-OC-LS 衛星の周波数帯	49
表 2-29 本通信技術調査で対象とした通信衛星の軌道傾斜角と高度	50
表 4-1 技術動向調査で対象としたプログラム/プラットフォーム	65
表 4-2 CREODIAS から新たに入手可能となった画像、プロダクト及びサービス	66
表 4-3 Azure Stack Edge Pro の諸元	73
表 4-4 ビジネスモデル等調査で対象としたプラットフォーム	75
表 4-5 Copernicus DIAS の各サービスの概観	76
表 4-6 SIWEI earth(四維地球)が提供するデータ及びサービス	81
表 4-7 欧米動向調査で対象とした官による民データ調達・利用連携の取組一覧	83

表 4-8 商業 GEOINT 戦略の主な変遷.....	85
表 4-9 EnhancedView 契約の主な動向.....	86
表 4-10 Global Enhanced GEOINT Delivery (G-EGD)の主な動向.....	87
表 4-11 NRO 研究契約の主な動向.....	89
表 4-12 EOCL プログラムの主な動向	90
表 4-13 商業無線周波数(RF)GEOINT 試験プログラムの主な動向.....	90
表 4-14 BAA for Strategic Enhancements (NRO)の主な動向	91
表 4-15 Third Party Mission における提携ミッション	93
表 5-1 SSPS の研究開発を実施している機関と研究タイトル(1/2)	96
表 5-2 SSPS の研究開発を実施している機関と研究タイトル(2/2)	97
表 5-3 電波(主にマイクロ波)方式 WPT の研究開発を実施している機関と研究タイトル	120
表 5-4 レーザー方式 WPT の研究開発を実施している機関と研究タイトル	120

1. はじめに

1.1 背景・目的

近年、安全保障分野のすそ野は経済・技術分野に急速に拡大。また、感染症の世界的拡大による、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。

そうした中で、本事業では、特に各国が開発を競い合う宇宙分野における重要技術について、技術基盤の実態、我が国の立ち位置等を正確に把握するとともに、我が国の産業競争力の維持及び技術の流出防止等のために必要な取組の方向性を検討することを目的として実施した。

1.2 調査の概要

1.2.1 衛星コンステレーション関連技術に関する調査

国内企業でも構築の進む衛星コンステレーションへの搭載可能性のあるミッション技術のうち経済産業省の指定する 3 つの技術(分光技術、GHG 観測技術、通信技術)について、国内外における研究開発動向、データ利用動向を調査し、我が国の産業競争力の維持及び技術の流出防止等のために必要な取組の方向性を検討した。

1.2.2 人工衛星の製造ビジネスに関する法的課題の整理

国際競争力の高い衛星コンステレーションを構築するためには、安価・高品質な民生品の活用が必要であるが、部品・コンポーネントメーカーの中には製造者責任法上のリスクを懸念して宇宙ベンチャー等に納入を行わない場合がある。このため、部品・コンポーネントメーカーと宇宙ベンチャー等との取引における法的課題の整理を行った。

1.2.3 衛星データ等地理空間情報活用技術に関する調査

欧米等における衛星データ等の地理空間情報活用のための技術及びビジネスモデルに関する調査を実施し、今後の我が国における衛星データ等の地理空間情報の活用促進策の検討を行った。特に、クラウド事業者の参入(Microsoft Azure Space 等)や、衛星データを利用したデジタルツインの構築(欧州 Destination Earth 等)といった最新の政策的潮流も踏まえた技術動向分析を実施した。また、NGA・FGDC・DHS・NRO や ESA による民間衛星データ調達等、官民連携を前提としたデータ連携の動向についても調査を行った。

1.2.4 宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術に関する調査

米国、欧州、中国等を対象地域として、宇宙太陽光発電システム及びマイクロ波／レーザーによる無線エネルギー伝送技術に関して実施されている研究開発又は FS について、実施機関、実施概要、実施

体制、今後の計画等について調査を行った。また、大規模エネルギー供給システムとしてだけでなく、被災地における即応型小規模エネルギー供給や宇宙空間でのエネルギー伝送など、いくつかのアプリケーションを対象として、我が国が行うべき技術開発の方向性や他国との連携を含めた開発体制等について検討を行った。

2. 衛星コンステレーション関連技術に関する調査

国内企業でも構築が進む衛星コンステレーションへの搭載可能性のあるミッション技術のうち、「分光技術」、「GHG 観測技術」、「通信技術」の3つの技術を対象として、国内外における研究開発動向、データ利用動向を調査し、我が国の産業競争力の維持及び技術の流出防止等のために必要な取組の方向性を検討した。

2.1 分光技術調査

2.1.1 調査概要

「分光技術」の調査では、表 2-1 に示すように、(1)衛星搭載ハイパースペクトル(HS)センサを用いた企業のビジネスモデルを調査する「HS ビジネス調査」、(2)ドローンや航空機でハイパースペクトルセンサの技術を利用している事例の調査を行う「航空機 HS センサ事例調査」、そして、(3)各国の短波長赤外(SWIR)帯・熱赤外(TIR)帯に観測波長域を有する衛星についての調査を行い、ASTER および HISUI の性能値との比較を行うとともに、今後の方向性について考察する「ポスト ASTER・HISUI 検討」の3つの調査を実施した。

表 2-1 分光技術調査概要

調査項目	調査内容
HS関連ビジネス調査	● 衛星搭載 HS センサデータを用いてビジネス展開を目指す企業のビジネスモデル調査 ● ビジネスモデル調査対象のうち、HS 衛星／センサを自社で開発や運用している場合はスペック情報も調査
航空機 HS センサ事例調査	● LCTF 以外にドローンや航空機で HS センサの技術を利用している事例の調査
ポスト ASTER・HISUI 検討	● 各国の SWIR 帯、TIR 帯に観測波長域を保有する衛星(計画中含む)についての調査を行い、ASTER および HISUI の性能値との比較を行うとともに、今後の方向性について考察

出所)三菱総合研究所作成

2.1.2 ハイパースペクトルビジネス調査

(1) 調査対象

本 HS ビジネス調査では、衛星搭載ハイパースペクトルセンサを用いたビジネスを構築または計画している事業者と、こうしたビジネスに関係している事業者を対象として調査を行った。調査対象とした11社を表 2-2 に示す。国については本社が所在する国を記載しているが、Satellogic 社については本社所在位置の詳細が不明であったため、本社として記載のあったウルグアイとアルゼンチンの2カ所を記載している。調査対象のうち、自社で衛星を運用または計画している場合は、衛星／センサスペック

についても調査した。

表 2-2 HS ビジネス調査の調査対象一覧

調査対象	国
Orbital Sidekick	アメリカ
Pixxel	インド
HySpecIQ	アメリカ
Kuva Space	フィンランド
Satellogic	ウルグアイ アルゼンチン
NorthStar Earth and Space Inc.	カナダ
ASTRO DIGITAL	カナダ
VTT Technical Research Centre of Finland Ltd	フィンランド
長春光学精密機械与物理研究所	中国
長光衛星技術有限公司	中国
珠海欧比特宇航科技	中国

出所)三菱総合研究所作成

以降、各企業について、企業の概要や保有する衛星／センサのスペック等を順次記載する。

1) Orbital Sidekick

米国の Orbital Sidekick 社は 6 機からなる自社のハイパースペクトル衛星コンステレーションを構築し、パイプライン監視等のモニタリングサービス構築を目指すスタートアップ企業である。同社は図 2-1 および表 2-3 に示すハイパースペクトルセンサを搭載した衛星 Aurora を 2021 年 6 月 30 日に打ち上げている。なお、衛星 Aurora の開発は 7) に示す ASTRO DIGITAL 社が行っている。



図 2-1 Orbital Sidekick 社の衛星 Aurora

出所) <http://www.alliedminds.com/assets/Orbital-Sidekick-ALM-CMD-14-April-2021.pdf> (2022年2月17日閲覧)

表 2-3 Orbital Sidekick 社の衛星 Aurora スペック

項目	スペック
空間分解能	30m
観測幅	不明
バンド数	450 以上
観測波長帯	400～2500nm
波長分解能	不明
分光方式	不明
衛星重量	30kg

出所)各種公開情報を基に三菱総合研究所作成

同社は、図 2-2 に示すように、自社のハイパースペクトル衛星コンステレーションを構築し、得られるデータを解析した情報を顧客に提供するデータサービスビジネスを目指している。データを解析するプラットフォーム SIGMA を用いて顧客に対して情報提供を行うとしている。

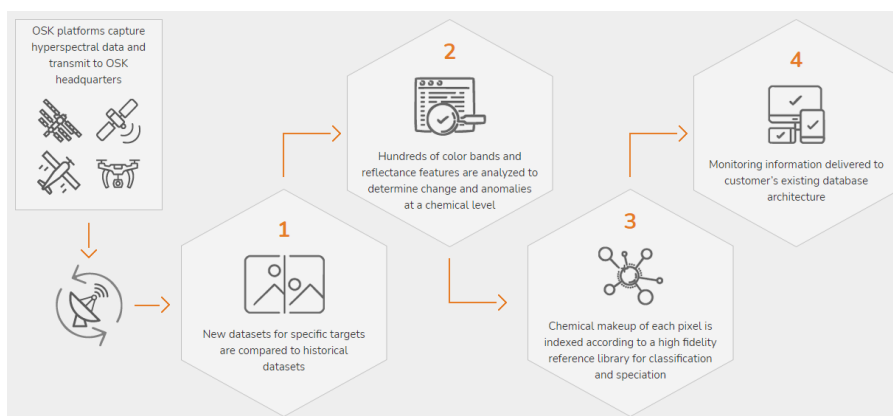


図 2-2 Orbital Sidekick 社のサービスイメージ

出所)<https://orbitalsidekick.com/technology/>(2022年 2 月17日閲覧)

同社では、ユースケースとして、石油・ガスパイプライン監視やメタンマッピング、クリーンエネルギー資源探査、鉱業、山火事リスク軽減等を想定している。例えば 2021 年より米国の石油関連企業である Phillips 66 とパイプライン監視のパイロットプロジェクトを実施しており、現在も継続している。

なお、同社は 2021 年 4 月に 1600 万ドルの資金調達を行っており、SIGMA の開発や衛星開発費用、打ち上げ費用等にこの資金を活用しているものとみられる。

2) Pixxel

インドの Pixxel 社は自社のハイパースペクトル衛星コンステレーションを構築し、データ分析サービスの提供を目指すスタートアップ企業である。

同社が計画するコンステレーションは、図 2-3 および表 2-4 に示す同社の衛星 Pixxel により構成され、2023年には30機からなるコンステレーションを構築するとしている。これらの衛星から得られたデータを、図 2-4 に示す同社が開発する分析ツールを用いてサービスの展開を目指している。また、将

来的には地球観測だけでなく、地球外の資源探査も行うとしている。

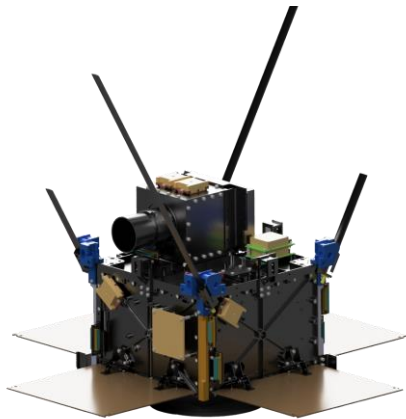


図 2-3 Pixxel 社の衛星 Pixxel

出所)<https://www.pixxel.space/>(2022年 2 月17日閲覧)

表 2-4 Pixxel 社の衛星 Pixxel スペック

項目	スペック
空間分解能	5m
観測幅	不明
バンド数	300
観測波長帯	不明
波長分解能	不明
分光方式	不明
衛星重量	16kg

出所)各種公開情報を基に三菱総合研究所作成

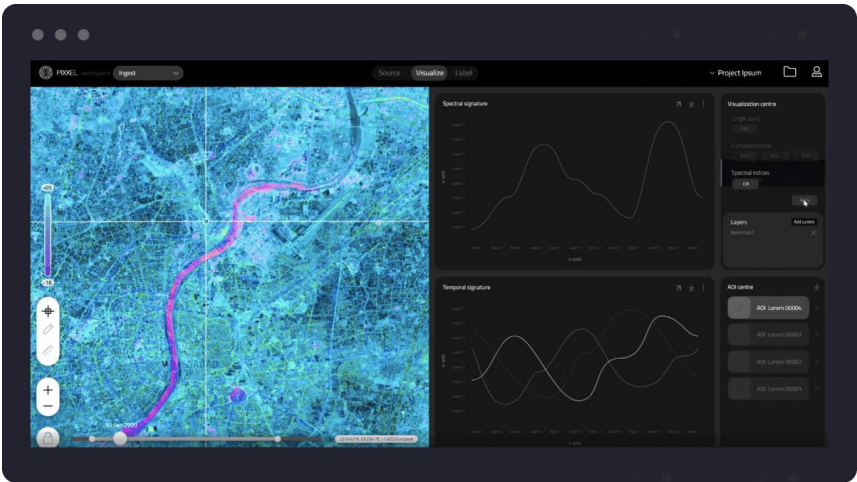


図 2-4 Pixxel 社のデータ分析サービスイメージ

出所)<https://www.pixxel.space/>(2022年 2 月17日閲覧)

3) HySpecIQ

米国の HySpecIQ 社は、自社のハイパースペクトル衛星コンステレーションを構築し、ハイパースペクトルデータの提供・分析サービスの実施を目指すスタートアップ企業である。

同社は 2013 年に創業しており、当初は図 2-5 および表 2-5 に示すボーイング社の小型衛星 HySpecIQ に対してハイパースペクトルセンサを搭載するとしていたが、資金面の問題で計画が中止されていた。しかし、PayPal 創業者のピーター・ティールが 2021 年に出資したことで再び注目されている。

現在、同社は最終的に12機の衛星からなるハイパースペクトル衛星コンステレーションの構築を目指しており、2023年には最初の2機を打上げ予定である。今後打ち上げる衛星が図 2-5 および表 2-5 に示す過去の HySpecIQ 衛星とスペックが同じか異なるかは不明である。

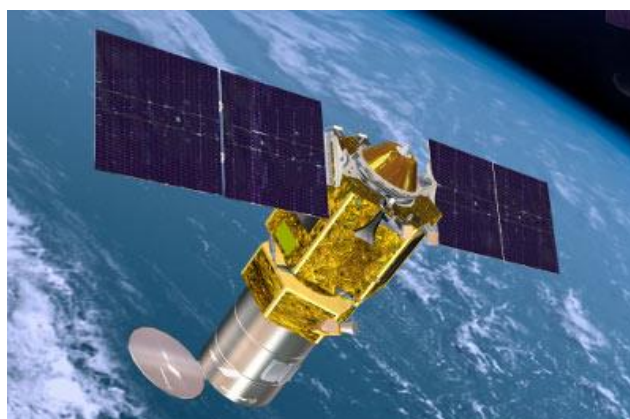


図 2-5 HySpecIQ 社の衛星 HySpecIQ

出所)https://space.skyrocket.de/doc_sdat/hyspeciq-1.htm(2022年2月17日閲覧)

表 2-5 HySpecIQ 社の衛星 HySpecIQ スペック

項目	スペック
空間分解能	5m 以下
観測幅	不明
バンド数	220以上
観測波長帯	400～2500 nm
波長分解能	不明
分光方式	不明
衛星重量	不明

出所)各種公開情報を基に三菱総合研究所作成

同社では、これら自社の衛星コンステレーションから得られるデータの提供と、図 2-6 に示すようなデータ分析結果を提供するサービスの提供を目指している。2019年には NRO と商用 HS 研究契約を締結しており、また各種報道から初期のユーザとしては行政ユーザの獲得を目指しているものとみられる。



図 2-6 HySpecIQ 画像(右)と分析(左)イメージ

出所)<https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-15/peter-thiel-bankrolls-satellite-imaging-startup-hyspeciq>(2022年2月17日閲覧)

4) Kuva Space

フィンランドの Kuva Space 社は、自社の HS 衛星コンステレーションを構築し、HS データの提供・分析サービスの実施を目指すスタートアップ企業である。同社は以前、Reaktor Space Lab の社名で知られていた。

同社は現在、「HelloWorld」、「W-Cube」、「Sunstorm」という3機の衛星を運用中であり、このうち衛星 HelloWorld にハイパースペクトルセンサを搭載している。

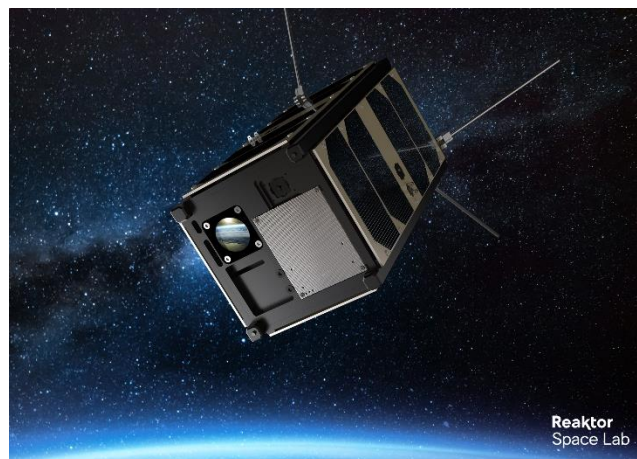


図 2-7 Kuva Space 社の衛星 HelloWorld

出所)<https://www.eurekalert.org/news-releases/761230>(2022年2月17日閲覧)

HelloWorld 以外は ESA から衛星開発を受注しており、小型衛星を製造するビジネスが中心とみられていた。しかし2021年10月5日に485万ドルの資金調達を発表すると同時にハイパースペクトル衛星コンステレーション構築計画を発表した。計画しているコンステレーションの規模は不明であるが、判明しているスペックを表 2-6 に示す。ニュース記事などの情報によると、同社は今後、このコンステレーションで取得したデータを農業や森林分野で活用することを想定しているとみられる。なお、同社は

2020 年に ESA のビジネスインキュベーションプログラムに参加しており、ESA Business Incubation Centre とフィンランド政府関連公社から資金提供を受けている。

表 2-6 Kuva Space 社の衛星コンステレーションスペック

項目	スペック
空間分解能	不明
観測幅	不明
バンド数	50
観測波長帯	400-1100nm(第1世代) 400-2500nm(第2世代)
波長分解能	不明
分光方式	不明
衛星重量	不明

出所)各種公開情報を基に三菱総合研究所作成

5) Satellogic

ウルグアイ・アルゼンチンの Satellogic 社は、低価格での地球観測データの提供サービス構築を目指すスタートアップ企業である。

同社は NEWSAT という17機の小型衛星を運用中であり、各衛星にはマルチスペクトルセンサとハイパースペクトルセンサの両方を搭載している。2025 年以降には図 2-8 および表 2-7 に示す 300 機以上の衛星コンステレーション Aleph-1 を構築するとしている。



図 2-8 Satellogic 社の衛星 Aleph-1

出所)<https://satellogic.com/technology/satellites/> (2022年2月17日閲覧)

表 2-7 Satellogic 社の衛星 Aleph-1

項目	ハイパースペクトルセンサスベック	マルチスペクトルセンサスベック
空間分解能	25m	0.99m
観測幅	125km	5km
バンド数	29	4
観測波長帯	460～830 nm	Blue: 450 - 510 nm Green: 510 - 580 nm Red: 590 - 690 nm Near-IR: 750 - 900 nm
波長分解能	14～35 nm	-
分光方式	不明	不明
衛星重量	37.5 kg～41 kg	

出所)各種公開情報を基に三菱総合研究所作成

同社は、研究開発期間の短縮と大幅なコスト削減により衛星製造コストを低減し、他社に比べて 100 倍以上の低価格での衛星データの提供を行うとしている。また、観測されたデータを自社のポータルサイトまたは API によってデータ提供を行う衛星データサービスビジネスの構築を目指している。さらに、このポータルサイトを通じてユーザ自身が直接衛星のタスキングを行うサブスクリプションサービスの提供も行っている点が特徴的である。

6) NorthStar Earth and Space Inc.

カナダの NorthStar Earth and Space 社は、地球観測と宇宙状況把握(SSA)の両方の観測を単一の衛星で行う衛星で構成されるコンステレーションの構築を行い、得られたデータを用いて行政ユーザ向けにサービス提供することを目指すスタートアップ企業である。

現状は SSA 向けの衛星コンステレーションのみが計画されており、現在、SSA 向けの光学センサを搭載した Skylark 衛星を 3 機開発中である。将来的には 12 機以上のコンステレーションを構築することを計画している。



図 2-9 NorthStar Earth and Space 社のコンステレーションイメージ

出所)<https://spacenews.com/exoanalytic-northstar-es-team-up-on-space-situational-awareness/>(2022年 2 月17日閲覧)

また、同社はカナダ政府の資金により、2021年にカナダ沿岸警備隊と共同で EOMCE (Earth Observation Monitoring System for Marine and Coastal Environments) という沿岸の海洋環境モニタリングを行うサービスを開発している。EOMCE ではドローン、航空機、衛星など様々な観測データを組み合わせて分析した結果を提供するポータルを構築するとしている。

7) ASTRO DIGITAL

カナダの ASTRO DIGITAL 社は衛星モジュールの開発・販売から顧客のコンステレーション構築・運用までを行うスタートアップ企業である。

同社は 10kg から 200kg 程度までの様々な大きさの衛星に対応可能で、衛星運用の自動化機能を備えた Corvus という衛星モジュールを開発している。これにより衛星開発期間の短縮が可能となっている。また、2019 年には Palisade という衛星を打ち上げており、推進システムや制御ソフト等のモジュールのテストを行っている。

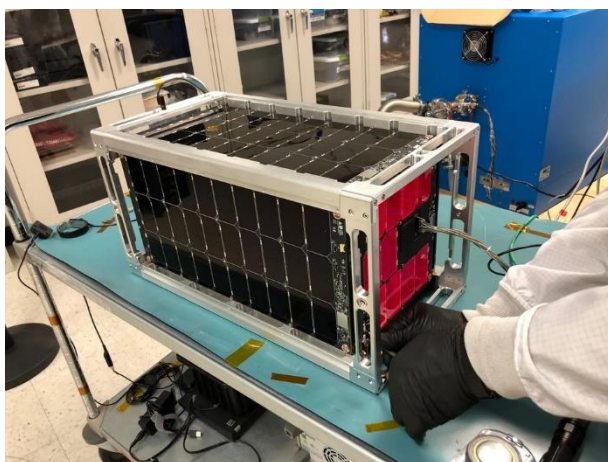


図 2-10 ASTRO DIGITAL 社の衛星 Palisade

出所) <https://www.nanosats.eu/sat/palisade> (2022年 2月17日閲覧)

創業当初は中・高分解能センサを組み合わせた自社衛星のコンステレーション構築を目指していたが、現在は衛星メーカーとなっている。前述のように、同社は Orbital Sidekick 社の HS センサを搭載した衛星 Aurora の開発にメーカーとして関わっている。

8) VTT Technical Research Centre of Finland

フィンランドの VTT Technical Research Centre of Finland 社は、フィンランド国営の非営利有限責任会社で、フィンランド最大の応用研究組織である。カーボンニュートラル、持続可能な製品・素材、デジタル技術を事業分野とし、多様な分野で技術開発を実施している。

ハイパースペクトル分野では、分光技術の一つである、ガラス板間で入力光を多重反射させることで特定の波長を取り出すファブリ・ペロー干渉計(FPI)の技術に強みがある。衛星用のハイパースペクトルセンサ開発としては、前述の Kuva Space 社の HelloWorld 衛星の HS センサを開発しているほか、ESA の衝突可能性のある小惑星の探知を行う Hera 衛星でもセンサ開発に協力している。なお、同社が開発したハイパースペクトルセンサは衛星だけでなく UAV や医療機器、モバイル端末に応用さ

れている。



図 2-11 VTT Technical Research Centre of Finland 社のハイパースペクトルセンサ活用イメージ

出所)https://www.vttresearch.com/sites/default/files/2020-05/Miniaturized%20hyper-spectral%20imaging_A5_2s_24052019_web.pdf(2022年 2 月17日閲覧)

9) 長春光学精密機械与物理研究所

中国の長春光学精密機械与物理研究所(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CIOMP)は、中国科学院(CAS)傘下の光学研究所であり、中国の宇宙開発にも深く関わりがある。宇宙分野以外でも光学分野の研究を行っており、光学分野の研究部門(宇宙光学研究部門、航空撮像・測量技術研究部門、画像処理技術研究部門ほか)を有し、図 2-12 に示すハイパースペクトルビデオカメラの開発等を行っている。さらに同研究所はベンチャー投資も行っており、スピンオフ企業として後述の長光衛星技術有限公司がある。

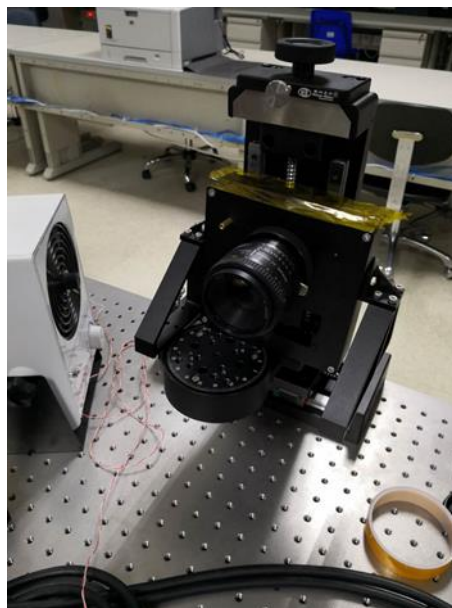


図 2-12 長春光学精密機械与物理研究所が開発したハイパースペクトルビデオカメラ

出所)http://english.ciomp.cas.cn/RD/ResearchProgress/201908/t20190812_214014.html(2022年 2 月18日閲覧)

同研究所は中国の動画共有サイト「ビリビリ動画」との協力によりビデオ撮影を行う Bilibili Video Satellite を開発している。2020 年 7 月の初回打上げでは打上げに失敗に終わったが、同年 9 月に打上げに成功している。

10) 長光衛星技術有限公司

中国の長光衛星技術有限公司(Chang Guang Satellite Technology Co.,LTD, CGSTL)は、中国初の商業リモートセンシング衛星企業であり、人工衛星や UAV(無人航空機)の開発や運用、そして取得したデータの販売などを事業としている。

同社は 2015 年には初の衛星の打上げに成功しているが、その後も継続して衛星を打上げ、現在では30 機の衛星を運用している。例えば図 2-13 および表 2-8、表 2-9 に示す 2019 年に打ち上げられた衛星である Jilin-1GP01/02 は、0.45~13.5 μ m に 26 バンド、空間分解能 5~150m のセンサを有している。

同社は将来的には 138 機の光学衛星からなるコンステレーション構築を目指しており、構築できれば同一地点を一日 5~7 回観測できるようになるとしている。

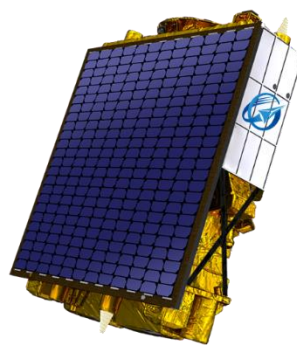


図 2-13 長光衛星技術有限公司の衛星 Jilin-1GP01/02

出所)http://www.charmingglobe.com/EWeb/product_view.aspx?id=676(2022年 2 月17日閲覧)

表 2-8 長光衛星技術有限公司の衛星 Jilin-1GP01/02 スペック

項目	スペック
空間分解能	5m(VNIR) 100m(SWIR,MWIR) 150m(LWIR)
観測幅	110km
バンド数	26
観測波長帯	403nm - 13500nm
分光方式	不明
衛星重量	16kg

出所)各種公開情報を基に三菱総合研究所作成

表 2-9 長光衛星技術有限公司の衛星 Jilin-1GP01/02 の各バンドにおける観測波長帯

バンド	観測波長帯
B0	450nm-800nm
B1	403nm-423nm
B2	433nm-453nm
B3	450nm-515nm
B4	525nm-600nm
B5	630nm-680nm
B6	784.5nm-899.5nm
B7	485nm-495nm
B8	615nm-625nm
B9	650nm-680nm
B10	698.75nm-718.75nm
B11	732.5nm-747.5nm
B12	773nm-793nm
B13	855nm-875nm
B14	660nm-670nm
B15	677.5nm-685nm
B16	750nm-757.5nm
B17	758.75nm-762.75nm
B18	935nm-955nm
B19	1000nm-1040nm
SW1	1195nm-1225nm
SW2	1360nm-1390nm
SW3	1550nm-1590nm
SW4	1610nm-1690nm
MW	3700nm-4950nm
LW	7500nm-13500nm

出所) http://www.charmingglobe.com/EWeb/product_view.aspx?id=676 (2022年 2 月17日閲覧)

11) 珠海欧比特宇航科技股份有限公司

中国の珠海欧比特宇航科技股份有限公司 (Zhuhai Orbita Aerospace Technology Co., Ltd) は、ハイパースペクトルセンサを搭載した衛星によるコンステレーションを構築し、衛星データ提供サービス構築を目指すスタートアップ企業である。

同社は集積回路の製造が主な事業であるが、衛星開発・運用も行っており、現在 12 機の衛星を運用中である。将来的には 34 機からなるコンステレーション珠海 1 号 (Zhuhai No.1) の構築を目指している。運用中の衛星には、図 2-14 と表 2-10 に示す OHS-2 シリーズ 4 機、OHS-3 シリーズ 4 機の計 8 機のハイパースペクトル衛星があり、今後さらに 2 機のハイパースペクトル衛星の打上げが計画さ

れている。

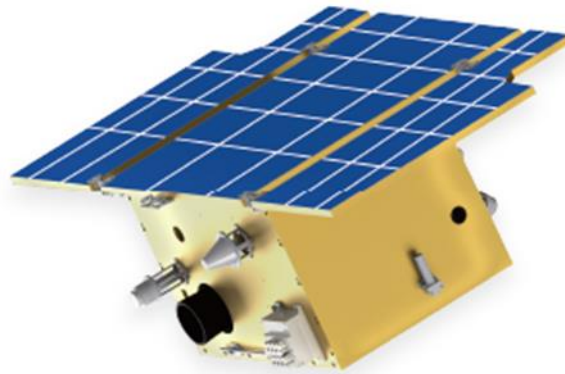


図 2-14 珠海欧比特宇航科技股份有限公司

出所)<https://www.obtdata.com/en/zhuhail.html>(2022年 2 月17日閲覧)

表 2-10 珠海欧比特宇航科技股份有限公司の衛星 OHS-2,3 スペック

項目	スペック
空間分解能	10m
観測幅	不明
バンド数	32
観測波長帯	400nm - 1000nm
波長分解能	2.5nm
分光方式	不明
衛星重量	67kg

出所)<https://www.obtdata.com/en/zhuhail.html>(2022年 2 月17日閲覧)

(2) ビジネスモデル分析

ここまで述べた調査結果を基にからビジネスモデルの類型化を行った。図 2-15 に示すように、衛星/センサの製造を上流、ソリューション提供を下流とし、上流から下流までを「衛星/センサ製造」「衛星運用」「データ配布」「ソリューション提供」の4つのカテゴリに大別した。

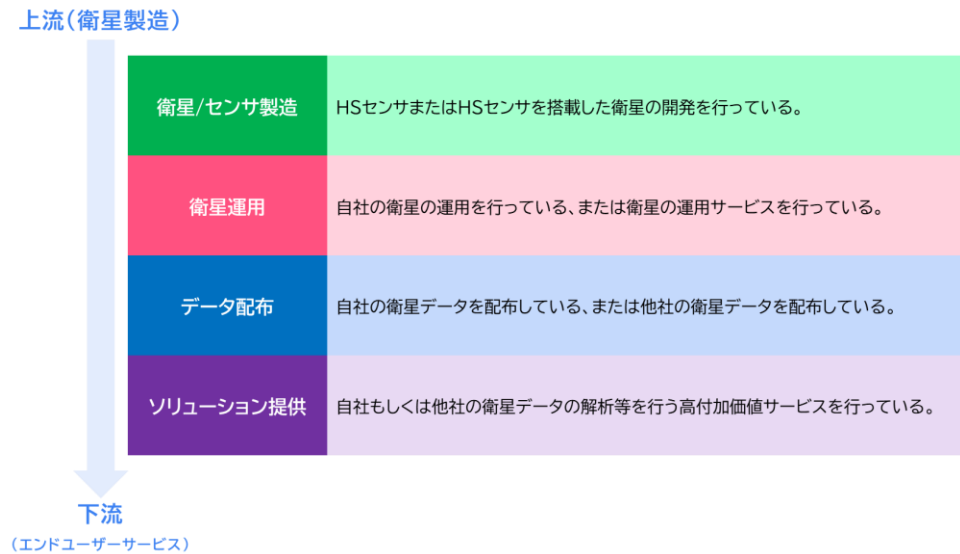


図 2-15 ハイパースペクトルビジネスモデルの類型

出所)三菱総合研究所作成

前述の調査対象企業について、どのカテゴリのビジネスを行っているかを表 2-11 に整理した。各社のビジネスにおいて当該カテゴリをビジネスの対象としている場合に○と表記している。

表 2-11 調査対象毎のビジネスモデル類型

調査対象	衛星/センサ製造	衛星運用	データ配布	ソリューション提供
Orbital Sidekick			○	○
Pixxel	○	○	○	○
HySpecIQ	○	○	○	○
Kuva Space	○	○	○	○
Satellogic	○	○	○	○
NorthStar Earth and Space Inc.	○	○	○	○
ASTRO DIGITAL	○	○		
VTT Technical Research Centre of Finland Ltd	○			
長春光学精密機械与物理研究所	○			
長光衛星技術有限公司	○	○	○	○
珠海欧比特宇航科技	○	○	○	○

出所)各種公開情報を基に三菱総合研究所作成

表 2-11 の整理結果からは、現在のハイパースペクトル関連ビジネスにおいては、これらの4つのカテゴリのどれかに焦点をあてたビジネス形態だけでなく垂直統合的なビジネスを展開している場合も多い

ことがわかる。また、これら4つのカテゴリ全てをビジネスモデルとしている企業も多く、ハイパースペクトル衛星ビジネスにおいては衛星/センサ製造からソリューション提供までを一気通貫に行う、垂直統合型のビジネスを展開することがトレンドとなっていることが分かる。

この垂直統合型のビジネスですでに衛星を打ち上げている Satellogic 社と珠海欧比特宇航科技股份有限公司では、可視から近赤外領域を対象としたハイパースペクトルセンサのバンド数が29バンドと32バンドの構成となっており、一般的なハイパースペクトルセンサのバンド数に対して少ないバンド数となっている。これは小型衛星に搭載するためにセンサの小型化を図った結果バンド数が削減されたためと推察される。一方、同じく垂直統合型ビジネスを目指している Kuva Space 社は50バンド、HySpecIQ 社は220バンド以上を有するハイパースペクトルセンサの打ち上げを計画しており、今後のハイパースペクトル衛星コンステレーションではバンド数を多く持つ衛星が多く打ち上げられていくと思われる。

2.1.3 航空機ハイパースペクトルセンサ事例調査

ハイパースペクトルセンサを実現するために必要となる分光方式はいくつか存在する。主な分光方式を表 2-12 に示す。本調査では、既に航空機や UAV で搭載実績のある LCTF 方式以外で、小型化に成功し航空機や UAV に搭載した事例がないかを調査した。

表 2-12 ハイパースペクトルセンサの分光方式

分光方式	説明
バンドパスフィルタ (フィルタホイール)	波長の光のみを透過させる特殊なフィルタを使用する方式で、多波長計測には複数のフィルタが必要である。
グレーティング (回折格子)	スリットにより分光する方式で、2 次元の空間情報を取得するには機械的に走査する必要がある。
LCTF (液晶チューナブルフィルタ)	バンドパスフィルタのフィルタを電圧変化によって生成する方式である。
AOTF (音響光学チューナブルフィルタ)	音響光学素子に照射した超音波がグレーティングと同様に働くことを利用した方式である。
FPI (ファブリ・ペロー干渉計)	高い反射率をもつ光学素子の多重反射によって特定の波長を観測する方式である。

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

(1) AOTF を搭載した事例

中国科学院が実施した研究では UAV に AOTF 方式のハイパースペクトルセンサが搭載されている(図 2-16 参照)。この AOTF センサは水域のモニタリングに用いられており、クロロフィル濃度の観測を行っている。AOTF センサにより、より高精度の水質モニタリングが可能になるとしている。



図 2-16 UAV への AOTF センサの搭載概観

出所)<https://www.mdpi.com/2072-4292/13/20/4069>(2022年 2 月18日閲覧)

(2) FPI を搭載した事例

図 2-17 に示す NASA の観測用航空機として知られている DC-8-AFRC には、FPI 方式のハイパースペクトルセンサが搭載されている。このセンサの詳細スペックは公開情報では得られなかったが、O₂ や CO₂ を観測する目的のために使用されているとされている。



図 2-17 DC-8-AFRC 概観

出所) <https://airbornescience.nasa.gov/aircraft/DC-8-AFRC>(2022年2月17日閲覧)

2.1.4 ポスト ASTER・HISUI 検討

ポスト ASTER および HISUI の検討にあたり、まず SWIR 帯および TIR 帯を有する宇宙用センサについて調査を行った。次に、調査した結果を基に、各センサについて観測幅と空間分解能等の軸でプロットを行った。最後にプロットした結果基にした傾向分析と近年の地球観測衛星全体の動向を踏まえ、ポスト ASTER・HISUI の方向性の検討を行った。

(1) 調査対象

観測波長帯として SWIR 帯および TIR 帯を有する宇宙用センサは様々に存在する。各衛星は軌道や観測目的が異なるため、本調査では「静止軌道」「グローバル観測」「ハイパースペクトル」「その他」の4つのカテゴリに分けて調査結果を整理した。調査対象としたセンサは2022年現在で稼働が確認できているセンサおよび将来計画があるセンサを基本とし、一部のセンサが不稼働である等の場合も参照すべきセンサについては調査対象とした。

なお、各センサ調査にあたっては、開発機関や打上年のほか、SWIR 帯および TIR 帯における波長帯、バンド数、空間分解能、観測幅、用途例等を基本的な調査項目として整理している。

(2) 各センサのスペック調査

各センサのスペックの調査結果を表 2-13～表 2-16 に示す。「ハイパースペクトルセンサ」に関しては、正しく傾向を把握するために、上述の基本的な調査項目に加えて VNIR 帯に関する波長帯等を追加の情報として調査している。

表 2-13 SWIR 帯および TIR 帯を有する静止衛星センサ

衛星/センサ名	国	正式名称	開発機関	打上 (予定)年	観測 頻度	SWIR (約0.9～2.5μm)				用途例	TIR (約6～13μm)				用途例
						波長帯 [μm]	SWIR バンド数	空間分解能 [m]	観測幅 [km]		波長帯 [μm]	TIR バンド数	空間分解能 [m]	観測幅 [km]	
VHRR/2 /INSAT-3	インド	Very High Resolution Radiometer	ISRO	2003, 2013, 2016	静止軌道	1.55 - 1.69	1	1000	静止軌道	気象観測	10.5 - 12.5	2	8000	静止軌道	気象観測
AHI /Himawari8,9	日本	Advanced Himawari Imager	JMA	2005	静止軌道	1.6 - 2.3	2	2000	静止軌道	気象観測	6.2 - 13.3	9	2000	静止軌道	気象観測

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

表 2-14 SWIR 帯および TIR 帯を有するグローバル観測用センサ

衛星/センサ名	国	正式名称	開発機関	打上 (予定)年	観測 頻度 (回帰 日数)	SWIR (約0.9~2.5 μ m)					TIR (約6~13 μ m)				
						波長帯 [μ m]	SWIR バンド数	空間分解能 [m]	観測幅 [km]	用途例	波長帯 [μ m]	TIR バンド数	空間分解能 [m]	観測幅 [km]	用途例
ASTER /Terra	日本	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	METI	1999 (2001-12-14)	16日	1.6 - 2.43	6	30	60	鉱物資源探査	8.125 - 11.65	5	90	60	地表面温度観測 鉱物資源探査
ETM+ /Landsat-7	米国	Enhanced Thematic Mapper Plus	NASA,USGS	1999*	16日	1.55 - 2.35	2	30	185	鉱物資源探査	10.4 - 12.5	1	60	185	地表面温度観測
OLI/TIRS /Landsat-8	米国	Operational Land Imager Thermal Infrared Sensor	NASA,USGS	2013	16日	1.56 - 2.3	2	30	185	植生 鉱物資源探査	10.6 - 12.51	2	100	185	地表面温度観測
OLI-2/TIRS-2 /Landsat-9	米国	Operational Land Imager 2 Thermal Infrared Sensor 2	NASA,USGS	2021	16日	1.56 - 2.29	2	30	185	自然火災観測 森林破壊 水資源	10.6 - 12.5	2	100	185	地表面温度観測
MSI /Sentinel-2	欧州	Multispectral Imager	ESA	2015	10日	1.375 - 2.19	3	20, 60	290	土地被覆分類	-	-	-	-	-
CHIME	欧州	Cooperative Hyper-spectral Imaging Mission for the Environment	ESA	不明	不明	0.4 - 2.5	不明	20 - 30	128	土地被覆分類	-	-	-	-	-

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

表 2-15 SWIR 帯および TIR 帯を有するハイパースペクトルセンサ

衛星/センサ名	国	正式名称	開発機関	打上 (予定)年	観測 頻度 (回帰 日数)	VNIR(約0.4～0.9μm)				SWIR (約0.9～2.5μm)				TIR (約6～13μm)					
						波長帯 [μm]	VNIR バンド数	空間分解 能 [m]	観測幅 [km]	波長帯 [μm]	SWIR バンド数	空間分解 能 [m]	観測幅 [km]	用途例	波長帯 [μm]	TIR バンド数	空間分解 能 [m]	観測幅 [km]	用途例
HISUI /ISS	日本	Hyperspectral Imager Suite	METI	2019	約90日	0.4-0.97	58	30	20	0.9-2.5	127	30	20	鉱物資源探査	-	-	-	-	-
PRISMA	欧州 (イタリア)	Precursore Operativo della Missione iperspettrale Precoeur and Application Mission	ASI	2019	29日	0.4-1.01	66	30	30	0.9-2.505	171	30	30	鉱物資源探査	-	-	-	-	-
HSI /EnMAP	欧州 (ドイツ)	Hyperspectral Imager	DLR	2021 (予定)	21日	0.42-1.0	96	30	30	0.9 - 2.45	136	30	30	土地被覆分類 森林減少	-	-	-	-	-
HyspIRI	米国	Hyperspectral Imager	NASA	不明	不明	不明	不明	60	145	不明	不明	60	145	災害観測	不明	8	60	596	-
HYPXIM /ESA Earth Explorer 8	欧州	-	ESA	2024	90日	0.4-1.1	不明	10～30	15	1.1～2.5	不明	10～30	15	-	8.0～12.0	不明	10～30	15	-

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

表 2-16 その他の SWIR 帯、TIR 帯を有するセンサ

衛星/センサ名	国	正式名称	開発機関	打上 (予定)年	観測 頻度	SWIR (約0.9~2.5 μ m)					TIR (約6~13 μ m)				
						波長帯 [μ m]	SWIR バンド数	空間分解能 [m]	観測幅 [km]	用途例	波長帯 [μ m]	TIR バンド数	空間分解能 [m]	観測幅 [km]	用途例
WorldView-3	民間 (米国)	-	Maxar	2014	1日以下 ~4日	1.195-2.364	8	3.7 - 4.1	13.1	鉱物資源探査	-	-	-	-	-
EMIT /ISS	米国	Earth Surface Mineral Dust Source Investigation	NASA	2022	不明	不明	不明	不明	不明	不明	-	-	-	-	-
HRMX-TIR /GISAT	インド	High resolution Me TIR	ISRO	2021 (予定)	不明	-	-	-	-	-	不明	-	1500	静止軌道	-

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

(3) スペック分析結果

(2)で示した調査結果を用いて、観測幅と空間分解能を2軸に設定し、分析を行った。

1) 観測幅×空間分解能(SWIR 帯センサ)

SWIR 帯に観測波長帯を有するセンサについて観測幅と空間分解能を軸にとった場合の分析結果を図 2-18 に示す。図 2-18 から、ASTER と他の「グローバル観測」センサを比較すると、Landsat 等と比較して空間分解能は同等レベルだが、観測幅が近年のグローバル観測衛星に対して狭いことがわかる。また HISUI と他の「ハイパースペクトル」センサを比較すると、空間分解能は同等レベルで、観測幅にも大きな差はないことがわかる。

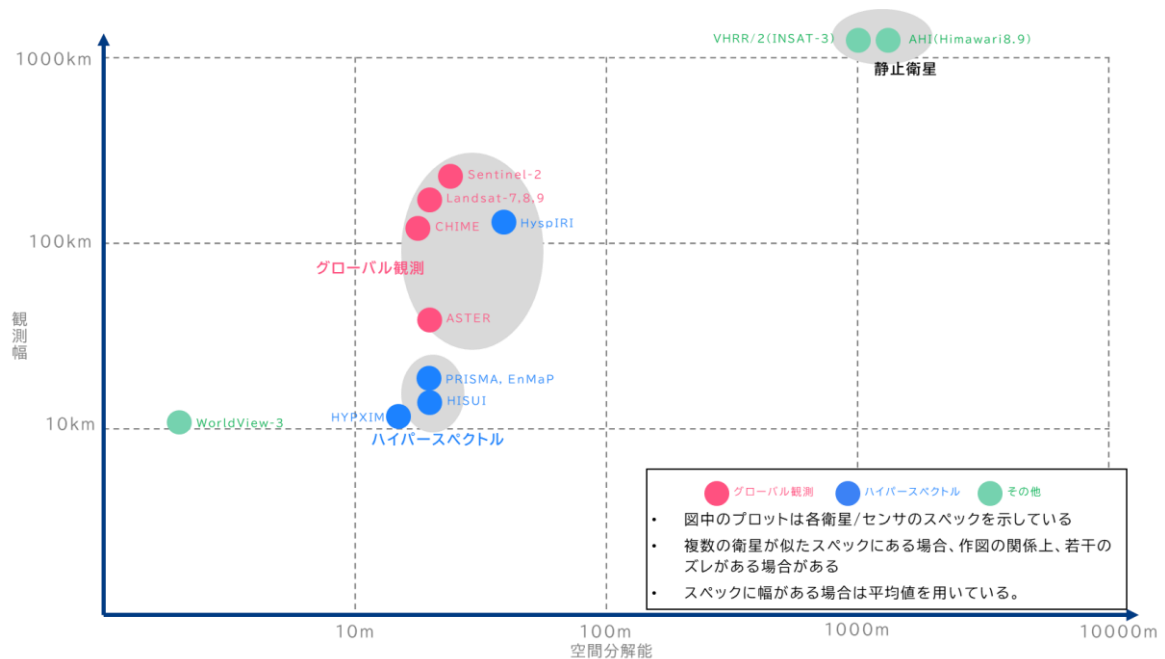


図 2-18 SWIR 帯における観測幅と空間分解能のスペックのプロット結果

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

2) 観測頻度×空間分解能(SWIR 帯センサ)

SWIR 帯に観測波長帯を有するセンサについて観測幅と空間分解能を軸にとった場合の分析結果を図 2-19 に示す。図 2-19 から ASTER と他の「グローバル観測」センサを比較すると、空間分解能・回帰日数は Landsat 等と同等レベルであることがわかる。ただし、ASTER はポインティング観測を行っており16日に一度必ず観測されるわけではないことに留意が必要である。また HISUI と他の「ハイパースペクトル」センサを比較すると、空間分解能は同等レベルだが、観測頻度が他に比べて低いことがわかる。これは HISUI が ISS に搭載されているセンサであることが大きい。

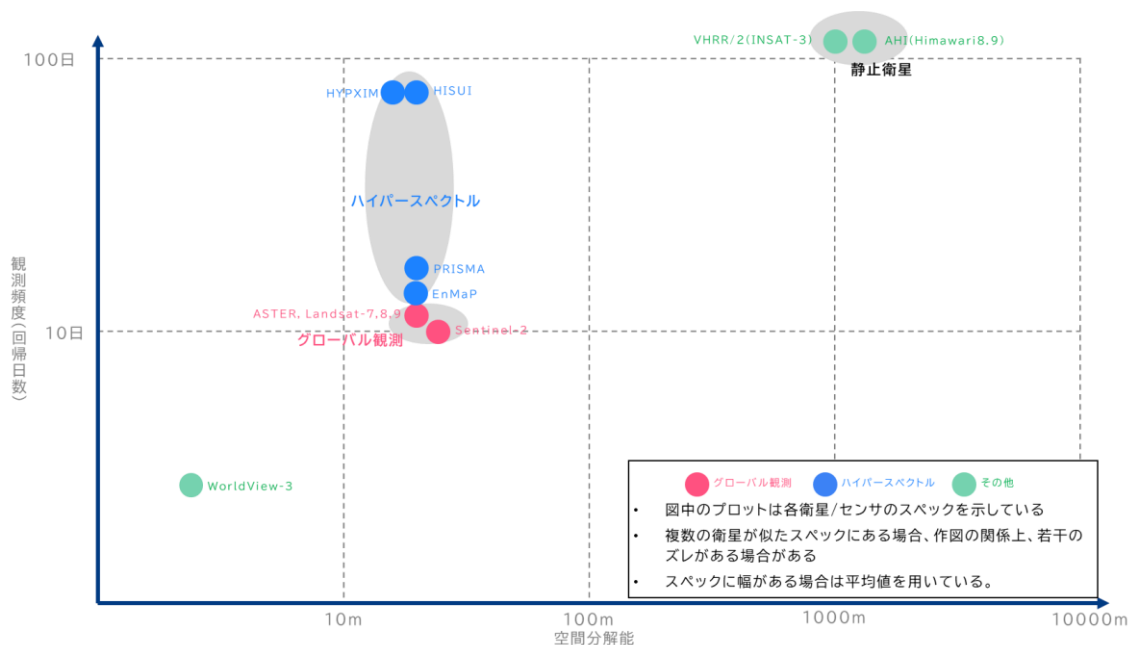


図 2-19 SWIR 帯における空間分解能と観測頻度のスペックのプロット結果

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

3) 観測幅×空間分解能(TIR 帯センサ)

TIR 帯に観測波長帯を有するセンサについて観測幅と空間分解能を軸にとった場合の分析結果を図 2-20 に示す。図 2-20 から、ASTER と「グローバル観測」センサである Landsat シリーズのスペックを比較すると、空間分解能は Landsat-7 と Landsat-8,9 の中間的なスペックであるものの、観測幅が狭いことがわかる。また TIR 帯にも観測波長帯を有する HYPXIM と HypsIRI の位置関係からは共通的な傾向はみられない。

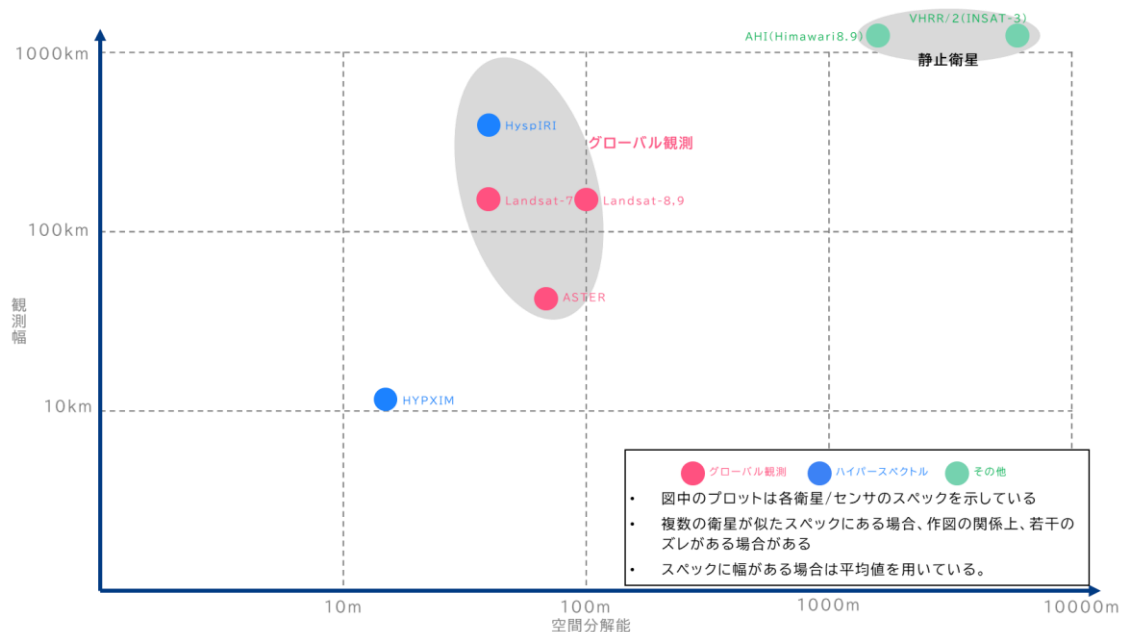


図 2-20 TIR 帯における観測幅と空間分解能のスペックのプロット結果

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

4) 観測頻度×空間分解能(TIR 帯センサ)

TIR 帯に観測波長帯を有するセンサについて観測幅と空間分解能を軸にとった場合の分析結果を図 2-21 に示す。図 2-21 から、ASTER と「グローバル観測」センサである Landsat シリーズのスペックを比較すると、3) で述べた通り空間分解能は Landsat シリーズの中間的なスペックで、観測頻度も同程度である。しかし、観測頻度については 3) で既に述べた通り、回帰日数としては 16 日と同じであるが、ASTER はポインティング観測を行っており 16 日に一度必ず観測されるわけではない。また、HISUI については TIR 帯を有していないため 3) 同様にプロットされておらず、プロットされている HYPXIM のみであるため傾向を分析することは難しい。

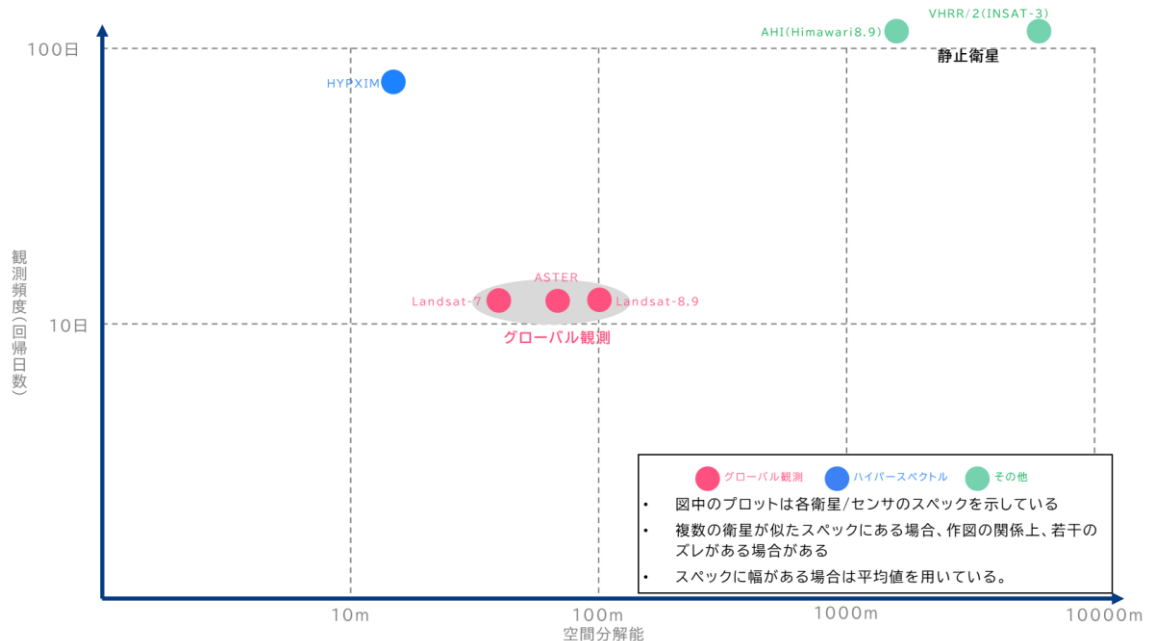


図 2-21 TIR 帯における空間分解能と観測頻度のスペックのプロット結果

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

(4) ポスト ASTER・HISUI 検討結果

前述の分析結果を踏まえ、ASTER および HISUI の今後の方向性について検討を行った。

ASTER および HISUI の現状認識は以下の通りである。

- ASTER は当時としては極めてユニークなセンサであり、今でもバンド数の多さなどユニークさが失われていない部分もある。一方で、空間分解能や観測幅などで ASTER を超えたセンサも出現してきている。
- ASTER の後継として開発された HISUI は、世界的に希少であったハイパースペクトルセンサとして価値を発揮し、新たな利用用途の開拓が進められている。一方で、ISS 搭載となったことにより、観測頻度およびタイムリーなデータ配布の点でユーザに制約を与えてしまっている。

この現状認識と分析結果を基に、「波長帯(VNIR 帯, SWIR 帯, TIR 帯)」「空間分解能」「観測頻度」「継続観測」の観点でポスト ASTER・HISUI の方向性の検討を行った。方向性検討結果を以下に示す。

- VNIR 帯において、有用なバンドに絞り込む、あるいはバンド選択とする多バンドマルチ(あるいはバンド選択型ハイパー)とする。
- SWIR 帯において、ASTER の発展型として資源探査に有効なバンドを拡充する。
- TIR 帯においては、ASTER の TIR を継続し 5 バンドとすること、もしくはバンド数を減らす代わりに高分解能化を図る。
- 世界的なトレンドを踏まえ高分解能化を図る。
- 複数の衛星によるコンステ化により観測頻度向上を図る。
- Sentinel や Landsatのように衛星計画の継続を図る。

これら方向性検討結果の詳細を表 2-17 に示す。

表 2-17 ポスト ASTER・HISUI の方向性

項目		方向性
波長帯	VNIR	Sentinel-2やWV-3等、一定レベル以上の衛星／センサにおいては、RGBNIRの4バンドにとどまらない波長帯の観測が一般化しつつある。一方で、Doveのようなコンステを目的とした小型衛星では4バンドが維持されている。このことから、HISUIの知見を活用した有用なバンドに絞り込むあるいはバンド選択とする多バンドマルチ(あるいはバンド選択型ハイパー)とすることが考えられる。なお、バンド数を絞り込むことにより小型化を実現しコンステ化の実現も視野に入れることが考えられる。
	SWIR	メインユーザである資源ユーザの利用を想定し、ASTERのバンド構成を基本としつつ、HISUIの成果を踏まえて資源探査に有効なバンドを拡充したASTERの発展型とすることが考えられる。
	TIR	世界的にも未だセンサが限定的な帯域であるため、TIRセンサの継続が考えられる。方向性としては、ASTERのTIRを継続し5バンドとすることとバンド数を減らす代わりに高分解能化を図ることの2つが想定される。
空間分解能		世界的なトレンドを踏まえると高分解能化は必須である。 一方で、我が国でも民間事業者が出現しつつある状況を踏まえると、Sentinel-2のスペックが一つのベンチマークと考えられる。
観測頻度		特にHISUIの観測頻度が低く、資源ユーザ以外のユーザを拡大することを考えると観測頻度の向上は重要である。一方で、多バンドマルチであれば観測幅の拡大は可能であるが、ハイパーの場合は空間分解能とのトレードオフとなり、HISUI以上を目指すことは難しい。一つの方向性としては、複数の衛星によるコンステ化により観測頻度向上を図ることが考えられる。
継続観測		SentinelやLandsatは継続して観測されデータが日々蓄積されていることから、ユーザがデータを安心して利用することができる。実用的な利用を考えると衛星計画の継続は重要である。

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

2.2 GHG 観測技術調査

GHG 観測技術の調査では、GHG 観測を目的とした衛星搭載センサのスペックを調査した。さらにスペック調査結果を用いて、観測幅と空間分解能を2軸として分析し、GHG 観測技術についての現状分析を行った。

(1) 調査対象

GHG 観測を目的としたセンサの観測方式としては、「回折格子」「フーリエ変換分光計(FTS)」「新方式」がある。本調査では、各観測方式を区別してスペックの整理を行った。なお、調査対象とした衛星センサは2022年現在で稼働が確認できているセンサおよび将来計画があるセンサを対象としている。

個別の調査項目としては、国、開発機関、観測波長範囲、観測幅、地表分解能、機数(コンステレーションの場合)、回帰周期、打上(予定)年とした。

(2) スペック調査

1) 回折格子

回折格子はスリットによって分光する方式である。衛星観測のような2次元の空間情報を取得する際には機械的に走査する必要がある分光方式である。GHG 観測衛星にも回折格子が用いられており、同方式を用いた衛星としては、欧州の ENVISAT や米国の OCO-2 等が知られている。回折格子を用いた GHG 観測衛星/センサの調査結果を表 2-18 に示す。

表 2-18 回折格子を用いた GHG 観測衛星/センサの調査結果

衛星/センサ名	国	正式名称	開発機関	観測波長範囲	観測幅	地表分解能	機数	回帰日数	打上(予定)年
ENVISAT /SCIAMACHY	欧州	SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY	ESA	0.240-2.238 μ m	1000km	16km $\times$ 32km	1	35日	2002年3月
OCO-2	米国	Orbiting Carbon Observatory-2	NASA	0.765-2.06 μ m	10km	1.3 $\times$ 2.25km	1	16日	2014年7月
TANSAT	中国	Chinese Carbon Dioxide Observation Satellite Mission	CMA/SIMIT	0.760-2.06 μ m	20km	2 $\times$ 1km	1	ISS搭載	2016年12月
Sentinel-5P /TROPOMI	欧州	TROPOspheric Monitoring Instrument	ESA	0.27-2.385 μ m	2600km	7 $\times$ 7km	1	17日	2017年10月
OCO-3	米国	Orbiting Carbon Observatory-3	NASA	1.61-2.06 μ m	13km	2.25 $\times$ 1.29 km	1	16日	2019年5月
Sentinel-5 (MetOp-SG A) /UVNS	欧州	Ultra-Violet /Visible/Near Infrared/SWIR Spectrometer	ESA	0.27-2.385 μ m	2670km	8 $\times$ 8km	3	29日	計画中 (2021年以降順次 打ち上げ)
MicroCarb	フランス	Carbon Dioxide Monitoring Mission	CNES	0.764-1.273 μ m	9km	3 $\times$ 3 km	1	25日	2022年12月
GEOCARB	米国	Geostationary Carbon Observatory	NASA	0.76-2.34 μ m	2,800km	5-10km	1	静止軌道	計画中 (2023年)
Sentinel-7(CO2)	欧州	Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring	ESA	不明 (観測対象CO2)	250km	2km	2 or 3	不明	計画中 (2025年)

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

2) フーリエ変換分光計(FTS)

フーリエ変換分光計(FTS)は観測された電磁波の干渉波形を測定し、測定結果に対してフーリエ変換処理を行うことで、電磁波のスペクトルを測定する方式である。GHG 観測衛星においても FTS 方式を採用しているセンサがあり、日本の GOSAT シリーズ等が知られている。FTS を用いた GHG 観測

衛星/センサの調査結果を表 2-19 に示す。

表 2-19 FTS を用いた GHG 観測衛星/センサの調査結果

衛星/センサ名	国	正式名称	開発機関	観測波長範囲	観測幅	地表分解能	機数	回帰日数	打上(予定)年
GOSAT /TANSO-FTS	日本	Greenhouse gases Observing SATellite	MOE, JAXA, NIES	0.785-14.3 μ m	160km	10.5 km	1	3日	2009年1月
GOSAT-2 /TANSO-FTS-2	日本	Greenhouse gases Observing SATellite-2	MOE, JAXA, NIES	0.760-14.3 μ m	160km	9.7km	1	6日	2018年10月
GOSAT-GW /TANSO-3	日本	Greenhouse gases Observing SATellite-GW	MOE, JAXA, NIES	不明 (観測対象CO ₂ , CH ₄ , NO ₂)	90~911km	3~10km	1	3日	2023年
Aura /TES	米国	Tropospheric Emission Spectrometer	NASA	3.2-15.4 μ m (元々はCO ₂ 観測センサでは なかったが、アルゴリズムを 開発)	5.3-37km	0.5-2.3km	1	16日	2004年7月
FY-3D /GAS	中国	Feng Yun 3D Greenhouse- gases Absorption Spectrometer	CMA*	0.75-2.35 μ m	100 km	10km	1	6日	2007年11月

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

3) 新方式

前述の回折格子や FTS 以外に、近年では新たな観測方式を採用したセンサが登場している。例えば GHGSat 社の衛星 GHGSat はハイパースペクトルセンサに用いられるファブリ・ペロー干渉方式を採用して、メタンガスの観測を行っている。また CNES と DLR が開発を進めている MERLIN は、GHGSat 社と同じくメタンガスの観測を目的としているが、衛星からレーザーパルス照射してその反射波を観測するレーザーパルス方式を採用している。レーザーパルス方式により、夜間の観測が可能になることや、大気の影響を低減した観測が行えるとしている。

新方式を用いた GHG 観測衛星/センサの調査結果を表 2-20 に示す。

表 2-20 新方式を用いた GHG 観測衛星/センサの調査結果

衛星/センサ名	国	正式名称	開発機関	方式	観測波長範囲	観測幅	地表分解能	機数	回帰日数	打上(予定)年
GHGSAT-D (CLAIRE)	カナダ	Greenhouse Gas Satellite - Demonstrator	GHGSat社	ファブリペロー干渉計	1.635-1.670 μ m	15km	0.05km	1	14日	2016年6月
GHGSat-C1 (Iris)	カナダ	Greenhouse Gas Satellite - Demonstrator-C1	GHGSat社	ファブリペロー干渉計	1.635-1.670 μ m	20km	0.025km	1	14日	2020年9月
GHGSat-C2 (Hugo)	カナダ	Greenhouse Gas Satellite - Demonstrator-C2	GHGSat社	ファブリペロー干渉計	1.635-1.670 μ m	20km	0.025km	1	14日	2021年1月
GHGSat-CX	カナダ	Greenhouse Gas Satellite - Demonstrator- C3,4,5	GHGSat社	ファブリペロー干渉計	1.635-1.670 μ m	20km	0.025km	8	14日	計画中 (2022年予 定)
MERLIN /IPDA LIDAR	フランス ドイツ	Methane Remote Sensing Lidar Mission	DLR, CNES	レーザーパルス	1.64555 μ m 1.64585 μ m	50km	0.15km	1	28日	計画中 (2025年予 定)

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

(3) GHG 観測衛星/センサの傾向分析

各衛星/センサスペック調査結果を用いて、GHG 観測技術の動向を分析するため、観測幅と空間分解能を2軸に分析を実施した。

分析結果を図 2-22 に示す。図 2-22 から、欧州全体としては幅広い空間分解能・観測幅の衛星アセットがあることがわかる。また欧州・米国・中国の GHG 観測衛星のスペックは空間分解能 1~5km かつ観測幅 10km~数十 km のスペックに衛星が比較的集中しているが GHGSat 等の新方式の登場により、近年では高分解能化が進みつつある傾向が分かる。

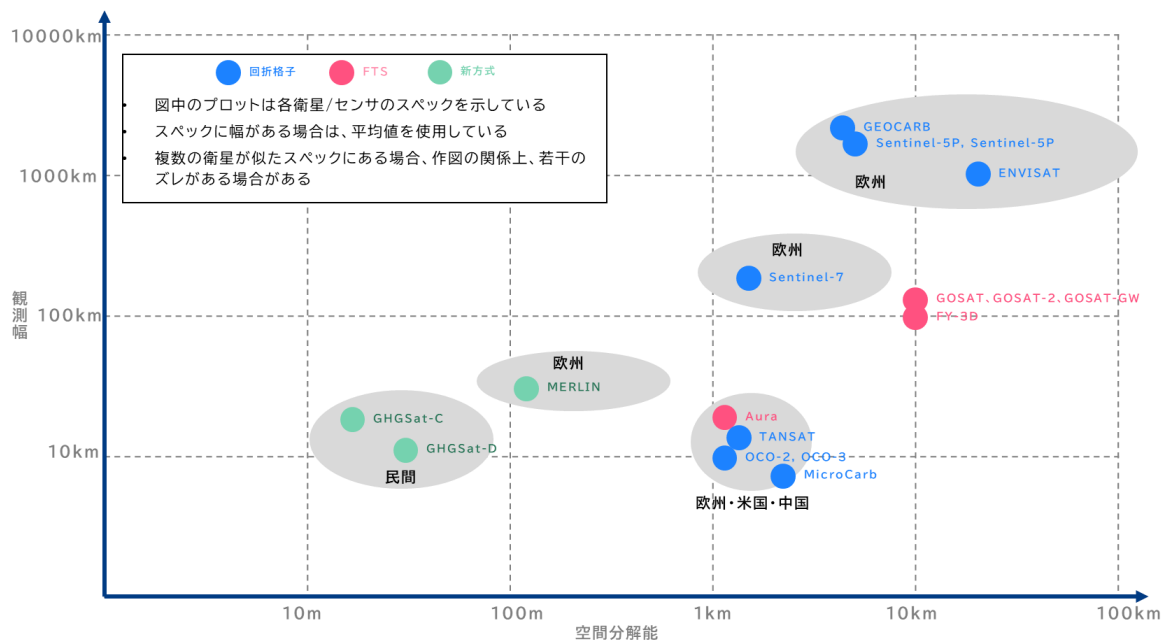


図 2-22 GHG 観測衛星の観測幅と空間分解能のスペックの分析結果

出所)各種情報より三菱総合研究所作成

以上の分析結果を基に GHG 観測技術の傾向についてまとめる。

- 空間分解能 1～5km かつ観測幅 10km～数十 km のスペックに欧州・米国・中国の衛星が比較的集中している。
- GOSAT シリーズの分解能・観測幅は欧州・米国等のアセットと比較して独自性がある。また日本だけで計画中合わせて 3 機のアセットがあることは世界的にも独自性がある。
- HS センサに用いられるファブリ・ペロー干渉計が GHG 観測に用いられ、高分解能化が進んでいる。

2.3 通信技術調査

2.3.1 調査概要

通信技術調査では、通信衛星のうち、地球低軌道上で運用される IoT 衛星(低消費電力で長距離通信が可能な LoRA や LPWA に対応するものを含む)と、次期 AIS とも呼ばれる VDES(VHF データ交換システム)衛星に着目し、各事業者がどのようなサービスを提供しているのか、または今後提供予定であるのかを調査した。

次に、IoT 衛星事業者として取り上げた企業の一部を対象とし、ITU におけるファイリング状況(申請されている国籍、ITU における申請の受領日等)を調査した。

また、本調査で取り上げた IoT 衛星事業者及び VDES 衛星事業者がこれまでに打ち上げた衛星を対象とし、その軌道傾斜角と高度についても調査した。

2.3.2 通信技術調査

(1) 調査対象一覧

本通信技術調査では、地球低軌道衛星による IoT サービスを既に提供している、または今後提供を予定している主な IoT 衛星事業者 14 社を調査対象とした。事業者名、国名、コンステレーション名、衛星機数、現在の打上げ状況を表 2-21 に示す。

表 2-21 通信技術調査で対象とした IoT 衛星事業者

事業者名	国	コンステレーション名	衛星機数	打上げ状況
Swarm Technologies社	米国	SpaceBee	150機	121機打上げ済み(2018年1月12日～)
Orbcomm社	米国	OG2	17機	17機打上げ済み
Iridium社	米国	Iridium NEXT	66機	66機打上げ済み
Spire Global社	米国	Lemur	150機	110機超打上げ済み
Omnispace社	米国	Omnispace	最大215機	未打上げ
Lynk Global社	米国	Lynk	5,000機	5機打上げ済み(2018年12月5日～)
Kepler Communications社	カナダ	Kepler	140機	15機打上げ済み(2018年1月19日～)
Kineis社	フランス	Kineis	25機	未打上げ。2023年から打上げ予定
Astrocast社	スイス	Astrocast	100機	10機打上げ済み(2018年12月3日～)
Myriota社	オーストラリア	Myriota	50機	1機打上げ済み(2021年3月22日)
Fleet Space Technologies社	オーストラリア	Fleet Space	140機	6機打上げ済み(2018年11月11日～)
Lacuna Space社	英国	Lacuna	36機	4機打上げ済み(2019年4月1日～)
北京国電高科技有限公司	中国	天啓(Apocalypse)	38機	14機打上げ済み(2018年10月29日～)
浙江吉利控股集团(Geely)	中国	吉利(Geely)	不明	未打上げ

出所)各種資料を基に三菱総合研究所作成

なお、従前より IoT 衛星コンステレーションの構築を計画していたオランダの Hiber 社は、2021 年 9 月に同計画を断念していることから、本調査の対象外とした。

同様に、VDES 衛星を既に打上げ済み、または打上げ計画を有する主な VDES 衛星事業者 4 社を調査対象とした。事業者名、国名、衛星名、衛星機数、現在の打上げ状況を表 2-22 に示す。

表 2-22 通信技術調査で対象とした VDES 衛星事業者

事業者名	国	衛星名	衛星機数	打上げ状況
ノルウェー宇宙機関(NOSA)	ノルウェー	NorSat-2	1機	打上げ済み(2017年7月14日)
		NorSat-TD	1機	未打上げ。2022年に打上げ予定
SSTL	英国	VESTA	1機	打上げ済み(2018年12月3日)
AAC Clyde Space社	英国	NJORD-1	不明	未打上げ。2022年に実証機を打上げ予定
Sternula	デンマーク	不明	50機	未打上げ。2022年に1機目MARIOT-1を打上げ予定

出所)各種資料を基に三菱総合研究所作成

上記の事業者について、以下、順次詳述する。

1) Swarm Technologies 社

Swarm Technologies 社は、2017 年に創業した米国を本拠地とする衛星事業者である。同社は小型衛星 150 機から構成される IoT 衛星コンステレーションの構築を目指している。同社は2018年以降、小型 IoT 衛星 SpaceBee を 121 機打ち上げている。なお、SpaceBee は大きさは 11 × 11 × 2.8cm で重さは 400g とかなり小型の衛星である。

SpaceBee 衛星の周波数帯は、ダウンリンク 137-138 MHz、アップリンク 148-149.95 MHz の VHF バンドであり、通信速度は 1 kbps である。

同社は、2021 年 2 月に商業サービスを開始している。現在販売されている、Swarm Tile と Swarm Eval Kit の 2 種類のデバイス(図 2-24、図 2-25 参照)のいずれかを購入し、月額 5 ドルを支払うことにより、IoT 通信サービスが利用できる。Swarm Tile は、大きさが 58.7 x 27.4 x 6.0 mm、重さ 14g、値段は119ドルであり、Swarm Eval Kit は大きさがトライポッド／アンテナを除き 32 x 26 x 8 cm、重さ 2.6kg、価格は 499 ドルである。同社のサービスは、農業、海洋、エネルギー、環境、地上輸送における利用が想定されている。特に地上輸送のユースケースとして、車両追跡、機器使用量モニタリング、車隊管理システム、コールドチェーンロジスティクス、貨物追跡、緊急支援が想定されている。

2021 年 7 月、Swarm Technologies 社が SpaceX 社の完全子会社となることが発表された。

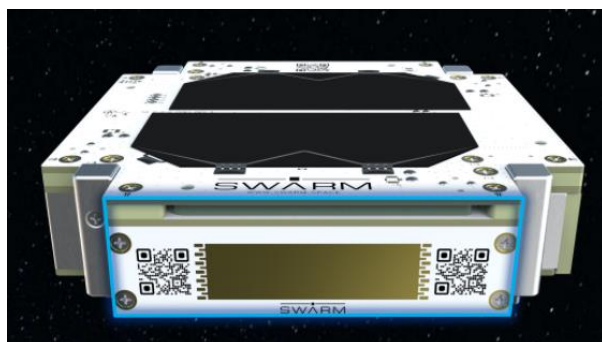


図 2-23 小型 IoT 衛星 SpaceBee の外観

出所)Swarm Technologies Our Technology <https://swarm.space/our-technology/> (2022年 2 月 9 日閲覧)

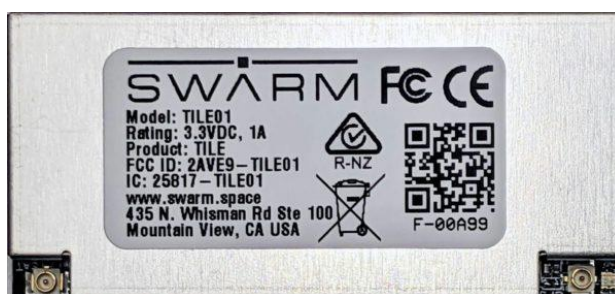


図 2-24 通信端末 Swarm Tile

出所)Swarm Technologies Swarm M138 Modem <https://swarm.space/swarm-m138-modem/> (2022年 2 月 9 日閲覧)



図 2-25 通信端末 Swarm Eval Kit

出所)Swarm Technologies Swarm Eval Kit <https://swarm.space/swarm-eval-kit/> (2022年 2 月 9 日閲覧)

2) Orbcomm 社

Orbcomm 社は、1993年に創業した米国を本拠地とする衛星事業者である。同社は、衛星ネットワークとセルラーネットワークから構成される IoT ネットワーク、IoT 通信用ハードウェア及びソフトウェアを提供している。

同社は、衛星ネットワークとして、主に自社の OG2 コンステレーション(VHF バンド)、パートナー企業 Inmarsat 社の静止衛星による IsatData Pro サービス(L バンド)を提供している。

OG2 コンステレーションと通信を行う地上端末 OG2 Modem の大きさは $40 \times 70 \times 10.5$ mm、IsatData Pro と通信を行う地上端末 ST 6100 では $12.6 \times 12.6 \times 4.9$ cm となっている(図 2-26、図 2-27 参照)。

また同社は AT&T 社、Orange 社、Rogers 社等との提携によりセルラーネットワークも提供しており、同社のデュアルモードデバイスを利用することにより、衛星ネットワークとセルラーネットワークを組み合わせた利用も可能である。同社のサービスは、車隊管理、コールドチェーン、重機、海洋、エネルギー、緊急対応等における利用が想定されている。特に車体管理については、運用コスト削減と生産性向上、ドライバーの運転状況監視と燃費向上、貨物のセキュリティと安全性強化、ロジスティックス合理化と顧客サービス向上等の利用が想定されている。

同社は Inmarsat 社との提携を 2035 年まで延長し、次世代サービス OGx の構築も進めている。Ogx では、今後打上げ予定の Inmarsat-6(I-6)コンステレーションも活用し、既存サービスから 40 倍の高速化を図るとされている。



図 2-26 OG2 コンステレーション用地上端末 OG2 Modem

出所)Orbcomm OG2 AND OGi MODEMS <https://www.orbcomm.com/PDF/datasheet/OG2-OG-ISAT-Satellite-Modems.pdf> (2022年 2 月 9 日閲覧)



図 2-27 IsatData Pro サービス用地上端末 ST 6100

出所)Orbcomm ST 6100 <https://www.orbcomm.com/PDF/datasheet/st-6100.pdf> (2022年 2 月 9 日閲覧)

3) Iridium 社

Iridium 社は、2001年に創業した米国を本拠地とする衛星事業者である。同社は衛星 66 機から構成されるコンステレーションを運用しており、衛星 IoT サービスを含む音声・データサービスを提供している。

同社は、自社の第 1 世代コンステレーションを代替する Iridium Next コンステレーションの打上げを 2017 年に開始し、2019 年に構築を完了した。Iridium Next コンステレーションは運用衛星 66 機、スペア衛星 9 機から構成されており、1 機あたりの重量は 860kg である。Iridium 衛星の周波数帯は L バンドであり、通信速度は 100 Kbps である。

また Iridium 衛星と通信を行う地上端末 Iridium Edge は大きさが 130 x 80 x 30 mm、重さ 320g である(図 2-29 参照)。

同社のサービスは、海洋、輸送、農業、石油・ガス、ユーティリティ、建設等における利用が想定されている。特に、輸送分野では、車隊管理、ドライバーコネクティビティ、貨物監視、安全・緊急対応等の利用が想定されている。

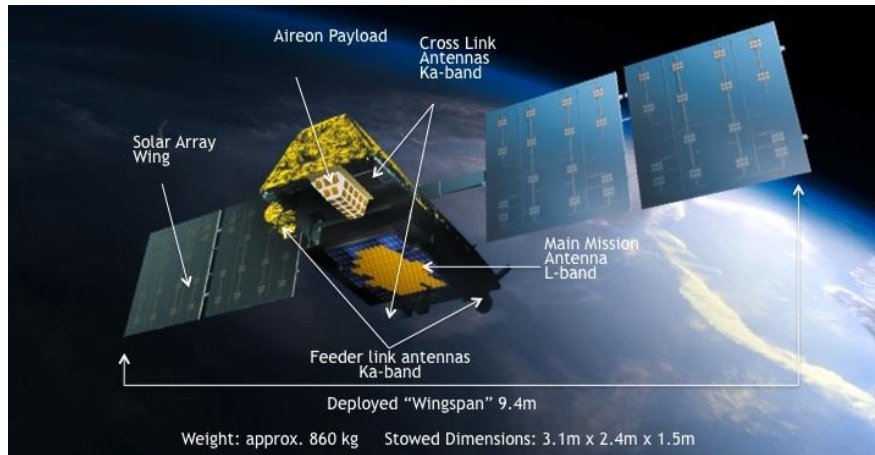


図 2-28 Iridium 社の Iridium Next 衛星

出所) Iridium Iridium NEXT: A Global Effort to Launch the Future of Global Communications
<https://www.iridium.com/blog/2013/04/19/iridium-next-a-global-effort-to-launch-the-future-of-global-communications/> (2022年2月9日閲覧)



図 2-29 Iridium 社の地上 IoT 端末 Iridium Edge

出所) Iridium Iridium Edge <https://www.iridium.com/products/iridium-edge/> (2022年2月9日閲覧)

4) Spire Global 社

Spire Global 社は、2012 年に創業した米国を本拠地とする衛星事業者である。同社は小型衛星 150機から構成されるコンステレーションの構築を目指しており、衛星データ及びアナリティクスの提供を行っている。同社は 2013 年以降、110 機超の衛星を打ち上げている。

Spire 社 Lemur 衛星は、大きさが 10 x 10 x 34.5 cm、重さ 4.6kg であり、周波数帯は UHF バンドと S バンドである(通信速度は不明)。同社が提供するサービスは、海洋、気象、航空、衛星プラットフォーム提供等の宇宙サービス、政府、地表・大気層の環境データ等の地球インテリジェンスにおける利用が想定されている。海洋分野では、Maritime 2.0 サービスのもと、AIS データを収集し全球船舶追跡データや船舶の特徴を提供している。

2021 年 9 月、Spire Global 社は IoT 衛星コンステレーションの構築を目指す後述の Myriota 社と提携することを発表した。Myriota 社は、Spire 社の衛星も活用することにより、迅速かつコスト効率高く IoT サービスをスケールさせることを目指す。

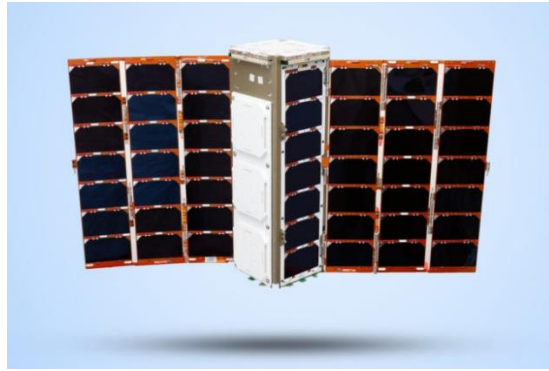


図 2-30 Spire 社の小型衛星 Lemur

出所)Spire The Low Earth Multi-Use Receiver (LEMUR) <https://spire.com/spirepedia/low-earth-multi-use-receiver/> (2022年 2 月 9 日閲覧)

				
Data collected from multiple sources	Unique coverage in high-traffic zones	Convenient delivery methods	Continuously growing infrastructure	Added value with Maritime Weather
We combine Satellite AIS, Terrestrial AIS and <u>Dynamic AIS™</u> to provide wide coverage and give our customers a serious competitive edge.	<u>Dynamic AIS™</u> collects data in busy shipping lanes, providing unprecedented coverage, especially in the most congested areas	We deliver live maritime tracking data through easy-to-use APIs or live feeds (TCP raw NMEA), as well as custom historical data file delivery.	New satellites added to our constellation each year means a constant increase of quantity and quality of data delivered and reduced latency.	Combine AIS-based data with Spire Weather's forecasts API, putting radio occultation data at the heart of your operational decision-making.

図 2-31 Spire 社の海洋サービスの強み

出所)Spire Maritime <https://spire.com/maritime/> (2022年 2 月 9 日閲覧)

5) Omnispace 社

Omnispace 社は、2012 年に創業した米国を本拠地とする衛星事業者である。同社は、世界初の全球 5G 移動ネットワークの構築を目指している。

同社が構築を進めるハイブリッドネットワークでは、移動通信事業者の地上ネットワークと同社の非静止衛星コンステレーションを組み合わせ、全球のあらゆる場所で 5G 接続を実現する。非静止衛星ネットワークの規模は、低軌道衛星最大 200 機かつ中軌道衛星最大 15 機が想定されている。

同社の周波数帯は S バンド(2 GHz 帯)である(通信速度は不明)。同社のサービスは、コンシューマ、企業、政府、IoT 等における利用が想定されている。IoT 分野では、無人航空機、コネクテッドカー、アセット追跡・監視、スマートインフラ等における利用が想定されている。

同社は 2020 年 4 月、非静止衛星コンステレーション向けのプロトタイプ小型衛星 2 機を Thales Alenia Space 社に発注している(Thales 社は NanoAvionics 社の 12U 衛星バス M12P を利用予定)。Omnispace 社は 2022 年初頭に同衛星を打ち上げ、同年中に初期サービスの提供を開始する計画である。

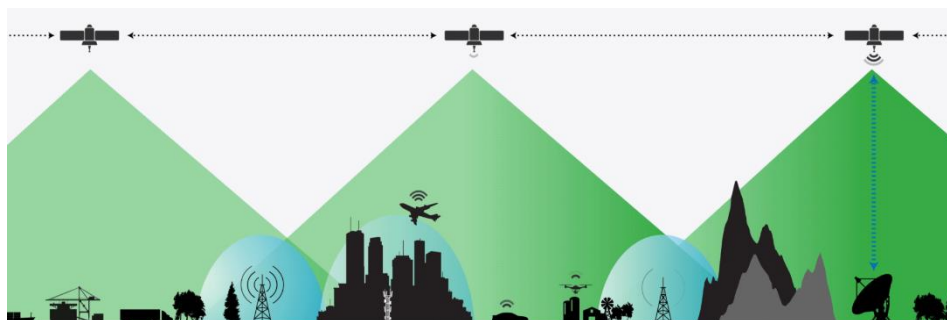


図 2-32 移動通信事業者の地上ネットワークと衛星ネットワークを組み合わせた Omnispace 社のハイブリッドネットワークのイメージ

出所)Omnispace How global hybrid mobile connectivity works <https://omnispace.com/network/> (2022年2月9日閲覧)



図 2-33 Omnispace 社のハイブリッドネットワークの IoT サービス向け利用のメリット

出所)Omnispace Powering IoT on a global scale <https://omnispace.com/solutions/> (2022年2月9日閲覧)

6) Lynk Global 社

Lynk Global 社は、2017年に創業した米国を本拠地とする衛星事業者である。同社は、地球低軌道コンステレーションを構築し、一般の携帯電話が直接接続可能な移動ブロードバンド接続サービスの提供を目指している。同コンステレーションは、長期的には 5,000 機体制とすることを目指している。同社は 2018 年以降、ホステッドパイロードを含む試験機 5 機を打ち上げている。

同社が各国の移動通信事業者と提携することで、ユーザは移動通信事業者の地上カバレッジ内では同事業者から、地上カバレッジ外では Lynk 社の衛星コンステレーションから接続性を確保できる計画となっている。一般の携帯電話向けの衛星接続性が実現することにより、災害対応、デジタルデバイドの解消、モバイル決済サービスの拡大等への利用が想定されている。

2021 年 5 月、同社は FCC に対し、携帯電話への衛星接続性を提供する初期衛星群(10 機未満)の免許申請を行った。同資料では、衛星の種類として、 $15 \times 100 \times 100\text{cm}$ (55kg)、 $15 \times 150 \times 150\text{cm}$ (85kg)の 2 種類が示されている¹。

2021 年 11 月、同社はモンゴルの移動通信事業者 Unitel 社と商業パートナーシップ契約を締結し、2022 年からモンゴル向けに衛星接続性サービスを提供予定である。Lynk Global 社は同様の契約をバハマや中央アフリカ共和国の移動通信事業者とも締結している。

¹ FCC SAT-LOA-20210511-00064 https://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.htm?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATLOA2021051100064&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number (2022年2月9日閲覧)

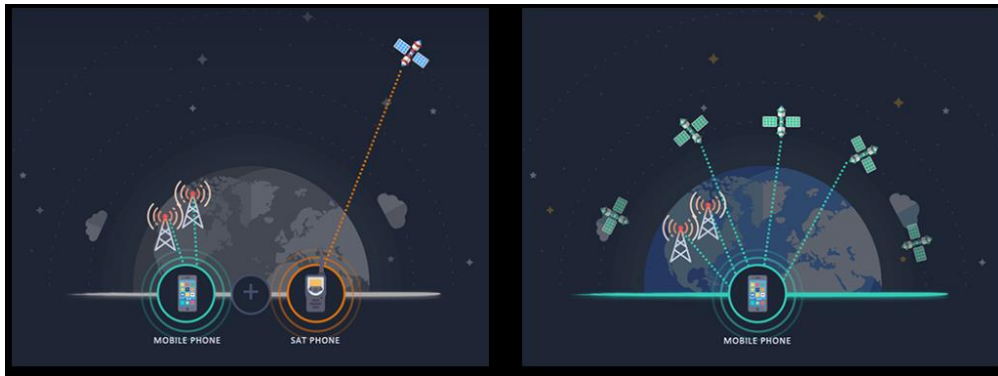


図 2-34 Lynk Global 社による、衛星に対して衛星電話のみが接続できる現在(左)と一般の携帯電話から接続できる将来(右)のイメージ

出所)Lynk Global The World's Problem & Lynk's Solution <https://lynk.world/our-technology> (2022年2月9日閲覧)

7) Kepler Communications 社

Kepler Communications 社は、2015年に創業したカナダを本拠地とする衛星事業者である。同社は小型衛星 140 機から構成される IoT 衛星コンステレーションの構築を目指している。同社は2018年以降、小型衛星 KIPP, CASE, TARS, GEN1 を計 15 機打ち上げている。

各衛星の大きさは、KIPP 及び CASE が 10 x 10 x 30 cm、TARS が 10 x 20 x 30cm、GEN1 が 10 x 22 x 36 cm である。

同社の衛星の周波数帯は、ダウンリンク 10.7-12.7 GHz、アップリンク 14.0-14.5 GHz の Ku バンドであり、2019 年には通信速度としてダウンリンク 38 Mbps、アップリンク 120 Mbps の実証に成功した。

同社のサービスとして、衛星 IoT サービス EverywhereIoT、宇宙アセットとのリアルタイム接続サービス AETHER、大容量データ転送サービス Global Data Service の 3 種類が提供予定となっている。同社のサービスは、農業、海洋、研究・探査、ロジスティクス・アセット追跡、防衛における利用が想定されている。特にロジスティクス・アセット追跡のユースケースとして、アセット追跡、貨物モニタリング、予知保全が示されている。

同社は、2 番目のコンステレーションとして 360 機体制のブロードバンドコンステレーションも計画している。

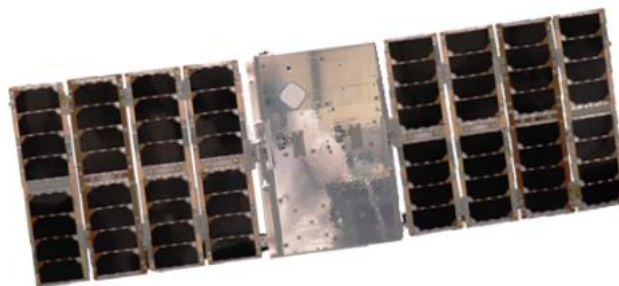


図 2-35 Kepler 社の小型 IoT 衛星 GEN1

出所)Kepler Communications GEN1 <https://kepler.space/network/> (2022年2月9日閲覧)

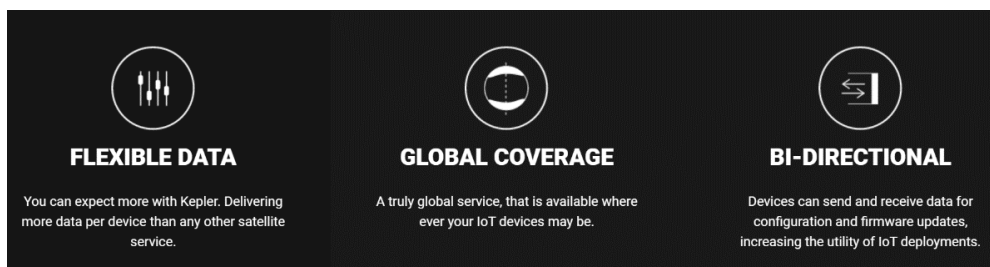


図 2-36 Kepler 社の衛星 IoT サービス EverywhereIoT の特徴

出所) Kepler Communications EverywhereIoT <https://kepler.space/everywhere-iot/> (2022年 2 月 9 日閲覧)

8) Kineis 社

Kineis 社は、2019 年に創業したフランスを本拠地とする衛星事業者である。同社は、ナノサット 25 機から構成される欧州初の IoT 衛星コンステレーションの構築を目指している。

フランス CNES と Collecte Localisation Satellites (CLS) 社により 2019 年に創業され、現在 CLS 社が運用している ARGOS システムの運用を将来的に Kinesis 社が担う予定となっている。

Kineis 社の IoT コンステレーションは、ARGOS システムを補完し、IoT サービスによる新たな市場を開拓することを目指す。同 IoT コンステレーションは、農業、海洋、科学・環境、人道支援、屋外活動、ネットワーク・インフラ、輸送・ロジスティクスにおける利用が想定されている。

Kineis 社の IoT 衛星と通信を行う地上チップセットはわずか 7×7 mm 程の大きさである(図 2-37 参照)。

同社の IoT 衛星は、IoT 通信用の 401 MHz 周辺の UHF バンドアンテナ及びデータ中継用の S バンドアンテナを搭載し、一部の機体はさらに AIS 信号収集用の VHF アンテナも搭載する予定である(通信速度は不明)。同社は 2023 年第 2 四半期に 1 回目の打上げを予定している。打上げは Rocket Lab 社の Electron ロケットにて実施され、5 回のミッションで計 25 機が打ち上げられる計画となっている。

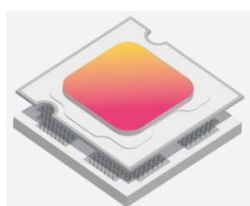


図 2-37 Kinesis 社の地上チップセットのイメージ

出所) Kineis The Chipset <https://www.kineis.com/en/a-technology/> (2022年 2 月 9 日閲覧)



図 2-38 Kinesis 社の IoT 衛星が想定する利用分野

出所) Kineis Your Industry <https://www.kineis.com/en/> (2022年 2 月 9 日閲覧)

9) Astrocast 社

Astrocast 社は、2014 年に創業したスイスを本拠地とする衛星事業者である。同社は、ナノサット 100 機から構成される IoT 衛星コンステレーションの構築を目指している。同社は2018年、2019 年に実証衛星を 1 機ずつ打ち上げ、2021 年に IoT コンステレーションを構成する運用衛星を計 10 機打ち上げている。

Astrocast 社の衛星の周波数帯は L バンドであり、NewSpace 企業の IoT 地球低軌道ネットワークとして L バンドサービスの提供を予定しているのは同社のみである(通信速度は不明)。

Astrocast 社の IoT 衛星と通信を行う地上モジュール Astronode S の大きさは 35 x 31 x 4.1 mm である(図 2-40 参照)。

同社のサービスは、海洋、環境、採掘、石油ガス、コネクテッドビークル、農業・畜産における利用やアセット監視等が想定されている。

Astrocast 社は 2021 年 8 月、ユーロネクスト・オスロ市場に上場し、2024 年末までに 100 機体制のコンステレーションを構築すべく資金調達を加速させている。

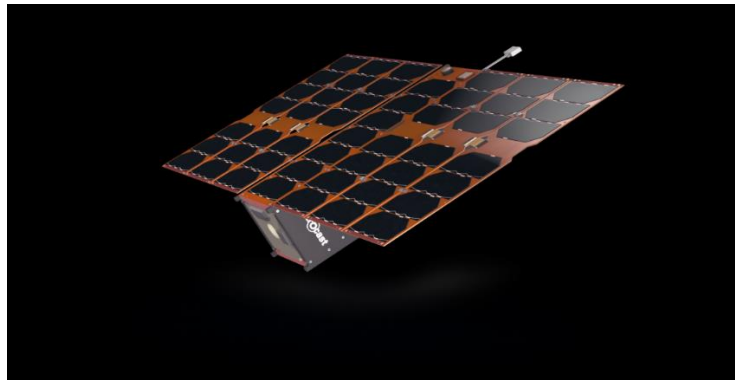


図 2-39 Astrocast 社が開発する 5kg 級ナノサットのイメージ

出所) Astrocast Swiss-made state-of-the-art nanosatellite IoT network
<https://www.astrocast.com/technology/> (2022年 2 月 9 日閲覧)



図 2-40 Astrocast 社の IoT モジュール Astronode S

出所) Astrocast Astronode S <https://www.astrocast.com/products/astronode-s/> (2022年 2 月 9 日閲覧)

10) Myriota 社

Myriota 社は、2015 年に創業したオーストラリアを本拠地とする衛星事業者である。同社は、ナノサット 50 機から構成される IoT 衛星コンステレーションの構築を目指している。同社は 2021 年 3 月、同社初の衛星 Myriota 7 を打ち上げている。

Myriota 社の衛星の周波数帯は UHF バンド、VHF バンドである(通信速度は不明)。同社のサービスは、農業、輸送・ロジスティクス、海洋、防衛、環境、採掘、ユーティリティ等における利用が想定されている。特に輸送・ロジスティクス分野では、アセット追跡、状況監視、エンドツーエンドの貨物トレーサビリティ、ルートのプランニング・最適化、ビジネス改善、インテリジェント輸送等が想定されている。

同社は、2021 年 3 月の自社衛星の打上げにより、米国とカナダ向けに商業 IoT サービスを開始した。なお、オーストラリアとニュージーランド向けには、パートナー企業の衛星を活用し、これ以前からサービスが提供されている。

2021 年 9 月には、Myriota 社が前述の Spire Global 社が提携することが発表された。同社は Spire 社の衛星も活用することにより、迅速かつコスト効率高く IoT サービスをスケールさせることを目指している。



図 2-41 Myriota 社の Myriota 7 衛星

出所)Nanosat Database Myriota <https://www.nanosats.eu/sat/myriota> (2022年 2 月 9 日閲覧)

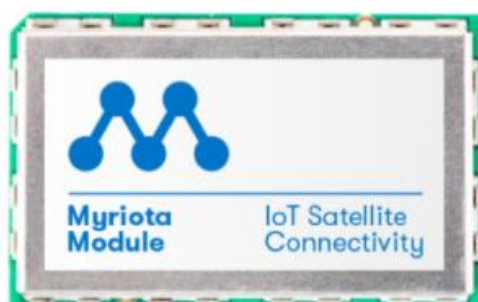


図 2-42 Myriota 社の地上端末 Myriota Module

出所)Myriota Products <https://myriota.com/products/> (2022年 2 月 9 日閲覧)

11)Fleet Space Technologies 社

Fleet Space Technologies 社は、2015 年に創業したオーストラリアを本拠地とする衛星事業者である。ナノサット 140 機から構成される IoT 衛星コンステレーションの構築を目指している。同社は 2018 年以降、Proxima 1&2、Centauri 1~4 からなる計 6 機の衛星を打ち上げている。

Fleet 社の衛星の周波数帯は L バンドと S バンドである(通信速度は不明)。同社のサービスは、ユーティリティ、採掘、防衛等における利用が想定されている。

同社では、自社衛星コンステレーションのほか、Iridium 社、Orbcomm 社とも提携し、2019 年 5

月から商業サービスを提供している。

次回の打上げとして、2022 年に複数機の打上げを計画している。同社は 2027年までに 140 機体制の衛星コンステレーションの構築を完了する予定としている。



図 2-43 Fleet 社の衛星イメージ

出所)Fleet Space Technologies About us <https://fleetspace.com/about> (2022年 2 月 9 日閲覧)



図 2-44 エッジサーバ、LoRaWAN ゲートウェイ、衛星モデムの機能を統合した Fleet 社の The Portal デバイス
出所)Fleet Space Technologies The Portal <https://fleetspace.com/portal> (2022年 2 月 9 日閲覧)

12) Lacuna Space 社

Lacuna Space 社は、2017 年に創業した英国を本拠地とする衛星事業者である。同社は、ナノサット 36機から構成される IoT 衛星コンステレーションの構築を目指している。同社は 2019 年以降、計 4 機の衛星を打ち上げている。

同社は、ESA の ARTES(Advanced Research in Telecommunications Systems)プログラムや英国宇宙庁(UKSA)の支援を受けている。

同社の衛星は LoRaWAN の周波数帯を使用し(通信速度は不明)、自社衛星コンステレーションと直接通信を行う計画である。同社のサービスは、スマート農業、アセット追跡、リアルタイム・遠隔監視等における利用が想定されている。

同社は、2022 年末までに36機体制の衛星コンステレーションの構築を完了する予定としている。



図 2-45 Lacuna Space 社の地上端末

出所) Lacuna Space Connecting sensors <https://lacuna.space/> (2022年 2 月 9 日閲覧)



図 2-46 Lacuna Space 社の LS-3 衛星

出所) NanoAvionics NanoAvionics launches second satellite for Lacuna Space's growing IoT satellite constellation <https://nanoavionics.com/news/nanoavionics-launches-second-satellite-for-lacuna-spaces-growing-iot-satellite-constellation/> (2022年 2 月 9 日閲覧)

13) 北京国電高科科技有限公司

北京国電高科科技有限公司(国電高科)は、2015 年に創業した中国を拠点とする航空宇宙企業である。同社は、ナノサット 38 機から構成される IoT 衛星コンステレーションの構築を目指している。同社は 2018 年以降、天啓(Apocalypse)衛星シリーズを計 14 機打ち上げている。

同社の衛星の周波数帯は UHF バンドであり、通信速度(上り)は 7 Kbps である。同社のサービスは、スマート農業、輸送・物流、石油・ガス、電力系統、気象、海洋、環境等における利用が想定されている。

同社は 2022 年末までに 38 機体制の衛星コンステレーションを構築し、地上ネットワークと衛星ネットワークを統合した衛星 IoT サービスを全球のユーザに提供する予定である。

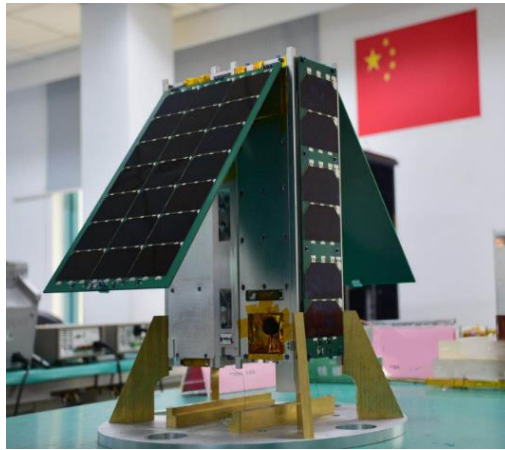


図 2-47 国電高科の天啓(Apocalypse)衛星

出所)Nanosat Database Tianqi <https://www.nanosats.eu/sat/tianqi> (2022年 2 月 9 日閲覧)

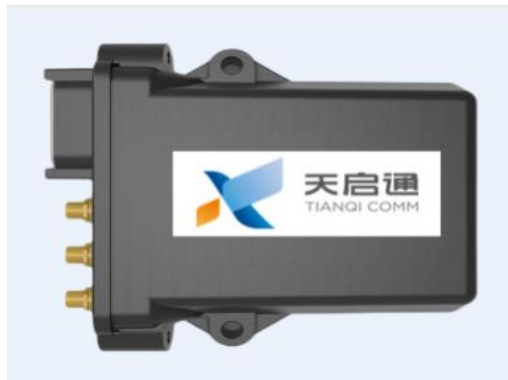


図 2-48 国電高科の地上端末 TQZD-01

出所)国電高科 衛星終端 <http://guodiangaoke.com/web/dist/index.html#/terminalAndAntennaList> (2022年 2 月 9 日閲覧)

14) 浙江吉利控股集团(Geely)

浙江吉利控股集团(Geely)は、1986年に創業した中国を本拠地とする企業であり、中国の大手自動車メーカー吉利汽車(Geely Automobile)の親会社である。自動運転を支援する衛星コンステレーションの構築を目指している。

同社のコンステレーションでは、自動運転を支援するための航法、コネクティビティ、通信の提供が想定されているが、衛星機数、打上げ時期、周波数帯、通信速度等の詳細は不明である。

Geely 社は 2021 年 10 月、浙江省台州市の自社衛星製造施設にて衛星の量産を開始した。同施設では年間 500 機の製造が可能とされている。同社は 2018 年に地球低軌道衛星の開発、打上げ、運用を担う子会社・浙江時空道宇科技(Geespace)を、2019 年に衛星の製造を担う子会社・台州星空智聯科技を設立しており、上記施設では Geespace 社が開発した衛星を台州星空智聯科技が製造することとなっている。

2021 年 12 月、Geely 社の衛星 2 機が快舟 1A ロケットで酒泉衛星発射センターから打ち上げられたが、同打上げは失敗となった。なお、Geely 社のコンステレーションを活用する車載測位端末 GEETRACKER も開発されており、大きさが 100 x 84 x 25mm、重さが 270g である(図 2-50 参照)。

また Geely 社は、上述の動きとは別に 2021 年 1 月、41.2 億元(約 732 億円)を投資し、山東省青島市にて低軌道衛星インターネットプロジェクトを立ち上げることを発表している。

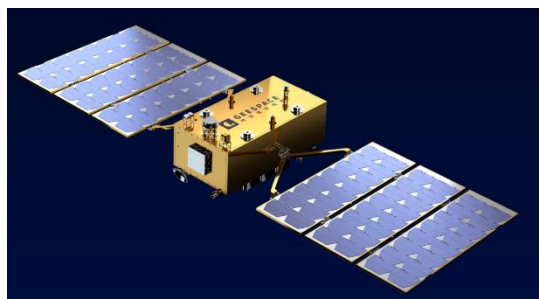


図 2-49 Geospace 社の GSP100 衛星プラットフォーム

出所)Geospace GSP100 <http://www.geospace.com/satellite/gsp100/> (2022年2月9日閲覧)



図 2-50 Geospace 社の車載測位端末 GEETRACKER

出所)Geospace GEETRACKER <http://www.geospace.com/product/geetracker/> (2022年2月9日閲覧)

15) ノルウェー宇宙機関(NOSA)

ノルウェー宇宙センター(NOSA)は、1987 年に設立されたノルウェーの国立宇宙機関である。2019 年、旧称ノルウェー宇宙センター(NSC)から現在の名称に変更された。

NOSA は 2017 年 7 月 14 日、VDES 実証衛星 Norsat-2 の打上げに成功し、現在も運用を継続している。Norsat-2 の諸元は表 2-23 の通りである。NorSat-2 には VDES 通信用に Kongsberg Seatex 社製の VDES ペイロードが搭載されており、八木アンテナが採用されている。

表 2-23 Norsat-2 の諸元

項目	内容
サイズ	20 x 30 x 40 cm
質量	16.7 kg
VDES 機器の質量	1.5 kg
電力	56 W
軌道	高度 600km(太陽同期軌道)

周波数帯	VHF バンド VDES transmit band: 161.7875-161.9375 MHz VDES receive band: 157.1875-157.3375 MHz
通信速度	船舶～船舶間: 38.4～115.2 kbps 船舶～衛星間: 2.1～140 kbps

出 所) eoPortal Directory NorSat-1 & NorSat-2 <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/n/norsat-1-2>, Norwegian Space Centre Norsast-2 http://nfas.autonomous-ship.org/wp-content/uploads/2020/09/6_mikrosat.pdf (2022年2月9日閲覧)

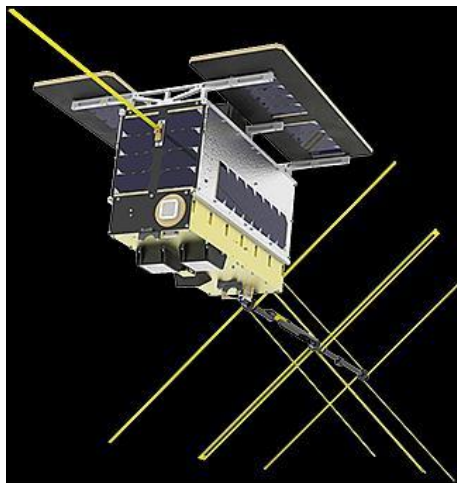


図 2-51 NOSA の Norsat-2 衛星

出 所) eoPortal Directory NorSat-1 & NorSat-2 <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/n/norsat-1-2> (2022年2月9日閲覧)

NOSA はまた、新たな技術実証機 Norsat-TD 衛星を 2022 年に打ち上げる予定である(諸元は不明)。Norsat-TD には、Norsat-2 の VDES ペイロードの改良版が搭載される。Norsat-2 と組み合わせで運用され、ノルウェー海域における船舶通信能力の強化を図っている。



図 2-52 NOSA の Norsat-TD 衛星

出所)eoPortal Directory Norsat-TD <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/n/norsat-td> (2022年2月9日閲覧)

16) Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL)社

Surrey Satellite Technology Ltd(SSTL)社は、1985年に創業した英国企業であり、小型衛星の設計、製造、試験から運用までを手掛けている。

VDES ペイロードを試験するための技術実証ミッション VESTA では、SSTL 社が製造した衛星バスに、ExactEARTH 社の海洋衛星コンステレーション向けに Honeywell 社が開発した VDES ペイロードが搭載された。VESTA は 3U サイズのナノサットで、重さは 4kg であり、展開型 VHF アンテナを搭載している(通信速度は不明)。運用は SSTL 社が行っている。

VESTA ミッションは、2018 年 12 月 3 日に SpaceX 社の Falcon 9 ロケットにて高度 575km の太陽同期軌道に打ち上げられた。同ミッションは、英国宇宙庁(UKSA)の National Space Technology Programme (NSTP)による資金提供のもと Honeywell 社が主導した。

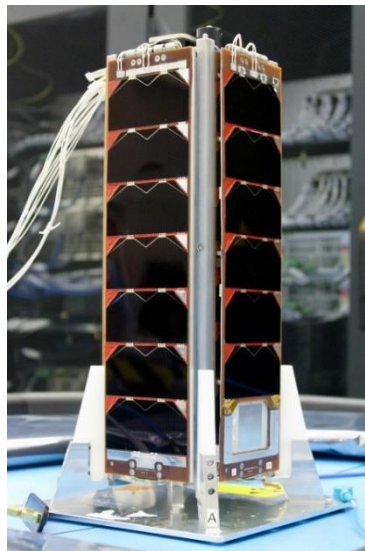


図 2-53 VESTA 衛星

出 所) SSTL VESTA: Launched 2018 <https://www.sstl.co.uk/space-portfolio/launched-missions/2010-2019/vesta-launched-2018> (2022年2月9日閲覧)

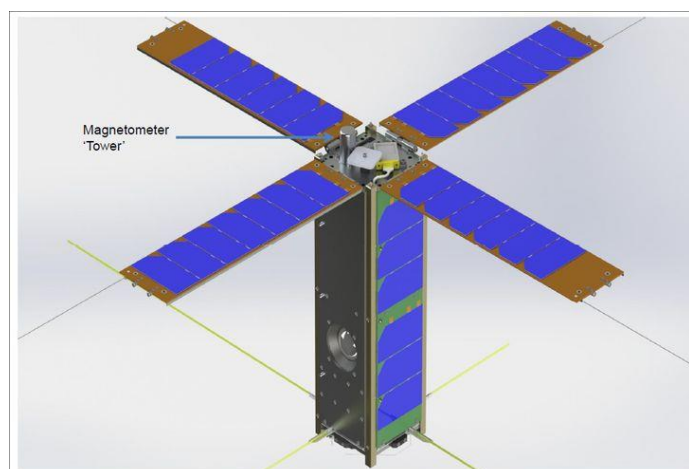


図 2-54 VESTA 衛星の展開時のイメージ

出 所) Honeywell VESTA Demonstrates Our Nanosat Capabilities and Connectivity Expertise <https://aerospace.honeywell.com/us/en/learn/about-us/blogs/vesta-demonstrates-our-nanosat-capabilities> (2022年2月9日閲覧)

17) AAC Clyde Space 社

AAC Clyde Space 社は、2005 年に創業した英国を本拠地とする小型衛星メーカーである。

2020 年 8 月、AAC Clyde Space 社は、米国 Orbcomm 社、スウェーデン Saab 社と提携し、2022 年半ばに VDES 衛星の実証機 NJORD-1 を打ち上げる計画を発表した。AAC Clyde Space 社が衛星開発、Saab 社が VDES ペイロード開発、Orbcomm 社がデータ配信を担当する（通信速度は不明）。スウェーデン交通局（Swedish Transport Administration）が、AAC Clyde Space 社による衛星開発に 1,220 万クロナ（約 1.6 億円）を提供することが決定しているが、同局からの資金提供が最終的には 1,700 万クロナ（約 2.3 億円）にのぼる可能性も示唆されている。

本プロジェクトは 2020 年 10 月に開始し、2022 年半ばに実証機を打ち上げ、2023 年第 1 四半期に軌道上実証を完了する予定である。同実証機を 1 機目とし、将来的には VDES 衛星コンステレーションを構築する計画となっている。合計機数が最大 100 機程度となることも検討されているが、現時点では未決定とされている。

2021 年 10 月、3 者は MoU を締結し、本取組を AOS と命名して次世代海洋通信サービスの提供を目指すことが発表された。



図 2-55 AAC Clyde Space 社の衛星バス Epic 3U

出所)SatCatalog EPIC 3U <https://www.satcatalog.com/component/epic-3u/>（2022年 2 月 9 日閲覧）



図 2-56 船舶搭載 VDES ペイロード R60 VDES Base Station

出所)Saab R60 VDES Base Station <https://www.saab.com/products/r60-vdes-base-station>（2022年 2 月 9 日閲覧）

18) Sternula

Sternula 社は、2019 年に創業したデンマークを本拠地とする衛星事業者である。同社は、VDES 衛星 60 機から構成されるコンステレーションの構築を目指している。

同社は、衛星海洋 IoT ネットワークを開発し、海洋／北極サービスを実証する MARIOT プログラムのリード企業である。同プログラムでは、2022 年に打上げ予定の Sternula 社の実証衛星 MARIOT-1 が利用される。MARIOT プログラムは、Innovation Fund Denmark から 2,000 万

クローネ(約 3.6 億円)の支援を受けている。

2021 年 6 月には、Sternula 社がパートナー企業とともに VDES Living Lab プロジェクトを立ち上げることが発表された。同プロジェクトでは、VDES 技術に関するデジタルサービスを試験できるテストベッドを開発する。

同社は、海域監視能力の強化を望む西アフリカの国々(ガーナ、シエラ・レオネ)との間で VDES サービスを提供する提携を既に締結している。同社は 2022 年の自社初の衛星打上げ後、2023 年には全球規模のサービスを開始予定である。



図 2-57 MARIOT プログラムによる VDES 衛星と船舶の通信イメージ

出所) Sternula Maritime IoT using small satellites - MARIOT <https://www.sternula.com/index.php/maritime-iot-mariot/> (2022年 2 月 9 日閲覧)

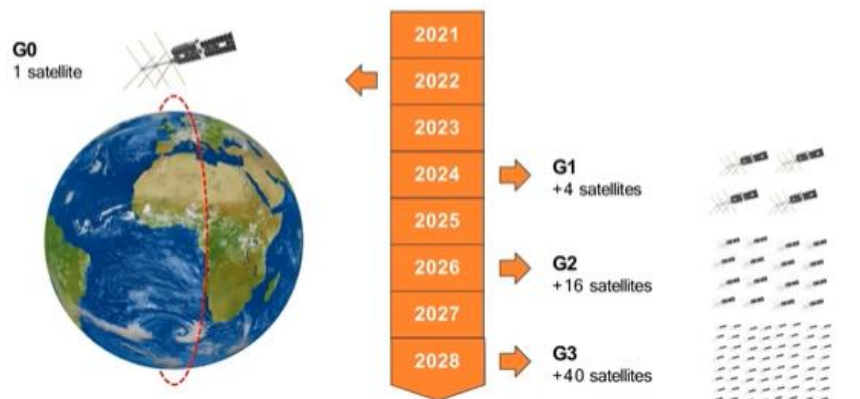


図 2-58 Sternula 社のコンステレーションの整備タイムライン

出所) Sternula Workshop in Ghana September 2021 <https://www.sternula.com/index.php/introducing-ais-2-0/> (2022年 2 月 9 日閲覧)

19) その他

前述までの低軌道衛星を利用する事業者以外に静止衛星を利用する事業者として Skylo 社がある。

Skylo 社は、2016 年に創業した米国を本拠地とする衛星通信事業者である。同社は自社コンステレーションを保有しておらず、Inmarsat 社と提携してサービスを提供する。Skylo 社の使用周波数は、Inmarsat 社の静止衛星を使用することから L バンドであり、通信速度は 20 Kbps である。

Skylo 社の地上端末 Skylo Hub は、大きさが約 20 x 20 x 3 cm、重さ 1kg である(図 2-59 参照)。

同社のサービスは、漁業、農業、ロジスティクス、鉄道、災害対応等における利用が想定されている。

特にロジスティクス分野では、車隊の追跡やパフォーマンスの監視等の用途が想定されている。同社は、地上端末 Skylo Hub(図 2-59 参照)、衛星接続サービス Skylo Connect、専用アプリ Skylo Apps を利用してユーザーにサービスを提供する。同社はインドにおいて商業サービスの展開を開始している。

2021年 6 月、Skylo 社はソフトバンク社と提携し、日本での衛星 IoT サービスの展開を計画していることが発表された。



図 2-59 Skylo 社の地上端末 Skylo Hub

出所)Skylo The Skylo Hub <https://www.skylo.tech/technology#skylo-hub> (2022年 2 月 9 日閲覧)



図 2-60 Skylo 社の専用アプリ Skylo Apps

出所)Skylo Skylo Apps -- Mobile and Web <https://www.skylo.tech/technology#skylo-hub> (2022年 2 月 9 日閲覧)

(2) ITU におけるファイリング状況調査

上述の IoT 衛星事業者 Lynk Global 社及び Lacuna Space 社について、ITU におけるファイリング状況を調査した。具体的には、申請されている国籍、ITU における申請の受領日、Lacuna Space については申請されている周波数帯についても調査した。

1) Lynk Global 社のファイリング状況

Lynk Global 社(旧 UbiquitiLink 社)について ITU のファイリング状況を調査した。調査の結果、5 機の衛星の申請が確認され(表 2-24 参照)、打上げ済の 5 機(表 2-25 参照)がこれらに該当すると考えられた。

表 2-24 Lynk Global 社の ITU におけるファイリング状況

衛星名	国籍	ITU 無線通信局(BR)の受領日
UBIQUITILINK	米国	2019 年 2 月 13 日
LYNK-2A	米国	2020 年 11 月 24 日
LYNK-1	米国	2020 年 12 月 21 日
LYNK-S	米国	2021 年 2 月 3 日
LYNK-SHANNON	米国	2021 年 6 月 4 日

出所)各種 ITU 資料を基に三菱総合研究所作成

表 2-25 Lynk Global 社の打上げに関する情報

衛星名	打上げ日	備考
Lynk 01 (ホステッドペイロード)	2018 年 12 月 5 日	SpaceX 社 CRS-16 ミッションで打ち上げ、Northrop 社 Cygnus に搭載
Lynk 02 (ホステッドペイロード)	2019 年 7 月 25 日	SpaceX 社 CRS-18 ミッションで打ち上げ、Northrop 社 Cygnus に搭載
Lynk 03 (ホステッドペイロード)	2019 年 12 月 5 日	SpaceX 社 CRS-19 ミッションで打ち上げ、Northrop 社 Cygnus に搭載
Lynk 04 (フリーフライヤ)	2020 年 3 月 7 日	SpaceX 社 CRS-20 ミッションで打ち上げ
Lynk 06(SHANNON) (フリーフライヤ)	2021 年 6 月 30 日	SpaceX 社 Transporter-2 ミッションで打ち上げ

出所)各種資料を基に三菱総合研究所作成

2) Lacuna Space 社のファイリング状況

Lacuna Space 社についても ITU のファイリング状況を調査した。調査の結果、1 機の衛星の申請が確認され(表 2-26 参照)、打上げ済の 4 機のうち LacunaSat 2b(表 2-27 参照)がこれに該当すると考えられた。

表 2-26 Lacuna Space 社の ITU におけるファイリング状況

衛星名	国籍	ITU 無線通信局(BR)の受領日
BEESAT-OC-LS	英国	2019 年 2 月 1 日、2021 年 5 月 24 日

出所)各種 ITU 資料を基に三菱総合研究所作成

表 2-27 Lynk Global 社の打上げに関する情報

衛星名	打上げ日	備考
LacunaSat-1 (ホステッドペイロード)	2019年4月1日	PSLV-QL ロケットで打ち上げ。リトアニア NanoAvionics 社の M6P 衛星に Lacuna Space 社の LacunaSat-1 と SpaceWorks Orbital 社の BlueWalker-1 が搭載
LacunaSat 3	2020年9月28日	Soyuz-2.1b ロケットで打ち上げ。NanoAvionics社の M3P バスを使用
LacunaSat 4	2020年11月7日	PSLV-DL ロケットで打ち上げ
LacunaSat 2b	2021年3月22日	Soyuz-2.1a ロケットで打ち上げ。Open Cosmos 社の BeeSat バスを使用。

出所)各種資料を基に三菱総合研究所作成

打上げ済みの LacunaSat 2b 衛星と考えられる、ITUファイリング上の BEESAT-OC-LS の周波数帯は表 2-28 の通りである。帯域 862-870 MHz(受信)が含まれており、欧州の LoRaWAN の周波数帯である 863-870 MHz におよそ合致することから、Lacuna Space 社は同衛星のファイリングとして LoRaWAN 周波数帯での受信を申請しているものと考えられる。

表 2-28 ITU ファイリングにおける BEESAT-OC-LS 衛星の周波数帯

ビーム名	送信/受信	中央周波数(MHz)	周波数帯域幅(kHz)	最低周波数(MHz)	最高周波数(MHz)	クラス
PLR1	受信	866	8000	862	870	EW(地球探査衛星業務)
PLR1	受信	915	26000	902	928	EW(地球探査衛星業務)
SUL1	受信	2067.5	85000	2025	2110	ET(宇宙運用業務)
SUL2	受信	2067.5	85000	2025	2110	ET(宇宙運用業務)
SDL1	送信	2245	90000	2200	2290	ET(宇宙運用業務)
SDL2	送信	2245	90000	2200	2290	ET(宇宙運用業務)
XDL1	送信	8212.5	375000	8025	8400	EW(地球探査衛星業務)

出所)各種 ITU 資料を基に三菱総合研究所作成

(3) 主な IoT 衛星および VDES 衛星の軌道傾斜角と高度

本通信技術調査で取り上げた IoT 衛星及び VDES 衛星について、主な軌道傾斜角及び高度についての調査結果を表 2-29 に示す。打上げ済みの衛星を対象とし、打上げ時期の異なる衛星を各社数機ずつ取り上げるにより、各社の代表的な軌道射角及び高度を整理した。

表 2-29 本通信技術調査で対象とした通信衛星の軌道傾斜角と高度

事業者名	国	衛星名	COSPAR	軌道傾斜角(deg)	高度(km)
Swarm Technologies社	米国	SpaceBEE 1	2018-004AH	97.4	472
Swarm Technologies社	米国	SPACEBEE-10	2020-061AK	97.5	534
Swarm Technologies社	米国	SpaceBEE NZ-10	2021-059D	97.5	533
Orbcomm社	米国	Orbcomm FM103	2014-040F	47	710
Orbcomm社	米国	Orbcomm FM105	2015-081C	47	750
Iridium社	米国	Iridium-NEXT 100	2017-061B	86.4	798
Iridium社	米国	Iridium-NEXT 150	2018-030H	86.4	799
Iridium社	米国	Iridium-NEXT 180	2019-002A	86.4	780
Spire Global社	米国	LEMUR-2 THEODOSIA	2019-089M	37	563
Spire Global社	米国	LEMUR-2 JEREMIAH	2020-081G	36.9	563
Spire Global社	米国	LEMUR-2 CARLSANTAMARI	2021-059CJ	97.5	540
Lynk Global	米国	Lynk 04	2020-011D	51.6	485
Kepler Communications社	カナダ	KEPLER-4	2020-068P	97.7	564
Kepler Communications社	カナダ	KEPLER-15	2021-006BA	97.5	545
Astrocast社	スイス	Astrocast 0101	2021-006T	97.5	535
Astrocast社	スイス	Astrocast 0201	2021-059CD	97.5	530
Myriota社	豪州	Myriota 7	2021-023D	45	552
Fleet Space Technologies社	豪州	Proxima 1	2018-088E	85	512
Fleet Space Technologies社	豪州	Centauri 1	2018-099BD	97.6	578
Fleet Space Technologies社	豪州	Centauri 3	2021-023B	45	552
Lacuna Space社	英国	LacunaSat 3	2020-068G	97.7	574
Lacuna Space社	英国	LacunaSat 2b	2021-022S	97.6	586
北京国電高科科技有限公司	中国	天啓5号	2020-003D	97.3	472
北京国電高科科技有限公司	中国	天啓12号	2021-039D	35	596
ノルウェー宇宙機関(NOSA)	ノルウェー	NorSat-2	2017-042D	97.5	603
SSTL	英国	VESTA	2018-099Z	97.6	573

出所)各種資料を基に三菱総合研究所作成

軌道傾斜角については、表 2-29 で調査した 26 件のうち 18 件(約 69%)が 85～97.7 度となっており、軌道傾斜角 90 度に近い極軌道が多い結果であった。これらの軌道を採用している各社では、極軌道に衛星を投入することによってグローバルに IoT サービスを提供することを志向しているものと考えられる。

高度については、26 件のうち 17 件(約 65%)が高度 500km 台で運用されており、最低高度が 472km、最高高度が 799km であった。

3. 人工衛星の製造ビジネスに関する法的課題の整理

3.1 本調査の概要

3.1.1 本調査の概要・目的

近年の宇宙ビジネスの中でも、目覚ましい技術の進歩と市場の拡大が進んでいる領域が人工衛星を用いたビジネスである。そして、人工衛星ビジネスを取り巻く状況は、これまでの国家プロジェクト主体の世界と比べて、小型衛星コンステレーションに代表される民間事業の増加や、大学やスタートアップが手掛ける超小型衛星プロジェクトの出現など、その担い手(プレイヤー)の拡大に伴い、実に多様化してきている。そして、人工衛星を用いたビジネスへの新規参入を検討する日本の事業者は年々増加している。

人工衛星を用いたビジネスに関する契約では、宇宙の特殊性に伴う取引上のリスクに配慮した上で、契約交渉および締結がなされることが望ましい。しかし、新規参入を検討している、宇宙関係の取引実務に精通していない事業者にとっては、宇宙ビジネスで留意すべき事項についての知見が乏しく、取引上のリスクが明確に認識されないままに契約を締結せざるをえない状況に直面している。実際に、当事者間の知識・ノウハウの非対称性により、取引リスクが明確に認識されず契約が締結されている事例も指摘されており、様々な立場に配慮した宇宙ビジネスにおける事業環境の整備が求められてきた。

このような状況を受け、本調査では、人工衛星の製造ビジネスに着目し、同ビジネスに携わる事業者からの意見等の収集を行い、人工衛星の製造ビジネスの契約法務に関わる現状の問題点・課題を把握した上で、人工衛星の製造ビジネスにおける法的課題を整理することを目的として実施した。法的課題の整理にあたっては、有識者による非公開の委員会での議論を経てとりまとめを行った。

3.1.2 調査の手順

本調査は、事業者からの現状の問題点・課題に関する意見の収集と上述の非公開の委員会での議論を組み合わせて行った。事業者からの意見の収集は委員会における事業者からのヒアリング(8社)および個別に実施した事業者ヒアリング(2社)を通じて行った。収集した問題点・課題の中には、法的論点以外のものや、人工衛星の製造関係の課題ではないもの(人工衛星のデータ利用や打上げサービス関係)も含まれていたが、本調査の目的を鑑み、人工衛星の製造ビジネスに焦点を絞り、取引上の課題について整理を行った。

また、収集した事業者の意見をもとにとりまとめた法的課題についての助言をいただくことを目的として、有識者による委員会を設置した。委員会は「人工衛星ビジネスに関する契約のあり方検討委員会」と称し、3回にわたり非公開で実施された。本委員会の委員は以下のとおりである(五十音順、敬称略)。

- 小塚 莊一郎 学習院大学法学部 教授(座長)
- 新谷 美保子 TMI 総合法律事務所 パートナー弁護士
- 伊達木 香子 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 新事業促進部 部長
- 松本 真輔 中村・角田・松本法律事務所 パートナー弁護士

各委員会の概要は表 1-1 のとおりである。

表 1-1 委員会のアジェンダ

各回アジェンダ	
第 1 回	- 調査の進め方 - 事業者による発表 その1 (5社) - 総合討議
第 2 回	- 前回振り返り - 事業者による発表 その2 (3社) - 問題点・課題の整理と解決策の方向性 - 総合討議
第 3 回	- 前回振り返り - 問題点・課題の整理と解決策 - とりまとめ内容の確認・討議

出所)三菱総合研究所作成

以降において、調査結果を順次述べる。

3.2 人工衛星の製造ビジネスの基本的な考え方

3.2.1 人工衛星の製造ビジネスにおける契約実務の特徴

人工衛星の製造は、部品・コンポーネンタからの個々の製品の納入を受けて、人工衛星製造事業者がそれらの部品を用いて製造・統合して完成させることが一般的であり、人工衛星の製造、運用、およびサービスの提供まで全て自社のみで完結する場合は稀である。そのため、通常、人工衛星の製造過程では、関連事業者間で部品供給契約が締結されることが多い。もっとも、この部品供給契約は、最終的な完成品が宇宙空間で使用される人工衛星であるということから、通常の地上における機械製品の製造過程と異なり、①打上げ後の人工衛星に欠陥が発見された場合に、それがどの事業者が負担すべきリスクか特定することが困難であり(原因究明の困難性)、②また、欠陥を特定した場合でもその修補は現実的には困難であり、代替機を打ち上げることも容易ではないため、金銭補償によって解決される(契約不適合箇所の修補の困難性)という点に大きな特徴がある。さらに、人工衛星は、他社の人工衛星その他の物体との「相乗り」で打ち上げられることも多く、その場合には打上げのスケジュールについては調整が困難であり、その結果、人工衛星の製造過程における「納期」は、これを柔軟に変更することが難しい場合も少なくない。

このように、人工衛星の製造過程において締結される契約は、一般的な製造物供給契約や請負契約に比して、上記のような特殊性が存在する。

3.2.2 人工衛星製造ビジネスの当事者と取引構造

衛星ビジネスにおける、部品・コンポーネンタ、衛星製造者、ユーザ(衛星保有・運用者)等の主要当事者の関係図は以下のとおりである。このうち、本調査では、人工衛星製造・運用をめぐる取引として、特に、

部品・コンポーネンタと衛星製造者の間の部品供給契約を主な検討の対象とすることにした(図 1-1 の部品供給契約)。

なお、部品・コンポーネンタ内でも、人工衛星ビジネス事業を推進したい事業部と、宇宙ビジネス全般でのリスク管理を担当する品証部との間に対立構造が生じがちな点も注意が必要である。

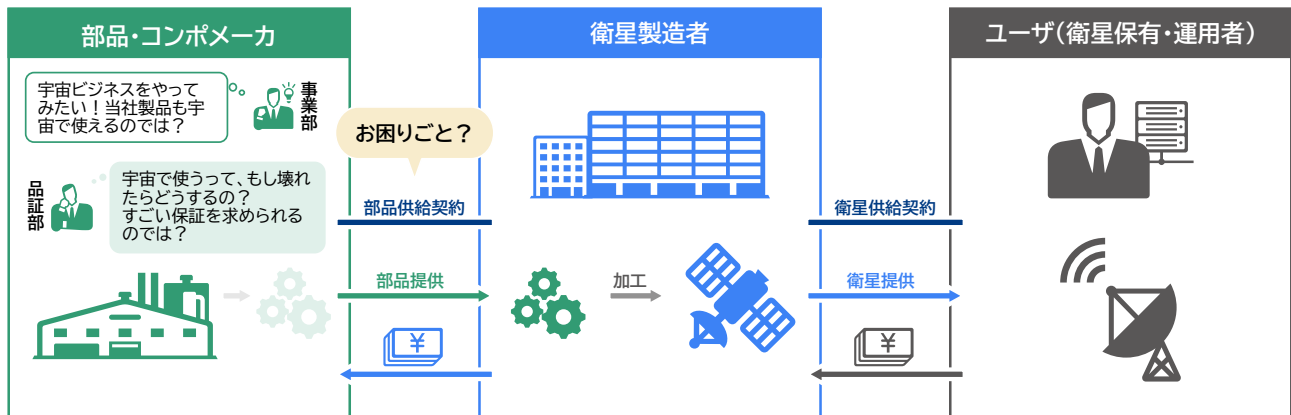


図 1-1 人工衛星ビジネスの取引構造

出所)三菱総合研究所作成

3.2.3 本調査で取り上げる法的論点

人工衛星製造ビジネスにおいて締結される部品供給契約では、例えば以下のような契約条項が含まれていると考えられる(図 1-2)。

< 部品供給契約における契約項目の一例 >	
総則	秘密保持義務
定義	不可抗力
委託業務の内容	免責事項
確定仕様の変更	損害賠償
契約金額	再委託の扱い
検査・検収	権利義務の譲渡
請求	契約解除
支払	反社会的勢力との関係
支払遅延損害金	契約期間
所有権の移転	管轄裁判所
保証	準拠法
特許権等	協議
第三者ソフトウェアのライセンス	

図 1-2 部品供給契約における契約項目(例)

出所)三菱総合研究所作成

このうち、本調査では、実際に取引に関与したことがある事業者から聴取した課題・問題意識を踏まえ、特に実務上の重要性が高いと考えられる以下の6つの契約条項について検討を行った。

- 部品発注/納入の条件
- 検査・検収
- 支払
- 損害賠償

- 契約不適合責任
- 第三者の権利処理

上述の論点には、それぞれ、①部品・コンポーネンタの立場から見た課題、②衛星製造者の立場から見た課題があり、加えて③海外との取引であるための課題が含まれる場合もある。そこで、各論点では、以下の①から③の課題別に整理してまとめている。

- ①宇宙ビジネスを進める上での課題（部品・コンポーネンタの立場から）
- ②宇宙ビジネスを進める上での課題（衛星製造者の立場から）
- ③海外との取引であるための課題

なお、長年、宇宙業界で活動している企業と新規参入企業との契約の場合など、各プレイヤーの保有する情報・技術あるいは経験の非対称性により、契約の交渉力には差異がある点に注意することが必要である。非対称性の例を図 1-3 に示す。本報告書における契約上の留意すべきポイントは、そうした非対称性を含め、多様な立場の事業者がそれぞれ様々な状況に直面して抱いた課題意識に基づくものであることを念頭に置いて理解する必要がある。

契約当事者は、自社と契約相手先企業との関係性を理解し、かつ早期から宇宙ビジネスに関する法務について知見を有する法律専門家に相談し、契約交渉を進めていくことが推奨される。

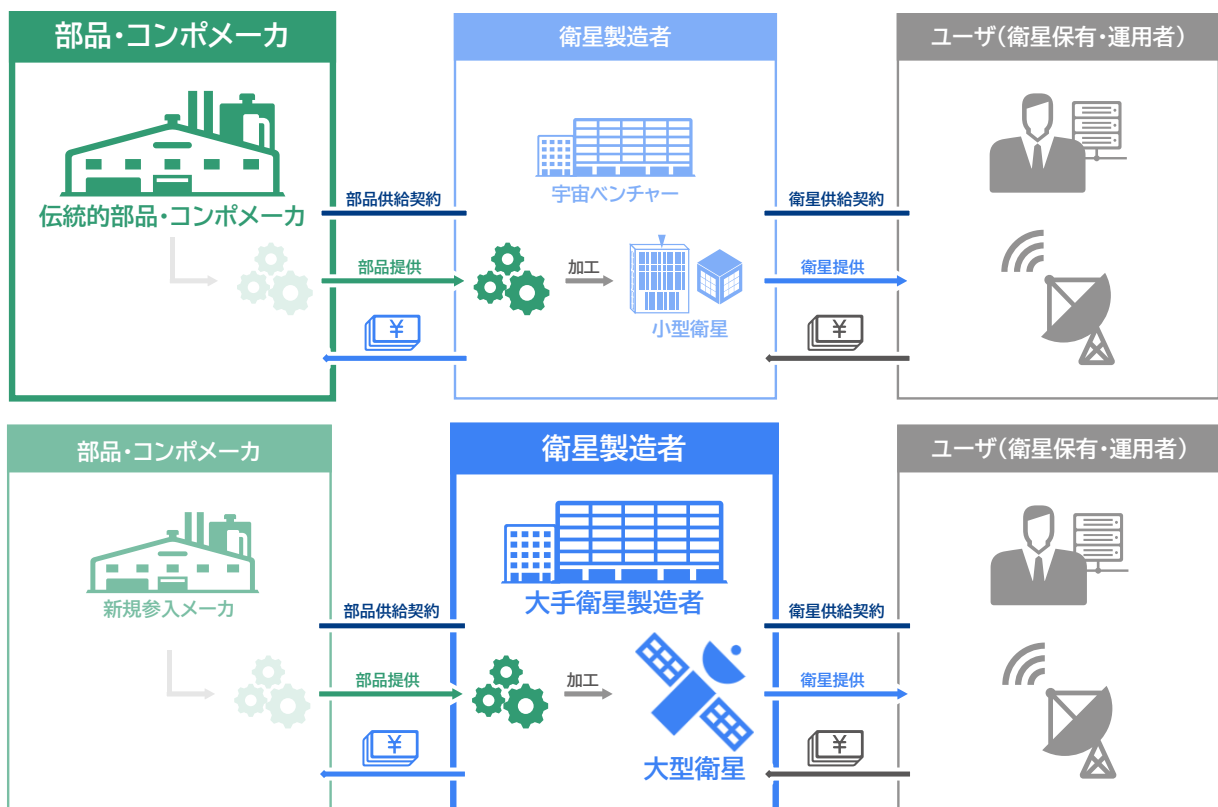


図 1-3 人工衛星ビジネスの形態および当事者関係例

出所)三菱総合研究所作成

3.3 人工衛星の製造ビジネスにおける部品供給契約上の留意事項

本節では、人工衛星の部品供給契約上の留意事項について、「部品発注/納入の条件」、「検査・検収」、「支払」、「損害賠償」、「契約不適合責任」、「第三者の権利処理」の6つの契約条項に分け、事業者の抱える課題と留意すべきポイントを述べる。

3.3.1 部品発注/納入の条件

部品・コンポーネントが物品を納入する際の条件や納入物については、契約当事者間の認識齟齬を回避するためにも詳細について合意することが望ましい。しかし、宇宙ビジネス特有の課題や海外ビジネスゆえの課題に起因し、取引上望ましくない例がみられる。

(1) 事業者の抱える課題



【部品コンポーネントメーカーの立場から】

①発注の条件が特殊・曖昧

- ユーザ(衛星保有・運用者)企業が発注する場合などは、発注者の宇宙に関する知見が乏しいことがあり、本来定めるべき条件が規定されていないなど、製造の発注条件が曖昧な場合がある。
- EM(エンジニアリング・モデル)品の段階で、EM(エンジニアリング・モデル)品だけでなく FM(フライト・モデル)品の発注条件についても要望が出される場合がある。プロジェクトが EM(エンジニアリング・モデル)の段階で、途中で取りやめになってしまうと、FM(フライト・モデル)についての作業が無駄になるおそれがある。

②長納期化

- 部品の納期が複数年度である等、長期にわたってしまう場合が多い。

③契約交渉が困難

- 大手企業に納入する場合、相手方の定型的な契約フォーマットからの交渉が難しい場合がある。



【衛星製造者の立場から】

④調達先不足・遅延リスク

- 世界的にみて半導体部品の供給不足が続いており、様々なコンポーネントの納期遅延につながっており、衛星開発プロジェクトに大きな影響を与えている。
- 過去の実績、コスト、納期等を勘案すると調達先の選択肢が少なくなってしまう。本来であれば、提供される物品・データの品質に応じた価格にしたいが、調達先が限られているため、交渉力が弱くなっている。
- 部品やコンポーネントの製造にあたっては、一部の部品を海外からの輸入に頼らざるを得ないことも多く、そのような場合には遅延が発生するリスクが生じている。



【海外との取引ゆえの課題】

⑤ 準拠法の違い、契約交渉長期化

- 取引先が海外であると、準拠法は相手国の法律であることもある。
- 契約書のドラフトに時間を要する。見落とされたリスクや契約上の手当てが十分でない例もある。

(2) 留意すべきポイント

1) 発注条件の明確化

人工衛星の製造の発注条件・品質条件等について、明確な条件を仕様書に規定してもらうように働きかけることが望ましい。例えば、対象となる部品・コンポーネントの設計はもちろんのこと、一定の環境試験に耐えうるものであることなどの想定される運用状況に応じた適切な仕様の設定を行うことが望ましい。

2) 長納期化を見据えた契約交渉

人工衛星の部品の中には製造に複数の開発フェーズを含むものがあり、長納期化が避けられない場合がある。そのため、このような部品が含まれている場合には、契約交渉の段階から、将来にプロジェクトの中断等もあり得ることを想定して、契約条項を定めることが必要である。プロジェクトの中断等が生じる場合に備えて、信頼利益の支払いを保証する旨の特約を設ける等、契約当事者間でリスク分配について契約条項を設けることも考えられる。

また、調達にかかる期間と打上げまでの全体のスケジュールを踏まえ、かつ、適切な検査・検収を行うことができるリードタイムを確保した納期を設定できるように協議することが望ましい。

3) 入念な契約交渉の実施

大手企業に納入する場合であっても、定型的なフォーマットのまま契約を締結するのではなく事前に交渉ポイントを準備した上で契約交渉に臨み、不合理な契約条項の修正を目指す交渉を行うことが望ましい。加えて、部品・コンポーネンタ側でも、例えば業界団体等が公正な取引条件を求めて業界全体として啓発する活動を行う等、片務的な契約を防止するような取組みを行っていくことも考えられる。

4) 調達先確保・遅延防止の工夫

満足のいく調達先が確保できなかったり、遅延が発生したりといった事態が発生した場合の対応について、予め契約書で規定しておくことが望ましい。例えば、契約上合意された部品の製造・納品が納期に間に合わないと見込まれた場合には、①事前に報告を行う義務を定めた条項、②発注者側が違約金を支払うことなく契約解除を認める条項、③代替品の利用による納品を認める条項、④(衛星製造者側で)別途調達して支給する条項、などを契約上規定することが考えられる。また、部品・コンポーネンタによる部品の供給にあたって、さらに下請や調達が見込まれる場合には、衛星製造者は、人工衛星の製造過

程に關与する当事者の役割・納期の仔細を把握することが重要である。当事者の一部が債務不履行（履行不能や重大な履行遅滞）に陥ることが見込まれる場合には、該当事者に代替する事業者を迅速に検討できるように事前にいくつかの発注先を確認しておくことも有効であると考えられる。

5) 十分な時間を確保した上での契約交渉

海外企業との取引は、日本国内の取引とは契約慣行が異なる上に、契約条件が詳細に定められる場合が多いこともあり、契約書の作り込みが極めて重要となる。他社事例の情報収集などの事前の準備や、十分な時間をとった契約交渉等を行うことが望ましい。特に、海外企業からの部品の輸入にあたっては、輸出入に関する規制法令が適用される可能性がある点にも留意が必要であり、そのような規制法令への対応に要するリードタイムも十分に確保することが望ましい。

準拠法や紛争解決に関しては、日本法・日本での裁判や仲裁とすることが交渉上難しい場合でも、第三国法や第三国での仲裁とすることで公平性を維持することが可能となる。特に、人工衛星の製造過程に権利化をしていないノウハウが含まれるような場合では、公開される法廷での裁判手続よりも非公開が原則とされる仲裁手続を紛争解決手段として設定することが適切であろう。

3.3.2 検査・検収

人工衛星の製造過程で、重要なポイントとなるのが、発注者による検査・検収の手続である。この検査・検収は、法的には受注者の債務の履行完了を決定するポイントであり、検査・検収の完了後は、契約不適合責任（債務不履行責任）も制限されることが一般的であるため、発注者たる人工衛星の製造者としても、慎重に行う必要がある。

(1) 事業者の抱える課題



【衛星製造者の立場から】

①検収の条件が緩い

- 品質を担保するために厳しい試験条件を課したいが、注文ロット数が限定的なため取引を断られてしまうというおそれもあり、検収での厳しい条件を課することが出来ていない。
- 宇宙ビジネスの新規参入業者に対して、宇宙環境における品質保証を要求することができていない。自社における信頼性試験の確認、実施が必要となり、結果として開発コスト増へつながっている。

②検収後のトラブル発生

- 検収後に発覚した部品の不具合により衛星本体に影響が出たが、検収後に発覚した欠陥であることから、部品メーカーには責任を問えなかった事例もある。



【海外との取引ゆえの課題】

③海外事業者の検収の遅れ

- 海外のコンポーネント事業者の納品の検収に時間を要する場合がある。

(2) 留意すべきポイント

1) 検査・検収の条件の厳格化

検査・検収の完了は受注者の債務の履行完了を意味するものであるため、検収の方法・基準・期限については明確に規定することが望ましい。検査・検収手続は仕様書と整合しているかどうかという観点からも行われるものであるため、前述のように仕様書を明確化することは、この検査・検収が適切に実施されることの前提となる点に留意が必要である。また、検査・検収はそれ自体に一定の時間を要するほか、検査・検収に不合格であった場合には、納入品の修補や再製造が必要となる。この際、人工衛星の打上げやエンドユーザーへのサービス提供への期間を理由として条件に達していない納入品を合格として取り扱ってしまうことは、一般論としては、事後的な紛争のリスクが高まってしまうことから避けるべきであると考えられる。

部品・コンポーネントの間で設定する納期は、検査・検収に要する時間や、仮に検査・検収の結果不合格であった場合の修補・再製造に要する時間も含めて設定することが望ましい。代替品の調達や自社での修補を認める規定の設定部品・コンポーネントの責に帰すべき事由や、いずれの当事者の責めに帰すべき事由にもよらずに納品や検収が遅れる場合への対応も想定することが望ましい。例えば、検査・検収の結果不合格であった場合には、自社で別途部品を調達することや他の業者への切り替え発注を認める(その際には、部品・コンポーネントに調達費用等の追加費用を請求する。)ことも考えられる。

2) 海外事業者に対する検査・検収手続

海外事業者との取引においては、時差や交渉の難易度の観点からも検査・検収手続に時間を要することが想定されるため、あらかじめ余裕をもったスケジュールを組むことが望ましい。また、海外の部品・コンポーネントの場合、商習慣の違い等を踏まえ、上記1)で述べた(検査・検収の条件の厳格化)の趣旨をより徹底して、発注側の検査条件を明確化しておくことが推奨される。

なお、海外ビジネスでは、国際物品売買契約に関する国連条約(CISG)²が適用される可能性もある(売主所在国が締約国の場合、日本が締約国となっているため、契約で明示的に排除しないかぎり適用される)。本条約が適用される取引の場合、売主に追完権が認められること、直ちに解除するのではなく付加期間を設定して履行を待つことが原則であるため、売主不履行の場合にもただちに買主が契約を解除できないという点に留意が必要になる。

² 国際物品売買契約に関する国連条約(United Nations Convention on Contracts for the International Sale of Goods: CISG)はウィーン売買条約とも呼ばれる条約であり、条約加入国の国際取引に適用される。契約の成立、売主・買主の義務、救済措置等について定めている。

3.3.3 支払

宇宙産業の健全な促進という観点からは、各当事者に適切に経済的利益が保障される必要があり、支払に関する契約上の条件設定は極めて重要である。部品・コンポーネントメーカーは相対的に規模が小さい企業であることも少なくないため、金額はもちろんのこと支払期限についても重要なポイントとなる。一方で、人工衛星の製造者は、打上げを起点とするスケジュールを遵守しなければならないというプレッシャーのもと、例えば、受注者が履行遅滞に陥っている場合等に他事業者へ切替発注ができるようにしておく必要がある点等から、先払いのリスクも決して小さいとは言えない。このような点から、支払に関する条項も契約上の重要なポイントとして、当事者間で慎重な協議・交渉がなされることが望ましい。

(1) 事業者の抱える課題



【部品コンポーネントメーカーの立場から】

①支払期限の長期化

- 大手企業がプライムとなっているプロジェクトでは、検収後の支払期限が半年以上先になっているようなことがあり、納入側の企業の資金繰りに影響が生じている。



【衛星製造者の立場から】

②不当な支払条件の受入れ

- 1 社独占技術を含む製品について、競合がない場合には、契約金額が先方の言い値になる。また、納品前の支払等、不利な支払条件を呑まざるを得ない。

(2) 留意すべきポイント

1) 適切な支払期限の設定

代金の支払期限については、前払い、分割払い、納品完了後(検査・検収後)の支払い等、複数のバリエーションが考えられ、契約当事者で協議の上、適切に設定することが期待される。

一般的に、発注者の立場としては、受注者が最終的に履行不能となった場合に、既払いの一部代金の返還を求めても、すでに受注者が無資力になっていて返還義務を履行できないリスク等を勘案し、納品完了後(検査・検収後)の支払いとすることを希望する場合が多い。一方で受注者の立場としては、そもそもの製造に要するコストを捻出する必要性から、極力早い段階で代金の支払いを受ける必要がある場合も珍しくない。このような場合には、部品・コンポーネントメーカーの仕入れ等に要する費用相当額は先払いとし、部品・コンポーネントメーカーの製造に要する代金(つまり報酬分)は後払いにする等の対応も考えられる。

発注者が政府機関や国立研究開発法人等の公的機関であるいわゆる「国プロ」の場合には、原則、納品完了後の精算払となっているが、交渉により前払い等が認められる制度等が整備されている。国プロを通じた国内の宇宙産業を促進する観点からは、より柔軟に支払期限を設定できるような検討を進めることも期待される。

より大局的な観点からは、宇宙産業の促進策の一環として、中小企業やスタートアップ、あるいは下請法の適用を受けない企業との契約の際にも、支払期限は一定期間(数か月)以内を目安とするというガイドラインを示すことも有効であるように思われる。

2) 不当な支払条件の回避

競合が存在せず、独占的技術を持つ企業との取引では、支払条件をはじめとする契約条件につき、当該企業側の指定を応諾するしかない場面も存在する。もちろん、当該技術の価値や市場における優位性は認めるべきではあるが、独占禁止法の目的である「公正且つ自由な競争」の実現という観点からは、支払条件を含む契約の諸条件について、必要に応じて弁護士等の専門家も含めた交渉を行うことが望ましい。

3.3.4 損害賠償

冒頭で述べたとおり、人工衛星を用いたビジネスにおいて、打上げ後の人工衛星に欠陥等が確認された場合、現在の技術ではこれを修補することは容易ではなく、専ら金銭補償、すなわち損害賠償によって損害の分担が行われることになる。また、その場合の損害は、当事者間の取引金額を超える多額にのぼる可能性も高い。そのため、損害賠償条項も契約上極めて重要なポイントであり、慎重な交渉が必要であるといえる。

(1) 事業者の抱える課題



【部品コンポーネンタの立場から】

① 契約交渉不足

- 宇宙ビジネスへの新規参入者であると経験値に乏しいため、損害賠償の範囲をなどの契約交渉が困難である。

② 過大な損害賠償額

- 損害賠償額に上限が設けられていないため、莫大な金額になる可能性がある。



【衛星製造者の立場から】

③ 不安定な損害賠償リスク

- 打上げ失敗など、自社でカバーできないリスクがあり、衛星機数が十分揃うまではサービス提供インフラとしての不安定さは否めない。契約上あまり厳密に交渉をしたことがない。

(2) 留意すべきポイント

1) 契約交渉事項に含む工夫

損害賠償に関する条項は重要な交渉ポイントであることは業界において認識される必要があり、特に

金額や規模が多額な契約や人工衛星の核をなす部品に関する契約といった「重要な契約」の交渉には、弁護士に依頼をしたり、社内の法務人材において十分な検討を経るといった対応が望ましい。

また、日本法の原則では、損害賠償は、予見可能性があるものに限り損害賠償責任を負うものであるため、事業者がリスクを過剰に捉えすぎないように留意する必要もある（あらゆる事象について責任を負うものではなく、例えば、部品・コンポーネントが、衛星の運用に伴うリスクについてまで予見をするかという、予見可能性の対象には含まれないという考え方も十分あり得る）。

2) 適切な損害の分担とする工夫

システム開発契約では、部品・コンポーネントが安価な契約金額で業務提供をすることを目的に、損害賠償範囲や損害賠償上限額を制限するという考え方もある。このようなシステム開発契約における考え方が宇宙ビジネスでも妥当するか否かは検討の余地がある。

民法 416 条は、債務不履行時の損害賠償の範囲を規定しており、同条 1 項は「通常生ずべき損害」が賠償範囲に含まれる旨を、同条 2 項は特別な事情によって生じた損害につき「当事者がその事情を予見すべきであったとき」には賠償範囲に含まれる旨を、それぞれ規定している。例えば、単純な遅延遅延（履行遅滞）や仕様書との相違があった場合に生じた損害については通常損害として賠償の範囲に含めることは公平な損害の分担であるように思われるが、一方で、打上げのプロセスで人工衛星が故障した場合、デブリや磁気嵐といった宇宙空間での後発的な事情により故障したような場合に、これらの原因事実が「予見すべきであった」事実と言えるかは不明であり、特別損害については賠償の範囲外とすることも、あり得る落とし所の一つであるように思われる。

3) 海外事業者との取引時の留意点

海外事業者との取引において、準拠法が日本法ではない場合には、日本の法制度とは異なる損害賠償法理が適用される可能性があるため、特に注意を要する。重要な契約の準拠法が外国法に設定されている場合には、必要に応じて、当該外国法の専門家に相談することが望ましい。

3.3.5 契約不適合責任

納品を受けた部品に事後的に欠陥（契約不適合）が認められた場合に、部品・コンポーネントがどのような責任を負うべきかという論点である。民法上、契約に適合していない製品の納品は、債務不履行と考えられ、発注者が当該不適合を知った日から 1 年以内に受注者に通知を行った場合（ただし、この期間制限は契約不適合の事実を受注者が認識していた場合には適用されない。）、受注者は契約不適合責任を負う（民法 566 条）。この問題は、検査・検収のプロセスをより適切・精緻に行うことで回避しやすくなる問題ではあるが、例えば納品物を組み込んだ人工衛星の最終試験において欠陥が発覚した場合等を想定して契約上規定しておくことが望ましい。

(1) 事業者の抱える課題



【部品コンポーネントメーカーの立場から】

①求められる保証のレベルが不明

- 発注者が政府機関や国立研究開発法人等の公的機関であるいわゆる「国プロ」では工程管理など厳しい条件があると認識しているが、求められる品質基準や保証含めてどのような契約条件になるか、経験が少なく参入障壁が高い印象がある。
- ISO9100(航空宇宙防衛機器の品質マネジメントシステム)の発注条件内での位置づけがよく理解できない。

②長期供給保証の要求

- 引き合いがあっても、長期供給への保証が求められる故に取引が成立しないことがある。

③高いレベルの保証

- 第三者に損害が生じた場合、発注側の帰責事由ある場合を除き、製造側が全ての責任を負うという契約条項もみられる。



【衛星製造者の立場から】

④瑕疵の特定の困難さ

- 宇宙ビジネスでは、不具合の検証が事実上できない場合がある。衛星の不具合が生じた場合、どの部分がどの契約に基づき提供されたものか、何の契約に基づく契約不適合の対象となるのか、実際の線引きが難しい場合がある。

⑤宇宙ビジネスに求められる保証への警戒

- 部品メーカー側がかなり品質保証に敏感になっている。そもそも宇宙分野での使用を認めていない部品メーカーもある。宇宙用途に適用した場合は、リスクを一切負わないという合意を求められたこともある。

(2) 留意すべきポイント

1) 品質要件を契約(仕様書)に的確に定めることができる人材の確保

取引上、求められる品質基準・水準を理解し、契約条項に落とし込む力量のある人材の育成や外部人材の確保を考える必要がある。前述のとおり、品質要件を契約上明確に規定することは、より実効的な検査・検収の手続にも繋がるものであり、事後的な契約不適合の発覚リスクを低減させるものである。

2) 保証のレベルの可視化

人工衛星の部品やコンポーネントに関して、契約不適合が存在するか否か(品質保証の範囲内か否

か)という問題の困難さは、「通常備えているべき品質」を想定し難いことがあげられる。もっとも全ての部品やコンポーネントがオーダーメイドであるわけではなく、例えば、汎用品を利用する場合には、当該汎用品において通常求められる一定程度の品質のみを担保責任の対象とするといった運用も検討することが期待される。

また、製造する人工衛星の種別(国プロ、商用、実証、等)に応じた品質保証体系や標準的な契約条項等を整理し、リスクについて明確化することが実現できれば、検査・検収手続や、契約不適合責任の対象か否かの判断の一つの基準ともなる。

3) 適切な責任期間の設定

民法上、契約不適合責任の期間は、発注者が当該契約不適合を知ってから1年以内に受注者に通知を行なった場合に限られるが、この規定は任意規定であり、責任の期間制限は短縮・延長することや排除することも可能である。そのため、契約当事者としては、期間制限についてなんらの規定もしない場合には、契約不適合の発覚時から1年間(ただし、受注者が当該契約不適合を知っていた場合は期間制限はなし。)となるという原則を念頭に、適切な担保責任の期間について協議する必要がある。また、検収時の検査で発見できなかった契約不適合を主張できる期間(商法526条2項では6か月)についても、より長い期間に延長するような特約を定める場合もある。

4) 契約不適合の有無の確認方法

完成した人工衛星に欠陥が認められる場合でも、それがどの部品の欠陥であるのか、その欠陥が納品物の契約不適合によるものなのか、事後的な故障なのかを確認することは容易ではなく、とりわけ人工衛星の打上げ後は、宇宙空間に存在する人工衛星の検査を行うことは容易ではないため、欠陥の分析は困難である。このような契約不適合の有無が不明確な場合であっても契約当事者間で適切にリスク分配できるように、契約上どのように取り決めるべきか検討すべきである。なお、文献によれば、実務上は、人工衛星の打上げ時点以降は免責とすることが一般的とされている³。

5) 部品・コンポーネントに求める保証の範囲の確定

契約不適合に該当するか否かの争いを予防し、受注者側の責任範囲をいたずらに拡大しないためにも、他の契約条項を勘案しながら取引全体の中で合理性のある規定を設けることが望ましい。

3.3.6 第三者の権利処理

人工衛星の製造過程で必要となる技術には、特許権等で保護されている第三者の権利対象が含まれることも珍しくない。第三者の権利侵害を行うことのないように、製造過程における契約段階で、必要な規定を設けることが望ましい。

³ 例えば、Lesley Jane Smith, Ingo Baumann (2011) “Contracting for Space: Contract Practice in the European Space Sector” p. 264 など

(1) 事業者の抱える課題



【部品コンポーネントの立場から】

① 第三者のライセンスの発覚

- 部品・コンポーネントの納入物に、第三者の開発した物品が使用されていたことが発覚した。ライセンスの付与条件として、通常取引より不当なものとなっていることも判明した。

(2) 留意すべきポイント

1) 第三者のライセンスを確認する措置

部品やコンポーネントの納入物に第三者が権利を保有する物品が含まれていないか、契約時および納入検査時に確認するプロセスを設けるのが望ましい。第三者が権利を保有する物品が含まれている場合は、ライセンス条件をクリアすることを契約当事者間の合意として盛り込むべきである。

3.4 まとめ

本調査では、人工衛星製造ビジネスに携わる事業者から法的課題を中心に現状の問題点・課題についての意見の収集を行い、非公開の委員会での議論を経て、人工衛星の製造ビジネスにおける法的課題を整理した。主に、衛星製造関係のビジネスに新規参入を検討する事業者、宇宙関係の取引実務に精通していない事業者を念頭においた記載が多いが、人工衛星の製造事業の契約交渉に携わる必要がある各事業者にも参考になる情報と考えている。

ただし、本調査における考え方は、一般的な考え方や留意事項を示したにとどまっており、実際の個別の取引では、宇宙ビジネスに関する法務について知見を有する法律専門家と相談しながら、契約交渉を行っていただくことを推奨する。

4. 衛星データ等地理空間情報活用技術に関する調査

4.1 地理空間情報活用のための技術及びビジネスモデル(プラットフォーム)調査

欧米等における衛星データ等の地理空間情報活用のための技術及びビジネスモデルに関する調査を実施し、今後の我が国における衛星データ等の地理空間情報の活用促進策の検討を行った。

特に、Microsoft Azure Space 等のクラウド事業者の参入や、欧州 Destination Earth 等の衛星データを利用したデジタルツインの構築といった最新の政策的潮流も踏まえた技術動向分析を実施した。

4.1.1 技術動向調査

技術動向調査では、欧米等における衛星データ等の地理空間情報に関する最新の研究開発動向について調査した。具体的には、以下表 4-1 に示す米国、欧州、豪州における主なプログラム及びプラットフォーム(PF)を対象に調査、整理した。

表 4-1 技術動向調査で対象としたプログラム/プラットフォーム

プログラム/プラットフォーム	国・地域	主体・事業者
Copernicus DIAS	欧州	欧州委員会(EC)、各コンソーシアム
Destination Earth(DestinE)	欧州	欧州委員会(EC)
Open Data Cube(ODC)	豪州	ODC コミュニティ(豪州政府出資あり)
Amazon Web Services (AWS)	米国	AWS
MS Azure Space	米国	Microsoft 社

上述のプログラム及びプラットフォームについて、以下、順次詳述する。

(1) Copernicus DIAS

2017 年より、欧州委員会が民間企業に委託するかたちで、Copernicus データのアクセスを促進するための DIAS(Data and Information Access Service)事業が実施されている。

同事業のもと、CREODIAS、Mundi、ONDA、sobloo、WEkEO からなる 5 つのコンソーシアムがデータプラットフォームを提供している(図 4-1 参照)。

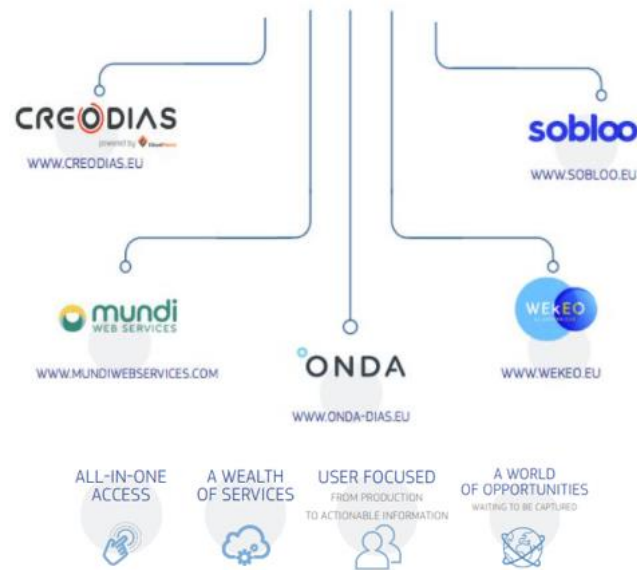


図 4-1 Copernicus DIAS の概観

出所) Copernicus Data and Information Access Services <https://www.copernicus.eu/en/access-data/dias> (2022年2月3日閲覧)

Copernicus DIAS に関する注目すべき最新動向として、ポーランド企業 Creotech 社のコンソーシアム CREODIAS において、2021 年 8 月に Airbus 社とパートナーシップを締結し、同社サービスの再販売を開始したことが挙げられる。これにより、CREODIAS を通じて Airbus 社の超高分解能画像及びサービスが購入可能となっている。今回のパートナーシップにより CREODIAS から入手可能となった画像及びサービスを表 4-2 に示す。

表 4-2 CREODIAS から新たに入手可能となった画像、プロダクト及びサービス

画像、プロダクト	Pléiades 1A & 1B、Spot 6/7、Vision-1、Radar constellation (TerraSAR-X, TanDEM-X, PAZ)、SpotMaps1.5 & 2.5、Elevation 30、DMC Constellation、SMART Report、Elevation 1/4/8/10、WorldDEM、GCPs(地上基準点)
サービス	OneAtlas Services (Living Library、WorldDEM Streaming、Basemap)

出所) CREODIAS Airbus VHR Imagery available https://creodias.eu/news/-/asset_publisher/fzMjey0hHf8j/content/airbus-vhr-imager-available?redirect=%2Fnews&inheritRedirect=true (2022年2月9日閲覧)

また CREODIAS では、クラウドに適した構造を持つファイル形式である COG (Cloud Optimized GeoTIFF) 形式の地球観測データの提供を 2019 年 3 月より開始している。これにより、CREODIAS を通じて Copernicus Sentinel-1 衛星のレベル 1GRD (Ground Range Detected) データ(位相情報を持たない地上投影プロダクト)が COG 形式で入手可能となった。

フランス企業 ATOS 社のコンソーシアム Mundi においても、2021 年 4 月に Maxar WorldView コンステレーションによる超高分解能画像の提供が開始された。これにより、Maxar 社が現在運用中の WorldView-3、WorldView-2、WorldView-1、GeoEye-1 による 30~50cm 空間分解能のマ

ルチ・パンクロ画像に加え、Ikonos、Quickbird、WorldView-4 の過去データにも Mundi からアクセス可能となった。

また、CREODIAS 同様、Mundi でも 2019 年 4 月から Copernicus Sentinel-1 GRD データが COG 形式で入手可能となっている。

(2) Destination Earth(DestinE)

欧州委員会(EC)のイニシアティブである Destination Earth(DestinE)は、超高精度地球デジタルモデル(デジタルツイン)を開発し、環境の変化や人的影響を監視・予測して持続可能な開発を支援することを目的としている。EC による監督、EU 加盟国、科学コミュニティ、その他ステークホルダの協力のもと、ESA、欧州中期予報センター(ECMWF)、欧州気象衛星機構(EUMETSAT)の3者がプログラムを実施する(具体的開発業者等は不明)。

この取組の背景には、2019~2020 年にかけて、欧州では環境政策(A European Green Deal)、データ政策(A European strategy for data)及びデジタル政策(Shaping Europe's digital future)等の発表があり、上記政策実現の一環として、現実を再現可能なデジタルツインを活用するという狙いがある。なお、デジタルツインとは、シミュレーション環境による試験・試算を行うことで、工程における生産効率の改善に用いられているものであり、多くの産業分野で導入が進んでいる。

DestinE のデジタルツインでは、以下の面から政策決定者を支援する計画となっている。

- 地球システム(土地、海洋、大気、生物圏)の進行と人的介入に関する監視とシミュレーション
- 環境災害とその結果としての社会経済危機を予測することによる、人命救助と景気悪化回避
- これまで以上に持続可能な開発のためのシナリオの開発と試験の実現

DestinE を通じ、エビデンスに基づく政策立案、欧州 Green Deal への寄与、データやベンチマーキングモデルへのアクセス、ユーザ固有の予測及び実用的な予測の実現が期待されている。

DestinE の予算は、以下のプログラムから拠出される。

- Digital Europe Programme
 - Digital Europe Programme では、DestinE の実施に対する資金を提供する。
 - Digital Europe Programme は、ビジネス、市民、行政機関にデジタル技術を導入するための EU のファンディングプログラムである。
 - プログラムの全体予算は 76 億ユーロであるが、DestinE への予算割当額は不明である。
- Horizon Europe(European Research Framework programme)
 - Horizon Europe では、DestinE を支援する研究開発のための資金を提供する。
 - Horizon Europe は、EU の研究・イノベーションを支援、促進するためのプログラムであり、EU Framework Programme 第 9 期(FP9)とも呼ばれる。
 - プログラムの全体予算は 955 億ユーロであるが、DestinE への予算割当額は不明である。
- Recovery and Resilience Fund
 - Recovery and Resilience Fund は、DestinE に関連する EU 加盟国の活動のための資金を提供する。
 - Recovery and Resilience Fund は、コロナウイルスのパンデミックによる社会的・経済

的影響を低減し、欧州の経済と社会をより強化するためのプログラムである。

- プログラム全体予算は 7,238 億ユーロであるが、DestinE への予算割当額は不明である。

DestinE の構成を図 4-2 に示す。Open Core Platform が中心に位置付けられており、デジタルツインやアプリケーション・サービスだけでなく、それを支えるクラウド、データソース、高性能計算機(HP C: High Performance Computing)を提供する構成となっている。Open Core Platform はユーザフレンドリかつセキュアなクラウド型デジタルモデリング・オープンシミュレーションプラットフォームであり、多様なデータソースを効率的に管理するため、専用データレイク DestinE Data Lake(図 4-3 参照)を使用する。同データレイクでは、衛星データその他、各種観測データ、社会経済データ(統計)等も提供される。

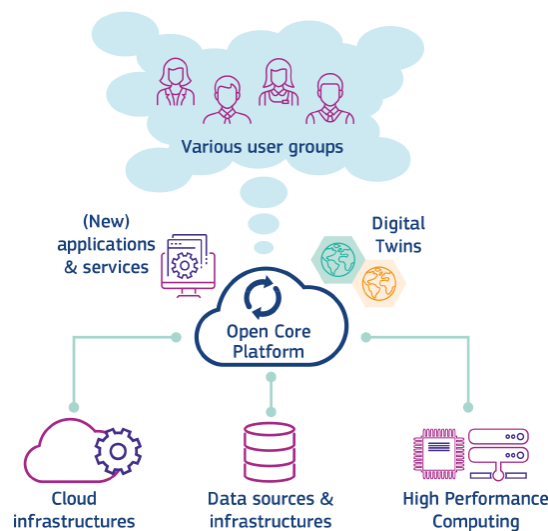


図 4-2 Destination Earth の主要構成要素

出所) European Commission Destination Earth <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/destination-earth> (2022年 2 月 9 日閲覧)

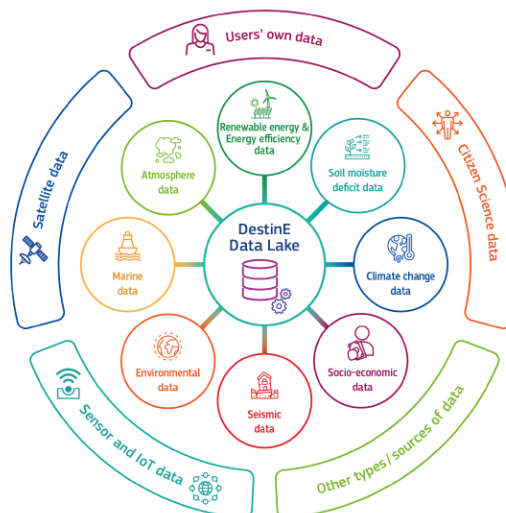


図 4-3 Destination Earth のデータレイク

出所) European Commission Destination Earth <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/destination-earth> (2022年 2 月 9 日閲覧)

DestinE に対するユーザーニーズとして、2050 年までに気候中立 (Climate-neutral) を目指す欧州の取組支援としての気候変動への対応、極端気象や地球物理的要因による自然災害の予測等の自然災害やリスク管理、地球内部の熱の利用等の新プロジェクトを実現する新たな知識を提供するエネルギー分野での利用、灌漑・肥沃化・収穫等を支援する農業分野での利用が挙げられる。DestinE では当初のユーザとして公的ユーザを想定しており、その後段階的に科学及び産業界の多数のユーザに公開することを計画している。

DestinE においては、ユーザの独自データ、市民科学データ、センサ・IoT データ、その他の種類/ソースのデータ等の多様なインプットの一つとして衛星データが含まれる構想となっている。衛星データは、官 (Copernicus)、民 (New Space 企業含む商業企業) 両方のデータの利用が想定されている。

DestinE の今後の計画としては、2021 年秋にプログラムが開始し、完成まで 7~10 年を要する見込みとなっている。主要マイルストーン及びロードマップ (図 4-4 参照) は以下の通りである。当初は Open Core Platform と 2 つのデジタルツインを開発し、段階的にデジタルツインを増やし、最終的にはすべてのデジタルツインを統合する計画となっている。

- 2024 年まで: Open Core Platform 及び最初の 2 つのデジタルツインの開発
 - 当初開発されるデジタルツインは、極端な自然現象向け、気候変動への適応向けの 2 つである。
- 2027 年まで: 特定のセクタのユースケース (海洋等) に利用するため、同 Platform への追加的なデジタルツインの統合
- 2030 年まで: 同 Platform を通じて既に提供されているデジタルツインの収斂を通じた、完全な地球のデジタルレプリカの実現

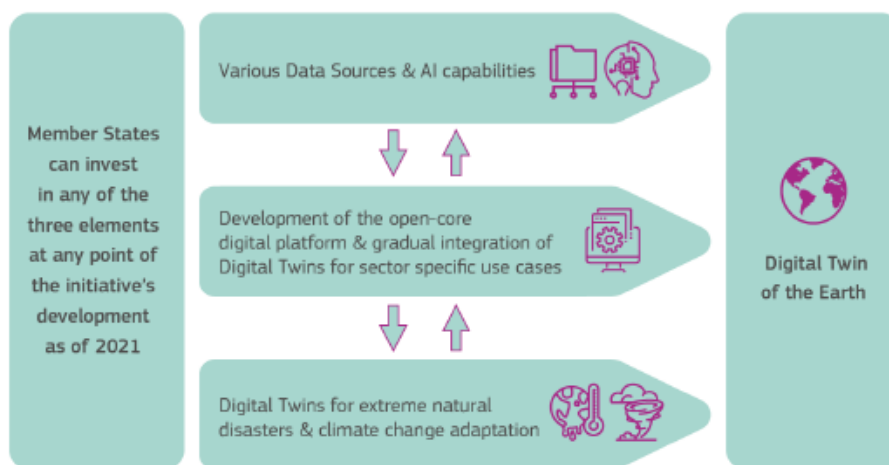


図 4-4 Destination Earth のロードマップ

出所) European Commission Destination Earth <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/destination-earth> (2022年2月9日閲覧)

(3) Open Data Cube (ODC)

Open Data Cube (ODC) は、豪州が主導する Landsat 等の地球観測衛星データをはじめとした「地理空間データを管理 & 分析するオープンソースソフトウェアプロジェクト」である。GitHub にて

ODC 関連のソースコードが公開されている。

ODC の構造を図 4-5 に示す。第 1 階層であるデータではオープンデータを利用して解析が容易な“ARD(Analysis Ready Data)”を整備し、第 2 階層であるインフラ構築から第 3 階層であるアプリケーション開発までを豪州政府が支援し、同国の地球観測・地理空間利用市場の拡大を狙う。2025 年までに豪州内で 15000 人の新規雇用、80 億米ドル/年の経済効果の実現が目標とされている。

ODC の特徴として、政府ユーザの存在や現時点での競争力の低さが政府「インフラ」投資の正当性となっていること、国内のサービス事業者の育成・市場拡大を支援することにより海外展開を行い世界市場の獲得を志向すること、オープンソースのためボトムアップ型で独自に ODC 整備を進める国(スイス、韓国等)も存在することが挙げられる。政府が「インフラ」投資を行う一方で、技術開発は民間が行う。

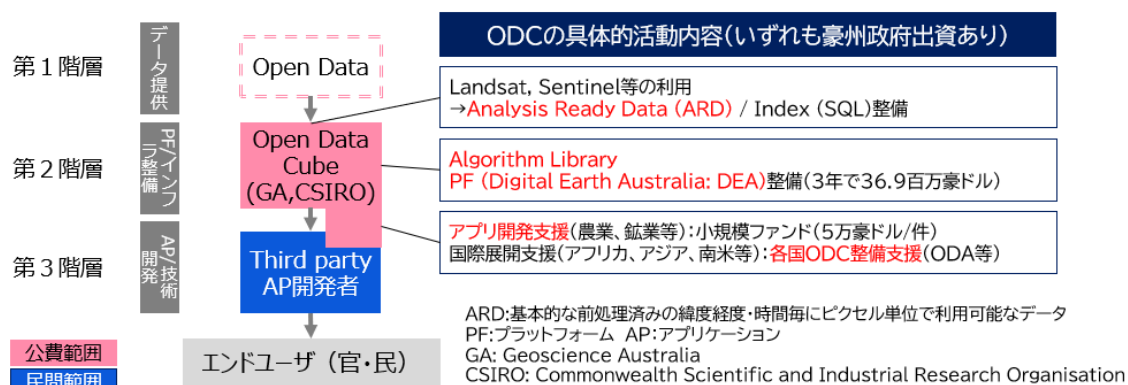


図 4-5 Open Data Cube (ODC)の各階層の責任範囲と具体活動内容

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

ODC については、技術面で特筆すべき最新動向は見られないが、ODC のアジア域等での導入が進展しており、後述のアジア展開調査で取り上げている。

(4) Amazon Web Services (AWS)

Amazon Web Services (AWS)では、2018 年 11 月に地上局サービス AWS Ground Station を立ち上げ、2020 年 6 月には宇宙産業に特化したビジネス部門として Aerospace and Satellite Solutions を立ち上げており、宇宙産業に対するクラウドコンピューティングサービスの提供を強化している。

直近の動向として、データ連携関連では、2021 年 4 月、AWS Ground Station が AWS のクラウド型オブジェクトストレージサービス Amazon S3 へのデータ配信のサポートを開始した。これにより、大容量データの保存、低コストのアーカイビング、自動化されたプロセスチェーンの開発が容易となった。

地上局関連では、AWS はデータセンター等に受信アンテナを設置し、AWS Ground Station が利用可能な地域を継続的に拡大している。現状、AWS Ground Station が対応する地域は以下の通りである。以下の地域では、AWS Ground Station アンテナを使用してデータを送受信できるほか、AWS Ground Station コンソールを使用して衛星とのコンタクトが予約できる。2021 年 5 月にはソウルが追加されている。

- 米国西部(オレゴン)

- 米国東部(オハイオ)
- 欧州(ストックホルム)
- 欧州(アイルランド)
- アジアパシフィック(シドニー)
- アジアパシフィック(ソウル)
- 中東(バーレーン)
- アフリカ(ケープタウン)
- ハワイ(米国) *
- 米国東部(バージニア北部) **
- 欧州(フランクフルト) **

* AWS Ground Station アンテナを使用したデータの送受信可能のみ可能な地域

** AWS Ground Station コンソールを使用した衛星とのコンタクト予約のみ可能な地域

また、2021 年 6 月、AWS Ground Station と GSaaS (Ground station as a Service) サービスを提供するインフォステラ社との提携が発表された。AWS Ground Station がインフォステラ社のクラウド型地上局プラットフォーム StellarStation 内で利用可能となり、衛星オペレータが StellarStation を通じてアクセスできる地上局の選択肢が拡大した。

さらに、地上局関連サービスの拡充のため、2021 年 9 月、AWS Ground Station は新たな機能である Licensing Accelerator を発表した。同機能は衛星オペレータが衛星の打上げ前に行う各種ライセンスの取得を支援するものであり、衛星ミッションに関するいくつかの質問に回答することで、各種ライセンス取得に関するステップバイステップのガイドが入手可能となっている。AWS のユーザは、Licensing Accelerator を無償で利用できる。

また、AWS 社は 2021 年 3 月、宇宙セクタへの進出強化の一環として、英国のベンチャー投資企業 Seraphim Capital 社と共同で、宇宙スタートアップ企業向けの 4 週間のメンタリングプログラム AWS Space Accelerator を立ち上げている。

(5) MS Azure Space

Microsoft 社が 2020 年10月に発表した Azure Space は、Microsoft 社のクラウドコンピューティングサービス Azure を活用した宇宙向け事業である。

Azure では、図 4-6 に示すさまざまな解析ツールが提供されている。また Azure では Airbus 社、Satellogic 社等のパートナー企業の人工知能(AI)／機械学習(ML)のツールも Azure 上で利用可能であり、2021年 4 月には Thales Alenia Space 社が開発した自動画像処理ソリューション DeeperVision が追加されている。



図 4-6 Azure で提供されている解析ツール

出所) Microsoft 社資料

また Azure Space ではシミュレーションツール Azure Orbital Emulator が提供されている。Azure Orbital Emulator は宇宙システムの開発者向けツールであり、モデルベースによる Hardware in the loop/Software in the loop での大規模コンステレーションのシミュレーションが可能であり、打上げ前に機械学習アルゴリズムを訓練することができるメリットがある。同ツールは政府向けサービスである Azure Government 環境ですでに利用されているほか、無線周波数の伝搬検証利用事例も有している。

直近の動向として、Azure Space ではエッジでの宇宙データ分析実証を進めている。2021 年 5 月には、エッジ処理端末 Azure Stack Edge(後述)の車両への搭載実験について発表がなされた。同取組では、Ball Aerospace 社と協力し、Azure Stack Edge を車両に搭載することで、エッジでの機械学習アルゴリズム処理による活動や特徴の検知が検証された。Telesat 社の衛星を通じ、シミュレートされた赤外線データを、データセンター内の Azure、及び Azure Stack Edge デバイスを搭載した車両に直接送信したところ、Azure によって従来の地上処理に比べ 5 倍の高速化が図られることが実証された(図 4-7 参照)。



図 4-7 エッジ処理デバイス Azure Stack Edge を搭載した車両

出所) Microsoft Azure Ground processing with space data 5x faster with Azure
<https://azure.microsoft.com/ja-jp/blog/ground-processing-with-space-data-5x-faster-with-azure/> (2022年2月9日閲覧)

また、Azure Stack Edge の航空機への搭載実験も行われている。同取組では、SpaceX 社、Ball Aerospace 社と協力し、Azure Stack Edge を米空軍の航空機コックピットに搭載し、コックピット内にあるカメラを元に行動を検出する実験を実施した。コックピットから分析情報(リアルタイムな分析情報を含む)が送信され、それを SpaceX 社の Starlink 衛星を通じて Ball Aerospace 社のアンテナで受信した。Starlink 衛星と航空機を常時接続可能な状態にし、エッジで得た情報をクラウドやエッジ側で処理することで、地上局と航空機を密に連携し、瞬時の分析が可能であることが実証された。

これらの実証に用いられた Microsoft 社のエッジ処理端末 Azure Stack Edge の諸元を表 4-3 に示す。同端末では、Hardware as a Service として容易に利用が開始でき、データに近いエッジでのアプリケーションの実行、Hardware accelerated AI/ML によるデータ分析と実用的なインサイトの入手、クラウド～エッジ間での効率的かつ容易なデータ移動が可能であり、活用シナリオとしてエッジ・遠隔地での処理、エッジでの機械学習、IoT、法規制遵守、エッジからクラウドへのネットワークデータ移動等が想定されている。

表 4-3 Azure Stack Edge Pro の諸元

仕様	詳細
CPU	2 X インテル Xeon Silver 4214 (Cascade Lake) CPU 物理コア 24 個(CPU 当たり 12 個) 論理コア 48個(vCPUs) (CPU 当たり 24 個)
RAM	128 GB
ローカルキャッシュ容量	8 TB NVME フラッシュストレージ
データ保護／セキュリティ	AES 256 ビット暗号化方式
フォームファクタ	1U ラックマウントサーバ、奥行き 29.6 インチ(約 75.2cm)
ネットワークインターフェース	4x 25Gbe SFP+, 2x1 GbE
Accelerated ML	NVIDIA Tesla T4 GPU × 2 まで
電圧	110/240 (50/60 Hz)

出所) Microsoft Azure Stack Edge Pro https://azure.microsoft.com/mediahandler/files/resourcefiles/azure-stack-edge-pro-datasheet/DATASHEET_Azure_Stack_Edge_Pro.pdf 2022年 2 月 9 日閲覧



図 4-8 Azure Stack Edge Pro の外観

出所) Microsoft Azure Stack Edge Pro https://azure.microsoft.com/mediahandler/files/resourcefiles/azure-stack-edge-pro-datasheet/DATASHEET_Azure_Stack_Edge_Pro.pdf (2022年 2 月 9 日閲覧)

地上局については、Azure Space では他社地上局ネットワークの活用をベースに、自社地上局の設置も進めている点が特徴的である。他社地上局については、Amersat 社、Kratos 社、KSAT 社、Kubos 社、Viasat 社、US Electrodynamics 社と提携し、これら企業の地上局ネットワークが利用可能となっている。自社地上局については、2021 年 4 月に 1 か所目として米国ワシントン州の地上局が公開され、今後スウェーデン、南アフリカ、シンガポール、チリ、ドバイにも地上局を配置し、計 6 か所を整備予定としている(図 4-9 参照)。

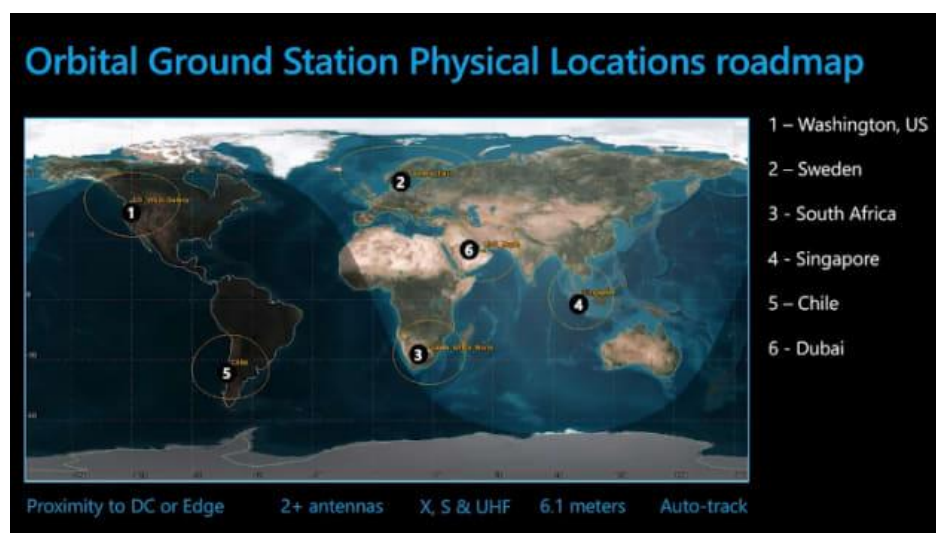


図 4-9 MS Azure Space の自社地上局ネットワークの展開予定図

出所) CNBC Microsoft unveils Azure Orbital, competing with Amazon to connect satellites to the cloud
<https://www.cnbc.com/2020/09/22/microsoft-azure-orbital-satellite-service-to-compete-with-amazon-aws-.html> (2022年 2 月 9 日閲覧)

4.1.2 ビジネスモデル等調査

ビジネスモデル等調査では、表 4-4 に示す米国、欧州、豪州の代表的なプラットフォームが開発・提供している技術・サービス及びビジネスモデルを整理した。具体的には、プラットフォーム毎に関連するステークホルダーと構成要素を整理し、そのプラットフォームとどのような価値交換が行われているかを図 4-10 に示すフレームに基づき整理・分析した。ステークホルダーはユーザやパートナー(サードパーティ)であり、構成要素は技術やサービスである。

衛星データ等プラットフォームのビジネスモデルは、以下の 3 分類が想定される。本調査対象がこのいずれに該当するか、その背景や成果の最新状況も含め調査・分析を実施した。

1. インフラ型:コンピューティングやストレージ等のクラウドサービスを提供するプラットフォーム
2. マーケットプレイス型:アプリケーションやアルゴリズム等のサービスも提供するプラットフォーム
3. 衛星データを主としない開発環境プラットフォーム型:AI 開発環境等のサービスも提供するプラットフォーム

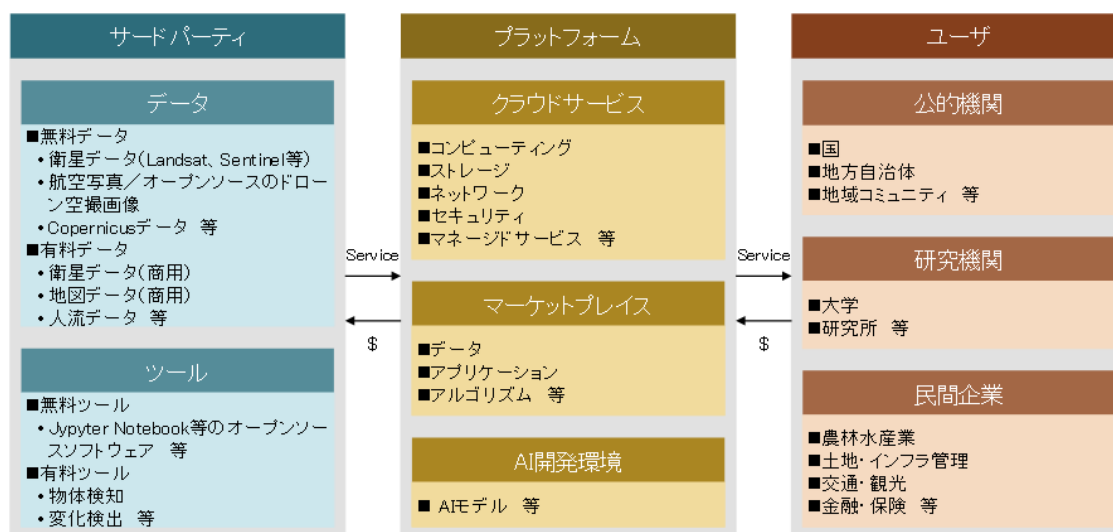


図 4-10 衛星データ等プラットフォームのステークホルダ・構成要素(技術・サービス)・価値交換
出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

表 4-4 ビジネスモデル等調査で対象としたプラットフォーム

プログラム/プラットフォーム	国	主体/事業者
Copernicus DIAS	欧州	欧州委員会(EC)、各コンソーシアム
Open Data Cube(ODC)	豪州	ODC(豪州政府出資あり)
Amazon Web Services (AWS)	米国	AWS
MS Azure Space	米国	Microsoft 社

上記のプラットフォームについて、以下、順次詳述する。

(1) Copernicus DIAS

まず Copernicus DIAS の 5 つのコンソーシアムについて、各サービスの概観を表 4-5 に示す。これらプラットフォームにおいて特徴的な点は以下の通りである(同表内で赤字ハイライト)。

- 主要マーケット:農業を対象とするプラットフォームが多い(CREODIAS、Mundi、sobloo)。また、金融・保険等の地球観測データの非伝統的ユーザもターゲットとしている(Mundi、sobloo)。
- ユーザ数:試験利用段階であるが、プラットフォーム間でユーザ数にばらつきがある。営業努力の違いもあり、特に CREODIAS は約 4000 名(2021 年 1 月時点)と多くのユーザを獲得している。
- 衛星データ:商用データもプラットフォームで利用(購入)可能となっている。特に CREODIAS では韓国(KOMPSAT)や中国(Jilin)、ONDA では米国のデータ(WorldView 等)も購入可能となっている。
- 課金モデル:地球観測衛星データの販売では、レベニューシェアを行っている。

表 4-5 Copernicus DIAS の各サービスの概観

	CREODIAS	Mundi	ONDA	sobloo	WEkEO
リード企業 (企業売上高)	ポーランド・CreoTech (765万米ドル、2020年)	仏国・Atos (111.81億ユーロ、2020年)	イタリア・Serco (39億ポンド、2020年)	仏国・Airbus (499億ユーロ、2020年)	ECMWF, EUMETSAT, Mercator Ocean
主要 マーケット	農業、自然環境	農業、自然環境、都市計画、エネルギー、金融、保険、交通、観光、小売	公開情報からは不明	農業、海事、保険	気象、海洋
登録ユーザ数	4,000人程度	3,000人以上	800人程度 (2019年6月資料)	無料ユーザが1,000人程度	2,000人程度
衛星データ (灰色ハッチは将来計画)	• Sentinel-1/2/3/5P • Landsat-5/7/8 • ENVISAT • SMOS • Jilin-1(商) • KazEOSat(商) • KOMPSAT-2/3/3A/5(商)	• Sentinel-1/2/3/5P • Landsat-8 • COSMO-Skymed • ユーザ保有データ	• Sentinel-1/2/3/5P • Landsat-8 • ENVISAT • Deimos-2(商) • GeoEye-1(商) • KOMPSAT(商) • QuickBird(商) • WorldView-1/2/3/4(商)	• Sentinel-1/2/3/5P • Muscate • Landsat-8 • Pleiades • Spot-6/7 • TerraSAR-X	• Sentinel-1/2/3/5P
Copernicus データ	• CAMS (Atmosphere) • CEMS (Emergency) • CLMS (Land) • CMEMS (Marine)	• CEMS (Emergency) • CLMS (Land)	• CAMS (Atmosphere) • CLMS (Land) • CMEMS (Marine)	• C3S (Climate) • CAMS (Atmosphere) • CEMS (Emergency) • CLMS (Land) • CMEMS (Marine)	• C3S (Climate) • CLMS (Land) • CMEMS (Marine) • CAMS (Atmosphere)
その他データ (灰色ハッチは将来計画)	• 標高(DEM)データ • 高度データ	• in-situデータ	なし	• 人流データ	なし
主要 提供サービス	• クラウド環境 • マーケットプレイス • サブスクリプション • 従量課金	• クラウド環境 • マーケットプレイス	• クラウド環境 • マーケットプレイス	• クラウド環境 • マーケットプレイス	• クラウド環境 • マーケットプレイス
課金モデル	• サブスクリプション • 従量課金 • レベニューシェア(データ)	• サブスクリプション • 従量課金	• サブスクリプション • 従量課金	• サブスクリプション • 従量課金	• サブスクリプション

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

続いて、これらのコンソーシアムのうち、もっとも収益性の高いプラットフォームづくりを志向している CREODIAS を対象とし、ビジネスモデルを整理した結果を図 4-11 に示す。

CREODIAS のビジネスモデルは「インフラ型+マーケットプレイス型」に該当する。CREODIASでは、コンピューティングやストレージ等のクラウドサービスを提供することで収益を生み出している。必要なリソースや期間が定まっている場合はサブスクリプション型を、必要なリソースが変動する場合は従量課金制の課金モデルを適用している。データのマーケットプレイスでは、ユーザからの売上の通常 10% 分がプラットフォーム側の取り分となっている。

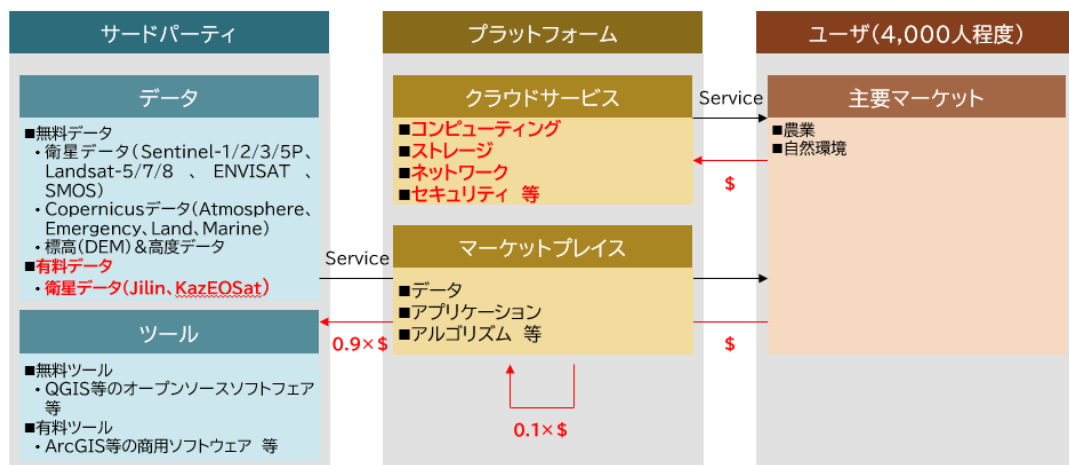


図 4-11 Copernicus DIAS (CREODIAS) のビジネスモデル

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

(2) Amazon Web Services (AWS)

AWS のビジネスモデルを整理した結果を図 4-12 に示す。

AWS のビジネスモデルは、「インフラ型+マーケットプレイス型+衛星データを主としない開発環境プラットフォーム型」に該当する。AWS では、GSaaS(Ground Station as a Service)として、アンテナの使用量(分単位)に応じた従量課金制の課金モデルが適用される。取得した衛星データに対するコンピューティングやストレージ等のクラウドサービス、アプリケーションやアルゴリズム等のマーケットプレイス、また AI 開発環境等の開発環境プラットフォームとして収益を生み出している。AWS を通じ、衛星データの取得、クラウド環境、AWS の各種既存サービスによる解析、開発が一気通貫で提供されている。

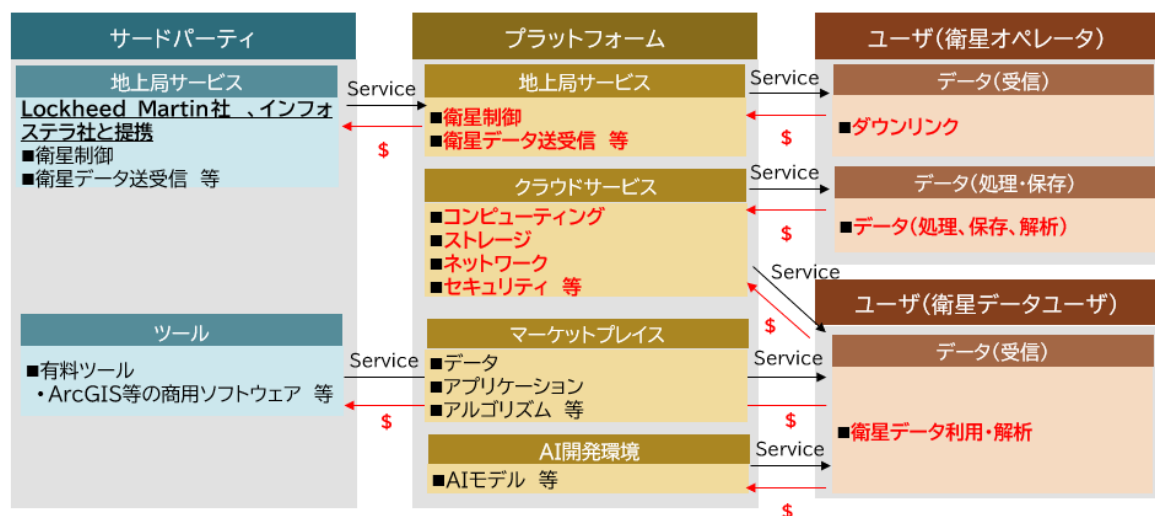


図 4-12 AWS のビジネスモデル

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

(3) MS Azure Space

Azure Space のビジネスモデルを整理した結果を図 4-13 に示す。

Azure Space のビジネスモデルは、「インフラ型+マーケットプレイス型+衛星データを主としない開発環境プラットフォーム型」に該当する。GSaaS(Ground Station as a Service)として、アンテナの使用量(分単位)に応じた従量課金制の課金モデルが適用される。取得した衛星データに対するコンピューティングやストレージ等のクラウドサービス、アプリケーションやアルゴリズム等のマーケットプレイス、また AI 開発環境等の開発環境プラットフォームとして収益を生み出している。AWS 同様、衛星データの取得、クラウド環境、Azure の各種既存サービスによる解析、開発が一気通貫で提供されている。

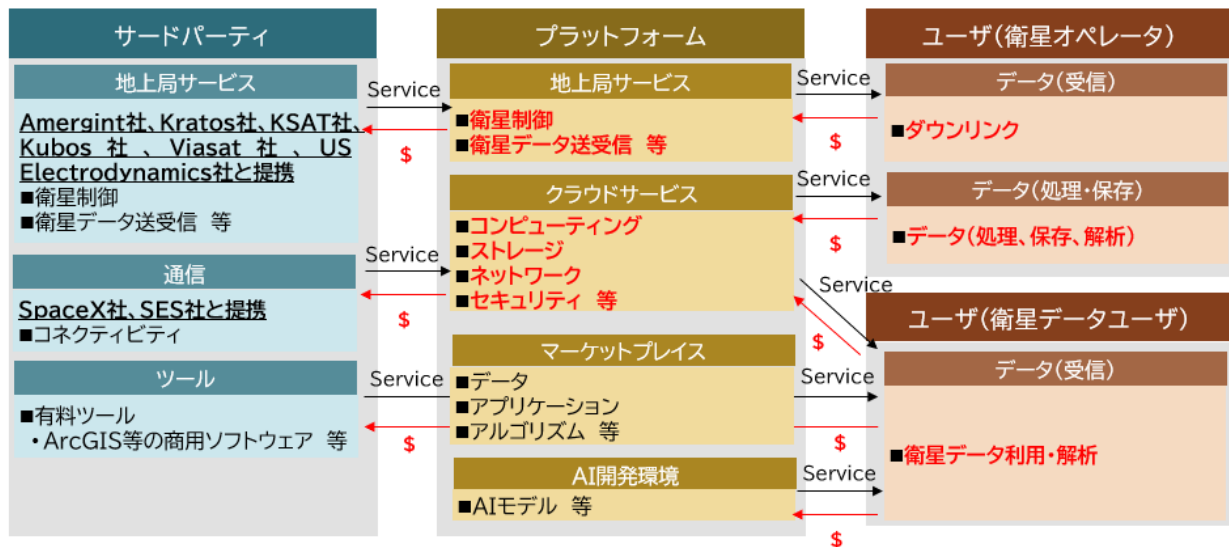


図 4-13 Azure Space のビジネスモデル

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

(4) Open Data Cube (ODC)

ODC について、ビジネスモデルを整理した結果を図 4-14 に示す。

ODC のビジネスモデルは、プラットフォーム自体から収益を生み出すのではなく、第 3 階層のサードパーティアプリ開発者の収益獲得に寄与することを志向するものである。ODC はオープンソースソフトウェアプロジェクトであり、上述の Copernicus DIAS (CREODIAS)、AWS、Azure Space のようなプラットフォームビジネスではなく、プラットフォームを利用してサードパーティアプリ開発者／サービス情報提供者の収益化に貢献する構造となっている。

豪州では第 1 階層～第 3 階層にわたって政府出資がなされており、国内事業者の支援を図っている。

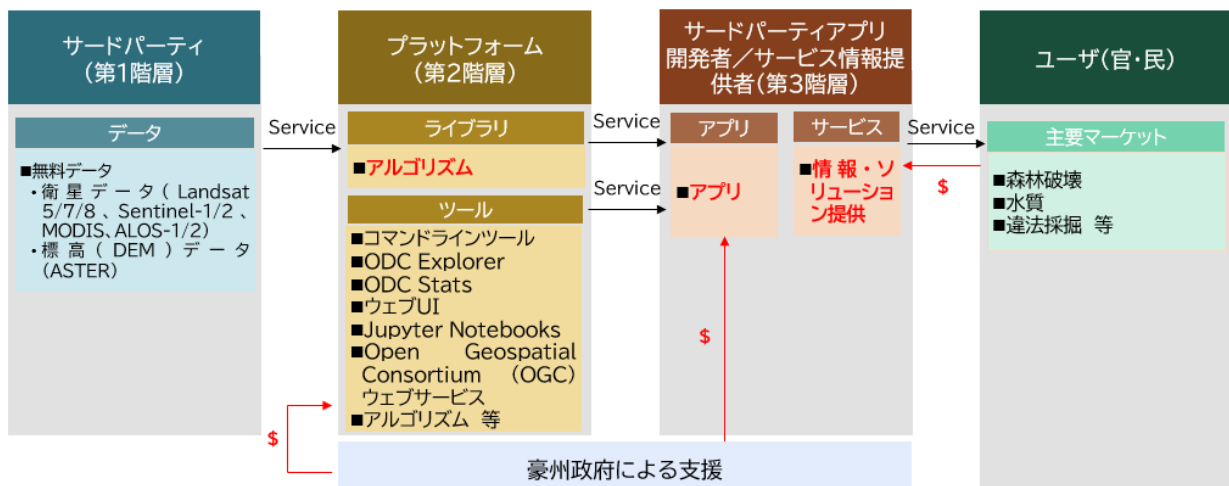


図 4-14 ODC のビジネスモデル

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

4.1.3 アジア展開調査

アジア展開調査では、前述のビジネスモデル調査で取り上げた米国、欧州、豪州の各プラットフォームに加え、中国のデータセンター及びデータプラットフォームについて、アジアにおける展開状況を調査した。

(1) Copernicus DIAS

Copernicus DIAS では、オーストラレーシア(Australasia)地域における Sentinel 衛星データのゲートウェイとして、The Copernicus Australasia Regional Data Hub を通してオープン&フリーで Sentinel 衛星データを提供している。本 Hub は、Geoscience Australia(GA)が英連邦の代表として欧州委員会(EC)と協力契約を、ESA 及び EUMETSAT と技術契約を締結して実現した。

本 Hub は、豪州の政府機関 5 者から構成されるコンソーシアムが開発資金を提供し、運用されている。コンソーシアムメンバは以下の通りである。

- Geoscience Australia(GA)
- The New South Wales Department of Planning, Industry and Environment
- Queensland Department of Environment and Science
- Western Australian Land Information Authority
- The Commonwealth Scientific Industrial Research Organisation

ユーザは、本 Hub の運用に資金提供している政府パートナー、産業界、研究セクタ、学術界、オーストラレーシア地域の非政府セクタであり、ポータルサイト Sentinel Australasia Regional Access (SARA)やサーバを通じ、図 4-15 に示す本 Hub の関心領域に関する Sentinel 衛星データ(Sentinel-1/2/3/5P)を利用できる。SARA では直感的なマップに基づくデータ検索やダウンロード機能が利用可能であり、Python API にも対応している。

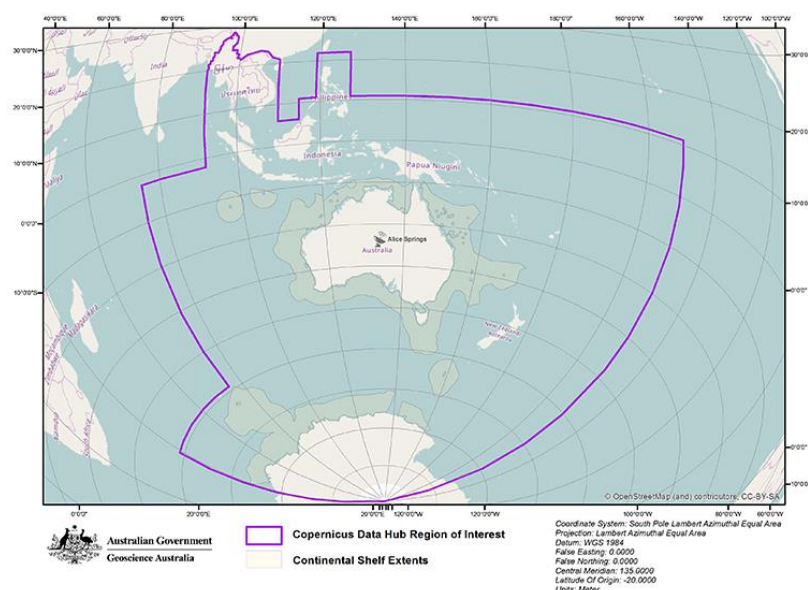


図 4-15 The Copernicus Australasia Regional Data Hub の関心領域(ROI)

出所) The Copernicus Australasia Regional Data Hub Region of interest (ROI)
<https://www.copernicus.gov.au/user-guide> (2022年 2 月 9 日閲覧)

(2) Amazon Web Services (AWS)

AWS のアジア展開状況は以下の通りである。

- 2021 年 5 月、アジア地域での AWS Ground Station サービスとしてソウル・リージョンを追加した。
- 2021 年 12 月、アジア地域の新たな AWS リージョンとしてジャカルタリージョンを開設した。

(3) MS Azure Space

Azure Space では、アジアにおいて複数の Azure データセンターリージョンの新規開設を計画している。Microsoft 社は 2020 年～2021 年にかけて、台湾、インドネシア、マレーシアにデータセンターリージョンを開設する計画を発表しており、これにより信頼性の高いクラウドサービスの現地での提供、世界水準のデータセキュリティ及びプライバシーの実現、データの同国内での保存を実現する計画である。このデータセンターリージョン開設は、Microsoft 社が各国の成長や DX 促進を支援する取組の一環であり、各国のデジタル人材の能力開発等の支援も行われる。各国の取組は以下の通りである。

- 台湾
 - 2020 年 10 月、Microsoft 社の取組 Reimagine Taiwan の一環として、台湾におけるデータセンターリージョンの開設予定が発表された。なお稼働開始時期は未発表である。また 2024 年末までに現地人材 20 万人のデジタル能力開発を行うとされている。
- インドネシア
 - 2021 年 2 月、Microsoft 社の取組 Berdayakan Ekonomi Digital Indonesia(インドネシアのデジタル経済をエンパワーする)の一環として、インドネシアにおけるデータセンターリージョンの開設予定が発表された。なお稼働開始時期は未発表である。
- マレーシア
 - 2021 年 4 月、Microsoft 社の取組 Bersama Malaysia の一環として、マレーシアにおけるデータセンターリージョンの開設予定が発表された。なお稼働開始時期は未発表である。また 2023 年末までに追加的に現地人材100 万人のデジタル能力開発を行うとされている。

(4) Open Data Cube (ODC)

ODC については、オープンソースソフトウェアプロジェクトであることから、アジア各国で独自の整備が進められている。ODC 導入計画が確認されたアジアの国々を以下に示す。

- ベトナム
 - Vietnam Data Cube のもと、ODC を活用した森林監視、水稻監視、水監視等の利用が行われている。また Vietnam Data Cube における試験 Cube として、Mekong Data Cube が立ち上げられており、対象地域やシステムスケールの拡大が志向されている。Mekong Data Cube では、ベトナムに加え、カンボジア、ラオス、タイも参加する計画である。
- 中国
 - China Data Cube(CDC)のもと、ODC をベースとし、システムパフォーマンスの向上、

地球観測データタイプの増加、より豊富な地域的利用事例を実現する取組が行われている。

- 台湾
 - TAIWAN Data Cube(TWDC)のもと、衛星画像での地球環境変化のマルチテンポラル分析を支援する高効率なクラウドコンピューティングプラットフォームの構築が行われている。
- 韓国
 - 韓国の地球観測衛星 KOMPSAT-3 の衛星データの取込みを ODC を活用して行う取組が行われている。

(5) 中国のデータセンター及びデータプラットフォーム

中国における主なデータセンター及びデータプラットフォームとして、CNSA-GEO プラットフォーム及び SIWEI earth(四維地球)がある。

CNSA-GEO プラットフォームは、2019 年 11 月に中国国家航天局(CNSA)が公開した衛星データ共有プラットフォームであり、同プラットフォームを通して高分(Gaofen)1号及び 6 号が収集した 16m 分解能の衛星データにアクセス可能となっている。

SIWEI earth(四維地球)は、中国企業である中国四維測繪技術有限公司(China Siwei Surveying and Mapping Technology 社)が運営するリモートセンシングビジュアルデータクラウドサービスである。同サービスでは中国の資源(Ziyuan)、高分(Gaofen)、環境減災(Huanjing)シリーズ衛星計20機超のデータにアクセス可能で、データ総量は 35PB 規模であり、日々20TB 規模のデータが追加されている。中国四維測繪技術有限公司は、中国の国有企業である中国航天科技集団(CASC)の傘下企業である。SIWEI earth では、表 4-6 及び図 4-16 に示すデータやサービスが提供されており、農業、政府、土地、水利等の分野での利用が想定されている。

表 4-6 SIWEI earth(四維地球)が提供するデータ及びサービス

データ/サービス	概要
あらゆる分解能の画像のオンライン利用	あらゆる分解能(0.8m~2m)の画像がオンラインで入手可能
毎日の画像	リモートセンシング画像は毎日追加され、高精度・高品質の過去画像が入手可能
モザイク画像	中国の行政区域を境界としたモザイク画像を提供
物体分類	画像をインプットとする物体分類(建築物、水域等)サービスを提供
変化検知	特定エリアの変化前後の画像をインプットとする変化検知(建築物、水域等)サービスを提供
目標検知	画像をインプットとする目標検知(石油タンク、航空機、船舶等)サービスを提供
カスタマイズされたエリアベースマップ生成	特定エリアについて、色を統一しモザイク処理した画像を提供
API 提供	ユーザは API を利用してクラウド上のデータやサービスに簡単にアクセス可能

出所) SIWEI earth(四維地球)ウェブサイトを基に三菱総合研究所作成

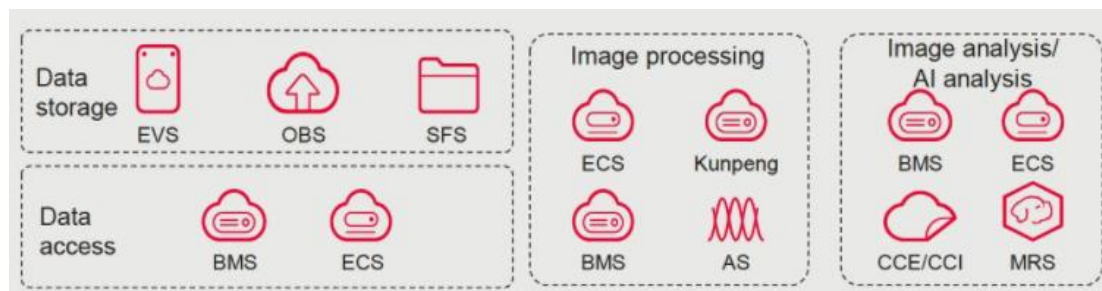


図 4-16 SIWEI earth(四維地球)の機能

出所) Intelligent Storage Helps Siwei Earth Build a World-Leading Remote Sensing Cloud Platform-SiweiXuqilong <https://e.huawei.com/jp/material/event/HC/701f48062c38451bb9ce5e61b6d74104> (2022年2月16日閲覧)

また上述の CNSA-GEO プラットフォーム及び SIWEI earth(四維地球)には、HUAWEI 社(華為技術有限公司)が運営する HUAWEI CLOUD が使用されている。HUAWEI CLOUD は、中国国内(北京、上海、広州、香港)及び海外(シンガポール、タイ、南アフリカ、メキシコ、サンパウロ、チリ)にデータセンターを有している。

4.1.4 まとめ

技術動向調査及びビジネスモデル調査を通して、Copernicus DIAS や ODC 等の政府系衛星データプラットフォームは現状では商用化には至っていないことが明らかとなった。一方で、Copernicus DIAS においては Airbus 社や DigitalGlobe 社の高分解能商用画像提供や、COG 採用等が進んでいる。また各プラットフォームでは、解析ツール等のマーケットプレイス、通信、地上局サービス等においてサードパーティ連携が進展している。具体的には、AWS 及び Azure においてマーケットプレイスを通じたサードパーティからの解析ツール等提供が進んでいること、Azure において KSAT 等の地上システムサービスや Starlink 等の通信サービスとの連携が図られていること、AWS Ground Station が Infostellar 社のシェアリング対象に含まれたことが挙げられる。Azure Stack Edge に見られる通り、クラウドエッジでの分散処理を前提としたアーキテクチャ構築も進んでいるが、これには赤外等の大容量データの利用にあたって通信負荷の低減する狙いがある。また欧州 Destination Earth(DestinE)では、クラウド、データソース、HPC、解析ツール等に加え、シミュレーション環境としてのデジタルツインを整備することにより、クラウドリソースを活用しながらシミュレーションにおける付加価値を生み出す取り組みが進行している。

アジア展開調査については、Azure では台湾、マレーシア、インドネシア、AWS ではインドネシア等、データセンター開設が進んでいるほか、AWS Ground Station サービスがソウル・リージョンへの拡張を通じてアジア展開を強化していることを確認した。

4.2 官民連携動向調査

4.2.1 欧米動向調査(官による民データ調達・利用連携)

欧米等主要機関における官による民間衛星データ等調達・連携等の事例について、連携の背景・目的、連携の具体内容、成果と課題・障壁、今後の計画等)、連携パターン分類、及びそれらを実現するプラットフォームやシステムの状況について、整理・分析を行った。

また我が国の状況(官側のニーズ、連携可能な民間企業パートナー候補等)を踏まえ、我が国における官による民間データ連携の在り方を検討した。

本欧米動向調査で対象とした、欧米における官による主要な民データ調達・利用連携の取組一覧を表 4-7 に示す。米国家偵察局(NRO)、米国家地理空間情報局(NGA)、欧州宇宙機関(ESA)による主な民間調達の取組として 9 件を取り上げた。

表 4-7 欧米動向調査で対象とした官による民データ調達・利用連携の取組一覧

取組名	実施主体
商業 GEOINT 戦略(それに基づく個別調達実績含む)	NGA
EnhancedView 契約	NRO
Global Enhanced GEOINT Delivery (G-EGD)	NGA
NRO 研究契約	NRO
Electro-Optical Commercial Layer (EOCL)	NRO
商業無線周波数(RF)GEOINT 試験プログラム	NGA
Broad Agency Announcement (BAA) for Strategic Enhancements	NRO
Director's Innovation Initiative (DII)	NRO
Third Party Mission (TPM)	ESA

出所)各種資料より三菱総合研究所作成

以降ではこれらの取組について順次詳述する。

(1) 米国における取組

米国については、衛星インテリジェンス機関である NRO 及び NGA における主な取組を 8 件取り上げた。米国における主な民間活用戦略及びプログラムの全体像を図 4-17 に示す。

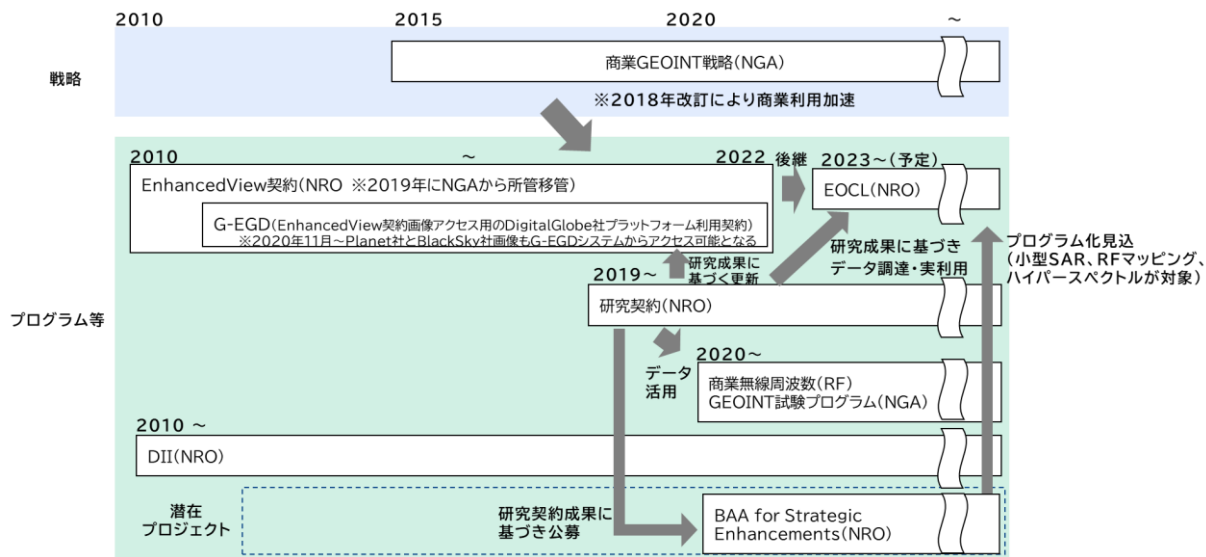


図 4-17 米国 NRO 及び NGA における民間活用戦略と主要プログラム

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

以降、上位戦略にあたる「商業 GEOINT 戦略」について示した上で、これら個別のプログラムの詳細を示す。

1) 商業 GEOINT 戦略(NGA)

(1) 目的

商業 GEOINT 能力を活用し、ミッションニーズを満たす最適なソースの組み合わせを採用するため、インテリジェンス・コミュニティ、戦闘コマンド、軍、連邦民生パートナーと協力して新たなサプライヤ及びサービスを取り入れることを目的としている。

(2) 概要

NGA が2015 年 10 月に発表した、商業地理空間能力の活用戦略について示した文書である。2018 年 10 月には改訂版が発表されている。商業 GEOINT 戦略では、遂行における必須事項として以下 5 点を挙げている。

- 協業ネットワークを通じた、商業 GEOINT 産業及び能力の状況に関する学習と理解
- 商業 GEOINT 分析、アルゴリズム、サービス、プロダクト、画像、データの探索と評価
- サプライヤベース及び能力における多様性と抗たん性を促進するための、産業全体への影響と投資
- 十分に成熟したミッション関連の商業 GEOINT 能力の加速と取得
- ミッション要件に対応するための商業運用の採用と統合

商業 GEOINT 戦略の一環として、NGA は Planet 社や Capella Space 社と契約を締結しており、データやプロダクトの提供を受けている。

商用画像調達は、元々は NGA の所管であり同戦略のもとで進められていたが、2018 年の画像調達の NRO への移管に伴い、NRO がその活動を推進することとなった。2018 年 9 月の同戦略の改訂は、この役割移管を踏まえた内容となっている。なお、現在 NGA は解析能力の民間

調達を所管する役割分担となっており、画像調達を行う NRO と連携して民間活用の検討を進めている。

(3) 予算

商業 GEOINT 戦略に関する予算は非公表である。なお契約金額が公開されている民間企業との契約として、NGA と Planet 社の 1,400 万米ドルの 1 年契約(2017 年 7 月)、同じく両者の 590 万米ドルの半年契約及び同契約の半年延長(2018 年 10 月、2019 年 4 月)等があるが、これらの契約と商業 GEOINT 戦略との関係は明示されていない。

(4) 主な動向

商業 GEOINT 戦略に関する近年の主な変遷を表 4-8 に示す。

表 4-8 商業 GEOINT 戦略の主な変遷

年月	内容
2015 年 10 月	• NGA が「商業 GEOINT 戦略」文書を発表
2016 年 10 月	• 商業 GEOINT 戦略の一環として、NGA と Planet 社が商用画像データの提供に関する契約を締結 • 契約期間は 7 か月間
2018 年 9 月	• NGA が「商業 GEOINT 戦略」文書を改訂
2020 年 6 月	• 商業 GEOINT 戦略の一環として、NGA が Capella 社と共同研究開発契約(CRADA)を締結

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

2) EnhancedView 契約(NRO)

(1) 目的

米国のインテリジェンス・コミュニティ及び国防総省による地理空間インテリジェンスニーズの高まりに対応する商業プロダクト及びサービスを提供することを目的としている。

(2) 概要

NRO が Maxar 社/DigitalGlobe 社と締結している商用画像調達契約である。同社は、国防総省やインテリジェンス・コミュニティ等の米国政府機関に対し、WorldView-1, 2, 3 コンステレーションによる高分解能画像へのアクセスを提供している。2010 年の本プログラム開始当初は NGA が契約を授与していたが、2018 年に商用衛星画像の調達主体としての役割が NRO に移管され、同年以降は NRO が授与する EnhancedView Follow-On(EVFO)契約となっている。EnhancedView 契約は、2023 年以降、Electro-Optical Commercial Layer (EOCL)プログラム(後述)に引き継がれる予定である。

(3) 予算

2010 年 8 月、NGA は DigitalGlobe 社に 35 億米ドル、GeoEye 社に 38 億米ドルの契約を授与した。このときの契約期間は両社とも 10 年間である。2018 年、NRO が授与する EVFO 契約となってからは、Maxar 社/DigitalGlobe 社に 3 億米ドルが授与されている。EVFO の契約期間は 1 年単位である。

(4) 主な動向

EnhancedView 契約の主な動向を表 4-9 に示す。

表 4-9 EnhancedView 契約の主な動向

年月	内容
2010 年 8 月	• NGA が DigitalGlobe 社と GeoEye 社に EnhancedView 契約を授与 • 契約金額は、DigitalGlobe 社が 35 億米ドル、GeoEye 社が 38 億米ドル(GeoEye 社はその後 2013 年 1 月に DigitalGlobe 社と合併) • 契約期間は 10 年間
2018 年 8 月	• 商用衛星画像の調達主体としての役割が NGA から NRO に移管されたことを受け、NRO が Maxar 社/DigitalGlobe 社に EnhancedView Follow-On(EVFO)契約を授与 • 契約金額は 3 億米ドル／年 • 契約期間は 1 年単位(オプション年は 3 年間。すべて行使すれば 2023 年 8 月まで)
2021 年 8 月	• NRO が EVFO 契約の 3 年間のオプションのうち 2 年目の契約(遂行期間 2021 年 9 月 1 日～2022 年 8 月 31 日)を締結

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

3) Global Enhanced GEOINT Delivery (G-EGD)(NGA)

(1) 目的

米国政府ユーザに対し、オンライン及びオフラインにて、高分解能商用画像へのオンデマンドアクセスを提供することを目的としている。

(2) 概要

NGA との契約の下、Maxar 社が米国防総省やインテリジェンス・コミュニティ向けに提供する非機密高分解能商用画像提供システムである。Global Enhanced GEOINT Delivery (G-EGD)システムは 2011 年に導入され、当初は Maxar 社/DigitalGlobe 社の画像のみにアクセス可能であったが、2020 年 11 月、Planet 社と BlackSky 社の小型衛星が撮像した商用画像も同システムから提供されることとなった。2021 年 10 月に開催された GEOINT Symposium 2021において、NGA が Maxar 社との G-EGD プログラム契約を更新することが発表された。G-EGD のシステムアーキテクチャを図 4-18、ウェブインタフェースを図 4-19 に示す。

(3) 予算

2019 年 8 月、NGA は Maxar 社に 4,400 万米ドルの契約に授与している。契約期間は 1 年単位である。

(4) 主な動向

Global Enhanced GEOINT Delivery (G-EGD)の主な動向を表 4-10 に示す。

表 4-10 Global Enhanced GEOINT Delivery(G-EGD)の主な動向

年月	内容
2011 年	Maxar 社/DigitalGlobe 社が Global Enhanced GEOINT Delivery(G-EGD)システムの提供を開始
2019 年 8 月	- NGA が Maxar 社/DigitalGlobe 社に対し、G-EGD システムの提供継続のための契約を授与 - 契約金額は 4,400 万米ドル/年 - 契約期間は 1 年単位(オプション年は 3 年間。すべて行使すれば 2023 年 8 月まで)
2020 年 11 月	- G-EGD のパートナーとして Planet 社と BlackSky 社が追加 - G-EGD システムを通じて、両社の小型衛星が撮像した画像にもアクセス可能となる
2021 年 10 月	NGA が Maxar 社との G-EGD プログラムの 3 年間のオプションのうち 2 年目の契約(遂行期間 2021 年 9 月 1 日~2022 年 8 月 31 日)を締結

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

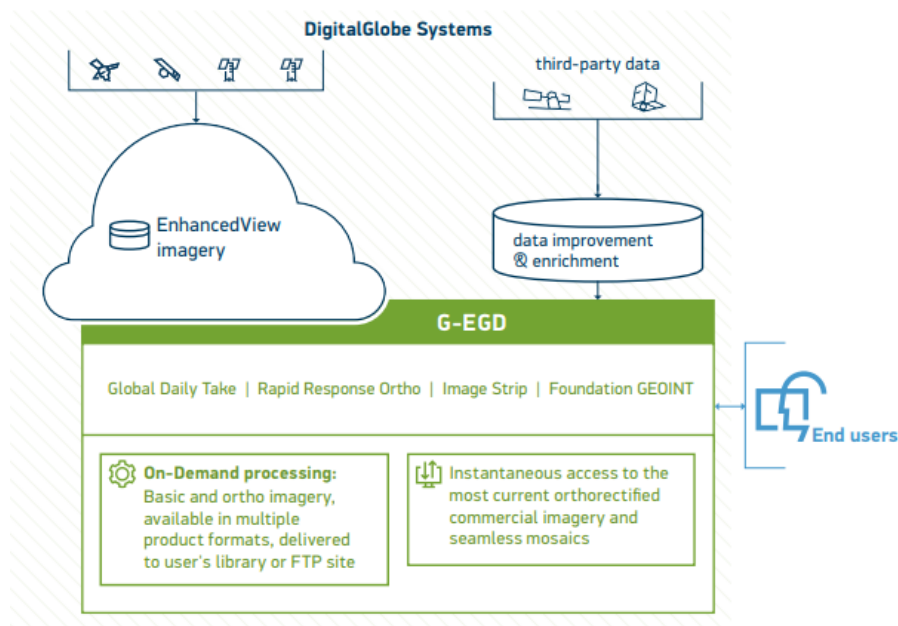


図 4-18 G-EGD のシステムアーキテクチャ

出所) Global Enhanced GEOINT Delivery (G-EGD) https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/legal_document/file/40/DS-GlobalEnhancedGeoInt-GECD-0416-web.pdf (2022年 2 月 17 日閲覧)

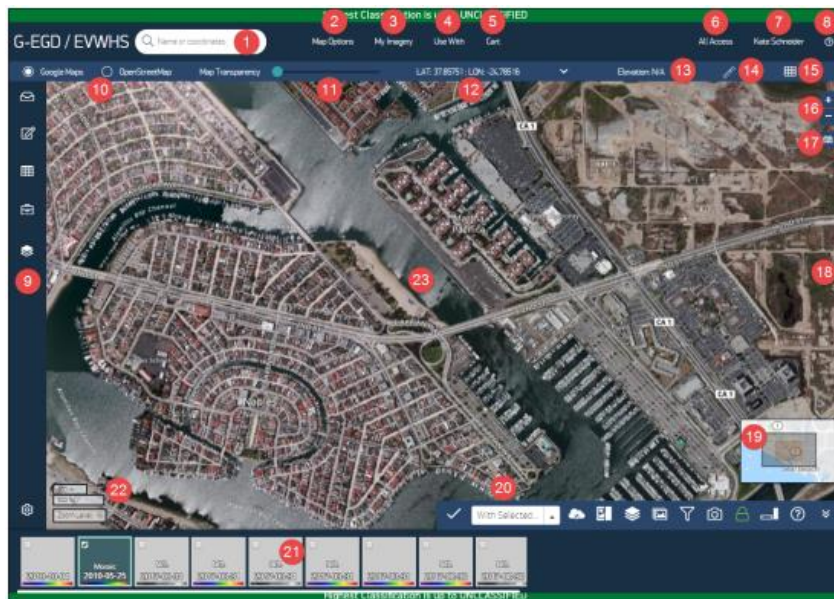


図 4-19 G-EGD のウェブインターフェース

出所) Global Enhanced GEOINT Delivery (G-EGD) User Guide https://gcs-docs.s3.amazonaws.com/PDFs/GECD_UserGuide.pdf (2022年 2 月 17 日閲覧)

4) NRO 研究契約(NRO)

(1) 目的

米国のさまざまな商用衛星画像プロバイダの能力を理解し、NRO 国家安全保障ミッションへの活用可能性を評価することを目的としている。

(2) 概要

NRO が米国の民間企業各社と締結している研究契約である。背景には、2018 年に商用衛星画像の調達主体としての役割が NGA から NRO に移管されたことを受けて、NRO が商業衛星産業の能力に関する研究を進めている点がある。NRO 研究契約は 2019 年に BlackSky 社、Maxar 社、Planet 社との間で締結され、その後 HySpecIQ 社、Capella Space 社、Hawkeye 360 社とも締結されている。2021 年 8 月には、BlackSky 社との NRO 研究契約が実運用の契約に変更されている。

(3) 予算

NRO 研究契約の予算や各社との契約金額は非公表である。

(4) 主な動向

NRO 研究契約の主な動向を表 4-11 に示す。

表 4-11 NRO 研究契約の主な動向

年月	内容
2019 年 6 月	NRO が BlackSky 社、Maxar 社、Planet 社と NRO 研究契約を締結(研究対象:商用光学画像)
2019 年 9 月	NRO が HySpecIQ 社と NRO 研究契約を締結(研究対象:ハイパースペクトル画像)
2019 年 12 月	NRO が Capella Space 社(研究対象:商用 SAR 画像)、Hawkeye 360 社(研究対象:RF マッピング)と NRO 研究契約を締結
2021 年 8 月	- NRO が BlackSky 社との NRO 研究契約を変更。この契約変更を受けて、BlackSky 社は月次のサブスクリプションを通じてオンデマンドの衛星画像を NRO に提供する - この契約変更による要件や資金は、EOCL プログラム(後述)に移行される

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

5) Electro-Optical Commercial Layer (EOCL)(NRO)

(1) 目的

次世代商用画像の提供により、特にインテリジェンス、防衛、連邦民生機関のユーザコミュニティのミッションニーズに応えることを目的としている。

(2) 概要

NRO が既存の EnhancedView 契約(前述)の後継と位置付ける次世代商用光学画像調達プログラムである。EnhancedView 契約は 2023 年 8 月に終了し、その後この Electro-Optical Commercial Layer(EOCL)プログラムが開始予定となっている。2021 年 11 月、EOCL プログラムの提案要請(RFP)が発表された。EOCL の特徴は以下の通りである。同 RFP に関して、2022 年春頃に複数件の契約を発注する予定となっている。

- EOCL は、「多様なユーザコミュニティによる商用画像へのより多くのアクセスと活用を可能にする、広範なレベルの共有可能性とユーザフレンドリなライセンス条件を提供する」とされている。
- EOCL には、Civil Space Reserve Fleet (CSAF)と呼ばれるシャッターコントロール規定が含まれている。これにより、NRO は、民間衛星に対して必要に応じて任意の地点への独占的なアクセスを有する。
- EOCL の RFP は、米国が所有、運用、管理する組織のみ提出可能である(米国市場の安定性向上と投資促進のため)。

(3) 予算

EOCL プログラムの予算は非公表である。

(4) 主な動向

EOCL プログラムの主な動向を表 4-12 に示す。

表 4-12 EOCL プログラムの主な動向

年月	内容
2021 年 6 月	• NRO が EOCL プログラムの RFP 草案を発表
2021 年 11 月	• NRO が EOCL プログラムの RFP を発表

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

6) 商業無線周波数(RF)GEOINT 試験プログラム(NGA)

(1) 目的

インテリジェンスプロダクトを支援するための商業無線周波数(RF)地理空間データ及び分析の利用可能性を検証することを目的としている。

(2) 概要

NGA が 2020 年 9 月に立ち上げた商業無線周波数(RF)に関する試験プログラムである。限定的なスコープの実験的な取組みであり、商業 RF データを NGA のアナリストや軍事戦闘コマンドに送信して既存のインテリジェンス活動を強化する方法を検討する。NGA は 2020 年 12 月、NRO と RF マッピング企業 HawkEye 360 社が締結している NRO 研究契約(前述)を活用し、本プログラムでの商業 RF データの評価を実施していることを発表した。NGA は 2021 年 3 月、本契約となる RF マッピングに関する提案要請(RFP)を発表し、2021 年 7 月に HawkEye 360 社が同契約を獲得した。

(3) 予算

本プログラム自体の予算は非公表であるが、本プログラムの結果を受けた RFP に基づく契約では、NGA が HawkEye 360 社に 1,000 万米ドルの契約を授与している。

(4) 主な動向

RF GEOINT 試験プログラムの主な動向を表 4-13 に示す。

表 4-13 商業無線周波数(RF)GEOINT 試験プログラムの主な動向

年月	内容
2020 年 9 月	• NGA が商業無線周波数(RF)GEOINT 試験プログラムを立ち上げ
2020 年 12 月	• 本プログラムに HawkEye 360 社が参画していることが発表される • HawkEye 360 社は、同社の編隊飛行を行う RF 監視衛星からのデータや分析を提供 • NGA は本プログラムにおける商業 RF データの評価にあたって、NRO と HawkEye 360 社の NRO 研究契約を活用
2021 年 3 月	• NGA が RF マッピングに関する提案要請(RFP)を発表
2021 年 7 月	• NGA が HawkEye 360 社に上記契約を授与 • 契約金額は 1,000 万米ドル • 契約期間は 1 年単位(オプション年は 4 年間)

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

7) Broad Agency Announcement (BAA) for Strategic Enhancements(NRO)

(1) 目的

新たなインテリジェンス課題への対応や運用要件に関する情報提供を行うため、革新的な産業能力を迅速に探索、評価、活用することを目的としている。

(2) 概要

2021 年 10 月 7 日、NRO 長官が GEOINT 2021 にて発表した新たなプログラムである。本プログラムの特徴は、新興かつ発展する電子光学能力に加え、商業レーダ、ハイパースペクトル画像、無線周波数(RF)リモートセンシング等の新たなセンサ能力が主な対象分野となっていることである⁴。BAAには米国内に事務所を構える外国企業も申請可能であり、NROは注力分野を年に複数回発表する計画としている。2021 年 10 月には最初の注力分野となる商業レーダに関する要請が発表され、2022 年 1 月には同要請のもと Airbus 社(米国)、Capella Space 社、ICEYE 社(米国)、PredaSAR 社、Umbra 社の 5 社に契約が授与されている。

(3) 予算

BAA の予算は非公表である。

(4) 主な動向

BAA の主な動向を表 4-14 に示す。

表 4-14 BAA for Strategic Enhancements(NRO)の主な動向

年月	内容
2021 年 10 月	• GEOINT 2021 にて、新たなプログラム Broad Agency Announcement (BAA) for Strategic Enhancements が発表される • 注力分野は、新たな現象(商業レーダ、ハイパースペクトル画像、無線周波数(RF)リモートセンシング)となる予定
2021 年 10 月	• 最初の注力分野である商業レーダに関する要請が発表
2022 年 1 月	• 上記の商業レーダに関する要請に基づき、NRO が Airbus 社(米国)、Capella Space 社、ICEYE 社(米国)、PredaSAR 社、Umbra 社の 5 社に契約を授与

出所) 各種資料より三菱総合研究所作成

8) Director's Innovation Initiative (DII)(NRO)

(1) 目的

NRO による国家安全保障のための上空 ISR(情報収集・警戒監視・偵察)に関連する最先端技術や大きな見返りが見込まれるコンセプトに投資を行うことを目的としている。

(2) 概要

NRO が毎年関心領域を定めて要請を発表するプログラムである。DII には主に以下 3 点の特徴がある。

- 革命的なコンセプトやアイデアに対する継続的なアクセスの実現
- 非従来の開発者へのアクセスと開発者ベースの拡充
- 潜在的に大きな見返りが見込まれるプロジェクトの実施に対してリスクを許容する環境の構築

DII の主な関心領域には、リモートセンシング、アンテナ、通信、システム設計、センスメイキング、

⁴ これらセンサは NRO 研究契約の対象となっていたものであることから、BAA はその研究成果に基づき行われているものであると推察される。よって、本情報提供に対して提案があったものは、最終的に将来の EOCL の一部として取り込まれる可能性もあると考えられる。

その他の破壊的コンセプトや技術が含まれる。NRO は、要請に対して米国内の教育機関、政府機関、NPO 組織、民間企業からの申請を受け付けている。DII 提案の実行期間は一般的に 9 か月間である。

(3) 予算

申請が受理された場合、最大 50 万米ドルを獲得できる。

(4) 主な動向

2021 年は 6 月～8 月にかけて募集が行われ、対象となった関心領域は、リモートセンシング、アンテナ、通信、システム設計、センスメイキング、その他の破壊的コンセプトの 6 分野であった。現在、DII のもと 24 のプロジェクトが進行中であり、その一部には磁気浮上式ジャイロスコープ、真空中で取り外し可能な接着剤、大型で軽量のアンテナ等がある。

(2) 欧州における取組

1) Third Party Mission (TPM)(ESA)

(1) 目的

ESA の取組であり、外部データ(ESA が所有や運用を行っていないミッションからのデータ)を広く提供することを目的としている。

(2) 概要

Third Party Mission (TPM)プログラムのもと、欧州及び世界のユーザに対し、表 4-15 に示す ESA の提携ミッションからの地球観測データが無償で提供されている。ESA では、TPM パートナーのミッションからのデータプロダクトを科学ユーザ向けに配布する契約を TPM パートナーと締結している。ユーザは現在、TPM パートナーの 50 以上のミッションによる 60 以上の機器が取得したデータプロダクトにアクセス可能となっている。TPM では、光学、SAR、大気、GNSS-R・電波掩蔽、重力場等のデータプロダクトが提供されている。民間 TPM パートナーには、Maxar 社、Planet 社、Spire 社、ICEYE 社等の衛星が含まれている。

また ESA earth online では、ESA の地球観測データ向けのツールとして、各種分析ツール、処理ツール、ビジュアライゼーションツールが提供されている。ESA の特定のミッションに特化したツールから、ESA ミッションに幅広く利用可能なツール等、さまざまな種類が提供されている。ESA earth online で提供されているツールの例を以下に示す。

- VtCryoSat ツール(分析ツール)

- VtCryoSat では、インタラクティブかつグラフィカルなウェブインターフェースを通じ、ESA の CryoSat 衛星のプロダクトを簡単に検索、ダウンロードできる(図 4-21 参照)。
- また CryoSat の地球物理的パラメータ(多数のプロットオプションを含む)を表示でき、関連プロダクトのエクスポートやダウンロードも可能である。

- HDFclean ツール(処理ツール)

- HDFclean では、HDF(階層的データ形式)で保存された画像の再処理が実行できる。
- ESA の PROBA-1 衛星のハイパースペクトル撮像機 CHRIS が撮像した画像の処理が本来の用途であるが、他ソースの HDF 画像に利用することも可能である。

- SMOS Global Mapping Tool(ビジュアライゼーションツール)
 - SMOS Global Mapping Tool では、ESA の SMOS 衛星データを全球マップにプロットすることができる(図 4-22 参照)。
- ESA PDGS Jupyter Notebook(分析、処理、ビジュアライゼーションすべての機能を含むツール)
 - ESA PDGS Jupyter Notebook では、対象の ESA サービス(Third Party Mission 含む)のデータにピクセルベースでアクセスできる。

(3) 予算

TPM プログラムの予算は非公表である。

(4) 主な動向

TPM プログラムは 45 年以上にわたって運用されており、2021 年 6 月にはフィンランドの民間企業 ICEYE 社の SAR 衛星画像にも TPM を通じてアクセス可能となっている。

表 4-15 Third Party Mission における提携ミッション

ALOS	IRS-1C	NOAA POES	Spire
Aura	IRS-1D	OceanSat-2	SPOT 1
COSMO SkyMed	IRS-P5 (Cartosat-1)	ODIN	SPOT 2
COSMO SkyMed Second Generation	IRS-P6 (ResourceSat-1)	PAZ	SPOT 3
DMC First Generation	IRS-R2 (ResourceSat-2)	PlanetScope	SPOT 4
GeoEye-1	JERS-1	Pleiades	SPOT 5
GEOSAT-1	KOMPSAT-2	PROBA-1	SPOT 6
GEOSAT-2	Landsat-1	QuickBird-2	SPOT 7
GHGSat	Landsat-2	RADARSAT	TanDEM-X
GOSAT-1	Landsat-3	RapidEye	TerraSAR-X
GOSAT-2	Landsat-4	SAOCOM	WorldView-1
GRACE	Landsat-5	SciSat-1	WorldView-2
ICEYE	Landsat-7	SeaSat	WorldView-3
IKONOS-2	Landsat-8	SkySat	WorldView-4

出所) ESA earth online を基に三菱総合研究所作成

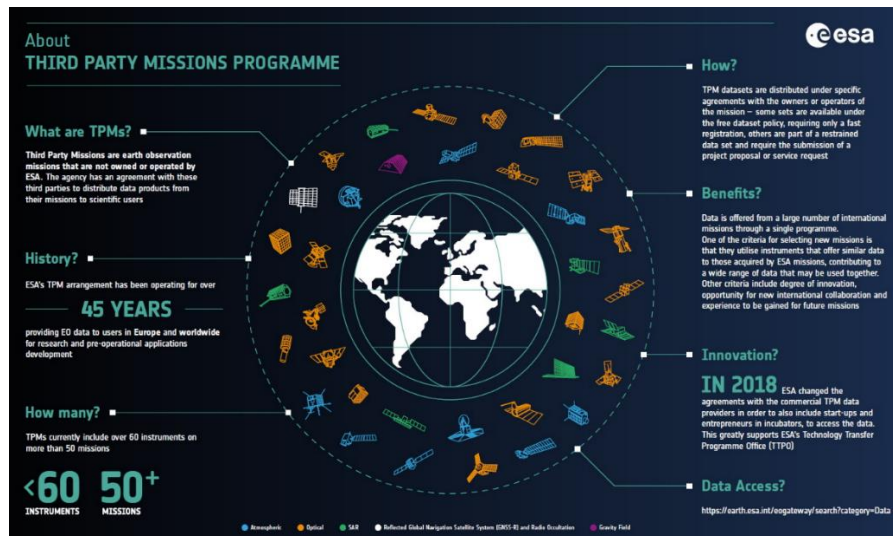


図 4-20 TPM プログラム概要

出所) ESA Third Party Mission infographic <https://earth.esa.int/eogateway/news/third-party-missions-infographic> (2022年 2 月 9 日閲覧)

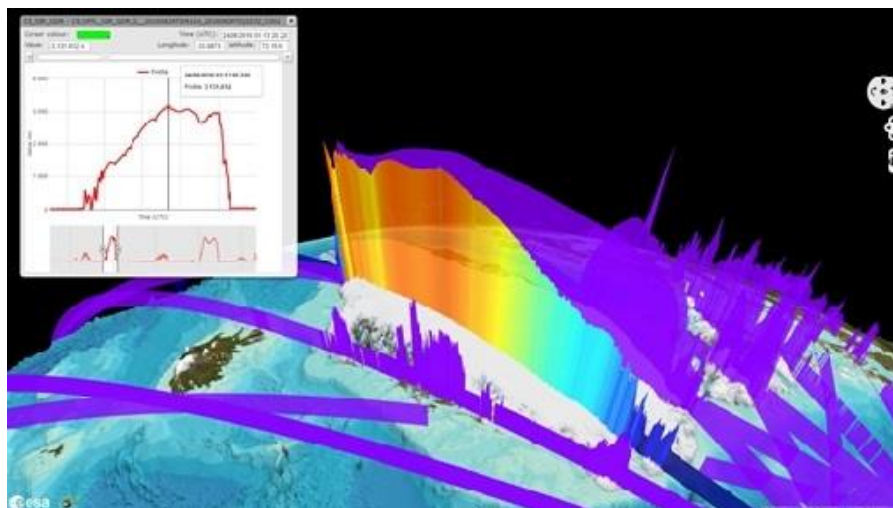


図 4-21 VtCryoSat のウェブインターフェース

出所) VtCryoSat <https://earth.esa.int/eogateway/tools/vtcryos-1> (2022年 2 月 17 日閲覧)

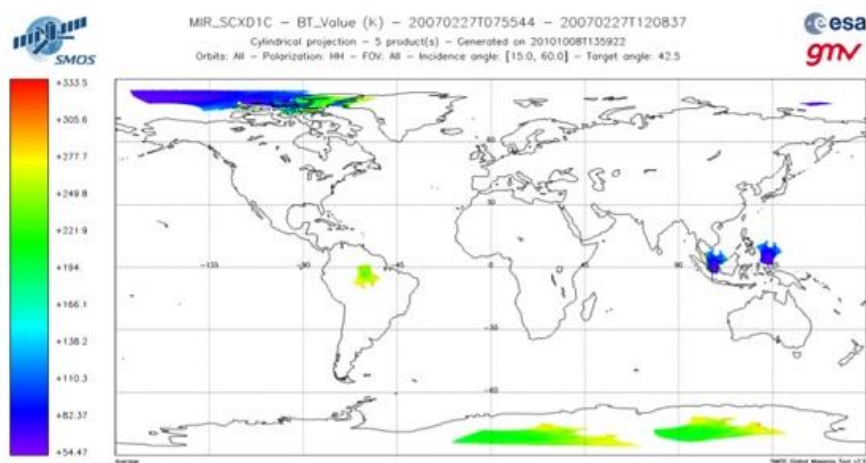


図 4-22 SMOS Global Mapping Tool を利用したサンプル図

出所) SMOS Global Mapping Tool <https://earth.esa.int/eogateway/tools/smos-global-mapping-tool> (2022年 2 月 17 日閲覧)

4.2.2 まとめ

官による商用衛星データの調達動向として、米国は、従来より DigitalGlobe 社の商用高分解能光学画像のアンカーテナンシーを実施してきたが、近年小型衛星スタートアップ企業が急増してきた状況を受け、積極的にそのリソースを活用していく方向に舵を取っている。一方でその品質面やインテリジェンス用途の要求に合致しうるかは不透明であり、特に小型 SAR、RF マッピング、ハイパースペクトル等の新たな種類のセンサについては不確かな要素が多いため、研究契約から開始し検証を行うというアプローチを取っている。その結果、既に Planet 社や BlackSky 社の商用小型光学衛星画像については、本格的な調達契約が結ばれている。小型 SAR 衛星や RF マッピング等は今後本格調達のステージに向かうと考えられるが、その結果も踏まえ現状の EnhancedView プログラムの後継とされ 2023 年以降に予定されている EOCL プログラムでは、アンカーテナンシーの対象が拡大する可能性もある。

EnhancedView プログラムの契約額は、Maxar 社/DigitalGlobe 社に対して年間 3 億米ドル（約 330 億円）となっている。一方、最近締結された新しいスタートアップとの契約については、例えば NGA と Planet 社の契約は 1 年で 1,400 万米ドル（約 15 億円）と比較的小規模なものとなっている。画像調達の規模にも依存するが、既存のアンカーテナンシーに比べると新興衛星画像の規模は金額面からは未だ補完的な役割として位置付けられていると推察される。

欧州における商用衛星の科学利用については、ESA の Third Party Mission (TPM) による画像活用が歴史的に行われてきたが、近年はスタートアップ企業 ICEYE 社の衛星データが追加されるといった変化が起きている。

システム及びプラットフォーム面の対応として、米国では NGA が Maxar/DigitalGlobe 社と締結している E-GED システムを通して政府が同社から調達するデータへのアクセスが可能であり、また Planet 社や BlackSky 社の商用小型光学衛星画像も同システム経由でアクセス可能となっている。こうした商用画像調達の取組では、非機密(Unclassified)の商用データが前提となっていることから、クラウド環境での利用がしやすく、官にとってインフラ整備の負荷が低減できるメリットがあるといえる。

欧州 ESA の TPM でも、データ処理・分析・可視化ツールが提供されており、開発環境として Jupyter Notebook も提供されている。

5. 宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術に関する調査

5.1 宇宙太陽光発電システムに関する調査

本節では、米国、欧州、中国、その他アジア等を対象地域として、宇宙太陽光発電システムの実現に向けた研究開発またはFS(Feasibility Study)について調査を行う。

なお、宇宙太陽光発電システムについては研究実施機関ごとにシステムの呼称が異なっているが、以降において本報告書では一般的な宇宙太陽光発電システムを指す場合はSSPS(Space Solar Power Systems)という略称を用いることとする。ただし、実施機関において特定のモデルや実証システム等で固有の呼称を用いている場合は、そちらに準じる場合もある。

5.1.1 諸外国におけるSSPSの研究開発動向

(1) 調査概要

米国、欧州、中国、その他アジア等を対象地域として、ここ数年内に実施されているSSPSの実現を目指した研究開発またはFSの調査を行った。代表的な国際会議IAF(International Astronautical Federation)SPACE POWER SYMPOSIUMおよびInternational Space Development Conference(ISDC)等で行われた直近3年分程度の講演から研究タイトルと実施機関を抽出し、主にインターネットによる公的情報を基に、可能な限り最新の研究開発状況を把握するようにした。さらにインターネット検索や有識者ヒアリングからも関連研究開発情報の収集を行い、調査対象を広げていくようにした。以上のようにして抽出した、今回の調査対象となる具体的な実施機関および研究開発/FSタイトルの一覧を表5-1～表5-2に示す。

これらの研究開発ごとに実施機関、研究者、研究開発概要(タイトル、研究内容、進捗レベル、キー技術)、実施体制、予算規模、今後の計画、その他(特許や国家戦略との関係)等について詳細を整理した。結果を添付資料1に示す。

次節ではこれらの調査結果を基に諸外国におけるSSPSの実現に向けた研究開発動向について国ごとに整理を行う。一部については現在の研究開発だけでなく、過去の実績についても言及している。

表 5-1 SSPS の研究開発を実施している機関と研究タイトル(1/2)

国		実施機関	部署／研究者等	研究開発／FS タイトル
米	公的機関	USAF Air Force Research Laboratory (提携先:Northrop Grumman)	Col. Eric Felt, James Winter, Dr. Andy Williams	Space Solar Power Incremental Demonstrations and Research (SSPIDR)
	"	U.S. Naval Research Laboratory	Dr. Paul Jaffe, Chris DePuma	PRAM-FX(Photovoltaic Radio-frequency Antenna Module Flight Experiment)
	"	U.S. Naval Research Laboratory	Dr. Paul Jaffe, Elias Wilcoski	ISS内におけるレクテナ装置(NRL's LECTenna)の実演
	大学	California Institute of Technology (提携先:Northrop Grumman)	Prof. Harry A. Atwater, Prof. Ali Hajimiri, Prof. Sergio Pellegrino, Richard Madonna	Space Solar Power Initiative (SSPI) / Space-based Solar Power Demonstrator-1 (SSPD-1)
	民間企業	Mankins Space Technology, Inc.(IBARTEMIS Innovation Management Solutions)	John C. Mankins	NEW CONCEPTS AND MARKETS FOR SPACE SOLAR POWER
	"	Solaren corporation	Gary T. Spirkak, Dr. James E Rogers	エネルギーと航空宇宙を組み合わせ、SSP(Space Solar Power)システム、SSPプラント・オペレーション、電力販売の3つのコア・ビジネス

表 5-2 SSPS の研究開発を実施している機関と研究タイトル(2/2)

国	実施機関		部署／研究者等	研究開発／FS タイトル
米	民間企業	Xtraordinary Innovative Space Partnerships, Inc. (XISP-Inc.)	Gary Pearce Barnhard	Space-to-Space Power Beaming (SSPB):宇宙空間電力伝送の検討。Commercial ISS Technology Development, Demonstration, and Deployment (TD3) mission for SSPB:ISSからキューブサットへの電力伝送実証ミッション。LSITP(Lunar Surface Instrument and Technology Payloads) Power & Ancillary Services Beaming Payload
	NPO	Beyond Earth Institute	Steven Wolfe, Tony DeTora	Draft National Strategy for Space Solar Power の提案
	"	National Space Society	Dale Skran	Space Solar Power: Enabling a Green Future with Economic Growth SSPの教育、普及、関連ワークショップや会議の開催、ポジションペーパーの発行等
	"	Space Solar Power Institute	Darel Preble	SSPの教育、普及、関連ワークショップ(Space Solar Power Workshop at Georgia Tech)の開催
加	NPO	SPACE(Solar Power Alternative for Clean Energy) Canada	Dr. Bryan Erb George Dietrich	教育、研究、商業化を通じてのSSP(Space Solar Power)に関する国際的な対話の支援、奨励、促進
欧	公的機関	European Space Agency (ESA)	Advenit Makaya	SBSP(Space-based solar power)の技術やコンセプトに関するアイデア募集
		European Space Agency (ESA)	Josef Aschbacher	ESA Agenda 2025
英	公的機関	UK Space Agency Department for Business, Energy & Industrial Strategy FRAZER-NASH CONSULTANCY	Martin Soltau	SBSP(Space-Based Solar Power)の実現可能性と経済性の調査検討
	大学	University of Strathclyde	PhD Andrew Wilson, Prof Massimiliano	SBSPコンセプトのプロセススペースのライフサイクル持続性評価
	民間企業	International Electric Company (IECL)	Ian Cash	CASSIOPEiA(Constant Aperture, Solid-State, Integrated, Orbital Phased Array)と名付けられたSSPモデルの検討および開発
独	民間企業	Deployables Cubed GmbH (DcubeD) California Polytechnic State University	Callan Whitley	SSP(SPACE SOLAR POWER)キューブサット技術実証ミッション -Powersat
仏	NPO	Science Sainte Rose, Université de la Réunion	Dr. Guy Pignolet	WIRELESS POWER TRANSPORTATION WORLD RESEARCH CENTER(WPT-WRC)の設立
印	公的機関	Indian Space Research Organisation (ISRO)	Dr. K. Sivan, Shri R. Umamaheswaran	SBSPを含む破壊的将来技術(Disruptive Future Tech)の開発
新	大学	National University of Singapore	Shu Ting Goh	Space Solar Power(SSP)衛星から全電動航空機(AEA:All-Electric Aircraft)への空中充電(MAR:Mid-Air Recharging)に関する解析
韓	公的機関	Korea Aerospace Research Institute (KARI)	Mr. Junwoo Park, Mr. Hojin Jung, Dr. Joon Min	SSPSのコンセプトおよびコスト評価
中	公的機関	China Academy of Space Technology(CAST)	Prof. Ming Li, Dr. Xinbin Hou	中国におけるSSPS(Space Solar Power Satellite)研究
	"	CAST、重慶市璧山区人民政府 Chongqing University(重慶大学)	Wang Li, Prof. Huaqing Zhang, Prof. Yang Shizhong	璧山宇宙太陽光発電実験基地(Bishan Base :Bishan Space Solar Power Station Experimental Base)プロジェクト
	"	National Natural Science Foundation of China(NSFC:中国国家自然科学基金委員会)	—	超大型(kmスケール)宇宙構造物(宇宙船)に関するFSプロジェクト
	大学	Xidian University(西安電子科技大学)	Baoyan Duan	SSPS OMEGA(Orb-Shape Membrane Energy Gathering Array)コンセプトの検討 SSPS(Space Solar Power Station)デモンストレーション・実証実験システムの建設
	学会	Space Solar Power Station Committee of Chinese Society of Astronautics	Baoyan Duan, Ming Li	CSSP-CSA 2021 (2021 Academic Exchange Conference of Space Solar Power Station Committee of Chinese Society of Astronautics and the 3rd National Symposium for Development of Space Solar Power Station)

出所)各種資料を基に三菱総合研究所作成

(2) 米国における SSPS 研究概要

1) 公的機関における取組み

a. NASA

米国では、1970 年代の終わりに実施された米国エネルギー省(DOE:Department of Energy)と NASA との共同研究である「SATELLITE POWER SYSTEM(SPS) CONCEPT DEVELOPMENT AND EVALUATION PROGRAM PLAN」から 20 年ほどの休止期間の後、1995 年に実施された NASA の「Fresh Look Study」により SSPS の検討が復活した。その後「SSP Concept Definition Study」、「SSP Exploratory Research & Technology Program」、「SSP Concept & Technology Maturation Program」が実施されたが、2003 年頃からは明確な SSPS 関連予算の拠出は見られず⁵、現在に至るまで NASA における SSPS 研究は事実上ストップした状況になっている。

なお、近年ではアルテミス計画に関連して月面での永久影領域における電力の確保が重要課題となっており、その解決策として月面探査におけるレーザーエネルギー伝送の可能性についての研究等が積極的に行われるようになってきている。NASA のこれらの研究の詳細は後述のレーザー方式 WPT の項で示している。

b. 米軍関係

NASA による SSPS 研究開発が 2000 年代前半以降に停滞したこともあり、近年の米国の SSPS 研究開発の中心は米空軍研究所(AFRL:USAF Air Force Research Laboratory)と米海軍研究所(NRL:U.S. Naval Research Laboratory)となっている。2007 年 10 月、国家宇宙安全保障局(NSSO:National Security Space Office)が SBSP(Space-Based Solar Power)フーズビリティスタディの中間評価レポート「Space-Based Solar Power As an Opportunity for Strategic Security」を公表して以降、Paul Jaffe 氏を代表とする NRL の研究者たちが本分野の調査やマイクロ波発電モジュールの要素試作試験等を実施してきている。

2020 年 5 月、NRL は PRAM-FX(Photovoltaic Radio-frequency Antenna Module Flight Experiment)(図 5-1 左)と呼ばれる約 30cm 四方のモジュールを試作し、空軍の X-37B 軌道試験機(OTV)に搭載して打ち上げた。そして、軌道上実証試験を実施し、軌道上飛行試験のデータを取得している。ただし本実験においては、モジュールのエネルギー生成効率と温度特性のデータ取得が目的であったため、マイクロ波送電は行っていない。なお、同 X-37B OTV は 2022 年 1 月現在もミッションを継続中である。

この他、NRL では 2020 年 2 月、非常に小規模であるが、ISS 内においてレクテナ装置の実演デモを実施した。宇宙飛行士である Jessica Meir 氏が NRL の「LEctennaTM」(発光型整流アンテナ)を使用して、家庭用ネットワークと同様の無線ネットワーク信号を電力に変換する様子を実演した(図 5-1 右参照)。

⁵ 2011-12 年に John Mankins 氏(NASA で SSPS 研究の指揮を執っていたが、民間企業に移籍)の SPS-ALPHA のコンセプト研究が NASA の NIAC 研究(NASA Innovative Advanced Concepts)のテーマの一つに採択されている。

また、2019 年夏には、AFRL の Space Vehicles Directorate において SSPIDR(Space Solar Power Incremental Demonstrations and Research)プロジェクトが始動している。世界中の遠征部隊に低コストおよび低リスクで常に安定したロジスティックに優れた電力を供給するために、革新的な SSPS 技術とハードウェアを開発することを目的としている。本プロジェクトは SSPS のプロトタイプに必要な要素技術を段階的に開発するプロジェクトであり、現在、地上実験を含む 3 つの実験を計画し一部遂行中である。中でも「Arachne」と呼ばれる軌道上実証実験は革新的なサンドイッチ・タイルを使用して、太陽エネルギーを高周波(RF)電力に変換する新たな技術を実証するとともに、そのエネルギーを地上に伝送して使用可能な電力に変換する可能性を示すもので、2025 年に打上げ予定となっている。バスとなる Helios ESPA リングとペイロードとなる SSPRITE(Space Solar Power RF Integrated Tile Experiment)を Northrop Grumman 社が製造しており、その契約金額は 1 億ドル以上となっている。2021 年 12 月には、AFRL と Northrop Grumman 社とで、サンドイッチ・タイルによる太陽光(ソーラーシミュレータ)から RF エネルギー変換を行う地上実験に成功している。

これらの米軍関係の機関で取組まれている SSPS は、軍のロジスティクスの課題に対応することが主目的となっているが、一方で商業的に非常に価値のある資産となる可能性や気候変動に対処するための新たな解決策になる可能性についても言及されるところとなっている。

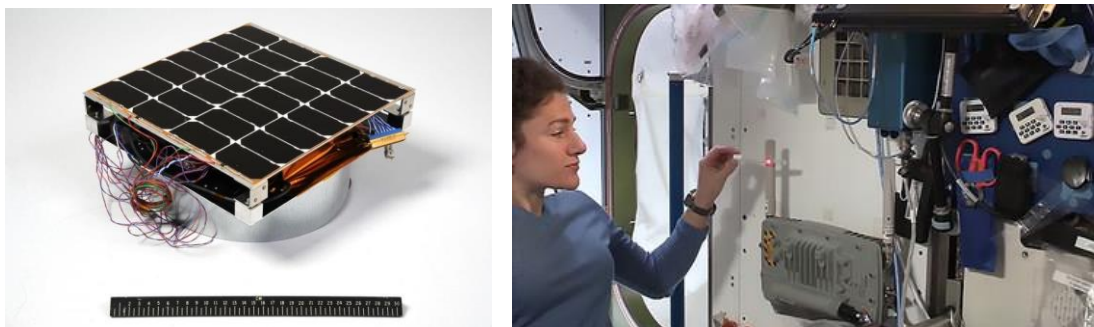


図 5-1 NRL の PRAM-FX 装置(左)と ISS 内において実施したレクテナ装置の実演デモ(右)

出 所) <https://www.cbc.ca/radio/quirks/a-secret-military-space-plane-is-carrying-an-experiment-to-harvest-power-from-space-1.5590837>(2022 年 2 月 2 日閲覧)(左) <https://www.youtube.com/watch?v=VICV-s0jMhU>(2021 年 9 月 17 日閲覧)(右)



図 5-2 軌道上での Arachne の実験イメージ(Credit : AFRL)

出所)<https://afresearchlab.com/technology/arachne/>(2022 年 2 月 7 日閲覧)

2) 大学における取組み

カリフォルニア工科大学(Caltech: California Institute of Technology)が 2013 年に Donarld Bren 氏による 1 億ドルの寄付を受けて SSPS 関連の研究開発を開始した(寄付の内容(人名、金額)は当初は秘匿されていた。)。2015 年には Northrop Grumman 社から 3 年間で 1,750 万ドルの受託研究契約を締結し、50 名以上のチームを組み、両機関による Space Solar Power Initiative(SSPI)を開始した。2017 年には超軽量・高効率の太陽電池と RF 送信機を統合させたモジュールや折り畳み可能な柔軟超軽量構造体のプロトタイプを試作試験を行い、現在は軌道上実証機 SSPD-1(Space-based Solar Power Demonstrator-1)の開発を行っている。SSPD-1 は VIGORIDE 衛星(Momentus 社製)に搭載し、当初は 2021 年 12 月に打上げ予定となっていた。現在では VIGORIDE 衛星自体の打上げが遅れており、スケジュールが遅延している。

3) 民間企業における取組み

上述のように、民間企業では、近年では Northrop Grumman 社が米空軍やカリフォルニア工科大学での取組みにおいて重要な役割を果たしている。

その他に、民間部門では John Mankins 氏が NASA 退職後も現在に至るまで SSPS 研究をリードしている。2005 年に Artemis Innovation Management Solutions, LLC(現在は Mankins Space Technology, Inc.)を立ち上げ、コンセプト検討や情報発信、関連著作の出版、ワークショップの企画等も積極的に行っている。2011 年～2012 年には NASA の NIAC(NASA Innovative Advanced Concepts)の研究テーマの一つに採択され、SPS-ALPHA のコンセプト検討を行ったが、その後も検討を続け、現在は SPS-ALPHA "Mark-III" (SPS by means of Arbitrarily Large Phased Array)をはじめとする SSPS のコンセプトや地球と月における SSPS の新しい市場について検討を行っている。図 5-3 に SPS-ALPHA のコンセプト変遷を示す。

また、2009 年にカリフォルニア州の電力大手 PG&E 社が電力購入契約を締結した Solaren corporation は SSP(Space Solar Power)システム、SSP プラント・オペレーション、電力販売の 3 つのコア・ビジネスを行っている。ただし同契約は Solaren 社に必要な融資が得られなかったため、2015 年に見送られている。その他、Xtraordinary Innovative Space Partnerships, Inc. (XISP-Inc.)は、SSPS のアプリケーションとして宇宙空間における電力伝送の検討や ISS を利用した技術実証の検討を行っている。近年は月面での応用に注力し、月面で電力や補助サービスを必要としている顧客向けにペイロードの提案等を行っている。

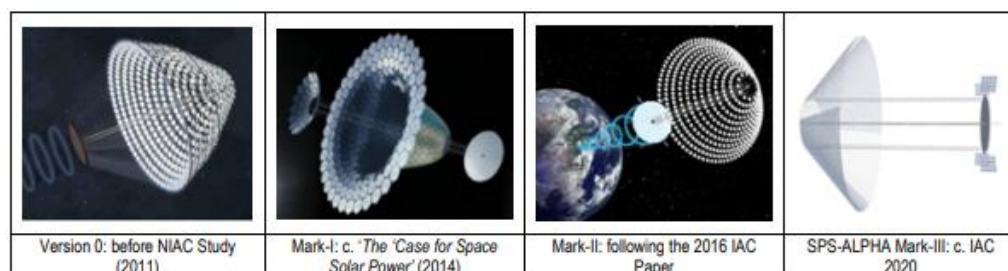


図 5-3 SPS-ALPHA Various Versions(Credit : John Mankins)

出所)John C. Mankins, "SPS-ALPHA Mark-III and an Achievable Roadmap to Space Solar Power", 72nd International Astronautical Congress (IAC) 2021 IAC2021/C3.1.2

4) 非営利組織(NPO)における取組み

SSPS 研究は米国の多くの非営利組織によっても促進されている。代表的な非営利組織は米国宇宙協会(NSS:National Space Society)であるが、1980 年代から SSPS は将来の重要なエネルギーソリューションであると位置づけ、関連教育、普及啓発活動、ワークショップや会議の開催等を継続的に実施している。その他にも、Space Solar Power Institute 等が同様の活動を行っている。さらに2021 年に入り、主に地球外への人類の進出をテーマにした政策提言等を行うNPOとして Beyond Earth Institute が設立され、宇宙政策大統領指示(SPD:Space Policy Directive)に SSPS 開発の促進を盛り込むことの提言等を行っている。

また米国外であるが、カナダのNPOであるSPACE Canada Corporationが2007 年の設立以降、SSPSに関する教育、リサーチ、ワークショップの開催等、国際連携の促進に関する取組みを実施している。

(3) 欧州における SSPS 研究概要

1) ESA における取組み

2002 年頃、ESA では SSPS 研究に関する欧州ネットワークを設立し、Advanced Concept Team を結成して、Leopold Summerer 氏を中心として欧州版の SSPS プログラムを進めてきた。2003 年には、総合研究プログラム(General Studies Programme)の中の事例検討フェーズで、2020/30 年を想定して地上でのソリューションとの比較検討を行ったが、この段階で SSPS は技術的には可能であるが、数十 GW を超えない限り地上プラントより優位には立てないとの結論に至り、その後は予算がつくような SSPS 研究は行われてこなかった。

しかし、長期間の活動休止の後、ESA は2020 年9月にDiscovery and Preparation 部門の OSIP(Open Space Innovation Platform)を利用してSBSP(Space-based solar power)の技術やコンセプトに関するアイデア・コンセプト募集のオンライン・キャンペーンを開始した。85 件のアイデアが提出され、うち16 件が新規性を評価されフォローアップステップに進んでいる。

また、2021 年3月31日に発行された「ESA Agenda 2025 Make Space for Europe」の中で、5つの緊急的な優先事項の中の1つである「BOOSTING COMMERCIALISATION FOR A GREEN AND DIGITAL EUROPE」において、エネルギー転換をサポートする宇宙ベースのサービス space-based solar power generation の可能性について、調査を進める必要があると言及されている。

このように ESA では2020 年から SSPS に関する取組みが開始されたところである。これらの動向を受けて、2021 年12月には、欧州が大規模な SBSP 開発プログラムに着手するための基礎となる情報を提供するために、ESA が産業界や国際的なパートナーの支援を受けて今後12ヶ月間(2022 年末まで)に率先して行うべき活動のロードマップを定義することを目的として、ワークショップ “Space-based Solar Power for Net Zero 2050” がESA-ESTEC(European Space Research and Technology Centre)の主催で開催された。

2) 英国における取組み

英国では、ここ数年で SSPS に関する取組みが大きく進展した。2050 年までに CO₂ 排出量の実質ゼロ化を目指す「Net Zero 戦略」を進めるために SSPS の貢献の可能性の検討の必要が高まったとして、英国宇宙庁(UKSA:UK Space Agency)とビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS: Department for Business, Energy & Industrial Strategy)が2020年9月から1年間をかけて SBSP(Space-Based Solar Power)の実現可能性と経済性の調査検討を実施した。具体的な調査内容としては、1) 米国(SPS-ALPHA)、英国(CASSIOPeiA)、中国(MR-SPS)の3つのコンセプト調査、2) 脱炭素経済に向けて SBSP の実用化と低価格化の実現性、3) 2050 年までに国際的なパートナーと協力して SBSP 運用を開始するためのエンジニアリングプランの策定、4) 将来のクリーンエネルギー技術の組合せの中で SSPS が果たす役割、等であり、Frazer-Nash Consultancy 社に委託して調査を行った。調査結果では、SBSP は英国の 2050 年までの Net Zero emissions の目標達成を可能にすること、開発に当たっては段階的な技術開発と実証プログラムを実施し、国際的なパートナーと検討を重ねることが推奨されること、等を示した。BEIS は、本報告書の内容を受けて、SBSP に関連する技術開発を目的とする SBSP イノベーション・プログラム(Space Based Solar Power Innovation Programme)をスタートさせる計画となっている。

また民間企業としては、上記の Frazer-Nash Consultancy 社の検討にもかかわった International Electric Company (IECL)社が Chief Engineer である Ian Cash 氏を中心として CASSIOPeiA(Constant Aperture, Solid-State, Integrated, Orbital Phased Array)と名付けられた SSPS モデルの検討および開発を行っている。図 5-4 に CASSIOPeiA コンセプトに基づく Frazer-Nash Consultancy 社が描く SBSP システムイメージ図を示す。

なお、これらの活発な SSPS に取組む活動の中で、2021 年には英国を拠点とするエネルギー、宇宙、材料、製造の研究・企業連合として「Space Energy Initiative」が設立されている。

この他、大学では英国スコットランドのストラックライド大学が SSPS 研究に取り組んでいる。2011～2012 年に NASA NIAC プログラムの一つとして採択された Mankins 氏の SPS-ALPHA プロジェクトの一部として、SSPS のような大型展開構造体に適用できる展開後も形状変化が可能な超軽量のセル構造 SAM(Self-inflating Adaptable Membrane)の開発を行ったが、現在は SSPS コンセプトのプロセスベースのライフサイクル持続性評価等を実施しており、上記の IECL 社の検討にも協力している。

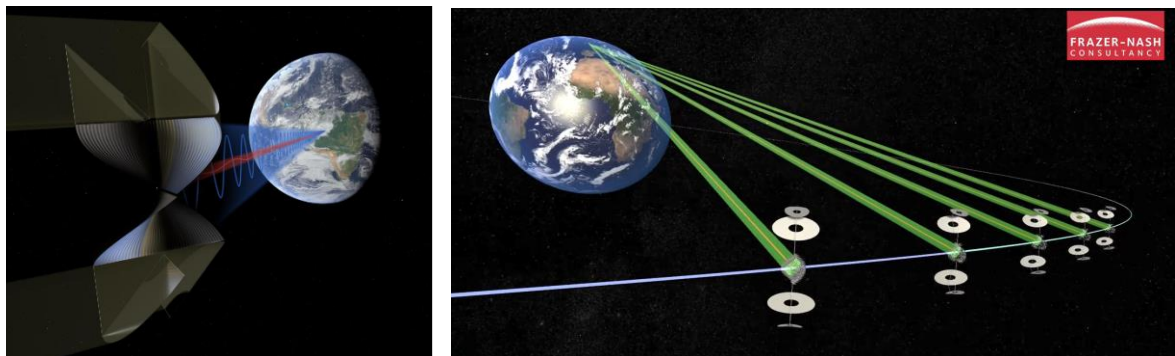


図 5-4 CASSIOPeiA SBSP システムイメージ図(Credit : Frazer-Nash Consultancy)

出所)Martin Soltau, Space Solar Power – the UK Study and the Space Energy Initiative” ,ESA Space-Based Solar Power International Workshop 9th – 10th December 2021

3) その他の欧州各国の取組み

ドイツではベンチャー企業である Deployables Cubed GmbH(DcubeD)社が米国のカリフォルニア工科大学(CalPoly)とパートナーシップを組んで、SSPS のキューブサット技術実証ミッション Powersatの開発を行っている。2021 年 4 月には NASA の CubeSat Launch Initiative(CSLI) の提案募集の結果、14 のミッション候補の一つとして PowerSat が選定され、2022 年から 2025 年に打上げ予定となっている。

その他、フランスでは Dr. Guy Pignolet が中心となり、2018 年頃に WIRELESS POWER TRANSPORTATION WORLD RESEARCH CENTER(WPT-WRC)をインターネットベースの組織として設立し、ワークショップの開催や La Reunion 島等でのフィールド実験の調整等を行うと発表していたが、その後の活動については不明である。

(4) 中国における SSPS 研究概要

中国では宇宙技術研究院(CAST:Chinese Academy of Space Technology)が中心となって SSPS 研究を進めている。2000 年代になって、CAST が中国政府に”Necessity and Feasibility Study Report of SPS”と題したレポートを提出し、これをきっかけに研究が本格的に始まったとされている。CAST の Qian Xuesen Laboratory の Xinbin HOU 氏と Ming Li 氏が中国における SSPS 技術のリーダーとなり、SSPS 研究プロジェクトを主導しているが、マルチロータリージョイント SPS(MR-SPS)等のコンセプト(図 5-5 参照)の提案等を行った。さらに 2015 年には 2050 年までの SSPS に関するロードマップを示した。ロードマップでは、2050 年には 1GW の商用システムの運用を開始とする目標を掲げている。

近年の CAST の大きな動きとしては、2019 年から行っている重慶(碧山区和平村)での高出力無線エネルギー伝送研究施設の建設が挙げられる。重慶市璧山区人民政府、重慶大学と共同で実施しているものであり、一時は建設中断等の状況にも陥ったが、現在は 2022 年 7 月に完成予定とされている。コア実験建設エリアがあり、その他、実験科学総合ビルと実験プラットフォームが建設される。コア実験エリアにはリフトオフテストサイト、気球プラットフォームデバッグホール、その他の施設が含まれる(図 5-6 参照)。基地建設費用として 1 億元(約 1500 万ドル)の初期投資が行われている。中国政府は 2060 年までのカーボンニュートラル目標を掲げており、本研究はエネルギー部門からの強い支持を得られているとのことである。

また、西安電子科技大学(Xidian University)では SSPS OMEGA(Orb-Shape Membrane Energy Gathering Array)コンセプト(図 5-5 参照)の検討を行うと共に、2018 年から SSPS(Space Solar Power Station)デモンストレーション・実証実験システムの建設に着手している。西安科技大学のキャンパス内に、75m の試験塔を設置し、塔の中央には、地上から 55m の高さに、直径約 6.7m の半球状の集光器が 4 つ設置されている。球状の反射面に太陽光が当たると、一定の集光部に収束し、太陽電池で直流を発生させた後、マイクロ波に変換して送信アンテナから地上に送信するというシステムである(図 5-7 参照)。現在は最終試運転段階にある。

一方、これらのコンセプト設計やシステム検討の他に、CAST や重慶大学では SSPS 実証用のマイクロ波による無線電力伝送(MPT)技術の開発にも注力している。CAST の National Key Lab. of Science and Technology on Space Microwave では、電波暗室内において送信アンテナ

1.2m×1.2m、レクテナアレイ 2m×2m、伝送距離 30m において、送信出力 900W、ビーム制御精度 0.44° 以上、MW-DC 変換効率 49% 以上を達成した。重慶大学では 2020 年、屋外において 5.8GHz、448W マイクロ波の 60m の距離の伝送実験を実施した。

その他の取組みとしては、中国国家自然科学基金委員会(NSFC:National Natural Science Foundation of China)が 2022 年 1 月から超大型(km スケール)宇宙構造物(宇宙船)に関する FS プロジェクトを開始している。軌道上に構築する何マイルものメガストラクチャーの一例として SSPS を掲げ、それを建設する技術を“urgent need”であるとして実現可能性を調査する計画となっている。また、2020 年 9 月、中国宇宙航行学会(Chinese Society of Astronautics)が SSP 委員会の設立を承認したことを発表し、2021 年 3 月に SSP 委員会設立式(Establishment Ceremony of the Committee of Space Solar Power, Chinese Society of Astronautics)が北京にて開催された。SSPS の分野における学術交流と技術協力を強化し、学術的なアイデアの発展、SSPS のための高度な人材育成、SSPS の分野における新技術、アイデア、成果の交換、SSPS キーテクノロジーの開発、キーマテリアルやデバイスのブレークスルー、重要な科学的課題の研究の促進を目的としている。7 名の学識経験者を顧問として招聘し、68 名の委員を選出している。

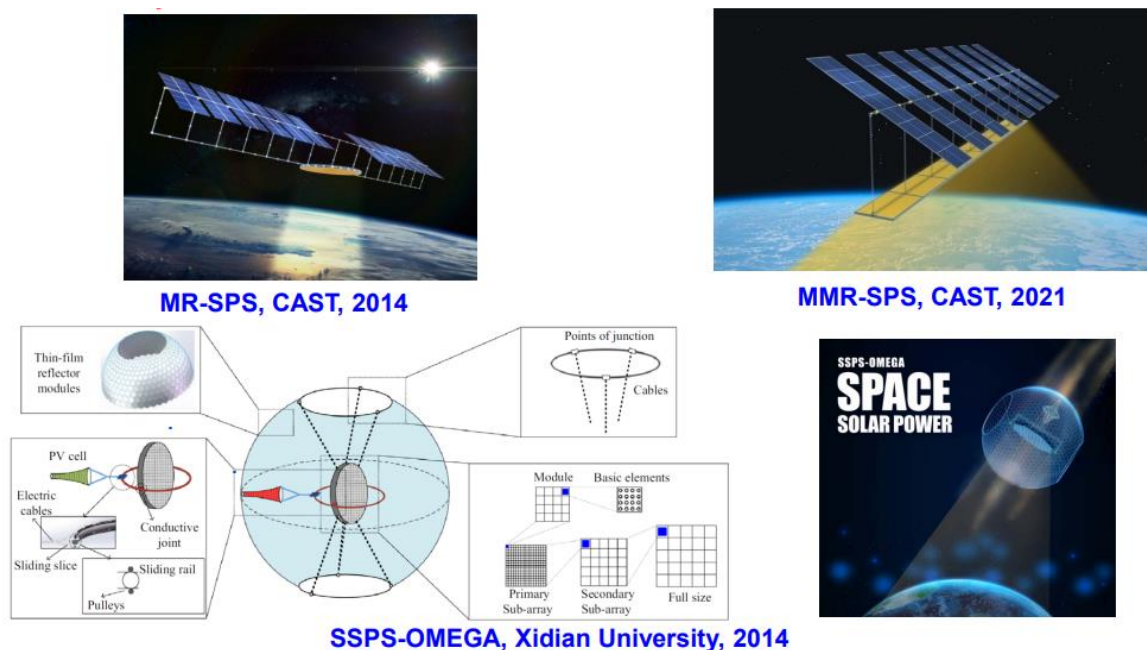


図 5-5 CAST のマルチロータリージョイント-SPS と西安電子科技大学の SSPS-OMEGA
 出所)Xinbin HOU; Ming LI, Activities of SPS Development in China” ,ESA’s 1st Space-Based Solar Power Workshop 2021.12.9-10



図 5-6 璧山宇宙太陽光発電実験基地イメージ

出所)Xinbin HOU; Ming LI, Activities of SPS Development in China” ,ESA’s 1st Space-Based Solar Power Workshop 2021.12.9-10



図 5-7 西安電子科技大キャンパス内に設置された試験タワー

出所)Xinbin HOU; Ming LI, Activities of SPS Development in China” ,ESA’s 1st Space-Based Solar Power Workshop 2021.12.9-10

(5) アジア(中国以外)における SSPS 研究概要

インドでは、Abdul Kalam 元大統領(第 11 代。任期 2002 年～2007 年)が SSPS 研究に熱心であり、米国宇宙協会 NSS(National Space Society)との関係を強化し、2010 年には Kalam-NSS Energy Initiative を発表するなどの活動を行っていた。しかし、同氏が 2015 年に死去した後は、インドの動きについての特筆すべき情報はなかった。その後 2018 年頃から ISRO(Indian Space Research Organisation)の Chariman の Sivan 氏が、国のエネルギー資源の枯渇問題に対応するために SSPS の構築の必要性を説き始めている。その流れを受けて、2021 年 11 月に開催された ISRO DTDI(Directorate of Technology Development and Innovation)部門の宇宙分野の潜在的な技術を開放する破壊的な将来技術(Disruptive Future Tech)サミット「DTDI-Technology-Conclave-2021」では、未来型技術開発プロジェクトの策定に着手していることが言及され、その破壊的な将来技術の一つとして Space-Based-Solar-Power が含まれており、今後の関連技術開発の促進が期待されるところとなっている。

シンガポールでは、シンガポール国立大学(National University of Singapore)が 2015 年頃から SSPS 衛星の軌道やコスト分析等を行っており、さらに 2020 年頃からは全電動航空機(AEA:

All-Electric Aircraft)を商業的に成立させるために、SSPS からの空中充電(MAR:Mid-Air Recharging)技術の提案を行っている。

韓国では、KARI(Korea Aerospace Research Institute)が2017年11月および2019年2月の2回、韓国内閣府内で国会議員を招きワークショップ(International Workshop for Space Based Solar Power)を開催している。SSPS 検討のために KARI を中心として7組織20名程度の組織が立ち上がったとの報告がなされ、その後、K-SSPS 等のコンセプト検討が実施されている。

5.1.2 まとめ

(1) 全体概要

SSPS 研究開発に関しては、1990年代からNASAをはじめとして積極的な取り組みが進められてきていたが、2000年代半ば以降、NASA および ESA においては予算がつくこともなく、欧米では国レベルの SSPS 研究開発は事実上休止状態にあった。しかし、数年前から(2018年頃～)急激に進展が見られている。特に大きな動きを見せているのは米国、英国および中国である。

米国では、現在の SSPS 研究開発の主流は米空軍研究所(AFRL)と米海軍研究所(NRL)であり、それぞれ要素技術の軌道上実証を進めている。NRL は2019年～2020年にかけて地上、ISS 内、X-37B による軌道上で関連実験を行っている。また AFRL は2025年に「Arachne」と呼ばれる軌道上実証実験を計画しており、1億ドル以上の予算を確保し開発を進めている。米国はこれとは別にカリフォルニア工科大学 Caltech が1億ドル以上の寄付を得て Space Solar Power Initiative (SSPI)と呼ばれるプロジェクトを開始しており、軌道上実証機 SSPD-1(Space-based Solar Power Demonstrator-1)の開発も行っている。

英国では、2050年までにCO₂排出量のネットゼロ化を達成することを目標としており、クリーンで安価、安全で信頼性の高いエネルギー源としての SSPS の可能性について注目を始め、2020年よりUKSAおよびBEISによる本格的な実現可能性についてのスタディを開始した。スタディの結果、SSPS は技術的に実現可能でありCO₂ ネットゼロを実現する新しい選択肢の一つとなり得ることが分かり、英国政府の優先順位に沿った開発であること、先進的なコンセプトではコスト的にも競争力があり、英国に広範な経済的利益をもたらすものであることが示された。今後、英国として本格的な取り組みを開始する可能性が高いといえる。

中国における SSPS 研究は2010年以前からCAST(China Academy of Space Technology)を中心に行われてきていたが、2018年頃から重慶市璧山区や西安電子科技大学に大規模な地上実験設備を建設するなどの動きが出てきており活発化している。2020年9月には、中国政府が2060年までのカーボンニュートラル達成の目標を掲げたことも追い風となり、軍事用と民生用のデュアルユース戦略で中国はSSPSの世界的なリーダーになることを意図して、研究開発を加速させている。

その他、ごく最近になって、ESA や ISRO といった宇宙機関も SSPS に関する取り組みを開始している。ESA は、今後1年以内に欧州が大規模なSBSP 開発プログラムに着手するための基礎となる情報を提供するとしており、ISRO も SSPS が一部に含まれている未来型技術開発プロジェクトの策定に着手を始めている。今後、両機関においても本格的なプログラムに発展する可能性があるといえる。

(2) コンセプト比較

SPS はこれまでも各国で様々なリファレンスシステムが提案され、それについての実現可能性等が検討されてきた。本項では、現在提案されている主なリファレンスシステムとして、米国 John Mankins 氏の SPS-ALPHA、英国の CASSIOPEIA、中国の MR-SPS および韓国の K-SSPS を取り上げ、システムの特徴等を示す。経済性の検討が行われている場合には、それらの検討内容も示す。

なお上述の米国、英国、中国のリファレンスシステムは、UKSA と BEIS の調査 (Frazer-Nash Consultancy 社に委託) でもコンセプトの比較検討が行われた 3 つのシステムとなっている。

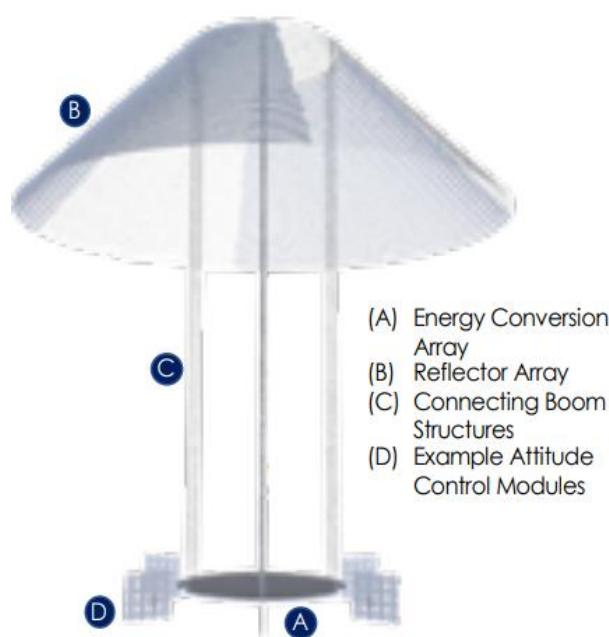
1) 米国 (SPS-ALPHA)

SPS-ALPHA (Solar Power Satellite Arbitrarily Large Phased Array) は、John Mankins 氏が 2011 年の NASA の NIAC (NASA Innovative Advanced Concepts) 研究で採択された際に提案したコンセプトである。図 5-3 に示したように 2011 年以降アップデートを重ね、現在は SPS-ALPHA Mark III が提案されている。

SPS-ALPHA は、太陽指向の反射鏡アレイを使用し、重量の大きいサンドイッチパネルと数 km の距離をおいて分離することにより重力勾配を利用した安定構造となっている。反射鏡はモーターで動き、太陽との相対的な位置の変化に応じて独立して調整され、サンドイッチパネル内の太陽光発電部に光を入射させる。サンドイッチパネルは常に地球指向である。最新の SPS-ALPHA Mark III は、以下のような特徴を有している。(図 5-8 参照)

- 構成部品は高度にモジュール化され、各モジュールは大量生産可能である。
- 構成する主なセグメントは以下の通りである。
 - エネルギー変換アレイ: 構成は太陽光発電アレイ、ワイヤレス電力伝送アレイ、およびローカルな電力管理・分配 (PMAD) モジュール
 - 反射鏡アレイ: 円錐形の構造体で独立した小型ヘリオスタット反射鏡
 - 反射鏡アレイとエネルギー変換アレイをつなぐ一連の構造ブーム
 - その他様々なモジュール: 姿勢制御モジュール等
- 1 基の出力 (宇宙での RF 出力) は 2GW、総重量は約 7,600ton、エネルギー変換アレイの直径は約 1.7km と見積もられている。地上のレクテナ直径は 6km である。

経済性の検討としては、約 20GW (10 基) の SPS-ALPHA を配備し、地上で約 30 か所の受信部に電力を供給する場合について検討を行った。最終的な電力コストは 6 ¢ /kWh と見積もられている。



SEGMENT	KEY PERF. PARAMETERS	VALUE
Energy Conversion	PV	3.4 MW
	WPT Frequency	2.45 GHz
	WPT Distance	~35,800 km
	WPT Power Transmitted (RF)	2.4 GW
	WPT Xmtr Diam.	1,685 m
	Receiver Diameter	6,000 m (@ Equator)
	Rcvr Output (DC)	2 GW
Platform System Characteristics	Primary Structure	~3.3 km x ~4.5 km
	No. of Modules	~1,900,000
	SPS Mass	~7,600 MT
	Ave. Mass / Module	~4 kg / module
Cost/Financials	SPS H/W Cost	~\$5,890 M
	Deployment Cost	~\$5,930 M
	Cost of Money	~\$19,000 M
	O&M Cost	~\$12,000 M
	Econ. Lifetime	40 years
	Total Electricity	702,559,375 MWh
	Cost of Energy	~6¢ / kWh

図 5-8 SPS-ALPHA Mark III の主要構成セグメントとシステム諸元

出所) John C. Mankins, SPS-ALPHA and the Economics of Space Solar Power”, ESA’s 1st Space-Based Solar Power Workshop 2021.12.9

2) 英国(CASSIOPeiA)

CASSIOPeiA(Constant Aperture, Solid-State, Integrated, Orbital Phased Array)は英国の International Electric Company (IECL)社の Ian Cash 氏が中心となり検討しているモデルである。2017 年に提案されている。FRAZER-NASH CONSULTANCY が受託した UKSA/BEIS の検討でも協力しており、現在は CASSIOPeiA が英国の SSPS モデルの代表にもなっている。

CASSIOPeiA は GEO に展開され、2GW を地上のグリッドに供給するモデル(質量 2,000 ton)となっているが、複数の軌道(GEO、GEO ラプラス平面軌道、MEO、SSO 等)にわたっても展開可能であり、サブ MW から数 GW の領域まで拡張できるようなシステムとなっている。最終的にはさらに GEO に 4 基展開し、10GW のエネルギー供給を行うことを目指している。CASSIOPeiA の特徴を以下に示す。

- 円錐形の曲率を持つ一次および二次反射鏡 (SSSC : Solid-State Symmetrical Concentrator)による集光システムで 2 倍集光を行う。反射鏡は回転部がない薄膜である。
- 中央は「Solar Panels & Transmitters」である。高集光型太陽電池(H-CPV)パネルとアンテナが配置されている。アンテナ部はフェーズドアレイであり、高利得アンテナでありながら、独自の素子設計と螺旋状の配置により軌道上で 360°のマイクロ波ビームステアリングを実現する Helical array(特許取得済み)となっている。モジュール分散型の設計で、個々のモジュールは

PVとRFの複合ダイポールから構成されている。アンテナ直径は1.7kmである。

- システムに可動部分は一切なく、軌道上での安定化は、electro chromic filmでミラーにかかる太陽輻射圧を調整することで行っている。わずか5種類の標準的なモジュールが大量に組合されることでできているため、展開やロボットによる組立てが容易である。
- レクテナは直径5km程度で $245\text{W}/\text{m}^2$ の電力密度で受電する。2GWを供給する。

地上の発電システムとの経済性の比較も行っているが、CASSIOPEIAシステムについては、上記の2GWシステムのイニシャルプロジェクトコストを216億米ドルと見込んでいる。さらに追加で4基構築するコストは190億ドルであり、10GWシステムを406億ドルで構築できる計画である。

他の再生可能エネルギー等との均等化発電原価(LCOE: Levelized Cost of Electricity)の比較も行われており、SSPSが他の発電システムと比較してもコスト競争力に優れていることが示されている。(図5-10参照)

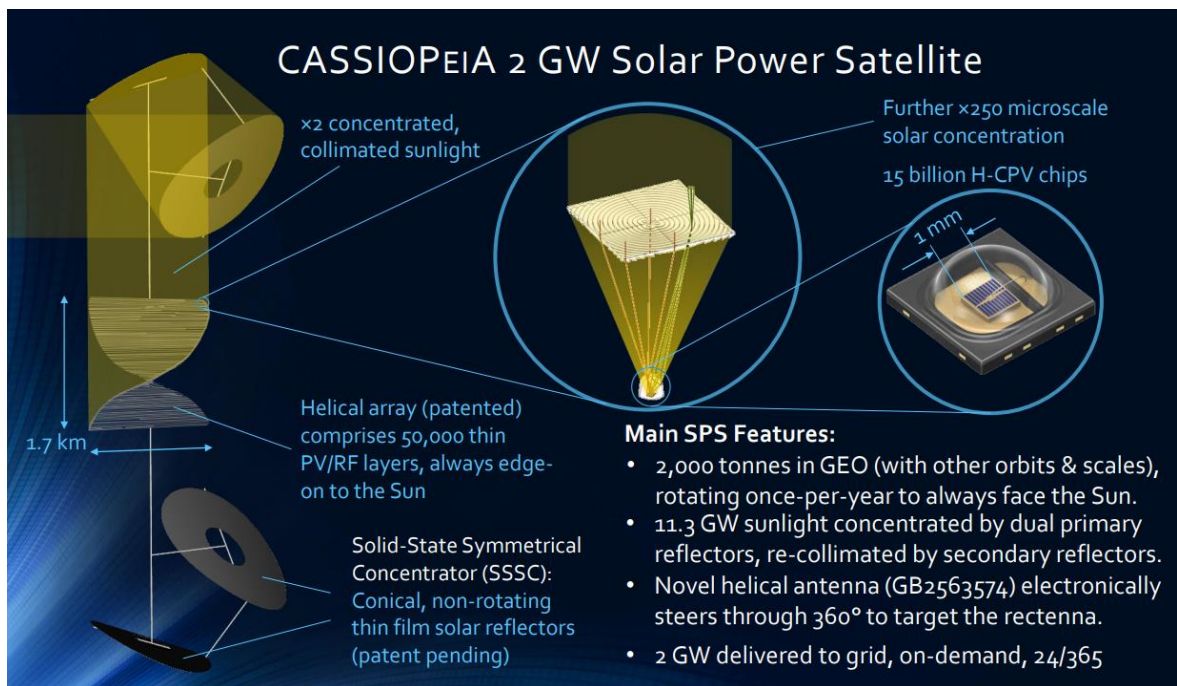


図 5-9 CASSIOPEIA の主要構成セグメントとシステム諸元

出所) Ian Cash M.Eng, CASSIOPEIA SPS”, ESA’s 1st Space-Based Solar Power Workshop 2021.12.9

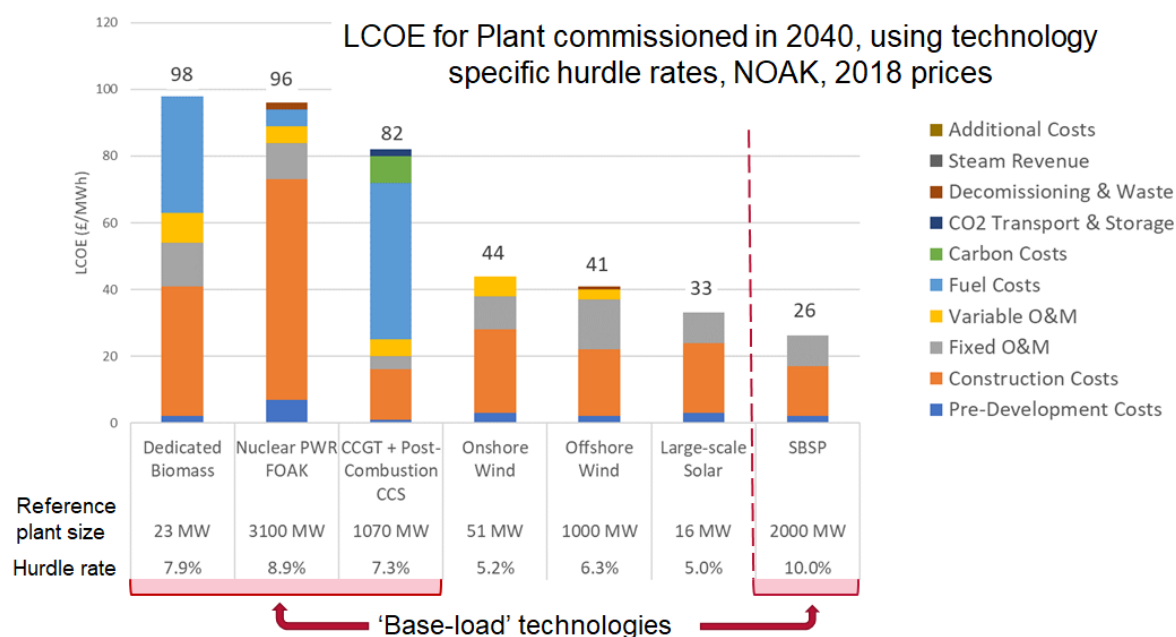


図 5-10 均等化発電原価(LCOE: Levelized Cost of Electricity)の比較

出所) Martin Soltau, Space Solar Power – the UK Study and the Space Energy Initiative”, ESA Space-Based Solar Power International Workshop 9th – 10th December 2021

3) 中国(MR-SPS)

中国(CAST)では、太陽電池を複数装備し、かつその方向を制御できるモデルとして MR-SPS (Multi-Rotary joints SPS)が 2014 年に提案された。MR-SPS は大型の太陽指向の複数の太陽電池パネルで構成され、両側を回転するロータリージョイントで支えている。複数の回転するロータリージョイントを分けて使用することで、太陽電池パネルが独立して回転する。太陽電池パネルでの発電電力はロータリージョイントを経由してアンテナに送電される。寿命は 30 年が想定されている。MR-SPS のイメージ図は図 5-5 の上段に示しているが、さらに詳細な仕様を図 5-11 に示す。本コンセプトの利点は、精密な太陽集光システムおよび熱制御エンジニアリングの課題を回避できることにある。しかし、非常に高い出力のロータリージョイントと長大な配電システムが大きな技術的課題となっている。

図 5-12 に 1GW(Delivered Power)のシステムについて、その寸法や重量、効率等を示す。総重量は約 10,000ton、太陽電池面積 6km²、送電アンテナ直径は約 1km、発電コストは \$ 0.15/kWh と見積もられている。

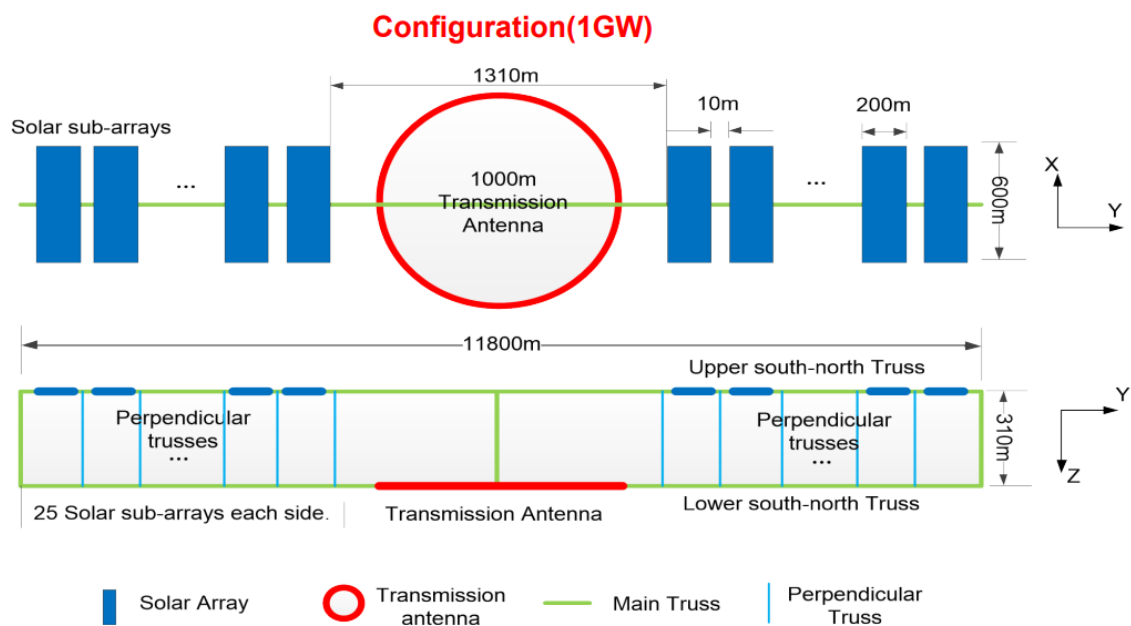


図 5-11 1GW MR-SPS

出所)Xinbin HOU, Ming LI, “Activities of SPS Development in China” ,ESA Space-Based Solar Power Workshop 9th – 10th December 2021

SPS system	Orbit	GEO
	Delivered power	~1GW
	Efficiency	~13%
	Total mass	~10000t
	Life time	30years
Solar Energy Collection and Conversion	Cost of electricity	\$0.15/kWh
	Solar cell	Thin-film GaAs
	Efficiency	~40%
	Area of solar array	~6km ²
	Output power	~2.4GW
Microwave Power Transmission	Mass	~2000t
	Frequency of microwave	5.8GHz
	Efficiency	~54%
	Diameter of transmitting antenna	1000m
	Number of antenna modules	128000
Power Transmission and Management	Transmitting power of an antenna module	12.5 kW
	Mass	4000t
	Diameter of receiving antenna	5km
	Style	Mix of distributed and centralized
	Voltage of main cable	20 kV
Structure	Voltage of solar sub-arrays	5000 V
	Number of rotary joints	100
	Mass	2500t
Attitude and Orbit Control	Module	Deployed truss
	Mass	1200t
	Thrusters	1N electric thruster
others	Mass	100t
	Mass of thermal Management	150t
	Mass of System Management	50t
Operation mode	Continuous transmission	

図 5-12 1GW MR-SPS の仕様

出所)Xinbin HOU, Ming LI, “Activities of SPS Development in China” ,ESA Space-Based Solar Power Workshop 9th – 10th December 2021

4) 韓国(K-SSPS)

韓国 KARI(Korea Aerospace Research Institute)では、2019 年に K-SSPS を発表している(図 5-13 参照)。モジュールを追加することによるスケールアップが容易に可能である構造とし、繰返

し作業やロボットアーム数の増加により組立て速度を上げることが可能である、としている。集光型を採用していないが、薄膜ロールアップ型の太陽電池を使用することにより重量増加を抑えている。またトラスや形状記憶複合材料などを用いて、可能な限り自己展開する機構としている。地上での電力を 2GW としており、総重量は約 10,000ton、寸法は 2.2km×6.8km、レクテナ径は約 4km と検討されている。

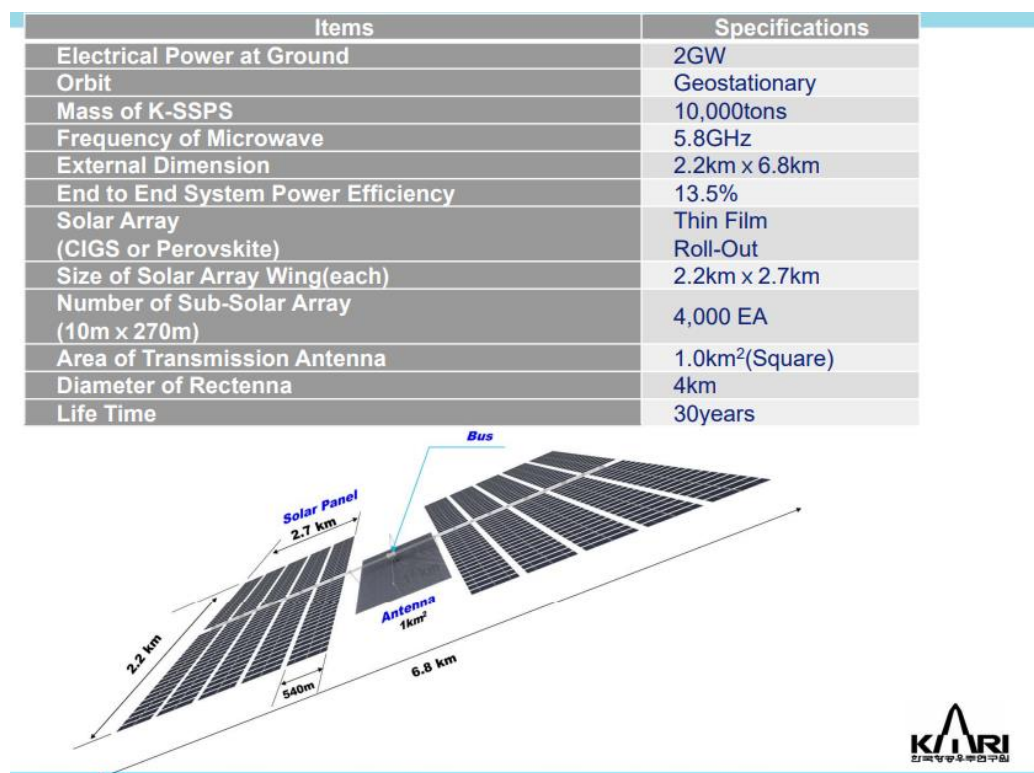


図 5-13 K-SSPS の仕様

出所)Joon Min.Choi, Net Zero Scenario and Status of Space Based Solar Power Research in Korea”,ESA’s 1st Space-Based Solar Power Workshop 2021.12.10

(3) ロードマップ／宇宙実証計画

SSPS の研究開発に当たっては、上述の SPS-ALPHA、CASSIOPeiA、MR-SPS のコンセプトについて、それぞれ商用化開始までのロードマップが描かれている。以下に各コンセプト検討において示されているロードマップを整理する。

SPS-ALPHA のロードマップでは、10 年以内に実用化を達成するシナリオとなっている。研究室プロトタイプ(1～1.5 年)、LEO 実証(1.5～2 年)、MEO パイロットプラント(2～3 年)、GEO 実用プラント(3～5 年)と開発を段階的に進めていく計画である。規模は 50kW から段階的に拡張していくが、MEO パイロットプラントで 10-100MW でコストは 10-20 億ドル、GEO 実用プラントは 1-2GW でコストは 100-120 億ドルと見積もられている。図 5-14 に SPS-ALPHA のロードマップを示す。

英国のUKSAおよび BEIS のレポートでは、2039 年に最初の 2GW システムの運用が開始されるとしてロードマップが描かれている。Phase 1(2022～26 年)では地上実証とバルーンによるリスクの小さい実証を行い、Phase 2(2027～31 年)では 40MW 級の LEO 軌道上実証を行い、Phase 3(2032～35 年)では 500MW 級のシステムの運用軌道上での実証を行うシナリオになっている。最後

に Phase 4(2036～39 年)では 2GW のシステムを運用軌道に展開しテスト終了後にグリッド接続を行う。さらに 2043 年には Full Capability のコンステレーションを構築することを目標としている。図 5-15 に英国が検討している SSPS 開発プログラムと主なマイルストーンを示す。

中国では 2015 年、CAST が SSPS 開発のロードマップを提示している(図 5-16 参照)。2035 年までに宇宙に MW 級の実証システムを、2050 年に 1GW 規模の商用システムを建設するという中長期的な目標を掲げ、そこに至るまでのキー技術の達成目標、技術実証、システム実証、アプリケーション等を併記している。図 5-17 も同様に CAST のロードマップであるが、2026 年に 10kW 級 WPT 実証ミッション、2030 年に GEO における 500kW 級 WPT 実証ミッション、2035 年に 20MW 級パイロット SSPS プラント、2050 年に 2GW 級 SSPS システムをマイルストーンとして掲げている。

A Roadmap to Operational / Cost-Effective SPS-ALPHA in less than a Decade

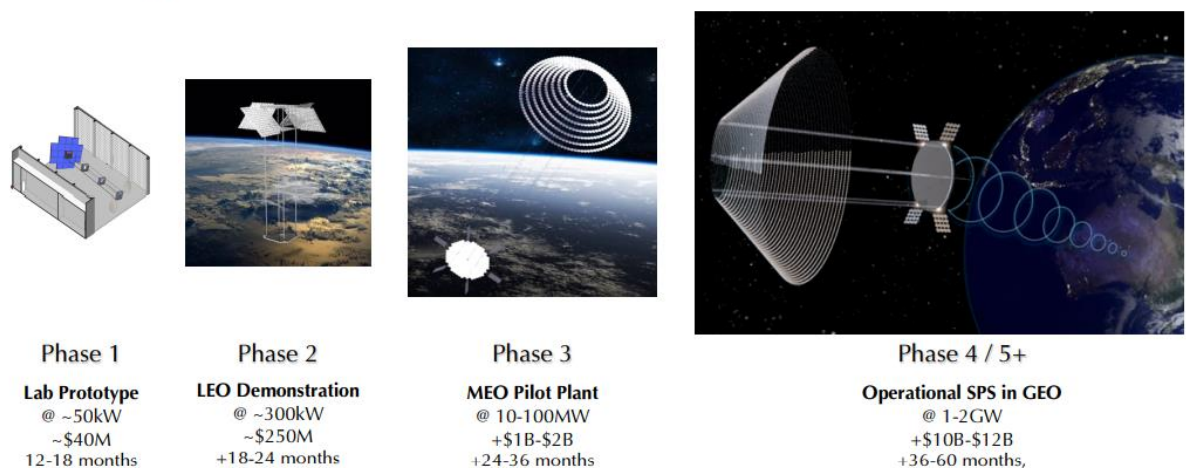


図 5-14 SPS-ALPHA の実用化までのロードマップ

出所)John C. Mankins, SPS-ALPHA and the Economics of Space Solar Power”,ESA’s 1st Space-Based Solar Power Workshop 2021.12.9

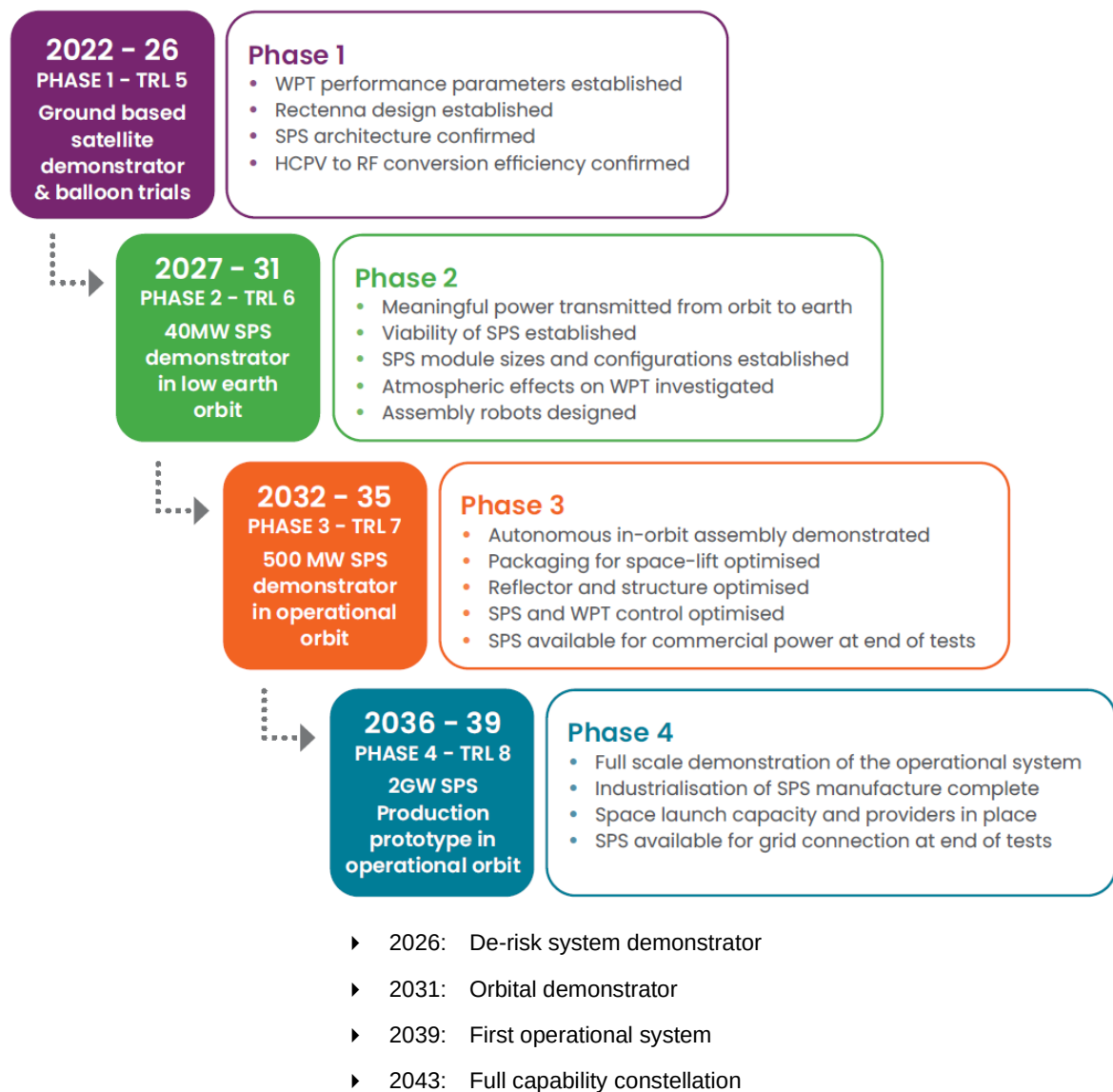


図 5-15 英国(CASSIOPeiA)の実用化までのロードマップ

出所)Martin Soltau, Space Solar Power – the UK Study and the Space Energy Initiative”, ESA Space-Based Solar Power International Workshop 9th – 10th December 2021

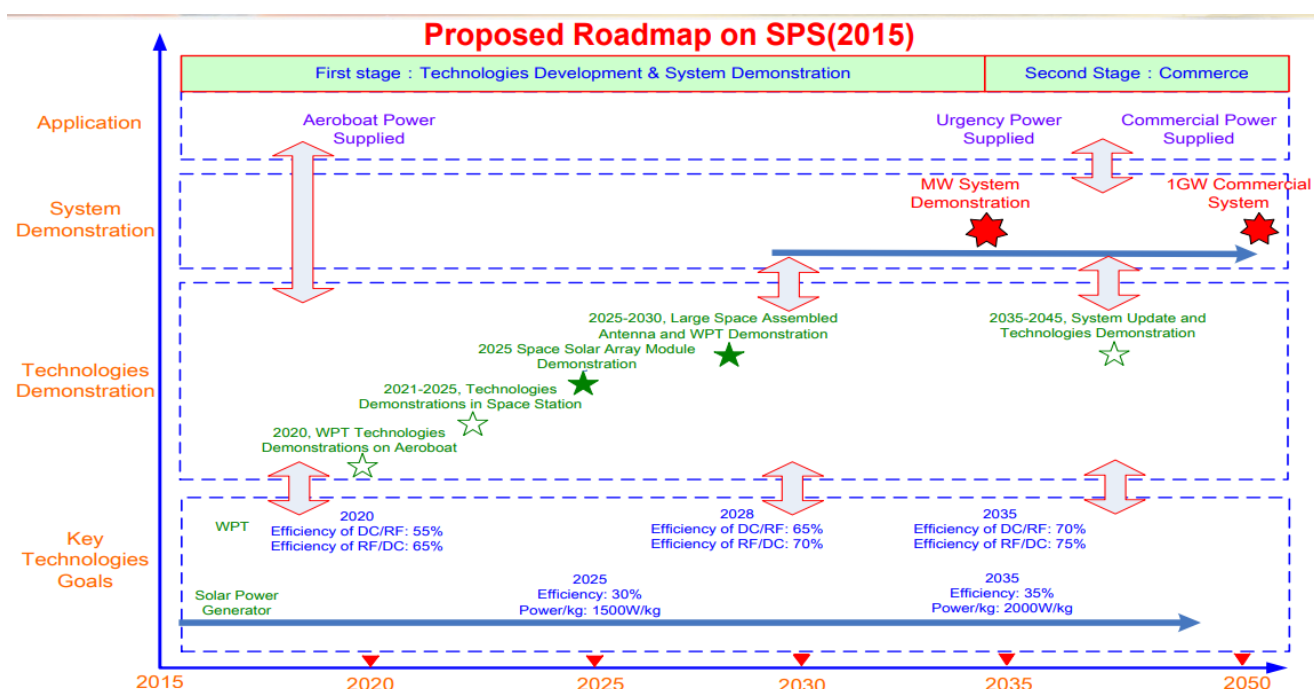


図 5-16 中国の SSPS ロードマップ

出所)Xinbin HOU, Ming LI, “Activities of SPS Development in China” ,ESA Space-Based Solar Power Workshop 9th – 10th December 2021



図 5-17 中国の SSPS マイルストーンミッション

出所)Xinbin HOU, Ming LI, “Activities of SPS Development in China” ,ESA Space-Based Solar Power Workshop 9th – 10th December 2021

5.2 無線エネルギー伝送技術(WPT:Wireless Power Transfer)に関する調査

5.2.1 地上における無線エネルギー伝送(WPT)技術を取巻く動向

地上における WPT 技術は、送電側と受電側がワイヤレスとなること等、高い利便性が期待できる技術である。近年では多くの方式が提案され、多様で幅広い製品分野への応用が進められてきている。

WPT は大きな分類として放射型と非放射型に分けられる。非放射型(Non-Beam WPT)は磁気共鳴型、電界結合型、磁界結合型等、自由空間にエネルギーを放射せずに電力を伝送する方式であり、スマートフォンや電動歯ブラシ、電気自動車への充電等で実用化が進んでいる。伝送距離はとれないが、送電電力が大きく伝送効率が高いことが特徴となっている。一方、放射型(Beam WPT)は主に電波(マイクロ波)やレーザーなどでエネルギーを遠距離に指向性をもって伝送する方式である。10m 以上離れたデバイスにも電力伝送を行うことができ、空間伝送型の無線給電方式などとも呼ばれる。

SSPS に関連している WPT の方式は放射型(空間伝送型)WPT となる。非放射型 WPT に比べると実用事例はまだ少なく、高効率化が課題とされているが、長距離伝送が可能であることから将来の無線給電方式としての実現性への期待は高い。なお本調査では SSPS に関連した技術として、以降では放射型 WPT 技術を対象として、諸外国の研究開発状況の整理を行った。

(1) 電波(主にマイクロ波)方式 WPT

本来は遠方にまで伝搬する遠方界の電波を利用する方式で、電波であるマイクロ波を用いるのが一般的である。マイクロ波の発振源は家庭用などの電子レンジ向けのマグネトロン管が大量に生産されていることから、安価にシステムを構成することができる。電波自体は原理的に真空中を伝搬する性質を持っており、どんな遠方にも到達させることができるため、航空宇宙分野での利用が可能な規模の距離、電力容量でエネルギー伝送が行える反面、電磁波のエネルギーが拡散してしまい伝送効率が上がらない、電磁波による生体への影響など解決すべき課題がある。

現状では、送電電力が数 10mW から数 100W 程度と比較的小さく、伝送効率も数%程度と低いことが課題となっているが、昨今ではマイクロ波の他にも、より周波数の高いミリ波、サブミリ波を利用する WPT の例も増加している。

非放射型 WPT を含め、実用段階にある無線給電方式の伝送距離や送電電力、伝送効率、課題などをまとめたものを図 5-18 に示す。

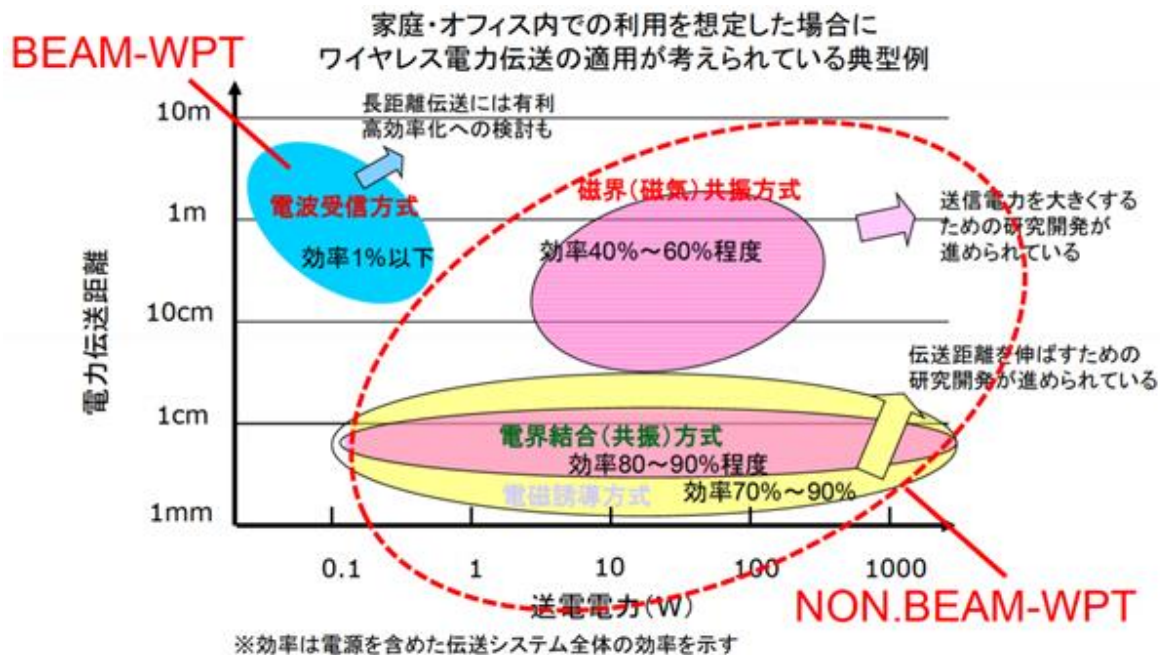


図 5-18 電波方式 WPT の伝送方式の違いによる伝送距離・送電電力・伝送効率
出所)総務省「ワイヤレス電力伝送(WPT)システムの安全性 ばく露評価法、植込み型医療器の EMI 評価」

(2) レーザー方式 WPT

レーザー方式 WPT はレーザーで送信し、太陽電池セルと同じように半導体で受信し、半導体の光起電力効果を利用して光エネルギーを直接電気に変換することで電力を伝送する技術である。レーザー光は遠方界を利用することでビームを形成でき、飛散角が小さく少ない減衰で長距離にまでエネルギーを伝搬できるため、小型装置かつ小径ビームでも大電力給電が可能であるという特長を有する。未だ研究開発段階にあるが、航空宇宙分野を中心に研究が進められてきており、近年は地上や近距離でも未来の無線給電方式として実現が期待されている。図 5-19 にレーザー方式 WPT の適用範囲を示す。

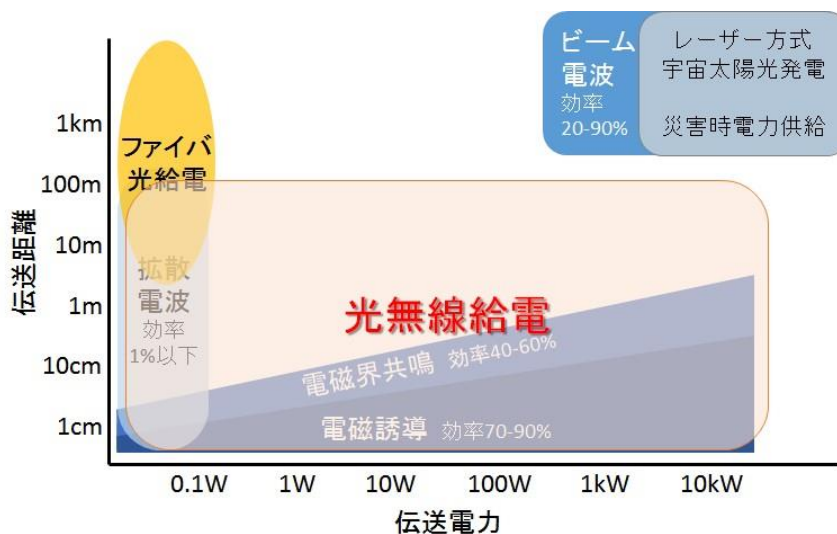


図 5-19 レーザー方式 WPT の適用範囲

出所)光無線給電検討会 H.P. (<http://vc sel-www.pi.titech.ac.jp/owpt/owpt.html>) (2022年2月7日閲覧)

(3) ワイヤレス給電の市場動向

近接型の非放射型 WPT については、すでに実用化が進み、日本も含めた世界中で無線給電を利用した様々な製品が発表されている。一方で、空間伝送型の放射型 WPT については、米国を中心に一部の製品化が行われているものの、現時点では実用化はあまり進んでいない。

実用化が進んでいる分野を中心に、その市場規模や今後の予測等のレポートは多く発行されている。一例として、株式会社矢野経済研究所が 2021 年 8 月に発行した「2021 年版 ワイヤレス給電市場の現状と将来展望」の要約版⁶を見ると、2021 年のワイヤレス給電⁷世界市場は前年比 111.5%の 4,301 億円と予測されている。今後も年率 10%以上の伸びを示し、2031 年には 1 兆 5,496 億円まで成長すると予測している。「小型電気機器」、「EV」、「産業機器」、「その他」別に市場規模の推移を見積もっているが、「小型電子機器用途」は、今後タブレットやスピーカーなどのニッチな分野にまで、ワイヤレス給電の採用が広がるとしている。「EV 用途」では、EV が 2030 年以降本格的な成長の軌道に乗ると予測されており、最初は停車中のワイヤレス給電システムが普及し、その後、商用車用の走行中でも充電可能なワイヤレス給電システムへと普及は段階的に行われる見通しである。「産業機器用途」は省人化・無人化と共に搬送効率の向上を目的として、工場のワイヤレス給電システム導入はさらに進んでいくと見られている。

実用化が始まったばかりの放射型(空間伝送型)WPT のワイヤレス給電システムについては、米国の Energous 社が図 5-20 に示すように、市場を伝送距離ごとに大きく 4 つの領域に区分している。5cm 程度の Near Field 領域、1m 程度までの Mid Field 領域、1m 以上～15m を超える Far Field 領域と、さらにその先に Harvesting の領域としている。

市場の見通しについては、Energous 社のシニアバイスプレジデントの Neeraj Sahejpal 氏は「現在は、Far-Filed 領域の市場が大きく広がっており、この分野に投資を行っている企業も数多くある」と述べている⁸。

⁶ https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/2790(2022 年 2 月 7 日閲覧)

⁷ 本調査におけるワイヤレス給電とは、装置間の距離に関係なく接点を設けない形式の給電システムとし、市場規模は各アプリケーションに搭載される受電モジュール・機器、送電モジュール・機器を対象としている。

⁸ 2021 年 8 月に開かれた Wired & Wireless Technologies (WAWT)'s Thought-Leadership Webinar Series にて。(<https://www.powerelectronicsnews.com/the-wireless-charging-technology-market/>)

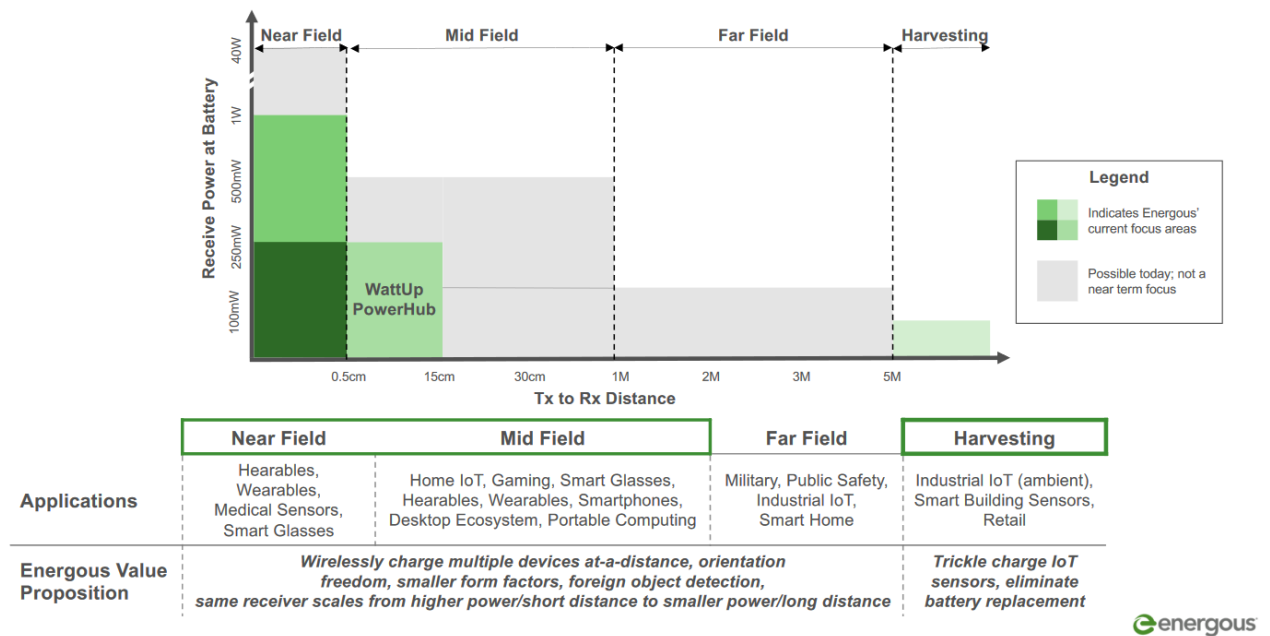


図 5-20 Wireless Charging 2.0 Ecosystem Roadmap (Credit: Energo)
出所)INVESTOR PRESENTATION, ENERGOUS, Nov 2020

5.2.2 諸外国における無線エネルギー伝送技術の開発動向

(1) 調査概要

米国、欧州、中国、その他アジア等を対象地域として、ここ数年内に実施されているビーム型電波(主にマイクロ波)方式およびレーザー方式 WPT の実現を目指した研究開発または実用化に向けた動きに関する調査を行った。代表的な国際会議 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)および IMS(International Microwave Symposium)等で行われた直近3年分程度の講演から研究タイトルと実施機関を抽出し、主にインターネットによる公的情報を基に、可能な限り最新の研究開発状況を把握するようにした。また実用化が進んでいるベンチャー企業等の情報については、製品化に向けた情報を積極的に Web サイト上で公開していることから、それらの最新情報を収集するようにした。さらにインターネット検索や有識者ヒアリングからも関連研究開発情報の収集を行い、調査対象を広げていくようにした。以上のようにして抽出した、今回の調査対象となる具体的な実施機関および研究開発タイトルの一覧を表 5-3～表 5-4 に示す。

これらの研究開発ごとに実施機関、研究者、研究開発概要(タイトル、研究内容、進捗レベル、キー技術)、実施体制、今後の計画、その他(特許等)について詳細を整理した。結果を添付資料 2 に示す。

次項ではこれらの調査結果を基に、電波方式およびレーザー方式 WPT の実現に向けた研究開発動向について整理を行う。

表 5-3 電波(主にマイクロ波)方式 WPT の研究開発を実施している機関と研究タイトル

国		実施機関	部署／研究者等	研究開発／FS タイトル
電波(主にマイクロ波)方式WPT				
米	公的機関	U.S. Naval Research Laboratory	R Christopher T. Rodenbeck, Dr. Paul Jaffe	Terrestrial Microwave Power Beaming (不規則で不均質な地形における)1km以上の距離での地上マイクロ波電力ビーム送電
	大学	Purdue University Graduate School	Abigail Jubilee Kragt Finnell	フェーズドアレイアンテナ(PAA)を用いた無線電力伝送の効率に関する研究
	民間企業	Energous Corporation	—	RFベースのワイヤレス充電技術「WattUp®」の技術開発および製品販売
		GuRu Wireless, Inc.	Prof. Ali Hajimiri	ミリ波による中距離充電技術(GuRu RF Lensing技術)によるワイヤレスOTA(Over The Air)電力伝送向けシステム
		Ossia Inc	—	ワイヤレス給電技術Cota®の技術開発およびライセンス提供(製品販売は行わない)
		Powercast Corporation	—	RFエネルギーハーベスティングと無線電力伝送に関するソリューション提供と米国内での関連製品販売
		Raytheon Technologies	Hooman Kazemi	ミリ波無線電力伝送用のレクテナ回路(効率61.5%、電力3.6kW/m ²)の実証実験
NZ	民間企業	Emrod	Greg Kushnir, Dr Ray Simpkin	長距離無線エネルギー伝送を可能にするテレエネルギー技術の開発
新	民間企業	TransferFi Pte. Ltd.	—	長距離ワイヤレスパワーネットワーク(WPN)の構築
韓	公的機関	Korea Electrotechnology Research Institute(KERI)	Young-Jin Park	ワイヤレス電力伝送システムの開発
	大学	Inha University(仁荷大学校)	Dr. Jaehwan Kim	マイクロ波駆動の飛行船(microwave-powered airship drone)実験機の開発と実証
中	大学	University of Electronic Science and Technology of China(電子科技大学)	PhD Biao Hu	非等方性共振型マグネトロンとサイクロトロン波整流器を用いた長距離大電力マイクロ波無線電力伝送システム
	民間企業	CEPRI(China Electric Power Research Institute)	—	10mマイクロ波無線伝送(a 10-meter microwave radio transmission)プロトタイプの開発
		Xiaomi Corporation	—	ミリ波を用いた近距離ワイヤレス充電技術「Mi Air Charge Technology」の開発

出所)各種資料より三菱総合研究所作成

表 5-4 レーザー方式 WPT の研究開発を実施している機関と研究タイトル

レーザー方式WPT				
米	公的機関	NASA	Geoffrey A. Landis, Jonathan Grandidier	Laser Power Beaming for Lunar Exploration
		U.S. Naval Research Laboratory (提携先:PowerLight Technologies)	Dr. Paul Jaffe, Tom Nugent	Power Transmitted Over Laser (PTROL)の地上実証試験
		DARPA	—	develop wireless networks that use lasers to transmit electrical power
	大学	University of Virginia	Prof. Mool C. Gupta	Beaming of Energy via Laser for Lunar Exploration (BELLE) システムの開発
	民間企業	PowerLight Technologies	Tom Nugent	レーザーを使ったワイヤレス給電技術の開発
英	大学	University of Surrey Space Power	Prof. Stephen Sweeney, Keval Dattani	LEO小型衛星へのレーザーによる無線電力伝送技術の開発
以	民間企業	Wi Charge	—	赤外線レーザーによるワイヤレス給電技術(AirCord™)の商品開発

出所)各種資料より三菱総合研究所作成

(2) 電波(主にマイクロ波)方式 WPT 研究開発への取組み

マイクロ波 WPT の形態については、ビーム型マイクロ波 WPT、ユビキタス電源、電磁波からのエネルギー・ハーベスティング(電力収穫)等が挙げられる。上述したように、現在のところマイクロ波方式 WPT は小電力の分野で実用化への動きが加速している状態である。

なお、レクテナの研究についてはエネルギー・ハーベスティング用のレクテナアレイも含め、世界各国の多くの大学で研究開発が行われるところとなっている。

以下に、国別の電波方式 WPT 研究開発への取組み動向を示す。

1) 米国

米国における電波(主にマイクロ波)方式 WPT 研究開発への取組みとしては、ベンチャー企業をはじめとする民間企業の取組みが際立っている。

公的機関としては、SSPS の研究開発でも主要な役割を果たしている米海軍研究所(NRL)(SSPS 研究のキーパーソンである Paul Jaffe 氏も関与)が 2020 年から 2021 年にかけて、不規則で不均質な地形における 1km 以上の距離での地上マイクロ波電力ビーム送電実験を行った。メリーランド州ブロッサムポイントの米国陸軍研究施設において、直径 5.4m の X バンド送信機から 1,046m のスタンドオフ距離で 1.6kW の電力を供給するデモンストレーションを実施した。

ベンチャー企業としては Energous Corporation、GuRu Wireless, Inc.、Ossia Inc.、Powercast Corporation が空間伝送型 WPT 技術の実用化を主導し、米国内での周波数の認可を進め、小型電子機器(スマホ・ウェアラブル機器等)や IoT 向けセンサへの充電機器の製品化を競っている状況にある。Energous 社では「WattUp®」Near Field 充電技術の製品化を行い、世界 112 カ国で販売可能な体制を築いている(中～遠距離充電製品については技術開発中)。カリフォルニア工科大学(CALTECH)からのスピンオフとして設立された GuRu 社は、ミリ波による中距離充電技術(GuRu RF Lensing 技術)によるワイヤレス OTA(Over The Air)電力伝送向けシステム開発を行っており、現在は試作段階であるが、2021 年 5 月に Motorola 社との提携を発表している。Ossia 社は「Cota®」の技術開発およびライセンス提供を行っている。製品販売は行わないが、多くの企業が Cota 技術のライセンスを受け、出資、製品開発、製品販売、ブランド提携を含む様々な役割を担っている。Powercast 社は「Powercast®」、「Powerharvester®」等の製品販売を米国内で行っており、世界中に 100 社以上の顧客とパートナー企業を有している状況である。

この他、上述のベンチャー企業とは異なるが、Raytheon Technologies 社が 2021 年にミリ波無線電力伝送用のレクテナ回路(効率 61.5%、電力 3.6kW/m²)の実証実験を実施した。W バンドの小信号および大信号の特性評価を行い、GaN ナノショットキーレクテナを試作し、95GHz において入力電力処理 3.6kW/m²で最高となる RF-DC 効率 61.5%を記録した。

2) 欧州

欧州では 2014 年にコンソーシアム WIPE(Wireless Power Transmission for Sustainable Electronics)(<http://www.cost-ic1301.org/>)が設立されている。ただし実際にはハーベスティングと RF-ID の研究がほとんどを占めており、放射型 WPT に関して目立った動きはない。

3) 中国

中国では前述のように、SSPS の研究開発を主導している宇宙技術研究院(CAST)の National Key Lab. of Science and Technology on Space Microwave が SSPS 実証用のマイクロ波 WPT 技術の研究開発を行っている。大学としては、同じく SSPS 研究を主導している重慶大学、四川大学(Sichuan University)、電子科技大学(UESTC:University of Electronic Science and Technology of China)等がマイクロ波送電実証実験を行っている。

企業としては Xiaomi Corporation が 2021 年 1 月、ミリ波を用いた近距離ワイヤレス充電技術「Mi Air Charge Technology」の開発を行うと発表した。また新華社通信によると、中国を代表する電力研究所である CEPRI(China Electric Power Research Institute)が 2021 年 9 月、10m マイクロ波無線伝送(a 10-meter microwave radio transmission)プロトタイプの開発を行っている。詳細は不明であるが、GaN ダイオードレクテナを用いた kW 級のマイクロ波無線電力伝送実験も実施していると報じられている。

4) アジア(中国以外)

アジアでも WPT 技術の開発を行うベンチャー企業が数年前から設立されてきている。2019 年に設立されたニュージーランドの Emrod 社は、同国第 2 位の電力会社 Powerco の資金提供を受けて、ワイヤレスかつ長距離のエネルギー伝送を効率的に行う技術の試験を開始している。2021 年 5 月に実施した屋内での伝送試験に続き、屋外でのフィールドテストを計画しており、京都大学の篠原研究室に送電システムの検討依頼がなされている。

また 2017 年に設立されたシンガポールの TransferFi Pte. Ltd.は長距離で安全かつ効率的な Wireless Power Network(WPN)の構築を目指して、TFi Turin-1 wireless power network (WPN) プラットフォームの開発、TFi WPN IIoT のリリース等を行っている。

その他、韓国では仁荷大学校(Inha University)は、2018-2019 年頃に X バンドの無線伝送により駆動する、ヘリウムを充填したマイクロ波駆動の飛行船(microwave-powered airship drone)実験機の開発と実証を行った。また KERI(Korea Electrotechnology Research Institute)が国家科学技術会議(NST)の BIG Issue Group プロジェクトとして 2019 年から 2025 年までの長期研究を開始している。宇宙での中距離大電力伝送システムを実現することを最終的な目標に掲げ、地上での要素技術研究や無線電力伝送実験に取り組んでいる。さらに Korean Wireless Power Forum が組織され、産業界や大学によりマイクロ波 WPT 実験等への取り組みが行われている。

5) 日本

上述した通り、海外では電波方式の放射型無線給電が実用化の段階に入ったところである。ここでは日本の WPT 技術の研究開発と実用化の動向について概要を示す。

産官学の連携した動きとしては、2013 年 4 月、マイクロ波送電を中心とする WPT に関する国内最大のコンソーシアムとして、WiPoT(Wireless Power Transfer for Practical Application)が設立された。篠原真毅教授(京都大学生存圏研究所)が代表を務め、100 以上の企業、研究機関、学識会員から構成されるコンソーシアムであり、WPT 技術に関する講演会、研究会、実演展示会等を継続開催し、また、WPT 技術の標準化・法制化を目指して経済産業省や総務省等の政府機関や国際的標準化団体との会合などを多数、継続的に実施してきている。

一方、日本では電波を発する機器は技術基準適合証明(技適)などで厳しく管理されており、電波法の規制により、放射型の無線給電については実用化のハードルが高い状況にあった。しかし、2020 年 7 月、総務省は情報通信審議会より「構内における空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの技術的条件」に関する一部答申を受け、関連制度の整備に向けて動き出した。国際標準化の観点やニーズ、コストなどの面から 920MHz 帯、2.4GHz 帯、5.7GHz 帯の 3 つの帯域の仕様を策定するとともに、3 段

階に分けて規制を緩和し実用化する方針を明らかにした。まずは第一ステップとして 2022 年中にも屋内に限り、920MHz 近辺の電波を使って免許届け出制で無線給電を認める計画となっている。さらに 2024 年頃には屋外用にも拡大し、2030 年頃には大電力の給電も可能にするなど段階的に規制を緩和していく方針となっている⁹。

これらの動きに合わせて、日本国内企業も空間伝送型ワイヤレス給電事業への参画を始めている。屋内での無線給電としては、産業用途としてパナソニックが名刺サイズのカード型の受信装置を開発している。東芝はインフラ整備やカメラへの活用を検討している。京都市のスタートアップのスペースパワーテクノロジーはタグなどに使える部品を開発し、物流に応用し、工場や倉庫の製品・部品をバッテリーなしで管理する用途を狙って開発を進めている。また、米スタンフォード大学発のスタートアップ企業であるエイターリンク社は 2021 年 11 月、最大 20m 先の IoT デバイスに無線給電できる技術を製品化している。米国の Ossia 社も日本の丸文と組んで事業を展開する予定である。

屋外での利用も認められる規制緩和をにらんだ動きとしては、ソフトバンクや NTT ドコモなどの動きがある。ソフトバンクは情報通信研究機構(NICT)の支援を受け、京都大学や金沢工業大学と協業して携帯の基地局から小型機器に給電を行う技術開発を始める。同社は国内に約 20 万の基地局を持っており、通信会社としてのインフラを使って給電を行うという新事業となる可能性がある。NTT ドコモも無線給電の技術を公表しており、高速通信規格「5G」以降の次世代技術として注目している。この他、2020 年には、ミネベアミツ社が京都大学と「地蔵トンネル避難坑にて無線給電での社会実証試験」を行い、これらの技術を用いたインフラモニタリングシステムの実用化に向けて必要な実験データの取得および評価を行っている。

(3) レーザー方式 WPT

レーザー方式 WPT の実用化は、マイクロ波 WPT より遅れて進んできているが、近年では NRL や国防高等研究計画局(DARPA:Defense Advanced Research Projects Agency)が長距離伝送の可能性に注目しており、取組みが進められている。NRL では SSPS 研究の中心人物である Paul Jaffe 氏が 2019 年 5 月、メリーランド州にある U.S. Naval Surface Warfare Center において長距離空間パワービームの初のデモンストレーションを行い、325m の距離にわたって 400W(受光部)のレーザー伝送を成功させた。DARPA では、2021 年 10 月、「Breakthrough Technologies for Energy Web Dominance」プロジェクトのための SBIR(Small Business Innovation Research)/STTR(Small Business Technology Transfer) Opportunity (SBO)を発出し、革新的コンセプトの提案を受付けている。Energy Web ネットワークとは、地上のレーザー光源から空中のノードに電力を供給し、ノードはその電力を変換して自船の要求に応じて使用し、変換せずに残った電力を他の Energy Web ノードに中継するというものである。

また、NASA においてはアルテミス計画に関連して月面での永久影領域における電力の確保が重要課題となっており、その解決策として月面探査におけるレーザーエネルギー伝送の可能性についての取組みがみられるところとなっている。月探査機への電力供給が可能なレベルのレーザー電力ビーム伝送技術のフライト実証システムについての概念設計や近赤外領域(808nm)でのレーザーパワー伝送を行

⁹ 総務省は電波法施行規則等の一部を改正する省令案等について、2022 年 1 月 15 日(土)から 2 月 14 日(月)までの間、広くパブリックコメント(意見公募)募集を行っている。

い、GaAs と InGaAs LPC (laser power converters) の性能評価試験等を行っている。さらに賞金付きコンテスト等により、産官学より様々なアイデアを募る取組みも行っており、University of Virginia が BELLE (Beaming of Energy via Lasers for Lunar Exploration) システムの開発等を行うなど、大学における研究成果の活用も図っている。

その他、民間企業としては米国の PowerLight Technologies 社がレーザーを使ったワイヤレス給電技術の開発を行っている。同社の前身である LaserMotive 社が 2009 年の NASA Centennial Challenges の Power Beaming Challenge で 1 位を獲得しているが、2019 年には上述の NRL の地上実証試験に参加している。さらに 2021 年 10 月には Ericsson の 5G 基地局「Streetmacro 6701」(最大消費電力 300W) に対し、同社のレーザー送電システムを使って、数百メートル離れた距離から数百ワットの電力を伝送する実証実験に成功しており、2～3 年以内に製品化できる見込みとなっている。

米国以外では、2022 年 1 月、英国でサリー大学とスタートアップ企業である Space Power 社が国家プロジェクト「SPRINT (SPace Research and Innovation Network for Technology)」の一部として、LEO 小型衛星へのレーザーによる無線電力伝送技術の開発を開始すると発表した。

この他、イスラエルの Wi Charge 社が赤外線レーザーによるワイヤレス給電技術 (AirCord™) の製品開発を行っている。商品化については未定であるが、NTT ドコモも協業している。

5.2.3 まとめ

WPT 技術は、非放射型 WPT 技術の実用化が先行して進んだが、放射型 WPT についても近年ではマイクロ波方式 WPT を中心に、様々な実用化の検討が始まり、米国や日本、中国、イスラエルなどのベンチャー企業を中心に商品化の動きも進んできている。まずは屋内・近距離での無線電力伝送について製品化を想定した機器の研究開発・実用化活動が活発に行われている。オフィスや物流、家庭、商業施設、工場、医療など様々な利用シーンでの IoT 機器やスマートフォンなどへの給電を目標とし、その先として屋外での利用が提案されている。

図 5-21 に、今回の調査で対象としてシステムについて無線伝送距離と送電電力についてプロットしたものを示す。ただし、レクテナやレーザー受光部の開発のための実験は伝送距離をパラメータとしてはいないため、本図では対象外としている。

屋内・近距離・小電力システムについては、実用化が目前もしくは一部製品化が行われており、製品化に向けて開発中のものを含めて図の左下の方に位置している。900MHz、915MHz、2.4GHz のシステムが実用化されている。また、24GHz やミリ波のものも商品化に向けて開発が行われている。

一方、屋外・中～大距離・大電力システムについては国の研究機関等を中心に屋内外実験が実施(一部準備中)されている状況であるが、これらは SSPS の重要要素技術の地上技術実証の一部として実施されているものもあれば、地上での無線電力伝送システムの実用化を目指してのものもある。主に 5.8GHz のマイクロ波や X バンドのものを使ったシステムの実験が行われている。なお、レーザーについては赤外線レーザーが使用されている。

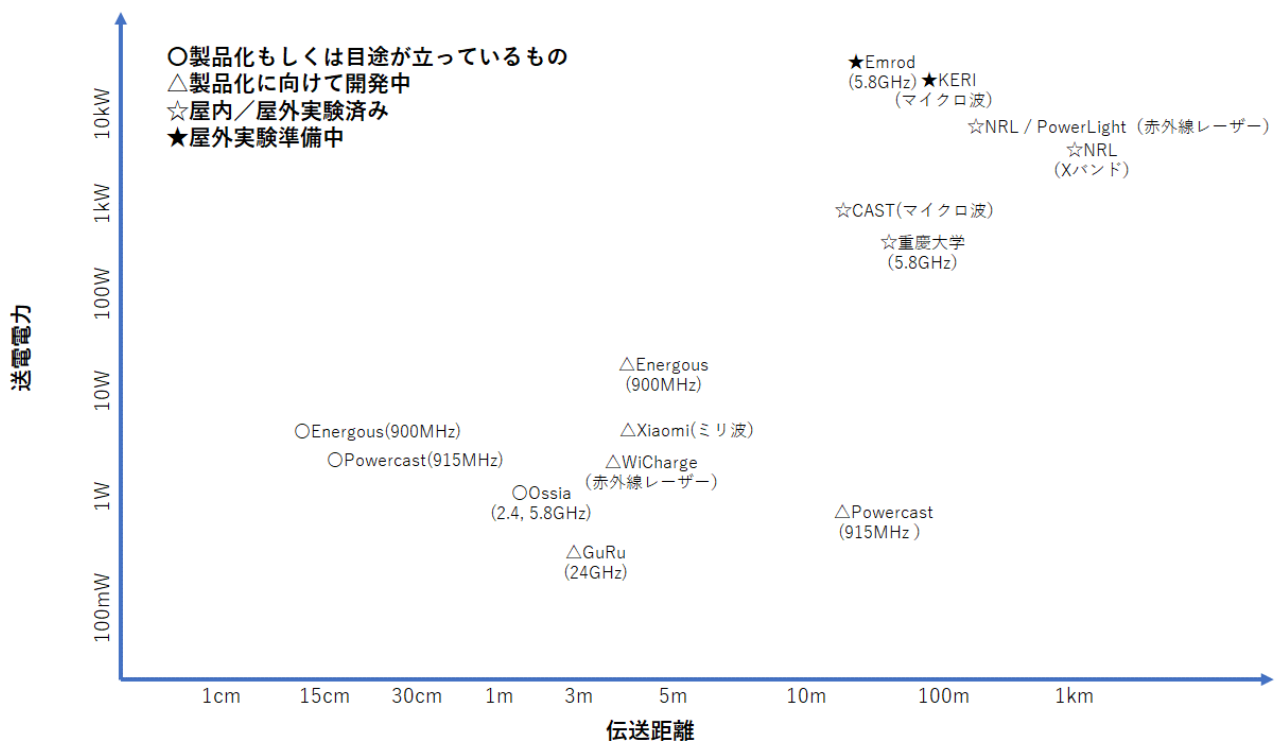


図 5-21 実用化に向けて開発が行われている WPT システム

出所)各種資料より三菱総合研究所作成

5.3 開発課題・体制等の検討

5.3.1 SSPS のアプリケーション例と技術的・運用的な課題

(1) SSPS のアプリケーション例

SSPS の市場アプリケーションの潜在的なユーザ層としては、以下の 3 つのカテゴリに大別される。

1) 地上における電力供給会社、2) 大きな需要がある、あるいは遠隔地にある地上の電力ユーザ(例：軍事基地などの施設ユーザ、孤立した町、大規模な鉱業・製造業、鉄道輸送システムなど)、3) 宇宙インフラ(例：人工衛星、宇宙ステーション、月面基地など)。

SSPS の初期の研究では、圧倒的に 1)の地上における電力供給会社を対象としているものが多かった。本アプリケーションは世界中で電力需要が増加し続けている現在でも重要な目標であるが、他の 2 種類のユーザへのサービスは、技術的も経済的にも早期に実現する可能性があるものとなっている。以下に、各ユーザへのサービスの内容と見通しについて示す。

- 地上における電力供給会社

地上における電力供給会社をユーザとする場合、化石燃料や再生可能エネルギーなど、比較的安価で定着しているさまざまなエネルギー源と競合することになる。人口密集地では、従来の電源は 1 キロワットあたり数ドルの価格で消費者に電力を供給することができる。SSPS が地上電力網に接続されるとすると、昼夜や天候に左右されない再生可能エネルギーを電力網に供給す

ることができることになるが、他の電源と競争力のある価格で実現するとなると、そのタイムフレームは数十年単位となる可能性もある。

- 大きな需要がある、あるいは遠隔地にある地上の電力ユーザ

軍事基地の電力は発電機で賄われ、敵地では液体燃料をトラックで輸送する必要があり、燃料輸送隊は頻繁に攻撃のターゲットになっている。軍隊以外でも孤立した地域社会では、燃料を消費する発電機への依存を解消する必要性があり、これらのユーザに対しては宇宙からオンデマンドで電力供給できる SSPS の価値が高く、高コストでもニーズが生じる。また、このようなユーザには大規模な産業施設、地域または全国的にサービスを提供する鉄道システム、および世界中で増加中の電力消費の多い海水淡水化プラントが含まれる可能性がある。

- 宇宙インフラ

無線ビーム電力伝送が実現すると、衛星やシスルナ空間の施設が最初のユーザとなる可能性がある。現在、衛星や ISS に搭載されている電力システムは高価であり、システム全体の重量増にもつながっている。今後、宇宙活動が活発化するのに伴い、電力需要も増加し、これまで宇宙で展開されてきた電力システムよりも大容量の電力が必要とされる可能性も高い。SSPS はこのような需要に対応するソリューションの一つになり得る。

また、ワイヤレス電力伝送は、NASA やその他の国家宇宙機関、そして現在月の採掘、特に月の南極にある氷の採取を調査している企業のニーズに応えることができる。特に月の南極にある氷の採掘は、エネルギー集約型の作業であるため、月の極軌道にある SSPS システムで電力を供給することができる。極点付近のクレーターの上にある太陽照射のある山頂に発電システムを設置し、その電力を永久影の領域に照射して、電力を必要な場所に供給することも可能である。

また、SSPS の無線電力伝送技術のスピンオフ事例としては、モバイルや防衛分野で多くの対応できるアプリケーションが示されている。これらは、前項で示した放射型(空間伝送型)WPT の適用事例と同様であるが、無人航空機(UAVs: Unmanned Aerial Vehicles)へのマイクロ波あるいはレーザーによる無線電力伝送や IoT 端末、電気自動車の充電ステーション、自動車の補助電源、移動体通信の端末等への充電等のアプリケーションが考えられている。

(2) 課題

1) サブシステムレベルの技術課題

SSPS を構成するサブシステムレベルでの課題を以下に示す。なお、これらの課題については、Xinbin HOU, Ming LI, “Activities of SPS Development in China”(参考文献(6))で示されているものを参考としている。

<SSPS のサブシステムレベルの技術課題>

- マイクロ波無線電力伝送技術
 - 高出力／高効率トランスミッタ

- ◇ 半導体アンプ
 - ◇ マイクロ波管(マグネトロン)
- 超大型／高出力送信アンテナ
- レトロディレクティブ・ターゲット検出
- 高精度なビーム方向制御
- 高効率整流器
- レーザー無線電力伝送技術
 - 高効率／高出力レーザー
 - 太陽光直接励起レーザー
 - 高出力大口径望遠鏡
 - 超高精度ビーム方向制御
 - 高効率レーザー受光セル
- 高出力電力発電、伝送および管理技術
 - 宇宙空間における高出力太陽光発電
 - ◇ 高効率、超軽量、長寿命の薄膜 GaAs 太陽電池
 - ◇ 電子蓄積と重大なアーク放電を防止する新カバーフィルム
 - 宇宙での高電圧電力伝送技術
 - ◇ 高効率コンバータ、スイッチ
 - ◇ 超軽量ケーブル、高電力ロータリージョイント
 - 特殊材料・部品
 - ◇ 新高導電性導体材料
 - ◇ 高温超伝導材料
 - ◇ 新世代 SiC、GaN パワーエレクトロニクス部品
 - 宇宙空間における電力システムの組立・保守技術
- 宇宙空間での超大型構造物、組立および制御技術
 - 超軽量構造材料
 - 長寿命フィルム素材
 - 新展開機構
 - 宇宙での組立用ロボット
 - 宇宙で 3D プリント製造
 - 宇宙での組立のための新手法
 - 高出力電気推進技術
 - 大型宇宙機の分散制御のための新手法
- 低コストおよび再使用可能な大型輸送技術
 - 低コストおよび再使用可能な大型ロケット
 - 低コストおよび長寿命な大型電気推進技術

2) 技術的・運用的課題への対応

SSPS の実現に必要となる発電および送電に関する基本的な技術はすでに実証済みのものである。

そのため、解決すべき技術的な問題は、システムの規模を十分に拡大できるかどうか、また宇宙空間や地球の大気圏を通過する長距離送電が安全で実用的かどうかに関わるものとなっている。SSPS システムの実現に懐疑的な意見の中には、技術的・経済的な実現性に関する多くの課題を指摘するものがある。最も多いものは、SSPS システムの質量が非常に大きく、多くの打上げを必要とするため、軌道へのアクセスにかかるコストが膨大になるというものである。その他、SSPS を構成する宇宙用部品のコスト、組立てに必要な作業量、継続的な運用・保守コスト、環境影響の緩和などが課題として挙げられている。長年にわたり、国内外の研究者は、これらの課題を解決しようとする多くのシステムコンセプト案を検討してきた。初期の研究では、大型のモノリシックな送受信機構造を含むコンセプトに重点が置かれていたが、1990 年代には、共通のバックボーンを使用しながらも、少なくとも部分的にモジュール化された構造へと移行した。そして近年では、コストを削減し、柔軟性を高める完全なモジュール構造のシステムに焦点が当てられ始めている。

なお、近年では、宇宙分野内外において、以下に示すような SSPS コンセプトの実現に向けて有利な方向の技術進歩がみられている。

<SSPS を取り巻く近年の技術進歩>

- 打上げ機会の増大と打上げコストの低減
- 太陽電池効率の大幅な向上
- モジュール式宇宙機部品(インターフェースや相互運用性の標準化を伴うもの)の大量生産の実現性の高まり
- 複数のソースから数十億ドルの投資を受けることによる、超大型商業宇宙プロジェクトの実現可能性の向上
- ロボットによる宇宙での無人組立作業の信頼性向上
- 月面の資源利用の検討が進み、SSPS の構成部品を現地(宇宙)の資源により調達できる可能性が増え、全ての資材を地球から打ち上げる必要がない可能性の出現

これらの大型ロケット、先進的な宇宙ロボット、大型宇宙構造物の組立技術、月や小惑星の現地資源利用技術開発などは、SSPS 以外の他のミッション達成のためにも必要な技術であるため、宇宙を利用する国や企業がこれらの技術開発を行い、その成果を SSPS 開発に活用していくような流れも考えられる。そのため SSPS 開発の実現性は、SSPS 単独の取組みだけでなく、他の宇宙開発ミッションの取組みとも深く関わってくることとなる。

この他、SSPS の実現に関する課題としては、安全性と環境の問題が挙げられる。低レベルのマイクロ波は通信インフラにより現代社会に常に存在しているが、高出力密度のマイクロ波ビームは環境、動物、人間、航空運航に深刻な被害を与える可能性がある。SSPS のオペレータは、安全、環境、健康、干渉防止に関するすべての慣行、法律、規制を遵守する責任を負うことになる。

5.3.2 WPT の実用化に向けての課題

放射型(空間伝送型)WPT は、小電力で比較的近距離のシステムについては、海外ではすでに実用化が始まっており、日本でも屋内での利用を前提としたマイクロ波方式の空間伝送型無線給電の利用に向けた制度化が進み、組立て型工場、加工型工場、配送センターの無人エリアのセンサや有人物物流現

場のセンサ、老人介護施設などの見守りセンサ等、2022 年にも社会実装が始まろうとしている。

さらに、空間伝送型無線給電の応用例として、遠隔地への大電力送電や飛行するドローンへの充電・給電などの発展も考えられている。現在、kW および km レベルの無線送電技術については実験レベルの段階にあるが、今後 SSPS 技術のスピンオフとしても、このようなレベルの屋外無線電力伝送技術が進展することが期待される。

これらの屋外・長距離無線電力伝送技術を実用化していくためには、長距離・大電力化や高効率化、軽量化等の技術的な課題がある。屋外・長距離 WPT に関する技術開発上の課題としては以下に示すものが挙げられる。

<技術開発上の課題>

- 送電ビームの制御技術
- 長距離電力伝送におけるビーム捕集効率の向上
- 受電部の大電力化(高耐電力)と軽量化
 - 受電装置の高性能化(RF-DC 変換に用いるデバイスや整流回路の高耐電力・高効率化等)

実用化に向けては、さらに制度・政策上の課題を解決していく必要がある。5.2.2 項で示したように、現在、日本においてもマイクロ波空間伝送型無線電力伝送の実用化のための制度整備が進んでいるところであるが、この他にも以下に示すような WPT 実用化に向けての課題が考えられる。

<制度・政策上の課題>

- 電波法などの法令整備
- 人体防護
- 既存の電波システムとの共存
- 障害物検知などの安全性対策
- 標準規格化

5.3.3 我が国が行うべき SSPS 技術開発の方向性の検討

5.1.2 項で現在提案されている主なりファレンスシステムとして、米国 John Mankins 氏の SPS-ALPHA、英国の CASSIOPeiA、中国の MR-SPS および韓国の K-SSPS を取り上げ、検討されているロードマップについても示した。各リファレンスシステムは 2GW 級であり、いずれも早期に容易に構築できるものではない。そのため、最初の実用システムの実現時期を SPS-ALPHA は 2030 年、CASSIOPeiA は 2040 年、MR-SPS は 2050 年として、そこに至るまでの過程にいずれも段階的にマイルストーンとなる実証試験を設定している。

実用レベルの SSPS は超大規模なシステムであるため、サブシステムレベルで必要な技術開発を行うと共に、システムとしての性能を確認し、それがどのようにフルサイズに拡張されるかを検証するために、システム全体の規模を拡大しながら段階的に実証を行っていくというロードマップは全てのロードマップに共通したシナリオである。システム全体の規模を拡大しつつ、かつ最終軌道により近い環境条件でパイロットプラントを構築していくことによって、SSPS の全体的なシステムとしての TRL(技術成熟度)を向上させるようなマイルストーンを設定することが重要となっている。

一方、それらのパイロットプラント実証と合わせて、サブシステムレベルでの小規模な地上試験および軌道上試験も行っていく必要がある。パイロットプラントでは実用 SSPS コンセプトモデルの体系的な検証を行うため、ゴールである SSPS コンセプトモデルからバックキャスト式に実証ミッションを検討する必要があるが、その手前である小規模な地上試験および軌道上試験については、コンセプトモデルに依存しない要素技術開発を行うことも求められる。上述したように、SSPS のコンセプトモデルは多様なものが提案されているが、現時点の既存の保有技術、アイデアをもとにシステムの検討を行っており、実現する 20～30 年後の技術革新を必ずしも考慮したものとはなっていない。そのため、初期の技術実証の段階では、ゴールであるコンセプトモデルに囚われない、基本的な要素技術の宇宙実証を迅速に（他国に先駆けて）行っていくという考え方も必要となろう。

このような技術実証例として考えられるのは、長距離にわたる高出力レベルのマイクロ波／レーザービーム、地上受信機の設計と運用、軌道上でのロボットによる組立てとメンテナンス、大規模構造物の構築と運用、大量部品製造などの重要技術で、これらの宇宙と地上の多くの技術要素について実際の運用環境で試験や実証を行う必要がある。ただし SSPS 実現の課題の一つである打上げコストの削減、ロボットによる組立てとメンテナンス、モジュラー・コンポーネントの大量生産などの課題は、他の宇宙ミッションによっても取組まれ、今後技術進展していく可能性も高い。SSPS 開発では、これら以外の SSPS 特有の技術開発に優先的に取り組んでいくことが効率的であると考えられる。

具体的には、無線電力伝送技術として、高出力デバイスの開発、ビームフォーミング／制御技術、そして大型宇宙構造物技術等の開発が SSPS 特有のものとして挙げられる。ただし、SSPS で必要となる宇宙における無線電力伝送技術は、地上の WPT 技術の進展が波及するものも多くあり、地上 WPT 技術開発の成果を生かして SSPS の無線電力伝送技術開発を促進させていくことも期待される。実際、日本で総務省が制度整備を行っている空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの検討において、第 3 ステップでは屋外利用・大電力送電を行う発展フェーズへ移行するとしており、SSPS のアプリケーションも視野に入ってくる可能性もある。有識者へのヒアリング結果によると、地上の WPT でのビームフォーミング技術や半導体デバイスなどは SSPS にも繋がるものもあり、WPT での技術や低コスト化などが進めば、SSPS もそれらの技術の恩恵を受ける可能性がある。地上放射型 WPT では、ここまで述べてきたようにミリ波やサブミリ波などの高い周波数のシステムが検討され始めているが、これらの技術動向も、地上へエネルギーを送る SSPS では応用が難しいが、月面でのエネルギー伝送等のアプリケーションには大きく活かされる可能性が高い。なお、SSPS では半導体デバイスとして高効率である GaN が有望視されているが、地上 WPT においても低コストの GaN の開発が進み SSPS での応用も期待できるところとなっている。一方で、地上では効率よりも低コスト化が重視される場合も多く、必ずしも地上 WPT と SSPS とで開発の方向性が同じになるわけではないが、いずれにしろ地上 WPT の分野で行われる送受信に関わるデバイスの開発が SSPS にも波及することは確実であり、SSPS の開発では、それらの宇宙環境における動作等の実証を行っていくことが求められる。

この他、初期の段階の宇宙実証の規模についても十分な検討が必要である。多くのロードマップが数十 kW～数百 kW の規模を第一段階の宇宙実証とするロードマップを描いているが、そのような規模のシステムの宇宙実証を行うことは容易ではない。そこに至るまでに、上述したような要素技術に関する小規模の軌道上実証を行ったり、広く国民の理解を得られるようなデモンストレーションを行ったりすることを検討する必要がある。例えば微小な電力であっても、宇宙からマイクロ波やレーザーで地上に送電できるということを、他国に先駆けて実証できれば、国民の理解増進という意味でも大きな効果を発揮

すると考えられる。

5.3.4 他国との連携の可能性等

超大型プロジェクトである SSPS の構築は、一国で取組むには資金的にも難しいため、どのロードマップにおいても国際協力で構築していくということが想定シナリオとして描かれている。

日本は現在、宇宙での無線電力伝送という点に関しては技術的優位の状態にあるが、今後、中国や米国が巨額の資金を投入して開発を加速させる可能性は極めて高い。日本が、現在の技術的優位性を保っている間に早急に国際協力の体制構築に向けて準備を進めておく必要がある。

国際協力の体制の検討を行うにあたり、現状の各国の研究実施機関の状況やキーとなる人物のつながり等を概観しておく(図 5-22 参照)。

米国では AFRL、NRL、Caltech、Northrop Grumman 等の SSPS 研究開発実施機関間の連携は強い。また、NASA 出身の John C. Mankins 氏は世界的にも SSPS の第一人者であり、各国のキーパーソンと交流を深めているが、英国の検討においても協力体制をとっている。

欧州では英国が国としての取組みを始めたところであるが、民間の IECL 社の Ian Cash 氏と Frazer-Nash Consultancy の Martin Soltau 氏が主導して検討を進めている。ESA も本格的な取組みを開始する準備を行いつつある。中国に関しては CAST が主導しており、Xinbin HOU 氏、Ming Li 氏が指揮を執っているが、重慶大学を含め、他の SSPS プロジェクトにも関与していることが多い。また中国を含め、韓国、シンガポール等のアジアについては、京都大学の篠原教授と共同研究を行ったり、良好な交流関係を保ったりしている。

どのような国際協力の体制をとるかについては、今後十分に検討する必要があるが、いずれにしろ SSPS の目標の一つを、世界的な温暖化対策としての CO2 削減、または国連の「持続可能な開発目標 SDGs」で設定されているゴール(例えば、(Goal 7:Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all)の達成とするならば、SSPS の実現へ向けた取組みを、国際社会に訴求していく必要があると考えられる。そのうえで、日本を取り巻く各国の状況を鑑みながら、今後どのような国際連携を行うべきか、十分な議論を行っていく必要があるだろう。

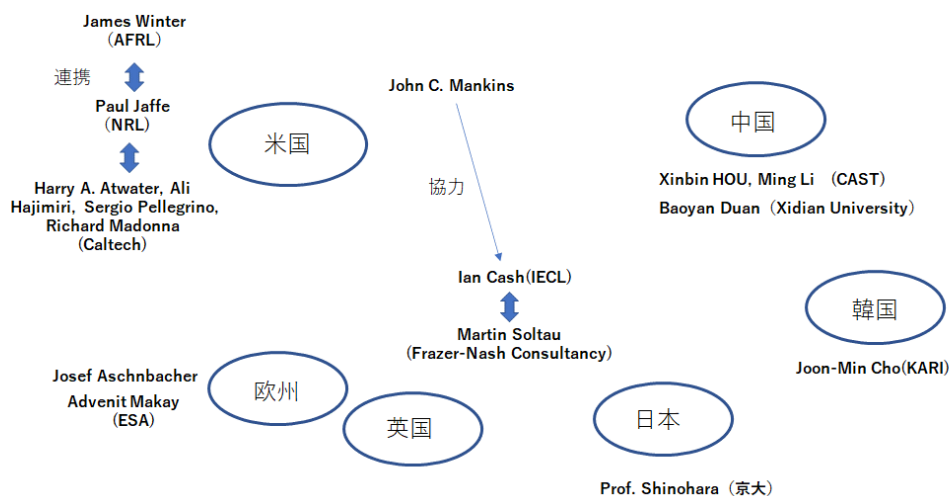


図 5-22 SSPS 各国のキーパーソン

出所)各種資料より三菱総合研究所作成

6. まとめと今後の課題

本調査では、「衛星コンステレーション関連技術に関する調査」、「人工衛星の製造ビジネスに関する法的課題の整理」、「衛星データ等地理空間情報活用技術に関する調査」、そして「宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術に関する調査」の4つのテーマについての調査・分析を行った。調査は、文献・Web サイト調査、ヒアリング調査、学会への参加による情報収集を組み合わせで行った。

2章で述べた衛星コンステレーション関連技術に関する調査では、経済産業省殿が指定した分光技術、GHG 観測技術、通信技術の3技術について着目し、特に分光技術のハイパースペクトルに焦点を当てて調査を行った。調査の結果、世界的に小型のハイパースペクトル衛星を用いたコンステレーションビジネスが展開されつつある状況が明らかとなった。また、ポスト ASTER・HISUI の方向性の検討においても、両センサと既存のミッションの比較・分析の結果、小型多波長センサによるコンステレーションを構成するという方向性が示唆された。

3章で述べた人工衛星の製造ビジネスに関する法的課題の整理では、多くの事業者に対するヒアリングにより各企業が抱えている契約における問題点・課題を把握し、人工衛星製造ビジネスにおける法的な課題を「部品発注/納入の条件」、「検査・検収」、「支払」、「損害賠償」、「契約不適合責任」、「第三者の権利処理」の6つの論点に整理するとともに、各論点について留意すべきポイントをまとめた。とりまとめにあたっては4名の有識者による委員会を設置し、3回の委員会を通じてご助言をいただいた。

4章で述べた衛星データ等地理空間情報活用技術に関する調査では、欧米等における衛星データ等の地理空間情報活用のための技術及びビジネスモデルに関する調査を実施し、今後の我が国における衛星データ等の地理空間情報の活用促進策の検討を行った。特に、Microsoft Azure Space 等のクラウド事業者の参入や、欧州 Destination Earth 等の衛星データを利用したデジタルツインの構築といった最新の政策的潮流も踏まえた技術動向分析を実施した。また、欧米等主要機関における官による民間衛星データ等調達・連携等の事例について、連携の背景・目的、連携の具体内容、成果と課題・障壁、今後の計画等)、連携パターン分類、及びそれらを実現するプラットフォームやシステムの状況について、整理・分析を行った。

5章で述べた宇宙太陽光・無線エネルギー伝送技術に関する調査では、米国、欧州、中国等を対象地域として、宇宙太陽光発電システム及びマイクロ波／レーザーによる無線エネルギー伝送技術に関して実施されている研究開発又はFSについて、実施機関、実施概要、実施体制、今後の計画等について調査を行った。また、大規模エネルギー供給システムとしてだけでなく、被災地における即応型小規模エネルギー供給や宇宙空間でのエネルギー伝送など、いくつかのアプリケーションを対象として、我が国が行うべき技術開発の方向性や他国との連携を含めた開発体制等について検討を行った。

今後の課題としては、衛星コンステレーション関連技術や地理空間情報活用技術については、日々新たな構想やプログラム／プロジェクトが創出されている状況であり、次年度以降も継続的に動向を把握し、我が国がとるべき方向性についての検討を深めることが必要と考える。法的課題の検討については、本年度は人工衛星製造ビジネスに焦点を当てたが、打上げビジネス等の他の宇宙ビジネスについて整理を行うことや、法的課題に関わらず、新規参入プレイヤーが直面する問題点・課題を明らかにし、宇宙ビジネスの参入障壁を下げるための方策を検討するが考えられる。宇宙太陽光・無線エネルギー伝送

技術については、本調査結果も活かしつつ地上や低軌道での実証等へとつなげていくことが肝要と考える。一方で、米国のアルテミス計画に代表されるように月面での活動が注目されている中、月面上での無線電力伝送に着目した検討を進めることも世界に先駆けるという点で考慮に値すると思う。

本調査結果が関連施策の検討に活かされることを祈念する。

添付資料

- 添付資料1:宇宙太陽光発電システムに関する研究開発一覧
- 添付資料2:無線エネルギー伝送技術に関する研究開発一覧

令和 3 年度重要技術管理体制強化事業(宇宙分野における重要技術の実態調査及び情報収集)報告書

2022 年2月

株式会社三菱総合研究所
フロンティア・テクノロジー本部
TEL (03)6705-6039

添付資料 1:宇宙太陽光発電システムに関する研究開発一覧

米国

USAF Air Force Research Laboratory (提携:Northrop Grumman).....	1
U.S. Naval Research Laboratory PRAM-FX3.....	4
U.S. Naval Research Laboratory NRL's LEctenna.....	6
California Institute of Technology(提携:Northrop Grumman).....	7
Mankins Space Technology, Inc.....	9
Solaren corporation.....	12
Xtraordinary Innovative Space Partnerships, Inc.	14
Beyond Earth Institute	16
National Space Society.....	18
Space Solar Power Institute	19

カナダ

SPACE (Solar Power Alternative for Clean Energy) Canada.....	20
--	----

欧州

ESA	21
ESA ESA Agenda 2025).....	23

英国

UK Space Agency/BEIS (委託先:Frazer-Nash Consultancy)	24
University of Strathclyde	27
International Electric Company (IECL)	29

ドイツ/米国

Deployables Cubed/California Polytechnic State University (CalPoly).....	31
--	----

フランス

Science Sainte Rose/Universit ´e de la R ´euni	33
--	----

インド

Indian Space Research Organisation (ISRO).....	34
--	----

シンガポール

National University of Singapore	35
--	----

韩国

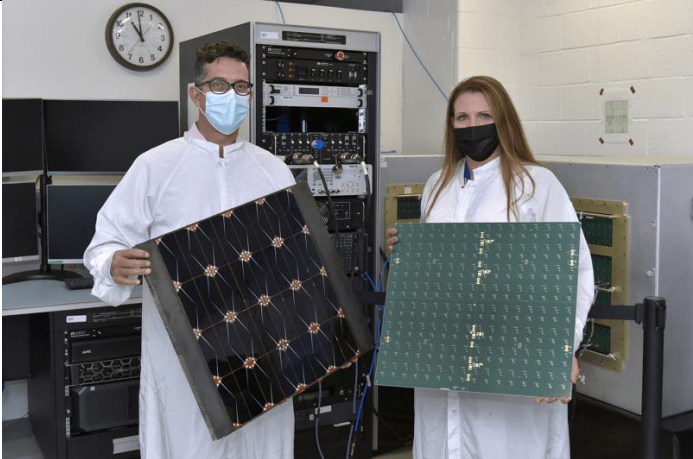
Korea Aerospace Research Institute (KARI)	36
---	----

中国

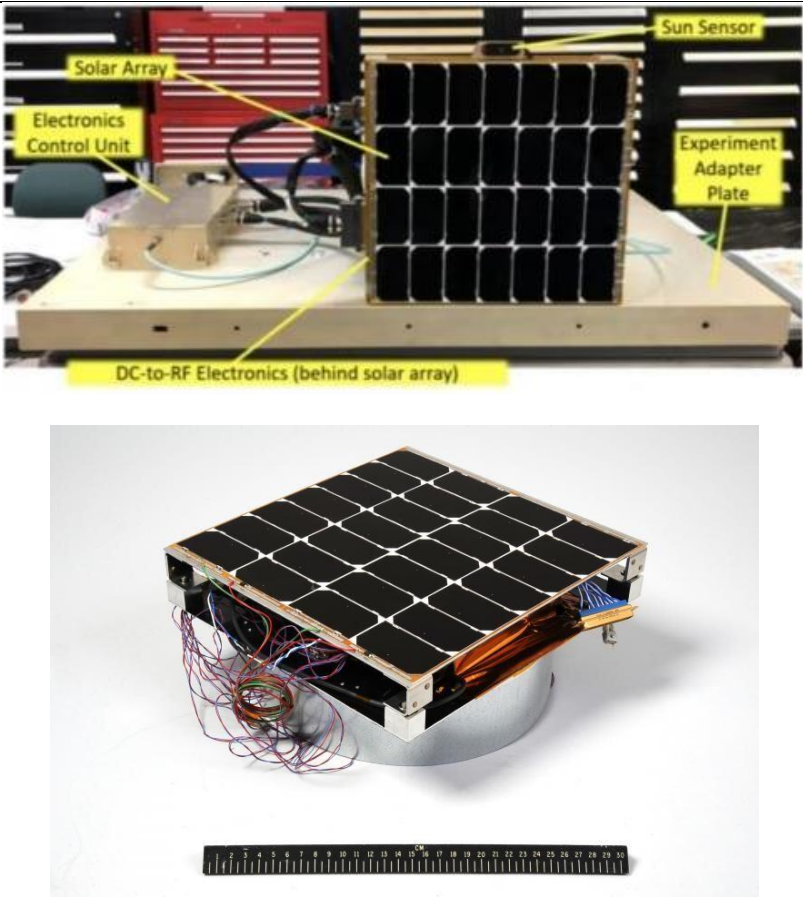
China Academy of Space Technology(Qian Xuesen Laboratory)	38
CAST／重慶大学／重慶市璧山区人民政府	40
National Natural Science Foundation of China	42
西安電子科技大学	43
Space Solar Power Station Committee of Chinese Society of Astronautics	45

		内容
項目		
実施機関		
機関名(所在地)	USAF Air Force Research Laboratory (AFRL:米空軍研究所) 提携先:Northrop Grumman 社(米)	
部署／研究者	Space Vehicles Directorate／Col. Eric Felt(director)、James Winter(SSPIDR project manager)、Dr. Andy Williams(Space Mission Area Lead)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	Space Solar Power Incremental Demonstrations and Research (SSPIDR)	
実施時期	2019 年夏～	
目的／背景	・国防総省のミッションを成功させるためには、必要なエネルギーを必要な時に必要な場所で確保しなければならない。本スタディは、世界中の遠征部隊に低コストおよび低リスクで常に安定したロジスティックに優れた電力を供給するために、革新的な SSP 技術とハードウェアを開発することを目的とする。 ・2019 年:AFRL の Space Vehicles Directorate の‘big idea pipeline’(10 年後に大きな変化をもたらす可能性のある革新的技術)の一つとして SSPIDER が始動	
研究内容	・SSPIDR は SSP のプロトタイプに必要な要素技術を段階的に開発するプロジェクトである。 ・2020 年 10 月:AFRL はカートランド基地に Deployable Structures Laboratory (DeSel)を新設し、高強度材料や衛星構造開発に焦点を当てた研究開発を行うことを発表。最初のプロジェクトとして SSPIDR の宇宙構造実験を行うとした。 ・現在、SSPIDR として以下の 3 つの実験を計画・遂行中 ✓ SPINDLE(Space Power Incremental Deployables Experiment):現在実施中の地上試験。大規模な SSP のアレイを支えるために、どのような構造が最適かを理解するための展開構造実験 ✓ SPIRRAL(Space Power Infrared Regulation and Analysis of Lifetime):サブシステムの故障の原因となる宇宙環境での大きな温度変化に耐えられる材料(可変放射率材料)実験。2023 年に ISS の MISSE(Materials International Space Station Experiment)ペイロードとして打上げ予定。 ✓ Arachne:SSPIDR プロジェクトを構成する段階的な実証実験の最初の実験。革新的な「サンドイッチ・タイル」を使用して、太陽エネルギーを高周波(RF)電力に変換する新たな技術を実証するとともに、そのエネルギーを地上に伝送して使用可能な電力に変換する可能性を示す。バスとなる「Helios ESPA」リングとペイロードとなる SSPRITE(Space Solar Power RF Integrated Tile Experiment)を搭載する。2025 年打上げ予定。Helios ESPA、SSPRITE とも Northrop Grumman 製 ✓ 2021 年 12 月、Arachne のための主要ハードウェアの最初のエンドー・ツー・エンド地上実証に成功。「サンドイッチ・タイル」による太陽光(ソーラーシミュレータ)からの RF エネルギー変換に成功。	
キー技術	・軽量・高効率の太陽電池と RF 送信機の組み合わせ。革新的なサンドイッチタイル(revolutionary sandwich tile) ・可変放射率材料	
進捗レベル	段階的な要素技術実証の最初の実証衛星である Arachne を 2025 年に打上げ予定。2020 年 12 月に、本衛星のバスを Northrop Grumman 社が納入済み。SPINDLE 地上試験は現在実施中。	
今後の計画	2023 年 SPIRRAL 実験を ISS で実施、2025 年に Arachne を低軌道で実証予定。SPINDLE は地上試験完了後に、軌道上試験の必要性を評価予定。	
予算規模	・2019 年 10 月:Northrop Grumman 社が重要なハードウェア要素を開発・提供する契約を 1 億ドル以上で受託 ・Arachne の衛星バスとなる Helios:2,500 万ドルの契約	
実施体制		
関連機関	・SSPIDR は段階的な技術実証と重要技術要素(CTE:Critical Technology Elements)の開発が必要であるとしており、開発中の CTE の一例として NRL(海軍研究所)が開発を行った1m ² のレクテナアレイが示されている。 ・NRI が行った PRAM-FX の実験からサンドイッチ・モジュールに関する有益な知見が	

	得られ、それらの知見が AFRL の Arachne に適用されている、とのこと。
国際協力	—
その他(特許、国家戦略との関係等)	
国家戦略との関係	・戦場での利用が最大の目的であるが、GPS が軍事目的から始まり世界中の人々が日常的に使用する技術へと移行したように、本技術も商業的に非常に価値のある資産となる可能性を強調している。 ・2021 年 11 月に米国宇宙軍、国防革新ユニット、AFRL が発表した報告書「STATE OF THE SPACE INDUSTRIAL BASE 2021」において、SSPS は大きな支持を得られた。SSPS を米国の宇宙と気候の課題に組込むことは、気候変動に対処するための新たな矢を提供するだけでなく、産業界、国民、国際的なパートナーを巻き込む新しい方法を提供することができる、と示されている。
参考図表	 SSP のコンセプト図(Credit : AFRL)  軌道上での Arachne の実験イメージ(Credit : AFRL)

	 2021 年 12 月の実験に用いたサンドイッチタイルの太陽光発電側と電波側のモデル (Credit : Northrop Grumman/Air Force Materiel Command)
出所	・ https://afresearchlab.com/technology/arachne/、2021 年 8 月 7 日取得 ・ https://breakingdefense.com/2021/04/solar-power-sats-help-drive-dod-deep-space-push/、2021 年 8 月 7 日取得 ・ https://news.northropgrumman.com/news/features/northrop-grumman-and-us-air-force-research-laboratory-partner-to-provide-critical-advanced-technology-in-space-solar-power/、2021 年 8 月 7 日取得 ・ https://www.kirtland.af.mil/News/Article-Display/Article/1997819/us-air-force-research-laboratory-developing-space-solar-power-beaming/、2021 年 8 月 7 日取得 ・ https://breakingdefense.com/2021/04/solar-power-sats-help-drive-dod-deep-space-push/、2021 年 8 月 7 日取得 ・ CHRISTOPHER T. RODENBECK; PAUL I. JAFFE et al., “Microwave and Millimeter Wave Power Beaming”, IEEE Journal of Microwaves, VOLUME 1, NO. 1, JANUARY 2021 ・ PETER GARRETSON, “STATE OF THE SPACE INDUSTRIAL BASE 2021, November 2021 ・ https://www.afrl.af.mil/News/Article/2878401/afrl-northrop-grumman-demonstrate-solar-to-radio-frequency-conversion/、2022 年 2 月 2 日取得 ・ https://sofrep.com/news/air-force-breakthrough-with-space-based-solar-energy/、2022 年 2 月 2 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	U.S. Naval Research Laboratory (NRL:米海軍研究所)	
部署／研究者	Dr. Paul Jaffe(the innovation power beaming and space solar portfolio lead) Chris DePuma(PRAM program manager)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	PRAM-FX(Photovoltaic Radio-frequency Antenna Module Flight Experiment)	
実施時期	2008 年～	
目的／背景	・ 国家安全保障宇宙局(National Security Space Office)が 2007 年に実施したフィージビリティ・スタディで、SBSP(Space Based Solar Power)技術の調査を推奨し、Paul Jaffe 氏を代表とする NRL の研究者たちが本分野の調査を実施することとなった。 ・ NRL では 2008 年からマイクロ波発送電モジュール(サンドイッチモジュール)の要素試作試験を実施している。	
研究内容	・ 太陽エネルギーをマイクロ波エネルギーに変換する技術の研究。PRAM-FX は 12 インチ(30.5cm)四方のタイルで、太陽エネルギーを RF 電力に変換する「サンドイッチ・モジュール」となっている。 ・ 2020 年 5 月:空軍の X-37B 軌道試験機(OTV)に搭載して打上げ。サンドイッチ・モジュールのエネルギー生成効率と温度特性のデータ取得が目的であり、変換したマイクロ波の送信は行わない。 ・ 2021 年 1 月:“Microwave and Millimeter Wave Power Beaming”論文を発表し、「サンドイッチ・モジュール」の初の軌道上飛行試験のデータを報告 ✓ 太陽電池層には、Spectrolab 社の UTJ 三接合太陽電池が使用されており、30.5cm×30.5cm×1.2cm のアルミニウムハニカムパネルを採用 ✓ RF エレクトロニクスは太陽光発電層と同一のアルミハニカム上に実装。送電実験は行わないため、アンテナはついていない。 ✓ これまでに達成した最大の RF 出力は、天頂から 32 度の角度の条件で 8.4W。モジュール全体の効率は約 8%。地上試験と比較しても良好な結果である。 ・ 現在、拡張試験段階に入っており、様々な動作条件を試している。	
キー技術	・ サンドイッチ・モジュール ・ 無線電力伝送、マイクロ波電力伝送、電力ビームング	
進捗レベル	技術開発の初期段階。現在は PRAM のデータ分析中。	
今後の計画	PRAM の結果分析後、次のステップとして、完全に機能するシステムを製作し、地球にマイクロ波送電を行う実験を行う計画。	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	Operational Energy Capability Improvement Fund in the Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering、Department of the Air Force Rapid Capabilities Office、Department of Defense Space Test Program、Boeing、TSC Praxis Operations、Gulfview Research、Odin Engineering、SpaceQuest.	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
	X-37B は通常は極秘任務を遂行するが、本ペイロードについては詳細が公表された。	

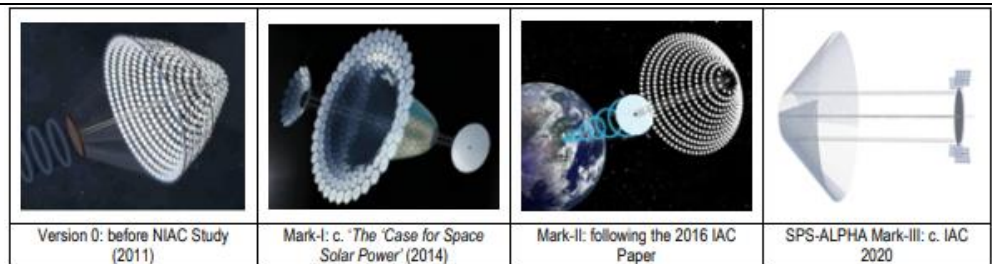
参考図表	 PRAM-FX の主要コンポーネント
出所	• https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/2651744/nrl-pram-mission-one-year-and-still-going/, 2021 年 8 月 10 日取得 • CHRISTOPHER T. RODENBECK; PAUL I. JAFFE et al., "Microwave and Millimeter Wave Power Beaming", IEEE Journal of Microwaves, VOLUME 1, NO. 1, JANUARY 2021 • https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/x-37b-otv 、2021 年 8 月 10 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	U.S. Naval Research Laboratory (NRL:米海軍研究所)	
部署／研究者	Dr. Paul Jaffe(the innovation power beaming and space solar portfolio lead) Elias Wilcoski(NRL research physicist.)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	ISS 内におけるレクテナ装置(NRL's LEctenna™)の実演 ※LEctenna:Light Emitting Diode (LED) Rectifying Antenna	
実施時期	2020 年 2 月 12 日	
目的／背景	・軌道上で電力供給デモンストレーションを成功させ、宇宙での無線電力伝送コンセプトを証明する。	
研究内容	・宇宙飛行士である Jessica Meir 氏が NRL の LEctenna™(発光型整流アンテナ)を使用して、家庭用ネットワークと同様の無線ネットワーク信号を電力に変換する様子を見せた。 ✓ LEctenna:高速スイッチングのショットキー・ダイオードと標準的な LED を並列に組み合わせ、試験管の中に入れて配線を分離したもの ・本デモンストレーションは、国防総省の Space Test Program のミッションによって発足した次世代のイノベータを鼓舞するための STEM プロジェクトにも位置付けられている。 ✓ LEctenna の製作方法もホームページ内で紹介されている。	
キー技術	・無線電力伝送、マイクロ波電力伝送 ・発光型整流アンテナ	
進捗レベル	ISS 内における非常に小規模のデモンストレーション。	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	NASA	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
参考図表	 ISS 内での LEctenna™の実験の様子(Credit:NASA)	
出所	・ https://www.nrl.navy.mil/STEM/LEctenna-Challenge/ ・ 説明動画、 https://www.youtube.com/watch?v=VICV-s0jMhU 、2021 年 9 月 17 日取得	

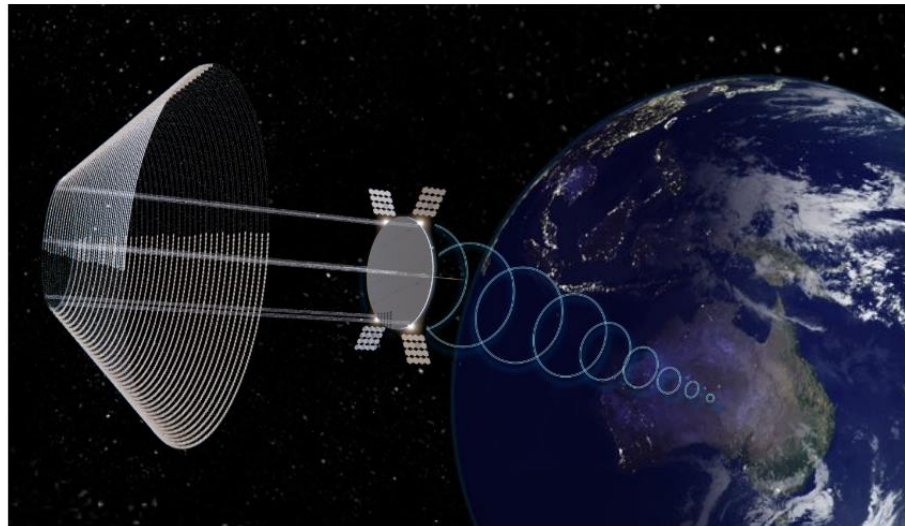
項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	California Institute of Technology (Caltech:カリフォルニア工科大学)(米) 提携先:Northrop Grumman 社(米)	
部署／研究者	Caltech's Division of Engineering and Applied Science (EAS)／Prof. Harry A. Atwater, Prof. Ali Hajimiri, Prof. Sergio Pellegrino Richard Madonna, Ph.D. (Project Manager, Caltech Space Solar Power Project)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	Space Solar Power Initiative(SSPI)／Space-based Solar Power Demonstrator-1 (SSPD-1)	
実施時期	2015 年～2017 年:Caltech/Northrop Grumman SSPI 2019 年以降:SSPI の成果を活用して SSPD-1 の軌道上実証を計画	
目的／背景	・ 2011 年、Donarld Bren 氏が Caltech に SSPP(Space-based Solar Power Project) の創設を打診し、2013 年に多額の寄付を行った。 ✓ Donarld Bren 氏は Irvine 社(大手不動産)の社長であり Caltech の理事会の終身会員でもある。いわゆる大富豪であり、多数の公的な寄付を行っている人物 ✓ 寄付の内容(人名、金額)は当初は秘匿されていたが、2021 年 8 月、SSPD-1 の実証が近づいてきたので、Caltech が 2011 年の Donarld Bren 氏の 1 億ドルの寄付のことを公表 ・ Caltech と Northrop Grumman 社は過去の長い歴史の中で協力関係を続けている。	
研究内容	・ 2015 年 4 月:Northrop Grumman 社が Caltech と 3 年間 1,750 万ドルの受託研究契約を締結し、両機関による Space Solar Power Initiative(SSPI)の開発を開始。 ✓ Caltech は 50 名以上のチームを組み、コスト競争力の高い SSP を実現するための革新的な超軽量技術やフェーズドアレイの開発を開始。 ✓ Atwater グループ:電力変換／伝送モジュールに適用可能な宇宙用の超軽量、高効率の太陽光発電タイルの設計・試作 ✓ Hajimiri グループ:直流(DC)の太陽エネルギーを RF パワーに変換し、フェーズドアレイから RF パワーを送信する統合システムを構築 ✓ Pellegrino グループ:100m スケールの折り畳み可能な柔軟超軽量構造体の構築に必要な主要部品の設計・試作 ・ 2017 年:2 種類のプロトタイプの実試作及び試験 ✓ 太陽光発電を集めてワイヤレスで送電する超軽量統合型プロトタイプ ✓ 直径 10cm、高さ 12cm の円筒に約 1m ² の膜を詰め、折りたたみと回転のコンセプトを実証。1kg/m ² 以下の面密度を達成 ・ 2020 年 12 月:momentus 社の軌道変換機 VIGORIDE のホステッド・ペイロードとして Caltech の SSPD-1 の搭載が決定(Space X 社のライドシェアミッションとして実施予定) ✓ 打上後は約 6 ヶ月間、VIGORIDE 上で運用される計画。ワイヤレス電力伝送と新しい展開可能な構造物の実証を行う	
キー技術	・ 軽量・高効率の太陽電池と RF 送信機の組み合わせ。革新的なサンドイッチタイル (“sandwich” module) ・ 超軽量集光装置と GaAs PV の使用による軽量化 ・ a single CMOS IC to convert DC to RF power ・ membrane-like surface	
進捗レベル	2015 年～2017 年の 3 年間で主要な地上要素技術実証を行い、2021 年 12 月に軌道上実証 SSPD-1 を目指して計画を進めていたが、スケジュールは遅延している。SSPD-1 についてはロケットおよび搭載衛星は決まっているものの、ペイロードの詳細については情報が出てきていない。	
今後の計画	2021 年 12 月、SSPD-1 を搭載した VIGORIDE 衛星(momentus 社製)を打上げ予定→スケジュールが遅延し、2022 年 10 月予定に変更。	
予算規模	・ 2013 年:Donarld Bren 氏が 1 億ドルを本研究開発のために寄付(公表は 2021 年 8 月) ・ 2015 年～2017 年:Northrop Grumman 社が Caltech に 3 年間 1,750 万ドルの資金を	

	提供(Caltech と受託契約)
実施体制	
関連機関	SSPI で開発したサンドイッチタイルおよび SSPD-1 は NRL が開発した PRAM-FX をベースとしている。
国際協力	—
その他(特許、国家戦略との関係等)	
参考図表	Three Major Technical Thrusts Flexible, high efficiency PV Multi-junction GaAs cells fab'ed with ELO technology [4] Ultralight concentrators Efficiency ~ 27 – 30% CMOS RF power conversion and phase control Projected ~50% DC/RF conversion efficiency Tile-to-tile timing jitter << 10° phase error [4] Structures & Mechanisms Membrane-like structure that can be folded and rolled for stowage, and deployed using carbon fiber coilable booms [4] Specific RF power > 1,800 W/kg Caltech SSPI で開発した主要要素技術(Credit : Caltech)
出所	• www.spacesolar.caltech.edu • https://www.caltech.edu/about/news/caltech-announces-breakthrough-100-million-gift-to-fund-space-based-solar-power-project、2021 年 8 月 7 日取得 • https://www.caltech.edu/about/news/space-based-solar-power-project-funded-46644、2021 年 8 月 7 日取得 • https://eas.caltech.edu/ingenious/12/idea_flow、2021 年 8 月 7 日取得 • Richard Madonna, “Space Solar Power Initiative (SSPI) – Results & Paths Forward”, National Space Society (NSS) International Space Development Conference Space Solar Power Symposium 2019 – Cislunar Marketplace & Space Solar Power, June 5 2019 • https://www.satellitetoday.com/launch/2020/12/15/momentus-lands-caltech-mission-for-its-new-hosted-payload-service/、2021 年 8 月 7 日取得 • Prof. Sergio Pellegrino ; Dr. Richard Madonna, “Caltech Space Solar Power Project”, ESA Virtual Workshop on Space-Based Solar Power For Net Zero, 9 December 2021

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Mankins Space Technology, Inc. (米 Nipomo, CA) (旧 ARTEMIS Innovation Management Solutions, LLC) (米)	
部署／研究者	President／John C. Mankins	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	NEW CONCEPTS AND MARKETS FOR SPACE SOLAR POWER	
実施時期	2010 年頃～	
目的／背景	・ Mankins 氏は NASA に所属していた 1990 年代後半から、長年 SSP (SPACE SOLAR POWER) 研究に携わっており、SSP 分野の世界的な第一人者である。2005 年 NASA 退職後も、SSP に関する活動を続け、2010 年頃より SPS-ALPHA (SPS by means of Arbitrarily Large Phased Array) コンセプトを提唱。 ✓ SPS-ALPHA は、モジュラー方式で小型 SPS を LEO に建設する案を発表した。この小型 SPS を拡大し、メガワット級発電施設を複数の GEO に建設するというコンセプトである。 ✓ 2017 年頃には、円錐形上の SPS-ALPHA Mark II コンセプトを発表。	
研究内容	・ SPS-ALPHA の技術成熟度 (TRL) は、現在 4-5 と推定される。打上げコストの削減や、大量生産技術等により、SPS-ALPHA は 2031 年までには、その実現可能性が証明され则认为している。さらに、2050 年までには 50-100GW のカーボンゼロの SSP が導入されるだろう。 ・ 現在は、SPS-ALPHA "Mark-III" (SPS by means of Arbitrarily Large Phased Array) をはじめとする SSP のコンセプトや地球と月における SSP の新しい市場について検討を行っている ✓ SPS-ALPHA "Mark-III" は軽量構造とヘリオスタット反射鏡による高度なモジュール化をコンセプトとする。十数種類、約 200 万個のモジュールで構成される。 ✓ エネルギー変換アレイ、円錐形の反射鏡アレイ、両者をつなぐ 7 本のブーム、その他姿勢制御モジュール等から構成される。 ✓ 1 基の出力 (宇宙での RF 出力) は 2GW、総重量は 7,496 ton と見込まれている。 ・ 約 20GW (10 基のプラットフォーム) の SPSALPHA Mk-III を配備し、地上で約 30 か所の受信部に電力を供給する場合の経済性の検討も実施。 ・ その他、フレームレス遠心構造のレーザー SSP の設計展望や、長距離 WPT に必要なスペクトラムを特定するための概念的なロードマップ等の検討も行っている。	
キー技術	・ 軽量構造 ・ 高度なモジュール化 ・ SPS-ALPHA (SPS by means of Arbitrarily Large Phased Array) ・ Carbon net-zero energy goals	
進捗レベル	コンセプト検討、関連技術の総合評価、市場分析等	
今後の計画	—	
予算規模	・ 2011 年～2012 年：NASA の NIAC プログラム (NASA Innovative Advanced Concepts) のフェーズ 1 プロジェクトとして採択。10 万ドルが提供された。	
実施体制		
関連機関	Mankins 氏は Moon Village Association (MVA) の Vice President も務める他、NSS (National Space Society) の Board of Directors のメンバー等の多くの関連機関の役職を兼任している。Beyond Earth Institute 社のアドバイザーにも就任している。	
国際協力	—	
その他 (特許、国家戦略との関係等)		



SPS-ALPHA Various Versions (Credit : John Mankins)

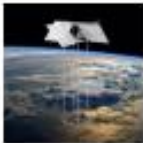
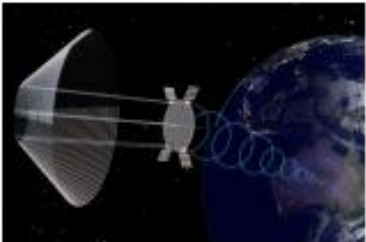


SPS-ALPHA Mark III (Credit : John Mankins)

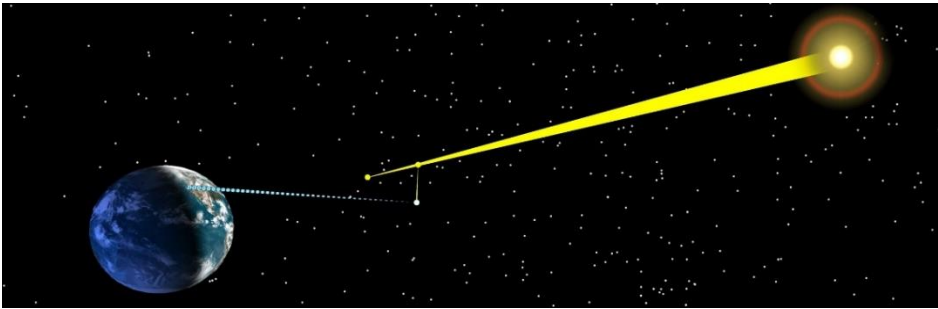
参考図表

SEGMENT	KEY PERF. PARAMETERS	VALUE
Energy Conversion	PV	3.4 MW
	WPT Frequency	2.45 GHz
	WPT Distance	~35,800 km
	WPT Power Transmitted (RF)	2.4 GW
	WPT Xmtr Diam.	1,685 m
	Receiver Diameter	6,000 m (@ Equator)
	Rcvr Output (DC)	2 GW
Platform System Characteristics	Primary Structure	~3.3 km x ~4.5 km
	No. of Modules	~1,900,000
	SPS Mass	~7,600 MT
	Ave. Mass / Module	~4 kg / module
Cost/Financials	SPS H/W Cost	~\$5,890 M
	Deployment Cost	~\$5,930 M
	Cost of Money	~\$19,000 M
	O&M Cost	~\$12,000 M
	Econ. Lifetime	40 years
	Total Electricity	702,559,375 MWh
	Cost of Energy	~6¢ / kWh

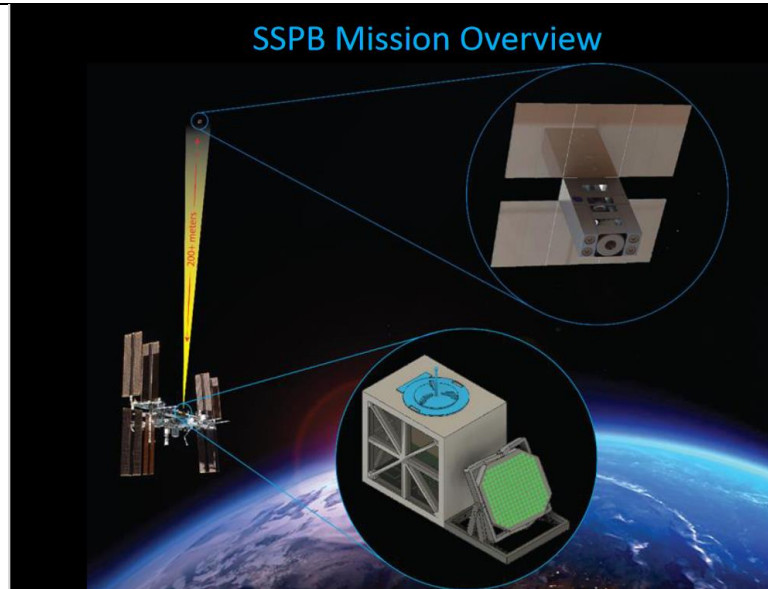
GEO SPS-ALPHA Mark III の仕様と経済性 (Credit : John Mankins)

	A Roadmap to Operational / Cost-Effective SPS-ALPHA in less than a Decade  Phase 1 Lab Prototype ≈ -50kW ~\$40M 12-18 months  Phase 2 LEO Demonstration ≈ -500kW ~\$250M +1B-24 months  Phase 3 MEO Pilot Plant ≈ 10-100MW + \$1B-\$2B +24-36 months  Phase 4 / 5+ Operational SPS in GEO ≈ 1-2GW + \$10B-\$12B +36-60 months SPS-ALPHA の開発ロードマップ (Credit : John Mankins)
出所	• John C. Mankins, SPS-ALPHA: The First Practical Solar Power Satellite via Arbitrarily Large Phased Array, Final report of A 2011-2012 NASA NIAC Phase 1 Project, September 15, 2012. • John C. Mankins, SPS-ALPHA Demonstrations to Operations, International Space Development Conference (ISDC 2017), May 24-28, 2017 • John C. Mankins, "SPS-ALPHA Mark-III and an Achievable Roadmap to Space Solar Power" ,72nd International Astronautical Congress (IAC) 2021 IAC2021/C3.1.2 • John C. Mankins, "KEYNOTE: NEW CONCEPTS AND MARKETS FOR SPACE SOLAR POWER" ,71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition, 12-14 October 2020 要約 • John C. Mankins, "CENTRIFUGAL LASER SPACE SOLAR POWER PLANTS: DESIGN PROSPECTS AND IMPLEMENTATION FEATURES" ,70th International Astronautical Congress (IAC) – 22 October 2019 要約 • John C. Mankins, "Identifying Spectrum for use in Long-Distance Wireless Power Transmission" ,69th International Astronautical Congress (IAC) – 1-5 October 2018 要約

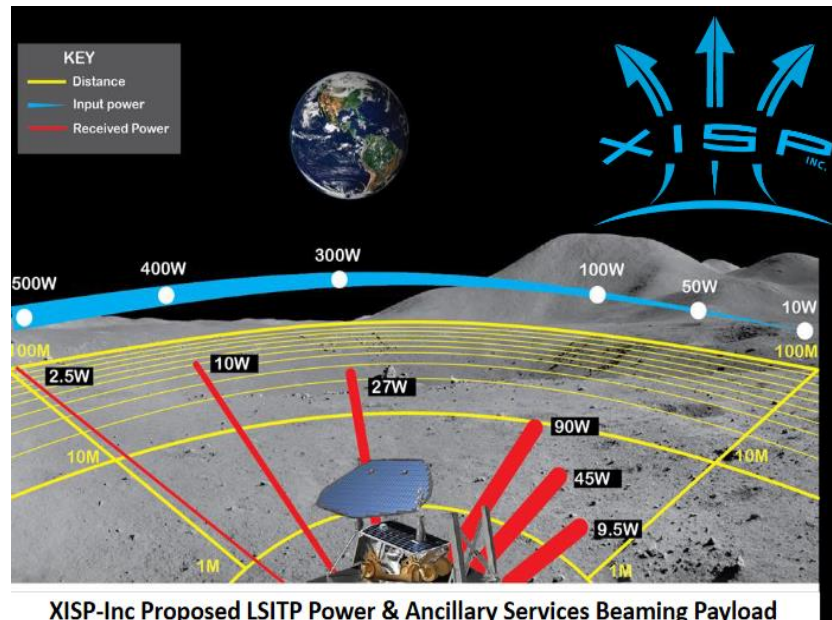
項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Solaren corporation (米 Manhattan Beach, CA)	
部署／研究者	Gary T. Spirnak(Founder, Chairman, President and CEO) Dr. James E Rogers(Co-Founder, Vice President and Chief Engineer)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	エネルギーと航空宇宙を組み合わせ、SSP(Space Solar Power)システム、SSP プラント・オペレーション、電力販売の 3 つのコア・ビジネスを行う。	
実施時期	会社設立は 2001 年であるが、本格的な研究開発業務は 2006 年～	
目的／背景	・ 創業者の Gary T. Spirnak 氏が「SSP はこれまで政府や学界の領域であったが、ビジネスになり、投資家に大きなリターンをもたらす」と判断し、投資家から資金調達を目指した。 ・ Solaren 社は、これまでの SSP システムと比較して画期的に軽量のシステムデザインを開発し特許を取得した。2006 年から 2015 年かけて、米国、カナダ、ブラジル、ロシア、インド、日本、中国でこれらの SSP システムの特許を取得した。	
研究内容	・ 2009 年 12 月：カリフォルニア州公益事業委員会(PUC)は電力大手 PG&E 社が Solaren 社との間で 4 月に締結していた電力購入契約(15 年間)を承認。 ✓ Solaren 社の太陽電池を周回軌道衛星に設置し、変換した RF を同州フレズノ郡の受電部に無線伝送し、再び電気エネルギーに変換するというもの。 ✓ Solaren 社は年間 17 億 kWh を発電できると試算。当初は運用開始を 2016 年としていた。 ✓ 本契約は Solaren 社が、プラント整備に必要な資金を獲得することが条件であったが、世界的な金融危機の影響もあり、必要な融資が得られなかったため、2015 年に契約を見送ることで合意した。 <Solaren 社が掲げる 3 つのコア・ビジネスの内容> ・ SSP(Space Solar Power)システム ✓ SSP プラントの設計、開発、統合、運用のための認証を行う。 ✓ 今後 10 年間で宇宙および地上においてサブシステムの実証を行い、GEO に 250MW の SSP プラントを打上げる。 ・ SSP プラント・オペレーション ✓ 構築した SSP プラントを 24 時間体制で維持・運用し、顧客への電力供給を継続的に管理する ・ 電力販売 ✓ 商業および政府機関の顧客と合意した条件で長期電力購入契約(PPA)を締結し、ゼロカーボンのベースロード電力を 24 時間 365 日供給する。1 つの地上基地で 250～2000MW の規模の受電が可能であり、世界中の国のベースロード電源として供給することができる。	
キー技術	ultra-lightweight SSP plant	
進捗レベル	SSP デザインに関する特許を多数の国で取得し、実験室レベルでの試験は行っている模様であるが、それ以上の活動については不明。 常に野心的な目標を掲げているが、具体的な進捗は見えてこない。	
今後の計画	・ 2021 年に実験室内で SSP のペイロードテストを完了予定 ・ その後、宇宙実証を経て、2025 年にメガワット級の SSP プロトタイププラントを GEO に打上げ予定 ・ 10 年以内にカリフォルニア州に 250MW の SSP プラントを完成させることを目標としている。	
予算規模	・ Solaren 社は 2005 年に創業者や投資家から「300 万ドルから 500 万ドル」を集めた ・ Solaren 社の H.P.には SSP 開発に数十億ドルを投じたと記載されている。	
実施体制		
関連機関	—	
国際協力	—	

その他(特許、国家戦略との関係等)	
特許	Weather management using space-based power system の特許 (US20110204159A1)も出願。
参考図表	 Solaren SSP のイメージ図 (Credit : Solaren)
出所	・ https://www.solarenspace.com/ ・ https://www.solarenspace.com/2021/01/29/facebook-post-referencing-solarenspace-solar-setting-the-record-straight/、2021 年 8 月 16 日取得 ・ https://www.greentechmedia.com/articles/read/Space-the-Next-Frontier-For-Renewable-Power、2021 年 8 月 16 日取得 ・ https://patents.google.com/patent/US20110204159A1/en?q=solarenspace、2021 年 8 月 16 日取得

		内容	
項目			
実施機関			
機関名(所在地)		Xtraordinary Innovative Space Partnerships, Inc. (XISP-Inc.) (米 Cabin John, MD) エンジニアリング・コンサルティングサービス・IT・ソフトウェア	
部署／研究者		Gary Pearce Barnhard (President and CEO)	
研究開発／FS 概要			
タイトル／テーマ		Space-to-Space Power Beaming (SSPB):宇宙空間電力伝送の検討 Commercial ISS Technology Development, Demonstration, and Deployment (TD3) mission for SSPB:ISS からキューブサットへの電力伝送実証ミッション LSITP (Lunar Surface Instrument and Technology Payloads) Power & Ancillary Services Beaming Payload	
実施時期		2012 年～	
目的／背景		・SSPS のアプリケーションとして宇宙空間における電力伝送を取り上げ、エンジニア リングの観点からの検討を行う。 ・段階的な技術開発の第 1 フェーズとして ISS のリソースを活用した実証ミッションを 提案する。	
研究内容		・宇宙機の電力システム(発電、送電、制御、蓄電、負荷部等)のアンバンドリング／分離 が可能であるとの仮説を立て、そのために必要な技術開発を提案する。 ・TD3 ミッションとして、ISS 上および近傍で、周波数に依存しないエネルギービーミン グ技術の開発をサポートする SSPB テストベッド環境を構築する。 ✓ ISS TD3:ISS を利用した技術実証。3-6kW レベル。 ✓ LEO TD3:LEO での実証。100kW レベル ✓ GEO TD3:GEO での実証。100MW レベル ・2019 年から、月面で電力や補助サービスを必要としている顧客向けに LSITP Power & Ancillary Services Beaming Payload を提案	
キー技術		宇宙機の電力システム(発電、送電、制御、蓄電、負荷部等)のアンバンドリング Space Power Beaming & Ancillary Services	
進捗レベル		コンセプト、実証ミッション提案段階	
今後の計画		・GEO での実証を 2025 年に行い、2029 年に 2GW の Full SSP を実現、商用化を開始 する。2038 年に 10GW、2047 年に 50GW の商用化を行うロードマップを描いてい る。	
予算規模		・2018 年 8 月に ISS National Lab Resource Allocation and Mission Development Funding に応募している。	
実施体制			
関連機関		—	
国際協力		—	
その他(特許、国家戦略との関係等)			
参考図表			



ISS を利用した TD3 ミッションのイメージ図 (Credit : XISP-Inc.)



XISP-Inc Proposed LSITP Power & Ancillary Services Beaming Payload

出所

- <https://www.xisp-inc.com/>
- <http://www.spacedevelopmentfoundation.org/wordpress/documents/2019/06/barnhard-space-solar-power-ancillary-services-beaming.pdf>, 2021 年 8 月 23 日取得
- <https://www.hou.usra.edu/meetings/lunarlsru2019/eposter/5093.pdf>, 2021 年 8 月 24 日取得
- <https://sic.jhuapl.edu/uploadedDocs/posters/917-Barnhard-Potter%20Power%20and%20Ancillary%20Services%20Beaming%20Infrastructure%20Poster.pdf>, 2021 年 8 月 24 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Beyond Earth Institute (米) ※本社の所在地は不明 主に地球外への人類の進出をテーマにした政策提言等を行う非営利団体	
部署／研究者	Steven Wolfe (President & Co-Founder)、Tony DeTora, (VP of Policy Coherence)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	Draft National Strategy for Space Solar Power の提案 宇宙政策大統領指示 (SPD: Space Policy Directive) に SSP (Space Solar Power) 開発の促進を盛り込むことを提言	
実施時期	発表: 2021 年 8 月 5 日	
目的／背景	50 年前から検討が進められてきた SSP は、昨今の技術の進歩により、地上の他の発電システムと競合し得るようになった。SSP は今後数十年の間に重要な技術となり、カーボンネットゼロエネルギーという世界的な課題を達成するための重要な選択肢となる可能性があるため、国としての開発促進が求められる。	
研究内容	米国が宇宙領域のこの分野におけるリーダーであり続けることを保証するとともに、宇宙を通じてすべての人々の生活の質を高め続けるために、以下の内容を SPD に盛り込むように提案する。 <Beyond Earth Institute 社の提言内容> ・米国は、民間ミッションと商業市場のための SSP 開発と実証をタイムリーに行うべきである。 ・NASA を主導的立場に置きつつ、国務省、エネルギー省、国防総省、その他の省庁、官民連携による民間企業、国際協力による民間企業が参加することが必要である。 ・NASA は他の機関と協力して、以下の目標を掲げることを推奨する。 ✓ 地球上に分散可能なベースロード電源となるカーボンネットゼロの商業用 SSP システムを開発する。 ✓ 月や惑星の表面や宇宙空間での電力供給に適した SSP システムを開発する。 ✓ 低コスト化を最大限に進めるために、官民パートナーシップを通じて、また可能な限り国際的なパートナーと協力して開発すべきである。 ・以下のマイルストーンを含むロードマップを推奨する。 ✓ 2020 年代半ばまでに、市場にカーボンネットゼロエネルギーを商業的に競争力のある価格で持続的に供給するのに適した SSP を可能にする技術基盤の開発を行う。 ✓ 2020 年代半ばから後半までに、米国や国際機関と協力して、周波数管理やその他の規制問題を解決する。 ✓ 2020 年代半ばから後半までに、地球低軌道から地表に 1kW 以上の電力を供給する SSP を実証する。 ✓ 2020 年代後半までに、月面に電力を供給する SSP を実証する。 ✓ 2020 年代後半までに、地球上の 1 つ以上の市場に 100MW 以上のカーボンネットゼロ電力を供給する SSP パイロットプラントを開発、展開、運用し、1GW 以上に拡張する。 ・米国は SSP システム(無線送電を含む)の開発と使用において、適用されるすべての連邦法に従い、国際的な義務と公約に従って、安全性、セキュリティ、持続可能性の原則を遵守すべきである。	
キー技術	—	
進捗レベル	政策提言	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	アドバイザーに John Mankins 氏が就任	
国際協力	—	

その他(特許、国家戦略との関係等)	
参考図表	—
出所	・ https://beyondearth.org/ ・ http://www.spaceref.com/news/viewpr.html?pid=57910、2021 年 8 月 23 日取得 ・ Draft National Strategy for Space Solar Power, Presidential Policy Directive National Strategy for Space Solar Power, 05 August 2021

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	National Space Society (NSS: 米国宇宙協会)(米、Washington DC) 地球外コミュニティ文明の構築に貢献するための教育や草の根活動を行う NPO。宇宙関連雑誌「Ad Astra」の発行や宇宙政策に関するポジションペーパーの作成も行う。	
部署／研究者	NSS COO／Dale Skran NSS Board of Directors and the NSS Policy Committee／John Mankins	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	Space Solar Power: Enabling a Green Future with Economic Growth SSP の教育、普及、関連ワークショップや会議の開催、ポジションペーパーの発行等	
実施時期	1987 年～	
目的／背景	—	
研究内容	NSS では SSP は将来の重要なエネルギーソリューションであると位置づけ、関連教育、普及啓発活動、ワークショップや会議の開催等を継続的に実施している。近年の主な活動を以下に示す。 ・毎年開催している ISDC(International Space Development Conference)で SSP のテーマを設けている。ISDC は 1982 年に第一回を開催している。 ・2021 年 5 月、SSP のキャンペーンとして作成したビデオ”Dear Earth”ビデオが第 42 回 Telly Awards の Best of Social Media 部門に選出。 ・2021 年 8 月、Beyond Earth Institutes が発表した米国政府トップへの公開覚書「Presidential Policy Directive」の支援を表明 ・NSS は、2030 年までに SSP の軌道上での実証実験を行い、2035 年までに実物大の運用システムを実現することを目指し、年間 5 億ドル以上の政府投資を推奨している。2021 年 8 月、ワシントンの大手シンクタンクである Progressive Policy Institute は NSS の推奨を強化する報告書を公表した。	
キー技術	—	
進捗レベル	教育、普及活動、政策提言	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	International Astronautical Federation (IAF) Power Committee、SPACE Canada、Progressive Policy Institute	
国際協力	欧米の企業 20 社以上が協力およびスポンサー関係を結んでいる。	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
参考図表	—	
出所	・ https://space.nss.org/space-solar-power/ ・ビデオ動画、 https://www.youtube.com/watch?v=WohkSJmCvKI 、2021 年 9 月 24 日取得 ・DANIEL OBERHAUS, “Space Solar Power: An Extraterrestrial Energy Resource for the U.S”.. 18 August 2021	

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Space Solar Power Institute (米、Jonesboro, GA) Space Solar Power について、一般を対象に教育を行うことを目的とする NPO 教育法人	
部署／研究者	SSPI Exective Director／Darel Preble Georgia Tech School of Electrical and Computer Engineering／Prof. Gregory D. Durgin	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	SSP の教育、普及、関連ワークショップ (Space Solar Power Workshop at Georgia Tech)の開催	
実施時期	1997 年～	
目的／背景	—	
研究内容	・ SSPI は世界のベースロード・エネルギー市場のための SSP の設計、構築、保守の方法の検討や普及啓発活動、ワークショップの開催等を継続的に実施している。 ・ またジョージア工科大学の航空宇宙工学部および電気・コンピュータ工学部と密に連携し、技術的課題の解決に取り組んでいる。 ✓ 毎年開催している Space Solar Power Workshop は Georgia Tech が後援している。	
キー技術	—	
進捗レベル	教育、普及活動、ワークショップの開催	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	Georgia Tech School of Electrical and Computer Engineering	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
参考図表	—	
出所	・ https://solarsat.org/ →2014 年以降更新なし ・ https://attend.ieee.org/wisee-2021/wp-content/uploads/sites/251/2021/10/Program-for-IEEE-WiSEE-2021-Space-Solar-Power.pdf 、2021 年 12 月 16 日取得	

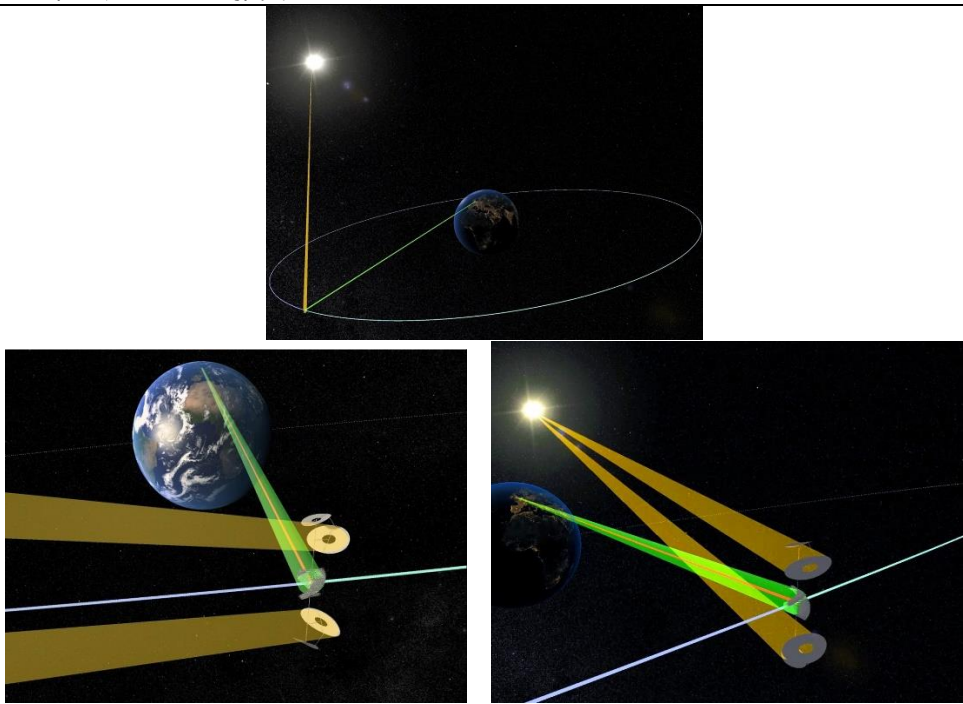
項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	SPACE(Solar Power Alternative for Clean Energy) Canada (加、Toronto) 2007 年設立の NPO	
部署／研究者	Honourary Chair／Dr. Bryan Erb President & CEO／George Dietrich	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	support, encourage and facilitate international dialogue on solar energy from space through education, research and commercialization 教育、研究、商業化を通じて、SSP(Space Solar Power)に関する国際的な対話の支援、奨励、促進	
実施時期	2007 年～	
目的／背景	・ SSP に関する教育、研究、ワークショップの開催等を行う。 ✓ 2009 年にカナダ・トロント市で “FROM THE SUN TO THE EARTH” An International Symposium on Solar Energy from Space を開催している。	
研究内容	・ 米 NSS が毎年開催している ISDC(International Space Development Conference) の Gold Sponsor となっている。 ・ 2016 年より、毎年、教員が指導し学生が実施するプロジェクトに関する国際的な研究・工学研究・論文コンテスト(International Space Solar Power Student Competition)を実施している。毎年、何十もの提案があり、IAF の IAF Power Symposia で発表される独創的な研究につながっている。 ✓ 本コンテストは International Astronautical Federation (IAF) Power Committee, Commission III of the International Academy of Astronautics (IAA), the National Space Society (NSS) International Space Development Conference (ISDC) SSP Track, International Astronautical Congress, the Space Generation Advisory Council の協力のもと、実施されている。 ✓ 選ばれた受賞者には、毎年開催される IAC SPS シンポジウムへの出席と中間発表を支援するため、一定額の資金援助が行われる。	
キー技術	STEM 教育	
進捗レベル	教育、普及活動、学生コンテストの実施	
今後の計画	—	
予算規模	H.P.上で寄付を募っている。	
実施体制		
関連機関	International Astronautical Federation (IAF) Power Committee, Commission III of the International Academy of Astronautics (IAA), the National Space Society (NSS) International Space Development Conference (ISDC) SSP Track, International Astronautical Congress, the Space Generation Advisory Council	
関係者	Advisory Board Member に John Mankins 氏	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
参考図表	—	
出所	・ https://www.spacecanada.org/ ・ SPACE Canada, “INTERNATIONAL SPACE SOLAR POWER STUDENT COMPETITION 2020-2021”. 12 April 2021	

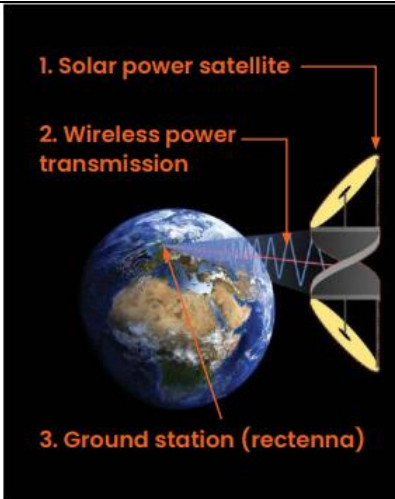
項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	ESA	
部署／研究者	Advenit Makaya (ESA Engineer)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	SBSP (Space-based solar power)の技術やコンセプトに関するアイデア募集	
実施時期	2020 年 9 月～2021 年 1 月 12 日	
目的／背景	・ 近年の技術進歩とロケット打上げ費用の低減により、SBSP の実現可能性が高まってきた。IAA(国際宇宙航行アカデミー)の提言に沿って、エンジニアリングコミュニティの創意工夫を活かし、実現に向けたキーテクノロジーを推進する時期に来ている。 ・ Rohan Ramasamy 氏および Leopold Summerer 氏(Advanced Concepts Team, European Space Research and Technology Centre)の IAC 2018 での論文 “Solar Power Satellites for Lunar Rover Exploration” がリファレンスとして示されている。	
研究内容	・ 宇宙で SBSP を実現するためのソリューションは非常に多岐にわたるため幅広いアイデアを募集する。特に以下のカテゴリーの新しいアイデアが期待される。 ✓ 地球、月、火星での使用を目的とした、SBSP の新しいシステムコンセプト ✓ SBSP の技術的・経済的な実現性を大幅に向上させる可能性のある新規のサブシステム・コンセプトや技術 ✓ SBSP をスケールアップし、エネルギーグリッドに統合するための新しい方法 ✓ 宇宙建設の機会を利用した斬新なアイデア(宇宙資源の利用、質量・サイズ・構造要件・体積などの打上げ制約の解消など) ✓ 先行的な宇宙実証のための新しいコンセプト ・ 募集は、ESA Discovery and Preparation 部門の OSIP(Open Space Innovation Platform)を利用して行われた。 ・ 85 件のアイデアが提出され、うち 16 件が新規性を評価され、フォローアップステップに招待され、以下の提出を要請されている。 ✓ 7 件:システム研究の提案書(system studies) ✓ 5 件:早期技術開発のための提案書(early technology developments) ✓ 4 件:共同出資による研究提案(co-funded research) ・ 2021 年 12 月には、欧州が大規模な SBSP 開発プログラムに着手するための十分な基礎を提供するために、ESA が産業界や国際的なパートナーの支援を受けて今後 12 ヶ月間(2022 年末まで)に率先して行うべき活動のロードマップを定義することを目的として、ワークショップ “Space-based Solar Power for Net Zero 2050” が ESA-ESTEC(European Space Research and Technology Centre)の主催で開催	
キー技術課題	—	
進捗レベル	アイデア募集の段階	
今後の計画	16 件が、さらなる具体的な研究提案の提出を求められているが、その先は不明	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	—	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
国家戦略との関係	—	

参考図表	ESA の SBSP イメージ 選定結果 (Credit : ESA)
出所	・ https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_P_reparation/Space-based_solar_power_seeking_ideas_to_make_it_a_reality、2021 年 9 月 17 日取得 ・ https://ideas.esa.int/servlet/hype/IMT?documentTableId=45087625530300097&userAction=Browse&templateName=&documentId=514a8db636ea637f6e27069183966350、2021 年 9 月 17 日取得 ・ Advenit Makaya., “Clean Energy - New Ideas for Solar Power from Space Summary of ESA OSIP Campaign”, ESA Space-based Solar Power for Net Zero Workshop, Dec. 10, 2021 ・ https://indico.esa.int/event/399/、2022 年 2 月 4 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	ESA	
部署／研究者	Josef Aschbacher (ESA Director General)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	ESA Agenda 2025	
実施時期	2021 年 3 月 31 日発行	
目的／背景	・「ESA Agenda 2025 Make Space for Europe」は、宇宙経済における欧州の役割を維持・成長させるために、今後 4 年間の課題を示し、さらに長期的な課題も示したものである。次の 10 年間で世界トップレベルの宇宙機関になるためのアジェンダとして定義される。 ・「ESA Aegnda 2025」の中でまとめられた 5 つの緊急的な優先事項は以下の通り。 ✓ ESA と EU の関係強化 ✓ グリーン経済とデジタル経済に向けた商業化の促進 ✓ 安全と安心のための宇宙の強化 ✓ プログラムの課題への取り組み ✓ ESA の変革の遂行	
研究内容	・「ESA Aegnda 2025」の中でまとめられた 5 つの緊急的な優先事項のうち、2 項目「BOOSTING COMMERCIALISATION FOR A GREEN AND DIGITAL EUROPE」において、エネルギー転換をサポートする宇宙ベースのサービス、space-based solar power generation の可能性について、調査を進める必要があると言及している。	
キー技術課題	—	
進捗レベル	ESA の基本方針を示した文書に SBSP の可能性調査の必要性が言及された	
今後の計画	不明	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	—	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
国家戦略との関係	—	
参考図表	—	
出所	・“ESA AGENDA 2025 Make space for Europe”, 31 March 2021	

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	UK Space Agency (UKSA:英国宇宙庁)／Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS:ビジネス・エネルギー・産業戦略省) 委託先:Frazer-Nash Consultancy 社(英)	
部署／研究者	Space Business Manager at Frazer-Nash／Martin Soltau	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	SBSP(Space-Based Solar Power)の実現可能性と経済性の調査検討	
実施時期	2020 年 9 月 28 日～2021 年 9 月 27 日	
目的／背景	・軽量の太陽電池や無線送電技術の進歩と共に、ここ 10 年間で宇宙輸送コストが劇的に低減し、SBSP に必要なインフラを宇宙で展開することの実現性が高まってきた。 ・近年、英国は宇宙における世界的なプレイヤーとしての地位を高めており、SBSP 事業の実現性と経済性の検討の必要性が高まってきた。 ・英国は 2050 年までに CO2 排出量をゼロにすることを目標としており、著名な研究機関や政府機関は地球温暖化を抑制するための新たなアプローチに新たな資金と関心を注いでいる。そのため、SBSP を他の再生可能エネルギーと比較し、将来のクリーンエネルギー技術の一部としてどのように貢献できるかを確認することが必要とされている。	
研究内容	・米国(SPS-ALPHA)、英国(CASSIOPEIA)、中国(MR-SPS)の 3 つの SBSP コンセプト調査 ・脱炭素経済に向けてクリーンで安価、安全で信頼性の高いエネルギー源としての可能性(実用化と低価格化の実現性) ・2050 年までに、国際的なパートナーと協力して SBSP システムの運用を開始するためのエンジニアリングプランの策定 ・将来のクリーンエネルギー技術の組み合わせの中で、SBSP が果たす役割 ・専門家や宇宙・エネルギー関連企業から構成される専門家パネルを設置し、産業界(Airbus, Thales Alenia Space 等)からさまざまな意見をヒアリング ＜報告書(2021/9/27 公表)概要＞ ・SBSP は技術的に実現可能であり、2040 年までに開発可能である。2GW 級の SBSP の開発と打上げにかかるコストは約 163 億ポンドであるが、18 年以内に達成可能である。 ・その後には上げる SBSP の費用は 1 基 36 億ポンド(約 5400 億円)で重量は約 2,000 トン、直径 1,700m の大きさで、静止軌道上で運用する。地球上の受電アレイは 6.7km ×13km の楕円面積を有する。 ・開発に要するリスク、コスト、期間は相当なものであり、開発の大部分に公的資金が必要である。また、これらの新技術は英国にとって価値ある投資となる。英国政府にとって、様々な優先事項に合致している。 ・SBSP は、経済的に競争力のある新たなベースロード電源となる。 ・SBSP は英国の 2050 年までの Net Zero emissions の目標達成を可能にする。 ・開発に当たっては、段階的な技術開発と実証プログラムを実施し、国際的なパートナーと検討を重ねることが推奨される。 ✓ 2031 年までに軌道上実証機を、2040 年までに運用システムを完成させることを目標にすべきである。	
キー技術課題	・衛星(ギガワットクラス)を静止軌道上に建設するためのエンジニアリングの規模 ・経済性 ・無線周波(RF)の国際的規制 ・民間が宇宙利用活動を行うための法体制の整備	
進捗レベル	工学的実現可能性と経済性に関する FS	
今後の計画	・英国政府は、低炭素技術の商業化を促進するための 10 億ポンドの基金をすでに設立しており、BEIS は、本報告書の内容を受けて、SBSP に関連する技術開発を目的とする SBSP イノベーション・プログラム(Space Based Solar Power Innovation	

	Programme)をスタートさせる計画。 ✓ SBSP と地上の電力システムのどちらにも使用可能なデュアルユースの関連技術の開発において、どのように技術革新を支援することができるかを検討する。 ✓ 2021 年 11 月 1 日を期限として、上記に関心を持つ組織を募集中。 https://www.smartsurvey.co.uk/s/SBSP-EOI/のページより
予算規模	・本調査の契約金額: 21 万 £ (約 3100 万円)
実施体制	
関連機関	これらの動きを受けて、英国を拠点とするエネルギー、宇宙、材料、製造の研究・企業連合として「Space Energy Initiative」が設立されている。 (https://spaceenergyinitiative.org.uk/)
国際協力	・米国 John Mankins 氏(米国) と International Electric Company(IECL)の Ian Cash 氏も同調査に協力 ・米 National Space Society も本報告書の内容と英国政府の取り組みについて支持を表明
その他(特許、国家戦略との関係等)	
国家戦略との関係	・英国は 2021 年の COP26 の開催国として、世界のエネルギーシステムの脱炭素化を加速するための目標を掲げる。2050 年までの Net Zero emission を達成するという政府の公約を実現するために、SBSP は重要な役割を果たすことを期待されている。 ・本調査の結果は、英国政府が SBSP への将来的な調査や投資を決定する上でのエビデンスとして使用される。 ✓ 報告書では、SBSP を Net Zero emission や国家宇宙戦略など、政府の関連政策に組み込むことが推奨された。
参考図表	

	 © Frazer-Nash Consultancy. Earth image: iStock.com/MarcelC Frazer-Nash 社の SBSP イメージ (Credit : Frazer-Nash Consultancy)
出所	・ https://www.gov.uk/government/news/uk-government-commissions-space-solar-power-stations-research、2021 年 7 月 26 日取得 ・ https://www.contractsfinder.service.gov.uk/Notice/41f6b0b0-ad67-4768-bb33-8402aeb669d6、2021 年 7 月 26 日取得 ・ https://www.fnc.co.uk/discover-frazer-nash/news/frazer-nash-exploring-viability-of-space-based-solar-power-to-help-deliver-net-zero、2021 年 7 月 26 日取得 ・ https://texasnewstoday.com/china-unveiled-plans-to-launch-a-mile-long-fleet-of-solar-panels-into-space/419332/、2021 年 9 月 14 日取得 ・ https://business.nikkei.com/atcl/NBD/19/world/00414/、2021 年 9 月 17 日取得 ・ https://www.fnc.co.uk/discover-frazer-nash/news/space-based-solar-power-can-help-uk-achieve-net-zero-press-release/、2021 年 9 月 29 日取得 ・ https://www.einnews.com/pr_news/552555142/the-national-space-society-supports-new-uk-government-space-solar-power-initiative、2021 年 9 月 29 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	University of Strathclyde(ストラックライド大学)(英 Glasgow, Scotland)	
部署／研究者	Aerospace Centre of Excellence, Department of Mechanical & Aerospace Engineering／PhD Andrew Wilson, Professor Massimiliano Vasile	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	A PROCESS-BASED LIFE CYCLE SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF THE SPACE-BASED SOLAR POWER CONCEPT SBSP コンセプトのプロセスベースのライフサイクル持続性評価	
実施時期	2020 年～	
目的／背景	・プロセスベースのライフサイクル持続性評価(LCSA)は、環境ライフサイクル評価(E-LCA)、社会ライフサイクル評価(S-LCA)、ライフサイクルコスト計算(LCC)を一つのフレームワークにまとめたものであるが、宇宙ミッションに適用できる新しい LCSA ツールをストラックライド大学で開発した。 ・この LCSA ツールを 1978 年の DOE/NASA SPS リファレンスシステムに適用し、SBSP のライフサイクルにおける環境・経済・社会的影響を明らかにする。 ・分析結果は、このようなシステムの継続的な改善とその将来的な応用に向けての検討に資することができる。	
研究内容	・ストラックライド大学において、Strathclyde Space Systems Database (SSSD)という新しいデータベースを含んだ宇宙ミッションに適用できる LCSA ツールを開発し、1978 年の DOE/NASA SPS リファレンスシステムについて、LCSA 評価を実施した。 ・広範囲の異なる環境影響カテゴリーにわたる環境影響、様々なステークホルダーグループに対するシステムの社会的影響、システムのライフサイクルにおけるコストを定量化して評価を行った。 ・ライフサイクル CO2e 排出量とコストは、従来のエネルギーミックスの一部としての相対的なパフォーマンスを評価するために、地上のエネルギーシステムと比較 ・DOE/NASA の SPS リファレンスシステムは、一般的に「環境に優しく」「コスト効率の良い」システムと言えるが、ライフサイクルへの影響を軽減するためには、いくつかの設計上のホットスポットが特定され、改善が必要であることが分かった。 ・特定された設計上のホットスポットをミッションドライバーとして、最新の SBSP 設計に反映させていく必要がある。	
キー技術	・プロセスベースのライフサイクル持続可能性評価(LCSA) ・Strathclyde Space Systems Database (SSSD)	
進捗レベル	環境、経済、社会ライフサイクル評価	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	論文共著: SPACE Canada Corporation(加)	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
過去の研究	ストラックライド大学の Advanced Space Concepts Laboratory は、過去に以下のプロジェクトに参加している。 ・ 2011-2012 年:NASA NIAC プログラムの一つとして採択された Mankins 氏の SPS-ALPHA プロジェクト ・ 2010 年 10 月～2013 年 12 月:モジュール型の展開可能な多機能構造体(SAM: Self-inflating Adaptable Membrane)の開発・試作・展開試験 ・ 2014 年 5 月:上記 SAM を StrathSat-R に搭載し、サウンディングロケット REXUS 15 にて打ち上げたが、ケーブル等の接続に問題があり軌道投入に失敗し、喪失	
参考図表		
出所	・ Andrew Ross Wilson; Massimiliano Vasile et al., “A PROCESS-BASED LIFE CYCLE SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF THE SPACE-BASED SOLAR	

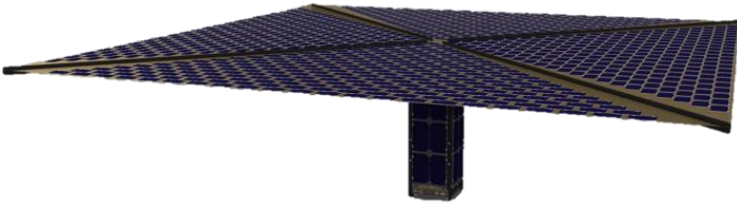
	POWER CONCEPT” , 71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition, 12-14 October 2020 • http://sam-strathclyde.blogspot.com/ 、2021 年 7 月 27 日取得
--	--

英 氏 同 正

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	International Electric Company (IECL)(英 Oxford) 独立系の設計・製造会社で、無線電力伝送と再生可能エネルギーに焦点を当てた革新的なエンジニアリングソリューションを提供する企業	
部署／研究者	Chief Engineer ／Ian Cash	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	CASSIOPeiA(Constant Aperture, Solid-State, Integrated, Orbital Phased Array)と名付けられた SSP モデルの検討および開発	
実施時期	2017 年～	
目的／背景	・ SSP (Space Solar Power)の基礎の理解は十分進んでおり、CO2 排出抑制の点から期待も高まっているが、実際の SSP の開発は 50 年間停滞している状態である。 ・ GEO に SSP を展開すると、供給される電力に関係なく、キロメートル規模のマイクロ波送信機が必要となるため、経済的には数ギガワット級のシステムが有利となるが、これが法外なスタートアップコストにつながっている。 ・ この問題点を打破すべく、CASSIOPeiA デザインを提案し、複数の軌道にわたって展開可能で、サブ MW から数 GW の領域まで拡張できるようなシステムを検討。 ・ 長期的には、IECL 独自の SSP コンセプトにより、ギガワット規模の再生可能エネルギーを、必要な場所に直接供給し、ゼロカーボンエネルギーを実現することを目指す。	
研究内容	・ 2017 年 10 月、カナダのモントリオールで開催された 5th Annual IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WISEE 2017) において CASSIOPeiA という新しい SSP コンセプトを提唱。 ・ CASSIOPeiA は機械的なポインティングの必要性がほとんどないフェーズドアレイであり、高利得アンテナでありながら、独自の素子設計と螺旋状の配置により軌道上で 360°のマイクロ波ビームステアリングを実現 ・ SSP の全機能をサブ波長スケールでモジュール化。同じ超軽量の物理的な基板を、集光型太陽光発電、電力管理/分配、熱放散、ビーム形成のために利用 ・ 4 分割された平面反射鏡による 1 倍集光、円錐形の曲率を持つ一次および二次反射鏡による 4 倍集光システムが可能 ・ 慣性モーメントの問題を排除し、複数の軌道(GEO、GEO ラプラス平面軌道、MEO、SSO 等)にわたって拡張可能な構成となっている。	
キー技術	・ フェーズドアレイアンテナによる 360°のビームステアリング ・ 円錐形の曲率を持つ一次および二次反射鏡	
進捗レベル	新たなシステムデザインの提案	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	FRAZER-NASH CONSULTANCY が受託した UKSA の調査に協力 フェーズドアレイ解析にストラックライド大学が関与	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
特許	CASSIOPeiA のフェーズドアレイは、可動部がなく、360 度のビームステアリングが可能。この高利得アンテナについては特許出願中	
アプリケーション	同社のホームページには、CASSIOPeiA のアプリケーションとして、地上での電力伝送、空中電力伝送、成層圏電力伝送等があると示されている。	

参考図表	CASSIOPeiA (Credit : IECL)
出所	・ Ian Cash, "CASSIOPeiA – A new paradigm for space solar power", Acta Astronautica, Volume 159, June 2019, Pages 170-178 ・ プレゼン資料、Ian Cash, "CASSIOPeiA –PART 1:INTRODUCTION AND BACKGROUND", SEOUL, 13 Feb 2019 ・ IECL H.P.、https://www.internationalelectric.com/、2021 年 7 月 29 日取得 ・ 説明動画、https://www.youtube.com/watch?v=OvuelEvsPZo、2021 年 7 月 29 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Deployables Cubed GmbH(DcubeD)(独、Bavaria) California Polytechnic State University (CalPoly)(米)	
部署／研究者	Cal Poly CubeSat Laboratory(CPCL)／Callan Whitley	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	SSP(SPACE SOLAR POWER)キューブサット技術実証ミッション -Powersat-	
実施時期	2020 年 8 月～	
目的／背景	・通信コンステレーションや電気推進力を持つ超小型衛星のミッション達成のために、高出力太陽電池の必要性が高まり、展開可能な大型構造物の実現が不可欠となっている。DcubeD 社では ESA の ARTES AT 契約に基づき、超小型衛星用のスケーラブルで展開可能な太陽電池の実現を目指して、PowerCube の開発を行っている。	
研究内容	・PowerSat ミッション:展開可能な構造体を使った SSP コンセプトの実現可能性を実証するための第一段階ミッション ✓ 地球低軌道上で最大 100W の発電が可能な大型の太陽電池アレイの展開を実証 ✓ ミッションの主目的は、展開型の太陽電池を宇宙で運用し、その発電量のデータを記録すること。 ・DcubeD が展開型高出力太陽電池サブシステム(PowerCube)を提供し、CalPoly がバスの設計・製造・運用を行う。 ✓ 1U の容積に収納された太陽電池アレイを折り紙のように広げて 4m ² の面積を確保し、2 台のカメラにより写真を撮影して太陽電池アレイの展開を検証する。 ✓ 発電電力は、CPCL 内で開発している MPPT(Maximum Power Point Tracking)ベースの電力サブシステムによって処理される。 ✓ 衛星に慣性計測装置(IMU)を搭載予定 ・2021 年 4 月:2020 年 10 月に発行された NASA の CubeSat Launch Initiative (CSLI)の提案募集(12 th Round)の結果、14 ミッションの候補の一つとして PowerSat が選定された。 ✓ NASA's Launch Services Program (LSP)が推進する超小型衛星の教育打上げ Educational Launch of Nanosatellites (ELaNa)ミッションとして、2022 年から 2025 年にかけて打上げられる	
キー技術	・DcubeD→PowerCube:スケーラブルで展開可能な太陽電池 MPPT(Maximum Power Point Tracking)を実装した先進的な電源システム ・CPCL→PowerCube:スケーラブルで展開可能な太陽電池	
進捗レベル	2021 年 4 月、2022 年から 2025 年にかけて打上げられる NASA の ELaNa ミッションの候補の一つとして選定。衛星は開発段階。	
今後の計画	2022 年から 2025 年に打上げ予定。	
予算規模	—	
実施体制		
国際協力	Cal Poly CubeSat Lab とドイツの Deployables Cubed との間で進められている新しいパートナーシッププロジェクト	
教育機会	・本プロジェクトは、CPCL の航空宇宙工学科および CENG による夏季学部生研究プログラムの一環として行われる。 ・教育にも焦点を当てており、大学生および大学院生 50 人以上を対象に、科学、技術、教育、数学、および多様性、公平性、包括性の価値観を意識した、プロジェクトベースの実践的な学習機会を提供する。	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
アプリケーション	CPCL で開発している MPPT は将来の深宇宙探査ミッションにも応用していく。	
参考図表		

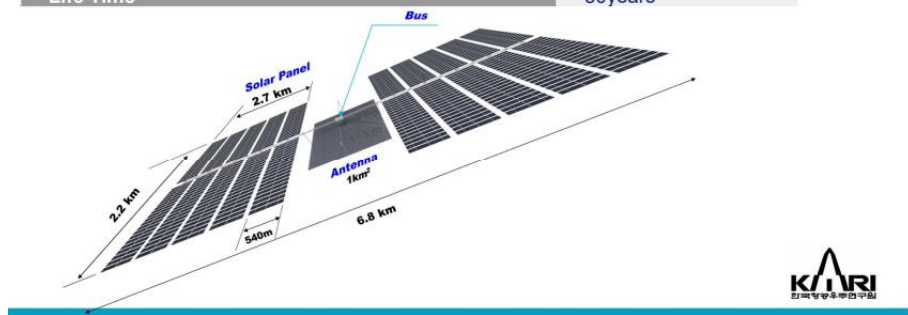
	 PowerSat(Credit : CalPoly)
出所	• Dr. Thomas Sinn; Dr. Pauline Faure ; Prof. Markus Pietras et al., “SPACE SOLAR POWER CUBESAT TECH DEMO MISSION – AN OVERVIEW” , 71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition, 12-14 October 2020 要約 • https://www.nasa.gov/feature/nasa-announces-12th-round-of-candidates-for-cubesat-space-missions、2021 年 9 月 17 日取得 • CalPoly H.P.、https://exhibits-cubesatdw.org/cubesat-laboratory/、2021 年 9 月 17 日取得 • https://www.polysat.org/monthly-project-updates/category/P?tag=PowerSat 、2021 年 9 月 17 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Science Sainte Rose、Universit� de la R�euni(仏、La Reunion)	
部署／研究者	Dr. Guy Pignolet	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	WIRELESS POWER TRANSPORTATION WORLD RESEARCH CENTER (WPT-WRC)の設立	
実施時期	2017～2018 年	
目的／背景	・ 近年、SSPS コミュニティは広がりを見せ、活発な議論が進んでいるものの、WPT というテーマは産業界や政治界のリーダーや意思決定者には、あまり興味を持たれていない。 ・ WPT という重要な分野に関する知識を、科学界の一般メディアや公共メディア、そして様々な政策機関に理解しやすい形で伝える必要がある。	
研究内容	・ WIRELESS POWER TRANSPORTATION WORLD RESEARCH CENTER (WPT-WRC)をインターネットベースの組織として設立する。 ✓ 物理的な住所は Reunion 島に所在 ・ WPT の世界規模でのフィールド実験の調整も行う。 ・ 年に 2 回プレスリリースを発行し、Reunion 大学と共同で毎年 1 日の最新ワークショップを開催する。 ・ Adelaide で開催された IAC-2017 で設立が決定され、ロゴがデザインされた。	
キー技術課題	—	
進捗レベル	不明。IAC-2018 で上記発表があったものの、その後のニュースはない。	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	—	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
国家戦略との関係	—	
参考図表	—	
出所	・ “Dr.Guy Pignolet et al., “WIRELESS POWER TRANSPORTATION WORLD RESEARCH CENTER - PURPOSE AND OPERATION” , 69th International Astronautical Congress (IAC) – Bremen Germany, 1-5 October 2018	

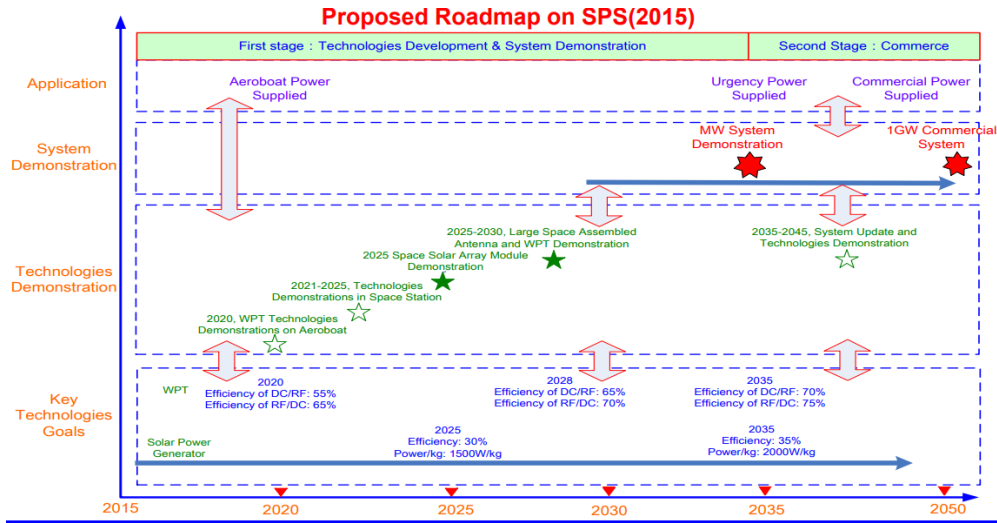
項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Indian Space Research Organisation (ISRO:インド宇宙研究機関)	
部署／研究者	ISRO Chariman／Dr. K. Sivan Scientific Secretary／Shri R. Umamaheswaran	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	SBSP を含む破壊的将来技術(Disruptive Future Tech)の開発	
実施時期	2021 年～	
目的／背景	・ ISRO Chariman の Sivan 氏は、国のエネルギー資源の枯渇問題に対応するために、solar power satellite の構築の必要性を主張していた。 ✓ 2018 年に開催された空軍協会主催の「11th Air Chief Marshal LM Katre Memorial lecture 2018」において講演。	
研究内容	・ 2021 年 11 月 22 日～26 日、ISRO の DTDI(Directorate of Technology Development and Innovation)部門は宇宙分野の潜在的な技術を開放する破壊的な将来技術サミットである「DTDI-Technology-Conclave-2021」を開催した。 ✓ DTDI が宇宙分野の技術予測を担当し、未来型技術開発プロジェクトの策定に着手していることに言及。 ✓ 未来型技術開発プロジェクトとして、Satellite-Based Quantum Communication, Quantum Radar, Self-Eating-Rocket, Self-Vanishing-Satellite, Self-Healing Materials, Humanoid Robotics, Space-Based-Solar-Power, Intelligent Satellites and Space-vehicles, Make-in-Space concept, Artificial-Intelligence based space applications が挙げられた。	
キー技術課題	—	
進捗レベル	研究開発イニシアティブを開始した段階	
今後の計画	今後 40～50 年の間に対応できるようにすることを目的とする。	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	ISRO/DOS(Department of Space)の科学者と技術者が国内の様々なセンターで協力	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
国家戦略との関係	これらの技術開発は、インド首相のビジョンである「Atmanirbhar Bharat」と宇宙部門の改革に沿ったものであると言及	
参考図表		
出所	・ https://www.isro.gov.in/update/22-nov-2021/isro-unlocks-future-space-technologies-through-dtdi-technology-conclave-2021 、2021 年 11 月 30 日取得 ・ https://www.indiatoday.in/science/story/hack-proof-communication-network-self-eating-rockets-vanishing-satellites-isro-working-on-disruptive-future-tech-1880068-2021-11-23 、2021 年 11 月 30 日取得 ・ https://www.newindianexpress.com/states/karnataka/2018/jul/08/india-needs-to-create-solar-power-satellite-indian-space-research-organisation-1840117.html 、2021 年 11 月 30 日取得	

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	National University of Singapore	
部署／研究者	Satellite Technology and Research Centre／Shu Ting Goh(Principal Engineer (Research Fellow))	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	Space Solar Power(SSP)衛星から全電動航空機(AEA:All-Electric Aircraft)への空中充電(MAR:Mid-Air Recharging)に関する解析	
実施時期	2020 年頃～	
目的／背景	2015 年頃から SSP 衛星の軌道やコスト分析等を行っている。	
研究内容	・全電動航空機(AEA:All-Electric Aircraft)を商業的に成立させるために、AEA のバッテリー搭載量を減らすための代替エネルギー源として、space solar power(SSP)衛星からの空中充電(MAR:Mid-Air Recharging)技術が提案されている。 ・SSP 衛星のアンテナアレイや AEA 搭載のレクテナアレイは、大気減衰や自由空間での経路損失によるエネルギー損失を最小限に抑えるように慎重に設計する必要がある。本研究では、レクテナアレイの構成に基づいて、異なる周波数帯における SSP 衛星のアンテナアレイの寸法を検討する。 ・30GHz のミリ波帯における WPT の減衰効果を、異なる巡航高度と場所に関して検討した結果、巡航高度が 6km 以上の場合、雨や雲による減衰は無視できることが確認された。 ・ミリ波帯においては、低コストかつ高速な AEA MAR システムを実現できる。	
キー技術課題	空中充電(MAR:Mid-Air Recharging)技術	
進捗レベル	システム解析	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	Michigan Technological University	
国際協力	—	
参考図表		
出所	・ https://ieeexplore.ieee.org/document/9262464 、2021 年 12 月 6 日取得 ・ https://www.researchgate.net/publication/308830401_Space_solar_power_orbit_design_and_cost_analysis 、2021 年 12 月 6 日取得 ・ https://attend.ieee.org/wisee-2021/wp-content/uploads/sites/251/2021/10/Program-for-IEEE-WiSEE-2021-Space-Solar-Power.pdf 、2021 年 12 月 6 日取得	

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Korea Aerospace Research Institute (KARI:韓国航空宇宙研究院)	
部署／研究者	Mr. Junwoo Park、Mr. Hojin Jung、Dr. Joon Min Choi	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	SSPS のコンセプトおよびコスト評価	
実施時期	2017 年頃～	
目的／背景	・ 2017 年 11 月および 2019 年 2 月の 2 回、KARI が韓国内閣府内で国会議員を招きワークショップ(International Workshop for Space Based Solar Power)を開催。 ✓ 本 Workshop の中心は KARI 元理事長で現 Research Fellow の Dr.Joo-Jin Lee 氏。 ✓ Lee 氏によると、SSPS 検討のために KARI を中心として 7 組織 20 名程度の組織が立ち上がったとのこと。	
研究内容	・ SSPS のニーズを把握し、コンセプトや RD の動向を検討した。 ・ SSPS のコスト予測を行ったところ、コスト削減の必要があることが分かった。 ・ 今後の方向性についての考察を行った。 ・ K-SSPS のコンセプト検討 ✓ モジュールを追加することによるスケールアップが容易に可能である構造とし、繰返し作業やロボットアーム数の増加により組立て速度を上げることが可能である。 ✓ 集光型を採用していないが、薄膜ロールアップ型の太陽電池を使用することにより重量増加を抑えている。 ✓ トラスや形状記憶複合材料などを用いて、可能な限り自己展開する機構としている。	
キー技術課題	・ コスト評価	
進捗レベル	コンセプト検討	
今後の計画	・ システムレベルの SSPS 研究は国家プロジェクトとしては認められていないが、コンセプト検討、技術課題の検討は実施。	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	—	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
国家戦略との関係	—	

参考図表	<table><thead><tr><th>Items</th><th>Specifications</th></tr></thead><tbody><tr><td>Electrical Power at Ground</td><td>2GW</td></tr><tr><td>Orbit</td><td>Geostationary</td></tr><tr><td>Mass of K-SSPS</td><td>10,000tons</td></tr><tr><td>Frequency of Microwave</td><td>5.8GHz</td></tr><tr><td>External Dimension</td><td>2.2km x 6.8km</td></tr><tr><td>End to End System Power Efficiency</td><td>13.5%</td></tr><tr><td>Solar Array (CIGS or Perovskite)</td><td>Thin Film Roll-Out</td></tr><tr><td>Size of Solar Array Wing(each)</td><td>2.2km x 2.7km</td></tr><tr><td>Number of Sub-Solar Array (10m x 270m)</td><td>4,000 EA</td></tr><tr><td>Area of Transmission Antenna</td><td>1.0km²(Square)</td></tr><tr><td>Diameter of Rectenna</td><td>4km</td></tr><tr><td>Life Time</td><td>30years</td></tr></tbody></table>	Items	Specifications	Electrical Power at Ground	2GW	Orbit	Geostationary	Mass of K-SSPS	10,000tons	Frequency of Microwave	5.8GHz	External Dimension	2.2km x 6.8km	End to End System Power Efficiency	13.5%	Solar Array (CIGS or Perovskite)	Thin Film Roll-Out	Size of Solar Array Wing(each)	2.2km x 2.7km	Number of Sub-Solar Array (10m x 270m)	4,000 EA	Area of Transmission Antenna	1.0km ² (Square)	Diameter of Rectenna	4km	Life Time	30years
	Items	Specifications																									
Electrical Power at Ground	2GW																										
Orbit	Geostationary																										
Mass of K-SSPS	10,000tons																										
Frequency of Microwave	5.8GHz																										
External Dimension	2.2km x 6.8km																										
End to End System Power Efficiency	13.5%																										
Solar Array (CIGS or Perovskite)	Thin Film Roll-Out																										
Size of Solar Array Wing(each)	2.2km x 2.7km																										
Number of Sub-Solar Array (10m x 270m)	4,000 EA																										
Area of Transmission Antenna	1.0km ² (Square)																										
Diameter of Rectenna	4km																										
Life Time	30years																										
	 K-SSPS(Credit : KARI)																										
出所	・ 篠原真毅, “アジアにおける SPS 研究の現状”, 第 3 回宇宙太陽発電シンポジウム Vol.3 (2018), pp.18-2 ・ Mr. Junwoo Park ; Mr. Hojin Jung, “A CONCEPT AND COST ESTIMATION OF SPACE SOLAR POWER SATELLITE SYSTEM”, 72nd International Astronautical Congress (IAC) – Dubai, 26 October 2021 要約 ・ Joon Min.Choi, Net Zero Scenario and Status of Space Based Solar Power Research in Korea” ,ESA’s 1st Space-Based Solar Power Workshop 2021.12.10																										

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	China Academy of Space Technology(CAST:中国宇宙技術研究院) Qian Xuesen Laboratory	
部署／研究者	CAST Qian Xuesen Laboratory／Dr. Xinbin Hou Prof. Ming Li	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	中国における SSPS(Space Solar Power Satellite)研究	
実施時期	2006 年頃～	
目的／背景	・ 2006 年、CAST は政府に”Necessity and Feasibility Study Report of SSPS”と題したレポートを提出し、これをきっかけに SSPS 研究が本格的に始まった。 ・ 中国は、2008 年に宇宙太陽光発電を重要な研究課題に掲げて以来、さまざまなソリューションを提案し、無線エネルギー伝送においても大きな飛躍を遂げてきている。 ・ 2014 年までに、CAST の Qian Xuesen Laboratory は、中国における SSPS 技術のリーダーとなり、SSPS 研究プロジェクトを主導するようになった。 ✓ マルチロータリージョイント SSPS(MR-SSPS)や球状エネルギー収集アレイ等のコンセプトの提案等を行った。	
研究内容	・ 2015 年、CAST は International Space Development Conference(ISDC 会議)において SBSP 開発のロードマップを提示した。 ・ 2018 年 1 月、CAST を中心として学識経験者、研究者、技術者から成る Chinese Space Solar Power Satellite (SSPS) Promotion Committee が組織された。 ✓ 中国各地でフォーラムを開催している。 ・ 2019 年～:CAST は重慶(碧山区和平村)に高出力無線エネルギー伝送研究施設の建設開始。→次項で詳述 ・ 2021 年 8 月 16 日～19 日、CAST の協力のもと、China's Aerospace Info Research Institute が東シナ海において、高高度気球を浮遊プラットフォームとした研究船による高度 300m のマイクロ波伝送実験を行った。 ✓ 実験は、緊急通信実験ネットワークプロジェクト「スマートオーシャン」の一環として行われたものであり、30kg のペイロードを搭載して、搭載された AIS データ受信、SOS データ受信、LTE 信号のカバー率、マイクロ波伝送の機能と性能指標のテストを行った。	
キー技術課題	・ 経済的実現性、製造コスト、エネルギー伝送効率、安全性 ・ 超高压電力伝送技術、高効率無線エネルギー伝送、超大型構造物の軌道上組立	
進捗レベル	SSPS の FS や概念設計から無線エネルギー伝送の実験施設の建設まで完了	
今後の計画	・ 重慶市の試験施設は 2022 年 7 月に建設完了予定 ・ 2021～25 年で成層圏に飛行船による太陽光発電ステーションを完成させ、距離 20km のエネルギー伝送試験を実施予定。さらに同施設では、エネルギーをドローンの動力源として使用する実験も行う。 ・ 今後 10 年ほどで宇宙超高压発電・送電と無線エネルギー伝送の試験検証を完了させる計画 ・ 30 年までに宇宙に MW 級の SBSP を、2050 年に GW 規模の商用 SBSP を建設するという中長期的な目標を掲げている。	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	・ 中国国家宇宙局(CNSA)、中国国家自然科学基金委員会(NSFC)、中国科学技術部(The Ministry of Science and Technology of the PRC)も関連研究への支援を表明 ・ 2021 年 6 月、長征ロケットシリーズのチーフデザイナーである Long Lehao 氏は「次期長征 9 号ロケットを複数回打上げて、SBSP を建設する計画である」と発表した。 ✓ 商用 GW 級 SBSP の建設には 100 回以上の打上げが必要とのこと。 ・ CAST の National Key Lab. of Science and Technology on Space Microwave においても、SSPS 実証用のマイクロ波送電システムの検討等を行っている。	

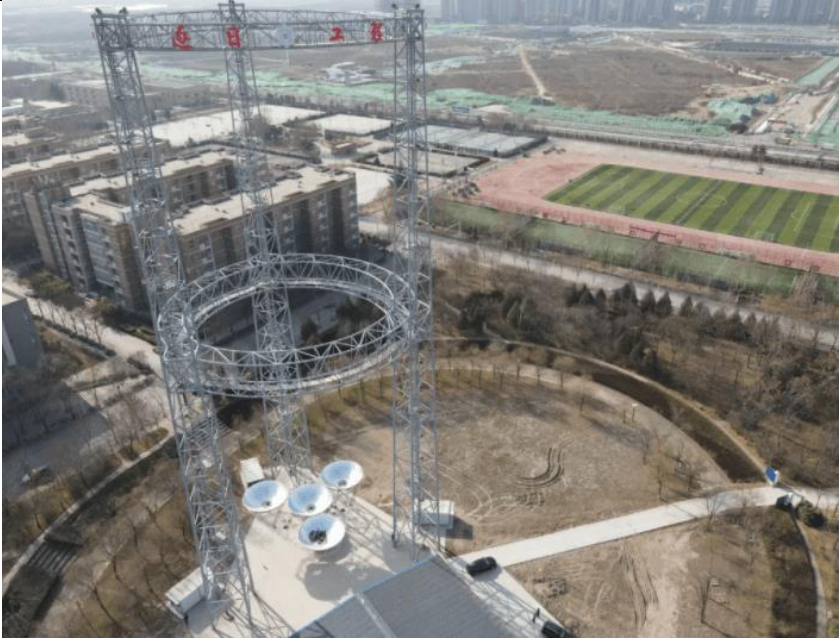
	✓送信アンテナ 1.2m×1.2m、レクテナアレイ 2m×2m、伝送距離 30m において、送信出力 900W、ビーム制御精度 0.44°以上、MW-DC 変換効率 49%以上を達成
国際協力	—
その他(特許、国家戦略との関係等)	
国家戦略との関係	・中国は SBSP の世界的なリーダーになることを意図しており、SBSP を化石エネルギーや海外の石油依存からの脱却のための戦略的必須事項と考えている。軍事用と民生用のデュアルユース戦略を目指している。 ・中国政府は 2060 年までのカーボンニュートラル達成の目標を掲げており、本研究はエネルギー部門からの強い支持を得られているとのこと。 ・国家宇宙探査技術の科学コミュニケーション主任専門家である Pang Zhihao 氏は、SSPS の核心的な応用目標は、地上への大規模な商用電力供給であると指摘
参考図表	 MR-SPS, CAST, 2014  Proposed Roadmap on SPS(2015) First stage : Technologies Development & System Demonstration Second Stage : Commerce Application: Aero-boat Power Supplied, Urgency Power Supplied, Commercial Power Supplied System Demonstration: MW System Demonstration, 1GW Commercial System Technologies Demonstration: 2020-2025, Technologies Demonstrations in Space Station; 2025-2030, Large Space Assembled Antenna and WPT Demonstration; 2035-2045, System Update and Technologies Demonstration Key Technologies Goals: WPT (Efficiency of DC/RF: 55%, Efficiency of RF/DC: 65%), Solar Power Generator (Efficiency: 30%, Power/kg: 1500W/kg), DC/RF (Efficiency of DC/RF: 65%, Efficiency of RF/DC: 70%), RF/DC (Efficiency of DC/RF: 70%, Efficiency of RF/DC: 75%), Power/kg (Efficiency: 35%, Power/kg: 2000W/kg) 2015 2020 2025 2030 2035 2050 ESA 1st SBSP Workshop Activities of SPS Development in China - Xinbin Hou, Ming Li Proposed roadmap on SPS in China (Credit : CAST)
出所	・“CHINA'S SPACE NARRATIVE” , CHINA AEROSPACE STUDIES INSTITUTE, 31 March 2021 (ISBN 9798674349808) ・ https://mp.weixin.qq.com/s/cCt-uw6l_KB9cuVVyYNQeA, 2021 年 9 月 14 日取得 ・ https://ieeexplore.ieee.org/document/9295541/authors#authors, 2021 年 12 月 24 日取得 ・ https://spacenews.com/chinas-super-heavy-rocket-to-construct-space-based-solar-power-station/, 2021 年 9 月 21 日取得 ・ https://texasnewstoday.com/china-unveiled-plans-to-launch-a-mile-long-fleet-of-solar-panels-into-space/419332/, 2021 年 9 月 14 日取得 ・ 篠原真毅, 「SSPS 研究開発の各国の動向について」, 第7回宇宙太陽発電(SSPS)シンポジウム講演資料, 2021 年 12 月 17 日

		内容
項目		
実施機関		
機関名(所在地)	China Academy of Space Technology(CAST:中国宇宙技術研究院) 重慶市璧山区人民政府、Chongqing University(重慶大学)	
部署／研究者	CAST／Wang Li(research fellow with the program) 重慶大学／Prof. Huaiqing Zhang 重慶大学 Communication and Measurement and Control Center／Prof. Yang Shizhong	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	璧山宇宙太陽光発電実験基地(Bishan Base :Bishan Space Solar Power Station Experimental Base)プロジェクト	
実施時期	2018 年 12 月発表。実施時期は～5 年間	
目的／背景	・中国は、2008 年に宇宙太陽光発電を重要な研究課題に掲げて以来、さまざまなソリューションを提案し、無線エネルギー伝送においても大きな飛躍を遂げてきている。 ・以来、CAST を中心に SSPS 研究が行われてきている。→前項で詳述	
研究内容	・2019 年～:CAST は重慶(碧山区和平村)に高出力無線エネルギー伝送研究施設の建設開始。 ✓ 重慶の碧山が選定された理由は、日照時間が多く、雲や雨が少なく、無霜期間が長く、湿度の高い気候であり、基地の三方が山に囲まれていること、であった。 ✓ 構想自体は 2010 年に検討されていた。その後、政治的・財政的な問題から進展と中止を繰り返してきた。 ✓ 工事中の施設で地面が崩れ、コスト、実現性、安全性に関する議論に時間が費やされ、一時建設は中断していたが、2021 年 6 月に工事再開。 ・33 エーカーのコア実験建設エリアがあり、実験科学総合ビルと実験プラットフォームが建設される。コア実験エリアは約 106 エーカーで、リフトオフテストサイト、気球プラットフォームデバッグホール、その他の施設を含む。 ✓ SSPS、無線マイクロ波エネルギー伝送、宇宙情報ネットワークなどの技術の予備的なデモンストレーションやシミュレーション等に重点が置かれる。 ✓ 外側には 167 エーカーの隔離エリアが設けられている。 ・完成後は実験、技術総合研究、科学データ観測、新産業育成を統合した中国初の大規模総合実験基地とする計画。	
キー技術課題	・マイクロ波の他の通信への干渉や安全性の問題。→GW 級の電力では、3 マイル以内では居住不可。	
進捗レベル	大規模地上実験施設の建設中。完了間近。	
今後の計画	・重慶市の実験基地のインフラは 2021 年末に建設完了予定 ✓ 基本となる試験施設は 2022 年 7 月に建設予定 ・2021～25 年で成層圏に飛行船による太陽光発電ステーションを完成させ、距離 20km のエネルギー伝送試験を実施予定。さらに同施設では、エネルギーをドローンの動力源として使用する実験も行う。 ・30 年までに宇宙に 1MW 規模の SBSP を、2050 年に GW 規模の SBSP を建設するという中長期的な目標を掲げている。	
予算規模	総投資額:26 億元の計画で、基地建設費用として 1 億元(約 1500 万ドル)の初期投資が行われた。	
実施体制		
関連機関	重慶市璧山区人民政府、重慶大学、中国宇宙技術研究院西安分院、西安電子科技大学で関連協力協定を締結	
国際協力	本施設の建設には海外の経験が参考になる。無線エネルギー伝送の技術的には、現在、日本が中国よりも優れている。そのため中国内の関連機関も日本の担当者と連絡を取っているが、協力関係はまだ確立していない、とのこと。	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
国家戦略との関	・人民日報の記事では、重慶の軍民融合・革新研究所の副所長である謝新が、重慶の	

係	SBSP 実験基地で行われる作業について語っている。この記事は、中国が SBSP の軍事利用も検討している可能性を示している。 ・ 中国政府は 2060 年までのカーボンニュートラル目標を掲げており、本研究はエネルギー部門からの強い支持を得られているとのこと。
行政上の位置づけ	・ 碧山区政府は「科学技術碧山、革新碧山」を区のスローガンとしている。また、同区は重慶市の主要都市の西部に位置しているため、成都との産業連関も期待できる。
関連研究	・ 2020 年、重慶大学では屋外でのマイクロ波 WPT 実験を実施した。 ✓ 5.8GHz、448W の電力を 60m 伝送。電力変換効率は 6.4%。送電アンテナ 1.26m × 1.26m、レクテナ 3m × 3m
参考図表	 璧山宇宙太陽光発電実験基地イメージ
出所	・ http://j.people.com.cn/n3/2018/1207/c95952-9526477.html、2021 年 9 月 8 日取得 ・ http://www.stdaily.com/index/kejixinwen/2019-02/14/content_750019.shtml、2021 年 9 月 8 日取得 ・ http://www.xinhuanet.com/english/2019-12/02/c_138599015.htm、2021 年 9 月 8 日取得 ・ https://www.thestar.com.my/tech/tech-news/2021/08/17/china-aims-to-use-space-based-solar-energy-station-to-harvest-suns-rays-to-help-meet-power-needs、2021 年 9 月 10 日取得 ・ https://www.theregister.com/2021/08/17/china_orbiting_solar_panel_tech_tests/、2021 年 9 月 10 日取得 ・ https://texasnewstoday.com/china-unveiled-plans-to-launch-a-mile-long-fleet-of-solar-panels-into-space/419332/、2021 年 9 月 14 日取得 ・ https://min.news/en/science/98a1c175c5f4c267c683ec86f28de00f.html、2021 年 9 月 21 日取得 ・ 篠原真毅, 「SSPS 研究開発の各国の動向について」, 第 7 回宇宙太陽発電(SSPS)シンポジウム講演資料, 2021 年 12 月 17 日

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	National Natural Science Foundation of China(中国国家自然科学基金委員会: NSFC) 科学・技術発展の方針と政策に基づき基礎研究と一部の応用研究を国の財政資金で助成する機構	
部署／研究者	—	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	超大型(km スケール)宇宙構造物(宇宙船)に関する FS プロジェクト	
実施時期	2022 年 1 月 1 日から 2026 年 12 月 31 日まで	
目的／背景	・ 2021 年 8 月 5 日、NSFC は 9 つの科学部門にまたがる 78 の主要プロジェクトの第 1 弾を発表した。 ✓ その中の数理・物理科学部門が策定した 10 の研究プロジェクトの 1 つが、「超大型宇宙構造物」の組立に関する FS。 ・ 超大型宇宙構造物の基本的な枠組みを策定し、必要な技術のハードルの高さを確認するための小規模な研究を行う。 ・ NSFC は本プロジェクトへの参加を科学者に呼びかけている。	
研究内容	・ 打上げ回数と建設コストを削減するために宇宙機の重量を最小限に抑えることを課題とする研究を行う。 ・ 予備的な研究として、軽量構造物の開発とそれに続く軌道上での組立てと制御の課題を研究する ・ 軌道上でのダイナミクスのモデル化や、宇宙組立てプロセスのダイナミクスと制御に関する地上シミュレーションテストも行う。 ・ 本技術は宇宙で組立てられる巨大な宇宙望遠鏡プロジェクトにも利用できる	
キー技術課題	・ 超大型(km スケール)宇宙構造物	
進捗レベル	実現可能性に関する FS	
今後の計画	不明	
予算規模	予算上限は 1,500 万元(230 万ドル)	
実施体制		
関連機関	—	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
国家戦略との関係	中国は軌道上に、太陽光発電所、観光地、ガソリンスタンド、さらには小惑星の採掘施設などを建設する計画を有しており、そのためには軌道上に何マイルもの「メガストラクチャー」を建設する技術を“urgent need”としている。	
参考図表		
出所	・ https://spacenews.com/china-researching-challenges-of-kilometer-scale-ultra-large-spacecraft/ 、2021 年 9 月 7 日取得 ・ http://nsfc.gov.cn/publish/portal0/tab442/info81561.htm 、2021 年 9 月 7 日取得 ・ https://digichat.info/2021/09/01/china-looks-to-build-giant-mega-structures-miles-away-in-space/ 、2021 年 9 月 7 日取得	

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	西安電子科技大学 (Xidian University) (中、陝西省西安市)	
部署／研究者	Academician／Baoyan Duan(段宝燕教授)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	SSPS OMEGA(Orb-Shape Membrane Energy Gathering Array)コンセプトの検討 SSPS(Space Solar Power Station)デモンストレーション・実証実験システムの建設	
実施時期	2014 年頃～:SSPS OMEGA の検討 2018 年～:実証実験システムの着工	
目的／背景	・リーダーの段氏はアンテナのトップエキスパートであり、これまで 500m の球形電波望遠鏡 FAST の全体設計を担当していた。	
研究内容	・2014 年、段氏のチームは、SSPS OMEGA コンセプトの提案を行った。SSPS OMEGA は GEO に展開され、球状の太陽電池コレクター、双曲面の太陽電池アレイ、電力管理・分配(PMAD)、マイクロ波送信アンテナといった 4 つの主要部分で構成されている。 ・西安科技大学のキャンパス内に、75m の試験塔を設置し、塔の中央には、地上から 55m の高さに、直径約 6.7m の半球状の集光器が 4 つ設置されている。球状の反射面に太陽光が当たると、一定の集光部に収束し、太陽電池で直流を発生させた後、マイクロ波に変換して送信アンテナから地上に送信する。	
キー技術	・ Multi-systems ・ Effective WPT ・ In-orbit assembly ・ Deployable array	
進捗レベル	実験システムは最終試運転段階。	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	—	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
参考図表	The diagram illustrates the SSPS OMEGA concept. It shows a spherical concentrator in a Geostationary Earth Orbit (GEO) around the Earth. Solar rays enter from the right, pass through a thin film, and are reflected to a PV array. The PV array converts solar power to DC and rotates along a circular rail to point the Sun. The DC is then converted to microwave power and transmitted to Earth via a transmitting antenna. Labels in the diagram include: GEO, Earth, Circular rail, PV array, Spherical concentrator, Solar rays, and Transmitting antenna. Text descriptions in the diagram: - Almost all solar rays passed through the thin film from outside to inside whilst being reflected from inside to outside. - This convert solar power into DC , and rotates along the circular rail of the spherical concentrator to point the Sun - This convert DC into microwave power, and transmit it to the Earth by pointing the Earth SSPS OMEGA コンセプト	

	 SSPS OMEGA スキームの実証のためにキャンパス内に設置された試験タワー
出所	• Xiangfei JI, Baoyan DUAN, Yang YANG et al., “Effect of operational condition of rotational subsystem on attitude control for space solar power station” ,Chinese Journal of Aeronautics, Volume 34, Issue 5, May 2021, Pages 289-297 • http://j.people.com.cn/n3/2019/0109/c95952-9536175.html、2021 年 9 月 29 日取得 • https://min.news/en/tech/e9ff9c0333bb878d07470c7144fc352d.html、2021 年 9 月 29 日取得 • https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094576516306014 、2021 年 9 月 29 日取得 • http://www.spacedevelopmentfoundation.org/wordpress/documents/2017/06/on-new-developments-of-space-solar-power-station-ssps-of-china.pdf/、2021 年 9 月 29 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Space Solar Power Station Committee of Chinese Society of Astronautics	
部署／研究者	Honorary Chairman／Academician Baoyan Duan(Xidian University)、Chairman／Researcher Ming Li(CAST)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	CSSP-CSA 2021(2021 Academic Exchange Conference of Space Solar Power Station Committee of Chinese Society of Astronautics and the 3rd National Symposium for Development of Space Solar Power Station Technology)の主催	
実施時期	2021 年 3 月～	
目的／背景	・ 2017 年、中国宇宙航行学会の支援を受けて、CAST の Qian Xuesen Laboratory of Space Technology が SSP 委員会設立の提案を開始し、37 の研究機関から回答を得た。 ・ 2020 年 9 月、中国宇宙航行学会が SSP 委員会の設立を承認したことを発表 ・ 2021 年 3 月、中国宇宙航行学会 SSP 委員会設立式("Establishment Ceremony of the Committee of Space Solar Power, Chinese Society of Astronautics ")が北京にて開催された。	
研究内容	・ SSP 委員会は 7 名の学識経験者を顧問として招聘し、68 名の委員を選出。 ・ 2021 年 11 月 30 日～12 月 3 日、重慶市において CSSP-CSA 2021 を開催する。→ 2022 年 3 月に延期 ・ SSPS の分野における学術交流と技術協力を強化し、学術的なアイデアの発展、SSPS のための高度な人材育成、SSPS の分野における新技術、アイデア、成果の交換、SSPS キーテクノロジーの開発、キーマテリアルやデバイスのブレイクスルー、重要な科学的課題の研究の促進を目的とする。 ・ 以下のトピックが予定されている。 ✓ Space solar power station system technology ✓ Construction and control of super large scale spatial structure ✓ High-voltage space power system ✓ Wireless Energy Transfer ✓ Efficient energy conversion devices and materials ✓ Other related technologies	
キー技術課題	—	
進捗レベル	—	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	・ Chongqing University ・ State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology ・ AEIC Academic Exchange Information Center ・ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences ・ Qian Xuesen Laboratory of Space Technology of China Aerospace Science and Technology Corporation	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
	—	
参考図表		
出所	・ http://www.cssp-csa.com/ 、2021 年 9 月 29 日取得	

添付資料 2:無線エネルギー伝送技術に関する研究開発一覧

◎電波方式(主にマイクロ波)WPT

米国

U.S. Naval Research Laboratory	1
Purdue University Graduate School	4
Energous Corporation	5
GuRu Wireless, Inc.	7
Ossia Inc.	9
Powercast Corporation	11
Raytheon Technologies	13

ニュージーランド

Emrod	15
-------------	----

シンガポール

TransferFi Pte. Ltd.	17
---------------------------	----

韓国

Korea Electrotechnology Research Institute	19
仁荷大学校	21

中国

電子科技大学.....	23
CEPRI(China Electric Power Research Institute)	25
Xiaomi Corporation.....	26

◎レーザー方式 WPT

米国

NASA	27
U.S. Naval Research Laboratory／PowerLight Technologies.....	29
Defense Advanced Research Projects Agency	31
University of Virginia.....	33
PowerLight Technologies	35

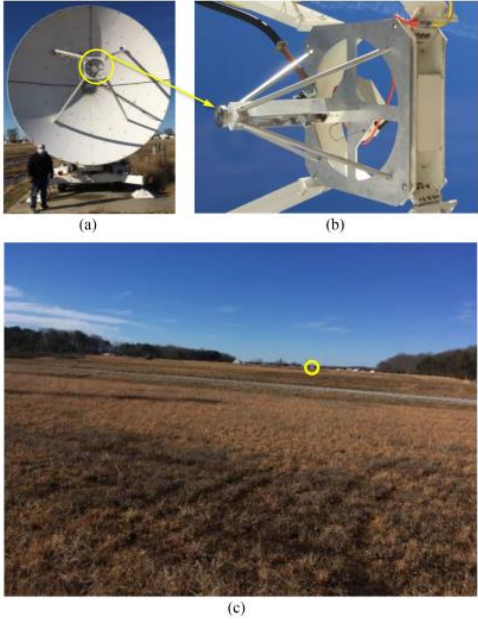
英国

University of Surrey / Space Power 37

イスラエル

Wi Charge 39

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	U.S. Naval Research Laboratory (NRL:米海軍研究所)	
部署／研究者	Radar Division's Advanced Concepts Group / Christopher T. Rodenbeck (Office Head) Dr. Paul Jaffe(the innovation power beaming and space solar portfolio lead) MIT Lincoln Laboratory Space Systems and Technology Division / Trevor Mayhan	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	Terrestrial Microwave Power Beaming (不規則で不均質な地形における)1km以上の距離での地上マイクロ波電力ビーム送電	
実施時期	2020 年～2021 年(13 カ月)	
目的／背景	・地表に沿ってマイクロ波電力をビーム送電するためには、地表の地形によるマイクロ波散乱の影響、マルチパスの存在下でのビームの特性評価方法、安全性、効率性などを考慮する必要がある。 ✓ 500m を超える距離での先行地上実証実験では、送信部とレクテナアレイの位置を大幅に上昇させ、ビームのターゲットを山腹の割れ目に配置することで地形散乱の影響を最小限に抑えてきた。 ・多くの実用的なシナリオでは、最小限のコストで任意の地形でビームを照射することが望まれている。本研究では“ground bounce”の効果を利用して目標地点での電力密度を向上させた初の電力ビーム実証実験を行うことで、マイクロ波による不規則で不均質な地形における電力伝送における実現性を確立する。	
研究内容	・メリーランド州ブロッサムポイントの米国陸軍研究施設において、直径 5.4m の X バンド送信機から 1046m のスタンドオフ距離で 1.6kW の電力を供給するデモンストラーションを実施した。 ✓ 2.5 GHz を超える周波数において、送信距離 1km、受信電力 1kW を超える初の実証。 ✓ 送信機から受信機までの地形は湿った草原で構成され、陰しく非均質である。 ✓ 送信部はカセグレンアンテナとして設計されたパラボラアンテナである。給電ホーンはリニアアクチュエータに取り付けられており、リフレクタに沿った 100mm の範囲で給電位置を変えることができる。 ✓ 個々のレクテナ要素はマイクロストリップパッチアンテナより構成される。181mm×256mm、203 素子のタイルを形成し、さらに 4 列 6 枚の並列接続されたタイルが直列に組み合わせられ、1.02m×1.09m のレクテナ quadrant を形成する。Quadrant は保護用のレドームが取り付けられている。さらに受信部は 4 つのレクテナ quadrant から構成される。 ✓ 4m² のレクテナで 1.6kW の電力を生成し、RF-DC 変換効率は 73%を達成した。X バンドにおける現在の技術水準を上回った。 ✓ 乱雑で不規則な地形を意図的に利用した ground bounce により、ターゲットサイトでの電力密度を 2.3dB 向上させた。 ✓ 過電圧保護技術により、パワーハンドリングは 1dB 以上向上した。 ・マサチューセッツ州ウェストフォードの MIT ヘイスタック (HUSIR : Haystack Ultrawideband Satellite Imaging Radar)天文台にある追加のテストサイトにおいても受電実験を行った。 ✓ HUSIR 送信機は 36.6m の円偏波カセグレンアンテナを使用している。 ✓ ブロッサムポイントでのレクテナを HUSIR 用に設計変更し、quadrant を製作。ブロッサムポイントと同様にレドームを設置し、アレイ全体を 1mm 厚のマイラーフィルムで密閉することで、設置から最終試験まで 2 回の激しい雷雨に耐え、無傷であることを確認 ✓ レクテナアレイは 70.6m の高さ、HUSIR 送信機から 1141m の距離に設置。下部に LED ディスプレイを設置し、1.2kW の電力を送信し、LED ライトを点灯させた。 ・今後、実運用に向けて技術を成熟させるためには、以下の追加研究が必要としている。	

	✓ Scalable Spatially Combined Microwave Sources ✓ High Power Handling Schottky Diodes: ✓ Rectenna Power Management Subsystems
キー技術	・無線電力伝送、マイクロ波電力伝送、電力ビーミング ・レクテナ、レクテナアレイ、RF の安全性 ・“ground bounce”効果
進捗レベル	技術デモンストレーションの段階
今後の計画	—
予算規模	—
実施体制	
関連機関	Office of the Undersecretary of Defense for Acquisition and Sustainment, Air Force Research Laboratory, Envisioneering, Inc., Lakenheath Electronics, Lincoln Laboratory, Engent, Inc.
国際協力	—
その他(特許、国家戦略との関係等)	
参考図表	 FIGURE 3. The transmit aperture is (a) a 5.4-m-diameter parabolic reflector fed by (b) a linearly actuated horn. Varying the feed location makes it possible to focus the beam at specific standoff distances from the transmitter. (c) A view of the transmitter from the target site 1046 m away.  FIGURE 5. (a) 24 rectenna tiles being assembled into a quadrant. (b) The assembled quadrant with a protective radome installed. (c) Four quadrants installed at the Blossom Point target location. Blossamポイントの実証の様子(左:送信部、右:レクテナ部)

出所	・ CHRISTOPHER T. RODENBECK; TREVOR MAYHAN; PAUL I. JAFFE et al., “Terrestrial Microwave Power Beaming”, IEEE Journal of Microwaves, VOLUME 2, NO. 1, JANUARY 2022

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Purdue University Graduate School(米 Indianapolis, Indiana)	
部署／研究者	Department of Electrical and Computer Engineering／Abigail Jubilee Kragt Finnell	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	フェーズドアレイアンテナ(PAA)を用いた無線電力伝送の効率に関する研究	
実施時期	2021 年 8 月(修士論文)	
目的／背景	・昨今では、送受信アンテナの技術が成熟し始めており、パワービーミングに関する論文は非常に多くなってきている。 ・従来使用されている送信アンテナ効率とファーフールドモデルを記述する方程式は、アンテナアレイ特有の効率を考慮したものとはなっていなかった。	
研究内容	・無線電力の送信と伝搬に焦点を当て、フェーズドアレイアンテナ(PAA)や従来とは異なるアンテナ構成を用いたビームフォーミングや、送信・伝搬効率の評価等を実施した。 ✓ ファーフールド解析についてのモデル、実験、結果。 ・本研究の目的の一つは SSPS への応用であるが、パワー・ビーミングが有益なアプリケーションは数多くあり、この研究の多くは他の RF アプリケーションにも拡大することができる。 ✓ 特に 5G では、信号のステアリングに PAA を多用しており、この種のアプリケーションは、電力ではなく情報を埋め込んだ信号を送信することが目的であるため、WPT とは大きく異なると考えられるが、いくつかの原理は共通である。	
キー技術	・フェーズドアレイアンテナ ・ファーフールド ・効率方程式	
進捗レベル	研究室での実験、モデル開発	
今後の計画	今回開発したフェーズドアレイアンテナのファーフールド解析に関するモデルをさらに拡張することも有用である。	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	—	
国際協力	—	
出所	・ Abigail Jubilee Kragt Finnell, "WIRELESS POWER TRANSFER: EFFICIENCY, FAR FIELD, DIRECTIVITY, AND PHASED ARRAY ANTENNAS: Master's thesis, August 2021	

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Energous Corporation (米 San Jose, CA)	
部署／研究者	Stephen R. Rizzone (CEO)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	RF ベースのワイヤレス充電技術「WattUp®」の技術開発および製品販売	
実施時期	2012 年(会社設立時)～	
目的／背景	・ Energous Corporation は、高速で効率的な接触型の充電に加え、非接触型充電に対応し、受賞歴のある WattUp®技術で、次世代のワイヤレス充電であるワイヤレス充電 2.0 を先導している。 ✓ 近距離充電と遠距離充電の両者をサポート。遠距離充電では、送電機から最大 20W の出力で 15 フィート(約 4.6m)離れたモバイルデバイスや補聴器のようなウェアラブルデバイスを充電可能 ・ 2016 年末時点では同社は、近接型の製品を 2016 年末～2017 年初めに提供し、中距離型を 2017 年後半、遠距離型を 2017 年第 4 四半期～2018 年第 1 四半期に提供するという予定を公表していた。 ✓ 2017 年に発表された Apple 社の iPhone 8 に採用されるのではないかと報道もあったが、実際に iPhone 8 に導入されたのは Qi 互換技術であった。 ・ 2017 年 12 月、世界で初めてワイヤレス遠隔充電技術に関する FCC 規則 Part 18 の認定を取得。	
研究内容	・ Energous Corporation はシリコンベースのワイヤレス電力伝送(WPT)技術と、カスタマイズ可能なリファレンスデザインを開発している。 ✓ 革新的なシリコンチップ、アンテナ、ソフトウェアがあり、これらはスマートフォン、フィットネストラッカー、ヒアラブル、医療センサーなど、多種多様なアプリケーションで使用可能である。 ✓ 配向性に制約がなく、90 度の角度に対応異物検出機能が金属やその他の材料による熱の問題を排除異なるメーカーでもすべての WattUp 技術に基づく製品の間ににおける相互運用性を確保 ・ 同社の Products&Solutions ✓ <レシーバー(受信機)> 耳に装着するタイプの補聴器から、産業用 IoT センサー、大型の偵察用ドローンまで、さまざまなデバイスのフォームファクターに合わせて拡張することが可能。 ✓ <トランスミッタ(送信機)> 近距離、中距離、遠距離伝送用の 3 つの WPT オプションがある。近距離用トランスミッタは充電面上でデバイスを充電し、中距離および遠距離用トランスミッタは無線でデバイスを充電する。 ✓ <ソフトウェア> WattUp®送信機と受信機は同社のワイヤレス充電 2.0 ソフトウェアによってサポートされており、WattUp®デバイスを管理・制御する ・ 以下の Developer Kits を販売中 ✓ WattUp 1W Active Energy Harvesting ✓ WattUp 5W Active Energy Harvesting ✓ WattUp® PowerHub : 充電ゾーンは送信機から 15cm の範囲内。900MHz の RF を使用。 ✓ Hearing Aids ✓ Smart Glasses ✓ WattUp® Near Field ・ 2020 年 2 月:日本の現行法に基づく規制準拠プロセスを完了し、世界 112 カ国で WattUp Near Field 充電技術が販売可能に。	
キー技術	・ ビームフォーミング ・ ワイヤレス充電	
進捗レベル	・ 近距離、Near Field 技術については製品化しているが、中～遠距離充電製品については技術開発中。	
今後の計画	—	

	予算規模 ・ Apple の部品サプライヤーである Dialog Semiconductor から 2500 万ドルの投資を受けている。 ・ 2014 年:NASDAQ に上場
実施体制	
	関連機関 ・ Dialog Semiconductor ・ vivo(中国の大手スマートフォンメーカー) ・ SK Telesys、PiBEX(POSCO)、Primax
	国際協力 —
その他	
	特許 ・ WattUp ワイヤレス充電技術に関する 228 件の特許を取得。(2020 年 11 月現在)
参考図表	 WattUp® PowerHub (Credit: Energous)
出所	・ https://energous.com/ ・ https://www.businesswire.com/news/home/20200228005172/ja/、2021 年 11 月 2 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	GuRu Wireless, Inc. (米 Pasadena, CA.)	
部署／研究者	Florian Bohn (CEO)、Prof. Ali Hajimiri (Chairman of the Board, Co-Founder, & Chief Scientific Advisor) ※Caltech の SSPS 研究者	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	ミリ波による中距離充電技術(GuRu RF Lensing 技術)によるワイヤレス OTA(Over The Air)電力伝送向けシステム開発	
実施時期	2017 年(会社設立時)～	
目的／背景	・OTA ワイヤレス電力伝送向けのトランスミッターの設計や、その配置方法、効率性の最大化、システム検証などに関しては、特定の技術が必要だったり、数値シミュレーションなどの高度なツールを使用したりする必要があるなど、新たに複雑な課題が提示されている。 ・GuRu Wireless 社は 2017 年、米国カリフォルニア工科大学(CALTECH)からスピンオフして設立された。2021 年にワイヤレス電力伝送向けシステムを開発したことを発表。	
研究内容	・充電ハブからデバイスへミリ波(24GHz 帯)によりピンポイントで電力を送る。障害物を検知した場合は送電をストップする。デバイスを動かした場合も、ハブはデバイスの新しい位置を数秒で検知する。 ✓ GuRu の充電ハブは、部屋のシーリングライトやオフィスの音声会議スピーカースステムのほか、スマートスピーカーなどのデバイスにも組み込める。 ✓ GuRu Wireless の充電ハブの一つは、Apple「iPhone 11」の 13Wh のバッテリーを、ゼロの状態から 2～3 時間でフル充電できる ✓ 24GHz 帯の最大のメリットの 1 つとして挙げられるのが、堅牢な Point-to-Point 接続を実現できるという点である。また、Wi-Fi や Bluetooth と干渉しないというメリットも有する。 ・GuRu Wireless の拡張可能なワイヤレスパワーモジュールは送受信アンテナが搭載されていて、統合されたミリ波チップによって電力が供給される。タイル状に配置できるモジュール／チップはカスタマイズ可能で、高いコスト効率を持つ小型ソリューションを実現できる。 ✓ 従来の 2.4GHz 帯向けモジュールと比較して、大幅な小型化が可能。	
キー技術	・“Smart Lensing”技術: 効率を最適化するために伝送されるビームの方向や数を制御する技術 ・完全に統合された高度なミリ波チップ	
進捗レベル	・試作段階 ✓ 3m 以上離れた場所にあるデバイスに電力を送信することができた他、会議用テーブルの電気スタンドの近くに置かれた複数の携帯電話機を充電することに成功。	
今後の計画	—	
予算規模	Kairos Ventures 社と Bold Capital Partners 社が出資	
実施体制		
関連機関	・カリフォルニア工科大学(Caltech) ・2021 年 5 月: Motorola と提携を発表。対応スマホの開発を目指すとのこと。	
国際協力	—	
参考図表		



GuRu ワイヤレス充電技術利用イメージ (Credit: GuRu Wireless)

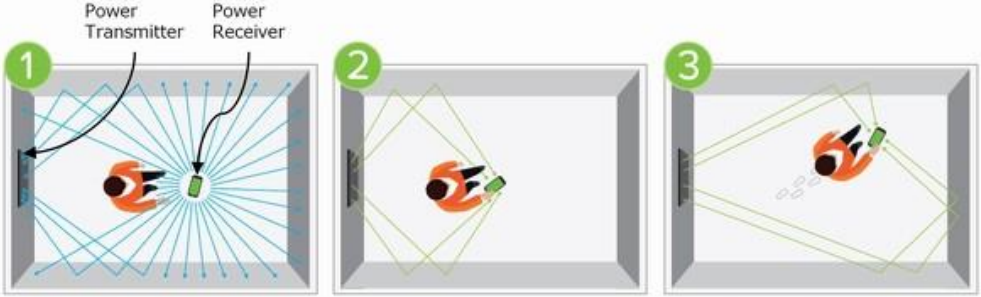


GuRu 充電ハブ (Credit: GuRu Wireless)

出所

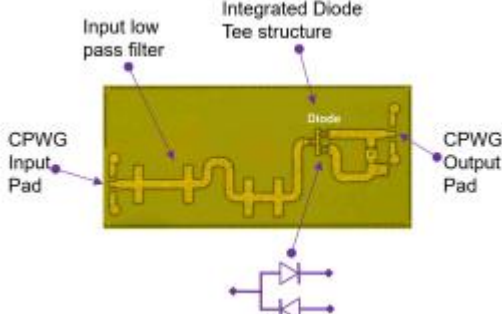
- ・ <https://guru.inc/>
- ・ <https://www.cnet.com/tech/mobile/motorola-signs-up-for-medium-range-wireless-smartphone-charging-no-pad-required/>、2021 年 11 月 9 日取得
- ・ <https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2103/11/news094.html>、2021 年 11 月 9 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Ossia Inc. (米 Redmond, WA)	
部署／研究者	Alexander Huang (CEO)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	ワイヤレス給電技術 Cota® の技術開発およびライセンス提供(製品販売は行わない)	
実施時期	2008 年(会社設立時)～	
目的／背景	・ 2013 年年末にはワイヤレス充電の概念を提起し、それから 3 年後に開かれた世界最大の IT 家電ショー「CES 2016」では自社の空間伝送型ワイヤレス充電プランであるワイヤレス充電ステーション「Cota」を披露した。	
研究内容	・ Cota は対応したデバイスに電力供給を行う。電力供給対象の識別、複数デバイスへの同時電力供給、一定空間内の離れたデバイスへの電力供給が可能であり、Cota Cloud プラットフォームを介して受信デバイスを監視し、管理する。 ✓ ビームフォーミングを応用して、室内に置かれた 1～2m 先の電子機器に約 1W の給電ができる。 ✓ 2.4GHz 帯や 5.8GHz 帯の電波を使用 ✓ 製品に組み込まれた小さなシリコンチップである Cota 受信機はビーコン信号を発信(毎秒 100 回)。デバイスに到達した経路をたどって充電を行う。人やペットが受信機とデバイスの間に人やペットがいても、壁や物を使って Cota 送信機までの経路を探索。受信機が移動しても充電可能。 ✓ 充電を受けるデバイス側に設定するマイクロチップは小型で、従来のバッテリーにも搭載することが可能。 ・ 使用事例 ✓ スーパーの陳列棚にある電子値札や工場内の IoT センサー、オフィス内の環境センサーなどをワイヤレス化 ・ 2019 年、Cota の Wireless Power System(2.4GHz)が FCC の認証を取得 ・ 2021 年 9 月:Cota テクノロジー対応製品が送受電に伝送距離の制限を設けることなく、欧州連合(EU)の CE および英国の UKCA マークの認証を取得 ✓ Cota システムが、EU 無線機器指令および英国無線機器規制の下で適用される無線、放射、イミュニティー、および RF 安全基準に準拠していることを確認するもの。欧州では CE マーク、英国では UKCA マークを表示しライセンス供与、販売ができる。→これまでは米国のみで販売可能であった。	
キー技術	・ ビームフォーミング ・ ワイヤレス給電	
進捗レベル	・ 「Cota Real Wireless Power」は現在、米国の物流・輸送業界のトラッキングシステムなど、複数の顧客アプリケーションに導入されている。 ・ 2021 年 9 月より、欧州および英国での販売が可能となった。	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	多くの企業が Ossia エコシステムに加わり、Cota 技術のライセンスを受け、出資、製品開発、製品販売、ブランド提携を含む様々な役割を担っている。 ・ パートナシップ契約:丸文株式会社(Cota の日本企業へのライセンス提供と技術サポート) ・ 出資:KDDI Open Innovation Fund(KOIF)、ENEOS ホールディングス ・ 共同開発:豊田合成株式会社 ・ 海外パートナー企業:FIH Mobile Limited、In-Q-Tel、Saint-Gobain、Molex、T-Mobile、SAP NS2®、SES-Imagotag、BOE、Galanz、Spigen、NGK Insulators、E-peas、Xirgo Technologies、LLC、Motherson Innovations、Motherson-Ossia、Displaydata、Goodman Networks、KonnectONE	
国際協力	—	

その他	
特許	・ Ossia はワイヤレス電力伝送システムにおいて、世界中で 158 件以上の特許を取得し、213 件以上の実用新案の特許資産を有している。(2021 年 9 月現在)
参考図表	 ➢ Receiver は弱電力ビーコンを発出 ➢ Transmitter はいろいろな経路を介しビーコン信号を受信 ➢ Transmitter の Phased Array の各アンテナでビーコンの位相を検出 ➢ Transmitter は検出した位相の逆位相で各アンテナから高周波電力を発出 ● Receiver から発出されたビーコンが Transmitter に到達した経路のみを使用して電力を伝送 ➢ ビーコンは 1 秒間に 100 回発出するので、移動にも追従可能 空間伝送型ワイヤレス給電技術「Cota」の利用イメージ (Credit: 丸文)  Cota Receiver(左)と Transmitter (右) (Credit: Ossia)
出所	・ https://www.ossia.com/ ・ https://www.marubun.co.jp/maker/a7ijkd000000kdh6.html、2021 年 11 月 5 日取得 ・ https://kyodonewsprwire.jp/release/202109099803、2021 年 11 月 5 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Powercast Corporation (米 Pittsburgh, PA)	
部署／研究者	Charles Goetz (CEO)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	RF エネルギーハーベスティングと無線電力伝送に関するソリューション提供と米国国内での関連製品販売(Powercast®, Powerharvester®, Powercaster®, Lifetime Power® Powerspot®, Wireless Power For A Wireless World SM , Power Finally Untethered SM , Power Over Distance SM , and Vikaura®)	
実施時期	2003 年(会社設立時)～	
目的／背景	- Powercast は、2003 年にワイヤレス給電の方式やアプリケーションを専門に研究することを目的として設立された。米国 FCC のワイヤレス給電用特定周波数(915MHz)の技術認証を受け、ワイヤレス給電のシステムを世界に先駆けて発表したワイヤレス給電システムのトップメーカーとなっている。 - 同社のワイヤレス給電技術は、最大 80 フィート(約 24m)の距離で動作する。すでに IoT、家電、RFID など 15 以上の業界で数百万人のユーザーに利用されている。同社は、デザイン、エンジニアリング、プロトタイピングに関する深い専門知識を有しており、これまでに数十のアプリケーションと数百万ユニットの出荷を実現している。 2017 年 12 月、915MHz で 10 フィートの距離で給電可能な機器が FCC Part15C で承認取得。	
研究内容	- Powercast の FCC 認定 RF トランスミッタは、915MHz の ISM 帯域を利用してデバイスに内蔵されたレシーバチップに RF エネルギーを送信し、直流(DC)に変換し、デバイスを直接駆動するか、バッテリーを充電する。 <送信側> Powercaster®送信機は、2010 年に FCC および ISED の承認を受けており(FCC ID: YESTX91501、IC 番号: 8985A-TX91501)、商業および産業用アプリケーションに使用されている。 ✓ Powercaster®を家庭向けにした小型 PowerSpot®トランスミッタは、独立した充電器として使用できるほか、他の民生用製品に組み込んで、周囲の複数の対応機器を充電することが可能。→送電電力は約 3W <受信側> Powerharvester®受信機は幅広い RF パワー(最低-17dBm)と周波数(10MHz～6GHz)で動作し、最大 80%の効率で RF を DC に変換する。 2019 年、PowerSpot®対応ゲームコントローラ充電器として Nintendo Switch のワイヤレス充電製品として、Nintendo Switch Joy-Con コントローラ用のワイヤレス充電グリップを発売。 ✓ Amazon.com で Wireless Charging Grip + PowerSpot Wireless Power Transmitter Bundle Pack を購入可能 2020 年 9 月:企業が COVID-19 モニタリングプロトコルに対応して従業員の体温を簡単かつ安全に監視することができるように、ワイヤレス給電式の RFID 温度スキャンシステムを発売 ✓ 従業員用の無線式温度スキャン・フォブ、RFID リーダー、TV モニタで構成される。従業員が入口にある RFID リーダーに自分専用の小型のフォブを近づけると、すぐに充電される。従業員はフォブを使って自分の額をスキャンして体温を読み取る。	
キー技術	- RF エネルギーハーベスティング - ワイヤレス給電	
進捗レベル	すでに商品化を行っており、世界中に 100 社以上の顧客とパートナー企業を有している。世界で 63 件の初期および基本特許を取得し、34 件の特許を申請中である。(2020 年末時点)	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	電子タグ、センサ、パッケージメーカー等とアプリケーションや技術開発で連携: PPG Teslin, IDEAL INDUSTRIES, VANGUARD ID SYSTEMS, INDUS INSTRUMENTS,	

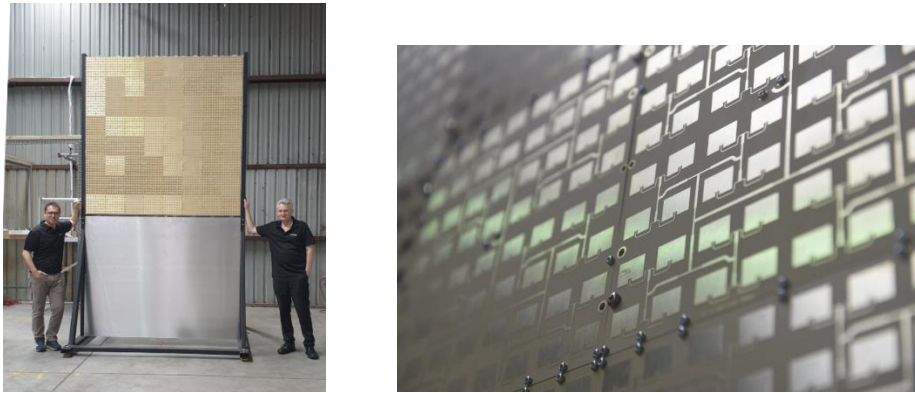
	EPSON、MICROCHIP、TEXAS INSTRUMENTS、MATRIX PRODUCT DEVELOPMENT、NXP、CYMBET、KYOCERA AVX、CAP-X、Compliance Innovations、E Ink、NORDIC SEMICONDUCTOR、ESensors 等
国際協力	—
その他	
特許	・世界で 63 件の初期および基本特許を取得し、34 件の特許を申請中である。(2020 年末時点) https://www.powercastco.com/IP/
参考図表	 The diagram illustrates the PowerSpot® charging zone, a circular area defined by a dashed blue line. At the top center is the PowerCast logo, featuring a stylized blue 'P' with green signal waves. Below the logo is a black rectangular charging pad. Various electronic devices are shown within the zone, with their charging ranges indicated by green concentric circles and labels: 1-6 inches (for a headset), 1-2 feet (for a game controller and another headset), 6 feet (for a keyboard, a smartwatch, a mouse, and a remote control), 10 feet (for a credit card), and 60-80 feet (for a small white circular device). To the right of the diagram, a list of features is provided: FCC/ISED Approved, Far Field RF Charging, 3W (EIRP) Transmitter, and Charges up to 30 Devices. PowerSpot® (Credit: PowerCast)  A close-up photograph shows a hand holding a black, oval-shaped wireless temperature scanner or fob. The device has a small circular sensor on its front face. In the background, a white rectangular RFID reader is visible, which is part of the PowerCast system. 無線式温度スキャン・フォブと RFID リーダー (Credit: Powercast)
出所	・ https://www.powercastco.com/ ・ https://www.prnewswire.com/news-releases/powercast-sees-record-customer-and-revenue-growth-in-2020-as-demand-for-wireless-power-gains-momentum-301200776.html、2021 年 11 月 2 日取得

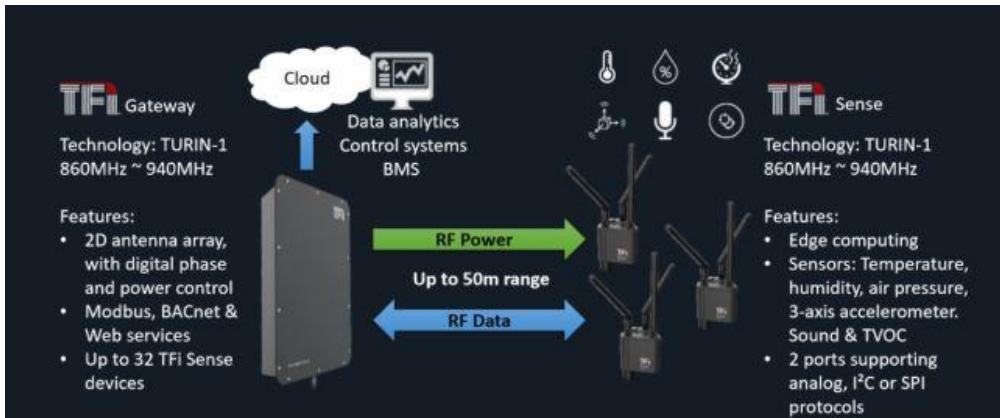
項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Raytheon Technologies (米 El Segundo, CA)	
部署／研究者	Intelligence and Space System Business Unit／Hooman Kazemi (Engineering Fellow)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	ミリ波無線電力伝送用のレクテナ回路(効率 61.5%、電力 3.6kW/m ²)の実証実験	
実施時期	2021 年	
目的／背景	・ファーフールド無線電力伝送の実用化のためには、受電部の小型化と高電力密度がキーとなる。 ・ミリ波帯のファーフールド無線電力は、RF やマイクロ波帯と比較して経路損失を大幅に低減することができる。 ・Intermediate force protection (IFP) system のような、非殺傷作戦用に設計された 100kW 指向型エネルギーミリ波トランスミッターは、ミリ波無線電力伝送のための高出力移動型電源を提供する。	
研究内容	・新しい技術である GaN ナノショットキーダイオード (GaN nano-Schottky diodes (NSDs)) をモデル化し、高出力ミリ波整流器とレクテナ回路の開発を行った。 ・W バンドの小信号および大信号の特性評価を行い、GaN ナノショットキーレクテナの性能を明らかにした。95GHz において入力電力処理 3.6kW/m² で最高となる RF-DC 効率 61.5% を記録した。 ✓ この結果は、最新の W 帯レクテナ回路の最高効率と比較して 15.7%の効率改善である。また入力電力処理能力も 94 GHz で報告された GaAs および CMOS レクテナ回路に対して 1.5 倍および 9.5 倍の改善となっている。 ・100GHz を超える高い動作周波数は、ビーム幅をさらに狭めて全体的な効率を向上させるため、今後注目されることが想定される。	
キー技術	・ダイオード、GaN トランジスタ、高出力レクテナ、ミリ波システム、W 帯 ・無線電力ビーミング、無線電力伝送	
進捗レベル	・実験室における実験	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	・ Teledyne Scientific Company: GaN ナノショットキーダイオードの設計と製作	
国際協力	—	
その他		
参考図表	 GaN/SiC ウェハ上に作製された GaN ナノショットキーレクテナ MMIC(2.1 mm × 0.75 mm、厚さ 50μm)	

	<pre> graph LR RF[RF Synthesizer] --> Freq[W-band Freq. Extender] Freq --> Iso1[Isolator] Iso1 --> Split(()) Split --> PA[W-band Power Amp] PA --> Att[Variable Attenuator] Att --> Iso2[Isolator] Iso2 --> Redenna[Redenna Circuit] Split --> Coupler[10 dB Coupler] Coupler --> WG Bend[WG Bend] WG Bend --> Probe[WG to CPW Probe] Probe --> Redenna PM[Power Meter] --> Coupler </pre> 大信号ブロック図とレクテナのセットアップ写真
出所	• Hooman Kazemil, "61.5% Efficiency and 3.6 kW/m2 Power Handling Rectenna Circuit Demonstration for Radiative Millimeter Wave Wireless Power Transmission", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES

INZ 民間正

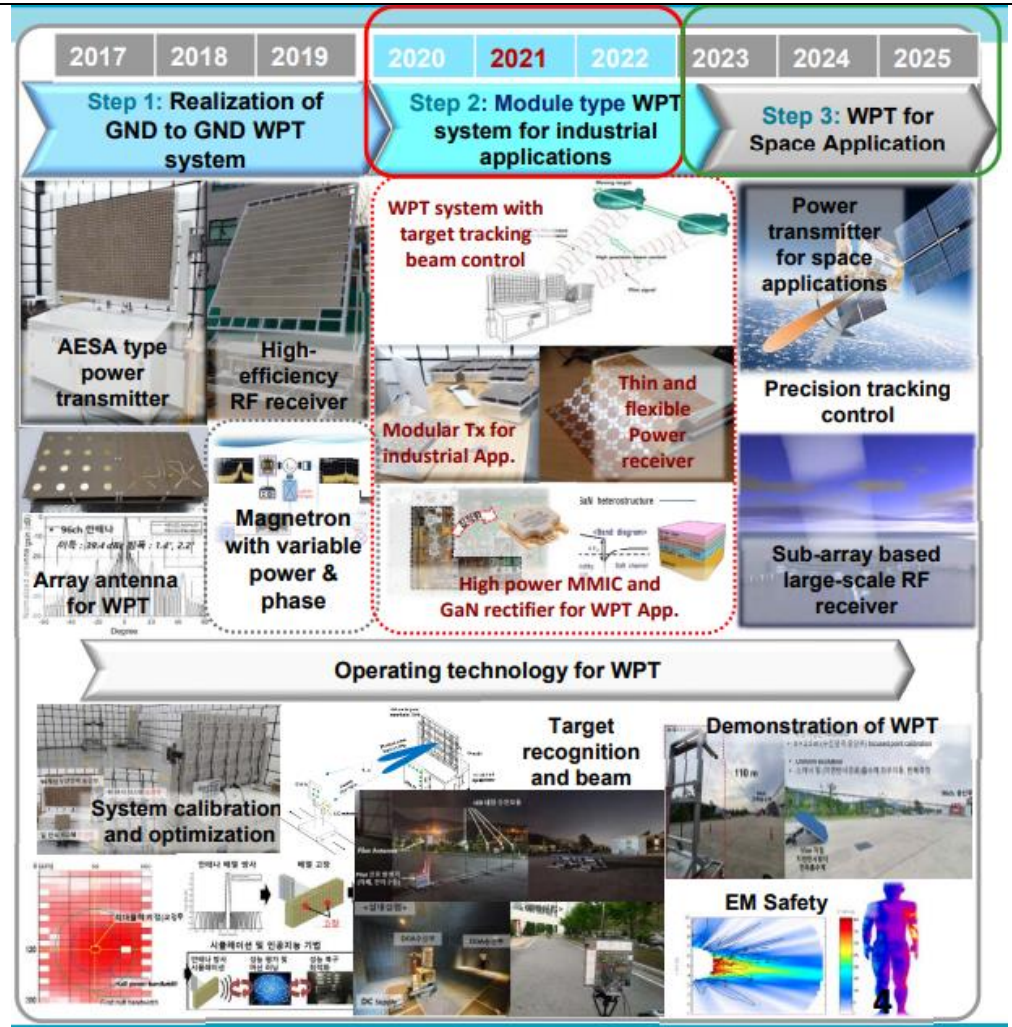
項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Emrod(Auckland, New Zealand)	
部署／研究者	Greg Kushnir (CEO)、Dr Ray Simpkin, (Chief Science Officer)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	tele-energy technology to transmit energy wirelessly over many kilometres /miles 長距離無線エネルギー伝送を可能にするテレエネルギー技術の開発	
実施時期	2019 年 6 月(会社設立時)～	
目的／背景	・ニュージーランドのクック海峡の沖合の風力発電所では海底ケーブルが必要であるが、それらの設置や維持に費用がかかりすぎる。 ・エネルギーの生成と貯蔵の方法は過去 100 年で飛躍的に進歩したが、エネルギーの伝送方法はほとんど進歩していない。 ・上記の理由から、Emrod 社では独自の技術開発により商業目的での無線長距離エネルギー伝送を安全かつ確実に実現する。	
研究内容	・ニュージーランド政府やニュージーランドのイノベーション支援団体 Callaghan Innovation の助成金により、マイクロ波を効率的に電力に変換するメタマテリアルを用いたプロトタイプの開発を実施。 ・2020 年 8 月:上記の知見を踏まえて第 2 のプロトタイプを開発し、ニュージーランド第 2 位の電力会社 Powerco の資金提供を受けて、ワイヤレスかつ長距離のエネルギー伝送を効率的に行う技術の試験を開始すると発表。 ✓ ISM(Industrial, Scientific and Medical)周波数帯を使用。 ✓ 2021 年 5 月:屋内での送電試験に成功。検査・検証・試験・認証の大手企業である SGS は、機器の試験に独立した第三者機関として立ち会い、規定の目標に対する性能を検証 ✓ ワイヤレス電力伝送システムの安全性、効率性、信頼性をさらに実証し、2022 年に実地試験を行う予定。40m の無線送電を実施。 ✓ マイクロ波の経路にはレーザーネットが設置され、鳥や人などにマイクロ波が当たりそうになると即座にマイクロ波が停止することで、安全性を確保する仕組みを確保 ・将来的にはニュージーランド本島とスチュアート島を隔てる 30km の無線送電の実現も視野に。アンテナ間に中継点を設けることで、伝送距離を延長する。 ・最終的には、遠隔地や険しい地形の地域での電力供給に使用することを想定している。また、既存のインフラのメンテナンス中に、顧客に電力を供給することも可能 ✓ ケーブル類の設置とメンテナンスが不要になることで、送電インフラに要するコストを最大 65%削減できると試算	
キー技術	・beam shaping(ビーム形成) ・metamaterials(メタマテリアル) ・rectenna technology(レクテナ技術)	
進捗レベル	2020 年 8 月の発表当初は、2020 年 10 月から屋内実験を行い、2～3 ヶ月でフィールドテストに移行すると述べていたが、実際は 2021 年 5 月に屋内実験を行い、2021 年 10 月現在、フィールドテスト実行に関する具体的なニュースはない。スケジュールは遅れている模様。	
今後の計画	・今後フィールドテストを実施予定。	
予算規模	・Challaghan Innovation から、2020 年 12 月 10～2021 年 12 月 9 日の契約(Project Grant)で 31 万 9,977 \$。 ・スタートアップ向けのクラウドファンディング・プラットフォームである Republic を通じて投資を受け付け。→目標を達成し 2021 年 10 月にクローズ。1,234 件の投資により 100 万ドルを確保。	
実施体制		
関連機関	Powerco、Callaghan Innovation	
国際協力	Emrod 社から京都大学篠原研究室の楊波氏に送電システムについて相談があり、大電力マイクロ波送電システム(Magnetron-combined phaser array)として、5.8GHz マグネ	

	トロンを 16 台用いる 12kW の送電システムを検討した。実際の実験のためのコスト評価(1 億円程度)も行った。
その他(特許、国家戦略との関係等)	
参考図表	 2021 年 5 月に実施した屋内試験のプロトタイプアンテナ (Credit: Emrod)
出所	・ https://emrod.energy/press-release-nz-start-up-launches-world-first-long-range-wireless-power-transmission/、2021 年 10 月 15 日取得 ・ https://emrod.energy/emrod-successfully-demonstrates-indoor-prototype-to-powerco/、2021 年 10 月 15 日取得 ・ https://startupsavant.com/news/emrod-wireless-power、2021 年 10 月 15 日取得 ・ https://www.callaghaninnovation.govt.nz/grants/emrod-prototype-rd、2021 年 10 月 15 日取得 ・ https://republic.co/emrod、2021 年 10 月 15 日取得 ・ https://www.sspss.jp/%E3%82%B7%E3%83%B3%E3%83%9D%E3%82%B8%E3%82%A6%E3%83%A0/2021%E5%B9%B4/、2022 年 1 月 11 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	TransferFi Pte. Ltd.(新 Central Region)	
部署／研究者	Aashish Mehta (CEO)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	長距離で安全かつ効率的な Wireless Power Network(WPN)の構築	
実施時期	2017 年 10 月(会社設立)～	
目的／背景	・ 産業用 IoT センサーネットワークの構築にはコストがかかるが、その 60%以上はケーブル配線と設置に関連するものである。 ・ TransferFi は電力へのアクセス方法に革命を起こすべく、長距離で安全かつ効率的な WPN を世界で初めて構築する。	
研究内容	・ WPN は、配線の複雑さを軽減するために産業用の IoT センサーに電力を供給したり、遠隔地やオフショアの再生可能エネルギーなどの主要エネルギー源に簡単にアクセスできるようになる高電力アプリケーションに使用されたりする。 ✓ 最終的には、特許取得済みの信号最適化およびビームフォーミングのアルゴリズムを通じて行われ、ワイヤレス給電(WPT)は 100m を超える範囲に拡大する。 ・ TFi Turin-1 wireless power network (WPN) プラットフォームの開発 ✓ TFi Gateway と各種センサーを搭載した TFi Sense ユニットで構成される。TFi Gateway は、遠距離 RF ワイヤレス給電を利用し、50m までの TFi Sense デバイスとデータ通信を行う。 ・ TFi WPN IIoT をリリース中。状態監視、スマートビルオートメーション、環境センシングのためのヒートマッピング(サーバールームや冷蔵室などで使用)を対象 ✓ WPN GATEWAYS, SENSE WPN	
キー技術	・ ビームフォーミング、信号最適化アルゴリズム ・ ワイヤレス充電	
進捗レベル	・ 商品化	
今後の計画	・ 将来的には給電範囲の拡大を目指す。(100m 以上)	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	・ —	
国際協力	—	
その他		
参考図表	 TFi Turin-1 wireless power network (WPN) プラットフォーム (Credit: TransferFi)	

	 GATEWAYS WPN (Credit: TransferFi)
出所	• https://www.transferfi.com/ • https://www.powerelectronicsnews.com/long-range-wireless-power-transfer-for-industrial-iot/、2022 年 1 月 11 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Korea Electrotechnology Research Institute(KERI:韓国電気研究院)	
部署／研究者	Electro-Medical Research Center / Young-Jin Park	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	ワイヤレス電力伝送システムの開発	
実施時期	2019 年～	
目的／背景	・ 1997 年から 2000 年までの KERI 中心のビームマイクロ波送電研究プロジェクトが行われていたが、その後は次のプロジェクトが認められていなかった。 ・ 2019 年から長期研究を開始したが、研究の目的は宇宙での長距離、高出力 WPT 技術の実現である、としている。	
研究内容	・ 国家科学技術会議(NST:National Research Council of Science and Technology)の BIG Issue Group プロジェクトとして長期研究を開始。(2019 年～2025 年) ・ 研究内容 ✓ 産業用途のモジュール型 WPT システム ✓ WPT の運用技術の開発 ✓ 電力・位相可変マグネトロン ✓ 宇宙アプリケーションでの WPT の開発 ・ 2020 年:ターゲット追跡と電力伝送技術の研究 ✓ 送信機の前 50m でターゲットが移動すると LED が順次点灯(1.3°のペンシルビームを精密に制御して表示) ・ 2021 年末までに、100m の距離で 10kw クラスのマイクロ波伝送実証を地上で実施する目標を立てていた。	
キー技術	・ モジュール型 WPT システム ・ ターゲット追跡技術	
進捗レベル	・ 地上実験	
今後の計画	・ 将来的には宇宙空間での大電力、長距離伝送を目指す。	
予算規模	・ 2019～2025 年:1100 万米ドル	
実施体制		
関連機関	—	
国際協力	—	
その他		
参考図表	[시연 조건] 송신 : 2.1 kW (44 W / 48 ch) 수신 : 50 m, 150 W/m² 빔폭 발사각 1.3° (1.13m) 96채널 4.8kW급 송신부 수신부 위치 추정장치 (DoA Rx) LED 내장 수전모듈 Pilot 안테나 KERI Pilot 신호 발생기 (DoA Tx) ターゲット追跡と電力伝送技術の研究 (Credit: KERI)	



WPT システムの開発目標 (Credit: KERI)

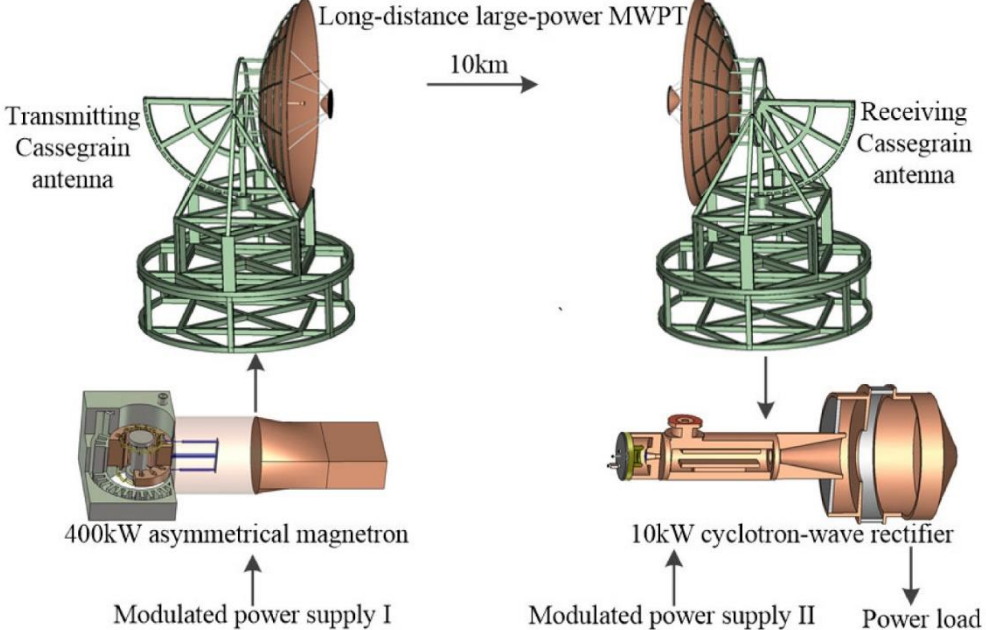
出所

・Joon Min.Choi, Net Zero Scenario and Status of Space Based Solar Power Research in Korea”, ESA’s 1st Space-Based Solar Power Workshop 2021.12.10

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	仁荷大学校(Inha University) (韓 仁川広域市)	
部署／研究者	Department of Mechanical Engineering, Creative Research Center for Nanocellulose Future Composite／Dr. Jaehwan Kim	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	マイクロ波駆動の飛行船(microwave-powered airship drone)実験機の開発と実証	
実施時期	2018 年～2019 年頃	
目的／背景	・近年、効率的で費用対効果の高い遠隔地や重量物の輸送手段として飛行船が見直され、新しい持続可能な飛行船輸送システムの開発が必要とされている。全く新しいエネルギー源とインフラ、そしてスマートでインテリジェントな輸送システムネットワークへの多大な投資が求められている。 ・空気よりも軽いガスを充填し、太陽電池で発電した電力で重いコンテナや人を輸送するグリーン飛行船が提案されている。昼間は太陽光発電や太陽熱発電、夜間はマイクロ波(MW)を利用して電気推進システムを駆動する。 ・本研究では、ヘリウムを充填し、X バンドマイクロ波を用いて、バッテリーなどの電源を搭載せずに、マイクロ波で駆動する飛行船ドローンの実証を行う。	
研究内容	・X バンドマイクロ波の無線伝送により駆動する、ヘリウムを充填した長さ 2.2m、直径 1.1m の飛行船(ヘリウムガスを充填したときの重量は 1kg)の実証を行い、輸送用飛行船の設計と運用に必要な定量的データを取得した。さまざまな入射角、電源からの距離、周波数(7～13GHz)での動作性能を検証した。 ✓ 200W のアンプから送信されるマイクロ波のみを動力源とする。 ✓ X バンドのダイポールレクテナアレイ 16 枚(計 32 枚)を飛行船の両側に配置し、マイクロ波を受電し、電気推進システムを動かすための直流電力に変換する。 ✓ 前進・後進用の電動プロペラが 2 つ、横方向の移動用のプロペラが 1 つ付いている。電気モーターには MPT システムを使用しており、飛行船の全必要電力は 7V、8W である。 ✓ NASA ラングレー研究センターの HIRF(High IntensityRadiated Fields)チャンバー内で、飛行船の動作実証に成功した。 ・実験の結果、最大出力 8.3W、最大電圧 10V、最大電流 895mA で、飛行船を走らせるのに十分な出力が得られた。操縦速度時速 7 マイルで操縦性の検証も行った。 ・輸送用飛行船ドローンにマイクロ波エネルギーを有効利用するための受電装置として、レクテナアレイシステムの実用化も示唆された。	
キー技術	・エアシップ、ドローン、マイクロ波電力伝送、レクテナ,サステナブル	
進捗レベル	チャンバー内での飛行実証	
今後の計画	・ 不明	
予算規模	2017 年国際協力プログラム(GRDC-INHA IST-NASA 宇宙探査共同研究センター)から韓国国立研究財団(NRF-2017K1A4A3013662)を通じた財政的支援を受けて実施。金額は不明。	
実施体制		
関連機関	U.S. Federal Highway Administration、Norfolk State University(米)、Dronicar Inc.(米)、National Institute of Aerospace(米)	
国際協力	NASA の国際協力プログラムにより実施。実験には NASA Langley Research Center の施設を利用	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
参考図表		

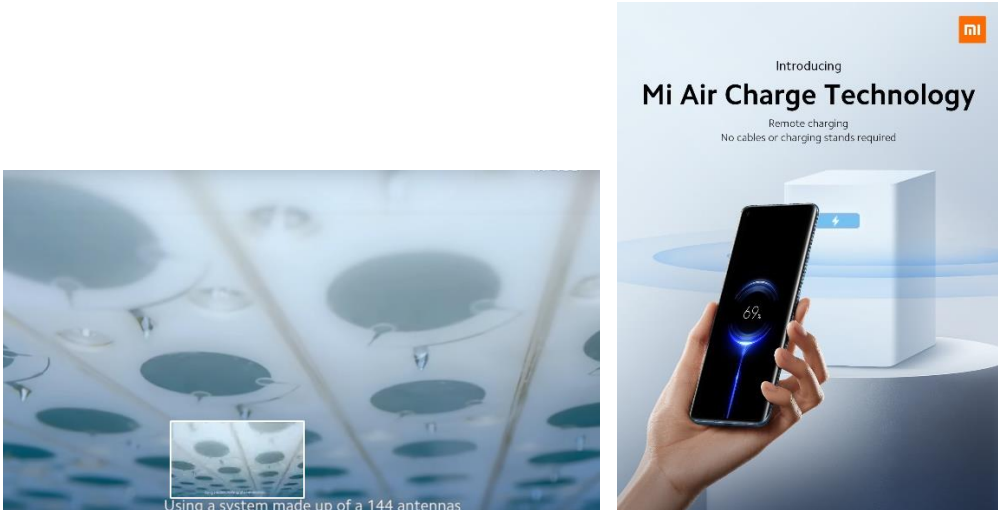
	  マイクロ波駆動飛行船の無線伝送飛行実証の様子
出所	• Kyo D Song; Jaehwan Kim et al., "Preliminary operational aspects of microwave-powered airship drone" International Journal of Micro Air Vehicles Volume 11: 1–10, October 2019

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	電子科技大学(UESTC:University of Electronic Science and Technology of China) (中、四川省成都市)	
部署／研究者	School of Electronic Science and Engineering／ PhD Biao Hu	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	非等方性共振型マグネトロンとサイクロトロン波整流器を用いた長距離大電力マイクロ波無線電力伝送システム(MWPT: Microwave wireless power transmission)	
実施時期	2020 年頃～	
目的／背景	・近年、電子科技大学では、MWPT に関する多くの研究が行われており、特に高出力マイクロ波源(Wang ら、2017)、高効率ダイオードベースの整流器やサイクロトロン波ベースの整流器(Zhao ら、2018)、その他の新規送受信アンテナの開発(Zhao ら、2017)が行われている。整流ダイオードに基づくコンパクトな Ku 帯 MWPT システムは、60m で 4%の DC to DC 効率を達成し、MWPT が無人のホバリング空中ビークルを遠隔充電するための実行可能なソリューションになり得ることを実証している。	
研究内容	・非等方性共振型マグネトロンとサイクロトロン波整流器を用いた長距離大電力マイクロ波無線電力伝送(MWPT)システムの解析を実施した。 ✓ マイクロ波発振器として、400kW、変換効率 45%の小型の非等方性共振型マグネトロンを選択。 ✓ 送受信アンテナとしては、カセグレンアンテナを選択し、大出力のマイクロ波を送受信する。10km の距離で 2.6%の積分電力伝送効率を達成することができる。 ✓ 受信したマイクロ波信号をサイクロトロン波整流器で電力に変換する。2.45GHz、10kW のマイクロ波を入力した小型サイクロトロン波整流器は、85%の高い変換効率を達成し、電力網に供給される。 ・長距離大電力 MWPT システムは、動作周波数 2.45GHz、10km の距離において、最終的に約 1%の DC-DC 伝送効率で 8.5kW の DC 電力を実現できる。このようなシステムは、燃料のない航空機に地上から遠隔で電力を供給するための潜在的かつ魅力的なソリューションであり、孤立した山頂や島に電力を供給することも可能である。静止軌道上の SSPS から地上に電力を伝送するための手段にもなる。	
キー技術	・マイクロ波無線電力伝送 ・非等方性共振型マグネトロン ・カセグレンアンテナ ・サイクロトロン波整流器	
進捗レベル	システム解析、シミュレーション	
今後の計画	・システムの小型化を進め、複雑さを低減させ、全体の効率を上げるために、さらなる研究を行う。	
予算規模	National Natural Science Foundation of China(中国国家自然科学基金委員会: NSFC)の助成金により実施。金額は不明。	
実施体制		
関連機関	成都理工大学、北京郵電大学、カルガリー大学(加)、清華大学	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
参考図表		

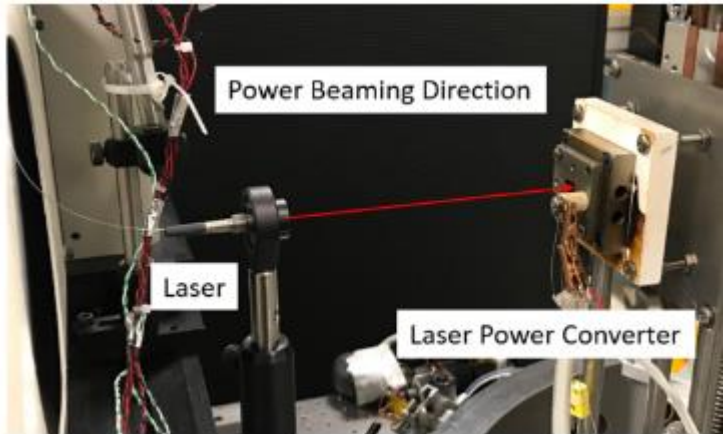
	Long-distance large-power MWPT  長距離大電力 MWPT の模式図
出所	• Biao Hu; Hao Li; Fadhel Ghannouchi et al., “A long-distance high-power microwave wireless power transmission system based on asymmetrical resonant magnetron and cyclotron-wave rectifier” Energy Reports Volume 7, November 2021, Pages 1154-1161

中止済

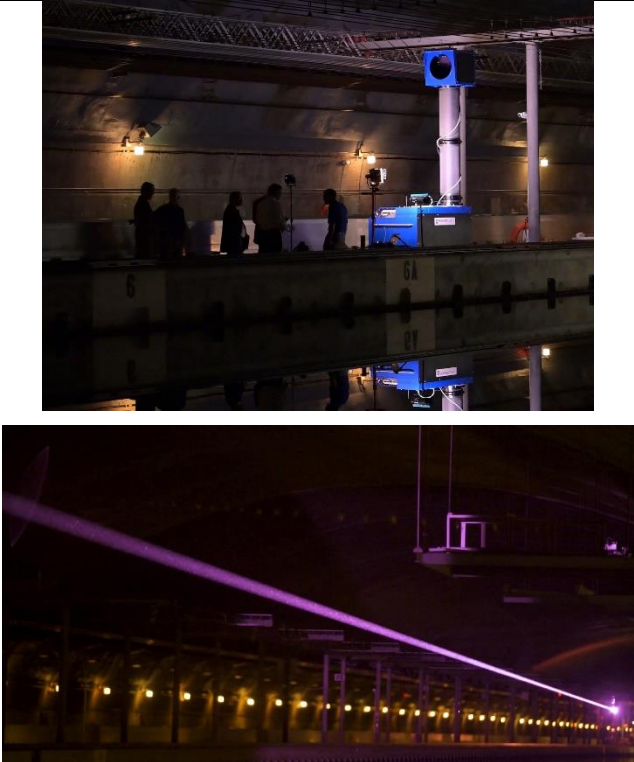
項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	CEPRI(China Electric Power Research Institute)(中) 中国を代表する電力研究所。中国国家電網公司(State Grid Corporation of China)に属している	
部署／研究者	—	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	10m マイクロ波無線伝送(a 10-meter microwave radio transmission)プロトタイプの開発	
実施時期	2021 年 9 月	
目的／背景	—	
研究内容	・ 20m の距離で kW 級の電力伝送を実現できる「10m マイクロ波無線伝送プロトタイプ」を開発した。 ✓ 伝送効率は 25.5%に達し、試作品は中国国家電網公司(State Grid Corporation of China)の承認を得た。 ・ CEPRI は、GaN ダイオードレクテナを用いた kW 級のマイクロ波無線電力伝送実験も実施している。	
キー技術	—	
進捗レベル	プロトタイプの開発	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	—	
参考図表		
出所	・ http://www.news.cn/english/2021-09/01/c_1310161562.htm 、2021 年 10 月 22 日取得	

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Xiaomi Corporation (中 Beijing)	
部署／研究者	Daniel Povey (CEO)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	ミリ波を用いた近距離ワイヤレス充電技術「Mi Air Charge Technology」の開発	
実施時期	2021 年 1 月～ (会社設立は 2010 年)	
目的／背景	・ Xiaomi は革新的な充電技術を開発しており、これまでに最大 80W という超高速の Mi ワイヤレス充電や、120W 有線充電など急速充電技術を積極的に自社製品に採用してきた。	
研究内容	・ 2021 年 1 月、近距離ワイヤレス充電技術「Mi Air Charge Technology」を発表。 ✓ 数メートル(最大約 15 フィート(約 4.5 メートル))離れた場所にある複数のデバイスに対し、同時に 5W でのワイヤレス充電が可能 ✓ トランスミッターは 144 個のアンテナアレイから構成され、ビームフォーミングによってピンポイントでミリ波を直接スマホ等へ送る。 ✓ 受電(スマホ)側にも「ビーコンアンテナ」と「受信アンテナアレイ」を搭載するが、現在開発中。ビーコンアンテナは位置情報を発信し、14 個のアンテナから成る受信アンテナアレイは受信したミリ波を整流回路によって電気エネルギーへと変換する。	
キー技術	・ ビームフォーミング ・ ワイヤレス充電	
進捗レベル	・ 商品技術のデモ段階	
今後の計画	・ 2021 年内には製品化の予定はない。 ・ 「近い将来」にスマートウォッチやブレスレットなどのウェアラブルデバイスにも対応できるようにするとのこと。	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	・ —	
国際協力	—	
その他		
参考図表	 Mi Air Charge 技術 (Credit: Xiaomi)	
出所	・ https://blog.mi.com/en/2021/01/29/forget-about-cables-and-charging-stands-with-revolutionary-mi-air-charge-technology/ 、2021 年 11 月 12 日取得	

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	National Aeronautics and Space Administration (NASA:米国国家航空宇宙局)	
部署／研究者	Glenn Research Center (Power Division) ／Geoffrey A. Landis Jet Propulsion Laboratory／Jonathan Granddier	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	Laser Power Beaming for Lunar Exploration	
実施時期	2020 年頃～ ※1990 年代～Laser Power Beaming の提案は行われてきたが、月面や深宇宙探査における利用が本格的に検討されるようになったのはアルテミス計画始動以降	
目的／背景	・月の極地方の永久影になったクレーターは科学や資源探査において優先順位の高いターゲットであるが、太陽光が照射しない領域であるため、電力供給が重要な課題として認識されている。近年のレーザー技術の進歩により、クレーター内に無線エネルギー伝送を行うシステムの実現性が高まってきた。 ✓ 数 kW 出力の高効率(約 50%)Erbium/Ytterbium 系を用いたダイオード励起ファイバーレーザーが市販されるようになってきている。 ・送信機から受信機までの効率的なエンドツーエンドの電力システム、およびこれらの新しい能力を最大限に活用する新しいミッションのコンセプトとアーキテクチャを開発する必要性が増している。	
研究内容	・月探査機への電力供給が可能なレベルのレーザー電力ビーム伝送技術のフライト実証システムについて概念設計を行う。 ✓ 波長 810nm のダイオードレーザーと GaAs 受光素子を用いた初期ミッションの概念設計と 1064nm のダイオード励起ファイバーレーザーと高効率 Si セルによる長距離ビーム照射の検証を行う。 ・NASA の JPL の温度可変テストチャンバーにおいて、近赤外領域(808nm)でのレーザーパワー伝送を行い、Spectrolab 社の GaAs (1.424 eV, 870 nm)と InGaAs (1.1 eV, 1130 nm) LPC(laser power converters)の性能評価試験を行った。 ✓ 出力を 2W まで増大させ、変換されたパワー密度がビームパワーに対して直線的に増加することを確認した。2W の出力では、変換された電気の電力密度は約 12kW/m ² であった。 ・NASA は月面探査技術開発の促進のために、以下に示すような複数の宇宙技術研究助成プログラムを実施中であり、その中でレーザーによる無線電力伝送技術がテーマになっているものがある。 ✓ Lunar Surface Technology Research (LuSTR) Opportunities 2020:Topic 3 - Flexible Power Distribution for Difficult to Reach and Mobile Applications ◇ 月面環境下で複数の遠距離(km レベル)にあるシステムに約 100W の電力を同時に送ることができる技術開発を促進する。 ✓ NASA 2020 Big Idea Challenge Awards ◇ Capabilities to Study Dark Regions on the Moon	
キー技術	・無線電力伝送、レーザー電力伝送	
進捗レベル	実証ミッションの提案、フライト実証システムの概念設計および実験室レベルでの実験段階。	
今後の計画	・—	
予算規模	NASA Glenn Center Innovation Fund	
実施体制		
関連機関	JPL での実験:U.S. Naval Research Laboratory(Paul Jaffe 氏が担当), University of California, Santa Barbara, Boeing Spectrolab Inc	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
参考図表		

	 JPL でのレーザー伝送実験の様子 (Credit: NASA)
出所	• Geoffrey A. Landis, "Laser Power Beaming for Lunar Polar Exploration", AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum, August 2020 • Jonathan Grandier ; Malcolm Wright; John Brophy et.al, "Power Beaming for Deep Space and Permanently Shadowed Regions", The 2nd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT2020), Yokohama, Japan, Apr.2020

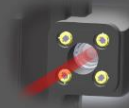
項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	U.S. Naval Research Laboratory (NRL:米海軍研究所)／PowerLight Technologies	
部署／研究者	Dr. Paul Jaffe(NRL the innovation power beaming and space solar portfolio lead) Tom Nugent(chief technology officer of PowerLight Technologies)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	Power Transmitted Over Laser (PTROL)の地上実証試験	
実施時期	2019 年 5 月 (準備期間は 2 年間)	
目的／背景	・ PowerLight Technologies 社は、以前は LaserMotive 社という企業で、2009 年に NASA の Centinnial Challenges Power Beaming Challenge で 1 位を獲得していた。 ・ SSPSに必要な技術として、装置の小型化を可能とする光(レーザー)を用いた電力供給デモンストレーションを成功させ、レーザーによる無線電力伝送コンセプトを証明する。	
研究内容	・ メリーランド州にある U.S. Naval Surface Warfare Center において「長距離空間パワービーミング」の初のデモンストレーションを行った。 ✓ 高さ 13 フィートの 2 本のタワーに、2kW のレーザー送信機と、特別に設計された太陽光発電の受信機が設置され、325m の距離にわたる 400W のレーザー伝送を行った。受信機はレーザーエネルギーを直流電力に変換し、インバーターで交流電力に変換して、照明や数台のノートパソコン、主催者が参加者にコーヒーを淹れるために使用していたコーヒーマーカー "laser lattes"などを動かした。 ・ システムの安全性の実証も重要な目的であった。 ✓ 本システムの安全性は Lead Naval Technical Laboratory for Laser Safety(LNTLS)によって検証された。→異物がビームに近づくときそれを検知し、異物が入る前にビームを止め、ビームの経路が確保されていることを確認してから再びビームを出す ✓ 実験施設では、システムを操作する人も含めて、誰もレーザー用の安全ゴーグルなどの安全装備を装着する必要がなかった。	
キー技術	・ 無線電力伝送、レーザー電力伝送 ・ システムの安全性	
進捗レベル	地上でのデモンストレーション。	
今後の計画	・ PowerLight 社は、レーザー出力を上げ、伝送距離を伸ばし、システム全体の効率化を目指した開発を継続。 ✓ 2020 年には、ドローンに適した軽量の受電装置のデモンストレーションを行った。 ・ システムは、海軍、海兵隊、陸軍、空軍の支持と承認を得ているとのこと。将来、国防総省や商業施設での使用に移行する準備が整う見込み	
予算規模	一連の実証プロジェクトに対して 950 万ドル	
実施体制		
関連機関	Operational Energy Capability Improvement Fund in the Office of the Undersecretary of Defense for Research and Engineering, the U.S. Naval Research Laboratory, PowerLight Technologies, the Office of Naval Research, Naval Surface Warfare Center Carderock Division, Naval Information Warfare Systems Command - Naval Information Warfare Center INDO-PACOM, U.S. Central Command, and the Army's Combat Capabilities Development Command C5ISR Center.	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
参考図表		

	 レーザー伝送実験の様子 (Credit: NRL)
出所	・ https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/2504007/researchers-transmit-energy-with-laser-in-historic-power-beaming-demonstration/、2021 年 9 月 30 日取得 ・ 説明動画、https://www.youtube.com/watch?v=Xb9THqrXd4I、2021 年 9 月 30 日取得 ・ https://finance.yahoo.com/news/powerlight-hitting-targets-power-beaming-001029109.html、2021 年 9 月 30 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA:国防高等研究計画局)	
部署／研究者	Small Business Programs Office (SBPO)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	Breakthrough Technologies for Energy Web Dominance プロジェクト	
実施時期	2021 年 10 月～	
目的／背景	・ 2018 年、DARPA は SUPER PBD (Stand-off Ubiquitous Power/Energy Replenishment - Power Beaming Demonstration) プログラムを実施 ✓ 飛行中の電気式無人航空機システムに、10km の距離でレーザービームを照射して充電することの実現性を証明することを目的とする。 ✓ 2018 年には Silent Falcon UAS Technologies 社を選定し、2019 年に試験を実施するとしていた。→試験実施のニュースはなし。 ・ DARPA は、軍事的能力を向上させるために、無線電力伝送技術の開発を産業界に期待していると発表。具体的には、強力なレーザー光をターゲットに照射し、そのエネルギーを吸収して電気に変換するレーザーベースの技術を期待しているとのこと。	
研究内容	・ 2021 年 10 月、「Breakthrough Technologies for Energy Web Dominance」プロジェクトのための SBIR/STTR Opportunity (SBO) (HR001121S0007-29) を発行。 ✓ Energy Web ネットワークは、地上のレーザー光源から空中のノードに電力を供給し、ノードはその電力を変換して自船の要求に応じて使用し、変換せずに残った電力を他の Energy Web ノードに中継するというものである。電力伝送システムの空中部分は、低サイズ、低重量、低消費電力 (SWAP) であることが望ましい。 ✓ 複数のダイナミックなノードで構成される無線ネットワークの Energy Web は、軍事能力を大幅に向上させると考えられる。 ・ 研究者たちは「高エネルギーフラックス (high-energy-flux)」「高効率光エネルギー変換 (high-efficiency optical energy conversion)」「中継技術 (relay technologies)」の 3 つの技術分野を重要分野と考えている。 ✓ 冷却損失を考慮してシステムの効率を最適化することを目指しており、1kW/m² のエネルギー束を 100kW/m² まで拡張可能なシステムを実現する。 ✓ 中継部は、光エネルギーを電気に変換することなく再送信する要素である。この光導波路は、ミラーのような単純なものもあるが、電力を目的の受信機に柔軟に転送するためには、複数の部品が必要になると考えられる。ビーム収差の補正方法や損失の軽減方法を検討する必要がある。 ・ 目標は、安全な光 Energy Web ネットワークを開発することである。人間や物体に危害を加えることなく、光エネルギーが確実に目的の受信体に届くよう、厳密な光子の封じ込めと侵入の監視が行われる。 ✓ 特に懸念されるのは、「splash」と呼ばれる光の反射や、「spillover」と呼ばれる反射が不意に意図しない場所に向けられることである。	
キー技術	・ Power Beaming, Energy Web, Wireless Power Transfer, photovoltaics, Laser power Transfer, eye safe lasers	
進捗レベル	・ DOD STTR により革新的コンセプトの提案受付中。(2021/11/30 日まで)→フェーズⅠ (システム分析と設計作業)提案のみ。	
今後の計画	・ 現在受付中の提案はフェーズⅠのみであるが、フェーズⅠの実施中にフェーズⅡの提案を要請予定。 ✓ フェーズⅡでは、フェーズⅠで得られた設計成果をさらにブラッシュアップし、スケールダウンしたプロトタイプシステムの構築とデモンストレーションを行う。 ・ フェーズⅢ:軍事的な用途に限定されず、効率的なパワービーミングに必要なシステムは、自由空間でのレーザー通信、高エネルギーレーザーの伝搬、LIDAR、その他の高パルスエネルギーや連続パワーのレーザーアプリケーションなど、多くのアプリケーションに応用できる。	
予算規模	・ フェーズⅠ:12ヶ月の実施期間で最大 22 万 5 千ドル。 ・ フェーズⅡ:最大 125 万ドルまでの(50 万ドル以下の 12 ヶ月間の基本期間+75 万	

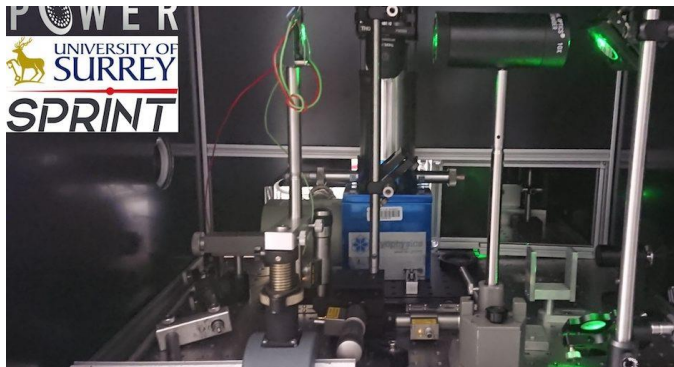
		ル以下の 12 ヶ月間のオプション期間)
実施体制		
	関連機関	DARPA の SUPER PBD プロジェクト: Optonicus、SolAero Technologies、Ascent Solar Technologies
	国際協力	—
その他(特許、国家戦略との関係等)		
	出所	・ https://www.militaryaerospace.com/power/article/14211849/transmit-electrical-power-laser-wireless-networks/、2021 年 11 月 12 日取得 ・ “Small Business Technology Transfer (STTR) Opportunity Announcement, HR001121S0007-29, Breakthrough Technologies for Energy Web Dominance” DARPA ・ https://www.electropages.com/blog/2021/10/darpa-looking-wireless-power-transmission-lasers、2021 年 11 月 12 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	University of Virginia (米 CHARLOTTESVILLE, Va)	
部署／研究者	Electrical and Computer Engineering ／Prof. Mool C. Gupta (UVA Langley Distinguished Professor)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	BELLE(Beaming of Energy via Lasers for Lunar Exploration)システムの開発	
実施時期	2020 年 2 月～2021 年 1 月	
目的／背景	・月の極地方の永久影になったクレーターは科学や資源探査において優先順位の高いターゲットであるが、太陽光が照射しない領域であるため、電力供給が重要な課題として認識されている。	
研究内容	・クレーターの縁に設置されたソーラーアレイからエネルギーを供給し、そのエネルギーをローバーのソーラーパネルにレーザーで送ることで、月面の永久影での活動を支援する。BELLE では、高効率・高出力レーザーを用いて、太陽光が絶えず降り注ぐクレーターの縁から、月内部の遠方にあるローバー等に電力を供給することができる。 ✓ 月の南極にあるシャクルトンクレーターは深さ 4.2km で、永久影領域である。しかし、月の軌道が 5 度傾いているため、その縁は 200 日以上日照している。 ✓ BELLE では、ビームスキャニングシステムと受光素子を用いる。自動化されたジンバルが太陽電池の向きを調整し、レーザー出力を電気エネルギーに変換することで、ローバー搭載機器等で用いることができる。 ✓ 本技術はや災害時や光のショーなど、地球上でも応用できる可能性がある。無人航空機の遠隔充電、高高度飛行船へのエネルギー供給、軌道上の衛星から月や火星のローバーへの送電、送電線が実用的でない場所へのエネルギー供給などの用途にも使用可能である。 ・2021 年 1 月、NASA は本チームに、最優秀技術ポスター賞と最優秀技術デモンストレーション賞を授与した。(COVID-19 の制約を受け、チームは NASA にビデオで提案を実施。)	
キー技術	・Power Beaming,Laser power Transfer	
進捗レベル	・システム提案とプロトタイプの製作	
今後の計画	—	
予算規模	・NASA の 2020 Big Idea Challenge Awards に参加し、12 万 3 千ドルの助成金を獲得。	
実施体制		
関連機関	本チームは Prof. Mool C. Gupta と大学院生と大学生とで構成されるが、アドバイザーに NRL の Paul Jaffe 氏が就任。	
国際協力	—	
その他(特許、国家戦略との関係等)		
参考図表	 BELLE プロトタイプ(Credit:UVA)	

	Specs 💡 Power Consumption: 62 W 🔌 End to End Efficiency: 3.7% 🔌 Efficiency Potential: 10-12% ⚖️ Weight: 14.83 kg 📏 Dimensions: 95 cm x 28 cm x 23 cm Subsystems Laser A 975nm high-powered fiber-coupled direct diode laser to power assets in PSR  Photovoltaics A high efficiency solar cell converts the laser energy back into electrical energy for use by the rover  Gimbal A dual axis gimbal to center laser on photovoltaic receiver  Quadrant Detector Silicon Photodiodes with high responsivity at NIR wavelengths to process reflected laser beam  Galvanometer A dual-axis mirror scanning system with resolution of 12 μrad, and repeatability of 8 μrad to direct high powered laser  BELLE システム仕様とサブシステム (Credit:UVA)
出所	• https://www.cbs19news.com/story/43322942/looking-into-using-lasers-to-beam-energy-for-lunar-exploration-more/、2022 年 1 月 7 日取得 • https://www.youtube.com/watch?v=yhr654ooHNA、デモ動画 2022 年 1 月 7 日取得 • https://bigidea.nianet.org/wp-content/uploads/2021/01/2020-BIG-Idea-Team-Digital-Poster_UVA.pdf、2022 年 1 月 7 日取得 • https://news.virginia.edu/content/researchers-explore-laser-beaming-energy-lunar-and-terrestrial-needs?utm_source=DailyReport&utm_medium=email&utm_campaign=news、2022 年 1 月 7 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	PowerLight Technologies (米 Kent, Washington)	
部署／研究者	Richard Gustafson (CEO)、Bob Zak (COO)、Tom Nugent(CTO)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	レーザーを使ったワイヤレス給電技術の開発	
実施時期	2007 年(会社設立時。当初の社名は LaserMotive Inc.)～ ※社名変更は 2017 年	
目的／背景	・ PowerLight Technologies 社は、レーザーによる電力伝送を提供する米国のエンジニアリング企業である。 ✓ 主な製品としては、レーザー光のエネルギーを光ファイバーで伝送する「power-over-fiber」と、レーザーエネルギーを空間で無線伝送する「laser power beaming」がある。 ・ 同社の前身である LaserMotive 社の最大の目的は、2009 年の NASA Centennial Challenges の Power Beaming Challenge に勝利することであった。 ✓ ケーブルクライミングロボットの電源供給に関するコンテスト(宇宙エレベーター競技会)で 1 位となり、90 万ドルを獲得した。 ・ その後、LaserMotive 社は UAV での商業的なアプリケーションのためのパワービーム技術の開発に注力してきた。	
研究内容	・ 2019 年 5 月:NRL の Power Transmitted Over Laser (PTROL)の地上実証試験を実施し、325m の距離で 400W のレーザー伝送に成功した。 ・ 2020 年:ドローンに適した軽量の受電装置の実証を実施。 ✓ 同社のレーザーシステムが、ビームに邪魔された人を危険にさらすことなく、安全に運用できることを実証。 ・ 2021 年 10 月:Ericsson(瑞)の 5G 基地局「Streetmacro 6701」(最大消費電力 300W)に対し、同社のレーザー送電システムを使って、数百メートル離れた距離から数百ワットの電力を伝送する実証実験に成功 ✓ 送信機から送出した赤外線のレーザービームを、受信機側の光起電力セルで電力に変換。ビームシェイピングの使用により、レーザーエネルギーの最適化、伝送時の損失の抑制、受信側での出力の最大化を実現 ✓ レーザーが遮断された時のための安全機構もある。何らかの物体がレーザーの経路に近づいた時には、ミリ秒単位の時間内でレーザーの送受信を止め、物体が離れたら再開。停止時にも予備バッテリーにより基地局の動作は継続 ✓ 都市部での使用は想定していないが、災害対策や緊急時の対応など、機器を迅速に稼働させなければならない環境での使用を想定して、パッケージ化に取り組む	
キー技術	・ beam shaping(ビーム形成) ・ 安全機構	
進捗レベル	・ 概念実証の段階であるが、既に 1km の距離までは実証を行っており、目標は数 kW の電力を数 km にわたって伝送することとなっている。	
今後の計画	・ 2～3 年以内に製品化できる見通し。 ・ 最低でも 1kW の電力を 1km 以上の距離で伝送することを目標としている。達成できれば、数年間で 1,000 万ドル以上の収益を見込む。 ・ 現在は軍事用アプリケーションに焦点を当てているが、センサーネットワーク、通信ネットワーク、自律走行車など、より多くの資産を接続することができるようになると、ビジネスの幅は劇的に広がるとしている。 ✓ 自律走行する地上車両の動力源や、戦場や被災地での一時的な電源としても利用できる。さらには、太陽光発電や風力発電の施設から中央の送電網に無線で電力を送ることも可能となる。	
予算規模	・ NRL の実証プロジェクトは 950 万ドル。 ・ 同社の運営資金は主に軍との契約によって確保しているとのこと。 ・ 約 600 万ドルの民間投資を受けている。さらに約 200 万ドルの転換社債型新株予約権付社債の発行を控えている。	
実施体制		

関連機関 国際協力	・NRL、Ericsson(瑞) ・NASA が要求する月面でのローバーへの電力供給や水の採掘をサポートするために、チームを組んで提案したいと、宇宙関連企業から打診されているとのこと。
その他	
派生製品	・派生技術として、光ファイバーケーブルを使った送電技術にも取り組んでいる。銅線での送電に比べ、ケーブルの軽さなどの面でメリットを有する。 ✓ ステークホルダーや開発パートナーは、海底電力、電気絶縁、EMF フリーの配電、伝送部の軽量化など、ファイバーベースのソリューションによって独自に解決できる重要な技術課題を有している。
参考図表	5G 基地局にエネルギーを供給するワイヤレス電力伝送システムの実証実験の PV レシーバー (Credit: Ericsson) ワイヤレス電力伝送技術システムズ (Credit: PowerLight Technologies)
出所	・ https://powerlighttech.com/ ・ https://www.geekwire.com/2021/powerlight-hitting-targets-power-beaming-system-uses-laser-light/, 2021 年 10 月 27 日取得 ・ https://www.networkworld.com/article/3637010/5g-base-stations-could-be-powered-by-lasers.html, 2021 年 10 月 26 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	University of Surrey (英)、Space Power (英)	
部署／研究者	University of Surrey ／Prof. Stephen Sweeney (Professor of Physics) Space Power ／Keval Dattani (Director)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	LEO 小型衛星へのレーザーによる無線電力伝送技術の開発	
実施時期	2020 年頃～	
目的／背景	・ 小型衛星にとって、日照がない時間帯の電力確保問題は重要な課題である。小型衛星を常時機能させることができる無線電力伝送技術が利用できれば、低軌道での必要な衛星数を減らすことができ、コストやスペースデブリの低減の点でも貢献することができる。 ✓ 小型衛星への電力伝送により、小型衛星の運用効率を 2 倍から 5 倍に高めることができる。 ・ Surrey 大学と SpacePower 社は SME Innovation Voucher scheme により初期のフィージビリティスタディを実施している。	
研究内容	・ レーザーによる電力伝送の効率的な利点を調査・検証し、新技術を開発し、宇宙での小型衛星用の試作品を設計するためのデータを取得する。 ・ 本研究は 740 万ポンド(1,010 億米ドル)の国家プロジェクト「SPRINT(Space Research and Innovation Network for Technology)」の一部として実施される。 ✓ SPRINT は、大学の宇宙に関する専門知識に前例のないアクセスを提供し、宇宙データや技術の商業的利用を通じて企業を支援するものである。 ・ Space Power 社は、2023 年までに衛星用のワイヤレスパワービームのプロトタイプを作り、2025 年までに商用化を開始するという計画を有している。 ✓ 最初の製品は、衛星メーカーが LEO コンステレーションの顧客に提供する製品に含めるための「プラグアンドプレイ」システムとして設計される予定	
キー技術	・ レーザーによるワイヤレス給電	
進捗レベル	・ プロトタイプ設計のためのデータ取得段階	
今後の計画	2023 年にプロトタイプ、25 年に商用化を目標	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	—	
国際協力	—	
参考図表	 サリー大学で行われたフィージビリティスタディの様子 (Credit: Space Power)	

	 小型衛星へのレーザーによる無線電力伝送イメージ図 (Credit: Space Power)
出所	・ http://www.space-pwr.com/ ・ https://www.eurekalert.org/news-releases/941531、2022 年 2 月 7 日取得 ・ https://www.aerospacetestinginternational.com/news/space/uk-company-to-develop-technology-to-transmit-power-in-space-using-lasers.html、2022 年 2 月 7 日取得

項目		内容
実施機関		
機関名(所在地)	Wi Charge. (Rehovot Israel)	
部署／研究者	Victor Vaisleib (CEO)	
研究開発／FS 概要		
タイトル／テーマ	赤外線レーザーによるワイヤレス給電技術(AirCord™)の商品開発	
実施時期	2010 年(会社設立時)～	
目的／背景	・ NTT ドコモが開催した「DOCOMO Open House 2020」では、次世代ワイヤレス充電として「Wi-Charge」が紹介された。	
研究内容	・ 1 台の送信機で 4m 程度の距離にある多くのデバイスに電力を供給可能。 ✓ Wi Charge トランスミッター(R1、R1-HP)：従来の AC・DC 電源や USB に接続することで、赤外線でレシーバーに電力を供給する装置。(参考図表参照) ✓ Wi Charge レシーバー：充電する機器に取り付ける装置で、Android スマホに多く使われている Micro-USB や、iPhone の Lightning などに接続するもの、レシーバー内蔵のスマホケースなどが想定されている。レシーバーを装着したデバイスがトランスミッターの範囲内に入ると、トランスミッターは自動的にレシーバーを判別して赤外線を放射する。レシーバーは赤外線を電力に変換する太陽電池を搭載しており、ケーブルなしで充電が行われるという仕組み(参考図表参照) ・ スマートリテル、ビルディングオートメーション、スマートホーム、デジタル広告、タッチレス家電、産業用センサーなど、スマートなコネクテッド IoT アプリケーションへの電力供給を目指している。 ・ レーザー製品の国際安全規格「IEC 60825-1」の Class 1 に準拠	
キー技術	・ 赤外線レーザー ・ ワイヤレス給電	
進捗レベル	・ 商品化については未定。(消費者販売の予定は立っていない)	
今後の計画	—	
予算規模	—	
実施体制		
関連機関	・ NTT ドコモ	
国際協力	—	
参考図表	 Wi-Charge 利用イメージ図(Credit: Wi-Charge)	

Specifications

Transmitter specifications	R1	R1-HP
Delivered power	100 mW	250 mW
Supports multiple receivers	Yes	Yes
Range	10 meters / 30 ft	5 meters / 15 ft
Coverage angle (cone), area	80°, -130 sq. meters (1400 sq. ft)	80°, -130 sq. meters (1400 sq. ft)
Dimensions	94 x 94 x 40 mm	94 x 94 x 46 mm
Weight	300 g	350 gr
Input voltage	12V	12V
Temperature range	5° - 55°C / 40° - 130°F	5° - 55°C / 40° - 130°F
Control interface (coming soon)	Proprietary API over WiFi	Proprietary API over WiFi
Technology	AirCord™ IR-based power transfer	AirCord™ IR-based power transfer
Standards compliance	UL, CE, FDA and international safety standards	UL, CE, FDA and international safety standards



Wi-Charge トランスミッタ (Credit: Wi-Charge)

Receiver specifications	Compatible with both transmitter models
Maximum output power (current/voltage)	5V @ 20 mA for R1 transmitter 5V @ 50 mA for R1-HP transmitter
Interface	5V ±0.25V
Connector	2-wires or any connector
Dimensions	21 x 57 x 8.7 mm
Operating temperature range	5° - 55°C / 40° - 130°F
Standards compliance	UL, CE, FDA and international safety standards



Dimensions in mm

Wi-Charge レシーバー (Credit: Wi-Charge)

出所

- <https://www.wi-charge.com/>
- <https://u-note.me/note/47510148>、2021 年 11 月 8 日取得

二次利用未承諾リスト

令和3年度重要技術管理体制強化事業（宇宙分野における重要技術の実態調査及び情報収集）

株式会社三菱総合研究所

頁	図表番号	タイトル
4	図2-1	Orbital Sidekick社の衛星Aurora
5	図2-2	Orbital Sidekick社のサービスイメージ
6	図2-3	Pixxel社の衛星Pixxel
6	図2-4	Pixxel社のデータ分析サービスイメージ
7	図2-5	HySpecIQ社の衛星HySpecIQ
8	図2-6	HySpecIQ画像（右）と分析（左）イメージ
8	図2-7	Kuva Space社の衛星HelloWorld
9	図2-8	Satellogic社の衛星Aleph-1
10	図2-9	NorthStar Earth and Space社のコンステレーションイメージ
11	図2-10	ASTRO DIGITAL社の衛星Palisade
12	図2-11	VTT Technical Research Centre of Finland社のハイパースペクトルセンサ活用イメージ
12	図2-12	長光光学精密機械与物理研究所が開発したハイパースペクトルビデオカメラ
13	図2-13	長光衛星技術有限公司の衛星Jilin-1GP01/02
14	表2-9	長光衛星技術有限公司の衛星Jilin-1GP01/02の各バンドにおける観測波長帯
15	図2-14	珠海欧比特宇航科技股份有限公司
15	表2-10	珠海欧比特宇航科技股份有限公司の衛星OHS-2, 3スペック
18	図2-16	UAVへのAOTFセンサの搭載概観
19	図2-17	DC-8-AFRC概観
29	図2-23	小型IoT衛星SpaceBeeの外観
29	図2-24	通信端末Swarm Tile
30	図2-25	通信端末Swarm Eval Kit
31	図2-26	OG2コンステレーション用地上端末OG2 Modem
31	図2-27	IsatData Proサービス用地上端末ST 6100
32	図2-28	Iridium社のIridium Next衛星
32	図2-29	Iridium社の地上IoT端末Iridium Edge
33	図2-30	Spire社の小型衛星Lemur
33	図2-31	Spire社の海洋サービスの強み
34	図2-32	移動通信事業者の地上ネットワークと衛星ネットワークを組み合わせたOmnispace社のハイブリッドネットワークのイメージ
34	図2-33	Omnispace社のハイブリッドネットワークのIoTサービス向け利用のメリット

(様式2)

35	図2-34	Lynk Global社による、衛星に対して衛星電話のみが接続できる現在（左）と一般の携帯電話から接続できる将来（右）のイメージ
35	図2-35	Kepler社の小型IoT衛星GEN1
36	図2-36	Kepler社の衛星IoTサービスEverywhereIoTの特徴
36	図2-37	Kinesis社の地上チップセットのイメージ
36	図2-38	Kinesis社のIoT衛星が想定する利用分野
37	図2-39	Astrocast社が開発する5kg級ナノサットのイメージ
37	図2-40	Astrocast社のIoTモジュールAstronode S
38	図2-41	Myriota社のMyriota 7衛星
38	図2-42	Myriota社の地上端末Myriota Module
39	図2-43	Fleet社の衛星イメージ
39	図2-44	エッジサーバ、LoRaWANゲートウェイ、衛星モデムの機能を統合したFleet社のThe Portalデバイス
40	図2-45	Lacuna Space社の地上端末
40	図2-46	Lacuna Space社のLS-3衛星
41	図2-47	国電高科の天啓（Apocalypse）衛星
41	図2-48	国電高科の地上端末TQZD-01
42	図2-49	Geespace社のGSP100衛星プラットフォーム
42	図2-50	Geespace社の車載測位端末GEETRACKER
42	表2-23	Norsat-2の諸元
43	図2-51	NOSAのNorsat-2衛星
43	図2-52	NOSAのNorsat-TD衛星
44	図2-53	VESTA衛星
44	図2-54	VESTA衛星の展開時のイメージ
45	図2-55	AAC Clyde Space社の衛星バスEpic 3U
45	図2-56	船舶搭載VDESペイロードR60 VDES Base Station
46	図2-57	MARIOTプログラムによるVDES衛星と船舶の通信イメージ
46	図2-58	Sternula社のコンステレーションの整備タイムライン
47	図2-59	Skylo社の地上端末Skylo Hub
47	図2-60	Skylo社の専用アプリSkylo Apps
66	図4-1	Copernicus DIASの概観
66	表4-2	CREODIASから新たに入手可能となった画像、プロダクト及びサービス
68	図4-2	Destination Earthの主要構成要素
68	図4-3	Destination Earthのデータレイク
69	図4-4	Destination Earthのロードマップ
72	図4-6	Azureで提供されている解析ツール
72	図4-7	エッジ処理デバイスAzure Stack Edgeを搭載した車両
73	表4-3	Azure Stack Edge Proの諸元
73	図4-8	Azure Stack Edge Proの外観
74	図4-9	MS Azure Spaceの自社地上局ネットワークの展開予定図
79	図4-15	The Copernicus Australasia Regional Data Hubの関心領域（ROI）
82	図4-16	SIWEI earth(四維地球)の機能
87	図4-18	G-EGDのシステムアーキテクチャ

(様式2)

88	図4-19	G-EGDのウェブインターフェース
94	図4-20	TPMプログラム概要
94	図4-21	VtCryoSatのウェブインターフェース
94	図4-22	SMOS Global Mapping Toolを利用したサンプル図
99	図5-1	NRLのPRAM-FX装置（左）とISS内において実施したレクテナ装置の実演デモ（右）
99	図5-2	軌道上でのArachneの実験イメージ（Credit：AFRL）
100	図5-3	SPS-ALPHA Various Versions（Credit：John Mankins）
102	図5-4	CASSIOPeiA SBSPシステムイメージ図（Credit：Frazer-Nash Consultancy）
104	図5-5	CASTのマルチロータリージョイント-SPSと西安電子科技大学のSSPS-OMEGA
105	図5-6	璧山宇宙太陽光発電実験基地イメージ
105	図5-7	西安電子科技大キャンパス内に設置された試験タワー
108	図5-8	SPS-ALPHA Mark IIIの主要構成セグメントとシステム諸元
109	図5-9	CASSIOPeiAの主要構成セグメントとシステム諸元
110	図5-10	均等化発電原価（LCOE: Levelized Cost of Electricity）の比較
111	図5-11	1GW MR-SPS
111	図5-12	1GW MR-SPSの仕様
112	図5-13	K-SSPSの仕様
113	図5-14	SPS-ALPHAの実用化までのロードマップ
114	図5-15	英国（CASSIOPeiA）の実用化までのロードマップ
115	図5-16	中国のSSPSロードマップ
115	図5-17	中国のSSPSマイルストーンミッション
117	図5-18	電波方式WPTの伝送方式の違いによる伝送距離・送電電力・伝送効率
117	図5-19	レーザー方式WPTの適用範囲
119	図5-20	Wireless Charging 2.0 Ecosystem Roadmap（Credit: Energous）