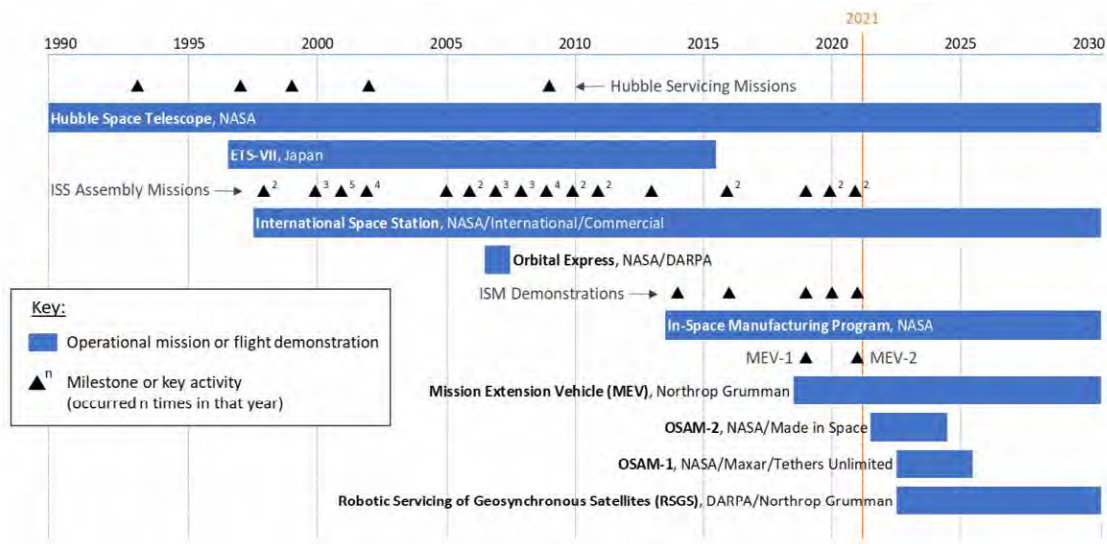


てきた。しかし、OSAM 技術の発展により、宇宙空間における活動の幅が広まり、より持続的で低コストの活動が可能になると考えられている⁶⁷⁵。具体的には、衛星の持続的な機能のアップデート・寿命の延長によるコスト削減が可能になるほか、研究目的の大型の探査機をより容易に地球上へ送り出すこともできる。

これまでも、1980 年代から国際宇宙ステーションやハubble宇宙望遠鏡において、宇宙飛行士の船外活動による保守や機器の取り換え作業が行われてきた。OSAM ではこれらのような作業を、地球から遠隔操作されたロボットによって完遂されることを目指している。現在、NASA は、OSAM-1、OSAM-2、Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites (RSGS) といった OSAM プロジェクトを予定している（図 18-1 参照）。



(図 18-1 NASA における OSAM 開発の経緯とこれから⁶⁷⁶)

また、日本では JAXA が静止軌道上で軌道上サービスを行う機能分散型のプラットフォーム構築を構想している⁶⁷⁷。

(2) 公的利用・安全保障における利用

⁶⁷⁵ NASA, “On-Orbit Servicing, Assembly, And Manufacturing (Osam) State Of Play, 2021 Edition “

https://aerospace.org/sites/default/files/2021-08/FY21_10570_CT0_State%20of%20Play_Emerging%20in%20Space_r7.pdf

⁶⁷⁶ i b i d.

⁶⁷⁷ JAXA 「燃料補給、機器交換～人工衛星の世界が劇的に変わる「軌道上サービス」～」

https://aerospacebiz.jaxa.jp/topics/news/20220520_in_orbit_servicing/

ロボットアームを用いたスペースデブリの除去や、衛星の保守作業などのいわゆる軌道上サービス (On-orbit Satellite Servicing : OSS) については、他国の衛星の除去、破壊、妨害行為に使用される点が安全保障上の懸念として挙げられる。米国の戦略国際問題研究所 (CSIS) によると、2020 年には中国の衛星 SJ-17 が他の衛星に対して不自然な接近を繰り返していたことが報告されており、破壊・妨害行為のテスト運転なのではないかという懸念が広まった⁶⁷⁸。中国は他にも自身の宇宙ステーションにて、ロボットアームを利用した宇宙貨物の転移試験や船外活動を実施するなど、着実に OSAM のノウハウを蓄積している⁶⁷⁹。一方、米国 DARPA (国防高等研究計画局) は、RSGS (Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites) プログラムのもとで、衛星の修理・機器更新等を目的としたロボットアームの開発研究を進めている⁶⁸⁰。このように各国が研究開発を進める中で、OSAM 技術において優位な開発が進んでいないことにより、ASAT (衛星攻撃兵器) による非常時のリスクに十分対処しきれない状態は大いに想定される。

また、2022 年 3 月には、DARPA が軌道上での製造についてさらなる開発を進めるためのプログラムを始動した。当該プログラムでは、国防省の宇宙システムを制限なく構築するために、地球からの資源と月で採取された資源の両方を用いて、軌道上で製造を行うことを目指している⁶⁸¹。

(3) 民生利用

OSAM によって衛星の寿命を低コストで延長することができれば、それだけ打ち上げなければならない衛星の数を減らすことができ、打ち上げコストを削減することができる。通信衛星、地上測位衛星なども、軌道上で最新の部品を搭載することで高精度のパフォーマンスを維持でき、サービスの向上につながる。一方で、これらのサービスにはコストパフォーマンスの面から今後改善が必要なものもある。たとえばスペース・ロジスティクスが開発した人工衛星 MEV-1 は 2020 年 2 月に通信衛星インテルサット 901 にドッキングし、2025 年までの 5 年間、軌道修正を担うことになった⁶⁸²。しかし、仮に

⁶⁷⁸ CSIS, “Threat assessment 2021” (April 2021).

<https://www.csis.org/analysis/space-threat-assessment-2021>

⁶⁷⁹ 新華社 「中国の宇宙ステーション、ロボットアームによる宇宙貨物船転位に成功」

http://jp.news.cn/2022-01/07/c_1310413424.htm

⁶⁸⁰ DARPA, “In-space robotic servicing program moves forward with new commercial partner.” (April 3, 2020). Retrieved from <https://www.darpa.mil/news-events/2020-03-04>

⁶⁸¹ DARPA, “DARPA Kicks Off Program to Explore Space-Based Manufacturing”

<https://www.darpa.mil/news-events/2022-03-23>

⁶⁸² 2 機の商業衛星の軌道上のドッキングは世界初だった。

MEV 衛星の寿命を 15 年間とすると、5 年間ずつつきっきりのサービスが必要なため、最大で 3 機にしかサービスを提供できず、コストパフォーマンスの面から新しい衛星を打ち上げた方がいいとする考えもある⁶⁸³。このような補助機能を搭載した衛星の開発がさらに進んでいけば、宇宙事業の参入障壁はさらに低くなっていくだろう。

2022 年には軌道上サービスに取り組む AstroScale (アストロスケール) と、「宇宙のガソリンスタンド」実現に取り組む Orbit Fab (オービット・ファブ) が、アストロスケールの寿命延長衛星 LEXI への燃料補給契約を結んでいる⁶⁸⁴。具体的には、軌道上で最大 1000kg のキセノン推進剤を注入しており、これによって LEXI のサービスミッションの範囲や柔軟性が拡大されるとしている。宇宙ビジネスが多様化していくにつれ、このような軌道上サービス会社間での新たなビジネスモデルも、今後増えていく可能性がある。

2. 汎用衛星バス (Commoditized satellite buses)

(1) 技術の概要

衛星は従来、いわゆる「一品物」であるため製造にはコストと時間が必要とされてきた。しかし、米国 DARPA を筆頭に衛星コンステレーション計画が各国で推し進められるなか、より低コストで手間のかからない衛星製造手段が模索されている⁶⁸⁵。その手段のひとつとして広く活用されているのが、衛星バスの標準化・汎用化だ。

人工衛星の「バス系」あるいは「バス部」とは、人工衛星の動作を支える基本的な部分のことであり、対してそれぞれのミッションを遂行するために必要な部分を「ミッション系」あるいは「ミッション部」と呼ぶ⁶⁸⁶。前者を標準化することで、衛星開発会社は標準のインターフェース上に実験装置を設計することが可能になり、搭載する機器も安価で汎用的なものを使用できるようになる。また、

⁶⁸³ JAXA、「燃料補給、機器交換～人工衛星の世界が劇的に変わる「軌道上サービス」～」

https://aerospacebiz.jaxa.jp/topics/news/20220520_in_orbit_servicing/

⁶⁸⁴ AstroScale, “AstroScale U.S. and Orbit Fab Sign First On-Orbit Satellite Fuel Sale Agreement”

<https://astroscale.com/astro-scale-u-s-and-orbit-fab-sign-first-on-orbit-satellite-fuel-sale-agreement/>

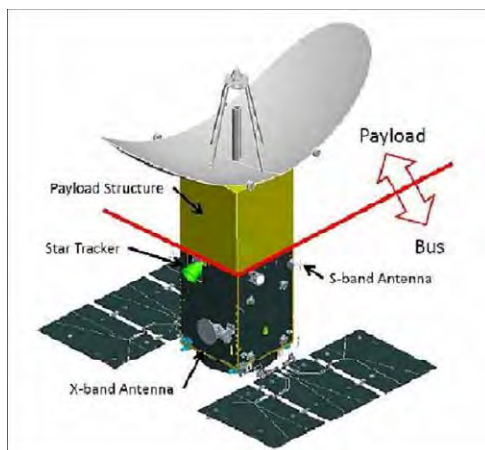
⁶⁸⁵ US Department of Defense “Space Development Agency Director, Dr. Derek Tournear, Holds a Briefing on Tranche 1 Tracking Layer Contract Awards”

<https://www.defense.gov/News/Transcripts/Transcript/Article/3098047/space-development-agency-director-dr-derek-tournear-holds-a-briefing-on-tranche/>

⁶⁸⁶ JAXA「ミッションの決定」サテナビ satellite navigator

<https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/satellite-knowledge/satellite/mission/index.html>

使い回しをすることも可能だ。これら要因によって、製造コストと参入障壁の低下が可能になる⁶⁸⁷。量産体制が可能になることによって、軍事・国防用だけでなく、民生のマーケット拡大・サービスの多様化にも貢献しており、現在では主に通信衛星などの商用の衛星には共通の衛星バスが用いられている。



(図 18-2 NEC の ASARAO-2、赤線より下がバス部⁶⁸⁸)

近年では、衛星コンステレーションの需要に伴い、小型衛星の標準バス開発が進められている。米国の Airbus (エアバス) は、小型衛星プラットフォーム「ARROW」の標準バスを開発し、通信衛星・地表測位など多様なサービスに対応するとしている⁶⁸⁹。また、DARPA が進める低軌道上での衛星コンステレーション計画「Blackjack」プロジェクトには、安価で高頻度のアップグレードが可能な標準衛星バスの開発も含まれている⁶⁹⁰。サプライ・チェーン上の問題で当初の予定より遅れたものの、2022 年には Blue Canyon Technologies が Blackjack に使用される小型衛星バスを初納入された⁶⁹¹。

⁶⁸⁷ Alex Knapp “Industry Veteran And Satellite Startup Join Forces To Industrialize Space”

<https://www.forbes.com/sites/alexknapp/2017/03/03/industry-veteran-and-satellite-startup-join-forces-to-industrialize-space/?sh=2795db2a1c09>

⁶⁸⁸ eo portal powered by ESA “ASARAO-2”

<https://www.eoportal.org/satellite-missions/asarao-2>

⁶⁸⁹ Airbus “ARROW Small Satellite Platform for LEO Constellations”

<https://airbus.com/leo-constellations/>

⁶⁹⁰ DARPA “BLACKJACK”

<https://www.darpa.mil/program/blackjack>

⁶⁹¹ Blue Canyon Technologies “Blue Canyon Technologies and Seakr Engineering deliver first flight unit and payloads for DARPA Blackjack program”

(2) 公的利用・安全保障における利用

低軌道上に小型衛星を多数配置することが可能になれば、世界全域での高速大容量通信が可能になるだけでなく、衛星に対する妨害行為があったとしても、すべての小型衛星を対象とすることは難しくなるため、抗たん性が上がると考えられている。このようなコンステレーションの形成には高性能の衛星バスが必要不可欠である。

(3) 民生利用

衛星バスの量産を利用して、民間にパッケージ化したサービスを提供しようとする動きもある。例えば、日本のアクセルスペースは、2022年4月に小型衛星量産体制を活用した新サービス「Axel Liner（アクセルライナー）」を発表した⁶⁹²。このサービスでは、高性能な汎用衛星バスシステムを開発することで、受注から最短1年以内で軌道上のサービスインを目指せるようになり、さらにミッション系の開発も受け持つことで宇宙事業をパッケージとして売り出す⁶⁹³。これまでは企業が宇宙事業を始めようとするスタートラインに立つまでに時間がかかったが、プロジェクトをパッケージ化することで、衛星データを利用したい企業からの需要が増えることが期待される。

3. 低コストのローンチ・ヴィークル

(1) 当該技術の概要

ローンチ・ヴィークル（衛星打ち上げロケット）とは、衛星を軌道上まで運ぶためのロケットである。ローンチ・ヴィークルは1950年代、60年代にかけて開発された弾道ミサイルが技術的土台となり、その後各国で開発が進められてきた。

各国が衛星コンステレーションの形成を目指すなか、ローンチ・ヴィークルにも低コスト化が求められている。下図は、低軌道（LEO）への1kgのペイロードあたりにかかるコスト（21年度ドル基準）を示したグラフである⁶⁹⁴。最大ペイロードによって色分けされており、濃い青、薄い青、オレンジの

<https://www.bluecanyontech.com/news/blue-canyon-technologies-seakr-engineering-deliver-first-flight-unit-and-payloads-for-darpa-blackjack-program>

⁶⁹² AXELSPACE 「アクセルスペース、日本初となる小型衛星量産体制を活用した新サービス『Axel Liner』を発表」

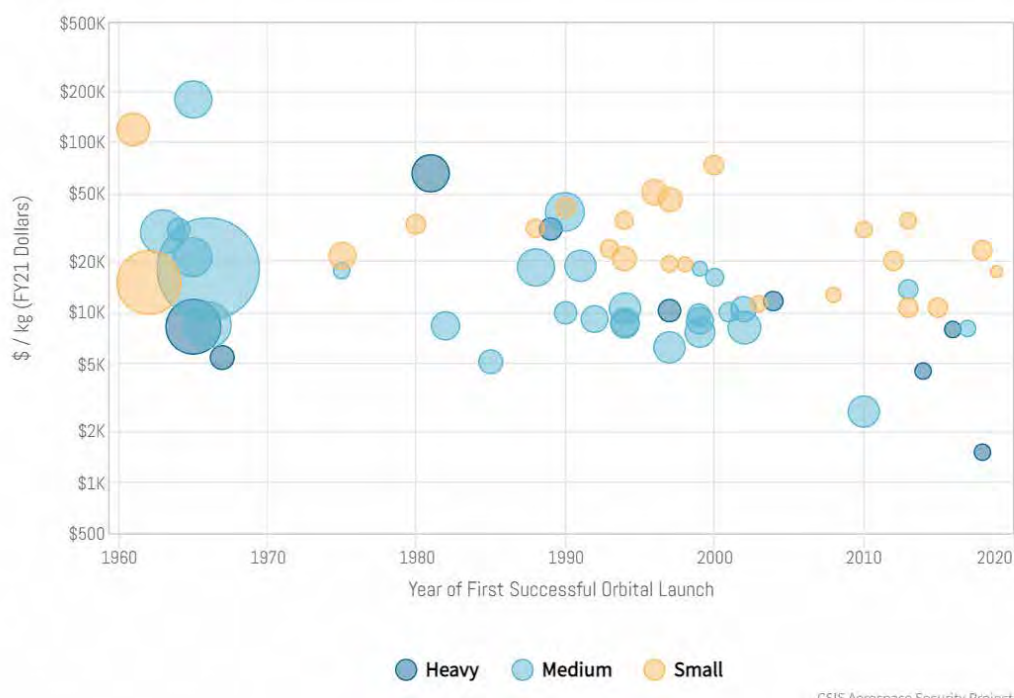
https://www.axel-space.com/ja/news/press_20220426/

⁶⁹³ i b i d.

⁶⁹⁴ AEROSPACE SECURITY “Space Launch to Low Earth Orbit: How Much Does It Cost?”

<https://aerospace.csis.org/data/space-launch-to-low-earth-orbit-how-much-does-it-cost/>

順に軽量化していく。特に近年は、ペイロードの大きいものに比べて、小さいものの方が kg あたりのコストが高いことがわかる。



(図 18-3 ローンチ・ヴィークルのコスト比較⁶⁹⁵)

(2) 近年の開発動向

ローンチ・ヴィークルのコストを低くする試みは、近年米国の SpaceX の試みによって一つの転機を迎えた。Space X は 1 段ブースターの回収・再利用ができるロケット「Falcon 9」を 2010 年に打ち上げ、2018 年にはより重いペイロードを運べる「Falcon Heavy」を打ち上げた^{696,697}。Falcon 9 は 2022 年 11 月現在、186 回打ち上げられ、そのうち 123 回が再利用による打ち上げとなっている⁶⁹⁸。このように、もっともコストのかかるロケット部分を再利用することで、大幅なコスト低下が実現された。実際に上図で最も縦軸（1kg あたりのコスト）の数値が低い濃い青色の円は Falcon Heavy を、次に縦軸の数値が低い薄い青色の円は Falcon 9 を示している。

また、近年の傾向として衛星コンステレーションを形成するための小型衛星打ち上げ需要の高まりが挙げられる。これに対して、小型衛星用の軽量ローンチ・ヴィークル開発や「相乗り（ライド・シ

⁶⁹⁵ Ibid.

⁶⁹⁶ Space X “Falcon 9” <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9/>

⁶⁹⁷ Space X “Falcon Heavy” <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-heavy/>

⁶⁹⁸ Space X “Falcon 9” <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9/>

エアリング)」とって複数の衛星を1度の打ち上げでまとめて軌道に送るといった方法が採用されている。

ローンチ・ヴィークルの低コスト化が進むことによって、民間が衛星を打ち上げる際のコストが抑えられ、宇宙ビジネスが参入しやすいものになり、さらに開発が加速化するという正のスパイラルが期待される。

4. 衛星によるリモートセンシング

(1) 当該技術の概要

「物を触らずに調べる」技術であるリモートセンシングのうち、人工衛星に専用の測定器（センサ）を載せて、地球上を観測することを衛星リモートセンシングと呼ぶ⁶⁹⁹。代表的なセンサの種類としては、太陽光の反射を図る光学センサ、センサから発射したマイクロ波を反射させて測定する能動型マイクロ波センサ、対象物が放射するマイクロ波を測る受動型マイクロ波センサなどがある。



(図 18-4 光学センサ（左）と能動型マイクロ波センサ（右）⁷⁰⁰)

センサの種類によって、様々な利用用途が想定される。例えば、受動型の光学センサであれば、砂漠化した土地の識別・都市の表面温度把握・海面温度やエルニーニョ現象発生 of 把握、能動型の光学センサであれば氷河の氷の高さ、大気中の雲、エアロゾル、黄砂の状況把握等である。

⁶⁹⁹ 一般財団法人リモート・センシング技術センター「リモートセンシングとは？」

<https://www.restec.or.jp/knowledge/sensing/sensing-1.html>

⁷⁰⁰ NASA “What is Remote Sensing?”

<https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote->

[sensing#:~:text=Remote%20sensing%20is%20the%20acquiring,record%20reflected%20or%20emitted%20energy.](https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing#:~:text=Remote%20sensing%20is%20the%20acquiring,record%20reflected%20or%20emitted%20energy.)

種類	観測方法※2	センサ	特徴	利用例
光学センサ	受動型	<ul style="list-style-type: none"> 光学画像センサ スペクトロメータ 	<ul style="list-style-type: none"> マイクロ波センサより高い解像度を持つ画像データを収集できる 細かい波長間隔で特定点のデータを取得(非画像データ)できる 	<ul style="list-style-type: none"> 砂漠化した土地の識別、都市の表面温度把握・海面温度・エルニーニョ発生の把握等 洪水氾濫状況と水稲の被害把握、鉱物マップ作成、乾燥地の植生把握、温室効果ガスの測定等
	能動型	<ul style="list-style-type: none"> ライダー 	<ul style="list-style-type: none"> レーザを光源とし、高度計や距離測定、大気中の雲やエアロゾルや黄砂等の微量粒子測定、原子・分子密度および気温・風速などの空間分布観測まで用途先が広い 	<ul style="list-style-type: none"> 水河の水の高さ、大気中の雲、エアロゾル、黄砂等の把握等
マイクロ波センサ	受動型	<ul style="list-style-type: none"> マイクロ波放射計(イメージャ、サウンダ) 	<ul style="list-style-type: none"> 地表面観測を目的とし画像データを収集したり(イメージャ)、大気観測を目的とし、観測する方向に1次元的な観測をする(サウンダ)、サウンダの位置/観測方法を変えて3次元的な観測も可能 	<ul style="list-style-type: none"> 森林火災検知、気象予報の精度向上、漁場情報の提供等
	能動型	<ul style="list-style-type: none"> レーダ(例:合成開口レーダ、マイクロ波高度計、マイクロ波散乱計、降雨・雲レーダ) 	<ul style="list-style-type: none"> 衛星からパルス状の電波を発信し、対象物からの戻り時間から距離を計測、また対象物の大きさ/電気的性質の違いから散乱(対象物からのパルスの再放射)の違いがあるため、この違いを利用して観測を行う 	<ul style="list-style-type: none"> 降雨観測(気象予報)、地形図作成(空中写真撮影が困難な離島含む)、ハザードマップ作成、地震の家屋倒壊率、洪水氾濫状況と水稲の被害把握、油汚染状況把握(例:メキシコ湾の原油流出)、洋上風力発電の資源推定、海上風推定、漁場探査等

※1 一般的に、数100MHz～数10GHzの周波数(波長換算で0.001m(=1mm)～1m)の電磁波を指す

※2 受動型はアンテナと受信機で構成され、観測対象自身から放射または反射・散乱される電磁波を観測し、一方で能動型は電磁波送信機と受信機、アンテナで構成され、電磁波を衛星センサから観測対象に向けて放射しその反射を観測するものとする

(図 18-5 利用する電磁波の種類と用途⁷⁰¹)

リモートセンシングの歴史自体は1世紀も前に遡る。当初はバルーンにカメラをくくりつけるような原始的な仕組みであったが、やがて V2 ロケットに搭載されたカメラが静止画像を捉えることに成功し、その後の米国の偵察衛星計画コロナや、1972年に運用が開始された米国の地上観測衛星ランドサットへとつながっていった⁷⁰²。その後、1978年には初の SAR (合成開口レーダー) 衛星である SEASAT が打ち上げられた。夜間や悪天候時でも地上を観測できるこのレーダーは、ノイズが多いうえに、サイズが大きく費用も高額だった。しかし近年、技術革新や部品の汎用化によって、SAR 衛星の小型化・低価格化が進んでいる。加えて、AI による画像処理機能も向上したため、新たなデータ利用方法に期待がかかっている。また、SAR 衛星のコンステレーションによって、準リアルタイムで地球上の詳細な映像データを把握できることになり、多面的な活用が想定されている。

リモートセンシング衛星の打ち上げ数は、米国が他国を大きく離して1位の座を維持している。しかし、近年では、2位の中国がリモートセンシング衛星を積極的に打ち上げている。中国は2022年8月20日に「遥感三十五号04組」を、同年11月15日に「遥感三十四号04組」を打ち上げ、軌道に

⁷⁰¹ NTT DATA 「衛星リモートセンシングデータ活用の現状及び展望」

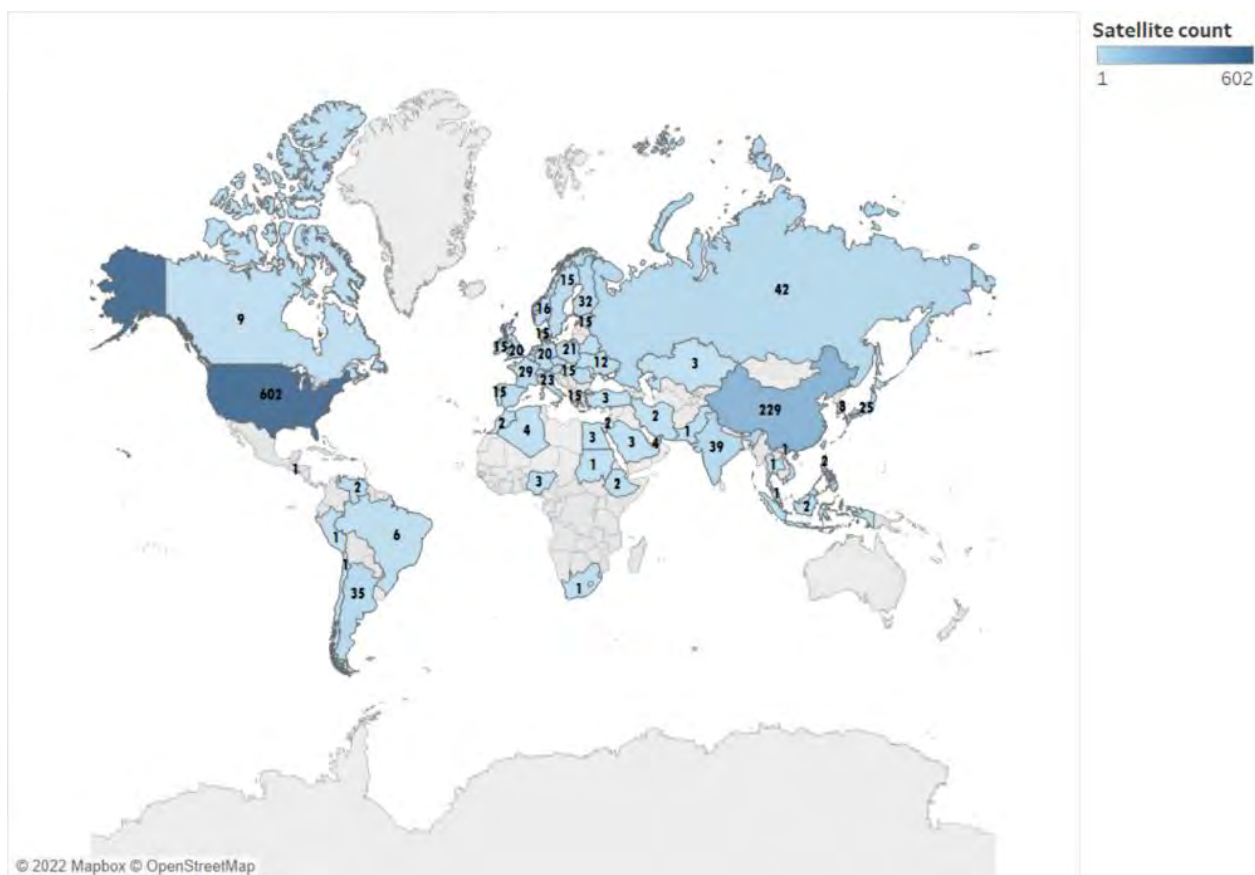
https://www.soumu.go.jp/mai_n_content/000534398.pdf

⁷⁰² DRAGONFLY aerospace “HOW REMOTE SENSING SATELLITES WORKS”

<https://dragonflyaerospace.com/how-remote-sensing-satellites-works/>

送り届けることに成功した⁷⁰³。中国政府によると、リモートセンシング衛星は土地資源調査、郊外開発、農作地の予想、災害の防止や被害軽減のために利用されるとのことだが、軍事利用される可能性も否定はできない。

下図の通り、中国が打ち上げたリモートセンシング衛星の数は米国の 602 基には及ばないものの、229 基と 3 位以下を大きく離している。次いでロシア、インド、ブラジルとなり、日本の打ち上げ数は 25 基となっている⁷⁰⁴。また、政府による打ち上げも増えてはいるものの、増加分のほとんどは民間の打ち上げによるものである。これら民間のリモートセンシング衛星をいかに国防につなげていくかは、各国が直面している課題の 1 つである。



(図 18-5 利用する電磁波の種類と用途⁷⁰⁵)

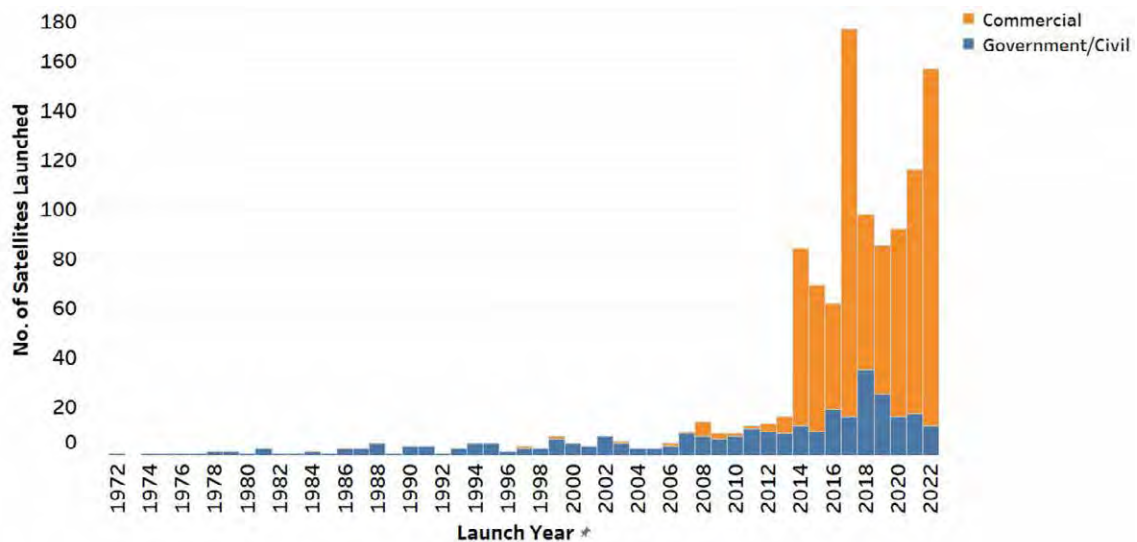
⁷⁰³ Xinhua “China launches Yaogan-34 remote sensing satellite”

<https://english.news.cn/20221115/0e423f640d4a46b8830e65b85632d274/c.html>

⁷⁰⁴ 2022 年 9 月 9 日現在

⁷⁰⁵ NTT DATA 「衛星リモートセンシングデータ活用の現状及び展望」

https://www.soumu.go.jp/main_content/000534398.pdf



(図 18-7 リモートセンシング衛星の内訳 (オレンジが民間、青が政府系) ⁷⁰⁶)

(2) 公的利用・安全保障における利用

リモートセンシング衛星及びそれらのコンステレーションは、戦況把握、弾道ミサイルの早期警戒や海洋状況監視 (MDA)、防災、不審船対策を含める対テロ等に広く活用が見込まれる⁷⁰⁷。また、従来であれば、衛星から取得した画像を生身の人間が確認する必要があったが、AI の画像認識機能が向上するとともに、より大量の画像を処理させて経済安全保障上の脅威を早期に予想・予防することも期待される⁷⁰⁸。しかし、精確な現状把握・予測を行うためには、高精度の衛星画像と処理能力が必要であり、米国では民生のリモートセンシング衛星から画像を買い取るなどの措置が必要だとする主張もある。

日本でも NEC や三菱電機が JAXA と共同で SAR 衛星の小型化・高性能化を進めるなど、官民共同で開発が行われている。リモートセンシング衛星が取得した画像は国防上の利用価値があるため、その取扱いについては十分な議論をする必要がある。最近では、ロシアの侵攻を受けて、ウクライナが日本政府に SAR 衛星の画像データを求めていたことが報じられた⁷⁰⁹。

⁷⁰⁶ USGS “Land Remote Sensing Satellites”

<https://www.usgs.gov/calval/land-remote-sensing-satellites>

⁷⁰⁷ 渡辺 (2020) 「衛星リモートセンシングの活用について -海洋安全保障応用を中心として-

https://www.mod.go.jp/msdf/navcol/assets/pdf/ssg2020_04_09.pdf

⁷⁰⁸ Harrison Todd “Commercial Space Remote Sensing and Its Role in National Security” CSIS

<https://www.csis.org/analysis/commercial-space-remote-sensing-and-its-role-national-security>

⁷⁰⁹ 日経新聞「ウクライナ、日本に衛星データ要請 情勢見極め政府判断」2022年3月17日

<https://www.nikkei.com/article/DGXZ00UA16AXP0W2A310C2000000/>

(3) 民生利用

民間のリモートセンシング衛星の打ち上げは、米国を中心に 2010 年代から急増しているが、日本ではまだ十分に民生で活用されているとは言い難い。実際の用途としては、土地資源の管理・開発（環境保護や都市計画への活用）、海洋資源の管理・開発（漁場予測など）、農作物の収量推定に必要な二次データの提供、洪水モニタリング機能などリスク管理による保険分野への応用、樹木による炭素固定量の把握（カーボン・クレジットへの活用）など多岐に渡り、情報の量と質が向上するほど民生での活用の幅が広がる⁷¹⁰。現在、ネットで蓄積されている個人に紐づく情報がビッグデータとしてターゲティング広告に活用されているように、膨大なデータの収集と自動化された情報分析によって、地球上の些細な変化に基づく様々な予測が可能になっていくと考えられる。リモートセンシング衛星の打ち上げ数だけでなく、これら民間での応用ビジネスがいかに広がっていくかが、今後の日本にとっても重要になってくる。

5. 宇宙機の推進法

(1) 技術の概要

現在、宇宙機の推進法としては①化学推進 ②電気推進 ③推進剤不使用、の3種類が挙げられ、実用化されているのは主に①と②である⁷¹¹。

①の化学推進は、宇宙開発の黎明期より使用されてきた推進法であり、燃焼などの化学反応を利用して推進力を得る方法だ。ヒドラジンを推進剤とするもの、その他推進剤を利用するもの、極低温液体推進剤を利用するもの、ハイブリッド型、固形推進剤を利用するものなどがあり、いずれも化学反応によってガスを噴射させ、その噴射の力を推進力として利用している。化学推進はコンパクトで強力な推進方法として、打ち上げロケットには必須とされてきた。

②の電気推進は、電気ので物質を加速して推進する方法だ。電気推進の特徴は排気速度が大きく取れることにあり、さらに宇宙機の質量を軽くできる点にある。日本のはやぶさ2などに使われているイオンエンジンも電気推進の1つであり、燃料をプラズマ化してプラスとマイナスのイオンに分け、そのうちプラスのイオンを静電気で加速させる⁷¹²。イオンエンジンは、電気推進の中でも特に燃費がいいのが特徴だ。他にも MPD（マグネットプラズマ・ダイナミック・エンジン）アークジェットやホー

⁷¹⁰ 藤井達人 「『宇宙×金融』さまざまな分野で活用が進む衛星データ | お金とテクノロジーの未来 vol.2」 XTECH

<https://xtech.mec.co.jp/articles/7882>

⁷¹¹ NASA “In-space Propulsion” <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/in-space-propulsion>

⁷¹² JAXA 「イオンエンジンだけじゃない、電気推進ってなんだ？」 <https://fanfun.jaxa.jp/feature/detail/10926.html>

ルスラスタ、VASIMR（比推力可変型プラズマ推進器）などがあり、化学推進と比べて活用された実績は少ないものの、それぞれの特徴に合わせて用途別に利用・実験されている。電気推進は、燃費はいいが力は弱いというイメージを持たれがちだが、必ずしもそうではなく、理論的にはエネルギーを投入するだけ力が出せるエンジンのため、光の速さをも超越できるという。また、電気推進の利点として、衛星の軌道維持に利用することで打ち上げコストが抑えられることも挙げられる⁷¹³。

③の推進剤不要のものとしては、太陽の光を受けて推進するソーラーセイル（太陽帆）、自転する惑星との間で惑星の磁場を介して運動量が交換されるエレクトロダイナミックテザー、そして実証には至っていないものの核熱推進（NTP）システムなどが挙げられる⁷¹⁴。



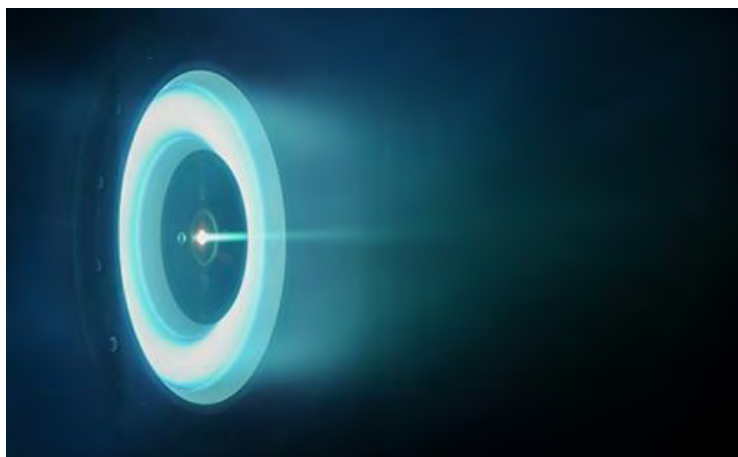
(図 18-8 MPD アークジェット。パワーはあるが、大電力が必要⁷¹⁵)

⁷¹³ mi nsaku 「ロケットエンジンの種類と、電気推進(イオンエンジン)の仕組み～超小型衛星に載せるエンジン開発の最前線(前編)」 <https://mi nsaku.com/arti cles/post819/>

⁷¹⁴ NASA “In-space Propulsion” <https://www.nasa.gov/small sat-i nsti tute/sst-soa/i n-space-propul si on>

⁷¹⁵ JAXA 「イオンエンジンだけじゃない、電気推進ってなんだ？」

<https://fanfun.jaxa.jp/feature/detai l/10926.html>



(図 18-9 ホールスラスタ (イメージ) ⁷¹⁶⁾)

日本で大きな注目を集めた小惑星探査機「はやぶさ」で使用されているイオンエンジンの $\mu 10$ エンジンは運転時間が 4 万時間にも及び、推力や耐久性共に「はやぶさ 2」では向上している。今後は電圧を上げてさらに燃費と推力を上げた $10\mu\text{HISp}$ という次世代型エンジンの開発に期待がかかっている⁷¹⁷。また、イオンエンジンの燃焼材として水を使った水推進のエンジン開発も進んでおり、東京大学と JAXA が共同開発した超小型探査機「エクレウス (EQUULEUS)」に搭載されている。

米国では、DARPA が NPT システムの開発を DRACO (Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations) プログラムとして公表しており、2026 年度の実現を目指している⁷¹⁸。DRACO プログラムによると、NPT システムは原子炉の高熱で推進剤を加熱膨張させ、高温の推進剤を放出することで推進を得る方法で、化学推進の 2～5 倍の効率で推進力を生みだし、地球と月などの長距離の有人飛行には重要な推進方法になるとしている。

(2) 公的利用・安全保障における利用

宇宙空間における推進方法は、衛星コンステレーションのコスト削減、衛星の軌道維持、OSAM への応用などを考慮すると、その技術的影響は多岐に渡る。また、国の威信をかけた宇宙における長距離の有人飛行にも、新しい推進方法の研究開発は大きな影響を持つ。従来の推進方法では惑星間の移動に時間がかかりすぎてしまい、人体に有害な放射線を被ばくしすぎてしまうからだ。DARPA の戦略テクノロジー局のネイサン・グレイナー氏は、「宇宙における機動力は、推進方法の制限によって地球上

⁷¹⁶ Ibid.

⁷¹⁷ Ibid.

⁷¹⁸ DARPA “DARPA Seeks Proposals Leading to In-Space Demonstration of Nuclear Thermal Rocket”

<https://www.darpa.mil/news-events/2022-05-04>

より難しくなっている。宇宙技術分野での優位性を保つためには、DRACO プログラムが提供する躍進的な推進方法が必要だ」としている⁷¹⁹。米国はアルテミス計画で月面に人を、その先には火星に人を送ることを目標としており、日本も日本人宇宙飛行士初の月面着陸や月面探査活動などへの参加に意欲を示し交渉を続けている⁷²⁰。

(3) 民生利用

推進法の開発によって、民間企業は衛星の打ち上げコストを抑えられるだけでなく、ビジネス領域の拡大も図れる。例えば米国が開発する核熱推進（NPT）システムが実現すれば、宇宙での有人飛行がより現実味を帯びてくる。また、宇宙における推進方法の開発は宇宙旅行ビジネスや、現在の移動速度では実現不可能な宇宙サービス提供の可能性も広げ、より多くの人々へ宇宙ビジネスを提供するきっかけとなりうる。

6. 宇宙ベースの測位・航法・タイミング（PNT：Position, Navigation, and Timing）とその抗たん性

(1) 技術の概要

米国の運輸省によると、PNT とは以下の3つの機能を指す。①測位：世界測地系（WGS84）などの標準的なシステム上で、精確に所在地を特定する機能、②航法：目的とすべき所在地を特定し、コースや速度を修正する機能、③タイミング：世界のどこからでも、適した標準時の時刻を精確に特定する機能、である⁷²¹。上記の3機能と地図データなどを合わせたサービスがGPS（Global Positioning System）であり、軍事だけでなく民生においても今や欠かせないツールの一つとなっている。このようなPNTサービスは、宇宙空間にある衛星から発信される信号によって成り立っている。例えば、GPSで現在地を特定する場合、現在地と複数の衛星との距離をそれぞれ電波で測り（電波が発信されてから受信されるまでの時間を測ることによって距離が測定される）、それぞれの衛星を中心とした「球」の交わる場所が現在地であると特定できる⁷²²。

⁷¹⁹ Ibid.

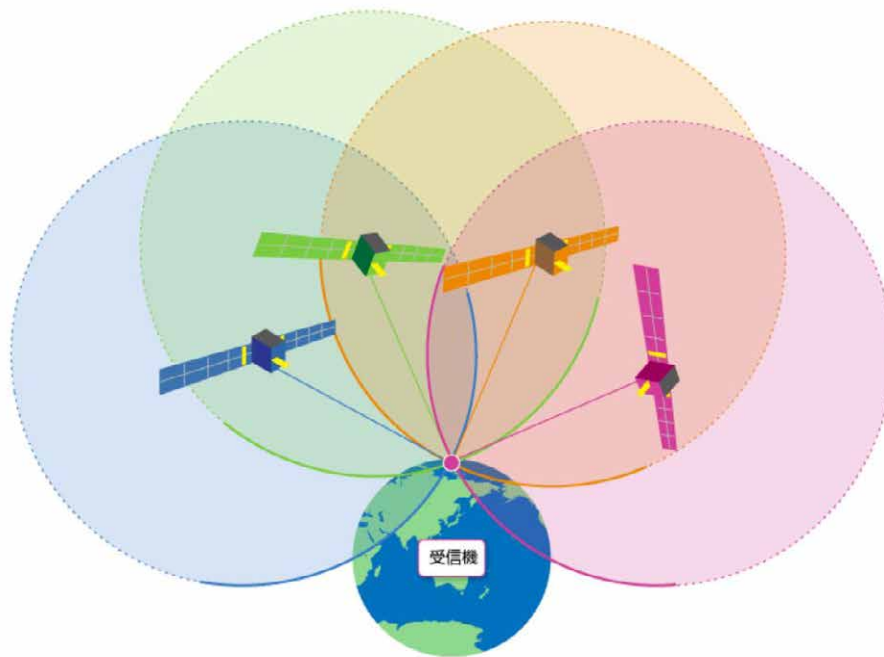
⁷²⁰ 文部科学省 「永岡大臣がネルソン NASA 長官と宇宙分野の協力について意見交換」

https://www.mext.go.jp/b_menu/acti_vity/detail/2023/20230206.html

⁷²¹ U.S. Department of Transportation “What is Positioning, Navigation and Timing (PNT)?”

<https://www.transportation.gov/pnt/what-positioning-navigation-and-timing-pnt>

⁷²² 日経新聞 「GPSでどうして自分のいる位置がわかるの？」



実際には、衛星から受信機までの距離は「円」ではなく「球」で捉えられ、球が交差する点で受信機の位置が特定できる。

(図 18-10 GPS による現在地の特定方法⁷²³)

(2) 近年の開発動向

GPS を生み出した米国では、近年 PNT のレジリエンス（抗たん性）を向上させようとする動きが政府に見られる。例えば 2020 年 2 月 12 日、米国のトランプ元大統領は大統領令 13905 号（PNT サービスの責任ある使用による国家レジリエンスの強化）を発出した。この大統領令では、PNT サービスが様々なインフラ機能に使用されている現在、これらの機能障害・妨害が国家安全保障に大きな影響を与えることを確認し、重要なインフラを担う事業者の責任ある使用を政府が促す必要があるとした⁷²⁴。その後、この大統領令は 2021 年 1 月 15 日の、宇宙ベースの測位・航法・タイミング（PNT）に関する大統領覚書（宇宙政策指令 7 号）によって補足されている⁷²⁵。

PNT の抗たん性を向上させる方法としては、従来の PNT と新技術（AI、5G、量子センサ、高軌道におけるプラットフォームの設立など）を組み合わせることでサービスの信頼性・効率・安全性を向上

⁷²³ 同上

⁷²⁴ NATIONAL ARCHIVES “Strengthening National Resilience Through Responsible Use of Positioning, Navigation, and Timing Services” <https://www.federalregister.gov/documents/2020/02/18/2020-03337/strengthening-national-resilience-through-responsible-use-of-positioning-navigation-and-timing>

⁷²⁵ White House “Memorandum on Space Policy Directive 7”

<https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/memorandum-space-policy-directive-7/>

させることや、GNSS など PNT サービスに必要な機能の保護・代替機能の準備をしたりすることが挙げられる⁷²⁶。ジャミングを検知するために、近年では GNSS を利用する機器に専用のソフトウェアをインストールし、全体のシステムが汚染される前に PNT の情報を無効化する手法も用いられている⁷²⁷。

その他の国々でも、GPS に依存しない PNT の方法が模索されている。日本では、2016 年に閣議決定された「宇宙基本計画」において、23 年度を目途に米国の GPS に頼る必要がなくなるよう、日本版の GPS を担う衛星「みちびき」の 7 基体制を確立するとしている⁷²⁸。また、中国では 2022 年から北斗衛星測位システムが大規模な応用発展段階に入り、北京市、上海市、江蘇省などの地域は、「北斗」と 5G、IoT、AI、ビッグデータなどとの融合を推奨・支援し、交通、物流、介護、医療など複数の分野で大規模なプロジェクトを推進している⁷²⁹。他にも、欧州宇宙機関（ESA）は NAVISP（Navigation Innovation and Support Program）を立ち上げ、PNT 分野の革新的な開発を目指している⁷³⁰。

(3) 民生利用

PNT サービスは公的利用だけでなく、民生利用にも大きな影響を持つ分野だ。上述した中国の北斗衛星測位システムの発展に伴い、21 年の中国衛星ナビ・位置情報産業の総生産高は 20 年比 16.29%増の 4690 億元に成長し、特許出願件数は 9 万 8 千件を突破したという⁷³¹。中国衛星ナビゲーション測位協会の于賢成会長は、「北斗はスマート交通、スマートエネルギー、スマート農業及び利水・治水、スマート製造業などの分野での応用で形成されたデジタル化シーンにおいて、新たな細分化された市場を絶えず形成し、中国衛星ナビ・位置情報サービスの全体的な市場規模をさらに拡大させた」と述べている⁷³²。

⁷²⁶ orolia “Understanding Resilient PNT for Defense” <https://www.rolia.com/understanding-resilient-pnt-for-defense/>

⁷²⁷ i b i d.

⁷²⁸ 内閣府 「宇宙基本計画」 <https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan3/plan3.pdf>

⁷²⁹ 日経 BP 総合研究所「中国北斗衛星測位システムが大規模応用発展の新たな段階へ」
<https://project.nikkeibp.co.jp/bpi/atcl/column/19/053100309/>

⁷³⁰ ESA “WHAT IS NAVISP” <https://navisp.esa.int/>

⁷³¹ i b i d.

⁷³² i b i d.