

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

論題 Title	第3章 衛星コンステレーションの可能性と課題
他言語論題 Title in other language	Chapter3, Possibilities and Problems of Satellite Constellations
著者 / 所属 Author(s)	清水 直樹 (SHIMIZU Naoki) / 国立国会図書館調査及び立法考査局国土交通課
書名 Title of Book	宇宙空間の利用をめぐる動向と課題 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (International Trends and Issues in the Utilization of Space)
シリーズ Series	調査資料 2022-5 (Research Materials 2022-5)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2023-03-27
ページ Pages	43-66
ISBN	978-4-87582-907-2
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	宇宙に関わるビジネス環境が「衛星コンステレーション」によって大きく変化しており、政府も産業振興に取り組んでいる。一方、宇宙空間の混雑等が国際的な課題となりつつある。

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

第3章 衛星コンステレーションの可能性と課題

国立国会図書館 調査及び立法考査局
国土交通課 清水 直樹

目 次

はじめに

I 人工衛星の現状と法制度

- 1 人工衛星の分類
- 2 人工衛星の数
- 3 法制度

II 衛星コンステレーションの活用

- 1 衛星コンステレーションの特長
- 2 衛星ブロードバンド通信
- 3 地球観測

III 衛星コンステレーションの課題

- 1 衛星通信—光通信の実用化—
- 2 ビジネス支援
- 3 宇宙交通管理
- 4 環境への影響

おわりに

【要 旨】

近年、宇宙空間の利用方法として、多数の小型の人工衛星を低軌道に打ち上げて一体的に運用する「衛星コンステレーション」が注目されている。その利活用分野としては、民生用では、衛星ブロードバンド通信、地球観測等のサービスがある。衛星コンステレーションを活用したサービスは、様々な地球課題の解決に資するとともに、これに関わる分野は成長産業として大きな可能性を持っていると考えられる。

宇宙に関わるビジネス環境が大きく変化する中、日本政府は、衛星コンステレーションに関わるスタートアップ企業の支援、光衛星通信の開発・実用化などに取り組んでいる。一方で、衛星コンステレーションの課題として、宇宙空間の混雑、地球の大気圏の環境汚染などが国際的に懸念されている。

はじめに

近年、宇宙に関するビジネスが活発化している。なかでも注目されているのが「衛星コンステレーション」である。コンステレーション (constellation) は「星座」を意味する語であり、衛星コンステレーションとは、多数の小型の人工衛星を連携させ、一体的に運用する仕組みを指す。衛星コンステレーションの活用により、これまでになかった高度なサービスをグローバルに展開することが可能になっている。具体的には、ブロードバンド通信サービスや地球観測データを提供するサービスが挙げられる。例えば、米国企業の SpaceX は、既に数千機の人工衛星を打ち上げて衛星コンステレーションを構築しており、地上の通信インフラが不十分な地域において通信サービスを拡大しようとしている。日本には、地球観測サービスを行うために、衛星打上げを進める企業が現れているが、海外企業との競争が激しくなることも予想される。

衛星コンステレーションによる宇宙ビジネスの競争の高まりを受けて、政策面でも衛星コンステレーションに対する取組は喫緊の課題となっている。政府の「宇宙基本計画」⁽¹⁾は、「小型・超小型衛星のコンステレーションによる通信衛星や観測衛星の新たなビジネスモデルが登場している」ことを指摘し、衛星コンステレーションの構築は、衛星の大量生産と多頻度打上げにより、関連産業にイノベーションの機会をもたらしており、今後の宇宙政策はこのような大きなゲームチェンジを前提に検討していく必要があるとしている⁽²⁾。また、与党自由民主党の宇宙政策に関する提言⁽³⁾は、「世界では、小型衛星コンステレーションやロケットなど宇宙分野の技術革新が続いて」とした上で、宇宙ビジネスの拡大に向けた諸施策を講じることなどを政府に求めている⁽⁴⁾。

本稿は、最初に人工衛星の現状と法制度を確認した後、衛星コンステレーションの民生分野における利用について、現状や可能性に触れた上で政策面の課題の整理を試みる。

* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和5(2023)年1月13日である。

(1) 「宇宙基本計画」(令和2年6月30日閣議決定) 内閣府ウェブサイト <https://www8.cao.go.jp/space/plan/kaitei_fy02/fy02.pdf>

(2) 同上, p.6.

(3) 自由民主党政務調査会宇宙・海洋開発特別委員会「宇宙安全保障の強化と宇宙ビジネスの拡大に向けて―第8次提言―」2022.5.17. 自由民主党ウェブサイト <https://storage.jimin.jp/pdf/news/policy/203611_1.pdf>

(4) 同上, p.1.

I 人工衛星の現状と法制度

1 人工衛星の分類

宇宙空間では地球上に比べて重力の影響が極めて弱く、空間中の物質の密度も極めて低い
ため、物体を宇宙空間に打ち出して必要な推進力（速さ）を与えると、地球周囲の軌道を周回し
続けることができる⁽⁵⁾。そのような仕組みを利用して、何らかの目的で人間が打ち出し地球の
周囲を周回する物体が人工衛星である。

地表近くの低い軌道を回る人工衛星の速さは、毎秒約 8km（時速約 28,800km）であり、地球
を 1 時間半程度で 1 周する⁽⁶⁾。地球の重力は地球から離れるほど弱くなるため、高い軌道の人
工衛星は、軌道を回るために必要な速さが小さくなる。地上約 36,000km の高度では、物体が
地球を円軌道で 1 周するのにかかる時間が地球の自転周期と一致する⁽⁷⁾。赤道上のこの高度に
ある人工衛星は、地球から静止しているように見えるため、「静止衛星」と呼ばれる。このよ
うに高度に着目すると、人工衛星は、低軌道（約 200～約 2,000km）⁽⁸⁾、中軌道（約 2,000～約
36,000km）、静止軌道（約 36,000km）に大きく分けられる⁽⁹⁾。

また、人工衛星は、その目的によって、通信・放送衛星⁽¹⁰⁾、測位衛星⁽¹¹⁾、気象衛星⁽¹²⁾、地
球観測衛星⁽¹³⁾等に分類することができる。人工衛星は、その衛星の目的に最も適した高度を選
んで打ち上げられる（表 1 参照）。低軌道は、打上げに要するエネルギーが比較的小さく済み、
地球に比較的近いいため、地球の詳細観測をする地球観測衛星等に多く採用されている⁽¹⁴⁾。衛星
コンステレーション（通信、地球観測等）でも多くは低軌道が用いられている。中軌道は、地
球の観測にはやや不利であるが、低軌道に比べて少ない衛星数で地球全体をカバーできるた
め、測位衛星等で用いられている⁽¹⁵⁾。静止軌道は、地球上のある地点に対して常に同じ位置に
あるという特徴から、気象衛星、通信・放送衛星等に適している⁽¹⁶⁾。

(5) 国立国会図書館調査及び立法考査局編『宇宙政策の動向—科学技術に関する調査プロジェクト 2016 調査報告書—』（調査資料 2016-5）国立国会図書館, 2017, p.7. <<https://dl.ndl.go.jp/pid/10314923>>

(6) 「よくあるご質問：人工衛星はどのくらいの速さで地球の周りをまわっているのだろうか？」宇宙航空研究開発機構ウェブサイト <<https://humans-in-space.jaxa.jp/faq/detail/000684.html>>

(7) 同上

(8) 空気の抵抗による衛星の減速を極力防ぐため、空気が十分薄い 200 キロメートル以上の高度が必要であるとされる。「よくあるご質問：人工衛星や ISS の軌道はどうやって決めるのだろうか？」宇宙航空研究開発機構ウェブサイト <<https://humans-in-space.jaxa.jp/faq/detail/000680.html>> ただし、JAXA の人工衛星「つばめ」は、令和元（2019）年 9 月、イオンエンジンの推力を利用することにより、ギネス世界記録となる 167.4 キロメートルの高度で 1 週間の飛行を行った。佐々木雅範「クイックレポート 超低高度衛星技術試験機「つばめ」(SLATS)によるギネス世界記録の達成」『日本航空宇宙学会誌』68 巻 4 号, 2020.4, pp.91-93.

(9) 分類としては、静止軌道より外側の高軌道（High Earth Orbit: HEO）もある。

(10) 人工衛星を電波の中継所として利用し、地上間の通信・放送などを行う衛星。宇宙での衛星同士の通信を中継する衛星もある。宇宙航空研究開発機構宇宙教育センター『宇宙活動ガイドブック』宇宙航空研究開発機構宇宙教育センター, [2006], p.68.

(11) 測位衛星の一形態として、GPS (Global Positioning System. 軌道を正確にコントロールされたいくつもの衛星からの精密な時刻信号を受信し、その信号の差から計算によって地球上の自分の位置を割り出す仕組み)の衛星等が運用されている。同上, p.69.

(12) 天気予報等の精度を向上させるため、地球上の気象情報を観測する衛星。同上, p.70.

(13) 地球上の資源の探査、環境汚染などの監視、海洋現象の監視などを行う衛星。なお、気象衛星も広い意味では地球観測衛星と言える。同上, p.71.

(14) 谷口義明監修『新・天文学事典』講談社, 2013, pp.637-638.

(15) 同上, p.638.

(16) 同上

表1 軌道高度による人工衛星の分類

区分*	特徴	適している衛星の種類
低軌道 (Low Earth Orbit: LEO)	高度約 2,000km までの軌道。約 1 時間半程度で地球を 1 周する。地球表面の一部しか見ることができない反面、高い空間解像度で観測することができる。	地球観測衛星 コンステレーション衛星 (通信、地球観測等)
中軌道 (Middle Earth Orbit: MEO)	高度約 2,000km から約 36,000km までの軌道。LEO の衛星よりも広く地球を見ることができる。	測位衛星
静止軌道 (Geostationary Earth Orbit: GEO)	高度約 36,000km の軌道。地球の自転周期 (約 23 時間 56 分) と同じ時間で地球を 1 周するため、地球上のほぼ同じ場所を観測し続けることができる。	気象衛星 通信・放送衛星

* 表で挙げた3つの区分のほか、高軌道(高度約36,000kmより外の周回軌道)、楕円軌道(特徴は表2参照)もある。(出典)「様々な人工衛星」宇宙航空研究開発機構サテライトナビゲーターウェブサイト <<https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/satellite-knowledge/whats-eosatellite/satellite-type/index.html>>; 谷口義明監修『新・天文学事典』講談社, 2013, pp.637-638などを基に筆者作成。

2 人工衛星の数

米国の非営利団体である「憂慮する科学者同盟 (Union of Concerned Scientists: UCS)」のデータベース⁽¹⁷⁾によると、2022年5月現在、稼働中⁽¹⁸⁾の人工衛星は5,465機ある。人工衛星の数を「軌道別」及び「国別」に見ると、それぞれ表2、表3のとおりとなる。

表2から、近年、低軌道の衛星の増加が顕著であることが分かる。これは、衛星コンステレーションを構成する小型の低軌道衛星が、相次いで打ち上げられているからである。2022年5月現在、衛星の運用・所有者の上位3者は、①SpaceX(米国):2,219機、②OneWeb(英国):427機、③Planet Labs(米国):215機であり、いずれも衛星コンステレーションのための低軌道衛星を運用・所有する民間事業者である。

表2 人工衛星の軌道別運用状況

	2019年4月	2020年4月	2021年1月	2022年1月	2022年5月
低軌道	1,338	1,918	2,612	4,078	4,700
中軌道	125	135	139	141	140
静止軌道	554	554	562	574	565
楕円軌道*	45	59	59	59	60
合計	2,062	2,666	3,372	4,852	5,465

* 楕円軌道は、人工衛星を打ち出す速度が円軌道高度に必要な速度より速かったり遅かったりする場合、また、打ち出す方向が水平でない場合に生じる軌道(宇宙航空研究開発機構宇宙教育センター『宇宙活動ガイドブック』宇宙航空研究開発機構宇宙教育センター, [2006], p.63)。楕円軌道では、地表からの高度が軌道上の位置によって異なる。

(出典) “UCS Satellite Database (Updated May 1, 2022).” Union of Concerned Scientists website <<https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>> (Internet Archive <<https://archive.org/>> に保存された過去ファイルを含む) を基に筆者作成。

(17) “UCS Satellite Database (Updated May 1, 2022).” Union of Concerned Scientists website <<https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>>

(18) 「稼働中 (active)」の人工衛星とは、現在、軌道を飛行中である及び／又は通信が確立している衛星を指し、軌道を周回しているが現在は使用されていない衛星は含まない。Union of Concerned Scientists, *UCS Satellite Database User’s Manual*, p.2. <<https://s3.amazonaws.com/ucs-documents/nuclear-weapons/sat-database/4-11-17-update/User+Guide+1-1-17+wAppendix.pdf>>

表3 人工衛星の国別運用状況（2022年5月現在）

国名	運用・所有中の衛星数*
米国	3,415
中国	535
英国	486
ロシア	170
日本	88
その他	771
合計	5,465

* データベース中の「Country of Operator/Owner」に、その国名が記載されている衛星の数。2つ以上の国名が記載されている衛星は「その他」とした。

(出典) “UCS Satellite Database (Updated May 1, 2022).” Union of Concerned Scientists website <<https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>> を基に筆者作成。

3 法制度

(1) 国際法

宇宙関係の国際法（国際宇宙法）としては、「月その他の天体を含む宇宙空間の探査及び利用における国家活動を律する原則に関する条約」（昭和42年条約第19号。以下「宇宙条約」）のほか、同条約で言及されている事項をより具体的に規定する条約又は協定が4つある⁽¹⁹⁾。これらの条約・協定は、いずれも国連総会の補助機関である宇宙平和利用委員会（Committee on the Peaceful Uses of Outer Space: COPUOS）で起草され、国連総会で採択されたものである（概要は表4のとおり）。

COPUOSの決定は全会一致方式であるため、加盟国数の増加に伴い、月協定の策定以降、新たな条約の作成が困難になっている。そのため、COPUOSで議論され国連総会で決議や支持表明（endorse）された文書等もソフトローとして重要な位置付けを担っている⁽²⁰⁾。例えば、スペースデブリ⁽²¹⁾低減についての取組を各国に促す「スペースデブリ低減ガイドライン」⁽²²⁾は、COPUOS科学技術委員会で作成され、国連総会で支持表明された技術的文書であるが、實際上、正式な国際法と類似の機能を持つ⁽²³⁾。

国際宇宙法の基本原則として、「宇宙活動の自由」、「宇宙の領有権禁止」、「宇宙の平和利

(19) 「宇宙飛行士の救助及び送還並びに宇宙空間に打ち上げられた物体の返還に関する協定」（昭和58年条約第5号。以下「宇宙救助返還協定」）、「宇宙物体により引き起こされる損害についての国際的責任に関する条約」（昭和58年条約第6号。以下「宇宙損害責任条約」）、「宇宙空間に打ち上げられた物体の登録に関する条約」（昭和58年条約第7号。以下「宇宙物体登録条約」）、「月その他の天体における国家活動を律する協定」（日本未署名。以下「月協定」）

(20) 小塚荘一郎・佐藤雅彦編著『宇宙ビジネスのための宇宙法入門 第2版』有斐閣, 2018, pp.32-35.

(21) スペースデブリとは「地球周回軌道上に存在し、又は大気圏に再突入する人工物であって、当該人工物から分離又は放出されたものを含む機能を果たさない物体」を指す。内閣府宇宙開発戦略推進事務局「軌道上サービスを実施する人工衛星の管理に係る許可に関するガイドライン 初版」2021.11.10, p.4. <https://www8.cao.go.jp/space/application/space_activity/documents/guideline_oosgl.pdf> スペースデブリのルール整備については、本報告書の中村真也「第7章 スペースデブリに対処するための技術とルールー宇宙空間の持続可能な利用のために」を参照。

(22) “Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space,” United Nations, *Report of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space: General Assembly Official Records, Sixty-second session, Supplement No.20 (A/62/20)*, 2007, pp.47-50. <http://www.unoosa.org/pdf/gadocs/A_62_20E.pdf>

(23) 小塚・佐藤編著 前掲注(20), p.33.

用」、「国への責任の一元集中」が挙げられる⁽²⁴⁾。なかでも特徴的なことは「国への責任の一元集中」であり、私人の活動も国家の活動と同一視し、私人が宇宙条約をはじめとする国際宇宙法に違反する行動をとった時には、私人の国籍国が外国に対して直接国際的責任を負わなければならないとする点である⁽²⁵⁾。私人の活動の結果生じた国際法に違反する状態を是正する国際責任が直接政府にかかる以上、政府は「許可及び継続的監督」(宇宙条約第6条)によって、自国の私人に対して国際宇宙法を遵守させる必要が生じる⁽²⁶⁾。

人工衛星の関係では、「打上げ国」が損害賠償責任(地表への損害については無過失責任、宇宙物体への損害については過失責任)を負う仕組みになっている。例えば、民間ロケットの打上げ失敗や打ち上げた人工衛星の墜落によって、他国の地上に損害が発生した場合には、「打上げ国」が賠償責任を負う⁽²⁷⁾。「打上げ国」とは、①打上げを行う国、②打上げを行わせる国、③自国領域内から物体が打ち上げられる国、又は④自国施設内から物体が打ち上げられる国である(宇宙損害責任条約第1条(c))。複数の国家により共同で打上げが実施される場合、これらの国は連帯して責任を負う(同第5条第1項)。ただし、私企業による衛星打上げでは不明瞭な部分が残る。例えば、A国企業がB国の施設から人工衛星の打上げを行う時で、当該企業の人工衛星が国連登録⁽²⁸⁾されていない場合には、A国が「打上げ国」となるかは明確ではない⁽²⁹⁾。

また、宇宙活動が自由であるといっても、宇宙活動で使用する電波(周波数)の分配については、混信が発生しないように、国際電気通信連合(International Telecommunication Union: ITU)の無線通信規則(Radio Regulations)に基づく拘束を受ける⁽³⁰⁾。具体的には、人工衛星を打ち上げようとする国の主管庁は、打上げの2~7年前までに、計画している衛星の軌道位置、使用周波数等の技術的な内容を記載した事前公表資料をITUに提出する必要がある⁽³¹⁾。各国主管庁は、公表された資料に基づき、自国の無線局に混信を与えるおそれがあると判断した場合には、打上げ国の主管庁に対して意見の申立てを行い、二国間で調整を進める。調整の結果はITUに通告され、最終的に国際周波数登録原簿(Master International Frequency Register: MIFR)に登録され、国際的な保護を受ける⁽³²⁾。あらかじめ国際的割当計画を策定する放送衛星を除いて、周波数登録は基本的に早い者勝ち(先着優先方式)である⁽³³⁾。また、衛星コンス

(24) 同上, pp.35-45; 大久保涼編著代表, 大島日向共同編著『宇宙ビジネスの法務』弘文堂, 2021, pp.3-6.

(25) 小塚・佐藤編著 同上, p.44.

(26) 同上, p.45.

(27) 大久保編著代表, 大島共同編著 前掲注(24), pp.6-7; 第一東京弁護士会編『これだけは知っておきたい! 弁護士による宇宙ビジネスガイド—New Spaceの潮流と変わりゆく法—』同文館出版, 2018, pp.26-27. なお、私企業の民事法上の責任が排除されているわけではない。小塚莊一郎「宇宙ビジネス法とは何か」小塚莊一郎・笹岡愛美編著『世界の宇宙ビジネス法』商事法務, 2021, p.6.

(28) 宇宙物体の登録は、国内登録と国連登録からなる。まず、国内登録として、宇宙空間に発射された物体を登録した打上げ国(登録国)が、その物体の管轄権及び管理権を保持する(宇宙条約第8条、宇宙物体登録条約第2条)。その上で、登録国から国連事務総長に提供された宇宙物体の情報が、国連事務総長が保管する登録簿に記載・公開されることで、国連登録がなされる(宇宙物体登録条約第3、4条)。打上げ国が複数ある時には、協議によりそのうちの1国が宇宙物体を登録し得る。小塚・佐藤編著 前掲注(20), p.48.

(29) 同上, pp.50-51; 大久保編著代表, 大島共同編著 前掲注(24), pp.6-7.

(30) 小塚 前掲注(27), p.5.

(31) 新谷美保子・小林佳奈子「衛星コンステレーション時代の到来と衛星国際周波数」小塚・笹岡編著 前掲注(27), p.177.

(32) 同上, pp.177-178; 「周波数の国際調整について」総務省電波利用ホームページウェブサイト <<https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/process/freqint/>>

(33) 「周波数の国際調整について」同上; 小塚・佐藤編著 前掲注(20), p.83.

テレレーションのような多数の衛星の周波数調整は、1つの衛星通信網としてまとめて行うことができる⁽³⁴⁾。

表4 宇宙関係諸条約の概要

名称	署名開放年	日本の加盟	加盟状況	主な内容
宇宙条約	1967年	1967年	112か国	宇宙活動の基本原則を定めると同時に、宇宙軍縮条約としての側面を持つ <ul style="list-style-type: none"> ・宇宙活動自由の原則 ・宇宙空間領有禁止原則 ・宇宙平和利用原則 ・国家への責任集中原則 ・打上げ物体に対する登録国の管轄権と所有権 ・宇宙活動に関する国際協力
宇宙救助返還協定	1968年	1983年	99か国 ・3機関	<ul style="list-style-type: none"> ・宇宙船乗員の緊急着陸等に対する情報提供義務 ・事故等により自国に着陸した又は公海等に着水した乗員の援助提供義務 ・乗員の打上げ国への送還、宇宙物体の回収及び返還
宇宙損害責任条約	1972年	1983年	98か国 ・4機関	<ul style="list-style-type: none"> ・地表での損害又は飛行中の航空機に与えた損害について無過失責任を採用 ・損害賠償請求手続
宇宙物体登録条約	1975年	1983年	72か国 ・4機関	<ul style="list-style-type: none"> ・宇宙物体の登録・識別手続を定める ・打上げ国の宇宙物体の国内登録 ・国連事務総長による登録簿の保管と締約国の情報提供義務
月協定	1979年	未署名	18か国	<ul style="list-style-type: none"> ・月の平和的利用 ・月における科学的研究の自由 ・月を人類共有の財産と位置づけ、所有権の主張を禁止するとともに資源開発を禁止 ・当事国相互の査察の自由

(出典) 小塚荘一郎・佐藤雅彦編著『宇宙ビジネスのための宇宙法入門 第2版』有斐閣, 2018, p.31; 濱川今日子「宇宙物体により生じた損害に関する国際責任」『レファレンス』686号, 2008.3, p.77. <<https://dl.ndl.go.jp/pid/999678>>; Committee on the Peaceful Outer Space, Legal Subcommittee, “Status of International Agreements relating to activities in outer space as at 1 January 2022,” A/AC.105/C.2/2022/CRP.10, 28 March 2022. <https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2022/aac_105c_22022crp/aac_105c_22022crp_10_0_html/AAC105_C2_2022_CRP10E.pdf> を基に筆者作成。

(2) 国内法

各国では、宇宙諸条約の義務を遵守することに加えて、特に近年は民間の宇宙ビジネスを促進することを目的に、国内宇宙法の整備を進めてきた⁽³⁵⁾。日本では、長らく、宇宙開発を行う組織は国の研究機関や国の監督を直接受ける特殊法人に限られていたため、国内法の整備は行われなかったが、平成20(2008)年に議員立法により宇宙基本法(平成20年法律第43号)が制定された⁽³⁶⁾。さらに、民間の宇宙活動に係る法整備として、平成28(2016)年に「人工衛星等の打上げ及び人工衛星の管理に関する法律」(平成28年法律第76号。以下「宇宙活動

(34) 「小型衛星通信網の国際周波数調整手続きに関するマニュアル 第3.1版」2021.2, pp.21-22. 総務省電波利用ホームページウェブサイト <<https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/freq/process/freqint/001.pdf>>

(35) 第一東京弁護士会編 前掲注(27), pp.130-131.

(36) 小塚・佐藤編著 前掲注(20), pp.157-158.

法)』及び「衛星リモートセンシング記録の適正な取扱いの確保に関する法律」(平成28年法律第77号。以下「衛星リモセン法)』が制定された。

(i) 宇宙基本法

日本の宇宙政策は、宇宙基本法によって大きく転換した。それまで、日本の宇宙開発利用は、昭和44(1969)年の国会決議⁽³⁷⁾に基づき、「平和の目的に限り」、すなわち原則として「非軍事」に限定して行われてきた⁽³⁸⁾。宇宙基本法では、「日本国憲法の平和主義の理念にのっとり」という語を入れることにより、専守防衛の範囲内での利用、すなわち「非侵略」での利用を許容した⁽³⁹⁾。また、同法は、宇宙開発利用の重点目標を、「研究開発」中心から「利用・産業振興」中心へと変更した⁽⁴⁰⁾。同法により、宇宙政策を総合的・計画的に進めるために、内閣に宇宙戦略本部(本部長:内閣総理大臣)が置かれるとともに、同本部が宇宙基本計画の案を策定し閣議決定を求めることとなった(宇宙基本法第24、25、28条)。

(ii) 宇宙活動法

宇宙基本法が掲げる民間による宇宙開発利用の推進を踏まえて、平成28(2016)年に制定されたのが宇宙活動法である。宇宙活動法は、人工衛星等の打上げ及び人工衛星の管理に係る許可、ロケット・人工衛星の落下等損害の賠償等について定めている。人工衛星等の打上げについては、国内に所在する打上げ施設(日本国籍を有する船舶・航空機を含む。)を用いて人工衛星等の打上げを行おうとする者は、内閣総理大臣の許可を受けなければならない(宇宙活動法第4条)。人工衛星の管理についても、人工衛星ごとに内閣総理大臣の許可が必要であり、許可に当たり提出する申請書には、管理の終了に伴う措置⁽⁴¹⁾等も記載することが求められる(同第20条)。また、前述したように国際宇宙法では、ロケット・人工衛星の落下による地表での損害について「打上げ国」が賠償責任を負うこととされており、宇宙活動法では、ロケットの打上げ実施者・人工衛星の管理者に無過失賠償責任を課している(同第35、53条)。その上で、ロケットの打上げ実施者には、損害賠償担保措置を講ずる義務(保険加入の義務)を課し(同第9条)、保険で対応することができない損害が発生した場合には、政府が締結することができる損害賠償保障契約によって補償を行うこととしている(同第40条)。

(iii) 衛星リモセン法

宇宙活動法と同時に制定された衛星リモセン法は、衛星リモートセンシング装置(以下「衛星リモセン装置」という。)⁽⁴²⁾の使用に係る許可について定めるとともに、衛星リモセン装置の使用によって得られる記録の流通を安全保障の観点から規制するものである。まず、国内に所在する操作用無線設備を用いて衛星リモセン装置の使用を行おうとする者は、衛星リモセン

(37) 「わが国における宇宙の開発及び利用の基本に関する決議」(第61回国会衆議院会議録第35号 昭和44年5月9日 p.1)

(38) 榎孝浩「国会における宇宙政策の議論」渡邊浩崇編著『宇宙の研究開発利用の歴史—日本はいかに取り組んできたか—』大阪大学出版会, 2022, pp.37-39.

(39) 渡邊浩崇「日本の宇宙政策の歴史と現状—自主路線と国際協力—」同上, p.21.

(40) 同上

(41) デブリ除去の一環として人工衛星の高度を下げて空中で燃焼させることなど、他の人工衛星の管理に支障を及ぼすおそれのない方法が求められている(宇宙活動法第22条)。

(42) 人工衛星に搭載されて地表又は水面からの電磁波を検出して記録し、地上に送信する機能を有する装置で、一定以上の解像度(対象物判別精度)を有するもの。対象物判別精度は、光学センサーであれば2m以下、SAR(Synthetic Aperture Radar. 合成開口レーダー)センサーであれば3m以下と定められている(衛星リモートセンシング記録の適正な取扱いの確保に関する法律施行規則(平成29年内閣府令第41号)第2条)。

装置ごとに内閣総理大臣の許可を受けなければならない（衛星リモセン法第4条）。次に、衛星リモセン装置の使用によって得られる記録のうち、国際社会の平和の確保等に支障を及ぼすおそれがあるものを「衛星リモートセンシング記録」⁽⁴³⁾と定義し、それを提供できる相手方を「記録を取り扱う者」の認定を受けた者、特定取扱機関⁽⁴⁴⁾等に制限している（同第18条）。「記録を取り扱う者」の認定は、記録の安全管理措置が講じられていることなどを条件に内閣総理大臣が行う（同第21条）。

II 衛星コンステレーションの活用

1 衛星コンステレーションの特長

近年、注目されている衛星コンステレーションとは、多数の人工衛星を軌道上に配置し、一体的に運用するものである⁽⁴⁵⁾。背景としては、技術革新によって衛星の小型化⁽⁴⁶⁾が可能になり、多くの衛星を低コストで打ち上げることができるようになったことが挙げられる⁽⁴⁷⁾。前述のとおり、衛星コンステレーションでは、小型衛星を低軌道で運用することが一般的である。低軌道を利用するメリットは、静止衛星に比べて地上に近い通信に用いる電波の遅延が少なく、送信電力も小さくて済む（機器を小型化できる）ことにある⁽⁴⁸⁾。また、低軌道の衛星は、地球を1時間半程度で1周する。小型衛星を多数打ち上げることによって、1機が見えなくなったら次の1機がやってくるという連携を取れば、いつでもどこでも観測や衛星通信が可能になる⁽⁴⁹⁾。

一方で、低軌道の衛星は、ごく微量に存在する地球大気の影響を受けるため、寿命が数年しかないとも言われる⁽⁵⁰⁾。寿命が15年ほどの静止衛星と対照的であり、必要な数の衛星を常に確保するには維持費用がかかる。

衛星コンステレーションを用いた主なビジネスとしては、衛星ブロードバンド通信と地球観測が具体化している（主な事業者は表5のとおり）。現段階の衛星保有数で見れば、通信分野では米国のSpaceX、地球観測分野では光学センサーを用いるものは米国のPlanet Labs、SAR（合成開口レーダー（II3参照））を用いるものはフィンランドのICEYEが多い。

(43) 補正処理を施していない「生データ」については、光学センサーであれば対象物判別精度が2m以下、SARセンサーであれば3m以下で、いずれも記録されてから5年以内のもの。補正処理を施し、メタデータを付与した「標準データ」については、光学センサーであれば対象物判別精度が25cm未満、SARセンサーであれば24cm未満のものなどと定められている（衛星リモートセンシング記録の適正な取扱いの確保に関する法律施行規則第3条）。

(44) 「特定取扱機関」とは、国、地方公共団体及び外国の政府機関（米国、カナダ、ドイツ、フランス）である（衛星リモートセンシング記録の適正な取扱いの確保に関する法律施行令（平成29年政令第282号））。

(45) 国立国会図書館調査及び立法考査局編 前掲注(5), p.14.

(46) 小型衛星とは、一般的に500kg以下の衛星を指す。衛星コンステレーションで用いられるのは主に100～200kg級であるが、30～50kg級を用いる事業者もある。麻生茂「第18回 超小型衛星の特徴や利点について」『日本リモートセンシング学会誌』34巻1号, 2014.1, p.33; 日経xTECH編『宇宙元年！新ビジネス起動中—一つに宇宙ビジネスが始まった！民間宇宙旅行、小型衛星コンステレーション、デブリ除去—』（日経BPムック）日経BP, 2022, pp.52-53.

(47) 第一東京弁護士会編 前掲注(27), p.33.

(48) 豊嶋守生「光衛星通信の最新動向」『光技術コンタクト』58巻7号, 2020.7, p.13.

(49) 有田祥子「宇宙開発における小型衛星開発と求められる技術、開発テーマ」技術情報協会企画編集『宇宙ビジネス参入の留意点と求められる新技術、新材料』技術情報協会, 2020, p.262.

(50) サテマガ・ビー・アイ『衛星通信ガイドブック2022』サテマガ・ビー・アイ, 2022, p.20.

表5 衛星コンステレーション事業を実施・計画する主な事業者（2022年時点）

分野	事業者（プロジェクト名）	国	軌道上保有数	計画総数
通信	SpaceX（Starlink）	米国	約 3,400	11,943
	Amazon（Project Kuiper）	米国	0	3,236
	Astra Space （Astra Constellation）	米国	0	13,620
	Telesat（Lightspeed）	カナダ	0	198
	OneWeb（OneWeb）	英国	428	648
	China Satellite Network Group （Guo Wang）	中国	0	12,992
	Hanwha Systems（Hanwha）	韓国	0	2,000
地球観測 （光学センサー）	Planet Labs（Planet Explorer）	米国	150 超	—
	BlackSky（Spectra AI）	米国	15	60
	Satelloptic（Aleph-1）	アルゼンチン	26	300
	アクセルスペース （AxelGlobe）	日本	5	10
地球観測 （SAR）	Capella Space （Capella Console）	米国	7	36
	ICEYE（ICEYE）	フィンランド	21	18
	シンスペクティブ	日本	3	30
	QPS 研究所	日本	2	36

（出典） OECD, *Earth's Orbits at Risk: The Economics of Space Sustainability*, Paris: OECD Publishing, 2022, p.25; 中田晃司・福原始「小型衛星コンステレーションビジネスの現状と将来」『日本リモートセンシング学会誌』41巻2号, 2021.5, p.291; 各社ウェブサイト等を基に筆者作成。

2 衛星ブロードバンド通信

衛星コンステレーションによる衛星ブロードバンド通信は、従来の静止軌道によるそれと比べて、人工衛星の地上からの距離が数十分の一であるため、低遅延で高品質な通信を提供できると期待されている⁽⁵¹⁾。サービス対象として主に想定されるのは、地上の通信インフラの整備が進んでいない国や地域である。ただし、宇宙からブロードバンド通信を提供する衛星コンステレーションを構築するためには、数千～数万機の衛星が必要とも言われており、プロジェクト全体の費用は数千億～数兆円になると言われている⁽⁵²⁾。

通信分野の代表的な事業者が米国の SpaceX である。SpaceX の Starlink プロジェクトでは、既に約 3,400 機の衛星が打ち上げられ⁽⁵³⁾、ブロードバンド通信のサービスが開始されている⁽⁵⁴⁾。SpaceX は、2019 年 10 月時点で、プロジェクト全体で連邦通信委員会（Federal Communications

(51) 八亀彰吾「宇宙ビジネスの最新動向と材料・部品メーカーの参入可能性（特集 宇宙ビジネスの未来予測、ビジネスチャンスと今後の課題）」『研究開発リーダー』17巻7号, 2020.10, pp.16-17.

(52) 青木英剛「The NewSpace Economy—宇宙ベンチャーが作り出す新宇宙経済圏—（特集 宇宙新時代へのメッセージ）」『航空と文化』121号, 2020. 夏季, p.34.

(53) “SpaceX launches another 52 Starlink satellites, lands rocket at sea,” September 25, 2022. Space.com Website <<https://www.space.com/spacex-starlink-satellite-launch-group-4-35>>

(54) “Starlink Availability Map.” Starlink Website <<https://www.starlink.com/map>>; 「スペース X、日本で「スターリンク」開始」『日本経済新聞』2022.10.12.

Commission: FCC)⁽⁵⁵⁾ から約 12,000 機の打上げの認可を得ていることに加え、更に 30,000 機の打上げを計画している⁽⁵⁶⁾。また、英国の OneWeb は、648 機の衛星から成るコンステレーションを計画しており、既に 428 機の衛星を打上げ済みである⁽⁵⁷⁾。米国の Amazon も、3,236 機の衛星コンステレーションの計画を発表しており、2023 年以降に打上げを開始する予定である⁽⁵⁸⁾。

日本の通信事業者も衛星コンステレーションの活用を検討している。KDDI は、SpaceX の Starlink による通信サービスを携帯電話基地局のバックホール回線（中継回線）として使用することにより、山間部や島嶼でも高品質な通信サービスを提供する予定である⁽⁵⁹⁾。OneWeb に出資しているソフトバンクは、①成層圏を飛行する無人航空機（High Altitude Platform Station: HAPS）⁽⁶⁰⁾、② OneWeb の衛星コンステレーション、③静止衛星という、異なる高度の通信インフラを組み合わせることで効率的なサービスを提供する方針である⁽⁶¹⁾。NTT は、スカパー JSAT との合弁で、「宇宙統合コンピューティング・ネットワーク」事業を担う新会社を設立し、今後、宇宙空間に光通信を活用したコンステレーションのネットワークを設けることを計画している⁽⁶²⁾。楽天モバイルは、米国の衛星スタートアップ企業と組み、地上約 700km に全長 24m の巨大なアンテナを搭載するコンステレーション衛星を打ち上げることによって、地上側ではスマートフォンでそのまま通信できるサービスを計画している⁽⁶³⁾。

3 地球観測

地球観測衛星に搭載されるセンサーには、大きく、「光学センサー」と「マイクロ波センサー」の 2 種類がある⁽⁶⁴⁾。光学センサーは、可視光線や赤外線を観測するが、可視光線を使った観測ではデジタルカメラのように衛星写真を撮影すること等ができる。ただし、目で見えるものしか撮影できないため、雲で遮られている時は地表の様子を捉えられないという欠点がある。一方、可視光線よりも波長の長いマイクロ波（電波）を観測できるマイクロ波センサーでは、昼夜天候に関わらず、雲で遮られていても観測できる。特に、合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar: SAR）は、自ら発したマイクロ波の反射を受信して地形を調べるものであり、

(55) FCC は、委員会組織の独立規制機関であり、電気通信・放送分野における規則制定、行政処分の実施を所掌している。「世界情報通信事情：アメリカ合衆国」総務省ウェブサイト <https://www.soumu.go.jp/g-ict/country/america/pdf_contents.html>

(56) Caleb Henry, “SpaceX submits paperwork for 30,000 more Starlink satellites,” October 15, 2019. SpaceNews Website <<https://spacenews.com/spacex-submits-paperwork-for-30000-more-starlink-satellites/>>

(57) “OneWeb Confirms Successful Launch of 34 Satellites, Delivering Ongoing Momentum at the Start of 2022,” 2022.2.10. OneWeb Website <<https://oneweb.net/resources/oneweb-confirms-successful-launch-34-satellites-delivering-ongoing-momentum-start-2022>>

(58) “Amazon’s Project Kuiper satellites will fly on the new Vulcan Centaur rocket in early 2023,” October 13, 2022. Amazon Website <<https://www.aboutamazon.com/news/innovation-at-amazon/amazons-project-kuiper-satellites-will-fly-on-the-new-vulcan-centaur-rocket-in-early-2023>>

(59) 「スペース X、日本で「スターリンク」開始」前掲注(54); 「特集 ヒートアップ! 宇宙ニューメディア 衛星コンステレーション・ビジネスの最前線」『NEW MEDIA』40 巻 3 号, 2022.3, pp.16-18.

(60) 一般的なジェット旅客機は地上から 10km 程度の高度を飛行することが多いが、HAPS は高度 20km 程度（成層圏に当たるエリア）を飛行する。松田治「新たな通信インフラとして期待される HAPS の概要と動向」『InfoCom T&S world trend report—世界の情報通信サービスの情報誌—』403 号, 2022.11, pp.26-30.

(61) 「特集 ヒートアップ! 宇宙ニューメディア 衛星コンステレーション・ビジネスの最前線」前掲注(59), pp.18-19.

(62) 同上, pp.14-16.

(63) 石川温「携帯衛星通信サービスに熱視線」『日経産業新聞』2022.9.15; 同上, pp.19-20.

(64) 神武直彦ほか『いちばんやさしい衛星データビジネスの教本—人気講師が教えるデータを駆使した宇宙ビジネス最前線—』インプレス, 2022, pp.22-23.

垂直・水平の偏波を使い分けることによって、材質や海水の塩分濃度など対象物の特性も調べられることもできる⁽⁶⁵⁾。

衛星データの民生分野の活用としては、農業（作物の生育状況の可視化）、漁業（海水温やプランクトン量から好漁場の予測）、林業（森林管理業務の効率化）、防災（地震や火山活動の監視）、インフラ点検（経年変化のモニタリング）など様々な場面が想定される⁽⁶⁶⁾。

日本の企業では、光学センサーを搭載する衛星を運用する事業者としてアクセルスペース、SAR衛星を運用する事業者としてシンスペクティブ、QPS研究所が知られている（表5参照）。

例えば、防災関係では、シンスペクティブが、SAR衛星で撮像されたデータを基に地盤変動をモニタリングし、地滑りや斜面崩壊といった災害の予兆を検知するシステムを開発した⁽⁶⁷⁾。地盤や地殻の変化を把握するこうした技術は、土石流災害で問題となった盛り土などに対しても活用できる可能性があり、防災・減災につながることを期待される⁽⁶⁸⁾。なお、現在、シンスペクティブが保有する衛星は3機であり⁽⁶⁹⁾。アジア域内を対象に24時間ごとに撮像できる。今後、6機になれば地球全体を24時間ごと、30機になれば地球全体を2時間ごとに撮像できるようになるという⁽⁷⁰⁾。

Ⅲ 衛星コンステレーションの課題

1 衛星通信—光通信の実用化—

(1) 光衛星通信の長所・短所

人工衛星と地上との通信には電波が利用されている。特に、低軌道・中軌道の衛星では、L帯（上り⁽⁷¹⁾1.6GHz／下り1.5GHz）、S帯（上り2.6GHz／下り2.5GHz）等が従来利用されてきたが、近年の衛星コンステレーションでは、Ku帯（12～18GHz）以上の高い周波数帯が利用されている⁽⁷²⁾。これは、L帯、S帯等の既存の周波数帯が使用されていることに加え、周波数帯が高くなることによってより広い周波数帯域を確保でき、伝送容量を増やすことが可能なためである⁽⁷³⁾。

今後、大規模な衛星コンステレーションの構築等、人工衛星の利用が更に進むと、衛星と地上との間で伝送すべき情報量が増加する一方で、使用できる電波の枯渇が課題となる。そこで、衛星通信に光による無線通信を利用することが国内外で検討されている。光も電波と同じ

(65) 同上, p.23.

(66) 同上, pp.32-47. 衛星リモートセンシングの技術と衛星データの民生分野の活用については、本報告書の森田倫子「第4章 衛星リモートセンシングによる観測データの利活用」を参照。

(67) 「SARデータ解析による、災害発生前の地盤変動から災害予兆変動を検知する“斜面不安定性検知機能”を開発」2022.8.26. シンスペクティブウェブサイト <https://synspective.com/jp/press-release/2022/patent_application_2022/>

(68) 「防災に“宇宙の目” 小型SAR衛星 被災把握」『日刊工業新聞』2021.8.11.

(69) 「Synspective、自社3機目の小型SAR衛星「Strix-1」軌道投入に成功」2022.9.16. シンスペクティブウェブサイト <https://synspective.com/jp/press-release/2022/strix-1_reaches_orbit/>

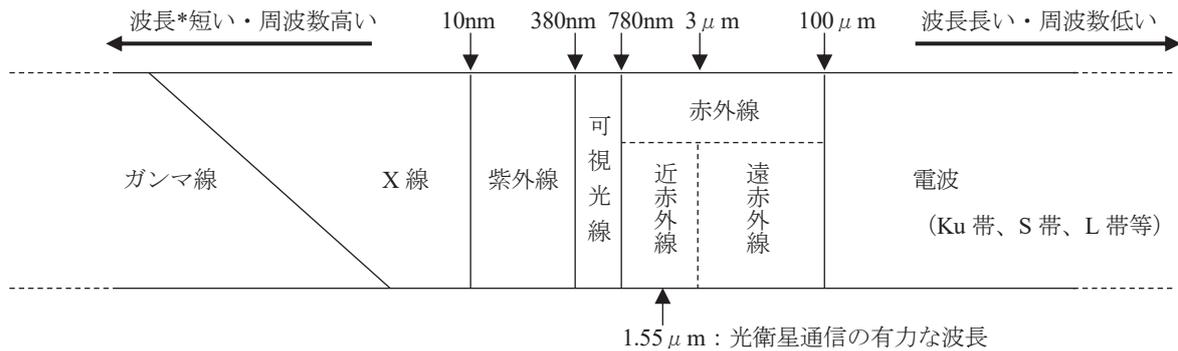
(70) 「衛星で監視 宇宙からの目で「変化」を見極め 地滑りや地盤変化の予兆をつかむ（特集 防災テックの快進撃）」『日経コンストラクション』782号, 2022.5, pp.64-65.

(71) 地上局から衛星局への回線を上り回線（アップリンク）、衛星局から地上局への回線を下り回線（ダウンリンク）と呼ぶ。衛星通信では、一般的に、上に使用周波数帯の高周波数側を、下りに低周波数側を割り当てる。吉村直子ほか「衛星用通信装置について」『電気設備学会誌』31巻5号, 2011.5, p.333.

(72) 筋誠久・亀井雅「衛星を利用した伝送技術の最新動向」『NHK 技研R&D』185号, 2021. 春, p.6.

(73) 同上

図1 電磁波の波長と名称



* 波長の幅は図の目盛りの長さとは比例していない。

(出典) 井上伸雄『「電波と光」のことが一冊でまるごとわかる』ベレ出版, 2018, p.113等を基に筆者作成。

電磁波であり (図1 参照)、情報の伝送に使うことができる⁽⁷⁴⁾。ただし、移動する物体との無線通信に光を使う場合には、電波と異なり、送信側から出る細いビーム (レーザー光) を受信するために、対象物を正確に捕捉追尾するシステムが必要になる⁽⁷⁵⁾。

衛星と地上との通信に光を使用することの長所・短所をまとめると、長所としては、①電波と比べて高周波数帯であるため広い帯域を使用可能であること (大量の情報を伝送できること)、②電波と異なり他の周波数との干渉を防ぐための使用周波数・帯域幅等の制約が存在しないこと⁽⁷⁶⁾、③送信ビームの直進性が高く秘匿性に優れること (漏洩電波による傍受を気にする必要がないこと)、④アンテナ径を小さくできるため衛星搭載機器の軽量小型化ができることなどが挙げられる⁽⁷⁷⁾。

短所は、①通信の成否が雲の存在に左右されること、②大気ゆらぎ⁽⁷⁸⁾の影響を受けること、③レーザー光の鋭さの裏返しで、広範囲にいるユーザーへ同時に情報を伝える用途には向かないこと、④ (衛星の捕捉追尾等のために) 現時点では地上局に大型望遠鏡が必要であることなどである⁽⁷⁹⁾。①、②のような短所があるため、サイトダイバーシティ技術 (離れた場所にある複数の地上局を運用して送信ビームを途切れなく受信する技術)、大気ゆらぎの影響を補正する技術の確立が必要になる⁽⁸⁰⁾。

(74) 現在普及している光ファイバーケーブルによる有線通信は、ケーブルの中心にある屈折率が高い直径0.01mm以下の細いガラス (コアと呼ばれる。) に光を投入することにより、コア周囲の屈折率が低いガラスとの間で光が全反射を繰り返しながら長い距離を進むことを利用したものである。井上伸雄『「電波と光」のことが一冊でまるごとわかる』ベレ出版, 2018, pp.211-215。

(75) 原田果林「光で6G支えるソフトバンク光無線の実用化には“トラッキング”が必須―『テレコミュニケーション』39巻4号, 2022.4, p.25。

(76) 電波法 (昭和25年法律第131号) は、「電波」を300万メガヘルツ (MHz) 以下の周波数の電磁波と定義し、規制の対象としている。300万MHzとは、3テラヘルツ (THz) を指し、波長で100マイクロメートル (μm 1μmは1000分の1mm) である。

(77) 荒木智宏「大容量通信を実現する、宇宙光通信の研究開発動向」『B-plus―電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン―』51号, 2019. 冬, p.205。

(78) 「大気ゆらぎ」とは、大気中の屈折率分布の変動によって、その境界面において光が屈折する現象。佐々木崇ほか「衛星―地上間光通信フェージングシミュレータ」『情報通信研究機構季報』58巻1・2号, 2012.3・6, p.83。

(79) 久保岡俊宏「静止衛星―地上間の超高速光衛星通信 (特集 光通信は空へ、海へ、量子の世界へ)」『O plus E―Optics + electronics―』42巻1号, 2020.1・2, p.28。

(80) 同上, pp.31-32。

(2) 国内外の動向

光衛星通信の研究は、日本が先行してきた分野であり、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）が1980年代⁽⁸¹⁾から行っている。1994年に、高度4万km以上の高高度の衛星⁽⁸²⁾と地上との間で、伝送速度1Mbpsの光通信に世界で初めて成功した⁽⁸³⁾。その後も、光衛星間通信実験衛星（きらり）⁽⁸⁴⁾と地上との通信（伝送速度10Mbps）、超小型衛星⁽⁸⁵⁾から地上への画像伝送に成功するなどしてきた⁽⁸⁶⁾。今後、NICTは、超高速の光通信機器として開発した「HICALI」を、2023年度にJAXAが打ち上げる予定の「技術試験衛星9号機」に搭載し、静止衛星と地上間で上り・下り10Gbps級の伝送速度の光通信を実証することを目指している⁽⁸⁷⁾。

JAXAは、衛星と衛星との間に光通信を使用する取組も進めてきた⁽⁸⁸⁾。2020年11月に光データ中継衛星（JDRS）⁽⁸⁹⁾を静止軌道に打ち上げ、これに光衛星間通信システム「LUCAS」を搭載した。「LUCAS」は、観測データ等を取得する低軌道衛星と光データ中継衛星との間に光通信を使用するもので、電波を用いる前世代のデータ中継衛星に比べ、7倍の通信速度（1.8Gbps）を可能にする⁽⁹⁰⁾。

米国では、航空宇宙局（National Aeronautics and Space Administration: NASA）が、2021年にデータ中継衛星を静止軌道に打ち上げ、地球局との通信を光で行うプロジェクト（Laser Communications Relay Demonstration: LCRD）を開始した⁽⁹¹⁾。このプロジェクトは、国際宇宙ステーション⁽⁹²⁾から、高解像度の実験データを、データ中継衛星経由で地上局まで光通信で送る（速度1.2Gbps）ものである。また、軍事分野で、国防総省（Department of Defense: DOD）⁽⁹³⁾の下にある宇宙開発局（Space Development Agency: SDA）が、国防宇宙アーキテクチャー（National Defense Space

(81) 当時の名称は郵政省電波研究所。

(82) 「きく6号」。なお、同衛星は静止軌道（高度約36,000km）への投入には失敗した。

(83) 久保岡 前掲注(79), p.28.

(84) 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）が開発し、2005年に低軌道に打ち上げた衛星。

(85) 2014年に打ち上げられた重量50kgの「SOCRATES」。NICTが開発した小型光通信機器（SOTA）を搭載した。

(86) 久保岡 前掲注(79), p.28.

(87) 同上;「NICTワイヤレスネットワーク研究センターバーチャル展示室：光衛星通信システム」NICTウェブサイト <https://www2.nict.go.jp/wireless/i_hicali.html>

(88) 光通信は、大気条件・天候の影響を大きく受けるが、大気を通過しない衛星間では、その長所を最大限発揮できる。山川史郎「光衛星間通信 宇宙開発 & 利用を支える次世代宇宙通信基盤技術（特集 光通信は空へ、海へ、量子の世界へ）」『O plus E—Optics + electronics—』42巻1号, 2020.1・2, p.22.

(89) データ中継衛星とは、主に静止軌道で運用され、低軌道で地球を周回する観測衛星で取得されたデータ（画像等）を、地上に中継する衛星である。低軌道衛星は、地球を1時間半程度で周回するため、地上から見ると10分程度で上空を通過してしまうが、静止軌道にあるデータ中継衛星を間に挟むことによって、地上と通信できる時間が大幅に増加する。

(90) 山川史郎「JAXA、光衛星間通信の狙い」『テレコミュニケーション』38巻8号, 2021.8, p.14. ただし、光データ中継衛星から地上局への通信には、曇天等を考慮して従来どおり電波を用いる。

(91) “Laser Communications Relay Demonstration (LCRD).” NASA Website <https://www.nasa.gov/mission_pages/tmd/lcrd/index.html>

(92) 高度約400kmを周回する、人間が居住可能な人工衛星。宇宙空間には「宇宙線」と呼ばれる人体に危険な放射線が飛び交っているが、地上1,000～5,000kmには地球の磁場で放射線を閉じ込める場所（ヴァン・アレン帯）があるため、その下の高度へ降り注ぐ放射線はかなりさげられる。そのため、人間が宇宙実験等を行うには、人体に安全な500km以下の軌道高度が選ばれる。「よくあるご質問：人工衛星やISSの軌道はどうやって決めるのだろうか？」前掲注(8)

(93) 米国では、NASAが民生分野の宇宙活動を行い、国防総省が軍事安全保障分野の宇宙活動を行うという体制になっている。国立国会図書館調査及び立法考査局編 前掲注(5), p.55.

Architecture: NDSA)⁽⁹⁴⁾の構築を進める中で、2022年2月に126機のコンステレーション衛星の調達契約(約18億ドル)を行った⁽⁹⁵⁾。この調達の要件の1つとして、それぞれの衛星に、光で衛星間を相互接続する機器の搭載が求められた。

SDAによる光衛星通信の大規模な調達は、これまで宇宙機関が行ってきた1対1の通信実験と異なり、衛星コンステレーションのシステムとして実際に機能するかどうかを検証されるものであるため、今後、光衛星通信の実用化を米国が主導することになるのではないかという点で注目される⁽⁹⁶⁾。衛星に用いる光通信機器については、NICT等と共同して研究開発を進めてきた日本企業があるが(三菱電機、ソニーグループ、NEC等)、米国やドイツにも世界をリードする企業がある⁽⁹⁷⁾。日本は、研究では光衛星通信に先行して取り組んできたが、技術の確立及び実用化を行い、世界市場でも優位性を持つことができるかが問われることになる⁽⁹⁸⁾。

2 ビジネス支援

(1) 現状

宇宙産業がビジネスとして本格的に認知され始めたのは2010年代からと言われる⁽⁹⁹⁾。それより前は国家主導で宇宙開発が行われていたが、2010年代に入って、米国を中心に多数のスタートアップ企業が参入し、それらの企業に対する投資も活発に行われるようになった⁽¹⁰⁰⁾。宇宙産業(構成は衛星サービス、地上機器、衛星製造、打上げ産業、非衛星産業)の規模は、2021年は世界で3860億ドルと推計されている⁽¹⁰¹⁾。将来的には、2040年に約3倍の1兆ドルに達するとの予測もある⁽¹⁰²⁾。

人工衛星のビジネスは、従来は、政府から委託された特定の大企業が、約5～10年の期間をかけて数百億円のコストでトンクラスの機体を開発し、それを大型ロケットに搭載して低頻度で打ち上げるというものであった⁽¹⁰³⁾。そうしたビジネスモデルを大きく変化させたのが衛星コンステレーションである。すなわち、衛星の小型化・打上げコストの低下等を背景に、ベン

(94) 数百機以上の安価な小型衛星を打ち上げて、通信・測位・偵察・宇宙状況監視・ミサイル追尾などを行う計画。防衛省「防衛省の宇宙分野における取組み」(第2回革新的将来宇宙輸送システム実現に向けたロードマップ検討会資料2-3)2020.12. 文部科学省ウェブサイト<https://www.mext.go.jp/kaigisiryu/content/20201202-mxt_uchukai01-000012395_7.pdf> NDSAについては、本報告書の辻見士「第6章 宇宙空間と安全保障に係る組織機構の動向」の脚注(80)も参照。

(95) “Space Development Agency Makes Awards for Tranche 1 Transport Layer.” SDA Website <<https://www.sda.mil/space-development-agency-makes-awards-for-tranche-1-transport-layer/>>

(96) 内田泰 「「光衛星通信」実用化へ世界大競争 ロシアの極超音速兵器で米国が本気モード」『日経エレクトロニクス』1242号, 2022.8, pp.66-68.

(97) サテマガ・ビー・アイ 前掲注(50), pp.42-43.

(98) 内田 前掲注(96), p.72. 政府の取組としては、例えば、内閣府・経済産業省「「光通信等の衛星コンステレーション基盤技術の開発・実証」に関する研究開発構想(プロジェクト型)」2022.10. <https://www8.cao.go.jp/cstp/anzen_anshin/20221021_meti_1.pdf>

(99) 青木 前掲注(52), p.30.

(100) 例えば、世界の宇宙関連のスタートアップ企業の資金調達額は、2021年は過去最大の約150億ドル(約1.6兆円)を超える規模であったとされるが、これは2010年代以降に急速に拡大した(2012年は10億ドルに満たなかった)ものである。BryceTech, *Start-Up Space 2022: Update on Investment in Commercial Space Ventures*, BryceTech, 2022, p.2. <https://brycetech.com/reports/report-documents/Bryce_Start_Up_Space_2022.pdf>

(101) “State of the Satellite Industry Report 2022.” Satellite Industry Association Website <<https://sia.org/news-resources/state-of-the-satellite-industry-report/>>

(102) “Space: Investing in the Final Frontier,” July 24, 2020. Morgan Stanley Website <<http://www.morganstanley.com/ideas/investing-in-space>>

(103) 日経xTECH 編 前掲注(46), pp.46-47.

チャー企業が官民からの発注を受けて小型衛星（数十～数百キログラム）を大量生産し（1機当たり数千万～数億円）、それらを低軌道に高頻度で打ち上げるビジネスが広がってきた⁽¹⁰⁴⁾。

衛星コンステレーションは、多数の衛星の打上げを必要とするため、巨大資本が必要となる。また、衛星が地球を周回すると地球上のあらゆる地域がサービス対象となるため、大規模な衛星コンステレーションは、グローバル企業や商社による事業展開が前提となりがちである⁽¹⁰⁵⁾。

これに対して、日本企業は、数十機レベルのコンステレーションで地球観測サービスを提供することを目指している。観測衛星の場合は常時観測するわけではないため、数十機単位で十分なサービスを提供できるという戦略である⁽¹⁰⁶⁾。SAR衛星を運用する事業者としては、現時点では、シンスペクティブが3機、QPS研究所が2機の衛星を打ち上げている（表5参照）。また、海外では、既にフィンランドのICEYEが21機⁽¹⁰⁷⁾、米国のCapella Spaceが7機の衛星を運用して事業を拡大させている⁽¹⁰⁸⁾。地球観測ビジネスは、衛星を多数打ち上げた会社の方が画像を安く高頻度で提供できることから、そのような会社に対抗するには際立った特徴が必要であることが指摘される⁽¹⁰⁹⁾。SAR衛星を使って天候に関わらず対象物の特性を調べられる地球観測サービスは、現時点で衛星の機数で先行している会社も、市場で決定的な状態にはなっておらず、競合他社にとっては、2025年頃までに技術力を高め、需要側のニーズを拾い上げられるかが重要であると指摘されている⁽¹¹⁰⁾。

(2) 支援策

日本では、宇宙政策委員会⁽¹¹¹⁾が平成29（2017）年に「宇宙産業ビジョン2030」⁽¹¹²⁾を取りまとめた。同ビジョンは、衛星コンステレーションは従来では考えられなかったサービスを生み出す素地を作り出しており、日本でもコンステレーションビジネスが出現しつつあるが、現状では、こうした事業を行う企業へのリスクマネーの供給が十分ではないことから、リスクマネーの供給を通じて大型の資金が迅速に投入されるよう促すことの必要性を指摘した⁽¹¹³⁾。

平成30（2018）年3月に、政府は、「宇宙ベンチャー育成の新たなパッケージ」⁽¹¹⁴⁾を発表し、

(104) 同上

(105) 山口真吾「衛星光通信と衛星量子暗号技術の開発促進—日本は、海外の衛星コンステレーション事業を上手に使い倒せ！—（特集 低軌道周回衛星（LEO）と衛星量子暗号（QSS）」『NEW MEDIA』39巻10号, 2021.10, p.64.

(106) 日経xTECH 編 前掲注(46), p.48.

(107) “ICEYE Successfully Completes Its Largest Satellite Launch Ever, Placing Five New SAR Satellites into Orbit,” May 25, 2022. ICEYE Website <<https://www.iceye.com/press/press-releases/iceye-successfully-completes-its-largest-satellite-launch-ever-placing-five-new-sar-satellites-into-orbit>>

(108) Michael Sheetz, “Satellite-imagery specialist Capella raises nearly \$100 million in network expansion,” April 25, 2022. CNBC Website <<https://www.cnbc.com/2022/04/25/capella-space-raises-97-million-to-expand-satellite-data-products.html>>

(109) 「東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻教授 中須賀真一氏 先を行く米国衛星ベンチャー 勝敗の行方は5年以内に見える」日経xTECH 編 前掲注(46), p.103.

(110) 同上, pp.103-104.

(111) 内閣府設置法（平成11年法律第89号）第37条に基づき内閣府に置かれる委員会で、内閣総理大臣の諮問に応じて宇宙開発利用に関する政策に関する重要事項を調査審議するなどの機関。

(112) 宇宙政策委員会「宇宙産業ビジョン2030—第4次産業革命下の宇宙利用創造—」2017.5.29. 内閣府ウェブサイト <<https://www8.cao.go.jp/space/vision/mbrlistsitu.pdf>>

(113) 同上, pp.10, 13.

(114) 内閣府ほか「宇宙ベンチャー育成のための新たな支援パッケージ」2018.3.20. <<https://www8.cao.go.jp/space/policy/pdf/package.pdf>>

政府関係機関（日本政策投資銀行、産業革新機構）をはじめ官民合わせて5年間に1000億円のリスクマネー供給を可能とする方針を打ち出した⁽¹¹⁵⁾。また、同パッケージは、宇宙ベンチャーとJAXA等との人材交流を促進するとともに、JAXAと民間企業とのパートナーシップ型の技術開発・実証を行うとした。これらの動きに呼応して、JAXAは、平成30（2018）年5月から、宇宙イノベーションパートナーシップ（JAXA Space Innovation through Partnership and Co-creation: J-SPARC）を開始した⁽¹¹⁶⁾。これは、JAXAが、事業意思のある民間企業等とパートナーシップを結び、共同で新たな発想の事業創出を目指すプログラムであり、衛星コンステレーションを手掛ける企業とのプロジェクトも複数実施している⁽¹¹⁷⁾。

直接的な補助金としては、経済産業省が、衛星コンステレーションに不可欠な基盤技術の開発を支援するための補助事業を開始した⁽¹¹⁸⁾。同事業は、様々なミッションに対応可能な衛星バス（汎用バス）⁽¹¹⁹⁾の開発・実証を支援するもので、バスの汎用化、共通規格化によって、小型衛星の低コスト化、短納期化等が期待されている⁽¹²⁰⁾。

また、ベンチャー企業の育成政策の手法として、アンカーテナンシー（anchor tenancy）がある。アンカーテナンシーとは、民間の産業活動に対して、政府が一定の調達を保証することにより、産業基盤の安定等を図ることである⁽¹²¹⁾。米国では、NASAと宇宙ベンチャー企業との間で多額の契約があり（例えば、2010年から2014年の間に総額約14億ドル）、この一部をSpaceXが受注したことが同社が躍進するきっかけになったと言われる⁽¹²²⁾。日本でも、政府が、地球観測衛星を運用する企業と、あらかじめ撮影データなどを買取る契約を結ぶことで、企業の開発を支援する予定である⁽¹²³⁾。

3 宇宙交通管理

(1) 宇宙交通管理とは

コンステレーション衛星の増加によって低軌道が混雑し、衛星同士あるいは衛星とスペース

(115) 実際に100億円を超える資金の調達に成功した宇宙ベンチャー企業が複数ある。内田敦「宇宙開発の最前線—多様なビジネスの姿と今後の見通し」『金融財政ビジネス business』11088号、2022.8.22, p.14.

(116) 川井孝之「宇宙産業と宇宙航空研究開発機構（JAXA）における知財活用の取り組み」『パテント』72巻3号、2019.3, p.17.

(117) 「J-SPARC: PROJECTS」JAXA 新事業促進部ウェブサイト <<https://aerospacebiz.jaxa.jp/solution/j-sparc/projects/>>

(118) 「令和3年度「産業技術実用化開発事業費補助金（宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業（超小型衛星コンステレーション技術開発実証事業）」に係る補助事業者の公募について」2021.2.5. 経済産業省ウェブサイト <<https://www.meti.go.jp/information/publicoffer/kobo/2021/k210205006.html>>

(119) 通信衛星は、その目的を達成するための機器（ミッション機器）と、それをサポートするための共通機器（バス機器）より構成される。ミッション機器には、中継器（トランスポンダ）と通信用アンテナがあり、バス機器は、衛星内部機器の遠隔監視制御用機器、姿勢及びアンテナ制御用機器、推進系機器、熱制御機器、電源、機体等から成る。情報通信技術研究会編『新情報通信概論 第3版』電気通信協会、2022, p.365.

(120) 日経xTECH 編 前掲注(46), pp.53-55.

(121) 佐藤将史「日本企業は強さを発揮できるのか？—変わる宇宙開発、拡大する宇宙ビジネス（後編）—」2017.10.4. 野村総合研究所ウェブサイト <<https://www.nri.com/jp/journal/2017/1004>>

(122) 日経xTECH 編 前掲注(46), pp.97-98.

(123) 「小型衛星網 開発を支援」『読売新聞』2021.7.19; 内閣府「内閣府における衛星データ利用拡大への取組状況について」（第2回衛星リモートセンシングデータ利用タスクフォース大臣会合資料1-1）2022.3.28, p.2. 内閣府ウェブサイト <https://www8.cao.go.jp/space/taskforce/rs/dai2/siryoul_1.pdf>; 経済産業省の「宇宙産業技術情報基盤整備研究開発事業（SERVIS プロジェクト）」で、アンカーテナンシーによる「衛星データプラットフォーム」の拡充を想定している。「地域の行政・産業の課題解決に向けた衛星データの活用に関する情報・提案を募集します」2021.10.14. 経済産業省ウェブサイト <<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211014001/20211014001.html>>

デブリが衝突するリスクが高まっていると言われる⁽¹²⁴⁾。しかし、異なる組織が所有する2つの衛星が衝突の危険にさらされた場合、どちらに通行権があり、どちらが回避措置を採らなければならないかのルールやガイドラインは存在しない⁽¹²⁵⁾。現在行われている取組は、当事者間で衝突回避行動に関する合意を事前に締結するレベルにとどまる⁽¹²⁶⁾。

こうした状況の中で注目されるのが、宇宙交通管理（Space Traffic Management: STM）の概念である。STMとは、もともと、1999年の米国航空宇宙学会（American Institute of Aeronautics and Astronautics: AIAA）において、宇宙機の運用全体を宇宙交通と捉え、円滑な交通を確保するために一定のルールを導入して管理するものとして提唱された⁽¹²⁷⁾。その後、国際宇宙航行アカデミー（International Academy of Astronautics: IAA）で理論的な整理が行われ、2006年に報告書⁽¹²⁸⁾がまとめられた。同報告書は、STMを実現するためには国際的な政府間協定に基づく包括的なレジーム（体制）が必要であるとし、そのレジームは次の4つの要素から構成されるとした。

- ①必要な情報の確保（必要なデータの定義、データ提供・管理のルール構築、宇宙天気⁽¹²⁹⁾に関する情報システム）
- ②通報システム（打上げ・軌道・軌道変更・再突入の事前通報、衛星の機能終了の通報）
- ③具体的な交通規則（打上げの安全規則、運用中の通行規則、軌道変更の優先権規則、有人宇宙飛行の保護規則、静止衛星・コンステレーション衛星の規則、デブリの低減規則、再突入の安全規則、大気圏・対流圏の環境保護規則等）
- ④履行確保のメカニズム（国際組織の在り方）

STMは、学界では研究が進められたが⁽¹³⁰⁾、国際的な合意を形成するには至っていない。原因としては、表6のような法的・政治的課題があり、国際的にSTMレジームを形成するインセンティブが働きにくいことが指摘されている⁽¹³¹⁾。

(124) 例えば、2019年、欧州宇宙機関（ESA）は、ESAの地球観測衛星が、SpaceXの衛星の1つと0.1%の確率で衝突する（ESAが回避行動を採る基準の10倍の値）という米軍からの通知を受け、軌道修正による緊急回避を行った。この時、SpaceX側は対応しなかったが、通信システムのバグが原因で衝突確率が高まったことを担当者が把握できなかったとしている。Mike Wall, “European Satellite Dodges Potential Collision with SpaceX Starlink Craft,” September 4, 2019. Space.com Website <<https://www.space.com/spacex-starlink-esa-satellite-collision-avoidance.html>> また、2021年にOneWebの衛星が打ち上げられた際、SpaceXの衛星の軌道を通るに当たって衝突確率が1.3%まで高まるのが米軍から両社に通知されたが、OneWeb側が回避操作を行う一方、SpaceX側は衝突確率は対応を要する閾値以下に下がったため危険性はなかったと主張し、回避操作を行わなかった。Jeff Foust, “SpaceX and OneWeb spar over satellite close approach,” April 22, 2021. SpaceNews Website <<https://spacenews.com/spacex-and-oneweb-spar-over-satellite-close-approach/>>

(125) Jeff Foust, “From space traffic awareness to space traffic management,” October 20, 2021. SpaceNews Website <<https://spacenews.com/from-space-traffic-awareness-to-space-traffic-management/>>

(126) 例えば、NASAとSpaceXの合意。“NASA, SpaceX Sign Joint Spaceflight Safety Agreement,” March 19, 2021. NASA Website <<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-spacex-sign-joint-spaceflight-safety-agreement>>

(127) 竹内悠「宇宙交通管理（STM）とは何か」小塚・笹岡編著 前掲注(27), p.266.

(128) Kai-Uwe Schrogl et al., *Cosmic Study on Space Traffic Management*, Paris: International Academy of Astronautics, 2006. 概要は、Kai-Uwe Schrogl, “Space traffic management: The new comprehensive approach for regulating the use of outer space—Results from the 2006 IAA cosmic study,” *Acta Astronautica*, Volume 62 Issues 2–3, January–February 2008, pp.272–276.

(129) 「宇宙天気」とは、地球を取り巻く宇宙空間の状態を指す。落合翔「宇宙天気現象とその災害対策の現状」『調査と情報—ISSUE BRIEF—』1215号, 2023.2.7, p.2. <<https://dl.ndl.go.jp/pid/12511949>>

(130) その後、IAAは、Kai-Uwe Schrogl et al., *Space Traffic Management: Towards a Roadmap for Implementation*, Paris: International Academy of Astronautics, 2018.6の取りまとめなどを行っている。

(131) 竹内 前掲注(127), pp.268–270.

表6 STMの合意形成に向けた課題

法的課題	<ul style="list-style-type: none"> ・宇宙空間には領域に対する国家主権が及ばないこと。 ・宇宙物体の登録をしなくてもその運用に支障はなく、制裁の対象でもないこと。
政治的課題	<ul style="list-style-type: none"> ・宇宙機の能力を制限することが想定されるため（回避行動を採るための推進系機器搭載、運用終了後に廃棄軌道に移動するための燃料搭載等）、1か国のみで導入すると国際競争力が阻害されることが懸念される。そのため導入のタイミングの見極めが困難であること。 ・共通データベースの運営と交通管理規則の監督には中立的な機関が必要であるため、組織の在り方やコスト分担が問題となること。 ・各国がこれまで意図的に共有してこなかった安全保障目的の衛星群の情報が漏れることを、各国安全保障当局が警戒していること。

(出典) 竹内悠「宇宙交通管理 (STM) とは何か」小塚莊一郎・笹岡愛美編著『世界の宇宙ビジネス法』商事法務, 2021, pp.268-270 を基に筆者作成。

国際社会では、宇宙諸条約では対応し切れない宇宙空間の交通問題に対して、ソフトロー⁽¹³²⁾を策定することで対処してきた。それらには、各国が問題意識を共有し解決のための必要な措置を議論する契機になるなどの効果は認められるが、STMのために必要な規則群としては役割が不十分であると言われる⁽¹³³⁾。

(2) 近年の動向

米国及び欧州連合 (EU) では、近年、STMを推進する動きがある。米国では、トランプ政権下の2018年6月、宇宙政策大統領令第3号⁽¹³⁴⁾が発せられた。同大統領令は、宇宙の混雑は米国の宇宙活動の安全性等に課題をもたらしているとの認識の下、宇宙での米国のリーダーシップを維持するために、STMへの新しいアプローチを開発する必要があるとした。そして、新しいアプローチには、国家安全保障の考慮事項を取り入れ、米国の商業宇宙部門の成長を奨励することなどを求めるとともに、商務省において米国主導のSTMの安全基準とベストプラクティスを策定し、国際的な合意形成を進めることとした。また、米国が実施している「宇宙状況監視 (Space Situational Awareness: SSA)」⁽¹³⁵⁾について、民生用データの提供サービスを国防総省から商務省に移すことなどを決めた。

また、EUでは、2022年2月、STMに関して、欧州委員会と外務・安全保障政策上級代表

(132) 締約国及び国際機関の宇宙物体の登録方法に関する勧告 (“Recommendations on enhancing the practice of States and international intergovernmental organizations in registering space objects,” A/RES/62/101, December 17, 2007)、スペースデブリ低減ガイドライン (“Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space,” *op.cit.*(22)) などが該当する。

(133) 竹内悠「国際宇宙交通管理 (STM) レジームによる国際宇宙ガバナンス確立の必要性」『法学政治学論究—法律・政治・社会—』120号, 2019. 春季, p.82.

(134) Presidential Documents, *Space Policy Directive-3, National Space Traffic Management Policy*, June 18, 2018. <<https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2018-06-21/pdf/2018-13521.pdf>>

(135) SSAに広く採用された定義は存在しないが、宇宙物体 (衛星やデブリなど) の検出、追跡、識別、カタログ化を行うなどの能力を指すなどとされる。SSAは世界各国で実施されており、米国が最大のセンサーネットワークによるSSAを実施している。株式会社アストロスケール「令和元年度内外一体の経済成長戦略構築にかかる国際経済調査事業 (宇宙状況把握データプラットフォーム形成に向けた各国動向調査) 調査報告書」2020.2, pp.18, 53-56. 経済産業省ウェブサイト <https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000054.pdf> 米国政府は、合衆国法典第10編第2274条 (10 U.S.C. § 2274) に基づき、各国政府等と協定を結んでSSAデータの共有をしている。

による共同コミュニケーション⁽¹³⁶⁾が発表された。同コミュニケーションは、衛星コンステレーションの普及に伴って低軌道での接近が頻繁に起こるようになり、将来起こり得る事故のリスクが増加していると指摘した上で、EUの「宇宙監視・追跡（Space Surveillance and Tracking: SST）」⁽¹³⁷⁾機能を強化するとともに、EUレベルでSTMに関する基準とガイドラインの開発・実施を促進し、それをグローバルレベルで推進することなどを掲げた。

日本では、令和4（2022）年3月、内閣府特命担当大臣（宇宙政策）が座長となり、総務副大臣、外務副大臣、国土交通副大臣、防衛副大臣等が構成員となる「宇宙交通管理に関する関係府省等タスクフォース」（「スペースデブリに関する関係府省等タスクフォース」を改組した会議体）を設置し、①STMに関する国内外の情報収集と共有、②STMの在り方に関する取組の進捗状況及び課題の把握、③STMの在り方に関する効果的な取組を促進するための方策の検討等を行うこととしている⁽¹³⁸⁾。宇宙空間のルールが未整備のまま、日本の事業者の衛星が不利益を被ることがないためにも、国際的なルール作りに関与していくことが求められる。

4 環境への影響

IIで見たように、衛星コンステレーションがうまく活用されれば、地理的なデジタルデバイドを解消したり、農業・漁業の効率化、防災等に寄与したりする可能性がある。さらに、コンステレーション衛星による地球観測情報は、気候変動対策の有用なデータになることなども期待されている⁽¹³⁹⁾。このように様々な地球課題の解決にも資すると考えられる衛星コンステレーションであるが、衛星コンステレーションを進めること自体について、環境等への影響を懸念する意見も存在する。

例えば、米国会計検査院（Government Accountability Office: GAO）は、2022年9月、大規模な衛星コンステレーションに関するテクノロジー・アセスメント⁽¹⁴⁰⁾の報告書を公表した。この中で、GAOは、衛星コンステレーションが環境等に及ぼす影響を3つのカテゴリー、すなわち、①ロケット打上げや大気圏での人工衛星再突入による排出物の影響があること、また衛星等の残存破片による（地上での）死傷リスクがあること、②衛星の太陽光反射や電波干渉が地球・宇宙観測に影響を及ぼすこと、③宇宙空間の衛星が軌道上デブリと衝突するリスクがあることに分類し、分析した⁽¹⁴¹⁾。そして、これらの影響は、単体の衛星であれば小さいかもし

(136) European Commission and High Representative of the Union for Foreign Affairs and Security Policy, *Joint Communication to the European Parliament and the Council, An EU Approach for Space Traffic Management, An EU contribution addressing a global challenge*, JOIN (2022) 4 final, 2022.2.15. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022JC0004>>

(137) EUでは、SSAを、①宇宙の人工物の監視・追跡（Space Surveillance and Tracking (SST) of man-made objects）、②宇宙天気監視・予測（Space Weather monitoring and forecast）、③地球近傍天体の監視（Near-Earth Objects (NEO) monitoring）の3つの分野に分けている。“Space Situational Awareness.” European Union Agency for the Space Programme website <<https://www.euspa.europa.eu/european-space/space-situational-awareness>>

(138) 「宇宙交通管理に関する関係府省等タスクフォースの開催について」（第1回宇宙交通管理に関する関係府省等タスクフォース大臣会合資料1-2）2022.3.28. 内閣府ウェブサイト <https://www8.cao.go.jp/space/taskforce/debris/stm/dai1/siryoul_2.pdf>

(139) 「衛星観測、気候変動対策への期待」『日経産業新聞』2022.10.28.

(140) 「テクノロジー・アセスメント」とは、科学技術がもたらす様々な社会的影響を学際的に、あるいは様々な利害関係者の観点を踏まえて調査・評価し、その結果を基にして政策課題や対策の選択肢（オプション）を提示することにより、政策立案・政策決定を支援する取組。遠藤真弘「欧州における議会向け科学技術調査—EPTAの活動を中心に—」『調査と情報—ISSUE BRIEF—』975号, 2017.9.7, p.1. <<https://dl.ndl.go.jp/pid/10953005>>

(141) United States Government Accountability Office, *Large Constellations of Satellites: Mitigating Environmental and Other Effects*, 2022.9, p.6. <<https://www.gao.gov/assets/gao-22-105166.pdf>>

れないが、多数の衛星が大規模なコンステレーションで運用された時にはより大きく、場合によっては未知数であるとした⁽¹⁴²⁾。

以下では、GAOの報告書でも指摘されている影響のうち、大気圏の環境への影響と宇宙観測（天文学）への影響について述べる。

(1) 大気圏への影響

人工衛星を運ぶロケットを飛ばすには燃料が必要であるが、宇宙空間には酸素がないため、ロケットには酸素などの酸化剤も搭載する。燃料と酸化剤を合わせて推進剤と呼ぶ。ロケットは、推進剤の種類によって、①固体燃料ロケット（燃料と酸化剤を混ぜ合わせて固めた固体燃料を搭載するロケット）、②液体燃料ロケット（液体燃料と酸化剤を別々のタンクに詰め、燃焼室で2つを混合して燃焼させるロケット）に大きく分類できる⁽¹⁴³⁾。

それぞれの特徴⁽¹⁴⁴⁾としては、固体燃料ロケットは、燃料が扱いやすく、ロケットの設計も単純で済むという長所がある。一方で、燃料に一度着火すると燃焼が止められないため、ロケットの正確な制御・誘導が難しく、また、ロケット全体を高温・高圧に耐える構造にする必要があるため、大型化に向かないという欠点がある。これに対して、液体燃料ロケットは、ロケットの構造が複雑になるほか、推進剤の温度管理（例えば、液体水素の場合はマイナス250度）に注意が必要であるという短所がある。一方で、燃焼力を調整して推力⁽¹⁴⁵⁾を加減できるため、ロケットの細かな制御が可能であることや、推進剤を多く積む場合でもタンクのみを高温・高圧に耐える構造にすればよいため大型化しやすいという長所がある。このような特徴から、現在、各国が打ち上げる大型ロケットは、ほとんどが液体燃料ロケットになっている。

液体燃料ロケットの推進剤としては主に以下がある⁽¹⁴⁶⁾。

- ・燃料：ケロシン、液体水素、液化メタン、ヒドラジン
- ・酸化剤：液体酸素、四酸化二窒素

これらのうち、ヒドラジンと四酸化二窒素の組合せは、長期間の保存が可能で良好な推進性能を発揮するが、ともに毒性が強いため取扱いには特別な注意が必要であり、ロシア、中国、インドで使用されているが、世界的に見ると使用例は少なくなってきた。ケロシン、液体水素、液化メタンの中では、最も扱いやすい燃料は石油系のケロシン（常温で保存可能）であり、液体酸素と組み合わせて宇宙開発の初期から用いられてきた。他方、推進剤として用いられた時に最も高い能力（比推力⁽¹⁴⁷⁾）を有するのは液体水素である。ただし、液体水素は、極低温液体である上、蒸発もしやすく、爆発の危険性も高いため、これを用いたエンジンの開発の難易

[142] *ibid.* 同報告書の中で、GAOは、2022年から2030年までに約58,000機の衛星（2022年時点で活動中の衛星の10倍以上に相当）が新たに打ち上げられる可能性があるという専門家の予測を紹介している。

[143] 谷合稔『ロケットの科学—創成期の仕組みから最新の民間技術まで、宇宙と人類の60年史—改訂版』（サイエンス・アイ新書 SIS-427）SBクリエイティブ、2019、pp.12-14。

[144] 固体燃料ロケットと液体燃料ロケットの特徴は、同上の文献を基に記述した。

[145] ロケットがどれくらいの重さの物を持ち上げることができるかを示す数値。毎秒噴射される燃焼ガスの量と、燃焼ガスの噴射速度を掛け合わせたもので、トンで表される。質量1トンのロケットを上昇させるには1トン以上の推力が必要である。宇宙航空研究開発機構宇宙教育センター 前掲注(10)、p.23。

[146] 推進剤や燃料の特徴は、宮澤政文『宇宙ロケット工学入門』朝倉書店、2016、pp.75-84を基に記述した。

[147] ロケットの推進剤の性能を示す数値。推力を、1秒間に消費される推進剤の質量で割った値で、秒で表される。数値が大きいほど推進剤の性能が良いことを示す。「液体水素+液体酸素」で400～450秒、「ケロシン+液体酸素」で310秒、固体推進剤の「ポリブタジエン+過塩素酸アンモニウム」で280～300秒である。宇宙航空研究開発機構宇宙教育センター 前掲注(10)、p.25。

度は高い。

環境への影響の観点で、各種の推進剤を燃焼させた時に発生する排出物を比較すると、表7のようになる。なお、各推進剤の環境負荷は、燃焼時だけでなく、製造時にも発生する。例えば、液体水素は燃焼時にはクリーンであるが、製造・液化時に大量のエネルギーを要し、二酸化炭素も発生させている⁽¹⁴⁸⁾。

表7 ロケットエンジン推進剤別の大気への排出物（燃焼時）

燃料	酸化剤	二酸化炭素	水蒸気	ブラックカーボン*	アルミナ**	塩素系ガス	窒素酸化物
ケロシン	液体酸素	発生	発生	発生	—	—	発生
液体水素	液体酸素	—	発生	—	—	—	発生
液化メタン	液体酸素	発生	発生	発生	—	—	発生
固体燃料		発生	発生	発生	発生	発生	発生

* ブラックカーボン（黒色炭素）はいわゆる煤（すす）である。

** アルミナは酸化アルミニウムの通称。

（出典） United States Government Accountability Office, *Large Constellations of Satellites: Mitigating Environmental and Other Effects*, 2022.9, p.12. <<https://www.gao.gov/assets/gao-22-105166.pdf>> を基に筆者作成。

前出の GAO の報告書は、ロケット等から大気に排出される物質が環境に及ぼす影響について、次のように述べている⁽¹⁴⁹⁾。

- ・ロケットの打上げや人工衛星の再突入により排出される物質は、成層圏の温度を変化させるとともに、オゾン層を破壊して、地球に到達する有害な紫外線量を増加させる可能性がある。
- ・具体的には、専門家は、粒子の排出（ブラックカーボンやアルミナ）による影響を、気体の排出（水蒸気や二酸化炭素）による影響より懸念している。ブラックカーボン及びアルミナは、それぞれ、成層圏に蓄積され、成層圏の温暖化とオゾン層の破壊を引き起こす可能性がある。また、固体燃料から出る塩素系ガスはオゾン層を破壊するが、塩素系ガスがアルミナと反応することでオゾン層の破壊を更に強めている可能性がある。
- ・これらの潜在的な影響がどれほど重大であるかを判断するには、より多くの情報が必要である⁽¹⁵⁰⁾。政府が採り得る政策オプションとしては、まずは産学官による大気の観測データの収集・共有を進め、その分析結果に基づいて、必要があれば規制を検討するなどの方法が考えられる。

(148) 坂口裕之「宇宙輸送はメタンエンジンにおまかせ！—ロケットの再使用と長期間軌道上運用を可能にするメタンエンジンの開発—」『IHI 技報』57巻3号, 2017, p.27. <https://www.ihico.jp/ihico/technology/review_library/review/2017/_cms_conf01/_icsFiles/afieldfile/2020/04/07/be8f2e98a375d988db8239436895066f.pdf>

(149) United States Government Accountability Office, *op.cit.*(141), pp.12-16.

(150) 現時点での環境に対する影響評価としては、「オゾン層破壊物質に関するモントリオール議定書」の下に設置されている科学評価パネルが公表する報告書（世界気象機関（World Meteorological Organization: WMO）、国連環境計画（United Nations Environment Programme: UNEP）等と連携して4年毎に公表するもの）によると、ロケットの打上げは成層圏のオゾン層全体にわずかな影響しか与えていない（0.1%よりはるかに少ない）とされる。一方で、同報告書は、ロケットの打上げや人工衛星の再突入により排出される物質には未解明な点や不確実性があるため、オゾン層への影響予測の信頼性が制約されていることも認めている。*Executive Summary: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022 (GAW Report No.278)*, Geneva: World Meteorological Organization, 2022, p.43. <<https://www.csl.noaa.gov/assessments/ozone/2022/downloads/executivesummary.pdf>>

GAOの報告書でも引用されている米国海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA) の研究⁽¹⁵¹⁾をはじめ、いくつかの研究で、コンステレーション衛星の打上げの拡大に伴って、特に成層圏に排出されたブラックカーボンがオゾン層の破壊等に寄与することの問題が取り上げられている⁽¹⁵²⁾。ブラックカーボンの排出という点に限れば、例えば、SpaceXがコンステレーション衛星を打ち上げるのに現在使用するロケット (Falcon9) は、ケロシンを燃料とするため⁽¹⁵³⁾、ブラックカーボンによる成層圏への影響が懸念される。GAOの報告書でも指摘されているように、ロケット打上げの環境への影響を検証した上で、必要があれば規制の導入を検討することが求められる。

(2) 天文学への影響

天文学者らでつくる国際天文学連合 (International Astronomical Union: IAU) は、SpaceX等のコンステレーション衛星の光の反射によって観測画像に光の線が映り込み、天体観測が阻害されていることを訴えている⁽¹⁵⁴⁾。

具体的な問題としては、地球への衝突が懸念される「潜在的に危険な小惑星 (Potentially Hazardous Asteroid: PHA)」の観測において、太陽に照らされたコンステレーション衛星が地球に向かってくる小惑星と混同されたり、小惑星を覆い隠したりする可能性があることが指摘されている⁽¹⁵⁵⁾。また、望遠鏡で空の広い角度を長時間露出で観測する場合には、移動する衛星による多数の光の線が映ることは避けられず、仮にソフトウェアによって光の線を除去する対策を実施しても、本来のデータが欠損するなどの問題が生じると言われている⁽¹⁵⁶⁾。IAUは、他の天文学関係団体とともに、「衛星コンステレーションの干渉から暗くて静かな空を守るためのセンター (IAU Centre for the Protection of the Dark and Quiet Sky from Satellite Constellation Interference: CPS)」を設立し⁽¹⁵⁷⁾、衛星の運用事業者に対して影響の緩和措置 (衛星表面を黒くすることや太陽光反射を遮蔽することなど) を講じることを求めている⁽¹⁵⁸⁾。

最も多くの衛星を運用しているSpaceXは、2020年に、日よけのひさしを装着した衛星 (バイザーサット) の打上げを行ったり、太陽光の反射を軽減するように衛星の向きを調整した

(151) “Projected increase in space travel may damage ozone layer,” 2022.6.21. National Oceanic and Atmospheric Administration Chemical Sciences Laboratory Website <https://csl.noaa.gov/news/2022/352_0621.html>

(152) M.N. ロス, L. デイビッド (長尾武彦訳) 「ロケット大量打ち上げ時代の大气汚染」『日経サイエンス』51巻8号, 2021.8, pp.66-69; “Rocket launches more polluting than all other sources.” University College London Department of Geography Website <<https://www.geog.ucl.ac.uk/news-events/news/rocket-launches-more-polluting-than-all-other-sources>>; Robert Ryan et al., “Impact of Rocket Launch and Space Debris Air Pollutant Emissions on Stratospheric Ozone and Global Climate,” *Earth’s Future*, Volume 10 Issue 6, June 2022; Mark Piesing, “The pollution caused by rocket launches,” 2022.7.16. BBC Website <<https://www.bbc.com/future/article/20220713-how-to-make-rocket-launches-less-polluting>>

(153) Janes, *Jane’s space systems & industry*, [Coulsdon]: Janes, 2022, p.160.

(154) 「人工衛星 過密で「光害」 天体観測画像 映り込み」『読売新聞』2022.5.5; “IAU Statement on Satellite Constellations,” June 3, 2019. International Astronomical Union Website <<https://www.iau.org/news/announcements/detail/ann19035/>>

(155) “Background.” International Astronomical Union Centre for the Protection of the Dark and Quiet Sky from Satellite Constellation Interference Website <<https://cps.iau.org/background/>>

(156) *ibid.*

(157) “About CPS.” International Astronomical Union Centre for the Protection of the Dark and Quiet Sky from Satellite Constellation Interference Website <<https://cps.iau.org/about/>>

(158) NOIRLab et al., “Impact of Satellite Constellations on Optical Astronomy and Recommendations toward Mitigation,” p.19. <<https://noirlab.edu/public/media/archives/techdocs/pdf/techdoc003.pdf>>

りするなどの取組を開始した⁽¹⁵⁹⁾。しかし、2022年6月以降、SpaceXは、（ひさしが衛星間通信の邪魔になるとされている）バイザーサット打上げを止めており、天文学関係者からはSpaceXの対策に懸念の声も上がるなど⁽¹⁶⁰⁾、解決に至っていない。

天文学関係者からは、低軌道の衛星が数万機になれば、天文学への影響を回避することが困難であるため、国際的に協力して、衛星の数、光反射率等に適切な規制を設けることが必要ではないかという意見も示されている⁽¹⁶¹⁾。

おわりに

宇宙空間の利用の新たな方法として、近年、衛星コンステレーションの構築が世界的に進められている。衛星コンステレーションによるビジネスでは、一定規模のコンステレーションを構築すれば、多くの国を対象にサービスし得るため、国際的な競争が激しくなりつつある。関係企業への投資規模も世界的に拡大しており、成長産業として大きな可能性を持っている。

衛星コンステレーションの出現によって宇宙に関わるビジネス環境が大きく変化する中、日本政府にも積極的な取組が求められている。例えば、コンステレーション衛星の開発、運用等を行うスタートアップ企業の支援、新しい通信技術である光衛星通信の開発・実用化などで、政府が関与すべき余地も大きいと考えられている。

一方、衛星コンステレーションの課題として、宇宙空間の混雑、地球の大気圏の環境汚染なども懸念されている。これらは、宇宙活動が自由であるという原則の下、米国等の資金力のある民間事業者が急速に宇宙開発を進めてきたことも原因であると考えられる。宇宙空間の適正な利用のために、国際的なルール作りの動きに対して、日本がどのように対応するかの検討を深めていくことも課題と言えよう。

(しみず なおき)

(159) “Astronomy Discussion with National Academy of Sciences,” April 28, 2020. SpaceX Website <<https://www.spacex.com/updates/#starlink-update-04-28-2020>>

(160) Jeff Foust, “Astronomers renew concerns about Starlink satellite brightness,” June 17, 2022. SpaceNews Website <<https://spacenews.com/astronomers-renew-concerns-about-starlink-satellite-brightness/>>

(161) Samantha Lawler et al., “Visibility Predictions for Near-Future Satellite Megaconstellations: Latitudes near 50 Degrees will Experience the Worst Light Pollution,” *The Astronomical Journal*, Volume 163 Number 1, January 2022, pp.1-14.