

東京大学公共政策大学院 研究論文

Master Thesis

Graduate School of Public Policy

The University of Tokyo

宇宙空間の持続可能な利用の実現に向けて

—具体的課題と対応策についての検討—

Toward the sustainable use of outer space

—A study on specific issues and countermeasures—

新見 奈緒子 Naoko Shimmi

学籍番号 51-208033

公共政策学専攻国際公共政策コース修士 2年

指導教官 城山英明教授

Supervised by Professor Hideaki Shiroyama

もくじ	
略語一覧	2
はじめに	3
第1章 持続可能な宇宙利用の必要性	4
1.1 宇宙開発の歴史とアクターの増加	4
1.2 スペースデブリ問題と宇宙空間の混雑	7
第2章 現行の取り組み	16
2.1 国際宇宙法	17
2.2 自主的な遵守	19
2.3 ハーグ行動規範における透明性・信頼醸成措置	21
2.4 SSA による衝突回避	23
2.5 ITU による割当て	24
2.6 現行の取り組みの課題	29
第3章 STM の構想と構築に向けた課題	30
3.1 STM とは何か	30
3.2 STM の構築に向けた課題	33
第4章 宇宙の持続可能な利用に必要な要素と既存制度からの応用可能性	34
a 軍民デュアル技術への対応と TCBMs のアプローチ	34
b 許認可機関の調整メカニズム	35
c 運用者間のコミュニケーション手段	37
d 衛星間の一定の回避行動規則	38
e 科学的データに基づいた議論と問題意識の醸成	40
第5章 日本から発信するベストプラクティスの試み	41
5.1 軌道上サービスとは	41
5.2 「軌道上サービスガイドライン」によるベストプラクティス	43
おわりに	45

参考文献	47
謝辞	53

略語一覧

AIS(Automatic Identification System) 自動認識システム	
ASAT (Anti-satellite weapon) 対衛星兵器	
COPUOS (United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space) 国連宇宙空間 平和利用委員会	
CSpOC (Combined Space Operations Center) 連合宇宙運用センター	
ESA (Europe Space Agency) 欧州宇宙機関	
GEO (Geostationary Orbit) 静止軌道	
GPS (Global Positioning System) 全地球測位システム	
IAA (International Academy of Astronautics) 国際宇宙航行アカデミー	
IADC (Inter-Agency Space Debris Coordination Committee) 国際機関間スペースデブリ調 整委員会	
ICAO (International Civil Aviation Organization) 国際民間航空機関	
ITU(International Telecommunication Union) 国際電子通信連合	
JAXA (Combined Space Operations Center) 宇宙航空研究開発機構	
LEO (Low Earth Orbit) 低軌道	
LTS ガイドライン(Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities) 宇宙活動に関する長期持続可能性ガイドライン	
NASA (National Aeronautics and Space Administration) 米国航空宇宙局	
OOS (On-orbit service) 軌道上サービス	
RPO (Rendezvous and Proximity Operations) ランデブー及び近接オペレーション	
RR (Radio Regulations) 無線規則	
SSA (Space Situational Awareness) 宇宙状況把握	
SSN (Space Surveillance Network) 米国国防総省の宇宙監視ネットワーク	
STM(Space Traffic Management) 宇宙交通管理	
TCBMs (Transparency and confidence-building measures) 透明性・信頼醸成措置	

はじめに

現代社会において、宇宙技術は私たちの日常生活の様々な場面において役立てられている。例えば、天気予報や位置情報、災害対応など多種多様なサービスに用いられており、もはや生活になくてはならない技術とすることができる。宇宙活動は国家の威厳をかけたプロジェクトとして、冷戦期にアメリカとソ連の間の開発競争から始まった。しかし、近年では国家主導型から市場牽引型へと産業の変革が進んでおり、市場の拡大や宇宙活動を行うアクターの増加と多様化によって、スペースデブリをはじめとした宇宙の持続可能な利用が課題となっている。

このような課題に対して、国際宇宙法をはじめとしたいくつかの法規制制度や、宇宙状況把握 (SSA) による監視、国際電気通信連合 (ITU) による周波数と軌道の割り当てなどいくつかのアプローチが存在する。一方で、特に利用需要の急増が見込まれる低軌道においては軌道位置の割り当て制度は確立しておらず、加えて衛星運用主体間での意思疎通手段や具体的な交通規則などといった制度も存在していない。今後、衛星コンステレーションなどにより引き起こされる宇宙活動の増大に対応するためには、国際社会によるさらなる取り組み必要であると考えられる。そこで本稿では、宇宙空間の持続可能な利用についての政策提言を目的として、宇宙の持続可能性には具体的にどのような要素が必要であるのか、またその課題は何かについて明らかにし、実現するためにはどのような対応を行うべきかについて検討したい。

本稿では以下の構成をとる。まず、第1章において持続可能な宇宙利用の必要性について、宇宙開発の歴史の変遷に言及し、その結果としてもたらされた宇宙環境の課題を提示する。第2章では、その課題に対し現行ではどのような取り組みが行われているのかについて論じ、第3章では、宇宙環境などの課題へのアプローチとして、長年にわたり提唱されている宇宙交通管理 (STM) の構想について分析する。そして第4章では、宇宙の持続可能な利用に必要な要素をいくつか具体的に示すとともに、それらの確立に向けて他分野の既存制度からの応用可能性を探る。最後に事例検討として、第5章において、日本の「軌道上サービスガイドライン」によるベストプラクティス発信の試みについて論じる。

第1章 持続可能な宇宙利用の必要性

1.1 宇宙開発の歴史とアクターの増加

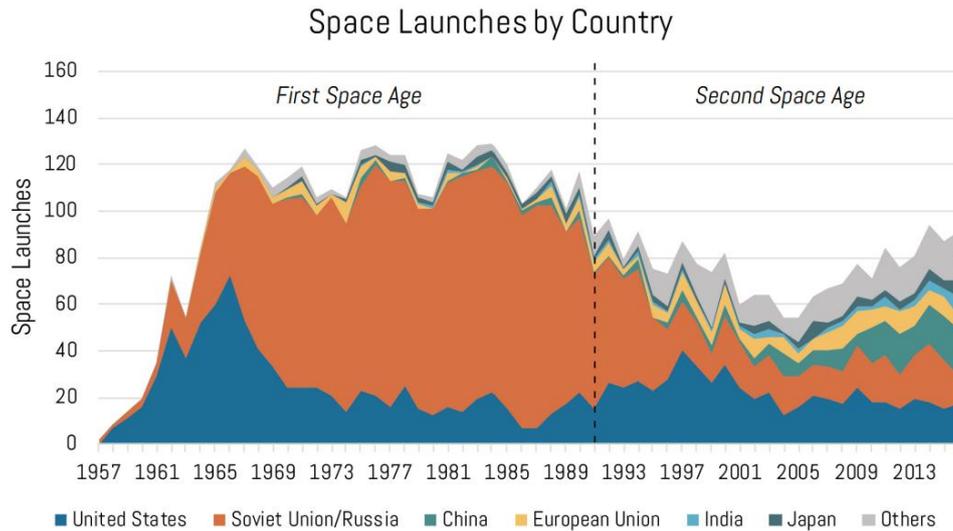
持続的に宇宙を利用していくためにはどのような仕組みが必要なのか。宇宙開発が加速している現在において、この問いはますます重要となってきた。なぜなら、宇宙開発が加速し宇宙空間が混雑する一方で、アクターの増加と多様化によって合意形成が難しくなっているからである。

宇宙開発の誕生は1950年代の東西冷戦の時代に遡る。当時、第二次世界大戦後の国際社会において政治的に対立していたアメリカとソ連は、国の威厳をかけて様々な分野で競い合っていたが、宇宙開発も冷戦期における米ソ対立の手段となった。1957年10月4日、ソ連は世界で初めて人工衛星「スプートニク1号」を打ち上げ、西側諸国に「スプートニク・ショック」と呼ばれる衝撃が走った。さらに追い打ちをかけるように、その1か月後にはスプートニク2号が打ち上げられ、1961年4月にはヴォストーク1号に搭乗したユーリ・ガガーリンが地球の周回軌道を1周することに成功した。ソ連による連続した人工衛星の打ち上げと人類初の有人宇宙飛行の成功は、世界にさらなる衝撃を与え、米国においては宇宙開発が加速する原動力となる。1962年、10年以内に月に行くというアメリカのケネディ大統領の演説によって、アポロ計画が打ち出された。そしてこの7年後の1969年、アポロ11号が人類初の月面着陸に成功するのである¹。

このように、宇宙開発は冷戦という文脈で、米ソ両陣営のイデオロギーと国の威信をかけた競争に牽引される形で始まり、その後は、ヨーロッパや日本、中国、インドなどが次々と参入していった。図1-1は1957年からの国別の打ち上げ数を表している。現在の打ち上げ数は冷戦期から減ってはいるものの、米ソの2カ国が独占していた状況から、打ち上げを行う国がより多様化していることが分かる。

¹ 鈴木一人『宇宙開発と国際政治』、東京：岩波書店、2011年、27-33頁。

図 1-1 国別の打ち上げ数の推移²



宇宙開発に乗り出すアクターが増加している背景には、主に3つの要因が考えられる。第1に、宇宙技術が生活に欠かせないものとなったことである。私たちが日常で触れる様々な情報やサービスは、宇宙技術に依存するものも多い。例えば、携帯電話やカーナビ、航空機などに使われる位置情報は、アメリカの全地球測位システム（GPS）をはじめとした測位衛星から得られるデータに基づいている。また、観測衛星は身近な天気予報や農林水産業に、通信衛星はテレビ放送や電話の一部に使われているほか、金融、海運、教育、災害、環境対策など幅広い分野に渡って宇宙技術が用いられている。さらに、宇宙技術は安全保障でも重要な役割を果たしている。例えば、情報収集やミサイル誘導にも衛星が使われており、その軍事上の重要性から我が国の防衛白書にも宇宙領域についての戦略が掲げられている³。このように、宇宙技術は生活に欠かすことのできないインフラであるということができる。

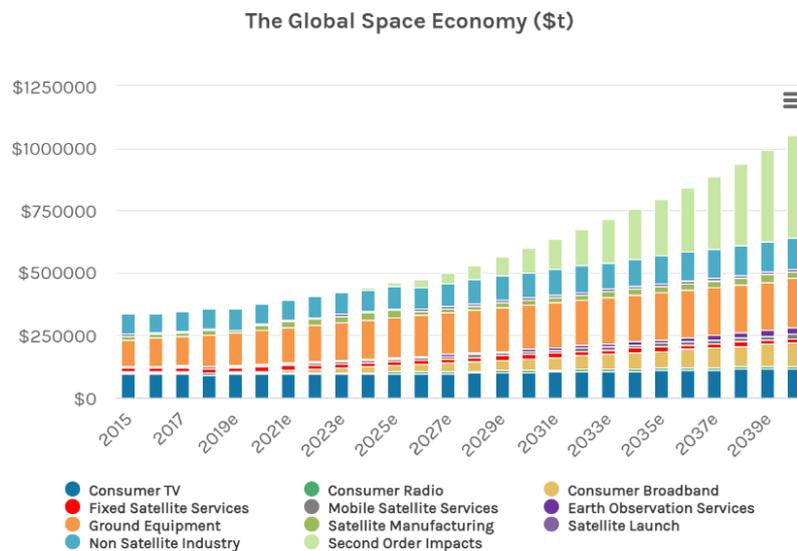
² Harrison, T., Cooper, Z., Johnson, K. and Roberts, T. G. “Escalation and Deterrence in the Second Space Age”, Center for Strategic & International Studies, 2017, p. 5, Figure1.

Space-Track.org のデータベースをもとに作成されているが、すべての打ち上げまたは衛星が登録されているとは限らないことに留意する必要があるとの注意書きがある。

³ 例えば、令和3年版防衛白書では、第I部第3章や第3部において宇宙領域が取り上げられている。

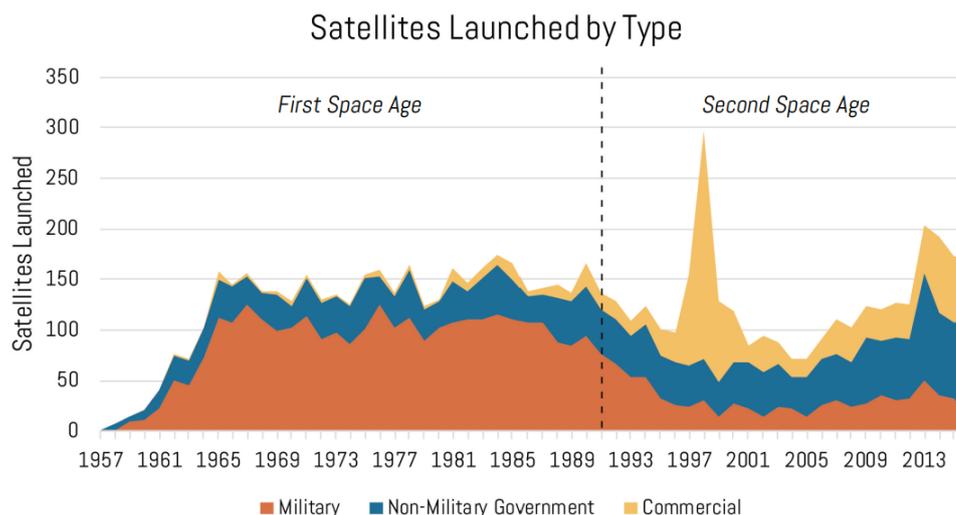
第2に、市場の拡大が見込まれていることである。図1-2は、2040年までの世界の宇宙市場を予想したものである。生活のあらゆる場面に宇宙技術が役立てられていることもあり、20年後には現在の2倍を超える100兆円以上の経済規模に成長する可能性があると予想されている。このように大幅な成長が期待される分野であるため、アクターの増加と多様化が進んでいる。図1-3は衛星の数を種類別に表したものである。冷戦期には軍事目的の衛星が大部分を占めていたが、冷戦の終結とともに割合は減っており、逆に民間事業者による打上げの割合が著しく増えていることが分かる。

図1-2 世界の宇宙経済 (\$t)⁴



⁴ Haver Analytics, Morgan Stanley Research forecasts, “Space: Investing in the final frontier”, July 24, 2020.

図 1-3 種類別の人工衛星の推移⁵



第3に、参入コストが低下していることである。国家の一大プロジェクトとして宇宙開発が行われていた時代と比べると、打上げや衛星開発のコストは低下している。例えば、打上げの相乗りや地上アンテナのシェアサービスも登場しており、これらを利用することで必ずしも自前でロケットを開発したり、アンテナを設置したりする必要がなくなった。また、小型の衛星は大学の研究室でも作ることができるほか、部品や衛星の大量生産を行う企業もあることから、以前よりも容易に宇宙活動に乗り出すことが可能となっている。

このような理由から、現在では発展途上国も含めた多くの国において宇宙活動が行われている。中東やアフリカ、南米地域においても、国内に宇宙開発機関を設けて国家の長期的な宇宙開発ビジョンを発表する国や、そこまで体制が整っていなくとも他国から衛星を購入して運用する国も少なくない。また、国家機関だけでなく、民間企業や大学などの教育・研究機関など、いまや多様な主体が宇宙開発に乗り出している。

1.2 スペースデブリ問題と宇宙空間の混雑

このように、宇宙活動が活発化で毎年たくさんの衛星が打ち上げられていることで、宇宙空間の物体数は増加している。図 1-4 はすべての軌道上における宇宙物体の数の推移、

⁵ Harrison, T., Cooper, Z., Johnson, K. and Roberts, T. G., op.cit., p. 6, Figure 2.

図 1-5 は軌道上の物体数を種類別に示したものであるが、ここ数十年間でその数が急激に増えていることが分かる。

図 1-4 すべての軌道上における宇宙物体数の推移⁶

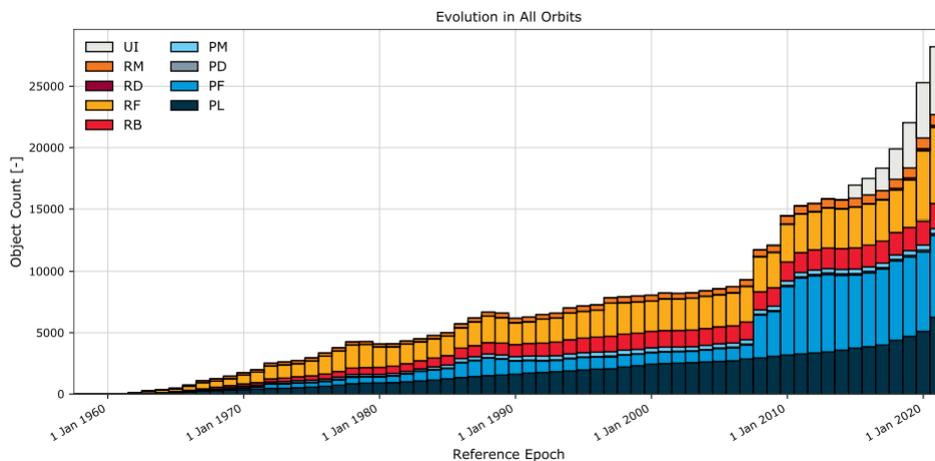
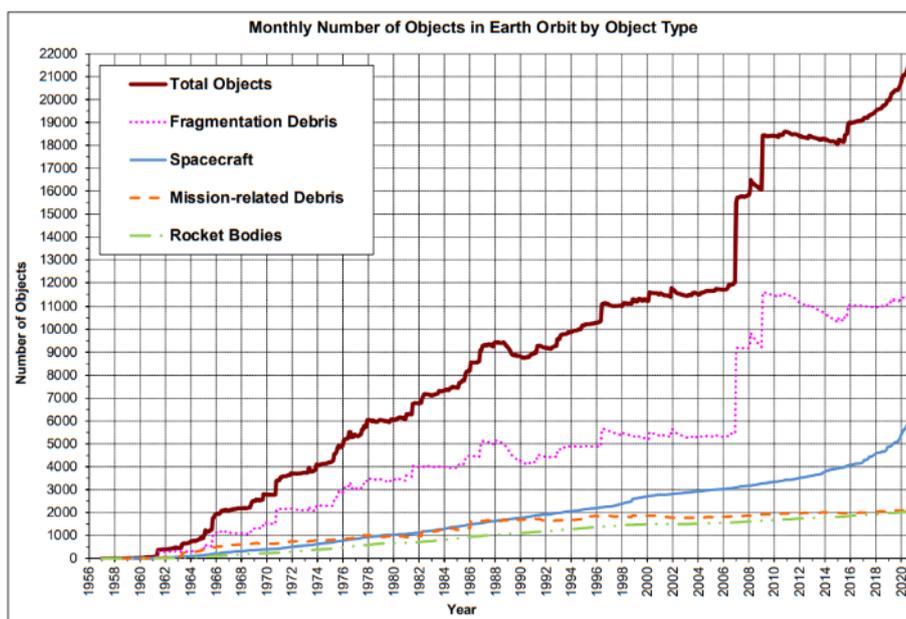


図 1-5 種類別の軌道上の物体数⁷



⁶ European Space Agency “ESA’s Annual Space Environment Report”, 2021, p.4, Figure 1.

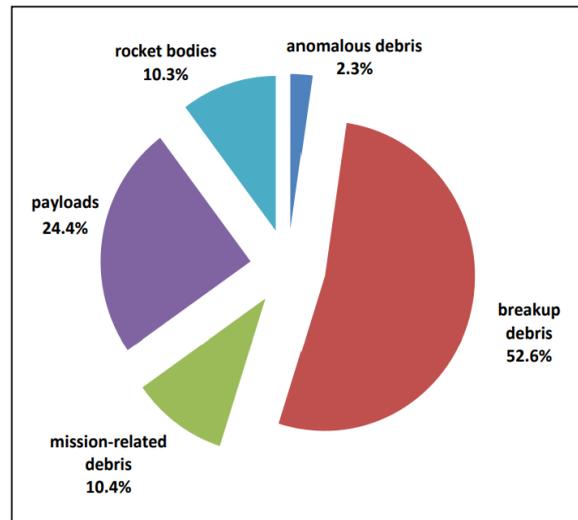
⁷ NASA “Orbital Debris Quarterly News”, Vol. 25, Issue 1, 2021, p.10.

宇宙空間における物体の増加に伴って懸念されているのが、宇宙ゴミとも呼ばれるスペースデブリの問題と宇宙空間の混雑である。スペースデブリには、天然の流星物質と人工の軌道上のデブリの両方が含まれるが、流星物質は太陽の周りの軌道に存在する一方で、ほとんどの人工デブリは地球の周りの軌道に存在する⁸。したがって、本稿ではスペースデブリとは軌道上のデブリを指す。スペースデブリは、発生原因によって大きく2つに分類できる。それは①打上げなどの宇宙活動の中で必然的に発生するものと、②衝突事故や意図的な破壊などで発生するものである。①にはロケットの機体、衛星などのペイロード（荷物）などが含まれる。②には衝突のほか、後に述べる Anti-satellite weapon (ASAT) 実験が起源のものも含まれ、一度に大量のスペースデブリを発生する場合も多い。

図 1-6 は、継続的に観測できるカタログ化されたスペースデブリの種類別割合を示したものである。半数以上のスペースデブリが Break up debris、つまり②の衝突や爆発などにより発生したデブリに分類されることが分かる。次に多いのが、①に含まれるペイロード、そして②に分類される軌道上での操作によって意図的に発生された mission-related debris、①に含まれるロケットの機体と続く。

⁸ NASA, “Space Debris and Human Spacecraft”, May 27, 2021.

図 1-6 カタログ化された軌道上の衛星の相対的な区分（2018 年 7 月 4 日現在）⁹



地上から継続的に観測できるスペースデブリは、米国国防総省などによってカタログ化される。しかし、これには一時的に検知されたものや機密上公表できないものについては含まれないほか、地上から観測できるデブリの大きさは高度 1,000km 付近では 10cm 以上の物体に限られる¹⁰。したがって、現在の技術でスペースデブリの正確な数を把握することは不可能である。それでも、現在 27,000 個を超えるスペースデブリが、国防総省の宇宙監視ネットワーク（Space Surveillance Network :SSN）によって追跡され、カタログ化されている。SSN は、低軌道で直径約 5cm、静止軌道で約 1m の物体を追跡するが、ほとんどは直径 10cm 以上の物体であり、それより小さい物体については National Aeronautics and Space Administration（NASA）が特別な地上センサーと衛星表面の検査を使用して分布範囲を統計的に決定している¹¹。

⁹ NASA “Orbital Debris Quarterly News”, Vol. 23, Issues 1 & 2, 2019, p.7, Figure 2.

図はカタログ化された物体から導き出されたデータであり、デブリの数やパーセンテージはカタログ化されているデブリの数に影響を受けること、また楕円軌道や高度の高い軌道、深宇宙のデブリのカタログ化は困難であることに留意する必要があるとの注意書きがある。また、anomalous debris は計画外の事象で発生したデブリである。

¹⁰ 加藤明『スペースデブリ—宇宙活動の持続的発展を目指して—』、東京：地人書館、2015 年、16、17 頁。地上からの観測は高度数千 km まではレーダー、静止軌道付近は望遠鏡などの工学観測で行われる。

¹¹ NASA “Space Debris and Human Spacecraft”, May 27, 2021.

NASAによると、ソフトボールよりも大きなスペースデブリは約23,000個あり、最大1cm以上のデブリは約50万個、1mm以上のデブリが約1億個、さらに小さなマイクロメートルサイズ（直径0.000039インチ）のデブリが存在するとされている。つまり、カタログ化されたスペースデブリは一部に過ぎず、実際には小さすぎて追跡することができないが有人宇宙飛行やロボットミッションを脅かすには十分な大きさの、より多くのデブリが存在しているのである。これらのデブリと宇宙船の両方が非常に高速（低軌道で約15,700 mph）で移動しているため、小さな破片でさえ大きな損害を引き起こす可能性がある。10cm以上の物体の場合は、SSNによる衝突評価と回避操作で対応されるが、これよりも小さく追跡不可能な物体の場合、例えば国際宇宙ステーションの米国のモジュールでは、1cm未満のデブリの衝撃に耐えられるようデブリシールドを用いることで対応されている¹²。

またスペースデブリと並んで、近年問題となっているのが低軌道（Low Earth Orbit：LEO）の混雑である。低軌道とは宇宙活動でよく利用される主要な軌道のひとつであり、厳密な定義はないものの高度2000km以下の軌道を指す場合が多い。低軌道の他にも代表的な軌道としては、静止軌道(Geostationary Orbit：GEO)や中軌道(Medium Earth Orbit：MEO)があり、各衛星はそれぞれの目的に合った軌道に配置される¹³。

図1-7は、運用される衛星がどの軌道に配置されているかの割合を示している。2021年4月時点では、低軌道が全体の65%、次いで静止軌道が27%を占めており、ふたつの軌道を合わせると全体の90%以上になっていることから需要の高さが伺える。また、図1-8が示すように、中軌道や静止軌道と比べても低軌道の物体数が圧倒的に多く、その数も急増していることが分かる。

¹² NASA “Space Debris and Human Spacecraft”, May 27, 2021.

¹³ 静止軌道は、周期性による分類である。衛星が地球を1周する周期が1日である軌道を地球同期軌道(Geosynchronous orbit: GSO)といい、中でも軌道傾斜角度が0度（赤道上）かつ離心率もゼロである軌道に配置された衛星は、地上から見ると常に同じ場所で静止しているように見えるため、この軌道は静止軌道と呼ばれる。高度としては35,786km±200kmで、常に同じ面の地表を観測できるため非常に重要な軌道となる。そして中軌道は、低軌道と静止軌道の間の高度の軌道のことで、測位衛星などに使われる軌道である。各軌道の詳細については、加藤明 前掲書、10-13頁。

図 1-7 衛星の軌道別割合¹⁴

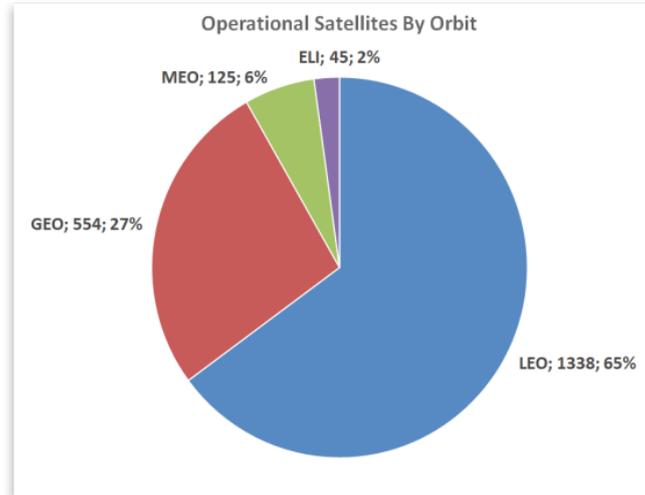
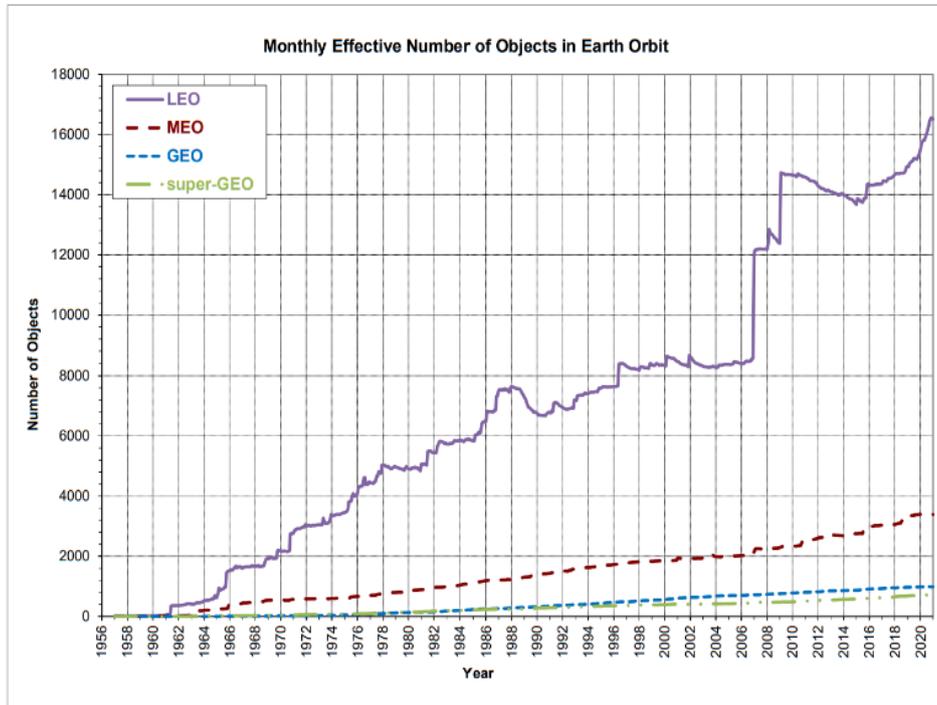


図 1-8 軌道別の物体数の推移（月別）¹⁵

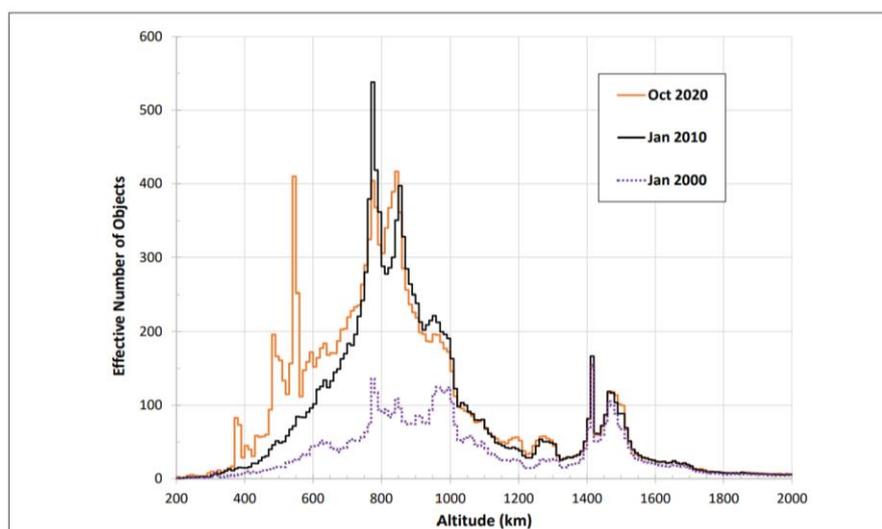


¹⁴ The Air Power Development Center and the Australia New Zealand Space Law Interest Group, “Project ASTERIA 2019 Space Debris Space Traffic Management & Space Sustainability”, Canberra, 2019, 19p, Figure 2.

¹⁵ National Aeronautics and Space Administration “Orbital Debris Quarterly News”, Vol. 25, Issue 1, 2021, p.10.

図 1-9 は低軌道で追跡された物体の推移を示しており、低軌道の中でも、特に高度 800m 付近に追跡可能な物体が集中していることが分かる。

図 1-9 2000～2020 年間に低軌道で追跡された物体の推移¹⁶



後に述べるが、静止軌道については利用の需要が高く、配置できる衛星数も限られていることから、国際機関が各国に軌道位置を割当てることにより、ある程度の持続可能性が担保されている。一方で、低軌道についてはこのような仕組みがないことに加え、近年多くの民間企業が大量の小型衛星を全球を囲むように配置するコンステレーション（日本語で星座の意）計画を打ち出しており、この計画が実現すれば低軌道は大変込み合うことが予想される。表 1-1 は、2019 年時点における、主なコンステレーション計画である。この表にあるだけでも、最大約 26,000 機の衛星が打ち上げられる予定である。

¹⁶ NASA, “Orbital Debris Quarterly News”, Vol. 24, Issue 4, 2020, p. 11.

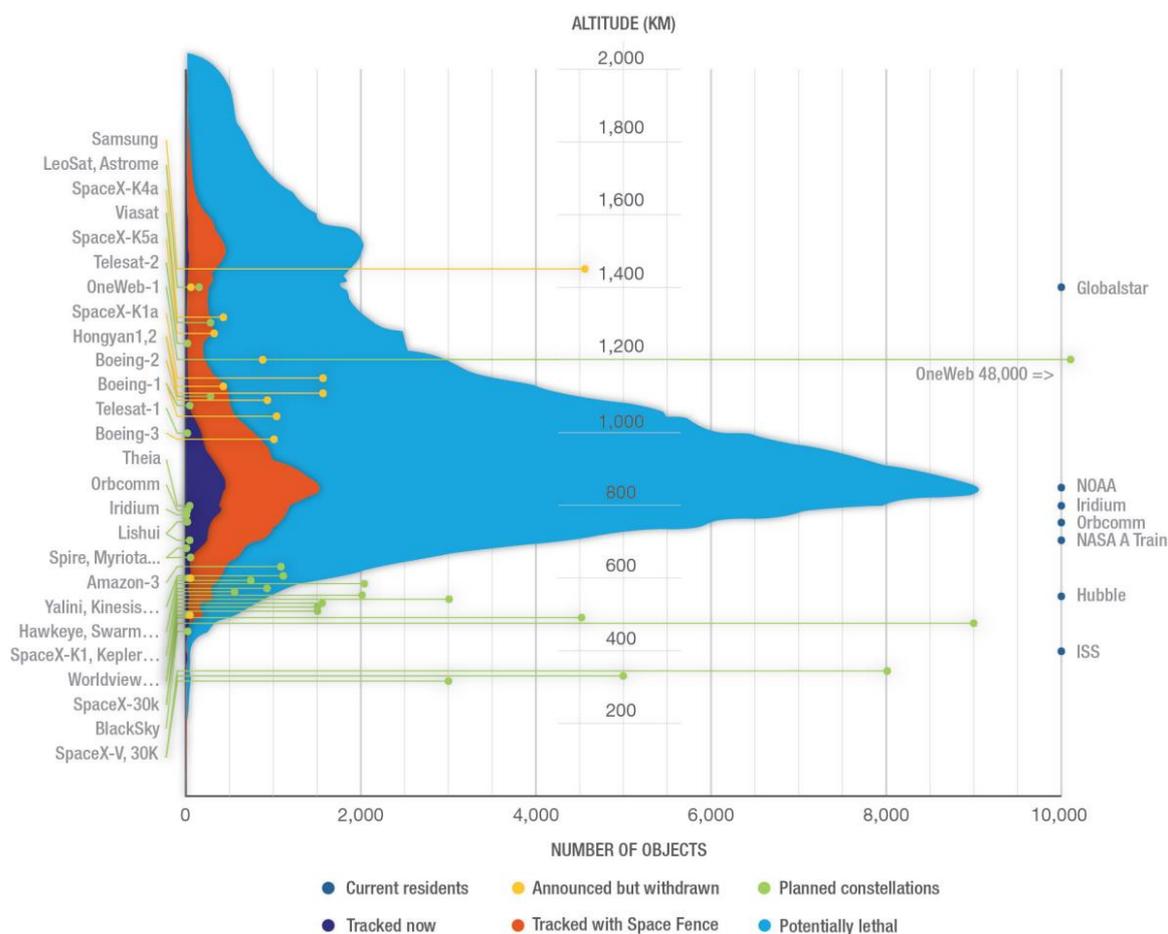
表 1-1 2019 年時点での衛星コンステレーション計画¹⁷

Company	Launch Plans
SpaceX	4,425 satellites in Phase I 7,518 satellites in Phase II
Samsung	up to 4,600 in LEO
Amazon	up to 3,236 LEO satellites
Boeing	up to 2,956 satellites to LEO
OneWeb	up to 1,320 LEO satellites, 720 to MEO
China Aerospace Science & Tech	up to 320 satellites
Russian Space Systems	up to 288 satellites
Sky & Space Global	up to 200 satellites
China Aerospace Industry Corporation	up to 156 satellites
Telsat	two constellations of 117 satellites each
LeoSat Enterprises	up to 108 satellites
Planet	at least 67 satellites in LEO

図 1-10 は、打上げの大幅な増加と宇宙物体の追跡機能の拡張により、衛星数と、追跡可能かつ回避する必要のある物体の両方がどれくらい変化する可能性があるかを示している。左側の紫色の領域は、SSN によって現在追跡されているものを示し、これには、運用中の衛星とデブリの両方が含まれる。オレンジ色の領域は、改善された SSN の追跡による物体の分布を、青い領域は大きさ 1cm までの物体の中で運用終了の可能性のあるものの分布を示す。さらに、右側の濃い青色の点は既存のシステムの高度の位置を、緑と黄色の点は発表された商用コンステレーションの想定される運用量を示す。これらの計画されたすべての衛星が打ち上げられるわけではないが、衛星数の増加の規模を測るうえで参考となる。

¹⁷ The Air Power Development Center and the Australia New Zealand Space Law Interest Group, op. cit., 21p, Table 2.

図 1-10 コンステレーション計画の衛星数と追跡可能な物体の変化¹⁸



この図からわかるように、衛星コンステレーション計画によって、これまでの何倍もの衛星が打ち上がる可能性がある。そもそもこれらの計画は、アップグレードのため寿命の短い衛星を頻繁に入れ替えることを想定しているが、これがさらに衝突リスクを大きくする可能性があるという研究もある¹⁹。各コンステレーションで高頻度にたくさんの衛星が入れ替わるということは、常に低軌道付近で複数の衛星の離脱と再配置が行われていることになり、非常に複雑な交通状況が生じる。

¹⁸ Sorge, M. E., Ailor, W.H. and Muelhaupt, T.J. "Space Traffic Management; Challenge of Large Constellations, Orbital Debris, and The Rapid Changes in Space Operations", Center for Space Policy and Strategy, The Aerospace Corporation, 2020, p.3.

¹⁹ Boley, A.C. and Byers, M. "Satellite mega-constellations create risks in Low Earth Orbit, the atmosphere and on Earth", Scientific Reports, 11, Number 10642, 2021, p.3-4.

例えば、SpaceX は、5～6 年で衛星を軌道外に処理する計画であるが、この作業には 6 か月かかるため、常時衛星の約 10% について軌道を外す作業（デオービット、de-orbit）が行われていることになる。他の会社が同様にデオービットを行う場合、何千もの衛星が同時に混雑した空間をゆっくりと通過することとなり、衝突のリスクが増大する²⁰。現状、衛星運用者間の衝突回避などに関するコミュニケーションは自発的なものに限られていることに加え、監視がきちんと行われているのか、どのようなデオービットを行う予定であるかなど、その過程や基準に必ずしも透明性があるわけではない。

有効な対策が行われないうまま、宇宙活動がさらに活発化した場合、「ケスラーシンドローム」と呼ばれる状況に陥るかもしれないという危惧もある。ケスラーシンドロームとは、1978 年に Donald J. Kessler と Burton G. Cour-Palais によって発表された『人工衛星の衝突頻度: デブリ帯の形成 (Collision Frequency of Artificial satellites: The creation of a debris belt)』という論文で提唱された仮説である。もし当時の速度でスペースデブリが増加した場合、打上げにより宇宙空間に物体が追加されなくても、スペースデブリの数が衝突によって指数関数的に増加するというものである。そして、多くのスペースデブリの発生により、宇宙プロジェクトの遂行自体が困難になってしまうと予想された²¹。ケスラーシンドロームが実際に起こるかについては専門家の間でも議論があるが、欧州宇宙機関 (Europe Space Agency : ESA) が発表したレポートにおいても、このままでは持続可能性を担保できないと危惧されている²²。我々が将来にわたって持続的に宇宙を利用するためには、この問題に国際的に取り組む必要があるといえよう。

第 2 章 現行の取り組み

では、現在のところだれがどのようにして宇宙の持続可能な利用に取り組んでいるのだろうか。この問いに対しては大きく、1) 法的拘束力のある国際法、2) ガイドラインや基準などの自主的な遵守、3) 宇宙状況把握による衝突回避、4) ITU による割り当て、の 4 つ

²⁰ Ibid., p.3-5.

²¹ The Air Power Development Center and the Australia New Zealand Space Law Interest Group, op. cit., p. 6.

²² ESA, op. cit., 2021, p7.

の取り組みから説明することができると考えられる。以下では、それぞれどのような内容や特性があるのか、またどのような課題が残されているのかについて明らかにしたい。

2.1 国際宇宙法

まず、国家間を規律するものとして5つの国際宇宙公法条約があげられる。年月の古い順に、1967年の「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（宇宙条約）」、1968年の「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（宇宙救助返還協定）」、1972年の「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（宇宙損害責任条約）」、1975年の「宇宙空間に打ち上げられた物体の登録に関する条約（宇宙物体登録条約）」、そして1979年の「月その他の天体における国の活動を律する協定（月条約）」である²³。これらは1958年に設立された国連宇宙空間平和利用委員会（COPUOS）で策定され、国連総会で採択された。

このうち最重要であり、すべての宇宙活動の原則となるのが宇宙条約である。宇宙条約第1条には、宇宙空間における探査及び利用はすべての国の利益のために行なわれるもので、全人類に認められる活動分野であること、平等かつ国際法に従い自由に探査及び利用できること、天体のすべての地域への立ち入りは自由であること、そして科学的調査における国際協力を推進しなければならないことが定められている。

さらに、だれが責任を負うかという問いに対する答えとして、宇宙条約にはこの分野に特徴的な国家への責任集中の原則が明記されている。この原則は、第6条において「条約の当事国は、月その他の天体を含む宇宙空間における自国の活動について、それが政府機関によって行われるか非政府団体によって行われるかを問わず、国際的責任を有し、自国の活動がこの条約の規定に従って行われることを確保する国際的責任を有する。（中略）非政府団体の活動は条約の関係当事国の許可及び継続的監督を必要とする」と定められている。つまり、国内の宇宙活動についてはすべて国家が責任を負い、活動の許可や監督についても国際的な第三者機関などではなく国家が担うという原則である。

²³ 年数は署名開放年。

しかし、活動の許可や監督業務の担い手である国家の間で、調整が行われる仕組みはなく、持続可能性に関わる宇宙機器の設計、運用、打上げなどが適切に行われているかについての判断も各国が行うこととなる。したがって、特に混雑が懸念されている低軌道に対して、衛星数の国際的な調整などが行われることもなく、国から許可が下りさえすれば早い者勝ちで軌道が利用されてしまうのが現状である。

なお、宇宙条約のほかに、宇宙の持続可能な利用に特に関連している条約としては、宇宙損害責任条約と宇宙物体登録条約がある。このうち宇宙損害責任条約は、宇宙空間での衛星同士の衝突やスペースデブリとの衝突で発生した損害がどのように扱われるかについて参考となる。

宇宙条約に定められた国家への責任集中の原則に基づき、他国に対する宇宙物体による損害は国家が賠償責任を負う。ただし、その損害責任の性質は地表・航空機とそれ以外とで分けられる。地表において引き起こした損害または飛行中の航空機に与えた損害は、宇宙損害責任条約の第2条において無過失責任を負うと明記されている一方で、地表以外の場所については第3条において過失責任と定められている。このような違いは、地表以外の損害の場合、加害国、被害国ともにリスクの大きい宇宙活動を行っているので過失責任で十分であるという考え方に基づいている²⁴。したがって、宇宙の持続可能性を脅かすと考えられる宇宙空間での衝突の場合は、どちらも宇宙活動を行っている国であることから過失責任を負うこととなる。

また、グローバル化している宇宙産業において、活動が複数の国をまたがる場合も少なくない。そこで問題となってくるのが、誰が当事国となるのかという点である。宇宙物体登録条約では、「打上げ国」が保管する登録簿に記入するとともに、国連事務総長に通報することが定められている。しかし、実際には国家が損害責任を負うことを恐れ、条約に加盟しない国も多く、すべての宇宙物体が登録されているわけではない。この状況を改善するために、国連総会において2004年に「打上げ国」概念適用、2007年に「国家・国際組織の宇宙物体登録実行向上勧告」が採択された。それでも未登録の宇宙物体もあること

²⁴ 小塚荘一郎、佐藤雅彦編『宇宙ビジネスのための宇宙法入門』、第2版、東京：有斐閣、2018年、52頁。

から、宇宙物体登録条約ではだれが宇宙での損害の責任を負うかについて特定するには不十分であるだろう²⁵。

さらに、宇宙関連条約がスペースデブリに適用されるかについて重要なのが、スペースデブリの法的位置づけである。すなわち、スペースデブリは宇宙物体に含まれるのか否かという点である。この問題については、専門家の間でも意見が分かれるが、細分化してしまったなどの理由で、「打上げ国」の特定が難しいデブリも多い²⁶。そのようなスペースデブリは管轄権が明確でないことから、関係のない第3者が処理することができるのかも法的に明らかでない。

2.2 自主的な遵守

法的拘束力がある国際法に対し、自主的に遵守を求める方法のひとつとしてガイドラインの作成がある。スペースデブリの問題に対する最初のガイドラインとして、2002年に Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC) で採択されたのが「スペースデブリ低減ガイドライン」である。IADC の設立のきっかけとなったのは、1986年のアリアンロケットの爆発事故によって開始された NASA と各宇宙機関の協議であった。以前にも、各国の宇宙機関などによって設定された独自の規範が存在したが、IADC でガイドラインが採択されたことにより、参加機関はガイドラインに沿った設計、製造、打上げ、運用、処理を行うことが求められるようになった。また、IADC のガイドラインでは、低軌道の衛星に対し、運用終了後 25 年以内に大気圏に再突入させ、焼却させるというデオービッドの規定も勧告された。このガイドラインは技術基準であるため、新技術に対応できるようその後も暫時的に修正が行われている²⁷。

2001 年には、COPUOS においても国連加盟国が自主的に従うスペースデブリガイドラインを作成することとなった。しかし起草は IADC に依頼されたため、COPUOS のデブリ低減ガイドラインも IADC と同じような基準となった。ガイドラインは 2007 年に

²⁵ 小塚荘一郎、佐藤雅彦編 前掲書、79-82 頁。

²⁶ 青木節子、『日本の宇宙戦略』、慶応義塾大学出版、2006 年、211 頁。

²⁷ 小塚荘一郎、佐藤雅彦編 前掲書 66-68 頁。

COPUOS で採択されたが、具体的な実施方法などについての記載はなく、最後には IADC ガイドラインやその他の文書を参照するようとの注意書きがある²⁸。

また、2019 年 6 月には約 10 年に及ぶ期間を経て、COPUOS において LTS ガイドライン (Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities) が採択された。これは 21 の項目から成り、スペースデブリの低減や運用の安全などに対し、加盟国が自主的に取り組むことを促す。COPUOS では、宇宙活動を長期的に持続可能なものとするために自主的に遵守すべきガイドラインの制定を目指して、2010 年にワーキンググループが設置されたが、21 のガイドラインについては議論が一致したものの、7 つのガイドラインについては一致できず、2018 年 6 月に一旦ワーキンググループが終了してしまった。しかし、日本がリーダーシップをとり、2019 年の本委員会初日に米国、カナダ、フランスの 3 カ国と共に、21 のガイドライン実施に関するワーキンググループを設置するという共同提案を行った。そして委員会会期中の議論を経て、21 の LTS ガイドラインを正式に採択するとともに、科学技術小委員会の下にガイドラインの実施および新たなガイドラインの可能性等を議論するワーキンググループを設置することが決定された²⁹。

この LTS ガイドラインの交渉が難航したことからも、国際的な合意形成が難しくなっていることが伺える。LTS ガイドライン以前にも、自主的な国際的枠組みである International Code of Conduct for Outer Space Activities (ICoC) の交渉が EU 諸国の提案によって行われたことがあった。これは参加国に対し、宇宙空間における運用、スペースデブリの低減、宇宙活動の通知、情報共有などを提供するメカニズムであったが、国際的な合意が得られず失敗に終わっている³⁰。多国間での合意形成が困難になった理由のひとつとして挙げられるのが、第 1 章でも述べたアクターの増加である。例えば、1958 年時点では 18 カ国であった COPUOS の加盟国は、現在 95 カ国まで増えており、この数字からも交渉の複雑化が伺える³¹。

²⁸ 同上 68、69 頁。

²⁹ 外務省、報道発表「国連宇宙空間平和利用委員会 (COPUOS) 本委員会 宇宙活動の長期持続可能性ガイドラインの採択」、2019 年 6 月 22 日。

³⁰ European Space Policy Institute “Towards a European Approach to Space Traffic Management”, Vienna, 2020, p. 57, 58.

³¹ United Nations Office for Outer Space Affairs “Committee on the Peaceful Uses of Outer Space: Membership Evolution”.

そのため近年では、難航する国家間の交渉に対して、非政府組織の取り組みが挙げられるが、その一例として、標準化団体による安全と持続可能な宇宙活動のための国際標準の作成である。特に非政府機関である国際標準化機構 (ISO) では、宇宙に関する2つの分科委員会が存在し、安全と持続可能性に関する複数のワーキンググループも設置されている³²。

また、民間事業者団体からもいくつかの取り組みが行われている。例えば米国にオフィスを構える Secure world foundation (SWF) は、宇宙空間の安全で持続可能かつ平和的な利用の達成を促進することをビジョンとして掲げており、問題に対する意識を高めるための様々な活動を行っている³³。また、CONFERS (Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations) は、米国防衛高等研究プロジェクト庁 (DARPA) と連携した産業界主導の団体であり、政府や産業のベストプラクティスを活用して、軌道上サービス (On-orbit service : OOS) とランデブー及び近接オペレーション (Rendezvous and Proximity Operations : RPO) の拘束力のないコンセンサス形式の技術および運用基準を研究、開発、公開することを目的としている³⁴。

2.3 ハーグ行動規範における透明性・信頼醸成措置の取り組み

自主的な遵守の実施例のひとつとして挙げられるのが、ハーグ行動規範である。安全保障に関わる技術の規制が困難であることは、これまでの軍縮や核の廃止の交渉からも明らかであり、さらに多国間の取り決めとなれば2国間や限られた国家間での調整に比べ、より複雑になることは先に述べた通りである。宇宙のルール作りが難航しているのも、安全保障の論点に関わっていることが最大級の要因のひとつである。この問題に対するひとつの打開策となるかもしれないアプローチが、ハーグ行動規範に用いられている、透明性・信頼醸成措置 (Transparency and confidence-building measures: TCBMs) である。

TCBMs とは、2013年に発表された国連総会の宇宙活動における透明性と信頼醸成措置に関する政府専門家のグループの報告書において、「政府が相互理解と信頼を生み出し、誤解や誤算を減らし、それによって軍事的対立を防ぎ、地域的および世界的な安定を促進

³² European Space Policy Institute, op. cit., p. 60, 61.

³³ Secure World Foundation “Who We Are”.

³⁴ CONFERS, “About”.

することを目的として情報を共有できる手段。また、国家の平和的意図に関する信頼の構築を支援し、国家が理解を深め、意図の明確さを高め、経済と安全保障の両方の分野で予測可能な戦略的状況を確認するための条件を作り出すのを助けることができる。」と定義されている³⁵。TCBMs は特に冷戦期の米ソ間における核軍縮、核管理における交渉で用いられ、米ソ間のパイプラインの設置や 1987 年の中・短射程ミサイル廃棄条約（INF 全廃条約）、その後の戦略兵器削減条約（START）に繋がった。また、多国間においては、核軍縮の取り決めとして、核兵器の不拡散に関する条約（NTP 条約）とレジームの形成が行われた。

宇宙においては、TCBMs を用いた軍事的な多国間合意として「弾道ミサイル拡散に対するハーグ行動規範（ハーグ行動規範）」が 2002 年に発効した。これは、ミサイル技術管理レジーム（MTCR：Missile Technology Control Regime）を補完するもので、MTCR とともに弾道ミサイルの拡散に関する多国間の取り組みである。この規範は、既存の国内および国際的な安全保障の取り決めと、軍縮・不拡散メカニズムの強化に貢献することを目的としており、法的拘束力を持つものではなく、あくまでも参加国の政治的意思を示す自主的なものとなっている³⁶。

その主な内容は、弾道ミサイルの拡散の防止・抑制すること、宇宙ロケット計画を弾道ミサイル計画の隠蔽に利用しないこと、弾道ミサイルの開発・実験・配備を最大限可能な限り自制すること（可能な場合には弾道ミサイル保有の削減を含む）、軍縮・不拡散条約の義務や規範に反して大量破壊兵器の開発・取得を行っている可能性がある国の弾道ミサイル開発計画を貢献・支持・支援しないこと、弾道ミサイルや宇宙ロケットの事前発射通報、政策に関する年次報告などを行うことである³⁷。ロケット打上げ技術と弾道ミサイルの発射技術は酷似しており、たとえロケットを打ち上げたとしても、他国はミサイルが発射されたのではないかという疑念を抱く可能性がある。そこで、メンバーは弾道ミサイルとロケット打上げに対する「打ち上げ前通知」を自発的に提供することで、打上げの意図が他国を脅かすものではないことを示し、なおかつ前年に発射された弾道ミサイルとロケ

³⁵ General Assembly, “Group of Governmental Experts on Transparency and Confidence-Building Measures in Outer Space Activities”, 2013, 12p. 筆者訳。

³⁶ The Hague Code of Conduct, “What is HCoC”.

³⁷ 外務省、「弾道ミサイルの拡散に立ち向かうためのハーグ行動規範（Hague Code of Conduct against Ballistic Missile Proliferation: HCoC）概要」。

ットの数などを含む、自国政策の年次宣言の提出を約束することで、透明性の確保と信頼醸成を行うのである。この行動規範には現在 143 か国が署名しており、広く合意された枠組みとなっている。オーストリアが事務局としての役割を果たしており、意思決定機関である定例会議は通常毎年開催されている³⁸。

2.4 SSA による衝突回避

衛星同士、または衛星とスペースデブリの衝突を回避するための対策として宇宙状況把握 (Space Situational Awareness : SSA) が行われている。Aerospace Corporation によると、SSA とは「宇宙で物体を追跡、識別し、その軌道を確認し、また物体が運用されている環境を理解し、将来の位置と運用に対する脅威を予測する方法」と定義される。SSA データは、衝突回避を可能にする潜在的に危険な接近について運用者に警告するために使用され、すべての宇宙安全および宇宙交通管理 (STM) 活動の基盤となると説明されている³⁹。また、欧州連合衛星センター (European Union Satellite Centre : SatCen) では、一般的に SSA は、宇宙での人工物の監視および追跡 (Space Surveillance and Tracking : SST)、宇宙天気監視と予測、地球近傍天体の監視 (自然の天体のみ) の 3 つの要素を含むとされている⁴⁰。

最大規模で SSA を行っているのは、米国の連合宇宙運用センター (Combined Space Operations Center : CSpOC) であり、宇宙物体のカタログの作成や接近評価、位置や速度の計算、大気圏再突入の予測支援や評価などを行っている⁴¹。また、欧州においては、2014 年に欧州連合によって SST の支援枠組みである EUSST が創設され、7 カ国がコンソーシアムを作り SST システムを運用している。そのデータは SatCen の運用するポータルにて一般に公開されている⁴²。日本では宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が、茨城県と岡山県にレーダーや解析施設を設置し、SSA に取り組んでいる⁴³。さらに近年では、民間企業

³⁸ The Hague Code of Conduct, “What is HCoC”.

³⁹ Aerospace Corporation, “Space Situational Awareness”.

⁴⁰ European Union Satellite Centre “Space Situational Awareness (SSA)”.

⁴¹ 加藤明 前掲書、52、53 頁。

⁴² EU SST, “What is EU SST?”.

⁴³ JAXA, 「宇宙状況把握 (SSA) システム」。

による SSA サービスも登場した⁴⁴。衛星運用者はこのようなデータベースやサービスを利用して、必要に応じて回避行動を行っている。

しかし、SSA の評価に用いられるデータやアルゴリズムは十分ではなく、最大規模である米国の宇宙状況把握ネットワーク (Space Surveillance Network: SSN) による接近警告もあまり正確ではない。このまま、特に大型コンステレーションが構築された場合、人間では処理できないほど多数の警告が発せられる可能性がある。また、それぞれで運用されるカタログのデータベースは統一されておらず、例えばどのタイミングで評価するのか、どれくらいの衝突確率で警告を発するのかなどについても決められていない。運用者によって監視の基準も異なるという問題に加え、運用者同士のコミュニケーション手段は確立されておらず、意思疎通が図れなかった場合に備えた一定の回避行動の規則もない。

2.5 ITU による割当て

先述の通り静止軌道は衛星を配置する需要が高いにも関わらず、その容量が非常に限られているため、以前から国際電気通信連合 (International Telecommunication Union : ITU) により各国に割り当てが行われてきた。ITU は情報通信技術の専門機関であり、193 の国と地域、700 以上の連合員 (科学・工業団体、公的運営体や民間業者、地域機関や国際機関、市民社会機関や学術団体など) によって構成されている。ITU の歴史は、1865 年のパリにおいて 20 人の創設者が最初の国際電信条約に署名したところから始まる。当時、電気信号が国境を超えて商業的に使われ始め、国際的なルール化の必要があったからである。その後、協定の改正を監督するために万国電信連合が設立され、無線通信が誕生したことで無線規則 (RR: Radio Regulations) が作られた。万国通信連合をもととした組織は、1932 年にマドリードで開催された会議において国際電気通信連合に名前を変え、同時に国際電信条約と国際無線電信条約を統合した国際電気通信条約が作られた。第二次世界大戦後の 1947 年には、国連の専門機関となり、宇宙開発が進むにつれて周波数と衛星の分野についても担当することとなる。

電波周波数スペクトルと静止軌道は限られた天然資源であり、干渉を回避する方法で公平に共有する必要があったことから、1963 年に ITU は宇宙通信のための臨時行政会議を

⁴⁴ 例えば Analytical Graphics, Inc. AGI “ODTK Space Situational Awareness”.

開催し、様々なサービスに周波数を割り当てた。地球同期衛星の実験を経て、初の静止衛星(Syncom-3)が打ち上げられたのは翌年の1964年のことであった。また、その後の会議において衛星の軌道スロットの使用に関する規制が設けられた⁴⁵。

現在、ITUの中で周波数と静止軌道を管理しているのが、ITU-Rと呼ばれる部門である。ITUは3つの専門分野に分かれており、そのうちのひとつであるITU-RはRRに定められた規則に沿って国際調整を行うことに加え、3~4年ごとに国際会議を通してRRの見直しを行う。

国際調整の一般的な流れはRRに定められている通り、衛星の運用を希望する主体は他国との交渉窓口となる自国の主管庁に計画を申請する。各国の主管庁は、使用を計画する周波数割当が他国の無線通信に有害な干渉を与えるおそれがある場合や、国際通信に使用される場合、また調整手続きが必要な場合、国際的な認知を得たい場合に該当する際は、ITUへ通告し国際周波数登録原簿(MIFR)に記録する必要がある。

さらに、混信問題が生じやすい衛星通信や短波放送、中波放送については、ITUへ通告する前に関係国との間で技術的な調整が行われる。ITUは干渉の有無や国際調整が完了しているかなどを審査し、問題がなければMIFRに登録する。特に衛星通信網の国際調整については、まず衛星通信網の使用開始2~7年前に衛星計画の技術的な概要資料を主管庁からITUに送付する必要がある、これを受けたITUが全ての主管庁へ公表する。そして、その影響を与えるまたは受ける衛星通信網を有する全ての主管庁との調整が行われる。これには衛星と地上局の間のダウンリンクやアップリンクの干渉の他、地上局同士の通信干渉なども含まれる。その後、衛星通信網の周波数割当を使用開始の3年前を超えない時期にITUに通告し、通告された周波数割当についてRRの規定に合致し、所要の国際調整が完了しているものはMIFRに登録され、国際的な認知が得られることになる⁴⁶。

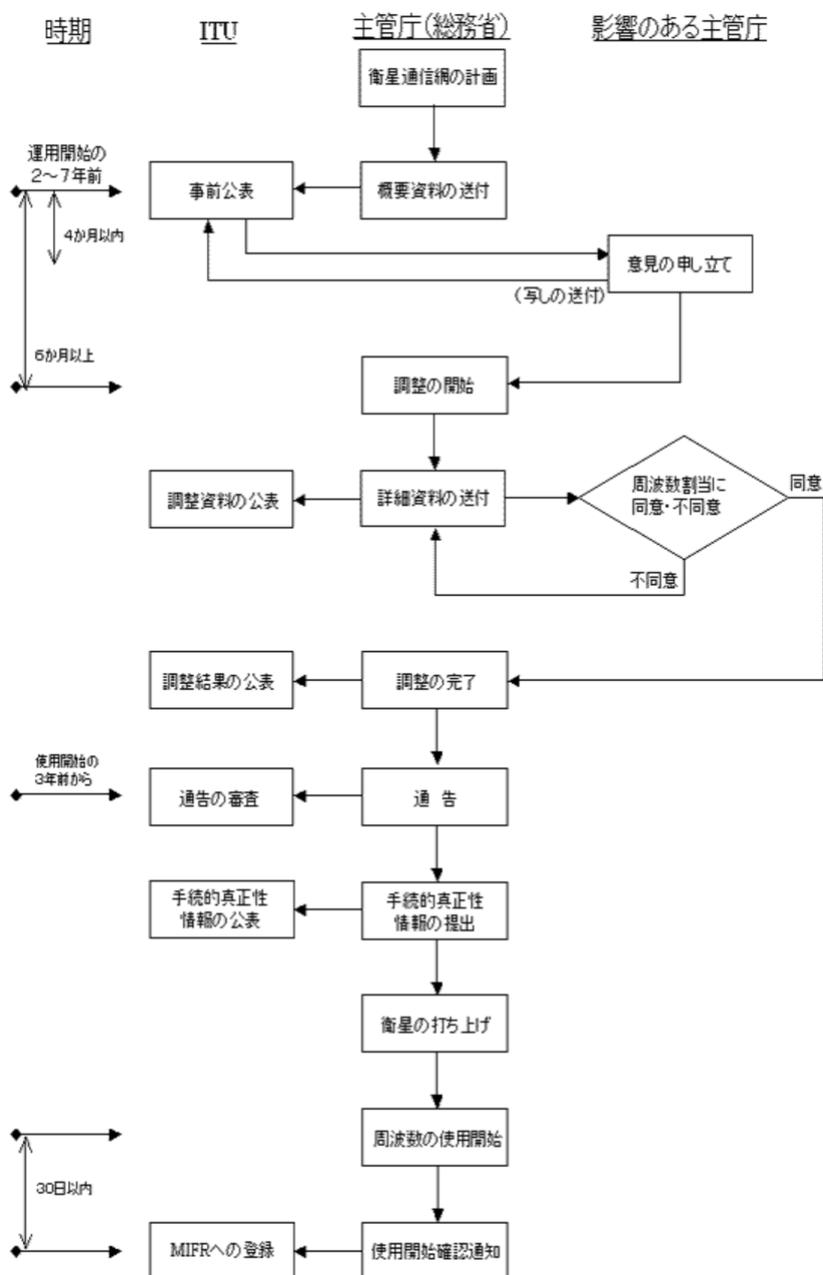
⁴⁵ ITUの歴史については、国連広報センター「国際電気通信連合」。

International Telecommunication Union “Overview of ITU's History”.

⁴⁶ 総務省「周波数の調整について」。

総務省『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年2月。

図 2-1 一般的な衛星通信網の周波数調整の流れ⁴⁷



衛星通信網の国際調整の方法は、衛星通信網の種類（静止衛星か非静止衛星か）や使用周波数および業務の種類などに応じて様々な様態がRRにおいて定められているが、これ

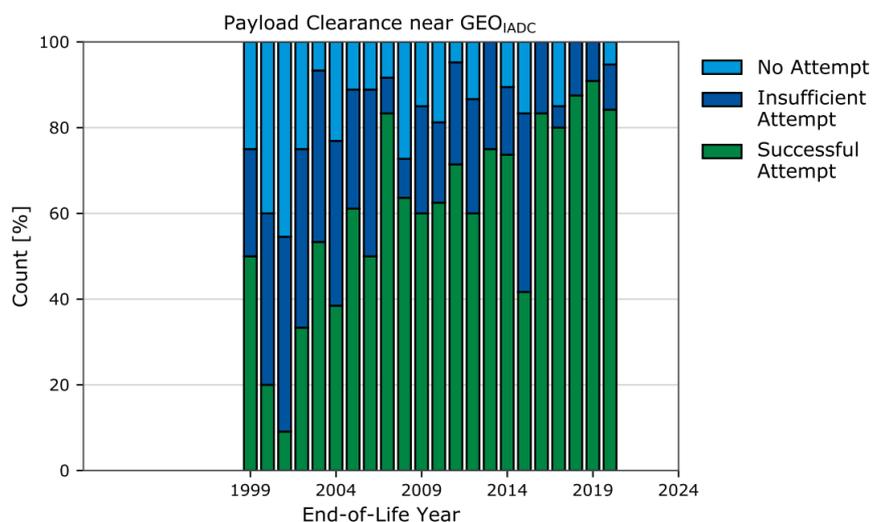
⁴⁷ 総務省「周波数の調整について」、図1より。

らは「国際プラン方式」と「先着優先方式」がある。「国際プラン方式」における調整は、主に放送衛星に適用される方式で、すべての国が一定数のチャンネルを確保できるようあらかじめ国際的割当計画を策定する。一方で、「先着優先方式」は主に通信衛星に適用され、先着順に周波数の優先利用権を認める方式である。

このように、周波数や静止軌道の割り当てはITUが担っており、公平性などについての議論はあるものの、持続可能性についていえば上手く機能していると言えるだろう。しかし、近年大型コンステレーション計画によって問題となっている低軌道の割り当てについてはこうしたルールは存在しないため、先述の通り国際的調整を欠いた先着順となってしまっているのである。

またデブリの低減措置について、ITUはIADCによってスペースデブリ低減ガイドラインが勧告される以前から、静止軌道についての勧告を作成していた。具体的には1993年の時点で、衛星の機能終了後は300km以上静止軌道から離れた軌道に移動することを勧告しており(ITU-R, S.1003)、IADCによるガイドライン勧告後はその規則を取り入れてより効率的な距離に変更した(ITU-R, S.1003-1)⁴⁸。図2-2は静止軌道におけるペイロード除去の割合を示したものであるが、近年では8割近くのペイロード除去が成功していることが分かる。

図 2-2 静止軌道付近におけるペイロードの除去の割合⁴⁹

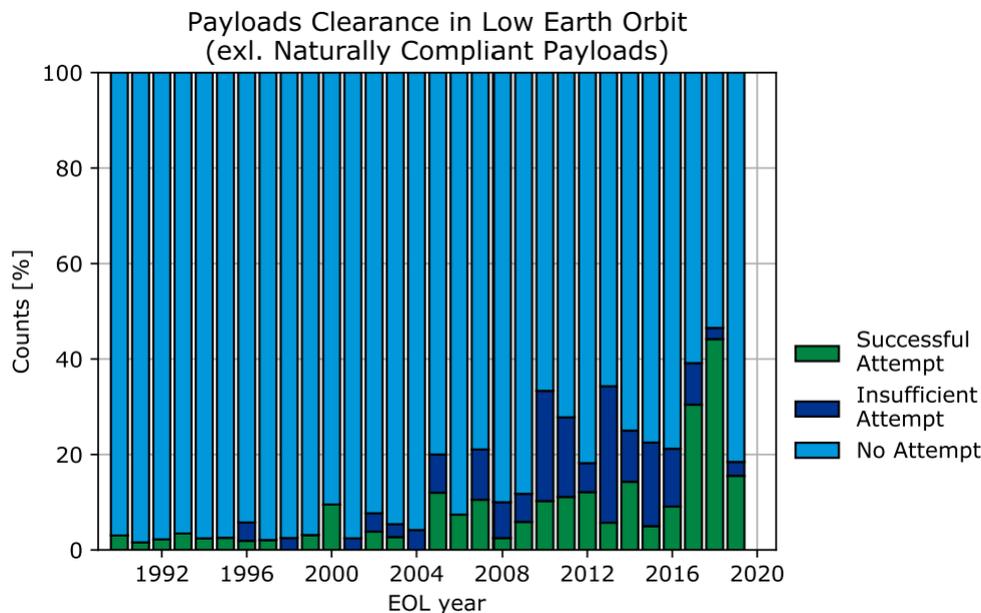


⁴⁸ 小塚莊一郎、佐藤雅彦編 前掲書、67頁。

⁴⁹ ESA, op. cit., 2021, p. 6, Figure 5 (c).

一方で、低軌道におけるペイロード除去は、増加傾向がみられるものの、それでも約20～40%ほど静止軌道と比べると少ない割合となっている。

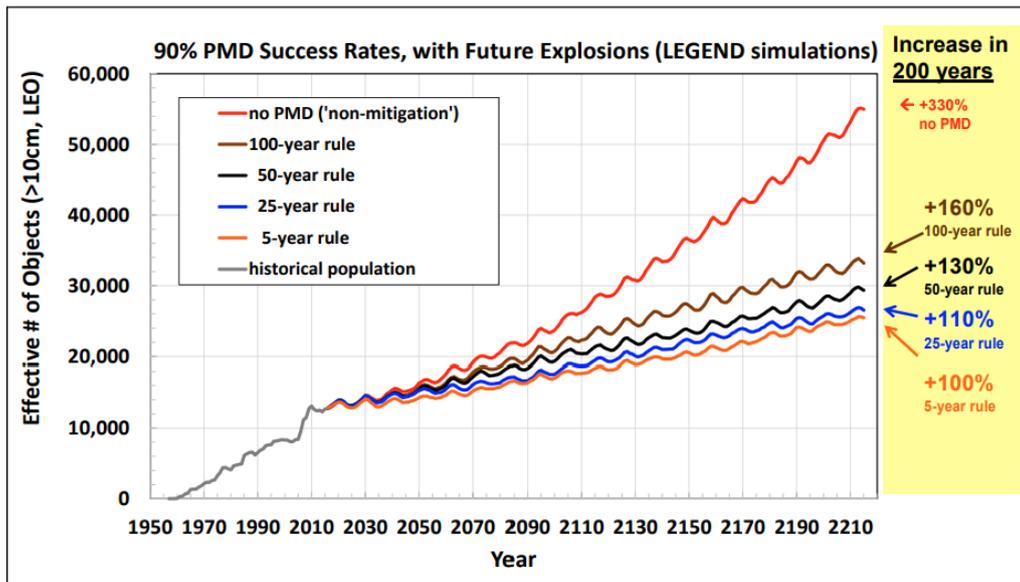
図 2-3 低軌道におけるペイロードの除去の割合（自然に除去されたものを除く）⁵⁰



また、IADC のスペースデブリ低減ガイドラインで勧告された 25 年のデオービットの規則を、さらに短縮しなければならないのではとの議論もある。図 2-4 は、今後 200 年間にわたる宇宙物体の低減シナリオである。何も対策をしなかった場合、200 年後は現在と比べて宇宙物体の数は 330%増加する。なお、90%の確率で運用終了後 100 年以内に宇宙物体のデオービットが実施された場合は 160%の増加、現行の IADC 規則の 25 年であれば 110%の増加となる。これが 5 年に短縮されると 100%の増加となる。現行の 25 年の 5 分の 1 である 5 年以内にデオービットを行ったとしても、現在の宇宙物体数から大幅に増加することが予想されており、この対策方法だけでは宇宙を持続可能に利用するには不十分となる可能性が高い。

⁵⁰ ESA, op. cit., 2021, p. 6, Figure 5 (a).

図 2-4 低減シナリオ⁵¹



2.6 現行の取り組みの課題

以上の現行の取り組みの課題をまとめると、国家間調整メカニズムの不在、多国間合意の難航、SSA における課題、そしてスペースデブリの除去の問題の主に 4 つが指摘できる。

第 1 に、特に低軌道の割り当てにおける国家間調整メカニズムの不在である。国内の宇宙活動の許可や監督について各国の国家が行うという原則があるものの、国家間での調整が行われる仕組みはなく、持続可能性への配慮も各国許認可主体の判断に任されている。

第 2 に、宇宙活動を行う国家の増加による多国間合意の難航である。宇宙物体の増加が予想されて、さらに厳格な対応が求められる可能性があるにも関わらず、新しい規則を追加することが困難となっている。

第 3 に、SSA における課題である。分析に用いられるデータやアルゴリズムは十分ではないため、警告が精密ではない。また、統一のデータベースがないこと、それぞれのデータベース間と運用者間で、評価基準や評価のタイミングが統一されていないこと。加えて、運用者間のコミュニケーション手段と回避行動規則がないことが問題となっている。

⁵¹ NASA “Orbital Debris Quarterly News”, Vol. 24, Issue 1, 2020, p. 5, Figure3.

第4に、現存するスペースデブリの除去の問題である。宇宙物体登録条約などの現行制度では、スペースデブリによる損害の責任を特定するには不十分であり、管轄権の不明なスペースデブリが多数存在している。したがって、少なくとも現在運用されている衛星、もしくはこれから打ちあがる衛星に関しては、管理者不明のスペースデブリとなる前に、責任を持って処理されることが重要である。

第3章 STMの構想と構築に向けた課題

3.1 STMとは何か

以上の問題意識をもとに、宇宙を持続可能的に利用するために長年にわたって議論されているのが、宇宙交通管理（Space Traffic Management：STM）という概念である。STMに共通定義は存在しないが、他の交通分野のように宇宙活動を一連の交通として管理するという構想であり、その歴史は宇宙活動が実現する以前に遡る。

人類初の人工衛星スプートニク1号が打ちあがるより以前の1932年、まだ宇宙飛行が空想のものであった時代に、チェコスロバキアの法学者Vladimir Mandlによって出版された宇宙旅行の問題についての一冊の書籍が、航空法をもととした最初の宇宙法の概念が記されたものであった。1950年代から1960年代になると、STMの概念に関連する宇宙法についてさらに議論が活発化していく。1957年、Eugène Pépinが宇宙空間において必要な5つの規則、すなわち主権空域を介したロケットの上昇、ロケット本体の再突入、軌道を回る衛星間の意図しない衝突、事故の場合の衛星の識別の必要性、および有害な電波干渉の回避を提唱する。これらは、現在に至るまで多くの人々の間でSTMの構成要素として考えられているものであった。そして、1982年に開かれた第25回国際宇宙法会議では、Lubos Perekが発表した「Traffic Rules for Outer Space」と題する論文において、STMについての明確な提案が行われた。これは、Pépinの5つの要素をより詳細にし、かつスペースデブリの低減についても加えられたものであった⁵²。

そして1999年と2001年に、American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)が開催した第5回、第6回国際宇宙協力ワークショップにおいて、International Academy of Astronautics (IAA)にSTMのワーキンググループが設置されることとなる。

⁵² Verspieren, Q. “Historical Evolution of the Concept of Space Traffic Management Since 1932: The Need for a Change of Terminology”, Space Policy, Vol. 56, 2021, p.2-3.

このワーキンググループはその後2006年に、「Cosmic Study on Space Traffic Management」というレポート（以下、IAAレポート）を発表し、2020年時点におけるSTMに必要な要素を予測した⁵³。

さらに2015年、オバマ大統領が宇宙関連法案に署名したことで、STMはまたしても注目を集めることとなる。なぜなら、法案のひとつとして従来CSpOCの前身であるThe Joint Space Operations Center (JSpOC)が担っていたSSAによる宇宙物体のカタログ化の業務のうち、民生機関への情報提供業務を軍ではなく民生の行政機関へと移管すべきか否かが検討するように指示されたからである⁵⁴。これに対しては2016年、米国運輸省とNASAの両者が民生用STM業務を運輸省内の連邦航空局に移管するべきと返答し、準備が開始された。この米国の民生STMの議論は、国際的なSTMではなくあくまでも米国内の行政的な枠組みの変更に関するものであったが、世界の宇宙開発をけん引する米国の動向は大きな注目を集め、STMに対する関心も高まった。

また、度重なるスペースデブリの発生によって、宇宙の持続可能性がより現実的な課題として広く認識されるようになる。2007年には中国がASAT実験を行い、2009年には米国の衛星イリジウムとロシアの衛星コスモスの衝突事故が起きたことで、大量のスペースデブリが発生した。ASAT実験とは、ミサイル技術を用いて意図的に自国の衛星を破壊することで、中国に対して国際社会から批判の声が高まった。その後も2019年にはインドが、2021年11月にはロシアがASAT実験に踏み切っている。このように、スペースデブリが多量に発生する機会が重なったこと、また宇宙活動のアクターが多様化し活発化したことで宇宙の持続可能性への関心が高まり、STMへの認識も高まったといえる。

先述の通り、STMには広く認められる共通の定義が存在しない。2006年のIAAレポートにおいては、以下のように定義されている。

“Space Traffic Management (STM) means the set of technical and regulatory provisions for promoting safe access into outer space provisions for promoting safe

⁵³ Ibid. p. 2.

⁵⁴ 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」、慶應義塾大学大学院法学研究科内『法学政治学論究』、2019年、72頁。

access into outer space, operations in outer space and return from outer space to Earth free from physical or radio-frequency interference.”⁵⁵

これを和訳すると「宇宙における安全な利用、運用そして地球への期間に際し、物理的に自由かつ無線周波数の妨害を受けないための技術的側面と規制的側面を合わせた規定」となる⁵⁶。同レポートでは、科学的小よび技術的小観点から、打上げ、軌道上、再突入の3つの段階についての分析がなされたほか、比較可能と考えられる航空ならびに海洋レジームとの比較が行われた。そして、情報ニーズの確保、警告システム、交通管理の3つの内容がSTMに関する同意に含まれると推定している。

また、European Space Policy Institute (ESPI)は、IAA レポートやSTM についての米国大統領令である SPD-3 などの複数の文献に共通した要素を分析している。まずSTM の目的としては、衝突や干渉リスクの低減によって軌道上での運用の安全性を高めること、宇宙環境への悪影響を軽減することにより宇宙活動の長期的な持続可能性を確保すること、また宇宙活動のグローバル化、強化、多様化、およびますます混雑する宇宙環境に関連する問題に対処することと分析されている。その範囲としては、物理的小よび無線周波数の運用リスクへの対処、また宇宙システムライフサイクルの様々な段階（設計、製造、打上げ、展開、運用、廃棄）に適用されるとしている。その構成要素としては、組織構造と運用機能の両方が含まれており、安全で持続可能な運用を支援するためのシステムやデータ、サービス、技術が必要であり、加えて技術および規制条件の定義、施行および検証と、様々なステークホルダー間の調整強化を伴うと分析されている⁵⁷。

以上から、STM の要素は、第2章で述べた宇宙条約やガイドライン、SSA による追跡などの現行制度のなかに部分的に存在しているといえるが、STM を構築するためには宇宙活動のすべての段階を統合し、より広域な問題に対処することが求められる。

⁵⁵ Contant-Jorgenson, C., Lála, P. Schrogl ed. “Cosmic Study on Space Traffic Management”, International Academy of Astronautics, Paris, 2006, p. 10.

⁵⁶ 筆者訳。

⁵⁷ European Space Policy Institute, op. cit., 2020, p. 6.

3.2 STMの構築に向けた課題

宇宙活動が始まってから50年以上経ち、構想の最初の提唱から1世紀近く経った現在もSTMは構築されていない。では、何がその障害となっているのであろうか。これには第1に定義の不在、第2にステークホルダーの増加と多様化、第3に宇宙分野の特殊性という主に3つの理由があると考えられ、第2章で挙げた現行の取り組みの課題ともある程度共通した点も認められる。

第1に、STMについて広く認められた共通した定義の不在が挙げられる。STMを構築するためには、打上から運用終了後までの宇宙活動のすべての段階についての統合した議論が必要であるが、共通した定義が欠如していることがこれを難しくしている。

第2に、ステークホルダーの増加と多様化である。STMをより効果的な仕組みとするためには、すべてのステークホルダー間での一貫して調整された包括的な努力が必要である。宇宙の持続可能な利用が必要であるという点ではほとんどのステークホルダーが一致しているものの、どのように実行するかについての議論は進まない。議論が必要な点としては、体制や役割・責任の分担の内容、強制と検証の方法などが含まれる。具体的には、多国間体制か2国間体制か、多国間体制であった場合は新しい国際機関の創設か、あるいは既存の機関に新たな役割を追加するのか、また政府間協力というかたちにするのかなどの点である。それに加えて、どのように役割を分担するのか、どのような内容の規制が必要か、どこまで厳格な遵守を求めるのか、どうやってきちんと実行されているのかを検証するのかといった多種多様な点について合意に至ることは極めて困難である。

第3に、宇宙技術自体が安全保障に関わるセンシティブで機密性の高い技術や情報であるという特殊性である。宇宙技術は従来、米ソ間のミサイル開発や偵察技術などの軍事競争から発展を遂げたことから分かるように、私たちの日々の生活を便利にする一方で、安全保障分野の根幹をなすデュアルユースの技術である。このことから宇宙空間での軍縮については、ジュネーブ軍縮会議（CD）において議論が進められてきた。

CDでは、冷戦期の東西対立構造が維持されてきた。2008年に、中国とロシアによって宇宙空間への兵器の配置を禁止することを含む「宇宙空間における兵器配置防止条約（PPWT）」案が提出されたが、西側諸国は兵器の定義の解釈が困難、検証が困難、地上ベースの衛星破壊兵器（ASAT）を禁止する項目がないなどの理由から反対の立場をとっ

た⁵⁸。このように、軍事活動や安全保障を前提にした議論の結果、大量のスペースデブリを発生させる ASAT 実験の禁止についての合意も達成されていない。また、STM の前提となるデータの収集や処理、共有などにも多くの機密性の高い情報が含まれていることが、STM の構築における大きな障害となっている。

第4章 宇宙の持続可能な利用に必要な要素と既存制度からの応用可能性

STM は、宇宙の持続可能性にとって理想の構想であるが、実現されるまでにはさらなる時間が必要であるだろう。また、その共通定義や構成要素なども不明確なものに留まっている。では、宇宙の持続可能な利用を実現するためには、具体的にどのような要素が実施される必要があるのだろうか。

第2章の現行制度と第3章のSTM構築に関する課題から、本項では次の5つの要素が必要であると考えた。すなわち、a 軍民デュアル技術への対応と TCBMs、b 許認可機関の調整メカニズム、c 運用者間のコミュニケーション手段、d 衛星間の一定の回避行動規則、e 科学的データに基づいた議論と問題意識の醸成である。もちろんこれだけにとどまらないが、ここで挙げた a~e の実現のために、他分野における既存の制度から応用できるのではないかと。そこで、各要素について航空や海運、周波数などの既存の制度と比較し、応用の可能性について探りたい。

a 軍民デュアル技術への対応と TCBMs のアプローチ

宇宙技術が特殊であるということは先に述べた通りであるが、安全保障への懸念が纏わりつくその他のデュアルユース技術について、関連分野ではどのように国際的に対応されてきたのだろうか。

航空の分野では、民間航空だけに限定したルール作りが行われてきた。国際民間航空条約（シカゴ条約）に基づいて、国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization : ICAO）が国連の専門機関のひとつとして発足したのは1947年のことである。ICAOはその名の通り民間機をその適応対象としており、国の航空機である軍用機などは対象としていない旨が第3条に定められている。したがって航空分野では、安全保障

⁵⁸ 軍縮会議日本政府代表部、「宇宙空間における軍事・安全保障面での制度的枠組み」。

にかかわる国の航空機を外すことによって、比較的容易に国際的な合意を得ることができたと考えられる。

海洋分野についても、無害通航権に代表されるように、軍艦と民生の船舶には異なるルールが存在する。一方で、衝突回避については、海上における衝突の予防のための国際規則に関する条約において、その規則が軍用民用を問わず適用水域の水上の船舶に適用されることが定められている。つまり、海洋における衝突回避については、軍民共通の最低限の規則が存在するのである。

このように、航空ならびに海洋分野では軍民の特徴の違いを踏まえた規則が作られているが、宇宙分野ではこのような対応はより難しいと考えられる。なぜなら、軍事衛星と民生衛星の間には、戦闘機と民間航空機、もしくは軍艦と一般の船舶のように能力による違いが明白でないからである⁵⁹。また安全保障上、軍事衛星であることは外部に公開されないため、ある衛星が軍事衛星であるか否かは外部からは判断できない。さらに、すでに軌道上に軍事衛星と民生衛星が混在してしまっているため、航空分野のように区域を分けることも非現実的である。したがって、宇宙空間では軍事衛星であるか否かが明らかでないまま軍民が無秩序に混在している。管理者不明かつ目的不明の衛星が存在していることで、その動向に対し他国から疑念を持たれやすい状況であるといえる。

そこで重要となるのが、透明性の確保と信頼の醸成である。TCBMsのためには自国の「行動の意図」を他国に開示することが不可欠である。少なくとも、民生の宇宙活動に関しては、計画内容や行動の意図、連絡方法などを外部に公開することで、安全で持続可能な宇宙活動に取り組むことがより容易になるだろう。また、アクターの増加により、国際条約やガイドラインの締結が難しくなっていることから、ハーグ行動規範のようなTCBMsを用いた自発的な枠組みが有効であるだろう。

b 許認可機関の調整メカニズム

宇宙空間は宇宙条約で定められているように、世界の誰もが平等に利用できる共有財であり、所有は認められない。このような空間は「コモンズ」と呼ばれるが、所有権が認められず皆がアクセスできてしまうからこそ、資源が好き勝手に使われてしまい、結果的に

⁵⁹ 鈴木一人教授からのご指摘。

枯渇してしまうという現象を経済学で「コモンズの悲劇」という。宇宙環境が「コモンズの悲劇」のように荒れ果ててしまわないためには、どのようにしたらよいのだろうか。

航空分野については、先述の通り ICAO が国際的な統制機能を担っており、具体的には事務局や 3 年に 1 回の総会、選挙で選ばれた国で構成された年 3 回の理事会によって、国際調整の機能が果たされている⁶⁰。また、ルールの統一化も図られている。各国の領空内では国際慣習法として国家の領空権が認められているため、それぞれの国によって定められた規則が適用される。これは 1944 年のシカゴ条約においても第 1 条によって明文化されている。しかし ICAO はシカゴ条約の付属書を策定することで航空に関する国際標準・勧告方式 (SARPs) を定めており、締約国は各国の航空規則を ICAO で定められる規則にできる限り一致させることが求められている。したがって、各国はこの SARPs に準拠して航空規則を作ることが推奨され、統一的なルールの形成が促されている。

さらに、公海上空は海洋における公海の自由の原則に基づきどの国にも属さない「コモンズ」であるといえるが、ここでも ICAO の規則に従って飛行することが求められている。シカゴ条約ではすべての国が公海上空においてナビゲーションを行えるようメカニズムを持つことが合意されており、ICAO が衝突回避の責任を果たしている。つまり、公海上空は、ICAO の原則に基づいた国家の法規制の主体となっている⁶¹。

また、国際的な情報通信分野については、先述の通り ITU が統制を担っている。周波数や静止軌道も資源が限られた「コモンズ」であるといえるが、ITU が航空における ICAO と同様に、各国の主管庁間の交渉や調整の場となっているほか、規則を作成し、定期的な国際会議によって修正する役割も担っている。

宇宙の分野においても、他の分野のように国の代表機関による調整の場が必要であると考えられる。先に触れたように、特に低軌道の混雑において最大の原因となっているのが、各国の活動計画が調整されないという点である。国家への責任集中の原則によって、国家が活動の審査や許可を行うことから、各国の許認可機関が責任を持って活動の調整を行う必要がある。このことは、コンステレーション計画によって大量の衛星の打ち上げが予想されることから、早急に取り組むべき課題といえるだろう。

⁶⁰ 外務省、「国際民間航空機関 (ICAO)」。

⁶¹ Stilwell, R. E., Howard, D., and Kaltenhauser, S. “Overcoming sovereignty for Space Traffic Management”, *Journal of Space Safety Engineering*, Vol. 7, Issue 2, 2020, p. 159.

c 運用者間のコミュニケーション手段

安全な運用のために必要と考えられるのが、宇宙機器運用者同士のコミュニケーション手段の確立である。なぜなら、衝突回避のためのマヌーバ⁶²を行う際、どの衛星がどの方向に移動するかについて迅速に決めなければならないからである。現在、衛星同士が接近する場合のコミュニケーションは自発的であり、接近の警告を受け取っても相手の連絡先が不明のためコミュニケーションを取ることができない場合も多い。十分に意思疎通が行われないままでは、両方の衛星が同じ軌道に移動してしまう場合や、必要以上に移動し無駄な推進剤を使ってしまうことも考えられる。また、衛星同士やスペースデブリを回避するためにマヌーバを行った結果、移動先の軌道で他の衛星と接近してしまう可能性もある。

運用者間のコミュニケーション手段を確立する際にも、道路交通、航空、海運、ドローンの分野での規制を参考することができると考える。例えば、最も身近な道路交通では、ライトやクラクションを用いて周囲と意思疎通が行われている。

民間航空機はICAOによって統制される規則に基づいて運航されており、管制機関の指示に従う計器飛行方式（Instrument Flight Rules：IFR）と、パイロットが目視により安全間隔を確保する責任を負う有視界飛行方式（Visual Flight Rules：VFR）の主に2つの飛行方式がある⁶³。ICAO非加盟国の領域上空と公海の一部を除いたほとんどの空域はICAOが定めた飛行情報区（Flight Information Region：FIR）に分けられており、IFR機に対しては担当の管制官が安全で効率的な空の交通となるよう管理を行っている⁶⁴。また、FIR内の空域はICAOの標準に従い高度が分けられており、高度約29,000 feet以上のクラスAの空域はIFRのみの空域となっている⁶⁵。

海洋においては、1972年の海上における衝突の予防のための国際規則に関する条約で、回避行動や追い越しの際には船舶間で適切なコミュニケーションをとることが求められている。一定以上の条件に当てはまる船舶には、音響装置や燈火などを定められた通りに備える必要があり、船舶同士はこれらの装置を用いてあらかじめ定められた合図の方法に従

⁶² 推進機能などを用いて、宇宙船や人工衛星を動かし軌道や姿勢などを制御すること。

⁶³ Stilwell, R. E., Howard, D., and Kaltenhauser, S., op. cit., p. 160.

⁶⁴ 園山耕司『よくわかる航空管制』、第2版、東京：秀和システム、2018年、45-48頁。

⁶⁵ 長岡栄「最近の航空航法と航空交通管理の動向（<特集>航空交通システムの展望）」、日本航海学会誌『NAVIGATION』2012年、Vol. 180、3頁。

い意思疎通を図る。例えば、周囲の他の船舶の進路について疑問がある場合には、信号を発することでその意思を示し、受け取った側は直ちに応答しなければならない。また、小さな船舶や運転が自由でない状態にある船舶にも同様の機能を備えることが求められている。一方、衛星運用者同士では、このようなコミュニケーションが義務付けられておらず、その手段も定められていない。また、衛星同士の状況を確認するタイミングが異なれば、違った状況と捉えられる可能性がある。どのくらい接近すると危険となるのか、警告を発する必要があるのかなどの基準も不明確であり、監視主体に任せられているのが現状である⁶⁶。

また、将来的には、衝突回避が自動化されていく可能性もある。近年では、海運やドローンの分野において自動認識システム（Automatic Identification System: AIS）が広く用いられており、船舶同士のコミュニケーションが自動化されている。このシステムは船舶が自動でお互いを認識するだけでなくナビゲーションも提供することで、運航者間の直接のやり取りを可能にしている⁶⁷。国際海事機関（International Maritime Organization: IMO）の海上における人命の安全のための国際条約は AIS を船舶に取り付けることを求めており、衛星についても同様の基準が求められる可能性がある⁶⁸。現在、衛星同士が自動で直接コミュニケーションを取ることはないが、将来的には AIS のように衛星同士が自動で互いを認識し、衝突回避行動を取ることも考えられる。

d 衛星間の一定の回避行動規則

衛星同士が接近した場合に備えて、事前に一定の回避行動を定める必要もあるだろう。軍事衛星との接近など、運用者間のコミュニケーションが困難な場合でも、相手と自らの衛星がどちらの方向に動くかが決まっていることで衝突を回避することができるからである。衛星は航空機と同様、衝突までの時間を引き延ばすために減速したり、停止したりすることができず、十分余裕のある段階で回避行動を行う必要がある。この特性は航空機に

⁶⁶ アストロスケール社のエンジニアへのインタビューより。

⁶⁷ Garber, S. and Herron, M. “How has traffic been managed in sky, on waterways, and on the road? Comparisons for space situational awareness”, Spacenews, June 8, 2020.

⁶⁸ Ibid.

また、IMO によると AIS の設置は 2000 年の SOLAS V/19 規則の改訂により定められた。IMO “AIS transponders”.

についても同様である。すなわち、ヘリコプターやドローン、自動車、船舶では、衝突回避の手段として停止が可能であるが、航空機は停止すると落下してしまうため、旋回するもしくは交通の流れ同士や飛行機同士に一定の距離を作って交差させる必要がある⁶⁹。加えて、立体的な情報が必要となることから、航空交通特有の対応が衛星間でも参考になるのではないか。

一方、海洋における旗国主義は、ICAO が定めた FIR 別に管制を行う航空分野に比べ、宇宙分野より近い制度であると考えられる。なぜなら、海洋分野では船の位置に関わらずその旗国の下に主権が認められており、国家への責任集中と打上げ国による自国衛星の登録義務によって、宇宙船などの位置に関わらず活動を許可した国家が主権を持つという点において宇宙分野と共通しているからである。さらに公海については、1982 年に採択された国連海洋法条約第 87 条における公海の自由により、どこの国にも属さない「コモンズ」であるという点において宇宙空間と共通している。公海における航行は、1889 年に初めて採択された海における衝突予防のための国際的規制によって、ナビゲーションに基づいて衝突回避が行われる⁷⁰。

また、衛星間における具体的な回避規則について定める際にも、海上の規則が参考になるのではないだろうか。1972 年の海上における衝突の予防のための国際規則に関する条約では、第 18 条において船舶の優先順位が規定されている。すなわち、動力船は帆船、漁ろうに従事している船舶、操縦機能が制限されている船舶、運転が自由でない状態にある船舶の進路を避けなければならない、操縦機能が制限されている船舶、運転が自由でない状態にある船舶、漁ろうに従事している船舶、帆船、動力船の順に優先される。そして、狭い水道では減速右端通行も定められている。互いに視野の内にある船舶同士が接近した場合、帆船同士であれば風を受ける向きや、風上か風下のどちらに位置しているかによって、事前に取りるべき回避行動や航行の優先順位が決められている。2 隻の動力船が行会う際にはそれぞれ進路を右に転じることが定められ、いずれかがもう一方の進路を避けなければならない場合、進路変更をしない船舶はその針路および速力を保持しなければいけない旨が定められている。

⁶⁹ 園山耕司『よくわかる航空管制』、第 2 版、東京：秀和システム、2018 年、21—25 頁。

⁷⁰ Stilwell, R. E., Howard, D., and Kaltenhauser, S., op. cit., p. 159.

このように機能や形態に応じてクラス分けを行い、それぞれの特性に合わせて通行権の順位付けや細かい回避行動を設定する方法は他の交通分野において一般的であるといえる。例えば、道路交通では、車両は普通自動車、大型自動車、大型二輪車などに分けられ、それぞれの特性に合わせて異なるルールが定められているほか、航空機も大きさや機能に合わせてルールが決められている。しかし、衛星にはそうした区分が設けられていない。特に問題となるのは推進機能の有無であり、小型衛星などの推進機能のない衛星は他の衛星と接近してしまった場合でも、回避行動を取ることができない。したがって、操縦機能が制限されている船舶が優先されるように、推進機能のない衛星が優先される必要があるだろう。衛星の特性や周囲の環境などを含め、どのような行動を取るべきかについて、事前に一定程度の行動規則を定めておくべきであろう。

さらに道路交通では自動運転という新しい技術に対し、技術の発展別にレベルを設定することで、どのような条件下でなら走行することが可能であるかを定めている。このような新しい技術の発展とリスクとバランスを取る政策方法は、宇宙分野でも応用できるのではないかという意見もある⁷¹。

e 科学的データに基づいた議論と問題意識の醸成

科学的データに基づいて議論を行い、規則を作ることも持続可能な宇宙利用を実現するために重要である。ガイドラインや規範の形成過程は、政治的なものになってしまう傾向にあるが、規則がデータに基づいた論理的な内容であるのか、実現可能なものであるのかを検討することも必要である。

そのためには、政治的なトップダウンのアプローチだけでなく、技術者や専門家などのデータに基づいた知見を取り入れることも重要である。これについては環境分野における気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が参考になる。IPCCは、1988年に世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)によって作成された。その目的は、あらゆるレベルの政府に気候政策の開発に使用できる科学的情報を提供することであり、IPCCの報告書は国際的な気候変動交渉における重要なインプットになっている⁷²。

⁷¹ Garber, S. and Herron, M., op. cit.

⁷² The Intergovernmental Panel on Climate Change “About the IPCC”.

また、実際に衛星の設計や運用を行うエンジニアの関心を高め、ニーズに対応することも大切である。例えば、宇宙の持続可能性への課題はエンジニアの間であまり共有されていないという声もある。また、衛星を新しく設計し、製造し、テストを行って打上げるには数年かかる一方で、宇宙政策の議論の展開スピードは目覚ましく、政策との間に時間的ギャップを感じるというエンジニアの意見もある⁷³。宇宙開発に関わる各分野の人々が意見を交換しお互いに情報を把握することが、宇宙環境への対策の近道であるかもしれない。さらに、持続可能性に配慮することへのインセンティブを高めるためにも、問題意識の醸成が必要である。とりわけ民間企業の場合には、直接の利益に繋がらない運用終了後の衛星の監視に対してのモチベーションを維持することが難しいのではないかという声もある⁷⁴。また他の交通分野と異なり、現状では宇宙ステーションを除いて直接人命に関係ないことや、直接環境の悪化を感じることができないという点で、議論の進展や規則の遵守に対する意欲を強く持つことが難しい。したがって、社会全体の問題意識を醸成することで、株主や顧客、NGO、社会に対するアカウンタビリティを求めることが有効なのではないだろうか。このようなアプローチについては、環境分野や Sustainable Development Goals (SDGs) に対する企業の社会的責任 (CSR) や自主規制などの取り組みが参考になるだろう。

第5章 日本から発信するベストプラクティスの試み

5.1 軌道上サービスとは

宇宙の持続可能性実現へのひとつの解決策になるかもしれないと期待されているのが、新しい技術である軌道上サービス(On-orbit survives: OOS)⁷⁵である。ESPI のレポートによると、軌道上サービスについての共通の定義は存在しないものの、主に以下の3つに分類できるとしている⁷⁶。1つは、メンテナンスである。これには軌道上の宇宙機器や宇宙船の修理、再構成、燃料補給、再充電、機能のアップグレードや部品の交換、追加などが含まれる。2つ目に、けん引である。例えば、ターゲットを特定の軌道または姿勢に保つ

⁷³ アストロスケール社のエンジニアへのインタビューより。

⁷⁴ 同上。

⁷⁵ In-orbit service (IOS)とも呼ばれる。ESPI のレポートでは IOS が用いられている。

⁷⁶ European Space Policy Institute “In-Orbit Services Policy and Business Perspectives”, Vienna, 2020, p. 3.

ためのドッキング、軌道の補正、宇宙機器の再配置、デオービット、軌道上での部品回収やリサイクルなどが想定される。3つ目に、検査である。これは宇宙機器の状態評価や衝突後の影響などを調べるための技術である。また、後で述べる日本のガイドライン案においては、軌道上サービスとは「ある人工衛星が軌道上に存在する他の人工衛星等を対象として、補給、点検、交換、修理・補修、機能付加等のために意図的に干渉し、又は管理を終了する人工衛星等若しくはスペースデブリを軌道から移動させて除去する行為」と定義されている⁷⁷。

軌道上サービスに対しては、宇宙開発のゲームチェンジャーになるかもしれないという期待もある。例えば、これまで打上げの振動に耐えられるよう衛星の設計には様々な制約があったが、部品だけを打上げて宇宙空間で衛星を組み立てることができればコストが節約できる可能性が高い⁷⁸。

もちろん、持続可能性への貢献も大きい。これまで、打上げ後の衛星に対しては、宇宙空間での修理や点検ができなかったため、故障や寿命によって運用できなくなった場合は使い捨てるのみであった。しかし、ロボットなどを用いて、軌道上での宇宙機器の再配置やデザイン変更、燃料補給などが可能となれば、衛星の寿命を延ばすことができる。さらに、サービスで得られたデータの追加による SSA 機能の向上も期待されている⁷⁹。第1章で触れた通り、地上から観測できる物体の大きさは限られていることから、現在の SSA の能力では追跡することのできない物体が多数存在する。しかし、宇宙空間の物体に直接接近できる技術が実用化されれば、地上からでは分からなかった情報を得ることも可能になると考えられている。

また、軌道上サービスによって、運用が終了した衛星をデオービットさせたり、大気圏に再突入させたりすることでスペースデブリ化を防ぐことができるため、デブリの低減手段としても注目されている。すでにこの技術を用いてビジネス化を目指す企業も誕生しているが、その代表のひとつが日本に本社を置くアストロスケール社である。

⁷⁷ 内閣府宇宙開発戦略推進事務局『(案)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』、4頁。

⁷⁸ アストロスケール社のエンジニアへのインタビューより。

⁷⁹ European Space Policy Institute “In-Orbit Services Policy and Business Perspectives”, Vienna, 2020, p. 4.

現在アストロスケール社が目指しているサービスとしては、End Of Life (EOL)、Active Debris Removal (ADR)、Life Extension がある。EOL は、他社の衛星にあらかじめ捕獲用のドッキングプレートなどを取り付けることで、運用終了後に衛星を捕獲しデオービットを行うサービスである。ADR は、すでに存在している被補獲装置のないスペースデブリに対しオービットを行うサービスであり、物体の状況がそれぞれ異なるほか、捕獲に非協力的である分 EOL よりも技術的に難しいとされている。そして、燃料補給や修理などを施すことで寿命を延長するのが Life Extension と呼ばれるサービスである⁸⁰。

5.2 「軌道上サービスガイドライン」によるベストプラクティス

世界に先駆けていち早くサービスの提供を可能にするために、現在日本が取り組んでいるのが、軌道上サービスに対するガイドラインの作成である。ガイドラインは、日本の宇宙活動法に基づいて運用のために新たに追加される予定で、内閣府宇宙開発戦略推進事務局のスペースデブリに関する関係府省等タスクフォース大臣会合において議論が進められている。

同タスクフォースでは、2019年3月に第1回目の会合が開催された。2020年11月の第4回会合では、JAXA が計画している商業デブリ除去関連技術実証が行われる2022年までにルールを検討することが提案され、2021年度末までにガイドラインを制定することが合意された⁸¹。そして、2021年5月の第5回会合において、ルール作りに関する取組の基本方針案と、2020年12月より行われていた軌道上サービスに関するサブワーキンググループの検討結果が提示された。2021年7月から9月には、これらに基づいて作成されたガイドライン案に対する意見聴取が行われた。

軌道上サービスは、宇宙開発に様々なメリットをもたらす一方で、軍事作戦にも応用される可能性のある技術という特徴がある。例えば、軌道上サービスのランデブー及び近接オペレーション (Rendezvous and Proximity Operations : RPO) 技術を用いたジャミングや化学スプレー、マイクロ波による破壊や妨害、ロボットアームによる衛星の破壊、スペ

⁸⁰ アストロスケール社のウェブページ「サービス」の説明より。

⁸¹ 内閣府スペースデブリに関する関係府省等タスクフォース、資料3-2「今後の取組方針(案)」、2020年11月10日。

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(案)の概要について」、2021年7月12日、2頁。

ースデブリの捕獲と同様の技術による他国衛星への攻撃なども想定される⁸²。このような軌道上サービスに対する他国からの懸念を防ぐために、日本のガイドライン案にはサービス提供の許可にあたって、TCBMsの手法を用いた様々な考慮がなされている。その内容は、権利侵害の防止のための要求、透明性確保のための情報開示要求、安全に関する要求の主に3つに分類できる。

第1に、権利侵害の防止のための要求である。例えば、軌道上サービスの提供者は、そのサービスの提供に際し、対象物体の権利者から委託または同意を得ていること、またサービスによって生じられる状況が、対象物体の登録国または許可した国の規制に抵触するものでないことを書面などにより示さなければならない。(ガイドライン4.1.1、4.1.2)。第2に、透明性確保のための情報開示の要求である。サービスによって周囲の人工衛星の安全を脅かさないこと、また他の衛星の管理者に安全を脅かすのではないかという疑念を持たれることのないよう、他の衛星運用者に対し運用の計画や必要な情報を通知することが求められている(4.3.1)。また異常が発生した場合にも、周囲に危険をもたらすおそれがあることから情報開示することが要求されている(4.3.2)。第3に安全に関する要求である。例えば、サービスの結果として起きる状況が法や水準に反するものでないこと(4.2)、事前に対象物体に係る情報を確認し、必要な構造や性能を有することを示すこと(5.1, 5.2)、対象物体の状態や周囲の状況などを把握し安全を確保すること(5.3)などが定められている。

このようにガイドラインでは、日本の国内法だけでなく対象物体についても、管轄権のある国の法に抵触していないか、情報共有の手段や安全性に問題がないかなどを含めた包括的かつ詳細な要件が設けられている。許認可主体とその要件を明確化し、国として責任を持って審査するという意思を示すことで、他国に対し透明性とアカウンタビリティを確保することが目指されている。日本で軌道上サービスを提供する主体にとっては、ガイドラインで示された要求を満たすことは負担となるが、サービスの提供にあたりどのような手続きが必要となるのかが明らかになるため、ガイドラインの作成がビジネスを後押しすることにもつながる。さらに、目的がビジネスのためであること、また軍事的な超大国

⁸² 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(案)の概要について」、2021年7月12日、6頁。

ではなく日本が最初に取り組んでいることで、他国から軍事的活動の拡張なのではないかと疑われる可能性も少ないと考えられる⁸³。

さらに、軌道上サービスガイドラインの策定には、日本から世界に向けて宇宙の持続可能性と環境保全に対するベストプラクティスの発信も狙いも含まれている。すなわち、宇宙の持続可能性と TCBMs に可能な限り配慮した日本の許認可基準が、これから策定が予想される他国の軌道上サービスに対する規制の手本となり、国際的基準となることを期待が期待されている。新たな国際的規制の追加が困難になっている宇宙活動分野において、TCBMs を取り入れた自主的な遵守を促すアプローチは、大きな一歩となるのではないか。

おわりに

本稿では、宇宙活動の増大による持続可能な宇宙空間の利用への問題意識から、その実現のために必要な要素と課題、具体的対応策について論じた。はじめに、宇宙開発の変遷とその結果としてもたらされた宇宙環境の課題を提示し、国際宇宙法やガイドライン、ハーグ行動規範などの現行の取り組みと STM 構想の課題を分析した。そのうえで、持続可能な宇宙利用のための5つの要素、すなわち TCBMs によるデュアルユース技術への対応、許認可機関の調整メカニズム、運用者間コミュニケーション手段、衛星間の一定の回避行動規則、科学的データに基づいた議論と問題意識の醸成を示し、各要素の実施に向けて航空や海洋といった他の分野の取り組みから応用できる可能性を探った。さらに、日本の「軌道上サービスガイドライン」の事例を取り上げ、世界に向けた透明性と信頼醸成措置のベストプラクティスの試みについて論じた。

ここでは、本稿の限界点についてもいくつか触れたい。まず、第4章で示した要素は必ずしも包括的なものではなく、本稿で指摘した5つ以外にも重要な要素が存在する可能性がある。また、実際に宇宙機器をつくり運用するエンジニアと政策とのギャップを埋める方法として、エンジニアの政策に対する関心を高め対話を進めていく必要があると述べたが、いかにして達成するかについてはさらに検討しなくてはならない。特に日本の宇宙産業では、世界的な宇宙政策のトレンドを事業に取り入れることや、そうした場に積極的に働きかけることの重要性があまり認識されていないように感じる。したがって国際的政策

⁸³ 鈴木一人教授からのご指摘。

を担当するリソースを持つ企業も少なく、そうした状況にあってはエンジニアの関心を高めるよりもまず、経営層や業界全体の意識から変えていく必要があるかもしれない。さらに、今後低軌道の商業利用や有人宇宙飛行、OOSによる宇宙空間での製造などがより一般的になった場合は、現在想定されるものと異なる宇宙環境が生じる可能性があり、追加的な調査が求められるだろう。

本稿で述べた通り、宇宙分野には、アクターの増加と多様化、デュアルユース技術であるという特殊性、さらには国家間調整のメカニズムの構築など、持続可能な利用の実現に向けて乗り越えなければならない多くの課題がある。そうした中、日本の軌道上サービスに対するベストプラクティスをはじめとした取り組みが、世界に広がっていくことに期待したい。また、近年の宇宙活動の変化は目覚ましいことから、新たなアプローチが生まれる可能性もある。今後も世界の動向に注目する必要があるだろう。

参考文献

The Air Power Development Center and the Australia New Zealand Space Law Interest Group “Project ASTERIA 2019 Space Debris Space Traffic Management & Space Sustainability”, Canberra, 2019.

Boley, A.C. and Byers, M. “Satellite mega-constellations create risks in Low Earth Orbit, the atmosphere and on Earth”, Scientific Reports, 11, Number 10642, 2021.

<https://doi.org/10.1038/s41598-021-89909-7>（閲覧日：2021年11月28日）。

Contant-Jorgenson, C., Lála, P. Schrogl ed. “Cosmic Study on Space Traffic Management”, International Academy of Astronautics, Paris, 2006.

European Space Agency “ESA’s Annual Space Environment Report”, 2021.

European Space Policy Institute “Towards a European Approach to Space Traffic Management”, Vienna, 2020.

European Space Policy Institute “In-Orbit Services Policy and Business Perspectives”, Vienna, 2020.

General Assembly, “Group of Governmental Experts on Transparency and Confidence-Building Measures in Outer Space Activities”, 2013.

<https://digitallibrary.un.org/record/755155>（閲覧日：2021年11月27日）。

Harrison, T., Cooper, Z., Johnson, K. and Roberts, T. G. “Escalation and Deterrence in the Second Space Age”, Center for Strategic & International Studies, 2017.

International Civil Aviation Organization “Global Air Traffic Management Operational Concept”, Doc 9854 AN/458, 2005.

Nag, S., Murakami, D., Lifson, M, Kopardekar, P. “System Autonomy for Space Traffic Management”, IEEE, 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8569343>（閲覧日：2021年11月28日）。

- Schrogl, K., Jorgenson, C., Robinson, J. and Soucek, A. “SpaIAA “Space Traffic Management —Towards a Roadmap for Implementation”, International Academy of Astronautics, Paris, 2018.
- Stilwell, R. E., Howard, D., and Kaltenhauser, S. “Overcoming sovereignty for Space Traffic Management”, *Journal of Space Safety Engineering*, Vol. 7, Issue 2, 2020, p. 158-161.
- Verspieren, Q. “Historical Evolution of the Concept of Space Traffic Management Since 1932: The Need for a Change of Terminology”, *Space Policy*, Vol. 56, 2021.
- 青木節子、『日本の宇宙戦略』、慶応義塾大学出版、2006年。
- 青木節子、小塚荘一郎編『宇宙六法』、東京：信山社、2019年。
- 秋本俊二『飛行機はなぜ、空中衝突しないのか？』、東京：河出書房新社、2017年。
- 加藤明『スペースデブリ—宇宙活動の持続的発展を目指して—』、東京：地人書館、2015年。
- 小塚荘一郎、笹岡愛美編『世界の宇宙ビジネス法』、東京：商事法務、2021年。
- 小塚荘一郎、佐藤雅彦編『宇宙ビジネスのための宇宙法入門』、第2版、東京：有斐閣、2018年。
- 齋藤靖「航空交通管制システムの発展プロセス」、『西南学院大学商学論集』、2007年、Vol.53、Issue 3・4、341—381頁。
- 城山英明『国際行政論』、東京：有斐閣、2013年。
- 鈴木一人『宇宙開発と国際政治』、東京：岩波書店、2011年。
- 園山耕司『よくわかる航空管制』、第2版、東京：秀和システム、2018年。
- 園山耕司『よくわかる NEO 航空管制』、東京：秀和システム、2018年。
- 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」、慶應義塾大学大学院法学研究科内『法学政治学論究』、2019年。

長岡栄「航空交通管理 (ATM) の動向」、日本航海学会誌『NAVIGATION』、2008 年、Vol.56、No. 649、35—39 頁。

長岡栄「最近の航空航法と航空交通管理の動向 (<特集>航空交通システムの展望)」、日本航海学会誌『NAVIGATION』2012 年、Vol. 180、2—11 頁。

藤石金彌『カラー図解でわかる航空管制「超」入門』、東京：SB クリエイティブ株式会社、2014 年。

防衛省『令和 3 年版防衛白書』、2021 年。

Aerospace Corporation, “Space Situational Awareness”. <https://aerospace.org/ssi-space-situational-awareness> (閲覧日：2021 年 11 月 28 日)

Analytical Graphics, Inc “ODTK Space Situational Awareness”.
<https://www.agi.com/products/odtk/odtk-space-situational-awareness> (閲覧日：2021 年 11 月 28 日)

Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations “About”.
<https://www.satelliteconfers.org/about-us/> (閲覧日：2021 年 11 月 28 日)

European Union Satellite Centre “Space Situational Awareness (SSA)”.
<https://www.satcen.europa.eu/page/ssa> (閲覧日：2021 年 11 月 30 日)

EU SST, “What is EU SST?”. <https://www.eusst.eu/> (閲覧日：2021 年 11 月 29 日)

Garber, S. and Herron, M. “How has traffic been managed in sky, on waterways, and on the road? Comparisons for space situational awareness”, Spacenews, June 8, 2020.
<https://www.thespacereview.com/article/3961/1> (閲覧日：2021 年 11 月 30 日)

The Hague Code of Conduct, “What is HCoC”. <https://www.hcoc.at/> (閲覧日：2021 年 11 月 28 日)

Haver Analytics, Morgan Stanley Research forecasts, “Space: Investing in the final frontier”, July 24, 2020. <https://www.morganstanley.com/ideas/investing-in-space/> (閲覧日：2021年11月28日)

IMO “AIS transponders”. <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/AIS.aspx> (閲覧日：2021年12月01日)

Intergovernmental Panel on Climate Change “About the IPCC”.
<https://www.ipcc.ch/about/> (閲覧日：2021年11月25日)

International Telecommunication Union “Overview of ITU's History”.
<https://www.itu.int/en/history/Pages/ITUsHistory.aspx> (閲覧日：2021年11月28日)

National Aeronautics and Space Administration “Orbital Debris Quarterly News”, Vol. 23, Issues 1 & 2, 2019. <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv23i1.pdf>
(閲覧日：2021年11月29日)

National Aeronautics and Space Administration “Orbital Debris Quarterly News”, Vol. 24, Issue 1, 2020, p. 5, Figure3. <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv24i1.pdf> (閲覧日：2021年11月30日)

National Aeronautics and Space Administration “Orbital Debris Quarterly News”, Vol. 24, Issue 4, 2020. <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv24i4.pdf> (閲覧日：2021年11月30日)

National Aeronautics and Space Administration “Orbital Debris Quarterly News”, Vol. 25, Issue 1, 2021. <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv25i1.pdf> (閲覧日：2021年11月28日)

National Aeronautics and Space Administration, “Space Debris and Human Spacecraft”, May 27, 2021. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html (閲覧日：2021年11月28日)

Secure World Foundation “Who We Are”. <https://swfound.org/about-us/who-we-are/> (閲覧日：2021年12月1日)

Sorge, M. E., Ailor, W.H. and Muelhaupt, T.J. "Space Traffic Management; Challenge of Large Constellations, Orbital Debris, and The Rapid Changes in Space Operations", Center for Space Policy and Strategy, The Aerospace Corporation, 2020.

https://aerospace.org/sites/default/files/2020-09/Sorge_STM_20200915.pdf (閲覧日：2021年11月27日)

United Nations Office for Outer Space Affairs "Committee on the Peaceful Uses of Outer Space: Membership Evolution".

<https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/copuos/members/evolution.html> (閲覧日：2021年11月28日)

アストロスケール社、ホームページ。<https://astroscale.com/ja/services/> (閲覧日：2021年12月1日)

外務省、「国際民間航空機関 (ICAO)」。

https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/page22_000755.html (閲覧日 2021年11月28日).

外務省、「弾道ミサイルの拡散に立ち向かうためのハーグ行動規範 (Hague Code of Conduct against Ballistic Missile Proliferation: HCOC) 概要」。

https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/mtr/hcoc_gai.html (閲覧日：2021年11月28日)

外務省、報道発表「国連宇宙空間平和利用委員会 (COPUOS) 本委員会 宇宙活動の長期持続可能性ガイドラインの採択」、2019年6月22日。

https://www.mofa.go.jp/mofaj/press/release/press6_000600.html (閲覧日：2021年11月30日)

軍縮会議日本政府代表部、「宇宙空間における軍事・安全保障面での制度的枠組み」。

https://www.disarm.emb-japan.go.jp/itpr_ja/chap12.html (閲覧日：2021年12月1日)

国連広報センター「国際電気通信連合」。

https://www.unic.or.jp/info/un/unsystem/specialized_agencies/itu/ (閲覧日: 2021年10月22日)

国土交通省プレスリリース、「「サブオービタル飛行に関する官民協議会」を設立します」、2019年6月21日。<https://www.mlit.go.jp/common/001294481.pdf> (閲覧日: 2021年10月22日)

国土交通省、「無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の飛行ルール」。
https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html (閲覧日: 2021年10月28日)

JAXA、「宇宙状況把握（SSA）システム」。<https://www.jaxa.jp/projects/ssa/>

総務省『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年2月。<https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/freq/process/freqint/001.pdf> (閲覧日: 2021年11月10日)

総務省「周波数の調整について」。
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/process/freqint/> (閲覧日: 2021年11月18日)

内閣府宇宙開発戦略推進事務局『（案）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』、4頁。
https://www8.cao.go.jp/space/public_comment/oos_gl/honbun.pdf (閲覧日: 2021年11月28日)

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（案）の概要について」、2021年7月12日、2頁。
https://www8.cao.go.jp/space/public_comment/oos_gl/gaiyou.pdf 閲覧日: 2021年11月28日)

内閣府スペースデブリに関する関係府省等タスクフォース、資料3-2「今後の取組方針（案）」、2020年11月10日。
https://www8.cao.go.jp/space/taskforce/debris/dai4/siryous3_2.pdf (閲覧日: 2021年11月28日)

謝辞

論文の作成にあたり、快くご指導をお引き受けくださり適切なご助言を賜った、城山英明先生に感謝申し上げます。また、鈴木一人先生、Quentin Verspieren 先生には、お忙しいところお時間をいただきご指導いただきましたこと改めて御礼申し上げます。また、論文にご協力いただいたアストロスケール社員の皆様、快くインタビューに答えて下さったエンジニアの方々にも心より感謝いたします。

最後に、コロナウイルスによる2年間のオンライン授業の中、大学院生活を支えてくれた家族と、友人に感謝の意を表します。