

# 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<br>Title                      | 宇宙の持続的利用                                                                                                                               |
| 他言語論題<br>Title in other language | Sustainable Use of Space                                                                                                               |
| 著者 / 所属<br>Author(s)             | 竹内悠 (TAKEUCHI Yu) / 慶應義塾大学宇宙法研究所研究員・宇宙航空研究開発機構                                                                                         |
| 書名<br>Title of Book              | 日本の宇宙政策を考える—今後10年のために何をすべきか—<br>—科学技術に関する調査プロジェクト報告書<br>(Considering Japan's Space Policy: What Should Be Done in the Next Ten Years?) |
| シリーズ<br>Series                   | 調査資料 2023-4 (Research Materials 2023-4)                                                                                                |
| 編集<br>Editor                     | 国立国会図書館 調査及び立法考査局                                                                                                                      |
| 発行<br>Publisher                  | 国立国会図書館                                                                                                                                |
| 刊行日<br>Issue Date                | 2024-2-29                                                                                                                              |
| ページ<br>Pages                     | —                                                                                                                                      |
| ISBN                             | 978-4-87582-922-5                                                                                                                      |
| 本文の言語<br>Language                | 日本語 (Japanese)                                                                                                                         |
| 摘要<br>Abstract                   | —                                                                                                                                      |

\* 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。

「日本の宇宙政策を考える—今後10年のために何をすべきか—」  
2023年9月22日（金）国立国会図書館

# 宇宙の持続的利用

竹内 悠  
慶應義塾大学宇宙法研究所  
宇宙航空研究開発機構

©Yu Takeuchi

スライド 1

## 「宇宙の持続的利用」とは何か

「持続可能な開発（Sustainable Development）」  
持続可能な開発とは、将来の世代が自らのニーズを満たす能力を損なうことなく、現在のニーズを満たす開発である。  
(環境と開発に関する世界委員会（WCED）報告書「Our Common Future」（1987年）)

「宇宙活動の長期的持続可能性（Long-term Sustainability of outer space activities）」  
将来の世代のために宇宙環境を保全しつつ、現在の世代のニーズを満たすために、平和目的のための宇宙空間の探査と利用から得られる利益への公平なアクセスという目的を実現する方法で、宇宙活動の実施を将来にわたって無期限に維持できる能力  
(国連宇宙空間平和利用委員会（COPUOS）「宇宙活動の長期的持続可能性（LTS）ガイドライン」（2019年）)

A. 宇宙活動に関する方針及び規制枠組み

- A.1 宇宙活動に関する国内規制枠組みの必要性の検証、強化及び修正
- A.2 宇宙活動に関する国際規制枠組みの検証、必要に応じて改善、改正または修正を行う際の政策意思の考慮
- A.3 国内宇宙活動の監督
- A.4 慶應義塾大学ベクトルの報奨、合理的かつ効率的な使用及び影響によって利用される様々な軌道領域の確保
- A.5 宇宙物体登録の実行強化

B. 宇宙資源の持続可能性

- B.1 資源としての宇宙資源の確保及び宇宙物体と軌道と資源に関する情報の共有
- B.2 宇宙物体の軌道データの確保向上並びに軌道情報の共有の普及及び信頼性の強化
- B.3 スペース・デブリ管理情報の収集、共有及び普及の促進
- B.4 軌道利用の持続可能性を確保するための研究
- B.5 打ち上げ継続性確保に向けた実用的な取組みの確立
- B.6 効率的な宇宙資源に関するパートナーシップ及び情報共有
- B.7 宇宙天気を宇宙及び地上の両方で監視し、宇宙天気による影響の軽減のための確立した実行の確保
- B.8 宇宙活動の持続可能性を確保するための宇宙物体の設計及び運用
- B.9 宇宙物体の制御装置再発見に伴うリスクを取り除く計画
- B.10 宇宙活動を実施するレーザー・ビーム源を使用する際の予備的の遵守

C. 国際協力、能力開発及び透明性

- C.1 宇宙活動の長期的持続可能性を支える国際協力の促進
- C.2 宇宙活動の長期的持続可能性に関する経験の共有及び情報交換のための適切な新たな手続きの作成
- C.3 能力開発の促進及び支援
- C.4 宇宙活動の透明性の向上

D. 結束的・包括的な研究開発

- D.1 宇宙活動の持続可能性の確保及び改善を促進する方法の検証および実施の促進及び実施
- D.2 長期的なスペース・デブリの除去を管理するための新たな科学的調査及び検討

(出典) 第81回宇宙政策委員会参考資料6 (2019年)

©Yu Takeuchi

スライド 2

## なぜ「宇宙の持続的利用」か

### THE KESSLER EFFECT

How terrorists could trigger chaos by setting off a chain reaction of collisions

STAGE 1



STAGE 2



STAGES 3 AND 4



**Stage 1:** Too many objects in orbit increase collision risk  
**Stage 2:** Rogue actors could jam or spook satellites into straying off course  
**Stage 3:** A single collision could be cause of a domino effect  
**Stage 4:** Increased debris risks destroying more satellites

(出典) <https://www.imdb.com/>

The National / Ramon Peñas Jr

**3**  
©Yu Takeuchi

スライド 3

### 〈超小型衛星の増加〉



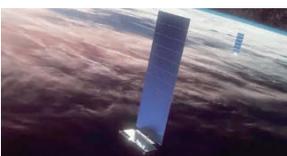
(出典) 星出宇宙飛行士が撮影した小型衛星放出の様子 (2021年) ©JAXA/NASA  
<<https://astro-mission.jaxa.jp/hoshide/report/211013-073051.html>>



(出典) "Exolaunch's 5th Rideshare Mission Successfully Gains Orbits After Being Launched Aboard The SpaceX Transporter-5 Mission", May 25, 2022. Satnews  
<<https://news.satnews.com/>>



(出典) "Next SpaceX launch to deploy fewer Starlink satellites into higher orbit", February 20, 2022, Spaceflight Now <<https://spaceflightnow.com/>>

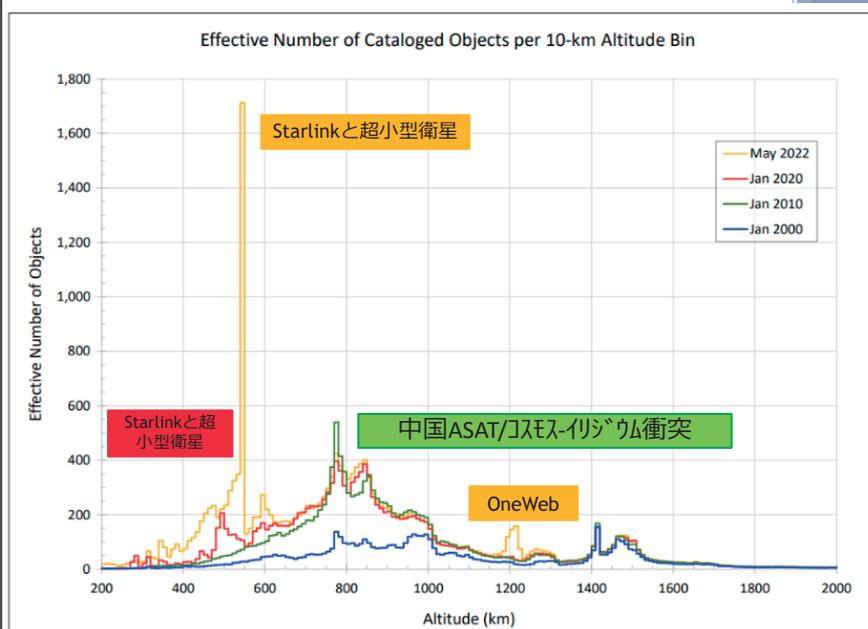


(出典) Space X illustration

**4**  
©Yu Takeuchi

スライド 4

<軌道別の宇宙物体数の推移>



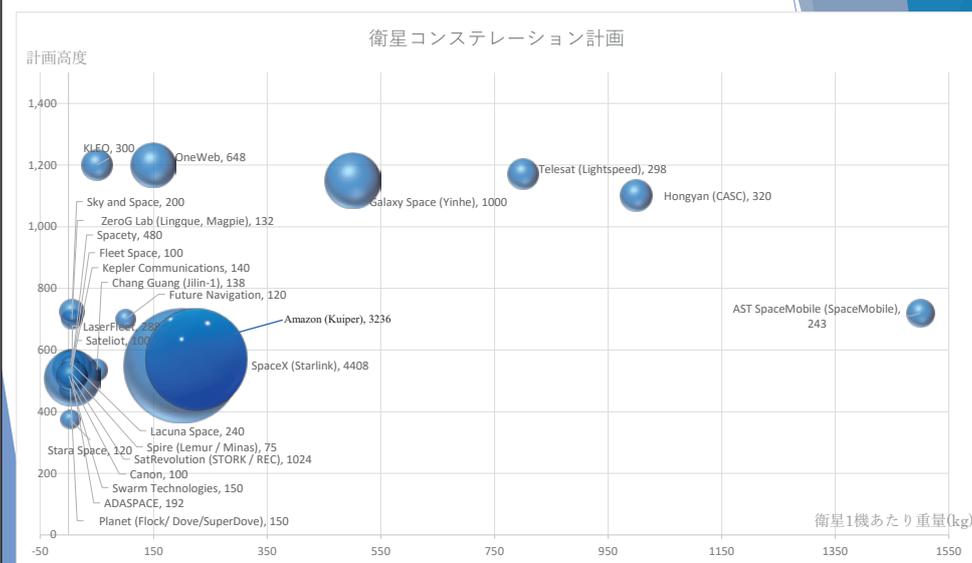
(出典) NASA Orbital Debris Quarterly News, Volume 26, Issue 2 June 2022.

5

©Yu Takeuchi

スライド 5

<衛星コンステレーション計画>



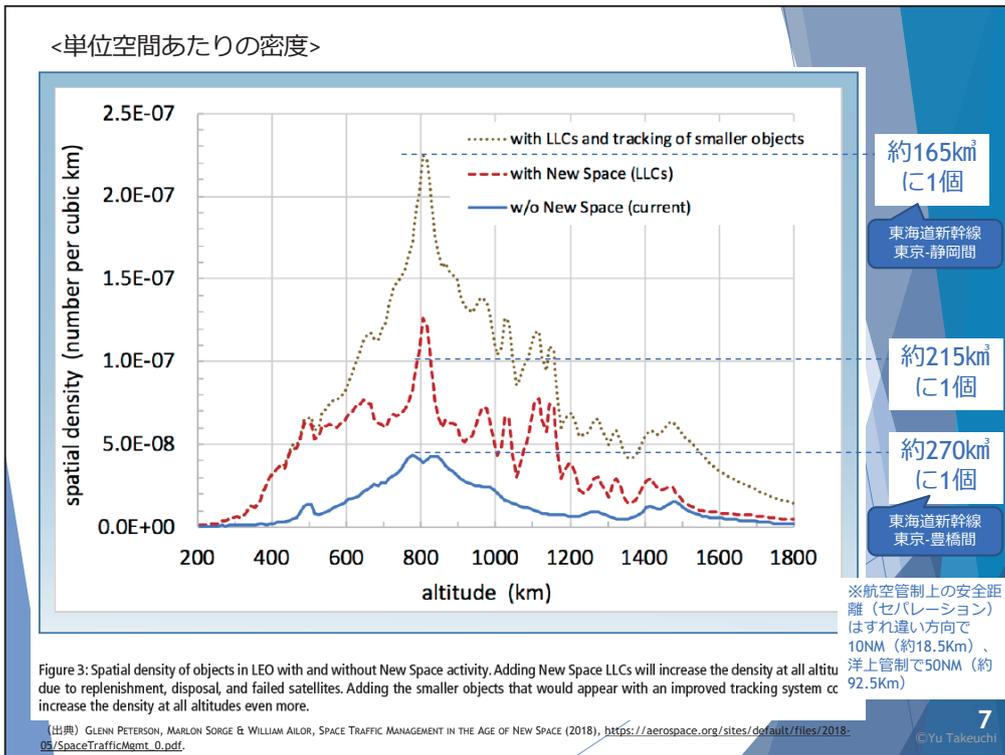
(凡例: 企業名 (計画名) 計画機数)

(出典) Erik Kulu, "NewSpace Constellations", available at <https://www.newspace.im/> (2022年11月時点) のデータに基づいて発表者作成

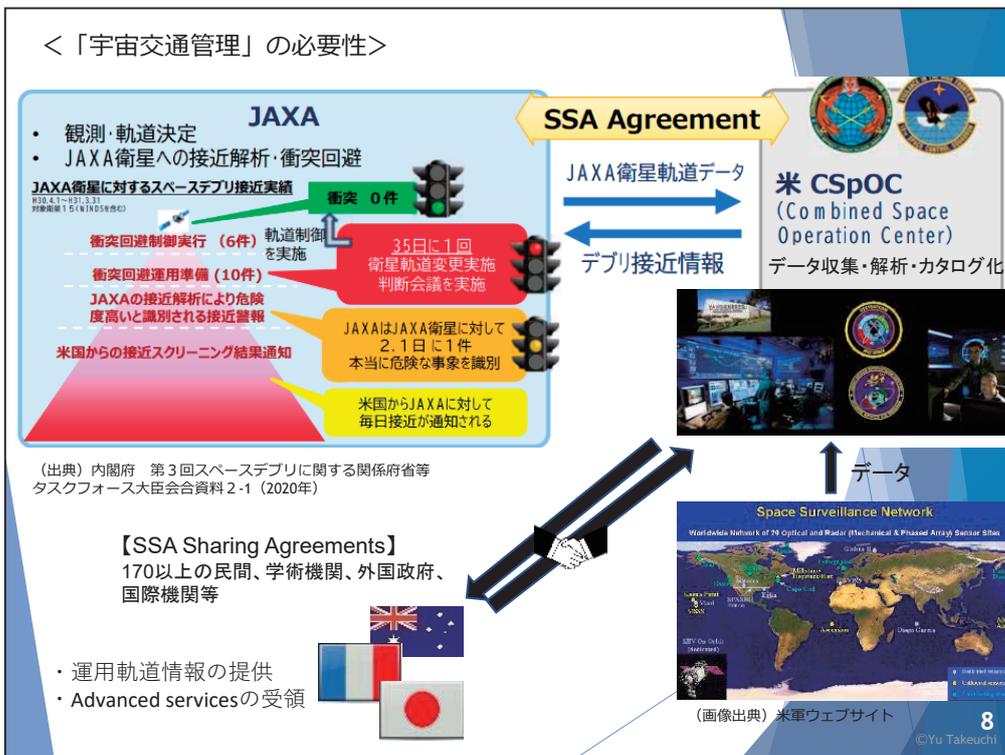
6

©Yu Takeuchi

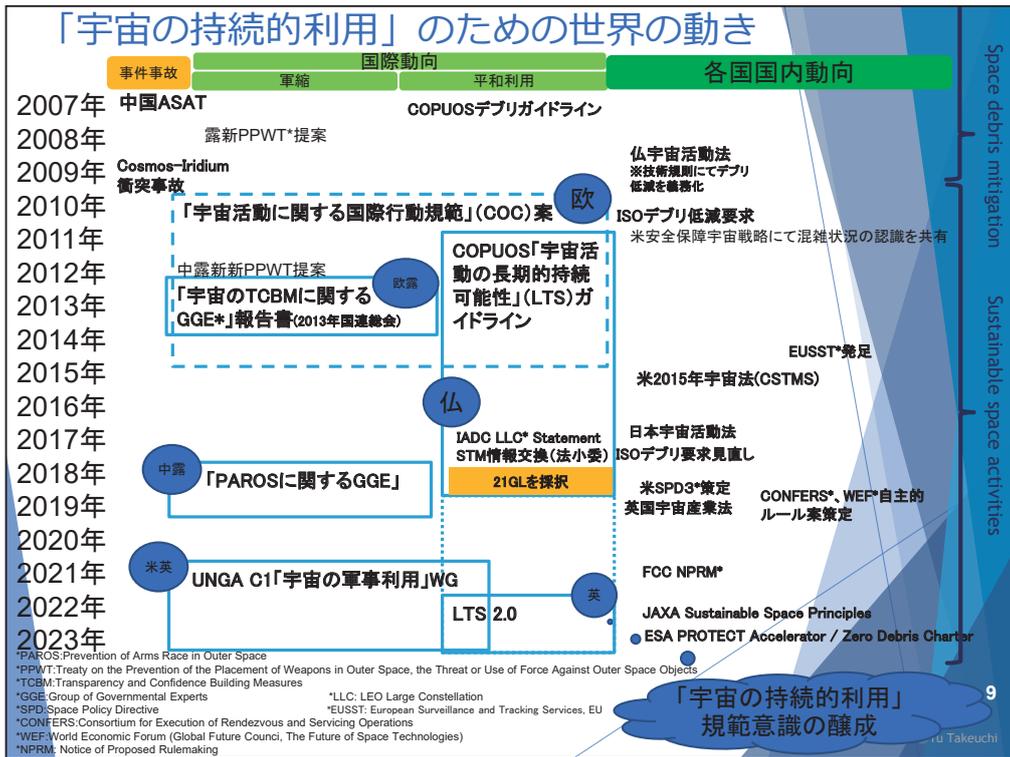
スライド 6



スライド 7



スライド 8



スライド 9

### ＜技術開発による解決策の模索＞

**政府系**

**OSAM/OSAM-2**  
(出典) NASAウェブサイト

**Orbital Express**  
(出典) DARPAウェブサイト

**DART (Demonstration of Autonomous Rendezvous Technology)**  
(出典) Krebs, Gunter D. "DART". Gunter's Space Page

**ConeXpress-OLEV**  
(出典) Krebs, Gunter D. "ConeXpress-OLEV (CX-OLEV)". Gunter's Space Page

**技術試験衛星VII型「きく7号」(ETS-VII)**  
(出典) JAXAウェブサイト

**Airbus (2018年までの計画)**  
(出典) Airbus impressed by Northrop Grumman, but remains undecided on satellite servicing. SpaceNews March 11, 2020.

**Tethers Unlimited**  
(出典) "Tethers Unlimited developing satellite servicer for LEO missions". SpaceNews, 21 May 2019

**Momentus**  
(出典) Momentus receives approvals for first tug launch". SpaceNews, 9 May 2022.

**Orbit Fab**  
(出典) Orbit Fabウェブサイト

**Spaceflight Sherpa**  
(出典) Spaceflightウェブサイト

**Altius** (出典) Altius ウェブサイト

**D-Orbit ION**  
(出典) D-Orbitウェブサイト

**MEV-1**  
(出典) Northrop Grummanウェブサイト

**CRD2/ADRAS-J**  
(出典) 文部科学省ウェブサイト

**ClearSpace-1**  
(出典) Clearspace Todayウェブサイト

**レーザーによるデブリ除去**  
(出典) スカパーJSATウェブサイト

10  
©Yu Takeuchi

スライド 10

### ＜規範形成による発展＞

- 国連を通じた動き
 



IADC Space Debris Mitigation Guidelines



GUIDELINES FOR THE LONG-TERM SUSTAINABILITY OF OUTER SPACE ACTIVITIES OF THE COMMITTEE ON THE PEACEFUL USES OF OUTER SPACE
- 経済界の動き
 



SPACE SUSTAINABILITY RATING



Space Industry Act 2018

軌道上サービスを実施する人工衛星管理許可ガイドライン（内閣府）

Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations (CONFERS)

Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations

**CONFERS Recommended Design and Operational Practices**

Implementing the CONFERS Guiding Principles for Commercial Rendezvous, Proximity Operations (RPO) and On-Orbit Servicing (OOS) will begin with developing recommended design and operational practices. Adopting these practices is an effective way to enhance operational safety and mission success. The following practices represent lessons learned from prior servicing and RPO operations. These practices are intended to evolve based upon experience gained through future commercial and government servicing operations.

11  
©Yu Takeuchi

スライド 11

### ＜更に新たな動き＞

- 政府による一方的宣言【直接上昇型ASATの自粛】  
豪加独日NZ韓瑞英仏が追随し、国連総会でも採択
- 宇宙機関による行動宣言【JAXA行動原則の公表】
- 関係機関での合意を広げる動き【ESA Zero Debris合意】



(出典) Carnegie Endowment for International Peace



(出典) ESAウェブサイト



(出典) JAXAウェブサイト

12  
©Yu Takeuchi

スライド 12

## 日本の宇宙政策への示唆 —【持続可能な宇宙活動の先頭に立つ】

「持続可能性」を実現するためには・・・

- 将来世代にわたって利用可能な宇宙を残す。
- ビジネスとして循環する活動へ昇華させる。

どのように・・・

- ① 宇宙活動全体の持続可能性の追求  
→ 商業活動の活発化に伴い、国際共通ルールによってレッドラインの提示と競争条件の統一
- ② ビジネスによる持続可能な宇宙活動とのバランスの取れた軍民関係  
→ 軍事での開発をビジネスの国際競争力強化に活かす視点（例：国内では技術流用を可能にする。）  
→ 2008年まで40年以上「非軍事」利用を続けてきた特徴を活かした対外活動（例：軌道上サービスにおける透明性確保）
- ③ All Japan体制で官需依存から市場拡大へ  
→ 商業活動領域の拡大を志向した制度と、先端的な研究開発による先導と技術移転

・・・そして世界に誇れる日本を。

13

©Yu Takeuchi

スライド 13

## 商業デブリ除去実証

Commercial Removal of Debris Demonstration (CRD2)

深刻化するスペースデブリ問題を改善するデブリ除去技術の獲得と、日本企業の商業的活躍の後押しの二つを目的とする、JAXAの新しい取り組みです。

スペースデブリの積極的除去(Active Debris Removal: ADR)は、その効果・必要性について学会や宇宙機関合等で議論されてきたものの、実現する技術を実証・獲得できていないことが大きく国際的な枠組み作りは具体的に進捗してきませんでした。CRD2は、日本由来の大型デブリの除去を、民間企業と協力して実施することで、この国際的議論の具体的な進展と、日本企業の軌道上サービス市場への訴求力向上の実現を目指すJAXAのプログラムです。



↑ターゲットデブリ



→  
アストロスケール社の  
ADRAS-J衛星によって  
接近、観察

(出典) 文部科学省宇宙開発利用部会資料から一部抜粋



まもなく打上げ！

14

©Yu Takeuchi

スライド 14

## 報告 (4) 宇宙の持続的利用

慶應義塾大学宇宙法研究所研究員・  
宇宙航空研究開発機構  
竹内 悠

佐伯先生から JAXA への要望をたくさんいただいたように理解をしています。普段私は JAXA で仕事をしておりますが、本日は JAXA の職員の立場からではなく、慶應義塾大学宇宙法研究所の一研究者として御報告をさせていただければと考えています。

私のお話は、これまでの先生方がおっしゃったことを、少し違う角度から捉え直したお話とお考えいただければと思います。

持続可能な開発ということ、国際協力あるいは開発学において 1987 年頃から言われている、「将来の世代が自らのニーズを満たす能力を損なうことなく、現在のニーズを満たす開発をする」ということです (スライド 2)。このコンセプトを宇宙にも適用しなければならない時代になりました。これは、宇宙活動の長期的持続可能性として、「将来の世代のために宇宙環境を保全しつつ、現在の世代のニーズを満たすために、平和利用のための宇宙空間の探査と利用から得られる利益への公平なアクセスという目的を実現する方法で、宇宙活動の実施を将来にわたって無期限に維持できる能力」と定義されています。この能力を、人類は持つ必要があります。

この考え方が現在、国際的な規範になりつつあるという観点から、日本も宇宙開発をしなければならぬということを本日は申し上げます。

今なぜ、宇宙の持続的利用かということ、宇宙デブリ同士の衝突により、加速度的に宇宙デブリが増殖していくケスラーシンδροームを恐れているからです (スライド 3)。ケスラーシンδροーム自体は 1970 年代に提唱され、理論的には起こり得ることが分かっていました。それがいよいよ現実化するのではないかという恐れが抱かれているのが現状です。原因としては、超小型衛星の増加が一番大きいと考えます。スライド 4 左上は、国際宇宙ステーションから超小型衛星を 1 機、2 機と放出している画像です。これは 2012 年頃から始まり、それからわずか 10 年で、スライド 4 左下に示したスペース X 社のトランスポーターのように、小型衛星を一度に何十機も放出できるようになりました。スライド 4 右上にあるのはスペース X 社のスターリンクの打ち上げ前の写真です。中の薄い物体のそれぞれがスターリンク衛星で、この薄い衛星から薄い太陽電池パドルが展開して運用されます。これらが既に実用化されています。このように宇宙物体が増えていくと、ケスラーシンδροームが現実化するのではないかという危機感があります。

スライド 5 に軌道上の宇宙物体数の推移を挙げています。2010 年までに、中国の ASAT 実験と、大型衛星同士の初めての衝突、コスモス-イリジウムの衝突がありました。また、2020 年から 2022 年のわずか 2 年間で、スターリンクと超小型衛星が増えています。この後アマゾンが運用するカイパーも参入します。

スライド 6 は衛星コンステレーション計画を示しています。縦軸で高度を、横軸でコンステレーションを構成する衛星 1 機あたりの重量を示しています。一番右側は大型衛星を使った

ものです。600kmほどの高度に150kgほどの衛星を、スペースX社とアマゾンのカイパーが競合する形で打ち上げる計画があります。またワンウェブは、高度1,200kmほどで648機の衛星を打ち上げる計画について、既に許可を取っています。

このようなホラーストーリーが最近よく語られますが、もう少し冷静になってもよいのかなということを、スライド7で示します。このスライドは、2018年に発表された研究で、単位空間当たりの平均密度を示しています。青い線はニュースペースの参入がない状態での2018年時点での平均密度、赤い点線は、2018年当時に計画されていたニュースペースが全て実現した場合の平均密度を表しています。また、現在は10cm以上の物体しかカタログ化していませんが、観測能力が向上して、1cm以上の物体もカタログ化できるようになったときの空間当たりの平均密度を予測したものを、一番上に示しています。

この密度が、肌感覚としてどれぐらいかを計算するとスライド7右のようになります。ニュースペースがない状態だと、 $270\text{km}^3$ に1個となり、距離感で言うと、東京-豊橋間を一辺とする立方体の中に宇宙物体が1個あることとなります。一番密度が高いと考えられる空間でも、一辺が165km、すなわち東京-静岡間を一辺とする立方体の中に1個存在するような状態です。もちろん軌道によって、近づいたり離れたり、スピードが非常に速かったりということもありますが、これがどこまで危険なのか、ある程度冷静に考える必要があると考えております。参考として、スライド7右下に示した航空管制上の安全距離では、すれ違い方向だと10NM（約18.5km）、洋上管制で50NM（約92.5km）がルールになっています。いろいろな要素が違うので一概に比較はできませんが、どこまで危ないかと考えるかは、かなり主観的な問題もあると考えています。

他方、現場はかなり大変になってきています。御存じのとおり、日本を始めとする西側諸国は、アメリカのCSPOC（連合宇宙運用センター）<sup>(1)</sup>のSSA（宇宙状況把握）アグリーメント（スライド8右上）に基づくサービスを使っており、JAXAの衛星に対して接近する宇宙デブリのスクリーニングもこれに含まれます。スライド8左上は、2020年に宇宙政策委員会にJAXAが提出した資料です。これによれば、スクリーニングをしている中で衝突回避制御を実行した回数は、2018年では2件、2020年には6件でした。2年間で2件から6件に増えています。6件程度は大したことではないと思われるかもしれませんが、衛星の運用計画を変更する回数がどんどん増えていることは、非常に大きな出来事であると捉えるべきです。つまり、現場としては難しい状況になりつつあるという証拠でもあります。

これに対して、宇宙の持続的利用のために世界はどのような動きをしているかを、スライド9の年表を用いて簡単に御説明します。2008年頃までには、宇宙デブリが主要な問題になってきました。例えば、宇宙デブリがいろいろな衛星に衝突したり、衛星の不具合の原因であったりすると考えられ、宇宙ステーションの運用にも支障を来している可能性があることが分かかってきた時期です。そのため、COPUOS（国連宇宙空間平和利用委員会）デブリガイドラインが一つの集大成となり、宇宙デブリを抑制する規範が国際的に出てきました。

ところが、2007年頃から、デブリだけを見ても、持続的な、将来にわたって安全な宇宙利用はできなくなるのではないかという機運が高まりました。そこで最初にCOPUOSの場

(1) 地上や宇宙空間の観測機器などでスペースデブリや各国の衛星を監視し、各国政府や衛星事業者に提供する機関。

で宇宙活動の長期的持続可能性を議論しましょうという議題が2007年に提出され、その議論が始まったのが2011年です。4年間、立て付けの議論をした上で、ようやく2011年からCOPUOSで実際の議論を始めています。

その契機は、先ほどもお話ししたとおり、2007年の中国のASAT実験と、2009年のコスモス-イリジウムとの衝突事故です。宇宙空間の物体が飛躍的に増加しているため、将来の持続可能な宇宙活動という観点で議論していかないと、早晩にケスラーシンドロームが現実化するという危機感を持って議論されたわけです。

この危機意識に2015年以降のニュースペースの台頭と、ラージコンステレーションの参入が拍車をかけて、現在は持続的な利用へ向けた活動が必要であるということが、国際的な規範として形成されつつあります。

国際社会では、規範的な側面だけではなく、新たな技術を開発することで解決しようとすることも模索されています（スライド10）。技術自体は政府系の技術開発で蓄積されていましたが、ここ5年ほどで衛星寿命延長、あるいは大型デブリ除去といったミッションが組み込まれる動きが加速しています。さらに、民間企業がそういった軌道上のサービスを提供する、事業としての開発競争も始まっています。

また、規範形成分野も国際社会にとどまらない広がりを見せております。持続可能な宇宙活動を行うための国連での動きに加えて、経済界では世界経済フォーラムがSSR（宇宙持続可能性付け）という仕組みを提唱しているほか、国内の規制官庁が規制を強化する方向に踏み切っている国々がいくつか現れています。日本もそのうちの一つです。さらに、民間の団体においても独自の規範文書を作成する動きが出てきています（スライド11）。また、スライド12に示したように、政治にも同じような動きがあります。

最後に私が申し上げたいことを、スライド13に集約しました。持続可能な宇宙活動を実現することは、将来世代にわたって利用可能な宇宙を残すことが目的ですが、これを実現するためには、ビジネスとして循環する活動に昇華させる必要があると考えています。歴史を見ても明らかなように、地上、海上、そして航空の交通でも、ビジネスとして成立させようとしな分野はなかなか見当たりません。ビジネスにならなければ、真の意味で持続可能な活動になりません。持続可能性を実現するためには、ビジネスとして循環させていくところへ持っていく必要があります。

そこで難しいのは、どのように持っていくかという部分です。この観点で三つだけ申し上げます。

一つ目は、宇宙活動全体の持続可能性の追求が必要だということです。具体的には、商業活動の活発化に対応して、国際共通ルールを作ることです。宇宙活動を運用する当事者全てが共通に遵守する国際ルールを作ることで、競争条件と禁止条件を統一します。これがインフラとして必要になるため、第1に実施しなければならないと思います。

二つ目は、ビジネスによる持続可能な宇宙活動とのバランスのとれた軍民関係です。バランスというのは、均衡させるというよりは、それぞれの国の事情においてバランスをとる必要があると考えています。例えば、日本では軍事での開発をビジネスの国際競争力強化にいかすというような観点を導入することが必要です。軍は軍、民は民、という形での開発ではなく、ビジネスによる持続可能な宇宙活動を行うためには、どのように共用するべきかという観点でバランスをとる必要があります。特に日本は、2008年まで40年以上の長きにわたって、非軍事

で利用するというポリシーで宇宙開発を続けてきた、非常に特徴的な国です。この特徴をいかした対外活動をすることによる、日本なりのバランスのとり方があるのではないかと思います。

最後に申し上げたいのは、官需依存から脱却し、オールジャパン体制で市場を拡大することです。商業活動領域の拡大を志向する制度を作るとともに、そこに先端的な研究開発による先導と技術移転をセットにするのです。もはや JAXA が、民間がと言っている場合ではなくなってきていると実感しています。オールジャパンで市場を拡大していくことを目標にする必要があります。

なお、今、申し上げたいいろいろな要素を併せ持った商業デブリ除去実証という JAXA のミッションがスタートしようとしています(スライド 14)。日本としては第 1 号になると思います。2023 年度中に打ち上げることになっておりますので、ぜひ皆さん応援していただければと思います。以上です。

(たけうち ゆう)