

## 大規模衛星コンステレーション：課題と影響

(Large satellite constellations: perspectives and challenges)

### エグゼクティブ・サマリー

---

#### 大規模衛星コンステレーション：視点と課題

大規模衛星コンステレーションの、特に低軌道（LEO）における急速な拡大は、地球近傍宇宙と人類の関係において転換点である。民間による技術革新、再利用型ロケット、6Gによって追及されるデジタルの普遍化を特徴とする New Space 時代の進展により、数万基規模の衛星がLEO及び中軌道（MEO）に配備され、地球規模のブロードバンド接続や準リアルタイムの地球観測を提供しようとしている。これらの進展は、より高いレジリエンスを備えた普遍的なインターネット・通信カバレッジ、通信とセンシングの統合、さらには宇宙空間を基盤としたインターネット拡張の可能性など、社会に変革的な便益をもたらす可能性がある。これにより、現在通信手段を持たない約30億人が接続できる機会が生まれる。

一方で、大規模コンステレーションは、短期的に軽減すべき前例のない課題とリスクももたらす。

- a. 衛星による反射光や地上方向への電波放射は、光学天文学及び電波天文学の攪乱要因となっている。
- b. 宇宙機の密度増加は衝突及びデブリ生成のリスクを高め、重要な軌道領域を使用不能にするおそれがある。
- c. ロケット打上げ頻度の増加は、再突入時に生き残るデブリが航空交通や地上で人身・物的被害を生じさせるリスクを高める。
- d. また、上層大気への化学物質や粒子の注入増加を伴い、その影響については慎重な評価が必要である。

こうした交通の激化は、共有領域としての宇宙の長期的持続可能性を脅かしている。さらに、不完全な追跡カバレッジ、センサー品質のばらつき、将来の打上げや軌道変更行動の不確実性に起因する知識上の不確実性によってリスクは増幅されている。New Space 革命がもたらす顕著な便益を確保しつつ将来を守るためには、ベストプラクティスの共有と国際的な行動の調整が不可欠である。

S7は、以下に要約する7項目の提言について、G7が検討するよう求める。

1. 大規模衛星コンステレーションに関する研究開発及び不確実性定量化の強化
2. （離脱軌道化（デオービット）及びデブリ低減基準の厳格な履行、許認可の基礎としての軌道収容能力概念の構築による）宇宙交通管理の改善
3. 設計革新及び規制による天文学観測の保護並びに地球観測衛星が最小限の干渉で任務を遂行できる保証
4. 上層大気への影響の評価及び低減
5. 有限資源管理のための新しく公平な許認可制度の実施
6. 現行の地上インターネットにおける普遍性・透明性・衡平な参加の原則の、将来の宇宙ベース・インターネットへの拡張
7. すでに進行中のすべての行動の推進と、可能であれば長期的には国際条約としての統合の検討

本分野の進展速度を踏まえると、地球近傍宇宙の将来の有用性及び人類に資する持続可能なプラットフォーム・機器を収容できる能力は、国際レベルでの行動の即時実施にかかっている。

## 声明

### 大規模衛星コンステレーション：課題と影響

New Space 時代における衛星配備の加速は、世界の宇宙活動に根本的な変革をもたらしている。この変革は、政府機関、並びに民間企業の役割拡大、破壊的なビジネスモデルの展開、再利用型ロケット、新しい衛星プラットフォームの設計と運用、デジタルネットワーク並びに経済との統合によって特徴づけられる。New Space は、急速な技術革新サイクル、打上げコストの低下、大規模な野心的プロジェクトによって定義される。本声明は、低軌道（LEO：高度 350～2000km）における新たな衛星コンステレーションの急速な発展を対象とし、併せて中軌道（MEO：高度 2000～25000km）のコンステレーションも一定程度扱う。ブロードバンド通信に関する展望では、今後 10 年間で約 10 万機の衛星が想定されており、現状と比してすでに巨大な数であるが、最近発表された軌道上 AI データセンター構想では、100 万機規模という警戒すべき計画さえ示されている。

衛星コンステレーションは、接続されていない人々へのインターネットアクセスなど、社会及び経済に新たな機会と便益をもたらす一方で、地球環境、人の安全、各種活動に対して重大なリスクも引き起こす。これらのリスクは、宇宙に存在する物体の数や分布だけでなく、それらの状態や相互作用を時間的に観測・推定・予測する能力の不確実性にも依存する。最近の発表以前でも、計画又は運用中の衛星数はコンステレーションあたり数万基に達していた。

これにより、以下の科学技術分野で多様な課題が生じている。

- ・ 通信：  
ブロードバンドカバレッジ、低遅延、衛星間通信、サイバーセキュリティ、レジリエンス、宇宙ベース・インターネット
- ・ 宇宙科学・技術：  
コンステレーション運用管理、再利用型ロケット、小型化ペイロード、軌道制御用プラズマスラスタ、衝突回避、追跡、宇宙デブリ
- ・ 天文学：  
光学・電波観測への悪影響による観測能力の低下、発見の阻害
- ・ 地球環境：  
打上げ及び再突入頻度増加による上層大気化学への影響、LEO/MEO での衛星・デブリ密度増加、再突入デブリによる危険

以下でこれらの課題を分析し、その後に一連の提言を示す。

## 通信

宇宙通信の進歩により、ユニバーサルブロードバンドカバレッジが可能となり、現在携帯通信やインターネットにアクセスできない30億人が接続する機会が生まれるとともに、将来の宇宙ベース・インターネットの展望が開けつつある。現在の、Starlink、OneWeb、Amazon LE0、中国の国網（Guowang）などのネットワークは、すでに数千基規模の衛星から成り、近い将来に向けてさらに多数の計画が発表されている。これらの衛星は、LE0 および ME0 に配備され、船舶・航空機・遠隔地の人々にブロードバンドを提供しており、地表に対して固定されている静止衛星（高度 36,000km）よりも遅延が少ない。これらのネットワークは、衛星間データ中継、機上データ処理に基づいており、場合によっては観測と通信の機能を有する。総容量（総ビットレート）は地上ネットワークよりもはるかに小さいものの、長距離のエンドツーエンド遅延とレジリエンスの面では地上ネットワークを上回る見込みである。機上 AI の初期の成功例や、量子鍵配送を介した最初の量子通信も近年報告されている。急速に進化する最先端技術は、将来、今日の我々になじみのある地上インターネットを補完し拡張する「空間インターネット」を予感させる。したがって、これらのコンステレーションによって既にもたらされている便益及びそれに付随する見通しは顕著である。しかしながらそれらの発展には重大な課題が伴う。その一つが、この文脈でよく知られた問題である、周波数資源の制約である。この点については、提言に列挙した一般原則が優先されるべきである。もう一つは、データセンター用途を想定した超大規模コンステレーションの技術的実現可能性（エネルギー需要、冷却、衝突回避、宇宙交通管理）である。現段階では科学的裏付けを欠いている。

## 宇宙科学・技術

衛星コンステレーションは、複雑な地上局運用の支援に加え、機上計算／データ処理能力などのこの分野における複数の科学技術的進歩を活用しており、それにより、大規模コンステレーションの効果的な管理が可能となっている。多数の衛星を軌道投入することを可能にしたのは、宇宙アクセス費用の顕著な低下、複数ペイロードの単一ロケットへの搭載を可能にする衛星プラットフォームの小型化、再利用型ロケット第1段の開発、軌道制御のための革新的な宇宙船のプラズマスラスタである。ブロードバンド通信、地球観測、全地球測位、時刻配信といった新たな機能は、高度に多様化した新たな種類の衛星とサービスの開発につながっている。

これにより、衛星とカタログ化デブリの軌道要素（エフェメリス）を維持・更新し、衝突確率を計算し、回避策を実施できるよう運用者へ適時情報提供するための、新たな監視・追跡システムが必要となった。異なる国が所有するコンステレーションの増加、衛星人口の増大、追加的に生成されるデブリにより、LE0/ME0 の軌道管理はより複雑になっている。衝突回避のためのマヌーバ回数は既に非常に多く（例：Starlink 運用の単年で10万回超）、より大規模なコンステレーションが配備されればさらに増えるであろう。回避マヌーバ率と

推進剤消費は、軌道シェルにおける混雑と運用負荷の定量指標として扱うべきである。衛星位置、光度、消滅（demise）データの情報は公開されるべきであり、政策決定者や公的安全担当者がデータに基づき意思決定を行えるようにする必要がある。

## 天文学

近年のコンステレーション急拡大は、光学・電波の両天文学に対してますます負の影響を及ぼしている。光学分野では、衛星の太陽光反射が夜空の望遠鏡画像に筋状の痕（ストリーク）を生じさせ、汚染する。これは広視野装置によるサーベイ、とりわけ突発現象の探索に大きく影響する。シミュレーションによれば、48,000 基の衛星がある場合、チリのアタカマ砂漠（ESO の超大型望遠鏡、超々大型望遠鏡、まもなく本格稼働する Vera Rubin 広視野望遠鏡の所在地）から薄明時に最大 2,000 基が見え、数百基は肉眼で見えるほど明るくなり得る。100 万基規模のコンステレーションでは、十分な緩和策がなければ、肉眼で見える衛星が約千基に達し、夜空は大きく変質する。注目に値するのは、LEO の宇宙望遠鏡すらコンステレーションの影響を受け始めている点である。電波天文学も、24 時間体制で妨害を受ける。ダウンリンク送信や基上電子機器からの干渉が、極めて高感度な電波源観測や基礎的宇宙論サーベイを脅かしている。この影響を緩和するための取り組みは、地上の電波観測所が視界に入っている間は当該観測所の方向に向けた信号送信を行わないことを求める「ローカルな電波聖域（radio sanctuaries）」の設定によって、すでに一定の進展を見せている。この手続きは一部の運用者により自主的に受け入れられており、電波観測所への影響を大幅に低減する。しかし残念ながら、このプロトコルを順守している運用者であっても、その影響を完全には緩和できない。というのも、衛星の電子機器が低周波で意図せず放射する電磁波が、極めて高感度な電波天文観測に対して追加的な擾乱を生じさせるからである。もし百万規模のコンステレーションが展開されれば、この状況は劇的に悪化する可能性がある。

## 地球環境と化学

この領域での主要な懸念は、デブリの増殖と、それに伴う軌道シェルの空間密度上昇、そして落下デブリが地上にもたらす危険である。現在、10cm 超の物体が 28,000 個以上追跡されている一方、より小さい破片は数十万個にのぼり、管理情報（custody information）がない。昨年の予測では、今後 10 年で LEO/MEO に最大 80,000 基の衛星が追加され得る。これは、稼働中の衛星や、寿命終了時に軌道を離脱しない宇宙船、デブリとの衝突リスクを高め、結果として自動衝突回避システムの複雑さが増し、新しい LEO 衛星は大幅に複雑化する必要がある。高度 600km 未満では、大気抵抗により数か月～数年（高度と太陽活動による）で自然に軌道離脱が進み、デブリの長期蓄積を抑制する。しかし 600km 超ではこの「掃除」ははるかに効きにくく、大気抵抗による離脱に長い時間がかかる。

注目すべきことに、一部のコンステレーション（例：Starlink）は、運用計画において標準的な慣行として再突入時の「消滅（demise）」と継続的な打上げによる補充を組み込んで

いる。寿命終了衛星の責任ある離脱軌道化に加え、故障衛星やデブリの能動除去を提案する新企業もあるが、そうしたサービスの実現性と経済性は評価が必要である。連鎖衝突（別名ケスラー・シンドローム）が起きれば、LEO/MEOの一部領域が利用不能になり得る。打上げペースの加速と大規模なコンステレーション増加を踏まえ、LEO/MEOの持続可能性評価の統一概念として「軌道収容能力 (orbital carrying capacity)」を検討することは喫緊事である。また軌道収容能力は、ある軌道領域が持続可能に受け入れられる最大の運用負荷を、結果 (consequence) に基づく複合指標として定義すべきである。宇宙機・デブリ・運用者・追跡知識からなる結合系が、許容可能な回避負担、衝突リスク、サービス継続性のもとで安全・信頼性ある運用を支えられなくなる時に飽和に達する。飽和は、回避マヌーバの急増、衝突接近 (conjunction) 警報の過負荷、独立カタログ間の追跡・予測乖離の拡大、科学やミッションの特定軌道シェルへのアクセス制限、宇宙ベースサービスの劣化など、測定可能な指標として現れる。従って軌道収容能力は物体数だけでなく知識不確実性にも依存する。信頼できる安全で経済的に成立し妨げられない運用を支えられない閾値を同定する助けとなり、より防御可能な許認可基準、高度別の管理レジーム、能動的混雑管理戦略の技術的基盤となり得る。

打上げ増加は大気への化学物質沈着も増やす。打上げ時の黒色炭素などの燃焼生成物、ロケット段や衛星再突入時のリチウム、アルミニウム、チタンなどが、成層圏・中間圏に蓄積する。上層大気化学、とりわけオゾン層への影響は慎重に評価される必要がある。さらに衛星再突入（現在は1日数回を超える頻度）は、人間及びインフラに対する危険性を増大させる。

## 提言

---

S7は、以下の7項目の提言について、G7が検討するよう求める。

1. **衛星コンステレーションの便益**（地球上の接続されていない多くの人々へのインターネットアクセス、より高速で強靱かつ安全な通信、リアルタイムの地球観測、通信とセンシングの共同利用、エッジコンピューティング、AI、量子通信等）を最大限に活用するため、非地上ネットワークに関する研究開発を強力に支援すべきである。

これらの顕著な進展は、本声明で挙げた主要な負の影響とリスクが集団的に対処されて初めて実現し、持続する。したがって、次の一連の提言は、これらのリスクに関するものである。

2. **急速に増加する衛星数に伴う主要リスクに対応するため、LEO及びMEOの軌道資源の収容能力に関する科学的評価を強化する必要がある。**

軌道領域を利用しアクセスする権利は、この能力評価に基づいて規制されるべきであり、現時点での知識の不完全性を明示的に認識する必要がある。これにより、すべての者による軌道資源の長期的かつ持続可能な利用が保証される。連鎖衝突を防ぐため、衛星が寿命終了時において確実に軌道を離脱し、追跡・衝突回避機構が強化されることを担保することが不可欠である。宇宙交通管理、デブリモデリング、ならびにコンステレーションのライセンスングにおいて、不確実性の定量化に関する要件を強化することが重要である。リスク評価においては、不確実性の境界、モデル感度、仮定への依存が報告されるべきである。ライセンスング及び配分に関する意思決定の評価は、モデル誤差や不完全知識のもとでも頑健性を担保する観点から、不確実性を考慮したリスク許容域に照らして行われるべきである。

3. 天文学は重大な困難に直面しており、将来にわたってもそうであろう。現在計画されている大規模コンステレーションが天文観測に与える影響を踏まえ、また現在及び将来のコンステレーションに関する計画や見通しを勘案すると、**天文学を破壊的影響から守るための緩和策を国際的規模で設計・実施すべきである**。同様に、地球観測プログラムを担う宇宙ベース・プラットフォームによるリモートセンシングも保護されるべきである。
4. ロケット打上げの著しい増加及び衛星の再突入数のさらなる増大により、**上層大気の化学変化、地球の地球規模の放射収支、残存コンポーネント (surviving components) が地上に到達することによる人身・物的被害、についての定量的評価が必要である**。

最後に、以下の提言群は、原則に関するものである。

5. 軌道及び周波数資源は、人類の公共財であり、基本的に有限である。短期的には、新しく、より情報に基づき、公平な配分制度が明確に求められる。
6. より長期的には、現在の地上インターネットにおける普遍性・透明性・公平な参加の原則を、本声明で言及した将来の宇宙ベース・インターネットへ拡張すべきであり、これは商業利用と政府利用の双方に適合するものであるべき。
7. **推奨実践の定義及び採択、国際標準、産業界・宇宙機関・学術関係者間の合意**など、すでに進行中の行動を促進・強化する必要がある。理想的には、国際電気通信連合（ITU）に類似しているものの、より広範囲の責務を有する、具体的には周波数・軌道の配分だけでなく、交通管理上の考慮事項や環境・天文学への影響も考慮する、統治機関が、地球規模の持続可能性を確保するために必要である。さらに、これらの課題に焦点を当てた政府間パネルを設立し、衛星の増殖とそれに付随する軌道収容能力の問題に関連した、現在の知見や宇宙環境の変化について、政策立案者に定期的な科学的評価を提供することは、時宜を得たものである。最終的には、大規模衛星コンステレーションに起因する主要課題に対処するための共通の枠組みとして、これらの問題に関する**国際条約**を締結することが推奨される。