



AIが再編する 次世代デジタル基盤

地上・宇宙融合インフラと日本の産業戦略



目次

01	はじめに	04
02	AIが再編するデータセンター	06
03	軌道上データセンターの登場	13
04	地上・宇宙融合インフラの構造転換	19
05	地上・宇宙融合インフラが支える新たなAI活用	27
06	地上・宇宙融合インフラにおける日本企業の勝ち筋	32
07	おわりに	38

本レポートについて

本レポートは、PwCコンサルティング合同会社の宇宙・空間産業推進室が、宇宙・ICT分野の業界知見を踏まえて作成したものである。政策・技術・経済の各分析を統合し、生成AIの普及がデータセンターの立地や機能分担に与える影響を起点に、軌道上データセンターをめぐる構想と技術課題、そして地上と宇宙が一体化する次世代インフラの構造転換を整理・分析している。本レポートは、軌道上データセンターを単独の宇宙ビジネスとしてではなく、AI・通信・計算・制御・データ流通・セキュリティを地上と宇宙にまたがって支える次世代産業基盤、すなわち地上・宇宙融合インフラとして捉え直し、日本がこの形成途上の領域にどのように関与し得るかを描くことを目的としている。

**中林 優介**

パートナー
PwCコンサルティング
合同会社

**榎本 陽介**

シニアマネージャー
PwCコンサルティング
合同会社

**江尻 智礼**

シニアマネージャー
PwCコンサルティング
合同会社

序文

AIの普及は、計算をどこでどう行うかという前提そのものを変えつつある。それは、データセンターを単なるIT設備から、電力・通信・土地・冷却・地域政策と一体で整備される社会インフラへと変え、その立地を地上から宇宙へと押し広げる動きを伴う時代である。従来は地上で完結していた通信・計算・データ流通は、軌道上データセンターやスペースエッジコンピューティングの登場により、地上と宇宙にまたがる一体のアーキテクチャ、すなわち地上・宇宙融合インフラへと再構成されつつある。本レポートは、この新たな基盤を単独の宇宙ビジネスとしてではなく、AI時代の通信・計算・制御・データ流通・セキュリティを支える次世代産業基盤として捉え直し、その意味と可能性を包括的に分析することを通じて、変革期にある産業の方向性を示そうとするPwCの取り組みである。政府から民間企業に至るまで、幅広いステークホルダーがこの形成途上の領域を的確に捉え、日本が次のデジタル・AI基盤の形成段階から主体的に関与していくための示唆を提供することを目的としている。

主要メッセージ

- AIの普及により、データセンターは社会インフラへと変化している。立地の論点は「どこに置くか」から「どのワークロードをどこで担うか」へと移行している。
- データ処理需要は地上に閉じない。軌道上データセンターやスペースエッジコンピューティングは地上を代替するのではなく、地上と宇宙が連携する分散型の地上・宇宙融合インフラとして捉えるべきである。
- その本質的価値は、宇宙を地球規模の観測点・通信点・処理点として組み込む点にある。世界モデルやPhysical AIの進展が、この基盤をAI時代の中核インフラとする。
- この領域はまだ勝者も標準も確定していない。日本にとっては、過去の「デジタル敗戦」を繰り返すか、形成段階から関与できるかの分岐点である。
- 日本の勝ち筋は、全レイヤーの垂直統合ではなく、強みのある基盤構成要素と社会課題起点のユースケースを押さえることにある。官民連動で実証・制度・標準・投資を進めることが不可欠である。

PwC スペースプラクティスチーム概要

PwCは、136の国と地域に364,000人以上の専門家を擁する、世界最大級のプロフェッショナル・サービス・ネットワークである。経営コンサルティングの黎明期にさかのぼる歴史を持ち、航空宇宙・防衛分野で強固な専門性を有するStrategy&も本ネットワークに含まれる。

PwCは、宇宙分野に特化した専門知見と、宇宙バリューチェーン下流領域（利用・産業応用分野）まで及ぶ幅広いリーチを併せ持つ、専任のスペースプラクティスチームを有する。中核チームの支援領域は、戦略、政策、経済分析、ガバナンス、テクノロジー、人材・組織、規制分析に及ぶ。

さらに、監査・保証、税務、テクノロジー、オペレーションといった各サービスラインと連携し、宇宙関連企業には監査・税務・事業変革・市場インサイト等の従来型サービスを、航空宇宙・防衛や宇宙セクター外の企業には宇宙特化型の支援を提供している。これにより、「宇宙の価値を引き出す（unlocking the value of space）」ことに貢献している。

01 はじめに



生成AIの急速な普及により、データセンターは単なるIT設備ではなく、電力、通信、土地、冷却、地域政策と一体で整備される社会インフラへと変化しつつある。大規模言語モデルの学習やAI推論の増加は、計算資源と電力需要を押し上げ、従来の都市近接・インターネットエクスチェンジ（IX）近接型のデータセンター立地に加えて、電力を確保しやすい地域や脱炭素電源を活用しやすい地域への分散配置を促している。こうした電力供給をめぐる制約は、太陽光発電をより効率的に活用できる宇宙空間で計算資源を確保するという発想にもつながっており、軌道上データセンターが検討される背景の一つになっている。

一方で、データ処理需要の拡大は地上だけに閉じた動きではない。衛星数の増加、観測センサーの高性能化、衛星間通信の高度化、人類の地球外活動、すなわち低軌道や月面などでの活動の拡大により、宇宙で取得・生成・中継・処理されるデータ量も増加している。従来は、宇宙で取得したデータを地上へ伝送し、地上のデータセンターやクラウドで処理することが基本であった。しかし、観測データ量の増大、通信帯域、地上局の可視時間、月面・深宇宙における通信遅延といった制約を踏まえると、宇宙空間でデータを保存・処理・中継するスペースエッジコンピューティングや軌道上データセンターの重要性が高まる可能性がある。

もともと、軌道上データセンターは、地上データセンターを単純に代替するものではない。電力供給、熱制御、通信、計算アーキテクチャ、運用・保守、打上げコストなど、多くの技術的・経済的課題が存在する。したがって重要なのは、軌道上データセンターを単体の取組・構想として捉えることなく、地上データセンター、軌道上データセンター、衛星ネットワーク、クラウド、エッジが連携する新たな分散型アーキテクチャとして捉えることである。

このような地上と宇宙が融合するインフラは、世界モデルやPhysical AIの進展とも密接に関係する。AIが文章・画像・コードの生成にとどまらず、現実世界の状態を把握し、予測し、判断・制御へ関与する方向へ拡張していくほど、衛星、地上IoTセンサー、設備、車両、ドローン、ロボットなどから得られるデータを、必要な場所で処理し、現場へ返す仕組みが重要になる。すなわち、地上と宇宙が融合したインフラは、AI時代におけるデータ取得、通信、計算、制御、セキュリティ、データ主権を一体で支える次世代ICTインフラ基盤として位置づけられる。

本レポートでは、まずAI需要の拡大が地上データセンターの立地や機能分担に与える影響を整理する。次に、軌道上データセンターをめぐる構想と技術課題を確認したうえで、地上・宇宙が融合したインフラの構造転換を整理する。その後、世界モデル／Physical AIの進展を踏まえたユースケースを示し、最後に、日本がこの次世代インフラ基盤形成にどのように関与し得るかを検討する。

02 AIが再編するデータセンター



生成AIの急速な普及は、データセンター需要を押し上げるだけでなく、データセンターをどこに配置するかという立地の前提を変え始めている。

大規模言語モデルをはじめとするAIの学習・推論には膨大な計算資源と電力が必要であり、AIデータセンター関連投資は今後も拡大していくと見込まれる。こうした投資拡大は、データセンターの容量拡大にとどまらない。AIデータセンターでは、従来以上に大規模かつ安定的な電力供給が求められ、特に大規模AI計算基盤では、キャンパス全体でGW級の電力確保が論点となるケースも出始めている。

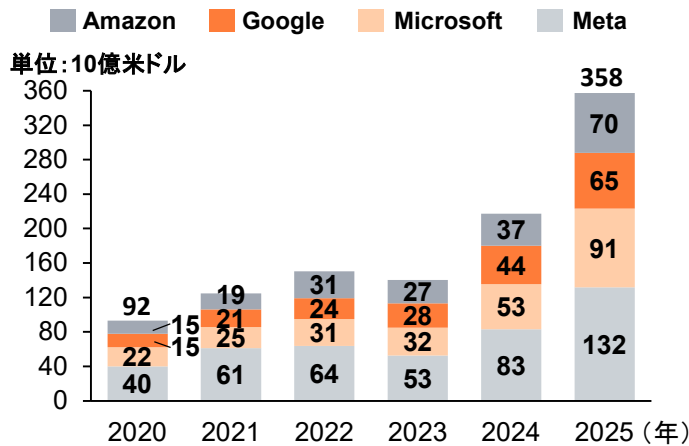
そのため、データセンター立地は、従来の大都市近郊・IX近接型の集積に加え、電力を確保しやすい地域や、再生可能エネルギー・脱炭素電源を活用しやすい地域へと広がり始めている。本章では、米国、欧州、日本におけるデータセンター立地の状況変化を確認したうえで、AI需要の拡大に伴うワークロードの分化を整理し、今後のデータセンターが「どこに置かれるか」だけでなく、「どの機能をどこで担うか」という観点で再編されていくことを示す。

生成AI・推論用途の拡大と データセンター投資の増加

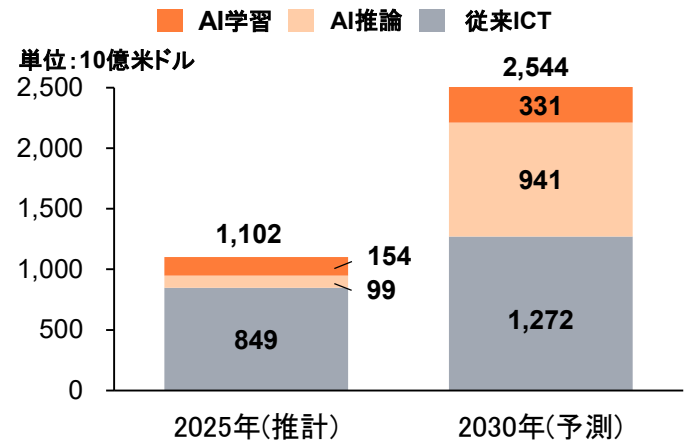
現在のデータセンター投資を強く牽引しているのは、大規模言語モデル(LLM)を中心とする生成AIの学習・推論需要である(図表1)。大規模言語モデルの学習には膨大な計算資源と電力が必要であり、また生成AIサービスの利用拡大に伴い、推論処理の需要も急速に増加している。今後は、マルチモーダルAI、AIエージェント、世界モデル、Physical AIといった技術領域の発展により、計算・電力需要はさらに拡大し、その用途も多様化していく可能性がある。

図表1 主要ハイパースケーラー設備投資額とデータセンター容量の建設費相当額(試算)

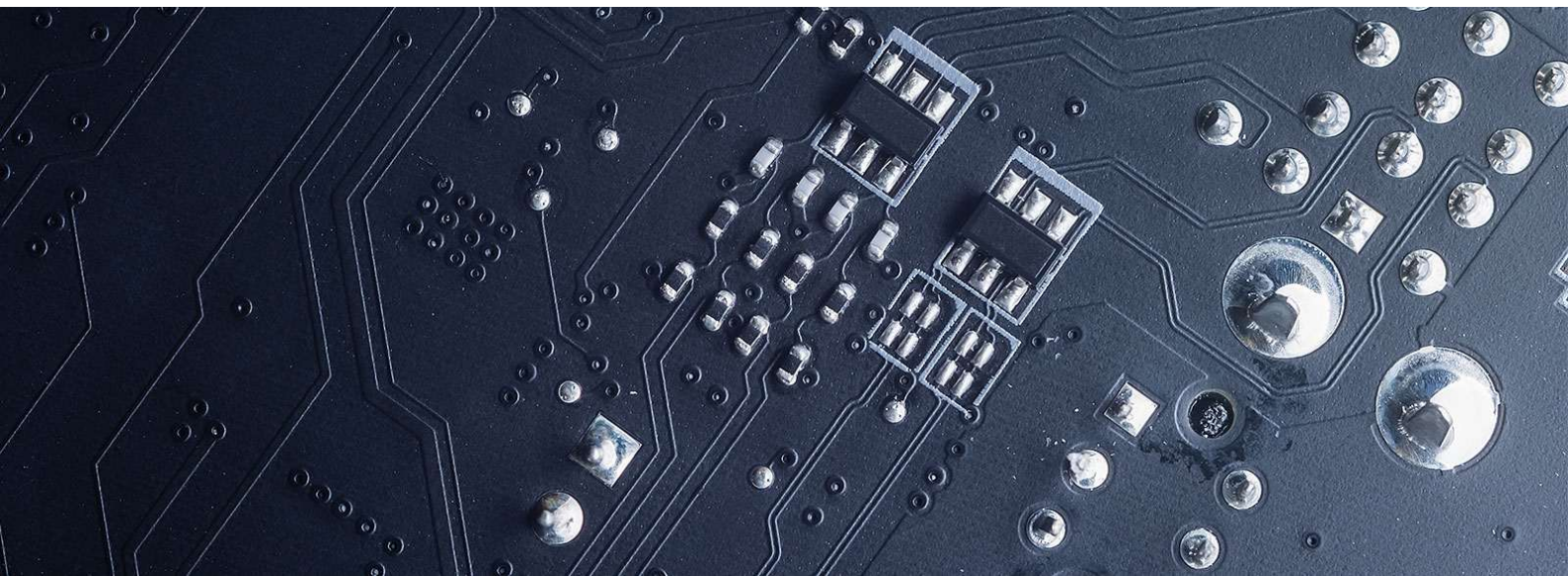
主要ハイパースケーラー設備投資額



ワークロード別データセンター容量 建設費相当額(試算)

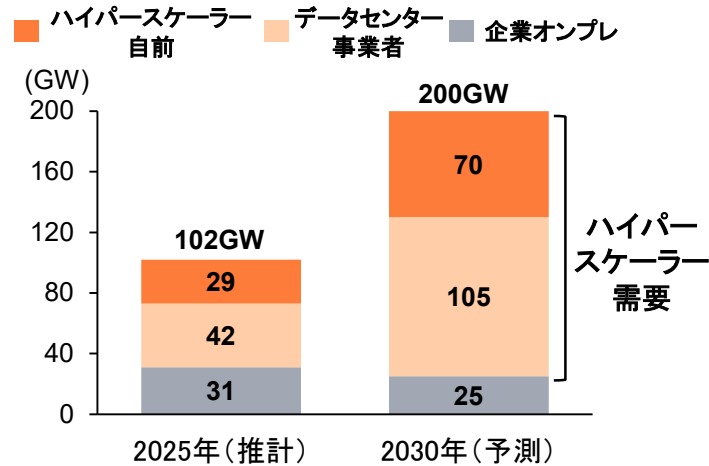


出所: WallStreetNumbers¹、JLL "2026 Global Data Center Outlook"²を基にPwC作成

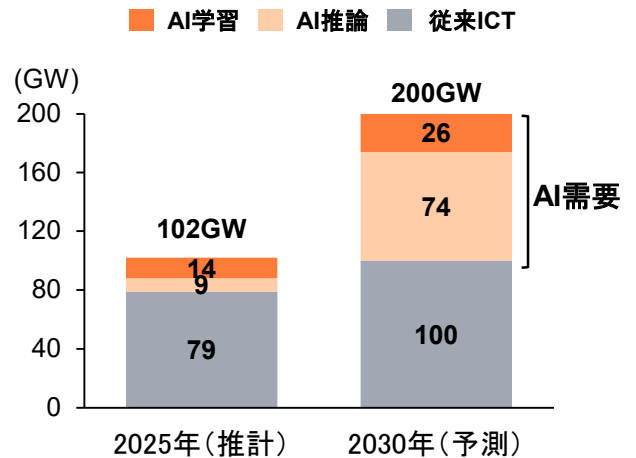


図表2 グローバルデータセンター容量の拡大

事業者タイプ別



ワークロード別



出所: JLL「2026 Global Data Center Outlook」を基にPwCが推計・作成

さらに、グローバルのデータセンター容量は、2025年の約102GWから2030年には約200GWへとほぼ倍増する見通しである(図表2)。容量拡大の中心はハイパースケーラーの自社データセンター建設と、主に旺盛なハイパースケーラー向けにデータセンターを提供するデータセンター事業者による建設である。ワークロード別では、AI学習・AI推論向けの需要が主な成長ドライバーとなっている。

米国におけるデータセンター立地の変化

米国におけるデータセンターの歴史を振り返ると、1990年代以降、IX、すなわちインターネット相互接続点の周辺を中心にデータセンターが集積し、発展してきた。代表的なエリアとしては、ワシントンDC近郊の北バージニア地域、シリコンバレー、ダラス・フォートワース、シカゴ、ニューヨーク・ニュージャージーなどが挙げられる。特に北バージニアでは、1990年代にMAE-Eastなどの相互接続拠点が形成され、1998年にはAshburnにデータセンターが開設されるなど、インターネットの相互接続機能を起点にデータセンター集積が進んだ³。

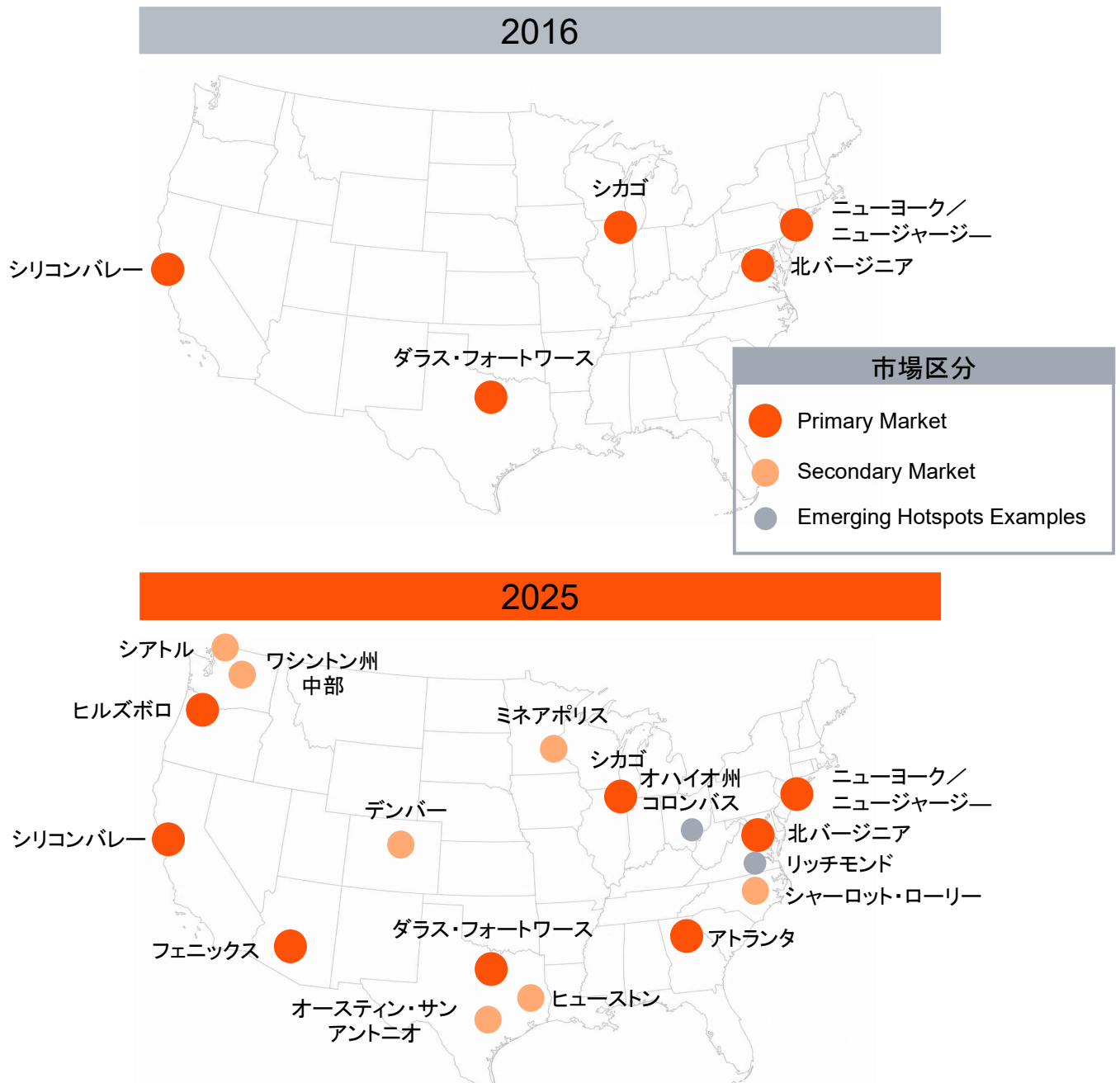
しかし、2010年代後半から2020年代にかけて、従来型のデータセンター集積地では新たな制約が顕在化している。西海岸のシリコンバレーでは、不動産価格の高騰やカリフォルニア州の高い電力費用、送電網の制約により、大規模なデータセンター開発が難しくなりつつある。実際、サンタクララ周辺では、電力供給の遅れにより、完成済みのデータセンター設備が十分に稼働できない事例も報じられている⁴。

同様の変化は、世界最大級のデータセンター集積地である北バージニアでも生じている。生成AIの普及に伴うデータセンター需要の急増により、電力供給や送電網の制約が深刻化し、地域の電力価格や系統投資負担をめぐる議論も広がっている。米国全体で、データセンターの電力需要は2023年の176TWhから2028年には325～580TWhへ増加する可能性がある⁵とされ、データセンター需要は電力システムに大きな影響を与え始めている⁵。

こうした中で、データセンター開発は既存の大都市圏・IX近傍だけでなく、より大規模な電力供給や土地を確保しやすい地域へと分散・拡張し始めている(図表3)。例えば、オハイオ州やインディアナ州など中西部では、大規模なAI向けデータセンター開発が進んでいる。AWSがAnthropic向けに構築したProject Rainierは、AWSのTrainium2チップを約50万個規模で用いるAI計算基盤であり、生成AI向けデータセンター投資の象徴的な事例といえる⁶。

すなわち、AI時代のデータセンター立地では、従来重視されてきた「IXや大都市圏への近さ」に加えて、「大規模な電力を安定的に確保できること」が重要な要件となっている。データセンターは、単なる通信・IT施設ではなく、電力供給、送電網、土地、冷却、地域政策と一体で考えるべきインフラへと変化している。

図表3 米国におけるデータセンター立地の変化



欧州におけるデータセンター立地

欧州における主要なデータセンター立地は、従来、フランクフルト、ロンドン、アムステルダム、パリを中心とするFLAP市場を軸に発展してきた。近年では、これにダブリンを加えたFLAP-D市場として語られることも多い。FLAP-D市場の稼働容量は2019年の1.8GWから2025年には3.6GWへと拡大しており、欧州の中核的なデータセンター市場としての地位を維持している⁹。

一方で、欧州でも米国と同様に、AI需要の拡大によりデータセンター立地の前提が変化し始めている。FLAP-Dのような主要市場では、電力系統の接続待ち、土地制約、規制・環境要件、地域住民との調整が課題となっている。電力系統への接続に最大10年程度を要するケースもあり、AI関連の成長の半分以上がTier 2市場や新興市場で発生する可能性がある⁹。

このため、欧州のデータセンター開発は、従来のFLAP-D中心の構造を維持しつつも、北欧、南欧、中東欧などの新たな地域へ分散していく可能性がある。特にノルウェー、スウェーデン、フィンランド、デンマークなどの北欧諸国は、冷涼な気候による冷却効率の高さ、再生可能エネルギー比率の高さ、比較的低炭素な電力供給という点で、AI時代のデータセンター立地として優位性を持つ。つまり欧州ではFLAP-Dなどの中核市場が引き続き重要である一方、電力アクセス、土地、系統接続の観点から、二次市場・新興市場への開発分散が進んでいる¹⁰。

もっとも、これはFLAP-Dから北欧などへ一気に重心が移るというよりも、ワークロードの性質に応じて立地が分化していく動きと捉えるべきである。低遅延や金融・企業向け接続が重要なワークロードは引き続きフランクフルト、ロンドン、アムステルダム、パリ、ダブリンなどの既存集積地に残る一方、大規模な電力を必要とし、一定の遅延を許容できるAI学習や大規模バッチ処理については、電力・冷却・土地の条件に優れた地域へ配置される可能性がある。すなわち、欧州でもデータセンター立地は、従来の「通信・金融・都市近接性」を軸とした集積から、「電力・冷却・脱炭素電源」を含む複合的な立地評価へと変化しつつある。

日本における データセンター立地とワット・ビット連携

日本においても、米国や欧州と同様に、データセンターへの電力供給の制約が、データセンター立地の前提を変え始めている。従来、日本のデータセンターは、需要地への近接性、通信インフラ、IX、海底ケーブル陸揚げ局との接続性を背景に、首都圏や関西圏へ集中してきた。特に千葉県の印西・白井エリアは、東京圏に近く、海底ケーブル陸揚げ局と東京都心のIXを結ぶ光ファイバルート上に位置する通信ネットワーク上の優位性や災害リスクの相対的な低さを背景に、国内最大級のデータセンター集積地として近年急激に発展してきた。NTTデータグループも、印西・白井エリアについて「国内最大級のデータセンター集積地」と位置づけ、同エリアで約250MW規模のデータセンターキャンパス開発を計画している¹¹。

また、Googleは千葉県印西市に日本初の自社データセンターを開設したことを公式に公表している。通常、ハイパースケーラーはデータセンターの具体的な所在地や設備規模を詳細に公表しないことが多く、同事例は、印西・白井エリアが国内有数のデータセンター集積地として位置づけられていることを象徴している¹²。

しかし、AI時代においては、こうした既存集積地への集中が新たな制約を生みつつある。大規模なAIデータセンターでは、従来型のクラウドデータセンター以上に高密度な電力供給や冷却能力が必要となる。そのため、首都圏や関西圏のような大需要地にデータセンター開発が集中し続けると、発電設備、送電網、変電設備、系統接続の面で追加的な負荷が発生する。また、防災・レジリエンスの観点からも、重要なデジタルインフラが特定地域に過度に集中することは、巨大地震や大規模災害時のリスクを高める可能性がある。

こうした問題意識を背景に、経済産業省と総務省は、2025年3月より「ワット・ビット連携官民懇談会」を開催している。ワット・ビット連携とは、電力、通信、データセンター事業者が連携し、電力インフラと通信インフラを一体的・効率的に整備する考え方である。経産省・総務省は、AIの利用進展や通信トラフィックの増加によりデータセンター需要が急速に拡大していることを背景に、データセンター整備を主に電力・通信インフラの側面から検討するため、官民の関係者による連携・協調の場として同懇談会を設置した¹³。

ワット・ビット連携の本質は、電力需要が集中する場所へ送電網を後追いで整備するだけでなく、電力供給が比較的容易な地域や、再生可能エネルギーなど脱炭素電源を活用しやすい地域にデータセンターを誘導し、通信ネットワーク側を含めて全体最適を図る点にある。すなわち、データを需要地の近くで処理するだけでなく、電力が得やすい地域に計算処理を配置し、通信網によって需要地と結ぶという発想である。

この動きと連動する政策として、経済産業省はGX戦略地域制度を創設している。GX戦略地域制度は、コンビナート跡地や地域に偏在する脱炭素電源などを核に、新たな産業クラスターを形成することを目的とする制度であり、その類型の一つとして「データセンター集積型」が設けられている。経産省は2026年4月、データセンター集積型の有望地域、すなわち一次審査通過地域として、北海道、秋田県、宮城県、栃木県、茨城県、富山県、香川県、福岡県、鹿児島県の9道県を選定した¹⁴。

上記のようなデータセンターの地方分散に向けた動きは、既存の首都圏・関西圏のデータセンター集積を直ちに置き換えるものではない。むしろ、低遅延が求められる処理や大都市圏の企業需要に対応するデータセンターは引き続き首都圏・関西圏に残りつつ、AI学習、大規模バッチ処理、バックアップ、災害対策、産業データ処理など、一定の遅延を許容できるワークロードについては、電力供給や土地、脱炭素電源の条件に優れた地域へ分散していく可能性がある。

その意味で、日本におけるワット・ビット連携とGX戦略地域制度は、米国や欧州で進むデータセンター立地再編と同じ構造を持っている。すなわち、従来の「需要地・IX・海底ケーブルに近い場所へ集積する」モデルから、「電力供給、通信網、脱炭素電源、レジリエンス、地域産業政策を組み合わせる」モデルへの転換である。

今後、日本においても、発電所や再生可能エネルギーの適地、送電網の増強計画、地上通信網、海底ケーブル、地方自治体の誘致政策が一体となり、電力地産地消型のデータセンター集積が形成される可能性がある。ただし、その実現には、電力会社、通信事業者、データセンター事業者、クラウド事業者、自治体が初期段階から連携し、電力・通信・土地・防災・地域受容性を一体で設計することが不可欠である。

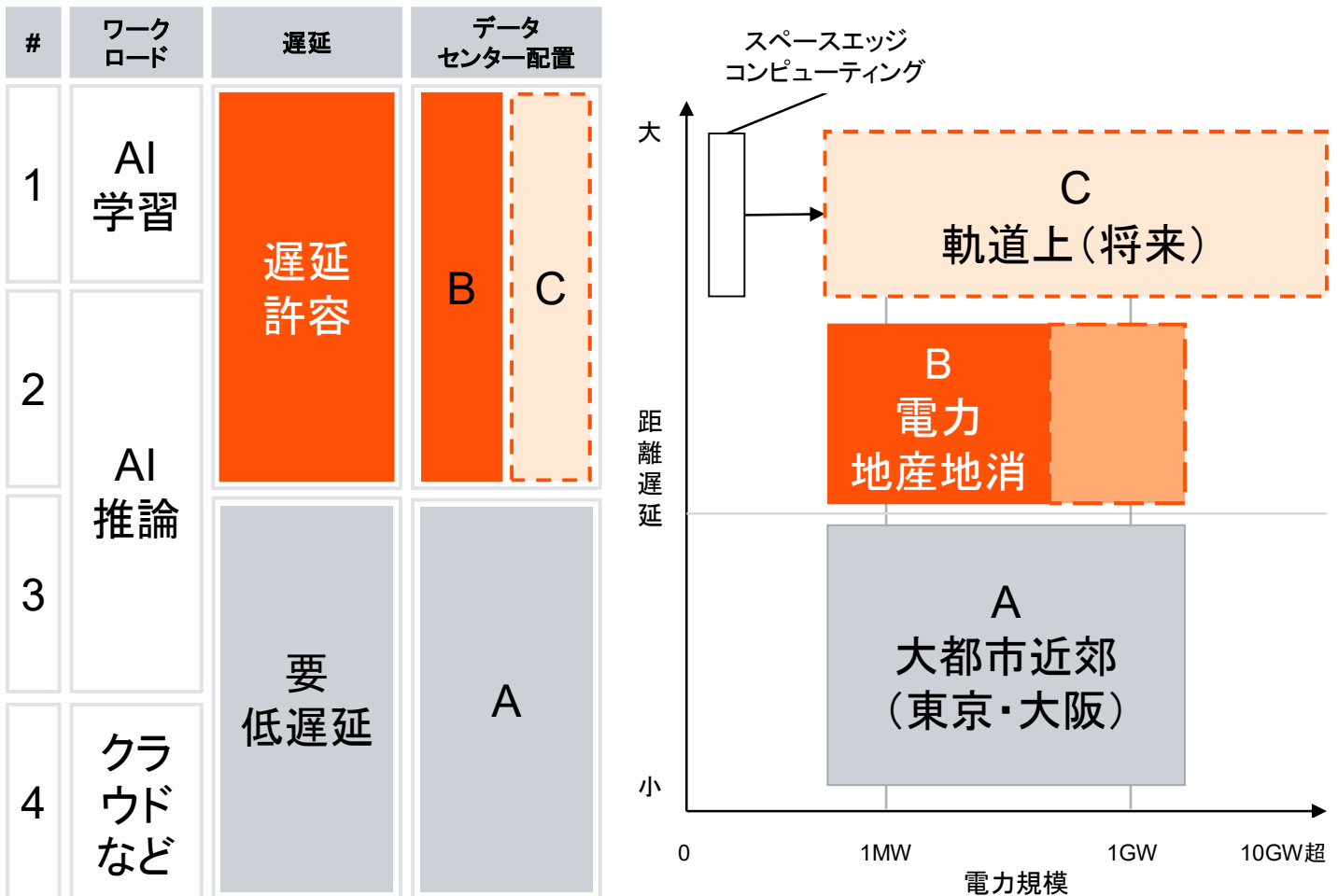
したがって、日本のデータセンター立地は、印西・白井のような既存集積地を中心とした構造から、ワット・ビット連携やGX戦略地域制度を通じて、地方分散型・電力連動型の構造へと徐々に広がっていく可能性がある。

データセンターの機能分担

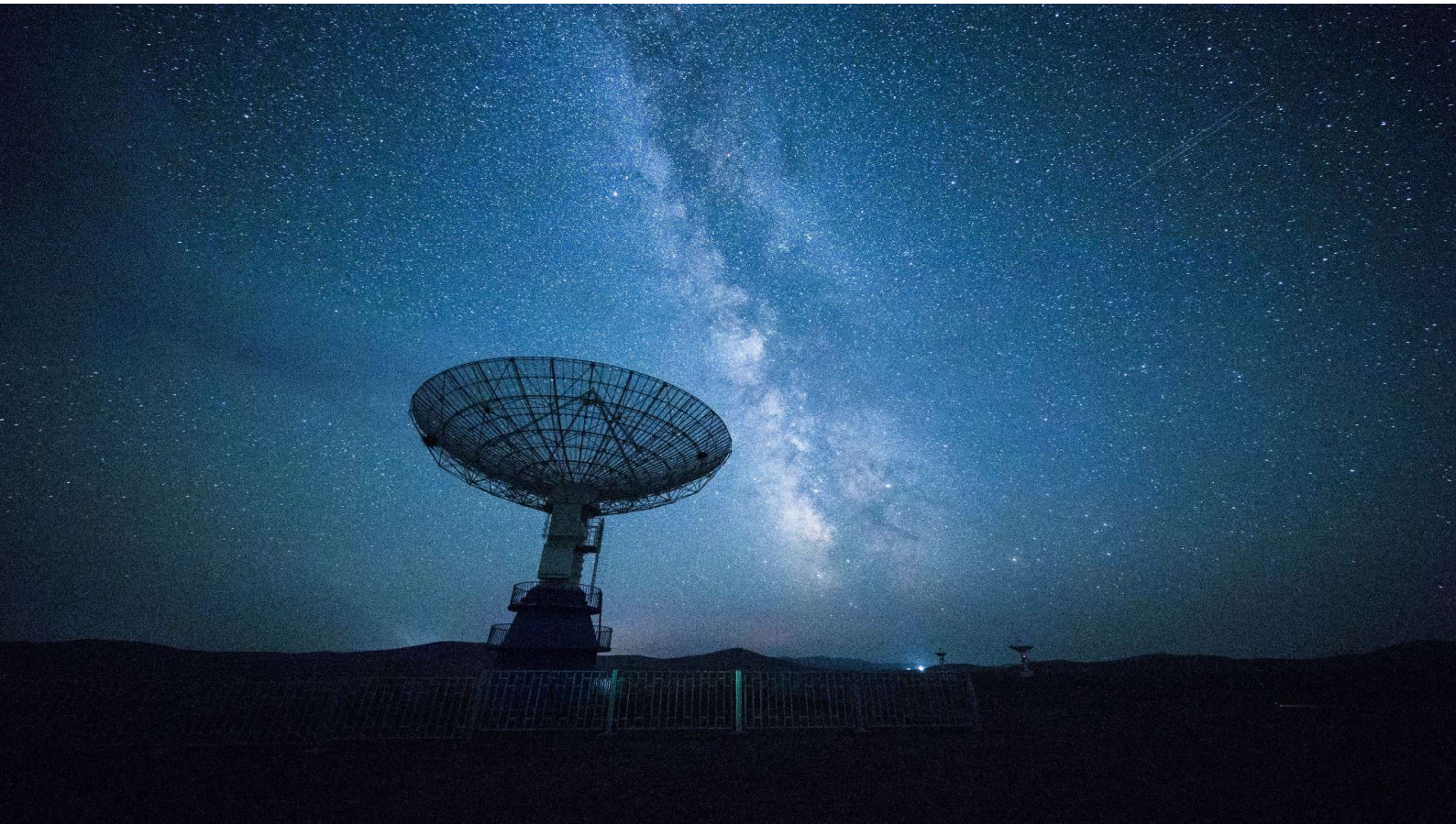
前節まで米国、欧州、日本それぞれにおいてデータセンターの立地の変化について考察してきたが、さらにこの変化をもう少し構造的に見ると、AIの成長によって、データセンターは「どこに置くか」だけでなく、「どの機能をどこで担うか」が問われるようになっていけると言える。低遅延が重要なクラウドサービスやAI推論サービスでは、東京・大阪、北バージニア、シリコンバレーのような大都市近郊・IX近接型の立地が引き続き重要である。一方で、AI学習のように大量の電力を必要とし、一定程度の遅延を許容できるワークロードは、電力を確保しやすい地域のデータセンターへ分散していく。

さらに将来的には、後述するように多くの技術課題はあるものの、宇宙空間で太陽光をより安定的・効率的に活用する軌道上データセンターも選択肢になり得る。ただし、これは地上データセンターを置き換えるものではなく、まずは特定用途から段階的に活用されていくものと考えられる。つまり、AI時代のデータセンターは、大都市近郊データセンター、電力地産地消データセンター、そして将来的な軌道上データセンターが、ワークロードに応じて役割分担していく世界になっていくと考えられる(図表4)。

図表4 データセンター機能分担(日本の場合)



03 軌道上データセンターの登場



第2章では、AI需要の拡大を背景に、地上データセンターの立地が主に電力制約を起点として再編されつつあることを見てきた。一方、データ処理需要の拡大は地上に閉じない。宇宙空間でも、衛星数の増加、観測センサーの高性能化、衛星間通信の高度化、月面などの地球外活動の拡大により、生成・中継・処理されるデータ量は増えている。従来は宇宙で取得したデータを地上へ送信して処理することが基本だったが、観測データ量の増大、地上局の可視時間、通信帯域、月面・深宇宙での通信遅延を踏まえると、全てを地上に伝送するモデルには限界が生じる。こうした背景から、宇宙空間でデータを保存・処理・中継するスペースエッジコンピューティングの重要性が高まりつつある。

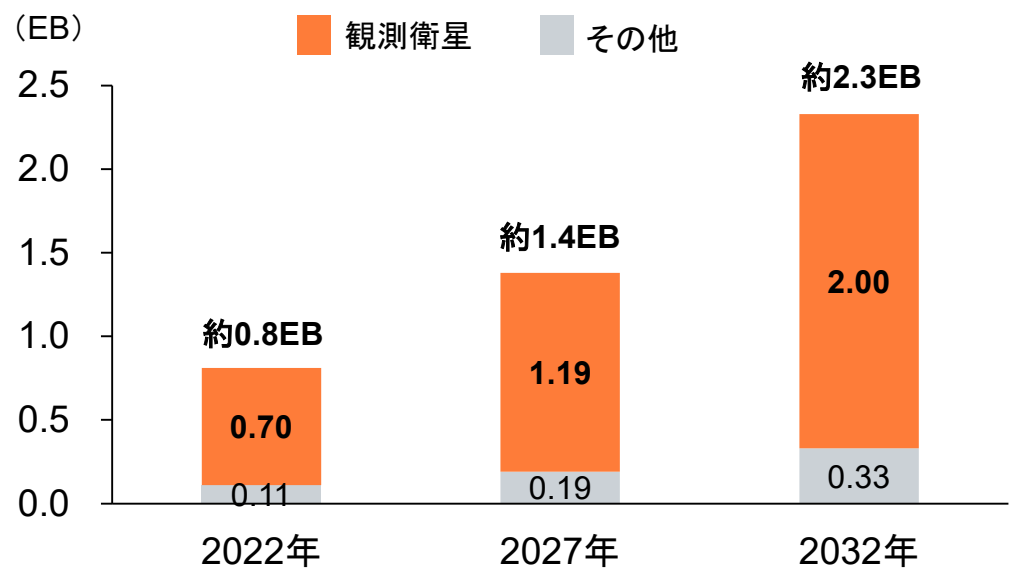
近年は、ハイパースケーラーやスタートアップが軌道上データセンター構想を相次いで発表している。宇宙で効率的に太陽光発電を行い地上の電力不足を補う点では、これも電力地産地消型と言える。ただし、電力供給、熱制御、通信、計算アーキテクチャ、運用・保守、打上げコストなど、直ちに地上を代替できない技術的・経済的課題は多い。本章では、宇宙におけるデータ量の増大と地球外活動の拡大を確認したうえで、主な軌道上データセンター構想を整理し、その実現に向けた技術課題と経済合理性を検討する。

宇宙におけるデータ量増大とエッジコンピューティング

宇宙で生成・中継されるデータは年々増加している(図表5)。再利用型ロケットの実用化や商業打上げサービスの拡大により、衛星の打上げ頻度は高まり、打上げコストも大幅に低下した。これにより、軌道上の地球観測衛星の機数が増加し、高頻度な観測サービスを展開しやすくなっている。さらに、光学カメラや合成開口レーダー(SAR)センサーなど観測デバイスの高解像度化も進み、打上げコストの低下と相まって、観測衛星データを中心に宇宙由来データの急増を後押ししている。

このため、宇宙におけるエッジコンピューティングの重要性は高まっている。軌道上でデータを処理できれば、地上への通信負荷を低減できるだけでなく、リアルタイム性を高め、通信断や地上局の可視時間に左右されにくい運用が可能となる。スペースエッジコンピューティングの実現は、防災、安全保障、海洋監視、インフラ点検などで強く求められる、よりリアルタイムな観測衛星データの活用を可能にする。これにより、観測衛星データは単なる蓄積・分析にとどまらず、現場の判断や対応に直結する情報としての実利用価値を高めていくと考えられる。

図表5 観測衛星データ量



出所: Analysys Mason "The Implications of Increasing Earth Observation Data"¹⁵(NSR "Space Traffic Study, 3rd Edition" に基づく)を基にPwC推計・作成。

人類の地球外活動の増加

宇宙における通信・データ処理・計算需要を押し上げるもう一つの要因が、人類の活動圏の拡大である。地球低軌道では2030年頃の国際宇宙ステーション(ISS)退役後を見据えた商業宇宙ステーション構想が進み、月関連では米国主導のArtemis計画、中国などが進めるILRSを中心に国際連携・官民連携によるシスルナ経済圏の確立に向けた月開発計画が具体化・本格化しつつある。さらに将来的には、火星へと活動領域が広がる可能性がある。

こうした活動は、通信、データ保存、観測、実験、ロボット制御、遠隔運用、設備監視などの宇宙での新たな需要を生む。宇宙ステーション、軌道上サービス機、月面基地、月面ローバー、建設機械、自律ロボットなどが増えれば、宇宙空間で生成・処理されるデータ量はさらに増加する。

ただし、その処理が全て地球周回の軌道上データセンターで担われるわけではない。月までは約38万kmあり、地球周回軌道（数万km）の数十倍に及ぶため、地球周回のノードから月へ通信しても遅延はほとんど改善しない。月や深宇宙の活動は、地球側ではなく、月面拠点や周回機など活動の現場側で自律的に処理・制御する基盤を必要とする。すなわち地球外活動の拡大が示すのは、地上・地球周回・月／深宇宙といった活動圏ごとに計算・通信基盤を分散して配置していく必要性である。本章で扱う地球周回の軌道上データセンターは、その多層的な宇宙インフラのうち、衛星観測など地球周回で完結するデータの処理を担うレイヤーとして位置づけられる。

軌道上データセンターの登場

生成AIの急激な成長に伴い、AIデータセンター向けの大容量電力の確保は、グローバル共通の社会課題となりつつある。特にAI学習や大規模推論を支える計算基盤では、GW級の電力確保を前提とした構想も議論され始め、電力供給、送電網、冷却、脱炭素との整合性が重要な制約条件となっている¹⁶。

この大容量電力確保という課題を背景に、軌道上データセンター構想が注目され始めている。宇宙空間では、大気や昼夜の制約を受けにくく、軌道条件によっては太陽光を地上より高い効率で継続的に活用できる可能性がある。GoogleはProject Suncatcherにおいて、適切な軌道では太陽光パネルが地上の最大8倍の発電効率を得られ、ほぼ継続的に電力を供給できる可能性があると説明している¹⁷。

この観点では、軌道上データセンターは、地上の発電所一体型・電力地産地消型データセンターとは異なる、もう一つの「電力地産地消型」計算基盤と位置づけられる。すなわち、地上では電力を確保しやすい地域にデータセンターを配置する動きが進む一方、宇宙では軌道上で発電し、軌道上で計算処理に利用する構想が生まれている。

主な軌道上データセンター構想

NTTとスカパーJSATが2022年に設立したSpace Compassは、「宇宙統合コンピューティング・ネットワーク」構想を掲げ、GEO（静止軌道衛星）、LEO（低軌道衛星）、HAPS（高高度プラットフォーム）、地上ネットワークを光通信で結ぶ地上・宇宙統合型のICTインフラ構築を目指している。これは、軌道上での計算処理を単体で捉えるのではなく、衛星通信、コンピューティング、地上ネットワークを一体で設計する取り組みとして位置づけられる¹⁸。

米Axiom Spaceは、Orbital Data Center構想を掲げ、低軌道上でのデータの保存・処理・中継機能の整備を目指している。同社はKepler Communicationsと提携し、Keplerの光データリレー網とオンボード計算・ストレージ機能を組み合わせ、宇宙で生成されるデータを軌道上で処理・中継する基盤の構築を構想している。これは、データを全て地上へ送信するのではなく、軌道上で一定の処理・保存・転送を行う地上・宇宙融合型のデータ処理アーキテクチャを志向する取り組みと位置づけられる¹⁹。

米スタートアップのStarCloudは、GPU搭載衛星により軌道上でAI計算を実行する構想を掲げている。StarCloud-1ではNVIDIA H100 GPU搭載衛星を打ち上げ、軌道上でのAI推論や小規模なLLM学習を実証したとしている²⁰。StarCloud-2ではGPUクラスター、ストレージ、電力・熱制御を備えた商用ミッションを²¹、StarCloud-3では軌道上H100ネットワークを活用したデータ処理構想を掲げる²²。米国連邦通信委員会(FCC)資料では、最大88,000機の衛星を分散型データセンターとして運用する申請も示されている²³。

Googleは、Project Suncatcherを発表し、Google TPU(Tensor Processing Unit: 機械学習に特化したプロセッサ)搭載の太陽光発電衛星を光通信で相互接続し、宇宙空間で機械学習計算を拡張する構想を示している。近接編隊を組む小型衛星群を想定し、Planetと連携して2027年初頭までに2機の試験衛星を打ち上げ、TPUハードウェアとモデルの宇宙環境での動作、光衛星間通信による分散MLタスクを検証する計画としている²⁴。

SpaceXは、Starlinkにより衛星間光通信を備えた大規模低軌道コンステレーションを商用運用していることに加え、軌道上AIデータセンター構想を具体化し始めている。最大100万機規模の「SpaceX Orbital Data Center system」をFCCに申請しており、FCC文書では500~2,000kmの高度で運用し、主に光衛星間リンクを活用する計画が示されている²⁵。これは、Starlinkで培った衛星量産、衛星間光通信、Starshipによる大量打上げを組み合わせ、軌道上に大規模なAI計算基盤を形成しようとする構想である²⁶。

ここで取り上げた以外にも、海外スタートアップを中心に、ハイパースケーラーや通信・宇宙関連企業による軌道上データセンター関連の取組・構想がいくつも生まれつつあり、この領域は今後本格化していく可能性がある。なお、これらの事例は商用運用、実証計画、規制申請、研究構想が混在している。そのため本節では、各社の取り組みを成熟した市場事例としてではなく、軌道上データセンターをめぐる技術・事業モデル形成の方向性を示すものとして整理した。

実現に向けた技術課題

軌道上データセンターは、地上データセンターとは異なり、エネルギー供給、熱制御、通信、計算アーキテクチャといった複数の基盤技術で根本的な制約を抱える。これらは個別の課題であると同時に相互に強く依存し合うため、システム全体として成立させる必要がある。

第一に、**電力供給**である。



現状の大型通信衛星の発電能力は数kW~数十kW級、ISSのような大型宇宙構造物でも平均供給電力は100kW前後と推定される。一方、AIデータセンターでは、GPUサーバの高密度化によりラック単位で数十kW~100kW超、施設全体では数十MW~100MW級の電力が必要となるケースも増えている。すなわち、地上データセンターの1ラック分の電力消費が、1基の大型衛星で利用可能な電力規模に相当する。軌道上データセンターをAI計算基盤として成立させるには、システム全体で電力供給能力をkW級からMW級、将来的には数十MW級へ引き上げる必要があり、大容量太陽光発電、蓄電、電力マネジメントを含む宇宙用電源システムの大幅なスケールアップが不可欠となる。そのアプローチとしては、個々の衛星の発電能力を高める方向と、複数の衛星を連携させ電力・通信・計算資源を分散コンピューティング基盤として統合運用する方向が考えられる。



第二に、**熱制御**である。

宇宙空間はほぼ真空のため、気体や液体を介した対流による放熱はほぼ利用できず、外部の宇宙空間へ熱を逃がす手段は主に熱放射になる。AI計算では投入電力の多くが最終的に熱として放出されるため、計算能力を高めるほど排熱能力の確保が重要となる。軌道上データセンターでは、衛星1機あたり100kW級の計算ペイロードを扱う場合でも消費電力に応じた熱を放出する必要がある、複数衛星を連携させMW級以上を実現する場合は排熱もシステム全体で同規模に拡大する。放射冷却は表面積に依存するため大規模なラジエータ構造が必要となり、打上げ質量、展開機構、姿勢制御、太陽光パネル配置、衛星構造全体の設計とも密接に関係する。このため熱制御は単なる冷却技術の問題ではなく、軌道上データセンター全体の成立性を左右するボトルネックとなる。



第三に、**通信**である。

現在、衛星間の光通信は数十Gbps~100Gbps級の帯域が実現されつつあるが、複数の衛星に分散した計算資源を一体として機能させるには、ネットワーク全体でTbps級のトラフィックを扱う能力が求められる。地上の光ファイバ通信では、デジタルコヒレント通信やDWDM(波長分割多重)を活用し、800Gbps級の光信号を多重化してTbps級通信を実現している。宇宙の光レーザー通信でもこうした技術の応用が検討されているが、衛星のサイズ、電力、熱設計といった厳しい制約下で実現する必要がある。さらに、衛星は軌道上を高速で移動するため接続可能な相手や通信経路が時間とともに変化する。そのため単なる帯域拡張にとどまらず、動的な経路制御やトラフィック分散を含めたネットワーク全体の設計が不可欠となる。この点は、第4章で述べる時空間オーケストレーションの論点にもつながる。



第四に**計算アーキテクチャ**である。

地上のAIデータセンターでは、多数のGPUサーバを低遅延・高帯域なネットワークで密に接続し、高い同期性を前提とした分散処理が行われている。一方、軌道上データセンターでは電力供給や冷却能力に制約があるため、巨大な単一拠点へ計算資源を集約する構成が必ずしも前提とならない。加えて、衛星間および地上との接続状況や通信経路は時間とともに変化する、ネットワークポロジも動的に変動する。そのため地上と同様の同期型分散処理をそのまま適用することは難しく、通信遅延や接続変動を前提とした新たな分散コンピューティングアーキテクチャが必要になる可能性がある。

これらの技術課題は独立して存在するのではなく、エネルギー、熱、通信、計算が相互に制約し合う構造にある。すなわち、軌道上データセンターの実現には単なる技術要素の積み上げではなく、異なる制約条件の下で全体最適を図る大規模分散システムの設計が求められる。

軌道上データセンターの経済合理性

軌道上データセンターの実現性を評価するうえでは、技術課題に加えて経済合理性の成立が不可欠である。特に、打上げ・軌道投入コストと、地上データセンターの電力・用地・冷却コストとの相対比較が重要な論点となる。宇宙空間では、軌道条件によっては太陽光を地上より継続的に活用できる可能性があり、長期的には電力制約の回避という優位性を持ち得る。一方で、通信コストや遅延、設備更新・保守の困難さ、放射線環境への対応といった新たなコスト要因も存在する。

近年の議論では、軌道上データセンターの経済合理性は、打上げコストの大幅な低下を一つの前提として検討されている。GoogleのProject Suncatcherでは、将来的に地球低軌道への商業打上げコストが200米ドル/kg程度まで低下した場合、宇宙ベースのAIインフラが地上データセンターの電力コストと比較可能になる可能性が示されている²⁴。

もっとも、経済性は打上げコストのみで決まるものではない。宇宙空間では故障時の物理的修理が困難で、冗長化や交換を前提とした設計が求められるため、運用・保守コストの構造も地上とは大きく異なる。また、データを地上へ伝送する通信コストや帯域制約、遅延も無視できず、計算と通信のトレードオフが重要な論点となる。さらに、衛星の寿命とIT機器の更新サイクルの違いも、長期的な投資回収に影響を与える。

こうした特性を踏まえると、軌道上データセンターは地上データセンターを全面的に代替するものではなく、処理特性やコスト構造に応じた使い分けを前提に、特定のユースケースから段階的に経済性を確立していく可能性が高い。すなわち、その成立性は単一のコスト要因ではなく、打上げ、電力、通信、運用・保守を含む複数のコスト構造のバランスとして評価されるべきものである。

04 地上・宇宙融合インフラの 構造転換



生成AIによる計算需要の拡大、地上データセンターの電力・用地制約、宇宙起点データの増加といった構造変化が重なり合うことで、計算・通信・データ処理を地上だけで完結させる従来型のインフラ構造は、見直しを迫られている。今後のインフラは、地上データセンター、軌道上データセンター、観測衛星、宇宙IX、地上IoT、月面・軌道上活動が一体的に連携する地上・宇宙融合インフラへと発展していく。

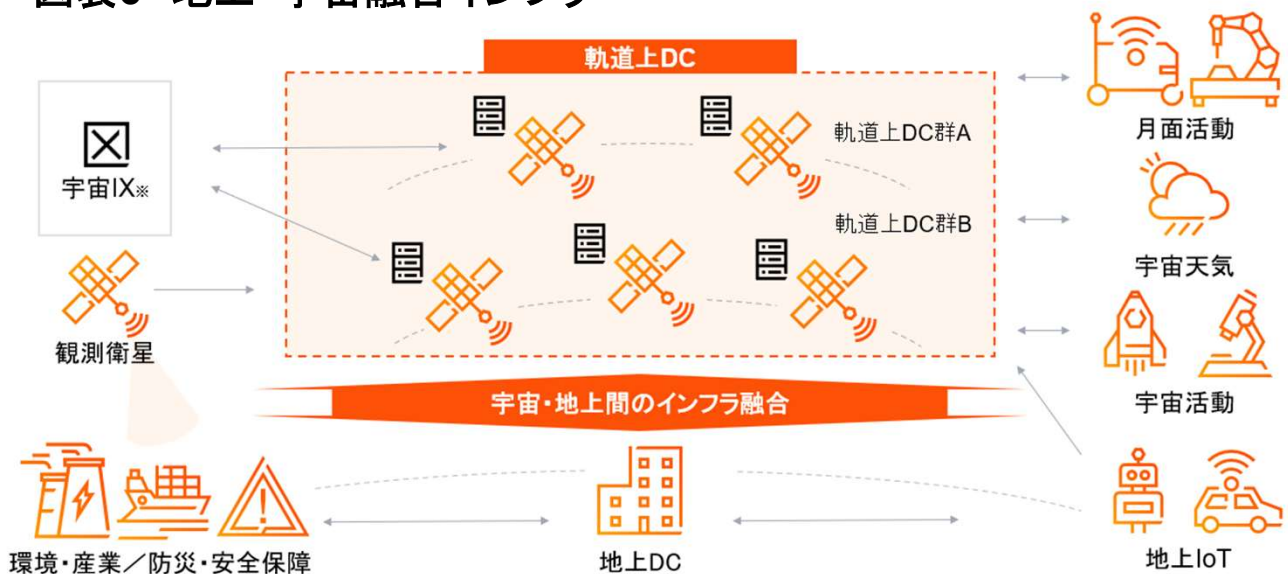
このアーキテクチャの本質は、軌道上データセンターを単体で捉えることではなく、地上と宇宙に分散した計算・通信・接続・制御機能を一体で設計する点にある。データの発生場所と利用場所が地上・海上・空中・宇宙へ分散していく中で、どこで取得し、どこで処理し、どの経路で流通させ、どの現場で利用するかを、ワークロードと制約条件に応じて最適配置する設計思想が求められる。

地上・宇宙融合インフラ

地上データセンターと軌道上データセンターは、代替関係ではなく補完関係にある（図表6）。クラウドやAIサービスの多くは、数ミリ秒から数十ミリ秒単位の応答性を必要とするため、地上との通信遅延が不可避な軌道上データセンターでは実現が難しいユースケースが存在する。一方で、軌道上データセンターは、宇宙太陽光や放射冷却を活用できる可能性があり、地上データセンターが直面する電力・用地制約を回避し得るという特徴を持つ。

したがって、軌道上データセンターの役割を考えるうえでは、「地上データセンターを置き換えるか否か」ではなく、どのワークロードを、どこで処理することが合理的かを起点に整理する必要がある。データセンターの最適配置は、主に遅延要求と電力規模の二つの軸によって分化する。遅延要求が厳しい処理ほど需要地や現場に近い場所で処理する必要があり、電力規模が大きい処理ほど電力供給や冷却に優位性のある立地が重要となる。

図表6 地上・宇宙融合インフラ



※宇宙IXをLEO・GEO等のどの軌道に配置するかについては、要検討

出所：PwC「【Interop Tokyo 2026 登壇資料】宇宙と地上を融合する次世代ICTの未来」（2026年）より抜粋・一部修正

軌道上データセンターと 地上データセンターの役割分担

重要なのは、軌道上データセンターを地上データセンターの全面的な代替として捉えるのではなく、両者がワークロードに応じて役割分担するものとして捉えることである。

第2章で整理したとおり、AI需要の拡大を背景に、データセンターの機能は大規模学習型、中規模推論・集約型、クラウド・汎用型を中心に分化していく(図表7)。これを地上・宇宙融合アーキテクチャの中で捉え直すと、低遅延性、既存システムとの接続性、可用性、セキュリティ、監査性が重視される処理は、引き続き地上データセンターやクラウド、エッジが中心となる。一方、軌道上データセンターの初期的な適用候補となり得るのは、図表7の「5.遅延許容・非同期推論」である。この類型は、ユーザー近接ではなくデータ発生点での前処理・自律化に価値があり、自律運用、異常検知、圧縮、フィルタリング、バッチ推論のように即時応答を前提としない処理が想定される。特に衛星観測データや宇宙起点データは、全てを地上へ伝送せず、軌道上で選別・圧縮・異常検知・優先度判定を行い、必要なデータだけを地上へ送ることで、通信負荷や地上処理負荷を抑えられる可能性がある。

図表7 データセンターの類型と軌道上データセンターの適用候補

類型		主用途	ユースケース	位置づけ	技術・運用特性
大規模学習型 Training-oriented Data Centers	1	大規模AI・基盤モデルの学習	LLM学習、国家・産業基盤AI	電力・冷却・土地を最優先するキャンパス型データセンター	超高密度GPU、バッチ型処理、電力効率重視
	2	企業データを用いたファインチューニング	製造設計AI、金融・保険モデル	企業専有・主権データ対応が前提	高セキュリティ、専有環境、拡張性
中規模推論・集約型 Inference-oriented Data Centers	3	リアルタイムAI推論	リアルタイム応答、制御系AI	『近さ』そのものが価値	低遅延最優先、ユーザー近接
	4	業務・API向け推論処理	業務AI、社内外AIサービス	利用率とコスト効率が競争軸	GPU利用率重視、集約運用
	5	遅延許容・非同期推論	自律運用、異常検知、圧縮/フィルタ、バッチ推論	ユーザー近接ではなく、データ発生点での前処理・自律化	断続通信、耐環境・冗長、モデル更新/ロールバック設計
クラウド・汎用型 General-purpose Data Centers	6	業務系・基幹システム	ERP、基幹業務	AI以外も含む企業IT基盤	CPU中心、高可用性、SLA重視
	7	AI前後処理・データ連携	データ前処理、分析	AIを支える周辺基盤	CPU+軽量GPU、柔軟構成

出所: データセンター類型に関するPwC整理

なお、大規模AI・基盤モデル学習はリアルタイム性を必須としないため、将来的には軌道上データセンターの候補となり得る。ただし超高密度GPU、大規模な電力供給、熱制御、高速同期通信、保守・交換、学習データの搬送といった制約が大きく、初期用途としては慎重に捉えるべきである。まずは遅延許容・非同期型の前処理や自律化用途から始まり、技術課題の解決とともに中長期的に拡張していく、と位置づけるのが妥当である。

したがって、地上データセンターと軌道上データセンターの関係は代替ではなく補完である。地上データセンターは低遅延処理、企業専有データ、基幹システム、既存クラウド連携を中心に担い、軌道上データセンターはまず宇宙起点データの前処理・中継や遅延許容・非同期推論を担う補完ノードとして位置づけられる。ワークロードごとに処理場所を最適化することが、今後の計算基盤設計の重要な論点となる。

地上・宇宙融合インフラ——宇宙IX

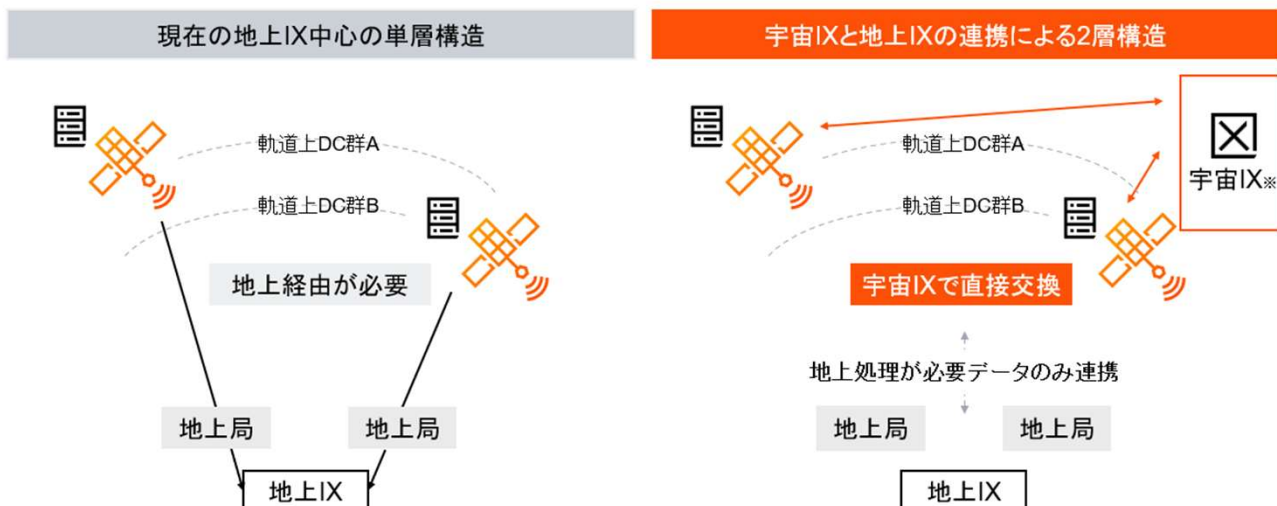
複数の事業者が軌道上データセンターによるサービスを提供するようになった場合、事業者間のトラフィック交換をどう行うかが重要な論点となりうる。

地上のインターネットでは、IXやその近傍でのピアリングを通じて、異なる通信事業者、クラウド事業者、コンテンツ事業者間のトラフィック交換が行われ、トラフィックを不要に遠回りさせず低遅延かつ効率的な相互接続が可能となっている。一方、軌道上データセンターや衛星コンステレーションが複数存在する状況で、事業者間のデータ交換を地上ネットワークやIX経由で行うと、通信容量、遅延、コストの面で非効率が生じる可能性がある。例えば、ある軌道上データセンターのデータを別の衛星ネットワークへ受け渡す際に、いったん地上局へ伝送し、地上ネットワーク経由でIXへ接続し、再び宇宙へ送信する構成では、宇宙空間で完結し得る通信まで地上経由となる(図表8左)。

このような非効率を低減するうえで重要となるのが、宇宙空間における相互接続機能、すなわち宇宙IXである。宇宙IXとは、複数の衛星ネットワーク、軌道上データセンター、地上局、クラウド基盤を相互に接続し、宇宙空間または地上・宇宙間でトラフィックを効率的に交換するための接続基盤と捉えられる(図表8右)。その実現には、衛星間光通信、地上局との接続、ルーティング、認証、セキュリティ、運用ルールなど複数の技術・制度要素が必要となる。特に、異なる事業者の衛星や軌道上データセンターが相互接続するためには、光通信方式、接続インターフェース、トラフィック制御、サービス品質、障害時運用などの標準化が重要となる。

軌道上データセンターを構想する事業者の多くは、衛星、通信、計算基盤、打上げ、地上局を垂直統合的に整備しようとしている。このモデルは初期段階ではサービス品質や事業展開の速度を高めるうえで有効である。一方、地上のインターネットが相互接続と事業者間の協調によって発展してきたことを踏まえると、宇宙でも、特定事業者に閉じたネットワークだけでなく、事業者間で接続可能なオープンな相互接続基盤が重要になる可能性がある。その意味で宇宙IXは、単なる技術的な接続点ではなく、地上・宇宙融合インフラにおける競争と協調の境界を定める重要なレイヤーである。今後、軌道上データセンターや衛星ネットワークが拡大するにつれ、宇宙IXをめぐる標準化、相互接続ルール、セキュリティ、データ主権、事業者間精算のあり方は、官民で検討すべき重要なテーマとなる。

図表8 宇宙IX



※宇宙IXをLEO・GEO等のどの軌道に配置するかについては、要検討

出所:PwC「Interop Tokyo 2026 登壇資料」宇宙と地上を融合する次世代ICTの未来」(2026年)より抜粋・一部修正

地上・宇宙融合インフラ —— 時空間オーケストレーション

地上のデータセンター間接続では、ノードの位置は基本的に固定され、光ファイバによる常時接続が前提となる。しかし、異なる軌道を周回する軌道上データセンター群や衛星コンステレーション同士の接続では前提が大きく異なる。データセンターのラックに相当する衛星がそれぞれの軌道で地球を周回するため、相対位置や通信経路が時間とともに変化する。

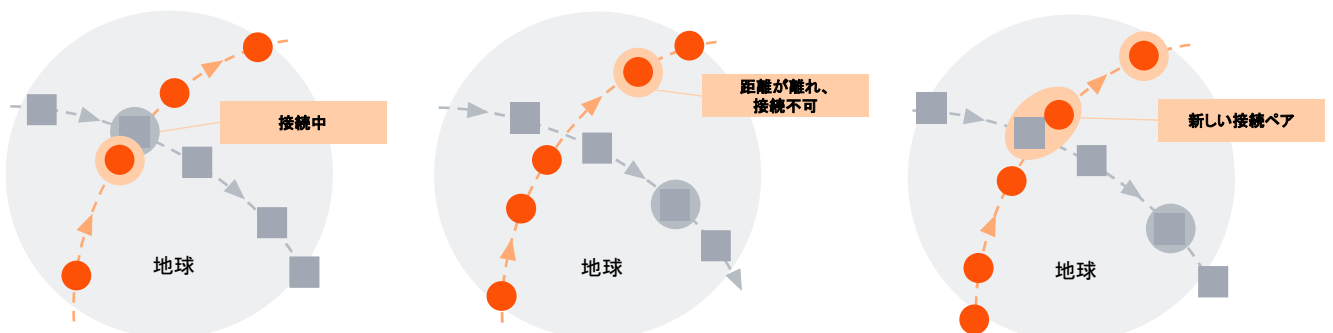
衛星間通信では、100Gbps級の光レーザー通信の軌道上実証が進んでいる。また、Terabit/sec級の大容量光リンクの実現に向けて、地上の光ファイバ通信で用いられてきたデジタルコヒレントやDWDMなどの技術要素を宇宙光通信へ取り込む標準化・仕様化の動きも進んでいる。もっとも、地上光ファイバ通信に匹敵する大容量通信が実現しても、軌道上ネットワークには地上とは異なる設計上の論点が残る。地上では固定された拠点間の常時接続を前提に通信経路や計算リソースを設計できるが、軌道上では衛星同士の相対位置、接続可能な相手、利用可能な衛星間通信経路が時間とともに変化する。そのため、どの衛星同士を接続し、どの経路でデータ処理・転送するかを、時間軸と空間軸の双方で最適化する必要がある。

つまり、時間軸・空間軸で刻々と変わる衛星の位置関係や接続状態に応じて、通信経路や計算リソースの割り当てをソフトウェアで動的に制御する仕組みが必要になる(図表9)。これが「時空間オーケストレーション」である。

これまでの宇宙開発では、衛星本体、光通信端末、オンボードコンピューティング、電源系、熱制御など個別技術の成立性の実証に重点が置かれてきた。こうした技術開発は不可欠である一方、地上・宇宙融合インフラが事業として成立するためには、開発者だけでなくオペレーター(サービス提供者)の視点が重要になる。顧客にとって重要なのは、光通信が技術的につながることや軌道上で計算処理が動くこと自体ではなく、必要なデータが、必要な品質、必要な時間、必要な安全性で利用できることである。そのためには、時々刻々と変化する軌道上ネットワークを前提に、通信経路、計算リソース、データ処理、保存場所を動的に制御し、サービス全体として最適化する仕組みが必要となる。時空間オーケストレーションは、宇宙インフラを単なる技術実証の集合ではなく、顧客価値を継続的に提供する運用基盤へと転換するための中核的なソフトウェア技術になると考えられる。

図表9 時空間オーケストレーション

接続可能な相手・経路が変化するイメージ(例)



地上・宇宙融合インフラ —— セキュリティ

地上・宇宙融合インフラでは、衛星、軌道上データセンター、地上局、地上データセンター、クラウド、エッジが相互に接続される。通信・計算・データ流通の基盤が地上と宇宙にまたがるほど、社会実装の前提としてセキュリティの重要性は高まる。

ここで、セキュリティリスクの「種類」自体が本質的に変わるわけではない。サーバ、ネットワーク、端末といった基本構成や、認証、暗号化、監視・状況認識といったセキュリティの原則は、地上インフラと大きく変わらない。決定的に異なるのは、リスクが顕在化した場合の「影響範囲」と「インパクト」である。軌道上データセンターは、AI処理基盤、衛星通信、安全保障、さらには将来的なロボティクスやPhysical AIの基盤とも結びつく可能性があり、単一の侵害が衛星運用や通信サービスにとどまらず、国家・社会レベルの影響へ波及する可能性がある。つまり、リスクの本質は「新しさ」ではなく「インパクトの広さと大きさ」にある。

具体的な脅威シナリオとしては、ジャミングやスプーフィングなどの電波妨害、不正信号や不正パケットによる侵害、地上局や運用システムを経由した攻撃などが考えられる。地上・宇宙融合アーキテクチャでは、衛星、地上局、地上データセンター、通信ネットワーク、AI処理基盤、現場のロボットや車両が連携するため、サイバー上の侵害がPhysical AIの停止や異常挙動など実社会のインシデントに直接つながる可能性もある。加えて、国際的な緊張が高まった際には、対衛星兵器(ASAT)などの物理的脅威も現実味を帯びる。AIが国家や社会の意思決定に深く組み込まれるほど、AI基盤そのものを戦略的に狙う動きも強まると考えられる。

もっとも、衛星・地上間通信や衛星間通信が電波通信から光通信へ移行することで、ジャミング、盗聴、スプーフィングのリスクは大幅に低減される可能性がある。レーザー通信はビームが極めて細く、その指向精度はきわめて高いため、第三者がその経路上で検知・傍受・妨害・なりすましを行うことは物理的に難しい。すなわち、光通信が成立している区間では、電波通信と比べて傍受・妨害の難易度を高められる可能性がある。

ただし、通信経路の全てを光信号で完結させることは現状では難しく、電波区間や地上ネットワークを含む経路全体では、依然として暗号化が不可欠である。この点で、暗号鍵そのものの安全性を物理法則に基づいて担保する量子暗号通信との統合は、地上・宇宙融合インフラの信頼性を一段高める方向性として位置づけられる。

軌道上データセンターや衛星における大きな制約は、打ち上げ後の修正・交換が困難なことである。地上インフラなら障害発生や脆弱性発見時に機器交換やソフトウェアアップデートで対処できるが、宇宙ではその選択肢が限られる。このためセキュリティは運用段階で後付けするものではなく、設計段階から組み込む必要がある。こうした観点から、ソフトウェアによって制御・更新可能なSDS(Software Defined Satellite)の重要性は今後さらに高まると考えられる。

この点を踏まえると、軌道上データセンターのセキュリティは単なる技術仕様ではなく、事業モデルそのものに組み込むべき要素である。宇宙領域のセキュリティは設計段階でほぼ成否が決まる領域であり、初期設計段階からセキュリティ、運用監視、更新可能性、責任分界を組み込むことが不可欠である。「誰が処理し、どの経路を通り、どの範囲まで分離されているか」を説明できる設計の重要性は、次節のデータ主権の論点へつながる。

地上・宇宙融合インフラ —— データ主権

地上・宇宙融合インフラにおけるデータ主権は、単に「どの国・地域のデータセンターに保存されるか」ではなく、「誰が管理し、誰がアクセスでき、誰が利用を制御できるか」という統治権の問題として捉える必要がある。データが日本国内に保存されていても、運用主体、クラウド基盤、AIモデル、通信経路、暗号鍵の管理が海外事業者や他国の法制度に依存していれば、日本側が実質的に管理できるとは限らない。

この論点は、軌道上データセンターを考慮するとさらに複雑になる。宇宙には地上のような国境がなく、データは衛星、軌道上処理基盤、衛星間通信、地上局、地上クラウドをまたいで流通する。そのため、データの生成場所や保存場所だけを特定しても、誰がそのデータやAI処理を管理しているのかを十分に説明できない。重要なのは、データがどこで生成され、どこで処理され、どの経路を通り、誰の管理下で利用されるのかを一連の流れとして把握することである。

特にAI基盤と結びつく場合、データ主権はデータそのものにとどまらない。学習済みモデル、推論基盤、軌道上GPU、衛星通信網、地上局、クラウド基盤のいずれかを海外事業者に依存していれば、他国政府の命令や事業者の判断によって、重要なAI処理やデータ利用が制約されるリスクがある。これは産業利用だけでなく、安全保障、防災、重要インフラ監視、行政サービスにおいても看過できない論点である。

したがって、地上・宇宙融合インフラにおけるデータ主権は、「データの所在地」ではなく「データ、モデル、処理基盤、通信経路を誰が管理できるか」として設計する必要がある。具体的には、データの生成から利用までの来歴を追跡できるプロベナンス管理、暗号鍵やアクセス権限の管理、利用主体・運用主体・責任分界の明確化、重要データや重要AI処理を日本側で管理できる論理的・制度的な分離設計が求められる。

つまり、これは単なるデータ保護の論点ではなく、重要なAI・データ基盤を日本として自立的に管理できるかという問題である。日本が全ての基盤を自前で保有する必要はないが、少なくとも重要データ、AIモデル、処理基盤、通信経路について、誰が管理し、どの範囲を日本側で制御できるのかを説明できる設計が求められる。そのため、サービス事業者あるいはオペレーターを日本企業が担うことが非常に重要となる。この点は、地上・宇宙融合インフラの普及条件であると同時に、日本が関与すべき基盤レイヤーを見極めるうえでも重要な論点となる。

地上・宇宙融合インフラ —— 宇宙天気とレジリエンス

中長期的な観点では、地上・宇宙融合インフラが社会基盤としての重要性を高めるほど、宇宙天気への対応も無視できない論点となる。宇宙天気とは、太陽フレア、コロナ質量放出、太陽風、磁気嵐、高エネルギー粒子などによって変動する宇宙環境の状態を指す。地上の気象が航空、物流、電力、通信に影響を与えるのと同様に、宇宙天気は衛星、宇宙通信、測位、電力網、航空運航、さらには軌道上データセンターの可用性に影響を及ぼし得る。

軌道上データセンターは、通常の衛星以上に、電力供給、熱制御、通信、計算処理、データ保存を高密度に統合するシステムである。そのため宇宙天気の影響は単なる衛星運用上の外乱にとどまらず、計算基盤そのものの可用性やサービス品質に関わるリスクとなる。例えば、太陽活動の活発化に伴う高エネルギー粒子は、半導体の一時的な誤動作や劣化、メモリ反転、センサー異常などを引き起こす可能性がある。磁気嵐は衛星の姿勢制御、通信品質、軌道予測、地上局とのリンクに影響を与え得る。低軌道では大気密度の変化によって軌道抵抗が増加し、衛星の軌道維持や運用計画にも影響が出る可能性がある。

この点で、宇宙天気は前節で述べたセキュリティリスクとは性質が異なる。セキュリティが主に悪意ある主体による攻撃や侵害への備えであるのに対し、宇宙天気は自然現象に起因する不可避の外部環境リスクである。しかし、地上・宇宙融合インフラが社会的に重要な計算・通信基盤となる場合、その影響はセキュリティインシデントと同様に重大になり得る。通信断、処理遅延、データ欠損、衛星機能の一時停止が、地上側のクラウド、エッジ、Physical AI、重要インフラに連鎖する可能性があるためである。

したがって、軌道上データセンターを含む地上・宇宙融合インフラでは、宇宙天気を前提としたレジリエンス設計が必要となる。具体的には、宇宙天気予報を運用システムに取り込み、太陽活動が高まる局面では重要処理を地上側へ退避させる、通信経路を切り替える、計算負荷を分散する、データを冗長保存する、一部機能をセーフモードへ移行するなどの制御が考えられる。ここでも重要になるのは、固定的な構成ではなく、宇宙環境の変化に応じて通信・計算・保存場所を動的に切り替える運用能力である。

この意味で、宇宙天気対応は本章で述べた時空間オーケストレーションとも深く結びつく。時空間オーケストレーションは衛星の相対位置や通信経路の変化に応じてリソースを制御する仕組みだが、将来的にはそこに宇宙天気という環境変数も組み込まれる必要がある。すなわち、どの衛星がどこにいるか、どの経路が使えるかだけでなく、どの軌道領域・どの時間帯で放射線リスクや通信擾乱リスクが高まっているかを踏まえ、処理場所や通信経路を選択することが求められる。

また、宇宙天気への備えは、個別衛星の耐放射線設計や冗長化だけで完結するものではない。軌道上データセンターが複数の衛星、地上局、クラウド、通信事業者と接続される以上、影響を受けたノードをどう切り離し、代替ノードへ処理を移し、どの品質水準までサービスを維持するかという、サービスレベル全体の設計が重要となる。これは単なる宇宙機設計の問題ではなく、地上・宇宙をまたぐ分散インフラ全体の可用性設計である。

したがって、宇宙天気は軌道上データセンターの実現可能性を否定する要因というより、社会実装に向けて織り込むべき運用前提である。地上データセンターが地震、台風、洪水、停電といった自然災害を前提に冗長化・分散化・BCPを設計するように、軌道上データセンターも太陽活動や磁気嵐を前提に、予測、監視、退避、迂回、復旧を組み込む必要がある。地上・宇宙融合インフラが社会基盤となるためには、宇宙天気を「特殊な宇宙リスク」としてではなく、可用性とレジリエンスを左右する通常の運用変数として扱うことが求められる。

05 地上・宇宙融合インフラが支える新たなAI活用



前章では、地上・宇宙に分散した通信・計算・データ流通基盤が、用途に応じて連携していく可能性を示した。この基盤の価値は、軌道上データセンターの設置や計算資源の宇宙移転そのものにあるのではない。宇宙空間が、地球規模の観測点であると同時に、宇宙起点データの発生源に近い処理点となることで、地上だけでは難しいAI活用を可能にする点にある。

LLM中心のAI活用では、計算資源の配置は主にコスト、遅延、データ所在地の最適化の問題として捉えられてきた。しかし、AIが世界モデル／Physical AIへ拡張すると、価値の源泉は、現実世界の状態をどれだけ高頻度・高精度に把握・予測し、その結果を現場へ反映できるかへ移る。論点は単なるコスト最適化ではなく、観測・通信・処理・判断・実行のループを、どこで、どのように閉じるかになる。

すなわち地上・宇宙融合インフラは、データセンターの新しい配置形態にとどまらず、現実世界を継続的に観測・理解・予測・制御する世界モデル／Physical AIを支える実装基盤である。特に、地球規模かつ準リアルタイムの世界モデルを構築するには、衛星観測、軌道上処理、地上データセンター、地上エッジ、NTNなどの非地上系通信基盤、そしてD2Dのような端末・移動体との直接接続形態を組み合わせた分散アーキテクチャが重要になる。

本章では、世界モデル／Physical AIの進展がなぜこの基盤の必要性を高めるのかを整理したうえで、気象・地球環境AI、産業・インフラオペレーション、生活・モビリティインフラを代表例として、地上・宇宙融合インフラが生み出す事業機会を検討する。

世界モデル／Physical AIの拡張

ここでいう世界モデル／Physical AIは、単に高度なAIモデルを指すものではない。現実世界を継続的に観測し、その状態をモデルへ反映し、予測結果や判断結果を現場へ戻す「物理世界とのフィードバックループ」を含む概念として捉える必要がある。

これまでのAI活用は、主にデジタルデータを入力とし、文章、画像、コード、分析結果などの成果物を出力する形が中心で、価値は既に蓄積されたデータをもとに知的作業や判断支援を効率化する点にあった。一方、AIが世界モデルやPhysical AIへ拡張すると、価値の中心は、現実世界の状態を継続的に把握し、将来の変化を予測し、その結果を人やシステムの判断、さらには設備・車両・ドローン・ロボットなどの実行系へ反映することへ移る(図表10)。世界モデルとは、現実世界の構造や状態変化をデータに基づいて内部的に表現し、将来の状態や行動結果を予測するためのAI基盤と捉えられる。例えば気象、海況、都市活動、交通、インフラ設備、物流、人流、災害リスクなどの変化を継続的に取り込み、現在の状態把握とともに将来起こり得る変化を予測する。Physical AIは、こうした認識・予測を、物理世界の機械、設備、車両、ドローン、ロボットなどの判断・制御・実行へ接続する考え方である。

図表10 世界モデル／Physical AIの拡張



この変化は段階的に進むと考えられる(図表11)。第1段階は現実世界のデータ取得・提供で、衛星、地上IoTセンサー、設備、車両、ドローン、ロボットなどからデータを取得し状態を可視化する。第2段階はデータに基づく状態把握・予測で、取得データを統合し異常、変化、リスク、需要、混雑、劣化などを検知・予測する。第3段階は実行可能な対応案の提示で、AIが予測結果をもとに運行計画、保守計画、避難計画、発電計画、配送計画などの選択肢を提示する。第4段階はAI判断に基づく自律対応で、設備、ロボット、車両、ドローン、建設機械、農機、船舶などがAIの判断・制御指示を受けて現場で自律的・半自律的に対応する。

図表11 AI活用が実行に近づく4ステップ



出所:PwC作成

AIがこのように現実世界の判断・制御・実行に近づくほど、求められるのは単なるモデル性能ではない。重要になるのは、現実世界のデータを広域かつ継続的に取得し、必要な場所へ届け、適切な場所で処理し、判断結果を現場へ戻すためのインフラである。取得から処理、判断までの遅れが大きければ、気象、災害、交通、インフラ異常、移動体制御のような領域では意思決定価値が低下する。また、全てのデータを地上へそのまま送信する前提では、通信帯域、接続機会、処理負荷、コストが制約となる。

この点で地上・宇宙融合インフラは、世界モデル／Physical AIの実装を支える重要な基盤となる。衛星は地球規模で現実世界を観測できるデータ取得点であり、NTN／D2Dは地上通信だけでは接続しにくい移動体や遠隔地をつなぐ通信基盤となる。さらに軌道上処理基盤や軌道上データセンターは、宇宙起点データを発生源に近い場所で前処理し、異常検知、圧縮、フィルタリング、優先度判定を行うことで、必要な情報を必要なタイミングで地上や現場へ届ける役割を担い得る。

世界モデル／Physical AIを支えるインフラには、主に四つの要件がある。第一に、データ発生地点と利用地点が分散することである。データは地上・宇宙にまたがって発生し、利用地点も地上DC、エッジ、現場システム、軌道上処理基盤に分散する。第二に、データ鮮度が意思決定価値に直結することである。気象、災害、インフラ異常、交通、移動体制御のような領域では、取得から処理、判断までの遅れが価値を大きく左右する。第三に、通信帯域や接続機会に制約があることである。全ての観測・センサーデータをそのまま地上に下ろすのではなく、異常候補、優先確認対象、アラート、制御に必要な特徴量のように、意思決定に直結する情報へ変換する必要がある。第四に、処理場所をワークロードごとに分化させる必要があることである。ミリ秒単位の制御は地上エッジ、広域の統合処理や宇宙起点データの前処理は軌道上処理基盤や地上DCを組み合わせるなど、処理内容に応じた配置が不可欠となる。

すなわち、世界モデル／Physical AIの高度化はAIモデル単体の進化では完結しない。現実世界を継続的に観測し、状態を更新し、予測し、判断結果を現場へ戻すフィードバックループを、地球規模で成立させる必要がある。そのためには、衛星、地上センサー、NTN／D2D、地上DC、地上エッジ、軌道上処理基盤、宇宙IX、時空間オーケストレーションを組み合わせた地上・宇宙融合インフラが重要となる。AIが現実世界の認識・予測・制御へ拡張していくほど、広域データの取得、リアルタイム処理、分散した計算資源の活用、信頼できる接続、現場へのフィードバックを一体で支えるインフラの重要性は高まる。

地上・宇宙融合インフラの活用領域の 代表ユースケース

世界モデル／Physical AIの進展により、地上・宇宙融合インフラの活用領域は、単なる宇宙データの取得や衛星通信の利用にとどまらない。現実世界の状態を広域かつ継続的に把握し、変化を予測し、その結果を人やシステムの意思決定、さらには設備、車両、ドローン、ロボットなどの実行系へ反映する領域へ広がっていく。

このとき重要なのは、AIの価値がモデル単体ではなく、現実世界のデータ取得、通信、処理、判断、実行までをつなぐ一連の仕組みに依存する点である。衛星、地上IoTセンサー、移動体、設備、ドローン、ロボットなどから発生するデータを適切な場所で処理し、必要なタイミングで現場に返すには、地上データセンター、地上エッジ、衛星上処理、軌道上データセンター、宇宙IX、NTN／D2D、時空間オーケストレーションを一体で組み合わせる必要がある。特に軌道上データセンターや軌道上処理基盤の価値は、宇宙で単に計算処理を行うことではなく、宇宙起点データを発生源に近い場所で前処理し、異常検知、圧縮、フィルタリング、優先度判定を行い、意思決定に必要な情報だけを地上や現場へ届けることで、通信負荷、処理遅延、地上側の負荷を抑えながら現実世界へのフィードバックを高速化できる点にある。

代表的な活用領域は三つある。

第一に、**気象・地球環境AI**である。

これは、気象、海洋、河川、地形、植生、都市活動などのデータを衛星・地上観測から統合し、広域の物理現象を把握・予測する領域である。予測精度が高まれば、災害予測にとどまらず、農業、航空、物流、再生可能エネルギー、防災、保険、都市運営など多様な意思決定に影響を及ぼす。例えば降雨、風、雲量、気温、海況をより高精度・高頻度に予測できれば、太陽光・風力発電の需給調整、航空便の運航判断、物流ルートの最適化、農作物の収穫判断、豪雨・洪水リスクへの事前対応が高度化する。これらは過去データの分析にとどまらず、現実世界の状態を継続的に観測し、変化を早期に検知して予測モデルへ反映することで価値を生む。この領域における宇宙側処理の価値は、衛星観測データを全て地上に下ろす前に、軌道上で雲、降雨兆候、海面変化、森林変化、都市活動の変化などを検知し、優先度の高いデータや特徴量を抽出できる点にある。これにより通信帯域や地上処理負荷を抑えつつ、災害予兆や急激な環境変化をより早く意思決定へ反映できる。地上データセンターや地上エッジは、軌道上で抽出された情報を地上センサー、行政データ、企業データ、現場データと統合し、より詳細な予測や対応計画へつなげる。

第二に、**産業・インフラオペレーション**である。

これは、工場、鉄道、道路、港湾、電力、通信、海底ケーブル、洋上風力、鉱山、物流拠点など、企業やインフラ事業者が運用する現場を対象に、異常検知、予兆保全、運用最適化、現場制御へつなげる領域である。衛星、ドローン、ロボット、地上センサー、設備データを組み合わせることで、広域に分散する設備や現場の状態を継続的に把握し、劣化、損傷、混雑、障害の兆候を早期に検知できる。送電線、パイプライン、鉄道、道路、港湾、洋上風力、鉱山、海底ケーブル陸揚げ局などは広域・遠隔地・海上・山間部に分散し、地上通信や人手による点検だけでは継続的な把握が難しい場合がある。この領域における宇宙側処理の価値は、広域に分散するインフラの変化や異常候補を衛星観測や宇宙側ネットワーク上で早期に抽出できる点にある。



例えば地表変位、土砂崩れの兆候、道路・鉄道沿線の異常、港湾混雑、洋上設備周辺の海況変化、山間部や遠隔地設備の被災状況などを軌道上で一次判定し、重要度の高い情報だけを地上側へ送る。地上側ではその情報を設備センサー、保守履歴、稼働データ、作業員・ロボットの位置情報と組み合わせ、保守計画、作業員配置、ロボット点検、設備制御へ接続する。このように、産業・インフラオペレーションにおける価値は単に遠隔地を観測することではなく、広域に分散する現場の状態を継続的に把握し、異常検知から保守・制御までをつなぐことで、Physical AIを平時の産業運用に組み込む点にある。現場ごとに求められる遅延、信頼性、安全性が異なるため、ミリ秒単位の制御は地上エッジ、広域の状態把握や異常候補抽出は宇宙側処理、詳細分析や計画最適化は地上データセンターというように、ワークロードごとの処理配置が重要となる。



第三に、生活・モビリティインフラである。

これは、自動運転車、ドローン配送、船舶、航空、鉄道、都市交通、配車、避難誘導、災害時輸送など、人やモノの移動を伴う社会活動を、宇宙・地上データとAIで支える領域である。人や移動体は常に位置や周辺環境が変化し、山間部、海上、離島、災害地域などでは地上通信だけで継続的に接続することが難しい。NTN/D2Dにより、スマートフォン、車両、ドローン、船舶、センサーを衛星経由で接続し、気象、道路、海況、空域、人流、物流、災害情報と組み合わせることで、移動ルート、配送計画、避難誘導、救援物資輸送などの判断を高度化できる。この領域における宇宙側処理の価値は、地上通信が届きにくい場所や広域に移動する対象を、地球規模の観測・通信・処理基盤に取り込める点にある。例えば災害時には、被災地域の通信断、道路寸断、河川氾濫、避難所の混雑、救援物資の位置、ドローンや車両の運行の状況を統合的に把握する必要がある。軌道上処理基盤は、衛星観測や衛星通信から得られる情報をもとに、被害が大きい地域、通信復旧が必要な地域、優先的に配送・避難誘導すべき地域を抽出し、地上側の防災・交通システムへ連携する役割を担い得る。平時でも、地上通信網だけではカバーしきれない移動体や地域をAI活用の対象に含めることが重要になる。船舶、航空、長距離物流、ドローン、山間部や離島のモビリティ、農業機械、建設機械などをNTN/D2Dを通じて継続的に接続し、気象・海況・道路・空域・混雑情報と組み合わせることで、移動や作業の安全性・効率性を高められる。ここでのNTN/D2Dは、災害時の非常通信に限られず、移動体や生活圏を世界モデル/Physical AIに取り込むための接続基盤として位置づけられる。

これら三つの領域に共通するのは、現実世界の状態が広域かつ動的に変化し、地上側のデータだけでは十分に把握できない点である。気象・地球環境AIでは地球規模の物理現象を高頻度に観測・予測する必要があり、産業・インフラオペレーションでは広域に分散する現場や設備を継続的に監視し異常検知から保守・制御までつなげる必要があり、生活・モビリティインフラでは人、車両、ドローン、船舶などの移動体をリアルタイムに把握し状況に応じて判断を変える必要がある。

したがって、地上・宇宙融合インフラの活用領域は、軌道上データセンターや衛星通信の単体利用に閉じるものではない。世界モデル/Physical AIが自然環境、産業現場、生活・モビリティへ広がるほど、衛星、地上通信、NTN/D2D、地上データセンター、軌道上処理基盤、エッジ、宇宙IX、時空間オーケストレーションを一体で組み合わせる必要が高まる。軌道上データセンターの本質的価値は、地上データセンターを代替することではなく、宇宙を観測点・通信点・処理点として組み込み、現実世界を高頻度に理解・予測・制御するAI基盤を形成できる点にある。地上・宇宙融合インフラは、こうした複数領域にまたがるAI活用を支える次世代基盤として位置づけられる。

06

地上・宇宙融合インフラにおける
日本企業の勝ち筋

前章では、地上・宇宙融合インフラが、気象・地球環境AI、産業・インフラオペレーション、生活・モビリティインフラなど、現実世界の認識・予測・制御を支える基盤となる可能性を整理した。

本章では、この新たな基盤に日本企業がどう関与すべきかを検討する。地上・宇宙融合インフラは、軌道上データセンター、宇宙IX、時空間オーケストレーション、セキュリティ、データ主権、世界モデル／Physical AIとの接続など、多くの領域で技術・標準・事業モデルが形成途上にある。だからこそ、完成した市場に後から参入するのではなく、形成段階から日本企業が担い得るポジションを見極め、官民が連動して関与することが求められる。

その際に重要なのは、軌道上データセンターや衛星通信を単独の宇宙ビジネスとしてではなく、AI、通信、計算、制御、データ流通、セキュリティを支える次世代産業基盤として捉えることである。そのうえで、日本企業がどの基盤構成要素を担い、どのユースケースで実装知を蓄積し、どの制度・標準形成に関与するのかを明確にする必要がある。

地上・宇宙融合インフラをめぐる論点

地上・宇宙融合インフラは、単なる軌道上データセンターや衛星通信の延長ではない。AI、データ、通信、計算、制御を一体で支える、次世代の産業基盤になり得るものである。日本企業にとって、このインフラ上のプラットフォームを主導できるかは重要な論点である。

過去のクラウド、スマートフォン、生成AIにおいて、日本企業は基盤レイヤーを海外勢に握られ、その上でサービスやアプリケーションを展開する立場にとどまってきた。クラウドでは海外のハイパースケーラー、スマートフォンでは海外OS、生成AIでも海外の基盤モデルやAIクラウドが主導的な位置を占め、日本企業はいずれも土台を握る側に十分なれていない。これは単に特定の製品・サービスで劣後したというより、デジタル社会の競争力を左右する基盤層を十分に押さえられなかったという意味で、「デジタル敗戦」として語られることが多い。

一方で、地上・宇宙融合インフラはまだ勝者が確定した市場ではない。軌道上データセンター、宇宙IX、時空間オーケストレーション、宇宙光通信、NTN／D2D、宇宙データ主権、世界モデル、Physical AIとの接続といった領域では、技術、標準、事業モデルの多くが形成途上にある。したがってこの領域は、過去のデジタル敗戦を繰り返さないための重要な戦略テーマであり、日本企業や日本政府には、完成した市場に後から参入するのではなく、形成段階から関与する余地が残されている。

もっとも、日本企業が単独で全レイヤーを自前で垂直統合し、海外勢と正面から総合プラットフォーム競争を行うことは現実的ではない。重要なのは、軌道上データセンター、衛星通信、AI基盤、ユースケースの全てを一律に取りに行くのではなく、日本が強みを持つ技術、顧客接点、データ、運用ノウハウ、制度設計力を、将来のアーキテクチャの中で不可欠な機能に接続することである。

その意味で、日本企業が考えるべき問いは「軌道上データセンターを自社だけで構築できるか」ではない。むしろ、「地上・宇宙融合インフラのどの機能を担えば日本企業が不可欠な存在になれるのか」「どのユースケースを起点にすれば日本の社会課題や産業基盤を強みに変えられるのか」「どの制度・標準形成に関与すれば将来のアーキテクチャに日本の要件を反映できるのか」である。次節以降では、この問いに沿って、日本企業の勝ち筋、官民連動のあり方、そして俯瞰図に基づく重点関与領域を順に検討する。



官民が連携するアプローチ

地上・宇宙融合インフラの形成に関与するには、民間企業単独の取り組みでは限界がある。この領域では技術、標準、制度、実証、初期需要が一体で形成されるため、官と民が個別最適で動くのではなく、共通の将来像を持ち、連動して取り組む必要がある。

官に求められる役割

官に求められる第一の役割は、地上・宇宙融合インフラを次世代産業基盤として位置づけ、官民が共有できる将来像を示すことである。軌道上データセンター、衛星通信、NTN、地上データセンター、クラウド、エッジ、AI、ロボティクスを個別の政策領域として扱うだけでは、将来のアーキテクチャ全体を捉えにくい。宇宙と地上に分散する通信・計算・制御・データ流通を一体のインフラとして捉え、どの領域で国内能力を確保すべきかを整理することが重要となる。

第二に、ルール形成・標準化・制度設計への早期関与が求められる。地上・宇宙融合インフラでは、衛星、地上局、通信網、地上データセンター、クラウド、エッジ、AI基盤をまたいでデータが流通する。そのため、従来のクラウド評価やセキュリティ認証を、宇宙側の処理、通信経路、運用主体、責任分界まで含めて拡張する必要がある。データ主権、プロベナンス管理、暗号鍵管理、監査可能性、相互運用性、障害時の責任分界といった論点を、地上と宇宙をまたぐ将来のアーキテクチャにどう組み込むかが重要となる。ただし標準化や相互運用ルールは官が一方的に定めるものではなく、実際に技術や運用を担う民間企業と協働して形づくる必要がある。官の役割は、民の実装知を標準・制度に反映できる場や枠組みを整えることにある。

第三に、実証環境と初期需要の整備が求められる。形成途上の市場では、民間企業だけで不確実性の高い技術・事業モデルに投資することは難しい。防災、重要インフラ監視、海洋・山間部通信、災害時通信、公共安全、インフラ点検、エネルギー、物流など公共性の高いユースケースを起点に実証環境を整え、民間企業が技術、運用、制度上の論点を検証できる場を提供することが重要である。

第四に、データ主権に影響を及ぼす役割を日本企業が担えるよう、積極的に支援することである。第4章で確認したように、宇宙空間には地上のような明確な国境が存在しない。そのため、軌道上データセンターが一般化した後には、データが物理的にどこに存在するかだけでなく、誰がその基盤を運用し、アクセス権限、暗号鍵、処理ルール、監査ログ、障害時対応を管理するのが、データ主権上の重要な論点となる。官には、こうした主権性に関わる機能について、日本企業が運用主体・管理主体として関与できるよう、研究開発、実証、調達、国際連携、標準化活動を通じて後押しすることが求められる。

民に求められる役割

民に求められる第一の役割は、自社の既存の強みを将来の地上・宇宙融合アーキテクチャ上で再定義することである。素材、部材、通信、計算、エネルギー、ロボティクス、セキュリティ、データ活用といった地上側の技術や事業は、そのまま宇宙側に転用できるとは限らないが、宇宙側の通信・計算・制御・データ処理と接続することで、新たな基盤機能やサービスとして位置づけ直せる可能性がある。したがって民間企業は「宇宙事業に参入するか」ではなく、「自社の強みが将来のアーキテクチャのどの機能を担えるか」を起点に検討する必要がある。

第二に、個別ユースケースの実証に閉じず、基盤レイヤーとの接続を意識した事業モデルを設計する必要がある。防災、インフラ点検、農業、建設機械自律施工、物流、モビリティ、ロボティクス、Physical AIなどのユースケースは重要だが、単発のアプリケーションとして捉えるだけでは将来の主導権を取りにくい。重要なのは、ユースケースを通じて得られるデータ、運用知、顧客接点を、通信・計算・制御・セキュリティ・データ流通の基盤設計に反映し、標準化やルール形成にもつなげることである。

第三に、官が整備する制度・実証環境・初期需要を待つだけでなく、自らリスクを取って実装知を蓄積する必要がある。形成途上の市場では、技術標準や事業モデルが確定してから参入しても、重要なポジションは既に他社に押さえられている可能性がある。宇宙事業者、通信事業者、データセンター事業者、素材・部材メーカー、AI・ロボティクス企業、インフラ事業者、公共機関が連携し、早期に実証と事業化の経験を積み上げることが求められる。

第四に、垂直統合モデルで各企業が単独で戦うことにこだわらないことである。一部のハイパースケーラーやスタートアップに見られる先行者総取り型の競争に対し、日本企業が取り得る勝ち筋は、各社がそれぞれの強みを持ち寄り、官民が連携してグローバルなエコシステムを形成することにある。インターネットが、複数の事業者が相互接続し、競争しながらも協調することで発展してきたように、地上・宇宙融合インフラもまた、一社で全体を囲い込むのではなく、標準化と相互接続を土台とした事業者間連携によって発展させる必要がある。その連携を国内に閉じず、グローバルに展開していくことが、形成途上の市場で日本企業が持続的なポジションを確保するうえで重要となる。

地上・宇宙融合インフラは、衛星、地上局、通信網、クラウド、エッジ、AI、ロボティクス、データ主権、セキュリティが相互に接続されて初めて価値を生む。そのため、個社単位のPoCを積み上げるだけでは、社会実装に必要な相互運用性、標準、責任分界、初期需要は形成されにくい。求められるのは、公共性の高いユースケースを起点に、複数年で技術実証、制度設計、標準化、調達、事業化を連動させる官民共同投資である。例えば防災、重要インフラ監視、海洋・離島通信、災害時通信、物流、エネルギー、インフラ点検といった領域では、国や自治体が初期需要を形成し、民間企業が技術・サービスを実装し、その過程で得られた運用知を標準化や制度設計に反映する循環を作ることが重要となる。

連動の必要性

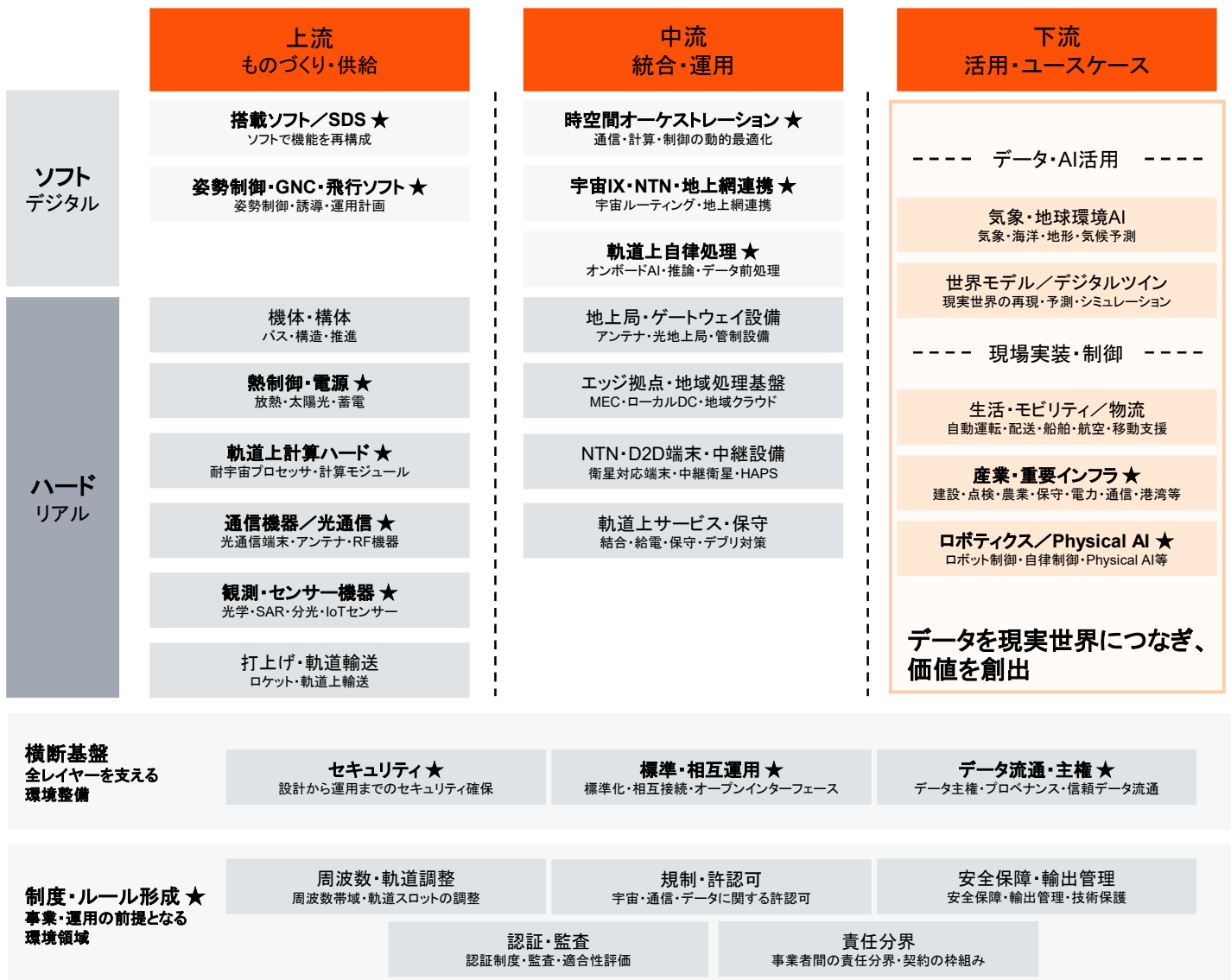
官が将来像、制度、実証環境を整え、民が具体的なユースケース、事業モデル、実装知を積み上げる。この往復がなければ、標準化やルール形成は実態を伴わず、民間の実証も単発PoCにとどまる。形成途上の市場で主導権を失わないためには、官民が共通の将来像を持ち、実証・制度・事業化を同時に進める必要がある。

地上・宇宙融合インフラの産業俯瞰と 重点関与の見極め

地上・宇宙融合インフラを産業として俯瞰すると、関与し得る領域は軌道上データセンターや衛星通信といった宇宙インフラに限られない。図表12に示すように、上流のものづくり・供給、中流の統合・運用、下流の活用・ユースケース、さらにそれらを支える横断基盤や制度環境にまで広く分布している。そのうえで重要なのは、これら全てに一律に取り組むことではなく、官と民がそれぞれ「自分はどのレイヤーに関与すべきか」を見極めることである。その判断軸は主体によって異なり、民間企業であれば技術、顧客接点、データ、設備、運用ノウハウが、国であれば確保すべき基盤能力、安全保障上の重要性、制度・標準への関与余地、公共性の高い初期需要が起点となる。

図表12 地上・宇宙融合インフラ 産業俯瞰図

★：重点関与領域



俯瞰図のとおり、上流には機体・構体、熱制御・電源、軌道上計算ハード、軌道輸送・打上げ、通信機器、観測・センサー機器、搭載ソフトウェア、SDS・制御ソフトなどがある。中流には軌道上データセンター運用、宇宙IX・相互接続、時空間オーケストレーション、地上局・運用基盤、軌道上自律処理、軌道上サービス・保守、セキュリティ運用などがある。下流には気象・地球環境AI、防災・減災、産業・インフラ監視、モビリティ・物流、農業・建設、ロボティクス／Physical AI、エネルギー・都市運営などが広がる。これらに加え、セキュリティ、標準・相互運用、データ流通・主権、プロベナンス管理、認証・監査は全レイヤーに共通する横断基盤であり、周波数・軌道スロット、規制・許認可、安全保障・輸出管理、責任分界は、事業成立の前提条件となる制度・環境として位置づけられる。

この俯瞰から分かるのは、関与の入り口が軌道上データセンター本体や衛星通信サービスだけではないということである。素材・部材、熱制御、電源、精密機器、光通信、センサー、ロボティクス、ソフトウェア、データ解析、インフラ運用、セキュリティといった日本の技術・事業基盤は、地上・宇宙融合インフラでも重要な役割を担い得る。これらを踏まえ、日本が重点的に関与すべき領域を俯瞰図の上で具体化すると、次の四つに整理できる。

第一に、**軌道上データセンターの成立性を左右する基盤技術**である。具体的には熱制御、電源、放射線対策、軌道上計算ハード、光通信、衛星間通信、地上局連携であり、軌道上で高密度な計算処理を行ううえで不可欠かつ技術的ボトルネックにもなり得る領域である。

第二に、**地上・宇宙をまたぐ運用ソフトウェアと制御基盤**である。時空間オーケストレーション、宇宙IX、ネットワーク制御、軌道上自律処理、SDS、障害時の迂回制御、宇宙天気を踏まえたレジリエンス運用などは、地上・宇宙融合インフラを単なる機器の集合ではなくサービスとして成立させる中核となる。

第三に、**セキュリティ、データ主権、信頼基盤**である。データが衛星、地上局、通信網、クラウド、エッジ、AI基盤をまたいで流通するため、誰が処理し、どの経路を通り、どの法律やルールが適用され、誰が監査できるのかを説明できる設計が必要となる。プロベナンス管理、暗号鍵管理、論理分離、認証、監査、責任分界は、日本が制度・標準形成と組み合わせることで関与し得る重要領域である。

第四に、**防災、インフラ維持管理、海洋・離島、物流・モビリティ、エネルギーなどの実装ユースケース**である。これらは日本国内に具体的な社会課題と顧客現場が存在する領域であり、地上・宇宙融合インフラの有効性を検証する実証フィールドとなる。国内の実装で得た知見を、国際標準、運用ルール、海外展開可能なサービスモデルへ接続できれば、日本企業の競争力につながる。

以上を踏まえると、日本に求められるのは、俯瞰図上の全ての領域に一律に取り組むことでも、全てを自前で囲い込むことでもない。官は国として確保すべき基盤能力、制度・標準、安全保障上の重要領域を見極め、民間企業は自社の強みを起点に、上流・中流・下流のどこで価値を出し、それを支える基盤機能にどこまで関与するかを選び取る。そのうえで標準化と相互接続を軸に事業者間で連携し、データ主権に関わる領域では日本企業がオペレーターとして中核を担う。これが、形成途上の地上・宇宙融合インフラにおける日本の現実的な勝ち筋となる。

07 おわりに



本レポートでは、生成AIの普及を起点に、地上データセンターの立地・機能分担がどう変化し、その延長線上で軌道上データセンターや地上・宇宙融合インフラがどのような意味を持ち得るのかを検討してきた。

生成AIやAI推論の拡大は、データセンターを単なるIT設備ではなく、電力、通信、土地、冷却、地域政策と一体で整備される社会インフラへと変えつつある。米国、欧州、日本のいずれでも、従来の大都市・IX近接型に加え、電力・脱炭素電源・土地・レジリエンスを考慮した分散配置が進み、計算基盤は「どこに置か」だけでなく「どのワークロードをどこで担うか」の問題へ移行している。

一方、データ処理需要の拡大は地上に閉じない。衛星数の増加、観測センサーの高性能化、衛星間通信の高度化、地球外活動の拡大により、宇宙で生成・中継・処理されるデータ量も増えている。軌道上データセンターは、地上を単純に代替するのではなく、宇宙起点データを発生源に近い場所で処理し、地上の通信・計算負荷を補完する計算ノードである。その実現には電力供給、熱制御、通信、計算アーキテクチャ、運用・保守、打上げコストなど多くの課題が残るため、単体で評価するのではなく、地上・軌道上データセンター、衛星通信、光データリレー、クラウド、エッジが連携する分散型アーキテクチャとして捉える必要がある。本レポートの地上・宇宙融合インフラとは、この地上と宇宙にまたがる通信・計算・データ流通基盤である。

その価値は、計算資源を宇宙へ拡張することにあるのではない。宇宙を地球規模の観測点・通信点・処理点として組み込み、現実世界を高頻度に把握・予測し、判断結果を現場へ返すAI基盤を形成できる点にある。AIがLLMによる生成を超え、世界モデルやPhysical AIへ拡張するほど、衛星、地上センサー、設備、車両、ドローン、ロボットのデータを必要な場所で処理し現場へ返す仕組みが重要になる。その意味で地上・宇宙融合インフラは、単なる宇宙産業の新領域ではなく、AI、通信、クラウド、ロボティクス、防災、インフラ、エネルギー、安全保障を横断する次世代の産業基盤であり、宇宙IX、時空間オーケストレーション、セキュリティ、データ主権、宇宙天気へのレジリエンスは、その社会実装に欠かせない構成要素である。

日本にとって重要なのは、この基盤を完成した海外プラットフォームの上で利用するだけの立場にとどめないことである。過去のクラウド、スマートフォン、生成AIで、日本は基盤レイヤーを海外勢に握られ、その上でサービスを展開する立場に置かれてきた。これは広義の「デジタル敗戦」であり、個別のサービスで努力しても、基盤、標準、データ流通、運用ルールを他者に握られれば産業全体の主導権は取り戻しにくい。しかし地上・宇宙融合インフラはまだ勝者も標準も確定しておらず、軌道上処理、宇宙IX、時空間オーケストレーション、NTN／D2D、宇宙データ主権、Physical AIとの接続といったレイヤーは形成途上にある。だからこそこの領域は、日本が次の基盤形成に主体的に関与できるかの分岐点となる。

もちろん全レイヤーを自前で垂直統合するのは現実的ではない。本レポートで論じたとおり、日本の勝ち筋は、強みを持つ基盤構成要素（熱制御・電源、光通信、センサー、ロボティクス、セキュリティ、データ主権、運用ソフトウェアなど）で不可欠な機能を担い、防災、インフラ維持管理、海洋・離島、物流・モビリティ、エネルギーといった社会課題起点のユースケースで実装知を蓄積することにある。そのためには、単発のPoCや個別補助金にとどまらず、公共性の高いユースケースを起点に、官民が複数年で実証・制度設計・標準化・調達・事業化を連動させる必要がある。官が将来像・制度・標準・初期需要を整え、民が技術・運用知・事業リスクを持ち寄る往復があって初めて、日本は形成途上のアーキテクチャに自国の要件と強みを反映できる。

地上と宇宙を分けて考える時代は、AIの計算需要、宇宙起点データの増大、衛星通信の高度化、世界モデル／Physical AIの進展を踏まえれば、徐々に終わりつつある。今後問われるのは、地上に置くか宇宙に置くかではなく、通信・計算・データ・制御を地上と宇宙にまたがる一体のアーキテクチャとしてどう設計するかである。これは産業競争力だけでなく、データ主権、重要インフラのレジリエンス、安全保障にも関わり、宇宙産業政策の一部ではなく、AI時代の国家的な産業基盤をどう設計するかという論点である。

地上・宇宙融合インフラは、まだ確定した未来ではない。しかしそれは、日本が形成段階から関与し得る余地が残されているということでもある。軌道上データセンターを一過性の構想として見るのではなく、AIが現実世界を理解・予測・制御する時代の基盤として捉え直し、自国の強みを将来のアーキテクチャ上の不可欠な機能へ接続していく必要がある。設計競争はすでに始まっている。日本に求められるのは、その利用者にとどまらず、形成段階から関与し、不可欠な機能を担う側に回ることである。

参考文献

1. WallStreetNumbers, 2026. "Market Overview." Accessed June 23, 2026. <https://wallstreetnumbers.com/>
2. JLL, 2026. "2026 Global Data Center Outlook." Accessed June 23, 2026. <https://www.jll.com/content/dam/jllcom/en/global/documents/reports/research-reports/26-research-global-data-center-outlook-new.pdf>
3. Data Center Frontier, 2022. "Why Ashburn Is the Hub of Northern Virginia's Digital Economy." Accessed June 23, 2026. <https://www.datacenterfrontier.com/special-reports/article/11427240/why-ashburn-is-the-hub-of-northern-virginia8217s-digital-economy>
4. A. Lazo, 2025. "Data Centers for AI Could Nearly Triple San Jose's Energy Use. Who Foots the Bill?" CalMatters. Accessed June 23, 2026. <https://calmatters.org/environment/2025/12/data-center-energy-san-jose/>
5. R. Mural et al., 2026. "AI, Data Centers, and the U.S. Electric Grid: A Watershed Moment." Belfer Center for Science and International Affairs. Accessed June 23, 2026. <https://www.belfercenter.org/research-analysis/ai-data-centers-us-electric-grid>
6. Amazon, 2025. "AWS Activates Project Rainier: One of the World's Largest AI Compute Clusters Comes Online." Accessed June 23, 2026. <https://www.aboutamazon.com/news/aws/aws-project-rainier-ai-trainium-chips-compute-cluster>
7. CBRE, "Smaller and Bigger: Divergent Demand Trends Underpin a Strong 2016", 2016. Accessed June 23, 2026. https://trerc.tamu.edu/wp-content/uploads/files/PDFs/MktResearch/US_Industrial_CBRE_DataCenters.pdf
8. CBRE, "North America Data Center Trends H2 2025", 2026. Accessed June 23, 2026. <https://www.cbre.com/insights/books/north-america-data-center-trends-h2-2025>
9. D. Thorpe, 2026. "EMEA Year End Data Centre Report 2025." JLL. Accessed June 23, 2026. <https://www.jll.com/en-de/insights/emea-data-centre-report>
10. Cushman & Wakefield, 2026. "H2 2025 EMEA Data Centre Market Update." Accessed June 23, 2026. <https://www.cushmanwakefield.com/en/insights/emea-data-centre-update>
11. NTT DATA, 2026. "Launch of One of Japan's Largest Data Center Campus Developments in the Inzai-Shiroi area of Chiba Prefecture with approximately 250 megawatts (MW)," Accessed June 23, 2026. <https://www.nttdata.com/global/ja/news/release/2026/041700/>
12. Google, 2023. "Opening a Data Center in Inzai City, Chiba." Accessed June 23, 2026. <https://blog.google/intl/ja-jp/company-news/inside-google/data-center-in-inzai-city/>
13. Ministry of Economy, Trade and Industry. 2025. "Outline for the Establishment of the Public-Private Council on Watt-Bit Collaboration." Accessed June 23, 2026. https://www.meti.go.jp/shingikai/economy/watt_bit/pdf/001_01_01.pdf
14. Ministry of Economy, Trade and Industry, 2026. "GX Strategic Region System." Accessed June 23, 2026. https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gx_strategy_area.html
15. Analysys Mason, 2023. "The Implications of Increasing Earth Observation Data." Accessed June 23, 2026. <https://www.analysismason.com/research/content/articles/the-implications-of-increasing-earth-observation-data/>

参考文献

16. International Energy Agency, "Data centre electricity use surged in 2025, even with tightening bottlenecks driving a scramble for solutions," 2026. Accessed June 23, 2026. <https://www.iea.org/news/data-centre-electricity-use-surged-in-2025-even-with-tightening-bottlenecks-driving-a-scramble-for-solutions>
17. T. Beals, "Exploring a space-based, scalable AI infrastructure system design," Google Research, 2025. Accessed June 23, 2026. <https://research.google/blog/exploring-a-space-based-scalable-ai-infrastructure-system-design/>
18. NTT, 2022. "Overview of Space Integrated Computing Network Initiatives." Accessed June 23, 2026. <https://journal.ntt.co.jp/article/19855>
19. Kepler, "Kepler Announces On-Orbit Compute Capacity on Optical Data Relay Network," 2025. Accessed June 23, 2026. <https://kepler.space/kepler-announces-on-orbit-compute-capacity-on-optical-data-relay-network/>
20. Starcloud, "Starcloud-1." Accessed June 23, 2026. <https://www.starcloud.com/starcloud-1>
21. Starcloud, "Starcloud-2." Accessed June 23, 2026. <https://www.starcloud.com/starcloud-2>
22. Starcloud, "Starcloud-3." Accessed June 23, 2026. <https://www.starcloud.com/starcloud-3>
23. Federal Communications Commission, "Satellite Licensing Division and Satellite Programs and Policy Division Information: Applications Accepted for Filing," 2026. Accessed June 23, 2026. <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-419509A1.pdf>
24. B. Agüera y Arcas et al., "Towards a future space-based, highly scalable AI infrastructure system design," Google, 2025. Accessed June 23, 2026. https://services.google.com/fh/files/misc/suncatcher_paper.pdf
25. Federal Communications Commission, "Space Bureau Accepts for Filing SpaceX's Application for Orbital Data Centers," 2026. Accessed June 23, 2026. <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DA-26-113A1.pdf>
26. SpaceX, "SpaceX IPO Roadshow," 2026. Accessed June 23, 2026. https://content.spacex.com/cms-assets/FINAL_Documents%20and%20Updates/SpaceX%20IPO%20Roadshow.pdf



お問い合わせ先

PwC Japanグループ

<https://www.pwc.com/jp/ja/contact.html>

