

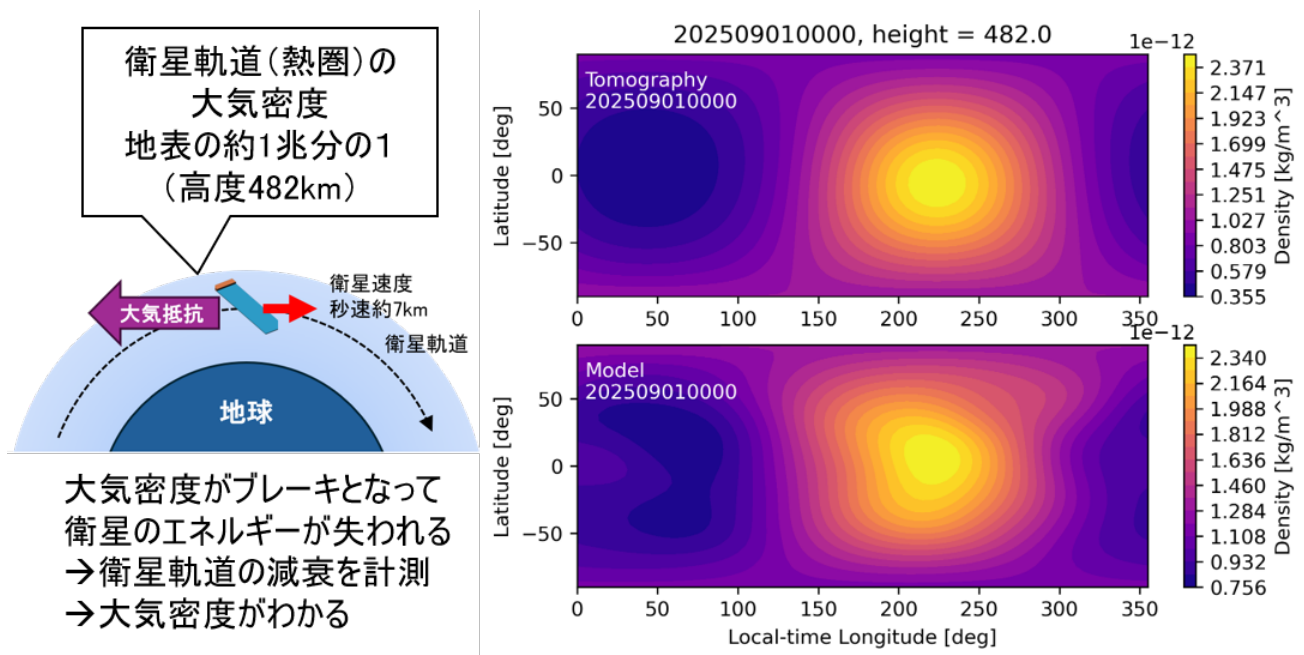
Starlink 衛星の軌道情報を元に、衛星が飛翔する高度の大気密度の緯度・経度分布をトモグラフィー解析によって計測しました（世界初の成果）

概要

地球周辺の宇宙空間は、数千もの人工衛星や宇宙ゴミ（デブリ）が低軌道を共有するようになり、ますます混雑しています。衛星の軌道予測や衝突回避には、大気密度に関する正確な情報が不可欠です。京都大学生存圏研究所の山本衛（まもる）特任教授は、衛星高度の大気密度を可視化する新しい手法を実証しました。SpaceX 社¹⁾の「Starlink（スターリンク）」衛星²⁾の公開軌道データを用いた高度約 500km における大気密度の画像化です。本研究成果は 7 月 30 日に学術誌『Earth, Planets and Space』に「Express Letter（速報）」として掲載されました。本研究では、Starlink 衛星群の詳細軌道情報（エフェメリス³⁾）が活用されました。高度 482km に存在する約 1,200 機の衛星が大気抵抗によって受けるわずかなエネルギー損失を計測し、トモグラフィー解析⁴⁾の手法によって、緯度・経度ごとの大気密度の分布を再構築しました。この成果は、2026 年 4 月に発表した関連研究（Starlink 衛星のより一般的な軌道情報を用いた、熱圏⁵⁾密度の時間・高度分布の推定）の発展であり、今回の研究では分析を水平方向（緯度・経度方向）に拡張しました。将来的には衛星周辺の大気密度の準リアルタイム監視を可能にし、将来の宇宙活動の安全性・信頼性向上に寄与することが期待されます。

論文情報

- Yamamoto, Tomography of Thermospheric Density from Starlink Ephemeris: Initial report, Earth Planets Space, 2026, Vol. 78, Article 175, doi:10.1186/s40623-026-02509-5（2026 年 7 月 30 日公表）
- Yamamoto and Sori, Thermospheric density from Starlink TLE, Data analysis and preliminary results, Earth Planets Space, Vol. 78, Article 60, 2026, doi:10.1186/s40623-026-02402-1（2026 年 4 月公表）



（左側）大気抵抗を用いて衛星高度（熱圏）の大気密度を計測する原理図。（右側）本研究で推定した高度 482km の大気密度の緯度経度分布（上：実測値）と、経験モデルから予想される大気密度分布（下：比較相手）。

1. 背景

宇宙開発の急激な進展により、地球周辺の軌道上には無数の人工衛星やスペースデブリ（宇宙ゴミ）が存在しており、「軌道上の混雑」が国際的な問題となっています。G7 各国の学術団体は、2026 年 5 月に、大規模衛星コンステレーション⁶⁾の問題点についての共同声明を発出しました。日本学術会議が公表しています。

- Gサイエンス学術会議 2026（日本学術会議 web ページ）
<https://www.scj.go.jp/ja/int/g8/index.html>
- （声明の原文）Large satellite constellations: perspectives and challenges
<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf2/kohyo-26-gs2026-1.pdf>
- （声明の和訳）大規模衛星コンステレーション：課題と影響
<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf2/kohyo-26-gs2026-1j.pdf>

この中には4つの提言がありますが、2番目で「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。」と指摘されています。

高度数百 km の低軌道では、わずかに存在する大気抵抗（空気抵抗）が衛星の軌道を狂わせます。衝突事故を防ぐためには「いつ・どこに・どれくらいの大気があるか」という正確な大気密度データが不可欠です。本研究は、この社会的要請に応える第一歩となる成果です。参考として、衛星打上げ増大の状況を示します。

1. 衛星の年間打上げ個数が約 200 機（2015 年）から 2700 機（2024 年）まで飛躍的に増大している。
参考：ESA' S ANNUAL SPACE ENVIRONMENT REPORT（2025 年版）
https://www.sdo.esoc.esa.int/publications/Space_Environment_Report_I9R1_20251021.pdf
2. 衛星の軌道予測や衝突回避には、衛星が飛翔する高度における大気密度の正確な情報が必要不可欠です。
参考：論文「Effects of Uncertainties in the Atmospheric Density on the Probability of Collision Between Space Objects」<https://doi.org/10.1029/2017SW001705>
3. SpaceX 社は、2026 年 7 月に、第 3 世代の Starlink 衛星を 10 万機に増やす計画を公表しました。
参考：記事「SpaceX、10 万基の第 3 世代 Starlink 衛星を FCC に申請」
<https://cafe-dc.com/network/spacex-files-fcc-application-for-100000-gen3-starlink-satellites/>

2. 研究手法・成果

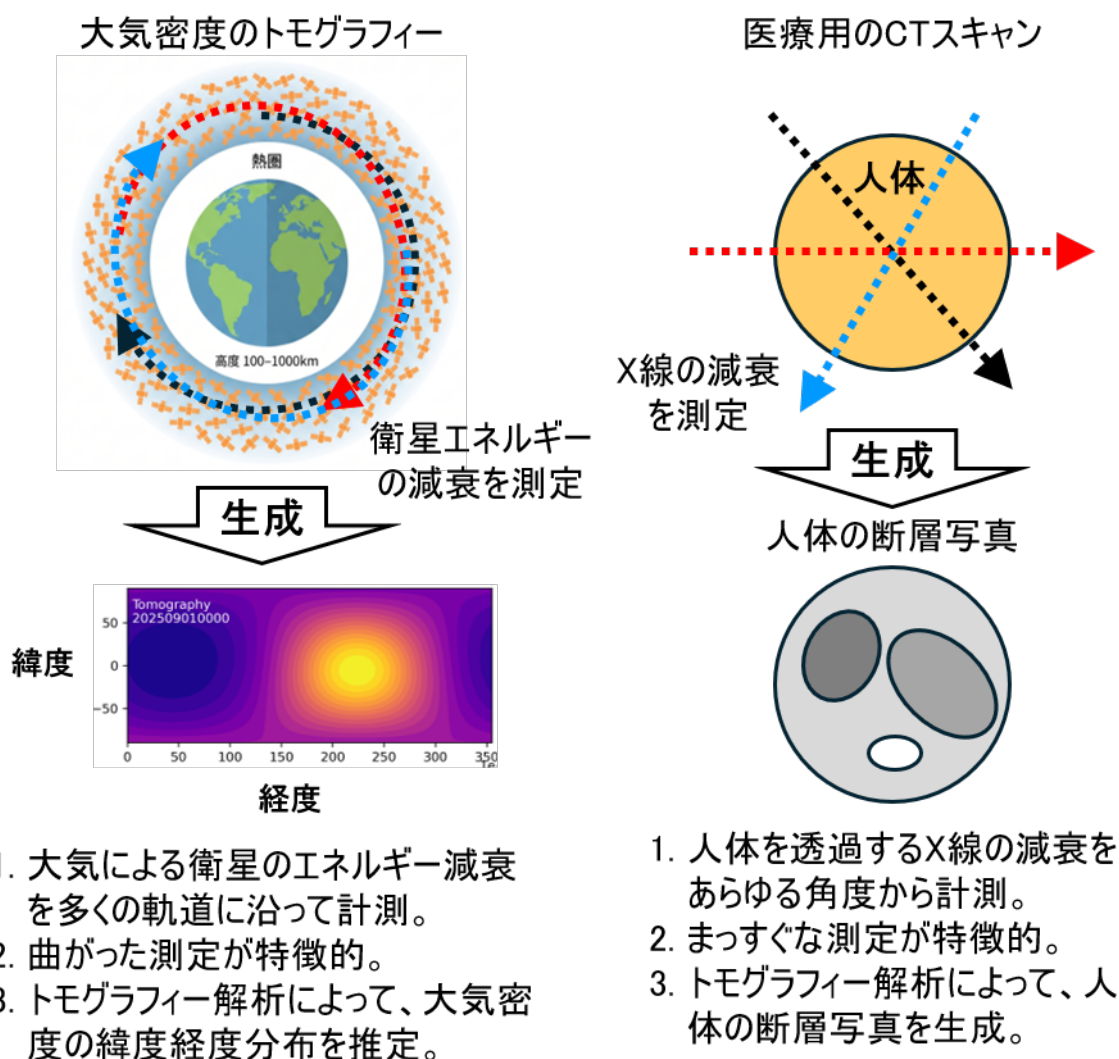
地球の周回軌道上にある Starlink 衛星の総数は、現在は約 1 万機に達しています。SpaceX 社は、Starlink 衛星と他の衛星の衝突を回避する目的で、エフェメリス（ephemeris）と呼ばれる詳細な軌道情報を 1 日に 3 回（約 8 時間ごと）に公表しています。本研究では、この公開エフェメリス・データを用いて、衛星が飛翔する高度の大気密度を研究しました。

大気は引力によって地球のまわりに引き寄せられており、地表が最も高密度であって、高度が上がるにつれて指数関数的に減少します。前頁の図（左側）に示した通り、高度 482km においては地表の約 1 兆分の 1 と極めて薄いために、衛星は地球を周回し続けます。しかし大気抵抗が衛星の軌道エネルギーを減衰させるため、徐々に落下します。Starlink 衛星は推進装置を備えています。活動中の衛星は、加速操作であるマニューバ⁷⁾（maneuver）操作を行って高度を維持し続けています。

本研究では、4 月と 7 月に論文発表をしました。それぞれ次のような内容です。

- 4 月の論文：Starlink 衛星の一般的な軌道情報（TLE⁸⁾と呼ばれます）を用いて、役割を終えて自然落下している衛星のみを選んで落下状態を調べることで、高度 200～600km における大気密度の高度分布を明らかにしました。この研究手法は従来からあるものですが、Starlink という大量の同種の衛星を活用した点が新しく、大気密度データの時間分解能を上げることに成功しました。
- 7 月の論文：Starlink 衛星のエフェメリス情報を使った解析です。4 月の論文とは異なり、活動中の衛星を用いた解析を行いました。高度 482km 付近を飛翔する衛星群（約 1200 機）が感じる大気抵抗を総合することで、大気密度の緯度・経度構造を明らかにしました。結果は経験モデルや他の衛星による実測と非常に良く一致しています。本研究で採用したデータ解析手法と結果は、いずれも世界初です。

7月の論文では、超希薄な大気密度を面的なスナップショットとして捉えることに成功しました。このために使用したデータ解析技術は、例えば人体の断面を輪切りにして可視化するCTスキャンやMRI画像と同じ「トモグラフィー（断層撮影）」です。下記に示す通り、CTスキャン（右側）では人体にX線を透過させた時の減衰をあらゆる方向から測定し、それを総合することで断層写真を生成します。我々の研究では、大気を周回する多数の衛星が「感じる」エネルギー減衰を総合することで、密度の緯度経度分布を求めました。CTスキャンと本研究では、測定方向が「直線」「曲線」、断層面が「平面」「球面」という違いはありますが、本質的には同様の解析手法です。



（注：左側の地球を取りまく多くの衛星の図は、Google Gemini Notebook から生成しました。）

3. 波及効果、今後の予定

地球大気が宇宙空間に接続する領域は高度 100～1000km の範囲で「超高層大気」と呼ばれています。超高層大気における大気密度は基本的なパラメータでありながら、超希薄なために観測手段が限られ、研究コミュニティから「謎が多い」とされてきました。今回、4月と7月の論文発表によって、Starlink 衛星の軌道情報が衛星周辺の大気密度の推定にとって有用であることが明らかにできました。Starlink 衛星のエフェメリスデータは1日3回も更新されますので、従来に比して飛躍的に高い時間・空間分解能の大気密度データが生成できます。これは超高層大気の研究自体に対してインパクトが大きく、地球大気と宇宙空間のかかわりを明らかにするうえで重要なデータ供給につながります。さらに、最近は衛星やデブリの衝突とその回避が問題化して

きたことから、社会的なインパクトも大きな成果です。将来的には、データが公表されたあと即座に大気密度データに変換して公表するという、リアルタイム・データサービスの構築に進みたいと考えています。

4. 研究プロジェクトについて

2026～2028 年度 日本学術振興会・科学研究費（基盤研究(C)）

題目「人工衛星の軌道変化を活用する熱圏大気密度リアルタイム・モニタリングの構築」(課題番号:26K07166)

<用語解説>

- 1) SpaceX 社：Space Exploration Technologies Corp.、起業家イーロン・マスク氏が 2002 年に設立したアメリカの民間宇宙開発企業、Falcon-9 ロケットによる衛星打上げビジネス、Starlink 衛星による通信事業などを展開している。
- 2) Starlink 衛星：SpaceX 社が展開するインターネット通信衛星システム。衛星数が約 1 万機に達する。
- 3) エフェメリス：衛星の詳細な軌道情報。時々刻々の衛星の位置と速度の情報の集積である。
- 4) トモグラフィー：対象物を破壊せずに、外側から内部の「断面」を画像化する技術の総称。
- 5) 熱圏：超高層大気の電氣的に中性である大気を指す。高度 300km 以上では酸素原子が主成分である。
- 6) 衛星コンステレーション：複数の衛星による編隊飛行。
- 7) マニューバ：maneuver、衛星の高度を維持したり位置を調整するための加速（あるいは減速）操作。
- 8) TLE：Two-Line Element、一般的な衛星軌道情報であり、ほぼ全ての衛星の TLE が公開されている。

<研究者のコメント>

本研究は 2024 年に Starlink 衛星が数千機に達したことを知って始めました。超高層大気の大気密度データは研究的にも決定的に不足しており、本研究はそのギャップを埋める重要な成果です。本研究は超高層大気（地球科学）と衛星軌道力学（宇宙工学）の知識をミックスした点に妙味があります。最新の AI 技術を利用することで、二つの遠く離れた研究領域をつなぎ合わせ、効率的なデータ処理を素早く実現できました。（研究代表者：山本衛）

Starlink衛星の軌道情報から熱圏大気密度のトモグラフィー解析に成功(世界初)
京都大学生存圏研究所 山本衛

研究の背景と社会ニーズ

1. 衛星軌道の混雑が問題化している。Starlink衛星(SpaceX社、約1万機)が典型例。
2. 衛星・宇宙デブリの衝突が連鎖的に進むと、極端な場合、宇宙空間がデブリだらけになってしまい、衛星軌道が使えなくなる可能性がある。
3. 衛星の軌道制御を精密化するため、熱圏大気密度(衛星のブレーキ)を詳しく知りたい。

本研究の原理

1. 熱圏大気(高度100~1000km)は超希薄ですが、地球周回軌道上の衛星のブレーキとして働きます。逆に、衛星軌道の減衰を解析することで、密度を推定できます。
2. Starlink衛星は482km付近に約1200機が飛翔しています。医療用の「CTスキャン」で使われるトモグラフィー技術を応用し、大量データから密度の空間構造の抽出に成功しました。

熱圏大気密度は、地表の約1兆分の1
(高度482km)

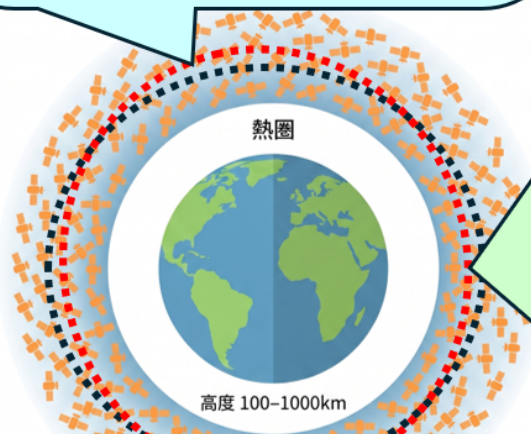
衛星速度
秒速約7km

大気抵抗

大気抵抗(衛星のブレーキ)
から密度が推定できる。

衛星軌道

軌道縮小
(落下)



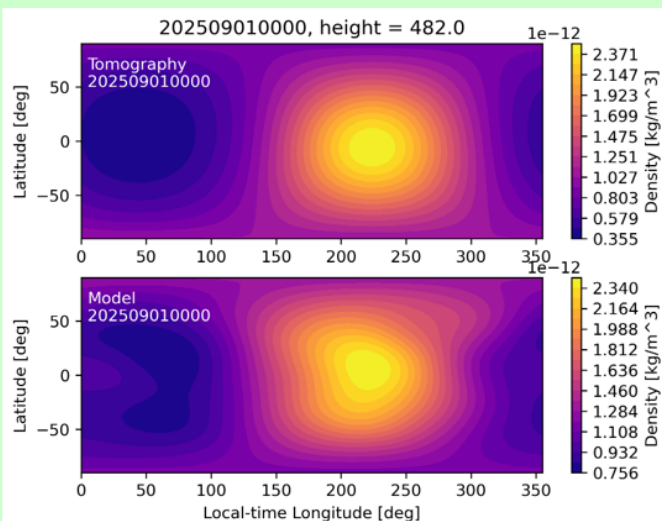
衛星軌道

約1万機のStarlink衛星は約8時間
ごとに詳細軌道情報を公開している

トモグラフィー解析結果

上図: 密度の緯度経度分布(本研究)

下図: 経験モデルからの緯度経度分布



- 1200機の衛星(軌道がわずかに異なる)からの軌道の減衰情報を総合することで、大気密度の緯度経度分布を推定した。大量の公開データの活用にあたります。
- 世界初の成果=Starlink衛星の軌道情報から、熱圏大気密度の緯度経度構造の抽出に成功しました!

今後の展開・将来展望

1. 長期間のデータ解析から、熱圏大気密度の時間空間変動の解明に取り組む。
2. リアルタイム解析(8時間ごと)を実現し、衛星衝突の回避に貢献して行きたい。