

2026 年 10 月 21 日

富士通株式会社

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学

国立研究開発法人海洋研究開発機構

国立研究開発法人情報通信研究機構

富士通、名古屋大学、JAMSTEC、NICT ら、太陽高エネルギー粒子シミュレーションの精度を高めるパラメータを、数理最適化で自動決定する技術を開発

放射線リスクから宇宙飛行士を守り、衛星データの利活用や将来の月面での産業創出を促進

富士通株式会社（注 1）（以下、富士通）、国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学（注 2）（以下、名古屋大学）、国立研究開発法人海洋研究開発機構（注 3）（以下、JAMSTEC（ジャムステック））、国立研究開発法人情報通信研究機構（注 4）（以下、NICT（エヌアイシーティー））を中心とする研究グループ（注 5）は、宇宙飛行士の被ばくや人工衛星の障害の原因となる太陽高エネルギー粒子（SEP）（注 6）の到来を計算する物理シミュレーションの精度を高めるパラメータを、5 機の探査機による観測データから客観的かつ再現可能な方法で自動決定する世界初（注 7）の技術（以下、本技術）を開発しました。本成果は、英国科学誌「Scientific Reports」に掲載されました（注 8）。

本技術を太陽高エネルギー粒子の到来予測に用いることにより、人工衛星の故障の発生を抑え、衛星データの利活用の促進が期待できます。また、被ばくリスクを低減できることから宇宙飛行士の安全を確保し、将来的には月面基地活動による新たな産業創出へ寄与します。

太陽高エネルギー粒子は電気を帯びており、太陽から伸びる磁力線に沿って進みながら散乱されるため、その到来を予測するのは非常に困難です。これまでの、過去に起きた現象の観測を再現できるよう、専門家が経験と試行錯誤でパラメータの値を決めてきました。しかし、この方法では、値の根拠を客観的に示して同じ手順で再現することが難しいという課題がありました。そこで今回、ブラックボックス数理最適化（注 9）を用いて、この設定を自動化しました。具体的には、太陽高エネルギー粒子の量と到達時刻を計算する物理シミュレーションについて、日欧国際共同プロジェクトである水星探査機 BepiColombo を含む 5 機の探査機による観測結果との誤差が小さくなるよう、19 個のパラメータを自動で設定すること（注 10）に成功しました。本技術の中核は、富士通が構築した「Fujitsu Solar Energetic particle Intelligent Tuning and Evaluation Network」（以下、SEITEN）（注 11）です。SEITEN は、名古屋大学宇宙地球環境研究所が開発し、NICT が運用する磁気流体力学（MHD）シミュレーション（注 12）SUSANOO（注 13）と、JAMSTEC が開発した粒子加速・輸送モデル SEPIF（注 14）を連携させ、ブラックボックス数理最適化によって、粒子の加速と輸送に関わるパラメータを自動決定できる技術です。なお、MHD シミュレーションのパラメータ設定のために名古屋大学宇宙地球環境研究所（ISEE）の IPS（惑星間空間シンチレーション）（注 13）観測データが活用されました。

研究グループは、本技術により、複数の探査機による観測データを基に、粒子の散乱の強さなどを表す複雑なパラメータ設定の自動化を実現するとともに、パラメータの空間分布の推定を可能にしました（注 15）。これは、太陽高エネルギー粒子の量と到達時刻を高い精度で予測する技術の実用化に向けた重要な一歩となります。

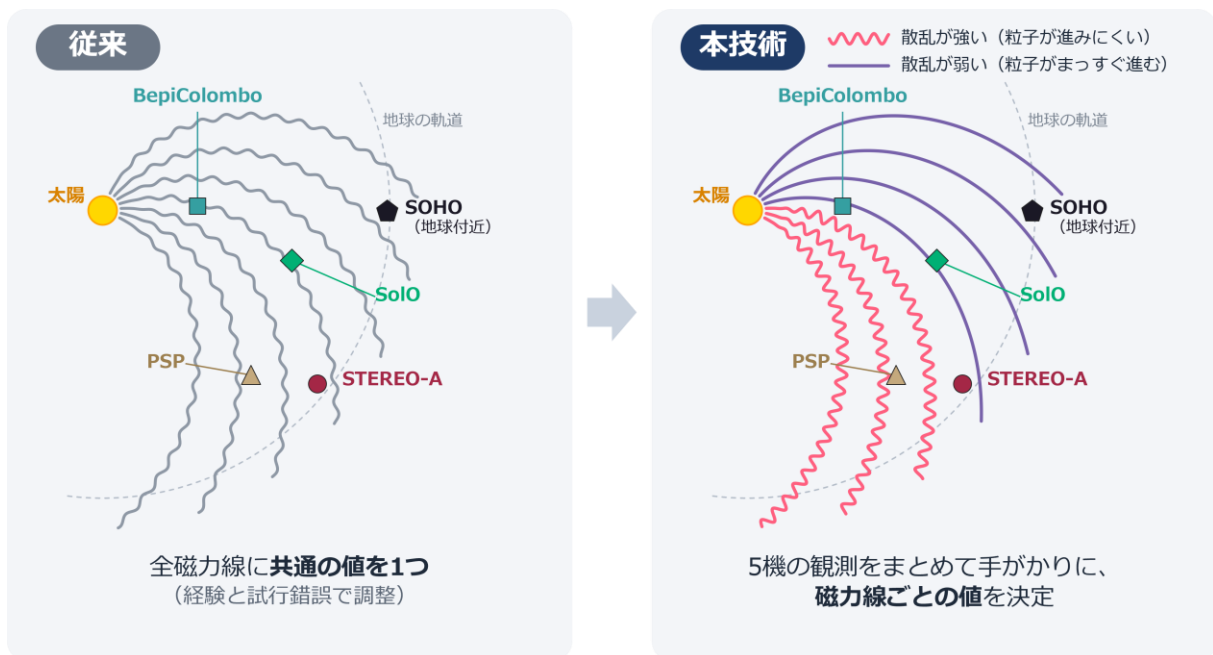


図1 従来と本技術のパラメータの決め方の違い。太陽を北極側から見下ろした模式図で、太陽から渦巻き状に伸びる線は磁力線、記号は5機の探査機の位置（2021年10月10日）を表す（PSP：Parker Solar Probe、SolO：Solar Orbiter）。

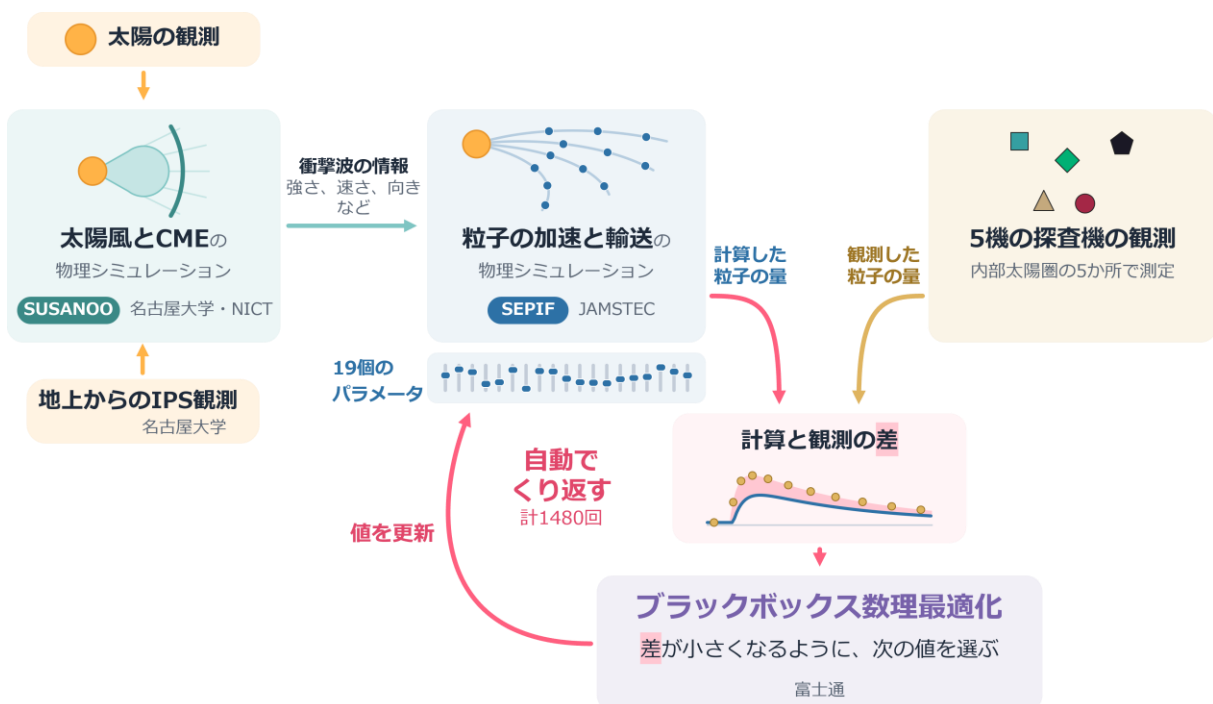


図2 本技術の仕組み。2つの物理シミュレーションを連携させ、計算と5機の観測との差が小さくなるように、数値最適化でパラメータの値を更新することを自動でくり返す。

【背景】

人類の活動領域は、地球の周りから月面へと広がりつつあり、日本の宇宙基本計画（2023年6月閣議決定）では、月面における持続的な有人活動に向けて、電力や通信、測位などのシステムを段階的に整備し、新たな産業の創出を目指しています。また、日本も参画するアルテミス計画など、月面での有人活動に向けた国際的な取り組みも進んでいます。一方で、こうした宇宙活動の安全を脅かす要因の一つが、太陽から飛来する放射線（太陽高エネルギー粒子など）です。

太陽表面で発生するフレアやコロナ質量放出（CME）（注 16）に伴い、陽子や電子などの粒子が光速の数十％に達する速さまで加速され、惑星間空間へ放出されることがあります。こうして発生する太陽高エネルギー粒子は、人工衛星の機器故障や誤動作を引き起こすほか、宇宙飛行士の被ばくリスクとなります。そのため、月面での活動が本格化する中で、太陽高エネルギー粒子がいつ、どこに、どれだけ到来するかを事前に把握することが重要です。この到来を予測する有力な手段が、粒子の加速と輸送を物理法則に基づいて計算するシミュレーションです。しかし、このシミュレーションには、観測から直接測ることのできない値（自由パラメータ）が数多く含まれます。代表的なものとして、衝撃波の上流にある粒子のうち、加速に取り込まれる割合を示す注入効率と、粒子が散乱されるまでに磁力線に沿って進む距離の目安を示す平均自由行程があります。これらの値がわずかに変わるだけで、予測される粒子の量は桁違いに変わることがあります。そのため、過去の観測データに合うようにパラメータを調整する必要がありますが、従来の調整方法は専門家の経験や試行錯誤に依存しているため、値の根拠を客観的に示し、同じ手順で再現することが困難でした。また、人手で調整できる範囲に収めるため、扱うパラメータの数を少なく抑えることが多く、本来は磁力線ごとに異なると考えられる値も、観測データに基づいて磁力線ごとに決定できていませんでした。磁力線ごとに値を決めようとすると、パラメータの数が増えてしまい、本研究で対象としたパラメータ 19 個それぞれを 10 通りずつ試すだけで組み合わせは 10 の 19 乗通りに達します。離れた複数地点の観測を同時に再現する組み合わせの人手での探索は現実的ではないため、観測データに基づいて、客観的かつ再現可能な方法で探索する仕組みが求められていました。

【今後について】

今後、富士通、名古屋大学、JAMSTEC、NICT らは、本技術をさらに発展させてより確かに予測できる技術の実現を目指して、被ばくや人工衛星の故障リスクをより早く把握できるようにし、月面での建設、輸送といった産業や、持続的な有人活動における安全性向上に貢献していきます。

【商標について】

記載されている製品名などの固有名称は、各者の商標または登録商標です。

【注釈】

注 1 富士通株式会社：本店 神奈川県川崎市、代表取締役社長 時田 隆仁。

注 2 国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学：
所在地 愛知県名古屋市、総長 杉山 直。本技術の研究は同大学の宇宙地球環境研究所（ISEE）とともに実施。

注 3 国立研究開発法人海洋研究開発機構：所在地 神奈川県横須賀市、理事長 河村 知彦。

注 4 国立研究開発法人情報通信研究機構：所在地 東京都小金井市、理事長 大野 英男。

注 5 本研究の実施体制：
富士通、名古屋大学 宇宙地球環境研究所、国立研究開発法人海洋研究開発機構、国立研究開発法人情報通信研究機構に加え、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、計測・実験素粒子物理学研究所（LIP：Laboratory of Instrumentation and Experimental Particle Physics）、リスボン大学（ポルトガル）が参加。

注 6 太陽高エネルギー粒子（SEP：Solar Energetic Particle）：
太陽フレアやコロナ質量放出にともなって加速され、惑星間空間に放出される高エネルギーの陽子や電子。本研究では、このうち陽子を対象とした。

注 7 「世界初」の根拠（富士通調べ、2026 年 10 月時点）：
本技術の新しさは、以下の 3 つの条件を同時に満たす点にある。

- ①複数の探査機による同時観測を拘束条件とすること（方向ごとに異なるパラメータを見分けるため）。
- ②MHD シミュレーションと粒子加速・輸送モデルを結合したシミュレーションであること（CME が作る衝撃波の強さや形を粒子の加速の計算に反映させるため）。
- ③粒子の加速と輸送に関わるパラメータを、人の判断を介さずにブラックボックス数理最適化で自動決定すること。

注 8 論文情報：

Hiroyuki Tako Ishikawa et al., "Automated Optimization of Solar Energetic Particle Acceleration and Transport Parameters Against Five-Spacecraft Observations of the 9 October 2021 Event", Scientific Reports (2026 年) . DOI: 10.1038/s41598-026-70869-9 (2026 年 10 月 20 日掲載)

注 9 ブラックボックス数理最適化：

目的関数の内部構造を仮定せず、試行と評価の繰り返しから良い解を探索する手法。本技術では準モンテカルロ法 (Sobol' 列) による広域探索と、ベイズ最適化の一種である TPE (Tree-structured Parzen Estimator) による集中探索を組み合わせた。実装にはオープンソースの最適化フレームワーク Optuna を用いた。

注 10 19 個のパラメータの自動設定：

対象とした 19 個は、散乱の強さを表す平均自由行程 (磁力線ごとに 7 個) と、衝撃波で加速に取り込まれる粒子の割合を表す注入効率 (方向ごとに 12 個)。1 回の試行ごとに時間のかかるシミュレーションを丸ごと実行するため、試せる回数には限りがある。そこで注 9 の二段構えの探索により、広く 1,000 通り、有望な範囲を集中的に 480 通りの計 1,480 回で絞り込んだ。2021 年 10 月 9 日に発生し、5 機の探査機で同時に観測された太陽高エネルギー粒子の現象に適用した結果、5 機すべてで、粒子の到来から立ち上がり、ピークまでの時間変化をおおむね再現した。手順と評価の基準はあらかじめ定めてあり、独立に繰り返しても同じ傾向が得られることを確認した。

注 11 Fujitsu Solar Energetic particle Intelligent Tuning and Evaluation Network (SEITEN)：

SEITEN (セイテン) は日本語の「晴天 (clear sky)」にちなむ。太陽高エネルギー粒子のふるまいを晴らして明らかにすること、そして粒子が脅威とならないオールクリア (all-clear) の状態を見通せるようにすること、という二つの願いを込めている。

注 12 MHD (磁気流体力学) シミュレーション：

プラズマを流体として扱い、磁場との相互作用を含めて解く計算手法。

注 13 SUSANOO (スサノオ)：

Space-weather-forecast-Usable System Anchored by Numerical Operations and Observations の略。名古屋大学 宇宙地球環境研究所 (ISEE) で開発された、太陽風と CME の惑星間空間における伝播を計算する MHD シミュレーション。NICT が運用し、宇宙天気予報における日々の太陽風じょう乱の到来予測に利用している。IPS (惑星間空間シンチレーション) は、遠方の電波天体からの電波が太陽風の密度のゆらぎによって散乱され、またたくように強さがゆらぐ現象で、CME が電波の通り道を横切るとこのゆらぎが強まる。本研究では、CME の磁束を変化させた複数の SUSANOO-CME シミュレーションを実施し、計算結果から IPS 観測量を合成して、名古屋大学 ISEE の実際の IPS 観測と比較した。その中から IPS 観測に最も整合するケースを選定し、地球への CME 到来時刻に最も整合する別のケースとともに、SEP の加速・輸送計算に用いた。

注 14 SEPIF (セップイフ)：

Solar Energetic Particle Injection and Focused transport model の略。JAMSTEC で開発された、衝撃波での粒子加速と磁力線に沿った輸送を計算するモデル。

注 15 パラメータの空間分布の推定と 5 機の探査機：

衝撃波の形や強さは太陽から見た方向によって異なるため、粒子が受ける散乱の強さも方向ごとに変わると考えられる。観測点が 1 か所ではこの違いを見分けられないため、従来はパラメータを空間的に一律と仮定せざるを得なかった。本技術では、太陽からの距離が 0.33~1.0 天文単位 (1 天文単位は太陽と地球の平均距離で、約 1 億 5,000 万 km)、太陽から見た角度が約 50 度にわたって離れた 5 機の探査機の観測を同時に満たす解を探索し、パラメータに方向ごとの分布を持たせて推定した。平均自由行程を方向によらず一律とすると、誤差が悪化し、5 機の観測を同時には再現できないことも確認した。

5 機は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、欧州宇宙機関 (ESA)、米国航空宇宙局 (NASA) による次の探査機で、いずれも高エネルギー粒子の観測装置を搭載している。BepiColombo (ESA と JAXA の水星探査機)、Solar Orbiter (ESA と NASA の太陽観測探査機)、Parker Solar Probe (NASA の太陽探査機)、STEREO-A (NASA の太陽地球観測探査機)、SOHO (ESA と NASA の太陽観測探査機)。

注 16 コロナ質量放出 (CME : Coronal Mass Ejection)：

太陽大気のパラズマが大規模に噴出する現象。前面に衝撃波を形成し、粒子を加速する。

【関連リンク】

- Automated Optimization of Solar Energetic Particle Acceleration and Transport Parameters Against Five-Spacecraft Observations of the 9 October 2021 Event (H. T. Ishikawa et al., Scientific Reports, 2026 年)
<https://doi.org/10.1038/s41598-026-70869-9>
- Human-Interpretable SEP Event Prediction Using White-Box Explainable AI (N. Fujita et al., Space Weather, 24, e2025SW004635, 2026 年)
<https://doi.org/10.1029/2025SW004635>
- 富士通と東海国立大学機構、AI 技術を駆使した意思決定のための宇宙天気予測を実現 (2026 年 1 月 28 日 富士通株式会社プレスリリース)
<https://global.fujitsu/ja-JP/pr/news/2026/01/28-01>
- 東海国立大学機構と富士通、包括協定における宇宙天気予測の課題探索や技術開発を加速 (2024 年 3 月 14 日 富士通株式会社プレスリリース)
<https://pr.fujitsu.com/jp/news/2024/03/14.html>
- 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 (ISEE)
<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/>
- 国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC)
<https://www.jamstec.go.jp/>
- 国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT)
<https://www.nict.go.jp/>
- 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
<https://www.jaxa.jp/>
- 計測・実験素粒子物理学研究所 (LIP)
<https://www.lip.pt/>
- リスボン大学
<https://www.ulisboa.pt/>