

PRESS RELEASE (2026/04/21)

## 月への低燃費航行を高速予測 ～カオス軌道を“線形モデル”で扱う新手法～

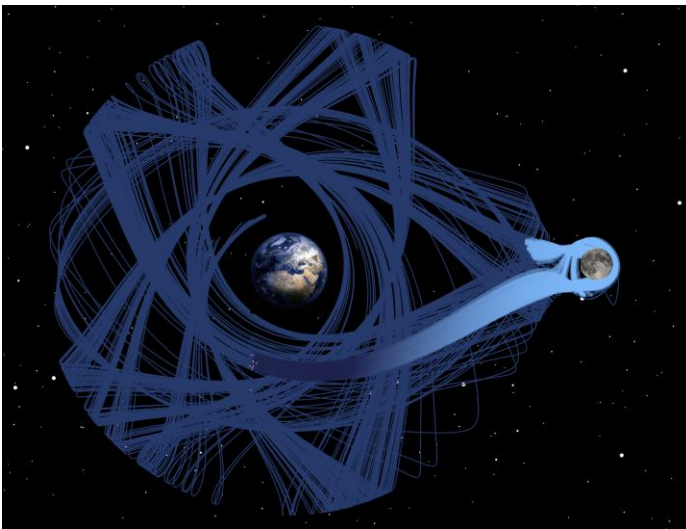
### ポイント

- ① 月へ少ない燃料で向かうには複雑なカオス軌道（※1）の利用が鍵となるが、その複雑な運動を直接設計に使うことは難しかった。
- ② 個々の軌道ではなく、軌道の集合がどのように変形するかを直接モデル化する新しい手法を開発。
- ③ これにより効率的な軌道設計が可能となり、将来の月探査や深宇宙ミッションへの応用が期待される。

### 概要

九州大学大学院工学研究院の坂東麻衣教授らの研究グループは、個々の軌道を長時間の数値積分で追跡するのではなく軌道の集合がどのように変形するかに着目し、カオス軌道の輸送構造をデータから直接抽出する新しい手法を開発しました。月や惑星への宇宙航行では、複数の天体の重力を利用することで燃料を大幅に節約できる「カオス軌道」が知られています。しかし、その複雑な運動を直接設計に活用するための枠組みは十分に整っていませんでした。この方法を用いれば、軌道遷移の幾何構造を行列演算のみで高速に予測できます。さらに、本手法を用いて月遷移軌道の設計にも成功し、実際の軌道設計に応用可能であることを示しました。本成果は、アルテミス時代の月航行を支える基盤の一端を担うことが期待されます。

本研究成果は2026年4月20日に、国際学術誌「Nonlinear Dynamics」に掲載されました。



#### 研究者からひとこと：

カオス軌道は一般に長期予測が困難であることで知られています。本研究は、個々の軌道を正確に追いつけるのではなく、「軌道の集合の変形」という観点から構造を捉え直し、複雑な運動を設計可能な形に整理した点に新しさがあります。将来の深宇宙ミッションにおける軌道設計を、より体系的かつ効率的に行うための基盤技術になることを期待しています。

図1 地球周回軌道から月周辺へと遷移する軌道の集合

地球と月の重力が生み出す複雑な宇宙空間で、カオス軌道の一部は変形しながら月へ向かう。

## 【研究の背景と経緯】

人類は今、再び月へ向かおうとしています。米国主導のアルテミス計画では、月の周りに拠点を建設し、月面探査と将来の深宇宙アクセスにつなげる構想が進められています。その実現には、できるだけ燃料を使わずに月へ到達し、宇宙機を月の周りを回る軌道へ投入するための「賢い航行技術」が欠かせません。しかし、地球と月の重力が同時に働く宇宙空間では、宇宙機の動きは想像以上に複雑になります。わずかな条件の違いで軌道が大きく変わるため、月へ向かう最適な経路を設計するには膨大な計算が必要で、時間もコストもかかるという課題がありました。

一方で、この複雑な動きの中には、燃料をほとんど使わずに遠くまで移動できる複数の天体の重力を利用することで初めて可能となる「隠れた通り道」が存在することも分かってきました。もしその構造を理解し、設計に用いることができるようになれば、月探査はより効率的で持続可能なものになります。本研究は、この「複雑で予測が難しい」とされてきた軌道の動きを、データから読み解き、設計に活かそうとするものです。

## 【研究の内容と成果】

本研究では、地球と月の重力が同時に作用する環境における複雑な軌道運動を、データから直接モデル化する新しい手法を開発しました。従来は、軌道の将来位置を予測するために、ある初期条件から出発する「1本の軌道」を追跡し、計算する方法が一般的でした。しかし本研究では、個々の軌道そのものではなく、「多数の軌道の束がどのように変形するか」に着目しました（図1）。

地球一月系の重力環境では、近点（※2）の集合は時間とともに引き伸ばされ、折り重なりながら複雑な構造を形成します。この変形の仕方が、月へ向かう軌道と、そうでない軌道を分ける「境界」を生み出します。従来の方法では、こうした境界付近の異なる運動を1つの線形近似で同時に扱うため、分離構造を正確に捉えることが困難でした。

本研究では、この問題を解決するために、個々の軌道ではなく近点集合の変形を直接モデル化する枠組みを構築しました。データ駆動型手法である Dynamic Mode Decomposition (DMD)（※3）に基づき、軌道の近点の集合がどのように変形するかを一つの写像として表現することに成功しました（図2）。

さらに、本研究では二つの補完的な手法を導入しました。一つは局所領域の変形を高解像度で捉える手法、もう一つは位相空間全体にわたる大域的な輸送構造を把握する手法です。前者は精密な軌道ターゲティングに適しており、後者は月遷移設計の初期検討や大域的な軌道構造の把握に有効です。

構築した線形写像により、有限時間の軌道遷移を高速に予測できるだけでなく、軌道がどのような幾何構造に従って輸送されているのかを可視化することも可能になります。実際に本手法を用いて月へ到達する弾道遷移軌道の設計を行い、理論が実際の軌道設計に有効であることを示しました。

本成果は、カオス軌道の背後にある集合変形の構造を利用して設計に活かすという、新しいデータ駆動型宇宙航行パラダイムを提示するものです。

## 【今後の展開】

本研究は基礎理論の成果ですが、その意義は、アルテミス計画をはじめとする次世代の月探査構想の中でより明確になります。現在進行中のアルテミス計画では、月周回拠点（Gateway）の構築や持続的な月面活動の実現を目指し、複雑な重力環境を活用した低燃費航行が重要な技術課題となっています。しかし、地球一月系の軌道運動は強い非線形性とカオス性を示し、設計には多大な計算時間と専門的知識が必要でした。

本研究で開発したデータ駆動型の予測手法は、こうした複雑なカオス軌道を線形写像による領域変形として扱える形に変換することで、従来よりも高速かつ体系的な軌道設計を可能にします。これは、月周回軌道への遷移軌道の設計や、月近傍での軌道変更、さらには将来の小型探査機による低コストな

ミッションの実現に向けた基盤技術となり得ます。本研究は、複雑な重力場を利用するための理論基盤として、アルテミス時代の月航行を下支えすることが期待されます。

#### 【参考図】

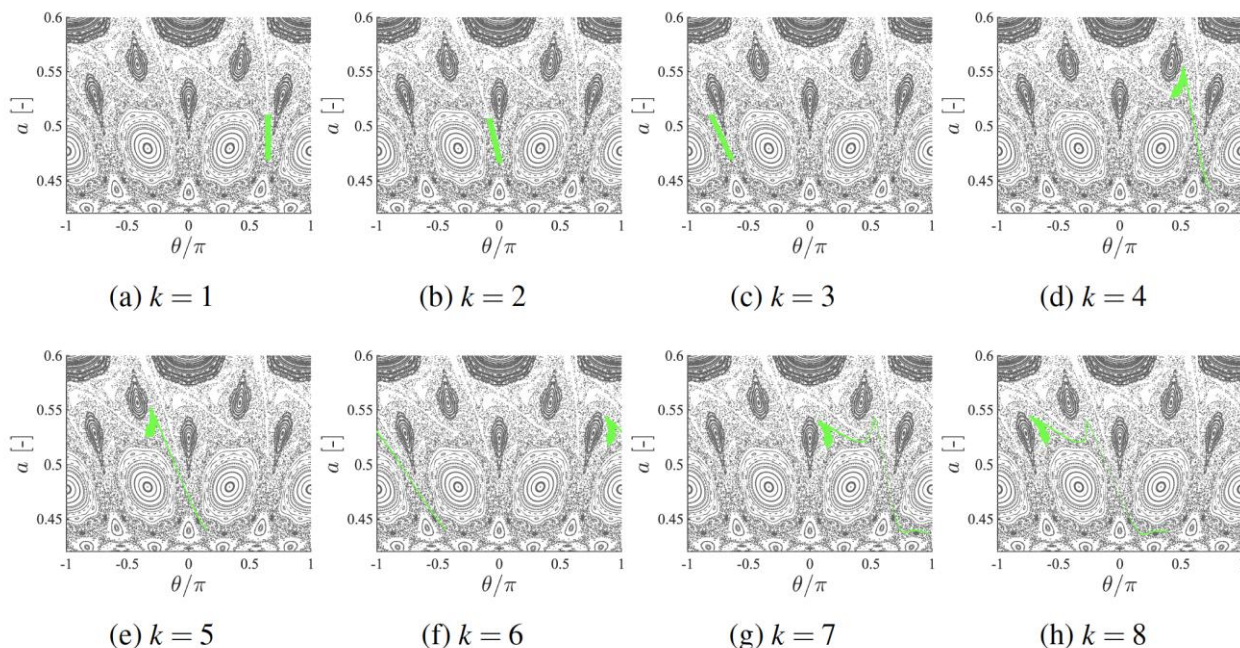


図2 データ駆動モデリングによる近点集合の時間発展の予測

データから構築した線形写像の反復適用による近点集合の時間発展。横軸は地球と月を結ぶ方向から測った角度、縦軸は軌道の長半径を表す。緑色で描かれた曲線は各反復回数  $k$  における近地点集合の像であり、反復が進むにつれて集合が引き伸ばし、折り畳まれながら変形していく様子が確認できる。本結果は、個々の軌道ではなく軌道集合の変形によりカオス的な輸送構造を捉えられることを示している。

#### 【用語解説】

(※1) カオス軌道

初期条件のわずかな違いで将来の状態が大きく変わる運動。

(※2) 近点

宇宙機が軌道上で中心となる天体に最も近づく位置。

(※3) Dynamic Mode Decomposition (DMD)

データから観測量の動力学を線形モデルとして近似する手法。

#### 【謝辞】

本研究は JST 創発的支援事業 (JPMJFR206M)、JSPS 科研費 (JP22H03663, JP25K17776) の助成を受けたものです。

【論文情報】

掲載誌：Nonlinear Dynamics

タイトル：Data-Driven Prediction of Chaotic Transition in Periapsis Poincaré Maps

著者名：Shanshan Pan, Taiki Urashi, Mai Bando, Yasuhiro Yoshimura, Hongru Chen, Toshiya Hanada

D O I : 10.1007/s11071-026-12390-2

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 大学院工学研究院 航空宇宙工学部門 教授 坂東 麻衣 (バンドウ マイ)

TEL : 092-802-3038

Mail : mbando@aero.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL : 092-802-2130 FAX : 092-802-2139

Mail : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp