

小天体の捕獲による火星衛星の形成メカニズムを解明

～火星衛星探査による地球型惑星の水・有機物の起源の解明に期待～

ポイント

- ・火星衛星（フォボス・ディモス）の軌道特性を、一時捕獲された小天体のガス抵抗捕獲で再現。
- ・捕獲衛星が火星赤道面に沿った軌道へ移行する仕組みを理論的に説明。
- ・火星衛星探査計画（MMX）により、地球型惑星への水・有機物供給過程解明への進展に期待。

概要

北海道大学大学院理学研究院の松岡 亮博士研究員と倉本 圭教授（宇宙航空研究開発機構 JAXA 宇宙科学研究所教授を兼任）の研究グループは、太陽を周回する小天体が惑星に捕獲されることによって形成される衛星の軌道が、火星の衛星（フォボス・ディモス）の軌道と整合することを、理論的解析とコンピューターシミュレーションによって明らかにしました。

火星には、二つの小さな衛星、フォボスとディモスがあります。これらの反射スペクトルは特定のタイプの炭素質小惑星との類似性を示すことから、小惑星が捕獲されて衛星が形成されたとする「捕獲説」が提唱されてきました。しかし従来の捕獲説には、太陽を周回していた天体が衛星となる際に、二つの衛星が実際に持つ規則正しい軌道（火星の赤道面に沿った、ほぼ真円の軌道）を再現することができないという難点があると指摘されてきました。

本研究では、原始太陽系星雲内に存在していた火星を想定し、そこへ接近する小天体の捕獲過程を詳細に解析しました。その結果、小天体が典型的には火星の周囲で「一時捕獲」という段階を経て捕獲されること、そしてこのようなプロセスを経て形成された衛星が、実際の火星の衛星と同様の、火星の赤道面に沿った円軌道を獲得することを示しました。

この結果は、火星の衛星が原始太陽系において地球型惑星の材料となった小天体たちの生き残りである可能性を示唆しています。宇宙航空研究開発機構（JAXA）が2026年に打ち上げを予定している火星衛星探査計画（MMX）によって持ち帰られる地質サンプルは、火星をはじめとする地球型惑星の形成過程を解明する重要な手掛かりとなることが期待されます。

なお、本研究成果は、2025年9月13日（土）先行公開の Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 誌に掲載されました。

【背景】

火星には、二つの小さな衛星、フォボスとディモスがあります。これらの衛星の反射スペクトルは、特定のタイプの炭素質小惑星と類似していることが知られており、小惑星が火星に捕獲されて衛星が形成されたという「捕獲説」が提唱されてきました。しかしながら、火星と無関係な領域から飛来する天体を単純に捕獲するだけでは、現在の衛星が示す規則正しい軌道（火星の赤道面に沿ったほぼ真円の軌道）を再現できないという課題が指摘されています。

一方、近年では地球の月の形成過程と同様に、火星への巨大天体衝突によって放出された物質から衛星が形成されるとする「巨大衝突説」が提唱されており、衛星の軌道特性を説明できることから注目されています。しかしながら、巨大衝突の過程では衛星の材料となる物質が高温にさらされるため、炭素質小惑星のような揮発性成分に富む組成を持つ衛星が形成されるかどうかは疑問視されています。

また最近では、潮汐破壊捕獲（tidally disruptive capture）というモデルも提唱されており、衛星の軌道と小惑星類似組成の両方を再現する可能性が示されているものの、このモデルについては現実的な条件でのシミュレーション検証は行われていません。

このように、衛星の軌道特性と組成の両方を同時に説明できる形成機構は確立されておらず、火星の衛星の起源は謎に包まれていました。

【研究手法】

本研究では、太陽重力と火星重力の影響下で小天体の運動を記述する「円制限三体問題」を解析しました。解析にあたっては、新たな保存則の観点からの理論的検討に加え、コンピューターシミュレーションを行い、同問題に現れる「一時捕獲状態」の特徴（火星への接近距離や軌道傾斜角など）を調べました。

一時捕獲状態とは、原始太陽系において惑星に接近した小天体に典型的に見られるもので、完全には束縛されず衛星にはならないものの、惑星の重力圏内に長期間滞在できる状態です。

さらに、原始太陽系星雲のガスを考慮すると、火星に接近して一時捕獲された小天体は、ガス抵抗を受けて完全に捕獲され、衛星へと移行する可能性があります。そこで本研究では、ガス抵抗を含めた場合についても理論解析とシミュレーションを行い、最終的に形成される衛星の軌道特性や、一時捕獲天体が捕獲される確率を調べました。

【研究成果】

一時捕獲天体は火星に極端に接近することではなく、再接近時でも典型的に数十火星半径の距離にとどまること（図 1）、また火星公転面に対する軌道傾斜角が火星接近時に小さくなること（図 2）が明らかになりました。これらの特徴は、本研究で導かれた「絶対角運動量の準保存則^{*1}」によって統一的に説明されます。

加えて、一時捕獲からの衛星形成は決して稀ではなく、典型的な星雲ガス密度下で数十%の確率で起こることが分かりました。火星の成長には多数の小天体の接近・衝突が必要であるため、一時捕獲からの衛星形成は頻繁に起きていたと考えられます。こうして形成された衛星は、一時捕獲時の軌道半径や傾斜角を色濃く引き継ぎ、さらにガス抵抗を受け続けることで、数千年の時間をかけてより小さくほぼ円形の軌道へ移行します。

衛星が火星からおよそ 10 火星半径の距離に至ると、自転する火星の扁平率に由来する非球対称重力場の影響が現れ、火星の公転面に沿う軌道は火星の赤道面に沿う軌道へと誘われます（図 3）。この

過程を経ることで、捕獲衛星はフォボスやディモスに想定される原始的な軌道（火星赤道面上、半径 6 火星半径程度のほぼ円軌道）に至ります。

さらに、衛星の軌道傾斜角の上限は捕獲前の火星との相対速度におおむね比例することも分かりました。星雲ガスが希薄になると小さな相対速度を持つ小天体のみが捕獲可能となるため、最終世代の捕獲衛星は小さな軌道傾斜角を示すことも明らかとなりました。

本捕獲シナリオは、火星形成の最終段階において実現したであろう原始太陽系環境を想定することで、火星の衛星の軌道特性を自然に説明できます。

【今後への期待】

捕獲説と巨大衝突説のどちらが妥当かを最終的に判断するには、反射スペクトルの特徴にとどまらない、より直接的な組成解析が必要です。これは、2026 年に打ち上げが予定されている JAXA の火星衛星探査計画（MMX）によるその場元素分析や、探査機が持ち帰るフォボス試料の分析によって明らかにされることが期待されます。

もし火星の衛星の炭素質組成が確認され、捕獲説が支持されるならば、本シナリオは、原始太陽系の段階ですでに地球型惑星への水や有機物の供給が進んでいたことを予測します。本研究の成果は、MMX によって得られるだろう膨大な探査データの詳細解析と相まって、地球型惑星における気圏・水圏・生命圏の起源に重要な示唆を与えると期待されます。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 JP24K07110、JP22K21344、JP22H00164、JP21K03638 の助成を受けました。

論文情報

論文名	Origin of Phobos and Deimos: gas-drag capture of temporarily captured bodies（フォボスとディモスの起源：一時捕獲天体のガス抵抗捕獲）
著者名	松岡 亮 ¹ 、倉本 圭 ^{1,2} （ ¹ 北海道大学大学院理学研究院、 ² 宇宙航空研究開発機構）
雑誌名	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society（天文学の専門誌）
D O I	10.1093/mnras/staf1534
公表日	2025 年 9 月 13 日（土）（オンライン先行公開）

お問い合わせ先

北海道大学大学院理学研究院 博士研究員 松岡 亮（まつおかりょう）

メール matryo@ep.sci.hokudai.ac.jp

北海道大学大学院理学研究院 教授 倉本 圭（くらもとときよし）

T E L 011-706-3827 F A X 011-706-2760 メール keikei@ep.sci.hokudai.ac.jp

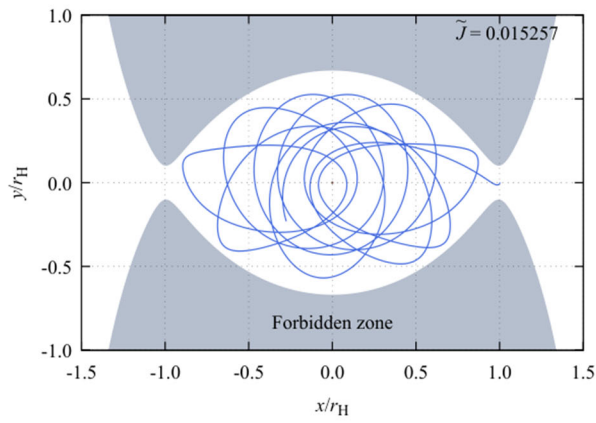
U R L <https://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~keikei>

配信元

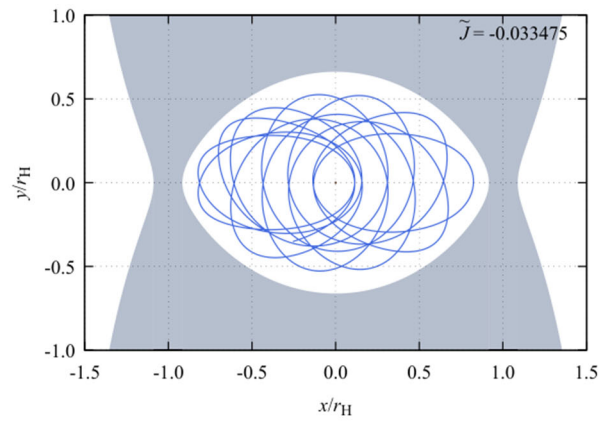
北海道大学社会共創部広報課（〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目）

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

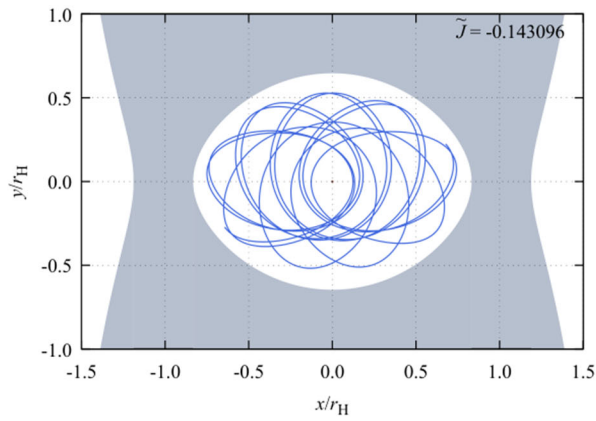
【参考図】



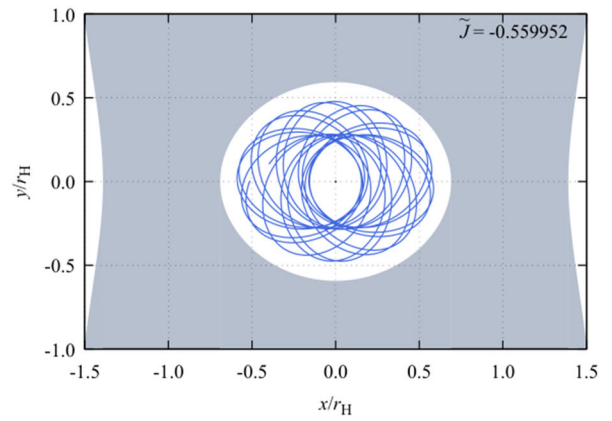
(a) $t = 0.0\text{yr}$



(b) $t = 100.0\text{yr}$



(c) $t = 316.0\text{yr}$



(d) $t = 1000.0\text{yr}$

図 1. 小天体が一時捕獲状態から完全捕獲状態へと至る様子。各時刻（0, 100, 316, 1000 年）から 5 年間の小天体の軌道（青線）を、火星中心座標系（原点：火星、x 軸：反太陽方向、y 軸：火星の公転方向）で示す。陰影は、エネルギー的に小天体が到達できない領域（禁制領域）を示す。ガス抵抗による小天体の力学的エネルギー減少に伴い禁制領域が拡大し、小天体は火星の重力圏内に閉じ込められて衛星となる（a, b）。その後もガス抵抗の作用により、より火星に近い軌道へと遷移する（b, c, d）。

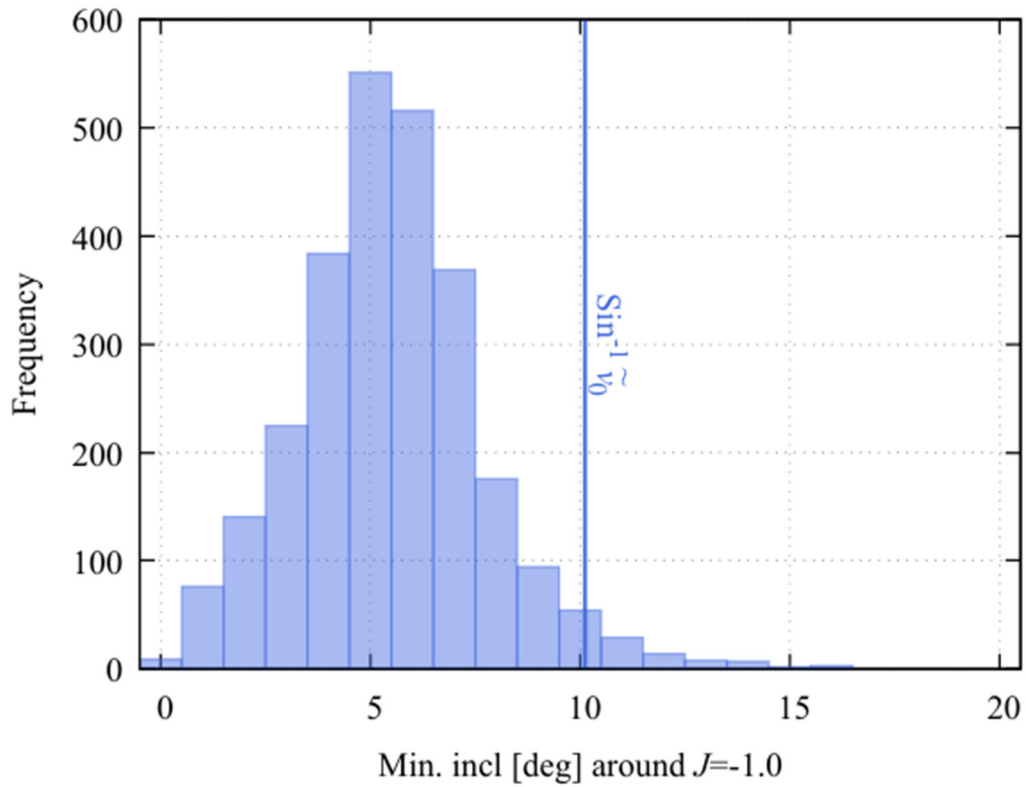
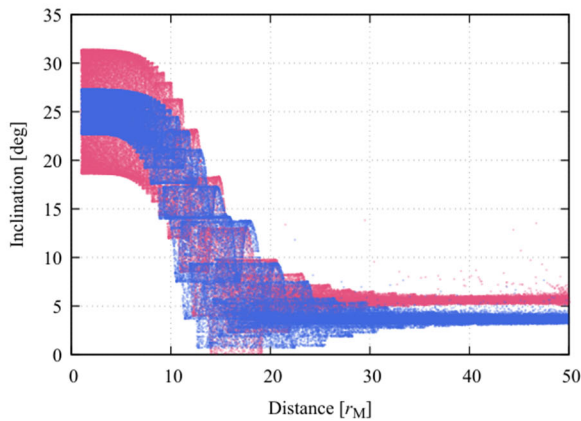
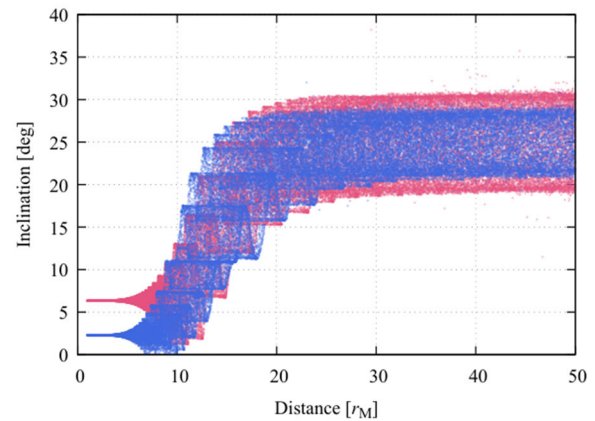


図 2. 進入速度 20 m/s で様々な角度から火星重力圏に入射した小天体から形成される捕獲衛星について、火星の公転面に対する軌道傾斜角のヒストグラムを示したもの（横軸：軌道傾斜角 [度]、縦軸：度数）。青い縦線はこの進入速度に対して絶対角運動量の準保存則から予測される大まかな上限値。小天体は様々な角度で入射しているにもかかわらず、結果的に形成される衛星では小さな軌道傾斜角が卓越する。



(a) Inclinations relative to the Martian orbital plane



(b) Inclinations relative to the Martian equatorial plane

図 3. 火星重力圏へ 20 m/s で進入して形成された捕獲衛星の 2 例について、火星中心からの距離（横軸、単位：火星半径）に対する軌道傾斜角（縦軸、単位：度）を示したもの。左図、右図はそれぞれ、火星の公転面に対する軌道傾斜角、火星の赤道面に対する軌道傾斜角を表す。衛星は時間の経過とともに火星に徐々に近づき（各図において右側から左側への変化）、初期段階では火星の公転面に対してある一定の小さな軌道傾斜角を取る（左図）。しかし、火星中心から 10 火星半径程度の位置で軌道面の遷移が生じ、その後は火星の赤道面に対して一定の小さな軌道傾斜角を持つ軌道へと変化する（右図）。

【用語解説】

- *1 絶対角運動量の準保存則 … 本研究での理論解析により導かれた保存則。絶対角運動量とは、惑星を中心とした座標系において、座標系の回転の寄与を加えることで拡張された角運動量（回転の勢い）のことである。これは厳密な意味では保存されないが、惑星重力圏内の軌道では大きな変動が生じず、近似的に保存されると見なせる。