



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Origin of Phobos and Deimos: Gas-drag capture of temporary captured bodies [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	松岡, 亮
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第15598号
Issue Date	2023-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/90741
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ryo_Matsuoka_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士 (理 学) 氏 名 松岡 亮

学 位 論 文 題 名

Origin of Phobos and Deimos: Gas-drag capture of temporary captured bodies
(Phobos と Deimos の起源：一時捕獲天体のガス抵抗による捕獲)

火星の衛星 Phobos と Deimos の、炭素質小惑星様反射スペクトルは、微惑星が捕獲されて衛星になったとする捕獲起源説を支持する。捕獲に必要なエネルギー散逸媒体は、星雲ガスの束縛で生じる原始火星大気によるガス抵抗が有望視される (抗力捕獲説)。火星隕石記録に基づく火星コア形成年代は、星雲期の火星集積を示しており、抗力捕獲説は自然な描像のように見える。もしこのシナリオが正しいならば、両衛星は地球型惑星の集積の直接的な物証となる。このことは、両衛星の近接探査と Phobos 土壌サンプルリターンを目指す、火星衛星探査計画 (MMX) の主要な動機となっている。

しかし抗力捕獲説は、現在の火星の衛星の軌道傾斜角 i の小ささ (火星赤道面に対し $< 2^\circ$) を説明できないように見える。本研究では、この問題に対し一時捕獲天体の捕獲に着目した。天体が惑星重力圏外へ脱出可能なエネルギーを持ちながらも、惑星重力圏内に長期間滞在する一時捕獲は、惑星に永久に束縛される捕獲とは区別される。しかし、一時捕獲天体は惑星重力圏内の希薄大気との相互作用により穏やかに捕獲されることがあり、この場合の衛星寿命は、火星に著しく接近して捕獲される場合と比べ 2-3 桁ほど長い (Sasaki, 1990)。Higuchi & Ida (2017) によれば、一時捕獲は火星重力圏へ突入する天体のうち 2×10^{-4} の割合で起こる。火星-微惑星質量比を考慮すると、火星の集積史に亘って幾度となく微惑星の一時捕獲が起きただろう。ただし、一時捕獲天体の捕獲達成条件や捕獲率は、いまだに定式化されていない。また一時捕獲には、天体の Lagrange 点からの低速進入が必要だが、このような特殊な状況にある天体が捕獲後に至る軌道は系統的に調べられていない。

本研究では、一時捕獲天体の抗力捕獲シナリオの検証を目的として、一時捕獲天体の抗力捕獲率と捕獲後の軌道要素を数值的・解析的に調べた。数値計算は、Lagrange 点からの低速進入を初期条件とし大気ガス抵抗を含めた円制限三体問題を解いた。大気モデルは、静止大気他に、 i の低下や衛星落下の抑制を引き起こす可能性がある回転大気を考慮した。回転大気は、共回転半径まで火星と共回転し、それ以遠では比角運動量が一定とした (粘性回転大気)。大気密度は、回転遠心力を大気の運動方程式に組み入れて決定し、軌道計算では、大気速度・密度分布を用いてガス抵抗が計算される。

結果は以下のようにまとめられる。

大気回転の影響が少ない火星から遠方の領域で捕獲が起こるため、捕獲率の大気モデル依存性は小さい。最小質量円盤下の大気で、Phobos サイズの一時捕獲天体の捕獲率は 0.1-1.0 程度である。捕獲条件は、一時捕獲天体の近点距離 r_p に依存する形で定式化された。この際、一時捕獲天体の r_p の典型値は $\sim 40-50 r_M$ となり、共回転半径以遠である。この値は Hi11 座標系上の見かけの角運動量に加え、座標系回転に起因するフレーム角運動量の寄与が決められている (絶対角運動量の準保存則)。この解析により、捕獲に必要な周回数 N_{cap} の初速度 v_0 -依存性が求められ、ガスフリー一時捕獲軌道計算による周回数頻度を合わせると、捕獲率の数値結果をよく再現する。

衛星の i は、その初期値ランダム性にもかかわらず、 $i_{\text{max}} \sim 10^\circ (v_0/20 \text{ m/sec})$ を上限とする小さな

値を示す。これは、低 v_0 が必然的な一時捕獲では、見かけの角運動量 $\ll$ フレーム角運動量 となることに起因する。この解析結果は、軌道計算で得られた衛星の軌道傾斜角分布の上限をよく再現し、一時捕獲天体の捕獲は火星の両衛星の低い i を自然に説明できる。また、長い寿命の間に離心率はよく低下し、典型的に $e < 0.1$ となる。

回転大気の影響が顕著になるのは、捕獲後の軌道進化により共回転半径付近に到達する頃である。この領域では軌道縮小率が低下し、静止大気の場合と比較して2桁以上長い衛星寿命、また3桁以上大きい共回転半径付近の衛星存在率となる。このことは、火星の両衛星が初期に共回転半径付近にあったとする潮汐軌道進化の予測と適合する。また、この長い衛星寿命の間に、典型的に離心率・傾斜角は $e < 0.01$, $i < 2^\circ$ にまで低下する。よって、共回転半径付近の大気回転は、火星の両衛星の軌道特徴の再現に有利である。

一時捕獲天体の捕獲率から、火星の両衛星は星雲期の終盤の集積天体のサンプルだと期待される。また、 N_{cap} の v_0 , ρ_{neb} -依存性は、低 ρ_{neb} でより低 v_0 の捕獲を卓越させ、星雲期終盤により小さな i の衛星を実現する。火星の両衛星の小さな i は、星雲散逸の過渡期の、特異な衛星形成環境に由来するかもしれない。

一時捕獲を経た捕獲例の初期条件時間を遡って積分すると、火星近接遭遇前の典型的な周太陽軌道要素が得られる。この軌道は、 e , i -分布が平衡状態にある火星近傍の微惑星集団の実に4%が占める。また、スノーライン以遠の炭素質微惑星が木星からの散乱を経て一時捕獲を達成するまでに、概ねMyrの時間が必要である。もし木星による散乱がインパルス的だとしても、そこから数Myrの間、次々とこのような天体が飛来し、それは火星がその質量のほとんどを獲得してもなお続いたと考えられる。

最後に、衛星やその前駆天体の空力加熱量を、衛星軌道進化の最終段階で最大70 K程度と見積もった。この加熱は、岩石成分が溶融・蒸発するほどではなく、火星衛星は捕獲前の組成をよく保存していると考えられる。このことは、MMX サンプルから衛星の捕獲前の出自に迫る情報を取り出せる可能性を示唆している。