

## 第1章 序論

本章では、フォボスとダイモスの起源問題を背景として、巨大衝突起源説の枠組みにおける未解決点を質量収支の観点から整理する。とくに、衝突直後計算と長期衛星形成モデルの間にある遷移期を独立の研究対象として位置づけ、内側円盤質量の初期条件をどのように更新すべきかを明確化した上で、本研究の目的と論文構成を示す。

### 1 火星衛星の起源—観測のパラドックスから巨大衝突説の再評価へ

フォボスとダイモスの起源は、表層スペクトルが示唆する「外来物質」と、軌道力学が示唆する「共形成」が同時に成立しにくい点に特徴がある。可視～近赤外の反射スペクトルは暗く、顕著な吸収帯に乏しいため、D型小惑星や炭素質物質に類似するという解釈が長く参照されてきた（例：Fraeman et al., 2012; Pajola et al., 2013）。しかし両衛星は火星赤道面に近いほぼ円軌道を保ち、単純な無傷捕獲が与える高離心・高傾斜軌道とは整合しにくい（Rosenblatt, 2011; Canup & Salmon, 2018）。

このねじれは、捕獲起源説と巨大衝突起源説を対比させると明確になる。捕獲説は「外来物質らしさ」を自然に説明しやすいが、現在の軌道へ至る散逸過程に強い要請が課される。一方、巨大衝突で形成された周回円盤からの集積は軌道を説明しやすいが、分光学的な“炭素質らしさ”をどのように再現するかが課題となる。

本研究は巨大衝突起源説を前提にしつつ、衝突直後計算（SPH など）と長期衛星形成モデルの間にある「遷移期」に着目する。遷移期では、円盤の熱・放射環境と微粒子過程が質量収支を変え得るにもかかわらず、長期モデル側では単純化されやすい。したがって、観測パラドックスを議論可能な形へ接続するには、円盤内の物質進化を含む中間過程を明示する必要がある。

#### 1.1 観測が与える制約：物質と力学

観測制約は、(i) 表層物質を反映する分光・物性と、(ii) 形成史を反映する軌道力学に大別できる。前者は捕獲説を、後者は円盤集積をそれぞれ支持し得るため、起源論争の焦点は両者の同時充足にある。

表層物質に関して、両衛星の反射スペクトルは低アルベドで全体として滑らかな傾斜を示し、炭素質物質やD型小惑星との比較がしばしば行われる（Fraeman et al., 2012; Pajola et al., 2013）。またフォボスの平均密度は小さく、内部空隙を含む集積体を想起させる（Andert et al., 2010）。外観と物性だけを見れば、両衛星は「小惑星帯から来た捕獲天体」に近い印象を与える。

一方で軌道は、火星赤道面に近く、離心率も小さいという点で、現在の火星スピンと整合した配置にある（Rosenblatt, 2011）。捕獲起源を採る場合には、捕獲直後の高離心・高傾斜軌道から、赤道面近傍の円軌道へ落とし込む過程が不可欠となる。逆に、周回円盤からの集積であれば、赤道面・円軌道は比較的自然な帰結として位置づけられる（Canup & Salmon, 2018）。

#### 1.2 捕獲起源説：物質の説明力と力学的困難

捕獲小惑星説は、表層スペクトルの類似性を最も素直に説明できる点で魅力的である。とくに、原始大気やガス環境による散逸を利用した捕獲（ガス抵抗捕獲）は、フォボス・ダイモスを炭素質小惑星とみなす発想と整合して提案されてきた（Hunten, 1979）。

しかし捕獲説は、現在の軌道状態へ至る道筋で繰り返し困難に直面してきた。捕獲直後の軌道は一

般に高離心・高傾斜になりやすく、そこから赤道面近傍の円軌道へ到達するには強い散逸が要請される (Burns, 1992; Rosenblatt, 2011)。とりわけ外側を公転するダイモスでは潮汐散逸が弱く、円軌道化・赤道面化を効率よく進める機構の設定が難しいと指摘されている (Rosenblatt, 2011; Canup & Salmon, 2018)。

近年も、一次捕獲とガス抵抗を組み合わせたシナリオなど、力学的困難を緩和しようとする再検討は続いている (例: Matsuoka et al., 2025)。ただし必要となるガス環境や初期条件の妥当性は依然として検証課題として残り、決定打には至っていない。

### 1.3 巨大衝突起源説：軌道の自然さと物質的パラドックス

捕獲説の力学的困難が意識されるにつれ、周回円盤からの形成が再評価されてきた。巨大衝突によって火星周回にデブリ円盤が形成され、その円盤から衛星が集積するという枠組みは、赤道面近傍の円軌道という配置を比較的自然に与える (Craddock, 2011; Canup & Salmon, 2018)。

この枠組みが直面する主要な課題は、表層の“炭素質らしさ”の起源である。近年、この点は単純な組成一致の問題というより、粒径分布・空隙率・鉱物混合・風化過程を含む分光解釈の問題として捉え直されつつある。熱赤外域の解析では、玄武岩質微粒子やフィロケイ酸塩成分がスペクトルを説明し得るという議論が提示されており、「炭素質物質でなければ説明できない」という状況は緩和されている (Giuranna et al., 2011; Glotch et al., 2018)。

さらに衝突円盤の熱化学進化を扱う研究は、粒径分布や鉱物相が時間発展し得る点を示し、巨大衝突起源説が物質制約と両立し得る条件を具体化してきた (Hyodo et al., 2017)。このとき、衝突直後の数十時間を扱う流体計算と、その後の集積を扱う長期モデルの間で、円盤の状態量をどのように定義し直すかが実装上の要点となる。

### 1.4 小括：パラドックスを解くための接続問題

フォボス・ダイモス問題は、「物質」と「力学」が与える含意のねじれとして整理できる。捕獲説は物質制約に強い一方で、軌道を整える散逸過程が難題となりやすい。巨大衝突起源説は軌道を説明しやすいが、表層の見かけを円盤進化と表層物理を含む形で説明する必要がある。

このねじれを定量的に議論するには、衝突直後の円盤から長期的な衛星形成へ至る「中間過程」を、質量収支と観測可能量の双方へ接続することが必要となる。第2節では巨大衝突起源説に関する先行研究を、ロッシュ限界内側の円盤（内側円盤）が担う役割に沿って整理し、どこに接続上の不確かさが残っているかを明確化する。

## 2 先行研究：内側円盤が繋ぐ衛星形成のストーリー

本節では、巨大衝突起源説に関する先行研究を「手法の違い」ではなく、「ロッシュ限界内側の円盤（内側円盤）が担う役割」に沿って整理する。火星衛星の形成過程は、衝突直後（概ね数十時間）を扱う数値流体計算と、その後の円盤進化・集積を扱う長期モデルという二段階で記述されてきた。ここでは両者の接続点に位置する内側円盤に注目し、(i) 初期条件の形成、(ii) 外側領域の集積を駆動する力学、(iii) 粘性拡散と潮汐が与える長期的帰結の順に述べる。

## 2.1 巨大衝突が作る内側円盤：衝突直後計算が与えた初期条件

巨大衝突後の火星周回円盤の初期状態は、平滑化粒子流体力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics; SPH) による数値流体計算によって定量化されてきた。SPH 計算は、衝突で放出されたデブリの束縛・散逸を粒子として追跡し、円盤質量や角運動量、半径分布の概形を与える (Citron et al., 2015)。

Citron et al. (2015) は、Borealis 規模の衝突を想定した SPH 計算により、衝突後約 30 時間時点の円盤質量と角運動量を整理した。同論文は、円盤外縁は少数粒子や数値粘性の影響を受けやすく、数十時間以降の分布を長期議論へ直結させる際には注意が要する点も明示している。したがって長期モデルへ渡す際には、「どの状態量を初期条件として採用するか」を別途定義する作業が必要となる。

Hyodo et al. (2017a) は、同様の衝突条件に対し、円盤の熱的状态と粒径の推定まで踏み込んで円盤像を具体化した。とくに重要なのは、形成された円盤物質の大部分がロッシュ限界内側に集中し、ロッシュ限界外側に残る質量は相対的に少ないという点である。さらに円盤温度は  $\sim 2000$  K 程度で比較的一様であり、蒸気割合は  $\lesssim 5\%$  と小さく、代表的な溶融滴半径は  $r_p \sim 1.5$  m と見積もられている (Hyodo et al., 2017a)。

衝突直後計算の出力を長期モデルへ渡すためには、非軸対称かつ高離心な粒子分布を、円軌道化後の分布へ写像して「内側円盤」と「外側円盤」を分離する操作が必要となる。たとえば Canup & Salmon (2018) は、半長軸  $a$  と離心率  $e$  から等価円軌道半径  $a_{\text{eq}} = a(1 - e^2)$  を定義し、円軌道化後の分布を構成した。Hyodo et al. (2017a) では傾斜角  $i$  を含めた  $a_{\text{eq}} = a(1 - e^2) \cos^2 i$  が用いられている。

この写像に基づき、ロッシュ限界  $a_R$  の内外で内側円盤質量  $M_{\text{in}}$  と外側円盤質量  $M_{\text{out}}$  を定義する。こうして得られる  $M_{\text{in}}$  は、長期的な供給量を支配する初期条件として位置づけられ、後段の衛星形成計算の成否を左右する。

以上より、SPH 計算は「内側円盤が主成分である」という円盤像と、その熱的性質を与えた。次節では、この内側円盤が外側領域の衛星形成をどのように駆動し得るかを、力学的機構に沿って整理する。

## 2.2 内側円盤が外側形成を駆動する：一時的内側衛星と共鳴掃引

外側 (現在のフォボス／ダイモス付近) に残る低質量デブリだけで衛星を形成する場合、集積効率や軌道配置の再現性が課題となる。これに対し、内側円盤を「外側の形成を駆動する重力的エンジン」とみなす視点が導入された。

Rosenblatt et al. (2016) は、円盤が広がってロッシュ限界外側へ供給される過程で、内側起源の一時的な大型衛星 (lost moons) が形成され得ることを示した。これらの衛星が移動する間、共鳴相互作用が外側のデブリ円盤を攪拌・拡張し、結果としてフォボス／ダイモス領域での集積を促進する (Rosenblatt et al., 2016)。

火星系では同期軌道がロッシュ限界より外側に位置するため、同期軌道内側で形成された衛星は潮汐作用により内向きに移動し、最終的に失われやすい。それでも、失われるまでの有限時間において内側衛星は外側円盤の進化を強く制御し得るため、内側円盤の存在は外側衛星形成を左右する主要因として位置づけられる。

## 2.3 内側円盤の粘性進化と潮汐：混成モデルによる長期描像

ロッシュ限界内側は潮汐により凝集体が維持されにくく、長期的には連続体 (流体) としての円盤進化が支配的となる。したがって長期モデルでは、内側円盤の粘性拡散がロッシュ限界外側への供給史を

規定し、最終的な衛星質量や軌道分布へ直結する。

Salmon & Canup (2012) は、ロッシュ限界内側を連続体円盤、外側を多天体重力計算として扱う混成モデルを提示した。同モデルでは、内側円盤が粘性で広がって外縁がロッシュ限界を越えると、その境界で新しい小天体を生成して外側計算へ追加する。外側で成長した天体は共鳴トルクにより内側円盤外縁を拘束し、供給開始時刻を左右する点が重要である (Salmon & Canup, 2012)。

火星系に対しては、Canup & Salmon (2018) が混成 (hybrid) N 体モデルにより、フォボス／ダイモスを再現するために必要な円盤条件を制約した。同論文は、形成領域が同期軌道  $a_{\text{sync}} \approx 6R_{\text{Mars}}$  近傍、具体的には  $5\text{--}7R_{\text{Mars}}$  の範囲であるとする。さらに、一時的に形成される内側衛星が小衛星を掃き集めてしまわない条件が重要であることも指摘している (Canup & Salmon, 2018)。

## 2.4 小括：先行研究の到達点と接続上の課題

先行研究を内側円盤の観点から整理すると、巨大衝突後の円盤は「内側円盤が主成分である」という初期条件をもつ (Citron et al., 2015; Hyodo et al., 2017a)。その後の衛星形成は、内側円盤の粘性拡散と潮汐相互作用により強く制御されることが、Rosenblatt et al. (2016)、Salmon & Canup (2012)、Canup & Salmon (2018) により示されている。したがって長期モデルへ渡す入力のうち、とりわけ内側円盤質量  $M_{\text{in}}$  とその供給史を規定する仮定が、最終的な衛星系の描像を左右する。

一方で、衝突直後の非平衡状態から「準定常な内側円盤」として状態量を定義できるまでの遷移は、長期モデル側では単純化されやすい。円盤が高温であること自体は共有されているが、蒸気による遮蔽や放射冷却の不均質が、遷移期の質量収支に与える影響は十分に検討されていない可能性がある。

第3節ではこの遷移期に注目し、長期モデルが初期条件として受け取る内側円盤質量をどのように更新すべきかを、追加の不可逆損失という形で定義する。

## 3 問題設定：遷移期の不可逆損失と内側円盤質量の更新

本節では、衝突直後計算 (SPH など) の出力を長期衛星形成モデルへ接続する際に残る不確かさを、質量収支の観点から整理する。焦点はロッシュ限界内側の固体円盤 (内側円盤) であり、長期モデルが初期条件として受け取る内側円盤質量が、遷移期の追加損失を無視すると過大になり得る点を明示する。

ここでいう遷移期とは、SPH の終端時刻  $t_0$  から、円盤が準定常近似 (軸対称・円軌道化) で表現可能となる時刻  $t_{\text{ss}}$  までの時間区間である。遷移期では、破碎で補給される微粒子が表層に存在し得る一方、火星からの照射により放射圧や昇華が作用し、微粒子が円盤から不可逆に除去される可能性がある (例: Hyodo et al., 2018)。この損失は、粘性拡散による外側供給や惑星への落下とは別のシンクであるため、長期モデルへ自動的に取り込まれない。

### 3.1 遮蔽と表層照射：光学的厚みの二つの向き

遷移期損失を見積もる上で最初に問題となるのは、「照射が届く物質がどれだけあるか」である。先行研究では、火星から見た視線方向に沿って光学的厚み  $\tau$  を評価し、遮蔽の強さを議論することが多い (例: Hyodo et al., 2018)。しかし  $\tau$  は視線方向の積分量であり、鉛直方向における「表層」と「深部」の区別を直接には与えない。

放射圧が直接作用するのは表面付近であり、遮蔽された深部では同じ加速度を受けない。したがって  $\tau > 1$  であっても、表層がまったく照射されないとは直ちに結論できない。そこで本研究では、円盤を「照射を受ける表層」と「遮蔽された深部」に分ける二層近似を採用し、表層に局在する損失を主要項と

して扱う。

### 3.2 照射の有効期間：火星冷却史の位置づけ

遷移期損失は、照射がどれだけの時間持続するかにも依存する。放射圧の大きさは火星からの放射フラックスに比例し、放射フラックスは火星表面温度  $T_{\text{Mars}}(t)$  の 4 乗に比例する。したがって、 $T_{\text{Mars}}(t)$  の仮定は損失量の時間積算に直接効き、単純な温度一定近似は系統誤差を導入し得る（例：Hyodo et al., 2017a; Hyodo et al., 2018）。

この点を明示するため、本研究では  $T_{\text{Mars}}(t)$  を外部入力として与え、照射の有効期間をパラメータとして扱う。遷移期の終端  $t_{\text{ss}}$  は一意に定めにくいため、固定値として扱わず、妥当範囲に対する感度として整理する。

### 3.3 不可逆損失の定義と初期条件の更新

遷移期に内側円盤から不可逆に失われる質量を  $\Delta M_{\text{in}}$  と定義する。損失率を  $\dot{M}_{\text{loss}}(t)$  と書くと、 $\Delta M_{\text{in}}$  は次式で与えられる。

$$\Delta M_{\text{in}} \equiv \int_{t_0}^{t_{\text{ss}}} \dot{M}_{\text{loss}}(t) dt \quad (1)$$

ここで  $\dot{M}_{\text{loss}}(t)$  は、遷移期に固有の追加シンク（放射圧による微粒子排除、ならびにそれと結びつく昇華・蒸気散逸など）をまとめた有効損失率である。長期モデルが含む粘性拡散や惑星への落下と二重計上しないため、本研究の  $\Delta M_{\text{in}}$  は「長期モデル側では陽に扱われない経路」に限定して定義する。

SPH 終端時刻に、等価円軌道半径などの写像に基づいて定義される内側円盤質量を  $M_{\text{in}}^{\text{SPH}}$  とする。このとき、長期モデルへ渡す更新後の内側円盤質量  $M_{\text{in},0}$  を

$$M_{\text{in},0} \equiv M_{\text{in}}^{\text{SPH}} - \Delta M_{\text{in}} \quad (2)$$

で与える。式 2 は、SPH と長期モデルの間にある遷移期を、質量収支の観点で「欠落していた区間」として切り出し、長期モデルの初期条件を更新するための最小限の接続式を与える。

本研究が直接に扱うのは  $\Delta M_{\text{in}}$  の推定であり、粘性拡散に伴う半径方向の質量輸送や、長期的な共鳴・潮汐進化そのものは長期モデル側の物理として保持する。したがって遷移期モデルは、(i) 表層に存在する微粒子の供給（破碎カスケード等）と、(ii) 照射による除去（放射圧・昇華）を同一の枠組みで扱い、 $\Delta M_{\text{in}}$  を時間積分として評価する設計とする。

以上より、内側円盤質量の更新は、表層がどの程度照射され得るか、照射がどれだけ持続するかという二つの要素に強く依存することが分かる。次節では、この問題設定を踏まえ、本研究が目指す到達点と具体的な研究目的・貢献を述べる。

## 4 研究目的・貢献

本節では、第 3 節で定義した遷移期損失  $\Delta M_{\text{in}}$  を中心に、本研究が何を定量化し、どこまで踏み込むかを示す。狙いは、巨大衝突直後計算と長期衛星形成モデルの間にある遷移期を、少なくとも質量収支の観点で一貫した形に整え、長期モデルへ渡す初期条件  $M_{\text{in},0}$  の系統誤差を抑えることである。

## 4.1 研究目的

本研究の目的は三点に整理できる。

第一に、遷移期に内側円盤から不可逆に失われる質量  $\Delta M_{\text{in}}$  を推定し、SPH から長期モデルへの直接接続が内側円盤質量をどの程度過大評価し得るかを定量化する。ここでいう不可逆損失は、長期モデルが既に含む惑星への落下や粘性拡散による外側供給とは別の経路として扱う。

第二に、遷移期損失率  $\dot{M}_{\text{loss}}(t)$  を与える支配要因を整理し、モデル化の前提を再現可能な形で固定する。具体的には、表層照射の成立条件（遮蔽と幾何）、微粒子の供給（破碎カスケードと表層再供給）、ならびに高温条件下での昇華・蒸気散逸を同一の枠組みで扱い、 $\Delta M_{\text{in}}$  を時間積分として評価する。

第三に、火星表面温度の冷却史や光学的厚みなどの不確かさが、 $\Delta M_{\text{in}}$  と  $M_{\text{in},0}$  の推定へ与える影響を感度として提示し、長期形成モデルの初期条件更新に関する指針を与える。とくに放射圧による微粒子排除は、遷移期における主要な損失経路の候補であり（例：Hyodo et al., 2018）、その有効性を条件付きで評価することが重要となる。

## 4.2 研究方針

遷移期損失の評価では、光学的に厚い円盤であっても表層が照射され得るという幾何学的条件を採用し、表層に局在する損失を主要項として扱う。標準ケースとしてはガスが希薄な（gas-poor）円盤を仮定し、微粒子の運動と損失がガス摩擦に強く支配されない極限から出発する。ただしガス量の効果は不確定であり、仮定の妥当性は（要確認）として残る。

また火星表面温度  $T_{\text{Mars}}(t)$  は照射の有効期間を通じて損失積算を左右するため、温度履歴も入力として取り込み、複数の冷却モデルに対する  $\Delta M_{\text{in}}$  の変化を比較する。これにより、遷移期の不確実性を「長期モデル初期条件の不確実性」として明示できる。

## 4.3 本研究の貢献

本研究の貢献は次の三点に要約できる。第一に、遷移期の不可逆損失を  $\Delta M_{\text{in}}$  として定義し、内側円盤質量の更新  $M_{\text{in},0} = M_{\text{in}}^{\text{SPH}} - \Delta M_{\text{in}}$  を通じて、SPH と長期モデルの接続に潜む系統誤差を扱える枠組みを与える。第二に、遷移期を独立の研究対象として切り出し、短時間スケールの衝突計算と長時間スケールの集積計算を、質量収支の観点で同一の議論へ接続する。第三に、放射圧・昇華・蒸気散逸に焦点を当て、光学的厚み・粒径分布・火星冷却史といった不確かさが損失量へ与える影響を感度として提示できる設計にする。

以上により、本研究は長期モデルの内部物理を改変するのではなく、入力条件の整合性を改善することで衛星形成シナリオの比較を容易にする。第 5 節では、本論文全体の構成と、各章が担う役割を簡潔に述べる。

## 5 本論文の構成（各章で何をするか）

本節では、本研究の議論を追跡しやすくするために、以降の章構成と各章の役割を示す。遷移期損失  $\Delta M_{\text{in}}$  の推定は、モデル化（第 2 章）と結果の整理（第 3 章）を経て、感度解析と長期形成モデルへの含意（第 4 章）へ接続される。

第 2 章では、遷移期モデルの仮定、状態変数、離散化、損失項の定義、および時間積分法をまとめ、

$\Delta M_{\text{in}}$  を計算する手順を定式化する。ここでは、SPH 出力から長期モデル入力を作る写像と、第 3 節で導入した「追加シンクとしての損失率  $\dot{M}_{\text{loss}}(t)$ 」の具体化が中心となる。

第 3 章では、代表条件下の損失時系列と累積損失を提示し、 $M_{\text{in},0}$  の更新量がどの程度になり得るかを示す。次いで第 4 章では、火星冷却史や遮蔽条件（光学的厚み）などの不確かさに対する感度を整理し、更新後の初期条件が長期衛星形成モデルの予測へ与える含意を議論する。第 5 章では、本研究で得られた更新指針をまとめ、残る課題と今後の検証可能性を述べる。

以上により、本論文は「遷移期の質量収支」という観点から、巨大衝突直後計算と長期形成モデルの間の接続を再構成する。