

## 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に、巨大衝突起源説に基づく火星周回円盤研究の到達点を整理し、本研究の位置づけと目的を述べる。まず観測制約と起源仮説の対立軸を示し、次に先行研究が構築してきた衛星形成像を内側円盤の役割に沿ってまとめる。その上で、モデル接続に残る論点を遷移期の質量収支として提示し、研究目的と論文構成を述べる。

### 1 火星衛星の起源—観測制約と起源仮説の対立軸

フォボスとダイモスの起源は、観測が示す「物質」と「力学」の含意が噛み合わない点に特徴がある。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）。一方で、両衛星は火星赤道面に近いほぼ円軌道を持ち、単純な無傷捕獲が与える典型的な高離心・高傾斜軌道とは整合しにくい（Rosenblatt, 2011; Canup & Salmon, 2018）。

本節ではまず、このパラドックスを構成する観測事実を、解釈から切り離して整理する。続いて、捕獲説と巨大衝突起源説がそれぞれの制約を説明しやすく、どこで困難を抱えるのかを概観する。最後に、巨大衝突起源説がどのような数値モデルとして具体化されてきたかを見渡し、次節の先行研究整理へ接続する。

#### 1.1 観測が示す二つの制約

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。前者は捕獲起源を、後者は周回円盤からの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到達する散逸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落とし込むには強い散逸が要請される（Burns, 1992; Rosenblatt, 2011）。とりわけ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、力学的困難を緩和しようとする再検討は続いている（例：(要確認)）。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のが現状である。

### 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。巨大衝突により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 naturally 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; Ronnet et al., 2016）。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をどのように接続するかが、実装上の重要点として浮かび上がる。

### 1.4 小括：起源問題が要請するモデル化の射程

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。

このため、巨大衝突後に形成される火星周回円盤の性質と、その長期進化を結びつける数値モデルが研究の中心に位置づけられてきた。次節では、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、長期的な衛星形成像がどのように構築されてきたかを概観する。

## 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「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) 初期条件の与え方、(ii) 外側形成を駆動する力学、(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る点も明示している。

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。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、外側（ロッシュ限界外側）に残る質量は相対的に少ないという結果が重要である。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  $\lesssim 5\%$  と小さい。代表的な溶融滴半径も  $r_p \sim 1.5$  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際には、非軸対称で高離心な粒子分布を、円軌道化後の半径分布へ写像して「内側円盤」と「外側円盤」を分離する必要がある。先行研究では、軌道要素から等価円軌道半径  $a_{\text{eq}}$  を定義し、この写像に基づいてロッシュ限界の内外で質量を積分する手続きが採用されてきた (Hyodo et al., 2017a; Canup & Salmon, 2018)。その結果として得られる  $M_{\text{in}}$  が、長期モデルの初期条件として用いられる。

## 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、内側円盤は質量貯蔵庫にとどまらず、外側形成の力学を規定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残された接続の空白

先行研究は、巨大衝突後の円盤が内側円盤を主成分として持ち、その粘性拡散と潮汐相互作用が外側の衛星形成を強く制御することを示してきた (Salmon & Canup, 2012; Rosenblatt et al., 2016;

Canup & Salmon, 2018)。この整理により、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点が明確になった。

一方、SPH が扱う衝突直後の円盤と、長期モデルが仮定する準定常円盤の間には時間スケールのギャップがあり、その間の状態変化はモデルにより扱いが分かれる。次節では、この空白を「遷移期」として位置づけ、質量収支の観点から論点を整理する。

### 3 本研究の着眼点：遷移期の質量収支

第2節で見たように、巨大衝突起源説に基づく長期形成モデルでは、内側円盤質量  $M_{\text{in}}$  が外側への供給史を決める主要な入力となる。ところが、この  $M_{\text{in}}$  は衝突直後計算の出力を準定常円盤へ写像して得られる値であり、その写像が成立するまでの過程は明示的に扱われないことが多い。ここに、本研究が扱う「遷移期」という空白がある。

本節では、この遷移期をモデル接続の問題として正面から位置づけ、長期モデルの初期条件に影響し得る質量収支の論点を整理する。重要なのは、遷移期の詳細な時空間構造を序論で確定することではない。むしろ、どの種の過程が「追加の不可逆損失」として現れ得るかを見通し、以後の章で評価すべき量と仮定の範囲を明確にする点にある。

#### 3.1 遷移期とは何か

遷移期とは、衝突直後の非軸対称で高離心なデブリが、衝突・歳差・散逸を経て円軌道化し、軸対称近似で記述できる状態へ移行するまでの期間である。長期モデルはこの移行が完了した後を出発点とするため、遷移期での状態変化は初期条件の側に吸収される。したがって、遷移期の扱いは「どの初期条件を長期モデルへ渡したと見なすか」という定義の問題として現れる。

#### 3.2 遷移期に働き得る追加の損失経路

遷移期の円盤は高温で、微粒子と蒸気が共存し得る。さらに火星自体も高温で強い放射源となるため、表層に現れた小粒子は照射の影響を受け、放射圧などにより選択的に除去され得る（例：Hyodo et al., 2018）。長期モデルは連続体円盤の粘性進化を主眼とするため、粒径に依存する表層過程は直接には含みにくい。

遷移期の不可逆過程は、少なくとも次の三つに整理できる。

- 放射圧による微粒子の排除（粒子サイズに依存）
- 高温下での昇華と、それに伴う蒸気の散逸・再凝縮
- 表層と深部の混合が追いつかない場合の、表層のみの選択的損失

これらは粘性拡散や惑星への落下とは性質が異なるため、長期モデルの質量収支に自動的に取り込まれるとは限らない。したがって、遷移期を無視した直接接続は、長期モデルへ渡す  $M_{\text{in}}$  を系統的に過大に評価する方向へ偏り得る。

#### 3.3 初期条件バイアスとしての問題

長期形成モデルでは、内側円盤がロッシュ限界外側へ供給する総量とタイミングが、最終的な衛星質量や軌道配置を左右する（Salmon & Canup, 2012; Canup & Salmon, 2018）。遷移期に追加の不可逆

損失が存在するなら、供給史の前提となる内側円盤質量が修正され、形成条件の評価も変化し得る。とくに火星系では、内側起源の一時的衛星 (lost moons) が外側領域の集積を駆動し得るため、内側円盤の有効質量は外側形成へ間接的に波及する (Rosenblatt et al., 2016)。

以上より、遷移期は「衝突直後」と「長期集積」を直結する際に見落とされやすいが、初期条件バイアスとして無視できない可能性がある。次節では、この問題を扱うために本研究が導入する評価量と、研究目的の位置づけを述べる。

### 3.4 本研究が導入する整理軸

本研究では、遷移期に内側円盤から不可逆に失われる質量を  $\Delta M_{\text{in}}$  と表記し、長期モデルへ渡す内側円盤質量を補正する枠組みを導入する。ここで狙うのは、遷移期の全過程を詳細に追跡することではなく、長期モデルの初期条件に効く「純損失」を再現可能な前提の下で見積もる点である。 $\Delta M_{\text{in}}$  の厳密な定義、ならびに算定法は第 2 章で述べ、代表条件での結果と感度を第 3 章・第 4 章で示す。

## 4 研究目的・貢献

本節では、第 3 節で整理した遷移期の質量収支問題に対し、本研究がどの量を推定し、どこまで踏み込むかを述べる。焦点は、長期形成モデルが初期条件として用いる内側円盤質量を、遷移期の不可逆過程を踏まえて更新できる形に整える点にある。以降では、研究目的を三点に整理した上で、本研究が与える貢献を要約する。

### 4.1 研究目的

本研究の目的は次の三点である。

- 遷移期に内側円盤から不可逆に失われる質量を「 $\Delta M_{\text{in}}$ 」として定量化し、長期モデルに入力する内側円盤質量の補正量を与える。
- $\Delta M_{\text{in}}$  を支配し得る要因（表層照射の成立条件、微粒子の供給と消失、火星からの照射強度など）を整理し、主要パラメータに対する感度として提示する。
- 上記の推定を長期形成モデルの初期条件更新へ接続し、衛星形成シナリオ比較に含まれる系統誤差を評価するための指針を与える。

これらは「遷移期の詳細を完全に再現する」ことを目的としない。長期モデルの入力として意味を持つ量に絞り、どの仮定が結果を左右するのかを明確にすることが主眼である。

### 4.2 本研究の貢献

本研究が与える貢献は、次の三点に整理できる。

- 遷移期をモデル接続上の独立な対象として切り出し、追加の不可逆損失を補正量として長期モデルへ渡すという接続の枠組みを与える。
- 補正量の推定に必要な仮定を、遮蔽・照射・粒子過程といった論点に分解し、再現可能な形で整理する。
- 代表条件下の推定値と感度を提示し、長期形成モデルの初期条件更新がどの程度結果へ影響し得るかを定量的に議論できる土台を提供する。

以上により、本研究は長期モデルの内部物理を置き換えるのではなく、入力条件の整合性を改善することで議論の透明性を高める。次節では、論文全体の章構成と各章の役割を簡潔に述べる。

## 5 本論文の構成（各章で何をするか）

本論文は、巨大衝突直後計算と長期形成モデルの間にある遷移期を、質量収支の観点から整理し直すことを目的として構成する。第2章では、遷移期損失の評価モデルの前提と入力・出力を定義し、補正量（ $\Delta M_{in}$ ）を計算する手順を与える。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、内側円盤質量の更新量がどの程度になり得るかを示す。

第4章では、遮蔽条件や火星の冷却史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、本研究で得られた知見を総括し、残る課題と今後の検証可能性を述べる。