

「2021年度最優秀発表賞受賞記念論文」 惑星形成理論×惑星探査に関するある取り組み

兵頭 龍樹¹

2022年12月14日受領, 査読を経て2023年1月27日受理

(要旨) 宇宙を取り巻くコミュニティは、科学界も参加する官民の社交場となり、ますます総合格闘技な世界になっていくと感じています。~20年後には、小惑星探査はアカデミア(宇宙科学)主導で行うものではなく、宇宙事業の主戦場にもなるかもしれません。このような未来を妄想して生きる若手・理学研究者として、他者との協働のあり方を模索する経験は将来に繋がると考えます。本紙前半では、JAXA火星衛星探査計画(MMX計画)に関連させて、独善的かつ利他的な思いで試みた理学研究の表現例を紹介させていただきます。一方で外惑星領域は、今後~20-30年は、アカデミアが主導し続ける世界であると考えます。しかしながら日本は、外惑星領域に独自に足を踏み入れたことがない現状です。本紙後半では、筆者が工学チームと考える日本初の外惑星探査(例として土星円環探査)×小惑星マルチフライバイ・コンステレーション案を紹介します。

1. はじめに

誤解を恐れずに極論を展開すると、小惑星探査などの過去の宇宙探査は「研究者中心の遊び場」だったが、「これからは官民の社交場」としての香りがより強くなると思っています。

太陽系の起源を解明するという旗印は、我々惑星科学会員にとって、これからも目指すところであり、筆者にとっても格別の面白さを感じるものがあります。巨人の肩の上に立ってやるべき惑星科学的な課題は明確で、尽きないものとして存在します。

一方で、我々惑星科学のコミュニティは社会のとても小さな一部に過ぎず、社会にとっての我々の存在価値や意義というもの日々考えずには(個人的には)いられません。そして技術の進歩とともに、宇宙というキーワードが、惑星科学の外で一般的に喧嘩れることが多くなってきました。これから宇宙を取り巻くコミュニティは、多種多様なアカデミア分野のみ

ならず、官民の直接的な参入・関与とともに、ますます総合格闘技な世界になっていくと感じています。

このような状況において、惑星科学会や自分自身の直接的な興味を追求するだけでなく、惑星科学を使いながら、他コミュニティと協働ができないかと筆者は模索を続けています。惑星科学を道具として、分野横断で、何か新しいものごとが始まる理由やきっかけを作れるような研究活動をしてみたいと思っています。

以下は、自分自身の興味のためだけでなく、誰かのために研究をしてみようと思った筆者の活動例になります。本誌前半ではJAXA火星衛星探査計画(MMX計画)に寄り添って、筆者が信頼する仲間と行った理学研究の一部を紹介させていただきます。本誌後半では、日本初の外惑星探査が工学的に実現するきっかけになればとの思いから生まれた惑星科学的な動機付けを紹介します。

日本独自の火星圏探査MMX ～その意義・価値 3本の柱～

我が国が誇る小天体サンプルリターン技術を武器に、火星衛星の起源を明らかにすると共に、火星生命探査の一翼を担い、将来の有人火星探査にも寄与する。MMXは**日本独自の火星圏探査**である。

はやぶさ2からの発展 生命と火星衛星の起源に迫るMMX



©Akihiro Ikeshita

MMXは、はやぶさ2に続く、JAXAの小天体探査戦略の中核を担うミッション。火星の衛星フォボスのサンプルを採取し、火星衛星の起源を明らかにするとともに、太陽系の中で水・有機物が、どのようにして惑星に供給され、生命が誕生・居住可能な環境ができたのかを明らかにする。

NASAパーサヴィアランスより早く 火星サンプルを持ち帰るMMX



Credit: NASA JPL

フォボス表面には、隕石衝突により火星表面から吹き飛ばされたサンプルが、かなりの量、降り積もっていると考えられている。MMXは、フォボス自身のサンプルに加えて、火星表層からのサンプルを、NASA・ESA、および中国の計画よりも早く、2029年度に地球に持ち帰る。

フォボスは火星への橋頭堡 有人火星探査の先陣を切るMMX



Credit: NASA/JPL-Caltech University of Arizona

MMXは、有人火星探査では必須となる火星圏への往復を果たす。また、有人火星探査の重要拠点と目されるフォボスの表面地形、地盤情報、表面・周辺環境を世界で初めて詳細に観測して、天然の宇宙ステーションとしての利用可能性を探る。

図1: MMX計画が掲げるその意義・価値の三本柱. 出典:JAXA

2. 火星衛星探査(MMX)計画に関するある取り組み

2.1 その意義と価値の三本柱

MMX計画がその計画当初から掲げている大目標として「火星衛星の起源を明らかにする」というものがあります。火星衛星が探査対象天体であることを考えると、ごく自然で、当たり前です。しかし、この「当たり前」に価値や意義を直接的に見出すのは、惑星科学を専門とする我々にほぼ限定されると思われる。惑星科学会は、宇宙を取り巻く多くのステークホルダーのほんの一部であり、他のステークホルダーはこの当たり前に満足しない、興味を持たないと想像できます。実際筆者がHUNTER×HUNTERの次に愛読するYahoo!ニュースで、MMX計画に対して、「なぜ、火星衛星なのか?」「なぜ、火星に行かな

いのか?」「莫大な税金を火星衛星に投入する価値が理解できない」等のコメントが散見していました。

図1は、カタルワールドカップで三笥薫がライン際で神躍動した2022年冬の時点でMMX計画が掲げている「その意義と価値の三本柱」になります。上の二つは惑星科学的なもの、一番下は工学・技術的なものです。本節では、惑星科学会における当たり前の追求だけでなく、他分野への波及と他者との協働に繋がる意義・価値の創出を目指した筆者の小さな努力の積み重ねを紹介したいと思います。

2.2 そもそも何故ウケないのか?

その答えは単純で、「フォボスとデイモスだから」です。筆者個人的には、衛星、リング、そして小天体は、とても興味深い惑星科学の研究対象です。しかし惑星科学会の外に存在する一般社会には「つまらない、よくわからない、何のため」と言われます。全員

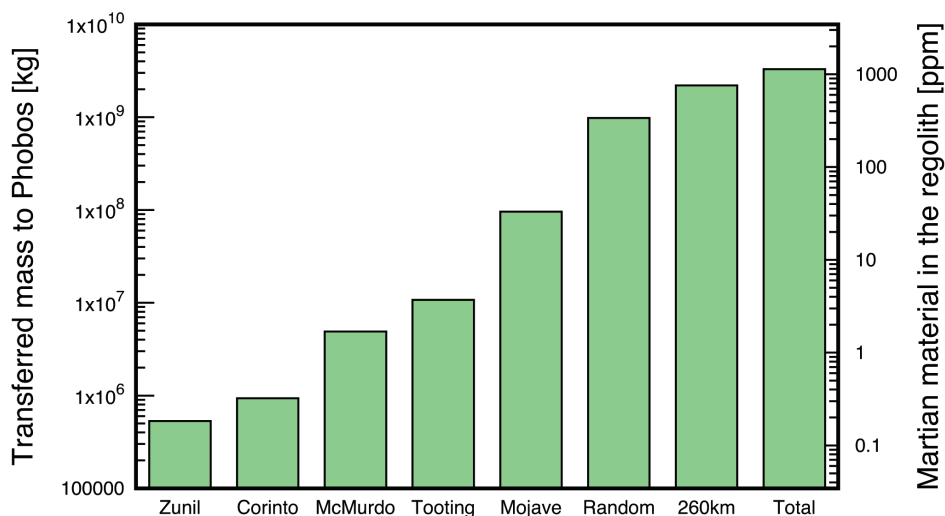


図2: フォボスへ輸送される火星物質質量(©R. Hyodo). 「Zunil」「Corinto」「McMurdo」「Tooting」「Mojave」は、火星表面上に存在するクレータの名前で、最近10万年以内に形成された直径10 km以上の新しいクレータからの寄与分です。「Random」は、最近5億年間に火星に起こった直径100 km以下のクレータを作る無数の小天体衝突によって輸送される総量を示しています。「260 km」は、最近5億年間で少なくとも一度は起こると考えられる直径260 kmのクレータを作る衝突によって輸送される量です。「Total」は、これらの合計値です。右の縦軸で表される量は、輸送された火星物質がフォボス表層1 mに均質に混ざった場合の火星物質の割合になります。

を説得するのは無理。でも少しでも多くの人と共有できる可能性を探る努力はできていると思っています。今回の場合、火星衛星ではなく、火星本体についてのことなら、人類の移住計画や生命探査と関連させることで、より多くの人々の興味を引き、協力を仰げる可能性があるかと期待できました。そこで以下、「火星」をキーワードとする研究を行ったので、その紹介をさせていただきます。

2.3 火星に行かずとも、フォボスから火星物質を獲得できる

始まりはMMX計画の惑星保護に関する課題でありました。というのも、先行研究で火星から火星衛星に火星物質が降り積もっているだろうと予想されていました[1,2]。これは、火星に隕石衝突が起こるたびに、火星表層物質がイジェクタとしてある程度の速度を持つからです。地球に火星隕石が到達するくらいなので、火星衛星に到達する可能性は大いにありと容易に想像できます。そしてもし火星表面に微生物が存在する可能性が無きにしても非ずということになれば[3,4]、それは火星衛星からサンプルリター

ンを狙うMMX計画において、惑星保護事情¹を考慮する必要が出てきたというわけです。

本誌では、惑星保護の課題をクリアした滅菌過程(衝突および放射滅菌など)の詳細は省きます(詳細は、[5,6]に譲ります)。一方ここで前提となる研究を行いました。それは惑星保護だけに留まらないものなので、その話を以下にします。ここでの問いは、「そもそも火星衛星に運ばれうる火星表層物質の総量はどの程度なのか?」です[7]。

すでに先行研究において、火星表層から火星衛星に運ばれうる衝突イジェクタ質量の推定が行われていました[1,2]。しかしその見積りに使われたイジェクタ速度分布は、シンプルな正面衝突モデルに基づくものでした。本研究では、3次元のSPH衝突計算を用いて、かつ、より現実的な衝突天体サイズ、衝突角度、衝突速度、これらの分布に基づいて上述の問

¹COSPARのPlanetary Protection Policy(PPP)では、Unrestricted Earth-Return missionsとするためには、直径10nm以上の滅菌されていない粒子がサンプルに1つでも含まれる確率が10⁻⁶未満でなければならない、とされています(REQ-10と呼ばれます)[3,4]。

いを再考しました。衝突計算によって求められた衝突直後のイジェクタの位置と速度の情報は、軌道計算のインプットとなり、長期の軌道進化で、イジェクタがフォボスかデイモスに到達するかを調べました。特に本研究では、過去5億年の間に火星に起こったクレータ形成衝突からの寄与分を調べ、潮汐によるフォボスの軌道進化も考慮しました(時間を戻すとフォボス軌道が広がるセンス)。

その結果、従来推定されていたよりも10倍以上の火星表層物質がフォボス表面に集積していることが明らかになりました(図2)[7]。輸送される火星物質の総量は、フォボス表層1 mに均質に混合したとすると、~1000 ppm程度の粒子数密度となるものです。このうち~340 ppmは火星表面に存在する直径100 km以下のクレータを形成する無数の衝突からの寄与分であり、残りの~760 ppmは過去5億年に一度は起こると考えられる直径260 kmサイズのクレータ形成衝突からの寄与分になります。これが意味することは、「火星に行かずとも、フォボスから火星物質を獲得できる」可能性がある、ということです。

2.4 MMX計画で得られる火星表層物質とは?

さて、MMX計画と掛け算することで得られる本研究の重要なメッセージは次のようになります。MMX計画では、少なくとも異なる2箇所から合計10 g以上のサンプル採取を目指しています(はやぶさ2では打ち上げ前の目標が0.1 gだったので、MMX計画はその100倍の量を目指す)。ここで~1000 ppmが意味することは、10 gサンプル中に火星表層から飛来した粒子が~100粒ほど存在するということです。ここでは、粒子を0.3 mmの立方体 [2] として、かつ密度を3 g/cm³ として見積もっています。少なくとも~34粒は火星表層のあらゆる場所から飛来した粒子がランダムに含まれていることになります。~76粒は直径260 kmサイズのクレータ形成衝突からの寄与です。さらに、火星から火星衛星に輸送するためのエネルギーは、火星から地球に火星隕石として輸送するのに必要なエネルギーに比べると、圧倒的に小さくなります。強い衝撃変性なしに(<5 GPa)、火星からの粒子が火星衛星に運ばれるということです [7]。

隕石衝突は火星表面でランダムに発生します。つ

まりMMX計画のサンプル中に含まれる火星表層物質が、さまざまな時代に形成された多様な岩石(from sedimentary to igneous)をランダムに含むこととなります。時間軸においても多様な火星粒子の採取と分析に成功すれば、火星史を“time-resolve”することが可能になります(図3)。MMX計画が、フォボスのみならず、火星の形成と進化を明らかにするという理学意義と価値を持ちうることを意味します。ちなみにここでの議論は、火星衛星の起源に関わらず、火星衛星が5億年前から存在すれば期待できる結果です。

2.5 火星隕石や他の火星探査計画との比較

我々の隕石コレクションや他の探査ミッションとの比較もポイントになります。まず、現在見つかっている火星隕石は、100種類以上、合計100 kg以上です。次に、NASA-ESAが計画する火星サンプルリターン計画(Mars Sample Return計画; MSR計画)は、火星表層にあるJezeroクレータからの物質採取を目指しています [8]。既にMSR計画の一部として、NASA・Perseveranceローバーが、長年の風化に耐えた岩塊などを掘削し、試料サンプルを無事に保管チューブに詰め込むことに成功しています。今後、さらなる物質採取を続け、最終的に2030年代前半に地球にサンプルを持ち帰ることを目標としています。

MMX計画による上述の火星表層起源サンプルと比べると、MSRサンプルは、そのgeological contextsが明確であり、サンプル量も圧倒的に多くなります(~15gチューブが43個)。しかし、Jezeroクレータに偏ったデータとなります。火星隕石は、MMXサンプルよりも圧倒的に多量で、豊富な理学データを我々にもたらしました。しかし、geological contextsが不明確であり、ある時代の産物に限定され(<1.3 Ga)かつ、全て火成岩で強い衝撃(>5 GPa)を経験していることが報告されています [9]。一方でMMXサンプルに含まれる火星表層物質は、火星表層からランダムに輸送されてきたため、geological contextsは不明確ですが、偏りのない多様な火星表層サンプルになりえます。しかし少量に限られます。このようにそれぞれが一長一短であるものの、互いに相補的な役割を担うことで、火星史をより包括的に紐解くことに繋がると期待できます。

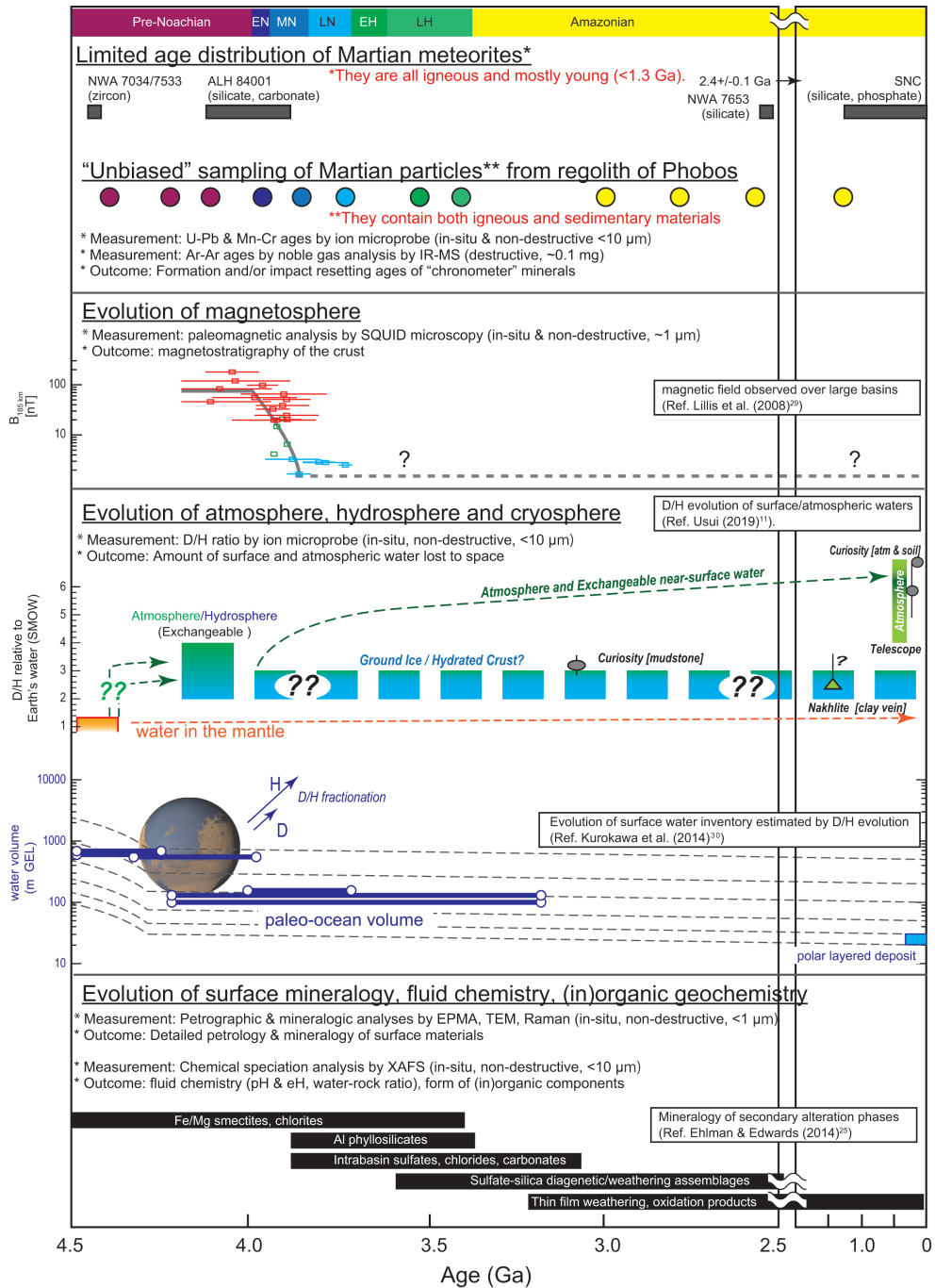


図3: 異なる火星物質サンプル(火星隕石とフォボス表層に存在すると期待される火星表層物質)を比較した概念図。現在発見されている火星隕石は、ある時代の産物に限定されている。フォボス表層から得られる火星表層物質は、さまざまな時代における多様な物質であると期待される(図中の上)。このような多様なサンプルを分析することで、火星の磁気活動、水・氷圏のD/H比、表層水インベントリ、鉱物などの進化の理解を深めることが可能になると期待している(図中の下)。Hyodo et al. 2019 [7]の図を改変。

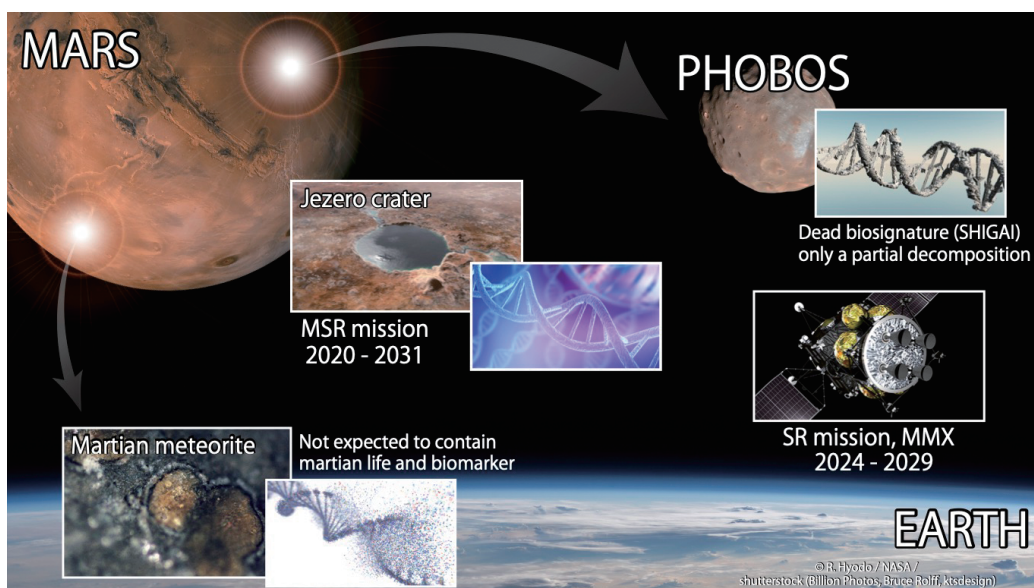


図4: 火星隕石, Jezeroクレータ, フォボス表層を比較した概念図(©R. Hyodo). 火星隕石は, その放出過程および地球大気への突入過程において高圧環境 and/or 高温環境を経験することで, 火星生命に関する情報が存在したとしても破壊されると考えられる. MMX計画では, 火星生命の情報がSHIGAIとして存在する可能性がある [11]. MSR計画では, Jezeroクレータに限られるが, そこを詳細に調べることで, もし存在すれば生きた生命までも発見できる可能性を秘めている [8].

2.6 火星生命探査に関して

NASA-ESA・MSR計画の最大の目的は、「生命の痕跡」を見つけることでもあります。「地球はどのようにして生命惑星となったのか?」「地球以外に生命はあるのか?」。このような問いは, 現在の惑星科学と惑星探査においてもトップに掲げられるものです。そして地球だけを見ても答えは出ないであろうという考えが, その背景にあります。現在では表面が干からびているように見える火星ですが, 35億年前頃まではその表面に海があったと考えられます [10]。「地球外で生命の痕跡を探すなら, まずは, かつて地球に似た環境があった火星であろう」というのが, 火星探査における基本戦略であります。

Jezeroクレータは, 数十億年前まで巨大な湖が存在していた可能性がある場所であり, 粘土鉱物など水の存在を示唆する鉱物が発見されています [8]。NASA-ESAはこのポイントに着目することで, この地域を精査することとしました。しかし, 地球や火星のようなサイズの天体の場合, ある一部の場所からの情報に基づいて惑星全体を議論することが

できるとは考えるべきではない。

そこで, 火星衛星フォボスの表面物質(つまりMMX計画)に新たな期待を寄せることができます。上述のように, フォボスは火星の近くを回っているため, 衝突で掘り起こされた火星表面物質の一部が低衝撃圧(<5 GPa)でフォボスまで飛来します。つまり, 火星生命の痕跡(太古の火星で存在した生命やバイオマーカーの化石や痕跡など)が火星表面にもしも存在していた場合, その情報が失われることなく, フォボスまで運ばれうのです(図4) [11]。

さらにMMX計画に関する惑星保護の議論を掛け算すると, 微生物が火星表層に仮に存在していたとしても, 衝突滅菌と放射滅菌によってフォボス上で死滅します [5,6]。つまり, 地球帰還が許される“安全な死骸”が存在する可能性を示唆しており, ある意味, “安全”であることが“退屈”や“無価値”と同義ではないということです。“死骸”の高い価値を改めて陽に議論したことがポイントとなります。

我々は, フォボス上で存在するかもしれない火星生命の痕跡と死骸を合わせて, SHIGAI (Sterilized and Harshly Irradiated Genes,

and Ancient Imprints) と定義しました [11]. 本研究でSHIGAIが確実に存在することを示したわけではありません. しかし, 「見ようとしないと見えないもの」があります. そのような思いで本研究がMMX計画の価値最大化に貢献できれば幸いです.

MSR計画とMMX計画, このように互いの相補的な意義が明確になり, 二つの計画が連携協働を目指しています. 2020年代, 火星生命探査はそのような新時代に突入し, MMX計画にはそこで果たすべき役割があると筆者およびISAS/JAXAでは考えております.

3. 外惑星探査計画に関する ある取り組み

ここから話題が変わります. JAXAは自力で外惑星領域に到達したことがありません. 現在JAXAの技術フロントローディング活動の中で, 超小型探査機技術を発展させ, 外惑星領域を目指す動きが見られます. またJAXA宇宙科学研究所には, 超小型宇宙機による外惑星探査実証ワーキンググループ(OPENS計画)が爆誕しています.

このような機運において筆者は, OPENS計画において, 日本として初めて外惑星領域を探査する動機付けになるような理学価値と意義の創出を担うことになりました. 巨大惑星である木星・土星は, その圧倒的な重力によって, 太陽系の形成過程(力学構造の形成や物質混合・分断など)に決定的な影響を与えてきたと考えられています.

現在, 太陽系の形成モデルは乱立しています. モデルによって木星・土星の材料物質(微惑星集積かペブル集積かなど), 形成時期と形成場所, および, 進化が異なります. その結果, 例えば, 巨大惑星大気の化学組成や同位体組成, および, 内部構造が変わってきます[12,13]. また木星トロヤ群の捕獲確率や分布は, 木星の軌道進化に依存する可能性が示されています [14]. 外惑星探査の惑星科学的な意義と価値は, 物質科学的な証拠から, これらのモデルを直接的に制約することで.

惑星探査を現実のものにするためには, 「実現可能性」が重要なポイントになります. 現状のOPENS計画の枠組みは小型探査機によるものです. 詳細

は省きますが, OPENS計画では, 軌道に強い制約があり, 科学ペイロードが小さく, 搭載機器は原則的に開発実績のあるものに限られます. このような状況では, 上述の巨大惑星大気の制約を十分な実現可能性を持って行うことは現状チャレンジングです. そこでここからは, 光学系(例えば望遠カメラTENGOO)のみでも最低限で達成しうる土星リング探査について, その理学意義と価値を中心に議論いたします.

3.1 そもそも, 土星リングとは?

そもそも土星メインリング(以下, リング)は, 土星周りをケプラー運動するcmからmサイズの無数の水氷粒子によって構成されていると考えられています [15,16]. リングの外縁は, 土星の中心から約14万kmです. 厚みは, リング粒子間の衝突ダンピングによって10m程度に保たれています. その軌道周期は1日よりも短く, 一周する間に数十から数百の粒子間衝突が起こっています [17]. 土星リングは, いま現在でも, 数日というタイムスケールで力学的な進化を遂げている非常にダイナミックな系です.

また, 土星リングの外側に存在する順行衛星は, 土星メインリングが, 数十億年をかけて土星のロッシュ半径の外側に染み出し, 自己重力集積することで形成された可能性が理論モデルより明らかになってきました [18-21]. さらにカッシーニによって, 現在進行形で, リング外縁で新たな衛星が集積している徴候を示すような画像も得られています.

一方, 土星リングの起源は未決着です. これまでに, (1)太陽系誕生から1,000万年以内に存在した周惑星円盤内での衛星潮汐破壊説 [22], (2)太陽系cataclysm期における太陽系外縁天体の土星近接遭遇による潮汐破壊説 [23], (3)数億年前に起こった衛星同士の衝突破壊説 or 衛星軌道の不安定による衛星の潮汐破壊説 [24,25], などが提唱されています. それぞれの説が正しかった場合に期待されるリング粒子の物質科学的特徴, 形成時の熱力学的環境, 形成年代は大きく異なります. しかしリング粒子の詳細な情報が得られていない現在では, 起源に決着がついていません. ring rainやspokesなど, リング粒子と土星磁気圏の相互作用もまだまだ理解が少ない現象として存在します [26].

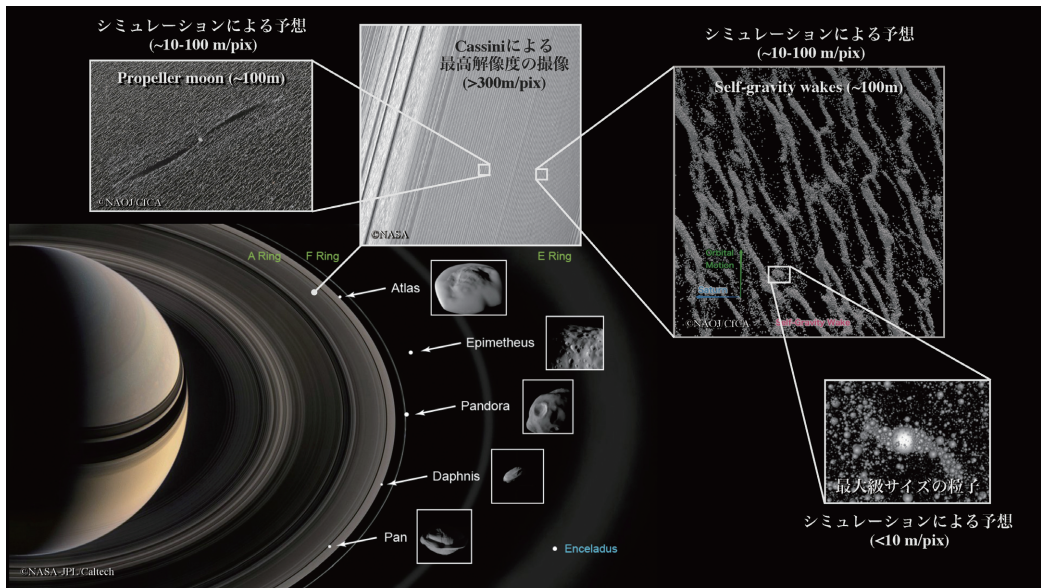


図5: 土星リングと衛星系(©R. Hyodo). 現在までに達成されている土星リングの撮像は、300 m/pixel 以上の解像度に留まっている。理論やシミュレーションから、 <100 m/pixelの解像度でself-gravity wakes や propeller 構造を形成する小衛星が見えてくると期待されている。もし <10 m/pixelでリングを解像することができた場合は、最大級サイズのリング粒子一粒が見えてくると期待されている。

これまで土星リングは、NASAカッシーニ探査計画によって、精力的な観測が行われてきました。とくに顕著なリングサイエンスの成果として、リング質量の制約 [16]、リング内に存在する衛星の発見 [27]、リング粒子群が作る巨視的構造の詳細観測(縞構造, propeller構造 [27], ring rainやspokesなどのリング粒子と土星磁気圏の相互作用)[26,28]、動径方向に存在する物質分布 [29]など、が挙げられます。しかしながら、カッシーニのリング観測における最高空間解像度は、300m/pixel程度に留まっていることから、以下に述べるサイエンスの課題は、未達成であります。

3.2 土星リングの惑星科学的な面白さは？

土星リングは粒子拡散円盤であり、この宇宙に、あらゆるスケールで普遍的に存在する物理現象の一例として魅力的なシステムです(銀河, 原始惑星系円盤, デブリ円盤なども全て拡散円盤である)。土星リングは、無数のリング粒子が、衝突によるエネルギー散逸, 重力エネルギーの注入を繰り返す, エネルギー注入・散逸系であり(図5), それがself-gravity

wakesと呼ばれる局所構造を生んでいます [17]。そして、そのself-gravity wakesが、巨視的なリングの角運動量輸送・拡散を制御し、さらにエネルギー散逸もコントロールしています [30]。その結果、数十億年の拡散進化によって、土星リングは、周囲の衛星を形成してきたと考えられています [18-21]。

しかし現状では、カッシーニ探査の結果をもってしても、土星メインリングの巨視的な構造進化を支配するリング粒子個々の特性に関する本質的な情報が欠けている状況です。例えば、ケプラー周期で変動するself-gravity wakes(10~100mスケール)や、個々のリング粒子(cm~mサイズ)の情報が欠落しています(図5)。土星リングの形成と進化を語る上で、これらの理解が本質的に重要です。

具体的にカッシーニがやり残した核心的な惑星科学的問いは以下です。

- 氷粒子は、どのような形をしているか？サイズ分布は？
- 粒子内部も、水氷なのか？化学組成は？同位体組成は？
- 氷粒子は、高密度なicy chunkなのか、空隙を持つsnowballなのか？

- 粒子表面は, fluffy, slushy, または frostyなのか?
- 氷粒子は, amorphous または crystallineなのか?
- 氷粒子は, 始原的なものなのか, 変質したものなのか?
- Self-gravity wakesは存在するのか? する場合, どのようなスケール・形状比なのか?
- リング粒子は重力や衝突によってどのように相互作用しているのか?
- 軸対称の無数の縞模様は, 密度起源なのか? または物質起源なのか?
- 土星リングの形成年代(年齢)・起源は?

観測的にself-gravity wakesを理解する(10~100m/pixelの解像度を達成する)ということは, 土星メインリングの拡散進化を特徴づける構造を, 直接見て, 理解することを意味します。さらに, self-gravity wakesは, リング粒子のサイズ分布, 重力相互作用, 衝突時の物性によって支配される構造であるため, 他の観測, 理論や数値計算との比較を通して, 間接的に粒子の表面特性など, リング粒子個々の物理化学特性を明らかにできる可能性があります。しかし, それでも情報が縮退してしまう場合は, 次に述べるリング粒子個々を解像する観測が必要です。

観測で, 粒子個々の形状, 表面化学組成, 表面力学特性, 空隙などの粒子内部構造, まで理解できた(cm~m/pixelの解像度を達成する)場合は, リング粒子が形成された当時の熱力学的環境や衝突破壊環境などに制約が与えられ, その起源に迫れる可能性があります。さらに, 上述のように粒子個々の物理化学特性がself-gravity wakesを支配することから, 拡散現象モデルの検証とさらなる一般理論の構築に繋がります。

もしリング粒子をサンプル分析して, 同位体, 鉱物組成, バルク化学組成, などを明らかにすることができた場合は, 隕石, 小天体, 彗星などのデータと比較することで, リングの材料物質が, いつ・どこで形成され, その後どのように進化したのかを明らかにできる可能性が高まります。ちなみに, カッシーニが採取した“リング物質”は, 土星メインリングから, 選択的に弾き出され, イオン化/部分昇華した粒子, または, 衛星エンケラドス起源のEリング粒子で, メインリングのバルク粒子とは異なることに注意です [31,32]。

最後に, カッシーニの観測によって新たに提示された謎として, 「なぜ, 数十億年のmicrometeoroid bombardmentから予想される“汚れ”が, 巨視的なリング表面観測では見られないのか?(i.e., 土星リングは, “汚れの少ない”きれいな氷でできているように見えている)」、というものがあります。現在これを理由に, リングの年齢が1億年程度と言われたりしますが, 確定的ではありません [33,34]。粒子個々の詳細な表面観測, または, リング粒子のバルクとしての理解は, この問題解決において鍵となります。

3.3 土星リング探査が持つ惑星科学的な波及効果

すでに述べた部分もありますが, 土星リングの起源と進化を理解することは, 次の波及効果を持ちます。

まず, 土星リング粒子の化学組成, 同位体, 粒子構造(表面/内部構造)を理解することは, リングの材料物質の起源と進化の理解に繋がります。提案されるリング形成モデルにおいて期待される材料物質, 形成時の熱力学的環境, 形成年代が大きく異なるからです。

次に, self-gravity wakesは, 土星リングの拡散現象(拡散の粘性係数)を支配します。ゆえに, self-gravity wakesの理解は, 数十億年をかけた土星リングの拡散進化の理解に繋がります。土星の衛星系の形成と進化の理解に繋がります。

さらに土星リングの形成と進化が, 太陽系の惑星形成の中で起こることを考えると, 土星リングの理解は, 太陽系形成の理解(原始惑星系円盤の描像, 太古の土星周囲の集積環境など)に波及します。また, self-gravity wakesと, それに支配される拡散現象の理解を, 理論面からだけでなく, ある現実の系を通して深めることは, 銀河, 原始惑星系円盤, デブリ円盤などの一般的な円盤システムの拡散現象を理解することに波及します。

3.4 土星リング探査のこれまで, これから

カッシーニを超えて土星リングを探査する(<300m/pixelを達成する)ためには, これまで以上に土星リングに近づくことが必要です。土星リング近傍では, 無数の粒子がランダムに飛び交っているため, 探査機にとってはリング粒子との衝突で破碎

リスクを伴う環境です。一方、カッシーニ探査のおかげで、粒子数密度が極めて低い領域や、ギャップ構造などが明らかになりました。カッシーニが積み重ねた過去の知識の上に、正確な軌道設計・軌道決定が実現できれば、カッシーニを超えて土星リングの姿を明らかにすることができるでしょう。このような探査はリスクとチャレンジ精神が必要であるため、欧米の巨額大型探査は理学価値・意義が明確でも、手を出しにくいでしょう。

また、土星リングに近づくということは、必然的に土星本体にも近づくこととなります。これは土星大気を観測する絶好の機会にもなります。近年、NASA・Junoが木星大気の構造や化学・同位体組成を制約することで、木星の形成過程の制約に重要な貢献を果たしました[13](NASA・Galileo木星プローブもそうです)。しかし土星に関して、このような探査は未だ行われていません。

3.5 外惑星探査 × 小惑星マルチフライバイ・コンステレーション案

最後に、外惑星探査(土星リング探査)は、小惑星探査の新しい形を実証する貴重な機会になりうるという話をしたいと思います。外惑星領域に到達するために、地球型惑星(金星や地球)のスイングバイを利用します。スイングバイは、その度に、探査機の軌道を調整する機会です。ある適当な小惑星のフライバイ探査を狙う絶好機となります(Asteroid Flyby Cypher Trajectory ; 詳しくは、尾崎直哉氏の[35]を参照)。

筆者(理学)と尾崎(工学)は協力して、外惑星探査計画にこのようなフライバイ探査手法の実証を盛り込むことを画策しています。例えば、地球(打上げ)→地球→金星→地球→地球→土星というような軌道設計を考えた場合、小惑星フライバイを入れ込む余地は、地球(打上げ)→小惑星#1→地球→金星→地球→小惑星#2→地球→小惑星#3→土星、となるようなものです。実現した場合、土星圏到達の前に、数年に一度の頻度で新たな小惑星をフライバイできる可能性があります(小惑星マルチフライバイ探査)。ここでポイントは、土星圏を目指した軌道に最適化した上での小惑星マルチフライバイなので、マルチフライバイの有無によって、土星到達までにかかる時

間が伸びることはありません。

さらにこのような技術実証の積み重ねの結果、N機の小型衛星のコンステレーションを組むことが有益ではないかと考えています(軌道設計の専門家である尾崎直哉氏がリード)。例えばN=10-20などでコンステレーションを組むことで、衛星が惑星スイングバイを定期的に行えるように配置します。この場合、スイングバイの度に適切な小惑星を見つけて探査を目指すことも可能ですし、Interstellar Objects や長周期彗星が突然現れた場合でも、即応型探査機として利用することも可能です(Comet Interceptorで採用するラグランジュ点での待ち一方の探査手法と異なります)。

探査機寿命の改善や安価に大型探査機が作れるような未来では、地球近傍でコンステレーションを組みながら地球近傍探査を行いつつ、適切・必要なタイミングで外惑星に軌道変更をするような柔軟性を持たせることが可能だと考えています。

4. まとめと今後の展望

結局、見てもSHIGAIは見つからないかもしれないし、土星リング探査も実現しないかもしれません。逆に、MMX計画がノーベル賞級の成果をあげるかもしれないし、日本が独自の外惑星探査を展開する未来がやってくるかもしれません。筆者は、黙っていても人類や業界を救えるような研究論文を書けるような能力は持っていません。その代わりに筆者は、「ただのサイエンティスト以上に何を語るか」「何かを言うために論文を書く」ことを意識し、惑星科学コミュニティを飛び越えて、工学分野、(非科学の)宇宙コミュニティ、そして社会一般(多種多様なステークホルダー)を巻き込む仕事をしたいと思っています²。その結果として、多種多様な人材、そして運が良ければ黙っていても我々を救えるような神人材を惹きつけ、宇宙コミュニティを真に総合格闘技化できる一翼を担えれば幸いです。

²最優秀研究者賞としての評価では、本誌に記載した内容だけでなく、純・惑星科学的な研究(微惑星形成 [36-39]や、衝突現象 [40-42]、衛星形成 [43-47])も含んでいただいています。

謝辞

修士課程において面倒を見ていただいた大槻圭史教授との出会いが全ての始まりでした(研究において父のような存在です)。博士課程で面倒を見てくれた Sebastien Charnoz 教授と Frédéric Moynier 教授は、受け入れ当日に「これからは友達で、同僚だ」と言ってくれました(いまでは家族ぐるみの付き合いです)。井田茂教授には、学生のころから一緒に飲み歩いてくださり、現在でも井田研メンバーとして受け入れてもらい、研究感だけでなく、「こんなことしてもいいんや」と思う生き方を見せ続けてくれています。藤本正樹教授には、「俺のことを友達と思ってるやろ」と(関西人として有難く)ツッコんでもらい、学生の頃から飲み连接到ってくださり、サッカーで互いに熱く語り、かつ国際協力や惑星探査の楽しさを教えてもらっています。臼井寛裕教授とは、大変だった SHIGAI 案の構築を共にし、そして宇宙研という少し変わった場所を共にする大先輩として、飲みながら良きアドバイスをいつもくれます。玄田英典教授は、偉くなり、年々連絡が返ってくるのが遅くなりますが(大変そうです)、誰よりも一緒に、たくさん仕事をし続けています(日本に帰ってきたときの最初の受け入れが玄田さんと良かったです)。以上の方々には、心より特別な感謝をいたします。そのほか、森島龍司さん、黒澤耕介さん、末次竜さん、鎌田俊一さん、北里宏平さん、浦川聖太郎さん、岡本尚也さん、角和樹さんに感謝の念に堪えません。

参考文献

- [1] Chappaz, L. et al., 2013, *Astrobiology* 13 (10), 963.
- [2] Ramsley, K. R. and Head, J. W., 2013, *Planetary and Space Science* 87, 115.
- [3] Patel, M. et al., 2018, ESA contract no. 4000112742/14/NL/HB.
- [4] Summers, D., 2017, *SterLim-Ph2-TAS-TN21*.
- [5] Fujita, K. et al., 2019, *Life Sciences in Space Research* 23, 73.
- [6] Kurosawa, K. et al., 2019, *Life Sciences in Space Research* 23, 85.
- [7] Hyodo, R. et al., 2019, *Scientific Reports* 9, 19833.
- [8] Beaty, D. W. et al., 2019, *Meteorit. Planet. Sci.* 54, S3.
- [9] Nyquist et al., 2001, *Space Sci. Rev.* 96, 105.
- [10] Eigenbrode et al., 2018, *Science* 360, 1096.
- [11] Hyodo, R. and Usui, T., 2021, *Science* 373, 742.
- [12] Drazkowska, J. et al., 2022, arXiv:2203.09759.
- [13] Guillot, T. et al., 2022, arXiv:2205.04100.
- [14] Pirani, S. et al., 2019, *A&A* 623, A169.
- [15] Zhang, Z. et al., 2017, *Icarus* 294, 14.
- [16] Iess, L. et al., 2019, *Science* 364, 6445.
- [17] Salo, H. et al., 2018, in *Planetary Ring Systems* (Cambridge University Press), 434.
- [18] Charnoz, S. et al., 2010, *Nature* 465, 752.
- [19] Crida, A. and Charnoz, S., 2012, *Science* 338, 1196.
- [20] Hyodo, R. and Ohtsuki, K., 2015, *Nature Geoscience* 8, 686.
- [21] Hyodo, R. et al., 2015, *ApJ* 799, 40.
- [22] Canup, R. M., 2010, *Nature* 468, 943.
- [23] Hyodo, R. et al., 2017, *Icarus* 282, 195.
- [24] Cuk, M. et al., 2016, *Astrophys. J.* 820, 97.
- [25] Wisdom, J. et al., 2022, *Science* 377, 6612.
- [26] Horanyi, M. et al., 2009, in *Saturn from Cassini-Huygens* (Springer Netherlands, Dordrecht), 511.
- [27] Tiscareno, M. et al., 2019, *Science* 364, 6445.
- [28] O'Donoghue, J. et al., 2019, *Icarus* 322, 251.
- [29] Cuzzi, J. N. et al., *Icarus* 309, 363.
- [30] Takeda, T. and Ida, S., 2001, *ApJ* 540, 514.
- [31] Hsu, H.-W. et al., 2018, *Science* 362, eaat3185.
- [32] Waite, J. H. et al., 2017, *Science* 356, 155.
- [33] Hyodo, R. and Charnoz, S., 2017, *AJ* 154, 34.
- [34] Crida, A. et al., 2019, *Nature Astronomy* 3, 967.
- [35] Ozaki, N. et al., 2022, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 45 (8), 1496.
- [36] Hyodo, R. et al., 2019, *A&A* 629, A90.
- [37] Hyodo, R. et al., 2021, *A&A* 646, A14.
- [38] Hyodo, R. et al., 2021, *A&A* 645, L9.
- [39] Hyodo, R. et al., 2022, *A&A* 660, A117.
- [40] Hyodo, R. and Genda, H., 2020, *ApJ* 898, 30.

- [41] Hyodo, R. and Genda, H., 2021, ApJ 913, 77.
- [42] Hyodo, R. et al., 2021, Icarus 354, 114064.
- [43] Hyodo, R. et al., 2016, ApJL 828, L8.
- [44] Hyodo, R. et al., 2017, ApJ 845, 125.
- [45] Hyodo, R. et al., 2017, ApJ 851, 122.
- [46] Hyodo, R. et al., 2018, ApJ 860, 150.
- [47] Hyodo, R. and Genda, H., 2018, ApJL 856, L36.

著者紹介

兵頭 龍樹



JAXA宇宙科学研究所 国際トップヤングフェロー (ITYF)。惑星形成論および惑星探査を専門とし、JAXA内部から積極的に次世代の惑星探査ミッションの構築を行なっている。ESA・NASA・JAXAの3機関の探査計画に参画。Cassini, Hayabusa2, BepiColombo, MMX, 次世代サンプルリターン計画, OPENS (日本初の外惑星探査計画) などに参画している。