

遊



日本惑星科学会誌

Planetary
People 1

March 2023 vol32 no

星

人

- 2021年度
最優秀研究者賞受賞記念論文
- フロンティアセミナー：
宇宙での生命の起源
- 一番星へ行こう！
4年に一度のTIRリセット
- 他の惑星や衛星の地質年代の大区分

日本惑星科学会誌「遊・星・人」投稿規定

日本惑星科学会

1. 投稿可能な記事

- ①学会誌に投稿できる記事内容は、
 - (a) 原著論文：惑星科学に関する研究のオリジナルな報告
 - (b) 解説論文：専門外の人にも分かりやすく解説した研究成果の総説や論説
 - (c) 解説記事：広く会員の関心をひく事柄についての解説
 - (d) 報告記事：学科、研究所、海外機関等の紹介、国内外の研究会の報告、New Face (博士号取得者の自己紹介)、インタビュー記事
 - (e) 情報記事：各種の情報記事
 - (f) エッセイ：上記の形式にとらわれず、惑星科学に関する話題を論じた文章など、広く会員の知的好奇心をみたすもの。
- ②投稿記事の長さについてはとくに制限をもうけない。ただし、標準的には上記 (a)～(c) については6～8ページ(1ページ2000字とし、タイトル、300字程度の概要、図表を含めたページ数)、(d) については4～6ページ、(e)、(f) は1ページとする。

2. 投稿資格者

日本惑星科学会会員及び編集委員会が適当と認めた者。

3. 投稿原稿及びその送付

- ①原則として、投稿原稿はワープロなどにより電子的に作成されたものであること。
また、原稿のファイル形式については「学会誌原稿作成の手引」に従うこと。
- ②投稿に際しては、原稿を日本惑星科学会編集専門委員会委員長宛に送付すること。(連絡先は「学会誌原稿作成の手引」参照。) 送付方法は、E-mail による送付が望ましい。但し、プリントアウトした原稿2部の郵送による送付も可とする。なお郵送された原稿は原則として返却しない。
- ③編集委員会が原稿を受領すれば、その日を受領日として、受領した旨投稿者に通知される。

4. 査読及びその後の取扱い

- ①投稿原稿は編集専門委員長が受領した後、原著論文や解説論文または編集専門委員会が必要と認めた記事については査読者が選定され査読に付される。

- ②査読終了後、査読者の意見を参考に編集専門委員会が掲載の可否を決定する。その際編集専門委員会は投稿者に論文の修正を求められることができる。
- ③査読に付されない記事についても、編集専門委員会が掲載の可否を決定し、必要があれば投稿者に修正を求められることができる。
- ④掲載が決定すれば直ちにその旨投稿者に通知される。
- ⑤編集専門委員会の求める修正が完了した最終稿は、WORD、PDF、テキストファイル、いずれかのファイル形式にて、E-mail などにより編集幹事宛に送付すること。(図表については、「学会誌原稿作成の手引」参照)
- ⑥査読に付された掲載記事については、査読を経た旨記事内に記載される (vol.24, no.3から適用)。

5. 校正

校正は投稿者の責任において行う、また、校正は原則として誤植の訂正に限る。

6. 別刷り

論文の PDF ファイルを提供する。

7. 著作権

投稿された記事の著作権は、会誌に掲載された時点で、著者から日本惑星科学会に移転されるものとする。

8. 倫理規定

学会誌に掲載される全ての記事は、「遊星人の記事掲載にあたっての倫理規定」について原稿投稿時に念書を提出し編集専門委員会に了承されなければならない(念書は投稿原稿送り状に記載)。

9. 投稿料・出版費

原則として無料。

ただし、カラーページの印刷を希望する場合は、著者が印刷費を負担する。なお、著者が希望し、かつ編集委員会が認めたものについては、印刷費用を学会が負担する。カラー印刷の希望が無い場合、カラーの図は白黒印刷される。電子版は費用負担無しでカラーの図を掲載する。

日本惑星科学会誌 遊・星・人
第32巻 第1号
目次

巻頭言 竝木 則行	3
<hr/>	
「2021年度最優秀研究者賞受賞記念論文」 惑星形成理論×惑星探査に関するある取り組み 兵頭 龍樹	4
「フロンティアセミナー・テキスト」宇宙での生命の起源, 進化, 伝播および探査 第1回 地球科学からわかる有機化合物の起源 山岸 明彦	16
<hr/>	
一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その53 ～4年に一度のあかつきTIリセット～ 安藤 紘基, 山崎 敦, 佐藤 毅彦	35
エッセイ:他の惑星や衛星の地質年代の大区分は「代」ではなく「紀」 山路 敦	38
<hr/>	
2022年度日本惑星科学会 秋季講演会 開催報告 百瀬 宗武	40
「天体の衝突物理の解明 (XVIII)～表層粒子から探る太陽系天体の進化～」参加報告 辰馬 未沙子	43
太陽系天体若手研究会2022 (SSBW2022) 開催報告 豊川 広晴, 荒木 亮太郎, 池谷 蓮, 于 賢洋, 菖蒲迫 健介, 鈴木 雄大, 野崎 舜介, 他2名	48
New Faces 辰馬 未沙子, 金丸 仁明	54
JSPS Information	59

Contents

Preface	N. Namiki	3
<hr/>		
Planet formation theory × Planetary exploration	R. Hyodo	4
Origin, evolution, distribution and exploration of life in space Part I. The origin of organic compounds revealed by geoscience	A. Yamagishi	16
<hr/>		
Road to the first star: Venus orbiter from Japan (53) - Akatsuki TI reset held once in four years -	H. Ando, A. Yamazaki, T. Satoh	35
Not ‘erathems’ but ‘systems:’ Geologic time scales of planetary bodies	A. Yamaji	38
<hr/>		
Report on the 2022 autumn meeting of the Japanese Society for Planetary Sciences	M. Momose	40
Report on “18th workshop on collisional physics of planetary bodies”	M. Tatsuuma	43
Report of solar system bodies workshop for youngsters in 2022	K. Toyokawa, R. Araki, R. Ikeya, K. U, K. Shobuzako, Y. Suzuki, S. Nozaki, and 2 authors	48
New Faces	M. Tatsuuma, M. Kanamaru	54
JSPS Information		59

巻頭言

日本惑星科学会の第17期運営委員会を代表して挨拶します。会長の竝木則行です。この役目に就いてまだ一月も経っていませんが、会長職に紐づいた仕事が既にぞろぞろと始まって、先が思いやられます。流れに身を任せて、大過なく2年間に耐えることも考えられなくはないですが、一生に一度の役目ですので(...のはずですので)、自分らしい課題に取り組んでみようと考えました。それは、他の学会やコミュニティとの連携を深めて自由に議論を戦わせる場を作ることです。

会長が先頭に立って働き始めると、他の運営委員、特に副会長と総務専門委員会が迷惑します。教授が張り切ると助教が振り回されるとか、政治家が出しゃばると五輪組織委員会が尻拭いに走り回るとかというパターンです。自分自身もそういう苦勞を重ねてきていて、『申し訳ない』と思うのですが、年齢を重ねると頭頂葉が衰えるのか自制心が働かなくなります。前頭葉が弱って思考力と判断力が落ちているのかも知れません。取り敢えず、中村昭子副会長、今村剛副会長、保井総務専門委員長にはごめんなさいです。先に謝ったので、もう自由にやらせて貰えましょう。

私は惑星探査の仕事をすることが多くて、どうしても「将来、大型の惑星探査を実現するためには？」みたいな事を考えてしまいます。月のアルテミス計画や、日本独自の火星探査などです。真面目に考えると、これらの大型探査は惑星科学会が総力をあげて取り組んでも成し遂げられるのかわからないくらい難しいミッションです。ましてや、火星衛星探査(MMX)や次世代小天体サンプルリターン等などと同時並行で開発するのは至難です。日本が独自の火星探査を実現するためには、大型月探査・開発に取り組んでいくためには、従来の宇宙科学分野の枠組みを外した大連携が必要であることは自明であるように私には思われます。

そういう考えは何も新しいアイデアではありません。これまでも多くの方々が、SGEPSSや天文学会、日本航空宇宙学会、宇宙生物科学会 etc.と研究交流を図ってこられました。それを学会間の活動にしようということです。もちろん、相手あつての話ですから、一筋縄には行かないでしょう。障害はあるかも知れませんが、その先に広がる可能性に私はワクワクしています。一緒に取り組んでくれるお友達を募集中です

竝木 則行(国立天文台)

「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)主導で行うものなくなり、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。巨人の肩の上に乗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

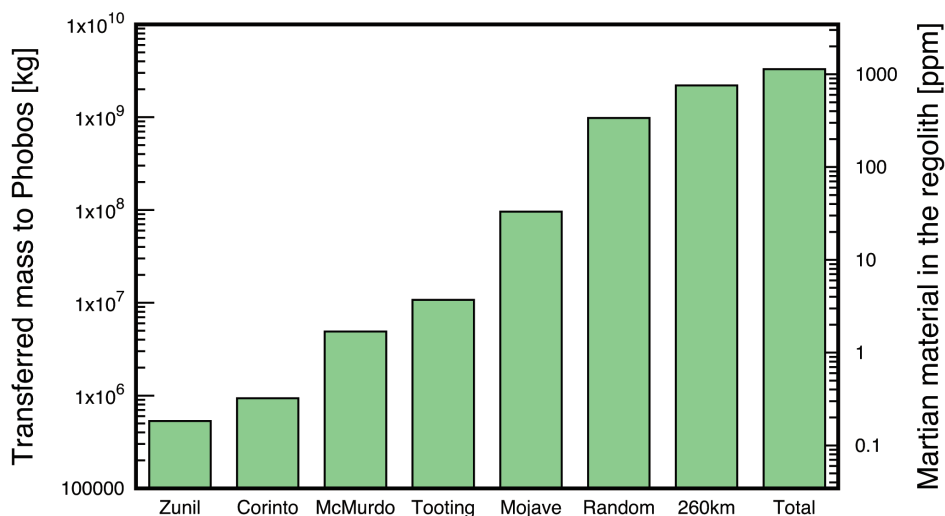


図2: フォボスへ輸送される火星物質質量(©R. Hyodo). 「Zunil」「Corinto」「McMurdo」「Tooting」「Mojave」は、火星表面上に存在するクレータの名前で、最近10万年以内に形成された直径10 km以上の新しいクレータからの寄与分です。「Random」は、最近5億年間に火星に起こった直径100 km以下のクレータを作る無数の小天体衝突によって輸送される総量を示しています。「260 km」は、最近5億年間で少なくとも一度は起こると考えられる直径260 kmのクレータを作る衝突によって輸送される量です。「Total」は、これらの合計値です。右の縦軸で表される量は、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計画で得られう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うるということです [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うる火星表層物質が、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になります。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サンプルに含まれうる火星表層物質は、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。

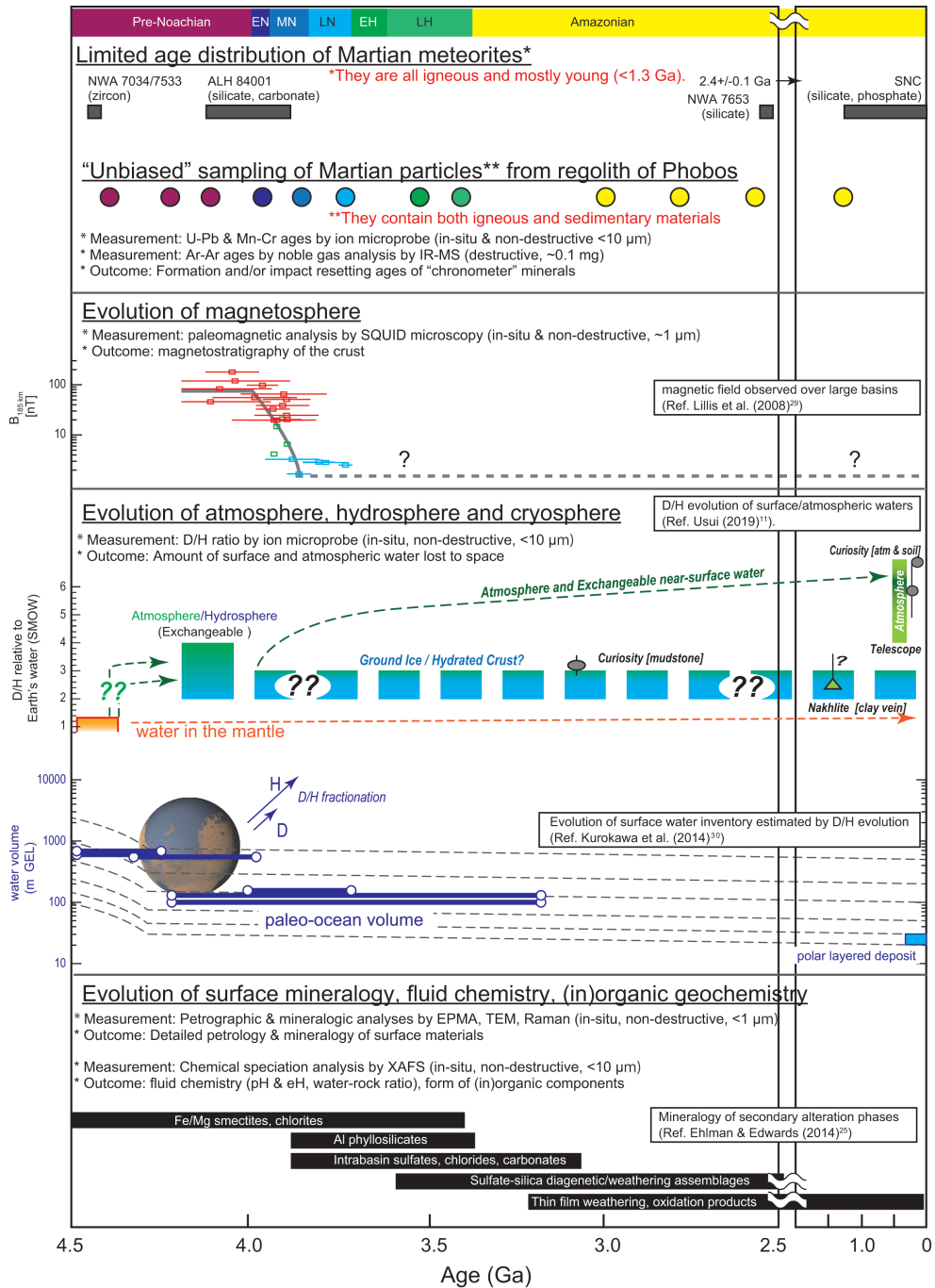


図3: 異なる火星物質サンプル(火星隕石とフォボス表層に存在すると期待される火星表層物質)を比較した概念図。現在発見されている火星隕石は、ある時代の産物に限定されている。フォボス表層から得られる火星表層物質は、さまざまな時代における多様な物質であると期待される(図中の上)。このような多様なサンプルを分析することで、火星の磁気活動、水・氷圏のD/H比、表層水インベントリ、鉱物などの進化の理解を深めることが可能になると期待している(図中の下)。Hyodo et al. 2019 [7]の図を改変。

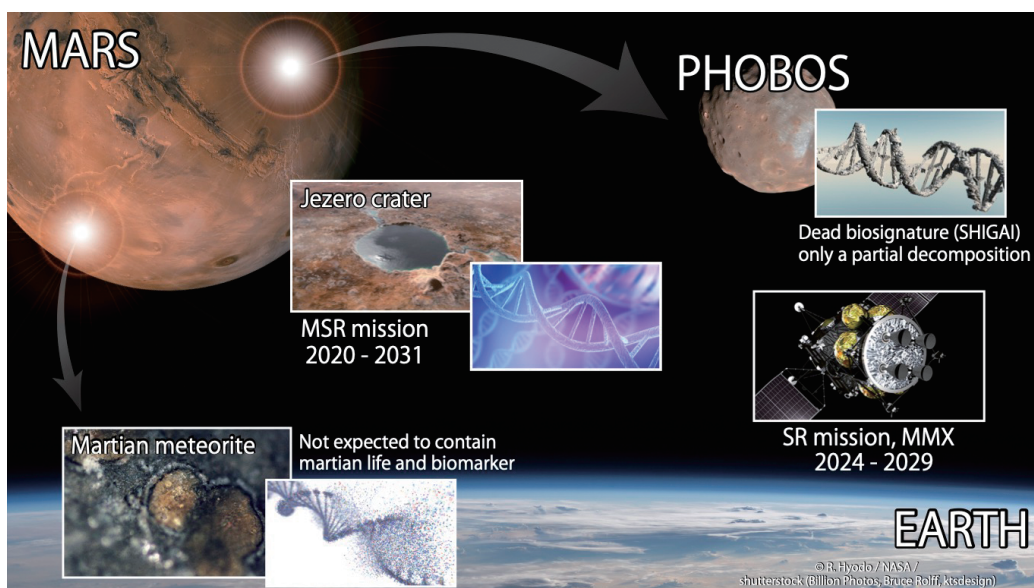


図4: 火星隕石, Jezeroクレータ, フォボス表層を比較した概念図(©R. Hyodo). 火星隕石は, その放出過程および地球大気への突入過程において高圧環境 and/or 高温環境を経験することで, 火星生命に関する情報が存在したとしても破壊されると考えられる. MMX計画では, 火星生命の情報がSHIGAIとして存在する可能性がある [11]. MSR計画では, Jezeroクレータに限られるが, そこを詳細に調べることで, もし存在すれば生きた生命までも発見できる可能性を秘めている [8].

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層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].

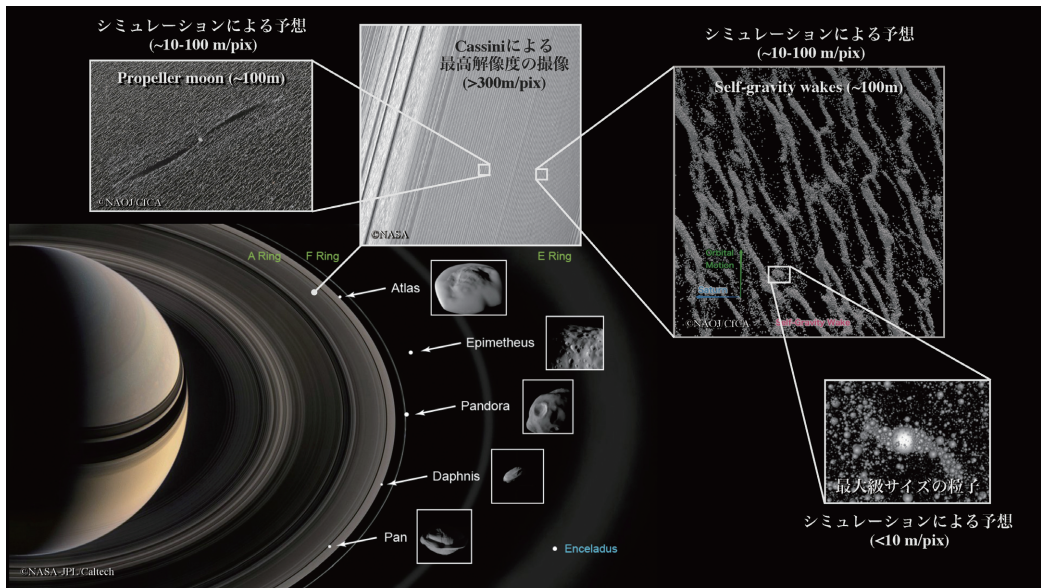


図5: 土星リングと衛星系(©R. Hyodo). 現在までに達成されている土星リングの撮像は、300 m/pixel 以上の解像度に留まっている。理論やシミュレーションから、 <100 m/pixelの解像度でself-gravity wakes や propeller 構造を形成する小衛星が見えてくると期待されている。もし <10 m/pixelでリングを解像することができた場合は、最大級サイズのリング粒子一粒が見えてくると期待されている。

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れるか」「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、学生の頃から飲みに連れて行ってくださり、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。

「フロンティアセミナー・テキスト」 宇宙での生命の起源, 進化, 伝播および探査 第1回 地球科学からわかる有機化合物の起源

山岸明彦¹

2022年12月19日受領, 査読を経て2023年1月16日受理

(要旨) 地層には, 地球の歴史が記録されている. 46億年前に誕生した地球の, 38億年前の地層には炭素同位体化石として生命の痕跡が残っている. 35億年前の地層には最古の細胞微化石が残されている. この時期の海底熱水活動の証拠も残されている. 海底熱水地帯では, 海水が地下の高温の玄武岩と反応して還元型の成分を含む熱水となる. この熱水と低温海水との反応に依存した生態系が熱水地帯周辺に形成される. 35~30億年前の微化石がどのような生物かということが, 当時の環境との関連で検討されている. 地球生命を構成する元素は, 宇宙に由来する. それらが, どのような経路で生命に利用されるに至ったか, 有機化合物の起源とともに解説する. 有機化合物は宇宙空間で合成され, 地球にやってきた可能性が高い.

1. はじめに

本連載は, 2019年2月18日-19日北海道大学で開催された惑星科学フロンティアセミナー2018「生命の起源: 地球上の生き物はどこでどのように誕生したか」の聴講ノートを元に, その後の新しい知見も含めて加筆修正した. 聴講ノートを作成した, 千葉紗登子氏, オン碧氏に感謝する.

本稿は, 三回に分けて連載される予定である. 第一回目は, 地球に残されている生命の痕跡と, 地球化学や宇宙科学から明らかになりつつある有機化合物の起源を解説する. 第二回目では, 生命科学からわかる生命の起源と進化について解説する. 特にRNAワールドや, 遺伝子からわかる生命の進化, ダーウィン進化等に関して解説する. 第三回目では, 地球大気圏での微生物採集, 地球低軌道での微生物・有機化合物実験, 火星での生命探査について解説する.

本連載で解説する分野は極めて広いが, 周辺分野に関しては概略の記載で済まし, 関連する総説を紹介するようにした. ただし, 重要な文献に関しては書誌情報を載せるようにしている. また, 講演では質疑応答が

あったが, その記録も読者の理解を助ける可能性が高いと判断して残した.

2. 生命の進化: 地層に隠された証拠

46億年前に地球が誕生してから今日にいたるまで, 様々な地学的証拠が残されている. 地学的証拠が生命の進化を考えるうえでの重要な基準年代を与える. ただし, 地球形成初期に関する地学的証拠はそれほど多くない. 海の形成時期に関してはGenda [1], 生命初期の炭素同位体化石に関しては掛川 [2], 初期の細胞化石に関してはSugitani [3]が参考になる.

2.1 地殻形成の歴史: 岩石の物質解析

地球上に残された最古の鉱物は, ジャックヒルズ (オーストラリア) で発見されたジルコンである. ジルコン ($ZrSiO_4$) はジルコニウムのケイ酸塩で, 1mmにも満たない大きさのジルコン結晶が多数収集されている. それらの結晶の鉛同位体分析から, 最古の年代を示したジルコンは今から45~44億年前に形成されたと推定されている. ジルコンはマグマと水との相互作用で形成される. ジルコン中の酸素同位体比 $\delta^{18}O$ から, 45~44億年前に海と大陸地殻が存在していたのではないかと推定

1. 東京薬科大学, 生命科学部
yamagish@toyaku.ac.jp

表1: 世界に知られる古い岩石(文献[5]より改変)。

年代	産出地	岩石名
40億年	カナダ・北西部	アカスタ片麻岩
38億年	グリーンランド・イスア	イスア緑色岩
	イスア・ゴッドハブ	アミツォーク片麻岩
37億年	シベリア・アルダン盾状地	片麻岩
	中国・河北省	グラニユライト
36億年	カナダ・ラブラドアー	片麻岩
34億年	オーストラリア・北西部	ビルバラ緑色岩

表2: 各地の太古岩石中の炭素¹³C/¹²C比と産状[2].

地域名	年代 億年前	$\delta^{13}\text{C}$ (%)	炭素の産状	コメント	
ジャックヒルズ (オーストラリア)	41	-24	ジルコン結晶中 (電子顕微鏡で確認)	炭素の混入時期 が不明	Bell, E. A. et al. (2015)
アキリア島 (グリーンランド)	38	-49 ~ -21	未確認	炭素の存在 未確認状態で分析	Mojzsis, S. J. et al. (1996)
イスア(1) (グリーンランド)	38~37	-35 ~ -12	未確認	炭素の存在 未確認状態で分析	Mojzsis, S. J. et al. (1996)
イスア(2) (グリーンランド)	37	-12 ~ -8	地下温泉脈中 (顕微鏡で確認)	37億年前の 非生物炭素	Van Zuilen, M. A. et al. (2002)
イスア(3) (グリーンランド)	38~37	-20 ~ -14	38~37億年前の堆積 岩中(顕微鏡で確認)	38~37億年前の 炭素	Rosing, M. T. (1999)
イスア(4) (グリーンランド)	38~37	-24 ~ -12	38~37億年前の堆積 岩中(顕微鏡で確認)	38~37億年前の 炭素	Ohtomo, Y. et al. (2014)

されている[4].

岩塊としての岩石が残っているのは40億年以降に限定される(表1). 大陸地殻の形成は45~44億年前と推定されているので[4], 40億年前以前の岩石は浸食されたか、後期重爆撃で失われたか、理由は不明であるが、現時点では大きな岩塊としては残っていない。

38億年前の岩石の中には枕状溶岩および、堆積岩がある。これらの岩石は38億年前に海があった証拠となる[1].

2.2 最古の生命の証拠

炭素には¹³Cと¹²Cの安定同位体が存在し、炭素同位体比分析を行うことで、炭素の起源をある程度明らかにすることができる[6]. 光合成あるいは化学合成によって、二酸化炭素が同化される際の酵素反応では、¹³Cに比べて¹²Cを効率良く取り込むため、炭酸固定された有

機化合物の¹³C/¹²Cは環境中の二酸化炭素に比べて低くなる。¹³C/¹²Cは基準試料との差 $\delta^{13}\text{C}$ として測定される。 $\delta^{13}\text{C}$ の基準としてアメリカ・サウスカロライナ州のPee Dee 層から産出するベレムナイト(PDB: Pee Dee Belemnite)が用いられる。

植物によって炭酸固定に用いられる酵素が光合成の種類C3植物、C4植物、CAM植物によって異なる。その結果、植物の光合成形式によって $\delta^{13}\text{C}$ の値が多少異なるが、 $\delta^{13}\text{C}$ は-10‰(パーミル)から-35‰となる(図1)。化学合成細菌でも植物と同じRubiscoを用いるタイプはC3植物に似た $\delta^{13}\text{C}$ の値になる。数値はPDBに対する数値であるが、同じ時代の炭酸塩と比較することにより、測定された炭素が光合成等の二酸化炭素固定反応であるかどうかの判断材料とすることができる[2].

表2はこれまでに報告された、37億年前までの地層中の炭素同位体分析結果である[2]. ジャックヒルズの

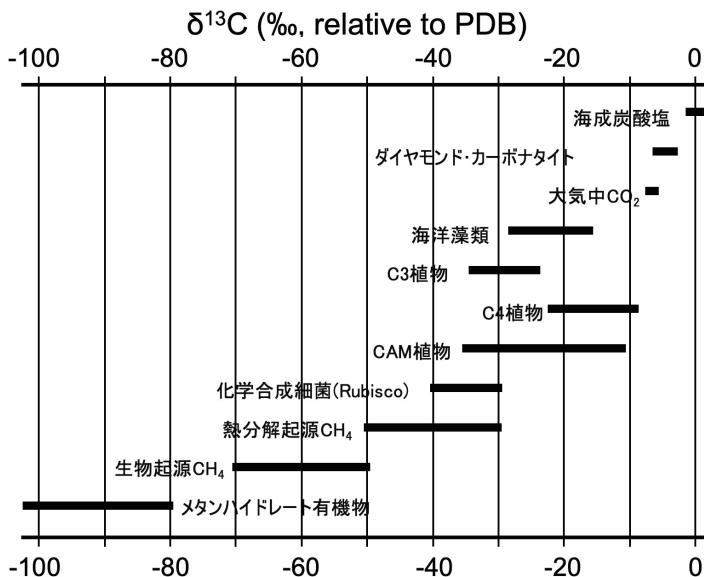


図1: 様々な起源の炭素の¹³C/¹²C同位体比. Naraoka [6].

表3: ガラパゴス海嶺周辺のATP, A_T, GTP : ATP [9].

Sample	ATP (ng/liter)	A _T (ng/liter)	GTP: ATP
Surface sea water ^a (50m)	130 ± 32	340 ± 112	0.16 ± 0.08
Deep seawater ^a (2400 m)	1.7 ± 0.3	3.4 ± 0.3	0.075
Garden of Eden vent ^a (2500m)	491 ± 151	1495 ± 553	0.86 ± 0.17
Garden of Eden vent ^b (2500m)	1943 ± 1143	4248 ± 2031	0.89 ± 0.35

Note: ^a ろ液. ^b 沈殿粒子.

41億年前のジルコン結晶中炭素の同位体比が報告されているが、炭素の混入年代が不明である[2]. Mojzsisら [7] によって、アキリア島、イスアの岩石中炭素の同位体分析が行われ、生命の痕跡を示すデータが得られていたがその産状は不明であった。その後、イスア堆積岩中炭素の同位体分析が行われ、その同位体比は生命の痕跡である可能性を示した(表1. イスア(3, 4)). 炭素の構造を顕微鏡で観察した結果、構造が不規則であることも炭素の起源が生命である可能性を支持している。すなわち、炭素同位体組成、炭素が堆積岩中にあること、さらに炭素の構造が不規則であることから、このイスア堆積岩中炭素は生命の痕跡である可能性が高い。つまり今から38~37億年前には生命が誕生していた可能性が高い [2].

2.3 最古の細胞化石

最古の細胞微化石はオーストラリア、ビルバラ地方の35億年前の岩石中に発見された[8]. 微化石は細長い数珠状でその幅は5μm程度であった。通常、微生物細胞の直径は1μm以下の大きさなので、細胞の直径が一般の微生物としては大きい。この微化石付近には、ストロマトライトが発見されて、この微化石はシアノバクテリアではないかと推測された。ストロマトライトとはドーム状の縞状模様がある岩石で、シアノバクテリアの関与でできるものが知られている。水中でシアノバクテリアと他の微生物の共生体が粘液を出し、周りの砂を固めることでドーム状となる。夏に成長して冬に成長が停滞するため、縞模様ができる。またシアノバクテリアは光

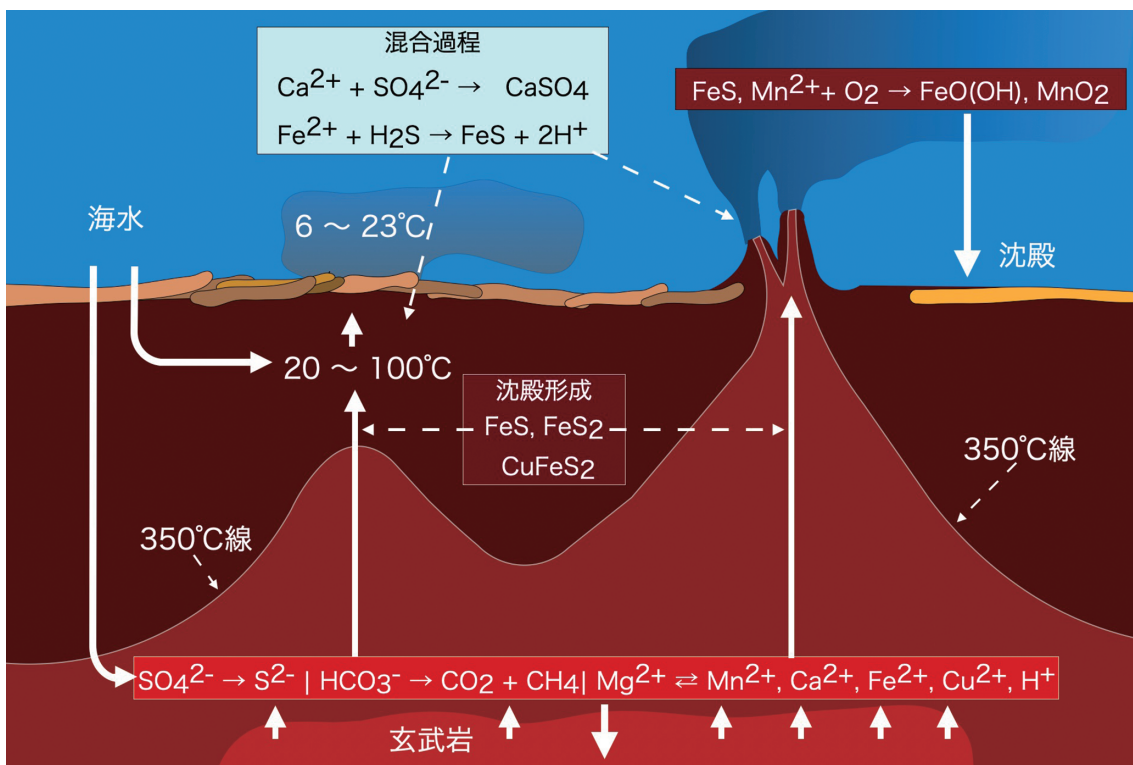


図2: 海底熱水噴出孔付近において推定されている化学反応モデル. Jannasch [11]より改変.

に向かって成長するため、ドーム状の形状となる。シアノバクテリアが最古の細胞化石生物なのだろうか。この最古の化石はシアノバクテリアでは無い可能性が高い。

2.4 深海熱水噴出孔付近の生物群集

最古の細胞化石がどのような生物なのか、初期生命に関して解説する前に、深海熱水噴出孔付近の生態系と化学合成細菌に関して解説する。

水深200m以下の深海にはほとんど生物は存在せず、砂漠同様のバイオマスである。動物、植物、微生物を含む全ての生物は、ATP(アデノシン三リン酸)をエネルギー利用に用いている。生物は有機化合物から取り出したエネルギーをATPに変換し、ATPの脱リン酸化で得られるエネルギーを生命活動に利用している。したがってATPは、生きている生物量を反映する。またA_Tは、ATP、ADP(アデノシン二リン酸)とAMP(アデノシン一リン酸)の合計で、生育が盛んな生物と盛んでない生物、あるいは死んでからまもない状態の生物量の合計を反映している。GTPは増殖中の微生物細胞内に多

いことがわかっており、GTP:ATPは微生物の増殖を反映している。

表3はガラパゴス海嶺周辺のATP、A_T、GTP:ATPを測定した結果である[9]。深海200m以下は光が届かず生物がほとんどいない。表層海水と比べて、2400mの深海海水はATPおよびA_Tが顕著に少ない。つまり深海には生物体がほとんど存在しない。Garden of Edenとよばれる熱水地帯では、周辺部の深海海水と比べてATPおよびA_Tが顕著に増加していた。これは、この地点に熱水等のエネルギー源があり、微生物やその残骸があることを示している。なお、GTPは増殖中の微生物細胞内に多いことがわかっており、この数値が高いことから、熱水地帯で微生物が増殖していることもわかる。

深海底でも熱水地帯では、熱帯雨林に匹敵する20kg/m²のバイオマスがあることが報告された[10]。熱水地帯には、化学合成細菌による生態系があり、チューブワーム、シンカイヒバリガイ、甲殻類、ゴカイなどが生息している。この発見により、光合成生産がなく

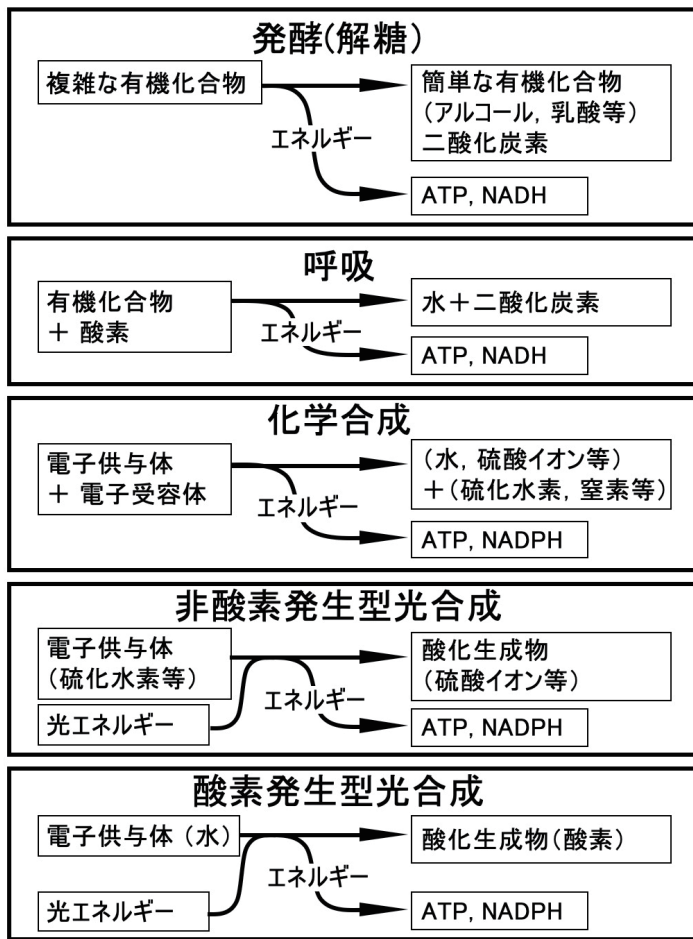


図3: 様々な代謝系の酸化還元反応とATP, NAD(P)H生産。発酵では有機化合物を、より低分子量の有機化合物(アルコールや乳酸など)や二酸化炭素に分解する時のエネルギーでATPとNADHを得る。呼吸では、有機化合物と酸素の反応によってATPとNADHを得る。化学合成では、電子供与体と電子受容体の酸化還元反応でATPとNADPHを得る。化学反応の種類に応じて、水や硫酸、硫化水素や窒素などの反応生成物を生じる。光合成では、光エネルギーを用いて、ATPを合成すると共に、電子供与体から電子と水素を取り出してNADPHを得る。酸素発生型光合成では水を、非酸素発生型光合成では硫化水素、水素あるいは低分子量の有機化合物を電子供与体として用いる。その結果、電子供与体から酸素や硫酸等が生成する。光合成や化学合成ではATPとNADPHを用いて二酸化炭素を還元して糖を合成する。

でも、熱水地帯で化学合成細菌による生態系が成立し得ることが明らかとなった[10]。これらの環境に生息している大型生物は、化学合成細菌と何らかの関係(共生、捕食等)を持って生育している。

2.5 海底熱水地帯地下および海中での化学反応

図2は海底熱水地帯地下でおきている反応を図示したものである[11]。海水中にはナトリウムイオンや塩素イオンの他、硫酸イオン、マグネシウムイオンが含まれて

いる。海底面下深部まで浸透した海水は高温の玄武岩と反応する。玄武岩との反応で、硫酸イオンは硫化物イオンに、マグネシウムイオンは、マンガン、カルシウム、鉄、銅、等の金属イオンや水素イオンと交換する。炭酸水素イオンは二酸化炭素やメタンに変換される。こうして、海水とは組成の変わった高温熱水が海底面に向かって上昇する。熱水が上昇する過程で温度が下がると、FeS、FeS₂、CuFeS₂等の沈殿を形成する。また、熱水が海底面下あるいはチムニー中で低温海水と混合する過程でCaSO₄やFeSの沈殿を形成する。熱水が海水

中に噴出して海水と混合すると、 $\text{FeO}(\text{OH})$ や MnO_2 が形成されて沈殿する。熱水が海底面下や海水中で混合する過程で希釈による温度の低下と沈殿形成が起きるが、それに加えて酸化還元反応が進行する。この酸化還元反応は化学的反応として進行するが、その一部は微生物の生育に利用される。

2.6 化学合成細菌

(1) 生物の代謝反応

海底熱水地帯の化学的非平衡状態から、微生物はどのようにエネルギーを取り出すのか。化学合成によるエネルギー獲得を、動物の呼吸や植物の光合成と比較しておく。なお、生化学反応での本質は反応前後でのギブス(自由)エネルギー差であるが、以下ではギブスエネルギー差を単にエネルギーと記述する。反応前後のギブスエネルギー差は、一般にエネルギーと言われる時の意味とほぼ同義である。必要があればエネルギーをギブスエネルギー差に読み替えて欲しい。

ヒトを含む動物(従属栄養生物)は、有機化合物からエネルギー(ATP)を取り出して、体の構成成分(有機化合物)を作り出している(図3)。酸素がある場合には従属栄養好気性生物は有機化合物と酸素の反応によってエネルギーを得る。まず、有機化合物から還元力として水素と電子をNADHに取り込む。NADHから電子伝達反応を介して酸素に電子を受け渡す反応過程でATPが合成される。NADHの水素は還元力が必要な生化学合成にも利用される。有機化合物と酸素との反応では、反応生成物として水と二酸化炭素が生成する。これは、呼吸と呼ばれる代謝過程である。

酸素が無い環境では、有機化合物を低分子量の有機化合物(アルコールや乳酸など)や二酸化炭素に分解することでATPとNADHを得る。この過程は発酵(あるいは解糖)と呼ばれる。

化学合成では、それぞれの生物種ごとに特定の化学物質の組み合わせからATPとNADHを得る(図3)。化学合成では還元型物質(H_2 , H_2S , Fe^{2+} 等:電子供与体)と酸化型物質(O_2 , SO_4^{2-} 等:電子受容体)の組み合わせが反応に使われる。この酸化還元反応の種類に応じて、水や硫酸、硫化水素や窒素などの反応生成物を生じる。化学合成ではそれらの酸化還元反応を行うことからATPとNADHを得る。得られたATPとNADHを用いて糖が合成される。なお、合成反応

に還元力を使う場合にはNADPHを、呼吸などの異化反応に還元力を使う場合にはNADHが使われる。NADPHとNADHは合成反応と異化反応で使い分けられている。

植物は、光エネルギーを用いてATPを合成すると共に、電子供与体である水から電子を引き抜くことで分解して O_2 を発生する(図3)。同時に水から引き抜いた電子と水素をNADPHとして受け取り還元力を得る。植物は、ATPとNADPHを用いて二酸化炭素を還元して糖を合成する。これは、酸素発生型の光合成と呼ばれる。

もう一つ別の光合成系として非酸素発生型の光合成がある(図3)。(光合成の詳細は第2回参照)。非酸素発生型光合成では、光エネルギーを用いてATPとNADPHを得るが、その時に電子供与体として水ではなく、硫化水素、水素あるいは低分子量の有機化合物を用いる。その結果、電子供与体は対応する酸化型の分子、硫酸や水等になる。非酸素発生型の光合成で、電子供与反応の結果できた化合物は化学合成の場合に似ているが、反応全体を見たときにエネルギーは低下せず、光エネルギーによって増加する。ATPとNADPHを用いて二酸化炭素を還元して糖を合成する点は、酸素発生型光合成や化学合成と同じである。

(2) 化学合成反応

化学合成反応でエネルギーを獲得する際には、電子供与体と電子受容体との間で進行する酸化還元反応を利用する。厳密には、電子供与体と電子受容体の反応後と、反応前のギブスエネルギーの差を利用する。様々な電子供与体と電子受容体の組み合わせを利用する様々な化学合成細菌および化学合成古細菌が知られている。個々の菌は細菌であったり古細菌であったりするが、化学合成細菌と化学合成古細菌の両方とも化学合成という観点では同じなので、区別をつけない場合には単に“菌”と記載しておく。その化学合成菌に利用される酸化還元反応の例は表4に、それらの反応を利用する化学合成菌が熱水地帯で見つかっているかどうか表5にまとめられている。主に電子受容体によって決まる反応の種類と電子供与体名で化学合成菌を名付けるが、メタンを生成する菌をメタン菌、酢酸を生成する菌を酢酸菌、窒素を生成する菌を脱窒菌とよぶ。

これらの細菌および古細菌は、電子伝達反応によってエネルギーを得ている。従属栄養微生物の酸素呼吸

表4: 化学合成菌が利用可能な反応の種類とその反応[11].

反応の種類	化学反応式
メタン生成	$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
硫酸還元	$4\text{H}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$
メタン酸化鉄還元	$\text{CH}_4 + 4\text{FeO}_3 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{FeO}_2$
メタン酸化	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
硫黄酸化	$\text{H}_2\text{S} + 2\text{O}_2 = \text{H}_2\text{SO}_4$
水素酸化	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$

表5: 熱水噴出孔付近で発見された化学合成菌[11].

+: 存在が確認されている ++: 単離されている

電子供与体	電子受容体	化学合成菌	存在
$\text{S}^{2-}, \text{S}^0, \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	O_2	イオウ酸化菌	++
$\text{S}^{2-}, \text{S}^0, \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	NO_3^-	脱窒硫黄酸化菌	+
H_2	O_2	水素酸化菌	++
H_2	NO_3^-	脱窒水素酸化菌	-
H_2	$\text{S}^0, \text{SO}_4^{2-}$	イオウ硫酸還元菌	++
H_2	CO_2	メタン菌, 酢酸菌	++
$\text{NH}_4^+, \text{NO}_3^-$	O_2	硝化菌	+
$\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$	O_2	鉄酸化菌, マンガン酸化菌	++
CH_4	O_2	メタン酸化菌,	++
CO	O_2	一酸化炭素酸化菌	++

では、有機化合物から得られた還元力NADHを用いてATP合成を行う。NADHを電子供与体として、細胞膜上の電子伝達系を通して電子を酸素に受け渡す。電子伝達過程で水素イオン濃度勾配を細胞膜内外に形成する。細胞膜内外の水素イオン濃度勾配を利用して、ATP合成酵素(プロトンATPアーゼ)がADPとリン酸からATPを合成する。多くの化学合成細菌や化学合成古細菌も、電子伝達反応でできる水素イオン濃度勾配を利用して、ADPとリン酸からATPを合成している。得られたATPとNADPHによって必要な有機化合物を合成している。

(3) 化学反応理論計算との比較

酸化還元反応のギブスエネルギー差は、標準ギブスエネルギー差と酸化還元に関わる基質の濃度によって決まる。熱水中の電子供与体濃度と周辺海水の電子受容体濃度を考慮して、酸化還元反応から得られるギ

ブスエネルギーの計算結果が表6にまとめられている。

350℃の熱水は海底面で上昇する過程で、地下に浸透した低温海水と混合して徐々に温度を下げる。温度がまだ下がりきらない高温の段階で、二酸化炭素と水素からメタンを生成する反応と、硫酸イオンを水素で還元する硫酸還元反応が進行する。熱水が低温海水中に噴出されると、低温海水との混合過程で急速に温度が下がる。低温海水との混合過程で様々な電子供与体の酸化反応が進行する。様々な反応の中で硫化水素を電子供与体としたギブスエネルギーが、獲得可能なギブスエネルギーの大部分を占めている。

ただし、反応で得られるギブスエネルギーは熱水中の電子供与体濃度に依存している。通常、海底地殻を構成する玄武岩との熱水反応でできた熱水は、硫化水素を主成分として含んでいる。したがって反応で得られるギブスエネルギーの中で、硫化水素を電子供与体としたギブスエネルギーが大部分となる。一方、特殊な環

表6: 熱水地帯における反応から得られるギブスエネルギー(McCollom and Shock [12]より導出).

Electron donor	Conc. (mM)	Reaction	T (°C)	cal /kg vent fluid	Location
H ₂	1.7	methanogenesis	>40	<10	subsurface mixing zone
SO ₄ ²⁻	28	sulfate reduction	>40	<10	subsurface mixing zone
H ₂ S	7.3	oxidation	<40	760	plumes or diffuse mixing
Fe	1.7	oxidation	<40	<10	plumes or diffuse mixing
CH ₄	0.07	oxidation	<40	<10	plumes or diffuse mixing
Mn ²⁺	0.96	oxidation	<40	<10	plumes or diffuse mixing

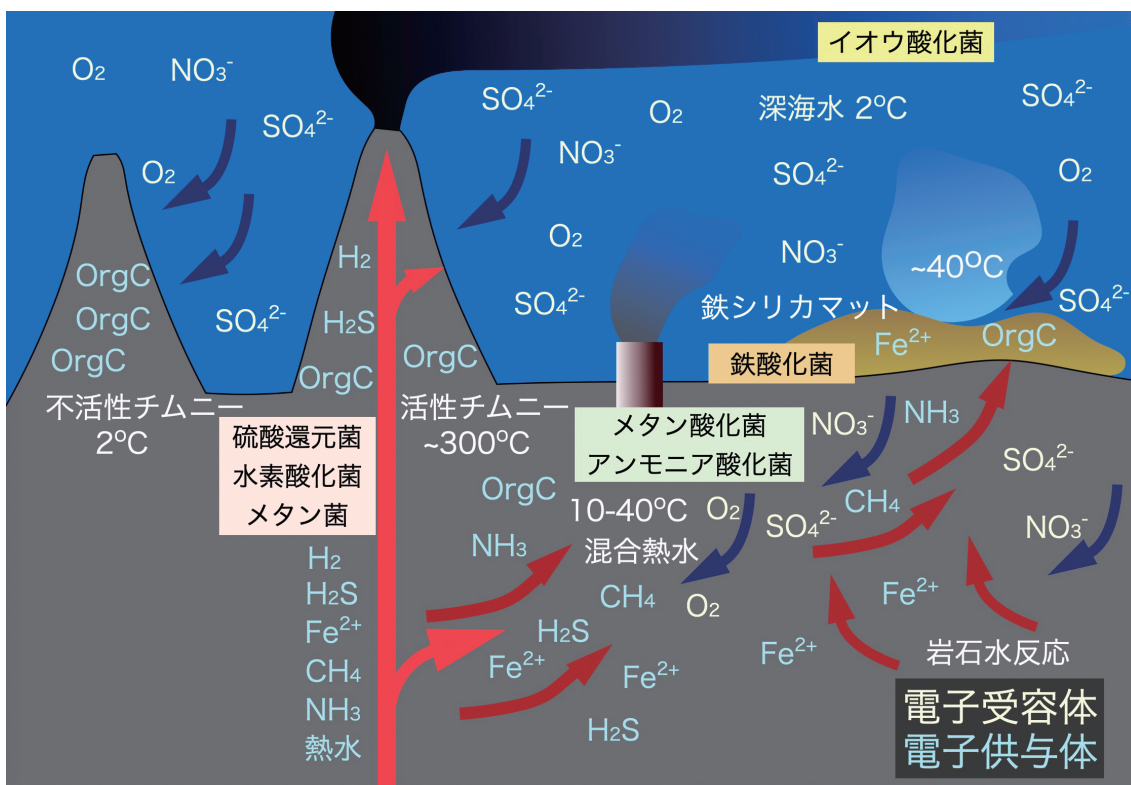


図4: 熱水系地下での電子受容体および電子供与体の流れと微生物群集. Katoら [13]より作製.

境ではマントル構成成分であるかんらん岩が海底面近くに露出している。その環境では水素やメタン濃度の高い熱水となり、水素やメタンに依存した反応から得られるギブスエネルギーが大きくなる。

(4) 熱水系の微生物群集

それでは、海底熱水地帯にはどのような微生物がどこにいるのか。海底熱水地帯から様々な試料が採集さ

れた。試料はチムニーや、チムニーから噴出した熱水、周辺海水、および海底掘削を行った掘削孔からの流出水で、それらの分析から以下の様な微生物種が確認された(図4) [13]。海底面下から上昇する高温熱水中には超好熱性や好熱性の硫酸還元菌、水素酸化菌やメタン菌が、海底面下で低温海水と混合した低温熱水中では生育温度が低いメタン酸化菌やアンモニア酸化菌が、熱水噴出孔周辺の海水では硫黄酸化菌が卓越して

いた。さらに熱水噴出孔周辺の鉄を含む沈殿物中には鉄酸化菌が見られた[13]。すなわち表6から推定される、酸化還元反応から想定される菌が温度に依存して実際に確認された。

2.7 35億年前の生物(最古の化石)は一体何なのか。

35~30億年前には多くの微化石が報告されている[8, 14, 15]。多くの現存原核生物細胞は直径1 μm 以下であるが、報告された微化石は数 μm を越える幅の細長い形状あるいは数珠状のものが多く、10 μm を越える大型の細胞をもつ真核生物が出現するのは、分子系統樹からは20億年前以降と推定されているので(第2回参照)、35~30億年前の大型細胞の微化石が真核生物とは考えにくい。

原核生物の中では、シアノバクテリア、非酸素発生型光合成細菌、化学合成細菌には直径数 μm を越える細長い細胞形状のものがある。化学合成細菌やシアノバクテリア、光合成細菌は電子伝達反応をおこなう複雑な膜系を細胞内に持っており、細胞が大きい。一方で、こうした独立栄養原核生物以外の原核生物、従属栄養原核生物は細胞内の複雑な膜系を持たず、細胞直径は小さい。細胞が大きい独立栄養原核生物が35~30億年前の微化石の候補となっている。

また、その微化石の産状から当時の環境を推定して、微化石がどのような生物であるかの推定が行われている。例えば、オーストラリア北西部ノースポールの地層の解析が行われた。ノースポールの地層は、熱水地帯に特有の地層であることがわかった。そこには地層を貫くシリカ岩脈が観察された。この地層は当時の深い海であった可能性が考えられる。するとそこは光が届かない環境なので、シアノバクテリアが生息するには不適であり、そこで発見された微化石は海底熱水付近の生物ではないかと推測された[16]。西オーストラリア北部、ピルバラ緑色岩体のシリカ岩脈内に微化石が発見された。これは地層の特徴を考慮してシアノバクテリアではなく、化学合成細菌であろうと推定された[14]。

現存の大型細胞を持つ化学合成細菌として *Beggiatoa* という硫黄酸化細菌が発見され、*Beggiatoa* が太古代の微化石の候補と提案された。しかし、*Beggiatoa* は硫黄酸化細菌であるが、硫黄酸化細菌は酸素を電子受容体として必要とする。35~30億

年前の酸素濃度は極めて低いので、硫黄酸化細菌が生育できるとは考えにくい。

一方、細胞の幅が5 μm の数珠状細胞をもつ硫酸還元菌が熱水噴出地帯で活動を停止したチムニー表面で見いだされた[17]。硫酸還元菌は電子受容体として硫酸を用いるので酸素は不要である。硫酸還元菌が35~30億年前の微化石の候補となる。

また、非酸素発生型光合成細菌と推定される34億年前の微化石も報告された[15]。炭素同位体比は-35~-20‰で生物由来の炭素と推定された。この微化石は幅が1~1.5 μm 程度の細長い形状で、同じ場所でバイオマツ(微生物が密集した微生物の固まり)が波によって変形したと推定される形状の化石も見つかった。つまり生育場所は比較的浅い波打ち際で、太陽光が当たる場所であろうと推定された。したがって、この化石は光合成生物の可能性がある。当時まだ地球に酸素はなかったことと、付近に菱鉄鉱(siderite: FeCO_3 (炭酸鉄(II)))の沈殿があったことを考慮して、この化石は非酸素発生型光合成細菌であろうと推定された[15]。非酸素発生型光合成細菌は、前述の様に水の代わりに硫化水素や水素、有機化合物を電子供与体とする光合成細菌である。

さらに、当時メタン菌がいた可能性も報告されている。熱水沈殿物中の液体包有物内にメタンが微量に含まれていることが発見された。同位体分析により、メタンが生物由来であることが確認でき、35億年前にメタン菌が存在していたことが推定された[18]。

2.8 第2節のまとめ

地球が46億年前に誕生してから45~38億年前に海ができていた可能性がある。38億年前には炭素同位体から炭酸固定を行う生物が誕生した可能性が高い。35~30億年前の地球には熱水活動があった。35~30億年前の生物細胞の微化石も見つかっている。ただし、微化石がどのような生物かという複数の可能性が提案されている。おそらく35~30億年前には化学合成細菌が存在していたと思われる。その種類として硫黄酸化菌や硫酸還元菌が提案されている。メタン菌や非酸素発生型光合成細菌もいた可能性が高い。

生物がエネルギーを得る手段として、発酵(解糖)、呼吸、化学合成、非酸素発生型光合成、酸素発生型光合成がある。光合成生物として、水素源および電子源とし

て水を使う酸素発生型光合成生物(植物とシアノバクテリア)と水以外(硫化水素、水素、簡単な有機化合物)を用いる非酸素発生型光合成細菌がいる。化学合成では電子供与体と電子受容体の組み合わせで炭酸固定を行う様々な化学合成細菌および化学合成古細菌がいる。

2.9 第2節への質疑応答

質問: 初期の海水量はどのくらいだっただろうか。

答え: 35億年前は現在と変わらないかあるいは2~3倍の量から減少している可能性があるが、まだ研究進行中であるとおもう。

質問: -25%は、光合成で作られる値であるが、化学エネルギーを食べる生物も同様なのか。

答え: 化学エネルギーを使う生物は、炭素の固定法が様々である。光合成と同じ酵素ルビスコ(Rubisco)を使う生物もいて、その場合には同様の値を示す(図1)。異なった代謝系をもつ細菌や古細菌は異なった値を持ち得る(参考: 金子と奈良岡 [19])。

質問: 酸素発生型光合成が始まったのはいつ頃か。

答え: まだ定まっていない。分子系統樹解析(次回参照)から30億年前くらいと推定されており、40億~30億年前頃は、まだ酸素発生型光合成生物は誕生していない。しかし、化学合成による炭酸固定は行われている可能性がある。その際、光合成と同様にルビスコ(Rubisco)を用いた炭酸固定をしている化学合成菌もいる(図1)。

質問: いつ頃の無機炭素を指標にしているのか? 当時か現在か?

答え: $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比測定の基準には標準化石(PDB)を用いるが、当時(40~35億年前)の無機炭素(炭酸カルシウム)を指標にして炭素微粒子中の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ を判定している(Mojzsis ら [7])。

質問: 地球の磁場の形成期とそれ以前の紫外線による影響は?

答え: 磁場が無い事による放射線や、紫外線は水素同位体比に影響を与えた可能性はあるとおもうが、炭素の同位体比率が変わる可能性は少ないと思う。何れにせよ当時の無機炭素を指標にしているので問題無いと思う。

質問: もととのソースは CO_2 という前提になっているが、

非生物的なものから合成された有機化合物は?

答え: 考慮していない。地球形成時に集積した有機化合物は、マグマオーシャンで分解されたはずである。その後、飛来した有機化合物の寄与はあるはずだが、これまでの検討では考慮されていない。ただし、Naraoka ら [20]は南極氷上で採集された炭素質隕石30数試料について、炭素量とその同位体比を測定し、約1.3 wt%と加重平均で-5.8%(vs. PDB)を得ている。そういう意味では飛来した有機化合物は炭素同位体比にはあまり影響がないということかもしれない。

質問: 火星の土壤中に有機化合物が見つかった。

答え: 火星でCuriosityが発見した有機化合物は、宇宙からきたものか、過去の火星生命由来の両方の可能性がある(第3回参照)。

質問: 微化石の顕微鏡写真の黒い影は膜か?

答え: 炭素の痕跡である、おそらくグラファイトかケロジェンで膜構造は残っていない。

質問: カニとエビは何を食べているのか、チューブワームを食べているのか?

答え: 化学合成細菌もしくは、化学合成細菌を食べている何かを食べていると思われる。

質問: 深海熱水付近の化学合成細菌は、実験室に持ち帰り、培養可能か?

答え: 化学合成細菌で培養されているものは表5に示した。ただし、特定の種を培養しようというのは極めて困難で成功率は1%以下である。ただし、現在はゲノム解析でどの様な代謝を行っているか推定することは可能。また、近縁種が培養されていることも多い。小さいチューブワームは浅い場所にも生息しており、短期間培養可能。ただし、代謝反応等を調べる時には、間接的に調査している場合が多い。例えば、サンプルをすり潰して遺伝子を調べる。化学合成細菌と近縁かどうかをみる。その遺伝子がどの細胞の遺伝子かを特定するためには、細胞を蛍光染色して特定の遺伝子配列をもっているかどうかを調べる等を行う。現地で同位体標識した炭酸を使って生体内への取り込みを測定する場合もある。

質問: 海面よりもエネルギー量が大きいのか?

答え: 熱水噴出孔近傍での海水中では、熱水から離れた海底面直上あるいは海表面よりもはるかに

ATP量や A_T 量が大きい(表3)。

質問: 熱帯雨林でも同様のデータはでるのか?

答え: 熱帯雨林と深海とは調査方法が異なる。深海には微生物しかいないため、化学的方法となる。熱帯雨林では生体重量をはかる。海底熱水噴出孔周辺の化学合成細菌に依存した大型生物に関しては重量ではかられて、 $20\text{kg}/\text{m}^2$ という熱帯雨林なみの数値が得られている[10]。

質問: 全ての生き物はATPを使うのか?

答え: 全ての生物がATPを使う。リン酸結合は強すぎず弱すぎずちょうどよい結合の強さであるためと思われる。ATPはRNAの単量体なので、必ず細胞内にある。

質問: リンは比較的早い時期に作られるのか?

答え: 恒星の核融合反応では比較的最後にできた。リンは他の元素に比べて、宇宙での構成比率と比べて生体内での濃縮度が高い。リン酸を様々な反応や核酸で使っているためだが、その理由は現在不明である。

質問: 紅色細菌は化学合成細菌か?

答え: 紅色細菌といった場合には従属栄養細菌を主に含むプロテオバクテリアのグループのことを指す場合もある。今はあまり使われないが、かつてWoeseが命名した。プロテオバクテリアには従属栄養細菌のほか、非酸素発生型光合成細菌や化学合成細菌も含まれる。紅色光合成細菌は、非酸素発生型の光合成細菌である。

質問: 各化学反応において得られたエネルギーをATPにどのように換算するのか?

答え: 例えば、グルコース1分子あたり、32分子のATPが生成される。1分子のATPは約 $30\text{kJ}/\text{mol}$ なので、グルコース1分子あたり合計約 $960\text{kJ}/\text{mol}$ のATPができることになる。一方、グルコースの燃焼熱は $2800\text{kJ}/\text{mol}$ なので、グルコースのもつエネルギーの大部分は熱エネルギーとなる。グルコースを基質とした呼吸では電子伝達反応が行われ、電子伝達反応によって細胞膜内外で水素イオンの濃度勾配が形成される。水素イオンの濃度勾配にしたがって、 H^+ -ATPアーゼによってATPが合成される。これらの反応経路でできるATPの数を足し合わせる。

質問: ATPが1つ足りない(中途半端な)場合はどうなるか?

答え: 水素濃度勾配形成とそれを利用したATP合成では、きちんとした化学反応量論は成立していない。水素イオン濃度勾配を細胞膜内外で形成して、 H^+ -ATPアーゼでATPを生成する。これらの機構は、全生物ほぼ共通である。ATPもNADHも様々な代謝反応、呼吸、様々な生成反応で共通なので、それらを融通する。

質問: これらの化学反応は複雑系であり、生物が進化した結果、可能になった?

答え: そうである。化学合成菌の機能を発揮するためには複雑な電子伝達系、酵素系が必要で、さらにそれを維持する遺伝の仕組みが必要である。生命の起源で最初に誕生した生き物とは全く別の進化した生物と考えた方がよい(第2回参照)。

質問: 電子伝達の最初の反応は膜の上で行われる?

答え: 電子伝達反応は膜に存在するチトクロームとよばれる電子伝達タンパク質を介して行われる。熱エネルギーは生物のエネルギーとしては利用できない。そのため、化学エネルギーである必要がある。電子伝達反応では、細胞膜上の電子伝達反応によって細胞膜内外の水素イオン濃度勾配の形成を介してATPが合成される。

質問: 地点によって、ガスの組成に微生物種は対応している?

答え: 対応している。ガスの組成は地下で海水と反応する岩質に対応している。熱水の組成は地下の岩質に対応している。微生物種はガス成分の組成に対応している。

質問: 微生物はチムニーにしがみついている、ブルームの中にいる微生物は流されて行かないのか?

答え: ブルームに流出した微生物は死んでしまうが、チムニーに残った部分が増殖を続けている。

質問: 進化の速度は?

答え: 様々な遺伝子の解析を行うと原核生物の進化速度は一般に真核生物よりも遅い。原核生物細胞の分裂速度が速い(速い場合には20分に1回分裂する)ので、遺伝子がランダムに起こす変異速度は速いのだが、原核生物の系統樹上の遺伝子変化速度は真核生物より遅い。遺伝子の変異が起きても、大部分の変異はむしろ適応度を下げたためと思われる。つまり、進化速度の決定要因は、変異が起きる速度ではなく、適応変異が起きる

速度によっている。

質問: チムニー間を移動している証拠はあるのか?

答え: 様々な場所の熱水地域で見つかる同種の原核生物の間に大きな違いはみられない。原核生物の場合、進化を決めているのは場所ではない。という事は系統樹的な時間スケールでは同種で、同じ種が移動したと考えられる。

質問: 積極的な移動は確認できないが、移動している可能性はある?

答え: ある。原核生物は増殖できない環境では仮死状態で生きていられるので、その状態である確率で移動していると思われる。

質問: 化学合成細菌の食性は?

答え: さまざまである。酸化還元反応を行いうる電子供与体と電子受容体の組み合わせが環境にあればそれを利用する(表5)。

質問: すりつぶしてしまうとわからなくなる?

答え: 酵素の種類を調べれば反応基質がわかるが、遺伝子を調べる方が早い。遺伝子を調べることで、どの様な化学合成菌かは概ねわかる。

質問: バイオマットの化石が非酸素発生型光合成細菌であると推定した件について、当時酸素分圧が低かった以外の証拠はあるのか?

答え: 23億年以前のイオウ同位体比にバラツキが見られることから、当時は酸素が現在の10万分の一以下であった。付近に菱鉄鉱(siderite: FeCO_3) (炭酸鉄(II))の沈殿があり酸素濃度はこの環境でも低かった。化学合成細菌の内、鉄酸化菌、水素酸化菌は酸素が必要なのでこの環境では生育できない。バイオマッ化石は、当時の深度200mより浅いところだけで確認された。これは、光合成生物であることとつじつまがあう。非酸素発生型光合成細菌と調和的である(Tice & Lowe [15])。シアノバクテリアの誕生が系統樹からは30億年前なのでシアノバクテリアでは無いと思うが、論文では検討していない。

質問: 非酸素発生型光合成細菌の反応系はどのようにして解明されたか?

答え: 植物生理学、遺伝学、生化学の面から調べられた。研究初期には、光をあてて光合成反応が起きるときに必要な基質と反応によってできる分子を特定した。その後、酵素の種類や、電子伝達系を

構成するタンパク質(チトクローム)の種類や反応が調べられた。多数の実験によって反応系が明らかにされた。

質問: 水素に着目している理由?

答え: 化学合成と光合成いずれの場合でも有機化合物を合成するためには CO_2 を還元する必要がある。そのためには、電子だけでなく水素が必要。NADPHを介して水素が CO_2 還元のために利用される。呼吸から得られたATPのエネルギーで有機化合物合成を行うこともあるが、その際に還元反応が行われるためには水素が必要でNADPHを介して他の有機化合物から得た水素が利用される。

質問: どうして細胞は数珠状なのか?

答え: 細胞分裂後の方向によるため。細胞を特定の環境におくと、分裂後の細胞が分離しないで数珠状になる微生物は多くいる。数珠状の細胞を形成することは困難ではない。進化的なメリットとしては、絡み合ってまとまるため、固着しやすく、流れのある環境で流されにくくなるかもしれない。

質問: どうして分裂する際に面的にひろがらないのか、線なのか?

答え: 面的に細胞を形成するのは難しい。微生物細胞の有る一つの軸の中央では分裂できるが、それと直交する軸では分裂装置を持たない。したがって、分裂を複数回行った場合に長い線状にはなるが、面にはならない。面状の分裂を行う様になるのは、真核生物の藻類以降である。

質問: 膜表面での反応系が重要であるのに、数珠状に結合することで、表面積は減少しないのか?なぜ表面積を増加させるよりも、結合するのか?

答え: 微生物細胞はサイズが $1\mu\text{m}$ 程度なので、光を透過する。そのため、細胞の裏が影にならないため、細胞が束にもなってもあまり支障がない。光合成細菌や化学合成細菌は細胞内に非常に複雑に折りたたまれた内膜構造を持って膜面積を増やしており、細胞膜よりも効率よくはるかに面積が多くなっている。

表7: 大腸菌の分子組成 [21]

成分	重量(%)
水	70
タンパク質	15
核酸(DNA)	1
(RNA)	6
糖類	6
脂質	2
その他の有機分子	1
無機イオン	1

3. 生命構成元素の由来

この節では、生物を構成する分子と元素と、その由来を簡単に説明する。

3.1 生き物の組成

生き物はどんな分子、どんな元素でできているのか。表7は大腸菌の成分を重量%で示している。大腸菌は生物学で最も代表的な生物として、様々な分析が行われている。他の微生物、動物や植物等の多くの生物でも、細胞構成成分の比率はほぼ同じである。その成分構成は水が70%程度、有機化合物が30%程度である。その中でもタンパク質が最も構成比率が高い。タンパク質は機能性の高い成分である。

タンパク質は、アミノ酸の重合によってできる高分子化合物である。アミノ酸50~100個以上が、決まった配列で結合してタンパク質ができる。このアミノ酸配列は、遺伝子によって決まっている。

例えば図5はリゾチームという名前の触媒タンパク質、酵素の立体構造である。リゾチームは涙の成分である。リゾチームは細菌の細胞壁を分解する触媒活性をもち、殺菌作用をしめすことで細菌感染を防いでいる。リゾチームのアミノ酸配列は遺伝子によって決まっており、その配列はヒト個人ごとには変わらない。アミノ酸配列が決まると、疎水性のアミノ酸は内側へ、親水性のアミノ酸は外側へ移動する。アミノ酸の構造がジグソーパズルの様に組上がって、タンパク質の立体構造が形成される。立体構造が決まると、基質(図5上の矢印の紫)が結合する部位ができる。反応を触媒する残基が基質に対して適切な位置にくることで、触媒

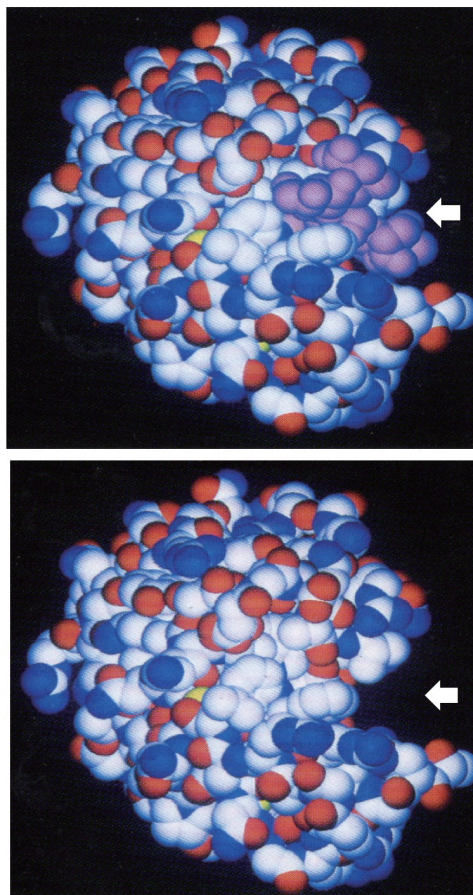


図5: リゾチームの立体構造。下図右の凹み矢印部分に上図では矢印の分子(反応基質:紫)がはまり込み、切断反応が触媒される。原子は、白:炭素(水素は省略されている)、青:窒素、赤:酸素、黄:イオウ。

機能を発揮する。つまり、図5の構造決定にはアミノ酸の疎水性と親水性が寄与しており、構造決定には溶媒として水が必要である。

こうして、水はタンパク質の構造維持に重要な役割をもっている。また、水は非常に優れた溶媒である。溶媒として体内の代謝系タンパク質や代謝産物を溶解し、その移動や拡散に大きく関与している。その他、脂質膜の形成にも膜脂質の疎水性と親水性部分が寄与している。したがって、水の存在が膜構造形成に必要である。水は分子間水素結合によって多量体性を持っている。水は水素結合の寄与によって、蒸発熱、凝固熱および比熱が高い。これが地球表面の温度の安定化にも寄与している。

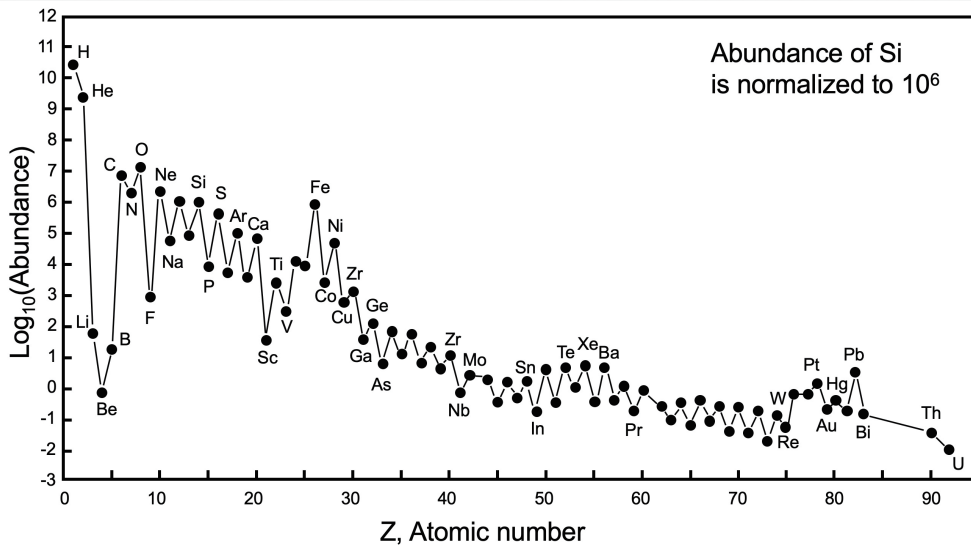


図6: 宇宙における元素存在量. Lodders [24]より作製.

表8: ヒトの元素組成 [22].

元素	乾燥重量(%)	元素	乾燥重量(%)
C	61.7	F	痕跡
N	11.0	Si	痕跡
O	9.3	V	痕跡
H	5.7	Cr	痕跡
Ca	5.0	Mn	痕跡
P	3.3	Fe	痕跡
K	1.3	Co	痕跡
S	1.0	Cu	痕跡
Cl	0.7	Zn	痕跡
Na	0.7	Se	痕跡
Mg	0.3	Sn	痕跡
B	痕跡	Mo	痕跡

表9: 海水の元素濃度[23].

海水	mg/kg
Cl	19350
Na	10780
Mg	1280
S	898
Ca	412
K	399
Br	67

3.2 ヒトの元素組成と宇宙における元素存在量比, 海水成分との比較

ヒトの身体を元素にまで分解して分析すると(表8), 主成分は炭素, 窒素, 酸素, 水素であるが, これらは宇宙に多い元素でもある(図6). 宇宙に多いから利用しているとは言えないが, 少なくとも利用可能であったとは言える. これらの元素は, 原始大気成分である二酸化炭素あるいは一酸化炭素, 窒素, 水蒸気にも含まれ

ていた。

ヒトを構成する元素の内、炭素、窒素、酸素、水素に次いで多い成分はカルシウム、カリウム、イオウ、塩素、ナトリウム、マグネシウムで(表8)、これらは海水の成分でもある(表9)。海水成分は地殻から溶け出した物であり、ヒトのこれらの成分は地殻由来と言っても良い。

3.3 生命構成元素に関するまとめ

生命を構成する分子は水が約70%で有機化合物が約30%、有機化合物の中でタンパク質が最も多くを占める機能的分子である。タンパク質を構成するアミノ酸残基の疎水性と親水性等の残基の性質によってタンパク質立体構造が決まっている。水は、タンパク質や膜構造を維持することと、種々の代謝関連分子の溶媒として機能している。

生体構成元素は、炭素、窒素、酸素、水素であるが、これらは宇宙に多い元素でもある。残りの生体構成元素として海水成分と同じ元素が含まれている。

3.4 生命構成元素の由来に関する質疑応答

質問: タンパク質の構造の決定方法は、乾燥させてX線解析するのだろうか?

回答: タンパク質を結晶化するが、その方法は単純に乾燥するわけではない。乾燥はさせず、徐々に吸湿させてタンパク質溶液の濃度をあげる。結晶のX線回折をおこない、分子構造を決定する。

質問: 得られたタンパク質の構造は正しいのか?

回答: X線解析を行う結晶内では、溶液中では存在しない隣接タンパク質分子同士の相互作用が発生している。その効果で接触箇所の構造が微妙に変わる可能性はある。しかし、その変化はそれほど大きくなく、タンパク質の全体構造が結晶化でかわることはない。

質問: 実験によって、生物の起源となるものを化学的に合成することは可能か?

回答: アミノ酸はMillerの気体中での放電によって合成可能である。RNAは水溶液中で合成可能。アミノ酸は乾燥状態で高温にすることで、脱水熱重合してプロテノイドになる。しかし、遺伝子で配列が決まっていなかったプロテノイドは、ペプチド鎖が溶媒中でランダムなブラウン運動をしている状態で、タンパク質の様な決まった構造をとるこ

とはない。RNAは乾燥することで、多量体を形成する。これも、リボザイム活性を持つ配列が偶然重合によってできる確率は極めて低い(第2回参照)。

質問: 宇宙の全物質の原子数を合わせてもタンパク質一つの合成を試すために足りない。しかし、生物は誕生した。なぜ?

回答: 1950年代、J. モノーによって指摘されている課題でもある。何らかのダーウィン進化が初期から働いたというのが可能性のひとつ。もう一つは、全宇宙がインフレーションの拡大によって現在見えている範囲よりはるかに大きい可能性がある。その場合には、生命誕生に必要な配列空間を試行錯誤するのに十分な原子があるという計算もある(Totani [25])。

質問: タイタンの表面には液体の有機化合物がある。ここでは、同じタンパク質をもつ生き物を探すことはできるか?

回答: タイタン表面の液体、エタン・メタンは疎水性である。エタン・メタンの液体中に、タンパク質のような多量体分子ができてダーウィン進化によって構造をとるようになったとする。すると、おそらく親水性が内側で疎水性が外側のタンパク質、つまり水溶液中とは裏表逆のタンパク質ができるのではないかと推定している(第2回参照)。

質問: 氷が浮くと、なぜ環境が安定化するのか?

回答: 氷は熱伝導度が低いので熱伝導が妨げられる。氷が浮いて下側の液体の水の上に保温性の蓋ができた構造になるので、液体の水が保温されて保持される効果がでてくる。

表10: Murchison隕石中に含まれる有機化合物量[33].

Compound class	Concentration (ppm)
Amino acids	17~60
Aliphatic hydrocarbons	>35
Aromatic hydrocarbons	3319
Fullerenes	>100
Carboxylic acids	>300
Hydrocarboxylic acids	15
Purines and pyrimidines	1.3
Alcohols	11
Sulphonic acids	68
Phosphonic acids	2

表11: Murchison隕石中に含まれるアミノ酸[34]. #は生物が使っているアミノ酸.

α	Glycine	#	α	D-allo-Threonine	γ	L-4-A-3-HBA
α	D-Alanine		α	L-allo-Threonine	γ	γ -ABA
α	L-Alanine	#	α	DL- α -Methylserine	α	D-Valine
α	Sarcosine		α	D-Homoserine	α	L-Valine #
α	D-Serine		α	L-Homoserine	α	D-Norvaline
α	L-Serine	#	β	D- β -ABA	α	L-Norvaline
β	D-Isoserine		β	L- β -ABA	α	DL-Isovaline #
β	L-Isoserine		β	D- β -AIBA	α	D-Glutamic acid
β	β -Alanine		β	L- β -AIBA	α	L-Glutamic acid #
α	α -AIBA		β	DL- β -Homoserine	β	D- β -(Aminomethyl)-succinic acid
α	D- α -ABA		β	DL-3-Amino-2-(hydroxy-methyl)propanoic acid	β	L- β -(Aminomethyl)-succinic acid
α	L- α -ABA		β	DL-Isythreonine	α	D- α -Aminoadipic acid
α	D-Aspartic acid		β	D-allo-Isythreonine	α	L- α -Aminoadipic acid
α	L-Aspartic acid	#	β	L-allo-Isythreonine	α	D-Leucine
α	D-Threonine		γ	DL-4-A-2-HBA	α	L-Leucine #
α	L-Threonin	#	γ	D-4-A-3-HBA	α	D-Isoleucine
					α	L-Isoleucine #

質問: ケイ素も多いけど、使われていないのか?

回答: 大多数の生物はケイ素を使っていない。珪藻がケイ酸の殻をもつこと、放散虫と呼ばれる生物種が放射状に突出する骨針や、外側を覆う殻としてケイ酸を使っているだけである。ケイ素も4本の腕を持つので、炭素同様の化合物をつくっても良い様にも見えるのだが、地球にはケイ酸とケイ酸塩しかケイ酸化合物は見当たらない。工業的にケイ酸化合物が合成されて使われているが、これも炭素を含む分子である。二酸化炭素にくらべてケイ酸(SiO₂)が安定すぎるためケイ酸以外の構造が採りにくいと思われる(第2回参照)。また、水に対する溶解度も炭酸より低い。

4. 化学進化:生命誕生前の有機合成

化学進化に関しては、Kobayashi [26]が詳しい。Millerは1953年、CH₄、NH₃、H₂、H₂Oの混合気体中で放電することにより、アミノ酸や有機酸などの種々の有機化合物が合成可能であることを示した[27]。その後、多くの実験が行われ、アミノ酸と核酸塩基は宇宙

線、紫外線、放電、粒子線などを用いて合成可能であることがわかってきた。しかし、窒素原子が気体成分に入っていると合成された分子にアミノ基が入ってしまうために糖を合成することは難しい。

またMillerの行った実験はタイタンの大気を想定した還元型大気での実験であったが、その後、初期地球の大気成分は火山ガスに近く、二酸化炭素や一酸化炭素を含むものの、メタンやアンモニア、水素を含んでいない可能性が高くなってきた。こうした大気は、弱還元型大気とよばれるが、弱還元型大気のもとでは、有機化合物合成の効率は極めて低い。そこで、有機化合物が宇宙起源であるという可能性が高まっている。

4.1 宇宙空間での有機化合物合成

宇宙空間での有機化合物探査に関しては、Ohishi [28]が詳しい。既に宇宙空間で、多くの有機化合物が見つかっている。分子雲中では200種類を越える有機化合物が検出されている。彗星からスターダスト計画で持ち帰られた惑星間塵中からはグリシンが検出されている[29]。

(1) 隕石中の有機化合物

隕石中有機化合物に関してはYabuta [30]が詳しい。隕石には多くの種類があるが、中でも炭素質コンドライトという炭素に富む隕石で有機化合物が多く検出されている。一般には、隕石を地球で採集する場合には、地球由来の有機化合物が混入する可能性があるが、Murchison隕石は、地球落下後に時間をおかずに採集されたため、地球由来の有機化合物混入の可能性は低い。この隕石の成分を調べたところ、たくさんの有機化合物が含まれていた(表10)。

Murchison隕石では数十種のアミノ酸が検出されている(表11)。アミノ酸にはカルボキシル基とアミノ基がある。生物が使っているアミノ酸は、カルボキシル基とアミノ基が一つの炭素(α 炭素とよぶ)に結合していて、これを α アミノ酸と呼ぶ。カルボキシル基とアミノ基が一つ隣の炭素(β 炭素)に結合している場合には、 β アミノ酸と呼ばれる。Murchison隕石中には、 α アミノ酸の他に、 β アミノ酸や γ アミノ酸が多数見つかっている。

また、 α アミノ酸の α 炭素の結合が鏡像異性のアミノ酸、D型アミノ酸とL型アミノ酸が存在するが、生物はそのうちL型アミノ酸を用いている。隕石中にはD型とL型が同程度の比率で含まれている。ただし、L型のほうが少し高い比率をもつアミノ酸もある[31]。生物はL型アミノ酸を利用してタンパク質を合成しているが、初期に地球にもたらされた隕石中アミノ酸のL型過剰がその起源である可能性もある。

この隕石には、生物が使っているアミノ酸よりも、はるかに多い種類のアミノ酸が含まれている(表11)。核酸塩基も、生物が使っているグアニンやアデニンを含む多数の塩基が見つかっている[32]。その中で、なぜ現存の生物が20種のアミノ酸を選択的に使っているのか、なぜ5種の核酸塩基を使っているのは不明である。

(2) 有機化合物のできかた

宇宙では、星間分子雲中で200を超える有機分子種が検出されている[28]。それらは、彗星、隕石として地球にやってきた可能性が高い[30]。

宇宙空間でどの用に有機化合物が合成されたのかということに関して、グリーンバークのモデルが提案されている[26, 30]。このモデルでは、 μm 以下のケイ酸塩粒子の周りに氷の層ができ、その中に取り込まれた一酸化炭素やアンモニア等が放射線によって重合して有

機化合物が合成された。合成された有機化合物は、酸や水不溶性の高分子化合物であるが、加水分解によってアミノ酸や有機酸を生じるような構造を持っている[26, 30]。

その後おそらく、有機化合物を含むケイ酸塩と氷の微粒子が集まって、だんだんと大きな天体となった。天体が十分に大きくなると微粒子成分の融解が起き、分画によって岩石惑星型の天体となった。つまり、天体が中心部の金属性の核、それを取り巻く岩石性のマントル構造に分化した。それらが再び破壊されたことによって、鉄隕石、エコンドライトと石鉄隕石となった。分画が起きない段階で微粒子成分の変質程度が低い物がコンドライトで、その化学組成でエンスタタイトコンドライト、普通コンドライト、炭素質コンドライト等に分類されている[30]。

4.2 第4節のまとめ:化学進化

Millerの実験以来、初期地球大気での有機化合物合成の実験が行われてきたが、初期地球大気は弱還元的で有機化合物合成には適していなかった可能性が高い。一方、宇宙での有機化合物の研究が進んでいる。炭素質隕石中には多種のアミノ酸や核酸塩基が検出されている。炭素質隕石に含まれる有機化合物は、宇宙空間で合成され、様々な過程を経て隕石となった。温度が充分低下したあとの初期地球表層に隕石中有機化合物がもたらされた可能性が高い。

4.3 第4節に関する質疑応答

質問: 芳香族アミノ酸の重要性はないのか?

回答: 芳香族分子そのものは、Murchison隕石中に大量に含まれているが(表10)、これまで芳香族アミノ酸に関してはフェニルアラニンとチロシンが報告されている[35]。タンパク質にはフェニルアラニン、チロシン、トリプトファンという3つの芳香族アミノ酸が含まれている。一方、生物が用いる20のアミノ酸種がなぜ、用いられているかは、まだはっきりわかっていない。ただし、生命誕生後ある時期までは、生物が20種よりも少ない種のアミノ酸種だけを用いていた可能性も提案されている。その場合、例えばアラニン、フェニルアラニン、イソロイシン、リシン、ロイシン、メチオニン、グルタミン、セリン、トレオニン、トリプトファンは無く

でも機能するタンパク質を構築できる(Shibue ら [36]). つまり, 初期生命は芳香族アミノ酸をあまり使っていなかった可能性もある.

質問: グリシンの次に見つかるべきアミノ酸は?

回答: 宇宙塵中に見つかってほしいアミノ酸という意味であれば特に指定はないが, アラニンがグリシンの次に簡単な構造を持っているので見つかりやすいのではないか.

質問: アミノ酸が隕石中などで重合していることは?

回答: 隕石の種類によっても異なるが, アミノ酸は抽出される量の半分程度が, 100℃の水で抽出される遊離のアミノ酸である. 残りの半分程度は, その残渣をさらに塩酸で抽出したときに抽出されるので, おそらく不溶性高分子として存在している. アミノ酸のダイマーも抽出されている[37].

質問: 隕石中でアミノ酸はどうできたのか?

回答: 星間空間の温度の低い部分で, シリカのサブ μm サイズのコアができ, コアの周りにできた氷に水素, 一酸化炭素, 窒素あるいはアンモニアが溶け込み, 放射線照射されたことによりアミノ酸ができた. その微粒子が重合してだんだん大きな塊となり, 途中の過程をへて隕石となって地球へやってきた.

質問: ラセミ体はできないのか.

回答: ラジカル反応でできる不溶性高分子中のアミノ酸は基本的にはラセミ体のはずである. ただし, L体とD体のどちらが選択的に合成されたかあるいはどちらが選択的に分解されたことによってL体過剰あるいはD体過剰になる可能性はある. そのプロセスはいくつか提案されて, 実験検証がおこなわれている.

質問: 糖はみつまっている?

回答: Murchison隕石中に糖リボースがみつまっているが, 塩基と縮合しないので, ヌクレオチドの合成過程が問題となっている(第2回参照).

質問: アミノ酸が宇宙由来であるとすると, 量的にはどのくらい必要であるか?

回答: わからない. 海に溶け出すと薄まってしまうので, 濃縮方法を考えないといけない. 波打ち際, 陸の池やクレーター等が生命の起源の場所として検討されている(第2回参照).

引用文献

- [1] Genda, H., 2019, in *Astrobiology: From the origins of life to the search for extraterrestrial intelligence* (Singapore: Springer Nature), 197.
- [2] 掛川 武, 2017, *生物の科学 遺伝* 71, 133.
- [3] Sugitani, K., 2019, in *Astrobiology: From the origins of life to the search for extraterrestrial intelligence* (Singapore: Springer Nature), 229.
- [4] Wilde, S. A. et al., 2001, *Nature* 409, 175.
- [5] 下山 晃, 1995, *月刊地球* 17, 440.
- [6] Naraoka, H., 2010, *Res. Org. Geochem.* 26, 13.
- [7] Mojzsis, S. J. et al., 1996, *Nature* 384, 55.
- [8] Schopf, J.W. and Packer, B. M., 1987, *Science* 237, 70.
- [9] Karl, D. M. et al., 1980, *Science* 207, 1345.
- [10] Grassle, J. F., 1985, *Science* 229, 713.
- [11] Jannasch, H. W., 1985, *Proc. R. Soc. Lond.* B225, 277.
- [12] McCollom, T. M. and Shock, E. L., 1997, *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 4375.
- [13] Kato, S. et al., 2010, *Environ. Microbiol.* 76, 2968.
- [14] Ueno, Y. et al., 2001, *Int. Geol. Rev.* 43, 196.
- [15] Tice, M. M. and Lowe, D. R., 2004, *Nature* 431, 549.
- [16] Isozaki, Y. et al., 1997, *EOS* 78, F 399.
- [17] Kato, S. and Yamagishi, A., 2016, *Deep-Sea Res. Part I* 110, 99.
- [18] Ueno, Y. et al., 2006, *Nature* 440, 516.
- [19] 金子雅紀, 奈良岡浩, 2011, *Res. Org. Geochem.* 27, 55.
- [20] Naraoka, H. et al., 1997, *Geochem. J.* 31, 155.
- [21] Watson, J.D., 1976, *Molecular Biology of the Gene*, 3rd ed. (New York: Benjamin).
- [22] ICRP, 1974, in *Report of the task group on reference man* ICRP Publication (Oxford: Pergamon Press), 23
- [23] DOE, 1994, in *Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in seawater. version 2* (Washington DC: USDOE), ORNL/CDI-

- AC-74.
- [24] Lodders, K., 2003, *Astrophys. J.* 591, 1220.
- [25] Totani, T., 2020, *Sci. Rep.* 10, Article number: 1671.
- [26] Kobayashi, K., 2019, in *Astrobiology: From the origins of life to the search for extraterrestrial intelligence* (Singapore: Springer Nature), 43.
- [27] Miller, S. L., 1953, *Science* 117, 528.
- [28] Ohishi, M., 2019, in *Astrobiology: From the origins of life to the search for extraterrestrial intelligence* (Singapore: Springer Nature), 11.
- [29] Elsila, J. E., 2009, *Meteor. Planet. Sci.* 44, 1323.
- [30] Yabuta, H., 2019, in *Astrobiology: From the origins of life to the search for extraterrestrial intelligence* (Singapore: Springer Nature), 23.
- [31] Cronin, J. R. and Pizzarello, S., 1997, *Science* 275, 951.
- [32] Callahan, M. P. et al., 2011, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 108, 13995.
- [33] Ehrenfreund, P. et al., 2002, *Rep. Prog. Phys.* 65, 1427.
- [34] Koga, T. and Naraoka, H., 2017, *Sci. Rep.* 7, 636.
- [35] Burton, A. S. et al., 2012, *Chem. Soc. Rev.* 41, 5459.
- [36] Shibue, R. et al., 2018, *Sci. Rep.* 8, 1227.
- [37] Shimoyama, A. and Ogasawara, R., 2002, *Orig. Life. Evol. Biosph.* 32, 165.

著者紹介

山岸 明彦

東京薬科大学 生命科学部 名誉教授. 東京大学 大学院理学系研究科 相関理化学専攻 博士課程修了. 理学博士. 日本学術振興会 奨励研究員, カリフォルニア大学 バークレー校 博士研究員, カーネギー研究所 植物生理学部門 博士研究員, 東京工業大学 生命理工学研究科 助手, 東京薬科大学 助教授, 準教授, 教授を経て, 2018年4月に退職して名誉教授. 専門は分子生物学・微生物学. 日本惑星科学会, 極限環境生物学会, 宇宙生物科学会, 生命の起原および進化学会に所属.

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その53 ~4年に一度のあかつきTIリセット~

安藤 紘基¹, 山崎 敦², 佐藤 毅彦²

(要旨) 人間のように時計を持たない探査機は、Time Indicator (TI) という数字で時刻を管理しています。TIの値は時々刻々増えていき、あかつきの場合は約4年で1周(ロールオーバー)します。ロールオーバーを放置してしまうと、探査機が想定外の動作をするため定期的にTIをオール0にリセットする必要があります。そして、あかつきのTIリセットが年明けの1月11日に行われました。本稿では、4年に一度の大イベントに向けて、あかつきの運用スタッフが丸となって取り組んだその様子をお届けします。

人が生活を送る際、常に気にするものがあります。それは「時間」です。何時に起きるか、会議は何時からやるか、何時の電車に乗って帰るか、というように常に時間のことを頭に入れながら動きます。これは探査機でも同様です。何時にどのような軌道にあるか、何時に姿勢変更して観測を開始するか、何時からデータを地上局に向けて下ろすか、など探査機も常に時間と隣り合わせです。人間が時間を知る場合は時計を見れば良いですが、探査機には時計は装備されていません。その時計の代わりとして使うのが Time Indicator(TI)で、探査機を運用する上で必要不可欠なものです。あかつき時代の探査機のTIは8桁の16進数で表される数字で約1/32秒ごとに1カウントずつ増えていき、約4年で値がFFFFFFFFから00000000に変わる、すなわち1周すること(ロールオーバーと呼びます)になります。

あかつきの運用は、主に長野県の白田宇宙空間観測所にある直径64 mの反射鏡の大型パラボラアンテナ(白田局)を用いて行われます。しかし、常に白田局からあかつきをモニターできるわけではないので、コマンドを時間順に並べたリスト(タイムライン、以下TL)をあかつきに予め送っておき、白田局か

ら見えない時でもあかつきがTLに沿って自動で姿勢変更や金星観測など行えるよう仕向けます。TLは人が分かりやすいように地上時刻を用いて作成しますが、あかつきは地上時刻を知りません。地上時刻とあかつきのTIを地上の衛星管制で値付けし、TIに換算したTLを送信することで、あかつきが時刻どおりに動作するようになります。つまり、あかつきの中にあるTIが1カウントずつ時々刻々増えていき、あるTIの値に該当するコマンドがTL上で見つかると、そのコマンドを自動で実行するようになっていきます。また、ある時刻であかつきのTIがオールFになれば、次の時間ステップでTIのカウントが1増えてオール0になります。しかし前述のように、あかつきは4年以上継続して使用できるカウンターを持っていませんので、TIがオール0になるとあかつきは過去にあった0と判断して、これを境にあかつきに送られたTLの整合性がとれなくなり、想定外の動作をします。そこで、4年に1度のタイミングでTIがオール0になる前に明示的にTIを0にリセットして、今の0を覚えさせることで、このような事故が起きぬよう防ぐのです。ちなみに、ロールオーバーは私たちの生活に身近なGPSでも発生します。GPSシステムが「週」を管理しているカウンターが10ビット長なので、1024週目になるとゼロに戻ってしまうことが原因です(直近の週数ロールオーバーは2019年4月7日でした)。

1.京都産業大学 理学部

2.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
hando@cc.kyoto-su.ac.jp

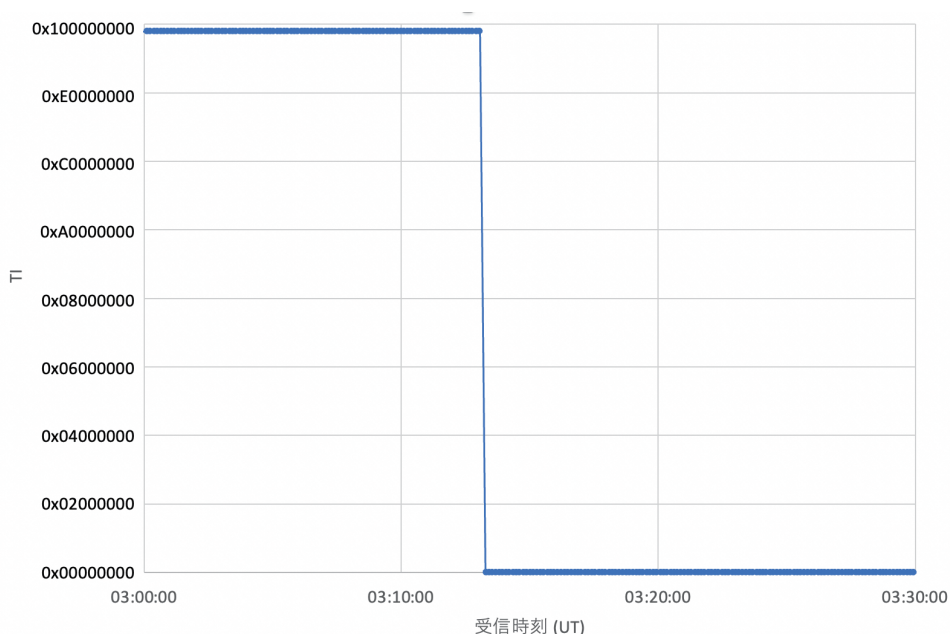


図1: あかつきTIの時系列を表したグラフ。横軸は地上局での受信時刻を表す。この日の運用における通信電波の片道伝播時間が約13分であるため、「UT3:00に0リセットが完了した」というあかつきからの通達がUT3:13頃に地上局で受信されたことが分かる。

話をあかつきに戻しましょう。あかつきでは機上で金星・地球・太陽の位置を計算する際にもTIを使用しているので、TIを0にリセットを実施する際はその時の金星・地球・太陽の位置を事前に計算してあかつきに覚えさせる必要があります。また、リセット後に地上時刻とあかつきのTIの値付けをやり直してから、TLを送信しなくてはなりません。そんな事前準備をしっかり行った上で、今回のTIリセットは年明けの1月11日に実施することになりました。そして、その日の運用当番は私でした。実は私が運用に入ると、テレメトリー画面が突然消えたり、観測機器やエレキ部にトラブルが発生したり、何かしらのアクシデントに見舞われることが数多くあり、このような大きなイベントを抱えた運用には私が一番適さないので、今更誰かと交代するわけにもいかなないので、とにかくその日は運用室にある神棚を入念に整えて、TIリセットも含めて運用が無事に終わるようしっかりお祈りしました。お祈りが終わったのも束の間、日本時間の午前10時からあかつきの運用が始まりました。4年に一度のイベントということで、いつもより多くのスタッフが集まり管制室に緊張感が

ありました。その一方で、あかつきのTIリセットが今回で3回目ということもあり、私以外の方々はどこなく余裕もありました。TIリセットに向けて、全員で着々と運用を進めていきます。混乱が起きないように既にあかつきに登録してあったTLを全て削除した後、地上時刻でちょうど日本時間の正午 (UT 3:00) にTIが0リセットされるようコマンドを送信しました。ただし、オール0だと何らかのソフトウェア誤動作に繋がる可能性もあるため、慎重を期して16進数の00000080にセットしました。そして、白田局とあかつきを往復通信した26分後くらいに、テレメトリー画面上にTI:00000087と表示されました(図1)。無事にTIリセットがうまく行ったことが分かった瞬間です。テレメトリーの更新はある周期で行われますから、00000080の瞬間は見えてはいませんが、これまでに見た最も小さなTI値にちょっと嬉しくなりました。また、あかつきの位置や姿勢が事前に予測したものと一致していることも確認できました。TIリセットが無事に成功したことで、今後もTL上のコマンドが正常に実施され、引き続き金星を観測することができそうです。その場にいた全員がホッと一安心。神棚にしか

りお祈りして本当に良かったと思います。その後も特に問題なく運用は進められ、午後4時30分に運用が無事終了したのです。

あかつきが金星周回軌道に入ってから7年が経ちましたが、カメラや電波発振器は今でも健在で、金星大気の観測を行なうことができます。あかつきが打ち上がってから12年が経過し、その間に5年も太陽を周回しましたが、そんなことを微塵も感じさ

せないあかつきのタフさには本当に頭が下がります。また、「あかつきがこれだけ頑張っているのだから、自分も一つでも多く論文を書けるよう研究を頑張らないといけない。」と気持ちが引き締まります。最後に、あかつき運用をいつもサポートしてくださっている方々に御礼の言葉を申し上げて、記事を締めさせていただきます。いつもありがとうございます!そして、これからもどうぞよろしく願いいたします!

Essay

他の惑星や衛星の地質年代の大区分は「代」ではなく「紀」

山路 敦¹

月や火星など、天体ごとに地質時代を大区分するとき、「代」と「紀」のどちらを使うべきか。月なら例えば、Imbrian Periodの訳語はインブリア代なのか、それともインブリア紀なのか。正解は「紀」であると筆者は考える。その理由を研究史にもとづいて解説することが小論の目的である。その前提として、「代」や「紀」など、地質年代の区分について、はじめに解説する。というのも、月でPeriodという語を使い始めた研究者達は、地球の層位学を下敷きにしていたからである[1, p. vii]。「代」も「紀」も、層位学の伝統的な術語なのである。

まず、「紀」とは何か。いちばん若い地層の集合を第四系(Quaternary System)とよび、それらが堆積した時代として第四紀(Quaternary Period)が定義される。つまり、Systemと一括される地層群があって、それをもとに時代区分としてのPeriodが定義されるわけである。Quaternaryはもともと、Primary, Secondary, Tertiaryとともに、それらより若いSystemとして、Giovanni Arduinoによって18世紀半ばに定義された[2]。Secondaryは今日いうところの中生代の地層群に、Tertiaryは第四紀を除いた新生代の地層群にほぼ相当する。その後、カンブリア系やオルドビス系など、地名や古代の部族名を冠したもろもろのSystemが定義されていった。そしてそれらをまとめて、古生界(Paleozoic Erathem)や中生界(Mesozoic Erathem)や新生界(Cenozoic Erathem)が定義され、また、それらに対応する期間として中生代などのEraすなわ

ち「代」が定義された。つまりまず、古生界がAdam Sedgewickによって1838年に定義され[3]、続いて惑星地質学の開祖でもあるJohn Phillips [4]によって中生界と新生界が1841年に定義された。こうした地層群の区分をするのが層位学(stratigraphy)で、その基礎になっているのが、より新しい地層がより上位に横たわるという、地層累重の法則(the law or principle of superposition)である。

月の地質年代区分は1960年代のはじめにShoemakerらによって開始された。その記念碑的論文であるShoemaker and Hackman (1962)の「Stratigraphic basis for a lunar time scale」という論文[5]の第1ページの「The geological law of superposition is as valid for the Moon as it is for the Earth」という文は、地層累重の法則だけを言っているのではなく、層位学的考え方が月にも通用する、という宣言として読むべきなのである。それには地層累重の法則のほか、the principle of original horizontality と crosscutting relationshipがある[6, 第8章]。「地層はもともと水平に近い姿勢で堆積する」というのが前者であり、「ある物が他の物を切っているなら、切られているほうが古い」というのが後者である。これらは惑星地質学の基本的考え方であり、これらを使って地層の新旧の順序体系が組み立てられる[1, 第2章]。こうして地層が分類され、それにもとづいて「系」や「紀」が定義される。これなら、放射年代データなど絶対年代の情報なくても、時代区分ができるわけである。こうした組織的作業が月の表側の中央部で1960年頃にはじまり、Imbrian などの「系」や「紀」が定義された。

1.京都市立大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
yamaji@kueps.kyoto-u.ac.jp

しかし月の「紀」が地球のそれより桁違いに長い期間であるらしいことは、1962年時点ですでに認識されていたのである[7]。地球の「紀」のなかで一番長い白亜紀でさえ継続期間が約7.7千万年[8]であるのに対し、ネクタリス紀を含めて[9]、月の「紀」はそれぞれ億年単位の期間である。つまり月で層位学的研究を進めたShoemakerやWilhelmsらは、地球でいえば「代」に相当するような期間であることをわかったうえで「紀」を使ったのである。

地球の層位学でそう訳すからというだけでなく、このような経緯から、月や他の惑星のPeriodやSystemは「紀」や「系」と訳されるべきであると筆者は考える。層位学において、地層区分は時代区分に先んじる。地層区分にSystem(系)を使えば必然的に時代区分はPeriod(紀)になるわけである。

参考文献

- [1] Wilhelms, D.E., 1987, The Geologic History of the Moon (USGS Proc. Pap.), 1348.
- [2] Gillispie, C.C. et al. (eds.), 1970, Dictionary of Scientific Biography (New York, Scribner).
- [3] Sedgwick, A., 1838, Proc. Geol. Soc. London 2, 675.
- [4] Fras, R.H., 2012, Antiquarian Astronomer 6, 44.
- [5] Shoemaker, E.M. and Hackman, R.J., 1962, in The Moon (Proc. Symp. 14th IAU), 289.
- [6] Grozinger, J. and Jordan, T., 2010, Understanding Earth, 6th Ed. (New York, Freeman).
- [7] Shoemaker, E.M., 1962, in Physics and Astronomy of the Moon (New York, Academic Press), 99.
- [8] Gale, A.S. et al., 2020, in Geological Time Scale 2020 (Amsterdam, Elsevier), 1023.
- [9] Evans, A.J. et al., 2018, JGR: Planets 123, 1596.

著者紹介

山路 敦

京都大学大学院理学研究科教授。専門は構造地質学, テクトニクス。

2022年度日本惑星科学会秋季講演会開催報告

2022年日本惑星科学会秋季講演会実行委員長(茨城LOC) 百瀬 宗武¹

1. 概要

2022年日本惑星科学会秋季講演会は、2022年9月20(火)-22日(木) に対面+オンライン(Zoom)のハイブリッドで開催された。対面での講演及びポスター会場はザ・ヒロサワ・シティ会館(水戸市)であった。また9月23日(金・祝)には、ザ・ヒロサワ・シティ会館小ホールにおいて、一般普及講演会「水惑星の誕生: その起源と条件を探る」を行った。懇親会については、9月21日夕方に開催できるように水戸駅近くの会場を確保して準備を進めていたが、COVID-19の感染拡大状況を踏まえ、8月下旬に中止を決定した。

秋季講演会には264名の参加申込があり、このうち175名は会場での参加があった。195件の講演申し込みがあり、その内訳は、最優秀発表賞ノミネート10件、口頭発表108件、ポスター発表77件であった。

LOCは、茨城大学理工学研究科(理学野)スタッフの百瀬宗武、橋爪光、藤谷渉、及びWeb系の折原龍太(茨城大学理工学研究科博士後期課程在学)を中心に構成した。

2. 準備の経過

本講演会の準備は2022年1月から本格的に開始した。当初よりCOVID-19感染症対策が継続的に求められる見通しがあったことから、(1)対面開催を想定しつつ、会場設備とLOCの対応が可能な範囲でハイブリッドを取り入れること、(2)対面の懇親会

の実施を模索はするものの、直前でのキャンセルに大きな支障がでない会場を確保した上で、会費の徴収を含め講演会本体とは分離してスケジュールを組むこと、以上2点を基本方針として準備を進めた。このうち(2)の懇親会については、2022年7月以降の急速な状況悪化を受けて中止したが、当初からキャンセルの可能性も視野に入れていたため大きな混乱がなかったのは不幸中の幸いであった。一方、(1)のハイブリッド開催については、今回が秋季講演会においては初の試みであったので、後ほど項を改めて少し詳しく報告したい。

参加申込に関わる各種手続きの締め切りは、以下の通りであった。

- i. 2022年6月24日(金) 24:00 参加申込、発表申込、支払い、予稿原稿受付開始
- ii. 2022年7月15日(金) 24:00 発表申込締切、最優秀発表賞予稿原稿の締切
- iii. 2022年8月26日(金) 24:00 参加申込締切、予稿原稿締切、支払い締切

このうち ii の際には、締切の6時間ほど前からサーバー(wakusei.jp)の反応が極端に遅くなり発表申込が受け付けられなくなったため、急遽、締切を連休後の2022年7月19日(火)に延長する措置を取った。サーバー自体の障害であったためメールやホームページでの広報も不可能となり、LOCとしては慌てたが、広報専門委員会にご協力をいただいで学会twitterで発信してもらうなどの対応をとった。また、参加費の支払いについては、昨年度に実績があったイベント運営支援サイト「イベントペイ」を主に用いたが、直前の別イベントで発生したクレ

¹茨城大学理工学研究科(理学野)
munetake.momose.dr@vc.ibaraki.ac.jp



図1: 口頭発表会場の様子。

ジットカード情報漏えいを踏まえて取扱業者が行政処分を受けたことに伴い、クレジットカードでの払込を受け付けられなかった。そこで、国内在住の参加者にはコンビニやペイジーでの支払いをお願いするとともに、主に海外に在住しクレジットカードでないと支払いが困難な参加者のために、別の決済手段(Square)を急遽、並列に用意した。

上記の通り、最優秀発表賞を含む口頭発表希望には118件の応募があった。当初は、昨年度の経験を踏まえ、申込多数の場合には提出された予稿原稿の査読を通じた口頭発表の絞りこみを計画していた。しかし実際の予稿に目を通した結果、絞り込みは困難であるとの結論に達した。そこで今回は、一件あたりの発表時間枠を8分に絞った上で、全て希望通りの発表形式で実施することにした。この判断の是非については賛否両論あると思うが、行事部会を中心に、ここ数年の参加体験に基づく会員からのご意見を集約していただき、より良い形態を模索する契機になればと考えている。各発表者が時間を厳守したことや質疑応答にSlackを併用したことから、会の進行自体はスムーズであった(図1)。

3. ハイブリッド形式の実施と課題

茨城LOCの人員体制が限られていたこともあり、当初より多大な労力をかけてのハイブリッド化は追求しない方針であった。しかし、2022年3月にザ・ヒロサワ・シティ会館担当者と詳しく打ち合わせを行った結果、「中継方式」のハイブリッド形式が現実的に



図2: ポスター発表スペースのレイアウト。

可能であり、かつ参加者にとっても大きなメリットがあると判断し、ハイブリッド形式を基本とすることを最終決定し、2022年5月の総会にてその旨を正式にアナウンスした。本番直前の2022年9月1日午後にはリハーサルを行い、参加者に見立てた茨城大学水戸キャンパスの人員と会場を繋ぎ、発表や質疑応答が双方向で実施できるかの確認と調整を行った。

そもそも純粋な対面形式、あるいはオンライン形式と比べたときの、ハイブリッド形式のメリットは何だろうか。それは、発表及び聴講を行うそれぞれの参加者が最適な参加場所を会期直前まで自由に選べることであろう。その前提として、参加場所によらずに同等の参加体験が得られることが重要となる。さらに、多数の発表者が次々と登壇する学会講演会においては、発表者全員が確実にネットワーク接続できるような準備・サポートを対面会場において行うことは不可能である。以上を踏まえ、参加者が参加場所によらずに「ハイブリッドを意識せずに済む」方式として、会場とZoomを中継で繋ぐ方式は最適なものであったと考えている。総会から受賞記念講演に移る際にZoomホストが手薄になったことに伴うトラブルが発生した点を除けば、シームレスに会場とZoomが繋がっていたはずである。今回の会場では、中継を可能とするだけの専用ネットワーク回線や音響映像設備があったこと、配信に詳しい経験豊富な会場スタッフの助けが得られたことから、理想的な会場であった。その意味では、同様な方式がいつでも可能であるとまでは断言できないが、今回得た技術的ノウハウ、経験は可能な限り引き継ぎたい。

最後に、ハイブリッド、あるいはオンライン形式での大きな課題として、ポスター発表が挙げられる。今回は会場でのポスター発表スペース(図2)の用意はもちろん、Zoom上でもポスター発表スペースを用意し、会期外の9月26日、27日の午前9時から午後6時までも、ブレイクアウトルームつきのZoomを稼働させた。しかし、対面会場のポスター会場の賑わいとは対照的に、Zoomスペースの利用は極めて限られていたと言わざるを得ない。これは本会の講演会だけでなく、オンラインでのポスター発表に共通する課題と思われる。この点は技術的観点に加え、企画・運営的な観点からの知恵を一層絞る必要がある。

4. 一般普及講演会

9月23日(金・祝)に開催した一般普及講演会には90名の聴衆が来場し、以下の2件の講演が行われた。

- 中村智樹氏(東北大学)「はやぶさ2が持ち帰ったサンプルが明かすリュウグウの起源と進化」
- 生駒大洋氏(国立天文台)「最新理論が予測する太陽系外の水惑星の存在度」

もともと高い関心が寄せられていた「はやぶさ2」の成果であったが、当日の午前中に、講演者である中村氏をはじめとするチームが行ったプレスリリース[1]に関する報道が広く行われ、より一層大きな興味を引く結果となった。また後半の生駒氏の講演では、水戸の名産品である納豆を題材にした小噺も交えつつ、海の起源に関する最新の研究成果が紹介されたが、こちらの関連研究も講演会からほどなくしてプレスリリースが行われた[2]。いずれの講演にも活発な質問が寄せられ、参加者にとって満足度の高い講演会ではなかったかと推察される。プレスリリースと連動したタイムリーな講演会になったことを含め、講演者の中村氏、生駒氏には、この場を借りて改めて御礼申し上げたい。

5. 終わりに

本講演会の開催にあつては、一般社団法人・水戸市観光コンベンション協会からコンベンション開催助成金・ハイブリッド開催助成金をいただくとともに、多くの助言を受けた。この助成金のおかげもあ

り、講演会全体を完全な収支均衡で終えることができた。茨城LOCとして感謝の意を表明する。

[1] <https://www.isas.jaxa.jp/topics/003192.html>

[2] <https://www.eps.s.u-tokyo.ac.jp/focus20220930/>

「天体の衝突物理の解明(XVIII)～表層粒子から探る太陽系天体の進化～」参加報告

辰馬 未沙子¹

1. はじめに

2022年11月9日から11日にかけて、第18回「天体の衝突物理の解明」が開催された。新型コロナウイルス感染症は依然として流行しているものの、ZoomとSlackを用いたオンラインと、千葉工業大学東京スカイツリータウンキャンパスでの現地を両立させたハイブリッド形式での開催となった。なお、感染対策のため現地での懇親会は行われなかった。今年度のテーマは「表層粒子から探る太陽系天体の進化」で、榎戸祐馬氏(東北大学)、松本徹氏(京都大学白眉センター)、松島亘志氏(筑波大学)を迎え、ご講演いただいた。研究会には現地30名、オンライン45名の合計75名の研究者と学生が参加し(図1)、招待講演を含めて現地13件、オンライン6件の合計19件の口頭発表と、現地7件のポスター発表が行われた。参加人数は現地参加のみの開催時よりは多く、オンラインのみの開催時と同等とのことであった。ハイブリッド開催に対応するため、会場のマイクやスピーカー、ミキサーを用いており、質的な不自由さを全く感じる事がなく研究会に参加することができた。講演時間は質疑応答込みで招待講演が60分、一般講演が30分と一般的な学会よりも長い時間に設定されており、じっくりと研究内容を聞くことができた。

本稿では講演の概要と研究会の様子をごく簡単に紹介する。各講演内容についてはあくまで私の理解の範囲内でまとめているが、より詳細な講演内容を知りたいという方は、研究会のwebペー

1. 東京工業大学理学院地球惑星科学系
misako.tatsuuma@gmail.com



図1: 研究会の集合写真(現地とZoom画面).

ジ (<http://www.impact-res.org/impact22/index.html>)にて公開されている要旨を参照していただきたい。

2. 講演概要

以下に研究会のプログラムを示す(敬称略)。なお、*はオンライン発表者であることを示している。

<口頭講演>

11月9日(水)

諸田 智克*(東京大学)

「小惑星リュウグウ表面の微小クレータの統計と岩塊の衝突強度」

黒澤 耕介(千葉工業大学)

「リュウグウの状態方程式モデル作成と炭素質小惑星上の衝突過程への応用」

保井 みなみ*(神戸大学)

「小惑星リュウグウ表層を模擬したサイズ分布を持つボルダー模擬物質へのクレーター形成実験」

榎戸 祐馬*(東北大学)

「リターンサンプル分析から明らかになったリュウグウ母天体の歴史」【招待講演】

松本 徹(京都大学白眉センター)

「微小隕石衝突・太陽風に曝された小天体表面における揮発性物質の振る舞い」【招待講演】

11月10日(木)

松島 亘志(筑波大学)

「天体表層土の力学: 粒子物性進化とバルク力学特性評価」【招待講演】

山本 裕也(神戸大学大学院理学研究科)

「低強度粗粒標的に対する衝突実験: アーマリング効果を含んだクレータースケール則の構築」

豊嶋 遥名(神戸大学大学院理学研究科)

「ハビタブル天体表面を模擬した含水砂標的への斜め衝突実験」

柿木 玲亜(神戸大学大学院理学研究科)

「レゴリスに覆われた基盤岩へのクレーター形成実験: 衝突励起振動による物質移動との関連」

門野 敏彦*(産業医科大学)

「中空プロジェクトイルによる放出物分布」

山口 祐香理(神戸大学)

「標的物性の高速度衝突エジェクタサイズへの影響」

11月11日(金)

辰馬 未沙子(東京工業大学)

「付着N体計算で探るダスト集合体のせん断強度: 彗星表層との比較」

黒崎 健二(神戸大学)

「巨大衝突に伴う大気流出と角運動量輸送への影響」

石田 紗那*(神戸大学理学研究科惑星学専攻)

「コア・マントル構造を持つ含水小天体の衝突破壊と破片速度分布: 標的内部の粒子速度分布の計測」

道上 達広*(近畿大学工学部)

「炭素質隕石に対する衝突実験〜コンドリユール内部のクラック成長」

豊田 優佳里(神戸大学理学研究科)

「多孔質氷球の反発係数: 粘弾性変形及び塑性変形を考慮した非弾性衝突メカニズム」

大野 正和(大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻)

「レーザー衝撃圧縮を受けたSiO₂の変成分布」

多田 賢弘(千葉工業大学地球学研究センター)

「花崗岩の衝撃回収実験: 石英中のFeather Features形成機構への示唆」

<ポスター講演>

松原 光佑(神戸大学理学部惑星学科)

「高速度衝突によって形成されるクレーターの形状と分光特性の観察」

木内 真人(宇宙航空研究開発機構)

「クオータースペース法を用いた低重力下での高速度クレーター形成実験」

櫻井 諒太(神戸大学)

「ダスト集合体の衝突圧密実験」

長足 友哉(東北大学)

「ダスト凝集現象に対するダストのサイズ分布の効果」

佐藤 瑠介(東京農工大学)

「対向集中荷重を受ける2次元弾性円板内の応力伝播の解析」

黒澤 耕介(千葉工業大学)

「ナイロンの状態方程式モデルの作成」

奥山 純吾(日本大学)

「月面衝突模擬実験における発光強度の、温度と衝突角による依存性について」

2.1 招待講演

研究会初日の後半から2日目の前半にかけて、今年度のテーマである「表層粒子から探る太陽系天体の進化」に関連した3件の招待講演が行われた。

榎戸氏と松本氏はリュウグウのリターンサンプル分析結果について詳細に講演された。榎戸氏はX線回折を用いて物質の同定を行った。その結果、ほとんどが含水鉱物であることがわかった。その中には一部水との反応が弱い部分が見つかる一方、200度ほどの高温で形成される珪酸塩も見つかった。これらの分析結果を合わせると、リュウグウ母天体は主には40度くらいの温度が維持され、水が液体になり水質変成を経験したが、表層では水が溶けずに水

質変成を経験せず、より内部では40度を超える高温になったことが示唆される。松本氏はリュウグウのリターンサンプル表面における、太陽風やマイクロサイズ以下の微小隕石による宇宙風化について講演された。サンプル表面にはマイクロサイズのクレーターが見つかっており、それは微小隕石の衝突による破片がさらに衝突した、2次衝突によるクレーターだと考えられる。また、表面のFeSからFeがひげ状に成長した結晶も見つかっており、太陽風との相互作用が示唆される。

土木工学や地盤工学を専門とされる松島氏は、天体表層土の力学について講演された。粒子破碎によるサイズ分布の進化モデルについては、単粒子の破碎実験や1次元圧縮実験の結果とその解釈について紹介された。また、粒子を割り続けることによる形状の進化については、白銀比を用いてイトカワや月の粒子の形状を議論できることを示した。

2.2 一般口頭講演

例年通り一般講演では、招待講演のテーマに限らず、天体の衝突現象に関するさまざまな分野の発表が行われた。以下ではセッションごとにそれぞれ簡単に紹介する。

小惑星リュウグウについてのセッションでは3件の講演が行われた。諸田氏は岩塊の細粒化過程を調べるため、微小クレータを画像から抽出した。その結果、熱疲労による岩塊表面の剥離が起きている可能性が高いことを示した。黒澤氏はリターンサンプルを用いてリュウグウの状態方程式モデルを作成し、リュウグウ母天体の破壊計算をiSALEで行った。その結果、リュウグウの元となる物質は、母天体が衝突を受けた点から少なくとも20 km程度遠方の部分の物質であることを示した。保井氏はクレーター形成について、サイズ分布を持つ岩塊の影響を調べた。その結果、弾丸が表面の岩塊を破壊してエネルギーを散逸し減速するアーミング効果が、サイズ分布の影響で弱くなることを示した。

クレーター形成についてのセッションでは3件の講演が行われた。山本氏は空隙率が高めで強度の低いサンプルを用いてクレーター形成実験を行った。その結果、重力支配のクレーター則には合わないことがわかり、粒子破壊の効果を含まないスケール則を構

築した。豊嶋氏は水を含む砂への斜め衝突によるクレーター形成実験を行った。その結果、含水砂ではクレーターが重力支配ではなく、強度支配域になっていることがわかった。柿木氏は層構造を持つ小惑星でのクレーター形状を調べるため、基盤と粒子層で構成される標的へのクレーター形成実験を行った。その結果、低速度領域と高速度領域でのクレーター形状を得ることに成功した。

エジェクタについてのセッションでは2件の講演が行われた。門野氏は中が空洞の弾丸を打ち込んだときに見られる、垂直なエジェクタの発生メカニズムについて調べた。その結果、弾丸の真真中に穴が開く場合に垂直なエジェクタが発生することがわかった。さらに、サンプルを採取しやすくするためには、円筒やリング型の弾丸の検討が必要であることを示した。山口氏は火星のエジェクタが衛星に到達する現象を模擬して、1次標的に弾丸が衝突し、そのエジェクタが2次標的に衝突する様子を実験で調べた。その結果、エジェクタの標的物質の物性への依存性を明らかにした。

数値計算についてのセッションでは2件の講演が行われた。辰馬氏は付着N体計算でダスト集合体のせん断強度を求めて定式化を行い、彗星67P表層のせん断強度と比較した。その結果、彗星67Pの構成粒子半径が20 μm 以上5 mm以下である必要があることを示した。黒崎氏は大気を持つ惑星同士の斜め衝突を計算した。その結果を用いて、角運動量の観点から大気流出について議論した。

衝突破壊・変形についてのセッションでは3件の講演が行われた。石田氏は水を含んだコアと多孔質マントルを模擬した2層構造の試料への衝突実験を行った。その結果、画像相関法を用いて衝突による物質の変位を得ることに成功した。道上氏は炭素質隕石に対する衝突実験を行い、クラックの入ったコンドリュールの3次元モデルを作成した。その結果、クラックがコンドリュール内部に入るのか表面に沿うのかという違いから、炭素質隕石の種類による強度の違いについて議論した。豊田氏は土星リングの多孔質氷を模擬した試料の反発係数を測定した。その結果、衝突速度と反発係数の関係を求めることに成功した。

衝撃変成についてのセッションでは2件の講演が

行われた。大野氏は粉末SiO₂にレーザーを照射し、微小領域X線回折を用いて衝撃による変成を評価した。その結果、X線回折の線幅が変成の新たな分類の指標となることを示した。多田氏は衝撃変成組織のFeather Featuresという鳥の羽根のような構造の形成機構を調べるため、実験とiSALEでの圧力計算結果を比較した。その結果から、形成されるとききの圧力や衝撃波の伝播方向との関連について議論した。

2.3 ポスター講演

研究会2日目の夕方に現地でのポスターセッションが開催された。前年度に引き続き、学生のポスター講演については3分間のフラッシュトークが行われた。現地では各講演者の周りに人が集まり、熱心な議論が繰り広げられていた。今回は全て現地でのポスター講演であったが、オンライン上であるSlackにもポスターをアップロードし、オンライン参加者も議論に参加できる形態であった。しかし、Slack上での議論は特に見受けられず(ダイレクトメッセージが使われていた可能性はあるが)、ハイブリッド開催において、オンライン参加者と現地参加者がいかに交流するかは今後の課題であると感じられた。

2.4 キャンパス見学ツアー

2日目のポスター講演後、会場の千葉工業大学東京スカイツリータウンキャンパスの見学ツアーが行われた。キャンパス関係者の方々や、千葉工業大学の黒澤耕介氏を始めとした参加者の方々による解説もいただけた。キャンパスはArea IとArea IIに分けられており、Area Iではロボットを中心とした展示を、Area IIでははやぶさ2を始めとした宇宙関連の展示を楽しむことができた。個人的な見どころとしては、Area IIのはやぶさ2の実物大模型や、アニメ「マクロスF (フロンティア)」に登場する変形ロボット「バルキリー VF-25F」を挙げたい。Area Iでのロボットに関する展示では、あまりなじみのない分野ではあるものの、最先端の技術に触れることができ、存分に楽しめた。入場無料なので、機会があればぜひ見に行っていきたい。

3. おわりに

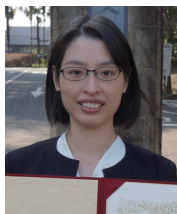
今回は「表層粒子から探る太陽系天体の進化」というテーマで、3人の招待講師を招いて開催された。初のハイブリッド開催ということで、現地とオンラインでの準備をいただいた世話人の皆様には感謝を申し上げたい。Slack上では活発な議論が見受けられなかったが、全体には公開されないダイレクトメッセージを利用した交流は(少なくとも私は)あったので、あまり使われていないと思わずに今後もZoomやSlackを用いたオンライン参加の選択肢が残ってほしいと思う。私は現地参加であったが、実際にオンラインからの口頭発表や質問は数多くあった。オンライン参加という選択肢を残すことは、研究会への参加人数を増やし、活発な議論などの交流を促進し、より多くの参加者にとって実りある研究会にする助けになると信じている。

謝辞

研究会の開催にご尽力いただいた世話人の皆様(岡本尚也氏、杉浦圭祐氏、黒崎健二氏、木内真人氏、大村知美氏、長足友哉氏、寫生有理氏)、そして会場準備をいただいた千葉工業大学東京スカイツリータウンキャンパス関係者の方々に感謝いたします。また、本稿執筆の機会は千葉工業大学の岡本尚也氏よりいただきました。さらに、集合写真は宇宙航空研究開発機構の木内真人氏よりいただきました。重ねて感謝いたします。

著者紹介

辰馬 未沙子



東京工業大学理学院地球惑星科学系 日本学術振興会特別研究員(PD). 東京大学理学系研究科天文学専攻 博士課程修了. 博士(理学). 2022年4月より現職. 専門は惑星形成論. 日本天文学会, 日本地球惑星科学連合, 天文・天体物理若手の会, 日本惑星科学会, 理論天文学宇宙物理学懇談会に所属.

太陽系天体若手研究会2022 (SSBW2022) 開催報告

豊川 広晴¹, 荒木 亮太郎², 池谷 蓮³, 于 賢洋⁴, 菫蒲迫 健介⁵,
鈴木 雄大⁶, 野崎 舜介⁷, 米谷 珠萌⁸, 吉田 有宏⁹

1. はじめに

太陽系の形成・進化に関する科学は、ますます発展を続けています。その背景には、数値計算や室内実験といった手法の改良に加え、近年の宇宙探査や観測技術の飛躍的な進歩が大きく貢献しているでしょう。その一方で、太陽系科学に携わる若手としては、研究分野の細分化により、自身の研究分野以外を包括的に学ぶことは、難しくなっているとも感じられます。若手にとって、近隣分野との意見交換及び連携は、自身の研究を見つめ直し発展させる機会として、大変重要だと考えます。そこで、太陽系科学に関わる若手研究者が広く気軽に交流できる場を目指して、太陽系天体若手研究会が発足されました。本研究会は2021年度に立ち上げられ、2022年11月に2度目の開催がされました。

本研究会では、若手間の交流を大きな目的の一つとしているため、個々の講演発表だけでなく議論や意見交換の時間を可能な限り確保しました。また本研究会では基礎的な知識の共有を重視し、学部生や修士の学生のような、まだ研究の結果が十分出

ていない方にも門戸を広げて参加を募集しました。一方で、本研究会は「若手研究会」と銘打っておりますが、これは若手研究者(学生・PD)、特に研究を始めたばかりの学生でも気軽に参加してもらうためであり、シニアの皆様の参加も歓迎しました。

2. 実施概要

2022年度の太陽系天体若手研究会は、11月16日から11月18日の3日間、各日午後実施されました。現状を鑑みて前年度と同様オンライン形式としました。媒体ツールとしては、各セッションの口頭発表と質疑はZoomを、文字ベースでの議論やスライドの公開にはSlackを利用しました。また、懇親会にはWonder.meというビデオチャットツールを用いました。参加は発表・聴講いずれも無料であり、計69人の方に参加登録していただきました。講演中も常時20~50人程度は参加されており大盛況でした(図1)。

発表件数は一般講演23件+招待講演3件で、各分野に関して議論を深めながら進行することができました。参加者の学年・職階について、参加申請時点で統計を取った内訳を図2に示します。大学院生を中心に、学部生から教授の方まで幅広い方々にご参加いただけました。

一般講演の発表形式としては、発表12分+質疑3分の口頭発表、もしくは5分間のライトニングトークのいずれかを選択できるようにしました。また、各セッションの最後に20分間の議論タイムを設置しました。議論タイムでは、各セッションで発表された研究内容に対しての追加質問やコメントなどを、発表者

1.総合研究大学院大学 物理科学研究科 宇宙科学専攻 博士1年
2.大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻 博士2年
3.神戸大学 大学院理学研究科 惑星学専攻 修士2年
4.東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻
広域システム科学系 博士1年
5.九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 修士2年
6.東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 博士3年
7.東京工業大学 理学院 地球惑星科学系 修士2年
8.明治大学大学院 理工学研究科 物理学専攻 修士2年
9.総合研究大学院大学 物理科学研究科 天文科学専攻 修士2年
toyokawa@planeta.sci.isas.jaxa.jp



図1: 参加者の集合写真.

2022年度参加者の学年・職階

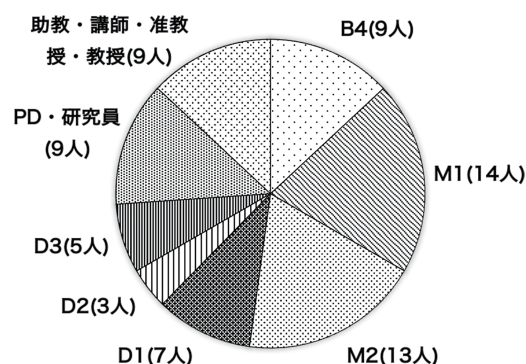


図2: 本研究会参加者の学年・職階の内訳

同士や聴講者を交えてざっくばらんに議論しました。

招待講演は、各日最後のセッションとして行いました。講演時間は、発表40分+質疑20分として実施いたしました。

3. 研究会の内容と雰囲気

本年度に開催されたセッションは、(1)衝突、(2)小

天体・氷天体、(3)惑星内部、(4)地学教育、(5)月、(6)惑星・惑星間空間、(7)円盤の7つでした。それぞれ1~4件の発表が行われ、盛況でした。

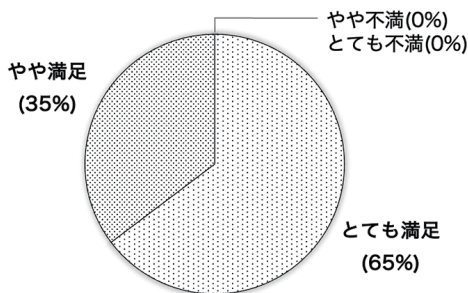
また一般講演に加えて3件の招待講演を行い、それぞれ、JAXA宇宙科学研究所の仲内悠祐氏、東京工業大学の野田夏実氏、東京大学の宮本英昭氏をお願いいたしました。

仲内氏には「分身が月へ行く~月面探査用近赤外分光カメラの開発とその場観測~」というタイトルでご講演いただきました。現在進行中の月極域探査計画LUPEXのカメラ開発のご紹介に加えて、月面における水の生成プロセスに関するわかりやすいご解説をいただきました。

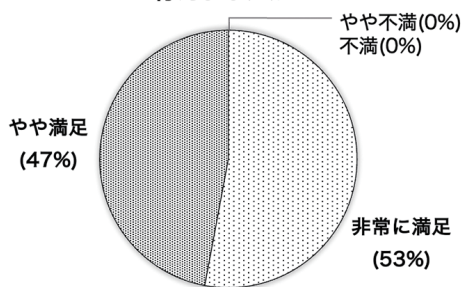
野田氏には「実験室で復元した火星から生命の条件に迫る」というタイトルでご講演いただきました。初期火星でのハビタビリティや、原始細胞を創る環境に対しての実験的アプローチについてわかりやすくご紹介してくださいました。

宮本氏には「宇宙資源開発と太陽系科学」というタイトルでご講演いただきました。小惑星を資源として活用することの可能性や、MMXなどの今後の探査によって切り拓かれる未来について裏話を交えなが

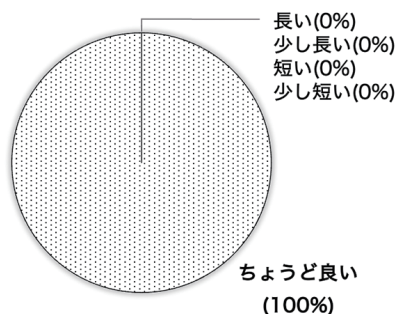
(a) 全体的な満足度はいかがでしたか



(b) 他の参加者との議論・交流は満足に行えましたか



(c) 一般講演の講演時間は適切でしたか



(d) 本研究会の開催時期は適切でしたか

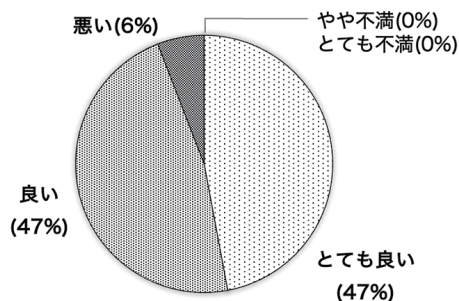


図3: 研究会後の感想アンケートの集計。それぞれ, (a)全体的な満足度, (b)議論・交流に対する満足度, (c)講演時間に対する満足度, (d)開催時期に対する満足度の結果。

らお話しいたきました。

また御三方には、最先端の研究内容をご解説いただいただけでなく、若手にとって自身の研究に活かすような太陽系研究に関する包括的なお話もしていただき、非常に勉強になりました。この場をお借りして、改めてお礼申し上げます。

また、一般講演の各セッションの最後に設けた20分の議論時間では、参加者の皆様同士で積極的な意見交換を行っていただくことができました。このような交流を通じてお互いの分野への理解も進んだと感じます。さらに、2日目終了後のオンライン懇親会には20名程度の方々にご参加いただきました。本研究会を通じて、分野やポジションを問わず同志を持った人々と議論・交流することの楽しさを感じていただければ幸いです。

4. 総括

本研究会は今回で発足から2度目の開催となりました。本年度の世話人には、昨年に引き続き参加したメンバーに加え、新たに複数名メンバーが増えました。世話人経験メンバーが昨年度に培ったノウハウを引き継ぎ、世話人全体で上手く役割分担をすることで、より円滑な運営ができたのではないかと感じています。

図3は参加者の方々に研究会後にご記入いただいたアンケート結果です。全体的な満足度や議論・交流に対する満足度が高く(図3(a),(b)), 参加者の皆様にとって意義のある研究会になっていたようで嬉しく存じます。発表12分+質疑3分の一般講演や発表40分+質疑20分の招待講演、各セッション最後の20分間の議論といったそれぞれの時間の長さについても、適切であったという声が多数でした(図3(c))。

また、研究会の開催時期についても多くの方に満足いただけたようですが(図3(d)), これに関してはより多くの若手が参加しやすいように、最適な開催時期を次回までに検討する必要があるかと考えています。

本研究会の今後としては、2023年度以降も継続的に実施していきたいと考えています。お手伝いいただける世話人も随時募集しております。また、本研究会に対してのご意見やご指摘等も大歓迎ですので、忌憚のない意見をぜひお寄せいただければと存じます。最後になりましたが、本研究会の開催に向けてご協力いただいた方々、本研究会にご参加いただいた方々に改めて感謝申し上げます。皆様のおかげで有意義な研究会を円滑に開催することができました。誠にありがとうございました。

5. タイムテーブルとプログラム

<タイムテーブル>

11/16(水)

13:00 - 13:10 開会の挨拶

13:10 - 14:00 衝突セッション

14:00 - 14:20 議論

14:20 - 14:30 休憩

14:30 - 15:30 小天体・氷天体セッション

15:30 - 15:50 議論

15:50 - 16:00 休憩

16:00 - 17:00 招待講演 仲内悠祐(宇宙科学研究所)『分身が月へ行く～月面探査用近赤外分光カメラの開発とその場観測～』

17:00 - 17:05 初日閉会の挨拶

11/17(木)

13:00 - 13:00 二日目開会の挨拶

13:00 - 14:45 惑星内部・生命セッション

13:45 - 14:00 議論

14:00 - 14:10 休憩

14:10 - 14:25 地学教育セッション

14:25 - 14:35 議論

14:35 - 14:40 休憩

14:40 - 15:40 月セッション

15:40 - 16:00 写真撮影& 休憩

16:00 - 17:00 招待講演 野田夏実(東京工業大学)

『実験室で復元した火星から生命の条件に迫る』

17:00 - 17:05 二日目閉会の挨拶

11/18(金)

13:30 - 13:30 三日目開会の挨拶

13:30 - 14:30 惑星・惑星間空間セッション

14:30 - 14:50 議論

14:50 - 15:00 休憩

15:00 - 16:00 円盤セッション

16:00 - 16:20 議論

16:20 - 16:30 休憩

16:30 - 17:30 招待講演 宮本英昭(東京大学)『宇宙資源開発と太陽系科学』

17:30 - 17:35 閉会の挨拶

<プログラム>

11/16(水)

○衝突セッション [座長:米谷珠萌]

13:10-13:25 山口祐香理(神戸大学理学研究科惑星学専攻)

『標的物性の高速度衝突エジェクタサイズへの影響』

13:25-13:40 内田雄揮(東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻JAXA 宇宙科学研究所)

『Phobos 捕獲年代を考慮したクレーター年代関数の導出』

13:40-13:55 米谷珠萌(明治大学大学院理工学研究科物理学専攻)

『ダイヤモンドアンビルセルを用いた小天体衝突再現実験について』

13:55-14:00 松原光佑(神戸大学 理学部 惑星学科)

『高速度衝突によって形成されるクレーターの形状と分光特性の観察』

○小天体・氷天体セッション [座長:池谷蓮]

14:30-14:45 鈴木雄大(東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻)

『彗星の「見かけのD/H比」に対する多重散乱・自己吸収効果の影響』

14:45-15:00 窪田暉(京都産業大学理学研究科物理学専攻)

『エウロパに間欠泉はあるのか?-ALMA データ

アーカイブからの探索-』

15:00-15:15 池谷蓮(神戸大学理学研究科惑星学専攻)

『小天体との近接遭遇におけるリングの安定性』

15:15-15:30 野崎舜介(東京工業大学地球生命研究所)

『分子動力学シミュレーションで探る, タイタンにおけるガスハイドレートの形成と進化』

○招待講演1 [座長:荒木亮太郎]

16:00-17:00 仲内悠祐(宇宙科学研究所)

『分身が月へ行く~月面探査用近赤外分光カメラの開発とその場観測~』

11/17(木)

○惑星内部・生命セッション [座長:菖蒲迫健介]

13:00-13:15 于賢洋(東京大学総合文化研究科宇宙地球部会)

『「マグマの生成・移動の効果」が引き起こす月の熱史モデルにおける指状のマグマ上昇プロセス』

13:15-13:30 菖蒲迫健介(九州大学理学府地球惑星科学専攻)

『弱圧縮SPH法によるマントル対流計算』

13:30-13:45 三堀遼太(東京大学総合文化研究科宇宙地球部会)

『カナダ・サグレック岩体の変成堆積岩(> 39.5 億年前)の岩石鉱物学・地球化学的分析から見る初期生命の代謝および生態系』

○地学教育セッション [座長:鈴木雄大]

14:10-14:25 荒木亮太郎(大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻)

『なぜ地学はマイナー科目になったのか? ~ 戦後日本の中理教育における地学科の変遷と現状~』

○月セッション [座長:豊川広晴]

14:40-14:55 荒木亮太郎(大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻)

『レゴリス反射率から水氷検量線を求める手法の構築および月極域探査への適用と考察』

14:55-15:10 加藤正久(京都大学大学院理学研究科地球惑星化学専攻)

『月探査における光電子・オージェ電子観測応用の可能性』

15:10-15:25 豊川広晴(総合研究大学院大学物理科学研究科宇宙科学専攻)

『SELENEの観測に基づく, 月初期に形成した純粹斜長岩に含まれる水が内部起源である根拠』

○招待講演2 [座長:于賢洋]

16:00-17:00 野田夏実(東京工業大学)

『実験室で復元した火星から生命の条件に迫る』

11/18(金)

○惑星・惑星間空間セッション [座長:于賢洋]

13:30-13:45 野口里奈(新潟大学自然科学系)

『火星露頭における柱状図自動作成のための機械学習の試行』

13:45-14:00 平田佳織(東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻)

『表面組成データの多変量解析による水星の化学組成ユニットの同定』

14:00-14:15 小長谷智哉(北海道大学)

『レゴリス角礫岩質隕石に記録された過去の太陽風フラックス』

14:15-14:30 眞田聖光(東京大学新領域創成科学研究科複雑理工学専攻)

『複数の衛星観測データを用いた木星磁気圏の構造解明』

○円盤セッション [座長:吉田有宏]

15:00-15:15 神野天里(神戸大学大学院 理学研究科 惑星学専攻)

『動径方向に不連続性を持つ原始惑星系円盤におけるpebble accretionを考慮した惑星系N体シミュレーション』

15:15-15:30 駒木彩乃(東京大学理学系研究科物理学専攻)

『原始惑星系円盤進化の中心星質量依存性』

15:30-15:45 吉田有宏(総合研究大学院大学/国立天文台)

『輝線の圧力広がりを用いた原始惑星系円盤ガス分布の直接的制約』

15:45-16:00 長足友哉(東北大学大学院理学研究

科地学専攻)

『地球外模擬有機物の真空・低温環境での付着力測定に向けて』

○招待講演3 [座長:野崎舜介]

16:30-17:30 宮本英昭(東京大学)

『宇宙資源開発と太陽系科学』

著者紹介

豊川 広晴



総合研究大学院大学 物理科学研究科 宇宙科学専攻 5年一貫制博士課程3年. 挑戦型SOKENDAI特別研究員. 専門は惑星地質学. 日本惑星科学会, 日本地球惑星科学連合に所属.

鈴木 雄大



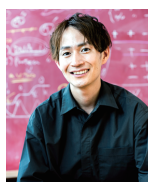
東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 博士課程3年. 日本学術振興会特別研究員 (DC2). 専門は惑星希薄大気, 装置開発. 地球電磁気・地球惑星圏学会, 日本地球惑星科学連合に所属.

荒木 亮太郎



大阪市立大理学部地球学科卒 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻 博士後期課程2年. 専門は惑星地質学, 火山学. 日本惑星科学会, 日本火山学会, JpGU所属.

野崎 舜介



東京工業大学 理学院地球惑星科学系/地球生命研究所 修士2年. 専門は惑星科学. 日本惑星科学会, 日本地球惑星科学連合に所属.

池谷 蓮



神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻 博士前期課程2年. 日本惑星科学会, 日本地球惑星科学連合に所属.

米谷 珠萌



明治大学大学院 理工学研究科 物理学専攻 博士前期課程2年. 専門は地球内部物理学, 高圧実験. 日本鉱物科学会に所属.

于 賢洋



東京大学大学院 総合文化文化研究科 広域科学専攻広域システム科学系 博士課程1年. 惑星内部物理学を専攻.

吉田 有宏



総合研究大学院大学 物理科学研究科 天文科学専攻 5年一貫制博士課程2年. 国立天文台科学研究部. 専門は惑星系形成論. 日本惑星科学会, 日本天文学会, 日本地球惑星科学連合に所属.

菟浦迫 健介



九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 地球内部ダイナミクス研究分野 修士2年. 専門は惑星内部の数値流体計算. 日本惑星科学会, 日本地球惑星科学連合に所属.

New faces

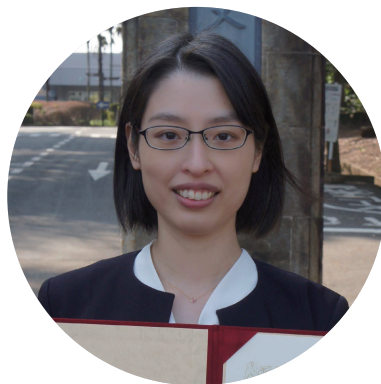
辰馬 未沙子¹ (東京工業大学理学院地球惑星科学系)

2022年3月に東京大学理学系研究科天文学専攻で博士号を取得した辰馬未沙子(たつうまみさこ)と申します。現在は、東京工業大学理学院地球惑星科学系奥住研究室で日本学術振興会特別研究員として研究しています。専門は惑星形成で、ダスト粒子シミュレーションを用いてダスト集合体の物質強度を求め、彗星や小惑星などの太陽系小天体の物性と比較し、惑星形成過程を調べています。今回、この場をお借りして、学生生活を振り返りながら自己紹介をしたいと思います。

最初に、私が惑星科学に興味を持ったきっかけについてお話しします。私は小学生の頃から物理が好きでした。東京大学の理科一類に入学し、学部1年の後期で小久保英一郎さんの惑星形成論に関する授業を受け、遠いと思っていた宇宙が簡単な式で表現できることに感動し、惑星形成を研究したいと思いました。

理学部天文学科に進学後、学部4年の研究室配属では、惑星形成の観測を勉強するために、田村元秀さんの研究室に入りました。卒業研究では、IM Lupという恒星の周りの原始惑星系円盤のすばる望遠鏡での偏光観測データを解析しました。田村さんの研究室では、学部4年のときに台湾の中央研究院天文及天文物理研究所(ASIAA)に行き、原始惑星系円盤の電波観測データを解析したり、修士1年の夏に南アフリカ赤外線天体観測所(IRSF)に行き、惑星トランジット観測をしたり[1]、さまざまな海外経験を積むことができました。

修士課程では、東京大学理学系研究科天文学専攻の小久保さんの研究室(場所は国立天文台)で、微惑星形成理論を研究しました。人生に迷っていた私



は、途中で1年間デンマークのコペンハーゲン大学に交換留学し、その分修士課程を1年延長しました。その後、就職か博士課程に進むか迷い、企業インターンにも行ったのですが、もっと研究したいと思い、博士課程に進学しました。修士論文では、岩石ダスト集合体の内部密度進化を考慮した、ダスト層の重力安定性解析を行いました[2]。

時間が少し戻りますが、修士論文を執筆する少し前、私にとって重要なターニングポイントが訪れました。国立天文台の片岡章雅さんに誘われ、ダスト集合体の数値計算をガッツリやれることになったのです。東北大学の田中秀和さんにもお世話になり、ダスト粒子シミュレーションについて多くのことを学びました。

同時期、これも私にとって大きなターニングポイントですが、大学院生活で出会った年上の研究者と結婚しました。そして、研究者のパートナーを見ているうちに、私自身も研究者を目指そうと思うようになりました。研究者としての出産などのライフプランを考える中で、任期や住む場所がまだ決まっていなかったボスドクになってからではなく、学生でも子供を預けることができる国立天文台の保育ルームなど、出産や

1. misako.tatsuumi@gmail.com

育児のための環境が整っている今、つまり学生のうちに子供を産みたいと思うようになりました。

結果として、私は博士課程の間に2度の出産を経験しました。第1子は2018年11月に、第2子はコロナ禍の2021年5月に生まれました。それぞれ半年間休学したため、博士課程に進学してから卒業するまでに4年かかりました。妊娠や出産はプライベートな話ですが、この場をお借りして、周りに当事者がいてもなかなか見えてこない、研究者の出産や育児について話をしようと思います。

まず、妊娠初期はつわりによる体調悪化が激しく、2ヶ月間ほど研究活動を行えませんでした。第2子妊娠中には、重症妊娠悪阻と診断され1週間入院しました。妊娠の時期は完全には予測できないため、つわりの酷い時期の研究活動をあらかじめセーブしておくことは不可能でした。この時期の学会では、発表直前に部屋の外で吐いたり(JpGU2018)、発表をキャンセルしたり(惑星科学会2020年秋季講演会)、周りの方々には大変ご迷惑をおかけしました。

つわりが終わっても、妊娠中の出張や日々の通学には大きな制限がありました。出張中の新幹線や飛行機などの長距離移動は体への負担が大きいと判断し、第1子妊娠中は行くことを断念した学会がありました。また、私は通学するだけで体力を消耗し、研究に集中できる時間が激減しました。しかし、第2子のときはコロナ禍のため学会や研究会にオンラインで参加できたり、日々の研究を在宅勤務で行うことができたり、研究活動を無理なく続けることができました。妊娠中の体調は個人差が大きいものですが、私のように体調が安定しない場合もあるので、オンライン参加や在宅勤務という選択肢は今後も残ってほしいと思います。

出産後は研究活動に復帰するため、定期利用できる保育園を探しました。私は第1子を11月に出産し、その直後に在住自治体の保育園の翌年度4月入園での申し込みをしました。しかし、私は学生であったため優先順位が低く、その保育園には落選しました。もちろん、年度途中での空きはありませんでした。

結局、私は2度の産後の復帰時どちらも国立天文台の保育ルームに子供を預けました。現在は子供2人とも自宅近くの保育園に転園していますが、私は第1子を生後5ヶ月から、第2子を生後3ヶ月半から預

け始めました。国立天文台の保育ルームの良いところは、学生であっても預けられ、定員に余裕があるため年度途中でも預けられるという点です。子供が生まれる時期は完全にはコントロールできないため、年度途中でも預けられる環境は非常にありがたいものでした。これは産後の復帰に限らず、乳幼児を連れて引っ越しの際にも言えることですが、大学や研究所の保育施設を定員に余裕がある状態で維持することは、乳幼児を抱える研究者を助けることにつながります。

保育施設利用開始後は自由に出張に行けるかと思いきや、そんなことはありませんでした。母乳育児をしていた私は、第1子が0歳のときに子供をパートナーに任せて出張に行った結果、授乳間隔が空きすぎて乳腺炎になりかけました。体質によりますが、私の場合は胸が張って非常に痛くなり、出張先での研究活動に集中できませんでした。しかし第2子が0歳のときは、コロナ禍のため学会や研究会にオンラインで参加でき、子供と離れて出張に行く必要がなく助かりました。

パートナーと一緒に同じ学会や研究会に参加したいと考え、子供を連れて出張に行くことを検討したこともありました。しかし、新幹線などの長距離移動は負担が大きいと判断し、子連れ出張を断念しました。夜に慣れない場所で子供の世話をすることや、懇親会に出る時間がないこと、託児所に預けるための子供の昼食を毎日用意すること、大量の着替えの洗濯が必要なことなども、子連れ出張を断念する理由となりました。子供の性格など個人差がありますが、子供がいると出張に行きづらくなるので、オンライン参加という選択肢は今後も残ってほしいと切に願います。

日々の研究に関しては、保育園に子供を預けられる限られた時間内でやりくりしています。最近、保育園のコロナ対応による遅めの登園のお願いがあることや、遅くまで預けて子供が疲れ果ててしまうことを避けるため、8時半に預けて17時半に迎えに行っています。私は現在自宅から片道1時間半ほどかかる場所に通っていますが、在宅勤務のおかげで通勤時間が大幅に減り、研究に時間を使えています。とはいえ、子供が保育園で風邪を移されて熱を出し、治ったと思ったらまた風邪を移されることを繰り返し、1ヶ月のうち半分も保育園に行けないような月も

ありました。育児のために研究活動がペースダウンして苦しいときもありますが、それでもオンライン参加や在宅勤務といった選択肢があることで、研究者が育児によってキャリアを中断せずに研究を続けていくことができると信じています。

最後に、博士論文の話をしたと思います。博士論文の執筆時期は第2子の生後半年頃で、夜中に2, 3回起きて授乳をしており、寝不足でとても大変でした。博士論文のタイトルは「惑星形成におけるダスト集合体の物質強度」で、田中さんや片岡さんとの共同研究の成果をまとめました。内容はだまかに3つの研究で構成され、修士課程の頃から研究を始めて第1子出産後に投稿論文が受理された、ダスト集合体の引張強度についての研究[3]、第1子出産復帰後に研究を始めて第2子出産後に投稿論文が受理された、ダスト集合体の回転破壊についての研究[4]、そして現在育児に追われながら投稿論文を執筆中の、ダスト集合体の圧縮強度とその応用としての太陽系小天体の密度との比較についての研究です。どの研究も共同研究者やパートナーの理解と協力のおかげで

遂行できました。博士論文に関しては、東京大学理学系研究科の研究奨励賞を受賞しました。この場をお借りして関係者の方々に深い感謝を申し上げます。

東京大学で博士号を取得した後は、日本学術振興会特別研究員(PD)に採用され、東京工業大学の奥住さんと一緒に研究を続けています。ダスト粒子シミュレーションも使いつつ、新しいことに挑戦したいです。今後も研究時間が思うように取れないことが予想されますが、私にしかできないような研究をして投稿論文を書き、なんとか研究業界で生き残ってみたいです。どうぞよろしくお願いたします。

参考文献

- [1] Hirano, T. et al., 2016, ApJ 820, 41.
- [2] Tatsuuma, M. et al., 2018, ApJ 855, 57.
- [3] Tatsuuma, M. et al., 2019, ApJ 874, 159.
- [4] Tatsuuma, M. and Kataoka, A., 2021, ApJ 913, 132.

金丸 仁明² (東京大学・地球惑星科学専攻)

東京大学の金丸仁明(かなまるまさのり)と申します。現在は日本学術振興会の特別研究員として地球惑星科学専攻の杉田研究室でポスドクをしています。気づけば学位を取得してから3年が過ぎようとしており、New Facesへの投稿も最後のチャンスとなりましたので、これを機に簡単に自己紹介をさせていただきます。

九州の山間の村¹で生を受けてからは、進学や就職を機に少しずつ都会へと移動していく半生を送ってきました。宇宙に興味を持ったルーツは、星が綺麗な場所で育ったことにあります。小学生の頃は、図鑑で覚えた星や星座を夜空の中に探したり、望遠鏡で月



や惑星を見たりしていました。自分で工夫しながら自然の中で遊ぶことが多く²、自分のマイペースな生き方や研究スタイルはこの辺りに源流があるのかなと思っています³。中学校時代は、野球と駅伝に明け暮

2. kanamaru@eps.s.u-tokyo.ac.jp

¹大分県竹田市。九州出身というとしばしば「暖かそう」という感想をもらうが、標高数百メートルを超えてくと東京や大阪の平野部よりは厳しい冬が待っている。あと古い家は気密性が低くて屋内でも吐く息が凍る。

²探検したり、秘密基地を作ったり、とても充実していた。

³人と比べて落ち込むことの少ないタイプ、博士課程を生き抜くには都合がよかった。

れていましたが、朝読書の時間に眺めていたダブル宇宙望遠鏡の写真集やWindows VISTAで動かしたシミュレーションソフトMitakaが宇宙との接点でした。高校時代は、親元を離れて寮生活をしながら、学校に通っていました。スパルタな指導方針でテストが多かったため、脳内のメモリ性能が最盛期を迎えました。天文学や地球惑星科学との接点はあまりなくて、進路決定のための情報収集やアクションはできていなかったと思います⁴。物理学を学んでから宇宙の研究ができる点に惹かれて⁵、大阪大学の理学部物理学科に進むことにしました。

大学では「音楽やりたいなあ...」と思っていたところ、大阪大学男声合唱団⁶という部活に迷い込み、熱い青春を過ごすこととなります。学部の際は、付け焼き刃の知識で試験に臨んでおり、勤勉な物理学徒ではありませんでした。もっと本を読んで勉強していたらよかったと毎日後悔しながら研究しています。「宇宙」の研究をしたいという漠然とした思いが惑星科学に向かうようになったのは、探査機「はやぶさ」の影響が大きかったと思います。ギリギリ手が届く「身近な宇宙」に憧れて、惑星探査に関わりたいと思うようになりました。希望が叶い、大学4年時の研究室配属から佐々木晶教授のもとで研究を始めることになりました⁷。研究室に入ると測地学の本読みから始めて、小惑星のような不規則な形状をした小天体の重力場のモデリングに取り組むようになります⁸。例えば、寄り道の多い大学院生活でした。当時は、副専攻として大学院生に5年一貫の教育カリキュラムを提供する博士課程教育リーディングプログラムとい

う教育研究事業が走っていて、大阪大学でも多様なプログラムが展開されていました。海外に行けそうという曖昧な動機で「超域イノベーション博士課程プログラム」の門戸を叩きました。文理融合のリベラルアーツとでも言うような怒涛のコースワークをこなしました⁹。大学院生としての本業の研究時間が削がれたことは否めないのですが、異分野の研究をする同世代の仲間ができたことは大きな財産でしたし、学位取得やその後のキャリア構築への励みになりました。

大学院で最初に取り組んだ研究テーマは、小惑星の内部構造というマニアックな内容でした[1]。重力の小さな小惑星Itokawaでは、探査機の軌道から天体内部の密度分布を制約するのは困難であったため、低地に広がる平坦な地形(smooth terrain)の分布を用いたアプローチを提案しました[2]。当時は小惑星の内部構造や形成史についての研究が何につながっていくのか見えていませんでした。しかし、その後はやぶさ2やOSIRIS-REx, DART/Heraなどの小惑星探査ミッションが続き、コマ型小惑星や二重小惑星の姿を見せてくれました。小惑星の形態と進化史を結ぶ統一的な描像を描くためのヒントをくれたように思います。

自由奔放な大学院生活を送っていた分、「ひとりて困る」という経験もたくさんしました¹⁰。手探りで始めた研究が論文になるのにも時間がかかりました。大きな転機となったのは、フランスのニース天文台での滞在でした。修士論文を終えた後、ニースで行われた研究会でポスターを貼っていたところ、Mark Wicczorek博士が興味を持ってくれて、ニース天文台に2ヶ月ほど滞在して研究することになりました¹¹。

⁴始まる前から情報戦で負けていることが多い自分のスタイルは、この辺りに源流がある。とはいえ、都会と田舎の情報格差は如何ともしがたいものがある。そんな環境の中で、大学院まで行くことを応援してくれた家族には感謝している。自分が履かせてもらった「下駄」の中で一番高いのがそれだと思っている。

⁵最終的な決め手は、大阪大学のキャンパスを地図で見たとときに緑が多そうという、なんとも不純(むしろ純粋)な動機だった。そのとき地図で見ていた豊中キャンパスの「大高の森」でハンモックを広げて、ぶかぶか研究することになる。

⁶男だけで合唱をする硬派な音楽ジャンル。

⁷私が希望の研究室を探していたのは、佐々木教授が国立天文台から大阪大学に異動してまもない時期で、「ラーメン王が来た」という噂が広がっていた。

⁸とはいえ、最初のうちは何をしたら研究になるのか、そもそも研究はどうやって進めるものなのか、何も分かっていなかった。

⁹気づくと、マーシャル諸島でボートを操縦して町に水を買に行ったり、大阪北部地域を盛り上げるためにショッピングモールの観光戦略を考えたりしていた。

¹⁰自分でやり切る力が付いたとも言える。人に相談するためには、手土産となる進捗が欲しくて、素直に「困った」と相談できないまま時間が過ぎていく。そして、過ぎ去った時間に見合うだけの進捗を生まねばならないという強迫観念のループ。健康に悪いので、気軽に相談に行くべきだと思う。ただ、何をしたいのか考え続けて自分と向き合う時間は無駄ではなかった(少なくとも無駄にしないように生きていこう)と思っている。

¹¹JSPS研究拠点形成事業「惑星科学国際研究ネットワークの構築」(コーディネーター:杉田精司教授)に支援いただいた。感謝申し上げます。

その後も何度か訪れる機会を得て、今でも関係が続いています。ニースは当時の自分¹²を見つけて背中を押してくれた町で、とても思い入れの深い場所です。

博士課程在学中、はやぶさ2が小惑星 Ryugu に到着しました。光学航法カメラチームでデータ解析に参加していたのですが、自分で提案した研究テーマにも挑戦したいと思うようになり、小惑星に働く YORP 効果の数値シミュレーションを始めました [3]¹³。YORP 効果は、小惑星から発する熱放射の異方性によって生じるトルクのことで、小惑星の自転進化を引き起こします。こうした非重力効果は、小惑星の自転進化だけでなく軌道進化や天体形状の進化にも関わっています。そして、これまで研究で扱ってきた小惑星の3次元形状のノウハウが使いそうだと気づいた時、雷に打たれたような衝撃と興奮を感じました¹⁴。研究を始めて5年経ってやっと、自分はこうやって生きていくぞというスタイルあるいは覚悟のようなものが固まったのだと思います。マイペースな私を程よい距離感で見守り続けてくれた指導教員や家族にはとても感謝しています。特に、私の一番の理解者であり、いつも支えてくれる妻には感謝してもしきれません。

学位をとった後は、新学術領域研究「水惑星学の創成」に参加し、宇宙科学研究所の臼井寛裕教授・岡田達明准教授のもとでポストドクとして2年間研究をしました。小惑星の力学進化を研究しながら、はやぶさ2やHeraなどの小惑星探査ミッションに密接に関わるようになりました。学位をとってからはコロナ禍が続いている一方で、じっくり研究に取り組む機会をもらえたとも思います。私は実験系ではないのですが、ものづくりと並行して研究を進めていく方が性に合っているので、数値シミュレーションのライブ러리開発も行っています¹⁵。小惑星探査から得られた地質や熱物性をもとに、小惑星と太陽系の進化史に迫れるような研究をしていきたいと思っています。どうぞよろしくをお願いします!¹⁶

参考文献

- [1] Kanamaru, M. and Sasaki S., 2019, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN 17, 3, 270.
- [2] Kanamaru, M. et al., 2019, Planetary and Space Science 174, 32.
- [3] Kanamaru, M. et al., 2021, Journal of Geophysical Research: Planets 126, e2021JE006863.

¹²当時は、自分の研究が世界に刺さっていないあという不安が大きかった。自分で研究テーマを設定するのは荷が重くて、明確な方針も見えないでいた。

¹³D3の夏から新しい事を始めるのは、なかなかリスクな選択だったと思う。賢明な読者におかれましては、早めに学位論文の構想をまとめることをお勧めする。でも、これが終わるまでは絶対に他のことをしたくないって思うことはありますよね。

¹⁴Eureka!!(エウレカ!!)確かにそう叫んでいた。

¹⁵小惑星の力学シミュレータAstroshaper(<https://github.com/Astroshaper/ThermoPhysicalModeling.jl>)。試しに動かしてみた!など、フィードバックをもらえると励みになります。Julia言語で作っています。まだまだユーザの少ないプログラミング言語ですが、数値シミュレーションを自分で書きたい人には特におすすめです。

¹⁶最後に、この小さな文字も読んでくれた読者の皆さん、ありがとうございます!

JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第155回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第156回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿

◇日本惑星科学会第155回運営委員会議事録

日時：2022年12月6日(火)～12月12日(月)

議題：

日本学術会議「学術の中長期研究戦略」への公募案について

運営委員会委員：

出席者22名

中村 昭子, 竝木 則行, 中本 泰史,
関根 康人, 奥住 聡, 寺田 直樹, 田中 秀和, 小林 浩,
関 華奈子, 千秋 博紀, 大竹 真紀子, 佐伯 和人, 薮田 ひかる,
保井 みなみ, 荒川 政彦, 白井 寛裕, 倉本 圭, 田近 英一,
中島 健介, 中村 智樹, 三浦 均, 百瀬 宗武

欠席者1名

玄田 英典

成立条件:期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす。

議決方法:上記期間内に steering-ml@wakusei.jp 宛に投票。

議題：

日本学術会議「学術の中長期研究戦略」の公募に関し、惑星科学会から応募予定の以下の3つを提案し、その承認および意見を求める。

1. 国際宇宙探査と連携した戦略的火星探査 提案者:関 華奈子 会員
2. 惑星科学, 生命圏科学, および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画 (LAPYUTA) 提案者:土屋 史紀 会員
3. 惑星探査コンソーシアム 提案者:竝木 則行 会員

内容:

秋の運営委員会での手順に従い将来構想検討作業部会にて議論を行った結果、日本学術会議「学術の中長期研究戦略」の公募(12月16日申請締切)に、上記の3つの案を応募することを決定した。

その決定に伴い、公募へは惑星科学会運営委員会での審議が必要であるため、上記3つの案について承認及び意見を求める。

審議結果:

各提案は以下の通り、承認された。

- 1.(承認20・不承認0)
- 2.(承認22・不承認0)
- 3.(承認21・不承認0)

なお、提案者及び提案グループに所属する運営委員は自身の提案には回答していないため、提案毎に票数が異なっている。

以上

◇日本惑星科学会第156回運営委員会議事録

日時: 2022年12月26日(月)～2023年1月5日(木)

議事:第17期役員等の選出について

- 報告1 会長選挙結果
- 報告2 運営委員選挙結果
- 報告3 会長による運営委員の選任
- 報告4 各専門委員会委員長の選任
- 議案1 副会長の選任
- 議案2 作業部会委員長の選任
- 議案3 監事候補者の選出

運営委員会委員:

出席者21名

竝木 則行,
玄田 英典, 保井 みなみ, 奥住 聡, 関根 康人, 大竹 真紀子,
千秋 博紀, 小林 浩, 田中 秀和, 諸田 智克, 瀧川 晶,
白井 寛裕, 三浦 均, 横田 勝一郎, 中本 泰史, 亀田 真吾,
関 華奈子, 村上 豪, 百瀬 宗武, 野村 英子, 癸生川 陽子

欠席者0名

成立条件:期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす。

議決方法:上記期間内に steering-ml@wakusei.jp 宛に投票。

報告1:会長選挙結果

有権者数 626

投票総数 115[有効票115]

投票率 18.4%

得票数	氏名	所属組織
108	竝木 則行	国立天文台 RISE月惑星探査プロジェクト
2	田中 秀和	東北大学 理学研究科
5	散票	

以上により、第17期会長に 竝木 則行 会員が選出された。

報告2:運営委員選挙結果

有権者数 626

投票総数 924(投票者数77×12名連記)

[有効票810, 白票75, 無効票39]

投票率 12.3%

順位	得票数	氏名	所属組織
1	33	玄田 英典	東京工業大学 地球生命研究所
2	32	保井 みなみ	神戸大学 大学院理学研究科
2	32	奥住 聡	東京工業大学 理学院
4	31	関根 康人	東京工業大学 地球生命研究所
5	27	大竹 真紀子	会津大学
6	26	千秋 博紀	千葉工業大学
7	23	小林 浩	名古屋大学 大学院理学研究科
8	22	田中 秀和	東北大学 理学研究科
9	20	諸田 智克	東京大学
9	20	瀧川 晶	東京大学 大学院理学系研究科
11	19	白井 寛裕	宇宙航空研究開発機構
12	18	三浦 均	名古屋市立大学 大学院理学研究科
次点*	18	和田 浩二	千葉工業大学 惑星探査研究センター
次々点*	18	関 華奈子	東京大学 大学院理学系研究科

散票 計 471

*日本惑星科学会役員選挙規定 第5章第18条より順位を決定

第5章 運営委員選挙

第18条 得票順に12名を選出する。得票同数の場合は年少者を優先する。

以上により、得票順に上位12名が、第17期運営委員に選出された。

報告3:会長による運営委員の選任

上記の選挙結果及び会則第12条3項により、下記8名が会長によって第17期運営委員に選任された。

横田 勝一郎, 中本 泰史, 亀田 真吾, 関 華奈子,
村上 豪, 百瀬 宗武, 野村 英子, 癸生川 陽子

報告4:各専門委員会委員長の選任

上記の選挙結果及び会則第12条4項により、以下のとおり、各専門委員会委員長が会長によって選任された。

総務専門委員会長 保井 みなみ
行事部会長 玄田 英典
広報専門委員会長 奥住 聡
財務専門委員会長 横田 勝一郎
編集専門委員会長 三浦 均
欧文誌専門委員会長 大竹 真紀子
将来計画専門委員会長 小林 浩
惑星探査専門委員会長 関根 康人
情報化専門委員会長 千秋 博紀
対外協力・連携専門委員会長 亀田 真吾

(以下より, 議案)

議案1:副会長の選任

会則12条2項により、副会長に下記2名が会長によって選出されたので、承認を求める。

副会長 今村 剛, 中村 昭子

審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可21・否0)。

議案2:作業部会委員長の選任

会則12条7項により、作業部会委員長に下記1名が会長によって選出されたので、承認を求める。

事務局体制検討作業部会長 中本 泰史

審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可21・否0)。

議案3: 監事候補者の選出

会則12条6項により、監事候補者として適任と思われる方2名を選出頂きたい。

審議結果:

会長から 大槻 圭史 会員と 岩田 隆浩 会員が推薦された。

運営委員による投票の結果、全会一致で大槻・岩田両会員が監事候補者に選出された。

以上

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2023年2月5日までに、賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです。社名等を掲載し、敬意と感謝の意を表します。(五十音順)

- ・Harris Geospatial 株式会社
- ・株式会社ナックイメージテクノロジー
- ・株式会社ノビテック

編集後記

こんにちは。遊星人新編集幹事の関口朋彦です。「新」と言っても編集委員自体は手元の資料では11年目でした。これまで長い間編集委員としてお名前入らせていただいておりますが、今回から幹事を仰せつかり、編集長/編集幹事のお仕事が他の編集委員とはぜんぜん違うということを今になって知ったのです。実は私、遊星人原稿の校正作業って、(恥ずかしながら)出版会社の方がしてくれていたような気でしたのですが、実は委員長が(そしておそらく幹事が)全ての記事の体裁、句点・句読点や引用文献の書式などの詳細にわたりひじょうに細かなチェックをなさっていたとは。

今回、三浦編集長と瀧川前編集幹事に支えられ(入稿直前にすさまじい数の質問メールに対して一つひとつ寛容に答えて

いただき)、なんとか発刊に漕ぎ着けたところです。3月号の編集作業時期はちょうど年度末、講義の試験問題作成・採点、卒論指導、そして小規模地方国立大学にいる手前、大雪山の施設長、教員免許状更新講習委員長、理科教育専攻代表と、大学業務の兼任兼任で手一杯。あたふたまくりでした。でもこの時期でてこ舞いなのは皆さん同じ。もしこれに子育て・介護といった方でも手一杯の方だったらどんなだったんだろうと(僕は小鳥を6羽育てていますが笑)。

ここ数日、かなり気が遠くなる思いで画面に向かっていました。ダメダメなガラスの○十代新米編集幹事、どうぞよろしくお願いします。これから成長できるかな。(関口)

編集委員

三浦 均 [編集長]

関口 朋彦 [編集幹事]

荒川 創太, 上栢 真之, 岡崎 隆司, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇氣, 黒澤 耕介, 小久保 英一郎, 坂谷 尚哉, 杉山 耕一郎, 瀧 哲朗, 瀧川 晶, 田中 秀和, 谷川 享行, 長 勇一郎, 成田 憲保, 野津 翔太, はしもと じょーじ, 濱野 景子, 本田 親寿, 諸田 智克, 山本 聡, 和田 浩二

2023年3月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第32巻 第1号

定 価 一部 1,925円(税込・送料込)
 編集人 三浦 均(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)
 印刷所 〒224-0044 神奈川県横浜市都筑区川向町787-1 株式会社 シュービー
 発行所 日本惑星科学会事務局
 〒604-8206
 京都市中京区新町通三条上ル町頭町112 菊三ビル2階 201号室(Ogyaa's御池内)
 Tel: 075-708-5984
 (連絡はできる限り電子メールをお使いいただきますようご協力お願いいたします)

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています。

複写される方へ

本誌に掲載された著作物を個人的な使用の目的以外で複写したい方は、著作権者から複写等の行使の依託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル 学術著作権協会

TEL : 03-3475-5618 / FAX : 03-3475-5619

e-mail : kammori@msh.biglobe.ne.jp

著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、直接日本惑星科学会へご連絡下さい。

1. 原稿の様式

○投稿原稿：

受領可能なファイルの形式は、MS WORD, PDF, またはテキストファイルである。原稿投稿時チェックリストを参照して作成すること。また、所定の投稿原稿送り状も提出すること。

○最終稿：

原稿の掲載が決定したら、最終原稿準備チェックリストを参照して必要なファイルを提出する。原稿のファイル形式は WORD, PDF, または、テキストファイル。図は別ファイルにて提出。そのファイル形式は tiff, eps, pdf, pict が望ましい。jpeg, png も可。

投稿原稿送り状の雛型および各チェックリストはウェブサイトで

(<https://www.wakusei.jp/book/pp/guide.html>)

から取得できる。

2. タイトル

記事のタイトルは20字程度以内。また、タイトル、筆者名、及び所属を和文・英文両者で付す。

(注：著者人数に対する制限はなく、紙面本文タイトルにおいて著者全員の氏名が原則掲載されるが、著者が多数である場合、各号の目次においては紙面の都合上一部著者名を省略することがある。)

3. 要旨

研究報告の記事や解説記事については、(原稿タイトルと著者名の後に) 300字程度の要旨をつける。

4. セクション

セクションは1,2,..., サブセクションは1.1,1.2,..., 細区分は(1), (2)...., の記号を頭にして、左寄せ、行末改行とする。

- ・文中での区分けは(a), (b), (c)を用いる。
- ・これら記号はすべて半角文字を用いる。
- ・セクションタイトルは簡潔にすること。

5. 述語

専門用語はなるべく避けるか、十分な説明をつける。特に、対応する日本語がある場合、英語・英略語は使わない。

6. 字体

- 数字、英字は半角とする。また () [] ; : など区切り記号も半角を用いる。
- 変数は斜体、ベクトルと行列は太字、を使う。

7. 句読点

句読点は全角の“,”と“.”を用いる。

8. 図、表

文中での図表の引用は“図1”, “図2”の形をとる。最終稿に図表の刷り上がり時の位置や大きさを指定のこと。他の文献から図表を転載する場合は、著者及び発行者より転載許可を得ること。また、出典を明記すること。

図作成のガイドライン：

原則として、電子ファイルとして作成すること。解像度は印刷時実寸で300dpi相当以上。ファイル形式はTIFF, EPS, PDF, JPEG, PNG が望ましい。

やむをえない場合に限り、写真も可とする。その際はL版サイズ以上の大きさと鮮明な写真を送付すること。送付された写真は原則として返却しない。カラーページは、著者の費用負担により可能。ただし、著者が希望し、かつ編集委員会が認めたものについては、印刷費用を学会が負担する。カラー印刷の希望が無い場合、電子版のみにカラー画像が掲載され、冊子体には白黒で印刷される。

9. 脚注

脚注は“1”などの記号をつける。

10. 文献の引用

引用文献は重要なものに限る。目安として20項目程度とする。ただし編集部が必要と認めた場合についてはこの限りではない。

本文中での引用は[1], [2]の形で通し番号をつけ、論文の末尾に一括してリストを載せる。[1,2,3]のように3つ以上の連番を引用する場合は、[1-3]のように、最初と最後の番号をハイフンで繋げる。

文献リストは以下の形式に従う。題名は省略する。3人以上の著者は、英文なら「et al.」、和文なら「ほか」と表記する。「et al.」「ほか」のあとには半角カンマを入れる。雑誌名などは一般に使われる略称を用いる。雑誌名の後のカンマは不要。ページについては開始ページのみを記す。書籍の場合は出版社をカッコ書きで明記。各文献の最後にピリオドをつける。

参考文献

- [1] Wakusei, T. et al., 1989, ApJ 220, 293.
- [2] 惑星太郎ほか, 1993, 天文月報 86, 186.
- [3] Bohren, C. F. and Huffman, D. R., 1983, Absorption and Scattering of Light by Small Particles (New York: Wiley).
- [4] Hayashi, C. et al., 1985, in Protostars and Planets II (Tucson: University of Arizona Press), 1100.

11. 投稿原稿送付先

遊星人編集長 三浦 均

e-mail : chiefeditor@wakusei.jp

電子メールで送付できない場合は下記へ郵送

日本惑星科学会事務局

〒604-8206

京都市中京区新町通三条上ル町頭町112

菊三ビル2階 201号室(Ogyaa's御池内)

Tel: 075-708-5984

e-mail: staff@wakusei.jp



The Japanese Society for Planetary Sciences

