日本惑星科学会誌　遊・星・人

第24巻　第2号

目　次

巻頭言　山本 哲生 …… 85

「2014年度最優秀発表賞受賞論文」

TEMによる三次元観察から探るGEMSの起源 …… 86
松野 淳也，土山 明，三宅 亮，中村 圭子，メッセンジャー スコット

『月惑星探査の来る10年』検討・第三段階報告：パブリックコメント …… 92
並木 則行，小林 直樹，出村 裕英，大槻 圭史

月惑星探査の来る10年：第三段階パネル報告　渡邊 誠一郎 …… 102

みんなでふたたび木星へ，そして氷衛星へ その3 ～非熱的中性粒子観測器 PEP/JNA ～ …… 113
浅村 和史，二穴 喜文，三好 由純，坂野井 健，齋藤 義文，下山 学，その他1チーム

火の鳥「はやぶさ」未来編 その９ ～ＴＩＲで観る小惑星表面のちょっと下～ …… 120
千秋 博紀，滝田 隼，荒井 武彦，福原 哲哉，田中 智，岡田 達明，関口 朋彦，その他2名

一番星へ行こう！日本の金星探査機の挑戦 その24 ～再び金星へ～ …… 126
廣瀬 史子，あかつきプロジェクトチーム

第5回月と火星の縦孔・地下空洞探査研究会　開催報告　春山 純一 …… 130

巨大惑星系研究会　開催報告　木村 淳 …… 135

国際研究会「Icy Grain Chemistry for Formation of Complex Organic Molecules : From Molecular Clouds to Protoplanetary Disks, Comets and Meteorites」開催報告 …… 139
野村英子

研究会参加報告「MISASA V “Comprehensive Exploration of the Solar system”」 …… 143
嶌生 有理

新刊書評　井田 茂 …… 149

2015年度日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ　井田 茂 …… 150

JSPS Information …… 152

表紙デザイン：BROOKS

Contents

Preface T. Yamamoto **85**

On the origin of GEMS by 3D TEM observation
J. Matsuno, A. Tsuchiyama, A. Miyake, K. Nakamura-Messenger, and S. Messenger **86**

Strategic study of lunar and planetary explorations in coming decade: Report on the third stage public comments
N. Namiki, N. Kobayashi, H. Demura, and K. Ohtsuki **92**

Next decade initiatives for lunar planetary explorations: A report of the third stage panel S. Watanabe **102**

Exploration of Jovian icy moon — Energetic neutral atom analyzer PEP/JNA —
K. Asamura, Y. Futaana, Y. Miyoshi, T. Sakanoi, Y. Saito, and 2 authors **113**

Phoenix "Hayabusa" : A tale of the future (9) — Observation of just beneath the surface of the target by TIR —
H. Senshu, J. Takita, T. Arai, T. Fukuhara, S. Tanaka, T. Okada, and 2 authors **120**

Road to the first star : Venus orbiter from Japan (24) — Reaching Venus again—
C. Hirose and Akatsuki Project Team **126**

Report of the 5th workshop for exploration of holes and underlying caverns on the Moon and Mars J. Haruyama **130**

A report on the workshop for giant planet system J. Kimura **135**

Report of an international workshop "Icy Grain Chemistry for Formation of Complex Organic Molecules: From Molecular Clouds to Protoplanetary Disks, Comets and Meteorites" H. Nomura **139**

Report on the MISASA V "Comprehensive Exploration of the Solar system"
Y. Shimaki **143**

Book review S. Ida **149**

Announcement for 2015 annual meeting S. Ida **150**

JSPS Information **152**

←目次へ

巻頭言

日本で惑星科学が学問分野として自力で本格的に発展し始めたのは，1970年代後半から1980年代にかけてであると思われる．その象徴的な出来事の一つは，宇宙科学研究所が大学の研究者とともに遂行したハレー彗星探査であろう．これは日本が初めて自前の探査機2機を惑星間空間へ送った探査である．後発であったものの，当時の米ソ欧に伍して，独自の技術開発とその蓄積をもとに，国際共同探査に参画した．1970年代から1980年代にかけて，林忠四郎京大教授(当時)を中心とした太陽系形成論の構築も，新たな学問分野を切り開いたことはもちろん，個別分野間の壁を突破するうえでも大きな影響を及ぼした．

このような潮流を背景に，当時の若手研究者の間でも，惑星科学をわが国でも確立しようという機運が盛り上がった．松井孝典氏らが立ち上げた日本惑星科学連合はその後，日本惑星科学会の設立へと繋がった．その背景には，大林辰蔵宇宙研教授，大家寛東北大教授，長谷川博一京大教授(いずれも当時)らによる太陽系起源の科研費特定研究の展開や，宇宙研における惑星研究系(現 太陽系科学研究系)の新設等への御尽力があったことを忘れることはできない．

学会設立準備会では，中澤清氏，水谷仁氏，松井孝典氏らを中心に，地球科学や天文学，宇宙工学等の広範な研究者による熱心な議論が行われた．当時，地球電磁気・地球惑星圏学会も，惑星探査を中心に惑星科学へとその研究分野を拡大しつつあったが，当時の西田篤弘会長，大家寛会長も大局的観点と広い度量から協力を惜しまれなかった．将来の宇宙科学の発展を見据えた多分野の先生方からの御支援があったことも感謝の念に堪えない．

それから20数年を経た現代はどうだろうか？

学会設立のころ，中澤清初代会長は10年後に学会を解散すべきであると言っておられた．どのような組織でも10年経つと腐ってくるから，必要ならばその時点で次の世代が新たに立ち上げるべきである，というのがその趣旨である．制度や体制が固まると，その「村」内の常識にもとづいて物事を考えたり活動したりする傾向が出てくる．一方，学問や社会は常に変化する．広い視野をもって，常識を疑い必要に応じてそれを打ち破るという気概を常にもっておかねばならない．研究においては多くの方々がこれを認識・実践しているが，学会を始め組織や制度についても，このことが言えるのではなかろうか

山本 哲生(北海道大学名誉教授)

←目次へ

「2014年度最優秀発表賞受賞論文」

TEMによる三次元観察から探るGEMSの起源

松野 淳也[1]，土山 明[1]，三宅 亮[1]，中村 圭子[2]，
MESSENGER Scott[2]

2015年4月13日受領，2015年4月22日受理.

（**要旨**）彗星塵に存在するGEMSは太陽系初期に存在した非晶質固体微粒子であるが，その起源・形成過程は議論中である．これらに制限を与えることを目的とし，本研究ではGEMSの三次元観察を行った．結果，複数のGEMSがクラスターをつくっている様子が確認され，金属鉄・硫化鉄の包有物の数は１つのものや複数のものなど様々であることがわかった．またGEMSの外形が明瞭に確認できるものや，その境界が不明瞭であるものが確認できた．凝縮実験でも金属鉄包有物を一つまたは複数含む球形の非晶質珪酸塩が生成しており，GEMSは凝縮物であることが示唆され，クラスター中で外形が不明瞭な粒子は弱い変成の影響であると考えられる．

1. はじめに

宇宙空間には広くダストと呼ばれる固体微粒子（典型的には100 nm程度）が存在しており，進化末期の赤色巨星や超新星爆発が放出する高温のガスが冷やされる際に形成されると一般的に考えられている．ダスト候補物質の分光データ[e.g., 1]と天文観測を比較することで，珪酸塩ダストは星周領域では90 %以上[2]が，星間空間では98 %以上[3]が非晶質であることが示唆される．このような珪酸塩ダストは初期太陽系にも広く存在したと考えられており，惑星形成の出発物質と考えられている[e.g., 4].

一方，彗星は太陽系外縁部の低温領域で形成された天体であるため，初期太陽系に存在していたダストを現在まで保持していると考えられており，太陽系の物質進化を考えるには重要な天体である．実際に，彗星由来と考えられる惑星間塵（成層圏中で捕獲される10 μm程度の宇宙塵のうち，ほぼコンドライト組成で多孔質なタイプの惑星間塵でCP-IDP, chondritic porous interplanetary dust particleと分類されるもの）中には太陽系の最も始原的な物質の一つと考えられているGEMS（glass embedded with metal and sulfides）と呼ばれる直径100-500 nmの非晶質珪酸塩ダストが普遍的（およそ50 wt.%）に存在している（図1）．GEMS粒子は5-50 nmの金属鉄や硫化鉄からなる包有物を含み，その平均化学組成は太陽組成よりもSiに富み，個々の粒子のバルク組成はばらつきが大きいという特徴を持つ[5]．非晶質珪酸塩からなるサブミクロン粒子という鉱物学的特徴に加え，その赤外スペクトルが星間ダストのものとよく合致する事から[6]，GEMSは星間ダストの生き残りではないかと唱えられ，天文分野において広く受け入れられてきた．GEMSの中には10 nm程度の微小結晶が含まれており，その外形がGEMSの外形とよく一致するという報告もあることから，GEMSは星間空間で結晶が非晶質化したものだという考えもある[7]．一方で，GEMSの大多数は初期太陽系の高温ガスの凝縮物であるという説も提唱されている[5]．このモデルでは，大多数（全体の94 %）のGEMSは太陽系の酸素同位体組成を持つこと，またGEMSの硫化鉄はGEMS表面にのみ存在しているようにみえることから，原始太陽系星雲において，高温ガスからforsterite（Mg_2SiO_4）や金属鉄といった平衡凝縮理論における高温凝縮物が先ず凝縮し，その残渣で

1. 京都大学大学院理学研究科
2. NASA ジョンソンスペースセンター
jmatsuno@kueps.kyoto-u.ac.jp

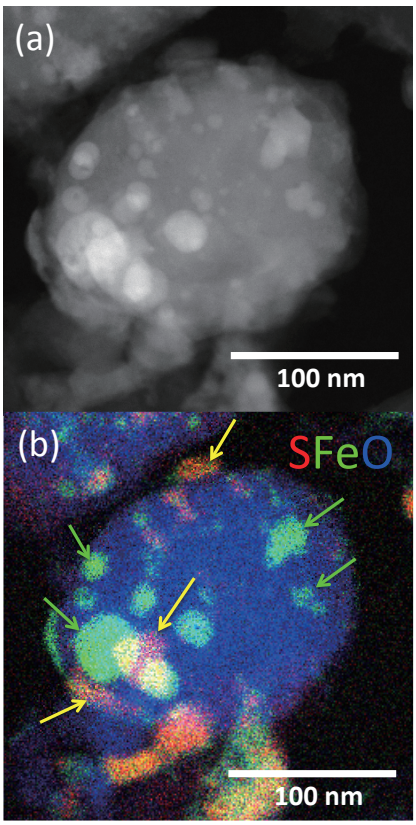


図1：Cluster CP-IDP L2036AA10cluster4中 のGEMSのSTEMによる二次元観察．(a)HAADF-STEM像．輝度が明るいほど，重い元素を含むことを意味する．(b)：(a)の元素組成像．赤，緑，青がそれぞれS，Fe，Oに対応．緑の矢印は金属鉄，黄の矢印は硫化鉄に対応．

あるSiに富むガスから金属鉄を含む非晶質珪酸塩が凝縮し，さらに低温でその粒子表面付近に存在した金属鉄がガス中の硫黄と反応することによってGEMSは形成されたと考えられている．

またGEMSは彗星塵中だけにみられるのではなく，最近では極めて始原的な炭素質コンドライトの水質変成をほとんど受けていないマトリックスから類似した組織をもつものが報告されている[8]．さらに，わずかに水質変成を受けたマトリックス中にもGEMSを水質変成実験したときに特徴的にみられる組織と類似した組織が見つかった[8,9]．このことは，かつてGEMSは少なくとも一部の炭素質コンドライト母天体形成領域から彗星形成領域までの初期太陽系に広く存在した極めてありふれた始原的物質であるということを示唆し，初期太陽系での物質進化を考える上でも鍵となる物質である．

このようにGEMSは太陽系形成初期の記憶をとどめる天文学的にも惑星科学的にも極めて重要な物質であり，GEMSの起源・形成過程を絞り込むことによって原始太陽系星雲や星間空間での環境に関する情報（高温ガスの冷却時間や宇宙線照射時間など）が引き出せるであろうと期待される．また若い星の星周で起きているとされるカンラン石や輝石などの非晶質珪酸塩からの結晶化[e.g., 1,2,10]においても重要な物質で，GEMSはその出発物質の候補と言える．先に述べた二つの形成過程・起源論に制約を与えるため，電子線トモグラフィーによる三次元観察を行った．従来のIDPs中のGEMSの組織観察は透過型電子顕微鏡（TEM, transmission electron microscope）を用いた二次元観察にとどまっている．しかしながら，切片の厚みに対して十分に大きいわけではないGEMSの組織（包有物の空間分布，形状など）をもってその形成過程を議論するには，従来の二次元の投影像だけでは不十分であると言わざるを得ない．そこで本研究ではGEMSの起源と形成過程に制約を与えるため，電子線トモグラフィーによる三次元観察を行った．

2. GEMSの三次元観察

2.1 電子線トモグラフィー

CT（computed tomography，コンピューター断層撮影法）とは，物体をある軸の回りに180度回転させながら撮影した透過像を再構成し，物体内部の組織を取得する撮像・分析手法である．近年では放射光X線を用いたX線CTによりはやぶさ粒子の形状や内部組織を非破壊で分析した例がある[11]が，さらに粒径が小さいGEMSのようなサブミクロンサイズの微粒子に対しては空間分解能（約40 nm/画素）が不十分である．そこで本研究ではTEMの電子線を用いたCT撮影（電子線トモグラフィー）をGEMSに対して行い，その形状や内部組織を評価した．また本手法では3次元構造が得られるだけでなく，2次元観察では試料厚み（通常70 nm）により制限されていた空間分解能がTEM透過像の画素サイズ（数 nm）程度まで上げることが原理的には可能になるため，ナノメートル単位での不均一性をもつGEMSには極めて有効な観察手段といえ

る．

ところで通常の超薄切片を用いた電子線トモグラフィーでは，試料の回転角度が大きくなるとホルダーや超薄切片をマウントしているグリッドが電子線を遮るため180度の回転角で透過像を取得することはできず，回転範囲は約±65°程度に制限されてしまう．この場合でも再構成し一連のCT像を得ることができる（不完全トモグラフィー）[12]が，取得されたCT像には偽像が出現し，また電子ビームの照射方向に像が伸びるため，三次元形状の評価が厳密には行えないという問題が生じる．

2.2 完全トモグラフィーの為の試料作成

本研究ではこの問題を解決するための手法開発を行い，完全トモグラフィーによるGEMSの三次元観察を行った．京都大学大学院理学研究科に設置してあるTEM（JEM-2100F, JEOL）を用い，明視野透過顕微鏡法（BF-TEM），および高角散乱環状暗視野走査透過顕微鏡法（HAADF-STEM）法により透過像を取得した．またTEMに搭載されているEDS（energy dispersive spectroscopy, エネルギー分散型分光法；JED-2300T, JEOL）を用いて組成分析を行った．

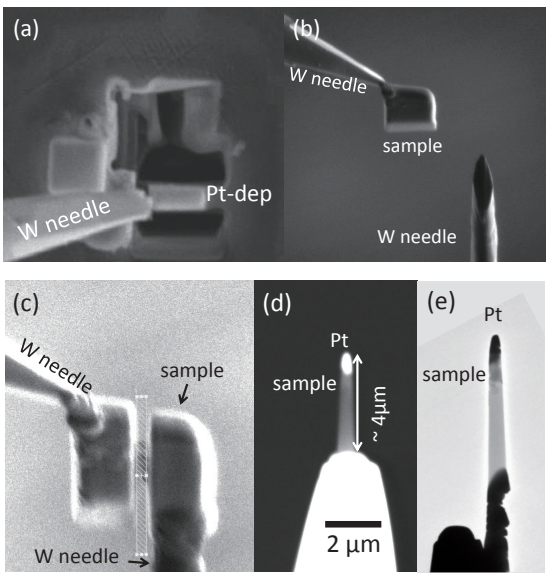


図2：完全トモグラフィー用の試料準備方法．（a）樹脂埋めしたIDP試料断面をFIBにより彫り，W針で引き上げる．試料表面にはビーム照射保護用のPt膜で覆ってある．（b）引き上げた試料を別のW針に載せ替える．（c）試料サイズをFIBにより整え，針状に削る．（d）完成した針状試料の後方散乱電子像．高さは約4 μm，太さは試料部で約400 nm．（e）図（d）のBF-TEM像．

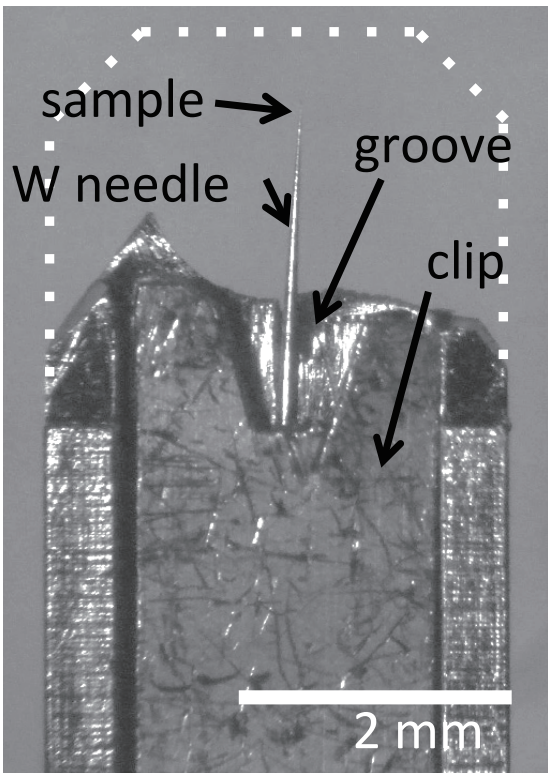


図3：試料を載せたW針をTEMホルダーに装着した様子（光学顕微鏡像）．通常のTEMホルダーを用いると高傾斜角度においてホルダーの縁が影となり電子線を遮るため，ホルダー先端部を切断してある．なお図の垂直方向中央部が電子線トモグラフィーの回転軸となる（W針と回転軸はおよそ一致する）．

まず樹脂に埋めた彗星塵（cluster CP-IDP）の断面をFE-SEM（field emission scanning electron microscope, FE-SEM; JSM-7001F, JEOL）で観察し，三次元観察をおこなう領域を決めた．次に集束イオンビーム（focused ion beam, FIB; Quanta 200 3DS, FEI）を用いて，観察領域の周囲を彫り込み，あらかじめ電解研磨法にて先端を約5 μmまで尖らせたタングステン（W）針により引き上げた（図2(a)）．なおFIBのガリウム（Ga+）イオンによる照射ダメージを抑えるため，試料表面にはプラチナ（Pt）薄膜を堆積させた．この試料を別のW針に載せ換え（図2(b)），形状を整えた後，FIBを用いて先端部分の観察領域約に400 nmの太さになるまで加工した（図2(c)）．詳細な加工条件は，文献[13]を参照されたい．

このようにして作成した針状試料（図2(d),(e)）を，

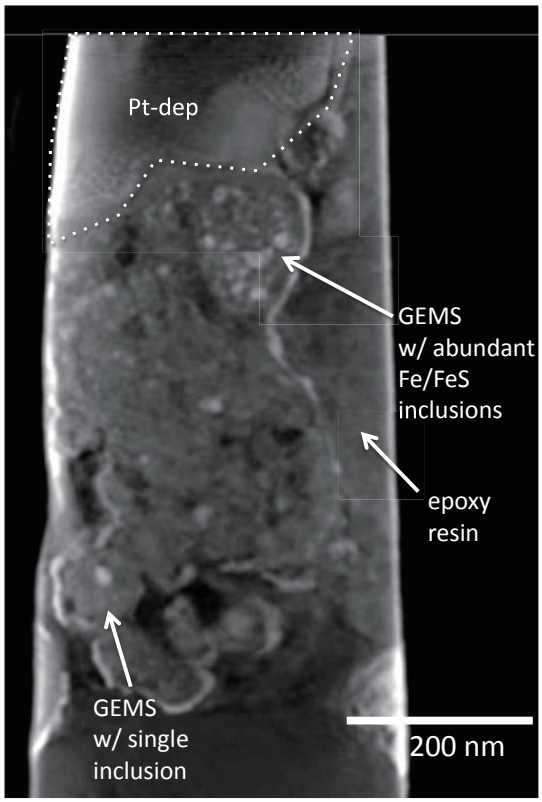


図4：Cluster CP-IDP L2036AA10 cluster4の針状加工試料のHAADF-STEMによる完全トモグラフィーのCT像．エポキシに埋まった多数のGEMSが確認できる．多数の包有物を含むGEMSや，包有物を一つしか含まないGEMSが見られる．試料上方のPtはFIB加工時に堆積させたもの．

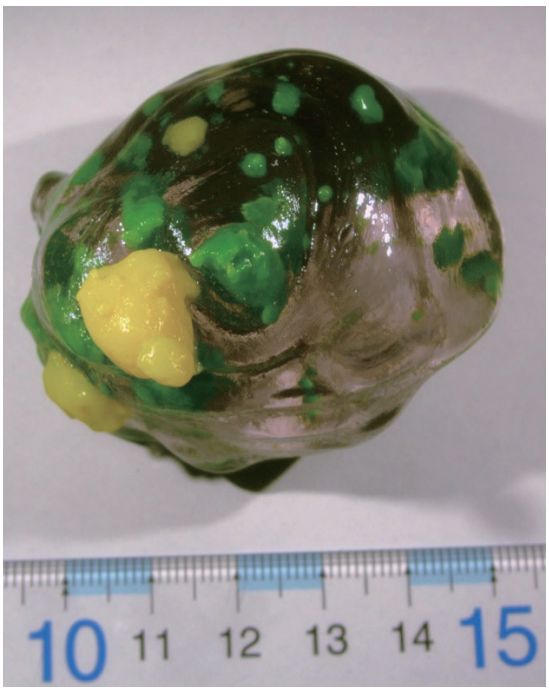


図5：3Dプリンターで約30万倍に拡大出力した図1のGEMSの模型．HAADF-STEM-CT像と元素組成図（図1(b)）をもとにGEMSの外形，金属鉄，硫化鉄を抽出し，それぞれ透明色，緑色，黄色の紫外線硬化型液体ポリマーを用い造形した．（カラー図は電子版のみ）

先端部を切断加工したTEMホルダーに装着した（図3）．このホルダーは高傾斜角度においても，通常のTEMホルダーのようにホルダー縁が電子線を遮ることはないように設計されている．このようにして透過像を回転角度約±90°の範囲で取得することで，完全トモグラフィーによるCT像を得ることに成功した．

2.3 完全トモグラフィーによる観察

Cluster CP-IDP（L2036AA10 cluster4）中のGEMSの観察を図4に示す．図4はHAADF-STEMで撮影した透過像をもとに再構成したCT像で，3次元の画素（ボクセル）サイズは2.443 nmである．試料中には多数のGEMSがクラスターを作って存在していることが確認できた．なお球状や，やや楕円形状のGEMSの外形が確認できる粒子もあれば，各粒子の境界が不明瞭なものもあった．またGEMSの包有物の数も各GEMSでばらつきがあることが確認でき，複数の包有物を持つ粒子や，観察した倍率においては包有物がひとつしか確認できないGEMSもあった．なおこの針状試料の直径は観察部で約400 nmと電子線が十分に透過するにはやや大きいため，樹脂部とGEMSの珪酸塩部分のコントラスト差がつきづらく，各々のGEMSの外形抽出や各包有物の相同定は行えなかった．今後，より細い試料を作成することで，これらの分析が可能になると考えている．

2.4 3次元プリンターによる造形

このようにして得られた3次元構造の理解を容易にするには，3Dプリンターを用いた造形が有効である．今回用いた3Dプリンター（Connex3, ストラタシス・ジャパン）では，紫外線により硬化する液体ポリマーを噴出し即座に紫外線ランプで硬化させレイヤーを重

ねることで，その３次元構造を忠実に造形できる．図1に示すcluster CP-IDP（L2036AA10 cluster4）の超薄切片中のGEMSに対してHAADF-STEMによる電子線トモグラフィーを行って得られたCT像を，拡大出力した（図5）．この模型では，非晶質珪酸塩の部分を無色透明ポリマーで作っているため，GEMSの包有物である金属鉄（緑色）や硫化鉄（黄色）を見ることができる．硫化鉄がGEMSの表面に存在するのに対し，金属鉄はGEMSの内部に存在する様子が確認できた．今回みられた包有物の分布は，GEMSの硫化物は金属鉄が硫黄を含むガスと反応して硫化したものであるとする先行研究のモデル[5]と調和的である．

3. GEMSの形成過程・起源

先行研究[5]ではGEMSが初期太陽系に存在した高温ガスからの凝縮物であるというモデルを提案しているが，GEMSが高温ガスから生成されることを再現する実験は今までに報告されていない．室内実験によりGEMSを再現することは極めて重要であり，我々の研究チームはGEMSを再現するための凝縮実験も行っている[14]．東京工業大学（現在は九州大に移設）の誘導熱プラズマ装置（induction thermal plasma, ITP）[15]を用いたGEMS平均組成の高温ガスの凝縮実験により，直径約100 nmの球状の非晶質珪酸塩中に直径10-30 nm程度の金属鉄粒子を１つまたは複数包有する粒子が合成された．特に，金属鉄は非晶質珪酸塩内部に分布するのに対し，硫化鉄は非晶質珪酸塩表面に分布していた．この粒子は先行研究で報告されているGEMSの鉱物学的特徴（含まれる鉱物相，粒子サイズなど）や赤外線スペクトルとよく似ていることから，高温ガスの凝縮によりGEMSが再現できたと結論づけた[14]．今回行ったGEMSの三次元構造観察結果もこの凝縮実験生成物の特徴とよく一致（特に金属鉄・硫化鉄の空間分布）したことから，GEMSが高温ガスから凝縮したという形成モデル[5]に矛盾がない．

先に述べたように，今回三次元で観察したGEMSのクラスター中には個々の粒子形状が不明瞭な部分もあれば，球～楕円形状の外形が確認できる粒子もあり，その粒子の金属鉄・硫化鉄の包有物の数は１つのものもあれば複数の物もあった．これらの特徴は，凝縮実験の合成物は球形で金属鉄包有物の数は１つまたは複数である[14]という特徴と類似している．このことは，球～楕円形状の外形のGEMSが高温ガスから凝縮したGEMSの一次粒子であり，個々の粒子の外形が不明瞭になっている部分は，凝縮した複数のGEMS一次粒子がお互いに何らかの弱い変成（熱変成など）を受けたということを示唆する．この変成が惑星間塵の母天体（彗星）上で局所的に起こったものなのか，あるいは母天体に集積する前に，弱い変成を受けたGEMSクラスター上に変成を受けていないGEMS一次粒子が付着したものなのかは今のところわからないが，いずれにせよ，GEMSクラスターの表面構造はGEMSの局所的な弱い変成を示唆しているようにみえる．

GEMSの酸素同位体比の分析の結果，大部分のGEMSは太陽系の酸素同位体比を持つことから大部分のGEMSは原始惑星系円盤で形成される必要がある[5]．

今回の観察結果もまた，多くのGEMSが原始惑星系円盤内の高温ガスから凝縮したことを支持している．惑星間塵の大気圏突入時に受けた加熱でもGEMSが変成し，元素組成や同位体比が変化してしまうという主張[16]もあるため厳密にどの程度の太陽系の酸素同位体比をもつ GEMSが太陽系を起源にしているのかはよくわからないが，彗星塵に存在するカンラン石や輝石などの結晶質珪酸塩は気相からの凝縮で形成したと考えられている[17]．多くのGEMSが初期太陽系の高温ガスから凝縮したとすると，彗星塵にみられる珪酸塩の多くは気相からの凝縮物であるといえる．

なお惑星物質に対して完全トモグラフィーに成功した例は本研究が初の報告となる．ところで，本手法で用いる針の太さは一般的なTEM薄片試料よりも厚いため，EDSを用いた特性Ｘ線による元素分析の際には試料のＸ線吸収が無視できなくなり，針状試料中の元素の定量分析が困難となる．針試料の元素分析を行う場合には電子線トモグラフィー後にさらにFIBを用いて薄膜化を行うなど追加工が必要となる．彗星塵やコンドライトマトリックスなどにはサブミクロンサイズの始原的物質が多く含まれており，本研究で開発したTEMによる完全トモグラフィーによって，それらの起源・形成過程も明かされてゆくことが期待される．

謝 辞

（株）システムインフロンティアの堀井則孝氏，（株）日本電子の青山佳敬博士，大西市朗博士，（株）メルビルの宮崎伸介氏，福岡大学の藤昇一博士には，TEMトモグラフィーの技術指導，ご助言を頂きました．また査読者である東北大学大学院理学研究科の中村智樹教授には本稿に対し有益なコメントと適切な指摘を頂きました．これらの方々に感謝致します．本研究は日本学術振興会の特別研究員奨励費（13J01031）の助成を受けておこないました．

参考文献

[1] 茅原弘毅ほか，2006, 遊星人 15, 44.
[2] Honda, M. et al., 2003, ApJ 585, L59.
[3] Kemper, F. et al., 2004, ApJ 609, 826.
[4] 奥住聡, 2014, 遊星人 23, 371.
[5] Keller, L. P. and Messenger, S., 2011, GCA 75, 5336.
[6] Bradley, J. P. et al., 1999, Science 285, 1716.
[7] Bradley, J. P. and Dai, Z. R., 2004, ApJ 617, 650.
[8] Leroux, H. et al., 2013, 44th LPSC, #1528 (abstr.).
[9] Nakamura-Messenger, K. et al., 2011, MAPS 46, 843.
[10] 木村宏, 2006, 遊星人 15, 58.
[11] Tsuchiyama, A. et al., 2011, Science 333, 1125.
[12] Matsuno, J. et al., 2014, 77th Metsoc, #5079 (abstr.).
[13] Miyake, A. et al., 2014, Microscopy 63, i24.
[14] Matsuno, J. et al., 2014, 45th LPSC, #1335 (abstr.).
[15] Watanabe, T., 2006, J. Aerosol Res. 21, 201.
[16] Ishii, H. A. et al., 2014, 77th Metsoc, #5421 (abstr.).
[17] Bradley, J. P. et al., 1983, Nature 301, 473.

←目次へ

『月惑星探査の来る10年』検討・第三段階報告：パブリックコメント

並木 則行[1]，小林 直樹[2]，出村 裕英[3]，大槻 圭史[4]

（**要旨**）『月惑星探査の来たる10年』検討では第三段階で3つのミッションコンセプト案をとりまとめ，各ミッションコンセプト案を第三段階委員会のレビューとパブリックコメントの集約という2通りの方法で評価した．本稿ではパブリックコメントの集約結果を報告する．評価の規準は（1）科学目標の重要性，（2）技術的実現性，（3）資金概算，（4）システム成立性，（5）スケジュール，（6）体制，という五項目である．多くのコメント提供者は(1)，(2)については多様な意見を提示しているが，(3)～(6)については経験の不十分さから評価することの困難を述べている．惑星科学コミュニティは今後も同様なトレーニングを繰り返すことで，宇宙探査の実現のための実力を養成する必要があるだろう．

1.「月惑星探査の来たる10年」の第一・第二段階の経緯

日本惑星科学会 将来惑星探査検討グループでは，日本の惑星探査の長期的な展望を検討し，その検討結果をまとめた報告書の作成を目指してきた．この検討活動は惑星科学のコミュニティが惑星科学会会員，非会員を問わず，自らの責任において将来像を描いていく作業である[1]．また，この検討作業では各段階で学会・シンポジウム等での中間報告を繰り返して広く意見聴取を図ることも活動の重要な一部と考え，日本惑星科学会のwebページ(https://www.wakusei.jp/~decade_sec/wiki/open/)を使って広範な惑星科学コミュニティとの意見交換を図ってきた．2010年1月から始まった本検討作業の第一段階は2011年5月に終了[2]，続いて同年6月からは第二段階に移行し[3]，2012年4月から第三段階を開始した．当初想定していた以上に長く続いた本検討作業も，第三段階ミッションコンセプトの評価によって終了した．その最終報告を，本稿と渡邊による第三段階委員会報告[4]によってまとめる．

本検討作業の第一段階の目的は，今後10年のトップサイエンスについての意見をボトムアップな提案からまとめることであった．最初に2010年地球惑星科学会連合大会にて検討作業の概要説明を行い，2010年9月10日に神戸大学理学研究科 惑星科学研究センター(CPS)の後援により公開討論会を行った．神戸大学のメイン会場からTV会議システムを利用して複数会場(北海道大学，会津大学，東京工業大学，JAXA相模原キャンパス，他)との多地点会議を行い，各パネルのとりまとめ方針は勿論，「月惑星探査の来たる10年」のあり方についても活発な議論を行った．

2010年9月10日の公開討論会では予定していた半日では到底議論を尽くすことができなかったため，パネル毎の分科会を開催することとなった．アストロバイオロジーパネルは11月25日に千葉工業大学に於いて，地球型惑星固体パネルは12月7日に東京大学地震研究所に於いて，小天体パネルは12月10日に国立天文台三鷹キャンパスに於いて，木星型惑星・氷衛星・系外惑星パネルは 2011年1月22日に東京大学地震研究所に於いて，それぞれ開催された．各パネルの報告は2011年5月1日に日本惑星科学会webページにアッ

1. 国立天文台 RISE月惑星探査検討室/総合研究大学院
2. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
3. 会津大学 先端情報科学研究センター
4. 神戸大学 大学院 理学研究科
nori.namiki@nao.ac.jp

プロードされ，パブリックコメントを受け付けた（2011年6月末まで）．そして，『月惑星探査の来たる10年』検討・第一段階報告として遊・星・人2011年Vol. 20, No. 4 [2]にまとめた．

科学のみの議論に的を絞った第一段階に対して，第二段階では将来ミッション・プロジェクトの創成を意図して進められた．第一段階の議論が進行している間に第二段階委員を依頼し，2010年5月26日，9月10日，2011年2月16日，5月25日の4回にわたって第二段階委員会の役割について議論した．そして「具体的なミッション提案，観測機器提案を公募し，その科学的重要性を評価する」という目的のもと，第二段階委員会はまずミッション提案と観測機器提案の募集を行った．募集にあたって第二段階提案書の雛形を2011年7月1日から日本惑星科学会webページで公開した．この提案書では，科学目標や期待される成果，関連分野に与えるインパクト等のサイエンス面を強調するとともに，計画遂行のための体制（人的，予算的）やスケジュールについても書ける範囲で記載することが要望された．2011年10月23日の委員会では受付手続きの確認を行い，2011年10月の惑星科学会総会，11月の宇宙科学研究所・太陽系科学シンポジウムで第二段階委員と事務局が提案募集の目的と記載項目の説明を行った．提案書の受付は最終的に12月19日に締切り，13件の応募があった[3]．

13件の提案の内訳は8つのミッション提案と，5つの機器提案である．第二段階委員会は受け付けた提案を個別に精査し，より良い提案のための要望，コメントを分担してまとめた．2012年2月15日に第六回目の委員会を開催してレビューレポート作成方針を確認し，最終的な文案の修正を終えた上で，3月15日に各提案者へレビューレポートが返信された．各提案者は，このレビューレポートをもとに，提案のブラッシュアップを行い，2012年5月24日の地球惑星科学連合大会「来る10年の月惑星探査」セッションで修正提案の発表を行った．その際の質疑応答をさらに取り込んで再修正を行い，遊星人2012年Vol. 21, No. 3，特集「月惑星探査の来る10年：第二段階」にまとめられた[5-15]．

2. 第三段階の概要

2012年6月からは第三段階へ移行した．第三段階における議論の焦点は，第二段階における13の提案をいかにして少数の具体的なミッションコンセプトにまとめあげていくかにあった．第三段階委員会における議論の詳細は[4]に詳述されており，最終的に『月惑星探査の来たる10年』検討の目指す中型フラッグシップミッションは火星生命探査，月惑星年代学探査，木星トロヤ群探査の3案に絞りこまれた．

各ミッションコンセプト提案グループは，2013年5月の地球惑星科学関連連合大会，8月の月惑星シンポジウム，9月のMCブラッシュアップ提案の報告会（於ける神戸大学CPS）において講演を行い，その内容を惑星科学コミュニティへ周知するように務めた．その間に第三段階委員会からミッションコンセプトのブラッシュアップについてのコメントを受けながら改訂を進め，2013年12月に最終案が『月惑星探査の来たる10年』事務局に提出された．事務局は各ミッションコンセプト案を日本惑星科学会webページにアップロードしてパブリックコメントを受け付けた．一方，第三段階委員会では各ミッションコンセプト案の評価を開始した．本稿では2014年7月21日までに事務局に寄せられたパブリックコメントの集計結果を報告する．第三段階委員会評価は[4]にまとめられている．本稿と[4]における評価は，惑星科学コミュニティ内部の自己評価と宇宙探査の専門家による外部評価という相補的な役割があり，読者には是非本稿のみならず[4]にも目を通していただくことをお願いする．

2.1 パブリックコメント概要

2014年7月の締め切りまでに延べ21件のパブリックコメントを受領した．評価者は14名で，内訳は，火星生命探査に8件，月年代学探査に8件，トロヤ群小惑星探査 5件であった．これらの数を多いと思うか少ないと思うかについては多様な見方があるであろうが，中型のフラッグシップミッションを支える基盤としては少ないと言わざるをえない．この点については，著者は「ミッションに関わった経験を持たないものには評価項目（表1）の内容が難しく，コメントすることへの敷居が高く感じられた」という意見も耳にした．

今後も同様な検討作業を継続する場合にはご意見を参考にし改善に努めたい．

寄せられたコメントの観点やレベルは様々であった．ただし，どのコメントも共通して評価に対する真摯な姿勢と，各ミッションコンセプト提案グループへの敬意を読み取ることができた．評価を送ったコメント者に感謝申し上げたい．提出された夫々の評価シートは，更なる提案の改善のために各ミッションコンセプト提案グループの代表者に送付された．

2.2 火星生命探査へのコメント

(1) 科学目標の重要性

火星生命探査の科学目標には理学と工学両面の要素があり，総合評価が難しい．理学目標として生命探査は重要である一方，当たり外れが大きい．ロードマップ中での日本のアストロバイオロジーの位置づけが不十分だが，波及効果は大きいと考えられる．日本の独自性については意見が分かれる．工学的には着実な成

表1：評価項目（https://www.wakusei.jp/~decade_sec/wiki/open/ よりダウンロード可）．

(1) 科学目標の重要性	
(1.1)	**長期的展望の中でのミッションの位置づけ** 単発のミッションとしてではなく，その次の 10 年や海外ミッションとの協力・競争，宇宙研ロードマップとの整合性を見据えて長期的展望とその中での本ミッションの位置づけが提示されているか？ 当該研究分野のコミュニティの中で，最優先のプロジェクトとして戦略的に位置づけられているか？
(1.2)	**波及効果** その後の国内外での惑星科学，探査計画にどのように波及していくか？
(1.3)	**日本の特技と独自性** 我が国の地球惑星科学，宇宙科学分野の国際的位置づけが考慮されているか？ 技術的特徴が明確であり，独自性や発展性が他分野にまで理解され得るか？ 海外に売り込み可能な付加価値の高い技術力を生み出しうるか？
(1.4)	**サクセスクライテリア** 目的の絞り込み，ミッションの先鋭化がなされているか？ 必須の科学観測，主要，オプション，エクストラの区分は明確であるか？
(2) 技術的実現性	
(2.1)	**科学目標から機器仕様・運用要求へのブレークダウン** 必要な精度，感度，分解能の要求は適切に設定されているか？ 重点開発項目は明らかにされているか？ ミッションクリティカルなキー技術の識別が十分になされ，それを踏まえた開発計画になっているか？
(2.2)	**技術的課題の克服** 各機器の現状の技術レベル（TRL）が明示的に評価されているか？ 開発課題の抽出に漏れはないか？ 開発のイメージは描けているか？ 技術的難易度は客観的に判断されているか？ 科学的成果と技術的難易度のトレードオフ検討がなされているか？ 不確定性の高い技術的困難がある場合には，あえて挑戦するという判断に至る経緯が分かりやすく説明されているか？
(2.3)	**観測技術の共通化** 他のミッションと共通に開発を行うことでリソースの節約は可能とならないか？ 海外宇宙機関との国際協力・分担は十分に検討されているか？
(3) 資金概算	
(3.1)	**科学成果とのバランス**

	「サイエンス／コスト」の観点での価値は十分に高いか？ 類似ミッションと比較して，科学成果とコストはバランスしているか？ 科学成果とコストのトレードオフは評価されたか？
(3.2)	**運用と外部施設，設備の費用** 運用シナリオはできているか？ サンプルキュレーション，プラネタリープロテクション，データ解析センターなどなどに関わるコストが含まれているか？ 関税・消費税は必要か？
(3.3)	**ミッションを支える研究活動の経費** データ解析やモデリングなどミッションを支える研究活動に関して，外部資金の獲得を含めて，見通しが立てられているか？
(4) システム成立性	
(4.1)	**システム構成** プロジェクトの制約条件は明確化されているか？ オービター，着陸機，ローバーへの要求は科学目標に合致しているか？ フライバイ・タッチダウンなどの代替手段とのトレードオフ検討はされているか？ 電力・重量・通信のリソースは科学目標に基づいて適切に設定されているか？
(4.2)	**先行ミッションとの関連** 先行する類似ミッションがある場合には，先行して実現するケース，実現しない（または遅れる）ケースに分けて，科学的価値やリスクとコストの修正が他分野にまで説明できるか？
(4.3)	**通信の成立性** 他国宇宙機関の支援が必須となる場合には，取引の材料が検討されているか？
(4.4)	**搭載重量の考え方** マニピュレーターやスコップ，データ処理系，サンプル回収機構などなど，クリティカルな要素が想定されているか？
(4.5)	**外部施設，設備** サンプルキュレーション，プラネタリープロテクション，データ解析センターなどなど科学成果達成に必要な要素が網羅され，タスクが定義されているか？
(5) スケジュール	
(5.1)	**開発段階のスケジュール** BBM，EM，FM などなどの開発は段階的に，整合的に計画されているか？ 資金計画，開発体制と整合しているか？ 審査会の計画時期は適切か？
(5.2)	**運用・解析段階のスケジュール** 運用シナリオは準備されているか？ 打ち上げ延期時のバックアッププランはあるか？ クルージングフェーズも科学観測に有効に活用されていているか？
(6) 体制	
(6.1)	**PI の適性** 経験はあるか？ 提案までのプロセスで明確なビジョンの提示，先導力の発揮などリーダシップを発揮しているか？ コミュニティの信頼を得ていることが外部に明らかであるか？ 技術力を有しているか？
(6.2)	**主要観測機器の開発（国際協力体制を含む）** 既開発の技術・経験が体制に反映されているか？

	長期ミッションでは体制維持の方策が検討されているか？ 当該分野の中でプロジェクトの実施主体が明確であるか？
(6.3)	**システム検討体制** 工学との連携は進んでいるか？ 10 人規模の開発体制が形成されているか？
(6.4)	**サイエンス活動** 学術的価値を創成し得る体制が出来ているか？ 数十人規模の解析体制（サイエンティストの参加）が期待できるか？

果が期待でき波及効果も大きいが，海外の後追いであり日本の独自性という点では弱い．

(1.1) 長期的展望の中でのミッションの位置づけ

地球外生命の存在可能性について現在持ち得る技術レベルで挑戦することは大変重要であり，このミッションが国内外の関連コミュニティに与える影響は極めて大きいと評価される．むしろこれまでの宇宙探査ロードマップがアストロバイオロジーをカバーしきれていないことが問題であるという指摘が多かった．

(1.2) 波及効果

地球外生命が発見された場合の理学的波及効果と，重力天体への着陸技術獲得という工学・政策的な波及効果の両方について大きな期待がよせられた．理学的波及効果については生命が発見されるか否かで国際的な影響は大きく異なるが，工学的波及効果は理学観測の成否に依らず一定の価値がある．(1.1)と同様に，惑星科学コミュニティあるいは我が国に具体的・現実的な戦略が欠けており，「どのように」波及するのか不明瞭であるという指摘があった．

(1.3) 日本の特技と独自性

探査機システム(ローバー)は後発で日本の特技・独自性あるものとは言えないが，達成される理学目標には独自性があると判断される．生命検出装置は日本で実績あるものではないが，今後安定した「お家芸」になりうるという高い評価と，地上のヘリテージ依存性が高いが故に海外へのアピール度や追随されやすさに難点を挙げる指摘とに二分された．生命検出装置以外は火星以外の天体への応用可能性があることも指摘された．

(1.4) サクセスクライテリア

明確/不明確で意見が割れた．不明確というコメントでは，生命探査に要する観測日数や，内部構造探査に求められる要求精度が具体的でないという指摘があった．

(2) 技術的実現性

科学目標から機器使用・運用要求へのブレークダウンを経て，克服すべき技術的課題を識別して取り組むべきだが，それが十分か否かの意見が分かれており，検討の進め方に改善の余地がある．着陸までの工学的システム検討は十分に進んでいると評価された．

(2.1) 科学目標から機器仕様・運用要求へのブレークダウン

生命検出装置に関しては，生命の有無を「膜の有無」という問題に落とし込み，それを判別するための手順が明確に示されていると評価が高い．また，ミッションクリティカルなキー技術についても，センサ以外に，火星軌道への投入，カプセルの大気突入と誘導制御と耐熱，カプセル分離後のモジュールの誘導制御，着陸，移動などの工学系技術については精力的に検討が進められ，項目の抽出がなされているという意見があった．一方で，生命探査以外の観測装置についてはクリティカルな技術の抽出や着陸地点選定を含む運用要求に関して検討を深めるべきとの指摘があった．

(2.2) 技術的課題の克服

分析のロジックは明確である．しかし，分析器にサンプルを回収するまでの技術的課題について技術レベルや耐環境性という点での検討の目が向けられていないという指摘がなされた．

(2.3) 観測技術の共通化

一部の観測機器は月探査と共通して議論されているが，生命検出装置は日本においては新規要素であり本評価基準がそもそも該当しないと判断された．データ伝送中継で国際協働によるリソース分散とリスク低減を図っていること，着陸・ローバ技術について月探査との共通化が検討されていることが評価された．国際的枠組で何を日本独自のものとし，何を共通化するの

か？といった検討を更に深めるべきというコメントがなされた.

(3) 資金概算

工学面の開発経費見積もりが明確であるのに対して，理学機器および検疫に掛かるコストについては情報が不足していると判断された.

(3.1) 科学成果とのバランス

生命探査はハイリスクハイリターンであるのに対し，工学的価値とその費用対効果は分かりやすい．両者を併せた評価でも，このコストで地球外生命を発見できたら費用対効果は極めて高いが，見つけられなかった時にどう説明できるのかという疑問も指摘されている．検疫に掛かる費用を除けば適正もしくは安価であるという評価だが，着実性という観点からバランスが取れているかについて判断が分かれた.

(3.2) 運用と外部施設，設備の費用

プラネタリープロテクションを含めて必要な施設・設備が網羅されているが，運用シナリオは現時点ではまだ明確ではない．そのため，費用の推定が妥当であるかは判断できないと評価された.

(3.3) ミッションを支える研究活動の経費

検討されているようであるが，説明が不足しており，活動が十分であるという判断ができないと評価された.

(4) システム成立性

細部に懸念が残るが，概ね検討が進んでいると判断された.

(4.1) システム構成

科学目標と整合させる形でどのような構成が良いか検討は進んでいる．しかし，オービターへの要求，ローバの移動距離や走破性能，崖や窪地での掘削技術など複数の懸念材料が指摘された.

(4.2) 先行ミッションとの関連

独自性が高いミッション提案であり，現時点では比肩しうるミッション提案は世界的にも見当たらない．従って本項は該当しないと判断された.

(4.3) 通信の成立性

海外衛星・海外局の支援を仰ぐことで成立させているが，それを実現するためにバーター材料として割けるリソース等の検討は不十分であると評価された.

(4.4) 搭載重量の考え方

概念検討されており，成立しているように見えるが，サンプル運搬機構等の細部などに懸念があり，現実的な重量評価はまだ困難であると判断された.

(4.5) 外部施設，設備

惑星検疫(プラネタリープロテクション)については十分に検討されている．データ解析センター等の追加検討が指摘された.

(5) スケジュール

検討は進んでいるが，十分かどうかの意見は分かれており，評価は困難であった.

(5.1) 開発段階のスケジュール

検討が進んでいることは認めつつも，十分な検討がなされているか否かについては意見は分かれる．スケジュールに余裕がないというコメントがあった.

(5.2) 運用・解析段階のスケジュール

不十分/十分でコメントが分かれた．ただし，不十分との判断に至る具体的な懸念は指摘されていない.

(6) 体制

コミュニティは小さいが，国内外の研究者を巻き込めるポテンシャルがあるので，最終案に絞り込まれても体制が維持されるような工夫が望まれるとのコメントがなされた.

(6.1) PIの適性

過去の惑星探査に経験のあるメンバから構成されており，ワーキンググループとしてもアクティブに活動している点が評価された.

(6.2) 主要観測機器の開発(国際協力体制を含む)

十分に検討されている．機器開発経験者や海外の専門家を取り込んだ体制を敷いていると評価された.

(6.3) システム検討体制

工学側に熱意があり，着陸地点検討やローバの概念検討で理工の連携が進んでいる良い体制であると評価された.

(6.4) サイエンス活動

活溌であるとの評価を得た．しかし，火星研究コミュニティや生命科学・惑星科学コミュニティからの支援がまだ小さいので，更なる絞り込みを経ても体制が維持されるような工夫が必要という指摘があった．関連研究者を広く巻き込めるポテンシャルはあるというコメントがなされた.

2.3 月惑星年代学探査へのコメント

(1) 科学目標の重要性

先鋭な目的のもと，日本の惑星科学を代表するに相

応しいテーマであると評価された．波及効果も期待できる．一方で，月探査ロードマップ上での位置づけは不明という指摘があった．海外類似機器に対する独自性が低いという指摘もある．

(1.1) 長期的展望の中でのミッションの位置づけ

着陸・表面探査・年代測定技術は月に限らず他天体探査にも繋がる重要な技術である．一方，月探査全体の展望の中でペネトレータ，SELENE-2との相対的位置づけが不明という評価であった．ただしその原因は，月探査の周辺環境がめまぐるしく変わるために，前提としてのロードマップをコミュニティが持っていないためであるというコメントがなされた．

(1.2) 波及効果

日本の惑星科学(惑星形成論や軌道進化)と親和性が高く，波及効果は大きい．また提案されている年代測定装置は他の惑星探査や小天体探査に応用可能である点が高評価であった．

(1.3) 日本の特技と独自性

提案された搭載装置には海外にも類似の開発計画があり，日本の特技と言える段階に至るためには海外の動向を見据え，即時性，戦略性を持った開発が必要とのコメントがなされた．試料の前処理を含め，実現までまだ技術的ハードルが高いという指摘もなされた．

(1.4) サクセスクライテリア

目的が先鋭化されている点が評価されたが，達成可能なシステムレベルをさらに明確にした上で，サクセスレベルの設定を再考すべきという判断がなされた．

(2) 技術的実現性

実験室での検証と搭載機器開発の間の溝が埋められていない．特にサンプル採取に関わる技術的課題の抽出が必要と指摘された．

(2.1) 科学目標から機器仕様・運用要求へのブレークダウン

科学要求は明確であるが，ミッション要求やシステム要求へのへのブレークダウンは不十分と判断された．例えば，採取資料の前処理などが不明である．

(2.2) 技術的課題の克服

現在は実験室での検証レベルであり，衛星搭載に至る技術課題の抽出はと判断される．特にミッションのキーとなる年代測定装置は要検討と指摘された．

(2.3) 観測技術の共通化

火星ミッションとの共通化は必要との指摘があった．また，国際協力に関しては賛成/反対の両方あるが，検討案としては国際協力による技術獲得の道筋も持っておくべきというコメントがあった．

(3) 資金概算

搭載機器開発としての取り組みは妥当であるが，ミッションとしてはコストが高いという評価であった．

(3.1) 科学成果とのバランス

月着陸機に相乗りであればコスト的に釣り合う．しかし，単独ミッションとしてはコストがかかり過ぎると判断された．コスト削減と科学的意義の再検討の両方の努力が必要と考えられる．

(3.2) 運用と外部施設，設備の費用

現時点では未検討項目が多いが，問題ないと判断された．

(3.3) ミッションを支える研究活動の経費

資金獲得は不十分かもしれないが，科研費を獲得している点が評価された．

(4) システム成立性

検討課題が多く，工学系との連携が必要であると判断された．

(4.1) システム構成

SELENE-Bに準拠して検討がなされているが，科学目的に応じてシステム要求は変わるはずである．今後は工学との連携を深めてシステム最適化の検討を進めることが必須であると判断された．

(4.2) 先行ミッションとの関連

月ミッションは数多く，ミッション提案はさらに多い．海外先行ミッションとの関連に気を使うよりも，日本の月探査を宇宙探査のロードマップにいかに位置づけるかが重要というコメントがなされた．

(4.3) 通信の成立性

他国宇宙機関の支援の要/不要や取引材料についての説明が少なく，検討は不十分であると評価された．

(4.4) 搭載重量の考え方

試料採取のためのマニピュレータやその先端の採取機構，試料の受け渡し，表面加工(平面だし)のための研削(そのためには試料のグリップが必要)，研削面の清掃，研削面をレーザやカメラの焦点位置への移動など，機械工学・制御工学などの分野での開発を要するはずで，殆どの点で検討は不十分であると判断された．

(4.5) 外部施設，設備

まだ時期尚早であり，検討は不十分なままで良いと

思われる.

(5) スケジュール

観測・機器運用は検討されているが，システム開発はまだ未検討である．工学者と早急にWG検討を行う必用があると考えられる.

(5.1) 開発段階のスケジュール

観測機器(センサ部分)については，2018年MDRは非現実的である．また，SELENE-2実施が困難な現状では，資金計画や開発計画の再考が必要とのコメントがあった.

(5.2) 運用・解析段階のスケジュール

観測機器動作の観点から運用シナリオの日割りスケジュールが提示されており，月の昼間時間内でミッションを完結するという厳しい制約にも目処を立てている点が評価された．今後はトラブルの対処等の検討も必要になるであろう.

(6) 体制

PIを含めてサイエンスチームの活動は十分に高い．しかし，工学との連携がまだ始まっていない.

(6.1) PIの適性

PIは理学代表として適性であり，信頼できると高く評価された．ただし，技術的には支援が必要とのコメントもあった.

(6.2) 主要観測機器の開発(国際協力体制を含む)

搭載機器そのものよりも前処理段階に懸念があり，工学検討・運用検討のために体制を強化すべきであるという指摘があった.

(6.3) システム検討体制

他の提案に比べて特に遅れており，工学との連携は必須であるという判断がなされた.

(6.4) サイエンス活動

かぐやチームを引き継ぎ，十分に活発であると評価された.

2.4 木星トロヤ群探査へのコメント

(1) 科学目標の重要性

ミッション期間が長いため，ミッション完了時の科学的重要性を評価することが困難である．ロードマップ上にも位置づけにくい.

(1.1) 長期的展望の中でのミッションの位置づけ

はやぶさ，はやぶさ2の延長であり，小惑星探査の長期的展望として高評価であった．しかしながら，全ての開発・運用が順調に行われた場合でも，科学的成果を得る時期が非常に遅い(トロヤ群到着が2037年，サンプルの地球帰還が2049年)ため，ロードマップとの整合性や，ミッションの最適化について懸念が指摘された.

(1.2) 波及効果

すぐに成果が出るならば波及効果は大きいと言える．しかし，ミッションが長期間に渡る間の惑星科学・天文学の進展の予測が困難であるため，波及効果についての評価は困難である.

(1.3) 日本の特技と独自性

質量分析計やソーラーセイル，イオンエンジンなど，ミッション全体として重要性があり日本の独自性があるが，惑星科学分野に限れば必ずしも特技と独自性ということはいえないと思われる.

(1.4) サクセスクライテリア

工学側のサクセスクライテリアは明確だが，理学観測のそれは曖昧である．特に2049年のサンプル採取の意義は評価できない.

(2) 技術的実現性

工学側の検討が進んでいるのに対し，理学側の搭載機器の検討が遅れているとの印象が強い.

(2.1) 科学目標から機器仕様・運用要求へのブレークダウン

搭載機器に対する要求スペックのブレークダウンはまだ不明確である．とくにその場分析に関して検討が必要とのコメントがなされた.

(2.2) 技術的課題の克服

理学搭載機器の検討が不十分である．特に海外調達機器については要注意というコメントがなされた.

(2.3) 観測技術の共通化

一定の検証はなされているが，十分とは言えないという評価であった.

(3) 資金概算

詳細が示されていないので現時点では楽観的と見える.

(3.1) 科学成果とのバランス

長期間に及ぶ運用コストの検討が不十分と思われる．ミッション成果が得られる時期が遅いことは，サインエス／コストでみると不利である．また，工学技術実証を主目的としており，サイエンスにかかるコストの考え方が不明であるという評価であった.

(3.2) 運用と外部施設，設備の費用

概念的な運用シナリオは一通りなされているが，詳細は未検討である．特にサンプルキュレーションについては説明が不足しているという指摘があった．

(3.3) ミッションを支える研究活動の経費

未検討／検討済み，両方の評価があった．

(4) システム成立性

不十分かもしれない(特にサイエンスの観点から)が，検討はなされている．

(4.1) システム構成

着陸機，その場観測装置，サンプル採取，サンプルリターンのいずれも検討が不十分で評価できないと判断された．

(4.2) 先行ミッションとの関連

トロヤ群探査の戦略として，トロヤ群のひとつの天体に絞って観測を行うことと複数の天体をフライバイ観測することのトレードオフが十分でないとの指摘があった．一つの天体に対して結果が得られてもそれがトロヤ群を代表している保証があるか？複数天体をフライバイしたのちに一つの天体にランデブーということは不可能か？など，サイエンスの観点からさらに検討が必要であると判断された．

(4.3) 通信の成立性

実現性が不明である．

(4.4) 搭載重量の考え方

概ね検討されているが，着陸機やサンプル運搬機構等の細部に懸念があり不十分と判断された．

(4.5) 外部施設，設備

一通りの検討がなされているが，サンプルキュレーションについては詳細な議論がない．2049年帰還といえども，サンプリング装置やカプセルとのインターフェースについては現段階で決定しておく必要があるとの指摘があった．

(5) スケジュール

可能である．しかし，長い．

(5.1) 開発段階のスケジュール

2023年頃の打ち上げはハードスケジュールである．実行不可能ではないが，着陸機の開発に懸念があると評価された．

(5.2) 運用・解析段階のスケジュール

概念検討はあるが，到着後の運用形態は説明がない．

(6) 体制

工学との連携は進んでいるが，理学の体制が不足気味と思われる．

(6.1) PIの適性

経験とビジョンの提示について適正である．一方で，実働部隊が十分に配される必要がある．長期ミッションであるため，引継ぎについて検討を要する．

(6.2) 主要観測機器の開発(国際協力体制を含む)

蛍光顕微鏡が主力な機器であるが，海底物質探査用の装置を宇宙ミッション経験者が入って開発したものであり，既にBBMレベルや，構造モデル試験による環境耐性のいくつかは確認済みであるため，実現性は高い．試料採取・受け渡しを含めた全システムとしての開発にも注力すべきであるという指摘があった．

(6.3) システム検討体制

イカルスチームが加わっており，理工連携は進んでいる．長期に渡る探査計画では人材の維持が不可欠であるが，若手中心のイカルスチームが加わっていることは大きな利点であると評価される．

(6.4) サイエンス活動

惑星科学コミュニティからの支援は十分／不十分，両方の評価があった．天文学分野からの人材取り込みを期待する指摘があった．

3.『月惑星探査の来たる10年』検討作業を終えて

『月惑星探査の来たる10年』検討は2010年から開始され，当初の予定を大幅に超過して4年半の年月を要した．また，検討方針や運営手続きをめぐって多くの異見が出され，紛糾することもあった．これはひとえに事務局長としての筆頭著者の責任であり，ご迷惑をおかけした関係者にお詫びしたい．一方で，本検討作業の第一・第二段階で提出されたアイデアが種となって新たなミッション提案に進んでいるケースもある．そのような形で『月惑星探査の来たる10年』検討の成果があがっているとしたら，事務局一同，大いなる喜びである．

本検討作業を開始するにあたって，「惑星科学コミュニティが自らの力量を知る」という目的を掲げた．第2章のコメントを一読して頂ければ分かるように，評価は評価される側だけでなく，評価する側の力量をも鋭く映し出す．特に，各ミッションコンセプト案の科学的重要性を評価する上で，惑星探査ロードマップ

の不備を指摘する意見が多く出された．このパブリックコメントをまとめた後，2015年1月に惑星科学・宇宙科学分野の「研究領域の目標・戦略・工程表」が日本惑星科学会会長の指導の下でまとめられた．今後はこの「研究領域の目標・戦略・工程表」とミッションコンセプトを並行して議論することが必要であろう．

ミッションコンセプトを提案しブラッシュアップを繰り返した提案グループに対しても，各段階で評価を分担した委員に対しても，本検討作業は非常に重い負担を強いたと思う．多くの関係者の貢献により，惑星科学コミュニティは着実に経験と実力を増したはずであると事務局メンバーは切に希望する．しかしながら，かぐや，ルナAの実績・経験を踏まえて多少は前進はしつつも，本検討に関しては労力対効果が必ずしも高くは無かった．特に第三段階に3年もの時間をかけたことは著者らを含む，惑星探査の責任世代の実力不足であったことを猛省している．非効率性の原因と改善策については関係者一同とともに今後も考え続けていきたい．一方で本検討作業が何らかの形で今後も日本惑星科学会のさらに若い世代の自主的活動として引き継がれ，日本の宇宙探査を推進する原動力となることを期待する．

謝 辞

『月惑星探査の来たる10年』検討は多くの提案者と，各段階委員のボランティアによって支えられた．特に第一段階委員の大谷栄治，倉本圭，今村剛，寺田直樹，渡部重十，荒川政彦，伊藤孝士，圦本尚義，渡部潤一，木村淳，高橋幸弘，中島健介，中本泰史，三好由純，小林憲正，山岸明彦，第二段階委員の向井正（委員長），笠羽康正，杉田精司，田村元秀，中村智樹，第三段階委員の渡邊誠一郎（委員長），向井利典，芝井広，川勝康弘，田中智の各氏に深く感謝する．

参考文献

[1] 並木則行ほか, 2010, 遊星人 19, 221.
[2] 大谷栄治ほか, 2011, 遊星人 20, 349.
[3] 並木則行ほか, 2012, 遊星人 21, 215.
[4] 渡邊誠一郎ほか, 2015, 遊星人, 本号.
[5] 大竹真紀子ほか, 2012, 遊星人 21, 217.
[6] 高橋幸弘ほか, 2012, 遊星人 21, 224.
[7] 関根康人ほか, 2012, 遊星人 21, 229.
[8] 荒井朋子ほか, 2012, 遊星人 21, 239.
[9] 荒川政彦ほか, 2012, 遊星人 21, 247.
[10] 中村良介ほか, 2012, 遊星人 21, 253.
[11] 石橋高ほか, 2012, 遊星人 21, 260.
[12] 長勇一郎ほか, 2012, 遊星人 21, 267.
[13] 山岸明彦ほか, 2012, 遊星人 21, 276.
[14] 白石浩章ほか, 2012, 遊星人 21, 283.
[15] 新谷昌人ほか, 2012, 遊星人 21, 289.

←目次へ

月惑星探査の来る10年：第三段階パネル報告

渡邊 誠一郎[1]

（**要旨**）月惑星探査の来る10年の第三段階パネルでは，第二段階で提案されたミッション案・搭載機器案をベースに，惑星科学コミュニティに呼びかけた検討会による議論を経て，月年代学探査，火星複合科学探査，トロヤ群小惑星探査の3計画が中型ミッション案として提出された．第三段階パネル委員会では，提出されたミッションコンセプトのポリッシュアップを図る活動を行い，それを踏まえた提案の最終案が2014年4月に提出された．ここでは提出された3つの最終案に対して，共通の評価項目を設けて行った評価を示す．評価は順位をつけるというスタイルではなく，今後，しっかりとした理学ミッション提案とするために必要なことや改善すべき問題点を指摘する形を取った．なお，第三段階パネルの活動中において月惑星探査を取り巻く状況が大きく急速に変化しており，それについても最後に述べる．

1. はじめに

月惑星探査の来る10年（以下，「来る10年」）の第三段階パネルは2012年4月に開始され，2014年8月まで行われた．パネル委員は渡邊誠一郎（委員長），向井利典，芝井広，川勝康弘，田中智の5名であった．ここでは，第三段階パネルに提出されたミッション案に対する評価のサマリを報告する．本稿の文責は渡邊にあるが，評価の内容は全委員の合議によってまとめられたものである．

第三段階パネル委員の当初の会合でまとめられた方針は次のようなものであった．さまざまな学問分野を内包し，探査においては後発の日本の惑星科学コミュニティは，「ボトムアップで暖められた探査提案を厳しい議論と共同作業を通じて鍛えながら集約し，コミュニティとして推すプロジェクトを絞っていく」という経験をこれまでほとんど積み上げられてこなかった．しかし，国の宇宙科学予算の逓減により，特に300億円規模の中型ミッションの打上げ機会は減少する中で，そのわずかな機会を巡っての他分野との厳しい競争を勝ち抜くには，魅力があり他分野に対しても十分な説得力を持つミッションをまとめ上げ，工学系や他分野の協力を得ながら，惑星科学コミュニティが主体的にそれを推進していく体制が必要である．そこでコミュニティとして，今後の探査の位置づけと進め方を明確にする「中期ビジョン」の構築し，そのビジョンに位置づけられた惑星探査ミッションを説得力のある「ミッションコンセプト」として提示することを目標とした．

そのため，「月惑星の構造と進化の比較学」と「生命に至る宇宙物質の進化学」という二つの大テーマを設定し，第二段階のミッション案提案者を中心に，関心のある惑星科学研究者や他分野の有識者などに参加してもらい，2012年9月に「セクション別検討会」を実施した．そして，そこでの話し合いをもとに，第二段階での各ミッション案を規模感や国際協力の可能性を踏まえて中期ビジョンの中に位置づけた上で，特に中型ミッションとして提案するべきミッション案を選び，そのミッションコンセプト（MC）を同年12月までに提案いただくことにした．その結果，

（1）その場年代計測装置による月惑星年代学探査計画
（2）火星着陸機・ローバ生命探査を主とする複合科学探査計画
（3）ソーラー電力セイル探査機によるトロヤ群小惑星

1. 名古屋大学大学院環境学研究科
seicoro@eps.nagoya-u.ac.jp

探査計画
の3件が提案された．これらはいずれも上記の2大テーマ両方に関係するものであった．

提出されたMCを第三段階パネル委員が検討する中で，それぞれの提案のサイエンス的意義は高いが，その検討の熟度には不十分な点があるという認識が共有された．そこで，通常の意味での審査を行うのではなく，よりよいミッション案にしていくためのアドバイスを行っていくという方針を採ることにした．提出されたMCについて，パネル委員が提案グループと会合を持ちながらブラッシュアップをしていく活動を行った．その結果，MCの最終案が2014年4月までに提出された．これらのMCや提案書は日本惑星科学会ホームページで公開されており，ニュース→「月惑星探査の来る10年」公開ページ→第三段階とたどって参照いただきたい[1].

3つの提案に共通する問題点として，すでにJAXA宇宙科学研究所(ISAS)の理工学委員会でプリプロジェクト化もしくはワーキンググループ(WG)化されていた関連計画(月着陸探査SELENE-Ⅱプリプロジェクト，火星複合探査WG，ソーラー電力セイルWG)との関係が不明確なことであった．いずれも，当初は2010年代の打上げをめざした計画であったが，実現が遅れていたため，2020年代の将来ミッションを標榜していた「来る10年」の提案との整合性がとれない状況になっていた．そのため，第三段階のポリッシュアップの作業では，先行計画と各提案の関係を整理いただくことを促した．その結果，「来る10年」の火星探査提案は火星複合探査WG計画に，トロヤ群探査提案はソーラー電力セイルWG計画に一致させた内容となり，月惑星年代学探査提案はSELENE-2実現後を想定したミッション案として位置づけられることとなった．

次節では，3提案に対して第三段階パネル委員が2014年夏までに行った評価を記載する．それぞれ，共通の評価項目毎に記載されている．

2. 第三段階パネル委員会によるミッション案に対する評価

2.1 「その場年代計測装置による月惑星年代学探査計画」に対する評価

(1) ミッション定義審査(MDR)項目

(1.a) 計画の科学目的が明確かつ適切に絞りこまれ，目的に応じたミッション(目的にいたる手段や考え方までを含む)の先鋭化がなされているか．

太陽系科学において，太陽系形成過程から現在に至る様々な事象を絶対的な時間軸で関連づけることの重要性は論を俟たない．その標準的手法はクレータ年代学であるが，物質科学的な実証データとの対比はアポロデータのみの限定された状態に留まっている．本計画の科学目的は，月面のAristillusクレータ原にある新鮮な小クレータ近傍の岩石の年代を計測する事により，(A)月の熱的進化史の復原による月形成モデルの検証，および，(B)小天体のサイズ分布進化の復原に重要な証拠を供すること，とされている．研究背景から具体的な科学目的の説明には説得力があり，この科学目的は明確かつ適切に絞り込まれていると評価できる．科学目的を達成するためのミッションとして「ピンポイント月着陸探査によるその場絶対年代測定により，10－20億年前の衝突で形成されたクレータ内の衝突溶融岩の固化年代を10%の精度で決めること」が，掲げられている(MCには，このミッションを端的に記載すべきである．また精度の記述については(1.b)を参照)．科学目的に応じて当該ミッションが，適切かつ最善なものであることをより明確に記載する必要がある．

(1.b) 科学目的から導かれるプロジェクトとしての成功基準とミッション要求が明確であるか．

MCには記載がないが，提案書(1.4節)にはサクセスクライテリアの記載がある．しかし，その記述は技術的側面に偏り，科学的視点が弱い．サクセスクライテリアは，科学目的に照らして成功基準が適切に設定されていることを具体的に書くべきであり，ミッション要求の記述と対になっているべきだが，提案書の記述はそのようにはなっていない．記載のミニマムサクセスでは科学目的達成には不十分であり，記載のノミナルサクセスがミニマムサクセスレベルではないか．

図4－1は以下の改訂が必要：科学目的を(1.a)の(A)と(B)からスタートし，「Aristillusクレータの形成年代を15%の精度で決定する」を探査目標とすべきである．(なおサクセスクライテリアには年代決定精度は10%と記載されているが，図4－1等の精度記述では，15%とあり整合していない．)「観測・運用項目」の整理が必要(岩石の選別，岩石研磨面観察，K計測，Ar計測，年代決定)，「観測・運用要求」の各数字の根拠(あるいは不定性)を明確にすべきである．なお，提案書のミッション要求(5章)には，システム要求が混在している．

なお，一般的コメントとして，システム工学においては，科学目的→ミッション要求→システム要求(ただし，要求だけでなく，制約条件も考慮)という紐づけが明確化されるべきであるが，宇宙プロジェクトに未経験な人，あるいは，システム工学的思考経験のない理学研究者に対しては然るべき指導が必要であろう．ただし，これはプロジェクト移行時までに固めればいいので，WG設立後でも遅くはない．

(1.c) JAXA/ISASの「プロジェクト」として実施することが適切であるか．

適切である．ただし，月探査に関しては過去に宇宙理学委員会の下にWGが設立され，一方，宇宙工学委員会の下でSELENE-Bの検討があり，現在はSELENE-IIがプリプロジェクトとして活動中である．また，イプシロン搭載小型科学衛星3号機のAOに対して，SLIMと月ペネトレータ実証計画が応募した．さらに，phase A段階にあるNASAのResource Prospector Mission（RPM）へ日本から着陸機の提供が検討されているとも聞く．このようにいくつもの月探査が必要なのか，そして，本ミッションが他の惑星探査よりも優先してやるべきミッションなのか，コミュニティとしてのクリアな説明が求められるであろう．K—Ar年代計測装置について，Mars2020搭載機器には採択されなかったが，海外ミッションへの機器提案の可能性は念頭に置いておくべきである．

(1.d) 該当研究分野の国際的な動向を踏まえてその価値が高いか．日本の特技や独自性を活かす提案になっているか．

価値は高く，独自性を生かす提案になっている．ただし，本ミッションのターゲットを選定した理由として，海外ミッションとの競合性・相補性を考慮したと記述されているが，その具体的な説明が記載されてない．その場年代測定がサンプルリターンに対して持つ優位性に関して，より精密に検討すべきである．その場年代計測は科学的意義が高いために海外でも精力的に検討されているはずだが，本ミッションのLIBS-QMSを用いたアイソクロン法によるK-Ar年代計測技術は日本が一歩先んじていると書かれている．ただし，海外でのその場年代測定装置の開発状況をレビューすべきである．なお，技術的な観点として，米国研究グループからのMars2020ローバ搭載の共同提案や日本の火星生命探査ミッションの搭載機器候補にも挙げられていることが述べられている(ただし，残念ながらともに落選した)．

(1.e) 科学目的が当該研究分野の長期計画の中に適切に位置づけられ，当該研究分野のコミュニティの中で，最優先のプロジェクトとして戦略的に位置づけられているか．また，提案ミッションが国内外でのその後の惑星科学・探査計画へ及ぼす効果がどの程度か．

(1.a)で述べたように，太陽系科学において，その形成から現在に至る様々な事象を絶対的な時間軸で関連付ける事の重要性は論を俟たないし，本ミッションの科学目的と位置づけについては説得力がある．ただし，(1.c)に述べたように，本ミッションが惑星科学分野の長期計画の中にどのように位置づけられているかはクリアでない．ただし，この点は提案グループだけの問題ではなく，惑星科学コミュニティ全体の問題として今後議論が深められるよう要望する．一方，その場年代計測の技術的な観点での波及効果は十分大きいと評価できる(1.d参照)．

(1.f) ミッションの絶対的な意義・価値だけでなく，必要なコスト・リソースを考慮した時に，“サイエンス/コスト”の観点で価値が十分に高いか．

コストは中型規模(SELENE-B程度)とされているが，現時点では，これはコスト見積もりというよりも制約条件である．今後，WG活動等を通じてコスト見積もりをしていく必要がある．本ミッションが上記のコスト制約の下で達成されるとすれば，その科学的意

義の高さと期待される成果に比して妥当と思われる．なお，本ミッションに直接関わる人数はさほど多くなく，直接的な成果としての論文数は限定されたものになるであろうが，その成果は太陽系の起源と進化に関わる様々な研究に引用され，長く名を留めるものと期待される．一方で年代学という目的に関して，サンプルリターンと比べてその場測定の優位性を「サイエンス／コスト」で精査して欲しい．（増強型）イプシロン搭載ミッションとしての可能性も検討すべきである．

(1.g) 当該分野の中でプロジェクトの実施主体が明確であるか．

現時点での検討の主体はプロジェクト未経験の理学研究者であるが，年代計測で使用する質量分析器の開発メンバーに宇宙プラズマ研究者などを引き込む等の増強を図っている．しかしながら，（提案者も認識しているように）本ミッションを成立させるためにはシステム工学的な面から様々な技術検討が必要であり，WG設立後，工学メンバーを増強する必要がある．併せて，何らかの指導体制，あるいは，アドバイザリーグループを持つことが望ましい．

(2) システム要求審査(SRR)相当項目(ただし，MDRにおいても概略は提示する必要がある)

(2.a) 運用要求(外部施設の整備や海外局の利用等を含む)やプラネタリープロテクション，リターンサンプルキュレーション，データ解析などを含むプロジェクトの制約条件が明確化されているか．

WG設立前の段階の検討としては概ね十分であるが，着陸精度と科学観測データ量，軌道設計などは今後検討を深めていく必要がある．なお，本ミッションでは，プラネタリープロテクションやリターンサンプルキュレーションは無関係である．

(2.b) ミッション要求と制約条件を満たすシステム要求が明確かつ適切であるか．

WG設立前の段階の検討として，SELENE-Bからの情報に基づいた予察的な段階と判断される．今後，検討を深めていく必要がある．

(2.c) システム要求を満たすミッション系を含むシステムの技術的な成立性が適切に検討されているか．特にミッションクリティカルなキー技術が識別され，その開発検証計画が明らかになっているか．ミッションクリティカルなキー技術の開発リスクが識別され，リスクへの対応が開発検証計画に適切に反映されているか．【実際のSRRでは，技術成熟度(TRL)については，JAXA技術成熟度(TRL)運用ガイドライン(BDB06005A）で定義されるTRLに従って，バスシステムのTRLは5以上，ミッション系のTRLは4以上であることを目安とされ，TRLがこれ以下である項目については開発・検証計画をより詳細に記述することが求められる】

まずは，TRLの評価をした上で，ミッションクリティカルなキー技術が識別し，検討を深めていく必要がある．

(2.d) スケジュール(プロジェクト準備段階からプロジェクト終了までの全スケジュール)・コスト(総資金に加えて，開発フェーズ・年度毎のコスト見積もりを含む)・実施体制(探査機開発／搭載機器開発／サイエンス検討体制など．国際協力を含む場合には国際協力体制を含む)を含めたプロジェクト終了までの開発・検証・実施計画が検討・設定され，ある程度明確化されているか．

ほぼ，未検討であり，評価するには時期尚早である．

(2.e) (2.c)，(2.d)を踏まえて，計画の実現性が高いか．

現在は判断できる段階ではない．

(2.f) (1.g)から(2.a)－(2.e)の検討結果に基づいて，プロジェクト実施のリスクが網羅的に識別され，その対策方針が検討され，明確になっているか．

現在は検討できる段階にない．

(2.g) 識別されたリスクとその対処方針に応じて，設計，スケジュールに適切なマージンを設定しているか．総資金の見積もりの不確定性を適切に認識しているか．

現在は検討できる段階にない．

(2.h) 質量や電力などのリソースに余裕がある場合

には，ミッションの本来の目的以外のオプション機器の搭載の可能性を残すことも考えられる．オプション機器に対しては，上記(1.a)から(2.g)までが明確化していることを要求とはしない．しかし，その境界条件の考え方と進め方のスケジュールは明確になっているか．

ローバがその候補に掲げられ，期待される成果の増大が見込まれているが，その具体的検討はこれからであり，評価は時期尚早である．

(3) ワーキンググループ活動としての観点

(3.a) ミッション準備を進めていく研究活動(データ解析・モデリングを含む)に関して，外部資金の獲得を含めて，見通しが立てられているか．

これまで科研費等の外部資金を獲得して，概念設計や観測機器のコンポーネントの開発を進めている．また，データ解析･モデリングの面では「かぐや」の人的･予算的な実績が継続されている．

(3.b) ミッション準備を進めていく体制(PIの適性，参加者の広がり，役割分担)は妥当か．

PIの努力／適性は評価できる．しかし，システム検討を進めるためには工学系の体制強化が必須である(1.g参照)．また，観測機器開発やサイエンス検討にもより広範な研究者の参加が望まれる．

2.2 「火星着陸機・ローバ生命探査を主とする複合科学探査計画」の評価

(1) ミッション定義審査(MDR)項目

(1.a) 計画の科学目的が明確かつ適切に絞りこまれ，目的に応じたミッション(目的にいたる手段や考え方までを含む)の先鋭化がなされているか．

「地球生命が宇宙で唯一の生命かどうか」という人類の根源的な問いが，宇宙探査の多大な投資に見合うテーマであることは明らかであり，その有望かつ現実的な探査対象として火星を目指すことは，一つの合理的な選択である．

この大目標に対して，本計画では，火星生命の存在についての答えを地球型生命の基本要素を直接検出することによって得ることを科学目的としており，明確に絞り込まれているといえる．このアプローチを選択した理由も何点か記載されていて，適切な絞り込み過程を経ていると推察されるが，ミッション提案に向けては，諸外国が採っている他のアプローチとのトレードオフの形で整理されることが望ましい．また，生命存在の証拠が得られれば大成果であることは疑いないが，否定的な結果の場合，もしくは判定が不明確な場合の成果(科学的価値)についてはさらに強化すべきである．その意味では，生命前駆環境進化の解明という観点からの整理も必要であろう．生命存在の可能性についてどこまで制約することを目的とするか，そのためにどのようなアプローチをとるか，という立場を明確にすることで，後述される「他の表面探査手段」を，速やかにミッション目標に統合できる可能性がある．「火星生命の直接検出」という目的に対しては，その手段は直接的・合理的であり，また検出感度等，具体的・定量的なミッション要求も設定されていて，ミッション要求は先鋭化されているといえる．一方，生命存在の可能性について制約を与えるための試料採取地点の選定条件や，採取地点の環境の評価方法については，整理の余地がある．これまでの委員会からの指摘に対応して，他の表面探査手段についても幅広く俎上に載せ，科学成果の最大化を図っていることは評価できる．ただし生命探査と，これらの新しい探査手段を組み合わせて，どのように全体の科学目的を構成するのかについては，まだ議論中のようであり，2014年中とされるミッション提案に向けて整理が望まれる．提案書に記述されているように，もう一つの柱を立てるという考え方もあるが，上述のように，生命存在の可能性について制約を与えるという観点での環境評価という観点から，MCに記述されているように生命探査を補強する形にすることで，ミッション目標の統一感を図れるのではないかと考える．なお，提案書の記載では，ところどころ，工学実験・技術実証もミッションの目的に含まれているのではないか，と思わせる部分もあるが，以降，理学ミッションに対象を絞って，評価を進める．

(1.b) 科学目的から導かれるプロジェクトとしての成功基準とミッション要求が明確であるか．

提案書1.2項では，科学目的を実現するための機器･装置の仕様・構成，着陸点選定等の運用条件が記載されていて，そこからは検出感度や，探査地域が満たす条件，観測地点の数等のミッション要求も読み取れる．

しかし，システム要求，設計結果が混在して書かれている部分もあり．ミッション意義・目的との対応を明確にするためにも，ミッション提案に向けては整理が望まれる．とくに，ミッション要求を満たすためには本来，複数のシステム構成の選択肢がありうるが，暗黙のうちにシステム構成・分界まで限定してしまっていないか，という観点からも，ミッション要求を切り出すことは重要である．

成功基準は，提案書1.3項に記載されているが，本来，ミッション要求に対応して設定されるべきところが，ミッション要求が整理されていないためにその対応が不明確になっている．また，技術的なステップに対応する形で記載されている項目もあったので，今後，ミッション要求と平行して整理していく必要がある．ミニマム／フル／エクストラで相対的な差をつけることに腐心しているようにも見えるが，まずは，ミッション要求との関係で，フルサクセスを設定することが重要である．そして，整理していく中で，サイエンス(生命探査)としてミニマムサクセス(「機器の動作」ではなく)も定義されていくことを期待する．

(1.c) JAXA/ISASの「プロジェクト」として実施することが適切であるか．

ミッションの科学目的は，JAXA/ISASのスコープに含まれることは確かである．ただし，我が国の宇宙科学の限られたリソースの中での本計画の優先度を議論する際には，我が国の宇宙科学の中での生命探査分野の位置づけ・体制が課題として取り上げられるであろう．そのため，今回の提案でも図られているが，表面探査に関わる他の分野を有機的に巻き込みつつ，先鋭性も保持できるようなミッション構想を組み立てる取り組みが重要である．また，今回の提案では，大雑把な経費として300億円が提示されていて，宇宙科学ロードマップにおける戦略的中型計画の規模となっているが，システム構成や，必要な技術の新規性を考慮すると，実際の経費がこの額を上回る可能性は決して低くはない．その場合，本計画を実行に移すためには，科学的価値以外の政策的意義が求められることになる．なお，生命探査顕微鏡(LDM)についてはNASA MARS2020ローバの搭載機器に提案されたことが言及されているが，残念ながら落選となっている．

(1.d) 該当研究分野の国際的な動向を踏まえてその価値が高いか．日本の特技や独自性を活かす提案になっているか．

「地球生命が宇宙で唯一の生命かどうか」という人類の根源的な問いが，宇宙探査の多大な投資に見合うテーマであることは明らかであり，有望かつ現実的な探査対象として火星を目指すことは，一つの合理的な選択である．また，諸外国も火星における生命探査を実行／計画していることから，国際的に見ても，その価値が高いことは明らかである．諸外国の探査計画が，過去の生命の痕跡の検出に焦点を絞っている中，それと一線を画し，世界に先駆けて生命体の直接検出を試みる，という点で，一定の独自性があり，本計画を進めることで，氷衛星など他の天体での生命探査構想にも波及する我が国の特技に発展する潜在力がある．ただし，(1.a)に述べた否定的な結果の場合における科学的価値については検討が不十分である．

また本ミッションを，より広く「火星着陸探査」と捉えると，その重要性に比して，我が国の立ち位置が欧米に対して大きく遅れていることは明らかである．本ミッションを通じてEDL技術を獲得することで，技術ステップの差を縮めることの価値も評価できる．

(1.e) 科学目的が当該研究分野の長期計画の中に適切に位置づけられ，当該研究分野のコミュニティの中で，最優先のプロジェクトとして戦略的に位置づけられているか．また，提案ミッションが国内外でのその後の惑星科学・探査計画へ及ぼす効果がどの程度か．

本計画が，アストロバイオロジーの分野で重要なプロジェクトとして位置づけられるのは明らかであるが，むしろ問題となりうるのは，我が国の宇宙科学における生命探査分野の位置づけであろう．今回の提案でも図られているように，表面探査に関わる他の分野を巻き込むことについては，生命探査自身の価値を高めるという観点はもちろん重要であるが，当該研究分野のコミュニティの中でも価値があることとして，戦略的に位置づけられることが重要である．

提案書でも述べられているように，首尾よく生命が検出されれば，生物学そのものに変革をおよぼすほどの巨大な効果があるのは明らかだが，そうでなくともアストロバイオロジー分野の道を拓くことで，小天体・

氷衛星における生命環境探査ミッションの構想や国際協力ミッションへの参加の資格が得られる．また，火星表面探査の実現は，火星や他の天体での着陸探査の実現可能性を大きく引き上げ，国際有人探査の中での我が国の立場の向上につながる．

また本ミッションを，より広く「火星探査」と捉えると，火星に関しては，2機のオービターによる火星大気散逸探査の検討が理学委員会の下のWGで進められている．また，イプシロン・ロケット搭載ミッションについても検討がされている．NASAやESAに対して後塵を拝している日本が，火星に対してどのような戦略で探査を進めていくのか，「火星を探査対象とするコミュニティ」として長期計画を議論していく必要がある．

(1.f) ミッションの絶対的な意義・価値だけでなく，必要なコスト・リソースを考慮した時に，“サイエンス/コスト”の観点で価値が十分に高いか．

生命が検出された場合のサイエンス/コストが充分に高いことは明らかであるが，その可能性が十分には見通せない状況にあるので，生命が検出されない場合のサイエンス/コストを充分に評価する必要がある．「本ミッションでは生命が検出されなかった」という結果により，火星における生命存在可能性をどれだけ制約することができるか，ということであるが，現時点では十分に高いかどうかを判断できる材料はない．また，プラネタリープロテクションへの対応等までを考慮してのサイエンス/コストを考える必要がある．

(1.g) 当該分野の中でプロジェクトの実施主体が明確であるか．

MCや提案書6章には，体制が記載されている．主ミッションとなる生命探査装置の担当者や，システム検討を担う主要メンバーは，プロジェクト化後も活動にたずさわる意欲が高いと考えられ，メンバーの補充・強化は今後必要なものの，プロジェクトの実施主体は明確である．

(2) システム要求審査(SRR)相当項目(ただし，MDRにおいても概略は提示する必要がある)

(2.a) 運用要求(外部施設の整備や海外局の利用等を含む)やプラネタリープロテクション，リターンサンプルキュレーション，データ解析などを含むプロジェクトの制約条件が明確化されているか．

打上ウィンドウや，海外衛星によるデータ中継，プラネタリープロテクションなど，いくつかの重要な点について，制約条件が明確に示されている．ただし，ミッション提案に向けては，より網羅的に制約条件を整理していく必要がある．特に本ミッションでは生命がいそうな場所に到達することが必須条件だが，そのためには「着陸分散円半径 < ローバ走破距離」が十分な余裕を持って満たされていることが必要であり，その点をより明確にすべきである．

(2.b) ミッション要求と制約条件を満たすシステム要求が明確かつ適切であるか．

検討のステップとしては，ミッション要求が把握されつつあり，それを満足するシステム設計例が示されている段階にあるといえる．したがって，ミッション要求を満足するための十分条件となるようなシステム要求までが定義されている段階にはない．

(2.c) システム要求を満たすミッション系を含むシステムの技術的な成立性が適切に検討されているか．特にミッションクリティカルなキー技術が識別され，その開発検証計画が明らかになっているか．ミッションクリティカルなキー技術の開発リスクが識別され，リスクへの対応が開発検証計画に適切に反映されているか．【実際のSRRでは，技術成熟度(TRL)については，JAXA技術成熟度(TRL)運用ガイドライン(BDB06005A)で定義されるTRLに従って，バスシステムのTRLは5以上，ミッション系のTRLは4以上であることを目安とされ，TRLがこれ以下である項目については開発・検証計画をより詳細に記述することが求められる】

提案書の3章において，探査機システムやローバについての概念検討結果が示されており，システムの技術的な成立性の検討は進められている．この検討を通じて，提案者側ではミッションクリティカルなキー技術は認識されていると推察するが，明示的に整理されてはいない．今後，ミッション提案に向けて，技術成熟度の評価，開発検証計画の策定を進める必要がある．

(2.d) スケジュール(プロジェクト準備段階からプロジェクト終了までの全スケジュール)・コスト(総資金に加えて，開発フェーズ・年度毎のコスト見積もりを含む)・実施体制(探査機開発／搭載機器開発／サイエンス検討体制など．国際協力を含む場合には国際協力体制を含む)を含めたプロジェクト終了までの開発・検証・実施計画が検討・設定され，ある程度明確化されているか.

ほぼ，未検討であり，評価するには時期尚早である.

(2.e) (2.c)，(2.d)を踏まえて，計画の実現性が高いか.

とくに資金概算の内容・精度について，その妥当性を確認する材料がないので，計画の実現性は評価できない.

(2.f) (1.g)から(2.a)－(2.e)の検討結果に基づいて，プロジェクト実施のリスクが網羅的に識別され，その対策方針が検討され，明確になっているか.

現在は検討できる段階にない.

(2.g) 識別されたリスクとその対処方針に応じて，設計，スケジュールに適切なマージンを設定しているか．総資金の見積もりの不確定性を適切に認識しているか.

現在は検討できる段階にない.

(2.h) 質量や電力などのリソースに余裕がある場合には，ミッションの本来の目的以外のオプション機器の搭載の可能性を残すことも考えられる．オプション機器に対しては，上記(1.a)から(2.g)までが明確化していることを要求とはしない．しかし，その境界条件の考え方と進め方のスケジュールは明確になっているか.

現状，必須とされている搭載観測装置は生命探査顕微鏡と気象パッケージであり，その他の装置(環境モニタカメラ，LIDAR，LIBS，等)はオプション選定中とされている．ただし，これらは「リソースの余裕を見て搭載を考慮する」というよりも，「ミッション全体の科学目的の構成を検討中であり未確定」というステータスにあり，ミッション提案に向けて確定していくものと考える.

(3)　ワーキンググループ活動としての観点

(3.a) ミッション準備を進めていく研究活動(データ解析・モデリングを含む)に関して，外部資金の獲得を含めて，見通しが立てられているか.

昨年度までは宇宙探査委員会下の，今年度からは宇宙工学委員会下のWGとして活動している．外部資金等の状況に関する記述はない.

(3.b) ミッション準備を進めていく体制(PIの適性，参加者の広がり，役割分担)は妥当か.

MCや提案書6章には，体制が記載されている．観測機器については，数多くの研究者名がリストアップされているが，関与の度合い，経験について充分な情報を持っていないので，妥当性の判断は難しい．工学については，ミッション準備段階で重要な，新規開発技術(ローバ，エアロシェル，空力誘導・制御等)の研究者，システム設計に関わる技術者は確保されているように思えるが，これに加えて，プロジェクト管理(コスト，スケジュール，リスクの管理)の経験を有する技術者を加えることが望ましい.

2.3 「ソーラー電力セイル探査機によるトロヤ群小惑星探査計画」の評価

(1)　ミッション定義審査(MDR)項目

(1.a) 計画の科学目的が明確かつ適切に絞りこまれ，目的に応じたミッション(目的にいたる手段や考え方までを含む)の先鋭化がなされているか.

科学目的は，木星トロヤ群小惑星の形成過程を調べることで原始太陽系円盤内の揮発性物質分布および惑星移動プロセスに重要な制約を与えること，とされている．この科学目的は太陽系形成過程を明らかにする上で第一級の価値を有するが，より絞り込む必要がある．なお，クルージング・フェーズでの宇宙赤外線背景放射・γ線バースト・惑星間塵の観測が掲げられているが，これらは副次的な目的であるので，オプション扱いとして，「来たる10年」の評価においては考慮しない．科学目標を達成するためのミッションとして，「木星スイングバイを活用したソーラー電力セイルによってトロヤ群小惑星の一つにランデブーし，リモートセンシング観測を行うとともに，子機を天体表面に着陸させ，試料を採取してその場分析を行い，可能であれば親機が試料を地球に持ち帰り地上分析を行

うこと」が掲げられている．これは成功すれば科学的意義は大変大きいが，ミッション期間が到着までででも14年，帰還までなら26年という長さになるため，他の太陽系探査との優先度については慎重な検討が必要である．また，トロヤ群のうちの一つの小惑星に行くことで普遍的な科学目的のどこまでが達成可能なのかについて検討を要する．

(1.b) 科学目的から導かれるプロジェクトとしての成功基準とミッション要求が明確であるか．

ミニマムサクセスが記載されておらず，不明確である．最低でもランデブーとリモートセンシング観測の達成をもってミニマムサクセスとすべきだが，それで十分かは，科学目的に照らして検討すべきである．ミッション要求としては，トロヤ群中の探査対象天体の選定基準，理学観測の種類と内容，その場分析の目標について，より具体的な検討が必要である．この1年での検討内容の進展があまり見られない(成功基準の定義があいまいになっている点で，むしろ後退したように見える)のは残念である．

(1.c) JAXA/ISASの「プロジェクト」として実施することが適切であるか．

国際協力・分担は特に理学機器については十分に検討すべきである．

(1.d) 該当研究分野の国際的な動向を踏まえてその価値が高いか．日本の特技や独自性を活かす提案になっているか．

国際的にも関心が高く，どこかの国がいつかは行う探査といえる．太陽系空間航行の工学，特に電気推進，ソーラーセイル，サンプルリターンについては日本の特技と考えて良い．理学機器では，マルチターン質量分析器は日本独自のものだが，他には独自技術は見当たらない．

(1.e) 科学目的が当該研究分野の長期計画の中に適切に位置づけられ，当該研究分野のコミュニティの中で，最優先のプロジェクトとして戦略的に位置づけられているか．また，提案ミッションが国内外でのその後の惑星科学・探査計画へ及ぼす効果がどの程度か．

はやぶさ，はやぶさ2という日本が積み上げてきた小惑星探査の流れに乗っており，推進技術やサンプルリターン技術の継承がそれなりに期待される．しかし，発展の先としてメインベルト小惑星か，彗星か，トロヤ群かは意見が分かれるところであろう．サンプルリターンはエクストラサクセスであり，試料がもどってくるまで今から少なくとも35年もかかる計画なので，このミッションだけで地上分析グループをつなぎ止めるのは困難であり，長期計画をより明確にする必要があろう．

(1.f) ミッションの絶対的な意義・価値だけでなく，必要なコスト・リソースを考慮した時に，“サイエンス/コスト”の観点で価値が十分に高いか．

コストは戦略的中型計画の枠内とされ，欧米の類似ミッションより格段に経費が小さいことが示されているが，ミッション期間の長さを考えた耐久性の確保や理学機器の不確定さから，現時点のコスト見積もりの精度が高いとは言い難い．また，“サイエンス／期間”の観点からの判断，特に開発に携わる研究者とデータを手にする研究者が世代を異にする点はミッションの求心力の低下につながりかねないため，慎重な検討が必要である．

(1.g) 当該分野の中でプロジェクトの実施主体が明確であるか．

2020年まではやぶさ2プロジェクトとの重複がある．理学の研究者の参加をもっと増やす必要がある．特に超長期ミッションであるので，学生・若手研究者の継続的参加が必須である．

(2) システム要求審査(SRR)相当項目(ただし，MDRにおいても概略は提示する必要がある)

(2.a) 運用要求(外部施設の整備や海外局の利用等を含む)やプラネタリープロテクション，リターンサンプルキュレーション，データ解析などを含むプロジェクトの制約条件が明確化されているか．

超長期運用になるため，体制の維持は十分に検討しておく必要がある．プラネタリープロテクションの検討も必要だが，十分検討されていないようである．サンプルキュレーションについては，カプセル等の開発のため，想定は必要だが，実際の地球帰還はずっと先

なので，施設等の具体的検討は後年で良いだろう．

(2.b) ミッション要求と制約条件を満たすシステム要求が明確かつ適切であるか．

検討が進んでいないため，判断ができない．特に理学機器については，まったく検討が進んでいないようである．子機の設計やサンプリング方式についても検討は不十分である．

(2.c) システム要求を満たすミッション系を含むシステムの技術的な成立性が適切に検討されているか．特にミッションクリティカルなキー技術が識別され，その開発検証計画が明らかになっているか．ミッションクリティカルなキー技術の開発リスクが識別され，リスクへの対応が開発検証計画に適切に反映されているか．【実際のSRRでは，技術成熟度(TRL)については，JAXA技術成熟度(TRL)運用ガイドライン(BDB06005A）で定義されるTRLに従って，バスシステムのTRLは5以上，ミッション系のTRLは4以上であることを目安とされ，TRLがこれ以下である項目については開発・検証計画をより詳細に記述することが求められる】

TRL以前に理学機器の概念検討すら，ほとんど進んでいない．早急に検討をすべき．

(2.d) スケジュール(プロジェクト準備段階からプロジェクト終了までの全スケジュール)・コスト(総資金に加えて，開発フェーズ・年度毎のコスト見積もりを含む)・実施体制(探査機開発／搭載機器開発／サイエンス検討体制など．国際協力を含む場合には国際協力体制を含む)を含めたプロジェクト終了までの開発・検証・実施計画が検討・設定され，ある程度明確化されているか．

検討できる段階にない．

(2.e) (2.c)，(2.d)を踏まえて，計画の実現性が高いか．

判断できる段階にない．

(2.f) (1.g)から(2.a)－(2.e)の検討結果に基づいて，プロジェクト実施のリスクが網羅的に識別され，その対策方針が検討され，明確になっているか．

検討できる段階にない．

(2.g) 識別されたリスクとその対処方針に応じて，設計，スケジュールに適切なマージンを設定しているか．総資金の見積もりの不確定性を適切に認識しているか．

検討できる段階にない．

(2.h) 質量や電力などのリソースに余裕がある場合には，ミッションの本来の目的以外のオプション機器の搭載の可能性を残すことも考えられる．オプション機器に対しては，上記(1.a)から(2.g)までが明確化していることを要求とはしない．しかし，その境界条件の考え方と進め方のスケジュールは明確になっているか．

赤外線背景放射・γ線バースト観測と惑星間塵の観測は二次的な目的であるので，オプションと位置づけるのが妥当であろう．

(3)　ワーキンググループ活動としての観点

(3.a) ミッション準備を進めていく研究活動(データ解析・モデリングを含む)に関して，外部資金の獲得を含めて，見通しが立てられているか．

工学委員会の下のWGとして活動をしている．外部資金等の状況に関する記述はない．

(3.b) ミッション準備を進めていく体制(PIの適性，参加者の広がり，役割分担)は妥当か．

工学委員会の下のWGとして活動をしているが，理学部分については脆弱である．この1年検討がほとんど進んでいないことから，プロジェクトをリードする体制を大幅に強化する必要がある．より若く牽引力のある理学研究者が中核に参加して，理学機器の検討を真剣に進める体制を構築すべきと考えられる．イプシロン搭載ミッション等で子機による試料採取やその場分析などの宇宙実証をすべきである．

3. 月惑星探査を取り巻く状況の変化

「来る10年」第三段階の活動を進める間に，太陽系探査をめぐる状況がめまぐるしく変化していった．

2013年1月，宇宙開発戦略本部は宇宙基本計画を決定し，「宇宙科学等のフロンティア」も3つの重点課題の一つに位置づけられた[2]．そして，2013年9月には宇宙科学研究所から宇宙政策委員会の宇宙科学・探査部会に「宇宙科学・探査ロードマップ」が報告され，同部会で承認され親委員会に報告された[3]．このロードマップでは，「太陽系探査科学分野は，最初の約10年を機動性の高い小型ミッションによる工学課題克服・技術獲得と先鋭化したミッション目的を立て，10年後以降の大型ミッションによる本格探査に備える．」とされた．

一方，宇宙政策全般についても，日本を取り巻く安全保障環境の変化や宇宙産業基盤の弱体化などを踏まえた見直しが進められ，2015年1月には新たな宇宙基本計画が宇宙開発戦略本部によって決定された．そこでは，「産業界の投資の「予見可能性」を高め，産業基盤を強化するため，今後20年程度を見据えた10 年間の長期整備計画とする」と謳われている．また，「新たな宇宙基本計画を「本文」と「工程表」の二部構成とし，「工程表」については，毎年，政策項目ごとの進捗状況を宇宙政策委員会において検証し，宇宙開発戦略本部において改訂する」とされた．そして，宇宙科学・探査については，「ボトムアップを基本としてJAXAの宇宙科学・探査ロードマップを参考にしつつ，今後も一定規模の資金を確保し，推進する」とし，今後10年間では，戦略的中型3機と公募型小型を5機(2年に1回のペース)打ち上げるとともに，多様な小型プロジェクトを着実に実行するとして「工程表」が示された．さらに，「太陽系探査科学分野については，効果的・効率的に活動を行える無人探査をボトムアップの議論に基づくだけでなく，プログラム化も行いつつ進める．プログラム化においては，月や火星等を含む重力天体への無人機の着陸及び探査活動を目標として，特に長期的な取組が必要であることから，必要な人材の育成に考慮しつつ，学術的大局的観点から計画的に取り組む」とある．

「工程表」の提示を受けて，2014年12月には，ISASからは「平成26年度戦略的中型宇宙科学ミッション候補の提案募集」が発出され，太陽系科学分野からは「火星着陸探査技術実証プロジェクト」と「ソーラー電力セイル探査機による外惑星領域探査の実証」の応募があった．ただし，ともに工学実証の色彩の強い提案となっている．また，ISASから宇宙科学コミュニティの各研究領域に対して，「研究領域の目標・戦略・工程表」提出の要望(RFI)が出され，この提出(2015年2月)を受けて，太陽系探査科学分野においてはプログラムの構築に向けた検討が進められる見込みである．このような急速な動きの中で，当初2014年12月発刊の『遊・星・人』掲載予定だった本報告は，公表のタイミングを失い，半年遅れてしまった．本来であれば，上述のような動きを先取りし，「来る10年」のビジョンを示した上で，惑星科学コミュニティの対応を模索すべきであったが，そのようにならなかったことについては，第三段階パネル委員長として力不足をお詫びしたい．しかし，「来る10年」の取り組みとそこでの真摯な議論の経験は，今後の太陽系探査科学の検討において，大きな糧となると確信している．

参考文献

[1] 日本惑星科学会ホームページ，月惑星探査の来る10年公開サイト，https://www.wakusei.jp/~decade_sec/wiki/open/
[2] 秋山演亮, 2012, 遊星人 22, 102.
[3] 渡邊誠一郎, 2014, 遊星人 23, 111.

←目次へ

みんなでふたたび木星へ，そして氷衛星へ その3 ～非熱的中性粒子観測器 PEP/JNA ～

浅村 和史[1]，二穴 喜文[2]，三好 由純[3]，坂野井 健[4]，
齋藤 義文[1]，下山 学[2]，JUICE-PEP/JNA 日本チーム

（**要旨**）欧州宇宙機関（ESA）は木星探査機 JUICE の開発を進めている．JUICE 衛星に搭載される予定の科学観測器の一つに非熱的中性粒子観測器 PEP/JNA（Plasma Environment Package / Jovian Neutrals Analyzer）がある．木星磁気圏において非熱的中性粒子の成因の一つは，Ganymede などの天体表面へのプラズマ粒子の降り込みによって起こる後方散乱及びスパッタリング現象である．生成した非熱的中性粒子は電磁場の影響を受けずに弾道飛行する．このため，希薄な大気しかもたず，氷衛星表面と木星磁気圏プラズマ粒子が直接衝突する環境における非熱的中性粒子観測は，氷衛星表面に投影したプラズマ構造の空間変化の情報をもたらす．これに対しプラズマ直接観測では，詳細なプラズマパラメータが得られるものの，原理的に時間・空間変化の分離が困難である．非熱的中性粒子観測はプラズマ観測に対して相補的な役割を持つものであり，両観測を通して木星／氷衛星磁気圏の理解を進めてゆきたい．

1. 非熱的中性粒子とは

希薄な大気しかもたない天体表面からは，プラズマ粒子の衝突や太陽光照射などによって粒子が放出される．これらの過程にはイオンが降り込んだ際に表面構成粒子がたたき出されるスパッタリング，自身が反射する後方散乱，宇宙塵／太陽光／電子衝突による粒子放出（MIV；Micrometeorite Impact Vaporization/PSD；Photon Stimulated Desorption/ESD；Electron Stimulated Desorption），熱脱離（TD；Thermal Desorption）などがある．この中でMIV, PSD, ESD, TDについては放出粒子のエネルギーが低く，最も高いMIVであっても2500 – 5000K（0.2–0.5 eV）程度と考えられている．

一方，後方散乱（backscattering）過程では入射プラズマと同程度のエネルギーを持つ粒子まで存在し得る．また，スパッタリング（sputtering）過程は運動量交換過程であり，入射粒子のエネルギー・質量，出射粒子の質量などによるものの，熱的エネルギーより十分高いエネルギーを持つ粒子が放出される（図1）．したがって，エネルギーの高い後方散乱粒子，スパッタリング粒子を選択的に計測することで，その生成起源である天体表面に降り込むイオンの情報を得ることができる[1, 2]．

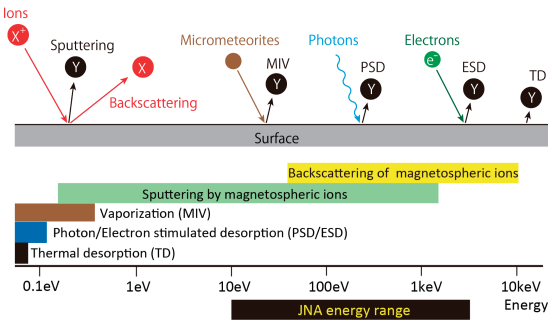


図1：希薄な大気しか持たない天体表面からの粒子放出過程と放出粒子の典型的なエネルギーレンジ．

これらの放出粒子のほとんどは電気的に中性の状態で放出される．このため，後方散乱粒子，スパッタリ

1. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
2. Swedish Institute of Space Physics
3. 名古屋大学太陽地球環境研究所
4. 東北大学惑星プラズマ・大気研究センター
asamura@stp.isas.jaxa.jp

ング粒子の多くは非熱的中性粒子であり，生成後，電磁場の影響を受けずに弾道飛行することとなる．これは，天体表面から飛来する非熱的中性粒子を撮像観測すると，天体表面に衝突した周辺プラズマ構造の空間構造やその時間変化といった情報を，天体表面に投影した形で得られることを意味している．これに対し，プラズマ直接観測では詳細なプラズマパラメータが得られるものの，原理的に時間・空間変化の分離が困難である．したがって，非熱的中性粒子の撮像観測はプラズマ直接観測の制約を補うものであり，相補的である．

本稿で紹介するPEP/JNAは，木星の衛星であるGanymede表面で生成される非熱的中性粒子の観測を主ターゲットとしており，観測される後方散乱粒子，スパッタリング粒子フラックスは天体表面と磁力線でつながった領域のプラズマ環境を示すものと考えることができる．

2. PEP/JNAの科学目的

木星の磁気圏において氷衛星起源のプラズマがどのような過程で生成され，どのような過程を経て磁気圏に供給されてゆくのかはよく分かっていない．例えば，過去のGalileo衛星の観測からはGanymedeが固有磁場を持つことが分かっており，木星磁気圏の中で独自の衛星磁気圏が形成されていると考えられている．また，希薄ながら大気圏を有している可能性も指摘されている．しかし，Ganymedeの磁気圏においては，木星磁気圏プラズマ流のマッハ数が小さいため，上流側に衝撃波面が形成されず，またAlfven Wingと呼ばれる特徴的な構造が形成される．これに対し，太陽風と惑星磁気圏の相互作用の場合には，超音速の太陽風が吹き付けることにより衝撃波面が形成され，Alfven Wingの形成が起こるのは極めて限られた太陽風条件に限定される．このように，木星プラズマ流-ガニメデ磁気圏相互作用は地球磁気圏とは異なる特徴を有している．こうした地球磁気圏とは大きく異なる磁気圏において，どのようにプラズマが分布し輸送されているか，さらには衛星磁気圏と木星磁気圏とがどのように相互作用しているかについては未だ理解されていない．また，Ganymede起源の中性粒子（H，O，H_2Oなど）は周辺空間に流出すると考えられる．しかし，流出源がGanymede表面にどのように分布し，どのような放出過程を経て希薄な大気を形成するのか，さらには流出した粒子が木星磁気圏にどのように分布し，木星磁気圏ダイナミクスに影響を与えているのかは分かっていない．

後方散乱粒子，スパッタリング粒子は木星磁気圏/衛星磁気圏から衛星表面にプラズマ粒子が降り込むことによって生成される粒子であり，これらを観測することによって磁気圏空間構造や時間発展を観測することができる．また，プラズマ粒子の降り込み，そして後方散乱過程，スパッタリング過程による粒子放出とその後の電離は木星磁気圏プラズマの消失・生成を意味しており，衛星を介した磁気圏プラズマの輸送過程の一端を担うものである．

そこで，PEP/JNAチームでは，上記の問題意識のもとに以下の2つの科学目標を設定し，JUICEミッションの目標である氷衛星科学探査の一翼を担う．

（a）Ganymede磁気圏構造，および木星磁気圏プラズマとの相互作用の理解

（b）木星磁気圏における物質の生成，輸送，消滅に果たす氷衛星の役割の理解

また，PEPはJNAによる非熱的中性粒子観測に加え，熱的中性粒子および4つのプラズマ直接観測を行うセンサーから構成される．さらにJUICEには磁場や波動を観測される機器も搭載される．これらのセンサーと同時観測を行うことで，氷衛星に起源をもつ中性粒子，プラズマがどのように生成され衛星磁気圏に分布するのか，さらに，それらが木星磁気圏の中でどのように輸送され，木星磁気圏のダイナミクスに影響を及ぼすかを解明し，JUICEのもう一つの科学目標である巨大ガス惑星の世界の理解にも貢献する．

2.1 Ganymede磁気圏構造の理解

Ganymedeの公転半径は15Rj（Rj：木星半径）であり，木星磁気圏内で木星の自転によって形成されるプラズマ共回転領域内を公転している．このため，Ganymede固有磁場と木星固有磁場によって磁気圏が形成されていると考えられている（図2）．そして，Ganymede表面へのプラズマ粒子の降り込み構造が磁気圏形状に対応して存在するものと考えられている．Galileo衛星がGanymedeフライバイ時に観測したプラズマパラメータを入力としたMHDシミュレーショ

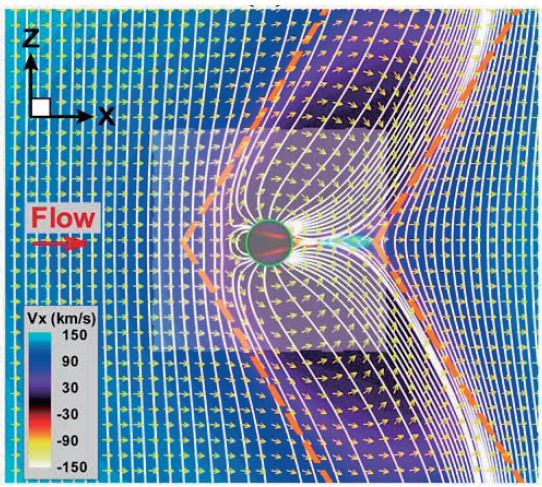


図2：MHD シミュレーションによって得られたGanymede磁気圏形状．白線は磁力線を示している．極域に「open」な磁力線，赤道域に「closed」な磁力線領域があることが分かる．[3]より転載．

ン[3]を用い，Ganymede表面に降り込むイオンフラックス分布を推定してみると，経度90° Eを中心としたtrailing hemisphere（反公転方向に面した半球）ではカスプ付近に降り込みがあり，経度90° Wを中心としたleading hemisphere（公転方向に面した半球）では赤道域付近に強い降り込みが存在することが確認できた．赤道域への降り込みの原因は，leading hemisphereの低緯度域上空で磁気リコネクションが発生し，Ganymede方向に向かう高温のプラズマ流が発生するためと説明されている．

一方，Galileo衛星で取得されたGanymede表面イメージでは，極域と赤道域でViolet/Green比が大きく異なっている．この理由として，Ganymedeの極域には片端がGanymede表面に接続し，反対側は木星磁気圏につながるいわゆる「open」な磁力線のフットプリントがあるが，低緯度域には両端がGanymede表面に接続する「closed」な磁力線フットプリントがあるため，長期間にわたるトータルのプラズマ粒子の降り込み量に差が出ることが表面特性の進化の差となって表れたという仮説が提唱されている[4]．この仮説は，極域にはプラズマ粒子の降り込みが多く，Ganymede表面に存在する氷の表面が不規則な構造になっているのに対し，赤道域ではプラズマ粒子の降り込みが少ない上に表面温度が極域より高く，氷の表面が滑らかになっているためViolet/Green比が異なる，というものである．しかし，この場合，上述のMHDシミュレーションの結果が正しければ，低緯度域にViolet/Green比が大きい領域が現れてもよいかもしれない（Ganymedeは自転と公転が同期しており，leading hemisphereの領域はleading hemisphereのまま維持される）．このように，Ganymede磁気圏構造の研究については，必ずしも整合的でない説が林立する状況であり，その統一的描像はまだ得られていない．プラズマ粒子が衛星表面に降り込むことによって生成される非熱的中性粒子を観測し，降り込み領域の空間分布，時間発展のリモート観測を実現することで，Ganymede磁気圏モデルに制限を与え，より現実的な磁場モデルが構築できると考えられる．

また，Ganymede磁気圏と相互作用する木星プラズマ流はマッハ数が低いため，地球磁気圏に見られるような衝撃波面とシース構造が形成されない．したがって，Ganymede磁気圏界面領域のプラズマの分布やダイナミクスは，地球磁気圏のそれとは大きく異なっていることが予想される．さらに，木星の高速自転により，木星磁気圏共回転プラズマは磁気赤道付近に集中し，Ganymede軌道付近ではディスクを構成していると考えられるが，木星の自転軸と磁気双極子軸が約10度傾いていることにより，Ganymedeはディスクの内外を行ったり来たりする．それに伴ってGanymede磁気圏の形状も大きく変わると考えられる．JUICE衛星搭載機器の中で，PEP/JNAによる非熱的中性粒子観測は木星プラズマ流とGanymede磁気圏の相互作用を直接反映すると考えられるカスプの空間構造を可視化できる唯一の手法であり，JUICEがGanymedeを周回する間に，カスプの構造の時間発展を追跡することができる．そしてプラズマ粒子直接観測とあわせることにより，地球磁気圏と異なるカスプの動態を明らかにすることが期待される．

2.2　木星磁気圏における物質輸送の理解

プラズマ粒子が衛星表面へ降り込んだ際の後方散乱の効率について，月では数％から20％との観測結果がある[5, 6]．このため，衛星表面に降り込んだプラズマ粒子の一部は後方散乱されるが，多くは衛星表面に留まると考えられる．ただし，希薄な大気しかもたない固体天体表面において，非熱的中性粒子の後方散乱効率が導出された例は月での例のみであり，他天体

での観測例はなく，未解決問題となっている．特に氷衛星においては，その表面のほとんどが氷に覆われていると考えられており，SiO_2を主成分とする月の表面とは特性が異なる．そのため，後方散乱効率を観測的に導出することは物質輸送を理解する上で重要である．

また，後方散乱粒子やスパッタリング粒子でエネルギーの比較的低いものは衛星重力圏を抜けられず，途中で電子衝突などにより電離し電離圏/磁気圏プラズマとなるか，再度衛星表面に到達する．一方衛星の重力圏を十分脱出可能なエネルギーを持つ非熱的中性粒子は木星磁気圏内に直接供給され，電離によって木星磁気圏プラズマ構成粒子となる．実際，Europa軌道ではGalileo衛星が観測したプラズマピッチ角分布から中性粒子トーラスの存在が示唆されており，Europa からの流出と考えられている[7].

このように，衛星の存在は木星磁気圏プラズマの消失・生成の一端を担っている．特にGanymedeでは，固有磁気圏の存在により粒子の降りこみが複雑になり，粒子流出の様相も変動しているものと考えられる．プラズマ直接観測とともに後方散乱粒子，スパッタリング粒子を観測することで，衛星表面に降り込むことによる木星磁気圏プラズマ粒子の消失，磁気圏内への後方散乱過程による粒子供給，スパッタリング過程による衛星表面構成物質の供給レートを定量的に明らかにできると期待している．

3. PEP/JNAの機器概要

3.1 開発経緯

私たちはスウェーデン宇宙物理研究所(IRF；Swedish Institute of Space Physics)，ベルン大学(スイス)と共に非熱的中性粒子観測器を開発してきた．これまでにMars Express(欧州の火星周回探査機)搭載ASPERA-3観測機器パッケージ，Venus Express(欧州の金星周回探査機)搭載ASPERA-4観測機器パッケージ，Chandrayaan-1(インドの月周回探査機)搭載SARA観測機器パッケージに観測器を提供し，BepiColombo/MMO(欧州の水星探査計画に対して日本が提供する周回探査機)にも搭載が予定されている(MPPE/ENA)．この中でSARA/CENAとMPPE/ENAはPEP/JNAのベースとなる観測器である．

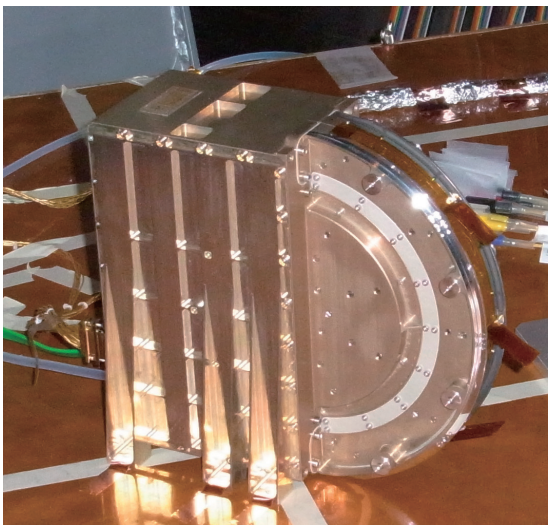


図3：MMO/MPPE/ENAプロトフライトモデル．

Chandrayaan-1は2008年に打ち上げられ，月周回軌道における観測を2009年まで行った．そして，Chandrayaan-1に搭載されたSARA/CENAは月のように希薄な大気しか持たない天体の周回軌道において，初めて非熱的中性粒子の観測に成功した．SARA/CENAは月表面で中性化・反射された太陽風起源後方散乱粒子を観測し[6, 8]，それによる経験的反射モデルを初めて構築した[9, 10]ほか，月表面でスパッタリングされたと考えられる酸素原子を初めて観測した[8]．また，月表面の磁気異常によって太陽風粒子の降り込みが抑制される「ミニ磁気圏」の発見[11]や，ミニ磁気圏内の電場構造のリモート撮像にも成功した[12]．これらの成果はBepiColombo /MMOにおける水星探査，JUICEにおける木星・氷衛星探査の基礎となるものである．なお，SARA/CENA開発において私たちは観測器(センサー)設計，検出器部設計・製作，電子回路部(ただし高圧電源を除く)設計・製作を行った．

BepiColombo衛星はまだ打ち上げられていない．ただし，MPPE/ENAとSARA/CENAはほぼ同じ観測器構成であり，SARA/CENAで得られた多くの知見を基に改良したものがMPPE/ENA(図3)となっている．開発体制は各機関の担当部分を含めSARA/CENAとほぼ同じであるが，後段のデータ処理部(MDP)は日本が開発するものであるため，機上ソフトウェア開発・実装も私たちが担当している．

PEP/JNAにおいても基本的な観測器構成，開発体

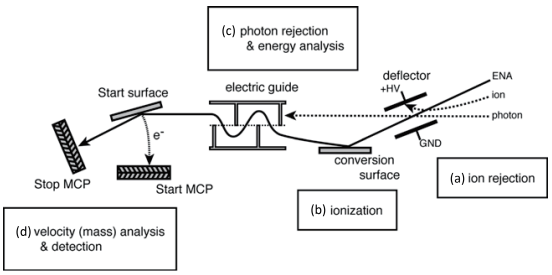


図4：PEP/JNA の観測原理．入射粒子を電離後，エネルギー分析，飛行時間分析を行う[13].

制，開発担当部分はSARA/CENA，及びMPPE/ENAと同様となる予定である．ただし，JUICE衛星への搭載にあたっては環境条件・搭載条件などが異なるため，耐放射線環境対策，衛星搭載インターフェースなどの観点で改良や最適化を伴う構成変更を行っている．

3.2　観測原理

PEP/JNAの観測原理は図4のようになっており，非熱的中性粒子のエネルギー分析，到来方向弁別のほか，質量分析を実現している．

(a) 荷電粒子除去部：入射粒子中に存在する荷電粒子は電場によって軌道を偏向し，除去する．

(b) 粒子電離部：残った中性粒子をconversion surfaceに衝突させ，一定の確率(粒子種・エネルギーによるが，5%程度)でイオン化する．

(c) エネルギー分析／光子除去部：イオン化した粒子の軌道を静電場によって偏向し，特定のエネルギー範囲のもののみを飛行時間分析部に導くことでエネルギー分析を行う．また，光子(紫外線)は静電場によって軌道偏向されないため，同時に光子除去を行う．

(d) 飛行時間分析部: エネルギー分析部から出射した粒子は静電場による加速後，Start surfaceに衝突する．Start surfaceでは衝突によって二次電子がたたき出され，START MCPで検出される．二次電子が表面からたたき出された時のエネルギーは10 eV程度以下と低い．このため二次電子の軌道は容易に制御でき，電子の飛行時間のばらつきを抑制することができる．一方，Start surfaceに衝突し，反射した粒子は STOP MCPで検出される．こうして二次電子と，もともとの入射粒子の検出タイミング差から粒子速度が求められる．エネルギー分析によって入射粒子のエネルギーが分かっているため，速度の情報から質量を割り出すことができる．

3.3　必要とされる性能と仕様

本章ではPEP/JNAの設計に必要となる性能要求と，設計を行った結果得た仕様について述べる．

3.3.1　視野範囲

衛星(Ganymede)表面を見下ろす方向を中心とし，JUICE衛星の軌道運動に垂直な方向に衛星表面を見渡せること．JUICE衛星の運動方向(極軌道であるため，ほぼ緯度方向)の視野については，衛星の移動に伴って観測領域を掃引できるため，広い視野を持たなくてもよい．なお，Ganymedeの高度500 kmの周回軌道の場合，軌道周期は200分ほどであり，100分毎に南北両極域を観測できる．

3.3.2　視野角

110度以上(JUICE衛星の軌道運動に垂直な方向)．110度以上とすることでGanymede衛星上空高度500 kmからは地平線まで見渡すことができる．また，この条件下では連続した二軌道で，Ganymede表面に投影した視野がオーバーラップし，同じ領域を観測することができるため，非熱的中性粒子の観測に変化があった場合に，時間変化と空間変化の分離が可能となる．

3.3.3　角度分解能

Ganymede表面を10度以下(Ganymede中心基準)で分割できること．MHDシミュレーションに基づく予測(2.1章)では，leading hemisphereの赤道域における降り込み粒子の空間スケールは60度程度あるが，カスプ領域の降り込み粒子の空間スケールは20度程度である．上記科学目的を考慮し，カスプ領域を空間分割して観測できることを基準とする．

3.3.4　時間分解能

ダイナミックであると予測されるGanymedeのカスプ形状の時間変化を捉えること．空間スケールとしてGanymede半径2634 km，速度スケールとしてGanymedeにおける典型的なAlfven速度である190 km/sを仮定することで，15秒をノミナルとする．なお，必要角度分解能である10度を，衛星の移動方向(緯度方向)に掃引するために必要な衛星移動距離は550 km(高度500 km円軌道の場合)であり，衛星移動時間は

約5分である．これはノミナルと設定した15秒より十分に長いため，15秒の分解能を与えれば緯度方向にも必要角度分解能を達成できる．

3.3.5 質量分解能

H, O/S-groupを分離できること．衛星表面に存在するとされる水分子に対し，スパッタリング粒子の観測によって水分子と同定/推定するためにはHと重粒子を弁別した観測が必要である．

3.3.6 エネルギー範囲

10–10000 eVを計測すること．後方散乱粒子，スパッタリング粒子の典型的エネルギーはこれらの放出を引き起こす降り込み粒子のエネルギーより低い．月での後方散乱粒子の観測結果では50%以上のエネルギーロスとなっている[6]．計算機シミュレーション[3]を基に求めた降り込み粒子のエネルギーは，leading hemisphere上空の磁気リコネクションによる加速に対応した領域でも20 keV以下に分布しており，対応する後方散乱粒子，スパッタリング粒子のエネルギー範囲は10 keV程度以下と考えられる．また，月における後方散乱粒子の観測・解析結果[10]などから，非熱的中性粒子の全体フラックス及びエネルギー分布から後方散乱係数やスパッタリングによるyieldをより正確に推定するため，低エネルギー側は10 eVまでの計測が必要と考えられる．

なお，～500 eV以上のエネルギー帯域はPEPに含まれる他観測器であるPEP/JENI(Jovian Energetic Neutrals & Ions)によって観測可能であり，PEP/JNAとしては機器間較正などのためのオーバーラップを含め3000 eV程度までをカバーすることが要求となる．

3.3.7 エネルギー分解能

ΔE/E = 1以下の分解能を持つこと．後方散乱粒子のエネルギースペクトルは経験的にはMaxwell分布に従うとされる[10]．また，スパッタリング過程では理論式としてSigmund-Thompsonの式[14]があり，基本的に微分フラックスはE^{-2}に従う(ここで，Eはスパッタリング粒子のエネルギー)．これらの放出粒子のエネルギーが降り込み粒子のエネルギー程度まで存在することを考えると，ΔE/E = 1程度で両過程のエネルギー分布を判別できると考えられる．

3.3.8 設計結果(仕様)

表1に上述の性能要求を受けて設計を進めた結果得られたPEP/JNAの仕様を示す．

表1：PEP/JNA仕様.

観測対象	非熱的中性粒子
エネルギー	10 eV – 3300 eV
エネルギー分解能	1（Δ E/E）
質量分解	1, >16 amu
視野範囲	15 deg x 150 deg
角度分解能	7deg x 25deg
感度	2×10^{-6} cm^2 str/pixel (efficiency を含んだ値)
時間分解能	15 s（ノミナル）

4. 今後の展開

現在，PEP/JNAは試験モデルの開発段階にある．今後，試験モデルを用い，IRF担当部分(観測器電極，筐体，高圧電源)，ベルン大学担当部分(電離用表面，二次電子放出用表面)との噛み合わせ試験を経て，フライトモデルの開発に移行してゆく．打ち上げ前にやることはまだまだ数多く残っているが，打ちあがってからも観測計画立案，軌道上較正作業などを経て観測データを取得することとなる．息の長い計画であるが，気を引き締めて進めてゆきたい．

5. 謝 辞

本連載を企画し，PEP/JNAの紹介の機会を作っていただいた木村淳氏(東京工業大学地球生命研究所)に感謝する．

6. 参考文献

[1] Grande, M., 1997, Adv. Space Res. 19(10), 1609.
[2] Futaana, Y. et al., 2006, Planet. Space Sci., doi:10.1016/j.pss.2005.10.010.
[3] Jia, X. et al., 2009, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2009JA014375.
[4] Khunara, K. K. et al., 2007, Icarus, doi:10.1016/j.icarus.2007.04.022.
[5] McComas, D. J. et al., 2009, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2009GL038974.

[6] Wieser, M. et al., 2009, Planet. Space Sci., doi:10.1016/j.pss.2009.09.012.
[7] Lagg, A. et al., 2003, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2003GL017214.
[8] Vorburgar, A. et al., 2014, J. Geophys. Res., doi:10.1002/2013JA019207.
[9] Schaufelberger, A. et al., 2011, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2011GL049362.
[10] Futaana, Y. et al., 2012, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2011JE004019.
[11] Wieser, M. et al., 2010, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2009GL041721.
[12] Futaana, Y. et al., 2013, Geophys. Res. Lett., doi:10.1002/grl.50135.
[13] Kazama, Y. et al., 2006, Adv. Space Res. 37, 38.
[14] Sigmund, P., 1969, Phys. Rev. 184, 383.

←目次へ

火の鳥「はやぶさ」未来編 その9 ～TIRで観る小惑星表面のちょっと下～

千秋 博紀[1]，滝田 隼[2]，荒井 武彦[2]，福原 哲哉[3]，田中 智[2]，岡田 達明[2]，関口 朋彦[4]，坂谷 尚哉[2]，はやぶさ2TIRチーム

（**要旨**）TIR（中間赤外カメラ）は，8から12ミクロンの波長帯で熱輻射の2次元イメージングを行う．ターゲット天体の1自転分の撮像から表層物質の熱履歴をもとめ，そこから熱物性を推定する．表層物質の熱物性は，ミッション遂行に必要な情報であるばかりでなく，その後の天体の運命を決める重要な情報である．

1. 何をしたいですか?

2014年12月3日の「はやぶさ2」の打ち上げ成功を受けて，一般の方を対象とした講演会でお話する機会を何度か頂いた．その中で聴衆の方々に「もしあなたが小惑星に行く機会を得たとしたら，何を見たい，または測りたいですか？」という質問をしている．すると，「天体の形や地形を見るために写真を撮る」という答えは返ってくるものの，なかなかその先が続かない．初号機の成果を知っている人からは「サンプルを持ち帰って地球で詳しく調べる」という答えが返ってくることもある．中には「天体に穴を開けて地下の物質を回収する」というプロもびっくりのアイディアを披露してくれる小学生もいたが，その子は宇宙が大好きで，「はやぶさ2」について事前にいろいろ調べたのだそうだ．しかし残念ながら「表面の温度を測りたい」という人はほとんどいないようだ．

この記事で紹介するのは，「はやぶさ2」搭載の中間赤外カメラである．読者の方々には，ぜひこの記事を読んで頂き，一般の方向けの講演の機会があれば「温度を測るのは実は科学的にとても大切なんですよ」と宣伝をしていただきたい．

なおこの記事では，紙面に限りがあるため機器性能や較正試験，記事中で紹介する数値モデルの詳細については踏み込まない．性能については，金星探査機「あかつき」に搭載された中間赤外カメラLIR（TIRはLIRとほぼ同じものとして開発されている）についての本誌の記事[1]を参照していただくか，現在TIRチームメンバーが準備している論文[2]の完成をお待ちいただきたい．

1. 千葉工業大学惑星探査研究センター
2. 宇宙航空研究開発機構
3. 北海道大学大学院理学院
4. 北海道教育大学
senshu@perc.it-chiba.ac.jp

2. TIRとは

TIRはthermal infra-red（熱赤外）の頭文字をとったものである．「はやぶさ2」搭載装置としてのTIRは熱赤外イメージャ（中間赤外カメラ）で，8から12ミクロンの波長で撮像を行い，対象物からの熱輻射量（温度）の分布を計測する．視野角は16°×12°，その中にピクセルが328×248あるので空間分解能はおよそ0.05°である．これは，「はやぶさ2」が停留する予定の高度約20 kmでは，およそ17 mの分解能に相当する．観測に用いる波長帯（8-12ミクロン）では多くの物質で熱放射率が高くまた一定である事が知られており，テレビなどで見かける，人間の皮膚の温度を測定するサーモグラフィでもこの波長帯（またはこれよりも短い3-5ミクロン）が使われている．「はやぶさ2」の場合には，3-5ミクロンの波長帯での観測から目標天体の表面温度を求めるわけにはいかない．その理由は，この連載をお読みの方にはおわかりだろう．ピンとこない方にはぜひ，この連載を遡って頂きたい．

TIRは，短期間で確実に開発できるように金星探査機「あかつき」に搭載された中間赤外カメラ（LIR）の設

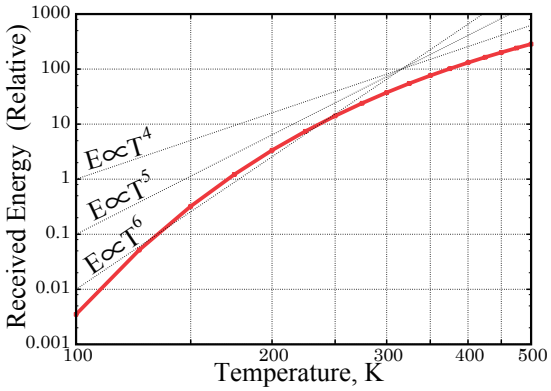


図1：ターゲット温度と，TIRが受ける輻射量の関係.

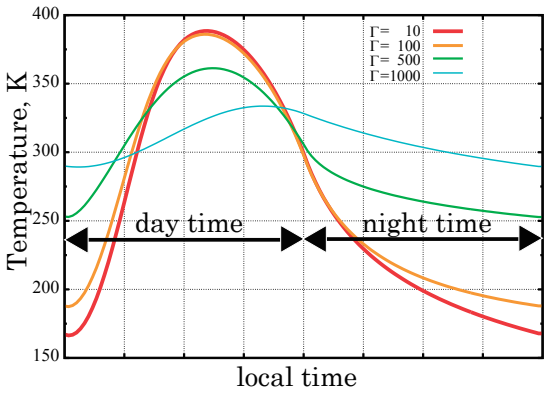


図2：さまざまな熱慣性における表面温度変化プロファイル(日心距離1AU, 自転軸傾斜角0度の場合の, 赤道での温度変化).

計をほぼそのまま踏襲している．赤外線天文衛星(たとえば「あかり」や「SPICA」)などは光エネルギーを捕える量子型の赤外線センサを採用しており，装置を極限まで冷却することで精度の高い観測を行っている．しかしこの方式では大掛かりな冷却装置が必要であり，重量や取り付け位置，装置サイズに強い制約のある惑星探査機には不向きである．これに対してLIR(TIR)は，小型赤外カメラに採用されている熱型の非冷却の2次元ボロメータを採用した．非冷却ボロメータは，センサ素子の抵抗が温度上昇に応じて変化する程度を電気信号として捕える赤外線センサで，2次元アレイにすることによって対象をイメージングできる．宇宙用としては「あかつき」LIRで初めて採用された最新の技術である．LIR(TIR)では，センサとレンズの間に設置したシャッターを開閉させて連続撮像し，差分画像を作成(いわゆるチョッピング)することによってノイズを低減させる．それでも取りきることができないノイズについては，地上試験を繰り返すことでそのレベルを評価する．また，LIR(TIR)はピクセル毎に感度が異なるため，地上試験によって得られたデータをもとに，ピクセル毎の較正線を引く必要がある．今のところ，ピクセル毎に乗るランダム誤差は 0.3 K相当，1枚の画像全体に乗ってくるバイアス誤差は3 K相当と見積もられている．

金星探査機「あかつき」に搭載されたLIRが想定しているターゲットである雲頂の温度は220–250 Kと見積もられている．これに対して，「はやぶさ2」のターゲット天体の表面温度は，日照時には250–400 Kか，条件によってはそれ以上になることが想定される．このため，出力がさちってしまわないための調整が必要である．ターゲット温度が高いことにはメリットもある．熱輻射は全波長で積分すると温度の4乗に比例するが，限られた波長帯のみで積分された輻射量は，一般には温度の4乗に比例しない．しかし，300–400 Kの範囲内では8から12ミクロンの波長範囲での輻射量はほぼ温度の4乗に比例している．それよりも低温ではベキは大きくなるため，同じダイナミックレンジに対して，計測可能な温度範囲が狭くなってしまう(図1)．

3. 温度分布からわかること

大気を持たない小天体の表面温度は，大雑把には日射量で決まる．つまり朝方と夕方は温度が低く，昼間は温度が高い．しかし深さ方向の温度分布を考慮すれば，熱伝導の影響によって，日射量の変動に対して表面温度の応答が遅れる．この，応答の遅れの程度を表すパラメータが熱慣性である．熱慣性は熱伝導率，密度，比熱の積の平方根($\sqrt{k\rho C_P}$)で与えられ，SI単位系では$J/m^2Ks^{1/2}$という次元をもつ．数学的に定義されたものなので次元のへんてこさには目をつぶるとして，大切なのは熱伝導の良いものほど熱慣性は大きい(温度が変化しにくい)ということだ．熱伝導の良い物質は，陽が昇っても日射として受けたエネルギーの一部を地下に伝えてしまうため表面温度は上昇しにくく，逆に陽が傾いてからは地下に溜めこんだ熱が伝わってくる

ため表面温度が下がりにくい，と考えれば理解しやすい(図2)．

天体表面で熱伝導率を大きく変化させる要因は，内部の空隙や粒子サイズである．組成が同じでも，隕石のように内部に多少の空隙を含む物質の熱伝導率は，稠密な岩石に比べると1桁，砂利やダストのような非常にふわふわな物質では2-3桁小さいことが知られている．このことから逆に，観測から熱慣性が求まればその岩石の空隙率または表面を覆うダストの粒子サイズに関する情報を抽出できる可能性がある．これまでに，小天体表層の熱慣性は天体サイズと相関がある，という提案がなされているが，これは表層物質の状態を反映しているのだろう[3]．ただし，ここでいう「表層」は，自転周期で決まる熱拡散距離程度の厚さの層の平均を意味する．「はやぶさ2」のターゲット天体の場合，「表層」の厚さは稠密な岩石の場合で17 cm程度，ふわふわな物質の場合はもっと薄いと見積もられる．このため，TIRは天体表面の少し下の物性を見ている，と言ってもよいだろう．

熱慣性の影響で太陽の南中時刻と最高温度が達成される時刻に違いが生じると，熱輻射の反作用によって天体の軌道が変化し得る．天体の自転軸の方向と公転軸の方向が揃っている場合には天体の軌道は広がってゆくのに対して，自転軸の方向が公転軸と反対の方向を向いている場合には天体の軌道は縮んでゆく(図3)．これをヤルコフスキー効果と呼ぶ[4]．ヤルコフスキー効果は，日周期に対してのみならず，年周期についても応用できる(地球の場合，一番暑いのは夏至ではなくその後であることを思い出してほしい)．この場合は天体の軌道は必ず縮む方向に働く．

一方，天体表面に凹凸がある場合には，後で述べるように，表面温度が地形に強く依存する．この時，非等方な輻射によってトルクが生じ，自転周期が変化する．この効果は提案者の頭文字を取ってYORP効果と呼ぶ．ヤルコフスキー効果もYORP効果も，天体表面上の温度分布で決まるものなので，その影響の程度を見積もるにはTIRによる直接観測が必要不可欠である．ただし，公転軌道や自転周期は非常に長い時間をかけて変化するので，探査期間中には直接的な証拠は得られないだろう．このため，「はやぶさ2」のミッションフェーズが終了し，探査機がターゲット天体を離脱した後も，地上からターゲット天体の観測を継続する事が肝要である[4]．

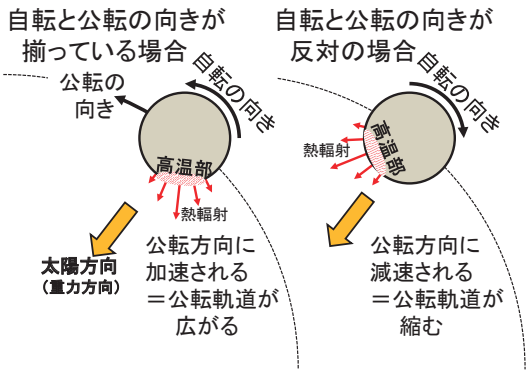


図3：ヤルコフスキー効果．

「はやぶさ2」の観測計画の立案を難しくさせている要因のひとつに，ターゲット天体の自転軸がわかっていない，という事がある．このため，観測期間のなるべく早いうちに自転軸の向きを決定させる必要がある．「はやぶさ2」では今のところ，光学航法カメラ(ONC)の撮像データから自転軸の方向を決めることを考えている．一方，TIRによる観測からでも自転軸の向きを制約できる可能性がある．太陽直下点と最高温度到達点が分離できれば，等緯度線はそれらを結ぶように引けるはずだ．等緯度線は大円ではないので1本引いただけでは極の位置は求まらないが，全球的な温度分布(熱履歴)も考え合わせれば，極の位置(自転軸の方向)はおおよそ求めることができる。もし，ターゲット天体の上に目印となるような地形がない場合には，TIRによる温度分布が重要となるだろう．

4. 温度分布から熱慣性を求める

天体の形状が球の場合には，表面の温度分布は比較的容易な数値計算で求めることができる．実際，「はやぶさ2」の目標天体はイトカワのような長細い構造ではなく，ずっと球に近い形状だと思われているので，形状を球で仮定することは全くの見当外れというわけではなさそうだ．目標天体の自転周期であるおよそ7.6時間に相当する熱の浸み込み深さは，稠密な岩石の場合でも17 cm程度であり天体スケールに比べると十分小さい．このため熱の水平方向の移動は考えず，太陽入射光を境界条件とする1次元の熱伝導問題をさ

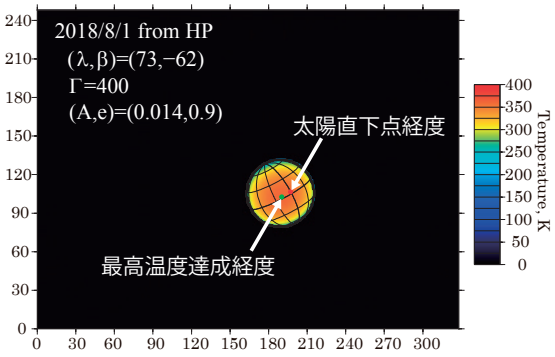


図4：TIR模擬画像.

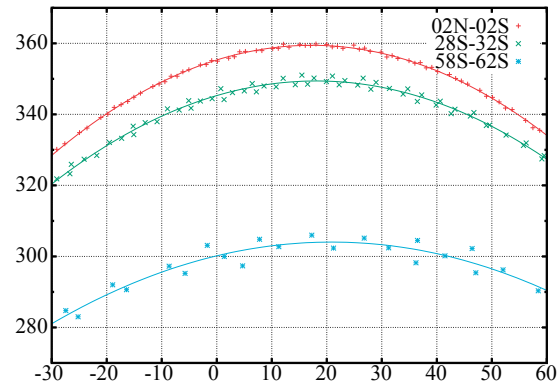


図5：特定緯度範囲の，最高温度到達点付近に相当するピクセルを抜き出して，2次関数でフィッティングした例.

まざまな緯度について解くことで自転に伴う表面温度の日周変化を求める．「はやぶさ2」の目標天体の場合，公転周期に比べて自転周期は十分に短いため，その間の太陽位相角の変化は考慮しなくて良い．

こうして求められた，表面温度の緯度，ローカルタイム依存性をもとにTIRの模擬画像を求めたのが図4である．この図を作るための計算では，熱慣性の値としてSI単位系で400を想定した．また，図には参考のために緯度・経度線および太陽直下点の位置も示した．この図から，最高温度の到達時刻は南中時刻とは異なっていることが見て取れる．

次に，こうして作られた模擬画像からスタートして，熱慣性を求める方法を考える．模擬画像の各ピクセルの緯度経度を求め，特定の緯度±2°の範囲に含まれるピクセルの温度を，その経度(ローカルタイム)の関数としてグラフ化したのが図5である．少し乱暴だが，最高温度付近の温度履歴を2次曲線でフィッティングすると，その関数形(関数の係数)から最高温度が達成されるローカルタイムを求めることができる．この操作を，異なるノイズを載せた模擬画像に対して繰り返し行い，また熱慣性が異なる条件に付いて生成した模擬画像についても同様の操作を行う事で，熱慣性の決定精度を求めることができる(図6)．この記事では詳細は省略するが，天体表面上で等緯度線に沿って物性値が同じ場合には，ホームポジションからの1枚の画像があれば熱慣性は10%以下の精度で求めることができそうだ．

実際の観測では，TIRは一定時間ごとに1自転分以上の撮影を行う．こうすると，同緯度線に沿って均質

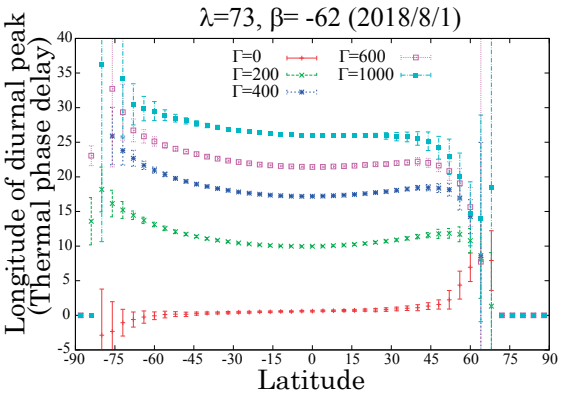


図6：さまざまな熱慣性に応じた最高温度到達経度(フィッティングした2次関数の頂点経度)とそのばらつき.

という仮定を置かずとも，特定地域の温度履歴を追跡することができる．ただしこの時には，画像ごとのバイアス誤差が，データのランダム誤差としてふるまうため，熱慣性の決定精度はもう少し悪くなりそうだ．

5. 運用に関連して

TIRによる観測は，「はやぶさ2」の運用にとって必要な情報を提供する．特に，タッチダウンを決行する前には候補地点の温度履歴を計測しておき，表面が熱すぎて探査機がダメージを受けるようなことが無いか検討しておく必要がある．ただし，温度が低ければ良いという話ではない．細かい粒子から構成される地面は熱慣性が小さく，逆に岩板から構成される地面は熱慣性が大きい．熱慣性が大きいほうが最高到達温度は

低いため，温度条件だけを考えるとタッチダウンに向いている．しかしサンプルを回収しやすいのはもちろん細かい粒子からなる地面であろうし，また細かい粒子が自由に動けるような地域であれば，おのずと地面は平らになっているはずだ．つまり，熱慣性が小さく，高温になるような場所こそサンプリングに向いている，という考え方もできる．これについては現地に到着してから頭を悩ますことになるだろう．

小天体表面に傾いた地形があった場合，太陽からの入射エネルギーは傾きに応じて変化する．例えば北半球で北に傾いている地面は，緯度から期待される温度変化とは異なり，より高緯度の地面と同じような温度履歴をたどることになる．また東に傾いている地面は経度から予想される温度履歴にくらべて，少し前倒しで温度変化する．このように，実際の緯度経度と，温度履歴から求まる相当緯度，相当経度との関係がわかれば，ローカルな地面の傾きを求めることができるだろう．ここで聡明な読者は小首をかしげるかもしれない．天体表面の熱慣性は最高温度に到達する時刻と南中時刻のずれから求めるのだが，そのためには，ローカルな地面の傾きによる相当経度の変化の影響を分離しなければならない．これらは実は，最高到達温度を記録する時刻だけでなく，その前後の温度変化のプロファイル(前述の，2次関数でフィッティングした際の2次の係数)を考慮することで分離が可能である．

熱慣性は，表面を構成する粒子サイズに強く依存する．このため，天体衝突によって作られたクレータの周囲にイジェクタが堆積すると，熱慣性の違いとして観測されるはずだ．実際，地上の小さなクレータの場合，温度(履歴)の違いとしてイジェクタブランケットを観測することができる．「はやぶさ2」の場合，衝突装置(SCI)で作った人工クレータをどのように探し出すのかが懸案の一つとなっているが，TIRの観測を通じて，衝突前後の熱慣性の分布の変化を見ることでクレータを見つけられるのではないか，と期待している．TIRが観測するのは熱輻射であるため，太陽位相角が異なる条件の観測を直接比較できる，という強みがある．

6. 現実は複雑

前章，前々章では理想的な系，すなわち1ピクセルに相当する空間スケールでは表面は滑らかと考えてよい，という場合について述べた．最後にこの章では，現実はどうなっていそうか，という事について紹介する．

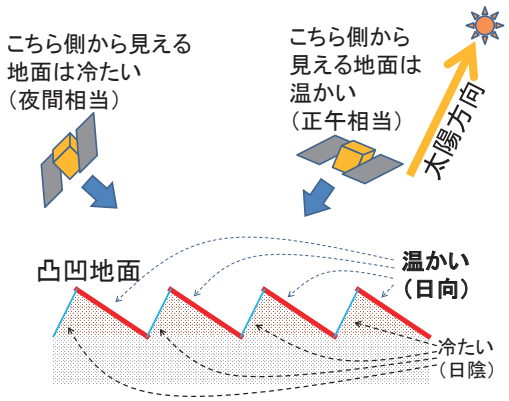


図7：凹凸のある地面の温度は見る方向によって異なる．

天体表面の凹凸は，TIRの観測にとって大きく分けて二つの影響が考えられる．まずひとつめは，放射再吸収の影響である．天体表面に衝突クレータのようなすり鉢状の構造があると，ある面からの熱輻射が，別の面にもう一度吸収される．放射再吸収が生じると，もちろん，表面温度は下がりにくくなる．なお，「はやぶさ2」の目標天体はC型の小惑星であるので，アルベドは小さい．このため月面のように，太陽光が複雑に散乱された結果，直接陽が当たっていないところを温める，という効果までは考えなくても良いようだ．

もうひとつは，見た目温度の方向依存性である．前章で表面が傾いていると「相当経度」が変化する，という事を紹介したが，実は表面に凹凸があるだけでも，見た目の温度履歴が変化する．これを極端かつ単純に示したのが図7である．この図を見ると分かるように，地形によっては，太陽側から観測すると高温だが，一定以上の位相角からの観測では見た目の表面温度は非常に低くなる可能性がある．表面凹凸による見た目の温度の変化についても現在，様々な条件で数値シミュレーションを進めている．その結果をデータベース化し，現地での撮像の際にはどの条件に一番近いのかを判断できるようにする予定である．

データを解釈するには，可能ならば，実際に天体表面がどのようになっているのかを調べるのが一番手っ取り早い．幸い，「はやぶさ2」にはドイツ航空宇宙セ

ンター(DLR)の小型ランダー(MASCOT)が乗っており，そこに搭載された多波長熱放射計(MARA)は，ランダー近傍の地面の温度を計測する．また近赤外分光計(NIRS3)は，解像度はTIRに劣るが1.8から3.2ミクロンの波長帯のスペクトルが得られるため高温領域ならば直接放射率を求められる可能性がある．TIRはMARAやNIRS3との同時観測を行うことで，ローカルな温度履歴と，上空から計測した有限の空間スケールでの温度履歴との関係も明らかにする予定である．

参考文献

[1] 福原哲哉 他, 2008, 遊星人 17, 77.
[2] Okada, T. et al., 執筆中 ; Tanaka, S. et al., 執筆中 ; Takita, J. et al., 執筆中.
[3] Delbo, M. et al., 2007, Icarus 190, 236.
[4] 伊藤孝士 他, 2004, 遊星人 13, 212.

←目次へ

一番星へ行こう！ 日本の金星探査機の挑戦 その24 ～再び金星へ～

廣瀬 史子[1]，あかつきプロジェクトチーム

（**要旨**）金星探査機「あかつき」は今年（2015年）12月に再び金星に会合する．2010年12月の金星周回軌道投入に失敗した後からの軌道設計には多くの困難が伴った．寝ても覚めても軌道を考える日々が続いたが，ようやく金星への道筋が決定し，奇しくも金星周回軌道投入に失敗した日からちょうど5年後の同日，12月7日に金星周回軌道に投入する．軌道の再設計に際して直面した困難を紹介すると共に，金星周回軌道投入までの計画を述べる．

1. 思わぬ事故

私は，「あかつき」が打ち上がった3ヶ月後の2010年8月に筑波宇宙センターから宇宙科学研究所に異動して来た．以前から惑星探査機に関わりたいと思っていたので，「あかつき」の運用パス前ブリーフィングに毎日顔を出すことにした．だが，今まで私が居なくて順調に進んでいたプロジェクト．出番などあるわけもなく，何か貢献出来ることは無いかと観察する日々が続いた．いまいち自身が満足する仕事は出来ず，2010年12月の金星周回軌道投入（VOI：Venus Orbit Insertion）の日を迎えた．その日，「あかつき」がエンジン噴射を開始し，途中で金星の裏側を通るため，電波が一時途切れる．電波再受信のタイミングが来て，1秒，2秒，3秒，と時間が過ぎる．10秒，20秒，30秒待っても電波は受信出来ず，何かがおかしいとなった．（この日の詳細は，本連載「その14」を参照されたい．）その後は原因究明で，主に推進系担当は大変な苦労を強いられた．軌道系担当としては，燃料が残っている限り，再び金星周回を目指すことになる．次のチャンスは2015年～2016年．軌道の再設計が始まった．

2011年はいくつかの大きな軌道上イベントがあった（図1及び表1）．9月に軌道制御エンジン（OME: Orbital Maneuver Engine）の試験噴射を2回実施．OME噴射で得られた加速度は想定の約1/9であり，単位質量推薬あたりの加速能力（比推力）を比較すると，姿勢制御エンジン（Reaction Control System: RCS）の方が効率的であった．よって，以降の軌道制御をRCS 4基を用いることとし，RCS噴射の場合は不要となる酸化剤を投棄（2011年10月）した上で，軌道制御DV1,

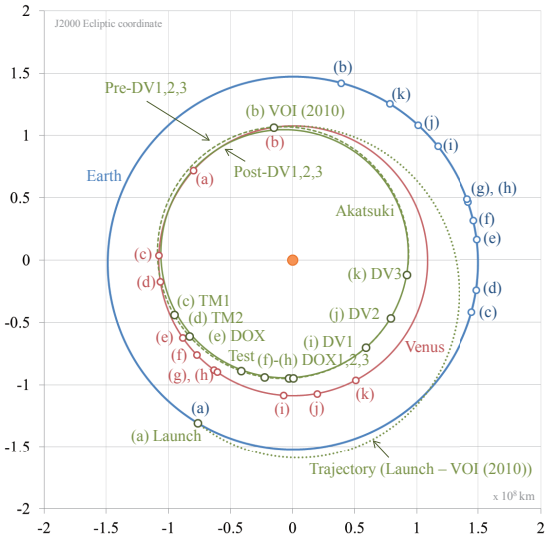


図1：あかつき・地球・金星の軌道（2010年～2015年）と主な軌道上イベント．

1. 宇宙航空研究開発機構　宇宙科学研究所
hirose.chikako@jaxa.jp

表1：2010年から2011年までの主な軌道上イベント（括弧内の数字は計画値）．

	Events	Time (UTC)	Duration [sec]	Engine	Maneuver Amount [m/s]					Maneuver Direction [deg]		
					Total	Radial	In-track	Crosstrack	Error	R.A.	Dec.	Error
(a)	Launch	2010/05/20 21:58:22										
(b)	Venus Orbit Insertion (VOI)	2010/12/07 00:00:00	717.5	OME	134.8 (748.3)	(0.0)	(-748.3)	(0.0)				
(c)	OME Test Maneuver 1 (TM1)	2011/09/07 02:50:00	2.0	OME	0.7	0.0	0.0	0.7	-	277.4	68.2	-
(d)	OME Test Maneuver 2 (TM2)	2011/09/14 02:50:00	5.0	OME	0.6	0.0	0.0	0.6	-	289.7	58.0	-
(e)	Disposal of Oxidizer Test	2011/09/30 03:02:00	60.0	-	1.9	0.0	-1.9	0.0	-	239.9	-28.1	-
(f)	Disposal of Oxidizer 1 (DOX1)	2011/10/06 02:53:00	360.0	-	7.6	0.0	-7.6	0.0	-	173.9	9.0	-
(g)	Disposal of Oxidizer 2 (DOX2)	2011/10/12 03:23:00	540.0	-	16.2	0.0	-16.2	0.0	-	183.0	0.1	-
(h)	Disposal of Oxidizer 3 (DOX3)	2011/10/13 04:53:00	540.0	-								
(i)	Delta-V 1 (DV1)	2011/11/01 04:22:00	587.5	RCS	88.6 (90.0)	2.3 (0.0)	-85.6 (-86.2)	-22.7 (-25.8)	-1.6	214.4 (213.2)	-27.3 (-28.8)	1.9
(j)	Delta-V 2 (DV2)	2011/11/10 04:37:00	544.0	RCS	90.6 (90.0)	-0.7 (0.0)	-87.6 (-86.2)	-23.1 (-25.8)	0.7	232.7 (232.0)	-33.0 (-34.9)	1.9
(k)	Delta-V 3 (DV3)	2011/11/21 04:57:00	342.125	RCS	63.5 (63.8)	-2.4 (0.0)	-59.7 (-60.0)	-21.4 (-21.6)	-0.5	256.8 (256.7)	-42.8 (-42.9)	0.2

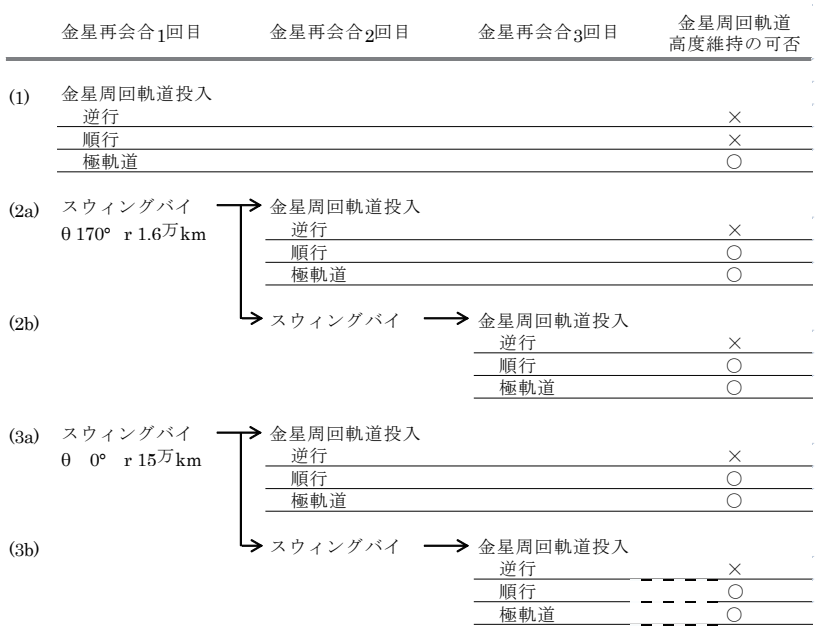


図2：金星周回軌道投入　解析ケース・サマリ．

DV2，DV3（2011年11月）を実施した．これにより金星との会合タイミングを2016年から2015年に早め，現在，「あかつき」は，2015年11月22日に金星と会合する軌道にいる．

2. 軌道，軌道，軌道

いざ軌道を検討してみると，全く一筋縄ではいかないことが判明した．2015年11月22日の会合時に金星周回軌道に投入すると，金星にすぐに落下してしまう．では，1回目の金星会合時は金星をスウィングバイし，2回目の会合で金星周回軌道に投入するとどうか．2回目の会合で投入しても金星にすぐに落下することが分かった．1回目のスウィングバイ条件を変更し，2回目の会合時に投入しても，やはり結果は同様．2回金星をスウィングバイし，3回目で投入してもやはり結果は落下．欧州宇宙機関（ESA）の金星探査機「ヴィーナス・エクスプレス」は，大気の成分観測が主目的であるため，極軌道を選択した．一方，「あかつき」は，連続的に大気を観測するため，金星の自転・大気の回転方向と同一の逆行（北から見て時計回り）に投入したい．だが，結果はことごとく数十日で金星に落下し，高度維持は不可能であった（解析ケースのサマリは図2）．これは，ひとえに太陽重力摂動に依るものである．

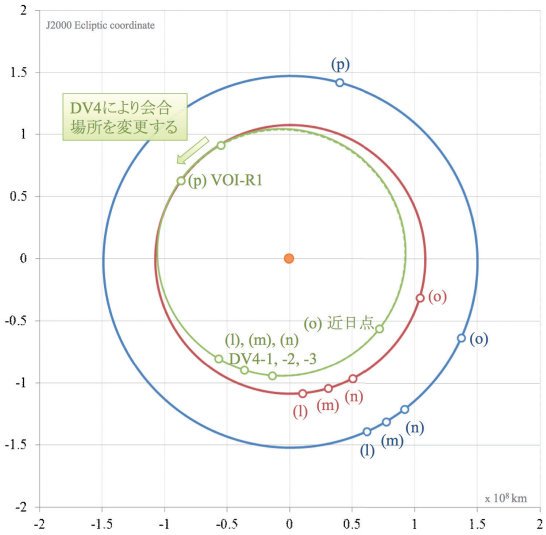


図3：DV4軌道制御及び金星周回軌道投入位置.

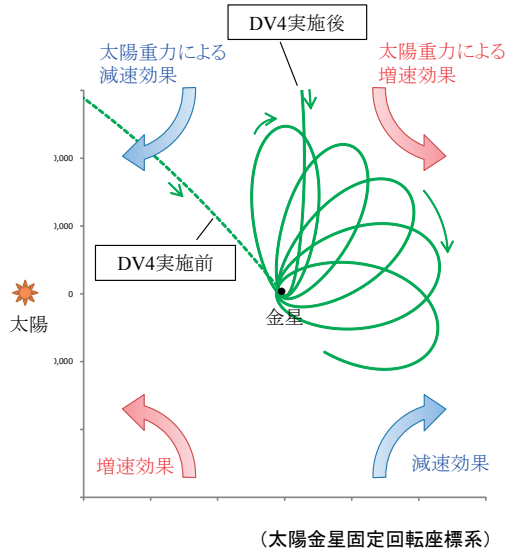


図4：DV4による金星接近方向の変更.

表2：2015年に予定する主な軌道上イベント.

	Events	Time (UTC)	Duration [sec]	Engine	Maneuver Amount [m/s]			
					Total	Radial	In-track	Crosstrack
(l)	Delta-V 4-1 (DV4-1)	2015/07/17 04:00:00	96	RCS	19.0	8.6	-12.3	11.7
(m)	Delta-V 4-2 (DV4-2)	2015/07/24 04:00:00	123	RCS	24.0	4.6	-16.7	16.6
(n)	Delta-V 4-3 (DV4-3)	2015/07/31 04:00:00	244	RCS	24.0	-4.9	-30.6	34.0
(o)	近日点	2015/08/29						
(p)	Venus Orbit Insertion (VOI-R1)	2015/12/07 00:00:00	1145	RCS	198.5	0.0	-198.5	0.0

打上げ当初「あかつき」は，遠金点高度約8万 kmの周回軌道に投入される予定であったが，今は，推進薬残量の制約から遠金点高度は約30万 kmとならざるを得ない．これにより，太陽重力の影響をより強く受けることになった．

私が「あかつき」プロジェクトの中でそれっぽい仕事を出来るようになったのは，2011年頃からである．それまではスペースデブリ（宇宙ごみ）の軌道決定や衝突解析等を専門としていたため，軌道設計などやったことも無かったが，宇宙研に異動して来て，思わぬ「あかつき」の事故に遭遇した．「あかつき」プロジェクトのサイエンス・メンバーは，観測データを得られぬなか，「あかつき」運用を黙々と続けてくれていた．サイエンス・メンバーからは，リスクとのトレードオフで必ずしも逆行軌道に拘らなくて良いと言われていたが，提案出来る投入シナリオのなかに，逆行軌道の物が一つも無かった．なんとしても逆行軌道ケースを提案シナリオの中に入れるべく，文字通り寝ても覚めても，睡眠時間を削って軌道を検討した．もっと頭の良さそうなやり方があるだろうと思いつつ，解析を回しては1つ1つ条件を書きとめ，次の解析で何をどちらに振るか考え，また解析を回した．「あかつき」の事故の翌年に結婚したが，夫などそっちのけで，軌道，軌道，軌道の毎日だった．

3. 2015年金星周回軌道投入計画

2013年に出産し，産休・育休に入る前に，軌道計画チームから，2通りの逆行軌道投入ケースを含む複数の軌道計画を提案することが出来た．しばらく軌道検討をお休みし，初めての育児に振り回されつつ，2014年春に仕事に復帰した．ちょうど提案軌道に基づくシステム検討が開始され，熱解析や姿勢解析を進めてもらい，皆で運用計画を組み立てた．その運用計画を更に吟味し，再度熱解析等を回す．3回ほどのサイクルを経て，現在，ほぼ運用計画が確定しつつある．

軌道投入計画を図3及び表2に示す．2015年7月に予定している軌道制御DV4(DV4-1, -2, -3の3回に分ける)を実施しない場合，2015年11月22日に金星に最接近するが，そこでVOIを行うと，近金点高度が低下し，数周回後に金星に落下してしまう．金星への接近方向を図4上方(12時の方向)からとするため，DV4を実施する．これにより，金星への衝突(落下)を回避する，というストラテジーである．DV4は，2015年12月の金星周回軌道投入(VOI-R1)で使用予定の姿勢制御エンジン(RCS)4基で噴射するため，スラスタ特性(噴射効率他)と姿勢安定性を把握する目的もある．現在，2015年12月7日の金星周回軌道投入を予定している．

4. 金星周回軌道投入に向けて

現在，2015年12月7日の金星周回軌道投入(VOI-R1)を目指し，プロジェクトチーム一丸となって，運用計画を精査しているところである．次の大きなイベントは，今年7月の軌道制御(DV4)である．DV4にて，スラスタ効率の特性等を得るが，期待通りの推力が出ることを願うばかりである．その後，8月に惑星間遷移軌道における最後の近日点を通過する．「あかつき」は金星軌道より内側を飛行しているため(図3)，近日点の熱環境は，金星軌道上(約2600 [W/m^2]) より約1000 [W/m^2] 高い熱入力である．これまで8回の近日点を乗り越えており，最後の近日点も無事に乗り切ることを願っている．近日点を過ぎると，VOI-R1に向けたリハーサルや，12月7日に精確な投入点を狙うため，軌道の微修正を行い，VOI-R1に臨む．2010年のVOI失敗から5年，長いようであっという間の5年間であった．引き続き，12月に無事に金星周回出来るよう，最善の策を練りたい．

謝 辞

本軌道検討は，軌道計画チーム：宇宙科学研究所 石井信明教授，日本電気(株) 寺田博氏，鵜飼千亜妃氏との成果であり，打合せ等の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた皆様に感謝致します．

←目次へ

第5回月と火星の縦孔・地下空洞探査研究会開催報告

春山 純一[1]

1. はじめに

2015年3月2日(月), 3日(火)に, 宇宙航空研究開発機構(JAXA)相模原キャンパス/宇宙科学研究所(ISAS)にて, 月と火星の縦孔・地下空洞探査研究会が開催された. これまで, 世話人をISASの春山が引き受けてきたが, 今回は新たにJAXA研究開発本部の河野功氏も共同世話人となり, 開催した. この研究会は, すでに5回目を数える. これまで会は,「月, 火星の縦孔・溶岩チューブ探査研究会」であったが, 溶岩チューブに限らない地下空洞をも視野に入れることを鑑み,「月, 火星の縦孔・地下空洞探査研究会」と名も新たに, 研究会を開催させていただいた. 講演者は30名以上, 二日間で, のべ100人以上の方々の参加していただいた, 充実した研究会となった.

2009年, SELENE(かぐや)は, 月の嵐の大洋の中のマリウス丘に直径・深さ共に50 mを超える巨大な縦孔を発見した. その後のSELENEデータによる全球調査で, 更に二つ直径・深さ共に100 m規模の縦孔が発見された. これらは, 火成活動に起因する地下空洞につながるのではないかと考えられた. SELENEの後に月を訪れた, 米国探査機LROは, SELENEが発見した縦孔について, これら縦孔が地下の巨大な空洞に開いたと信じるに足る画像データを取得している. これら縦孔・地下空洞は, 科学的に多くの重要な課題の解決につながる鍵を秘めている. また, 縦孔や地下空洞は, 放射線や隕石衝突から遮蔽されることもあり, 将来の人類活動拠点として非常に有効である.

月の縦孔発見の翌年度, 平成22年度より毎年度,「月と火星の縦孔・溶岩チューブ探査研究会」として, 理学者・工学者・中高校/高専教育関係者を含むアウトリーチ関係者など, 幅広い方々と, 様々な視点で, こうした月や火星の縦孔・地下空洞の探査について, 研究会を重ねてきた. 第二回となった平成23年度の研究会では, 富士山麓の洞窟の実地調査も兼ね, 特に工学関係者からは実地を見て調査方法を色々考えられたという意見が寄せられた. 一方, 富士山麓まで行くのは参加しづらいという声もあり, 平成24年度は, 会場を都内東京大学本郷に移して開催することになった. この時は大雪となり一部参加者が来られないなどのハプニングもあったが活発な討議となった. その翌年となる一昨年の第4回研究会は, 海外からの研究者の複数の参加もあり, 国際的な活動へとの広がりを見せた. そして今回, 第5回を迎えた.

これまでの研究会での議論は着実に深まりを見せてきている. その結果の現れとして, 昨年度平成26年度からは, 宇宙工学委員会の下のリサーチグループとして, 月惑星の縦孔・地下空洞探査のプロジェクト化を目指す活動も新たに始まったことが挙げられる. この「月惑星の縦孔・地下空洞探査」リサーチグループの主査が今回の研究会の共同世話人である, JAXA研究開発本部の河野功氏である. 彼は, 旧宇宙開発事業団(NASDA)による宇宙でのランデブー技術実証衛星ETS-7「おりひめ」「ひこぼし」の開発をリードした実力派工学研究者であり, 私が旧NASDAに職を得た20年前以来の知己でもある. 当時は, どちらかというと遊び仲間という関係であったが, 20年の時を経てプロジェクトを目指す活動を一緒にさせていただく

1. 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
Haruyama.junichi@jaxa.jp

表1：研究会のプログラム.

3月2日（月）プログラム

13:00 - 13:30	**受付**	
13:30 - 13:35	**開催の辞**	春山 純一（JAXA）
13:35 - 15:10	**セッション1-1 科学1**	
13:35 - 13:50	月と火星の縦孔・地下空洞	春山 純一（JAXA）
13:50 - 14:10	プラズマ・電磁気環境研究見地からの月の縦孔探査	西野 真木（名古屋大）
14:10 - 14:30	月の縦孔周辺のプラズマ静電環境に関する粒子シミュレーション	三宅 洋平（神戸大）
14:30 - 14:50	縦孔底面を含む月表土への水捕獲に関する考察	橋爪 光（大阪大）
14:50 - 15:10	PKT領域縦孔からのサンプルリターンの意義	諸田 智克（名古屋大）
15:10 - 15:20	**休憩**	
15:20 - 16:35	**セッション1-2 工学1**	
15:20 - 15:45	搭載性を考慮した着陸誘導技術の研究	上野 誠也（横浜国大）
15:45 - 16:10	縦孔探査を目的としたローバーシステムの開発とフィールド試験	吉田 和哉（東北大）
16:10 - 16:35	人型ロボットシステム研究と月探査への挑戦	岡田 慧（東京大）
16:35 - 16:45	**休憩**	
16:45 - 17:45	**セッション1-3 工学2、アウトリーチ1**	
16:45 - 17:05	月縦孔用遠隔操作型代理科学者システムの検討	児玉 浩明（MHI）
17:05 - 17:25	月の縦孔・地下空洞探査システムの検討	松尾 忍（MHI）
17:25 - 17:45	次期学習指導要領 高校地学分野の改正とUZUME計画	藤原 靖（向の岡工高）

3月3日（火）プログラム

9:30 - 10:00	**受付**	
10:00 - 11:40	**セッション2-1 アウトリーチ2、科学2、工学3**	
10:00 - 10:20	月・火星の縦穴探査のアウトリーチ　～自身の経験から～	寺薗 淳也（会津大）
10:20 - 10:40	『月の縦孔探査かるた』を用いたアウトリーチ活動	新井 真由美（未来館）
10:40 - 11:00	宇宙塵による惑星への有機物供給の検証:「たんぽぽ」から「うずめ」へ	小林 憲正（横浜国大）
11:00 - 11:20	ワイヤ投てき型プローブによる縦孔探査	有隅 仁（産総研）
11:20 - 11:40	球体型全方向観測ロボットのコンセプト実証モデルの開発	山田 康介（慶應大）
11:40 - 12:40	**昼食**	
12:40 - 14:40	**セッション2-2 工学4、科学3**	
12:40 - 13:00	小型月着陸技術実証ミッション"SLIM"の提案について	坂井 真一郎（JAXA）
13:00 - 13:20	UZUME探査データを、より魅力的に	山本 幸生（JAXA）
13:20 - 13:40	月の縦穴と地下空洞での天文学	岩田 隆浩（JAXA）
13:40 - 14:00	月惑星の縦孔・地下空洞探査:探査機器の検討状況	西堀 俊幸（JAXA）
14:00 - 14:20	小型低消費電力レーザ距離画像センサの開発	石上 玄也（慶應大）
14:20 - 14:40	月探査用レーザセンサの概要	加瀬 貞二（NEC）
14:40 - 14:50	**休憩**	
14:50 - 17:10	**セッション2-3 科学4、工学5**	
14:50 - 15:10	月・火星表面及び縦穴内での放射線線量の評価	長谷部 信行（早稲田大）
15:10 - 15:30	月面放射線環境計測準備状況	永松 愛子（JAXA）
15:30 - 15:50	月・火星における緊急被ばく医療	道川 祐市（放医研）
15:50 - 16:10	月の縦穴探査をシミュレーションする地球の候補地点	白尾 元理（惑星地質研）
16:10 - 16:30	縦孔探査と検疫	嶋田 和人（JAXA）
16:30 - 16:50	たんぽぽ計画における微生物捕集と微生物宇宙曝露実験とその先	横堀 伸一（東京薬科大）
16:50 - 17:10	UZUMEが拓く有人宇宙活動の未来(生命維持技術に関して)	桜井 誠人（JAXA）
17:10 - 17:20	**休憩**	
17:20 - 17:55	**セッション2-4 まとめ、総合討論、閉会の辞**	
17:20 - 17:50	月と火星の縦孔・地下空洞探査実現に向けて、総合討論	河野 功（JAXA）、春山 純一
17:50 - 17:55	閉会の辞	河野 功（JAXA）

ことになった．これほど信頼に足る相手はいない．リサーチグループという公式に活動も認められてこの一年，縦孔・地下空洞探査に向けての研究，特に工学面での研究の進展は，理学者である私から見ると，一挙に長足の進歩，と感嘆せずにはいられない．今回の研究会でも，こうした工学面での研究成果が語られ，一気に月火星の縦孔・地下空洞探査は，実現へと向かいだした感がある．

2. 研究会プログラム

研究会講演プログラムを表1に示す．惑星科学の理学中心の講演会と異なり，この研究会の特徴は，理学者・工学者が一堂に会するということである．探査は，理学と工学の緊密な連携協力があってこそ成り立つ．これは，SELENE（SELenological and Engineering Explorer：月の理学と工学の探査機）がまさに体現したものであるが，その精神を受け継ぐ．更に加えて，この研究会では第一回より，学校教育，一般教育関係者を含めたアウトリーチ関係者の講演も積極的にいただいている．将来の基地構想なども考えると，惑星科学者，惑星探査工学研究者を超えた広がりが必要となる．長期的なビジョンでのプログラムとしていくことが求められよう．どうやったら，より多くの方々に知っていただき，理解をいただき，そして，参加いただくか，月惑星の縦孔・地下空洞探査の重要なテーマの一つである．研究会では一人講演時間が質疑合わせてわずか15分から20分，それでも，きついスケジュールとなり，講演者の方には，もう少し話をしたかった方も多かったのではないだろうか．かといって，3日間の会にするには，すでに多くの学会・研究会がある中で難しいであろう．悩ましいところである．1日目の後夜には，宇宙研のカフェテリアに場を移し，ざっくばらんな「意見交換会」を行い，将来の探査に向けて，様々な分野，様々な年代の方々により，日中の研究会とはまた異なった有意義な議論がなされた．

3. 講演：理学・工学・アウトリーチ

研究会での講演では，プログラムを見ていただければ分かるように，プラズマ電磁場環境，水揮発性物質，火成活動，生命探査など，様々な理学分野からの研究発表・講演が行われており，月火星の縦孔・地下空洞に多くの理学的興味が存在することが分かる．天文観測のための最適地といった報告もなされている．これらの発表をまとめるのは難しいが，縦孔探査の理学的魅力を語るとすると，まず言えることは，月－地球系の進化を解明する上で，もっとも重要な因子のひとつである月-地球系外からの物質供給の情報を得られる可能性が非常に高い特異な場所である，ということである．新鮮なままの，縦孔露頭や，地下空洞内は，彗星・小惑星からどれだけの水等揮発性物質が供給されたのかといった点について精度よい情報を提供するであろう．過去の太陽活動に関わる情報も得られるだろう．もしかすると，地球の過去の物質も見つかるかもしれない，との発表があった．次に言えることは，月火星の縦孔・地下空洞は，月の内部構造の調査に最適な場所ということである．月のような大型衛星は，主惑星に強い潮汐力を働かせ，主惑星の進化，生命の発現に大きな影響を与えた可能性がある．潮汐力がどの

図1：講演会の様子．

時点でどのように働いたかは，月の内部構造，その形成初期から今日に至るまでの進化の過程を知る必要がある．そこで，やはり魅力にあふれていると言えるのが，熱的に静謐な縦孔底や，地下空洞内である．秤動･月震の(長期)観測による核や，マントル構造解明への期待がある．温度・熱流量・残留磁気の調査や直接サンプリングにより，地下の放射性物質，溶融核発現の有無，PKT領域火成活動の時期・量・温度・物質の詳細を解き明かすための情報が期待される，というのである．

工学面での研究発表は，リサーチグループの研究の進展もあり，縦孔を探査するためのシステム，個別技術，アイデアレベルのものから，すでにプロトタイプ開発まで行われているものまで多様な発表であった．着陸については，誘導制御の基礎的な面からのレビュー的講演から，実際に進んでいる小型着陸探査SLIMの検討状況報告までカバーされた．どうやって着陸点から縦孔までアプローチするのかについては一番議論もはずんだといえよう．投てきシステム，ヒューマノイド型ロボット，球形プローブなど，思っていた以上に工学的研究は進んでいることに，今更ながら驚かされた．一方で，観測機器については，いくつか説明されたものの，もっと多様な研究が進められるべきだという感を持った．日本には優れた観測機器開発能力をもった方々がおられる．今後，そういう方々にもっと参加協力頂く事に余地があるといえよう．

縦孔や地下空洞に基地を建設するという構想も，極めて現実的な課題となりつつあることが，講演から見えてきた．今や縦孔・地下空洞探査が地下空洞開発へと進むことも，決して遠い将来では無いのではないかと思わされた．そういう状況の中でむしろ，探査という手段を使ってどんな理学的課題が解決されるのか？ということだけでなく，探査・開発において，理学がどのような貢献ができるのか？という視点ももっと必要となりそうである．縦孔・地下空洞探査，そして開発は，様々な学問分野が必要とされることも緊急医療という観点からの講演の際に非常に感じられた．これまで，月惑星探査を人々に語るとき，「応援して下さい」であったが，こと月火星の縦孔･地下空洞探査では，「参加して下さい」と言うべきなのであろうと，改めて思った．

アウトリーチの研究活動報告も非常に興味をひくものが多かった．最近，「縦孔探査かるた」活動がボランティア的に進められている．「かるた」には，縦孔探査に関連しての月惑星科学や探査技術のことが盛り込まれ，きわめて教育的な配慮がされている．この活動で，月や火星の縦孔のことを初めて知ったという小学生がたくさんいる．地道ながらも，こういう活動を通してこそ，国民に支持され，期待される探査となっていこう．学校の教育現場でも，うまく縦孔・地下空洞探査というネタを使って，国民の科学技術力を上げることに使っていけないか．第一線の研究と学校教育

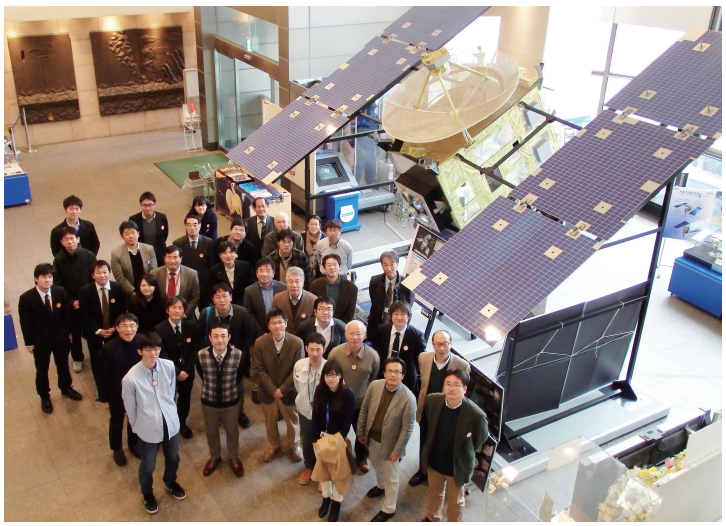


図2：集合写真．

をつなぎ合わせようとしてくれる高校の先生方がおられることに，日本の未来の明るさを感じたのは私だけでは無かったと思う．

4. 今後に向けて

出会いは，大事で有り，なんと楽しいことであろうか．JAXA内のJSPECという組織が行ってきたSELENE-2の着陸点検討の際には，私は縦孔探査を提案した．しかし，そこでは，早い月着陸実現こそが命題と思い，「縦孔の中には入らず，縦孔に近づいてのみの探査」という方針での提案を行った．しかし，それは失敗であった．痛恨のミスであった．この方針は，「縦孔の中に入らなければ，科学成果がない」と堕とされる理由となり，縦孔探査の優先順位は著しく落とされることになってしまったのである．一方，アームを持つ巨大ローバが繰り出され，サンプルを確かめ，拾って，割って，切って，磨いて，顕微分光するというような探査が推されることになった．このようなシステムの近未来での実現性がどの程度のものだったのか分からないが，縦孔探査でもやはり工学的な実現性が重要だと改めて思ったものである．そういう忸怩たる思いのさ中，河野氏に出会い，縦孔探査をあらためて，「ウズメ」（UZUME：Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/Mars，古今未曾有の日本の月/火星 地下世界探査）計画と名付け，新たなスタートを切った．ウズメ計画は，2020年代初頭の月縦孔・地下空洞内探査技術実証，2020年代半ばの縦孔・地下空洞からのサンプルリターン，2030年前後の火星の縦孔探査を目指そうとしている．数年前には，とても無理無理，と思われていたことが，河野氏はじめ，JAXA久保田氏，野田氏，東北大吉田氏といった探査工学分野の大御所的研究者の方々の好意的助言，JAXA内の川勝氏ら，豊田工大の古谷氏ら，古くからのつきあいの工学関係者の助力，加えて，JAXAの大槻氏，慶應大学の石上氏のような30代の若手工学研究者らとの出会いにより，次第に現実化しつつあると心底感じている．今回報告させていただいた研究会を終えて，改めて惑星科学会の皆様に言わせていただきたいと思う．「ウズメ計画に参加しませんか？」

←目次へ

巨大惑星系研究会　開催報告

木村 淳[1]

2015年4月14日(火)に，東京工業大学地球生命研究所(ELSI)において「巨大惑星系研究会」を開催した(世話人：木村淳，藤本正樹，藤井友香，臼井寛裕)．本稿では，研究会の主旨に関わる学術的背景や国際情勢を概観しつつ，本会と文脈を共有する他の学会研究会等の履歴に触れながら，本会合を開催するに至った経緯と報告を行う．

太陽系最大のサイズと角運動量を持つ木星は，その形成が土星など他の巨大惑星との相互作用を通して太陽系全体のデザインに本質的な役割を果たし，地球など内側の惑星の軌道状態や物質供給にも多大な影響を与えたと考えられている．また爆発的な拡がりを見せる太陽系外惑星の発見は，木星のような巨大惑星が太陽系以外の系においても普遍的な形態であることや，巨大惑星がその形成後に大きく移動する可能性があることを目の当たりにさせている．こうした多様な惑星系の姿を前に，かつて「太陽系形成論」として構築されてきたモデルを，より普遍的な形での「惑星形成論」の枠組みの中で説明することが試みられている．つまり我々の太陽系のデザインは必然的に生じるものではなく，そこへ至った経緯と理由が理解されなければならないという文脈で，太陽系形成論が再び盛り上がりを見せている．

また巨大惑星自身も様々な科学的重要性と波及性を持つことは言うまでもない．大気については，強い鉛直対流機構に代表される特徴的なダイナミクスを把握することが，太陽系外惑星も含めた惑星流体の一般的性質を理解する重要なステップとなるほか，組成とその鉛直構造の把握を通して深部も含めたバルク組成の理解へと繋げることで，巨大惑星系が形成時に経た環境への示唆も得られ，惑星形成論へのフィードバックが期待される．また強大な磁気圏は，その内部にプラズマ源となる衛星を内包することや，巨大惑星の自転に引きずられて高速で回転すること，そして外部から太陽風による揺さぶりを受けることといった特徴によって，その場観測が可能な空間の中で強力な粒子加速が起きている領域という魅力を持ち，相対論的エネルギー粒子加速の解明という宇宙物理学の大きな課題に迫るための最高のターゲットと言える．

図1：会場となった東京工業大学地球生命研究所(ELSI)の玄関．

巨大惑星の周りには数多くの多様な衛星が回り，それらのほぼ全ては氷に覆われた氷衛星として存在する．氷のテクトニクスに彩られた表面の下には大規模な海洋の存在が推測される衛星も今や数多く，有機物や内部熱源との共存を示唆する研究・観測結果とも合わせて，潜在的な生命居住可能領域として第一級の研究対

1. 東京工業大学地球生命研究所
junkim@elsi.jp

象となっている．

こうした，太陽系の起源への本質的な関わりからアストロバイオロジーへの展開に至るまでの様々な文脈を持つ巨大惑星系への興味を実証的に解明する動きも近年再び活発である．2004年から土星系を探査しているCassiniは現在も大きなトラブルなく様々な科学成果をもたらし続けている(2017年にミッション終了)．2010年に打ち上げられたNASAの木星系探査機JUNOは2017年に木星へ到着する予定である．そして我が国では2013年に打ち上げた惑星観測用宇宙望遠鏡ひさき(SPRINT-A)が定常観測を開始し，地球周回軌道からの遠隔観測で木星のプラズマ領域をモニタし，プラズマ環境のエネルギー供給過程の理解に貢献している．さらに2022年の打ち上げを目指す木星氷衛星探査機JUICEが，欧日協同体制で開発が進められている(木星到着は2030年) [1]．従来の日本にとって，巨大惑星系の研究に実証的手段をもって取り組むことは夢に過ぎなかったものが，ここへ来て前述のような様々な科学的興味があらわとなり，具体的な探査ミッションへの主体的な参画が実現する時代が到来したことに興奮を禁じ得ない．

しかし，もしかしたらこの興奮は思い過ごしで，私だけが空回りしているのかもしれない．本研究会を開催したのは，そのあたりの雰囲気を見極めるためである．という表現はやや過言で自分勝手が過ぎるけれど，あながち嘘でもない．欧米と手を取り巨大惑星系へ探査機を送り込める時代の到来を感じるとは言え，いざそのデータや知見を共有できそうなコミュニティを眺めるに，その拡がりは欧米のそれと比べてまだまだ圧倒的に狭い，というか視界がぼやけている印象がある．惑星形成論や広い意味での惑星物質科学をも含めた人材は少なくないが，それらが有機的な繋がりをもって当該および周辺分野の科学研究が底上げされ，視野を広げているかと問われれば，現状ではネガティブな回答をせざるを得ない(私の視野と視力が悪いだけかもしれない)．しかしそうした状況を少しでも打破し，人材のネットワークを作ろうと，数年来さまざまな場を作ってきた．2009年11月には，「木星・巨大惑星系の起源と衛星サイエンス」と題した国際会合を惑星科学研究センター(CPS)主催のワークショップとして北海道大学で開催した．これを端緒として，2010年の地球惑星科学連合(JpGU)大会では「巨大惑星・衛星・系外惑星」というセッションを立ち上げ，翌年にはこれを「Future explorations of Jupiter and Saturn system」として国際セッション化．以来，多少のセッション名の変更はあったものの，現在もなお継続して開催している．また2011年には，遊星人にて「将来木星圏・土星圏探査計画へのサイエンス」という特集を2号にわたって組んだ[2]．そして最近では木星探査機JUICEの準備が本格的に始動し，日本のチームもその開発に参加している [1].

前置きがずいぶん長くなったが，このような背景と経緯を受けて，(いわゆる学会講演会よりは)ある程度の時間をかけてじっくり話を聞く研究会を開くことを決意した．はじめはJUICE計画に特化した議論の場をイメージしていたが，様々な審査イベントが立て込むこの時期にあっては計画内部の方々にとっての過剰な負担や視野狭窄をもたらし，かつ，外の人への波及効果も薄い(むしろ敬遠されるかもしれない)のではないかと考え直し，「巨大惑星系」をキーワードに，それ以上の文言は重ねずあえてゆるいテーマの会合にした．また，2月に惑星科学会が示した「惑星科学／太陽系科学研究領域の目標・戦略・工程表」では，この先100年程度を見通す超長期的なビジョンとして「太陽系生命環境の持続」を，そして20年程度のスパンでは「前生命環境の進化―生命圏の誕生・持続に至る条件の解明―」を地球生命圏との対比において進めることが適切な科学目標だと掲げられている．氷衛星を持つ巨大惑星系がまさにその具体的な「現場」であることも，本研究会をこのタイミングで，かつ特定のミッションに特化しないスタイルで開催する発想に至った重要な理由のひとつである．

会を構成するにあたっては，前段で述べた最近数年での様々な学会・研究会や出版活動の経験と経緯を活かしながら，巨大惑星系というキーワードに内包される様々なカテゴリをまず洗い出し，各々に対応するキーパーソンをピックアップした．巨大惑星系探査ミッションのタイムスケール(すなわち仮説と実証のフィードバックサイクル)の長さを考えると，若手を含めた研究者層の底上げを図ることも必須なので(主宰の私自身がもはや若手と言えるのかは棚に上げ)，意識的にそういった年齢層の研究者へ講演依頼をかけた．依頼をかけ始めたのが研究会のたった一ヶ月前であったにも関わらず，依頼したほぼ全ての方々から即座に

快諾の返事をいただき，依頼開始から3日ほどで会の大枠は整った．

かくして表1に示す講演が揃い，研究会が開催された．講演は質疑を含めて各30分を割り当てて日本語で行ったが，日本学術振興会の世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）採択拠点であるELSIでの開催にあたり，構成員の約4割が外国籍であるELSI研究員への便宜を図るため，スライドは英語で作製していただいた．参加者は50〜60人に達し，トピックの多彩さを反映した大いに盛りあがる議論が交わされた．参加者からの声で印象深かったのが，異口同音に聞こえてきた「こんなに人が集まるとは思わなかった」という反応である．個人的には，これまでのJpGUでのセッション運営やJAXAでの次期木星探査ワーキンググループ会合などの経験からも，この参加者数は期待通りというか楽観していたのだが，これを「意外だ」と受け止める反応が多かったことは，巨大惑星系が包含する研究分野とそこに携わる人々の顔がお互いにまだ見えていない実情を反映しているのだろう．また，いまや研究会・会議や雑用が乱立し研究時間の確保が難しいという愚痴があちこちから聞こえて来る現状にあって，新たな会合を開くことの意義を訝る向きも本会の立ち上げ時にはあった．しかしそれはあくまでも会の主旨に独自性があり，そこにコミュニティが必要性を感じるかどうかの問題であって，その答えは会終了後に参加者それぞれが実感して頂けたものと確信している（ただし世話人の労力は最低限まで削ぎ落とした．完全手弁当，集録・アーカイブ作業なし，懇親会なし，等々）．会の終了後には「○○の講演をした□□さんに詳しく話を聞きたいので連絡先を教えて下さい」という類の問い合わせが多数寄せられたことにも，研究会を開いた最低限の意義はあったと感じる．

巨大惑星系にまつわる議論の場は本会をもって単発で終わるものではないし，すべてが議論し尽くされたわけでもない．本会で採り上げきれなかった，しかし巨大惑星系の科学には欠くことのできない分野やトピックはまだまだ数多い．今後はそうした話題をカバーしながら，しかしいたずらに義務感に追い立てられることなく，研究の進捗のタイムスケールと歩調を合わせながらメリハリのある会として在り続けたい．むしろ惑星科学会員や周辺他学会の方々から，「次はこういうテーマで」「この人の話を聞きたい」というようなアイデアを寄せて頂き，この場を積極的に利用するようなアクションを期待したい．

また本会の他に，巨大惑星の衛星系に焦点を当てた議論の場として「衛星系研究会」を毎夏に開催してい

表1：研究会のプログラム．

1月14日（火）9：30〜18：45	
平田　直之（神大）	土星中型衛星の地質
栗田　　敬（東大）	潮汐相互作用と衛星の内部進化
高井　　研（JAMSTEC）	Thermodynamic estimation of hydrothermal fluid chemistry and associated chemosynthetic microbial community development in Enceladus interior ocean
松尾　太郎（京大）	Europaの分光観測とその準備状況
堀　　安範（国立天文台）	Peer into a Nutshell: The Interior of Jupiter
杉山耕一朗（JAXA）	木星の大気構造
谷川　享行（産業医大）	巨大惑星周りの衛星系形成
関根　康人（東大）	JUICEに期待する木星系探査からの惑星科学
松島　政貴（東工大）	Galileo衛星の磁場
木村　智樹（理研）	その場観測と多波長遠隔観測に基づく高エネルギー磁気圏物理
垰　　千尋（IRAP）	木星・衛星オーロラと環境/ダイナミクス探査
総合　討論	
谷川　享行（産業医大）	衛星系探査からの惑星形成論
笠井　康子（NICT）	JUICE搭載サブミリ波分光計による木星系観測からの惑星科学
渡邊誠一郎（名大）	巨大ガス惑星系からの惑星科学

る [3] ほか，より大規模な報告・議論の場としては，JpGUでのセッションや，AOGSでの「Icy satellites and rings」セッションを毎年開催しているので，積極的に利用して頂きたい．本年5月のJpGUでは，「P-PS01: Outer Solar System Exploration Today, and Tomorrow」セッションとして合計34件（口頭23件，ポスター11件）の講演が行われ，最大瞬間値で約80名に達する聴衆を集めて活発な議論が行われた．

と，ここまで一通り書き上げてから再読するに自画自賛的な文章だらけで気持ち悪いことを認識したのだが，投稿〆切まで数時間しかないのでもはや手直しできないことをお詫びしたい．そして最後に，本稿執筆者自身も会の最中は講演と議論に夢中で，「研究会の様子」なる写真を撮る暇がまったく無かったことを言い訳しつつ，筆を置く．

謝 辞

御講演いただいた皆様には厚く御礼申し上げます．完全な手弁当の会合だったにもかかわらず，かつ年度初めの多忙な時期に急な講演依頼に快く応えて下さったこと，重ねて深く感謝致します．また，当日会場へ脚を運び議論に参加して下さった多くの皆様にも御礼申し上げます．

参考文献

[1] 木村淳ら, 2013, 遊星人 22, 146.
[2] 木村淳ら, 2011, 遊星人 20, 252.
[3] 谷川享行ら, 2014, 遊星人 23, 386.

←目次へ

国際研究会「Icy Grain Chemistry for Formation of Complex Organic Molecules: From Molecular Clouds to Protoplanetary Disks, Comets and Meteorites」開催報告

野村　英子[1]

1. はじめに

2015年3月5日－7日に東京工業大学において国際研究会「Icy Grain Chemistry for Formation of Complex Organic Molecules: From Molecular Clouds to Protoplanetary Disks, Comets and Meteorites」が開催された．我々の生命起源を探る上で，星間空間における大型有機分子生成過程の理解は1つの鍵となる．近年の天文観測技術の進展により，アミノ酸や核酸塩基の前駆体，糖類など，星間空間における複雑な有機分子の発見数が増えている．特にアタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計ALMA（Atacama Large Millimeter/submillimeter Array）により，従来のミリ波・サブミリ波望遠鏡をはるかに上回る高感度・高空間分解能観測が可能になった．実際，ALMAにより既にイソプロピルシアニドが大質量星形成領域で発見されたり，原始惑星系円盤でもアセトニトリルが初検出されたりしている．星間雲中ではアミノ酸は現在探査中であるが，一方で，彗星や隕石中では既にアミノ酸が発見されており，星間空間で検出されている複雑な有機分子からどのようにして太陽系内天体中で発見されたアミノ酸を生成するかに関し，様々に議論が行われている．

星間空間は低温低密度かつ紫外線や宇宙線により分子は壊されるため，気相における大型有機分子の生成は難しい．よって星間空間で大型有機分子が発見されて以来，星間塵表面反応の重要性が指摘されている．実際，大質量星形成領域で検出されている複雑な有機分子は，星形成前の冷たい分子雲コア中で星間塵表面反応により生成された分子が星形成に伴う塵の加熱により気相に放出され，その後気相反応を起こして生成されたと考えられている．近年のより複雑な有機分子の検出に伴い，星間塵表面反応モデルはさらに発展している．しかし，反応素過程の理論計算や実験はごく限られたものしか存在せず，モデルは多くの不定性を含んでいる．

本研究会は，星間塵反応素過程の室内実験や理論計算に基づき，星間塵表面／マントル反応の化学反応ネットワークを如何に構築するかに焦点をあて，議論を行うことを目的に開催された．また，星間雲中の複雑な有機分子やその前駆体の観測によるモデルへの制約や，観測された分子の反応経路に対するモデルからの提案，さらには，星間分子から彗星や隕石中に存在する複雑な有機化合物，ひいては生命起源分子種を作る反応経路の解明まで，幅広い分野の研究者が互いに情報交換し，議論することも本研究会の目的である．研究会では，星間雲中の複雑な有機分子の観測，星間塵表面／マントル反応のモデル，素過程の理論計算と室内実験，また，彗星や隕石中の有機分子の研究に携わる研究者14名（海外：8名，国内：6名）に招待講演をして頂いた．また，国内外より総勢50名（海外：14名，国内：36名）の皆様に御参加頂いた．

2. 講演内容

（I）星間雲および彗星中の複雑な有機分子の観測とモデル，（II）星形成コアおよび原始惑星系円盤中の複雑な有機分子生成に関する塵表面反応を含めた化学反応ネットワーク計算，（III）星間塵表面／マントル反応の室内実験，（VI）隕石中や赤色巨星周囲の有機

1. 東京工業大学 大学院理工学研究科
nomura@geo.titech.ac.jp

表1：研究会プログラム：(I) 招待講演，(C) 一般講演.

3月5日(木)

13:30 − 13:50 Introduction (Hideko Nomura)

(I) FROM ASTRONOMICAL OBSERVATIONS TO MODELLING FORMATION PROCESS OF COMPLEX ORGANIC MOLECULES

13:50 − 14:35 (I) Brett McGuire
"Complex Organic Molecules as Gas-Phase Tracers of Ice Processing: HNCNH and NH_2OH"

14:35 − 15:20 (I) Masatoshi Ohishi "Discovery of Objects Richest in CH_3NH_2, Candidates for Future Glycine Surveys"

15:40 − 16:25 (I) Steven Charnley "The Chemical Composition of Comets"

16:25 − 16:40 Short Discussion 1 (Robin Garrod)

16:40 − 17:40 Poster Presentation (Short Oral Presentation)

3月6日(金)

(II) MODELLING FORMATION PROCESS OF COMPLEX ORGANIC MOLECULES

09:00 − 09:45 (I) Eric Herbst "Some Major Questions Concerning Ice Chemistry on Grains"

09:45 − 10:30 (I) Robin Garrod "Modelling the formation of complex organic molecules in star forming regions"

10:50 − 11:35 (I) Yuri Aikawa "Gas-Grain Chemical Models in the Star- and Planetary System Formation"

11:35 − 12:20 (I) Catherine Walsh "Complex Organic Molecules in Protoplanetary Disks"

14:00 − 14:30 (C) Maria Drozdovskaya "Complex Chemistry Embracing Low-Mass Protostars Exposed"

14:30 − 15:00 Short Discussion 2 (Tom Millar)

(III) FROM THEORETICAL SIMULATIONS TO LABORATORY EXPERIMENTS RELATED TO ICY GRAIN CHEMISTRY

15:20 − 16:05 (I) W.M.C. Sameera "Interstellar radical species binding on ices: a hybrid QM/MM approach"

16:05 − 16:50 (I) Naoki Watanabe "Experimental approach to nonenergetic physicochemical processes on icy grains"

16:50 − 17:20 (C) Jean-Baptiste Bossa "Methane ice photochemistry and kinetic study using laser desorption time-of-flight mass spectrometry at 20 K"

17:20 − 18:00 Poster Presentation

3月7日(土)

09:00 − 09:45 (I) Patrice Theule "Ice chemistry"

09:45 − 10:30 (I) Asper Chen "The effects of photon energy and carbon source on the formation of S-bearing species by VUV/EUV irradiation of H2S-containing ice mixtures"

10:50 − 11:20 (C) Angela Ciaravella "Soft X-ray Irradiation of CO Ice: Effects of the Photon Energy and Flux"

11:20 − 12:05 (I) Kensei Kobayashi
"Formation of Complex Amino Acid Precursors and Nucleic Acid Bases from Possible Interstellar Media"

12:05 − 12:20 Short Discussion 3 (Patrice Thuele)

(IV) ORGANIC COMPOUNDS IN METEORITES AND AROUND EVOLVED STARS

14:00 − 14:45 (I) Jim Cleaves "From Simplicity to Complexity: HCN/HCHO as a Model System for Parent Body Processes"

14:45 − 15:15 (C) Zan Peeters "Large veins of organic matter in meteorites"

15:15 − 15:45 (C) Sun Kwok "Synthesis of Complex Organics in the Late Stages of Stellar Evolution"

15:45 − 16:10 Discussion and Summary (Tom Millar)

化合物の4つのセクションで，招待講演と一般講演あわせて18講演があった(表1にプログラムを示す)．以下にそれぞれのセッションでの講演内容の概略を記す．

(I) 星間雲および彗星中の複雑な有機分子の観測とモデル

星間雲中の複雑な有機分子の観測に関連して，Brett McGuire氏(NRAO/Caltech)と大石雅寿氏(国

立天文台）に招待講演をして頂いた．Brett McGuire氏には，核酸塩基の前駆体といわれるシアノメタンイミン（HNCHCN）とカルボジイミド（HNCNH）の発見およびヒドロキシルアミン（NH_2OH）の探査とこれらの有機分子の生成過程，室内実験と遷移線モデル計算について講演頂いた．大石雅寿氏には，アミノ酸のグリシンの前駆体であるメチルアミン（CH_3NH_2）とメチレンイミン（CH_2NH）の最新観測とその生成過程，および今後のグリシンの探査について講演して頂いた．

また，Steven Charnley氏（NASAゴダード宇宙飛行センター）には，彗星の化学に関して招待講演をして頂いた．彗星中の水素，炭素，窒素化合物の同位体比に関する観測的・理論的研究や，Lemmon, ISON, PanSTARRS彗星の最新観測，ALMAによる有機分子存在量の時間変動の観測など，最新の研究成果を紹介して頂いた．

（Ⅱ）複雑な有機分子生成の化学反応ネットワーク計算

大質量星形成領域で発見された有機分子の生成過程を探るための塵表面反応モデルおよび化学反応ネットワークの構築とそれを星形成コアや原始惑星系円盤に適用したモデル計算について，国内外の5人の研究者の方に招待講演，一般講演をして頂いた．

Eric Herbst氏（バージニア大学）には，星間塵表面反応モデルの様々な不定性について，特に，星間塵表面における分子の拡散過程のモンテカルロ計算などについて最新の研究成果を紹介して頂いた．Robin Garrod氏（コーネル大学／バージニア大学）には，氏が近年開発してきた暖かい星間塵表面におけるラジカル同士の反応モデルについて，特に最近取り組んでいるアミノ酸のグリシン生成まで含めた化学反応ネットワークの構築および，それを応用したALMAによる星間雲中のグリシン観測可能性に関して講演して頂いた．相川祐理氏（神戸大学）には，水素分子のオルソ・パラによる反応率の違いを含めた化学反応ネットワーク計算とその重水素生成への依存性や，星形成コアの流体シミュレーションを取り入れたダイナミカル化学反応計算と原始惑星系円盤形成時の有機分子生成についてお話し頂いた．Catherine Walsh氏（ライデン大学）には，原始惑星系円盤中の有機分子生成と彗星中の有機分子組成との関連およびALMAによる円盤からの有機分子輝線観測の予測，若い星団中における近傍の大質量星からの紫外線照射が円盤内有機分子生成におよぼす影響などについて講演頂いた．Maria Drozdovskaya氏（ライデン大学）には，星形成コア中の原始惑星系円盤生成段階における有機分子分布の時間進化と有機分子の寿命に関する最新研究の成果を発表して頂いた．

（Ⅲ）星間塵表面／マントル反応の理論計算と室内実験

星間塵表面／マントル反応素過程に関する最新の理論計算と室内実験の研究結果を，国内外の7人の研究者の方に招待講演，一般講演をして頂いた．

W.M.C. Sameera氏（京都大学 福井謙一記念研究センター）には，実験室での取り扱いが難しいが，星間化学，特に星間塵表面反応において重要な役割を果たす，OH, HCO, CH_3, O, Hなどのラジカルの氷ダスト表面への束縛エネルギーに関する量子力学／分子力学法（QM/MM）による計算の成果を講演して頂いた．ダストへの束縛エネルギーは，化学反応ネットワーク計算においてダスト表面反応を制御する非常に重要な物理量である．渡部直樹氏（北海道大学 低温科学研究所）には，渡部氏らのグループで行っている星間塵表面反応の実験結果について，特に氷表面の水素原子の拡散と氷表面反応におけるトンネル効果の役割に焦点をあて，講演頂いた．Jean-Baptiste Bossa氏（ライデン大学）には，紫外線レーザー脱離と飛行時間質量分析計を用いた最新の実験装置により，メタンからの炭化水素生成反応に関する紫外線照射実験の成果をお話し頂いた．

Patrice Theule氏（アクス・マルセイユ大学）には，暖かな氷マントル内における非ラジカル同士の反応実験，特に反応係数と氷マントル内の分子の拡散係数に関する最新の成果をお話し頂いた．Asper Chen氏（台湾国立中央大学）には，反応性が高く実験が困難な，硫黄を含む分子の紫外線照射実験の成果と，ペプチド生成における硫黄分子の役割についてお話し頂いた．Angela Ciaravella氏（イタリア国立宇宙物理学研究所INAF）には，炭素鎖分子生成に関する氷マントル反応のX線照射実験の成果を発表して頂いた．小林憲生氏（横浜国立大学）には，星間空間の氷マントルを想定した高エネルギー粒子照射実験によるアミノ酸や核酸塩基生成に関する実験について，メタンの影響など還元的環境下での成果について，また，X線や紫外線に

よる生成物の変性と隕石中の有機分子の形成，タンポポ・ミッションによる惑星間塵の採集・解析，特にアミノ酸関連化合物の安定性についてなど，様々な話題に関して講演頂いた．

(Ⅳ) 隕石中や赤色巨星周囲の有機化合物

Jim Cleave氏(東工大ELSI／IAS)には，NH_4CN/HCHO溶液の様々な温度での液相反応による有機化合物生成実験と生成物の質量分析について，また，これらの実験生成物と隕石中の有機化合物との関連，特に炭素質隕石の母天体における水質変性との関連について講演頂いた．Zan Peeters氏(台湾中央研究院ASIAA)には，ASIAA nanoSIMSを用いたマーチソン隕石中の有機物質のその場分析の成果について，特にその元素組成や同位体組成の不均質性についてお話し頂いた．Sun Kwok氏(香港大学)には，赤色巨星から惑星状星雲にかけての各進化段階で存在する様々な有機化合物の赤外線スペクトル分光と観測，未確認赤外線放射(UIE)と非結晶炭素質固体との関連，またその隕石中の有機化合物との類似性について講演頂いた．

3. まとめおよび謝辞

口頭講演のほかにも，ポスターセッションで国内研究者12名の発表があった．ポスターセッションの時間はもちろんそれ以外の時間帯でも，海外・国内の研究者とポスターの前で活発に議論を交わしている姿が良く見られた．また，各セッションの最後に議論の時間を設け，研究会最後にはTom Millar氏(クィーンズ大学ベルファスト)にまとめの講演として頂いた．

海外・国内より多くの皆さんに御参加頂き，盛況な研究会が開催でき，大変感謝している．星間塵表面／マントル反応による有機分子生成はまだまだ未解明の点が多いが，本研究会で得られた知識や議論が，今後の研究の足掛かりになれば幸いである．

最後になりましたが，研究会開催を支えてくれたオーガナイザーの皆様，丁寧に講演準備をして頂いた招待講演者の皆様，また，研究会を盛り上げて頂いた全ての参加者の皆様に感謝致します．また本研究会は，自然科学研究機構 新分野創成センター 宇宙における生命研究分野からの援助で開催されました．深く御礼申しあげます．

図1：研究会集合写真．

※http://www.geo.titech.ac.jp/lab/nomura/grain_chem/index.html

←目次へ

研究会参加報告「MISASA V “Comprehensive Exploration of the Solar system”」

嶌生 有理[1]

1. はじめに

衝突現象は小惑星進化において重要な役割を担う．破壊と再集積によりがれき小惑星が形成されるだけでない．テクトニクスの無い小惑星における元素再分配は，衝突による物質の機械的混合による．その一方で，小惑星試料を回収する，サンプルリターンミッションにおいても，衝突現象は注目されている．はやぶさにおいて，衝突銃による試料回収が計画され，はやぶさ2ではさらに，衝突機による新鮮表面の暴露が予定されている．著者は，小惑星の表面に最も豊富であるカンラン石の衝突進化に着眼し，微量元素及び同位体の解析をすすめている．以上に述べたように，小惑星の物質進化，衝突現象，そしてサンプルリターンミッションは綿密に関係している．三朝にて衝突および物質分析をハイブリッドさせた研究手法の確立をめざす著者[1]は，これらが網羅された国際シンポジウムMisasa V（表1，図1d，e）にホストとして携わる機会を得た．ここでは，講演を概説するとともに，その舞台裏について記述する．

2. シンポジウム背景

21世紀の地質学は地球を越え，小惑星，彗星，火星そしてその衛星へとフロンティアを広げている．隕石研究に，系統的なサンプリングによる試料解析とリモートセンシングによる観測を組み合わせることで，太陽系の起源・進化・ダイナミクスに関する学問的展開が加速することが期待される．ただし，その期待と裏腹に複合領域及び複数国家にまたがる相互関係の構築は，研究者の苦手とするところである．複眼的視点による総合分析により，物質進化における本質的プロセスを演繹することを標榜する岡山大学地球物質科学研究センター（ISEI）は，ディシプリン，プロジェクト及び人の交流に基づく学問発展を志し，国際シンポジウムMisasa Vを鳥取県三朝町にて開催した．

ISEIは，2005年以降の過去10年間に戦略的な国際シンポジウムを4回開催してきた． Misasa Vはその一連のシリーズの延長にあり，多様なデシプリンを持つ国内外の研究者による学術交流の場となった．とりわけ，Misasa Vにおいては，地球惑星物質総合解析に基づく最新の研究結果（チェリャビンスク隕石ほか）を核として，国内外の探査ミッション（はやぶさ2，OSIRIS-REx，Mars 2020など）や試料キュレーションに関わる世界トップクラスの研究者が三朝に集い，解析と探査の両面から最新の科学研究の成果ならびに将来の研究計画についての実質的な議論が行なわれた．

3. Analysis of rocks delivered by geologist ... or space mission

シンポジウム初日は，中村栄三センター長（岡山大学）の開会の挨拶から始まった（図1a）．その挨拶では地球化学，地質学，物質科学，サンプルリターンミッション，生物学の融合を目指した本シンポジウム開催の経緯を概説し，分野の垣根を越えた議論と意見交換の重要性が強調された．そして，ISEI分析地球化学部門が国際的な共同研究拠点として作り上げてきた「シームレス地球惑星化学解析システム「CASTEM」[2]」のアドバンテージを，イトカワ微粒子およびチェ

1. 岡山大学地球物質科学研究センター
shimaki@cc.okayama-u.ac.jp

表1：　Misasa V プログラム.

Day 1	**Analysis of rocks delivered by geologist ... or space mission**	
14:05–14:30	中村栄三 (岡山大学地球物質科学研究センター長)	Introduction to comprehensive material analyses: The sensitivity to a process by multi disciplinary analyses
14:30–15:00	國中均 (ISAS/JAXA)	Hayabusa 2: Overview of JAXA's mission to asteroid
15:00–15:30	渡邊誠一郎 (名古屋大学)	Science objectives of Hayabusa-2, a C-type asteroid sample-return mission
15:40–16:40	Dante Lauretta (アリゾナ大学)	OSIRIS-REx: Over view of NASA's mission to another asteroid
16:40–17:20	Ian Franchi (オープン大学)	Sampling the most primitive materials. D-type asteroids and the proposed marcopolo-2d mission
17:20–17:50	藤本正樹 (ISAS/JAXA)	Frequency matters: ISAS's strategy for small but edgy planetary exploration
Day 2	**Pieces of asteroid and comet, and their connections**	
08:50–09:30	Boris Shustov (ロシア科学アカデミー宇宙研究所)	Search for dangerous asteroids: Activities in Russia
09:30–10:10	Jeremie Lasue (トゥールーズ第3大学)	Rosetta: Similarity and differences of comet landscapes to asteroids
10:10–10:50	Scott Messenger (JSC/NASA)	Connections and distinctions between cometary and asteroidal materials
10:50–11:10	Victor Grokhovskiy (ウラル連邦大学)	Structure, properties and fracture of Chelyabinsk meteorite body with different lithology
11:10–11:30	辻森樹 (岡山大学地球物質科学研究センター)	Geological record preserved in the Chelyabinsk meteorite: Shock-induced process and hydrous alteration
11:30–11:50	太田努 (岡山大学地球物質科学研究センター)	Comprehensive mass-balance on the Chelyabinsk meteorite: Clues to decode the process
11:50–12:10	田中亮吏 (岡山大学地球物質科学研究センター)	Chronology of catastrophic impact on the Chelyabinsk meteorite: Recent process
	Pieces of larger bodies ー Mars and Moon	
14:00–14:40	Kenneth Williford (JPL/NASA)	NASA Mars2020 Rover mission: Science introduction and sample return considerations
14:40–15:10	Éric Lewin (グルノーブル大学)	Curiosity: Geochemistry of martian atmosphere
15:10–15:40	Leonid Ksanfomality (ロシア科学アカデミー宇宙研究所)	On comparison of some properties of the nucleus of the comets 67p/ Churumov-Gerasimenko and 1P/Halley
15:50–16:20	James Darling (ボーツマス大学)	Untangling detailed geological and shock histories of planetary materials: New developments and opportunities
16:20–16:50	関根康人 (東京大学)	Enceladus' ongoing hydrothermal activity
16:50–17:20	田中智 (ISAS/JAXA)	The Japanese lunar penetrator: Technical readiness and its applications to the future planetary Exploration
17:20–17:50	Mikhail Gerasimov (ロシア科学アカデミー宇宙研究所)	Russian missions to polar Moon: The importance of in situ preanalysis of the volatiles composition in lunar soil samples before their delivery to the Earth
17:50–18:10	新井達之 (東京工業大学)	Formation of primordial continents on the Moon and the Hadean earth
Day 3	**Further Solar exploration with theorist, geologist, and perspectives**	
08:50–09:20	戎崎俊一 (理化学研究所)	The tandem formation of planetesimals in the accretion disk around a protostar: The CAIN (Chondrite Accumulation In Nebula) model
09:20–10:20	丸山茂徳 (東京工業大学)	A way to establish astrobiology
10:30–12:00	Steven Squyres (コーネル大学)	The future of planetary sample return: Multi-national opportunities, and lessons learned from eleven years on Mars
12:00–12:05	常田佐久 (宇宙科学研究所長)	Comments from Director-General of ISAS/JAXA
	Depository for References of Extraterrestrial and Analytical Material	
13:00–13:25	山口亮 (国立極地研究所)	curation and research of antarctic meteorites at the National Institute of Polar Research, Japan (NIPR)
13:25–13:50	安部正真 (ISAS/JAXA)	Extraterrestrial sample curation center in JAXA: Hayabusa and Hayabusa2
13:50–14:15	橘省吾 (北海道大学)	Hayabusa2: Returned sample analysis in 2021
14:15–14:55	中村圭子 (JSC/NASA)	Curation and analysis of astromaterials returned by NASA's missions
14:55–15:10	山本幸生 (ISAS/JAXA)	Experience of Planetary Data Archive and its Application to Materials Analyses
15:10–15:30	国広卓也 (岡山大学地球物質科学研究センター)	Comprehensive curation that ties your and my dream, stones and material analyses – Concept of DREAM and status on 2015

図1：シンポジウムの様子．(a)中村栄三センター長，(b)Steven Squyres先生，(c)中村圭子先生，(d)口頭発表会場，(e)ポスター発表会場，(f)懇親会での中村圭子先生ご一家，(g)エクスカーション足立美術館での集合写真，(h)送別会で蕎麦打ちの手伝いをする著者(YS)．蕎麦打ちも二次イオン質量分析も修行の身である．

リャビンスク隕石の研究成果を例に力強く講演した．CASTEMは，1つの物質試料に対して20を越える湿式および表面分析装置を組み合わせた，連続的かつ多角的な分析によって，79元素，9同位体，9年代学の実現を可能にする．

続いて，国内外の小惑星サンプルリターン計画の現状について講演が行なわれた．C型小惑星を目標とするはやぶさ2（2014年12月打ち上げ）の運用状況について，國中均先生（ISAS/JAXA，はやぶさ2プロジェクトマネージャー（シンポジウム当時））が講演を行ない，寄付金という形で表われている国民の関心の高さに海外研究者から驚きと感嘆の声が聞かれた．引き続き，渡邊誠一郎先生（名古屋大学，はやぶさ2プロジェクトサイエンティスト）が講演し，はやぶさ2 の4つの科学目標（初期太陽系での物質混合過程の特徴づけ，微惑星での鉱物－水－有機物の反応過程，初期太陽系での物質進化，天体ダイナミクス）について報告した．B型小惑星に向かう予定のOSIRIS-REx（2016年打ち上げ予定）については，Dante Lauretta先生（アリゾナ大学，OSIRIS-REx ミッションP.I.）から運用計画の詳細が紹介された．サンプル採取のみならず，レーダーによるYarkovsky効果の高精度測定による天体

ダイナミクスの解明が期待されるとあって，講演直後には多くの質問が寄せられ，会場は大いに湧いた．D型小惑星を探査候補とするESA主導のMarcopolo-2d（2025年打ち上げ予定）については，Ian Franchi先生（オープン大学）が科学目標と運用計画について講演した．小惑星帯外縁に存在するD型小惑星はTNO 起源と考えられ，サンプルリターンによって小惑星と彗星核，惑星間塵（IDP）の関連性が解明されると期待される．藤本正樹先生（ISAS/JAXA）はISAS/JAXA の宇宙探査方針について，ミッション提案過程の概説と，ミッション規模に応じた打ち上げ機の利用（H-IIa，イプシロンロケット，国際協力による海外ペイロード利用）について講演した．

懇親会（図1f）で山陰の幸を味わった後に，牛骨ラーメンを探求した．本シンポジウムのために製作したガイドを元に，三種の牛骨ラーメンが吟味された．

4. Pieces of asteroid and comet, and their connections

翌日は，太陽系小天体である小惑星と彗星に関する講演から始まった．Boris Shustov先生（ロシア科学アカデミー宇宙研究所）はロシアにおけるスペースガード活動について，2013年のチェリャビンスク隕石の落下を受け，市民による防御観測網の必要性と，ラグランジュ点（L1）の宇宙望遠鏡による近地球小惑星検出の試みを紹介した． Jeremie Lasue先生（トゥールーズ第3大学）は，昨夏，本格的な観測を開始したRosetta による67P Churyumov-Gerasimenko彗星の観測成果について講演した．複雑な地形やジェット噴出孔など，始めて見る彗星核の詳細な素顔や，着陸機Philaeが困難に陥りながらも懸命に調査を続けている状況が報告されると，会場からは多数の質問と賞賛の声が寄せられた．着陸機と探査機間のレーダーによる内部構造探査は彗星核の起源と進化に重要な制約を与えると期待され，その成果を待ち遠しく感じた．Scott Messenger先生（JSC/NASA）は地球帰還試料の分析結果に基づく彗星と小惑星の連続性について，隕石中のプレソーラーグレインや彗星由来のIDPにおける珪酸塩鉱物の発見から，従来の熱い星雲モデルや彗星核の形成モデルが覆され，太陽系内での物質混合過程が明らかになった経緯を概説した．多様なIDPの分析は我々に惑星物質の始源的情報を与えるものの，その多数は素性不明の「転石」として回収されるという問題点を指摘した． Victor Grokhovskiy先生（ウラル連邦大学）はチェリャビンスク隕石の物性と化学分析について講演した．引き続き，ISEIにおけるチェリャビンスク隕石の総合分析結果について，辻森樹・太田努・田中亮吏が連続して報告した．リングウッダイトやワズレアイトといった衝撃変成鉱物の発見の他，全岩分析・局所分析を駆使したマスバランスによるリチウムリザーバーの発見や100 Ma以内という若い衝突溶融年代などが報告された．

5. Pieces of larger bodies — Mars and Moon

午後には火星や月などに焦点を当てた講演が行なわれ，話題は太陽系の起源から生命の起源，アストロバイオロジーへと移っていった．Kenneth Williford先生（JPL/NASA, Mars 2020 D.P.S.）は次期火星サンプルリターン探査Mars 2020の科学目標と運用計画について講演し，火星ローバーによるその場分析とサンプリング方法，および回収コンテナの打ち上げと母船による帰還計画を紹介した．続いて，Éric Lewin先生（グルノーブル大学）は火星ローバー Curiosityのその場分析について講演し，ChemCamとLIBSによる化学分析の運用方法とその成果を紹介した．Leonid Ksanfomality先生（ロシア科学アカデミー宇宙研究所）は67P Churumov-Gerasimenkoと1P Halleyの ガス・ダスト放出と物性の比較について話題提供した．James Darling先生（ポーツマス大学）は惑星物質の地質学的衝突史の解明に向けた隕石の年代測定，鉱物学的記載，イメージング，微小構造解析，同位体分析を組み合わせた総合的分析手法について講演した．関根康人先生（東京大学）は熱水系を模擬した室内実験から，土星リング系で観測されたプリューム起源のシリカナノ粒子がエンセラダスにおける現在活動中の熱水活動起源であることを示した．田中智先生（ISAS/JAXA）は壇上にて月ペネトレータの実物を披露し，その開発史と将来探査への展望について講演した．著者は学生時代，名古屋大学の廊下に鎮座していたペネトレータ模型機を思い出し感慨に浸った．Mikhail Gerasimov先生（ロシア科学アカデミー宇宙研究所）はロシアによる一連の月探査計画と月極域サンプルリターン計画，および揮発性元素のその場測定の重要性について報告

した．新井達之さん（東京工業大学）は月の冥王代原初大陸の形成ついて，月マグマオーシャンの結晶分化による斜長岩地殻の形成過程について講演した．

この日の夜も，盛大な懇親会が開催された．岡山大学山本進一研究担当理事，文部科学省研究開発局局長，鳥取県知事代理からの挨拶に引き続き，三朝町長の発声で乾杯が行なわれた．ISEI田中による三線演奏は，海外からの参加者たちを大いに楽しませた．初日の牛骨ラーメン研究会が好評であったせいか，牛骨ラーメンを食べたいというリクエストが多く，この日はラーメン王の佐々木晶先生も参加してのラーメンツアーが実施された．

6. Further Solar exploration with theorist, geologist, and perspectives

最終日は，地球惑星科学，そして惑星探査の将来について講演が行なわれた．戎崎俊一先生（理化学研究所）は，周原始星集積円盤における内縁乱流域－不活性領域境界での岩石微惑星形成と，不活性領域－外側乱流域境界での氷微惑星形成という2領域微惑星形成モデルについて講演した．続いて，丸山茂徳先生（東京工業大学（シンポジウム当時））は，アストロバイオロジーの確立に向けた講演を行ない，惑星形成，惑星物質の起源と進化，原始大陸進化，さらに生命の起源と進化について包括的な描像を示した．生命が持続可能な惑星の条件が示されると，会場からは矢継ぎ早に質問が上がり，白熱した議論が展開された．そして，11年間の火星探査から学ばれた教訓を基に，惑星サンプルリターンの将来についてSteven Squyres先生（コーネル大学，Chairman of the NASA Advisory Council）が基調講演を行なった（図1b）．NASAミッションの選考過程や，月や彗星核へのサンプルリターン計画や有人小惑星サンプルリターン計画，火星ローバーミッションについて講演した．多様な物質の測定に大きく貢献したローバーの機動力の重要性や，非常にストレスの溜まる運用チームの選考やトレーニング方法など，探査ミッションの困難と素晴しさを熱く語った．なかでも，太陽電池をダストに覆われ，絶対絶命の火星ローバーを一陣の“lucky wind”が吹き飛ばし息を吹き返したという逸話は，人事を尽した時にこそ幸運が訪れるという教訓が込められていた．この逸話を聞き，著者自身も死ぬ気で精進せねばならないと気が引き締まる思いを感じた．常田佐久先生（宇宙科学研究所長）は水星探査計画「BepiColombo」や金星探査機「あかつき」など，ISAS/JAXA におけるミッション状況について講演した．芯の通った語り口は，日本独自の探査のあり方を示しているように感じられた．

7. Depository for References of Extraterrestrial and Analytical Material

最後のセッションでは，各研究機関における，隕石試料／サンプルリターン試料の取扱い（キュレーション体制）について議論された．山口亮先生（国立極地研究所）は，南極における隕石回収及びそのキュレーションについて紹介した．横一列に並ぶスノーモービルによる隕石回収は効率的で，小惑星サンプルリターンを補完する点を強調した．安部正真先生（ISAS/JAXA）は，帰還したはやぶさカプセルからの試料回収方法とJAXAキュレーション施設での初期分析成果，さらにはやぶさ2回収試料に向けた運用計画について講演した．続いて，橘省吾先生（北海道大学）ははやぶさ2による回収試料の分析計画について，帰還までの準備計画と回収試料（粗粒，細粒，ガス）ごとの分析手法，初期分析と二次分析計画について講演した．中村圭子先生（JSC/NASA）は，NASAにおけるアポロ時代から始まる月惑星物質のキュレーションについて講演した（図1c）．窓の無いキュレーション施設を「インベーダーから防御するため」と語るなど，ユーモアを交えたその語り口は会場を魅了した．アポロの月試料，南極隕石，IDPなどのキュレーション状況，はやぶさ2とOSIRIS-RExのキュレーション計画について紹介するとともに，キュレーションにおける若い研究者育成の必要性を強調した．

帰還物質のキュレーションと同等に重要となるのが，探査データや試料デポジトリの管理システムである．山本幸生先生（ISAS/JAXA）は惑星探査データアーカイブの現状と物質科学への応用について講演し，データの公開性とその公開指針および国際的なデータフォーマット制定の必要性を強調した．国広卓也は三朝にて開発する地球惑星試料デポジトリ「DREAM[1]」の現状と，データベースソフトウェアMedusa [3]を紹介し，試料が研究機関及び分析装置のまたぐことを可能とするシステム構築の必要性を，サンプルリターン・コミ

※1. http://dream.misasa.okayama-u.ac.jp/

図2：キリコちゃん(Medusaイメージキャラクター)．二次元バーコードはDREAMへのリンク．

ユニティに対して提案した．Medusaソフトウェアのイメージキャラクター「キリコちゃん(図2)」は聴衆を魅了した．

閉会の挨拶として，Dante Lauretta先生は本シンポジウムを通じて国際的な協力関係が構築されたことの重要性を強調した．そして，Steven Squyres先生は本シンポジウムで出会った国際的な若い学生たちこそが次世代の探査ミッションを牽引していくということを強調し，会場からは喝采が巻き起こった．

シンポジウム後にはISEIにおいてラボツアーが行なわれた．ツアーはクリーンルームの設計思想の解説から始まり，湿式分析に必要な空調や酸処理などの設備，複数の表面電離型質量分析装置(TIMS)や異なるタイプの誘導結合プラズマ質量分析装置(ICPMS)などの分析装置，安定同位体および希ガス分析装置，電界放射型走査電子顕微鏡(FE-SEM)や二次イオン質量分析装置(SIMS)などの表面分析装置，DREAMによる試料追尾システムが紹介された．見学者からは矢継ぎ早に質問が聞かれ，その鋭い質問に著者は回答に窮することもあり，著者自身の意識を高める必要性を痛感した．

翌日のエクスカーションでは，松江城，堀川遊覧と足立美術館を案内した(図1g)．その後の三度目の懇親会では，挽きたて・打ちたて・茹でたての三たて蕎麦打ちが国広(倉吉蕎麦鳥[2])により披露された(図1h)．水廻しをダスト集積に見たて，微惑星形成が議論が展開された．著者は見習い中である．

※2. https://www.facebook.com/soba.tottori

8. おわりに

著者はシンポジウムの起案，計画，及び運営を身近に見た．前回のMisasa IVにはゲストとして参加したこともあり，ホスピタリティについて強く意識することとなった．三朝は交通の便が悪いため，送迎は周到に計画された．ゲストは著者の拙い英語に応じてくれが，語学力というより会話力に欠ける自分を認識することとなった．日々先輩にいわれていることであるが，地元山陰や日本文化などへの理解について，努力を継続しようと考える．

著者は，シンポジウムの少し前，衝突実験の結果発表のため宇宙研に滞在した際，来日中の中村圭子先生にご挨拶する機会を得た．三朝に圭子先生ご夫妻がいらした際には，同じ小さい子を持つ旧知の親同士の関係で三朝をご案内することができた．一度のご挨拶で気持ちが通じることを実感し，人及び研究交流に対して積極的になろうと考えた．

人及び研究交流を進めたい気持ちから，国内の研究者の方々に，ハガキにて参加をお誘いした．丁寧なお返事を頂くこともあり，気持ちの交換をうれしくも感じた．研究交流の他，温泉を楽しんだとの声をいただきほっとした．

2020年以降，はやぶさ2やOSIRIS-RExによる回収試料が地球に帰還し，惑星地質学はさらにフロンティアを広げることになる．帰還に先んじ，小惑星における衝突による物質進化についての研究をここ三朝で進めようと思う．総合分析に基づいた物質科学に，衝突研究の切り口を加えることで，岡山大学ISEIは小惑星にとどまらない，惑星物質分析における国際的な共同利用拠点として実質的な役割を果たすことになるだろう．共同利用及び共同研究のために，そして次回国際シンポジウムの開催に際して，よりいっそうの国内外の研究者にここ三朝にご参集いただきたいと思う．

参考文献

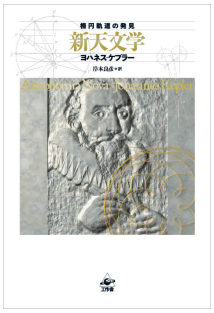
[1] 嶌生有理, 2013, 遊星人 22, 116.
[2] 中村栄三ら, 2012, 表面科学 33, 681.
[3] Yachi, Y. et al., 2013, Geostand. Geoanal. Res., doi:10.1111/j.1751-908X.2013.00205.x.

←目次へ

書評

「新天文学」

ヨハネス・ケプラー 著　岸本良彦 訳
工作舎
2013年11月刊行　全688ページ　定価10,000円＋税
ISBN: 9784875024538



井田 茂[1]

ヨハネス・ケプラー(Johannes Kepler)は17世紀に活躍したドイツの天文学者だが，“Kepler”という言葉は，僕のような惑星形成理論を専門とする研究者が書く論文では，頻繁に出てくる言葉だ．Kepler orbit, Kepler frequency, Kepler time, Keplerian elementsなどなど．Kepler宇宙望遠鏡が3000個以上の系外惑星候補天体を発見しているので，系外惑星の観測研究者も Keplerという言葉を聞かない日はあまりないであろう．400年も経って，これだけ連呼される人も珍しいであろう．

本書が発表された時代(17世紀初頭)は，コペルニクスの地動説が提唱されてはいたが，それは惑星の動きを説明するひとつの説というだけであり，従来の天動説と地動説が共存していた時代だ．ケプラーは火星の天球上の位置の変動(運行)を精密なデータにより解析していき，やがてコペルニクスの地動説よりも過激な，地球も他の惑星も「楕円軌道」で太陽のまわりを公転するという結論に導かれていく．

神がなす技ならば，ものごとは美しい「真円」で記述されるというのが常識だった．当時のティコ・ブラーエなどの天動説は，真円の運動に他の真円の運動を重ねあわせていくことで，惑星の複雑な運行を説明しようとしていた．コペルニクスの地動説も真円の軌道を前提としていたので，火星の運行は説明しきれておらず，天動説も地動説もどっちもどっちであった．ニュートンが万有引力の法則を提出し，点源の重力ポテンシャルのものとでは，軌道は一般に楕円になるということが導き出されるのは，ずっと後の話である．

ケプラーは綿密にデータを解析して，楕円軌道を認める地動説が完璧に火星の運行を説明することを明らかにしていく．「楕円」というのは，地動説と同じかそれ以上に，それこそ神をも恐れぬ結論であったことであろう．ケプラーは皇帝に雇われていたのだから，そのような結論を示すことには大変な覚悟が必要であったであろう．そのためか，本書は皇帝への宣言文から始まり，そのあとも数十ページにわたる序文で決意表明が示される．

そこから先は，ひたすら，データ解析・解釈の説明が500ページにわたり続く．ケプラーの思考の軌跡である．現代の論文においては，ほぼ全てカットされる内容である．現代の論文では，著者がどのように考えていったのかの時系列は無視して，得られた結論を説明するのに最も簡潔なロジックを記述する．たいがいの場合，著者が実際に格闘したものとは全く違う道筋のロジックになる．本書が書かれた頃は，今のように一年に何本も論文を書かなければならない訳ではないので，10年を単位にするような膨大な思考の記録となり，全体で600ページを超える大著となっている．

そのケプラーが記述した太陽系だが，その形成モデルは観測データを説明するために，現在，次々と真円を重ねるような状況に陥っている．特に，多様な系外惑星系が発見されたことで，その状況はますます混沌としてきている．この状況を打開するには，シンプルに全てを統一的に説明できる「楕円軌道」のような思い切ったアイデアが必要なのかもしれない．惑星系形成モデル以外にも同じような状況にある問題はたくさんあるであろう．そのようなときに，本書を覗き(全文を詳細に読まなくてもいいと思う)，ケプラーの思考的格闘の跡をたどってみるのもいいかも知れない．

1. 東京工業大学地球生命研究所
ida@elsi.jp

←目次へ

2015年度日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ

2015年度日本惑星科学会秋季講演会実行委員長(東工大LOC) 井田　茂[1]

本年度の日本惑星科学会秋季講演会を東京工業大学地球生命研究所(ELSI)において開催致します．本講演会は日本惑星科学会の主催のもとに開催されます．未だ検討中の事項もありますが，以下は，2015年6月はじめ時点での予定です．詳細については本会ホームページ https://www.wakusei.jp/ をご参照ください．

1. 日程と会場

●日程

2015年10月14日(水)～10月16日(金)

10月15日(木)に総会と懇親会，および今年度の最優秀研究者賞受賞講演会を予定しています．

また，10月17日(土)に一般向けアウトリーチイベントを地球生命研究所主催，日本惑星科学会共催で行うことを予定しています．

●講演会場

東京工業大学大岡山キャンパス石川台地区地球生命研究所1号館(ELSI-1)

(受付，講演会場，ポスターセッションとも1階)

http://www.titech.ac.jp/maps/ookayama/

地球生命研究所1号館は2015年7月完成予定のため，この地図にはまだ載っていませんが，石川台2号館北側に隣接します．

●懇親会

東京工業大学大岡山キャンパス石川台地区地球生命研究所棟2号館(ELSI-2)1階コミュニケーションスペースにて，10月15日(木)18：00頃から行う予定です．簡単な軽食，スナックと飲み物を用意する予定です(飲み物のセレクションは実行委員長が行います)．本格的な夕食が必要な方は大岡山駅前，自由が丘などに多数の飲食店があるので，そちらでお楽しみください．

1. 東京工業大学地球生命研究所
ida@elsi.jp

2. 発表要項

●発表資格

著者に本会の会員を含むこと．

●発表形式とプログラム編成

口頭発表またはポスター発表．申し込みは，「1.ポスター希望」または「2.口頭発表希望」を選択して申し込んでもらう予定です．なお，2.については，第一著者としては1件までの申請とします．発表形式の決定(発表の採否も含む)やプログラム編成については実行委員会が最終的に決定致します．予めご了承下さい．

●口頭発表

1講演につき12分程度(質疑応答も含む)を予定しています．スクリーンを1面，液晶プロジェクターを一台利用可能です．

●ポスター発表

ポスターセッションを設けます．ポスター会場は講演会場と同じ建物になります．一人当たりのポスタースペースはA0用紙を縦張りできるサイズを予定しています．

●最優秀発表賞セッション

本講演において第一著者として発表する博士学位を有していない学生会員は，最優秀発表賞に応募できます．最優秀発表賞セッションに採択された発表者には口頭発表とポスター発表の両方を行って頂きます．別途定める今年度の要領に従ってください．詳細は本会メーリングリスト(oml)および本会ホームページ「2015年秋季講演会のお知らせ」でお知らせします．

●予稿原稿

本会ホームページ記載の指示に従ってください．

3. 参加および発表の申込み方法

本会ホームページよりお申込み下さい．事前参加申し込み，発表申し込みは，すべて本会ホームページ上で行います．これらの登録には次の(1)(2)の両方が必要になります．(1)本会の会員番号もしくは非会員登録番号，(2)本会ホームページに会員または非会員としてログインするためのパスワード．本会への新規入会登録および非会員登録も本会ホームページから行ってください．なお，非会員登録には一日以上，新規入会登録には二週間以上かかりますので，発表申込みを予定されている非会員の方は余裕を持って登録手続きを開始してください．

4. 本秋季講演会までの主なスケジュール(予定)

2015年6月22日(月)
事前参加申込・発表申込・事前支払の受付開始
2015年7月16日(木)正午
発表(予稿原稿を含む)申込，および最優秀発表賞申込の受付締切
2015年9月14日(月)正午
事前参加申込・事前支払の受付締切

5. 予稿集について

本年度も予稿集の冊子体での販売を行いません．講演会に先立って本会ホームページに予稿集のPDFファイルを用意し，ダウンロードできるようにする予定です．

6. 参加費用

費用項目		事前支払	当日支払
参加費	一般会員	3000円	4000円
	学生会員	2000円	3000円
	非 会 員	5000円	5000円
懇親会費※	一般会員	2000円	3000円
	学生会員	1500円	2000円
	非 会 員	2000円	3000円

※懇親会は簡単な軽食・スナックと飲み物を用意する予定です．

事前支払口座振込先

みずほ銀行[銀行コード0001]
大岡山支店[店番号145]
口座番号：普通2283014
口座名：惑星秋東工大　ワクセイアキトウコウダイ

申込みの詳細は，本会メーリングリスト(oml)と本会ホームページでお知らせします．

7. 交通手段・食事など

東京工業大学大岡山キャンパス正門は東急大岡山駅の目の前ですが，石川台地区は正門から徒歩で7分ほどかかるので，ご注意ください．東急池上線石川台駅からも同程度の徒歩時間で石川台地区に到着します．

http://www.titech.ac.jp/maps/

大岡山駅および石川台駅近くには多くの飲食店があります．石川台地区から大岡山駅に行く途中には弁当屋も何軒かあります．

8. 一般向けアウトリーチイベントの開催について

日時：2015年10月17日(土)
場所：東京工業大学地球生命研究所1号館(ELSI-1)
主催：地球生命研究所　共催:日本惑星科学会
内容：検討中

9. その他

(1)乳幼児を同伴され保育サービスのご利用を検討されている方は，下記までお早めにご相談ください．最寄りの保育施設などを紹介いたします．なお，保育費用の一部を学会が補助します．また，受付締切後も可能な範囲で対応いたしますので，ご連絡ください．

受付締切：2015年9月14日(月)正午
担当：井田茂 e-mail : aloc-ml@wakusei.jp

(2)このお知らせの内容は，その一部が変更される可能性があります．本会ホームページで最新の情報をご確認下さい．

←目次へ

JSPS Information

◇日本惑星科学会第110回運営委員会議事録
◇日本惑星科学会賛助会員名簿
◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

◇日本惑星科学会第110回運営委員会議事録

期　　間：2015年2月16日(月)～2月19日(木)
議題・報告事項：
　議題1．専門委員会・部会委員の承認
　報告1．会計監事信任投票結果
運営委員会委員：
　倉本 圭,
　渡邊 誠一郎，荒川 政彦，田近 英一，中村 昭子，千秋 博紀，中本 泰史，並木 則行，平田 成，
　林 祥介，井田 茂，和田 浩二，春山 純一，竹広 真一，諸田 智克，永原 裕子，橘 省吾，
　はしもと じょーじ，小久保 英一郎，荒井 朋子，佐々木 晶，生駒 大洋，小林 直樹
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e-mailにより投票

議題1．各専門委員会委員の承認をお願いしたい．
(◎の各専門委員会委員長，○の部会長，グループ長については第109回運営委員会にて承認ずみ)

1) 総務専門委員会
◎諸田 智克
平田 成，城野 信一，長沢 真樹子，奥住 聡，谷川 享行，保井 みなみ，小林 浩
行事部会
○城野 信一
中村 昭子，中島 健介，出村 裕英，木村 勇気，浦川 聖太郎，奥住 聡

2) 財務専門委員会
◎竹広 真一
佐々木 貴教，荒井 朋子，中本 泰史

3) 編集専門委員会
◎和田 浩二
三浦 均（編集幹事）
生駒 大洋，上椙 真之，岡崎 隆司，奥地 拓生，木村 勇気，小久保 英一郎，
白石 浩章，杉山 耕一朗，関口 朋彦，田中 秀和，谷川 享行，成田 憲保，
はしもと じょーじ，本田 親寿，諸田 智克，山本 聡，渡部 潤一

4）将来計画専門委員会

◎橘 省吾

荒川 政彦，田近 英一，田中 智，中本 泰史，並木 則行，諸田 智克

将来惑星探査検討グループ

○並木 則行

佐藤 毅彦，大竹 真紀子，関根 康人，亀田 真吾，小川 和律

5）対外協力専門委員会

◎中本 泰史

伊藤 洋一，小久保 英一郎，橘 省吾

6）欧文誌専門委員会

◎生駒 大洋

佐々木 晶，三浦 弥生，大竹 真紀子，大槻 圭史

7）連合連携専門委員会

◎永原 裕子

宮本 英昭，小川 佳子，田近 英一，

納田 明達(連合大会プログラム委員・正)，大宮 正士(同・副)

8）情報化専門委員長

◎平田 成

千秋 博紀，伊藤 孝士，大竹 和生，石岡 圭一，荒川 政彦，小川 和律，

石原 吉明

議題は全会一致で承認された(可23，否0)．

報告 1．会計監事信任投票結果

候補者:

松田 佳久

山岸 明彦

投票数(=不信任投票数): 0

松田 佳久: 0

山岸 明彦: 0

以上により、第13期会計監事を松田 佳久会員、山岸 明彦会員の二名に委嘱することが決定した。

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2015年6月25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)

有限会社テラパブ

株式会社ニュートンプレス

フジカット有限会社

◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

(a)場所，(b)主催者，(c)ウェブページ/連絡先など.
転記ミス，原稿作成後に変更等があるかもしれません．各自でご確認ください.

2015/07

7/4-7/10　第30回宇宙技術および科学の国際シンポジウム（ISTS）
(a)兵庫県神戸市中央区港島
(b)日本航空宇宙学会
(c)http://www.ists.or.jp/2015/

7/21-7/22　第43回可視化情報シンポジウム
(a)工学院大学新宿キャンパス，東京都新宿区西新宿
(b)可視化情報学会
(c)http://www.visualization.jp/event/detail/symp2015.html

2015/09

9/26-9/28　日本流体力学会 年会2015
(a)東京工業大学大岡山キャンパス，東京都目黒区大岡山
(b)日本流体力学会
(c)http://www2.nagare.or.jp/nenkai2015/

2015/10

10/10-10/11　可視化情報全国講演会（京都2015）
(a)京都工芸繊維大学松ヶ崎キャンパス，京都府京都市左京区松ヶ崎
(b)可視化情報学会
(c)http://www.measlab.kit.ac.jp/cf/2015/vsj2015_kyoto.html

10/14-10/16　日本惑星科学会 秋季講演会
(a)東京工業大学大岡山キャンパス，東京都目黒区大岡山
(b)日本惑星科学会
(c)https://www.wakusei.jp/meetings/fallmeeting/

2015/11

11/10-11/12　第56回高圧討論会
(a)アステールプラザ，広島県広島市中区加古町
(b)日本高圧力学会
(c)http://www.highpressure.jp/new/56forum/

編集後記

この冊子が皆さんのお手元に届く頃には，秋季講演会の参加申込・原稿受付が始まっているでしょうか．今年の秋季講演会は，できたてほやほやの東京工業大学地球生命研究所(ELSI)で開催されます．新しく建設された建物には，きれいな講演会場や，やたらにくねくねと曲がっている机が切れ目なく繋がっている前衛的な大部屋などもあるようで，今から参加するのが楽しみです．講演会の詳細については本号の井田さんの案内記事を，ELSIの様子については前号や本号の木村さんの研究会開催報告をご覧下さい．

さて，秋季講演会と言えば，最優秀発表賞です．院生さんのいる研究室では，発表賞への応募が話題にのぼるのではないでしょうか．「なぁ，発表賞どうする？」「んー，発表ネタはあるけれど，口頭とポスターどっちもやらなきゃなんでしょ？ ダルくね？」と思っているそこの貴方！ 逆です！ 口頭とポスター，両方できちゃうんです．近年は講演者の増加に伴い，口頭発表の時間が限られてきています．ですが，発表賞講演では通常の1.5倍ほどの時間がもらえます．それで足りなかったとしても，さらにポスターでしゃべり倒せます．おまけに，審査員を務める偉い先生方がこぞって聴衆になってくれるというサービスつき．このように，エントリーするだけでもメリットだらけの発表賞ですが，ウィナーになればさらにお得です．講演会会場では皆さんから祝福され，さらには本誌に「最優秀発表賞受賞論文」と銘打って論文を掲載する名誉がもらえます．ですから皆さん，発表ネタがあれば，ぜひ気負わずにエントリーしてください．なお，本号には2014年度ウィナーの松野さんの記事が掲載されていますので，ぜひご覧下さい．

最優秀発表賞は，最優秀研究者賞とともに，2002年に非会員の方から頂いた多額の寄付により創設されました．当時修士の学生だった私は，「若手研究者育成のために」と匿名で寄付をしてくださったことに感動を覚えた記憶があります．13回目を迎える今年の発表賞も盛り上げていきましょう．（三浦）

編集委員
和田 浩二 [編集長]
三浦 均 [編集幹事]
生駒 大洋，上椙 真之，岡崎 隆司，奥地 拓生，木村 勇気，小久保 英一郎，白石 浩章，杉山 耕一朗，
関口 朋彦，田中 秀和，谷川 享行，成田 憲保，はしもと じょーじ，本田 親寿，諸田 智克，山本 聡，
渡部 潤一

2015年6月25日発行

日本惑星科学会誌　遊・星・人　第24巻　第2号

定　価　一部　1,750円（送料含む）
編集人　和田 浩二（日本惑星科学会編集専門委員会委員長）
印刷所　〒501-0476 岐阜県本巣市海老A&A日本印刷株式会社
発行所　〒105-0012 東京都港区芝大門2-1-16 芝大門MFビルB1階
株式会社イーサイド登録センター内 日本惑星科学会
e-mail : staff@wakusei.jp
TEL : 03-6435-8789／FAX : 03-6435-8790
（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．