令和2年12月25日発行 年4回発行 第29巻4号 ISSN 0918-273X







# Planetary People December 2020 vol29 no





 ●特集「古今未曽有の日本の月/火星 地下世界探査 (UZUME)計画」(2)
 ●連載:あかつき,はやぶさ, 遊星百景,海外研究記

The Japanese Society for Planetary Sciences

## 日本惑星科学会誌 「遊・星・人」 投稿規定

日本惑星科学会

## 1. 投稿可能な記事

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

#### 2. 投稿資格者

日本惑星科学会会員及び編集委員会が適当と認 めた者.

#### 3. 投稿原稿及びその送付

①原則として,投稿原稿はワープロなどにより電子 的に作成されたものであること.

また, 原稿のファイル形式については「学会誌原 稿作成の手引」に従うこと.

- ②投稿に際しては、原稿を日本惑星科学会編集専門委員会委員長宛に送付すること.(連絡先は「学会誌原稿作成の手引」参照.)送付方法は、 E-mailによる送付が望ましい.但し、プリントアウトした原稿2部の郵送による送付も可とする.な お郵送された原稿は原則として返却しない.
- ③編集委員会が原稿を受領すれば、その日を受領 日として、受領した旨投稿者に通知される.

#### 4. 査読及びその後の取扱い

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

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

#### 5. 校正

校正は投稿者の責任において行う,また,校正は原 則として誤植の訂正に限る.

#### 6. 別刷り

論文の PDF ファイルを提供する.

#### 7. 著作権

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

#### 8. 倫理規定

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

#### 9. 投稿料·出版費

原則として無料.

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

# 日本惑星科学会誌 遊·星·人

# 第29巻 第4号

# 目 次

<b>卷頭言</b>	187
近赤外線二色図による小惑星スペクトル型の定量的判定	
神山 悠翔, 井上 昭雄	188
特集「古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査(UZUME)計画」	
月縦孔地下空洞の磁力探査	
清水 久芳, 春山 純一	200
小型探査プローブ搭載の複数広角カメラを用いた縦孔側壁の3次元再構成 榎田 直紘, 宮内 貴大, 石上 玄也	208
<ul> <li>一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その44</li> <li>~ΔVと三機協同観測: 2020年10月の多忙な「あかつき」~</li> <li>佐藤 毅彦, 山崎 敦</li> </ul>	218
<b>火の鳥「はやぶさ」未来編 その22 ~ SCI衝突実験とDCAM3の観測 ~</b> 門野 敏彦	222
遊星百景その20 ~ ミューゼスの海~ラブルパイル小惑星に広がる「水面」~ ~ 金丸 仁明	225
遊星人の海外研究記 その4 ~ 台湾における天文研究 ~ 松本 侑士	227
日本惑星科学会2020年秋季講演会プログラム 出村 裕英, 大竹 真紀子, 平田 成, 小川 佳子, 本田 親寿, 北里 宏平, 奥平 恭子, 嵩 由芙子	231
JSPS Information	247

Contents	
Preface N. Namiki	187
A quantitative classification of asteroid spectral types on a near-infrared color-color diagram Y. Kamiyama and A. K. Inoue	- 188
Magnetic field observations in a lunar vertical hole H. Shimizu and J. Haruyama	200
SLAM-based 3D reconstruction of lunar lavatube using multiple fisheye cameras mounted on small probe N. Enokida, T. Miyauchi, and G. Ishigami	208
Road to the first star: Venus orbiter from Japan (44) – Busy October 2020 of Akatsuki; PC2 and tri-spacecraft campaign observation T. Satoh and A. Yamazaki	- 1 <b>s -</b> 218
Phoenix "Hayabusa": A tale of the future (22)- SCI impact experiment and observation by DCAM3-T. Kadono	222
My favorite view in planetary sciences (20) – Muses Sea: "Water surface" on the rubble-pile asteroid – M. Kanamaru	225
Letter from planetary people working abroad (4) – Astronomical researches in Taiwan – Y. Matsumoto	227
<b>Program for 2020 JSPS fall meeting</b> H. Demura, M. Ohtake, N. Hirata, Y. Ogawa, C. Honda, K. Kitazato, K. Okudaira, and Y. Daket	231

## **JSPS Information**

247

# 巻 頭 言

世界がCOVID-19によって変容している.日本惑星科学会はどうだろうか?テレワークが広 がり、大学授業はオンライン講義となり、学会はリモート開催になった.これを一過性とは考え ず、人々は不可逆な変革の始まりだと感じている.感染拡大の終息後もネットの活用で地理的 な距離が克服され、研究活動も確実に影響を受けるだろう.仕事のために家族やパートナーと 離れて暮らす必要は減るし、留学せずとも海外大学の講義を受けられるようになる.外国人ポ スドクの受け入れも容易になる.性別や国籍の優位性が均されれば国際化が進み、研究の質 が向上するだろう.研究者同士の競争が激化すると同時に、研究活動の多様性が増えていくの ではないか.

日本惑星科学会は冷静に今後の世界に目を向けるべきだ.惑星探査では中国が台頭し,米 国,欧州とともにトップ3を形成している.他方で,UAEや韓国,イスラエルが宇宙開発に参加 して,多極化が進んでいる.日本はかつて米ソ,米欧につぐ「第3の宇宙開発国」を目指して奮 闘努力を続けてきたが,現状ではロシアやインドとともに第2集団にいる.アルテミス計画は多極 化を加速させるとともに,産業振興,安全保障という観点で科学に求められる価値を大きく変え ていく.世界の変容とともに惑星科学の意義すら変わっていくことを私達は認める必要がある.

世界が変わっても研究者はなかなか変わらない. 学術会議は内閣府の圧力に抵抗し,「日本 惑星科学会を壊す」と学会長が宣言しても(中本, 遊星人2019年1号巻頭言)簡単には壊れそう にない. 変わっていく世の中に,「人類の発展に貢献する知識を発見する」という目的を決して譲 らない科学者の頑固さは, それはそれで希少価値がある. 変わる世界への適応と変えない信 念の一徹さを両立させるコミュニティが生き残って行くのだろうか.

科学を広い視野で観察していれば、学問の境界領域に新しい分野が生まれるはずだ.天文 学の分野では系外惑星の観測が盛んに行われるようになって、太陽系内の惑星の観測との関 連に興味が集まっている.太陽惑星圏分野とは惑星探査において協力が必須となり、共同作業 が求められている.工学分野とは「はやぶさ」以来密接な協力関係にある.変わっていく世界に はチャンスがある.どうせこの先学会設立のメンバーたちは徐々に引退していく.今なら新しい 世界にふさわしい新しい惑星科学コミュニティが誕生できるのではないか.

並木 則行 (自然科学研究機構 国立天文台/総合研究大学院大学 物理科学研究科)

# 近赤外線二色図による小惑星スペクトル型の定量的判定

## 神山 悠翔<sup>1</sup>, 井上 昭雄<sup>1, 2</sup>

2020年2月25日受領, 査読を経て2020年8月14日受理

(要旨)小惑星はその反射スペクトルの形によって複数のタイプに分類され、組成の統計的な調査によっ て小惑星の起源や太陽系進化に関する情報が得られる.しかし、厳密なタイプ分類には分光観測が必要 であり、これまで発見されている小惑星のうちタイプが判明しているものはごく一部に過ぎない.よって、 本研究では近赤外域のJHK<sub>S</sub>バンドの測光値から簡易的かつ定量的にスペクトル型を判定する方法を提 案する.2MASSの小惑星カタログを利用して、近赤外線二色図上におけるタイプごとの分布を二次元正 規分布でモデル化し、各点における確率密度を計算することでタイプの判定と評価を行う.開発した判定 法を用いてタイプが未知あるいは不明瞭な2799件の小惑星についてタイプ判定を行い、判定法の信頼性 を多角的に検証した.

## 1. 序論

## 1.1 小惑星スペクトル分類の意義と歴史

小惑星とは、太陽の周りを公転する天体のうち、 惑星や衛星,彗星などを除いたもののことである.主 に火星と木星の間に多く分布しており、2020年1月現 在までに85万個を超える小惑星が発見されている. 小惑星の起源は、太陽系初期における惑星形成の 段階で惑星に成長しきれなかった微惑星や原始惑 星の残骸だと考えられており、その性質を調べるこ とは、太陽系形成のプロセスを理解することに繋が る.

小惑星は太陽光を反射することで輝き、その反射 スペクトルは様々な形を呈する.反射スペクトルの違 いは小惑星の表面組成の違いを反映しており、地上 で採取できる鉱物や隕石のスペクトルと対応させる ことで、炭素質や岩石質など様々な組成の小惑星が 存在することが明らかになっている.このような組成 の違いは、小惑星が誕生する際の環境の違いに起 因しており、たとえば炭素質の小惑星は分化を経験 しておらず、原始太陽系円盤の元素組成を保存して いるとされる.小惑星のスペクトル分類によってその 小惑星自体の性質や起源だけでなく、それらの統計 的な情報から、原始太陽系円盤における物質移動 や、惑星への物質供給などを理解する手掛かりが得 られる[1].

小惑星をその反射スペクトルによって分類すると いう試みは1970年代に始まったが、この分野を最初 に体系づけて確立したのはTholenによる分類[2] である. Tholenは、主成分分析という手法を用い て小惑星のスペクトルを14のタイプに分けた. 主成 分分析では、複数の観測値の線形結合のうち、デー タセットの分散を最大にするものを第1主成分とし、 第1主成分に直交するという条件のもとで分散を最 大にするものを第2主成分とする. このようにして分 散が最大となるよう構成された主成分の組は、観測 対象の多様性を最もよく反映した直交基底である と考えられる. Tholen分類では、小惑星を可視域

<sup>1.</sup>早稲田大学理工学術院先進理工学部物理学科 2.早稲田大学理工学術院総合研究所 kamiyan.quiz@toki.waseda.jp

の8つのバンドで観測したEight-Color Asteroid Survey (ECAS)をもとに主成分を構成し、それら を軸とするプロットを分析して小惑星を分類した。

Tholen分類から派生して, Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey の Phase II (SMASSII)をもとにしたBus分類[3]が考案され た. Tholen分類は測光観測に基づいた分類であっ たが, Bus分類ではより詳細な分光観測に基づいて おり, Tholen分類をさらに細分化しただけでなく, K型, L型, O型といったカテゴリーが追加されてい る. さらに, 2009年にはBus分類を近赤外域に拡張 したBus-DeMeo分類[4]が考案され, 近年広く使わ れるようになっている.

## 1.2 本研究の目的

小惑星スペクトル型を厳密に判定するには,小惑 星の分光観測が必要であり,比較的長時間の観測を 必要とする.そこで本研究では,近赤外線3バンド (JHK<sub>S</sub>バンド)による二色図を用いたより簡易的な 判定法を開発する.近赤外域では,2 µm付近に幅 広い吸収帯を持つS型やV型,1.0 µmから1.7 µm にかけて急激に反射率が上がるA型といったタイプ が容易に判別できると期待される.また,国内の西 はりま天文台などでは近赤外線3バンド同時測光が 可能であり[5],観測が短時間で済むことで天球上を 素早く移動する天体の分析が容易であるほか,小惑 星の自転による光度変化の影響を受けることなく測 光することができるという利点がある.

JHK<sub>s</sub>バンドを用いた小惑星分類は古くから行 われており、Leakeほか[6]やVeederほか[7,8]に よるものがある.本研究では1997年から2001年に かけて実施されたTwo Micron All-Sky Survey (2MASS)による豊富な測光データ[9]、および長年 蓄積されてきた多数の小惑星タイプカタログを利用 し、二色図上での分布を統計的に分析することで、 より定量的かつ信頼性の高い分類を行う.2MASS の成果を利用した研究としては[10]があり、A、C、 D、S型の小惑星が近赤外線二色図上でどのように プロットされるかを示している.この二色図を参考に して、逆にタイプが未知の小惑星のタイプ判定を行 うことが考えられるが、4タイプに限られている上、直 線的な区域分けは便宜的すぎて実用には難しい、本 研究はこの二色図の区域分けを改良し,実用的なタ イプ判定が可能な程度に信頼性を高めたいという動 機から出発している.具体的には,判定可能なスペク トル型を増やし,正規分布モデルによって数学的に タイプごとの境界を定め,判定の信頼性を定量的に 評価できるようにする.また,[10]ではタイプが既知 の小惑星について分析をするに留めているが,本研 究では[9]に記載された小惑星のうちタイプ未知のも のについてのタイプ判定も行う.

近年における類似の研究としてはPopescuほかによるMOVIS-C分類[11, 12]がある.これは VISTA Hemisphere Survey (VHS)で得られた 近赤外線4バンド(YJHK<sub>S</sub>バンド)の測光データを, Bus-Demeo分類と照らし合わせたのちに,近赤外 域のスペクトルに基づいた新たな分類を開発したものである.YJHK<sub>S</sub>バンドを同時撮像できる観測装 置は限られており,本研究の方がより簡便な手法と言える.

## 2. データの取得

## 2.1 2MASS Asteroid and Comet Survey

NASA Planetary Data Systemから[9]を取 得し, その中に含まれる2MASS小惑星カタログ (ast\_ext2mass.tab)を利用した.2MASS小惑星 カタログは40859行×63列からなる.各列には小惑 星番号,固有名,仮符号,J(1.25 $\mu$ m),H(1.65 $\mu$ m), K<sub>s</sub>(2.17 $\mu$ m)の3バンドのベガ等級値と測光誤差を はじめとして,測光の信頼性を表す様々なフラグや, 観測した小惑星の位置に関する情報などが含まれて いる.まず,カタログのフラグ情報に基づき,以下の 4つの条件に従って信頼性の高いデータのみを抜き 出した結果,40859件のデータから8468件を抽出し た.

・RELIABILITY\_FLAG: "A"のみ

- 2MASSの天体検出の信頼性を表すフラグで、"A" はprobability of source validityが90%より大 きいと推定されたものにあたる.
- ·RD\_FLG: "1", "2", "3"のいずれかのみ
   各バンドについて既定の等級値と誤差の起源を表

す読み取りフラグで、"1"~"3"が一般に品質の高い検出・測光であると説明されている。

・CC\_FLG: "0"のみ

各バンドについて近くにある別光源の光が測光に混 入した可能性を表すフラグで、"0"は測光値が既知 の別天体による悪影響を受けていないことを表す. ・PH QUAL: "A"、"B"のいずれかのみ

RD\_FLGや測光誤差などの情報から総合的に決 定される各バンドの測光品質を表すフラグで、"B" 以上は有効な検出が行われた範囲で各バンドの SN比が7より大きく、誤差が0.15510等級より小さ いことを示す。

この時点で縦軸J-H, 横軸H-K<sub>s</sub>の二色図を描く と,他の大多数の小惑星に比べて異常に赤化した小 惑星が見られた.そして,これらの赤化した小惑星 は銀河系中心方向に集中していることが分かった. 銀河系中心方向は背景の恒星密度が高く,小惑星と 重なる確率が高くなる.恒星は銀河面の星間塵によ る赤化を受けるため,これが小惑星の測光に混入し て異常に赤化したと考えられる[13].[9]の付属文書 (IV.9.b.)では赤化したデータを取り除くため,可視 光で予想される明るさが17等より明るく,小惑星の 予測位置と2MASSの光源位置の誤差が1秒角より 小さいという条件を付けている.しかし,この手法 では赤化汚染されていない多くのデータも取り除か れ,有効なデータが約3分の1しか残らない.そこで, 本研究では銀経 -40~40°を長軸, 銀緯 -20~20° を短軸とする銀河系中心方向の楕円領域で観測され たデータを取り除くこととした.結果として8468件か ら1292件が取り除かれ,約85%にあたる7176件が 残った.

## 2.2 タイプ既知の小惑星カタログ

2MASS小惑星カタログにはスペクトル型の情報 が含まれていないため、タイプ既知の小惑星カタロ グとして次の2件を取得した。

1つ目に, NASA Planetary Data Systemか らAsteroid Taxonomy[14]を取得した. これは TholenやBusなどによる8本の論文で発表され た小惑星タイプをまとめたもので, 2615個の小惑 星について記載がある. 本研究ではTHOLEN\_ CLASS[15], SMASS\_CLASS[16], BUS\_ CLASS[3], S3OS2\_CLASS\_BB[17], BUS\_ DEMEO\_CLASS[4]の5つを参照した.

2つ目に, NASA Planetary Data Systemか らSDSS-based Asteroid Taxonomy[18]を取得 した. これはSloan Digital Sky Survey (SDSS) で観測された63468件の小惑星タイプを記載してい る. ただし, SDSSは可視域の5バンドしか測光して いないためタイプは推定値であり[19], 信頼性に基 づいてそれぞれ0~100のSCOREが付けられてい る. 本研究ではSCOREが60以上の10991件を参照 した.

本研究	BUS_DEMEO	BUSおよびS3OS2	SMASS	THOLEN	SDSS
А	А	А	-	А	А
С	B, C, Cb, Cg, Cgh, Ch	B, C, Cb, Cg, Cgh, Ch	С	B, C, F, G	C, CX
D	D	D	D	D	D
S	K, L, S, Sa, Sq, Sr, Sv, Sw	K, L, Ld, S, Sa, Sk, Sl, Sq, Sr	S	S	L, LS, S, SQ
V	V, Vw	V	J, V	V	V
Х	X, Xc, Xe, Xk	X, Xc, Xe, Xk	Х	Е, М, Р, Х	X, XL
Ο	0	Ο	0	-	-
Q	Q	Q	-	Q	Q
R	R	R	-	R	-
Т	Т	Т	Т	Т	-

表1: 各文献のタイプ分類と本研究におけるタイプの対応.

タイプ	個数	割合[%]	J-H平均	J-H分散	J-H参考	H-Ks平均	H-Ks分散	H-Ks参考
А	8	0.5	0.691	0.031	0.836	0.112	0.005	0.108
С	360	22.6	0.367	0.006	0.354	0.127	0.009	0.171
D	87	5.5	0.474	0.011	0.438	0.186	0.011	0.195
S	819	51.3	0.432	0.010	0.364	0.072	0.012	0.055
V	30	1.9	0.281	0.036	0.102	0.020	0.023	-0.043
Х	265	16.6	0.381	0.004	0.372	0.141	0.008	0.168
Ο	0	0	-	-	0.453	-	-	-0.085
Q	9	0.6	0.437	0.013	0.430	0.081	0.030	0.055
R	1	0.1	0.373	-	0.400	0.082	-	0.101
Т	17	1.1	0.431	0.004	0.367	0.151	0.008	0.153

表2: タイプが既知である1596個の2MASS小惑星の個数と色の概観。

平均/分散:本研究で利用する2MASSカタログのうち§3.2で得られた1596件の小惑星のタイプ別平均値および分散。 参考:Bus-DeMeo分類における各タイプの典型的な反射スペクトル[20]と太陽の色[21]をもとに算出した参考値.

## 3. データの解析

## 3.1 複数回観測された小惑星の平均処理

§2.1で抽出した2MASSの7176件のデータに ついて、複数回観測がある小惑星の色(J-Hおよ びH-K。の値)を平均した.小惑星1つあたりの観 測回数の平均は1.63回であり、最大値は(1528) Conradaの112回であった.小惑星は時間によって 明るさが変化するため,測光誤差(σ<sub>J-H</sub>, σ<sub>H-Ks</sub>)には 色のばらつきと各バンド測光値の測光誤差を平方和 の平方根で合成した,平均処理によってデータ数は 4395件に減少した.

## 3.2 小惑星タイプカタログの編纂

2MASS小惑星カタログにはスペクトル型の情報 が無いため、まず§2.2で取得したカタログを集約し てタイプ既知の小惑星タイプカタログを編纂した.な るべく多くの小惑星タイプのデータを集めるため、複 数の異なるタイプ分類を参考としたが、その際、表1 に基づく変換対応を行った. Tholen分類などでは スペクトルが複数のタイプの性質を併せ持つ場合に 複数タイプを割り当てる(TCGやSTUなど)場合が あるが、今回それらは除外した、同じ小惑星につい て分類が重複した場合は、原則として表1で左側に ある分類を優先した.結果、13156件の小惑星のス

ペクトル型を収めた小惑星タイプカタログが完成し. §3.1で得た4395件を対応させたところ、うち1596 件がタイプ既知となった.

#### 3.3 判定タイプの決定

表2にタイプ既知となった1596件のタイプごとの 内訳と、色の概観としてJ-HとH-K。の平均値および 分散に加え、先行研究による参考値を示す.参考値 はBus-DeMeo分類による平均的な反射スペクトル [20]から、太陽の色[21]を用いて算出した、平均値と 参考値を比べると、分散の大きいV型やA型のJ-H に差が見られ、分散の小さいところでもS型のI-Hが 参考値よりやや高くなっている. 個数比をみるとC. S. X型の数が特に多く、合わせると全体の90.5% を占める. C型とX型は非常に近い色を持っており二 色図上で区別できないため、本研究ではC型および X型の近傍に位置するグループを「C/X」としてまと めて評価する.数が多いC, S, X型を基準として, D 型は色が赤く、二色図上で右上に現れることが分か る. 逆にV型はJ-HとH-Ksがともに小さく、二色図 の左下に現れる、A型は個数こそ少ないが、I-Hの値 が極めて大きく、二色図上で容易に判別できる.Q, R. T型は個数が少ない上、C. S. X型の集まる密集 地に近接しており、二色図での判別は困難である。〇 型は該当する2MASSのデータが無く、判定は不可 能である.以上を踏まえ、本研究では小惑星を近赤 外色に基づき,「A」,「C/X」,「D」,「S」,「V」の5タ イプで判定する. 参照するタイプ既知のデータはQ, R, Tの27件を除外し, 1569件となる.

## 3.4 二次元正規分布によるモデル化

小惑星のスペクトル分類がその表面組成の違いを 反映しているという考えに立つならば、各タイプに典 型的な表面組成が存在しており、その組成に従った 典型的な反射スペクトルが存在するであろう.すなわ ち二色図上において、各タイプが各々の典型的な位 置を中心として、それぞれが独立して分布するので はないかと考える.本研究では、各タイプの分布を 二次元正規分布でモデル化して各点の確率密度を 計算し、各点においてどのタイプが優位なのかを判 定する.より良いモデル化を行うため、信頼性の高い データに以下の重みを付けることで、不確かさを含 むデータの寄与を減少させた.

・タイプの参照元による重みづけ		
Asteroid Taxonomy[14]		3倍
SDSS-based Asteroid Taxonomy	[18]	
SCORE: 80以上	•••••	2倍
SDSS-based Asteroid Taxonomy	[18]	
SCORE: 60以上		1倍
・測光誤差( $\sigma_{J-H}$ , $\sigma_{H-K_s}$ )による重みづけ		
$\sigma_{ ext{J-H}}$ および $\sigma_{ ext{H-K}_{ extsf{s}}}$ がともに $0.100$ 未満	•••••	4倍
σ <sub>J-H</sub> またはσ <sub>H-Ks</sub> のどちらかが0.100以	Ŀ.	
	•••••	1倍

一般にn次元の多変量正規分布の確率密度関数 f(x)は式(1)で表される.

$$f(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} \sqrt{|\boldsymbol{\Sigma}|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu})\right) \quad (1)$$

ここでμはn次元の平均ベクトル, Σはn×nの共分 散行列である. n=2の場合を展開すると,

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left(\frac{(x_1-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - 2\rho \frac{(x_1-\mu_1)(x_2-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x_2-\mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right)\right\} (2)$$

となる. ここで $\sigma$ は標準偏差,  $\rho$ は相関係数である. x<sub>1</sub>をH-K<sub>s</sub>, x<sub>2</sub>をJ-Hとして, タイプ既知小惑星の 2MASSカタログで得た値から各タイプの平均( $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ), 不偏標準偏差( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ), 相関係数( $\rho$ )を求め, 式(2)から二色図上の各点における確率密度を計算 した.

分布の正規性の仮定を確認するために,数が多い C/X型とS型について正規確率プロットを調べた(図 1). 正規確率プロットとは,縦軸に観測値と平均値の 差を標準偏差で規格化した値を,横軸に対応する標 準正規分布の分位数をとったプロットである.結果, ±2σの範囲で直線のグラフが得られ,小惑星分布 の正規性がある程度確認できた.



図1: C/X型およびS型の小惑星における近赤外色の正規確率 プロット.

#### 3.5 区域分け・閾値の設定

各点においてどのタイプの確率密度が最も高くな るかによって二色図の区域分けを行うが、そのまま だと分散の大きいV型などが予想される領域を超 え、観測値の少ない背景全体に広がってしまう.ま た、各タイプの確率分布は独立しており、それぞれ 確率の総和は1であるため、単純に比較すると観測 頻度の少ない珍しいタイプの領域が必要以上に広く なってしまう.そこで、次の2つの追加処理を施す.

1つ目に、タイプの存在比を区域分けに反映させる ため、タイプごとに確率密度の重みづけを行う.重 みづけの係数を決めるにあたっては、本研究で使っ ているデータが実際の小惑星のタイプ個数比を反映 しているとは限らないので、既知のタイプと判定タイ プの一致率がなるべく高くなるように定める.2つ目 に、既知データの98 %が判定されるように閾値を設 定し、全てのタイプで確率密度が閾値以下であるよ うな点は分類不能(タイプU: unclassifiable)として 扱う.したがって、データ全体の2 %がタイプUとな る(ただし、§3.4の重みづけを外すと誤差の大きい データの割合が増えるのでタイプUの割合は2 %よ り多くなる).

結果として、式(3)に見える重みづけ係数と閾値を 採用した際に一致率が71.5%となり、これを採用し た.各タイプの確率密度関数を $f_{Type}$ として、二色図上 の点 $(x_1, x_2)$ におけるタイプ判定Type $(x_1, x_2)$ は式(3) に従う.

$$Type(x_1, x_2) = \begin{cases} A & (f_{max} = 2f_A) \\ C/X & (f_{max} = 27f_{C/X}) \\ D & (f_{max} = 10f_D) \\ S & (f_{max} = 18f_S) \\ V & (f_{max} = 11f_V) \\ U & (f_{max} = 15.3) \end{cases}$$
(3)

 $f_{\max}(x_1, x_2) \coloneqq \max \left\{ 2f_{\mathbb{A}}(x_1, x_2), 27f_{\mathbb{C}/\mathbb{X}}(x_1, x_2), 10f_{\mathbb{D}}(x_1, x_2), 38f_{\mathbb{S}}(x_1, x_2), 11f_{\mathbb{V}}(x_1, x_2), 15.3 \right\}$ 

## 3.6 スコアの設定

異なるタイプとの接続域においては判定の正解率

が低く, 逆に各タイプ域の中心付近では判定の正解 率が高くなると予測される. そこで, 正解率の目安と して式(4)で定義されるスコアを導入した.

 $Score(x_1, x_2) = \begin{cases} 0 & (Type(x_1, x_2) = U) \\ \frac{f_{max}}{2f_A + 27f_{C/X} + 10f_D + 38f_S + 11f_V + 15.3} & (otherwise) \end{cases}$ (4)

スコアは0から1未満の値を取り,1に近づくほどその 点(x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>)において判定されたタイプの確率密度が 支配的であることを示す.他の領域と隣接する場所 のスコアは0.5程度より小さくなる.

## 4. 結果と考察

#### 4.1 近赤外線二色図の小惑星タイプ別分布

図2に完成した二色図の区域分けを示す. 各タイ プ別に見ていくと、A型はJ-Hが特に大きく、1.0 µm から1.7 µmにかけてのスペクトルの急激な傾斜を反 映している. ただし、A型は他のタイプと比べてサン プル数が少ないため、新たなデータの追加によって



図2: 近赤外線二色図の小惑星タイプ別分布. 各タイプの色の平均値および太陽の色[21]をプロットしている. 区域の形が比較的容易に変化することが予想され る. D型は密集地の右上を占めており, 右上がりの赤 いスペクトルを反映している. S型は密集地の左側を 占めており, H-K<sub>S</sub>が小さいことが分かる. C/X型は 数の多さに比して領域が狭く見えるが, 元々平坦な スペクトルであり色の分散が小さいためだと考えら れる. V型は2 μmに見られる吸収帯がJ-HとH-K<sub>S</sub> の値を押し下げ, 図の左下に表れる. 数は少ないが 天体ごとにスペクトルのばらつきが大きいため広い 領域を占めており, 平均値はS型の領域に入ってし まっている.

Sykesほかの研究[10]と比べると、A、C/X、D、 S型の4タイプの領域はいずれもSykesほかの示した 領域をほとんど含むような形になっている. 左下には V型の領域が追加されている. また、領域の形は直 線的ではなく、自然な曲線形となっている.

図3に§3.6で設定したスコアの分布を示す.スコ アが0の点は黒く、スコアがより高くなるにつれてより 明るい白色で表示している.異なるタイプ領域との 接続域はスコアが低いため暗く、各領域の中心付近 はスコアが高いため明るくなっていることが分かる.



図3: スコアの分布.

## 4.2 正解率と測光誤差・スコアの関係

区域分けが完成したため、1569件のタイプ既知 小惑星について§3.4で施した重みづけを外した状 態でタイプ判定を行い、区域分けの信頼性を評価し た、1569件のうち、判定したタイプが既知のタイプと 一致したものは1000件であり、正解率は63.7%に留 まった、§3.4の重みづけを外したことで、§3.5で述 べた一致率71.5%からは低下している。

図4に測光誤差と正解率の関係を表したグラフを 示す.§3.4において測光誤差に基づく重みづけを 行ったが,閾値の前後で急激に正解率が変化すると いうことは無く,測光誤差の大きさにほぼ比例する 形で正解率が減少している.σ<sub>J-H</sub>+σ<sub>H-Ks</sub> < 0.05の



図4: 測光誤差と正解率の関係.

横軸に測光誤差σ<sub>J-H</sub>とσ<sub>H-Ks</sub>の和をとった積み上げヒストグ ラム. 判定タイプと既知タイプが一致した小惑星の個数と不 一致だった小惑星の個数を表す. 折れ線は一致した小惑星 の割合, すなわち各誤差階級における正解率を表し, 母数が 全体の1%に満たない階級については点線としている.





階級においては正解率86.5%となっており、十分に 測光誤差が小さいデータが得られれば、図2の区域 分けに基づいて信頼度の高いタイプ判定が行えると 言える.

図5にスコアと正解率の関係を表したグラフを示 す.スコアが0の階級はタイプUの数を表しているが, §3.4の重みづけを外したことで閾値の基準とした 2%より多くなっている.~0.4以上の階級において はスコアが大きくなるにつれて正解率が高くなってお り, §3.6での予測通り,スコアが判定タイプの信頼 性を表す尺度として機能することが分かる.

#### 4.3 タイプ未知の小惑星のタイプ判定

§3.1で得た4395件の小惑星の2MASSデータの うち, §3.2でタイプ既知となった1596件を除いた 2799件についてタイプ判定を行った.表3に結果を 示す.

表2に示したタイプ既知の場合と比べると、全体の割合ではA, D, V型が多く、C/X, S型が少ないことが分かる.分類不能であるUの割合も14.5%と高い.そこで測光誤差が小さいものに絞って割合を見ると、Uの割合は6.0%にまで下がり、各タイプの存在比も既知のものに近づいている.唯一A型のみは既知と比べて5~6倍ほど存在比が多くなっており、近赤外域で特徴的なスペクトルを持つことから可視域での調査に比べて多く検出・分類される可能性や、他タイプの混入が考えられる.

表3: タイプ未知の小惑星のタイプ判定.

タイプ	個数	割合[%]	個数*	割合*[%]
А	66	2.4	13	3.2
C/X	730	26.1	122	30.3
D	287	10.3	32	8.0
S	1191	42.55	203	50.5
V	119	4.25	8	2
U	406	14.5	24	6.0
合計	2799	100.0	402	100

\*測光誤差が小さい( $\sigma_{J-H}$ + $\sigma_{H-K_s}$  < 0.1)ものに絞った場合.

## 4.4 判定タイプの検証

本項では本研究における小惑星のタイプ判定に ついて,異なるタイプ分類法MOVIS-C分類[12]と の比較と,軌道分布およびアルベドの統計的な考察

	MOVIS-C classification										
		Ad	Bk	С	Cgx	Xt	Ds	S	KI	V	計
	А	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	3 38%	4 50%	1 13%	0 0%	8
1 t)	C/X	1	3 3%	17 18%	10 11%	7 8%	9 10%	34 37%	10 11%	2 2%	93
る て と	D	2 8%	0 0%	2 8%	0 0%	1 4%	7 29%	11 46%	0 0%	1 4%	24
F究(3	S	1	7 4%	7 4%	16 <sub>9%</sub>	2 1%	10 6%	110 <sub>64%</sub>	15 9%	5 3%	173
本研	V	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	3 14%	3 14%	16 <sup>73%</sup>	22
	U	2 4%	1 2%	4 8%	4 8%	0 0%	7 14%	21 42%	3 %	8 16%	50
				MO	VIS-C	clas	sifica	tion			
		Ad	Bk	С	Cgx	Xt	Ds	S	KI	V	計
	А	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	1 100%	0 0%	0 0%	0 0%	1
	C/X	1 3%	0 0%	9 23%	6 15%	2 5%	6 15%	9 23%	4 10%	2 5%	39
言類度	D	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	3 60%	1 20%	0 0%	1 20%	5
究(值	S	0 0%	0 0%	1	5 9%	0 0%	1	38 <sup>69%</sup>	8 15%	2 4%	55
本研	V	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	3 100%	3
	U	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

#### 図6:本研究における判定タイプとMOVIS-C分類タイプの比較比較. 各行(本研究における判定タイプ)の合計に占める割合が 大きいほどセルの色を濃くしている.

を通して多角的に検証を加える.

MOVIS-C分類は近赤外域の4バンド(YIHK。 バンド)をもとに定められたタイプ分類であり、本研 究におけるタイプ分類と対応するとは限らないが、と もにBus-DeMeo分類を参考にしていることからお おまかな傾向は同じものと期待される. [12]から取 得したMOVIS-C分類カタログに記載のある18265 件の小惑星のうち、ClassFin(最終的な分類型)が U(分類不能)でない6495件を抽出した. このうち. §3.1で得られた2MASS小惑星4395件に含まれて いるものは370件であった.この370件について、本 研究での判定タイプとMOVIS-C分類タイプの対 応を調べ、図6にまとめた<sup>1</sup>. 上段が判定した370件 全て、下段は370件のうち判定信頼度が高い103件  $(\sigma_{1-H} + \sigma_{H-K_o} < 0.15 かつスコア > 0.5) に絞った対応$ 表である. 全体的な傾向として, MOVIS-C分類に おいてもS型が約半数を占めており、本研究でA. C/X、D型と判定した小惑星の中にS型が数多く混 入している. この傾向は判定信頼度が高いグループ

<sup>1</sup>370件の中にはタイプが既知の天体も127件含まれるが、ここで は既知タイプを参照するのではなく、本研究の判定法を用いた判 定タイプを参照した. ではやや和らいでいる. S型(S, K1型に対応)とV型 (V型に対応)はMOVIS-C分類との一致率が7割を 超えており,他のタイプと比べて判定の信頼性が高 いと考えられる. C/X型(Bk, C, Cgx, Xt型に対応) はMOVIS-C分類の4タイプの大半がC/X型に属し ている反面,本研究でC/X型と判定された小惑星 にはDs, S, K1型も多く含まれてしまっている. D型 (Ds型に対応)は数が少ないためS型の混入の影響 が大きいが,信頼度の高いグループではDs型と一 致する割合が大きくなっている. A型(Ad型に対応)は 十分な議論に足るだけの数が無いが,同じく赤いスペ



図7: 各タイプ別の軌道分布.

横軸に軌道長半径をとった積み上げヒストグラム. タイプ未 知の小惑星2799件については判定タイプを参照し, 信頼 度が高い( $\sigma_{J:H}+\sigma_{H:K_S} < 0.15$ かつスコア>0.5)判定タイ プは濃い色,その他の判定タイプは薄い色で表す. タイプ既 知の小惑星1569件については既知タイプを参照し, 黒の折 れ線で表している. クトルを持つDs型が混入しやすい可能性がある.

次に、2MASSカタログ[9]に含まれる軌道要素の 情報から小惑星タイプごと(Uを除く)の軌道分布を 調べた(図7). 小惑星タイプごとの分布はDeMeoと Carryによる研究[22]が知られており、図7の既知タ イプの分布(折れ線)はこれによく従っている、すなわ ち、S型は小惑星帯の内側、C型は外側でそれぞれ 大多数を占める. D型は5.2 auのトロヤ群でほとん どを占めるが、小惑星帯にも散見される、V型は2.2 ~2.5 auのベスタ族に分布が集中しており、それら が過去の衝突によって生じた(4) Vestaの破片に由 来していることを示唆する[23]. A型はDeMeoほか の研究[24]によると小惑星帯全体にほぼ均等に分布 しており、これも既知タイプの分布と一致する、本研 究による判定タイプの分布を見ると、S型およびV型 は小惑星帯内側の2.2~2.4 auにピークを持っており 従来の研究によく一致している。C/X型は既知タイ プの分布と比べて小惑星帯内側の割合が多くなって おりS型の混入が疑われるが、S. V型に比べれば小 惑星帯外側の割合が多い. D型はトロヤ群の割合が 他タイプに比べるとやや多く見られるが、小惑星帯 内側まで多く分布しており他タイプの混入が著しい と考えられる。A型は小惑星帯全体に広く分布して おり、軌道分布の偏りから既知タイプとの差異を見つ けることはできない.

次に、赤外線サーベイ衛星のIRAS[25]、あか り[26], WISE[27-39]から得られたデータを参 照し、小惑星タイプごとのアルベド分布を調べた (図8). WISEで同一天体に複数のデータがある 場合はthermal fittingに使われた測定数(N W1~N W4)が多いものを採用した上で、あかり →WISE→IRASの優先順で採用した. §3.1で得 られた2MASS小惑星4395件のうち、アルベドの データが得られたのは3329件であった.小惑星の アルベドとスペクトル型の間には密接な関係があり. DeMeoとCarry[22]によれば各タイプの平均値は V型が0.35±0.01. S型が0.23±0.02. A型が0.20± 0.03と比較的明るく、C型が0.06±0.01、D型が0.06 ±0.01と暗い. 図8における既知タイプの分布(折れ 線)も、C/X型についてはX型を含んでいるため注意 が必要であるものの、先行研究によく従っている、本 研究で判定した判定タイプの分布を見ると、S型とV



図8: 各タイプ別のアルベド分布. 横軸にアルベドの対数をとった積み上げヒストグラム. 形式 は図7に準ずる.

型はほとんどが明るいアルベドを持っており,既知タ イプの分布とほぼ一致している.ただしアルベドが 0.1より暗いものも全体の2割程度存在しており,これ らについては他タイプの混入が疑われる.A型は既 知タイプと同様に0.3前後にピークが見られるが,0.1 以下の暗いアルベドを持つものが約4割存在し,同じ く赤いスペクトルを持つD型などの混入が考えられ る.C/X型とD型については,約半数が0.1以下の暗 いアルベドを持っており,ヒストグラムの形状も明る いタイプとは異なることが分かるが,残りの半数はS 型などが混入しているものと考えられる.

最後に観測バイアスについて述べる.可視~近赤 外域の波長では主に小惑星の太陽反射光を観測し ているため、サイズが小さい、アルベドが低い、遠方 にあるといった天体は検出されにくい傾向にある. 特に本研究では2MASSデータのうち品質の良いも のを選んでおり,近赤外域で15等前後より暗い天体 は僅かしか扱っていない.また,厳密なスペクトル型 分類に必要な分光観測では観測対象を事前に選定 しているため,観測しやすい天体が選ばれやすい傾 向がある.したがって図7,8から現実の小惑星分布 を考察する上では,本項で議論した判定法の妥当性 に加えてこれら観測バイアスの補正を検討する必要 があり,それは今後の課題である(cf.[22]).

## 5. 結論

小惑星の近赤外線二色図上での分布を二次元正 規分布でモデル化し、重みづけ等の適正な処理を 施した上でスペクトル型の区域分けを作成した.区 域分けに加えて信頼度の指標としてスコアを設定す ることで、近赤外線JHK<sub>S</sub>バンドの測光結果から定 量的に小惑星のスペクトル型を判定することが可能 となった.また、スペクトル型が未知・不明瞭である 2799件の小惑星について判定を行い、多角的な検 証を通して、S、V型では7~8割程度、C/X、D型で は4~5割程度の正解率で判定が可能であることを 確認した.A型については従来予想される数より多 く判定される傾向にあり、近赤外域での更なる調査 が必要である.

本研究で提案した判定法は従来のスペクトル分 類に比べて、必要とする測光値が少ないため短時間 の観測で済むほか、V型などの近赤外域で特徴的 なスペクトルをもつタイプの判定に適するといった利 点がある.C型とX型の判別については今後の課題 だが、本判定法は単独で用いるだけでなく、アルベ ドや軌道要素などの情報を合わせることでより有意 義なものになると考える。今後より多くの小惑星に ついてスペクトル分類がなされることで、太陽系形 成の理解や将来的な宇宙開発の一助となることが 期待される。

## 謝辞

本論文の執筆にあたり, 査読者の臼井文彦氏には 多くの有益なご意見をいただきました. この場を借り

#### 改めて厚く御礼申し上げます.

This publication makes use of data products from the Two Micron All Sky Survey, which is a joint project of the University of Massachusetts and the Infrared Processing and Analysis Center/ California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration and the National Science Foundation. This research is based on observations with AKARI, a JAXA project with the participation of ESA. This publication makes use of data products from the Wide-field Infrared Survey Explorer, which is a joint project of the University of California, Los Angeles, and the Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration. This publication also makes use of data products from NEOWISE, which is a project of the Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, funded by the Planetary Science Division of the National Aeronautics and Space Administration.

## 参考文献

- [1] 廣井孝弘, 杉田精司, 2010, 遊星人 19, 36.
- [2] Tholen, D. J., 1984, Ph.D. thesis, Univ. of Arizona.
- [3] Bus, S. J. and Binzel, R. P., 2002, Icarus 158, 146.
- [4] DeMeo, F. E. et al., 2009, Icarus 202, 160.
- [5] Takahashi, J. et al., 2014, PASJ 66, 53.
- [6] Leake, M. et al., 1978, Meteoritics 13, 101.
- [7] Veeder, G. J. et al., 1982, Astron. J. 87, 834.
- [8] Veeder, G. J. et al., 1983, Astron. J. 88, 1060.
- [9] Sykes, M. V. et al., 2010, NASA PDS, EAR-A-10054/I0055-5-2MASS-V2.0.
- [10] Sykes, M. V. et al., 2000, Icarus 146, 161.
- [11] Popescu, M. et al., 2016, Astron. Astrophys. 591, A115.
- [12] Popescu, M. et al., 2018, Astron. Astrophys. 617, A12.
- [13] Sykes, M. V. et al., 2002, in Proc. Asteroids,

Comets, Meteors - ACM 2002, ed. B. Warmbein, ESA SP-500 (Noordwijk, Netherlands: ESA), 481.

- [14] Neese, C., 2010, NASA PDS, EAR-A-5-DDR-TAXONOMY-V6.0.
- [15] Tholen, D. J., 1989, in Asteroids II, ed. R. P. Binzel et al. (Tucson: University of Arizona Press), 1139.
- [16] Xu, S. et al., 1995, Icarus 115, 1.
- [17] Lazzaro, D. et al., 2004, Icarus 172, 179.
- [18] Hasselmann, P. H. et al., 2012, NASA PDS, EAR-A-I0035-5-SDSSTAX-V1.1.
- [19] Carvano, J. M. et al., 2010, Astron. Astrophys. 510, A43.
- [20] Slivan, S. M., Last modified 2019 Dec 14, http:// smass.mit.edu/busdemeoclass.html.
- [21] Casagrande, L. et al., 2012, Astrophys. J. 761, 16.
- [22] DeMeo, F. E. and Carry, B., 2013, Icarus 226, 723.
- [23] Binzel, R. P. and Xu, S., 1993, Science 260, 186.
- [24] DeMeo, F. E. et al., 2019, Icarus 322, 13.
- [25] Tedesco, E. F. et al., 2002, Astron. J. 123, 1056.
- [26] Usui, F. et al., 2011, PASJ 63, 1117.
- [27] Grav, T. et al., 2011, Astrophys. J. 742, 40.
- [28] Grav, T. et al., 2012, Astrophys. J. 744, 197.
- [29] Grav, T. et al., 2012, Astrophys. J. 759, 49.
- [30] Mainzer, A. et al., 2011, Astrophys. J. 743, 156.
- [31] Mainzer, A. et al., 2012, Astrophys. J. 760, L12.
- [32] Mainzer, A. et al., 2014, Astrophys. J. 784, 110.
- [33] Masiero, J. R. et al., 2011, Astrophys. J. 741, 68.
- [34] Masiero, J. R. et al., 2012, Astrophys. J. 759, L8.
- [35] Masiero, J. R. et al., 2014, Astrophys. J. 791, 121.
- [36] Masiero, J. R. et al., 2017, Astron. J. 154, 168.
- [37] Masiero, J. R. et al., 2018, Astron. J. 156, 60.
- [38] Nugent, C. R. et al., 2015, Astrophys. J. 814, 117.
- [39] Nugent, C. R. et al., 2016, Astron. J. 152, 63.

## 付録

A. 区域分け・スコアの詳細

本研究で作成した区域分けおよびスコアの詳細は 以下のリンクに公開している。

https://drive.google.com/file/d/1gt4dZ8i8scE-KwcLpVzAk-8ADm7GJlfT/view?usp=sharing

B. タイプ判定した小惑星リスト

本研究でタイプ判定した2799件の小惑星リストは 以下のリンクに公開している.分類不能としたものや 判定信頼度が低いものも含んでいる.

https://drive.google.com/file/d/1QfQCk5-bgH\_ DUtWNrIiniFyZ4lTmyFxB/view?usp=sharing

## 特集「古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査(UZUME)計画」 月縦孔地下空洞の磁力探査

## 清水 久芳<sup>1</sup>, 春山 純一<sup>2</sup>

2020年6月29日受領, 査読を経て2020年9月19日受理

(要旨) 天体の古磁場とその変遷は, 天体進化の情報をもたらす. 月においては, 月表面で採取された岩 石から1~100 µT におよぶ強い磁場が過去に存在したと推定されること[1], および, 月表面付近の磁化 による磁気異常[2]には月磁場が逆転を繰り返していた証拠がみられること[3]から, 月の核がかつてダイ ナモとして機能していたことが示唆される. 一方で, 月ダイナモを駆動するエネルギー源の変遷やダイナモ が停止した時期等, 月科学における本質的な疑問が残されている. 本論文では, 月縦孔周辺と内部にお ける磁場観測が, 古月磁場の時間変化に関する新たな情報をもたらす可能性があることを紹介し, 月や 火星の縦孔を通して地下空洞を調査する「月火星の縦孔・地下空洞直接探査(UZUME)計画」に期待する ことを述べる.

## 1. 古月磁場の変遷と 月ダイナモの進化

過去の地球磁場の情報は、岩石サンプルに基づい た古地磁気学的測定(古地磁気強度や古地磁気方 位の,室内実験による推定)や,地殻磁化に起因する 磁場(磁気異常)の観測から得ることができる.これ は、火成岩や堆積岩が形成された時の地磁気が、そ れぞれ熱残留磁化と堆積残留磁化として岩石に記 録されることによる.これらの磁化は、岩石形成時 以降の地磁気や周辺環境の影響により変化する可 能性があるものの、古地磁気学的測定では様々な測 定法や消磁法、検定を適用することにより、残留磁 化獲得時に周辺に存在した磁場の方位や強度を高 い信頼度で推定することができる.一方、顕著な磁 気異常は火山や海洋底にみられるが、これらはそれ ぞれ火山活動の把握や、海洋底の年代推定とこれに 基づくプレート運動の復元等に用いられており、磁 気異常から過去の地磁気変化を議論することは稀 である.この理由として,前述の周辺環境の影響に より,磁気異常から地殻の磁化が推定できたとして もそのままでは過去の磁場を復元したことにはなら ないことに加えて,地球上では比較的容易に古地磁 気測定のための岩石サンプルを採取することが可能 であることがあげられる.これに対し,月から持ち帰 られた岩石サンプルは極めて限られているため,磁 場観測から求めた月の磁気異常は過去の月磁場に 関する貴重な情報源として用いられており[3],今後 も磁気異常から得られる情報を活用して古月磁場の 推定に努める必要がある.

月表面における磁気異常の原因には諸説あった. 一つは隕石等の衝突に起因する衝撃残留磁化であ る.このモデル[4]では,衝突によって月から放出さ れたプラズマが,月表面に沿って惑星間空間磁場を 移流し,磁力線を衝突の対蹠点に集中させることに よる磁場の強化,および,衝突で生じた地震波が対 蹠点で集中することによる地殻圧力の急激な上昇と いう,衝突に起因する2つの現象が同時に発生する ことにより地殻が磁化を獲得するとしている.しか

 <sup>1.</sup>東京大学地震研究所
 2.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

shimizu@eri.u-tokyo.ac.jp

し、セレーネ(かぐや)やルナ・プロスペクタの磁場観 測によって明らかにされた孤立した磁気異常は、月 磁場が核におけるダイナモ作用によって作られてい たことを強く示唆する。たとえば、磁気異常から推定 された磁化が示す仮想月磁気極(磁化の原因となっ た磁場が、月中心におかれた双極子磁場であると仮 定して求めた磁極)は、年代によりクラスター化する こと、および、クラスター内には、正・逆両方向の月磁 場の痕跡が認められることが報告されている[3]. こ れらは、回転系における均質ダイナモの特徴である (1)時間平均として、ダイナモ領域外の磁場は自転角 速度方向を向く月心双極子(月中心においた双極子) により近似できる、(2) 生成される磁場は逆転を繰 り返す(ことがある),の2点に加えて、(3)月の極(自 転軸)は何回か移動した、と考えると全てが説明でき る、したがって、古月磁場は月内部でダイナモ作用に より生成されていたと考えてよく、地球と同様に、月 の地殻磁化から月の進化にアプローチすることが可 能である.

アポロ計画により取得された月岩石サンプルの古 月磁気学的な計測・研究によると、4.2 Ga から 3.2 Ga には月表面に1 µT 以上の磁場が存在したと推 定されている[1.5-7]. このうち. 3.8 Ga 付近では. 月表面において 100 µT におよぶ磁場が存在して いた可能性も示唆されている. また, 2.5 Ga から 1 Ga においても 1 µT 程度の磁場が存在したとい う報告もある[8]. 月ダイナモの停止時期については 未だ議論の余地が残されているが、月磁場はおよ そ 30 億年という長期にわたって内部で生成され続 けていた可能性が高い.また、月の核の半径が300 km 程度であり[9]. 双極子磁場が卓越していたと仮 定すると、月表面における1 uT の磁場は核表面に おける約 200 uTの磁場に相当する. これは、地球 の核表面において推定されている現在の磁場強度 と同程度であり、地球の核と比較して約0.06%の体 積しかもたない小さいダイナモが生成する磁場とし ては、非常に強いといえる、

月ダイナモの駆動には、月形成から数億年間については冷却に伴う熱エネルギーの放出(熱対流)が重要であるが、小さい核は急速に冷やされるため、10億年以上にわたって熱対流で磁場を維持し続けることは、おそらく不可能である[10,11].月ダイナモ

のライフタイムを説明するためには、内核が成長(固 化)する際に多量の軽元素を含む液体が内核境界に 残され、これが外核内を上昇することによる重力エ ネルギーの解放(組成対流)[10]や、月の歳差運動に よるマントルから核への運動エネルギーの伝達[11] 等. 熱エネルギー以外のエネルギーで外核内の流れ を駆動する必要がある、月の歳差運動をエネルギー 源とするダイナモが生じるのは、月の軌道要素進化 の見積もりから、約 2.7 Ga 以前であると考えられて いる[11]. このメカニズムで生成される磁場の時空間 的特徴は熱対流や組成対流によって生成される磁 場とは大きく異なるため[12],ある年代においてこ の磁場生成メカニズムが支配的であったとすれば、 その年代に磁化を獲得した岩石やこれに伴う磁気 異常から、ダイナモのエネルギー源が判別できると 期待される.

前述のように、月地殻には月磁場の進化過程が記 録されており、月ダイナモが磁場を生成していた期間 や、月の極の位置が移動した可能性があることを議 論できた. 今後. 月表層付近の磁化から連続的な月 磁場時間変化に関する情報が得られれば、月の進化 に関する理解をさらに深めることができると期待さ れる、以下に述べるように、「月火星の縦孔・地下空洞 直接探査(UZUME)計画」で月縦孔周囲や内部に おいて新たな磁場観測を行うことにより、破砕や礫 化の過去を持つ月岩石のサンプルや時間的解像度 の粗い磁気異常からは得られないような、月磁場の 変遷に関する新たな情報が得られる可能性がある. ただし、地殻が磁化を獲得した年代は、クレーター 年代によって推定されるその周辺の月表面の年代と 異なる可能性があるため、これに留意して議論を進 める必要がある.

## 2. 月表面における磁場と 月地殻の磁化

高度数10~100 km を飛行する月周回衛星磁場デー タから求められた月表面の磁気異常[2]は、アポロ計 画によって実施された月表面における磁場観測の結 果[13]と大きく異なることが知られている。例えば、 アポロ 12 号と14号の着陸地点における磁場の強さ は、それぞれ 40 nT, 40 ~ 100 nT 程度[13]である ことが報告されているが、衛星観測により求められ た月表面における磁気異常の強さはそれぞれ 3.8 nT, 0.9 nT であり[2], 月表面における観測値とくらべ て顕著に小さい.これは、月表面で観測された磁場 は、表層付近の、短波長成分を含む磁化構造に強く 影響を受けるのに対し、衛星飛行高度で測定された 磁場から求められた磁気異常は、より大きい空間ス ケール(飛行高度よりも大きい空間スケール)を持つ 磁化を反映するからである.すなわち、アポロ12,14 号着陸点近傍地下浅部には、局所的な磁化構造が 存在すると推察される.

では、局所的に強い磁気異常を発生させる磁化 構造はどのようなものであろうか. アポロ 16号ミッ ションでは、宇宙飛行士はローバーを駆って広範囲 の探査を行ったが、月面磁場測定も着陸点周り距離 7 km に渡る範囲において行われ、その結果として、 磁場強度は 110~330 nTと月表面における磁場と しては強く、また、磁場勾配も大きいことが報告され ている[13]. この地点の磁気異常は、たとえば火成 活動により生じた厚さ 1000 m. 磁化の強さ(周辺の 磁化強度とのコントラスト) 0.6 A/mの, 水平方向片 側に延びた磁化層("端"をもつ磁化層)が、月面より 深さ 1 m の位置に存在するというモデルで大局的 に説明できる[14]. ここで、磁化層の"端"の存在が 重要となる. つまり, 水平方向に無限に広がる層で近 似して考えると、一様に磁化した層ではその外部に 磁場を作らないが,磁化に端(磁化のコントラスト)が あり、磁化構造が一様でなくなることにより磁化層 外部に磁場が作られ、この端の付近において強い磁 気異常や磁場勾配が得られるのである.

次に、月地殻の磁化強度について考える.人工衛 星観測により求められた局所的で強い磁気異常を 説明するためには(磁化の空間的な広がりや磁化領 域までの深さにも依存するが)平均として0.3 A/m 程度の磁化が必要であり、また、ライナーガンマの非 常に強い磁気異常を発生させるには、0.42~1.2 A/m の磁化が必要であると見積もられている[3].一方、 アポロ計画によって得られた月岩石の磁化の測定値 は10<sup>-5</sup>~10<sup>-2</sup> A/m 程度[15] であり、これは磁気 異常から推定された磁化の強さと比べて弱い.この 違いの理由は未だ不明であるが、採取された月岩石 は、ごく表層の採取地点近傍の局所的な磁化を代表 している可能性があり、また、これらには衝撃による 磁化や消磁の影響が残存することも否定できない. したがって、表面そのものではない位置における、衝 撃による影響を受けていない岩石の磁化をなんらか の方法で測定・推定できれば、上記の問題に一定の 結論を与えることができると期待される.

## 3. 月縦孔地下空洞における磁場探査

セレーネ以来の観測により発見されている月縦孔 は,溶岩チューブ等の地下空洞に開いた水平,鉛直 共に数10 m スケールの孔であり[16],縦孔側壁の 観察により,表層付近が層構造をなしている可能性 も示唆されている[17].これらの層が,異なる年代に 噴出した溶岩により形成された層であるとすると,異 なった年代の月磁場の痕跡を,深さによって変化す る磁化として残している可能性がある.また,縦孔 壁は磁化した溶岩層の端となり,縦孔周辺や内部に おいて顕著な磁気異常をつくることが期待される.

地球や月,火星の磁気異常分布は,極軌道周回衛 星を用いた磁場観測等。磁場を面的に観測すること により求められている[2,18]. 月表面においても面的 な観測から磁化の情報を得ることが望ましいが、移 動が困難である地球以外の天体表面において,面的 な観測を行うことは現実的ではないであろう. しか し、限られた観測であっても、月表面における測線 を工夫することにより、なんらかの磁化情報を得るこ とができると期待される. さらに,縦孔の場合には, 縦孔壁に沿った深さ方向の磁場プロファイルを観測 することも可能である、これは、隕石衝突等による衝 撃の影響を受けていない溶岩層の磁化による磁場 を観測可能であること、および、(月面における水平 方向の局所的な測線に沿った磁場観測では得るこ とができない)月磁場の時間変化に関する情報をも たらす可能性があることの2点において、特に重要で ある.したがって、縦孔の周囲や内部における磁場 観測により、月の過去の磁場に関する新たな情報が 得られると期待される.

UZUME計画に向けて縦孔探査の方法について 検討が進められているが,月着陸機や観測機器を 搭載したプローブやローバーを用いた縦孔探査の過 程において,(1)縦孔付近をローバーが移動する際



図1: MHH(図中の●)とその周辺における磁気異常分布. 左から, 磁場の北向き, 東向き, 鉛直上向き成分を示している. 等値線の間隔は1 nT. 実線と破線は磁場成分の値がそれぞれ正および負であることを示す.

の磁場連続観測.(2)プローブの縦孔侵入後.観測 機器が縦孔底部まで降下する際の連続的な磁場観 測、および、(3) 観測機器が縦孔底部に到達した後 のその場における磁場観測.の3つの観測は実現で きる可能性があると考えられる.この論文では、(1) として縦孔外部を一周する測線上での磁場観測。 (2) として縦孔側壁に沿った深さ方向の測線上での 磁場観測.(3)として縦孔外部と底部のある点にお ける磁場観測を想定して議論を進める。磁場観測を 用いた地殻磁化とその空間分布の推定可能性に関 する議論は、より体系的にパラメータを変化させた モデリングによる調査や、逆問題による磁化構造の 復元可能性の考察に基づくことが望ましい. しかし、 ここではそのような研究の第一ステップとして、仮定 したモデル磁化分布が、分解能 0.01 nT, 確度 1 nT 程度のベクトル磁力計を用いた観測により検出でき るか否かという点から議論を行う.

ここから具体的な例として、マリウス丘地域の縦 孔[16](Marius Hills Hall, 以下MHH と略す)を 考える. MHH は 14.2 N, 303.3 E に位置する直 径50 m, 深さ 40~50 m の縦孔であり[19,20], この 付近では図1に示すような磁気異常分布が推定され ている[2]. MHH の位置で推定されている磁場強 度は約 4 nT であるが, 前述のように, 表層付近に 存在する局所的な磁化により, これより強い可能性 がある.

MHH 周辺と内部における上記 (1)~(3) の観測

を想定し、単純化した磁化モデルを用いて磁場の フォワードモデリングを行った[21].本論文では、 MHH を直径 50 m、深さ 40 m の、鉛直方向に中 心軸をもつ円筒状の空洞と考え、月表面と縦孔底面 は水平であると仮定した.一方で、MHHでは縦孔 底部から水平方向に地下空洞(溶岩チューブ)が存在 することが Lunar Radar Sounder (LRS) [22]や 重力場観測[23]により示唆されている.縦孔底に横 方向に広がる地下空洞は、縦孔周辺や縦孔壁に見ら れる溶岩層の磁化を議論する上で本質的な存在で あるが、ここでは問題を簡単化するために無視する. したがって、この論文では観測磁場に影響を与える 地殻磁化構造として、水平方向に無限に広がる厚さ 40 m の磁化層に、これを貫く円筒状の空洞が存在 するモデルを考える.

まず,最も単純な場合として,縦孔周辺領域の磁 化が一様であるモデルについて考える.これは,定 常とみなせる磁場中で磁化層が作られた場合を想 定したモデルである.このモデルの磁化方位を伏角 26.8度,偏角0度と仮定した.この方位は,月ダイナ モによって作られる磁場が月心軸双極子磁場である と仮定した際に,MHHの緯度において期待される 磁場方位である.比較のために,磁化の伏角が50 度の場合についてもモデル計算を行った.磁化強度 は,アポロサンプルの磁化を参照し1×10<sup>-3</sup> A/m と 仮定したが,仮定した磁化強度と磁場は比例関係に あるため,磁化強度が異なる場合についても計算結



図2: 月表面の縦孔周辺および内部における磁場成分の方位依存性. 左図は縦孔(白い部分)とその周辺の平面図である. 右図は磁化強度 1×10<sup>-3</sup> A/m, 偏角0度, 伏角26.8度(太線)または50.0度(細線)の一様な地殻磁化モデルによる磁場成分を示しており, B<sub>x</sub>, B<sub>y</sub>, B<sub>z</sub> は それぞれ北向き, 東向き, 鉛直下向き成分である. 実線は月表面から高度 0.5 m, 縦孔中心軸から 30 mの位置(左図の実線の円, 縦孔 の縁から 5 mの位置)における磁場, 破線は縦孔底部から0.5 m の高さにおいて, 縦孔中心軸から 20 mの位置(左図の破線の円, 縦孔 の側面から 5 mの位置)の磁場を表す.

果を適宜定数倍することにより議論できる.また,こ のモデルに対しては,(1)に相当する縦孔外部を一 周する測線による観測と,(3)の縦孔外部と底部に おける観測を想定した.

図2に、月表面から高度 0.5 m、縦孔中心軸から 30 m(縦孔の縁から 5 m)の円周に沿った測線にお ける磁場分布(実線)と、縦孔底面から0.5 m 上部、 縦孔中心から 20 m(縦孔の縁から内側に 5 m)の円 周に沿った測線における磁場分布(破線)を示す.図 2左図に示されているように、(x,y,z)座標は地磁気 の慣習に則って、それぞれ北向き、東向き、および、 鉛直下向きを表す.また、太線と細線はそれぞれ、伏 角が26.8度と50度の場合である.Bx 成分とBz 成分 は、北からの方位角(θ)に対して同位相の変化を示 し, Bv 成分はこれらとは位相が 90 度ずれている. 従って, 鉛直成分と水平成分の位相の比較から磁化 の偏角の方位が推定できる.また,磁化の伏角と磁 場成分の振幅の対応が、水平成分(伏角が大きい方 が大きい)と鉛直成分(伏角が大きい方が小さい)で 異なることを用いて,縦孔周辺を一周する観測から伏 角に関する情報も得ることができる、ここで、磁場成 分の確度が1nT 程度であるとすると、1×10<sup>-3</sup> A/m 以上の磁化強度であればシグナルの検出は可能で あるが、これより1桁以上小さい磁化の場合には、シ グナルを検出することが困難であり、想定した磁場 観測から磁化を推定することはできない.この他.

縦孔周辺の観測から偏角が求められていれば,(3) で想定した観測により求められる縦孔外部と底部付 近の1点における磁場成分の差(図中の実線と破線 の差)から、磁化強度の推定値を(1)の観測とは独立 に得ることが可能となる.また,底部における観測位 置によって磁化強度への感度が異なることを考慮し て,最適な観測地点を決定することも可能である.

次に,縦孔周辺領域で伏角と偏角はそれぞれ一様 であるが,磁化強度が深さ方向に変化している場合 について考える.これは,火成活動によって流出し た溶岩層がその年代の月磁場強度に対応する磁化 を獲得した場合を想定したモデルである.ここでは, 厚さ5 m の磁化強度が異なる層が8層重なっている 場合について考える.ただし,月磁場強度の短期的 な変化は明らかではないので,磁化強度分布は最大 10倍程度の違いがあると仮定して適当に与えた.深 さ方向の磁化分布を明らかにすることが月磁場時間 変化の情報を得ることの手がかりとなるので,ここで は観測方法として,(2)の月縦孔側壁付近の深さ方 向の測線で観測することを想定した.

図3に,縦孔側壁から1 m 離れた3地点(左図の A, B, C)における磁場ベクトルの深さ方向のプロ ファイルを示す. それぞれの地点において異なった 変化をすることが確認できるが,縦孔壁に沿って深 さ方向に 2×10<sup>3</sup> A/m 程度の磁化の差があれば, 1 nT 程度の確度の磁場成分観測により磁化強度分



図3: 層ごとに磁化強度が異なるモデルに対する, 縦孔側面から1mの地点(左図のA, B, C)における磁場3成分の深さ方向のプロファイル. 磁化の伏角を26.8度, 偏角を0度とした. 実線は *B<sub>x</sub>*(北向き), 破線は *B<sub>y</sub>*(東向き), 点線は*B<sub>z</sub>*(鉛直下向き)成分を表す. M は各層で仮 定した磁化強度を表し, 単位は 10<sup>-3</sup> A/m である.

布に関する情報を得ることができることがわかる. 最後に,磁化方位が深さによって異なる場合につい て考える.まず,月表面から 40 m の厚さの層が, その内部で等しい厚さの2層構造をしており,両層で 磁化の強さ(1×10<sup>3</sup>A/m)と伏角(26.8度)は等しい が,偏角は上層で0度,下層で45度と,層により偏 角が45度異なるモデルを考える.(これは,何らか の要因で磁場方位が急激に45度変化した場合に 対応するが,磁場方位を変化させる要因については 深入りしないことにする.)ここでも観測方法として, (2)の月縦孔側壁付近の深さ方向の測線で観測する ことを想定する.

図4に、仮定した磁化モデルに対する地点A、B、C (図3左図参照)における磁場の深さ方向のプロファ イルを示す.参考のため、偏角が層内部で一様な場 合(上下層ともに磁化の偏角は0度)の結果も示した (細線).与えた磁化強度では、 $B_x$ , $B_z$ 成分の両モデ ル間の差は約0.3 nT、また、 $B_y$ 成分の差は1 nT 程度である.この観測から数十度程度の偏角の差を 検出するためには、ここで想定したモデルの磁化強 度より5倍程度以上(5×10<sup>3</sup> A/m)強い磁化が必要 がある.また、比較のため、上層と下層で磁化方位が 逆向きの場合、つまり、層が形成される途中で月磁 場逆転が発生した場合についての計算結果を図5に 示す.この場合は、どの地点のプロファイルでも符号 が変わる磁場成分が存在し、最大-最小振幅も5 nT 程度であるため、ここで仮定した磁化強度で検出は 十分可能である。

## 4. 克服すべき課題

前章では縦孔周辺と内部における磁場観測によ る磁化情報の検出可能性を示したが、これらはあく まで理想的な磁化モデルと観測条件を想定した場 合に対する結果である.しかし実際の観測環境は単 純ではなく,複雑な状況が磁場観測値に多大な影響 を与える.

観測値への影響が大きい要素として,縦孔側壁 の形状があげられる. 側壁の凹凸が存在することは 磁化が複雑な空間分布をすることと等価であり,こ の影響を正しく評価しなければ,信頼性の高い磁化 の見積りはできない.また,移動体を用いた磁場観 測値には磁場の時間変化と空間分布の両者が含ま れており,なんらかの方法でこれらを分離する必要 がある.さらに,実際に磁場観測値を解析する際に は,磁力計を搭載した移動体や,磁力計の周辺に設 置された他機器による磁気ノイズの影響を除去する 必要もある.

磁場から磁化を見積もることにも問題が内在す る. 観測された磁場から磁化を求める逆問題には一 意性がないため,磁場以外の情報を用いて条件を課 して推定する必要がある.



図4: 上層と下層で磁化の偏角が異なるモデルに対する,縦孔側面から1mの地点(図3左図のA, B, C)における磁場3成分の深さ方向のプロファイル、実線は B<sub>x</sub>(北向き),破線は B<sub>y</sub>(東向き),点線はB<sub>z</sub>(鉛直下向き)成分を表す.磁化の伏角は両層ともに26.8度,磁化強度は1×10<sup>-3</sup> A/mを仮定した. D は各層で仮定した偏角を表し、単位は度である.



図5: 上層と下層で磁化が逆方向を向いているモデルに対する、縦孔側面から1mの地点(図3左図のA, B, C)における磁場3成分の深さ 方向のプロファイル(太線). 実線は B<sub>x</sub>(北向き), 破線は B<sub>y</sub>(東向き), 点線はB<sub>z</sub>(鉛直下向き)成分を表す. 上層の磁化の伏角は26.8度, 偏角は0度, 磁化強度は両層共に1×10<sup>-3</sup> A/m を仮定した. P は磁場の極性を表し, N がノーマル(正磁極, 磁場が北向き), Rがリバー ス(逆磁極, 磁場が南向き)を表す. 参考のとして磁化が伏角26.8度, 偏角0度, 磁化強度1×10<sup>-3</sup> A/mで一様のモデルに対する磁場成 分も示した(細線).

磁化が求められたとしても,これには岩石形成時 に獲得した磁化に加え,その後に岩石が獲得した2 次的な磁化も含まれる.さらに,岩石の磁化は,岩石 の組成と磁場獲得時の環境に依存し,周辺磁場と 岩石磁化の関係も複雑であるという問題もある.

このように、縦孔とその周辺での磁場観測に基づ

いた古月磁場の議論には様々な困難が伴うが,将来 の探査で古月磁場強度等の情報が得られた場合, それら岩石が形成された年代周辺の磁場の大まか な傾向としてとらえられるであろうことに留意して,よ り有意義な議論や解釈をするために,事前の研究準 備を十分に行う必要がある. 月縦孔地下空洞の磁力探査/清水,春山

## 5. UZUME 計画への期待

月のような小型の天体でどうして磁場が形成され たのか.その詳細の解明は、一般の惑星・衛星の磁 場生成、そして消失の理解を深めるであろう.天体 の固有磁場は、宇宙放射線から天体を遮蔽すること で生命の発現・進化・絶滅などにも大きく関わる要因 の一つであり、これまでにもまして一層の理解が求め られている.

月磁場観測による磁化の推定と、それに基づいた 古月磁場情報の抽出には、たしかに困難が伴う.し かし、月表面における磁場観測は、磁化を通して過 去の天体におけるダイナモ形成や内部進化に関わる 新たな情報をもたらすことができる有望な観測であ るため、是非とも達成すべきものである.

今世紀になって発見された月の縦孔においては強 い磁気異常が期待され、また、1地点において月磁 場の変遷に関する情報を得られる可能性があるた め, 月進化を議論するための情報が得られる観測地 点として最適な地点の一つであるといえる.縦孔や その下に広がる地下空間は、月面での基地建設候補 地でもあり、今後繰り返し探査が行われ、更には人 が長期滞在するミッションも恒常的になされるように なると考えられる.従って、将来的には、溶岩チュー ブ内のフレッシュな岩体や縦孔壁の各層の岩体が, サンプルとして数多くもたらされることが期待され る. 持ち帰られたサンプルの古地磁気計測結果と縦 孔における磁化の比較により、古月磁場変化に関す るより確実な情報が得られ、月の過去の磁場の生成 と衰退の歴史の解明が飛躍的に進むことも期待され る.

現在検討が進められているUZUME 計画では, たとえば初号機で縦孔形状の詳細と磁場環境の調 査を行い,この結果をふまえて,成果を最適化する 測線や観測方法,解析方法を決定し,その後の探査 において移動体を用いた磁場観測を実施する,とい うように,長期的な戦略をもってこの難題に挑戦して いくことが可能であり,また,求められよう.

#### Cosmochimica Acta 60, 1205.

- [2] Tsunakawa, H. et al., 2015, J. Geophys. Res. Planets 120, 1160.
- [3] Takahashi, F. et al., 2014, Nature Geoscience 7, 409.
- [4] Hood, L. L., 1987, Geophys. Res. Lett. 14, 844.
- [5] Garrick-Bethell, I. et al., 2008, Science 203, 356.
- [6] Shea, E. K. et al., 2012, Science 335, 453.
- [7] Suavet, C. et al., 2013, PNAS 110, 8453.
- [8] Tikoo, S. M. et al., 2017, Science Adv. 3, e1700207.
- [9] Shimizu, H. et al., 2013, Icarus 222, 32.
- [10] Laneuville, M. et al., 2014, Earth Planet. Sci. Lett., 401, 251.
- [11] Dwyer, C. A. et al., 2011, Nature 479, 212.
- [12] Lin, Y. et al., 2016, Physics of Fluids 28, 066601.
- [13] Dyal, P. et al., 1974, Rev. Geophys. Space Phys. 12, 568.
- [14] Strangway, D. W. et al., 1973, Nature 246, 112.
- [15] Fuller, M. and Cisowski, S. M., 1987, in Geomagnetism vol. 2 (ed. Jacobs, J. A.), 307.
- [16] Haruyama, J. et al., 2009, Geophys. Res. Lett. 36, L21206.
- [17] Robinson, M. S. et al., 2012, Planetary and Space Science 69, 18.
- [18] Morschhauser, A. et al., 2014, J. Geophys. Res. Planets 119, 1162.
- [19] Haruyama, J. et al., 2012, Moon (ed. V. Badescu), 139.
- [20] Haruyama, J. et al., 2016, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan 14, Pk\_147.
- [21] 清水久芳, 2019, 第63回宇宙科学技術連合講演 会予稿集, 3C06.
- [22] Kaku, T. et al., 2017, Geophys. Res. Lett. 44, 10155.
- [23] Chappaz, L. et al., 2017, Geophys. Res. Lett. 43, 105.10.1002/2016GL071588.

## 参考文献

[1] Runcorn, S. K., 1996, Geochimica

# 特集「古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査(UZUME)計画」 小型探査プローブ搭載の複数広角カメラを用いた 縦孔側壁の3次元再構成

## 榎田 直紘<sup>1</sup>, 宮内 貴大<sup>1</sup>, 石上 玄也<sup>1</sup>

2020年6月30日受領, 査読を経て2020年10月29日受理

(要旨)本論文では、月縦孔降下中の探査プローブが撮像した複数の時系列画像を用いて、月縦孔側 壁形状を3次元再構成することを目的とする。3次元再構成では、Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)の技術を援用し、探査プローブの自由落下運動条件をSLAMの各処理過程に組 み込むことによって、カメラの回転に頑強なSLAMへと改良した。提案SLAMのシミュレーション検証 において、3次元再構成の精度向上を確認した。さらに、探査プローブ搭載カメラの性能の違いによる 3次元再構成への影響の検証も実施し、本研究で得られた検証結果から、ミッションシナリオと探査プ ローブの運動要件、カメラ性能に関する議論を行った。

## 1. はじめに

月面探査において、縦孔およびそこからつなが る地下空洞の探査が注目を集めている.2009 年 に、日本の月周回衛星かぐやに搭載された地形カメ ラの画像データによって月のMarius Hills Hole (MHH) に通常のクレータとは異なる直径,深さ共 に50 m の縦孔が発見された.また、2009 年に打ち 上げられた米国の月周回探査機によるカメラ観測に よって、その縦孔の底には水平方向に数10 m 以上 の空間が広がっていることが確認され、地下空洞の 存在が期待された.また2017 年には、JAXA がか ぐや搭載の電波レーダ、月レーダサウンダーで取得し たデータを解析し、月の火山地域の地下数10 m か ら数100 m の深さに、複数の空洞の存在を確認し た.その中の1 つは縦孔から数10 km 続く未崩 壊の地下空洞があることを報告している[1].

このように月の縦孔探査が注目を集めているの は、縦孔探査には多くの価値があるためである. 探 査によって縦孔の壁に見られる層序を取得すること で月の地層の状態を知ることができる.また,縦孔 からつながる地下空洞は,月面と異なり隕石によって 破壊されていないため,月に磁場があった証拠や水 のような揮発性物質が見つかる可能性があるなど, 様々な科学的課題の解決が期待できるとされてい る.加えて,地下空洞は微隕石の衝突や強い放射線 などの,月面の厳しい環境から機器や人を守り,温 度が比較的安定しているなどの利点から,有人基地 建設に最適と言われている[2].

月火星の縦孔・地下空洞直接探査(UZUME)計 画では、本格的探査の前に縦孔側壁の3次元再構 成を行うミッションが想定されている[3,4].3次元 再構成とは、2次元平面に投影された複数の画像情 報から、対象物体の3次元構造を取得することであ る.縦孔を3次元再構成することで、理学的には縦 孔の壁に見られる層序を知ることができ、また、工学 的にはその後の探査の際にどの壁面から降下するこ とが好ましいか、探査経路の検討に活用されること が期待される.このように縦孔探査において3次元 再構成のミッションを達成することは、探査全体に 大きな影響を与える.

縦孔側壁再構成のミッションシナリオとして,小型

<sup>1.</sup>慶應義塾大学 taka0427@keio.jp



図1: 小型プローブ.

探査プローブを縦孔内に投下して側壁を撮像すると ともに、同画像を着陸機経由で地上局へ送信し、地 上局にて同データをもとに3次元構成するシナリオ が検討されている[4].本論文において想定する小 型探査プローブを図1に示す.総重量1kg程度、カ プセル両端に広角カメラを搭載し、金蒸着バイザー で保護されており、外装はMLIによる断熱とし、 搭載機器は一部宇宙実証済みのものを積極的に活 用している.なお、この小型プローブは、NASA/ JPL が検討しているMoon Diver 計画[5]におけ るAxel ローバ[6]への搭載を想定したものである. 同ローバへの搭載寸法の制約、プローブ展開方法な らびにミッション要求などから、小型プローブの形状 ならびにカメラ配置が決定されている.

本論文では、この小型プローブに搭載された 2 つの広角カメラを用いた縦孔の3 次元再構成に ついて、ロボット工学分野において確立している Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)を援用し、縦孔側壁の3 次元再構成シナ リオに特化した改良を行うとともに、その手法のシ ミュレーション検証、ミッションシナリオについて検 討する.

## SLAM 手法概要と 従来手法の検証

## 2.1 SLAM 概要

SLAM を用いた3次元再構成では,連続画像を 対象とした再構成において局所的にバンドル調整を 行って最適化を行う.バンドル調整とは,一方の画像 の対応点を位置関係を用いて,もう一方の画像へ投 影した際に生じる再投影誤差の総和が小さくなるよ うに,相対的位置関係と物体の3次元位置を最適化 することをいう[7,8]. SLAM では、1 タイムステッ プ前のカメラ姿勢に基づいて推定した現在のカメラ 姿勢を最適化することで、リアルタイムに自己位置推 定と地図生成を可能にする. SLAM は以下の処理に よって自己位置推定と地図生成を同時に行っている.

- Initialization:2 つの画像間の対応点から相 対的な位置関係と初期マップを生成する.
- 2. Tracking:画像上での特徴点を追跡し、入力フレームのカメラ位置と姿勢を推定する.
- 3. Mapping:位置関係と点群をバンドル調整に よって最適化し、点群の生成・更新を行う.
- Loop Closing: 周回経路を検出し、閉じること で蓄積誤差を削減する.

レーザ測距やRGB-D カメラのような深度測定方 式は、重量やサイズ、消費電力、宇宙環境での未実 証などの点において小型プローブへの搭載が困難で あり、また、より広範囲の画像情報を取得することを 主眼として、本研究では複数の魚眼カメラを用いる こととした.さらに、従来のダイレクトSLAM(LSD-SLAM など)ではなく、Urban らによって提案され た複数の魚眼カメラ対応のMultiCol-SLAM を援 用する[9]. MultiCol-SLAM は、特徴点ベースで 基準となっているORB-SLAM[10,11] を複数台の 魚眼カメラに使用できるように拡張したものである. もととなっているORB-SLAM は重度の乱れに対 して頑強であるため、落下運動においても3 次元再 構成が可能であること、またオープンソースのため、 これをもとに改良できることがメリットである.

## 2.2 SLAM の予備検証

本研究においてSLAM を改良するにあたって, 実際の縦孔内形状の真値が未観測であるため,縦 孔の3 次元形状を模したランダムな表面凹凸を持つ 中空円筒をCG ソフトウェア3ds max を用いて作 成した.さらにCG 空間内に魚眼カメラを2 台搭載 した小型プローブを作成し中空円筒内を自由落下さ せ,そのカメラ映像を任意のフレームレートで出力 し,プローブ自由落下時の連続画像を獲得した.こ れら画像をもとにMultiCol-SLAM を用いて3 次 元再構成を行った.本節では,従来のMultiColSLAM を用いた際の課題を明確にし、次節においてSLAM の改良を行う.

## (1) 前提条件

CG ソフトウェアにより作成した縦孔は,鉛直方向 の深さが約100 m,入り口付近の直径が約50 mの 円筒形状を想定しており,アスペクト比1:2 で作成し た(図2).縦孔内がどのようなテクスチャになってい るかは不明のため,層序はあるがはっきりとした特 徴のない画像を基本のテクスチャとした.

プローブの落下運動は自由落下,かつ空気抵抗が 微小で無視できるため,本体の角速度一定,鉛直方 向に等加速度運動,水平方向に等速運動という運 動法則に従う.月における重力加速度は地球の6分 の1であるため,100mの落下には11.06秒かかる.

プローブ搭載カメラは視野角180 度とし, プロー ブ両端にそれぞれ1 つずつ設置した. カメラの最大 フレームレートを20 fps と想定し, 縦孔開口部から の落下の場合, 縦孔底部までの到達の間に, 220 枚 の画像が作成されるよう設定し, またカメラ画素数 ははやぶさ2 搭載のカメラを参考に800 px とした. CG 空間内にチェッカーボードを作成し, 魚眼カメ ラの一般的なモデル[12]に基づいてカメラキャリブ レーションも実施した. 画像中心と平均ピクセル誤 差を表1 に示す.

本研究では、運動速度とフレームレートの差異に よって発生するモーションブラーを除いている.これ は、モーションブラーによって3次元再構成が一切 できなくなると、他の要素の影響の検証が困難にな るためである.また、プローブの落下方法はプローブ 長手方向の並進運動のみの場合と、並進運動に加 えカメラの中心方向を軸として姿勢安定のスピン回 転をする場合を想定する.回転に関しては、鉛直方 向を軸として角速度ω = 60°/sとした.なお、プ ローブを長手方向に落下させる理由として、プローブ の2台のカメラのうち1台を常に縦孔開口部に向け ることにより、縦孔開口部と月面上空との境界部分 においてSLAM処理に必要な特徴点ならびに明確 な特徴量が検出されると期待されるためである.

## (2) SLAM 検証:並進運動の場合

SLAM の初期化において、カメラフレーム間に

発生する視差の調整が結果に影響を及ぼすことが ある. 視差角の閾値を1.0°, 2.0°, 3.0° と変更して SLAM を行った. 代表として閾値1.0°の結果を 図3 に示す。 以降のグラフも含め、 リセットを含む SLAM によるトラッキング開始点をグラフの原点と している。またプローブの移動量については、カメラ フレームごとにトラッキングできた相対的な移動量を Frame position として無次元量でプロットしてい る. 実移動量への変換に必要なスケールファクタに ついては今回は同定せず、本研究では、各種条件に おいて特徴点の継続的なトラッキングが可能であっ たかどうかを検証するのみとする. 閾値を1.0° に設 定した場合,初期化で1つの点を生成する際,2視 点からのベクトルがなす角が1.0°を上回った場合 のみ初期マップに登録される。3次元の再構成結果 で見えている側面は、図2 と同様の面である、回転 が無い場合。3次元再構成によって視差に関係なく おおよそ縦孔の外形の再現ができていた.

問題点として、z 方向について、100 フレーム以前 では、自由落下に相当する放物線形状の自由落下軌 跡が確認されるが、それ以降は直線状となっている。 この軌跡は等速で落下していることと同義であり、 実際のプローブの運動とは一致しない、さらに、水平 方向にも初期段階では直線あるいは放物線の位置 推移を示しているが,特にy 方向については放物線 形状を示し、等加速度運動をしていることとなり、実 際の運動とは一致しない. これに対する1 つの要因 として、小型プローブの2 つが180°正対させて配置 したことが、SLAM の計算に対して不適当であった ためである. SLAM 計算時に三角関数を用いるた め,180°の入力があった場合,数学的にゼロ除算が 発生しSLAM の計算が停止してしまうことが確認 された、よって、ゼロ除算を避けるため、実際のSLAM 計算時には、2つのカメラの相対角度を180°に限りな く近い値として設定した. つまり. CG 空間内ではカ メラ相対角度が180°であるのに対し、SLAM 計算 時ではこの角度を180°に限りなく近い値としている ため、経路と縦孔の湾曲が生じていると考えられる.

また,カメラキャリブレーションの影響も大きい. 表1にまとめたように,画像中心が50pxほど離れ ている.このため鉛直方向に落下しているにもかか わらず,水平方向にも小さい加速度がかかっている

表1: キャリブレーション結果.

Parameters	Value
$x_c$	442.49 px
$y_c$	377.30 px
$error_{calib}$	2.59 px



図2: 縦孔CG 画像.

と誤推定したと考えられる.

#### (3) SLAM 検証:並進回転運動の場合

同様にして、初期化における視差の閾値を1.0°, 2.0°, 3.0°と変更して、プローブが並進回転運動 をする際のSLAM を行った.代表として視差閾値 が1.0°の結果を図4 に示す.なお、図4の原点は、 前述のとおりトラッキング開始点を原点としているた め、図3の原点とは一致していない.回転が加わった 場合、精度が著しく下がったことが確認できる.

視差が1.0°の場合,図4のように本来の経路から 大きく逸脱し,その間一切回転しない経路を生成す ることが起きた.これは視差1.0°の場合に多く発生 し、2.0°,3.0°ではほとんど発生しなかった.

これより視差の設定が回転の推定と関わっている と推測することができる. 視差を小さく設定した場 合, 画像上であまり動いていない点も初期マップに 追加される. 視差が小さい点とは, カメラ位置から 遠方に位置する点であり, この点はプローブから常 に観測できる点となるため, 位置推定に失敗すると 正しい3次元再構成が困難になる. また視差に関係 なく, プローブの経路推定が開始できるカメラフレー





図4: 回転:改良前SLAM (視差閾値1.0°).

ム数が遅いことがある. これは初期化でマップを生成したとしても、Trackingで正しい姿勢を推定できずにリセットを繰り返すためである. 以上より、初期化の精度とともに、回転でも正しく姿勢を推定できるTracking に改良する必要があると言える.

## 2.3 SLAM 手法改良の要点

上記の検証結果より、改善すべき点としては、以 下のものがある.まず第1 に回転への対応である. これには初期化とTracking の改良が必要になる. Tracking可能な初期化を早い段階で作成すること と、回転がある場合でも安定してTracking できる ようにすることが、再構成の成功と失敗を決める.

また従来のSLAM ではLoop Closing, すなわ ち同じ場所を通過する際にループが構成され, その 情報をもとに最適化を行う技法があるが, 本研究で は, プローブが鉛直に落下するのみの運動であるた め, この技法を適用できない. よって, 再構成ができ たうえで, 経路と点群を本来の運動法則に合った形 にするため, Loop Closing に代わる全体最適化手 法を考案すべきであると考える.

## 3. 縦孔降下プローブに特化した SLAM 手法と検証

## 3.1 改良SLAM

予備実験で判明した課題を解決するため, SLAM 手法の改良を行う. プローブ落下は,1度の 自由落下というSLAM にとって特殊なケースになる ため,その運動に特化したSLAM へと変更する.回 転の対応のために初期化の改善と運動モデルの変 更を行い,全体最適化のためにスムージングと運動 法則の適応を行う.

本研究ではプローブ落下実験に特化したSLAM を作成するため、以下の4 ステップの改良を行う.

#### (1) 初期化の改善

本研究では繰り返し計算による初期化アルゴリズ ムを追加し,下記のステップに基づいて,画像ペアに おける一致度を比較して優秀なペアを使用する.

- 回転量推定:画像やプローブ搭載の慣性センサの値から、あらかじめおおよそのプローブの姿勢角度・回転量を推定する。
- ノイズ付加:最適な値を計算するため、回転量と 並進移動量を少しずつ変更し、相対的位置関係 とする.
- 3. 初期マップ生成:相対的位置関係を使って初期 マップの生成を行う.
- 繰り返し計算による最適化:回転量と並進移動 量に与えるノイズを変更し1から3を繰り返し 計算.再構成できた点群の数が最も大きいもの を初期化の結果とする.

## (2) 運動モデルの変更

Tracking において失敗しやすい回転量の推定 を,連続画像や慣性センサの値から推測された一定 値を用いて行うことで,前回の値に依存しない推定 を可能にする.以下Tracking の流れである.

1. 運動モデル固定:1 ステップ前の計算において Trackingに成功した場合,あらかじめ推測さ れた運動モデルによってカメラ姿勢を推定する.

- 対応点の探索:前回観測された点群を,推定された姿勢に基づいて現在のフレーム画像に投影し、その付近で対応点を探索する.
- 最適化:カメラ姿勢を対応点に基づいて MotiononlyBundle Adjustment (BA) で 最適化する.
- ノイズ付加:回転量にノイズを付加し、1から3 を繰り返し計算により最適化.最も精度が高い ものをカメラ姿勢とする.

Motion-only BA とは点を固定した状態でカメ ラ姿勢のみをバンドル調整で最適化することであ る.本研究ではその調整時に慣性センサの誤差分の 幅を与えて繰り返し計算させることで,前回の状態 に依存することなく真値付近での最適解の探索を可 能にし,現在の姿勢推定を可能にする.

## (3) スムージング

Tracking 内の局所最適化によってブレを持つ 経路を, 球面線形補間と最小二乗法により滑らかに し, その変化量に合わせてマップを修正する. 視点 が1 点の場合, カメラの姿勢を修正した分だけ周囲 のマップも移動すれば良い. しかし複数視点になる と1 つのマップポイントが複数の視点から見られる ことがあり, 多くの視点から見られた点ほど大きく動 いてしまう.

これを解決するため, 複数フレームにTracking されたマップポイントについては, それらフレームの 修正量の平均によって更新を行う.1 つの点につい て,以下の処理を行う.

- フレームを記憶:SLAM が実行されている間, 点をTracking したフレームを記憶する.
- 平均修正量を算出:点をTracking した全フレームの,修正量の平均を球面線形補間によって算出する.
- マップの更新:平均修正量を点の座標にかける ことでマップを更新する.これを全ての点に対し て繰り返すことで、マップの更新を行う.

#### (4) 運動法則の適応

物体の落下軌跡が実際の運動法則に従うように 修正し、本研究では、z軸を鉛直方向とし、鉛直方 向には等加速度運動、水平方向には等速運動をする ようにカメラ位置を変化させ、その変化量に合わせ てマップを修正する.

## 3.2 改良SLAM による シミュレーション検証結果

本節では改良したSLAM 手法を用いて縦孔の3 次元再構成を行う.まず,前節の予備実験で用いた CG 映像を用いて3 次元再構成を行い,改良の評価 を行う.

予備実験と同様のCG 画像を用いて,改良SLAM による3次元再構成を行った.予備実験において,す でに並進は3次元再構成が行うことができたため, ここでは改善が顕著に見られた回転について評価を 行う.図5に各改良ステップの効果を図示する.図5 からも,大きく広がってしまっていた縦孔底部の点群 が,運動法則の適応によって円筒に近い形に修正さ れていることがわかる.また,図6に各フレーム間で Tracking に成功した対応点の数であるScore of Tracking の推移を図示する.同図より改良SLAM によりTracking 数が向上していることが分かる.

一方で、経路のスムージングと運動法則の適応に よって推定経路が改善するのは当然であるといえ る.したがって、経路の修正によって位置が更新さ れたマップ形状を比較することでスムージングと運 動法則の適応の効果を評価する.図5 中段より、ス ムージングによって縦孔のv 正方向への曲がりが解 消され、外側へ拡散していた点群が集約された分布 へと改善されたことがわかる。以上より、初期化と Tracking である程度の3 次元再構成ができてい れば、全体最適手法であるスムージングと運動法則 の適応は一定の効果があるといえる. なお、CG 画 像の多面体形状とSLAM から得られる点群の位置 関係から3次元再構成の精度を定量評価すべきで あるが、多面体形状と点群との位置合わせにおいて も繰り返し計算が発生してしまい、各手法における 正当な評価ができない. よって今後は適切な評価指 標の導入も必要となる.

## 4. 実ミッションを想定した検証

#### 4.1 カメラや運動の影響の検証

SLAM による3 次元再構成に対して、プローブ 自体の運動やカメラの性能、環境が要因となって精 度が低下することが考えられる.本研究では、プロー ブの初速、角速度、縦孔壁面のテクスチャ、カメラフ レームレート、カメラ画像ノイズを変更し、SLAM の 検証を行った.このうち、本論文では、特に3 次元再 構成への影響が大きかった要因であるプローブ角速 度とカメラフレームレートについて述べる.またそれ ぞれの要因の影響を検証するため、全体最適化は行 わずに3 次元再構成のみを実施する.これは全体最 適化により経路が修正され、それぞれの要因による 影響が見えなくなってしまうためである.

#### (1) 角速度による影響

角速度を変更して、SLAM の精度への影響を検 証した.角速度は $60^{\circ}$ /s、 $120^{\circ}$ /s、 $180^{\circ}$ /s の3 パ ターンで行ったところ、結果として、 $\omega = 180^{\circ}$ /s で は初期化ができず、Tracking も開始しなかった. 図7 には、 $60^{\circ}$ /s、 $120^{\circ}$ /s、のみの結果を示す.同図 より角速度が大きくなるにつれて、Tracking してい る特徴点の個数が少なくなることが確認された.

角速度が大きくなるにつれ、1 フレームレートあた りのカメラ画像が大きく動くため、キャリブレーショ ンや再構成における誤差の影響が顕著に現れる. 角速度が60°/s、120°/s、180°/s のとき、フレーム レートが20 fpsのため、毎フレームごとにそれぞれ 3.0°, 6.0°, 9.0° ずつ回転している.また、初期化で は推定した一定の回転量からそれぞれの軸方向に 2°分の幅を与えて最適化を行っている.よって、最 適化計算のための2°という幅が、各角速度に対して 異なった割合となってしまい、結果として最適化計算 が十分ではなく、大きな角度変化に対応できていな いと推測することができる.120°/sや180°/s のよう な角速度が大きい場合に、初期化での最適化の計 算回数を増やすことで初期化の精度向上ができる可 能性がある.



図5: 改良後SLAM による3 次元再構成(上段:3 次元再構成,下段:推定経路).



## (2) フレームレートによる影響

宇宙空間で使用されるカメラはフレームレートが 一般的に低い.例えばはやぶさ2 で使用された分離 カメラは5 fps である.よって、ここでは20 fps を実 現できない場合を想定し、プローブの垂直落下にお いて姿勢回転(60°/s) がある場合で、10 fps と5 fps で検証を行った.その結果、図8 に示すように、フ レームレートが下がるほど3 次元再構成が困難で あった.フレームレートが小さいことは画像間の対応 点の低下を招き、理論上最も再構成が困難になる条 件といえる.これに加えて、3 次元再構成が困難にな る原因として、カメラキャリブレーションによるピクセ ルの誤差の影響が考えられる.姿勢回転が加わるこ とで、キャリブレーションでの画像中心と実際の中 心との位置関係に変化が生まれ、1 タイムステップ あたりの点群運動の推定が困難になる可能性があ る.よって、カメラキャリブレーションによって画像中 心がイメージ上の中央に来るような、低歪のレンズを 搭載したカメラを使用することが、3 次元再構成の 精度を上げると推測される.

## 4.2 全体最適化を含めたSLAM 適応性の 検証

前述の検証によって判明した3次元再構成の精 度を悪化させる要因を、全体最適化を含めて再度 3次元再構成し、本研究において改良したSLAM の適用性を検証する.SLAMの処理において、 Trackingの繰り返し回数を増やし、さらに解の探 索範囲を広げる調整を実施し、前述の再構成不可能 であった、角速度180°/s、フレームレート20 fpsの ケースと、角速度60°/s、フレームレート5 fpsでの 再構成を実施した.また対応点が少ないため、まず は初期化を完了させるため初期化における視差の閾 値を下げ、点の数を増やす処理を追加した.



図7: 異なる角速度でのSLAM (上段:点群と経路,中段:位置推 移:下段:トラッキング数).

## (1) 角速度に対する全体最適化による改善

図9(a) より, SLAMの設定を変更する前では一切 マップが生成できなかったが, 220 フレームのうちお よそ100 フレームはTracking ができている. 探索 範囲の拡大が3 次元再構成を可能にしたことが分 かる. しかしながら同図(a) 中段より, 初期化付近で 経路が大きく歪み, 位置推定が正しく行えていない. 回転の作用が大きくなると並進の推定が正しく行え なくなっていると考えられる. 運動を一切考慮せず に探索範囲を拡大すると、本来の姿勢ではなくても 良い一致度が出ることがあることも考えられ, 実際 の運動を考慮して探索範囲を拡大することが重要で あると考えられる.

## (2) フレームレートに対する全体最適化による 改善

図9(b) より,対応点の数は少ないが,Tracking Lostを起こすことなく3次元再構成を行うことがで



図8: 異なるfps でのSLAM (上段:点群と経路,中段:位置推移: 下段:トラッキング数).

きている.これは、Trackingの解の探索範囲を広 げたためである.フレームレートが下がると、画像自 体の対応点が少なくなるため、画像間での対応点も 少なくなっている.しかし、その推移は安定している ことがわかる.このことは、本研究で行った改良が 低フレームレートのカメラに対応できることを示して いる.フレームレートが高いほど対応点が多くなるた め、再構成の点群の密度が上がりTracking もしや すいが、対応点を原理上Tracking できる範囲のフ レームレートであれば、計算の試行回数の増加によ る探索範囲の拡大によって3次元再構成が可能で あるといえる.このことから本研究で行った改良は、 フレームレートに対して一定の適応性を有することが 確認された.

## 4.3 ミッションシナリオでの検討事項

前述において得られた各要因の影響をもとに,本 研究において提案する改良SLAM を用いたミッ ションシナリオでの検討事項を議論する.

215

## (1) 角速度について

プローブの角速度が小さいほど3次元再構成の 精度は高くなるため、プローブ放出時には角速度は 極力与えないほうが好ましいと言える.一方で、改良 SLAMにより、ある程度の角速度であれば3次元再 構成が可能となっている.本研究の手法を探索範囲 を広げて行うことで、角速度が大きい場合でも精度 の良い3次元再構成を実現できる可能性がある.

プローブへ角速度を与える必要がある場合,モー ションブラーの影響も考慮する必要がある。モー ションブラーの大きさによる影響の違いは定量的 に検証できていないが,一般的に考えてモーショ ンブラーが大きくなるほど特徴点が少なくなり, Tracking が困難になると予測される。モーション ブラーの影響検証はさらに深める必要があると考え る.

## (2) カメラ性能について

自由落下においてフレームレートが小さくなること は、時系列画像間でのプローブの落下速度が大きく なることと同義である.フレーム間の変位が大きくな ると、対応点の数が下がり、物体が回転する場合、 フレームレートが下がることは角速度が上がること と等しいため、さらに3次元再構成を困難にする. Tracking や初期化での探索範囲を広げることで、 あるレベルまでの精度を出すことはできるが、対応点 が少ないことは3次元再構成において致命的な要素 となる.よって、可能な限り高いフレームレートのカメ ラを用いることが好ましい.

## 4.4 今後の課題:アルゴリズムおよび精度評価

一般的に、SLAMにおける3次元再構成自体は Trackingした特徴点に依存するため、縦孔の模様 にほとんど変化が無い場合や、縦孔内の明るさが特 徴点を得るには不十分な場合は、再構成が困難に なるという課題がある.よって今後の課題として、カ メラキャリブレーションの影響による経路湾曲を修 正すべく、キャリブレーション手法の改良、あるいは カメラ自体の設定変更などが挙げられる.また、カ メラの回転成分のみを最適化する手法[13]を取り 入れたL-infinity SLAM[14]も近年発表されてい



#### 図9: 全体最適化によるSLAM (上段:点群と経路,中段:位置推 移:下段:トラッキング数).

る.同手法は、カメラ回転にロバストかつBundle Adjustment が不要なSLAM であり、同手法が 適用可能かを今後検討していく.さらに、SLAM自 体の精度評価においても、再構成された3 次元点 群データと真値との比較についても検討が必要であ る.前述のとおり、真値との比較において繰り返し計 算が発生してしまうことを解決すべく、より解像度の 高いCG生成ならびにMultiCol-SLAM の処理時 間向上が必要である.また、推定されたプローブの 運動経路に関しても精度評価が必要となる.

## 5. まとめ

本研究では、従来SLAM における初期化の改善 と運動モデルの変更、ならびに球面線形補間を用 いたスムージングを実装することによって、プローブ 回転動作条件下でのSLAM においてもTracking Lost が発生することなく、3 次元再構成が可能で あることを示した.この改良によって、3 次元再構 成の結果に致命的な影響を及ぼす要素、すなわちプ

217

TOPへ↑

ローブの回転角速度やカメラのフレームレートなどを 定量的に特定することが可能になった.

実ミッションを想定したシミュレーション検証で は、プローブの鉛直軸周りの角速度が60°/s、カ メラフレームレート5 fps の条件下においても、 Tracking Lost を生じることなく、3 次元構成が可 能であることを示した.今後は、フレームレートや画 素数といったカメラ性能によっても再構成に用いる ことができる情報量が変わるため、理学的要求とカ メラ性能ならびに3 次元再構成精度とのトレードオ フ検討、さらには、地上の縦孔を使用した実地実験 など、実ミッションに向けての改良と検証を行うこと が必要となる.

## 謝辞

本論文の執筆ならびに修正にあたっては,国立研 究開発法人産業技術総合研究所 有隅仁博士に多 大なるご指摘とご助力を頂きました.この場を借りて 深く御礼申し上げます.

## 参考文献

- Kaku, T. et al., 2017, Geophys. Res. Lett. 44, 10155.
- [2] Haruyama, J. et al., 2012, Moon (ed. V. Badescu), 139.
- [3] 春山純一他, 2019, 第 63 回宇宙科学技術連合講 演会, 3C01.
- [4] 石上玄也他, 2019, 第 63 回宇宙科学技術連合講 演会, 3C09.
- [5] Kerber, L. et al., 2019, 50th Lunar and Planetary Science Conference, No.1163.
- [6] Nesnas, I. et al., 2012, Journal of Field Robotics 29, 663.
- [7] Hartley, R. and Zisserman, A., 2003, Multiple view geometry in computer vision, Cambridge University Press.
- [8] Caruso, D. et al., 2008, International Journal of Computer Vision 80, 189.
- [9] Urban, S. and Hinz, S., 2016, arXiv:1610.07336.
- [10] Mur-Artal, R. et al., 2015, IEEE Transactions on

Robotics 31, 1147.

- [11] Mur-Artal, R. et al., 2017, IEEE Transactions on Robotics 33, 1255.
- [12] Scaramuzza, D. et al., 2006, Proc. of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 5695.
- [13] Chatterjee, A. and Govindu, V. M., 2013, Proc. of the 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, 521.
- [14] Bustos, Á. P. et al, 2019, Proc. of the 2019 International Conference on Robotics and Automation, 2385.

218

# ー番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その44 ~ΔVと三機協同観測: 2020年10月の多忙な 「あかつき」~

## 佐藤 毅彦<sup>1,2</sup>,山﨑 敦<sup>1</sup>

(要旨) 2020年10月は、あかつきが金星の周回軌道に入ってから間もなく5年という時期でしたが、特筆す べきイベントのあった「多忙な一か月」でもありました.ひとつは、探査機にとって4年半ぶりの「軌道微修 正運用」であり、もうひとつは「日本の宇宙機3機による金星協同観測」という、日本の宇宙科学史上でも初の イベントへの参加です.その二つについて、運用の当事者目線からドキュメンタリ風にお伝えしています.

## 1. 「超長時間日陰」を避けよ!

あかつきは金星の赤道面近くを西回りに,約11地 球日をかけて一周回する軌道をとっています.長楕円 軌道の長半径は約37万kmで,周回軌道上でときど き金星がつくる影「日陰」を通過することになります. 長期の軌道計算を行ったところ,2022年2月11日より も先に「超長時間日陰(半影を含む)」が頻繁に起こる ことが分かりました.

「あかつき」搭載のバッテリーはそもそも、最長90 分の日陰を安全に過ごすことを想定したものです. そこはもちろんマージンもあり、また高信頼の日本 製ということもあって、これまでに最長259分の日陰 (2019年1月30日)を乗り切ることができました.しか し2022年2月11日よりも先に予測されたのは、300分 を超え500分に近い「超長時間日陰(半影を含む)」 であり、しかもそれが頻繁に起きます(表1の左側). 2019年1月30日の経験から推測して(2022年までの 間にも徐々にバッテリーの劣化は進行しますから)、 300分超を乗り切ることは難しそうです.そこで軌道 の微修正計画が練られました.

実は軌道を修正するのは、2016年4月4日(金星周

回軌道に入って約4ヶ月後)以来,久しぶりのことで す.今回の修正はPhase Controlを略してPC2と呼 ばれます(2016年4月4日はPC1).PC2により日陰時 間をどれだけ短くできるか,計画値を表1の右側にま とめました.日陰の起きるタイミングからして変わり ますので一対一対応にはなっていませんが,最長で も250分,これまでの実績内に収まる見通しであるこ とが分かります.

## 2. 決戦は2020年10月7日, わずか4秒間の大勝負

PC2の実施日は2020年10月7日,日本時間21:22:00 と決定.内惑星の金星はこの時間帯,日本からは非 可視となりますので,DSN局(NASAが運用する深 宇宙探査用アンテナ局ネットワーク)のお世話になり ました(マドリッド局からゴールドストン局へとリレー する運用).

10月7日といえば、BepiColombo(以下ではBCと 略記します)が金星フライバイをするわずか一週間 前です。何もそのタイミングで「リスクがゼロではな い」PC2をやらなくてもよさそうなものですが、しか しそこには事情がいくつもあります。PC2は近金点 に探査機が差しかかるタイミングで行うものであり、 選択肢は10月7日または18日または29日でした。最

<sup>1.</sup>宇宙航空研究開発機構·宇宙科学研究所 2.総合研究大学院大学·物理科学研究系·宇宙科学専攻 satoh@stp.isas.jaxa.jp
長時間日陰(ΔV無し)			長時間日陰(ΔV実施)		
年月日	本影 (分)	半影(40%以上) (分)	年月日	本影 (分)	半影(40%以上) (分)
2022.02.11	232	333	2022.02.05	213	250
2022.09.28	231	453	2024.01.06	195	244
2023.05.14	249	489	2025.02.17	149	231
			2027.01.17	199	226

XⅠ ΔV 天旭日無による支町间口医町间の建す	無による長時間日陰時間の違い	の違い.
-------------------------	----------------	------

後の29日では予備日を確保することができません. 18日は、15日のBCスイングバイとの協同観測延長 線上にあり、ここでのデータ取得を行いたいところ. そうすると消去法的に10月7日になるわけですが、7 日ならではの利点もあります.この日であれば、スラ スタ噴射姿勢へと移行する際、探査機のY軸(常に 角運動量をもたせている方向)を傾ける必要がなく、 安全性の高い実施が可能なのです.所の了承を得 て、10月7日に向けて準備作業が始まりました.

スラスタの噴射時間はわずか4秒, 探査機速度の 変化であるΔV量として約0.53 m/sという小さなも のですが, これが表1のような大きな違いを生むの です. 逆にいえば, このΔVに対するごく微小な誤差 も先々の大きな差になり得るわけで, 慎重かつ正確 にこれを達成しなければなりません.

# 3. そしてPC2の結果は

メンバーが固唾を飲んで見守る中, 探査機に仕込 まれたタイムライン・コマンド(直前の臼田局運用で アップロードしたもの)は着実に実行されてゆきまし た. すべてが終了し,「出来上がりの軌道」をもとに ΔV量を計算したところ, 98 %以上が達成されてい ることが分かりました. この場合,これまでの最長実 績259分を上回る日陰の発生はなんと2035年7月3日 です!これから15年先ではその前に燃料が尽きてし まうでしょうから,実質的に「超長時間日陰の心配は なくなった」ことになります.ΔVオペレーションをす るのも,これが最後でしょう.そう思うと少しさびし い気もします(もちろんリアクションホイールに蓄積し た擾乱アンローディングのため,秒以下の噴射はとき どきありますが).

こうしてPC2を無事終えたあかつきは次の大仕 事,15日のBCスイングバイ・イベント(金星協同観測) へ向けた準備に取りかかったのでした.

### 4. 協同観測計画

BCは水星軌道に向かうため金星での減速スイン グバイを10月15日に実施する計画で、1年以上前から この日の前後に金星観測を行う計画を進めていまし た.現在金星を周回する唯一の探査機「あかつき」も 同時観測を計画し、地球を周回する惑星分光観測衛 星「ひさき」も金星に視野を向けて、日本の宇宙機3 ミッション協同による金星同時観測という壮大な計 画となったのです。各衛星の特徴を生かして、金星の 雲層から金星近傍の宇宙空間プラズマまで総合的 な観測、複数衛星での観測で初めて可能となる全球 的な観測、そして、同時・同波長帯観測による相互較 正データの取得が目的です。



黄道面に投影した位置関係

図1. 原点に金星,太陽方向を右側に固定した座標系で,黄道面に投影した各探査機の軌道.赤線が10月の「あかつき」 の軌道を示し,太線部分がBC(「みお」)の金星最接近前後数時間の軌道を表します.青線がBCのスイングバ イ軌道を示し,「ひさき」は地球方向(緑矢印)から観測します.(ISASニュース掲載図より)

当日の「あかつき」, BC,「ひさき」の軌道位置関係 を図1に示します.「あかつき」と金星の間をBCが通 過し, その反対側から「ひさき」がモニタリング観測す るという構図です.「あかつき」は, 遠金点を過ぎた当 たりに位置し視直径小さめの金星しか観測できない のは残念ですが, その一方で固定した地方時を連続 して観測できるメリットがあります.

BCのスイングバイは15日ですが、もちろんこの日 だけ観測すればよいものではありません.ご存じの とおり、金星を覆う雲はスーパーローテーションして いますし、大気圏・電離圏は熱潮汐波・重力波で数日 の周期変動が知られています.貴重な協同観測を最 大限有効に活用するには、スイングバイの前後数日 以上観測を継続していることが必要となります。「あ かつき」は紫外イメージャおよび中間赤外カメラで 1~2時間毎に雲頂の構造と温度を10日間以上観測 し、「ひさき」で金星電離圏の極端紫外分光観測を前 後1週間継続、BCで金星の赤外・紫外の分光観測や 金星周辺のプラズマ環境計測を実施する、という協 同観測計画を立案しました。

# 5. 観測の実施結果

「あかつき」は、10月12日から金星観測を再開しま

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その44 ~ΔVと三機協同観測: 2020年10月の多忙な「あかつき」~/佐藤,山崎 221



図2. 10月15日13時頃(日本時間)に「あかつき」搭載紫外イメージャ(左)および中間赤外カメラ(右)が捉えた金星像 (Credit: Planet-C Project Team).

した. PC2後の初観測ということで撮像後すぐに観 測データを確認したい焦る気持ちがありましたが, 金星の協同観測のために観測姿勢を継続する必要 があります. 協同観測機会は一瞬で過ぎ去るのに対 し, データ再生は後日でも可能ですから, そこ(即日 観測データを再生できない) はぐっとこらえたのでし た. 協同観測時の画像データを再生開始できたのは 16日で, 付帯情報まで含め必要なデータがすべてそ ろったのは19日のことでした. 心落ち着かずの数日 を過ごしましたが, 無事に図2に示した画像を取得す ることに成功しました. BCの金星最接近は10月15日 12時59分(日本時間)で, その最近接時刻の画像で す.

紫外線の画像(左)は、10月15日の13時01分と13時 05分(日本時間)に撮影された2波長(283nm:赤 と 365nm:青)から疑似カラー合成したもので、昼半球 の雲の濃淡が見て取れます、中間赤外線の画像(右) は、13時08分(日本時間)に撮影された雲頂の温度 を色付けした画像で、視直径の小さめ金星像にも関 わらず熱潮汐波構造がはっきりと見えています、今後 の定量的なデータ解析が待たれます。

# 6. まとめ

超長時間日陰回避のためのPC2を無事成功させた「あかつき」チームは、「ひさき」とともにBC金星ス

イングバイ時の金星観測キャンペーンも成功させ、極 めて多忙な一か月を過ごしました.日本の宇宙機3 ミッション協同による惑星同時観測は、地球以外で は日本の宇宙科学史上初めて実現されたものです. 金星の近くに日本の探査機が2機飛翔し3機での協 同観測が成功したことは、今後の惑星科学への日本 の貢献度をますます高める実績になると期待します.

# 火の鳥「はやぶさ」未来編 その22 ~SCI衝突実験とDCAM3の観測~

# 門野 敏彦

「はやぶさ2」探査機はSmall Carry-on Impactor (SCI)と呼ばれる衝突装置を持っており、それを小 惑星Ryuguに打ち込み、その様子をDCAM3と呼 ばれる分離カメラで撮影します、3億km離れた本物 の小惑星の表面に、実験室と同程度の2 km/sの速 度で大きな飛翔体(十数 cm)を衝突させる実験で す[1].

この実験が行われた2019年4月5日金曜日の朝7 時前,私は宇宙科学研究所のB棟,管制室に入りま した.大学院生からポスドクの5年半,宇宙研に在籍 しましたが,管制室は初めてです.最初は入口付近に こっそり居ましたが,あとから来た方々に押されて, 混んでいるのにそこだけなぜか空いている場所に移 動しました.そこはプロジェクトマネージャー席の後 方で,しばらくしてから,ちょうどそこを撮影するた めのカメラの視線方向であることに気付きましたが 既にもう他の場所は空いていませんでした<sup>1</sup>.

11時半頃, SCI衝突実験が行われます. 探査機は 「SCIを分離した」「DCAM3を分離した」などの信号 を送り管制室で受け取るのですが, 探査機が信号を 出してからそれが地球に届くまでは時間差<sup>2</sup>がありま す. SCIが動作する予定の時刻が過ぎ, 探査機から 「SCI動作=SCI実験が実行された」という信号が届 くまで, 荒川氏と時計を見ながら「実際にはもう衝突 していますよね」「うん, 光の速さは遅いね<sup>3</sup>」などと話 しているうちに, 無事SCIが動作したという信号が 届きました. しばらくして,朝からまったく言葉を発せず話しか けられても返事もしない小川氏と,彼と一緒にずっと DCAM3の開発を進めてきた澤田氏が「DCAM3 が生きている」という信号が来たのを確認し,静寂の 管制室で突然二人が雄叫びを上げました<sup>4</sup>. その後, いつもの小川氏に戻りました(図1).

DCAM3の画像データが送られてくるのは、その 日の夕方4時頃であろう、ということで、とりあえず、 控え室として解放された管制室の向かいの会議室 で居眠りを始めました、ところが、2時過ぎ 嶌生氏が 「何やってるんですか、もう出てますよ」と起こしに来 て、「ん、何が|「いいから来い|と運用室に連れて行 かれました. 運用室はめちゃ混みで, 荒川氏から「門 野くん、何やってたの と言われながら人をかき分け 一番奥のモニターの前で「どうだ」という顔で座って いる白井氏のところまで行き画面を見ると、おー、エ ジェクタが飛んでいるではないですか!予定よりはや くデータが降りてきて、白井氏の速攻解析の技が冴 え、DCAM3のアナログ画像が現れ、エジェクタが 飛んでいる様子が映っていたのでした. 衝突が確認 され、ちょうどいい案配に漆黒の宇宙空間を背景と して飛んでいます、しかし、見慣れた実験室の結果と 違って左右対称ではなく北側のみ、その場で荒川氏 と杉田氏と、なぜ非対称か、衝突点付近南側に何か

<sup>3</sup>この荒川氏の発言はどこで漏れたかネットに「本日の名言」と書か れていました.

<sup>4</sup>DCAM3開発についての小川氏と澤田氏の苦労は[2].

1.産業医科大学 kadono@med.uoeh-u.ac.jp

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>カメラの上方には探査機の高度が出ていて、そのカメラに気 づいてしまってからは、高度を見たら視線を下げてそのまま カメラを見てしまい、何度もカメラ目線になってしまいました. <sup>2</sup>3億km/光速~17分.



図1. 当日の管制室の様子. (©JAXA)

あるのでは<sup>5</sup>, という話になりました.

ここに至ってもなお、「まだわかりません、まだわ かりません」と言いながら運用室から管制室に戻る (SCIの開発を率いてきた)佐伯氏を見て、50を過ぎ て涙腺がゆるくなっている荒川氏と私はもらい泣き をするのでした.

夜にかけてDCAM3のデジタル画像も降りてき て,澤田氏に「デジタルとアナログ,両方載せてよかっ たですね」と言うと深くうなずいていました.

SCI衝突実験は、DCAM3によってその場でエ ジェクタの様子を時系列で撮影することができたこ と、事前と事後の画像からクレーターの様子を探査 機本体に搭載されたカメラONCで確認できたとい う意味で、3億 kmの彼方で室内実験と同じ事がで きました<sup>6</sup>. ONCとDCAM3の観測でわかったこと は、大小さまざまな岩塊で構成されているRyugu表 層に形成されたクレーターのサイズは、これまでの 室内実験で得られている重力支配域<sup>7</sup>でのスケーリ ング則をSCIの衝突条件で適用した結果と合ってい ること[3]、表層と下層は構成粒子のサイズ分布が異 なっていること[3-5]、2回目のタッチダウンの場所に

<sup>5</sup>これはその後のONCによるクレーター画像により確認されました[3].

<sup>6</sup>TIR(熱慣性)やNIRS3(赤外線)など他の計測機器でもSCIク レーターに関連して興味あるデータが取れているようです. <sup>7</sup>標的の強度がなくクレーター形成が重力の影響のみで決まる状況. もこのクレーターから飛び出したエジェクタが堆積し ているであろうこと[3], 1 m近い岩塊が多数, 宇宙 空間に飛び出しているが衝突点付近にあった数mの 岩塊はクレーター内に残っていること[3,4], などな どです.

近年の小惑星探査から小惑星の表面は多様なサ イズの粒子・岩塊で構成されていることがわかってき ました. ところが. 構成粒子が単一サイズでない標 的への衝突実験は系統的に行われていません<sup>8</sup>. そ のため、たとえば今回のような衝突条件に対して、ど のようなサイズ・初期位置の岩塊が掘削流に乗って 宇宙空間に飛び出せるのか/乗れずにクレーター内 に残るのか、などは、よくわかりません、小惑星表面 から脱出することができる岩塊のサイズは地球に飛 来する隕石のサイズや小惑星表面の岩塊サイズ分布 の進化にも影響しますので、今後はサイズ分布を持 つ標的に対しての衝突実験を系統的に行い. クレー ターやエジェクタの様子をあらためて調べなくてはな らないようです. このような標的が複雑な場合には. 衝突実験と粉体を取り扱う数値計算を相補的に行っ ていくことも重要かと思います。

最後に,惑星探査とどう関わるかという問題につ

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>近年,表面が大きな岩塊で覆われているときのクレーター径[6] や、大小、二種類の粒子が混合されている場合のエジェクタの模様[7]など、構成粒子が単一サイズでない場合での結果が報告さ れ始めています。

いてです. 探査というのは何百人というものすごい 人数が関わり、10年以上の時間をかけ、何十何百億 というお金をつぎ込み、すべてが桁違いで、得られ るデータは世界で唯一無二,科学的価値は計り知れ ません、今回、私がずっと実験室で行ってきた衝突 実験と同じ事が実際に宇宙で行われるということで 参加させてもらいましたが、「おー、自分が実験室で やってきたことが宇宙で起こっている」という感覚を 得られたことについては、やはり何物にも代えがた く、そういう場に立ち会えてそのデータを基に論文 を書けたのは本当に楽しかったです<sup>9</sup>. ただ, 探査に も光と影があり、ものすごい人数であるがために個 性が発揮できないこともあるし、10年という年月の 間、ずっと論文が出ないかもしれない、お金が足りな くて途中で中止になり、それまでの苦労が水の泡に なることもあります。若い人、特に大学院生がそこに 全てを捧げるのはあまりにリスクが大きいでしょう<sup>10</sup>. しかしながら、この30年、宇宙研の内外でずっと日 本の惑星探査を支えて頑張った多くの方々のおかげ で、私が大学院生の頃とは大きく状況が変わりまし た<sup>11</sup>, いろいろな探査が動いて結果が出ている現 状では、おそらく、大学院生も含めた若い方にとっ てリスクの少ない関わり方がいろいろあるはずです。 実験,理論,機器開発,マネージメント,何でも良い ので,小さいことでも自分が楽しく思えそうな事が探 査にあれば<sup>12</sup>,参加してみると他では得られない体 験ができるのではないかと思います. 探査自体も多 様な人材が参加すれば内容も充実してさらに面白い ものになるでしょう<sup>13</sup>.

査読がないと果てしなく余計なことを書いてしま うので、このあたりで終わりたいと思います.

#### 日本惑星科学会誌Vol. 29, No. 4, 2020

### 謝辞

文中, 実名で書くことを許していただいた方々, コ メントをいただいた皆さまに感謝します. ここで紹介 したSCI衝突実験とDCAM3の運用と成果は「はや ぶさ2」プロジェクトメンバーのご協力で成し遂げら れたものです. ありがとうございました. このような 文章の掲載を許可してくれた遊星人編集長にも感謝 いたします. (本文および脚注の内容については私個 人の感想です)

## 参考文献

- [1] 荒川政彦 他, 2013, 遊星人 22, 152.
- [2] 小川和律他, 2019, 遊星人 28, 231.
- [3] Arakawa, M. et al., 2020, Science 368, 67.
- [4] Kadono, T. et al., 2020, ApJL 899, L22.
- [5] Wada, K. et al., 2020, submitted to A&A.
- [6] e.g., Tatsumi, E. and Sugita, S., 2018, Icarus 300, 227.
- [7] Kadono, T. et al., 2019, ApJL 880, L30.

<sup>9</sup>荒川氏は記者会見で人生最大の喜びと言いました.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>大学院生の頃はそういう探査の悪口を散々言っていたので,当 時から宇宙研に居たT氏からは「宇宙研に探査しに来たらぶん殴 る」と言われていました.今回,宇宙研に探査しに来たのですが, 実際はぶん殴られず,良いデータがでたことを友好的に喜び合い ました:T氏の心の広さに感謝します.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>私自身は悪口だけ言って外に出て、何も貢献できませんでした. <sup>12</sup>自分で楽しく面白いと思える部分がないとしんどいのは、探査 に限らずどんな研究にでも言えることですが.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup>佐伯氏は「これから先も泣けるミッションをやっていきたい」とコ メントしています.

# 遊星百景その20 ミューゼスの海 ~ラブルパイル小惑星に広がる『水面』~

# 金丸仁明



図1: 小惑星Itokawa上に広がるミューゼスの海. イラストは, The 50th Lunar and Planetary Science Conferenceで筆者が発表した際にJ. T. Keane氏に描いていただいたものである.

特段geologist的なバックグラウンドを持たない 私が、本コラムでお気に入りの地形を紹介するのは 恐れ多いというのが正直なところであるが、ユニーク な形をした小惑星と戯れてきた大学院時代の経験を もとに筆を取らせていただく、今回紹介したいのは、 はやぶさ初号機が探査した小惑星Itokawaにある 「ミューゼスの海」と呼ばれる地域である.

1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 kanamaru.masanori@jaxa.jp 2005年, 探査機「はやぶさ」のカメラが写し出した 小惑星Itokawaの姿は驚くべきものであった. 当時 中学一年生であった筆者も熱狂していた…と言いた いところだが, 野球をしているか走っているかという オフラインな日常の中で, はやぶさの偉業をリアルタ イムで知ることはなかった. しかし,満身創痍で地球 に帰還したはやぶさの活躍の知らせは, 九州の片田 舎にも届き, 高校生だった筆者の心を躍らせたのを 記憶している. もともと抱えていた宇宙への憧れは, 226

惑星科学的な興味に変わっていき,吸い寄せられる ように大阪大学の佐々木晶教授のもとで研究するよ うになる.

かくして、「Itokawaのラッコのようなユニークな 形状で何かできないか | という入り口から研究を始 めた私が迷い込んだのが、本題のミューゼスの海で ある\*. 岩塊に覆われたItokawa表層の大半とは対 照的に、ミューゼスの海は細かな砂礫に覆われた平 坦な地域である(図1). 試料採取のために、はやぶさが 降り立ったのも(しばらく迷子になっていたようだが…). ここミューゼスの海である. 不規則な形状をもつ天 体の重力場を計算して遊んでいた筆者にとっても大 変興味深い地域であった. Itokawaのような大気の ない小規模天体では、重力と振動が表層の物質移 動を引き起こす。3次元形状をもとにItokawa表面 における重力ポテンシャル(標高)の分布を計算して みると、全球で最大80メートルほどの高低差が生じ る. そして、Itokawa上で最も標高の低い地点は、 ミューゼスの海の中にある. 度重なる隕石衝突に よってItokawa全球が振動し、動きやすい細かな粒 子が低地に運ばれてきたのであろう。

小惑星Itokawaがどのように形成したのかを明ら かにする上で、その中身がどうなっているのか?とい う疑問が生じてくる. Itokawaの平均密度は2 g/cm<sup>3</sup> 程度であり、Itokawaを構成する普通コンドライトの 密度を考えると、内部に40%以上の空隙をもつと考 えられている[1]. 衝突で破壊された母天体の破片が 集まってできた低密度の天体は、ラブルパイル天体 と呼ばれている. 小惑星の平均密度は重要な情報で あるが、逆に言うと、天体内部に関して得られる情報 はそれくらいしかない. 筆者が大学院時代に取り組 んだのは、小惑星の内部構造にもう一歩踏み込むた めの研究である、平坦な地面が広がるミューゼスの 海は、地球の海面(ジオイド)のようにItokawa上で の等ポテンシャル面に沿って分布していると考え、逆 に天体内部の密度構造を推定するという手法を提案 した[2]. その結果. Itokawaの頭(図1の左側)は. 残りの胴体に比べて20%ほど密度が高く、一枚岩に 近い構造をもつことが示唆された.

小惑星Itokawaのユニークな形状と地質は、筆

者を惑星科学研究の道に誘うこととなった.本稿執 筆時点では,はやぶさの後継機「はやぶさ2」が小惑 星Ryuguでの観測を終え,回収試料を届けるべく地 球に向かっている.Ryuguのそろばん玉のようなユ ニークな形状(コマ型形状)が投げかける謎に導か れて,小惑星のカタチと成り立ちをめぐる旅は続く.

# 参考文献

- [1] Abe, S. et al., 2006, Science 312, 1344.
- [2] Kanamaru, M. et al., 2019, Planetary and Space Science 174, 32.

<sup>\*</sup>ミューゼスの海(Muses Sea)は通称である. 正式名称としては MUSES-C Regioが国際天文学連合によって承認された.

# 遊星人の海外研究記 その4 ~台湾における天文研究~

# 松本 侑士

# 1. 中央研究院 天文及天文物理 研究所に至るまで

私の在籍する中央研究院 天文及天文物理研究所 (Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics, ASIAA)は台湾における国 立天文台に相当するような研究機関です.元は1928 年に南京に設立されましたが,その後台湾におい て2010年に正式に復興された,比較的新しい研 究機関にあたります.ASIAAは台北市にある国 立台湾大学(國立臺灣大學)のキャンパスの北側に ある天文數學館の10階から最上階である14階に 入居しています(図1). ASIAAからは毎年ポス ドクの公募が出ています.また東アジア中核天文 台連合(EACOA)の一員でもあるためEACOA Research Fellowshipにおける所属先としての 選択も可能です.

私がASIAAを知ったのも、これらの公募を通し てのことです. 私のASIAAへの応募は、実は複数 回に及びます. 不採用, 折り悪く辞退といった経緯を 経て、2017年12月に着任に至りました. 私の選出に おいては、受け入れ研究者であるPin-Gao Gu博士 の強い後押しを受けてのことだと聞いています. 私 が初めてGu博士に会ったのは、2010年に石垣島で 開かれた、惑星系形成の国際研究会でのことです. 当時はたいして議論等をしたわけではありませんで

l.Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica vmatsumoto@asiaa.sinica.edu.tw



図1: ASIAAの入居する国立台湾大学天文數學館(中央2棟).

したが,そういえば会ったことがある,程度のつな がりから公募に際しコンタクトを取りました.この結 果,受け入れ研究者としてご助言をいただき,現在は 共同研究を行うに至っています.

台湾のビザの申請は台北経済文化代表処で行い ました.ASIAAのフロントオフィス(事務部)に書類 と作成方法について指示をいただいており,特に取 得に苦労はありませんでした.渡航準備はつつがな く終わりましたが,着任に際しては,夕方退職した 足でスーツケースを2つ持ってフライトし,夜に台湾 桃園国際空港についた後はフロントオフィスにピック アップしてもらったタクシーに乗ってASIAAの最 寄りのホテルまで運ばれ,翌日朝に着任と慌ただし かったことを覚えています.

# 2. 研究生活

着任後のポスドク生活については、基本的には日 本でのポスドク生活とほぼ変わりません. ASIAA の公用語が英語なこともあり、セミナーや議論、また ASIAAの理論グループのミーティングや後述する ポスドクミーティング等あらゆる場所で英語で生活し ています. 英語が話せればやっていけますし、英語 からは逃げることができないといった感じでもあり ます.

日本でのポスドク生活との違いとして感じることの 1 つがポスドクの意見が強く、また重視されている 点です、海外からのポスドクのリクルーティングを重 視しているためか、欧米でポスドク生活を過ごしてい た方が多いためか、ポスドクのASIAA への意見や 要望のためのミーティング(ポスドクミーティング)が 行われ、また所長とポスドクの意見交換会も年に一 度行われています、これらでは、ポスドクの給与や 年次休暇数が海外と比べて少ない等の"意見"もよく 出ますが、自分の着任時におけるトラブルや研究費 について、あるいは勤務時間と観測時間のズレにつ いてなどの意見や要望も活発に出ています. 実際に 研究費がプロジェクトと独立に与えられる新しいポ スドクポジション(Distinguished Postdoctoral) Fellow)が2019 年に設立されており、ポスドクの意 見を受け入れて研究所を良くしていっているという印 象があります.

ASIAA は、そのメンバーに台湾以外の出身者が 多く含まれている、かなり国際色の強い研究所です. 2020年9月14日現在、ポスドクおよそ30名の2/3程度 が台湾以外の出身で、日本人5名の他、欧米、またこ こ数年でインド系の方も多くなってきたように思いま す.ファカルティはおよそ30名の内10名程度が台湾 外出身で、ほぼ日本人です、日本人ファカルティが多 いという点では、日本人がポスドクをしやすい環境か もしれません.私もセカンドスーパーバイザーは高見 道弘博士に担当していただいています、ファカルティ については、ここ数年でALMA などを用いた研究 で成果を上げている台湾出身の研究者が増加して いる印象です.この辺りの人を中心に原始惑星系円 盤の研究について盛り上がってきていると感じてい ます.

ASIAA は国立天文台のような機関ですが、ファ カルティ数に表れるように、その規模は国立天文台 ほど大きくありません。台湾の天文学会(中華民国天 文學會.ASROC)もほぼパラレルセッションなしに2 日間の日程であり、単純な規模としては惑星科学会 よりも小さいのではないかと感じます。 このように規 模が小さくなると、1. 天文分野全体の中で分野に強 弱が大きく現れる: 2. 個人の研究分野が広めに扱 われるようになる、といった影響があるように思いま す.1 点目は装置や予算の投入先に応じて自然と分 野の偏りが生まれるためでしょう. また台湾内の主 要な研究所や大学のファカルティの専門分野に、台 湾の強い研究分野が依存しているようにも思います。 私の専門である惑星系形成の理論研究分野につい ては、近年ASIAA のMin-Kai Lin 博士のグルー プが活発に研究していることもあり、私の着任当初よ りも分野が活発になってきているように思います.欧 米や日本ほどの規模がないため、台湾ではPIとして 研究グループを立ち上げて分野を盛り上げていくこ とがより重要なのではないかと感じています.

2点目については、例えば私の場合、惑星形成の特 に力学過程が専門であるというよりも、惑星や太陽 系の専門家のようだ、と関連分野の研究者が少ない ので少しほんやりと広く研究分野を扱われるような 感じでしょうか.この点が功を奏したのか、講師とし て台湾内で呼んでいただくこともあります.またその ように知識を求められるので、少し広めに知識を仕 入れておこうというモチベーションにもなっています.

一方でこちらからコンタクトを取りにいかないと, 同じ分野の研究者と議論する機会が減少してしまう ようにも思います.この点においてASIAAのポスド クは,元々台湾外出身や台湾外でポスドクを経験し ている方が多いので,台湾外の研究者と共同研究 をすることで解消していることが多いようです.私も ASIAA理論グループのサポートを受けて,学会つ いでに国立天文台にはしばしばお邪魔して議論させ ていただいています.これは,広く台湾外の研究者を 台湾に招いたりASIAAを周知する効果もある一方 で、ASIAA内部での共同研究が生じにくい原因の 一つであるように思います.

# 3. 台北での生活

台北についた当初はホテル生活をしていました. 基本的には最初にフロントオフィスに2週間分ホテル を予約してもらい、その間に賃貸を探すことになりま す. 日本では新築や築浅が好まれますが、 台湾では このような物件は多くの場合トラブルに見舞われる ため、 避けた方が無難です. 私の契約した賃貸はあ まり築浅というわけではありませんでしたが、トイレ のケーブルの水漏れや温水器のトラブル等に見舞わ れています、台湾での物件探しは、既に誰かが入っ たことのある条件の良い物件で、かつトラブル対応 の良い大家さんとうまく出会えるかがポイントなの で、台湾人か台湾に精通している方の協力なしでは なかなか困難です. 私は、日本人スタッフに内見・契 約をサポートしてもらう仲介業者に依頼し、賃貸契 約を済ませました. これは早くホテル生活を解消する こと、また契約とその後の言語的なサポートを期待 してのことでしたが、結果的に、上記のトラブルにも 即座に対応して頂ける大家さんを紹介していただけ ており、悪い手ではなかったと認識しています。もう 一つ, 台湾での部屋決めにおいて避けた方が良いの が、南向き最上階です. 夏が長く暑い台湾において は直射日光の多い部屋は避けたほうがよいというこ とです、私は賃貸及びASIAA の居室を最上階に決 めた後で知りました.

台北では、日系企業がそれなりに進出しており、日本と同じように生活環境を整えることができています。大型の百貨店といえば三越やそごうですし、また ニトリなども進出しており、賃貸契約後に家具等を買い足す際もスムーズに終わりました。

飲食店についても日系企業が多く進出しています. 台湾では外食が安く,また単身者向けの物件には キッチンがほぼないため、食事は外食で済ませるこ とになります.水餃子の店などにも通ったりしていま すが,日系の飲食店が豊富にあることでだいぶスト レスなく過ごせています.

台湾では国民皆保険が完備されおり, 医療費が日本よりも安く, 渡航前に医者に通い詰めなくとも, 十

分台湾で医療を受けることが可能です.一部では日本語か英語での受診ができるところもあります.また健康診断も行われており,健康的に生活しやすい環境が整っています.ただ保険適用外の医療は高額です.私は胃を痛めた際に,日本語で受診可能な外国人向け外来を利用しましたが,ここでの医療は保険適用外でまた通訳費が入り,数万円程度の医療費がかかりました.幸いこの費用は日本で加入しておいた保険が適用され,事なきを得ました.

台湾といえば長い夏が特徴的です. 12月1日の着 任時にスーツを着て来たら昼の暑さに後悔したこと を覚えています. 一方で短い冬は思っていたよりも 寒いです. 単純な気温では10℃を切ることは稀です が, 台北では冬が雨のシーズンであり, 低温多湿と低 温サウナにずっと入っているような気分になります. また台湾ではエアコンに暖房機能がないことも多い ため, 暖まれる場所がなく, 2—3 ヶ月の間着膨れし て凌ぐことになります. この冬の間は月に何度か温泉 に温まりに行っています. 台湾付近ではフィリピン海 プレートが沈み込んでおり, 台湾も広い範囲に温泉 が存在しています. 台北市付近にもいくつかの温泉 が存在しており, 特に冬の間は重宝しています.

私が台湾で最も長い時間を過ごしているのは, ASIAAの存在する国立台湾大学においてでしょう. 国立台湾大学の前身は台北帝国大学ですが,そ の初代総長である幣原坦博士は古在機構で有名な 古在由秀博士の祖父にあたるようです.国立台湾大 学キャンパスの南側には台北帝国大学時代からの建



図2:国立台湾大学校史館、台北帝国大学時代の1929年に建造 され、現在は国立台湾大学の歴史についての展示がなされ ています。

230



図3:国立台湾大学総合体育館(中央).2001年に完成し,同年 から学外からの活動も受け入れているようです。これとは別に体育館もあります。

物も残っています(図2). 一方で北側には、ASIAA のある天文數學館など,比較的新しい建物が多く建 てられています.また北側には総合体育館が建てら れていますが(図3),この体育館は一般向けの用途に 開かれているようで、ライブやコンサート、同人系の イベントなどが開かれています.休日まれにコスプレ をした方が体育館から天文數學館まで溢れかえって いることもあります.台北帝国大学時代の建物があ り、一方で体育館という資源を活かして現代的なイ ベントも開かれている様子はどことなく台湾らしさを 感じています.

台湾においても大学はある種市民の公園のような 扱いがされているのか,国立台湾大学のキャンパス 内でも散歩やジョギングをしている方,また親子連 れなどを見かけます.ASIAAの目前には醉月湖とい う池がありますが,この付近ではキャンプ用具を出し てくつろいでいる方々を見かけることもあり,自由だ なと感じています.

# 4. 結び

台北生活は日本に近いけれど少し異なる,日本から一歩踏み出した海外といったように感じています. 一方でASIAA は国際色の強い研究環境です.この3 年ほどで日欧米とはまた少し異なる環境にある 台湾における天文研究を体験したようにも思います.

現在はCOVID-19により情勢がよくありませんが、ASIAA ではコロキウム講演者の募集も広く

行っています. コロキウム講演者であればASIAAに よるサポートを受けて滞在することも可能です. ご興 味あれば私,あるいは分野の近いファカルティにご 連絡ください.

日本惑星科学会誌Vol. 29, No. 4, 2020

本稿の執筆を勧めていただいた黒澤耕介博士, また執筆に際しご助言いただいた高見道弘博士に 感謝いたします.

# 日本惑星科学会2020年秋季講演会プログラム

出村 裕英<sup>1</sup>, 大竹 真紀子<sup>1</sup>, 平田 成<sup>1</sup>, 小川 佳子<sup>1</sup>, 本田 親寿<sup>1</sup>, 北里 宏平<sup>1</sup>, 奥平 恭子<sup>1</sup>, 嵩 由芙子<sup>1</sup>

## ●秋季講演会

日程:2020年11月12日(木)~14日(土)

場所:オンライン会場

講演数: 口頭発表数118件, 最優秀発表賞選考10件, 最優秀研究者賞受賞講演1件, ポスター発表48件 主催者: 惑星科学会, 会津大学宇宙情報科学センター\*

\* 会津大学宇宙情報科学研究センター(ARC-Space)は、日本惑星科学会を母体の学協会とし、地球惑星科学およびその関連分野を研究 分野とした共同利用・共同研究拠点(月惑星探査アーカイブサイエンス拠点)です。文部科学省より特色ある共同研究拠点の整備の推進事業 JPMXP0619217839の助成を受けています、日本惑星科学会2020年秋季講演会は、日本惑星科学会の定期学術講演会として、また会津大 学宇宙情報科学研究センターの事業である研究集会として、共同主催により実施されます、また、会津大学グローバル推進本部国際戦略室よ り開催に関わる諸費用の助成を受けています。

1	1/12(木)	Room A	Room B
	8:55-9:00	LOC 委員長挨拶	LOC 委員長挨拶
AM	9:00-11:45	機器開発・将来計画	衝突現象
PM1	12:30-15:00	最優秀発表者賞選考(オーラル)	
PM2	15:15-16:45	原始惑星系円盤	アーカイブサイエンス
PM3	17:00-18:00	擬似ポスター(フラッシュトーク )	
PM4	18:00-18:45	擬似ポスター(コアタ	イム:各講演者設定)
1	1/13(金)	Room A	Room B
AM	9:00-11:45	月	小惑星
PM1	12:30-15:00	惑星大気・表層環境	小惑星・アストロバイオロジー
PM2	15:15-16:45	原始惑星系円盤	氷天体
PM3	17:00-18:00	擬似ポスター(フ	フラッシュトーク )
PM4	18:00-18:45	擬似ポスター(コアタ	イム:各講演者設定)
1	1/14(土)	Room A	Room B
AM	9:00-11:45	惑星・衛星形成	隕石・彗星
DM1	12:30-13:30	日本惑星科学会	総会(特別会場)
PIVIT	13:45-15:00	最優秀研究者賞受賞講演	
PM2	15:15-16:45	火星・火星衛星	系外惑星
PM3	17:00-18:00	擬似ポスター(コアタ	イム:各講演者設定)
PM4	18:00-18:45	擬似ポスター(コアタ	イム:各講演者設定)
	19:00 ~	オンライン懇親	<b>1</b> 会(特別会場)

1.会津大学宇宙情報科学研究センター demura@u-aizu.ac.jp

## ●口頭発表

今年は、Zoomを使ったオンライン開催となりました. 最優秀発表賞選考及び、一般公演は15分講演(3分間の質 疑時間および交代時間を含む)です.

# ●擬似ポスター発表

発表者が共有可能な資料を「ポスター」として提示し、オンラインで議論を行います.発表者が登録した、擬似ポ スターの閲覧,議論に必要な情報は、プログラム情報の一部として公開されます.また、疑似ポスターセッションで は、最大 2分フラッシュトークセッションが用意されています.なお、口頭発表に割り当てられている方も擬似ポス ター発表者と同じ形式で、情報を登録、公開が可能です.

# ●プログラム

講演番号(Oral/Poster-Day#-RoomA/B#),開始時間,表題,講演者を掲載しています.各発表の著者リスト は,発表申込受付時の著者リストフォーム入力内容に,追加入力された著者情報が存在する場合はそれを末尾に 付け加えたものです.また,所属は筆頭著者のみ表記しています.いずれも申込受付時の入力内容そのままです が,著者名のうち英文表記が適切と判断したものは英文表記内容に置き換えています.

# 《11月12日(木)AM 口頭発表プログラム Room A》

8:55 LOC 委員長挨拶

機器開発·将来計画(座長:石橋 高·村上 豪)

9:00	日欧共同 BepiColombo 水星探査計画に向けた取り組み:ミッション概要 村上 豪(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所太陽系科学研究系), Benkhoff Johannes
9:15	日欧共同 BepiColombo 水星探査計画に向けた取り組み: 後期集積が水星に与える影響 兵頭 龍樹(宇宙航空研究開発機構(JAXA)), 玄田 英典, Ramon Brasser
9:30	日欧共同 BepiColombo 水星探査計画に向けた取り組み: 水星形成解明のための理論研究 鎌田 俊一(北海道大学理学研究院), 兵頭 龍樹, 高橋 太, 吉崎 昂, 石城 陽太, 倉本 圭, 村上 豪
9:45	戦略的火星探査計画および国際協働探査 Ice Mapper 計画の検討状況 臼井 寛裕(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所), 関華奈子, 藤田和央, 着陸機による火星環境探査リサーチグループ
10:00	月・火星・小惑星地下探査レーダ試作機を用いた検証実験 熊本 篤志(東北大学大学院理学研究科), 宮本 英昭, 西堀 俊幸, 土屋 史紀, 石山 謙
10:15	月の縦孔・地下空洞直接探査(UZUME) 春山 純一(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所太陽系科学研究系), 岩田 隆浩, 岡田 達明, 庄司 大悟, 諸田 智克, 清水 久芳, 内藤 雅之, 河野 功, 西堀 敏幸, 角 有司, 安光 亮一郎, 石上 玄也, 本多 力
	9:00 9:15 9:30 9:45 10:00 10:15

- O-D1-A7 10:30 月面の放射線環境と縦孔領域内での防護効果
   内藤 雅之(量子科学技術研究開発機構),小平 聡,長谷部 信行,天野 嘉春, 春山 純一
- O-D1-A8 10:45 DESTINY+計画の進展とサイエンス
  荒井 朋子(千葉工業大学惑星探査研究センター),小林 正規,石橋 高,吉田 二美,木村 宏,平井 隆之,洪 鵬,千秋 博紀,和田 浩二,Srama Ralf, Kruger Harald, 今村 裕志,豊田 裕之,西山 和孝,高島 健,佐々木 晶,薮田 ひかる,石黒 正晃,渡部 潤一,伊藤 孝士,大坪 貴文,大塚 勝仁,阿部 新助,中村 智樹,小林 詩歩,廣井 孝弘,小松 睦美,中村 メッセンジャー 圭子,関口 朋彦,木下 大輔,浦川 聖太郎,橋 省吾,三河内 岳,諸田 智克,野口 高明,金田 英宏,矢野 創,吉川 真,岡本 尚也,中藤 亜衣子,柳沢 俊史,黒崎 裕久,小松 吾郎,山田 学,出村 裕英,平田 成,伊藤 元雄,松浦 周二
- O-D1-A9 11:00 DESTINY+搭載用小惑星追尾望遠モノクロカメラ(TCAP) およびマルチバンドカメラ(MCAP)の検討状況 石橋 高(千葉工業大学惑星探査研究センター), 洪 鵬, 岡本 尚也, 石丸 貴博, 山田 学, 奥平 修, 荒井 朋子, 吉田 二美, 尾崎 直哉, 佐藤 峻介, 亀田 真吾, 鍵谷 将人, 宮原 剛, 太田 方之, 高島 健
- O-D1-A10 11:15 始原天体サンプルリターンミッションの検討 
   島生 有理(宇宙航空研究開発機構), 脇田 茂, 浦川 聖太郎, 洪 鵬, 臼井 文彦, 松岡 萌, 坂谷 尚哉, 田中 智, 長谷川 直, 黒田 大介
- O-D1-A11 11:30 はやぶさ2拡張ミッション:微小で高速自転する小惑星へのランデブーする理学的意義 平林 正稔(Auburn University), 三枡 裕也, 坂谷 尚哉, 渡邊 誠一郎, 津田 雄一, 佐伯 孝尚, 菊地 翔太, 神山 徹, 吉川 真, 田中 智, 中澤 暁, 藤井 淳, 岩田 隆浩, 津村 耕司, 松浦 周二, 嶌生 有理, 浦川 聖太郎, 石橋 之宏, 長谷川 直, 石黒 正晃, 黒田 大介, 奥村 真一郎

# 《11月12日(木)AM 口頭発表プログラム Room B》

8:55 LOC 委員長挨拶

衝突現象(座長:寺田 健太郎·黒澤 耕介)

O-D1-B1	9:00	「かぐや」が明らかにした地球-月システムを襲った小惑星シャワ- 寺田 健太郎(大阪大学大学院理学研究科), 諸田 智克, 加藤 麻美
O-D1-B2	9:15	ラブルパイル天体に適用可能なクレータースケール則と 衝突励起振動に関する実験的研究 山本 裕也(神戸大学理学研究科), 荒川 政彦, 保井 みなみ, 長谷川 直, 横田 優作, 大川 初音, 杉村 瞭
O-D1-B3	9:30	小惑星の起伏地形上に形成するクレーターに関する実験的研究 横田 優作(神戸大学理学研究科), 荒川 政彦, 保井 みなみ, 山本 裕也, 長谷川 直, 大川 初音
O-D1-B4	9:45	クレーター形成時のエジェクタ放出過程におけるサイズごとの三次元粒子追跡 大川 初音(神戸大学大学院理学研究科), 荒川 政彦, 保井 みなみ, 長谷川 直, 横田 優作, 山本 裕也
O-D1-B5	10:00	斜め衝突による高速度岩石エジェクタのサイズ-速度同時計測 野村 啓太(神戸大学理学研究科), 中村 昭子, 長谷川 直

O-D1-B6	10:15	多孔質氷天体を模擬したクレーター形成実験:衝突残留熱の計測 笹井 遥(神戸大学大学院理学研究科), 保井 みなみ, 荒川 政彦, 白井 慶
O-D1-B7	10:30	低強度標的を用いた高速度衝突破壊実験:衝突破壊強度と引っ張り強度の関係 堀川 和洋(神戸大学大学院理学研究科), 荒川 政彦, 保井 みなみ
O-D1-B8	10:45	フラッシュX線による衝突破片の速度-質量分布の計測:粘土を用いた 延性標的の衝突破壊実験 長野 巧(神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻), 荒川 政彦, 保井 みなみ, 堀川 和洋
O-D1-B9	11:00	衝突閃光のターゲット物性と発光メカニズムの関係 布施 綾太(日本大学), 阿部 新助, 柳澤 正久, 福原 哲哉, 坂谷 尚哉, 長谷川 直
O-D1-B10	11:15	3次元衝撃回収実験によるコンドライト隕石の衝撃変成度の見直しに向けて 大野 遼(千葉工業大学惑星探査研究センター), 黒澤 耕介, 新原 隆史, 三河内 岳, 玄田 英典, 鹿山 雅裕, 小池 みずほ, 富岡 尚敬, 佐野 有司, 佐竹 渉, 松井 孝典
O-D1-B11	11:30	粉体衝突実験における衝突直下点物質の回収 黒澤 耕介(千葉工業大学惑星探査研究センター), 大野 遼, 佐藤 雅彦, 新原 降史,

# 《11月12日(木)PM1 ロ頭発表プログラム Room A》

長谷川 直, 佐竹 渉, 松井 孝典

最優秀発表賞選考(座長:諸田知克)

- O-D1-A12 12:30 原始惑星系円盤におけるN2H+, N2D+輝線観測データの解析
   大和 義英(東京大学大学院理学系研究科天文学専攻), 相川 祐理, Cataldi Gianni
- O-D1-A13 12:45 原始惑星系円盤HD 163296のALMA連続波観測によるダストスケールハイトの制限
   土井 聖明(国立天文台科学研究部), 片岡 章雅
- O-D1-A14 13:00 講演キャンセル
- O-D1-A15 13:15 小惑星リュウグウ上の岩塊の形態・分光スペクトル的特徴 湯本 航生(東京大学), 巽 瑛理, 海老原 樹, 諸田 智克, 長 勇一郎, 木 直史, 杉本 知穂, 本田 理恵, 亀田 真吾, 横田 康弘, 坂谷 尚哉, 神山 徹, 澤田 弘崇, 早川 雅彦, 松岡 萌, 鈴木秀彦, 山田学, 小川和律, 吉岡和夫, 杉田精司
- O-D1-A16 13:30 LIBSによる月隕石の主要元素濃度予測 および月着陸探査を想定したLIBS装置改良 小倉 暁乃丞(東京大学理学系研究科), 湯本 航生, 長 勇一郎, 新原 隆史, 亀田 真吾, 杉田 精司
- O-D1-A17 13:45 クレーターサイズ頻度分布が語るセレスと月の類似性 豊川 広晴(総合研究大学院大学),春山 純一,平田 直之,岩田 隆浩
- O-D1-A18 14:00 タイタンの成層圏超回転へのヘイズ層の影響 墨 幹(東京工業大学大学院地球惑星科学系), 竹広 真一, 大淵 済, 野村 英子, 藤井 友香
- O-D1-A19
   14:15
   短周期super-Earthの大気散逸に伴う軌道進化 藤田 菜穂(京都大学大学院理学研究科), 堀 安範, 佐々木 貴教
- O-D1-A20
   14:30
   還元型原始地球大気の流体力学的散逸

   吉田 辰哉(北海道大学 大学院理学院), 倉本 圭

 O-D1-A21 14:45 10年間のWASP-33bの軌道歳差 渡辺 紀治(総合研究大学院大学天文科学専攻),成田 憲保, Marshall C. Johnson, 福井 暁彦, 日下部 展彦,川内 紀代恵, John Livingston, Jerome de Leon, 森 万由子,西海 拓, Enric Palle, Hannu Parviainen, Felipe Murgas, Pilar Montaes-Rodriguez

# 《11月12日(木)PM2 口頭発表プログラム Room A》

原始惑星系円盤(座長:國友 正信·森 昇志)

- O-D1-A22 15:15 ngVLAによる原始惑星系円盤観測の展望 百瀬 宗武(茨城大学), 伊王野 大介
- O-D1-A23 15:30 次世代電波望遠鏡 ngVLA でスノーラインを観る
   奥住 聡(東京工業大学), 百瀬 宗武, 片岡 章雅
- O-D1-A24 15:45 磁気的に降着する原始惑星系円盤におけるスノーラインの移動:
   地球型惑星の形成過程への示唆
   森昇志(東京大学天文学専攻),奥住 聡,國友 正信, Bai Xuening
- O-D1-A25 16:00 原始惑星系円盤の消失:磁気駆動円盤風と光蒸発の競合
   國友 正信(久留米大学), 鈴木 建, 犬塚 修一郎
- O-D1-A26 16:15 円盤風によって散逸していく原始惑星系円盤における新しいダスト成長メカニズム 瀧 哲朗(国立天文台), 桑原 滉, 小林 浩, 鈴木 建
- O-D1-A27 16:30 原始惑星系円盤進化の中心星質量への依存性
   中野 龍之介(東京大学), 鈴木 建, 小久保 英一郎, 荻原 正博

# 《11月12日(木)PM2 口頭発表プログラム Room B》

アーカイブサイエンス(座長:出村 裕英・平田 成)

O-D1-B12	15:15	月惑星探査アーカイブサイエンスの意義と大学共同利用・ 共同研究拠点ARC-Spaceの取組 出村 裕英(会津大学宇宙情報科学研究センター)
O-D1-B13	15:30	ウェブ地図技術を用いた大規模惑星大気数値シミュレーションデータ 可視化ツール dcwmt の開発 杉山 耕一朗(松江工業高等専門学校情報工学科), 松村 和樹, 森脇 大智, 村橋 究理基, 石渡 正樹, 林 祥介
O-D1-B14	15:45	「たんぽぽ計画」捕集実験試料用データベース構築 奥平 恭子(会津大学), 三田 肇, 佐々木 聰, 矢野 創, 山岸 明彦, 出村 裕英, 矢口 勇一, 石橋 之宏, 今仁 順也
O-D1-B15	16:00	小天体探査データ解析のための三次元地理情報システムと画素指向画像DBの開発 平田 成(会津大学宇宙情報科学研究センター,会津大学コンピュータ理工学部), 菊地 紘,出村 裕英,佐藤 広幸,松本 晃治,中里 直人,河野 郁也,古舘 拓真
O-D1-B16	16:15	月南極域カラーモザイクの作成 佐藤 広幸(宇宙航空研究開発機構). 大竹 真紀子, 嵩 由芙子, 山本 光生
O-D1-B17	16:30	すばる望遠鏡HSCデータを用いた小惑星検出アプリCOIASの開発 浦川 聖太郎(日本スペースガード協会)

# 《11月13日(金)AM 口頭発表プログラム Room A》

月(座長:山本 聡·唐牛 譲)

- O-D2-A28 9:00 三次元球殻プログラムによる月内部マントルの対流安定性についての計算実験 荷見 拓生(東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻), 小河 正基, 亀山 正典
- O-D2-A29 9:15 月面上のカンラン石と斜長石に富む露頭の共存領域の リモートセンシングによる地質的研究 山本 聡(産業技術総合研究所地質調査総合センター地質情報研究部門),大竹 真紀子, 唐牛 譲, 鹿山 雅裕,長岡 央,石原 吉明,春山 純一
- O-D2-A30 9:30 機械学習を用いた新たに形成されたクレータの検出 森川 恵海(東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学部),小野寺 圭祐, 山本 光生,田中智
- O-D2-A31 9:45 月面のクレータ斜面におけるボルダー崩れの成因の検討:
   舌状衝上断層での月震と斜面上の少クレータ形成による震動の比較 池田 あやめ(名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻地球惑星物理学講座), 熊谷 博之,諸田 智克
- O-D2-A32 10:00 「かぐや」スペクトルプロファイラデータによる月極域の水氷探索 大竹 真紀子(会津大学コンピュータ理工学部),田中 智,仲内 悠祐,小野寺 圭祐, 長岡 央
- O-D2-A33 10:15 月極域探査計画による水資源利用可能性検討
   唐牛 譲(宇宙航空研究開発機構国際宇宙探査センター),石原 吉明,野村 麗子, 金森 洋史,白石 浩章,大竹 真紀子,水野 浩靖,星野 健,麻生 大
- O-D2-A34 10:30 月極域探査 LUPEX に向けた水資源分析計-質量分析部 REIWA-TRITON の開発 齋藤 義文(宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所), 浅村 和史, 横田 勝一郎, 笠原 慧, 齋藤 直昭, 藤原 幸雄, 浅川 大樹, 西野 真木, 柳瀬 菜穂, 本 直輝, 齋藤 義文, 浅村 和史, 横田 勝一郎, 笠原 慧, 齋藤 直昭, 藤原 幸雄, 浅川 大樹, 西野 真木, 柳瀬 菜穂, 本 直輝
- O-D2-A35 10:45 月着陸実証計画SLIMおよび月氷探査計画LUPEXにおける 可視近赤外分光観測の戦略 佐伯 和人(大阪大学理学研究科)
- O-D2-A36 11:00 月面に露出した深成岩の観測のための, 焼結人工岩石の鉱物境界面の分光学的性質の研究 松井 俊樹(大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻), 佐伯 和人
- O-D2-A37 11:15 月極域氷探査に向けた,粒径と種類が異なる鉱物粉体に付着した 氷の近赤外スペクトルによる定量
   荒木 亮太郎(大阪大学 理学研究科), 佐伯 和人

## 《11月13日(金)AM 口頭発表プログラム Room B》

小惑星(座長:杉田 精司·金丸 仁明)

O-D2-B18 9:00 はやぶさ2のリュウグウ近傍観測の科学成果 渡邊 誠一郎(名古屋大学),田中 智,吉川 真,杉田 精司,岡田 達明,北里 宏平, 並木 則行,荒川 政彦,橘 省吾,諸田 智克,杉浦 圭祐, 嶌生 有理,平田 成,平田 直之, はやぶさ2 サイエンスチーム

- O-D2-B19 9:15 小惑星リュウグウ上の明るい岩塊の高分解能観測
   杉田 精司(東京大学大学院 理学系研究科地球惑星科学専攻),杉本 知穂,巽 瑛理, 湯本 航生,青木 美波,諸田 智克,本田 理恵,亀田 真吾,長 勇一郎,田 康弘, 坂谷 尚哉,神山 徹,澤田 弘崇,早川 雅彦,松岡 萌
- O-D2-B20 9:30 「はやぶさ2」タッチダウン運用で得られたRyugu表面の詳細な熱物性構造
   田中 智(宇宙航空研究開発機構), 菊池 翔太, 白井 慶, 坂谷 尚哉, 嶌生 有理,
   岡田 達明, 福原 哲哉, 千秋 博紀, 荒井 武彦, 神山 徹, 出村 裕英, 関口 朋彦
- O-D2-B21 9:45 小惑星リュウグウ上の高空隙率で始原的な岩塊 坂谷 尚哉(立教大学理学部 物理学科),田中 智,岡田 達明,福原 哲哉, Riu Lucie, 杉田 精司,本田 理恵,諸田 智克,横田 康弘,巽 瑛理,湯本 航生,平田 成, 三浦 昭,神山 徹,千秋 博紀,嶌生 有理,荒井 武彦,滝田 隼,出村 裕英, 関口 朋彦, Thomas Mueller, Axel Hagermann, Jens Biele, Matthias Grott, Maximilian Hamm, Marco Delbo, Wladimir Neumann
- O-D2-B22 10:00 小惑星探査機はやぶさ2の低高度運用で観測された 小惑星リュウグウに点在する岩塊の温度変化分布解析 大杉 歩(東京大学理学系研究科化学専攻),坂谷 直哉,嶌生 有理,千秋 博紀, 荒井 武彦,出村 裕英,田中 智,福原 哲哉,岡田 達明
- O-D2-B23 10:15 小惑星エロス,イトカワ,リュウグウのボルダーサイズ分布,形状分布の比較 ~ 重力場とボルダーの移動 道上 達広(近畿大学 工学部), Hagermann Axel
- O-D2-B24 10:30 小惑星リュウグウにおける岩の分布と方位角の調査:表面進化への示唆 海老原 樹(東京大学),湯本 航生,杉田 精司,本田 理恵,亀田 真吾,巽 瑛理, 長 勇一郎,吉岡 和夫,澤田 弘崇,横田 康弘,坂谷 尚哉,早川 雅彦,松岡 萌, 山田 学,神山 徹,鈴木 秀彦,本田 親寿,小川 和律,道上 達広,諸田 智克
- O-D2-B25 10:45 小惑星の赤道リッジ形成へのエジェクタ堆積物の寄与 池谷 蓮(神戸大学理学研究科惑星学専攻),平田 直之
- O-D2-B26 11:00 歪な天体表面上で生じたイジェクタの再衝突地点 菊地 紘(宇宙航空研究開発機構)
- O-D2-B27 11:15 小惑星リュウグウ表面のボルダー上に観測された小クレーターの統計 高井 雄大(東京大学),諸田 智克,杉田 精司,湯本 航生,本田 理恵,亀田 真吾, 巽 瑛理,長 勇一郎,吉岡 和夫,澤田 弘崇,横田 康弘,坂谷 尚哉,早川 雅彦,松岡 萌, 山田 学,神山 徹,鈴木 秀彦,小川 和律
- O-D2-B28 11:30 小惑星Ryuguに働くYORP効果と自転進化史
   金丸 仁明(宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所), 佐々木 晶, 諸田 智克, 長勇一郎, 巽 瑛理, 平田 成, 千秋 博紀, 嶌生 有理, 坂谷 尚哉, 田中 智, 平林 正俊, 岡田 達明, 臼井 寛裕, 杉田 精司, 渡邊 誠一郎

## 《11月13日(金)PM1 口頭発表プログラム Room A》

惑星大気·表層環境(座長:黒崎 健二·野津 翔太)

O-D2-A38 12:30 陸惑星におけるハビタブルゾーン 小玉 貴則(ボルドー大学), 玄田 英典, 阿部 彩子

- O-D2-A39 12:45 細な円盤化学進化計算を初期条件としたホットジュピター大気の平衡化学構造 野津 翔太(理化学研究所 開拓研究本部 坂井星・惑星形成研究室),野村 英子, Christian Eistrup, Catherine Walsh
- O-D2-A40
   13:00
   初期火星の高EUV放射下における酸素大気の形成可能性

   小山 俊吾(東北大学), 寺田 直樹, 寺田 香織, 中川 広務, 黒田 剛史, 小河 正基
- O-D2-A41 13:15 天体衝突に伴う水素大気散逸率における惑星大気量依存性 黒崎 健二(名古屋大学), 犬塚 修一郎
- O-D2-A42 13:30 初期金星における大気散逸と元素分配
   櫻庭 遥(東京工業大学 地球惑星科学系), 黒川 宏之
- O-D2-A43 13:45 一酸化炭素に富んだ大気を持つ地球型惑星の表層環境
   青木 紘介(東京工業大学),黒川 宏之,藤井 友香
- O-D2-A44 14:00 全球非静力学火星大気大循環モデルによる鉛直対流とダスト巻き上げ輸送の計算 樫村 博基(神戸大学),八代 尚,西澤 誠也,富田 浩文,小郷原 一智,黒田 剛史, 中島 健介,石渡 正樹,高橋 芳幸,林 祥介
- O-D2-A45
   14:15
   星雲ガス中で集積する岩石惑星の希ガス同位体比 齊藤 大晶(北海道大学理学研究院),馬上 謙一,山本 順司,倉本 圭
- O-D2-A46 14:30 月の起源仮説で何が説明できるのか? Multi-Impact Hypothesis, Giant Impact Hypothesis で何が示せたのか? Natureと何が一致出来たのか? 出来なかったのか?
   種子 彰(SEED SCIENCE Labo.銀河系・惑星・地球月起源研究室)

# 《11月13日(金)PM1 口頭発表プログラム Room B》

小惑星・アストロバイオロジー(座長:荒川 政彦・黒川 宏之)

- O-D2-B29 12:30 衝突残留熱と小惑星母天体の熱変成過程に関する実験的研究 保井 みなみ(神戸大学大学院理学研究科),田澤 拓,橋本 涼平,荒川 政彦,小川 和律
   O-D2-B30 12:45 Jbilet Winselwan 炭素質 CM2コンドライト中の酸不溶性有機物の元素・同位体・ 化学構造分析による母天体熱変成の評価 上出 奏海(広島大学),重中 美歩,池原 実,川上 紳一,薮田 ひかる
- O-D2-B31 13:00 分子雲中での高分子態アミノ酸前駆体の生成とその宇宙安定性の検証
   小林 憲正(横浜国立大学), 倉本 想士, 佐藤 智仁, 横尾 拓哉, 癸生川 陽子, 三田 肇,
   中川 和道, 吉田 聡, 福田 一志, 小栗 慶之, 柴田 裕実, 矢野 創, 山岸 明彦, 左近 樹
- O-D2-B32 13:15 C型小惑星の起源と炭素質コンドライト隕石との繋がり:水岩石反応と赤外スペクトルモデルからの示唆
   黒川 宏之(東京工業大学地球生命研究所), 渋谷 岳造, 関根 康人,
   Ehlmann Bethany L., 臼井 文彦, 菊池 早希子, 依田 優大
- O-D2-B33 13:30 原始惑星系円盤におけるダストの紫外線被曝と有機物形成: 乱流混合と アグリゲイト衝突破壊の重要性 本間 和明(東京工業大学 理学院 地球惑星科学系), 奥住 聡

 O-D2-B34 13:45 木曽広視野CMOSカメラTomo-e Gozenを用いた微小地球接近小惑星の探索 紅山 仁(東京大学天文学教育研究センター), 酒向 重行, 大澤 亮, 諸隈 智貴, 瀧田 怜, 小林 尚人, 奥村 真一郎, 浦川 聖太郎, 吉川 真, 柳沢 俊史, 黒崎 裕久, 吉田 二美, 佐藤 英貴

- O-D2-B35 14:00 赤外線カメラデータを用いた局所地形モデルの作成と 小惑星「リュウグウ」の熱慣性評価 伊藤 瑞生(東京大学),田中 智,坂谷 尚哉,千秋 博紀
- O-D2-B36 14:15 はやぶさ2SCIによる人工クレーター形成に伴う小惑星リュウグウの再表面化過程 本田 理恵(高知大学), 荒川 政彦, 横田 康弘, 嶌生 有理, 白井 慶, 門野 敏彦, 和田 浩二, 小川 和律, 石橋 高, 坂谷 尚哉, 中澤 暁, 保井 みなみ, 諸田 智克, 亀田 真吾, 巽 瑛理, 山田 学, 神山 徹, 長 勇一郎, 松岡 萌, 鈴木 秀彦, 本田 親寿, 早川 雅彦, 吉岡 和夫, 澤田 弘崇, 杉田 精司, 平田 成, 平田 直之
- O-D2-B37 14:30 遠心力による砂山の形状変化および流動特性
   入江 輝紀(名古屋大学大学院環境学研究科),山口 隆正,渡邊 誠一郎,桂木 洋光

O-D2-B38 14:45 行列表示を用いた有機物反応のモンテカルロ計算:星間粒子を模擬した 糖合成実験の再現に向けて 竹原 仁(東京工業大学 理学院地球惑星科学系), 庄司 大悟, 井田 茂

# 《11月13日(金)PM2 口頭発表プログラム Room A》

原始惑星系円盤(座長:冨永 遼佑·田中 佑希)

- O-D2-A47 15:15 ダスト衝突成長過程が駆動する原始惑星系円盤の不安定性 富永 遼佑(名古屋大学理学研究科), 犬塚 修一郎, 小林 浩
- O-D2-A48 15:30 原始惑星系円盤における鉛直シア不安定性とダストの共進化 福原 優弥(東京工業大学),奥住 聡,小野 智弘
- O-D2-A49 15:45 移動する惑星に追随するガス圧バンプにおける 微惑星形成
   芝池 諭人(ベルン大学), Yann Alibert
- O-D2-A50 16:00 超木星質量の巨大ガス惑星による原始惑星系円盤へのギャップ形成 田中 佑希(東北大学理学研究科), 金川 和弘, 谷川 享行, 田中 秀和
- O-D2-A51 16:15 すばる望遠鏡を用いた原始惑星系円盤 HD34700 の観測
   鵜山 太智(カリフォルニア工科大学), Thayne Currie, Christiaens Valentin, Bae Jaehan, 武藤 恭之, 田村 元秀
- O-D2-A52 16:30 高分解能多波長画像解析によるTWHyaの原始惑星系円盤の スペクトルインデックス動径分布の調査 塚越 崇(国立天文台), 武藤 恭之, 野村 英子, 川邊 良平, 金川 和弘, 奥住 聡, 井田 茂, 高橋 実道, 橋本 淳, 鵜山 太智, 田村 元秀, Catherine Walsh, Tom J. Millar

# 《11月13日(金)PM2 口頭発表プログラム Room B》

**氷天体**(座長:木村 淳・豊田 優佳里)

- O-D2-B39 15:15 土星リング粒子を模擬した多孔質氷球の非弾性衝突メカニズムに関する実験的研究 豊田 優佳里(神戸大学理学研究科), 荒川 政彦, 保井 みなみ
- O-D2-B40 15:30 階層粉体の伝熱過程に基づく彗星表層の熱慣性の解釈
   荒川 創太(国立天文台科学研究部), 大野 和正
- O-D2-B41 15:45 衛星の内部海のシミュレーションのためのSPH法のコード開発 村嶋 慶哉(京都大学大学院理学研究科 宇宙物理学教室),細野 七月,斎藤 貴之, 佐々木 貴教

O-D2-B42	16:00	海王星衛星 Triton の窒素噴出現象における内部熱構造の寄与
		今井田 奈波(大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻佐々木研究室), 木村 淳
O-D2-B43	16:15	木星衛星カリストの不完全な内部分化と地下海の維持を説明する長期進化モデル 松岡 夏季(大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻佐々木研究室), 木村 淳
O-D2-B44	16:30	木星衛星エウロパに地下海が存在し金属核起源磁場が 存在しないための内部構造条件

木村 淳(大阪大学)

# 《11月14日(土)AM 口頭発表プログラム Room A》

**惑星・衛星形成**(座長:植田 高啓・小林 浩)

O-D3-A53	9:00	デッドゾーン内側境界での微惑星形成:太陽系地球型惑星形成への示唆 植田 高啓(国立天文台), 奥住 聡, 荻原 正博, 小久保 英一郎
O-D3-A54	9:15	ダストリング構造の重力崩壊による微惑星形成 高橋 実道(国立天文台科学研究部), 小久保 英一郎
O-D3-A55	9:30	低質量周りのペブル集積を考慮した共鳴惑星系の形成 松本 侑士(中央研究院天文及天文物理研究所), Yu-Chia Lin, Pin-Gao Gu
O-D3-A56	9:45	原始惑星系円盤内のダストリングの局所数値シミュレーション 関谷 実(九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門)
O-D3-A57	10:00	原始惑星重力による摂動を受けた原始惑星系円盤ガスの流れと 小天体の集積率についての理論的研究 岡村 達弥(名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻理論宇宙物理学研究室), 小林 浩
O-D3-A58	10:15	進化する円盤中での岩石惑星及びガス惑星の形成 荻原 正博(国立天文台), 堀 安範, 國友 正信, 黒崎 健二
O-D3-A59	10:30	ダストから惑星まで直接合体成長を取り扱う統一シミュレーション 小林 浩(名古屋大学大学院理学研究科), 田中 秀和
O-D3-A60	10:45	N体計算コード GPLUM の開発: 惑星形成の展望 石城 陽太(東京大学, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所), 兵頭 龍樹, 藤本 正樹, 牧野 淳一郎
O-D3-A61	11:00	散逸中の周惑星円盤における衛星系の形成について 藤井 悠里(名古屋大学高等研究院/理学研究科素粒子宇宙物理学専攻理論宇宙物理学 研究室), 荻原 正博
O-D3-A62	11:15	N体計算を用いた巨大天体衝突に伴う衛星系形成のパラメータスタディ 長谷川 祐一(京都大学大学院理学研究科), 細野 七月, 佐々木 貴教
O-D3-A63	11:30	衛星前駆天体の捕獲とその周火星領域での集積による火星衛星形成シナリオ 松岡 亮(北海道大学理学院宇宙理学専攻), 倉本 圭

# 《11月14日(土)AM 口頭発表プログラム Room B》

**隕石・彗星・流星**(座長:古川 善博・樋口 有理可)

O-D3-B45 9:00
 形成過程から明らかにする長周期彗星分布の非等方性
 樋口 有理可(産業医科大学)

- O-D3-B46 9:15 地球に接近したパンスターズ彗星(P/2016 BA14)の彗星核の中間赤外線観測 大坪 貴文(国立天文台天文データセンター),河北 秀世,新中 善晴
- O-D3-B47 9:30
   レゴリス粒子の固着力:粒子の形状と塑性変形の効果
   長足 友哉(神戸大学理学研究科),中村 昭子,青木 降修
- O-D3-B60 9:45 講演キャンセル
- O-D3-B48 10:00 放出物カーテン内での粒子のクラスター形成:解析モデルと
   室内実験・数値計算との比較
   中澤風音(東京工業大学地球惑星科学系),奥住聡,黒澤耕介,長谷川直
- O-D3-B49 10:15 石鉄隕石メソシデライトの形成シナリオ解明に向けたベスタへの 巨大衝突の数値計算 杉浦 圭祐(東京工業大学 地球生命研究所), 羽場 麻希子, 玄田 英典
- O-D3-B50 10:30 火星隕石 ALH 84001 の炭酸塩中の硫黄化学種解析に基づく 初期火星表層環境の推定 梶谷 伊織(JAXA 宇宙科学研究所),中田 亮一,小池 みずほ,田辺 学,臼井 寛裕, 松浦 史宏,福士 圭介,黒川 宏之,横山 哲也
- O-D3-B51 10:45 隕石有機物の主要生成反応:炭素同位体組成からの制約
   古川 善博(東北大学理学研究科 地学専攻), 岩佐 義也, 力石 嘉人
- O-D3-B52 11:00 分光観測と数値シミュレーションによる2017-2018年ふたご座流星群Na変動量の 調査
   小川 巧覽(日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻), 阿部 新助, 新垣 志麻,
- O-D3-B53 11:15 東京大学本曽観測所広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozenと 京都大学生存圏研究所MUレーダーを用いた微光流星の同時観測 森田 晃平(日本大学大学院理工学研究科航空宇宙工学専攻), 阿部 新助, 大澤 亮, 藤原 康徳, 中村 卓司, 西村 耕司, 酒向 重行, 渡部 潤一, Johan Kero, Daniel Kastinen
- O-D3-B54
   11:30
   炭素含有鉱物による天体のシステム環境(流体・生命)研究

   三浦 保範(山口大学海外の大学)

宇田 天音,前田 幸治,荒井 朋子

# 《11月14日(土)12:30-13:30 特別会場》

日本惑星科学会総会

# 《11月14日(土)13:45-15:00 Room A》

最優秀研究者賞受賞講演(座長:はしもと じょーじ)

O-D3-A70 13:45 分子雲から原始惑星系円盤に至るまでの化学組成進化 古家 健次(国立天文台科学研究部)

### 《11月14日(土)PM2 口頭発表プログラム Room A》

火星・火星衛星(座長:倉本 圭・長 勇一郎)

O-D3-A64 15:15 火星内部進化の数値モデル

小河 正基(東京大学教養学部宇宙地球科学科)

- O-D3-A65 15:30 火星のクリュセおよびアキダリア平原における地下構造の探索 大浦 愛菜(東北大学大学院理学研究科), 笠羽 康正, 野口 里奈, 熊本 篤志, 石山 謙, 臼井 寛裕, 土屋 史紀, 植村 千尋, 木村 智樹
- O-D3-A66 15:45 火星衛星探査計画MMXの進捗2020
   倉本 圭(北海道大学),川勝 康弘,藤本 正樹, Maria Antonella Barucci, David J. Lawrence, 玄田 英典,平田 成,今村 剛,亀田 真吾,小林 正規,草野 広樹,松本 晃治,Patrick Michel, 宮本 英昭,中川 広務,中村 智樹,小川 和律,大嶽 久志,尾崎 正伸,Sara Russel, 佐々木 晶,澤田 弘崇,千秋 博紀,寺田 直樹,Stephan Ulamec,臼井 寛裕,和田 浩二, 横田 勝一郎
- O-D3-A67 16:00 MMX/MEGANEの元素組成データを用いたPhobosの起源の制約について
   平田 佳織(東京大学), 臼井 寛裕, 兵頭 龍樹, 玄田 英典
- O-D3-A68 16:15 MMXローバ搭載用ラマン分光計RAXのエンジニアリングモデル開発状況
   長 勇一郎(東京大学地球惑星科学専攻), 亀田 真吾, 臼井 寛裕, Boettger Ute, 湯本 航生, 小倉 暁乃丞, Ryan Conor, Buder Maximillian, Hagelschuer Till, Routley Selene, Dietz Enrico, Kopp Emanuel, Moral Andoni, Rull Fernando
- O-D3-A69 16:30 モンテカルロシミュレーションによるフォボス表面の メートルスケール以下の起伏の予測
   竹村 知洋(東京大学工学系研究科システム創成学専攻), 逸見 良道, 宮本 英昭

# 《11月14日(土)PM2 口頭発表プログラム Room B》

系外惑星(座長:堀 安範·川島 由依)

- O-D3-B55 15:15 すばる/IRDを用いた赤外ドップラー法によるM型星周りの系外惑星サーベイ 大宮 正士(アストロバイオロジーセンター), 佐藤 文衛, 田村 元秀, 小谷 隆行, 葛原 昌幸, 平野 照幸, 原川 紘季, 工藤 智幸, 日下部 展彦, 宝田 拓也, 高橋 葵, 笠木 結, IRD-SSPチーム
- O-D3-B56 15:30 中間赤外高分散分光による系外地球型惑星の大気組成の検出可能性 藤井 友香(国立天文台), 松尾 太郎
- O-D3-B57 15:45 低温度星周りの水惑星が持つ炭素循環の観測的制約:高層酸素大気による 紫外線トランジット透過率の理論的検討 中山 陽史(東京大学), 生駒 大洋, 亀田 真吾
- O-D3-B58 16:00 系外惑星大気における非平衡化学の影響川島 由依(オランダ宇宙研究所), Michiel Min
- O-D3-B59 16:15 磁場から探る系外巨大惑星の内部組成 堀 安範(自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター)

# 《擬似ポスター発表》

フラッシュトーク

### Room A 11月12日(木)17:00~ (座長:嵩 由美子)

P-D1-A1 オールト雲起源新彗星の力学進化:新彗星の最小近点距離分布 伊藤 孝士(大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台天文シミュレー ションプロジェクト), 樋口 有理可

P-D1-A2 MMX搭載用イオンエネルギー質量分析器の性能評価 出口 雅樹(大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻寺田研究室), 横田 勝一郎, 寺田 直樹, 齋藤 義文, 浅村 和史, 笠原 慧, 松岡 彩子 小惑星リュウグウ形状モデリングの現状 P-D1-A3 平田 成(会津大学コンピュータ理工学部). 平田 直之, 野口 里奈, 嶌生 有理. 杉田 精司, 松本 晃治, 千秋 博紀, 山本 幸生, 村上 真也, 石原 吉明, 津田 雄一, 渡邊 誠一郎. Robert Gaskell. Eric Palmer P-D1-A4 火星ポリゴンにおける、 亀裂方向の 定量化とアナログ実験 植村 千尋(総合研究大学院大学), 中原 明生, 岩田 隆浩, 松尾 洋介, 庄司 大悟, 野口 里奈, 臼井 寛裕 P-D1-A5 FDTD法に基づいた小惑星内部探査の基礎研究 石山 謙(鶴岡工業高等専門学校創造工学科電気・電子コース). 熊本 篤志 P-D1-A6 原始惑星系円盤内に埋没した原始惑星周りの3次元ガス流構造: その形態とペブル降着への影響 桑原 歩(東京工業大学理学院地球惑星科学系, 地球生命研究所), 黒川 広之 P-D1-A7 コンドリュール・リム形成時のダスト形態のモノマーサイズ依存性 金子 寛明(東京工業大学), 荒川 創太, 中本 泰史 P-D1-A8 リュウグウの宇宙風化から見たB型小惑星とC型小惑星の関連 巽 瑛理(カナリア天文物理学研究所, 東京大学), 坂谷 尚哉, 杉田 精司, 本田 理恵, 諸田 智克, 松岡 萌, 亀田 真吾, 長 勇一郎, 吉岡 和夫, 澤田 弘崇, 横田 康弘, 早川 雅彦, 山田 学, 神山 徹, 鈴木 秀彦, 本田親寿, 小川和律 鉄コンクリーションから推測する地下水組成 P-D1-A9 城野 信一(名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻), 柴田 拓真, 吉田 英一, 勝田 長貴 P-D1-A10 熱赤外カメラを用いた多孔質標的の衝突加熱に関する実験的研究 嶌生 有理(宇宙航空研究開発機構), 長谷川 直, 福原 哲哉 P-D1-A11 フォボスシミュラント(UTPS-TB)標的の衝突破壊実験 塩本 純平(神戸大学理学部), 中村 昭子, 長谷川 直, 宮本 英昭, 新原 隆史 P-D1-A12 太陽放射力の下での火星周辺の小さな塵の進化 Liang Yuying(宇宙科学研究所太陽系科学研究系), 兵頭 龍樹 P-D1-A13 DESTINY+による小惑星フライバイ探査を模擬した地上撮像試験 洪鵬(千葉工業大学惑星探査研究センター),石橋高,岡本尚也,奥平修,山田学 将来の惑星探査に向けた高エネルギー電子観測器のASIC技術による小型化 P-D1-A14 菅生 真(東京大学), 笠原 慧, 池田 博一, 小嶋 浩嗣, 菊川 素如, 頭師 孝拓 P-D1-A15 月極域探査の質量分析に資するタンデム型イオン源の開発 柳瀬 菜穂(東京大学), 笠原 慧, 齋藤 義文, 横田 勝一郎, 平原 聖文, 川島 桜也 P-D1-A16 太陽系探査を目指したOrbitrap型質量分析器の開発 川島 桜也(東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻), 笠原 慧, 齋藤 義文. 横田 勝一郎, 平原 聖文, 杉田 精司 P-D1-A17 N体計算を用いた近地球型小惑星の惑星による掩蔽の探索 櫻井 祥(会津大学), 北里 宏平

- P-D1-A18
   簡易的な落下装置を用いた高速度クレーター形成実験: クレーターサイズの重力依存性
   木内 真人(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所), 岡本 尚也, 長足 友哉, 長谷川 直, 中村 昭子
- P-D1-A19
   DESTINY+搭載用ダストアナライザの開発と地上較正計画2020
   平井 隆之(千葉工業大学惑星探査研究センター),小林 正規,荒井 朋子,木村 宏, 薮田 ひかる,天野 翠,小林 幸雄,伊藤 元雄,佐々木 晶,矢野 創, Trieloff Mario, Hillier Jon, Khawaja Nozair, Eckart Lisa, Simolka Jonas, Harald Krueger, Ralf Srama
- P-D1-A20MMX搭載赤外線分光計MIRSの観測計画と開発状況<br/>岩田 隆浩(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所),中川 広務,中村 智樹,<br/>Antonietta Barucci Maria, Reess Jean-Michel, Bernardi Pernelle,<br/>Doressoundiram Alain, Fornasier Sonia, Le Du Michel, Sawyer Eric
- P-D1-A21 (162173) リュウグウ上の岩塊の割れ目の方向の分布と熱疲労効果 佐々木 晶(大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻),神田 志穂,菊地 紘,道上 達広, 諸田 智克,本田 親寿,宮本 英昭,逸見 良道,杉田 精司,巽 瑛理,渡邊 誠一郎, 並木 則行,平林 正稔,平田 成,中村 智樹,野口高明,廣井孝弘,松本晃治,野田寛大, 坂谷尚哉,亀田真吾,神山徹,鈴木秀彦,山田学,本田理恵,長勇一郎,吉岡和夫, 早川雅彦,松岡萌,金丸仁明,澤田弘崇,横田康弘,吉川真
- P-D1-A22
   月の溶岩洞探査用ローバー

   梁 晨(足利大学工学部システム情報分野荒井研究室)
- P-D1-A23
   中心核星と逆回転方向 太陽系外惑星の存在 犬山 文孝(九電産業株式会社環境部)
- P-D1-A24
   ダークマターの宇宙年齢約1億年を特殊相対論,3元時空等によって推算 犬山 文孝(九電産業株式会社環境部)

# フラッシュトーク

# Room A 11月13日(金)17:00~ (座長:嵩 由美子)

P-D2-A25	「はやぶさ2」搭載分離カメラDCAM3によりSCI衝突実験時に観測された放出ボルダ 石橋 高(千葉工業大学), 白井 慶, 和田 浩二, 小川 和律, 坂谷 尚哉, 嶌生 有理, 横田 康弘, 本田 理恵, 門野 敏彦, 荒川 政彦
P-D2-A26	DCAM3D画像を用いた小惑星Ryuguの形状モデル 白井 慶(神戸大学大学院理学研究科),石橋 高,小川 和律,澤田 弘崇, 荒川 政彦, 門野 敏彦,和田 浩二,本田 理恵,坂谷 尚哉, 嶌生 有理
P-D2-A27	すばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam で検出された微小メインベルト小惑星の サイズ分布測定 前田 夏穂(神戸大学), 寺居 剛, 大槻 圭史, 吉田 二美, 石原 昂将, 出山 拓門
P-D2-A28	超木星質量の惑星周囲における巨大衛星の形成可能性 山中 陽裕(京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻宇宙物理学教室), 佐々木 貴教, 芝池 諭人
P-D2-A29	高EUV放射下における初期火星の膨張大気を考慮したフォボスの軌道進化計算 藤田 晃平(東北大学理学研究科), 寺田 直樹, 堺 正太朗, 寺田 香織

- P-D2-A30 弾丸形状が重力支配域クレータ形状に与える影響
   嶌生 有理(宇宙航空研究開発機構), 黒澤 耕介
- P-D2-A31
   機械学習による月地形の自動抽出

   嵩 由美子(会津大学宇宙情報科学研究センター),本田 親寿,出村 裕英
- P-D2-A32 小惑星探査機はやぶさ2搭載中間赤外カメラTIRのデータアーカイブ 荒井 武彦(足利大学工学部創生工学科システム情報分野), 荒井 武彦, 岡田 達明, 田中 智, 福原 哲哉, 出村 裕英, 坂谷 尚哉, 嶌生 有理, 千秋 博紀, 神山 徹, 関口 朋彦
- P-D2-A33
   米欧火星探査機群観測データによる新大気リトリーバル技術の検証 (2)
   ~欧ExoMars Trace Gas Orbiter および 日MMXへの応用展開準備~
   中川 広務(東北大学理学研究科), 笠羽 康正, 青木 翔平, Mahiaux Arnaud, 小暮 李成, 岩渕 弘信, 出村 裕英
- P-D2-A34
   Comet Interceptor ミッション:WGからISAS所内検討チームに移行
   笠原 慧(東京大学), 吉岡 和夫, 坂谷 尚哉, 亀田 真吾, 松岡 彩子, 村田 直史, 船瀬 龍,
   中島 晋太郎, 尾崎 直哉, 字佐美 尚人, 河北, 秀世, 新中 善晴
- P-D2-A35 SCIクレーター周辺のブライトボルダーのスペクトル解析 青木 美波(東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻杉田研究室), 杉本 知穂, 湯本 航生, 巽 瑛理, 諸田 智克, 横田 康弘, 荒川 政彦, 杉田 精司, ONCチーム
- P-D2-A36
   DESTINY+搭載カメラTCAPとMCAPの機上校正計画
   岡本 尚也(宇宙航空研究開発機構),石橋 高,山田 学,洪 鵬,吉田 二美,荒井 朋子, 石丸 貴博,高島 健
- P-D2-A37 火星表面探査に向けた生命兆候探査顕微鏡のブレッドボードモデル開発 吉村 義隆(玉川大学),山岸 明彦,宮川 厚夫,今井 栄一,佐々木 聰,塩谷 圭吾, 三田 肇,小林 憲正,癸生川 陽子,佐藤 直人,佐藤 毅彦,薮田 ひかる,長沼 毅, 藤田 和央,臼井 寛裕
- P-D2-A38
   21P/Giacobini-Zinner 彗星の形成環境

   新中 善晴(京都産業大学),河北 秀世,大坪 貴文,田実 晃人
- P-D2-A39 (3200)Phaethonの可視スペクトルとその自転位相への依存性
   大塚 勝仁(東京流星観測網), 伊藤 孝士, 木下 大輔, 阿部 新助, 澤井 恭助, 船橋 和博, 加藤 遼, 宮坂 正大, 長谷川 直, 中村 智樹, 陳 文屏
- P-D2-A40 月の縦孔下に想定される溶岩チューブの探査項目とその探査精度 本多力(NPO法人火山洞窟学会),春山 純一
- P-D2-A41
   Hera 搭載熱赤外カメラTIRIの開発
   岡田 達明(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所,東京大学),福原 哲哉,田中 智, 千秋 博紀,坂谷 尚哉,嶌生 有理,荒井 武彦,神山 徹,出村 裕英,関口 朋彦,Hera TIRI チーム
- P-D2-A42 周白色矮星円盤モデルの構築: 光球面への重元素供給メカニズムの解明に向けて 奥谷 彩香(東京工業大学理学院 地球惑星科学系), 井田 茂, 兵頭 龍樹
- P-D2-A43
   Abducton with Evolution 理論で仮説は検証できるか?

   起源を探究する方法を提案した.
   種子 彰(SEED SCIENCE Labo. 銀河系・惑星・地球月起源研究室)

P-D2-A44	月の起源仮説で、何故プレートテクトニクスの起源が示せるのか?
	何故地球の海洋底の起源が示せるのか?
	何故環太平洋弧状列島と背弧海盆の起源を示せるのか?
	何故マントル対流が無くてもプレート移動が示せるのか?
	何故プレートが相互に重なり始める事を示せたのか?
	何故太平洋プレートの移動方向が急変する事を示せたのか?
	何故地球自転軸が急に傾いた事を示せたのか?
	種子 彰(SEED SCIENCE Labo. 銀河系・惑星・地球月起源研究室)
P-D2-A45	銀河回転の謎をAbduction with Nature Structure で解明する.
	種子 彰(SEED SCIENCE Labo. 銀河系・惑星・地球月起源研究室)
P-D2-A46	夜空の星は何故星型★に見えるのか? 検証は如何に?
	パラダイムシフト, モデルの限界, 発想の転換, 自然との一致⇒真実に至る道.
	種子 彰(SEED SCIENCE Labo. 銀河系·惑星·地球月起源研究室)
P-D2-A47	赤方偏移の謎, 実証が出来ない宇宙仮説(論), 検証ができる宇宙仮説(論)
	種子 彰(SEED SCIENCE Labo. 銀河系·惑星·地球月起源研究室)
P-D2-A48	月の海は何故表側だけに有るのか,
	Multi-Impact Hypothesisだけが検証できたその理由,
	月が常に地球を向く理由と同じ、月の偏芯形成メカニズムが起因であった.

種子 彰(SEED SCIENCE Labo. 銀河系·惑星·地球月起源研究室)

JSPS Information

# **JSPS** Information

◇日本惑星科学会第137回運営委員会議事録
 ◇日本惑星科学会第138回運営委員会議事録
 ◇第53回総会
 ◇日本惑星科学会賛助会員名簿

# ◇日本惑星科学会第137回運営委員会議事録

日時: 2020年8月3日(月)18:30-20:30

場 所:オンライン開催

#### 運営委員:

出席者 18名

中本 泰史, 中村 昭子, 和田 浩二, 諸田 智克, 玄田 英典, 中島 健介, 寺田 直樹, 田中 秀和, 竹広 真一, 小林 浩, 臼井 寛裕, 奥住 聡, 荒川 政彦, 北里 宏平, 佐伯 和人, 田近 英一, 平田 成, 薮田 ひかる 欠席者5名

中村 智樹, 倉本 圭, 関根 康人, 関 華奈子, 渡部 潤一(委任状:議長1通)

#### オブザーバー:

はしもと じょーじ(2019年学会賞選考委員長) 堀 安範(2019年連合大会プログラム委員) 出村 裕英(2020年秋季講演会組織委員長) 保井 みなみ(総務専門委員)

#### 議題·報告事項:

#### 1. 第15期上期活動報告, 第15期下期活動計画(北里 総務専門委員長)

・2019年度の活動実績及び2020年度の活動計画について、steering MLによる展開の報告があった. 修正が あれば、総会までに総務専門委員長まで報告するようにとのこと.

#### 2. 入退会状況報告(北里総務専門委員長)

・2020年8月3日現在,正会員一般は507名,正会員学生は85名,シニア会員は24名, 賛助会員は3名との報告 があった.

・ここ数年間の会員数と比較すると、正会員学生の会員数が増加したが、他は大きな変化はなかった.

#### 3. 第53回総会の議長・書記の推薦について(北里 総務専門委員長)

・議長に菅原春菜会員(宇宙科学研究所),書記に田中佑希会員(東北大学)がそれぞれ推薦され,承認された. ・コロナ禍のため,第53回総会は8月4日(火)の12:30~13:30に Zoom Webinarを用いたオンライン開催で 実施される.

- 4. シニア会員制度について(諸田総務専門委員)
  - ・会員の種別表を作成したとの報告がされた.一部訂正の上,日本惑星科学会のホームページの入会案内 ページに掲載することが承認された.
  - ・シニア会員のDPS affiliate member入会については、詳細を確認後、検討することになった.

#### 5. 第15期上期一般会計·特別会計決算報告(佐伯 財務専門委員長)

・2019年度決算額は、2018年度と大きく変更はない.

- ・会津大学で開催された探査データ解析実習会(2020年3月)はオンライン開催となったため、旅費補助がなく なった. そのため、2019年度支出の研究会等補助額が15万円の減額となっている.
- ・京都産業大学で開催された日本惑星科学会2019年秋季講演会の収支は,京都産業大学からの補助金の余 剰分返却により,0円となっている.
- ・新型コロナウイルスの影響により、支出が若干減少となっている.
- ・(株)イーサイドへの業務委託費の消費税は、2020年度会計から10%に上昇する。
- ・賃借対照表についての照会があった.

#### 6. 遊星人の発行状況報告(和田編集専門委員長)

- ・コロナ禍においても、ほぼつつがなく順調に発行できている.
- ・印刷所を(株)シュービに変更したことにより、今後、印刷費が1~2割減額になる予定であるとの報告がなさ れた.

#### 7. RFI回答文書改定について(寺田 惑星探査専門委員長)

- ・主査1名、副査4名、会長、委員長含む計89名の部会委員と外部有識者による2019年度RFI回答文書の改 訂作業を行った。
- ・2019年10月6日に検討会を開催,同年11月18日にオンライン全体会議を開催,2020年2月1日に日本惑星科学 会ホームページで公開されたとの報告があった.
- ・2020年度は大きな改訂が実施される予定であるが、コロナの影響で遅延している. そのため、その進行状況 及び2019年度の公開に関しては、2020年度秋季講演会総会で報告する予定である.

#### 8. 日本地球惑星科学連合:プログラム委員会(堀連合大会プログラム委員)

・次年度のプログラム委員について報告があり,田中佑希会員(東北大学)がプログラム委員(正),黒崎健二会 員(名古屋大学)がプログラム委員(副)に推薦され,承諾された.

#### 9. 日本地球惑星科学連合:学協会長会議(中本 会長)

・2020年7月14日に、オンラインによる学協会長会議が開催された.

- ・日本学術会議の近況報告として、次期委員長に田近英一会員が選任されたことが報告された.また、田近委 員は日本地球惑星科学連合の会長にも選任された.
- ・次期学協会長会議議長に,渡辺俊樹物理探査学会会長が選任されたことが報告された.
- ・学協会員の会員減少(特に若手研究者)に関する対策を行うため、2019年にアンケート調査が実施され、その 集計結果が紹介されたとの報告があった。

#### 10.2019年度最優秀研究者賞について(はしもと 学会賞選考委員長)

- ・古家健次(筑波大学計算科学研究センター,現国立天文台科学研究部)を推薦することが提案され,承認された。
- ・応募者は6名で、2020年4月30日に全選考委員による審議が行われた.

#### 11.2020年秋季講演会について(出村 秋季講演会組織委員長)

・新型コロナウイルス感染拡大防止のため、2020年度の秋季講演会はオンラインで開催されると報告があった。

- ・会議日程について、2020年11月12日(木)~14日(土)が提案され、承認された.
- ・オンライン開催の大まかな概要が紹介された.
  - ・オーラルセッションはzoom会議室を用いて行い,発表希望者の発表分野によっては並列セッションを 組む可能性がある.
  - ・擬似ポスターセッションは共有可能な資料を提示し、各種オンラインメディアを用いたオンラインで議論を 行う、ポスターセッションに相当するものである。
  - ・1日目に発表賞セッション及び発表者賞選考委員会,2日目に運営委員会,3日目に総会(発表者賞受賞者 公表)および研究者賞受賞講演を行う.
  - ・参加登録費は無料とする.
  - ・主催は日本惑星科学会と会津大学宇宙情報科学研究センターとする.
  - ·発表申込受付期間は9月1日(火)~14日(月)とし、セッションプログラムの公開は10月頭をめざす。
  - ・参加登録システムは特に設けないが、参加希望者には日本惑星科学会の非会員登録を行う事を指示する。
  - ・翌日の総会にて、2020年秋季講演会オンライン開催に関するアンケートを募る予定である.

#### 12.2021年秋季講演会について(中島 行事部会長)

- ・名古屋大学及び名古屋市立大学が組織委員会として、秋季講演会を開催する旨が報告された。
- ・時期は未確定である.来年度もオンラインでの開催を検討する必要があることが報告された.

#### 13.2022年秋季講演会LOCへの補助について(中島 行事部会長)

・現在交渉中のLOC担当候補において、新型コロナウイルス感染症が収束していない場合を考えると、感染防止のために大きな部屋を使用する必要があり、会場費がかなり大きくなることが予想される。そのため、会場費を含めた運営費に学会から30万円程度の補助を希望したいとの要望があり、承認された。

#### 14. その他

- ・北里 総務専門委員長より, 現在総務委員会内で検討している事案についての報告があった.
  - ・入退会業務の見直し(総務作業の簡略化・自動化)
  - ・委嘱状の発行業務の整備
  - ·会計年度の変更案(1月→4月)の実現性·有用性の検討
- ・玄田 欧文誌専門委員長より, EPSの現状報告があった.
  - ・臨時分担金は終了した.
  - ・編集長及び編集委員の交代が報告された.
  - ・Impact factorが低くなってきたため、今後更なる投稿をお願いしたいとのことである.

### ◇日本惑星科学会第138回運営委員会議事録

- 期 間: 2020年10月23日(金)~10月26日(月)
- **議 題:**第16期役員選挙管理委員の承認について

#### 運営委員:

出席(23名)

中本 泰史, 中村 昭子, 倉本 圭, 和田 浩二, 諸田 智克, 関根 康人, 玄田 英典, 中村 智樹, 中島 健介, 寺田 直樹, 田中 秀和, 竹広 真一, 小林 浩, 臼井 寛裕, 奥住 聡, 荒川 政彦, 北里 宏平, 佐伯 和人, 関 華奈子, 田近 英一, 平田 成, 薮田 ひかる, 渡部 潤一 欠席(なし)

成立条件:期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす.

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

#### 議題: 第16期役員選挙管理委員に下記の会員8名を選出したので承認を求める.

- 北里 宏平(委員長) 平田 成 諸田 智克 奥住 聡 谷川 享行 保井 みなみ
- 小林 浩
- 藤谷 渉

参考:日本惑星科学会役員選挙規定

https://www.wakusei.jp/abstract/rule/rule-elec-steer-18-9-09.html

**審議結果:** 議題は原案のとおり承認された(可23·否0).

### ◇第53回総会

日時:2020年8月4日(火)12:30-13:30

場 所:オンライン開催

**正会員数:**592名 定足数:59名 参加人数:120名 委任状:65通(議長:65通)

1. 開会宣言

北里総務専門委員長が開会を宣言.

#### 2. 議長団選出

運営委員会からの推薦で議長に菅原春菜会員,書記に田中佑希会員が選出された.

#### 3.議事

#### 3.1. 審議事項

#### ・第15期上期(2019年度)活動報告(中本会長)

日本地球惑星科学連合2019年大会,日本惑星科学会2019年秋季講演会の参加者数および発表数,学会誌 の発行状況,最優秀研究者賞および最優秀発表賞の受賞者,各種セミナーやシンポジウムの開催状況,学会 運営等の説明がなされた.

#### ·第15期下期(2020年度)活動方針(中本会長)

先日開催されたJpGU-AGU Joint Meeting 2020,開催予定の秋季講演会,学会誌の発行予定,各種セミ ナーや実習会の開催予定等の説明がなされた.国立天文台の渡部潤一氏を講師に招いて開催予定だった惑 星科学フロンティアセミナーは、コロナ禍のため2021年度に延期することが報告された.

#### ·第15期上期一般会計·特別会計決算報告(佐伯財務専門委員長)

第15期上期の一般会計・特別会計の決算報告についての説明がなされた.秋季講演会の事業収入に関して, 補助金は収支が0となるように返却するシステムであったため,惑星科学会側の収支はプラスマイナスゼロとな

#### 251

JSPS Information

る旨の説明がなされた.また、今年度の水害や新型コロナウイルス感染症などの影響で財政が厳しくなってい る会員向けに、学会費の免除などを実施することも説明がなされた.

#### ·会計監査報告(門野会計監事)

収支決済に誤りの無いことが報告された.

#### ・その他

特になし.

#### ・質疑応答及び討論

なし.

・採択

審議事項の採決が行われ, 賛成: 177(うち出席者112), 反対: 0, 保留: 0により採択された.

#### 3.2. 報告事項

#### ・2019年最優秀研究者賞受賞者発表(はしもと学会賞選考委員長)

古家健次会員(筑波大学,現国立天文台)に授与されることが発表された.

#### ・2020年秋季講演会について(出村秋季講演会組織委員長)

2020年秋季講演会の実施案についての報告がなされた.新型コロナウイルス感染症の影響により,初のオンライン開催とし,なおかつ日程が変更される.開催は11/12-14とし,オーラルセッションに加えて擬似ポスターセッションを検討していることが説明された.

参加登録費は無料だが、参加可能なのは正会員・シニア会員および非会員登録を行った者のみである。発 表受付期間は9/1-14,10月頭にセッションプログラムを公開する予定である。

オーラルセッションはZoom会議室を利用し、パラレルセッションとなる可能性がある.

JpGUとは異なり、アプリ版・ブラウザ版いずれのZoomも使用可能とする予定である.

また擬似ポスターセッションのショートオーラル発表も行われる予定である.

擬似ポスターセッションは,発表者が共有可能な資料を提示してオンラインで議論する形式とする予定である. 近日中に会員に秋季講演会の実施案についてアンケートを実施することが告知された.

辺口中に云貝に朳字碑供云の天爬条に JV・C / J / 「ドを 天爬 りるここが 日知された.

アンケートの回答を元に接続数などの規模の調整や実施形態が定められるので、参加を検討している方は 回答してほしい.

#### ・その他

なし.

#### 4. 議長団解任

#### 5. 閉会宣言

北里総務専門委員長が閉会を宣言.

以上

# ◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2020年11月4日までに, 賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです. 社名等を掲載し, 敬意と 感謝の意を表します. (五十音順)

·Harris Geospatial 株式会社

・株式会社ナックイメージテクノロジー

・株式会社ノビテック

# 編集後記

今号は前号に引き続き特集「古今未曽有の日本の月/ 火星地下世界探査(UZUME)計画」をお送りします. ゲストエディターの春山純一さんのご尽力で充実した 誌面になりました.また,今号も原著論文・連載記事が 集まり,興味深い誌面になったと思います.コロナ禍の 中でも原稿を作成してくださる皆さまに感謝申し上げ ます.

前任者の三浦均さんから引き継いで3年間勤めてき た編集幹事ですが,次号からは瀧川晶さんにバトン タッチ致します.最初は感覚が掴めなくて右往左往し ておりましたが,皆さんの支えがあり,何とか無事に 役目を終えることができそうです.この3年の中で最も 大きな変更は印刷所の変更でしょう.それによって誌 面が大きく変わることのないよう (変更したことに気 がつかれないよう) 努めたつもりですが, どうでしたで しょうか?

さて、コロナ禍で皆さんもバタバタした生活をされ ているのではないかと思います。私のところでは、実 験実習を分散登校・集中講義形式で行うことになり、 10月は1ヶ月間毎日2コマ学生演習という乾いた笑いし か出なくなるようなスケジュールとなってしまいました… コロナ禍は簡単には収まりそうにありませんので、ま だまだ変則的かつ窮屈な生活が続くのかなと思うと ため息が出ますが、気分は前向きにと思っています。

次号からも皆さんからの原稿を心よりお待ちしてお りますので、よろしくお願い致します. (杉山)

編集委員

- 和田 浩二 [編集長]
- 杉山 耕一朗[編集幹事]

春山 純一 [特集「古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査 (UZUME)計画」ゲストエディター] 上椙 真之, 岡崎 隆司, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇気, 黒澤 耕介, 小久保 英一郎, 坂谷 尚哉, 関口 朋彦, 瀧川 晶, 田中 秀和, 谷川 享行, 長 勇一郎, 成田 憲保, はしもと じょーじ, 濱野 景子, 本田 親寿, 三浦 均, 諸田 智克, 山本 聡, 渡部 潤一

2020年12月25日発行

#### 日本惑星科学会誌 遊·星·人 第29巻 第4号

定価 一部 1,925円(税込・送料込)
 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 〒224-0044 神奈川県横浜市都筑区川向町787-1 株式会社 シュービ
 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.

# 学会誌原稿作成の手引き

#### 日本惑星科学会編集専門委員会

#### 原稿の様式

#### ○投稿原稿:

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

#### ○最終稿:

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

投稿原稿送り状の雛型および各チェックリストは ウエブサイト

(https://www.wakusei.jp/book/pp/guide.html) から取得できる.

#### 2. タイトル

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

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

#### 3. 要旨

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

#### 4. セクション

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

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

#### 5. 述語

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

#### 6. 字体

一数字, 英字は半角とする. また() []: ;など区切り記号も半角を用いる.
 一変数は斜体, ベクトルと行列は太字, を使う.

7. 句読点

句読点は全角の","と"."を用いる.

#### 8. 図. 表

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

#### 図作成のガイドライン:

原則として、電子ファイルとして作成すること、解像度 は印刷時実寸で300dpi相当以上、ファイル形式は TIFF, EPS, PDF, JPEG, PNG が望ましい。 やむをえない場合に限り、写真も可とする.その際は L版サイズ以上の大きさで鮮明な写真を送付すること。 送付された写真は原則として返却しない.カラーペー ジは、著者の費用負担により可能.ただし、著者が希望 し、かつ編集委員会が認めたものについては、印刷費 用を学会が負担する.カラー印刷の希望が無い場合、 電子版のみにカラー画像が掲載され、冊子体には白黒 で印刷される.

#### 9. 脚注

脚注は"l"などの記号をつける.

#### 10. 文献の引用

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

本文中での引用は[1], [2]の形で通し番号をつけ, 論文の末尾に一括してリストを載せる。

文献リストは題名は省略し、3人以上の著者は et al. と表記する. 雑誌名などは一般に使われる略称を用い、 ページについては開始ページのみを記すこととする.

#### 参考文献

[1] Wakusei, T. et al., 1989, Astron. Astrophys. 220, 293.

[2] 惑星太郎, 1993, 天文月報 86, 186.

[3] Bohren, C. F. and Huffman, D. R., 1983, Absorption and Scattering of Light by Small Particles (New York: Wiley).

 $\left[4\right]$  Hayashi, C. et al., 1985, in Protostars and Planets II, 1100.

#### 11. 投稿原稿送付先

遊星人編集長 和田 浩二 e-mail:chiefeditor@wakusei.jp

電子メールで送付できない場合は下記へ郵送 〒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 日本惑星科学会事務局 遊星人編集長



# The Japanese Society for Planetary Sciences

