

---

---

# 日本惑星科学会誌 遊・星・人

## 第25巻 第3号

### 目次

---

---

巻頭言 小林 憲正	89
エポックメイキングな隕石たち その9 ～タギシュ・レイク隕石～ D型小惑星由来の隕石～ 藤谷 渉	90
遊星百景 その5 ～小惑星Gaspraのクレーターサイズ頻度分布～ 本田 親寿	94
みんなでふたたび木星へ、そして氷衛星へ その4 ～電波・プラズマ波動観測器RPWIの飛翔へ～ 笠羽 康正, 三澤 浩昭, 土屋 史紀, 笠原 禎也, 井町 智彦, 木村 智樹, 他14名	96
火の鳥「はやぶさ」未来編 その11 ～小惑星の内部構造を探る～ 並木 則行, 水野 貴秀, 千秋 博紀, 山田 竜平, 平田 成, 野田 寛大, LIDARサイエンスチーム	108
一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その28 ～「あかつき」紫外イメージャ本格観測開始!～ 山崎 敦, 山田 学, 渡部 重十, 今村 剛, あかつきプロジェクトチーム	115
「天体の衝突物理の解明(XI)～衝突研究における状態方程式の役割～」参加報告 黒川 宏之	117
「第三回 iSALE 勉強会」参加報告 岡本 尚也	121
2016年度助成事業2件公募のご案内 公益財団法人 宇宙科学振興会	124
2016年度宇宙科学奨励賞公募のご案内 公益財団法人 宇宙科学振興会	125
JSPS Information	126

---

# Contents

---

<b>Preface</b>	K. Kobayashi	<b>89</b>
<hr/>		
<b>Epoch-making meteorites (9)</b>		
—Tagish Lake meteorite, derived from a D-type asteroid—	W. Fujiya	<b>90</b>
<b>My favorite view in planetary sciences (5)</b>		
—Crater size-frequency distribution on Gaspra—	C. Honda	<b>94</b>
<b>Back to Jupiter, with renovated point of view and focus on icy moons</b>		
—Toward the flight of ‘Radio and Plasma Wave Instruments’—		
Y. Kasaba, H. Misawa, F. Tsuchiya, Y. Kasahara, T. Imachi, and 14 authors		<b>96</b>
<b>Phoenix “Hayabusa” : A tale of the future (11)</b>		
—A study of internal structure of asteroid—		
N. Namiki, T. Mizuno, H. Senshu, R. Yamada, N. Hirata, H. Noda, and 1 author		<b>108</b>
<b>Road to the first star : Venus orbiter from Japan (28)</b>		
—Onset of ultraviolet imagery by AKATSUKI—		
A. Yamazaki, M. Yamada, S. Watanabe, T. Imamura, and AKATSUKI project team		<b>115</b>
<b>Report: Meeting “Physics of Impact Process of Astronomical Bodies XI”</b>		
	H. Kurokawa	<b>117</b>
<b>The 3rd iSALE study meeting report</b>	T. Okamoto	<b>121</b>
<b>Announcement of public offering for 2016 grants</b>		
	Society for Promotion of Space Science	<b>124</b>
<b>Announcement of public offering for Space Science Incentive Award</b>		
	Society for Promotion of Space Science	<b>125</b>
<b>JSPS Information</b>		<b>126</b>

## 巻頭言

惑星科学の研究手法は、理論・計算、観測、探査、室内実験など多岐にわたるが、さらに宇宙実験というチョイスがある。宇宙実験というと、どうしても宇宙ステーションの与圧部などを用いた生物実験や材料実験ばかりが目されるが、これは、宇宙環境の様々なパラメータの中でも主として微小重力と放射線に着目したものである。これに対して、宇宙ステーションの曝露部や、小型衛星を用いれば、微小重力に加え、超高真空、宇宙線・太陽紫外線の同時照射、超高速衝突(約10 km/s)など、宇宙環境独自の、地上では達成が難しい種々の実験条件が利用可能となる。

曝露部環境を用いた宇宙実験に関しては、米国よりはむしろ欧州やロシアの方が熱心である。欧州宇宙局(ESA)は、小型衛星を利用した宇宙曝露実験(BIOPAN, LDEFなど)や、国際宇宙ステーション(ISS)の欧州・ロシア実験モジュールの曝露部を利用した有機物や微生物の曝露実験(EXPOSE-E, EXPOSE-Rなど)を行ってきた。また、ロシアは人工衛星FOTON-M4の壁面に微生物などを埋め込み、これを地球大気に再突入時させ、その生存可能性を調べる実験なども行っている。

ISSの日本実験モジュール「きぼう」には大型の曝露部が設置されているが、主として観測や人工衛星搭載機器のテスト用などに用いられてきた。2015年5月に開始された「たんぽぽ」は、日本初のアストロバイオロジー・惑星科学関連の宇宙実験である。超低密度のシリカエアロゲルを用いたダストの捕集や、微生物や有機物の宇宙曝露が行われており、2016年6月には一部の試料が与圧部に回収され、近く地球に帰還後、試料の解析が始まることになっている。地球生物圏外で捕集された宇宙塵は、小惑星や彗星試料などとの比較により宇宙での物質進化に関する新たな知見を与えてくれるだろう。また、これを契機に国際協力による宇宙実験プロジェクトへの発展も期待されている。あなたの研究においても「宇宙実験」というチョイスを考えてみてはどうだろうか。

小林 憲正(横浜国立大学大学院工学研究院)

# エポックメイキングな隕石たち(その9)： ～タギシュ・レイク隕石～ D型小惑星由来の隕石～

藤谷 渉<sup>1</sup>

2016年7月3日受領, 査読を経て2016年7月5日受理.

(要旨) タギシュ・レイク隕石は, 反射スペクトルのデータからD型小惑星を起源としている可能性が高い. 物理的, 岩石鉱物学および地球化学的な特徴はこの隕石が既存の化学グループには属さず, 非常に始原始的で特異な炭素質コンドライトであることを示す. その特徴は, 小惑星帯の外縁部に多く存在するD型小惑星に予想されるものと調和的である.

## 1. はじめに

本稿では, 既存の化学グループには属さない炭素質コンドライトであるタギシュ・レイク (Tagish Lake) 隕石について紹介する. この隕石は比較的最近落下したものであるが, 太陽系物質の多様性や小惑星帯外縁付近の天体の性質, 母天体における物質の変成過程を理解するための貴重な試料として認識されており, 今日まで活発に研究されている.

タギシュ・レイク隕石は, 2000年1月18日にカナダ北部のタギシュ湖に落下した落下目撃隕石である [1]. この隕石が落下した冬の時点では湖は凍結しており, 春に氷が溶けるまでこの隕石は液体の水にさらされることはなかった. 地域住民のジム・ブルック (Jim Brook) は落下からわずか1週間後の1月25日に凍結した湖面から隕石の破片を発見し, 26日にかけて回収した. 回収した隕石は素手で触ることなくビニール袋に入れ, 凍結した状態で保存された. その結果, 極めて保存状態がよく地球上での汚染を最小限に抑えることができたのである. このように回収・保存された破片はおおよそ850グラムにのぼる. これから説明するように, タギシュ・レイク隕石は始原始的かつ特異な隕石で, 非常に学術的価値の高いものであるが, その隕石がこのようによい状態で保存されていたのは幸運と言



図1: タギシュ湖の地図. 矢印は火球の進行方向を, 楕円はタギシュ・レイク隕石が発見・回収された場所を示す. 理由は不明だが, Googleマップ日本語版にはタギシュ湖がタギシュ・レイク隕石と表記されている. Googleマップより(地図データ: Google).

うほかないだろう. なお, 春になって氷が溶けた後も10 kg程度の隕石片が回収されており, 隕石片が回収された場所は湖上で16 kmの長さの領域に及んでいる (図1).

## 2. タギシュ・レイク隕石の物理的特徴

タギシュ・レイク隕石は密度が $1.6 \text{ g/cm}^3$ ほどであり, これはCIやCMコンドライト (それぞれ $2.2\text{--}2.3$ と $2.6\text{--}2.9 \text{ g/cm}^3$ ) と比較して非常に小さい値である. そのぶ

1. 茨城大学 理学部  
wataru.fujiya.sci@vc.ibaraki.ac.jp

ん空隙率は高く、40%ほどである。2000年に回収された直後、タギシュ・レイク隕石の細粒マトリクスは非常に脆かったと言われている。

タギシュ・レイク隕石のメテオロイドが大気圏に突入する際のさまざまな物理量は、衛星および地上からの火星の観測によって推定されている[1]。それによると、タギシュ・レイク隕石のメテオロイドが大気圏に突入した時点での総重量は約200トンで、その質量の大半を大気中で失ってしまった。大気圏への突入速度は約16 km/s、突入角度は17°と非常に浅い。このことが、低密度・高空隙率で強度の低い物質が上空で粉々に破壊されることなく、ある程度の大きさのまま地表面に落下した要因となった。

後にも触れるが、地球の成層圏で回収される惑星間塵(Interplanetary Dust Particle: IDP)や南極氷床から回収される微隕石(Micrometeorite)を含む宇宙塵の中には、鉱物組成がタギシュ・レイク隕石に類似したものがかなりの頻度で見られる。一般に、IDPの密度はタギシュ・レイクと同様に小さく、その多くは脆いことが知られている。このことは、タギシュ・レイク隕石のような強度の低い物質の破片が宇宙塵として地球上に降着していることを示唆しているのかもしれない。つまり、このような物質は宇宙塵として地球上で回収することができる一方、隕石としてある程度の大きさのものを手にするのは難しいのである。

### 3. タギシュ・レイク隕石の構成鉱物と水質変成作用

タギシュ・レイク隕石の岩石鉱物学的な特徴として特筆すべきは、その反射スペクトルが他のどの炭素質コンドライトとも異なり、D型あるいはT型小惑星のそれと類似していることである[2,3]。Hiroi et al. (2003)は小惑星308 Polyxoをタギシュ・レイク隕石母天体の候補として提案している[3]。D型小惑星の軌道長半径はほとんどが3 AU以上であり、普通コンドライトや他の炭素質コンドライトの母天体(S型やC型小惑星)よりも太陽から遠い位置に存在している。もし小惑星の形成した場所が現在の小惑星帯の位置だったとしたら、D型小惑星はC型小惑星より揮発性物質やプレソーラー粒子の存在度が高く、また、熱変成度の影響も小さい可能性がある。

タギシュ・レイク隕石は角礫岩の組織を示す。タギ

シュ・レイク隕石を構成する物質は主に層状ケイ酸塩のマトリクス、コンドルール、カンラン石の結晶片であり、水質変成の影響が顕著である[4]。難揮発性包有物もわずかに確認できる。マトリクスにはマグネタイト、Fe-Ni硫化物や炭酸塩鉱物が含まれる。マトリクスに含まれる炭酸塩鉱物の存在度は試料によって様々であり、初期分析における岩石学的記載では、炭酸塩鉱物に富む岩相と乏しい岩相が存在することが示されている。マトリクスを構成する層状ケイ酸塩鉱物は主にサポナイトであるが、蛇紋石をかなり含む部位も存在する。上述のような鉱物の組み合わせは多くの含水IDPと共通しており、含水IDPの母天体はタギシュ・レイク隕石の母天体に類似したD型小惑星であると考えられる。

ところで、タギシュ・レイク隕石には炭酸塩鉱物に富む岩相と乏しい岩相が存在すると述べたが、水質変成の程度やそれに伴う有機物の組成の変化などから、より多様な岩相が存在することが示唆されている[5]。筆者もこの隕石から、今まで報告例のない大きい粒子サイズ(約100マイクロメートル)の炭酸塩(ドロマイト)を発見し、多様な岩相が存在することを裏付けるものとして解釈している(図2)。なお、この岩相はコンドルールや多量のマグネタイトを含んでおり、CIやCMコンドライトの組織とは異なる。このドロマイトが形成した年代は $^{53}\text{Mn}$ - $^{53}\text{Cr}$ 年代測定から4564 Ma

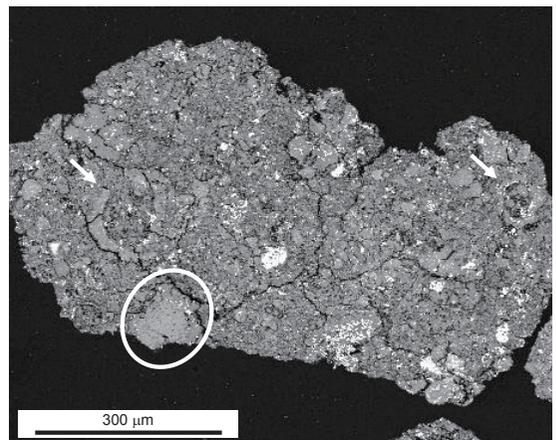


図2：タギシュ・レイク隕石の薄片の電子顕微鏡(反射電子)像。丸で囲った部分の薄いグレーに見える鉱物は粒子サイズの大きな(約100  $\mu\text{m}$ )の炭酸塩(ドロマイト)。矢印で示したのはコンドルール。白く見えるものはマグネタイトや硫化物。他にも小さな岩片が観察でき、角礫岩であることを示している。[6]より改編。

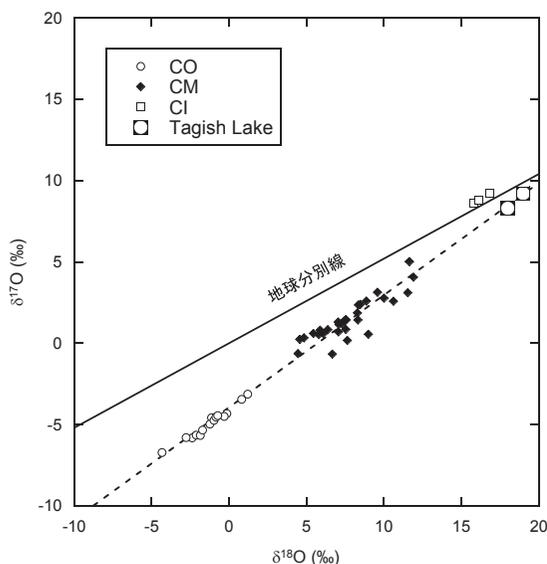


図3: タギシュ・レイク隕石, CI, CM, COコンドライト全岩の酸素同位体比を示す三酸素同位体図. タギシュ・レイク隕石の酸素同位体比は他のいずれの隕石とも異なるが, CM, COコンドライトのデータ点の回帰直線上の $^{17}\text{O}$ に富む側にプロットされる. データは[1,14]より.

と判明しており, これが地球外起源である(すなわち, 地球上での風化作用によるものではない)ことは明白である. この形成年代は, 他の水質変成を受けたコンドライト(CIやCMコンドライト)に含まれる炭酸塩鉱物の形成年代とほぼ同じである[6]. すなわち, 水質変成のタイミングはどの隕石母天体でもそれほど変わらなかったと考えられる.

タギシュ・レイク隕石には無水ケイ酸塩を含むコンドラールが観察され, CIコンドライト(岩石学的タイプ1)のようにコンドラールや無水ケイ酸塩が存在しない隕石より水質変成の程度が低いと考えられる. このことから, 岩石学的タイプは2とするのが妥当である. また, 層状ケイ酸塩の鉱物種や炭酸塩鉱物の存在度および化学組成が異なること, 多量のマグネタイトを含むことから, CMコンドライトとも区別される. このように, タギシュ・レイク隕石の岩石鉱物学的観察から, この隕石は既存の化学グループには属さない特異なものであることが結論される.

#### 4. タギシュ・レイク隕石の地球化学的特徴

よく知られているように, 隕石全岩の酸素同位体比は隕石の分類をするうえで重要な分析値である. タギシュ・レイク隕石の酸素同位体比は, CIやCMコンドライトのいずれとも異なる[1]. 三酸素同位体図上で, タギシュ・レイク隕石はCMとCOコンドライトのデータ点の回帰直線上に,  $^{17}\text{O}$ に富む側にプロットされる(図3). 同じような温度で水質変成を経験しているとする, 酸素同位体比からタギシュ・レイク隕石はCMコンドライトよりも水を多量に含んでいると考えられ, その水/岩石比(酸素原子数比)は1.2と見積もられている[7]. また近年, Cr安定同位体比も隕石の分類に有用であることがわかり, Crの最も中性子に富む同位体である $^{54}\text{Cr}$ の存在度( $^{54}\text{Cr}$ 同位体異常)が隕石の化学グループごとに異なっていることが知られている. タギシュ・レイク隕石全岩の $^{54}\text{Cr}$ 同位体異常はCMとCIコンドライトの中間的な値を示すが, ケイ酸塩相に限定すると同位体異常はすべての隕石の中でもっとも大きい[8].

タギシュ・レイク隕石の炭素含有量は5.8 wt%であり, 他のどのコンドライトよりも多い[9]. 有機炭素の存在量は2.6 wt%でCMとCIコンドライトの中間的な値である. プレソラー粒子であるナノダイヤモンドの存在量はおよそ4000 ppmですべてのコンドライトの中でもっとも多い. プレソラー粒子の存在度が大きいということは, 先に述べたように, タギシュ・レイク隕石のケイ酸塩相の $^{54}\text{Cr}$ 同位体異常がすべてのコンドライト中で最も大きいということと関係しているのかもしれない. 一方でプレソラーケイ酸塩相の存在度は非常に低く, 水質変成によって失われてしまった結果であると解釈できる. Feをほとんど含まないカンラン石がマトリクスにごく少量しか存在しないことはこの解釈を支持しているであろう[10].

全岩の化学組成については, 大まかに述べると, タギシュ・レイク隕石はCMコンドライトと比較して揮発性元素に富んでいるが, CIコンドライトよりは乏しい[11,12]. 難揮発性元素は逆の傾向を示す. このようにタギシュ・レイク隕石はCMとCIコンドライトの中間的な元素存在度パターンを示すように思える. しかし, 揮発性・中程度の揮発性・難揮発性の3つの

元素の比(例えばZn/MnとSc/Mn比)を縦軸・横軸にとったグラフにCMとCIコンドライトの組成をプロットすると、タギシュ・レイク隕石のデータはこれらの隕石のデータの混合線上にはプロットされないことがわかる。

以上述べてきたように、地球化学的な特徴からタギシュ・レイク隕石は炭素質コンドライトに分類され、非常に始原的な物質であるが、既存の化学グループには属さない特異な隕石であることがわかる。

## 5. おわりに

これまで述べてきたように、タギシュ・レイク隕石は非常に始原的で特異な隕石であり、既存の化学グループに分類することはできない。反射スペクトルのデータから、タギシュ・レイク隕石の母天体はD型小惑星である可能性が高い。タギシュ・レイク隕石の岩石鉱物学的観察あるいは地球化学的分析から、D型小惑星は揮発性元素やプレソーラー粒子、水や炭素を多く含むこと、熱変成の影響をほとんど受けていないこと、密度が小さく空隙率が大きいことなどが明らかになった。このような特徴は、D型小惑星が小惑星帯の外縁部に存在していることと整合的である。タギシュ・レイク隕石はD型小惑星が起源だと考えられる数少ない隕石の一つだが(WIS 91600という隕石もD型あるいはT型小惑星由来かもしれない)、宇宙塵にはこれに類似した試料が高い頻度で含まれている。直径1 mm以下の宇宙塵は地球へ年間 $(40 \pm 20) \times 10^6$  kg落下し[13]、この降下量は全地球外物質の降下量の90%以上である。そのため、D型小惑星由来の物質は地球上の水や有機物を含む揮発性物質の起源を理解するために重要であり、タギシュ・レイク隕石はそのための貴重な手がかりである。この隕石の詳細な分析によって、太陽系の揮発性物質の始原的な姿やそれが小惑星内で変成されていく過程が明らかになるものと期待される。

## 謝辞

木村真博士、野口高明博士、岡崎隆司博士には本稿を執筆する機会を与えていただき、また、注意深く原稿を読んでいただきました。本稿を査読していただいた野口高明博士には有益なコメントをいただきました。

ここに御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] Brown, P. G. et al., 2000, *Science* 290, 320.
- [2] Hiroi, T. et al., 2001, *Science* 293, 2234.
- [3] Hiroi, T. and Hasegawa, S., 2003, *Antarct. Meteorite Res.* 16, 176.
- [4] Zolensky, M. E. et al., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 737.
- [5] Herd, C. D. K. et al., 2011, *Science* 332, 1304.
- [6] Fujiya, W. et al., 2013, *Earth. Planet. Sci. Lett.* 362, 130.
- [7] Clayton, R. N. and Mayeda, T. K., 2001, 32nd Lunar Planet. Sci. Conf. #1885 (abstr.).
- [8] Petitat, M. et al., 2011, *Astrophys. J.* 736, 23 (8pp).
- [9] Grady, M. M. et al., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 713.
- [10] Nakamura, T. et al., 2003, *Earth Planet. Sci. Lett.* 207, 83.
- [11] Friedrich, J. M. et al., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 677.
- [12] Mittlefehldt, D. W. et al., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 703.
- [13] Love, S. G. and Brownlee, D. E., 1993, *Science* 262, 550.
- [14] Clayton, R. N. and Mayeda, T. K., 1999, *Geochim. Cosmochim. Acta* 63, 2089.

# 遊星百景「私のお気に入りの地形」その5 ～小惑星Gaspraのクレーターサイズ頻度分布～

本田 親寿<sup>1</sup>

遊星百景シリーズの連載が始まって1年経ちました。地形に偏った雰囲気がありますが、この連載の対象は地形に限ったものでもないと思います。例えば普段皆さんが研究を進める上で発想のきっかけになった実在する天体はすべて含まれます。そこで、連載タイトルを少し変更しました。連載記事の依頼を受けるかどうか判断に悩むかも知れませんが、新しいタイトルからも分かるように連載記事の対象・枠組みは広いので気軽にご判断頂きますと幸いです。

さて、今回紹介するのは小惑星Gaspraです。1991年10月に探査機ガリレオに搭載されたSolid State Imaging Camera (SSI)によってGaspraをフライバイしたときに撮像されました。クレーターサイズ頻度分布(以下CSFD)に関する詳細な論文は、Chapmanら[1]によるものが1996年にIcarusに掲載されました。1997年、私が学部4年生になって月のCSFD関数の形状について勉強・研究を始めたころには既に論文が出ていたはずなのですが、出来のよくない学生だったため修士1年になってようやくこの論文に気づきました。

当時私は、月の海で見られるCSFDが直径300 m - 4 kmの範囲でベキの傾きが急勾配になる原因について古い論文をレビューし、過去に挙げられていた仮説について検証するためにルナオービターやアポロの写真を使ってクレーターの計測を行っていました。この直径の範囲でCSFDが急勾配になっていることを説明する2大仮説は、「衝突天体のサイズ頻度分布の形を反映している」「二次クレーターのサイズ頻度分布を反映している」というものです。衝突天体のサイズ頻度分布を調べるために良い対象が小惑星に形成された



図1：小惑星Gaspra (Galileo SSIモザイク画像を切り出して作った画像)。空間分解能は53 m/pixel。Gaspraは19×12×7 km。

クレーターです。小惑星だとクレーター形成時の放出物によって形成される二次クレーターは小惑星表面にほとんど形成されないとすると、小惑星上のCSFDは二次クレーターの影響を受けずに衝突天体のサイズ頻度分布を反映していると考えられます。残念なことに、それまで他に探査された小惑星のCSFDは飽和していました。ところがGaspraのCSFDはかろうじて飽和サイズ分布に達しておらず、ベキ数も比較的急勾配を示していました。月のクレーターを計測していた私は、丁寧に二次クレーターを除いてCSFDを作らなければ二次クレーターの影響を受けてしまうことを実感していました。このこととGaspraのCSFDから、CSFDが急勾配になる原因は2大仮説のうちどちらとも間違いではなく、その組み合わせの結果現在の観測される

1. 会津大学コンピュータ理工学部  
chonda@u-aizu.ac.jp

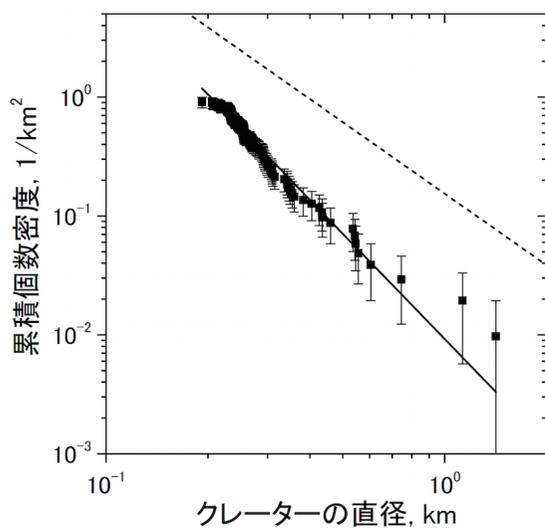


図2：Gaspraのクレーターサイズ頻度分布。確認のために今回GaspraのCSFDを調べてみました。黒四角はGaspraのCSFD。実線は回帰直線(べき数 -2.9)、破線は10% Geometric Saturation(べき数 -2)を示す。

CSFDが作られているという思いを強くしていきました。月のクレーターばかりやっていたら気づかなかった視点を与えてくれた小惑星がGaspraでした。

## 参考文献

- [1] Chapman, C. R. et al., 1996, Icarus 120, 231.

# みんなでふたたび木星へ、そして氷衛星へ その4 ～電波・プラズマ波動観測器RPWIの飛翔へ～

笠羽 康正<sup>1</sup>, 三澤 浩昭<sup>2</sup>, 土屋 史紀<sup>2</sup>, 笠原 禎也<sup>3</sup>, 井町 智彦<sup>4</sup>,  
木村 智樹<sup>5</sup>, 加藤 雄人<sup>1</sup>, 熊本 篤志<sup>1</sup>, 小嶋 浩嗣<sup>6</sup>, 八木谷 聡<sup>3</sup>,  
尾崎 光紀<sup>3</sup>, 石坂 圭吾<sup>7</sup>, 埜 千尋<sup>8</sup>, 三好 由純<sup>9</sup>, 阿部 琢美<sup>10</sup>,  
Baptiste Cecconi<sup>11</sup>, 諸岡 倫子<sup>12</sup>, Jan-Erik Wahlund<sup>12</sup>,  
JUICE-RPWI日本チーム

(要旨) 欧州宇宙機関(ESA)木星探査機JUICEに搭載される電波・プラズマ波動観測器RPWI(Radio Plasma Wave Instruments)は、欧州チームにとり米土星探査機カッシーニ搭載のRPWS、日本チームにとり月探査機かぐや・ジオスペース探査衛星ERG・日欧水星探査機BepiColombo搭載の電波・プラズマ波動・レーダー観測器群からの発展展開となる。木星・衛星周回軌道への初投入となる低温電子・イオンおよびDC電場観測機能、電磁場三成分のプラズマ波動観測機能、電波の方向探知・偏波観測機能、および高度オンボード処理によるパッシブ表層・地下探査レーダー機能や波動・粒子相互作用検出機能により、木星磁気圏の構造・ダイナミクスおよびガリレオ衛星群との相互作用、氷衛星の大気・電離圏および氷地殻・地下海へのアクセスを狙う。2016年7月に仙台で行われた「RPWIチーム会合」での最新状況を踏まえ、1970年代に遡る本チームの経緯・目標・展望を述べる。

## 1. 木星システム電磁圏 ～最強かつ複雑な巨大惑星-衛星結合系への挑戦～

木星は、全惑星の7割に達する質量・角運動量を持ち、太陽系惑星システムを代表する。こうした巨大ガス惑星は宇宙に溢れており、その理解は「宇宙に遍在する惑星」の理解へ直結する。木星が伴うガリレオ衛星群は「大きな天体を巡る小さな天体群」として発見者ガリレオに地動説への確信をもたらしたものの<sup>1</sup>、巨大惑星からの潮汐による継続的なエネルギー投入を伴う

氷衛星(エウロパ・ガニメデ・カリスト)・火山衛星(イオ)として特異である。イオ火山ガスは電離して木星磁場に錘として付加され、これが木星自転から巨大な電磁エネルギーを引き出す導火線ともなる。こうした惑星-衛星間相互作用は、恒星近傍を周回する系外惑星群の理解の母体ともなる。

地球の約2万倍に達する磁気双極子モーメントを擁する高速回転天体(自転周期:約10時間)が火山衛星・氷衛星群を振り回すこのシステムは、外惑星へのアクセス能力を持つ唯一の国アメリカによって挑戦を受けた、バイオニア・ボイジャー・ユリシーズ・カッシーニ・ニューホライズン等によるフライバイ接触、また1995-2003年にはガリレオ探査機の周回探査による挑戦を受けてきた。ガリレオ探査機はアンテナ・レコーダ故障から通信量が限定された(160 bps、予定の3桁減)が、氷衛星フライバイ時の磁場擾乱から、地下の導電層、おそらくは「塩水の地下海」を示唆するなど新たな問題を示した。

日本では、東北大等による木星電波観測(~20

1. 東北大学 理学研究科 地球物理学専攻  
2. 東北大学 惑星大気・プラズマ研究センター  
3. 金沢大学 自然科学研究科 電子情報科学専攻  
4. 金沢大学 総合メディア基盤センター  
5. 理化学研究所 仁科加速器研究センター  
6. 京都大学 生存圏研究所  
7. 富山県立大学 工学部 情報システム工学科  
8. 情報通信研究機構 電磁波研究所  
9. 名古屋大学 宇宙地球環境研究所  
10. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
11. LESIA, Observatoire de Paris, France  
12. IRF-Uppsala, Sweden  
kasaba@pat. gp. tohoku. ac. jp

MHz帯)が1970年代に開始。惑星到達能力を持つ前から木星探査は囑望された。この野心が火星探査機のごみ、月探査機かぐや、金星探査機あかつきに至る「日本の惑星への道」の源流だが、木星への挑戦は小型科学衛星シリーズ初号機「ひさき」の打ち上げ(2013)によって一部実現を見た。我々も中核メンバーを形成するこの極端紫外線・紫外線宇宙望遠鏡は、小規模な地球周回軌道からの遠望とはいえイオ噴出ガス(イオトラス)・オーロラ全輝度の初の継続観測を実現。ハッブル宇宙望遠鏡やJAXAすざくなどX線望遠鏡群との国際キャンペーンにも成功し、ガリレオ衛星群からの物質放出と木星電磁圏からのエネルギー放出の時空間変動とその間の因果関係研究に新境地を開きつつある(例えば[1])。2016年7月にはNASA探査機ジュノーが木星に到達し、人類は13年ぶりに木星周回機を得た。この探査機は初めて極周回軌道に入り、雲層下に至る対流圏深部の大気組成や極域-磁気圏結合の解明に挑戦する。日本側チームも、ひさき望遠鏡および光赤外・電波地上望遠鏡による継続観測によってジュノーを支える国際連携チームを形成しており、これに要するデータアーカイブ構築の渦中にある(例えば東北大-パリ天文台「SAKURA計画」[2])。

隣の巨大惑星・土星には、米探査機カッシーニが2004年の「南半球の夏」に到着。ほぼ完璧に機能し、2017年9月の土星突入"Grand Finale"に向け、最後の「北半球の夏」を熱く過ごしている。欧州研究者は長年米探査機群観測装置チームに参画し、カッシーニでもRPWS(Radio Plasma Wave Science) [3]の中核をなす。土星は木星と地球の中間の磁気双極子モーメント(地球の約600倍)を持ち、双方の中間的な性格をもつ。RPWSセンサー群の1つ「3軸モノポールアンテナ」は、南北電波源の偏波による分離能力によって「南北半球で異なる磁気圏自転周期」の発見など土星系の電磁天体としての性格に新知見をもたらした(例えば[4])。また氷衛星の1つ、エンセラダスはその地下海から大量の水を周辺空間へ噴き出している(ブルーム)。RPWSセンサー群の1つLangmuir Probeはこのブルーム中ダストの研究で傑出した成果をあげた(例えば[5])。折しもエウロパでも、地下からの水噴出の兆候がハッブル宇宙望遠鏡による表層紫外線発光観測に伴って確認され[6]、ガニメデでも同様の観測で得られた紫外線発光分布変動から「塩水の地下海」の存在が

示唆される[7]。高速自転、強力な固有磁場、大量の水/氷噴出で供給される低温衛星・磁気圏プラズマ、太陽系外縁の弱い太陽風等の諸要素に支配される土星での新発見現象・過程の多数が、木星システムでも期待されうる(例えば[8])。

RPWS欧州側チームを構成する2つの主要機関、パリ天文台(フランス)とIRF ウプサラ(スウェーデン)は、我々のPI-ship下で開発を進めてきた日欧水星探査計画BepiColombo・MMO(2018年打上予定)に搭載されるPWI(Plasma Wave Investigation) [9]の主要メンバーでもあり、またこの成立前から頻繁な往来がある。長年の木星・太陽電波観測におけるパリ天文台との同志関係、2000年のBepiColombo計画正式スタートから綿々と続く、我々のパリ・ウプサラ長期滞在、欧州の面々の京都・相模原長期滞在、諸岡・Wahlund(IRFウプサラ)の仙台長期滞在、カッシーニ等を舞台とした探査機データ解析の共同研究や数々の国際会議、これらに伴う無数の昼食・夕食・漫談、月探査機かぐや搭載のLRS(月レーダーサウンダー) [10]の成果、打ち上げ迫るジオスペース探査衛星ERG搭載PWE(プラズマ波動観測器)からの展開・・・互いのモチベーションと能力を持ち寄り噛み合わせ、ESA探査機に乗り込むいや同乗させて頂くこの「日欧横断物語」は生まれ出た。

## 2. RPWIの目標: “If it is electrified & wiggles – It is ours !”

木星磁気圏・衛星電離圏には、様々な時間・空間スケールを持つ電磁界が存在する。数100 Hz以下の遅い変動は電場によるプラズマ大規模輸送・加速を引き起こし、kHz以上の速い変動はプラズマ密度・組成・エネルギー分布情報、および無衝突プラズマの最重要エネルギー過程「波動-粒子相互作用」による粒子加速・加熱を特徴づける。In-situ観測される低周波「プラズマ波動」は、粒子・磁場観測とともに活動域の現場情報を我々にもたらす。Remote観測される高周波「電波」はこの現場群から飛来し、赤外線・可視・紫外線・X線観測とともに「高エネルギー粒子加速・加熱域」の時間・空間変動および全活動量の情報をもたらす。電波はまた伝搬・反射経路の情報を含み、衛星電離圏の密度情報や氷衛星の表層・地下構造情報をも

たらず。

木星周回した先行機器, ガリレオ探査機PWI (Plasma Wave Instrument) [11]とジュノー探査機 Wavesは以下の制約を抱える。(A) Langmuir Probe: 搭載せず。火山・氷衛星に由来する低温プラズマ(〜数eV)へのアクセス能力がない。(B) 電場計測: 1軸観測(Tip-to-Tip長: ガリレオ 6.6 m, ジュノー 4 m)に留まり, 方向探知・偏波観測能力が欠如。米・ユリシーズ(とカッシーニ: flyby距離は137木星半径[R<sub>J</sub>])は, 三軸電場観測機能を有したが, フライバイ観測であったため期間・位置(緯度・経度)が限られる。またDC電場観測機能がなく(下限周波数: ガリレオ 5.6 Hz, ジュノー 50 Hz), プラズマ輸送・加速の探知が困難である。

土星探査機カッシーニ搭載のRPWS[3]では「Langmuir Probe」「3軸電場モノポールアンテナ(10 m長)」で取り除かれ, 1章に掲げた「南北非対称性」や「衛星エンセラダス噴出プラズマ」などの発見を生んだ。RPWIの基本構想はこの機器を基礎とし, ジュノー探査機がカバーしない木星の中低緯度磁気圏および氷衛星フライバイ・周回観測に要するIn-situ・

Remote観測能力を持つ。近年のデジタル部の大規模化・高速化の恩恵による高度オンボードデータ処理機能も盛り込まれ, 木星-火山・氷衛星結合システムの電磁構造・変動とそのプロセス解明における基盤機器の1つとして, JUICE計画において磁場・粒子(in-situ)や紫外・可視・赤外・高速中性粒子(remote sensing)とともに, 「木星およびガリレオ衛星環境観測」に枢要な位置を占める。DCから45 MHzに至る全電磁擾乱が我々の世界である。PIのJan-Erik Wahlund曰く, "If it is electrified & wiggles - It is ours!"

RPWIは, 日本チームにとり以下2つの合流点に位置する。(1)外惑星研究: 稼働中の紫外線・極端紫外線望遠鏡衛星ひさきによる木星系長期継続観測, 日本側も解析参加するカッシーニ(土星)・ジュノー(木星), そして長期蓄積で両者を支援する地上観測(東北大ハレアカラ 40 cm/60 cm望遠鏡・飯館IPRT-31 m電波望遠鏡[12]や建設途上にあるハレアカラ惑星・系外惑星専用望遠鏡2 mおよび東大アタカマ望遠鏡TAO 6 mなどによる継続モニターや, 公開利用のSubaru 8 m・IRTF 3 m・インドGMRT電波干渉計など大中望

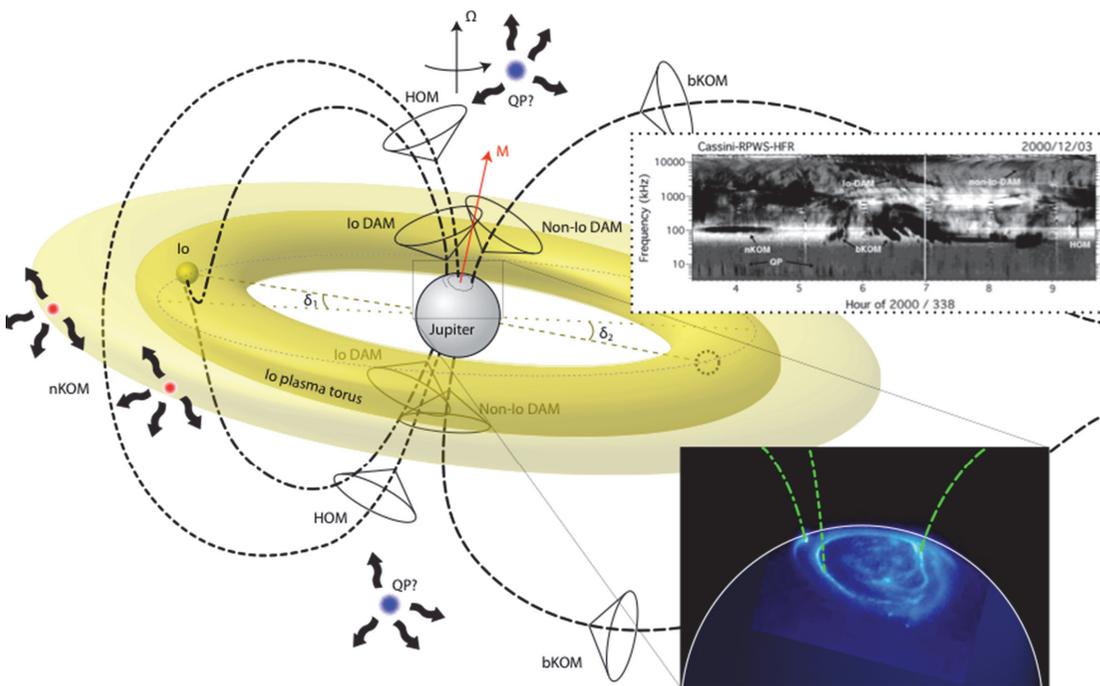


図1: JUICE RPWI高周波受信機(HF)の計測範囲に入る木星電波源群([22] Fig.2を改定).

遠鏡によるキャンペーン観測)。(2)地球・月・水星研究：稼働中のGeotail衛星，2016年度打ち上げ予定のERG衛星など地球磁気圏探査，かぐや探査機による月環境・地下電波サウンダー探査，これらの成果を展開するBepiColombo水星探査。平行して行いつつある系外惑星システム観測やこれらを横断・包含する数値モデル研究も含め，これらが我々および次世代研究者の問題意識をJUICE探査に向け深化させていく。

## 2.1 木星電離圏-磁気圏システム ～高速回転天体による巨大磁気圏の駆動～

木星は，中性大気と力学結合する「電離圏」が沿磁力線電流を介して「磁気圏」につながる結合系を介し，惑星本体の自転エネルギーを運び出すことで磁気圏の巨大な活動エネルギーを賄う。RPWIは，3軸DC電場情報を木星衛星圏・磁気圏(高密度域)で初観測し，この機構を支えるプラズマ運動・輸送の情報をもたらす。またポインティングフラックスの観測から，木星-磁気圏結合を支える磁力線上エネルギー交換の方向・量の評価につなげる。

木星電波源の位置を図1に示す。電磁結合を担う沿磁力線電流は，磁気圏の高エネルギー粒子によって賄われる。これらは木星極域大気へ衝突して電波～X線に広がる「オーロラ」を生む(衛星でも同様の発光が見られる)。電波域では数10 kHz～40 MHzにわたる非熱的放射を生むが，この励起周波数は磁場強度・プラズマ密度すなわち「電波源の高度」を示し，またその空間分布・強度は「沿磁力線電流の分布・強さ」を示す。また2.2項で述べる内部-外部磁気圏結合に伴い，内部磁気圏へ進入する高エネルギー粒子がイオトラスへ衝突して別の電波放射も放つ。JUICEの観測は赤道面近傍から行われるため，南北両極・赤道域に広がるこれら電波活動を概ね連続モニタ可能である。3軸性を生かす方向探知能力・偏波解析能力で電波源位置を求め，紫外・赤外線リモート観測と共に活動域の空間構造・変動を長期トレースし，磁気圏-電離圏結合系とそれが駆動する巨大磁気圏ダイナミクスの探索を行う。

近年のひさき衛星や地上光学観測は，「硬い」と思われた内部磁気圏域への太陽風影響の浸透を示唆している[13]。地球の場合，極域電離圏へ投影された太陽風電場情報が中低緯度にダクト伝搬し，そこから磁力

線沿いに内部磁気圏へ戻る例が知られる[14]。干渉計電波観測では，さらに内側に位置する放射線帯にも太陽紫外線応答を示し，同様の結合が示唆される[15, 16]。RPWI電場・電波観測は，より外側の磁気圏に加わるIn-situ情報を捉え，軌道望遠鏡・地上観測とも結合させ「自転駆動型磁気圏」のレスポンス機構とその経路情報も提供しうる。

## 2.2 木星磁気圏のエネルギー開放 ～巨大磁気圏による粒子加速・加熱の解明～

木星周辺空間は数十MeVに達する高エネルギー粒子に溢れ，一部は惑星間空間へ放出され地球近傍にも届く。RPWIは，DC域に始まる広帯域プラズマ波動の電場・磁場3軸成分全域で，磁気圏赤道域～中緯度域(Inclination：最大約25度)の広大な領域を初カバーする。「磁気リコネクション」「プラズマインジェクション」「交換型不安定性」・・・といった内部-外部磁気圏間を跨ぐ大規模変動は地球でもホットな研究対象だが，ひさき衛星観測で「極域オーロラ発光(遠方磁気圏活動を反映)」と「イオトラス発光(内部磁気圏加熱を反映)」の相関およびその時間差として一端を垣間見せた[17]。RPWIはPEP(粒子)・JMAG(磁場)と共に，2.1項で述べたオーロラ遠隔観測がもたらす全体情報と併せて，プラズマ輸送と粒子加速・加熱の結合を観測の俎上にのせる。

ERG衛星では，こうした「プラズマ波動電場成分による粒子加速・加熱」を検証する「Software-type Wave-Particle Interaction Analyzer：S-WPIA」[18]を搭載しその定量解明を目指している。惑星探査機はより通信量の制約がきつく，JUICEでも同様のオンボード相関を取ることができれば強力な手段となる。幸い，ERGで目指した電子波(kHz帯)よりも容易なイオン波(Hz帯)によるプラズマ加熱に的を絞った「RPWI版S-WPIA」の実装はRPWI以外を含む全関係者によって合意された。ガリレオ衛星周囲ではイオンサイクロトロン波が観測され，衛星大気からピックアップされたイオンの加熱およびトラスの形成に重要な役割を果たしていると考えられる。PEP(粒子)・JMAG(磁場)との連携・試験を要するためハードルは高いが，ERG衛星に引き続き，さらに太陽系最大の惑星加速器を対象にそのメカニズム調査を展開する。

## 2.3 木星-ガリレオ衛星結合システム ～ 電磁結合バイナリ ～

木星システムの特徴は、「木星-衛星間の電磁結合」である。最も顕著な影響を及ぼすのがイオが噴出する大量の火山ガスで、プラズマトローラスを形成して共回転系に錘として加わる。ひさき観測はこのイオ起源重イオンプラズマが惑星電離圏-磁気圏結合の駆動源となることを実証しつつある[19]。この過程は太陽風が駆動源の「地球型」とは異なる「電磁結合バイナリ」システム特有のもので、重イオンが遠心力で磁力線を引き延ばしていく機構が2.2項で述べた「内部-外部磁気圏間結合」を生む。RPWIは、in-situ観測でこの低温成分の動態とこれに伴う電場・波動-粒子相互作用を調べる機会を提供する。

ガリレオ衛星は、電離大気を引きずって木星磁場を横切するため、巨大な起電力を生んでその磁力線の足元に「フットプリントオーロラ」をもたらす。JUICEは放射線リスクを避けイオ軌道までは進入しないが、現計画では2029～2032年にエウロパ(2回)・ガニメデ(11回)・カリスト(13回)フライバイを経たのち、ガニメデ周回を行い2033年にミッション終了となる。エウロパ・ガニメデ・カリストは氷地殻から揮発した $O_2$ ・ $O$ 大気・電離圏を持つことがガリレオ探査機で確認されている。特にガニメデでは木星と結合する電流系の横断機会もあるため、木星-衛星間の(a) 沿磁力線電流量、(b) ポインティングフラックスによるエネルギー交換方向・量、(c) 沿磁力線加速電場の観測による初の「木星-衛星結合システム解剖」を行う。これらの情報は2.4項の基礎ともなる。

ガニメデはまた、「有意な磁場を有する天体(磁気双極子モーメント： $\sim 10^{13} \text{ Tm}^3$ 。水星よりやや強)」という点で特異である。公転運動中に上流の木星プラズマ流のプラズマ $\beta$ は $<1$ から $>1$ に変化し、異なる性質のプラズマ流との相互作用も期待できる。木星プラズマ流は亜音速であるため、衝撃波を形成せず木星磁気圏プラズマが直接ガニメデ磁気圏界面に接触するという点も関心を呼んでいる。

## 2.4 ガリレオ衛星：希薄大気・磁気圏および表層・内部との結合

RPWIは、衛星大気In-situ・Remote観測および表層・

地下Remote観測も行う。

(a) 氷衛星起源低温プラズマの掌握：Langmuir Probe・プラズマ波動観測は、衛星電離圏から磁気圏へと広がる低温(数eV)電子の密度・温度および低温イオンの密度・温度を掌握し、各衛星の大気放出(噴出・脱ガス活動等)・流出(磁気圏プラズマ流・電流との相互作用等)とその変動を捉える。また衛星近傍での木星電波掩蔽を利用し、伝搬経路上に位置する電離圏密度の高度分布も提供する[20]。

(b) 火山・氷衛星起源ダストの掌握：カッシーニRPWSは、Langmuir Probeで衛星エンセラダスプルームに起源を持ち内部磁気圏へと広がる大量の負帯電ダストを検出した[5]。活発なイオ火山、可能性が指摘されるエウロパからの水噴出に伴う同様の発見可能性がある。また電場アンテナでダストの探査機衝突で発生するプラズマが作るパルス(10s msec幅)を計測し、そのサイズ・数をカウントする[3](BepiColombo/MMO PWIでも水星で予定している[9])。

(c) 衛星電離圏及び地下海電流の検証：電離圏密度・磁場からは電気伝導度・電流量が推定できる。「これ以外」の部分、すなわち氷衛星表面・地下の電気伝導は、深さ数10～150 km程度の氷地殻下にある導電性塩水地下海」に由来するとされるが、この分離は「惑星-衛星結合電流」全体から電離圏寄与分を引き算して初めて現れる。

(d) 衛星の表層・地下のリモートセンシング：木星電波(数百kHz～数十MHz)は、氷衛星表層・地殻および氷地殻-地下海境界で反射されうる(図2)。「オーロラ電波の反射波」は月探査機かぐや搭載LRS(Lunar Radar Sounder)でも見られた[10]。JUICEにはLRS同様の「アクティブレーダー」RIME(Radar for Icy Moon Exploration：9 MHzを放射)も搭載され、主に木星電波が遮蔽される反木星側半球で狙う。RPWIの「パッシブレーダー機能」は木星側半球を狙い、相補的な機能発揮を期待する。

## 3. RPWIの機器構成

RPWIは、「5本の伸展ブーム上の3種のセンサー群が、3つのレーザ群に結合」される複雑なシステムである(図3、図4、図5)。センサー群は、打ち上げ後すぐに展開する4本のLangmuirプローブ用LPブー

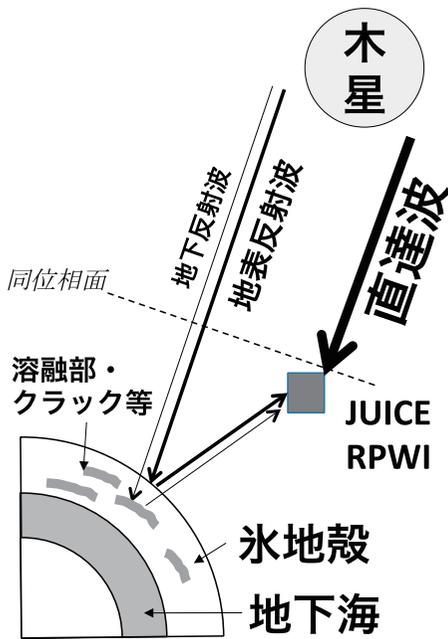


図2：Passive Sub-Surface Radar (PSSR) の原理。

ム(3 m長)と、JMAG(磁場チーム)センサー3つに加えてRPWI サーチコイル(SCM)・RPWI電波アンテナ(RWI)が相乗りするMAGブーム(10.5 m長)に載っ

て探査機外に晒され、この状態で複数回の地球フライバイ時での校正観測を行い、金星フライバイ時の高温環境に耐え(現時点では"電源OFF")、木星軌道上の低温・高放射線環境下でのフル観測にミッション終了まで耐え抜く。これらのセンサーは、探査機内のRPWI-EBOX(共通box)の中に配されるLPレーザー、低周波レーザー(LP)、高周波レーザー(HF)に接続、データはDigital Processing Unit(DPU：H/WはCBK(Poland)、S/WはIRF他)で処理された後にSystemを介して地球へ送られ、表1に示す観測・目標を達成する。

(1) 電子・イオンの密度・温度およびDC電場観測 [LP-PWI(センサー)・LP-MIME(レーザー)：IRF-ウプサラ(Sweden)] Langmuir プローブ(LP-PWD)は、プローブ電位sweepに伴うプラズマ流入・流出電流量変動から電子・イオンの密度・温度を導出、また定バイアス電流を与えてプローブ間電位差から3軸電場導出を行う。これは、非平行に伸展する4本の3-mブームを持つ、という惑星探査機史上初の豪快な方式で初めて実現する(カッシーニRPWSは1本のみ)。粒子系計測器では観測が難しい氷衛星由来の低温プラズマや帯電ダストを含むプラズマの観測によって、プラズマ運動・加速、ポインティングフラックス、氷衛星電離圏の密度・電気伝導度の掌握を可能とする。

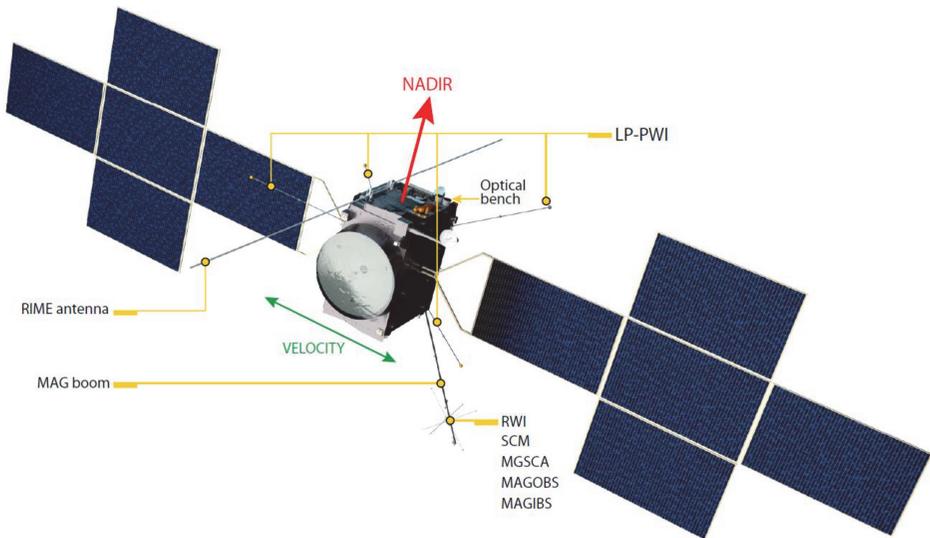


図3：現時点のJUICE探査機形状案および調整中の伸展センサー群配置(courtesy: Airbus DS)。3m長のLP boom(LP-PWI)x4、10.5m長のMAG boom(RWI, SCM, および3つのJMAGセンサー)、及び16m長のRIMEアンテナが見える。

(2) プラズマ波動観測 [LP-PWI(低周波電場センサー)・SCM(磁場センサー)：LPP(France), LFレシーバー：IAP(Czech)] 低周波レシーバー(LF)は、

電場3軸をLP-PWIから、磁場3軸をSearch Coil Magnetometer (SCM)から受け、木星圏初のプラズマ波動電場・磁場6成分観測を few - 20 kHzの広帯域で実現

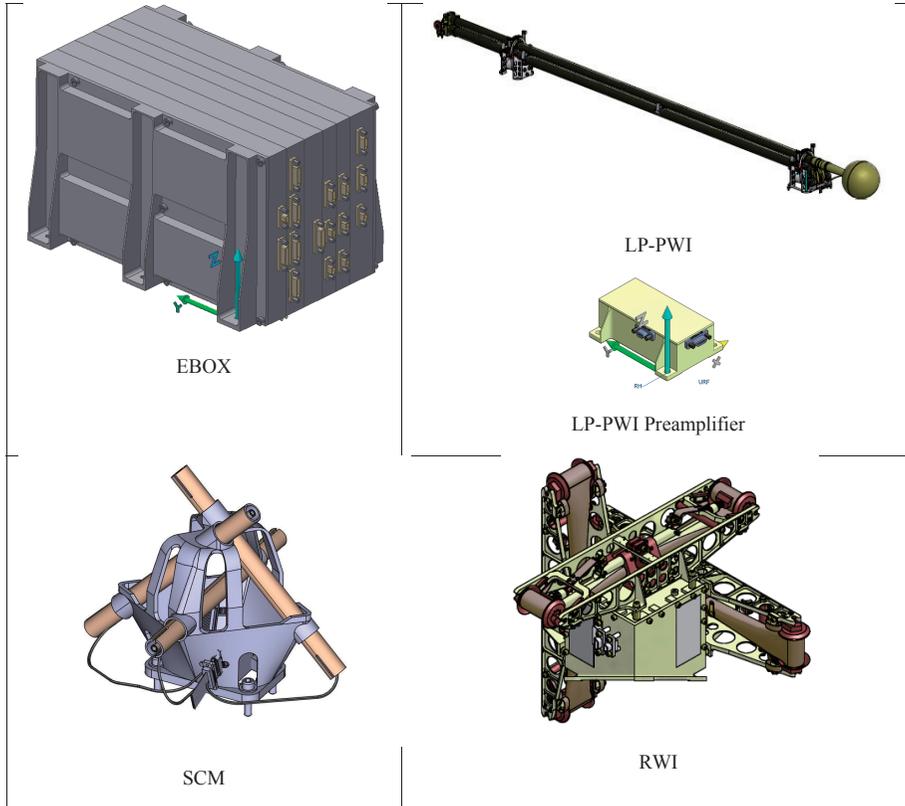


図4：RPWIを構成するH/W群(EM2仕様)：探査機内に置かれるEBOX(LP-MIME・LF・HFの3レシーバ群, DPU, 電源部を内蔵)と3種のセンサー群(LP:Langmuir Probe, SCM：Search Coil, RWI：Radio Wave).

表1：RPWI センサー・レシーバの目標性能(EM2仕様).

計測項目	計測性能要求
低温プラズマ密度・温度 (LP + LP-PWI)	電子： $10^{-4} - 10^5 \text{ cm}^{-3}$ , 0.01 - 100 eV イオン： $1 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$ , 0.02 - 20 eV 衛星ポテンシャル： $+100 \sim -100 \text{ V}$ 標準時間分解能： $< 1 \text{ Hz}$
低周波電場 (LF + LP-PWI)	* DC電場：3成分 $< 7 \text{ mV/m}$ @ 磁気圏 $< 1 \text{ mV/m}$ @ 衛星flybys $< 0.1 \text{ mV/m}$ @ ガニメデ電離圏 * プラズマ波動: 0.1 Hz - 20 kHz, 3成分 $2 \mu\text{V/m}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ $> 500 \text{ Hz}$
低周波磁場 (LF + SCM)	* プラズマ波動： $0.1 \text{ Hz} - 20 \text{ kHz}$ , 3成分 $8, 0.6, 0.06, 0.02 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1, 10, 100, $< 500 \text{ Hz}$
高周波電場 (HF + RWI)	* 電波(電場)： $80 \text{ kHz} - 45 \text{ MHz}$ , 3成分 感度： $10 \text{ nV/m}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 10 MHz 到来角分解能： $\sim 1^\circ$ @ 10 MHz 偏波角分解能： $\sim 10\%$ @ 10 MHz 標準時間分解能： $30 \text{ sec} - 2 \text{ min}$

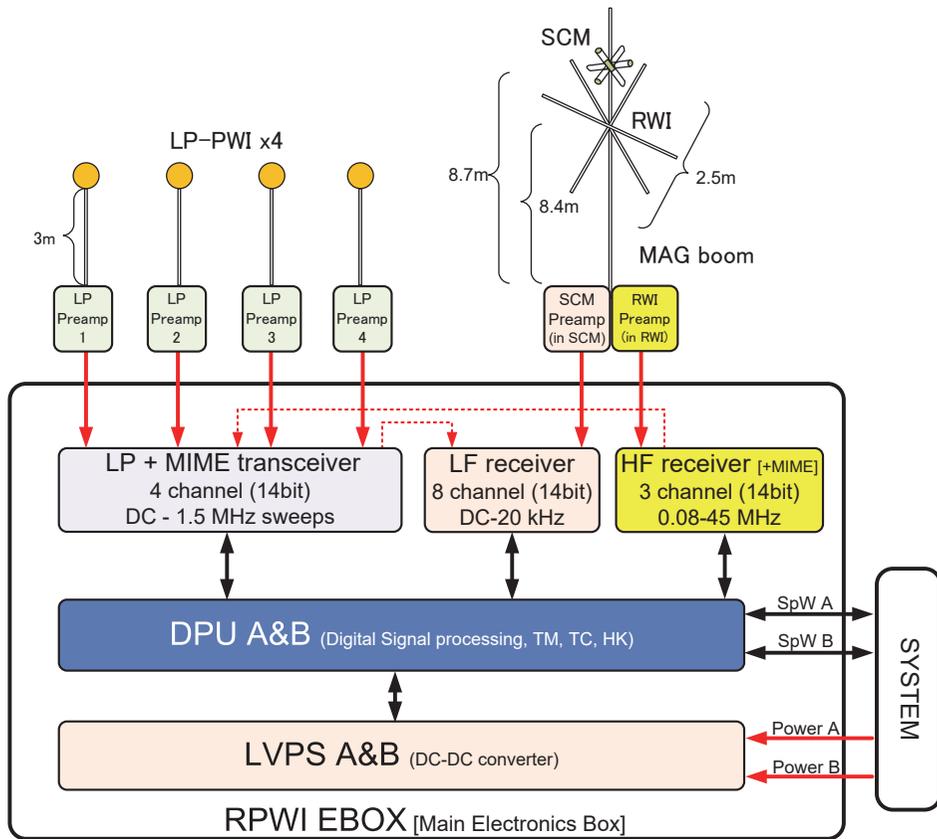


図5：RPWIの構成(EM2仕様).

し，プラズマ加熱の現場，すなわち波動-粒子相互作用の種類・強度解明の主役となる。またPEP(イオン観測)・JMAG(磁場観測)と結合させ，ERG計画で実証予定の「S-WPIA」を展開して波動-イオン間エネルギー交換の方向・量のオンボード検出を実現し，通信量制約の中でイオン加熱現場を統計的かつ直接に掌握可能とする。

(3) 電波観測 [RWI(高周波電場センサー) - アンテナ:CBK(Poland), Preamp:東北大, HFレシーバー:東北大(FPGA:IRFウプサラ(Sweden))] 木星圏で3軸電場アンテナRadio Wave Instrument(RWI:2.5-mダイポール3対)を初展開し，放射線帯シンクロトロン放射(>100 MHz)を除く全ての木星電波活動(80 kHz - 45 MHz)に対する方向探知・偏波解析能力を得る。他のリモート観測手段(赤外・紫外・高速中性粒子)観測とともに南北極域・赤道域に連なる活動源の探査を行うとともに，電波掩蔽による衛星電離層電子密度

の高度分布観測，電波反射による氷衛星の表層・地下探査といった「電波を駆使するリモートセンシング」を実現する。

RPWIは，メンバー全体で検討・開発・運用される。以下，日本側が開発を主担当するRWI部・HF部，およびDPU搭載S/WのうちHF制御機能・パッシブレーダ機能・S-WPIA機能について述べる。

### 3.1 3軸高周波電場センサー Radio Wave Instrument(RWI)

80 kHz - 45 MHzの3軸高周波電場成分を検出するRWIは，MAGブーム(10.5 m長)上で，JMAGセンサー群(先端に2つ，探査機から7.5 m先に1つ)から約1 m，RPWI-SCMセンサー(探査機から8.5 m先)から約0.3 m離れて置かれる。伸展アンテナは3つのDipole(2.5 m tip-to-tip長)で，CBK(ポーランド)が提供する。AO提案時にはカッシーニを踏襲した「モノポールア

ンテナ3本(許容されたのは2.5 m長, カッシーニの1/4)を探査機表面に装着」だったが, G. Fischer(IWF, Austria)によるアンテナパターン解析の結果, 導体である巨大な「探査機本体+太陽電池パネル」(総幅約20 m)に平行な電場成分を受信できないことがわかった。原子力電池を有し探査機が小さなカッシーニ(とはいえ7 mはある)に対し, JUICEの大きさはアンテナ長を圧倒する。このためブーム上に移動して探査機本体からやや離れ, またついでに「ダイポールアンテナ化」した。探査機起源電磁ノイズが軽減するという効果もあったものの, 巨大な太陽電池パネル, MAGブーム, および隣接するLPブーム(全て導電体)が依然としてアンテナパターンへ影響する。この評価はAustria組によるアンテナシミュレーションおよびレオメトリ実験(衛星導電モデルを水中に沈めて行う電波伝搬のスケールモデル実験: 日本では井町(金沢大)らが実施)で予測を試みるが, 地上検証すなわち「太陽電池パネル・全ブームを伸展し, 探査機を空に浮かべぐるぐる回す」ような受信パターン模擬試験は不可能である。このため「地球フライバイ(3回を予定)時に探査機姿勢を回していただき, 地球オーロラ電波を使ってアンテナパターンを確認」することを要請し, ESAとAirbus(System: 旧EADS・Astrium, 欧州側のBepiColombo担当メーカー)からいろいろ言われつつ調整中である。

CBKにはアンテナ3ペアを支える「Chassis」も担当いただき, 我々はこの中に入る「RWI Preamp」を開発する。BepiColomboおよびERG向けの設計をベースに2010年度から検討・試作に着手し, カッシーニRPWSの1/4のアンテナ長でも同等感度を達成すべく奮闘していたが, 突如としてブームの上に載せられて宇宙空間に暴露されることとなり, 我々の頭痛の種は増した。この状況に陥った2013年から耐放射線(Al-3 mm厚に囲まれても2 Mrad)・耐低温(単純予測で通常~130 K, 日陰時~80 K)への耐久法を検討。前者は放射線シールドの追加, 後者は試作基板の液体窒素投入試験とCBK共同でのChassis設計改善で目処を立てた。ただしMAGブームの担当メーカー選定が遅れ(2015年末決定:SENER), 2016年末を待たないと我々乗客の環境は定まらない。またRWI-HF間ハーネスも暴露されるため, Preampからの熱流出パスとなってしまうことと, 高放射線による材料劣化が問題である。

後者は2016年7月にAirbusの各種材料耐環境試験結果を精査の結果, やや愁眉を開きつつある。

MAGブーム上に同居するJMAG(DC磁場), SCM(低周波磁場), RWI(高周波電場)は「電磁干渉にしい」曰く付きの面々である。普通の衛星・探査機では3-5m離れて棲み分けるが, 今回の相互距離は1 m - 30 cmしかない。互いに疑惑の念を抱くのも当然で, 2016年10月に各試作モデルをChambon(フランス)へ持ち寄り, 共同電磁ノイズ計測試験を実施して互いを叩き合う予定である。

### 3.2 3軸高周波電場レシーバー High Frequency receiver (HF)

RPWI-EBOXに入る, RWIの高周波電場3ch出力を受けるRPWI唯一のレシーバーである。ERG衛星搭載PWEのHigh Frequency Analyzerと極力設計を共通させ, 高放射線環境下を飛翔するERGの経験を踏襲可能とした。Digital部はADコンバータ(90 MHz, 14bit)で電場3成分を捉え, 80 kHz - 45 MHzを222 kHz幅, 202ステップ(各11 msec, 総計2.2 sec)でダウンコンバート波形を生成しつつ1-2回/分の割合でスキャンしながら木星磁気圏・衛星電離圏全域をサーベイする。デジタル側設計・試作は2015年までIRFウプサラが行い2016年に日本側へ引き継がれたが, FPGAは対DPU-I/Fを含むためSweden側が引き続き担当する。原子力電池を有さないJUICEは電力にうるさく, 高電力消費品は不使用時にスタンバイ状態に入れることで, 木星でのエコライフを追求する。

HFが生成するダウンコンバート波形情報はRPWI-DPUに送られ, 日本側(東北大・金沢大)が開発する「HF制御タスク」によってノイズ除去処理を経たのち電波スペクトル情報・伝搬方向情報・偏波情報へ転換され, TLMバンド幅に応じた周波数・時間平均処理を施したのち, 探査機SystemのData Recorderを経て地球へ伝送される。鍵を握る「方向探知機能」は, エウロパ(9.6 R<sub>J</sub>)・ガニメデ(15.3 R<sub>J</sub>)・カリスト(26.9 R<sub>J</sub>)近傍から各電波源を空間分解すべく, 角度分解能1°を目指す。HFから同相校正信号をRWI-Preampの各入力へ供給することで, 観測周波数全域でオンボード位相校正を可能とする。

### 3.3 DPU : Passive Sub Surface Radar (PSSR) 機能

氷衛星近傍では，木星電波は「直達波」に「衛星表面・氷地殻内・地殻-地下海境界からの反射波」（高度～500 kmで直下反射波を見る場合，約3 msecの遅延を伴う）が加算される。玄武岩の場合，低周波ほど導電率が低く伝搬損失が低い。木星電波の広帯域性を用いると，1 MHz近傍（波長300 m，半波長アンテナ搭載は不可能）から下では「氷地殻-地下海境界」の反射波を検出可能？という期待が出る。氷地殻と溶融部の想定比誘電率はそれぞれ約3（80-270 K）と約90（月地殻：4-11）。後者が桁違いに大きく，地殻-地下海境界では高い反射率が期待できる。

残念ながら，物事はそう簡単ではない。「かぐやLRSによる月地下探査」[10]との違いは，「水の導電率は，融点付近では周波数によらず一定，かつチタン含有率の高い玄武岩並に高く（ $10^{-4} \sim 10^{-5} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ ），伝搬損失が大きい」ことにある。氷地殻の想定導電率[21]は，80 Kでは $\sim 10^{-29} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ だが，270 Kでは $\sim 6 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ に達する。減衰は低温の表層近傍では無視できるが，270 Kに近づくと-50 dB/kmに達することになるため，地下海境界面への到達は困難，という推測が成り立つ。とはいえ，氷地殻の温度分布が内部海との境界近傍で急激に融点に遷移する場合や，浅い低温域に大きな不連続がある場合には可能性を残す。実際JUICE・RIME（アクティブレーダー：9 MHzでレーダー波送信）の探査目標深度は9 km，目標として「氷地殻内の液体水ポケット」「地殻構造そのもの」としている。木星電波はRIMEにとって雑音であり，運用は反木星半球側が望ましい。一方PSSRにとっては信号であり，運用は木星半球側で行う。Galileo衛星は公転・自転が同期し木星側半球が固定されており，PSSRはRIMEによるアクティブレーダ観測への相補的な機能となりうる。表面・氷地殻の電気伝導度特性をより広い周波数・空間スケールで取得可能，また地殻表面の凹凸に起因する「クラッターエコー」も低周波ではより低減される，というメリットもある。

銀河背景電波（HF noiseフロアよりやや大，木星電波に対し，Europaで $1 \times 10^{-5}$ ，Ganymedeで $3 \times 10^{-4}$ 強度[22]）を上回る反射波がある場合，木星電波の強度・位相が $\geq 3$  msecで一定であれば「電波スペクト

ル上での直達波-反射波干渉」が検出される（スペクトル検出方式）。継続時間が $\ll 3$  msecでパルスと見なせる場合は，「反射パルス波形の検出」（パルス検出方式）となる。木星電波のmsec order以下の高速変動の観測情報はなく（20 MHz帯のS-burst波の継続時間は数msec[23]だが，10 MHz以下は情報なし），この選択は木星到着まで確定しない。このため双方の機上処理モードを準備する。「スペクトル検出方式」では，周波数方向の干渉縞が信号となる（月探査機かぐや搭載LRSでの地球オーロラ電場の反射成分検出[10]と同方法）。電波源からの光路長が異なるパスを経由した2つの電磁波が重畳する場合，周波数方向の干渉縞の幅[Hz]は「光速 $[3 \times 10^8 \text{ m/s}] / \text{光路長差} [\text{m}]$ 」で表せる。高度500 kmで直下を観測する場合，直達波と直下地表反射波（光路差は往復1,000 km）および表層反射波と地下0.7 kmの反射波（光路差は往復1.4 km）の干渉は，300 kHz，220 Hzの幅を持つ干渉縞となる。HF標準データ出力仕様は「周波数幅222 kHz，周波数分解能2 kHz」のため，周波数分解能が一桁足りない。このため，より長時間の波形を取得した高周波数分解能モード（周波数分解能：100 Hz，往復の最大光路差：3,000 kmに相当）を設け，衛星フライバイ・周回時に活用する。この方法は「周波数方向干渉縞」の幅と振幅を伝送すれば足りるため，テレメトリ圧縮にもつながる。一方，パルス検出方式ではダウンコンバート波形の自己相関解析を基礎とし，直達波に対する表層・地下反射波の伝搬時間差（・方向）から反射面の深さ（・位置）を導出する。これは「通常のレーダーデータ処理」と同手法であり，解析には遅延時間（数 msec）を超える長さのダウンコンバート波形データを地球に伝送する必要がある。このため機上で自己相関係数を評価し，電波強度と併せた機上データ選別を行い，必要伝送データ量を削減する検討を行っている。この方法は波形処理のため，光路差分解能が450 mまで改善する。

### 3.4 DPU : Software-type Wave-Particle Interaction Analyzer (WPIA) 機能

ERG搭載のS-WPIAは，波動-電子相互作用による相対論的電子の生成・加速過程解明を目標とし，電子スケール（時間分解能：10  $\mu\text{sec}$ ）の相関処理を要した。Payload間通信・専用H/Wといった衛星設計そのも

のをこれに最適化する必要があるため、欧州探査機であるJUICEへの単純な適用は無理である。このため、ガニメデ等の水衛星周辺でのイオンサイクロトロン波による衛星起源イオン加熱・加速に焦点を当て、LFが取得する低周波電磁波動とPEPが取得するイオン速度分布関数を時間分解能0.1 sec程度で相関処理することとした。地球周回衛星のような高速通信が可能であれば地上処理できるがJUICE(>~160 kbps)では困難であり、この機能により初めてイオン加熱・加速の場所・量・性格を統計処理する道を拓くことになる。

本機能はRPWI共通資源「RPWI-DPU」搭載ソフトウェアへの「RPWI-PEP相関処理機能」の追加となる。このため、開発はRPWI-DPUソフトウェアチーム(IRFウプサラ, Sweden)・LFチーム(IAP, Czech)との共同作業となる。また、PEP/JDCチーム(低中エネルギーイオン観測: IRFキルナ, Sweden)からの同時スナップショットデータの取得と伝送が必要となる。Systemから双方へ「起動CMD」を仕掛け、一定周期でPEP側がイオン分布関数データ(8 sec長)をRPWI-DPUへ伝送し、これをRPWI-DPU内でLF電場・磁場3成分128 Hz波形と相関処理する方式とすることを、2016年5月に全関係者が同意した。今後、具体的なプロトコル・試験方法・検証方法の策定へと進む。実装にご協力頂くRPWI DPU・LFメンバー、PEPメンバー(特にPIのStas Barabash およびJDCメンバー)、JMAGメンバー、Airbus・ESAメンバーに感謝を申し上げたい。

#### 4. おわりに: 始まった長旅の車窓から

IRFウプサラにおける試作機同士の初結合・統合試験に目処がついた2016年4-7月、我々は欧州側でのESA審査(Instrument Preliminary Design Review: I-PDR)と、日本側でのJAXA審査(プリプロジェクト審査, EM設計審査)の双方に忙殺された。「海外探査機への観測装置の提供」という形態は、現時点では我々の観測装置を載せた日本の探査機を提供する"BepiColombo型"よりロードが重く、先が思いやられる。とはいえ、この渦中に開いたRPWIチーム全体会合(仙台: 7月11-15日)では、旅費不足で欧州になかなか足が延びない多くの日本側メンバー、初来日にニコニコ顔の欧州側若手研究者・技術者、双方の活発な

議論と生き生きとした顔が実に印象的で報われた。本チームは2016年度に最終的にはESAまで出て行くEM2(Engineering Model)、2017年度にフライト準拠のQM(Qualification Model)・熱構造モデルをそれぞれ開発して設計・検証を確立、2018年度にはいよいよFM(Flight Model)を開発し、2019年からの探査機レベル統合試験を経て2022年の打ち上げに向かう。本当のリターンが戻って来るのは2030年代であり、メンバー個々の人生に並走する長丁場である。

この実現に至る数々の布石を敷かれた先人の皆様に深謝するとともに、RPWIチームを構成するIRFウプサラ(Sweden)、CBK(Poland)、IAP(チェコ)、パリ天文台・LPP(France)、IWF(Austria)、ICL(UK)、国内開発を支える明星電気をはじめとする全ての同行者達の、2033年(予定)まで続くご健勝を祈る。特に日本のコアメンバーは、誰が欠けても大変ですよ。またの若手の皆さまのご活躍に期待するところ大です。

JUICEはジュノーによる木星内部・大気・極域観測を引き継ぎ、リモートセンシングとその場観測(電磁場・プラズマ)を統合したカッシーニ型の巨大惑星-衛星系探査となる。米も多数回フライバイを軸とする「エウロパ探査計画」を起動し、JUICEとの同時活動可能性もある。巨大惑星・衛星の磁気圏・電離圏分野に関わる世界中の研究者は、国際ワークショップ「Magnetospheres of Outer Planets」に2年に一度参集する。次回は2017年夏、開催地ウプサラはカッシーニとジュノーの成果で溢れるだろう。この会合はかつて2011年夏の仙台開催が予定され、我々は3月11日まで準備に忙殺された。断念に至る日々の軌跡は記憶に焼きついている。「再招致はしないのか?」と国内外で聞かれ続けており、ひさき衛星の活躍で厚みが増した仲間の皆様と共に再招待検討を行いたい。

最後に、本連載を企画いただいた木村淳氏(東京工業大学地球生命研究所)に御礼を述べる。

#### 参考文献

- [1] Kimura, T. et al., 2015, *Geophys. Res. Letters* 42, 1662.
- [2] <http://c.gp.tohoku.ac.jp/sakura/>
- [3] Gurnett, D. A. et al., 2004, *Space Sci. Rev.* 114, 395.
- [4] Kimura, T. et al., 2013, *J. Geophys. Res.*,

doi:10.1002/2013JA018833.

- [5] Morooka, M. W. et al., 2011, *J. Geophys. Res.*,  
doi:10.1029/2011JA017038.
- [6] Roth, L. et al., 2014, *Science* 343, 171.
- [7] Saur, J. et al., 2015, *J. Geophys. Res.* 120, 1715.
- [8] 笠羽康正ほか, 2014, *プラズマ・核融合学会誌* 90,  
769.
- [9] Kasaba, Y. et al., 2010, *Planet. Space Sci.* 58, 238.
- [10] Ono, T. et al., 2009, *Science* 323, 909.
- [11] Gurnett, D. A. et al., 1992, *Space Sci. Rev.* 60, 341.
- [12] 東北大PPARC [[http://pparc.gp.tohoku.ac.jp/  
observatory.html](http://pparc.gp.tohoku.ac.jp/observatory.html)]
- [13] Murakami, G. et al., *Geophys. Res. Letters*, submitted.
- [14] Nishimura, Y. et al., 2010, *J. Geophys. Res.*,  
doi:10.1029/2010JA015491.
- [15] Miyoshi, Y. et al., 1999, *Geophys. Res. Lett.* 26, 9.
- [16] Kita, H. et al., J. 2015, *Geophys. Res.*, doi:10.1002/  
2015JA021374.
- [17] Yoshikawa, I. et al., *Geophys. Res. Letters*, submitted.
- [18] Katoh, Y. et al., 2013, *Ann. Geophys.*, doi: 10.5194/  
angeo-31-503-2013.
- [19] Tsuchiya, F. et al., 2015, *J. Geophys. Res.*,  
doi:10.1002/2015JA021420.
- [20] Kurth, W. et al., 1997, *Geophys. Res. Letters* 24, 1171.
- [21] Chyba, C. F. et al., 1998, *Icarus* 134, 292.
- [22] Cecconi, B. et al., 2012, *Planet. Space Sci.*,  
doi:10.1016/j.pss.2011.06.012.
- [23] Ryabov, V. B. et al., 2014, *Astron. Astrophys.*,  
doi:10.1051/0004-6361/201423927.

# 火の鳥「はやぶさ」未来編 その11 ～小惑星の内部構造を探る～

並木 則行<sup>1,2</sup>, 水野 貴秀<sup>3</sup>, 千秋 博紀<sup>4</sup>, 山田 竜平<sup>1</sup>, 平田 成<sup>5</sup>,  
野田 寛大<sup>1</sup>, LIDARサイエンスチーム

(要旨) はやぶさ2では小惑星内部構造の解明を目指している。レーザ高度計からは測距と送受光レベルの観測データが得られ、形状モデルや重力推定の基礎データが提供される。小惑星の不均一性や形状の静水圧平衡からのずれ、形状中心と重心のずれは小惑星の合体成長史を知る手掛りになるだろう。また、レーザ高度計のダスト観測モードでは浮遊ダストの検出に挑戦する。もし検出されれば、小惑星表層進化の理解に一石を投じることになる。さらに宇宙衝突実験で発生する地震波動は表面流動と地形緩和を広範に引き起こす可能性があり、小惑星内部構造の研究に新たな分野を切り拓くことになるかも知れない。

## 1. 小惑星の内部構造という科学

筆者らはレーザ高度計(Light Detection And Ranging: LIDAR)の開発に従事しながら、

- ・ 小サイズの惑星の形成過程を明らかにし、小惑星の衝突進化モデルを検証する
- ・ 小惑星上の物質移動など、地質活動を明らかにし、回収試料のコンテキストを与える

という目標を掲げて、小惑星の表層と内部の研究を行っている。はやぶさ2に搭載されるレーザ高度計からは測距値と送受光レベルが得られる。その詳細については3本の機器開発論文が出版されているので、是非、これらの論文を参照していただきたい。基本の測距性能についてはMizuno *et al.* [1]に、アルベド観測において想定される測定誤差についてはYamada *et al.* [2]に、ダスト観測の概要についてはSenshu *et al.* [3]に詳述されている。

小惑星の「内部構造」といっても、月や火星のような重力天体内部と同様に分化が生じているとは考えら

れない。期待されるのは、衝突・合体の痕跡として残されているかもしれない不均一性と、表層のレゴリス、ボルダーの水平、垂直移動による物質進化である。こうした研究は隕石サンプルの分析データを解釈する上で重要な先験的情報となるだろう。これまでは、隕石サンプルが母天体内で形成されてから地球に到達するまでの間に、母天体同士の合体による天体内部の流動や、サンプルが表層に露出してからのレゴリス内での上下運動はほとんど考慮されていなかった。しかし、小惑星が静的な母天体という描像を探查が変えていく可能性がある。また、小惑星での衝突、合体、軌道変遷、表層進化についての知見は太陽系形成、衛星形成の理論研究にも波及して、惑星科学の体系を実証的に補強するという意義がある。

### 1.1 惑星科学における意義

はやぶさ初号機はラブルパイル(rubble pile)構造を有する小惑星が実在すること世界で初めて明らかにした。ラブルパイル構造は小惑星が衝突破壊と再集積を繰り返して進化してきたことを意味する。そこで次に重要となるのは小惑星内部での不均一から小天体同士の合体と、その後の形状変化を探ることだろう。そのヒントもはやぶさ初号機からもたらされている。図1に示すようにラッコの頭と胴に例えられる小惑星

1. 国立天文台 RISE月惑星探査検討室  
2. 総合研究大学院大学  
3. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
4. 千葉工業大学 惑星探査研究センター  
5. 会津大学 先端情報科学研究センター  
nori.namiki@nao.ac.jp

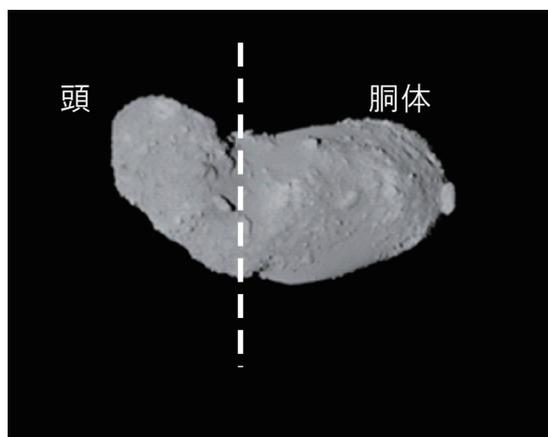


図1：はやぶさが取得したイトカワ画像(ST-2420855658)に加筆。

Itokawaの形状は独立に進化した2天体が緩やかに結合している可能性を暗示する。これはItokawaに限らず、Toutatisにも共通する特徴である[4]。

太陽系内での衝突破壊については、クレーターを始めとして様々な証拠が残されている。しかし、天体同士の合体についての痕跡は非常に少ない。Itokawaのように緩く合体した(らしい)天体内部の不均一を観測し、サンプルを増やしていくことで、合体天体の形状がどのように変化していくかという素過程[5]を調べることができるかもしれない。合体とその後の形状変化が小惑星のサイズ分布や物質進化に与えた影響は、観測的な制約が無いためにこれまでは大きく取り上げられてこなかったが、日本の小惑星探査が新しい分野を切り拓く切掛けになるのであれば面白い。

小惑星表層を内部構造と呼ぶのは言辞において矛盾しているかも知れないが、小惑星表層のレゴリスやボルダーの挙動[6]、地形もまた重要な研究対象となる。表層の形態が内部での運動や応力場の制約となるからである。例えばAsphaug *et al.* [7]は小惑星Eros表層のボルダーのサイズ分布から、ブラジルナッツ効果によるサイズ分布の変化を提唱した。また、微小衝突とその振動が引き起こす小惑星レゴリスの対流運動については、Yamada *et al.* [8]によって詳細な検討がなされている。こうした小惑星表層の運動についての仮説は、検証のための観測データが不足しており大きな不確定性を内在している。それでもこれらの仮説が示唆する表層進化の影響は大きい。静的な、安定した環境を前

提とした隕石サンプルの太陽風照射や宇宙線照射から推定される深さや年代について見直しを迫ることになるかも知れないからである。小惑星の表層進化の研究には探査機によるその場観察が必須であり、その最先端を行く日本でこそ今後の発展が期待される分野である。

## 1.2 形状モデルと重力観測

小惑星の内部構造を探る上でもっとも基本的な観測量は形状と重力である。Itokawaを含む複数の小天体のバルク密度の推定をもとに、マクロ空隙率による小惑星の分類が提案されており[9]、空隙率30%以上の天体をラブルパイル構造天体、20%以下を破碎構造天体、ほぼ0%を稠密構造天体と定義している。従って、10%の精度で空隙率を推定することができればラブルパイル構造天体と破碎構造天体を区別することが可能である。これははやぶさの後継機としてはやぶさ2が必ず達成すべき目標である。また、地溝やリッジ、クレーターの空間分布を正確な形状モデルをもとに記載し、その形態から表層下の層構造や空隙率変化といった物理的状态を明らかにすることは、内部構造を調査するための基礎となる[10]。さらに、重力データをもとに等ポテンシャル面形状や地表面傾斜量を推定することで、表層物質の流動過程が議論される[6]。

小天体の合体過程の研究という観点では、天体の全体構造に関わる規模の不均一性が重要である。図1に見られるようにItokawaでは天体を二分するような空隙率や密度の変化があると期待されるが、残念ながら質量(重力場の0次項)以上の観測結果は得られなかった。はやぶさ2が目指している小惑星162173 RyuguはItokawaに比べて球形に近い形状をしている[11]ので、Itokawaのような大きな構造変化は期待できないのかもしれない。それでも、静水圧平衡からの形状のずれや、重心と形状中心のずれから不均一性を調査することは大切な達成目標である。

## 1.3 物理探査

天体の内部構造を調べる上でもっとも空間分解能が高い手法は、もちろん地震波探査である。小惑星探査用のペネトレータの開発はこれまで度々話題には上がっているが、残念ながら本稿の執筆時点でもまだ実用化されていない。電磁波探査も地球観測では有力な

手法であるが、天体深部まで探ることは難しい。将来的にはミュオンを用いた探査も検討されているようなので大いに期待したい。つまり、現状からははやぶさ2での物理探査は検討外、と考えられるかもしれない。しかし、はやぶさ2には衝突装置(SCI)[12]という大変ユニークな実験装置が搭載されている。SCIの第一の目的は内部物質のサンプル回収のための掘削であるが、SCI衝突が引き起こす地震波動によって小惑星表面の地形が変化することが考えられる。Seismic shakingと呼ばれる小惑星の地形緩和は表面のクレーター年代の測定[e. g., 10]や、クレーター、ボルダーサイズ分布を解釈する[e. g., 13, 14]上でも、決して無視できない要因であろう。衝突実験の前後で表面地形のビフォー・アフターを観察することにより表層流動のヒントを得ることが出来れば、小惑星表層の物質進化に関してははやぶさ2独自の貴重な観測的制約が手に入る可能性がある。

秤動、自転速度の変化も天体内部を制約する重要な観測量である。外部からのトルクに対する天体の応答から、慣性モーメントやエネルギー消散率を読み取ることができる[e. g., 15]。しかしながら、外部に主だった摂動源が存在しないRyuguでは秤動、自転速度の変化から内部構造を推定することは期待できない。なお、Ryuguの自転軸が公転面に対して大きく傾いている場合[11]にはYORP効果によって自転速度が変化する可能性がある[16]。これはこれで大変興味深い研究課題であるが、本稿の主旨からは外れるのでこれ以上は追求しないことにする。

## 2. はやぶさ2の観測

形状モデルや重力観測から小惑星の内部構造を探るために、はやぶさ2 LIDAR(図2)の測距値が有効である。LIDARは探査機から照射されたレーザーが小惑星表面で反射され、探査機に返ってくるまでの時間を計測することで、探査機と小惑星表面の距離を計測する装置である。LIDARは測距と同時に送光パルスと受光パルスの強度を計測して、小惑星表面の反射率(アルベド)を測定することができる。また、測距モードからダストカウントモードに切り替えて、小惑星表面付近を浮遊しているダストを検出する機能も有している。以下にこうした観測手法を概説し、想定される観



図2: LIDARフライトモデル外観。

測誤差と期待される成果について紹介したい。

SCI実験では小惑星表面に地震動が生じるだろう。小惑星の微小な重力下では、僅かな地震の加速度でも容易にレゴリスやボルダーが浮きあがる[13, 14]。安息角に近い傾斜があれば重力傾斜の方向に地すべりが起きるだろうし、ブラジルナツ効果[7]によってボルダーが浮き上がってくるかもしれない。どれくらい広範囲にseismic shakingが起きるかは、表層の層構造や、レゴリスのエネルギー消散率、空隙率、内部摩擦といった弾性波の伝播特性に依る。微小重力下で堆積するレゴリスの物理特性は地上実験では再現が困難である[12]ため、seismic shakingのモデルを実際の小惑星に適用する上で大きな不確定要因となっている。SCIの衝突実験でこうした物理量をおさえることができれば、小惑星の表層進化の研究を一步前へ進めることになる。

### 2.1 LIDAR測距と重力

測距の基本性能はMizuno *et al.* [1]に詳述されている。その主要項目のみをまとめると表1ようになる。バルク密度推定に要求される精度は最大10%である(1.2)。はやぶさ2では初号機の実績も考慮して、要求精度を7%と設定し、体積計測目標精度に5%、質量(重力)計測目標精度に3%と配分した。これに対応する測距精度は、ホームポジション(HP)高度20 kmから33 mとなるが、表1から明らかなようにはやぶさ2 LIDARはこの要求を十分に満足している。一方、重

表1：はやぶさ2 LIDAR測距基本性能.

項目	性能(地上試験実績)
測距範囲	30 m - 25 km (想定アルベドが0.06 - 0.1に対して)
測距誤差	± 1 m (高度30 mにおいて), ± 5.5 m (高度25 kmにおいて)
フットプリントサイズ	20.4 mrad (高度1 km以下において), 1.5 mrad (高度1 km以上において)
サンプリング周波数	最大1 Hz

力計測精度ははやぶさ2アストロダイナミクスチームが推定しており、HPから12時間以上かけて高度4 kmまで自由落下させる運用を2回繰り返すことで重力計測精度3%が達成される。小惑星の重力はあらゆる近接運用、降下運用に必須の情報であるので、はやぶさ2では小惑星到着後の早い時期に2回の自由落下計測が予定されている。アストロダイナミクスチームの推定の前提となっている測距誤差(標準偏差)は10 mであり、この要求もLIDARは満たしている。

形状中心と重心のずれの計測に関しては目標設定が難しい。あまりに小さなバルク密度の差や、あまりに小さい形状中心/重心ずれを計測目標に掲げたとしても、所詮は内部が均一であることを示すに過ぎないからである。大規模な構造の大きなバルク密度差を検出してこそ科学的意義がある。ひとつの目安として、最低でも直径の1/3以上のサイズの密度偏りが、最低でも10%以上の空隙率の差異を有していると仮定すると、形状中心/重心ずれは10 mを超える。そこで重心を10 m以下の精度で推定するために必要な自由落下(12時間以上)の回数をアストロダイナミクスチームが求めたところ、4回以上必要となることが分かった。2回の重力測定運用だけでは、この要求は満たされないが、幸いなことにははやぶさ2は3回のタッチダウン運用、3機のローバ放出、SCIクレーター探索と複数回の近接運用を実施することになっている。降下時には探査機の安全確保のために軌道マヌーバを実施しない訳にはいかないが、上昇時は制約が少ないので自由「上昇」を行うことが可能である。これらの機会を利用して、Ryuguの重心位置決定精度の向上と、重力場の高次項推定を図りたい。

測距の空間分解能は1秒周期のサンプリング中にどれだけ自転するかによる。自転周期7.63時間と有効直径875 m[11]を用いると、測線上の最大間隔は10 cmである。一方、測線間隔は自転軸の向きに依るため、見積もりが困難である。もし仮に、1週間に2自転分の測距を1年間繰り返せば104本の測線が得られる。

この測線が北極から南極まで等間隔に並んだとすると、約13 m間隔になる。ちなみに形状モデルの解像度はONCの画像解像度に依るので、LIDARの平均測線間隔よりもはるかに高い解像度が得られる。

1本の測線上に並んだ測距値は空間分解能が高く、かつ、精度も良い。1本の測線を観測している間に軌道修正が行われることは少ないので、HPにおける小惑星重心に対する探査機の運動は太陽光圧の影響が支配的になると考えられる。この摂動は、フットプリントの緩やかな水平移動と測距値の単調増加/減少として表れるはずで、形状モデルと測線を照合させれば容易に除去できるバイアス誤差である。この高空間分解能、高精度地形データは特に短波長のroughnessの推定に威力を発揮する[17]。小惑星表面のroughnessは一方で測距とアルベド測定の誤差要因となっているので、測距とroughness測定を繰り返し解析して地形モデルの精度を上げることが可能かもしれない。

## 2.2 表面アルベド観測

レーザ送光強度と小惑星表面からの反射光強度を測定することで、レーザ波長(1064 nm)における小惑星表面の幾何アルベド(geometric albedo)を観測することができる[2]。表層進化の観点からは、特に相対アルベドの地域変化が重要な観測目標となる。アルベドの変化要因としては、衝突によるイジェクタ放出、同じく衝突により励起されるseismic shaking、そして地球などの潮汐力の影響が考えられる。急斜面では地表更新が頻繁に起きて宇宙風化のムラが生じている可能性も大いにある。

C型小天体表面のアルベドの地域変化については、小惑星Mathildeでは比較的小さく±6%程度であった[25]が、火星の衛星Phobosでは±20%とやや変化が大きいことが知られている[26]。両者の違いが何に起因するのかはよくわかっていないが、レゴリスの移動や宇宙風化作用との関連が考えられる。一方で、はやぶさ2 LIDARのアルベド観測は誤差が大きく、機

器固有の誤差要因を積み上げるだけでも $\pm 18\%$ に達する[2]。加えて、地形傾斜やroughnessといった小惑星の表面状態も大きな誤差要因である。形状モデルや1本の測線から得られるroughness推定値からアルベドの観測精度どこまで上げられるかの検討(2.1)が、探査機が小惑星に到着するまでの重要課題である。

### 2.3 小惑星浮遊ダストの検出

アポロ探査の当時から、月面のダストは舞い上がり易く、また静電気によって付着しやすい特性を持つ事が知られている。また、月ではhorizon glowと呼ばれる現象が起きる。月面上に置かれたカメラがとらえた現象で、日没後に太陽の方向に太陽光を散乱する層が見られる。これがダストによる光の散乱だとすると、ダスト層の高さは地面から30 cm程度、ダストの特徴的なサイズは $3\ \mu\text{m}$ と見積もられる[e. g., 18]。月のhorizon glowを起こすメカニズムはまだよくわかっていないが、表面付近の電場によって起きているというモデルが有力である[e. g., 18, 19]。

上の理解が正しければ、全く同じ現象が小惑星上でも起きるはずである。浮遊ダストが直接確認された例はまだないが、Gaspra, Ida, Eros等の小惑星の表面には滑らかな地形があることから、粒径が解像度よりも十分に小さな粒子で覆われていると考えられている。中でも小惑星ErosはNEARシューメーカーによって詳細な観測がなされており、直径20-300 mのクレーターの底に水面のように滑らかで、周囲に比べて「青い」色をしている地形が発見されている[20, 21]。“Pond”と名付けられたこの地形の色の特徴は、 $50\ \mu\text{m}$ よりも小さなダストが濃集して作られたと考えれば説明可能である[20]。

初号機のサンプル分析から、Itokawaが800万年に1 mの割合で小さくなっていると推定された[22]。ItokawaではErosよりも天体との静電反発でダストが重力を振り切って脱出しやすいことから、Itokawaのサイズ減少はダストの消失と理解できるかもしれない。天体重力圏から逃げ出したダストは惑星間空間塵(interplanetary dust particle: IDP)となるため、小惑星からのダストの放出量を直接観測することでIDPの起源と進化、総量の見積もりに制約を与えられるかもしれない。

LIDARのレーザー光が浮遊するダスト雲に当たれば、

ごく微弱な反射光が戻ってくると期待される。LIDARの閾値は十分低く設定できるので、原理的にはダスト雲からの反射を検出できる。しかし、浮遊ダストの存在を確実に実証するためには、反射光のプロファイルからダスト数密度の視線方向に沿った分布を決める必要がある。開発当初には、はやぶさ2 LIDARには反射光プロファイルを取得する機能がなかったが、サイエンスチームの要望により、一部区間について時間の関数として反射光のエネルギーが閾値よりも高いか低いかを検出する機能が追加された。我々はこの新機能をダスト観測モードと呼んでいる。ダスト観測モードで、閾値を変化させながら測定を繰り返すことで、擬似的に反射光のプロファイルを決めることができる。一方で、閾値を下げると電気的ノイズが増大することも地上試験で確認されている[3]。小惑星浮遊ダストの実測データが全く無いため、浮遊ダストの検出は予測が困難であるが、LIDAR以外にも中間赤外カメラ[23]や光学航法カメラ[24]でダスト雲が観測される可能性がある。もし、小惑星周辺で浮遊ダストの存在を確認できれば世界初の観測となり、表層進化に一石を投じることになるだろう。

### 2.4 SCIの宇宙衝突実験

はやぶさ2には小型の衝突装置が搭載されており、2 kgのライナーを2 km/sの速度でRyuguに衝突させる[12]。この宇宙衝突実験で形成されるであろうクレーターについては荒川ら[12]が詳しく説明しているが、本稿ではクレーター形成に伴うseismic shakingについて考えてみたい。Seismic shakingについては既に詳細な研究がなされており[8, 13]、例えばGarcia *et al.* [14]は10 gの物体が6 km/sで衝突した際に生じるであろう鉛直方向加速度と鉛直方向速度の最大値が見積もられている。彼らの計算によれば、直径1 kmの小惑星では、衝突点から少なくとも半径300 mの領域内で表層物質が持ち上げられるという結果が得られている。単純にエネルギーで比較してもSCIでは28倍の衝突が起これ、着弾点を中心にRyuguの広範な地域でseismic shakingの影響が現れると期待できる。

Garcia *et al.* [14]の見積もりではseismic shakingによって生じる鉛直方向速度は直径1 kmの小惑星の脱出速度よりも2桁小さく、表層物質は浮き上がっても惑星間空間へ散逸することはない。つまり、衝突の直

後に地震ダスト雲が同心円上に湧き上がるのではないかと予想される。残念なことに、着弾時にははやぶさ2探査機はRyuguの裏側に退避し、ONCカメラも小惑星を捕らえてはいない。分離カメラ[12]で地震ダスト雲を撮像することがもし可能であれば、地震波の伝播速度や表層の変位速度が分析できるかもしれない。また、たとえ地震ダスト雲そのものをとらえることができなくても、地震ダスト雲の再集積や地すべりが起きて、着弾点を中心に広範な地形緩和が起きるであろうと期待される。SCI衝突実験では、新たに形成されるクレーターを特定するために、衝突の前後で着弾予想点から半径200 mの範囲を精査する計画になっている。宇宙衝突実験のビフォー・アフター画像は seismic shaking とそれに伴う地形緩和の貴重な実証データになるのかも知れない。表層レゴリスの深さの違いが表面流動として観察されるかもしれないし、ボルダのブラジルナッツ効果が実証される可能性もある。そうした成果をErosやItokawaといった他の小惑星に応用することができれば、小惑星表層進化の全く新しい展開となる。

Garcia et al. [14]の見積もりには大きな不確定性が含まれている。特に重要な不確定要因は地震動のパワースペクトル、衝突の継続時間、そして表層内で地震動が伝播する際のエネルギー消散率である。SCIの宇宙衝突実験では、むしろこれらの不確定要因を実測値から制約することに大きな意義があるのかもしれない。とりわけエネルギー消散率は表層微粒子の結合力を示す指標として、1 G下の地上実験では得ることができない貴重な観測データ[12]になるかもしれない。浮遊ダストの原因とも考えられている静電反発力(2.3)は微粒子間の結合力にも影響する可能性があるので、LIDARダスト観測も併せて小惑星表層の物理状態に迫りたい。

### 3. 小惑星科学の発展

「小惑星の内部構造」という視点で思いつき程度に話題を並べさせて頂いた。月や氷衛星のような重力天体の内部構造は教科書で学ぶことができるが、小天体の内部構造はそれ自体が研究対象となり得るか否かまだ不明である。はやぶさ初号機によるラブルパイル天体の実証と、それに続くはやぶさ2の観測が新たな分

野の開拓につながることを期待している。最後に強調したいのは、「小惑星の内部構造」は未開拓の分野だけに現在のサイエンスチームが想像していない観測結果が見つかるかも知れないという点である。はやぶさ2探査機の小惑星到着までまだ2年ほどあるので、プロジェクトチーム外の読者も今後のはやぶさ2の観測に注目して頂いて、隙あらばサイエンスチームを出し抜くような研究成果を上げて頂きたい。そのための取り掛かりになればと、本稿を執筆させて頂いた。内容に誤記や理解の及ばない点があれば、第一著者の責任である。どうぞお叱りは第一著者に送って頂きたい。

### 謝辞

はやぶさ2 LIDARの開発に携わった技術者の方々、はやぶさ2プロジェクトを支える技術者、事務員、その支援員、全ての方々に心より感謝します。本稿は渡邊誠一郎プロジェクトサイエンティストに執筆の機会を頂きました。

### 参考文献

- [1] Mizuno, T. et al., 2016, Space Sci. Rev., in print, doi:10.1007/s11214-015-0231-2.
- [2] Yamada, R. et al., 2016, Space Sci. Rev., in print, doi:10.1007/s11214-016-0240-9.
- [3] Senshu, H. et al., 2016, Space Sci. Rev., in print, doi:10.1007/s11214-016-0242-7.
- [4] Zhu, M-H. et al., 2014, Geophys. Res. Lett., doi:10.1002/2013GL058914.
- [5] Hirabayashi, M. and Sheers, D. J., 2015, Astrophys. J. Lett. 798, doi:10.1088/2041-8205/798/1/L8.
- [6] Miyamoto, H. et al., 2007, Science 316, 1011.
- [7] Asphaug, E. et al., 2001, LPSC XXXII, Abstract 1708.
- [8] Yamada, T. M. et al., 2016, Icarus 272, 165.
- [9] Britt, D. T. et al., 2002, Asteroids III (Univ. Ariz. Press, Tucson).
- [10] Hirata, N. et al., 2009, Icarus 200, 486.
- [11] Müller, T. et al., 2011, Astron. Astrophys. 525, A145.
- [12] 荒川政彦ほか, 2013, 遊星人 22, 152.
- [13] Richardson, J. E. et al., 2005, Icarus 179, 325.
- [14] Garcia, R. F. et al., 2015, Icarus 253, 159.

- [15] Harada, Y. et al., 2014, *Nature Geosci.* 7, 569.
- [16] 伊藤孝士ほか, 2004, *遊星人* 13, 212.
- [17] Barnouin-Jha, O. et al., 2008, *Icarus* 198, 108.
- [18] Rennilson, J. J. and Criswell, D. R., 1974, *Moon* 10, 121.
- [19] Poppe, A. and Horanyi, M., 2010, *J. Geophys. Res.* 115, doi:10.1029/2010JA015286.
- [20] Robinson, M. S. et al., 2001, *Nature* 413, 396.
- [21] Veverka, J. et al., 2001, *Science* 292, 484.
- [22] Nagao, K. et al., 2011, *Science* 333, 1128.
- [23] 千秋博紀ほか, 2015, *遊星人* 24, 120.
- [24] 諸田智克ほか, 2015, *遊星人* 24, 48.
- [25] Clark, B. E. et al., 1999, *Icarus* 140, 53.
- [26] Simonelli, D. P. et al., 1998, *Icarus* 131, 52.

# 一番星へ行こう!

## 日本の金星探査機の挑戦 その28

### ~「あかつき」紫外イメージャ本格観測開始!~

山崎 敦<sup>1</sup>, 山田 学<sup>2</sup>, 渡部 重十<sup>3</sup>, 今村 剛<sup>4</sup>,  
あかつきプロジェクトチーム

(要旨) 2015年12月7日に金星周回軌道に投入された金星探査機「あかつき」は、2016年4月から本格的な金星観測を開始した。搭載された紫外イメージャ(UVI)は、軌道制約により定型観測は4月からとなったが、この数か月間で高画質の金星紫外画像を取得している。その一端と今後の展望を紹介する。

## 1. 金星周回投入後は夜面観測

2015年12月7日に金星周回軌道に投入された「あかつき」の軌道は、まず、金星から最も遠い距離(遠金点)が36万km、金星から最も近い距離(近金点)が1,000-10,000km、周期が10.5日の楕円軌道となった。遠金点での観測は、低解像度にはなるが衛星速度が遅いため連続観測による雲の時間変化観測に向いている。逆に近金点での観測は、高解像度ではあるが速い衛星速度のためスナップショットには向いている。紫外線観測の主目的のひとつは、雲追跡による風速分布の導出にあるため、遠金点での観測が最初の対象となった。

投入後の周回軌道は、本誌シリーズでも記述されているように遠金点の位置が少しずつ金星夜側に回り込む軌道であった[1]。紫外イメージャ(UVI)は雲頂での太陽反射光を検出するので昼面側の雲構造解析担当であり、夜側に遠金点が位置する期間は観測できず、UVI担当としてはもどかしい日々が続いた。それでも、投入直後金星撮像を敢行したファーストライト画像[2]は、UVIの経年変化も少なく世界最高水準の高画質であることを示し、構想を練ってきた科学テーマを十分に満足させる結果をもたらすと期待させるもので

あった。また、12月9日に観測された3枚の連続写真[3]は、遠近点付近からの観測ではあるが、雲追跡解析に十分供することのできる分解能の画像であることが示された。

## 2. UVIの連続観測開始

遠金点からの紫外観測が可能となったのは、金星周回軌道投入から4か月立った2016年4月に入ってからであった。金星の公転周期の半分が経過したところからである。この時期の4月4日7時28分(UT)に、観測期間を延ばす目的で軌道修正を実施し、遠金点37万km、近金点1,000-10,000km、周期10.8日の楕円軌道となった。このころに、遠金点が昼面側に位置するようになり、2時間間隔での観測が定常的に実施できる運びとなった。

その中のベストショットの1枚を図1に示す。2016年5月6日16時17分(UT)に金星中心距離8.5万kmから波長365 nmで撮像した昼面画像である。衛星直下点の地方時が12時で、満金星がUVI視野いっぱい広がる画像である。衛星機上でのスミア補正と地上でのフラット補正だけ画像処理した画像でも高コントラストで雲頂の吸収物質の分布がはっきり示されている。さらにハイパス処理を実施すると、細かな雲構造が鮮明に表れ、高精度で雲頂高度における風速分布を導出できることを如実に表している。また、同時に撮像し

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所  
2. 千葉工業大学 惑星探査研究センター  
3. 北海道情報大学 宇宙情報センター  
4. 東京大学大学院 新領域創成科学研究科  
yamazaki@stp.isas.jaxa.jp

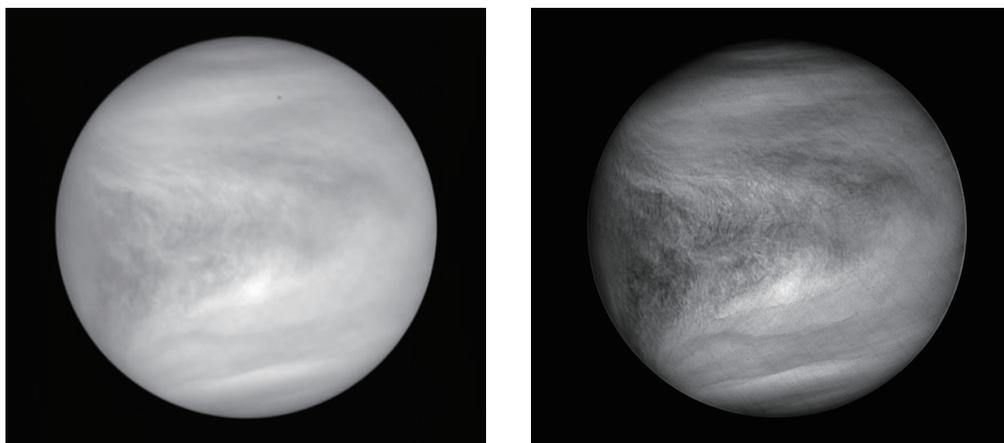


図1：波長365 nmで撮像した昼面画像のベストショットの一枚。(左)スミア補正とフラット処理の画像，(右)ハイパス処理を加えた画像。細かな雲構造が鮮明に見えてとれる。

た波長283 nmの画像は、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)の分布を示し、雲の形成・消失にかかわる物理プロセスを推定できることを期待させる。

### 3. 今後の展望

図1から雲追跡による雲頂高度での風速分布の同定は、確実に導出できると考えられる。また、同時に撮像する波長283 nm, 365 nmの画像から、雲生成に関係すると考えられるSO<sub>2</sub>分布と雲構造から、雲生成メカニズムの理解が進むと予想される。さらには、SO<sub>2</sub>分布とその時間変化からSO<sub>2</sub>に関わる化学プロセスの理解深化が期待される。もちろん金星近点近傍でのクローズアップ観測による、鮮明な渦状雲の追跡も実施できると考えている。予想に違わない高画質の紫外画像は、プロジェクト発足当初から考えられてきた科学テーマに加え、金星大気研究の更なる深化を見せると期待している。今後の紫外画像に請うご期待！！

### 謝 辞

画像処理についてJavier Peralta博士、佐藤隆雄博士(宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)にご協力いただきました。また、「あかつき」の観測運用に関して紙面に記しつくせない関係各方面の大勢の方々にも多大なるご協力・ご支援をいただいております。この

場を借りて深甚の謝意を表します。

### 参考文献

- [1] 廣瀬史子, あかつきプロジェクトチーム, 2015, 遊星人 24, 126.
- [2] 中村正人ほか, 2016, 遊星人 25, 4.
- [3] 金星探査機「あかつき」試験観測中間報告に関する説明会 (<http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2016/0401.shtml>)

# 「天体の衝突物理の解明(XI) ～衝突研究における状態方程式の役割～」 参加報告

黒川 宏之<sup>1</sup>

## 1. はじめに

2015年11月26日から28日にかけての3日間、すでに冬の装いの北海道は北海道大学低温科学研究所にて、研究会「天体の衝突物理の解明」が開催された(図1)。今回で第11回目となるこの研究会は通称「衝突研究会」と呼ばれ、衝突業界ではお馴染みの冬のイベントである(らしい)。毎回、衝突物理に関わるテーマを掲げていることが本研究会の特徴だが、今回は「衝突研究における状態方程式の役割」と題し、関連する3件の招待講演が行われた。加えて、21件の口頭講演(1講演30分)、17件のポスター講演が行われ、活発な議論が交わされた。

筆者は惑星大気や内部構造を主な研究対象としており、衝突物理については門外漢であったが、今回、高圧の惑星内部構造を知る上でも重要となる状態方程式がテーマであると聞き、はじめて参加させていただい

た。状態方程式に関する3件の招待講演もとても勉強になったが、その他の一般講演も衝突物理に関して長時間どっぷりと聴くことははじめての経験であり、素過程の解明を重視する衝突業界の研究スタイルを存分に味わわせていただいた。

本稿では、講演の概要と研究会の様子をごく簡単にお伝えする。研究会の空気を多少なりともお伝えできれば幸いである。ページ数の都合から個々の講演について詳細をお伝えすることはできず、またここに記載する内容は筆者の理解にとどまる。各講演の要旨及び発表スライドは研究会のHP(<http://www.impact-res.org/impact15/>)に掲載されているので、興味を持たれた方はぜひそちらを参照していただきたい。

## 2. 研究会の概要

以下に研究会のプログラムを示す。



図1: 集合写真

1. 東京工業大学地球生命研究所  
hiro.kurokawa@elsi.jp

---

**■11月26日(木)**

**岡本尚也**(千葉工大)

「衝突放出物の超高速撮像計測：iSALE計算結果との比較」

**木内真人**(神戸大)

「砂礫への低速度衝突クレーター形成実験：重力依存性と真空度依存性」

**高野翔太**(神戸大)

「氷・石英砂混合標的に対する高速度クレーター形成実験」

**小川 諒**(神戸大)

「鉄へのクレーター形成に関する温度と衝突速度への依存性」

**紫垣沙央**(神戸大)

「コンドリュールの強度に関する実験的研究」

**保井みなみ**(神戸大)

「石膏球の斜め衝突破壊実験」

**長谷川直**(ISAS)

「2015年度の宇宙研超高速衝突実験施設の現状」

**松榮一真**(神戸大)

「粉粒体を伝播する衝突励起振動に関する実験的研究」

**大村知美**(神戸大)

「再集積天体内部の密度構造に関する実験的研究」

**黒澤耕介**(千葉工大)

「水氷の衝突蒸発について」

---

**■11月27日(金)**

**川合伸明**(熊本大)

「衝撃圧縮と状態方程式」【招待講演】

**丹下慶範**(JASRI)

「スケールフリー統合解析による状態方程式の決定」  
【招待講演】

**土屋卓久**(愛媛大)

「状態方程式を含めた熱力学特性の第一原理計算」  
【招待講演】

**脇田 茂**(NAOJ)

「微惑星衝突によるコンドリュール形成シミュレーション」

**杉浦圭佑**(名古屋大)

「弾性体ゴドノフSPH法を用いた衝突計算」

**小林 浩**(名古屋大)

「衝突による岩石－金属量比の進化」

**黒川宏之**(東工大)

「天体衝突と大気散逸による火星表層環境の進化」

**西田政弘**(名工大)

「超高速衝突時にアルミニウム合金から噴出するイジェクタの相似性」

**門野敏彦**(産業医科大)

「破片の形状分布：2次元破壊の場合」

**道上達広**(近畿大)

「岩石の衝突破片形状と石の形状についてのアンケート調査報告」

---

**■11/28(土)**

**柳澤正久**(電通大)

「2007ふたご座流星群に伴う月面閃光の2色測光」

**安藤滉祐**(名古屋大)

「月表面におけるボルダーの細粒化プロセスとそのタイムスケール」

**諸田智克**(名古屋大)

「月のクレータ放出物の風化について」

**平田 成**(会津大)

「月 Tycho クレータ対眠点およびその周辺の堆積物」

---

**■ポスター講演**

**中村昭子**(神戸大)

「空隙率の高い弾丸の衝突実験」

**荒川政彦**(神戸大)

「衝突貫入時の加速度計測による惑星表面の力学的性質の調査」

**千秋博紀**(千葉工大)

「人工流星生成実験(速報)」

**黒澤耕介**(千葉工大)

「iSALE shock physics codeによる衝撃圧減衰率の再評価」

**金久保隆太**(電通大)

「蒸気雲の固体壁への衝突による発光」

**柿沼文広**(電通大)

「月面衝突閃光のスペクトル観測計画」

**東畑秀尚**(電通大)

「月面衝突閃光の2色測光計画」

高木靖彦(愛知東邦大)

「人工衝突クレーター周辺の誘電率・密度・クラック分布の測定」

末次 竜(神戸大)

「ガス抵抗による微惑星の捕獲及び軌道進化」

鈴木絢子(ISAS)

「曲率のある面への衝突：iSALEによる数値計算例」

佐藤雅彦(産総研)

「Preliminary report on shock remanent magnetization measurement using a SQUID scanning microscope」

小林正規(千葉工大)

「大面積ダストセンサ開発のための衝突実験」

関根利守(広島大)

「相関係を考慮した状態方程式の必要性」

上塚貴史(東京大)

「TAO/MIMIZUKU を用いた小天体の含水鉱物探査計画」

細野七月(理研)

「FDPSを用いた巨大衝突の高解像度計算」

小川和律(神戸大)

「Hayabusa2/DCAM3による衝突実験観測」

平田直之(神戸大)

「土星系氷衛星におけるレイクレーター」

## 2.1 招待講演

研究会のテーマである「衝突研究における状態方程式の役割」に関連し、3件の招待講演が行われた。1件目の招待講演である河合伸明氏の講演(図2)では、衝

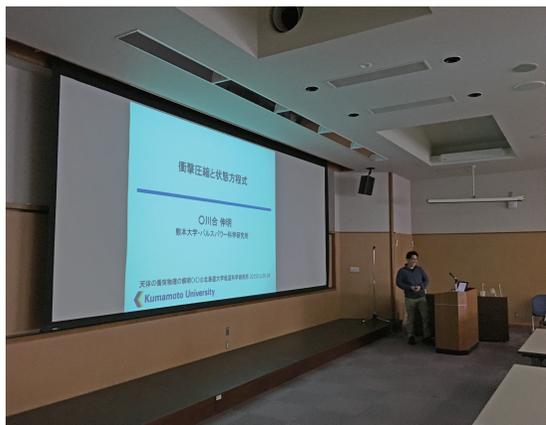


図2：講演の様子。

撃圧縮による状態方程式研究が紹介された。状態方程式研究における平面衝撃圧縮実験の価値を強調するのみならず、一軸方向の圧縮であることが圧縮時の圧力の導出においてどう影響しうるか、注意深く解析していたのが印象的であった。2件目の丹下慶範氏の講演では、高圧科学における圧力スケールの使用に関わる問題と、それを解決するスケールフリー統合解析についての紹介があった。最後の土屋卓久氏の講演では、実験室ではつくりだせない高圧下の状態を計算できる第一原理計算について詳しい解説があった。第一原理計算に基づく状態方程式は、巨大氷惑星・巨大ガス惑星の内部構造を研究する筆者にとっても関わりの深い内容である。“第一原理計算”と称される計算の中で実際に行われている密度汎関数理論(他の原始・電子の影響を平均場として1電子について解く)について、専門家の解説を聴くことができ、理解が深まった。

## 2.2 一般口頭発表

一般口頭講演のテーマは多岐にわたったが、以下では筆者なりの理解で講演を5つに分類して紹介していく。

### (1) 衝突放出物・破片

衝突放出物・衝突破片に関する講演は今回の研究会で最も多かった。岡本氏からは、衝突実験によるイジェクタカーテンの形状観察に加え、iSALE・SPH数値計算との比較の結果が報告された。今後は数値計算の高解像度化・斜め衝突の検討を経て、火星から火星衛星への物質輸送へ応用をしていくとのことであった。西田氏からは、スペースデブリの衝突によるイジェクタ生成過程を想定したアルミニウム合金の高速衝突実験の成果が報告された。衝突破片の形状分布を決めるメカニズムについて、クラックの分岐に着目した説を唱えた門野氏の講演は、門外漢ながらとても興味深く聴かせていただいた。衝突破片の形状の測定については、道上氏からも報告があり、イトカワのボルダーとの比較も紹介された。

### (2) クレーター形成

木内氏からは、低重力・高真空度における砂標的クレーター形成実験の結果が紹介された。また、得られたスケーリング則をイトカワに応用し、イトカワ上のdimpleがボルダーの低速度衝突を起源とすると結論付けられた。高野氏の講演は、氷天体を想定した凍結

砂標的クレーター形成実験の報告であった。小川氏の講演では、鉄質天体を想定した鉄へのクレーター形成実験の報告があり、特に温度依存性が詳しく検討されていた。また、この講演でも iSALE による数値計算との比較が行われた。研究会では実験と iSALE 数値計算の比較が複数の講演で行われており、衝突研究のツールとして浸透しているという印象を受けた。

### (3) コンドリュール

コンドリュール・コンドライト母天体の形成過程の理解は、初期太陽系環境の解明に繋がると考えられる。これに関連して、2件の講演が行われた。紫垣氏の講演では、コンドライト母天体の形成進化過程を解明すべく行ったコンドリュールの強度測定実験の結果が報告された。脇田氏の講演では、impact jetting によるコンドリュール形成の理論研究の報告があった。原始惑星-微惑星衝突がコンドリュール形成の主要な形成過程であるとのことだった。

### (4) 衝突破壊・蒸発

保井氏からは多孔質天体を想定した斜め衝突実験の成果が報告された。黒澤氏の講演は iSALE 数値計算による衝突時の衝撃圧減衰の空隙率依存性について、空隙が衝撃圧の減衰に寄与することが示された。杉浦氏の講演では、ゴドノフ SPH 法の弾性体力学への拡張と岩石物性の組み込みについて紹介があり、現実的な天体衝突計算への応用が楽しみな研究であった。

### (5) 天体内部構造・進化

衝突・圧縮現象に関連した天体進化に関する研究も3件あった。大村氏の講演では、粉粒体小天体を想定した試料の圧縮実験から、天体内部の密度構造の推定が行われた。小林氏の講演では、天体衝突による地球型惑星の岩石-金属比の進化についての理論計算の成果が示された。微惑星サイズに応じ、地球型惑星の岩石-金属比が変化することが示された。また、筆者は天体衝突による火星大気の進化について講演を行った。

### (6) 月

月に関しては4件の講演があった。柳澤氏の講演では、月面閃光の測光観測の報告があった。安藤氏の講演では、月表面のボルダーサイズ分布の解析が報告された。クレーターごとにボルダー数密度の減少の仕方が異なるなど、ボルダー細粒化過程の複雑さが議論された。諸田氏の講演では、かぐやマルチバンドデータの解析によるクレーター放出物の宇宙風化度の研究が

紹介され、宇宙風化に2つの特徴的なタイムスケールが見られるとのことであった。平田氏の講演では、月 Tycho クレーター対眠点の堆積物の解析から、Tycho クレーターへの斜め衝突からの放出物と整合的であることが示された。

## 2.3 ポスターセッション

夕方のポスターセッションは酒を片手に行われたこともあり、とても賑やかに議論が行われた。興味を引く講演が数多くあったが、特に千秋氏による人工流星生成実験と佐藤氏による衝突残留磁化実験は斬新な試みであり、特に印象深かった。

## 3. まとめ

研究会全体を通じて、iSALE の普及により、実験と理論計算を比較する研究が複数あったことが印象に残った。これを機に実験・理論双方の専門家の交流がよりいっそう深まることが期待される。また、筆者にとってははじめての参加であったが、これまでこの歴史ある研究会の積み重ねてきた交流のおかげか、講演者・聴衆の間で非常にオープンスタンスな議論が交わされる事が多く、他にないこの研究会独自の魅力であると感じた。この報告記事を読んでこの研究会に興味を湧いた方は、ぜひ次の機会に参加してほしい。

## 謝辞

この研究会の開催にあたり尽力いただいた世話の方々へ感謝いたします。また、筆者は研究会参加にあたり、北海道大学低温科学研究所から旅費を支援していただきました。この場で感謝申し上げます。

# 「第三回 iSALE 勉強会」参加報告

岡本 尚也<sup>1</sup>

「第三回 iSALE 勉強会」が2015年11月26日に北海道大学低温科学研究所で行われました。iSALE (impact SALE) とは数値衝突流体計算コードであり、SALE (Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian) コードを惑星科学研究用に改良したものです。弾性・塑性モデル、破壊モデル、空隙モデルなどが組み込まれており、惑星科学分野での天体衝突等を扱えるようになっていきます。iSALEは科学研究に使用する目的であれば、誰でも無償で利用可能です。そのため欧米の多くの研究者者に利用され、50報を超える査読付き論文が出版されています。日本では2014年に「iSALEusers group in Japan」が千葉工業大学の黒澤耕介氏を中心として立ち上げられ、日本の惑星科学研究者へiSALEの利用が広められています[1]。これまでに2回の「iSALE 勉強会」[2, 3]と、より実習に重点を置いた「講習会」[4]が行われてきました。グループではwikiを運営し、これら勉強会・講習会の資料が置かれているだけでなく、iSALEの詳細なインストール方法やデモ計算などの情報をまとめています。iSALEについて興味をもたれた方、利用されたい方はぜひこちらのwikiページ(<https://www.wakusei.jp/impact/wiki/iSALE/>)をご覧ください。

今回の「第三回 iSALE 勉強会」ではiSALEについての基本的な説明に加え、iSALEを実際に使用している方々によるその使用方法や研究の紹介が行われました。

## ◆◆◆◆◆プログラム◆◆◆◆◆

13:00 – 13:25

**黒澤耕介**(千葉工大)

「iSALEの基本的な説明」

13:30 – 14:30

**黒澤耕介**(千葉工大)

「iSALEで使える状態方程式の解説」

14:40 – 16:00

**黒澤耕介**(千葉工大)

「iSALE基本操作実習」

16:10 – 18:00

**iSALEを用いた研究例紹介**

**岡本尚也**(千葉工大)

「iSALEを用いた高速放出物の計算」

**細野七月**(京大兼理研)

「iSALEとSPHの衝突計算の比較」

**鈴木絢子**(宇宙研)

「球対球衝突におけるiSALE使用雑感」

**脇田 茂**(国立天文台)

「iSALEを用いた微惑星衝突シミュレーション」

**黒澤耕介**(千葉工大)

「iSALEの計算出力と衝撃圧縮実験との比較」

## ◆◆◆◆◆

はじめに黒澤氏からiSALEの基本的な説明が行われました。iSALEが非常に有用であり思いついたことをすぐに計算できること、また1次元衝撃波管問題の解析解や衝突実験との比較を通して計算結果の信頼性について解説頂きました。

次にiSALEで扱える状態方程式についての説明が

1. 千葉工業大学惑星探査研究センター  
tokamoto@perc.it-chiba.ac.jp

行われました。Tillotson EOS (equation of state) と ANEOS(analytic equation of state) を取り上げ、それぞれがどのような状態方程式なのか、どのような長所と短所があるのか、そして自分で設定した問題に対してどちらの状態方程式を選択すべきか、状態方程式中で必要となるパラメーターをどのようにして求めるかについて短い時間ではありましたが非常に内容の濃い授業をしていただきました。

続いての実習では、参加者それぞれが事前に iSALE をインストールしてきたノートパソコンを用いて、初期条件の作成から計算結果の可視化まで行いました。黒澤氏が初期条件を設定するファイルや計算結果の描画ソフト (VIMoD) について解説するとともに、スクリーン上で丁寧に一つ一つの操作を行いました。参加者はそれを見ながら同じ操作を自身のファイルに施すことができ、iSALE を動かすための一連の手順を体験することができました。

実習が終わると iSALE を実際に研究で用いている、あるいは iSALE と関連深い研究を行っている方々による研究紹介が行われました。最初は私が行いました。私は衝突直後に放出される衝突点近傍の高速な放出物について研究しています。その放出物の速度がどの程度であるのか、そしてそれはどのぐらい量があるのかを調べるのに iSALE を利用することは一つの大きな手段です。このとき重要となる問題の一つは空間解像度です。空間解像度の依存性を調べるために入力ファイル (初期条件) をどう設定したかについて解説を行いました。次に京都大学兼理化学研究所の細野七月氏に、iSALE と同じく衝突シミュレーションでよく用いられる SPH (smoothed particle hydrodynamics) 法についてお話いただきました。従来の SPH 法と改良された SPH 法である DISPH (density independent SPH) 法で巨大衝突の計算を行ったときに発生する結果の違いについて説明いただきました。宇宙科学研究所の鈴木絢子氏は曲率のある面に形成される衝突クレーターの研究を行っています。曲率がある面の場合と無い面の場合とで衝突クレーター形成時の内部圧力分布などにどのような違いが生じるかについて iSALE を使って調べています。標的表面を曲面にする場合と平面にする場合で入力ファイルをどのように変更したかについて詳しく解説されました。国立天文台の脇田茂氏は微惑星衝突によるコンドリュールの形成をテーマにし



図1：参加者の集合写真。

て iSALE を用いています。初期条件の作成方法だけでなく、トレーサー粒子解析のためのデータ出力方法、自身で作られた解析プログラムの実行、といった iSALE コードを走らせてからデータ解析を行うまでの一連の操作について解説いただきました。脇田氏はこの計算に国立天文台の天文シミュレーションプロジェクトの計算サーバを利用しています。こちらは同プロジェクトに申請手続きを行うことで計算機の使用が可能となるようで、利用を希望される方はぜひホームページを訪れてみてください (<http://www.cfca.nao.ac.jp>)。最後に黒澤氏からは、衝撃圧縮実験と iSALE による数値計算との比較についてお話いただきました。実験では高強度レーザーを用いて試料中に強い衝撃波を発生させていますが、iSALE で同じようにレーザー照射を行う計算はできません。そこでレーザー照射と同等となる固体弾丸の衝突条件はどうであるかを考え、その衝突体を iSALE 内でどう作成したかについて解説いただきました。

現在 (本稿執筆時)、日本からは iSALE を用いた査読付き論文が 1 報出版されています [5]。今回紹介された研究以外にも iSALE を使って進められている研究はあり、今後は徐々に出版される論文数も増えてゆくでしょう。また今回新たに勉強会に参加された方々も多く、日本でも iSALE ユーザーは増えていくと思われれます。iSALE の一利用者である私にとってもユーザーが増えることは嬉しいことであり、その活用方法について様々な情報交換ができるようになっていければ良いと考えています。

最後になりましたが、本勉強会を開催してくださった黒澤氏を中心とする世話人の方々に感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 黒澤耕介ほか, 2014, 遊星人 23, 103.
- [2] 常晃, 2014, 遊星人 23, 156.
- [3] 末次竜, 2015, 遊星人 24, 63.
- [4] 脇田茂, 2015, 遊星人 24, 346.
- [5] Nagaki, K. et al., 2016, MAPS 51, 1153.

## 2016年度助成事業2件公募のご案内

### 公益財団法人 宇宙科学振興会<sup>1</sup>

公益財団法人宇宙科学振興会は宇宙科学分野における学術振興を目指し、2016年度も引き続き下記の助成事業を行います。それぞれの応募要項の詳細は当財団のホームページ：<http://www.spss.or.jp>に掲載しています。それぞれの公募に対する応募申請に際してはホームページご参照の上、申請書をダウンロード・作成いただき必要な書類を添付の上、財団宛に電子メール(admin@spss.or.jp)で申請下さい。奮ってご応募いただくようご案内申し上げます。

#### (1) 国際学会出席旅費の支援

##### ●支援対象

宇宙理学(地上観測を除く)および宇宙工学(宇宙航空工学を含む)に関する独創的・先端的な研究活動を行っている若手研究者(当該年度4月2日で35歳以下)、またはシニアの研究者(当該年度4月2日で63歳以上かつ定年退職した者)で、国際研究集会で論文発表または主要な役割などが原則として確定している者。

●助成金額・件数：一件あたり10～25万円程度、年間10件程度

##### ●申し込み受付時期

応募締切り2016年8月31日(今年度については締め切りました)：2016年10月1日～2017年3月31日の間の出発者対象

応募締切り2017年2月28日：2017年4月1日～2017年9月30日の間の出発者対象

#### (2) 国際学会開催の支援

##### ●支援対象

宇宙科学研究を推進している国内の学術団体(研究所、大学等)で、宇宙理学(地上観測を除く)及び宇宙工学(宇宙航空工学を含む)に関する国際学会、国際研究集会の国内開催を主催しようとする団体。

●助成金額・件数：一件あたり30～50万円程度、年間3～5件程度

##### ●申し込み受付時期

応募締切り2016年8月31日(今年度については締め切りました)：2016年10月1日～2017年3月31日に開催の国際学会対象

応募締切り2017年2月28日：2017年4月1日～2017年9月30日に開催の国際学会対象

##### ●照会先

公益財団法人宇宙科学振興会事務局

<http://www.spss.or.jp>

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1

Email：admin@spss.or.jp

Tel：042-751-1126

1. 公益財団法人宇宙科学振興会 事務局  
admin@spss.or.jp

# 2016年度宇宙科学奨励賞公募のご案内

## 公益財団法人 宇宙科学振興会<sup>1</sup>

公益財団法人宇宙科学振興会では、宇宙科学分野で優れた研究業績を挙げ、宇宙科学の発展に寄与した若手研究者を顕彰し、宇宙科学奨励賞を授与いたします。ここに2016年度の第9回宇宙科学奨励賞候補者のご推薦を募集いたします。推薦要綱の詳細は当財団のホームページ(<http://www.spss.or.jp>)に揭示しておりますが、当奨励賞の概要は以下の通りです。皆様の周りで優れた業績を挙げ将来の活躍が期待される若手研究者をご存知の際には、是非ともご推薦いただきますようお願い申し上げます。

**表彰の趣旨：**宇宙理学(地上観測を除く)分野及び宇宙工学分野で独創的な研究を行い、宇宙科学の進展に寄与する優れた研究業績をあげた若手研究者個人を顕彰する。

**授与機関：**公益財団法人 宇宙科学振興会

**候補者：**上記分野で優れた業績をあげた当該年度の4月1日現在37歳以下の若手研究者個人。候補者の推薦は他薦に限る。

**業績の審査：**業績の審査は、推薦理由となる研究業績に関連して発表された論文に基づいて、当財団が設置する選考委員会において行う。

**賞の内容：**授賞は原則として毎年宇宙理学関係1名、宇宙工学関係1名とする(ただし適格者のいない場合は受賞者なしとする場合がある)。受賞者には本賞(賞状と表彰楯)および副賞(賞金30万円)が贈られる。

**推薦締切日：**2016年10月31日(月)必着。

**表彰式：**選考結果は2017年1月に推薦者と受賞者に通知するとともに、当財団ホームページにおいて発表する。その後2017年3月に表彰式を行い、受賞者には受賞対象となった研究に関する講演をして頂く。

なお、推薦の手続きの詳細については財団のホームページ(<http://www.spss.or.jp>)をご覧ください。推薦書式をダウンロードして必要事項を記載の上、(1)候補者の略歴、(2)論文リスト、および(3)推薦の対象となる論文の別刷等必要書類を添付の上、電子メールにてご提出下さい。

**お問い合わせ先および推薦書送付先：**

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1  
公益財団法人宇宙科学振興会 事務局

E-mail: [admin@spss.or.jp](mailto:admin@spss.or.jp)

## JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第115回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第45回総会議事録
- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿
- ◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

### ◇日本惑星科学会第115回運営委員会議事録

日 時：2016年5月24日(火) 18:30 - 20:30  
 場 所：日本地球惑星科学連合2016年大会会場(千葉市美浜区中瀬2-1)  
 幕張メッセ国際会議場101A

運営委員：

出席者 15名

倉本 圭, 渡邊 誠一郎, 田近 英一, 中村 昭子, 千秋 博紀, 中本 泰史, 並木 則行, 平田 成, 林 祥介,  
 竹広 真一, 諸田 智克, はしもと じょーじ, 小久保 英一郎, 佐々木 晶, 生駒 大洋

欠席者 6名

委任状有り 6名(議長への委任状6通)

荒川 政彦, 井田 茂, 和田 浩二, 春山 純一, 永原 裕子, 橋 省吾

委任状無し 1名

荒井 朋子

オブザーバー：

大宮 正士(連合大会プログラム委員)

議 題：

#### 1. 会計第13期上期決算

竹広財務専門委員長より、おおむね予算通り執行したとの報告がなされた。収支は24万円の黒字。支出減の主なものは、原稿起こし30万円の不使用。秋季講演会は40万円の収入。来年度からは、サーバー費30万円が加わるので収支はより厳しくなる。

#### 2. 会計第13期下期予算執行状況報告

収入支出ともに、ほぼ予算どおり、例年どおり進んでいる。10万の寄付金があり、これは発表賞に使用させていただく。会員区分・所属などのアップデート、会費納入をお願いしたい。秋に熊本地震に関する自然災害免除のアナウンスをする予定である。

Q. 最近では遊星人のページ数が減っているが、遊星人の製本印刷費が変動していない。

A. 過去の費用をチェックして、値上げがあったか確認する。

#### 3. 第13期上期活動報告ならびに第13期下期活動計画

諸田総務専門委員長より、活動報告書と計画書について説明がなされた。学会が推薦していた、関根会員

の平成28年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞の受賞が決まった。運営委員より、運営委員会の開催日、秋季講演会のエントリー数の記述について修正の要望があった。

#### 4. 2015年度最優秀研究者賞について

中村2015年度学会賞選考委員長より、2015年度最優秀研究者賞に3名の応募があり、受賞者として黒澤耕介会員、癸生川陽子会員の2名を受賞者として推薦することが報告された。審査過程と推薦理由の概要が説明され、異議なく承認された。

#### 5. 2016年秋季講演会・学会賞実施案等

はしもと2016年秋季講演会組織委員長より、各種日程、会場、収支見込について説明がなされた。開催期間は2016年9月12日~14日。ノートルダム清心女子大カリタスホールで開催。運営委員より、参加費について修正の要望があった。開催日程が天文学会と一部重複していることが確認された。

#### 6. 2017年秋季講演会について

佐々木2017年秋季講演会組織委員長より報告がなされた。会場は大阪大学のホール、もしくは会館を検討している。秋の学会までに会場候補を絞って決定する。会期は9月~11月になる予定。

#### 7. 学会賞選考委員の入れ替え

諸田総務専門委員長より、学会賞選考委員の交代について説明がなされ、承認された。退任が中村昭子、竹広真一、三河内岳、谷川享行会員。2016年度委員は門野敏彦、千秋博紀、薮田ひかる、高橋芳幸会員。

#### 8. 入退会について

諸田総務専門委員長より入退会状況について報告がなされた。正会員600名で前年から16名減。

Q. 正会員は長期的に減っているのか？

A. 4年ほど前より会員数に大きな増減は無いが、来年度以降の動向を注意する必要がある。

#### 9. その他総務からの案件

諸田総務専門委員長より、議長に小川和律会員、書記に平田直之会員がそれぞれ推薦され、承認された。

#### 10. 情報化専門委員会からの報告

平田情報化専門委員会より、4月28日に実施したサーバー移行について報告があった。SteeringなどのMLでSPAMが大量に流れ、ウイルス付きのSPAMも流れた。無料のウイルス対策ソフトを導入する予定。有力の対策ソフトの導入は要検討（およそ10万円/年かかる）。その他にもいくつかの不具合が発覚した。他にも不具合、要望があれば連絡いただきたい。

#### 11. 遊星人の発行状況報告

和田編集専門委員長より、書面による報告がなされた。遊星人はつつがなく発行されている。遊星人記事のJ-Stageにおける公開作業も進めており、早ければ秋口から公開の見通し。

#### 12. 日本地球惑星科学連合の報告

倉本会長から報告がなされた。理事・会長・副会長が改選され、田近英一、中村昭子、倉本圭会員が理事に、副会長の1人に田近英一会員がそれぞれ選出された。また、社員総会の投票制度の変更、JpGUフェローの選出について報告があった。惑星科学会からの新フェローは藤原顕会員、富樫茂子会員。

#### 13. 行事部会からの報告

中村行事部会委員より、以下2点の報告がなされた。

(1) 2018年の秋季講演会は北海道教育大および北大が組織し、旭川で開催予定。

(2) 予稿集を公開してきた CiNiiの運用が終わる。今後は学会ウェブサイトで開催するなどの可能性を検討する。

Q. これまでの予稿集も公開するのか？

A. 確認する。

#### 14. 連合大会プログラム委員からの報告

大宮連合大会プログラム委員より、来年度のプログラム委員として押野翔一会員(正)と黒川宏之会員(副)が推薦され、異議なく承認された。また、来年度の惑星科学セッションコンビーナとして鎌田俊一会員(正)、岡本尚也会員(副)が選出されたとの報告がなされた。

Q. 来年はAGUと共催だが、惑星科学セッションとして何か対応する必要は。

A. 個別のテーマについて英語の別セッションを提案する開催する可能性はある。

#### 15. その他

- ・ 諸田総務専門委員長より、日本学術振興会育志賞の学会枠推薦について、会員からの推薦がない場合の推薦者選出方法の提案がなされ、承認された。
- ・ 中本財務専門委員より、保育サービスの補助金金額上限を、子供1人・1日あたり10,000円とする方針が報告された。
- ・ 平田委員より、新しい賛助会員が入会予定であることが報告された。入会手続きについては説明済み。潜在候補を掘り起こして打診すれば、賛助会員として入会してくれる企業はあるかもしれない。
- ・ 渡邊委員より、天文衛星「ひとみ」の運用断念に関し、宇宙理学委員会にて今後の方針について議論がなされる予定であることが報告された。

## ◇日本惑星科学会第45回総会議事録

日 時：2016年5月25日(水) 12:30 - 13:30

場 所：日本地球惑星科学連合2016年大会会場 幕張メッセ国際会議場104  
〒261-0023 千葉県美浜区中瀬2-1

正 会 員：600名

定 足 数：60名

参加人数：39名(開会時) (これに加えて非会員の傍聴者0名) > 39名(議事3.1採択時) > 39名(議事3.2採択時)

委 任 状：157通

議 長：154通

倉本会員：2通

佐々木晶会員：1通

### 1. 開会宣言

諸田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小川和律会員、書記に平田直之会員が選出された。

### 3. 議 事

#### 3.1. 第13期上期(2015年度)活動報告

- ・ 基調報告(倉本会長)

事業概要として、連合大会の共催、東工大にて開かれた秋季講演会、遊星人・欧文専門誌EPS誌の発行、フロンティアセミナーの開催等の説明がなされた。

- その他、報告事項として関根康人会員を文部科学大臣・若手科学者賞に推薦し受賞した事柄が挙げられた。
- ・会計報告(竹広財務専門委員長)  
2015年度決算額として242768円の黒字決算であったことが報告された。
  - ・各種専門委員会報告
  - ・会計監査報告(松田・山岸会計監事(代読：小川議長))  
収支決済に誤りの無いことが確認された事が報告された。
  - ・2015年度最優秀研究者受賞者発表(中村学会賞選考委員長)  
黒澤耕介会員と癸生川陽子会員が受賞されたことが報告された。
  - ・質疑応答及び討論  
特になし
  - ・採択  
第13期上期活動報告の採択が行われ、賛成：39、反対：0、保留：0により採択された。

### 3.2. 第13期下期(2016年度)活動方針

- ・基本方針(倉本会長)  
ノートルダム清心女子大学(岡山市)における秋季講演会の開催、学会誌の発行、フロンティアセミナーの開催、連合大会の共催などが説明された。
- ・各種専門委員会活動方針  
特になし
- ・質疑応答  
特になし
- ・採択  
第13期下期活動方針の採択が行われ、賛成：39、反対：0、保留：0により採択された。

## 4. 報告事項

### 4.1. 2016年秋季講演会について(はしもと2016年秋季講演会組織委員長)

会期(9/12-14)、会場やその周辺施設の情報、講演受付日程、会費などについて説明がなされた。

### 4.2. その他

千秋会員から、9月5～8日に北海道で開催される予定の惑星科学フロンティアセミナー2016の案内があった。

## 5. 議長団解任

## 6. 閉会宣言

## ◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2016年9月25日までに、賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです。社名等を掲載し、敬意と感謝の意を表します。(五十音順)

株式会社五藤光学研究所  
 有限会社テラパブ  
 株式会社ニュートンプレス  
 Exelis VIS株式会社

## ◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

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

**2016/09****9/26-9/28 日本流体力学会 年会2016**

- (a)名古屋工業大学 御器所キャンパス, 愛知県名古屋市昭和区
- (b)日本流体力学会
- (c)<http://www2.nagare.or.jp/nenkai2016/>

**9/28-9/30 第9回惑星探査データ解析実習会**

- (a)オフィスゴコマチ大会議室, 京都府京都市下京区
- (b)月惑星探査育英会 実行委員会
- (c)[https://www.cps-jp.org/~tansaku/wiki/top/?school\\_mission-9](https://www.cps-jp.org/~tansaku/wiki/top/?school_mission-9)

**2016/10****10/8-10/9 可視化情報全国講演会**

- (a)茨城大学 日立キャンパス, 茨城県日立市
- (b)可視化情報学会
- (c)[http://vsj2016.cis.ibaraki.ac.jp/vsj2016\\_hitachi.html](http://vsj2016.cis.ibaraki.ac.jp/vsj2016_hitachi.html)

**10/26-10/29 第57回高圧討論会**

- (a)筑波大学大学会館, 茨城県つくば市
- (b)日本高圧力学会
- (c)<http://www.highpressure.jp/new/57forum/>

## 編集後記

皆様、お久しぶりです。前編集幹事の諸田です。お元気でしょうか。

今回、私が編集後記を執筆しているのは遊星人をご愛読いただいている皆様にお詫びをしなければならぬからです。まずは遊星人23巻2号と3号が手元にある方をご覧ください。何か違和感を感じましたでしょうか。問題に気がついた方は原稿をチェックする才能、つまり、編集幹事の才能に恵まれた方です。

実は、23巻2号の終わりが176ページ、3号の始まりが275ページとなっていました。何とページが98ページも飛んでしまっていたのです。かつて98ページも飛んだ雑誌がありましたでしょうか。私が知る限り遊星人だけです。これは編集幹事のミスです。皆様に

は混乱を与えてしまい、申し訳ありません。心よりお詫び申し上げます。23巻2号の編集後記で「致命的なミスをせずにこなせている」と書いているのをみると恥ずかしい限りです。この時に戻って、編集後記を書いている自分を思いっきり殴ってやりたいです。「目を覚ませ!」と。

さて、この原稿を執筆している7月下旬の名古屋は茹だるような暑さで気を失いそうです。先日、久しぶりにプールにいつて泳いできました。100m泳いただけで息が切れ、もうダメかと思いました。なんとか秋季講演会までには身体を作っておくようにいたします。(諸田)

編集委員

和田 浩二 [編集長]

三浦 均 [編集幹事]

生駒 大洋, 上相 真之, 岡崎 隆司, 奥地 拓生, 木村 勇氣, 黒澤 耕介, 小久保 英一郎, 白石 浩章,  
杉山 耕一郎, 関口 朋彦, 瀧川 晶, 田中 秀和, 谷川 享行, 成田 憲保, はしもと じょーじ, 本田 親寿,  
諸田 智克, 山本 聡, 渡部 潤一

2016年9月25日発行

## 日本惑星科学会誌 遊・星・人 第25巻 第3号

定 価 一部 1,750円(送料含む)

編集人 和田 浩二(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

印刷所 〒501-0476 岐阜県本巣市海老A&A日本印刷株式会社

発行所 〒105-0012 東京都港区芝大門2-1-16 芝大門MFビルB1階

株式会社イーサイド登録センター内 日本惑星科学会

e-mail : staff@wakusei.jp

TEL : 03-6435-8789 / FAX : 03-6435-8790

(連絡はできる限り電子メールをお使いいただきますようご協力お願いいたします)

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています。

複写される方へ

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

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル 学術著作権協会

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

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

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