

---

---

# 日本惑星科学会誌 遊・星・人

## 第22巻 第2号

### 目次

---

---

巻頭言 吉田 和哉	67
<hr/>	
特集「はやぶさ帰還試料の分析で分かったこと」	
探査機「はやぶさ」が持ち帰った小惑星イトカワ粒子の初期記載について	68
矢田 達, 安部 正真, 岡田 達明, 中村 智樹, 野口 高明, 岡崎 隆司, その他10名	
イトカワの宇宙風化における太陽風照射の重要性について	78
野口 高明, 木村 眞, 岡崎 隆司, 日高 洋	
はやぶさ試料の希ガス同位体組成にもとづく太陽風照射の履歴解読	86
馬上 謙一, 松田 伸太郎, 岡崎 隆司, 野口 高明	
「はやぶさ」粒子の有機化合物分析と「はやぶさ2」	94
奈良岡 浩	
<hr/>	
新しい日本の宇宙政策と今後の科学・探査計画	102
秋山 演亮	
火の鳥「はやぶさ」未来編 その2 ～宇宙工学・宇宙探査としての意義～	109
國中 均	
日本惑星科学会特別賞の授与について	113
渡邊 誠一郎	
新刊書評 関口 朋彦	115
New Faces 寫生 有理, 川村 太一	116
2013年秋季講演会のお知らせ 渡部 潤一	120
Whiteboard	123
JSPS Information	124

---

# Contents

---

<b>Preface</b>	K. Yoshida	<b>67</b>
<hr/>		
<b>Special issue : What has been clarified by analytical results of Hayabusa-returned samples</b>		
<b>Initial description of asteroid Itokawa particles returned by Hayabusa spacecraft</b>		<b>68</b>
T. Yada, M. Abe, T. Okada, T. Nakamura, T. Noguchi, and 11 authors		
<b>Solar wind irradiation as the major agent of the space weathering on Itokawa</b>	T. Noguchi, M. Kimura, R. Okazaki, and H. Hidaka	<b>78</b>
<b>The solar-wind irradiation record of the Hayabusa samples inferred from noble gas isotope compositions: Towards understanding of the evolution of small bodies based on the returned sample analyses</b>		<b>86</b>
K. Bajo, S. Matsuda, R. Okazaki, and T. Noguchi		
<b>Organic compound analysis of the Hayabusa particles related to the Hayabusa 2 project</b>	H. Naraoka	<b>94</b>
<hr/>		
<b>New Japanese space policy and future science and exploration programs</b>	H. Akiyama	<b>102</b>
<b>Phoenix “Hayabusa” : A tale of the future (2)</b>		<b>109</b>
— Significance on space technology and space exploration —		
H. Kuninaka		
<b>Japanese Society of Planetary Science Special Prize</b>	S. Watanabe	<b>113</b>
<b>Book review</b>	T. Sekiguchi	<b>115</b>
<b>New Faces</b>	Y. Shimaki, T. Kawamura	<b>116</b>
<b>Announcement of JSPS 2013 fall meeting</b>	J. Watanabe	<b>120</b>
<b>Whiteboard</b>		<b>123</b>
<b>JSPS Information</b>		<b>124</b>

## 巻頭言

人生には、決定的な出会いが何度か訪れる。

1969年7月、当時8才だった私は、アポロ11号の月着陸をほぼリアルタイムで見ていた。「アメリカのアポロ計画」という言葉が意識の中に飛び込んでくるようになったのは、1968年12月、アポロ8号が有人の月往復飛行に成功したときからであったと記憶している。この前後には、1971年火星大接近や1972年ジャコビニ流星群(マスコミの事前報道は大きかったが、結局大出現にはならなかった)などの天文イベントもあり、当時小学生だった私は、星や宇宙に大いに興味を持つようになった。ただし、これだけでは人生が大きく変わることはない。当時の多くの老若男女と同じように、自分も宇宙に興味を持った、という程度であった。その後中学生になり、高校を受験して、普通の高校生活を送っていた。

そんな私をぐっと宇宙に近づけたのは、高校2年生のときの学校行事であった。秋の文化行事の一環という位置づけだったと思う。東京天文台(現国立天文台)の古在由秀先生が高校に来て、ビックバン宇宙の話をしてくださった。これは私に非常に大きな衝撃を与えた。早速、講演会を聞いた晩に、小学生のとき買ってもらった望遠鏡を引っ張り出してきて星を眺めた。そして、その後、宇宙論や相対論に関する入門書を読み漁った。

大学受験では、理学部に進んで物理や天文を学ぶ方向を目指したが、一浪の末に合格できたのは第二希望の工学部であった。大学院進学の際には、当時注目を集めていたロボット工学の研究室を選んだ。そこで、恩師の梅谷陽二教授に出会い、これが大きな転換点となる。梅谷教授は、私に「宇宙ロボット」というテーマを与えてくださった。工学部に入学したことで、もう宇宙への関わりは切れたと思っていたところへ、一転して、工学者として宇宙ミッションに貢献するという道が開かれたのだ。

以来、「宇宙ロボット」にこだわり続けている。2003年打上げの「はやぶさ」の開発メンバーに加えていただき、サンプル採集方式の検討や探査機がタッチダウンする際のダイナミクスのシミュレーションを担当した。2005年のイトカワへのタッチダウンに際しては、データ解析を担当し、サイエンス誌掲載論文の共著者にも加えていただいた。これこそまさしく、工学者として宇宙探査ミッションに貢献するという夢が実現した瞬間だと、私は思っている。そして、2010年6月に地球に帰還したカプセルの中に、数多くの破片が入っており、それによってさらに太陽系科学の研究が進むことが、なによりうれしい。

少し遡って1998年より、縁あって、国際宇宙大学(ISU)の非常勤講師を務めている。ここは宇宙を目指す志の高い老若男女が、世界中から集まる場所だ。ISU創設者の一人、Peter Diamandis氏との出会いも、私の人生にとっての大きなマイルストーンになっている。いま、彼が企てるGoogle Lunar XPRIZEに挑戦する日本チームの、ローバー開発メンバーの代表を務めさせていただいている。

小学生の頃、白黒テレビで見た月からの中継映像。それから44年の月日がたったいま、自分を作るロボットが月の上を走り回る瞬間を夢見て、日々の研究開発に取り組んでいる。その日は、そう遠からずやってくる、と確信している。

吉田 和哉(東北大学)

## 特集「はやぶさ帰還試料の分析で分かったこと」

# 探査機「はやぶさ」が持ち帰った小惑星イトカワ粒子の初期記載について

矢田 達<sup>1</sup>, 安部 正真<sup>1,2</sup>, 岡田 達明<sup>1,2</sup>, 中村 智樹<sup>3</sup>, 野口 高明<sup>4</sup>,  
 岡崎 隆司<sup>5</sup>, 石橋 之宏<sup>1</sup>, 白井 慶<sup>2</sup>, 上相 真之<sup>1</sup>, 唐牛 譲<sup>1</sup>,  
 八亀 彰吾<sup>6</sup>, 上野 宗孝<sup>1</sup>, 向井 利典<sup>1</sup>, 吉川 真<sup>1,2</sup>, 川口 淳一郎<sup>2</sup>,  
 藤村 彰夫<sup>1</sup>

2013年4月5日受領, 2013年4月30日受理.

(要旨) 地球外物質の採取・記載・保管および配布の目的で発足したJAXAキュレーションセンターでは、現在は小惑星イトカワにタッチダウンした探査機「はやぶさ」の試料を取り扱っている。「はやぶさ」から分離して地球帰還した再突入カプセルを受け入れ、その内部の試料コンテナを取り出してクリーンチェンバー内に導入し、開封を行った。試料コンテナ内の残留ガスから地球外起源の希ガスは検出できなかったが、キャッチャー内部からは主にケイ酸塩鉱物から成る微粒子を回収した。初期記載の結果、それらの鉱物比・鉱物組成がLL4-6コンドライト隕石に近いことが分かり、イトカワ試料と確認された。現在までに400個以上の粒子の回収・初期記載を行い、そのうち8割がイトカワ粒子だった。キュレーションセンターではこの試料を初期分析チーム、NASA、国際公募研究に対して配布し、多様な科学成果が挙がっている。

## 1. はじめに－小惑星探査機「はやぶさ」による小惑星探査と地球帰還

小惑星探査機「はやぶさ」は2003年5月に鹿児島宇宙空間観測所(現内之浦宇宙空間観測所)より打ち上げられ、2005年9月に目標天体である近地球型小惑星25143イトカワ(スペクトルタイプS(IV)<sup>\*</sup>)に到達し、およそ2ヶ月にわたる遠隔探査を行った[1]。一連の遠隔探査の後、同年11月に2回のタッチダウンによるイトカワ表層の試料回収を試みた[2]。2回のタッチダウンとも弾丸が射出されなかったが、微量であっても試料が回収されている可能性を秘めて、「はやぶさ」は2006年3月に地球への復路飛行に入った。

宇宙航空研究開発機構(Japan Aerospace Exploration

Agency; JAXA)では、「はやぶさ」が小惑星イトカワでの探査を行っていた2005年より本格的に帰還試料受入を行う設備の仕様検討・設計を始めた[3]。世界でもNASA以外では初めての本格的な帰還惑星物質試料キュレーション設備は2008年3月にJAXA相模原キャンパス内に完成した[3-5]。「はやぶさ」の試料地球帰還までの2年間をかけて、設備の機能・性能確認、総合試験、受入りハーサルを行ってきた。2010年6月、「はやぶさ」は試料を収めた可能性のある再突入カプセル(以下カプセルと省略)をオーストラリアのウーメラ砂漠に帰還させ、カプセルは速やかに回収された[4]。JAXA惑星物質試料受入れ設備(以下キュレーションセンターと呼称)では、帰還直後よりカプセルの受け入れ、試料コンテナの取り出し・洗浄・開封を行

1. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所  
 2. 宇宙航空研究開発機構月・惑星探査プログラムグループ  
 3. 東北大学大学院理学研究科  
 4. 茨城大学理学部  
 5. 九州大学大学院理学研究院  
 6. 東京大学大学院理学系研究科  
 yada@planeta.sci.isas.jaxa.jp

\*小惑星は、地上からの反射スペクトル観測に基づき、主にC型、S型、X型、D型などクラスに分類されている。それぞれ反射スペクトルのクラスは、地球上で見つかる隕石との対応が示唆されている。S型は岩石質の隕石、特に普通コンドライト隕石との類似性が示唆されている。S(IV)はS型のサブクラスの一つである。



図1：小惑星探査機「はやぶさ」が帰還させ、豪ウーメラ砂漠で発見された再突入カプセルの火工品の取り外し作業の様子。

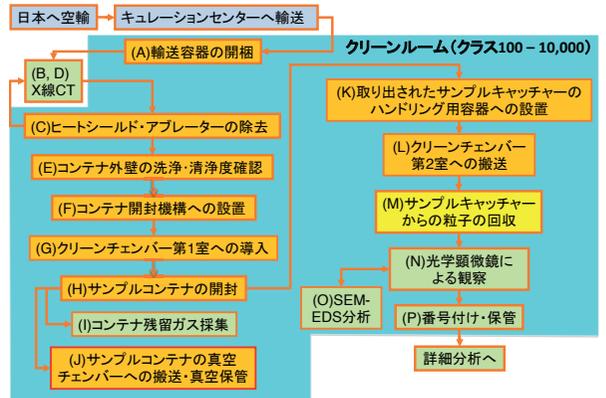


図2：帰還した試料コンテナの受入・開封・試料回収作業フロー図。グレーのハッチはクリーンルーム内での作業を示す。帰還前に同じ手順で繰り返しリハーサルを行った。

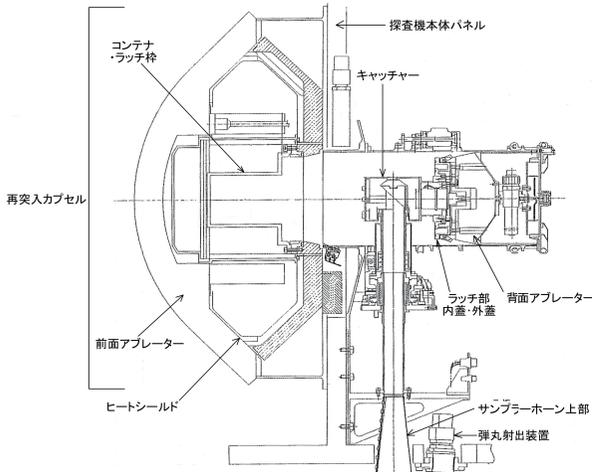


図3：探査機はやぶさ本体における再突入カプセルとサンプルキャッチャーの配置図([24]のFig.1を一部改訂)。キャッチャー等はサンプラーホーンの根元に設置されており、タッチダウン終了後、カプセルに設置されているコンテナに搬送・密閉される機構になっている。カプセルの直径はおよそ40cm。

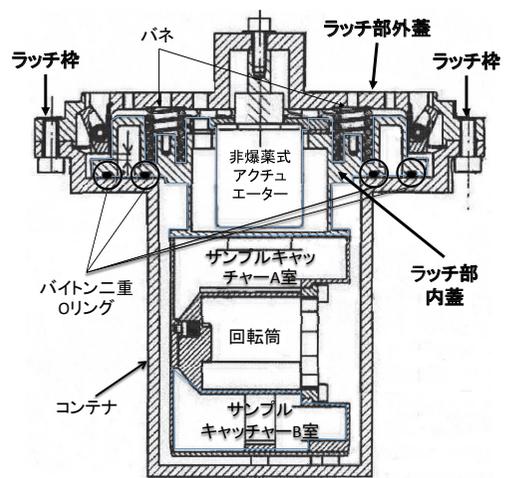


図4：「はやぶさ」試料コンテナの断面図。試料コンテナは図3に示す向きから左回りに90°起きた状態になっているので、注意されたい。主にラッチ部外蓋、ラッチ部内蓋、ラッチ枠、コンテナ、キャッチャーから成る。サイズは外径12cm、高さ13cm。

い、試料コンテナに収められた粒子の回収・初期記載を進めてきた。本稿では、キュレーションセンターで行われた上記一連の処理と成果を紹介したい。

## 2. 試料コンテナの取り出し・洗浄・開封

2012年6月13日深夜に帰還した探査機「はやぶさ」のカプセルは、翌14日ウーメラ砂漠上で回収された(図1)。回収されたカプセルは梱包された上で空輸さ

れ、回収の4日後の18日未明にキュレーションセンターに搬入された。以下、図2に示す手順でカプセル内部の試料コンテナは処理され、最終的に試料の取り出しに到った[4, 5]。

まず始めに、探査機「はやぶさ」における試料採集方法の概要を説明する。「はやぶさ」の目標天体が長径1 kmにも満たず、微少な重力しか持たないことが分かっていた[6]。よって、採集方式として、天体表面層の砂礫層の有無に関わらず試料の採集が見込まれる、

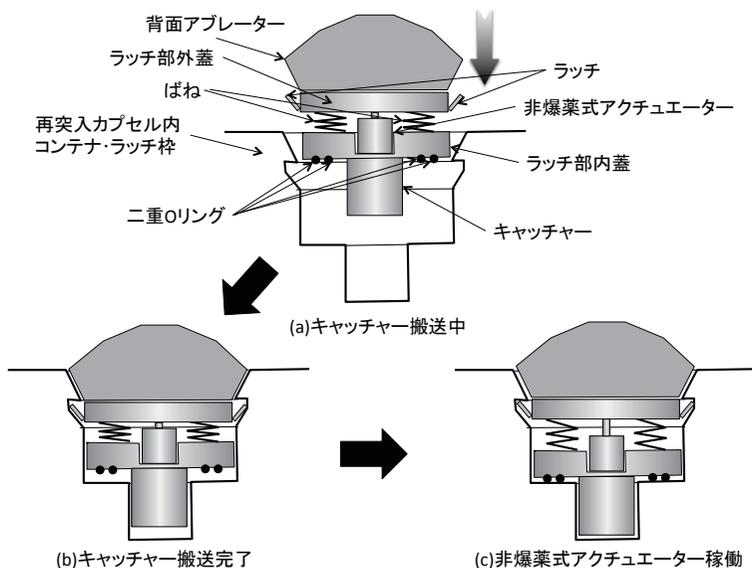


図5：「はやぶさ」キャッチャー搬送の概念図。試料コンテナは図3に示す向きから左回りに90°起きた状態になっているので、注意されたい。(a)キャッチャー搬送機構によりキャッチャーが再突入カプセル内のコンテナまで搬送され、(b)停止位置までの搬送が完了しラッチがかかった後、(c)非爆薬式アクチュエーターが動作することでバネ力が解放され、ラッチ部内蓋の二重Oリングがコンテナ上面に押しつけられることで、キャッチャーはコンテナ内に密封される。

打ち込み式サンプラーが採用された[7]。具体的には、サンプラーは伸展時に長さ1 mとなる円錐状のカバー(サンプラーホーン、以下ホーンと省略)を備えており、ホーンの根元近くには弾丸射出装置が、ホーンの根元にはサンプルキャッチャー(以下キャッチャーと省略)が備えられている(図3参照)。探査機が小惑星表面にホーン先端からタッチダウンしたタイミングで、弾丸射出装置から重さ5 gのタンタル製弾丸が天体表面へ300 m/sの高速で発射され、弾丸の衝突により舞い上げられた砂礫・破片がホーン内を跳ね返りながらホーン根元に設置してあるキャッチャーに回収される仕組みになっていた。ここで試料コンテナの概要を図解により説明しておく。図4は、キャッチャーがコンテナに搬送された後の「はやぶさ」試料コンテナの断面図である。試料コンテナは主要な構造体として、コンテナ、キャッチャー、ラッチ部内蓋(以下内蓋と省略)、ラッチ部外蓋(以下外蓋と省略)、ラッチ枠から構成されている。図3の通り、試料コンテナを大気圏突入時の加熱から守る為に、外蓋の上面には炭素繊維強化樹脂から構成された背面アブレーター(以下アブレーターと省略)が取り付けられている。また、内蓋には縮んでいるバネを解放する動作を行う非爆薬式アクチュエー

ター(以下アクチュエーターと省略)が取り付けられている。打ち上げ時のコンフィギュレーションでは、コンテナとラッチ枠のみがカプセル内に固定されており、一方キャッチャー、内蓋、外蓋、アブレーターの部分は探査機本体のホーンの根元部分に設置されている(図3参照)。試料回収作業後、キャッチャー、内蓋、外蓋、アブレーターは、カプセル内のコンテナに搬送され(図5(a))、外蓋に付いているラッチがラッチ枠に引っかかることでロックがかかる(図5(b))。その後、アクチュエーターの稼働により解放されたバネの力で内蓋下面の二重Oリングがコンテナ上面に押しつけられ、キャッチャーを含むコンテナ内部が外部環境から密閉される構造になっていた(図5(c))。

試料が回収されるキャッチャーはA室、B室と回転筒から構成されている。図6に示すとおり、1回目のタッチダウンの際はB室への開口部が開いており、1回目が終わった後に回転筒を1/3回転させることで、B室の開口部が閉じてA室への開口部が開く構造になっている。これにより1回目と2回目のタッチダウンにより回収される試料をそれぞれB室とA室に分けることができる。なお、2回目のタッチダウンが終わった直後、回転筒は更に1/3回転され、タッチダウン時

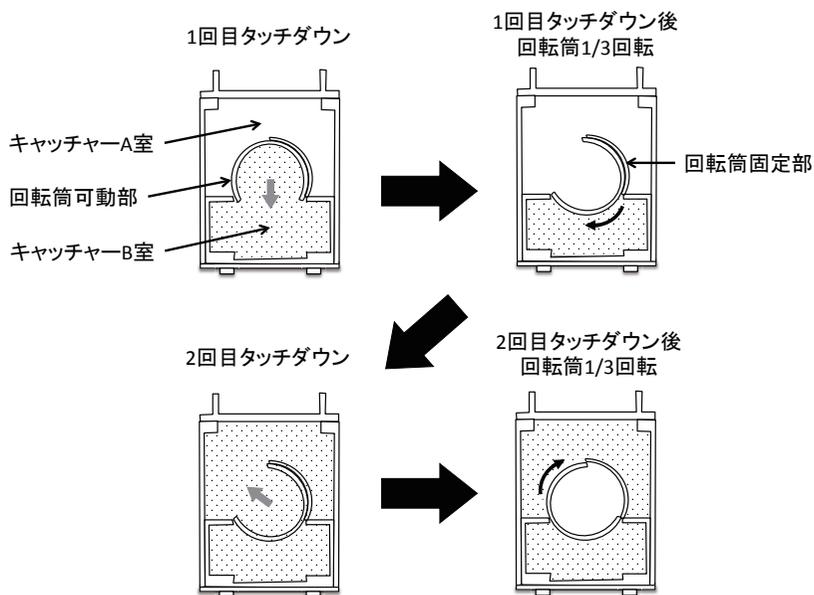


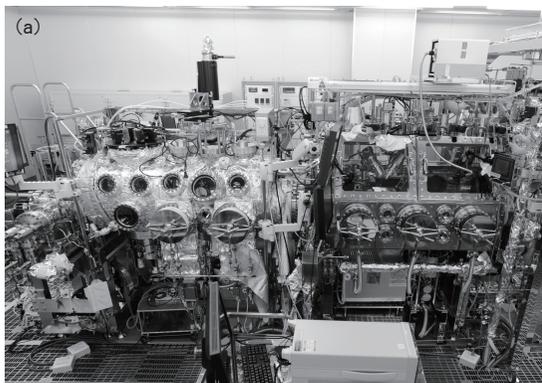
図6：「はやぶさ」サンプルキャッチャーの動作概念図。1回目と2回目のタッチダウン後、それぞれ回転筒可動部が1/3ずつ回転することで、1回目と2回目の採集試料をそれぞれキャッチャーB室とA室に分けて回収し、回転筒のキャッチャーへの開口部を閉じて試料を閉じ込める機構になっている。

に開いていたキャッチャー各室に対する開口部は閉じられる。

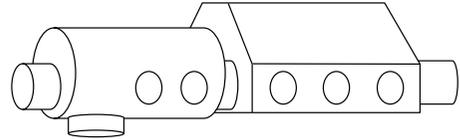
上記の構造・機構を持つ試料コンテナが収められたカプセルを収納した輸送箱は、クラス10,000のクリーンルームに持ち込まれて開梱され、ポリエチレン製の袋に窒素封入されたカプセルが取り出された(図2(A))。カプセルの内、試料を収めるコンテナからケーブル・温度シールなどの部品の除去を行った上で、JAXA調布キャンパス飛行場分室の大型X線CT装置にて1回目の解析を行った(図2(B))。これにより、試料を密閉しているコンテナに異常が無く、且つ探査機における回転筒の回転、キャッチャー部の搬送などが正常に行われていたことが確認された。その後、再びクラス10,000のクリーンルームに持ち込まれ、試料コンテナに取り付けられていたヒートシールド・アブレーターの取り外しが行われた。アブレーターを取り外すために、その上面8カ所をフライス盤で削り、取り付けネジの頭を露出させた(図2(C))。

ヒートシールド・アブレーターの取り外しが終わった後、もう一度JAXA調布キャンパス飛行場分室で小型X線CT装置による解析を行った(図2(D))。この作業で、試料コンテナ中に1 mm以上のサイズの試

料は存在しないことが分かった。再びクリーンルームに持ち帰ったコンテナから温度センサーを取り外し、コンテナ外壁の乾式・湿式ワイブ洗浄及び乾式機器洗浄を行った(図2(E))。洗浄後のコンテナ表面の洗浄度評価を光学顕微鏡、接触角計、フーリエ変換型赤外分光分析装置で行い、著しい汚染が見受けられないのを確認した。この後、コンテナ開封のために不要な部品(ラッチ枠、外蓋、バネ、アクチュエーター)を除去した。図5で説明した通り、試料を収めるキャッチャーは、ラッチとバネ力により二重Oリングでコンテナ内に密封されているので、常に二重Oリングの付いている内蓋を何らかの手段で押さえながら進めた。まず図4の外蓋の上側から治具を押しつけて力を加えた状態にして、コンテナと締結しているネジを外してラッチ枠を取り外した。次に外蓋とコンテナの隙間から内蓋を治具で押さえ、外蓋を取り外し、更に外蓋と内蓋の間に設置されているバネ、アクチュエーターを取り除いた。この状態から、内蓋を直接押さええて密封保持が可能なコンテナ開封機構へ設置し、内蓋に必要な荷重をかけた状態にした上で、内蓋を押さええている治具を取り外した(図2(F))。ここで、内蓋とコンテナの隙間に残っていた汚染粒子の除去・清掃を行った。こ



- (b)
- |   |  |
|---|--|
| <b>クリーンチェンバー第1室</b><br>(超高真空仕様)<br>・コンテナ開封機構<br>・残留ガス捕集機構<br>・ラッチ部内蓋の取り外し<br>・真空中でのコンテナ保管 | <b>クリーンチェンバー第2室</b><br>(雰囲気置換グローブボックス仕様)<br>・キャッチャー分解<br>・試料回収・保管<br>・粒子のハンドリング<br>・粒子の保管・移送容器への密封 |
|---|--|



- 共通仕様**
- ・高純度窒素雰囲気
  - ・大気圧ハンドリング用グローブ
  - ・チェンバー外からの光学観察
  - ・除電器具

図7：クリーンチェンバーの外観の(a)写真及び(b)概念図。(b)概念図は[3]の図2を一部改訂して引用。コンテナの開封などを行うチェンバー第1室(左側)と、試料の拾い出しなどを行うチェンバー第2室(右側)から成る。



図8：キャッチャーA室内部を搔いたテフロンヘラの光学顕微鏡写真のモザイク画像。多数の粒子が主にヘラの縁辺部・稜部に捕獲されているのが確認できる(矢印)。ヘラの縦の長さが5mm。

の隙間はコンテナの二重Oリングで密閉されている空間の外側にあたる為外部環境に通じており、カプセルが着陸したオーストラリアの砂漠の土壌やアブレーターを切削加工した際の削りかすなどが入り込む可能性がある。

清掃の後、試料コンテナを設置した開封機構を、コンテナの開封・コンテナ内残留ガスの捕集の目的で開発されたクリーンチェンバー第1室(図7)に導入した(図2(G))。コンテナ開封機構は、独立及び全軸同時

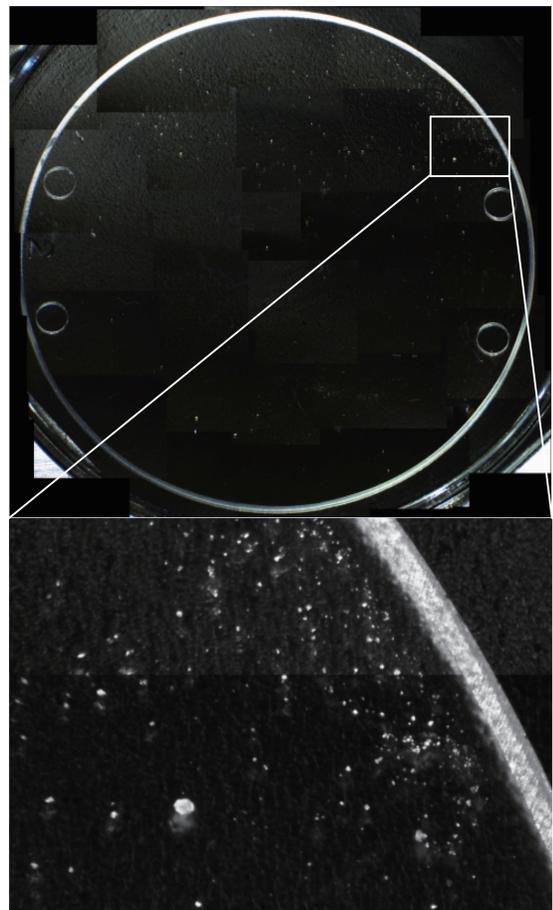


図9：上はキャッチャーA室に取り付けて粒子を落下回収した合成石英ガラス製円盤のマップ写真。粒径  $10 \mu\text{m}$  以上の粒子が1000個以上有るのが確認された。円盤の直径は48mm。下は上の枠内の拡大写真。様々なサイズ・形状の粒子が多数確認できる。写真の横幅が約7mm。

に上下動可能な4本の軸を介して内蓋の中央を押さえる仕組みになっており、4軸それぞれが接触型及びブレーザー変位計、荷重計でモニター可能である。これにより、変位・荷重をモニターしつつ、クリーンチェンバー第1室に導入されたコンテナの内蓋の上下動、つまり密封・開封を行うことが出来る。Oリングを介したコンテナ内部への拡散による地球大気の混入を最小限に抑えるために、カプセルの受入から第1室導入作業までは昼夜連続で行い、地表帰還後7日後の6月20日までに一連の処理を完了した。

コンテナ開封機構に設置された試料コンテナをクリーンチェンバー第1室に導入してから、一晩高純度窒素ガス循環環境で保持してチェンバー内の清浄度を高めた。翌日、チェンバーの圧力を徐々に下げつつ、コンテナ蓋を抑えているロッドに変位を加え、ロッドにかかる応力の変化を計測した。この結果からコンテナのOリングによるシールは機能しており、コンテナ内圧は大気圧より減圧環境にあることが分かった。チェンバーを超高真空( $10^{-7}$  Pa)で12時間排気を続けた後、真空排気ラインのバルブを閉じて真空密閉状態にし、コンテナの開封とコンテナ内残留ガスの捕集を行った(図2(H, I))。開封時のチェンバー第1室の圧力変化から、コンテナ内には5000 Pa相当の気体が入っていたことが分かった。開封時に捕集したガスの希ガス同位体分析を行った結果、捕獲されたコンテナ内残留ガスの大部分は地球大気由来であることがわかった[5, 8]。

### 3. サンプルキャッチャーからの試料の回収

試料コンテナ開封後、クリーンチェンバー第1室で開封された試料コンテナのうち、キャッチャーを収納していたコンテナは、まず第1室に付属している搬送室に真空環境で移動された(図2(J))。搬送室は単独での真空排気が可能で、コンテナは現在に至るまで $10^{-3} \sim 10^{-6}$  Paの高真空環境で保管されており、コンテナ内は帰還後一貫して真空でのみ取り扱われている。チェンバー第1室内でコンテナから取り出されたキャッチャーは容器状の治具に設置された(図2(K))。設置の過程でキャッチャーA室は開封され、キャッチャーA室蓋と一体化している内蓋は取り外され別途容器に収納された。キャッチャーA室蓋を含む内蓋

がこの段階で取り外された理由としては、探査機内でのキャッチャー部分のカプセルへの搬送の際の滑らかな摺動を実現するために内蓋の側面に少量使用されている二硫化モリブテンによる汚染を避ける為である。

チェンバー第1室でキャッチャーA室が開封された時点で、キャッチャーA室内が観察できる状態になる。キャッチャーA室内部を肉眼で観察した結果、視認できるサイズの粒子は存在しないことが確認された。キャッチャーは収容された容器状治具ごと、粒子ハンドリングに特化したクリーンチェンバー第2室に搬送された(図2(L), 図7を参照)。キャッチャーが搬送された第2室には粒径 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ の粒子試料のハンドリングの為に独自製作された、静電制御マイクロマニピュレーターが準備されている。

静電制御マイクロマニピュレーター(詳細は参考文献[9]に記載されている)、電圧をかけて帯電させた石英ガラスプローブで粒子をハンドリングする機構で、主に $10 \mu\text{m}$ 以下の微動が可能な手動式の4軸(X, Y, Z,  $\theta$ )試料ステージと、同様の精度の手動5軸(X, Y, Z,  $\theta$ , 傾き)プローブステージ(左右一対)と、直上及び斜めから試料ステージ上を観察可能な2種類の光学顕微鏡からなるシステムである。プローブステージには前述の石英ガラスプローブが取り付けられており、プローブには白金線が埋め込まれている。この白金線がチェンバー外の直流電源と接続されており、 $\pm 110\text{V}$ の電圧の印可が可能である。このプローブ内の白金線に印可する電圧と極性を調整し、静電気力で粒子をプローブ先端に付着させ、目的の場所に試料ステージを移動し、印可電圧などを変更(多くの場合0Vに)して粒子を設置する、という方法で粒子をハンドリングしている。

チェンバー第2室に搬送されたキャッチャーの内、蓋が開封されたA室からマニピュレーターにより、顕微鏡で見える細かい粒子の拾い出しを試みた(図2(M))。数十個の粒子の拾い出しに成功したが、キャッチャー内部の構造の複雑さや、キャッチャー内面のアルミ金属表面の加工痕の光学散乱による視認性の悪さなどの難点から、効率が悪かったので、別の粒子回収方法を試みる必要があった。

試料に与える影響が少ない手法として最初に試したが、テフロンヘラだった。電子顕微鏡に導入可能なサイズのテフロン製のヘラを開発し、キャッチャー

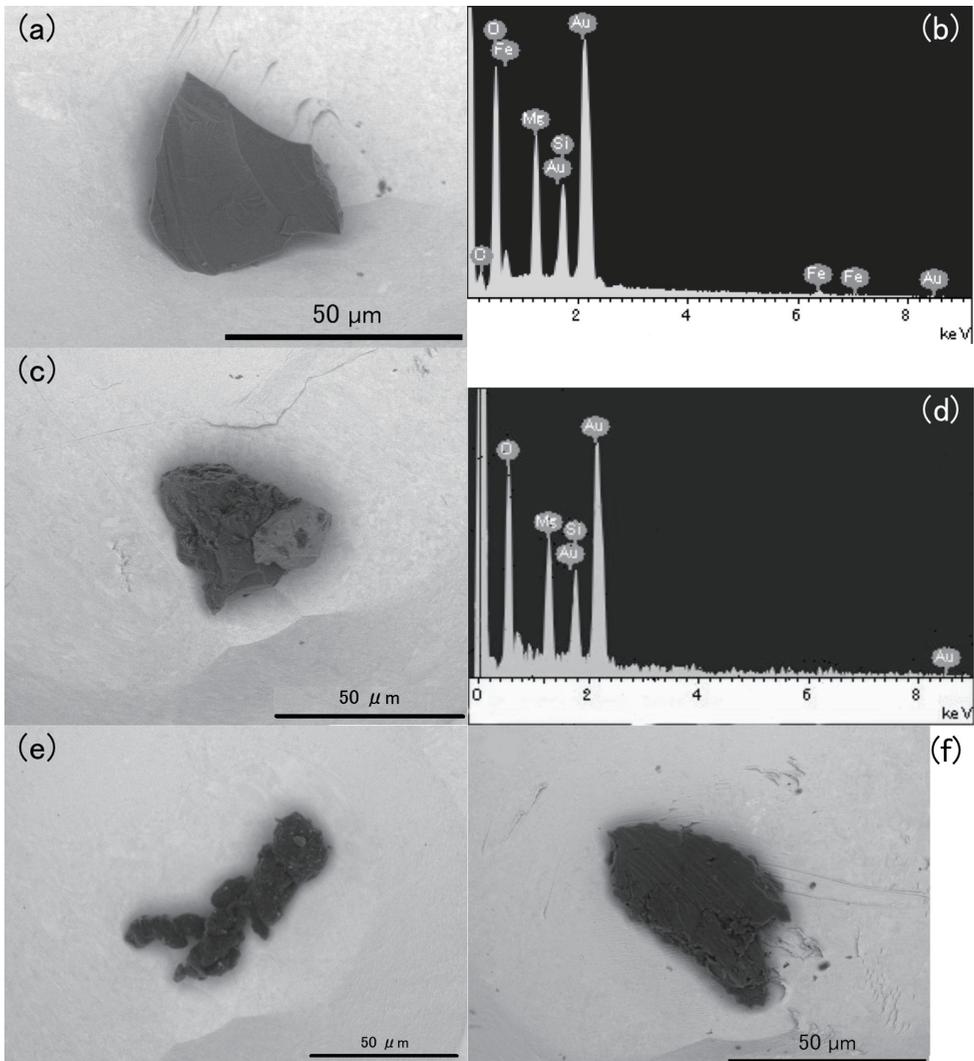


図10: 「はやぶさ」サンプルキャッチャーから回収された粒子の後方散乱電子像及びEDSスペクトル。(a) カテゴリー1粒子. 主にケイ酸塩鉱物から成る. この粒子は(b)に示すとおり, かんらん石の組成を示した. (c) カテゴリー2粒子. (a)と同じだが, 硫化鉄・鉄ニッケル金属などを含む. (d)に示すとおり, この粒子の主要鉱物もかんらん石だった. (e) カテゴリー3粒子. 主に炭素, 酸素, 窒素から成る. (f) カテゴリー4粒子. アルミニウムや石英ガラスの破片など人工物起源.

A室内部をそのヘラで掻いて, 光学顕微鏡及び電界放射形電子顕微鏡(FE-SEM)で観察した(図2(N, O), 図8). なお, 粒子を大気で汚染しないように, クリーンチェンバー第2室から電子顕微鏡内までの搬送が窒素封入状態でできるような密閉型SEMホルダーを用いた. また, 試料への無用な汚染を避けるためにテフロンヘラ及び捕獲粒子に対して導電膜蒸着を行わず, 帯電を防止するために, 低真空環境(60 Pa)で環境2次電子像及び反射電子像により観察を行った. その結

果, 主に10  $\mu\text{m}$ 以下の微粒子が多数捕獲されていることが確認された. これらの微粒子の定性元素組成分析を電子顕微鏡に付属するエネルギー分散型X線分光分析装置(EDS)で行った(図2(O)).

その結果, 付着している粒子3000個余りのおよそ半数がケイ酸塩鉱物(かんらん石, 輝石, 斜長石), 硫化鉄, 鉄ニッケル金属, クロム鉄鉱, リン酸塩鉱物などの化学組成を示しており(残りの半数はアルミ粒子などのキャッチャー材質由来の人工物), それらの主

要鉱物比率は、かんらん石54%：輝石17%：斜長石13%と、LL4-6コンドライト隕石とはほぼ一致した。また、それらの粒子中のかんらん石とCaに乏しい輝石の鉄マグネシウム比の平均値もそれぞれFa28, Fs23とLLコンドライト隕石の値の範囲内であった。一種類の地球の岩石で、このような造岩鉱物から構成されるものはなく、地上からの可視近赤外分光観測及び小惑星イトカワの遠隔探査の結果から小惑星イトカワがLLコンドライトに近い物質であることが示唆されていたことから[6, 10]、これらの粒子が小惑星イトカワ起源であることが分かった[11, 12]。

イトカワ粒子の存在が確認されたという意味で、テフロンヘラによる粒子回収は成功だった。しかし、この方法で回収された粒子は主に10 µm以下と小さく、かつテフロンヘラ表面に埋め込まれていたり、強力で静電気捕獲されているため、クリーンチェンバー内のマニピュレーターでは、ヘラから粒子を回収して詳細分析の為に配分することは難しかった。詳細分析に配布するための粒子を確保するために、サンプルキャッチャーの蓋と同じサイズの合成石英ガラス製の円盤を製作し、蓋を外した開口部に設置して、キャッチャーを上下反転させてから振動を与えて粒子をガラス円盤表面に落下させ、そのガラス円盤を回収して光学顕微鏡で観察してみた。その結果、最大で300 µm超という比較的大きな粒子が多数(粒径10 µm以上で1000個以上)確認された(図9)。この方式の回収は、現時点でキャッチャーA, B室両方で1回ずつ行われ、粒子の回収が進められている。

#### 4. 粒子の初期記載・分類・保管・配布

粒子は前述のガラス円盤及びキャッチャーB室蓋から1個ずつ静電制御マイクロマニピュレーターでピックアップされ、前述の密閉型SEMホルダーに設置して、クリーンチェンバーから電子顕微鏡に移動し、観察及びEDS分析を行った。EDSによる定性元素組成分析の結果から、粒子を4つのカテゴリーに分類した(図10)。カテゴリー1は、主にかんらん石・輝石・斜長石からなる粒子である(図10(a, b))。カテゴリー2は、主要構成鉱物はカテゴリー1と同じだが、硫化鉄や鉄ニッケル金属を含むものに該当する(図10(c, d))。初期分析の結果、このカテゴリー1, 2が小惑星

イトカワ起源であることが判明している[12-18]。カテゴリー3は主に炭素・酸素・窒素からなる粒子である(図10(e))。現在の所、その起源は調査中である。カテゴリー4はキャッチャー材質であるアルミ片、ガラス円盤などに用いられている石英ガラス片など明らかな人工物起源の粒子である(図10(f))。

粒子は電子顕微鏡分析後、クリーンチェンバーに戻して、上記の分類に基づいてグリッドをきった合成石英ガラス製スライドガラスの上に設置され、高純度窒素循環環境で保管されている(図2(P))。最新の集計(2013年3月15日時点)では400個を超える粒子が回収されており、その内8割の330個ほどがカテゴリー1, 2粒子、つまりイトカワ起源粒子だった。なお、上記の粒子の電子顕微鏡写真・EDSスペクトルは、後述の国際公募研究のために公表されている([http://hayabusao.isas.jaxa.jp/docs/sample\\_top.html](http://hayabusao.isas.jaxa.jp/docs/sample_top.html))。興味があれば是非ご参照頂きたい。

FE-SEM-EDSによる初期記載が完了し、保管されている粒子については、個別に試料番号が付けられる(図2(P))。ここで試料番号の付け方について言及しておく。キャッチャーA室から回収された粒子には「RA」、B室から回収された粒子には「RB」の番号がまず付けられる。その次には拾い出された場所、例えばキャッチャーA室の粒子を回収した石英ガラス製円盤(quartz disk)だと「QD02」(数字は石英ガラス製円盤の通し番号)、キャッチャーB室の蓋であれば「CV」(cover)等が来る。その後は各区割りにおける通し番号が4桁の数字で付けられる。例えば、キャッチャーB室のガラス円盤「QD04」から拾い出された107番目の粒子だと、「RB-QD04-0107」となる。更に分析やハンドリングの過程でこれらの粒子が分割した場合は、個別に前述の番号の末尾に二桁の数字による通し番号が付けられる。

初期記載の済んだ粒子の内、一部は3つのルートによりJAXA以外の研究機関に配布されている。一つ目は初期分析で、2000年及び2004年に行われたテスト試料分析結果の評価に基づき選抜された国内の研究チームに対して、イトカワ粒子の配布を行い、帰還後1年を目処に粒子の詳細分析が行われた[11]。なお、この初期分析チーム選抜の過程については[19]に詳しいので、ご参照頂きたい。初期分析の結果、イトカワの粒子が熱変成度の進んだLLコンドライトとよく似

た特徴を持つこと、その表面には小惑星イトカワ表層で受けた宇宙風化の痕跡があることなどが分かった[12-18]。なお、本特集号の[20]はその初期分析における有機分析についてまとめている。

二つ目が米国NASAに対する試料配付で、探査機「はやぶさ」の打ち上げ前の取り決めで、NASAとの協力関係の中で回収された試料の一定量について配布することになっている。これに基づき、既に2回の配布が実施済みである。

三つ目が国際公募研究で、これは一定数の粒子について、上記の初期記載情報を開示し、国内外の研究者に広く研究テーマの募集を行う。応募された研究テーマから専門委員会による審査の結果、採択されたテーマについて決められた数の粒子を配布するものである。この1回目の国際公募研究では17件の研究テーマについて既に試料配布が行われ、科学成果が上がりつつある。なお、採択された研究テーマの詳細については、以下のURL([http://www.jaxa.jp/press/2012/06/20120613\\_sac\\_hayabusa.pdf](http://www.jaxa.jp/press/2012/06/20120613_sac_hayabusa.pdf))をご覧ください。本特集号の[21]は初期分析も含めたそれらの希ガス分析についての成果、[22]は初期分析も含めたそれらの透過電子顕微鏡観察・分析による成果がまとめられている。国際公募研究の2回目の公募は今年の1月に開始し、同3月に締め切られて、現在審査中である。同6月までには審査結果が公表され、配布が始まる予定である。なお、NASAへの配布は提供であるが、初期分析と国際公募研究に対する配布は貸与であって、可能な限り分析後の試料はJAXAに返却することになっている。

因みに、現在、国際公募研究及びNASAへの粒子配布には、主に合成石英ガラスとステンレス製容器からなる密閉型移送容器が用いられている[23]。クリーンチェンバー第2室中で配布対象粒子を拾い出して、ステンレス製容器中の合成石英スライドグラス上のくぼみの中に収め、スライドグラスのカバーを取り付けて、容器を密閉することにより、高純度窒素雰囲気下にて試料を研究者やNASAの元に届けることが可能である。これらは参考文献[23]及び以下のURL(<http://hayabusaao.isas.jaxa.jp/docs/accepted.html>)の“Information of sample container”に詳しい。

## 5. 今後の展望

今後は、粒子のピックアップ・初期記載を進め、出来る限り早くキャッチャー内の粒子の全容を把握する予定である。こうして得られた試料の初期記載情報及び配付による詳細分析からイトカワ粒子全体の特徴をとらえ、他の惑星物質試料と比較して、小惑星イトカワ及びその前駆天体の形成・物質進化過程、ひいては初期太陽系の物質進化過程の解明を目指す。また、同時に粒子回収後の地球物質による汚染レベルの詳細評価や物理的な変化などから探査機「はやぶさ」での試料回収の問題点を明らかにし、今後のサンプルリターンミッションに対して課題と対応案を提起していきたい。

## 謝辞

世界初の小惑星往復飛行を成し遂げた「はやぶさ」(MUSES-C)プロジェクトチーム設計・製作・試験・運用・回収各担当及び各関連メーカーの皆様には厚く御礼申し上げます。キュレーションセンター仕様検討に多くの有益なコメントを頂きました。惑星物質試料受入設備仕様検討委員会の皆様には謝意を表します。また、多数の建設的なコメントを頂きました。橘省吾准教授に感謝致します。

## 参考文献

- [1] Fujiwara, A. et al., 2006, *Science* 312, 1330.
- [2] Yano, H. et al., 2006, *Science* 312, 1350.
- [3] 矢田達ほか, 2007, *日本惑星科学会誌* 16, 170.
- [4] 藤村彰夫, 安部正真, 2010, *日本惑星科学会誌* 19, 211.
- [5] Yada, T. et al., 2013, *Meteoritics Planet. Sci.*, in press.
- [6] Binzel, R. P. et al., 2001, *Meteoritics Planet. Sci.* 36, 1167.
- [7] Yano, H. et al., 2002, *Proc. Asteroids Comets Meteors ESA-SP-500*, 103.
- [8] Okazaki, R. et al., 2011, *Lunar Planet. Sci.* XLII, #1653.
- [9] 藤村彰夫, 2011, *静電気学会誌* 35, 255.

- [10] Abe, M. et al., 2006, *Science* 312, 1334.
- [11] 安部正真, 藤村彰夫, 2011, *日本惑星科学会誌* 20, 185.
- [12] Nakamura, T. et al., 2011, *Science* 333, 1113.
- [13] Yurimoto, Y. et al., 2011, *Science* 333, 1116.
- [14] Ebihara, M. et al., 2011, *Science* 333, 1119.
- [15] Noguchi, T. et al., 2011, *Science* 333, 1121.
- [16] Tsuchiyama, A. et al., 2011, *Science* 333, 1125.
- [17] Nagao, K. et al., 2011, *Science* 333, 1128.
- [18] Nakamura, E. et al., 2012, *Proc. Nat. Acad. Sci.* 109, E624.
- [19] 山本哲生, 2007, *日本惑星科学会誌* 16, 165.
- [20] 奈良岡浩, 2013, *日本惑星科学会誌* 22, 94.
- [21] 馬上謙一ほか, 2013, *日本惑星科学会誌* 22, 86.
- [22] 野口高明ほか, 2013, *日本惑星科学会誌* 22, 78.
- [23] Ishibashi, Y. et al., 2012, *Lunar Planet. Sci.* XLIII, #2887.
- [24] Fujiwara, A. et al., 2004, *Adv. Space Res.* 34, 2325.

特集「はやぶさ帰還試料の分析で分かったこと」

# イトカワの宇宙風化における太陽風照射の重要性について

野口 高明<sup>1</sup>, 木村 眞<sup>1</sup>, 岡崎 隆司<sup>2</sup>, 日高 洋<sup>3</sup>

2013年4月3日受領, 2013年4月22日受理.

(要旨) 宇宙風化とは惑星間空間にさらされた大気の無い天体表面で起こる光学特性を変化させる過程や産物を包括的に示す語である. 近地球型のS型小惑星であるイトカワは宇宙風化を受けている. 宇宙風化を起こす主要因として, 太陽風の照射や微小隕石の衝突が考えられてきた. イトカワ試料初期分析は, イトカワ粒子のごく表面を変化させている主要因は太陽風照射であることを支持している. また, 太陽風照射による宇宙風化過程は, 小惑星の観測および天体力学的な考察から考えられているよりもさらに速い可能性を示している. 本稿ではイトカワ粒子の極表面に観察された宇宙風化について紹介し, さらに, イトカワ粒子に観察された宇宙風化組織にもとづいて, S型小惑星の宇宙風化の時間変化について検討する.

## 1. はじめに

イトカワ試料の初期分析によって, イトカワの構成物の多くはLL5-6とほぼ同じ物質であることが明らかになった[1]. ところが, LLコンドライト隕石の反射スペクトルはイトカワの反射スペクトルとは合致しない. これは, 惑星間空間にさらされた大気の無い天体表面の光学特性を, 微小隕石の衝突や太陽風の照射などによって変化させる宇宙風化に起因すると考えられた[2]. 光学特性を変化させる物質は粒子のごく表面に存在するナノメートルサイズの金属鉄(ナノフェーズ鉄)であることが月レゴリス物質の研究[3]や微小隕石の衝突を模擬したレーザー照射実験[4]によって示された. S型小惑星であるイトカワの反射スペクトルが, LLコンドライト隕石にナノフェーズ鉄を分散させた場合のスペクトルと合うことから, イトカワを構成する物質も宇宙風化を受けていると考えられた[5].

しかし, ナノフェーズ鉄を形成する主要な機構がイトカワと月レゴリス物質で必ずしも同じである必要はない. なぜなら, 微小隕石の衝突の影響が顕著になる

ためには, 衝突地点の物質が容易に散逸しない必要がある. それには, 比較的大きな脱出速度を持つこと, 未固結の細粒レゴリス(ソイル)層を持つことが重要となる. しかし, イトカワの脱出速度は $\sim 15$  cm/sであり, 月の脱出速度の $\sim 6 \times 10^5$ しかない. また, イトカワには厚い細粒レゴリス層はない[6]. こうしたことから, イトカワの宇宙風化の研究では, 月の宇宙風化では脇役とされている太陽風照射の効果を考慮する必要がある. 月ソイルの構成粒子は長期にわたって月表面にとどまるため, ナノフェーズ鉄が存在する再凝縮リム以外に, 照射損傷による非晶質リム, これら2種類の複合リム, 発泡リムが観察されている[3]. イトカワのごく小さな小惑星表面に存在していた物質のごく表面はどのような変化をしていたか, 次章で述べていきたい. なお, 本稿ではイトカワ粒子の極表面に観察された組織・組成・微細構造変化は, 反射スペクトルの変化を起こすか否か(ナノフェーズ鉄が含まれるか否か)によらず, 宇宙風化リムと呼ぶことにする.

1. 茨城大学理学部

2. 九州大学大学院理学府

3. 広島大学大学院理学研究科

tngc@mx.ibaraki.ac.jp

## 2. イトカワ粒子に観察された宇宙風化リム

### 2.1 手法

筆者らが宇宙風化の研究に用いたイトカワ試料は12粒子である。これら12粒子のうち11粒子からは超薄切片法によって厚さ100 nmの透過電子顕微鏡観察用の超薄切片試料を作成した。2粒子からは集束イオンビーム(FIB: focused ion beam)加工装置を用いたリフトアウト法で厚さ100 nmのFIB切片試料を作成した。1粒子については、超薄切片法とFIBリフトアウト法の2通りで試料作製を行った。超薄切片法を主要な試料作製法に選んだのは、FIB加工において問題となる、切片の両面に形成されるGaイオンビームによる非晶質層が高分解能観察に影響すること、珪酸塩鉱物中のナノ鉄がFIB加工で酸化する可能性を危惧したためである。通常、超薄切片切削時には蒸留水上に超薄切片を浮かせて回収するが、本研究では水分との接触を避けるために脱水エチレングリコールを用いた。さらに、包埋、切片作成、走査透過電子顕微鏡(STEM)観察、試料保管に至る工程で、できる限り大気との接触時間を短くするように努めた[7]。高分解能の高角度散乱暗視野-走査透過電子顕微鏡(HAADF-STEM)像および明視野像(BF-STEM)像を得るために、冷陰極電界放出型電子銃と球面収差補正機能を搭載したHitachi HD-2700 STEMを使用した。実際、このSTEMを使用することで、HAADF-STEM像中にナノフェーズ鉄が微小な輝点として観察できた。なお、STEM試料観察とFIB加工は、日立ハイテクノロジー社の全面的な支援をいただいた。

### 2.2 イトカワ粒子の宇宙風化リム

イトカワ粒子本来の表面付近の断面組織を詳細に調べるには、粒子本来の表面が入射電子線とほぼ平行になるように試料を傾斜する必要がある。実際に観察された宇宙風化リムの厚さは数nmから80 nm程度しかないため、粒子表面と入射電子線がほぼ平行でない限り、リムの正確な内部構造を知ることができないためである。粒子本来の表面と入射電子線がほぼ平行になるようにして観察することを、ここではエッジオンで観察するということにする。我々は、イトカワ粒子の

主成分鉱物であるカンラン石、低Ca輝石、Naに富む斜長石についてエッジオンで観察することができた。初期分析当初に見出した宇宙風化リムは1種類だったが[7]、初期分析終了時までには3種類の異なる内部構造を持つ宇宙風化リムを見出すことができた[8]。それらは、Redeposition rim, Composite rim, Composite vesicular rimである[8]。これらの典型的なHAADF-STEM像と、対応するリムの内部構造の模式図を示したのが図1である。これら3種類のリムの内部構造は一見異なっているが、以下に述べる3種類のZoneの組み合わせとして理解することができる。Zone Iは、イトカワ粒子の最表面に存在する、それよりも下位の鉱物に含まれない元素を含むことを特徴とする領域である。Zone IIは部分的に結晶構造が非晶質化されている領域である。そして、Zone IIIは結晶構造が保持されている領域である。Zone IIの化学組成はその直下にあるZone IIIの化学組成とほぼ同じである。

Redeposition rimは、厚さわずか2-3 nmのZone Iだけからなり、その直下には結晶構造が変化していないZone IIIが存在している(図1(a), (b))。一例として、カンラン石( $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ )の表面に観察されたごく薄いZone Iの場合、Siに非常に富みMgに欠乏しているとともに、少量のNa, Al, S, Cl, K, Caを含んでいる。すなわち、Zone Iの形成には、周囲に存在する鉱物起源の元素の寄与(再凝縮)があったことは明らかである。再凝縮物であるZone Iのみからなるリムであるため、Redeposition rim(再凝縮リム)と名付けた。

Composite rimには、5-15 nmの再凝縮層であるZone Iと、結晶構造が部分的に非晶質化した領域であるZone IIの2種類の領域が存在する。このため、Composite rim(複合リム)と名付けた。Zone Iの厚さが10-15 nmある場合、Fe, S, Mgに富むナノ粒子(ナノフェーズ( $\text{Fe, Mg}$ )S)が密に並んだ層が含まれている場合が多い。部分的に非晶質化した領域であるZone IIの構造は、斜長石のように $\text{Fe}^{2+}$ をほとんど含まない鉱物と、カンラン石や低Ca輝石のように $\text{Fe}^{2+}$ を多く含む鉱物では大きく異なる。図1(c), (d)は、 $\text{Fe}^{2+}$ を多く含む鉱物の場合を示している。カンラン石や低Ca輝石の場合、部分的に非晶質化した部分は、ナノフェーズ鉄とそれと密接に伴って産する非晶質の $\text{Fe}^{2+}$ に乏しい部分からなる。Composite rimは総厚30-60 nmである。

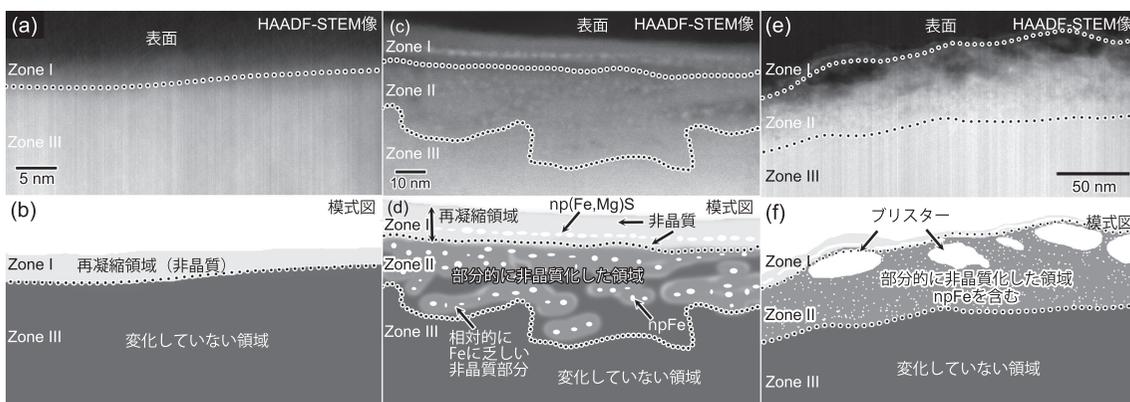


図1：イトカワ粒子表面に見られた3種類の宇宙風化リム(HAADF-STEM像とその模式図)。  
(a) (b)Redeposition rim. (c) (d)Composite rim. (e) (f)Composite vesicular rim.

Composite vesicular rimはComposite rimの一種である(図1(e), (f)). Composite rimのZone IIの最上部にバブルが存在し、バブルは粒子表面を押し上げ、長さ約50 nm、高さ約20 nmの多数の膨らみとなっている。この膨らみがあるため、Composite vesicular rimの厚みは60-80 nmである。膨らみの厚さを除くと、Composite rimと同程度の厚さである。発泡していることよりComposite vesicular rim(複合発泡リム)と名付けた。

Zone Iの非晶質珩酸塩中に存在するにもかかわらず、ナノフェーズ(Fe,Mg)Sの格子像を観察することは難しく、結晶度は低いことを意味している。まれに格子縞が観察される場合は、0.21-0.23 nmであった。この値は、ナインジャーライトMgSやカイライト(Fe,Mg)Sの(200)面の面間隔0.26 nmよりも明らかに狭く、トロイライトFeSの(114)やピロータイト $Fe_{1-x}S$ の最強線の結晶面(面指数は構造による)の0.21 nmと誤差(約5%)の範囲で一致する。すなわち、STEM元素マッピングでは、Fe, S, Mgは密接に存在しているように見えるが[7]、少なくとも格子像が観察される部分は、ナノフェーズFeSである可能性が高い。

鉄マグネシウム珩酸塩のZone IIに観察されるナノフェーズFeの格子像は、0.20-0.22 nmである。 $a$ -Feの(110)の面間隔0.203 nm前後の面間隔を持つものが多いが、上記のように誤差の範囲を超えて幅広い面間隔を示すものや格子像が見られないものも存在する。これらのことから、Zone IIのナノフェーズFeは

ナノフェーズ金属鉄である場合が多いが、結晶度の悪いものやナノフェーズ鉄酸化物( $Fe_{1-x}O$ )も存在する可能性がある。

月レゴリス(ソイル)試料でも最表層が非晶質化している粒子は以前よりよく知られている[3]。そのような試料では、非晶質層の下位には多数のソーラーフレアトラック(ソーラーフレア粒子のインプラントによって形成された線状欠陥)が観察される。図2にイトカワ試料RA-QD02-0033と月レゴリス試料15009,129に観察されたソーラーフレアトラックの暗視野像を示す。イトカワ粒子のソーラーフレアトラック密度が月よりもずっと低いことが分かる。ソーラーフレアトラック数密度はそれぞれ、 $\sim 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ と $\sim 3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ である。初期分析では2試料について暗視野像観察し、ソーラーフレアトラックを探した。数密度を計測できたのはRA-QD02-0033のみであり、他のイトカワ粒子のトラック密度はそれよりもかなり低いと考えられる。

### 2.3 イトカワ粒子の宇宙風化リムの形成機構

Zone Iの形成には周囲に存在していた鉱物由来の元素の寄与があったことから、Zone Iは再凝縮物であることは明らかである。月レゴリス(ソイル)試料の場合、ナノフェーズ鉄を含むおよそ100 nmの非晶質珩酸塩層全体(宇宙風化層)が微小隕石の衝突による蒸発物が再凝縮したものであるのに対して、イトカワ粒子では再凝縮物の厚さは2から15 nmしかない[8]。先に述べたように、イトカワの脱出速度は月の脱出速度の

$\sim 6 \times 10^{-5}$ しかないため、Zone Iの形成には太陽風によってスパッタリングされた物質の再凝縮の方が微小隕石の衝突による蒸発物の再凝縮よりも寄与しているように思われるが、両者の相対的な寄与率については今後の理論的な研究が必要である。

複合リムおよび複合発泡リムのZone Iにはナノフェーズ(Fe,Mg) Sが存在するケースが多い。一方、再凝縮リムを形成しているごく薄いZone Iの場合はナノフェーズ(Fe,Mg) Sが存在しない。Zone Iがある程度厚くないとナノフェーズ(Fe,Mg) Sが存在しないことを考慮すると、より長く惑星間空間に曝露されることがナノフェーズ(Fe,Mg) Sの形成に重要であることが示唆される。スパッタリングの際にナノフェーズ(Fe,Mg) Sが形成されて鉱物表面に凝縮したならば、ナノフェーズ(Fe,Mg) SはZone I中に分散して存在すると予想される。しかし、ナノフェーズ(Fe,Mg) Sはごく薄い層としてZone I中に産する。このような産状のナノフェーズ(Fe,Mg) Sの形成には、Zone Iに撃ち込まれた太陽風イオン(後述の侵入深さを考慮すると、おそらくH<sup>+</sup>)によるナノフェーズ(Fe,Mg) Sの照射誘起偏析(放射線照射によって誘起される固体中の元素の偏析のこと)、微小隕石衝突による加熱によるZone I中でのナノフェーズ(Fe,Mg) Sの析出の促進、あるいは、それら両方が関与した可能性があるだろう。ナノフェーズ(Fe,Mg) Sがイトカワ粒子に存在し、月ソイル粒子には存在しないのは、両者でトロイライトFeSの含有量が2 vol.% [9]と<0.2 vol.% [10]と大きく異なるため、再凝縮物に含まれるS含有量が異なるためであろう。実際に、普通コンドライトの物質へのレーザー照射実験では、ごく容易にナノフェーズFeSが形成される[11]。初期分析の元素分布マッピングにおける空間分解能ではFe, S, Mgが密接にかかわって存在するためナノフェーズ(Fe,Mg) Sと記載したが[8]、すでに述べたように、それらの格子像はFeSであることを示唆している。イトカワ試料で観察されたナノフェーズ(Fe,Mg) Sと、実験産物のナノフェーズFeSとは実際は同じ可能性がある。興味深いことに、実験産物中のナノフェーズFeSは反射スペクトルを赤化させる効果を持つ[11]。このことは、S型小惑星のスペクトル変化を考える際に、ナノフェーズFeと共にナノフェーズFeSも無視できない可能性を示している。

Zone IIは、結晶質のホスト中にパッチ状の非晶質

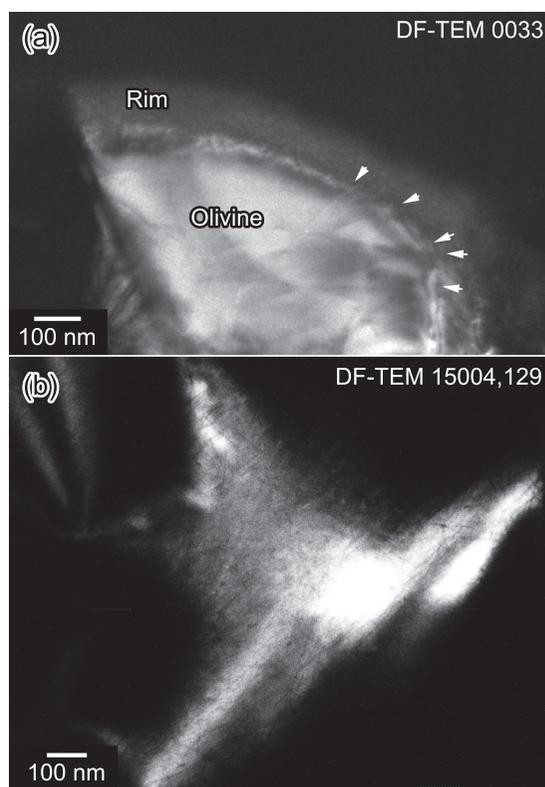


図2：イトカワ粒子RA-QD02-0033と月レゴリス試料15004,129の地下結晶に見られるソーラーフレアトラック(ともに暗視野像)。 (a)ではトラックを矢頭で示した。 (b)ではトラックが多数みられるため、トラックを矢頭で示していない。明るいバックグラウンド中に多数みられる黒い細線がトラックである。

領域が存在するという組織を持つ。このような組織は、放射線損傷を中程度受けた鉱物に特徴的である[17]。イトカワ試料に照射損傷を起こした主な放射線は、太陽から放出される低エネルギーの荷電粒子の流れである太陽風と考えられる。Fe<sup>2+</sup>イオンを多く含むかんらん石や低Ca輝石では、非晶質領域内のFe<sup>2+</sup>イオンがFe<sup>0</sup>へ還元されナノフェーズFeが形成されている。太陽風の主要な陽イオンは低エネルギー( $\sim 1$  keV/amu)のH<sup>+</sup>( $\sim 95.4\%$ )とHe<sup>+</sup>( $\sim 4.6\%$ )である。低エネルギーH<sup>+</sup>やHe<sup>+</sup>をFe<sup>2+</sup>を含むカンラン石へ照射すると、照射部に金属鉄が形成されること[12]を考慮すると、照射による部分的な非晶質化、および、非晶質部内での照射誘起偏析とFe<sup>2+</sup>のFe<sup>0</sup>への還元が太陽風照射によって引き起こされたと考えられる。一方、月ソイル試料の場合、ナノフェーズFe<sup>0</sup>は厚さ $\sim 100$  nmの再凝縮物中に存在しており[3]、イトカワ粒子の場

合とナノフェーズ $\text{Fe}^0$ の形成機構が異なるのは明らかである。

複合発泡リム表面に見られるたくさんの膨らみは、インプラントされた太陽風陽イオン( $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^+$ )の拡散による移動と偏析によって形成されたものと考えられる。単純に $\text{He}$ が偏析することでバブルが形成された場合、バブルは球状で圧力がかかった状態になる。しかしながら、複合発泡リムでは、膨らみはZone IIの上部に形成され、Zone Iを塑性変形させており、バブルに圧力はかかっていない。こうした表面に膨れを生じさせるバブルのことをプリスタリングという。プリスタリングは、 $\text{H}^+$ や $\text{He}^+$ イオンなどの照射によって金属やセラミックスの表面に形成されることが知られている[13]。金属では加熱されている状態で照射されないとプリスタリングを生じないが、珪酸塩鉱物への低エネルギー $\text{He}^+$ イオンの照射では100℃よりも十分低い温度でプリスタリングが生じる。後者の結果は、現在の軌道におけるイトカワ表面の最高温度が100℃より十分低い(310±10K [6])という事と矛盾しない。

月ソイル試料では明らかなプリスタリングを示すものは少ないが、見出されてはいる[14]。一方、イトカワ粒子の場合、12試料中3試料からプリスタリングが見出された。プリスタリングの大きさと数密度の関係は月試料の範囲に入ることから[15]、両者でプリスタリング形成機構は大きくは異ならないことが示唆される。一方、月レゴリスやレゴリスプレッチャーに見られる発泡リムでは、ときに数百nmに達するバブルが粒子表面を膨らませており、その形成には、隣接した場所への衝突に伴う加熱の影響があるとされる[16]。しかし、こうした大きなバブルと、イトカワ粒子や月ソイル試料一部に観察された50 nm程度のプリスタリングの形成機構は必ずしも同じとは限らないだろう。

今まで述べてきたように、イトカワ粒子の極表面に見られるリムの形成は、太陽風照射によって引き起こされた各種過程(スパッタリングと再凝縮、照射損傷、照射誘起偏析と $\text{Fe}^{2+}$ の還元、イオン注入とガスの偏析)が主要因と考えられる。もし、そうならば、リムの厚さは太陽風中の主要陽イオンの侵入深さによって規定されていると予想される。フォルステライトモル%が70のかんらん石(イトカワ粒子のかんらん石の範囲内[1])に、太陽風とほぼ同じ~1 keVの $\text{H}^+$ および~4 keVの $\text{He}^+$ を照射した際の侵入深さをSRIM

(stopping and range of ions in matter)コードで計算した。侵入深さは、飛程(projected range)と縦方向のゆらぎ(longitudinal straggle)の和とすると、それぞれ、~27 nmおよび~51 nmであった[8]。最も厚いリムの厚さ~60 nmと整合的なのは $\text{He}^+$ イオンの侵入深さであり、宇宙風化リムの厚さを規定しているのは $\text{He}^+$ イオンであると推定される。 $\text{H}^+$ イオンよりも $\text{He}^+$ イオンの方が $\text{Fe}^{2+}$ の還元能力が高いことを考慮すると[12]、かんらん石や低Ca輝石のZone II下部までナノフェーズ $\text{Fe}$ が存在するという事は、Zone II下部まで $\text{He}^+$ イオンが侵入していたことを支持する。

### 3. S型小惑星における宇宙風化過程速度について

#### 3.1 イトカワの宇宙風化リム形成速度

イトカワ粒子の3種類のリムと太陽風照射との関係は、定性的には以下のようにまとめられる。太陽風照射期間がごく短い場合は、Zone Iのみからなる再凝縮リムが形成された。より照射期間が長くなると、最表面に再凝縮層(Zone I)があり、その下位に照射損傷によって部分的に非晶質化した層(Zone II)が存在する複合リムが形成された。さらに、照射期間が長くなると $\text{He}$ や $\text{H}$ がZone II内で偏析しプリスタリングが起こって複合発泡リムが形成された。

これらリム形成の速さを定量的に考察するのは現況では難しい。しかし、RA-QD02-0033の複合発泡リムに観察されたソーラーフレアトラック数密度 $\sim 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ から、大まかな照射期間の推定が可能である。1 AU付近では、惑星間塵(IDP)や月試料の研究から、トラック数密度 $10^{10-11} \text{ cm}^{-2}$ を達成するまでの1 AUでの太陽風照射期間は $10^4$ 年と見積もられている[17]。イトカワの平均軌道半径が1.3 AUであることを考慮しても、RA-QD02-0033の太陽風照射期間は $10^3$ 年程度と考えられる。トラック数密度のより低かった他のリムの形成期間はさらに短いと考えられる。注意する必要があるのは、宇宙風化リムのZone IIにおける非晶質化の程度は月レゴリス試料の非晶質リムよりもずっと低いことである[3,8]。このため、月の非晶質リムを持つ試料の非晶質リム直下の下地結晶に観察されるソーラーフレアトラック密度がイトカワ試料よりも1から2桁高いのはむしろ当然であろう。

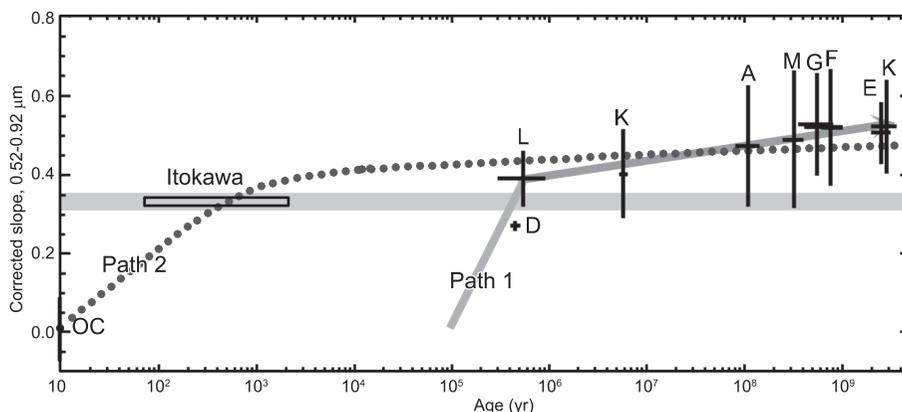


図3：イトカワ粒子から推測される宇宙風化の進行過程(Vernazza et al., 2009; Marchi et al., 2012のデータを使用)。横軸が照射期間(単位：年)，縦軸は、反射スペクトルの波長0.52と0.92  $\mu\text{m}$ における値を結んだ線分の傾き(カンラン石の組成の効果を補正したもの)。Path 1はVernazzaらによって推定された宇宙風化の変化経路。Path 2は本研究で推定された宇宙風化の変化経路。

### 3.2 S型小惑星の宇宙風化の二つのタイムスケールについて

S型小惑星の宇宙風化には、1 Myr(あるいは、より短い)と数百Myrの二つのタイムスケールが存在することが知られている[例えば18](図3)。速い赤化速度は、形成後1 Myr程度しか経過していないDaturaとLucascavinという二つの小惑星族が十分に赤化しているということと、普通コンドライト隕石への(重)イオン照射実験にもとづいており、太陽風照射による赤化と考えられている[18]。一方、後者は微小隕石衝突の効果と考えられている[18]。

しかし、速い効果が初めの数Myrだけ顕著でそれ以降は顕著な赤化を起こさず、別の過程が有効になるという考え方には必然性はないと言われている[19]。宇宙風化を起こす過程と宇宙風化の影響を取り去る過程が競合することで、全ての過程の総和として、宇宙風化が初期に速く進行しその後ゆっくりと進行するという考え方も可能だろう。ここでは、このような考え方にもとづいて、図3の赤化トレンドをごく定性的に考えてみる。Path 1は[18]で考えられた赤化トレンドである。この論文では、Path 1の左下に普通コンドライトの反射スペクトルがプロットされていた。これは、[18]で議論された小惑星族の年代が $10^5$ から $10^9$  yrであるため、 $10^5$  yr以下のスペクトル変化を無視したことによる。イトカワは $10^3$  yrの照射期間でスペクトルが赤化しており、イトカワをアンカーとして書き直し

たのがPath 2である。近地球型小惑星の補正済傾きの平均値は0.43であるため[19]、0.43に漸近的に近づくようにトレンドを引いた。

図3に示した修正した赤化トレンドにおいても、初期に速く変化し、その後、漸的に赤化が進むという傾向は同じである。宇宙風化を特徴付ける反射スペクトル形状の変化として、暗化(全体的なアルベドの低下)、赤化(長波長域で相対的に高いアルベドを持つ)、 $\sim 1 \mu\text{m}$ と $\sim 2 \mu\text{m}$ の6配位の $\text{Fe}^{2+}$ に起因する吸収バンドの減衰の3つがある[4]。図3はこのうち赤化と吸収バンドの減衰の効果を見ている。イトカワは十分に赤化が進んでいるが(図3)、アルベドはS型小惑星の中では0.29と大きい[30]。これはイトカワ粒子に存在するナノフェーズFeやナノフェーズ(Fe,Mg)Sのサイズが $< 2 \text{ nm}$ と小さいため、ナノフェーズFeがスペクトルの赤化を顕著におこすが暗化は顕著にはおこさないためであると考えられる[11]。一方、多くのS型小惑星のアルベドは0.10から0.22であり、図3において漸的に赤化が進んでいく領域では赤化よりも暗化が顕著に進行すると予想される。暗化をより顕著におこすには、より大きなナノフェーズが形成される、あるいは、月レゴリス試料に含まれるようなスペクトルの暗化を引き起こすガラスの形成、及び、これら両方が関わる必要があるだろう。

初期の速い赤化過程の進行が頭打ちになるように見えるのはなぜだろうか。原子炉材料科学の分野では、

材料極表面の剥離現象として、プリスタリングとフレーキングが知られている[13]。フレーキングとはイオン注入されたガスが偏析してごく表面が剥がれ落ちる現象のことである。曝露時間が $10^{4-5}$  yrのオーダーに達すると、プリスタリングがより進行しフレーキングが起きると仮定する(この仮定が正しいかどうかは照射実験によって証明できるはずである)。フレーキングによる極表面層の剥落によって、Zone Iのナノフェーズ(Fe,Mg)Sの多くと、Zone II最上部のナノフェーズFeが失われ、スペクトルの赤化(と吸収帯の減衰)が減少すると考えられる。そして、フレーキングによって曝露した面に新たなZone I(再凝縮層)の形成とZone IIの再形成が開始されると考えられる。この拮抗する両過程によって宇宙風化は定常状態になり、速い赤化の進行がほとんど進まなくなる可能性があるだろう。そうした定常状態に到達したところに、より遅い過程である微小隕石衝突が作用し始めると、すでに存在していたナノフェーズFeが加熱により合体し、より大きなナノフェーズFeが形成され、スペクトルの暗化を引き起こすようになる。並行して、太陽風照射により新たな細粒ナノフェーズFeの形成も起き、総合的には、暗化が進み、かつ、徐々に赤化も進むというシナリオが考えられる。今後、イトカワ及び月レゴリス試料を使って、このシナリオの当否を検討したいと考えている。

従来、赤化過程のゆっくりとした進行については、レゴリスガーデニング、地球や金星などへの大接近による小惑星表面の更新、インパクトエジェクタの部分的な被覆、他天体の衝突による小惑星の振とうなどの影響が主張されてきた[19]。こうしたマクロな過程もちろん宇宙風化の進行速度に根本的な役目を果たしているはずであるが、天体のサイズや軌道(メインベルト小惑星か近地球小惑星か)によらず、似たようなスペクトル変化経路をたどるということは、ごく表面において共通の過程の影響があることを示唆しているのではないかと考える。図3においてメインベルトのS型小惑星族のそれぞれにおいて、最も赤化の程度が低いものがイトカワ程度であるというのは偶然ではないように思えてくる。すなわち、上記のいずれかの過程によって小惑星表面が更新されても、すぐに非常に速いイトカワ型の宇宙風化(主に太陽風照射による宇宙風化)を受け、赤化したという解釈が可能であ

る(むしろ、Daturaの赤化の程度が低い理由を再度検討する意義があるのではないかと)。これからの宇宙風化についての議論では、宇宙風化のミクロな過程を十分に組み込んだ上でマクロな過程の影響を考えていく必要があるだろう。

## 4. 今後の計画

著者らが現在進めている基盤研究(A)では、一粒のイトカワ粒子から走査透過電子顕微鏡(STEM)観察試料の作製と希ガス同位体試料の作成を行い、本稿で示したような宇宙風化層の微細組織と、希ガス質量分析データを得ることを目指している。イトカワ粒子の希ガス同位体分析は、個々のイトカワ粒子が複雑な履歴を経ていることを示唆している[20]。現在までに、月レゴリス試料を使った試料作製と、同一試料に対する透過電子顕微鏡観察・希ガス質量分析は確立することができた。今後、希ガス同位体質量分析とSTEM観察と組み合わせることで宇宙風化組織のより精密な理解、各種宇宙風化リムの形成期間の推定、さらには月型宇宙風化も含め宇宙風化の物質科学的な理解を目指したいと考えている。

## 謝辞

本稿は、はやぶさ初期分析の一環として行われた研究成果を出発点として、JSPS科研費242440088の助成を受けて行っている研究を加えたものです。はやぶさプロジェクト関係者、JAXAキュレーションチーム、初期分析メンバー、雰囲気遮断システムの作成やSTEMおよびFE-TEM分析等をサポートして下さいました。日立ハイテクをはじめとする多くの関係者の方々に感謝します。また、低エネルギーイオンの照射損傷について検討する際には、日本原子力機構のセミナーにおける議論やJ. P.ブラッドリー博士との議論が役に立ちました。また、査読者の松本徹さんのコメントは文章の改善に役立ちました。これらの方々にも感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Nakamura, T. et al., 2011, Science 333, 1113.

- [2] Chapman, C. R., 2004, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 32, 539.
- [3] Keller, L. P. and McKay, D. S., 1997, *GCA* 61, 2331.
- [4] Sasaki, S. et al., 2001, *Nature* 410, 555.
- [5] Binzel, R. P. et al., 2002, *MAPS* 36, 1167.
- [6] Yano, H. et al., 2006, *Science* 312, 1350.
- [7] Noguchi, T. et al., 2011, *Science* 333, 1121.
- [8] Noguchi, T. et al., 2013, *MAPS* (in press).
- [9] Tsuchiyama, A. et al., 2011, *Science* 333, 1125.
- [10] Taylor, L. A. and Patchen, A., 1995, 26th LPSC, 227.
- [11] Keller, L. P. et al., 2013, 44th LPSC abstract #2404.
- [12] Loeffler, M. J. et al., 2009, *JGR: Planet* 114, E03003.
- [13] 井形直弘 編, 1986, 核融合炉材料(培風館: 東京).
- [14] Assonov, S. S. et al., 1998, 29th LPSC abstract #1635.
- [15] Matsumoto, T. et al., 2013, 44th LPSC abstract #1441.
- [16] Noble, S. K. et al., 2005, *MAPS* 40, 397.
- [17] Fraundorf, P. et al., 1980, *Proc. 11th LPSC*, 1235.
- [18] Vernazza, P. et al., 2009, *Nature* 458, 993.
- [19] Marchi, S. et al., 2012, *Month. Not. R. Astron. Soc.* 421, 2.
- [20] Nagao, K. et al., 2011, *Science* 333, 1128.

特集「はやぶさ帰還試料の分析で分かったこと」

# はやぶさ試料の希ガス同位体組成にもとづく 太陽風照射の履歴解読

馬上 謙一<sup>1</sup>, 松田 伸太郎<sup>2</sup>, 岡崎 隆司<sup>3</sup>, 野口 高明<sup>4</sup>

2013年4月8日受領, 2013年4月24日受理.

(要旨) 2010-2011年に実施された「はやぶさ試料初期分析」のひとつとして希ガス同位体分析が行われた。はやぶさ試料のHeやNeの同位体組成は太陽風の値と一致し、はやぶさ試料はイトカワの最表層に存在していた粒子であることが証明された。それら初期分析とそれに引き続くはやぶさ試料の分析により、小天体レゴリス粒子の宇宙風化による変質過程が明らかにされようとしている。本論文は希ガス同位体分析によって明らかにされた希ガス同位体組成と宇宙風化との関連性、および最先端の分析手法を用いたはやぶさ試料分析から期待される結果について述べる。

## 1. 序論

大気を持たない小天体の表面は、天体衝突・レゴリス形成・ガーデニングや太陽風・太陽宇宙線照射・銀河宇宙線の照射、微小隕石の衝突などの様々な過程を経ている。天体表面は地上及びリモートセンシングなどにより、その表面の様々な波長におけるスペクトル測定や可視像撮影などが行われている。特に可視から近赤外域の反射スペクトルからは表面を構成する主要な鉱物存在度が推定でき、隕石物質との直接比較が可能であるため重要である。また、小惑星表面構造の高解像度写真からクレーターや岩塊の形状、サイズ、空間分布などの情報が得られ、天体の経験した衝突・破壊活動に関する知見を与えてくれる。

イトカワ表面の地形・構造の観察ははやぶさ探査機によってなされ、表面のクレーター密度からイトカワ表面の年代が75 Myr-1 Gyrと見積もられている[1]が、これまで予想されていた直径数100 mの天体同士の衝突破壊寿命(数十 Myr; [2])より長い。また、リモートセンシングによる反射スペクトルからはS型小惑星で

あることが確認された[3]。X線蛍光分析ではイトカワの化学組成はLLコンドライト的であることも判明した[4]。

2010年のはやぶさ地球帰還後に、「はやぶさ初期分析(The initial analysis of the HAYABUSA samples)」において化学組成分析、結晶構造解析、同位体組成分析などが行われた。はやぶさ試料はLLコンドライト的な全岩化学組成を持ち、その不均一性や鉱物化学組成は岩石学的タイプ4-6に相当することが判明し、リモートセンシングの結果を支持するものであった[5]。また、酸素同位体分析もLLコンドライトの値と矛盾しない結果であった[6, 7]。

一方、はやぶさ試料の極表面の数nmから数十nmの領域は「宇宙風化層」と呼ばれる金属ナノ粒子を含む層が存在することが判明した[8, 9]。宇宙風化層は月表土の微粒子においても研究が広くなされており、その成因は宇宙線・太陽風照射による非晶質化・還元作用および衝突加熱によって生成された蒸発物の再凝縮によるものとされている[10]。一方、走査型透過電子顕微鏡(STEM)観察によると、はやぶさ試料表面の宇宙風化層は主に太陽風照射に起因すると考えられている[9]。

はやぶさの持ち帰った試料は天体表層微粒子をサンプリングしたものであり、宇宙風化層形成時には太陽

1. 北海道大学 創成研究機構  
2. 東京大学大学院 理学系研究科  
3. 九州大学大学院 理学研究院  
4. 茨城大学 理学部  
bajo@ep.sci.hokudai.ac.jp

風や太陽宇宙線、銀河宇宙線を照射されていたことになる。このような照射の履歴は太陽風起源の元素や宇宙線による核反応生成核種を分析することで解明され得る。本稿では[11]による希ガス同位体分析をもとに、イトカワ表層での太陽風および銀河宇宙線照射の履歴に関してこれまでに判明したことを述べる。

## 2. 太陽風・銀河宇宙線と物質の相互作用

太陽風はHとHeを主成分とした1核子当たり数keVの運動エネルギーを持つプラズマ流であり、その飛程はケイ酸塩鉱物では100 nm程度( $4 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ )である。その他に太陽フレアにともない放出される、より高エネルギー(1-100 MeV)の太陽宇宙線や主に陽子からなるさらに高エネルギー(数 MeV-数 GeV)の銀河宇宙線が宇宙空間を飛び交っている。太陽風及び太陽宇宙線のフラックスは太陽の距離の逆二乗に比例して減少していくが、太陽系外を起源とする銀河宇宙線は太陽系内を等方的に飛び交っている。そのためフラックスは地球近傍では太陽風が圧倒的に高いため(太陽風フラックス@1 AU :  $3 \times 10^8 \text{ protons/cm}^2/\text{sec}$ , 太陽宇宙線フラックス@1 AU :  $100 \text{ ions/cm}^2/\text{sec}$ , 銀河宇宙線フラックス :  $100 \text{ ions/cm}^2/\text{sec}$ [12]), 天体表層物質の極表面は主に太陽風の影響を反映していると考えられる。

銀河宇宙線は標的物質表面から数m( $10^3 \text{ g/cm}^2$ )の深さの標的物質構成原子核と相互作用し、多種の銀河宇宙線起源核種が生成・蓄積される。銀河宇宙線起源の希ガスは同位体比が1に近い特徴があり、太陽風や地球大気など他の希ガスと区別することが可能である。また、太陽宇宙線も物質の極表面(<数cm)に太陽宇宙線起源核種を生成し、その同位体比は銀河宇宙線起源のものとは異なっている[13]。

物質中の宇宙線照射起源希ガスの濃度とその生成率<sup>2</sup>から、宇宙線の照射を受けた時間(宇宙線照射年代)を算出することが可能である。これら、太陽風や宇宙線照射の影響は様々な元素組成や同位体組成に変化をもたらすが、水素・希ガス以外の元素は固体中の元々存在する元素量を大きく上回ることが少なく、組成の変

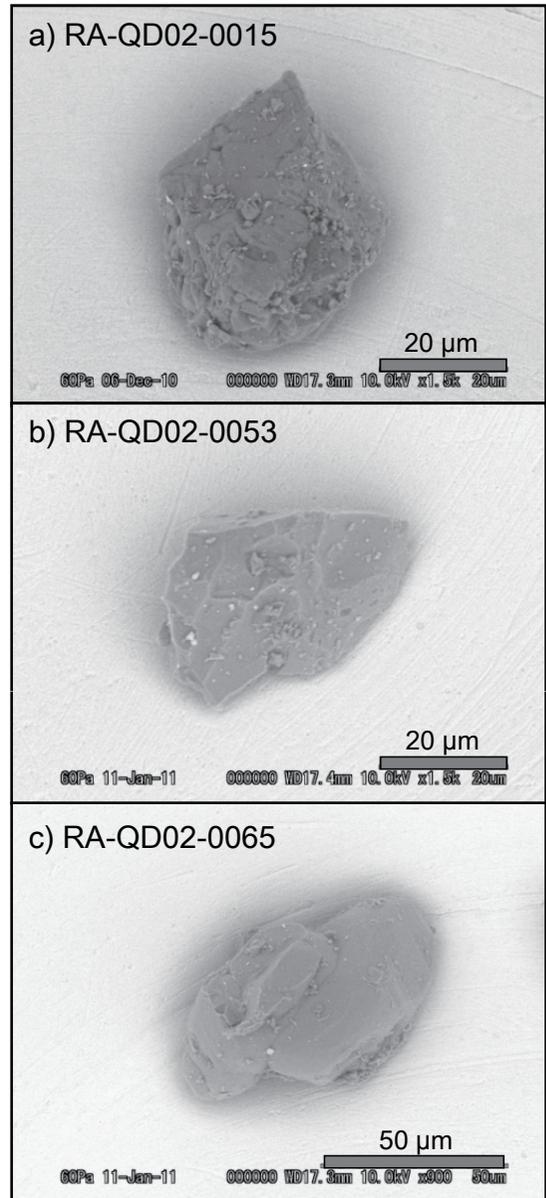


図1：希ガス同位体分析に用いられたはやぶさ試料の電子顕微鏡写真。

動を見いだすことは困難である。一方、希ガスは一般的に固体中含有量が極めて低く二次的な同位体の付加・変化がわずかであっても有意な差として検出可能である。こうした理由のため、希ガス同位体を用いた地球外物質の太陽風・宇宙線照射の影響に関する研究がこれまで広く行われてきた[e.g., 13, 14]。

はやぶさ試料では、隕石や宇宙塵のように母天体放

1. 柱密度は岩石の密度 $\sim 4 \text{ g/cm}^3$ に注入深さ100 nmをかけたもの。  
2. 宇宙線フラックス、標的物質化学組成、反応断面積、標的物質自身による宇宙線遮蔽効果の積で求めることができる。

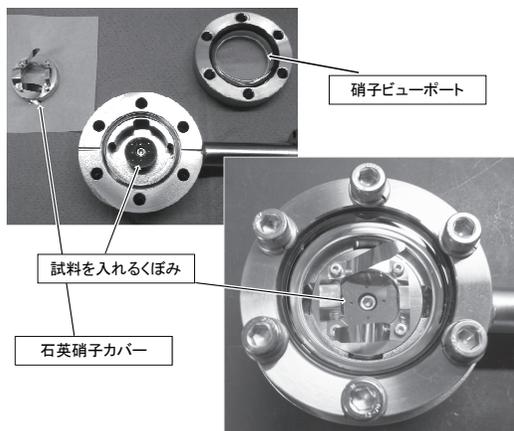


図2：希ガス同位体分析専用真空容器。試料をくぼみに入れた後、粒子が損失しないようにガラスカバーをかける。その後、ガラスビューポートを閉める。ここまでの作業は、JAXAのキュレーション施設にあるクリーンチェンバ内で高純度窒素雰囲気にて行われた。その後、東京大学に移送され、大気に晒すことなく真空排気され、希ガス分析が行われた。

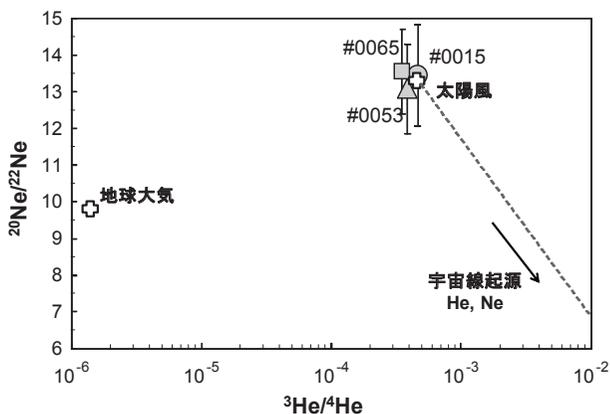


図3：はやぶさ試料から抽出されたHeとNeの同位体比。

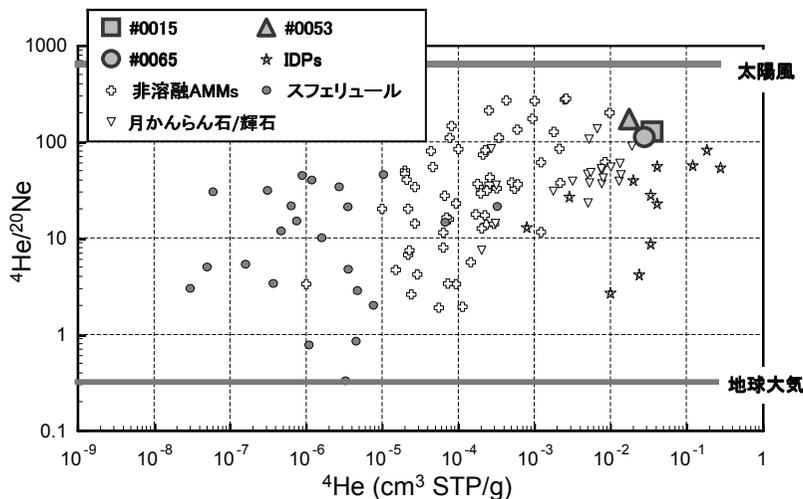


図4：はやぶさ試料と太陽風起源ガスを含む地球外物質の<sup>4</sup>He濃度と<sup>4</sup>He/<sup>20</sup>Ne元素比。

出後の様々な過程(地球に飛来するまでの宇宙線照射や加熱、大気圏突入時加熱、地上での酸化・風化・汚染)の影響を考慮する必要がないため、天体表面での物質進化過程に関する議論を行ううえで最良の試料である。しかし、実際の天体表面においては太陽風や宇宙線照射に加えて微小隕石の衝突や小惑星同士の衝突などによる表面物質の攪拌、細粒化、放出など、複雑

な過程が混在する。これらの影響は天体サイズや軌道などの要素とも関連しており、天体ごとに大きく異なると予想される。これまでに天体表面から採取された試料としては隕石・宇宙塵を除くと月のレゴリス試料に限られるが、月は小惑星に比べて天体サイズが大きく、月の表面物質進化過程を小天体のそれに適用できない。小天体上での物質進化過程と比較・議論が必要

である。以下に高感度希ガス質量分析計を用いたはやぶさ試料の希ガス同位体分析で解明されたこと、それに加えてLIMAS “Laser Ionization Mass nanoScope” と呼ばれる次世代型二次イオン質量分析装置による分析で将来さらに解明されうることを述べる。

### 3. はやぶさ試料の希ガス同位体分析

#### 3.1 微小試料の希ガス同位体分析方法

Nagao et al. [11]では3つのはやぶさ試料(RA-QD02-0015, -0053, -0065; 図1)の希ガス同位体分析が行われた。はやぶさ試料はJAXA/ISASのキュレーション施設にある専用のクリーンチェンバ内で希ガス分析用真空容器(図2)に密封された。JAXAのクリーンチェンバ内は希ガス、水、酸素濃度が極めて低い高純度窒素で満たされており[15]、地球大気による試料表面の汚染、風化が最小限に抑えられている。

希ガス分析用真空容器に密封された試料は、東京大学へと移送され、希ガス分析装置の真空ラインに取り付けられ、超高真空にまで真空排気された。試料はその後、事前に温度キャリブレーションを行った連続波型のNd-YAGレーザーを用いて1粒ずつ、段階加熱法により200, 300, >1800℃の3つのガスフラクションをそれぞれ同位体分析した。この際、各温度で個別に抽出された希ガスを精製し、He, Ne, Ar, Kr, Xeと元素分離を行った後それぞれの元素を希ガス用質量分析装置(modified-VG5400)によって超高真空下での静作動同位体分析<sup>3</sup>を行っている。このように希ガス分析用真空容器とレーザーを用いた局所加熱によって、はやぶさ試料を大気に晒さずに質量分析装置に導入することができたため、低バックグラウンドでの分析が可能となった。

#### 3.2 太陽風起源希ガスと宇宙風化層

測定した試料は直径40-60 μmの主にかんらん石からなる粒子であった。試料重量は、はやぶさ試料の形状平均値[16]と密度(3.4 g/cm<sup>3</sup>)の平均値から推定した(0.06-0.12 μg)。分析の結果、3つの粒子全てから太陽風の同位体組成を持つ希ガスが検出され(図3)、そのガス量(2.4 × 10<sup>-2</sup> <sup>4</sup>He cm<sup>3</sup> STP/g, 1.3 × 10<sup>-4</sup> <sup>20</sup>Ne cm<sup>3</sup> STP/g)は月レゴリス試料や惑星間塵(Interplanetary

dust particles; IDPs)に匹敵するものであった(図4)。また、図4には南極の雪を溶かして収集した非溶融の微隕石(Antarctic micrometeorites; AMMs)と、スフェリキュール中の太陽風起源Heを比較のために示した。これらの微粒子は大気圏突入時に加熱を受け脱ガスし易いHe, Neが一部脱ガスしているが、イトカワ表面層から直接持ち帰ったはやぶさ試料はこのような脱ガスを考慮する必要はない。イトカワ表面での太陽風フラックスを8.9 × 10<sup>10</sup> <sup>20</sup>Ne atoms/cm<sup>2</sup>/yr [17]と仮定すると、3つの粒子#0015, 0053, #0065の太陽風照射年代は410, 150, 550 yrとなる。

一方、希ガス元素比も地球大気とは明らかに異なり、太陽風起源を支持するが元素間の分別が見られた。はやぶさ試料の<sup>4</sup>He/<sup>20</sup>Ne比は110-170(図4)と太陽風の値(~600 [17])よりも低いが、<sup>20</sup>Ne/<sup>36</sup>Ar比(43-46)は太陽風と同程度である[17]。このことから、Heが粒子から選択的に損失されていることがわかる。このようなHeの選択的損失として(1)加熱に伴うHe/Ne間の拡散速度差による元素分別、(2)He濃集層の剥離、および(3)Heの飽和現象、の3つがその要因として挙げられる。以下にそれぞれの現象を詳しく述べる。

(1) 硝子内でのHeの拡散速度は0-100℃の温度域においてNeの3桁以上も大きく[e.g., 18]、数十℃の加熱でも元素分別が起こりうる。

(2) Genesisリターンサンプルの分析では、物質の表面から40 nm程度の領域にHeが、40 nmより深い領域にNeが濃集していたことが報告されている[17]。太陽風の照射を受けた物質は、表面層の<sup>4</sup>He/<sup>20</sup>Ne比は高くなり、約30 nmより深い層では<sup>4</sup>He/<sup>20</sup>Ne比は低くなる。はやぶさ試料が太陽風の照射を受けた後、天体表層で攪拌作用や太陽風照射による損傷(フレーキング)などによってHe濃集層が剥ぎ取られたとすれば、太陽風の値より低い<sup>4</sup>He/<sup>20</sup>Ne比を説明できる。

(3) 粒子が長期間(>10<sup>3</sup> yr)の太陽風の照射を受けている場合にはHeの飽和によるHe/Ne比の低下が起こりうる。Heが表面層に大量に存在するようになると、太陽輻射により最表層(<100 nm; アモルファス層)の

3. 真空ポンプから切り離れた精製ラインで希ガスを抽出・精製し希ガス元素ごとに分離した希ガスを質量分析計に導入し、同様に真空ポンプから切り離れた質量分析計で同位体分析を行う方法であり、非常に感度良く希ガス同位体分析ができる手法である。
4. 試料内部で発生した気泡による火ぶくれ状の材料剥離で、この剥離した部位をプリスターと呼ぶ。

温度が上昇し、Heの拡散による脱ガスが起こる。これがHeの打ち込み量と釣り合い、飽和状態に達すると考えられている。

レーザー段階加熱による希ガスのリリースパターンは試料ごとに異なる(図5)。#0065は200℃でほとんどのHeを放出するが、#0015は300℃を超える高温でHeを放出している。低温で放出される太陽風希ガスは拡散速度が速い物質(例えば非晶質なケイ酸塩層; [18])、または拡散距離が短い(粒子表面付近)層に存在していると考えられる。一方、高温で放出される希ガスは拡散速度がより遅い物質(例えば結晶質ケイ酸塩層)かまたは拡散距離が長い(粒子表面から深い)層に存在していたと考えることができる。従って、段階加熱のリリースパターンは標的物質の素性と打ち込み粒子のエネルギーと質量に依存している。つまり、太陽風打ち込みによるはやぶさ試料表面での物質構造の変化は希ガスの放出過程に深く関わっており、上記のHeの選択的損失とも関連しているはずである。

はやぶさ試料表面にみられる宇宙風化の痕跡は[8, 9]で報告されている。STEMでの観察によると、はやぶさ試料表面には非常に薄いリムが存在し、層構造やナノサイズのFe-metal, (Fe,Mg)S, プリスタリング<sup>4</sup>の有無によって3種類(Redeposition rim, Composite rim, Composite vesicular rim)に分類される[9]。Redeposition rim [9]は非常に薄い(2-3 nm)非晶質層が基盤物質の直上にある事から、3つのリムの中でも宇宙風化の度合いは軽いと考えられる。一方、Composite rim [9]やComposite vesicular rim [9]はそれぞれ30-60 nmと60-80 nm程度の厚みがあり、表面にはRedeposition rimと同様に薄い非晶質層があり、その下に基盤物質の一部が非晶質化した層が確認できる。この2つのリムにはRedeposition rimには存在しないナノサイズのFe-metal, (Fe,Mg)Sが存在する。これらのナノフェイズはある程度厚い非晶質層にしか存在しないため、より長い期間の宇宙風化作用を反映したものと考えられる[9]。また、Composite vesicular rimの局所的に非晶質化した層にはプリスターが存在している。非晶質層中のプリスタリングは月試料でも観察されており、打ち込まれた太陽風Heの飛程に相当する領域にプリスターが形成されている[19]。はやぶさ試料のプリスターも月試料同様に太陽風Heの打ち込みにより形成されたと考えられる。上記の3つの

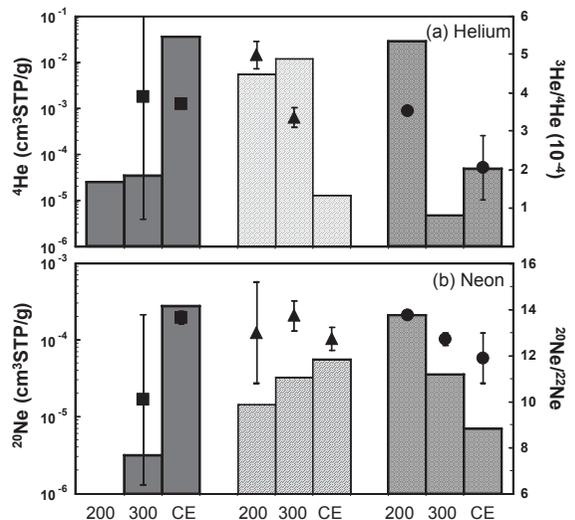


図5: レーザー段階加熱法(200°C, 300°C, Complete Extraction)によって抽出された3つのはやぶさ試料のHeとNeのリリースパターンと各温度フラクションでの同位体比。棒グラフは希ガス濃度であり、各点(プロット)は同位体比を示す。

リムの特徴は太陽風照射の程度を反映しており、Composite rimとComposite vesicular rimはより長い期間の太陽風照射の結果形成された宇宙風化層であると考えられる。

上記の観察結果とはやぶさ試料中希ガスのリリースパターン(図5)を合わせて考えると、200-300℃で放出された希ガスは表層の非晶質層に捕獲されており、より高温で放出された希ガスはより深い一部が非晶質化した層やプリスターに保持されていたと考えると整合的である。低温で希ガスの放出が極めて少なかった粒子(#0015)については、剥がれやすい表層の薄い非晶質層が欠落していることが示唆される。#0053からは200-300℃で大部分のHeが放出され、Neは全ての温度フラクションで徐々に放出されている。これはcomposite vesicular rimのような不連続な希ガスの濃集が無いことを示唆しているのかもしれない。これに対し、#0065はHeが200℃で>1800℃で不連続に放出されており、高温フラクションのHeはプリスターから放出されたのかもかもしれない。

これら宇宙風化を経験した粒子表面の層構造とそこに捕獲されている希ガス元素・同位体組成および濃度分布との関係を明らかにすることが宇宙風化層の形成・進化の理解に必要なことは上記の議論からも明ら

かである。太陽風照射による構造・組成変化は表面から数十nmという局所で起こっているため、従来の希ガス同位体分析では検出感度及び空間分解能が足りない。そこで100 nm以下の局所希ガス同位体分析ができる二次イオン質量分析装置”LIMAS” [20]を用いればはやぶさ粒子表面で起きていた現象がどのようなものであったかを解明できる可能性がある。

### 3.3 銀河宇宙線照射の痕跡

先に述べたように太陽風起源の $^{20}\text{Ne}$ 量から見積もった太陽風照射年代は150-550 yrであった。太陽風は珪酸塩鉱物ではすぐに遮蔽されるため、この年代はイトカワ表面の微粒子が直接太陽風を浴びた期間を示す。しかし、レゴリス層の厚さやガーデニングの規模など、天体表面でのマクロな現象を評価するには適さない。そこで、銀河宇宙線(飛程~数 m)や太陽宇宙線(飛程<数 cm)によって生成される希ガス同位体をもとに、その照射期間(宇宙線照射年代)を見積もってみる。

Neの同位体比は図3に示したように太陽風の値にほぼ一致し、測定誤差を超えた太陽宇宙線や銀河宇宙線の寄与は見られなかった。そこで、測定された $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比の平均値から $2\sigma$ 高い値を同位体比の上限値と仮定して、それぞれの粒子について宇宙線照射起源 $^{21}\text{Ne}$ 濃度の上限値を計算した。得られた値は、#0015, #0053, #0065でそれぞれ109, 49,  $13 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$ であった。

太陽宇宙線による $^{21}\text{Ne}$ 生成率は物質の極表面で最大で、その貫入深さに従って急速に減少する。一方、銀河宇宙線による生成率は表面から緩やかに上昇し $50 \text{ g/cm}^2$ 程度の深さで極大となる[13]。これら2つの効果を合算した生成率は最表面での最大値( $5.20 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ STP/g/Myr}$ )から急激に減少して $5 \text{ g/cm}^2$ あたりでの極小( $1.65 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ STP/g/Myr}$ )を過ぎると緩やかに増加する。3つのはやぶさ試料から宇宙線照射年代の最小値を求めると、#0065の2.5-7.9 Myrが得られる。このことは、分析されたはやぶさ試料の母天体表面( $<400 \text{ g/cm}^2$ )での滞在期間が1千万年よりも短いことを示しており、月のレゴリス試料の多くから報告されている数億年を超える年代[14]と比べると非常に短い。これはなぜだろうか？一つの可能性は、イトカワの脱出速度が $0.2 \text{ m/s}$ と小さいため、表面のレゴリス粒子は宇宙空間に絶え間なく放出されている可

能性がある。[21]によると、直径10 km以下の天体では、微小隕石衝突などによるレゴリス層の形成とレゴリス粒子の脱出のタイムスケールが同程度であるため、厚いレゴリス層が形成されないことが予想されている。これはリモートセンシングによる観測と総合的に思われる。このような天体表面のマクロな環境について、[9]で議論されているようなミクロな過程からの推察と太陽風及び宇宙線照射年代について併せて議論を進めていくことが重要だろう。

## 4. 太陽風起源希ガスの局所分析への期待と展望

はやぶさ試料の希ガス同位体分析は太陽風照射とそれに伴うHe/Ne間の分別を明らかにした[11]。しかし、希ガス分析は粒子一粒ごとの結果でありSTEM観察との直接比較を行うには希ガス分析事前にSTEM観察を行うなど、分析方法の工夫が必要である。一方、最近開発されたポストイオン化二次イオン質量分析装置LIMAS(図6 [20])を用いることで、希ガス同位体分析を数十nmスケールの空間分解能で行うことが可能となり得る。

LIMASは $^{69}\text{Ga}$ イオンを固体試料表面に照射し、スパッタされ遊離した原子や分子をフェムト秒(fs)レーザーによって非共鳴多光子吸収ポストイオン化ができる二次イオン質量分析装置である。この装置は主に

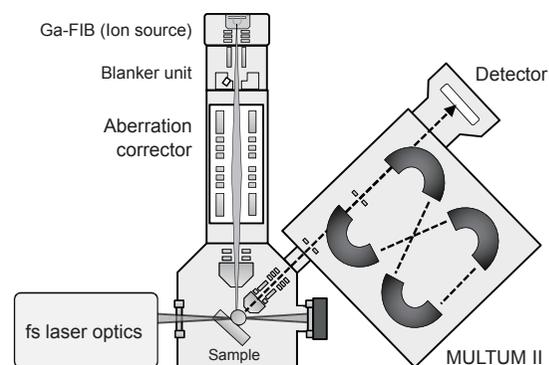


図6：LIMASの概略図。イオン源のGa-FIB、一次イオンをパルス化するためのブランカーユニットと色・球面収差を補正するための12極8組の収差補正装置、超高真空チャンバー内にあるサンプル、イオンを質量分離するためのMULTUM IIが設置されている。一次イオンによってスパッタされた粒子は効率よくfsレーザーによりポストイオン化され、質量分析装置に導入される。

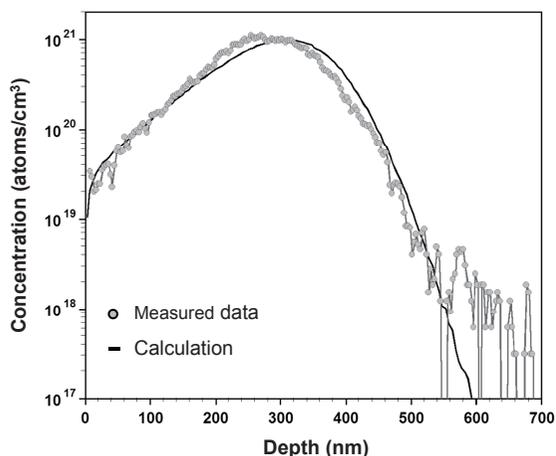


図7:  $^4\text{He}$ 注入試料(n型Si)の深さ方向分析結果とTRIMによる $^4\text{He}$ 注入シミュレーション結果.  $^4\text{He}$ 照射積算量は $2 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup>で注入エネルギーは30 keV.

Gaイオン源、多重周回型質量分析計、fsレーザーで構成されている。液体ガリウムイオン源(Ga focused ion beam: Ga-FIB)は高い空間分解能を達成するために用い、Ga-FIBによってスパッタされる。しかし、パルス状のGa-FIB(パルス幅~200 ns)によってスパッタされ、イオン化される粒子は極めて少ない。そこでスパッタされた中性粒子をfsレーザーによって効率的にイオン化し、そのイオンを飛行時間型の質量分析計によって質量スペクトルを取得する。このfsレーザーによってイオン化ポテンシャルが高いHeで~10%、Neではほぼ100%のイオン化ができる[20]。ただし、fsレーザーによるポストイオン化はそのイオン化領域(~50 × 50 × 50 μm<sup>3</sup>)にある粒子をすべてイオン化させるため多元素同時分析ができる一方、そのマススペクトルは互いのイオンが妨害しあい非常に複雑で定量性に乏しいスペクトルになってしまう。それを避けるためにLIMASでは多重周回型質量分析計MULTUM IIを用いることで目的の同位体の単離を行い、高精度の定量分析を行うことができる。

上記の通り、LIMASはこれまで不可能だったHe、Neの100 nm以下での分析が可能である。これははやぶさ試料に適用することで、Heの深さ方向分析が可能である。図7はSiウェーハに $^4\text{He}$ を $2 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup>注入した試料の深さ方向分析結果とTRIM(the Transport of Ions in Matter)によってシミュレートし

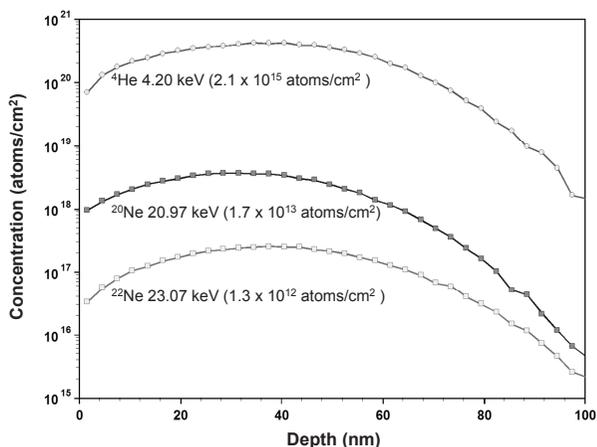


図8: TRIM を用いた $^4\text{He}$ 、 $^{20}\text{Ne}$ 、 $^{22}\text{Ne}$ のイオン注入深さ方向プロファイルの結果. イオンの速度は太陽風の平均的な速度である450 km/sで、図中のエネルギーがそれに対応する. イオン照射積算量は[11]の希ガス量を50 μm径の球粒子に照射した状態を仮定した.

たものを示している。スパッタによってあけられた穴の深さは3Dレーザー顕微鏡によって測定した。現在のHe検出限界は $10^{18}$  atoms/cm<sup>3</sup>で、およそ50 ppmに対応する。また、深さ分解能は3 nm程度である。図8にTRIMによるはやぶさ試料(オリビン粒子を想定)の太陽風打ち込みシミュレーションを示す。この結果によるとイオン注入深さは $^4\text{He}$ でピーク濃度が $4 \times 10^{20}$  atoms/cm<sup>3</sup>で表面から30-40 nm程度の位置に打ち込まれている。これだけの濃度のHeが粒子内に存在していれば、はやぶさ試料のLIMASによる $^4\text{He}$ 深さ方向分析は原理的に可能であるといえる。今後、低エネルギーの照射試料の実験で分析可能なことを確認した後、はやぶさ試料の分析を行う予定である。また、NeはHeよりイオン化効率が良いことを考えると $10^{17}$  atoms/cm<sup>3</sup>まで検出ができると期待される。はやぶさ試料の $^{20}\text{Ne}$ 、 $^{22}\text{Ne}$ ピーク濃度はそれぞれ $3 \times 10^{18}$ 、 $2 \times 10^{17}$  atoms/cm<sup>3</sup>程度なので $^{22}\text{Ne}$ に関してはピーク位置を確認できる程度の分析になってしまうかもしれない。しかしながら $^4\text{He}$ 、 $^{20}\text{Ne}$ の深さ分析は深さ80 nmまで測定可能なので粒子表面での軽希ガスの挙動を明らかにすることは可能であると考えられる。

$^4\text{He}$ 、 $^{20}\text{Ne}$ の深さ分析が可能になれば、上述した個々の粒子表面からの $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比及び $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比の深さプロファイルから、太陽風と物質との相互作用の理解がさらに深まるはずである。LIMASによる分析で解

明が期待される結果として以下の3つが考えられる。

(1) 風化の度合いと太陽風照射年代を組み合わせることで宇宙風化の経年変化を明らかにする。これは粒子表面領域 $1\ \mu\text{m}^2$ のイオン照射積算量をLIMAS深さ分析によって定量し太陽風の暴露年代を求める。その穴を基準にFIB加工し、ほぼ同位置の微細構造を調べるための透過顕微鏡(TEM)用試料を切り出す。その試料をTEM観察することによって太陽照射年代と宇宙風化の度合いを直接比較することができる。(2) はやぶさ試料等の宇宙風化を受けている粒子表面の深さ方向分析を行うことでHe, Ne分布を決定し、その分布をTRIMによるイオン注入シミュレーションと比較することによって粒子表面からの希ガス脱離機構が解明されるはずである。これは深さ方向の高い空間分解能と、Neの定量のためにより高い分析感度を必要とするが、これまでにTEM観察によって見いだされた様々な表面構造を理解するための相補的な情報になるはずである。(3) 上記二つの分析法を組み合わせる希ガス注入深さイメージを取得することで太陽風打ち込み分布を三次元的に決定し、複雑な太陽風打ち込み、表面剥離の素過程を可視化する。以上の軽希ガスの挙動が明らかになれば、宇宙風化の物理解明に貢献できるはずである。

## 謝 辞

独立行政法人物質・材料研究機構坂口勲博士に本論文中の $^4\text{He}$ 注入試料を作製していただきました。また、査読者の中嶋大輔博士には有益で建設的なコメントを数多くいただきました。心より感謝致します。

## 参考文献

- [1] Michel, P. et al., 2009, *Icarus* 200, 503.
- [2] O'Brien, D.P. and Greenberg, R., 2005, *Icarus* 178, 179.
- [3] Abe, M. et al., 2006, *Science* 312, 1344.
- [4] Okada, T. et al., 2006, *Science* 312, 1338.
- [5] Nakamura, T. et al., 2011, *Science* 333, 1113.
- [6] Yurimoto, H. et al., 2011, *Science* 333, 1116.
- [7] Nakamura, E. et al., 2012, *PNAS* 109, E624.
- [8] Noguchi, T. et al., 2011, *Science* 333, 1121.
- [9] Noguchi, T. et al., 2013, *M&PS*, in press.
- [10] Keller, L.P. et al., 1997, *GCA* 61, 2331.
- [11] Nagao, K. et al., 2011, *Science* 333, 1128.
- [12] Caffee, M.W. et al., 1988, in *Meteorites and the Early Solar System*.
- [13] Wieler, R., 2002, *Rev. Mineral. Geochem.* 47, 125.
- [14] Wieler, R., 2002, *Rev. Mineral. Geochem.* 47, 21.
- [15] Yada, T. et al., 2013, *M&PS*, in press.
- [16] Tsuchiyama, A. et al., 2011, *Science* 333, 1125.
- [17] Grimberg, A. et al., 2008, *GCA* 72, 626.
- [18] Ozima, M. and Podosek, A., 2002, *Noble Gas Geochemistry* (New York: Cambridge University).
- [19] Carrez, P. et al., 2002, *M&PS* 37, 1599.
- [20] Ebata, S. et al., 2012, *SIA* 44, 635.
- [21] 道上達広, 2000, *遊星人* 9, 186.

## 特集「はやぶさ帰還試料の分析で分かったこと」

# 「はやぶさ」粒子の有機化合物分析と「はやぶさ2」

奈良岡 浩<sup>1</sup>

(要旨) 小惑星探査機「はやぶさ」が持ち帰った粒子の有機化合物分析に関する顛末について記述した。S型小惑星表面上に有機化合物が存在するかどうかはおもしろい問題であるが、今のところ、はやぶさ粒子にイトカワ固有の有機物は発見されていない。これからの「はやぶさ2」やNASA「OSIRIS-REx」計画に期待するとともに、このような惑星物質研究を成功させるためには、長期の視点で積極的な若い研究者を育てることが必須である。

## 1. はじめに

2010年6月に帰還した「はやぶさ」が持ち帰った粒子の有機化合物分析を担当させていただいた[1]。現時点では残念ながら、はやぶさ粒子にイトカワ固有の有機物は発見されていない。そもそもS型小惑星表面上に有機化合物が存在し得るかどうかはおもしろい重要な問題であるが、それについては後述する。2003年5月の打ち上げ以来、幾多の困難を乗り越え、小惑星物質のサンプルリターンという人類初の快挙を成し遂げた宇宙研の研究者をはじめ、プロジェクトメンバーの皆様にご敬意を表す。「はやぶさ」を契機として、「はやぶさ2」やNASA「OSIRIS-REx」計画が進行中で、アポロ計画以来の惑星探査による新しい太陽系物質科学が始まった。本稿では筆者の個人的立場から、「はやぶさ」計画への関わり、「はやぶさ」粒子の分析計画と実際、さらに太陽系物質に含まれる有機化合物を研究する意義、「はやぶさ2」への期待などについて記したい。

## 2. MUSES-C計画

筆者が最初に小惑星サンプルリターン計画に関わったのは1995年であり、当時、東京都立大(現、首都大東京)で地球環境試料や炭素質隕石中の有機化合物と

その同位体比を研究していた。「はやぶさ」計画のサイエンスリーダーであられた宇宙研・藤原顕教授から「小惑星から物質を持ち帰ったら何を研究したいか、そしてその意義は何か」話してほしいと要請され、8月のある暑い土曜日に相模原の宇宙研でセミナーをおこなった。その当時のターゲット天体は4660ネレウスであり、もしかしたら炭素質な表面を持つかもしれないと言われていた。そのような観点から筆者にセミナー依頼があったようだ(単に、相模原と八王子が近いだけかもしれない)。

セミナーの多くの部分は忘れたが、地球環境に置かれる前の宇宙有機化合物を分析し、とくに、地球外アミノ酸の左右(D,L)の優位性をはっきりさせたいことを話した。当時、地球外有機物の研究はほとんどが1969年にオーストラリアに落下した炭素質隕石Murchison(CM2)を用いて行われていた。落下後回収され、すぐ分析された研究ではアミノ酸はDL体等量混合物のラセミ体化合物として存在すると報告された[2]。しかし、落下から20年後に、同位体比も含めて分析されたアミノ酸はL体過剰であった[3]。筆者が南極氷床上で採集したAsuka881458のアミノ酸についても、帰国後すぐに分析したときにはほぼラセミ体であったが、数年後の分析ではL体過剰であった。このL体過剰は地球上での汚染であるとの見方が一般的であった。アメリカでの学会において、Asuka881458の結果について報告した時も、地球上での汚染を受けて

1. 九州大学大学院理学研究院 地球惑星科学部門  
naraoka@geo.kyushu-u.ac.jp

いない試料とのコメントをもらった。しかし、1997年にMurchison隕石から地球上の生命が用いていないアミノ酸にL体過剰が報告されたことから[4]、地球外アミノ酸はL体過剰であるとの考えが主流になっている。このような経過は2000年にカナダに落下したTagish Lake隕石でも同じであり、落下後すぐの分析ではアミノ酸はほとんど含まれないと報告されたが[5]、10年後に行われた分析ではL体の大過剰が報告されている[6, 7]。これらは隕石中の不均一性のためとされている。地球外有機物の研究にとって、左右対掌体の優位性は、生命を構成する有機化合物とも関連して、最も謎の多い興味深い未解決な問題である。

その後、ロケット計画の遅れから、MUSES-Cの対象天体はネレウスから1989MLに変更され、さらに1998SF36(イトカワ)となった。2003年5月9日のMUSES-C打ち上げ時はちょうど学部の授業中で、「今、日本の小惑星探査機が人類初となるサンプルリターンを目指して打ち上げられたところです」と学生に話した記憶がある。

### 3. 分析コンペティション

MUSES-Cの打ち上げ前に、リターン試料を想定した分析コンペが開催された。これに参加し、合格評価を受けなければ初期分析に参加できないということであった。下山晃教授(当時、筑波大)を代表とし、三田肇さん(当時、筑波大)、古宮正利さん(当時、地調)、筆者の4名でチームを編成し、有機化合物分析の計画を立てた。アミノ酸や多環芳香族炭化水素(PAH)の有機化合物と、炭素含有量と安定同位体比の分析をすることとした。MUSES-C模擬試料として、サンプル1Dと2Dの2種類の粉末試料それぞれ約100 mgが宇宙研より配分された。それぞれガラスバイアルに入っており、テフロンバックに包まれていた。標準試料としてMurchison隕石とブランク試料も合わせて、2000年秋に試料調製を筑波大のクリーンルーム内でおこない、化合物の質量分析を筑波大で、同位体比分析を都立大でおこなった。分析結果は公表されているが[8]、配分された試料には生体構成L-アミノ酸や機械油などに用いられる炭素数25程度までの奇数偶数優位性のない $n$ -アルカンが入っており、配布時にはすでに地球由来有機物の汚染を受けていた。試料の履歴やキ

ュレーション作業がいかに大事であるかという認識を持った(配布試料にこれらの化合物を意図的に混入させた可能性もある)。審査はどういう基準でおこなわれたかは知らないが合格という評価で初期分析に参加できることになった。審査コメントとして、2段階レーザー質量分析などで化合物の局所分析を考えてはという意見があったが、当時そのような分析装置は米国スタンフォード大学に自作1台があったのみで、分析の対象化合物はイオン化されやすいものに限られており、事実上、PAHしか分析できない。現在でも、ほとんどの有機化合物研究は溶媒を用いて抽出物について解析されている。特に、アミノ酸についてはその多くの部分が水による抽出物を酸加水分解することによりアミノ酸となる前駆体有機物として存在しているので、抽出分析に頼らざるを得ないのが現状である。

### 4. 小惑星イトカワ上の有機物

イトカワはS型小惑星であり、隕石ではLL5-6コンドライトに相当することがはやぶさからのスペクトル観測から明らかになっていた[9, 10]。岩石学タイプ5-6の隕石は一般的に高い変成温度(600~950 °C)を経験しており、有機物などからなる揮発性元素は元々あったとしても、変成過程で完全に失われているのが普通である。しかしながら、イトカワ形成後の表面に彗星塵などを含む炭素質粒子が宇宙空間から降り注いでいただろうし、太陽から揮発性元素からなるCNなどがイトカワ表面粒子に打ち込まれた(インプランテーション)可能性もある。実際、原田馨筑波大名誉教授(当時、マイアミ大学)により、アポロ計画で持ち帰られた月表層土壌約1 gの水抽出物を加水分解したものにグリシンやアラニン、アスパラギン酸などのアミノ酸がppbレベルで検出された[11]。この結果は後年、高感度蛍光検出を用いた高速液体クロマトグラフィー(High Performance Liquid Chromatography, HPLC)による追試でも確かめられ、原田教授は月アミノ酸研究のパイオニアであると論文で賛辞を送られている[12]。月土壌から、はっきりとした炭素質粒子が見つからないことや土壌粒子から太陽からのインプランテーションによる可能性が強いHCNなどが検出されたことから、これらが反応してアミノ酸前駆体になったと思われる。また、炭素質隕石や彗星などが

月面に衝突した際に蒸発した有機物が残存した可能性も指摘されているが確固たる証拠はない。これらアミノ酸などの有機化合物の存在量は低すぎて、同位体組成は測定されることがないので、月表層アミノ酸の成因については未だに決着していない。

いずれにしても、ターゲット天体がS型小惑星であるイトカワに変更になっても、表層に有機化合物が存在するかどうか分析してみる価値はあるということで、分析チームには残っていた。

## 5. はやぶさ帰還延期

ご存じのように当初の計画では、はやぶさ地球帰還は2007年6月であったが、2010年に延期となり、また、採取量もかなり少ないだろうということで、分析チームの再編成をおこなうこととなった。初期分析コンペティションに参加した8チームのうち、7つの大学連合が大学コンソーシアムチームとされた(表1)。土山明さん(当時、阪大；現、京大)を代表として、種々の一連の分析の流れの中で有機化合物分析をおこなうこととなった。構成は北大から九大までであったので、繁く集まって分析計画を練る必要があった。筆者は当時、岡山大に異動していたので、鉱物グループのSPring-8での実験の合間に、計画を話し合ったことも

あった(議論を終えて、真夜中の山陽道は高速トラックばかりで非常に怖かった)。放射光を用いたトモグラフィやXRDでは、試料粒子を最初に、有機樹脂に包埋することから始まるので、有機化合物分析は一連の操作の中の一番上流に入れてくれるように主張した。一方で、有機分析の際には大気や溶媒に晒されるので鉱物の宇宙風化の研究にはマイナスとなる。分析の対象・手法が異なると、相互に影響が出てくるので、話し合いが幾度となく繰り返された。初期分析に供される試料量が数十 mg、数 mg、粒子毎のそれぞれの場合の分析フロー作成では土山さんのご苦労は相当なものであっただろう。

粒子受け入れとキュレーションのための施設の建設も始まった。有機分析の立場からクリーンルームの設計に関して、何度か宇宙研に呼ばれて、藤村彰夫・加藤学両教授、平田岳史さん(当時、東工大；現、京大)、香内晃さん(北大)と議論させていただいた。あまり役に立つ仕事はできなかったが、真空系では油ポンプは用いないこと、用いる器具の有機物汚染を除くベーキング炉の設置、有機溶媒を扱う専用のクリーンルームとベンチの設置、使用する有機物はテフロンコーティングのものをお願いした。真空に引いているのだから、その空間はきれい(汚染がない)と考えがちであるが、低圧化で蒸気圧をもつ油炭化水素はポンプで引いてい

表1: 「はやぶさ」粒子初期分析の大学コンソーシアムチーム一覧

	氏名(*代表)	所属	分析項目
1	海老原 充* 関本 俊	首都大・理工 京都大・原子炉	元素組成
2	北島 富美雄* 小嗣 真人 大河内 拓雄	九州大・理 JASRI/SPring-8 JASRI/SPring-8	高分子有機物質の有無と構造
3	土山 明* 上杉 健太郎	大阪大・理 JASRI/SPring-8	粒子の3次元形状および3次元内部構造
4	中村 智樹* 野口 高明 田中 雅彦	東北大・理 茨城大・理 物質・材料研究機構	鉱物の種類と存在度、全岩元素組成 岩石組織と鉱物元素組成
5	長尾 敬介* 岡崎 隆司	東京大・理 九州大・理	太陽風および宇宙線起源希ガスの存在量と 同位体組成に基づくイトカワ表面環境
6	奈良岡 浩* 三田 肇 浜瀬 健司 福島 和彦	九州大・理 福岡工大・工 九州大・薬 名古屋大・農	有機化合物の有無と種類
7	塚本 尚義*	北海道大・理	同位体組成、微量元素組成

注 JAXAから当初公表された名簿で、実際に参加した人数は表より多く、NASAから Zolensky氏、Sandford氏も参加している。

る全空間に広く遍く行き渡り、吸着されて大きな汚染となる。一般に、微量無機化学元素の分析者は施設・容器に金属やガラスを使用することを極端に嫌がるが、微量有機化合物を分析する我々是有機素材を嫌い、450~500℃で数時間、加熱処理したガラス器具を用いる。プラスチックなどの可塑剤として広く用いられ、環境中に普遍的に存在するフタル酸エステル類は容易に検出される。有機物分析に用いる唯一の有機素材はテフロンであるが、高価で硬くて扱いにくい。キュレーション施設が完成して、作業する段階になって有機物のクリーンルームは2人が入って作業するには非常に狭い空間であることに気付かされた。設計時の、私の主張が足りなかったことを反省している。

より少ない試料で有機化合物分析をおこなうための検討も順次行った。それまでは、隕石中のアミノ酸分析には数100 mg以上の試料を用いることが一般的だったが(現在もそうである)、高感度蛍光検出による液体クロマトグラフィーにより、西村佳恵さん(当時、岡山大学・九大院生)が苦勞して、数mgの炭素質隕石粒子を用いて、サブピコ( $10^{-12}$ )モルオーダーでのアミノ酸分析を可能にしてくれた。単なる純粋なアミノ酸のフェムト( $10^{-15}$ )モル程度の蛍光分析は難しくない。しかし、実験室内で隕石を熱水抽出し、塩酸で加水分解を行い、さらに誘導体化をおこなってからの実際の分析では、いかにバックグラウンドを低く抑えるかが分析の成否を決める。分析のバックグラウンドをゼロにすることは残念ながら不可能である。高感度にすればするほど、グリシンやアラニンなどの地球上に遍く存在するアミノ酸のピークがバックグラウンドに必ず現れる。g単位の試料を用いて、ppbレベルで存在するアミノ酸を分析することは可能でも、mg単位の試料でppbしか存在しない化合物を分析するのは至難の業である。

また、分析コンペでは念頭に置いていなかった溶媒抽出に依らない有機化合物分析の検討も必要と感じた。ある企業が持つ飛行時間型二次イオン質量分析計(Time of Flight-Secondary Ion Mass Spectrometer, ToF-SIMS)を使用させてもらって、一次イオンとしてGaイオンを炭素質隕石に照射して高質量分解能分析をおこなった。有機フラグメントイオンが得られることはわかったが、イオン化されるものは限られていた。企業のToF-SIMS分析は非常に人気が高く、ほ

んどマシンタイムが取れなかったし、有機物のイオン化には一次イオンビームとしてAuイオンがよい。そこで、有機物のToF-SIMSを専門に分析を開始されていた名古屋大学の福島和彦教授と齋藤香織さん(現、京大)のお世話になって、炭素質隕石のToF-SIMS分析も検討し始めた。

## 6. はやぶさ粒子の有機化合物分析

2007年に筆者は九州大に異動し、炭素質物質のラマンスペクトルや赤外分光スペクトルを担当する北島富美雄さんと分析作業の流れを同じ建物でおこなうことができることとなった。また、福岡工大に三田さんが異動していたので、有機化合物分析を自分だけの作業でおこなわずにすんだ。分析最中に常時、間違いがないかチェックし、記録を残しておいてくれる共同研究者は必須であるので助かった。さらに、鉱物の中村智樹さん(現、東北大)、希ガスの岡崎隆司さんもいたので、粒子分析に関する議論もしやすくなった。とくに、両氏はキュレーション施設が完成してから、はやぶさ粒子受け入れのためにISASにはほぼ常駐していたので、分析のための進行状況を把握することができた。

2010年が明けた頃には、最終的に粒子毎の分析スキームが現実的になり(実際にそうなったのだが)、粒子径で50~100  $\mu\text{m}$ 程度1粒を念頭においた水を使用しない有機化合物分析をする必要に迫られた。重量でいうとマイクロg以下であり、 $\mu\text{g}$ 以下の試料でppbレベルの化合物を検出するにはサブフェムトモル( $10^{-15}$ モル以下)の分子を検出することになり、今まで開発してきた分析法ではほぼ不可能な分析であった。幸い、九大薬学部には二次元HPLCを駆使して生体DL-アミノ酸の世界最高感度での蛍光分析を達成されていた浜瀬健司さんがいらしたので、ご協力をお願いした。何度か理学部と薬学部を往復し、分析のバックグラウンドを可能な限り下げの方法を考え、実際の分析に備えた。もし、ppmレベルのアミノ酸を含むような炭素質隕石のような粒子が発見されれば、 $\mu\text{g}$ 程度の粒子1つでアミノ酸分析が可能になった。

有機化合物分析は九大で北島さんによる粒子のラマン分光と赤外分光スペクトル測定後に、粒子を理学部本館の4階から3階に移動して行うこととし、宇宙研からははやぶさ粒子を移送する容器が必要になった。移

送容器をそのまま測定容器としたいとの北島さんの希望で、10 mm × 10 mm、厚さ0.7 mmのダイヤモンドに0.5 mm直径で深さ0.25 mmの円筒溝が8個あるダイヤモンドホルダーを作成し、その溝にはやぶさ粒子を入れて移送する計画を立てた。分析の流れで、有機化合物分析もその溝内で行うこととし、実際に粒子の溶媒洗浄が可能かどうか検討するため、ダイヤモンド板にダイヤモンドドリルで直径0.5 mmの円溝の作成をおこなった。ダイヤモンド板上でダイヤモンドドリルが滑り、予想以上に多大な時間を要することとなったが、どうにか試験に使える1個だけは作成することができた。ダイヤモンドとダイヤモンドを擦りあわせると、黒い粉(グラファイト)が魔法のように出てくるという熱力学を実感した。作成した円溝に模擬粒子を入れ、溶媒をマイクロシリンジで注入して粒子を洗浄して、そのまま引き上げることは予想通りうまくいった。実際の宇宙研からはやぶさ粒子の移送に用いるダイヤモンドホルダーは外注により作成してもらった。

宇宙研キュレーション施設のクリーンルーム内ではやぶさ粒子をダイヤモンドホルダー円溝に収容する作業には藤村彰夫教授、石橋之宏さんをはじめ多くの方々にお世話になった。ダイヤモンドホルダーを有機溶媒および超純水で洗浄・乾燥・組立するのに約3日間かかり、リハーサルを含めて何度か行った。静電マニピュレーターを使った粒子の移動は藤村教授にお願いし、静電気で粒子は動き回って収容が困難で、5個の粒子を収容するのに丸々2日を要した。藤村教授の心身はたいへんお疲れになったことと思う。作業が終了したのは真夜中で、次の日の朝一番の電車と新幹線で、相模原から福岡まで粒子を北島さんと2人で移送

した。キュレーション施設の皆さんには感謝するのみである。

九大に戻ってからは北島さんの分光分析終了を待って、日曜夜10時頃に溶媒抽出を三田さんとクリーンベンチ内に設置した実体鏡下でおこなった(図1)。溶媒抽出後の粒子は月曜午前には放射化分析のために海老原充教授(首都大東京)にわたすことになっていたもので、原子炉でのマシンタイムの制限から時間的余裕はなかった。何度も練習はしていたので、抽出自身は1時間程度で終了した。実体鏡下で見たイトカワ粒子はキラキラと輝いており、何か神秘的なものを感じた。

配分された5個のイトカワ粒子(RA-QD02-0017, -0033, -0044, -0049, -0064)は30 μm ~ 200 μmで、主要構成鉱物はカンラン石であり、北島さんによるラマン分光スペクトルでも炭素質隕石に含まれるような不溶性有機物は検出されなかった[13]。-0033と-0049粒子の抽出物はそれぞれアミノ酸分析に使い、残りの3つの粒子の抽出物は合わせて石英板に塗りつけてToF-SIMS分析に使用した。ダイヤモンドホルダーの合計8つの円溝のうち、5つにはイトカワ粒子が入っており、残りの3つの溝は空だったので、その溝を同じように溶媒で洗浄し、粒子に対する同じ操作をおこない、分析ブランクとした。実際の分析データは*Geochemical Journal*のサイト(<http://www.terrapub.co.jp/journals/GJ/pdf/free/4601/46010061>)から自由にダウンロードできるので参考にしてほしい。結果はアミノ酸蛍光分析にしても、ToF-SIMS分析にしても、分析時のバックグラウンドを有意義に超えるような量は検出されなかった。一方で、同時に行ったCM2南極隕石であるYamato791191の約50 μmの粒子3個を塩酸抽出した

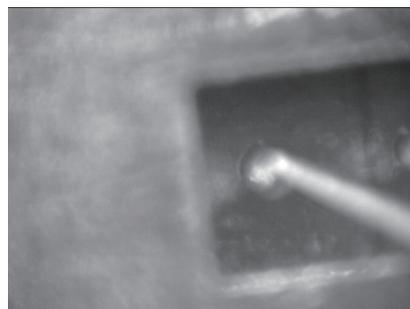
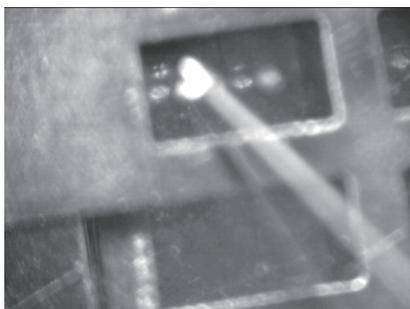


図1: ダイヤモンドホルダーの円溝での粒子洗浄操作。ダイヤモンド板の直径500ミクロンの円溝中のはやぶさ粒子にマイクロシリンジを用いて溶媒を注入(左)して粒子を洗浄し、さらに溶媒を用いて洗浄液を回収(右)している様子。(福岡工大・三田さん写真提供)

分析では、グリシン、ほぼラセミ体のアラニン、および地球上にはあまり存在しない $\alpha$ -アミノイソ酪酸がppmオーダーで検出された。アミノ酸分析では水抽出が有効であるので、水抽出をおこなっていない本研究の論文報告ではpreliminary analysisという題目にさせていただいた。ただし、水抽出して数ppbレベルのアミノ酸が入っていたとしても、試料量が1  $\mu$ g程度では現段階では検出は難しい。よって、今回の分析結果として、イトカワ粒子には有機化合物は検出されず、もし存在していたとしてもppm以下の量である。分析結果は2011年3月のLPSCで藪田ひかるさん(阪大)によって発表された(筆者は入試作業で出席できなかった)。また、2012年8月のロンドンでの国際隕石学会でも発表した。アメリカの隕石アミノ酸の研究者から蛍光分析のみではなく、質量分析もおこなうべきとの指摘を受けた。地球上の生体構成20種アミノ酸とは異なり、隕石中にはDL立体異性体を別として、構造異性体をもつ70種以上のアミノ酸が存在するので、質量分析は必須である。

## 7. はやぶさ2計画

はやぶさ2が向かう1993 JU3はC型のスペクトルタイプに属する炭素や水などの揮発性物質に富む表面を持つ小惑星と考えられている。将来、人類が宇宙空間に飛び出し、C型小惑星表面に訪れた時に資源として利用できる水は本当に存在するのであろうか。C型

小惑星の反射スペクトルは波長0.9~2.4  $\mu$ mの近赤外領域が平坦である(例えば、[14])。そのような特徴的なスペクトルを示さない小惑星には他にもC型のサブグループとも言えるようなG型やB型などがあり、加熱を受けて水をほとんど失い、炭素も有機物というよりはグラファイトとして存在している可能性もある。また、我々が手にしている炭素質隕石にもCI, CM, CR, CV, CO, CK, CH, CBなどのサブグループが存在し、隕石母天体となる小惑星との関係はよくわかっていない。はやぶさ2ミッションによって、これら複雑な対応関係が明らかにされる可能性が高い。

また、太陽系小天体の有機物・水をはじめとする揮発性物質を研究することは、我々地球における海・生命の起源を探求することにつながる。水・有機物を構成する元素であるH, O, C, Nは宇宙で最もありふれた元素であり、太陽系元素存在度においても、希ガスであるHe, Neを除くと、原子数で上位4つを占める。しかしながら、現在の地球海洋に存在する水の質量は $1.4 \times 10^{21}$  kgであり、地球質量の0.023 wt%でしかない。マントル岩石中に存在する水を海水の10倍と見積もっても0.23 wt%と非常に少ないことがわかる。地殻の代表的な元素であるSiで規格化してみると、地球表層では $H/Si = 2.7 \times 10^{-2}$ であり、太陽系存在度 $H/Si = \sim 3 \times 10^4$ に対して、約百万分の一まで枯渇している。炭素についても同様で、現在の地球表層(地圏・大気圏・生命圏)に存在する見積炭素量は約 $1 \times 10^{20}$  kgで、地球質量の0.0017 wt%である。近年、研究が進みつつ

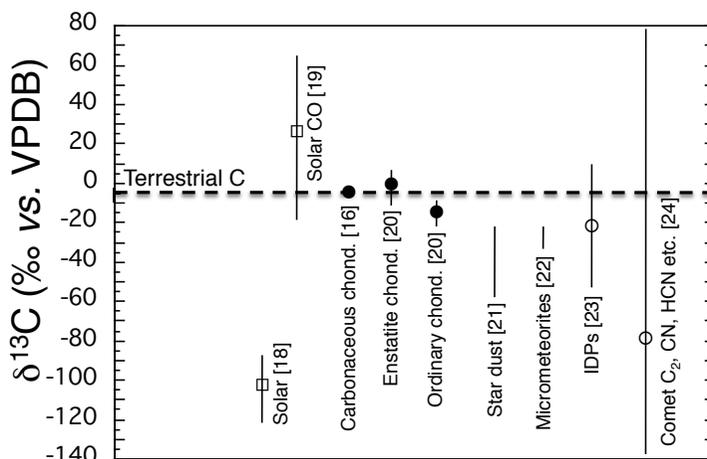


図2: 地球外物質の炭素同位体組成。記号はおおよその中央値、[ ]内は参考文献番号を示す。

ある Deep Carbon (深層炭素) の存在量が表層の10倍だとしても 0.017 wt% とその存在量は少ない。太陽系存在度での C/Si  $\approx$  10 に対して、地球表層では C/Si  $= 1.7 \times 10^{-3}$  と約六千分の一まで枯渇している。つまり、地球上では満ちているように思われる水・生命も宇宙や太陽系全体からみると、極めて限られた量の HOCN からなっていることがわかる。例えば、水 10 wt% と炭素を 1.3 wt% を含む典型的な炭素質隕石が地球質量の 0.2 wt% 分 ( $1.4 \times 10^{22}$  kg) だけ地球上に降り注げば、地球表層の水・炭素の現在量に相当する量になる。このように太陽系レベルでいうと極めて存在量の少ない地球上の水の起源は未だに謎である (例えば, [15])。

このように少量の地球上の水・炭素はどこ(どのような小天体)に起原を持つのであろうか。炭素について言えば、地球全体の平均同位体組成 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) が起原を示している。地球表層の炭酸塩と生物を含めた有機物の量と同位体比、中央海嶺からの脱ガスする  $\text{CO}_2$  や深層からの炭酸塩マグマ(カーボナタイト)、およびダイヤモンドなどからの全地球の平均同位体比は  $\delta^{13}\text{C} = -5\%$  程度と考えられている(図2)。一方で、炭素質隕石の加重平均  $\delta^{13}\text{C}$  値は約 -6% であり、地球平均値と最もよく一致する [16]。また、水はほとんど含有されておらず、炭素(グラファイト)量は数千 ppm 以下であるが、エンスタタイトコンドライトの  $\delta^{13}\text{C}$  値の範囲も一致する。しかし、普通コンドライトの  $\delta^{13}\text{C}$  値は -20 ~ -13% と例外なく、地球に比較して同位体的に軽い。つまり、普通コンドライトだけをどんなに集めても地球の炭素は説明できない。重い成分との混合で地球炭素の同位体組成を作り出すことができるかもしれないが、そのような重い炭素はどこにあるのだろうか。天文学的観測によって、太陽や彗星には重い炭素をもつ CO や有機分子が存在しているようだが、極めて大きな同位体組成幅を持つ(図2)。はやぶさ2や OSIRIS-REx による炭素質小天体、およびはやぶさ MkII による枯渇彗星核の探査は、アミノ酸をはじめとする有機化合物の種類や立体構造の他にも、地球炭素の起原(地球生命物質の起原)を知る上で非常に重要なミッションである。

## 8. これから

2016年打ち上げ予定の NASA による OSIRIS-REx

は炭素質な小惑星 1999 RQ36 からのサンプルリターンを目指し、始原天体と生命の起原 (Origins)、小惑星のスペクトル解釈 (Spectral Interpretation)、資源の同定 (Resource Identification)、地球の安全 (Security) を目的とした岩石採取探査機 (Regolith Explorer) で、科学的には事実上はやぶさ2と同じである。失敗に終わったが、一昨年にロシアがサンプルリターンを目指した火星の衛星フォボスも炭素質な表面からなる。より始原的な天体を探査したいという思いは世界共通のようだ。宇宙研のはやぶさ MkII にも期待したい [17]。

筆者が小惑星サンプルリターン計画に出会ってから20年弱が過ぎた。惑星探査計画は人類にとって大いに夢のある未知なるものへの挑戦であるが、長いタイムスパンと多くの人々の貢献が必須である。とくに、サンプルリターンのような惑星物質研究を成功させるためには長期の視点で、惑星物質科学に興味を持ち、実行力のある若い研究者を育てていく必要がある。

## 謝辞

本特集「はやぶさ帰還試料の分析で分かったこと」では有機化合物分析に関しては現時点で書くことがなく執筆を辞退していたが、エディターの矢田達氏から執筆して下さいとのことで、急遽本文を書くことになった。記憶違いなどによる間違いがあれば、責任はすべて筆者にある。初期分析を遂行するにあたってお世話になった非常に多くの方々へ感謝いたします。とくに、研究畑の全く違う名古屋大学生命農学研究所の福島和彦教授と斎藤香織さん、および九州大学薬学研究院の浜瀬健司准教授には分析協力の申し出を快くお引き受けいただきました。また、九大・北島富美雄さん、福岡工大・三田肇さん、京大・土山明さん、北大・塚本尚義さん、および査読者には原稿に有益なコメントをいただきました。最後に、拙文を読んでいただいた皆さんと本稿の執筆を勧めていただいた矢田達氏に感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] Naraoka, H. et al., 2012, *Geochem. J.* 46, 61.
- [2] Kvenvolden, K. et al., 1970, *Nature* 228, 923.
- [3] Engel, M. H. et al., 1990, *Nature* 348, 47.

- [4] Cronin, J. R. and Pizzarello, S., 1997, *Science* 275, 951.
- [5] Pizzarello, S. et al., 2001, *Science* 293, 2236.
- [6] Herd, C. D. K. et al., 2011, *Science* 332, 1304.
- [7] Glavin, D. P. et al., 2012, *Meteorit. Planet. Sci.* 47, 1347.
- [8] Shimoyama, A. et al., 2003, *ISAS Report SP 16*, 121.
- [9] Abe, M. et al., 2006, *Science* 312, 1334.
- [10] Okada, T. et al., 2006, *Science* 312, 1338.
- [11] Harada, K. et al., 1970, *Science* 173, 433.
- [12] Brinton, K. L. F. and Bada, J. L., 1996, *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 349.
- [13] Kitajima, F. et al., 投稿中.
- [14] Hiroi, T. et al., 1994, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites* 7, 230.
- [15] Genda, H. and Ikoma, M., 2008, *Icarus* 194, 42.
- [16] Naraoka, H. et al., 1997, *Geochem. J.* 31, 155.
- [17] 橘省吾ら, 2013, *遊星人* 22, 4.
- [18] Hashizume, K. et al., 2004, *Astrophys. J.* 600, 480.
- [19] Scott, P. C. et al., 2006, *Astronm. Astrophys.* 456, 675.
- [20] Grady, M. M. and Wright, I. P., 2003, *Space Sci. Rev.* 106, 231.
- [21] McKeegan, K. D. et al., 2006, *Science* 314, 1724.
- [22] Wright, I. P. et al., 1997, *Meteorit. Planet. Sci.* 32, 79.
- [23] Messenger, S. 2000, *Nature* 404, 968.
- [24] Wyckoff, S. et al., 2000, *Astrophys. J.* 535, 991.

---

本稿では化学構造のわかった有機物(化合物名を命名できる)を有機化合物とし, CHONなどからなる構造の定まらないものを単に有機物とした.

# 新しい日本の宇宙政策と今後の科学・探査計画

秋山 演亮<sup>1</sup>

(要旨) 2008年に制定された宇宙基本法に基づき2012年7月によく関連する法案が成立し、我が国の宇宙開発は総理直下のプロジェクトとして大きく体制が変更がされた。また2013年1月には改訂宇宙基本計画も発表され、新しい宇宙政策が進められつつある。本稿ではこのような体制変更が行われた理由、および新体制が目指す宇宙政策に関して解説し、それらを踏まえた上で、今後の科学・探査計画の立案・遂行にあたり必要となる考え方に関して解説と意見陳述を行う。

## 1. はじめに

大型月探査計画SELENEが立ち上がった1995年当時、学会内では「どのようにしてこのような大型プロジェクトを立ち上げる事が出来るのか?」に関して、明確な答えは聞かれなかった。むしろ「大型探査 heavy bombardment 説」のような、突然、天から降ってくるようなとらえ方をしていた人も多かったように記憶している。このようにある種主体性を欠いた状況の中で、平行してポストMUSES-CやSELENE-2あるいはB等の計画立案もまた進められていた。しかしバブル経済が崩壊する中、これらの計画案はずるずるとその決定が遅れた。10年以上の歳月を経た後、ようやく昨年になってはやぶさ2は実現が期待できる状況になってきたが、その他の探査計画に関しては未だにその実現が危ぶまれているのが現状である。

筆者はこのような状況の中、どのようにすれば大型プロジェクトが実現できるのかという観点から宇宙政策にも興味を持ち、これまで調査・活動を行ってきた。本稿ではこれまでに得た知見を紹介し、探査計画の立案・遂行にあたり必要となる考え方についての解説と意見陳述を行いたい。

## 2. 我が国の現状と宇宙基本法の制定

2007年～2008年にかけて、我が国の安全保障に関する根幹をなす3つの基本法、「海洋基本法」(2007年4月20日成立)・「宇宙基本法」(2007年5月21日成立)・「地理空間情報活用推進基本法」(2007年5月23日成立)が、いずれもいずれも議員立法により提案され成立している。これには自公民による三党合意が大きく影響している。

55年体制の下で我が国の政治状況は長らく「一と二分の一政党制」と呼ばれ、自民党による長期政権が続いていた。1993年の非自民連立政権、1994年の自社さきがけ連立政権によりこの構図は一旦崩れるが、その後も自民党による政権が10年以上にわたり継続してきた。ところが2003年9月に自由党と合併した民主党が同年11月の総選挙により大きく躍進、2007年には参議院で与野党議席逆転を果たす中、二大政党制が現実味を帯びてきた。このような状況の中、「政権交代によっても国家の安全保障政策はぶれるべきではない」との考え方が政権を担う可能性が高いとされた自公民に強く意識されるようになり、それぞれの分野で3党協議会が結成されるに至った。その成果が先に述べた3つの基本法である。2009年にはついに民主党が政権を奪取し、2012年には再び自民党主導の政権が復活するが、3党議連の活動は未だに維持されている。我が国の安全保障政策に関する考え方はおれずに継続

1. 和歌山大学 宇宙教育研究所  
akiyama@center.wakayama-u.ac.jp

されていることは、この分野を考えるにあたり、留意しておく必要がある事実である。

戦後60年を経て高度経済成長を成し遂げた後に、20年にわたる経済停滞に陥った我が国を尻目に、周辺国が経済力・国際競争力の急成長を遂げる状況の中で、我々はどうのような未来を築いていくべきなのか、国家戦略的なビジョンを描く政治家によるこのような意思の表れが、今回の宇宙開発の方針転換と体制変更を産み出した。これまでは主に科学と工学の発展に重点を置いて進められてきた我が国の宇宙開発が、政治的にもその意義を認められたと言っても良いだろう。かつてはロシア(旧ソ連)・アメリカ・欧州とならび「宇宙4強」と言われた我が国の宇宙開発は、中国・インドが加わった「宇宙6強」へと変化する中で、ずるずるとその地位を減じ始めている。これに対し、今後も強国であるために宇宙大国として有り続けるとの強固な意志が、3党を動かしている。宇宙基本法が「宇宙の安全保障への活用」を決め、総理の強い指導力により推進される「司令塔の設置」を求め、「宇宙産業の強化」を謳っているのも、全てこの流れの中にある。

一方で、我が国の財政は危機的な状況にある。平成24年度末における国と地方の長期債務残高は940兆円程度となっており、これは我が国のGDPに対し196%もの高率を示している[1]。このような中、宇宙基本法を読み解くとどうなるか? 「もはや我が国には一円の余裕もない。これまで宇宙は我が国の収益に全く寄与してこなかったが、ポテンシャルは高く、今後の稼ぎ頭となる可能性がある」。これが政治が下した判断である。将来の大国としての必要な技術・国家経済を支える重要な産業基盤としての宇宙開発。この文脈を

理解せずに、従来の科学・工学の延長線上として「宇宙開発の重要性が認められた」と考えるのは、大きな誤りである。

宇宙基本法の制定後、政権交代の混乱により、一時的に宇宙開発体制の変更に遅れが生じたことは非常に残念な出来事だった。しかし当時の前原宇宙担当大臣の下に有識者会議が設定された影響は大きく、政権末期にもかかわらず、昨年には宇宙関連法案が成立したことは極めて重要な成果であった。これにより、政権に復活した自民党の下、現在も宇宙開発は我が国の根幹的な活動として重要な地位を占めている。

### 3. 新旧宇宙開発体制の比較

宇宙基本法制定以前、我が国の宇宙開発は、その多くが文部科学省の指導の下に進められてきた(図1)。文部科学省の下に「宇宙開発委員会」が設置され、『我が国の宇宙開発の長期的かつ基本的な方向を見定め』、『JAXAの中期目標の基となる「宇宙開発に関する長期的な計画」等に関し調査審議』を行ってきた[2]。JAXAは文科省・総務省を主務官庁とし、活動を展開してきた。文部科学大臣は閣議に参加し総理の指揮命令下にあるため、広義の意味では当時も日本の宇宙開発は総理の指揮命令下にあったと言える。しかし文部科学省の下に宇宙開発委員会が設置され施策が進められていたため、様々な制約があった。

一つには他省庁が実施する宇宙関連の政策を統制することが出来無かった。宇宙開発委員会が文部科学省の中にあっただため、国家全体としての宇宙開発戦略の立案・実施が困難であった。科学や工学、探査に係わ

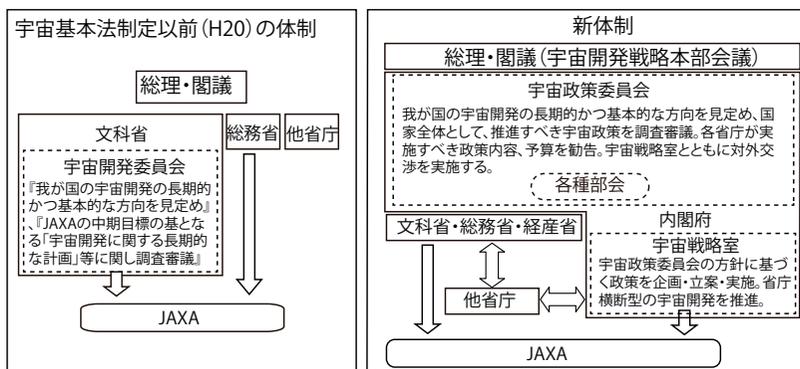


図1: 我が国の宇宙開発体制の新旧比較

る内容は文部科学省で統一的に判断し進める事が出来たが、市場の大半を占める海外への宇宙機・宇宙関連機器の売り込みは経済産業省の担当とされており、統一的な戦略の立案や実施が難しかった。

二つには、例えば中国などではアフリカ諸国に対し資源と衛星のバータ取引を進める中、やはり文科省設置法の範囲に縛られた我が国の宇宙開発はこのような活動をとることが出来無かった。もちろん省庁間の連携は理屈の上では可能であったが、実質的には機能していなかった。

三つには、JAXA法が文部科学省設置法の範疇にあったため、その枠を越える活動(実利用の推進や、宇宙基本法で定めた宇宙の防衛利用等)が出来無かった。

これらの制約は新しく宇宙開発を国家パワーの源泉として捉えるとき、致命的であると考えられた。そこで2008年に制定された宇宙基本法ならびに2012年7月に制定された宇宙関連法案では、宇宙開発を「総理が直接実施するプロジェクト」として捉え、必要な体制変更を行った。

まず総理が議長を務め全ての大臣が参加する「宇宙開発戦略本部会議」が最高意思決定機関とされ、トップダウンにより各省庁によりその意思が示されることとなった。また「宇宙政策委員会」が総理に対する勧告権限を有し、『我が国の宇宙開発の長期的かつ基本的な方向を見定め、国家全体として、推進すべき宇宙政策を審議。各省庁が実施すべき政策内容、予算を勧告。宇宙戦略室とともに対外交渉を実施する』とされた。また内閣府には「宇宙戦略室」が設置され、『宇宙政策委員会の方針に基づく政策を企画・立案・実施・省庁横断型の宇宙開発を推進』することとなった。JAXAの主務官庁には従来の文部科学省・総務省に加え、経済産業省・内閣府が加わることになり、JAXA法も改定された。これにより従来の問題点は大きく改善され、国家の全体戦略に基づき宇宙開発政策が立案・実施できることとなった。例えば、我が国が重要と認める国に対し宇宙開発技術を供与することにより、強固な二国間関係を築くことが出来るようになった。あるいは我が国の国家ブランド高揚のために、世界に先駆けた探査の実施や各種機会を外交的に活用することの法的な根拠も得ることが出来るようになった。またJAXA法が改定されたことにより、これまで研究開発の枠に押し込まれていた活動が実利用にも適用でき

ることとなった。特に宇宙の海外マーケットシェアの確保や防衛利用の推進が出来る事となった。また2013年3月からは、宇宙政策委員会を支える4つの部会(調査分析部会、宇宙科学・探査部会、宇宙輸送システム部会、宇宙産業部会)が設置され、より細やかな検討が進められる体制が整いつつある。

今後100年の世界の歴史を考えると、宇宙開発関連技術が戦略的に重要になってくることは否定しえない事実であろう。新体制に関する評価はまだ固まっていないが、このように考えるとき、中央集権的な宇宙開発実施体制を固めた今回の体制変更は今後、大きな成果を上げることが期待できる。

#### 4. 今後の動向予測と我々が取るべき対策

宇宙政策委員会発足後の半年間は、宇宙基本法が前倒しで改定される作業が発生したこともあり、かなりタイトなスケジュールで全体の検討が進められた。そのため細部に関しては十分な検討を実施する事が出来ず、今回の政策変更・体制変更がもたらした混乱は未だ完全に収束しているとは言えない。そのためにも今後、引き続きぶれない地道な政策推進が必要不可欠である。このような問題を解決するため、部会はより大きな役割を果たすと考えられている。

特に「宇宙科学等のフロンティア」分野に関しては、「宇宙科学・探査」部会が大きな影響力を発揮する。この部会ではより高い見地から、「宇宙科学・探査」の国家的な意義を論じ、価値付けを行い、「一定規模の資金の確保」を行うための提案を政策委員会に対し実施する。個々のプロジェクトの内容にまで踏み込んだ議論は同部会では実施されず、コミュニティとして示された判断が重要視される。そのため、今後はより一層、宇宙科学研究所における理学委員会・工学委員会の決定が重要になる。

一方で、理学委員会・工学委員会がコミュニティ全体の意思を反映していると広く認められることも重要な課題である。現状においては、理学委員会は宇宙科学や探査において我が国のセンターに位置していると言えると思うが、工学委員会に関しては必ずしもそうではない状況にある。また理学に関しても、宇宙研内部に席を置く分野とそれ以外の分野の格差等に関する不満の声も聞こえてくる。これらの状況を改善し、

日本の「宇宙科学等のフロンティア」を強固に推進する母体として宇宙科学研究所ならびに理学委員会・工学委員会が再生され、機能強化されることを強く希望する。また位置づけが不明瞭になっている月・惑星探査プログラムグループは、宇宙科学研究所に再統合されるべきである。後述でも参考例を提示するが、輸送系と搭載機が一体となった効率の良いマネジメントを実行する上で、宇宙科学研究所は輸送系に対し、例えば現行の輸送系システムに関する絶えざる改良研究を実施しその実証打上機会を保有するなど、一定の影響力を保持すべきである(このような打上実証の機会では、搭載機の選定には科学技術上の国際協力等も有効に利用しながら、国際市場を取り込む工夫なども期待される)。ただし輸送系の問題に関しては様々な要因を加味した議論が必要であるため、宇宙輸送システム部会と宇宙科学・探査部会の合議による検討を強く希望する。

一方で、これら政策に「翻弄される」参加分野の人間として、我々も政策の動向を理解し対策を講じて行く必要もある。

旧体制下ではいわゆる「文科省のものさし」での価値判断が可能であった。それは大学等で我々が慣れ親しんでいる論文の被引用数であり、人材育成であり、科学技術の推進であり、従来はこれらをもとに価値判断を行い、様々なプロジェクトを遂行することが出来た。言い換えれば、これらの価値を提示することで、新しくプロジェクトを立ち上げることも可能だった。しかし新体制化では、この「ものさし」に対する理解が、関連業界や国民全体に、広くコンセンサスを得るに至っていない。新体制化での新しい「ものさし」に関する議論と浸透が必要不可欠である。

例えば既にリモートセンシングの分野では、改訂宇宙基本計画ではリモセン衛星計画が大幅な後退をしているとして議論が起きている。地球環境の理解や保全には、リモートセンシングによる地球観測が必要不可欠であることが示され、何故その分野にもっと予算が割り振られないか?と宇宙戦略室へ提言を行うべく、既に複数回のタスクフォース会合が開催されている。確かにこの主張には正しい側面もある。リモートセンシングの分野で日本の衛星が多く使われ、今後の気象予測モデルや降雨予測等に対して、国際的にも大きな影響を与えてきたことは、リモートセンシング業界の

「ものさし」で計れば事実なのだろう。しかし一方で、そういった「リモートセンシングのものさし」ではなく、例えば「有人宇宙開発のものさし」と比較してみたときにはどうだろうか?先進各国が宇宙空間に有人の実験室を持つ中、科学技術立国を標榜する我が国がそのような実験室を持たないことは大問題だ。これはISSの存在意義に関する質問をしたときに、とある関係者から聞かれた発言である。この考えも「有人宇宙開発のものさし」で考えるならば、我が国にふさわしい立ち位置を確保するという意味でも、ISSに参加する意義として、一定の説得力を持つと思われる。

「地球環境保全の分野における我が国の尊厳の確保」と、「有人宇宙開発分野における我が国の尊厳の確保」という二つの価値を提示されたとき、それらのどちらに軍配を上げるのか、どのように判断がなされるべきなのか?これが現在、宇宙戦略室や宇宙政策委員会に求められている。「国家視点のものさし」による判断である。両者を比較するとき、共通言語となるのはおそらく「予算額」であり「定量換算されたリターン」である。この「定量換算された」というのがくせ者で、それぞれの業界人にとっては重要と見えることも、外から見ると必ずしもそうは見えてこない。

まずは各々の分野において宇宙開発の「ものさし」が変わったことを理解し、様々な分野を比較して量化できるような「ものさし」に関する提案を行っていく事が必要不可欠であることを理解する必要がある。我が国は既に、収入の倍にも上る借金を抱えている。その中で、他を押しつけてでも実施するだけの価値が自分の提案にはあるのか?このことを提示できない限り、宇宙分野における大型プロジェクトの成立はあり得ない。「国家予算は膨大にあるのだから、その一部を割いてくれてもいいじゃないか」といった甘えが入る余地は既に無い。

宇宙科学・宇宙探査に関しては、宇宙基本計画で「一定規模の資金の確保」と明記されていることを根拠として安心する向きもあるが、これは正しくない。上記の「国家視点のものさし」で判断し、十分と判断された「一定規模」が保障されているだけで、そもそも十分と判断する「ものさし」は我々の「ものさし」が適用されるわけではない。

それではどのような「ものさし」が、普遍的な国家的コンセンサス(国家視点のものさし)としてあり得る

のだろうか？改訂宇宙基本計画では、「宇宙利用の拡大」と「自律性の確保」を基本方針として掲げた上で、「安全保障・防災」「産業振興」「宇宙科学等のフロンティア」を3つの重点課題として掲げている。ここでも「宇宙科学等のフロンティア」が書かれていることに安心する向きもあるが、それも正しくない。まずは基本方針に立ち返り、「宇宙利用の拡大」と「自律性の確保」を考えたときに、この3つの重点課題がどれだけの価値を発揮するのか？を考えるべきである。

「安全保障・防災」「産業振興」が2つの基本方針のどちらも充たすのに対し、「宇宙科学等のフロンティア」は「宇宙利用の拡大」と技術レベルの確保という意味での「自律性の確保」しか充たさない。もちろん技術レベルの確保は重要な課題ではあるが、多くの借金を抱える我が国にとって、「自律性」とはむしろ資金の確保を意味している。実際、改訂基本計画にも「民間需要獲得などにより産業基盤の維持、強化を図る事で、我が国が自律的に宇宙活動を行う能力を保持する」事がクローズアップされて取り上げられていることに留意すべきである。

それでは「宇宙科学等のフロンティア」はどのようにして、この基本方針に対して自らの価値提案を行っていくべきであろうか？筆者は以下のような視点を、今後の提案に盛り込むことが重要であると考え。

#### (1) 産業基盤を支える(マネジメント/インテグレート/専門知識・技術)人材育成

現代型プロジェクトマネジメントは、アポロ計画により飛躍的に向上したとも言われるように、宇宙科学等のフロンティア分野は、この方面に関して実用的な知見が得られる現場でもある。多くの専門家を集めて巨大なプロジェクトを推進する能力、また多くの技術をインテグレートし一つにまとめ上げる能力、そしてそれら一つ一つに関する専門的な知識や技術を身につけた人材を育成することは、今後も革新が続く技術文明社会にあって、産業基盤を維持するのに必要不可欠な課題である。

#### (2) 戦略的技術の開発

個々のセンサー類のみに留まらず、それらを複合的に使うシステムとして、宇宙科学等のフロンティア分野は我が国の将来を支える戦略的技術の宝庫とも言える。これまでは研究開発に特化して取組が行われてきたが、今後は民間利用や安全保

障面での利用も視野に入れたデュアルユースも念頭に置いた開発実用化提案が重要である。

#### (3) 技術の国際標準化、国際市場の獲得

国内だけの技術利用では、その市場規模が小さすぎ、自律的・自立的な宇宙開発を実現し、ひいては我が国産業の起爆剤となるような活躍は望めない。そのため、積極的に技術の国際利用を進めることで国際標準化を成し遂げ、国際市場におけるシェア拡大に務めることは重要である。従来は「最先端のセンサー開発」により我が国だけの探査計画などが進められてきたが、これからは他国ともセンサーを共有し、各国の支出による多くの探査計画の推進によりビッグデータによる科学探査を目指すなど、活動の拡大が求められる。

#### (4) 外交的資産の構築(人的ネットワーク構築・国際的信用の向上)

宇宙科学等のフロンティア分野では、国境を越えた大学・研究機関の連携等が比較的容易に実施する事が出来る。我が国が重要な探査プロジェクト等を海外諸国と共に実施する事で得られる人的ネットワークは、我が国の外交的資産として、非常に重要である。また一方で、我が国の先端的な先行調査・開発は、我が国の国際的信用を向上させるショーウィンドー効果がある。これらも外交的資産として非常に大きな役割をはたしている。しかしこれらの「外交的資産」の定量評価が困難であることも、十分に理解されなくてはならない。「外交的資産」の限界も理解しつつ、この付加価値を獲得する努力が継続されるべきである。

また上述の1~3がいわゆる文部科学省的な予算として配分されるのに対し、4に関してはその意義を定量的に示すことが出来た場合、宇宙戦略に基づく予算としての配分も期待できる(ただし現状では非常に狭き門である)。現行の枠を突破する一つの方策としても、その価値の定量化と、政府に理解を深めて貰う必要がある。

内閣府による宇宙開発体制の整備が進む中、文部科学省の中でも、省内の宇宙開発の方針と評価を実施するために、2012年7月には「宇宙開発利用部会」が設置され、2013年4月には「宇宙科学小委員会」「調査・安全小委員会」が設置された。このような動きに関して、屋上屋を画す動きと捉える向きもある。もちろんその

ような恐れもあるが、文部科学省と宇宙戦略室、宇宙政策委員会と宇宙開発利用部会が密に連携し、文部科学省として宇宙基本計画に則り、上記のような新しい「価値提案」を行っていくのであれば、これらの動きは相反しないと筆者は考えている。

## 5. おわりに

我が国の新しい宇宙政策・体制を考えるにあたり、まず念頭に置くべきは「国民総生産の2倍に相当する借金の存在」であり、「21世紀にも責任有る大国として国際社会の中に存在する意思」の二点である。十分な経済基盤があれば後者の実現は困難ではないが、現状の経済状態では、金の代わりに知恵を絞ることが重要である。

最近、「はやぶさ2」のピギーバック衛星に関する公募が発表されたが、ここに至るまでには様々な議論があった。これは今後の宇宙開発を考えるにあたり、我々が当事者として理解すべき事柄を含んでいるので、その詳細に関して最後に記述しておく。

紆余曲折を経て予算化された「はやぶさ2」は、打上キャリアとしてH2Aを利用することとなった。検討の過程において昨年の早い段階で300kg～400kgの余剰打上能力が生じることが明らかとなったが、この事実はJAXA外には公表されることがなかった。もっともこれは必ずしもJAXAの秘密主義を意味しているわけではなく、今後の検討の過程においてそのような余剰打上能力が減少するあるいは無くなる恐れもあったからだとも考える事は出来る。ただし、JAXA内部(の一部)ではこの余剰能力を使ったある計画の検討も進められていた。

このような事は前例がないことではない。例えば小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」は、H2A17号機により、金星探査機「あかつき」のあいり機として実施された。「IKAROS」は打上時重量310kg、予算総額も15億円にのぼるに係わらず、いわゆる「概算要求」として国家予算上の項目としては出てこない。これらは「運営費交付金」として配分された予算がJAXA内で再配分され、「IKAROS」予算として使用することで実現された。このことは独立行政法人の運営方法としても、また運営費交付金の使用方法としても何ら問題はないし、ここでもそれを問題視しているわ

けではない。むしろ、「あかつき打上時に生じる余剰打上能力が効率的にJAXAによって利用された、全体としてのマネジメントの成功例の一つ。またJAXAに交付された運営費交付金が効率的に使用され、IKAROSという良い成果も産むことが出来た」と解釈しても良いと思う。

しかし今回は、このように良い方向には物事が進まなかった。悪く解釈すれば、「JAXAは『はやぶさ2』打上時に余剰能力が300～400kgも有ることを知りながら、そのことを公表しなかった。これは内部において、その余剰能力を利用する計画が進んでいたからである。しかしその計画は実現可能性に乏しく、納期等の問題もあり結局実現しなかった。結果、『はやぶさ2』の下にあいり機を収納するようにフェアリング内を改修する時期に公表が間に合わず、衛星とフェアリングの隙間(包絡域)に収納できるサイズでしか余剰能力が利用出来なくなってしまった。」と見ることも出来る。このことは、現在の宇宙開発を巡る状況下においては、大いに問題である。

我が国には余分な予算は一円たりとも存在しない。そのような状況下において、我々は最大限、与えられた資源を活用すべきである。もしもJAXAが早期にこの余剰能力に関する公表を行っていれば、惑星間空間という限られた船便しかない貴重なチャンスに対して、最大限の利用を行うことが出来た可能性が大きい。この問題に関して当事者がきちんとした理解をしているのか？という疑念が、今回巻き起こった様々な議論の原因である。

はたしてこの問題の責任者は誰なのか？「はやぶさ2」プロジェクトは、自身のプロジェクトに関して少ない時間の中で最大限の努力を行っている。余剰能力に関する対応はプロジェクトの問題ではないと考えているのも理解できる。輸送手段としてのH2Aは民間企業である三菱重工によって運用されており、打上に関しては完全に「請負」である。「施主」が打上機を贅沢に利用しようが、「請負」が何か言う立場ではもちろん無い。JAXA本体は、もちろんこの打上余剰能力に関して知っていたと思われる。しかしこれは月・惑星探査プログラムグループ(JSPEC)が実施するプロジェクトであり、JSPECから相談(あいり機の公募等提案)が上がってこない限り動くに動けないという判断が働いたのだろう。

かくして貴重な惑星間空間への打上余剰能力が失われる結果が現出した。この事に対して、関係者(あるいは事態を知っていた周辺)の誰もが、自分に責任がなかったと述べている。しかし繰り返すが、そのような無駄を生じさせる余裕は我が国にはもはや存在しないと言うことを、肝に銘じるべきである。今回の事態によって、「宇宙科学等のフロンティア」に従事する当事者にその意識もマネジメント能力も欠如していると理解されても仕方がないと筆者には見える。すくなくとも宇宙政策委員会が感じている「危機感」が共有されていないと理解され、今後のプロジェクト提案や遂行に関して大きな悪影響を与える恐れが大きい。

誰も責任感を感じない。誰も責任を負わない。ただ、予算と資源だけが浪費されていく。この事に対し、政策意志決定者は、非常に冷徹な視点を有していることを忘れてはならない。

筆者は引き続き、「宇宙科学等のフロンティア」の開発に対して重きを置き提案活動を続けていくつもりであるが、学会の諸兄におかれても、このような現状を理解し、今後のプロジェクト提案を実施されることを、強く御願したい。

## 参考文献

- [1] 財務省, 2011, 平成24年度予算政府案,  
[http://www.mof.go.jp/budget/budger\\_workflow/  
budget/fy2012/seifuan24/index.htm](http://www.mof.go.jp/budget/budger_workflow/budget/fy2012/seifuan24/index.htm)
- [2] 文部科学省, 2011, 宇宙開発委員会について(概要),  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/uchuu/aboutsac/  
sac.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/uchuu/aboutsac/sac.htm)

# 火の鳥「はやぶさ」未来編 その2 ～宇宙工学・宇宙探査としての意義～

國中 均<sup>1</sup>

(要旨) 宇宙工学は、宇宙への往來の実現を目指し、技術を切磋琢磨してきた。その成果の端的な例は、「はやぶさ」にて実現された地球～小惑星間往復航行(2003年～2010年)である。それにより、科学や技術分野を越えて、より大きな世界観を得ることができた。次の新しい知見を得るために、科学的な意義はもちろんのこと、「宇宙を自在に往來する独自能力の維持発展」と「人類の活動領域の宇宙への拡大」という宇宙工学・宇宙探査に跨る目標を担い、「はやぶさ2」小惑星探査ミッションが開発中である。

## 1. 宇宙への往來技術

日本の宇宙技術は、故・糸川英夫教授を開祖として1955年ペンシルロケット水平発射から始まった。弾道ロケットは1957年国際地球観測年(IGY)を契機に高度100 kmに到達し、超高層大気や電離層プラズマの研究に供された。さらに技術を進捗させ、ラムダ・ロケットにて1970年「おおすみ」の地球周回軌道投入に至る。さらに射程を伸ばし1985年には、「さきがけ」「すいせい」と2機の探査機がミュー3型ロケットにて太陽周回軌道に投入されて、ハレー彗星の観測を行った。日本のロケット技術は、水平発射から30年間を要して、深宇宙にようやく100 kg級の投入を実現したのだ。しかしこの規模でさえ、各国がこのハレー彗星観測船団に送り込んだ探査機と比較して、まったくもって貧弱と言わざるを得なかった。超遠距離飛行を達成させるため、次にミュー5型ロケットを完成させ深宇宙に500 kgを投入し本格的深宇宙探査に乗り出すことが、1990年代初頭の宇宙科学研究所(以下、宇宙研)の最大テーマであった。我々電気推進工学部門も、栗木・元教授のご指導のもと、ミュー5型ロケットに最適化された電気推進の研究開発を続けていた。元来、宇宙技術は宇宙への往來を実現させるために、

切磋琢磨してきた。故・フォン・ブラウン博士が米国初の人工衛星エクスプローラ1の打ち上げに成功した時、「われわれは宇宙に確固たる橋頭堡を作りました。絶対に手離しません。」と述べたことは、そのことを当に言い表している。宇宙輸送技術は、宇宙への往來

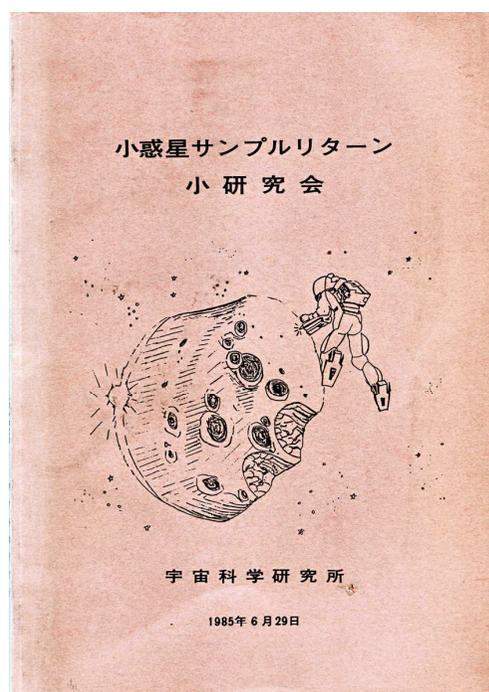


図1：小惑星サンプルリターン小研究会(1985年)冊子の表紙[1]

1. 宇宙航空研究開発機構 月惑星探査プログラムグループ  
地球生命研究所 (ELSI: Earth-Life Science Institute) 併任  
kunikana@isas.jaxa.jp

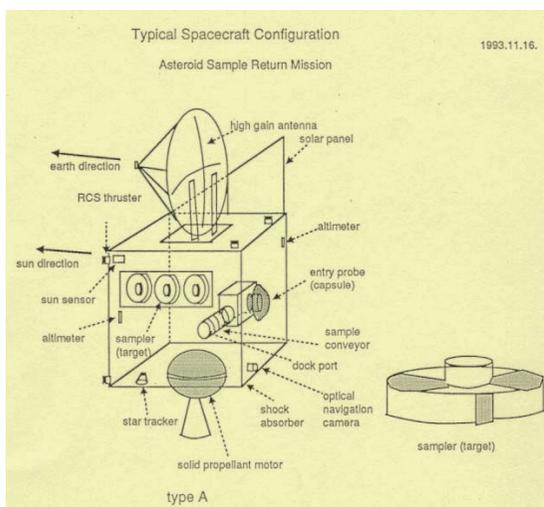


図2：ネレウス小惑星サンプルリターン計画原案(1993年)

を支える橋の基礎であり、永続的に維持発展させる必要があるのだ。

## 2. 小惑星サンプルリターン

「さきがけ」「すいせい」を打ち上げたと同じく1985年に「小惑星サンプルリターン小研究会」[1]という集まりが宇宙研にて催されている。図1にその小冊子の表紙を示す。宇宙飛行士が小惑星に取り付いて、削岩機で表面に穴を開けて標本を取り出して、地球に持ち帰ろうとする様が描かれている。当時の実力からして、到底実現するはずのない崇高な目標であったが、このような未来を拓くために、科学技術研究開発に果敢に挑戦をしていたのだ。その巻頭の文章に鶴田・元所長は、当時のミュー3型ロケットからさらに大型化すれば本格的惑星探査が可能であることを述べた上で、宇宙科学探査の条件として以下を列挙している。

- (1) 科学に新しい視野をもたらすものであること
  - (2) 広範囲の科学者、技術者が情熱を持てるものであること
  - (3) 目標達成の各段階に成果が期待できること
  - (4) 組織的な技術開発により達成可能であること
  - (5) できれば文化史的な意義を持つものであること
- そしてさらに加えて「この条件を満足するであろう目標の一つは小惑星探査」と明言されている。

海外の動向も見逃せない。Johns Hopkins University

Applied Physics Laboratoryの主導する、小惑星とのランデブーを目指すNEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous)計画(1996年打上)は、当時NASAが推進するDiscovery Programの第1ミッションとして選ばれた。このプログラムは“faster, better, cheaper” planetary missionsを標榜するもので、ミッションそのもののみならず方針・精神自体も宇宙研が推進する宇宙ミッション概念と競合する。また、宇宙研とNASAの共同計画として立案された彗星とのフライバイ+サンプルリターンミッション(SOCCER計画)が一旦中止され、その後NASA単独のStardust計画(1999年打上)として実現化して行く。この状況にあって、ランデブーだけ/サンプルリターンだけといった従前の計画では、他国との差別化ができず日本の科学探査ミッションとして採択される可能性は低く、関係者は憤まんやる方ないといった心持ちだったらしい。

ミュー5型ロケット開発が具体化するにつれ、深宇宙探査機の机上検討が開始される。科学領域では火星探査やペネトレータ月探査であり、工学分野では金星気球・月ローバー・小惑星探査[2]であった。これらの中から、技術的成立性があり多くの工学研究分野を包含した科学的価値ある宇宙ミッションが選別され、1993年11月に「ネレウス小惑星サンプルリターン計画90日検討会」が招集され、具体的計画が練られた。その時提案された探査機の原案を図2に掲げる。光学航法カメラ、高度計、ターゲットマーカー、サンプラー、標本移送機構、帰還カプセルと、主要な機器が既に構想されている。抽出された技術的課題は以下であった。

- (1) 無重力下におけるサンプラー機構
  - (2) 通信遅延のため地球からの遠隔操作は効かないので、自動自律性の確保
  - (3) 人工目印を用いた小惑星着陸表面の自動捕捉
  - (4) 深宇宙からの直接リエントリーカプセル技術
  - (5) 高い増速 $\Delta V$ に対応するため、電気推進の利用
- そして、小惑星サンプルリターン法の技術実証を目的として、工学試験機「MUSES-C」として実現化して行く。私は、電気推進イオンエンジン[3]の担当として、本計画に加わり、世界標準とは一線を画した無電極でプラズマを生成するマイクロ波放電式イオンエンジンの宇宙実現に挑戦した。システム設計・電気推進機器設計・耐久試験設備の建設・耐久試験・フライトモデル製造試験・宇宙機組み立てと順調に進んだ[4]~[6]。

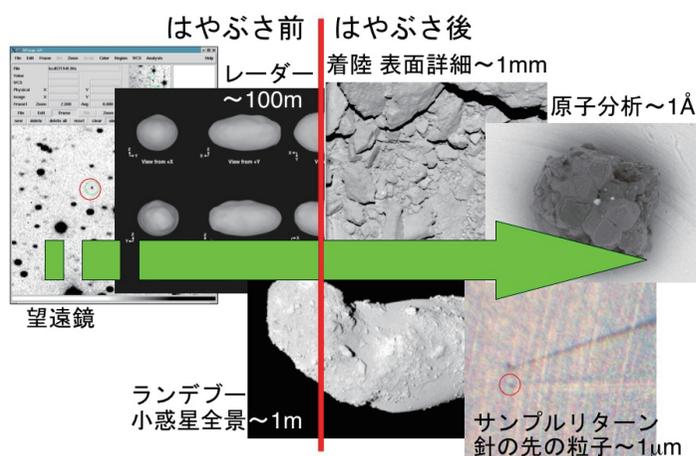


図3：「はやぶさ」による観測分解能の改善経緯(2003年～2010年)

地上において2年半を要する2万時間の実時間耐久試験を2度実施して、宇宙運用に備えたことを特記する。小惑星科学の側面からは、藤原・元教授の述懐[7]を参照されたい。

小惑星着陸とサンプルリターンを目標とするMUSES-C改め「はやぶさ」は、野心的な工学の粋をたった500 kgのボディーに最適化して詰め込んで完成し、2003年深宇宙投入された。各技術や各担当がバトンを繋ぎ難難辛苦を乗り越えて、7年を要して惑星間往復航行を達成し、リエントリーカプセルが大気を突破し地球帰還を果した。技術的な観点から、図3に示すような order of magnitude の技術革新を主張したい。「はやぶさ」以前では、望遠鏡やレーダーしか小惑星の観測手段はなく、その空間分解能は100mがせいぜいであった。「はやぶさ」がランデブーや着陸を果たした時、それは1mや1mmに改善された。採取された小惑星試料は、顕微鏡を介してミクロン級でその姿を現した。原子レベルの分析は、オングストームの精度に至る。両者とも〇で囲む点にしか過ぎないが、図3の最左と最右の写真は隔世の技術差を示している。「小惑星サンプルリターン」が有効な観測手法であることを世界に知らしめた。「はやぶさ」の地球～小惑星往復探査は、科学や技術の範囲を越えて大きな社会反響をもたらした。それは前述鶴田・元所長の25年前の指摘の通りであったと言えよう。

### 3. 宇宙探査

宇宙技術の利用は、天文観測、超高層／磁気圏観測、無重力利用、地表観測、気象観測、放送、通信、測位...とたいへん広範囲に及ぶ。さしずめ前半が科学、後半が衛星利用となろう。技術が進歩・成熟し、今度は次の新しい領域に向かわんとしている。それは、地球を離れ太陽系宇宙に乗り出し、人類の活動領域を拡大させるとともに、地球に還元させる活動：「宇宙探査」(Space Exploration)である。まずは、「何処に何があるのか」を調べるため、宇宙探査から取り掛かろう。人間が直接行か、ロボットでやるか、それらは手段なのでどちらも「あり」だが、順当にはロボットが斥候で、後から人が行くのであろう。「かぐや」や「はやぶさ」は、斥候として事前に探ってくるロボット探査の典型と言える。

「かぐや」のリモートセンシング・データは、科学的意味合いは当然として、国家戦略的意義がもっと重視されるべきだ。「月の何処に何があるのか?」、「着陸し安い平らな場所は?」、「そこから興味のある地点まで陸路で進むために起伏の少ないルートは?」、「太陽電池を動力源にするため、地形に依存する日照時間は?」といった課題に答えを出せるデータ群である。将来想定される資源探査や利用または国際協力のため、日本の財産と言えらるだろう。他国も盛んに月のデータを集めている事実を指摘したい。

「はやぶさ」が先鞭を付けた「小惑星サンプルリターン法」へは、各国からの追従が著しい。NASAは小惑星ベンヌ(1999RQ<sub>36</sub>)からの標本採取のためOSIRIS-REx探査機の2016年打上を準備しているし、ESAもMarcoPolo-Rミッションを企画中である。決して、日本の独壇場ではない。

小惑星に関しては、先日ロシアでチェリャビンスク隕石(直径17 mと言われる)による被害があった。もしももっと規模が大きければ、地球気候に変動をもたらして恐竜絶滅級の被害を彷彿とさせる。小惑星衝突は当に自然災害であり、これに対する予知と回避策を具体化させる必要がある。観測網を充実させればより小さな小惑星の軌道が特定できて、地球への接近や衝突の予測が可能となる。さらに進めて、衝突の可能性のある小惑星の軌道を能動的に変更することも想定しなくてはならない。またこれに関連のある話題として、米国オバマ大統領が提唱する「小惑星有人探査」に呼応するように、10 m級小惑星を捕獲して月周回軌道に投入して、宇宙飛行士による標本採取を行うミッション(NASA Asteroid Initiative) [8]がつい最近、米国にて提案された。MPCVオライオン宇宙船から、捕獲された小惑星に宇宙飛行士が乗り移る想像図は、図1に重なって同一にさえ見える。「到底実現するはずのない崇高な目標」が人類の手中範囲に見えてきたのかもしれない。これらを実行するに当たっては、小惑星に対する詳細な知識が不可欠だ。特に10 mとか100mとか、宇宙規模からするとたいへんに小さな小惑星がその対象範囲となる。「はやぶさ」が到達した小惑星イトカワ(1998SF<sub>36</sub>)は差し渡し500 mで、人類が間近で詳細観測したもっとも微小な天体である。日本は、他国に先んじて微小小惑星への往復能力と知識を有していると言える。

この日本先取のトレンドを維持・発展させるため、「はやぶさ2」が現在開発中であり、小惑星1999JU<sub>3</sub>からの標本採取を目指している。私はこのミッションに3つの大きな意義があると考え、一つ目は、この目標小惑星は、S型イトカワとは異なる組成のC型であり、水や有機物を含む可能性が指摘されている。標本を直接分析して、太陽系宇宙の生い立ちや生命の起源に肉薄できれば“宇宙科学”を前進させられるだろう。詳細な解説は、本シリーズ前稿[9]に譲る。二つ目は、「はやぶさ1」ではたくさんの故障を起こしたけれど、

これを克服してより完全な探査機を実現させるという“宇宙工学”上の目標がある。深宇宙探査にはこれまで、「ひてん」「LUNAR-A」「かぐや」(月)、「のぞみ」(火星)、「はやぶさ」(小惑星)、「あかつき」(金星)とたくさんの挑戦を行ってきたが、決して成功率は高くないのである。三つ目には“宇宙探査”の意味合いにあって、日本が地球～小惑星間を往来する独自能力を永続的に保有することにある。日本の国力からして全領域で宇宙探査を展開することは到底できないが、少なくとも日本が先鞭を付けたのだから「小惑星サンプルリターン法」を維持・発展させる根拠と地の利がある。探査技術とそれによりもたらされる知見は日本の財産であり、国際社会への存在感(presence)の証だ。その知識を隕石衝突回避や小惑星有人探査などに還元して世界協働宇宙活動に貢献しつつ、もっと先の将来の小惑星資源利用を射程範囲とすれば、日本の独自性や利益を保ちながら世界から一目を置かれ尊敬される立場を得られるはずだ。

衛星業界にはスラングとして衛星を「星(ほし)」という言い方がある。イオンエンジンを駆る「はやぶさ」「はやぶさ2」は敢えて「船(ふね)」と呼びたい。この宇宙船で太陽系宇宙という大海原に乗り出し、人類の活動領域を広げるのだ。純粋科学とは異なる視点で文章をまとめたことをお許し頂きたい。

## 参考文献

- [1] 「小惑星サンプルリターン小研究会」, 1985, 宇宙科学研究所.
- [2] 中谷一郎, 齊藤宏文, 川口淳一郎, 平成3年, 科学衛星シンポジウム, 99.
- [3] Kuninaka, H. and Satori, S., 1998, *Journal of Propulsion and Power* 14, 6, 1022.
- [4] 國中均, 1998, 日本航空宇宙学会誌 46, 530, 174.
- [5] Funaki, I. et al., 2002, *Journal of Propulsion and Power* 18, 1, 169.
- [6] 船木一幸, 國中均, 1999, 日本航空宇宙学会誌 47, 550, 411.
- [7] 藤原顕, 2012, 日本惑星科学会誌 21, 2, 168.
- [8] [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/asteroids/news/asteroid\\_initiative.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/asteroids/news/asteroid_initiative.html)
- [9] 渡邊誠一郎, 2013, 遊星人 22, 1, 23.

# 日本惑星科学会特別賞の授与について

第11期会長 渡邊 誠一郎<sup>1</sup>

2012年12月、運営委員会は、飯島祐一会員<sup>2</sup>(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)に対し、月周回衛星計画SELENE(かぐや)をはじめとする固体惑星探査における貢献、特に、ミッション系の役割の開拓と確立に関する卓越した貢献を高く評価し、日本惑星科学会特別賞を授与することを決定しました。

飯島氏は、名古屋大学において惑星形成に関する衝突実験で学位を取得後、1997年、宇宙科学研究所(ISAS)にCOE研究員として着任し、翌年に助手となりました。当時は日本の固体惑星探査の黎明期で、飯島氏は着任直後より、水谷、鶴田、佐々木、加藤各教授のもとで、SELENEの科学目標の設定、搭載機器の選定・統合を進め、提案書にまとめました。SELENEは、当時別機関であったISASと宇宙開発事業団(NASDA)の初の合同ミッションであり、科学と実用という目的の異なる衛星開発の文化を融合して、最先端の科学探査を高い信頼性で実現するという、きわめて難しい計画でした。

飯島氏は、サイエンスチームにとどまらず、システムチームに入って、搭載観測機器と衛星バスシステムの接続を媒介する“ミッション系”として、科学的成果の最大化に心血を注ぎました。当時は、ミッション系の役割はコミュニティにはほとんど認識されていませんでしたが、飯島氏は黎明期にある固体惑星探査にこそミッション系は不可欠であると確信し、その役割を開拓し、その業務の遂行に使命感と厳しさを持って当たったのです。

飯島氏は、電気・熱・テレメトリコマンド・高圧電源回路などの設計基準について、ISAS科学衛星経験

者にインタビューし、NASDA方式の基準と丹念に比較して、両者を調整した基準書を策定しました。また、衛星試験や運用体制、審査会、さらには噛み合わせ試験やプロトフライト試験においても、科学衛星の方式を積極的に取り込み、特に現場主義を徹底させました。さらに自動化自律化試験や運用上負荷最大試験など実運用模擬試験をシステムメーカーと協力して実施し、机上検討のみでは発見困難な不具合をいくつも洗い出しました。

SELENEにおいては、感応性の高いLRS(レーダサウンダー)とLMAG(磁力計)を搭載するため、従来よりもずっと厳しいEMC(磁場、電界放射、表面電位など環境)対策が必要とされました。これに対しても、飯島氏は、磁場に関してはLMAGセンサ位置で残留磁場0.02 nT、磁場変動0.006 nTの制約を、電界放射に関しては一般的な探査機が採用している基準(MILスタンダード)に対して3桁以上厳しい規制値を設定しました。そしてその実現のため、磁性体の識別、電流ループの排除、大電流回路の識別などのガイドラインを設け、すべてのコンポーネントに設計段階から発生磁場低減対策や電源フィルター強化、検証項目を設定して開発を進め、コンポーネント間インターフェイス回路の調整、パネル間インピーダンスの低減なども行いました。また、衛星の試験環境をメーカーと共同で整備し、筑波宇宙センター電波試験棟にて実施された試験では、試験システムGNDの工夫や衛星電源装置と配電盤の徹底した分離などを実施し、高いEMC基準を検証できるレベルを整えました。この結果、

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

2. 飯島祐一氏は病氣療養中のところ、2012年12月7日にご逝去されました。飯島氏の惑星科学界に対する貢献に深く感謝するとともに、謹んで哀悼の意を表します。

SELENE衛星はサイエンス要求を満足する大型衛星としては世界トップレベルのEMC性能を達成したのです。

その他にも3つのCPUを同時実行させて多数決処理を行わせるオンボードコンピュータをメーカーと共同開発し、テレメトリコマンド回路の冗長化、カレントリミッタ回路の検証、EMC・放射線対策など、宇宙使用での信頼性に重点を置いた開発を行いました。このオンボードコンピュータは、「はやぶさ」やINDEX衛星などでも採用されました。また、データ処理系の自律化運用機能の検討、開発費の調整・予算要求・契約などのマネジメント作業も担当し、各観測機器の運用要求の取りまとめとガイドラインを作成し、初期の地上系の整備も行いました。また、ミッション系として飯島氏とともに作業を行った若手に多大な影響を与え、その後のプロジェクトを担える人材に育てました。

以上のように、飯島氏の取り組みは、SELENEミッションのあらゆる要素におよびながら、科学成果の最大化、観測データの高品質化、リスク耐性の強化という科学衛星の本質の見地から、一貫して厳しくかつ献身的なものでした。しかも、衛星の制約やプロジェクトのリソースなども充分に考慮し、必要な時は事前確認の試験を行い、常に成立性を意識しつつ取り組ん

でいました。

SELENEは、2007年9月に打ち上げられ、2009年6月に制御落下させるまでの間、計画された観測を成功裏に行い、日本の固体惑星探査機としてはじめて世界に発信できる本格的で大量の科学データを生産し、2012年末現在120本以上もの研究論文が発表されています(図1)。この成果は、飯島氏の貢献なくしてはあり得なかったといっても過言ではありません。

飯島氏はその後も、固体惑星探査計画を支えながら後継の育成に全身全霊を傾け続けました。SELENE-2計画では、ミッション系の立ち上げに大きな貢献をし、技術面でも懸案事項であった月面着陸機における越冬に関して、月レゴリスとの熱的結合による画期的な保温方式を用いたサバイバル・モジュールを考案し、大きなブレイクスルーとなりました。また、小惑星探査機「はやぶさ2」においても、理学的な位置づけが曖昧であるとの厳しい指摘がなされていた中でミッション系を立ち上げ、科学的にその内容を再構成する重責を担いました。飯島氏の蒔いた種はSELENEという最初の芽吹きだけでなく、仕事をともにした同僚や育成された多くの若手後継者を通じて、これからの日本の惑星探査を支える太い幹となっていくことは間違いないでしょう。

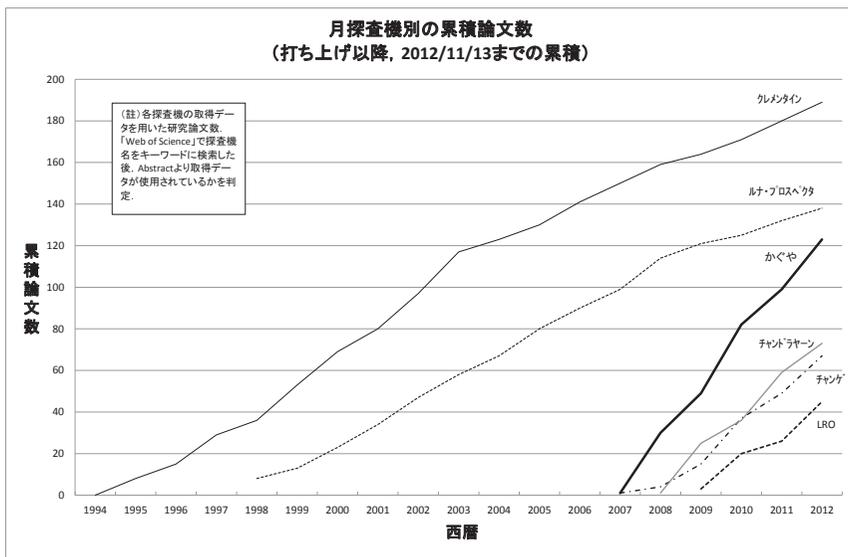


図1：月探査機別の累積論文数。

## 「太陽系探検ガイド —エクストリームな50の場所—」

David Baker and Todd Ratcliff著(渡部潤一, 後藤真理子 翻訳)

朝倉書店 ISBN: 987-4-254-15020-9

発行日: 2012/10/20 価格(税込): 4725円 296頁

関口 朋彦<sup>1</sup>

本書は“The 50 Most Extreme Places in Our Solar System (2010)”の翻訳である。著者のDavid Bakerはアメリカ・オースティン＝カレッジの物理学科長(教授)で、専門は環境物理、惑星物理、物理教育、地球システム科学教育となっている。『鑑訳者のまえがき』によれば執筆時には准教授であったようだ。もう一人の著者であるTodd RatcliffはNASAジェット推進研究所・地球ダイナミクス部門所属の研究者であり惑星地球物理学者となっている。

取り上げられた題材はすべて太陽系の「エクストリーム」に的を絞っており、ひじょうに最近のトピックスやそれらの画像が取り上げられ「探検ガイド」と名打ってはいるが、当然ながら「地○の歩き方」とはかなり趣の異なるガイドブックである。

アメリカ人であるからであろうか、文面がキザだったり、あるいは前書きに(加えて謝辞にまで)この本がいかにおもしろいかスゴいかという自賛を謙虚さなしに表現してあるのはご愛嬌。

本書の「エクストリーム」であるが、元々の構想が、地球の気象現象の議論の際にその議論の発展延長上にあった「エクストリーム」を表現しているらしく、『著者前書き』には、著者ら自身が欲していた「太陽系で一番エクストリームな場所はどこだろう?という問に答えてくれるような本」は、誰かが書かなくてはならないんだ、とか、「読者をあつと言わせ、クールで魅力的で『惑星科学の道へ進みたい』と思わせる内容が書かれている本」を作りたいんだ、とか、まったく別次元の話であるように思えてしまうような種々の熱く暑い思いが綴られている。

ペーパーバックであるが、一目にキレイな図柄の表紙が被せてあって、専門的な正確性を保ち、

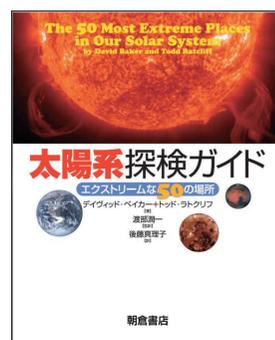
- ・約4ページで1トピックを扱う
- ・紙面の半分は図
- ・個々の項で内容が

自己完結している

ことが意図されており、そこには本物の撮影画像に加えて、ポンチ絵や想像図が多用されており、ダイナミクスを専門とする著者であるからだろう、実際の地球上の地形や地球の気象現象などとの対比も多く、表層運動の図などには必ず模式的な運動方向の矢印が描き込まれ、動きが目で見えて理解できるように工夫されている。用語集、参考文献もしっかりしている。

翻訳にやや不自然な日本語であるように感じられる部分もあるが、それは科学書籍における正確性を重要視する限りにおいて致し方ないと言ったところ。土星のミマスの章などには「おっと!痕が残るじゃないか!—衝突クレーター」という見出しになっており、訳には随所に工夫と苦勞の痕が見られる。

点数(星数)を5点で付けるとすると4星点か、そのマイナス1点は価格。「ちょっと読んでみよう」として買うには4,500円はやや高い。しかしながらこれも本書の多数のカラー画像を採用している故か、本の値段を減点対象とするのは、いささか酷なのかもしれない。(ちなみに某オンライン書店での原著のレビューでは4人とも5星でした。)



1. 北海道教育大学 旭川校  
sekiguchi.tomohiko@a.hokkyodai.ac.jp

## New Faces

### 鷲生 有理(岡山大学地球物質科学研究センター)

皆様こんにちは。岡山大学地球物質科学研究センターの鷲生有理(しまきゆうり)と申します。2012年12月に名古屋大学環境学研究科において、荒川政彦教授(現 神戸大学)と古本宗充教授のご指導の下、学位を取得しました。博士論文のタイトルは「Experimental Study on the Formation of Icy Planetesimals by Coagulation of Ice Dust Aggregates and the Evolution of Icy Bodies by High-velocity Impacts in the Solar Nebula」です。私はこれまでに太陽系氷天体の起源と進化を明らかにするべく、高空隙率氷ダスト集合体を用いた低温室内での衝突実験を行い、氷ダストから氷天体への衝突成長過程について研究を行ってきました。今回New Faceを書く機会を頂き、研究室配属からの6年間を振り返ってみると、研究者としての第一歩を踏み出せたのもこれまでにご縁のあった様々な方のおかげだと感じております。そこで本稿では、私のこれまでに振り返りつつ、皆様に御礼申し上げたいと思います。

私が惑星科学の研究者になったのは、新宿高校で受けた高畑早苗先生の地学の授業がはじまりでした。大学受験を前にして、当初は漠然と宇宙に携わることを生業にしたいと思い、都立大の航空宇宙工学科を志望していました。しかし、何気なく受講した地学の授業では、高島屋へ行って大理石の壁からアンモナイトを探したり、10億分の1のミニチュア太陽系を持って校庭に並んだり、身近に体感できる地学の楽しさを知りました。これを機に地球科学を学びたくなり、名古屋大学理学部へと進学しました。

名古屋大学の地球惑星科学科では地質調査や地球化学など一通りの地球科学を堪能しましたが、卒論では宇宙をテーマにしたいと思い、地球惑星物理学講座を選択しました。手を動かす実験が楽しそうだと思います。

shimaki@cc.okayama-u.ac.jp



「実験」で「惑星」な荒川先生に弟子入りを希望したところ、「え、きみ、実験希望なの?」と驚かれたのをよく覚えております。ともあれ、いくつか提案されたテーマのなかで興味を惹いたのは、氷(雪)の衝突実験でした。これは世界的にも類の無い研究とのことで、それならばやれるだけ挑戦してみようと決意しました。この6年間を通じて、荒川先生には惑星科学と雪氷学、装置設計、実験屋の心得など本当に多くのことを学ばせて頂きました。H<sub>2</sub>O氷は太陽系に広く存在する物質ですが、水分子の強い極性のためにその性質は普通の鉱物とは異なります。そのため惑星科学と雪氷物性の両方を学ぶことになり、大変苦労しました(どちらもまだ半人前ですが…)。実験は氷が扱える低温室で行う必要があるため、北海道大学の低温科学研究所で行わせて頂きました。卒論を始めたころは荒川先生と保井みなみ助教(現 神戸大)とともに、南極越冬隊のような防寒着を着て低温室に入り、装置を組み立て、氷試料を準備し、寒さに耐えながらひたすら実験を行いました。おかげで、冬場は低温室から雪の積もった屋外に出ると温かく感じるほどでした。結局、学位を取るまでに1-2週間の実験を通算19回通わせていただきました。その際には低温科学研究所の山本哲生教授、香内晃教授らの研究グループと技術部の皆様には大変お

世話になりました。

名大・地物講座では古本宗充教授、渡邊誠一郎教授、吉田茂生准教授(現九州大)、桂木洋光准教授、城野信一助教、諸田智克助教ら個性的な教員に叱咤激励を頂き、またパワフルな先輩・後輩達に恵まれ、刺激的な研究生活を送ることができました。特に、惑星科学だけでなく地震学や地球内部物理、気候変動など多様な研究が身近にあったおかげで、自分の研究だけに閉じず、耳学問として色々な分野に興味を抱くようになりました。今思い返すと、タフで粘り強い研究室の雰囲気良かったのだと思います。

博士課程2年次からは、荒川先生が神戸大学理学研究科へ異動されたのに伴って研究委託させて頂き、中村昭子准教授、鈴木絢子博士と実験惑星科学分野の院生たちとともに衝突漬けの日々を過ごしました。学位取得記念に後輩達から貰ったDoctor hutは一生の宝

## 川村 太一(パリ地球物理研究所)

みなさまこんにちは、そしてはじめまして。川村太一と申します。2012年3月に東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻で博士号を所得し、現在はパリのInstitut de Physique du Globe de Paris(IPGP)でNASAのInSightミッションの研究員として火星を目指して研究に励んでいます。学位を所得してからすでに1年以上がたっており、New Faceなどと言われると気恥ずかしい気もしますがご縁があり、執筆させていただくことになりました。せっかくの機会ですのでこの業界を目指したきっかけ、大学院での研究、今の所属に至った経緯などをお話出来たらと思っています。

### 驚きとワクワクを提供してくれる科学に憧れたあの頃…

「Jurassic Park」や「Apollo 13」小学生の頃映画の中の科学の世界に魅了され、「科学者」に憧れていた僕が惑星科学に興味を持ったのは高校生の頃でした。高校では幸運にも地学の授業があり太陽系の姿、地球型、

物です。また、惑星科学会分科会の衝突研究会を通して、CPS衝突実験実習、TV会議システムを用いた衝突勉強会に参加し、「天体の衝突物理の解明」研究会を通じて実験、理論、観測といった様々な分野の研究者と知り合えたことは貴重な財産になっています。

この春からは、研究会でご縁のあった国広卓也准教授からお話を頂き、鳥取県三朝町にある岡山大学地球物質科学研究センターの研究員として隕石の物質科学的研究を行うことになりました。偶然にも、2013年2月にロシアへ落下したChelyabinsk隕石の分析に携わることになり、エキサイティングな日々を過ごしております。今までとは異なる研究手法と環境に戸惑いもありますが、田舎暮らしを満喫しつつ、氷と衝突を軸として太陽系小天体の進化履歴に迫るべく挑戦して参ります。皆様、今後ともどうぞ宜しくお願い致します。



木星型惑星の成り立ちの違いなどについても学ぶことができました。当時の僕は惑星の異なる姿やその成因の違い等の基本を学び「こんなことがわかるなんてすごい!」と感動したものでした。大学では是非こんなことを勉強してみたい、と思うようになりました。

念願が叶い、東京大学理学部地球惑星物理学科に進学することができました。東大地惑では基礎の物理はもちろん、解析、プログラミング、実験の基礎、色々なことを学び、今振り返っても当時習ったことは大事な財産になっているな、と感じます。そんな中、月に

興味を持ち始めました。きっかけは惑星科学が対象としている天体の中でも比較的近い、空を見上げればすぐに見つけられる、と言った程度だったのですが学部演習の月面大気分光観測や月面の衝突現象の観測などを通して月や月—地球システムに興味を持つようになりました。地球に対して非常に大きな月は地球への影響も大きいはず、月を知ることは地球のことを知る上でも重要なのでは、と単純に考え、大学院では月の研究がしたいと考えるようになりました。

## 宇宙研での研究、そしてフランスへ…

大学院では宇宙研の固体惑星研究系で学生生活送ることとなりました。当時は月探査衛星「SELENE」の打ち上げの直前でした。月探査ミッションをやっている時に宇宙研にいれる、なんて経験はなかなか出来ないのではないのだろうか、と考えた僕は宇宙研への進学を決めました。進学から打ち上げまでは数ヶ月あり、その間は基礎の勉強をしながら過ごすつもりだったのですがふとしたきっかけで月震波解析をやることになりました。当初は打ち上げまでの演習のつもりが、気がついたらそちらがメインの仕事になるということに、今思うと不思議なご縁だと思います。今となっては「惑星地震学」という分野の魅力に魅せられ、月の地震、そして火星の地震へと興味の幅を広げていくことになりました。

アポロ計画により地球以外で唯一地震活動のネットワーク観測が行われた月では月震波解析は内部構造推定の重要な手段として用いられています[1]。月の内部構造は月の全球組成や月内部の熱史に対する重要な制約となる、月の起源や進化を考えるにための重要な情報です。月震波解析は月の内部の地震波速度、内部構造の定量的な推定を実現し、月科学に置ける重要な知見をもたらしてきました。

僕の基本的な研究テーマは「アポロの月震データを新たな視点で解析することで月震学に残された謎にどこまで迫れるか」ということです。その中でも大学院での研究では主に以下のテーマに取り組んで来ました

月の裏側でも月震は起こっているのか。月震の活動度は月面で一樣か。

月震が起こるメカニズムはどのようなものか。月震データから明らかになる月面衝突の性質

はどのようなものか。

アポロの観測では特定された震源のほとんどが表側にあると推定されました[1]。そのため月の表側に設置された観測ネットワークで観測された月震波の波線は月の深部まで達せず、月の深部の構造は地震学的には観測ができていません。月の裏側の震源を探ることは全球的な月震活動度を知る上でも、月の深部の構造を知るためにも重要なテーマであると言えます。月震には主に深発月震と浅発月震がありますが共に詳細な発生メカニズムについては明らかになっていません。月震の発生機構は震源領域の応力場、物質の状態に支配されるため、月の内部の状態を知る重要な手がかりになると言えます。隕石衝突は地球の地震学での研究例は少なく、月震、惑星地震学における特徴的なテーマだと思います。特に月のように大気の薄い天体では隕石衝突は重要な震源の一つであり、月震データに残された隕石記録は、現在の月面衝突の記録として有用だけでなく、メートルスケールの大規模な衝突実験としてもとらえることが出来ます。

約5年間そのような謎に迫るためにいくつかのテーマで研究をしてきました。アポロ17号の月面重力計を利用した月震波解析では新たな月の裏側の震源の同定に成功し、月の裏側と表側で活動度に大きな差がない可能性を見いだしました[2]。震源メカニズムの推定のためにはアポロに搭載された短周期、長周期の月震計のデータを組み合わせることで仮想の“広帯域”月震計を作り、得られた月震波シグナルのスペクトルから深発月震の応力降下量、地震モーメントの推定を行いました[3]。複数の震源で発生した約60のイベントについて推定を行うことでより一般的な月震に震源の姿を明らかにすることに成功しました。また、月震データに残された隕石衝突の記録から月面の衝突イベントの前面-後面不均質性が小規模の近年の衝突イベントでも存在していることを示し、cm~mサイズの衝突体の月面への衝突速度を推定しました[4]。月震記録が衝突履歴の記録としても有用であることを示したことは今後の月震観測の可能性を広げることもつながったと考えています。多くのテーマに取り組み、そのたびに多くのことを学べた非常に充実した研究生活であったと感じています。

このようなテーマに取り組み、宇宙研で研究をしていた僕に転機が訪れたのが修士論文提出の数週間前のこ

とでした。偶然宇宙研で行われていた宇宙研とフランスのIPGPの合同ミーティングで重力計を利用した地震波解析や新たに特定した裏側の深発月震について発表することになりました。修論提出の数週間前ということもあり睡眠不足に準備不足という状態で英語の発表をするという無謀な状況だったのですがそれがきっかけとなり、博士課程1年～2年にかけて約1年間、フランスのIPGPで研究をすることになりました。最悪のコンディションでも発表はしてみるものだとこの時から思いました。フランスで過ごした1年間は非常に刺激的な1年となりました。研究テーマとしては新たに月震の震源メカニズムの研究に着手し、研究としての幅も広がったと感じています。そしてなにより、海外で日本とは全く違う環境で研究が出来たのは非常に有益だったと感じています。所属していた研究室はフランス人以外のPD、留学生も多く、刺激的な環境で研究をすることができました。海外の学会への参加の機会が増え、様々な国の研究者と交流できたのもいい経験となりました。日本に戻り、日本、フランスでの研究結果をもとに、2012年3月に無事学位を所得することができました。

## 就職、再渡仏

学位所得後、PDの職が見つけれなかったこともあり、僕は民間企業に就職しました。そこではある商品がどのくらい売れるかを予測するシステムやアルゴリズムを考える、という仕事を担当させていただき、惑星科学とは違う世界を垣間見ることができました。今まではあまりなじみのなかった経済や社会、商売の仕組みを学ぶことは好奇心を刺激され、さらにそれを実際の社会で実現されているのを見るのは非常に興味深かったです。

「経済のモデリングもなかなか面白いしこういう仕事も悪くないな」と思い始めた僕に改めて転機が訪れました。フランスの研究室から「InSightのミッションで働くPDを探しているんだけどフランスに来ないか」というお誘いをいただきました。InSightはNASAのDiscoveryミッションで地震観測を含めた火星での地球物理探査を目指すミッションです[5]。火星地震計はVikingに搭載されていましたがその際は風の影響や設置に問題があり、火星地震のデータに関して有

用なデータを得ることは出来ませんでした。InSightはVikingでの問題も考慮し、初めての火星地震の観測を目指しています。ミッションの話聞いた時に素直に面白い、と感じました。また、大学院でやった研究についてももっと深められるのではないかと、という思いもあり、退職し、アカデミックの世界に戻ってくることを決意しました。現在は渡仏し、パリのIPGPでミッションの仕事と自分の研究に取り組む毎日です。ミッションの仕事や地震計の開発については始めて学ぶことも多く、刺激的な毎日を送っています。

## 最後に…

色々と遠回りしてきましたが現在は充実した日々を過ごしています。ここにいたるまでに非常に多くの方々に助けられてきました。特に宇宙研の田中智准教授、小林直樹助教、IPGPのPhilippe Lognonné教授には学生時代から今日まで様々なご指導をいただきました。この場を借りてお礼を申し上げたいと思います。ミッションに取り組むというのは研究をするのとはまた異なった取り組みが必要だと感じることもあり、毎日が勉強です。このように海外のミッションで仕事をする、ということは貴重な経験だと感じており、一つでも多くのことを学べればなと思っています。できることならば、ここで学んだことを活かして、日本でもミッションが出来れば、と思いながら現在は頑張っています。まだまだ若輩者ですが日本、そして世界の惑星科学の世界に少しでも貢献できればと思っています。みなさま、今後ともよろしく願いいたします。

- [1] Nakamura, Y., 1983, *J. Geophys. Res.* 88, Issue B1, 677.
- [2] Kawamura, T. et al., 2010, 41<sup>st</sup> LPSC, No 1522, p 1766.
- [3] Kawamura, T. et al., 2010, AGU Fall Meeting 2010, abstract #U41A-07.
- [4] Kawamura, T. et al., 2011, *Geophys. Res. Lett.* 38, Issue 15, CiteID L15201.
- [5] <http://insight.jpl.nasa.gov/home.cfm>.

# 2013年秋季講演会のお知らせ

2013年度日本惑星科学会秋季講演会実行委員長(国立天文台LOC) **渡部 潤一<sup>1</sup>**

本年度の日本惑星科学会秋季講演会を沖縄県石垣市民会館において開催いたします。本講演会は日本惑星科学会が主催し、国立天文台後援の下に開催されます。未だ検討中の事項もありますが、以下では2013年5月初め時点での予定をお知らせします。詳細については本会ホームページ <http://www.wakusei.jp/> 上に随時掲載します。大学などにおいては学期期間中の平日での開催ではありますが、多数の皆様の参加をお待ちしております。

## 1. 日程と会場

### ●日 程

2013年11月20日(水)～22日(金)

11月21日(木)に総会と懇親会、および今年度の最優秀研究者賞受賞講演を予定しています。

なお、11月23日(土・祝)に一般者向けの講演会を予定しています(第7項をご参照下さい)。

### ●講演会場

石垣市民会館

〒907-0013 沖縄県石垣市浜崎町1丁目1番2

(受付は1階、講演会場は大ホール、ポスターセッション会場は1階ホワイエ)

本会ホームページの秋季講演会の案内ページに地図があります。

### ●懇親会

ホテルミヤヒラにて11月21日(木)18:30～20:30に行う予定です。

## 2. 発表要項

### ●発表資格

著者に本会の会員を含むこと。

### ●発表形式とプログラム編成

口頭発表またはポスター発表。

今回の秋季講演会でもポスター発表を充実させたいと考えていますので、積極的なご応募をお待ちしています。但し申込数の関係で、発表形式のご希望に添えないことがあります。原則として、同一の方が第一著者として複数件発表される場合、口頭発表は1件までとさせていただきます。発表の採否も含め、プログラム編成については実行委員会が最終的に決定します。予めご了承下さい。

### ●口頭発表

1講演につき10-12分程度(質疑応答含む)を予定しています。スクリーンを1面、液晶プロジェクタを1台利用可能です。

### ●ポスター発表

ポスターセッションを設けます。ポスター会場は講演会場1階のホワイエとなります。一人当たりのポスタースペースはA0用紙を縦貼りできるサイズを予定しています。

### ●最優秀発表賞セッション

本講演会において第一著者として発表する博士学位を有していない学生会員は、最優秀発表賞に応募できません。最優秀発表賞セッションに採択された発表者には口頭発表とポスター発表の両方を行っていただきます。別途定める今年度の要項に従ってください。詳細は本会メーリングリスト(oml)および本会ホームページ

1. 国立天文台天文情報センター  
aloc@wakusei.jp

ジでお知らせします。

### ●予稿原稿

本会ホームページに記載された指示に従って下さい。なお、インターネットが利用できない方は「8. その他」の項をご覧ください。

### 3. 参加および発表の申し込み方法

本会ホームページよりお申し込みください。申し込みには事前参加・発表・予稿原稿の三段階の登録手順があり、すべて本会ホームページ上で行います。これらの登録には次の(1)(2)の両方が必要となります。(1)本会の会員番号もしくは非会員登録番号、(2)本会ホームページに会員または非会員としてログインするためのパスワード。本会への新規入会登録および非会員登録も本会ホームページから行ってください。なお非会員登録には一日以上、新規入会登録には二週間以上かかりますので、発表申し込みを予定されている非会員の方はできる限り早目に登録手続きを開始してください。

### 郵便振替口座 振込先

口座記号番号：00160-8-600275

口座名称(漢字)：JSPS国立天文台LOC

口座名称(カナ)：

ジェイエスピーエスコクリツテンモンダイエル  
オーシー

他銀行等からの振り込みの場合は以下をご利用下さい。

銀行名[金融機関コード]：ゆうちょ銀行[9900]

店名[店番]：〇一九(ゼロイチキュウ)店[019]

預金種目：当座

口座番号：0600275

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

### 4. 本秋季講演会までの主なスケジュール(予定)

2013年6月20日(木) 事前参加申込・発表申込・事前支払・予稿原稿の受付開始

2013年7月24日(水) 最優秀発表賞申込の受付締切

2013年7月31日(水) 発表申込締切

2013年9月19日(木) 予稿原稿の受付締切

2013年10月21日(月) 事前参加申込・事前支払の受付締切

### 5. 参加費用

費用項目		事前支払	当日支払
参加費	一般会員	2500円	3000円
	学生会員	1500円	2000円
	非会員	4500円	5000円
予稿集		1200円	1500円
懇親会費	一般会員	4500円	6000円
	学生会員	2500円	3000円
	非会員	4500円	6000円

### 6. 交通手段・食事など

石垣市民会館へは、「市街地バスターミナル」から徒歩約6分です。石垣新空港から市街地バスターミナルまでは、鈍行バスで約45分、準急バスで約35分です。タクシーを使うと約30分で市街地まで出られます。なお、宿泊施設によっては空港送迎バスを出しているところもあります。詳しくは下記をご参照ください。  
[http://www.city.ishigaki.okinawa.jp/home/other/airport\\_access/index.htm](http://www.city.ishigaki.okinawa.jp/home/other/airport_access/index.htm)

石垣市民会館は「市街地バスターミナル」の出口を右に出て北(右)へ歩き、2つ目の交差点を西に折れて道なりに5分ほど歩いた左手にあります。本会ホームページの秋季講演会の案内ページに地図を掲載します。会期中の昼食等は、市民会館内の「軽食喫茶 イレブン」や近隣の飲食店等を御利用下さい。詳細は下記のサイト等をご参照ください。また、当日、近隣の飲食店マップを配布する予定です。

石垣市観光協会：<http://www.yaeyama.or.jp/>

石垣島ねっと：<http://www.isigakizima.net/>

石垣島タウンガイド：<http://www.isigakizima.net/ebook/ebook.pdf>

### 7. 一般向け講演会の開催について

日時：2013年11月23日(土・祝) 13:00～

場所：石垣市民会館 中ホール

〒907-0013 沖縄県石垣市浜崎町1丁目1番2  
講演者：田村 元秀たむら もとひで(東京大学大学院理学系研究科・教授)

題目：「New Worlds：太陽系外惑星観測の最前線」

主催：石垣市教育委員会

共 催：日本惑星科学会，国立天文台

## 8. その他

- (1) 乳幼児を同伴される予定の方は，下記までお問い合わせください。最寄りの保育施設を紹介いたします。なお，保育費用の一部を学会が補助します。申込締切は10/18(金)とさせていただきます。

担当：宮地 竹史

E-mail：aloc-takuji@wakusei.jp

- (2) 秋季講演会の申込にあたり，インターネットが利用できない方，また，何かご不明な点がおありの方は，下記までお問い合わせ下さい。

〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1

国立天文台天文情報センター気付

日本惑星科学会国立天文台LOC

FAX：0422-34-3810, E-mail：aloc@wakusei.jp

- (3) このお知らせの内容は，やむを得ない事情が発生した場合にその一部が変更される可能性があります。本会ホームページで最新の情報をご確認下さい。

# Whiteboard

## 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

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、2013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> にごございます。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)で申請いただけます。奮ってご応募いただくようご案内申し上げます。

なお、2014年度より国際学会出席旅費に対する応募回数、適用期間を変更するために、今年度は国際学会出席旅費に対する各応募締め切りの適用期間が不規則になっておりますのでご注意ください。

### (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 2013年5月15日：2013年7月1日～2013年10月末日の間の出発者対象

応募締切り 2013年9月15日：2013年11月1日～2014年3月末日の間の出発者対象

応募締切り 2014年1月15日：2014年3月1日～2014年9月末日の間の出発者対象

### (2) 国際学会開催の支援

#### ●助成対象

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 2013年7月15日：2013年10月1日～2014年3月末日に開催の国際学会対象

応募締切り 2014年1月15日：2014年4月1日～2014年9月末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

E-mail：admin@spss.or.jp

Tel：042-751-1126

## JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第100回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿
- ◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

### ◇日本惑星科学会第100回運営委員会議事録

期 間：2013年2月12日(火)～2月18日(月)

議 題：専門委員会・部会委員の承認

運営委員会委員：

出席者(23名) 田近英一, 渡邊誠一郎, 倉本 圭, 中村昭子, 荒川政彦, 林 祥介, 生駒大洋, 渡部潤一, 並木則行, 永原裕子, 井田 茂, 千秋博紀, はしもとじょーじ, 平田 成, 荒井朋子, 小久保英一郎, 藤本正樹, 橘 省吾, 佐々木 晶, 城野信一, 小林直樹, 中本泰史, 杉田 精司

欠席者(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e-mailにより投票

**議題1.** 各専門委員会委員の承認をお願いしたい。

(◎の各専門委員会委員長, ○の部会長, グループ長については第99回運営委員会にて承認済み)

賛成多数により, 議題1は承認された. 賛成: 23, 反対: 0, 棄権: 0

#### 1) 総務専門委員会

◎平田 成

城野信一, 長沢真樹子, 日高 宏, 生駒大洋, 諸田智克, 奥住 聡  
行事部会

○中村昭子

出村裕英, 中島健介, 城野信一, 奥住 聡

#### 2) 財務専門委員会

◎荒井朋子

中本泰史, 大野宗祐

#### 3) 編集専門委員会

◎はしもとじょーじ

諸田智克(編集幹事)

倉本 圭, 渡部潤一, 生駒大洋, 和田浩二, 田中秀和, 山本 聡, 杉山耕一朗, 奥地拓生, 渡部直樹,

小久保英一郎, 谷川享行, 杉田精司, 白石浩章, 関口朋彦, 本田親寿, 木村勇氣, 岡崎隆司

#### 4) 将来計画専門委員会

◎荒川政彦

小林直樹, 橘 省吾, 出村裕英, 並木則行, 藤本正樹, 林 祥介, 中本泰史

将来惑星探査検討グループ

○並木則行

加藤 学, 大槻圭史, 出村裕英, 小林直樹, 田村元秀, 寺田直樹, 関根康人

#### 5) 対外協力専門委員会

◎小久保英一郎

伊藤洋一, 橘 省吾, 矢野 創

#### 6) 欧文誌専門委員会

◎佐々木 晶

三河内 岳(委員:JPGU新ジャーナル担当+全体補助), 三浦弥生(委員:EPS運営委員),

大竹真紀子(委員:JPGU新ジャーナルの運営or編集委員), 中本泰史(委員:EPS編集委員)

#### 7) 連合連携専門委員会

◎永原裕子

高橋幸弘, 宮本英昭, 玄田英典(連合大会プログラム委員・正), 山田 耕(同・副),

小川佳子(男女共同参画担当委員)

#### 8) 情報化専門委員会

◎千秋博紀

伊藤孝士, 大竹和生, 石岡圭一, 小林直樹, 荒川政彦

## ◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2013年3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)

アメテック株式会社カメラ事業部

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

## ◇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.

---

### 2013/07

---

#### 16-17 第41回可視化情報シンポジウム

- (a)工学院大学新宿キャンパス (b)一般社団法人 可視化情報学会(日本惑星科学会協賛)  
(c)<http://www.visualization.jp/event/detail/symp2013.html>
- 

### 2013/09

---

#### 17-20 惑星科学フロンティアセミナー 2013

- (a)北海道虻田郡ニセコ町 (b)惑星科学フロンティアセミナー実行委員会(日本惑星科学会共催)  
(c)<http://www.wakusei.jp/meetings/fs/2013/2013-09-17/index.html>

#### 27-28 可視化情報全国講演会(2013会津)

- (a)会津大学 (b)一般社団法人 可視化情報学会(日本惑星科学会協賛)  
(c)<http://web-ext.u-aizu.ac.jp/conference/vis2013/>
- 

### 2013/11

---

#### 20-22 日本惑星科学会秋季講演会

- (a)石垣市民会館, 沖縄県, 石垣市 (b)日本惑星科学会主催  
(c)[https://www.wakusei.jp/meetings/fall\\_meeting/](https://www.wakusei.jp/meetings/fall_meeting/)

## 編集後記

私が本特集号「はやぶさ帰還試料の分析でわかったこと」のゲストエディターを務めることになったきっかけは、昨年の惑星科学会秋期講演会の際に遊星人編集委員の白石さんから、遊星人で特集号をやらないかとお声をかけて頂いた事だった。それ以来、本特集号の取り纏めに微力を尽くし、この度出版まで到ったのは望外の喜びである。

小惑星探査機「はやぶさ」は人類初の小惑星から回収された試料を地球に帰還させた。本特集号の矢田ほか(2013)では、再突入カプセルが回収されてから試料が取り出され、最終的に研究者の手に渡るまでの過程を記載している。「はやぶさ」は、隕石のような岩石の試料としては得られない、天体表層の砂礫(レゴリス)を回収した。これにより、その天体の物質科学情報だけでなく、天体と惑星間空間環境との相互作用の履歴の情報も得られる。本特集号の野口ほか(2013)では、微小天体表層における太陽風による宇宙風化の影響を、粒子表層の透過電子顕微鏡による観察から明ら

かにしている。本特集号の馬上ほか(2013)は、太陽風及び太陽・銀河宇宙線の照射履歴を粒子の希ガス同位体分析の結果から議論している。また、本特集号の奈良岡(2013)では、残念ながら小惑星起源の有機物の発見には未だ到らないが、イトカワ試料の有機分析の過程を計画段階からエピソードも交えてつぶさに描いている。

惑星物質科学の発展は、画期的な試料がもたらすパラダイムシフトに依っているところが大きい。米アポロ・ソ連ルナ計画による月試料、日本の南極地域観測隊が発見した南極隕石、アエンデ炭素質コンドライト中の難揮発性包有物などがそれに当たる。隕石はいつ落ちてくるか分からないが、サンプルリターンミッションは意図して実施し、画期的試料をもたらすことが出来る。今世紀に入り、我々はアポロ計画以来のリターンサンプルのラッシュを迎えている。これらの試料の研究により、また新たに太陽系進化の歴史が紐解かれていくことを望んでやまない。(矢田 達)

編集委員

はしもと じょーじ [編集長], 諸田 智克 [編集幹事]

矢田 達 [特集「はやぶさ帰還試料の分析で分かったこと」ゲスト・エディター]

生駒 大洋, 岡崎 隆司, 奥地 拓生, 木村 勇氣, 倉本 圭, 小久保 英一郎, 白石 浩章, 杉田 精司,

杉山 耕一郎, 関口 朋彦, 田中 秀和, 谷川 享行, 本田 親寿, 山本 聡, 渡部 潤一, 渡部 直樹,

和田 浩二

2013年6月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第22巻 第2号

定 価 一部 1,750円(送料含む)

編集人 はしもと じょーじ(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 〒223-8526 横浜市港北区日吉4-1-1 慶應義塾協生館2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 : 045-534-3881 / FAX : 045-534-3882

(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。