

はやぶさの成果

— サンプルがかえる前に分かったこと、その2 —

井上朋香¹, 本田隆行², 出村裕英³, 二村徳宏⁴

(要旨) 前号に引き続き、残りの3セッションを紹介する。地質と地理、測光と表面状態、そして他ミッションについて、大学院生のメモから書き起こされたものだ。前回と重複するが、これは口頭発表の聞き書きであって査読を経たものではなく、今後の研究の進展によっては変わる可能性もある。それを踏まえて、楽しんでもらえれば幸いである。

●地質と地理セッション

<Geology and Geography>

- 1 O. S. Barnouin-Jha* et al.
"Small-scale topography from the Hayabusa laser altimeter:
Implications for Itokawa's internal structure"
- 2 T. Michikami* et al.
"Boulders on the Global Surface of Asteroid 25143 Itokawa:
Characteristic of Otter's Head and Body"
- 3 H. Yano* et al.
"Characterizing the Muses Sea geology"
- 4 H. Miyamoto* et al.
"Landslide-like mass movements formed the well-sorted pebble ponds
partly covering a tiny asteroid, Itokawa"
- 5 T. Noguchi* et al.
"Itokawa as a source of meteorites: Morphological similarities between boulders on Itokawa and fragile and porous ordinary chondrites"
- 6 N. Hirata* et al.

1. 東京大学
2. 神戸大学
3. 会津大学
4. 東京大学 ブラウン大学地質学専攻留学生

"The Black Boulder on the surface of Itokawa"

1 Barnouin-Jha氏は、はやぶさに搭載されたレーザー高度計 (LIDAR) を用いてイトカワ表層の地形を観測することにより、イトカワ表層の進化を解明することができると述べた。LIDARデータに基づき、イトカワの低地やなめらかな部分が約2mの厚さのレゴリスで覆われていることを示した。また観測された地形学的な特徴から、イトカワはいくつかのコアを持つラブルパイルであることが示唆された。

2 道上氏は、イトカワの表層が重力が小さいにも関わらず非常に多くの岩塊 (ボルダー) で覆われていることを示した。はやぶさによって得られた高分解能画像から、イトカワ表層全体のボルダー (< 5 m) のサイズ分布を決定した。その結果、“頭”部分のべき指数は、“体”部分のそれと比べて小さいことがわかった。またボルダーの形状の計測から、頭部分のボルダーの方が体部分のボルダーに比べて、細長い形をしているという事もわかった。イトカワの頭と体のボルダーサイズの違いや形状の違いから、イトカワの頭と胴体は異なる履歴を経たものだと考えられる。

3 矢野氏は、はやぶさミッションにおいて最も重要な挑戦がサンプルリターンであると強調した。2005年10月、はやぶさチームはサンプリング候補地を二つに

绞り、最終的には科学的なメリットと技術的な制約などから“MUSES-C (Muses Seaから改名されて、現在はIAUに承認されている.)”地域を選択した。そこには粒子サイズ数cm以下～3m (主にmm～cm)の砂礫が多数存在しており、くぼみや壕によって囲まれた、数m以上のボルダーが数個存在している。また、滑らかな地域と粗い地域との境界には、“transition zone”が存在し、そこから低地の中心に向かって砂礫平均直径と岩塊空間密度が徐々に減少している。また、数十cmサイズの礫は丸みを帯びており、粉碎された可能性とレゴリスの移動機構の存在を示唆している。

4 宮本氏は、小惑星上のレゴリスは小惑星の衝突によって形成された破片が堆積したものであるという考えを示した。ある一定サイズ以下のレゴリスは、脱出速度が小さいため失われてしまったか、あるいは小惑星表面に薄く均質に分布・堆積していると考えるのが普通だ。この場合には、レゴリスは分級(粒径を揃える方向で分離させること)されない。しかしイトカワ表層では砂礫の移動の痕跡と、それによる分級メカニズムが働いていることが示された。移動の証拠としてその粒子形態を考察した。

5 隕石とイトカワの岩塊(ボルダー)の形状を比較した。イトカワランデブー中に撮影された画像では、ボルダーと破砕された隕石形状との類似性が確認された。様々な隕石の空隙率や硬度に基づき、ボルダーのそれらを推定した。大部分のボルダーの形態は空隙率の高い隕石形状に似ている。比較した隕石の空隙率は16～32%であり、平均的なLコンドライト(5.8%)やLLコンドライト(9.3%)より高い。少なくともイトカワ表層は平均的なLやLLコンドライトよりも、高空隙率のボルダーで覆われていると考えられる。

6 平田氏は、ブラックボルダー(黒い岩塊)について述べた。これはイトカワの頭に位置していて、反射率が非常に小さく、AMICAの画像によると周囲の物質と比較して約50%暗い(v-band)。はやぶさチームはこの位置を本初子午線とした。このボルダーは6×6×6(m)のピラミッドまたはコーン形をしていた。これ

より大きいボルダーが500以上ある中で、このような暗いボルダーはこれ一つだけである。もしこのボルダーが暗い原因が宇宙風化だとすると小惑星全体に影響することになり、説明が難しい。また、炭素質コンドライトだという説も可視領域のスペクトルが異なっているため否定される。イトカワ母天体上での衝撃黒化(Shock Darkening)によって暗くなったと考えるのが妥当である。

(東大M2 井上朋香, 神戸大M2 本田隆行)

●測光と表面状態セッション

<Photometry and Surface Condition>

- 1 D. J. Tholen* et al.
"Calibrating Hayabusa AMICA Data"
 - 2 Y. Yokota* et al.
"Opposition surge of Itokawa observed by Hayabusa ONC-W1"
 - 3 S. Sasaki* et al.
"Brightness/Color variation of Itokawa: Space weathering and mass movement"
 - 4 S. Sasaki* et al.
"Rock weathering on small asteroids: Space weathering experiments and close-up observation of Itokawa"
 - 5 T. Hiroi* et al.
"Estimation of the compositions and degrees of space weathering of major landmarks on asteroid Itokawa and its significance to the S-type asteroid - ordinary chondrite controversy"
 - 6 B. E. Clark* et al.
"Near-Infrared Photometry of Asteroid 25143 Itokawa: Observations from the Hayabusa Near-Infrared Spectrometer"
- 1 Tholen氏講演では、ECAS (Eight Color Asteroid Survey) 準拠のフィルタ構成で分光多帯カメラAMICA (Asteroid Multiband Imaging CAmera)

が設計されたこと、そのカメラ校正が恒星観測に基づいてなされたこと、が述べられた。最初、1999年の地上観測で標準星セットのデータを得たが、2002年打上から遅れたことで対象天体も1989MLからイトカワに変更され、探査機の経路と撮像できる天球領域も変わって、標準星セットも撮り直しとなった。イトカワ自体も観測し、典型的なS型の分光タイプであることを確認した。平田氏の協力を得て、ガスケル氏作成の形状モデル断面積から予想されるイトカワの変光曲線と実測値とが良好に一致を示すことも確認された。

2 横田氏講演では、科学観測機器ではなく光学航法用の広角カメラONC-Wで観測された衝効果(Opposition Effect)について述べられた。はやぶさの影を使ってpointingしやすいというメリットがあった(図1)。JPEG圧縮による輝度値のエラーは1 DN未満であると評価された。イトカワ表面は滑らかな領域と粗い領域に二分されるが、測光学的には違いを認識できなかった。

3 & 4 佐々木氏の2講演では宇宙風化について触れられた。小惑星イトカワ表面では、20%の輝度値バリエーションが見られた。例えば白神地域は明るく目立つ特徴であり、岩塊の移動やインパクトによる表面削剥が原因と考えられる場所ばかりだった。それらの特徴から表面の暗い物質の層厚は1 mに満たないと考えられる。新しく露出した場所が明るく、イトカワ全体のごく表面が暗い。最近接画像では岩塊同士が擦れ合って白く明るい傷を作ったと考えられる場所が見つ

った。レゴリスだけでなく、岩塊表面も宇宙風化して暗化する可能性を強く示唆している。

5 廣井氏講演では、小惑星イトカワの主要ランドマークの宇宙風化度合を調べた報告がなされた。次のClark氏講演と併せて、最近掲載された右論文でカバーされる内容であり、省略する。

T.Hiroi, M.Abe, K.Kitazato, S.Abe, B.E.Clark, S. Sasaki, M.Ishiguro, and O.S.Barnouin-Jha
"Developing space weathering on the asteroid 25143 Itokawa"

Nature, Volume 443, Issue 7107, pp. 56-58 (2006)

6 Beth氏講演では、はやぶさ近赤外分光計による観測に基づくイトカワの近赤外域測光モデルが取りあげられた。位相角依存性のみを考慮した最初のモデルではイトカワのOpposition Surgeはエロスよりも弱いことが示された。加えて、エロスよりも非常に強い赤化が見られた。これらは、両者のレゴリス特性の違いを示唆している。

(会津大 出村裕英)

●他ミッションセッション

<Other Missions>

- 1 P. Tsou*
"STARDUST, a Comet Coma Sample Return - its legacy."
- 2 P. Tsou* et al.
"STARDUST Preliminary Findings"
- 3 M. F. A' Hearn* and M. J. S. Belton
"Implications of Deep Impact for Sample Return Missions"
- 4 H. Yano* et al.
"Hayabusa-2, Hayabusa-MkII and Beyond"

シンポジウム最後の本セッションでは、日本のはやぶさ同様、大きな話題となった始原天体探査であるSTARDUSTミッションおよびDeep Impactミッションに関する最新の成果が報告された。これらの成果は、小天体の科学および太陽系の起源と進化の科学に大

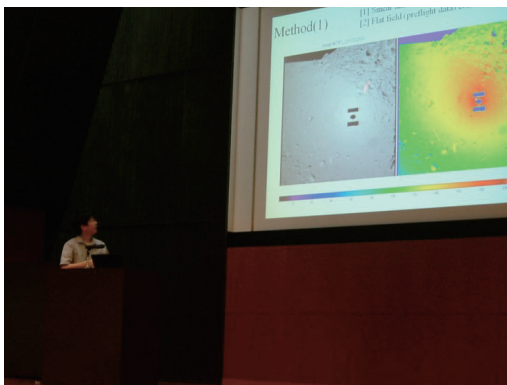


図1

きく貢献するだけにとどまらず、これから将来に向け、さらにこのような探査計画を新たな小天体へと繋げていくためにも重要である。セッションの最終講演では矢野氏(ISAS)より、はやぶさに続く日本の次期小天体探査構想である「はやぶさ2」および「はやぶさMk-II」についての科学目的やミッション設計に関する概説と議論が行われた。

1 & 2 JPLのTsou氏2本の講演は、STARDUSTとその前身であるSOCCER計画についてであった。SOCCER計画は1990年代初頭に日米共同で検討された彗星塵サンプルリターンであり、超高速衝突する塵の非破壊捕獲機構(エアロジェル)が開発された。その技術が後のSTARDUST計画へと引き継がれた。そのSTARDUSTは、2004年1月に最接近距離236.4kmから、Wild第二彗星核の直接観測および彗星塵の捕獲に成功し、2006年1月には地球に帰還カプセルが届けられた。その初期成果は、エアロジェル内に、1000本以上の衝突トラックが確認でき、すでに3ダース以上のトラックについてスペクトル、鉱物、岩石、同位体、有機物等の調査が行われた旨、報告した。

3 Maryland大学のA'Hearn氏講演は2005年7月に9P/Tempel彗星核にフライバイした親機から超高速で子機を衝突(エネルギーにして19GJ)させて、5000-1000トンもの新鮮な地下物質を放出させたDeep Impactミッションについての報告である。ここでは、最新のデータに基づいて、将来の彗星起源の氷のサンプルリターンへの技術的可能性が示唆された。彗星核の表面物質は弱く粒子状で、地下1m程度の掘削は容易であると述べられた。

4 シンポジウムの最後は、はやぶさに続いて小天体サンプルリターンのシリーズ化を推進する、日本の始原天体探査プログラム構想についての矢野氏講演で締められた。「はやぶさ2」ははやぶさの不具合を改善した同型機であり、実証技術を継承することで開発期間を短縮して、迅速に次期探査を行うことをコンセプトとしている。2010 - 2011年に打ち上げを予定してお

り、C型の近地球型小惑星のサンプルリターンを目指す。2010年代半ばにはシリーズ第3弾として、「はやぶさMk-II」を、前人未踏で地球上でも明確なアナログ隕石が発見されていないP/D型小惑星や枯渇彗星核(CAT天体)など、最も始原的な小天体へ送り、そのサンプルリターンを目指す計画を進めている。それらの主要な観測機器や、探査天体に対応した試料採取機構の開発状況についての報告も行われた。はやぶさの弾丸打ち込み式サンプラーを開発の出発点としながらも、高空隙率の標的からの試料放出や、層序を維持した試料採取を目指して、コアボーリングとテザーを組み合わせた新技術についても報告された。

(東大D1 二村徳宏)