

機関番号：82645

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008～2010

課題番号：20200048

研究課題名（和文） 微小重力地質学の創成： 粉体物理が拓く太陽系科学の新展開

研究課題名（英文） Innovation of Microgravity Geology:
New Perspective of Solar System Science through Granular Physics

研究代表者

矢野 創 (Yano Hajime)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：00321571

研究成果の概要（和文）：

本研究は、太陽系科学と粉体物理の学際領域で国内外の研究者と連携し、はやぶさ等の探査機による微小重力天体の地質・地形データの解析、地上での衝突・弾性波計測実験、自由落下用真空カプセルを使った微小重力環境下での衝突・粉体流動実験、数値シミュレーションなどから地質現象の発生モデルを構築し、「微小重力地質学」という新しい学問の創成を目指した。またその成果を、次世代の小天体探査計画の研究開発に応用した。

研究成果の概要（英文）：

This research program aimed to create a new interdisciplinary field between solar system science and granular physics called “Microgravity Geology”, under the collaboration among domestic and international scientists. To achieve this goal, we mainly focused on data analyses of geology and geomorphology of microgravity bodies such as asteroids and comet nuclei like Hayabusa mission, impact and wave propagation experiments in 1G environment, impact and granular flow experiments in microgravity environment by using free fall, drop tower vacuum chambers, numerical simulations, and modeling of geological process on such bodies. These results are applied to research and development of next generation plans of solar system small body exploration.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2008年度 | 3,100,000 | 930,000 | 4,030,000 |
| 2009年度 | 7,400,000 | 2,220,000 | 9,620,000 |
| 2010年度 | 7,600,000 | 2,280,000 | 9,880,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 18,100,000 | 5,430,000 | 23,530,000 |

研究分野： 太陽系科学

科研費の分科・細目：(1)地球惑星科学・固体地球惑星物理学,

(2)プロセス工学・化工物性・移動操作・単位操作

キーワード： 惑星系形成, 小惑星, 彗星核, 小型衛星, 衝突現, 粉体流動, 微小重力地質学

1. 研究開始当初の背景

惑星系形成の起源と進化の研究は、系外惑

星および原始惑星系円盤の直接観測により、大きな転換点を迎えた。ただしシナリオの後

半、微惑星の成長過程は、天体観測でも隕石分析でも直接の証拠が得られないため、ブラックボックスの状態が長く続いた。

だが過去 10 年間に日米が、「微惑星の残滓」とされる小惑星や彗星核への直接探査を開始したことで、新たな展望が開けつつある。特に 2000 年に NASA の NEAR シューメイカー探査機が 10km クラスの地球接近小惑星 (NEO) エロスの全球観測を実現し、2005 年には JAXA のはやぶさ探査機がサブ km クラスの NEO イトカワの全球観測と離着陸に成功した。100km クラス未満の木星・土星の小型衛星も NASA のカッシーニ探査機らが直接計測した。

これらの探査以前、低重力天体は脱出速度が小さいため、超高速衝突による放出物はほとんど天体表層に残れないと考えられ、小天体の多くは一枚岩構造が想定されていた。しかしイトカワの地形的特徴と空隙率の測定から、「瓦礫の寄せ集め天体」の存在が初めて証明された。さらに地球上の地形に類似した地滑り・土砂崩れ・表土の分級と集積などが発見されたことにより、低重力天体上の地質現象の発生機構と重力の関係を解明する必要が生まれた。しかし微小重力を再現できる地上実験設備は、日・米・独にしかなく、本研究開始当初、「微小重力地質学」はまだ黎明期であった。

2. 研究の目的

本新領域研究では、直径 100km クラスからサブ km クラスの小型衛星・小惑星・彗星核のように、過去に探査された固体惑星・衛星よりも数桁重力が小さな固体天体で起きている地質現象を、(1) 探査データから詳細に分析し、(2) 「微小重力における衝突現象」、「粉体・砂礫の流動」、「高空隙率天体中の弾性波の伝播」について実験や数値解析を行い、(3) 前二者の結果を統合する「微小重力天体上の地質現象の発生モデル」を構築する。その成果により、地球上や大型天体では重力の影響が排除できずに解明できない地質現象の本質を考察する、「微小重力地質学」という新しい学問を創成することを目指す。

なお本研究の成果は、微惑星進化における地質過程モデルの提唱、過去の探査データの新しい解釈、革新的な小天体探査計画の立案、将来の小天体資源の利用可能性の探求などへの貢献が期待される。さらに従来の地質学には、地球上の地滑り・土砂崩れの機構に関する新たな視点を、粉体物理学には、「長期間継続する粉体流動の天然実験室」としての小天体表層の観測が飛躍の機会を、それぞれ提供する可能性も秘めている。

3. 研究の方法

微小重力天体上の地質的特徴の画像解析を行った上で、「微小重力における衝突現象」、「粉体・砂礫の流動」、そして両者をつなぐ「高空隙率天体中の弾性波の伝播」に関する実験および解析に絞って研究を行い、現実の微小重力天体探査案への応用を図る。

なお、当初は既存の微小重力実験設備を活用することを想定していたが、国内設備の閉鎖に伴い、本テーマに合致した微小実験を独自で行える自由落下実験装置の設計・製作・試験についても、本研究で行うこととした。

具体的な研究項目としては以下の 6 項目に整理して、国内外でこれらの新分野の創成に興味を持って下さった研究者と学際連携を推進していった。

研究項目 1：低重力天体の地質・地形データの
高解像度解析

研究項目 2：高空隙率標的、粉体標的への地上
衝突実験・弾性波計測

研究項目 3：微小重力環境下での衝突実験

研究項目 4：微小重力環境下での粉体流動実
験

研究項目 5：微小重力下の地質活動・数値シ
ミュレーション

研究項目 6：微小重力地質現象の発生モデ
ル：探査データ・室内実験・数値計算の相互
検証

4. 研究成果

本研究は微小重力天体上の地質現象を、粉体物理という切り口から整理して、新たな学問領域を創成し、将来の始原天体探査計画の学術的基盤に貢献することを目指した。具体的には、2.5 年間の期間中に、以下の 6 つの研究項目に区分して、それぞれに研究成果を得た。

「研究項目 1：低重力天体の地質・地形データの
高解像度解析」：はやぶさ探査機による小惑星イトカワ表面の岩塊と大型の普通コンドライト隕石の岩石学的比較を論じた。丸みを帯びたタイプと結晶組織が強度を支配するタイプに大別できることから、衝突破壊後の再集積・表面移動の過程での進化の重要性が示唆された。また 2010 年に地球帰

還したはやぶさ探査機に収納された小惑星イトカワ起源微粒子（他研究者による）希ガス分析・鉍物分析などにより、本研究責任者らが提唱している微小重力天体上の砂礫の運動について、流動・風化の証拠が物質科学的にも証明された。

「研究項目 2：地上衝突実験・弾性波計測」：高空隙率標的、粉体標的への衝突・弾性波実験のため、隕石・宇宙塵の圧縮強度データから模擬小惑星物質を試作し、一枚岩・砂礫・粉体に分割した。特にガラスビーズ焼結体などの模擬炭素質コンドライト物質を製作して標的とした衝突実験により、C 型小惑星など強度が弱い微小重力天体上の衝突地形や放出物の振る舞いなどを、実証的に模擬した。その成果は、C 型小惑星を探査する「はやぶさ後継機」の研究開発を支援する知見となった。

「研究項目 3：微小重力環境下での衝突実験」：本研究専用の実験スペースを JAXA 相模原キャンパス内に確保し、1G 対照実験用バネ銃、粉体の安息角計測器などを整備した。様々な形状の物体が微小重力下で低速衝突できる射出機構も新作した。また、本研究が当初利用を想定していた MGLAB 自由落下塔の H21 年度閉鎖を受けて、独自の自由落下用真空実験カプセルを自作した。またドイツブレーメンの ZARM 自由落下塔についても、落下用真空チェンバ内の実験装置の共通化を進めた。

「研究項目 4：微小重力環境下での粉体流動実験」：MGLAB 閉鎖に伴い、当初予定通りには微小実験データは取得できなかった。一方、欧米の研究者と国際ワークショップ「NuMAGs」を開催し、粉体物理学者と学際分野での共同研究を進めることで合意した。また、過去の自由落下塔による粉体衝突の画像データの再解析を行い、砂礫・粉体の粒度および形状が粉体の流動に与える影響について考察した。

「研究項目 5：微小重力地質学シミュレーション」：微小重力衝突実験の画像データを用いて、フランスの数値シミュレーション研究者との共同研究を進めた。また二重結節小惑星周辺における準平衡点に関するモデル研究を行い、生成された衛星やダストトーラスの安定性に関する知見を深めた。また C 型小惑星上にクレーターを形成した際のクレーターサイズや放出物の振る舞いについて、

ハイドロコード計算による推定を行った。

「研究項目 6：微小重力地質現象の発生モデル」：土砂崩れや雪崩の専門家や、隣接分野の微小重力科学の研究者を招いて「微小重力地質学研究会」を開催し、発生モデル構築に向けた共同研究を進めた。また、微小重力環境下での振動に起因した「ブラジルナッツ効果」の発生規模について地上実験と物理モデル化を行い、砂礫のサイズと振動周期、強度の間の相関関係を明らかにした。これは小惑星イトカワのようなラブルパイル天体の地下構造に新たな示唆を与えるものとなった。

以上、本研究でこれまで得た成果は、現在開発中の微小重力天体上の衝突実験や試料採取などの探査計画の機器開発へ反映させる。次世代小惑星サンプルリターン（はやぶさ 2）の試料採取、人工クレーター形成、小惑星着陸探査（MASCOT や AMOR）等の開発に応用されつつある。

（以上）

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

①T. Noguchi, A. Tsuchiyama, N. Hirata, H. Demura, R. Nakamura, H. Miyamoto, H. Yano, T. Nakamura, J. Saito, S. Sasaki, T. Hashimoto, T. Kubota, M. Ishiguro, M.E. Zolensky: Surface morphological features of boulders on Asteroid 25143 Itokawa, *Icarus*, 206, pp319-326, (2010). (査読有り)

②M. Hirabayashi, M.Y. Morimoto, H. Yano, J. Kawaguchi, J. Bellerose: Linear stability of collinear equilibrium points around an asteroid as a two-connected-mass: Application to fast rotating asteroid 2000EB14, *Icarus*, 206, pp780-782, (2010). (査読有り)

③野口高明、土山明、中村良介、宮本英昭、矢野創、中村智樹、齋藤潤、佐々木晶、橋本樹明、久保田孝、石黒正晃、M.E. Zolensky: 小惑星イトカワ表面に存在する岩塊の表面組織の解説：小惑星のフィールド岩石学の試み、*日本惑星科学会誌：遊・星・人*、19, pp12-22, (2010). (査読有り)

〔学会発表〕計 (14) 件

①A. Fujimura, M. Abe, T. Yada, T. Nakamura, T. Noguchi, R. Okazaki, Y. Ishibashi, K. Shirai, T. Okada, H. Yano, M. E. Zolensky, S. Sandford, M. Ueno, T. Mukai, M. Yoshikawa and J. Kawaguchi: PROCESSES TO OPEN THE CONTAINER AND THE SAMPLE CATCHER OF THE HAYABUSA RETURNED CAPSULE IN THE PLANETARY MATERIAL SAMPLE CURATION FACILITY OF JAXA, Lunar and Planetary Science Conference 2011, 2011年3月10日, Houston, TX, U.S.A.

②T. Jones, P. Lee, J. Bellerose, E. Fahnestock, R. Farquhar, M. Gaffey, J. Heldmann, D. Lawrence, M. Nolan, T. Prettyman, P. Smith, P. Thomas, J. Veverka, G. Benedix, R. Elphic, R. Gellert, A. Hildebrand, H. Yano, P. Bhavsar, J. Chartres, A. Cox, T. Debus, R. DeRosee, D. Dunham, R. Fleischner, J. Goldsten, J. Horsewood, D. Mayer, J. McCarthy, T. McCarthy, G. Mungas, D. Osterman, H. Sanchez, B. Williams: Amor: A Lander Mission to Explore the C-type Triple Near-Earth Asteroid System 2001 SN263, Lunar and Planetary Science Conference 2011, 2011年3月8日, Houston, TX, U.S.A.

③C. Dietze, F. Herrmann, S. Kuß, C. Lange, M. Scharringhausen, L. Witte, T. van Zoest, and H. Yano: LANDING AND MOBILITY CONCEPT FOR THE SMALL ASTEROID LANDER MASCOT ON ASTEROID 1999 JU3, International Astronautical Congress 2010, 2010年9月5日, Prague, Czech. Republic.

④Y. Zemba, H. Yano, O. Mori, and J. Kawaguchi: Shape and Regolith Distribution of Rubble-Pile Asteroid, 20th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics. 2010年7月26日 JAXA 相模原キャンパス (神奈川県) .

⑤H. Yano and Hayabusa-2 Pre-Project Team (M. Yoshikawa, H. Yano, Y. Tsuda, S. Nakazawa, H. Mimamino, F. Terui, T. Saiki, K. Nishiyama, T. Kubota, T. Okada, M.Y. Morimoto, N. Ogawa, C. Okamoto, Y. Takagi, S. Tachibana, R. Nakamura, N. Hirata, H. Demura, and 80 other scientists and engineers) Hayabusa's follow-on mission for surface and sub-surface sample return from a C-type NEO, COSPAR Scientific Assembly 2010 (招待講演), 2010年7月23日, Bremen, Germany.

⑥矢野創, 吉川真, 津田雄一, 中澤暁, 南野浩之, はやぶさ2プリプロジェクトチーム: はやぶさ2:ミッション設計と理工学目標, 2010年度日本地球惑星科学連合大会, 2010年5月26日, 幕張、千葉.

⑦矢野創: ISAS34m 自由落下実験装置の製作 (招待講演), 第二回微小重力地質学研究会, 2010年3月25日, JAXA 相模原キャンパス (神奈川県) .

⑧H. Yano: Itokawa and Experimental Works on Microgravity Geology (招待講演), Numerical Modeling of Asteroids as Granular Systems, 2010年1月15日, ムドン天文台 (パリ、フランス) .

⑨H. Yano, et al.: Development of Sampling Systems for Small Solar System Bodies onboard Hayabusa Follow-on Missions, International Symposium on Space Technology and Science 2009, 2009年7月7日, エポカルつくば国際会議場 (茨城) .

⑩H. Yano: Microgravity Geology: In-situ Measurements and Laboratory Simulations, International Symposium on Marco Polo and other Small Body Sample Return Missions, 2009年5月18日, パリ大学 (パリ、フランス) .

⑪J. Bellerose and H. Yano: Electrostatic Charge on Small Bodies: Dust Levitation Effects and Transport, 第一回微小重力地質学研究会, 2009年2月2日, 東京大学・総合科学博物館 (東京) .

⑫矢野創: 微小重力地質学における衝突・振動・粉体挙動 ~探査・実験・モデル研究の融合に向けた課題~, 第一回微小重力地質学研究会, 2009年2月2日, 東京大学・総合科学博物館 (東京) .

⑬矢野創ほか: はやぶさ後継シリーズの微小重力天体試料採取機構の開発, 2008年度宇宙科学シンポジウム, 2009年1月7日, 宇宙航空研究開発機構・相模原キャンパス (神奈川県) .

⑭矢野創ほか: 固体天体表面試料採取機構の開発: 始原天体サンプルリターンを例に, 2008年度太陽系科学シンポジウム, 2008年12月19日, 宇宙航空研究開発機構・相模原キャンパス (神奈川県) .

〔図書〕（計 1 件）

- ①川口淳一郎、はやぶさプロジェクトチーム（矢野創他）編，小惑星探査機「はやぶさ」の超技術，392 ページ，講談社，（2011）.

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢野 創 (Yano Hajime)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
助教
研究者番号：00321571

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

宮本 英昭 (Miyamoto Hideaki)
東京大学・総合研究博物館・准教授
研究者番号：00312992

高木 靖彦 (Takagi Yasuhiko)
愛知東邦大学・経営学部・教授
研究者番号：10192147

(4) 研究協力者

長谷川 直 (Hasegawa Sunao)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
研究員

奥平 恭子 (Okudaira Kyoko)
会津大学・企画運営室・准教授