

月惑星探査のための基盤技術の研究

研究代表者 天野 嘉春
(基幹理工学部 機械科学・航空宇宙学科 教授)

1. 研究課題

多くの国々が、人類の活動領域を広く宇宙に広げようとしている。国際宇宙ステーション ISS を起点にして太陽系へと拡大し、最終的には有人の火星探査を目指している。有人宇宙探査は、国際宇宙探査協働グループ ISECG が定めた国際協働による ISS の次の長期目標である。有人宇宙探査には、多くの克服すべき技術的課題、膨大な費用が掛かるなどの問題があるために、多くの国々が国際協働の形で、持続的に共通目標を掲げて取り組む必要がある。この有人宇宙探査は、世界的に大きな流れが形成され始めている。日本はこれまで、多く地球観測衛星、科学観測衛星、ISS、月探査かぐや、小惑星探査はやぶさなど、多大な成功を収めてきた宇宙開発の先進国である。今後、日本が主導的な立場で無人・有人宇宙探査を、他の多くの国々と進めていくためにも基盤となる科学・技術の継続的な研究が必要である。

地球から水を運搬していく宇宙機の輸送費は非常に高いので、将来の惑星探査では月のような重力の小さい天体から輸送していく事になるだろう。小惑星や月極域の水の存在は、有人の月探査を経済的に進める上で重要である。飲料水や動植物などの水として、また水素と酸素に分解することで呼吸用の酸素やロケットの燃料として、将来の有人宇宙探には水は不可欠である。また、月や小惑星の砂や岩石を構成する鉱物の酸化物からは、大量の酸素を得ることができる。

最近の宇宙タンでは大型の宇宙探査機だけでなく、50 kg 級の超小型衛星による地球近傍小惑星(NEAs)の探査が期待されている。大型衛星は開発のコストが高く開発期間が長いなどの欠点がある。一方、超小型衛星は迅速な開発、また低コストで宇宙探査が可能となり、新技術を取り入れやすいために、複数台の超小型衛星による惑星探査方法が提案されている。月や小惑星への超小型衛星による深宇宙探査ミッションは、大型の惑星探査衛星への相乗りすることで、より小さい Δv で目標の月や小惑星まで到達可能となる。

小惑星の中で特に C 型小惑星は、熱的な変成を受けてない始原的な組成を持つと考えられ、水素や炭素などの揮発性元素に富んでいる。こうした小天体から水素や酸素を取り出して、ロケットの推進剤や飲料用の水として確保することができるので、小惑星や極域の月は、宇宙資源探査の観点から大変魅力的である。

将来のミッションとして直接接近可能な NEAs については、2010 年より NASA が提供する NHATS と呼ばれるデータベースがある。NHATS によると、2,000 個以上の探索可能な NEAs が登録されている。

NEAs や月などの天体表面の元素組成、特に水を調査する方法として、ガンマ線分光法と中性子分光法による核分光法が有力である。宇宙空間における中性子計測においては、衛星筐体及びその搭載燃料と銀河宇宙線とが核相互作用した結果発生する中性子が、計測精度や計

測時間に影響を与えるバックグラウンド計数(雑音)となる。そこで中性子計測では、少ない搭載燃料(少ない Δv)でターゲットに接近することが可能な宇宙機が望まれる。そのような観点から、小型のイオンエンジンを搭載した超小型も深宇宙衛星機は、近未来の惑星探査機として大変有力である。

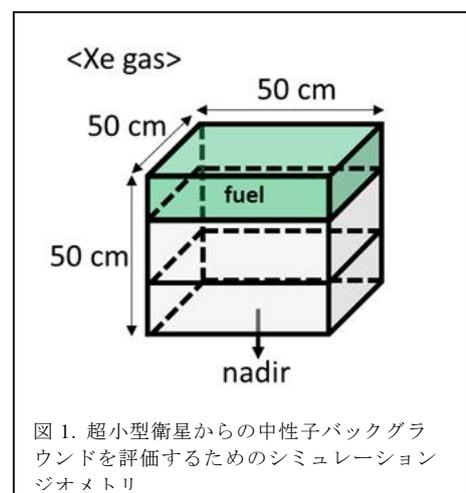
月・惑星の起源や進化の研究や宇宙資源の利用にあたり惑星表層の全域にわたる元素成分の情報を取得することは不可欠である。宇宙機の軌道上から遠隔探査で天体の元素分布を計測する唯一の方法は、核分光法である。天体表面から放出されるガンマ線や中性子を計測する事で、天体表面の全域を構成する元素分布を求めることができる。また、中性子分光法は遠隔探査で水の濃度を求めることができる唯一の方法である。本研究では、高性能核分光計の開発を中心として、月惑星探査のための基盤となる技術を開発することで、月惑星探査技術の開発を目指す。

本年度は、月や小惑星などの天体と高エネルギー宇宙線との核衝突により発生する中性子束やそのエネルギースペクトル、そして天体を構成する水素濃度依存性について調べた。また、50 kg級の超小型衛星を利用する深宇宙探査機を考え、その筐体から発生する中性子束やそのエネルギースペクトルを評価した。それらのシミュレーション結果について報告する。

A. 超小型衛星構体のジオメトリ

月探査や小惑星探査における中性子計測は、宇宙機の構体や搭載燃料を構成する物質と高エネルギー宇宙線 GCRs とが核相互作用することで、中性子が発生して計測のバックグラウンド(雑音)になり、S/N 比が悪くなる。本研究では、50 kg 級の超小型衛星に搭載する中性子分光計を想定し、図1のような超小型衛星のジオメトリを仮定した。月や小惑星表層から発生する中性子を検出して天体表層に含まれる水の量を求めるために、宇宙機から放出される中性子バックグラウンドを見積もった。

超小型衛星の筐体は、一辺の長さが 50 cm 立方体とし、内部に 2 枚の板を挟む。衛星の構体はアルミ Al として、筐体の重量が 50 kg とした。搭載燃料はヒドラジン(N_2H_4)+酸化剤 MON-3(N_2O_4)及びキセノンガスの 2 種類を考える。ヒドラジンとキセノンガスとではそれぞれの持つ原子量の差の分だけ推力が異なるために、キセノンガスよりもヒドラジンのジオメトリでは燃料の重量を大きくした。ヒドラジンと酸化剤の重量は 75 kg であり、キセノンガスは、気圧を変化させることでその重量を変化させることが可能であるため、2.5 kg, 5.0 kg, 7.5 kg, 10 kg における中性子発生量を計算した。キセノンガス 10 kg における気圧はおよそ 50 atm である。ジオメトリ内の超小型衛星中心から半径 100 cm 球殻ソースから内側の筐体に向けて等方的に GCRs を照射する。Al 機体や燃料との核相互作用により発生する中性子を、衛星筐体の底面におけるエネルギースペクトル及び角度分布を数値シミュレーションで求めた。



B. 超小型衛星からのバックグラウンド

衛星から発生する中性子放出量に関する搭載燃料の依存性を調べた。衛星構体から発生する中

中性子のエネルギースペクトルを図2に示す。キセノンガス搭載時の中性子束は高速中性子と比較的高エネルギーの熱外中性子が支配的である。これは、減速材となる軽元素を含む物質がジオメトリ中に存在しないからである。キセノンガスの重量が大きくなるにつれて、高速中性子のフラックスが増加する。一方、化学燃料(ヒドラジンと酸化剤：水素・窒素・酸素)の場合は、天体の表層から発生する中性子スペクトルと似た形となる。これは、発生した高速中性子が化学燃料を構成する軽元素が減速材として働き、中性子を熱化するために熱中性子束が増加

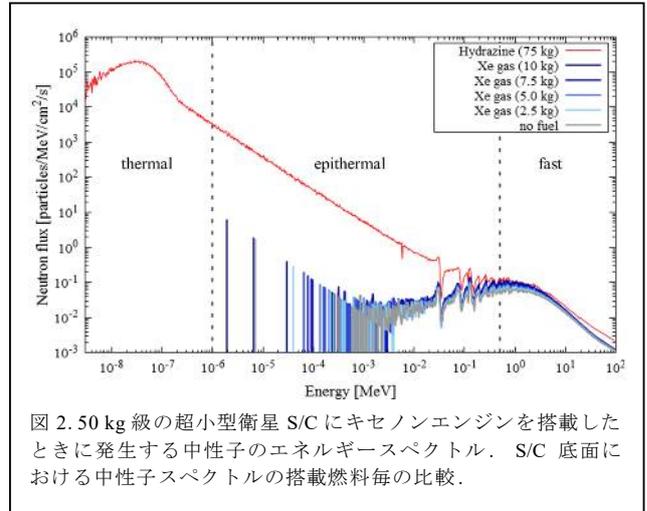


図 2. 50 kg 級の超小型衛星 S/C にキセノンエンジンを搭載したときに発生する中性子のエネルギースペクトル。S/C 底面における中性子スペクトルの搭載燃料毎の比較。

するためである。この図からわかるように、キセノンガスは化学燃料のスラスターと比較して、熱外中性子や熱中性子の発生量が大幅に減少することが判る。中性子計測法を用いる宇宙の水の検出では、大量の化学燃料を搭載した大型宇宙機に比べて少量のキセノンガスを載せた超小型衛星のほうが、遥かに有利であるといえる。

C. 天体表層から放出される中性子のエネルギースペクトルとの中性子束の水素濃度依存性

ターゲットとして CI コンドライト組成を仮定した。GCRs をターゲットに照射して、その表面から放出される中性子のエネルギースペクトルについて、その水素濃度依存性の計算結果を図 3 に示す。また、中性子フラックスの各エネルギー領域 (熱・熱外・高速) について、水素濃度に対する変化率を図 4 に示した(水素濃度 0 ppm の中性子束に規格化)。

水素濃度の増加により高速中性子、熱外中性子のフラックスは単調減少する。それに対し、熱中性子のフラックスは 5000 ppm 程度までは増加し、その後減少していくことがわかる。特に、熱外中性子のフラックス変動は水素存在量の変化に強く影響を受ける。

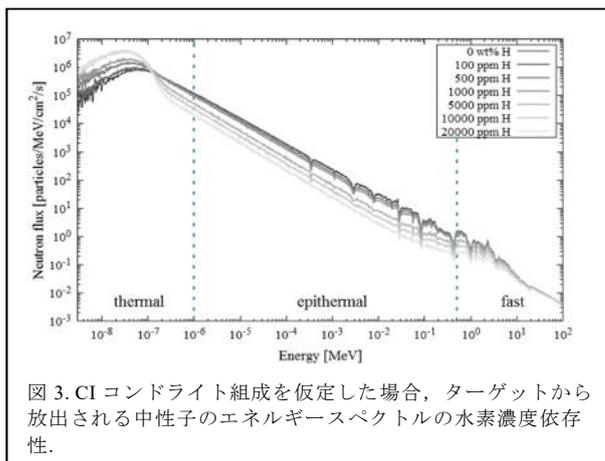


図 3. CI コンドライト組成を仮定した場合、ターゲットから放出される中性子のエネルギースペクトルの水素濃度依存性。

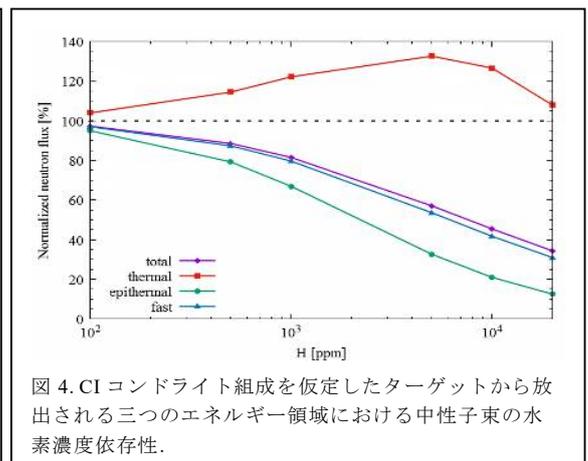


図 4. CI コンドライト組成を仮定したターゲットから放出される三つのエネルギー領域における中性子束の水素濃度依存性。

月面や小惑星の表面から放出される中性子の三つのエネルギー領域 (熱・熱外・高速中性子) の計測を行えば、天体の表層に含まれる水素濃度の定量ができることが明らかになった。また小惑星については、中性子計測により天体表面物質の組成が求められることで、可視・近赤外分光の反射スペクトルと同様な分類が可能になる。

2. 主な研究成果

- 発表論文「H. Kawamoto and S. Kojima, "Electrostatic Precipitation in the Martian Environment," *J. Aerospace Engineering*, Vol. 32, No. 3 (2019) 04019006」が、*Journal of Aerospace Engineering* の Editor's Choice に選定された。
日本画像学会より川本広行が「功労賞」を受賞した。
- Boston University にて Electromagnetic Handling of Regolith Particles on Moon, Mars and Asteroids および Electrostatic Cleaning of Dust on Solar Panels of Mega Solar Power Generation Plants の題目で川本広行が Invited Lecture (2件) を実施
- HeyLabo の HP (<https://hey-labo.com/labo/kawamoto-mech-waseda/blog/8>) に川本広行のインタビュー記事が掲載された。
- 2020年1月16日～2020年3月31日、IHI エアロスペース社の委託研究「月面ローバのレゴリス付着及び侵入対策に関する研究」を実施。受託金額 500,000 円
- 月面における氷粒子の静電採取技術に関する研究」の題目で、科研費 基盤研究(C) (一般) が決定。助成金額 2,470,000 円
- Institute of Basic Science (IBS) Daejeon, Korea; Korean Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) Daejeon, Korea; The 4th Int'l Conf. on Active Materials and Soft Mechatronics (AMSM 2019) Sheraton Grand Incheon Hotel, Incheon, Korea にて、招待講演、セミナー講演を実施。
- 唐牛讓, 長岡央, 石原吉明, 鹿山雅裕, 山本聡, 長谷部信行, 橋爪光, 小川佳子, 矢田達, 春山純一, 安部正真, 大竹真紀子, HERACLES サイエンスワーキンググループ, HERACLES 国際科学定義チーム; [PPS08-16]“HERACLES mission: Returning to the Moon by an ESA-JAXA-CSA Joint Study”, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 2019 年 5 月 30 日(木)幕張メッセ 国際会議場

3. 共同研究者

長谷部信行 (理工総研 名誉研究員), 川本広行 (理工総研 名誉研究員), 岩瀬英治 (基幹機航 教授)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- T. Tamura, R. Akiyama, R. Tanaka, H. Kawamoto and S. Umezu, "Groove fabrication on surface of soft gelatin gel utilizing micro-electrical discharge machining (Micro-EDM)," *J. Food Engineering*, 277 (2020) 109919.
ゲル状の軟体の精密加工を目的としたマイクロ放電加工技術を開発した。
- H. Kawamoto, "Improved Electrostatic Precipitator in Martian Environment," *J. Aerospace Engineering*, Vol. 33, Issue 3 (2020) 04020011.
火星大気である CO₂ に含まれる粉塵の除去を目的とした静電脱塵機構を開発し, 80%以上の脱塵性能を実証した。
- H. Kawamoto, "Vibration Transport of Lunar Regolith for In-Situ Resource Utilization Using Piezoelectric Actuators with Displacement-Amplifying Mechanism," *J. Aerospace Engineering*,

Vol. 33, Issue 3 (2020) 04020014.

月レゴリスの搬送を目的とし、アクチュエータとして振動増幅機構を備えた振動搬送機構を開発した。

- H. Nagaoka, T. J. Fagan, M. Kayama, Y. Karouji, N. Hasebe, Mi. Ebihara; "Formation of ferroan dacite by lunar silicic volcanism recorded in a meteorite from the Moon", *Progress in Earth and Planetary Science* (2020) 7:12; <https://doi.org/10.1186/s40645-020-0324-8>.
- N. Hasebe, M. Miyajima, E. Shibamura, A. Hitachi, M. Naito, K. Murakami, H. Kusano, J.A. Matias-Lopes, V. Dmitrenko; "alpha-particle spectrometer based on xenon gas ionization chamber using coplanar electrodes", *Nucl. Instr. Methods, Res. A* 25(2019) 123-127.
- H. Kusano, M. Miyajima, N. Hasebe, and V. V. Dmitrenko; "Measurements of electron mobility and longitudinal diffusion coefficient in high pressure xenon doped with hydrogen", *Jpn. J. Appl. Phys.* 58(2019) 038001, <https://doi.org/10.7567/1347-4065/aafc4a>.
- M. Naito, N. Hasebe, H. Nagaoka, C. Wohler, A.A. Berezhnoy, M. Bhatt, K.J. Kim; "Potassium and Thorium Abundances at the South Pole-Aitken Basin Obtained by the Kaguya Gamma-Ray Spectrometer", *J. Geophys. Res. Planets* 114(9)2019. <http://dx.doi.org/10.1029/2019JE005935>.
- S.-L. Guo, T. Doke, D.-H. Zhang, B.-L. Chen, L. Li, J.-S. Li, N. Hasebe, N. Yasuda, T. Murakami; "Determination of number and diameter of superheated droplets in bubble detectors (BD) of Type T-12 by irradiation with high energy heavy ions ^{56}Fe , ^{84}Kr and ^{132}Xe at accelerator", *Perspectives in Science* (2019) 12, 100398, Available online at www.sciencedirect.com, ScienceDirect, journal homepage: www.elsevier.com/pisc.

4.2 総説・著書

- 川本, "太陽光発電パネルの静電クリーニング", 岩谷直治記念財団 研究報告書, Vol. 42 (2019) pp.92-94.

太陽電池発電の問題点である粉塵の静電クリーニングに関する解説論文である。

4.3 招待講演

- H. Kawamoto, "Electromagnetic Handling of Regolith Particles on Moon, Mars and Asteroids," Boston University (2019).
月・火星・小惑星上に存在するレゴリスの静電操作に関する報告である。
- H. Kawamoto, "Electrostatic Cleaning of Dust on Solar Panels of Mega Solar Power Generation Plants," Boston University (2019).
太陽電池発電の問題点である粉塵の静電クリーニングに関する報告である。
- N. Hasebe, K.J. Kim; "Resource Utilization of The Moon, Mars and Asteroids --- Concerning Water and Mineral Resources ---", The 4th Int'l Conf. on Active Materials and Soft Mechatronics (AMSM 2019), Oct. 16-19, 2019 | Sheraton Grand Incheon Hotel, Incheon, Republic of Korea.
- N. Hasebe; "Lunar and Planetary Science Based on the Nuclear Method", Seminar at School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Feb. 20, 2019 | Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima Province, Thailand
- N. Hasebe; "Application of Nuclear Spectroscopy to Planetary Science and Resource Utilization in Space --- Securing a Better Life in the Future ---", Nov. 20, 2019 | Seminar of Physics Division at Institute of Basic Science (IBS), Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea.

4.4 受賞・表彰

- Editor's Choice in Journal of Aerospace Engineering 対象論文: H. Kawamoto and S. Kojima, "Electrostatic Precipitation in the Martian Environment," *J. Aerospace Engineering*, Vol. 32, No. 3 (2019) 04019006.

- 川本, 功勞賞, 日本画像学会 (2019).

4.5 学会および社会的活動

- H. Kawamoto, "Vibration Transport of Lunar Regolith for In-Situ Resource Utilization Using Piezoelectric Actuators with Displacement-Amplifying Mechanism," 32nd International Symposium on Space Technology and Science (32th ISTS), Fukui (2019).
月レゴリスの搬送を目的とし, アクチュエータとして振動増幅機構を備えた振動搬送機構を開発した.
- H. Kawamoto, "Improved Electrostatic Precipitator in Martian Environment," 49th International Conference on Environmental Systems (ICES 2019), Boston (2019).
火星大気である CO₂に含まれる粉塵の除去を目的とした静電脱塵機構を開発し, 80%以上の脱塵性能を実証した.
- B. Guo, W. Javed, B. Figgis, Y. S. Khoo, C-Yu Wu, J. Chesnutt and H. Kawamoto, "Electrodynamic Dust Shield for Particle Repulsion in Solar Energy Applications," IOP Electrostatics Conference 2019, Manchester (2019).
太陽電池発電の問題点である粉塵の静電クリーニングを, Doha で実証した.
- H. Kawamoto, "Electrostatic Cleaning of Dust on Solar Panels of Mega Solar Power Generation Plants," Workshop on International Standards Related to Solar PV Power Generation and Operating Solar PV Plants in Desert Environments, Doha (2019).
太陽電池発電の問題点である粉塵の静電クリーニングに関して, 据置型と可動型を開発し, とともに 80%以上のクリーニング性能を得た.
- 川本, 吉田, 前田, "イオン風を利用した火星環境における CO₂ガスの導入機構", 第 31 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD31), 東工大 (2019).
イオン風を利用した火星環境における CO₂ガスの導入機構を開発し, 火星環境である低圧での問題点を提示した.
- 川本, "静電力を利用した太陽電池パネル上の砂のクリーニング機構", D&D2019, 九大 (2019).
太陽電池発電の問題点である粉塵の静電クリーニングに関して, 可動型を開発し, 80%以上のクリーニング性能を得た. また, 粉塵のセメント化に対する対策を提示した.
- 川本, 久保, "鉛直振動による月レゴリスや氷の回収機構", 機械学会年次大会, 秋田 (2019).
パイプを垂直振動することによって, 月レゴリスや氷を 1 m 程度の上方まで採取できることを示した.
- 秦, 柴田, 川本, "進行波電界を用いた月面における氷の垂直サンプリング機構", 第 63 回宇宙科学技術連合講演会, 徳島 (2019).
パイプに巻き付けた電極に 4 相の進行波電界を印加することによって, 月レゴリスや氷を 1 m 程度の上方まで採取できることを示した.
- 江川, 鮎川, 岩坪, 川本, "磁力を利用した月・火星土壌のサンプリングシステム", 第 63 回宇宙科学技術連合講演会, 徳島 (2019).
月・火星レゴリスが磁性体であることを利用して, 磁気力より, レゴリスを長距離搬送できることを示した.
- 川本, 郭, 武田, 陳, "月レゴリスの振動搬送と粒度分別", 第 28 回スペース・エンジニ

アリング・コンファレンス [SEC'19] 講演論文集 No. 19-394, 鳥取 (2019).

傾斜支持した円環を斜め方向に加振することによって月レゴリスを効率よく上下に粒度分別できることを示した.

- 唐牛譲, 長岡央, 石原吉明, 鹿山雅裕, 山本聡, 長谷部信行, 橋爪光, 小川佳子, 矢田達, 春山純一, 安部正真, 大竹真紀子, HERACLES サイエンスワーキンググループ, HERACLES 国際科学定義チーム ; [PPS08-16]“HERACLES mission: Returning to the Moon by an ESA-JAXA-CSA Joint Study”, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 2019 年 5 月 30 日 (木)幕張メッセ 国際会議場

5. 研究活動の課題と展望

- 2020-2022 の予定で科研費を受託したので, 2020 年度はこれを中心に研究を行う. また, IHI エアロスペースの受託研究は 2019 年度でいったん終了するが, 2020 年度以降も継続する予定である. さらに, 月面における氷粒子の採取 (下図参照) に関して JAXA と連携して研究を行う予定である.

