

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04927

研究課題名(和文) 月面における氷粒子の静電採取技術に関する研究

研究課題名(英文) Electrodynamic Sampling of Water Ice on the Moon

研究代表者

川本 広行 (Kawamoto, Hiroyuki)

早稲田大学・理工学術院・名誉教授

研究者番号：50318763

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、月の極地に氷の存在が確認されたことから、これを採取して、大規模な有人月面探査に利用することが期待されている。具体的には、米国NASAを中心に、月面有人探査Artemis計画が進められており、わが国もこれに参画することが決定している。このため、本研究では、機械的な掘削やベルトコンベヤなどの従来技術に対して信頼性などの点で利点のある静電式や振動式のハンドリング機構の研究を行った。その結果、静電式については、4相進行波を用いる方式を、振動式については、振動搬送を利用する方式を検討し、これらの有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在計画されている機械的な氷粒子の操作は、高重量となる、消費電力が大きい、制御が複雑である、軸受やスライド部などにダストが侵入し故障する危険性がある、などの問題点があり、これを止揚する新しい方式の有効性を実証した。このような研究はNASAをはじめとしてどこからも報告されておらず、われわれのオリジナルである。なお、進行波電界(電界カーテンと称された)によって粒子を搬送する技術は、1970年代に増田(東大)が最初に発表した我が国独自の技術であり、これの宇宙応用技術が実現できれば、月面探査における我が国の存在感を増すことができると期待される。

研究成果の概要(英文)：In-situ resource utilization is indispensable for large-scale human lunar exploration. Water ice, one of the most precious resources, is believed to exist in the Moon's polar regions. Because the capture and delivery of ice are required to utilize water on the Moon, the following capture and delivery technologies utilizing electrodynamic and vibration forces are developed. The first is a capture and delivery system utilizing an electrodynamic traveling wave. A four-phase high voltage is applied to the parallel line or ring electrodes to form an electrodynamic traveling wave. The ice particles are conveyed by the traveling wave. The second is a vibration delivery system. When the lower end of an axially vibrating tube is immersed in a layer of ice particles, particles are introduced into the tube, and the friction force between the particles and the inner wall of the tube is used to convey the particles forward in a horizontal tube and/or upward in a vertical or inclined tube.

研究分野：機械工学

キーワード：宇宙探査 月面探査 静電搬送 振動搬送 サンプリング レゴリス 個別要素法 月面ローバー

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、月の極地に氷の存在が確認されたことから、これを採取して、大規模な有人月面探査に利用することが期待されている。具体的には、米国 NASA を中心に、月面有人探査 Artemis 計画が進められており、わが国もこれに参画することが決定している。このため、本研究では、機械的な掘削やベルトコンベヤなどの従来技術に対して信頼性などの点で利点のある静電式や振動式のハンドリング機構の研究を行った。

### 2. 研究の目的

宇宙探査は人類の普遍的な夢であり、各国でさまざまなプロジェクトが進められている。わが国でも、月探査機 Kaguya や小惑星探査機 Hayabusa の成功が、科学的な成果だけでなく、われわれに夢と感動をあたえてくれたことは記憶に新しい。しかし、宇宙探査は科学研究にとどまらず、実利でも注目されている。とくに月は地球に最も近い天体であり、近年、氷の存在が確認されたことから、資源探査や将来の宇宙探査活動を行ううえでの前進基地としての利用が期待されている。これらを実現するためには、まず「どの場所に、どのような形態で、どの程度の量の」水が存在するのかを直接探査する必要がある。本研究では、この探査活動に不可欠な水の採取に注目し、ほかに例のない独自の技術確立することを目的とする。提案する採取方法は、信頼性、重量、必要電力などの点で格段に優れていると思われる静電式と振動式であり、本研究によってその有効性を実証した。

### 3. 研究の方法

開発した採取方法の第一は、機械式の採取方法に対して、信頼性、重量、必要電力などの点で格段に優れていると思われる進行波電界を利用する方式である。氷は絶縁性であることや比誘電率がレゴリス(月の砂)と同等であることなど、比重がレゴリスの 1/3 程度であることを除いて、その物理的性質はレゴリスに類似している。いっぽう、静電力による粒子のマニピュレーションに関しては、電子写真や静電脱塵などの分野で工業的にも成熟した技術がある。また宇宙応用でも、我々のほか、NASA Kennedy Space Center や MIT など多くの研究実績がある。具体的には、レンズや太陽電池パネルなどに堆積するルナダストの進行波電界によるクリーニング、進行波電界によるレゴリスの搬送、定在波電界による宇宙服のクリーニング、ダストの静電シールド、微小重力下におけるレゴリスの静電サンプリング、レゴリスの静電分級、静電脱塵、等々である。したがって、氷粒子に対しても、この静電操作技術が適用できると考えられる。すなわち、これまで培ってきたルナダストの静電クリーニングや静電搬送技術を、氷粒子あるいは氷とレゴリスの混合物の採取にも適用できるのではないかと、というのが基本的な発想である。第2の採取方法は、振動式である。パイプ、もしくは平板を斜め方向に振動させるとその中(もしくは上)の粒子が摩擦力によって搬送される。本研究では、この振動搬送についても検討した。

### 4. 研究成果

研究期間中、コロナ禍により活動が制約されたが、在宅で実施できるシミュレーションや論文執筆を中心に、以下の研究を実施した。また、最終年度は、コロナ禍もやや落ち着いてきたので、対面での学会発表などの活動も行った。

まず、静電式の採取方式に関しては、パイプにリング状の電極を巻き付け、これに進行波電界を印加することによって、氷粒子を上方に搬送するものであり、電極形状や進行波などの条件を適正化することによって、1-m 程度まで、レゴリス粒子や氷粒子を搬送することができることを実験により実証した。(図1参照)低重力・真空の月面での性能は、個別要素補によってシミュレーションし、地上よりも高性能が期待できることを示した。研究成果は、国内学会で発表したほか、英文誌に投稿し、受理された。

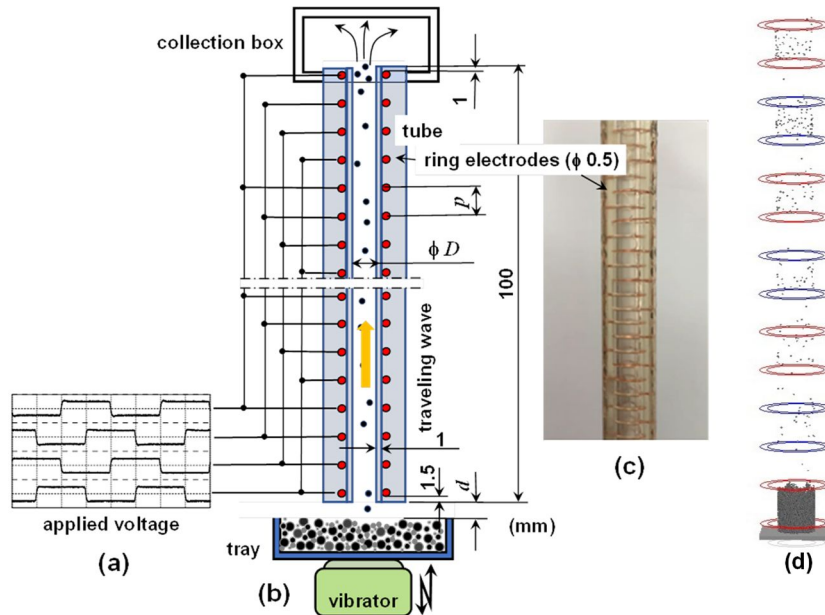


図1 静電進行波を利用した氷粒子の垂直搬送システム (a) リング電極に印加する4相高電圧波形(b)搬送装置の構造 (c) リング電極を巻き付けたプラスチックパイプの外観 (d) 粒子の垂直搬送を個別要素法によって計算した結果

また、振動式の採取方式は、中空パイプを上下振動することによって粒子を上方に搬送するというユニークなものであり、この方式についても、条件の適正化によって1-m程度まで、粒子を搬送することができることを実験により実証した。(図2参照)低重力・真空の月面での性能は、ドイツDLRの研究者とコレボレーションし、その有効性を示した。この研究についても、国内学会で発表したほか、英文誌に投稿した。

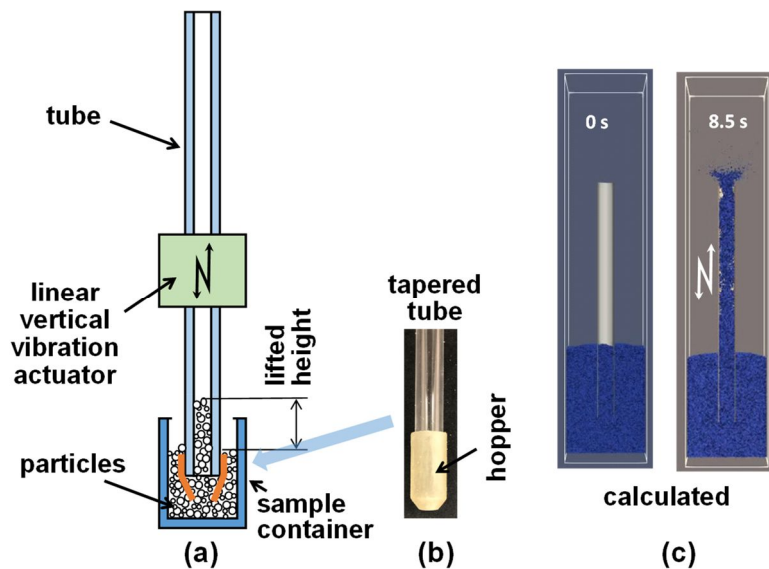


図2 振動を利用した氷粒子の垂直搬送システム (a) 搬送装置の構造 (b) 搬送チューブ先端形状 (c) 低重力真空の月面環境における垂直搬送を個別要素法で計算した結果

また、これらに関連する活動として、(1) JAXAの「宇宙探査イノベーションハブアドバイザーボード」の専門委員として活動した。(2) 米国の科学技術雑誌 ScienceNews のインタビューを受け、その記事が掲載された。(3) 共同執筆の Advances in Extraterrestrial Drilling: Ground, Ice, and Underwater (川本執筆 7.6.2 Electrostatic and Magnetic Regolith Transport and Capture)が、CRC Press より発行された。(4) 「月面ローバーのレゴリス除去技術に関する質疑対応」の某社からの委託業務を行った。(5) 発表論文 Improved Electrostatic Precipitation in the Martian Environment, J. Aerosp. Eng, 33 (2020) が、Editor's Choice Collection に選定された。(6) 本研究の派生技術である太陽電池パネルの静電クリーニングに関し、Qatar University の QU High-Potential Projects Program H3P Grant の External Reviewer に就任し、提案研究を評価した。(7) 川本のアドバイスをもち、Colorado School of Mines と Lockheed Martin が公募した Dusty Moon Challenge に、Aachen University の学生が応募した Concept of a Modular High Volume Regolith Transport System

が採用された。(8) Qatar University, Post-Doc Initiative Program の Reviewer に委嘱された。(9) H. Kawamoto, Electrostatic cleaning equipment for dust removal from soiled solar panels, J. Electrostat, 98 (2019) 11-16 が、Journal of Electrostatics の Most Cited Article と Most Downloaded Article に選定された。(10) Lesile Connelly, Electromagnetic experiment sweeps dust, purifies air in a lunar lander, TECHNICAL NOTES in American Society of Civil Engineers (2022.7) に、H. Kawamoto, Feasibility Study on Electrostatic Precipitator Combined with Ionic Fan for Air Purification in Lunar Module, J. Aerosp. Eng, 35 (2022) 04022053 が紹介された。(11) 共同執筆の本 Electrostatic Dust Mitigation and Manipulation Techniques for Planetary Dust(川本執筆 Chapter 6 Particle handling with electrostatic force)が、Elsevier より発行された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Kawamoto and K. Chin	4. 巻 31
2. 論文標題 Particle-Size Classification of Lunar Regolith through Inclined Vibrating Tube	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Aerospace Engineering	6. 最初と最後の頁 6021003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001264	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Kawamoto and R. Egawa	4. 巻 34
2. 論文標題 Long-Range Magnetic Transport of Regolith Particles Utilizing Multistage Coil Gun on Moon and Mars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Aerospace Engineering	6. 最初と最後の頁 4021026
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001268	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Kawamoto, K. Hata and T. Shibata	4. 巻 34
2. 論文標題 Vertical Transport of Lunar Regolith and Ice Particles Using Electrodynamic Travelling-Wave	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Aerospace Engineering	6. 最初と最後の頁 4021042
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Kawamoto	4. 巻 34
2. 論文標題 Handheld Cleaning Tool for Lunar Dust Adhered to Spacesuits Using Magnetic and Electrodynamic Forces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Aerospace Engineering	6. 最初と最後の頁 4021044
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001287	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Kawamoto and R. Ichikawa	4. 巻 34
2. 論文標題 Development of Ionic Pump Used in Martian Environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Aerospace Engineering	6. 最初と最後の頁 4021050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)AS.1943- 5525.0001308	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Kawamoto, K. Kubo, R. Kikumiya and M. Adachi	4. 巻 34
2. 論文標題 Vertical Transportation of Lunar Regolith and Ice Particles Using Vibrating Tube	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Aerospace Engineering	6. 最初と最後の頁 4021097
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001346	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Kawamoto, J. Tanabe and Y. Kobayashi	4. 巻 113
2. 論文標題 Airflow assisted electrodynamic cleaning of sand deposited on solar panels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Electrostatics	6. 最初と最後の頁 103618
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elstat.2021.103618	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Kawamoto, H. Morooka and H. Nozaki	4. 巻 35
2. 論文標題 Improved Electrodynamic Particle-Size Sorting System for Lunar Regolith	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Aerospace Engineering	6. 最初と最後の頁 4021115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001371	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Kawamoto	4. 巻 107
2. 論文標題 Improved detachable electrodynamic cleaning system for dust removal from soiled photovoltaic panels	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Electrostatics	6. 最初と最後の頁 103481
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elstat.2020.103481	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Kawamoto, K. Nogami and Y. Kadono	4. 巻 197
2. 論文標題 Vibration Conveyance of Lunar Regolith in Lunar Environment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 139-144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2022.05.028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Kawamoto	4. 巻 35
2. 論文標題 Feasibility Study on Electrostatic Precipitator Combined with Ionic Fan for Air Purification in Lunar Module	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Aerospace Engineering	6. 最初と最後の頁 4022053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001451	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 H. Kawamoto
2. 発表標題 Long-Range Vertical Transport of Lunar Regolith and Ice Particles Using Electrodynamic Force and Mechanical Vibration
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (33rd ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川本
2. 発表標題 自然風の増幅機構を利用した太陽光発電パネル上に堆積する砂の静電クリーニング
3. 学会等名 第33回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD33)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川本
2. 発表標題 月レゴリスの静電操作に関する研究
3. 学会等名 第22回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川本、市川、長崎、戴
2. 発表標題 火星環境におけるイオン風を利用したCO2ガスの導入機構
3. 学会等名 第32回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD32)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川本
2. 発表標題 鉛直振動による月レゴリスのサンプリング機構
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2020
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 川本、陳
2. 発表標題 ブラジルナッツ効果を利用した月レゴリスの粒度分別
3. 学会等名 機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川本、久保、菊宮、秦、柴田、安達
2. 発表標題 月面における氷粒子の垂直採取
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川本
2. 発表標題 電磁場における粒子の動特性に関する研究－画像技術から宇宙探査まで－
3. 学会等名 2020年度日本画像学会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川本
2. 発表標題 イオン送風機と組み合わせた月モジュール内で用いる静電脱塵装置
3. 学会等名 第34回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD34)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川本
2. 発表標題 月面上の低重力環境におけるレゴリスの振動搬送
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Kawamoto
2. 発表標題 Electrodynamic dust shield systems to clean soiled solar panel
3. 学会等名 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Kawamoto
2. 発表標題 Capture and Delivery Technologies of Water Ice on Moon
3. 学会等名 34th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS34) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川本、野崎、大黒
2. 発表標題 静電進行波を利用した月レゴリスの分級
3. 学会等名 第35回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD35)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 H. Kawamoto (Yoseph Bar-Cohen, Kris Zacny edition)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 CRC Press	5. 総ページ数 374
3. 書名 Advances in Extraterrestrial Drilling: Ground, Ice, and Underwater	

1. 著者名 H. Kawamoto (Nima Gharib, Javad Farrokhi Derakhshandeh and Peter Radziszewski edition)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 265
3. 書名 Electrostatic Dust Mitigation and Manipulation Techniques for Planetary Dust	

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	DLR			
カタール	Texas A&M University at Qatar			