

令和 1 年 4 月 27 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人 日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 30 年度

受付番号 201860286

氏名 安達 真聡

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地 (派遣先国名) 用務地: ケルン (国名: ドイツ)

2. 研究課題名 (和文) ※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。

Electrostatic Effects on Particle Dynamics and Its Application for HandlingTechnologies of Lunar Regolith (宇宙環境下の静電場における粒子のダイナミクスとルナレゴリスの操作技術に関する研究)

3. 派遣期間: 平成 30 年 4 月 1 日 ~ 令和 1 年 9 月 30 日

4. 受入機関名及び部局名

ドイツ航空宇宙センター (DLR)5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注) 「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

本研究の目的は、将来の長期宇宙探査を実現するための、月面に存在する土壤粒子 (レゴリス) のハンドリング技術開発と、静電場における粒子ダイナミクスの解明である。物資の搬送リスクやコストの観点から、現地資源であるレゴリスを活用する In-Situ Resource Utilization (ISRU) が不可欠であり、また、このレゴリスは探査機器等に付着し易く、機器の隙間から侵入して故障を招くことから、その対策 (除去技術) が最重要課題の 1 つとして認識されている。つまり、宇宙環境下で不具合なく稼働する、信頼性の高い粉体ハンドリング技術の確立が長期宇宙探査の成否の鍵である。そこで本研究では、機械的な駆動部が無いため故障しづらく、制御が簡単で信頼性が高い、静電気力を活用した粉体ハンドリング技術に着目した。具体的には、(1) 静電気力と振動を組み合わせた粒子ハンドリングシステムの開発、(2) 電子・イオン・紫外線等の宇宙特有の帯電環境が粒子帯電・静電場に及ぼす影響の解明、(3) 粒子の帯電量を能動的に制御するシステムの開発、の 3 点について研究活動を行ったので、その実施状況を説明する。また、その研究過程で行った発展研究についてもここで報告する。

(1) の課題について、粒子に強く働く付着力を軽減し、静電気力による操作性の向上を実現するために、振動と静電気力を組み合わせたハイブリッドシステムの開発に取り組んだ。最初に、宇宙服の表面に付着したレゴリス粒子を 4 相進行波電界によって自動的に除去する静電式宇宙服クリーナーを開発した。本システムの開発は European Astronaut Centre (EAC) / European Space Agency (ESA) と共同で行われたものであり、そこに所属する修士課程・学士課程の学生 (Spaceship EAC という制度により、欧州内の大学から派遣された学生) と共同で取り組んだ。本システムについて、EAC によって開発された月模擬砂 EAC-1 を使用して実験を行い、静電場における粒子の挙動観察とその画像解析を行った。その結果、進行波電界の周波数・印加電圧などの電氣的パラメータがそ

の性能に及ぼす基礎特性を明らかにすることができた。また、20 μm 以下の小粒径粒子を静電式宇宙服クリーナーにより除去することが難しく、静電力のみを利用する際の最適な粒子サイズが存在することを確認した。その成果をまとめて、European Lunar Symposium 2018 において発表した。また、その成果について、指導していた学生が修士論文を完成させた。

次に、電磁アクチュエータにより垂直加振された状態での静電式宇宙服クリーナーの性能を調査した。周波数を 1-100 Hz まで変化させた状態で除去試験を行ったところ、大粒径粒子の流動性向上に対して、振動の導入が効果的であり、粒子の除去速度が向上することを確認した。小粒径粒子に対しては、100 Hz までの周波数の振動の影響は確認できなかった。より付着力の影響が強い小粒径粒子に対しては、高周波数の振動を利用して振動加速度を大きくすることが効果的であると考えられる。現在、超音波振動アクチュエータにより発生させた高周波数の振動と静電気力とを組み合わせたシステムを開発中である。それを用いて、粒子サイズと振動周波数（振動加速度）の組み合わせが、静電場における粒子運動の操作性に及ぼす影響を調査する予定である。

また、上記の静電式宇宙服クリーナーの技術を応用して、無重力環境下での 3D printing を実現するための静電式粒子供給システムの開発にも取り組んだ。無重力下では重力による粒子の沈殿・堆積が発生せず、また、ISS 等の無重力環境下では既存の粒子ハンドリング技術の利用に制限があることから、宇宙環境下での利用に適した粒子搬送技術・粒子層の形成技術が必要とされている。そこで、静電式宇宙服クリーナーに利用した進行波電界の技術を応用した粒子供給システムの開発に取り組んだ。静電式宇宙服クリーナーでは外側へ向かう進行波電界により粒子を外側へ除去するのに対し、静電式粒子供給システムでは内側へ向かう進行波電界により、レーザー等で粒子層を焼結させる領域まで粒子を静電気力により搬送し、粒子層を形成させる。ここまでの研究では、静電気力により粒子を焼結領域まで搬送させることが可能であるものの、静電場中での粒子飛翔距離が大きく、焼結領域よりもさらに先まで搬送される粒子が存在することが確認された。今後は、粒子の搬送方向を制御するためのガイドを導入することにより、より均一な粒子層を形成するための条件を確認する予定である。

(2)の課題については、当初、電子・イオン・紫外線を個別かつ同時に照射可能な大規模プラズマ照射施設内（German Aerospace Center (DLR), Bremen, complex plasma facility）で、試験を行う予定であったが、施設の担当者と具体的な実験条件について協議を重ねていく中で、技術的な課題により、施設の利用が困難であるという結論に達した。そこで、他の方法を検討する中で、欧州の宇宙工学に関する中心的な研究機関である、European Space Research and Technology Centre (ESTEC)/ESA との共同研究を行うことを考えた。現地の月・火星探査研究グループに所属する Dr. Roland Trautner のサポートの下、実際のシステム開発などを行う研究者・エンジニア達に対して、静電式レゴリスハンドリング技術についての研究講演を行い、その結果、Dr. Fabrice Cipriani と共同研究を行うことで合意した。そのために、ESA が提供する Open Space Innovation Platform (OSIP) という宇宙工学に関わる研究を実施する博士課程学生雇用のための助成金に、DLR でのメンターである Prof. Matthias Sperl と Dr. Fabrice Cipriani と共同提案書を提出し、その 1 次選考を通過した。現在も、ESTEC の研究者達とその研究計画・調整を続けている。今後は、その OSIP プログラムの中で ESTEC の施設を利用した粒子の月面環境下での帯電状態についての実験・数値解析を行う予定である。また、ESTEC や DLR の専門家達との議論の結果、電子・イオン・紫外線等の影響だけでなく、摩擦帯電の影響についても検討が必要であるという考えに至り、現在、DLR において修士課程の学生を指導しながら、粒子と静電気式粒子ハンドリング技術の表面材料の組み合わせが、粒子の摩擦帯電へ及ぼす影響についても調査中である。具体的には、粒子・静電気式システム双方の表面をコーティングして、その帯電列を調整し、それらの接触条件・環境条件（大気・真空・電子照射・イオン照射・紫外線照射）が粒子帯電に及ぼす影響を調査する。その学生は OSIP プログラムの候補者として、博士課程進学後もその研究を継続する予定である。また、(3)の課題についても、(2)の変更とも関連して、ESTEC・DLR の Complex Plasma Research Group（Oberpfaffenhofen, Prof. Hubertus Thomas）と協力して、紫外線を活用した粒子の能動的帯電制御システムの開発と、その帯電メカニズムを解明するための研究を行うことで合意した。特に、紫外線の波長・照射角度・距離・時間といった帯電システムとしての基礎特性を明らかにし、その粒子帯電だけでなく帯電粒子のダイナミクスに及ぼす影響を明らかにする。

以上のように、DLR において当初に計画されていた研究について、予期せぬ課題が発生したものの、様々な研究者との交流を図るなかで、その解決策を見出し、国際的な研究コンソーシアムの形成や共同研究を実現することに成功した。この過程で、Alexander von Humboldt Foundation より Humboldt Research Fellowship for Postdoctoral Researcher が授与されることが決まり、海外特別研究員としての滞在期間は当初の予定よりも短くなったものの、DLR において研究活動が継続できることとなった。当初の予定から修正された箇所も多いが、今後も本研究課題について取り組んで

いく。また、より長期的に本研究課題に対して取り組めるようになったことで、各国の宇宙研究機関と協力しながら、実際の宇宙探査システム搭載に向けた最適化などにも取り組んでいきたい。

ここからは、上記の課題に取り組む中で新たに開始した発展研究の経過について述べる。まずは、磁場中での粉体ダイナミクスの調査に関する研究を説明する。静電気式だけでなく、磁気式の粉体ハンドリング技術も、機械的な駆動部が無いため故障しやすく、宇宙環境との相性が良いといった特徴を持つが、その無重力環境下での粉体運動については理解されていない部分が多い。また、磁場中の粒子内に発生した磁気双極子モーメントにより磁化した粒子同士がお互いの運動に影響しあう現象は、電場中の電気双極子モーメントによる現象と類似している等と、磁場と静電場での粉体運動には関連性が多く、そこで得られた知見は本研究の主題である静電場での粒子ダイナミクスの学理構築に還元されることが期待できる。そこで、無重力環境下における磁場中での粉体ダイナミクスを明らかにするために、DLR の Dr. Peidong Yu が主導する粉体気体の研究に参画した。粉体気体とは、粒子群の空間密度や外部からのエネルギー注入状態によって、粉体が励起されて気体のようにふるまう状態である。地上では重力によってこの気体状態を保つことが難しいため、その研究の多くは無重力環境下で行われており、物理学の最先端分野の 1 つとして世界中で研究が行われている。その中でも注目されているのが、熱力学的平衡状態にある粉体気体へのエネルギー注入を止めた際に、粒子同士が衝突しながらエネルギーを散逸し（粉体気体の冷却と呼ばれる）、粒子のクラスターが形成されるという現象である。この形成過程を調査することで、宇宙の塵から形成されたと考えられる惑星の起源解明に繋がることが期待されている。また、工学的にも、将来の宇宙環境下での ISRU を考えた際に、粉体運動制御という観点からも粉体気体の研究は重要である。この研究の課題点は、制約の多い無重力環境下で、どのように粒子群を励起するかということである。一般的には、粒子群が設置される容器を加振し、接触した粒子にエネルギーを与えるという方法が利用されてきたが、どうしても粒子群全体をランダムに加振することが難しいという課題がある。そこで、われわれのグループは、容器の周囲に複数の電磁コイルを設置し、それらを輪番的に稼働させることで様々な方向の磁場を形成させ、容器内の磁性粒子を非接触的な磁気力により加振する方法を開発した。ドロップタワー、航空機のパラボリックフライト、超音速ロケットなどにより再現した無重力環境下で実験を行い、従来の機械的加振方法と比較して、より平衡状態に近い粉体気体を再現することに成功した。その研究成果を論文にまとめて、それが Review of Scientific Instruments に採択された。

さらに、無重力下での輪番的な磁場中において、どのように粉体気体の平衡状態に達したのかに関して、粒子解析技術として広く利用されている個別要素法に磁気力計算の影響を導入し、それを用いたシミュレーションと無重力実験での観察結果とを比較することで、磁性粉体気体のダイナミクスについての詳細な検討を行った。その結果、1) 複数の電磁コイルによる様々な方向からの加振、2) 粒子内部の磁気双極子によって磁気力の指向性（基本的には電磁コイルを向く）が緩和、3) 輪番的な磁場生成間隔の微小時間中における粒子同士の衝突によるランダムな方向へのエネルギーの散逸、の 3 点によって平衡状態を再現していることを明らかにした。この結果を論文にまとめて、それが Nature Microgravity に採択された。現在も、粉体気体に関する研究を継続中である。具体的には、粒子数を増加させてシステムの大規模化を図り、クラスターの形成過程に関する詳細な調査を行う。現在、所属先である DLR と、中国空間技術研究院 (CAST) の間で、CAST 側が打ち上げる人工衛星の内部で DLR 側の提供する実験装置を使用して、宇宙空間上での様々な基礎物理実験を行うというプロジェクトが進展している。その中で粉体気体に関するプロジェクトが採択され、シミュレーション・実験準備の面からそのプロジェクトに参加中である。今後は、この研究過程で培った磁性粒子ダイナミクスに関する知見、粒子シミュレーションの経験を活かして、レゴリスの磁気式ハンドリング技術の開発、静電場・磁場を統合した粉体ダイナミクス学理構築などにも繋げていきたい。

次に、もう 1 つの発展研究として実施した、機械振動を利用して粉体を垂直方向に搬送する粉体振動ポンプシステムの研究について説明する。静電気力や磁気力を利用した粉体ハンドリング技術の課題として、大量の粉体が扱えない、粒子の電氣的・磁氣的性質に大きく影響を受けるという点が挙げられる。そこで、静電気力や磁気力を駆動力とする誘電・電磁アクチュエータなどを利用して、機械的駆動部を必要とせずに機械振動を発生させ、それを利用して粒子を搬送する粉体振動ポンプシステムを開発した。このシステムは、アクリルパイプと電磁アクチュエータのみで構成される。アクリルパイプを粉体に導入し、垂直方向に振動させると、粒子がパイプの内部を昇っていくという現象を利用し、月面からのレゴリス粒子の採取・搬送を行う。このシステムは、大量搬送・高ダスト耐性・高信頼性という特徴を持ち、その性能は粒子の静電的・磁氣的性質にもよらないなどと様々な利点を持つ。本システムについて、月模擬砂 EAC-1 を使用した実験を行い、地上環境下において月模擬砂が垂直方向に搬送可能であることを実証し、また、振動の周波数・振幅・加速度

が粒子搬送性能に及ぼす影響を明らかにした。本システムについて DLR の修士課程の学生を指導し、その成果を European Lunar Symposium 2018 において発表した。このシステムは、静電気式・磁気式技術との組み合わせも容易であり、宇宙だけでなく地上用の技術としても広範囲な粉体産業へ応用できることが期待される。現在も引き続き、DLR・EAC の研究者達と協力して、その詳細な特性について調査中である。