

特別賞

宇宙環境下における静電気力を利用した 粉体ハンドリング技術の開発とその地上技術への応用

－微小粒子に着目して、宇宙を切り拓く－

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科 機械科学専攻
博士後期課程3年

安達 真聡

1. 緒言

アメリカのアポロ計画、わが国の Hayabusa、中国の嫦娥計画など、宇宙探査ミッションは世界中に夢と希望を与えるだけでなく、資源探査や生命の起源解明の手がかりを掴むためにも重要である。また、近年では各国の宇宙研究機関だけでなく、民間企業による宇宙環境の産業応用も注目されている。NASA の報告によると、将来の有人や長期の宇宙探査を実現するためには、物資の搬送リスクやコストの観点から、レゴリスと呼ばれる惑星土壌を現地資源として活用する In-Situ Resource Utilization (ISRU) が必要である [1-3]。また、図 1 に示すように、このレゴリスは宇宙服や探査機器等に付着し易く、その隙間から侵入して故障を招くことから、その対策が最重要課題の 1 つとして認識されている [4-5]。つまり、宇宙環境下において土壌である粉体を利用し、さらにその悪影響を軽減するためには、宇宙環境上でも不具合なく稼働する粉体ハンドリング技術の確立が不可欠である。過去の宇宙探査ミッションではドリルやブラシ、空気輸送等の機械式・流体式のハンドリング技術の使用が検討されてきたが [6-11]、機械式のシステムは駆動部分の隙間に砂が侵入して不具合を招くこと、損耗により寿命が低下すること、装置が複雑かつ巨大化すること、消費電力が大きいこと等の課題がある。また、流体式システムに関しては、宇宙環境で流体である中間媒体を得ることは難しく、地上から媒体を搬送する場合は、その漏れを確実に防いで常時慎重に管理しなければならない等の課題がある。このような機械式・流体式の問題点を解決するものとして、本研究では静電気力を利用した粉体のハンドリング技術開発に取り組んだ。静電気力を利用したシステムは不具合を招きやすい機械的な駆動部を必要とせず、空気や液体等も使用しない。さらに、装置が小型化かつ簡素化でき、しかも制御が簡単で、低消費電力であるなど、宇宙環境下で使用するにあたり多くの利点を有している。地上環境下において、静電気力を利用したシステムは数 $10\mu\text{m}$ ~ 数 $100\mu\text{m}$ スケールの粒子の運動を操作するのに



図 1. 月レゴリスが付着した宇宙服

使用されている。図 2 に示すように、粒子に加わる外力はそのサイズに大きく影響を受け、静電気力はこれらのサイズにおいて地上で支配的となるからである。粒子運動を操作するうえで重要な外力のバランスは、地上に関しては十分な研究がなされているも

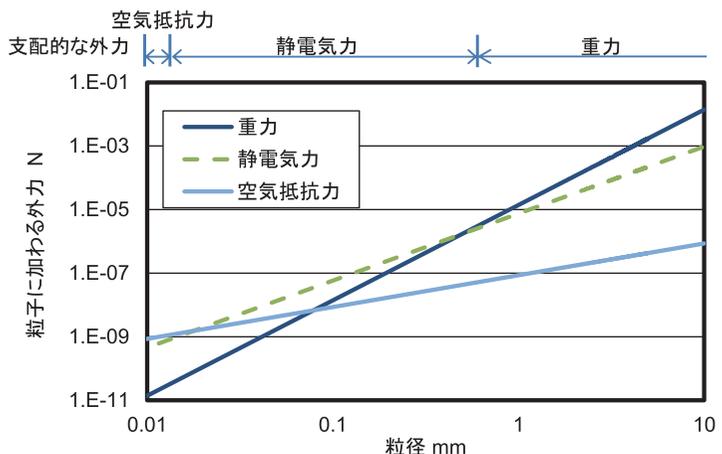


図 2. 各粒径の月レゴリス粒子に加わる外力の理論計算結果

の、低重力・真空といった宇宙特有の環境下においては詳細な研究は行われていない。特に、小粒径粒子に対して大きく影響を及ぼす空気抵抗力や、大粒径粒子に対して支配的な重力が変化した際の粉体挙動については明らかにされていない。さらに、適用範囲に制限があるため、静電気力を利用した粉体ハンドリング技術の開発は十分に行われていない。そこで本研究の目的は、第一に、宇宙環境下の静電場における粉体ダイナミクスに関する基礎理論を構築することである。静電気力を利用した粉体ハンドリング技術を開発し、その性能を地上における実験だけでなく、真空や低重力環境下での実験や粉体解析手法である個別要素法 (DEM) を使用した数値シミュレーションにより評価しながら粉体挙動を観察することで、宇宙環境が粉体ダイナミクスに及ぼす影響を明らかにする。具体的には、月・火星・小惑星上においてレゴリス粒子が起因する問題を解決する技術として、静電分級システム、静電サンプラー、静電防塵システムを開発する。さらに、宇宙用に開発された技術を地上の身近な問題に応用するために、砂漠で太陽光発電パネル表面に堆積した砂を除去するための静電ソーラークリーナーについての研究も実施したので、本論文にて紹介する。

2. 月面上における In-Situ Resource Utilization を実現するための静電分級システム

将来の長期月面探査を実現するためには、現地の月レゴリス粒子から水、酸素、金属等を抽出し、利用する技術が必要となる。特に、数 $10\mu\text{m}$ 以下の小粒径粒子には多くの金属が含まれており、それを建設資材として利用した月面基地開発の計画も進められている [12-13]。このプロセスを効率的に進めるためには、その $1\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ 程度の粒度分布を持つレゴリス粒子群の中から $10\mu\text{m}$ 程度以下の小粒径粒子を効率的に取り出すための分級システムが不可欠である。しかし、地球上で行われている分級の多くは粒子の搬送媒体として気体を利用するものであり、これを月で使用するのは実用的ではない。そこで、図3に示すように、宇宙環境で用いるための技術として、静電気力を利用した分級機構を開発した。このシステムは、基板上に平行電極を印刷し、これに位相が 90° 異なる4相の高電圧を印加することによって基板表面に進行波電界を形成し、この進行波が発生する静電気力によって、粒子を一方方向に

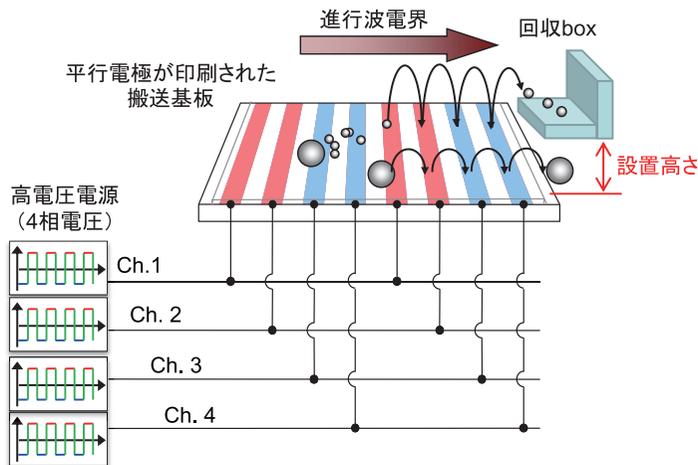


図3. 進行波電界を利用した静電分級システムの概要図 [16]

搬送する技術を応用している [14-15]。本研究では宇宙用として、このシステムに分級機能を付与させた [16]。基板上に、大・小の様々なサイズのレゴリス粒子を投入した際に、粒子に加わる外力のバランスにより支配的な外力が異なることを利用して分級を行う。具体的には、静電気力の影響を相対的に大きく受けて、高く飛翔しながら搬送される小粒径粒子のみを、基板上部に設置した回収 Box で採集する。JAXA と共同で大気・真空環境下における実験を実施し、その性能を確認した。図4に示すように、大気中では空気抵抗が支配的であるため、小粒径粒子は高く飛翔せず、20mm の高さに設置した回収 box には大粒径の粒子しか回収されなかった。その一方、真空環境下ではその影響がないことにより、小粒径粒子が高く飛翔し、粒子の飛翔高さの違いを利用した分級が可能であることを実証した。また、小粒径粒子ほど高く飛翔するので、回収 box を高く設置するほど、回収された粒子は小さくなり、200mm の高さに設置した際は、 $20\mu\text{m}$ 以下の粒子が効率的に回収できることを確認した。さらに、重力が地上の $1/6$ となる月面では、その飛翔高さの違いが顕著に表れるため、 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子が効率的に回収できることを数値シミュレーションにより予測した。このように、将来の ISRU を実現するための画期的な分級システムを提案するとともに、小粒径粒子に対して働く空気抵抗の影響と、真空環境でのそのダイナミクスを明らかにすることができた。

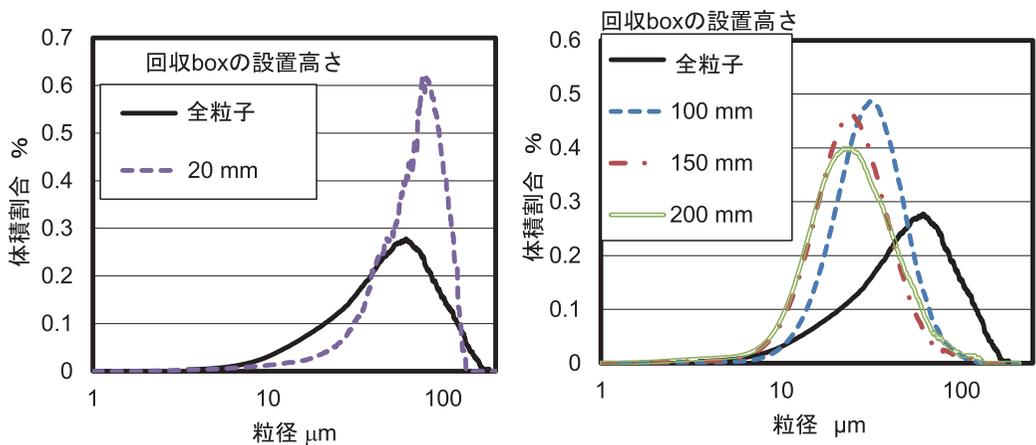


図4. 実験前の月レゴリスの粒度分布と静電分級システムにより回収された粒子の粒度分布 (左：大気中の実験結果、右：真空中の実験結果、印加電圧： 2kV_{pp} 、周波数： 1Hz)。回収 box の高さをパラメータとして実験を行い、大気中では粒度分布のピークが右側へシフトしていることから大粒径粒子が多く含まれており、真空中ではピークが左側へシフトしていて、小さい粒子が多く含まれている。

3. 小惑星サンプルリターンミッションを成功に導くための静電サンプラー

小惑星探査機 Hayabusa は、小惑星の表面からレゴリス粒子を持ち帰ることに初めて成功し、世界中から注目を集めた[17-19]。Hayabusa にはレゴリスを回収するために弾丸打ち込み式の採取システムが搭載された。そのシステムは、弾丸によって硬い地盤でも砕くことができ、また、柔らかい砂状の土壌からでも粒子が回収できるため、地球からの観測ではその表面状態が確認できない小惑星に対し、最適な回収システムであるといえた。しかし、機械的な駆動機構があるために、その操作はどうしても複雑になってしまい、システムエラーによって実際には弾丸が発射されず、小惑星に探査機が衝突した際の衝撃で、幸運にも舞い上げられた粒子が回収されていたということも明らかになった[19]。つまり、ターゲットとなる惑星表面に適した採集システムだけでなく、それらと併用可能なシンプルかつ信頼性の高い採集システムも必要となる。そこで、図5に示すような、駆動部をもたず、シンプルな制御で操作可能な静電サンプラーを開発した[20-21]。アクリルチューブの下部に設置した平行メッシュ状電極に交流電圧を印加し、発生する静電力によって粒子を電極間で振動させる。粒子の振動と電圧の極性切り替えのタイミングにより、粒子は上部メッシュ電極の隙間を抜ける。地上の重力環境ではすぐに粒子が落下してしまうものの、小惑星の低重力環境下では粒子自身の慣性によってそのまま上部の回収 box まで搬送することができる。シンプルな電気回路で構成されるので簡単に制御でき、小型化が容易であるため、探査機に搭載しやすい。本システムの性能を確認するためには、航空機を利用した上下飛行のパラボリックフライトにより低重力環境を再現し、その環境下で実験を行う必要があるが、その高価なコストにより実験を行うことは簡単ではない。そこで、他大学の低重力環境を必要とする研究室に働きかけ、各研究室の教員も説得し、航空機のレンタル料をシェアすることで解決した。図6に示すように、1-G の環境下ではサンプリングできないが、0.01-G 環境下では、900mg 程度の1mm 以下の月レゴリス粒子を回収できることを実証した[20]。また、小粒径粒子だけでなく2mm のガラス粒子と5mm の岩石のサンプリングを行い、図7に示すように、1G 環境下では全く動かすことが出来なかったこれらの粒子が0.01-G 環境下において回収可能であることを確認した[21]。これらの実験結果は数値シミュレーションの結果と良く一致した。さらに、重力加速度が低下するほど静電サンプラーの回収性能が向上することを数値シ

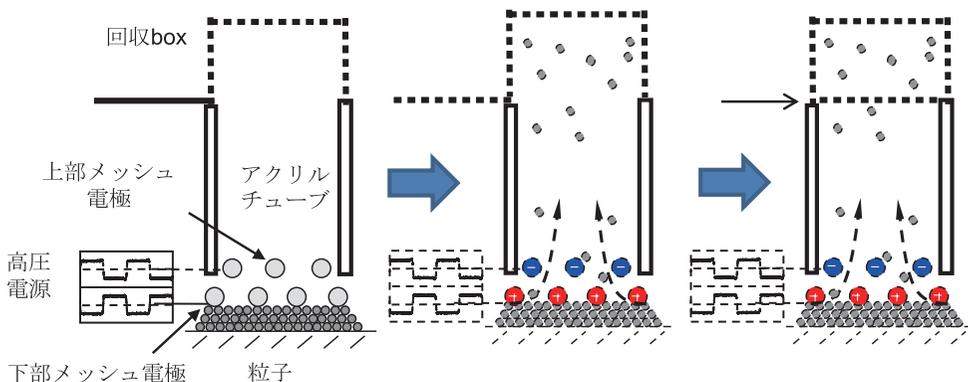


図5. 静電サンプラーを用いたサンプリング方法[20,21]

ミュレーションにより予測した。このように、1mm 以上の大粒径粒子に対する重力の変化の影響および重力加速度と静電気力とのバランスについて明らかにし、低重力環境下における静電サンプラーの有用性を示すことが出来た。

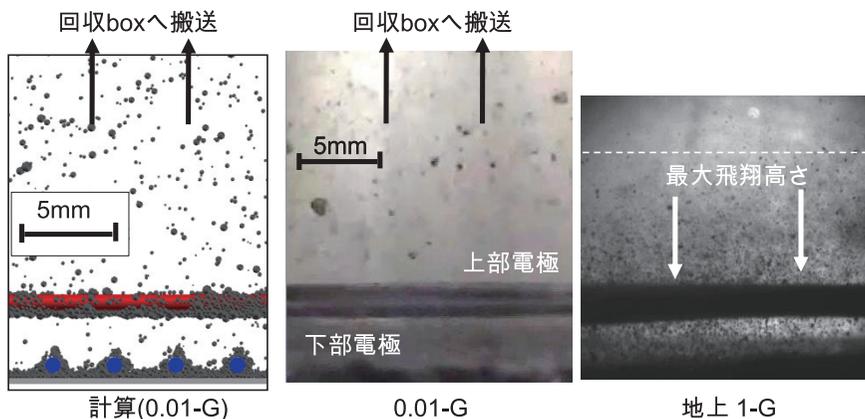


図6. 静電サンプラーを用いた実験・シミュレーション中の月レゴリスの挙動。地上では粒子が電極を抜けた後にすぐに落下するのに対し、1/100重力環境下では回収 box まで搬送される。(印加電圧：10kV_{p-p}、周波数：1Hz) [20]

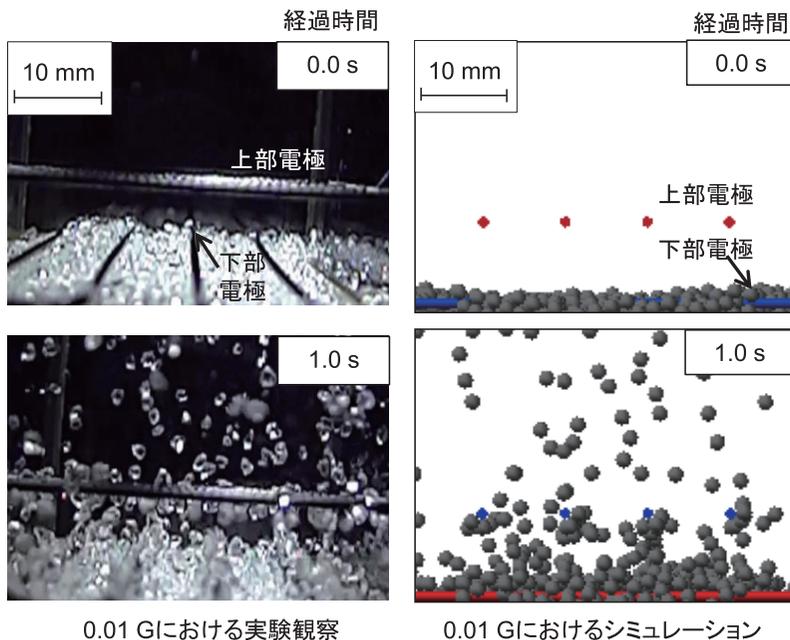


図7. 静電サンプラーを用いた実験・シミュレーション中の2mm のガラス粒子挙動。地上重力では動かすことが出来ないガラス粒子も、0.01G の環境では回収することが出来る。(印加電圧：10kV_{p-p}、周波数：1Hz) [21]

5. 月面探査時のレゴリスによる悪影響を軽減するための静電防塵システム

採集や分級等のレゴリスを利用する観点での技術だけでなく、その悪影響を軽減する技術として、探査機器の機械的駆動部の隙間に侵入する月レゴリスを除去する静電防塵システムを開発した[22]。この機構は、図8に示すように、機器の隙間に設置した電極間に交流電圧を印加し、それにより発生する静電力によってダストを電極へ引き付け、電圧の極性が切り替わると反発力が働いて外側へ弾き飛ばすという仕組みである。可動部がなく非接触で粒子を除去できること、制御が容易であること等の特徴がある。本システムの地上・月における性能を、地上実験と数値シミュレーションにより評価した結果、地上において本システムは隙間に侵入しようとする砂の95%程度を弾き飛ばせることを確認し、月面環境では低重力の影響と空気抵抗が無視できることにより、その性能が向上することを予測した[22]。また、今回は実験の都合上、駆動部の隙間を1mmに設定したものの、実際にはこれよりも小さく設計されることが殆どであり、防塵性能はより向上するものと考えられる。このように、過去に例を見ない静電力を利用した防塵システムを開発し、その宇宙環境における有用性を示すことができた。

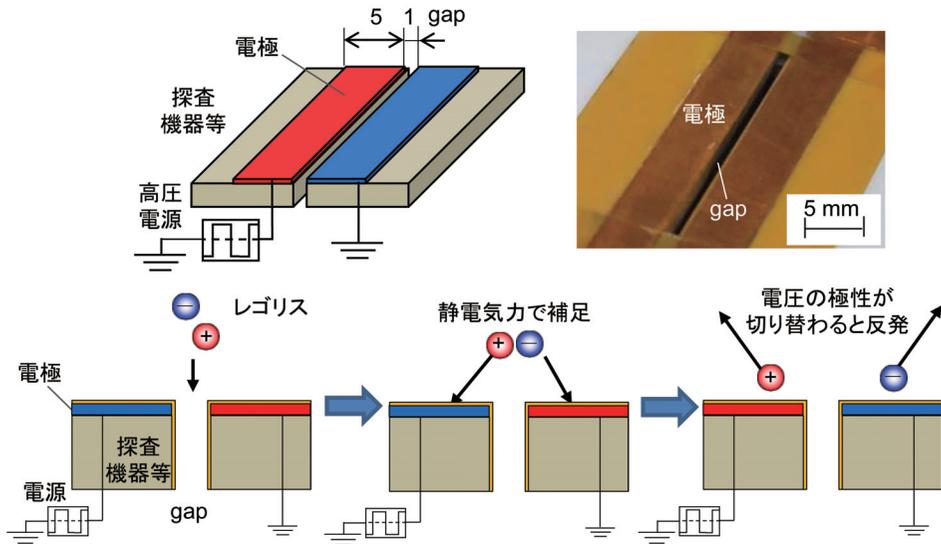


図8. 静電防塵システムの構成図・写真(上図)と、粒子を除去する仕組み(下図)[22]

6. 宇宙用に開発された技術の地上応用(ソーラークリーナー)

これまでの宇宙探査用の技術を応用し、地上の砂が起因する問題に対しても研究を行ったのでここで紹介する。地球温暖化防止に関連するCO₂低減等の観点から、太陽光発電が注目されている。太陽光発電パネルは日照量の多い砂漠地帯に大量に設置し、大規模な発電を行うのが効率的だが、図9のように砂嵐により舞い上げられた砂塵が、パネルの表面に堆積して太陽光の透過を妨げることで発電量を低下させるという問題がある。砂漠環境では降雨がないため、堆積した砂塵が自然に除去されず、また、砂漠では水が貴重であり、高温の厳

しい環境下において大量のパネルを人的に洗浄することは実現的ではない。この問題に対し、静電気力を利用したソーラークリーナーが注目されている。先行研究では、静電分級システムに応用したような4相電圧を利用した進行波電界を、透明なガラス基板に発生させることで、太陽光透過を阻害せずにクリーニングできるシステムが開発されているが、その配線の構造上、大量生産するのに適しておらず、そのままでは産業的に応用できない[23-24]。そこで、図10に示すような2相の定在波電界により砂をクリーニングするシンプルなシステムが開発された[25]。定在波の場合、一方向へ搬送されずに、ランダムに様々な方向へ砂が弾き飛ばされるため、そのままではクリーニングには使えないが、太陽光発電パネルは太陽光を効率的に集めるために、数10°ほど傾けて設置されるため、重力によって落下方向へと徐々に動かすことが出来る。仕組み自体はシンプルであり、またガラスへの配線が簡単になることで安価に生産できるため、産業応用に適している。このシステムについて、中東カタルの研究機関との実証試験が計画されており、その予備試験としてカタルの砂を利用した除去実験を行った。カタルの砂は10 μ m以下の小粒径粒子が多く、月レゴリス粒子と比較して相対的に小さい。小さい粒子に対し強く働く付着力の影響が大きくなるため、幾つかの小粒径粒子が残ってしまうものの、70%の砂の除去が可能であることを実証した(図11)。このように宇宙用の技術やそこで得られた知見を活用して、地上の身近な問題であるエネルギー問題を解決するための技術を開発することが出来た。

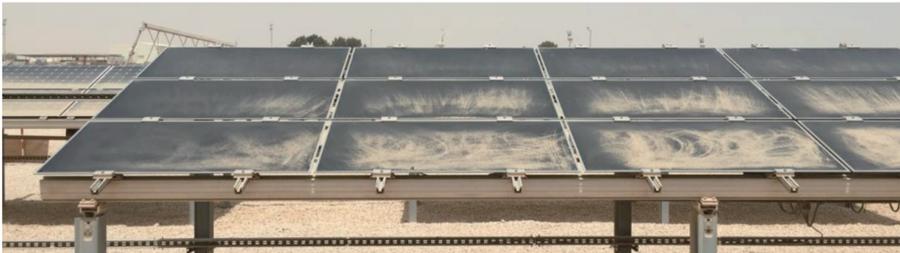


図9. カタルの砂漠環境に設置された太陽光発電パネルの写真。クリーニングされて綺麗だったパネルの表面に、1日の間に発生した砂嵐により、堆積した砂の様子を示している。

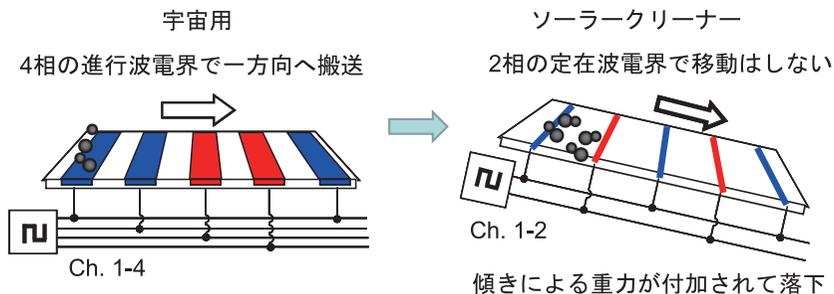


図10. 宇宙用の4相進行波電界とソーラークリーナー用の2相定在波電界による砂除去の仕組みの違い。ソーラークリーナーでは、重力によって落下方向へと徐々に除去される。

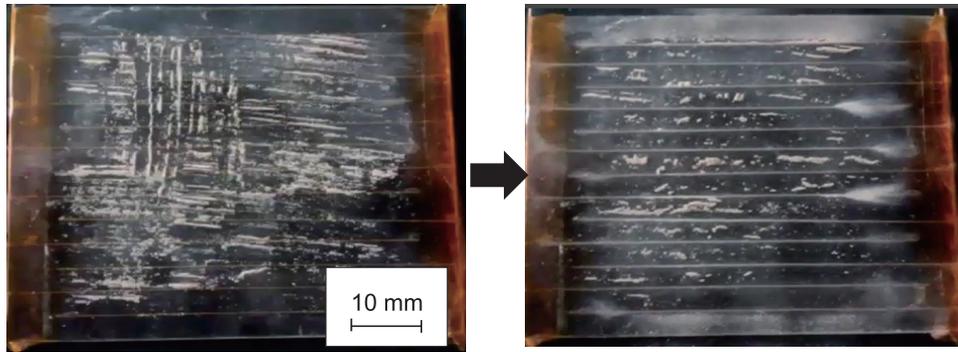


図11. 除去前(左図)と除去後(右図)のソーラークリーナー表面の様子。電極の間部分に少量の砂が残っているものの、70%程度の砂が除去できた。(初期設置粒子： $10\text{g}/\text{m}^2$ 、印加電圧： 6kV_{pp} 、周波数： 1Hz 、パネルの傾き： 20°)

7. まとめと今後の展望

静電気力を利用した粉体ハンドリング技術を開発し、その性能を地上・真空・低重力環境下での実験と数値シミュレーションにより評価しながら、宇宙環境下の静電場における粉体ダイナミクスの基礎理論を構築するに至った。先行研究の機械式・流体式のハンドリング技術ではなく、静電気力を利用するという着眼点は新しく、また、真空と低重力が静電場における粉体のダイナミクスに及ぼす影響を明らかにしたのは、世界で初めての成果である。開発した静電気力を利用した粉体ハンドリングシステムは宇宙環境上での使用に適しており、またその性能は地上よりも向上することから、将来の月・火星・小惑星探査ミッションにおいて利用することが期待できる。火星の有人探査や、深宇宙探査、さらには宇宙環境への移住や地球外生命の探査など、人類の共通の夢を実現するためには、今後も国内外の研究者達と英知を結集させながら、本研究を改良・発展させることが不可欠である。今後の具体的な課題としては、(1) 宇宙環境のプラズマが静電場におよぼす影響の調査、(2) $10\mu\text{m}$ 以下の小粒径粒子に対する付着力低減、(3) 地上の粉体が起因する様々な課題への応用が考えられる。

(1) 宇宙環境のプラズマが静電場におよぼす影響の調査

月や小惑星などの大気が殆どない真空の環境下では、物質がプラズマ状態となり、電荷を帯びたイオンや電子・陽子として存在している。それらが粒子と接触すると、粒子の帯電状態が変化し、また、静電場自体にも影響を及ぼすことが予測される。単純な真空環境下での実験は実施済みであるものの、宇宙線や太陽から飛来する太陽風等のプラズマ状態が関連する現象を考慮した実験は行っていない。それらの粉体ダイナミクスへの影響を確認することで、静電気力を利用した粉体ハンドリング技術の宇宙実用化が大きく近づく。

(2) $10\mu\text{m}$ 以下の小粒径粒子に対する付着力低減

ソーラークリーナーの実験において、 $10\mu\text{m}$ 以下の小粒径粒子に対して付着力が強く働き、静電気力によるハンドリングを阻害することが確認された。ただし、付着力は接触状

態が少し変わるだけでその力の大きさは容易に変化する。実際に、静電分級システムの実験では、大きい粒子が小さい粒子に衝突する際の影響などによって、付着力が軽減されて、分級することに成功している。つまり、付着状態の粒子に外乱を与え、それを静電場と組み合わせることで、ハンドリング性能を向上させることが期待できる。具体的には、カメラのレンズクリーニングに利用されている微小振動との併用が期待できる。振動により付着力を低減させて、静電力によって粒子を運ぶという手法を検討している。振動との併用により性能が向上することで、ソーラークリーナーの実用化が大きく近づき、エネルギー問題の解決に貢献することが期待できる。

(3) 地上の粉体が起因する様々な課題への応用

地上には、太陽光発電への砂の堆積だけでなく、粉体が起因する様々な問題がある。例えば、近年、世界中で高層ビルの建設が進められているが、その高層階のガラスに付着したダストのクリーニングは人的に行われており、安全面でのリスクが大きい。また、自動運転を実現するためには自動車の車載カメラや道路脇のカメラ等により、周囲の状況を逐次モニターすることが不可欠であるが、そのレンズ表面にダストやごみが付着するという問題は解決されていない。このような、泥臭くも根本的な解決がなされていない粉体の問題に対して、本研究で開発された技術を応用することが期待できる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、熱心なご指導を賜りました早稲田大学の川本広行教授に深く感謝を申し上げます。また、本研究に関わる実験・数値シミュレーションサポートをして頂いた川本研究室のメンバーに感謝いたします。

参考文献

- [1] Sanders, G. B., William E. L., "Integration of In-Situ Resource Utilization into lunar/Mars exploration through field analogs." *Advances in Space Research* **47**, 1 (2011), 20-29.
- [2] Sanders, G. B., William E. L., "Progress made in lunar in situ resource utilization under NASA's exploration technology and development program." *Journal of Aerospace Engineering* **26**, 1 (2012), 5-17.
- [3] Platts, W. J., et al., "Prospecting for native metals in lunar polar craters." *Proceedings of the American Institute of Aeronautics and Astronautics 7th Symposium on Space Resource Utilization* **338** (2014), 1-13.
- [4] Wagner, S., "The Apollo experience lessons learned for constellation lunar dust management." *TP-2006-213726* (2006).
- [5] Wagner, S., "Asteroid, Lunar and Planetary Regolith Management A Layered Engineering Defense." *NASA Technical Report* (2014), 20140011751
- [6] Zacny, K., et al., "Honeybee Robotics approach to technology development and infusion." *Aerospace Conference 2010* (2010), 1-7.
- [7] Finzi, A. E., et al., "SD2-How to sample a comet." *Space science reviews* **128**, 1-4 (2007),

- 281-299.
- [8] Mueller, R. P., Ivan T., "Lunar regolith simulant feed system for a hydrogen reduction reactor system." *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting* (2009).
 - [9] Mueller, R. P., Paul, J. V. S., "A review of lunar regolith excavation robotic device prototypes." *Space* (2011).
 - [10] Sullivan, T. A., et al., "Pneumatic conveying of materials at partial gravity." *Journal of Aerospace Engineering* **7**, 2 (1994), 199-208.
 - [11] Zacny, K., et al., "Investigating the efficiency of pneumatic transfer of JSC-1a lunar regolith simulant in vacuum and lunar gravity during parabolic flights." *AIAA Space*, (2010).
 - [12] Taylor, L. A., et al., "Lunar mare soils : Space weathering and the major effects of surface-correlated nanophase Fe." *Journal of Geophysical Research: Planets* **106**, E11 (2001) , 27985-27999.
 - [13] Taylor, L. A., Meek, T. T., "Microwave sintering of lunar soil : properties, theory, and practice." *Journal of Aerospace Engineering* **18**, 3 (2005), 188-196.
 - [14] Masuda, S., et al., "Confinement and transportation of charged aerosol clouds via electric curtain." *Electrical Engineering in Japan* **92**, 1 (1972), 43-52.
 - [15] Masuda, S., Matsumoto, Y., "Theoretical characteristics of standing-wave electric curtains." *Electrical Engineering in Japan* **93**, 1 (1973), 71-77.
 - [16] Adachi, M., et al., "Particle-Size Sorting System of Lunar Regolith Using Electrostatic Traveling Wave." *Proceedings of the 2016 Electrostatics Joint Conference*, (2016), B5.
 - [17] Kubota, T., et al. "Robotics technology for asteroid sample return mission MUSES-C." *The 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space : A New Space Odyssey* (2001), AS016.
 - [18] Saiki, T., et al. "Small carry-on impactor of Hayabusa2 mission." *Acta Astronautica* 84 (2013) , 227-236. (in Japanese)
 - [19] Hajime, Y., et al. "Touchdown of the Hayabusa spacecraft at the Muses Sea on Itokawa." *Science* **312**, 5778 (2006), 1350-1353.
 - [20] Adachi, M., et al., "Sampling of Regolith on Asteroids Using Electrostatic Force." *J. Aerospace Engineering* **29**, 4 (2016), 04015081-1-9.
 - [21] Adachi, M., et al., "Electrostatic Sampler for Large Regolith Particles on Asteroids." *J. Aerospace Engineering* (in press) (2016).
 - [22] Adachi, M., Kawamoto, H., "Electrostatic dust shield system used for Lunar and Mars exploration equipment." *Trans. JSME* **81**, 821 (2015), 14-00224 (in Japanese).
 - [23] Mazumder, M., et al., "Characterization of electrodynamic screen performance for dust removal from solar panels and solar hydrogen generators." *IEEE Transactions on Industry Applications* **49**, 4 (2013), 1793-1800.
 - [24] Horenstein, M. N., et al., "Predicting particle trajectories on an electrodynamic screen-theory and experiment." *Journal of Electrostatics* **71**, 3 (2013), 185-188.
 - [25] Kawamoto, H., Shibata, T., "Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels." *Journal of Electrostatics* **73** (2015), 65-70.

その他、2章に関する論文を現在、投稿中