

|      |      |    |       |          |         |
|------|------|----|-------|----------|---------|
| 専門分野 | 機械工学 | 氏名 | 白井 啓太 | 指導<br>教員 | 川本 広行 印 |
| 研究指導 | 精密工学 |    |       |          |         |

研究  
題目

## 進行波電界を利用した月土壤搬送システム

### 1. まえがき

近年、月面開発計画が世界各地で進められており、その中でも ISRU (In-Situ Resource Utilization) と呼ばれる月土壤などの現地資源から酸素や水を生成する技術が注目されている。そこでわれわれは、月土壤を大量かつ効率的に搬送できるシステムを開発するため、進行波電界と呼ばれる静電力を利用した粒子搬送に関する研究を行なっている。本研究では、月土壤の成分・形状・粒度分布を再現した模擬砂を用いて、粒子の搬送特性について定量的な調査を行い、最適な搬送条件を把握した。また、搬送基板の表面改良や、振動により粒子の運動を促進することで搬送性能の向上を図った。さらに、月模擬砂の搬送特性を数値解析によるモデル粒子の搬送シミュレーションに反映することで、地上での粒子挙動の再現と月面上での挙動の予測を行った。

### 2. 静電搬送システム

図1に粒子搬送（静電搬送）システムの構造を示す。電極を長手方向に縞状に並べた構造で、粒子—電極間の絶縁および電極間の放電防止のために、電極上は絶縁フィルムで被覆されている。進行波電界は、4台の発振器から位相を順に $\pi/2$ ずつずらした4相の交流信号を出力し、高圧アンプによって増幅し、縞状電極に印加した。これより粒子は静電力によって進行波方向に力を受け搬送される。

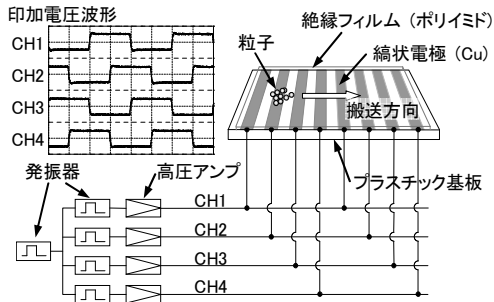


図1 静電搬送システムの概略図

### 3. 月模擬砂の搬送特性

月模擬砂は、形状が不均一で、粒度分布は $1\mu\text{m}$ から $1\text{mm}$ で粒径が小さいほど個数が多く、凝集性があるため搬送しにくい。そこで、月模擬砂の最適な搬送パラメータを把握するため、搬送基板の電極ピッチ( $p$ )と進行波電界の周波数を変化させ、1分間搬送した後に粒子重量を測定した。実験は粒子の凝集を防ぐために、超音波振動子を併用し

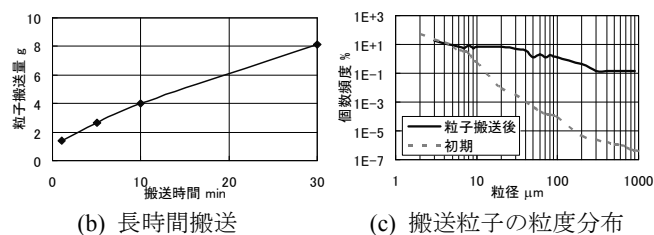


図2 静電搬送システムによる月模擬砂の搬送特性

て基板を振動させながら搬送した。図2(a)に示すように、電極ピッチが広いほど搬送量が増え、周波数は10 Hz程度が適当で、1分間で最大約2gが搬送された。また、超音波振動によって搬送性能が向上することも明らかとなった。次に、 $w/p=0.3/1.3$ の基板を用いて粒子搬送を長時間行ない、搬送量を測定した。図2(b)に示すように、30分間で約8gの粒子が回収された。今後、基板表面の改良や最適な基板振動値を把握することで、搬送性能の更なる向上が期待できる。そして、搬送された粒子は数 $\mu\text{m}$ から $1\text{mm}$ まで幅広く分布を持ち、月模擬砂の多様な粒径に対応できていることから(図2(c)), 静電搬送システムは月模擬砂に対し有効であるといえる。

### 4. 搬送粒子の挙動解析と傾斜特性

月面上での搬送を再現・予測するため、斜面に対する粒子の搬送形態を観察した。数値解析は電界計算と粒子挙動追跡計算から成り、電界分布は2次四角形要素による有限要素法でラプラス方程式を解いた。粒子挙動追跡計算は剛体球モデルによる個別要素法を用いて、式(1), (2)に示す運動方程式を4次ルンゲクッタ法により解いた。なお、 $\mathbf{F}_q$ :クーロン力、 $\mathbf{F}_{dipole}$ :分極力、 $\mathbf{F}_{image}$ :鏡像力、 $\mathbf{F}_{adhesion}$ :付着力、 $\mathbf{F}_{air}$ :空気抵抗力、 $\mathbf{F}_g$ :重力、 $i$ :粒子番号、 $m_i$ :粒子の質量、 $\mathbf{u}_i=(x, y, z)$ :粒子の並進ベクトル、 $\boldsymbol{\theta}_i=(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ :回転ベクトル、 $I$ :粒子の回転慣性モーメント、 $r$ :粒子半径、 $\mathbf{n}$ :法線方向単位ベクトル、 $\mathbf{J}$ :粒子 $i$ に働く衝撃力である。衝突後の状態については\*を添えている。傾斜に対しては $\mathbf{g} = (-\cos\phi, \sin\phi)\mathbf{g}$ とした。

$$m_i \ddot{\mathbf{u}}_i = \mathbf{F}_q + \mathbf{F}_{dipole} + \mathbf{F}_{image} + \mathbf{F}_{adhesion} + \mathbf{F}_{air} + \mathbf{F}_g, I_i \ddot{\boldsymbol{\theta}}_i = 0 \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_i^* = \dot{\mathbf{u}}_i + \mathbf{J} / m_i, \boldsymbol{\theta}_i^* = \boldsymbol{\theta}_i + r\mathbf{n} \times \mathbf{J} / I \quad (2)$$

図3(a), (b)より、実際の搬送と搬送シミュレーションがほぼ一致していることから、粒子の運動は式(1)に示した力により支配されていることが明らかになった。これを用いて月面上の搬送を予測した結果、重力 $1/6g$ 、空気抵抗ゼロである月面上の方が地上より搬送しやすいことを示した。(図3(c))

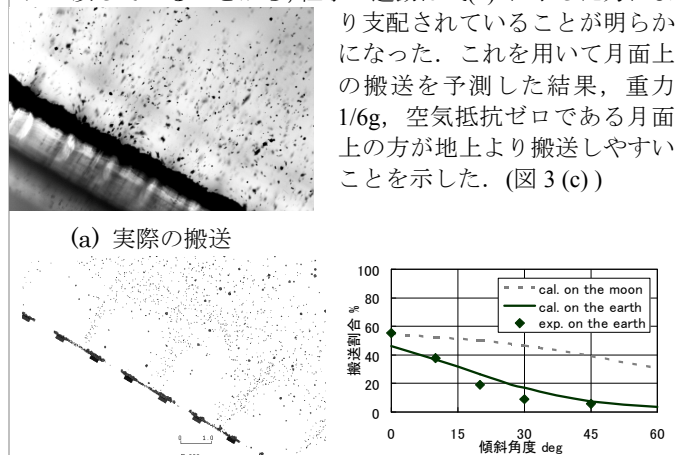


図3 実際の搬送と搬送シミュレーションの比較

( $w/p=0.3/1.3$ , 10 Hz, 粒径 $25\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ )

### 発表論文

- 白井, 内山, 大河原, 川本, 進行波電界を利用した月面ダストクリーニング機構の開発, SEAD20 (2008) pp.693-696.
- H. Kawamoto and K. Shirai, "Electrostatic Transport of Lunar Soil for In-Situ Resource Utilization," *Earth & Space 2010* (2010).