

専門分野	機械工学	氏名	内山 雅貴	指導 教員	川本 広行 印
研究指導	精密工学				
研究 題目	進行波電界を用いたルナダストの搬送				

## 1. まえがき

近年、月探査計画が世界各地で進められているが、技術的課題点の一つとして、ルナダストと呼ばれる月面上に存在する微小な月土壌粒子が、月面上に設置する探査機のソーラパネルや観測用レンズに堆積することで、探査に悪影響を与えてしまう問題がある。そこでわれわれは、ルナダストの除去を目的として、進行波電界と呼ばれる静電力を利用した粒子搬送機構を開発した。本研究では、ルナダストの入手は困難なため、成分・形状・粒度分布を再現した月模擬砂を用い、搬送特性を定量的に把握した。また、進行波電界中における月模擬砂の挙動を高速度カメラによって観測し、これを数値計算によって再現し、動特性を解明した。

## 2. 実験装置

図1に粒子搬送機構（静電コンベア）の構造を示す。粒子搬送基板は光を透過させるため、ガラスと透明電極を用いて作成した。粒子が接する基板表面材料は珪酸ガラスである。また、電極を長手方向に縞状に並べた構造で、電極ピッチは電極幅の2倍になるよう設計した。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の力を受け搬送される。

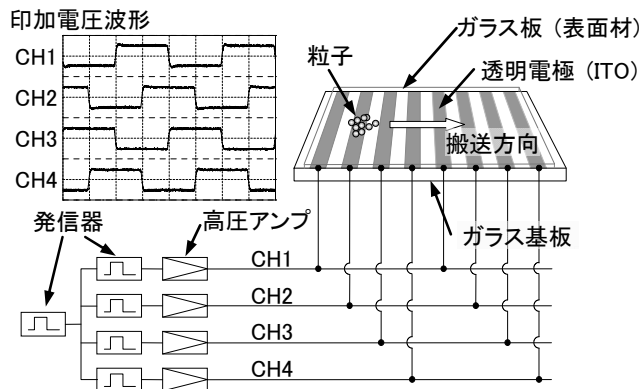
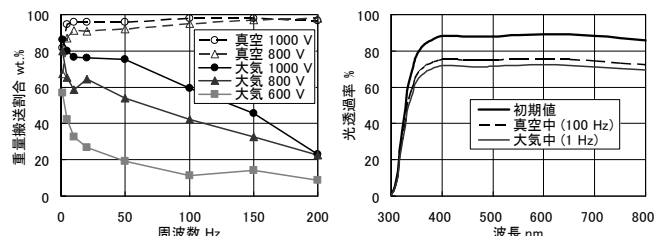


図1 粒子搬送機構の概略図

## 3. 月模擬砂の搬送特性

月模擬砂は、形状が不均一で縦横比が1.3程度の粒子である。また、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、凝集しやすい。そこで、搬送の基礎特性を把握するため、印加電圧と周波数を変化させ、基板上からどの程度搬送されるか、重量搬送割合を算出した結果を図2(a)に示す。大気中において電圧を上げると静電力が強くなり搬送割合が上がる。真空度 $10\text{Pa}$ の環境では空気抵抗が無いので、95%以上の粒子を搬送できた。しかし、最も搬送割合が高いときでも、数 $\mu\text{m}$ 以下の粒子が基板表面に付着して残留してしまう。この残留した粒子が基板にどの程度影響を及ぼすか、光透過率を測定した結果を図2(b)に示す。粒子を搬送すると、粒子を設置する前の初期値より2割ほど低下する。この付着した粒子の除去が、さらなる性能向上のための課題である。



(a) 電圧周波数特性

(b) 光透過率 (800 V)

図2 静電コンベアによる月模擬砂の搬送特性

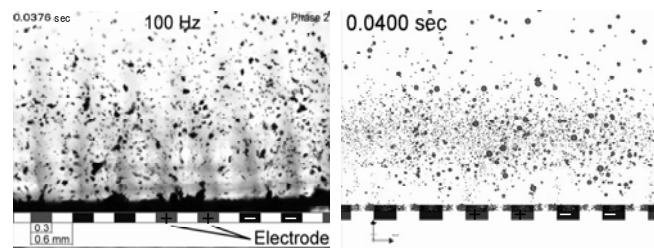
## 4. 搬送粒子の挙動解析

進行波電界中における月模擬砂の搬送形態と数値計算によりモデル化した搬送形態の比較・検討を行い、搬送メカニズムの解明を行った。数値計算は、電界計算と粒子挙動追跡計算の二つから成る。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。粒子挙動追跡計算には剛体球モデルによる個別要素法を用いた。式(1)の運動方程式を4次ルンゲクッタ法により解いた。また、粒子の衝突処理は式(2)に示す衝撃方程式を解くことにより求めた。ここで、 $\mathbf{F}_q$ :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、 $\theta_i = (\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ :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。なお、衝突後の状態については\*を添えている。

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

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

実際の搬送の様子と数値計算の結果を図3に示す。基板表面に発生した電界に沿って搬送される様子等の数値計算結果が実験値と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。これより数値計算による機構の最適化や応用に期待できる。



(a) 実際の搬送

(b) 数値計算

図3 進行波電界中における月模擬砂の挙動 (大気中 800 V)

## 発表論文

1. 内山, 大河原, 梅津, 川本, 進行波電界を利用した粒子の粒度分別, SEAD19 (2007) pp.174-176.
2. 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.
3. Kawamoto H., Uchiyama M., Electrostatic Cleaner of Lunar Dust on Solar Panel and Optical Lens, Joint Annual Meeting of LEAG-ICEUM-SRR (2008) pp.72.