

静電力を利用した小惑星からの粒子採集システムの開発

前園 拓紀¹・芦葉 健太郎¹・橋 祐哉

Sampling of Small Regolith Particles from Asteroids

Utilizing Alternative Electrostatic Field

Hiroki Maezono¹, Kentaro Ashiba¹ and Yuya Hashi¹

Abstract

To realize reliable regolith sampling for autonomous operation in space, the authors have developed a new sampling system that employs electrostatic force. High voltage is applied between parallel screen electrodes of the sampling device. Owing to electrostatic force, particles are captured at the screen electrode of the device. The captured particles are then transported transferred to a collection capsule and this transport is supported with an electrostatic traveling wave. It has been demonstrated that lunar soil simulant can be captured and transported if gravity is extremely low.

Keywords: Space Engineering, Electrostatic Force, Regolith, Asteroid, Electrostatic Traveling-Wave

1. 緒言

太陽系小天体と呼ばれる小惑星や彗星は、原始的な状態を保っている。これらを分析することで過去の太陽系の情報を手に入れることができ、太陽系の発生やその進化の過程を知る上で非常に大きな意味を持つ¹⁾。また、小天体に含まれる太古の有機物を調べることで、生命の起源に迫ることができる可能性もある。このように、小天体の試料を地球に持ち帰るサンプルリターン技術は、惑星科学だけでなく生命科学など多くの分野に進展をもたらすとして大きな注目を集めており、2010年に「はやぶさ」によって回収された粒子も今後の惑星科学の発展に大きく寄与することが予測される²⁾。

サンプル採集は、小天体への影響を少なくするため短時間の試料採集であるタッチアンドゴー方式を取ることが望ましい。また、未知の惑星でのサンプリングにはどのような環境でも粒子採集を行える柔軟性が必要である。この条件を満たすため「はやぶさ」では弾丸撃ち込み方式がサンプリングシステムとして採用された。この方法は、天体表面に高速で弾丸を発射し、筒状のホーン部に沿って舞い上がった試料を回収する³⁾。しかしこの方法

には、弾丸の発射に火薬を使う必要があること、着地の瞬間を感知する必要があるなど弾丸の発射までに多くのプロセスが必要なことなど、その複雑さゆえ改善すべき点が見られた⁴⁾。

これに対して、本研究では静電力を利用したサンプリングシステムを考案している。この粒子サンプリングシステムは2層の電極間に高電圧を印加することで粒子を巻き上げ回収する。利点としては構造や採集までのプロセスが非常に単純であることがあげられる。また、天体の表面物質を破壊することなくそのままの形で採集することも利点としてあげられる⁵⁾。一方、天体表面が固い岩などで覆われていた場合は試料を採集することができないという欠点も存在する。

本機構は地上の実験において試料を上空に巻き上げること、つまり粒子の捕捉に成功している。しかし、巻き上げた粒子がFig 1のようにサンプラー上部に設置した回収部とよばれる粒子を保存する機構へ到達する前に落下してしまうといった問題点が存在した。また捕捉した粒子を解析した結果、Fig 2のように1000 μm以上の粒子が含まれていないことが判明した。これらの問題は地球に重力が存在する以上避けようがない。しかし、サンプリ

1 早稲田大学 基幹理工学研究科 〒169-8555 東京都 新宿 大久保 3-4-1
Waseda University, Aerospace Engineering, 3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan
(E-mail:foruthissimo@ruri.waseda.jp)

ターンを行う小天体は微小重力である。このことを考慮して数値計算によるシミュレーションを行い、これらの問題を解決できるであろう結果を得ることができた。そこで、パラボリックフライトを利用した微小重力実験を行いこのシミュレーションの検証を行った。

2. 静電力を利用したサンプラーの機構

本実験で使用したサンプラーは、Fig 1 のように粒子を巻き上げる捕捉部、捕捉した粒子を運ぶ搬送部、搬送された粒子を閉じこめる回収部の 3 つからなる。捕捉部では電極に電圧を印加し、発生する電界によって粒子を捕捉する。粒子は捕捉部で与えられた初速をもって搬送部を移動する。その際、進行波電界を発生させることで粒子の移動の補助を行う。その後、搬送された粒子は回収部に保存される。以下、捕捉部、搬送部について詳細を述べる。

2.1 静電力による粒子捕捉の原理

本研究での粒子捕捉の原理を示す。捕捉部は Fig 3 のように上部電極と下部電極がメッシュ状に設置されている。この電極に高電圧の方形波を印加することで電極間に不平等電界を発生させる。不平等電界中で粒子はクーロン力や分極力をうけ、上方向への速度を与えられ巻き上げられる。

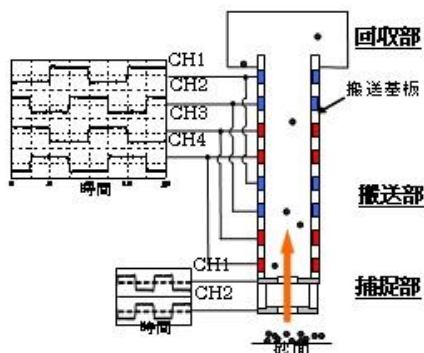


Fig 1 静電サンプラーの概略図

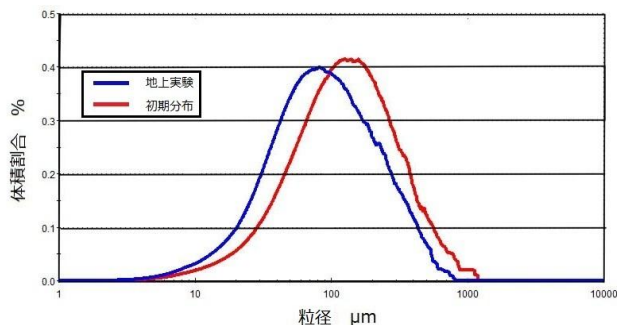


Fig 2 地上実験での捕捉粒子の体積粒度分布

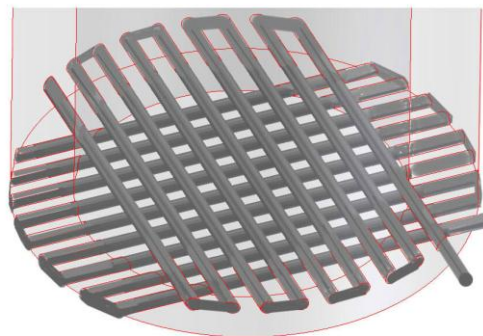


Fig 3 捕捉部電極の概略図

2.2 進行波電界による粒子搬送の原理

静電力によって粒子を搬送するという手法は、従来からよく知られており、その中でも、位相をずらした交流電圧を縞状の電極に印加することによって粒子を搬送するシステムは、さまざまな種類の電極を用いた研究がされている⁶⁾。ここで進行波電界を用いた静電搬送の概略図を Fig 4 に示す。位相を順に $\pi/2$ ずつずらした 4 相の交流信号を縞状に並んだ電極に出力することより、電極表面に不平等電界が発生する。これにより、電極表面付近に存在する粒子は、主に電氣的なクーロン力や分極力により搬送される。

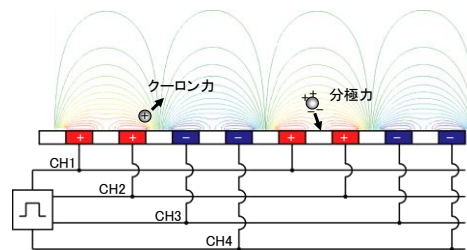


Fig 4 進行波電界による静電搬送の概略図

3. 実験装置

3.1 微小重力実験用装置

微小重力実験は航空機内で行うため、限られたスペースに収めなくてはならない。今回の実験では、実験装置を縦 550 mm、横 650 mm、高さ 500 mm のラック内に収めた。このときの実験装置の全体図を Fig 5 にしめす。以降本機構を構成する装置、実験試料について説明する。

3.2 電源装置

3.2.1 2相高圧電源

2相高圧電源は Fig 1 の捕捉部電極のように二つの方形波を同期させて、CH1 と CH2 から発生させることができる。

3.2.2 4相高圧電源

4相高圧電源は、4つの方形波を Fig 1 のように同期させて出力できる。各チャンネルから出力される信号は、上から順に $\pi/2$ ずつずれている。この電源は主に進行波電界を発生させる搬送基板に電圧を印加するために用いる。

3.4 サンプラー

前述した原理を用いて、サンプラーを作成した。この外観図を Fig 5 の拡大部に示す。このサンプラーは内径 50 mm、外径 70 mm のアクリルの筒を用いた捕捉部、搬送部、回収部からなる。捕捉時に粒子が通過する捕捉面積は、「はやぶさ」に搭載されたサンプラーの 1/9 である。³⁾ 捕捉部には外径 1.3 mm のナイロン被覆されたステンレスワイヤーを Fig 3 のようにメッシュ状に設置して上部電極、下部電極としている。また、これらの電極のピッチは 5 mm であり、上部電極と下部電極間の距離である電極間距離は 5.1 mm である。搬送部には Fig 9 の搬送基板を筒の内側に沿って設置した。搬送基板とは 2.2 章の原理を用いて粒子を搬送する装置である。今回用いた搬送基板は、電極ピッチ $p = 1.0$ mm、電極幅 $w = 0.3$ mm の銅電極を並べた縦 130 mm 横 150 mm のポリイミドフレキシブル基板（株式会社東和テック製）である。電極から搬送表面まで厚さ 12.5 μm のポリイミドフィルムで絶縁被覆した構造となっている。回収部は、ストッパーを嚙ませることで粒子を閉じ込める機構となっており、150 mm の高さに設置されている。ストッパーには搬送されてきた粒子が通過する穴と、搬送した粒子を回収するシャーレを設置する溝が設けられており、ストッパーをスライドさせることでこれらの切り替えを行うことができるようになっている。

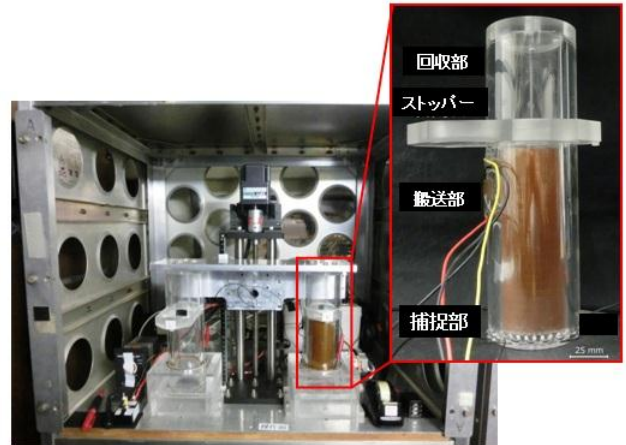


Fig 5 ラック搭載時の実験装置全体図

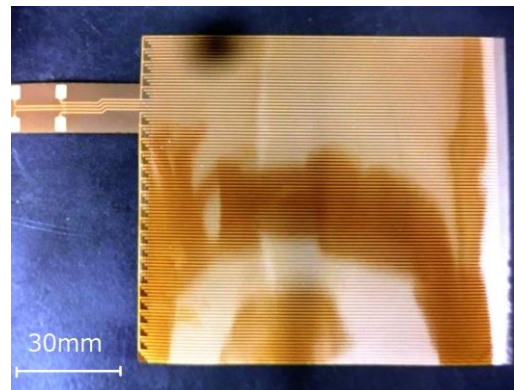


Fig 6 搬送基板の外観図

3.5 粒子飛散防止カバー

試料として用いた FJS-1 には非常に細かい粒子も含まれており、これが航空機や実験装置に進入し悪影響を与える可能性がありこれを解決することが準備段階における大きな課題であった。そこで、砂面とサンプラーの間に Fig 7 のような粒子飛散防止カバーを取り付けた。また、サンプラーと粒子飛散防止カバーの接触部にはブラシールを用いることで隙間をなくしている。

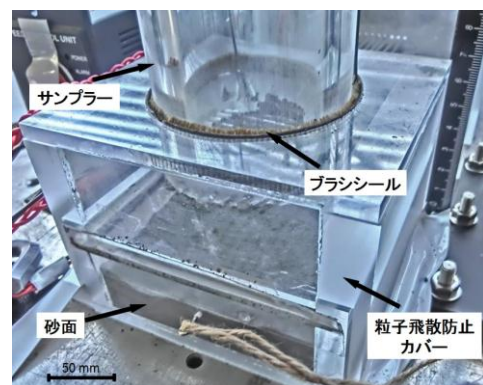


Fig7 粒子飛散防止カバー

3.6 動画撮影用粒子捕捉装置

微小重力状態で粒子が飛翔する様子を撮影する。しかし、サンプラー周囲には粒子飛散防止カバーがあり十分な撮影を行うことができない。そこで動画撮影用にサンプラーの捕捉部を再現した動画撮影用粒子捕捉装置を作成した。なお電極の太さやピッチなどの条件は静電サンプラーと同様に設定した。

3.7 サンプラー上下機構

今回の実験では、タッチアンドゴーを再現するために、サンプラーを Z 軸ステージに取り付けることで上下移動させることができるようになっている。電圧を印加した状態でサンプラーを下降し、砂面に接地することで粒子の回収が行われる。また、微小重力状態の短い時間で上下させなくてはならないため、モータを動力としている。

3.8 粒子測定装置

粒度測定は Malvern 社製の乾式粒子画像分析装置 Morphologi G3/G3S を使って測定した。この装置は採集したサンプルを空気圧を用いて一つ一つばらばらに散布させてそれを適当な倍率の光学顕微鏡で写真を撮り、粒子一つ一つの形状や大きさ等を観察することができる。そして、粒度分布や体積分布など粒子観察を行うことができる。

3.9 実験試料

太陽系小天体は、大小の流星物体や帯電粒子の衝突により粉碎された岩石で覆われていると考えられている⁷⁾。実験に用いる粒子としては入手のしやすさから月土壌を模擬した月模擬砂を使用した。

本研究で使用した粒子は、月土壌シミュラント FJS-1 (清水建設株式会社製) である。月模擬砂 FJS-1 はアポロ計画により持ち帰った月土壌のデータを元に作成されたものであり、日本国内で入手できる原料である玄武岩質溶岩を粉碎、粒度試験、粒度調整、せん断試験などの工程を繰り返し作られている。月土壌 FJS-1 の走査型電子顕微鏡 (SEM : Scanning Electron Microscope) によって撮影した写真を Fig 8 に示す。FJS-1 は堆積しやすく、粒子形状は、全体的に多少細長く角張っており、粒子表面は荒く見える。Fig 9 に示すように、100 μm 程度の粒子が多くを占めるが、10 μm 以下の微小粒子や 1 mm 以上の大粒子も存在する。また月模擬砂 FJS-1 の機械的性質を Table 1 に、化学組成を Table 2 に示す。

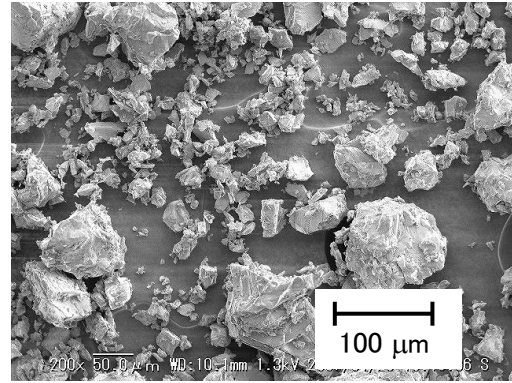


Fig 8 月模擬砂 FJS-1 の SEM 写真

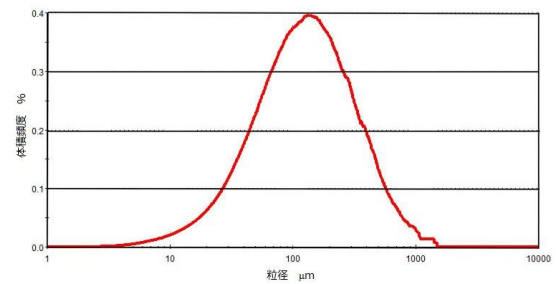


Fig 9 月模擬砂 FJS-1 の体積粒度分布

Table 1 月模擬砂 FJS-1 の機械的性質

	FJS-1
かさ密度 g/cm ³	1.55
比重 g/cm ³	2.7
粘着力 kPa	0
内部摩擦角 deg	33

Table 2 月模擬砂 FJS-1 の化学組成

	Lunar Soil Simulant (FJS-1)
SiO ₂	49.4
Al ₂ O ₃	18.0
Fe ₂ O ₃	4.4
FeO	8.0
Cr ₂ O ₃	-
TiO ₂	1.6
MgO	5.2
CaO	9.3
アルカリ	2.9

4. シミュレーションによる予測

4.1 シミュレーション概要

本研究における剛体球モデルを用いた数値シミュレーションモデルについてその概要を示す。粒子の挙動追跡アルゴリズムは4次ルンゲクッタ法を用い、粒子間衝突は剛体扱いとして計算を行った。本研究では粉体解析の離散的な手法である個別要素法 (DEM: Discrete Element Method) を採用して、粒子挙動シミュレーションを行った。個別要素法とは、個々の粒子に対して成立する運動方程式を微小時間ごとに繰り返し解くことにより、個々の粒子の運動を追跡し、時系列的な粒子群の挙動を求めるシミュレーション手法である。

4.2 シミュレーション結果

無重力状態における粒子捕捉実験のシミュレーション結果を Fig 10 に示す。地球上では重力が存在しているため粒子が高く飛翔することができない。そこで、粒子が 1 mm 飛翔した時点で粒子を捕捉したと考えている。一方、無重力状態では、粒子が 150 mm まで飛翔した粒子のみを回収した粒子とみなしている。この結果、無重力においては捕捉した粒子が回収部まで飛翔することができる。また、印加周波数 10 Hz 以下の場合、地球上での捕捉量よりも回収量が増加していることから、無重力状態においては粒子の捕捉性能も上昇することが予測される。

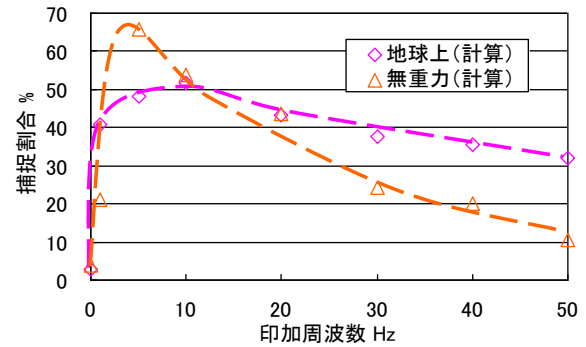


Fig 10 シミュレーションによる粒子回収実験の予測

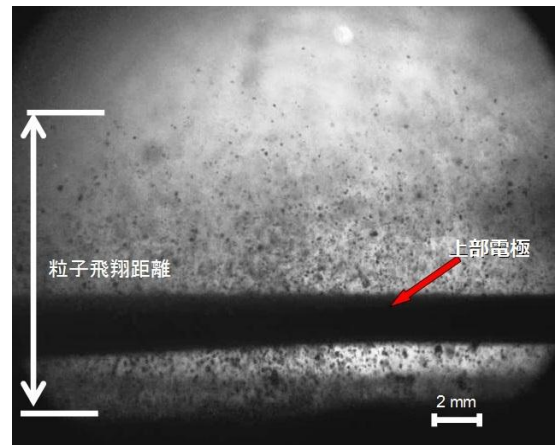


Fig 11 地上における粒子捕捉の様子

5. 粒子回収実験

5.1 実験条件

今回の実験では、静電サンプラーを用いて粒子飛散防止カバー内に設置した FJS-1 を回収した。実験のパラメータにはサンプラー捕捉部の電極に印加する電圧の周波数としている。また、捕捉部の電極には 20 kVp-p の方形波を印加し、捕捉時間は 1 秒に設定した。なお、進行波電界による粒子搬送補助の効果を確認するために、搬送基板の有無で 2 種類のサンプラーを用意した。

5.2 動画撮影による観察

微小重力状態で粒子が捕捉される様子を撮影し観察した。比較として、地上実験における粒子捕捉の様子を Fig 11 に、微小重力における粒子捕捉の様子を Fig 12 に示す。Fig 11 より、飛翔粒子径や飛翔距離が小さいという地上実験での問題点が確認できる。一方、微小重力においては粒子が高い位置までの飛翔や 1 mm 以上の大粒径粒子の飛翔が確認できる。

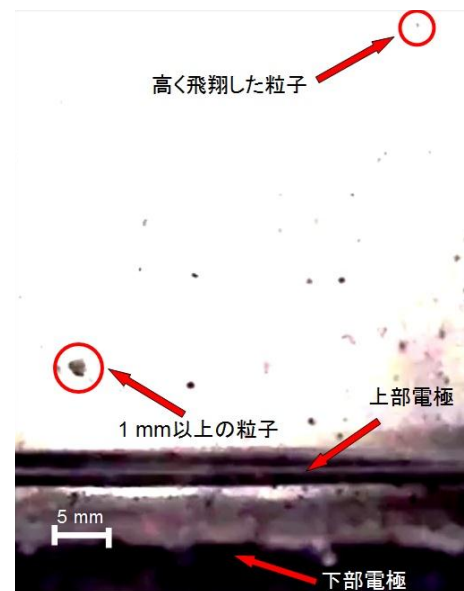


Fig 12 微小重力状態における粒子捕捉の様子

5.3 回収量

微小重力状態での回収量の周波数特性を Fig 13 に示す。なお、搬送部における進行波電界の補助効果を調べるために補助ありと補助なしの両サンプラーを用いて同時に実験を行った。捕捉時間は接地の 1 秒後に電圧の印加を止め、その 2 秒後の時点で回収部にある粒子を回収量とした。搬送基板には印加電圧 2 kV_{p-p}, 印加周波数 10 Hz の方形波を印加している。この結果、印加周波数 1 Hz において最大 916 mg の粒子を回収することに成功した。このときの粒子の様子を Fig 14 に示す。この結果より、微小重力状態において静電サンプラーを用いた粒子の回収が可能であることがわかった。また、補助の有無による回収量の差は見られなかった。

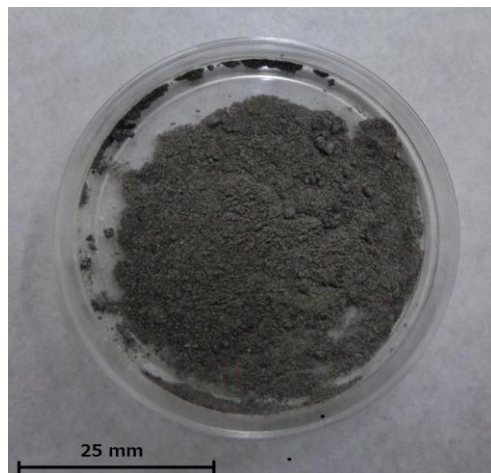


Fig 14 最大回収量における回収粒子の様子 (916 mg)

5.4 粒子の粒径

回収した粒子に対し粒径別の体積粒度を分析した。結果を Fig 15 に示す。この結果より、微小重力状態で回収した粒子は地球上と比べ粒径が大きくなっており、初期分布に近づいていることがわかる。特に地球重力下では飛翔させることのできなかつた 500 μm 以上の粒子が体積の多くを占めている。よって微小重力状態において、静電サンプラーは大粒径の粒子を回収することができた。一方、微小粒子の割合が減ってしまったのは空気抵抗の影響を強く受けてしまったことや付着力が大きいためサンプラー内壁に付着してしまったことなどが原因であると考えられる。また、粒径においても補助の有無によって大きな違いは生じなかった。

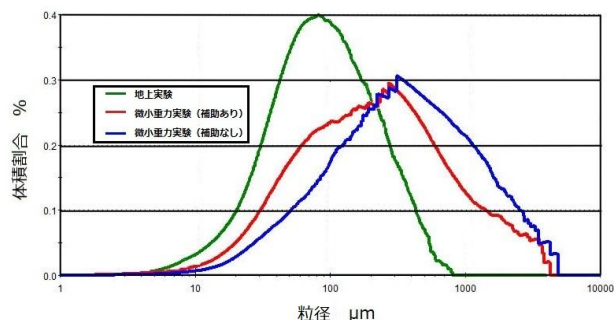


Fig 15 無重力実験によって回収した粒子の粒径別体積粒度分布 (印加電圧: 10 kV_{p-p}, 捕捉時間: 1 s, 印加周波数: 1 Hz, 印加方式: 2 相印加方式)

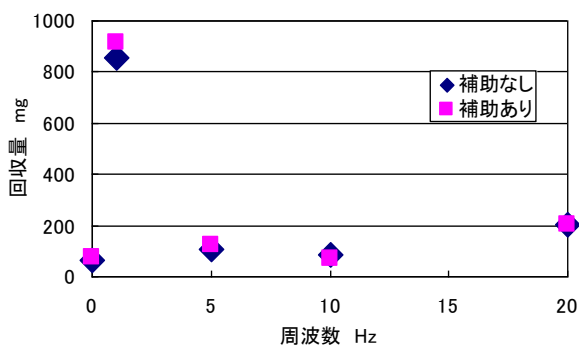


Fig13 無重力状態における捕捉量の周波数特性 (印加電圧: 10 kV_{p-p}, 捕捉時間: 1 s, 印加方式: 2 相印加方式)

5.3 シミュレーションとの比較

微小重力実験においては、各実験ごとに重力の状態や振動などの誤差が発生してしまい再現性のある粒子捕捉量を得ることは難しい。しかし Fig 10 と Fig 13 の比較より、印加周波数 1 Hz~5 Hz で大きな回収量を得ることや、高周波数になるにしたがって回収量が低下していくという同様の傾向があり、定性的な一致を得ることができた。

6. 結 言

小惑星サンプルリターンミッションにおいて弾丸打ち込み型に代わる、より確実に信頼性の高いサンプリングを行なうことを目的として静電力を利用したサンプラーの開発を行なった。その過程で生じた問題の解決を行なうための仮説の検証を行なうために無重力実験を行った。以下に今回の研究で得られた知見を示す。

1. 微小重力状態で静電サンプラーの有用性を確認できた。
2. 微小重力下において最大 916 mg の粒子を採集し、地球上では困難であった粒径 500 μm 以上の粒子の採集に成功した。
3. 粒子搬送の補助として進行波電界を用いたが、補助なしとの違いは確認できなかった。

謝辞

本実験にご協力いただいた、(独)宇宙航空研究開発機構、(財)日本宇宙フォーラム、ダイヤモンドエアサービス(株)、直接の御指導を戴いた早稲田大学教授 川本広行先生、そしてこの実験に関わってくださった全ての方に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 吉川真, 小惑星探査ミッション「はやぶさ」の成果と今後の小天体探査計画, 信学技報, vol. 110, no. 92, (2010) pp.37-42.
- 2) 藤原顕, はやぶさ探査機が拓くサンプルリターンと小惑星の科学, 総研大ジャーナル7号, (2011) pp.32-37
- 3) 矢島暁, 小惑星探査機「はやぶさ」搭載サンプル採取機構, 住友重機械技報, 176号, (2011) pp.1-6
- 4) 萩野慎二, 小惑星「はやぶさ」の開発と成果, NEC 技報, Vol.64, (2011) pp.130-135.
- 5) 土山明, はやぶさサンプルを分析する, 生産と技術第 64 巻, 第 3 号, (2006) pp.30-36
- 6) Moesner F.M, Higuchi T, Electrostatic Devices for Particle Microhandling, *IEEE Trans. Ind. Applications.* 35-3 (1999) pp.530-536.
- 7) H. Kanamori, S. Udagawa, T. Yoshida, S. Matsumoto, and K. Takagi, Properties of lunar soil stimulant manufactured in Japan, Proc. of the 6th International Conference on Engineering, Construction and Operations in Space, ASCE, (1998), pp.462-468.