

IIII 特集：航空機の放物線飛行による短時間微小重力実験 II IIII
(解説)

ISS 搭載用静電浮遊炉開発における航空機実験

石川 毅彦・岡田 純平・Paul-Francois PARADIS

Parabolic Flight Experiments on the Development of an Electrostatic Levitation Furnace for the International Space Station (ISS)

Takehiko ISHIKAWA, Junpei. T. OKADA and Paul-Francois PARADIS

Abstract

Short duration microgravity experiments are useful tools for the development of experimental apparatus for microgravity researches. Parabolic flights have been frequently used for the development of the electrostatic levitation furnace (ELF) for the International Space Station (ISS). The history of ELF development and parabolic flight experiments conducted for its development are briefly described in this paper.

Keyword(s): Electrostatic Levitation Furnace, parabolic flight

1. はじめに

ISS やスペースシャトルを用いた本格的な長時間微小重力実験を実施する前に、航空機や落下塔による短時間微小重力実験によって課題の抽出やその解決策の確認を行うことは非常に重要である。2015 年頃に国際宇宙ステーション（以下 ISS と記す）に搭載予定の静電浮遊炉（Electrostatic Levitation Furnace : ELF）においても、その開発当初から航空機によるパラボリックフライトが用いられてきた。本文書では、静電浮遊炉の開発の経緯と変遷を概説するとともに、行われてきたパラボリックフライトの目的と結果について紹介する。

静電浮遊炉は、帯電した試料と周囲の電極間に働くクーロン力を利用して試料位置制御を行い、空間に固定した試料を高出力加熱レーザーやランプを用いて加熱し、熔融させる装置である¹⁾。静電浮遊法は、電磁浮遊、音波浮遊等他の方式に比べて位置制御に伴って試料に与えられる擾乱が最も少ない、帯電するあらゆる種類の試料を位置制御できる、加熱と位置制御にカップリングがない等、優れた特徴を持つ方式であるが、高速のフィードバック位置制御が必要、試料表面の電荷（帯電量）の維持が必要と言った技術的な課題があり、開発が比較的遅れていた。静電浮遊炉の開発は 1980 年代に欧州及び米国で開始された。ドイツは TEXUS ロケットを用いた短時間微小重力実験を実施したが²⁾、試料位置を検出するセンサーが打ち上げの振動で故障して芳しい成果が挙げられなかつ

た。以後、ドイツでは電磁浮遊炉に絞って微小重力実験用の装置が開発されていく。米国では NASA ジェット推進研究所（JPL）において音波浮遊、電磁浮遊及び静電浮遊の研究が進められた。しかし、予算の制約から、米国は高温融体についてはドイツの電磁浮遊炉に頼ることとして、音波浮遊³⁾による常温で液体の試料を用いたドロップダイナミクス実験装置のみ開発することとした。また、静電浮遊炉については地上研究及び短時間微小重力実験のみが実施された。JPL での研究は直接宇宙実験に結びつかなかったが、Rhim 等は地上においても高融点金属の浮遊熔融に成功し、宇宙での静電浮遊装置の実現性に大きな確信を与えた⁴⁾。

日本での静電浮遊炉研究のさきがけとして、IHI の技術研究所において直流電極付交流 4 重極型の静電浮遊装置の研究が進められた^{4,5)}。残念ながら試料の浮遊熔融まで達成されたかは記録されていない。

日本では当初音波浮遊炉の開発が進められ、1992 年のスペースシャトルミッション（ふわっと '92）には、液滴マニピュレーション実験装置と音波浮遊炉が搭載された。残念ながら 2 つの装置とも、試料の安定浮遊は達成できなかった。特に後者においては常温では安定した試料位置制御が達成されたものの、試料温度の上昇に伴って制御が困難となった。高温試料の周りのガス中に急峻な温度勾配ができる中、定在波を維持することが非常に困難なことが原因であり、音波浮遊法を用いて高温試料を安定浮遊させることの技術的限界が明らかとなった。

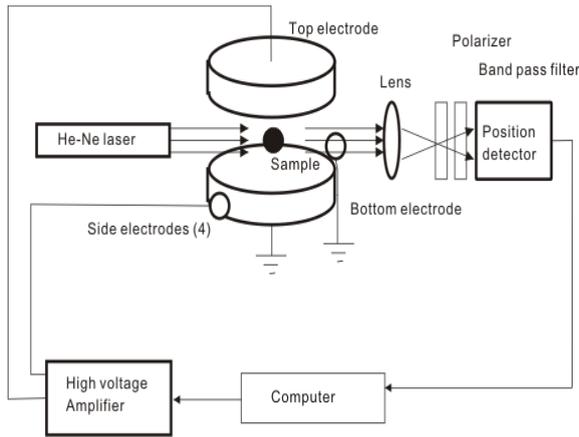


Fig. 1 Schematic drawing of sample position control system on the ground based electrostatic levitator.

この結果および JPL での静電浮遊技術の進歩を踏まえ、ISS 用浮遊装置として宇宙開発事業団 (NASDA) は静電浮遊法を選定した。

Figure 1 に静電浮遊法の概念図を示す。試料の位置検出は、レーザー光で試料の影を位置センサーに投影することで行う。位置情報は、コンピュータに取り込まれ、ここで制御演算が行われ、その結果に基づいて、電極に印加する電圧が調整される。帯電した試料は、各電極との間で発生するクーロン力に応じて運動する。このループを高速で繰り返すことにより、安定した浮遊が達成される。従って、試料の安定浮遊に必要な要素は、

- ・適切な電極構成
- ・試料位置検出
- ・位置制御アルゴリズム
- ・初期帯電および加熱中の電荷補給の方法

が挙げられる。また、無重力下での試料の回収や、浮遊に失敗した試料の取り扱いなど、無重力特有の検討項目もある。さらに、宇宙用装置には要素の小型化が必須である。パラボリックフライトでは、こうした要素技術について確認・検証が行われてきた。

2. 静電浮遊炉開発とパラボリックフライト

2.1 TR-IA 実験まで

NASDA での静電浮遊炉開発は、三菱電機 (MELCO) への委託によって先行する JPL での研究等を参考にしながら進められた。電極構成は、JPL で検討された複数の形式の中から、最も地上において安定して試料浮遊が達成できる平行平板電極が採用された。ただし、水平方向の位置制御については、JPL では下電極周囲に小電極を 4 つ配置する方式 (**Fig. 1**) であるのに対し、上下の電極を 4 分割した 8 電極構成を採用した⁶⁾ (**Fig. 2**)。この理由は記録に残っていないので正確には分からないが、**Fig. 2** の様

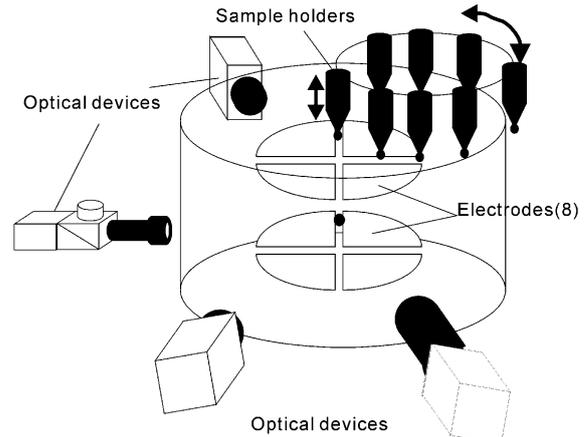


Fig. 2 Conceptual drawing of the ELF by MELCO.

に上下の平行電極間の水平面に多くの観察機器を配置する都合上、視界の妨げとなる横電極を排除したものと想像される。但し、この電極構成では、高電圧アンプ (High Voltage Amplifier) が 8 台必要になる (JPL 方式の場合、最大 6 台) 上、横方向の制御力が大きくとれないというデメリットがある。この電極構成および位置制御則については、地上での浮遊実験に加えて、MU-300 を用いたパラボリックフライトが用いられた。宇宙開発事業団による航空機微小重力実験結果報告書“パラボリックフライト”には位置制御方式としてファジー制御が試みられていたこと、横方向の位置制御が航空機の横 G によって大きく乱れることが記載されている⁷⁾。

試料の挿入・回収機構については、指先のようなマニピュレータ方式 (**Fig. 3**) が検討された。2 枚の板バネによって試料を保持するとともに、この導電性の板バネを通じて初期帯電を行う。**Figure 2** に示すように、試料の個数だけこのマニピュレータが用意される設計であった。このマニピュレータについても、航空機実験においてその動作が検証された。

MELCO による静電浮遊炉は 1998 年の小型ロケット TR-IA 7 号機において全体の機能確認が行われた⁸⁾。この実験では酸化物試料 (BiFeO_3) が用いられた⁹⁾。位置制御は常温では良好であったが、熔融状態では試料の表面電荷量が著しく低下して試料位置は大きく変動した。しかしながら、回収試料の解析から、試料の熔融が達成されていたことが確認された。マニピュレータによる試料

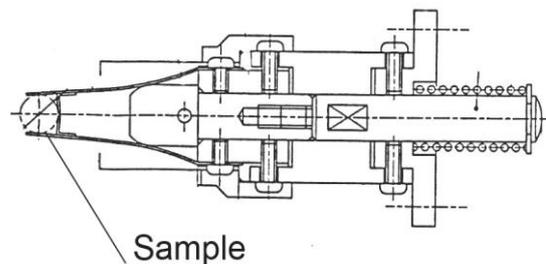


Fig. 3 Sample holder used for the TR-IA ELF

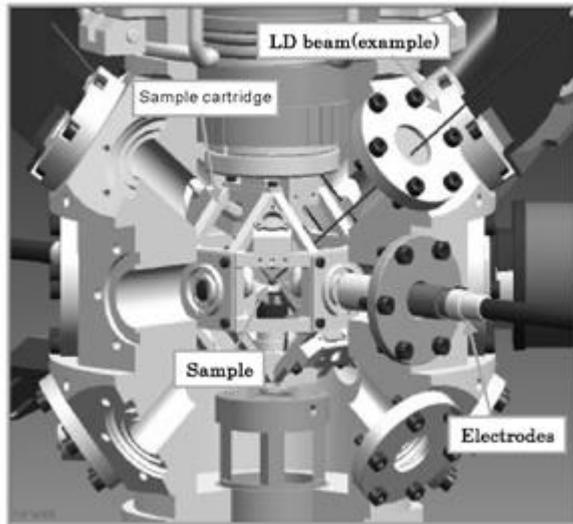


Fig. 4 Electrodes and chamber design by IHI Aerospace Co. Ltd.

の供給は非常にスムーズに行われたが、回収後の試料は指先からはずれており、着水の衝撃により脱落したものと推定された。実験から得られた教訓および技術的課題は、その後のISS搭載用静電浮遊炉の開発に申し送られた。

2.2 IHI エアロスペースの独自研究

TR-IA 実験が行われた 1998 年頃から ISS 計画の度重なる見直し及び遅延が起り、ISS 用静電浮遊炉は開発着手のタイミングを見失った。また、技術的には TR-IA 実験から申し送られた課題に加えて、スペースの観点から大きな課題を抱えていた。平行平板電極を用いた設計では観測機器が電極間の水平面にしか配置できないためチャンバーサイズが大きくなり、ISS の標準ラックには収まらなかったのである。さらに、2000 年に行われた浮遊炉ワークショップにおいて、世界の研究者から「温度均一性の向上のため、正四面体の 4 方向からのレーザー加熱」が要望されたが、Fig. 2 の電極構成では、適用が困難であった。こうした状況からエンジニアリングモデルの設計等の本格的な開発は凍結となり、MELCO による静電浮遊炉の開発は中断した。

一方、この頃 IHI エアロスペース社 (IA) は、社内研究として静電浮遊炉の技術研究を開始した。IA は、電極構成を根本的に見直し、従来の平行平板電極を止め、等方的な 3 軸電極 (6 個) を採用した (Fig. 4)。これによって観察機器も立体 (3 次元) 的に配置することが可能となり、チャンバーサイズが飛躍的に小さくなった。また、横方向にも上下方向と同等の制御力が発生出来るため、横方向の G 擾乱が大きい航空機実験においても安定した浮遊が可能となった。さらに正四面体 4 方向加熱にも対応できた。Figure 5 に IA 社の静電浮遊装置を示す。この静電浮遊装置は G-II に搭載され、パラボリックフライトによる機能検証が行われた。装置は横 G が大きい航空機実験においても安定した試料位置制御を達成し、Zr 試料 (融点

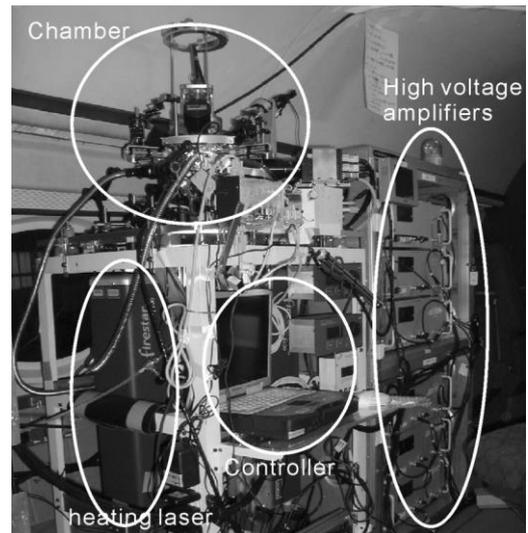


Fig. 5 ELF by IA installed in G-II aircraft

約 1850°C) の浮遊溶融に成功した¹⁰⁾。この電極構成は、現在のISS搭載用静電浮遊炉に採用されている。

2.3 公募型地上研究

IA の静電浮遊炉は、その後公募型地上研究制度により MU-300 に搭載可能な小型バージョンが製作された。小型の飛行機への搭載により運用コストを下げ、実験機会を増やして、地上では浮遊が困難な酸化物等の融体熱物性を取得するシステムを構築するのが研究のねらいであった。Figure 6 に静電浮遊装置 (チャンバーの部分) を示す。パラボリックフライトでは Zr 試料の液滴振動法による表面張力および粘性係数測定実験が行われたが、狙った結果は以下の理由により得られなかった。

パラボリックフライトでは、重力が 1/100G 程度になるため、試料の位置制御に必要な電極間電圧 (DC 成分) は地上に比較して 1/100 程度となった。しかし、1/100G 程度の G ジッター (変動成分) により、制御電圧の AC 成分は、地上よりもはるかに大きくなった。このため、表

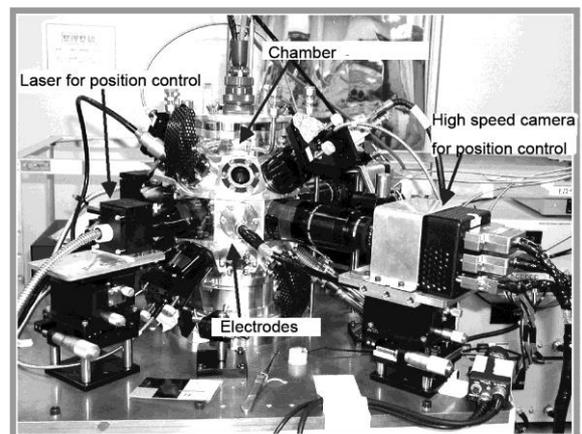


Fig. 6 ELF chamber for MU-300.

面電荷量の少ない酸化物質の浮遊は、地上同様に困難であった。またこのころ、液滴振動法による粘性係数測定では位置制御のための外場が液滴振動の減衰に大きな影響を与えるため、AC成分が小さい環境が必要であることが分かってきた¹¹⁾。従って、Gジッターの大きな航空機実験の環境では静電浮遊炉を用いた熱物性計測研究は困難であることが明らかとなった。以降、静電浮遊炉に関しては、パラボリックフライトはより技術開発に特化した利用が進められることとなった。

2.4 ELF 小型化と航空機実験

「きぼう」のISS設置(2008年)を契機として、温度勾配炉や流体物理実験装置等に続く次世代の実験装置開発が始まった。ただし、財政上の問題からラック全体を占有する装置の開発は困難であり、多目的実験ラックのフリースペースに挿入できる小型の装置開発が進められた。

静電浮遊炉をフリースペースに収納するためには、浮遊炉の各構成要素を大幅に小型化する必要が生じた。このため、以下に示す要素の小型化が行われ、その機能検証のための航空機実験が実施された。

2.4.1 位置センサー

Figure 7 にこれまで静電浮遊装置に用いられてきた位置センサーを示す。IAによる航空機実験用静電浮遊炉(G-II及びMU-300)に用いられた高速度カメラは、大型の上、得られた画像から試料位置を算出するのに別の装置が必要であるため、とてもISS用には採用出来なかった。地上の装置で主に用いられるPSD(Position Sensing Device)は小型であるがノイズが大きく、またセンサーの縁で極性が反転するなど特異な性質を持っているため、宇宙実験には適さなかった。インテリジェントビジョンシステム(IVS)は最も小型で上述の反転領域がない上、センサー内部で重心計算を行う高機能のもので、試料位置認識系全体の小型化が可能であったため、これを採用した。

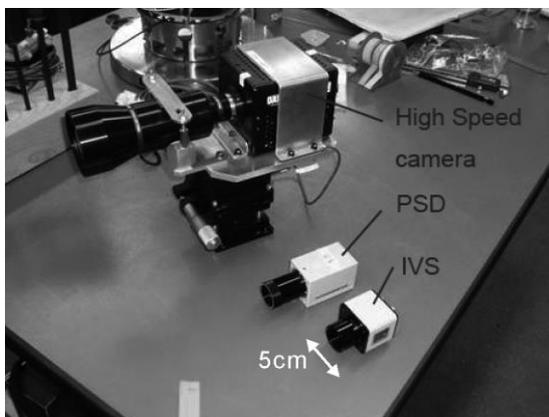


Fig. 7 Three different position sensors. The IVS is the smallest and has the highest S/N ratio.

2.4.2 高速高電圧アンプ

高速(応答周波数1000 Hz程度)かつ高倍率(1000倍以上)のアンプは、高速フィードバック位置制御達成に重要な構成要素である。地上実験では、30 kV程度の高電圧を発生可能なアンプを利用しているが、このような大電圧は1G下での浮遊に必要なもので、微小重力環境のISSではもっと小さな出力で十分である。アンプの小型化のためには、出力の低下が必須であり最大3 kVの電圧を発生する仕様とした。但しこのアンプでは出力が小さく、地上で試料を浮遊する試験ができないため、航空機実験で機能検証が必須となった。

2.4.3 試料カートリッジ(試料供給・回収機構)

MELCOが検討したマニピュレータ方式(Fig. 2)は、大がかりでありとても収納できないため、試料の供給・回収に関しては、抜本的に見直しが行われた。

Figure 8 に採用された試料供給・回収機構の概念を示す。試料は、回転式の試料ホルダーに装填されている。試料は、押し棒によって電極の間まで運ばれる。放出された試料は、電極に衝突した際に帯電され、その後電極間に位置制御される。試料は実験終了後、浮遊目標位置を急激に変更する操作によって、試料ホルダーの方向に投げ込まれる。航空機実験の結果、この投げ込み方式では、試料ホルダーまで試料は到達しないことが明らかとなったため、投げ込み後の試料は回収用の押し棒により、ホルダーまで移動される様にした。

放出された試料が電極に衝突する一瞬で果たして十分

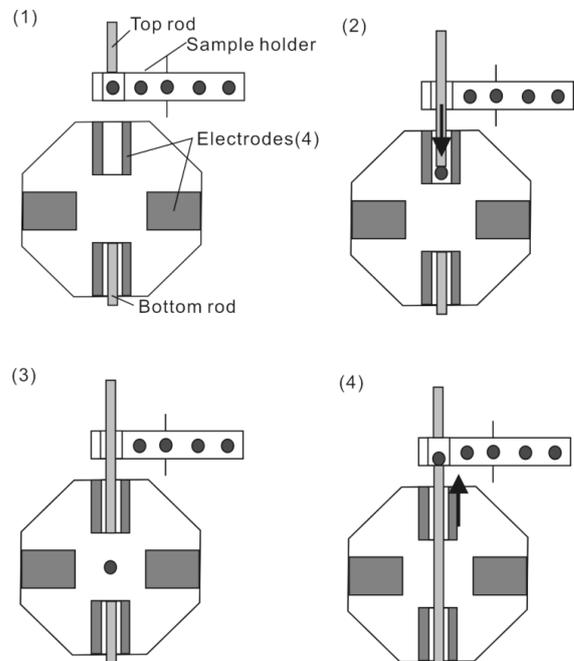


Fig. 8 Conceptual drawing of sample handling mechanism; (1) overall mechanism, (2) sample insertion, (3) experiment, and (4) sample retrieval.

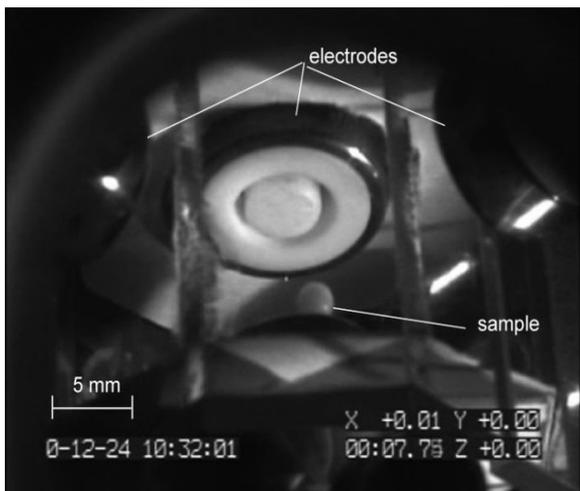


Fig. 9 Snapshot during a parabolic flight experiment.

に帯電するかが、本機構の最大の懸案事項であったが、2008年から実施した航空機実験において、**Fig. 9**に示すとおり、帯電しにくいアルミナについてもこの方法で浮遊に成功しており、成立性が確認されている。¹²⁾

2.5 ISS-ELF 開発

2.4に記載した要素の小型化およびパラボリックフライトによる機能検証により設計の妥当性が確認され、多目的実験ラック搭載にめどがたつた。そして2011年によく静電浮遊炉の開発がJAXAにおいて承認され、エンジニアリングモデル(EM)の開発が開始された。EM開発においても残された確認項目である「喪失試料の回収機構」について航空機実験を活用した機能検証を行っている。

地上の浮遊実験では、浮遊制御に失敗した試料は電極外に落下する。このため、次の実験に影響を与えない。一方、微小重力下では喪失試料はチャンバー内をさまようこととなる。この試料が次の実験試料の実験中に電極間に戻ってくると、(二つの試料を同時に位置認識することが出来ない)正常に試料位置制御が行えず、次の実験も失敗することになる。このため、喪失試料を回収する機能が必須である。採用されている方式は、真空を利用して試料を吸い取る(掃除機の原理)方式である。

Figure 10に概念図とカートリッジの周辺部の写真を示す。標準ラックが提供する真空排気ラインを利用して、Suction portから空気と一緒に漂流試料が吸い込まれるしくみである。Suction portの先には篩のついた試料だまりが設けられており、吸い込まれた試料はそこに止まることとなる。更に、内部の空気を攪拌して試料をよどみ点から移動させるために、ブロワーが設けられている。

この「喪失試料の回収機構」の機能確認は、地上では出来ないため、航空機実験を利用している。航空機実験のセットアップを**Fig. 11**に示す。供試体として試料カートリッジのみを搭載し、真空ポンプでラック供給の真空

ラインを模擬している。予め試料を複数個電極周辺にばらまいておき、微小重力下で真空弁を開いて吸い込みを開始して、内部の試料の動きを観察窓に設置したカメラで観察した。

実験の結果、Suction port周辺の試料が吸い込まれていく様子が観察され、回収機能が予想通り働くことが確認された。但し、現在のブロワーのセッティングではよどみ点の試料を動かすことが困難であることなどの課題があきらかとなった。これらの改善事項はフライトモデルに反映される予定である。

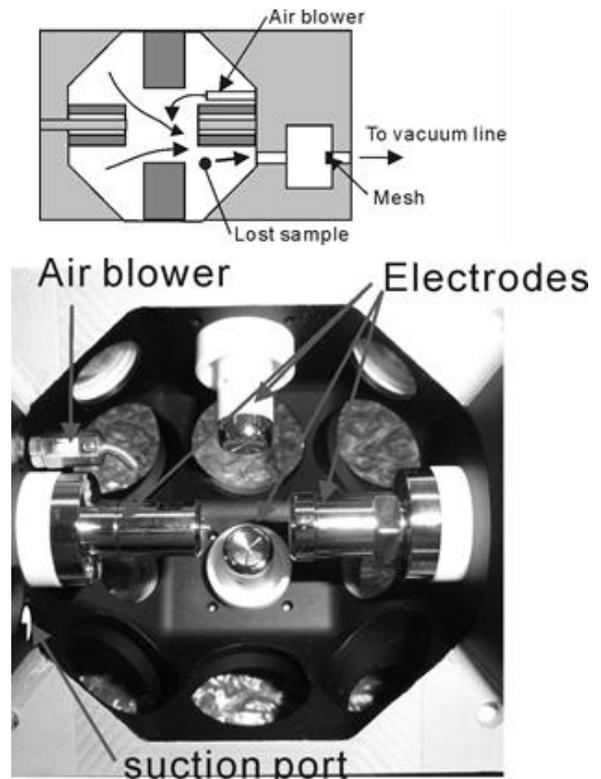


Fig. 10 Conceptual drawing on sample recovery system (top) and actual picture

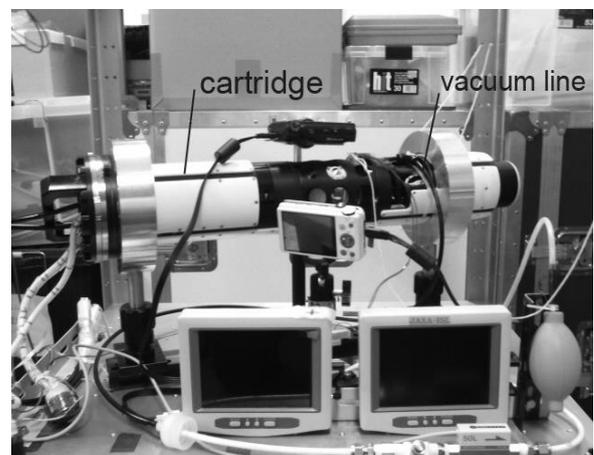


Fig. 11 Experimental setup for parabolic flight to check the function of sample recovery.

3. おわりに

これまでの ISS 搭載用静電浮遊炉開発における航空機実験についてまとめた。静電浮遊炉の開発において航空機実験による機能検証は大きな役割を果たした。今後の装置/供試体開発に於いて参考にして頂けると幸甚である。

謝辞

航空機実験の実施にあたっては、ダイヤモンドエアサービス社のスタッフに毎回格別のサポートを頂いていることに感謝致します。一部の航空機実験機会については、JAXA 宇宙科学研究所の宇宙環境利用科学委員会から提供頂いた。また、本稿の執筆に当たっては、JAXA 宇宙環境利用センター村上敬司氏、IHI エアロスペース社高田哲也氏から情報や写真をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) W. -K. Rhim, S. K. Chung, D. Barber, K. F. Man, G. Gutt, A. Rulison, and R. E. Spjut: *Rev. Sci. Instrum.* **64** (1993) 2961.
- 2) E. G. Lierke, R. Grossbach, G. H. Frischat, and K. Fecker: *esa SP-1132* (1991) 370.
- 3) T. G. Wang, A. V. Anilkumar, and C. P. Lee: *J. Fluid Mech.* **308** (1996) 1.
- 4) M. Ogihara, T. Fujii, M. Aoyama, and T. Oda: *J. Jpn. Microgravity Appl.* **9** (1992) 163.
- 5) M. Ogihara, T. Fujii, S. Endo, M. Aoyama, and T. Oda: *J. Jpn. Microgravity Appl.* **10** (1993) 100.
- 6) Y. Tsuchiya, K. Murakami, M. Yuzawa, Y. Awa, Y. Gotoh, S. Shimada, K. Yoshizawa, C. Tsukishima, H. Shimoji, and Y. Tamagawa: *J. Jpn. Microgravity Appl.* **13** (1996) 16.
- 7) C. Tsukishima, M. Yanagida, T. Okuzono, M. Kageyama, T. Abe, K. Shibukawa, K. Murakami, and S. Yoda: "Parabolic Flight" (EG-930010) ed. by National Space Development Agency of Japan (1993) 38.
- 8) S. Yoda, N. Koshikawa, T. Nakamura, J. Yu, T. Nakamura, Y. Nakamura, S. Yoshitomi, H. Karasawa, T. Ikeda, Y. Arai, M. Kobayashi, Y. Awa, H. Shimoji, T. S. Morita, and S. Shimada: *J. Jpn. Microgravity Appl.* **17** (2000) 76.
- 9) J. Yu, N. Koshikawa, Y. Arai, S. Yoda, and H. Saitou: *J. Crystal Growth* **231** (2001) 568.
- 10) N. Sugi, T. Harada, H. Morisaki, A. Moriya, M. Egashira, T. Takada, and S. Kiguchiya: *J. Jpn. Microgravity Appl.* **23** (2006) 20.
- 11) T. Ishikawa, P.-F. Paradis, N. Koike, and Y. Watanabe: *Rev. Sci. Instrum.* **80** (2009) 013906.
- 12) T. Ishikawa, J. T. Okada, K. Murakami, S. Ogawa, N. Koshikawa, K. Shibasaki, Y. Yamaura, and T. Takada: *J. Jpn. Microgravity Appl.* **27** (2010) 199.

(2014年1月27日受理, 2014年3月7日採録)