

静電浮遊の航空機による微小重力実験

Report on the Microgravity Experiments of Electro-static Floating Furnace

山脇敏彦⁽¹⁾

Toshihiko Yamawaki

吉沢憲治⁽²⁾

Kenji Yosizawa

金子敦子⁽²⁾

Atsuko Kaneko

村上敬司⁽¹⁾

Keiji Murakami

築島千尋⁽²⁾

Tihiro Tukijima

湯沢真理⁽²⁾

Mari Yuzawa

依田慎一⁽¹⁾

Shinichi Yoda

景山正則⁽²⁾

Masanori Kageyama

奥園 強⁽²⁾

Tuyasi Okuzono

阿部俊雄⁽²⁾

Toshio Abe

(1) 宇宙開発事業団

National Space Development Agency of Japan

(2) 三菱電機株式会社

Mitsubishi Electric Corporation

Abstract

This report describes the results of floating control by the electrostatic float furnace and the lighting experiment on the plasma lamp with the aircraft. We produce the minute gravity environment with aircraft (MU-300). The computer adjusts the electric field and the position of the sample. The result of the experiment succeeded in the float in 6-mm diameter drop of water. The drop of water kept globular while floating. Moreover, we can freely floated the sample under the new floating control system. Then, it was confirmed that the acceleration which the sample have received reduced to the microgravity level. We were able to confirm the float controlling system was able to be managed both solid and liquid samples by the same method. We further did the lighting experiment on the plasma lamp. The plasma uniformity became well in the minute gravity environment. We were able to confirm a basic performance of electrostatic float furnace from these results.

1. 緒言

静電浮遊炉は宇宙開発事業団殿のご指導の下、JEMに搭載される共通実験装置として開発が行われている浮遊炉である。この静電浮遊炉は無容器処理を行う実験装置で、試料

を静電力で空間に浮遊させて位置制御を行い、高温で均一な加熱を行う実験装置です。特にJEM搭載用として直径20φ程度の試料を無振動、無接触で浮遊し、高度な均一加熱を実現するので準安定状態の観察に適したものとなっている。

現在宇宙開発事業団殿から委託を受け浮遊炉の要素試作試験を実施中であるが、この中で航空機による微小重力実験を実施し、浮遊制御性能の評価を行うこととなっている。そこで、平成4年及び5年の2年間にわたりMU-300による微小重力実験を行った。この報告では平成5年度に行った航空機実験の内容について記述する。平成4年度の航空機実験は個体を試料として浮遊実験を行い特殊な制御方法で、電界で作られた仮想的な容器の内部に試料を自由浮遊させることが可能なことを確認している。

この実験成果を受けて平成5年度の微小重力実験は流体を浮遊させることで浮遊中の流体の挙動を観察することおよびプラズマランプ内部のプラズマ挙動を観察することを目的とした。実験の結果、流体浮遊とプラズマ観察の両方とも良好な結果を得ることができ、これらのデータが今後の設計データとして有効に利用できることが確認された。

2. 実験方法

2.1 静電浮遊炉の概要

(1) 試料の浮遊位置制御の概念

宇宙における材料製造実験で最も興味をそそられるものの一つに無容器処理実験がある。もし完全な無重力環境を実現できたら試料を空間に浮遊させる事は簡単にできるわけであるが、宇宙ステーションの残留重力やバックグラウンドジッタがあるため能動的な位置制御を行う必要がある。

浮遊炉は試料を図1に示すように電圧を印加した電極の間に帯電した試料を静電力で位置制御を行いながらその位置を一定に保ち、均一な加熱を行う実験装置である。この試料の位置をカメラにより検出し、計算機によりファジー制御演算を行って電極の電圧を制御することで試料の位置を安定化させる。

ファジー制御を行う事で試料の電荷量の変動などの予測できない変化に対しても追従できるようになる。また、試料に与える加速度を非常に小さくする事ができ宇宙ステーションの微小重力環境を最大限に活かせる浮遊制御を行っている。つまり、制御により環境を上まわる重力外乱を発生しないこと、さらに高周波領域では環境を百倍から一千倍程度は良くすることが可能である。また、浮遊する試料の材質を問わず、固体、液体、導体、絶縁体などいずれも浮遊させる事ができる。

静電浮遊炉は試料を図2に示すように電圧を印加した電極の間に帯電した試料を静電力で位置制御を行いながらその位置を一定に保ち、均一な加熱を行う実験装置である。特にJEM搭載用として直径20mmφ程度の試料を無接触で浮遊し、良好な均一加熱を実現するので坩堝との汚染防止や、応力歪の防止等の効果がある。また、静電浮遊炉は核を発生し難くするため、準安定状態の物質製造や過冷却現象の観察に最も適したものとなっている。

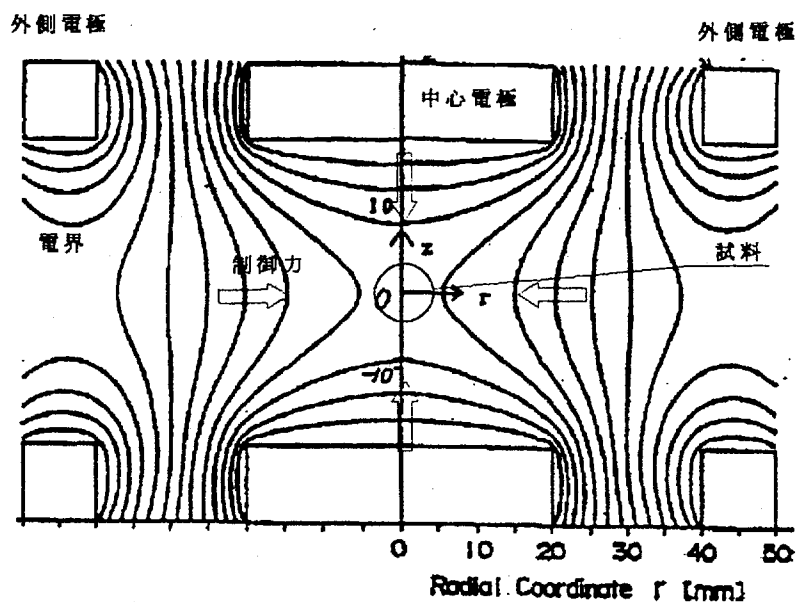


図 1 浮遊制御電界の分布

Fig. 1 Distribution of the electric-field for floating control

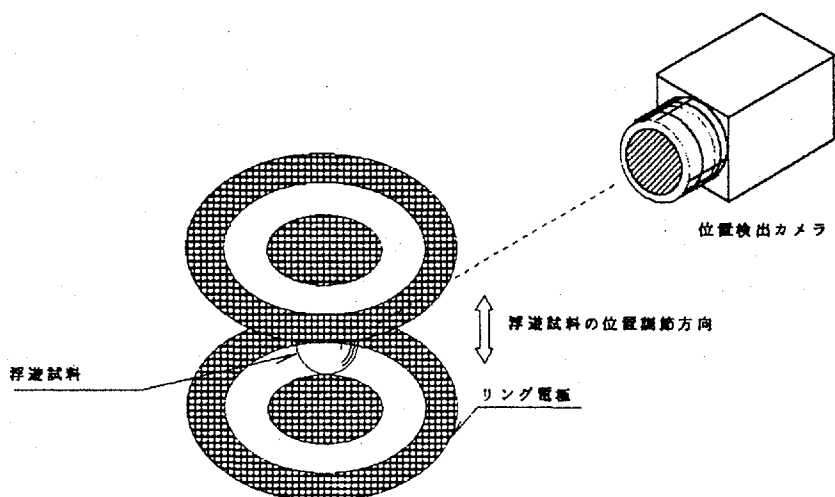


図 2 静電浮遊の浮遊制御の概念

Fig. 2 The concept of electro-static floating mechanism

(2) 加熱方式などの概念

静電浮遊炉は炉本体部と制御部、計測部、雰囲気制御部、浮遊加熱電源部、冷却部等から構成されている。炉本体部には、加熱機構として球形のプラズマランプと単楕円鏡を採用しており、加熱をプラズマイメージ加熱で行っている。この加熱においては、プラズマ発光の波長を $0.25\mu\text{m}$ から $0.8\mu\text{m}$ の範囲で選択することができる。また、試料の周囲をプラズマイメージで包みこむため試料を非常に均一に加熱することが可能になっている。また、仮に試料が若干移動しても、加熱の均一性はほぼ維持される。

さらに加熱に用いる光の波長を選択できるためほとんどの光透過性材料を直接的に光で加熱溶解できるという特徴がある。

このため、ガラスの高純度処理に新しい道を切り開くものと期待されている。

加熱方式の概念は図 3 に示されるように楕円体鏡のイメージ加熱方式を採用しプラズマランプのイメージで試料を包み込むような方式をとっている。

また、試料の温度分布は図 4 のようにきわめて均一なものとなる。このことは過冷却現象の実現のために非常に重要な要素となる。このように温度分布を均一にできることで不要な核の発生を防止し、深い過冷却現象を実現できることになる。

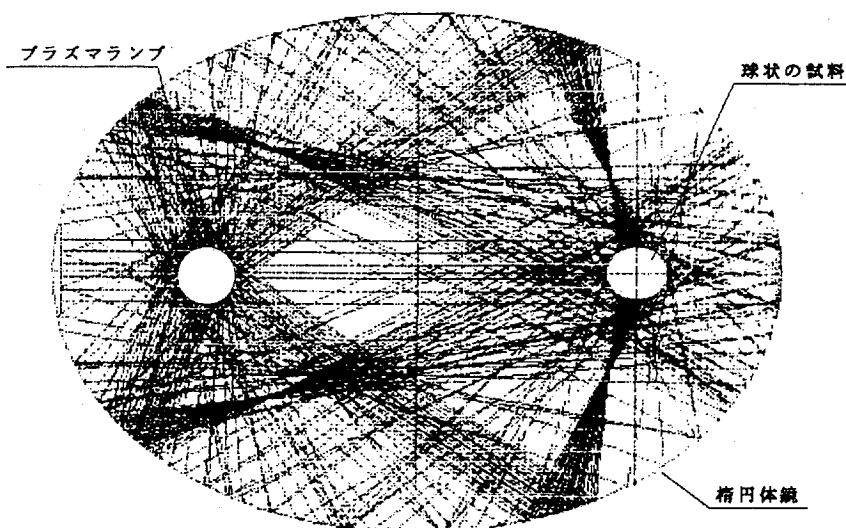


図 3 プラズマランプイメージ加熱方式の概念

Fig. 3 The concept of plasma-image heating system

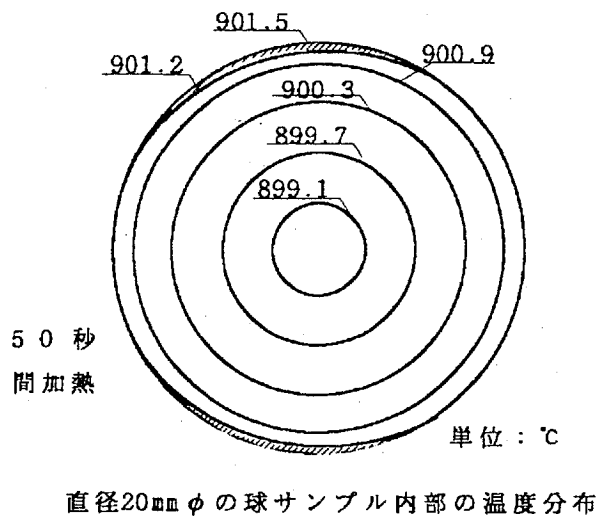


図 4 浮遊加熱試料の温度分布

Fig. 4 Estimated temperature distribution on the surface of a floating sample

2.2 実験装置及び実験手順

平成4年度5・6月期において第一回航空機実験を実施し、直径5mm重さ0.04gのチタンコーティングした中空ガラス球と直径10mm重さ1.3gのアルミ球について、ファジィ制御による位置制御機能が正常に動作することを確認した。また実験結果の解析により航空機の外乱によって実験装置にかかる加速度が1/100Gレベルの環境において、制御ルールの設定次第で試料にかかる加速度レベルを5/1000G以下に抑えられることが確認された。平成5年度2月期の第二回航空機実験では、第一回目の航空機実験に用いた装置を改修補強し、液滴噴射装置を追加している。また、プラズマランプの点灯実験をも行うために実験装置を補充した。

(1) 実験装置

実験には直径5mm～10mm、重さ0.1g～1g程度の水を用いることにして、最大11kVの電圧が電極に印加されるよう設定した。実験装置のシステム構成ブロック図として、流体浮遊制御実験装置を図5にまた、プラズマランプ実験装置を図6に示す。また、その外観図として図7および図8、外観写真として浮遊制御実験装置の写真を図9に、プラズマランプ実験装置の写真を図10に示す。

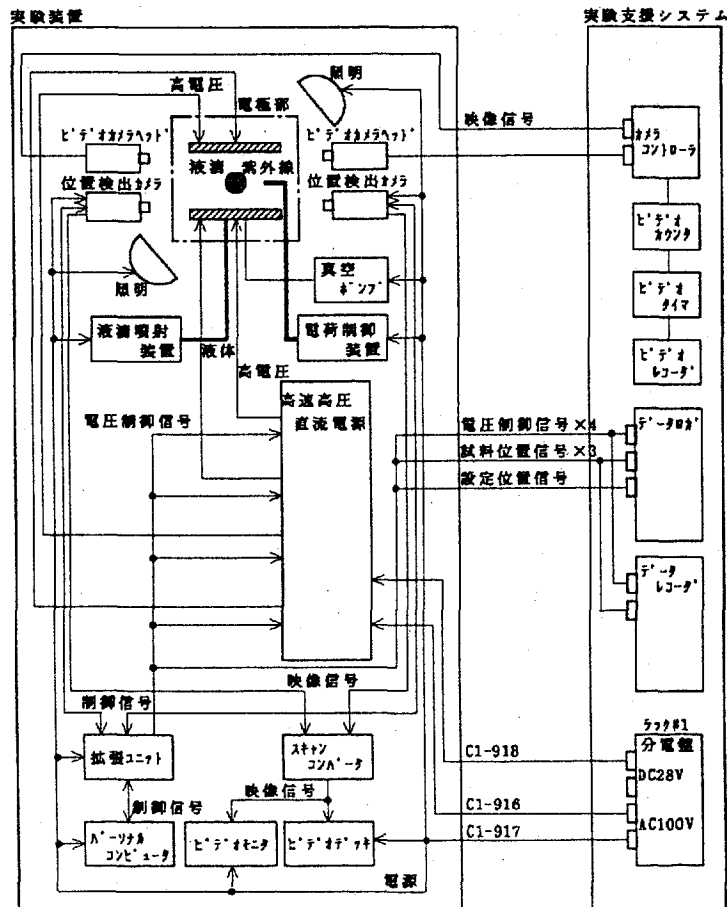


図 5 流体浮遊実験装置の構成ブロック図

Fig. 5 Block diagram of the experimental equipment for floating control

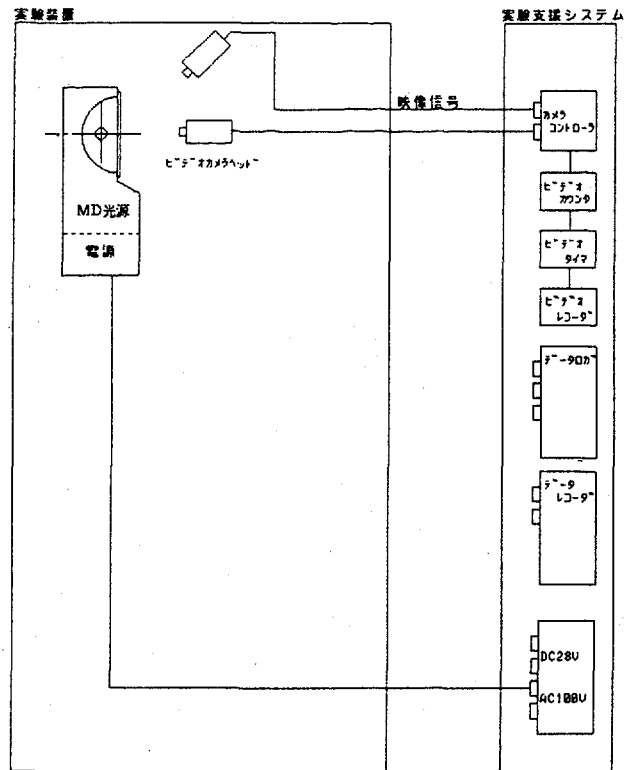


図 6 プラズマランプ実験装置の構成ブロック図
 Fig. 6 Block diagram of the equipment for plasma-lamp monitoring

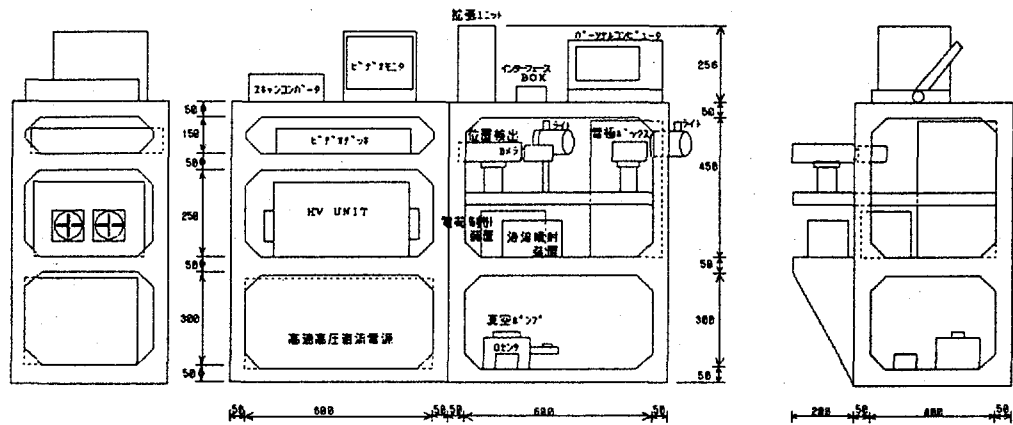


図 7 流体浮遊実験装置の構成図
 Fig. 7 Configuration of the floating control experiments

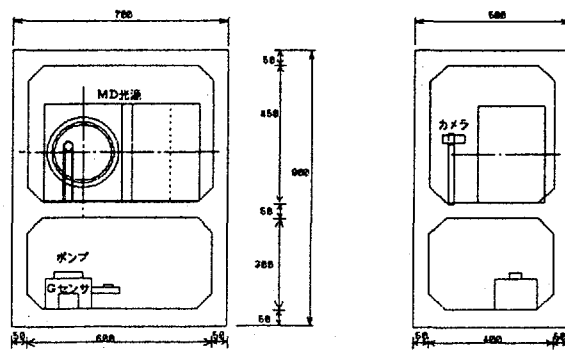


図 8 プラズマランプ実験装置の構成図
 Fig. 8 Configuration of the plasma-lamp experiments

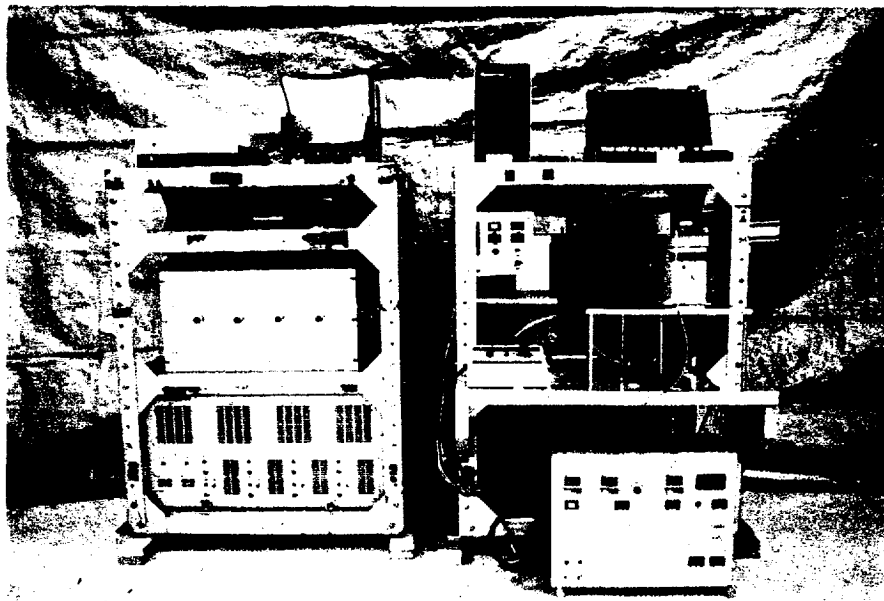


図 9 浮遊制御実験装置の外観写真
Fig. 9 Photograph of the floating control experiments



図 10 プラズマランプ実験装置の外観写真
Fig. 10 Photograph of the plasma-lamp experiments

(2) 実験手順

前記の実験装置を用いた実験は表 1 のような手順に従って実施された。この手順は MU-300 に常備されている実験支援装置の利用と、航空機のフライト状態および実験装置の状態の関連を示すものである。

表 1 実験手順

Table 1 The sequence of experiment

実験装置名 浮遊炉

所属会社及び機関 三菱電機株式会社

パイロット	実験者	項目	実験装置					実験支援システム	
			主電源	プログラマ	真空ポンプ	高圧電源	照明	データロカ	ビデオ
		・エンジンスタート (実験用電源OFF) ・実験用電源ON ・離陸 ・水平飛行 ・空域到達10分前 ・空域到達5分前 ・空域到達	ON OFF	操作	ON OFF	ON OFF	ON OFF	ON OFF	ON OFF
		準備作業 準備完了							
1		μG ² 分前 μG ¹ 分前 μG ³⁰ 秒前 μG ^{NOW} μGから回復							
		水平飛行 準備開始 準備完了							
2		μG ² 分前 μG ¹ 分前 μG ³⁰ 秒前 μG ^{NOW} μGから回復							
		水平飛行 準備開始 準備完了							
3		μG ² 分前 μG ¹ 分前 μG ³⁰ 秒前 μG ^{NOW} μGから回復							
		水平飛行 準備開始 準備完了							
-----			-----						
6		μG ² 分前 μG ¹ 分前 μG ³⁰ 秒前 μG ^{NOW} μGから回復							
		水平飛行 準備開始 準備完了							
		・空域離脱 ・装置用電源OFF ・着地							
		後処理作業 作業終了 装置電源OFF							

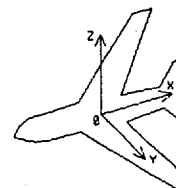
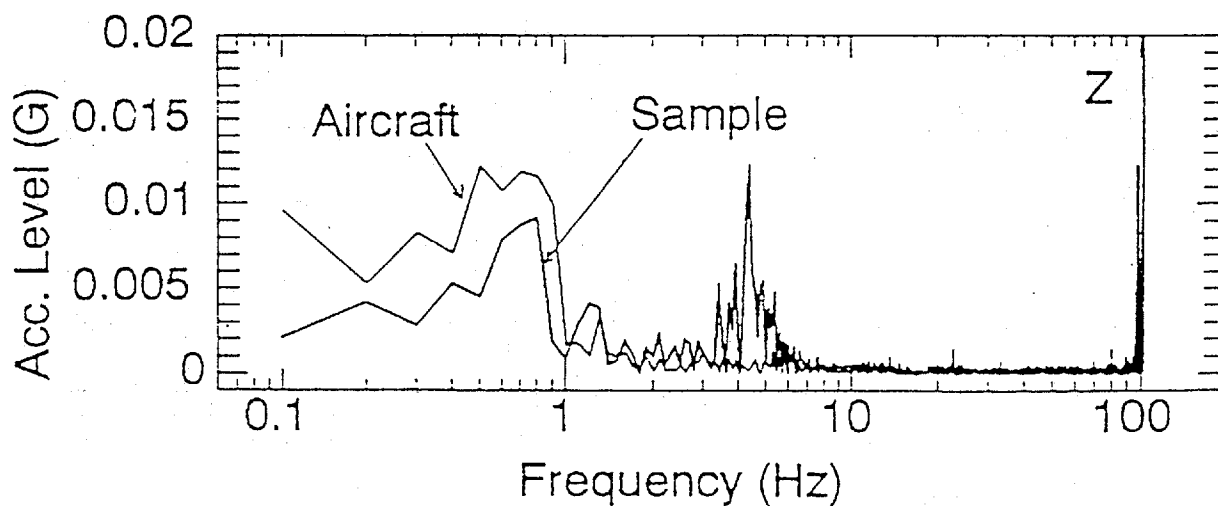
3. 実験結果と考察

前記のような実験方法で平成5年2月中旬から MU-300 型航空機（ダイヤモンドエアサービス株式会社運航）による微小重力実験を実施した。この結果を以下に述べることにする。

3.1 浮遊制御実験結果と考察

流体の浮遊制御実験は非常に困難な実験であると言われているが、それは液体をノズルの先端から分離することが難しいということ、特に微小重力環境では表面張力が顕著に作用して液体がノズル先端から離れにくくなることが知られているからである。そこで、この実験では工夫を凝らして新規に開発した、特殊な方法でノズルと液滴を分離させている。分離実験にはじめの一日を当て、無事成功したので実験のための重要な条件設定が初日で完了できた。二日目からは分離した液体の浮遊制御を目的とした浮遊実験に入り浮遊制御のパラメータを種々変更しながらデータを取得した。その結果、シミュレーション通りの条件で安定な浮遊ができることを確認した。

図 11 に実験データの一部を示し、図 12 に浮遊中の流体試料の状況を写真で示す。浮遊試料の位置データを周波数分析したものを図 13 に示す。このデータから、試料に印加される加速度は 1 Hz 以上の周波数で大きく減衰されていることが解る。計算によると試料の受ける正味の加速度は MU-300 の場合で一千分の五 g 程度となる。



z: 上下方向

図 11 流体浮遊制御実験データの一部

Fig. 11 A data sample of the floating control experiments

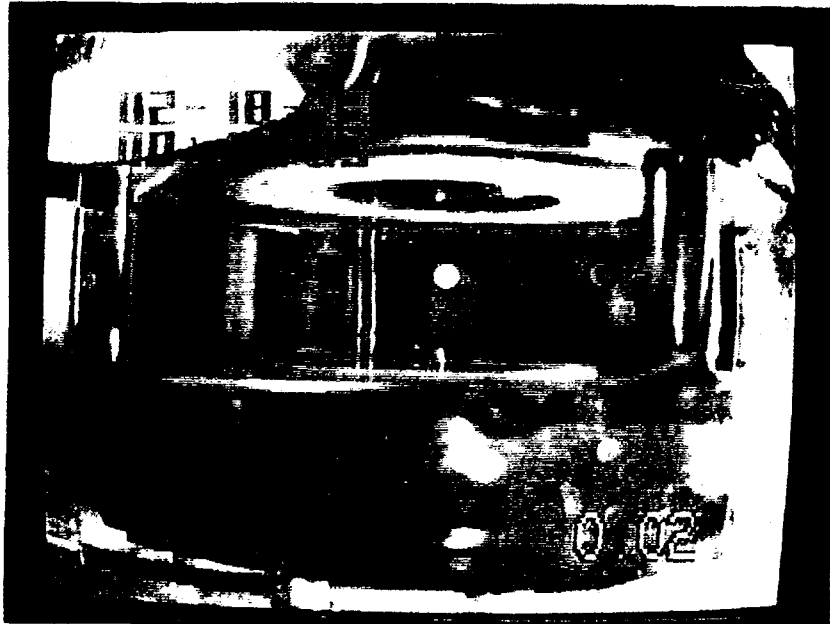


図 12 浮遊中の流体試料

Fig. 12 Photograph of the floating liquid sample

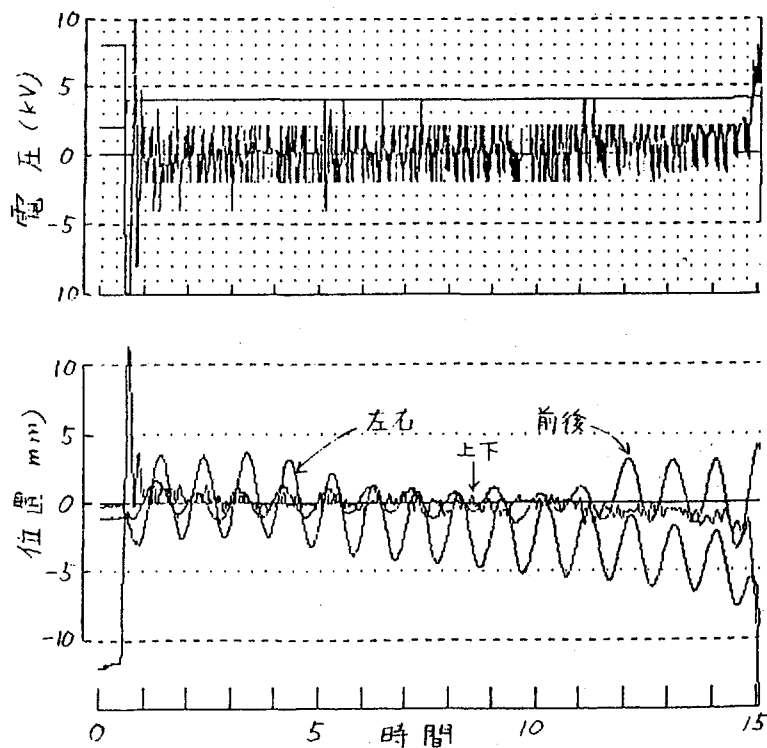


図 13 試料加速度の周波数解析結果の一例

Fig. 13 Frequency spectrum data of acceleration of the sample

このような実験結果から次のことが考えられる。

①流体は浮遊制御期間中変形せず個体と同様の振る舞いをする事が確認された。このことは計算により予測されたとおり、流体をほぼ個体と同様に扱えることを示している。従って、試料が溶解した後の変形については問題ないことが確認された。

さらに、平成4年度の航空機実験の結果と今回の結果を総合して考えると、

②浮遊試料に与える加速度外乱は機体の加速度変化より極めて低く抑えられることが確認された。

③ファジー制御が従来の制御方法に比較して非常に有効であることが確認できた。それは試料を閉じこめる仮想的な電界の容器を自由に設定できる事や、試料を自由浮遊の状態におけることなど優れた特徴が発揮されるためである。

④浮遊制御の計算機シミュレーションと実験結果が良く一致するため、シミュレーション技術が確立されたと考えられる。

3.2 プラズマランプ点灯実験結果と考察

プラズマランプ点灯実験は微小重力環境におけるプラズマの挙動の観察と、点灯性能の確認を行うものである。

微小重力環境においては熱対流がないため地上のプラズマよりも均一になることが考えられているが、このことを実験で確認する必要があるため、また微小重力環境におけるプラズマの生成が地上と変化ないことを確認するためのものである。

実験は最後の一日を利用して行われた。その結果は図 14 に示すように、予想通り微小重力環境でプラズマの形状が地上よりも均一性が向上することが確認された。また、微小重力環境における点灯も問題ない事が確認された。

これらの結果から、微小重力環境におけるプラズマランプの使用に問題のないことが確認されたと考えられる。

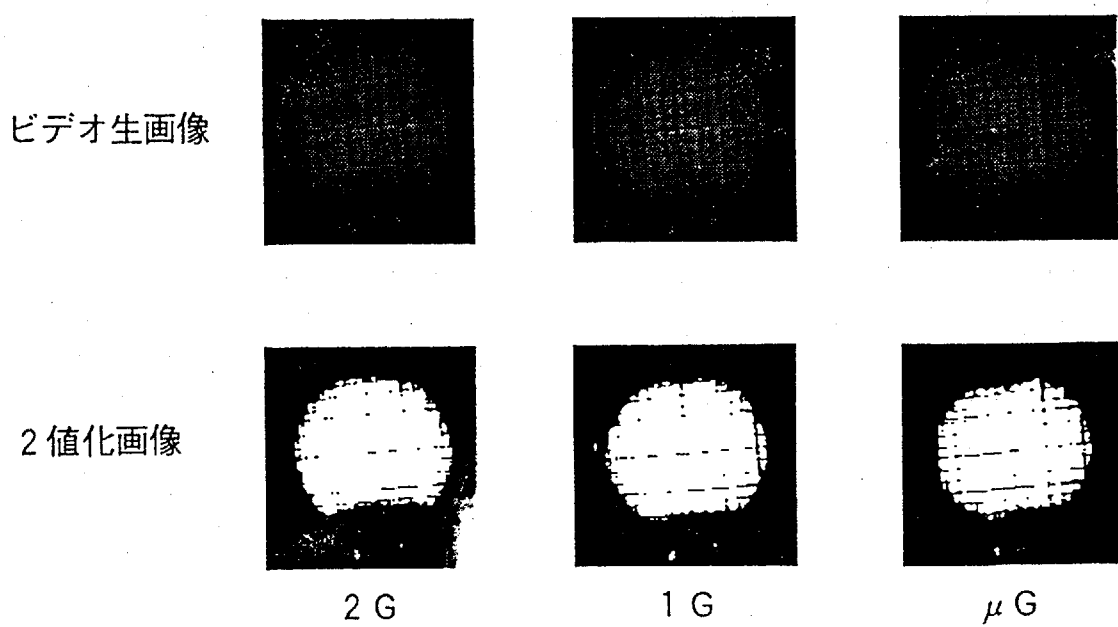


図 14 プラズマランプのプラズマ分布観察

Fig. 14 Distribution of the plasma in a lamp

4. 結言

以上の微小重力実験の結果、及び平成4年の航空機実験の結果を総合して評価したところ次のようなことが判明した。

- ①ファジー制御方式により固体や流体の区別なく浮遊し制御が可能であることが確認された。
- ②浮遊中の試料について、自由浮遊状態を実現できることが確認された。このことはJEMの共通実験装置として加速度外乱を $10^{-5}g$ より良くできることを示すもので非常に意義深いものと考えられる。
- ③流体を微小重力環境で扱う技術が習得された。
- ④プラズマランプが微小重力環境で正常に動作することが確認され、プラズマの均一性も向上することが確認された。

謝辞

今回の航空機実験を行うに当たり多くのご協力をいただいたダイヤモンドエアサービス株式会社の皆様に深く感謝申し上げます。