

論 文

微小重力環境における格子型4重極静電浮遊炉の特性

荻原正明*, 青山道夫**, 小田徹**, 藤井積***

(1996年7月22日受理)

Characteristics of Rod Type Quadrupole Electro-Static Levitation Furnace under Micro-Gravity Condition

Masaaki OGIHARA,* Michio AOYAMA,** Toru ODA** and Tsumoru FUJII***

(Received July 22, 1996)

One of space material experimental themes is containerless material processing that studies material properties and creates new materials. The attainment of stable levitation and high temperature heating of sample is indispensable for the experiment. In order to solve these two problems at the same time, rod type quadrupole levitation electrode which is characterized by small shield area against heat radiation was proposed from the result of theoretical analysis and further the prototype apparatus was made. With this apparatus, the sample levitation, the sample heating by infra-red radiation and the melting experiment were carried out under micro-gravity condition. The result showed that the melting of the sample with the stable levitation can be performed by this system. Namely the two problems were solved. Furthermore, it was also confirmed that the levitation of the sample can be controlled by changing an applied voltage.

1. はじめに

宇宙材料実験の一つに無容器で材料を空間に浮遊させ、加熱・溶融し高純度物質や新材料を創製するテーマがある^{1,2)}。実験を達成するためには、試料を空間で安定に浮遊させる技術と小電力で高温度を達成するための加熱システムを備えた浮遊炉の開発が必要である。

本研究ではこれら二つの課題の解決を目的とした。すなわち安定浮遊は交流2次元4重極（以下単に4重極）電界が作る閉じ込め力と、それに直交する直流電界による静電反発力との組み合わせにより可能であること、および試料に外乱が作用しても定位置保持のための位置制御がPID

制御と筆者らが提案した間欠課電方式³⁾により可能であることを理論的にも実験的にも実証した。

高温の達成のために、加熱用熱線が電極により遮蔽される割合ができるだけ小さくした格子状電極を提案した。この電極を反射率85%の球面鏡で囲み、0.16 kWの電力を投入すると、直径10 mm、輻射率0.3の灰色試料の表面温度2,000°Cが達成でき、材料実験に十分対応できることが理論的に求められている⁴⁾。

なお格子状電極の電位および電界分布はすでに理論的に求められており⁵⁾、それを基本にしたこの電極系での運動とほぼ同じであることも示されている。

以下、試料浮遊の理論を概略述べ、微小重力場での浮遊、加熱溶融実験の結果を紹介する。

2. 浮遊理論

2.1 電極構造

浮遊電極系の基本構成は、2葉双曲線断面を有する4重極と直流電極の組み合わせである。直流電極は2個の球電極で、4重極中心Z軸上に適当な間隔で配置されている。重力の方向をZ軸上にとると、荷電された試料は4重極の電気力学的な閉じ込め力とそれに直交する力である試料の電荷極性と同極性の直流電界からの反発力によって2球電極間のZ軸上、重力と平衡する位置で静止浮上する。また宇宙実験用の装置は小型、軽量かつ高加熱効率が要求される。

キーワード：静電浮遊、2次元4重極、浮遊炉、宇宙、微小重力

* 石川島播磨重工業(株)産業機械事業部 (235 横浜市磯子区新中原町1, 横浜エンジニアリングセンター)
Industrial Machinery Division, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., Yokohama Engineering Center, 1, Shin-Nakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama 235, Japan

** 西日本工業大学電気工学科 (800-03 福岡県京都郡苅田町大字新津1633)
Department of Electrical Engineering, Nishinippon Institute of Technology, 1633, Aratsu, Kanda-cho, Miyako-gun, Fukuoka 800-03, Japan

*** 石川島播磨重工業(株)技術研究所 (135 東京都江東区豊洲3-1-15)
Research Institute, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 3-1-15, Toyosu, Koutou-ku, Tokyo 135, Japan

以上のこと考慮し、4重極を最も良く近似できる円筒電極(以下仮想4重極)の表面に複数の円柱が等間隔で配置されている格子状2次元4重極を提案した。図1(1)はその概念図であり、(2)は断面図である。図中 R_0 は電極定数で座標原点から X または Y 軸上の格子電極表面までの距離で30 mmとした。格子直径は電極系の構造強度を維持でき、かつ製作の容易さの点から2 mmとした。また材質は耐熱性を考慮しタンクステンを選んだ。格子状により試料から見た熱源の遮蔽面積は従来形の4重極に比較して約1/12となり、加熱効率が上昇する⁴⁾。

2.2 格子電極系の電位および電界

電位は格子を構成する各円柱内に電荷密度 λ [C/m]の1本の代用線電荷(以下線電荷)を配置し、それらの作る電位を重ね合わせる代用電荷法で近似的に求めた。

すなわち図1(2)に示すように、 K 番目($K=1, 2, 3, 4$)の仮想4重極のそれぞれの円周上に偶数本である N 本の線電荷が等間隔で並んでいるとき、 K 番目の電極の I 番目($I=1 \sim (N/2)-1$)の線電荷の座標を $P_{K,I}(X(K,I), Y(K,I))$ とする。線電荷が $+Z_0$ から $-Z_0$ まで存在する場合、それらの線電荷群が形成する静電ポテンシャル V (以下電位 V)は次式で与えられる。

$$V = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \sum_{K=1}^4 \sum_{I=1}^{N/2-1} \left[(-1)^{K-1} \ln \frac{Z_0 + \sqrt{(X-X(K,I))^2 + (Y-Y(K,I))^2 + Z_0^2}}{-Z_0 + \sqrt{(X-X(K,I))^2 + (Y-Y(K,I))^2 + Z_0^2}} \right] \quad (1)$$

ただし ϵ_0 は真空の誘電率(8.85×10^{-12} F/m)、また正弦的な時間変化は省略してある。

電界の成分 E_X, E_Y は(1)式を座標で微分することにより次式で与えられる。

$$E_X = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \sum_{K=1}^4 \sum_{I=1}^{N/2-1} \left[(-1)^{K-1} \frac{Z_0 \{ X - X(K,I) \}}{\{(X-X(K,I))^2 + (Y-Y(K,I))^2\} \sqrt{(X-X(K,I))^2 + (Y-Y(K,I))^2 + Z_0^2}} \right] \quad (2)$$

$$E_Y = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \sum_{K=1}^4 \sum_{I=1}^{N/2-1} \left[(-1)^{K-1} \frac{Z_0 \{ Y - Y(K,I) \}}{\{(X-X(K,I))^2 + (Y-Y(K,I))^2\} \sqrt{(X-X(K,I))^2 + (Y-Y(K,I))^2 + Z_0^2}} \right] \quad (3)$$

(1)式の未定定数($\lambda/4\pi\epsilon_0$)は、 $K=1$ 番目の4重極の X 軸上の点にある線電極の表面電位が単位電位1 Vになるよう決めた。また、線電荷は円柱表面 $X=29$ mmに配置し、そのときの電位の相対誤差は1%以内であり、直径10 mm程度の試料の運動の解析に対しては十分な近似を与えることができる⁴⁾。

線電荷の長さ $2Z_0$ は電極端部の電界の乱れの影響が中央部には現れないと考えられる長さで格子の直径2 mmの100倍の200 mmとした。

このように配置された線電荷による0.1 V間隔の等電位線のパターンを図2に示す。図2(1)~(3)は格子数が3, 5, 9本の場合を、(4)は2葉双曲線形すなわち理想4重極の場

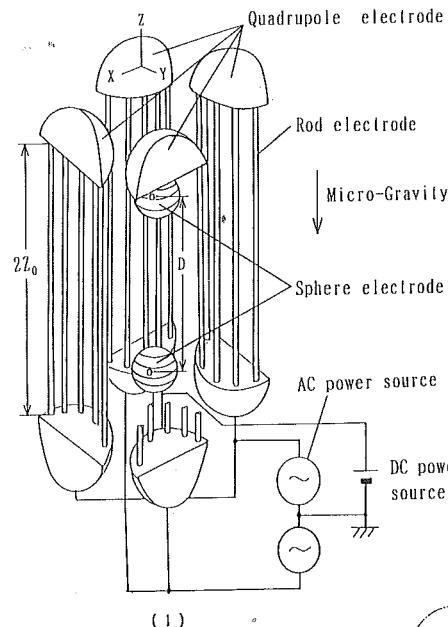
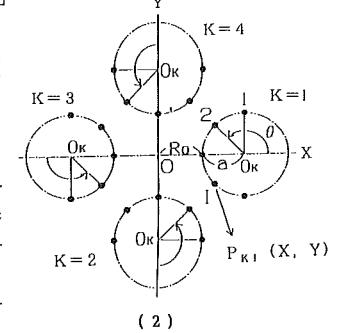


図1 格子型2次元4重極

静電浮遊装置
(1) 装置概要,
(2) 格子配置断面。

Fig. 1 Rod type two dimensional quadrupole electrostatic levitation apparatus.
(1) Schematic diagram, (2) Cross section.



合の等電位線図である。格子の数が増加し5本以上になると、ほぼ理想4重極系のそれと同等であるのがわかる。

2.3 同極性、同電位の2個の対向する球電極をもつ格子型4重極系の電位分布

浮遊試料の位置制御用に Z 軸上に配置された2個の球電極による電位も、代用電荷を用いて次式で近似的に表される⁶⁾。

$$V_s = U_{dc} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z-d)^2}} + \frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z+d)^2}} \right] \quad (4)$$

U_{dc} : 球電極の電位と同じ大きさの数[−], Q : 2個の球

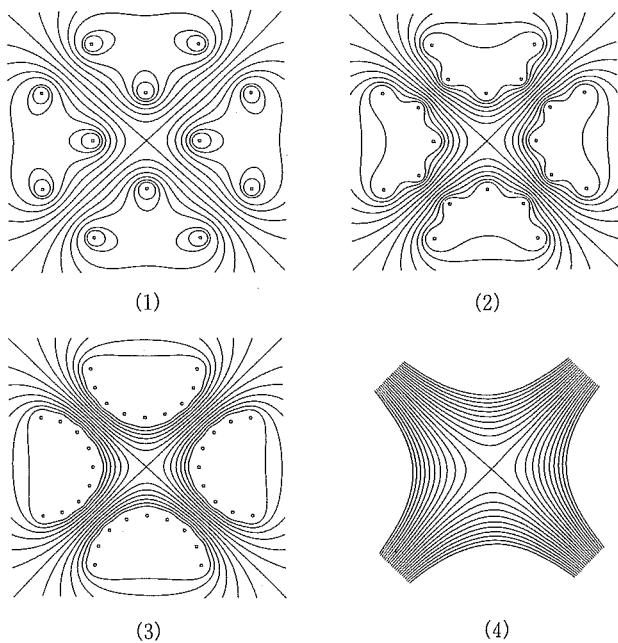


図 2 格子電極の等電位面

(1) 格子数=3本, (2) 格子数=5本, (3) 格子数=9本, (4) 従来型.

Fig. 2 Equipment surface of rod type levitation electrode.

(1) Rod quantity=3, (2) Rod quantity=5, (3) Rod quantity=9, (4) Prototype.

電極に与える代用点電荷[C], d : 原点より代用電荷までの距離[m]

式(4)の計算電位の誤差を最小にする最適な代用電荷の大きさ Q_{opt} と、その位置の d_{opt} は次の手順で決める。

(1) 代用電荷 Q の位置をまずある値 d に固定し、球電極の境界条件を満足するように Q の値を求める。さらにこの Q を用いて球電極全体の表面電位を計算し、与えられた球電極電位に対する相対誤差の最大値 ε_{max} を求める。

(2) 次に代用電荷の位置 d を Δ だけ微小変化させて、(1)の計算を行う。

(3) 手順(2)を繰り返し、 ε_{max} の最小値 $\varepsilon_{\text{max/min}}$ を与える Q , d が、それぞれの最適値 Q_{opt} , d_{opt} である。

表 1 はこのようにして求めた Q_{opt} , d_{opt} , $\varepsilon_{\text{max/min}}$ と球電極中心間の距離 D の関係である。

図 3(1), (2)は図 2 の電極系で球電極印加電圧 7 kV, 4 重極電圧 12 kV の場合の浮遊電極全体の電位を(1)式および(4)式の重ね合わせで計算した例である。それぞれ Z をパラメータにとり X 方向 ($Y=0$ の断面) と Y 方向 ($X=0$ の断面) での電位分布である。

4 重極では隣り合わせる電極間に交流電圧が印加されているために、電位は例えば電極表面では +6 kV に対し、-6 kV のように絶対値は同じであるが極性が反転している。

また図は電位が球電極の内部にも存在する分布となって

表 1 球電極における最適代用電荷およびその最適配置と最大誤差の最小値：印加電圧が同極性の場合

Table 1 Relation between sphere electrode position and optimum charge, minimum value of maximum error: both electrodes have the same polarity of potential.

| D [cm] | Q_{opt} [pC] | d_{opt} [m] | $\varepsilon_{\text{max/min}}$ [%] |
|----------|-----------------------|----------------------|------------------------------------|
| 5.0 | 1.25077 | 0.050012 | 2.68 |
| 7.5 | 1.29044 | 0.075012 | 1.11 |
| 10.0 | 1.31247 | 0.100012 | 0.558 |
| 12.5 | 1.32650 | 0.125012 | 0.294 |
| 15.0 | 1.33620 | 0.150012 | 0.149 |
| 20.0 | 1.34877 | 0.200012 | 3.38×10^{-3} |

いる。しかし、電極内部に電位差は存在せず、表面が等電位でなければならないため、図中破線で示されている電位は、本質的にすべて球電極電位 7 kV の等電位面をもつ特性となるべきである。さらに 4 重極の等電位についても同様のことが考えられ、これについても本質的には電極表面が等電位面となる特性である。

ただ浮遊の問題については試料は浮遊空間の Z 軸上で球電極より離れた位置であるため、ここで求めた電位分布の式を基本にした試料の運動シミュレーションの結果には、実用上大きな影響を与えることはない。

2.4 安定浮上位置の推定

浮遊空間内で荷電試料が安定浮上する位置は、4 重極の電気力学的閉じ込めポテンシャル ϕ_c と外力ポテンシャル ϕ_0 の和 ($\phi_c + \phi_0$) で表される総合ポテンシャル ϕ_t で論ずることができる。

閉じ込めポテンシャル ϕ_c は粘性流体中に配置された 4 重極電界内での荷電粒子に対する運動方程式の線形近似理論より、次式で表される⁷⁾。

$$\phi_c = \frac{1}{4} \frac{Q^2 E^2}{M \Omega^2 \left\{ 1 + \left(\frac{6\pi\eta A}{M \Omega} \right)^2 \right\}} \quad (5)$$

また ϕ_0 は、重力加速度 g 、質量 M 、位置 Z の試料に作用する位置エネルギー MgZ および Z における直流電位 U_{DC} と電荷 Q の試料による静電ポテンシャル QU_{DC} の和で考える⁸⁾。

$$\phi_0 = MgZ + QU_{\text{DC}} \quad (6)$$

A : 球形試料の半径 [m], Ω : 電源の角周波数 [1/s], η : 媒質の粘性係数 [Ns/m²], E : 電界強度 [V/m]

総合ポテンシャル ϕ_t の勾配は保存力であるため、試料が外力に抗して安定する位置は $\text{grad}(\phi_t) = 0$ を満足する点で与えられる。

図 4 は(5)および(6)式をもとに U_{DC} をパラメータとし

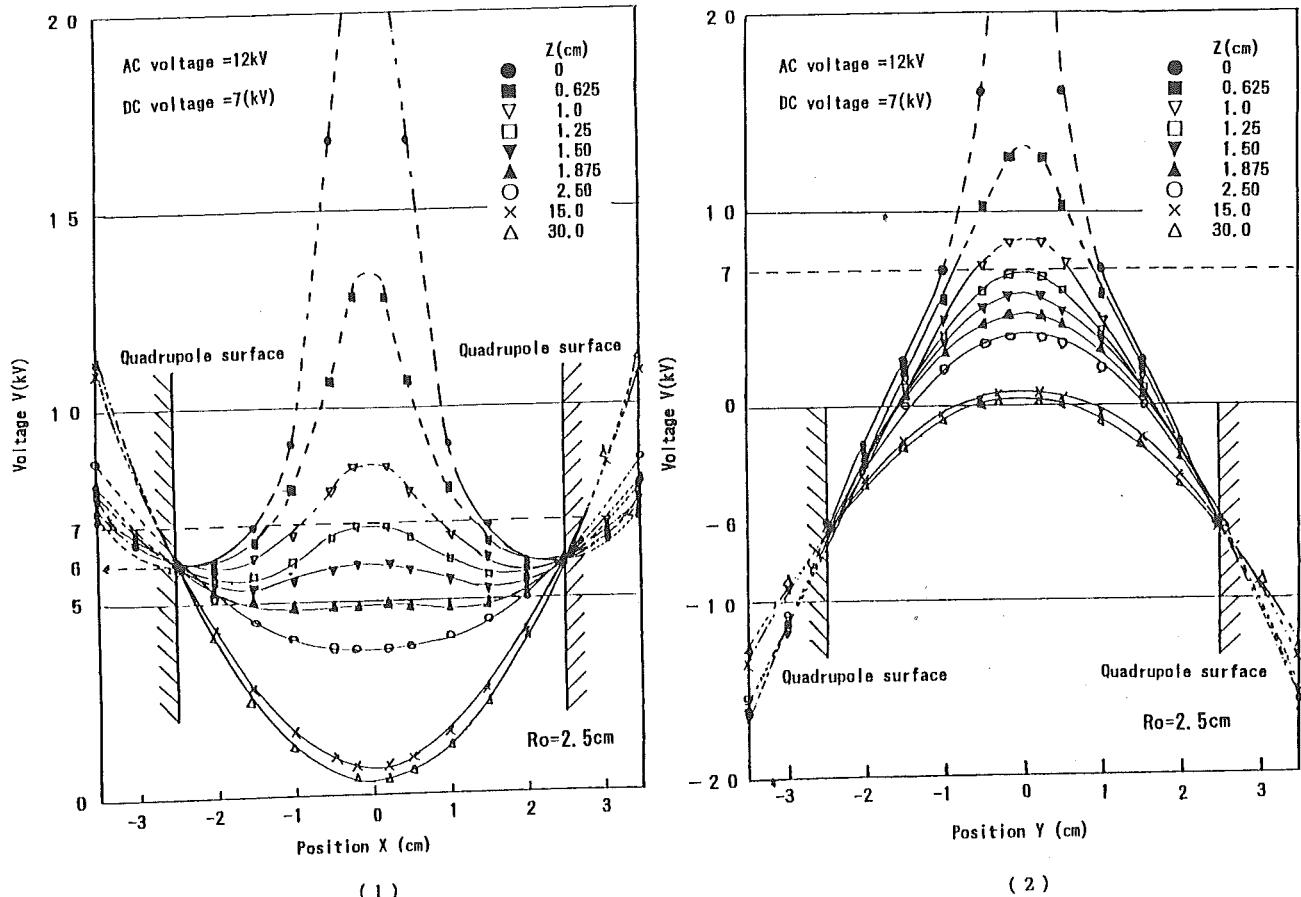


図 3 同極性電位をもつ 2 個の球電極間の電位分布

(1) $X-Z$ 面の分布 ($Y=0$), (2) $Y-Z$ 面の分布 ($X=0$).

Fig. 3 Characteristics of potential distribution within the levitation electrode space when both sphere electrodes have the same polarity.

(1) Distribution at $Y=0$ surface, (2) Distribution at $X=0$ surface.

て ϕ_t と Z の関係を計算したものである。総合ポテンシャル ϕ_t は Z が 0 から増加するに従って急激に減少し極小値に至り、その後緩やかに増加する特性を示す。各曲線の極小値に対応する Z の値が、与えられた球電極電圧での試料の静止浮上位置である。

図 5 は図 4 の結果から求められた理論浮上位置および実験で求めた浮上位置と直流電圧の関係である。特性曲線の形状は、理論と実験の間で定性的な一致が見られる。定量性については荷電量、電界の精度を向上させることで解決できると考えられる。従って浮上位置はここに示した解析手法により、理論的に求めることができる。

3. 格子電極空間内の試料の運動

浮遊空間内に存在する荷電粒子の運動は微小重力環境でかつ残留重力が無視できる場合には、 $X-Y$ 平面で考えてよい。

このとき運動方程式は媒質の粘性抵抗のみを考慮し、次式で表される。

$$M_e \frac{d^2 X}{dt^2} + 6\pi\eta_e A \frac{dX}{dt} = QE_x \cos(\Omega t - \alpha) \quad (7)$$

$$M_e \frac{d^2 Y}{dt^2} + 6\pi\eta_e A \frac{dY}{dt} = QE_y \cos(\Omega t - \alpha) \quad (8)$$

ここで E_x , E_y は(2), (3)式で与えられる。また α は電源の初期位相、 M_e および η_e はそれぞれ等価質量および等価粘性係数である⁷⁾。

$$M_e = M + M_m \left(\frac{1}{2} + \frac{9}{4AS} \right) \quad (9)$$

$$\eta_e = \eta + \frac{1}{6\pi A} \frac{9M_m Q}{4AS} \quad (10)$$

$$S = \sqrt{\frac{\rho_m Q}{2\eta}} \quad (11)$$

M_m : 試料と同じ体積の媒質質量 [kg], ρ_m : 媒質密度 [kg/m^3]

図 6 は次の条件での試料運動のシミュレーション結果である。

4 重極印加電圧: 10 kV (実効値), 電源周波数: $f = 50$ Hz, $\alpha = \pi/4$, 試料初期位置: $X = 1.73$ cm, $Y = 1.00$ cm, 試料: $M = 5.5$ mg, $A = 4.4$ mm, 試料電荷量: $Q = 2$ nC, 媒

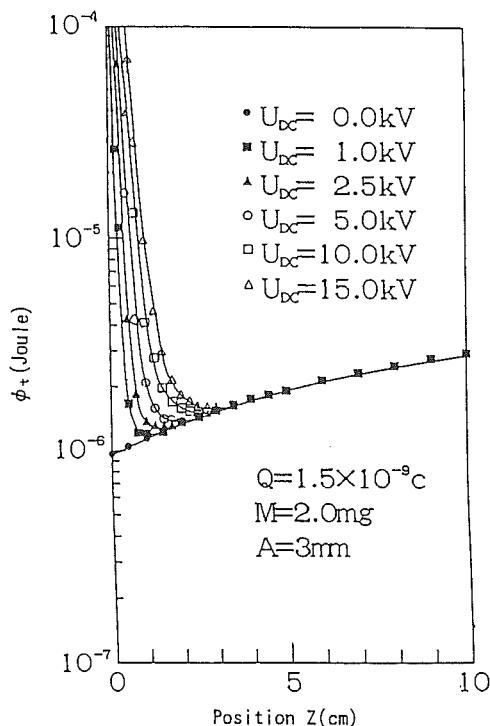


図 4 試料位置 Z と総合ポテンシャルの関係
Fig. 4 Relation between total potential ϕ_t and position Z .

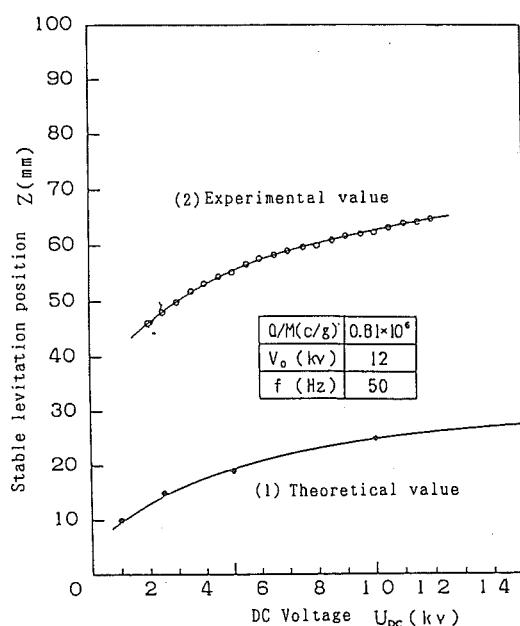


図 5 安定浮上位置
(1) 総合ポテンシャルの最小値から求めた理論的浮遊位置, (2) 実験的に求めた浮遊位置。ただし、下部電極中心位置を $Z=0$ としてある。

Fig. 5 Stable levitation position.
(1) Theoretical levitation position which was evaluated by minimum value of total potential ϕ_t , (2) Experimental levitation position which was measured in a terrestrial experiment. Where the center position of the bottom sphere electrode is the $Z=0$.

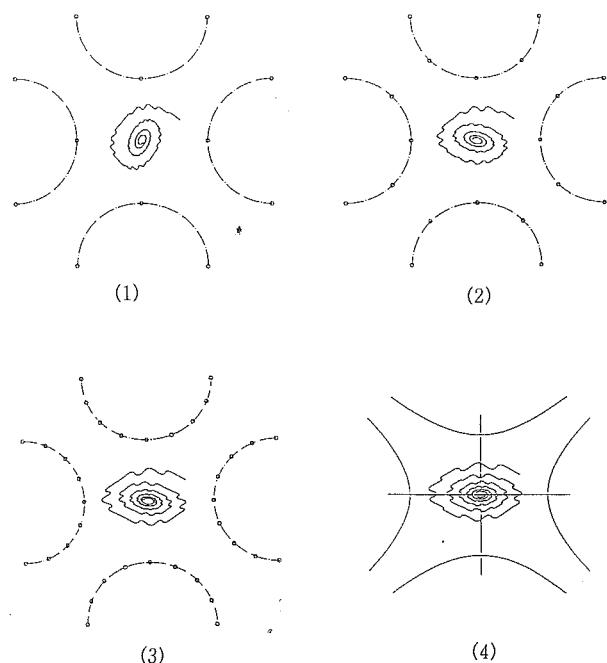


図 6 格子電極内の試料運動シミュレーション
(1) 格子数=3本, (2) 格子数=5本, (3) 格子数=9本, (4) 従来型。
Fig. 6 Simulation of a sample motion in rod type levitation electrode.
(1) Rod quantity=3, (2) Rod quantity=5, (3) Rod quantity=9, (4) Prototype.

質粘性係数(窒素, 20°C) : $\eta = 17.4 \text{ Ns/m}^2$, 媒質密度(窒素, 20°C) : $\rho_m = 1.25 \text{ kg/m}^3$

格子を5本以上で4重極を構成すると、粒子運動軌跡は図6(4)に示す理想4重極の結果と、ほとんど同一になることがわかった。

4. 実験装置および実験結果

4.1 装置

実験装置は、 $900 \times 900 \times 1,400 \text{ mm}$ のラック内に浮遊装置本体、電源、観測装置、記録装置、制御装置、加熱装置が収納されている。主要な仕様は次のとおりである。

(1) 格子電極：材質はタンクステン、直径2mm、長さ270mm、1電極当たり5本、4重極全体で20本。

(2) 球電極：材質は鉄、直径20mmでZ軸上に対向させて2個設置されている。

(3) 加熱源：1,000Wの赤外線イメージ炉を熱線がZ軸上でかつ2球電極間の中間部に焦点を結ぶように2基配置されている。

(4) 電源：(a) 波高値±21kVの交流電源2基で中性点接地、(b) 最大値20kVの直流電源。

(5) 観測系：CCD(Charge Coupled Device)カメラ。

(6) 試料荷電部：試料の形状や性質により摩擦荷電方式、または接触荷電方式を適用。

(7) 試料供給部: (a) 微粉体供給用として圧縮空気吹きだし方式、(b) 単体試料供給用として静電反発力利用方式。

4.2 実験結果

実験は北海道上砂川の地下無重力実験センターにある $10^{-3} \sim 10^{-4} g$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$) 程度の微小重力環境が約 10 秒間発生できる落下塔で実施した⁹⁾。

(1) 浮遊溶融実験

試料のガラス粉末は成分が $\text{NaO}_2\text{-TeO}_2$ (80 : 20), 融点が 470°C , 最大直径約 $300 \mu\text{m}$, 摩擦帶電で $1 \sim 0.1 \text{ nC}$ の予備電荷が与えられている。電極空間で浮遊しているガラス粉末に自由落下開始 3 秒後に, 2 基のイメージ炉から $1,900 \text{ W}$ の熱出力が放射され, 6 秒間保持されるように制御した。このとき予備実験のデータから, イメージ炉の焦点近

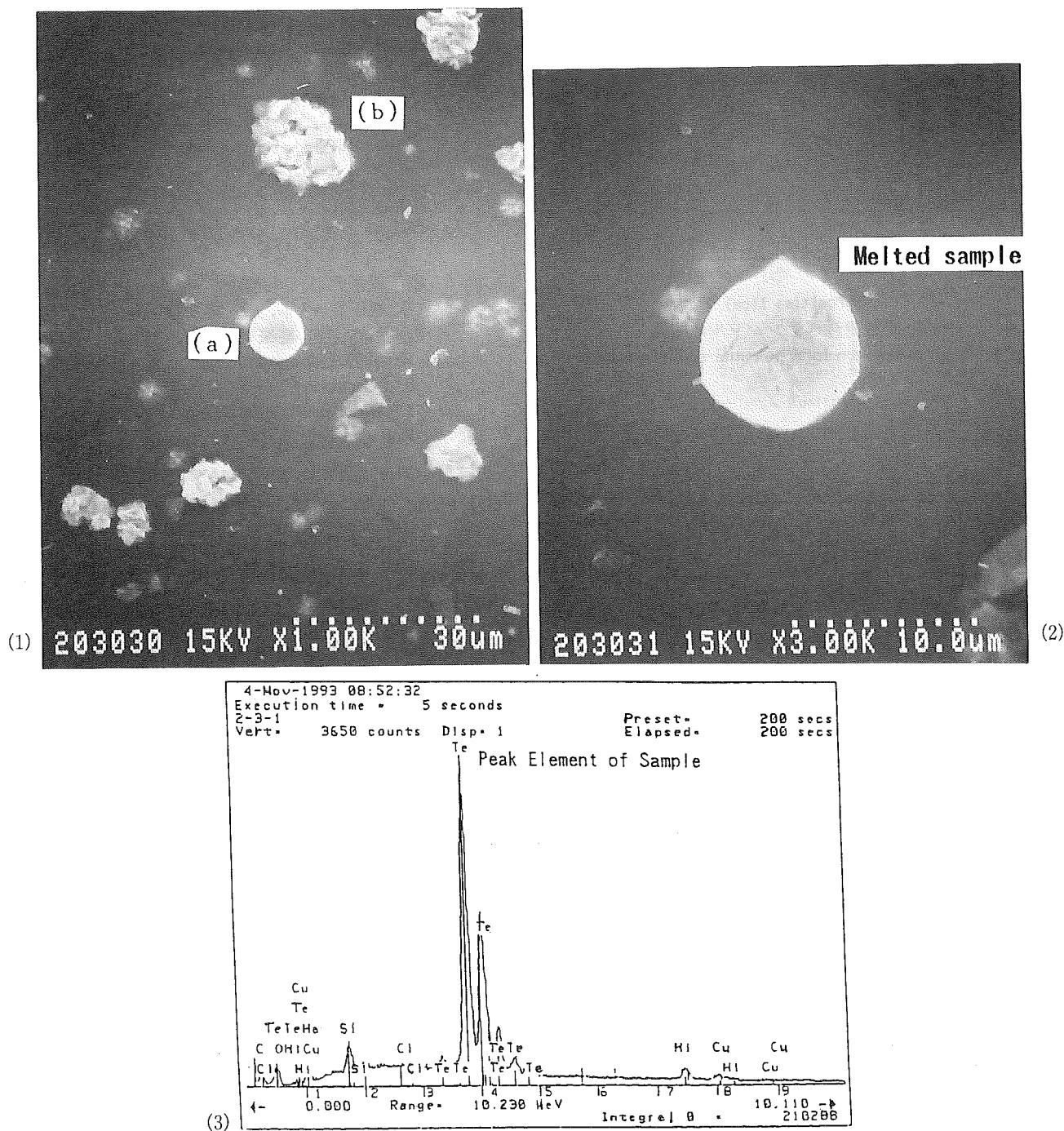


図 7 無重力場での加熱実験結果

(1) SEM 観察結果: (a) 溶融部分 (b) 非溶融部分, (2) SEM 結果: 溶融部分拡大, (3) EDX 解析結果.

Fig. 7 Melting of sample in a micro-gravity experiment at drop tube.

(1) SEM observation of sample: (a) Melted glass sample, (b) Non-melted glass sample; (2) SEM observation of sample: Enlargement of melted glass sample; (3) EDX analysis.

傍の粒子は約 800°C に加熱されていると推定される。この温度はガラスの融点以上であり、照射時間や熱吸収等の条件が整えば溶融が可能である。実験終了後試料を回収し走査電子顕微鏡で観測した写真を、図 7(1), (2) に示す。図中(a)は(b)に比べ丸みがあり、(b)に見られるような角ばった粒子が溶融して、滑らかな球形になったものと推定できる。同図(2)は(a)の部分を拡大したもので丸みがはっきりとわかる。また同時にこの部分を X 線回析(EDX)で調べた結果を同図(3)に示す。この結果、試料成分の一つである Te のピークが確認でき、他の物質ではないことが判明した。

(2) 大質量粒子の浮遊と位置制御

地上実験では質量 100 mg 以上の試料を、静電気力のみで浮遊させることは不可能であった。また大質量の浮遊が可能な微小重力環境ですら浮遊位置の制御実験はこれまでなされたことはなかった。しかし本研究では、わずか 10 秒間の微小重力環境ではあるが、大質量粒子の安定浮遊と浮遊位置制御が可能であることを、確認することができた。

図 8 は $10^{-3} g$ の微小重力環境で中空ニッケル球（質量 130 mg、直径 12 mm、電荷量 1 nC）が、2 個の直流電極間に安定に浮遊している状態である。図 9 はこの状態で直流電極の電位を変化させたとき、それに追従するニッケル球の Z 軸方向の位置変化である。直流電圧の昇降に応じて試料の位置も精度良く追従しているのがわかる。

ただ X-Y 方向（水平方向）については、4 重極閉じ込め空間に試料が常に存在するように制御されたが、完全に静止させるには至らなかった。これは試料の慣性力が 4 重極の電気力学的閉じ込め力より大きいためで、10 秒という短時間で大質量粒子の運動を静止させるためには、電極中心

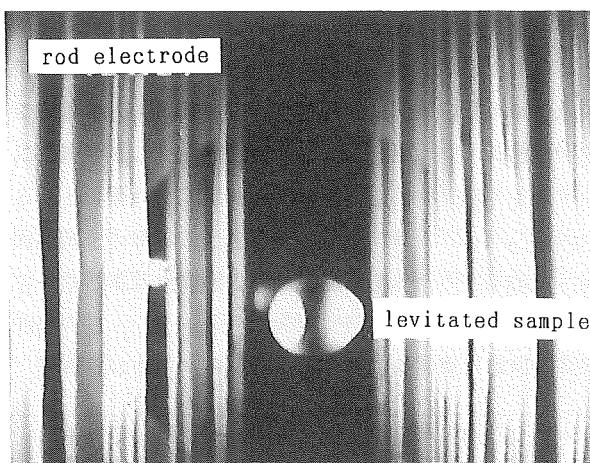


図 8 微小重力実験における試料の安定浮上
試料=Ni. 質量=130 mg. 重力= $10^{-3} g$.
Fig. 8 Stable levitation sample in a micro-gravity experiment.
Sample=Ni. Mass=130 mg. Gravity= $10^{-3} g$.

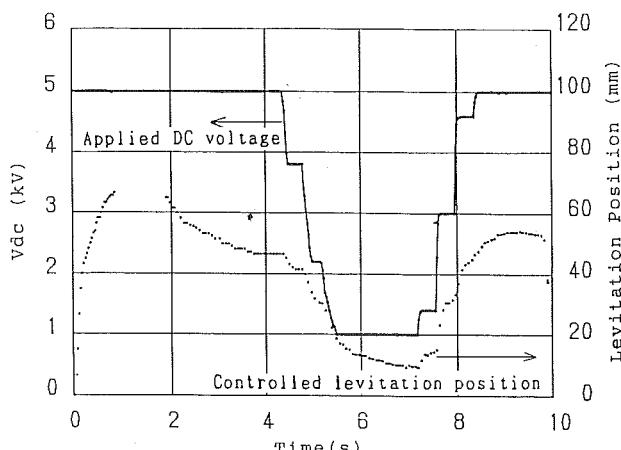


図 9 直流電圧による浮遊位置制御

Fig. 9 Levitation position control by DC voltage applied to a sphere electrode.

に粒子を向ける力がさらに補助的に必要となる。そのためには中心からの位置変位量に応じてすべての 4 重極に粒子電荷と同一極性の直流電位をパルス的に与える間欠課電制御方式の有効性がコンピュータシミュレーションで証明されており³⁾、現在その実験的な確認が行われている。

5. まとめ

宇宙材料実験を目的とした、格子状 4 重極型静電浮遊炉を提案し、電極系の近似的な電位分布をコンピュータシミュレーションにより求め、それにもとづく試料の運動解析が妥当であることを短時間微小重力環境で実験的に確認した。

また、試料の浮遊、加熱、溶融も確認できた。さらに浮遊試料の位置制御機能も確認された結果、微小重力環境での諸機能を満足でき、格子状 4 重極型の静電浮遊炉が、宇宙材料実験用装置として適用可能なことがわかった。

今後は浮遊空間内で、3 次元的な位置制御の応答精度を向上させる研究をすすめ、静電浮遊炉の完成を目指す。

本研究を行うにあたり有益なご助言を賜わった故増田閃一先生および東京大学電気工学科 小田哲治教授に感謝の意を表します。また本研究に用いたガラス粉末試料は大阪工業技術試験所ガラスセラミックス材料部主任研究官牧原正記氏に提供していただいた。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) E.G. Lierke, D. Langbein and R. Grossbach : Study of the Positioning and Liquid Materials in Near Zero Gravity Environments by Electrostatic Fields, pp. 1-100, Rep. Eur. Space Agency (1978)
- 2) D.E. Dayand and C.S. Ray : Research on Containerless

- Melts in Space*, pp. 165-192, American Institute of Aeronautics, Inc. (1996)
- 3) M. Ogihara, T. Fujii, M. Aoyama and T. Oda : Microgravity Sci. Technol., **5** (1992) 138
 - 4) 萩原正明, 藤井 積, 遠藤輔治, 青山道夫, 小田 徹 : 日本マイクログラビティ応用学会誌, **10** (1993) 100
 - 5) 萩原正明, 藤井 積, 青山道夫, 小田 徹 : 日本マイクログラビティ応用学会誌, **9** (1992) 174
 - 6) 小田 徹, 青山道夫, 萩原正明, 藤井 積, 池上雄二,
- 栗林宗孝 : 西日本工業大学紀要 理工学編, **20** (1990) 17
- 7) 増田閃一, 藤林宏一 : 電気学会雑誌, **90** (1970) 861
 - 8) 小田 徹, 青山道夫, 萩原正明 : 第18回静電気学会全国大会講演論文集, 25pc1 (1995)
 - 9) 萩原正明, 藤井 積, 鷹見雅和, 池上雄二, 青山道夫, 小田 徹 : 第9回宇宙ステーション講演集, 2B1 (1993) p. 85 *