B 2 4 3

帯電微粒子の回転運動の研究

小嶋裕文、服部耕太、横田俊昭 (愛媛大学 理学部)

Experiment on Rotational Motion of Charged Particle

Hirofumi Kojima, Kota Hattori, and Toshiaki Yokota

ABSTRACT

Fine particle plasma has large charge in comparison with gaseous plasma and indicates various singular behaviors due to strongly coupled character. Research of fine particle plasma is not only useful for investigation of space phenomena (formation and behavior of planetary ring) but also contains various possibilities of application through control of particles. As part of such purpose, we experiment that negatively charged particle irradiated by electron beam is confined and makes rotation in logarithmic potential around coaxial cylindrical electrodes. Particles used in this experiment are volcanic ashes of Mt. Usu and we used particles with radius of $90\mu\text{m}$ measured diameter by laser scattering and sorted by wind tunnel. In the experiment, we could confirm orbital motion of particle around central electrode by adding positively voltage to central electrode. By analyzing motion of particle in VTR pictures recorded this motion, we can calculate mass-to-charge ratio, and particle charged one estimated to be several thousand electrons.

Keywords: Fine particle plasma, Laser scattering, Kingdontrap, Rotational motion

1. はじめに

宇宙空間には多数の微粒子が存在し、それらが電荷を獲得して微粒子プラズマの状態になっている。土星や木星の惑星リングがこの状態で、また、地球上でも核融合プラズマやプロセッシングプラズマ中に微粒子が発生、混入し微粒子プラズマ状態になっていると考えられている。

微粒子プラズマとは、気体プラズマ中で微粒子が電荷を獲得して混在している状態もしくは、正および負に帯電した微粒子が混在している状態の総称である。この微粒子プラズマに関わる諸現象を研究する上で、微粒子の粒子径や帯電量を知る事が重要である。そこで、我々の研究室では、粒子径や帯電量をリアルタイムで測定できる方法を研究している。測定手段として、粒子径測定には He-Ne レーザーによる散乱強度比を測定し、帯電量

測定の 1 つの方法としてキングダムトラップによって、それぞれ粒子径と帯電量を測定する実験を行った。

2. 粒子径測定

2.1 風洞

風洞は断面が正方形の空洞になっており、一方の端にファンが取り付けられ、横方向から一定速度の風が送り込まれる。上部に取り付けられたドロップパーから粒子を落下させることにより、等しい密度の粒子を粒子径ごとにふるい分けることができる装置である。この装置を用い、平均直径 $10\mu\text{m}$ ~ $400\mu\text{m}$ の火山灰粒子を 25 個のセルに選別し、セルごとに電子顕微鏡で撮影した画像 (Fig.1) をもとに、粒子径を測定した結

果をグラフに示す (Fig.2)。さらに、平均直径 $90\mu\text{m}$ の粒子をメッシュによるふるいわけ法によって選別する事ができ、その粒子を平均直径 $60\mu\text{m}$ 以下と $90\mu\text{m}$ の粒子に選別できた。

Fig. 1 電子顕微鏡の画像

Fig.2 風洞による選別粒子の粒子径

2.2 レーザー散乱による粒子径測定

He-Ne レーザーから照射された光はビームエキスパンダーで直径が拡大されレンズを通過し、試料を入れた容器の中心に焦点が合わせられる。粒子によって散乱されずに通過したレーザーは、ガラス板を貼り付けた銅板により 90° の向きに反射され、フォトダイオード 2 に入射する。そのレーザーの強度を I_2 とする。粒子によって散乱されたレーザーは、銅板の周囲を通過してフォトダイオード 1 に入射する。そのレーザーの強度を I_1 とする。光の強度をフ

ォトダイオードで検出しオシロスコープに表示させ、それぞれの強度を読み取り強度の比 I_1/I_2 を測定する。粒子径が大きくなるにつれて、レーザー光の散乱強度が増加し、非散乱強度が減少する。あらかじめ粒子径に対する強度比がわかっているれば、未知の粒子径の強度比 I_1/I_2 を測定することによって、その粒子の粒子径が得られる。

2.3 実験方法

まず初めに、標準粒子 $0.2, 0.5, 1, 5, 8, 10, 20, 40\mu\text{m}$ を使い、散乱強度比 I_1/I_2 と粒子径の関係をグラフにプロットし校正曲線を描く。次に、電子顕微鏡で測定した平均直径 $90\mu\text{m}$ 以下の火山灰粒子を同様の方法で測定し散乱強度比を求め、標準粒子の校正曲線上にプロットした (Fig.3)。

Fig.3 火山灰粒子の校正曲線上へのプロット

2.4 実験結果

Fig.2 より、粒子が落下する地点のセルの番号を 1 として、セルの番号が大きくなるにつれて緩やかではあるが粒子径が減少していているのがわかる。Fig.3 より、 $60\mu\text{m}$ 以下の火山灰粒子をレーザー散乱で測定した結果、 $10\mu\text{m}$ 以上 $90\mu\text{m}$ 以下という結果が出た。これは、顕微鏡で測定した結果とほぼ等しいといえる。

3. 帯電量測定

3.1 キングダムトラップ

キングダムトラップは、直径 10mm の中心電極と直径 72mm の外部円筒電極の二つの同軸円筒電極から成っている。これらの電極間に電位差を与えると、中心電極に対して半径方向の対数ポテンシャルが形成され、帯電微粒子は中心電極の周りで軌道運動しながらトラップされる。トラップされた粒子の軌道を円軌道に限定した場合には、次の関係式が導かれる。

$$\frac{q}{m} = \frac{\omega^2 r_c^2 \ln(r_1/r_2)}{V} \quad \cdots(1)$$

ここで、 V を電極間電位差、 ω を角振動数、 r_c を軌道半径、 r_1 と r_2 を外部電極と中心電極の半径とする。このことから、軌道半径と振動数を測定することにより、微粒子の質量電荷比を得ることができる。

3.2 実験装置

十字型の 20cm×30cm と 30cm×30cm のガラス真空チェンバーを組み合わせ、帯電微粒子生成部と微粒子閉じ込め部で構成されている。真空排気装置は、油回転ポンプと油拡散ポンプを使用し、 6×10^{-6} torr 程度の真空度を得ることができる。

帯電微粒子生成部には、ドロップパーと電子銃が備え付けられている。微粒子は、ドロップパーの振動により振るい落とされ、電子ビーム照射領域を通過することにより、負に帯電する。その後、自由落下により閉じ込め部に導かれる。

閉じ込め部には、キングダムトラップが備え付けられ、微粒子はここでトラップされる。トラップ微粒子は、白色 LED ライトによって照らされ、軌道面に垂直に撮影されたデジタルビデオカメラの画像によって軌道運動が解析される。

3.3 実験方法

粒子には、前章の粒子径測定で選別された平均直径 90 μ m の火山灰粒子を用いる。このようにすることで、粒子径のばらつきによる帯電量の誤差を小さくする事ができる。

チェンバーを 6×10^{-6} torr に排気し、電極間電位差は 0~6500V、電子銃の加速電圧は 0~1500V で変化させ実験を行う。電子ビーム照射によって負に帯電した微粒子が、キングダムトラップ中に閉じ込められ軌道運動が始まる。この軌道運動の振動数と軌道半径を測定し、微粒子の質量電荷比を求める。

3.4 実験結果

キングダムトラップに入射した帯電微粒子の運動の画像を解析することにより、次のような結果が得られた。

- (1) 微粒子が中心電極の周りで、円軌道又は楕円軌道を描きながらトラップされるのが確認された。また、中心電極から遠ざかる微粒子も確認された。これは、二次電子放出のために正に帯電した微粒子が存在するためであると考えられる。
- (2) 軌道運動の寿命は、最大で 3 回転、最小で 0.5 回転であった。また、2 個の微粒子が同時にトラップされたものも確認された。
- (3) 画像をもとに軌道運動の解析を行った結果、回転半径 $r_c = 6.50 \sim 18.1$ (mm)、振動数 $f = 14 \sim 30$ (Hz) であった。
- (4) 以上の結果から、質量電荷比 $q/m = 5.70 \times 10^{-4} \sim 3.15 \times 10^{-3}$ (C/kg)、よって微粒子には $3.10 \times 10^6 \sim 1.68 \times 10^7$ 個の電子が付着していることが確認された。

また、典型的な粒子の軌道運動の例として、Fig.4 ではトラップされた微粒子の画像を、Fig.5 では 2 個の微粒子が同時にトラップされた画像を示した。

Fig.4 トラップされた粒子（中央の円弧を描いている部分がトラップされた粒子の軌道）

Fig.5 同時にトラップされた粒子（中心電極から右方向の2つの円弧が同時にトラップされた粒子の軌道）

Fig.4 は、電極館電位差が 3200V、電子銃の加速電圧が 1000V のものである。粒子の軌道から、 $r_c = 11.5$ mm、振動数 $f=30$ Hz、 $q/m=3.15 \times 10^{-3}$ C/kg、よって 1.7×10^7 個の電子が付着している。

Fig.5 は、電極館電位差が 3400V、電子銃の加速電圧が 1000V のものである。粒子の軌道から、中心電極により近い方の粒子は、 $r_c = 8.00$ mm、振動数 $f=30$ Hz、 $q/m=1.32 \times 10^{-3}$ C/kg、よって 6.8×10^6 個の電子が付着している。他方の粒子では、 $r_c = 17.0$ mm、振動数 $f=20$ Hz、 $q/m=2.64 \times 10^{-3}$ C/kg、よって 1.65×10^7 個の電子が付着している。

4. 結論

実験から、以下のようなことが分かった。

平均直径 $10 \mu\text{m} \sim 400 \mu\text{m}$ の火山灰粒子を大まかながら風洞によって、粒子径ごとに選別することができた。さらに、未知の粒子のレーザー散乱強度比を測定し校正曲線上にプロットすることにより、粒子径を推定できることが確認できた。また、電子ビームによって帯電した粒径 $90 \mu\text{m}$ 程度の微粒子は、 $10^6 e$ 程度の電荷を持つことが確認できた。

以上のように、微粒子の粒子径と帯電量をリアルタイムで測定するために、レーザー散乱とキングダムトラップの方法を用いる事が有効であると確認できた。今後、実際に微粒子プラズマ中の微粒子の粒子径と帯電量を測定するためには、微粒子の形状を考慮に入れる事や軌道の寿命をさらに長くすることが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 横田俊昭 著 微粒子プラズマの生成と素過程の研究 基礎研究 (C)(2) 研究成果報告書(No.07808052)
- 2) 横田俊昭 著 ダストプラズマの現状と課題
Journal of Plasma and Fusion Research
Vol. 73, No. 11 (1997), pp. 1220~1261
- 3) Carole Smetana, David Alexander, Scott Robertson, Kim Vilkaitis and Bob Walch, American Association of Physics Teachers, A spherical electrostatic orrery
Am. J. Phys. 64(11), November 1996
- 4) L. Mees, G. Grehan, G. Gouesbed. Optics Communications 194 (2001) 59-65, Time-resolved scattering diagram for a sphere illuminated by plane wave and focused short pulse.
- 5) 粉体工学会 編 粒子径測定技術
日刊工業新聞社 1994 年