

# 磁化プラズマ中微粒子の電荷測定

新松寛明<sup>1</sup>、齋藤和史<sup>2</sup>、中村良治<sup>1</sup>、石原修<sup>1</sup>

<sup>1</sup>横浜国大・理工、<sup>2</sup>宇都宮大・工

## I. はじめに

約 15 年程前からコンプレックスプラズマの実験が盛んに行われてきた。それらは、いくつかの教科書やレビュー論文で紹介されている[1~4]。コンプレックスプラズマ中の微粒子（直径  $0.1\sim 10\mu\text{m}$ ）は、電極面上のシース内の下向きの重力  $Mg$  と上向きの力  $QE$  が釣り合う位置に浮遊している。ここで、 $M$  と  $Q$  は微粒子の質量と電荷、 $g$  は重力定数、 $E$  は電場である。質量  $M$  と  $g$  は既知であるが、シース内の電場  $E$  の測定が難しいので、 $Q$  が計測出来ない。しかし、 $Q$  は重要な物理量なので、いろいろな方法で測定された。しかし、それらは間接的な方法なので、本実験では以下に述べる直接的な方法を用いて測定する。

微粒子が磁場  $B$  に垂直に速度  $v$  で動く時のラーモア半径  $R$  は、

$$R = Mvc/QB \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $c$  は光速である。このラーモア半径を測定することにより  $Q$  を求める。電荷  $Q$  は、容量が半径  $a$  であるので、関係式  $Q=aV$  を用いて見積もることが出来る。ここで、 $V$  は、周囲のプラズマに対する微粒子の電位である。例えば、直径  $0.5\mu\text{m}$ 、 $V=-30\text{V}$  の粒子が速度  $2\text{cm/sec}$  で磁場  $100$  ガウスの中を走る時の  $R$  は約  $3.5\text{cm}$  である。

## II. 実験方法

実験は横浜国大石原研究室に設置してある YCOPEX 装置[5]を用いて行った。装置の概略を 1 図に示す。パイレックスガラス管(G)は、長さ  $1\text{m}$  で内径  $15\text{cm}$  である。このガラス管内に水平に厚さ  $2\text{mm}$  のステンレススチール板(P) ( $14.5\text{cm}\times 90\text{cm}$ ) が置かれている。この板の左側は、左端から  $40\text{cm}$  が船形に作られ上向きに折れ曲がる構造になっている。この左端近くの下に微粒子源として、ピエゾ素子ブザー(Z)が取り付けられている。ブザー内には直径  $5\mu\text{m}$  で密度  $2.6\text{g/cm}^3$  の金メッキされた微粒子が入っている。ブザーの上部のステンレス板には、直径  $1\text{mm}$  の穴があいている。ブザーに  $0\sim 10\text{V}$  の直流電圧を印加すると  $2\text{kHz}$  で振動し、穴から微粒子が飛び出してくる。それらはプラズマで負に帯電して、板上のシース内に浮遊する。しかし、板が傾いているために板に沿って重力で加速されてきて折れ曲がり領域に到達し、それから右側の部分は水平なので等速で右に流れてゆく。この領域の上下に直径  $60\text{cm}$  のヘルムホルツコイルが置いてあり、垂直方向に最大  $300$  ガウスの磁場が印加出来る。

プラズマは、 $13.56\text{MHz}$  の高周波（電力= $10\text{W}$ ）をガラス管の上部に貼った幅  $8\text{cm}$  で長さ  $80\text{cm}$  のステンレスメッシュ (M) と接地されたステンレス板 (P) に印加して生成した。用いたガスはアルゴンで、圧力は、 $0.01\text{Torr}$  である。平板プローブで測定した電子密度は、 $2\times 10^8/\text{cm}^3$ 、電子温度は  $5\text{eV}$ 、プラズマ電位は  $+30\text{V}$  である。浮遊している微粒子に円筒レンズによって水平方向に広げたグリーンレーザー（波長

532nm) を照射し、微粒子からの散乱光を上からデジタルカメラで撮影した。

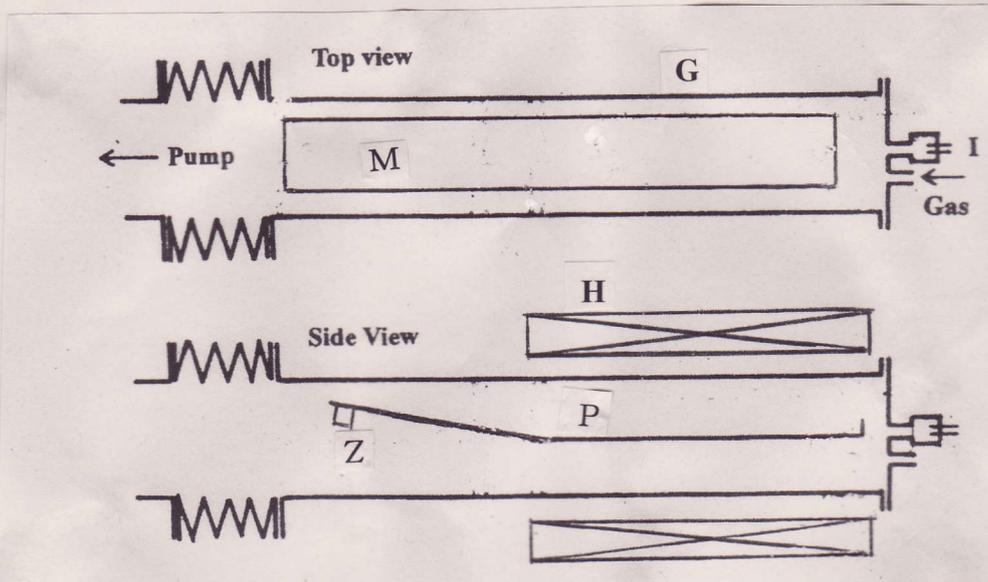
### III. 実験結果と考察

今回の実験で帯電量が測定可能な微粒子の大きさを見積もってみる。微粒子として市販のアクリル粒子 (比重=1.19) を用いる。プローブで測定した浮遊電位  $V=-30V$  を用いると上で I 述べたように  $Q=Ze=aV$  となる。実験値に近い  $v=2\text{cm/sec}$  で磁場 =100 ガウスとすると  $2a=1$  ミクロンで  $R=65\text{cm}$  となる。この半径では、現在の装置でも測定が難しいと考えられるので、微粒子として、 $2a=0.15, 0.3$  と  $0.5$  ミクロンを選んだ。

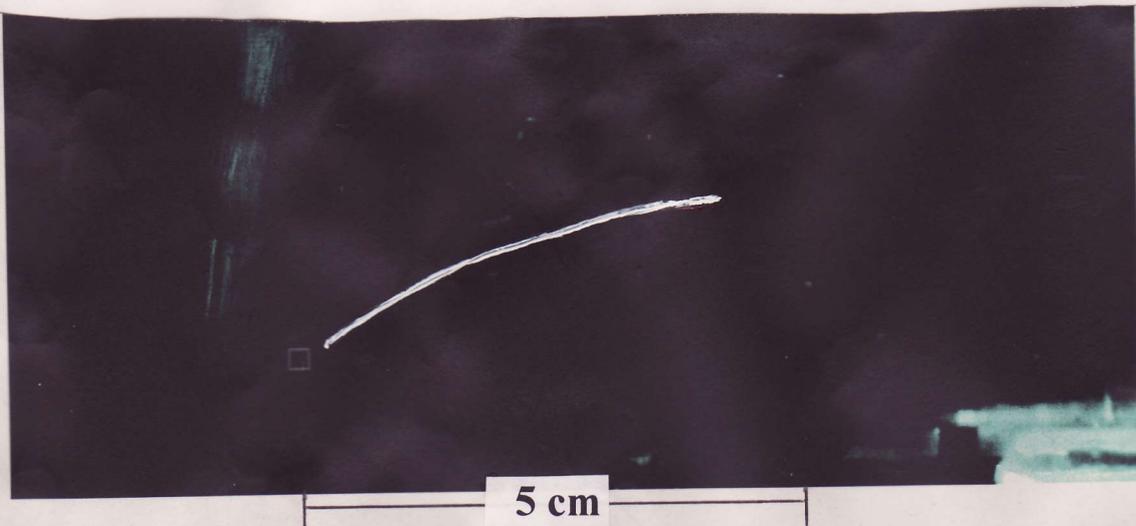
撮影された軌跡の一例を 2 図に示す。この円弧から微粒子の速度  $v$  と円の半径  $R$  を見積もった。計測された  $v, R$  と  $B$  から (1) 式を用いて計算した  $Q$  を 3 図に示す。ここで縦軸は  $Q$  ではなく、 $Q$  を素電荷  $e$  で企画した  $Z$  である。実践は、理論値  $aV/e(V=-30V)$  である。直径  $2a=0.3$  と  $0.5$  ミクロンの測定結果は理論値に一致していると言えるであろう。この理論は、別の方法で測定した直径 5 ミクロンの帯電量にもほぼ一致していた [6]。しかし、3 図に見られるように、 $0.15$  ミクロンの帯電量は、理論値よりも約 10 分の 1 になっている。この測定値は、1 回の計測ではなく 4 回の計測値を示しているので誤差による不一致とは考えられない。それ故、どこに不一致の原因があるのか考えてみると  $M$  か  $V$  か、その両方にあるのであろう。今後の課題である。

### 参考文献

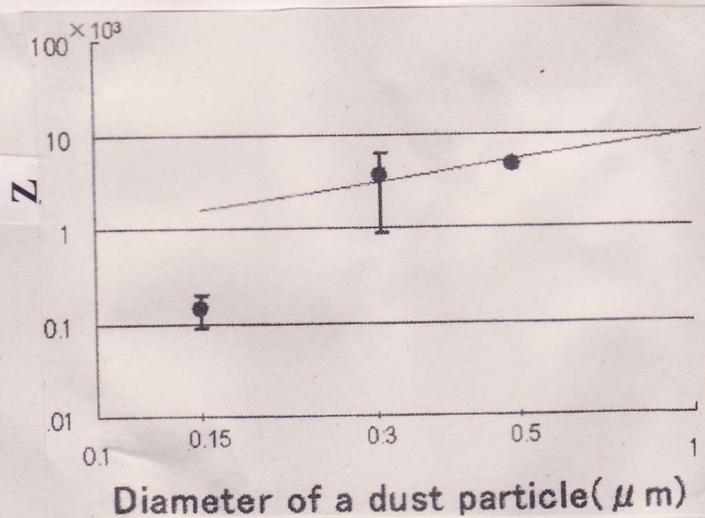
1. P. K. Shukla and A. A. Mamun, Introduction to Dusty Plasma Physics(Institute of physics Publishing, Bristol UK, 2002).
2. V. E. Fortov, A. V. Ivlev, S. A. Khrapak, A. G. Khrapak and G. E. Morfill, Physics Reports 421, 1(2005).
3. O. Ishihara, J. Phys. D 40, R121 (2007).
4. V. N. Tsytovich, G. E. Morfill, S. V. Vladimirov and H. Thomas, Elementary Physics of Complex Plasmas (Springer-verlag, berlin, Germany 2008).
5. Y. Nakamura and O. Ishihara, Rev. Sci. Instrum 79, 033504(2008).
6. Y. Nakamura and O. Ishihara, Phys. Plasmas 16,043704(2009).



1 図 実験装置 (YCOPEX) の概略図。 G : パイレックスガラス管。 M : ステンレスメッシュ。 H : ヘルムホルツコイル。 P : ステンレス板。 Z : ブザー。



2 図 微粒子の軌跡。  $B = 300$  ガウス。  $2a = 0.15 \mu\text{m}$ 。  $v = 8.4 \text{cm/sec.}$ 。  $R = 6.5 \text{cm}$ 。露光時間 0.5 秒。



3 図 測定された帯電量  $Z = Q/e$  の微粒子直径  $2a$  依存性。  
 実践は  $Z = aV/e$  から  
 の計算値。  $V = -30V$ 。