

コンプレックスプラズマ中微粒子の温度と相関測定

吉田岳¹、齋藤和史²、中村良治¹、石原修¹

¹横浜国大・理工、²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は、電極面上のシース内の微粒子の重力と上向きの電場 $\times$ 電荷が釣り合う位置に浮遊する。それらの微粒子は、電極面にプラズマからイオンシース内にボーム速度で流れてくるイオン流によって不安定となり動き始める[5]。動き始めた微粒子は、お互いの衝突によって熱化するので、その温度と相関関数を測定することにより、微粒子群の相転移を観察するのが本実験の目的である。

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[6]を用いて行った。装置を 1 図に示す。パイレックスガラス管は、長さ 1 m で内径 15cm である。このガラス管内に水平に厚さ 2mm のステンレススチール板 (14.5cm $\times$ 90cm) が置かれている。この板の下に微粒子源として、 piezo 素子ブザーが取り付けられている。ブザー内には直径 5 μ m で密度 2.6g/cm³ 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 1mm の穴があいている。ブザーに 0~10V の直流電圧を印加すると 2kHz 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。ステンレス板の両端には、微粒子を軸方向に閉じ込めるために高さ 2cm のステンレス板が立てられている。また径方向には、ガラス壁前面に形成されているイオンシースによって閉じ込められる。

プラズマは、13.56MHz の高周波 (電力=10W) を幅 3cm で長さ 80cm の 2 枚のアルミニウム箔をガラス管の上面に 5cm 離して平行に貼り、これに+、ステンレス板 (接地) を一として印加することにより生成された。用いたガスはアルゴンで、圧力は、0.01~0.2Torr である。電子密度と電子オンドは、直径 6mm の平板プローブで測定した。高周波放電でプラズマは生成されているが、プローブはダブルプローブではなく、接地されているステンレス板を対抗電極とした単一プローブである。それは、この装置の場合、ステンレス板の面積は、 $(M/m)^{1/2}S$ より非常に大きいからである。ここで、 M と m は、Ar イオンと電子の質量、 S は平板プローブの面積である。測定された電子密度は、 $2 \times 10^8/\text{cm}^3$ 、電子温度は 5eV、プラズマ電位は +28V 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 (61 ショット/秒) で撮影した。

III. 実験結果

上から撮影した結晶の微粒子を図 2 に示す。微粒子は二次元の六角格子状に、ステンレス板の上のイオンシース内 (高さ 8 mm) に浮いている。ガラス管方向を X 軸、管径方向を Y 軸として測定した微粒子の速度分布の例を図 3 に示す。図からあきらかなように速度はマックスウエル分布をしている。また、二次元であるが等方分布と

なっている。温度が 4.4 万度とプラズマの粒子（イオン温度＝約千度）と比較して大変高いのは微粒子の質量が大変大きいからである。

この状態でのクーロン結合パラメーター Γ [7]（次式で与えられる）は約 3 であるので、気体である。結晶状態では、 Γ は 172 より大きくなければならない[8]。微粒子の温度は、圧力に反比例していて、4Pa で 9eV, 17Pa で、0.08eV であった。

$$\Gamma = \frac{Q^2}{dkT_d} \exp\left(-\frac{d}{\lambda}\right)$$

ここで、 d は微粒子間の平均距離、 T_d は微粒子の温度、 λ は、イオンのデバイ長である。

気体状態での二体相関を図 4 に示す。比較のために結晶状態での二体相関を図 5 に示す。この場合、微粒子は平均距離約 0.5mm で分布しているのがわかる。図 4 の場合、増大した微粒子の運動エネルギーにより、微粒子間の最短距離は、図 5 と比較してかなり小さくなっている。また、それより離れた距離では高温状態でランダムに運動しているために相関が認められない。

IV おわりに

非常に大きなダストプラズマ装置(YCOPEX)を用いて、イオンシース中に浮遊している微粒子群の固体と気体の相状態を観測することが出来た。しかし、液体から気体への相転移がまだ解明されていないので、今後の研究課題である。特に各相転移におけるクーロン結合パラメーターの測定が要求される。

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. R. L. Merlino, Phys. Plasmas 16, 124501(2009).
6. Y. Nakamura and O. Ishihara, Rev. Sci. Instrum 79, 033504(2008).
7. Y. Nakamura and O. Ishihara, Phys. Plasmas 16, 043704(2009).
8. H. Ikezi, Phys. Fluids 29, 1764(1986).

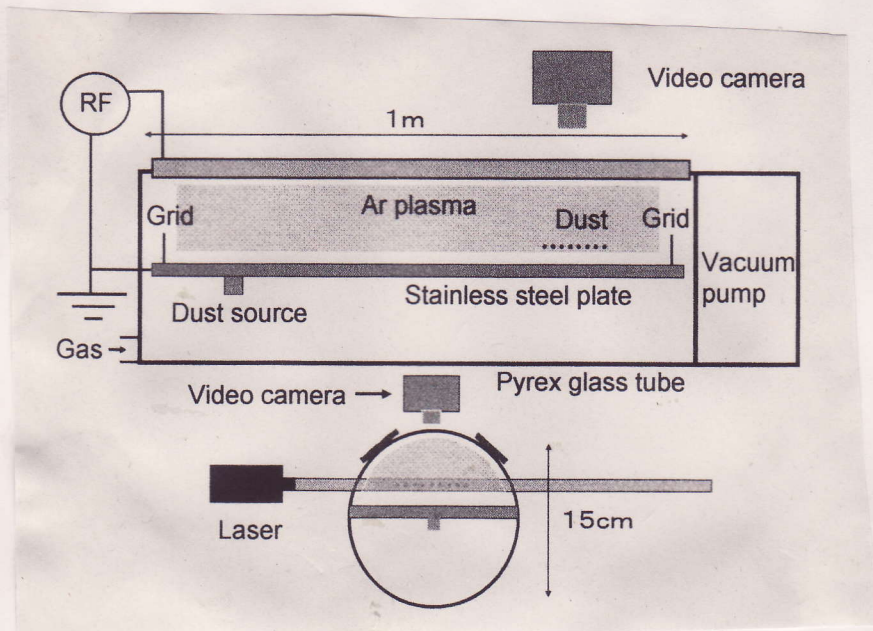


図1 YCOPEX 装置の概略図。

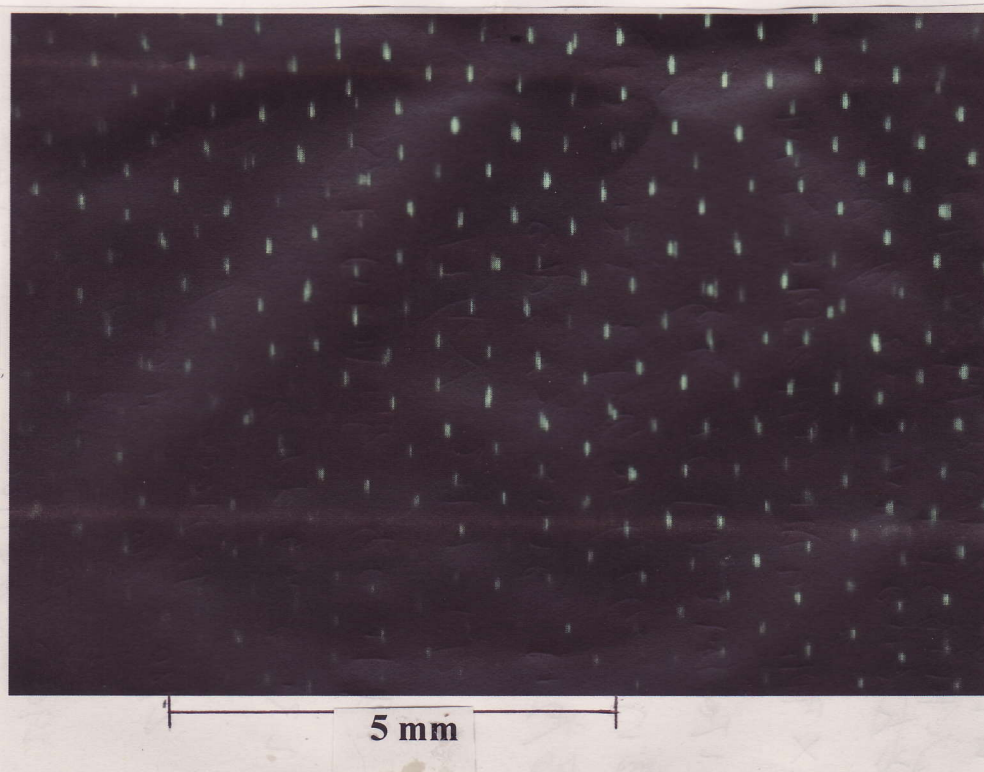


図2 微粒子の写真の一例。 圧力 = 8 Pa。

Particle Number

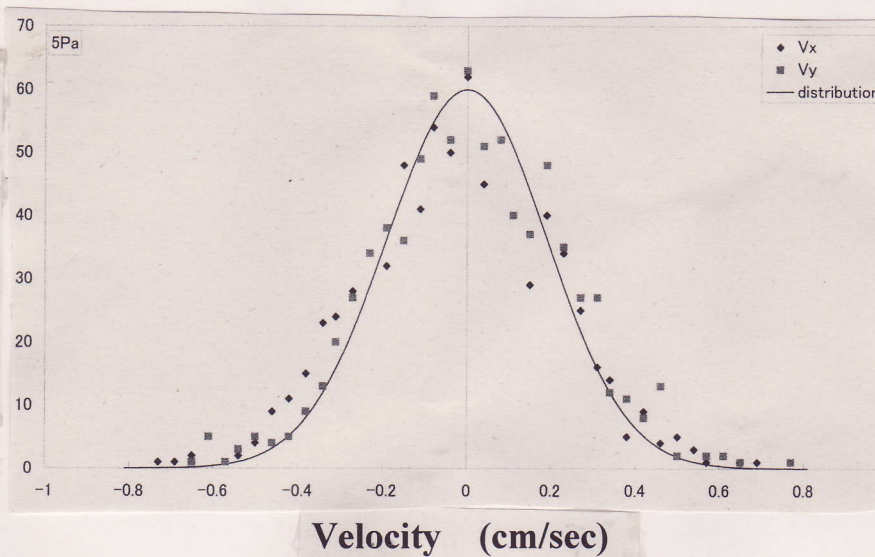


図3 微粒子の速度分布。 温度 = 4.4 万度。 圧力 = 5 Pa。

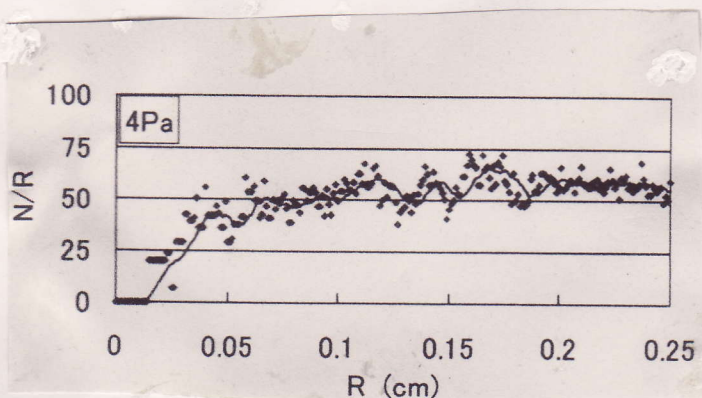


図4 二体相関。 圧力 = 4 Pa。

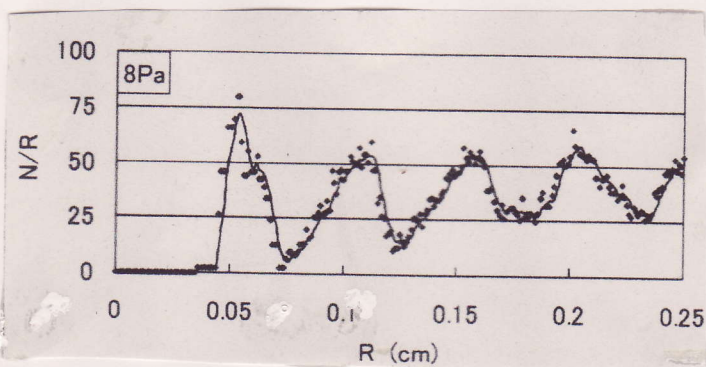


図5 二体相関。 圧力 = 8 Pa.