

流れのある直流放電コンプレックス・プラズマにおける渦・乱流構造

宇都宮大・院工 齋藤和史

背景と目的

一様に流れている水に円柱を置いたとき、円柱の周りでの水の挙動は、Reynolds 数

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{\rho v^2}{\mu v / L} = \frac{\text{(慣性力)}}{\text{(粘性力)}}$$

によって違いがある^[1]。ここに、 v は平均流速、 L は系の特徴的長さ、 μ は粘性係数、 ρ は密度である。 $Re \leq 5$ では層流、 $Re \geq 5$ で円柱後方に渦対ができ、 $Re \geq 40$ で円柱の後流が振動を始め、さらに Re が非常に大きくなると後流が乱流となる。

我々は、地上におけるコンプレックスプラズマ実験の一つとして、微粒子に 2 次元的な流れをつくり、流れの中に針状の障害物を置いたときの微粒子流に着目して研究を行っている。流れが亜音速の場合には層流的な流れであり、超音速の場合には障害物前面にバウ衝撃波が生成されることを報告した^[2]。微 "粒子" の流れでも MHD 的な描像で相当程度の記述ができる。通常の流れとの比較から、流速を大きくすることで障害物の後方に渦的な構造が形成されることが期待されるが、少なくともこれまでの研究では、そのような構造は見出されていない。一方、国際宇宙ステーションにおける微小重力下におけるコンプレックスプラズマの実験では、微粒子に渦的な構造が形成されることが報告されている^[3]。

本研究は、2 次元的な微粒子流において、2 流体の相互作用等によって渦や乱流を生成してそのメカニズムを解明するため、直流放電によるコンプレックスプラズマにおいて、微粒子流を生成すること、重力下のコンプレックスプラズマにおいて、重力を用いずに微粒子流を生成することを目指している。ここでの目的は、我々の従来の微粒子流実験では微粒子の流れを生成するために重力を利用していたが、理論モデルを単純化するために重力を利用せずに流れを生成することである。障害物の周りにおける微粒子の挙動に対して、通常の流れにおける Reynolds 数をそのまま用いることができるのか否か、あるいは、微粒子の運動論的な効果を考慮した、微粒子流のための新たな指標が必要となるのか等々、物理学的に意義深い研究となることが期待される。

実験装置

実験は、宇宙研の小型スペースチェンバーに取り付けた、長さ 30 cm、内径 15 cm の丁字ガラス管を用いて行った。ガラス管の両端に各 1 組、放電用のオキサイドを塗布した熱陰極、および、その前面に電子加速用としてステンレスのメッシュグリッドを、それぞれ設置し、直流放電によってプラズマを生成した。放電電圧は 30 V、放電電流は 30 mA である。アルゴンのガス圧力は $0.1 \leq p \leq 1$ Pa である。Figure 1 に概略図を示す。

微粒子として、直径 9.8 μm の酸化ケイ素球を用いた。ガラス板下部に取り付けられた圧電ブザーに通電することによって微粒子がプラズマ中に供給される。装置の側面や上面から薄い扇状の緑色レーザー光を照射する。微粒子はレーザーの散乱光によって可視化される。これまでの実験結果から、微粒子は $\sim -10^4 e$ (e : 素電荷) の負に帯電していると推

定される。ガラス管内部には、長さ約 20 cm、幅約 15 cm の擦りガラス板表面にアルミの薄いシートを被せたものが水平に設置してある。このガラスやアルミの表面に形成される遷移シース (板表面から 8~10 mm) に微粒子は浮遊した。ここでは、微粒子に作用する重力とシース電場による力が釣り合っている。結果的に微粒子は 2 次元的に浮遊することとなる。

従来の我々の研究では、実験装置を傾けて重力の実験板に沿った成分を用いて微粒子の流れを生成していた。重力を用いずに流れを生成するために、実験板のアルミに Fig. 2 のような幅 5 mm の薄い短冊状部分の電極を 2 mm の間隔で作成して並べた。短冊状の多電極には、 V_{max} V (< 0) から 0 V にステップ状に傾斜している電位を印加した。

実験結果と議論

直流放電によってアルゴンプラズマが安定的に維持されたところで圧電ブザーを動作させ、プラズマ中に微粒子を投入する。中性ガス圧力を様々に変え、それぞれの場合に $-70 \leq V_{max} \leq -10$ V の電圧を加えて実験を行った。 $V = V_{max}$ をステップ状に印加することによって微粒子は移動する。電圧を印加した直後の移動の初速度の典型例を図示したものが Fig. 3 である。中性ガス圧が 0.43 Pa と 0.67 Pa の 2 つの場合を示している。いずれの圧力の場合にも、印加電圧に比例して初速度が変化していることが明らかである。

中性粒子とイオンのドラッグ力はそれぞれ

$$\begin{aligned} F_n &\propto -n_n v_{Tn} (v_d - v_n) \\ F_i &= F_i^{coll} + F_i^{coul} \\ F_i^{coll,coul} &\propto n_i \sigma^{coll,coul} v_{Ti} v_i \end{aligned}$$

で表される^[4]。ただし、 n_j ($j = n$: 中性粒子, i : イオン。以下同様) は密度、 v_{Tj} は熱速度、 v_j 粒子の速度、 σ^j ($j = coll$: 剛体衝突, $coul$: Coulomb 衝突) は微粒子とイオンが衝突することによるイオン捕集に対応する運動量衝突断面積である。圧力が高ければ中性粒子とイオンの密度が高くなるため、いずれのドラッグ力も大きくなる。実際、実験で得られた初速度は圧力が高いほど遅く、すなわち、ドラッグ力が大きくなっており、定性的な傾向が一致する。

これまでにも報告していることではあるが、直流放電プラズマは中性ガスの圧力が rf 放電プラズマに比べて相対的に低いため、微粒子に働く中性ガスによるドラッグ力とイオンのドラッグ力が相対的に弱い。このため、ガス圧力が低いコンプレックスプラズマでは、予想される微粒子温度 (~ 室温) よりも異常といえるほど高く見積もられることがあることが知られており^[5, 6]、微粒子は非常にランダムな運動をする。本実験では、このように微粒子がランダムに運動しているところに電圧を印加して微粒子に初速度を与えていることになる。

また、今回の実験では、電圧印加によって初速度を与えられた微粒子が、短時間の内に元いた場所の近傍まで戻ってくる現象がみられた。これは、短冊状の電極と電極の間にガラス (= 絶縁体 = 浮遊電位) があり、ステップ状に V_{max} V (< 0) から 0 V まで掛けている電圧の内、浮遊電位よりも絶対値が小さい部分で微粒子が跳ね返されているために生じている現象ではないかと推測している。

まとめと今後の課題

本研究によって、短冊状に電極を並べてステップ状で傾斜した電位勾配を与えることによって、微粒子を移動させることが出来た。その初速度は印加電圧に比例しており、圧力が低いほど初速度は大きいことが明らかとなった。実験板状に、微粒子を一様に分布させることができれば、重力を用いずに微粒子流を生成することができるようになる。現状では、ガラス板の上に短冊状の電極を配置しているため、誘電体の浮遊電位のために、微粒子が跳ね返される現象が観測されるため、印加電圧を浮遊電位よりも低い値の側を有効に活用できるようにしなければならない。

今後、電圧を印加して流れを形成する前に広範囲に一様に微粒子を分布させる必要がある。その上で、短冊状の電極を左右に対称に設置すれば、微粒子の対向流を生成することが可能となる。微粒子流による二流体実験ができることが期待される。

参考文献

- [1] 種子田定俊『画像から学ぶ 流体力学』(朝倉書店, 1993).
- [2] Y. Saitou, Y. Nakamura, T. Kamimura, and O. Ishihara, *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 065004 (2012).
- [3] P. Nefedov, G. E. Morfill, V. E. Fortov, H. M. Thomas, H. Rothermel, T. Hagl, A. V. Ivlev, M. Zuzic, B. A. Klumov, A. M. Lipaev, V. I. Molotkov, O. F. Petrov, Y. P. Gidzenko, S. K. Krikalev, W. Shepherd, A. I. Ivanov, M. Roth, H. Binnenbruck, J. A. Goree, and Y. P. Semenov, *New J. Phys.* **5**, 33 (2003).
- [4] P. K. Shukla and A. A. Mamun, *Introduction to Dusty Plasma Physics*, (IOP pub., 2002), chap. 3, pp. 76-80.
- [5] 例えば J. D. Williams and E. Thomas, Jr., *Phys. Plasmas* **13**, 063509 (2006).
- [6] 齋藤和史, 中村良治ほか, スペースプラズマ研究会 (2012).

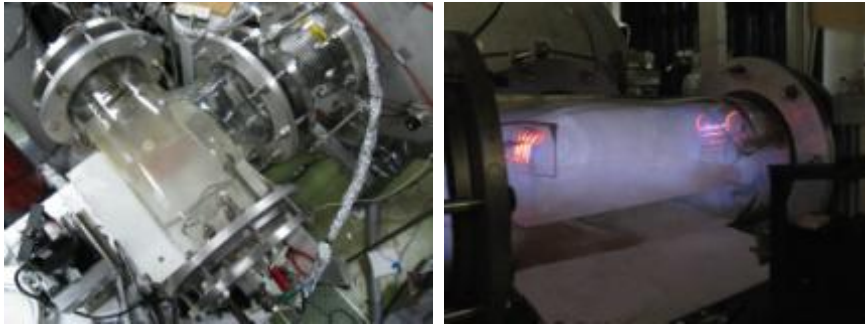


Fig. 1 実験装置等の写真. 上面からの写真(左)と, プラズマを生成したときの写真(右)

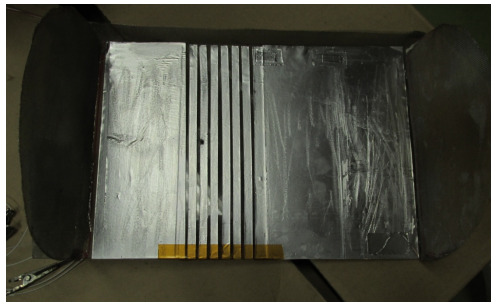


Fig. 2 微粒子流生成のための短冊状多電極.

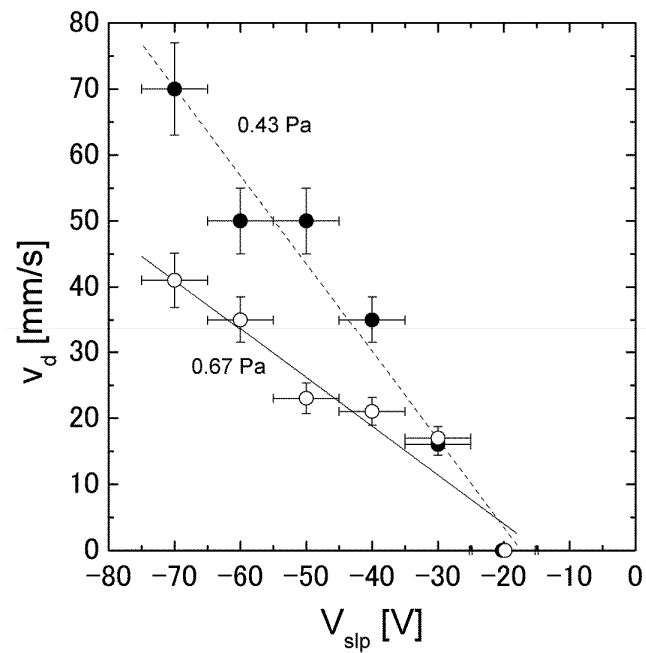


Fig. 3 ステップ状電圧印加直後の微粒子の速度.