

# 電子プラズマにおける二次元渦度分布の非線形発展と構造形成 I

## —リング状初期分布からの非線形発展—

<sup>A</sup> 広島大学大学院先端物質科学研究科, <sup>B</sup> 京都大学大学院人間・環境学研究科,

<sup>C</sup> 京都大学総合人間学部基礎科学科

伊藤清一<sup>A</sup>, 三瓶明希夫<sup>B</sup>, 際本泰士<sup>C</sup>, 曾我之泰<sup>C</sup>

E-mail:kiyokazu@sci.hiroshima-u.ac.jp

## 1 Introduction

磁場方向に一様な密度分布を持つ電子プラズマの運動は, 案内中心近似では 2 次元の Euler 流体の運動と等価である [1]. このとき電子密度分布  $n(x, y)$  と渦度分布  $\zeta(x, y)$ , 静電ポテンシャル  $\phi(x, y)$  と流れ関数  $\psi(x, y)$  が対応し, その間には次の関係が成り立つ.

$$\zeta(x, y) = \frac{e}{\epsilon_0 B_0} n(x, y) \quad (1)$$

$$\psi(x, y) = \frac{1}{B_0} \phi(x, y) \quad (2)$$

ここで,  $e, \epsilon_0$  はそれぞれ, 電子の素電荷, 真空の誘電率である.  $B_0$  は一様磁場の強さであり,  $x, y$  は磁場に垂直な断面内の座標である. このような分布を Malmberg Trap (図 1) により形成することができる.

初期条件として電子プラズマに中心がへこんだリング状の渦度 (密度) 分布を与えた場合, 速い変型が生じる. この速い変型の原因には, 回転角速度の Shear による Kelvin-Helmholtz 不安定性 (非中性プラズマでは Diocotron 不安定性) がある. このリング状の初期渦度分布からの不安定な構造変化について, 細密な計測を行なった.

## 2 Experimental Setup

実験は図 1 に示す Malmberg 型の閉じ込め装置を用いて行なった [2, 3, 4]. 容器内部は  $10^{-9}$  Torr 程度の超高真空に保たれており, 円筒状の電極が軸をそろえて配置されている. 外部にはソレノイドコイルが設置してあり, これにより軸方向に  $B_0 = 0.048$  T の磁場を印加する.

まず, 容器の一端 (図中では左端) に設置されたカソードアレイより電子を, 磁力線に沿って中央の閉じ込め領域へと入射する. 電子プラズマはその名の通り電子のみで構成されており, 互いのクーロン斥力により反発しあい, 拡散しようとする. これに対し, 閉じ

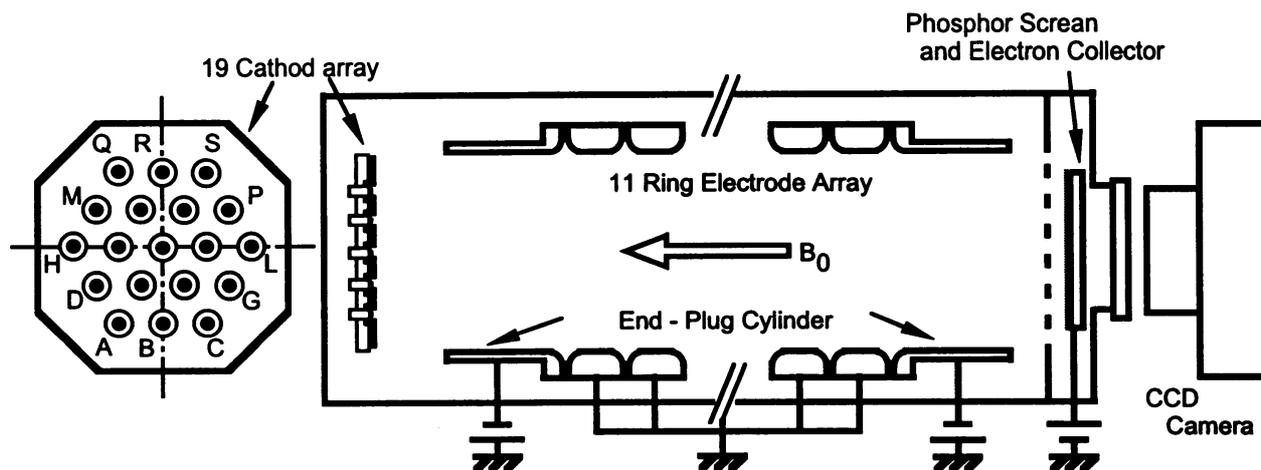


図 1: 実験装置概略図

込め領域では電子を外部磁場  $B_0$  により半径方向に閉じ込めると同時に、装置内に設置したプラグ電極に印加した負のバイアス電圧により生成したポテンシャル  $\phi^{ext}$  で軸方向に閉じ込める。本実験で使用した電子プラズマの密度は典型的には  $10^{13} \text{ m}^{-3}$  程度であり、 $10^6 / \text{s}$  程度の渦度となる。

任意の時間電子プラズマを閉じ込め相互作用（渦相互作用）をさせた後、電子プラズマを図中右側に設置された蛍光面へと磁力線に沿って排出する。このとき生ずる光量の2次元分布を高感度 CCD カメラにより観測する。ここで、発光量と電子プラズマの磁力線方向に積分された密度分布は線形の関係にある [4]。電子プラズマは閉じ込め領域においては  $B_0$  と  $\phi^{ext}$  の一様性から軸方向に一様に分布していると仮定できるので、光量の分布を電子プラズマの密度分布すなわち渦度分布に読み替えることが出来る。この様な計測を電子プラズマを閉じ込める時間を変えて行なうことにより、渦度（密度）分布の時間発展を観測することが出来る。

また、このようにして得られた密度分布から2次元のポテンシャル分布  $\phi$ 、即ち流れ関数  $\psi$  を高速に計算することも出来る [4]。

### 3 Results

初期条件として渦度分布にリング状の分布を与えた場合の、渦度分布の時間発展の例を図 2 に示す。色の変化は渦度の強さを表し、左上の数字は時間を表す。磁場は紙面に垂直で、手前から奥側を向いており、電子プラズマは全体としては時計方向に回転をしている。

初期にリング状であった渦度分布は、時間とともに細長く引き伸ばされ、円周方向で渦度に高低が生じるのが観測される。やがて渦度の低いところからちぎれ二つの大きな渦を

形成するが、すぐに二つの渦は渦度の高いところから合体してしまう。その過程で多くのフィラメント状の構造が形成され、渦度分布内部に渦度の低い領域 (hole) が無数に形成される。この hole 構造は徐々に渦度分布の外へと吐き出され、最終的には渦度が半径方向に単調に減少する山型の分布へと落ち着く。

この間、渦度分布は大きく変化するが、渦度の最大値は常に初期の最大渦度とほぼ等しい大きさである。従って、渦度の高い部分は渦度が増加することにより生じるわけではなく、その周辺の渦度をはぎ取られることにより生じていると考えられる。

この場合、変型のモード数は2であったが、初期条件を変化させることにより3, 6といったより高次の不安定のモードも観測される。また条件によっては、不安定発展により生じた渦度の高い領域が、そのまま長時間にわたり準安定的な構造を形成する様子も観測される。

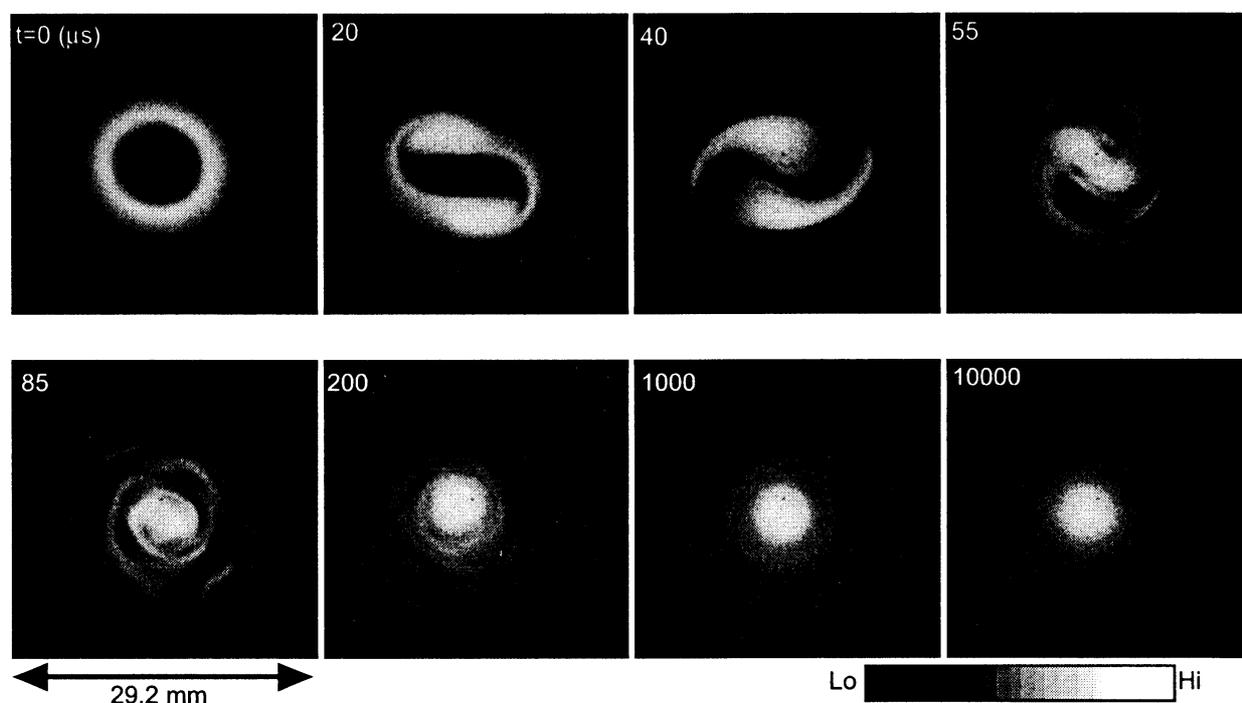


図 2: 2次元渦度分布の時間発展

このような速い変形の原因として回転角速度の Shear による Kelvin-Helmholtz 不安定性 (非中性プラズマでは Diocotron 不安定性) が考えられる。リング状初期分布の形状を変えて、計測を行なったところ観測されるモード数は線形解析 [6] から予想されるモード数とよく一致した。しかし、不安定発展の速度は実験の方が速い傾向に有り、また線形解析では安定なはずの分布でも不安定となることがしばしば観測された。

図 3 に観測された渦度分布とそこから計算された流線を示めす。色の変化は渦度の分布

を示すが、図 2 とは逆になっている。実線が流線（等ポテンシャル面）を表す。左上の数字は時間を表す。

渦系は全体が高速で回転しているため、実験室系で流線を見るとその速い回転に呑み込まれてしまい、細かい構造を確認することは出来ない。ここでは、適当な回転座標系で見ることにより、流線の細かな構造を強調している [7]。渦度分布のコアの部分から流線に沿ってスパイラルアームが伸びる様子など渦度分布と流線の構造の対応がよく再現されている。

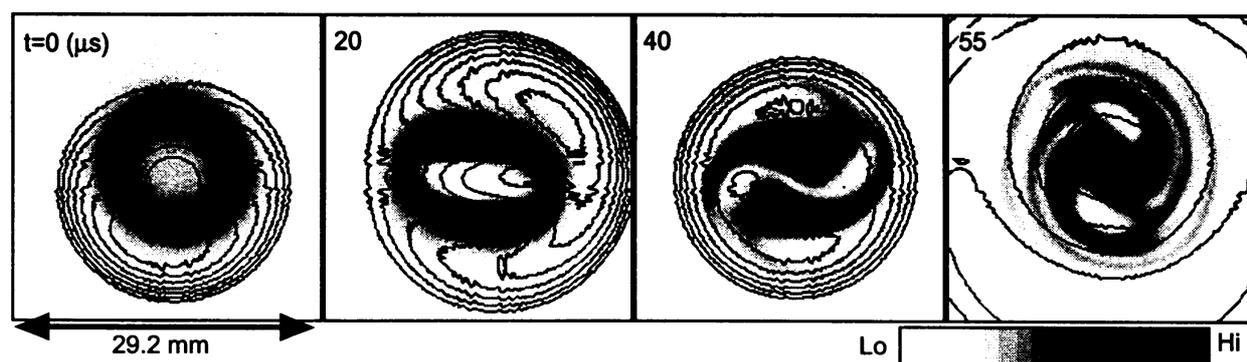


図 3: 観測された渦度分布と回転座標系でみた流線

## 4 Summary

非中性プラズマを用いて 2 次元 Euler 流体の渦運動を実験的に検討した。電子プラズマにリング状の初期渦度（密度）分布を与えると早い変形が生じ、多くの場合、径方向に減少する分布へと向かうことを確認した。変形の原因には Kelvin-Helmholtz 不安定性（Diocotron 不安定性）が考えられ、実験により観測されるモード数は、線形解析から予想されるモード数と良く一致した。ただし、線形解析にくらべ実験で観測される成長は速く、また線形解析では安定な場合でも実験では不安定であるなど、いくつかの相違点も確認された。また条件によっては、不安定発展により生じた渦度の高い領域が、そのまま長時間にわたり準安定的な構造を形成する様子も観測された。

## 参考文献

- [1] Levy, R. H., Phys. Fluids 11, 920 (1968).

- [2] Y. Kiwamoto, K. Ito, A. Sanpei, A. Mohri, T. Yuyama, T. Michishita, *Journal of Phys. Soc. Japan* **68**, 3766 (1999).
- [3] Y. Kiwamoto, K. Ito, A. Sanpei and A. Mohri, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3173 (2000).
- [4] K. Ito, Y. Kiwamoto, A. Sanpei, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 2558 (2001).
- [5] A. Sanpei, Y. Kiwamoto, K. Ito, *J. Phys. Soc. Jpn. (Lett.)* **70**, 2813 (2001).
- [6] R. C. Davidson, G. M. Felice, *Phys. Plasmas*. **5**, 3497 (1998).
- [7] Melander, M.V., Zabusky, N.J. and McWilliams, J.C., *J. Fluid Mech.* **195**, 303 (1988).