

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19540389

研究課題名（和文） コンプレックスプラズマの新しい秩序の形成過程

研究課題名（英文） The formation process of a new ordered structure in complex plasmas

研究代表者

藤田 文行 (FUJITA FUMIYUKI)

北海道大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10002312

研究成果の概要：定在縞を持つ陽光柱プラズマという秩序状態に、外部から微粒子を導入することでコンプレックスプラズマとする。このプラズマにおける新たな秩序状態(プラズマクリスタル)形成過程を実測し、データ解析を行った。安定な結晶が生成される放電条件で放電させておき、直径  $10\mu\text{m}$  の微粒子を落下させると、プラズマ内で微粒子の浮遊が起こり、次いで“気体または液体状態”となり、落下後数十秒以内でプラズマクリスタル状態へ移行していくことを観測した。この新たな秩序の形成過程を評価するために、画像データから対相関関数（動径分布関数）を求めるアルゴリズムを開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：非平衡・非線形物理学・コンプレックスプラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

(1)従来の研究の対象であったプラズマといえば、電子・イオン・中性分子からなる電離気体を指している。以上の成分に加えて、原子のスケールから見ると非常に巨大な微粒子(ダスト粒子)が加わった複合系としてのコンプレックスプラズマのほうがより普遍的なプラズマ状態といえる。このことは、宇宙空間物理学・天文学・核融合炉開発・プラズ

マプロセッシングなどの分野で成立する。微粒子の存在のため、プラズマの集団的な振る舞いも複雑になり、新しい波動現象の存在も予測・実証されている。コンプレックスプラズマは、プラズマ物理学の新分野となってきた。

(2)コンプレックスプラズマ内では、負に帯電した微粒子間に引力が働き、格子形成(プラズ

マクリスタル)が可能になる。これを予測したのが、ウエイクポテンシャルの理論(M. Nambu and A. Akama: Phys. Fluids 28 (1985) 2300.)である。1994年、容量結合型高周波放電プラズマの駆動電極シース内で、プラズマクリスタルの存在が世界の4か所でほぼ同時に実験的に確認された(H. Thomas, et al.: Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 652, Y. Hayashi and K. Tachibana: Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) L804, J.H. Chu and Lin I.: Phys. Rev. Lett. 72 (1994) 4009, A. Melzer, et al.: Phys. Lett. A191 (1994) 3001.)。

(3)プラズマクリスタル実験の多くで用いられている高周波放電の電極シース部は、正イオンが過剰に存在する強い電場を持つ領域であって、本来の意味でのプラズマ状態とはいえない。一般に、プラズマはデバイ遮蔽効果を持つため、プラズマバルク内に強い電場を形成しない。帯電した微粒子が重力に抗して空間中に浮遊するためには、強い電場が必要なために電極シース内で実験がおこなわれてきたのである。

(4)我々は、放電維持のために自己電場を内在する直流グロー放電陽光柱プラズマに着目して、プラズマバルク内部におけるプラズマクリスタル形成の実験的検証に成功した。

## 2. 研究の目的

(1)多数のミクロンサイズの微粒子がプラズマ中に存在するとき、微粒子系とプラズマ系が相互作用して、新しい複合系としてのコンプレックスプラズマ(ダストプラズマ)となる。時間的スケールにおいても空間的スケールにおいても、かけ離れた2つの系が相互作用することによって新しい集団運動を形成していく。微粒子が秩序化され規則的な配列を行うまでの形成過程にコンプレックスプラズマ解明の鍵があると考えられる。本研究の目的は、直流放電による秩序を持った弱電離プラズマバルク中に、外部から微粒子を導入することによって新たな秩序が形成されていく過程を実験的及び統計力学的に解明することである。

(2)新たな秩序状態であるプラズマクリスタルの配列・運動状態から、プラズマのパラメータを求める新しいプラズマ診断法を開発することも研究目的である。

## 3. 研究の方法

(1)コンプレックスプラズマ実験用放電管を作成する。主要部は縦置きにした内径3cm、長さ60cmのパイレックスガラス円筒で、上

部に微粒子落下装置を設置した。微粒子落下装置の概念図を図1に示す

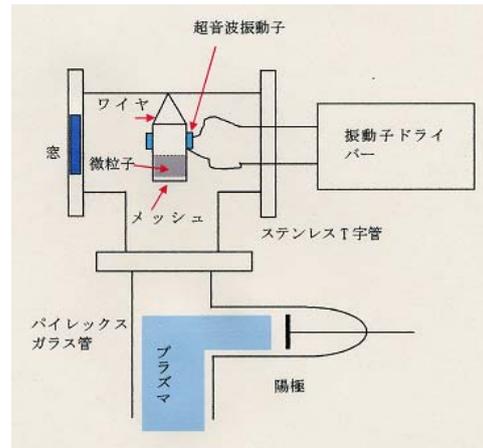


図1 微粒子落下装置

バースト状に変調した高周波信号を超音波振動子に印加して、微粒子を落下させる。実験体系の模式図を図2に示す。

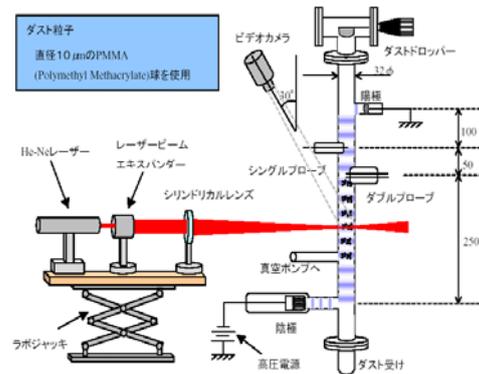


図2 実験体系

プラズマ内の微粒子の位置を、He-Neレーザー光のMie散乱光により、高速度ビデオカメラで計測する。

(2)空間的な構造が一定で、格子点の振動も少ない最も安定なプラズマクリスタルの形成を可能とする、放電に条件を決定する。

(3)微粒子の導入する前に、得られた放電条件で、陽光柱プラズマを発生させておく。直径 $10\mu\text{m}$ のPolymethyl Metacrylateの微粒子を落下させ、レーザー散乱光を撮影する。

(4)動画解析ソフトで微粒子の軌跡を追跡する。

(5)取得した動画を静止画像に変換して、微粒子導入後の各時刻における秩序形成を評価する。

#### 4. 研究成果

(1) 図 1 に示した構成で、超音波素子を用いたダストシェイカーを開発した。振動子の共振周波数は 68Hz であり、0.1sec のバースト信号で微粒子を落下させた。その様子を図 3 に示す。

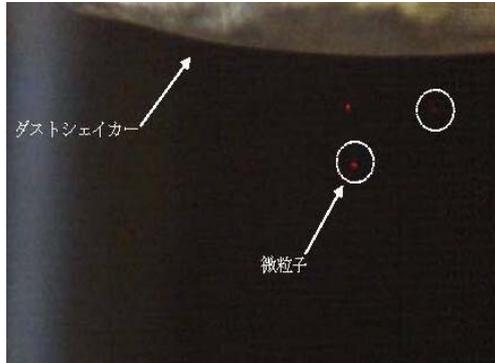


図 3 微粒子落下の様子

(2) 陽光柱プラズマの電子温度・密度をダブルプローブによって計測した。フローティングダブルプローブ計測回路を新たに開発して、データを取得している。積算平均と平滑化微分法を用いてプラズマのパラメータを決定した。取得データの 1 例を図 4 に示す。

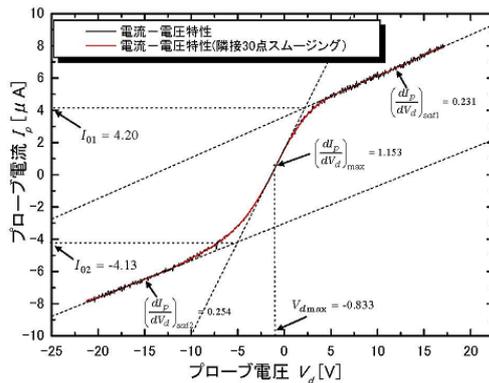


図 4 ダブルプローブ測定(実測)

#### (3) ウェイク場理論

プラズマクリスタルの鉛直方向の連なりに関して、連続の式、運動量保存の式および Poisson 方程式からなる流体力学的なモデルで理論解析した。プラズマ中に浮遊する単一の微粒子の真下のウェイクポテンシャル分布  $\Phi(z)$  が

$$\Phi(z) = (Q/2\pi\epsilon_0)(M^2/(M^2 - 1))(1/z)\cos(z/L_S)$$

と求められた。ここで、 $Q$ は微粒子の電荷、 $M$ はプラズマイオン流のマッハ数、 $\lambda_{De}$ をデバイ長とすると  $L_S = \lambda_{De}\sqrt{M^2 - 1}$ である。 $M > 1$ と仮定した。このポテンシャルの極小位置に次の微粒子がトラップされ、その下に同様なウェイクポテンシャルが形成されていく。した

がって、陽光柱プラズマの定在縞の電場が強くてイオン流の速度が大きい場所に、直列に連なる秩序構造が現れるのである。

#### (4) プラズマクリスタル形成過程の動画計測

0.2Torr のアルゴンガスを封じて電流 2.0mA で放電させると、浮遊した微粒子が最も安定した配列を示すことが分かった。そこで、秩序の形成過程を測定するために、プラズマ中に微粒子を導入する前に、この条件で放電させておき、直径  $10\mu\text{m}$  の PMMC を落下させた。落下の開始後、プラズマ内で微粒子の浮遊が起り、次いで“気体または液体状態”となり、さらに数十秒経つと、プラズマクリスタル状態へと移行していく。この変化を図 5 に示す。



図 5(a) 落下直後 t=0

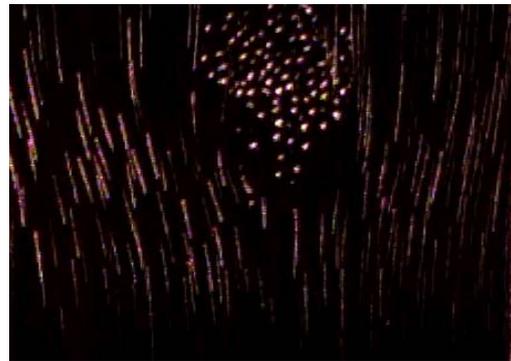


図 5(b) 落下 10 秒後 t=10s



図 5(c) 落下 20 秒後 t=20s

(5) 動画ソフトによる微粒子の軌跡  
ビデオカメラで撮影したプラズマクリスタ

ルの動画データを2次元動画解析ソフトを用いて解析した。垂直方向の配列の画像において微粒子を番号付けし、その位置座標を読み取った。結果の例を図6に示す。

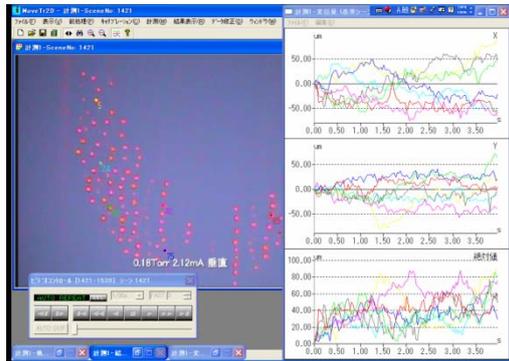


図6 垂直断面の動画画像処理

同様に水平面上の動画画像処理結果も図7に示す。水平面上では多角形構造を示すことが分かった。

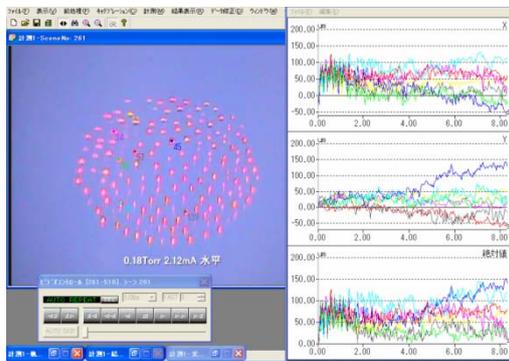


図7 水平断面の動画画像処理

時間の関数として微粒子の位置座標データが取得された。プラズマ結晶格子位置の振動状態を調べるために、表演算ソフトOriginwp用いて、フーリエ解析を行い振動スペクトルを算出した。結果の例を図8に示す。

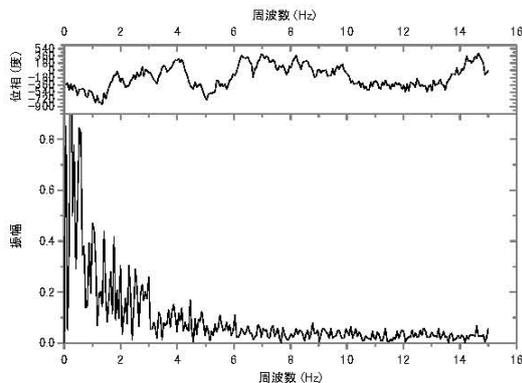


図8 プラズマ結晶格子点の振動スペクトル

3Hz以下の低い周波数の振動が顕著である。この結果は、Ishiharaらによって予測されていた低周波振動の存在を検証したといえる。

(6) 対相関関数(動径分布関数)を用いた秩序形成過程の評価

新秩序の形成過程を評価する方法として、対相関関数に着目した。微粒子の密度 $\rho(\mathbf{r})$ の相関関数 $\langle \rho(\mathbf{r}')\rho(\mathbf{r}'+\mathbf{r}) \rangle$ のフーリエ変換を $S(\mathbf{k})$ とおくと、対相関関数(pair correlation function)(動径分布関数) $g(\mathbf{r})$ は

$$S(\mathbf{k}) = 1 + \int g(\mathbf{r})e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} d\mathbf{r}$$

で定義されている。

図7で示されるような配列データから動径分布関数を求めるため、図中の任意の微粒子を原点として選び、半径 $r$ の円周から $d\mathbf{r}$ の中にある粒子の個数(図9)で評価した。

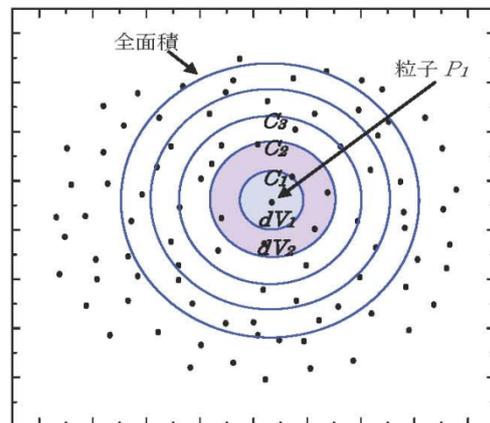


図9 実験データからの動径分布算出法

算出された動径分布関数の1例を図10に示す。

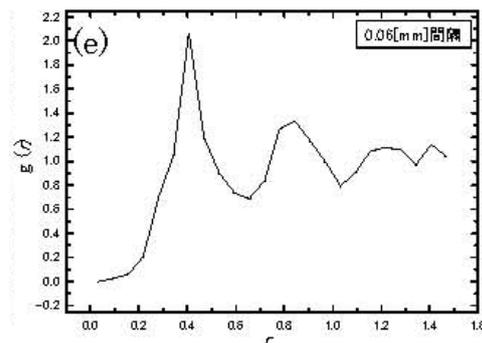


図10 プラズマ結晶の動径分布

このようにして得られる動径分布関数をプラズマへの微粒子導入時から、時間を追って求めていけば、“液体”状態から結晶状態への秩序形成過程を、定量的に評価できる。図10におけるピークの間隔分布から結晶形が求められる。さらにピークの幅は微粒子のランダム運動の強度の評価に使える。完全な

結晶ならば、動径分布は離散的になる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

- ① 藤田文行、古坂道弘、金子純一、西山修輔、コンプレックスプラズマの新しい秩序の形成過程、第 25 回プラズマ核融合学会年会 2008/12/02~05、4aB20P、栃木県総合文化センター (宇都宮市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤田 文行 (FUJITA FUMIYUKI)  
北海道大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：10002312

### (2) 研究分担者

古坂 道弘 (FURUSAKA MICHIHIRO)  
北海道大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：60156966  
金子 純一 (KANEKO JUNNICHI)  
北海道大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：90333624  
西山 修輔 (NISHIYAMA SHUUSUKE)  
北海道大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：30333628

### (3) 連携研究者

なし