

令和元年6月5日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05629

研究課題名(和文) 非一様磁場を印加したコンプレックス・プラズマにおける微粒子に関する研究

研究課題名(英文) Research on Behavior of Dust Particles in a Plasma under Nonuniform Magnetic Field

研究代表者

齋藤 和史 (Saitou, Yoshifumi)

宇都宮大学・工学部・助教

研究者番号：70251080

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：永久磁石を二個用いて非一様磁場を微粒子プラズマに印加したときの微粒子の挙動を調べた。明らかになったことの一つは、微粒子の閉じ込め電場が重要なことである。もう一つは、磁石の極性が平行の場合には微粒子は単一の磁石の場合と同様であったこと、反平行の場合には二つの磁石の中心を結ぶ直線に垂線な方向に微粒子が加速されたことである。微粒子の加速機構として有用である。

微粒子の帯電量を計測する簡便な手法も開発した。帯電量は、RFプラズマではイオンと中性粒子の衝突が効き、直流放電プラズマでは衝突が効かないことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微粒子プラズマの物理は、宇宙物理との関連があることが指摘されている。本研究のように軸対称の非一様磁場中での振舞に関する研究はあまり存在しない。軸対称の非一様磁場は磁場を持った星の周りでの宇宙塵の振舞に関連付けられる可能性を持っている。微粒子を実験的に容易に加速できる方法を見出すことができた意義も大きい。

一方、プラズマ中の微粒子の帯電量計測にはこれまで様々な方法が用いられているが、煩雑なセッティングや解析が必要であった。本研究によって、簡単で容易な帯電量の評価方法を開発できた。微粒子プラズマの実験への貢献は少なくないと思う。

研究成果の概要(英文)： Behavior of dust particles in a plasma under nonuniform magnetic field, which was applied using two permanent magnets, was investigated. The followings were clarified, that is, one was the importance of the electric field for confinement, and the other was the difference in behavior brought by combinations of polarities of the magnets. Dust particles behaved as same as one magnet when the polarity was parallel. The particles were accelerated along a bisecting perpendicular line against the magnets when the polarity was antiparallel. This is useful as an acceleration mechanism of dust particles.

A simple and easy estimation method of an averaged dust charge was developed. It was found that the charge was reduced by the short mean-free-path of the ion-neutral collision when the plasma was generated using rf discharge. The charge was not reduced when the plasma was generated using hot-cathode discharge because the mean-free-path was longer.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：微粒子プラズマ 非一様磁場 帯電量 微粒子加速

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

プラズマ中の微粒子に関する研究は 1940 年代に宇宙塵の研究を嚆矢とする。その後、1970 年代には微粒子の結晶構造の存在が理論研究によって予言され、1980 年代から 1990 年代にかけて、宇宙物理や半導体プロセスでの微粒子制御に関する研究等を中心に行われて、1990 年代半ばにプラズマ中において微粒子の結晶が実験的に発見された。以後、地上の実験室における重力下において、あるいは、国際宇宙ステーションにおける微小重力下において、国際的な規模で活発に研究が行われるようになった。

微粒子プラズマは、電子、イオン、および、多くの場合、大きく負に帯電した直径数～数十  $\mu\text{m}$  程度の固体粒子から成る。重力下においては、微粒子はシース電場の重力に平行な成分と重力が釣り合った高さに 2 次元的に浮遊する。微粒子によって Mie 散乱された可視レーザー光を用いることで個々の微粒子を可視化できる。さらに、帯電量が変化し得ること、微粒子について、弱結合から強結合まで、言い換えると、気相から固相まで様々な状態を作り得ることなどが特徴である。

ところで、ソリトンやカオス、フラクタルといった非線形現象の研究が盛んとなったのは 1980 年代であるが、それ以前から流体力学や電磁流体力学において、渦や乱流などの研究が盛んに行われている。微粒子プラズマにおいては、微粒子の集団的振る舞いが流体的な説明とよく合うことが知られているが、微粒子集団の形成する渦や乱流については、微粒子集団が粒子の集まりであることをきちんと取り入れた物理的描像は、寡聞にして知らない。

我々はこれまで、微粒子プラズマに関する地上実験を様々に行ってきた。例えば、大面積かつ超音速の微粒子プラズマ流によって、針状の導体障害物の上流にバウ衝撃波が形成される (Saitou ほか Phys. Rev. Lett. **108**, 065004 (2012) など)、また、軸対称な磁場を面積の大きな永久磁石によって印加した微粒子プラズマに多量の微粒子を投入すると、微粒子がヘリカル状の渦構造を形成し、その中心部からは重力に逆らって微粒子が上方に放出される現象を見出している (Saitou ほか Phys. Rev. Lett. **111**, 185003 (2013) など)。さらに先行研究として、永久磁石の面積が小さい場合には、上から見た形状がドーナツ状に分布し、分布の内外の境界に存在する微粒子が、それぞれ時計回りと巻時計回りに境界上を移動する現象を見出している (Saitou, Phys. Plasmas. **23**, 013709 (2016) など)。

### 2. 研究の目的

永久磁石を複数個(ここでは 2 個)用いて非一様磁場を微粒子プラズマに印加し、そのような場における微粒子の挙動を明らかにすること、特に、同一水平面内における微粒子の公転運動を調べることを主とした目的で研究を行った。実験条件に依存するが、微粒子は時計回りや反時計回りに円周上を公転運動する(微粒子はマクロな大きさを持っており、自転運動をすることが知られている。自転運動と区別するため公転運動という言葉を用いている)。

具体的には、2 個の磁石を用いて同心円の微粒子分布を 2 つ独立に生成する。互いの磁石の極性の向き、磁石間の距離を変え、お互いの磁石の磁場によって水平面内で回転している微粒子同士を相互作用させる。概念図を Fig. 1 に示す。2 つの磁石の極性が共に上向きの場合 (a)、2 つの磁石の極性が互いに逆向きの場合 (b) である。図中に「?」を記した領域で微粒子がどのように振舞うのかを調べる。

### 3. 研究の方法

本研究には Fig. 2 に概念図を示したように、大きさ 10 cm 程度の現用の装置を用いた。容器内にアルゴン・ガスを導入し、所要の圧力に達したところでガスの供給と排気を止める。給気・排気に伴う中性ガスの流れによるドラッグ力が微粒子に及ぼす力を排除するためである。プラズマは 13.56 MHz の rf 電場を上下の電極に印加することによって生成した。上側の電極には、上から内部を観察できるようにするために中心部分が金属メッシュとした。これらの電極のプラズマに接する側にはガラス板が挿入されており、電極への荷電粒子の流れができるだけ小さくなるようにした。下側の接地電極に置かれたガラス板表面にシースが形成され、このシース電場による静電力と重力が釣り合う高さに微粒子が浮遊した。上下の電極の間には、プラズマと微粒子を閉じ込めるための電極を設置した。閉じ込め電極の電位は可変であるが、基本的には接地とした。全ての電極は非磁性体のステンレス製である。下側の電極の外に小型で強磁場のネオジム磁石を置き、実験領域内に非一様の磁場を印加した。磁場の大きさとしては、磁石表面で 0.15 T 程度であった。

電極の外には、図では省略されている微粒子供給装置を

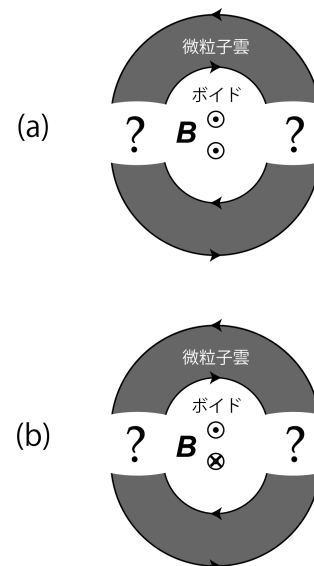


Fig. 1. 期待される二つの永久磁石によって分布した微粒子の公転の向きと、二つの磁石間距離による微粒子の軌道. ”?”とした部分に存在することになるであろう微粒子の挙動を調べるのが当初の研究目的.

置いた。微粒子としては、粒径 5.6  $\mu\text{m}$  で単分散のアクリル樹脂球を主として用いた。容器側面や容器上面から薄いシート状に広げたレーザー光を照射し、微粒子による Mie 散乱光によって微粒子を視覚化した。視覚化された微粒子を、容器外に置かれたカメラによって静止画あるいは動画として記録した。

永久磁石は、1つは Fig. 2 のように下側の電極のさらに下側に固定した。もう1つの磁石は外からロッドによって挿入し、水平面内の位置を可変とした。研究期間中に微粒子の分布の形状を決める閉じ込め電極を2つ目の永久磁石の移動に伴って変形する機構を取り入れることを試みている。

新しい手法である Smoothed Particle Hydrodynamics 法を用いた3次元の数値シミュレーションを実験と並行して行った。

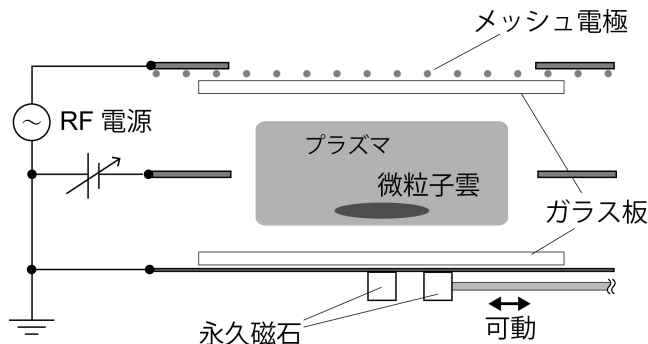


Fig. 2. 実験装置の側面概念図と回路等の概略。

#### 4. 研究成果

本研究によって、以下に述べるようなことを明らかにすることができた。一つは、このような実験においては、境界における閉じ込め電場が非常に重要であることである。単一の磁石の場合、Fig. 3 (a) に示したように、円形の閉じ込め電極の中心に永久磁石を置けば微粒子の分布は軸対称となる。分布の内外の境界で微粒子の公転運動の向きが互いに逆となる現象については、定量的な物理描像を作るには至らなかったが、本研究の先行実験 (Y. Saitou, Phys. Plasmas **23**, 013709 (2016)) 等を基にした論文が Gibson らによって出版されていることを付言しておくきたい (J. Gibson and M. Coppins, Phys. Plasmas **25**, 112103 (2018))。

Smoothed Particle Hydrodynamics 法を用いた3次元の数値シミュレーションでは、微粒子が実験では見られないほど頻繁に上下運動をした。実験において明確に認識されていないメカニズムが存在している可能性を否定しきれない部分もあり、実験とシミュレーションの違いの原因について色々と考察を進めているところである。

2つの磁石を用いる場合には、閉じ込め電極を工夫するなどしたが対称な分布を形成することが困難であった。それでも、2つの磁石の極性が平行の場合には微粒子雲を実験領域中に閉じ込めることができ、2つの磁石の距離が近づくにつれて微粒子雲が8の字型からだるま型、楕円状にと分布形状を変えていく様子を観察することができた。分布が楕円状になったときの概念図を Fig. 3 (b) に示す。

また、磁石の極性が反平行の場合については、以下のことが明らかとなった。Figure 3 (c) に示すように、2つの磁石に挟まれた領域に存在する微粒は磁石の中心を結ぶ直線に対して垂線方向に加速された。その加速は非常に大きいため通常の閉じ込め電場では閉じ込めきれず、加速された微粒子は実験領域外へ飛び去ってしまい、実験領域に存在した微粒子数が減少していく。微粒子がこのような大きく加速されることは全く予想されなかったことであると同時に、非常に興味深い現象である。また、微粒子が面状ではなく線状に加速されていると考えられることも特徴である。今後の微粒子プラズマの実験的研究に微粒子の加速機構として有用であり、例えば、結晶構造を作っている微粒子に本機構によって加速された微粒子を衝突させて結晶構造の変化や、衝突による微粒子の軌跡を追うなどする実験、あるいは、加速微粒子を対向して衝突させる実験等々が可能となり、微粒子プラズマ研究の幅をさらに広げることが可能となる。ただし、現状のままの実験装置では加速度や軌跡についてデータを蓄積することが容易ではないため、実験装置の改造等を考えている。

本研究の副次的な成果として、比較的容易に実験

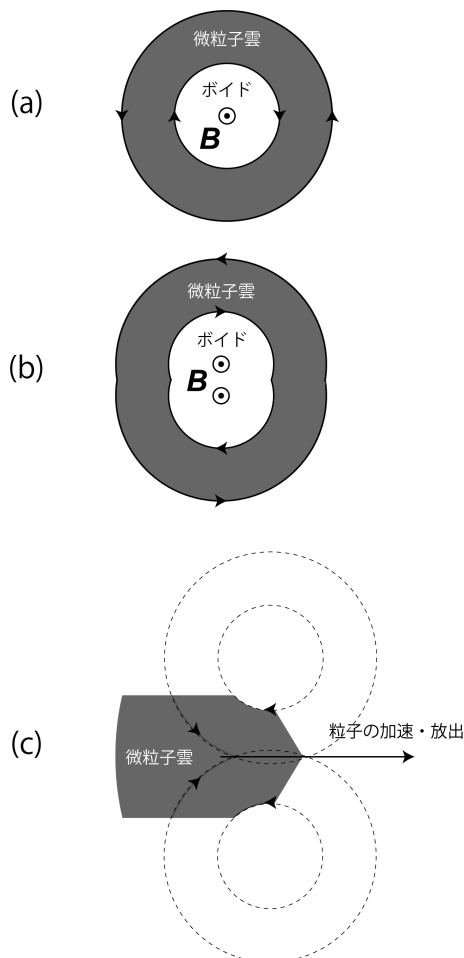


Fig. 3. 水平面内における微粒子雲と内外境界における微粒子の公転運動。永久磁石が1つの場合 (a), 2つの永久磁石の極性が平行の場合 (b), 反平行の場合 (c)。

領域中の微粒子の帯電量を計測する手法を見出した(Y. Saitou Phys. Plasmas **25**, 073701 (2018)). 一般に、ある系の未知の物理量を知りたいとき、外部からその系に刺激を加え、その応答から見積もる方法がよくとられる。この手法は、まさにその方法である。この計測法のための装置のセッティングの基本的な例を Fig. 4 に示す。写真等から計測した微粒子の密度と、外部から微粒子プラズマ周波数近傍の周波数  $f_{ex}$

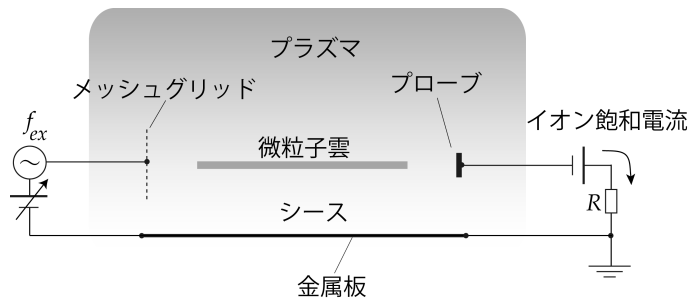


Fig. 4. 帯電量評価のための基本的なセッティング.

の電場を印加してイオン飽和電流によって系の応答(プラズマ中に励起された振動の内の最低周波数)を知ることによって微粒子の帯電量を評価するものである。この手法の特徴として、一つ目は、個々の帯電量を評価するのではなく実験領域中の微粒子の平均帯電量を求めるものであること。二つ目は微粒子プラズマ振動を励起するための励起グリッドと励起された振動を計測するためのイオン飽和電流を計測するプローブがあればよく、システムとして非常に簡単であることである。微粒子プラズマの基礎研究で用いられることの多い RF プラズマ中ではイオンと中性粒子の衝突効果が無視できないこと、中性ガス圧が低い直流放電プラズマではイオンと中性粒子の衝突効果が無視できることが明らかとなった。

微粒子プラズマの物理は、単にプラズマ物理の延長ではない複合系(コンプレックス・プラズマ)としての物理を含んでいる。また、磁場を印加したプラズマにおいては、無磁場プラズマにおけるよりもヴァリエーションに富んだ現象が存在することが知られており、微粒子プラズマに磁場を印加することによっても、微粒子プラズマの基礎研究に新しい展開をもたらすものである。特に、2つの永久磁石の極性を反平衡状態にしたときには全く予想外なほど大きく微粒子が加速された。このように非常に簡単に微粒子を加速することができれば、実験的研究の幅を大いに広げることができる。さらなるデータの蓄積を行って論文文化したい。また、基本的なパラメータである微粒子の帯電量を容易に見積もる方法を開発できたため、より一層実験的研究を行い易くなったことは非常に有益である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2件)

Yoshifumi Saitou, “A simple method of dust charge estimation using an externally applied oscillating electric field”, Phys. Plasmas **25**, 073701-1 – 073701-5 (2018).

doi: 10.1063/1.5037020

Yoshifumi Saitou, “Motions of dust particles in nonuniform magnetic field and applicability of smoothed particle hydrodynamics simulation”, AIP Conf. Proc. **1925**, 020009-1 – 02009-5 (2018).

doi: 10.1063/1.5020397

[学会発表](計 10件)

齋藤和史「プラズマ中の微粒子の新しい帯電量計測法と帯電量へのイオン-中性粒子衝突の効果」日本物理学会第74回年次大会 17aK310-12 (九大, 2019年3月).

Yoshifumi Saitou, “A New Estimation Method of an Averaged Charge of Dust Particles”, Intern. Cong. Plasma Phys. P032 (Vancouver, June 2018).

齋藤和史「微粒子の新しい平均帯電量評価法」日本物理学会第73回年次大会 25aK609-12 (東京理科大, 2018年3月).

齋藤和史「微粒子プラズマの低周波応答」日本物理学会第72回年次大会 20aC33-7 (大阪大学, 2017年3月).

齋藤和史「コンプレックス・プラズマ中の微粒子電荷の新しい評価法」京都工繊大プラズマ制御科学センター研究会(京都工繊大, 2017年3月).

齋藤和史「コンプレックス・プラズマにおける可視的帯電微粒子の集団的振舞い — 流体論と運動論の狭間 —」招待講演、東北大学仙台プラズマフォーラム『プラズマ流の基礎と応用に関する研究会』東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会『プラズマ流中マルチスケール構造形成による新規反応場の開拓』(東北大学, 2017年3月).

Yoshifumi Saitou, Invited Talk, “Motions of dust particles in nonuniform magnetic field and applicability of smoothed particle hydrodynamics simulation”, 8th Intern. Conf. Dusty Plasma Phys. (Prague, May 2017).

Yoshifumi Saitou, “Low Frequency Response of a Complex Plasma”, 17th Workshop on Fine Particle Plasmas (NIFS, December 2016).

Yoshifumi Saitou, “Low Frequency Response of a Complex Plasma”, 17th Workshop on Fine Particle Plasmas / Japan-Korea Workshop on Dust Plasmas (NIFS, December 2016).

Yoshifumi Saitou, “Effects of Nonuniformity of Magnetic Fields to Dust Particles”, Intern. Cong. Plasma Phys. PAM1-21 (Kaohsiung, June 2016).

## 6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。