

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：12201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654188

研究課題名(和文)大面積二次元微粒子プラズマ流における波動

研究課題名(英文)Wavy structures in wide area two-dimensional dust particle-flows in a complex plasma

研究代表者

齋藤 和史(Saitou, Yoshifumi)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70251080

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文): 微粒子プラズマの流れや渦構造などに関する実験的研究を通して、流体力学等における基礎物理への様々な寄与が期待される成果が得られた。観測された現象の多くは電磁流体力学の法則で説明できるが、微粒子プラズマ固有と考えられる現象も観測された。針状導体障害物下流域における2次元微粒子流での滞留粒子の存在、0.15 Tの磁場の印加による厚みのある円盤中心からの微粒子の吹き出しなどである。コンプレックス・プラズマ中の微粒子は、媒質の運動の単なるマーカーではなく、それ自身が電磁気学的な力に基づいて運動しており、コンプレックス・プラズマにおける流体的な現象での個々の微粒子の動力学の重要性を示唆している。

研究成果の概要(英文): Results expected to contribute to basic physics in various fields such as fluid mechanics were obtained by carrying out the experiments on the dust flows and the vortex formations using the complex plasma systems; that is, major collective behaviors of the dust particles were describable by the laws of MHD, and there existed phenomena peculiar to the complex plasmas. The phenomena are that some dust particles were trapped near the void-flow boundary at the lower reach of the needle-like obstacle in the 2-dimensional dust flow, and that the dust particles were blew up from the thick disk center with helical motion when the magnetic field of 0.15 T was applied. The dust particles in the complex plasmas are not only markers of the media, but main bodies of the motions obeying the electromagnetic forces. These phenomena suggest that the dynamics of each dust particle is important in the fluid dynamic phenomena in complex plasmas.

研究分野: プラズマ物理学

キーワード: 微粒子プラズマ コンプレックスプラズマ 微粒子流 渦 障害物 磁場 吹き出し

### 1. 研究開始当初の背景

1940年代に宇宙塵の研究を嚆矢とするプラズマ中の固体微粒子に関する研究は、1980年代の惑星探査機による惑星の環の観測、1986年のIkeziによるプラズマ中の微小粒子のクーロン格子の理論的研究、1990年代初期の半導体プロセスでの微粒子制御に関する研究等を経て、以後、実験室プラズマを用いた微粒子プラズマの自己構造形成などの基礎研究が活発となった。ここでいう微粒子プラズマとは、プラズマの電子を捕捉するなどして大きく負に帯電した直径数 $\mu\text{m}$ 程度の固体粒子が存在するプラズマである。地上実験においては、微粒子はシース電場と重力がバランスしたところに浮遊するが、2000年代に入ってから、国際宇宙ステーションの微小重力下における微粒子プラズマの実験でポイドや渦構造が形成されることなどが報告された(例えば など多数)。

微粒子プラズマは、レーザーの散乱光を用いることで個々の微粒子の挙動を可視化できることが一つの大きな特徴であり、さらに、微粒子の帯電量が変化し得ること、微粒子の強結合状態(結合パラメータ $\Gamma = Q^2 \exp(-a/\lambda_D) / (4\pi \epsilon_0 a k_B T_d) \gg 1$ ; ただし、 $Q$ : 微粒子電荷、 $a$ : 微粒子間隔、 $\lambda_D$ : イオンのDebye長、 $\epsilon_0$ : 真空の誘電率、 $k_B$ : Boltzmann定数、 $T_d$ : 微粒子の温度)を作り得ること、固相液相気相などの状態を作ることができ、相変化を直接観測できることなど、多くの新しい性質がある。また、二次元の微粒子プラズマにおける波動モードについて、従来のプラズマで観測されている者とは異なるモードの波動が存在し得ることが理論的に幾つか提案されている(例えば )。

#### < 引用文献 >

- H. Ikezi, Phys. Fluids **29** (1986) 1764.  
 A. P. Nefedov *et al.*, New J. Phys. **5** (2003) 33.  
 G. J. Kalman *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 065001.

### 2. 研究の目的

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。そこで本研究では、大面積の二次元微粒子プラズマ流実験装置を用いて、微粒子プラズマ流についての新しい物理を開拓すること、その一例として実験室実験において衝撃波と航跡波が強結合状態においても形成することが可能であることを明らかにし、励起される波動のモードには新しい二次元の微粒子波動モードが存在し得ることを明らかにすることが目的である。

### 3. 研究の方法

大面積二次元微粒子プラズマ流実験装置である YCOPEX、および、円筒ガラス管の

YD-1 を用いて二次元微粒子プラズマ流と導体障害物の相互作用について実験的研究を行う。Ar ガスを用いて rf 放電または直流放電プラズマでコンプレックス・プラズマ系を生成する。微粒子が浮遊している基板を瞬時に傾斜させ、重力を利用して微粒子に流れを生じさせる。微粒子の流速を様々に変え、さらに、微粒子プラズマ流の結合係数が固相( $\Gamma \gg 1$ )・液相( $\Gamma \approx 1$ )・気相( $\Gamma \ll 1$ )それぞれの場合について障害物の相互作用について実験し、粒子シミュレーションや理論的考察の結果と比較検討する。

### 4. 研究成果

YCOPEX 装置を用いた大面積二次元流と障害物の相互作用実験において、障害物の周りには微粒子の存在しないポイドが形成される。微粒子流は障害物の上流で2流に分岐される。分岐された流れは下流域において合流する。障害物の下流側のポイドと流れの境界領域において、流速が亜音速の場合に少数の微粒子が滞留することを見出した。このような滞留が生じるメカニズムは、欠損流速によって障害物後方で流速が遅くなる領域が存在すること、障害物によって2分された微粒子流が再び合流することによって局所的に負電位の大きな領域が形成されることなどであると考えられる。

強結合状態での微粒子流を形成するには、如何にして微粒子の熱運動エネルギーを抑えるかが重要である。YCOPEX 装置では、微粒子に作用する力の内、中性粒子によるドラッグ力とイオンによるドラッグ力が主たるものであると考えられる。そのため、中性粒子温度、イオン温度、電子温度の制御ができれば、より容易に強結合の微粒子流を形成できると考えられる。そのため、小型の装置を用いて雰囲気温度が液体室温温度において微粒子プラズマを生成し、これらの温度制御を試みた。

障害物で2流に分岐され、下流域において合流した流れを狭めたりあるいは堰き止めたりすることで、微粒子はその2次元的な分布から3次元的な分布になると同時に、とりわけ堰き止めた場合には合流点付近で結晶化がみられた。上流域で液相的ないは気相的に振る舞っていた微粒子流が、合流点において固相に相転移したと考えられる。

これらの装置では流れの生成に重力の実験板に沿った成分を利用したが、この場合、微粒子には常に外力が働いている。これが結晶状態の流れを生成できなかった理由の一つであると考えられる。また、中性粒子によるドラッグ力の影響も可能な限り低減することも必要であると考えられる。そこで、直流放電プラズマにおいてコンプレックス・プラズマを形成し、装置内に水平に置かれた実験板上に短冊状の電極を数本、流れを生成する方向に並べて電位勾配を与

え、重力を用いずに流れを生成することを試みた。電位勾配を与えた瞬間に流れが生じることが確認できた。一方、直流放電で中性ガス圧がrf放電に比べて相対的に低いにも関わらず、流れは短距離しか維持されなかった。この方法によって重力を用いずに流れを生成するには、長距離にわたって流れを維持できるようにすることが課題であることが明らかとなった。

円筒ガラス管の YD-1 装置に、円筒軸方向に永久磁石で磁場を印加して軸周りの微粒子の流れを作り、YCOPEX と並行して実験を行った。YD-1 で得られた構造形成等に関する知見は YCOPEX での実験に活用できる。中性ガスの圧力が高い場合には微粒子は薄い層の円盤として 2 次元的に分布し、圧力が低い場合には微粒子はある程度厚みを持った円盤として分布する。永久磁石を用いて磁場を印加することでイオンが方位角方向に回転し、そのイオンに押される形で微粒子が回転を始める。2 次元的に分布している状態で磁場の強さを変えると、微粒子が同心円状に種々の構造を形成することが明らかとなった。また、厚みを持って分布している状態で磁場の強さを調節し、実験領域での磁場の強さが 1.5 kG 程度とすると、微粒子が円盤中心部から重力に逆らって上方へと吹き出す現象が観測された。この現象は、紅茶をスプーン等で一方向に掻き回したときに、茶葉等が底の中心部に集まり、中心部で上昇する現象 (Ekman ポンピング) に類似していると考えられる。ただし、茶葉等は流体運動の単なるマーカーであるのに対して、帯電微粒子の場合には微粒子そのものが運動の主役であるという本質的な違いがある。これらの場合にも、微粒子は強結合系をなしておらず、結晶構造を形成していない。微粒子プラズマには強結合系以外にも多様な未解明の現象が存在する。

#### 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)

#### [雑誌論文](計 3 件)

Yoshifumi Saitou and Osamu Ishihara “Tempest in a glass tube – A helical vortex formation -” *J. Plasma Phys.* 80 (2014) 869-876 査読有.

Yoshifumi Saitou, Alex A. Samarian, and Osamu Ishihara “Differential Dust Disk Rotation in a Complex Plasma” *JPS Conf. Proc.* **1**, (2014) 015012-1–015012-5 査読有.

Yoshifumi Saitou and Osamu Ishihara “Dynamic Circulation in a Complex Plasma” *Phys. Rev. Lett.* **111** (2013) 185003-1 - 185003-5 査読有.

#### [学会発表](計 11 件)

齋藤和史, 石原修 「2 次元的微粒子流における渦実験」日本物理学会 年次大会 21aCM-1 早稲田大学(早稲田)(2015 年 3 月).

Yoshifumi Saitou “Tempest in a Glass Tube – A Helical Dust Vortex Formation –” 7th Intern. Conf. Phys. Dusty Plasmas (Delhi, 2014), *Invited Talk*.

齋藤和史 「微粒子プラズマの制御と波動現象」日本物理学会 年次大会, シンポジウム講演 28pAE-4 東海大学(湘南)(2014 年 3 月).

齋藤和史, 石原修 「コンプレックスプラズマにおける渦」プラズマ流の基礎と応用に関する研究会 東北大学 (2014 年 2 月).

Y. Saitou, A. A. Samarian, and O. Ishihara “Vortex Formation in a Complex Plasma” 14<sup>th</sup> Workshop on Fine Particle Physics (NIFS, 2013)

Yoshifumi Saitou, Alex A. Samarian, and Osamu Ishihara “Differential Dust Disk Rotation in a Complex Plasma” 12th Asia Pacific Physics Conference (Makuhari, 2013)

齋藤和史, A. A. Samarian, A. J. Choudhury, 石原修 「コンプレックスプラズマによる渦構造のジェット形成実験」日本物理学会 年次大会 29aEA-6 広島大学(2013 年 3 月).

Y. Saitou, Y. Nakamura, T. Kamimura, and O. Ishihara “Dust Particle Trapping in a Void Boundary in the Presence of Dust Flow” *Proc. Intern. Cong. Plasma Phys.* (Stockholm, 2012). P1. 128.

Y. Nakamura, Y. Saitou, and O. Ishihara “Electric charge of microparticles in a complex plasma with an external magnetic field” *Proc. Intern. Cong. Plasma Phys.* (Stockholm, 2012). P4.137.

齋藤和史, 中村良治, 上村鉄雄, 石原修 「プラズマ中の 2 次元微粒子シートに励起される波動モード」日本物理学会 年次大会 24aYE13 関西学院大学 (2012 年 3 月)

Y. Saitou, Y. Nakamura, T. Kamimura, and O. Ishihara “Observation of Wave of Two-Dimensionally Distributed Micro-Particles” 13<sup>th</sup> Workshop on Fine Particle Physics (NIFS, 2012)

#### [図書](計 0 件)

#### [産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：

種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齋藤和史 (Yoshifumi Saitou)  
宇都宮大学・工学研究科・助教  
研究者番号：70251080

### (2) 研究分担者

( )  
研究者番号：

### (3) 連携研究者

石原修 (Osamu Ishihara)  
横浜国立大学・工学研究院・教授  
研究者番号：20313463

眞銅雅子 (Masako Shindo)  
横浜国立大学・工学研究院・特別研究教員  
研究者番号：10345481