

# 二次元微粒子プラズマの様々な挙動

— 新しい実験装置 YCOPEX の持つ大きな可能性 —

齋藤 和史\*<sup>1</sup>, 中村 良治\*<sup>2</sup>, 石原 修\*<sup>2</sup>

## High Potential of YCOPEX Device for 2-Dimensional Complex Plasma Experiments

Yoshifumi SAITOU\*<sup>1</sup>, Yoshiharu NAKAMURA\*<sup>2</sup> and Osamu ISHIHARA\*<sup>2</sup>

### Abstract

A brand-new experimental device, which is named YCOPEX (Yokohama Complex Plasma Experiments) suitable for two-dimensional wide area complex plasma experiments, designed by Nakamura and Ishihara. (Rev. Sci. Instrum., **79**, (2008) 033504), is introduced. To show its high potential for complex plasma experiments with/without dusty-plasma flows, several qualitative experiments are presented such as void formation around a biased obstacle, three states of dusty plasmas around the obstacle, and a possibility to excite a dusty-plasma turbulence.

**Keywords:** Complex plasma, Dusty-plasma flow, YCOPEX device, Complex plasma experiment

### 1. はじめに

微粒子プラズマ等の複雑系プラズマに関する研究は、国際宇宙ステーション (ISS) における微粒子プラズマ中の void 形成と、その周りにおける渦構造や乱流の観測はもちろん<sup>[1,2]</sup>、惑星形成などの構造形成過程における星間微粒子の重要性や土星の環の形成などスペース・プラズマにおける各種の現象理解のため<sup>[3-7]</sup>、あるいは、プロセス・プラズマにおける堆積基板近傍に存在する不純物除去法開発のため等の目的などのため<sup>[8]</sup>に意欲的に行われるようになって久しい<sup>[9-19]</sup>。微粒子プラズマの実験は、多量の微粒子を効率的、かつ、長時間にわたってプラズマ中に浮遊させることが容易ではないため、比較的小規模で行われることが多い。そのような中、2008年に中村らによって提案された YCOPEX (Yokohama Complex Plasma Experiments) と名付けられた装置<sup>[20]</sup>は、比較的に大規模な2次元微粒子プラズマを容易に生成できる。

そこで本稿では、YCOPEX 装置によって可能だと考えられる各種実験の内、ごく一部ではあるが、定性的な結果が得られている実験を紹介することによって、YCOPEX 装置が2次元の微粒子実験装置として高いポテンシャルを持っていることを示すことを目的とする。具体的には、以下の実験を示す:

- |   |     |                   |
|---|-----|-------------------|
| (i) 微粒子プラズマ中に置かれた導体障害物周りに形成される void と微粒子の状態 | ... | 3.1.1 節 ~ 3.1.2 節 |
| (ii) 導体障害物の電位を変えたときの微粒子の挙動                  | ... | 3.1.3 節           |
| (iii) 微粒子に流れを与えた際の導体障害物周りでの微粒子の様子           | ... | 3.2 節             |

\* 1 Utsunomiya University

\* 2 Yokohama National University

## 2. YCOPEX 装置とは

YCOPEX 装置の概念図を Fig. 1 に示す。本体は内径 15 cm、長さ約 1 m のガラス管であり、内部に幅 15 cm、長さ 80 cm の平らなアルミ板が基板として挿入してある。装置内部を真空ポンプで  $10^{-4}$  Torr 程度まで排気した後、ガスを所要の圧力になるまで充填する。装置上部にはループ・アンテナやダイポール・アンテナなどのアンテナが取り付けられており、数 W ~ 10 数 W 程度の 13.56 MHz の高周波を用いてプラズマを生成する。ここではアルゴン・ガスを 0.01 Torr 以下程度で用いた。

基板は接地されているため、プラズマとの間にシースが形成される。アルミ板の一端には直径数 mm の小さな穴があけてあり、その下部に微粒子源（圧電プザー）が置かれている。微粒子源を電気的に振動させることによって直径  $5 \mu\text{m}$  の微粒子を少量ずつプラズマ中に供給できる。供給された微粒子はプラズマによって負に帯電し ( $10^4 |e|$  程度と見積もられる<sup>[9]</sup>； $e$  は素電荷)、プラズマシースの遷移領域に、ほぼ 1 層の層状に浮遊する。理想的には、最大  $15 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$  の 2 次元微粒子プラズマの形成が可能となる。プラズマがほとんど均一に生成されるため、微粒子はほとんどの領域、特に実験領域では 1 層の薄い膜状に分布している。

ファン・ビーム状に広げられた、厚さ 1 mm 程度のシート状の緑色レーザー光源が装置外に設置されている。赤色レーザーに比べて緑色レーザーは輝度が高いため、個々の微粒子の測定をより容易にできる。このレーザー光によって内部を照射し、浮遊した微粒子によって散乱された光を装置外に設置されているカメラにより静止画や動画として記録する。

装置本体は、ジャッキによって軸方向に傾斜を与えることが可能であり、これによって微粒子に流れを生じさせることが可能である。また、極わずかではあるが、径方向にも傾斜角を与えることができる構造となっている。

基板の途中には、直径 0.2 mm 程度、長さ 2 cm 程度の線状の導体障害物が置かれている。障害物には任意の電位を与えることができる。ここでは線状であるが、実験によっては導体板や導体メッシュを障害物などとして用いることが可能である。

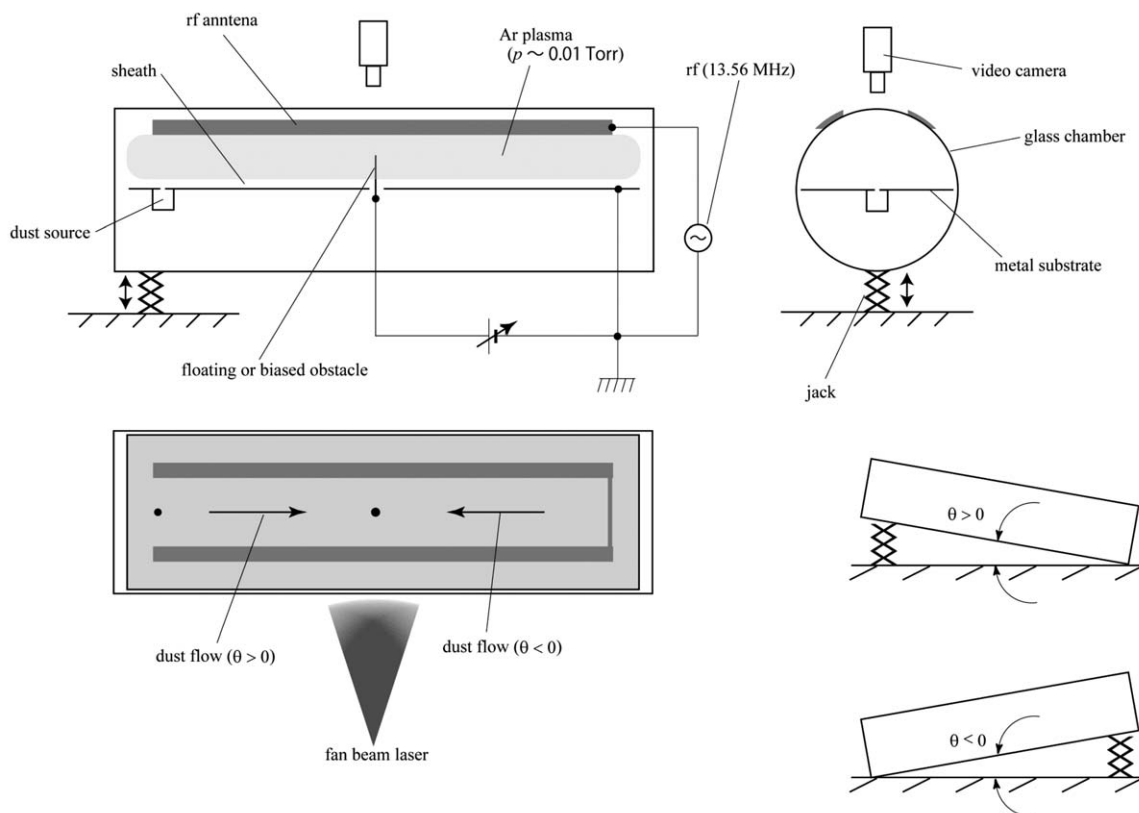


Fig. 1 YCOPEX 装置の概念図

### 3. YCOPEX を用いた幾つかの実験例

#### 3.1. 微粒子プラズマに流れのない場合

##### 3.1.1. バイアスされた障害物周りでの微粒子プラズマ

まず、基板を水平に保って微粒子プラズマに流れがない場合の実験を行った。プラズマによって負に帯電した微粒子の静電ポテンシャルは、実験においては、遮蔽距離を  $\lambda$  として Yukawa 型ポテンシャルであるとして扱われることが多い<sup>[21]</sup>。微粒子を平面的に密に浮遊させると、各粒子は互いに  $2\lambda$  程度の距離だけ離れて結晶構造を作ることが知られている。

今、基板から突き出した線状の導体障害物の周りにもプラズマシース遷移領域が形成されるので、負に帯電した微粒子は障害物周りのシースに滲入することができず、ある程度離れたところに留まる。Figure 2 にその様子を示す。直径 0.2 mm の障害物の位置を図中に×印で示した。障害物から半径 5 ~ 10 mm ほどの楕円状に広がった、微粒子のない void が形成されている。この void の大きさは障害物のバイアス電位  $V_0$  (および、微粒子の帯電量) によってその大きさが変わる。すなわち、微粒子は負に帯電しているため、 $V_0$  が大きくなるにつれて微粒子が障害物に引き寄せられて void の径は小さくなる。電位  $V_0$  を適切に調整することで様々な実験の目的に適した大きさの void を形成することができる。なお、障害物の周りに白く見えるものは、基板の凹凸や基板に障害物を固定する際に用いた物質が基板に極薄く堆積したものが除去しきれずに残存したものであり、レーザー光によって側面から照射されているため、際立って見えているものである。ここでは端緒的な実験を紹介することが目的であるために、残存物が完全に除去されていないままの状態の写真を用いている。現在、定量的な実験に用いている基板では、ほぼ完全に除去されている。

##### 3.1.2. 障害物周りの void における微粒子プラズマの「三態」

前節のように形成された void と微粒子の境界を詳しく見たのが Fig. 3 である。void 近傍では微粒子同士の相互作用によって空間的な束縛され方が強く、「固体」ともいえるべき状態となっていると考えられる。void から遠く離れた領域では微粒子はバラバラに動いており、「気体」といえるであろう。両者の中ほどに「液体」と呼べるであろうと考えられる、微粒子が動いたり動かなかったりという領域が存在している。ただし、これらの境界は現状では不明瞭な場合が多く、「三態」間の定量的な区分には、何らかの統計的な手法を用いた解析が必要であると思われる。

通常物質の三態に準えて、ここではこれを微粒子プラズマの三態と呼ぶ。微粒子プラズマの三態間の相転移現象も微粒子プラズマ研究の重要なテーマの一つであるため<sup>[18]</sup>、本装置を用いることによって実験的に大きな寄与をすることが可能であると予想される。

##### 3.1.3. 障害物の周りに同心円状に広がる波動

障害物のバイアス電位  $V_0$  を + 数 10 V から瞬時に開放して浮遊電位とするようなステップ的な電位変動を与えると、障害物から外側へ向けて同心円状に波動のように見えるものが伝播する。Figure 4 に 1/15 秒毎のスナップ・ショットを示す。void の境界が外側へと広がっているのは明らかである。同時に、観測手法の未熟ゆえにこの写真では明瞭ではないが、境界の外側に微粒子密度の濃淡が同心円状に存在し、拡張する境界に押されるように密度の濃淡が外側へ伝播していることがわかる。この波動は非常に減衰が強いようであり、void 半径の 2 ~ 3 倍程度の距離を伝播すると観測が困難となる。周期

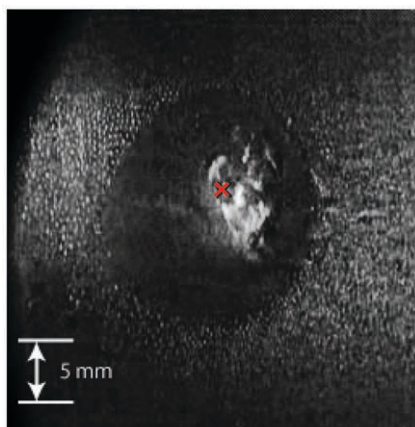


Fig. 2 障害物の周りにおける微粒子の void. 形成された void の大きさを示すため、図中にスケールを入れた。

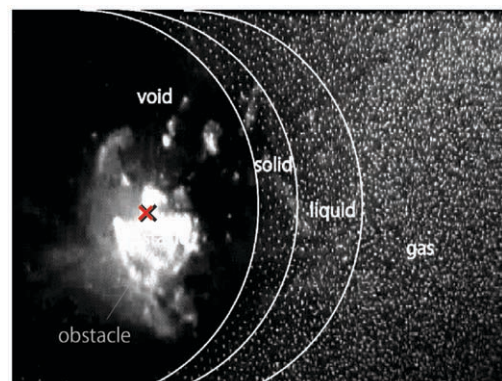


Fig. 3 void の周りにおける微粒子の「三態」

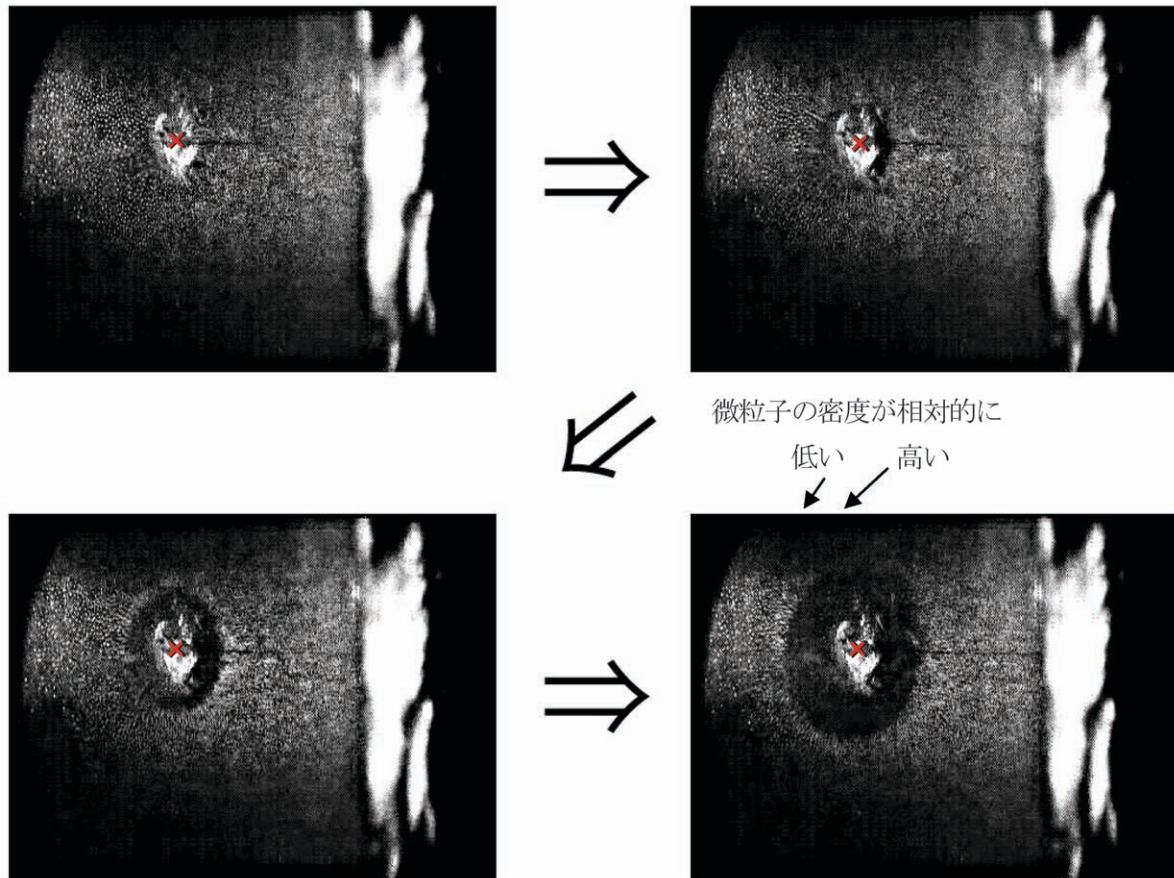


Fig. 4 同心円状に広がって伝播する波. 1/15秒毎のスナップ・ショット. 最後のショット(右下)には, voidの外側において, 同心円状に微粒子密度が相対的に高くなっている部分と低くなっている部分を示す矢印を付した. この粗密が外側に伝播していく. なお, 右端近傍の明るい部分はガラス・チェンバーによって散乱されたレーザー光である.

や波長, 減衰率等についての定量的な計測, 波動のモードの同定等々は今後, 逐次行っていく. Figure 4で一波长程度しか確認できないのは, 電位変動が単一のステップ状であり, かつ, 波の減衰が強いためである. 励起された波動については, 興味ある様々な実験が予定されている.

一般には平面波の方が理論との比較が容易であるので, 障害物の形状を平面としてこの方法を用いれば, 励起された波動の分散関係や減衰率の実験結果と理論予想との比較検討が容易になると考えられる. そうすることによって, より定量的な実験研究が可能となるであろう. さらには, 微粒子プラズマのソリトンや衝撃波, 微粒子音波をはじめとした各種の波動実験が可能であると考えられる.

### 3.2. 微粒子プラズマに流れのある場合

すでに書いたように, 装置の一端にはジャッキが取り付けられている. ジャッキの高さを変えて装置の軸方向に対してガラス管全体を傾けることができる. 基板が傾くため, 微粒子は重力によって斜面を滑り, 結果として微粒子に流れを与えることが可能となる. 傾斜角を変えることで流れの速さを変えることができる. 微粒子に流れを与えた場合の障害物の周りでの様子を Fig. 5に示す. 図中, voidの境界をより明瞭にするために, 白線でvoidの輪郭を明示している. この図では, 微粒子プラズマは左から右に流れている. 同心円状だったvoidが流れによっ

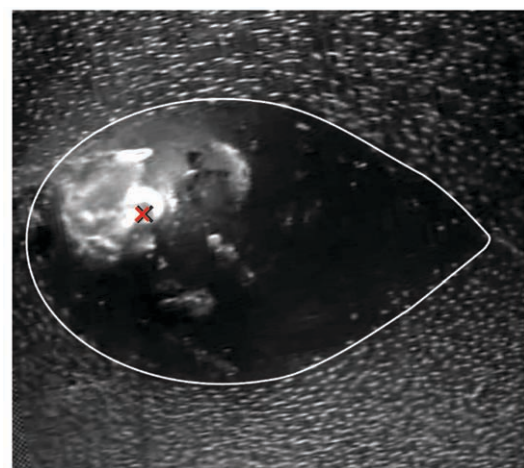


Fig. 5 微粒子の流れによって変形した, 障害物の周りのvoid.

て下流側に尖った流線形状に変形していることが判る。カメラの露光時間を適切に与えれば流れている微粒子が線状に写るため、微粒子の流跡線、延いては微粒子の流速が測定可能であることも判る。

さらに、ここでは示していないが、障害物の下流で微粒子が合流する近傍において渦的なものが生成されることが観測される場合がある。これは、微粒子プラズマ乱流が生成される可能性、および、生成された乱流を視覚的に捉えることができる可能性を示唆しており、今後の定量的な研究が俟たれるところである<sup>[12,13,22]</sup>。

#### 4. ま と め

本稿では、2次元大面積微粒子プラズマ実験用に開発された YCOPEX 装置の概要を示し、その微粒子実験装置としての高いポテンシャルを、いくつかの定性的な実験例を示すことで明らかにした。この装置を用いることによって、微粒子の自己組織化に関する実験をはじめ微粒子プラズマの三態実験、微粒子音波の実験はもちろんのこと、微粒子プラズマ乱流実験など、微粒子プラズマに関する大規模で広範囲な実験が可能であると考えられる。とりわけ、実験装置が地上にあるため、ISS における実験などに比べて細かい実験条件の設定が容易であり、大面積の2次元微粒子プラズマに関する定量的な研究が行いやすいと考えられる。微粒子プラズマを用いることによって流れの状態を可視化できるメリットは計り知れないほど大きく、スペース・プラズマは言うまでもなく、基礎プラズマ物理学全体に大いに寄与できるのではないかと期待される。

今後は、今回紹介したそれぞれの実験や紹介できなかった実験について、順次、定量的に研究を行っていく予定である。また、写真の解像度を向上させることなど、測定方法には非常に大きな改善の余地があり、本研究をより良いものにするために必要である。

#### 参 考 文 献

- [1] G. E. Morfill, H. M. Thomas, U. Konopka, H. Rothermel, M. Zuzic, A. Ivlev, and J. Goree: *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1598 (1999).
- [2] 足立聡, 高柳昌弘, 依田真一: *プラズマ核融合学会誌* **83**, 130 (2007).
- [3] 向井正: *プラズマ核融合学会誌* **82**, 77 (2006).
- [4] 釜谷秀幸: *プラズマ核融合学会誌* **82**, 81 (2006).
- [5] 堀内千尋: *プラズマ核融合学会誌* **82**, 87 (2006).
- [6] 横田俊昭: *プラズマ核融合学会誌* **82**, 92 (2006).
- [7] 足立聡, 高柳昌弘, 依田真一: *プラズマ核融合学会誌* **83**, 130 (2006).
- [8] 白谷正治, 渡辺征夫: *プラズマ核融合学会誌* **73**, 1240 (1997).
- [9] O. Ishihara: *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, R 121 (2007).
- [10] V. N. Tsytovich, G. E. Morfill, and H. Thomas: *Plasma Phys. Rep.* **28**, 675 (2001).
- [11] G. E. Morfill, V. N. Tsytovich, and H. Thomas: *Plasma Phys. Rep.* **29**, 3 (2002).
- [12] H. Thomas, G. E. Morfill, and V. N. Tsytovich: *Plasma Phys. Rep.* **29**, 963 (2003).
- [13] V. N. Tsytovich, G. E. Morfill, and H. Thomas: *Plasma Phys. Rep.* **30**, 877 (2004).
- [14] C. Zafiu, A. Melzer, and A. Piel: *Phys. Plasmas* **10**, 1278 (2003).
- [15] Y. Hayashi and K. Tachibana: *Jpn. J. App. Phys.* **33**, L 804 (1994).
- [16] A. Piel and A. Melzer: *Adv. Space Res.* **29**, 1255 (2002).
- [17] S. Ali and P. K. Shukla: *Phys. Plasmas* **13**, 022313 (2006).
- [18] 東辻浩夫: *プラズマ核融合学会誌* **82**, 693 (2006).
- [19] ミハイ・ホラニイ, コリン・ミッチェル: *プラズマ核融合学会誌* **82**, 98 (2006).
- [20] Y. Nakamura and O. Ishihara: *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 033504 (2008).
- [21] S. A. Khrapak, A. V. Ivlev, G. E. Morfill, S. K. Zhdanov, and H. M. Thomas: *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32**, 555 (2004).
- [22] 齋藤和史, 中村良治, 小島力, 石原修: *日本物理学会第64回年次大会講演*, 28 pSP 5 (2009).