

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月14日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008, 2010～2011

課題番号：20740318

研究課題名（和文） 超流動ヘリウム液面上における帯電微粒子とプラズマとの相互作用の研究

研究課題名（英文） Interaction between charged dust particles and plasma on super-fluid liquid helium surface

研究代表者

眞銅 雅子 (SHINDO MASAKO)

横浜国立大学・工学研究院・特別研究教員

研究者番号：10345481

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、超流動液体ヘリウムの冷たく静寂な表面に帯電微粒子の2次元構造を生成することである。ヘリウム蒸気中でのプラズマ放電またはフィラメント加熱により液体表面と微粒子の帯電を試みたところ、微粒子帯電量は通常より2桁程小さいことが分かった。これは、イオン-中性ガス粒子間衝突の増加とイオン温度低下のためと考えられる。さらに液体表面に数 kV/cm 程度の鉛直方向電場を印加し、液体表面近傍に微粒子群が捕捉されている系の実現に成功した。

研究成果の概要（英文）：Micron-sized particles with negative charge and larger mass density than liquid helium (LHe) were dropped onto the LHe surface. Here, dust particles and LHe surface were charged with electrons emitted from a hot filament or an rf-plasma. The charge of those particles was found to be smaller than those measured at room temperature. Furthermore, a system with floating particles near the LHe surface was established by applying strong upward electric field (~a few kV/cm) on the LHe surface.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 1,800,000 | 540,000 | 2,340,000 |
| 2010年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 2011年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ、微粒子プラズマ、コンプレックスプラズマ、液体ヘリウム

1. 研究開始当初の背景

数ミクロンの帯電微粒子を含んだプラズマは、微粒子プラズマまたはコンプレックスプラズマと呼ばれる。室温の微粒子プラズマ中では、微粒子は負に帯電し、シース（プラズ

マ-壁境界に生成される電場発生領域)においてクーロン結晶を形成することが広く知られている。その結晶構造は、外部ポテンシャルやプラズマの遮蔽長、微粒子の帯電量などに応じて多様に変化し、擬似原子モデルや多粒子系相転移の擬似モデルとして認識され

てきた。多数の帯電微粒子が形成する帯電微粒子群の3次元球対称構造は、多数の研究グループによって理論・シミュレーション研究が行われている。しかし、実際にこのモデルを観測するには微小重力環境の実現が不可欠となる。したがって地上実験においては、専らプラズマ中に水平に置かれた電極前面のシースを利用し、荷電微粒子にはたらく重力を静電気力と拮抗させることにより、重力の問題を解決する。それによって幾層かにわたる結晶形成を行い、その準2次元的な物理量が観測されてきた。最近では、固体、液体、気体状態間の相転移などが詳しく論じられ、物質の相転移を巨視化する例として注目を集めている。しかし、イオンドラッグ力・ウェイクポテンシャル形成の影響などによる帯電微粒子・プラズマ間の相互作用が大きく、問題を複雑化している。

物質の「次元性」は、電気伝導やフォノン等の物性に大きく関わってくる重要なパラメータの1つである。現に、液体ヘリウム表面では電子が理想的な2次元系を形成することが既に知られ、プラズモンの励起や、リブロン(量子化された表面波)との相互作用等、次元性が関与した現象が観測されている。最近では、この2次元電子系を量子コンピュータの qubit へ応用するなど、工学的な側面からの研究も進んでいる。プラズマ中において理想的な2次元帯電微粒子系を実現することは難しいが、液体ヘリウム表面の帯電微粒子系ならば、それを実現することは可能であると思われる。近年 Rosenberg and Kalman(Europhys. Lett. **75** (2006) 894)によって、帯電微粒子が液体ヘリウム表面に2次元系を形成する可能性について理論的考察が行われ、実現可能との解答が得られた。この解答を受けて、本研究では、超流動ヘリウムの冷たく静寂な表面に、プラズマ等で帯電させた微粒子の2次元構造を生成することを目的として実験を行う。取り扱う液体ヘリウム表面における2次元帯電微粒子系の特長について以下に挙げる。

- (1) 液体ヘリウムは転移温度以下では超流動流体となり、その表面は滑らかで2次元系の物理の観測には理想的なバックグラウンドを提供する。
- (2) 超流動液体ヘリウムは誘電率が小さく ($\epsilon \sim 1.056$)、電気伝導度が極めて小さいため、微粒子は長時間にわたって電荷を保持でき、観測に適している。
- (3) 電子系と比べ、微粒子系ではサイズが大きいのでレーザー光を利用でき、その散乱光を観測することによって、微粒子の位置や挙動を可視化できる。
- (4) 液体ヘリウム表面近傍にプラズマが存在しなければ帯電微粒子同士は遮蔽のないベアクーロン相互作用をする(静電相互作用ポ

テンシャルが Yukawa 型でない)ので、クーロン系の研究に適している。加えて、プラズマを存在させることによって2次元コンプレックスプラズマ(帯電微粒子とプラズマとの複合系)を形成し、微粒子・プラズマの相互作用を際立たせることも可能である。

(5) プラズマが存在しなければ、イオンドラッグ力やウェイクの影響の無い条件を作ることができる。ただし、微粒子-ヘリウム表面波相互作用は存在する。

(6) 微粒子が磁性を持つ場合、2次元磁気双極子相互作用をモデル化できる系となる。

(7) 重力の効果を考えなくてよいので、帯電量・質量比の異なる微粒子の混合系の議論を行うことができる。

本研究の対象は、超流動液体ヘリウム上で生成するコンプレックスプラズマであり、世界に先駆けて扱うユニークなプラズマである。

2. 研究の目的

超流動液体ヘリウム表面で2次元の帯電微粒子結晶を生成するためには、安定なプラズマの生成を実現することと、投入した微粒子の帯電量を知ることが必須である。したがって本研究では、微粒子の帯電量等の定量的測定を行い、その後に帯電微粒子を液体ヘリウム表面に捕捉する試みを行う。特に、液体ヘリウム蒸気中および表面近傍での微粒子の帯電量、液体ヘリウム表面近傍での微粒子にはたらく力、帯電微粒子群が液体ヘリウム表面で形成する構造、等について明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

液体ヘリウムの蒸気中で、プラズマ放電または熱フィラメントによる電子放出を行って微粒子を帯電させる。微粒子にレーザーを当てて散乱光をカメラで撮影し、微粒子の運動から帯電量を見積もる。さらに、液体ヘリウム表面近傍に微粒子を捕捉するための装置を開発する。

(1) 実験装置

液体ヘリウムとプラズマが安定に存在する系を生成するため、放電システム内蔵型のガラスデュワーを使用した(図1)。ガラスデュワーは、図に示すように内径160mm、高さ1000mmの大きさで、断熱のため真空領域を含み、かつ銀メッキによって外部からの輻射熱を防いでいる。光学観測用に、幅15mmのスリットが対向して設けられており、スリットから高速度CCDカメラで撮影することにより、微粒子の運動が観測できる。デュワーに液体ヘリウムを入れた後で減圧冷却によ

り液体ヘリウムの温度を1K程度まで下げることが可能である。プラズマを発生させ帯電した微粒子を液面まで導くための装置(図1(a))を作成し、液体ヘリウム蒸気中に設置した。この装置では、1W程度での放電維持が可能である。

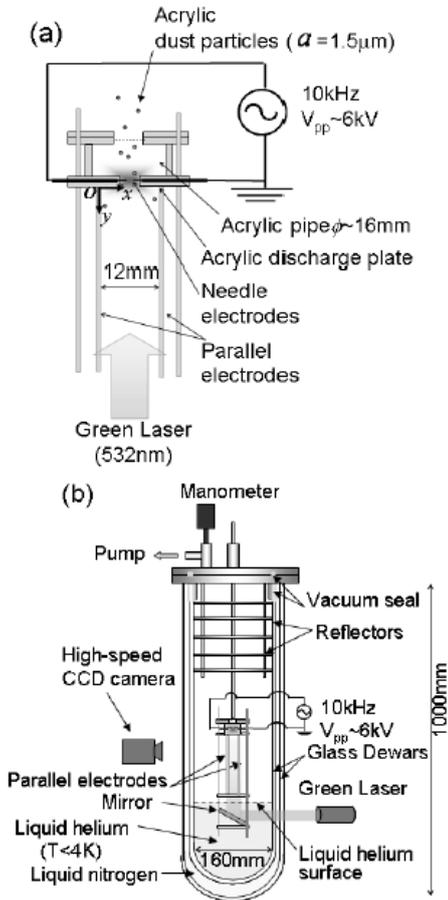


図 1 (a)プラズマ中で帯電した微粒子の帯電量を測定するための装置。(b)2重のデュワーシステム。

(2) 微粒子の帯電量測定実験

微粒子表面の帯電量は最も重要な物理量の1つであり、かつ局在するプラズマを通りぬけた微粒子の帯電量変化は、コンプレックスプラズマの物理において非常に興味深い問題である。直径数ミクロンのアクリル微粒子を外部から落とし、落下中の微粒子の電荷、および液体ヘリウム表面での微粒子の帯電量を測定するため、液面近傍に平行電極を設置し数10~数100Vの電圧を印加する。400fpsの高速度カメラを用いて微粒子の軌道偏向の様子を撮影し、各フレーム上での粒子の電場方向の位置と速度を解析することにより、電荷量を計算する方法を確立した。

(3) 液体ヘリウム表面での微粒子捕捉実験

室温でのガスプラズマ中では、シースとプラズマの境界近傍に、負に帯電した微粒子が浮遊する様子が数多く観測されている。シースには下向きの電場が形成されているため、重力と負電荷に作用する静電気が釣り合っているためである。一方液体ヘリウム表面に2次元電子系を生成する際には、上向きの電場を印加する。帯電した液体表面に強い電場を印加すると、静電気力と表面張力との作用によって液体ヘリウム表面が窪む。表面電荷と電場の強さを適切に調整すれば、巨大なdimple(窪み)が形成されることが知られている。1つのdimpleは直径1mm深さ数100 μm 程度で、電子 10^7 個が内部に局在している。この電子数はプラズマ中で帯電した微粒子の帯電量に匹敵する量であり、かつ表面の歪みは微粒子を支えるのに十分な表面張力を与えるので、同様の方法により帯電微粒子を表面に束縛できると考えた。そこで、液体ヘリウムを挟んで2枚の平板電極を設置し、プラズマまたは熱フィラメントから電子を供給して液面を帯電させ、そこに帯電させた微粒子を落下させる。この実験のために図2に示すような装置を開発し、図1(b)のデュワー内に設置した。

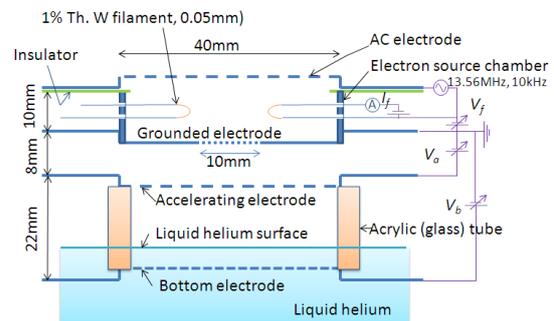


図 2 液体ヘリウム表面に帯電微粒子を捕捉するための装置。

4. 研究成果

(1) 微粒子の帯電量測定実験

液体ヘリウム蒸気は非常に中性粒子密度が高いため、プラズマが電極の周辺に局在する様子が観測された。放電中の液体ヘリウム温度および蒸気の圧力に急激な上昇は見られなかった。高速度カメラで撮影した直径 $3\mu\text{m}$ の微粒子の代表的な軌道偏向の様子を図3に示す。各フレームでの微粒子の位置を読み取り、差分化した運動方程式

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}, v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}, \quad (1)$$

$$M_d \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = QE - kv_x \quad (y \geq 0),$$

$$M_d \frac{\Delta v_y}{\Delta t} = M_d g - kv_y,$$

より、微粒子の帯電量 Q を計算した。ここで、 M_d は微粒子の質量、 E は水平方向の電場、 k は微粒子と中性ガス粒子間の衝突に由来する摩擦係数である。見積もられた帯電量は負であり、その絶対値をプラズマからの距離の関数として図 4 に示す。極低温環境下での微粒子帯電量は、室温環境と比べて 2 桁程小さく、またプラズマからの距離に従い指数関数的に大きく減少することが分かった。

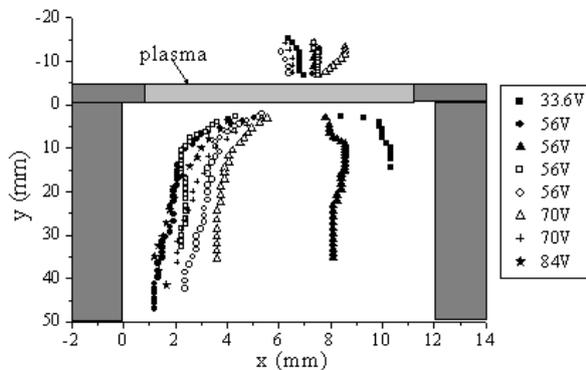


図 3 液体ヘリウム(1.6K)蒸気中における微粒子の軌道偏向の様子。

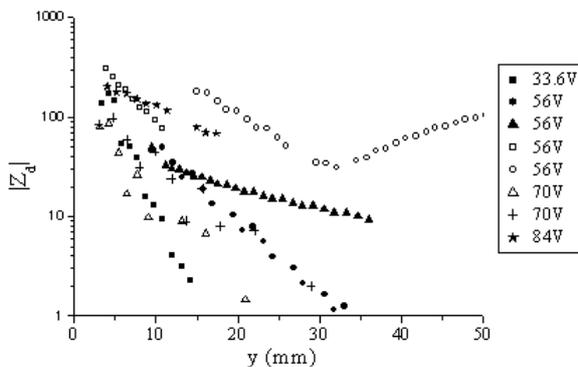


図 4 液体ヘリウム(1.6K)蒸気中における微粒子の帯電量の変化。

(2) 液体ヘリウム表面での微粒子捕捉実験

図 2 に示すような装置で熱フィラメントやプラズマで電子を供給しつつ、直径 $3\mu\text{m}$ の微粒子を液体ヘリウム表面へ落下させ、表面近傍に上向き 2kV/cm 程度の電場を印加すると、液体ヘリウム近傍に微粒子が浮く様子が観測された。レーザーシートを液面下 2mm に照射したときに、微粒子が最も明るく観測されたため、微粒子は液面下に浮遊していると考えられる。帯電量などを観測するには至ら

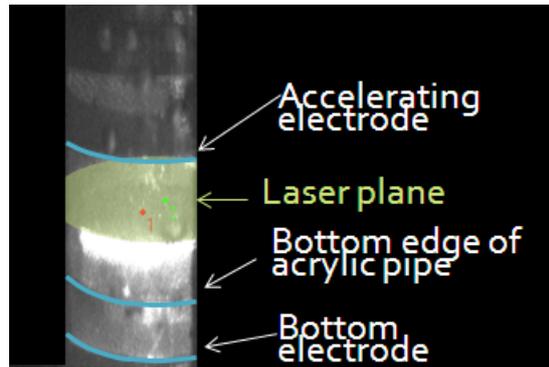


図 5 デュワーのスリットから観測された、液体ヘリウム表面に捕捉された微粒子。

なかったが、電子を供給しかつ上向きの電場が存在する時のみ浮いたことや、電場の向きを反転させると捕捉されていた微粒子が即座に落下したことから、帯電した微粒子が液体ヘリウム表面の電子と相互作用を行っていると考えられる。今後は、微粒子や液面の帯電量などを明らかにしていく必要がある。次に高周波放電プラズマを用いて同様の実験を行ったところ、数個の微粒子が単体で短時間表面近傍に浮遊する様子を観測することができた。プラズマ放電の実験では、フィラメントを用いた実験よりも液体ヘリウム表面の揺動が大きくなりやすかったため、プラズマ放電時間等の工夫を施す必要がある。また、高電圧を印加する電極のサイズを小さくして、局所的に電場を印加できるようにしたところ、電極の上の液体ヘリウム表面が深さ 1mm ほど窪み、その中に微粒子が 2 次元形状に捕捉される様子が観測された。以上のことから、本研究により帯電した液体ヘリウム表面に帯電微粒子を捕捉する技術が確立されたといえる。

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)

- ① M. Chikasue, M. Shindo and O. Ishihara, Thermophoretic force on a dust particle in a diffused plasma in the vapor of liquid helium, AIP Conf. Proceedings, 査読有, Vol. 1397, 2011, pp.337-338, DOI:10.1063/1.3659831.
- ② N. Uotani, J. Kubota, W. Sekine, M. Chikasue, M. Shindo and O. Ishihara, Dust Charging in Collisional Plasma in Cryogenic Environment, Journal of Plasma and Fusion Research Series, 査読有, Vol. 9, 2010, pp.404-409.

http://www.jspf.or.jp/JPFERS/PDF/Vol9/jpfrs2010_09-404.pdf

- ③ M. Shindo, N. Uotani and O. Ishihara, *Dust Charge in Collisional Plasma in Liquid Helium Vapor*, J. Plasma Fusion Res. SERIES, 査読有, Vol. 8, 2009, pp.294-297.
http://www.jspf.or.jp/JPFERS/PDF/Vol8/jpfrs2009_08-0294.pdf

〔学会発表〕(計6件)

- ① 眞銅雅子、近末恵美、脇屋誉大、石原修
プラズマ中で帯電した微粒子と液体ヘリウム表面上の電子との相互作用、
Plasma Conference 2011、2011年11月
25日、石川県立音楽堂(石川県金沢市)
- ② M. Chikasue, M. Shindo and O. Ishihara, *Thermophoretic force on charged dust particles in cryogenic complex plasma*, 6th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, May 17, 2011, Garmisch-Partenkirchen, Germany.
- ③ 近末恵美、久保田夏子、関野千穂、眞銅雅子、石原修、液体ヘリウム蒸気中の拡散プラズマ領域における熱泳動力、日本物理学会 2011 年第 66 回年次大会、2011 年 3 月 26 日、新潟大学.
- ④ M. Chikasue, N. Adhikary, N. Uotani, C. Sekino, M. Shindo and O. Ishihara, Study of thermophoretic force on a dust particle in collisional cryogenic plasma, 11th Workshop on Fine Particle Plasmas, November 30, 2010, National Institute for Fusion Science, Gifu.
- ⑤ N. Uotani, M. Chikasue, T. Wakiya, C. Sekino, M. Shindo and O. Ishihara, *Behavior of charged dust particles on the liquid helium surface*, 11th Workshop on Fine Particle Plasmas, November 20, 2010, National Institute for Fusion Science, Gifu.
- ⑥ M. Shindo, N. Uotani, and O. Ishihara, *Dust Charge in Collisional Plasma in Liquid Helium Vapor*, International Congress on Plasma Physics, September 11, 2008, Fukuoka, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

眞銅 雅子 (SHINDO MASAKO)

横浜国立大学・工学研究院・特別研究教員
研究者番号：10345481

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし