

希薄な微粒子密度の微粒子プラズマ中における微粒子孤立波様波動

宇都宮大・工 齋藤和史

研究の背景

電子とイオン、および、中性ガス粒子から成るプラズマに、直径数 μm の微粒子を加えた、いわゆる微粒子プラズマにおいて、イオン音波孤立波や微粒子孤立波に関する研究が行われている。

例えば、Nakamuraらはダブル・プラズマ装置中にイオン音波孤立波を励起・伝播させ、微粒子との相互作用を調べる実験を行った¹⁾。イオン音波孤立波は、微粒子密度の増加と共に増える散逸の効果によって構造が変化して減衰し、その振る舞いは modified Korteweg-de Vries Burgers (modified K-dV Burgers) 方程式

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} + \alpha \Phi - \beta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi^2} + \gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} + \delta \frac{\partial^3 \Phi}{\partial \xi^3} = 0$$

による計算結果とよく一致することを報告している。ただし、 Φ は波のポテンシャル、 τ と ξ は規格化された時間と空間の変数であり、係数 α 、 β 、 γ 、 δ はプラズマの波数や周波数、粘性係数等と関係付けられている(原論文ではその関係が明示されている)。

また、Boruahらは円筒のガラス製真空容器を用いた微粒子孤立波に関する実験を行い、その伝播特性もまた、同様の modified K-dV Burgers 方程式による計算結果とよく一致することを報告している²⁾。

以上の例は勿論のこと、微粒子プラズマ中の孤立波様波動の研究は、そのほとんどが微粒子密度の高い微粒子プラズマを用いている。

本研究の目的は、従来の実験的研究におけるものよりも微粒子の密度が小さい微粒子プラズマ(以下、希薄微粒子プラズマと略称)における、孤立波様波動について、励起条件、伝播の状態、孤立波の衝突や追い越し等の性質を調べることである。とりわけ、先述の2つの例には次のような問題点があるのではないかと考えられる。1つ目の実験においては微粒子を真空容器の上から重力によって多量に落下させ、その中をイオン音波孤立波が伝播しており、微粒子による局所的なプラズマの擾乱が無視できないと考えられる。また、2つ目の実験においては、ガス圧力が $0.5 \sim 2 \text{ Pa}$ と、非常に広い圧力領域で実験を行ったことがわかるのみである。微粒子プラズマ中の微粒子に働く中性粒子のドラッグ力を無視できないため、このような広い圧力の範囲においてはもう少し慎重な圧力制御が必要だと考えられる。これらから、微粒子をプラズマ中に(2次元的に)可能な限り一様に分布させて実験を行う必要があること、ガス圧力をできるだけ正確に制御して実験を行って中性ガス粒子によるドラッグ力の影響を正しく見積もった上で実験を行わなければならないと考えられる。

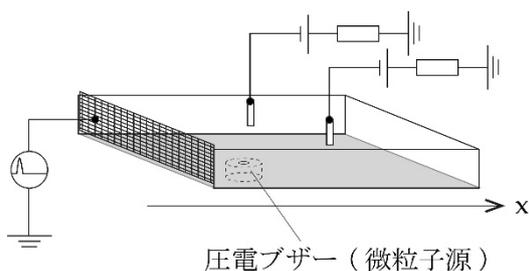


図1 実験装置主要部の概略図。左は励起用金属メッシュ。メッシュ($x = 0 \text{ mm}$)から $x = 50 \text{ mm}$ と $x = 80 \text{ mm}$ にイオン飽和電流計測用の平板プローブを設置している。

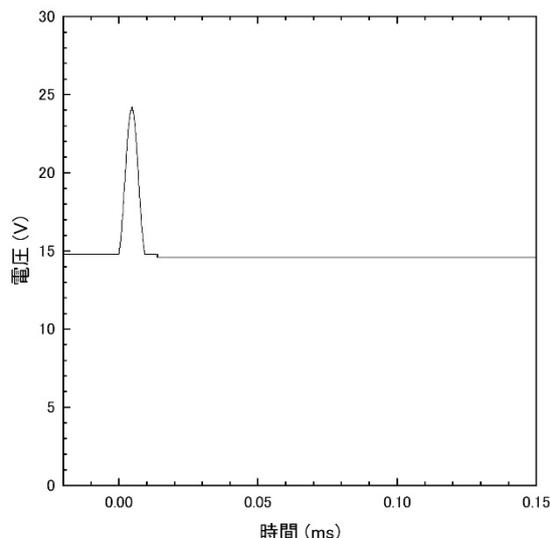


図2 波動励起のためにメッシュに印加した電圧の例。

実験方法

宇宙科学研究所先端宇宙科学研究棟 2 階にある小型スペースチェンバーに T 字型ガラス管を接続して行った。図 1 にガラス管内の実験装置の主領域の概略図を示す。使用したガスはアルゴンである。プラズマの生成には熱陰極放電を用いる。

ガラス管内には微粒子プラズマ生成領域として、底面を $110 \times 50 \text{ mm}$ とし、高さ約 30 mm の領域側面の 3 方をガラス板で囲った。残りの面には波動励起用の金属メッシュを設置した。メッシュには半波整流した正弦波パルスと dc 電圧を同時に印加した。領域内の信号をイオン飽和電流として受信するため、メッシュから水平方向 (x 方向) に $x = 50 \text{ mm}$ と $x = 80 \text{ mm}$ の位置に、底板から約 10 mm の高さに平板プローブを置いた。

微粒子源として圧電ブザーを用いる。圧電ブザーは底板の下に設置されている。実験領域とは直径約 3 mm の孔で繋がっている。微粒子はブザーの圧電素子上に蓄えられており、ブザーに通電して圧電素子が振動すると、その振動によって微粒子が小孔を通じて実験領域内に叩き上げられてプラズマ中に放出される。放出された微粒子はプラズマ中の荷電粒子を取り込んで帯電する。垂直方法に微粒子に働く力は、主に重力と底板表面に形成されているシース電場による静電力であり、微粒子は両者がバランスする高さにほぼ 2 次元的に浮遊する。これらの結果、微粒子プラズマ系が形成される。ただし、今回の実験では微粒子プラズマ系が形成されることを確認するにとどめ、微粒子の無い状態で実験を行った。

熱陰極放電プラズマでは、微粒子プラズマの実験で用いられることの多い RF 放電プラズマに比べて低いガス圧力にする必要があり、中性粒子によるドラッグ力が小さいため、微粒子が結晶構造を作ることは稀である。そのため、微粒子が熱運動等によって散逸してしまうことが多く、低微粒子密度の微粒子プラズマ系が形成される。

実験結果と議論

アルゴンガスの圧力を $0.1 \sim 1 \text{ Pa}$ の範囲で変え、図 2 に示すような $\sim 14 \text{ V}$ の dc 電圧に 9.6 V のパルスを重ねたものをメッシュに印加して波動の励起を試みた。圧力 0.8 Pa では、ピークが現れなかった。圧力 0.1 Pa では、波動由来であろうと思われる小さなピークが現れた。このピークは、プローブ位置が $x = 50 \text{ mm}$ では明瞭であるが、 $x = 80 \text{ mm}$ では、 $x = 50 \text{ mm}$ に比べて若干の時間遅れを伴い、かつ、なだらかな波形となっている。時間遅れがあることから、観測されたピークは波動であることが予想される。

波動であること、および、そのモードをより確実に特定するには、波動の伝播方向に可動なプローブを設置するのが最良であるが、装置の構造上ほぼ不可能である。改善の策としてプローブの数を増やすことを検討しているが、増やすことによってプラズマを乱し、波動の励起に影響が出ないようにしなければならない。

まとめ

熱陰極直流放電によって生成された $0.1 \sim 1 \text{ Pa}$ という、微粒子プラズマの視点からは非常に低いガス圧力下において微粒子プラズマ系を形成した。一方、この圧力は、特にイオン音波孤立波に実験に比べては $10 \sim 100$ 倍程度高く、イオン-中性粒子衝突の平均自由行程が非常に短い。イオン音波孤立波の励起が非常に困難な実験条件である。そのような条件下であっても、非常に小さいながらもイオン音波孤立波ではないかと思われる信号を確認できた。この波と思われる信号がイオン音波であること、さらに、非粒子を付加してその信号どのような影響があるのかなどを今後調べていくことになる。イオン音波孤立波のみならず高微粒子密度の微粒子プラズマ系を形成して微粒子音波孤立波が励起できるような実験条件を探ることも必要である。

参考文献

- 1) Y. Nakamura and A. Sarma, *Physics of Plasmas* **8**, 3921 (2001).
- 2) A. Boruah, S. K. Sharma, Y. Nakamura, and H. Bailung, *Phys. Plasmas* **23**, 093704 (2016).