

不定形および蛍光球形微粒子を用いた放電プラズマシース構造計測に関する研究

表面物性工学研究室 21M805 高山 大輔

1. はじめに

微粒子を含むプラズマのことを微粒子プラズマ、あるいはダストプラズマとよぶ。微粒子プラズマは自然界にも存在し、人工物でも色々な問題になっており、研究が続けられている。

当研究室では浮遊した状態の微粒子表面に全方位から均一に製膜を行うことによる新しい機能材料の開発を目指している。まずは、シース中に浮遊した微粒子の浮遊領域や動きをコントロールしたいが、そのためには使用している装置のプラズマのパラメータを明らかにする必要がある。

そこで、私の研究は廣氏の粒子コードシミュレーションと比較しながら不定形微粒子、蛍光球形微粒子を用いてプラズマのパラメータやシース構造(形状、電界・電位分布を計測することを目的とした。

2. 不定形微粒子

2-1 オフセット変調法による質量電荷比の計測

Fig.1 の RF(13.56MHz)電源とグラウンドの間に LF(10Hz)電源を接続し、RF 波形に LF オフセット変調をかけた。Al₂O₃ 微粒子(粒径 1~100 μm)は RF 波形には応答せず、LF 波形に反応して上下に振動する。微粒子が静止している時、一番低く浮遊している時、一番高く浮遊している時の写真を撮り、浮遊高さの変化を計測した。指数関数近似ながらシース内電界を決定できた。また、質量電荷比は 1094.64[kg/C]となり、微粒子の平均粒径と質量密度から質量を仮定すると平均帯電量は 1.89×10^{-15} [C]となった。これは付着電子数 1.18×10^4 個に相当する。OML 理論による予測値 2.4×10^5 個の一分小さくなりました。これは不定形のものを球体近似しているためと思われる。

2-2 微粒子の最大浮遊高さと圧力依存性

Fig.1 において気体(空気)圧力を変化させながら浮遊した微粒子の高さを計測した。Al₂O₃ 微粒子(粒径 1~100 μm)を使用。

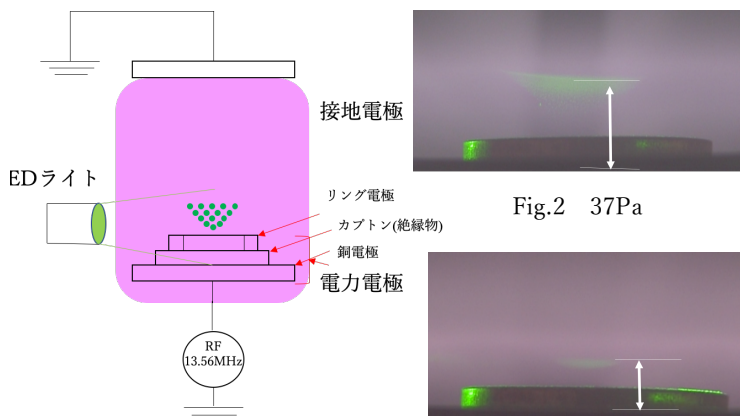


Fig.1 実験の概略図

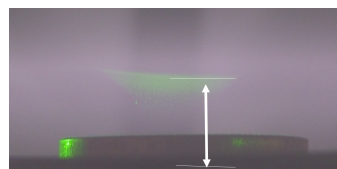


Fig.2 37Pa

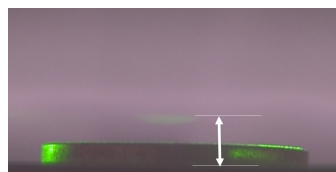


Fig.3 82Pa

長さ D に比例し、 λ_D は電子密度の平方根に逆比例する。もし電子密度が圧力 P に比例するならば、 L は、大雑把には $P^{-0.5}$ に比例することになる。Fig.4 の黒点は実験値で、赤線は $P^{-0.5}$ を示している。廣氏の粒子コードシミュレーションと比較しやすいように横軸を圧力からガス密度に変換している。

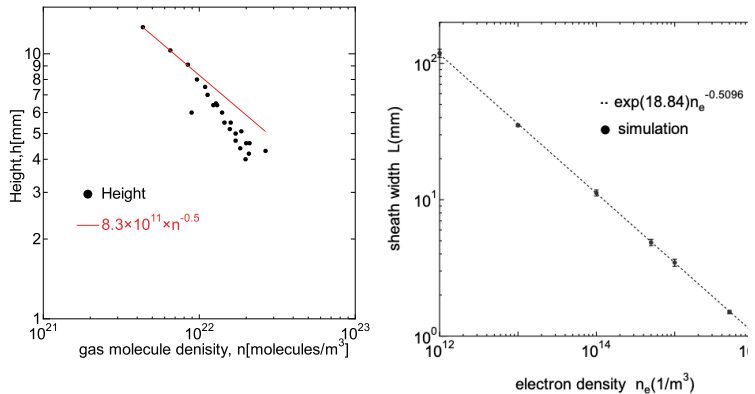


Fig.4 実験結果

Fig.5 シミュレーション結果(by 廣)

シミュレーションにおいて電子温度 1eV、電離度は 10^{-7} を仮定すると実験とよく一致する。このことから微粒子の最大浮遊高さはシース厚みと対応することがわかった。

3. 蛍光球形微粒子

3-1 蛍光微粒子を用いた最大浮遊高さと圧力依存性

紫外光による照明と蛍光微粒子(ポリスチレン 10~60 μm:球形)を用いることで、シース構造(シース厚みや形状など)を正確に観測することを試みた。蛍光微粒子を用いた最大浮遊高さと圧力依存性の実験でも、シミュレーション結果とよく一致することが確認された。

3-2 ラングミュアプローブ法

ラングミュアプローブ法を用いて最大浮遊高さと圧力依存性と同じ実験条件で電子温度、電子密度、浮遊電位、プラズマ電位などを計測した。プローブ電極の表面積 8.64×10^{-6} (m²) で計測した。

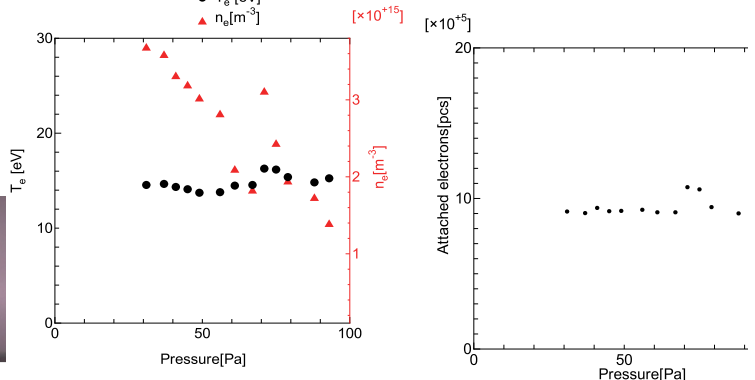


Fig.6 圧力と電子温度、電子密度

Fig.7 圧力と付着電子数

電流電圧特性の傾きから求めた電子温度は 13~16[eV]、電子

チャイルド・ラングミュア則によるとシース厚み L は、デバイ

密度は $1\sim4\times10^{15}[m^{-3}]$ となった。浮遊電位から微粒子の帯電量を求めると、付着電子数 $8\sim11\times10^5$ 個となった。また、帯電量も OML 理論に基づく計算によると非常に近い値になった。

3-3 微粒子投下機構

2種類の粒径の微粒子の蛍光色を変えると区別できるが、それを使うと電荷比と粒径の関係を明らかにできる。複数種類の実験は調べた限りではこれまで行われていない。しかし従来用いていた微粒子投下方法では、投下量の微調整ができず、複数種類の微粒子の投下もできない。そこで、今回それらを解決するためにベルトコンベアー式の微粒子投下装置を製作した。磁石を動かすことでベルトが動き、あらかじめ投下量と種類をセットしておいた微粒子を順番に投下できるようにした。これにより複数種類の微粒子投下実験ができるようになった。

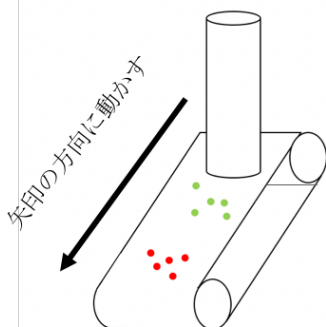


Fig.6 微粒子投下機構

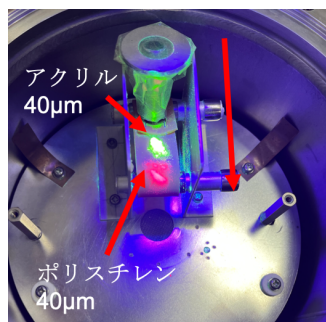


Fig.7 実験の様子

3-3 2種類浮遊実験

蛍光球形微粒子を用いてサイズや種類を変えての微粒子浮遊実験をおこなった。蛍光微粒子のサイズや種類はアクリル 10 μm (発光色:青), 40 μm (発光色:緑), ポリスチレン 40 μm (発光色:赤)を使用した。最初にサイズを変えて、アクリル同士の浮遊実験をおこない次にサイズは同じで種類を変えての実験をおこなった。

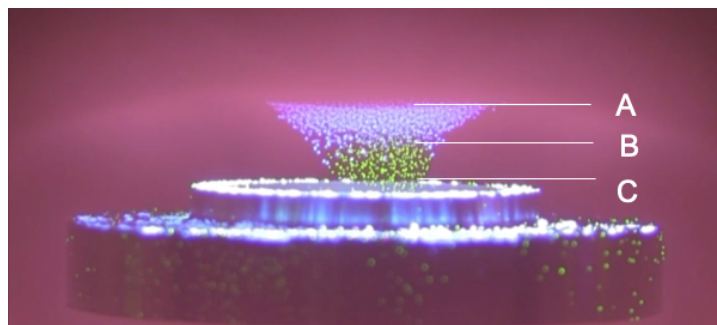


Fig.11 アクリル 10 μm (青), アクリル 40 μm (緑)浮遊の様子

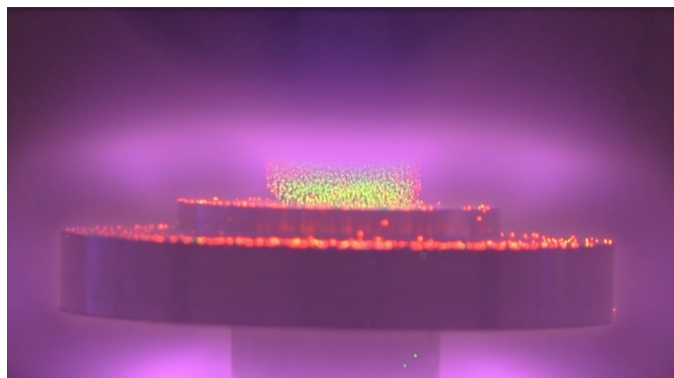


Fig.12 アクリル 40 μm (緑), ポリスチレン 40 μm (赤)浮遊の様子 2

今回はアクリルのサイズを変えた 10 μm と 40 μm でどのように浮遊するのかを確認した。大きい粒子が下に浮遊し小さい粒子が上に浮遊することの確認ができた。

重力と電気力のバランスから、微粒子が浮遊している場所の電界を見積もることができる。そこで、Fig.11 の A,B,C の電界分布を計算してみると

$A=79.2[V/m]$, $B=316.8[V/m]$, $C=1979.8[V/m]$ となった。

Fig12 のポリスチレンとアクリルの実験では最初は全体が混ざっている感じであったが 10 秒ほど経ったあたりから分離していき外側にポリスチレン, 中心にアクリルの微粒子が集中して集まっていた。

4.結論

本研究では、微粒子を用いてシース構造を計測することを目指した。得られた知見としてまず、微粒子雲の形状の観察で、従来のチンダル現象を利用する方法から、蛍光微粒子を用いる方法に変えることで、(1)より広い領域の観察が可能となった。これにより、シース厚みや形状、真空チャンバー内で生じる気流の存在などがわかった。(2)また粒子コードシミュレーションと比較することで、電子温度や電子密度などを推定することがわかった。次に、微粒子の質量電荷比がわかると浮遊位置での電界強度を見積もることができる。(3)不定形微粒子では、今回発案したオフセット変調法によって粒子を振動させシース中の電界および質量電荷比を測定することができた。(4)蛍光球形微粒子では、粒径とプラズマ電位、浮遊電位から質量電荷比を見積もることができ、(5)MOL 理論と良い一致を見た。プラズマ電位、浮遊電位はラングミュアプローブ法で計測できる。浮遊に必要な電界は粒径 r の 2 乗に比例する。(6)粒径の異なる微粒子の蛍光色を変え得ることで区別し、この規則が定性的に成立していることを確認した。

今後の発展として、粒径を蛍光色で区別した複数種類の粒子を用いれば電位電界分布を 3 次元的に計測できるのではないかとと思われる。

参考文献

- [1]Robert Merlino, Dustyplasmas, Advances in Physics, Vol.6 (2021) 1873859,
- [2]田中宏彦, 静電プローブ計測の基礎と応用, プラズマ若手フォーラム 2020.
- [3]J.E.Allem, Physica Scripta 45,497(1992).
- [4]Y.Watanabe, J.Phys.D.39,R329(2006).
- [5] 行村建, 「放電プラズマ工学」, オーム社, (2008).

関連する発表

- [1]高山大輔, 廣大輔, 朴商云, 唐木裕馬, 井上雅彦, 田口俊弘, 低周波オフセット変調法を用いた RF 放電プラズマ中微粒子の質量電荷比とシース幅の評価, 応用物理学会関西支部 2021 年度第 2 回講演会 2021 年 10 月 15 日
- [2]高山大輔, 廣大輔, 朴商云, 井上雅彦, 唐木裕馬, 田口俊弘, 蛍光微粒子を用いた放電プラズマシース構造の観察, 2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 2022 年 9 月, 東北大学

謝辞

本研究を進めるにあたり、摂南大学名誉教授田口俊弘先生には、プラズマについてご指導賜りました。同先生には研究内容についても相談にのっていただき、数多くのアドバイスをいただきました。深く感謝申し上げます。
また本学機械工学科教授堀江昌朗先生には蛍光微粒子に関する詳細な情報をご提供いただきました。厚く御礼申し上げます。