

## 協同的トムソン散乱法を用いた高気圧マイクロプラズマの診断法の開発

富田, 健太郎

<https://doi.org/10.15017/1441348>

---

出版情報：九州大学, 2013, 博士（工学）, 論文博士  
バージョン：  
権利関係：全文ファイル公表済

氏 名：富田健太郎

論文題名：協同的トムソン散乱法を用いた高気圧マイクロプラズマの診断法の開発

区 分：乙

## 論 文 内 容 の 要 旨

大気圧を含む高気圧下で生成される、1 mm以下の微小スケールのプラズマ(高気圧マイクロプラズマ)の研究が1990年代以降に精力的に行われている。これらのプラズマは、環境浄化、医療・バイオ、表面処理、短波長光源など、様々な応用が期待されている。しかし、プラズマを理解し、制御する上で重要な電子密度や電子温度の測定法は、十分に確立されていない。一方で、レーザーを用いた計測方法を用いれば、10 ns以下の時間分解能、0.1 mm以下の空間分解能が得られ、しかもプラズマを乱すことも少ないと期待される。このような背景の下、本研究では、代表的な高気圧マイクロプラズマである大気圧非平衡プラズマと、極端紫外(EUV)光源用プラズマの診断にレーザートムソン散乱(LTS)法を適用し、それらの電子密度・電子温度計測法として開発した。トムソン散乱スペクトルは、強度や波長幅が大きく異なる電子項とイオン項から構成される。どちらを測定するかは対象プラズマのパラメータによる。大気圧非平衡プラズマ(電子密度  $10^{22} \sim 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度 1~3 eV)では電子項計測を、EUV光源用プラズマ(電子密度  $10^{24} \sim 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度 30~50 eV)ではイオン項計測を行った。得られた計測結果の妥当性については、多方面から検討した。その結果、電子密度 ( $10^{18} \sim 10^{25} \text{ m}^{-3}$ )・電子温度 (0.5~50 eV)の広範な領域にある高気圧マイクロプラズマに対して、LTS法の適用が有効であることを示した。

本論文はこれらの研究をまとめたものであり、5章より構成される。

第1章では、本研究の背景と目的、および本論文の構成について述べた。

第2章では、大気圧非平衡プラズマと、EUV光源用プラズマの概要を述べた。次に、LTS法やプラズマ分光計測の原理について概説した。最後に、LTS法で留意すべきレーザーによるプラズマの擾乱過程とその対策について述べた。

第3章では、大気圧非平衡プラズマのLTS計測について述べた。同プラズマは、微小(<1 mm)、短命(<100 ns)である上、発生位置や時刻がランダムであるため、そのままではLTS法の適用が困難であった。そこで、まずは発生位置・時刻が制御可能な大気圧非平衡プラズマの生成を、新たな放電生成装置を製作することで可能とした。このプラズマの電子密度・電子温度の空間分布計測が可能なトムソン散乱計測システムを構築した。それにより、50  $\mu\text{m}$ の空間分解能、10 nsの時間分解能での電子密度・電子温度計測を可能とし、それらの2次元空間分布計測に成功した。上記で得られた結果の妥当性は、水素原子のバルマーベータ線のシュタルク広がり幅や、レーザーによる電子加熱の有無を調べることで行った。本システムの電子密度・電子温度測定精度は、主に散乱スペクトルのショットノイズで決定され、それらの曖昧さは最大で $\pm 10\%$ であることを示した。トムソン散乱計測が可能な電子密度の下限を検討した。放電初期で想定される  $10^{18} \text{ m}^{-3}$ の電子密度であっても、十分な信号対ノイズ比で計測可能であることを示した。

第4章では、EUV光源用プラズマのトムソン散乱計測について述べた。スペクトル幅の狭いイオン項を計測するため、35 pmの高波長分解能と、十分な迷光除去性能を持つ計測システムを開発した。同システムで、レーザー生成炭素プラズマからの波長広がり200 pmのイオン項スペクトル計測に成功した。得られた結果のレーザー擾乱の有無について実験的、理論的検討を行い、広範な電子密度・電子温度の領域でのレーザー擾乱回避のための指針を示した。レーザー生成炭素プラズマを用いて、EUV光源用プラズマで予想される電子密度・電子温度の領域にあるプラズマのトムソン散乱計測を行い、得られたトムソン散乱スペクトルから、これらのパラメータの評価が可能であることを示した。炭素プラズマ計測を元に、EUV光源用プラズマ（スズ）のための装置の設計目標を明確にした。

第5章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめると共に、今後の展望について述べた。