

論文審査の結果の要旨

氏名 野間 由里

本論文は、プラズマのガス温度が数千～数万Kの熱プラズマ、室温～数千Kの低温プラズマに続く室温以下のクライオプラズマに焦点を当てており、プラズマのガス温度を室温以下で連続的に低下させて発生したクライオプラズマの診断を行っている。そしてプラズマ中の粒子の運動エネルギー低下によるクライオプラズマの特性変化などを明らかにしている。

本論文は4章から構成されており、第1章では序論として、ガス温度が室温以下で制御できるクライオプラズマの研究に至った背景についてふれている。またそれら背景のもと、研究の目的を明示している。

第2章では、準備実験として、まず、大気中でクライオプラズマの発生を行ったことについて述べている。プラズマのガス温度を冷却する手段として電極部分に導入する動作ガスであるヘリウムをあらかじめ液体窒素にて冷却を行っており、クライオプラズマの発生手法としてはプラズマの過剰な熱化を防ぐのに適している誘電体バリア放電(DBD)が用いられている。そしてプラズマガス温度低下に伴うクライオプラズマの様子を観察したところ、プラズマ発生部周辺に霜の付着が伴っていたが発生自体は安定であると確認している。プラズマのガス温度は2通りの方法で得ており、1つ目が直接熱電対をプラズマに挿入し、計測された温度とシミュレーションを用いてプラズマのガス温度を評価する方法で、この方法により大気中ヘリウムクライオプラズマのガス温度が氷点下になっていることが示されている。また2つ目は発光分光法により測定した窒素の回転スペクトルから窒素の回転温度を算出しそれをプラズマのガス温度と見なす方法で、熱電対による測定結果とほぼ良い一致を示している。よってこの大気中クライオプラズマの準備実験により、室温から極低温まで連続的にプラズマガス温度を制御できるクライオプラズマの発生及びその診断の可能性を示唆している。

第3章では、第2章に基づき、室温から5Kまで連続的にプラズマガス温度を制御できるクライオプラズマの発生とその診断について述べている。電極周りの霜の付着を防ぐために真空断熱層によって内部チャンバーを大気から隔離できる実験装置を用いており、平行平板型電極を用いると、プラズマのガス温度低下(室温～78K)に伴って電極内に生成されるプラズマのパターンが変化することを確認している。これはフィッツヒュー・南雲方程式を用いて数理的に発生させたパターンとの定性的な対応から、プラズマのガス温度低下によって主に放電を消す方向に形成される電場の拡散が抑制されることと印加電圧が上昇することに起因していると推測された。一方、ジェット型電極を用いたクライオプラズマの発生および診断では、プラズマのガス温度低下(室温～5K)に伴い雰囲気密度が増加し放電開始電圧が増加することが示されている。また、ガス温度が低温になるほど窒素発光スペクトル測定によるクライオプラズマのガス温度見積もりが有効でなくなるということを示している。そこで代わりに熱伝導の式を使って計算

を行い、プラズマ発生部と原料ガスの測定をシリコンダイオードセンサーで行っている部分との温度差は最も温度上昇しやすい条件のもとであっても 1K程度と見積もられている。すなわち、センサーで測定されている原料ガス温度をクライオプラズマのガス温度と見なして良いことを確認している。次に、プラズマガス温度低下に伴うプラズマの特性変化を調べるために電気学的、および、分光学的診断を行っている。電子密度と電子温度の結果よりプラズマガス温度が 50K以下になるとミクロ的な視点からはクライオプラズマがファンデルワールス力やクーロン力などの分子間相互作用力の影響下にあることが示唆されている。また、放電モードも 50Kあたりを境に大気圧グローモードから大気圧タウンゼントモードへ遷移しているのが確認されている。クライオプラズマの発光分光の結果と合わせるとこの大気圧タウンゼントモードへの遷移はプラズマのガス温度低下に伴ってヘリウムの準安定励起種 (He^* 、 He_2^*) の衝突による電子生成が増加したことに起因すると考察している。また、プラズマガス温度低下に伴う He_2^* の発光強度増加は雰囲気密度の増加というマクロ的な要因と、プラズマ中の粒子の運動エネルギー低下に伴う分子間相互作用力の増加というミクロ的な要因の両方に関連していると考察している。

第 4 章では、本研究の総括を述べている。

以上、本論文は、プラズマのガス温度が数千～数万Kの熱プラズマ、室温～数千Kの低温プラズマに続いて室温以下のクライオプラズマに焦点を当てており、プラズマのガス温度を室温以下で連続的に低下させて発生したクライオプラズマの診断を通してクライオプラズマ研究の新規性を見出している。さらにまた、クライオプラズマを近い将来プロセスへ応用することを見据えてその必要性および可能性を示している。ゆえに本論文はプラズマ材料科学において新しい研究分野の基礎づくりに貢献するものと判断できる。

なお、本研究の第 2 章は、石原大輔、Sven Stauss、崔允起、笹居高明、寺嶋和夫との共同研究であり、第 3 章は崔宰赫、Sven Stauss、笹居高明、寺嶋和夫との共同研究であるが、論文提出者が主体となって、分析および、検証を行ったもので論文提出者の寄与が十分であると判断する。

従って本論文に対して博士（科学）の学位の授与を認める。