

論文の内容の要旨

氏名：中 村 耀

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：ホローカソード放電を利用した電子ビーム源の開発に関する研究

電子ビームは、荷電粒子である電子を電場や磁場を用いて加速、収束させることで、それらのエネルギーや軌道を制御できるようにした荷電粒子の流れである。電子ビームは、産業分野ではブラウン管や透過型電子顕微鏡（TEM）、走査型電子顕微鏡（SEM）といった電子顕微鏡、また金属製の造形物を出力することが可能な金属 3D プリンターを含めた電子ビームで材料の溶接や切断を行う電子ビーム加工などに利用されている。他方、研究分野では粒子加速器などにも電子ビームは用いられており、産業分野から研究分野まで幅広く利用されている。

この電子ビームを発生させる装置のことを電子ビーム源と呼ぶ。電子ビーム源の構造を機能的に分類すると、大きく二つの要素に分けることができる。一つは加速対象である電子を発生させる領域で、本論文中では「電子供給源」と呼ぶ。もう一つは発生させた電子加速する構成要素であり、本論文中では「電子加速部」と呼ぶ。本研究では、プラズマを電子ビーム源の電子供給源に応用する研究を行った。

電子ビーム源の性能を示す指標の一つである寿命は、電子供給源の寿命によるものである。この電子供給源の寿命は、以下に示す四つの原因に起因すると考えられている。一つ目は、電子供給源が高温になることによって発生する供給源そのものの蒸発である。また、二つ目の原因としては、高温になった電子供給源と水蒸気を主体とする気体との高温反応による腐食が挙げられる。これら二つの原因の影響の度合いは、どちらも電子供給源の温度によって決定され、その度合いにより電子供給源の寿命が決まる。三つ目の原因は、イオン衝撃による電子供給源の局所的な加熱と腐食であり、また、四つ目はイオン衝撃による電子供給源の損耗である。これらの原因は、電子ビームによって気体分子が電離させられた際に生成された正イオンが、電子を加速するために外部から印加された電界によって電子供給源へ向かって加速され、電極部材と衝突をすることによって引き起こされる。

現在多くの分野で利用されている固体を電子供給源として利用した電子ビーム源では、イオン衝撃による腐食や損耗を防ぐために、 10^{-7} Pa 以上の真空度の超高真空空間や、 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ Pa の真空度の高真空空間で利用されている。そのため、現在の一般的な固体を電子供給源にした電子ビーム源を $10^{-4} \sim 1$ Pa の真空度の中真空空間や 1 Pa 以下の真空度の低真空空間で利用することは難しい。

一方で、電子供給源が固体ではなく、電子、イオン、および、電離していない中性粒子によって構成された準中性の電磁流体であるプラズマを電子供給源に利用した電子ビーム源も存在する。この場合、残留気体の存在によるイオン衝撃による電子供給源の損傷が発生しないため、中真空空間や低真空空間においても電極構造の劣化や損耗を抑えつつ電子ビーム源として運転することが可能であると考えられる。しかしながら、電子供給源としてプラズマを利用するためにはプラズマ生成部に気体が必要であり、その気体が電子加速部へ流出してしまう関係上、低真空空間以外での電子ビームの運用は現状では達成できていない。プラズマを電子供給源にした電子ビーム源を中真空空間で運用することが可能になれば、現時点では存在していない中真空空間でもイオン衝撃による損耗を抑制しつつ運用することができる電子ビームが実現できると考えられる。これは電子ビーム源という大きな枠組みの性能の幅を広げることに直結する。

以上の理由から、本論文では、中真空空間で運用することが可能な、プラズマを電子供給源にした電子ビーム源の開発を最終的な目的とする。これを実現するために、電子供給源であるプラズマ生成部と電子加速部との間に圧力差を発生させつつ、電子ビームを形成することが必要となる。はじめに、メッシュなどの様々な形状をしたグリッド電極で圧力差を発生させつつ、ホローカソードでプラズマを生成し電子を引き出すことを目標とした、ホローカソードプラズマを電子供給源に利用した電子ビーム源の開発を行った。その結果としては、今回実験に使用したグリッ

ド電極では電子の引き出しと圧力差の発生を同時に達成することはできず、このホローカソード放電を電子供給源に利用した方式では、プラズマ生成部と電子加速部との間に圧力差を発生させつつ、中真空の領域で電子ビームを形成することが困難であることが確認された。次に、プラズマを利用して管内の気体の流れを抑制し、真空領域と大気圧領域の圧力差を発生させる「プラズマウィンドウ」と呼ばれる技術に着目し、従来とは異なる手法であるマイクロホローカソード放電で形成したプラズマウィンドウを電子供給源に利用した電子ビーム源の開発を行った。その結果としては、マイクロホローカソード放電で形成したプラズマウィンドウでも圧力差を発生させることができることを明らかにし、その状態でプラズマウィンドウとして機能しているマイクロホローカソードプラズマから電子を引き出せることも確認できた。以上のことから本研究において、中真空空間でも利用することができるプラズマを電子供給源として利用した電子ビーム源を開発することができた。

本論文は第一章から第五章までで構成されており、各章の構成および概略について要約すると以下の通りである。

第一章「緒言」では、電子ビームの種類や特徴、プラズマを電子供給源に利用した電子ビーム源の研究状況などの背景について記述した。また、現時点では存在していない中真空空間でもイオン衝撃による損耗を抑制しつつ運用することができる電子ビームになると考えられる、中真空空間で運用することが可能なプラズマを電子供給源にした電子ビーム源の開発を最終的な目的としたことについても述べた。

第二章「電子ビームの形成とプラズマの生成に関する理論」では、本研究で利用する電子ビームに関する理論や、電供給源として利用するプラズマの理論について記述した。まず、電子ビームに関する理論である平均自由行程や空間電荷効果、空間電荷効果による電子ビームの発散について述べ、次に、プラズマの概念を含めた気体放電のメカニズムや、気体放電の形態、そして、本研究で利用するホローカソード放電について述べた。

第三章「ホローカソードプラズマを電子供給源に利用した電子ビーム源の開発」では、ホローカソードとアノードであるグリッド電極によって生成されたホローカソードプラズマを電子供給源に利用した電子ビーム源の設計開発および開発した電子ビーム源から電子ビームの形成を行う実験について記述した。まず、電子供給源となるプラズマの状態を調査する手法であるプラズマ診断法の概要について述べ、次に、設計開発を行ったホローカソードプラズマを電子供給源にした電子ビーム源とその構造について述べた。続いて、電子供給源であるホローカソードプラズマの状態を調査する実験や、ホローカソードプラズマから電子ビームの形成を行う実験の内容や手順について述べ、その結果として、今回使用したグリッド電極では電子の引き出しと圧力差の発生を同時に達成することはできず、今回の方式では電子供給源であるプラズマ生成部と電子加速部との間に圧力差を発生させつつ、中真空の領域で電子ビームを形成することが困難であることを確認した。

第四章「マイクロホローカソードを用いた電子ビーム源の開発」では、マイクロホローカソード放電によって生成されたプラズマウィンドウを電子供給源に利用した電子ビーム源の設計開発、および、開発した電子ビーム源から電子ビームの形成を行う実験について記述した。まず、プラズマを利用して圧力差を発生させる技術であるプラズマウィンドウの概要について述べ、次に、設計開発を行ったプラズマウィンドウを電子供給源にした電子ビーム源とその構造について述べた。続いて、プラズマウィンドウ効果による圧力差の発生を調査する実験や、プラズマウィンドウから電子ビームの形成を行う実験の内容や手順について述べ、結果として、マイクロホローカソード放電で形成したプラズマウィンドウでも圧力差は発生することを明らかにし、その状態でプラズマウィンドウとして機能しているマイクロホローカソードプラズマから電子を引き出せることを確認した。

最終章の第五章「結言」では、論文の結論と、本研究の今後の展望について記述した。本論文では、プラズマウィンドウとして機能しているマイクロホローカソードプラズマを利用することによって、中真空空間でも利用できるプラズマを電子供給源とした電子ビーム源を開発することができた。以上のことから本研究において、中真空空間でも利用することができるプラズマを電子供給源として利用した電子ビーム源を開発することができた。