九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

誤差解析に基づいた線スペクトルと連続スペクトルによる熱プラズマの高精度な二次元温度分布計測

竹本，裕貴

https://hdl.handle.net/2324/7363779

出版情報：Kyushu University, 2024, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

（様式２）

氏　　名　：竹本　裕貴

論 文 名　：誤差解析に基づいた線スペクトルと連続スペクトルによる
熱プラズマの高精度な二次元温度分布計測

区　　分　：甲

論　文　内　容　の　要　旨

熱プラズマは高温，高エンタルピー，高化学活性，急冷効果といった特長を有しており，溶接，溶射，切断，廃棄物処理，ナノ粒子合成といったプロセスに応用されている．熱プラズマの温度はプラズマを特徴づける重要な物理量の一つであり，エネルギーなどの輸送現象にも影響を与える．プラズマからの発光を計測，解析することでプラズマの電子温度を算出する発光分光法がよく用いられている．従来では，波長分解能の高い分光器を用いて発光の計測が行われていた．しかし，測定対象が定常状態のプラズマにしか適用できないことから，近年では優れた時空間特性をもつ高速度カメラによる計測が注目されている．高速度カメラと特定波長のみを透過するバンドパスフィルタ光学系を組み合わせた計測手法がよく用いられており，この手法のほとんどが線スペクトルの発光のみに着目して温度の算出を行っている．高速度カメラによる計測は厳密にスペクトルを分離することができないため，線スペクトルのみに着目する手法では，連続光といった他の発光の影響で正確な温度が算出できない．本論文では，高速度カメラ観察において，より高精度な温度を算出するため，連続光を考慮した温度解析手法の確立を目的とした．安価で工業的利用が期待される N_2 と不活性ガスである Ar の混合気体の雰囲気の直流アークを対象に実験を行った．

第 1 章では，熱プラズマの温度計測手法について概説し，本論文の目的を示した．

第 2 章では，線スペクトルの強度比を連続光で補正した相対強度比法による温度測定について検討した．温度解析手法の誤差を定量的に評価することで，温度誤差に大きな影響を与える重要因子(以下エネルギーファクター)を見出し，エネルギーファクターの差が大きいほど温度誤差が小さくなることがわかった．連続光が主体となる温度域では，相対強度比の温度依存性が小さく，温度を可視化することが難しいことが理論的にも実験的にも確かめられた．測定時のノイズによる誤差については，直流アークの中心付近では 10%の温度誤差を有すると見積もられた．これはプラズマ画像を Abel 逆変換によって空間分解する際にノイズが大きく増幅されることによる．

第 3 章では，連続光と線スペクトルの強度比から温度を算出する手法について提案した．具体的には原子由来の線スペクトルの波長とイオン由来の線スペクトルの波長を組み合わせることで，低温域では原子由来の線スペクトルと連続光の組み合わせ，高温域では連続光とイオン由来の線スペクトルの組み合わせから温度を算出する．測定している両方の波長域において連続光が支配的となる温度がなく，相対強度比の温度依存性が大きくなるため，局所熱平衡仮定が成り立つと考えられる 10,000 K 以上の温度の測定が可能であり，第 2 章の温度測定手法よりも広い領域で温度が可視化される．第 3 章の温度計測手法の特長としてエネルギーファクターの差が非常に大きく，放射係数の計算精度による温度誤差は 5%未満と十分に小さいことが見積もられた．また，ノイズの影響を受けやすい Abel 逆変換に対して正則化を用いてノイズを軽減する手法についても検討した．放射分布を仮定したシミュレーションにおいて，ノイズの影響が平滑化によるノイズ除去よりも 1/10

以下にノイズを軽減できることを示した．実験による温度計測および理論的な誤差の評価を実施した．高速度カメラでの測定時に発生する光ショットノイズによる温度誤差は 1%未満であった．第 3 章で提案した温度計測手法は第 2 章で提案した温度計測手法よりも広い範囲で高精度に温度測定が可能であることが示された．

第 4 章では，第 2 章，第 3 章において，連続光を考慮するために必要であったデミキシングが無視できるという仮定について分光器を用いて検討した．Ar^+の線スペクトルによる Boltzmann plot 法を用いてデミキシングの影響を受けないアーク温度計測をおこなった．また，基底状態の数密度比と平衡組成の関係から Ar 濃度の定量をおこなった．50vol%Ar-50vol%N_2 雰囲気においては陰極直下 2 mm において Ar 濃度が 10wt%程度低下しており，第 3 章で提案した温度計測手法において 1%程度の温度誤差が生じることが推定された．また，第 3 章で測定された温度と第 4 章で測定された温度で比較すると，測定誤差の範囲で一致した．エネルギーファクターの差が大きい場合，デミキシングが無視できない条件でも高精度な温度測定が可能であることが示された．

第 5 章では，結論と将来の展望について示した．

本研究は,熱プラズマの温度場の高速度カメラを用いた高精度可視化の達成に関する論文である．本論文では，線スペクトルと連続光を理論的に考慮した温度解析手法を用い，温度解析手法の誤差の定量評価に基づく，誤差と密接に関係する重要因子であるエネルギーファクターを見出すことにより，高精度な 2 次元温度解析に成功している．特に 3 章で提案した線スペクトルと連続光の強度比を用いた温度計測手法では，エネルギーファクターの差が大きいことにより，広い領域の精密な温度を測定可能である．また，混合ガス雰囲気で重要となるデミキシングがある条件であっても高精度な温度計測が可能であることが示された．本研究は熱プラズマのより精密な 2 次元アーク温度計測手法を提供し，熱プラズマの現象の理解や熱プラズマのモニタリング技術の向上に貢献する．