

学位論文題名

輻射吸収光画像解析による火炎内発光原子数密度計測の研究

学位論文内容の要旨

近年の環境保全思想の高まりのなかで、廃棄物を燃やす際の有害物質発生を規制すると共に、発生しない燃焼処理法の重要性が高まっている。また省資源の立場から、高効率燃焼の必要性は依然として高い。地球環境とエネルギー確保の両面から、燃焼は今日世界的に最も注目を集めている研究対象の一つである。有害物質を出さずに高効率燃焼を実現するに当たっては、実際の場において火炎の構造や過渡的な振る舞いを解明することが重要な研究課題である。火炎の内部構造として、化学種や形態ごとに異なる密度あるいは濃度の分布を詳しく調べ、それに基づいて精緻に燃焼を制御する技術の構築が求められる。またアークガスや弱電離プラズマを利用してプラズマ CVD やプラズマエッチングによる新材料の生成や加工も盛んに行われているが、これらプラズマの構成物質ないし添加物質の原子・分子の数密度を高精度に測定することも重要な課題である。

従来から、燃焼炎やアークガスの温度、および構成原子・分子の数密度の光学的測定が行われてきている。これらの測定の方法の多くは被測定量の光路上の平均値を得るものであるが、レーザー誘起蛍光法やコヒーレント反ストークスラマン分光法のように直接局所値を測る方法もあり、また二次元的に観測する光強度画像から局所値分布を求める方法も知られている。しかし、これまでの積分情報から局所値情報を復元する(再構成する)方法においては、測定される光は発光もしくは吸収のどちらか片方のみの光過程によるとの仮定を置くことが多かった。また光学厚さの制約を受けることも多く見受けられた。例えば、Buuron, Otorbaev らは成長曲線法を基に水素-アルゴン混合アークプラズマ中の励起アルゴン原子の数密度分布を求めているが、その際プラズマから放射される光は補正量として取り込んでいる。また彼らは同プラズマ中の励起水素原子に対し、光学的に薄い仮定を置くことで吸収スペクトル形状の仮定を逃れ、吸収効果を線型近似で扱い数密度分布を求めている。しかし金属原子の線スペクトルの場合に見られるように、吸収が大きいものほど発光も大きくなり、片方のみを仮定して取り扱うことは測定精度を悪くするか或いは測定可能な対象を限定することにつながる。このことは特に、光学的に厚い対象を測定する場合に困難が生じる。したがって火炎のように金属原子を含み、発光と吸収の両者が共存する対象の測定には、両方の光過程を取り込める新しい計測方法の開発が必要と考えられる。

本研究は、高効率燃焼に必要なと考えられる火炎中の特定物質の数密度を詳細かつ簡便に計測する方法を構築することを目的とし、特定すべき対象例として火炎中に添加されたカリウムを考え、観測光の強度分布情報から火炎内カリウム原子数密度分布を再構成する新たな方法を、発光と吸収の両方の光過程を取り込んだ輻射輸送方程式を基礎式として、逆問題的アプローチにより与えたものである。観測量は、光路積分されると同時に帯域通過フィルターにより特定の周波数範囲の光に制限されて検出系に至る光束であり、二次元検出器によって画像データとして記録する。時系列画像の時間平均像から火炎内の各点において周波数積分された吸収係数をアーベル変換により再構成し基底状態にあるカリウム原子の数密度分布を求めた。この方法の有効性をファントムデータを用いるモデル分布の再構成結果から検証する一方、実際に、帯域制限フィルタにより周波数積分され

た輻射・吸収光強度をビデオカメラにより取り込む実験を行ない、得られる画像データから火炎中のカリウム原子数密度の再構成を行ない従来法による結果と比較した。また、本測定法の有効性、適用範囲、精度について検討し、さらに誤差要因について精査・検討している。本研究から提案される手法が火炎に有効ならば、プラズマプロセス用の低温弱电離プラズマや高速大熱容量の熱プラズマへの発展的適用も可能と考えられる。

本論文は、結論を含めて全6章から構成されている。その概略は以下の通りである。

第1章は序論であり、燃焼炎およびプロセスプラズマ等の計測診断技術の現状と輻射光または吸収光を利用する過去の研究を概説すると共に、本論文の目的及び構成を述べている。

第2章では、本研究の理論的・実験的背景を述べており、原子の放射過程及び衝突過程に関する分光学的理論が既存の燃焼炎測定法、特に測定対象からの放射と吸収を共に考慮した透過吸収法と関連づけて記したほか、逆問題の数学的基礎および局所量再構成手法に必要な数学的理論を与えている。

第3章では、周波数積分された吸収係数と原子数密度の関係と観測対象及び観測系の配位と観測量についての記述の後、本研究で新たに取り入れた逆問題的アプローチと再構成の方法についての理論を述べている。また、積分吸収係数の光路積分の誤差についての理論的検討を行なっている。さらに本研究から提案される手法と既存の測定手法との間の相違点、特に Buuron 等の方法との異同を明らかにしている。

第4章では、数値モデル分布を用いた本研究の手法の検証を行なっている。すなわち、数値モデルで模擬的に与えた火炎からの観測ファントムデータを用いてモデル分布の再構成を行なうことにより、本測定法の適用範囲及び再構成誤差をもたらす諸要因について検討している。

第5章では、本研究で提案する測定法の有効性を確認するために行なった火炎内カリウム数密度の測定実験および解析結果をまとめている。すなわち、燃焼炎の生成とカリウムのシーディングを含む測定条件、測定体系、燃焼炎の定常性と対称性、火炎中の散乱体の効果、実測データからの再構成及び再構成誤差について詳細な考察をしている。

第6章は結論であり、本研究で新しく得られた結果と知見を総括している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 粥 川 尚 之

副 査 教 授 榎 戸 武 揚

副 査 教 授 板 垣 正 文

学 位 論 文 題 名

輻射吸収光画像解析による火炎内発光原子数密度計測の研究

燃焼火炎中に金属原子が存在し強い発光を伴う状況は、不純物として金属原子を含む各種液体燃料、固体燃料の燃焼場の他に火炎の温度計測のトレーサーとしての添加、あるいはMHD直接発電や電磁推進の動作気体である電気伝導性の燃焼プラズマ生成において観察される。それらは一般に環境への放出は望ましくないことが多く、火炎の放射熱損失に占める割合も無視できないことがしばしばである。したがって環境保全、高効率燃焼、直接発電・推進等の分野で火炎中の金属原子数密度を定量的に計測できる簡便な方法の必要性は高い。

従来から、燃焼炎やアークプラズマの温度、および原子・分子数密度の光学的測定が行われてきている。これらの測定方法の多くは測定量の光路上の平均値を得るものであるが、レーザー誘起蛍光法(LIF)やコヒーレント反ストークスラマン分光法(CARS)のように直接局所値を測る方法もあり、また二次元的に観測する光強度画像から局所値の分布を求める方法も知られている。しかし、LIF や CARS は大掛かりな装置を必要としさらに二次元情報を得るのは容易でない。また積分情報から局所値情報を復元する(再構成する)在来の方法では、測定される光は発光もしくは吸収のどちらか片方のみの光過程によるとの仮定を置くことが多い。また光学的に厚い対象への適用には困難があった。たとえば、水素・アルゴンアークプラズマ中の励起アルゴン原子の数密度分布を求めた Buuron, Otorbaev らの方法はプラズマからの放射を補正量として取り込み、さらに励起水素原子密度はプラズマが光学的に薄いとして吸収効果を線型近似で扱っている。しかし金属原子の線スペクトルは通常吸収が大きいほど発光も大きく片方のみを仮定して取り扱うことは測定精度を悪くするか或いは測定可能な対象を限定することになる。このことは特に、光学的に厚い測定対象で困難を生じる。したがって火炎中の金属原子の計測では発光と吸光の両者を考慮することが必要である。さらに火炎中の金属原子は多種多様な原子・分子と衝突する結果、スペクトル形状が理論プロファイルからずれる性質がある。このためプロファイルを既知として特定波長の光学厚さと光路長から原子密度を求めることはできず、周波数積分された光強度情報に基づく新しい計測法の開発が必要である。

以上の背景を踏まえ本研究は、発光と吸収の両者の周波数積分光強度を同時に考慮して火炎中の金属物質の数密度を詳細かつ簡便に計測する新しい方法を研究したものである。すなわち、発光と吸収の両過程を取り込んだ輻射輸送方程式を基礎式として、計測対象として火炎中に添加されたカリウムを考え、CCD 光学素子に記録された光強度分布情報を逆問題の手法により解析し局所カリウム原子数密度分布を再構成する方法を与えたものである。観測量は光路上で空間積分されると同時に帯域通過フィルターによりスペクトル線を含む特定の周波数範囲の光に制限されて検出系に至る光強度情報であり、二次元検出器により画像データとして記録される。この時系列画像データの時間平均値から火炎内の各点において周波数積分された吸収係数をアーベル変換により再構成し基底状態にあるカリウム原子の数密度分布を求めている。著者は、提案する方法の有効性を二通りの方法で検証している。一つは数値ファントムデータを用いた検証であり、もう一つは実際のカリウム添加火炎の輻射・吸収光強度を CCD ビデオカメラで撮像した画像データから局所カリウム原子数密度を再構成し先に述べた従来法との比較検討を行うと共に、本測定法の有効性、適用範囲、精度、誤差要因について精査・検討し、結論として、(1)観測光路上の平均値で比較する限り従来法と同程度の精度が得られること、したがって局所値を得ることができる点で本方法が優れていること、(2)同程度の精度で計測密度範囲を在来法より約二桁高めることができること、を示している。

本研究では測定対象原子としてカリウム原子を選んでいるが、著者が提案した手法は対象原子に特別な制限はない。また対象を特に火炎に限定するものでもなく、原理的に低温弱电離プラズマや大熱容量の熱プラズマへの適用も可能と考えられる。

これを要するに、著者は、高温燃焼場や低温プラズマに含まれる金属原子の輻射、吸収光の画像情報から局所発光原子数密度分布を実用に供し得る精度で計測する簡便な手法を提案したものであり、エネルギー変換工学上貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。