

氏 名	相 馬 憲 一
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 4 年 3 月 18 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 56 年 3 月 東北大学大学院工学研究科材料化学専攻 前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	発光画像分光法の開発と火炎計測への応用
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 斎藤正三郎 東北大学教授 松本 繁 東北大学教授 三浦 隆利

論 文 内 容 要 旨

研究の背景

燃焼は発光と発熱を伴う化学反応で人類にとって身近な現象であり、エネルギー源として利用してきた現象である。従って、古くから科学的あるいは工業的に多くの研究がなされてきた。

そして近年、地球温暖化という新たな問題が生じている。これは、燃焼装置からの大気汚染物質抑制問題に留まらず、燃焼技術に対する考え方を地球規模にまで拡大させた。地球温暖化の原因物質の 1 つと言われている二酸化炭素抑制のために 1) 高効率燃焼, 2) 省エネルギー対策, および 3) 二酸化炭素固定化に向けて様々な研究が行われるようになった。発電所や工場等における燃焼排ガスの固定発生源に対しては、ある程度の対策が可能である。このような固定発生源であるエネルギー産業からの大気汚染物質排出量と同レベル、あるいはそれ以上の公害源となりつつあるのが、輸送手段である自動車、トラック、バスなどの不特定多数の移動発生源である。これらについては、排気ガス処理触媒があるのみで十分な対策はとられていない。今後 LEV (Low Emission Vehicle ; 低公害車) 規制などの施行により、更なる排気ガス対策が必要になる。

目 的

以上の背景に基づき、今後は環境汚染物質除去技術の開発と同時に、高効率燃焼を実現する技術、環境対策に優れた火炎形成技術等に関する燃焼研究が重要である。ここでは、上記課題にアプローチするため火炎の計測法について検討し、燃焼火炎の特徴を明らかにする。

種々の火炎計測法が開発されているが、いずれの方法にも長所や短所がある。例えば、発光分析や LIF (Laser Induced Fluorescence) では、不安定成分の情報は得られるが、安定成分の情報は CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy) 法の方が適する。また、発光スペクトルの情報からラジカル等の濃度を定量化するには、計算に必要な多くの物理量や仮定を用いることになり、容易ではない。レーザを用いる計測では、空間分解能や測定精度は高いが、レーザの発振を安定に保つ必要があり、また、光学系も複雑である。従って、複数の方法を一つの火炎の計測に適用し、燃焼過程を多方面から評価することが不可欠である。今後は、従来の火炎計測法を発展的に駆使すると共に、更に必要に応じた新たな計測手法を開発することが要求される。

本研究では、火炎の発光分析により火炎中ラジカルの生成過程を推定すると共に、火炎を発光画像として分光分析する 2 次元発光分析法を提案することを目的とした。また、レーザ分光法のうち非線形ラマン分光である CARS 法を火炎計測に適用し、発光分析のみでは得難い安定成分濃度や温度を測定して、火炎の特徴をより明確にすることを目的とする。更に、発光分析の工学的応用の 1 つとして、ラジカルの発光強度比から火炎の空気過剰率を、固体輻射光強度比から火炎温度を高速で測定する方法を検討し、ガソリンエンジン用燃料インジェクタの性能評価とエンジンノッキング発生時の燃焼火炎の特徴を火炎計測の面から明らかにすることを目的とする。

内 容

第 1 章では本研究の背景、火炎研究の概要、目的、意義及び構成を述べた。

第 2 章では火炎の発光の概念等の従来の知見をまとめると共に、減圧下に形成したプロパン/空気予混合火炎の発光分析を行い、火炎中のラジカルを検出、特定した。更にそれらラジカル分布の測定結果からラジカルの生成過程を推定して、火炎の特徴を明らかにした。

火炎中に存在するラジカルや活性分子の分布を検出することは、燃焼反応や火炎構造を解明する上で重要である。そこで第 3 章では、任意の発光体から必要な波長の光のみを画像として連続的に検出できる画像分光方法を提案し、試作した。試作装置では、回折格子 1 枚を分光と光混合の 2 つの目的に利用して、画像分光を可能にした。また、対物レンズ系を前後に移動する方法による自動色収差補正機構、および分光スペクトル測定光学系を備え付加価値を高めた。ここで試作した装置の性能は、水銀灯による測定の結果、波長分解能は 0.4nm、測定波長域は 200nm~700nm であり、試験画像による測定の結果、空間分解能は 1mm 以下、測定領域は 50mm×50mm である。この装置を用いて、第 2 章において測定対象としたプロパン/空気予混合火炎の他に、保炎安定化されたメタン/空気予混合火炎中ラジカル分布の具体的測定例を示し、装置の有効性と共に火炎の特徴を明らかにした。この火炎は、高効率燃焼、環境対策に優れたガスボイラやガスタービン燃焼器に適用が検討されている。

第 4 章では、第 2 章と第 3 章で明らかにした火炎の特徴を、レーザ分光の 1 つである CARS 法により、火炎中の気体分子濃度や温度分布の面から更に明らかにした。特に、保炎器により保炎安定化されたメタン/空気予混合火炎の保炎機構と低 NO_x 機構について考察した。予め燃料と空気を混合して燃焼させる予混合燃焼法は、短炎化が可能である。また、火炎内のいずれの場所におい

ても設定値に近い空気過剰率となるため、火炎全体として希薄予混合火炎（例えば空気過剰率 1.3 以上）とすれば、火炎温度が最も上昇する 1.1 付近の火炎を形成する所はなくなり、低 NO_x 燃焼が実現できる。しかし、火炎を安定に形成するための空気過剰率や噴出速度の条件は、拡散火炎の場合よりも狭い。そこで、高負荷化及び低 NO_x 化を達成するには、火炎の安定形成に優れた予混合燃焼技術の確立が必要である。そのための基礎知見を得る目的で、分光学的手法により非接触で火炎の特徴を明らかにしたものである。第 3 章で提案した方法を用いたラジカル分布の計測結果や CARS 法による温度分布の測定結果から、保安器保安メタン/空気予混合火炎では、予混合気体噴流の内側に高温の燃焼気体が存在し、この熱エネルギーによりメタン/空気予混合気体噴流中の未燃気体が着火され、火炎が保持安定化される。また、予混合気体噴流の外側に低温の燃焼気体が存在し、それらがメタン/空気予混合気体と混合してメタンや空気の分圧が下がり、従って火炎温度が下がることで NO_x の発生が抑制される。以上のことを明らかにした。

自動車用エンジンの高出力、高性能化と共に低公害を図るには、失火やノッキングを抑制し、燃焼性を高める高度な燃焼技術が要求される。これには新たな計測技術の開発も重要である。エンジン内の燃焼は、空気過剰率、火炎温度、圧力等の因子に影響され、これらについて、古くから数多くの計測が行われている。エンジン内火炎の空気過剰率や温度は、エンジンの性能や窒素酸化物、炭火水素等の排出ガス組成にも大きく影響する。エンジンの 1 燃焼行程は十数ミリ秒なので、その燃焼火炎を評価するためには高速の計測技術が必要であり、第 5 章では、エンジン内火炎の発光を利用した空気過剰率、温度計測について検討した。CH、 C_2 ラジカルの発光強度比から、シリンダ内の空気過剰率を測定できる。また、火炎内粒子（すす）からの発光の中で、波長 502nm と 797nm の発光を利用してガソリンエンジン筒内の温度が測定できる。これらの方法をガソリンエンジン内火炎計測に適用し、火炎の空気過剰率を測定することで燃料インジェクタの性能評価を行った。また、火炎温度の経時変化とその出現頻度の分析を行いエンジンノッキング発生時の火炎の特徴を明らかにした。エンジン内の燃焼は噴霧粒径の影響を受け、粒径が小さいと燃料と空気の混合が良く、1 燃焼行程中の空気過剰率の分散が小さく、公害の原因物質の 1 つである炭化水素を含む未燃ガスの排出も抑制される。ノッキング発生直前の火炎温度は正常時と等しいが、発生後は急激に低下し、平均温度は正常燃焼時より低い。また、正常時には火炎の平均温度付近の温度が多く出現するが、ノッキング発生時には高温から低温まで広い範囲にわたって出現し、低温部と高温部に温度が集中する。以上のことを明らかにした。

第 6 章は、本研究の総括である。

まとめ

本研究により開発した 2 次元発光画像分光法は、ラジカル分布の非接触計測を容易にし、工学的に重要である燃焼の研究あるいは発光を伴う放電現象やプラズマ現象の解明に、画期的な方法になると思われる。また、本研究により予混合火炎中ラジカルの生成過程や、保安器保安予混合火炎の保安及び低 NO_x 化の機構が明らかにでき、予混合火炎をガスボイラやガスタービン燃焼器に応用する際の基礎知見を与える。発光分析によるエンジン内火炎計測により、エンジン部品や内燃機関

の開発に寄与でき低公害車の実現に貢献できる。すなわち、燃焼を利用するエネルギー機関や装置等に対して、今後更に厳しくなると予想される高効率化や環境対策のための基礎研究の促進に貢献できる。

また、燃焼現象の解析と予測を可能とする本研究の成果は、燃焼現象を支配する諸因子相互間の関係を解析的に把握することが出来るので、それらの因子を使って燃焼を制御する可能性をもたらす。実用的な燃焼器における燃焼に関する諸現象は極めて複雑であり、これらの諸現象を実際の状態で把握することは、非常に難しかった。これら、複雑な実用燃焼系でなされた実験、計測に裏付けられたデータをもとに、合理的な数学モデルを確立し、燃焼の診断と予測を可能にできる。

審査結果の要旨

燃焼は発光と発熱を伴う化学反応であり、古くから多くの研究がなされてきた。本論文は分光学的に、特に火炎発光を利用して火炎の特徴を明らかにすることを目的として、ラジカルの発光画像分光法を提案し、その有効性を実験により確認した。更に、発光分析のみでは得難い物理情報を得るために、レーザ分光を加え、工業的に応用が期待される保炎器による予混合火炎の保炎機構、低 NO_x 機構を明らかにした。また、発光分析をエンジン内火炎計測に適用して、空気過剰率及び温度を測定することで燃料噴射弁性能や異常燃料時の特徴を明らかにした。

本論文は、全6章よりなる。

第1章は緒論であり、本論文の背景、火炎研究の概要、目的、意義及び構成を述べ、本論文の立場を明確にしている。

第2章では火炎の発光の概念等の従来の知見をまとめると共に、減圧下に形成したプロパン／空気予混合火炎の発光分析を行い、火炎内のラジカル分布の測定結果からラジカルの生成過程を推定して、火炎の特徴を明らかにしている。

第3章では火炎中ラジカルの発光強度分布を画像として測定できる画像分光方法を提案し、予混合火炎中ラジカル発光強度分布の具体的測定例として、第2章において測定対象としたプロパン／空気予混合火炎中のラジカル分布の他に、高効率燃焼、環境対策に優れたガスボイラやガスタービン燃焼器への適用を目的とした保炎安定化されたメタン／空気予混合火炎中ラジカル分布の測定例を示し、提案方法の有効性を明確にしている。

第4章では、レーザ分光の1つであるCARS法により、第2章と第3章で明らかにされた火炎の特徴を、火炎中の気体分子濃度や温度分布の面から更に明らかにした。特に、保炎安定化されたメタン／空気予混合火炎の保炎機構と低 NO_x 機構について明確にしている。

第5章では火炎の発光分析をガソリンエンジン内火炎計測に適用し、火炎の空気過剰率を測定することで燃料インジェクタの性能評価を行えること、また火炎温度の経時変化とその出現頻度分析を行い、エンジンノッキング等の異常燃焼時の火炎を明らかにできることを実証している。

第6章は、本研究の総括である。

以上、本論文は、従来とはまったく異なる発光画像分光法を提案し、火炎の特徴を明らかにする方法や、発光分析の工業的応用としてエンジン内火炎の空気過剰率、温度を測定することにより燃焼を評価する方法を明らかにし、燃焼を利用するエネルギー機関や装置等に対して、今後更に厳しくなると予想される高効率化や環境対策のための基礎工学研究の促進に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。