

博士（工 学）立 田 節 雄

学 位 論 文 題 名

火炎色の定量的表現に関する基礎研究

学位論文内容の要旨

発光と発熱を伴う急激な酸化反応を燃焼と定義しているように、火炎の可視発光は燃焼を特徴付ける重要な要素の一つである。火炎の目視観察によって得られる視覚情報は、火炎の内部で起こっている現象を理解したり、燃焼状態を把握するうえで貴重な指標となっている。例えば、民生用ガス器具では火炎の色によって混合気の当量比をおおまかに知ることが可能であり、輝炎が形成されるボイラなどの大型燃焼装置においても、火炎の色や明るさから燃焼状態が推測されている。

炭化水素火炎の可視発光スペクトルは、主として、CHラジカルやC<sub>2</sub>ラジカルのバンドスペクトル、CO分子とO原子の再結合反応によって生じる連続スペクトル、すす粒子の熱発光による連続スペクトルで構成されている。これらの発光成分の相対強度は、燃料の種類、燃料と酸化剤の混合状態、燃焼反応過程などの違いによって変化し、それに伴って火炎色が変化する。すなわち、火炎色には燃焼反応や燃焼生成物に関する様々な情報が総括的に含まれている。しかし、火炎色を視覚に基づいて記述した研究は数多くあるものの、火炎色そのものを対象とした研究はこれまで殆ど行われていない。その理由は、(1)火炎色は火炎から放射された可視光によって生じる感覚であり、火炎色の認識には個人差がある、(2)火炎色と燃焼状態の関係が定量的に明らかにされていないためと考えられる。

人間の感覚を対象とする心理物理学のなかでも、色を定量的に表現する測色学は古くから確立されている。また、カラーセンサや色彩計を用いた色計測技術が急速に進歩しており、カラーCCDカメラによって得られるカラー画像から、RGB信号あるいはNTSC信号として色情報を得ることも比較的容易である。したがって、上記(2)を解決すれば、火炎色によって燃焼状態を評価できる可能性がある。その場合、既存の色計測装置をそのまま用いることが可能であり、これまでに蓄積された火炎色に関する経験的な知識を活用できると予想される。

本研究は火炎色という心理物理量に着目して燃焼現象を新たな観点から把握しようとするものであり、(1)火炎色に関するデータベースの構築、(2)火炎色の決定要因の解明、(3)火炎色の工学的な応用方法の確立を目的としている。本研究では、CIE(国際照明委員会)が定めた標準表色系の一つで、工業的に用いられることが多いXYZ表色系色度座標を導入することにより、円管バーナ上に形成される層流火炎の火炎色を定量的に表現し、燃焼形態、燃焼条件、燃料の種類などによる火炎色の違いを明確にした。また、可視域の発光スペクトルから火炎色を決定している発光成分を明らかにし、火炎色に対するそれらの寄与を色彩学的な手法で評価した。さらに、火炎色によって予混合火炎の当量比を非接触計測する方法を提案し、測定精度、測定上の問題点、燃焼機器制御への適用性について検討した。

本論文は 8 章より構成されている。

第 1 章では、火炎の可視発光およびその工学的応用に関する従来の研究動向について記述し、本研究の意義、目的および得られた成果の概要について述べている。

第 2 章では、XYZ 表色系色度座標 ( $x$ ,  $y$ ) を定義し、色度座標を測定するさいに採用した刺激値直読方法と分光測色方法、および  $x$   $y$  色度図を用いた火炎色の定量的な表現方法について説明した。

第 3 章では、15種類の燃料について、予混合火炎の火炎色を定量化した。その結果、大部分の炭化水素火炎では当量比による火炎色の違いを  $y$  で精度良く表すことが可能であり、 $x$  と  $y$  の間には相関関係が認められた。また、可視域の発光スペクトルを CH ラジカルと C<sub>2</sub> ラジカルのバンドスペクトルおよび CO 分子と O 原子の再結合反応による連続スペクトルに分け、加法混色の考え方に基づいて、各発光成分の火炎色に対する寄与を評価した。火炎色の変化は発光成分の刺激和の相対値が当量比によって変化することに起因しており、燃料希薄火炎の火炎色が青紫となるのは、CH ラジカルのバンドスペクトルよりも連続スペクトルの影響が大きいことを明らかにした。

第 4 章では、燃焼条件や燃料の種類による拡散火炎の火炎色の違いを検討した。拡散火炎の色度座標は、燃料流量および周囲空気流速によらず、 $x$   $y$  色度図上において一本の曲線で表すことが可能であった。このような  $x$  と  $y$  の関係をメタン、プロパンおよびエチレン火炎について実験式で整理した。また、可視域の発光スペクトルより、拡散火炎から放射される可視光は化学発光とすす粒子の熱発光が加法混色したものであり、両者の相対強度によって火炎色の分布が生じていることを見出した。さらに、火炎色に対する両者の寄与を理論的に解析するため、火炎の構造と発光現象を単純化した発光モデルを用いて、光路上のすす粒子数の指標である吸収強度や火炎温度などの影響を定性的に明らかにした。

第 5 章では、部分予混合火炎の火炎色を定量化し、予混合火炎および拡散火炎の場合と比較した。部分予混合火炎の青炎領域では、火炎の外周部に形成される再結合領域からの青白色の発光が火炎色に対して強く影響していることを指摘した。さらに、一酸化炭素火炎の火炎色は燃焼形態によらず同一であり、色度座標の値は (0.218~0.224, 0.216~0.222) であることを明らかにした。

第 6 章では、第 3 章で得られた予混合火炎の火炎色に関する知見をもとに、火炎色による当量比の非接触計測方法を提案し、測定精度と測定上の問題点について検討を加えた。この計測方法では、色度座標で数値化した火炎色と当量比の関係を予め較正しておき、対象とする火炎で測定した色度座標から当量比を推定する。炭化水素および石油系燃料の予混合火炎では、当量比が約 0.8 から 1.4 の範囲において、当量比を  $\pm 0.02$  以上という極めて高い精度で測定することが可能であった。また、バーナー直徑、混合気流速、混合気温度、湿度などの燃焼条件は測定精度に殆ど影響しないことを示した。

第 7 章では、第 6 章で述べた火炎色による当量比計測を、予混合型燃焼機器の当量比制御に応用することの適用性を検討した。その結果、排ガス再循環方式を採用している燃焼機器では当量比の検出精度が低下するが、しづく状層流火炎が形成される高負荷燃焼機器においても高精度で当量比を制御できることを明らかにした。また、背景光がある場合の色度座標の補正方法について説明し、その妥当性を標準の光を用いて検証した。さらに、炭化水素火炎における  $x$  と  $y$  の相関関係を参照して、対象とする火炎が火炎色によって当量比を制御可能な火炎であるか否かを判定できることを示した。

第 8 章は結論であり、本研究で得られた成果を総括し、今後に残された課題について述べている。

# 学位論文審査の要旨

主査教授 伊藤 献一  
副査教授 菱沼 孝夫  
副査教授 宮本 登  
副査教授 酒井 洋輔

## 学位論文題名

### 火炎色の定量的表現に関する基礎研究

火炎から放射される可視光の発光スペクトルは、主として、各種ラジカルのバンドスペクトル、CO分子とO原子の再結合反応によって生じる連続スペクトル、すす粒子の熱発光による連続スペクトルで構成されている。これらの発光成分の相対強度は、燃料の種類、燃料と酸化剤の混合状態、燃焼反応過程などの違いによって変化し、それに伴って火炎色が変化する。したがって、火炎色には燃焼反応や燃焼生成物に関する様々な情報が総括的に含まれていることになる。しかし、火炎色を工学的に利用しようとする試みはこれまで殆ど行われていない。その理由は、火炎色は火炎から放射された可視光によって生じる感覚であり、火炎色の認識には個人差があること、および火炎色と燃焼状態の関係が定量的に明らかにされていないためと考えられる。

本研究は、火炎色の決定要因の解明、火炎色の工学的な応用方法の確立を目的としたもので、層流火炎の燃焼形態、燃焼条件、燃料の種類などによる火炎色の違いを明確にするため、火炎色をXYZ表色系色度座標(x, y)で定量的に表現し、また、可視域の発光スペクトルから火炎色を決定している発光成分を明らかにし、火炎色に対するそれらの寄与を色彩学的な手法で評価している。さらに、火炎色によって予混合火炎の当量比を非接触計測する方法を提案し、測定精度、測定上の問題点、燃焼機器制御への適用性について論じたものである。本研究の主な成果は以下のように要約される。

炭化水素の予混合火炎では、当量比による火炎色の違いをy座標で精度良く表すことが可能であり、x座標とy座標の間には相関関係が認められることをまず明らかにしている。予混合火炎の可視発光スペ

クトルをCHラジカルとC<sub>2</sub>ラジカルのバンドスペクトルおよびCO分子とO原子の再結合反応による連続スペクトルに分け、加法混色の考え方に基づいて、各発光成分の火炎色に対する寄与を評価した。当量比による予混合火炎の火炎色の変化は、発光成分の刺激和の相対値の変化に起因することが見出された。

拡散火炎に関しては、可視発光は化学発光とすす粒子の熱発光が加法混色したものであり、両者の相対強度によって拡散火炎の色分布が生じていることを見出している。火炎の構造と発光現象を単純化した発光モデルを用いて、光路上のすす粒子数の指標である吸収強度や火炎温度などが拡散火炎の火炎色に及ぼす影響を理論的に明らかにしている。

さらに、火炎色に着目して予混合火炎の当量比を測定する場合、炭化水素および石油系燃料では、当量比が約0.8から1.4の範囲において、当量比を±0.02以上という極めて高い精度で測定可能であること、また、バーナ直径、混合気流速、混合気温度、湿度などの燃焼条件は、測定精度に殆ど影響しないことが示された。火炎色による当量比計測の応用方法として、予混合形燃焼機器において、混合気の当量比をフィードバック制御できる可能性のあることが明らかにしている。

これを要するに、著者は、燃料の燃焼火炎色を色彩学的な観点から数量化し、燃焼状態との関連性を明らかにし、心理物理量を燃焼の制御に応用できる可能性に関して多くの知見を得たものである。

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。