

博士(工学) 城戸 章宏

学位論文題名

霧囲気 LIF 法による間欠ガス噴流の
画像計測と特性解明に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、各種燃焼機器からの排出ガス、あるいはそれに起因する環境問題に対して社会的関心が極めて高くなっています。例えばエンジン等においても混合気形成ならびに燃焼過程の解明が更に強く求められています。

本論文は、特に間欠ガス噴流の混合過程を定量的に解明することを目的として、レーザ誘起蛍光法をベースとする噴流濃度・温度同時定量計測手法、すなわち霧囲気 LIF 法を開発し、更にこの手法の適用によって間欠ガス噴流の混合推移特性、特にそれと各種噴射条件、霧囲気ガス温度、および噴流衝突壁面温度との関連について論述したものであり、全 8 章から構成されています。

第 1 章は序論であり、本研究の目的および得られた結果の概要について述べると共に、研究の背景、ならびに間欠噴流の濃度・温度計測法および噴流特性に関する研究動向について記述した。

第 2 章では、本研究の供試蛍光物質であるヨウ素の蛍光特性解明のための装置、噴流の噴射系と観測容器、濃度・温度画像計測光学系、および画像処理装置等について記述した。また、実験に用いた噴流の流速計測法、ならびに温度計測法についても触れた。

第 3 章においては、本研究で開発した霧囲気 LIF 法による噴流濃度・温度の画像計測理論について論述した。本手法による噴流濃度計測では濃度を蛍光物質の蛍光強度から解析的に決定し得るため、濃度の絶対校正が不要になること、温度計測については、蛍光物質の発光特性に対する波長および温度依存性を応用することによって、温度の瞬時画像計測が可能となること等に対して理論背景を提示した。

第 4 章では、供試蛍光物質であるヨウ素の吸光係数および量子収率について記述した。ヨウ素は可視域に吸光バンドを有しており、かつモル吸光係数が常温でおよそ $180\text{m}^2/\text{mol}$ と非常に高く、また発光強度も高いため LIF 計測に適合している。ヨウ素の吸光係数は、 525nm 付近で最大値となる波長特性を示すこと、温度の上昇あるいは圧力の減少に伴って全般に減少する特性を示すものの、 580nm よりも長波長では温度によってほとんど変化しないこと、また共存ガス

の種類にはほとんど依存しないこと等を示した。

一方、ヨウ素の量子収率は温度、圧力、共存ガス、および蛍光波長の関数として与えられ、理論的にはAINシュタインのA定数、クエンチングQ、および無輻射速度定数 k_{nr} に支配されるが、なかでも支配的因素はクエンチング、すなわち励起ヨウ素分子への共存分子の衝突による失活であって、共存分子の巨化に伴って低下することを明らかにした。従って、共存ガスがヘリウムの場合における量子収率は極めて大きくなるが、その反面ヨウ素濃度増加に伴う消光現象、すなわち濃度消光が顕著となることを示した。

量子収率の温度特性に関して、特にアルゴン雰囲気における特定の2波長での量子収率比には温度依存性が存在することを見出した。すなわち、雰囲気LIF法において特にアルゴンガスを雰囲気とした場合、2つの異なる波長での蛍光画像強度比から温度の画像計測が可能となることを示唆した。

第5章においては、雰囲気LIF法を噴流濃度計測に適用する際の実験条件の設定方法、ならびに各種計測精度について論述した。すなわち本研究で使用した雰囲気蛍光法では、観測容器内で蛍光が減衰するため、供試観測容器のサイズおよび蛍光物質の吸光係数に応じた蛍光物質濃度を特定することによって濃度計測の精度向上が可能になること、またその特定によって本手法による蛍光強度の計測精度は95%以上になること等を示した。

一方、雰囲気LIF法による温度計測では、蛍光観測レンズ系の集光効率を位置毎に補正することが計測精度上非常に重要なことを明らかにすると共に、この補正による温度計測の妥当性をも示した。

また、雰囲気LIF法による質量噴流濃度の計測においても、温度計測の場合と同様に、集光効率の補正が必要不可欠であること。また噴流濃度の計測精度は、希薄域で悪化するものの、蛍光物質濃度および温度の計測精度の向上によって改善し得ること等を示した。

第6章では、雰囲気LIF画像から得られた噴流中心軸断面での噴流濃度分布を基に解析される、間欠噴流の形状および濃度場の推移特性について論述した。間欠ガス噴流の構造はその先端部分が傘状に半径方向に拡がること、雰囲気ガスの取り込みは傘状構造の上流側で著しくなること等を示した。

噴流中心軸上における噴流濃度のスペクトル解析から、噴流の混合は、波数の大きな濃度成分のパワースペクトルの増加、つまり小規模渦の増加によって顕著となることを明らかにした。

更に、各種噴射条件および噴射ノズルの設計諸元と噴流濃度との相関について、噴流全体を平均した濃度、すなわち平均噴流濃度は、噴射ガスおよび雰囲気ガスの密度 ρ_j および ρ_a 、噴孔径D、噴流の動粘性係数および渦動粘性係数 ν および v_t 、噴射後の経過時間 Δt から構成されるパラメータ、つまり $(\rho_j/\rho_a)(\Delta^2/((\nu+v_t)\Delta t))$ によって一義的に記述し得ること、またこのパラメータの減少に伴って平均噴流濃度は単調に減少すること等を提示した。

第7章においては、霧囲気LIF法による噴流温度・濃度同時計測手法を用いて間欠自由噴流および壁面衝突噴流の特性を解明した結果について論述した。まず、本研究で用いた手法によって噴流の温度・濃度の同時計測が可能であることを実証すると同時に、噴流内部では温度と濃度とは単純な相関関係にあること、すなわち単純な物質のエンタルピー混合によって温度場が概ね決定されること等を示した。

一方、壁面衝突噴流においては、自由噴流に比べて壁面衝突噴流での霧囲気巻き込みが著しいこと、衝突壁面の温度によって壁面衝突後の噴流の混合過程が著しく影響を受け、特に壁面上の噴流先端部では壁面温度が高いほど混合が促進されること等を明らかにした。

第8章は本研究の結論であって、得られた結果を総括した。

学位論文審査の要旨

主査教授 宮本 登
副査教授 木谷 勝
副査教授 伊藤 純一
副査教授 山崎 巍

学位論文題名

霧囲気 LIF 法による間欠ガス噴流の 画像計測と特性解明に関する研究

近年、各種燃焼機器においては排出ガス、およびそれに起因する環境問題に對して社会的関心が極めて高くなっています。燃料の混合気形成ならびに燃焼過程の解明が強く求められています。

本論文では、特に間欠ガス噴流の混合過程を定量的に解明することを目的として、レーザ誘起蛍光法（LIF 法）をベースとする噴流濃度・温度同時定量計測手法、すなわち霧囲気 LIF 法を提案すると共に、この手法の適用によって間欠ガス噴流の混合推移特性を解明した結果について取りまとめている。

第 1 章は序論であり、本研究の目的および得られた結果の概要について述べると共に、研究の背景、ならびに間欠噴流の濃度・温度計測法および噴流特性に関する研究動向についても記述している。

第 2 章では、本研究の供試蛍光物質であるヨウ素の蛍光特性を解明するための装置、噴流の噴射系と観測容器、濃度・温度画像計測光学系、および画像処理装置等について記述している。

第 3 章においては、間欠ガス噴流における濃度および温度を瞬時画像計測するための霧囲気 LIF 法に対する理論背景について論述している。すなわち、霧囲気内蛍光物質の蛍光強度を基にした濃度画像計測と、その発光特性における波長および温度依存性を応用した温度画像計測とに対する可能性を理論上から示唆している。

第 4 章では、供試蛍光物質であるヨウ素の吸光係数および量子収率について論述している。ヨウ素の吸光係数は、温度の上昇あるいは圧力の減少に伴って全般に減少する特性を示すが、580nm よりも長波長では温度によってほとんど変化しないこと、また共存ガスの種類にほとんど依存しないこと等を明らかに

している。

一方、ヨウ素の量子収率、特にその温度特性について、アルゴン雰囲気では特定の2波長における量子収率比に温度依存性が存在することを見出し、雰囲気LIF法において2つの異なる波長での蛍光画像強度比から温度の画像計測が可能であることを具体的に提示している。

第5章においては、雰囲気LIF法を噴流濃度計測に適用する際の実験条件の設定方法、および各種計測精度について論述している。すなわち雰囲気LIF法では、観測容器内で蛍光が減衰するため、供試観測容器のサイズおよび蛍光物質の吸光係数に応じた蛍光物質濃度を特定することにより濃度計測の精度が、また、蛍光観測レンズ系の集光効率を位置毎に補正することにより温度計測の精度がそれぞれ大幅に改善されることを明らかにしている。

第6章では、雰囲気LIF画像から得られた噴流中心軸断面での噴流濃度分布を基に、間欠噴流の形状あるいは濃度場の推移特性を解明している。

特に、各種噴射条件および噴射ノズルの設計諸元と噴流濃度との相関については、噴流全体を平均した平均噴流ガス濃度が、噴流ガスおよび雰囲気ガスの密度、ノズル噴孔径、噴流の動粘性係数および渦動粘性係数、噴射後の経過時間から構成される一つのパラメータによって一義的に記述し得ること等を提示している。

第7章では、雰囲気LIF法によって間欠ガス噴流の温度と濃度の同時画像計測が可能であることを実証すると同時に、間欠自由噴流および壁面衝突噴流の特性を解明している。特に、壁面衝突噴流においては、自由噴流に比べて壁面衝突噴流での雰囲気巻き込みが著しいこと、衝突壁面の温度によって壁面衝突後の噴流の混合過程が著しく影響を受け、壁面上の噴流先端部では壁面温度が高いほど混合が促進されること等を明らかにしている。

第8章は本研究の結論であって、得られた結果を総括している。

これを要するに、著者は、間欠ガス噴流の画像計測手法を確立すると共に噴流特性に関わる新知見を得ており、内燃機関工学、燃焼工学に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。