

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 4月30日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2012

課題番号：24656512

研究課題名（和文） 2色蛍光比法による圧縮性混合場の瞬時モル分率及び密度測定

研究課題名（英文） Two-color Fluorescence ratio method to measure instantaneous mole fraction and density in compressible mixing field

研究代表者

升谷 五郎 (MASUYA GORO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20271869

研究成果の概要（和文）：燃料と空気の迅速な混合は極超音速空気吸込みエンジンを実現するための最も重要な技術課題の一つである。瞬時の燃料モル分率分布を測定するために、2種類のトレーサー物質のレーザー誘起蛍光を用いる新しい手法を開発しようとしている。数種類の候補となる物質の蛍光特性を調査し、アセトンとトルエンをトレーサー物質として選定した。これらのガスの混合気が、空気やその他の気体中でどのような蛍光特性を示すかを実験的に調べた。

研究成果の概要（英文）：Fast mixing of fuel and air is one of the most important technical subjects to realize hypersonic air breathing engines. In order to measure instantaneous distribution of fuel mole fraction, we tried to develop a new technique using laser induced fluorescence signals of two tracer gases. We investigated fluorescent characteristics of several candidate matters and selected acetone and toluene as the tracer gas. We tested fluorescent characteristics of their mixture in air and other gases.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：推進工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：推進・エンジン，圧縮性流れ，レーザー計測，超音速混合，瞬時モル分率

1. 研究開始当初の背景

極超音速機用の空気吸込みエンジンにおいて、最も重要な課題の一つである燃料と空気の混合促進を図るためには、温度、圧力、密度が変化する圧縮性流れ場における乱流混合の特性を明らかにしなければならない。最近のレーザー計測法の発達により、このような流れ場の平均モル分率や、密度とモル分率の積である濃度の瞬時値は計測できるようになってきたが、密度とモル分率を分離して測ることは未だ実現されていない。実際の燃焼は瞬時のモル分率に依存するため、その実測は極めて重要である。

2. 研究の目的

2種類の蛍光物質を空気流と燃料に混入して、それらをレーザー光で励起し誘起された蛍光 (Laser Induced Fluorescence: LIF) の強度を測定して瞬時の密度とモル分率の分布を求める方法を確立する。

3. 研究の方法

本研究の当初計画では、

- (1)このような計測を実現できる2種類の蛍光物質の選定とそれらの蛍光発光特性データの取得、
- (2)2種類の蛍光発光強度から瞬時モル分率を求める手順の定式化、
- (3)実際の超音速流れ場へ適用してデータを取得、

(4) Large Eddy Simulation (LES) の結果との比較

を行う予定であった。

(1)の蛍光物質の選定にあたって、まず従来使用してきたアセトンをもつ目の蛍光物質に選定し、これと共用できる第2の蛍光物質をしらべたが、特性等に不明な点が多く、選定に手間取った。文献調査で明らかに不適当な物質を除外し、実験による調査の対象とした候補気体は二酸化窒素、2-ブタノン、トルエンである。

まず、各候補気体について、窒素に混入させ、図1のように石英ガラス製の容器(セル)に入れて光を照射し、吸光の周波数特性を調べた。次いで分光器をCCDカメラに

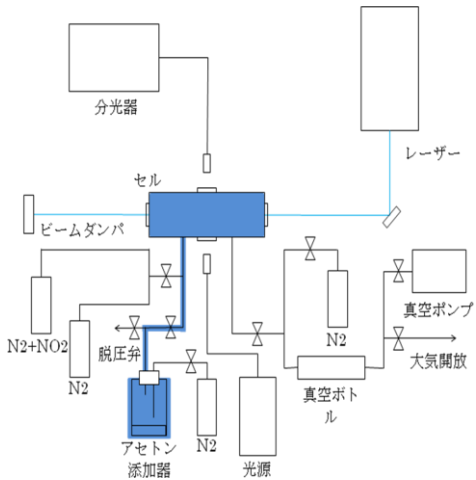
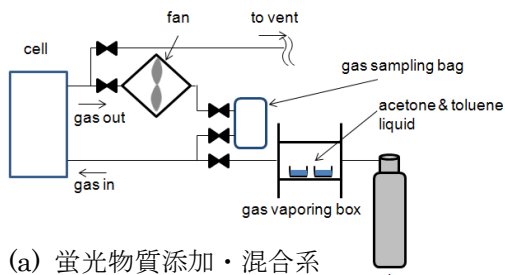
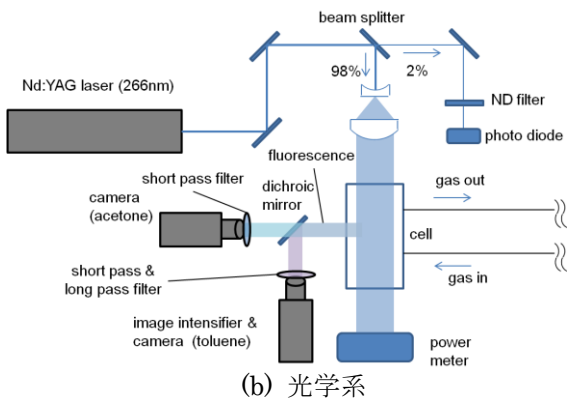


図1 二酸化窒素とアセトンに対する吸光周波数特性測定実験の装置配置



(a) 蛍光物質添加・混合系



(b) 光学系

図2 2種類の蛍光物質のLIF画像撮影

変え、レーザーを照射して2つの蛍光物質間のLIF特性の干渉を調べた。

2つの蛍光物質の混合気を窒素や空気と共にセルに入れて、励起用レーザーを照射しLIF画像を測定する場合の構成を図2に示す。トレーサーと添加される気体を一緒に混合させるため、セルを含む閉じた流路を構成し内部に設置したファンによって機体を強制的に循環させた(a)。レーザー照射による2つの蛍光物質によるLIF画像は、ダイクロイックミラーによって分離して2台のCCDカメラで撮影した。

(2)の2種類の蛍光発光強度から瞬時モル濃度を求める手順を定式化するために、各蛍光物質に対する蛍光強度の式を整理し、瞬時モル分率を求めるための式を導く。その際、実験により較正すべきパラメータを明らかにする。

(3)については2012年度内に実施できなかったが、前年度までに単一の蛍光物質を添加してLIF画像の撮影を行っており、それを適用すれば大きな問題なく達成できる。

(4)については、既に基本的形状・条件に対してはLES計算が行われており、結果をデータベースから取り出して、本計測法との定量的な比較を行うためのデータ処理をすれば良い段階にある。

4. 研究成果

(1) 2種類の蛍光物質の選定

図1の装置を用いて測定したアセトン及び二酸化窒素とそれらの混合気を窒素に添加した際の吸光周波数特性を図3に示す。アセトン(赤)は280nm付近にピークを持ち、その両側にそれぞれ50nm程度広がる吸収帯を持っている。二酸化窒素(緑)の主たる吸

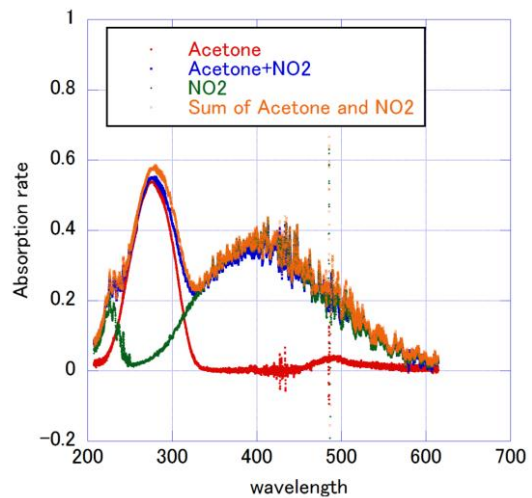
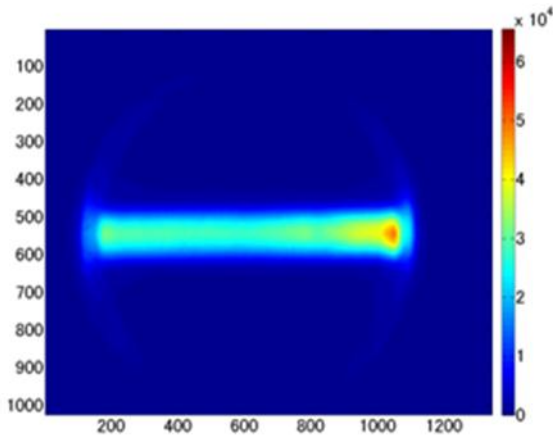
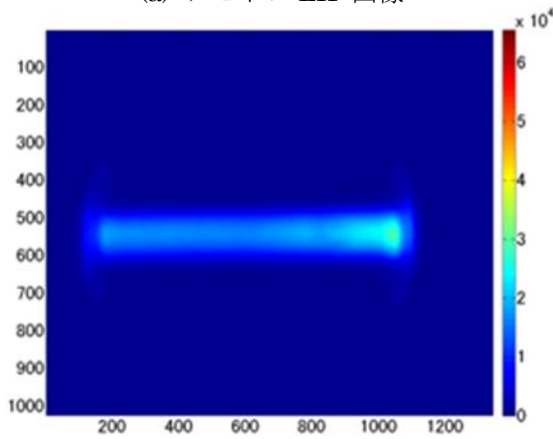


図3 アセトン及び二酸化窒素の吸光特性



(a) アセトン LIF 画像



(b) アセトン+二酸化窒素 LIF 画像

図4 二酸化窒素によるアセトン蛍光の吸収光帯は 400 nm 付近にピークを持ち正の側に約 200 nm, 負の側に約 150 nm の拡がりを持つ。アセトンと二酸化窒素の混合気 (青) の吸収は単体の吸収特性を加え合わせたもの (橙) と一致しており, 吸収に関しては両者の干渉はないことが分かった。

次に窒素にアセトン及びアセトンと二酸化窒素の混合気を添加してレーザーを照射して, LIF 強度を測定した。図4に得られた LIF 画像を示す。LIF 強度は図右端のカラー尺度による。アセトンの LIF 強度は二酸化窒素が存在することによって約 40%低下した。これは, アセトンの LIF の周波数範囲が 420 nm を中心として存在するため, 図3に示す二酸化窒素の吸収範囲と相当程度重なることにより引き起こされた。このように LIF について, 二酸化窒素はアセトンに対して強い干渉を持つことが分かったため, 今回の検討対象から除外することにした。

第2の候補である2-ブタノンは, 文献調査で見出すことができる蛍光発光特性に関するデータが少なく, 吸収断面積や蛍光量子収率などを計測する必要がある。そのため, 本手法に用いるためには, 相当な量の独自の計測を新たに行わねばならないことが予測さ

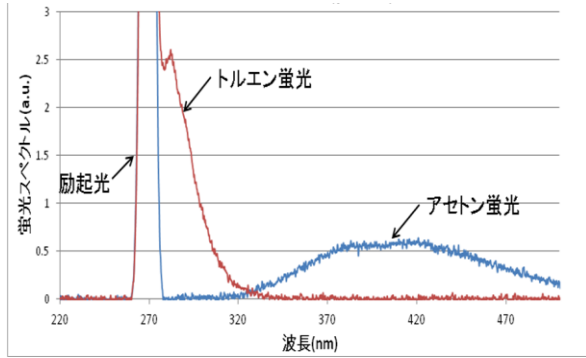


図5 アセトンとトルエンの蛍光スペクトル

れるので, さし当たってはトレーサー候補に加えないことにした。

第3の候補であるトルエンはアセトンと同じ波長のレーザー光によって励起でき, 発生する蛍光の波長は, 図5に示すように互いに異なっていて, 適切なフィルターやダイクロイックミラーを使用すれば分離可能である。一方, 吸光特性においては, トルエンがアセトンの蛍光をやや吸収する可能性がある。さらに, トルエンは酸素が存在する場合には, 励起されても酸素消光が起り, 蛍光強度が弱まることが知られている。現在, これらの特性を組み込んだ瞬時モル分率算出法の定式化が進められており, いくつかのパラメータを実験によって較正できれば, 瞬時モル分率を求めることができる見通しがつきつつある。従って, 本研究の結果として, トルエンを第2のトレーサーに選定した。

(2) 瞬時モル分率を求める手順の定式化

アセトンの蛍光発光強度 S_{ace} は次式で表される。

$$S_{ace} = \eta_{opt} \cdot \frac{E}{hc/\lambda} \cdot dV_c \cdot N_{ace} \cdot \sigma_{ace}(T) \cdot \phi_{ace}(T)$$

ここで, N は分子の数密度, σ は吸収断面積, ϕ は蛍光量子収率である。トルエンについても同様の式が書かれるが, 蛍光量子収率にアセトンの場合にはない酸素消光の影響を表す項が含まれる。次式において右辺の最後の係数が酸素消光を表す。

$$S_{tol} = \eta_{opt} \cdot \frac{E}{hc/\lambda} \cdot dV_c \cdot \sigma_{tol}(T) \cdot \phi_{tol}^{O_2=0}(T) \cdot \frac{N_{tol}}{1 + k_{sv}(T) \cdot N_{O_2}}$$

空気中にアセトンを添加し, 空気を含まない燃料噴流中にトルエンを添加することにする。燃料噴射マニホールド等をトルエン LIF の参照点 (ref) とすれば, 燃料噴流の瞬時数密度とトルエン蛍光強度は次式で関係付けられる。

$$\frac{S_{tol}}{S_{tol_ref}} = A(T) \cdot \frac{1}{1 + k_{sv}(T) \cdot N_{O_2}} \cdot \frac{N_{jet}}{N_{jet_ref}}$$

$$A(T) = \frac{\sigma_{tol}(T)}{\sigma_{tol}(T_{ref})} \cdot \frac{\phi_{tol}^{O_2=0}(T)}{\phi_{tol}^{O_2=0}(T_{ref})}$$

上式で酸素消光を見積もるために必要な局所的な酸素数密度は次式に示すようにアセトンの蛍光強度に比例する。

$$\frac{S_{ace}}{S_{ace_ref}} = \frac{N_{O_2}}{N_{O_2_ref}}$$

実験によりパラメータ $A(T)$ と $k_{st}(T)$ を較正すれば良いことが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

升谷 五郎 (MASUYA GORO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20271869

(2) 研究分担者

滝田 謙一 (TAKITA KENICHI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：80282101

河内 俊憲 (KOUCHI TOSHINORI)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：40415922

(3) 連携研究者

()

研究者番号：