

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560226

研究課題名(和文) 非定常火炎の四次元CT計測法の確立

研究課題名(英文) Development of a time series 3D-CT measuring technique applicable for turbulent flames

研究代表者

石野 洋二郎 (Ishino, Yojiro)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30242902

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、最先端の「高速ノンスキニング多次元CT計測システム」を構築し、乱流燃焼現象の解明技術を飛躍的に前進させることである。

初年度は、「火炎輝度・時系列・三次元CT計測」の開発を実施した。1台の高速度ビデオカメラと多数(26枚)の平面ミラーが立体的に配置されるマルチミラー撮影システムから成る、四次元CT計測システムを製作し、1m/s毎の時系列三次元輝度分布が獲得された。2年目以降は、より高速の実用乱流火炎への適用のために、「20方向・マルチシュリーレンカメラ」を製作し、高速火炎の瞬間密度分布の再構成に成功した。

研究成果の概要(英文)：In 2011 year, time series 3-dimensional CT(Computer Tomography) measurement (4D-CT) of emission light distribution of a turbulent propane/air premixed flame have been made with a single high speed camera and multi-mirror optical system which has a number of plane mirrors on a ellipsoid of revolution. The high speed camera and the flame were respectively set on two foci of the ellipsoid of revolution in order to focus on each mirror-images of the target flame. The 3D-CT algorithm, MLEM algorithm, employed in this study was verified by using ring-type "phantom distribution". As the result of the 4D-CT measurement, spatio-temporal variations of the turbulent flame luminescence distributions have been obtained successfully.

Second, for 2012-2014 year, instantaneous density distributions of high-speed turbulent flames, having a variety of nozzle exit flow velocity of 4, 6, 8 and 10 m/s, have been successfully CT-reconstructed with a custom-made 20 directional schlieren camera.

研究分野：燃焼工学

キーワード：燃焼 CT計測 多次元計測 定量シュリーレン計測 乱流火炎 輝度分布

1. 研究開始当初の背景

本研究で対象とする燃焼現象は、将来 2030 年においても全世界の一次エネルギー供給のほとんど全て (88.9%) を担うと予測されており [IEA 見通し/World Energy Outlook 2002 年版], 言うまでもなく地球環境保全にとって最も重要な要素技術と言える。とくに、乱流火炎に代表される三次元非定常火炎は、高性能燃焼装置の設計には欠くべからざる要素である。

しかし、乱流火炎などの三次元非定常火炎は、その空間的三次元性および時間的ランダム性が、当該火炎の詳細構造の把握を妨げていた。当該火炎の詳細構造に関する知見を獲得する為に、それまで、多くの研究技術が提案されてきたが、三次元非定常火炎全体の瞬時的立体構造を三次元計測により解明しようとする試みは本研究以外に見当たらなかった。例えば、飛躍的發展を遂げたレーザー技術と IT 技術との融合技術である LIF 法・レーザ法・ラマン法・PIV 法による濃度・温度・速度場の計測は現在、標準的技術となっているがその多くは二次元計測に留まっていた。一方では、燃焼数値解析技術は既に、詳細反応機構を含む DNS による三次元燃焼解析が可能となっており、多次元燃焼計測技術の飛躍的な發展が待たれている状況であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、最先端の「高速ノンスキャニング多次元 CT(コンピュータ断層再構成)計測システム」を構築し、乱流燃焼現象の未だに未知な三次元現象の解明技術を飛躍的に前進させることである。

3. 研究の方法

本研究では、1 年目は、火炎の発光輝度の三次元分布を時系列で捉える、「火炎輝度・時系列・三次元 CT 計測」の開発を実施した。

この「火炎輝度・時系列・三次元 CT 計測システム (四次元 CT 計測システム)」(図 1) は、パイプバーナー、バーナー下方に上向きに設置される高速度ビデオカメラ、多数の平面ミラーが立体的に配置されるマルチミラー撮影システム、および三次元 CT 解析用 PC から成る。このシステムでは、1 台の高速度ビデオカメラの画像上に、パイプバーナー上の乱流火炎の像が、全ての平面ミラーに反射されて多方向同時撮影される。平成 23 年度に製作したシステムでは 26 枚の平面ミラーが配置され、26 方向からの同時撮影が可能である (図 2)。画像獲得には 512×512 ピクセルの画素数の高速度ビデオカメラを使用した。調整・試運転の際の計測対象火炎には、1 種類の乱流予混合バーナー火炎を用い、2 種類の観察方法を用い、計測精度確認した。一つ目の観察方法は、火炎からの放射可視光を時系列三次元 CT 計測するものであり、毎秒 1000 コマの三次元データ

が得られる。この手法は、可視化情報学会学会賞を受賞した。

1 年目の分析結果にもとづき、本研究では、より高速な実用バーナー火炎への対応と、より重要性の高い対象を計測するため、2 年目以降は、承認を得て、計測方法を変更した。

すなわち、1 年目に計測対象とした、燃料の反応速度分布と密接な関係を有する「輝度分布」ではなく、有害排気物の生成と関連づけられる「温度分布」あるいはその逆数で表される「密度分布」を対象とする変更を行った。

2 年目以降の方法を以下に記す。

高速噴流バーナー火炎 (乱流予混合火炎) の瞬間三次元密度分布を得るために、「定量シュリーレン・20 方向同時撮影装置 (マルチ・シュリーレン・カメラ)」の設計ならびに製作を行った。この特殊カメラは、直径約 3 m の平面上に、20 台の定量的シュリーレン撮影光学系が 9° 毎に 180° にわたり放射状に配置される、大型の撮像装置であり、溶接等を駆使して自作された。また、企業工場での実地計測を考慮して、可搬性、水平から垂直までの計測平面の角度設定機能を持たせた。この計測装置により、(1) 出口直径 4.2 mm の小型バーナーによるプロパン空気の乱流予混合火炎、ならびに (2) 保炎機能付き中型バーナーによる同乱流予混合火炎の三次元 CT 再構成計測が実施された。とくに (1) については、予混合ガスの噴出速度を 4m/s から 10 m/s まで変化させ、噴出速度と瞬間火炎形状の関係について調査が行われた。

4. 研究成果

はじめに、1 年目の、「火炎輝度・時系列・三次元 CT 計測 (四次元 CT 計測)」の結果について簡単に記載する。

図 3 に、再構成より得られた断面輝度分布を示す。それぞれの時刻で、上図が $x = 0, y = 0$ における垂直断面の結果を、下図はそれぞれの高さにおける水平断面図の結果である。

本計測手法により、三次元輝度分布の時空間変化を観測できる様子が分かる。ここで、高速度カメラにより取得される画像の空間解像度は 0.82 mm であり、前述の通り、対象とした乱流火炎の積分スケールおよびコルモゴロフ・スケールは、それぞれ $l_E = 5.00 \times 10^{-3}$ m および $\eta = 0.27 \times 10^{-3}$ m である。したがって、本実験では、流れの大規模構造による変化のみ解析可能と言える。図 3 に示す通り、大スケール ($\sim 10^{-3}$ m) での輝度分布の変形過程は良く捉えられており、また $t = 3$ ms, $z = 14$ mm の水平断面図に着目すると、局所的な消炎現象も確認できる。今後の画像処理を通じて、従来は評価が困難であった火炎の三次元曲率と輝度の時系列変化を明らかにできると考えられる。しかしながら、乱流の

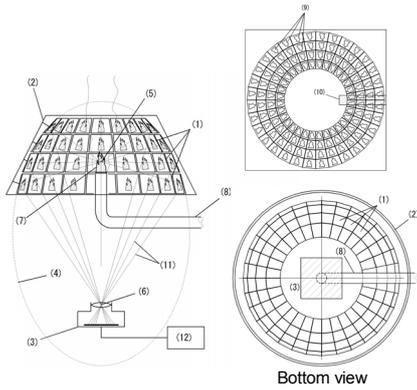


図1 四次元 CT 計測システムの原理図

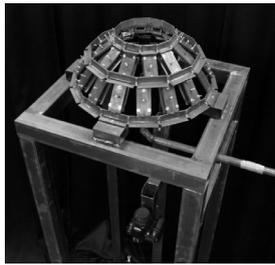


図2 四次元 CT 計測システムの外観

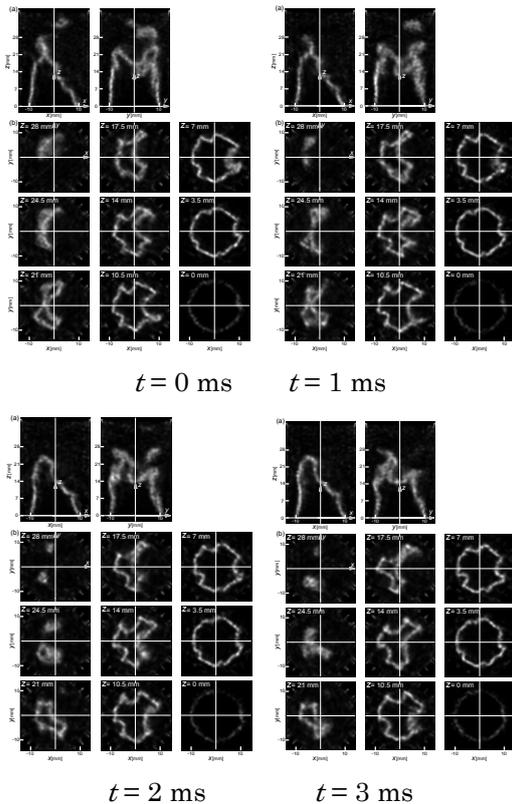


図3 マルチミラーシステムにより三次元 CT 再構成された 1/1000 秒ごとの火炎輝度の三次元分布。(上図：縦断面，下図：水平断面)

微細渦構造と予混合火炎面との相互干渉や、実機を想定したより高レイノルズ数での乱流燃焼機構の解明に本手法を適用するためには、高解像度・高感度の高速カメラの導入による1火炎像あたりの画素数の増加など、画質の向上が必要不可欠である。

つぎに、2~4年目に得られた研究成果を以下に記載する。

この研究では、予混合火炎に対し多方向から定量シュリーレン撮影を実施し、空間積分処理による密度厚さ分布画像を作成し、CT処理により三次元密度分布を得る、新たな計測法を提案し、実施した。

計測対象は、図1左図に示すバーナーにより形成される乱流予混合火炎(図1右図)である。図1左図にはxyz座標系も付記した。本実験では、プロパン・空気の当量比1.1、ノズルの出口平均速度 $U=10.0\text{ m/s}$, 8.0 m/s , 6.0 m/s , 4.0 m/s で行った。各出口平均速度における乱れ強さは $u'=0.61\text{ m/s}$, 0.54 m/s , 0.48 m/s , 0.42 m/s 、積分スケールは $It=1.6\text{ mm}$, 1.5 mm , 1.4 mm , 1.25 mm である。図2は20組の定量シュリーレン撮影系からなる20方向マルチ・シュリーレンカメラである。多方向定量シュリーレン撮影装置では、フラッシュ光源(発光時間 $10\mu\text{s}$ 以下)で均一に裏面照射された矩形($1\text{ mm}\times 2\text{ mm}$)の発光面を光源とする。光束の集光には2枚の凸レンズ(直径 50 mm , 焦点距離 300 mm)を用いた。シュリーレン・ストップには垂直ナイフエッジ

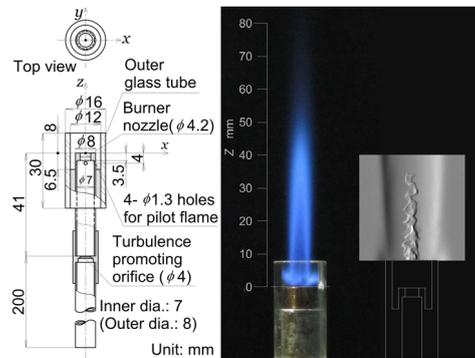


図4 計測対象火炎

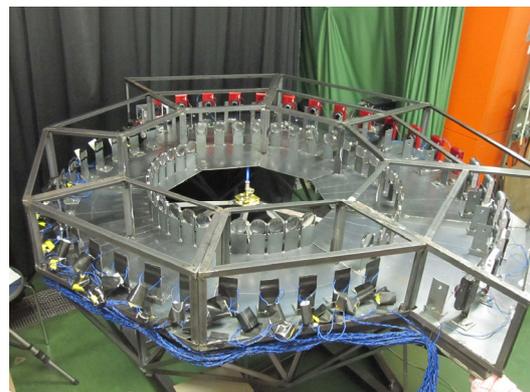


図5 20方向マルチシュリーレンカメラ

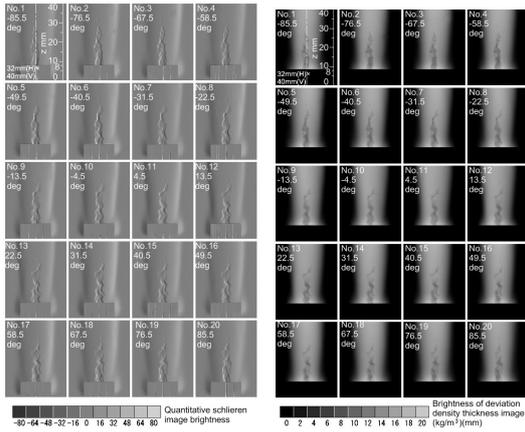
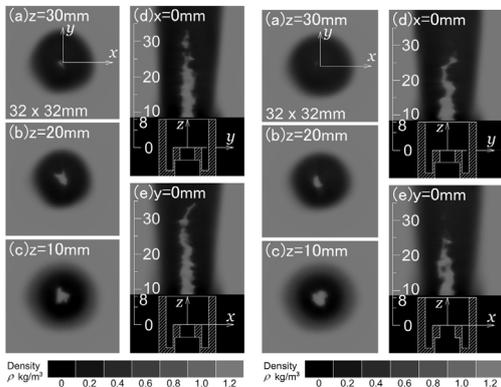


図6 シュリーレン画像 図7 密度厚さ分布

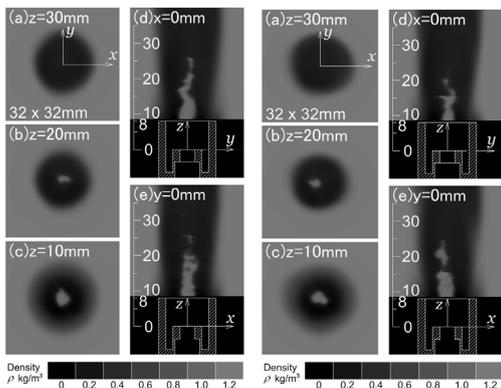
ジを使用し、焦点面光源像がナイフエッジから離脱しない設定とした。光源のフラッシュのタイミングを合わせ、多方向同時撮影が行われる。

図6に撮影されたノズルの出口平均速度 $U = 8 \text{ m/s}$ の時の乱流予混合火炎のシュリーレン輝度分布を示す。さらに、この画像から算出された $z = 8.5 \sim 40 \text{ mm}$ の範囲の密度偏差厚さ $\Delta D t$ の画像を図7に示す。この密度偏差厚さを用いて三次元再構成を行い、 $400(x) \times 400(y) \times 500(z)$ 個のボクセルからな



$U = 10 \text{ m/s}$

$U = 8 \text{ m/s}$



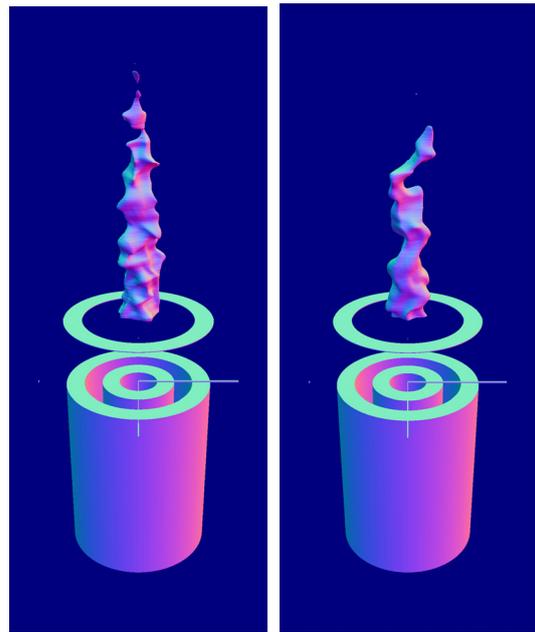
$U = 6 \text{ m/s}$

$U = 4 \text{ m/s}$

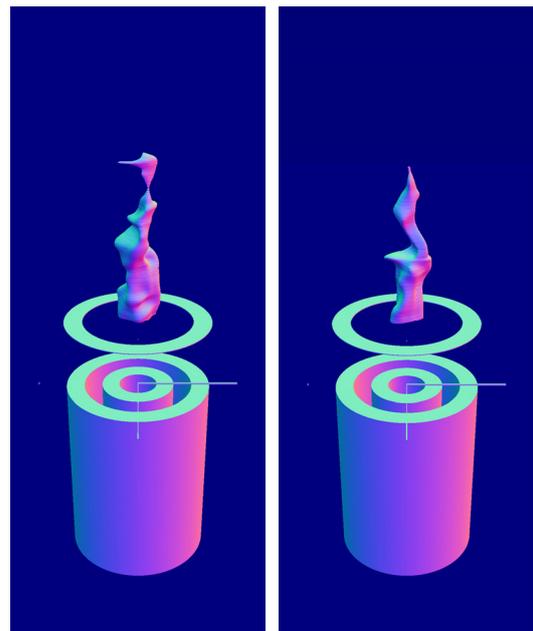
図8 瞬間三次元密度分布の再構成結果

る三次元密度分布 $\rho(x, y, z)$ を得た。図8に、ノズルの出口平均速度 $U = 10 \text{ m/s}$, 8 m/s , 6 m/s および 4 m/s における代表的な断面の密度分布を表す。図8(a-c)は水平断面、図(d)および(e)はそれぞれ yz 面 ($x = 0 \text{ mm}$) および xz 面 ($y = 0 \text{ mm}$) の垂直断面密度分布を表す。図中、密度の値は、図8下方に添付したグレースケールに基づき、高密度領域は明るく、低密度領域は暗く表現される。

さらに、三次元火炎データを STL ファイルに変換し、三次元立体表示を行う。ただし、火炎形状の特徴を良好に立体表現するため、密度の閾値を 0.7 kg/m^3 とし、この値より高密



(a) $U = 10.0 \text{ m/s}$ (b) $U = 8.0 \text{ m/s}$



(c) $U = 6.0 \text{ m/s}$ (d) $U = 4.0 \text{ m/s}$

図9 再構成密度分布の三次元立体表示

度の領域を火炎形状(未燃ガス領域)とした。図 9(a-d)に、それぞれのノズル出口平均速度について得られた三次元立体表示を示す。それぞれ、x 軸方向から見た鳥瞰図である(俯角は 30°)。各図には、参考のためバーナーノズルとガラス管(外径 16 mm)の上端面($z = 8$ mm)も表示した。

図 8~9 から、ノズル出口速度の増大に伴い、火炎長が増加することが確認される。火炎面の凹凸については、ノズル出口速度 $U = 4$ m/s では、火炎面は複雑な形状を持たず、凹凸のスケールは、比較的大きい。一方、ノズル出口速度 $U = 10$ m/s の火炎では、多くの細かなスケールの凹凸が認められ、複雑な形状であることがわかる。

このように、三次元再構成により三次元密度分布形状が詳細に得られ、高速乱流バーナー火炎への本計測手法の応用の妥当性が示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Yojiro Ishino, Takahiro Kato, Yudai Kurimoto, Yu Saiki, "3D-CT Measurement of an Instantaneous Density Distribution of a Turbulent Premixed Flame with a Multi-Directional Quantitative Schlieren Camera", Proceedings of 10th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence, Modelling and Measurements, 査読有り, 2014, pp.1-6
- ② Yojiro Ishino, Naoki Hayashi, Ili Fatimah Bt Abd Razak, Yu Saiki, "3D-CT Measurement of Instantaneous Density Distributions of High-Speed Premixed Turbulent Burner Flames with a Multi-Directional Schlieren Camera (Effects of Flow Velocity on 3D Flame Front Shape)", Thermal and Fluids Engineering Summer Conference, 査読有り, 2015, pp.1-11
- ③ Yojiro Ishino, Kenta Horimoto, Takahiro Kato, Shoma Ishiguro, Yu Saiki, "3D-CT Measurement of Premixed Flames Using a Multi-Directional Quantitative Schlieren Optical System (Solo-Measurement of Density and Combined-Measurement of Density and Light-Emission distributions)", Procedia Engineering, 査読有り, Vol. 67, 2013 pp.303-316

[学会発表] (計 2 3 件)

- ① 林直樹, Ili Fatimah Abd Razak, 齋木悠,

石野洋二郎, 20 方向マルチシュリーレンカメラによる高速乱流バーナー火炎の瞬間三次元密度分布の三次元 CT 計測, 第 52 回燃焼シンポジウム, 2014 年 12 月 3 日~2014 年 12 月 5 日, 岡山コンベンションセンター (岡山)

- ② Yojiro Ishino, Kenta Horimoto, Takahiro Kato, Shoma Ishiguro, Yu Saiki, "Multi-Directional Quantitative Schlieren Observations for 3D-CT Reconstruction of Three-Dimensional Density Distribution of Steady Non-axisymmetric Premixed Flame", The 9th Asia-Pacific Conference on Combustion, 2013 年 5 月 19 日~2013 年 5 月 22 日, 慶州 (韓国)

- ③ Yojiro Ishino, Kenta Horimoto, Takahiro Kato, Shoma Ishiguro, Yu Saiki, "3D-CT Measurement of Three-Dimensional Density Distribution of Premixed Flames Using a Multi-Directional Quantitative-Schlieren Optical System", The 7th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science, 2013 年 5 月 23 日~2013 年 5 月 26 日, Sun-Moon Lake (台湾)

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: 三次元 CT 計測システム

発明者: 石野洋二郎

権利者: 国立大学法人 名古屋工業大学

種類: 特許

番号: 特許第 5294403 号

出願年月日: 2008 年 11 月 19 日

取得年月日: 2010 年 6 月 3 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石野 洋二郎 (ISHINO, Yojiro)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30242902