

平成21年 6月15日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560203  
 研究課題名（和文） 多眼カメラとCT法による非定常火炎の局所燃焼速度の瞬間三次元分布計測手法の確立  
 研究課題名（英文） Measurement of Instantaneous 3D Distribution of Local Burning Velocity on Turbulent Flames by Non-Scanning 3D-CT with Multi-Lens camera  
 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・准教授  
 研究者番号：30242902

研究成果の概要： 本研究の目的は、乱流予混合火炎などの三次元非定常火炎の瞬間三次元分布に対する、研究代表者が提案している新計測法「ノンスキニング三次元CT(コンピュータ断層再構成)法」を、多時刻計測法に発展させることである。はじめに、40眼カメラを用いた2時刻の三次元輝度分布の計測法を完成させ、予混合ガスに混入したトレーサー粒子軌跡のステレオ撮影との同時計測により、局所燃焼速度の計測法を完成させた。さらなる時系列計測に向けて、158眼カメラの製作を行い、4時刻の多方向同時撮影法を完成させた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：燃焼，多次元計測，三次元CT，燃焼速度，医用工学，CT

## 1. 研究開始当初の背景

代表的非定常火炎である乱流火炎は、炉用バーナーや内燃機関など工業的にも広く用いられているが、さらなるクリーン高効率燃焼のためには、乱流火炎に関する詳細な知見を得ることが重要である。ところが、乱流火炎は、その空間的三次元性および時間的変動といった合計四次元の次元に特徴付けられる。このため、ありのまま、すなわち四次元的に乱流火炎を実験的にとらえることは困難であった。複数のレーザーシート光による濃度場計測などは為されていたが極めて不十分であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、前述の現状に鑑み、本研究者

が開発した、乱流火炎の瞬間三次元データの新計測法を更に発展させ、多時刻での瞬間三次元分布を得ることを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、ガソリンエンジン内での燃焼と同じカテゴリーに分類される乱流予混合火炎からの青色のラジカル発光の輝度分布を計測対象に選定した。本方法「ノンスキニング三次元CT法」あるいは「多眼カメラ三次元CT法」は、その火炎発光像を40眼カメラによって40方向から同時に撮影し、輝度補正されたプロジェクション画像から、火炎領域における三次元輝度分布を三次元CT法により再構成する。このようにして、1時刻の乱流火炎瞬間輝度分布を得る。これ

を2時刻に発展させるためには、40眼カメラの奇数番レンズと偶数番レンズと撮影時間差を与え、20方向からの2時刻撮影を行う。

連続した時刻での瞬間三次元輝度分布から、短時間での火炎の移動挙動が三次元的に捉えられるため、1時刻では不明であった局所燃焼速度の計測に見通しが立つ。局所燃焼速度の計測のためには、予混合気の瞬間三次元分布を必要とする。本研究では、はじめに、予混合気流速を仮定して局所燃焼速度の試算を行う。つぎに、40眼カメラ2時刻撮影と同時に、混入したトレーサー粒子軌跡のステレオ撮影も行い、予混合気の局所三次元流速の計測結果から、乱流火炎の局所燃焼速度の算出をはじめて試みる。

また、2時刻同時撮影だけではなく、さらなる多時刻計測のために、158眼カメラを設計・製作を行う。この特殊カメラにより、40(39)方向からの4時刻の同時撮影が可能であることを証明する。

#### 4. 研究成果

本研究では、ガソリンエンジン内での燃焼と同じカテゴリーに分類される乱流予混合火炎からの青色のラジカル発光の輝度分布を計測対象に選定した。本方法「ノンスキャニング三次元CT法」あるいは「多眼カメラ三次元CT法」は、その火炎発光像を40眼カメラによって40方向から同時に撮影し、輝度補正されたプロジェクション画像から、火炎領域における三次元輝度分布を三次元CT法により再構成する。このようにして、1時刻の乱流火炎瞬間輝度分布を得る。

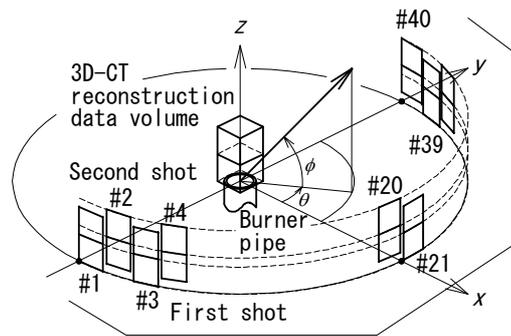
##### (1) 連続2時刻の瞬間三次元CT計測

###### ① 計測対象火炎

図1に、多時刻ノンスキャニング三次元CT法の概略を示す。40レンズ多眼カメラによる多方向同時撮影により、乱流火炎からの放射可視光のプロジェクション画像を獲得し、三次元CT解析処理を経て、火炎の瞬間輝度分布を再構成する。座標は、バーナー出口中心を原点とし水平方向に $x$ および $y$ 軸を、鉛直上方に $z$ 軸を設定する。連続した2時刻のプロジェクション画像を得るため、奇数番レンズ群と偶数番レンズ群に分割し、後述の手法により $\Delta t = 1.3 \text{ ms}$ の時刻差で撮影を行う。

###### ② 計測対象火炎

計測対象火炎は、円管バーナー（内径19.0 mm、乱流格子設置）上に形成される当量比1.5のプロパン空気乱流予混合火炎（予混合気平均速度 $U = 1.76 \text{ m/s}$ 、高位発熱量に基づく熱発生量出力2.7 kW）である。バーナーパイプから流出する予混合気平均流速は1.76 m/sであり、レイノルズ数は2144であるが、



Projection images taken by 40-lens camera

図1 多時刻ノンスキャニング三次元CT法の概要

パイプ出口から上流150mmに設置した乱流格子により0.14 m/sの乱れ強さが与えられ、複雑な凹凸を有する乱流火炎が形成される。

###### ③ 多方向2時刻同時撮影

本実験装置では、乱流火炎面が予混合気流出平均速度の1.1倍で流下すると仮定し、図2および図3のように、多眼カメラをこの速度 $S_c = 1.94 \text{ m/s}$ で上方に等速移動させ、乱流火炎の凹凸の流下を追跡し、ブレの少ない鮮明なプロジェクション画像を獲得する。多眼カメラのシャッターには固定スリット(幅5mm)を使用し、カメラ自体の移動により露光時間制御を行う。ただし、上下方向に2.5mmずらした2種のスリットをレンズ群毎に設置することにより、撮影時刻差 $\Delta t = 1.3 \text{ ms}$ が

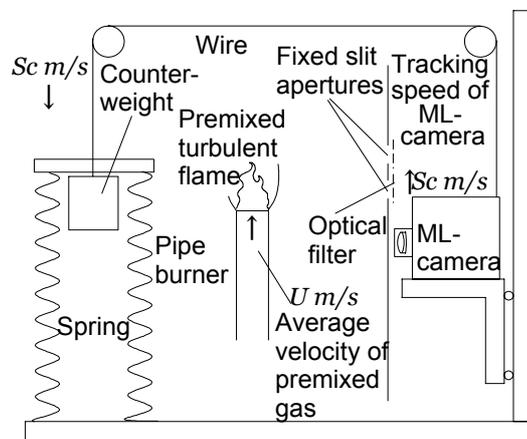


図2 火炎追跡多眼カメラシステムの概要

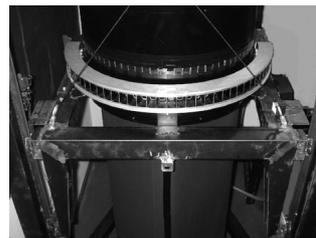
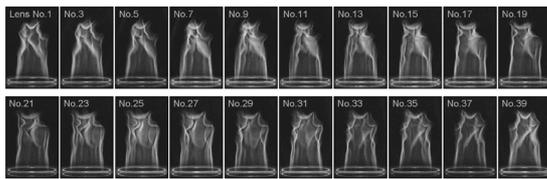
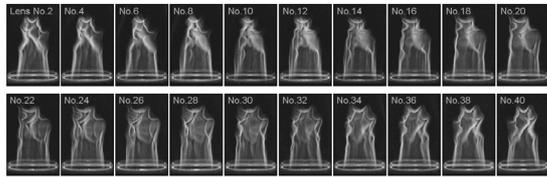


図3 火炎追跡多眼カメラの外観写真

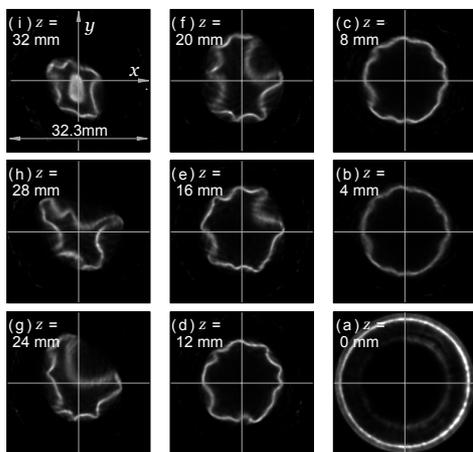


(a) 第1時刻 ( $t = 0$  ms)

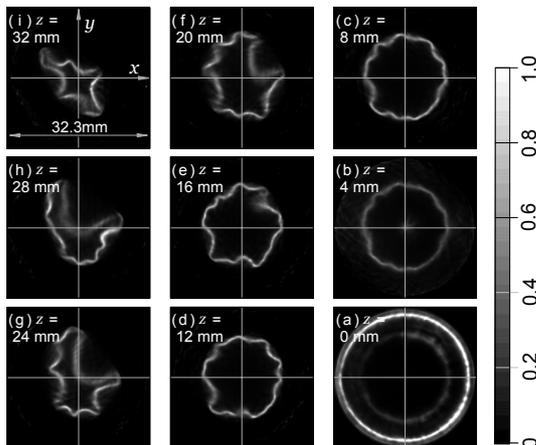


(b) 第2時刻 ( $t = 1.3$  ms)

図5 火炎追跡40眼カメラで撮影した連続2時刻のプロジェクション画像



(a) 第1時刻 ( $t = 0$  ms)

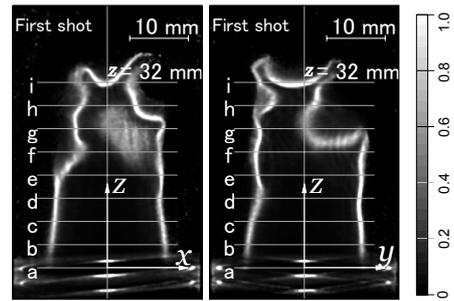


(b) 第2時刻 ( $t = 1.3$  ms)

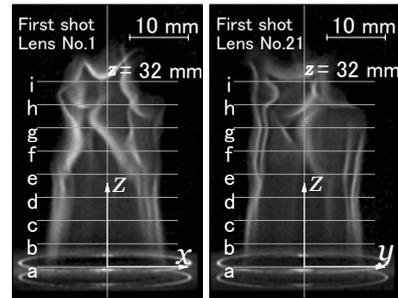
図6 再構成された水平断面輝度分布の一例

設定される。

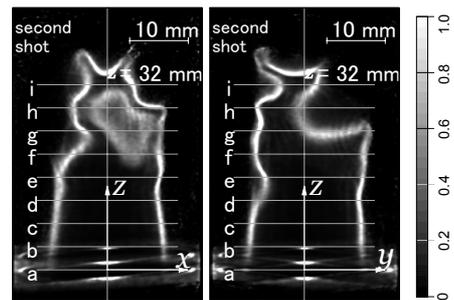
なお使用レンズ (5群6枚, 前玉直径 10 mm) の有効径を 5mm と仮定すれば, 露光時間の半値幅は 2.6ms と算出される。また, 薄青緑色フィルター (フジ, SP-5) を全スリ



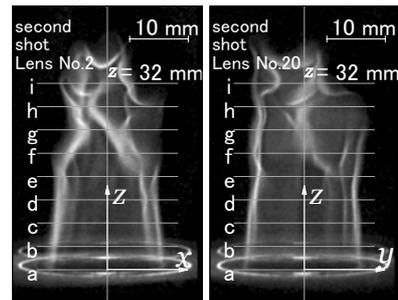
(a) 再構成結果: 中央断面



(b) 参考プロジェクション画像  
(1) 第1時刻 ( $t = 0$  ms)



(a) 再構成結果: 中央断面



(b) 参考プロジェクション画像  
(2) 第2時刻 ( $t = 1.3$  ms)

図7 再構成情報からの垂直断面画像とプロジェクション画像との比較

ットに設置した. 使用フィルム (ネオパン 400 PRESTO) とネガ複写用カメラ (ニコン, D80) の感度特性については, 撮影フィルムに予め露光したステップ濃度フィルタ (エドモンド製, 10 ステップ) のネガ像により校正した。

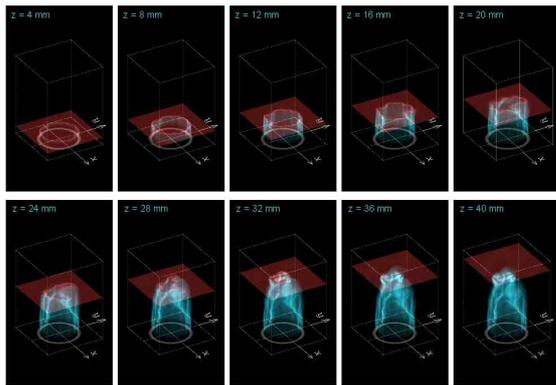
多眼カメラ撮影と同時に、40 眼カメラの 25 番レンズ (Fig.1 参照) の逆方向から高速カメラ撮影 (Photron 製 Fastcam-512PCI, 2000fps, 露光時間 0.5 ms) を行い、火炎挙動、火炎全体発光強度変動および火炎輝度の自己相関係数の同時獲得を行った。

#### ④ 三次元 CT 再構成

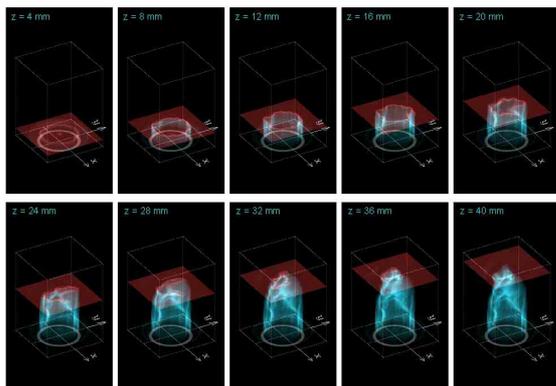
三次元 CT 再構成には、図 4 に示す分配バックプロジェクション法 (MLEM 法) を用いたが、本報では、プロジェクション水平二次元断面情報積層型の三次元 CT 再構成ではなく、三次元再構成空間の直接再構成を行う。1 時刻あたり 240×376 画素の画像データ 20 枚を対象とし、空間分解能 0.13mm の 240×240×376 ボクセルの三次元データを得る。演算時間は PC (CPU2.66 GHz, 8core) で約 2 時間である。

#### ⑤ プロジェクション画像の撮影結果

図 5 に多眼カメラで撮影された 2 時刻のプロジェクション画像を示す。(a) は第 1 時刻の画像であり、(b) は時刻差 1.3 ms の第 2 時刻の画像である。これらの鮮明な画像は、通常



(a) 第 1 時刻 (  $t = 0$  ms )



(b) 第 2 時刻 (  $t = 1.3$  ms )

図 8 乱流火炎の連続 2 時刻の瞬間三次元輝度分布の鳥瞰図 (水平断面情報を含む)。視点は、 $(\theta, \phi) = (-30 \text{ deg}, 30 \text{ deg})$ 。ここで、 $\theta$  は  $x$  軸からの平方向角度、 $\phi$  は水平からの高度角。

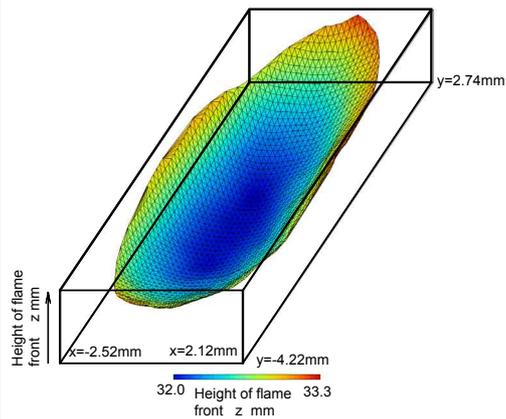


図 9 局所燃焼速度の算出対象の上部皿状火炎片の形状

の静止カメラでは乱流火炎の静止映像を捉えることの困難な長時間露光 (2.6 ms) であっても、予混合気速度で追跡撮影することであたかも静止したかのようなバーナー乱流火炎像を捉えることが可能なことを示している。

#### ⑥ 連続 2 時刻三次元再構成結果

図 6 に CT 再構成処理し得られた三次元輝度分布から抜粋した水平断面輝度分布の一例を示す。また、垂直断面分布を図 7 に示す。図 7 には、再構成断面とほぼ同じ方向から撮影したプロジェクション画像を掲げた。

図 8 に、三次元データの獲得の成功が分かるように、瞬間三次元輝度分布の鳥瞰図を示す。同図には、水平断面情報も描画されている。本実験では、以上のように、連続 2 時刻の瞬間三次元輝度分布の獲得に成功した。

#### (2) 局所燃焼速度の計測

##### ① 予混合気流速を仮定した場合

はじめに、前述の乱流火炎の連続 2 時刻の三次元輝度分布のデータから、火炎片の局所燃焼速度を算出する。ただし、予混合気の流れ速は、鉛直上方に一定値 (2.03 m/s) であると仮定した。

図 9 に、局所燃焼速度の算出対象とする上部の皿状の火炎片の形状を示す。この火炎面の第 1 時刻と第 2 時刻での火炎移動と、仮定した予混合気流速を考慮し、局所燃焼速度の三次元ベクトルの分布を得た。局所燃焼速度の大きさを各火炎位置毎に図示したものが、図 10 である。火炎曲率の小さな火炎片中央部分の局所燃焼速度が大きく計測されている。

##### ② 予混合気流速を実測した場合

連続 2 時刻の瞬間三次元輝度分布と同時に、予混合気に混入したトレーサー粒子軌跡のステレオ撮影を行い、予混合気の流れ速の 3 次元ベクトルを得た。計測システムの写真を図 11 に示す。計測の結果、図 12 に示す粒子軌

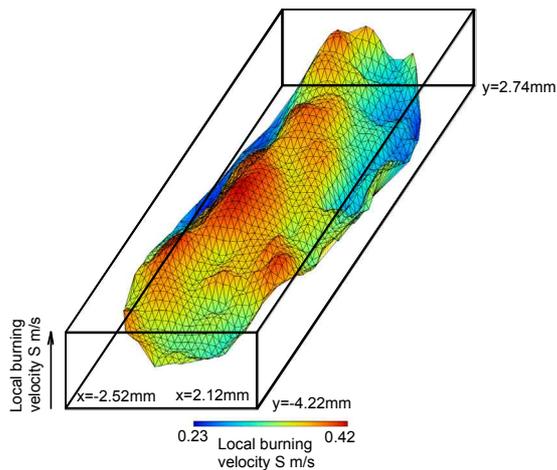


図 10 上部皿状火炎片の局所燃焼速度の三次元分布



図 11 多眼カメラによる多時刻多方向同時撮影装置に加えられたトレーサー粒子軌跡のステレオ撮影装置

跡が得られ、図中「粒子 1」と記した軌跡から、それに隣接する火炎面の局所燃焼速度を計測した。その火炎位置は、 $(x, y, z) = (3.6\text{ mm}, -1.9\text{ mm}, 26.8\text{ mm})$ であり、局所燃焼速度  $S$  ならびにベクトル  $(u, v, w)$  は、

$$(S, u, v, w) = (0.83\text{ m/s}, -0.21\text{ m/s}, -0.52\text{ m/s}, -0.81\text{ m/s})$$

と算出され、乱流火炎の局所燃焼速度ベクトルの計測に成功した。

### (3) 158 眼カメラによる多時刻計測

新たに 158 眼カメラを製作した。このカメラは前述の 40 眼カメラを 4 段に積み上げた構成となっているが、そのため、35mm フィルムではなく、60mm 幅の大判カメラ用のフィルムを使用する。露光は、レンズ直前に設置した固定水平スリットにより制御するが、このカメラにも、火炎追跡機能が付与されているため、カメラ自体の上方への走行により、シャッターリングが行われる。第 1 時刻および第 3 時刻は 40 方向から、また、第 2 時刻および第 4 時刻は 39 方向から火炎の同時撮影が行われる。図 11 に、撮影された火炎像を示す。

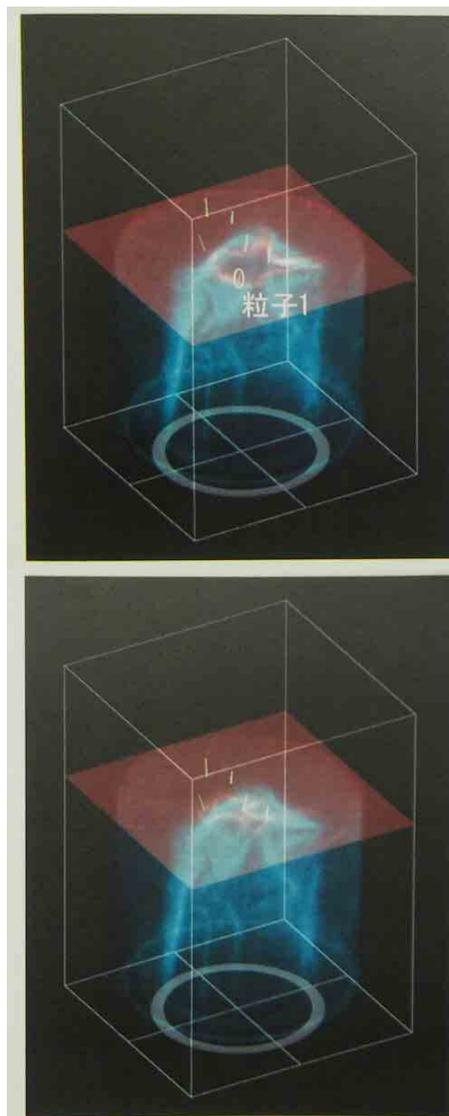


図 12 同時ステレオ撮影によって PTV 計測された粒子軌跡を、同時計測された連続 2 時刻多眼カメラ C T 計測結果に重ね描きした映像。上図は第 1 時刻、下図は第 2 時刻。



図 13 設計・製作された 158 眼カメラの写真



図 14 製作した 158 眼カメラによってフィルム上に撮影された 158 個の火炎像

これにより、40 (39) 方向からの 4 連続時刻の同時撮影の成功を確認することができた。

以上のように、本研究は成功裏に終了することができた。

#### 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 1 件)

- ① Y. Ishino, K. Takeuchi, S. Shiga, N. Ohiwa, Non-Scanning 3D-CT Measurement with 40-Lens Tracking Camera for Turbulent Propane/Air Rich-Premixed Flame, Proceedings of the 6th International Energy Conversion Engineering Conference, 2008 年, 5664-1~17, 査読なし

[学会発表] (計 7 件)

- ① 志賀早希子, 富田和史, 松井裕典, 石野洋二郎, 大岩紀生, 40 眼追跡カメラ三次元 CT 法による乱流予混合火炎の局所燃焼速度の瞬間三次元分布計測, 第 46 回燃焼シンポジウム, 2008 年 12 月 5 日, 京都
- ② 志賀早希子, 富田和史, 松井裕典, 石野洋二郎, 大岩紀生, 40 眼追跡カメラを用いた乱流予混合火炎の局所燃焼速度の瞬間三次元分布の 3D-CT 計測, 流体力学会年会 2008, 2008 年 9 月 7 日, 神戸
- ③ Y. Ishino, T. Hirano, M. Hirano, N. Ohiwa, Non-Scanning 3D-CT Visualizations of Premixed Flames with a 40-Lens Camera, PSFVIP-6: The 6th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, May 17, 2007, Hawaii, USA

[産業財産権]

- 出願状況 (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：名古屋工業大学

種類：特許

番号：特願 2008-295062

出願年月日：平成 20 年 11 月 19 日

国内外の別：国内

[その他]

- ① 石野洋二郎, 連続多時刻撮影マルチレンズカメラによる乱流火炎瞬間形状変化の三次元 CT 計測, 日本機械学会 RC237 先端的熱流体計測法に関する研究分科会にて話題提供, 2008 年 9 月 9 日, 東京
- ② 石野洋二郎, 保浦知也, いろいろなエンジンを調べてみよう, 日本伝熱学会, キッズエネルギーシンポにて本内容を紹介, 2007 年 11 月 7 日, 名古屋市科学館
- ③ 石野洋二郎, 大岩紀生, 乱流火炎のノンスキャン 3 次元 CT 計測, 計測展に出展, 2007 年 11 月 7~9 日, 東京ビッグサイト

#### 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・

准教授

研究者番号：30242902