多方向同時撮影・三次元 CT 法による 非定常燃焼現象の可視化計測*

石野 洋二郎**, 齋木 悠***, 富田 和史****, 大北 雄哉****

3D Visualization of unsteady flames by the combined technique of multi-directional simultaneous photography and 3D-Computed Tomography

Yojiro ISHINO, Yu SAIKI, Yasufumi TOMIDA and Yuya OKITA

1. はじめに

本稿では、研究やエンターテインメントの分野で利用されている「多方向同時撮影」と、医療分野で CT スキャンとして普及している「三次元 CT (コンピューター断層撮影)」とを組み合わせた、ノンスキャン三次元 CT 計測法「多方向同時撮影三次元 CT 法」による非定常火炎の計測について述べる。なお、可視化情報学会には様々な領域の会員、すなわち、燃焼・流体研究者以外の会員も所属していることも意識して、当該技術の周辺事項についても記述する。

2. 多方向同時撮影

2.1 「撮影」

多方向同時撮影の記述に先立ち、はじめに、「撮影」という用語について述べる。

日常でもよく使用する「撮影」もしくは「(写真を)撮る」という表現は、三次元空間にある被写体に分布する電磁波(可視光以外も含む)の輝度あるいは透過率を、無限遠を含む一定の距離にある収束領域(ふつうはレンズ)を経由して二次元面に投影し、二次元画像情報を得る行為として定義できる。「撮影」に際しては、被写空間に非透過領域が存在する場合、収束領域から見て非透過領域より遠い領域の情報は「撮影」されない。すなわち、「物体の表面(二次元情報)しか撮影できない」という特徴を持つ。ここで、「撮影」により得られる情報が二次元情報である理由は、ヒトが持つ光センサーである「目」の構造が、水晶体と網膜(湾曲二次元面)とからなり、単独眼で二次元情報を処理することに由来する。多方向同時撮影では、通常、二次元情報しか扱わない

「撮影」という行為を多方向から同時に実施することで、二次元情報にダウングレードした多数の情報を得る。その情報量を利用することで、被写空間の三次元情報を獲得することが可能となる。

2.2 エンターテインメント分野での「多方向同時撮影」

エンターテインメント分野での「撮影」は、主として人物や物体(不透明)の表面を撮影対象とする。「多方向同時撮影」のエンターテインメント分野での有名な利用例は、たとえば、キアヌ・リーブス主演の SF 映画「マトリックス」が挙げられる。メイキング映像によれば、数十台の一眼レフカメラを撮影領域の周囲に配置し、同時もしくは時間差を与えて撮影を行い、得られた多数の静止画像を動画に加工し特殊映像を得ている。その結果、静止するはずのない状態、すなわち、俳優が飛び上がった瞬間や弾丸を避けるためにのけぞった瞬間、また、水たまりの水が跳ね上がった水しぶきの様子など、これらが静止した状態で視点だけが静止被写体の周囲を回っているような特殊映像が得られ、観客に不思議な感覚を与えることに成功している。

同様に、エンターテインメントの例でもう一例挙げれば、カーネギーメロン大学の金出武雄教授が開発した EyeVisionTM が有名である¹⁾。これは、2001 年、アメリカンフットボール NFL の SuperBowl XXXV の会場で初めて使用された映像システムで、33 台のロボット(自動追尾)カメラを会場であるレイモンド・ジェームス・スタジアムに配置して撮影を行い、タッチダウンなどの決定的な瞬間を、任意視点からの動画映像として放映した。

2.3 流体・燃焼研究分野での「多方向同時撮影」

流体研究や燃焼研究において、1つの研究対象を同時に2方向から撮影することは、しばしば行われてきた²⁾。また、一般的となったステレオ PIV 計測でも、トレーサー粒子分布状況の2~4方向からの同時撮影が行われる。

一方、流動状況や燃焼現象の研究にコンピューター断層造影法(CT)を適用する研究も数多く行われている

* 原稿受付 2010 年 10 月 29 日

** 正会員 名古屋工業大学大学院 機能工学専攻 しくみ領域 (〒466-8555 名古屋市中昭和区御器所町, E-mail: ishino@nitech.ac.jp)

*** 名古屋工業大学大学院 機能工学専攻 ながれ領域

**** 名古屋工業大学大学院 機能工学専攻

が, CT 計測ではより多数の方向から輝度分布や透過率分布の情報を獲得する必要がある. さらに, 計測対象が時間変動する現象である場合には, その多方向からの情報獲得を同時に行う必要が生じる. とくに三次元 CT 計測では, 二次元情報を多方向から同時に得る必要があるため, 「多方向同時撮影」が必要となる.

2.4 「多方向同時撮影」の撮影機材

流体研究や燃焼研究において, 「多方向同時撮影」を行う場合, (i)複数のカメラを並べる, (ii)複数のカメラと複数の鏡を配置³⁾, (iii)単数のカメラと複数の鏡を使用⁴⁻⁸⁾, (iv)多眼カメラを利用⁹⁻¹⁴⁾などの方法が実施される.

Fig. 1 に本研究のために設計・作製した多眼カメラ = 40 眼カメラ¹¹⁻¹⁵⁾の外観と寸法を示す. この多眼カメラには 40 個の小型カメラ用レンズ (5 群 7 枚, 焦点距離 30 mm, F 3.5, 前玉直径 10 mm) が 4.5 度間隔で半周にわたり装着され, カメラの周囲に 35 mm 銀塩フィルム (フジネオパン 400 PRESTO および 1600 PRESTO) が装填される. 露光制御は, 全レンズ正面を同時通過する幅 5 mm のスリット (露光時間: 4 ms) により行う.

また本研究では 158 眼カメラ¹⁰⁾ (Fig. 2 および口絵) も使用している. このカメラは, 40 眼カメラの機能を 4 段重ね, 4 時刻の多方向同時撮影が可能のように設計されており, 平面寸法は 40 眼カメラと同様である. レンズ列が 4 段に配置されるため, フィルムは, ブローニー・サイズを使用する.

なお, ハリウッド特撮映画での多眼カメラの使用例としては, デンゼル・ワシントン主演の SF 映画「デジャブ」での 80 眼カメラの使用が確認されている.

2.5 158 眼カメラのギネス世界記録認定

本研究の 158 眼カメラは, 2009 年 11 月 24 日, 「世界

で最もレンズ数の多いカメラ」としてギネス世界記録に認定された (申請者: 石野・志賀・大岩・齋木). 研究の公表という観点から, ギネス世界記録認定は有益であるので, ここで, ギネス記録の申請から認定までの流れを記載する (情報は申請時).

ギネス申請は, Guinness World Record 社の日本語版または英語版の Web サイトから下記の方法で行う.

- ・英語無料申請 (回答までに約 2 ヶ月必要)
- ・日本語プレミアムサービス (費用 1000 ポンド, 3 営業日以内に回答)
- ・Fast Track 申請 (英文, 費用 400 ポンド, 回答 3 日以内)

また, 申請内容としては, つぎの 2 つの場合がある.

- (a) 従来の記録カテゴリーの記録の更新
- (b) 新たな記録カテゴリーの設定が必要なもの

今回の 158 眼カメラの場合は(b)であったため, (b)の場合の申請～認定の経過について記載を進める. 認められる記録カテゴリーは, 更新できる記録であること, 数値で示すことのできるもの, 危険や犯罪を誘発しないもの, 等の制約があるが, 採否はギネス委員会側の価値判断である. そのため, 今回の申請では,

- ・新カテゴリー内容 (最もレンズ数の多い写真機)
- ・158 眼カメラの特徴 (映画「マトリックス」などの多数カメラを並べる撮影システムとは異なること, 158 個全てのレンズが撮影可能であること)
- ・カメラ自体が世界的に人気のあるアイテムであること
- ・他者が追い越しうる記録であること (ハリウッド特撮映画「デジャブ」での 80 眼カメラの使用)
- ・証拠の提出が可能であること

などを強調して Fast Track による Web 申請を行った. その結果, 即日, 委員会からカテゴリーの承認と設定ルールが連絡された. 設定ルールには,

- ①明らかに 1 台の写真カメラであること

(a) Dimensions of the 40 lens camera

(b) Appearances

Fig. 1 The 40 lens camera

Fig. 2 The 158 lens camera awarded the Guinness world record™. The mobile phone indicates the scale.

- ②全レンズが映像を捉える必要があること
- ③2名の写真技術の専門家の証明が必要（その専門家の知っている限りにおいて最多レンズ数であればよい）

などが提示されていた。③の実現のため、代表的老舗カメラ店2店に158眼カメラを持ち込み、社長・専務取締役から証明のサインを受領し、証拠書類・写真等とともにロンドンのギネス委員会に郵送し、審査を経て、記録認定に至る。

3. コンピュータ断層 (CT) 撮影¹⁴⁾

3.1 CT 計測の概略

CT 計測をあえて定義すれば、「内部構造あるいは内部物理量分布が未知の物体あるいは現象に対して、対象外部の多方向から一次元分布情報あるいは二次元分布情報（「プロジェクションデータ（画像）」と呼ぶ）を獲得（「プロジェクション」）し、それをコンピューターを利用して、仮想的に逆投影（「バックプロジェクション」）することで再構成処理を行い、内部の未知情報を得る計測手法」である。なお、CT 計測においては、使用する電磁波に対して計測対象が「半透明」である必要がある。

3.2 医用 CT 計測

CT 計測手法は、主として医用 CT スキャンの開発として発展してきた。医用 CT では、被検体である人体構造が三次元であるため、三次元情報の獲得が目的とされる。現在の X 線 CT では、三次元 CT 表示は二次元的な画像を連続的に並べて表示されているにすぎない。医用 CT 技術分野においても目標はスキャンレス高速 CT にあり、NEDO プロジェクトで面検出器（スキャンレス化が可能なエレメント数）を有する次々次世代機の研究が進められている¹⁶⁾。しかし、医用 CT 技術では、計測対象が不動体である人体なので、低速の CT スキャンでも対応可能であるが、高速運動を伴う乱流燃焼研究用 CT 技術はこの点で医用 CT 技術を凌駕する必要がある。

3.3 燃焼と CT 計測

CT 解析を用いた火炎計測では、おもに火炎の断面温度分布や断面濃度分布などが計測されている。一方、本研究で扱う青炎の可視域発光強度は、燃焼研究にとって非常に重要な物理量であり、古くから計測対象とされてきた。Najm ら¹⁷⁾および Rehm & Paul¹⁸⁾の否定的な議論もあるものの、青炎からの発光の主要な部分を占める CH や C₂ラジカル発光の強度は、火炎の局所反応速度にほぼ比例する¹⁹⁾と広く言われている。これに基づけば青炎の輝度分布は、乱流予混合火炎の瞬間的な三次元反応速度分布を概ね表現していることになる。

3.4 CT 計測法の分類

CT 計測の形式は、その対象とする物理量の獲得方法に基づき、おもに(1 a)透過 (Transmission) 型 CT 法および(1 b)放射 (Emission) 型 CT 法の2種類²⁰⁾に大別され、多方向同時撮影との組み合わせの容易さを規定

する。

(1 a) 透過型 CT 法：透過型 CT 法では、背後から照射された背景放射が観察領域を透過する際に生じる減衰・干渉などをプロジェクションデータとして扱う。医用 X 線 CT スキャンが有名。燃焼研究では、赤外線背景光を利用し火炎断面の温度分布や化学種濃度分布を再構成した例など多くの実施例がある。背景放射を必要とし装置が複雑化するため、高速スキャンレス CT 化が容易ではない。

(1 b) 放射型 CT 法：放射型 CT 法は、観察対象自らが放出する光（可視光、赤外光）や照明の散乱光などを計測対象とする形式。時間平均三次元温度場の計測例などがあるが、高速スキャンレス三次元 CT 計測の実施例はまだ少ない。背景放射を必要とせず、多方向同時撮影の方向数の増加が容易である。

また、CT 再構成アルゴリズムについては、(2 a)～(2 d)などが適宜利用される。

(2 a) バックプロジェクション法 (BP 法)

(2 b) フィルタードバックプロジェクション法 (FBP 法)

(2 c) 代数的反復法 (ART)

(2 d) 分配バックプロジェクション法 (DBP 法)^{14,15)}

(2 e) フェルドカンパ法²¹⁾

筆者らが研究で多用する分配バックプロジェクション法 (DBP 法) は、反復演算による分配型の BP 法として開発を行ったもので、確率論的に妥当性が証明されている MLEM 法¹⁴⁾と同等の処理を行っている。屈折・反射・三次元化への対応が容易であり、プロジェクション方向数の少ない場合にも良好な再構成が得られる。フェルドカンパ法は三次元 CT 再構成手法の一つである。

4. 多方向同時撮影三次元 CT 法

以下に、多眼カメラによる1時刻の三次元 CT 再構成データ取得方法の原理について、40眼カメラを例にして、述べる。本手法ではまず、観察領域に乱流予混合火炎（観察対象輝度分布体）を設置し、40眼カメラによって40方向から同一時刻に撮影を行い、40枚の二次元プロジェクション画像を獲得する。この際、三次元 CT 再構成の方法には、下記(1)および(2)の2種類がある。

(1) 二次元積層型三次元 CT 再構成：プロジェクション画像から同一高度の一次元輝度情報を取り出し、各高度毎に求めた水平断面 CT 再構成画像を高さ方向に積み重ね、三次元分布を獲得する。

(2) 純三次元 CT 再構成^{15,21)}：全プロジェクション画像から三次元再構成を行う。

ところで、火炎の自発光を計測する場合、光量を確保するために遅いシャッター速度に設定する必要があるが、火炎の流下に伴う画像のブレを低減するため、多眼カメラを予混合気の流出速度で高速移動させる例^{4,10-13,15)}もある。

40 眼カメラでは、通常、1 時刻で撮影を行うが、スリットシャッターの位置をレンズ毎に上下にずらし、スタガード配置とすることで、2 時刻の三次元データを獲得することができる⁹⁾。また、158 眼カメラでは、40 レンズによる 2 時刻と、39 レンズによる 2 時刻の合計 4 時刻の多方向同時撮影を行う¹⁰⁾。

多方向同時撮影三次元 CT 法は、他の非浸襲計測方法との複合計測が可能である。例えば、高速度カメラ撮影^{11-13,14)}、PTV 計測^{9,10)}との複合計測例が実施されている。計測対象としては、火炎輝度の他に、予混合ガスに混入させたオイルミストをフラッシュライトで照明し、多方向同時撮影と三次元 CT 再構成を行い、高速火炎の未燃領域の三次元形状の獲得に成功した例⁹⁾もある。

5. 計測結果 1 : 158 眼カメラ CT 法と三次元 PTV 計測の複合計測¹⁰⁾

5.1 装置および方法

158 眼カメラによる多方向同時撮影・三次元 CT 法による火炎輝度分布計測と、3 カメラによる三次元 PTV 計測との同時計測^{9,10)} (Fig. 3) を行い、未燃予混合気の流速分布と火炎形状の関係を調査することを目的とする。

多眼カメラの撮影タイミングは、第 1 時刻を $t = 0$ ms とし、第 2 時刻は $t = 1.2$ ms, 第 3 時刻は $t = 10.0$ ms, 第 4 時刻は $t = 11.2$ ms に設定した。

三次元 PTV 計測では、30 度の間隔で設置した 3 台のデジタルカメラ(ニコン D 80, タムロン SP AF 90 mmF/2.8, 干渉フィルター (Melles-Griot, 03 FIV 111 中心透過波長: 532 nm) 使用)を用いて、火炎中を流れるトレーサ粒子 (ガラスマイクロバルーン (粒径: 20 μm)) の撮影を行い、ステレオ法を用いた粒子位置移動距離の算出から予混合気流速を測定する。トレーサ粒子は、158 眼カメラ撮影の第 1 時刻と第 2 時刻との間に 1 ms 照射される CW レーザー光 (波長 532 nm, 出力 260 mW, 断面 20 mm $\times$ 5 mm) の照射により、散乱光像として撮影される。中央カメラの映像は、左右カメラ映像から算出した三次元粒子軌跡の検証に利用する。

計測対象火炎は、円管バーナー (内径 19 mm, 乱流格子設置) 上に形成される乱流予混合火炎 (プロパン空気, 当量比 1.5, 予混合気平均速度 $U = 1.76$ m/s, レイノルズ数 2144, 相対乱れ強さ 8%) である。

5.2 結果

Fig. 4 に、多眼カメラの第 1 時刻で撮影されたプロジェクション画像を示す。第 2 時刻から第 4 時刻においても同様にプロジェクション画像を獲得できており、4 時刻それぞれの任意の位置での瞬間的な三次元輝度分布を獲得することが可能である。これらのプロジェクション画像を用いて CT 処理を行い、撮影火炎を三次元再構成した。再構成によって得られた 4 時刻の垂直断面輝度

Fig. 3 Three-camera Stereoscopic PIV combined by multi-lens-camera 3DCT

Fig. 4 Forty projection images taken for 1st-shot with multi (158)-lens camera. 118 projections for other 3-shots have been also taken.

Fig. 5 Cross-sectional images of 3D-CT reconstruction in central longitudinal planes ($y = 0$ mm). 1st-shot: $t = 0$ ms, 2nd-shot: 1.2 ms, 3rd-shot: 10.0 ms, 4th-shot: 11.2 ms.

分布を Fig. 5 に、また第 1 時刻の水平断面輝度分布を Fig. 6 に示す。

つぎに三次元 PTV 計測により得られた 16 個の粒子の三次元軌跡を、三次元 CT 再構成された火炎輝度三次元分布に重畳させた鳥瞰図を Fig. 7 に示す。また Fig. 8 には当該瞬間の火炎面の上部をグリッド表示した鳥瞰図を示す。両者の位置関係から未燃予混合気の流動と火炎面形状との関係を調べることが可能となる。連続した時間間隔での火炎面位置変化から、瞬間局所燃焼速度分布の試算が試みられている^{9,10)}。

6. 計測結果 2 : 立体配置マルチミラー光学系とシングル高速度カメラによる四次元計測⁴⁻⁷⁾

6.1 装置および方法

Fig. 9 に、マルチミラー光学系を用いた、単一カメラによる火炎の多方向同時撮影の概念図を示す。図中には、(1)平面鏡 (26 枚), (2)平面鏡固定枠, (3)撮像装置 (例:

Fig. 6 Emission light images taken by CT reconstruction in various cross-sectional planes for the 1st shot; Note that see Fig.5 for vertical positions

Fig. 7 Location of the particles on 3-D-CT data

Fig. 8 Grid of the target flame front on 3-D-CT

デジタルカメラ, 高速度ビデオカメラ), (4)平面鏡配置位置の基準となる回転楕円面, (5)楕円面焦点1 (被写体側), (6)楕円面焦点2 (撮影側), (7)被写体 (例: 乱流予混合火炎), (8)バーナー, (9)撮影火炎像, (10)バーナーによる欠像領域, (11)撮影光路, および(12)三次元 CT 演算システムが示されている. このシステムでは, 多数の平面鏡群(1)が, バーナー中心軸上に2つの焦点 (5, 6) を持つ回転楕円面(4)上に立体的に配置される. 上側の楕円面焦点(5)には, 被写体である乱流火炎(7)を設置し, 一方で下側の楕円面焦点(6)には撮像装置(3)を配置する. Fig. 9 に例示するようにこの撮像装置は, その視野に全ての平面鏡が入るように設置され, 平面鏡に反射された多方向からの火炎像を同時に撮影することが可能である. なお, 回転楕円面の採用は, レンズから各平面鏡を経て火炎に到達する全ての光路長を一定として, 全ての火炎像に合焦させるためである. ここで, Fig. 10 に製作したマルチミラーシステム⁴⁻⁷⁾の外観写真を示す. この装置では, 26枚の角度微調整可能な平面鏡が, スチール製の平面鏡固定枠によって内向きに固定される.

撮像装置であるデジタル高速度カメラ (Photron 製, FASTCAM-512 PCI, 512×512 画素) は, 撮影速度 1000 fps およびシャッタースピード 1/1000 s に設定した.

計測対象火炎は, 円管バーナー (内径 19 mm, 乱流格子設置) 上の乱流予混合火炎 (プロパン/空気, 当量

Fig. 9 Schematic of the multi-mirror optical system for simultaneous multi-directional photography

Fig. 10 Overview of the multi-mirror optical system for simultaneous multi-directional photography with a single camera.

比 1.5, 予混合気平均速度 $U=1.76$ m/s) である.

6.2 結果

はじめに, Fig. 11 に 1000 fps で高速度撮影されたプロジェクション画像の一例を示す. つぎに, Fig. 12 および Fig. 13 に, 1 ms 毎の 5 時刻の三次元 CT 再構成結果を示す. ただし, Fig. 12 では三次元再構成データは, 斜め上方から見た鳥瞰図として表現されている. また, Fig. 13 では, 3 方向の断面輝度画像として表した. これらにより, 火炎の内部構造の時系列三次元 CT 計測, すなわち, 四次元計測が達成されていることが判る.

Fig. 11 Projection images of turbulent premixed flame ($t=0$ ms) taken by simultaneous multi-directional photography with a single high-speed camera and the multi-mirror system

Fig. 12 Time series emission light images taken by 3 D-CT reconstruction using multi-mirror system

Fig. 13 Time series emission light images taken by 3 D-CT reconstruction ($t=0\sim 4$ ms). Top and middle figures are for central longitudinal planes. Bottoms are for cross-sectional plane at $z=10$ mm

7. 結言

本稿では、多方向同時撮影の例、三次元 CT 計測の概説、および両者を組み合わせた計測手法「多方向同時撮影三次元 CT 法」について記載した。この方法により、北海道大学・英国インペリアルカレッジのグループ⁸⁾や、Upton ら³⁾も、乱流火炎の三次元 CT 計測研究を実施しており、多方向同時撮影三次元 CT 法を、燃焼計測研究に於ける標準技術として確立させる機運が急速に高まっているといえる。

謝 辞

研究の実施に際し、科学研究補助金 (No.19560203) の援助を受けた。また、実験、数値処理等の実施に際し、本学学生 (含む：当時)、竹内慧氏、志賀早希子氏、珠久陽輔氏、徐ヨウ氏、堀本健一氏らの協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) www.takeda-foundation.jp/reports/pdf/
- 2) 石野洋二郎, 杉浦啓介, 大岩紀生: 平面予混合せん断流中の組織構造における火花点火火炎の伝播挙動 (二方向同時撮影による火花点火火炎の光学的観察), 日本機械学会論文集 (B 編), 68-665, (2002), pp.231-237.
- 3) Upton, T. D., Verhoeven, D. D., Hudgins, D. E.: High resolution computed tomography of a turbulent reacting flow, Experiments in Fluids, Online First, 14 June (2010)

- 4) 大北雄哉, 徐ヨウ, 堀本健太, 齋木悠, 石野洋二郎: シングル高速度カメラ・マルチミラー光学系と 3 D-CT 法による乱流予混合火炎輝度分布の時系列三次元計測, 第 48 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2010), 掲載決定.
- 5) 徐ヨウ, 大北雄哉, 齋木悠, 石野洋二郎, 大岩紀生: マルチミラー光学系と 1 台のカメラを用いた多方向同時撮影による乱流予混合火炎の三次元 CT 計測, 第 47 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2009), pp.374-375.
- 6) 齋木悠, 大北雄哉, 徐ヨウ, 堀本健太, 石野洋二郎: マルチミラー光学系と三次元 CT 法による乱流予混合火炎の時系列三次元計測, 可視化情報学会論文集, 掲載決定.
- 7) 大北雄哉, 徐ヨウ, 齋木悠, 石野洋二郎, 大岩紀生: 日本機械学会東海支部第 59 期総会講演会講演論文集, No. 103-1 (2010-3) pp.139-140.
- 8) 村井祐一, 田中大樹, 田坂裕司, アレックス・テイラー: 火炎断層計測のための Two-Way 線形後退投影 CT スキーム, 第 47 回燃焼シンポジウム講演論文集, Vol.II+III, (2010), pp.575-576.
- 9) 富田和史, 志賀早希子, 齋木悠, 石野洋二郎, 大岩紀生: 40 眼カメラ CT 法およびステレオカメラ PTV 法の同時計測による乱流予混合火炎の局所瞬間燃焼速度の獲得, 第 47 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2009), pp.444-445.
- 10) 富田和史, 珠久陽輔, 堀本健太, 齋木悠, 石野洋二郎: 158 眼カメラ 3 D-CT 法および 3 D-PTV 法の同時計測による乱流予混合火炎の火炎面移動量と未燃予混合気流速の把握ならびに局所燃焼速度の試算, 第 48 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2010), 掲載決定.
- 11) Ishino, Y., Takeuchi, K., Shiga, S., Ohiwa, N.: Non-Scanning 3 D-CT Measurement with 40-Lens Tracking Camera for Turbulent Propane/Air Rich-Premixed Flame, Proc. of The 6th International Energy Conservation Engineering Conference (IECEC), AIAA
- 12) Ishino, Y., Hirano, T., Hirano, M., Ohiwa, N.: Non-Scanning 3 D-CT Visualizations of Premixed Flames with a 40-Lens Camera, Proc. of The 6th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing: PSFVIP-6, No. A 02-2, (2007), pp.44-49.
- 13) Ishino, Y., Inagawa, O., Ohiwa, N.: Non-scanning 3 D-CT measurement of Premixed Flames, "Turbulence, Heat and Mass Transfer 5", Ed. by K. Hanjalic, Y. Nagano and S. Jakirlic, (2006), pp.617-620.
- 14) 石野洋二郎, 大岩紀生: 乱流火炎形状のスキャンレス三次元 CT 計測—40 眼カメラによる多方向同時撮影法と三次元 CT 法による乱流予混合火炎の瞬間輝度分布の三次元計測—, 燃焼学会誌, 46-137, (2004), pp.142-152.
- 15) Saiki, Y., Tomida, Y., Shiga, S., Ishino, Y., Ohiwa, N.: Measurement of a local burning velocity of a turbulent premixed flame by simultaneous 3 D-CT Reconstruction with 40-lens camera and stereoscopic PTV, Proc. of the 8th Int'l ERCOFTAC Sympo. on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, pp.1-6
- 16) 片田, CT の近未来, 高橋・荒川編, Multidetector Helical CT のすべて, 金原出版 (2002), p.211.
- 17) Najm, H. N., Paul, P. H., Mueller, C. J. and Wyckoff, P. S., Combust. Flame 113 (1998), pp.312-332 (1998).
- 18) Rehm, J. E. and Paul, P. H., Proc. Combust. Inst. 28 (2000), pp.1775-1782
- 19) Hurler, I. R., et al., Proc. Royal Soc. Lond., Ser. A 303 (1968), pp.409-427.
- 20) Correia, D. P., Ferrao, P. and Caldeire-Pires, A., Proc. Combust. Inst. 28 (2000), pp.431-438.
- 21) 斎藤恒雄: 画像処理アルゴリズム, 近代科学社 (1993) p.156.