

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06118

研究課題名(和文)フラッシュ・シュリーレン3D-CT法による実用乱流火炎の実像獲得

研究課題名(英文) Three dimensional reconstruction of high speed turbulent flames by flash light schlieren 3D CT(computer tomography) technique

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：20本の超高速発光フラッシュ光源を増設した20方向同時撮影シュリーレン・カメラと三次元CT(コンピュータ断層造影)法とを組み合わせた「フラッシュ・シュリーレン3D-CT法」を開発し、高速変動する熱流動現象(バーナー火炎、火花点火火炎、衝撃波など)の瞬間三次元密度分布の計測を実施した。また、ガス漏れ検知機にも応用可能な、空気中に分散する多種燃料ガスの当量比の三次元計測技術も開発した。理論面では、複素シュリーレン画像の概念の発案、および、それを用いたCT画像処理における画像ノイズの低減技術の開発も行い、2件の学会賞(「アメリカ熱流体学会・最優秀論文賞」、 「可視化情報学会・技術賞」)を受賞した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3次元現象でありながら計測が困難で、これまで、2次元的な計測・研究が主流であった、高速変動を伴う熱流動現象(乱流火炎、爆発、超音速噴流)に対して、その3次元瞬間実像を提供する最先端計測技術「フラッシュ・シュリーレン3D-CT法」を開発し、それらの三次元計測データを提示することで、研究活動の対象次元を2次元(平面)から3次元(実空間)へと格上げするパラダイムシフトをもたらす研究成果をあげた。このCT(コンピュータ断層造影)法は、いわゆる医学のCTであり、医用CTでも実現できていない「瞬間CT」を、医用技術に先駆けて実現することにも成功した。

研究成果の概要(英文)：Flash schlieren 3D-CT (Computer Tomography) technique is improved by new multi(20) directional schlieren camera with high-speed flash lights. This measurement technique has been applied for obtaining the instantaneous 3D distributions of high-speed fluctuating flow phenomena; i.e. turbulent flames, spark ignited flame kernels and supersonic jets. The measurement technique for 3D distribution of equivalence ratio of multi-fuel component has been also invented. The theoretical research has been made, showing new concept of "complex schlieren image". This novel concept has been utilized for image noise reduction for CT reconstruction processing, bringing us to win two academic prizes; 2019 best paper award of American Society of Thermal and Fluids Engineers (ASTFE) and 2019 Technical prize of the Visualization Society of Japan.

研究分野：熱工学

キーワード：三次元CT計測(コンピュータ断層造影法) 燃焼 超音速流れ 多方向定量シュリーレン法 直噴エンジン 当量比分布計測 画像ノイズ低減

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

燃焼現象は、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(88.9%)を担うと予測され[IEA 見通し]、地球環境保全にとって最も重要な要素技術である。とくに、乱流火炎に代表される三次元非正常火炎は、高性能燃焼装置には不可欠であるが、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掌握を妨げている。

乱流火炎の詳細構造に関する知見を獲得する為に、多くの研究技術が提案されてきたが、三次元非正常火炎全体の瞬間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い。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・レーリヤ法・PIV法による濃度・温度・速度場の計測は現在、標準的技術となったがその多くは二次元計測に留まっている。一方で、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であり、多次元燃焼計測技術の飛躍的發展が待たれていた。

このような状況に鑑み、研究実施者らは、以下のような研究を始めていた。

研究実施者の関連研究では、当初、局所反応速度(局所燃料消費率)を表す予混合火炎(青炎)の瞬間輝度分布を対象とする三次元CT輝度計測を実施した。火炎追尾機能付き40眼カメラによる研究成果としては、2001年、定常予混合火炎と粉末混入噴流の瞬間三次元像の可視化技術についての講演発表の後、希薄乱流火炎、過濃乱流火炎、火花点火球面伝播火炎について、火炎輝度ならびに局所燃焼消費率の瞬間三次元分布を計測し公表した。さらに、乱流火炎面の全体形状と局所燃焼速度の実測にも成功した。2004年には、燃焼の三次元CT計測に関する総説を日本燃焼学会誌に寄稿した。158眼カメラは、2009年、ギネス世界記録に認定された。2010年には、26枚の平面鏡から成るマルチミラー光学系と1台の高速度カメラにより、三次元輝度分布の1kHz時系列計測に成功した。本手法はSGI映像賞(可視化情報学会)、技術賞(可視化情報学会)を授与され、高い評価を受けた。

乱流火炎の三次元CT計測研究は、他の国内外の研究グループも研究を開始し、燃焼計測の標準技術として確立させる機運が急速に高まっており、本研究の重要性・緊急性は極めて高かった。

2. 研究の目的

本研究では、高速流動を有する非正常現象を対象とし、現有の「多方向同時撮影フラッシュ・シュリーレン・カメラ」での画像獲得と三次元CT再構成から成る「フラッシュ・シュリーレン3D-CT法」により、対象の瞬間三次元密度分布の三次元再構成を行い、各種熱流動現象の3次元的な瞬間実像を提示することを目的とした。

3. 研究の方法

研究期間を平成28年度～平成31年度の4年間と設定し、計測実験では(1)バーナー火炎、(2)火花点火火炎および(3)衝撃波(超音速噴流)を計測対象とし、1年目にそれらの流動現象の生成装置をそろえ、計測は2年目までにほぼ終了し、3～4年目は、再実験と、成果公表(学会発表、論文発表)に備えた。

本研究で対象とする(1)バーナー火炎、(2)火花点火火炎 および (3)衝撃波の多方向シュリーレン撮影に対しては、現有の「多方向同時撮影フラッシュ・シュリーレン・カメラ」では、時間分解能が不足するため、20台の光源を、発光時間がサブマイクロ秒の超高速フラッシュライトに換装し、超音速現象などの高速流動現象に対応した。

また、多方向撮影画像の画像変換と三次元CT再構成を行う処理プログラムについては、当初予定していなかった理論的研究も行った。具体的には、「シュリーレン画像の複素数的性質」の発見に伴い、画像処理におけるノイズリダクション法の開発と実装を行った。

一方、本研究で用いる「定量シュリーレン法」により、予混合ガス(空気に燃料が混入したガス)の当量比(着火、燃焼のしやすさを表す指標)が、ほとんどの燃料において、そのガスの屈折率の関数(ユニバーサルな関数)となることを発見し、多種燃料が混在する不均一予混合ガスの当量比分布の瞬間三次元分布計測も実施した(特許出願済み)。

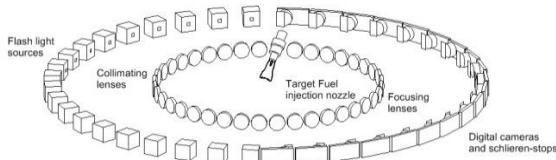
4. 研究成果

(1) 直噴エンジンモデルにおける燃料噴流と火炎核の瞬間三次元密度場の計測

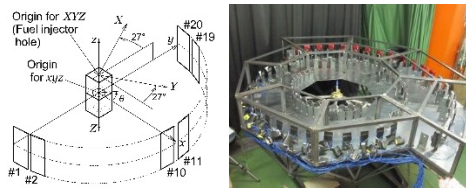
緒言 20組のシュリーレン光学系から構成される20方向シュリーレンカメラを使用し、燃料インジェクター、燃料噴流を偏向させる半球形凹み(キャビティ)および点火電極から成る直噴エンジンモデルにおける、燃料噴流と火炎核の瞬間三次元密度分布の三次元CT再構成を試みた。

計測装置および計測方法

はじめに、多方向定量シュリーレンカメラの詳細について示す。この装置は、図1-1(a)に構成図を示すように、20組の定量シュリーレン光学系から成る。各定量シュリーレン光学系は、フラッシュライトで裏面照射された矩形(水平方向1mm×鉛直方向2mm)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50mm、焦点距離300mm)を用いた。撮影装



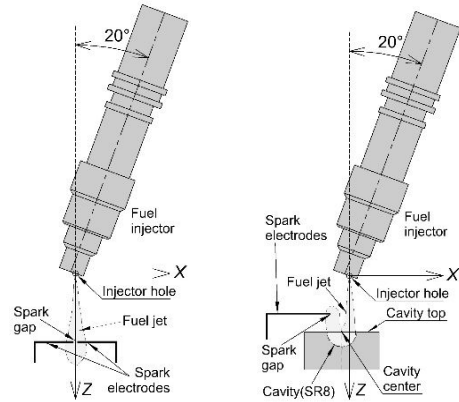
(a) 多方向シュリーレンカメラの概念図



(b) 座標系

(c) 写真

図 1 - 1 20 方向シュリーレンカメラ



(a) Free jet

(b) Cavity guide jet

図 1 - 2 燃料噴射器と噴射の詳細

置には、デジタルミラーレス一眼カメラボディ（ニコン製，J1）および小型カメラ用レンズ（5 群 7 枚構成，焦点距離 30mm，F3.5，前玉直径 10mm）を使用する。シュリーレン・ストップには、鉛直方向ナイフエッジを使用し，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。

図 1 - 2(a)および(b)に，本実験で使用する燃料インジェクター，点火電極およびキャビティーの位置関係を示す。燃料インジェクター（三菱電機製，EAT317。スズキ K6A エンジンに装着）は，出口径 0.15mm の噴射孔を 4 孔 × 2 列（8 孔）有し，2 本の燃料噴流（間隔 40°）を生成し，K6A エンジンの 2 つの吸気経路に対してポート噴射できる。本研究では，図 2 に示すように，噴射孔 1 列を塞いだ燃料インジェクターを 20° 傾けて設置することで，鉛直下向きの 1 本の燃料噴流を得た。燃料にはプロパンガスを使用した。図 2(a)は，燃料の自由噴流に対して火花点火を実施し，火炎核を得る，自由噴流実験を示す。また図 2(b)は，直噴ガソリンエンジンにおけるピストン凹部で制御された燃料噴流への火花点火を想定したモデル実験の様子を示す。ピストン凹部を模擬する凹部は，直径 8 mm，深さ 4 mm の半球形であり，球中心の位置によりキャビティーの位置を表す。

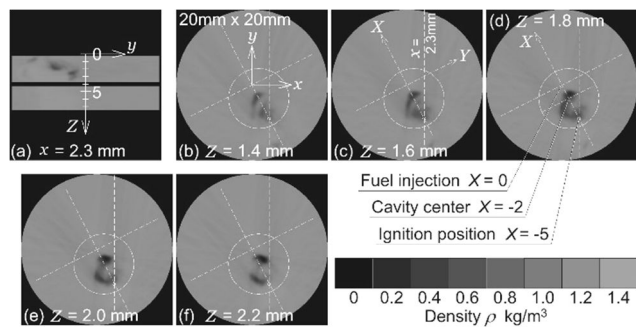


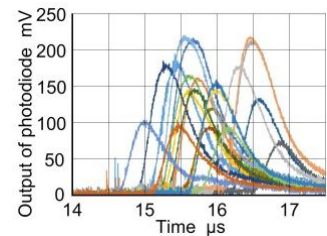
図 1 - 3 Horizontal and vertical distributions of CT density distribution

結果（直噴エンジンモデルにおける点火実験）

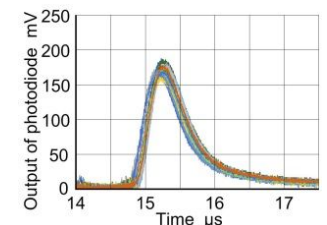
燃料インジェクターからの燃料噴流が，キャビティー凹部によって偏向され，点火電極ギャップに到達し，火花点火により火炎核が形成された結果を示す。キャビティー位置 $(X, Y, Z) = (-2 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 8 \text{ mm})$ ，点火電極ギャップ位置 $(X, Y, Z) = (-5 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 4 \text{ mm})$ ，燃料噴出時間 5 ms，点火時刻 6 ms，光源のフラッシュ時刻 7 ms である。図 1 - 3 に，断面の瞬間密度分布の CT 再構成結果を示す。図 1 - 3 (a)は yz 面 ($x = 2.3 \text{ mm}$ ，点火電極の x 座標に相当) の垂直断面の密度分布，図 1 - 3 (b-f)は水平断面の密度分布を表す。再構成の領域サイズ，データ数およびボクセルサイズは，20 mm(x) × 20 mm(y) × 16 mm(z)，500 (x) × 500 (y) × 400 (z) および 0.04 mm である。図 1 - 3 (b-f)の水平断面分布図には，キャビティー位置（直径 8 mm）と XY 軸を図示した。高温の低密度ガスである火炎核の存在を示す低密度領域（暗部）が，インジェクター噴孔とは反対側のキャビティーの縁部に存在することが確認される。

(2) 超音速噴流の非定常流動現象の瞬間密度分布の計測

緒言 ここでは，高速フラッシュ光源への換装により可能となった，超音速噴流後部の高速変動流れの瞬間密度分布の計測について記載する。



(a) Histories without trimming.



(b) Trimmed flash histories

図 2 - 1 発光の時間履歴

計測装置，方法，結果
 図 2 - 1 に，換装した短時間光源(浜松ホトニクス，L13821-01，発光半値幅 $0.6\mu\text{s}$) 20 台の発光時間履歴を示す．同時入力されたトリガー信号からの発光履歴の時間差は，無調整時には図 2 - 1 (a) のように $2\mu\text{s}$ であるが，調整後，図 2 - 1 (b) のように時間差が短縮された．この光源を搭載した 20 方向定量シュリーレンカメラにより，出口形状が，1 辺 1mm の正方形の超音速ノズルからの超音速噴流（圧力比 5.0）の瞬間シュリーレン画像を獲得した（図 2 - 2，図 2 - 3）．発光時間 $10\mu\text{s}$ 程度の低速フラッシュ光源では，衝撃波構造は整列して撮影されるが，短発光写真では左右に偏移した構造が確認される（例えば，図 3 (d)）．この偏移構造は，図 2 の画像データを三次元 CT 処理により三次元再構成したデータの三次元表示（密度 $1.4 \sim 2.0 \text{ kg/m}^3$ を実体表示）である図 4 により，より明確に示される．

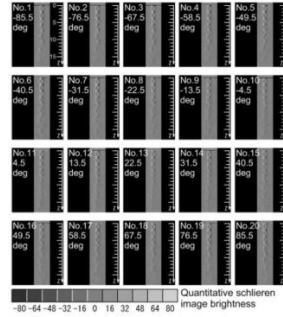


図 2 - 2 20 方向同時画像

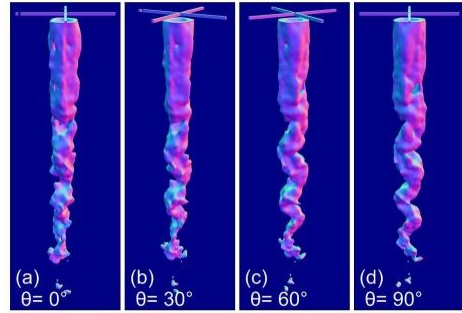


図 2 - 3 再構成結果の立体表現

図 2 - 2 20 方向同時画像

(3) 不明種類の多種燃料が混在する予混合気の当量比の三次元分布の計測

緒言 本計測法を「成分不明な複数種類の燃料が混在する予混合気の当量比」の計測に用いて，当該予混合気が存在する流れ場の瞬間三次元当量比分布の計測を試みた．また，CT 再構成精度の向上の為，画像解析を行う前にノイズの低減（ノイズリダクション）を目的とした画像処理が必要であると考えられる．そこで，従来のシュリーレン画像を拡張した「複素シュリーレン画像」という概念を導入し，その特性を用いた新しいノイズリダクション技術を提案する．

当量比計測

本研究では，多方向シュリーレンカメラにより獲得した定量シュリーレン画像群から得られる「修正光路長分布画像」群をプロジェクションデータとする三次元 CT 法により瞬間三次元修正屈折率分布を獲得し，その修正屈折率分布から当量比分布を獲得する手法を提案する．この手法を用いれば炭素数 3 以上の炭化水素系燃料ならば，成分不明の燃料が複数種類存在する場であってもその当量比の瞬間三次元分布の獲得が可能となる．

図 3 - 1 に予混合気の当量比と密度の関係を示す．図 3 - 1 において，同じ当量比であっても，燃料種ごとに予混合気の密度が大きく異なることがわかる．つぎに，当量比と修正屈折率 n_m ($=n - 1$, n : 屈折率) の関係を図 3 - 2 に示す．修正屈折率の算出には，のグラッドストーン・デール定数 k を用いた．図 3 - 2 において，メタン，エタンを除き，異なる燃料種であっても，その予混合気の修正屈折率と当量比とが，一本の直線で表されることがわかる．図 3 - 2 において，メタン，エタンを除き，ほぼ一本の直線で表せることがわかる．この関係式を基にすれば，修正屈折率から当量比を求める場合に，燃料毎に異なる定数などは不要で，成分不明な複数の燃料が複雑に混ざり合った場でも，当量比の計測が可能である．この方法はガス報知器などへの応用も可能である．

- 1 再構成結果

図 3 - 3 は，ノズルからの高さ $z = 15 \text{ mm}$ の水平断面の再構成結果である．図 3 - 4 に $x = 0 \text{ mm}$, $z = 15 \text{ mm}$ の直線上での修正屈折率 n_m と当量比 ϕ の分布を示す．異なった燃料種（右：プロパン，左：ガソリン）であるにも関わらず，左右でほぼ同じ当量比が示され，設定当量比 1 に近い値となった．図 3 - 5 に，再構成分布の立体表示を示す．修正屈折率の閾値を 3.0×10^{-4} とした．

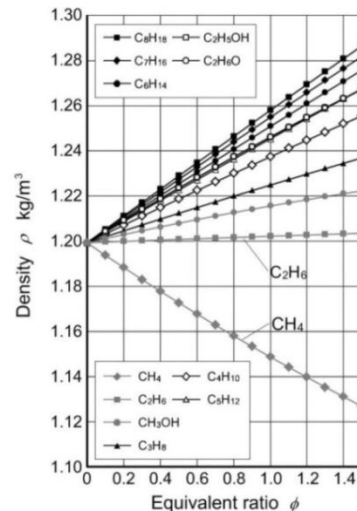


図 3 - 1 ϕ と ρ の関係

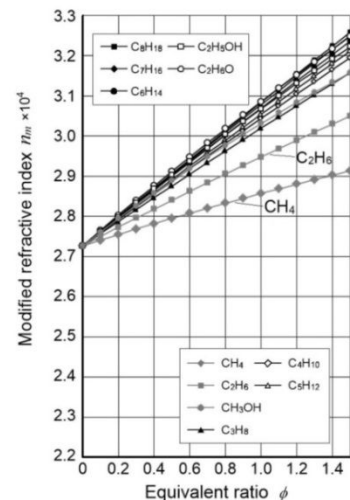


図 3 - 2 ϕ と n_m の関係

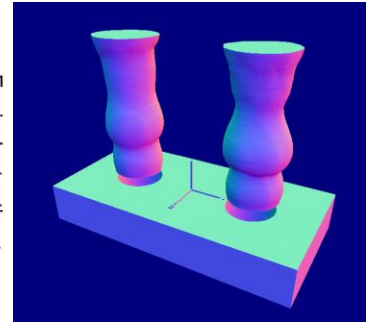
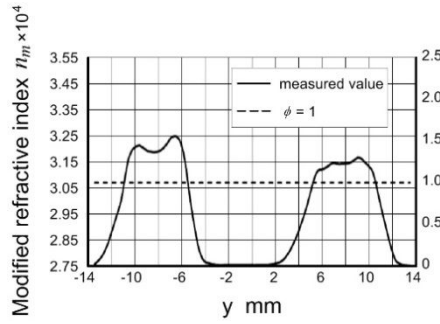
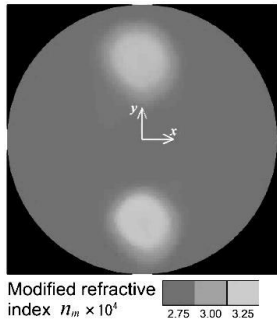


図3 - 3 n_m の CT 再構成分布

図3 - 4 n_m と当量比の分布

図3 - 5 当量比の立体表示

(4) 複素シュリーレン画像を基礎とするノイズ除去技術

図4 - 1 に密度偏差厚さの等高線表示の一例を示す．このとき，シュリーレン画像の輝度値は曲面の勾配で与えられる．例えば， y 軸に対して平行なナイフエッジをシュリーレン・ストップとして用い， $+x$ の方向へ光束を切る場合，シュリーレン画像の輝度を計測することで赤曲線の勾配が得られる．一方，ナイフエッジを 90° 傾けた場合は，青曲線の勾配が得られる．したがって，水平方向（赤，Real part）と鉛直方向（青，Imaginary part）の2方向のシュリーレン輝度情報を同時に考えることで，任意の位置における密度偏差厚さ分布の複素勾配が得られ，シュリーレン画像から密度厚さ分布を得るために行う空間積分を任意の経路上で行うことができるようになり，ノイズ領域を回避するノイズリダクションが可能となる．本研究では，直交する2方向の密度偏差厚さの勾配の情報を持ったシュリーレン画像を「複素シュリーレン画像」と呼ぶ．

- 1 積分経路とノイズ除去技術

複素平面のある領域において，コーシーの積分定理より，以下の定理が成り立つ．

$f(z)$ を単連結領域 D で正則な関数とし， C を D 内のある閉曲線とすると，

$$\oint_C f(z) = 0 \tag{1}$$

また， a, b を単連結領域 D の任意の2点とすると，

$$\int_a^b f(z) = f(b) - f(a) \tag{2}$$

つまり，複素平面においては，式(1)より，ある領域を囲む閉曲線で関数 $f(z)$ を積分すると，その積分の値は必ず 0 になる．また，式(2)より，積分の値は，始点と終点の値によってのみ決まり，積分経路にはよらない．以上の定理を応用して，ノイズ除去技術を開発する．すなわち，図4 - 2 に示すように，任意の位置における密度厚さ値を求める空間積分の際に，(i)密度厚さが既知の領域からの任意の複数経路による空間積分，および(ii)任意の複数の閉経路上の空間積分値が 0 となるようにノイズを除去する，といった手法を採用することができることが示された．

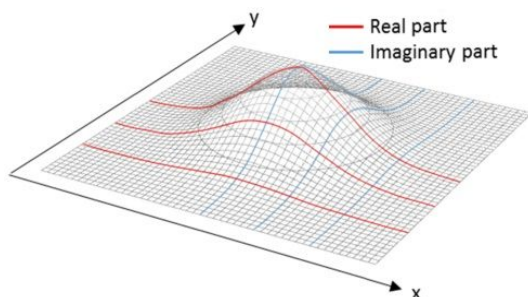


図4 - 1 複素シュリーレン画像の説明

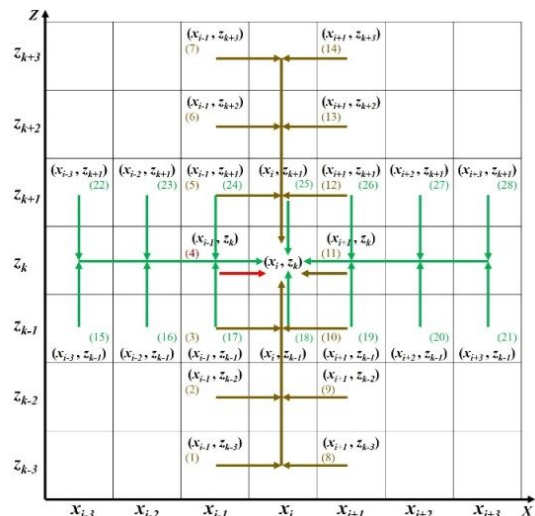


図4 - 2 空間積分経路

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 NAZARI, Ahmad Zaid, ISHINO, Yojiro, KONDO, Harumi, MOTOHIRO, Takanori, YAMADA, Ryoya and ITO, Fumiya	4. 巻 -
2. 論文標題 Multi-Schlieren 3D-CT Measurements of Instantaneous Equivalence Ratio Distributions of a Premixed Gas Field Based on Modified Refractive Index	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本燃焼学会誌論文	6. 最初と最後の頁 掲載決定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ahmad Zaid Nazari, Yojiro Ishino, Yuta Ishiko, Fumiya Ito, Harumi Kondo, Ryoya Yamada, Takanori Motohiro, Yoshiaki Miyazato, Shinichiro Nakao	4. 巻 8
2. 論文標題 Multi-Schlieren CT Measurements of Supersonic Microjets from Circular and Square Micro Nozzles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Flow Control, Measurement & Visualization	6. 最初と最後の頁 77,101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ahmad Zaid Nazari, Yojiro Ishino, Fumiya Ito, Harumi Kondo, Ryoya Yamada, Takanori Motohiro, Yu Saiki, Yoshiaki Miyazato, Shinichiro Nakao	4. 巻 8
2. 論文標題 Quantitative Schlieren Image-Noise Reduction Using Inverse Process and Multi-Path Integration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Flow Control, Measurement & Visualization	6. 最初と最後の頁 1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 S. Sugawara, S. Nakao, Y. Miyazato, Y. Ishino and K. Miki	4. 巻 893
2. 論文標題 Three-dimensional reconstruction of a microjet with a Mach disk by Mach-Zehnder interferometers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Fluid Mech.	6. 最初と最後の頁 A25-1, A25-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2020.217	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Z. Nazari, Y. Ishino, R. Yamada, T. Motohiro, F. Ito, H. Kondo, Y. Miyazato, S. Nakao	4. 巻 -
2. 論文標題 CT (COMPUTER TOMOGRAPHY) MEASUREMENT OF 3D DENSITY DISTRIBUTIONS OF HIGH-SPEED PREMIXED TURBULENT FLAMES (MULTI-PATH INTEGRATION IMAGE-NOISE REDUCTION TECHNIQUE BASED ON NOVEL CONCEPT OF COMPLEX BRIGHTNESS GRADIENT IN QUANTITATIVE SCHLIEREN IMAGES)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th International Symposium on Flow Visualization	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Sugawara, S. Nakao, Y. Miyazato, and Y. Ishino	4. 巻 -
2. 論文標題 APPLICATION OF TWYMAN-GREEN INTERFEROMETERS FOR SHOCK-CONTAINING FREE JETS FROM AXISYMMETRIC CONVERGENT MICRO NOZZLES	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th International Symposium on Flow Visualization	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ahmad Z. Nazari, Yojiro Ishino, Ryoya Yamada, Takanori Motohiro1, Fumiya Ito, Harumi Kondo, Yoshiaki Miyazato, Shinichiro Nakao	4. 巻 TFEC-2019-27746
2. 論文標題 CT (COMPUTER TOMOGRAPHY) MEASUREMENT OF 3D DENSITY DISTRIBUTIONS OF FLAME: OBTAINING VERTICAL GRADIENT SCHLIEREN BRIGHTNESS FROM HORIZONTAL GRADIENT FOR IMAGE-NOISE REDUCTION	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of th 4th Thermal and Fluids Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ahmad Zaid Nazari, Yojiro Ishino, Takanori Motohiro, Ryoya Yamada, Yuta Ishiko, Yu Saiki	4. 巻 -
2. 論文標題 Schlieren CT Measurement of 3D Density Distributions of Flame Kernels of Spark-Ignited Direct-Injection of Free, Cavity-Guided and Plane-Guided Fuel Jets	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of the 11th Asia-Pacific Conference on Combustion	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. FUKUDA, H. MAEDA, D. ONO, S. NAKAO, Y. MIYAZATO, Y. ISHINO	4. 巻 -
2. 論文標題 COMPUTER FLOW VISUALIZATION OF UNDEREXPANDED JETS FROM AXISYMMETRIC SUPERSONIC MICRO NOZZLES	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of the 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroaki Maeda, Hikaru Fukuda, Shinichiro Nakao, Yoshiaki Miyazato, Yojiro Ishino	4. 巻 -
2. 論文標題 Rainbow schlieren measurements in underexpanded jets from square supersonic micro nozzles	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of the Experimental fluid mechanics 2017	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hikaru Fukuda, Shinichiro Nakao, Yoshiaki Miyazato, Yojiro Ishino	4. 巻 -
2. 論文標題 Study of Fee Jets from Axisymmetric Supersonic Micro Nozzles (Part 1, Quantitative Flow Visualization)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of the 14th International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hikaru Fukuda, Shinichiro Nakao, Yoshiaki Miyazato, Yojiro Ishino	4. 巻 -
2. 論文標題 Study of Fee Jets from Axisymmetric Supersonic Micro Nozzles (Part 2, RANS Simulation)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of the 14th International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Z. Nazari, Y. Ishino ¹ , Y. Ishiko, T. Motohiro, R. Yamada, Y. Saiki, Y. Miyazato, S. Nakao	4. 巻 TFEC 1528
2. 論文標題 SCHLIEREN CT MEASUREMENT OF 3D DENSITY DISTRIBUTIONS OF PERFECTLY AND IMPERFECTLY EXPANDED SUPERSONIC MICRO-JETS FROM CIRCULAR AND RECTANGULAR MICRO NOZZLES	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of the The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference(TFEC9)	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Kato, T. Hirasawa, Z. Diao, M. Winter, Y. Ishino	4. 巻 TFEC1321
2. 論文標題 THREE-DIMENSIONAL FLAME STRUCTURE AND CHARACTERISTICS OF HEATING PARTICLES IN METHANE CLUSTERED MICROFLAMES ON SIX FUEL AND ONE AIR JETS	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yojiro Ishino, Naoki Hayashi, Yuta Ishiko, Kimihiro Nagase, Kazuma Kakimoto, Ahmad Zaid Nazari, Yu Saiki	4. 巻 139-2
2. 論文標題 3D Printing of Spark-Ignited Flame Kernels, Experimentally Captured by 3D-Computer Tomography and Multi-Directional Schlieren Photography	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Heat Transfer, Transaction of the ASME	6. 最初と最後の頁 020913, 020913
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hikaru FUKUDA, Hiroaki MAEDA, Daisuke ONO, Shinichiro NAKAO, Yoshiaki MIYAZATO, Yojiro ISHINO	4. 巻 ISTP27-158
2. 論文標題 Rainbow Schlieren Measurements in Underexpanded Jets from Axisymmetric	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of The 27th International Symposium on Transport Phenomena(ISTP-27)	6. 最初と最後の頁 1, 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yojiro Ishino, Naoki Hayashi, Yuta Ishiko, Ahmad Zaid Nazari	4. 巻 HT2016-7423
2. 論文標題 Schlieren 3D-CT Reconstruction of Instantaneous Density Distributions of Spark-Ignited Flame Kernes of Fuel-Rich Propane-Air Premixture	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2016 Summer Heat Transfer Conference	6. 最初と最後の頁 1, 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 A. Z. Nazari, Y. Ishino, R. Yamada, T. Motohiro, F. Ito, H. Kondo, Y. Miyazato, S. Nakao
2. 発表標題 CT (COMPUTER TOMOGRAPHY) MEASUREMENT OF 3D DENSITY DISTRIBUTIONS OF HIGH-SPEED PREMIXED TURBULENT FLAMES (MULTI-PATH INTEGRATION IMAGE-NOISE REDUCTION TECHNIQUE BASED ON NOVEL CONCEPT OF COMPLEX BRIGHTNESS GRADIENT IN QUANTITATIVE SCHLIEREN IMAGES)
3. 学会等名 18th International Symposium on Flow Visualization (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Sugawara, S. Nakao, Y. Miyazato, and Y. Ishino
2. 発表標題 APPLICATION OF TWYMAN-GREEN INTERFEROMETERS FOR SHOCK-CONTAINING FREE JETS FROM AXISYMMETRIC CONVERGENT MICRO NOZZLES
3. 学会等名 18th International Symposium on Flow Visualization (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ahmad Z. Nazari, Yojiro Ishino, Ryoya Yamada, Takanori Motohiro ¹ , Fumiya Ito, Harumi Kondo, Yoshiaki Miyazato, Shinichiro Nakao
2. 発表標題 CT (COMPUTER TOMOGRAPHY) MEASUREMENT OF 3D DENSITY DISTRIBUTIONS OF FLAME: OBTAINING VERTICAL GRADIENT SCHLIEREN BRIGHTNESS FROM HORIZONTAL GRADIENT FOR IMAGE-NOISE REDUCTION
3. 学会等名 4th Thermal and Fluids Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤 晴海, 元廣 孝徳, アハマド・ザイド・ナザリ, 山田 凌矢, 伊東 郁哉, 石野 洋二郎, 宮里 義昭, 仲尾 晋一郎
2. 発表標題 成分不明な複数種類の燃料が混在する予混合気体場での当量比分布の定量シュリーレン瞬間三次元CT計測 (20方向シュリーレンカメラとCT法による計測)
3. 学会等名 日本機械学会 環境工学総合シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田 凌矢, アハマド・ザイド・ナザリ, 元廣 孝徳, 伊東 郁哉, 近藤 晴海, 石野 洋二郎, 宮里 義昭, 仲尾 晋一郎
2. 発表標題 定量シュリーレン三次元CT計測における進展 (当量比の計測と複素シュリーレン法によるノイズリダクション)
3. 学会等名 日本機械学会 2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石野 洋二郎, 近藤 晴海, 元廣 孝徳, Ahmad Zaid NAZARI, 山田 凌矢, 伊東 郁哉
2. 発表標題 複数燃料種が混在する予混合気体場の当量比分布の定量シュリーレン瞬間三次元CT計測- 当量比・屈折率の普遍関係式に基づく当量比計測 -
3. 学会等名 日本燃焼学会 燃焼シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田凌矢, 石河 雄太, Ahmad Zaid Nazari, 元廣 孝徳, 石野 洋二郎, 齋木 悠, 宮里 義昭, 仲尾 晋一郎
2. 発表標題 20方向シュリーレンカメラとCT法による三次元密度場の計測 (直噴エンジンモデルおよび超音速ノズル出口における密度場の計測)
3. 学会等名 日本機械学会年次大会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 元廣 孝徳, 石河 雄太, Ahmad Zaid Nazari, 山田 凌矢, 石野 洋二郎, 齋木 悠
2. 発表標題 直噴エンジンモデルにおける燃料噴流と火炎核の瞬間三次元密度場の計測 (20方向シュリーレンカメラとCT法による計測)
3. 学会等名 第27回環境工学総合シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ahmad Zaid NAZARI, Yojiro ISHINO, Yuta ISHIKO, Yoshiaki MIYAZATO, Shinichiro NAKAO
2. 発表標題 Schlieren 3D-CT Measurement of Instantaneous Density Distributions of the Shock-cell Structure of Under-expanded Supersonic Micro-jet
3. 学会等名 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hikaru FUKUDA, Hiroaki MAEDA, Daisuke ONO, Shinichiro NAKAO, Yoshiaki MIYAZATO, Yojiro ISHINO
2. 発表標題 Rainbow Schlieren Measurements in Underexpanded Jets from Axisymmetric
3. 学会等名 The 27th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-27) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yojiro Ishino, Naoki Hayashi, Yuta Ishiko, Ahmad Zaid Nazari
2. 発表標題 Schlieren 3D-CT Reconstruction of Instantaneous Density Distributions of Spark-Ignited Flame Kernel of Fuel-Rich Propane-Air Premixture
3. 学会等名 ASME 2016 Summer Heat Transfer Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Ahmad Zaid Nazari, 林直樹, 石河雄太, 永瀬公博, 柿本和摩, 石野洋二郎, 宮里義昭, 仲尾晋一郎
2. 発表標題 20方向シュリーレンカメラによる不足膨張超音速噴流のセル構造の瞬間密度分布の三次元CT計測
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石野洋二郎
2. 発表標題 多レンズ多方向光学系の設計および瞬間CT法による非定常流体現象の三次元計測
3. 学会等名 日本機械学会年次大会, EFDワークショップ: 光学的流体計測手法 (招待講演)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 燃料濃度計測機器	発明者 石野洋二郎	権利者 名古屋工業大学 学長
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-120960	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>本研究に関して、 「アメリカ熱流体学会・最優秀論文賞」(2019年) 「可視化情報学会・技術賞」(2019年) を受賞。</p>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考