

ナザリ アハマド ザイド

氏 名 NAZARI AHMAD ZAID
学位の種類 博士 (工学)
学位記番号 博第1201号
学位授与の日付 2021年3月31日
学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目 Multi-Directional Quantitative Schlieren 3D-CT Measurements
Technique for Combustion and Supersonic Flows
(燃焼ならびに超音速流動のための多方向定量シュリーレン3D-CT
計測技術)

論文審査委員 主査 教授 石野 洋二郎
教授 田川 正人
教授 古谷 正広
教授 宮里 義昭
(北九州市立大学)

論文内容の要旨

In the previous works, a three-dimensional computerized tomography (3D-CT) non-scanning technique using a delicate 20-directional quantitative schlieren optical system is employed and developed. By using the 3D-CT technique, measurement of the instantaneous density distributions of several types of flames in laminar and turbulent flows have been successfully obtained.

In the present work, the results of the conducted research to extend and improve the above method are summarized and reported in chapters 2 to 5.

In **CHAPTER 1**, the necessary information regarding the research method and the experimental apparatus setup is described.

In **CHAPTER 2**, two new techniques (1) and (2) are introduced for image processing.

- (1) A novel technique "multi-path integration" method is proposed for noise reduction in projections images of CT.
- (2) A new technique "inverse process" method is employed which enables us to obtain vertical schlieren brightness gradient from horizontal experimental data without the necessity of a new optical system and

can be used for obtaining any optional directions of schlieren brightness gradient.

In **CHAPTER 3**, the findings of the complex three-dimensional structure of the supersonic microjets from axisymmetric convergent-divergent (Laval) micro nozzles with circular and square outlet shapes are reported. First, from the multi-directional schlieren images, from the symmetry and diagonal views of square microjets for the first shock-cells, two different patterns of shock waves are observed, and the shock-cell spacing L_s and supersonic core length L_c for all nozzle pressure ratios are investigated and reported. Next, from the measurement results by three-dimensional CT measurement, the three-dimensional structures of square microjets are more clearly observed with two types "upright" and "diagonal" of "cross-shaped" of cross-sectional structures. In addition, gradual changes in the cross-sectional structure in the flow direction, which is called the "axis-switching" phenomenon are clearly observed.

In **CHAPTER 4**, by using the mentioned method, measurement of three-dimensional (3D) density distributions of the initial flame kernels induced by spark-ignition of three types of fuel jets from direct injection nozzle has been conducted.

In **CHAPTER 5**, experimental and analytical studies have been conducted to obtain the information needed for a deep understanding of the relation between "equivalence ratio" and "refractive index" in the flow fields. A "universal relationship" between a refractive index of a premixed gas of fuel and air and its equivalence ratio has been discovered in this study. Using this relationship, it is possible to measure the equivalence ratio of all the premixed gas from its refractive index only with a unique coefficient, except for the premixed gas of light fuels. The uniqueness of the relation coefficient enables us to obtain the local equivalent ratio distributions of even multi-fuel premixed gas from its refractive index CT measured. This method can be applied to develop gas alarm systems that can be used without knowing the fuel type.

In **CHAPTER 6**, the conclusions are given.

本研究では、これまでに、独自設計・製作された 20 方向の定量的シュリーレン光学システムを使用した最新の 3 次元コンピューター断層撮影 (3D-CT) 非スキャン技術の開発と計測が行われ、3D-CT 計測技術を使用することにより、層流火炎ならびに乱流火炎の瞬間密度分布が測定されている。

本論文では、上記の方法の拡張と改良のために行った研究の成果を、第 2 章から第 5 章にまとめ、報告を行った。

第 1 章では、研究方法と実験装置のセットアップに関する必要な情報を記載した。

第 2 章では、画像処理に関する、2 つの新しい手法(1)および(2)について記載した。

- (1) CT の投影画像におけるノイズ低減のために、新しい技術「マルチパス積分法」を提案した。
- (2) 光学系の変更を必要とせずに水平実験データから垂直シュリーレン輝度勾配を取得することを可能にし、シュリーレン輝度勾配の任意の方向を取得するために使用できる新しい技術「逆プロセス法」を提案した。

第 3 章では、出口形状が円形および正方形の収束・発散 (Laval) マイクロノズルからの超音速マイクロジェット of 複雑な三次元構造に関する研究成果を報告した。はじめに、多方向シュリーレン画像から、正方形マイクロジェットにおける第 1 段ショックセルについて、2 つの異なるパターンの衝撃波構造が得られ、各種ノズル圧力比におけるショックセル間隔 L_s と超音速コア長さ L_c の関係が調査され、報告された。三次元 CT 計測による正方形マイクロジェットの三次元構造の計測結果からは、それらの三次元構造がより明確に捕らえられ、「アップライト」と「ダイアゴナル」の 2 種類の「十字型形状」の断面構造や、「軸方向スイッチング」と呼ばれる、流れ方向への断面構造の変化まで、明確に捕らえることに成功した。

第 4 章では、直噴ノズルからの 3 種類の燃料ジェットの火花点火によって誘発される初期火炎核の 3 次元 (3D) 密度分布の測定を行った。

第 5 章では、流れ場における「当量比」と「屈折率」の関係を深く理解するために必要な情報を得るために、実験的および分析的な研究を行った。この研究では、燃料と空気の予混合ガスの屈折率とその当量比との間の「普遍的な関係」を発見し、この関係を利用して、軽質燃料の場合を除いて、普遍的な係数の関係式のみで屈折率からすべての予混合ガスの当量比を計測することが可能となった。普遍的な関係式により、多種燃料が存在する場であっても予混合ガスの局所当量比分布を屈折率 CT 計測から求める方法を提案した。この方法により、燃料種が分からなくとも使用できるガス漏れ検知装置の開発に利用できることを示した。

第 6 章には、結論を記載した。

論文審査結果の要旨

本論文の内容は、申請者が著した査読有りジャーナル論文3報と全文査読有り国際会議論文4報で公表された一連の研究をまとめたものである。本研究は、独自に設計・製作した20方向の定量的シュリーレン光学システムを使用した最新の三次元コンピューター断層撮影（3D-CT）非スキャン技術の開発と計測に関するもので、本論文では、上記の方法の拡張と改良のために行われた種々の研究の成果が、第2章から第5章において報告されている。

第1章では、研究方法と実験装置に関する情報が記載された。

第2章では、定量シュリーレン写真をCT法に適用できる画像に変換（空間積分）する際に問題となる画像ノイズの低減処理に関して、複素シュリーレン画像という新しい提案概念に基づき、下記(1)および(2)に記す、2つの新しいノイズ低減手法が提案された。

(1) CTの投影画像におけるノイズ低減のために、新しい技術「マルチパス積分法」。

(2) 光学系の変更を必要とせずに水平実験データから垂直シュリーレン輝度勾配を取得することを可能にし、任意方向のシュリーレン輝度勾配を取得するために使用できる「逆プロセス法」。

第3章では、本開発計測手法による、出口形状が円形あるいは正方形の先細末広マイクロノズルからの超音速マイクロジェットの高複雑な三次元構造の研究結果が報告された。三次元CT計測による正方形マイクロジェットの高複雑な三次元構造の計測結果では、それらの三次元構造がより明確に捕らえられ、「アップライト」と「ダイアゴナル」の2種類の「十字型形状」の断面構造や、「軸方向スイッチング」と呼ばれる、流れ方向への断面構造の変化まで、明確に捕らえることに成功した。

第4章では、非定常燃焼現象への本CT計測手法の適用として、直噴ノズルからの3種類の燃料ジェットの火花点火によって誘発される点火火炎の形状の計測を行い、燃料ジェットに誘発される気流、燃料濃度分布や点火タイミングなどの複雑な関係により生成される火炎核の瞬間三次元構造の獲得に成功した経緯が記載されている。

第5章では、本研究で多用するシュリーレン撮影で計測対象とする「屈折率」と、燃料・空気混合ガスの燃焼性の指標である「当量比」との関係に関する発見的な研究およびその三次元CT計測への応用例が示された。すなわち、一部の燃料種を除いたほとんどの燃料種と空気との予混合ガスの「屈折率」と、その「当量比」との間には、「普遍的な関数関係」があることが発見された。この関係を利用して、空気環境に混入する燃料種が不明であっても、あるいは多種の燃料種が混入していたとしても、その混合ガスの局所的な燃焼性（「当量比」）が「屈折率」から算出することが可能となった。第5章ではさらに、2種の燃料が混在する予混合ガスの瞬間三次元当量比分布のCT計測の成功例が示された。

本論文は、米国熱流体学会最優秀論文賞および可視化情報学会技術賞を受賞した内容も含まれるなど、上述のように工学的に重要な新たな知見を多数与えるもので、博士論文にふさわしく、申請者の学力も確認されており、博士（工学）の学位授与を「可」とすることが適当であるとの結論に至った。