

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：34406

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14655

研究課題名（和文）シュリーレンベースのCFD融合型の圧力推定手法の開発

研究課題名（英文）The development of a pressure estimation method based on Schlieren coupling of CFD

研究代表者

鵜飼 孝博 (Ukai, Takahiro)

大阪工業大学・工学部・講師

研究者番号：80813534

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、圧縮性流体分野で広く活用されているシュリーレン法を用いて、密度・速度・圧力推定手法の開発に取り組んだ。画像伝送ファイバーを応用して1台の高速度カメラで時系列三次元密度場計測システムを開発した。また、シュリーレン画像流速法において、ユーザー指定の最適なパラメータ設定を明らかにし、低Re数流れにおける流速推定法の有効性を実証した。さらに、計測誤差によるロバスト性の課題が残っているものの、CFDと融合させた圧力推定手法を提案し、有効性と課題を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で取り組んだシュリーレン法を基にした密度・速度・圧力推定法は、トラッキング粒子が不要であり計測環境を問わない故に、ユーザーフレンドリーな計測手法である。特に、本研究で開発した1台の高速度カメラによる時系列三次元密度場計測手法は、低導入コストおよび省設置スペースを達成しており、広範囲のユーザーが複雑な流動現象を調査することが可能となる。また、シュリーレン法を基にした圧力推定法の開発において課題を明らかにしたことで、今後の手法開発の発展に寄与できると期待している。

研究成果の概要（英文）：The gas pressure, density, and velocity estimation methods based on a schlieren image were developed in this study. Several image fibres were applied to a BOS method, and the measurement technique enables us to measure a time-resolved three-dimensional density field using a single high-speed camera. Additionally, the optimal user-defined parameters were clarified for a physics based schlieren image velocimetry, namely a SME method. The SME method with the optimal parameters estimates successfully a good velocity field in a low Reynolds number region. We attempted developing a pressure estimation method and provided the technical issues for the improvement of its system achievement.

研究分野：圧縮性流体力学

キーワード：シュリーレン法 流体可視化 圧力推定 CFD 計測融合

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

シュリーレン法は、対流や衝撃波の様子が可視化できる計測手法として、幅広い分野で利用されており、定量的な密度場計測が可能となっている。また、近年、シュリーレン法により得られた画像から、速度場を推定する計測方法 (Schlieren PIV) が開発され、粒子画像流速計測法 (PIV) に劣らないほどの推定精度が得られるようになってきた。この Schlieren PIV の最大の特徴は、トラッキング粒子と呼ばれる流体中に混入させる不純物が不要なことである。そのため、流れが大規模はく離れた領域など、トラッキング粒子が混入できない箇所でも計測が可能となる。また、シュリーレン特有の衝撃波可視化によって、トラッキング粒子が追従しにくい急激な圧力上昇を伴う衝撃波波面の動きを捉えることもできる。さらに、密度値と速度値が同時に計測できる点が優れている。このようにシュリーレン法は、密度・速度場が可視化できることから、圧縮流体分野で力を発揮できるものの、圧力値の推定には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、三次元性が現れる複雑な圧縮性流れに適用できる圧力場計測システムの構築を目指し、シュリーレン法によって得られた実験データ (密度値・速度値) に数値流体力学 (CFD) を融合した圧力推定手法を開発する。また、計測システムの汎用性を高めるため、三次元性を伴う複雑な流れ場に適用できる計測技術も開発する。

3. 研究の方法

(1) 三次元時系列密度場推定法の開発

シュリーレン法を用いた三次元密度場計測には、FBP 法 (Filtered back-projection) や ART 法 (Algebraic Reconstruction Technique) による三次元再構成技術が利用されている。これらの手法では、複数方向からの投影画像が必要であり、先行研究によると、精度よく三次元再構成を行うためには十数方向からの投影画像が求められる。つまり、非定常の時系列可視化計測に対しては、高価な高速度カメラが十数台必要となり、導入コストの増加やカメラの設置スペース確保が課題となる。

そこで、本研究では、複数台のカメラの代わりに医療分野で広く使われていた画像伝送光ファイバーを応用し、1台のカメラで十数方向から投影した画像を1台のカメラで記録させる。つまり、1台のカメラで複数の視野の画像を撮影するため、画像を数ミリメートルオーダーまで光学的に縮小させ、画像伝送光ファイバーでカメラレンズまで伝送させる。そして、各視野から伝送された画像を配列させ、カメラレンズを用いて画像を適切に拡大/縮小し、イメージセンサーに記録させる。このように低導入コストかつ省設置スペースが達成できる三次元可視化法を構築する。また、密度場計測を達成するため、この三次元可視化システムに BOS 法 (Background Orientated Schlieren) を適応させた Fibre BOS 法を開発する。画像伝送光ファイバーは、主に1万本程度の束となっているコアとコア材を覆うような皮膜状のクラッドから構成されており、クラッドとコアの境界面で光が全反射し、コア内部で光が伝送できる。Fibre BOS 法では、この束状の光ファイバーを用いるため、コアやクラッドによる BOS 可視化精度の影響が懸念される。そのため、画像伝送光ファイバー特有のコアとクラッドが密度場計測に及ぼす影響を調査して、Fibre BOS 法を用いた時系列三次元密度場計測の実証実験を行い、実用的かつ汎用性の高い時系列三次元密度場計測手法を確立する。

(2) 低 Re 数におけるシュリーレン流速推定法の有効性および最適パラメータ

シュリーレン画像を用いた流速推定手法である SIV 法 (Schlieren image velocimetry) の活用が普及しつつあるものの、適応範囲は限られている。この SIV 法では、気流の追従用の粒子の代わりに、乱流場に現れる渦の動きを追従して流速場を推定している。特に、渦の移流が流速と一致するような流れ場においては、高い精度で流速場が推定できるが、低 Re 数領域においては、SIV 法の流速推定精度が低いと考えられる。一方、別のシュリーレン画像流速法である SME 法 (Schlieren Motion Estimation) では、シュリーレンの輝度特性と連続の式を利用した物理モデルベースの流速推定アルゴリズムを用いているため、必ずしも流れ場に渦構造が必要ではない。

そこで本研究では、低 Re 数における SME 法の世界推定の有効性を調査するため、PIV および SIV 法で得られた流速場と比較・評価する。また、この SME 法においては、ユーザー定義のパラメータが計測精度に影響を及ぼすため、シュリーレン画像の輝度勾配とパラメータの関係性を調査し、最適パラメータの設定ルールを明らかにする。

(3) CFD 融合型圧力推定法の有効性および課題

トラッキング粒子を必要とする PIV 計測では、実験で得られた速度データと数値流体力学を融合させた、圧力場推定手法が開発されているが、非圧縮流体の基礎方程式を解いているため、衝撃波の伴う高速流体には適用できない。一方、シュリーレン法を用いた場合、流速値に加えて

密度値が実験的に得られるため、圧縮性流体の基礎方程式を解くことができ、圧縮性を伴う高速流体の圧力場が推定できる。

このような考えのもと本研究では、圧力結合方程式の半陰解法である SIMPLER 法をシュリーレン法に応用する。一般的な SIMPLER 法では、繰り返し計算において密度場を更新しながら速度・圧力場を補正する。一方、本研究で行う圧力場の推定では、SIMPLER 法のフレームワークを応用するものの、シュリーレン画像により算出した密度場が正しいと仮定して、密度場を更新させずに速度・圧力場を推定する。また、シュリーレン画像から、高精度な速度場を算出することが困難であるため、シュリーレン法で得られた速度場を初期値として利用して、数値解析において反復計算によって速度場を補正・推定する。本研究では、提案手法の有効性および課題を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 三次元時系列密度場推定法の開発

画像伝送光ファイバーを用いたテレセントリックFibre BOS法における解像力を評価した。図1にファイバー有無により撮影した画像を示す。ファイバーによって解像度が低下しているものの、被写体（レンズ）および背景を十分に識別できている。理論式を基に空間解像度を定量的に算出した結果、テレセントリックBOS（ファイバー無しの場合）とテレセントリックFibre BOSのテストセクションにおける空間解像度は、それぞれ1.2 mmおよび1.5 mmであった。これは、ファイバーの解像力が光学システム（カメラレンズ等）の解像度よりも低いため、Fibre BOSの空間解像度が低くなった。よって、カメラレンズ等の光学系よりも高い解像力を備えたファイバーを用いる場合は、従来のBOS法の空間解像度と同等になることが分かった。

従来のBOSシステムと比較して、同程度の空間解像度を備えているテレセントリックFibre BOSシステムであるが、撮影画像（図1の左図）にファイバーのクラッドによる影が現われるため、鮮明な被写体と背景の可視化を妨げている。これは、カメラのイメージセンサーに画像が結像した際、ファイバーのコア径またはクラッド材の厚みに対して、カメラ素子のサイズが小さいため（カメラの解像度が高い）、クラッドの影が識別された。このファイバー端面のクラッドの影が、背景の移動量の推定に及ぼす影響を調べた結果、クラッドの影が識別できる場合、BOS解析において光の偏向角の推定が困難であることが分かった（図1の実線と青破線の比較）。また、クラッドの影を識別できないように、カメラレンズの焦点をズラしてぼやけた画像を撮影した場合（図1の赤破線）、理論偏向角（図1の実線）と比較的よい一致を示すことが分かった。

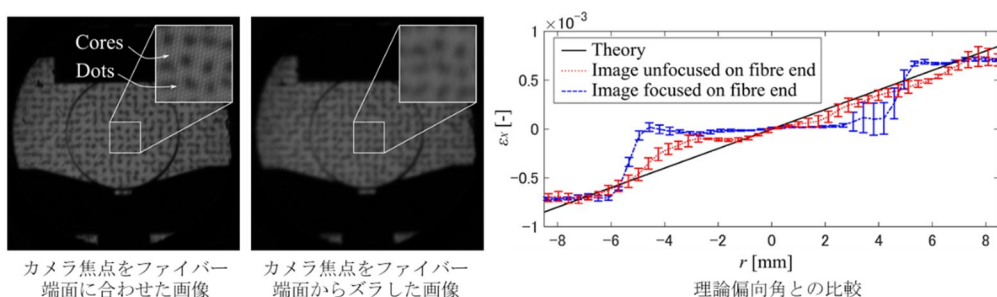


図1 FibreBOS法によって可視化された画像と光の偏向角

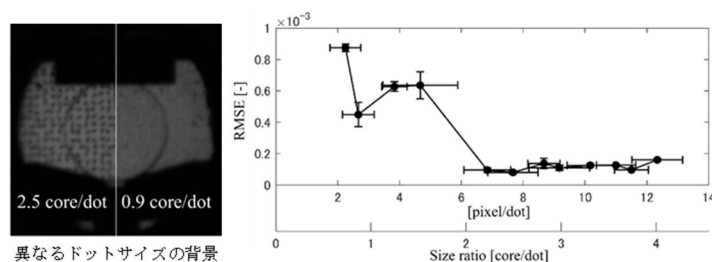


図2 背景ドットサイズの影響

BOS計測を行う際、カメラ素子サイズ（ピクセル）に対して背景のサイズの選定は重要である。Fibre BOSにおいてカメラの素子と同様な役割を担うファイバーのコアサイズに関して、背景のドットサイズの関係性を明らかにするため、背景のドットサイズを変化させて、ピクセル移動量の推定精度を評価した。コアサイズよりも小さいドットサイズは、解像度不足によりドットが識別できないことが分かった。また、BOS解析において偏向角を理論値と比較し、その誤差をRMSEで評価した（図2）。2 core/dot以下の場合、推定精度が悪い。これは、PIV解析において問題となるピークロッキング現象と類似している。つまり、ドットの大きさがコア径の2倍以上とすることで推定精度が向上することが分かった。最後に、本テレセントリックFibre BOSを用いて、1台のカメラで時系列三次元密度場の実証試験を行った。その結果、同時に12投影の画像を撮影し、噴流の時系列三次元密度場が算出できたことから（図3）、本手法の有効性が確認された。本研究

で開発したテレセントリックFibre BOS法は、1台の高速カメラを用いた実用的な高速時系列3次元密度場計測法であり、高時空間の詳細な計測を求めているユーザーや様々な計測対象へ普及することが期待できる。

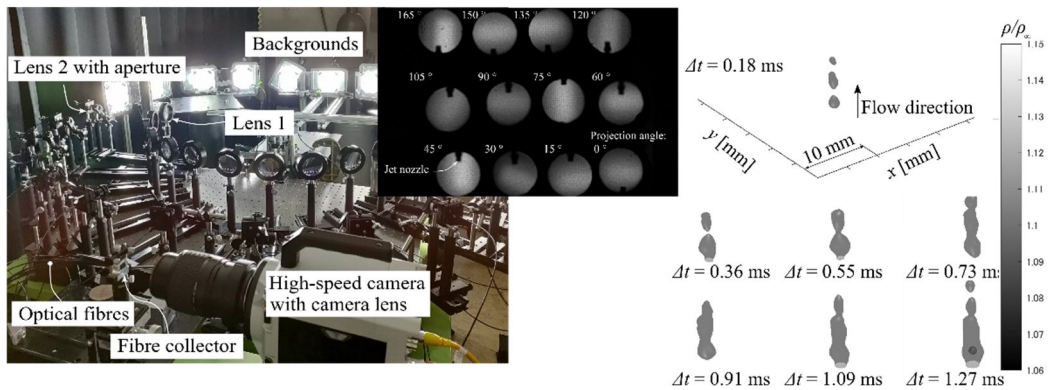


図3 Fibre BOS法の光学システム(左図), CCDセンサ上に12方向から同時撮影した投影画像(中央)および噴流の時系列三次元密度分布(右図)

(2) 低Re数におけるシュリーレン流速推定法の有効性および最適パラメータ

SME法における任意設定のウェイトパラメータとシュリーレン輝度勾配の関係を調査するため、疑似的にシュリーレン画像(密度勾配)が得られる長焦点レンズを使用した(図4)。このレンズを物理的に移動させて得たピクセル移動量を真値と仮定し、SME法で推定したピクセル移動量と比較して、最適な任意パラメータを導出した。なお、このレンズに現われる輝度勾配の調整および物理的な移動量を変化させた。この調査の結果、輝度勾配($\Delta I/\Delta x$)が増加すると最適なウェイトパラメータが二次関数的に増加することが分かった(図5)。また、測定対象のピクセル移動量が大きい場合、小さなウェイトパラメータを設定すればいいことも分かった。

シュリーレン特有のナイフエッジの向きに対して推定精度を明らかにするため、低速噴流の速度場を評価した。その結果、流れ場に垂直に配置したナイフエッジの場合、PIVによる流速場と比較的よい一致が得られた(図6)。この垂直配置のシュリーレン画像では、縦方向のフィラメント状の流れ場構造が可視化されているものの(図6の右図)、ナイフエッジの垂直配置によって縦方向の輝度変化をほとんど捉えられていない。一方、水平配置のナイフエッジでは(図6の左図)、比較的小さなこぶ状の流れ場構造が可視化されていることで、水平配置のナイフエッジにも関わらず、横方向の輝度変化も疑似的に捉えられている。SME法では、輝度勾配がある流速場が推定できるため、全方向に輝度変化が現れている水平配置のナイフエッジが、速度場推定において適切な設定方法であることが分かった。

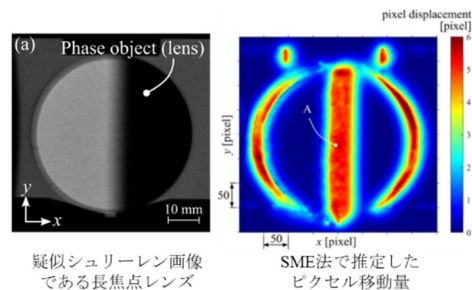


図4 疑似シュリーレン画像およびそのピクセル移動量

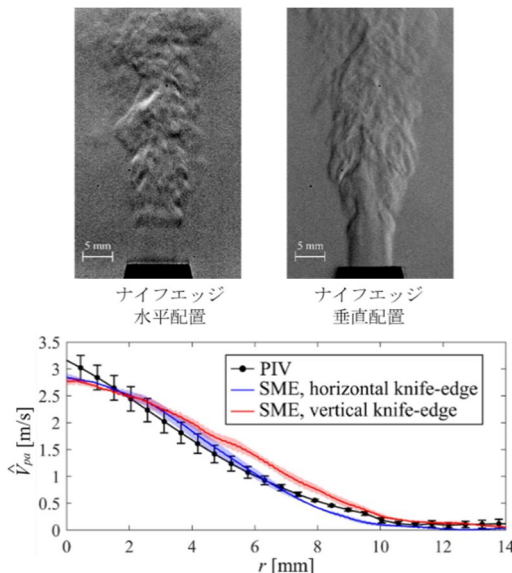


図6 ナ이프エッジの配置による噴流の流速分布の変化

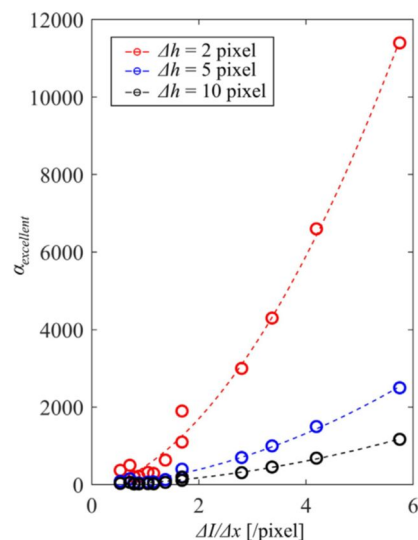


図5 ウェイトパラメータと輝度勾配の関係

これらの知見を基に適切なパラメータを設定し、低 Re における SME 法の有効性を明らかにするため、低速噴流における PIV および SIV 法で計測した速度場と比較・評価した。図 7 に SIV 法および SME 法で推定した流速場を示す。SIV 法では乱流場における渦サイズをトレーサ粒子として利用しているため、解析時に設定する 2 種類の検査領域 (33×33 pixel と 17×17 pixel) における流速推定の結果も示す。ノズル出口付近に現れる輝度の時間変化がない層流領域では、SIV 法および SME 法により流速推定は困難である。一方、大きな渦構造が現われる領域 (WVS 領域: $7 \text{ mm} \times 21 \text{ mm}$) および小さな渦が現われる領域 (AS 領域: $21 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$) では、適当な流速が推定できた。しかしながら、SIV 法では検査領域によって流速場が変化し、PIV の結果と差異が現れた。特に、検査領域が大きい場合 (図 7 (b)) , 検査領域内の渦群の特徴を捉えることが容易であり、流速推定の精度が高くなるが、空間解像度が低下する。そのため、ノズル出口から離れた AS 領域では、広い範囲で流速値が大きくなり、局所的な流れ場が捉えられない。一方、検査領域が比較的小さい場合 (図 7 (c)) , 検査領域内の渦群の特徴を捉えることが困難となる。噴流の初期発達領域では、大きなサイズの渦がノズル出口に現れ、下流に移流するとともに小さくなるため、検査領域が小さい場合は、WVS 領域において推定精度が悪くなる。したがって、SIV 法ではトレーサ粒子の代わりとなる渦のサイズが小さい領域において、検査領域を小さくし、WVS 領域では検査領域を大きくする必要がある。一方、SME 法による流速場では (図 7 (d)) , WVS 領域において検査領域の大きな SIV 法 (図 7 (b)) と同様な流速分布が現れるとともに、AS 領域では PIV の結果 (図 7 (a)) と類似した流速分布となった。また、AS 領域において、斑模様の流速場も発生していない点で SIV 法より優れている。SME 法では、輝度変化を基に流速を推定しているため、たとえ渦サイズが時間および場所で変わったとしても、広い範囲で適切な流速推定が可能である。したがって、検査領域によって推定精度および解像度が悪化する SIV 法に対して、SME 法ではロバスト性に優れた流速推定法であることが分かった。

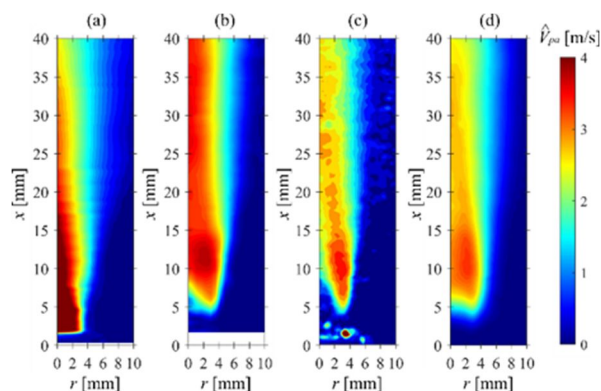


図 7 SME, PIV および SIV 法で得られた速度分布。(a) PIV, (b) SIV : 検査領域 33×33 pixel, (c) SIV : 検査領域 17×17 pixel, (d) SME

(3) CFD 融合型圧力推定法の有効性および課題

圧力推定手法の有効性を確認するために数値実験を実施した。流れ方向に沿って断面積が変化するダクト内の準一次元圧縮性等エントロピー流れを用いて、本圧力推定法の推定精度を評価した。シュリーレン法によって速度・密度場の定量計測が得られるため、この数値実験においては、解析値を仮想的にシュリーレン法で得られた密度・流速値とした。その結果、密度場および速度場を基に、本手法で得られた収縮拡大ノズル内部の圧力分布は、真値 (解析値) との誤差が、 $RMSE = 209 \text{ Pa}$ であり、非常によく一致した (図 8) 。この数値実験では、シュリーレン法で得られた速度場が正確に算出できていると仮定し、真値を用いているが、シュリーレン法によって正確な速度場を推定するのは困難である。また、計測ノイズも含まれていると考えられる。そこで、本手法に初期値として利用する速度場に誤差を付加して、圧力場を推定した。図 9 に誤差を含んだ初期速度場、本手法によって得られた速度場および真値を示す。真値と推定値の誤差は、 $RMSE = 0.34 \text{ m/s}$ であり、たとえシュリーレン法で得られたノイズを含んだ速度場が初期値であっても、本手法によって高精度に速度場が推定できることが分かった。

シュリーレン可視化実験における本手法の課題を明らかにするため、2 次元先細ノズルの出口における密度・速度場を BOS 法で計測し、圧力場を推定した。その結果、反復計算において値が発散して圧力場が推定できなかった。これは、シュリーレン可視化実験によって得られた密度場が正しくないことが要因であった。この実験によって計測した密度場の計測誤差に対するロバスト性不足の課題が明らかとなり、今後のシュリーレン法ベースの圧力推定手法の開発に役立つと期待している。

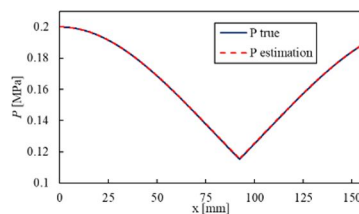


図 8 収縮拡大ノズル内部における圧力分布

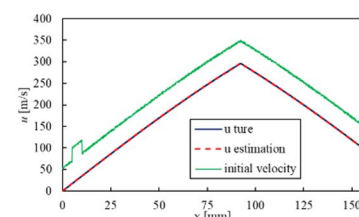


図 9 収縮拡大ノズル内部における流速分布

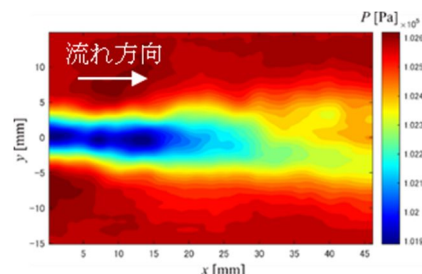


図 10 シュリーレン実験における推定した圧力場

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ukai Takahiro	4. 巻 62
2. 論文標題 The principle and characteristics of an image fibre Background Oriented Schlieren (Fibre BOS) technique for time-resolved three-dimensional unsteady density measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-021-03251-2	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 鷗飼孝博	4. 巻 JAXA-SP-21-008
2. 論文標題 画像伝送光ファイバーを応用した3次元BOS法の原理と基礎特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JAXA Special Publication	6. 最初と最後の頁 235-241
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 無
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 Takahiro Ukai	4. 巻 34
2. 論文標題 Quantitative investigations of a schlieren velocimetry technique by a schlieren motion estimation (SME) method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 76113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0096939	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 Takahiro Ukai, Takuma Kuroda	4. 巻 26
2. 論文標題 Flexibility and versatility enhancements due to a portable optical system for the Background-Oriented Schlieren techniques	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Visualization	6. 最初と最後の頁 551-561
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12650-022-00903-1	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7件(うち招待講演 1件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 鵜飼孝博
2. 発表標題 画像伝送光ファイバーを応用した3次元BOS法の原理と基礎特性
3. 学会等名 第53回流体力学講演会 / 第39回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒田拓真, 鵜飼孝博
2. 発表標題 Portable Fiber BOSの特性評価
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鵜飼孝博, H. Zare-Behtash, K. Kontis, A. Russell
2. 発表標題 シュリーレンベースの定量可視化技術を用いたナノ秒パルスプラズマアクチュエータの誘起流について
3. 学会等名 日本機械学会流体工学部門A-TS 05-24研究会「プラズマアクチュエータ研究会」第8回シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鵜飼孝博
2. 発表標題 物理モデルベースのシュリーレン画像流速法の特長
3. 学会等名 第54回流体力学講演会/第40回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鶴飼孝博
2. 発表標題 実用的なTime-resolved 3DBOS法に関する研究
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鶴飼 孝博
2. 発表標題 画像伝送光ファイバーを応用した3次元BOS法の原理と基礎特性
3. 学会等名 第53回流体力学講演会/第39回航空数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kuroda, M. Kobayashi, T. Ukai
2. 発表標題 A time-resolved three-dimensional density measurement for an asymmetrical unsteady supersonic impinging jet using a Fibre BOS technique
3. 学会等名 The 13th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------