

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14645

研究課題名（和文）壁近くの三次元流れ場計測を実現する鏡面反射型3D-BOS法の構築

研究課題名（英文）Development of 3D-BOS using Mirror for three-dimensional flow field measurement near a wall

研究代表者

赤嶺 政仁（Masahito, Akamine）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：00835465

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）：従来難しかった壁面近くの三次元密度場計測を可能にする3D-BOS using Mirror法を提案した。本手法では、壁面を鏡として使うことで、密度場再構成に必要な多方向からの光路を、壁に遮られないようにできる。従来型3D-BOS法を拡張して本手法を定式化し、仮想的なモデルデータで動作検証を行った上で、単純な密度場として、壁面近くに置いたロウソク上の密度場の計測実証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、3D-BOS法による三次元密度場計測がこれまで困難であった壁面近くの計測が可能となり、適用範囲が拡大した。これにより、例えば遷音速パフェット、衝撃波-境界層干渉、そして衝突ジェットといった様々な壁面近くの流れ場において、衝撃波や剪断層に伴う密度場の計測が期待される。なかでも衝突ジェットの計測は、ロケット打上げ時の騒音発生メカニズムの理解とモデル化につながる。

研究成果の概要（英文）：This study proposed a new measurement method, 3D-BOS using Mirror, that enables three-dimensional density field measurement near a wall, which has been difficult in the past. By using a wall surface as a mirror, the light path from multiple directions, which is necessary for density field reconstruction, can be unobstructed by the wall. The proposed method was formulated as an extension of the conventional 3D-BOS, validated using a virtual model data, and demonstrated using a candle plume near a wall.

研究分野：流体力学

キーワード：流体計測 三次元密度計測 3D-BOS

1. 研究開始当初の背景

流れ場の空間的な構造を把握して流体现象を理解するため、これまでシュリーレン法[Settles (2001) Springer 他]や、より計測系を単純化した背景型シュリーレン(background-oriented schlieren, BOS)法[Raffel (2015) Exp. Fluids 56(3)他]が用いられてきた。これらは密度勾配による光の屈折を利用した可視化手法で、流れを乱すことなく広範囲の流れ場を捉えられる。一方で、光路上の屈折がすべて積分されて可視化されるため、三次元的な流れ場の把握が難しいという課題もあった。これを解決するため、X線CT等と同様に、computed tomography を用いることで、BOS 計測データから三次元密度場を再構成する 3D-BOS 法が研究されるようになった[Nicolas et al. (2017) Exp. Fluids 58(5)他]。

3D-BOS 法では、三次元密度場を再構成するために、流れ場に多方向から光を通す必要がある。このため壁で光が遮られて光路方向が限られる、壁面近くの流れ場(たとえば超音速衝突ジェット[Akamine et al. (2021) JASA 150(3)ほか]、遷音速パフエツト、衝撃波-境界層干渉など)への適用はこれまで困難であった。改善案も提案されている[Hashimoto et al. (2017) Trans. JSASS 60(2); Bühlman (2020) PhD thesis, ETH Zurich]ものの、それぞれ壁面近くの感度や計測特性の把握に課題が残る。このため、壁面近くまで感度よく計測でき、かつ、従来型の 3D-BOS 法の計測特性に近いような新たな拡張手法が必要であった。

2. 研究の目的

従来型 3D-BOS 法のわずかな拡張で、壁面近くまで感度よく三次元密度場を計測する新たな手法として、3D-BOS using Mirror 法を提案する。この手法では、壁面を鏡とすることで密度場再構成に必要な多方向からの光路を確保する。本研究では、提案法の定式化と実装、動作検証、および実験的な実証を行う。

3. 研究の方法

- 定式化・実装:
 - 鏡で反射した光路を取り扱うための定式化の拡張を行う
 - 再構成解析を行うためのプログラムを作成する
- 動作検証:
 - 正解の分かる問題として、仮想的なモデル分布・カメラ配置を仮定して投影データを作成し、再構成を行って誤差等を確認する
- 実験的な実証:
 - 単純で分かりやすい密度場として、ロウソク上の円筒状の密度場を計測し、熱電対で計測した温度から求めた密度値と比較をする

4. 研究成果

- 定式化・実装:
 - 従来型 3D-BOS 法 [Nicolas et al. (2016) Exp. Fluids 57(1)]の定式化に基づいて、鏡で反射した光路の影響を新たに考慮した拡張を行った。幾何光学的な光線方程式 (ray equation) に基づく検討を行った結果、従来型からの変更点は光路上の積分計算における経路の変更などのわずかな範囲にとどまることを確認した。
 - 従来法・提案法の再構成解析を行うプログラムのライブラリを作成した。GPU 計算による高速化も行った。
- 動作検証:
 - 正解の分かる問題として、単純な円筒状の分布と仮想的なカメラ配置を仮定し、それらから作成した投影データから再構成を行って、誤差の現れ方等の特性を調べた。
 - 少なくとも調べたケースの範囲内では、従来法と比較して、提案法に顕著な誤差等は見られなかった。壁面近くの流れ場でも提案法を用いれば、従来法と同程度の精度で再構成が可能であることが示された。
- 実証:
 - 提案法での実験計測系を構築し、Takahashi et al. (2016) [IPJSJ Trans. Comp. Vis. Appl. 8]のカメラキャリブレーション法を応用して、カメラや鏡の相対位置や姿勢を求めた。
 - 単純で分かりやすい密度場として、壁面から約 20 mm に置いたロウソク上の密度場を計測した。図 1 のようなカメラ 12 台を用いた計測装置により、図 2 のような円筒状の密度分布が計測できた。燃焼ガスの組成等の不確かさの範囲内で、熱電対で計測した温度から求めた密度値と整合性があることも確認した。以上の内容について現在、論文を投稿中である。
 - より複雑な流れ場として、壁面に衝突する超音速ジェットの計測を検討し、予備試験を行った。衝撃波による屈折等が定性的に計測できることまで確認しており、再構成にむけたカメラ配置や衝突板の構造の最適化について引き続き検討を進めている。

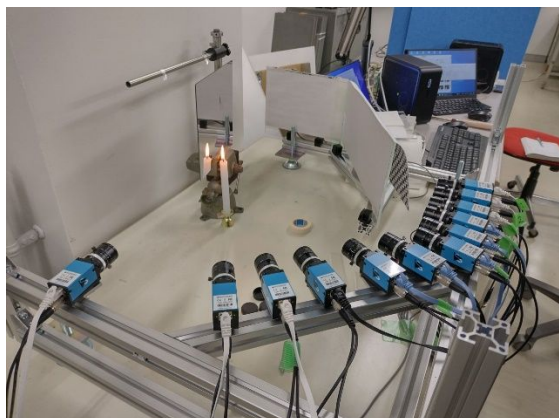


図1 提案手法によるろうソク計測実験

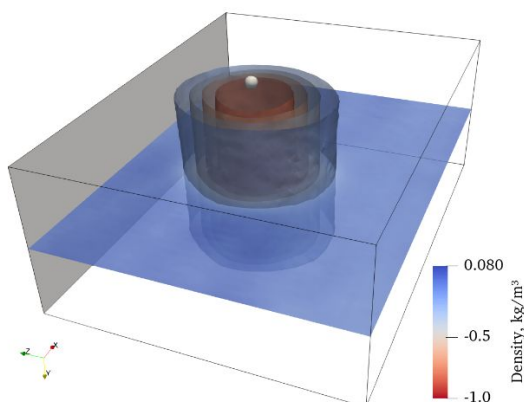


図2 ろうソク上の瞬時密度分布の計測例 (灰色面は鏡面)

● その他:

- 提案法の予備検討としての従来型 3D-BOS 法の計測特性把握, および構築した計測系を応用したさらなるジェット音響の研究に向けて, 壁面を伴わない超音速ジェットの三次元密度場計測を行った.
- 図3のような実験装置を作成した. 図中右側の従来型 3D-BOS 計測系に加え, 左側にマイクロホンアレイを設置し, 音圧信号との同時計測を行った.
- 従来型 3D-BOS 計測により, 図4のような三次元密度分布が得られた. 左側がノズル出口で, 右方向(下流側)へ向けてジェット境界に大きな変動が発達する様子が捉えられている. これらの時間平均と分散の分布は, 過去のレイリー散乱法[Panda and Seasholtz (2002) J. Fluid Mech. 450]の点計測の値と良好に一致することを確認した. 瞬時場に現れた三次元的な剪断層の変動について, 引き続きマイクロホンアレイのデータとの関連を調べることで, よりよいジェットの音源モデル構築等について検討を進めている.

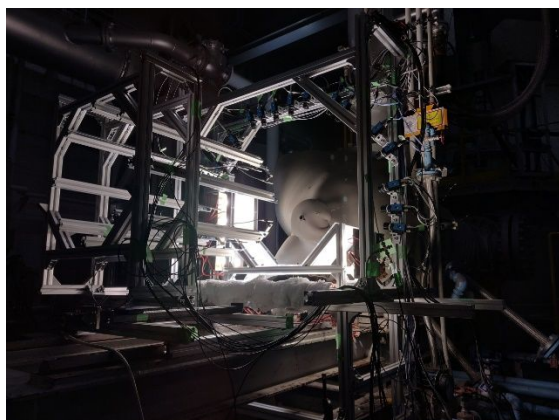


図3 従来型 3D-BOS 法の計測特性把握やジェット音響理解への応用に向けた, マイクロホンアレイとの同時計測システム

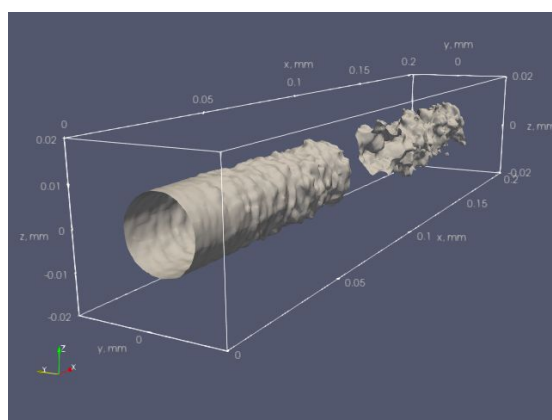


図4 超音速ジェット境界の大規模変動の計測例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 赤嶺政仁, 市川豪士, 寺本進, 岡本光司
2. 発表標題 超音速円形ジェットから生じるスクリーチ現象の多方向同期計測
3. 学会等名 第41回流力騒音シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤嶺政仁, 寺本進, 堤誠司, 岡本光司
2. 発表標題 間欠移流現象のスペクトル固有直交分解における高次モードの役割
3. 学会等名 第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤嶺政仁
2. 発表標題 壁面近傍の流れ場構造のBOS-CT計測について
3. 学会等名 令和2年度 宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahito Akamine, Susumu Teramoto, and Koji Okamoto
2. 発表標題 A validation of three-dimensional near-wall density measurement with background-oriented schlieren using mirror
3. 学会等名 Asian Joint Conference on Propulsion & Power (AJCPP) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤嶺政仁, 林悠游, 寺本進, 岡本光司
2. 発表標題 超音速適正膨張ジェット境界の三次元密度変動可視化
3. 学会等名 第42回流力騒音シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤嶺政仁, 寺本進, 岡本光司
2. 発表標題 超音速ジェット境界の三次元背景型シュリーレン計測の妥当性検討
3. 学会等名 第55回流体力学講演会 / 第41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 2023年

1. 発表者名 Masahito Akamine, Susumu Teramoto, and Koji Okamoto
2. 発表標題 An Investigation on Spatial Resolution in Three-Dimensional Background-Oriented Schlieren Measurement of a Supersonic Round Jet
3. 学会等名 International Gas Turbine Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------