

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01529

研究課題名（和文）独自の音響-流れ場同期可視化手法による、ジェット騒音発生過程の3次元非定常可視化

研究課題名（英文）Three-dimensional unsteady visualization of jet noise generation process using synchronous fluid-acoustic visualization

研究代表者

寺本 進（Susumu, Teramoto）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：30300700

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,690,000円

研究成果の概要（和文）：超音速乱流ジェットから生じるジェット騒音の発生機構の可視化で確認することを目的として、間欠性があり高速なため通常は可視化することが難しい、音源となるジェット剪断層の大規模構造と近傍場の音波を、コンパクト・低コストな計測系で3次元可視化することに成功した。大規模構造と遠方場音響の関係や、遠方場音響の周方向相関長と近傍場音波の関係を明らかにした。また、3次元乱流流れから効率良く周期成分を抽出できるHB-LES法を新規に開発し、基礎的流れや衝撃波を含む非定常乱流流れに適用し既存手法と同等の精度と高い計算効率があることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実験面では、高周波数かつ間欠的であるため、従来は大規模で高価な計測系が必要だった音源の流れ構造や近傍場の3次元構造と遠方場音の関係、比較的簡便な計測装置で計測することに成功した。シミュレーション面でも、非定常乱流のシミュレーションについて、従来と同等の精度を保ちつつ、計算速度をストローハル数倍程度向上させることに成功した。これらの成果により、本研究で取り組んだジェット騒音よりも複雑な、より実用的な高速流の乱流騒音の研究が進展することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：To visually clarify the noise generation mechanism of jet noise from supersonic turbulent jets, the three-dimensional structures of both the coherent structure of the turbulent jet shear layer and the near-field sound wave have been successfully visualized. These two phenomena are difficult to visualize with conventional experimental methods due to their high frequency and intermittency.

From the visualization, the correlation between the coherent structure and the far-field sound, as well as the correlation between the near-field sound wave and the circumferential correlation of far-field noise, has been clarified.

The HB-LES method, which can efficiently extract periodic components from unsteady turbulent flow fields, has been proposed. This method has been applied to various flow fields, from canonical flows to unsteady turbulent flows including shock waves. It was confirmed that the method has accuracy comparable to existing methods while greatly improving efficiency.

研究分野：流体力学

キーワード：超音速ジェット ジェット騒音 可視化 BOS法 Computed Tomography

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ジェット騒音は、乱流剪断層中の大規模構造から生じるとされているが、音波も音源となる大規模構造も時間的・空間的にも局在化した間欠性のある三次元現象ため実験的に観察することが難しく、大規模構造から音波が生成する過程を実験的に直接確認できていない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ジェット騒音の音源メカニズム解明であり、「間欠的に生じる3次元な流れ構造の、時間的な発達により、音波が放射される」過程をまとめて確認することを目指している。音波が放射される過程を実験的に可視化できれば、音源となっている流れ構造の発生位置や成長過程を知ることができるので、音源のモデル化や騒音低減など、工学的に有用な情報も得ることができる。

そのために、3つのサブテーマを設定している。

- (1) ジェットから生じる間欠的な音波の周方向分布の時間解像計測
- (2) ジェット剪断層の大規模構造から音波が発生していく過程の3次元可視化
- (3) 音響トリガ条件付き抽出法の、数値シミュレーションへの適用性検証

### 3. 研究の方法

音波やジェット大規模構造を3次元的に可視化するためには、計測器を周方向に多数配置して再構成することが必要だが、複雑なシュリーレン光学系や高価で大型の高速カメラを多数配置することは現実的で無いため、サブテーマ(1),(2)では現実的なコスト・装置で取得可能な計測データに対して解析方法を工夫することで、それぞれ音波とジェット剪断層の大規模構造の3次元可視化を試みた。

#### (1) ジェットから生じる間欠的な音波の周方向分布の時間解像計測

超音速ジェットから発生するマッハ波を対象を絞り、光学計測系を3次元配置する代わりに、より安価でコンパクトなマイクロホンアレイを周方向に12-24本配置(図1)して、1セットの高速カメラとシュリーレン光学系と同期計測した上で、

- A) ジェットから発生する音波の時間的、空間的スケール(相関長)を把握し、可視化対象とする音波の検出方法を検討する
- B) 2次元可視化で実績のある音響トリガ条件付抽出法にCT(Computed Tomography)法を組み合わせる

の2段階で、音波の3次元可視化を試みる。

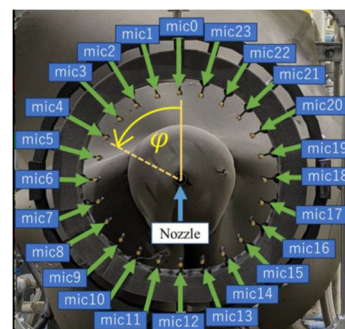


図1 マイクロホンアレイ

#### (2) ジェット剪断層の大規模構造から音波が発生していく過程の3次元可視化

ジェット剪断層では音波よりも大きな密度勾配が生じることを利用して、

- A) 複雑な光学系を必要としない背景型シュリーレン(Background-Oriented Schlieren, BOS)法を用い、コンパクトな低フレームレートカメラを周方向に16台配置(図2)することで、ジェット剪断層3次元構造の、低フレームレートデータを取得

B) 遠方場音響信号の高時間分解能データの取得をした上で、低フレームレートの剪断層構造データと高時間分解能音響データの相関をとることで、計測された3次元密度場データから、遠方場音響と相関を持った大規模構造を抽出する。

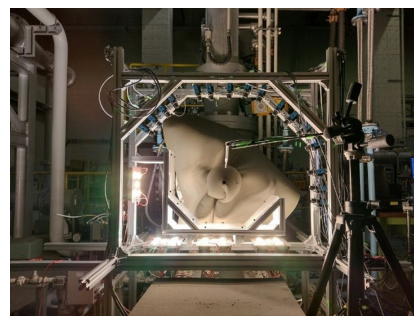


図3 3D-BOS計測系

#### (3) 音響トリガ条件付き抽出法の、数値シミュレーションへの適用性検証

3次元乱流流れから効率良く周期成分を抽出するために、Harmonic Balance法を非定常流れに拡張し、その有効性を確認する

### 4. 研究成果

#### (1) ジェットから生じる間欠的な音波の周方向分布の時間解像計測

超音速ジェットから発生するマッハ波構造の三次元再構成のカギとなるのは、マッハ波が円周方向に異なる相関長を持って発生している点である。マイクロホンアレイで取得したデータ

をウェーブレット解析した結果、周方向に異なる長さを持った波面が一定の頻度で発生していることが確認でき、CT 解析に適したトリガ検出条件を設定することができた。また、限られた視野の光学系で広範囲の音波伝播を観察するために、複数回の実験で取得した画像を滑らかに接続する手法についても検討した。

構築した手法を用いて可視化動画の三次元再構成を行ったところ、周方向相関長の異なるマッハ波の発生伝播の様子を3次元的に捉えることに成功した(図3)。また、マイクロホンの本数を12本から24本に増やすことによって、再構成結果の精度が大幅に改善することが確認された。

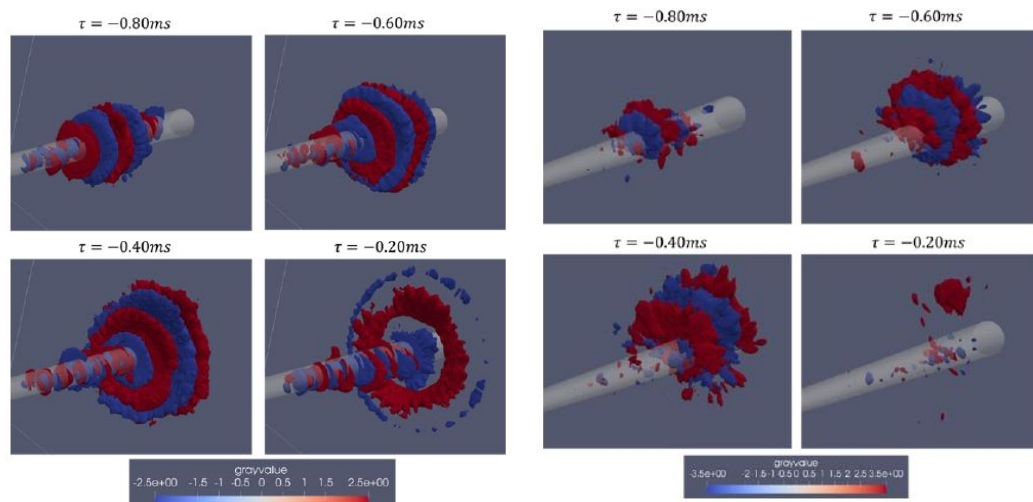


図3 マッハ波発生伝播の3次元再構成結果  
(左：周方向相関長 360 度，右：周方向相関長 60 度)

## (2) ジェット剪断層の大規模構造から音波が発生していく過程の3次元可視化

仮想的なモデルデータを用いて検証や空間解像度等の検討を行った結果、ジェットを対象とした場合8-16セットの光学系を用いれば、周方向波数10程度の構造まで解像可能なことが確認できた。

図2の3D-BOS計測系を用いてジェット密度分布を測定し、低フレームレートの瞬時3次元密度場(図4)を得ることに成功した。本手法で計測した半径方向密度分布と密度変動RMSはPandaらのレイリー散乱による計測(J.Fluid Mech.2020)と概ね一致し、本計測手法により十分な精度で3次元密度分布を計測できることを確認した。

また、マイクロホンで計測した音圧信号との相互相関解析により、得られた密度変動には、音と相関を持つ大規模乱流構造が含まれていることが示された。

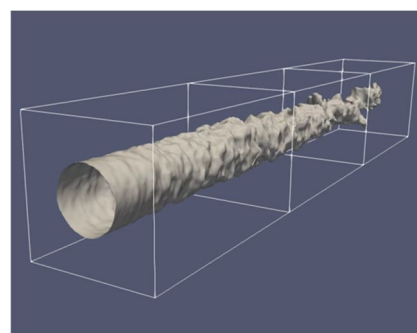


図4 3D-BOS計測で得られたジェット剪断層の瞬時密度等値面

## (3) 音響トリガ条件付き抽出法の、数値シミュレーションへの適用性検証

大規模変動と乱流変動の時間スケールが異なることを仮定した上で、大規模変動を Harmonic Balance (HB) 法、乱流変動を Large Eddy Simulation (LES) でそれぞれ解像して両者を基礎方程式から導出される相互干渉項で接続することで、周期乱流流れを高精度高効率にシミュレーションできる HB-LES 法の新規に開発した。HB-LES 法をチャネル流れの脈動、2次元振動翼、遷音速フラッタ流れに適用して従来の LES の解と比較した結果、HB-LES が、(1)剥離や遷移を含む乱流流れに対しても、時間スケールの分離が成立すれば、従来の LES と同等の信頼性での予測が可能であること、(2)計算時間を従来の LES のストローハル数倍まで短縮できること、(3)基本周波数とその高調波成分のみを計算するため、シグナルノイズ比の低い現象においても、周期変動と相関のある変動のみを解として得ることができることを確認した。

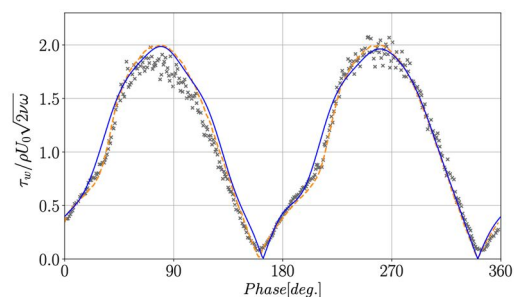


図5 脈動チャネル流れの壁面摩擦変動  
(青:HB-LES, 赤:LES)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 Akamine Masahito, Okamoto Koji, Teramoto Susumu, Tsutsumi Seiji	4. 巻 150
2. 論文標題 Experimental study on effects of plate angle on acoustic waves from supersonic impinging jets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 1856 ~ 1865
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/10.0006236	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 Akamine Masahito, Tsutsumi Seiji, Okamoto Koji, Teramoto Susumu, Nonaka Satoshi	4. 巻 60
2. 論文標題 Interpretation of Multilobe Wavepackets in Spectral Proper Orthogonal Decomposition of Supersonic Jet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1 ~ 9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.J060341	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 Iwamoto Yuma, Teramoto Susumu, Okamoto Koji	4. 巻 62
2. 論文標題 Large-Eddy Simulation for Slowly Oscillating Turbulent Flow Using Harmonic Balance Approach	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 153 ~ 161
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.J063196	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11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Ogawa, D., Teramoto, S., and Okamoto, K
2. 発表標題 Resolvent analysis for compressibility effect on jet shear layer
3. 学会等名 Asian Joint Conference on Propulsion & Power (AJCPP) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shun NAKAMURA, Susumu TERAMOTO, and Koji OKAMOTO,
2. 発表標題 Extension of a harmonic balance method to the incoming wake effect on the separated boundary layer
3. 学会等名 Asian Joint Conference on Propulsion & Power (AJCPP) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuma Iwamoto, Susumu Teramoto, and Koji Okamoto
2. 発表標題 Acceleration of Large-Eddy Simulation for Slowly Pulsating Flows Using Harmonic Balance Approach
3. 学会等名 Asian Joint Conference on Propulsion & Power (AJCPP) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akamine, M., Teramoto, S., Okamoto, K
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)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 権 寧河, 岡本 光司, 赤嶺 政仁, 寺本 進
2. 発表標題 レーザー音響計測法を用いた衝突噴流から生じる複数騒音現象の光学計測
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 鏡を用いた背景型シュリーレン法による壁面近傍の三次元密度場計測
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 権寧河, 岡本光司, 赤嶺政仁, 寺本進
2. 発表標題 レーザー光と位置検出素子を用いたジェット騒音計測の周波数特性評価に関する研究
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 赤嶺政仁, 岡本光司, 寺本進, 堤誠司
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 日本航空宇宙学会第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中大貴, 岡本光司, 寺本進, 赤嶺政仁
2. 発表標題 ウェーブレット変換を用いた超音速噴流から生じるマッハ波の周方向構造の解析
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹本 晃也, 寺本進, 岡本光司, 赤嶺政仁 (
2. 発表標題 斜め平板に衝突する超音速噴流から生じる音響現象に関する研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第61回航空原動機・宇宙推進講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤嶺政仁, 市川剛士, 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

〔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
研究 分担者	岡本 光司  (Okamoto Koji)  (70376507)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授   (12601)	

	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
研究 協力者	赤嶺 政仁  (Akamine Masahito)		

#### 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
---------	---------