

3D04 超音速ジェットの詳細パルス3D-BOSと 正準相関解析による大規模構造抽出

○市川豪士, 赤嶺政仁, 寺本進, 岡本光司（東大）

Large-scale structure extraction using double-pulse 3D-BOS and canonical correlation analysis for a supersonic jet
Goshi Ichikawa, Masahito Akamine, Susumu Teramoto and Koji Okamoto (The University of Tokyo)

Key Words : Aeroacoustics, Flow Visualization

Abstract

To understand the mechanism of jet noise, it is necessary to visualize the turbulent structure of the jet shear layer. The objective of this study is to visualize the structures that generate jet noise. In this study, the advection structure is visualized by double-pulse 3D-BOS. Furthermore, the turbulence structure is extracted by canonical correlation analysis with the microphone signal. As a result of this analysis, we were able to visualize a circumferentially broad structure that may be related to Mach waves.

1. 背景

超音速ジェットでは、強い騒音であるマッハ波が発生する。マッハ波は超音速航空機の騒音やロケットの音響振動の主要な成分であり、その低減のために、マッハ波を発生させる流れ場構造を理解することが重要である。

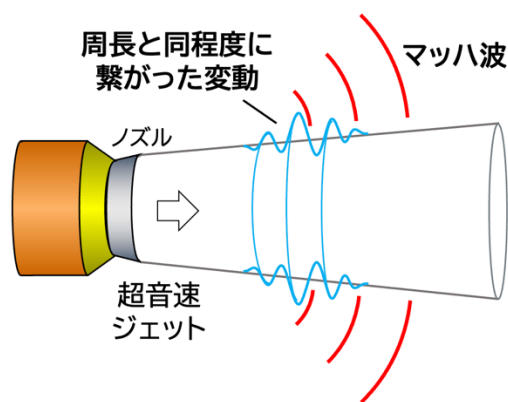


図1 wavepacket構造からの騒音モデル

マッハ波は剪断層上に成長する周長程度の周方向スケールを持つ変動(wavepacket構造)から発生すると説明されている[1-6, 図1]。しかし、3D-BOS法によって超音速ジェットの三次元密度場の可視化結果[7]では、瞬時場中には細かな変動が観察され、wavepacketのように周長程度の周方向スケールを持った構造は明確には観察されていない。そのため、wavepacket構造がマッハ波を発生させるという説明は仮説の段階と言える。

瞬時場中に細かな変動が観察された三次元密度場の可視化結果も、ジェット剪断層の変動を周方向フーリエ変換すると、周長程度の周方向スケールの変

動に対応するような低次モードの存在が報告されている[7]。このように、超音速ジェットにはfine-scale乱流構造[8]等の剪断層厚さスケールの変動が多数存在し、それらが重なることで、周方向スケールの大きなwavepacket構造が埋もれてしまい、wavepacket構造が実験的に観察できていないと考えた。

そこで本研究では、瞬時場のデータからマッハ波に無関係な乱流構造を取り除くために、ジェットの3D-BOS法のデータと音響データの因果・相関関係に着目し、音響と相関関係のある構造のみを抽出することによって、マッハ波を発生させる流れ場構造を可視化することを考えた。この相関関係のある構造を取り出す手法は、気象学や計量化学において因果関係にある構造を抽出している[9, 10]。そのため、流れ場がマッハ波を発生させるという因果関係を踏まえると、この手法を用いることによって、マッハ波を発生させる流れ場構造を抽出できる可能性がある。

本研究の目的は、超音速ジェットを3D-BOS法によって可視化し、その結果を音響と相関関係のある構造を抽出することで、マッハ波を発生させる流れ場構造を可視化できるか調べることである。

2. 手法

2. 1. 可視化するジェットの条件

可視化をするマッハ波を発生させる超音速ジェットとして、本研究では東京大学柏キャンパス極超音速高エンタルピー風洞を用いて、直径20mmのノズルから出る非加熱のマッハ1.8の適正膨張噴流を用いた。その他のジェットの条件やノズルの詳細についてはAkamineら[11]と同様である。このジェットにお

いては、ノズル出口からノズル直径の6倍の位置からマッハ波が発生することが明らかにされている。

2. 2. ジェットの可視化と騒音計測

マッハ波とそれを発生させる流れ場構造の関係を調べるために、マッハ波を計測するためのマイクロフォンアレイ計測と超音速ジェットの三次元密度場計測をする。

マイクロフォンアレイは、マッハ波の伝播方向・位置であるノズル直径を D とした時に、流れ方向 x 、ノズル軸からの距離を r としたときに $\left(\frac{x}{D}, \frac{r}{D}\right) =$

(18, 10)の位置に、24本のマイクロフォンを円周上に均等に設置した。

超音速ジェットの三次元密度場計測は3D-BOS法を用いた。BOS法(Background Oriented Schrielen法)は、流れ場の背後にドットパターンを設置し、流れ場の密度変化によるドットパターンの変位を調べることによって、密度の空間微分の光路上積分を観察することができる[図2(a)]。そして、さまざまな方向からBOS法を行うことによって、三次元的な密度場構造を可視化する手法が3D-BOS法である[図2(b)]。

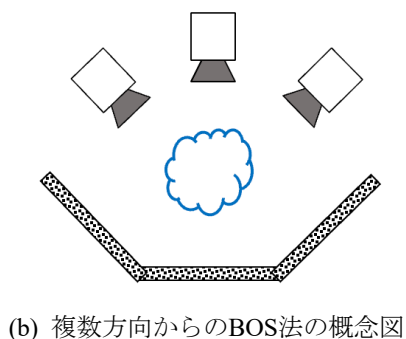
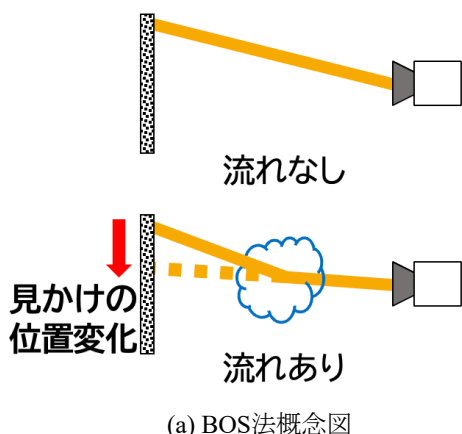


図2 3D-BOS法 / BOS法の概念図

本研究での3D-BOS法の配置はAkamineら[10]と同様のものを用いた。これにより、半径方向には1.5D、ジェット軸方向には4D程度を可視化した。また、可

視化範囲については、0-4D, 2D-6D, 4D-8D, 6D-10D, 8D-12Dという5つの範囲を変更している。3D-BOS法において複数のBOS法の結果から三次元的な密度場に再構成する方法・条件についてもAkamineら[7]と同様のものを用いた。

本研究では、騒音を発生させるジェットの構造を可視化することから、構造の移流を観察することが求められる。一方で、研究に用いたカメラは70[fps]と低速であったため、移流する構造は観察できない。そのため、カメラを2つグループに分けて、それぞれのグループの撮影トリガのパルスを入れるタイミングをずらすことで、撮影タイミングをずらし擬似的に高速度な撮影をした。その結果の差分から密度の時間微分を得ることで、移流する構造を可視化した。今回の報告では撮影タイミングを10[us]ずらしたものをを用いている[図3]。

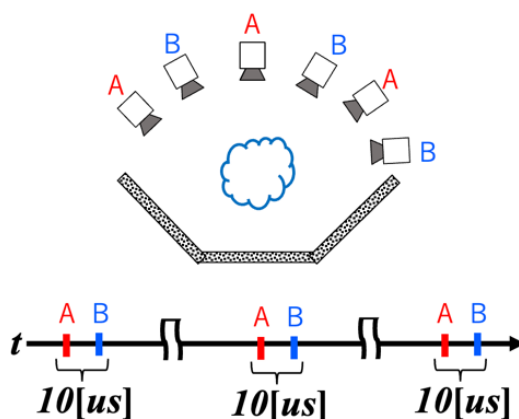


図3 ダブルパルス撮影概念図

2. 3. Momentum Potential Theoryを用いたフィルタ

流れ場にはさまざまな変動があることから、大規模乱流構造のみを可視化する必要がある。そのため、本研究ではMomentum Potential Theoryを用いて、質量フラックスに対応した運動量ベクトルのみを解析した。Momentum Potential Theoryは、Doakによって提案された特徴量抽出手法[12, 13]であり、運動量を熱・音響・渦の3成分に分ける手法である。この中で熱成分と音響成分を合わせたものは質量フラックスに等しい。本研究では、乱流による質量輸送を観察することで、大規模乱流構造を観察する。

Momentum Potential Theoryは次の(1)-(3)の手順で質量フラックスを得る。運動量をヘルムホルツ分解によって、一意な非回転成分と回転成分に分解する。

$$\rho \mathbf{u} = \mathbf{B} + \bar{\mathbf{B}} + \nabla \phi \quad (1)$$

ただし、回転成分 \mathbf{B} と調和成分 $\bar{\mathbf{B}}$ は、 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ かつ $\nabla \cdot \bar{\mathbf{B}} = 0$ である。質量保存則を考えると

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) \quad (2)$$

(1)と(2)を合わせると

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3)$$

というポアソン方程式が得られる。この時、得られるポテンシャルが運動量ポテンシャルである。運動量ポテンシャルの空間微分である $\nabla \phi = \rho \mathbf{u}_{div}$ を考えると

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho \mathbf{u} = -\nabla \cdot \rho \mathbf{u}_{div} \quad (4)$$

であるため、 $\nabla \phi = \rho \mathbf{u}_{div}$ 成分は密度変化に寄与する運動量であり、質量フラックスを意味する。ジェット剪断層において、密度変化に寄与する質量フラックスは、大規模乱流構造に関係すると考えられ、これを用いることでフィルターとなる。

2. 4. 共分散関係に基づく構造抽出

マイクロフォンアレイによる騒音データと3D-BOS法による三次元密度場データの関係性を調べる必要がある。このような2つのデータの関係性を調べるために、2つのデータの共通の構造の抽出や回帰分析をする手法として、PLS法がある。PLS法の基本にある構造抽出は、二つのデータの時空間構造を時間変動と空間モードに分解する際に、互いの時間変動の共分散が最大になるようにする。その構造抽出を数式化すると式(5)、(6)のように表される。

$$U(x, y, z, t) = \sum_i A_i(t) \phi(x, y, z) \quad (5)$$

$$V(x, y, z, t) = \sum_i B_i(t) \psi(x, y, z) \quad (6)$$

ただし、 $A_i(t)$ と $B_i(t)$ の共分散は最大となるような分解である。このように、時間変化の共分散が大きくなるように、2つの入力データを、時間 $[A_i(t), B_i(t)]$ と空間構造 $[\phi(x, y, z), \psi(x, y, z)]$ に分解することで、相関の大きな構造を抽出するものである。

PLS法は、計量化学分野において、溶液の成分と分光スペクトルという二つのデータの関係性を調べるために、 $A_i(t)$ から $B_i(t)$ への回帰分析をすることによって、溶質の成分から分光スペクトルを予測する[14]ために研究されていたものである。PLS法による構造抽出は、気象分野ではSVD解析、流体分野ではCanonical Correlation Decompositionという名前でのその応用可能性の検討や因果関係の解析に用いられている [9, 10]。

本研究では、流れ場の情報にはMomentum Potential Theoryから得られる質量フラックスを $U(x, y, z, t)$ 、騒音の情報であるマイクロフォンアレイの音圧データを $V(x, y, z, t)$ にして解析を行うことによって、騒音を発生させる流れ場構造を抽出す

る。

さらに、相互相関解析と同様に、遅れ時間 τ を質量フラックスデータ $\rho \mathbf{u}(x, y, z, t + \tau)$ に持たせて、マイクロフォンアレイの音圧データ $P(x, y, z, t)$ とPLS法による解析をすることで、騒音を発生させる構造の移流を調べる。今回は、解析手法の妥当性を確かめるために、最低次モードに注目をする。

3. 結果と考察

3. 1. 三次元密度場の時間平均

3D-BOS法を対象の超音速ジェットに適用した時の結果の平均・二乗平均平方根が図4と図5である。ジェットは軸に対して対称であり、下流に行くに従って、平均の値は下がり、変動は大きくなることがわかる。値や分布については先行研究[10]とほぼ同じである。PLS法による解析では、特に変動が小さな上流($\frac{x}{D} = 2$)付近、マッハ波が発生するとされる中

流($\frac{x}{D} = 6$)付近、変動の大きな下流($\frac{x}{D} = 10$)付近に注目をする。

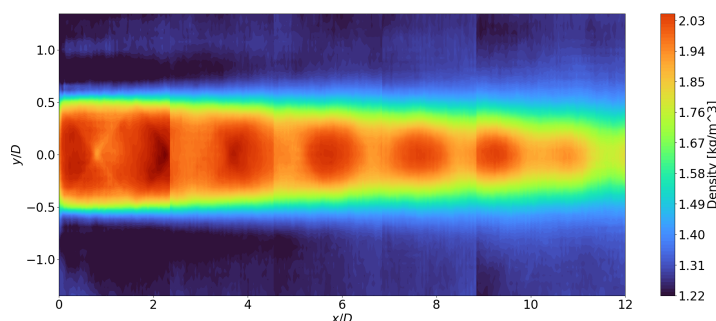


図4 超音速ジェットの平均密度場の断面

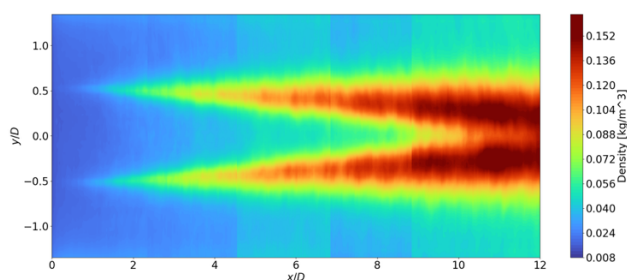


図5 超音速ジェットの密度場の平均二乗平方根の断面

3. 2. 運動量ポテンシャルのPLS法による解析

超音速ジェットの三次元的な質量フラックスとマイクロフォンアレイの音圧データにPLS法による解析をしたものが図6(上流), 7(中流), 8(下流)である。また、資料フラックスのモードの変動が中心にくるようにそれぞれ、遅れ時間を上流では $\tau =$

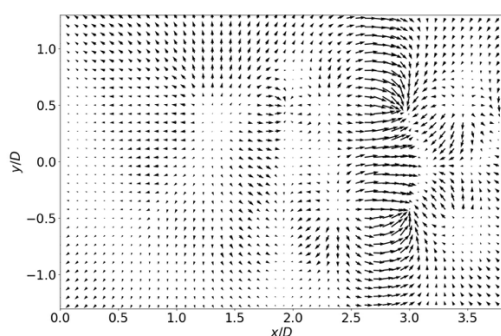
$-1.0[ms]$ 、中流では $\tau = -0.845[ms]$ 、下流では $\tau = -0.65[ms]$ としている。また、(a)は質量フラックスの空間モード (b)では質量フラックスのモードの発散をとることで、湧き出し・吸い込みという形で $\frac{\partial \rho}{\partial t}$

を観察している。(c)は(b)の点線の断面である。また、(d)はマイクロフォンの空間モードである。

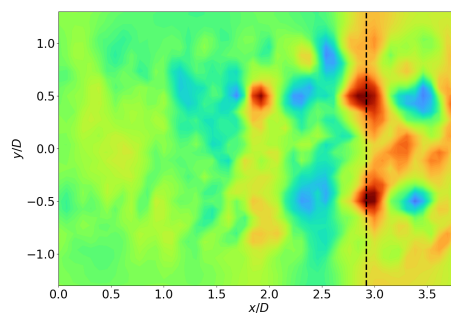
まず、中流について注目する。図7(b)を見ると、図の中心に吸い込みが存在し、その両端に湧き出しが存在する。また、吸い込みのある断面である図7(c)は、ドーナツ状に吸い込みがあることがわかる。吸い込みは密度が高まる・湧き出しは密度が下がる領域を意味しており、それがドーナツ状・繰り返して存在している。Wavepacket構造は圧縮・膨張の繰り返し、ドーナツ状に存在することを意味しているので、以上の結果は大規模乱流構造を観察している可能性がある。また、図7(d)のマイクロフォンの空間モードもドーナツ状であることから、マッハ波を観察していると考えられる。この両者が関係していると考えられる。

次に、上流を観察すると、図6(c)(d)のようにドーナツの一部が存在しない。図5のように上流では大規模乱流構造が成長しておらず、マッハ波を発生させる構造が一部しか存在していないことに対応していると考えられる。

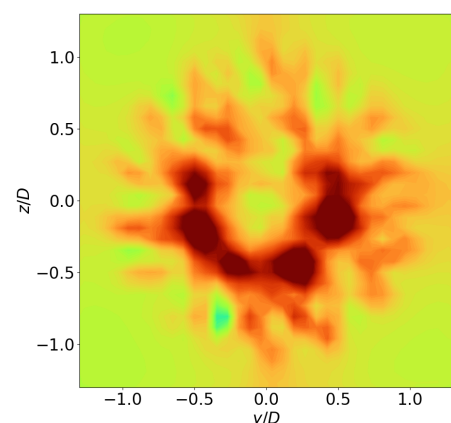
次に下流を観察すると、図8(d)のマイクロフォンのモードはドーナツ状であるものの、図8(c)ではドーナツ状ではなく円筒状になっている。図5のように下流で大規模乱流構造は崩壊しているため、マッハ波を発生させる構造が崩壊し、ジェット内部に入り込んでいることに対応していると考えられる。



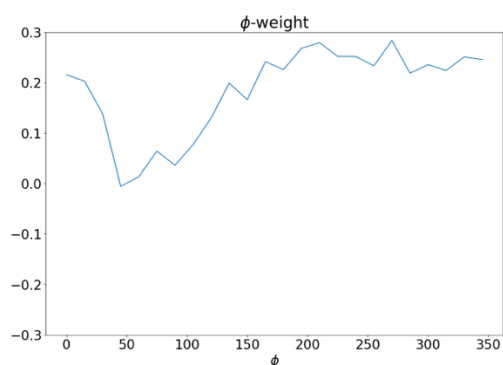
(a) 上流の質量フラックスのモード



(b) (a)の発散



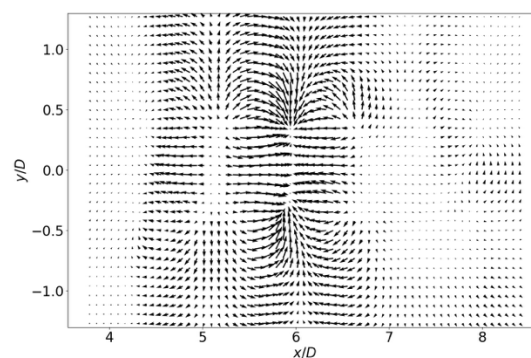
(c) (b)の点線上の断面図

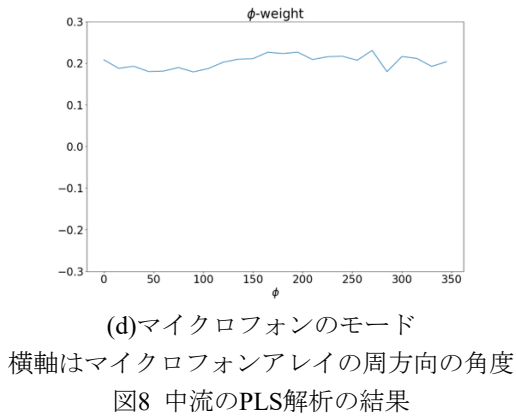
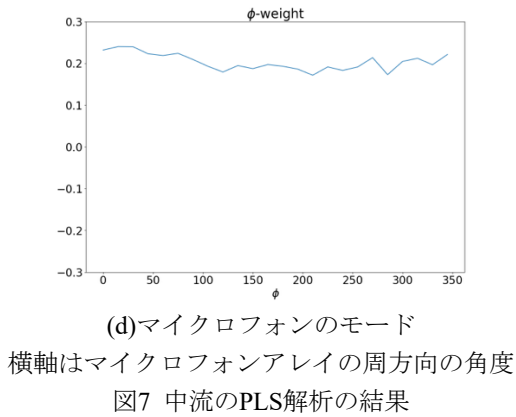
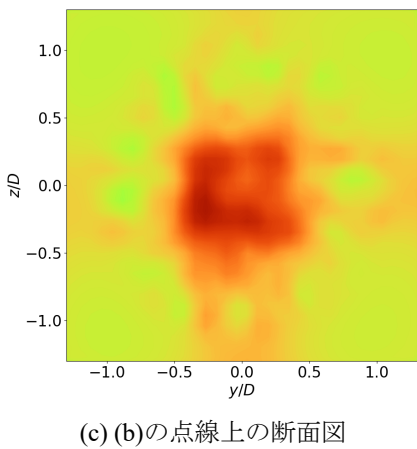
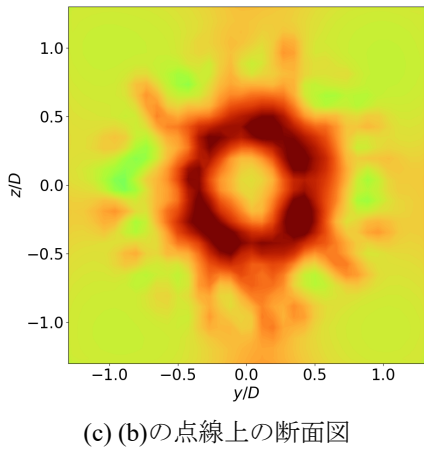
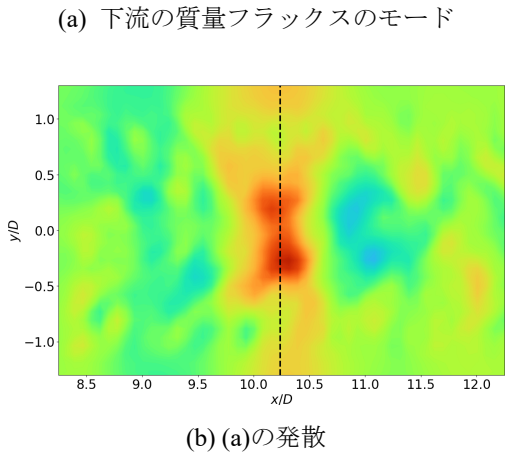
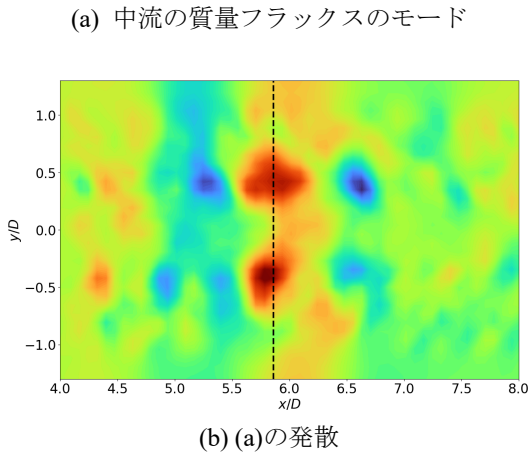


(d)マイクロフォンのモード

横軸はマイクロフォンアレイの周方向の角度

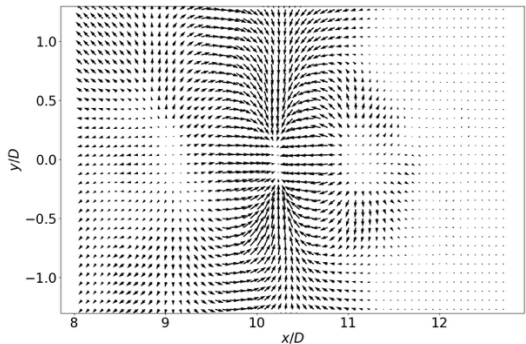
図6 上流のPLS解析の結果





3. 3. マッハ波との関係性

遅れ時間を変えて空間モードを観察したものの剪断層での値をx-tマップとしてプロットしたものが図9である。この空間モードの伝播速度はジェット velocitiesの0.785倍に近い。これは先行研究[1]で示されている大規模乱流構造の移流速度に近い。この観点からも観察される構造は大規模乱流構造であると考えられる。



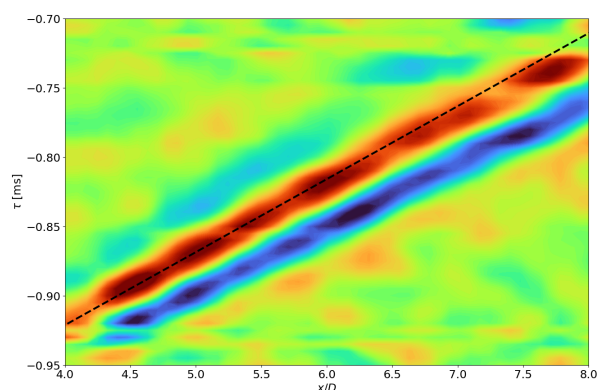


図9 空間モードの剪断層におけるx-tマップ
点線はジェット velocities の0.785倍

また、PLS解析を遅れ時間を変えると、ある点においては、時間変動を観察することができる。マッハ波が発生するとされる $\frac{x}{D} = 6$ の剪断層の点での変動のスペクトルを観察したものが図10である。変動のスペクトルである赤線は、計測される騒音のスペクトルの黒線のピーク位置・高周波側の傾き・山なり形状と良い一致をしている。そのため、抽出された構造がマッハ波と関係していると考えられる。

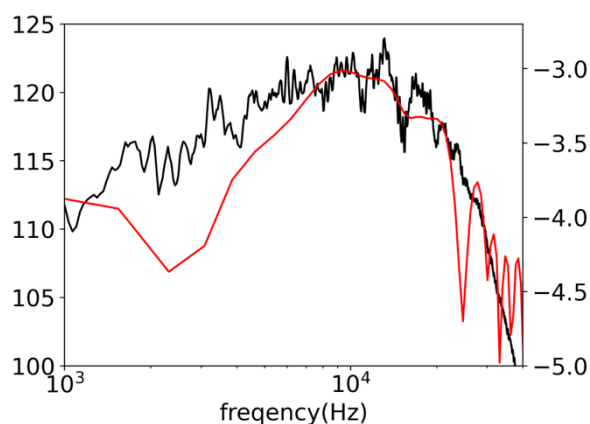


図10 PLS解析の最低次モードの剪断層での
変動のスペクトル(赤線)
黒線：比較のための音響のスペクトル

4. まとめ

マイクロフォンアレイの音圧データと質量フラックスの三次元データをPLS解析することによって、大規模乱流構造と考えられる構造を抽出することができた。その形はwavepacket仮説で予測される構造に近い。また、遅れ時間を変えて変動を観察すると、そのスペクトルはマッハ波と関係があることを示した。今後は、この手法の特性などを踏まえて、高次モードの成分を調査する。

5. 参考文献

- [1] Tam, C. K. W., "Mach Wave Radiation from High-Speed Jets," AIAA Journal, Vol. 47, No. 10, 2009, pp. 2440–2448.
- [2] Jordan, P., and Colonius, T., "Wave Packets and Turbulent Jet Noise," Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 45, 2013, pp. 173–195.
- [3] Sinha, A., Rodríguez, D., Brès, G. A., & Colonius, T. "Wavepacket models for supersonic jet noise". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 742, 2014, pp. 71–95.
- [4] Cavalieri, A. V. G., Jordan, P., and Lesshafft, L. "Wave-Packet Models for Jet Dynamics and Sound Radiation." ASME. Appl. Mech. Rev. March 2019; 71(2): 020802.
- [5] Suzuki, T., and Colonius, T. "Instability waves in a subsonic round jet detected using a near-field phased microphone array". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 565, 2006, pp. 197–226.
- [6] Breakey, D. E. S., Jordan, P., Cavalieri, A. V. G., Nogueira, P. A., Léon, O., Colonius, T., Rodríguez, D., "Experimental study of turbulent-jet wave packets and their acoustic efficiency". Physical Review Fluids, Vol. 2, 2017, p. 124601.
- [7] Masahito, A., Susumu, T. and Koji, O., "Microphones and Three-dimensional Background-Oriented Schlieren Measurements of an Ideally Expanded Supersonic Jet," AIAA 2024-2101. AIAA SCITECH 2024 Forum. January 2024.
- [8] Brown, G. L., & Roshko, A. "On density effects and large structure in turbulent mixing layers". Journal of Fluid Mechanics, 64(4), 775–816, 1974.
- [9] J. M. Wallace, C. Smith and C. S. Bretherton, "An Intercomparison of Methods for Finding Coupled Patterns in Climate Data." Journal of Climate, Vol. 5, 1992, pp. 561–576.
- [10] Benshuai Lyu. "Canonical Correlation Decomposition of Numerical and Experimental Data for Observable Diagnosis," AIAA 2024-3206. 30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2024). June 2024.
- [11] Masahito, A., Yuta, N., Koji, O., Susumu T., Takeo, O., and Seiji, T. "Acoustic Phenomena from Correctly Expanded Supersonic Jet Impinging on Inclined Plate." AIAA Journal, 2015, Vol. 53:7, pp. 2061–2067.
- [12] P.E. Doak, "Momentum potential theory of energy flux carried by momentum fluctuations," Journal of Sound and Vibration, 1989, Vol. 131, Issue 1, pp. 67–90.
- [13] S. Unnikrishnan, "Recent advances in feature extraction techniques for high-speed flowfields,"

Progress in Aerospace Sciences, 2023, Vol. 140, p.
100918.

[14] S. Wold, N. Kettaneh-Wold, B. Skagerberg,
“Nonlinear PLS modeling”, Chemometrics and
Intelligent Laboratory Systems, Vol. 7, 1989, pp. 53-65.