

データマイニングによる 斜め平板に衝突する超音速ジェットから発生する音響波の理解

森澤征一郎¹, 野々村拓², 大山聖², 藤井孝藏², 大林茂³

1. 東北大学大学院, 2. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, 3. 東北大学流体科学研究所

Data Mining for the Understanding of Acoustics Waves Generation from a Supersonic Jet Impinging on Inclined Flat Plate

by

Seiichiro Morizawa, Taku Nonomura, Akira Oyama, Kozo Fujii, and Shigeru Obayashi

ABSTRACT

Key features from acoustics waves generated from a supersonic jet impinging on three kinds of inclined flat plates are extracted by applying two types of data mining techniques. One is cluster analysis which consists of self-organizing map and k-means method, and the other is proper orthogonal decomposition (POD) with Fourier transformation. The flow data is taken from the numerical simulation data in the previous study. First, the cluster analysis is applied to the dataset based on the normalization of the sound pressure level spectra on symmetrical plane. The results show the apparent characterization of regions based the frequencies of acoustics waves. Clusters corresponding to three kinds of acoustics waves are clearly generated. Next, POD is applied to two-dimensional pressure distribution in the acoustics fields. The results reveal the source locations where strong acoustics waves are generated. These results agree with the previous observations. Thus, this study shows the capability of data mining to extract key features of acoustics waves generated from the flow field.

1. はじめに

数値計算手法と実験手法の進歩に伴い、流れ場における圧力・流速などの詳細な物理情報が容易に得られるようになった。それらの結果は複雑な流体现象の解明や設計に活用され、多くの成果につながっている。一方、京に代表される大規模計算機や 3 次元 Particle Image Velocimetry (PIV) など得られる流れ場の物理情報は数値データとして蓄積され、そのデータ容量は膨大になる傾向がある。そのため、これらのデータを人間の力ですべて処理することは難しく、データ利用者の勘や経験を基に、注目すべきデータを絞り込んだ上で処理することが通例である。このような従来の方法では、得られたデータの中から有意な原理や現象を解明するのが困難である。

この問題の解決策として、データマイニングの適用が有効と考えられる。データマイニングとは、膨大かつ複雑なデータに潜む特徴を人間の頭で理解しやすい情報形態（数値・画像・文章など）として系統的に抽出する技術である¹⁾。これまでにベース流れの非定常な数値シミュレーションの解析結果に対して、適用され流れ場情報の抽出が行われてきた²⁾。現在はより複雑な現象に対して、データマイニングを適用し、現象理解が難しい非定常現象に関する物理情報の獲得が期待される。

本研究では、斜め平板に衝突する超音速ジェットから発生する音響波の数値計算結果に、データマイニングを適用し、大規模なデータを低次元化することでその現象理解が大幅に助けられることを示し、その有効性を確認する。

2. 解析対象

ロケットの打ち上げ時の轟音に代表されるように斜め平板に衝突する超音速ジェットの流れ場から強い音響波が発生することが知られている。このような流れ場から生じる音響波は非常に強く、ブロードバンドな周波数特性をもつ音響荷重として、ロケット内の人工衛星や宇宙機などのペイロードに悪影響を及ぼし、問題となる。現在、この音響波の予測は、フリージェットや単純な幾何形状の射場による試験結果から推測される経験的な方法^{3,4)}やサブスケール試験に基づいて行われているが、その予測精度は十分とは言えない。これは、これまで予測方法が騒音発生メカニズムを十分に考慮していないためである。そのため、騒音

特性、騒音源、発生メカニズムを物理メカニズムに基づいて解明することが必要である。

近年では、Large-Eddy Simulation 等の数値シミュレーションによって実験との一致も見られ、複雑な流れ場でも有益な情報を得られるようになった^{5,6)}。また、射点のディフレクタを模擬した斜め平板と超音速ジェットの干渉及び、その際に発生する音響波の物理現象理解を目指し、ジェットのノズル出口温度及びノズル平板間距離の違い⁷⁾、平板角度の違い⁸⁾を調べる数値シミュレーションが行われてきた。その結果、彼らの研究から斜め平板に衝突する超音速ジェットからは、少なくとも図 1 で示すような以下の 3 種類の音響波が発生することが明らかになった。

- (i) 主流ジェットから発生するマッハ波
- (ii) 衝突点から発生する音響波
- (iii) 衝突後の超音速流れから発生するマッハ波

特に音響波(ii)に関しては、存在自体も十分明らかでなく、これまでにモデル化もほとんどされていなかった。一方、最近では実験でもこの音響波(ii)を確認されるようになったが⁹⁾、その詳細な発生メカニズムについては明らかでない。

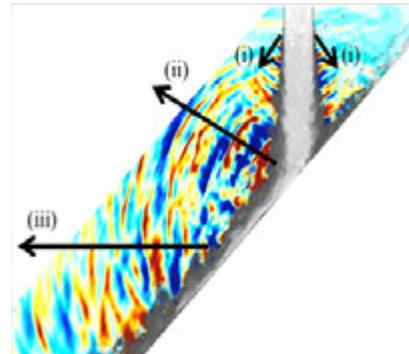


図 1 斜め平板に衝突する超音速ジェットから発生する音響波

3. 適用データについて

本稿では、Nonomura, *et. al.* 及び、Honda, *et. al.* によって行われた角度の異なる 3 種類の斜め平板に衝突する超音速ジェット及び、そこから発生する音響波に関する数値シミュレーション結果のデータを用いた⁷⁾。

図 2 はノズルと射点のディフレクタを模擬した平板の幾何形状を示す。本稿では $L/D=5$ を固定し、 $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ と平板角度を変更した形状である。数値計算結果は図 3 で示した 11zone からなる総格子点数、約 2800 万点の計算格子である。

さらに、本稿で対象としたデータは、平板に衝突する超音速ジェットから発生する音響波についての流れ場における 2 次元断面である対称面(図 3(a))での音圧レベルである。

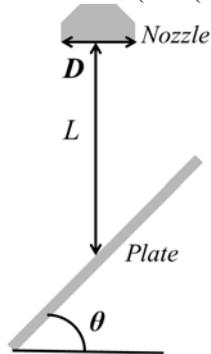


図 2 幾何形状の定義

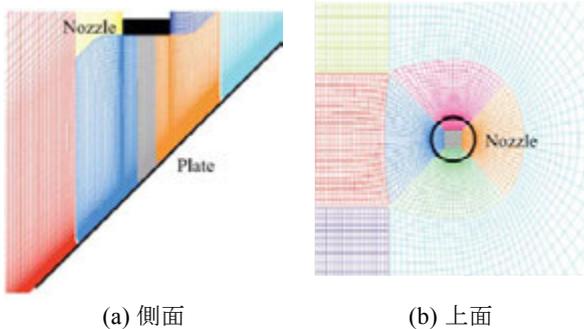


図 3 計算格子

ストローハル数と音圧レベルは、以下の式で表される。

$$St = \frac{fD_j}{u_j} \quad (1)$$

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}_{ref}} \quad (2)$$

f は周波数、 \tilde{p} は有効圧力変動と \tilde{p}_{ref} は参照圧力を示す。参照圧力は以下のように表される。

$$\tilde{p}_{ref} = \frac{2.0 \times 10^{-5} [Pa]}{101300 [Pa]} \times p_\infty \quad (3)$$

4. データマイニング

本研究では数値シミュレーションから得られた結果に対して、クラスタ分析と固有直交分解(POD)を適用し、音響波の現象理解を試みた。クラスタ分析では音響波の分類・同定を、POD では音響波から生じる特徴的なモードの抽出を試みた。これらの手法の共通目的は、大規模なデータを低次元空間で現象を捉え、簡潔に示すことで人が直観的に議論できる形に整理することである。

4. 1 クラスタ分析

本研究で用いたクラスタ分析の解析手順を図 4 に示す。始めに、各格子点での音響波に関する特徴量を抽出する。次に、自己組織化マップ及び k-means 法を用いて格子点を属性値の似た集合(クラスタ)に分類する。最後に、その分類結果を元の解析対象の実空間にマッピングし、その分類結果と解析対象を比較することで超音速ジェットから発生する音響波の理解を試みる。ここで、2 段階のクラスタ

分析を施したのは直接、k-means 法のみでクラスタ分析を行うより精度良くデータを分類できると報告されているためである¹⁰⁾。

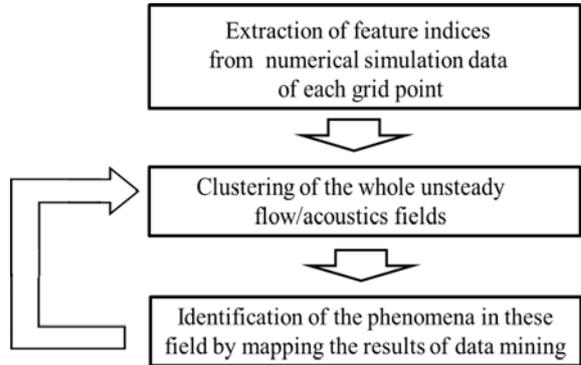


図 4 クラスタ分析の手順

4. 1. 1 特徴量の定義

本稿では N_SPL という値を特徴量と定義し、データマイニング手法に適用する。 N_SPL とはオクターブバンドの音圧レベル ($OBSPL$) とオーバーオール音圧レベル ($OASPL$) の比で表したもので、音圧レベルの距離減衰に関する影響を取り除き周波数特性のみを取り出している。 $OBSPL$ は次式で示される。

$$OBSPL = \int_{St_{min}}^{St_{max}} SPL(St) dSt \quad (4)$$

N_SPL は次式で示される。

$$N_SPL = OBSPL/OASPL \quad (5)$$

本稿ではこの式 (5) より導いた $St_c=0.00625, 0.0125, 0.25, 0.5, 1.0$ の計 5 つを特徴量として用いた。

St の添え字の min, max, c は各スペクトル領域でのストローハル数の下限値、上限値、中央値を示す。

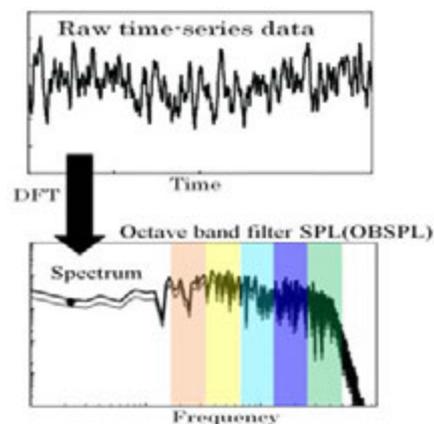


図 5 OBSPL の導出

4. 1. 2 自己組織化マップ (Self-organizing map, SOM)

SOM は入力層と出力層の 2 層からなる学習なしニューラルネットワークモデルの 1 つである¹¹⁾。このモデルは、分析対象の多次元データに含まれる特徴(類似・相反関係)を保持した状態で図 6 に示すような形で 2 次元平面マップ上の六角形のノードであるクラスタに射影するように設計されている。図中の同じ配置におけるカラーパターンを各々比較することで多次元データの特徴を 2 次元平面上で、容易に考察できる。

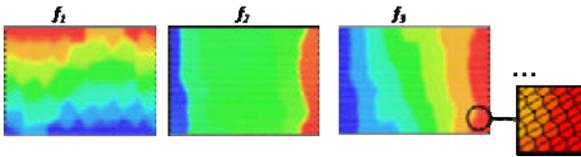


図 6 自己組織化マップ

本研究では、特徴量である N_{SPL} データを SOM の入力データとして用いて、音響波の周波数特性に基づいて解析を行う。

4. 1. 3 k-means 法

k-mean 法は N 個のデータに対して、予め指定した数 k 個 ($<N$) のデータ構造の似ているグループ (クラスタ) に分類する方法で、クラスタ分析の 1 つである¹²⁾。この方法は求めた各々のクラスタの重心とデータ間のノルムによってデータの類似度を決める。その結果、この手法は分割されたクラスタの境界が図 7 で示すように明確に決まる特徴をもつ。

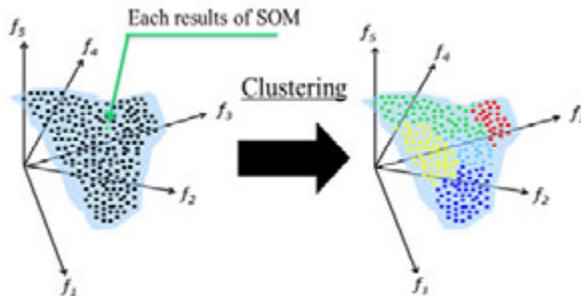


図 7 k-means 法による分類

本研究では、前節の SOM で得られた 2 次元平面上に射影された結果に対して、k-means 法を適用し、より大きなクラスタへと分類する。そして、それらの分類結果を用いて、解析者が解析対象の実空間と比較することで現象を同定する。

4. 2 固有直交分解

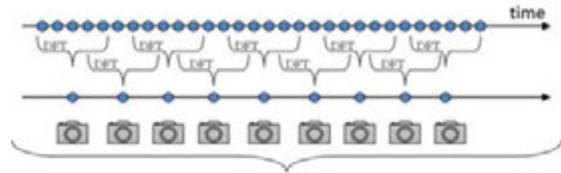
(Proper orthogonal decomposition, POD)

POD とは統計の分野では主成分分析、パターン認識の分野では Karhunen-Loeve 展開と呼ばれ、様々な分野で利用されている¹³⁾。本手法はデータの分散が最大になる直交基底ベクトルの組み合わせに分解することで、支配的な現象を抽出する。また、流体の数値計算結果などに POD を適用する場合、空間方向ではなく、時間方向の直交基底ベクトルを求めることが一般的である。そして、その時間方向の Snapshot POD という形で固有値問題を解く¹⁴⁾。

本研究では周波数領域において圧力変動に関する POD を施した¹⁵⁾。ここでいう周波数領域とは直交基底ベクトルを求める際、図 8 で示すようにオーバーラップした形でフーリエ解析を行った。また、POD を周波数領域で行ったのは、従来の時間領域では乱流現象のような複雑な流れ場を再構成するために必要なモード数が急増するためである¹⁶⁾。

事実、平板角度 45° の斜め平板に衝突する超音速ジェットについて時間領域での POD を施した場合 90% の再構築を行うためには図 9 で示すような非常に多くのモード数が必要となる。これは乱流から生じる音響現象が非常に複雑で、多くのモードが入り乱れた形で存在するためである。

本稿では、過去の研究から音響波 (ii) が最もよく観測された $St=0.5$ でフーリエ解析を行い、その結果に対して周波数領域の POD 解析を行った。



Most energetic modes are linearly extracted

図 8 フーリエ解析を用いた周波数領域で POD

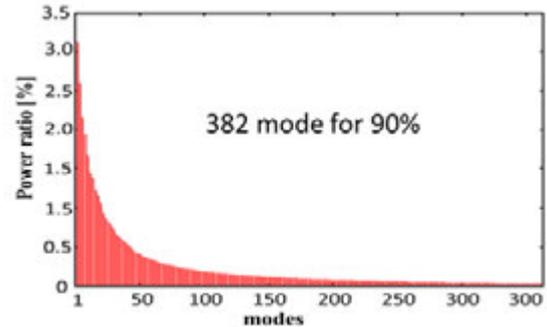


図 9 時間領域での POD のエネルギー比率 (平板角度 45°)

5. 結果および考察

5. 1 クラスタ分析

図 10 に、斜め平板に衝突した超音速ジェットから発生する音響波のオーバーオール音圧レベル (OASPL) の分布及び、クラスタ分析の結果を示す。ここでのクラスタ分析の結果は、前章で定義した特徴量 N_{SPL} に基づき分類し、実空間上にマッピングさせた結果である。このとき、図 10(a), (b), (c) は平板角度 30° , 45° , 60° の結果を示す。その結果、音響波 (i) について、 30° では黄緑からピンク、 45° ではピンクからオレンジ、 60° ではピンクからオレンジへと推移するクラスタと対応する。また、音響波 (ii) について、 30° ではオレンジの領域、 45° 及び 60° では黄緑の領域と対応し、音響波 (iii) については 30° では黄色及び赤の領域、 45° では水色及び薄青の領域、 60° では青の領域と対応する。すなわち、いずれの角度においても 2 章で述べた 3 つの音響波がクラスタ分析によって分類できた。

さらに、平板角度の違いによる影響を見た場合、角度 30° の結果において、斜め平板の上流部と下流部で同じカラーパターンを示す。これは、今回用いた特徴量 N_{SPL} に基づく流れ場の周波数特性が平板角度 30° では同じであることを示す。加えて、流れ場の様子を図 11 で確認する。このとき、図 11 の左図にマッハ数の分布、右図に乱流エネルギー (TKE) の分布を示す。その結果、図 11 より平板に衝突したジェットは下流にいくに従い、流れは超音速から亜音速へ推移し、乱流エネルギーは減少している。平板角度 30° において、この流れ場の様子が上流部でも確認でき、これは上述のカラーパターンから読み取ったことと一致している。以上、クラスタ分析の結果と音響場及び、流れ場の結果を比べることで、本手法の妥当性を確認できたと共に、複数の現象を一度に表現しており、本手法が現象を簡潔に示すことが可能であることを示した。

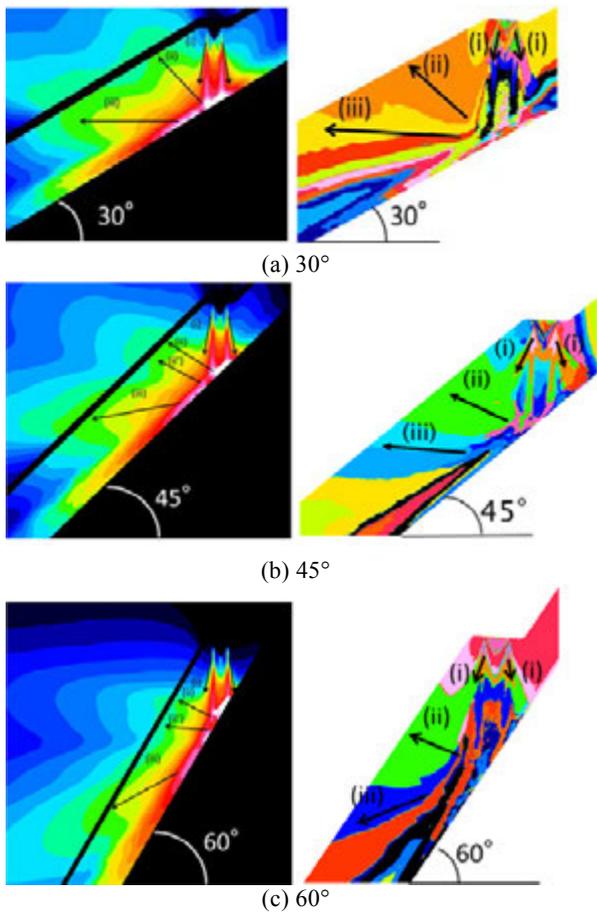


図 10 音響波の OASPL 分布とクラスタ分析の結果

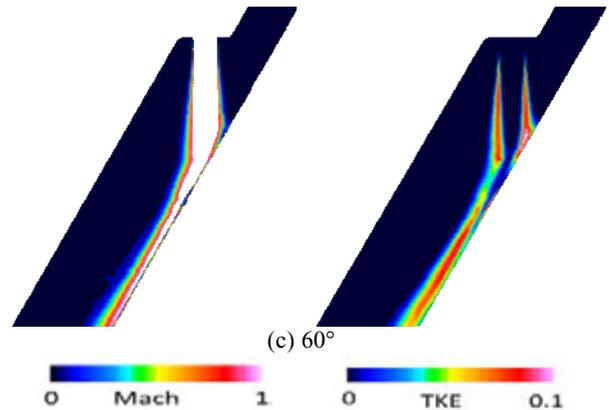
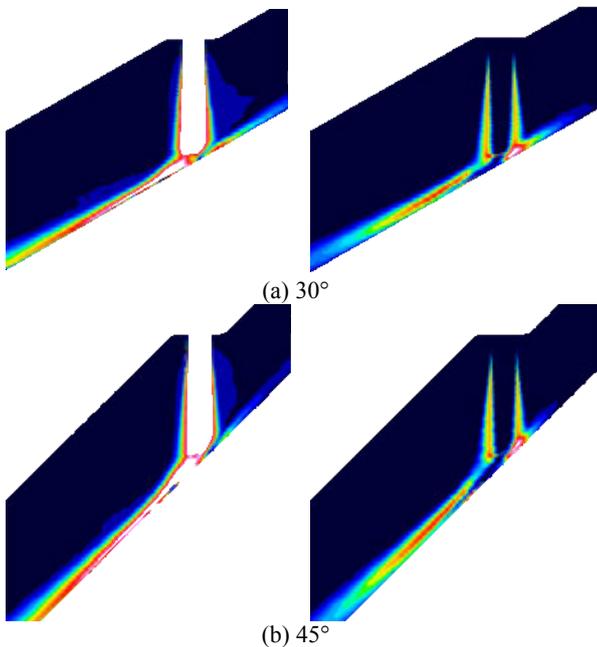


図 11 流れ場の分布 (左図：マッハ数, 右図：TKE)

5.2 POD

図 12, 13 に周波数領域における POD の結果を示す. 図 12 は POD を求めた際の流れ場及び, 音響場の主要構造 (モード) のエネルギー比率を示す. その結果, 流れ場及び, 音響場を 90%再構成するために必要なモード数は平板角度 30, 45, 60°に対して, 9, 11, 15 個となった. これは前述した例 (図 9) の時間領域における POD のエネルギー比率に占めるモード数に比べて, 周波数領域における POD のエネルギー比率に占めるモード数ははるかに少ない. つまり, 乱流から生じる音響現象は時間領域における POD より周波数領域における POD の方が少ないモード数で簡潔に表現できることを示す.

次に, POD より求めた主要なモードについて議論する. 図 13 は斜め平板に衝突する超音速ジェットから発生する音響波の POD より導いた実部の第 1, 第 2, 第 3 モードを示す. また, 本稿では赤線で囲まれた 2 次元断面の領域について POD を行った. その結果, 平板角度の異なる全ての上位 3 モードにおいて, 音響波(ii),(iii)の伝播の様子を確認できる. さらに, 図 13 において, 音響波の伝播について特徴的な領域を白色, 緑色及び, 紫色で囲んだ. これらは, POD から導出した音響波の伝播の源流に対応し, 音響波(ii),(iii)の音源及び, 発生メカニズムを議論できると考えたためである. その結果, 白色で囲まれた領域, 特に POD から導出した第 1 モードと平板に衝突した流れの下流方向へのせん断流れ及び, 音響波(ii)の伝播が対応している. このことから音響波(iii)の発生源がこのせん断流れによることを示す. また, 緑色及び, 紫色で囲んだ領域を音源として音響波(ii)が発生していることが確認できる. 特に, 角度が大きい平板角度 60°のケースのモード 2, 3 において, 音響波(ii)が分離し, 2 種類のモードが確認できる. この結果は過去の研究において, この結果は図 14 で示すように衝撃波の間隔が広がり, OASPL のピーク値が 2 種類存在し, それらが音響波 (ii) から 2 種類のモードとして抽出されたと考える. ここで図 14 は, OASPL 分布と Shock Function の等値面の関係を示す.

以上, POD より導出した結果は過去の研究結果で明らかにされている⁸⁾が, 周波数領域における POD を用いることで, 現象をより簡潔に示すことができ, 容易に現象を捉えることが可能となった. 以上から本手法の有効性を確認した.

6. 結論

本研究では, 角度の異なる 3 種類の斜め平板に衝突する超音速ジェットから発生する音響波の数値計算結果に対して, データマイニング (自己組織化マップ・k-means 法によるクラスタ分析及び, 固有直交分解) を適用し, その現象理解を試みた. クラスタ分析では周波数特性に基づく特

微量を用いて流れ場から生じる音響波の分類を行った。その結果、(i)主流ジェットから発生するマッハ波、(ii)衝突点から発生する音響波、(iii)衝突後の超音速流れから発生するマッハ波の3つの音響波が自動的に分類できた。また、平板角度の小さい斜め平板に衝突する超音速ジェットについて、下流部の超音速ジェットの流れ場と上流部の流れ場が類似の性質をもつ可能性を示した。事実、乱流エネルギーの分布も平板角度が小さいほど上流部への影響も大きいことを確認した。一方、固有直交分解では音響波の伝播の様子が確認できると同時に、音響波(ii)、(iii)の発生メカニズムを示した。以上からデータマイニングを用いることで、現象をより簡潔に示すことができ、その適用に関する有効性を示した。

謝辞

本研究において、科研費(23760773)の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。また、本稿で用いた数値計算結果は JAXA・JSS 及び、東北大学サイバーサイエンスセンターで行われた。ここに記して深く感謝する。

参考文献

- 1) Fayyad, U., Piatetsky, G. P, Smyth, P., "Knowledge Discovery and Data Mining: Towards a Unifying Framework," AAAI paper 1996-82.
- 2) 柴崎剛志, 大林茂, "非常常流れ場解析結果に対するデータマイニング手法の構築," 日本機械学会 第 19 回計算力学講演会, 2006, pp.431-432.
- 3) Eldred, S., "Acoustics Loads Generated by Propulsion System," NASA SP-8072, 1971.
- 4) Varnier, J., "Experimental Study and Simulation of Rocket Engine Freejet Noise," AIAA Journal, Vol. 39, No. 10, 2001, pp.1851-1859.
- 5) Bailly, C., and Bogey, C., "Contributions of Computational Aeroacoustics of Jet Noise Research and Prediction," International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol. 18, No. 6, 2004, pp.481-491.
- 6) Bodony, D., and Lele, S., "Current Status of Jet Noise Prediction Using Large-Eddy Simulation," AIAA Journal, Vol. 46, No. 2, 2008, pp. 364-380.
- 7) Nonomura, T., Goto, Y., and Fujii, K., "Aeroacoustics waves generated from a supersonic jet impinging on an inclined flat plate," International Journal of Aeroacoustics, Vol. 10, No. 4, 2011, pp. 401-425.
- 8) Honda, H., Nonomura, T., Fuji, K., and Yamamoto, M., "Effects of Plate Angles on Acoustic Waves from a Supersonic Jet Impinging on an Inclined Flat Plate," AIAA paper 2011-3260.
- 9) Tsutsumi, S., Takaki, R., Nakanishi, Y., Okamoto, K., Teramoto, S., "Numerical Study on Acoustics Radiation from a Supersonic Jet Impinging to an Inclined Plate," AIAA paper 2011-2922.
- 10) Kohonen, T., Self-Organizing Maps, Springer, 1995.
- 11) Vasanto, J., and Alhoniemi, E., "Clustering of the Self-Organizing Map," IEEE, Transaction on Neural networks, Vol. 11, No. 3, 2000, pp. 586-600.
- 12) MacQueen, J. B., "Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations". Proceedings of 5th

Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 1967, pp. 281-297.

- 13) Sirovich, L., and Kirby, M., "Low-dimensional procedure for the characterization of human faces," Journal of the Optical Society of America A, Vol. 4, No. 3, 1987, pp.519-524.
- 14) Sirovich, L. "Turbulence and the dynamics of coherent structures," Parts I-III. Q. Applied Mathematics and computation XLV, 1987, pp. 561-590.
- 15) Suzuki, T., Bodony, D., Ryu, J., and Lele, S. K., "Noise Sources of High Mach number jets at Low Frequencies Studied with a Phase-array Approach Based on LES Database," Annual research briefs 2007, Center for Turbulent Research, NASA Ames and Stanford University, 2007.
- 16) Freund, J. B., and Colonius, T., "Turbulence and sound-field POD analysis of a turbulent jet," International Journal of Aeroacoustics, Vol. 8, 2009, pp. 337-354.

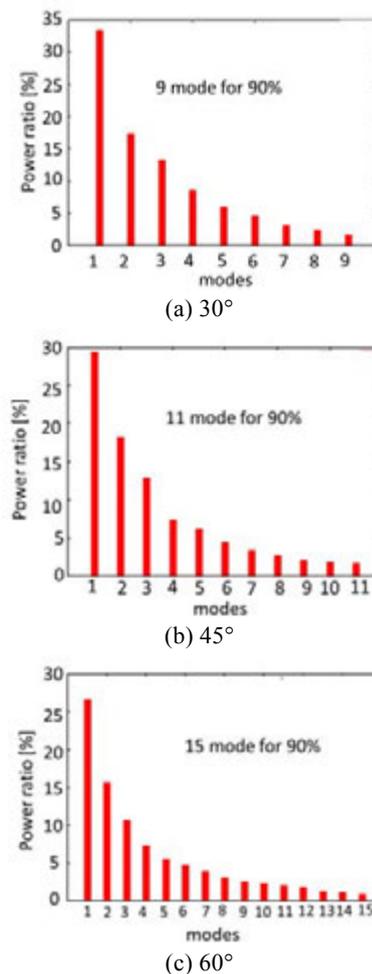


図 12 時間領域における POD のエネルギー比率

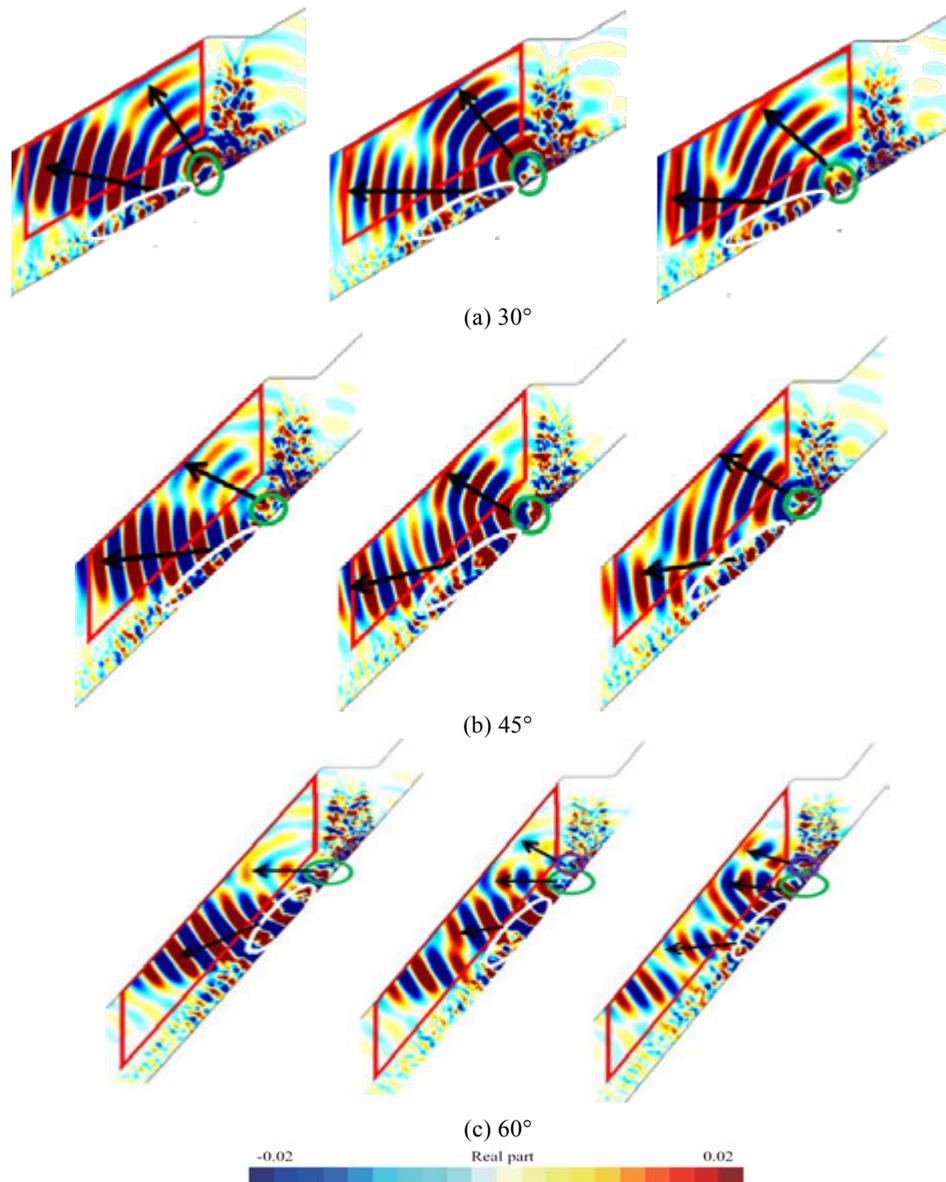


図 13 時間領域における POD の結果

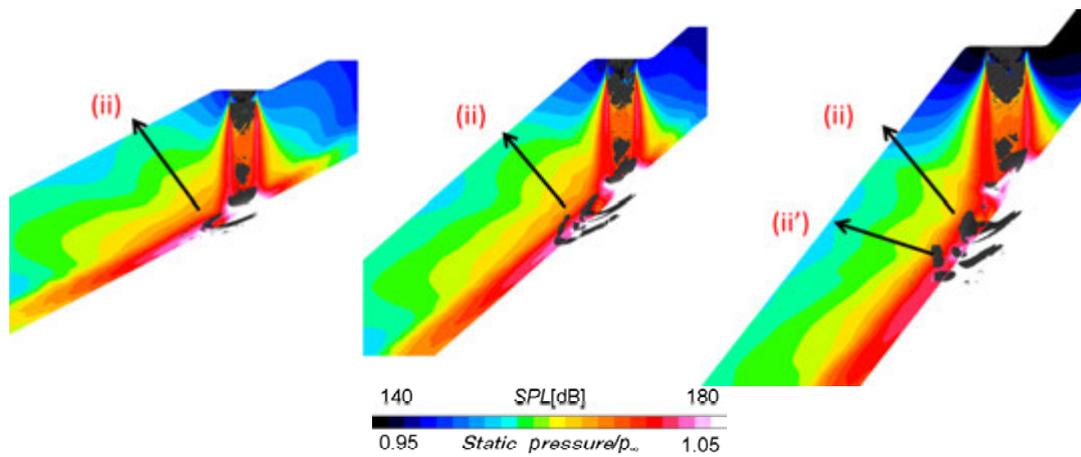


図 14 OASPL 分布と Shock Function の等値面の関係