

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03473

研究課題名(和文) 先進計測と高解像度数値解析を用いた複数超音速噴流の予測モデル構築

研究課題名(英文) Construction of prediction model of multiple supersonic jets based on Advanced Measurement and High Resolution Numerical Simulations

研究代表者

野々村 拓 (Nonomura, Taku)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60547967

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本課題で実施した1)計測技術の高解像度化、2)超音速ジェットのリノルズ数効果の解明、3)複数超音速噴流の空力音響場の解明、4)複数超音速ジェットの音響場のモデル化、の研究成果をそれぞれ示す。1)シングルピクセル解像度PIVを超音速流に適用し、同解像度のシュリーレン速度計測法を新たに提案した。2)レイノルズ数100,000と1,000,000において乱流遷移の有無により空力音響場が大きく変化することを示した。3)複数超音速噴流から発生する音響波は基本的に遮蔽効果で弱められるが干渉が生ずるために特定の角度・周波数で強められることを示した。4)結果をデータベース化し音響場の予測に使える形にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小型のロケットエンジンの複数搭載化は現状でのロケット開発のトレンドであり、このような場合におけるロケットエンジンからの騒音予測はロケットに搭載する人工衛星や宇宙飛行士の安全のため非常に重要である。この問題は個々のエンジンの小型化によるレイノルズ数効果の影響と複数噴流の影響を含んでおり、これらはそれぞれ学術的な研究項目である。これらを切り分けてそれぞれの効果を説明したことに学術的な大きな貢献がある。

研究成果の概要(英文)：The results of the following researches are obtained:1) development of a high-resolution measurement method, 2) investigation of Reynolds number effect on a supersonic jet, 3) investigation of aeroacoustic field of multiple supersonic jets, and 4) modeling of acoustic field of multiple supersonic jets. Here, the summary of each result is described as follows. 1) Single pixel resolution PIV was applied to supersonic flow, and a new schlieren velocity measurement method with the same resolution was newly proposed. 2) The aeroacoustic field was shown to significantly change with Reynolds numbers of 100,000 and 1,000,000. 3) The acoustic waves generated from multiple supersonic jets were found to be basically weakened by the shielding effect, but strengthened at a specific angle and a frequency due to interference of jets. 4) A database of results which can be used for the prediction of the acoustic field is constructed.

研究分野：航空宇宙流体力学

キーワード：流体力学 超音速流れ 空力音響学 粒子画像速度計測法 シングルピクセル解像度

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ロケットエンジンから噴出される排気ジェットの流れ/空力音響場はロケット内部の人工衛星に悪影響を与えるため、その理解は工学的に非常に重要である。研究代表者は「単体」の超音速衝突噴流の複雑流れ場の理解を世界に先駆けて行うとともに、「単体」の超音速自由噴流から発生する空力音響波を数値解析で予測する際に、数値解析で解像すべき現象を明らかにすることで高精度な予測手法を実現し、世界的に進む噴流から発生する空力音響波の数値解析(CFD)の発展に貢献してきた。

一方、近年の新型ロケットは、これまで日本が開発してきた大型のロケットエンジンを一基積む高効率な方法から、アメリカ SpaceX が採用するように小型ロケットエンジンをクラスター化することで、複数のエンジンの内一基が不調でもミッションが継続できることによる信頼性の飛躍的向上、エンジンの大量生産による生産コストの低減、を狙った設計に変化してきた。実際に日本の新型 H-3 ロケットにおいても、3基のエンジンを積んだ構成が検討されており、今後のロケットが持つ新たな特徴の一つと言える。しかしながら、このような複数ロケットエンジンから噴出した「複数」噴流の流れ場と音響場は理解が十分でないことに加え、噴流間の干渉が非常に強く「単体」噴流の結果からは予測できないため、これを理解して新型ロケットやその射場の設計に反映させる必要があった。

2. 研究の目的

上述の研究開始当初の背景の中で、本研究では研究代表者の過去の研究で得られた単体の超音速噴流の流れ場と音響場の研究を基に発展させ、申請者のグループが持つ感圧塗料などの先進計測技術と高解像度数値解析技術を「複数」超音速自由噴流の流れ場と音響場に適用し、その理解を進め音響場の予測モデルを構築することを目的とした。具体的には、複数の小型ノズルを利用した場合には音響場において、乱流騒音の低減があることが示唆されてきたが、これらの原因となる物理現象を明らかにし、予測モデルの構築、低騒音化の方法を明らかにする。

具体的には本研究では研究項目を以下のように分け研究を行った。

- 1) 計測技術の高解像度化
 - 2) 超音速噴流のレイノルズ数効果の解明
 - 3) 複数超音速噴流の空力音響場の解明
 - 4) 複数超音速噴流の音響場のモデル化
- 単体噴流に流量を合わせた複数噴流は一つ一つの噴流が相対的に小さくなるために、1)計測技術の高解像度化および 2)超音速噴流のレイノルズ数効果の解明が重要となる。これらの基盤技術をもとに本課題の主たる目的である 3)複数超音速噴流の空力音響場の解明および 4)複数超音速噴流の空力音響場のモデル化を行った。

3. 研究の方法

先進計測と高解像度数値解析を組み合わせて研究を行った。

先進計測に関しては本研究費のサポートを得て、1)無響室(図 1)、2)超音速ジェット発生装置(PIV の粒子を入れ込めるように配慮して設計した)、3)超音速用粒子画像速度計測システム(PIV)、4)マイクロフォンによる音響場測定装置の製作を行い、これらを利用して研究を行った。初年度-2 年度目にかけてこれらの計測機器の性能を調べており、本研究の結論に問題が生じない精度を有することを確認した。また、複数噴流を発生させるために、同じ精度で複数の小型ノズルを製作する必要があり、放電加工を注意深く利用することで、同じ精度の複数の小型ノズルを製作した。

高解像度数値解析に関しては、分担者の芳賀氏が中心となり、これまでに開発してきた非構造高次精度数値解析手法を用いた高解像度解析を実施し、実験結果と照らし合わせながら結果を解析し流体場の理解を深めることに利用した。(数値解析の結果は紙面の都合で本報告書からは割愛する。)

4. 研究成果

1)計測技術の高解像度化

前述のように、単体噴流に流量を合わせた複数噴流は一つ一つの噴流が相対的に小さくなるために、計測技術の高解像度化が必要となる。このために、シングルピクセル相関を用いた計測技術を発展させ、計測の飛躍的な高解像度化を実現した。

シングルピクセル相関法は当初、マイクロ流れの PIV で提案されたものであったが、これを超音速流での PIV に適用しても問題ないことを明らかにした(図 2 左)。さらに、同様のアイデアが、シュリーレン法やシャドウグラフ方で得られた密度分布の微分値のような諸量に対しても問題なく利用でき、PIV で必須となる粒子を使わないで、高解像度に速度場が計測できることを示した。これをシングルピクセルシュリーレン(シャドウグラフ)画像速度計測法(SIV)とする。シングルピクセル SIV の場合には計測された速度場は、可視化された乱流構造(そのサイズは可視化手法条件によって異なる)の移流速度であることを詳細に議論した(図 2 右)。付け加えて乱れの無い場の計測はできないことや、シュリーレンとシャドウグラフで可視化された乱流構造の大きさが違うことが、それらの移流速度の違いにつながることなどの注意点も合わせて議論した。この成果は国際学会誌に掲載されている。

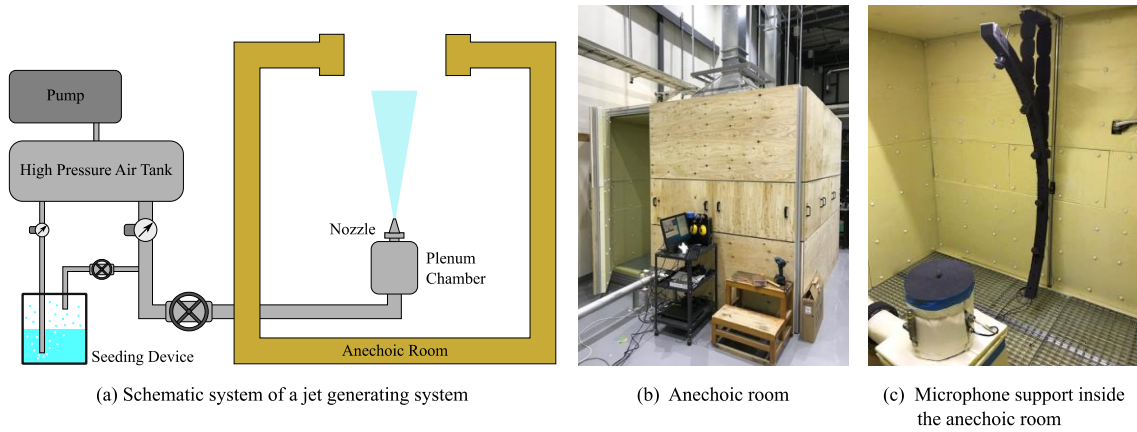


図1 本研究で製作した超音速噴流実験用無響室

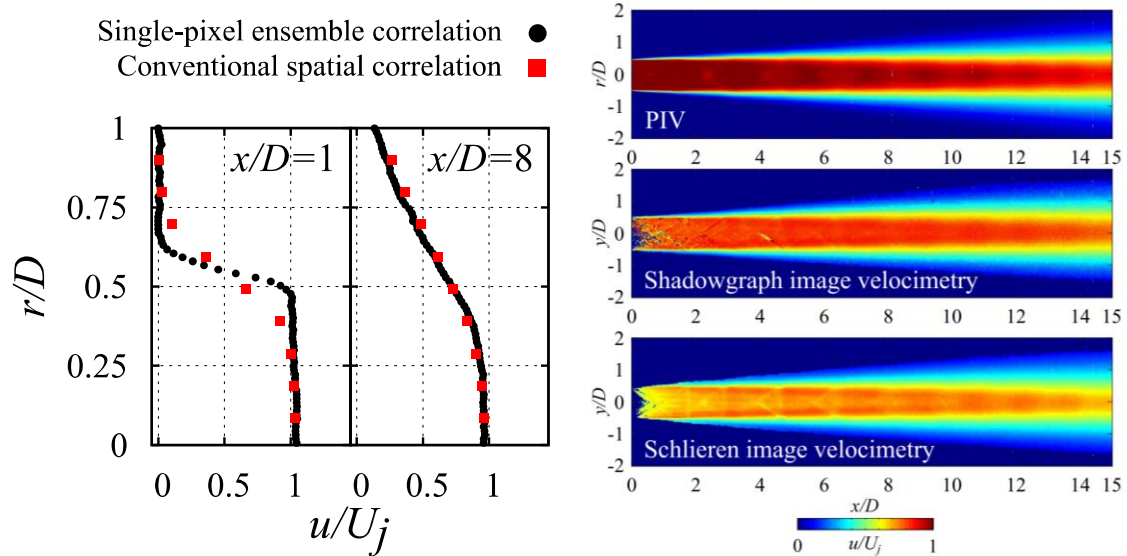


図2 シングルピクセル解像度可視化によるジェット速度分布(左: PIVに適用した場合のプロファイル、右: PIVとSIVによるジェット速度場の全体像)

さらにシングルピクセル PIV の結果を利用して、乱流変動の大きさを見積もる手法が過去に提案されたが、これを一般化し、超音速流れのような非常に厳しい計測条件でも乱流変動が見積もることのできる方法を提案した。これにより、非常に高解像度な超音速噴流の乱流変動分布の計測を可能にした。

2) 超音速ジェットのレイノルズ数効果の解明

次に超音速噴流のレイノルズ数 $10^5 \sim 10^6$ の範囲でレイノルズ数が変化する効果を調べた。宇宙科学研究所の噴流装置と東北大学の噴流装置を用いて異なるレイノルズ数の 2 つの噴流装置を用いて実験を行った。図 3 にモデルプロファイルをフィッティングしてせん断層厚さを算出した結果を示す。レイノルズ数が 10^5 の場合においてノズル出口において乱流遷移が生じないために、ノズル出口下流で乱流遷移による影響で、非線形なせん断層厚さの成長が観察される。ノズルから出た噴流が急激に乱流に遷移する際に非常に強い乱流変動とそこから生ずる音響波が観測された。一方で、今回の複数噴流で変化させる予定の単一の噴流に基づくレイノルズ数は $700,000 \sim 1,000,000$ でありこの範囲ではノズル出口において既に乱流となる流れ場であり、この場合には上述の乱流遷移が生じないために急激な乱流変動の増加や音響波の強さが抑えられることを観察した。この結果より本研究での複数噴流は一つ一つの噴流をみるとスケールが小さくなりレイノルズ数下がるが、本条件下ではこのレイノルズ数は音響場に影響をほとんど及ぼさないことを明らかにした。この成果は国際学会誌に掲載されている。

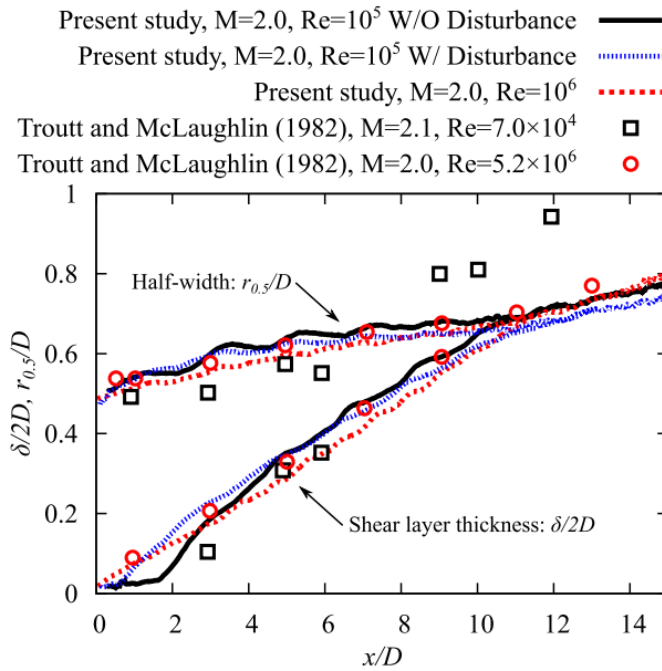


図3 速度プロファイルの特徴量に対するレイノルズ数効果の影響

3) 複数超音速ジェットの空力音響場の解明

本研究では、基本となる2本の超音速噴流に関して重点的に研究を行った。

まず、ノズル中心間距離 s を用いて $s/D=1.55, 2, 3, 4, 5$ とした2本の超音速噴流の流体場に関して干渉の様子を明らかにした。

図4に速度場の全体像、図5に $s/D=5$ のツインジェットの片方の噴流において、噴流の対称軸側のせん断層を内側せん断層、その反対側のせん断層を外側せん断層とし、それぞれに対しモデルプロファイルをフィッティングしてせん断層厚さを算出した結果を示す。同一の噴流に対して両側からせん断層厚さと半値幅を算出したため、双方の算出結果でポテンシャルコア長さは同じとなる。しかし、内側せん断層は $x/D=4$ 周辺から成長率が高くなり半値幅の推移も外側せん断層と比較して高い。これはシュリーレン画像での可視化から、片方のジェットからのマッハ波の放射により擾乱が誘起され、せん断層成長率が高くなるためと説明される。また、2本を同時に可視化できる方向からシュリーレン画像を取得して動的モード分解を利用すると噴流の中心軸間距離が小さい場合には2本の超音速噴流の干渉が観察でき、ほぼ適正膨張の条件にも関わらず、単体の超音速噴流の非適正膨張時にしばしば生ずる衝撃波関連騒音の発生が確認できた。

最後に、図6に示す音響レベルの特性を議論した。基本的には、2本の超音速噴流の重ね合わせをベースラインとして考えれば良いことを明らかにした。このベースラインに対して、過去の研究で提案された遮蔽効果により基本的には3dB程度音響レベルが小さくなる。付け加えて上述の2本の超音速噴流の干渉によって生ずる音響波により、2本の超音速ジェットが見える角度では音響レベルが高くなる周波数帯があることを示した。これらの空力音響場の特性は高解像度数値解析でも定性的に一致することを確認した。

4) 複数超音速ジェットの音響場のモデル化

上述のように、音響場は遮蔽効果による音響レベルの低下および干渉による音響レベルの増加の2つの効果があることを示した。これらの効果をデータベース化し、音響予測ができるように整理を行った。これを応用することで、2本以上の場合の音響波の予測がおおよそ可能となることが期待できる。

以上のように、複数超音速噴流の空力音響場の解明に向けて、計測の高解像度化を行い、一つ一つが小スケールの噴流になるためのレイノルズ数効果を解明した上で、複数超音速噴流の空力音響場の解明を行った。本研究では特に2本の超音速噴流の条件に関して先進的な計測・数値解析を用いて解析を行った。基本的には遮蔽効果が強く生じ音響レベルが下がるが、2本が見える角度においては、超音速噴流同士の干渉の影響により音響波が発生して音響レベルが上がる周波数帯があることがわかった。これらの結果はデータベース化し、複数超音速ジェットの音響場の予測ができるよう整理を行った。

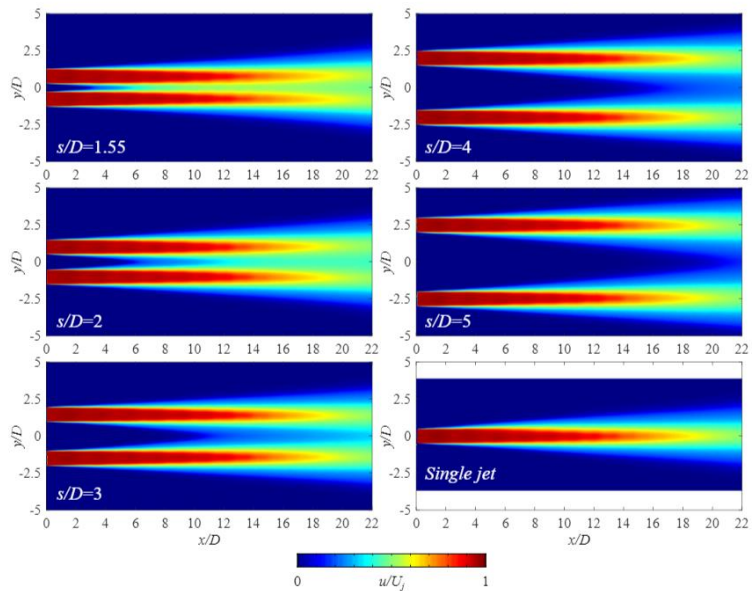


図4 2本の超音速噴流の速度分布

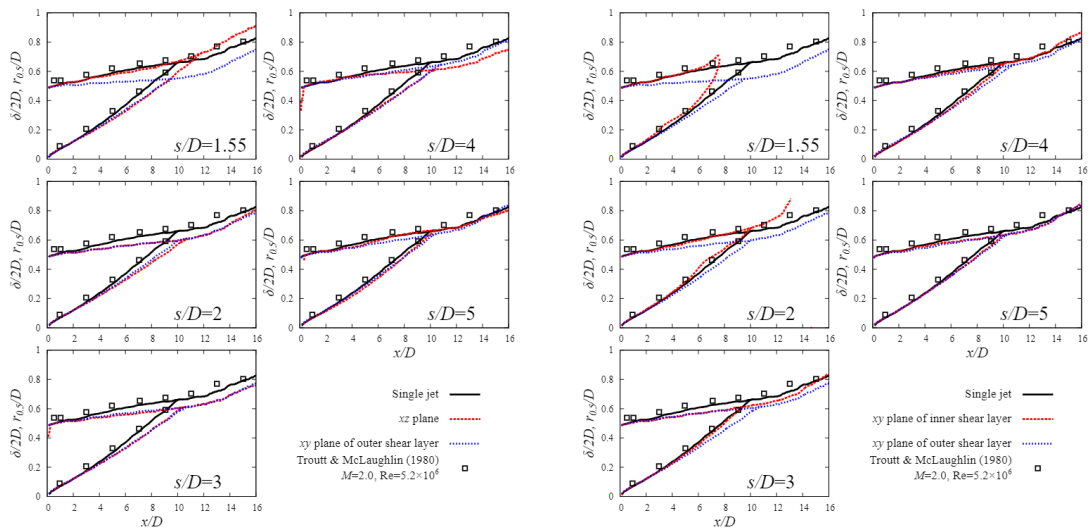


図5 2本の超音速噴流の速度プロファイルの特徴量 (左：外側せん断層, 右：内側せん断層)

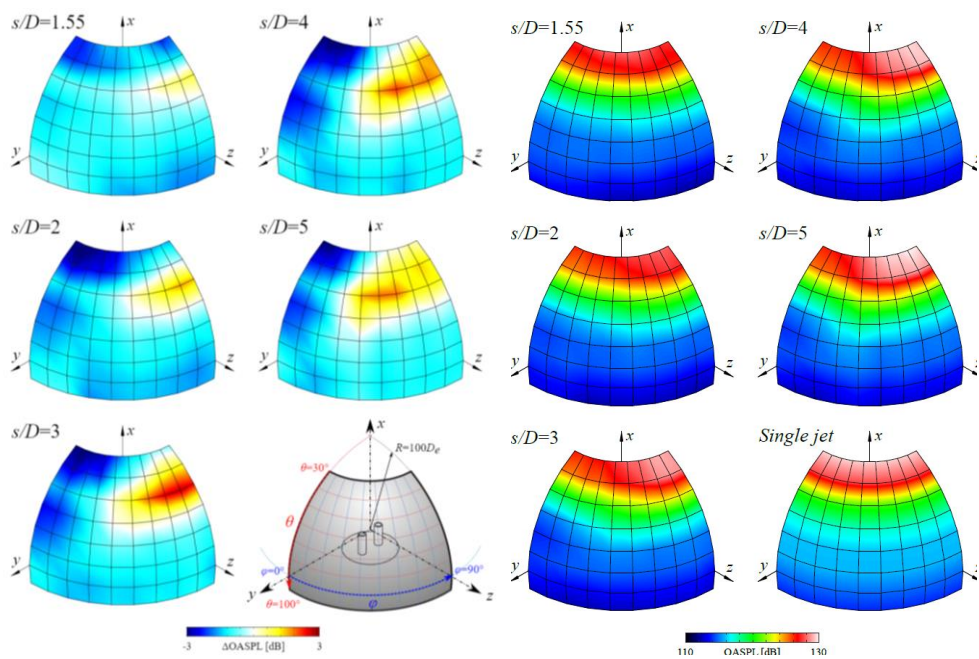


図6 2本の超音速噴流から発生する音響波 (左：等価な単体噴流からの差, 右：OASPL)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Ozawa Y., Nonomura T., Oyama A., Asai K.	4. 巻 32
2. 論文標題 Effect of the Reynolds number on the aeroacoustic fields of a transitional supersonic jet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 046108 ~ 046108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5138195	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 Ozawa Yuta, Ibuki Takuma, Nonomura Taku, Suzuki Kento, Komuro Atsushi, Ando Akira, Asai Keisuke	4. 巻 61
2. 論文標題 Single-pixel resolution velocity/convection velocity field of a supersonic jet measured by particle/schlieren image velocimetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 61 ~ 129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-020-02963-1	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 -
1. 著者名 Nonomura T., Nakano H., Ozawa Y., Terakado D., Yamamoto M., Fujii K., Oyama A.	4. 巻 29
2. 論文標題 Large eddy simulation of acoustic waves generated from a hot supersonic jet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Shock Waves	6. 最初と最後の頁 1133 ~ 1154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00193-019-00895-2	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 OZAWA Yuta, NONOMURA Taku, ANYOJI Masayuki, MAMORI Hiroya, FUKUSHIMA Naoya, OYAMA Akira, FUJII Kozo, YAMAMOTO Makoto	4. 巻 61
2. 論文標題 Identification of Acoustic Wave Propagation Pattern of a Supersonic Jet Using Frequency-Domain POD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 281 ~ 284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tjsass.61.281	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8件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 小澤雄太, 野々村拓, 浅井圭介
2. 発表標題 超音速ツインジェットから発生する乱流騒音に対するノズル間距離の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuma Ibuki, Yuta Ozawa, Taku Nonomura, Keisuke Asai
2. 発表標題 Estimation of the shear layer velocity fluctuation in a supersonic jet with single-pixel resolution
3. 学会等名 The 15th International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Ozawa, Taku Nonomura, Akira Oyama, Makoto Yamamoto
2. 発表標題 Experimental Investigation of Reynolds Number Effect on the Aeroacoustics Fields of a Supersonic Jet
3. 学会等名 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小澤雄太, 野々村拓, 浅井圭介
2. 発表標題 超音速ツインジェットから発生する乱流騒音の解析
3. 学会等名 第51回流会力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Ozawa, Taku Nonomura and Keisuke Asai
2. 発表標題 Comparison of Time-Averaged Supersonic Jet Profile Acquired by Particle Image Velocimetry and Shadowgraph Velocimetry Using Single Pixel Ensemble Correlation
3. 学会等名 AIAA Scitech 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Ozawa, Taku Nonomura, Akira Oyama, Hiroya Mamori, Naoya Fukushima, Makoto Yamamoto
2. 発表標題 Shear Layer Profiles of a Transitional Supersonic Jet with High Spatial Resolution Obtained by Single-pixel PIV
3. 学会等名 第50回流体力学講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小澤雄太, 野々村拓, 安養寺正之, 大山聖, 藤井孝藏, 山本誠
2. 発表標題 超音速噴流騒音の周波数領域固有直交分解解析
3. 学会等名 第38回流力騒音シンポジウム発表
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ozawa, T. Nonomura, A. Oyama, H. Mamori, N. Fukushima, M. Yamamoto
2. 発表標題 Effects of the shear layer growth rate on the supersonic jet noise
3. 学会等名 The 70th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2017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	芳賀 臣紀 (Haga Takanori) (30646930)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員 (82645)	