

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03945

研究課題名(和文)非対称なヘリカルモードの組合せによる超音速ジェット騒音抑制に関する数値解析

研究課題名(英文) Numerical analysis of noise suppression by asymmetric helical modes combination in a supersonic jet.

研究代表者

渡邊 大輔 (Watanabe, Daisuke)

富山大学・学術研究部工学系・講師

研究者番号：70363033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：マッハ数2の超音速ジェット騒音抑制を目的に、線形安定性解析および直接数値シミュレーションを用い、不安定波(ヘリカルモード)の特性および非線形発達による遷移への影響および音響放射特性を調査した。線形安定性解析より、低い周方向波数のヘリカルモードは、遠方まで広がる圧力変動を放射し、高い周方向波数のモードは強い圧力変動を外部に放射しないことが予測された。また、シミュレーションにより、ヘリカルモードを組み合わせてジェットに加えることにより、加えないケースと比べ放射圧力変動レベルが低下することを確認した。このとき、非対称なヘリカルモードの組み合わせ($m=2$ と $m=4$)が最も圧力変動が低い結果を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の特色は、高い移流マッハ数の超音速円形ジェットに対し、速度分布の持つ不安定波の特性を利用した、ノズル部における能動的な騒音低減手法の可能性を理論的・数値的に探ることである。この不安定波による抑制手法が効果的であれば、ノズル部に与える不安定波の振幅は微小でよいことから、ノズル部に設置するアクチュエータも小型化が可能と考えられる。そのため従来の手法に比べ、推力低下を招かない、広範なマッハ数に対応した、高性能騒音抑制ノズルの開発に貢献できると予想する。さらに、ジェットの拡散(中心速度の低下)が促進できれば、空港での離発着時間短縮の妨げとなる残留ジェット気流の抑制にも貢献できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Linear stability analysis and direct numerical simulations were used to investigate the characteristics of unstable waves (helical modes) and their effects on transitions and acoustic radiation characteristics due to nonlinear development for the purpose of supersonic jet noise suppression at $M=2$. Linear stability analyses show that helical modes with low azimuthal wavenumber radiate pressure fluctuations far from the jet, while modes with high circumferential wavenumbers do not radiate strong pressure fluctuations jet outside. Simulations also confirmed that adding a combination of helical modes to the jet reduces the level of radiated pressure fluctuations compared to the case where no helical modes are added. The combination of asymmetric helical modes ($m=2$ and $m=4$) resulted in the lowest pressure fluctuations.

研究分野：流体力学

キーワード：超音速ジェット マッハ波 騒音抑制 線形安定性解析 DNS

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ジェットから発生する音波は、航空機の飛行による騒音や離発着時の空港騒音など、周囲環境に対する問題を伴っている。特にジェットが超音速では、ノズル背後に形成されるショックセルなどの衝撃波に起因するスクリーチ音、さらに高マッハ数のジェット(約 $M_j > 2$)ではマッハ波が発生するなど、亜音速ジェットに比べ周囲環境に耐えがたい騒音が発生する (Phillips 1960)。このため、超音速輸送機や、スペースプレーンなどの極超音速機の実用化に向け、騒音抑制技術のさらなる向上が重要であると考えられる。このマッハ波抑制に関し、ジェット速度分布に依存し増幅する不安定波の特性から、せん断層の急速な拡散により速度分布を短い距離で変形させ低減できることが予測され、ノズル部において「突起物の設置」による混合促進などの手法が提案 (Seiner 1989) されているが、限定的なマッハ数の範囲での抑制効果であり、速度に応じた能動的な手法が求められる。

2. 研究の目的

本研究では超音速の円形ジェットに対し、亜音速の進行速度を持つヘリカルモードの線形および非線形発達したジェット拡散・音響特性を調査しその対称および非対称な組み合わせ (ペア) を利用した、ノズル部におけるヘリカルモード挿入による能動的マッハ波抑制の可能性を理論的・数値的に探ることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、ノズルから噴き出す乱れたジェットを模擬したランダム攪乱により励起された $M=2.0$ 、 $Re=2000$ の超音速円形ジェットに、同一周波数の互いに反対回転の対称および非対称なヘリカルモードペアを流入部より加えた直接数値シミュレーション (DNS) を実行し、対称・非対称に組み合わせられたヘリカルモードペアの放射マッハ波強度に対する影響を調査した。また、ヘリカルモードの特定には線形安定性解析を用いた。

4. 研究成果

線形安定性解析より得られた単一ヘリカルモードケースの不安定波増幅による時刻毎の音響場を図 1 に示す。計算には時間発展 DNS を用いている。図 1(a), (b), (c), (d) はそれぞれ振幅 2% の $m=0, 1, 2, 3$ それぞれのケースの $\theta=0^\circ$ 断面圧力分布であり、渦構造を表す $Q=0.1$ の $\theta=90^\circ$ 方向から見た等値面を合わせて示している。図 1(a), (b) より、超音速の高い位相速度を持つ $m=0, 1$ の増幅では、マッハ波の特徴である斜めに分布を持つ圧力変動が放射されていることが分かる。 $m=0$ では、モードの増幅により固有関数分布の特徴と一致する半径方向に広く分布する圧力変動がジェット中心からジェット外側に現れており、渦構造が減衰する $t=30$ 付近まで圧力変動の振幅は増加している。その後、 $t \geq 40$ 以降では渦構造の減衰に伴い中心部の圧力変動は減衰するが、 $t=40$ までに外側に放射された圧力変動は緩やかに減衰しながら、斜めの分布や方向を維持しジェット遠方に伝播していくことが分かる。また、 $m=1$ はモードの増幅に伴い圧力変動の振幅も持続的に大きくなり、波面が非線形性により等高線が密となる衝撃波状のマッハ波が形成されジェット外側に放射することが分かる。一方、音速付近の位相速度を持つ $m=2, 3$ のモードの増幅では、放射される圧力変動は $m=0, 1$ と比べ非常に弱い (図 1(c), (d))。

図 2 はペアケースの振幅 2% の $m=\pm 1, \pm 2, \pm 3$ および振幅 5% の $m=\pm 3$ の時刻毎の $\theta=0^\circ$ 断面圧力分布であり、速度分布が放射状に拡散する方向と一致する断面である。図には図 1 と同様に $Q=0.1$ の等値面を合わせて示しており、また、圧力変動のカラーコンターの範囲と等高線間隔は図 14 の倍としている。図 2(a) の $m=\pm 1$ を見ると、 $t=20$ までは正負の波数のヘリカルモードが重なり合うことにより圧力変動の振幅は単一ケースの 2 倍となっているが、ペアケースと単一ケースを比較すると圧力分布の違いは僅かである。しかし、 Δ 状の渦構造が発達する $t=30$ 以降では、渦構造が複雑化しジェットの拡散が進むことから、ジェット内部における $m=\pm 1$ のモードの増幅が抑制され、単一ケースと異なりジェット外側に分布した圧力変動がジェットから分離したように遠方に伝播していることが分かる。一方、2% の $m=\pm 2$ (図 2(b)) および 5% の $m=\pm 3$ (図 2(d)) では、単一ケースと異なり Δ 状の渦構造を経て発達した渦構造が現れる $t=30$ 以降において、2% の $m=\pm 1$ (図 2(a)) と比べ弱い圧力変動がジェット外部に放射されていることが確認できる。これらの圧力変動の放射は、不安定波の振幅が増大することによる圧力固有関数分布に起因する $m=0, 1$ とは異なり、渦構造の発達における渦の形成や変形・合体等による乱流騒音と考えられる。このことは 2% の $m=\pm 3$ が示すように (図 2(c))、ヘリカルモードの振幅が十分大きくなっておらず渦構造が発達していない $t=40$ 以前において、ジェット外側にほとんど圧力変動が生じていないことから推測できる。

図 3、4 はそれぞれ単一ケースとペアケースのジェット周囲の圧力 p_∞ に対する圧力変動レベルを示している。また、図 5(a)、(b) は図 3、4 の $\theta=0^\circ$ における圧力変動レベルの半径方向分布を

示している。単一ケースを比較した図3より、各モードの成長による圧力変動の大きさには方向依存性がなく周方向に均一であることが分かる。また、図5(a)に示した単一ケースでは、おおよそ位相速度の高い順にジェット遠方の圧力変動レベルが高い傾向を示している。特に線形成長率が $m=1$ の $1/3$ 程度である軸対称モードの $m=0$ に関し、 $r=10r_0$ 付近の圧力変動レベルの最大値は $m=1$ と比べると低いが、より半径の大きい遠方でも高い圧力変動レベルを保ち広がっており、線形成長率が低くとも位相速度が高速なモードは遠方音響場に影響を与えることを示唆している。一方、図4に示したペアケースでは、正負のヘリカルモードの重ね合わせの影響を受け、位相がそろい振幅が増大する角度 ($\theta=0^\circ$ 等) と相殺し合い減衰する角度が存在し、圧力変動は周方向に指向性を持って放射している。この振幅が増大する角度はジェット平均速度の拡散方向と一致している。また、図5(b)の初期振幅が2%のケースの圧力変動レベルを比較すると、単一ケースと同様に位相速度の高い順に圧力変動も大きくなっている。また、ジェット幅が $t=20$ 付近から拡散する振幅2%の $m=\pm 1$ 、 ± 2 および振幅5%の $m=\pm 3$ を比較すると、マッハ波を放射する $m=\pm 1$ に比べ主に乱流騒音を放射する $m=\pm 2$ 、 ± 3 のケースはおおむね $r > 10r_0$ の範囲で10 dB程度低くなる結果となった。このことから、低速(音速付近も含む)の位相速度を持つヘリカルモードペアの増幅は、マッハ波のような強い圧力変動を伴わずにジェットの拡散を促進することが確認された。

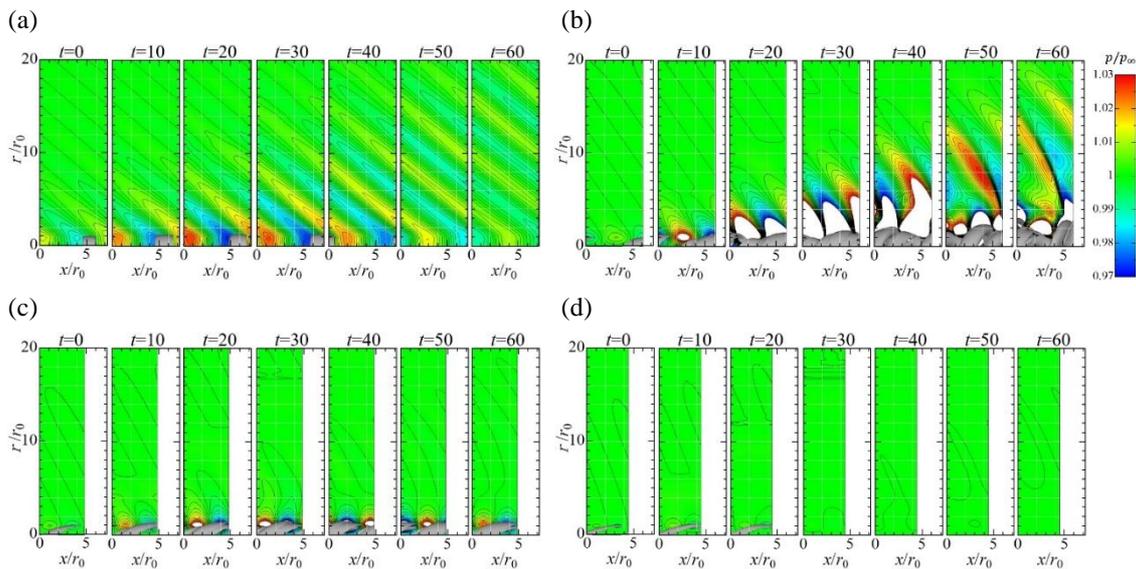


Fig. 1 Time developments of pressure fields (color contour: p/p_∞) and iso-surfaces of $Q=0.005$ (vortex structure) for 2% single cases at $\theta=0^\circ$ plane; a) $m=0$, b) $m=1$, c) $m=2$ and d) $m=3$.

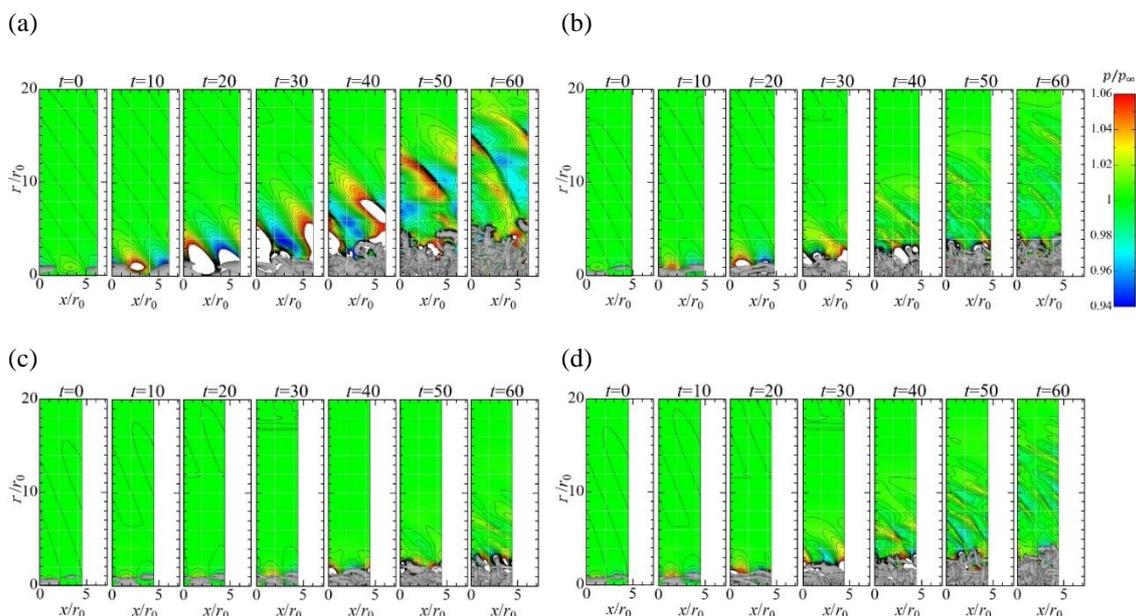


Fig. 2 Time developments of pressure fields (color contour: p/p_∞) and iso-surfaces of vortex structure ($Q=0.1$) for pair cases at $\theta=0^\circ$ plane; a) $m=\pm 1$, 2%, b) $m=\pm 2$, 2%, c) $m=\pm 3$, 2% and d) $m=\pm 3$, 5%. The

contour increments are 0.005.

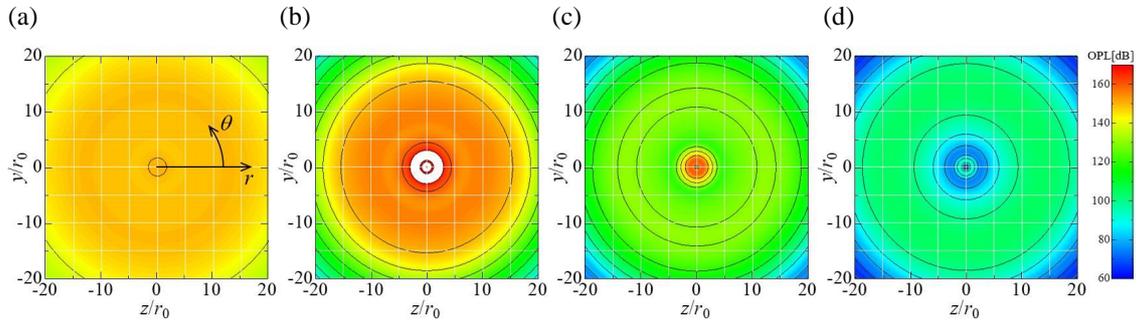


Fig. 3 Overall pressure fluctuation levels for single 2% cases at $t=60$; a) $m=0$, b) $m=1$, c) $m=2$ and d) $m=3$.

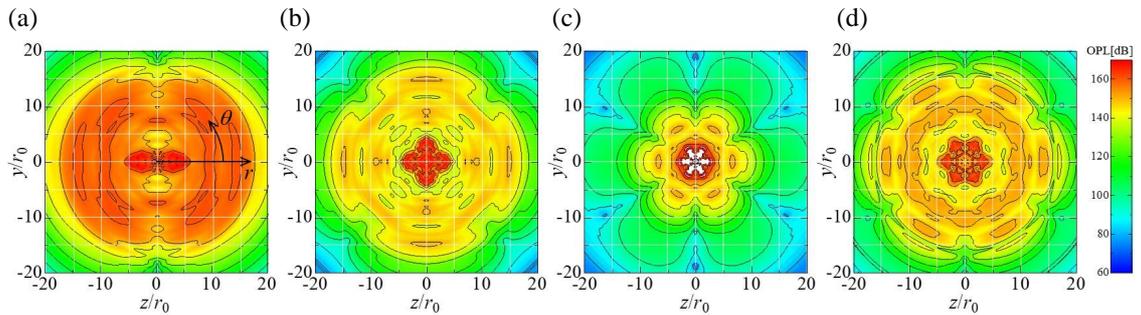


Fig. 4 Overall pressure fluctuation levels for pair cases at $t=60$; a) $m=\pm 1$, 2%, b) $m=\pm 2$, 2%, c) $m=\pm 3$, 2% and d) $m=\pm 3$, 5%.

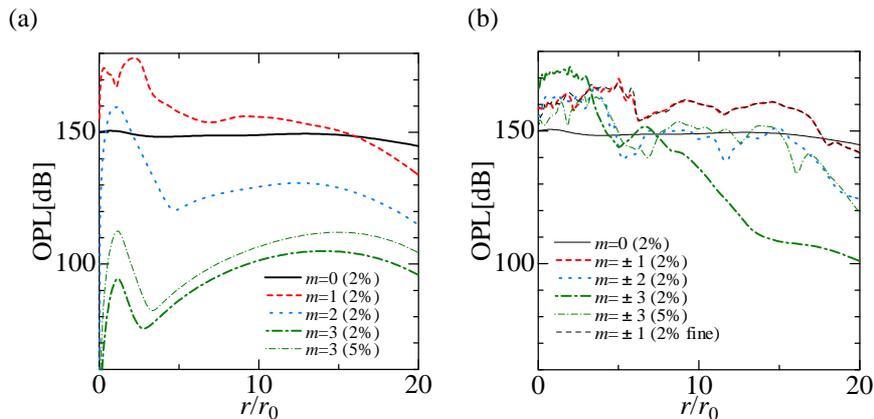


Fig. 5 Radial profiles of overall pressure fluctuation levels at $\theta=0^\circ$ and $t=60$; a) single cases and b) pair cases.

次に空間発展 DNS において超音速ジェット自然遷移を模擬したランダム攪乱を与えた流れに第 2($m=2$)~第 5($m=5$)のヘリカルモードを周方向波数 m の正負を組み合わせ、ランダム攪乱のみ ($A_r = 2.5\%$)の圧力変動放射強度と比較を行った結果を図 6 に示す。同じ周方向波数同士の組み合わせ $m=\pm 2(A_{m22})$ と $m\pm 3(A_{m33})$ の比較では、図 5(a)で示したモード単一での圧力変動レベルが低い第 3 ヘリカルモードを組み合わせさせた $m\pm 3(A_{m33})$ のケースの方がランダム攪乱のみより圧力変動レベルが低い傾向を示した。一方、異なる周方向波数を組み合わせさせた非対称なケースを比較すると、 $m=2$ と $m=4$ の組み合わせが最も圧力変動が小さくなる結果を示した。この原因に関しては、 $m=2$ の高い成長率と、低成長率ではあるが圧力変動をほとんど放射しない $m=4$ の非対称な組み合わせの相互作用により良好な結果を示したと思われるが、詳細の解明には至っていない。(この結果は 2024 年 11 月 19~20 日開催の第 102 期流体力学部門講演会で発表予定)

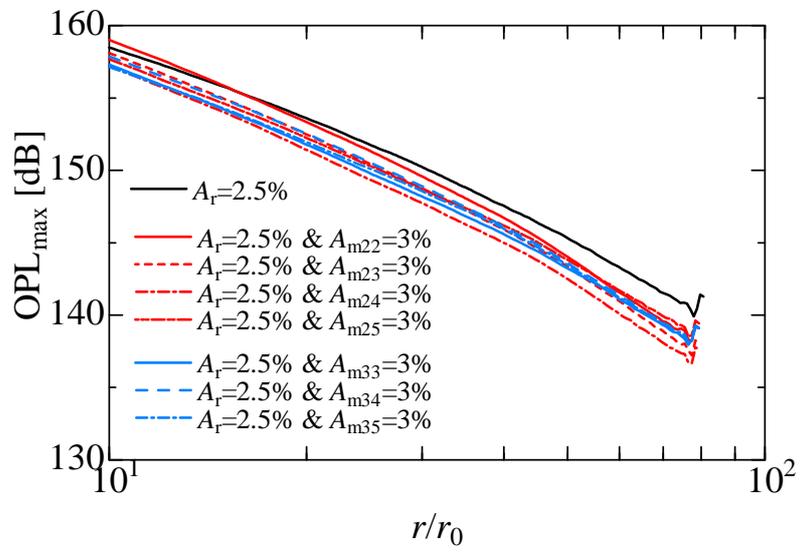


Fig.6 Radial decay of the maximum value of overall pressure fluctuation level [dB] in the same radius r/r_0 .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 渡辺 大輔	4. 巻 JAXA-SP-19-007
2. 論文標題 超音速ジェットの拡散に及ぼす攪乱速度成分の影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 宇宙航空研究開発機構特別資料	6. 最初と最後の頁 135-139
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Daisuke Watanabe & Hiroshi Maekawa	4. 巻 2019-2754
2. 論文標題 Mach wave suppression by a pair of subsonic helical modes in a supersonic jet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 proc. of the 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/6.2019-2754	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15件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 渡辺 大輔
2. 発表標題 ヘリカルモードの発達に対するジェット速度分布の影響
3. 学会等名 日本機械学会 第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松長 優, 渡辺 大輔
2. 発表標題 超音速ジェットにおける流入攪乱のジェット拡散への影響
3. 学会等名 日本機械学会 年次大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮越 巧弥, 渡辺 大輔
2. 発表標題 超音速ジェットにおけるヘリカルモードペアを用いたマッハ波の圧縮性の影響
3. 学会等名 日本機械学会 第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松長 優, 渡辺 大輔
2. 発表標題 ヘリカルモードペアを用いた超音速ジェットの騒音低減に対するせん断層厚さの影響
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 2022 年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮越 巧弥, 渡辺 大輔
2. 発表標題 高マッハ数超音速ジェットのヘリカルモードペアによるマッハ波低減
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 2022 年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮越 巧弥, 渡辺 大輔
2. 発表標題 ヘリカルモードペアによるジェット拡散に対するマッハ数依存性
3. 学会等名 日本機械学会 年次大会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松長 優, 渡辺 大輔
2. 発表標題 異なるせん断層厚さの超音速ジェットにおけるヘリカルモードペアの増幅
3. 学会等名 日本機械学会 第98期流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮越 巧弥, 渡辺 大輔
2. 発表標題 超音速ジェットにおけるジェット拡散時の遷移構造のマッハ数依存性
3. 学会等名 北陸信越支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 異なるせん断層の厚さの超音速ジェットの遷移構造
2. 発表標題 松長 優, 渡辺 大輔
3. 学会等名 北陸信越支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺 大輔
2. 発表標題 超音速ジェットの拡散に及ぼす縦渦の不安定性の影響
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡辺 大輔
2. 発表標題 圧縮性ジェットにおけるヘリカルモードペアの増幅に対するマッハ数の影響
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 渡辺 大輔
2. 発表標題 超音速ジェットから放射されるマッハ波に及ぼす流入攪乱成分の影響
3. 学会等名 日本機械学会 第96期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡辺 大輔、石崎 匡則
2. 発表標題 超音速ジェットにおけるヘリカルモードペアを用いた マッハ波抑制のせん断層厚さの影響
3. 学会等名 第50回流体力学講演会/第36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 2018年

1. 発表者名 渡辺 大輔、前川 博
2. 発表標題 低い位相速度を持つヘリカルモードペアを用いた超音速ジェットのマッハ波抑制
3. 学会等名 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡辺 大輔
2. 発表標題 超音速ジェットにおけるヘリカルモードの受容性に対する速度成分の影響
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 第56期総会・講演会
4. 発表年 2019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
---------	---------