

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06147

研究課題名(和文) 緩慢な遷移状態を使った"Attached-Eddy"の起源の解明と応用

研究課題名(英文) Analysis of origin of Attached-Eddy in a boundary layer using significant slow transition

研究代表者

前川 博 (Maekawa, Hiroshi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・特命教授

研究者番号：90145459

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：超音速境界層バイパス遷移に関連して有限振幅攪乱によって生成される空間局所構造の特徴を高解像度シミュレーションによって明らかにした。長寿命な逆回転の縦渦対は壁近傍のストリークの不安定性を誘起し境界層は乱流遷移する。クロスフローエネルギーの軌跡を相平面にプロットして解析した。相平面ではサドルポイントが存在し、サドルポイント近傍ではクロスフローエネルギーが減衰して層流状態になる軌跡とエネルギーが極小値になりその後増幅する軌跡が存在する。サドルポイントからエネルギーが増幅する不安定多様体は自己維持機構を包含し、エネルギー増加はWeierstrassの楕円関数によって特徴づけられることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果の学術的意義は乱流遷移がWeierstrassの楕円関数によって特徴づけられることを明らかにしたことである。乱流遷移を代数幾何学で理解するプロセスを示した。楕円曲線と数論幾何学とは関係があり、乱流現象は整数論と繋がりをあることを研究成果は示唆している。社会的意義は、乱流遷移した乱流境界層が発達する物体からの音響場の発生は実社会への応用においていたるところに見られ、渦運動からの音響場が支配的になる新幹線の高速度における環境適合性の向上には欠かせない技術の進展や、遷移予測が各段に向上することを可能にしたことによって低燃費の航空機開発に寄与することである。

研究成果の概要(英文)：This study describes a self-sustained structure created from the rapid growth of unsteady finite-amplitude perturbations in a supersonic boundary layer. The localized incipient structure is identified as a long-lived structure with a pair of quasi-streamwise vortices with vorticity of alternate sign at a saddle point in the state space. The time averaged trajectories of the cross-flow energy in the state space indicate the geometric structure consisting of the stable and unstable manifolds around the saddle point. The long-lived structure creates the site of subharmonic and fundamental sinuous instabilities evolving into a turbulent spot with the pre-nucleation event of the spot. Temporal variations in the cross-flow energy on the unstable manifold clearly indicate the alternation of bursting and pre-nucleation phases. The escape process along the unstable manifold from the saddle point is characterized by the Weierstrass elliptic function.

研究分野：流体力学

キーワード：圧縮性境界層 乱流遷移 乱流と音響場 国際研究集会 射影幾何学 楕円曲線

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

空間的局所構造は様々な散逸系において共通である。局所構造によって発生する自己組織化は自発磁化、熱対流、反応拡散系、そして流体力学分野でパターン形成が起こる事と同義である。自己組織化は自発的であり、時には、ランダムな有限振幅の攪乱によって引き起こされる。流体力学では、せん断流におけるコヒーレント構造によるダイナミクスによって引き起こされる自己組織化によってパターン形成が同定される。固体壁から流体に熱輸送がある流れにおいて、流体粘性のため壁面近傍に速度及び温度境界層が発達し、層流状態から乱流状態に境界層遷移が起こるが遷移プロセスは一意的ではない。超音速境界層では、遷移過程は主流マッハ数や固体表面を通して起こる気体との間の熱輸送、レイノルズ数、表面粗さや主流乱れのレベルに依存する。その結果として境界層流れは層流または乱流状態である。層流乱流遷移の理解には、非圧縮性壁面せん断流れについて、層流-乱流セパトリス上の力学を追跡することによって平面クエット流れやポアゼイユ流れのような平行平板流において得られる厳密な平衡解や進行波解を基礎とした新しいパラダイムによる展開があった。一方、圧縮性流れにおいては非圧縮性で求められた厳密な平衡解や進行波解は求められていない。

また、非圧縮性および圧縮性流れにおける大規模構造として認識されてきた”Attached-Eddy”の起源はこのような層流乱流遷移の厳密な解や空間局所構造とどのような関係にあるか理解されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は有限振幅の解によって生成される乱流遷移の起源を抽出することである。相平面においては層流と乱流を分離する境界に存在し、物理空間では正弦モードを形成する縦渦対によるダイナミクスをあらわす有限振幅解によって生成される遷移機構の起源を解明することが研究目的である。境界層流れは流れ方向にその厚さが増加するため、従来、平行流で用いられている Edge 多様体の定義に対して、境界層では、相空間において短時間で乱流遷移する軌跡と速度変動エネルギーが減衰し十分時間が経過した後乱流になる軌跡を分離する多様体であるとする。

また、乱流遷移現象に関する国際ワークショップを国内で開催し、国内外の招待講演をはじめとして、関連分野で活躍する若手研究者や大学院博士課程に所属する学生の講演発表を企画し乱流遷移に関して意見交換することであるも研究の目的の一つである。

3. 研究の方法

非圧縮性条件を満たす一様等方性乱流攪乱を空間発展シミュレーションの上流に導入している。等方性乱流はそのエネルギー： $E(k) = k^{-4} \exp[-2(k/k_{\max})^2]$ が波数 k_{\max} に極大値を持つ分布であらわされる。主流マッハ数は 2.5 で、壁面温度が主流温度と一致するため一般化変曲点が消失し高レイノルズ数で亜臨界状態 (Subcritical) である。比熱比一定プラントル数一定で粘性率がべき乗則で

近似できる理想気体を仮定した。空間微分には高次コンパクト風上バイアスキーム (対応する中心コンパクトスキームの Nyquist 周波数によるエリアシング誤差の蓄積を防ぐ特徴を持つ) 基礎方程式の時間積分には 4 次精度ルンゲクッタ法を用いる。流れ方向と垂直方向には NSCBC 境界条件、スパン方向には周期境界条件を用いている。入口境界層排除厚さを代表長さとしたレイノルズ数が 1000、計算領域は $L_x \times L_y \times L_z = 600 \times 30 \times 66$ で計算収束性解析よりグリッド数は $N_x \times N_y \times N_z = 1801 \times 101 \times 192$ を選択している。流入口での攪乱の強さは 1.25, 1.125, 1, 0.95, 0.9, 0.85% である。

一方、乱流境界層中の "Attached-Eddy" 構造のコントロールに関する研究は、乱流境界層の計算結果より得られた Pre-multiplied スペクトルを用いて、低乱風洞に設置された乱流境界層が発達する平板上に大規模構造を操作する装置を設置して装置下流の速度分布や速度変動を主に熱線流速計を用いて計測した。

4. 研究成果

主流に垂直な面内の速度変動 v', w' 成分を使って、Cross-flow energy : $E_{cf}(t) = \iint (v'^2 + w'^2) dydz = E_v(t) + E_w(t)$ と定義する。時間平均 E_{cf} を構成する時間平均成分 $\sqrt{E_v}, \sqrt{E_w}$ を使って相平面図 1 にプロットして層流と乱流の境界のダイナミクスを解析した。攪乱の強さに応じて、 E_{cf} が極小を示す領域を通過して乱流に遷移

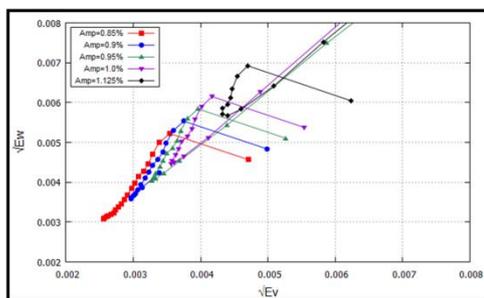


図 1 $\sqrt{E_v}, \sqrt{E_w}$ 相平面拡大図 (特異点近傍) {赤:0.85, 青:0.9, 緑:0.95, 紫:1, 黒:1.125%}.

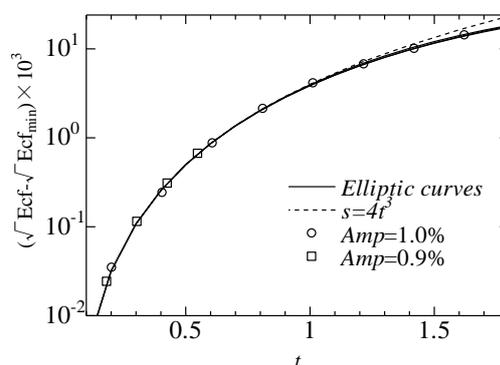


図 2 E_{cf} の増加と楕円曲線 $s=4t^3+ats^2+bs^3$, 計算結果 (Amp=1.0%,0.9%)

する場合とそのまま層流状態に収斂する場合があることより、 E_{cf} 極小値近傍を解析すると、特異点周辺の軌跡は平面 (円錐) 曲線で近似でき、攪乱振幅が 0.9, 0.95, 1.0% の 3 ケースは特異点 (ヘッシアン行列は正と負の固有値を持つため) がサドルポイントであることが示される。この平面曲線の特異点是非退化特異点とも呼ばれ特異点がすべて非退化であるとき曲線を表す関数は Morse 関数であり、他の物理分野でも応用されている。さらに、サドル点から E_{cf} が増加する不安定多様体の特徴を解析するため、 E_{cf} が極小値 E_{cfmin} を経て増加する大きさをレイノルズ数の関数として $\sqrt{E_{cf}} - \sqrt{E_{cfmin}} = g(\text{Re} - \text{Re}_0)$ を調査した。そして、本研究では、 $t = (\text{Re} - \text{Re}_0) / d$ と規格化し $s = (\sqrt{E_{cf}} - \sqrt{E_{cfmin}})$ を使って、関数 $s = g(t)$ を射影幾何学 (射影変換に対して曲線

の不変的な性質を研究する幾何学) によって研究した。すなわち $s=g(t)$ を非特異 3 次曲線 Σ $a_{ij}x^i y^j z^{n-1-j}=0$ ($n=3$) であらわして Ecf を解析した。実射影空間 $RP^2(x, y, z)$ においてすべての曲線は Weierstrass の標準形 (定義式) $y^2z=4x^3+axz^2+bz^3$ であらわされる。ただし、係数 a, b は有理数である。この定義式に対して、変数変換 $t=x/y, s=1/y$ を使って $s=4t^3+ats^2+bs^3$ と楕円曲線を表す。図 2 は、攪乱の振幅が 1.0% と 0.9% の結果と非特異楕円曲線 $s=4t^3+ats^2+bs^3$ 及び比較のため特異楕円曲線 $s=4t^3$ を示す。図 2 の結果を数学的に解釈する。この形式は複素射影空間 CP^2 で成立し、複素射影空間における幾何学は実射影空間 RP^2 の幾何学より単純であり、標準形 $y^2=4x^3-g_2x-g_3$ が複素射影空間に埋め込まれていると解釈できる。楕円曲線は数論幾何学で重要な関数であり、ワイルズ (1993) とテイラー等によって谷山—志村予想 {すべての楕円曲線はモジュラーである} が証明され、その結果フェルマーの最終定理が証明された。一般に楕円関数というのは複素平面上で有理型 (極以外の特異点をもたない) であるような 2 重周期関数に与えられた名称である。基本周期 ω_1, ω_2 をもつ Weierstrass の楕円関数 \wp (ペー) は微分方程式 $(d\wp/du)^2 = 4\wp^3 - g_2\wp - g_3$ を満たし、 $x = \wp(u), y = \wp'(u)$ とおけば、楕円曲線 (標準形) $y^2=4x^3-g_2x-g_3$ (ただし、 $g_2^3 - 27g_3^2 \neq 0$) の点となる。楕円関数 \wp のモジュラー不変量 $J(\omega_1, \omega_2) \{=12^3 g_2^3 / (g_2^3 - 27g_3^2)\}$ はアイゼンシュタイン級数 g_2, g_3 とともに保型形式と言って図 2 で楕円曲線がフィットした不安定多様体の特徴を代数幾何学的に研究する重要な手段である。一方、ミレニアム懸賞問題の一つである BSD 予想も楕円曲線 $E: y^2=x^3+ax+b$ に対して定義する L 関数を用い $L(E, s)$ の $s=1$ における零点の位数と E のランクは一致するというものである。偏微分方程式で記述される乱流遷移現象が Weierstrass の楕円関数によって特徴づけられるという結果は、乱流遷移の数学的側面が明らかになり数論幾何学的描像と繋がっていることを示した。さらに、計算結果にフィットする楕円曲線 E (虚数乗法を示さない場合) はモジュラー不変量 J が整数でない (佐藤—テイト予想と関連する)。これらの代数幾何学的研究成果 (射影幾何学による解析) は流体力学のみならず物理学においてこれまでにない結論である。

計算結果も含めた研究成果をまとめると、

- (1) 等方性乱流を導入した境界層流れの中に生成された逆回転する縦渦対は低速ストリークを伴う局所構造に対してスパン方向低調波と基本波正弦不安定性を引きおこし、その流れ方向基本周波数やスパン方向波数は非定常ストリーク (N. J. Vaughan and T. Zaki, JFM, 681(2011)) の結果とよく一致する。
- (2) 上記低調波及び基本波の不安定性から生成される非線形現象はバーステイングと再生過程を持つサイクリックプロセスを形成している。
- (3) 準周期的構造が空間時間ダイアグラムにされ投影され、Ecf (t) のフーリエ解析結果は Weierstrass の楕円関数で予測された周期 (図 2 の楕円曲線の係数 g_2, g_3 から計算される) とよく一致する。楕円積分 $\int dx/\sqrt{(4x^3 - g_2x - g_3)}$ によって支配される系である。
- (4) 典型的な varicose ストリーク不安定性が計算結果に現われる。対称な構造はヘアピンパケット構造になり二次的低速—高速ストリークが縦渦を伴ってヘアピンパケット構造によるバーステイングの下流に出現する。

- (5) 上記(4)の結果は、ヘアピン渦による自己組織化は再生過程の活発なコアと低速ストリークを形成する縦渦を生成している。
- (6) ヘアピンパケット構造が生成される場合においても相平面の特異点近傍は類似の幾何学的特徴が現われ (Sinuous の場合と同様な領域に)、乱流に向かう不安定多様体は共通するほぼ直線で近似でき、その直線上で E_{cf} を解析すると、同様に楕円曲線で近似できることが明らかになった。
- (7) 乱流開始を特徴づける楕円曲線は整数論と乱流現象とにつながりがある事を示唆した。
- (8) “Attached-Eddy” を乱流境界層中に意図的に出現させる装置を使って実験を行うと、“Attached-Eddy” の壁面に対する傾きが大きくなり乱流境界層の平均速度分布が壁面から直線的になり、壁面近傍の速度勾配が小さくなり乱流境界層の摩擦抵抗が小さくなる事を示した。壁面に対する傾きが大きくなった “Attached-Eddy” の断面を PIV で計測し主流に垂直な面内の速度 v, w の二次流れを計測しロール構造であることを示した。
- (9) “Attached-Eddy” をコントロールする措置の寸法はスパン方向に壁関数で数百であり、数値計算で示された Pre-multiplied スペクトル結果から対数層に到達するスパン方向スケールを参照すると装置の基本的な寸法が設定できることを実証実験で示した。
- (10) 最後に、乱流遷移に関する国際ワークショップ「乱流遷移の解明と制御」を電気通信大学で開催した。なお、プロシーディングスが発行されている。

参考文献

Proceedings of 61st Workshop on “Investigation and Control of transition to Turbulence”
2017-9/20~9/23, Invited Speakers: Jens Fransson(KTH, Sweden), Ramis Oru(KTH, Sweden),
Tamar Zaki(Johns Hopkins Univ. U.S.), Mohammed Hosssain(Univ. of Western Ontario,
Canada), Michio Nishioka(Osaka Pref. Univ. Japan), Editors: Hiroshi Maekawa, Yohei Inoue.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Shiko Moriyama, Yohei Inoue, Hiroshi Maekawa	4. 巻 16
2. 論文標題 Sound radiated from low Mach number turbulent boundary layer flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2021jfst0010	査読の有無 有
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 井上洋平, 穂積尚門, 前川博	4. 巻 38
2. 論文標題 境界層中に設置された平板に作用する流体力	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 348-356
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 有
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 Hiroharu Matsubara, Wataru Nakayama, Yohei Inoue, Hiroshi Maekawa	4. 巻 1
2. 論文標題 Study of the Interaction between Vortex and a Squire Cylinder with a part of Structure made by Flexible Material	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 AIAA Aviation Forum	6. 最初と最後の頁 1 - 20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/6.2019-3674	査読の有無 有
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 1
2. 論文標題 Mach wave suppression by a pair of subsonic helical modes in a	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shikou Moriyama, Yohei Inoue, Hiroshi Maekawa	4. 巻 1
2. 論文標題 Sound Radiated from Low Mach Number Turbulent Boundary- layer Flows (Turbulent Boundary Layer On a Smooth Plate and Over a Forward Facing Step)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 16th International Conference of Fluid Dynamics	6. 最初と最後の頁 1 - 2
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 有
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 Yohei Inoue, Takahiro Shimokawa, Hiroshi Maekawa	4. 巻 1
2. 論文標題 Numerical Investigation of Compressible Cross Jet with Temperature Difference	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 1 - 5
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 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 Yohei Inoue, Tsuyoshi Kanuma, Yuma Tasai, Hiroshi Maekawa	4. 巻 AA/54
2. 論文標題 Effects of Free Stream Disturbance on the Development of the Compressible Flow around a Square Cylinder at Subsonic Mach Numbers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. 2018 AIAA Aviation Forum	6. 最初と最後の頁 1-15
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 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 Tsuyoshi Kanuma, Keisuke Kuramata, Yohei Inoue, Hiroshi Maekawa	4. 巻 FD/36
2. 論文標題 Effect of Upstream Disturbance on the Development of a Wall-Bounded Plane Jet at Subsonic Mach Numbers with Separated Flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. 2018 AIAA Aviation Forum	6. 最初と最後の頁 1-15
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 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 Tsuyoshi Kanuma, Yohei Inoue, Hiroshi Maekawa	4. 巻 HX/0062
2. 論文標題 Aeroacoustic Noise Generated by Air Flowing through a Slit in an HVAC System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. World Congress and Exhibition	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) なし	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 Editor Hiroshi Maekawa, Yohei Inoue, and Masaharu Mtsubara	4. 巻 1
2. 論文標題 Investigation and Control of Transition to Turbulence	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 61st Workshop on Investigation and Control of Transition to Turbulence	6. 最初と最後の頁 1-18
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 有
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 該当する

1. 著者名 Hiroharu Matsubara, Yohei Inoue, and Hiroshi Maekawa	4. 巻 G60
2. 論文標題 Interaction between Flexible Structure and Compressible Flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Ameical Physical Society Meeting	6. 最初と最後の頁 348-348
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 有
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 Yuma TASAI, Yohei INOUE, Tsuyoshi KANUMA, Hiroshi MAEKAWA	4. 巻 L60
2. 論文標題 Transition of a compressible square cylinder wake structures subjected to free-stream disturbance	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Ameical Physical Society Meeting	6. 最初と最後の頁 340-340
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 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 Yohei Inoue, Tsuyoshi Kanuma, Yuma Tasai, Hiroshi Maekawa	4. 巻 AA
2. 論文標題 Effects of Free Stream Disturbance on the Development of the Compressible Flow around a Square Cylinder at Subsonic Mach Numbers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of AIAA Aviation Forum	6. 最初と最後の頁 1-15
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 有
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 Tsuyoshi Kanuma, Keisuke Kuramata, Yohei Inoue, Hiroshi Maekawa	4. 巻 FD
2. 論文標題 Effects of Upstream Disturbance on the Development of a Wall-Bounded Plane Jet at Subsonic Mach Numbers with Separated Flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of AIAA Aviation Forum	6. 最初と最後の頁 1-11
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 有
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 鹿沼剛, 井上洋平, 前川博	4. 巻 89, 917
2. 論文標題 角柱近傍を移動する渦対による音波発生について	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00223	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 森山 史孝
2. 発表標題 平板乱流境界層中に存在する微小ステップの高さが音響場に与える影響
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
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
2. 発表標題 超音速ジェットの拡散に及ぼす攪乱速度成分の影響
3. 学会等名 宇宙航空研究開発機構特別資料JAXA-SP-19-007
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上 洋平 鹿沼 剛 前川 博
2. 発表標題 平行平板間噴流における上流攪乱の影響
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森山 史孝 井上 洋平 前川 博
2. 発表標題 低亜音速境界層における乱流遷移渦構造から発生する空力音の数値計算
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018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 原田 天晴
2. 発表標題 超音速平面ジェットにおけるノズルクラスタ化のマッハ波放射への影響
3. 学会等名 日本機械学会 2018年度年次大会
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 第96期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡辺大輔、前川 博
2. 発表標題 超音速境界層における長波長の主流乱れの遷移に及ぼす影響
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
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

1. 発表者名 渡辺 大輔、広上 溪介、前川 博
2. 発表標題 超音速ジェットにおける非対称なヘリカルモード組合せの遷移構造への影響
3. 学会等名 日本機械学会 2017年度年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡辺 大輔、前川 博
2. 発表標題 超音速円形ジェットの安定性に及ぼす速度分布の影響
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大和 優太、渡辺 大輔
2. 発表標題 超音速co-flowジェットの遷移に対する流入攪乱の影響
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松原弘明, 中山渉, 井上洋平, 前川博
2. 発表標題 圧縮性流れにおける様々な固体壁境界条件
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井上洋平, 前川博
2. 発表標題 鈍体後流構造へのジェットによる変調と流体抗力の関係
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井上洋平, 前川博
2. 発表標題 鈍体に設置された噴流による後流構造の変化
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2017
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	渡邊 大輔 (Watanabe Daisuke) (70363033)	富山大学・学術研究部工学系・講師 (13201)	
研究分担者	井上 洋平 (Inoue Yohei) (40397625)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・准教授 (12612)	

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1件

国際研究集会 Workshop on Investigation and Control of Transition to Turbulence	開催年 2017年～2017年
-----------------------------------------------------------------------------	--------------------

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
---------	---------