

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05145

研究課題名（和文）高マッハ数における革新的な乱れの成長促進の創出を目指した縦渦遷移の研究

研究課題名（英文）Study on transition processes of streamwise vortices aimed at an innovative creation for the growth of perturbations in a high Mach number

研究代表者

比江島 俊彦 (Toshihiko, Hiejima)

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・講師

研究者番号：60316007

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）：縦渦は低速流から高速流まで乱流遷移における核となる組織渦構造であるが、高速流での縦渦の遷移機構は低速流と違ってよくわかっていない。本研究により、主流マッハ数の増加とともに乱れの成長を抑制する圧縮性効果の要因がエントロピーの変動成長と関連があることを明らかにし、超音速流中で軸流の加速により淀み点の生じない渦崩壊が発生することも発見した。さらに、ヘリシティの不安定効果が高マッハ数での圧縮性効果に打ち勝つことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象とした縦渦遷移機構、つまり、高速流での縦渦の安定化・不安定化をもたらすその層流化・乱流化における知見は、航空宇宙分野における将来の課題である超音速旅客機や宇宙往還機のエンジン性能の向上、超音速での騒音低減および再突入時に生じる空力加熱に対する機体の熱防御に関する問題等への貢献が期待できる基礎となるものである。加えて、このような高マッハ数での縦渦遷移の内部理解は、高速流遷移分野を切り開く流体力学的にも価値が高い研究である。

研究成果の概要（英文）：Although streamwise vortices become the nucleus for vortical structures of turbulent transition, transitions of the vortices on high-speed flows have not been so known as those on low-speed flows. Compressibility effects suppress a disturbance growth as the mainstream Mach number increases. The present study demonstrated that the cause is related to the growth of entropy fluctuation. It was also shown that vortex breakdown without a stagnation point is caused by a flow acceleration in supersonic flows. Furthermore, it was found that the effect of helicity on instability succeeds in beating the compressibility effects in a high Mach number.

研究分野：流体力学，航空宇宙工学

キーワード：高マッハ数 縦渦 流れの不安定性 渦崩壊 数値流体力学

1. 研究開始当初の背景

層流から乱流への遷移過程において、流れの不安定性を基に変動が成長し、それによって流れ場に応じた組織渦構造が生まれ、続いて起こるそれらの複雑な非線形干渉によって乱流へと発達する。低速流の多くの流れ場では、乱流場に至る前に生じる組織渦として縦渦(リップ構造)が存在することが知られている。縦渦構造の発達と共にその周りに生じる小スケール渦がその大スケール組織渦の渦崩壊に関わっていることから、縦渦の遷移は乱流遷移に対して重要な役割を果たしている。このように変動の成長とそれに伴い発達する組織渦構造が超音速流では圧縮性により抑制され、乱流遷移に大きな影響を与えている。この変動成長を抑制する圧縮性効果の本質的な研究は十分でない。高速流での縦渦の遷移過程(出現含む)については、縦渦が圧縮性効果を受けにくいという傾向のみ既知で、その詳細な物理機構は(その計測および可視化実験も困難であるため)未解明なままであった。この高速流における縦渦遷移機構の解明は、次世代高速旅客機や宇宙往還機におけるエンジンの性能向上、超音速域での騒音低減および再突入時に生じる空力加熱に対する機体の熱防御に関する問題等に貢献が期待できる基礎的知見となる。

2. 研究の目的

高いマッハ数での縦渦の遷移機構を不安定特性に基づいて明らかにすること、その渦崩壊等の制御に必須な知見を得ることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

流れの遷移機構の解明に必須な空間精度の高い計算コード(9次精度差分)を使って、スーパーコンピュータ(大規模計算機システム)による直接数値計算と安定性理論に基づく数理解析により、高マッハ数縦渦の変動成長過程を詳細に調べた。

4. 研究成果

(1) 超音速縦渦の圧縮性効果

微小攪乱を伴った超音速 Batchelor 渦の遷移過程から、空間的な微小攪乱の線形発達の範囲は短いこと、発達する組織渦構造は、波数モード、マッハ数により異なること、マッハ数の増加とともに変動運動エネルギーは減少し、変動エンタルピーが増加することがわかった(図1)。主流マッハ数の増加とともに乱れの成長を阻害する圧縮性効果の要因がエントロピーの変動成長と関連があることを明らかにした¹⁾。このように圧縮性効果が高マッハ数で顕著となる縦渦分布の熱力学的特性と関係するという新規の結果を得た。

(2) 超音速縦渦の渦崩壊

亜音速流では、旋回強さを示すスワール比をある値以上にすると、渦中心が低圧となり軸流れ方向に逆圧力勾配が生じ減速して、渦崩壊が起こる。また、超音速流でも縦渦が衝撃波と干渉することにより、衝撃波による圧力上昇が逆圧力勾配を生み、渦崩壊が生じる。上記2つはいずれも淀み点が生じる。本研究により、超音速流中では軸流の加速により淀み点の生じない渦崩壊が発生することを発見した(図2)。このように衝撃波を伴わない超音速縦渦の崩壊現象を初めて捉え、その発生条件²⁾も解析的に明らかにした。

(3) 圧縮性効果の影響を受けない乱れの成長促進

縦渦の基本流分布におけるヘリシティの不安定効果を線形安定解析によって調べ、それらの非線形発達を3次元数値計算で解析した結果、主流マッハ数が5.0の場合でも多くの小スケール渦を伴う大きな変動生成と動径方向への強い変動場の拡がりが見られた(図3)。このように、高いマッハ数で圧縮性効果に打ち勝つ、乱れを促進するヘリシティ不安定効果を見出した³⁾。

引用文献

- 1) T. Hiejima, "Compressibility effects of supersonic Batchelor vortices," *Physical Review Fluids*, **4**, 093903 (26 pages), (2019).
- 2) T. Hiejima, "Onset conditions for vortex breakdown in supersonic flows," *Journal of Fluid Mechanics*, **840**, R1 (12 pages), (2018).
- 3) T. Hiejima, "Helicity effects on inviscid instability in Batchelor vortices," *Journal of Fluid Mechanics*, **897**, A37 (28 pages), (2020).

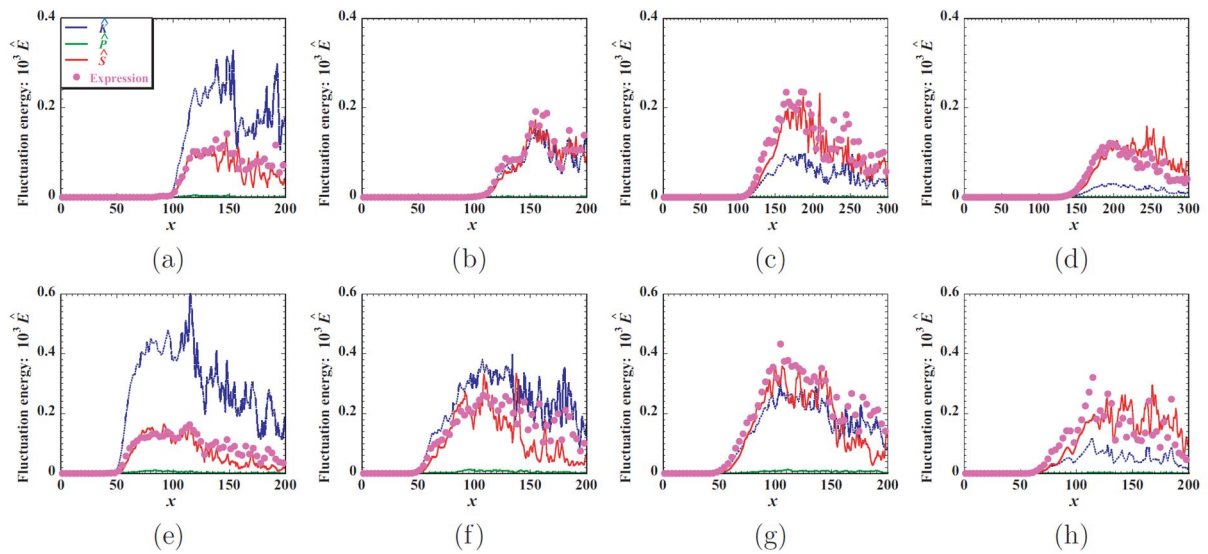


図 1 : 変動運動エネルギー \hat{K} , 変動圧力エネルギー \hat{P} , 変動エントロピーエネルギー \hat{S} および評価式 ; (a), (e) マッハ数 $M = 1.5$; (b), (f) $M = 2.5$; (c), (g) $M = 3.5$; (d), (h) $M = 5.0$

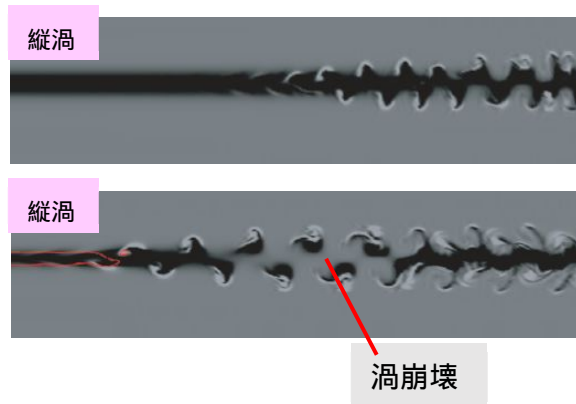


図 2 : 超音速縦渦の微小攪乱による渦崩壊の有無 (主流マッハ数 5.0)

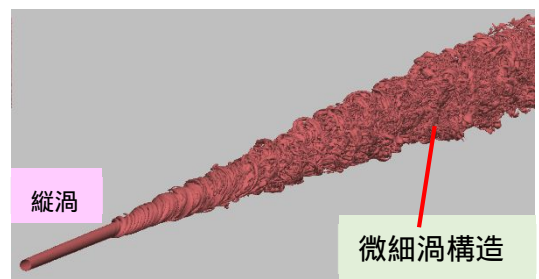


図 3 : ヘリシティ不安定による縦渦の遷移と下流の微細渦構造の可視化 (主流マッハ数 5.0)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11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 T. Hiejima, K. Nishimura	4. 巻 11
2. 論文標題 Effects of fuel injection speed on supersonic combustion using separation-resistant struts	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 065123(13pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0055104	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 T. Hiejima	4. 巻 897
2. 論文標題 Helicity effects on inviscid instability in Batchelor vortices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A37, (28 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2020.388	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 T. Hiejima	4. 巻 32
2. 論文標題 How the circulation and axial velocity deficit in Batchelor vortices affect their disturbance growth?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 076107(8 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0014192	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 T. Hiejima	4. 巻 31
2. 論文標題 Development of specific structures occurring from hyper-breakable vorticity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 071701(5 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5100643	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 T. Hiejima	4. 巻 4
2. 論文標題 Compressibility effects of supersonic Batchelor vortices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 093903(26pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.4.093903	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 T. Hiejima, T. Oda	4. 巻 32
2. 論文標題 Shockwave effects on supersonic combustion using hypermixer struts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 016104(18pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5128677	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 T. Hiejima	4. 巻 168
2. 論文標題 On the rapid breakdown of supersonic streamwise vortices with opposite sign double annular vorticity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 220, 229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actaastro.2019.12.018	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 T. Hiejima	4. 巻 201
2. 論文標題 Development of linear unstable modes in supersonic streamwise vortices using a weighted compact nonlinear scheme	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers and Fluids	6. 最初と最後の頁 104416(10pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2019.104416	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 Hiejima Toshihiko	4. 巻 29
2. 論文標題 Streamwise vortex breakdown in supersonic flows	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 054102(13pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4982901	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 Hiejima Toshihiko	4. 巻 840
2. 論文標題 Onset conditions for vortex breakdown in supersonic flows	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 R1 (12 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2018.92	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14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 西村海斗, 比江島俊彦
2. 発表標題 SRストラットの燃料噴射角度が超音速燃焼に与える効果
3. 学会等名 日本流体力学会第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 T. Hiejima
2. 発表標題 Effects of thermodynamic profiles on developments of supersonic Batchelor vortices
3. 学会等名 The 12th European Fluid Mechanics Conference (EFMC12) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Hiejima
2. 発表標題 Development of linear unstable modes in supersonic streamwise vortices using a weighted essentially non-oscillatory scheme
3. 学会等名 10th International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD10) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 比江島俊彦
2. 発表標題 超音速 Batchelor 渦の発達におけるエントロピー変動の影響について
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 比江島俊彦
2. 発表標題 超音速流中での渦崩壊の発生
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 比江島俊彦, 小田哲平
2. 発表標題 燃料噴射ストラットが作り出す縦渦と衝撃波が超音速燃焼に与える影響
3. 学会等名 第54回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 比江島俊彦
2. 発表標題 超音速縦渦の線形不安定モードの発達における非線形補間法の精度について
3. 学会等名 日本流体力学会第31回数値流体力学シンポジウム
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
---------------------------	-----------------------	----

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