

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05561

研究課題名(和文) 双曲型不安定性と波動の位相シフトが生み出す新しい型の流体力学的不安定性の研究

研究課題名(英文) A Novel Type of Instability due to Hyperbolic Instability and Phase Shift by Waves

研究代表者

服部 裕司 (Hattori, Yuji)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：70261469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：流れの中に出現する強い渦構造は、しばしば双曲型よどみ点をもつ。双曲型よどみ点をもつ渦が、密度成層、回転(自転)、一様磁場の効果を受けるときに、双曲型不安定性と波動の位相シフト効果により新しい型不安定性が発生することを明らかにした。その物理的メカニズムを解明し、不安定性の発生条件、不安定成長率の密度成層・回転・磁場の強さに対する依存性を明らかにした。さらに密度成層と回転の複合的な効果について調べ、非線形段階での時間発展を解析し、乱流遷移における新しい型不安定性の役割を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、気象現象・惑星大気・宇宙流体現象において重要である密度成層・回転・磁場の効果により、これまで知られていなかった流れの不安定性が発現することを明らかにした。これは、台風や竜巻の拳動・進路/成長予測の精度向上を図る上で考慮する必要があるもので、これに貢献することができる。また、長年の課題である木星の長寿命渦の維持メカニズムの解明の突破口となる結果を得た。さらに、既知の不安定性(双曲型不安定性)に別の現象(波動)が作用することで生み出される複合的な不安定性の概念は、今後流れの安定性理論の新しい分野を拓くと期待される。

研究成果の概要(英文)：The vortices which appear in a wide variety of flows often possess hyperbolic stagnation points. It is shown that there appears a new type of instability due to the hyperbolic instability and phase shift by waves in the vortices which possess hyperbolic stagnation points affected by density stratification, rotation, or magnetic field. The physical mechanism of this instability is revealed. Characteristics of stability including the condition of instability are also revealed. Combined effects of density stratification and rotation are elucidated. The role of the new instability in turbulent transition is clarified by numerical simulation.

研究分野：流体物理学, 数値流体力学

キーワード：双曲型不安定性 密度成層 自転効果 電磁流体 内部重力波 アルヴェーン波 渦列 非線形拳動

1. 研究開始当初の背景

流れの中に出現する強い渦構造は、気象現象においては台風(熱帯低気圧)や竜巻としてしばしば甚大な災害をもたらす。惑星大気においては木星の大赤斑や白斑など 100 年単位の長寿命をもつ渦が存在するが、これが維持されるメカニズムの解明は長年の課題である。宇宙においては、惑星が形成される前段階の粒子の凝集を渦が担っているという説が提案されている。

これらの渦は多くの場合、双曲型よどみ点を伴う(図 1)。双曲型よどみ点では双曲型不安定性が発生する。近年、流れの不安定化と乱流遷移を双曲型不安定性の立場から理解する研究が注目されている。上に挙げた渦の挙動・維持メカニズム・役割を理解し予測するための一つの鍵がこの双曲型不安定性にあると考えられる。

気象現象や惑星大気の強い渦は、一般に密度成層や回転(自転)の効果を受ける。申請者らは周期的な渦流れにおける非モード安定性の役割を明らかにした後に、密度成層の効果がこの流れの安定性に及ぼす影響に興味を持ち、安定密度成層流中の周期的渦流れの局所安定性解析を行った。この研究の中で、双曲型よどみ点をつなぐ流線近傍で新しい型のパラメタ共鳴不安定性を発見した。その不安定成長率は、密度成層により発生する内部重力波の周期と流体粒子運動の周期が共鳴条件を満たすとき最大となる。したがって、内部重力波による位相シフトが不安定性を誘発すると考えられる。

流れの中の重要な渦構造は、密度成層や回転のほかにも磁場の効果を受けることがある(核融合プラズマ、宇宙流体など)。これらの効果はいずれも流れの中に波動を生み出す(密度成層内部重力波、回転慣性波、磁場アルヴェーン波)。密度成層流以外でも、双曲型不安定性にこれらの波動が加わった場合に今までに知られていない不安定性が発現する可能性が強い。

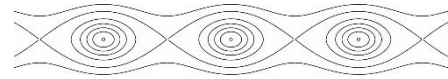


図 1. 双曲型よどみ点(黒丸)をもつ流れ (1次元渦列)

2. 研究の目的

双曲型不安定性と波動の位相シフト効果が生み出す新しい型の不安定性の存在と普遍性を立証し、その物理的メカニズムを明らかにする。一般に双曲型よどみ点をもつ流れに、密度成層・回転・磁場の効果による波動が加わった場合について、局所擾乱レベルでの不安定性の解析、固有モードレベルでの不安定性の解析、非線形段階の時間発展の解析を行う。これにより、不安定性の発生条件、不安定成長率のパラメタ依存性(密度成層・回転・磁場の強さ、波数など)、乱流遷移の条件を求め、気象現象や惑星大気、宇宙流体現象にあらわれる強い渦のダイナミクスの解明に資する。

- (1) 双曲型よどみ点をもつ密度成層流の不安定性の解明
安定密度成層の効果プシネ近似により取り入れ、双曲型よどみ点をもつ密度成層流の不安定性を上記の 3 つの方法により解析する。
- (2) 双曲型よどみ点をもつ回転流の不安定性の解明
回転の効果をコリオリ力により取り入れ、(1)と同様に双曲型よどみ点をもつ回転流の不安定性を解析する。
- (3) 双曲型よどみ点をもつ電磁流体の不安定性の解明
電磁流体を考える。一様外部磁場下で双曲型よどみ点をもつ流れの不安定性を I, II と同様に解析する。
- (4) 複合的な効果(密度成層+回転、密度成層+一様外部磁場)を受ける双曲型よどみ点をもつ流れの不安定性の解明

気象現象や惑星大気、宇宙流体現象では上の効果が複数加わる場合がある。密度成層と回転の効果が同時に存在する場合、密度成層と一様外部磁場の効果が同時に存在する場合について、流れの不安定性を解析する。

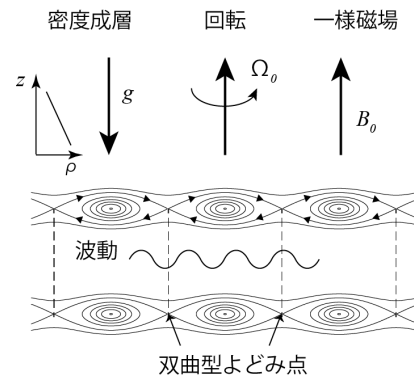


図 2. 双曲型不安定性と波動の位相シフト効果による新しい型の不安定性の概念図。

3. 研究の方法

双曲型不安定性と波動の位相シフト効果が生み出す新しい型の不安定性の存在と普遍性を立証し、その物理的メカニズムを明らかにする。双曲型よどみ点をもつ流れに、密度成層・回転・磁場の効果による波動が加わった場合について、局所擾乱レベルでの不安定性の解析(局所安定性解析)、固有モードレベルでの不安定性の解析(固有モード安定性解析)、非線形段階の時間発展の解析(直接数値シミュレーション)を行う。

- (1) 双曲型よどみ点をもつ密度成層流の不安定性の解明
- (2) 別種の波動(回転慣性波、磁場アルヴェーン波)によるパラメタ共鳴不安定性の解明
- (3) 複合的な効果(密度成層+回転、密度成層+一様外部磁場)によるパラメタ共鳴不安定性の解明

4. 研究成果

(1) 双曲型よどみ点をもつ密度成層流の安定性解析

1次元周期渦列および渦対の局所安定性解析を行った。2次元周期渦列と同様に新しい型の不安定性がパラメタ共鳴により発現することを確認した。これにより、新しい型の不安定性が、複数の渦が存在する成層流体において普遍的に存在することを示した。さらに不安定成長率の成層強度依存性を明らかにした。さらに固有モード安定性解析により新しい型の不安定性の線形領域における特性を研究した。線形化方程式の長時間シミュレーションにより、最も不安定な固有モードを得る方法を採用した。まず、新しい型の不安定性が固有モードとして存在することを確認した(図3)。短波長領域において局所安定性解析による結果との比較を行い、局所安定性解析の解が固有モードの構造をよく説明することを示した。以上の結果より、新しい型の不安定性を成層双曲型不安定性と名付けた。

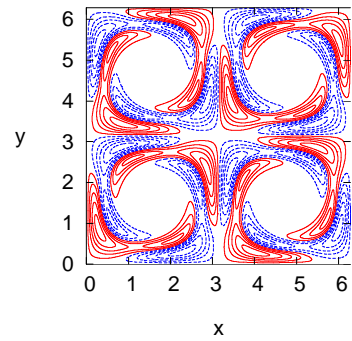


図3. 成層双曲型不安定モードの例

(2) 双曲型よどみ点をもつ電磁流体の安定性解析

局所安定性解析により、一様外部磁場下にある2次元周期渦列の安定性を研究した。磁場の大きさに適切な仮定を置き、局所安定性解析の方程式系を導いた。数値シミュレーションにより、双曲型不安定性とアルヴェーン波が協働して生み出すパラメタ共鳴不安定性が存在することを示し、その発現の条件と磁場の強さの関係を明らかにした。さらにこの結果を、固有モード安定性解析により裏付けることができた。また、2次元周期渦列に加えて1次元周期渦列を対象とし、新しく発見したパラメタ共鳴不安定性が一般に存在することを示した。

(3) 双曲型よどみ点をもつ回転流の安定性解析

別種の波動によるパラメタ共鳴不安定性の解明のため、双曲型不安定性と回転の効果により生ずる慣性波が協働して生み出すパラメタ共鳴不安定性の発現の条件と回転の強さの関係を研究した。1次元周期渦列および2次元周期渦列を対象とし、局所安定性解析および固有モード安定性解析により、回転が弱い場合に双曲型不安定性が強くなること、回転が強くなると逆に双曲型不安定性が弱くなり安定化することを明らかにした。また、渦と逆向きの回転を与えた場合には遠心力不安定性が発生することもわかった。楕円型不安定性を加えた3種類の不安定性の相対的な強さの比較を行い、回転の向きと強さ、渦列のパラメタに対する依存性を明らかにした。

(4) 密度成層および回転の効果を受ける双曲型よどみ点をもつ流れの不安定性

複合的な効果によるパラメタ共鳴不安定性の解明のため、まずメソスケールの気象現象や惑星大気で重要となる密度成層と回転の複合的な効果を扱った。成層双曲型不安定性の特性が回転と成層の強さによってどのように変化するかを局所安定性解析と固有モード安定性解析により明らかにした。回転が弱いときには双曲型不安定性と成層双曲型不安定性のどちらも成長率が大きくなり不安定性は強まるが、回転が強くなると逆に安定化することがわかった(図4)。また、回転の向きが渦の回転の向きと逆方向の場合には、遠心力不安定性が発生することも明らかとなった。この密度成層と回転の複合的な効果を、局所安定性解析の枠組みの中で理論的に説明することに成功した。

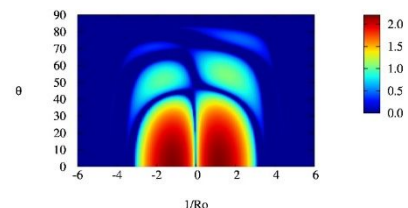


図4. 密度成層と回転の効果を受ける2次元周期渦列の安定性

(5) 双曲型よどみ点をもつ密度成層流体中の渦の非線形段階の時間発展の解析

われわれが発見した成層双曲型不安定性を契機として成長する擾乱が、双曲型よどみ点をもつ密度成層流体中の渦の乱流遷移過程において果たす役割を解明するため、直接数値シミュレーションによる研究を行った。まず、密度成層の効果を実用近似により取り入れた支配方程式の高精度直接数値シミュレーションにより、非線形領域における不安定化過程・成長の飽和・乱流遷移の過程を解明するため、数値シミュレーション用のプログラム開発を行った。実際に数値シミュレーションを行い、擾乱の波長が大きい場合は、発達した擾乱が渦を崩壊に導き、最終的に元のエネルギーの8%程度のみが残ることを明らかにした。これに対し、擾乱の波長が短い場合は、擾乱の影響は渦の周辺部のみに限られ、渦の中心は擾乱の影響を受けずに残ることもわかった(図5)。気象現象や宇宙流体現象においてあらわれる強い渦は、成層や回転の効果により渦度の向きのスケールが制限を受けるため、擾乱の波長が小さいものに限定的なことが多い。このため、本研究の結果は、強い渦が安定して存在し続けるメカニズムとして有力なものを与えると考えられる。

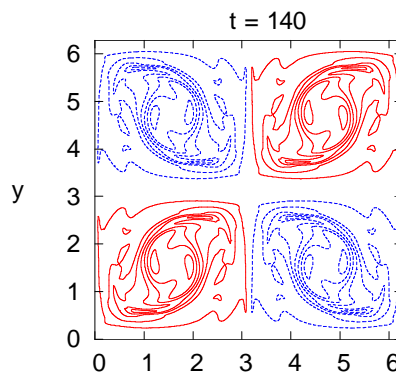


図 5. 非線形段階の時間発展の例 .

渦中心は安定に残る .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Stefan G. Llewellyn Smith and Yuji Hattori	4. 巻 33
2. 論文標題 Generation of bulk vorticity and current density in current-vortex sheet models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 100712
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.hedp.2019.100712	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 該当する
1. 著者名 Yuji Hattori, Francisco J. Blanco-Rodriguez and Stephane Le Dizes	4. 巻 878
2. 論文標題 Numerical stability analysis of a vortex ring with swirl	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 5-36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2019.621	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 該当する
1. 著者名 Shota Suzuki, Makoto Hirota and Yuji Hattori	4. 巻 854
2. 論文標題 Strato-hyperbolic instability: a new mechanism of instability in stably stratified vortices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 293, 323
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2018.641	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 Manish K Khandelwal, Shota Suzuki, Makoto Hirota, Yuji Hattori	4. 巻 -
2. 論文標題 Hyperbolic Instability of Stratified Vortices	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the Fourteenth International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 590-591
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Yuji Hattori
2. 発表標題 Anisotropic Effects on Stability of Periodic Array of Vortices
3. 学会等名 IUTAM Symposium on Vortex dynamics in science, nature and technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji Hattori, Ivan Delbende, Maurice Rossi
2. 発表標題 Instability and Wave Interactions in Helical Vortice
3. 学会等名 The 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Nakazawa, Yuji Hattori
2. 発表標題 Numerical Studies on Structure of Jupiter's Great Red Spot based on Simplified Model
3. 学会等名 The Sixteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Takahashi, Makoto Hirota, Yuji Hattori
2. 発表標題 Numerical Simulation of Vertical Vorticity Generation in Unstable Stratified Shear Flow
3. 学会等名 The Sixteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji Hattori, Makoto Hirota
2. 発表標題 Nonlinear dynamics of destabilized array of vortices in stratified fluid
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamic (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 服部裕司, 廣田真
2. 発表標題 成層流中の渦列の不安定化過程
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 高橋翠, 廣田真, 服部裕司
2. 発表標題 不安定密度成層せん断流における鉛直渦度発生の数値シミュレーション
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 Y. Hattori, S. Suzuki, M. Khandelwal, M. Hirota
2. 発表標題 Global Analysis of Strato-Hyperbolic Instability of Stably-Stratified Vortices
3. 学会等名 12th European Fluid Mechanics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuji Hattori
2. 発表標題 Magneto-Hyperbolic Instability: a new instability due to hyperbolic instability and phase shift by Alfvén waves
3. 学会等名 Satellite meeting of ICFD on Instability and Nonlinear Dynamics of Curved Vortices (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuji Hattori, Makoto Hirota, Masaru Furukawa
2. 発表標題 Magneto-hyperbolic instability: a new instability due to hyperbolic instability and phase shift by Alfvén waves
3. 学会等名 71th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 服部裕司, 鈴木翔太, Manish Khandelwal, 廣田真
2. 発表標題 成層双曲型不安定性の発現メカニズム
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 服部 裕司, 廣田 真, 古川 勝
2. 発表標題 双曲型よどみ点をもつ渦の不安定性に対する磁場の効果
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Hattori, S. Suzuki, M. Khandelwal, M. Hirota
2. 発表標題 A New Short-Wave Instability of Stratified Vortices
3. 学会等名 70th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 服部裕司, 鈴木翔太, Manish Khandelwal, 廣田真
2. 発表標題 成層双曲型不安定性の発現メカニズム
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018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
連携研究者	廣田 真 (Hirota Makoto) (40432900)	東北大学・流体科学研究所・准教授 (11301)	
連携研究者	古川 勝 (Furukawa Masaru) (80360428)	鳥取大学・工学研究科・教授 (15101)	