

自己評価報告書

平成23年 3月31日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2011

課題番号：20540379

研究課題名(和文) 曲がりをもつ渦構造の非線形ダイナミクス

研究課題名(英文) Nonlinear Dynamics of Curved Vortical Structures

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

研究分野：流体物理学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：渦運動、線形安定性、曲率不安定性、直接数値シミュレーション、非線形性

1. 研究計画の概要

曲がりをもつ渦構造について、そのダイナミクス、特に安定性、カオス・乱流に至るルートを解明し、渦のダイナミクスにおける曲がりの普遍的な効果を明らかにするのが本研究の目的である。渦どうしの相互作用や自己相互作用の結果として一般に生じる「曲がり」は、渦の変形と同時に一般に不安定性を誘起する。その結果として起こる渦の大変形や崩壊過程を明らかにし、渦運動を曲がり効果という視点から統一的に理解し解析する新しい方法を提案する。さらに、乱流中での曲がり効果を検証し、乱流の新しい統計理論を確立する。

まず曲がりをもつ渦構造の具体例として典型的なもの(太い渦輪・らせん渦・屈曲渦)を取り上げ、その安定性、弱非線形領域での挙動、大局運動の理論解析を行い、直接数値シミュレーションにより理論解析の結果を検証するとともに、強非線形領域での挙動を研究する。次にこれを材料として、曲がりをもつ渦構造のダイナミクスの一般論を展開し、曲がり効果の普遍性を追究する。さらに、乱流への応用を行うために、直接数値シミュレーションにより「曲がり」の統計法則を解明し、曲がり効果を考慮した乱流の統計理論を構築する。

2. 研究の進捗状況

(1)太い渦輪のダイナミクス: オイラー方程式の定常解である Hill の球形渦を太い渦輪の代表例として取り上げ、その安定性を短波長安定性解析により調べた。その結果、細い渦輪と同じように曲率不安定性和楕円型不安定性が存在することを示すことができた。さらに、曲率の効果と歪み流の効果の結合によ

る第三の不安定性を新たに発見した。これは太い渦輪特有のものである。第三の不安定性の成長率は曲率不安定性和同様の傾向を示すことも明らかにされた。

(2)らせん渦のダイナミクス: らせん渦の安定性を短波長安定性解析により調べ、やはり曲率不安定性が存在することを示すことができた。さらに、らせん渦の特徴である「振れ」と「回転」の効果により曲率不安定性が変調を受けることを明らかにした。

(3)屈曲渦のダイナミクス: 屈曲波が誘起する2次不安定性を3波共鳴の立場から捉え直し、不安定波がある程度発達した弱非線形領域に理論を拡張・展開した。

(4)曲がりによる渦構造の大局運動(大変形・長波長): 渦輪・らせん渦・屈曲渦について、大局運動の理論解析を行った。漸近解析を用いて渦核の構造を考慮した解析を行い、これを一般の形状をもつ渦構造の大局運動に拡張した。

(5)一般の形をもつ渦構造の安定性: 一般の形状をもつ渦構造の線形安定性を理論解析により調べた。軸流の効果を定量的に評価するとともに、一般に非定常運動を行う渦構造においても曲率不安定性が存在する場合があることを示した。

(6)曲がりをもつ渦構造のダイナミクス(具体例の直接数値シミュレーション): 渦輪・らせん渦・屈曲渦のダイナミクスについて、直接数値シミュレーションによる研究を行った。非圧縮性 Navier-Stokes 方程式をスペクトル法により数値的に解くプログラムを開発した。曲率不安定性の存在を数値的に確かめるとともに、非線形性が強くなると不安定成長が抑えられる傾向があることを明らかにした。

(7) 乱流の直接数値シミュレーション：非圧縮性および圧縮性 Navier-Stokes 方程式を周期境界条件（一様等方性乱流）においてスペクトル法により高精度に数値的に解くプログラムを開発した。これを用いた直接数値シミュレーションによりデータを蓄積し、最終年度のデータ解析の準備を行った。

(8) 渦構造の渦度分布とその形成過程：渦構造の渦度分布は不安定性を大きく左右する。乱流中の渦構造の形成過程と準定常状態における渦度分布を、理論解析と直接数値シミュレーションにより調べた。得られた渦度分布は、Reynolds 数が小さい場合は代表的な渦度分布と考えられている Gauss 分布に近いが、Reynolds 数が大きくなると Gauss 分布からのずれが顕著になることを示した。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

(理由)

ほぼ当初の計画通りに進展している。「屈曲渦のダイナミクス」において一部未解決のことが残っていること、(4)および(5)の成果発表が遅れていることその他は計画通りである。

4. 今後の研究の推進方策

(1) 乱流中の渦構造の曲がりの統計法則：一様等方性乱流と壁乱流の直接数値シミュレーションのデータ解析を行い、渦構造の曲率や振率など曲がりの特徴付ける物理量の統計法則を明らかにする。

(2) 曲がり効果を考慮した乱流の統計理論：得られた曲がりに関する統計法則を用いて、乱流の現象論を構築する。曲がりをもつ渦構造の統計的な配置から乱流の速度場を再構成し、統計的性質を研究する。

(3) 曲がりをもつ渦構造のダイナミクスに対する軸流の効果の再検討：渦輪、らせん渦の安定性における軸流の効果、短波長安定性解析およびノーマルモード安定性解析により再度詳細に検討する。

5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計12件)

- ① Y. Hattori and K. Hijiya, Short-wavelength stability analysis of Hill's vortex with/without swirl, Physics of Fluids Vol. 22 (2010) 074104 (8 pages), 査読有
- ② Y. Hattori and Y. Fukumoto, Short-wave stability of a helical vortex tube: the effect of torsion on the curvature instability, Theoretical and Computational Fluid Dynamics Vol. 24

(2010) 363-368, 査読有

- ③ Y. Hattori and Y. Fukumoto, Nonlinear Dynamics of Disturbed Vortices, Proceedings of The Sixth International Conference of Flow Dynamics, (2009) 568-568, 査読有
- ④ Y. Hattori, Assessment of Volume Penalization Method for Direct Numerical Simulation of Incompressible Flows, Proceedings of The Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, (2009) 116-117, 査読有
- ⑤ Y. Hattori and Y. Fukumoto, Short-wavelength Stability Analysis of a Helical Vortex Tube, Physics of Fluids Vol. 21 (2009) 014104 (7 pages), 査読有

[学会発表] (計14件)

- ① Y. Hattori and K. Hijiya, Local Stability Analysis of Fat Vortex Ring, The 62nd Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics, 2009年11月23日 ミネアポリス (アメリカ)
- ② 服部裕司, 泥谷圭亮, 渦輪の安定性: swirlの効果, 日本物理学会2009年秋季大会, 2009年9月26日, 熊本大学 (熊本)
- ③ Y. Hattori, K. Hijiya and Y. Fukumoto, Curvature instability of vortical structures, Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics, Third International Symposium, 2009年8月12日, ノッティンガム (イギリス)
- ④ Y. Hattori and Y. Fukumoto, Short-wave stability of a helical vortex tube: The effect of torsion on the curvature instability, IUTAM Symposium: 150 Years of Vortex Dynamics, 2008年10月16日, コペンハーゲン (デンマーク)
- ⑤ Y. Hattori and Y. Fukumoto, Curvature instability of a vortex ring and a helical vortex tube, 22nd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2008年8月25日, アデレード (オーストラリア)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)
- [その他]