

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月21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

研究成果の概要（和文）：

渦は流れの基本構造である。本研究は渦のふるまいに対する曲がりの普遍的な効果を明らかにすることを目的としている。曲がりをもつ渦構造として太い渦輪・らせん渦などの具体例を取り上げ、不安定性と非線形ダイナミクスについて理論的に調べ、これを一般的な渦構造に展開した。さらに、多くの渦に存在する軸流の効果を実験および数値シミュレーションにより明らかにした。得られた知見を利用し、乱流の統計法則の精密化を行った。

研究成果の概要（英文）：

Vortices are important and fundamental structures in fluid dynamics. We clarify the effects of curvature on the behavior of vortices. The instability and nonlinear dynamics of a fat vortex ring, a helical vortex tube etc. are investigated theoretically; the results are generalized to a general class of vortices which are curved. The effects of the axial flow, which exists in most of vortices, on the stability and nonlinear dynamics are also clarified by theoretical and numerical analysis. The obtained results are used to improve the statistical theory of turbulence.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

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. 研究開始当初の背景

「流れ」は血管のような小さなスケールから地球・宇宙規模のような大スケールまでさまざまな現象・システムに表れる。多種多様な流れ現象の統一的な理解は物理学・数理学の問題としてのみならず、工学的応用においても極めて重要である。

流れ現象を解析する際に、「渦」のダイナミクスの視点からこれを行うことは、有力な研究手段の一つである。非粘性・非圧縮性流れの場合、「渦は流れとともに動く」ために、渦を流れの基本構造と見ることができからである。粘性流れ・圧縮性流れにおいても渦の立場からの解析は多くの有用な結果を

もたらす。

しかし、渦の動力学は本質的に非線形性を有するため、その解析は困難である。いくつかの重要な定理があるものの、対象とする渦の個性に依存して渦運動の様相は多種多様であり、統一的な理解への道のりは険しい。

研究代表者はこの数年渦輪・楕円渦を主な対象として、渦構造のダイナミクス（特に安定性）を精力的に研究している。一連の研究の中で「細い渦輪の局所安定性解析」により平成 17 年度日本流体力学会竜門賞を受賞した。特に渦輪についてこれまで知られていなかった新しいタイプの不安定性が存在することを示した。この不安定性は渦輪の「曲がり」に直接的な起源をもつものであり、「曲率不安定性」と呼ばれている。

この曲率不安定性の物理的メカニズムは、「曲がり」が渦度を伸張するところにある。この伸張効果は渦輪に限らず広く曲がりをもつ渦構造一般に存在すると期待される。そこで、「曲がり」をもつ一般的な渦構造のダイナミクスについて不安定性を中心に研究し、曲がりの効果の普遍性を明らかにできれば渦構造のダイナミクス解明を強力に推し進めることとなる。

渦構造の「曲がり」は、渦どうしの相互作用や自己相互作用の結果として普遍的に存在する。曲率が大きい部分は局所的に大きい自己誘導速度をもつ。この結果、渦構造は大局的に変形する。同時に、曲がりは不安定性を誘起する。したがって、渦の相互作用の結果生じる曲がりから、不安定性により内部モードが発達し、渦構造自身の崩壊に至るといったシナリオが浮かびあがる。本研究はこのシナリオの普遍性を追究するものである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は以下の通りである。

(1) 曲がりをもつ代表的な渦構造のダイナミクスの解明：太い渦輪・らせん渦・屈曲渦

研究代表者はこれまで主に細い渦輪を対象として曲がりの効果を研究してきた。曲がりの効果の普遍性を追究する手がかりとして、曲がりをもつ渦構造の典型的な例を取り上げ、そのダイナミクスを解明する。具体的な対象としては、太い渦輪・らせん渦・屈曲渦を取り扱う。特に、らせん渦は、曲がりと同時に振りをもつ最も基本的な渦構造である。振りの効果が渦のダイナミクスにどのように表れるかを明らかにする。

(2) 曲がりをもつ一般的な渦構造のダイナミクスの解明：一般論の展開

上の代表的な渦構造に関する結果を受けて、一般的な渦構造における曲がりの効果を研究する。曲がりによる大局的な変形と、不安定化による局所的な変形（内部モードの発達）、およびその関係を解明することにより、

曲がり効果の普遍性を明らかにし、その一般論を展開する。

(3) 乱流への応用

曲がりをもつ渦構造の一般論の立場から乱流の統計的性質の解明を行う。まず、一様等方性乱流、壁乱流中を対象として、乱流中の渦構造の「曲がり」の統計法則を開拓する。これを利用して、曲がり効果を考慮した乱流の統計理論を構築する。

## 3. 研究の方法

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。

## 4. 研究成果

(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と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と同様の傾向を示すことも明らかにされた。（図 1）

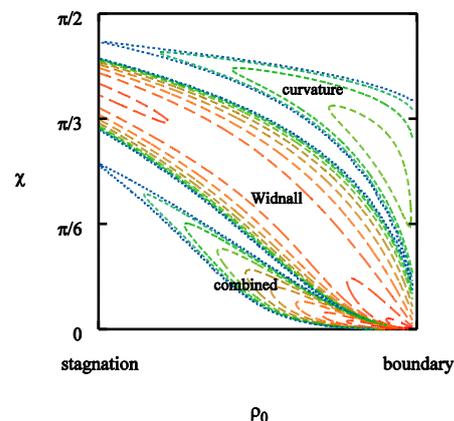


図 1. Hill の球形渦の不安定性

(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、一般に非正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、これにより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、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、乱流中の渦構造の抽出を行った。（図2）

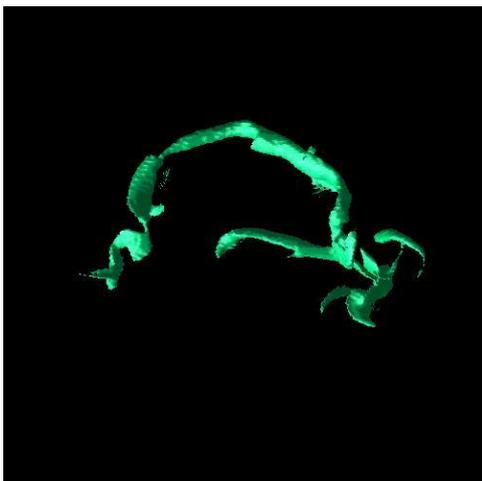


図2. 乱流中の渦構造

(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。（図3）

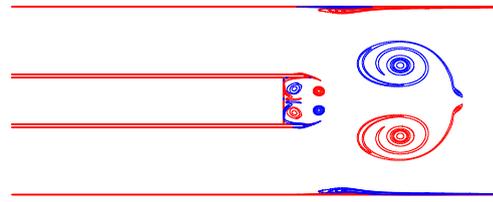


図3. 渦形成機構の数値シミュレーション

(9) 乱流中の渦構造の曲がりの統計法則：一様等方性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した。曲率、振率は渦度が小さい点でも定義されるが、渦度の大きさによる重みづけを考慮した統計解析を行うことにより本質的な統計法則を抽出することができた。

(10) 曲がり効果を考慮した乱流の統計理論：上で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した。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、統計的性質を説明することに成功した。既存の乱流理論による統計法則との関係を議論し、乱流に関して得られた新しい知見を整理した。

(11) 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：回転翼に形成されるらせん渦は、一般にらせん方向の流れ（軸流）をもつ。この軸流が曲がりをもつ渦構造のダイナミクスに及ぼす効果について研究した。渦輪、らせん渦の安定性における軸流の効果も、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解明した。さらに、一般の渦

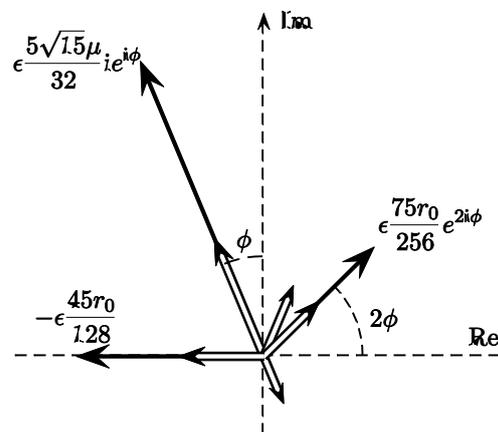


図4. 軸流をもつらせん渦の不安定成長率管を対象とし、その安定性と大局運動に対する軸流の効果を解析的手法と直接数値シミュレーションにより解明した。(図4)

#### 5. 主な発表論文等

(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17件)

1. Y. Hattori and Y. Fukumoto, Effects of axial flow on the stability of a helical vortex tube, Physics of Fluids Vol. 24 (2012) 054102 (15 pages), 査読有
2. 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
3. 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
4. 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
5. 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
6. 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20件)

1. Yuji Hattori, Instability of a Helical Vortex Tube with Axial Flow, Hot Topic Workshop on Fluid Dynamics : Vortex Dynamics, Biofluids and Related Fields (招待講演), 2011年12月12日, 大田(韓国)
2. Yuji Hattori, Development of volume penalization method for simulation of flow around complex bodies, CCS Symposium Autumn 2011(招待講演), 2011年11月2日, 名古屋大学(名古屋)

3. 服部裕司, 福本康秀, らせん渦の線形安定性解析: ノーマルモード解析と短波長解析の関係, RIMS研究集会「オイラー方程式の数理: 力学と変分原理250年」, 2010年7月14日, 京都大学(京都)
4. 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)
5. 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)
6. 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)
7. 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)
8. 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)

#### 6. 研究組織

##### (1) 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

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: