

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560148

研究課題名（和文）階層的スペクトルによる多重モード・スパイラル渦クラスター構造の研究

研究課題名（英文） Investigation on the multi-mode spiral vortex cluster structure based on the hierarchical spectrum

研究代表者

堀内 潔 (HORIUTI KIYOSI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：10173626

研究成果の概要（和文）：

乱流場の DNS と実験計測データを用いて階層性を有する非平衡エネルギースペクトルの抽出を行い、平衡な Kolmogorov  $-5/3$  乗成分に加えて非平衡  $-7/3$  乗と  $-9/3$  乗成分が存在する事、 $-9/3$  乗成分には代数的な対数補正が付随する事を明らかにし、非平衡スペクトルの非定常なエネルギーカスケード生成における役割を示した。さらに、DNS データの解析から 3 モードのスパイラル渦の存在を示し、カスケード過程と instability cascade によるスパイラル渦クラスター形成過程との相関を示した。

研究成果の概要（英文）：

We conducted extraction of hierarchical-nonequilibrium energy spectrum in the turbulent field using the DNS and experimental measurement data. It is shown that nonequilibrium components with  $-7/3$  and  $-9/3$  powers resides in both data in addition to the equilibrium Kolmogorov  $-5/3$  power component, but the  $-9/3$  power component associates an algebraic-logarithmic correction. The role of the nonequilibrium spectrum in the generation of unsteady energy cascade is elucidated. The stretched-spiral vortices with 3 modes of configurations are identified in the DNS data, and the correlation between the generation process of the energy cascade and the formation process of the spiral vortex cluster by the instability cascade is revealed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：流体物理学・数値流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：(1) 非平衡性 (2) DNS (3) エネルギースペクトル (4) Kolmogorov 則  
(5) Lundgren spiral vortex (6) 階層性 (7) エネルギーカスケード (8) 粘弾性流体

## 1. 研究開始当初の背景

乱流の特徴は、流れ場の幾何形状に依存する大スケールから最少の Kolmogorov スケール

ルまで広範囲のスケールを包含する点にあり、これらのスケール間でエネルギーのカスケードが形成される。このカスケードに伴い、固有の勾配を持つエネルギースペクトルが

生成され、統計平均を施した平衡成分としては Kolmogorov の $-5/3$ 乗則が得られる。一方、 $-5/3$ 乗則を基礎とした摂動展開からは、 $-7/3 \cdot -9/3$ 乗といった高次の冪を持つ階層的なスペクトルが導出され、これらが非平衡的な成分を形成する事が知られていた。これらの成分は、カスケードの非定常性の生成を担うと考えられ、非定常挙動の形成において重要な役割を果たす可能性が示唆された。また、これらのスペクトルを励起する渦構造のモデルとしては、Lundgren のスパイラル渦が知られており、これらの渦との相関の解明により、カスケード過程が明らかにされ、同時にカスケード発生の抑制により、乱流制御への応用も図る事が期待されたため、本研究の発想に至るきっかけとなった。

## 2. 研究の目的

統計理論から予測される平衡成分の $-5/3$ 乗則に従うエネルギースペクトルに加えて、非平衡性を有する $-7/3 \cdot -9/3$ 乗スペクトルを実際に検出した例は未だ皆無のため、本研究は、最初に、その抽出を目指す事を目的とする。このためには、数オクターブにわたる $-7/3$ 乗スペクトルの抽出が可能な高レイノルズ数のデータが必要となり、先ず、 $-5/3$ 乗と $-7/3$ 乗スペクトルが観察されるの波数域に十分な格子点数が分布された、一様等方乱流および一様せん断乱流を対象とした Direct numerical simulation (DNS) データの生成を目指す。次に、この DNS データを用いた解析を行って $-7/3$ 乗スペクトルの抽出を図り、エネルギー伝達関数の解析から小スケールへのエネルギーカスケードの生成機構を明らかにし、非定常挙動の形成における $-7/3$ 乗スペクトルの役割をする事を目的とする。さらに、上述の Lundgren のスパイラル渦には渦管と渦層上の渦度の配向により 3 モードが存在する事が示されているが、DNS データの渦構造の可視化解析により、3 モードのスパイラル渦の抽出を試みる。そして、カスケードの時間発展と数世代に及ぶスパイラル渦の instability cascade による渦クラスターの形成過程との相関を示す。

DNS データにおける検証と共に、実験で計測されたデータを用いた非平衡スペクトルの抽出も試みる。実験データとしては、混合層における速度場の時系列計測データを用いた条件付抽出を行い、 $-7/3$ 乗スペクトルの存在を検証する。

乱流制御への応用として、乱流生成機構発生の抑制を図る事による乱流制御の可能性を探る。本研究では、粘弾性流を取り上げ、特に、非アファイン粘弾性の導入が $-7/3$ 乗スペクトルと乱流の生成に与える効果について検証する。

## 3. 研究の方法

研究は、DNS データを用いた解析、理論による解析、および、実験データを用いた解析から構成され、これらの 3 方法を有機的に結合する事により行う。

### (1) DNS データを用いた解析

高レイノルズ数における検証を目指し、一様等方乱流、および一様せん断乱流を対象とする DNS データを作成し、数オクターブに渡る $-7/3$ 乗スペクトルを抽出して、エネルギースペクトルの時間発展と散逸率の時間変化との対応を解析する。さらに、エネルギー伝達関数を用いてエネルギーカスケードの生成機構の解析を行い、 $-7/3$ 乗スペクトルがカスケードの生成において果たす役割を明らかにする。次に、Instability cascade によるスパイラル渦の伸長とモード遷移を検証し、クラスター構造の形成過程を明らかにする。

### (2) 理論による解析

スペクトルモデルを用いて、平衡成分の Kolmogorov の $-5/3$ 乗則を基本解とした摂動展開の解を求める。スペクトルモデルとしては、Kovasznyai モデルおよび Heisenburg モデル等の数種のモデルを用い、解のスペクトルモデルに対する依存性を明らかにする。

### (3) 実験データを用いた解析

実験による計測データを用いて、散逸率の時間微分の符号に関する条件付抽出を行い、 $-7/3$ 乗スペクトルの存在を検証する。実験データとしては、名古屋大学工学研究科の辻教授により計測された混合層における速度場のデータを用いる。このデータは空間一点での時系列データとして計測されているため、空間分布の時間発展として与えられる DNS データとの対応を Taylor の凍結仮説に基づいて行う。さらに、DNS データに対応する時系列データの統計平均の取り方について検討する。この実験は高レイノルズ数 ( $R_\lambda \sim 500$ ) において行われているため、高レイノルズ数における検証が可能となる。

## 4. 研究成果

平成 20 年度において、高レイノルズ数における検証を目指し、先ず、一様等方乱流および一様せん断乱流の高レイノルズ数 DNS データの作成を行った。一様等方乱流では、外力の低波数成分への注入により統計的に定常な状態を実現し、格子点数を最大  $1024^3$ 、

Taylorマイクロスケールに基づくレイノルズ数 $R_\lambda$ を256とした。ランダムな位相をもった外力とlinear forcingによる外力の2種類の外力注入法を比較した。せん断乱流では、体積力の印加により定常状態を維持し、格子点数を $512 \times 512 \times 129$ 、 $R_\lambda$ を150とした。次に、このデータを用いたエネルギースペクトルの非平衡成分の分析を行い、一様等方乱流においてKolmogorovの $-5/3$ 乗スペクトルに加えて、約2オクターブに渡る $-7/3$ 乗成分を抽出し、この結果が外力の注入法に依存しない事を示した。せん断乱流においても $-7/3$ 乗成分が抽出され、 $-7/3$ 乗スペクトルの存在が強固である事を明らかにした。次に、この非平衡スペクトルとエネルギーカスケードの相関を解析し、低レイノルズ数の場合と同様に、 $-7/3$ 乗成分は散逸率が極小値から増加する時間帯においては低波数成分が正值を取るが、極大値から減少する時間帯で負値に転じて高波数成分に伝達されてカスケードが起き、この遷移過程で生成される多重モードspiral vortexが誘発するスペクトルと整合している事を示した。

更に、 $-5/3$ 乗則スペクトルを定常基本解とした摂動展開の高次項を導出して $-9/3$ 乗成分の存在を予測し、その抽出を試みた。そして、 $-9/3$ 乗成分が実際に存在する事を示し、この成分が散逸率が極値を取る時間帯で出現し、 $-7/3$ 乗成分の符号変換に重要な役割を果たす事を明らかにした。

平成21年度において、先ず、平成20年度に抽出されたエネルギースペクトルの非平衡成分の、定常な乱流状態を維持するために低波数帯に注入する外力の印加法に対する依存性を検証した。格子点数を $512^3$ 、レイノルズ数 $R_\lambda$ を120として、ランダムな位相をもった外力とlinear forcingによる外力2種を比較し、何れの場合においても、平衡成分のKolmogorovの $-5/3$ 乗則に加えて、 $-7/3$ 乗と $-9/3$ 乗スペクトルが得られる事を示した。しかしながら、 $-9/3$ 乗成分は、平均としてはおおむね $-9/3$ 乗を示すものの無視できない分散を伴う事を明らかにした。このため、平成20年度に用いたKovasznyのスペクトルモデルに加えて、Heisenbergモデルを用いた摂動展開を行い、前者の解が $-7/3 \cdot -9/3 \cdot -11/3$ 乗といった冪を持つ無限次展開となるのに対し、後者では $-9/3$ 乗に代数的な対数補正が付随する事を示した。この解析解は、スペクトルの時間変動が、散逸率が増加する時間帯(Phase 1)、減少する時間帯(Phase 2)、両者間の遷移期(Phase T)の3 Phaseから成る事を予測するが、実際、 $-7/3$ 乗はPhase 1と2、 $-9/3$ 乗はPhase Tにおける条件付平均から抽出された。次に、非平衡成分のエネルギー・カスケードの形成過程における役割をエネルギー伝達関数を用いて解析し、Phase 1で

は $-7/3$ 乗成分による順方向のカスケードが生成されるのに対し、Phase Tでは $-9/3$ 乗成分により、またPhase 2では $-7/3$ 乗成分によって逆方向のカスケードが生成され、概周期的な乱流変動が形成される事を明らかにした。次に、粘弾性一様等方乱流と円管内乱流のDNSを行い、非平衡スペクトルに対する粘弾性効果を示し、乱流抵抗の削減機構を明らかにした。

平成22年度においては、その存在が実証されたエネルギースペクトルの非平衡成分の、実験計測データおよび高レイノルズ数DNSデータにおける検証を行った。実験計測データとしては、名古屋大学の辻義之教授から混合層における時系列データの供与を受け、Taylor仮説に基づく空間データへの変換を行ってスペクトルを算出した。DNSでは、格子点数を $2048^3$ 、レイノルズ数 $R_\lambda$ を400とした強制一様等方乱流のDNSデータの作成を行った。このため、複数node上で並列計算を行うコードを開発した。そして、両データにおいて、平衡成分のKolmogorovの $-5/3$ 乗則に加えて、広波数帯にわたる $-7/3$ 乗と $-9/3$ 乗スペクトルが抽出される事を示した。更に、昨年度指摘した $-9/3$ 乗成分における代数的な対数補正が付随する事を明らかにした。次に、一様せん断流のDNSデータを用いて、ストリークにより形成されるスパイラル渦のモードと非平衡スペクトルとの相関を解析した。ストリークによって循環流が形成される時間帯においては、 $-7/3$ 乗スペクトルを生成するモードのスパイラル渦が形成されるのに対し、ストリークが消失する時間帯においては、 $-5/3$ 乗スペクトルを生成するモードのスパイラル渦が多く形成され、これらの渦がクラスターを形成してエネルギーのカスケードが起きる事を示し、強制一様等方乱流においても同様な形成が起きる事を示した。次に、スパイラル渦形成に対する粘弾性効果を、一様等方乱流と円管内乱流において、高分子応力は非affine性を考慮した構成方程式により与えるDNSにより検証した。法線応力差の正確な算出法を新たに開発して高分子の分布領域を特定し、スパイラル渦形成の抑制と乱流抵抗低減機構を明らかにし、非平衡スペクトルに対する非affine粘弾性効果を示した。

## 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7件)

- ① K. Horiuti and T. Ozawa, Multi-mode stretched spiral vortex and nonequilibrium energy spectrum in

homogeneous shear flow turbulence. *Physics of Fluids* 23, 035107 (2011), 査読有.

- ② K. Horiuti and K. Matsumoto, Normal stress difference and drag reduction mechanism in Johnson-Segalman viscoelastic turbulence. *Bulletin of the American Physical Society* 55, 396 (2010), 査読無.
- ③ 松本 一真, 堀内 潔, 粘弾性法線応力差による乱流抵抗低減機構の解明. 日本流体力学会誌「ながれ」別冊 229, 278 (2010), 査読無.
- ④ I. Bermojo-Moreno, D.I. Pullin, K. Horiuti, Geometry of Enstrophy and Dissipation, Grid Resolution Effects and Proximity Issues in Turbulence. *J. Fluid Mech.* 620, pp.121-166 (2009), 査読有.
- ⑤ K. Horiuti, Y. Tsuji and K. Saitou, Extraction of the non-equilibrium energy spectrum in high Reynolds number turbulence. in *Advances in Turbulence XII*, Springer Proceedings in Physics, Ed. by B. Eckhardt, Springer, pp.705-708 (2009), 査読有.
- ⑥ K. Horiuti, and K. Saitou, Energy flux in non-equilibrium energy spectra in steady turbulence. *Bulletin of the American Physical Society* 54, 143 (2009), 査読無.
- ⑦ K. Horiuti and T. Fujisawa, The Multi Mode Stretched Spiral Vortex in Homogeneous Isotropic Turbulence. *J. Fluid Mech.* 595, pp. 341-366 (2008), 査読有.

[学会発表] (計 11 件)

- ① K. Horiuti, Energy cascade in multi-mode stretched spiral vortices, 6th IMS Turbulence Workshop (Invited), 2010 年 7 月 14 日, London, Imperial College, UK (2010).
- ② 松本 一真, 堀内 潔, 粘弾性法線応力差による乱流抵抗低減機構の解明, 日本流体力学会年会 2010, 2010 年 9 月 11 日, 北海道札幌市 (2010).
- ③ 堀内 潔, 多重モードSpiral vortexと非平衡エネルギースペクトルの抽出, 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」(招待講演), 2010 年 11 月 12 日, 九州大学応用力学研究所 (2010).
- ④ K. Horiuti and K. Matsumoto, Normal stress difference and drag reduction

mechanism in Johnson-Segalman viscoelastic turbulence, The 63rd Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics, 2010 年 11 月 23 日, Long Beach, California, U.S.A. (2010).

- ⑤ 川村康太, 堀内潔, 非平衡エネルギースペクトルによる 1 方程式 S G S モデルの検証, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, 2009 年 12 月 16 日, 仙台市, 仙台市民会館
- ⑥ 鈴木剛, 堀内潔, 円管内乱流における非アファイン粘弾性効果, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, 2009 年 12 月 16 日, 仙台市, 仙台市民会館
- ⑦ K. Horiuti and K. Saitou, Energy flux in non-equilibrium energy spectra in steady turbulence, The 62nd Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics, 2009 年 11 月 23 日, Minneapolis, Minnesota, U.S.A.
- ⑧ K. Horiuti, T. Fujisawa and K. Saitou, Extraction of the hierarchical energy spectrum in forced turbulence. 12<sup>th</sup> EUROMECH European Turbulence, 2009 年 9 月 8 日, Philipps-Universität Marburg, Germany.
- ⑨ 齋藤憲作, 堀内潔, Triad interaction による階層的エネルギー伝達機構の解明, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, 2008 年 12 月 17 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- ⑩ K. Horiuti and K. Saitou, Turbulence energy transfer associated with hierarchical energy spectra, The 61st Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics, 2008 年 11 月 24 日, San Antonio, Texas, U.S.A
- ⑪ K. Horiuti, T. Fujisawa and K. Saitou, Extraction of the hierarchical energy spectrum in forced turbulence, Workshop 'Inertial-Range Dynamics and Mixing' 2008 年 9 月 30 日, Isaac Newton Institute, Cambridge University, U.K.

[図書] (計 1 件)

- ① 堀内 潔 他, 培風館 (株), 乱れと流れ (分担, 第 4 章 LES の乱流モデルと粘弾性流体), 2008 年.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀内 潔 (HORIUTI KIYOSI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科  
・准教授  
研究者番号：10173626