

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22540386

研究課題名(和文)空間的住み分けをし空間的な自己相似性を持つ多スケール乱流への力学系的アプローチ

研究課題名(英文) Dynamical systems approach for spatially segregated multi-scale turbulence with spatial self-similarity

研究代表者

藤 定義 (Sadayoshi, Toh)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10217458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：空間的に住み分けをする乱流状態を動的に記述するために、支配方程式に着目する空間領域の外包領域に選択的に減衰効果を及ぼすフィルターを導入するフィルター法を開発した。対応する空間局在解を求めるニュートン法に振幅をパラメータとするフィルター法を1次元モデル方程式に実装し、局在解を得た。定常進行孤立波をもつ系に対しては、振幅値を0とする極限で特異性を生じるが、その除去方法を開発した。

2次元エネルギー逆カスケード系において、ランダム外力による局在渦構造の形成によってエネルギーの非局所的な輸送が生じ普遍性を破ることを示した。

研究成果の概要(英文)：To dynamically describe spatially segregated turbulence, we developed a damping filter method: To the governing equation we add the filter which damps out fluctuations in the external region of the focused spatial region where the turbulence is sustained. To obtain the corresponding exact solution, we have applied Newton method with the damping filter to one dimensional model equation and succeeded to get spatially localized solutions. Dealing with traveling solitary waves, we found that some singularities appear in the limit that the amplitude of the filter goes to zero and we proposed a method to remove the singularity.

We showed that in the 2D inverse energy cascade turbulence, spatially localized vortices produced by a random forcing induce non-local energy transfer and this nonlocal transfer breaks universality of energy cascade.

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：数理物理・物性基礎

キーワード：乱流 局在構造 多重スケール 素過程 輸送現象

1. 研究開始当初の背景

乱流は流体の乱れた運動で、流体が係わる多くの物理現象において、ダイナミクスを扱う場合に必然的に出現する。この意味で乱流は普遍性を持つ。

極めて発達した乱流の小スケールの揺らぎは、コルモゴロフ流の自己相似性を持ち統計的に普遍的である。一方、それらを内包する大きなスケールにおいては乱流自身が個別性を示し、個別的な取り扱いが必要となる。加えて、系の振る舞いが空間的に非一様である場合、現れる乱流も空間の部分において異なり、これらの空間領域が相互作用を行う場とみなすことができる場合もある。

このような乱流が占める領域に応じて異なる特性を示すもっとも基本的な流れとして、壁乱流が取り扱われてきた。

発達した壁乱流では、壁近傍の粘性が支配的な領域で乱流乱れが生成される一方で、エネルギーの多くは壁から離れた外部領域が担う2種類の異なるスケールからなることが知られている。このような乱流を、空間的棲み分けをする多スケールの乱流、と呼ぶ。

乱流遷移が起きる場合には、乱流斑やパフと呼ばれる空間的に局在した乱流状態が存在することが知られている。

乱流の理解や記述には、統計理論を用いて乱れを縮約する処方箋が一般的である。しかし、空間的な棲み分けや多スケールの共存が起きる場合、統計的取扱いは必ずしも有効ではない。

壁乱流においては、壁近傍の乱流生成機構が乱流アトラクター中に埋め込まれた厳密解によって記述されることがあきらかになった。更に、亜臨界な乱流遷移が、解空間における多重解や分岐現象として理解できることが明らかになりつつあった。

このような乱流に埋め込まれた厳密解や解の位相空間の大域的な構造の情報に基づく乱流の理解を力学系的なアプローチと呼ぶ。

実際の乱流においては、空間領域を局所的に占める乱流状態の内部に、更に秩序構造が存在し、乱流輸送や乱れ生成の素過程や構成要素とみなされる場合もある。例えば、壁乱流の壁近傍層には縦渦やストリークが存在し、これらには対応するナビエ・ストークス方程式の厳密解が存在しているが、空間領域が小さい場合、1個の厳密解が乱流全体を記述する。一様等方乱流においても、空間的に局在した秩序渦構造が存在している。いずれにせよ、これらの秩序構造は動力学的な記述が可能であり、乱流の位相空間を記述する構成要素となる可能性がある。

乱流が空間的に局在している場合及び乱流中の局在秩序構造の両者に対して、総合的に力学系的に理解することが期待されている。

十分発達した壁乱流では、上記の2つの異なるスケールの乱流状態が空間的な棲み分

けを行うだけでなく、接合領域においていずれのスケールとは異なる空間的な自己相似性を示す、対数則領域が形成される。

これは、一様等方乱流における、スケール空間に形成される慣性領域に対応するものである。慣性領域が、渦の分裂過程として模式化される生き生きとしたいわゆるリチャードソン描像で理解されるが、対数則層におけるコンセンサスの得られた模式的な描像は未だない。本研究で対象とする、空間的に局在した解が、そのような素過程となることを期待している。

2. 研究の目的

本研究においては、空間的な棲み分けをする多スケールの乱流場を、統計理論を直接用いることなく、成因や維持機構をダイナミクスから理解し、乱流の振る舞いを記述することを目的とする。

とりわけ、壁乱流に見られるような空間的に分離した異なる特徴的なスケールにより支配される乱流領域を、それぞれ動力学的に独立に維持されるか否かを検証することを試みる。更に、十分発達した高レイノルズ数の流れにおいて、対数則層に対応する、空間的に自己相似的な解が存在することを検証し、その解が運動量の輸送過程の素過程としての役割について検討することも目的とする。

可能であれば、系全体の記述の縮約として棲み分けした乱流場を用いることが期待できる。このような局在した乱流場の記述の基礎付けとして、厳密解や近似解を用い、系全体の振る舞いを位相空間での大域的な構造として理解する力学系のアプローチを試みる。

更に、乱流中でのエネルギーや物質の輸送現象に対して、局在渦構造などの解を用いて素過程や異常な輸送過程を記述することを試みることを目的とする。

3. 研究の方法

空間的に棲み分けをする乱流場を選択的に取り出すために、着目する特定の領域にダイナミクスを限定するフィルター法の開発を行う。空間的なフィルターは、目的の空間領域を包含する領域以外でダイナミクスを減衰させるように基礎方程式に加える。数値的な厳密解を求める場合には、このフィルター振幅をパラメータとするニュートン法を開発する。発達した乱流を対象とするため、通常モード展開では計算資源が不足する。この欠点を補うために、クリロフ部分空間法を用いる。

空間的に非一様な系におけるエネルギーや物質の輸送を記述するために、素過程として空間的に局在した解の役割を調べる。

4. 研究成果

フィルター法をニュートン法に適用する場合、フィルターを導入したために解の自由度が増え、フィルター振幅を0にする極限において特異性が生じる。この特異性を回避するための処方箋を開発するために、双安定な系のモデルとして、1次元のスィフト・ホーヘンベルグ方程式を、空間的に局在した定常進行波を持つ系のモデルとして、1次元の蔵本・シバシンスキー方程式を、それぞれ用いた。

双安定系においては、振幅が負になる経路を用いることで、負の振幅による乱れの励起を介してオリジナルの系では接続していない解を結びつけることが可能であること示した。また、孤立波タイプの進行波では、特異性の由来が振幅0の極限で消える孤立波に対応するホモクリニック軌道の固定点の固有ベクトル方向成分にあることを明らかにし、除去するための付加条件を提案した。当初の目的であった壁乱流系への応用にむけた処方箋の開発は達成できた。

発達したチャンネル乱流において、エッジステートと呼ばれる乱流アトラクターの境界に外部スケールに支配され、内層領域が層流状態にある定常進行波解や周期解、更には乱流状態を見出した。これらの解は、発達したチャンネル乱流では、壁近傍の乱れ生成過程と外層での大規模な乱流が近似的にも力学系的に独立したものであることを示唆するもので、研究目的が適切であることを示す結果である。更に比較的高いレイノルズ数において、外層に相当する領域にフィルターを設定したシミュレーションでは、安定な定常進行波解が存在することを確認した。これらの解を初期値として、ニュートン法を用いた解の追跡を行い、フィルター振幅がほぼ0になる点まで解が存在することを確認している。残念ながら、振幅を0とするまでに至ってはいない。この原因として、振幅0近傍にながしかの特異性が存在することが考えられるが、確認及びその回避方法に対する知見を得るために、上記一次元モデル系に対する取り組みを行った。得られた結果によれば、チャンネル乱流へのフィルター法の適用の可能性示唆しており、更なるチャンネル乱流場の理解や多重スケール・多重物理系への応用が期待される。

乱流の輸送現象における素過程としての局在構造の役割の解明のために、2次元エネルギー逆輸送乱流における、エネルギー輸送の普遍性の検証を行った。コルモゴロフ描写のカスケードによるエネルギーのスケール間輸送では、慣性領域においてはスケール間の局所的な相互作用による局所的な輸送が素過程となっており、外力や散逸機構には依存しない普遍性を持つと考えられていた。しかしながら、外力によって空間的に局在したスポット渦と呼ばれる渦構造が励起される場合、小スケールでの外力から大スケールへ

の直接的な非局所的な輸送を起こすため普遍性を破ることを明らかにした。この局在渦構造の形成は、通常ランダムな外力によって阻害されると考えられている。しかしながら、渦渡場から与えられる決定論的な外力の場合に形成が阻害されること、更にランダム外力は、外力(エネルギー注入)のスケール(小スケール)と散逸(エネルギー流出)のスケール(大スケール)の比(外部レイノルズ数)が一定値を超えると局在渦の形成が起き、スケールに依存して活発化する、相転移的なパラメータ依存性を示すことを見出した。これらの結果は、乱流のエネルギー輸送過程の普遍性に対する秩序構造の影響を定量的に与えるもので、乱流場による物質の輸送や混合などの解明においても秩序構造を考慮する必要があることを示唆するものである。

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2件)

Toshiki Teramura and Sadayoshi Toh, Damping filter method for obtaining spatially localized solutions, Phys. Rev. E 89, 2014, 052910, 査読有 <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.89.052910>

Atsushi Mizuta, Takeshi Matsumoto, and Sadayoshi Toh, Transition of the scaling law in inverse energy cascade range caused by a nonlocal excitation of coherent structures observed in two-dimensional turbulent fields Phys. Rev. E 88, 2013, 053009 査読有 <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.88.053009>

[学会発表](計5件)

Toshiki Teramura and Sadayoshi Toh, "The connection of differently spatially localized solution revealed by the filtering method", XXIII ICTAM, Aug. 19th-24th 2012, Beijing China.

Atsushi Mizuta, Takeshi Matsumoto and Sadayoshi Toh, "Transition of universality observed in 2D inversed cascade", IUTAM symposium, Mar. 10th-14th 2013, 九州大学

Toshiki Teramura and Sadayoshi Toh, "A method for obtaining traveling wave solution spatially localized in the stream-wise direction" European Turbulence Conference 14, Sep. 1st-4th, 2013, Sep. 1st-4th 2013, ENS de Lyon, France

Sadayoshi Toh, “Coherence in turbulence”, Mathematical Theory of Turbulence via Harmonic Analysis and Computational Fluid Dynamics in 2014, March 3rd-5th 2014, 奈良日航ホテル

Toshiki Teramura and Sadayoshi Toh, “Damping filter method for a spatially localized solution in tow-dimensional channel flow” Euromech Colloquium EC565 on SUBCRITICAL TRANSITION TO TURBULENCE, May 6th-9th 2014, CARGÈSE, Corsica, France

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤定義 (TOH, Sadayoshi)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：10217458

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：