

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03927

研究課題名(和文)大規模構造・波動・渦の共存する非等方性乱流の生成維持機構と遷移域のエネルギー輸送

研究課題名(英文)Driving mechanism of coexistence of large-scale structures, waves and eddies in anisotropic turbulence, and its energy flux in transition wavenumber range

研究代表者

横山 直人 (Yokoyama, Naoto)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：80512730

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：非等方性を持つ流体乱流系が広帯域スペクトルをもつとき、異なる種類の乱流が共存することがある。特に異種乱流の遷移波数領域でのエネルギー輸送に着目し、この共存状態の生成維持機構を定量的に調べた。時間スケールと各エネルギー構成比を用いて、成層乱流の内部重力波と渦が支配的な波数領域を同定した。エネルギー輸送の波数空間における局所性と最小作用の原理に基づき、エネルギーフラックスベクトルを提案し、回転乱流や準地衡流乱流において、このエネルギーフラックスベクトルが弱乱流理論や臨界平衡の予想と一致することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非等方性を持つ多くの流体乱流において、大規模構造・波動・渦が共存することが知られている。これらの間の遷移波数領域のエネルギー輸送は、臨界平衡という定性的な予想はあったが、それを定量的に確認する方法がなかった。本課題では、非等方エネルギーフラックスを定量的に評価する方法として局所エネルギーフラックスベクトルを提案し、準地衡流乱流で臨界平衡を定量的に確認した。このことは、非等方性乱流に共通した未解決問題であった遷移波数領域のエネルギーフラックスを求め、異種乱流の共存状態の生成維持機構を明らかにすることを可能にした。

研究成果の概要(英文)：Different kinds of turbulence coexist in anisotropic turbulence that has broadband spectrum. Driving mechanism of the coexistence is quantitatively investigated especially from the viewpoint of energy transfer in transition wavenumber range. The wavenumber ranges of the internal gravity waves and eddies in stratified turbulence are identified by time scales and proportion of energies. Local energy-flux vector in anisotropic turbulence is proposed based on two ansatzes: net locality and least-action principle. The local energy-flux vectors in rotation turbulence and quasi-geostrophic turbulence successfully show the energy fluxes predicted by the weak turbulence theory and critical balance.

研究分野：流体物理学

キーワード：非等方性乱流 エネルギー輸送 局所エネルギーフラックスベクトル 異種乱流の共存 臨界平衡

1. 研究開始当初の背景

回転乱流、成層乱流、準地衡流乱流、電磁流体乱流などの外力や磁場由来する非等方性を持つ多くの流体乱流系では、大規模構造・波動・渦が共存する。例えば、ニュートリノ輻射が非等方性をもたらす超新星爆発では、フィラメントや泡状などの大規模構造の形成、宇宙重力波の放射、相対的に微細な渦の形成が生じる。また、湯を沸かすような強制熱対流では、循環流、内部重力波、プルームに付随する渦が、それぞれ、大規模構造・波動・渦に対応する。これら三者の共存する非等方性を持つ乱流系は、テーブルトップサイズから宇宙規模まで数多く存在する。

流体乱流の研究は Richardson の渦カスケードのアイデアから 1941 年の Kolmogorov 理論へ発展した。他方、波動乱流では 1966 年に Zakharov が弱非線形性と乱雑位相を仮定し弱乱流理論を構築した。例えば回転乱流では、前者の流体乱流が支配的な高波数領域(図 1 中の KT)において、等方的なエネルギーフラックスであり、慣性波の時間スケールがエネルギー輸送の非線形時間スケールより十分小さい低波数領域(図 1 中の WT)では波動乱流が支配的となる。慣性波の波動乱流では、回転に垂直な波数 k_{\perp} の高波数領域へとエネルギーが輸送され、回転に平行な波数 k_{\parallel} 方向のエネルギー輸送はないと考えられる。

異種乱流間の遷移スケールの中で、波動と渦の間のエネルギー輸送の定性的な conjecture として、critical balance(臨界平衡)理論が知られている。臨界平衡理論の検証は、磁気流体乱流などでエネルギースペクトルの観察によって、波数空間で遷移波数領域が同定されつつあるが、波数空間でエネルギー輸送が描かれたことはない。また、回転乱流の 2 次元構造の形成には、波数空間における非局所相互作用が支配的である可能性が示唆されており、波数空間のエネルギー輸送を定量的に評価することは、大規模構造・波動・渦の共存する乱流の形成を理解する上で重要な役割を果たす。

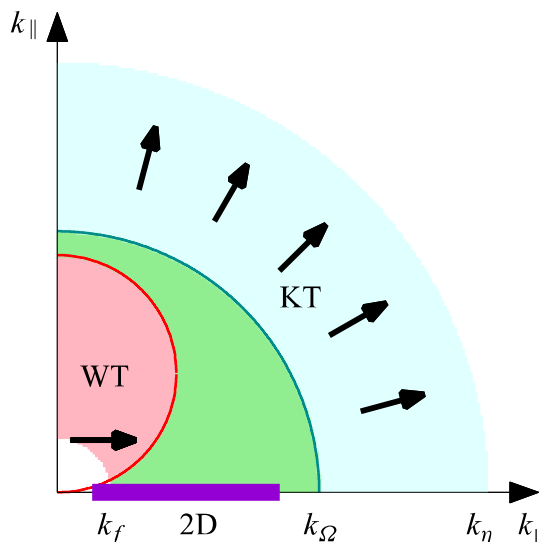


図 1 回転乱流のエネルギーフラックス(模式図)。[1]より。

2. 研究の目的

本研究課題では、非等方性をもち大規模構造・波動・渦が共存する流体乱流系の最も単純な系として回転乱流・成層乱流・準地衡流乱流を対象とし、全波数領域において非等方性を有するエネルギーフラックスを定量的に評価する。これまで非等方性乱流では定量的に評価できなかった波数空間での局所エネルギーフラックスを用いて、遷移波数領域のエネルギーフラックスを示し、臨界平衡理論の予想する線形波の時間スケールと渦の時間スケールが同程度となる波数に沿うエネルギーフラックスが得られるかを検証する。

本研究課題で得られる遷移波数領域のエネルギー輸送によって、異種乱流間のエネルギー輸送が明らかになる。これと比較的理解の進んでいる流体乱流・波動乱流とを合わせて、非等方性乱流におけるエネルギー輸送の全体像を示し、大規模構造・波動・渦の共存状態の生成維持機構を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

回転乱流・成層乱流・準地衡流乱流の大規模かつ長時間の直接数値シミュレーション(DNS)を行い、大規模構造・波動・渦が広帯域に渡って共存する発達した乱流を数値的に作成する。下記のように、実際には、3次元の乱流である回転乱流と成層乱流においてはDNSの規模が十分でなく、大規模構造・波動・渦が十分広帯域に渡る共存状態が得られず、Charney-Hasegawa-Mima方程式に支配される2次元の準地衡流乱流でのみ、十分広帯域に渡る共存状態が得られた。したがって、特に準地衡流乱流において、遷移波数領域でのエネルギーフラックスを定量的に評価し、非等方性乱流における共存状態の生成維持機構を調べた。

それぞれの乱流で得られたDNSデータから、波数間の非線形相互作用による波数ごとのエネルギー輸送率が求められる。しかし、この波数間非線形相互作用は3波相互作用であり、ある波数へのエネルギー輸送に対する他の2つの波数の寄与の分解が一意でない。このため、多くの場合、エネルギーカスケードの描像に基づき、エネルギーフラックスを用いてエネルギー輸送を定量化することが行われる。等方乱流では、エネルギーフラックスとエネルギー変化率はいずれもスカラー量であり、直接数値シミュレーションなどによって得られるエネルギー変化率を積分することで、エネルギーフラックスが得られる。一方で、非等方性乱流におけるエネルギーフラ

ックスは方向を持ったベクトル量で表される。非等方性乱流では、未知のベクトル量であるエネルギーフラックスが既知のスカラー量であるエネルギー輸送率より大きな自由度を持つため、仮定を付加することなしにエネルギー輸送率からエネルギーフラックスを一意に定めることはできない。

本研究課題では、DNS で得られるエネルギー輸送率からエネルギーフラックスを一意に定めるために、エネルギー輸送の局所性と効率性を仮定し、一般化(Moore-Penrose)逆行列を用いるエネルギーフラックスベクトルの同定法を確立した。一般化逆行列は、最小作用の原理に基づき、エネルギー保存則を満足するエネルギーフラックスベクトルの中で最小のノルムを持つものを選ぶ。その際、ノルム最小というエネルギー輸送の効率性とエネルギーフラックスベクトルの非発散条件が同等である。この方法を回転乱流と準地衡流乱流に適用し、非等方エネルギーフラックスベクトルを定量的に得る。

4. 研究成果

非等方性乱流において、大規模構造・波動・渦の共存する系の波数空間でのエネルギー輸送機

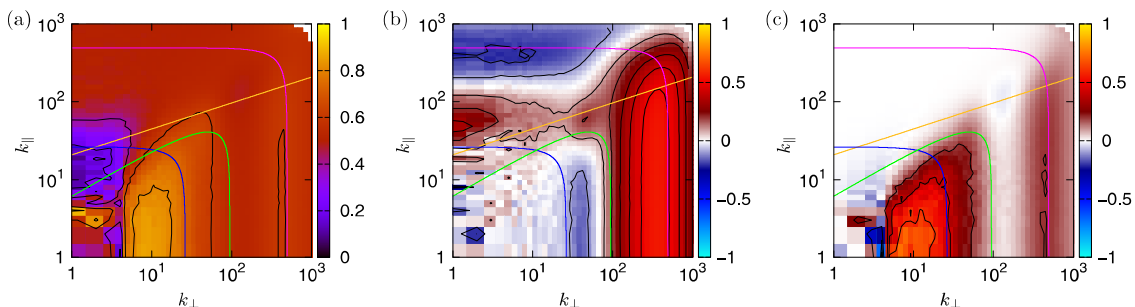


図 2 成層乱流における(a)全運動エネルギーに占める波動運動エネルギーの割合、(b)波動運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの相対比、(c)運動エネルギーに占める偏向成分の割合。緑線と橙線は線形と非線形の時間スケールの比が 1/3 となる波数であり、緑線には線形分散関係に標準的(3 次元的)な内部重力波の分散関係を用い、橙線には、線形分散関係において水平波長が鉛直波長よりも十分長い(2 次元的)とした近似を行った。また、青線と桃線は、それぞれ、浮力波数と Ozmidov 波数を表す。[2]より。

構を明らかにするために、これらの共存状態において、異なる乱流の境界となる波数を定量的に定める必要がある。成層乱流において、波数のもつエネルギーの内訳を、それぞれの乱流を構成する要素もつ時間スケールの比によって説明した。内部重力波の時間周期と渦のもつ時間スケールの比が 1/3 より小さい波数領域で、内部重力波のもつエネルギーが渦のもつエネルギーよりも十分大きくなった。また、同じ波数領域で、波動運動エネルギーとポテンシャルエネルギーが概ね等しく弱乱流理論が適用可能であることと、運動エネルギーに占める偏向成分の割合が大きく非等方性が強いことを示した。これらによって、内部重力波の時間周期と渦のもつ時間スケールの比が 1/3 より小さい波数領域で、内部重力波が支配的であることを示した。(図 2)一方、渦は Ozmidov 波数よりも高波数領域で支配的であるので、内部重力波の時間周期と渦のもつ時間スケールの比が 1/3 となる波数と Ozmidov 波数の間の波数領域が、内部重力波と渦の遷移波数領域である。

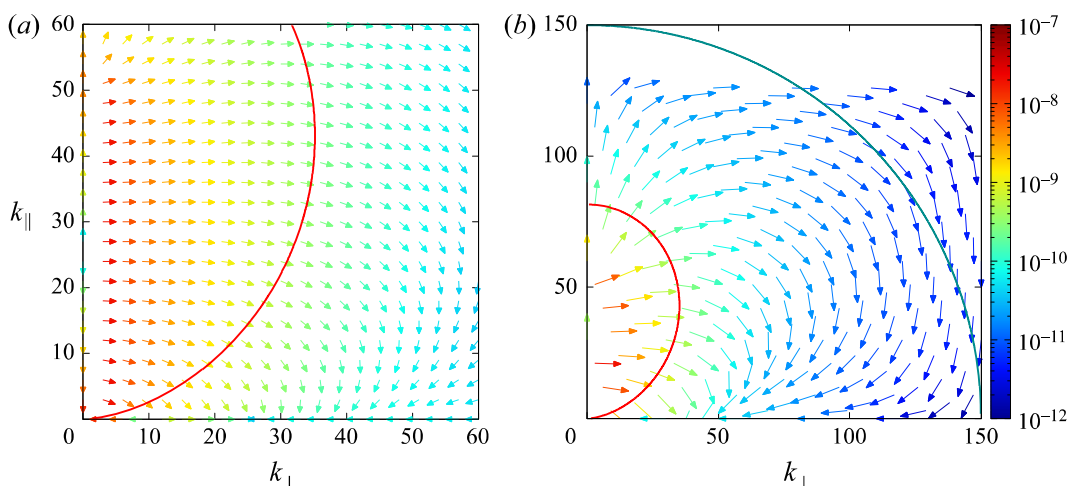


図 3 回転乱流におけるエネルギーフラックスベクトル。(a)弱乱流領域。(b)全波数領域。赤線と青線は、それぞれ、線形と非線形の時間スケールの比が 1/3 となる波数と Zeman 波数を表す。[1]より。

回転乱流の慣性波乱流において、本研究課題で提案する局所エネルギーフラックスベクトルを適用した。回転乱流においては、慣性波乱流の共鳴相互作用によるエネルギー輸送の指向性が非常に高いため、得られたエネルギーフラックスと弱乱流理論と比較することが容易になる。弱乱流理論によって予測される慣性波乱流のエネルギースペクトルの冪則が観測される波数領域において、系の回転軸方向と垂直な方向のエネルギーフラックスベクトルが得られ、弱乱流理論の予測と一致する結果を示した。(図 3)また、局所エネルギーフラックスベクトルが、これまで非等方性乱流で用いられてきた積分エネルギーフラックスと一致することや、等方性乱流での放射状のエネルギーフラックスベクトルを示すことで、既存のエネルギーフラックスのもつ性質と矛盾しないことを確認した。

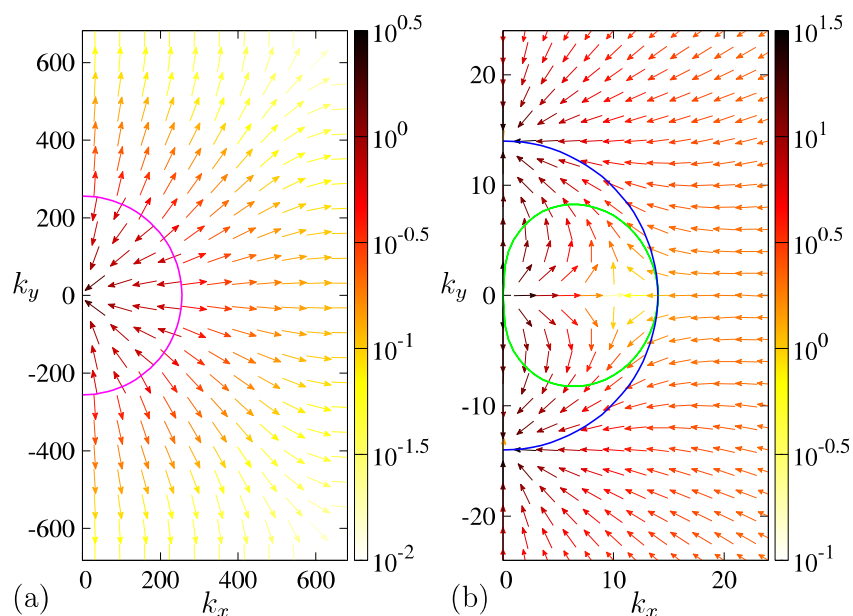


図 4 準地衡流乱流におけるエネルギーフラックス。(b)は (a)の低波数領域の拡大図。緑線は、Rossby 周期と渦回転時間が同程度の波数を表す。青線と桃線は、それぞれ、Rhines 波数と外力波数を表す。[3]より。

成層乱流や回転乱流の 3 次元乱流の計算規模が小さく十分なモード数が確保できておらず、異種乱流間のエネルギー輸送を定量的に評価することは難しい。このため、広帯域にわたる直接数値シミュレーション計算が可能な準地衡流乱流の 2 次元モデルの一つである Charney-Hasegawa-Mima 方程式を用いて、2 次元非等方性乱流モデルで異種乱流間のエネルギー輸送を定量的に評価した。大規模構造・波動・渦が十分広帯域に存在し、かつ、これらの遷移波数領域が同定可能な大規模 DNS を行い、異種乱流共存状態における種々の保存量に対応するフラックスを得た。得られたエネルギーフラックスは、遷移波数に沿ってエネルギーが輸送されるとする臨界平衡の予想と一致した。また、このフラックスは、準地衡流乱流で観測される大規模構造である帯状流の形成を説明することが可能である。(図 4)

<引用文献>

- [1] N. Yokoyama, M. Takaoka, Energy-flux vector in anisotropic turbulence: application to rotating turbulence, *J. Fluid Mech.*, 908, 2021, A17.
- [2] N. Yokoyama, M. Takaoka, Energy-based analysis and anisotropic spectral distribution of internal gravity waves in strongly stratified turbulence, *Phys. Rev. Fluids*, 4, 2019, 104602.
- [3] M. Takaoka, N. Yokoyama, E. Sasaki, Local-flux vectors of conserved quantities in wavenumber space: Anisotropic structures in Charney-Hasegawa-Mima turbulence, *Phys. Rev. Fluids*, 7, 2022, L012601.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takaoka Masanori, Yokoyama Naoto, Sasaki Eiichi	4. 巻 7
2. 論文標題 Local-flux vectors of conserved quantities in wavenumber space: Anisotropic structures in Charney-Hasegawa-Mima turbulence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 L012601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.7.L012601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yokoyama Naoto, Takaoka Masanori	4. 巻 908
2. 論文標題 Energy-flux vector in anisotropic turbulence: application to rotating turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2020.860	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yokoyama Naoto, Takaoka Masanori	4. 巻 4
2. 論文標題 Energy-based analysis and anisotropic spectral distribution of internal gravity waves in strongly stratified turbulence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 104602
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.4.104602	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 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 4件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 高岡正憲, 横山直人, 佐々木英一
2. 発表標題 波数空間で局在した初期条件を用いた保存量の流れの同定
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横山直人
2. 発表標題 波動乱流の共鳴相互作用と非共鳴相互作用
3. 学会等名 海洋波および大気海洋相互作用に関するワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Takaoka, N. Yokoyama, E. Sasaki
2. 発表標題 Comparison between time-evolution of centroids and local-flux vectors for localized initial conditions in wavenumber space
3. 学会等名 The 74th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横山直人
2. 発表標題 強回転乱流の局所非等方エネルギーフラックス
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高岡正憲, 横山直人, 佐々木英一
2. 発表標題 波数空間における局所フラックスベクトルと“重心”の時間発展の比較
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoto Yokoyama, Masanori Takaoka
2. 発表標題 Energy-flux Vectors of Inertial Waves in Strongly Rotating Turbulence
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高岡正憲
2. 発表標題 2次元および3次元の回転乱流における保存量の波数空間局所流れ
3. 学会等名 同志社大学エネルギー変換研究センター研究成果報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高岡正憲
2. 発表標題 2次元および3次元の非等方乱流における保存量の波数空間局所流れ
3. 学会等名 RIMS共同研究(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高岡正憲、横山直人、佐々木英一
2. 発表標題 CHM乱流におけるトリプルカスケードのフラックスベクトル場
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高岡正憲、横山直人、佐々木英一
2. 発表標題 2次元乱流におけるエネルギーフラックスベクトルに対する粘性項の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高岡正憲、横山直人、佐々木英一
2. 発表標題 2次元回転乱流におけるエネルギーの流れ
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横山直人、高岡正憲
2. 発表標題 回転乱流におけるエネルギー輸送と等方化機構
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masanori Takaoka, Naoto Yokoyama
2. 発表標題 Energy flux vectors in two-dimensional anisotropic turbulence
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the American Physical Society/Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Yokoyama, Masanori Takaoka
2. 発表標題 Energy fluxes in anisotropic turbulence
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山直人, 高岡正憲
2. 発表標題 一般化逆行列を用いた回転乱流におけるエネルギーフラックス方向の同定法
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 高岡正憲, 横山直人, 佐々木英一
2. 発表標題 2次元非等方乱流におけるエネルギーフラックス場
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Yokoyama, M. Takaoka
2. 発表標題 Energy flux vectors in anisotropic turbulence
3. 学会等名 17th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Takaoka, N. Yokoyama, E. Sasaki
2. 発表標題 Energy flux vector in a shell model of 2D rotating turbulence
3. 学会等名 17th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Yokoyama, M. Takaoka
2. 発表標題 Energy budget in stratified turbulence
3. 学会等名 京都大学数理解析研究所共同研究
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山直人
2. 発表標題 成層乱流における異種乱流の共存
3. 学会等名 京都大学数理解析研究所共同研究 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山直人, 高岡正憲
2. 発表標題 非等方乱流におけるエネルギーフラックスの方向分布
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 N. Yokoyama, M. Takaoka
2. 発表標題 Directional energy flux in anisotropic turbulence
3. 学会等名 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高岡正憲, 横山直人, 佐々木英一
2. 発表標題 2次元乱流のモデル方程式におけるエネルギーフラックススペクトル
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山直人, 高岡正憲
2. 発表標題 非等方乱流におけるエネルギーフラックス方向の同定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019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
研究 分担者	高岡 正憲 (Takaoka Masanori) (20236186)	同志社大学・理工学部・教授 (34310)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------