

令和 6 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：2021～2023

課題番号：21K03883

研究課題名（和文）強弱乱流の遷移領域での実空間および波数空間の局所非等方エネルギー輸送機構の解明

研究課題名（英文）Elucidation of mechanism of local anisotropic energy transfer in transitional region between weak and strong turbulence in real and wavenumber spaces

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：我々は先行研究にて、非等方性を持つ異種乱流の共存状態におけるエネルギーフラックスを同定するために、エネルギー輸送の波数空間における局所性と効率性を仮定しエネルギーフラックスベクトルを提案した。本研究課題では、準地衡流乱流において、このフラックスベクトルは異種乱流共存状態で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することを定量的に示した。また、成層乱流においては、弱乱流理論によって共鳴相互作用の非等方かつ非局所の極限で誘導拡散によるエネルギー輸送が卓越すること知られているが、我々の提案手法は局所性を仮定するにもかかわらずこれと矛盾しないエネルギーフラックスが得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

先行研究にて提案された非等方乱流のエネルギーフラックスベクトルの同定手法を準地衡流乱流と成層乱流に適用し、成層乱流、準地衡流乱流、先行研究で行った回転乱流の3つの代表的な非等方乱流系のいずれにおいても弱乱流理論や臨界平衡仮説と整合するエネルギーフラックスを定量的に得ることができた。特に成層乱流において弱乱流理論によって共鳴相互作用の非等方かつ非局所の極限で誘導拡散によるエネルギー輸送が卓越すること知られているが、局所性を仮定したにもかかわらずこれと矛盾しないエネルギーフラックスが得られたことは、局所エネルギーフラックスの有用性を強く示唆している。

研究成果の概要（英文）：In previous studies, to identify the energy flux in coexistence of multiple kinds of turbulence, energy-flux vector in anisotropic turbulence was proposed by assuming the locality and efficiency of the energy transfer in the wavenumber space. In two-dimensional quasi-geostrophic turbulence, the local flux agrees with the critical balance, which conjectures that the energy is transferred along the separating wavenumbers in the coexistence of weak and strong turbulence. It is found that the local energy flux in stratified turbulence is consistent with the induced diffusion which is obtained in the limit of the anisotropy and the nonlocality in the weak turbulence theory, though the locality is assumed in our method.

研究分野：流体力学

キーワード：非等方乱流 強弱乱流 非等方エネルギー輸送 準地衡流乱流 成層乱流 臨界平衡

### 1. 研究開始当初の背景

非等方性を持つ乱流では、系を特徴的づける方向を持つ大規模構造、非等方性を持つ大スケールの波動、系の非等方性の影響を受けにくい小スケールの渦を構成要素とする、異なる種類の乱流が共存する。これらの異種乱流の共存は準地衡流乱流、成層乱流、回転乱流、電磁流体乱流などの外力や磁場によって非等方性を持つ多くの流体乱流系で見られる。異種乱流間で互いにエネルギーを輸送することによって、これらの共存構造は維持される。

例えば、成層乱流におけるこれらの支配的な乱流の波数空間分布は、図1に示すようになっていていると考えられる。内部重力波の弱乱流領域(図中 WT)でのエネルギー輸送は、波動間のエネルギー輸送は、Zakharov が構築した弱乱流理論によって記述される。Kolmogorov 乱流(図中 KT)では、渦間のエネルギー輸送は、渦のエネルギーが大きな渦から小さな渦へとカスケードするという Kolmogorov 理論によって記述され、次元解析によって各スケールでのスペクトル強度が得られる。このように同種の乱流内のエネルギー輸送は比較的よく理解されている。

一方で、非等方乱流の異種乱流の共存状態の生成維持機構全体を理解するために、異種乱流間のエネルギー輸送を記述する必要があるが、これらの異種乱流の遷移領域では、各乱流の時間スケールが同程度となる遷移領域に沿ってエネルギーが輸送されるという、critical balance (臨界平衡)と呼ばれる定性的な予想がある。臨界平衡は、電磁流体乱流、回転乱流、成層乱流など多くの非等方乱流において、数值的、実験的にその検証がなされているが、スペクトル形状の議論に留まり、その議論の根幹である波数空間でのエネルギーフラックスを直接観測したものは、我々の知りうる限り存在しない。

我々は先行研究において、遷移領域を含む非等方乱流の非等方なエネルギー輸送を定量的に評価するために、エネルギー輸送の波数空間局所性と効率性の 2 つの仮説の下にエネルギーフラックスのベクトル表現を提案した。このエネルギーフラックスベクトルは、回転乱流の慣性波からなる弱乱流において弱乱流理論と整合することを確認した。その仮説の妥当性は明らかではなく、非等方乱流一般で弱乱流理論などの既存の理論との比較・検証がなされるべきものであった。

### 2. 研究の目的

臨界平衡は異種乱流の時間スケールが同程度の波数領域をエネルギーが輸送されるという素朴なアイデアであるが、その定量的検証は難しい。これは、非等方乱流における波数空間でのエネルギーフラックスをベクトル量として一意に決定することができないためである。我々は先行研究において、エネルギー輸送が波数空間の局所的なエネルギー保存則を満足するというエネルギー輸送の波数空間局所性と、このエネルギー保存則を満足するベクトルのなかでノルムが最小、すなわち渦なしベクトルを選択するというエネルギー輸送の効率性の 2 つの仮説の下に、エネルギーフラックスベクトルを一意に決定する方法を提案した。このエネルギーフラックスベクトルを用いて、非等方乱流の波数空間内のエネルギーフラックスを定量的に検証することが本研究課題の目的である。同時に、エネルギーフラックスベクトルを一意に決定するためになされた 2 つの仮説の妥当性を評価することも研究目的である。これらによって、非等方乱流の異種乱流の共存状態の生成維持機構全体を理解することが可能となる。

### 3. 研究の方法

2 次元準地衡流乱流において、大規模構造である帯状流、Rossby 波乱流、Kolmogorov 乱流が波数空間の広帯域に渡って共存する大規模直接数値計算(DNS)を行った。DNS で得られたエネルギー輸送率から波数空間の局所エネルギーフラックスベクトルが定量的に得られた。得られたエネルギーフラックスベクトルを、Rossby 波乱流の支配的な波数領域において弱乱流理論と比較した。同様に、Kolmogorov 乱流の支配的な高波数領域から、Kolmogorov 乱流と Rossby 波乱流間の遷移波数領域を経て、帯状流に至る経路におけるエネルギーフラックスベクトルを、既存の帯状流形成機構と比較した。

成層乱流においても、大規模構造である鉛直剪断一様流、内部重力波乱流、Kolmogorov 乱流が広帯域に渡って共存する DNS を行う予定であったが、これらが広帯域に渡る共存状態では、計算時間不足のため統計的に定常状態に達しなかった。このため、当初予定していた、Kármán-

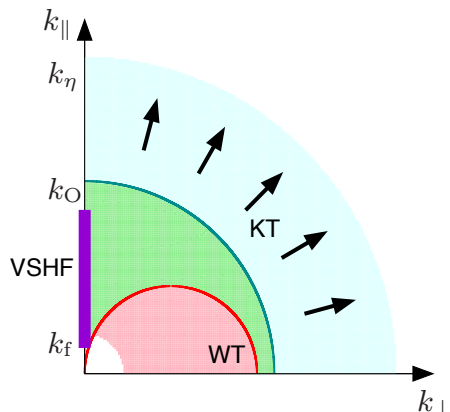


図1 成層乱流における弱乱流 (WT)、Kolmogorov 乱流 (KT)、鉛直剪断水平流 (VSHF) および遷移領域の波数分布。[3]より。

Howarth-Monin 方程式に基づく厳密な実空間のエネルギーフラックスと2つの強い仮説の下に決定される波数空間局所エネルギーフラックスを比較し、局所エネルギーフラックスの妥当性を検証することは断念せざるを得なかった。一方で、内部重力波乱流では非等方の極限で誘導拡散と呼ばれる非局所相互作用が支配的になることが知られており、局所エネルギーフラックスベクトルと非局所誘導拡散のエネルギーフラックスを比較した。

#### 4. 研究成果

準地衡流乱流中に現れる非等方乱流の生成維持機構とエネルギー輸送の関係を、波数平面での局所フラックスベクトルを用いて明らかにした ([1, 2])。

図2に、準地衡流乱流の統計的定常状態において時間平均した2次元エネルギースペクトルを示す。波数が  $|k| \approx 256$  の半円は外力によるエネルギー注入域である(図2左)。線形特性時間と非線形特性時間とがバランスする波数の内部でエネルギーが小さくなっている領域が Rossby 波乱流の波数領域であり、Kolmogorov 乱流が高波数領域に存在する。また、線形特性時間と非線形特性時間とがバランスする波数は ( $k_x < 0$  領域も含めて) ダンベル型をしている(図2右)。このダンベル型の波数領域と支配方程式の線形項と非線形項とをバランスする波数領域  $|k| \approx 10$  の近傍が弱乱流と Kolmogorov 乱流の遷移領域となる。さらに、エネルギースペクトルは Rhines 波数  $|k_y| \approx 10$  にピークを持ち、これが実空間における帯状流に対応する。

準地衡流乱流はエネルギーとエンストロフィの2つの2次の保存量を持ち、これらの局所フラックスベクトルをそれぞれ図3および図4に示す。図3左は、外力によって注入されたエネルギーが、外力の波数を示す半円を分水嶺として高波数側と低波数側にほぼ等方的にエネルギーが流出していることを示している。低波数領域に逆カスケードしたエネルギーは、線形項と非線形項とをバランスする波数まで到達すると非等方性の寄与が大きくなり向きを変え、線形項と非線形項とをバランスする波数に沿って Rhines 波数  $|k_y| \approx 10$  に流入する。このことは、Rossby 波の周期より遅い特性時間を持つ渦構造はエネルギーを保持することができず、帯状流成分へエネルギー注入が生じることを示唆している。

一方で、エンストロフィの局所フラックスベクトルは、低波数領域も含めて全波数領域に渡って概ね等方的である(図4)。エネルギーとエンストロフィは同じ2次の保存量でありながら、これらに対する非等方性の寄与の大きさが異なることは興味深い。

[3]において、成層乱流における局所エネルギーフラックスを定量的に示した。成層乱流で得

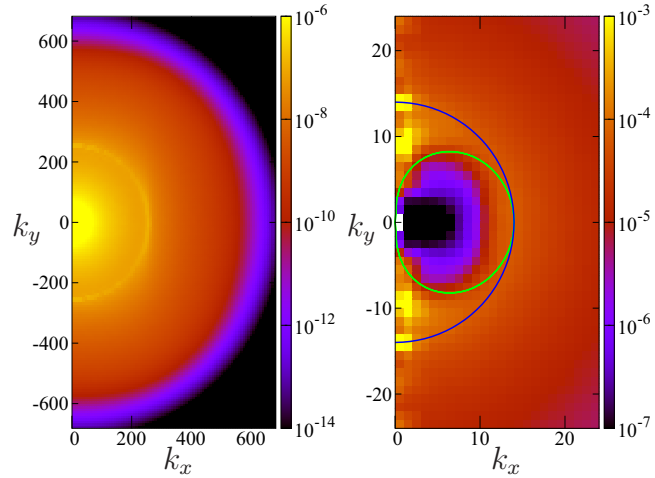


図2 準地衡流乱流のエネルギースペクトル。(左)全波数領域、(右)低波数領域。[1]より。

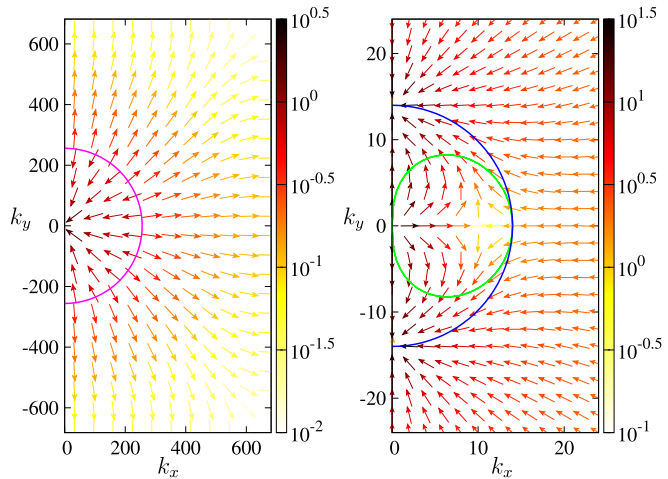


図3 準地衡流乱流の局所エネルギーフラックスベクトル。(左)全波数領域、(右)低波数領域。[1]より。

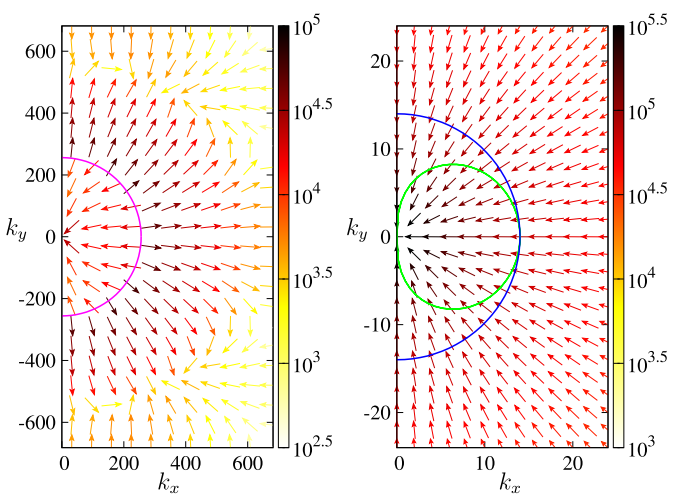


図4 準地衡流乱流の局所エンストロフィフラックスベクトル。(左)全波数領域、(右)低波数領域。[1]より。

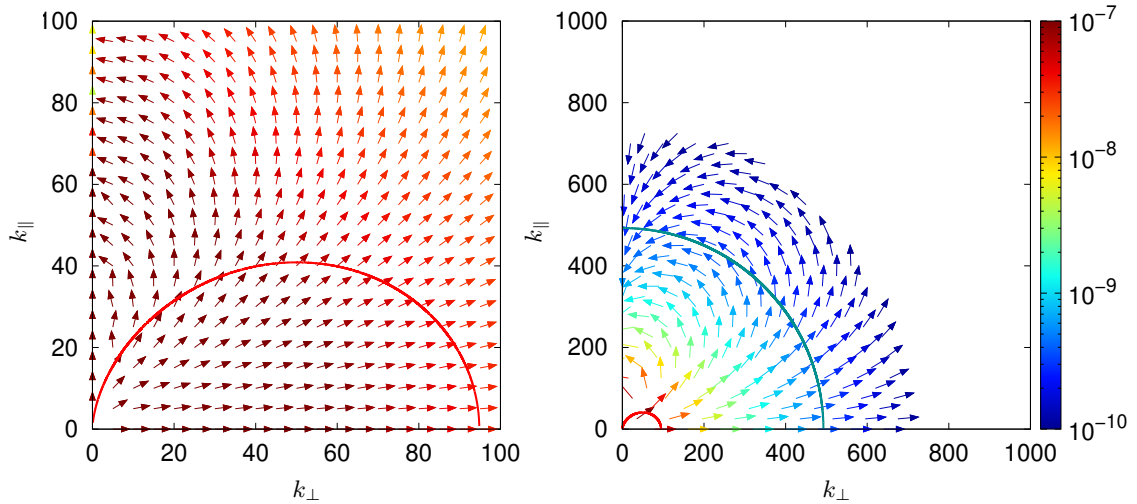


図 5 成層乱流の局所エネルギーフラックススペクトル。(左)低波数領域、(右)全波数領域。  
[3]より。

られた局所エネルギーフラックススペクトルをつなげた曲線(流線)は、内部重力波乱流が支配的な波数領域において、下に凸になっている(図5)。弱乱流理論によると、十分に広帯域の内部重力波乱流のエネルギー輸送では非等方かつ非局所の極限で誘導拡散が支配的であり、エネルギーは高振動数かつ高鉛直波数にエネルギーが輸送されると考えられる。本研究課題で得られた下に凸の局所エネルギーフラックスはこの誘導拡散によるエネルギー輸送と矛盾しない。エネルギー輸送の局所性を仮定して得られた局所エネルギーフラックスベクトルが、非局所的な誘導拡散によるエネルギー輸送と整合することは、エネルギー輸送の局所性の仮説が緩和可能であることを示唆している。一方で、本研究課題の局所エネルギーフラックスでは、臨界平衡の予測する各乱流の時間スケール同程度となる遷移領域に沿うエネルギー輸送は観測されなかった。これは、DNSの規模が依然として小さく、遷移領域にエネルギー散逸領域が形成された(図6)ためと考えられる。

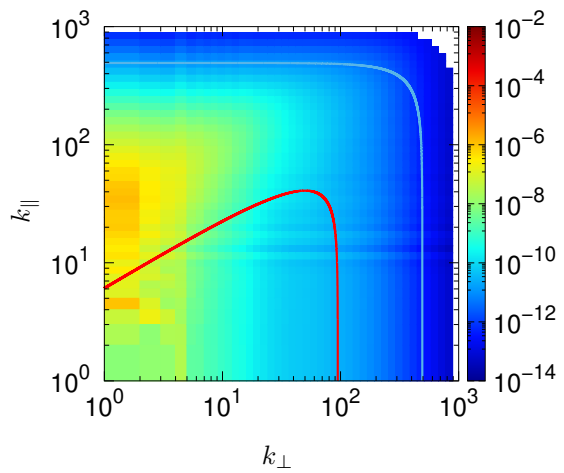


図 6 成層乱流の散逸スペクトル。[3]より。

成層乱流、準地衡流乱流および先行研究で行なった回転乱流の3つの代表的な非等方乱流系のいずれにおいても局所エネルギーフラックスが弱乱流理論の予測と矛盾しないことは、局所エネルギーフラックスの有用性を強く示唆している。2次元乱流である準地衡流乱流では臨界平衡と整合するエネルギーフラックスが得られたが、3次元乱流である成層乱流と回転乱流ではいずれもDNSの規模が不足し臨界平衡と整合するエネルギーフラックスは得られていない。今後は、これらの3次元非等方乱流でより大規模DNSを行い、臨界平衡の定量的に検証し、非等方乱流の生成維持機構を明らかにする。

#### <引用文献>

- [1] 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.
- [2] 高岡正憲, 横山直人, 佐々木英一,  $\beta$  平面乱流における大規模構造と局所フラックスベクトル, プラズマ・核融合学会誌, 99, 2023, 202-206.
- [3] N. Yokoyama, M. Takaoka, Anisotropic energy cascade in strongly stratified turbulence, in preparation.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 高岡正憲、横山直人、佐々木英一	4. 巻 99
2. 論文標題 平面乱流における大規模構造と局所フラックスベクトル	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 202-206
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -

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 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 2件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Naoto Yokoyama
2. 発表標題 Anisotropic energy cascade in strongly stratified turbulence
3. 学会等名 Workshop on Nonlinear Water Waves and Related Topics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoto Yokoyama, Masanori Takaoka
2. 発表標題 Anisotropic energy-flux vector in stratified turbulence
3. 学会等名 18th European Turbulence Conference（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masanori Takaoka, Naoto Yokoyama, Eiichi Sasaki
2. 発表標題 Relation among zonal flow, Rossby radius, and triple cascade in two-dimensional equivalent barotropic vorticity turbulence
3. 学会等名 18th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoto Yokoyama, Masanori Takaoka
2. 発表標題 Local anisotropic energy flux in strongly rotating turbulence
3. 学会等名 28th International Conference on Statistical Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masanori Takaoka, Naoto Yokoyama, Eiichi Sasaki
2. 発表標題 Potential quasi-crystallization and cascade isotropization due to finite Larmor radius in Hasegawa-Mima turbulence
3. 学会等名 28th International Conference on Statistical Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masanori Takaoka, Naoto Yokoyama, Eiichi Sasaki
2. 発表標題 Zonal flows driven by energy and zonestrophy conservations in Charney-Hasegawa-Mima turbulence
3. 学会等名 The 75th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高岡正憲, 横山直人, 佐々木英一
2. 発表標題 ベータ平面乱流における局在スペクトルの時間発展と保存量の波数空間輸送
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Takaoka, N. Yokoyama, E. Sasaki
2. 発表標題 Local Fluxes of Conserved Quantities Started from Localized Initial Spectra in Charney-Hasegawa-Mima Turbulence
3. 学会等名 14th European Fluid Mechanics Conference (国際学会)
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

複合流体力学研究室web site  
<https://sites.google.com/view/ifd/>



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  (Masanori Takaoka)  (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