

平成 30 年 5 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17971

研究課題名(和文) 異方性のある流体乱流におけるエネルギー輸送

研究課題名(英文) Energy transfer in anisotropic hydrodynamic turbulence

研究代表者

横山 直人 (Yokoyama, Naoto)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：80512730

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：回転乱流において系の角速度を変化させたとき、慣性波乱流、3次元的な渦乱流、大規模渦柱が共存する準2次元的で異方性の高い流れ場と、統計的に等方な3次元の流れ場の間で、相異なる角速度で遷移が生じるというヒステリシス現象を見出した。また、安定成層した背景場中の成層乱流では、異方性、波動の卓越性、弱乱流の成立が線形の内部重力波の時間スケールと渦の非線形時間スケールとの比較により説明できた。また、回転乱流と成層乱流のいずれの系でも、低波数域での粘性散逸を無視できないことがわかった。このことは、異種乱流の共存状態の形成・維持機構において、粘性散逸が重要な役割を果たすことを示唆する。

研究成果の概要(英文)：When the angular velocity of the system in rotating turbulence is varied, the transitions between quasi-two-dimensional anisotropic flow and isotropic three-dimensional flow occurs at different angular velocities. Namely, the transition shows a hysteresis. The quasi-two-dimensional anisotropic flow consists of inertial-wave turbulence, three-dimensional eddy turbulence, and large-scale columnar vortex. In stratified turbulence, anisotropy, dominance of internal waves, and validity of weak turbulence are evaluated from viewpoint of the linear time scale of internal waves and the nonlinear time scales of eddies. It was found that viscous dissipation at small wave numbers is not small in both rotating turbulence and stratified turbulence. This suggests that the viscous dissipation plays an important role in mechanism of formation and maintenance of coexist of different kinds of turbulence.

研究分野：流体物理学

キーワード：流体乱流 異方性 乱流の共存 ヒステリシス エネルギー輸送

1. 研究開始当初の背景

流体乱流の系において、弱非線形な波数領域では波が、強非線形な波数領域では渦がそれぞれ基本的な要素となる。水面に現れる表面重力波や水中に現れる内部重力波など弱非線形の乱流は弱乱流と呼ばれる。弱乱流の統計では、波数間の非線形相互作用が弱く波の位相の相関がないとする近似に基づく弱乱流理論が成功を収めている。一方で、Navier-Stokes 方程式によって支配される強非線形な乱流統計では、Kolmogorov に始まる乱流理論が流体渦構造の統計を与える。しかしながら、これら強弱非線形の乱流は概ね独立に研究されてきたために、弱非線形性の支配する波数領域と強非線形性が支配する波数領域が共存するような、中程度の非線形性をもつ系における乱流統計は十分な理解がなされていない。

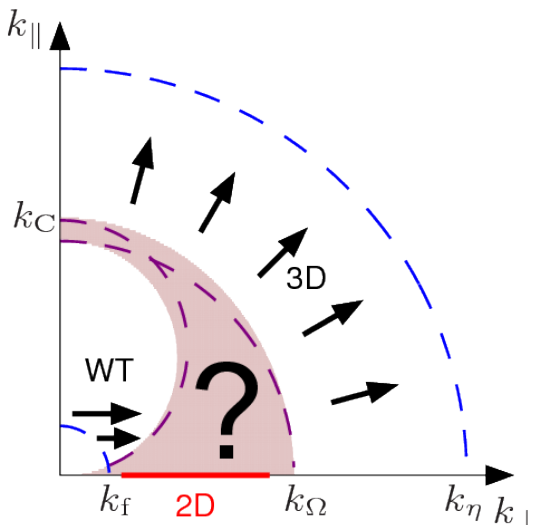


図 1 回転乱流におけるエネルギー輸送の予想図。

例えば、回転乱流においては、慣性波が支配的な波数領域では、回転に垂直な向きの波数の大きい領域へとエネルギーが輸送される。一方で、渦が支配的な波数領域では等方的に高波数領域へとエネルギーが輸送される。一般に、エネルギーは高波数領域で熱へと散逸されるため、線形の波の時間スケールと非線形の渦の時間スケールが広帯域に渡って釣り合う波数領域ではエネルギー散逸は無視でき、この線形と非線形の時間スケールが同程度の波数帯(図 1 の「?」で示した領域)に沿ってエネルギーが輸送される critical balance (CB) 状態が存在すると予想されている。回転乱流や成層乱流、磁気流体乱流など多数の異方性のある波動乱流系でもこのような CB の存在が予想されている。

2. 研究の目的

CB は波と渦が共存する乱流系におけるエネルギー輸送の過程を説明するための有力な理論的予想であるが、数値的・実験的にはその存在は未確認であり、波と渦が共存する系

全体としてのエネルギー輸送機構は、重要な未解決問題である。本研究の最終的な目的は、これらの異方性があり、強弱乱流の共存状態にある乱流系において、強弱乱流の境界領域でのエネルギー輸送を定量的に描くことである。この目的の実現のため、回転乱流および成層乱流の直接数値シミュレーションによって得られた波動場から CB を構成する素過程を同定し、CB の機構を明らかにする。さらに、系のエネルギー輸送を数値的に得ることによって、CB の成立する波数上をエネルギーが輸送されることを検証する。

系のもつ異方性に着目し、多次元のスペクトルを描いたものは多くない上に、系のもつ異方性に着目し、エネルギー輸送を定量的に描いた研究は、研究代表者の知る限り存在しない。CB では、強弱乱流の境界となる波数領域で、エネルギーフラックスに基づく異なる時間スケールがバランスすることから、この領域の新たな平衡状態である CB の存在を予想している。しかしながら、強弱乱流の境界となる波数領域でエネルギーフラックスが必ずしも異なるのではない。実際、異方性のない強弱乱流の共存する系において、エネルギーカスケードを仮定すれば、両波数領域でエネルギーフラックスが異なることはあり得ない。CB が存在する場合は、CB によるエネルギー輸送を、存在しない場合は、実際に生じているエネルギー輸送の機構を同定することが本研究課題の目的である。

異方性を持つ乱流系のエネルギー輸送過程を同定することによって、回転内部流れの効率的運転や海洋内部の物質輸送機構の解明につながると思う。また、本研究の数値的研究に基づいて、異方性を持ち、強弱乱流が共存する系における一般的な解析方法を確立し、星間乱流のような多様な構造形成機構の解明に寄与する。

3. 研究の方法

CB の存在が予測されている異方性のある流体乱流系の中で、回転乱流と成層乱流を対象として選び、大規模直接数値シミュレーションを行った。これらの波の弱乱流と狭義の乱流の共存状態におけるエネルギー輸送を定量的に調べるために、広帯域(格子点数 2048×2048×1024 程度)の波数領域が必要である。

このシミュレーションによって、回転乱流においては慣性波乱流と狭義の乱流の共存するエネルギースペクトルを得た。同様に、成層乱流においては内部重力波波動乱流と狭義の乱流の共存するエネルギースペクトルを得た。また、それぞれの系において、波の線形分散関係から得られる線形の時間スケールと eddy-turnover time で評価した非線形の時間スケールの拮抗する波数領域と、エネルギースペクトルの強弱乱流の境界となる波数領域を比較した。これによって CB の存在可能性を調べた。波数空間におけるエネルギーフ

ラックスを定量化し、CB が、弱乱流や強非線形性をもつ乱流の間で、エネルギー輸送を担うことが可能かを調べた。また、流れ場の可視化によって、予測されているような強弱乱流の共存状態の特徴的な実空間構造を抽出することで、CB の形成機構を調べた。

4. 研究成果

回転乱流において系の角速度が十分大きいとき、慣性波乱流、3 次元的な渦乱流、大規模な渦柱が共存する準 2 次元的で異方性の高い流れ場が現れる。一方で、角速度が十分小さいとき、統計的に 3 次元的で統計的に等方な流れ場が現れる。

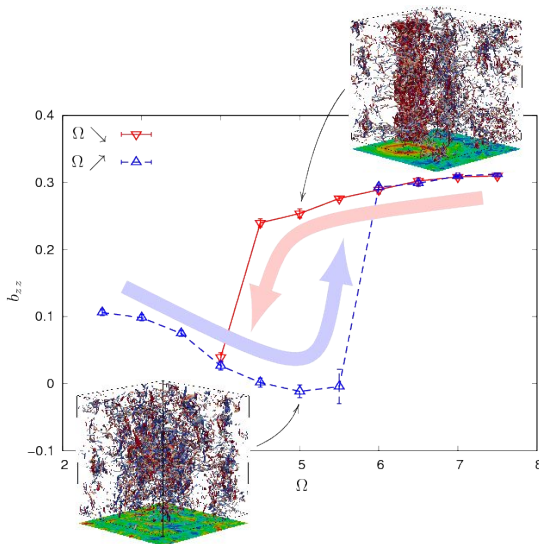


図2 回転乱流における準 2 次元流と 3 次元流間の遷移に現れるヒステリシス。雑誌論文より。

ヘリシティを生じない Taylor-Green 型外力によって駆動される統計的定常状態にある回転乱流で、準 2 次元の流れ場から準静的に系の角速度を小さくすると、3 次元の流れ場へ遷移し、逆に 3 次元の流れ場から角速度を大きくすると準 2 次元の流れ場へ遷移する。これらの遷移の生じる角速度は相異なり、準 2 次元的な流れ場と 3 次元流れ場が双安定となる角速度が存在するヒステリシス現象が得られた。(図 2)

また、準 2 次元流れ場と 3 次元流れ場の重ね合わせた場を初期条件とする数値シミュレーションを行い、双安定状態の basin を同定した。同様に、時間相関のない乱雑外力に対しても、パラメータ領域は非常に狭いものの、双安定状態が存在することから、このヒステリシスに普遍性があることが明らかにされた。このことは、低次元力学系にしばしば現れるヒステリシスが、回転乱流の強弱乱流の共存状態の形成という高次元力学系に出現したことを表す。

安定成層した背景場中の成層乱流では、内部重力波、3 次元的な渦乱流、鉛直剪断水平流が共存する。線形の内部重力波の時間スケ

ールと渦の非線形時間スケールとの比が 1/3 程度となる波数を境界として、線形の時間スケールが小さい波数領域で弱乱流スペクトルが観測される。

この波数領域で、鉛直運動エネルギーに占める(速度ベクトルの異方性による)偏向異方性成分の割合が大きく異方性が顕著に現れること、全運動エネルギーに占める波動成分の割合が大きく波動が支配的であること、運動エネルギーとポテンシャルエネルギーが同程度の大きさを持つことが確認された。これにより、線形の内部重力波の時間スケールが渦の非線形時間スケールより十分小さいとき、波数モードの異方性、波動の卓越性、弱乱流の成立が確認された。ここで、これらの三つの性質は本来異なる性質であることに注意が必要である。これまでは、Brunt-Väisälä 周期が eddy-turnover time と同程度となる Ozmidov スケールが、弱乱流と強乱流の境界であると考えられてきた。Ozmidov スケールは等方的に強乱流の波数領域を示すものではあるが、弱乱流の波数領域は異方的であり、本研究課題のように線形の時間スケールには異方性が考慮されている内部重力波の周期を用いる方がより正確であることがわかった。

回転乱流と成層乱流のいずれの系においても、低波数領域で支配的な波動と大規模構造が急峻なエネルギースペクトルを持つことから、低波数域での粘性散逸を無視できないことがわかった。このことは、異種乱流の共存状態におけるエネルギー輸送に対する重要な予想である CB 理論とは必ずしも整合性をもたないが、異種乱流の共存状態の形成・維持機構において、粘性散逸が重要な役割を果たしていることを示唆している。

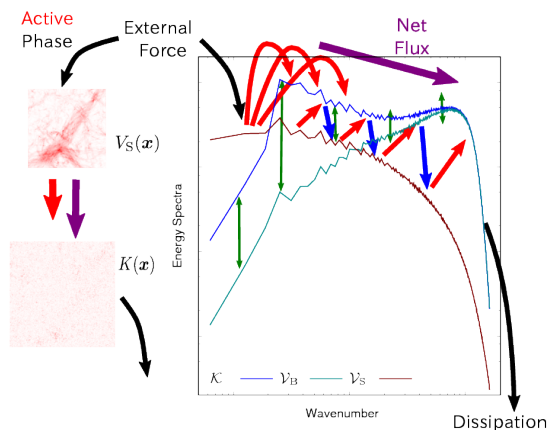


図3 弾性波動乱流におけるエネルギー輸送。雑誌論文より。

等方的ではあるが強弱乱流の共存する弾性波乱流において、波数空間および実空間のエネルギー輸送の全体像(図 3)を明らかにした。強乱流状態にある低波数領域では、曲げエネルギーが波数区間で非局所的かつ間欠的に高波数の運動エネルギーへと輸送され、弱乱流状態にある高波数領域では、共鳴相互作用によってエネルギーがカスケードすることが

わかった。さらに、波数空間の非局所的かつ間欠的なエネルギー輸送は、実空間で間欠的に形成される、曲げエネルギーの繊維束状構造によって生じることが明らかになった。

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 5件)

Tanaka, Mitsuhiro, Yokoyama, Naoto,
On the initial evolution of the weak turbulence spectrum in a system with a decay dispersion relation, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 71, 2018, 103~112, 査読有、

<https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2018.03.015>

03.015

Yokoyama, Naoto, Takaoka, Masanori,
Hysteretic transitions between quasi-two-dimensional flow and three-dimensional flow in forced rotating turbulence, *Physical Review Fluids*, 2, 2017, 092602, 査読有、

<https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.2.092602>

2602

Yokoyama, Naoto, Takaoka, Masanori,
Integrated analysis of energy transfers in elastic-wave turbulence, *Physical Review E*, 96, 2017, 023106, 査読有、

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.023106>

6

Mizushima, Jiro, Abe, Kazuki, Yokoyama, Naoto,
Sequential transitions of bathtub vortex flow, *Physical Review Fluids*, 2, 2017, 083903, 査読有、

<https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.2.083903>

3903

横山直人, 高岡正憲, Föppl-von Kármán 方程式に従う弾性波の乱流、*応用数理*, 26, 2016, 15~23, 査読有、

http://doi.org/10.11540/bjsiam.26.4_15

[学会発表](計 20件)

高岡正憲, 横山直人, 弾性波動乱流における外力とエネルギー輸送の関係、日本物理学会第73回年次大会、2018年3月22日~2018年3月25日、東京理科大(千葉県野田市)

横山直人, 高岡正憲, 回転乱流におけるエネルギー散逸の役割、日本物理学会第73回年次大会、2018年3月22日~2018年3月25日、東京理科大(千葉県野田市)

Yokoyama, Naoto, Takaoka Masanori,
Identification of weak-turbulent wave-number region in stratified turbulence, 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 2017年

11月19日~2017年11月21日、Denver、USA

高岡正憲, 横山直人, 弾性波動乱流の複素振幅における外力や散逸について、日本物理学会2017年秋季大会、2017年9月21日~2017年9月24日、盛岡大学(岩手県盛岡市)

横山直人, 高岡正憲, 回転乱流のエネルギー輸送、日本物理学会2017年秋季大会、2017年9月21日~2017年9月24日、盛岡大学(岩手県盛岡市)

横山直人, 高岡正憲, 成層乱流における波数間非線形相互作用のエネルギー収支、日本流体力学会年会2017、2017年8月30日~2017年9月1日、東京理科大(東京都葛飾区)

Yokoyama, Naoto, Takaoka, Masanori,
Separation of gravity waves in stratified turbulence, 16th European Turbulence Conference, 2017年8月21日~2017年8月24日、Stockholm, Sweden

Takaoka, Masanori, Yokoyama, Naoto,
Memories of initial conditions and large-scale columnar vortices in forced rotating turbulence, 16th European Turbulence Conference, 2017年8月21日~2017年8月24日、Stockholm, Sweden

横山直人, 高岡正憲, 回転系における慣性波乱流のエネルギースペクトル、日本物理学会第72回年次大会、2017年3月17日~2017年3月20日、大阪大学(大阪府豊中市)

Yokoyama, Naoto, Takaoka, Masanori,
Large-scale columnar vortices in rotating turbulence, 69th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 2016年11月20日~2016年11月22日、Portland (USA)

横山直人, 高岡正憲, 成層乱流の線形・非線形時間スケールの波数空間分布、日本流体力学会年会2016、2016年9月26日~2016年9月28日、名古屋工業大学(愛知県名古屋市) 注目研究 in 年会2016、*ながれ:日本流体力学会誌*, 35, 2016, 471~474

横山直人, 高岡正憲, 一様回転乱流における大規模渦柱の回転方向の選択機構、日本物理学会2016年秋季大会、2016年9月13日~2016年9月16日、金沢大学(石川県金沢市)

Yokoyama, Naoto, Takaoka, Masanori,
Initial-condition dependence of large-scale structures in rotating turbulence, 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2016年8月21日~2016年8月26日、Montreal (Canada)

横山直人, 高岡正憲, 成層乱流のエネルギースペクトル中の異種乱流領域の同定、京都大学数理解析研究所研究集会:高レイノルズ数の流れを記述するモデルの数理、2016年7月13日~2016年7月15日、京都大学(京都府京都市)

Yokoyama, Naoto, Takaoka, Masanori,
Weak and strong nonlinearities in

stratified turbulence、京都大学数理解析研究所共同研究:Mini-Workshop on Nonlinear Waves in Fluids、2016年5月19日～2016年5月20日、京都大学(京都府京都市)

高岡正憲、横山直人、弾性波動乱流の外力スケール依存性、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日～2016年3月22日、東北学院大学(宮城県仙台市)

横山直人、高岡正憲、回転乱流におけるエネルギースペクトルの初期条件依存性、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日～2016年3月22日、東北学院大学(宮城県仙台市)

高岡正憲、横山直人、弾性波動乱流の実空間におけるエネルギー収支と秩序構造、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月16日～2015年9月19日、関西大学(大阪府吹田市)

Yokoyama, Naoto、Takaoka, Masanori、Wave turbulence properties of vibration in thin elastic plate、Workshop on Nonlinear Waves and Fluid Mechanics、2015年8月10日～2015年8月13日、Daejeon (Korea)

横山直人、高岡正憲、強弱非線形性の共存する弾性波動の乱流の性質、京都大学数理解析研究所研究集会:乱流を介在した流体现象の数理解析、2015年7月22日～2015年7月24日、京都大学(京都府京都市)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 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 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

横山 直人 (YOKOYAMA, Naoto)
京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80512730

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

高岡 正憲 (TAKAOKA, Masanori)