

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03677

研究課題名(和文) 3次元乱流中に自発的に現れる2次元構造とエネルギー伝達の時間的・空間的揺らぎ

研究課題名(英文) Temporal and spatial fluctuations of energy transfer and two-dimensional structures spontaneously appearing in three-dimensional turbulence

研究代表者

高岡 正憲 (Takaoka, Masanori)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：20236186

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)：小スケールの一様等方乱流と大スケールの非等方の構造と波動乱流とが一般には共存している。種々の異種共存乱流を調べ、実空間での構造の生成維持機構と波数空間での保存量のカスケードとの関係を明らかにした。球殻Couette乱流では赤道域と極域に現れる2次元構造の遷移を明らかにし、3次元成層乱流では異種乱流の境界波数を同定する指標を提案した。非等方カスケードを定量化する局所フラックスベクトルを提案し、3次元回転乱流でエネルギーカスケードに適用し、Charney-Hasegawa-Mima乱流で3重カスケードでのエネルギーとゾノストロフィの逆カスケードの非等方化と自発的に現れる帯状流の関係を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カスケード理論は一様等方乱流の統計理論の根幹をなし、弱乱流理論は波動乱流の根幹をなすが、回転や成層の効果があると、大スケールに2次元構造が現れる波動乱流と、小スケールに渦管が現れる一様等方乱流とが共存する。このような異種共存乱流を統一的に理解する理論も評価する定量的手法も無かった。研究成果の一つである局所フラックスベクトルは、異種乱流の時間スケールが同程度となる領域に沿ってエネルギーがカスケードされるという臨界平衡の予想を初めて定量的に確認したのみならず、エネルギー以外の保存量に対しても波数空間におけるカスケードの非等方化と実空間における大規模構造の生成維持との関係を調べることが可能にした。

研究成果の概要(英文)：Small-scale homogeneous isotropic turbulence, large-scale anisotropic structures and wave turbulence coexist in general. Various types of heterogeneous coexistence turbulence are investigated to clarify the relationship between the driving mechanism of structures in real space and the cascades of invariants in wavenumber space. The transition of 2-dimensional structures appearing in the equatorial and polar regions has been clarified for spherical Couette turbulence. An index to identify the boundary wavenumber among turbulences with different properties has been proposed for 3-dimensional stratified turbulence. Local-flux vectors to quantitatively investigate anisotropic cascades have been proposed and applied to the energy cascades in 3-dimensional rotating turbulence. The relationship between the anisotropy of the inverse cascades of energy and zonostrophy and the spontaneously appearing zonal flows in the triple cascade has also been clarified in Charney-Hasegawa-Mima turbulence.

研究分野：流体物理学

キーワード：局所フラックスベクトル 異種共存乱流 カスケード 臨界平衡 波動乱流 回転乱流 成層乱流 Charney-Hasegawa-Mima乱流

1. 研究開始当初の背景

流体現象は日常生活と深く関わっており、古くから多大な関心が寄せられてきた。とりわけ乱流の複雑さは Leonardo da Vinci をも魅了し、Reynolds(1883)は円管内の水流について系統的实验をし、流れの層流から乱流への状態遷移は、長さや速さと粘性率からなる無次元数 (Reynolds 数) のみで記述されることを見出した。Richardson(1922)は渦がより小さな渦を次々励起するという『順カスケード』描像を提唱し、Kolmogorov(1941)はこの描像に対応したスケール間のエネルギーの流れを一樣等方性の仮定の下に波数空間で定式化した (K41 理論)。惑星物理学的な流れは 2 次元流とみなせるが、粘性や外力を無視すると流体粒子に付随する渦度が保存されることから、Kraichnan(1967)は 2 次元一樣等方乱流においてエネルギーがより大きなスケールへ伝達されるという『逆カスケード』を提唱した。これらの理論は、3 次元と 2 次元の一樣等方乱流では反対向きのエネルギーの流れを予測している。

波浪のような複雑な様相を示す状態における相互作用は、一般的には共鳴として扱われる。波動乱流では各スケールで波の線形時間とエネルギー伝達の非線形時間が現れ、前者が後者に比べ十分に小さいという仮定と乱雑位相という仮定の下に、Zakharov(1966)により弱乱流理論が構築された。結果としての運動論的方程式には、熱平衡解とは別に K41 理論に類似の保存量のカスケードを表す乱流解がある。弱乱流理論は非等方なカスケードにも適用可能であるが、弱非線形性の仮定は大きい波数または小さい波数の少なくとも一方で破綻する。

『カスケード理論』と呼ばれる上記の統計的アプローチに対して、最近では動力的アプローチも成果を上げている。カオスアトラクターはフラクタル構造を持ち加算無限個の不安定周期軌道が埋め込まれている。擬周期性を示す乱流においても、不安定周期軌道が乱流生成過程や平均流を再現できることが示された。他方、直接数値シミュレーションにより、一樣等方乱流においてエネルギー散逸が効く小スケールを径に持つ微細渦管構造が現れ、その集団が大規模クラスター構造を形成することがわかってきた。また、回転乱流では慣性波や Taylor 渦柱、成層乱流では内部重力波や鉛直剪断水平流、壁乱流では縦渦や低速ストリークが現れることも知られている。つまり 3 次元乱流中に管状や層状の 2 次元的な自己組織構造が現れるのである。

上記のように、多くの乱流では、非等方な構造と波動乱流と等方な渦乱流とが共存している (異種共存乱流)。しかしながら、このような異種共存乱流のカスケードを統一的に扱う理論も、定量的に評価する手法すらも欠如している状況であった。異種共存乱流の遷移波数域に対する考えとして臨界平衡(critical balance)というのがある。臨界平衡における、同程度の時間スケールを持つモード間でのみエネルギーの遣り取りをするという考えは一般的だと思われるが、線形時間でも非線形時間でも代表時間としてどの表現を用いるかという、定量的評価のために不可欠な情報は与えてくれない。また、波数空間のカスケードと実空間の構造の生成維持機構との関係の理解も十分といえる状況にはなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は『自己組織構造の起源とそのエネルギー伝達に対する影響の解明』と言える。まずは、弱乱流理論が適用できない強い非線形性を持つ乱流に対してでも、非等方なカスケードを定量的に評価できる手法を開発する。次に、それを用いて異種共存乱流における各保存量のカスケード過程を解明する。最後に、実空間における自己組織構造の生成維持機構と波数空間におけるカスケードの非等方化との関係を明らかにすることが、上記の目的の中身である。

これらの目的は、以下の展望につながると期待している。カスケード理論は波を基底とする波数空間で構成され、発達乱流のスケールに関する統計的情報を提供してくれるが、Fourier 変換は実空間を一樣に取り扱うために渦のような構造の情報が消失している。他方、不安定周期軌道は実空間の構造も波数空間の情報も持っているが、乱流アトラクターの輪郭しか描かない。本研究では自己組織構造を用いて両者の橋渡しをすることになる。不安定周期軌道と自己組織構造の関係が解明されれば発達乱流への新たな力学系のアプローチが可能となり、発達乱流の実空間と波数空間が結びつくのでカスケード理論を新たな段階へ導くと考えている。大スケールの自己組織構造との関係を理解することで、効率的な乱流の予測と制御が可能となる。

3. 研究の方法

スケール間のエネルギー伝達をみるために流体運動の支配方程式を波数空間で表現すると、エネルギー伝達関数は 3 つの波数の Fourier 成分間の相互作用で表される：

$$\sum_{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2} P_{ijm} u_i^*(\mathbf{k}, t) u_j(\mathbf{k}_1, t) u_m(\mathbf{k}_2, t) \delta_{\mathbf{k}=\mathbf{k}_1+\mathbf{k}_2}$$

ここで各項は 3 成分相互作用関数と呼ばれ、 P_{ijm} は非発散空間への射影演算子である。エネルギー流束関数は、ある波数より大きいエネルギー伝達関数を積算したものであり、その波数を横切る単位時間のエネルギー流量を表す。カスケード理論は局所相互作用とエネルギー流束一定という仮説の上に築かれている。3 成分相互作用関数から、波数 \mathbf{k} のモードが $\mathbf{k} = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$ を

満たす \mathbf{k}_1 と \mathbf{k}_2 の各モードから受け取る総量は求まるが、 \mathbf{k}_1 と \mathbf{k}_2 の各モードから \mathbf{k} のモードに輸送される量は個別には求まらない。この不定性を除去する方法について、長年にわたり多くの研究者によって様々なアイデアが提案されてきたが、未だに確定的なものはない。

我々は、この3成分相互作用関数の不定性と対峙することは避けて、一様等方乱流において一定の成果をあげているカスケード理論のアイデアを非等方乱流に拡張することを考えた。波数空間における保存量の非等方なカスケードを、フラックスベクトル場として表すのである。非局所相互作用を無視することになるが、一様等方乱流の先行研究では局所相互作用が主要な役割をしていることが示されているので、手始めとしてこのアプローチを選択した。次の「研究成果」に記すように、この場合にも3成分相互作用関数と同様の不定性がある。

波動現象が支配的となる局所的波数領域もあると考えているが、自己組織構造のある流体乱流では、共鳴相互作用の前提となる乱雑位相となっていない。実空間の相互作用と波数空間の位相の関係を調べることで、弱乱流理論の限界についての知見も得られる。直接数値シミュレーション (DNS) をすることで、実空間のイベント (構造の融合・変形・分裂など) と波数空間におけるエネルギー伝達との関係を、不安定周期軌道を利用して調べる。3次元で自由度が多すぎて解析が困難となった場合には、対称性を課して2次元化した乱流や乱流シェルモデルのような数理モデルなどを利用し、解決の手がかりを探る。

4. 研究成果

回転や成層の効果があると、大スケールに2次元的な非等方な構造や波動乱流が誘起され、カスケードを繰り返しながら小スケールでは一様等方乱流となる。このような異種共存乱流における、エネルギーを含む保存量の流れを調べてきた。我々のこれまでの研究経験を踏まえて、特に3次元と2次元の回転系を中心に調べた。

球殻 Couette 乱流では、内外殻の回転の大きさに応じて赤道域と極域とで異なる2次元性の構造が現れ、それらの間の遷移 (分岐) を明らかにしたが、各流れにおけるスケール間のエネルギーの流れを同定するまでには至らなかった。3次元の成層乱流では、異種乱流間の境界波数を同定する指標を提案し、論文として公表した。3次元の回転乱流では、エネルギーカスケードの非等方な流れを捉えることに成功し、論文として公表した。他方で、臨界平衡との整合性を確認するには更に大規模な計算が必要であることが分かった。2次元の回転系に相当する Charney-Hasegawa-Mima 乱流では、波数空間も広く取れることもあり、異種共存乱流の3重カスケードにおける等方的逆カスケードの低波数域での非等方化を局所フラックスベクトルで描くことに成功し、臨界平衡との整合性も示し、論文として公表した。また、その乱流中に自発的に現れる実空間の帯状流と波数空間のカスケードの非等方化との関係を明らかにした。現在その結果をまとめて論文を執筆中である。

以下に、各異種共存乱流における研究成果を具体的に記す。

(1) 球殻 Couette 乱流中に自発的に現れる2次元構造と遷移

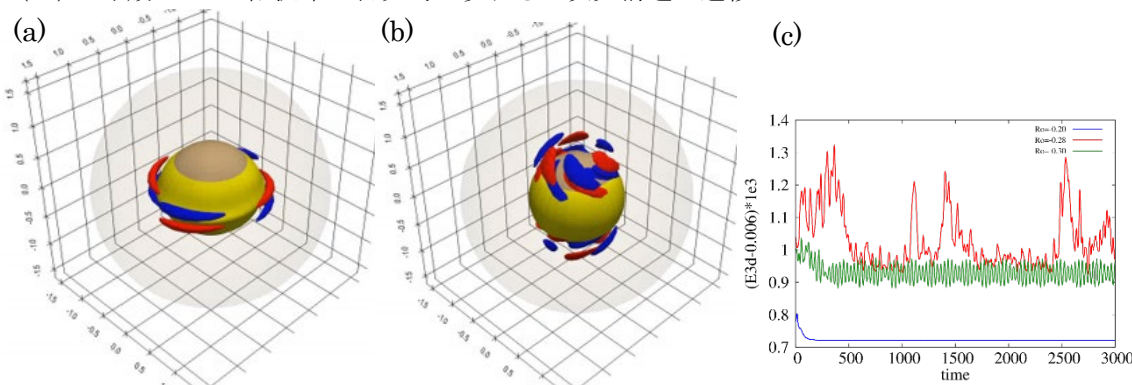


図1 球殻 Couette 流中の自己組織構造とエネルギーの時間発展。(a)と(b)はそれぞれ赤道域と極域に現れた定常進行波の等値面表示。黄、赤、青の等値面はそれぞれ u_ϕ 、 ω_ϕ の正、 ω_ϕ (の負の領域を示す。(c)は3次元の流れのエネルギーの時間発展の外殻の回転の大きさに対する依存性。青、赤、緑の各色のグラフの順に外殻の回転が大きくなる。

乱流における不安定周期軌道の研究は平行平板間流に始まるが、本研究では、壁乱流と回転効果の両方の特性を持ち、幾何学的に対称性の高いコンパクト領域内の流れである球殻 Couette 流の遷移を調べた。この流れは慣性波だけではなく Taylor 渦や帯状流と呼ばれる大規模構造が現れる異種共存乱流となりうる。

この系には Reynolds 数以外にも、内殻と外殻の回転の大きさの比や、内殻と外殻の半径の比などのパラメータがある。本研究では、内殻の外殻に対する半径比が $0.3 \sim 0.5$ の広い隙間内の、内殻と外殻が逆回転する場合を中心に調べた。内殻の回転による遠心力不安定性が動径方向の流れを誘起し、図1(a)のように赤道付近に定常進行波を生じる。加えて外殻の回転が大きくなると図1(b)のように中高緯度に渦構造が発現する。

図1(c)には、臨界 Reynolds 数の3倍程度の Reynolds 数における流れの3次元の流れのエネルギ-の時間発展の外球面回転の大きさに対する依存性を示してある。青色のグラフで示された定常解から緑色のグラフの準周期解への間に、赤色のグラフで示された間欠的遷移が観測された。これは方位角方向の波数が境界条件と適合するための離散性によるものと考えている。

(2) 強い成層のある異種共存乱流の境界波数に対するエネルギーに基づく指標

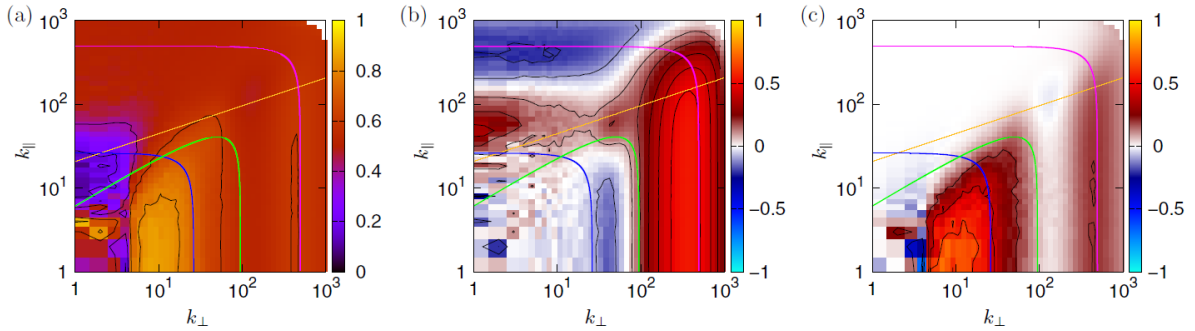


図2 指標として提案したエネルギー比 ((a) Kwk/Kk , (b) $(Kwk - Vk)/(Kwk + Vk)$, (c) $KzPAK/Kk$) のカラー等高線図。緑色と黄色の曲線はそれぞれ $\chi_k = 1/3$ と $\chi_{2Dk} = 1/3$ に対応した境界波数、青色とマゼンタ色の曲線はそれぞれ浮力波数と Ozmidov 波数。論文[1]の Fig.5。

成層の効果が強いと、内部重力波の非等方な弱乱流と渦の等方な Kolmogorov 乱流との異種共存乱流状態となりうる。臨界平衡の検証に不可欠な波数空間における異種乱流間の境界波数を見積もる指標を提案した。

これまで、そのような指標として Ozmidov 波数や浮力波数が用いられてきた。前者は、Brunt-Väisälä 振動数と eddy-turnover time がバランスする波数として定義され、非等方乱流と等方乱流の境界波数とされ、後者は、特性水平速度と Brunt-Väisälä 振動数により定義され、剪断層と内部重力波の境界波数とされてきた。このような臨界平衡のアイデアは一般的だが曖昧性があり、線形時間として代わりに線形分散関係を用いた指標 χ_k や、非線形時間として代わりに2次元乱流の eddy-turnover time を用いた指標 χ_{2Dk} なども用いられてきた。

我々は、異種乱流の境界波数を見積もる量として、エネルギーに基づく指標を提案した。Cartesian 分解を利用して、各波数におけるエネルギー E_k を運動エネルギー Kk とポテンシャルエネルギー Vk に分解し、 Kk を渦と波と剪断に関する部分 Kvk と Kwk と Ksk とに分解した。更に、鉛直方向の運動エネルギー Kzk とその偏光異方性 $KzPAK$ を非等方性の特徴づけに利用した。図2に示されたように、これらの比で作られた無次元量 Kwk/Kk , $(Kwk - Vk)/(Kwk + Vk)$, $KzPAK/Kk$ は、これまでの指標 χ_k とコンシステントな結果を与え、境界波数に利用できることがわかった。

(3) 3次元回転乱流におけるエネルギーフラックススペクトル

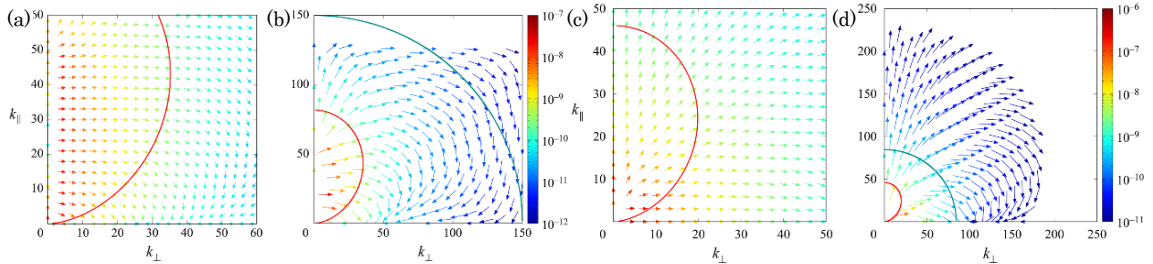


図3 エネルギーフラックススペクトル。(a)と(b)は小さい垂直波数に外力を与えた場合の低波数領域と全波数領域。(c)と(d)は等方的に小さい波数に外力を与えた場合のそれぞれ低波数領域と全波数領域。赤色とシアン色の曲線はそれぞれ臨界波数と Zeman 波数。論文[2]の Fig.7 と Fig.11。

3次元一様等方乱流のエネルギーカスケードは、そのフラックスの一定性で特徴づけられ、フラックスは波数の大きさのスカラー関数として与えられる。他方、非等方乱流のフラックスは波数ベクトルのベクトル関数となる。我々は、数値シミュレーションで得られるエネルギー輸送率からそのフラックススペクトルを一意に決定するために、エネルギー輸送の局所性と効率性という2つの仮説を導入することを提案し、3次元回転乱流に適用した。この乱流は低波数域に2次元性の高い大規模構造 (Taylor 渦柱) や慣性波の波動乱流と高波数域に3次元等方乱流とからなる異種共存乱流となりうる。弱乱流理論は、慣性波乱流の共鳴相互作用から回転軸方向と垂直な方向へのエネルギー輸送を予測する。また、臨界平衡に基づき異種乱流間の境界波数として臨界波数や Zeman 波数が知られている。前者は、線形波の周期と eddy turnover time とがバランスする波数として定義され、波動乱流と渦乱流の境界波数を与え、後者は、Coriolis 周期と eddy turnover time がバランスする波数として定義され、非等方乱流と等方乱流の境界波数を与えると考えられている。故に、遷移波数領域は臨界波数と Zeman 波数に挟まれた領域となる。

小さい垂直波数 k_{\perp} 、つまり k_{\parallel} 軸近傍に外力を与えると、図3(a)のように臨界波数（図中の赤色半円）の内側の領域で弱乱流理論と一致する結果が得られた。しかしながら、図3(b)に示された高波数側の遷移領域では、臨界平衡から予測されるような境界波数に沿ったエネルギーの流れは観測されなかった。また、等方的に小さい波数 $|k|$ に外力を与えた場合にも期待されたものとは異なる構造を示した。この差異が生じた原因は、遷移領域における散逸が大きくて無視できないことであると考えられる。

(4) Charney-Hasegawa-Mima 乱流における局所フラックスベクトル

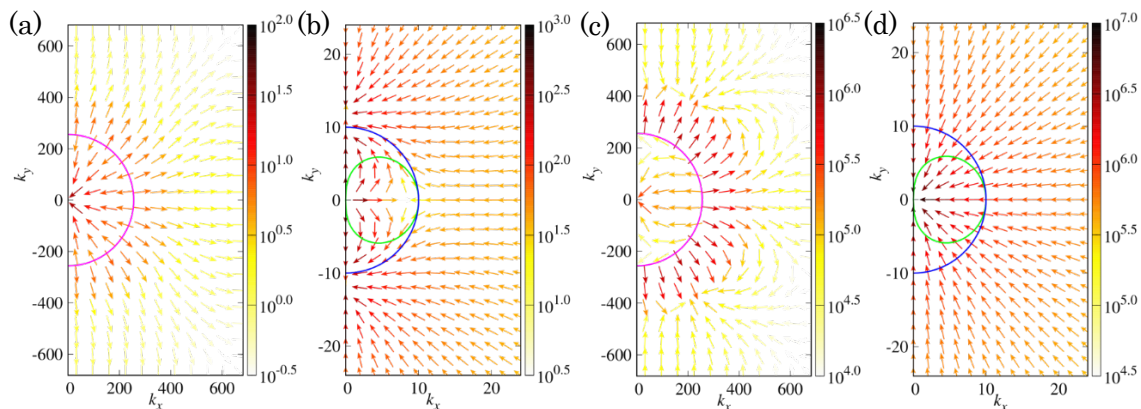


図4 局所フラックスベクトル。図(a), (b)と図(c), (d)はそれぞれエネルギーとエンストロフィの全波数領域(a), (c)と低波数領域(b), (d)。桃色の半円は外力を与えた波数。青色と緑色の曲線はそれぞれ Rhines 波数と Vallis-Maltrud のダンベルスペクトルに相当する波数。論文[3]参照。

3次元の成層乱流や回転乱流の数値計算では十分なモード数が確保できず、異種共存乱流の遷移領域のエネルギー輸送と臨界平衡との整合性を見ることができなかった。そこで、2次元流であるが異種共存乱流が存在する Charney-Hasegawa-Mima 方程式を調べることにした。この式は、準地衡流の Rossby 波や磁場閉じ込めのドリフト波に共通する物理を記述し、帯状流と呼ばれる大規模構造と低波数域に非等方の波動乱流と高波数域に等方の渦乱流の共存状態を示しうる。また、2次元一様等方乱流におけるエネルギーとエンストロフィの2重カスケードに加えて、ゾノストロフィとよばれる非等方性の準保存量も存在し、より複雑な3重カスケードも予想されている。

エネルギーに限らず任意の保存量に対する局所フラックスベクトルを提案し、直接数値シミュレーションにより検証した。局所相互作用が支配的であるとして、保存量が波数空間を流れるベクトル場と見做して、局所フラックスベクトルは波数空間の連続の式を満たすとした。このスカラー方程式だけからではベクトル場が一意には決まらないので、保存ベクトル場、つまり任意の閉曲線に対して循環のない渦無しベクトル場であり、経路によらない値を与えることを要請した。これは3成分相互作用関数の不定性と照らしても自然な要請だと考えている。加えて、エネルギーの輸送の局所性と効率性から得た(3)のベクトル場と同じ結果を与える。

図4に得られた局所フラックスベクトル場を示してある。臨界平衡の考えに従い線形時間と非線形時間のバランスから境界波数を見積もることができるが、その代表時間の取り方には曖昧性がある。ここでは代表的な Rhines 波数と Vallis-Maltrud のダンベルスペクトルに相当する波数を示してある。図から分かるように、高波数域の等方性の高い領域で一様等方乱流の2重カスケードと一致する結果が得られただけでなく、低波数領域における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いう臨界平衡の予想とも一致した[3]。更に、図は省略してあるが、ゾノストロフィのフラックスベクトル場もエネルギーのそれと同様の非等方構造を示した[4]。詳しく見るとエネルギーとゾノストロフィとで流れ込む k_y 軸上の波数が異なっているが、帯状構造をどの物理量で見るとかに対応していることも分かった。実空間の大規模構造の生成維持機構と波数空間の保存量との流れとの関係調べる手段を得たことになる[5]。

<引用文献>

- [1] N. Yokoyama and M. Takaoka, Energy-based analysis and anisotropic spectral distribution of internal gravity waves in strongly stratified turbulence, *Physical Review Fluids* vol.4 (2019) 104602
- [2] N. Yokoyama and M. Takaoka, Energy-flux vector in anisotropic turbulence: application to rotating turbulence, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.908 (2020) A17
- [3] M. Takaoka, et al, Local-flux vectors of conserved quantities in wavenumber space: Anisotropic structures in Charney-Hasegawa-Mima turbulence, *Physical Review Fluids*, vol.7 (2021) L012601
- [4] M. Takaoka, Local fluxes of conserved quantities in the wavenumber space: application to two- and three-dimensional rotating turbulence, エネルギー変換研究センター成果報告書, (2021) 369-374
- [5] M. Takaoka, Driving Mechanism of Zonal Flows and Local Fluxes of Conserved Quantities in Quasi-Geostrophic Turbulence, エネルギー変換研究センター成果報告書, (2022), 269-274

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6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 4件）

1. 著者名 高岡正憲、横山直人、佐々木英一	4. 巻 99(5)
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 高岡正憲	4. 巻 -
2. 論文標題 Driving Mechanism of Zonal Flows and Local Fluxes of Conserved Quantities in Quasi-Geostrophic Turbulence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 同志社大学エネルギー変換研究センター成果報告書	6. 最初と最後の頁 269--274
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 -
1. 著者名 Masanori TAKAOKA	4. 巻 -
2. 論文標題 Local fluxes of conserved quantities in the wavenumber space: application to two- and three-dimensional rotating turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 エネルギー変換研究センター、2020 年度成果報告	6. 最初と最後の頁 369-374
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 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 M.Takaoka, N.Yokoyama, E.Sasaki
2. 発表標題 Zonal flows driven by energy and zonestrophy conservations in Charney-Hasegawa-Mima turbulence
3. 学会等名 APS DFD 2022 75th Annual Meeting, Indiana, USA (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、京都、日本
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, Athens, Greece (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高岡正憲
2. 発表標題 準地衡乱流における保存量の局所フラックスと帯状流の生成維持機構
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 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 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 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 佐々木英一, 高岡正憲
2. 発表標題 回転球殻Couette 乱流の大規模構造と動力学
3. 学会等名 日本機械学会第99 期流体工学部門講演
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 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 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 N. Yokoyama, M. 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 佐々木英一、高岡正憲
2. 発表標題 回転球殻Couette流の遷移
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次元乱流におけるエネルギーフラックス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 M. Takaoka, N. Yokoyama, E. Sasaki
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's Division of Fluid Dynamics (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 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 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

〔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	佐々木 英一 (Sasaki Eiichi) (60710811)	秋田大学・理工学研究科・助教 (11401)	
研究 分担者	横山 直人 (Yokoyama Naoto) (80512730)	東京電機大学・工学部・教授 (32657)	

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
---------	---------