

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05490

研究課題名(和文)十分に発達した乱流における時間的・空間的多重状態と記憶

研究課題名(英文)Temporal and spatial multiple states and memory in fully developed 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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：弾性薄板の波動乱流では、強・弱乱流状態の共存機構と、波数空間および実空間におけるエネルギー輸送の全体像を解明した。回転乱流で幕則を示す発達乱流状態でも、Rossby数および外力の振幅によるヒステリシスのような現象を見出した。回転球殻内流で同方向に差分回転を与えると、高緯度の渦柱と低緯度のトロイダル渦との遷移が現れ、多重状態となり得ることが分かった。回転乱流や成層乱流には、低波数側に非等方性波動乱流と高波数側に3次元等方性乱流とが共存する。波数空間での各乱流域の同定を行った。また、波数空間でのエネルギーの流れの定式化を提案し、共存する乱流の境界を流れるエネルギーを調べることが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

弾性薄板の波動では複素振幅に加えてAiryポテンシャルを要素波とすることで非線形エネルギーも含めた詳細釣り合いを成り立たすことが出来、エネルギー輸送を波数空間と実空間の両面から解析する手法を提案し、従来の弱乱流理論に対する1つの拡張可能性を示した。

十分に発達した系のヒステリシスの報告は壁で囲まれた閉じた系のみであったが、回転乱流において開いた系でも同様の現象が起こりうることを示し、研究対象が広がった。

Navier-Stokes方程式の3波相互作用におけるエネルギー収支の不定性を除去する方法を提案し、非等方性乱流においても波数空間のエネルギー輸送を定量的にベクトル場として評価出来るようになった。

研究成果の概要(英文)：Coexistence of weak turbulence and strong turbulence is found in the wave motion on a thin elastic plate, and integrated analyses of the energy transfer is performed in both the real space and the wavenumber space. We have shown that hysteretic behaviour in rotating turbulence can be observed even in the fully developed turbulence state. Transition between a columnar vortex in high latitude and a toroidal vortex in low latitude is found in co-rotating spherical Couette flow. Anisotropic wave turbulence in low wavenumber range and isotropic Kolmogorov turbulence in high wavenumber range coexist in such as rotating turbulence and stratified turbulence. We have proposed a method to identify a wavenumber domain for each turbulence and confirmed its efficiency. We have also proposed a method to determine quantitatively energy flux in the wavenumber space, which makes it possible to examine the energy flux along the boundaries among coexisting turbulences.

研究分野：流体物理学

キーワード：流体乱流 波動乱流 ヒステリシス 非等方性乱流 渦構造 エネルギー輸送 波数空間 共存

1. 研究開始当初の背景

円柱を過ぎる流れは剥離を伴う代表的なものであり古くからよく研究されてきた。その流れの Reynolds 数 (Re) 依存性を大まかに纏めると、 $Re \ll 1$ で前後左右に対称な流れは $Re \sim O(1)$ で剥離は無いが前後非対称な流れとなり、 $Re \sim O(10)$ では円柱後流に 1 対の対称渦 (Föppl 渦) が現れる。更に Re が大きくなると流れが円柱表面から剥離し、渦が交互に放出され千鳥型に配列した渦列 (von Kármán 渦列) が形成される。 $Re \sim O(10^2)$ で渦域に乱れを伴う von Kármán 渦列へと遷移し、更に Re が大きくなると渦列全体が乱れた状態となる。 $Re \sim O(10^5)$ になると円柱表面の境界層も乱流となり後流の幅が狭くなり顕著な構造も見えなくなる。特筆すべきは、更に Re が大きくなると乱流状態にもかかわらず再び「渦列」が現れることである。

Reynolds 数が比較的小さい時の層流から乱流への遷移は、分岐理論を通じて理解が深まっている。また、一括りに乱流と呼ばれる状態でも、 Re が比較的小さい場合には乱流アトラクターの次元もさほど高くなく、力学系に対して発展させられてきたカオス理論などにより理解が得られている。 Re が大きくなりアトラクターの次元が高くなると、パワースペクトルが冪則を示すようになる。このような十分に発達した乱流状態に対しては、統計的なアプローチが一般的である。この統計的非平衡定常状態に対し、Kolmogorov はエネルギーカスケードと呼ばれるアイデアを導入し、パワースペクトルの予測にある程度成功した。最近では、実験及び数値計算において非常に大きな Re の場を詳しく調べることが可能となり、発達乱流として一括りにされてきた流れにも異なる状態があることが明らかになりつつある。

平成 25~27 年度の基盤研究(C) により、以下の 2 例において異なる統計的性質を示す乱流の共存を見出した。

図 1 は、平行平板間乱流における平板からの高さ y^+ とスケール λ_z^+ に対するエネルギーフラックスの依存性である。系としては平板に平行な平面内で一様であるが、各 y^+ において λ_z^+ が小さい (大きい) 所では平板から離れる (平板に近づく) 向きにエネルギーが流れる異なる乱流が共存した「空間的多重状態」であることを示している。平板から離れる (平板に近づく) 向きのエネルギーの流れは、Reynolds 数に依らない (依る) ことなども見出した。

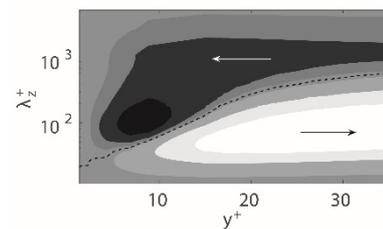


図 1 平衡平板間乱流のフラックス。

薄板の弾性波動を記述する Föppl - von Kármán 方程式の数値計算から、図 2 のように、高波数側では弱乱流理論から予想される冪則 k^1 を、低波数側では強い非線形性による冪則 $k^{-1/3}$ を示す「空間的多重状態」を見出した。この系のポテンシャルエネルギーの線形部である曲げエネルギー V_b と非線形部である伸縮エネルギー V_s とが、それぞれの冪則を生み出していることがわかった。運動エネルギー K は、 V_b や V_s とエネルギーの交換を行うので、波数パワースペクトルに 2 つの冪則スケール領域が共存する。

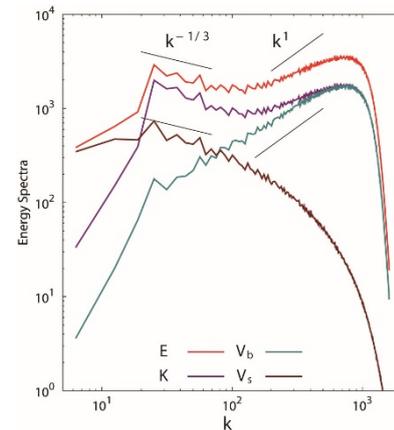


図 2 強・弱乱流の共存を示す波動乱流のエネルギースペクトル。

他の乱流場でも、異なる冪則スケールが共存していることが報告され始めた。von Kármán 旋回流の実験の時系列データで得られた振動数パワースペクトルにおいて、3 つの冪則スケールが共存していて「時間的多重状態」があることが報告されている。また、慣性波や内部重力波の現れる回転乱流や成層乱流においても、波動の位相の時間スケールと渦によるエネルギー輸送の時間スケールが等しくなる場合 (critical balance) に、強・弱非線形乱流の共存があるという予想もある。更に、von Kármán 旋回流や Taylor-Couette 流に対する最近の実験的研究から、十分に発達した乱流においてヒステリシスが存在することが見出された。これは、混合が活発に行われている乱流においてもある種の「記憶」があることを示している。

2. 研究の目的

流体の運動が激しく (即ち Reynolds 数が大きく) になると、順次複雑な流れへと分岐を起し、層流から乱流へと遷移する。乱流状態となつてからも Re が大きくなると、アトラクターの次元が高くなりスペクトルに冪則が現れるようになる。この十分に発達した乱流においては混合が活発に行われているが、時間的あるいは空間的に異なる統計的性質を示す「多重状態」となることがある。また、流体運動の制御パラメータを徐々に増加減少させるとき、ヒステリシスを示すこともある。つまり、乱流状態になつても以前の状態を「記憶」しているような振る舞いが現れる。このような多重状態と記憶という現象に着目し、その発現機構を解明することを目的とする。

壁との相互作用のある乱流 (「壁有乱流」と略す) と波が重要な役割をする乱流 (「波有乱流」) の両方を対象とする。前者では流れ (渦) の動力学、後者では位相 (波) の動力学が重要な役割をする。両乱流の相補的關係を利用しながら、様々な乱流における多重状態に対する知見を得る。

3. 研究の方法

十分に発達した乱流の力学や統計則の研究は、自然界や実験室の実在流れの計測に代表される実空間のダイナミクスと、基礎方程式に基づいたカスケード理論に代表される波数空間の統計的解析に始まる。最近ではコンピュータの発達により大規模な直接数値シミュレーション (DNS) を用いて両空間を結びつけて調べることが可能となってきた。本研究では、実空間と波数空間の詳細な情報を得ることで実験と理論の仲立ちを可能とする数値解析を採用する。プログラムの開発およびパラメータ探索は研究室のワークステーションで行うが、大規模 DNS には九州大学情報基盤センターの高性能演算サーバを定額利用で使用する。スペクトルが冪則を示す発達した乱流を調べるためには大規模 DNS が必要である。

本研究は、壁有乱流と波有乱流の両方を対象とするが、手始めに、扱い慣れた弾性薄板の波動乱流に対して、実空間と波数空間の両面から理解する為の手法の開発と経験を積む。コードの開発では各分担者の培ってきたノウハウが活かせる系を中心に進める。理論との比較を容易にするために一様なカノニカル乱流を中心に考える。このような系ではスペクトル法が有利である。

壁有乱流としては、経験豊富な平行平板間流から始める。我々はエネルギーフラックスの向き異なる乱流が共存していることを見出しており、この空間的多重状態に対応した実空間のダイナミクスとして断面内旋回流 (Görtler 渦) に着目している。波有乱流としては、回転乱流から始める。既作の Navier-Stokes 方程式のプログラムに Coriolis 力項を付加することで DNS を行うことができ、研究室の計算機で出来る予備的な計算により共存の手がかりを得ている。この系には慣性波が存在し、低波数側に非等方性弱乱流状態と高波数側に 3 次元等方性 Kolmogorov 乱流状態が「共存」することが予想されている。また、このような回転系では Taylor-Proudman の定理が知られ、系の回転軸方向に大きいスケールの渦柱が現れることが期待される。この渦構造の剛性は、慣性項と Coriolis 力項の比である Rossby 数 (Ro) で特徴づけられる。この Ro を徐々に増減させることで、ヒステリシスのような多重状態を観測できる可能性がある。上記と並行して成層乱流の DNS をするコードの開発を行う。この流れではエネルギースペクトルで異なる冪則領域が「共存」するとの報告もあり、また、内部重力波が重要な役割を担っており、分担者の持っている海洋波に関する知見が活かせる。

波数空間において異種乱流の境界に沿ったエネルギーの流れが critical balance により予想されている。様々な乱流における波数空間でのエネルギーの流れを調べることが、「多重状態」と「記憶」といった共存機構の解明につながると考えている。

4. 研究成果

先行研究となる平成 25~27 年度に科研費の基盤研究 (C) において、一様な系に現れる異なる統計的性質を持つ乱流域の共存機構を解明するために、弾性薄板の波動乱流を調べた。図 2 に示したように、この系は等方的ではあるが、強・弱乱流が共存する。これら 2 種乱流の領域を分離する波数は、自己相互作用による非線形振動数シフトが線形振動数と同程度となる波数である。従来の弱乱流理論は複素振幅を要素波とするが、Airy ポテンシャルを加えることで非線形エネルギーも含め 1 波数表現が可能となり詳細エネルギー収支が示せる。結果、線形の曲げエネルギー、運動エネルギーと非線形の伸縮エネルギーの間のエネルギーの流れの定式化が可能となる。エネルギーが外力から伸縮エネルギーへ注入され、慣性小領域を順カスケードし、運動エネルギーとして散逸されるという、この弾性波動乱流の非平衡統計的定常状態を維持する機構が明らかになった。これをレビューとして **応用数理 26 巻 (2016) pp. 15-23** にまとめて公表した。

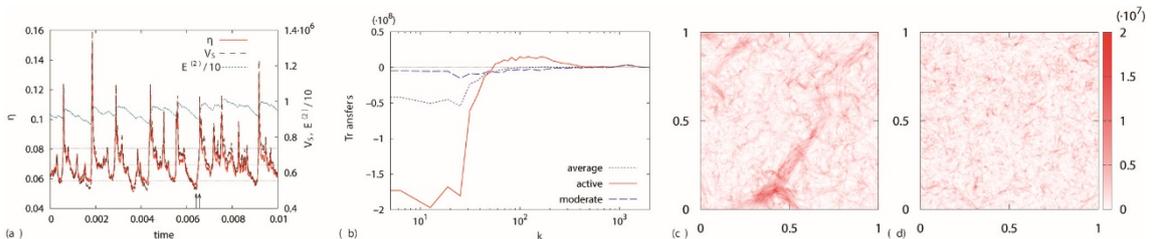


図 3 (a)線形エネルギー $E^{(2)}$ 、非線形エネルギー V_s 、とその比で定義された非線形性 η の間欠的時間発展、(b)活発期、平穏期、と全体の平均エネルギー輸送、(c)活発期と(d)平穏期の伸縮エネルギー場の構造。

この弾性薄板の波動乱流を詳しく調べると、図 3 に示すように、活発期と平穏期という多重状態があり、それぞれで波数空間におけるエネルギー輸送も実空間に現れる伸縮エネルギー場の構造も異なることがわかった。図 3 (a)の縦軸の η は、線形エネルギー $E^{(2)}$ と非線形エネルギー V_s との比 $\eta = V_s/E^{(2)}$ で、非線形性の強さの指標となる。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空間内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弱乱流理論に従い共鳴相互作用によってエネルギーがカスケードする。さらに、図や式は省略してあるが、実空間の面積分により各粗視化スケールでのエネルギーを調べることで、波数空間の非局所的かつ間欠的なエネルギー輸送は、図 3 (c)に示された伸縮エネ

ルギーの実空間において間欠的に形成される繊維束状構造によって生じることが明らかとなった。一様等方な系で実空間の非等方な構造が、波数空間の非局所相互作用の担い手となっているのである。これらの結果を **Phys. Rev. E96(2017)23106** として公表した。

また、上記のように低波数帯への外力の場合に強・弱乱流状態が共存することを見出したが、高波数帯への外力の場合に2次元流体乱流のようにエネルギーが低波数側に流れ、凝縮のような様相を示すことも分かってきた。弱乱流理論では数学的構造の美しさから複素振幅を要素波とし、上記DNSにおいてもその表現を用いたが、先のエネルギー輸送の解析結果や振動の物理を考えると、運動量と変位の時間発展の連立方程式を用いるほうが自然に見える。この表現における外力や散逸に対するエネルギースペクトルの依存性などを調べ、国際学会 (24th ICTAM) や物理学会などで発表した。

壁との相互作用を調べるため、当初予定していなかった矩形断面容器内の流れをシミュレーションし、矩形断面容器の壁との相互作用で生じるバスタブ渦の生成機構や非定常流に至る遷移過程を調べた。分岐と線形安定性解析を行い、ヒステリシスと関係する亜臨界分岐は捉えられなかったが、ピッチフォーク分岐や Hopf 分岐と流れの対称性の破れとの関係を明らかにした。日本流体力学学会などで発表し、**Phys. Rev. Fluids 2(2017)083903** に論文として公表した。壁の角により発生する渦とその相互作用であり、平板や曲面壁の場合と異なる知見を与えてくれる。

研究分担者の交替があり研究対象の流れを平行平板間乱流から回転球殻内乱流に変更した。DNS をするコードを開発し、乱流状態を調べるためのプログラムのチューニングとパラメータ探索を行った。この系は緯度による非一様性があり空間的多重状態が期待されるが、回転の制御のパラメータ以外にも幾何学的なパラメータがあり探索域の選択が難しい。これまでの先行研究の結果をヒステリシスという観点から見直し、Taylor-Proudman の定理からも示唆されることではあるが、探索パラメータ領域を内・外球殻のギャップが広く同方向に回転する場合に絞った。必要な精度を保ちつつ高い Reynolds 数の計算をするためには当初の想定よりも大規模な計算が必要ながわかった。内殻と外殻を同方向に回転させ更に差分回転を与えると、その大きさによりトロイダル渦が卓越する状態 (図4 (a) と (b)) と系の回転軸方向の渦柱が卓越する状態 (図4 (c) と (d)) との遷移が現れ、初期状態の記憶により多重状態となり得ることがわかった。緯度による非一様性があり解析は難しいが、球殻による剪断という面積力から生じる遠心力とコリオリ力という体積力の優劣によるものと思われる。

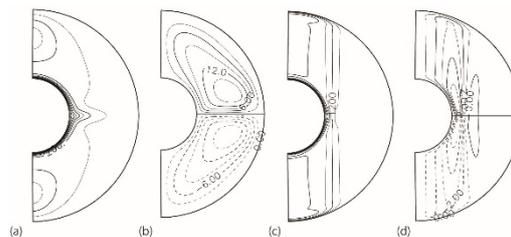


図4 同方向差分回転球殻内に現れる軸対称流。トロイダル渦の(a)角速度と(b)子午面流線。回転軸方向渦の(c)角速度と(d)子午面流線。

波有乱流については、回転乱流から始めた。この系には慣性波が存在し、低波数側に非等方性の波動乱流状態と高波数側に3次元等方性のKolmogorov乱流状態が共存することを、DNSにより確認した。また、回転系ではTaylor-Proudmanの定理が知られているが、エネルギースペクトルが冪則を示すような十分に発達した乱流においてもRossby数が小さくなると系の回転軸(z軸)に平行な大規模柱状渦が現れることを確認した。図5には、z軸まわりの角速度 Ω や低波数に与えたTaylor-Green流タイプの外力の振幅 f_0 に対する非等方テンソル $b_{ij} = \delta_{ij}/3 - \langle u_i u_j \rangle / \langle |u|^2 \rangle$ のzz成分 b_{zz} の依存性を、また、図6には、双安定となるパラメータ領域における各ブランチの実空間での様子を示してある。z軸に垂直な平面内の速さ分布をカラー等値線で底面に、空間構造を渦度のz成分で色付けされた等渦度面により描いてある。大規模な柱状渦の出現により、3次元等方的な乱流(図5の上ブランチ、図6(a))と渦柱構造による準2次元的な乱流(図5の上ブランチ、図6(b))との間の遷移が、 Ω や f_0 を増加または減少させたときに異なる値で起こることを見出した。十分に発達した乱流においてヒステリシスを示す系として知られているのは、Taylor-Couette流のような閉じた系のみであったが、壁がない開いた系でもヒステリシスのような振る舞いが起こりうることが分かった。これらの結果は、国際学会 (24th ICTAM および 69th APS/DFD) や日本物理学会などで発表した。

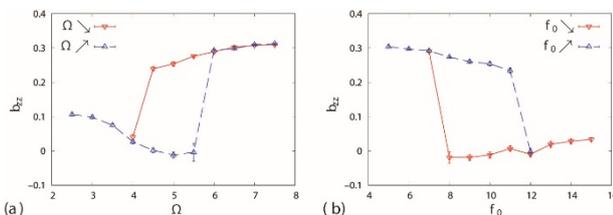


図5 (a)系の軸回転角速度 Ω と(b)外力の振幅 f_0 に対する非等方テンソルのzz成分 $b_{zz} = 1/3 - \langle u_z^2 \rangle / \langle |u|^2 \rangle$ の依存性。

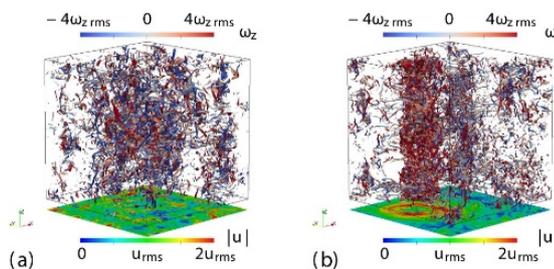


図6 空間構造の等渦度面表示とxy平面内の速さ分布。双安定域での(a)3次元的乱流と(b)準2次元的乱流。

と渦柱構造による準2次元的な乱流(図5の上ブランチ、図6(b))との間の遷移が、 Ω や f_0 を増加または減少させたときに異なる値で起こることを見出した。十分に発達した乱流においてヒステリシスを示す系として知られているのは、Taylor-Couette流のような閉じた系のみであったが、壁がない開いた系でもヒステリシスのような振る舞いが起こりうることが分かった。これらの結果は、国際学会 (24th ICTAM および 69th APS/DFD) や日本物理学会などで発表した。

それらをまとめて論文として *Phys. Rev. Fluids* 2(2017)092602 に公表した。

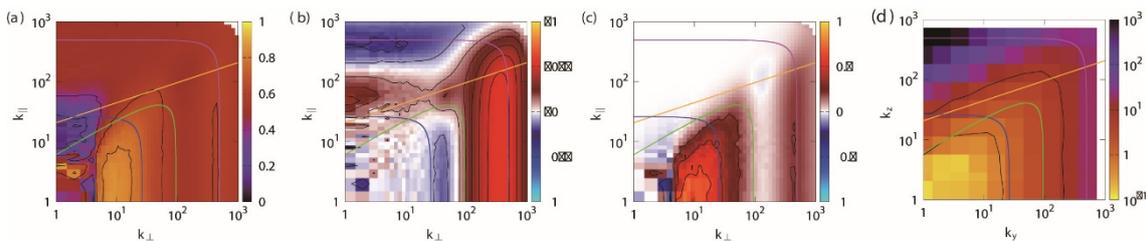


図 7 エネルギー比および相対振動数揺らぎによる波数空間における波動乱流領域の同定。カラー等値線は (a) K_w/K , (b) $(K_w - V)/(K_w + V)$, (c) K_{zPA}/K , (d) $\delta\sigma/\sigma$ 。図中に描かれた緑、黄、青、赤紫の曲線は其々、 $\chi = 1/3$ の波数、 $\chi_{2D} = 1/3$ の波数、浮力波数、Ozmidov 波数を表す。

回転乱流や成層乱流のような非等方乱流のスペクトルを調べる場合には、一様等方性乱流のように球面で積分したり各方向の余次元平面で積分したりしてスカラー化することで消失したり歪められる情報が出てくることや、余次元波数を固定し積分しないスペクトルや $k_\perp k_\parallel$ 平面での分布を調べることの有用性を示した。成層乱流では内部重力波が重要な役割をする弱乱流と渦が重要な役割をする Kolmogorov 乱流とが共存することがある。異種乱流の境界の解析では、時間スケールに着目されることが多く、Brunt-Väisälä 周波数を N 、平均エネルギー散逸率を ϵ とし、Ozmidov 波数は $k_o = \sqrt{N^3/\epsilon}$ 、浮力波数は $k_b = N/u_{Lrms}$ で定義されるが、どちらも等方的である。2次元と3次元の渦回転時間 τ と τ_{2D} を非線形時間とし、其々の線形振動数 σ と σ_{2D} との比 $\chi = 1/(\sigma\tau)$ と $\chi_{2D} = 1/(\tau_{2D}\sigma_{2D})$ で非線形性を見積った。更に、Cartesian 分解を用いて、渦モードと波モードと鉛直剪断水平流に分解し、それぞれに対応した運動エネルギー、 K_v と K_w と K_s を導入し、ヘリカル分解を用いて、運動エネルギーを等方成分 K_I 、 \mathbf{k} 向き指向性非等方成分 K_{DA} 、 \mathbf{u} 向きの極性非等方成分 K_{PA} に分解した。特に z 成分 $K_z = K_\parallel$ を同様に分解した極性非等方成分を K_{zPA} と書くことにする。図 7 に示すように、これらの運動エネルギーの比で波数空間での波動乱流の領域を同定することを提案した。妥当性の検証のために、図 7(d) に示したように、弱乱流理論で用いられる複素振幅 $a(t)$ の時間発展のスペクトルから線形振動数からのずれ $\delta\sigma$ を見積もり、非線形性を直接評価した。これらの結果を *Phys. Rev. Fluids* 4(2019)104602 として公表した。

エネルギーフラックスは、エネルギーカスケードのある乱流解析で重要な役割をする。一様等方性乱流では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が、ここで扱っているような非等方性乱流では波数空間に分布したベクトル場となり、一様等方性乱流のように一意に決まらない。この不定性は Navier-Stokes 方程式の非線形項による 3 波相互作用に由来する。2つの仮説を導入することで、Moore-Penrose の逆行列を用いて、非等方性乱流のエネルギーフラックススペクトルを決定する方法を提案した。これはフラックススペクトルがポテンシャル流となっていることと同等である。このアイデアを一様等方性乱流や回転乱流に適用することにより、図 8 に示すように、系の対称性や弱乱流理論と矛盾しない結果を得た。しかしながら、慣性波が重要な役割をする弱乱流領域と渦が重要な役割をする Kolmogorov 乱流領域の境界に沿ってエネルギーが流れることが critical balance により予想されているが、それとは異なる結果となった。低波数側での急勾配のエネルギースペクトルだけではなく低波数域でも重要な役割をしている。これらの結果を、国際学術誌に投稿中である。

外力や散逸に対する弾性薄板の波動乱流の依存性や、回転乱流における critical balance からのずれという結果から、乱流における慣性領域の存在と其処でのエネルギーの流れが、次の問題として浮かんでくる。回転球の接平面 (β 平面) 上の乱流を調べた。この系は、モデル的な流れではあるが、非等方性乱流として豊富な情報をもち 3 次元流の計算と比べて負荷が軽いので、慣性領域に関する様々なアイデアを調べるのに適している。上で提案した波数空間でのエネルギー流れを評価する手法を適用し、Rhines のダンベルスペクトルを回り込むようにエネルギーが流れ、結果として実空間で緯度方向に構造を持つ帯状流を作り出していることを見出した。また、本研究により、波数空間における波や渦が重要な役割をする各乱流状態の領域の同定およびエネルギーの流れを調べることもできるようになった。得られた手法を領域の境界に用いることで、波と渦との間の相互作用を波数空間におけるエネルギーの流れとして捉えることが可能となる。つまり、乱流中に自発的に現れる波や渦といった構造のダイナミクスや相互作用を波数空間から解析できるようになったのである。この研究の流れは、令和元年度から始まった科研費の研究につながっている。

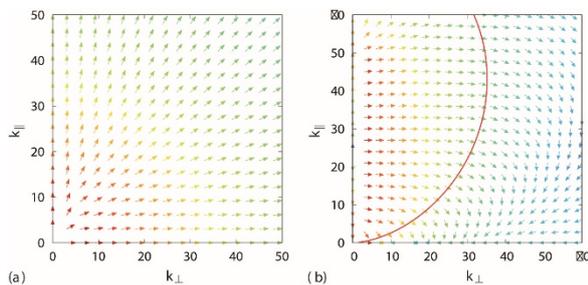


図 8 大スケール外力による低波数域のエネルギーフラックススペクトル。(a)一様等方性乱流と(b)回転乱流。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

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 -
1. 著者名 Yokoyama Naoto, Takaoka Masanori	4. 巻 2
2. 論文標題 Hysteretic transitions between quasi-two-dimensional flow and three-dimensional flow in forced rotating turbulence	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 92602
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.2.092602	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 96
2. 論文標題 Integrated analysis of energy transfers in elastic-wave turbulence	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 23106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.023106	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 Mizushima Jiro, Abe Kazuki, Yokoyama Naoto	4. 巻 2
2. 論文標題 Sequential transitions of bathtub vortex flow	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 83903
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.2.083903	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 横山直人、高岡正憲	4. 巻 26
2. 論文標題 Foeppel-von Karman方程式に従う弾性波の乱流	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 応用数理	6. 最初と最後の頁 15-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11540/bjsiam.26.4_15	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29件(うち招待講演 2件/うち国際学会 11件)

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

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ベクトル
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

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
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 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散逸の役割
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高岡正憲、横山直人
2. 発表標題 弾性波動乱流における外力とエネルギー輸送の関係
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M.Takaoka, N. Yokoyama
2. 発表標題 Memories of initial conditions and large-scale columnar vortices in forced rotating turbulence
3. 学会等名 16th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N.Yokoyama, M. Takaoka
2. 発表標題 Separation of gravity waves in stratified turbulence
3. 学会等名 16th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 横山直人、高岡正憲
2. 発表標題 回転乱流のエネルギー輸送
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高岡正憲、横山直人
2. 発表標題 弾性波動乱流の複素振幅における外力や散逸について
3. 学会等名 日本物理学会 2017 年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 横山直人、高岡正憲
2. 発表標題 回転乱流のエネルギー輸送
3. 学会等名 日本物理学会 2017 年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Yokoyama, M. Takaoka
2. 発表標題 Identification of weak-turbulent wave-number region in stratified turbulence
3. 学会等名 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 横山直人、高岡正憲
2. 発表標題 回転系における慣性波乱流のエネルギースペクトル
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masanori Takaoka, Naoto Yokoyama
2. 発表標題 Dependence of energy spectra on forcing scales in elastic wave turbulence
3. 学会等名 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Naoto Yokoyama, Masanori Takaoka
2. 発表標題 Initial-condition dependence of large-scale structures in rotating turbulence
3. 学会等名 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 高岡正憲、横山直人
2. 発表標題 高波数外力で維持される弾性波動乱流における初期条件依存性
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 横山直人、高岡正憲
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 松田玲依、水島二郎、横山直人
2. 発表標題 矩形断面容器中でのバスタブ渦の発生と遷移
3. 学会等名 日本流体力学会年会2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Naoto Yokoyama, Masanori Takaoka
2. 発表標題 Large-scale columnar vortices in rotating turbulence
3. 学会等名 69th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2016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	水野 吉規 (MIZUNO YOSHINORI) (70402542)	同志社大学・理工学部・助教 (34310)	2016年10月に削除
研究分担者	横山 直人 (YOKOYAMA NAOTO) (80512730)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	2018年12月に削除
研究分担者	佐々木 英一 (SASAKI Eiichi) (60710811)	同志社大学・理工学部・助教 (34310)	2017年5月に追加