

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 7 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015 ~ 2017

課題番号：15K05288

研究課題名 (和文) 完結近似方程式の構築とそれを用いた地衡流乱流の理論的研究

研究課題名 (英文) Construction of closures and theoretical studies on geostrophic turbulence using closures

研究代表者

岩山 隆寛 (Iwayama, Takahiro)

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10284598

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,100,000 円

研究成果の概要 (和文) : 一般化された2次元流体系の強制散逸乱流, しばしば乱流と呼ばれる, におけるエンストロフィー慣性領域のエンストロフィースペクトルを理論的に研究した. この系の支配方程式は実数パラメーター β を含み, β は系のダイナミクスに影響する. これまでの数値実験によりエンストロフィー慣性領域のエンストロフィースペクトルは波数の冪則に従い, $\beta < 2$ では冪は $\beta - 2$ に依存するが, $\beta > 2$ では冪は1となることが知られている. この系の渦減衰準正規Markov化完結近似方程式の解析により, $\beta = 2$ におけるエンストロフィースペクトルの冪則の転移は, 波数空間内の非局所相互作用が原因であることを示した.

研究成果の概要 (英文) : The enstrophy spectrum in the enstrophy inertial range for forced-dissipative turbulence governed by the generalized two-dimensional turbulence, the so-called β -turbulence was theoretically investigated. The governing equations of this system includes the real parameter β and the parameter affects to the dynamics of this system. The preexisting studies indicate that the enstrophy inertial range spectrum obeys the power-law with a negative exponent. The exponent depends on β for $\beta < 2$, however, it is independent of β for $\beta > 2$. That is, the exponent exhibits a transition at $\beta = 2$. Using the eddy damped quasi-normal Markovian closure approximation equation of this system, the transition of the exponent was successfully derived theoretically.

研究分野：地球流体力学

キーワード：乱流 一般化された2次元流体 2次元乱流 エンストロフィー慣性領域 非局所相互作用

1. 研究開始当初の背景

いくつかの地球流体力学的2次元系を統一的に記述できる一般化された2次元流体系の乱流状態(しばしば α 乱流と呼ばれる)の研究が、最近15年間に精力的に行われている。乱流特性として一般的に最も関心の高いのは、波数空間内のスペクトルで、 α 乱流ではエンストロフィースペクトルがそれにあたる。強制散逸 α 乱流において、波数の最も低い赤外領域のエンストロフィースペクトルは波数の5乗に比例することが、渦減衰準正規マルコフ化(EDQNM)完結近似方程式と呼ばれる乱流のモデル方程式を用いた解析的研究から予測され、直接数値実験によってその予測の正当性が確認されている(Iwayama and Watanabe, 2014)。一方、赤外領域よりも高い波数領域のエネルギー慣性領域やエンストロフィー慣性領域のエンストロフィースペクトルに関しては、次元解析によるスペクトルの冪指数の予測があるものの、完結近似方程式を用いた理論的・解析的な予測は今まで行われてこなかった。

2. 研究の目的

一般化された2次元流体系の強制散逸乱流におけるエンストロフィー慣性領域の力学をEDQNM完結近似方程式を用いて解析した。一般化された2次元流体系は、移流される物理量(一般化渦度)と流れ関数との関係式にパラメータ α を含み、この α が一般化渦度と速度とのスケール分離を支配する。さらに非線形項を通じて波数空間内の相互作用の局所・非局所性に影響を与える。過去の研究(Pierrhumbert, et al., 1994)によると $\alpha = 2$ を境に、エンストロフィー(一般化渦度の2次モーメント)スペクトルが能動的スカラー場に特有のものから、受動的スカラー場に特有なものに変化することが知られていた。このスペクトルの転移は、Watanabe and Iwayama (2004)による現象論(修正KLB理論)により説明されていた。このべき指数の転移をEDQNM完結近似方程式から解析的に導出すること、もし必要なら新たな完結近似方程式の導出も行うことを目的とした。

3. 研究の方法

エンストロフィー輸送に係る三波相互作用の詳細を、EDQNM完結近似方程式を用いて解析し、エンストロフィー慣性領域の形成に係る三波相互作用の性質を明らかにした。

4. 研究成果

EDQNM完結近似方程式を解析することにより、エンストロフィー慣性領域では高波数から低波数へ向かうエンストロフィーフラックスは α の増大とともに小さくなり、 $\alpha = 2$ でほとんどゼロになる(図1参照)、さらに低

波数から高波数へ向かうエンストロフィーフラックスは α の増大とともに、より非局所な三波相互作用によって担われることを示した(図2参照)。

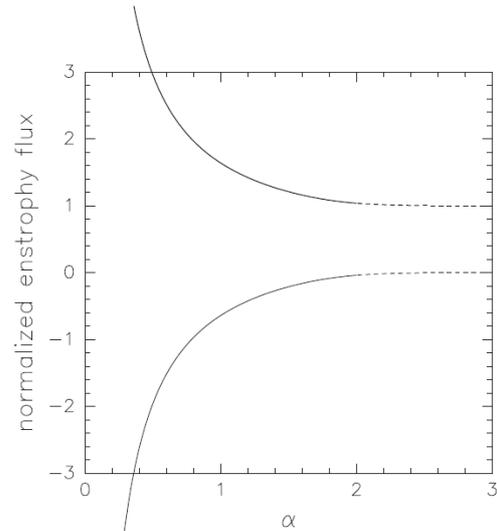


図1: 細実線は高波数から低波数へ向かうエンストロフィーフラックス。太実線は低波数から高波数へ向かうエンストロフィーフラックス。ともに、全エンストロフィーフラックスで規格化してある。

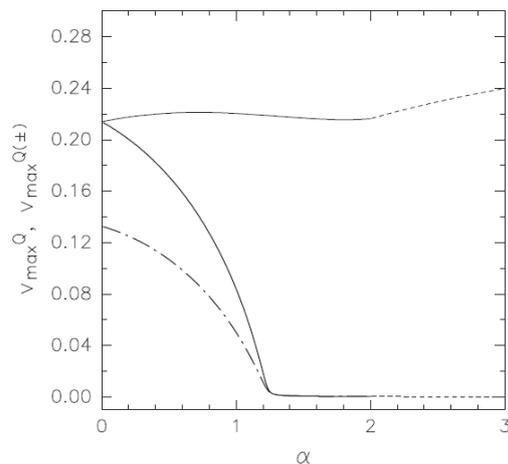


図2: エンストロフィー輸送に係る三波の形の α 依存性。三波の形は三波を構成する最小波数と中間の大きさを持った波数との比 ν で表し、 ν が小さいほどより非局所な三波を表す。エンストロフィー輸送は、 ν の関数である非局所性関数 L の積分としてあらわされ、 L は単峰関数である。図の縦軸は L が峰となる ν の値を示している。太実線が今注目すべき低波数から高波数に向けてのエンストロフィー輸送の非局所関数の峰 ν の α 依存性を表している。

これらの特徴を念頭におき、EDQNM完結近似方程式のエンストロフィーフラックスを漸近展開して非局所相互作用による効果を取り出すことによって、 $\alpha = 2$ でのエンストロフィースペクトルの転移と $\alpha > 2$ でのエ

ンストロフィースペクトルの冪則を解析的に導出した。EDQNM による解析は、修正 KLB 理論で仮定されていた特性時間の非局所性だけでなく、エンストロフィーフラックスが非局所な三波相互作用によって担われることがスペクトルの転移に必要なことを示している。

なお、実際に非局所相互作用がエンストロフィースペクトルの転移に寄与していることを EDQNM 関係近似方程式の数値計算によっても明らかにした。通常、完結近似方程式を数値計算する場合にはより幅広い波数領域を実現するための波数空間を対数で等分割になるように離散化する。このような場合には、非局所相互作用の効果が数値計算の中には取り入れられていない。一方、波数空間を線形に等間隔で離散化した場合には、数値計算に非局所相互作用が取り込まれている。両者の計算を比較することにより、波数空間内の非局所相互作用の効果を見ることが出来る。

図 3 に示したのが、波数空間を線形に離散化した場合の計算で、 α が 2 よりも大きな場合にはエンストロフィーの冪則のべき指数が -1 に飽和している。それに対して、図 4 に示した波数空間を対数で離散化した場合にはべき指数は α に依存し、転移が見られない。このことは波数空間内の非局所相互作用が、 $\alpha > 2$ の場合には重要であり、それがエンストロフィースペクトルの冪則の指数の決定に大きな役割を果たしていることを示している。

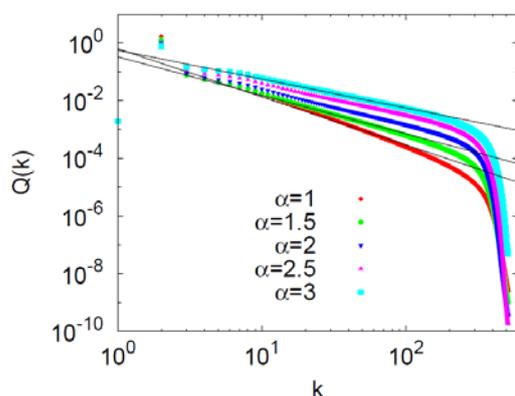


図 3 : EDQNM 完結近似方程式の数値計算によって得られたエンストロフィースペクトル。波数空間を線形離散化した場合。

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 4 件)

① 岩山隆寛, 渡邊威, α 乱流におけるエンストロフィー慣性領域の力学, *京都大学数理解析研究所 講究録* 2048, 「高レイノルズ数の流れを記述するモデルの数理」,

(2017 年 10 月), 1 - 13 . 【査読無】

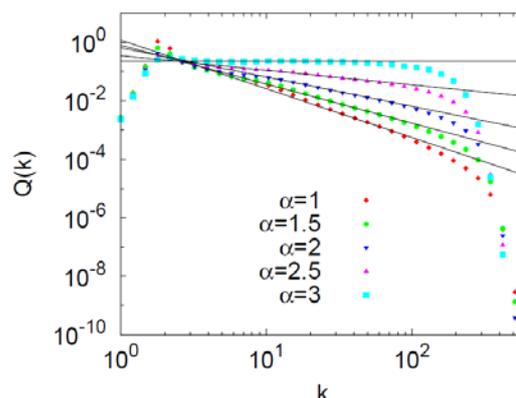


図 4 : EDQNM 完結近似方程式の数値計算によって得られたエンストロフィースペクトル。波数空間を対数離散化した場合。

② Iwayama, T., and Watanabe, T., Enstrophy inertial range dynamics in generalized two-dimensional turbulence. *Physical Review Fluids* vol. 1(2016), 034403 (17 pages) . 【査読有】

③ 岩山隆寛, 村上真也, 渡邊威, 2 次元乱流における異常渦粘性, *京都大学数理解析研究所 講究録* 1944, 「乱流研究のフロンティア」, (2015 年), 1 - 14. 【査読無】

④ 岩山隆寛, 渡邊威, 2 次元減衰性乱流における普遍的赤外領域スペクトルと不変量, *京都大学数理解析研究所 講究録* 1943, 「大スケール流体運動と乱流揺らぎ」, (2015 年), 1 - 15 . 【査読無】

[学会発表] (計 15 件)

① 岩山隆寛, 岡崎正悟, 渡邊威, “地衡流乱流における Danilov の不等式”, 第 19 回地球流体力学研究集会「地球流体における渦の形成・構造・作用の力学」, 2018 年 3 月 5-6 日 (3 月 5 日発表), 東京大学大気海洋研究所.

② 岩山隆寛, 地球大気における大規模・中規模乱流のエネルギースペクトル, 公益社団法人 土木学会 水工学委員会 基礎水理部会 基礎水理シンポジウム 2017 「乱流研究クロスオーバー: 流体物理学から水理学まで」, 2017 年 12 月 6 日 (12 月 6 日発表), 土木学会 講堂.

③ 岩山隆寛, 地衡流乱流における Danilov の不等式, 大気境界層ミニワークショップ, 神戸大学大学院理学研究科惑星科学研究センター, 2017 年 11 月 20 日 (11 月 20 日発表), 神戸大学大学院理学研究科惑星科学研究センター.

④ 岩山隆寛, 岡崎正悟, 渡邊威, “準地衡

流 2 層モデルにおける Nastrom-Gage スペクトルの形成メカニズムに関する数値実験的研究”, 京都大学 数理解析研究所研究集会「非一様乱流の数値」, 2017 年 7 月 26--28 日(7 月 27 日発表), 京都大学数理解析研究所.

⑤岡崎正悟, 岩山隆寛, “準地衡 2 層モデルにおける Nastrom-Gage スペクトルの形成メカニズムの検証”, 日本気象学会 2017 年度春季大会, 2017 年 5 月 25--28 日(5 月 25 日発表), 国立オリンピック記念青少年総合センター, B161.

⑥村上美雪, 岩山隆寛, “非線形・非静力学・圧縮性モデルを用いた内部重力波の数値実験的研究”, 第 18 回地球流体力学研究集会「地球流体における構造の形成と変動の力学」, 2017 年 3 月 2--3 日(3 月 2 日発表), 東京大学大気海洋研究所.

⑦岡崎正悟, 岩山隆寛, “準地衡 2 層モデルを用いた地衡流乱流の波数空間動力学の研究”, 第 18 回地球流体力学研究集会「地球流体における構造の形成と変動の力学」, 2017 年 3 月 2--3 日(3 月 2 日発表), 東京大学大気海洋研究所.

⑧ T. Iwayama and T. Watanabe, Spectral dynamics in enstrophy inertial range in α -turbulence, 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics - ICTAM 2016, 2016 年 8 月 21--26 日 (short talk: 8 月 23 日発表, poster: 8 月 22-23 日発表), Palais des congres, Montreal, Canada.

⑨岩山隆寛, 渡邊威, “ α 乱流のエンストロフィー慣性領域の力学”, 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値」, 2016 年 7 月 13--15 日 (7 月 13 日発表), 京都大学 数理解析研究所.

⑩岩山隆寛, 渡邊威, “ α 乱流におけるエンストロフィー慣性領域の力学”, 日本気象学会 2016 年度春季大会, 2016 年 5 月 18--21 日 (5 月 18 日発表), 国立オリンピック記念青少年総合センター. D159.

⑪岩山隆寛, “2 次元乱流の渦粘性”, 複雑熱流体工学シンポジウム, 2016 年 5 月 9 日 (5 月 9 日発表), 神戸大学工学研究科.

⑫岩山隆寛, “一般化された 2 次元流体系の Kelvin-Helmholtz 不安定”, 伝熱学会関西支部第 23 期第 1 回講演討論会, 2016 年 4 月 28 日 (4 月 28 日発表), 京都大学桂キャンパス.

⑬岩山隆寛, 渡邊威, “一般化された 2 次元流体系の強制散逸乱流におけるエンストロフィー慣性領域の力学”, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19--22 日 (3 月 22 日発表), 東北学院大学 泉キャンパス. 22aBU-7. 日本物理学会講演概要集 p. 3106.

⑭岩山隆寛, 渡邊威, “一般化された 2 次元流体系の強制散逸乱流におけるエンストロフィー慣性領域の力学”, 第 17 回地球流

体力学研究集会, 2016 年 3 月 1--2 日 (3 月 1 日発表), 九州大学応用力学研究所.

⑮岩山隆寛, 渡邊威, “完結近似方程式を用いた α 乱流のエンストロフィー慣性領域の解析”, 日本流体力学会年会 2015, 2015 年 9 月 28--30 日 (9 月 29 日発表), 東京工業大学 大岡山キャンパス.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩山 隆寛 (IWAYAMA, Takahiro)
神戸大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 10284598

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

渡邊 威 (WATANABE, Takeshi)
名古屋工業大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 30345946

村上 真也 (MURAKAMI, Shin-ya)

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
PLANET-C プロジェクトチーム

研究開発員

研究者番号: 30345946

(4) 研究協力者

岡崎 正悟 (OKAZAKI, Seigo)
神戸大学・大学院理学研究科

村上 美雪 (MURAKAMI, Miyuki)

神戸大学・大学院理学研究科