

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：63902

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610194

研究課題名(和文) 対称性が破れた系の乱流輸送に関する基礎実験

研究課題名(英文) Experimental study of turbulence transport with symmetry breaking

研究代表者

永岡 賢一 (Nagaoka, Kenichi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：20353443

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)：対称性が破れた系の乱流輸送に関する実験研究として、回転軸が観測領域に平行な場合の回転系の実験を実施した。液晶に混入した微粒子追跡から乱流拡散係数を評価することができるが、粒子ごとのばらつきが大きく、回転軸に平行方向と垂直方向の乱流輸送に回転の影響を見出すことはできなかった。液晶の透過光の計測から視線方向速度の2次元空間分布を計測できるため、速度場の波数スペクトルの評価を行った。回転軸に平行方向と垂直方向の違いを調べた結果、高波数領域では両者はよく一致したが、低波数領域では違いがみられ、乱流構造が回転軸方向に伸びる傾向を初めて観測することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Turbulent transport and structure formation was experimentally investigated using electro-hydrodynamic convection (EC) with symmetry breaking. We applied the rotation in the system for breaking symmetry, then the turbulent transport efficiencies were compared between parallel and perpendicular to the axis of applied rotation. Because of large scattering among particles traced in the EC, any effects of rotation on the turbulent transport were identified. On the other hand, the wave number spectrum of turbulent velocity parallel to the line of sight have a different slope with respect to the wave number between parallel and perpendicular to the axis of rotation, which is caused by inverse-cascade in the direction parallel to the rotation axis. We have identified for the first time in the EC the stretching of turbulent vortex in the direction parallel to the rotation axis, which is identical to the tendency observed in normal fluid turbulence such as Taylor column.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：乱流 構造形成 輸送 対称性の破れ

1. 研究開始当初の背景

一様等方乱流では、Kolmogorov スケーリング則が成り立つことが知られており、数値シミュレーション研究が精力的に行われている。一方で、現実の世界では、渦巻き銀河、星や惑星の大気循環、台風などに代表される様々な構造（非一様性）が乱流中に形成されることが知られている。このような構造形成を伴う乱流の性質が、天文学、地球惑星科学、プラズマ科学、流体力学などに共通する重要な研究課題となっている。

近年、核融合を目指した実験室プラズマ中の乱流輸送の研究において、乱流駆動の巨視的流れ構造の研究が急速に進展している。磁場閉じ込めプラズマ中では、乱流強度の空間不均一や磁場のシア（捩れ）などが乱流場の対称性を破り、レイノルズ応力（乱流による流れ場の駆動力）を発生させることが明らかになってきた。また、太陽対流層でも回転や圧力勾配が対称性を破り、巨視的循環構造を形成させると考えられており、トラスプラズマの回転駆動過程との共通性が指摘されている(Diamond, IAEA-FEC, 2012)。しかしながら、乱流中において“対称性の破れ”から流れ場が形成される実験的検証は、これまで行われていない。

2. 研究の目的

上記のような背景のもと、本研究では、極めて制御性に優れた乱流に“対称性の破れ”を導入することにより、流れ場構造形成の物理過程、及び“対称性の破れ”が乱流中の輸送特性に与える影響を実験的に解明することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、液晶を用いた電気対流乱流を様々な系で発生させ、その中の乱流状態と乱流輸送過程の実験的な評価を行う。具体的にはこれまで開発してきた平面セルの電気対流乱流実験を発展させ、乱流強度に空間勾配を導入し、乱流輸送特性の評価を行う。次に、高速回転ステージを製作し、回転場と乱流が結合する乱流状態を生成し、その輸送特性の評価から回転が乱流輸送に与える影響を明らかにする。これらの実験を通じて、対称性の破れにより乱流から構造が形成する物理過程と対称性の破れが乱流輸送に与える影響を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 回転ステージ上での電気対流実験の構築：

本研究では、液晶乱流に与える回転の影響を調べるために、回転ステージ上での実験を構築した。図1にその概略を示す。液晶

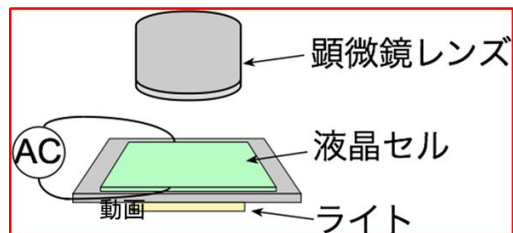
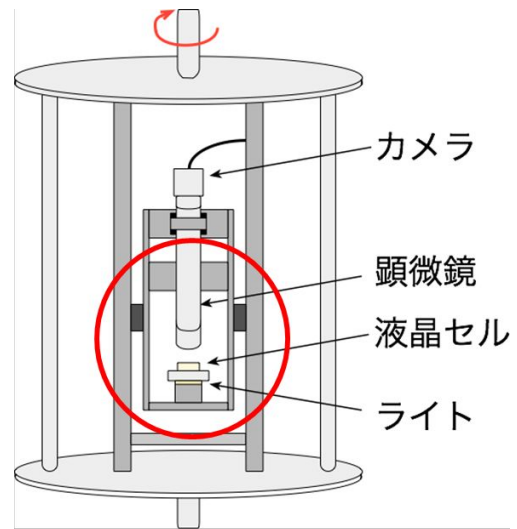


図1. 回転ステージ上での電気対流実験の概略図。(上)回転ステージの全体図。(下)液晶セル、光源、計測系の詳細図。

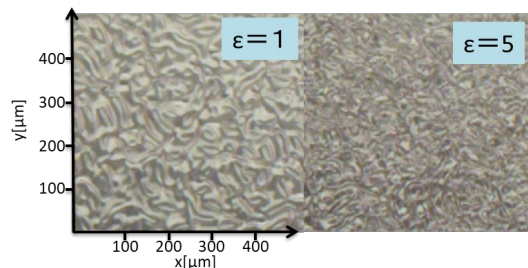


図2. 液晶乱流の観測例。印可電圧を上げる（をあげる）と対流構造が小さくなり、発達した乱流へと変化する。

セル、顕微鏡、カメラなど実験に必要な機器をすべて回転ステージ上に、設置した。これにより回転数をあげても計測系に生じる影響を最小に抑えた。また、液晶セル、顕微鏡、カメラを一体として、回転軸から傾けることが可能であり、カメラ視線方向と回転軸を並行から垂直まで変えることが可能となっている。AC電圧を印可することにより液晶セル中に対流を発生させ、電圧を上げることにより乱流状態へと遷移する。液晶を透過する光の濃淡は、視線方向の速度場の分布を示している。その実験観測の一例を図2に示す。電圧を上げる（を増加させる）ことにより、より発達した（レイノルズ数の大きい）乱流へ変化する様子がわかる。

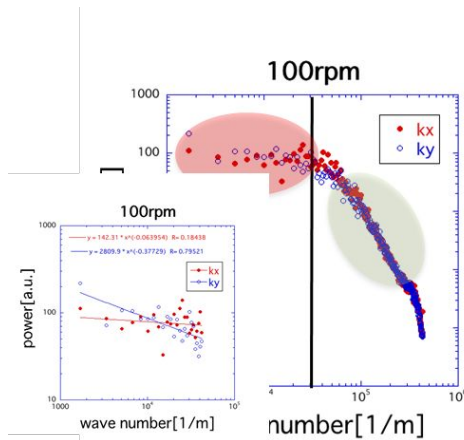


図3. 視線方向流速の波数スペクトル。Kxは、回転軸と垂直方向波数、kyは回転軸に平行な波数。挿入図は、低波数領域の拡大図。y方向は低波数領域に逆カスケードしている傾向がみられる。

(2) 乱流スペクトルへの回転の影響：
 回転を加えた時の乱流スペクトルを計測する実験を行った。図3に回転軸とカメラ視線を垂直にした場合の計測結果の一例を示す。波数 k_x は、回転軸に垂直方向、波数 k_y は回転軸方向の波数に対応している。高波数領域では、両者にほとんど差はないが、低波数領域（図中赤くハッチした領域）では、わずかな差が見られる。この低波数領域の波数依存性の幂を評価し、x方向とy方向の差を図4に示す。回転数を上げると対称性が破れていく様子がわかる。回転を上げることによりy方向（回転軸方向）の幂が小さくなることに起因しており、このことは、乱流の構造が回転軸方向に大きく伸びることを意味している。通常流体では、回転軸方向に Taylor 柱と呼ばれる渦構造が伸びることが知られており、電気対流乱流中でも回転により通常流体と同様の渦構造の伸長を初めて観測することに成功した。

(3) 乱流拡散係数の回転依存性
 液晶中に混入させた微粒子を追跡することで電気対流乱流中の局所的な速度場を可視化することが可能であり、この粒子追跡から乱流拡散を評価することも可能である。蛍光粒子を用いた計測系を新たに構築し、乱流中の粒子追跡精度を格段に向上させることに成功した。これを用いて図3に示した実験において、乱流拡散係数への回転の影響を調べたが、粒子ごとのばらつきが大きく、回転の影響を精度よく見出すことができなかった。今後は、さらに高い回転数における実験を行うことを計画している。

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0件)

[学会発表](計6件)

堀田彩, 永岡賢一, 吉村信次, 日高芳樹, 寺坂健一郎, 小澤直也,
 液晶電気対流を用いた回転乱流の拡散特性
 2016年度春季物理学会、大阪大学、大阪府豊中市、2017/3/17-20

永岡賢一, 堀田彩, 吉村信次, 日高芳樹, 前田和也, 小澤直也, 寺坂健一郎, 大島慎介, 小林達哉,
 乱流拡散への回転の影響の実験観測,
 日本物理学会(秋)、金沢大学、石川県金沢市、2016/9/13-16 13aAE12 (2016).

K. Nagaoka, S. Yoshimura, S. Hotta, N. Ozawa, Y. Hidaka, K. Maeda, K. Terasaka, S. Ohshima, T. Kobayashi, M. Kubo, R. Ishikawa and N. Yokoi
 Experimental Study of Turbulent Transport and the Effect of Rotation in an Electro-Convection
 6th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas, Tsukuba, Ibaraki, Japan, Jul. 11 - Jul. 16, 2016

永岡賢一, 吉村信次, 小林達哉, 日高芳樹, 前田和也, 寺坂健一郎, 大島慎介
 系の回転が乱流スペクトルと乱流輸送に与える影響
 日本天文学会、首都大学東京、東京都八王子市、2016/3/14-17

日高芳樹, 前田和也, 永岡賢一, 吉村信次, 寺坂健一郎, 岡部弘高, 原一広
 液晶電気対流による乱流構造と輸送現象についての研究
 2015年日本液晶学会討論会、東工大、東京都目黒区、2015/9/5-7

永岡賢一, 吉村信次, 日高芳樹, 寺坂健一郎, 小林達哉, 横井喜充, 政田洋平, 三浦英昭, 久保雅仁, 石川遼子
 回転流体中の乱流輸送の基礎実験
 Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ、新潟県新潟市、2014/11/18-21

K. Nagaoka, S. Yoshimura, Y. Masada, Y. Hidaka, N. Yokoi, S. Tsuneta, M. Kubo, R. Ishikawa, K. Terasaka, H. Miura
 A New Experimental Approach to Turbulent Transport in Complex Systems,
 日本地球惑星科学連合 2014, パシフィ

コ横浜、神奈川県横浜市, 2014/4/28-5/2

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永岡 賢一 (NAGAOKA Kenichi)
核融合科学研究所・プラズマ加熱物理研究
系・准教授
研究者番号：20353443

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

日高 芳樹 (HIDAKA Yoshiki)
九州大学・工学研究院・エネルギー量子工
学部門・助教
研究者番号：70274511

寺坂 健一郎 (TERASAKA Kenichiro)
九州大学・総合理工学研究院・エネルギー
科学部門・助教
研究者番号：50597127

政田 洋平 (MASADA Yohei)
愛知教育大学・教育学部・自然科学系・講
師
研究者番号：30590608

(4) 研究協力者

吉村 信次 (YOSHIMURA Shinji)
核融合科学研究所・高密度プラズマ物理研
究系・准教授
研究者番号：50311204

堀田 彩 (HOTTA Sayaka)
名古屋大学・大学院理学研究科・素粒子宇
宙物理学専攻・博士課程前期課程2年