

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月14日現在

機関番号：63902  
 研究種目：挑戦的萌芽研究  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23654072  
 研究課題名（和文） 太陽対流層の大規模流れ場模擬実験  
 研究課題名（英文） Experimental simulation of large-scale flow field in solar convection zone  
 研究代表者  
 永岡 賢一（核融合科学研究所 ヘリカル研究部 助教）  
 研究者番号：20353443

研究成果の概要（和文）：液晶を用いることで制御性が非常に優れた乱流を生成し、その乱流輸送特性の実験的評価を行った。乱流中の構造形成に対して、回転の効果を実験的に調べることに成功した。さらに、液晶を用いた電気対流を用いることで、球対称重力場の熱対流を電場が駆動する電気対流に置き換えることで、回転球殻における球対称対流場の実験研究が可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：Turbulent transport characteristics was experimentally investigated in an electrohydrodynamic turbulence in liquid crystal. It was found that it is possible to investigate the effects of rotation on structure formation in turbulence, and that it is also possible to investigate experimentally the spherical symmetric convection in a rotating spherical shell due to replacement of spherical symmetric convection by electrohydrodynamic convection.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：プラズマ物理

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：乱流、対流、太陽対流層、電気対流、液晶、構造形成、流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

ようこう」、「ひので」による太陽観測の成果により、太陽対流層の大規模流れ場の構造が明らかになってきた。磁場の発生機構（ダイナモ効果）や黒点活動周期（11年周期）に、対流層の流れ場の構造が深く関与していると考えられ、注目を集めている。球殻対流層の実験は、球対称な重力場の模擬が難しく、遠心力（2次元系）を使ったものに限られてきた。

## 2. 研究の目的

本研究では、電気対流を用いることで球対称な対流場（3次元系）を実現し、それに回転を加えることで、太陽対流層の模擬実験に挑

戦する。自発的な流れ場構造を太陽対流層と同じ幾何構造で行うことにより、太陽対流層の流れ場構造の理解を進展させ、磁場発生機構の解明に貢献することが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究は、2年の期間で、回転球殻シェル乱流の流れ場の自発的構造形成の実験を計画する。具体的には、次の2点を実施する。

- ① 平面及び球殻形状で電気対流を生成し、制御された乱流状態を作ること。
- ② 回転乱流中の自発的な流れ場形

成観測し、太陽対流層と同様の差動回転を生成する。

この実験に必要な液晶電気対流セルの製作及び、液晶に混入させた微粒子の追跡による速度場計測法の開発を行う。平面及び球殻乱流を回転させて、乱流中に自発的に形成される流れ場を観測し、太陽対流層と同様の赤道方向差動回転と緯度方向流れ場の励起を試みる。太陽対流層と同様の差動回転を観測できれば、その流れ場構造が形成されるパラメータ領域を同定することにより、その流れ場形成機構の理解を目指す。

## (2) 実験計画

実験は、構成がシンプルな平面電極を用いた実験と球殻形状電極を用いた実験の2段階に分けて実施する。その理由は、①これまで多数報告のある平面での乱流実験との比較が容易であること、②流れ場の計測をシンプルな系から初めて、確実な技術開発を行うこと、③2次元系と3次元系の実験を比較することで、3次元効果を明確に同定することなどである。最終的には球殻シェル構造で実験を行い、太陽対流層と同様の流れ場構造の励起を目指す。

## 4. 研究成果

本研究は、回転乱流場における流れ場の自発的構造形成という視点に基づき、太陽対流層や核融合プラズマの自発回転に共通する普遍性を理解するための実験研究である。この研究は、もともと核融合科学研究所と天文台の連携作業会合で議論されたものであり、機構連携活動のボトムアップとして提案されたプロジェクトである。平成23年度初めて採択され、実験環境整備、実験機器の整備、装置開発などが開始された。2年目となる平成24年度は、乱流の計測系の整備を含めて実験装置開発を進展させ、乱流実験が開始できた。以下に、代表的な乱流実験の結果と回転ステージにおける実験装置開発の進展をまとめる。

### (1) 乱流スペクトルの観測

電気対流は、液晶にある閾値以上の電圧をかけることで生じる対流である。本実験では、印加電圧を大きくする(レイノルズ数を増加させる)と対流の基本構造である厚みスケ-

ルの対流(ロール構造)から、高波数成分が急激に増加し、発達した乱流状態へ遷移する様子が観測され、空間・時間スケールのスペクトル構造を系統的に調べた。クロスパワースペクトルの解析から、乱流の相関長の評価を行い、印加電圧の上昇とともに、乱流の相関長が減少することが確認できた(図1参照)。液晶を用いた電気対流とほぼ同等の条件を用いた数値計算を現在実施している。今後は本実験で得られたスペクトル構造と数値計算結果との比較を行う予定である。

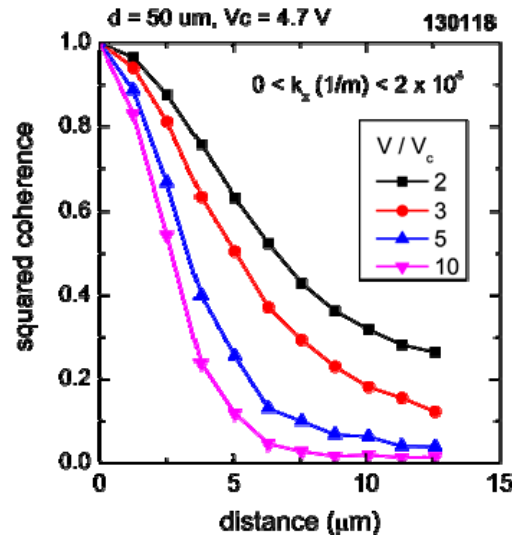


図1. 2点相関の距離依存性。発達した乱流ほど、相関の減衰は強くなる。

### (2) 拡散的粒子輸送の観測

液晶中に微粒子(tracer)を混入することにより、乱流中の局所的な流れを可視化することが可能となる。本実験では、液晶とほぼ同程度の密度を持つガラス球を用いた。微粒子の直径は、セルの厚みの1/10程度である。乱流状態では、ランダムに動き回る微粒子を観測し、フレーム毎の微粒子の位置を記録し、乱流中の局所的な流れ場の振る舞いを調べた(図2参照)。速度確率密度関数は、ほぼガウス分布的であり(図3参照)、微粒子の運動は、Hurst指数=0.5の拡散的運動(ブラウン運動)であることが実験的に得られた(図4、5参照)。拡散係数を評価するとレイノルズ数の0.85乗のべきで、増加することが分かった(図6参照)。通常流体の乱流では、このべきは、1であることが知られており、このずれが実験誤差なのか、それとも系統的に何か異なる性質を持つものであるかを今後検証する必要がある。

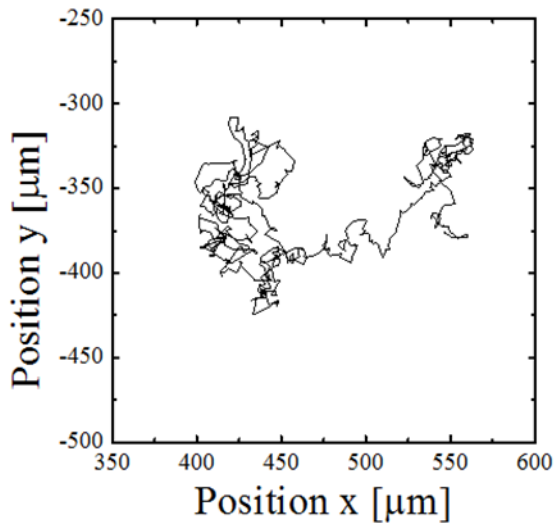


図2. 乱流中の微粒子追跡の一例。ランダムに動く粒子の位置を2次元空間に記録したもの。

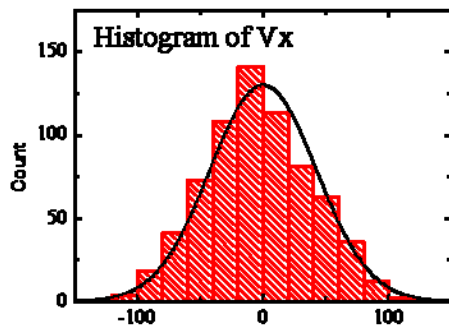


図3. 微粒子の速度分布関数の一例。ほぼ、ガウス分布することがわかる。

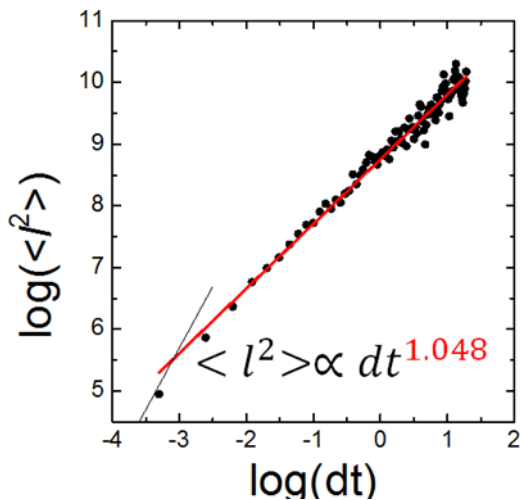


図4. 平均移動距離と移動時間の関係。冪束が得られることがわかる。この冪は、2倍のHurst指数であり、輸送特性を判別できる。

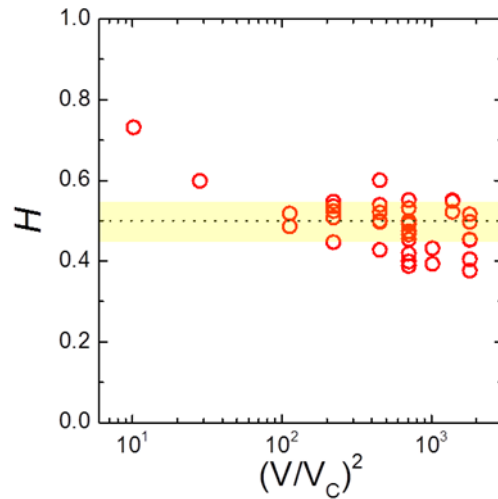


図5. 実験から得られたHurst指数の印加電圧依存性。印加電圧の2乗は、Rayleigh数、又は、Reynolds数に比例することが知られている。発達した乱流状態では、 $H \sim 0.5$ となり、乱流輸送は、ランダム過程拡散過程となることがわかる。

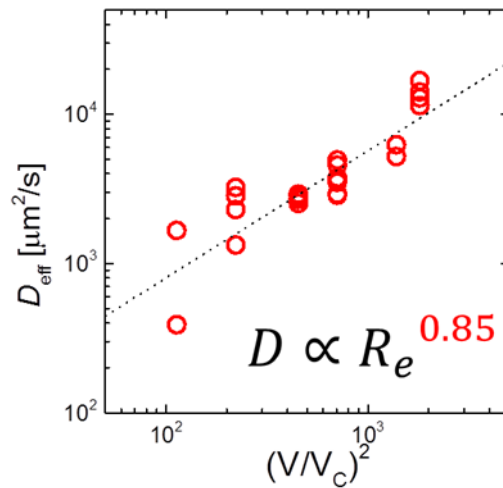


図6. 乱流輸送がランダム拡散となる場合の乱流拡散係数の印加電圧依存性。実効拡散係数は、Reynolds数のほぼ0.85乗で増加する。

#### 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)

[学会発表] (計5件)

○永岡賢一、吉村信次、三浦英昭、常田佐久、久保雅仁、横井喜充、政田洋平、甲斐昌一、日高芳樹、寺坂健一郎、「回転する乱流中の速度場形成」、プラズマ・核融合学会第29回年会、2012年12月、(春日)

(3) 連携研究者  
なし

○K. Nagaoka, S. Yoshimura, Y. Masada, S. Kai, Y. Hidaka, N. Yokoi, S. Tsuneta, M. Kubo, K. Terasaka, H. Miura、  
「 Electrohydrodynamic convection driven turbulence in a rotating system and laboratory simulation of the solar convective zone」、22<sup>nd</sup> Int. Toki Conf., 2012年11月、(土岐)

○Kenichi Nagaoka, Shinji Yoshimura, Hideaki Miura, Youhei Masada, Shoichi Kai, Yoshiki Hidaka, Kenichiro Terasaka、  
「 Turbulence experiment with high controllability in a rotating system for dynamo physics」APS-DPP 2012年10月、Providence, RI, USA

○永岡賢一、吉村信次、三浦英昭、常田佐久、久保雅仁、横井喜充、政田洋平、甲斐昌一、日高芳樹、寺坂健一郎、「回転乱流中の流れ場生成 - 太陽対流層模擬実験 -」、日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月、横浜国大 (横浜)

○永岡賢一、吉村信次、吉沼幹朗、常田佐久、久保雅仁、石川遼子、横井喜充、政田洋平、日高芳樹、甲斐昌一、「回転球殻乱流場における大規模流れ場生成実験」、日本天文学会、2012年3月19日-22日、龍谷大学 (京都)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

永岡 賢一 (Kenichi Nagaoka)  
核融合科学研究所ヘリカル研究部 助教  
研究者番号：20353443

### (2) 研究分担者

なし