

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540509

研究課題名（和文）非発散正規直交ウェーブレット基底を用いたMHD乱流中の磁場生成機構の解明

研究課題名（英文）Orthonormal divergence-free wavelet analysis of magnetic field generation mechanism in magnetohydrodynamic turbulence

研究代表者

荒木 圭典 (KEISUKE ARAKI)

岡山理科大学・工学部・准教授

研究者番号：90299181

研究成果の概要（和文）：宇宙プラズマ、核融合プラズマ等における磁場生成のメカニズムについてウェーブレット関数を用いた解析を行った。プラズマのモデルとしてホール電磁流体力学方程式を取り上げ、数値シミュレーションを用いて乱流状態における磁場の自発的生成を伴うエネルギー輸送の解析を行った。解析の結果、プラズマの運動と磁場の相互作用による自発的なエネルギー輸送におけるゆっくりとしたエネルギー伝達の補償機構が見出された。

研究成果の概要（英文）：Wavelet function based analysis of the mechanism of magnetic field generation in a fully developed magnetohydrodynamic turbulence of space or fusion plasmas was carried out. In the present study we focused on the dynamics of the Hall magnetohydrodynamic system. Energy transfers by the quadratic terms effects are analyzed by direct numerical simulation. We found that slow compensating energy transfer after the formation of self-similar, universal turbulent state.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系化学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：MHD乱流、ウェーブレット解析

## 1. 研究開始当初の背景

MHD流体中の複雑な渦運動が乱流のダイナミクスならびに磁場生成の機構を理解する鍵であることは言を俟たない。しかしシミュレーションの結果得られた、流体の渦運動をどのように捉え、力学的に理解し位置づけるかは確定的ではない。習慣的には渦度ベクトルの絶対値の等値面で表現されるものを「渦」として捉え、その「渦」の配置(configuration)によって場の特徴を理解しよ

うとする場合が多い。そのようにして可視化された渦は「ワーム」と呼ばれる構造をなし、一つ一つのワームは細長く、その断面はBurgers渦に似た構造を持つものであることはよく知られている。しかしBurgers渦の渦度場をフーリエ変換すればわかるように一つのワームは全ての波長の情報を抱えているはずだが、乱流ダイナミクスの定性的な議論においては、可視化によって見えている構造の直径のサイズに着目した議論しか

なされていない。

その一方で Kolmogorov に始まる一様等方乱流の普遍平衡領域とりわけ慣性小領域の理論はなんらかの意味での「自己相似性」を前提しており、スケーリングの概念の導入を可能にするような特徴が場に備わっていると考えるところから始まっている。この概念の有効性は乱流の統計理論における速度相関のモーメント関数の解析で明らかである。しかしながら渦度の可視化で得られた図では、渦の太さは Kolmogorov スケールの数倍程度で一様であり、渦の長短はあっても渦そのものの旋回半径サイズの大小の極端な差は見られない。これら「各々のワームは全ての波数の成分を抱えているはず」「渦の階層構造はなんらかの自己相似的な特徴を備えている」という二つの事実をコンシステントに理解するにはどうすればよいのか。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、非発散正規直交ウェーブレット基底の持つ空間的な位置とスケールの情報を用い、MHD乱流中の磁場生成に対してプラズマの流れのスケール・位置間の相互作用を分析し、乱流ダイナモによる磁場生成機構の解明を行うことである。とくにウェーブレット解析により得られる空間的な情報を用いて、相互作用のモード解析の流れや磁場の可視化の手法と組み合わせて、総合的に理解することを目指す。とくに乱流中のエネルギー輸送において関心の高い、相互作用の局所性、非局所性の解析、ならびに Hall MHD 流体における Hall 項の相互作用に及ぼす影響をターゲットとする。

## 3. 研究の方法

非発散正規直交ウェーブレット基底の持つ空間的な位置とスケールの情報を利用した解析手法を開発する「アルゴリズムの実装、基本ツールの組合せと数学的概念の整理」、相互作用のモード解析の流れや磁場の可視化の手法と組み合わせる「可視化手法の開発」、MHD乱流中の磁場生成に対してプラズマの流れのスケール・位置間の相互作用を分析し、乱流ダイナモによる磁場生成機構の解明を行う「非線形ダイナミクスの解析」の各段階に分かれる。

## 4. 研究成果

(1) 平成 22 年度は、研究の対象を電磁流体のエネルギー伝達機構の可視化において、これを Hall 電磁流体のダイナミクスに適用する方向で研究をすすめた。

電磁流体ダイナミクスにおける磁場と速度場間のエネルギー伝達機構と組織構造の関係を可視化するために、ウェーブレット解析を応用した技法を開発し、強い背景磁場が

存在するときのエネルギー伝達の可視化に応用した結果を公表することができた。特に可視化技法の「円錐表示」を電磁流体へと応用する技法を定式化することができたことは大きな前進である。

この「円錐表示」による可視化技法の応用範囲を広げるために、Hall 電磁流体における磁場と速度場間のエネルギー伝達の機構に着目して、ウェーブレット展開を用いた相互作用解析を行った。この相互作用解析の目的は、計算のコストパフォーマンスを上げるために、解析のターゲットを絞るための基礎的なデータを蓄積することにある。

解析の結果、Hall 電磁流体における Hall 項によるエネルギー伝達には、二つのまったく性質が異なる相互作用のあり方があったことが分かった。そのうちの一つは高い波数側への輸送で、局所的な相互作用が卓越しており、小さいスケールの構造を次々と生み出していく傾向があることが分かった。もう一つは、低い波数側への輸送で、非局所的な相互作用が卓越しており、磁場の大規模な構造の維持に寄与していることを示唆する結果が得られた。

また Hall 電磁流体と通常の電磁流体との比較において、エネルギー輸送の振幅には大きな差が見られるものの、定性的な相互作用の傾向には大きな違いが見られなかった。これは両者の輸送量や形成された組織構造の違いが大きかったことに対して、対照的であり非常に興味深い結果であった。

(2) 平成23年度は、研究の対象を電磁流体力学におけるエネルギー伝達の定量的評価を目標において、Hall 電磁流体の数値シミュレーションによって得られた時系列データを用いて、解析を進めた。

数値シミュレーションの結果得られた時系列データは、磁場の散逸率を基にして正規化を行うと、磁場、速度場ともにエネルギースペクトルの関数形が時刻に依らず、ひとつの普遍的な関数形を満たしていることが分かった。これより解析対象となる磁場ならびに速度場は一種の普遍平衡な状態を満たしながら「自己相似的」に減衰しているものと考えられる場であることが明らかになった。したがってこれらの時系列データの時間変化を追えば、Hall 電磁流体に特有のエネルギー伝達のダイナミクスの解明が期待できる。

解析の結果、Hall 電磁流体におけるエネルギー伝達の機構は、磁場と速度場間のエネルギーの伝達においては、規格化したエネルギー伝達関数スペクトルで比較を行うと、時間的にほとんど変化のない定常な状態にあることが示された。これに対して慣性項による

速度場内でのエネルギーの伝達、Hall 項による磁場内でのエネルギー伝達を解析すると、これらは時間とともに減衰することが明らかになった。

(3) 平成 24 年度は、研究の対象を前年度に引き続き電磁流体力学におけるエネルギー伝達の定量的評価を目標におき、解析を進めた。

平成 23 年度に発見された、外力の無い状況下における自己相似的な自由減衰解において、エネルギーの規格化を行ってもなお、慣性項ならびに Hall 項における非線形性によるエネルギー伝達が時間とともに相対的に逓減していく現象の解明を行った。このような非線形性の逓減は中性流体ならびに Hall 項の効果を含まない電磁流体における一様等方性乱流においてはいくつかの研究が散見されたが、Hall 項の効果を含む場合において具体例が見つかったのは初めてであると考えられる。特にエネルギースペクトルの自己相似性が得られているので、この逓減現象は Hall 電磁流体力学における流れ場と磁場のトポロジーの傾向の変化に基づいていると考えられる。

今年度の主なターゲットはこの現象の基盤となる物理的機構のトポロジーの側面からの解明であった。Hall 電磁流体力学の非散逸極限における保存量を手掛かりとした解析を行い、ヘリシティスペクトルの挙動の時間変化を追跡し、小スケールでの等方化のメカニズムが全体としては大スケールでの鏡像対称性の破れを促進する効果を持つことが示された。

また慣性項、Hall 項の非線形性の強度の逓減に関して、ローレンツ項、電磁誘導項の効果を含めた、磁場・流れ場間のエネルギー輸送の全体を見ると、時間的に定常な状態に収まっていることが発見された。これはエネルギーの相互作用の様式が時間とともに慣性項からローレンツ項へ、Hall 項から電磁誘導項へとゆっくりと変化していることを示している。これは磁場、流れ場のおのおのを見ていくと、非線形性を緩和しつつ、エネルギーの伝達の総量は維持されるトポロジカルな機構の存在が示唆されており、この現象のさらなる解明が必要であると考えられる。

#### 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 6 件)

- ① H. Miura and K. Araki, "Coarse-graining study of homogeneous and isotropic Hall magnetohydrodynamics turbulence", Plasma Physics and

Controlled Fusion, 査読有, Vol. 55, 2013, 14012, doi:10.1088/0741-3335/55/1/014012

- ② K. ARAKI and H. Miura, "Nonlocal Interaction of Inverse Magnetic Energy Transfer in Hall Magnetohydrodynamic Turbulence", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 6, 2011, 2401132, doi:10.1585/pfr.6.2401132

- ③ H. Miura and K. Araki, "Local structures of homogeneous Hall MHD turbulence", Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 318, 2011, 072032, doi:10.1088/1742-6596/318/7/072032

- ④ Hideaki MIURA, "Contributions of Small Scales to Statistics of Hall MHD Turbulence", J. Plasma and Fusion Research SERIES, 査読有, Vol. 9, 2010, pp. 535-540.

[http://www.jspf.or.jp/JPFRRS/PDF/Vol9/jpfrs2010\\_09-535.pdf](http://www.jspf.or.jp/JPFRRS/PDF/Vol9/jpfrs2010_09-535.pdf)

- ⑤ Keisuke ARAKI and Hideaki Miura, "Orthonormal Divergence-free Wavelet Analysis of Energy Transfer in Hall-MHD Turbulence", Plasma and Fusion Research, 査読有, Volume 5 Special Issue 2 (2010), S2048

- ⑥ Keisuke ARAKI and Hideaki Miura, "Visualization of energy transfer to magnetic energy by rolling-up vortices with uniform background magnetic field", Journal Plasma and Fusion Research SERIES, 査読有, Vol. 9 (2010), pp. 446-451

[http://www.jspf.or.jp/JPFRRS/PDF/Vol9/jpfrs2010\\_09-446.pdf](http://www.jspf.or.jp/JPFRRS/PDF/Vol9/jpfrs2010_09-446.pdf)

[学会発表] (計 13 件)

- ① 三浦英昭, "MHD 乱流における非線形相互作用と粗視化", 第 26 回数値流体力学シンポジウム, 2012 年 12 月 18 日-20 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都)

- ② 荒木圭典, "Hall MHD 乱流でのエネルギー輸送の特徴", 第 10 回日本流体力学会中四国・九州支部講演会, 2012/12/8-9, 熊本大学(熊本)

- ③ H. Miura, "Contributions of sub-grid-scales to energy transfer in Hall MHD turbulence", 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics Volume 57, Number 12 Monday-Friday, October 29-November 2 2012; Providence, Rhode Island

- ④ 荒木圭典, "Hall MHD 乱流における保存

量の選択的散逸”, 日本流体力学会 年会 2012, 2012/9/16-18, 高知大学 (高知)

- ⑤ Keisuke Araki, "Selective reduction of triad interaction in Hall magnetohydrodynamic turbulence", The 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 19-24 August 2012, Beijing (China).
- ⑥ 三浦英昭, "一様等方性 Hall MHD 乱流の統計的性質", 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月27日, 関西学院大学(西宮)
- ⑦ 三浦英昭, "一様等方減衰性 Hall MHD 乱流の統計的性質", 物理学会・天文学会・SGEPSS 合同プラズマ共催セッション「プラズマ宇宙物理」, 2012年3月21日, 龍谷大学(京都市)
- ⑧ 三浦英昭, "等方 MHD 乱流の渦構造に対する Hall 効果の影響", 第61回理論応用力学講演会, 2012年3月7日, 東京大学生産技術研究所(東京都)
- ⑨ H. Miura, "Local structures and energy transfer in homogeneous and isotropic Hall MHD turbulence", ISHW & APPTC: 18th International Stellarator/Heliotron Workshop & 10th Asia Pacific Plasma Theory Conference, 30 Jan 2012, Australian National University (Canberra, Australia)
- ⑩ 荒木圭典, "Hall MHD 乱流における非線形性の遁滅", プラズマシミュレーションポジウム2011, 2011年9月13日, 核融合科学研究所(土岐市)
- ⑪ K. Araki, "Orthonormal Divergence-free Wavelet Analysis of Inverse Transfer of Magnetic Energy by the Hall Term", 20th International Toki Conference, 7 December 2010, Ceratopia Toki (Toki).
- ⑫ H. Miura, "Sub-grid-scale Effects on Short-wave Instability in Magnetized Hall-MHD Plasma", 23rd IAEA Fusion Energy Conference, 14 October 2010, Daejeon Convention Center (Daejeon, Korea Rep.)
- ⑬ 荒木圭典, "Hall MHD 乱流場を用いた場のモード間相互作用の考察", 日本流体力学会 年会 2010, 2010年9月10日, 北海道大学(札幌)

[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  
なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

荒木 圭典 (ARAKI KEISUKE)  
岡山理科大学・工学部・准教授  
研究者番号: 90299181

### (2) 研究分担者

三浦 英昭 (MIURA HIDEAKI)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号: 40280599

### (3) 連携研究者

なし