

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23540583

研究課題名(和文) 拡張MHD乱流におけるスペクトル構造の解明

研究課題名(英文) Spectral structure in extended MHD turbulence

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：電磁流体力学方程式を、短波長効果(イオンスキン長効果、有限ラーマー半径効果)について拡張した拡張MHDモデルを用い、これらの効果が乱流のエネルギースペクトルや空間構造に与える影響を、数値シミュレーションで調べた。イオンスキン長効果が渦構造の層状から管状への構造遷移をもたらすこと、短波長領域においてイオンスキン長効果がより短波長領域への磁気エネルギーの伝達を促すこと、有限ラーマー半径効果は不安定性の成長の非線形段階において二次的な不安定性を誘引し、短波長領域でスペクトルの励起を促すことなどを明らかにした。これらの知見をもとに、イオンスキン長効果を含む乱流のラージエディシミュレーションに成功した。

研究成果の概要(英文)：Influences of the ion skin depth and the finite Larmor radius effects on magnetohydrodynamic (MHD) turbulence have been studied by means of numerical simulations of extended MHD equations. It has been clarified that the ion skin depth (Hall) term can induce structure transition of the vorticity field from sheet to tubular structures, and that the term enhance the forward energy transfer of the magnetic energy at very large wave number region. It has also been clarified that the finite Larmor radius effect can induce secondary instability and excite high wave number coefficients. Based on these knowledge obtained by direct numerical simulations, we have successfully carried out large eddy simulations of MHD turbulence under the ion skin depth effects (Hall MHD turbulence).

研究分野：プラズマ物理

キーワード：拡張MHD 乱流 スペクトル 不安定性 Hall項 ジャイロ粘性

### 1. 研究開始当初の背景

プラズマ乱流については、太陽風、核融合の高温プラズマなど多数の(国際共同研究を多数含む)研究が行われているが、過酷な環境や高温、多様な長さ・時間スケールに妨げられ、詳細な乱流像に迫るに至らないのが現状であり、数値シミュレーションは乱流研究の有効な手段の一つとなっている。乱流の最も顕著な特徴の一つは、エネルギースペクトルが波数  $k$  のべきに比例する、スケールリング則の存在である。太陽風など一様に近い乱流の場合、従来は一流体 MHD 方程式を基に研究が進められてきたが、イオンスキン長やラーモア半径等の物理効果が排除されるため、乱流の理解には十分ではない。我々は、これまでの Hall MHD 乱流研究を発展させ、有限ラーモア半径等の非 MHD 的效果で、より緻密に拡張された MHD 流体モデルを用いた乱流シミュレーションによって、広範な波数領域に対するスケールリング則とその具体的な構造に迫ることを構想するに至った。

また、もう一つの背景として、イオンスキン長やラーモア半径効果を取り入れた MHD モデルは、数値的に硬い方程式であり、数値シミュレーションに困難が伴うことが挙げられる。イオンスキン長効果(Hall 項)の導入は、物理的には whistler 波の導入を意味するが、これが数値シミュレーションに対して意味するところは、周波数が波数の二乗に概ね比例する分散性波動の出現である。この結果、数値シミュレーションの際の時間刻みが極めて小さくならざるを得ず、大型数値シミュレーションを極めて困難にしている。ここで、拡張 MHD モデルで記述される乱流のスペクトル構造を明らかにすることは、短波長成分の性質と振る舞いを明らかにすることに他ならず、この短波長成分を長波長成分で記述できる簡単な現象論的なモデルで代替する、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)手法の導入に繋がるという着想をえた。

### 2. 研究の目的

空間について一様なプラズマ乱流の普遍的な構造、特にスペクトルのスケールリング則の理解を目的とする。拡張 MHD 方程式に基づいた高精度一様プラズマ乱流の大規模シミュレーションを実行し、イオンスキン長、イオンラーモア半径などを考慮した MHD モデルの拡張が一様乱流の構造、特にエネルギースペクトルのスケールリング則に与える影響を明らかにする。このスケールリング則を支えるスケール間エネルギー伝達構造、実空間でこれに対応する乱流要素構造のダイナミクスの解明を進め、非一様でより広範な乱流現象の構造解明への足がかりとする。

### 3. 研究の方法

本研究の方法は、以下の3要素で構成された。(1) Hall MHD 及び拡張 MHD 乱流の大規模シミュレーション。これまでの一様 Hall

MHD 乱流直接数値シミュレーションから推測されてきたスケールリング則(空間波数  $k$  に対して  $k^{-5/3}$ ,  $k^{-7/3}$ ,  $k^{-11/3}$ )の検証、エネルギー伝達構造の解明。(2) エネルギー収支構造解析・ウェーブレット解析による、エネルギー伝達の順方向性/逆方向性、波数空間におけるエネルギー収支の局所性/非局所性、エネルギー伝達の活発な領域の特定。(3) 活発なエネルギー収支に対応する実空間構造の特定、そのダイナミクスの理解。これらの3段階を、一様 Hall MHD 乱流、より拡張された MHD モデルの一様乱流について行う事で乱流エネルギースペクトルの構造を解明する。

### 4. 研究成果

電磁流体力学に基づく巨視的シミュレーションの中に微視的效果を取り入れる研究の一環として、Hall MHD 方程式に基づく乱流シミュレーションを実施し、微視的效果(ここでは Hall 項による磁場へのイオンスキン長効果)が巨視的成分(イオンスキン長よりも長い成分)に及ぼす影響を調べた。Hall MHD 一様等方乱流の大規模シミュレーションから、微視的效果の導入が(1)磁場のエネルギースペクトルの高波数成分が励起され、乱流のイオンスキン長よりも長い波数領域に波数の $-5/3$ 乗則が現れる一方で、イオンスキン長よりも短い波数領域には波数の $-7/3$ 乗則が現れること、(2)磁場の波数間の非線形結合が生じる結果、高波数成分と低波数成分の結合が著しく強化される場合があること、(3)磁場の構造以上に、速度場(渦度場)の構造を大きく変化させる構造遷移をもたらすことなどを明らかにした。さらに、数値シミュレーションを比較的粗い解像度で実施し、格子解像度以下の短波長成分が格子解像度以上の長波長成分に与える影響を現象論的モデルで代替する、LES を実施した。この LES には、Hamba and Tsuchiya(Physics of Plasma, 2010)による Smagorinsky 型の渦(電流)拡散モデルを使用した。この研究から、Hall 項を含む電磁場の時間発展についても、短波長成分が長波長成分に果たす役割を渦(電流)拡散モデルで近似的に代替可能であることを示すとともに、ここで採用した Smagorinsky 型モデルに最適なモデル係数を決定した。この LES 手法を、トラスプラズマの不安定性シミュレーションに応用し、低い解像度でも、長波長成分の時間発展について妥当な結果を与えつつ、数値発散することなくシミュレーション可能となる結果を得た。これについては、2016年のIAEA核融合会議で報告予定となっている。

さらに、イオンスキン長効果だけではなく、有限ラーモア半径効果も調べるため、2次元レイリー・テイラー不安定性の数値シミュレーションも実施した。有限ラーモア半径効果(ジャイロ粘性)は不安定性を抑制する方向に作用することが知られているが、レイリ

ー・テイラー不安定性の非線形段階では、速度シアを強化し、ケルヴィン・ヘルムホルツ的な二次不安定性を生じさせ得ることが明らかになった。この二次不安定性は乱流エネルギースペクトルの高波数成分を強く励起し、数値シミュレーションを極めて困難にするものであり、ジャイロ粘性の導入が常に短波長成分を抑制するものではないことが明らかになった。

#### 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)

“Hall effects and sub-grid-scale modeling in magnetohydrodynamic turbulence simulations”, H. Miura, K. Araki, and F. Hamba, *J. Comput. Phys.*, Vol. **316** (2016) 385-395. [査読有]

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2016.03.067>

“Formation of large-scale structures with sharp density gradient through Rayleigh-Taylor growth in a two-dimensional slab under the two-fluid and finite Larmor radius effects”, R. Goto, H. Miura, A. Ito, M. Sato, and T. Hatori, *Physics of Plasmas* Vol. **22** (2015) 032115. [査読有]

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4916061>

“Structure transitions induced by the Hall term in homogeneous and isotropic magnetohydrodynamic turbulence”, H. Miura and K. Araki, *Phys. Plasmas* Vol. **21** (2014) 072313. [査読有]

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4890857>

“Coarse-graining study of homogeneous and isotropic Hall magnetohydrodynamic turbulence”, H. Miura and K. Araki, *Plasma Phys. Control. Fusion* Vol. **55**, (2012) 014012. [査読有]

<http://iopscience.iop.org/0741-3335/55/1/014012>

[学会発表](計9件)

“Investigation of short-wave Hall and gyro-viscous effects in instability and turbulence”, H. Miura, K. Araki, and A. Ito, *the 25<sup>th</sup> International Conference on Numerical Simulation of Plasmas* (12-14 August, 2015, Golden, Colorado, U.S.A.) [招待講演]

“Hierarchical Simulation of Rayleigh-Taylor Instability of extended MHD with AMR framework and visualization”, T. Hatori, A.M. Ito, M. Nunami, H. Usui, and H. Miura, *the 25<sup>th</sup> International Conference on Numerical Simulation of Plasmas* (12-14 August, 2015, Golden, Colorado, U.S.A.) [招待講演]

“Hall effects on scale-hierarchy in MHD turbulence”, H. Miura, T. Hatori, and K. Araki, *the 15<sup>th</sup> European Turbulence Conference* (25-28 August, 2015, Delft, Netherlands).

“Two-fluid Effects on Pressure-Driven Modes in a Heliotron Device”, H. Miura, R. Goto, A. Ito, M. Sato, and T. Hatori, *the 25<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference* (13-18 October, 2014, St. Petersburg, Russia).

“Hall effects on energy transfer of isotropic MHD turbulence”, H. Miura and K. Araki, *The 14<sup>th</sup> European Turbulence Conference*, (1-4 September, 2013, Lyon, France).

“A direct comparison between single-fluid and Hall-MHD turbulence”, H. Miura and K. Araki, *the 55<sup>th</sup> Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics* (11-15 November, 2013, Denver, Colorado, USA).

“Contributions of sub-grid-scales to energy transfer in Hall MHD turbulence”, H. Miura and K. Araki, *the 54<sup>th</sup> Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics*, (29 October-2 November, 2012, Providence, Rhode Island, USA).

“Local structures and energy transfer in homogeneous and isotropic Hall MHD turbulence”, H. Miura and K. Araki, *The 18<sup>th</sup> International Stellarator/Heliotron Workshop and 10<sup>th</sup> Asia Pacific Plasma Theory Conference*, (29 January-3 February, 2012, Australian National University and Murrumbidgee Beachfront Nature Resort, Australia).

“Local structures in homogeneous Hall MHD turbulence”, H. Miura and K. Araki, *The 13<sup>th</sup> European Turbulence Conference* (Warsaw, Poland, 12-15 September 2011).

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2)研究分担者

伊藤 淳 (ITO Atsushi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：70413987

(3) 研究分担者

荒木 圭典 (ARAKI Keisuke)

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：90299181