

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05734

研究課題名(和文) 超大レイノルズ数MHD不安定性・乱流シミュレーションのための微視的数値モデル開発

研究課題名(英文) Development of micro-physics SGS model for very high Reynolds number MHD simulations

研究代表者

三浦 英昭 (hideaki, Miura)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：40280599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：超大レイノルズ数MHD不安定性・乱流シミュレーションの実行を実現するため、以下の2つの方向から研究を行った。1) Hall MHD方程式や、より複雑な拡張MHD方程式に基づく乱流の直接数値シミュレーションを実施し、その物理的な性質の特徴づけを行った。2) 直接数値シミュレーションデータを参照データとして、格子解像度以下のスケールが格子で解像されるスケールに与える影響を表現するサブグリッドスケール(SGS)モデルを開発した。特に1)では、高磁気プラントル数の場合に、運動エネルギースペクトルに新しいスケール領域が発生し得ることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

MHD乱流に対する微視的効果を明らかにし、これを物理モデルとして表現すること、乱流の性質を明らかにすることは、プラズマ乱流の特に巨視的側面を理解するうえで重要である。また、近年重要性を増している宇宙天気予報などのアプリケーション開発にも有用である。特に昨今はParker Solar Probe衛星が太陽への接近を果たし、乱流の観測データを大量に発信し始めたことなど、乱流の実データの提供も増えている。このため、このデータの解析や理解の観点からも、我々がこの課題で行った数値シミュレーションと開発した数値モデルは、重要な役割を果たし得る。

研究成果の概要(英文)：We have carried out direct numerical simulations of turbulence based on MHD, Hall MHD, and extended MHD models. We have clarified that the gyri-viscosity can suppress the intensity of turbulence at high wave numbers even when the mean magnetic field disappears. In addition, we have also carried out a numerical simulation of Hall MHD turbulence with a high magnetic Prandtl number. We have found that the kinetic energy spectrum $E(k)$ (k is the wave number) can obey to a new energy spectrum proportional to $k^{-17/3}$.

Based on these numerical simulation data, we have developed an SGS model that incorporates the Hall effect. The LES that incorporates this model satisfactorily reproduces the important physical characteristics obtained by turbulent DNS, and improves the actual numerical resolution at the same grid point by about twice compared to the conventional model.

研究分野：プラズマ物理、流体物理

キーワード：乱流 微視的効果 サブグリッドスケールモデル ラージエディシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

我々は MHD 不安定性・乱流のスペクトル構造や空間構造、これに対する微視的効果の研究を行ってきた。その中心手段は、スーパーコンピュータによる大型直接数値シミュレーションである。

MHD 乱流は宇宙、太陽、太陽風、核融合等様々な事象に現れる普遍的な現象である。その理解や予測には、極めて大きいレイノルズ数(Re)およびランキスト数(以下、単に大レイノルズ数)のシミュレーションが求められるが、現在のスーパーコンピュータによる直接数値シミュレーションでこれを実現するのは全く不可能である。現状では乱流の微細スケールの運動を十分に表現する解像度が確保できない(解像度を確保したシミュレーションでは Re を大きくできない)一方、微細スケールに関わる非線形相互作用が大規模運動にも影響を及ぼすことである。

このような大レイノルズ数シミュレーションの難しさを克服する手段として、我々はラージエディシミュレーション(LES)手法に注目してきた。これは、シミュレーションの解像度以下のスケール(SGS)が解像されている成分(GS 成分)に及ぼす影響を SGS モデルと呼ばれる現象論的数値モデルで代替するものであり、厳密さに欠けるものの十分に実用に耐える手法として流体力学分野で確立されている。我々は、先行研究の一つ(Hamba & Tsuchiya 2010)をもとに、微視的効果を含む乱流モデルを開発し、核融合の不安定性研究などに応用してきた(科研費 23540583, Miura & Araki 2014, Miura et al. 2016)が、イオン表皮長効果の乱流に対する影響の詳細な解明や、イオンラーマー半径効果の SGS モデルへの反映などが課題として残されていた。

2. 研究の目的

本研究では、(1)電磁流体力学(MHD)方程式で記述される巨視的な不安定性や乱流現象への微視的効果の影響を、人為的なモデルを排した大規模直接数値シミュレーション手法によって調べること、(2)ここで判明した物理機構を包含しつつも、より少ない格子点数で計算可能なラージエディシミュレーション手法の開発を行うことの2点を主要な目標として設定した。これにより、様々な分野で現れる超大レイノルズ数乱流の巨視的な挙動に、格子解像度以下の効果や電磁流体力学近似で無視された微視的スケール効果を取り入れる手法を確立することを目的とした。また、この研究を通じて、大レイノルズ数 MHD 乱流の空間構造やスペクトル構造への微視的効果の寄与を明らかにすることも重要な研究要素として設定されていた。

3. 研究の方法

我々の主要な研究方法は、電磁流体力学不安定性の成長と乱流遷移、十分に発達した乱流を対象とする大規模数値シミュレーションである。

- (1) 拡張 MHD モデルの SGS モデルの開発
 - (2) SGS モデルを用いない不安定性・乱流現象の大型直接数値シミュレーションの実施とイオン表皮長・ラーマー半径効果の非線形エネルギー輸送に対する影響の解明
 - (3) 拡張 MHD モデルの高度化とこれに対応した SGS モデルの開発
 - (4) SGS モデルを用いたラージエディシミュレーションの実施と SGS モデルの有効性の確認
- の4項目の観点から、相互に研究成果をフィードバックしながら研究を進めた。

4. 研究成果

主要な研究成果として、課題代表者が主著者の論文3編の成果をここに記載する。

高レイノルズ数の MHD 乱流、Hall MHD 乱流と、Hall MHD モデルに Braginskii によるジャイロ粘性(イオンラーマー半径効果)を加えた拡張 MHD 乱流の直接数値シミュレーションを行い、これらの乱流の性質について調べた。図1は、Hall 項、ジャイロ粘性項を加えた拡張 MHD モデルによる乱流シミュレーションの可視化したものである。エンストロフィー密度(緑色)が管状、電流密度(白)が層状のコヒーレント構造がみられる。このような特徴は Hall MHD 乱流と同様であるが、その強度分布は異なり、報告したシミュレーションのパラメータ範囲において、ジャイロ粘性が乱流の強度を比較的強く抑制するなどの性質が明らかになった。(Miura, fluids 2019)

また、粘性の電気抵抗に対する比率(磁気プラントル数)が高い場合についての Hall MHD 乱流の数値シミュレーションを実施した。磁気プラントル数が高い場合、速度場のフリーエ成分が粘性によって減衰する高波数領域においても、磁場の高波数成分は減衰せずに乱流として振る舞う。我々の研究では、この磁場が卓越する高波数成分が、ほぼまるごと Hall 項が支配する(サブイオンスケールである)場合についてのシミュレーションを行った。サブイオンスケールにおいて、高磁気プラントル数のために速度場の移流項が無視できる。このとき、運動エネルギースペクトル $E(k)$ (k はシェル平均されたスペクトルの波数)について $E(k) \sim k^{-17/3}$ の新たなエネルギースペクトルが形成され得ることを明らかにした。また、このエネルギースペクトルの形成が、

運動エネルギーおよび磁気エネルギー方程式のエネルギー収支式の比較による現象論によって説明できることを示した。(Miura, Yang, and Gotoh 2019)

これらの数値シミュレーションのデータに基づき、Hall 効果を考慮した、SGS モデルを開発した。この SGS モデルを組み込んだ非圧縮性 Hall MHD 方程式系は下記のように書ける：

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{B}_i \bar{B}_j) + \left(\bar{p} + \frac{1}{2} \bar{B}_k \bar{B}_k \right) \delta_{ij} \right] + \nu \frac{\partial \bar{S}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j}, \\
\bar{\tau}_{ij} &= \left[(\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{B}_i \bar{B}_j) + \frac{1}{2} \bar{B}_k \bar{B}_k \delta_{ij} \right] - \left[(\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{B}_i \bar{B}_j) + \frac{1}{2} \bar{B}_k \bar{B}_k \delta_{ij} \right], \\
\bar{S}_{ij} &= \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}, \\
\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} &= 0, \\
\frac{\partial \bar{B}_i}{\partial t} &= -\epsilon_{ijk} \frac{\partial \bar{E}_k}{\partial x_j}, \\
\bar{E}_i &= -\epsilon_{ijk} (\bar{u}_j - \epsilon_H \bar{J}_j) \bar{B}_k + \eta \bar{J}_i - \bar{E}_i^M - \bar{E}_i^H, \\
\bar{E}_i^M &= -\epsilon_{ijk} (\bar{u}_j \bar{B}_k - \bar{u}_j \bar{B}_k), \\
\bar{E}_i^H &= -\epsilon_H \epsilon_{ijk} (-\bar{J}_j \bar{B}_k + \bar{J}_j \bar{B}_k), \\
\frac{\partial \bar{B}_k}{\partial x_k} &= 0, \\
\bar{\tau}_{ij} &= -\nu_{SGS} \bar{S}_{ij}, \\
\bar{E}_i^M + \bar{E}_i^H &= -\eta_{SGS} \bar{J}_i + \epsilon_H \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu_{SGS} \sigma_{H,1} \bar{S}_{ij}) - \epsilon_H^2 \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_{SGS} \sigma_{H,2} \bar{S}_{ij} \left(\frac{\partial \bar{J}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{J}_j}{\partial x_i} \right) \right], \\
\nu_{SGS} &= C_\nu \Delta^2 \left(\frac{1}{2} C_\nu \bar{S}_{ij}^2 + C_\eta \bar{J}_i^2 \right)^{1/2}, \\
\eta_{SGS} &= C_\eta \Delta^2 \left(\frac{1}{2} C_\nu \bar{S}_{ij}^2 + C_\eta \bar{J}_i^2 \right)^{1/2},
\end{aligned}$$

この SGS モデルを組み込んだ LES では、磁気エネルギー Spektral や運動エネルギー Spektral など乱流の重要な物理的特徴を再現するとともに、シミュレーションに必要な格子点数を 1024^3 から $64^3 \sim 128^3$ に低下させるなど良好な結果を示した。さらに、この課題以前に我々のグループが開発した SGS モデルに比べて、実質的な数値解像度が、同じ格子点数でありながら 2 倍程度に向上する（数値拡散が弱く、シャープな解像度をもつ）ことを示した。(Miura and Hamba, J. Comput. Phys. 2022)

この他、圧力勾配型不安定性の一つである Current Interchange Tearing MODE (CITM) の成長について、乱れた磁力線の効果を数値的なモデルとして表現することで、CITM が理論モデルの示すとおり成長し得ることを、圧縮性拡張 MHD モデルのシミュレーションで示した。(Miura, Zheng, and Horton, Phys. Plasmas 2017)

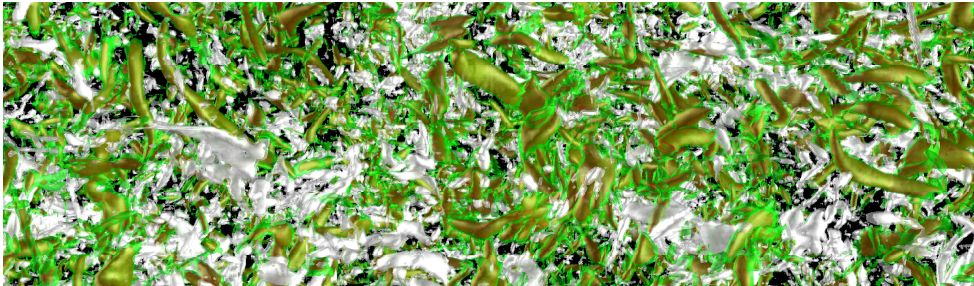


図 1: Hall 項, ジャイロ粘性項を加えた拡張 MHD モデルによる乱流シミュレーションの可視化。エンストロフィー密度 (緑色) が管状、電流密度 (白) が層状のコヒーレント構造が現れる点は、Hall MHD 乱流と同様であるが、その強度分布は異なる(Miura, fluids 2019)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 A. Kageyama, N. Sakamoto, H. Miura, and N. Ohno	4. 巻 15
2. 論文標題 Interactive Exploration of the In-Situ Visualization of a Magnetohydrodynamic Simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401065
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.15.1401065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Araki, H. Miura	4. 巻 15
2. 論文標題 Asymmetry of Quadratic Energy Transfer Between Ion Cyclotron and Whistler Modes in Fully Developed Hall Magnetohydrodynamic Turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2401024
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.15.2401024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Miura Hideaki, Yang Jiguan, Gotoh Toshiyuki	4. 巻 100
2. 論文標題 Hall magnetohydrodynamic turbulence with a magnetic Prandtl number larger than unity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 63207
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.100.063207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 ARAKI Keisuke	4. 巻 14
2. 論文標題 A Note on Stability Analysis by the Second Variations of Lagrangian and Hamiltonian for Ideal Incompressible Plasmas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3401073
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.14.3401073	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miura Hideaki	4. 巻 4
2. 論文標題 Extended Magnetohydrodynamic Simulations of Decaying, Homogeneous, Approximately-Isotropic and Incompressible Turbulence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fluids	6. 最初と最後の頁 46.1~28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/fluids4010046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Miura Hideaki, Zheng Linjin, Horton Wendell	4. 巻 24
2. 論文標題 Numerical simulations of interchange/tearing instabilities in 2D slab with a numerical model for edge plasma	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 92111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4993962	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Miura Hideaki, Hamba Fujihiro	4. 巻 448
2. 論文標題 Sub-grid-scale model for studying Hall effects on macroscopic aspects of magnetohydrodynamic turbulence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 110692
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2021.110692	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 H. Miura and F. Hamba
2. 発表標題 A study of large eddy simulations of compressible extended MHD model
3. 学会等名 International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三浦英昭, 大野暢亮, 陰山聡, 大谷寛明
2. 発表標題 乱流シミュレーションにおける同時可視化手法を用いた構造解析
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三浦英昭, 大野暢亮, 陰山聡, 大谷寛明
2. 発表標題 3次元乱流のVISMO, 4DSVによる in-situ 可視化
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三浦英昭, 後藤俊幸
2. 発表標題 高磁気シュミット数Hall MHD乱流の統計的性質
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Miura, J. Yang, and T. Gotoh
2. 発表標題 High magnetic Prandtl number magnetohydrodynamic turbulence under Hall effect
3. 学会等名 The 17th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Miura and F. Hamba
2. 発表標題 DNS and LES of homogeneous MHD turbulence under Hall and FLR effects
3. 学会等名 The 61st Annual Meeting of American Physical Society Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 W. Horton, H. Miura, and L. Zheng
2. 発表標題 Nonlinear Extended MHD Simulations of turbulent CITM for a study of transport at edge-plasma SOL
3. 学会等名 The 61st Annual Meeting of American Physical Society Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦英昭, 大野暢亮, 大谷寛明
2. 発表標題 In-situ可視化ライブラリvismoを用いた一様等方性乱流の構造解析
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦英昭, 大野暢亮, 大谷寛明
2. 発表標題 In-situ可視化ライブラリvismoによる乱流管状渦構造形成可視化解析
3. 学会等名 日本物理学会春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Miura and F. Hamba
2. 発表標題 Large eddy simulations of magnetized plasmas described by extended MHD model
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Miura
2. 発表標題 Direct and large eddy simulations of Hall MHD turbulence
3. 学会等名 International Congress of Plasma Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Miura
2. 発表標題 Anisotropic SGS modeling for large eddy simulation of magnetized plasma
3. 学会等名 International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Miura
2. 発表標題 wo-fluid simulations of edge-plasma interchange/tearing instabilities in 2D slab
3. 学会等名 Sherwood International Fusion Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三浦英昭
2. 発表標題 弱圧縮性一様等方性乱流におけるパンプスカラーの構造形成
3. 学会等名 日本流体力学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三浦英昭
2. 発表標題 Hall効果のMHD乱流の巨視的スケールへの影響
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Miura
2. 発表標題 imulation study of edge-plasma interchange/ tearing instability transition
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideaki Miura
2. 発表標題 Numerical simulations of interchange/tearing instabilities in 2D slab with a numerical model for edge plasma
3. 学会等名 The Sherwood Fusion Theory Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hideaki Miura
2. 発表標題 DNS And LES Of Homogeneous and Isotropic Hall Mhd Turbulence
3. 学会等名 The 16th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hideaki Miura
2. 発表標題 Large-eddy-simulation approach for numerical simulation of ballooning modes in LHD
3. 学会等名 the 26th international Toki Conference and 11th Asia Plasma & Fusion Association Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三浦英昭
2. 発表標題 Hall MHD乱流のLESとその応用
3. 学会等名 日本流体力学会2017年年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三浦英昭
2. 発表標題 Hall MHD乱流のLES
3. 学会等名 数理解析研究所研究会「非一様乱流の数理」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三浦英昭
2. 発表標題 高温プラズマ実験装置"LHD"中の圧力駆動型不安定性・非線形飽和のラージ・エディ・シミュレーション
3. 学会等名 第45回LES研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hideaki Miura
2. 発表標題 Statistical properties of Hall MHD turbulence with a high magnetic Prandtl number
3. 学会等名 XXXII IUPAP Conference on Computational Physics 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideaki Miura
2. 発表標題 Structures and statistics of Hall MHD turbulence
3. 学会等名 Association of Asia-Pacif Physical Societies, Division of Plasma Physics (AAPPS-DPP) 5th Asia Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	荒木 圭典 (Araki Keisuke) (90299181)	岡山理科大学・工学部・教授 (35302)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	半場 藤弘 (Hamba Fujihiro) (20251473)	東京大学・生産技術研究所・教授 (12601)	
連携研究者	大谷 寛明 (Ohtani Hiroaki) (90332189)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	
連携研究者	伊藤 淳 (Ito Atsushi) (70413987)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関