

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390129

研究課題名(和文) 一様磁場中における平行二平板間電磁流体乱流の界面構造とその動力学の解明

研究課題名(英文) Turbulent/non-turbulent interface in magnetohydrodynamic channel flow in an imposed magnetic field

研究代表者

岡本 直也 (Okamoto, Naoya)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：80547414

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)：一様磁場下における電磁流体チャネル乱流中に、乱流・非乱流界面が存在することを示すため直接数値計算(DNS)を行った。得られたDNSデータの渦度場の可視化によりチャネル中に、乱れの強い壁近傍の境界層領域と乱れの弱いコア領域があることが明らかになった。境界層領域とコア領域の間にあると考えられる界面を定量化するため、条件付き統計解析を行った結果、その解析により定義される界面の近傍で、渦度成分の大きさの条件付き平均がシャープな勾配をもつことが明らかになった。これは、通常の流体シア乱流で過去に観察されたものと類似する。また電磁流体乱流に特徴的なジュール散逸も界面近傍でシャープな勾配をもつことがわかった。

研究成果の概要(英文)：Direct numerical simulations (DNSs) are performed to show the presence of turbulent/non-turbulent interfaces in a magnetohydrodynamic (MHD) turbulent channel flow under the influence of a wall-normal magnetic field. Visualization of the vorticity field reveals flow structures consisting of two internal turbulent boundary layers (ITBLs) growing from each wall and a non-turbulent channel core. The flow structures suggest the presence of an interface between the ITBL and the core. The conditional statistics of the DNS data shows that vorticity components have sharp gradients at the interface as observed in external hydrodynamic shear flows. The Joule dissipation rate, a characteristic quantity in MHD flow, is shown to have sharp gradients at the interface.

研究分野：数値流体力学

キーワード：乱流 電磁流体 直接数値計算

1. 研究開始当初の背景

地球内部におけるダイナモ運動や、国際熱核融合実験炉 (ITER) の冷却剤や鉄鋼製造における鋳造などでみられる高温液体金属の流動は乱れており、乱流状態になっている。液体金属は電気伝導性を持った流体であり、電磁流体力学 (MHD) に従う。これらの流れは多くの場合、外部磁場の影響下にあり非等方性をもつ。MHD 乱流は、巨大自由度、多階層性、強間欠性、強非線形性をもった現象である。レイノルズ数 (Re 数; 非線形性の強さを表す無次元パラメータ) が十分高い乱流では、さまざまな乱流に共通する普遍性が存在すると考えられている。乱流現象の予測や理解には、近年めざましい発展を遂げている計算機を利用した計算科学的手法、特に、理論や実験では求めることが困難な物理量までも得ることのできる、数値計算とそのデータ解析が強力な手段となってきた。一方、工学的あるいは地球物理にみられる乱流は、その巨大自由度のため、現在のスーパーコンピュータや予見しうる計算機の性能をもってしても不可能である。よって、そのような乱流現象を予測・解明するためには、乱流の普遍性の解明ならびに、その普遍性を利用した数理・物理学的根拠を持った情報縮約手法の開発と信頼性の評価が不可欠である。

近年工学的に重要な、上面と下面が絶縁壁で、その間を流れる一様磁場中の MHD 乱流 (平行二平板間 MHD 乱流) の直接数値計算 (DNS) が行われ、壁面近傍は乱れ、中央部分は乱れが抑制される現象が報告された (Boeck et al. J. Fluid Mech., 572, 179-188, 2007)。電気伝導性のない乱流 (HD 乱流) においては、このような、乱流部分と乱れの弱い (非乱流) 部分が混在する現象はいくつかの規範的な乱流 (乱流噴流、乱流混合層、乱流境界層、乱流後流) で知られている。特に非乱流から乱流領域にかけて渦度場などの物理量が急激に変化する狭い領域 (界面) の存在は古くから実験により知られていたが、その特性は近年、計算科学的手法で明らかにされ始め、例えば Re 数の増加と共に界面の厚さが狭くなることが知られている。

HD 乱流だけでなく、外部磁場のある平行二平板間 MHD 乱流においても、界面現象が存在する可能性が高いと考え、規範的な平行二平板間 MHD 乱流に対して界面が存在する条件、ならびに MHD 乱流における界面構造とその役割の解明が重要であると考えられる。また、このような界面現象を含む乱流の情報縮約手法の開発ならびにその信頼性の評価が重要である。

2. 研究の目的

(A) 一様磁場下の平行二平板間 MHD 乱流の DNS を行い、界面構造がみられるか、また HD 乱流における界面現象との類似性を明らかにする、(B) 任意形状を有する固体壁内部の

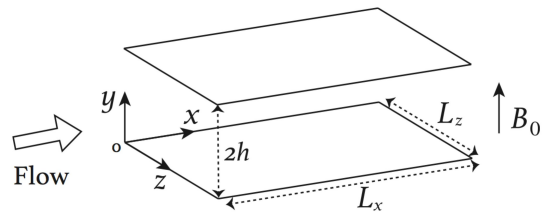


図1：問題設定と座標系

流れの情報縮約手法の開発と信頼性の評価を行う。

3. 研究の方法

(A) 界面現象の解明には乱流中における急激な変化をとらえる必要があるため、高解像度・高精度を有するスペクトル法を利用する。得られた DNS データの可視化やデータ解析により界面現象を定量化する。(B) 詳細は文献 1 (Okamoto et al. ESAIM. Proc. 2016) を参照されたい。

4. 研究成果

(A) 図1は平行平板をすぎる流れの方向ならびに一様磁場 B_0 の方向を表している。磁気レイノルズ数は十分低く、準定常近似が使えるものとする。水平方向は周期境界条件を課す。壁上では速度、電流の壁垂直成分は0とする。壁と水平な方向にフーリエスペクトル法を、壁鉛直方向にはチェビシェフ・タウ法を用いて、平行二平板間 MHD 乱流の DNS コードの開発を行った。粘性項には陰的オイラー法を、それ以外の項には3次精度ルンゲクッタ法を用いた。(格子点数 $256^3 \sim 512^3$)。

図2は流れ方向速度 $U(x, y, z)$ を xz 平面で平均した量を壁からの距離 y の関数として表示している。ただし両軸とも wall unit で無次元化している。

Boeck らと同様に、大まかに U に三層構造がみてとれる：粘性領域 ($y^+ < 40$)、対数領域 ($40 < y^+ < 400$)、プラトー領域 ($40 < y^+ < 400$)。

図3は xy 平面における渦度の大きさを可視化している。ただし構造を大きくみるため、計算領域のある部分を抽出している。チャンネル中央領域では、壁近傍と比較して乱れ成分が非常に抑えられていることがわかる。

次に、Westerweel らと同様に界面からの距離の関数として統計をとる条件付き統計解析を行う。

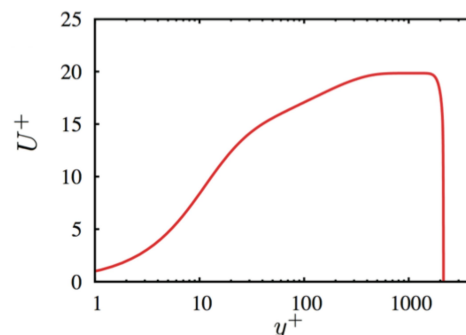


図2：平均速度プロファイル

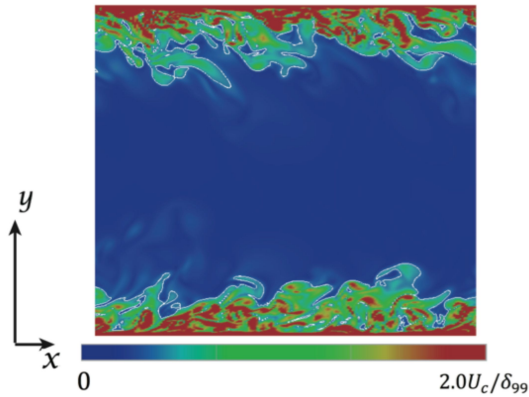


図3：渦度の二次元スライス

そのため、まず渦度の大きさをチャンネル中央から調べていき、ある閾値以上になった点を界面の位置 $y_1(x, z)$ と定義する。この界面の壁からの距離の平均値 $\langle y_1 \rangle$ はおよそ 340 程度であることがわかった。この値は図2における対数領域の右端あたりに位置する。この $y_1(x, z)$ からの距離を Y として平均をとるものを $\langle y_1 \rangle$ と表す。

図4は、渦度の x, y, z 成分それぞれの大きさと渦度の大きさの条件付き統計を示している。横軸 Y と縦軸は、チャンネル中央の速度 U_c と、乱流境界層厚さ δ_{99} で無次元化してある。乱流領域が $Y < 0$ 、チャンネルコア領域が $Y > 0$ に対応している。渦度の大きさは、コア領域から乱流領域にかけてシャープな勾配をもっていることがわかる。この MHD チャンネル乱流中にみられるシャープな勾配は、HD シア乱流(例えば乱流境界層、後流、噴流)でこれまで観察されてきた乱流・非乱流界面の性質とよく似ている。渦度の z 成分の大きさが x, y 成分に比べて界面近傍で寄与が大きいのことがわかる。

渦度以外にも MHD 乱流に特有な電流密度の大きさの条件付き統計を調べたところ、電流密度にもシャープな勾配がみられることがわかった(図5)。

ここで紹介した渦度や電流などの条件付き統計が、 $R=Re/Ha$ が同じであれば、グラフがよく重なることがわかった。 Re, Ha はそれぞれレイノルズ数、ハルトマン数である。

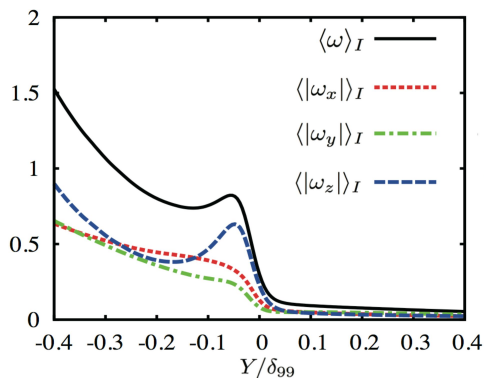


図4：渦度の大きさの条件付き統計

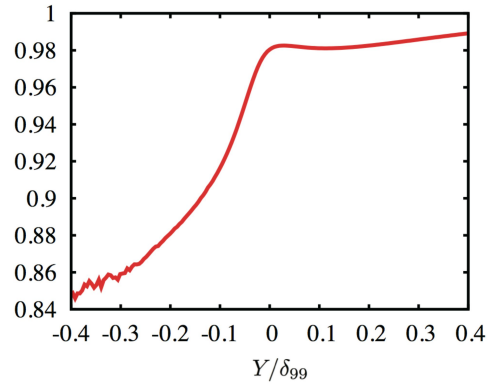


図5：電流密度の大きさの条件付き統計

また界面の壁からの距離の平均値の現象論的予測を行った。その理論式は、

$$\left[\delta_v^+ + \frac{1}{U_\delta^+} \left(\frac{\delta^+ \alpha(\delta^+)}{\kappa} - C \right) \right] (U_\delta^+)^3 = \left(\frac{Re}{Ha} \right)^2$$

である。ここで、

$$\alpha(\delta^+) = 1 - \frac{\delta_v^+}{\delta^+} + \frac{\delta_v^+}{\delta^+} \ln \frac{\delta_v^+}{\delta^+},$$

$$U_\delta^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \delta^+ + A,$$

$$C = \int_0^{\delta^+} U^+(y^+) dy^+$$

であり、界面の平均高さ δ^+ が $R=Re/Ha$ の関数であることが示された。 δ^+ のついた記号は、wall unit で規格化されたことを表す。 δ_v^+ は粘性底層の終わりであり、DNS データから 40 を代入した。対数法則にみられる δ^+ と A は DNS データからそれぞれ 0.47, $A=7.2$ とした。この式の導出は、(i)界面の平均位置が対数領域の右端であること、(ii)統計量が水平方向に一樣であること、(iii)統計量がチャンネル中央に関して対称であること、(iv)対数法則、を利用し準定常近似下の Navier-Stokes 方程式から導出した。

この式から数値的に求められた界面の高さ(例えば $R=600$ のとき 390)が DNS の値(340)と近い値をもつことがわかった。

(B)の情報縮約手法に関する結果の詳細は以下の文献 1(Okamoto et al. ESAIM. Proc. 2016) を参照されたい。

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 1 件)

1. N. Okamoto, M. Domingues, K. Yoshimatsu, K. Schneider, Adaptive wavelet simulation of weakly compressible flow in a channel with a suddenly expanded section, ESAIM: Proceedings and Surveys, 査読有, 53, 38-48 (2016)

〔学会発表〕(計 8 件)

1. Turbulent/non-turbulent interface in magnetohydrodynamic channel flow, N. Okamoto, Y. Otake, T. Ishihara, 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2016 年, Montreal, (Canada)

2. Turbulent/non-turbulent interface in turbulent magnetohydrodynamic channel flows at low magnetic Reynolds number, N. Okamoto, Y. Otake, T. Ishihara, Japan-Russia Workshop 2015, 2015 年, Nagoya University, Nagoya (Japan)

3. 電磁流体乱流の直接数値シミュレーションによる原始惑星系円盤内の粒子運動の解析, 高橋良輔, 岡本直也, 芳松克則, 石原卓, 白石賢二, 梅村雅之, 日本天文学会 2015 年秋季年会, 2015 年, 甲南大学, 兵庫県.

4. Applications of wavelet analysis to turbulence, N. Okamoto, 2015 International Workshop on Computational Science and Engineering, 2015 年(招待), 名古屋大学, 名古屋, 愛知県

5. Adaptive Wavelet Simulation for Weakly Compressible Flow Bounded by Solid Walls of Arbitrary Shape, N. Okamoto, M. Domingues, K. Yoshimatsu, K. Schneider, 2015 SIAM Conference on Computational Science and Engineering, 2015 年, Salt Palace Convention Center, Salt Lake City (USA)

6. Interfacial phenomena in turbulent magnetohydrodynamic channel flows at low magnetic Reynolds number, N. Okamoto, Y. Otake, T. Ishihara, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 2014 年, San Francisco (USA)

7. 低磁気レイノルズ数電磁流体チャネル乱流における乱流・非乱流界面, 岡本直也, 大竹悠介, 石原卓, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年, 中部大学, 春日井市, 愛知県

8. Interfacial phenomena in turbulent magnetohydrodynamic channel flows in an imposed magnetic field, N. Okamoto, Y. Otake, T. Ishihara, Waves and Turbulence in Rotating, Stratified and Electrically Conducting Fluids, 2014 年(招待), University of Cambridge, Cambridge (UK)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等
http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100002236_ja.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本直也 (OKAMOTO, Naoya)
名古屋大学・工学研究科・助教
研究者番号: 8 0 5 4 7 4 1 4

(2) 研究分担者

芳松克則 (YOSHIMATSU, Katsunori)
名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授
研究者番号: 7 0 3 7 7 8 0 2

(3) 連携研究者

石原卓 (ISHIHARA, Takashi)
名古屋大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 1 0 2 6 2 4 9 5