

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760161

研究課題名(和文)世界最大直接数値計算に基づく高プラントル流体MHD乱流熱伝達データベースの構築

研究課題名(英文)Development of high-Pr turbulent heat transfer database under magnetic fields by means of the world's largest direct numerical simulation

研究代表者

山本 義暢 (YAMAMOTO, Yoshinobu)

山梨大学・医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：40377809

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉デザイン条件下(高レイノルズ数，高ハルトマン数，高プラントル数)を対象としたMHD乱流熱伝達の高精度DNSデータベースを構築することを目的として，現在までにベクトル並列計算機及びスカラ並列計算機上での，高速大規模数値計算コード開発に成功した．具体的には，最速で実行演算速度21TFLOPSの高速演算が可能となった．開発コードを用いて，実際の核融合炉ブランケットデザイン条件下でのDNSデータベースの構築に成功し，その精度を検証した．

研究成果の概要(英文)：Aiming to the development of the Magneto-Hydro-Dynamics (MHD) high-Pr heat transfer database under the design conditions of the next advanced blanket in Fusion Reactors, we have succeeded the large-scale direct numerical simulations (DNS) of a MHD turbulent flows on both vector- and scalar type massively parallel processing supercomputer systems. The maximum computational speed was measured up to 21 Tflops and the sufficiently parallelization efficiency by using up to over thousands CPUs was achieved, and the obtained DNS results were validated by means of spectral analysis.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、熱工学

キーワード：MHD 高プラントル流体 熱伝達 DNS

1. 研究開始当初の背景

核融合炉次世代ブランケット冷却材(及び増殖材)の有力候補の一つである FLibe 溶融塩(LiF と BeF の混合溶融塩)は、(1) 化学的安定性、(2) 磁気流体力学的 (MHD, Magneto-Hydro-Dynamics) 圧力損失の劇的低減、(3) 冷却材のみならず増殖材及び中性子増倍材といった多機能性を有している反面、腐食、伝熱劣化の問題点が指摘されている。

この FLibe 溶融塩はプラントル数 20-40 程度の高プラントル数流体(プラントル数: 運動量拡散と熱拡散の比, プラントル数 40 の場合、熱拡散は運動量拡散の 1/40 であることを示す)であるため、その伝熱特性は乱流熱伝達に強く依存する。しかしその高プラントル流体における MHD 乱流熱伝達の知見は非常に少ない。原因としては、非定常性・3次元性を有する強非線形・散逸力学現象であり、理論的取り扱いが困難であること、さらに実験的手法においても磁場下を対象とするため、電子機器を用いた高精度計測機器が適用できないこと、また不透明流体であるためレーザ等の光学測定や可視化が困難であることが挙げられる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、近年目覚ましい進展を遂げつつある計算科学的手法に着目し、磁性効果・乱流効果・熱輸送効果を高精度に予測可能な直接数値計算手法(DNS, Direct Numerical Simulation)の開発及びその精度の検証を実行するとともに、実際の核融合炉デザイン条件(：高ハルトマン数(磁性効果)、高レイノルズ数(乱流効果)、高プラントル数(熱拡散効果)、に適用し、高精度 DNS データベースの構築を目指すものである。

3. 研究の方法

本研究では、高プラントル流体熱輸送を伴う MHD 乱流場の直接数値計算を対象とする。解析対象は図 1 にブランケット冷却流路を簡略化した平行平板間流であり、壁垂直方向に磁場が印加されている。FLiBe 溶融塩を用いた核融合炉ブランケットのデザイン条件は、バルクレイノルズ数： 10^4 - 10^5 、ハルトマン数：10-100、プラントル数：25 程度となる。したがって計算格子としては、レイノルズ数が低い場合において 10003 の格子が必要となり、さらに磁場効果による乱流変動及び温度輸送を解析するために、非磁場下の計算と比べて、10 倍-50 倍の時間積分長が必要となる。

(1)基礎方程式 支配方程式は、磁場効果によるローレンツ力を加えた非圧縮性流体の運動方程式及び連続式、磁場に関するポアソン方程式、そしてパッシブスカラーを仮定したエネルギー方程式である。

(2)計算手法 空間の離散化において、主

流及びスパン方向にフーリエ・スペクトル法、壁垂直方向に 2 次精度中心差分を用いた。また主流及びスパン方向のエイリアジング誤差に関しては、位相シフト法によりこれを除去した。時間進行は対流項に 3 次精度 Runge-Kutta 法、拡散項に Crank-Nicolson 法、圧力勾配項に Euler 陰解法により行った。

(3)境界条件 境界条件は全物理量に対し、主流及びスパン方向に周期境界条件とし、壁面で no-slip 条件、電位ポテンシャルは絶縁壁を仮定し勾配 0、温度は一定とした。またスパン方向の平均電流は 0 とした。

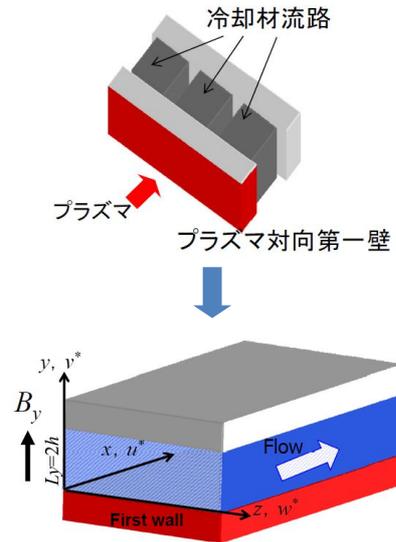


図 1 ブランケット冷却流路と計算体系

4. 研究成果

(1)ベクトル並列計算機上における性能評価

ベクトル並列計算機上での性能目標は、1000 並列以上において、実行効率 20% 以上の高速直接数値計算コードの開発を目標としたプログラム改良を実施した。その結果、ノード間通信方法の最適化により、海洋研究開発機構の地球シミュレータ(128 ノード/1024 並列、一般利用の最大ノード)において実行演算速度：21TFLOPS、実行演算効率：20.1%を達成した。また東北大学サイバーサイエンスセンターのSX-9(16 ノード/256 並列)において、実行演算速度：6.5TFLOPS、実行演算効率：24.8%の値が得られている(図 2 参照)。

(2)スカラー並列計算機での性能

同様にスーパーコンピュータ京を対象として通信部分の最適化を行った。本 DNS コードにおける主要通信部分である全対全 (All to all) 通信部分に対し、1 対 1 通信から集団通信 (MPI_ALLTOALLV) への書き換え作業と性能評価を実施した。

図 3 に alltoall 通信部分を集団通信へ変

更した場合の実行演算速度を示す．また参考のため地球シミュレータ(ES2)での値もプロットしている．京での実行演算速度は，1024 ノード使用時に 6.8TFLOPS となった．1024 ノードと 2048 ノードの比較により算出した並列化率は，99.997%である．また実行効率は，1024 ノード時に 5.2%，4096 ノード時に 3.6% 程度であるため，実行効率の向上をさらに図る必要がある．
しかし今回の通信方法の修正により，4096 ノード時には，17.6TFLOPS となり，演算速度の絶対値においては，ベクトル並列計算機並の値が得られるようになっている．

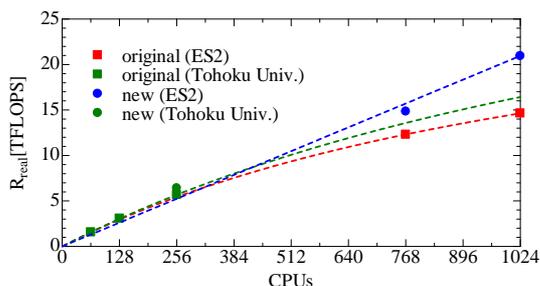


図 2 開発コードの性能評価(実行演算速度)

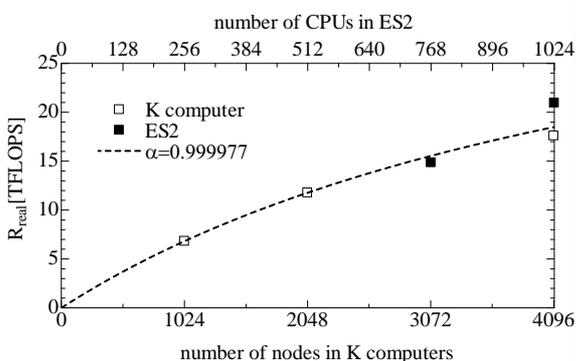


図 3 開発コードの性能評価(実行演算速度)

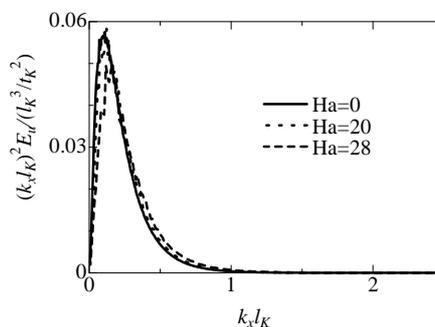
(3) DNS データベースの構築

現在までに，3.1 で紹介したベクトル並列計算機における DNS コードを用いて，核融合炉ブランケットデザイン条件において，バルクレイノルズ数：1 万 4000，ハルトマン数：0，20，28，プラントル数：25 の DNS データベース構築が終了している．

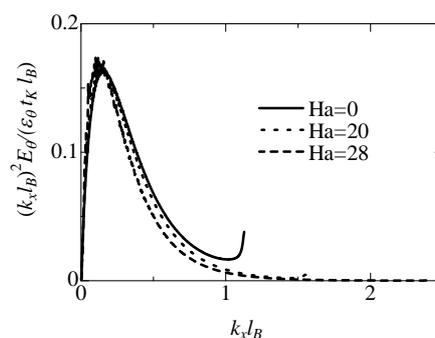
現在まで，デザイン条件下での高プラントル流体 MHD 熱伝達データベースは，実験・計算の両面において得られておらず，本プロジェクトによって初めて得られたものである．本研究ではさらにそのデータベースを用いた詳細解析を実施しておりその一部を紹介する．

(4) DNS データベースの精度検証

図 4 にコルモゴロフスケール及びバチェラスケール(長さ： l_B ，時間： t_B)で規格化した主流方向速度及び温度変動の散逸スペクトルを示す．主流方向速度のスペクトルにおいては全ケースにおいてコルモゴロフスケール



(1)



(2)

図 4 散逸スペクトル分布

(1)主流方向速度(コルモゴロフスケールで規格化)，(2)温度(バチェラスケールで規格化)

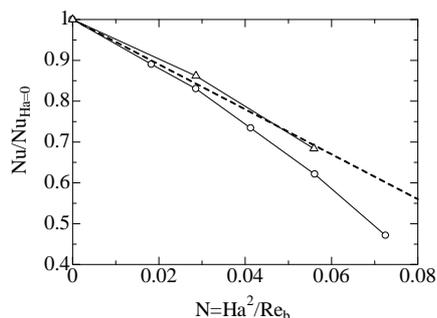


図 5 MHD 効果によるヌッセルト数の変化

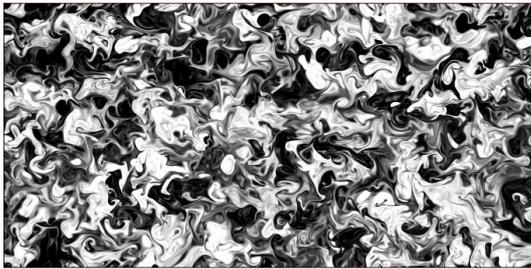
の 2 倍以上の空間解像度が確保されていることが確認できる．また温度場においても，バチェラスケール($k_x l_B=1$)以上の空間解像度が得られており，十分な精度を有する DNS データベースであると判断できる．

また本計算で得られたヌッセルト数を図 5 に示す()．参照のためプラントル数 5.25 の KOH を対象とした実験 5) 及び数値計算 2) に基づく相関式 ($Nu/Nu_{Ha=0} = 1 - 5.5N$, $N = Ha^2 / Re_b$) 及びプラントル数 5.25 の場合の DNS データベースの値() をプロットしている．本 DNS の結果は，相関式と良好に一致していることが確認できた．なおヌッセルト数は核融合炉デザインコードにおける入力条件となっており，ブランケットの伝熱設計上，MHD 効果に伴うヌッセルト数の定量的変化を評価する

ことが、第一の課題である。本プロジェクトの実行により、計算科学的手法により高レイノルズ数・高プラントル流体における磁場下の熱伝達に関する知見を初めて得られたことは大変価値が高いと考えている。



(1)



(2)



(3)

図6 温度変動分布の比較

(1) $Ha=0$, (2) $Ha=20$, (3) $Ha=28$

(5)DNS データベースによる乱流構造解析次に得られた DNS データベースに基づく MHD 効果による乱流変調に関する解析結果の一部を示す。

図6に、 $Ha=0$ (非磁場下)、 $Ha=20$ 及び $Ha=28$ における瞬時の温度変動の可視化結果を示す。非磁場下においては、高プラントル流体特有の微細な温度変動が確認できるが、磁場効果が大きくなると(Ha 数が大きくなる)と微細な温度変動が低減していることがわかる。これは磁場効果により乱流が低減し、乱流拡散効果が低減していることを示す。

図7に摩擦温度で無次元化した平均温度分布を示す。ハルトマン数 0(非磁場下)においては、Kader による実験式と良好に一致するが、磁場下(ハルトマン数 20 及び 28)においては、温度分布が上方に逸れ、磁場

効果により温度分布が層流化していることが確認できる。

図8に摩擦温度で無次元化した温度変動強度分布を示す。温度変動強度においては、磁場下の場合(破線及び点線)、非磁場下(実線)と比べ乱流強度が強くなっているように見えるが、これは規格化に用いた摩擦温度が減少しているためであり、乱れ自体は減少している。

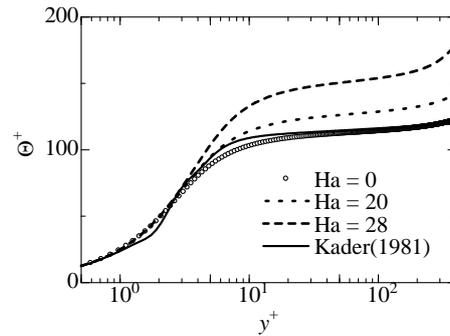


図7 平均温度分布

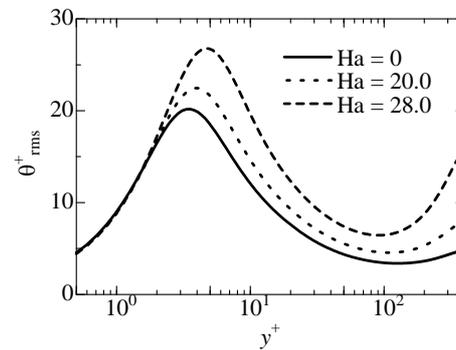


図8 温度変動強度分布

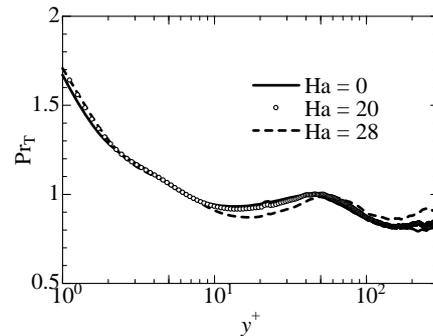


図9 乱流プラントル数分布

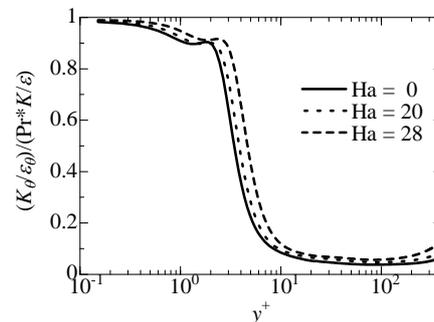


図10 タイムスケール比の分布

さらに乱流モデルによる熱伝達解析において重要なパラメータである，乱流プラントル数及びタイムスケール比の分布を図 9 に示す乱流プラントル数は，温度場解析の 0 方程式モデルで必要となる値であり，図 10 に示すタイムスケール比は温度場 2 方程式モデルでの支配パラメータである．図 9 に示す乱流プラントル数の結果により，磁場下においても，非磁場下と同様の傾向を示すことが確認できる．したがって，MHD 変調における乱流熱解析が 0 方程式モデルにより予測可能であることを示唆している．一方，タイムスケール比においても分布傾向は類似しているもののピークの位置が MHD 効果によりチャンネル中央側へシフトしていることがわかる．以上より，乱流モデルによる熱伝達解析においては，乱流プラントル数に基づく解析が可能であると結論付けられた．

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 6 件)

1. N.Osawa, Y.Yamamoto, and T.Kunugi, Investigation of MHD RANS modeling based on DNS database under the advanced blanket design conditions utilized molten salt, Proceedings of the 22th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE22), July 7-11, 2014, Prague, Czech Republic(in press), 査読有
2. 猿渡祥悟, 山本義暢: 高レイノルズ数チャンネル乱流場の内層温度分布におけるプラントル数効果, 日本機械学会論文集(掲載決定), 査読有
3. 猿渡祥悟, 山本義暢, 高レイノルズ数チャンネル乱流場における高プラントル数乱流熱輸送に関する四象限・結合確率密度関数解析日本機械学会論文集 B 編, 79 巻, 803 号(2013), pp.1281-1296(査読有).
4. 山本義暢, 高レイノルズ数大規模構造解析を対象とした壁水平方向高次精度差分法による直接数値シミュレーションの検討, 日本機械学会論文集 B 編,

79 巻, 807 号(2013), pp.2409-2423(査読有).

5. 猿渡祥悟, 山本義暢, 高レイノルズ数チャンネル乱流場の内層における乱流熱流束の高プラントル数効果に関する考察, 日本機械学会論文集 B 編, 79 巻, 808 号(2013), pp.2846-2853(査読有).
6. 猿渡祥悟, 山本義暢, 高解像度 DNS データベースを用いた高レイノルズ数チャンネル乱流場の四象限・確率密度関数解析, 日本機械学会論文集(B編), 78 巻 795 号(2012), pp.1951-1966(査読有).

[学会発表](計 5 件)

1. 猿渡祥悟, 山本義暢, 辻義之, スーパーコンピュータ京を用いた高レイノルズ数チャンネル乱流場における大規模組織乱流構造解析, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 2013 年 12 月 18 日.
2. 山本義暢, 大沢直樹, MHD チャンネル乱流場における実効レイノルズ数の予測, 日本機械学会関東支部山梨講演会 2013, 2013 年 10 月 27 日.
3. 猿渡祥悟, 山本義暢, 高レイノルズ数乱流熱輸送におけるプラント効果に関する結合確率密度関数解析, 日本流体力学会年会 2013, 2013 年 9 月 12 日, 東京農工大学.
4. 猿渡祥悟, 山本義暢, 高レイノルズ数チャンネル乱流場における高プラントル数乱流熱伝達の組織乱流構造解析, 可視化情報シンポジウム 2013, 2013 年 7 月 16 日, 工学院大学.
5. 長坂和輝, 山本義暢, 磁気乱流場における高精度大規模直接数値シミュレーション手法の開発(並列化手法の検討), 日本機械学会関東支部山梨講演会 2012, 2012 年 10 月 27 日, 山梨大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.me.yamanashi.ac.jp/lab/yamamoto/DNSdatabase.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 義暢 (YAMAMOTO, Yoshinobu)
山梨大学・医学工学総合研究部・准教授

研究者番号: 40377809