

## 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 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760156

研究課題名（和文） 大規模直接数値計算及び高精度表面波計測に基づく自由表面乱流熱物質移動現象の解明

研究課題名（英文） Investigation of free-surface turbulent heat and mass transfer by means of large-scale direct numerical simulation and high-precision turbulent measurement  
研究代表者

山本 義暢（YAMAMOTO YOSHINOBU）

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：40377809

研究成果の概要（和文）：本研究においては、自由表面乱流場における乱流構造及び熱物質輸送現象の解明を目的として、フルード数 1.8 の高フルード数開水路乱流場の直接数値計算の実行に初めて成功した。また高精度乱流計測結果と照合し、本計算結果の信頼性を確認した。これにより、界面変形を伴う自由表面乱流場における高精度直接数値計算データベースの構築を達成した。さらに、得られたデータベースを用いて、自由表面近傍の乱流構造を明らかにした。また、高プラントル数及び磁場効果の組み込み及び精度検証を行い、次世代核融合炉設計の実機条件に適用可能な直接数値計算コード開発に成功した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we successfully conducted a direct numerical simulation of a high-Fr turbulent open-channel flow at a Froude number of 1.8 and a Reynolds number of 2325 based on bulk velocity, gravitational acceleration, water depth, and kinetic viscosity, using the multi-interface advection and reconstruction solver (MARS). Near the free-surface, wall-normal turbulent intensity and energy-dissipation rates increase toward the free-surface, and the tendencies of turbulent statistical quantities near the free-surface are in good agreement with the experimental measurements obtained using a laser Doppler anemometer (LDA). Finally, we established the high-precision direct numerical simulator, which can be covered the effects of high-Pr heat transfer and magnetic force for design activity to the next generation fusion reactor engineering.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：自由表面流 乱流熱物質移動 直接数値計算

## 1. 研究開始当初の背景

自由表面を有する乱流場は各種工学分野で頻りに出現し、自由表面近傍の乱流構造及びそれに伴う乱流熱物質輸送解析は、工学機器の新規開発及び高精度化に不可欠である。例えば、核融合炉用材料開発に不可欠な材料照

射試験用施設 (International Fusion Material Irradiation Facility, IFMIF) のターゲット系においては最大流速 20m/s で安定な液体リチウム流を実現することが求められている。現在まで、液体リチウム流の界面波計測とその安定性評価が精力的に行わ

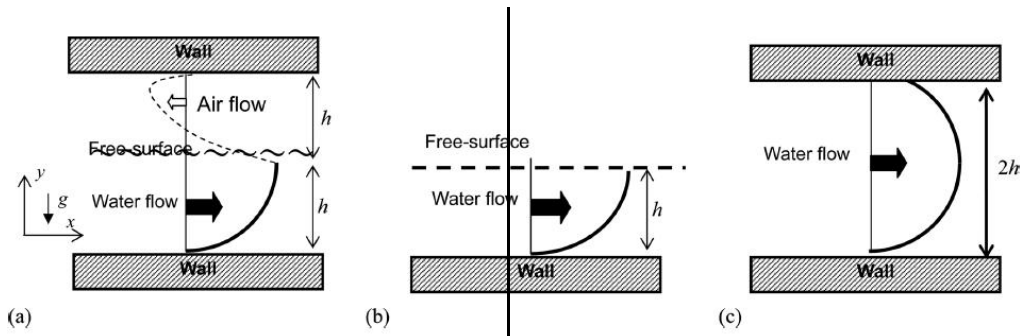


図1 計算対象

表1 計算条件

TABLE I. Numerical condition:  $Re_t = u_* h / \nu_w$ : turbulent Reynolds number;  $u_*$ : friction velocity at bottom wall;  $h$ : water depth (= gas layer height);  $\nu_w$ : kinetic viscosity of water,  $Fr = U_m / (gh)^{1/2}$ : Froude number;  $U_m$ : bulk mean velocity at water side;  $\rho_w$ : liquid density;  $\rho_g$ : air density;  $L_x, L_y, L_z$ : computational domain;  $N_x, N_y, N_z$ : grid number;  $\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+$ : grid resolution for streamwise ( $x$ ), vertical ( $y$ ), and spanwise ( $z$ ) directions, respectively. Superscript + denotes the dimensionless quantities normalized by friction velocity and kinetic viscosity using the definition of the Reynolds number.  $T_0^+$ : time integration length from initial condition to fully developed status;  $T^+$ : time integration length after fully developed status.

	$Re_t$	$Fr$	$\rho_w / \rho_g$	Domain $L_x \times L_y \times L_z$	Grid number $N_x \times N_y \times N_z$	Resolution $\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+$	$T_0^+$	$T^+$
Case1	150	1.8	842.1	$12.8 h \times 2 h \times 6.4 h$	$384 \times 214 \times 192$	5.0, 0.26-2.0, 5.0	610	730
Case1'	150	1.8	842.1	$12.8 h \times 2 h \times 6.4 h$	$648 \times 214 \times 324$	3.0, 0.26-2.0, 3.0	610	730
Case2	150	0	-	$12.8 h \times 2 h \times 6.4 h$	$384 \times 107 \times 192$	5.0, 0.26-2.0, 5.0	-	700
Case3	150	-	-	$12.8 h \times 2 h \times 6.4 h$	$384 \times 182 \times 192$	5.0, 0.26-2.0, 5.0	-	700

れているものの、液体金属特有の取り扱いの困難さも伴い実験的手法で得られる情報は間接的(等温⇔加熱状態、水ループ⇔リチウムループ)かつ断片的(界面波、速度分布、温度分布等に関する個別計測)情報である。そこで液体リチウム流れにおける機構論的現象解明のための高精度評価手法の確立が望まれていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、フルード数が1を越える高フルード数開水路乱流場の直接数値計算手法の確立とそれに基づく乱流構造解析を行うことである。また、高プラントル数熱輸送及び磁場効果の組み込みを行い、次世代核融合炉設計に適用可能な高精度直接数値計算手法として確立させることである。

## 3. 研究の方法

研究方法としては、気液混相乱流場の直接数値計算手法としてMARS法を高フルード数開水路乱流場用へ改良して適用した。また大規模直接数値計算の実行のために、並列化手法の検討と高速化を併せて行った。実際の計算は、東北大学サイバーサイエンスセンタのSX-9及び京都大学学術情報メディアセンタのT2Kオープンスパコンを利用して行った。

## 4. 研究成果

(1) 高フルード数開水路乱流場の直接数値計算

計算対象として図1に示す3種類の乱流場

を対象とした。ここに、図1-(a)高フルード数開水路乱流場、(b)低フルード数開水路乱流場、(c)チャンネル乱流場である。また表1に計算条件を示す。十分に時間積分を行い、十分に発達した高フルード数開水路乱流場状態を数値計算により再現することができた(図2)。

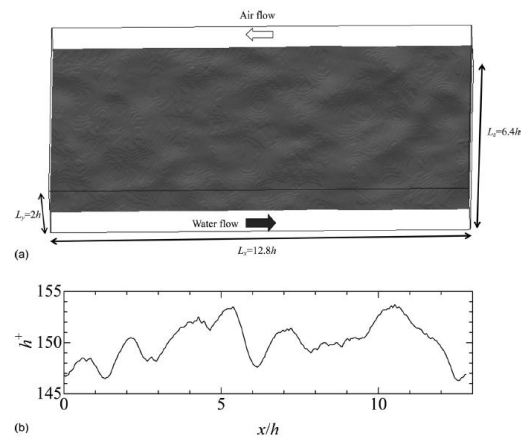


図2 十分に発達した高フルード数開水路乱流場における界面波形態(a)とその波高(b)

そして発達乱流場の形成を確認した後、さらに十分な時間積分を行い、自由表面近傍における高フルード数開水路乱流の詳細な直接数値計算データベースを構築した(例として図3に示す乱流強度分布)。

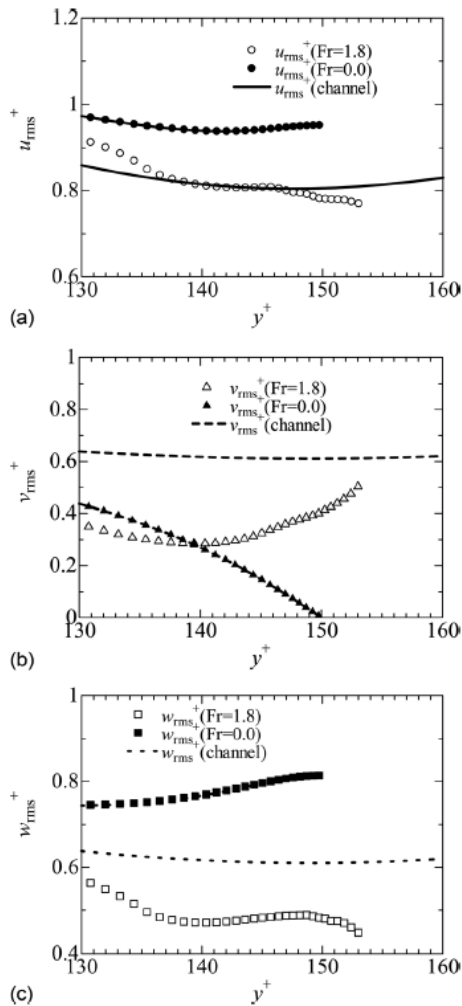


図3 自由表面近傍の乱流強度分布

さらに、データベースを用い自由表面近傍の再配分率及び散逸率に関する解析を行った。その結果、再配分率は高精度乱流計測結果と定量的に一致することが確認できた。また界面変形効果により自由表面近傍では散逸率が急上昇することを示した(図4)。

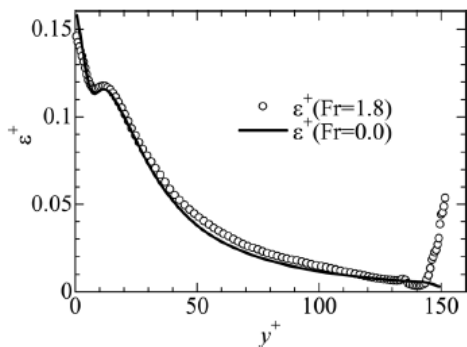


図4 自由表面近傍における再配分率

その他、圧力歪相関項といった乱流モデリン

グに必要な乱流諸量についても、高フルード数条件におけるデータベース構築に成功した。これらのデータをもちいて、自由表面乱流場の乱流モデル解析における境界条件設定方法について提案を行った。

以上の通り、本計算により高フルード数開水路乱流場の高精度直接数値計算を確立させるとともに、その詳細なデータベース構築に成功した。今後は、開発コードを核融合炉材料照射試験用施設 (International Fusion Material Irradiation Facility, IFMIF) ターゲット系への適用を行い、本開発コードの有用性を示す予定である。

(2) 高プラントル数効果・磁場効果の組み込み

次世代核融合炉ブランケットの冷却材の候補の一つである FliBe (混合熔融塩) は、熱工学の観点から検討すべき課題として、磁場効果の影響を受けにくいという利点がある反面、伝熱劣化の問題がある。本研究では、この高プラントル効果と磁場効果を直接数値計算手法により、考慮可能とすべくコード開発とその検証を行った。

計算体系は、実験データベース (Yokomine et al. 2007) と同様の 2 次元チャンネル乱流場とし、計算条件においても実験データベースと同様とした。その結果、実験データベースの伝熱劣化を良好に再現することに成功した(図4)。

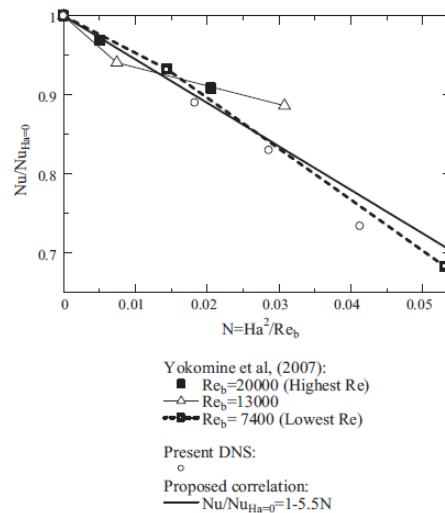


図4 高プラントル数流体 MHD 熱伝達特性 (実験との比較)

また開発コードの高速化を行い、東北大学サイバーサイエンスセンターSX-9/16 ノード上において、4.3TFLOPS の高速演算が可能となった(図5)。以上により、本開発コードを用いることにより、次世代核融合炉設計条件

と同条件下の大規模直接数値計算による高精度解析が可能となることを示した。

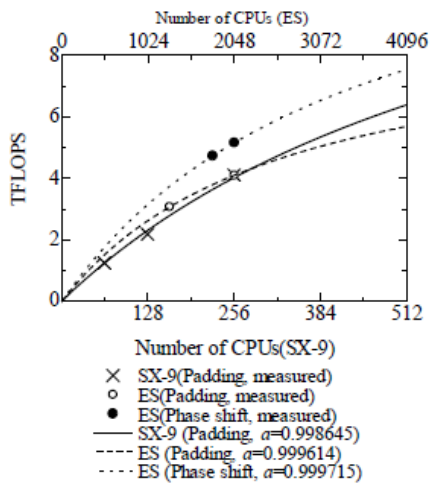


図5 開発コードの実行演算速度

#### 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 9 件 全て査読有)

1. Y. Yamamoto and T. Kunugi, Direct numerical simulation of a high-Froude number turbulent open-channel flow, *Physics of Fluids*(2011), Vol.23, 12510810, pp.1-11.
2. Y. Yamamoto and T. Kunugi, Discussion on heat transfer correlation in turbulent channel flow imposed wall-normal magnetic field, *Fusion Engineering and Design* 86 (2011) pp. 2886-2890.
3. Y. Yamamoto and T. Kunugi, Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow with Deformed Bubbles, *Progress in Nuclear Science and Technology* (2011), Vol.2. pp.543-549.
4. Y. Yamamoto and T. Kunugi, Direct Numerical Simulation of MHD Turbulent Flows with High-Pr Heat Transfer, *Progress in Nuclear Science and Technology*(2011), Vol.2. pp.550-555.
5. 山本義暢, 功刀資彰, 辻義之, 高プラントル数乱流熱伝達の直接数値計算における適切な空間解像度に関する考察(Pr=5の場合), *Thermal Science and Engineering*(2011), Vol.19 No.3,

pp.59-70.

6. Y. Yamamoto and T. Kunugi, Prandtl number effect on heat transfer degradation in MHD turbulent shear flows by means of high-resolution DNS, *Developments in Heat Transfer* (2011), InTech, ISBN 978-953-307-569-3, pp.638-648.
7. Y. Yamamoto and T. Kunugi, High Performance Computing for MHD Turbulent Flows with high-Pr Heat Transfer, *Green Energy and Technology, Zero-Carbon Energy Kyoto* 2010, pp.222-229.
8. 山本義暢, 功刀資彰, 高フルード数開水路乱流場の直接数値シミュレーション, *混相流*, 24 巻, 2 号(2010), pp.169-178.
9. Y. Yamamoto, T. Kunugi and C-F. Li, High-Pr Heat Transfer in Viscoelastic Drag-Reducing Turbulent Channel Flow, *Green Energy and Technology, Zero-Carbon Energy Kyoto* 2009, pp.58-64.

[学会発表] (計 8 件)

1. 山本義暢, 功刀資彰, 高レイノルズ数 MHD チャンネル流れにおける内層乱流構造特性, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011, 2011 年 10 月 29 日.
2. 山本義暢 功刀資彰, 変形する気液界面近傍の乱流構造に関する考察, 日本混相流学会年会 2011, 2011 年 8 月 6 日.
3. Y. Yamamoto, T. Kunugi, Interaction between turbulent dynamical processes and statistics in deformed air-liquid interfaces, via DNS, *Turbulent Shear Flow Phenomena 7*, Paper No.3B3P(OTTAWA), 2011.7.29.
4. Y. Yamamoto, T. Kunugi, Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow with Deformed Bubbles, *Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA + MC2010)*, CD-ROM, Paper No.10352(TOKYO), 2010.10.17
5. Y. Yamamoto, T. Kunugi, Direct Numerical Simulation of MHD Turbulent Flows with High-Pr Heat Transfer, *Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA + MC2010)*, CD-ROM, Paper No.10351(TOKYO), 2010, 10.18.
6. Y. Yamamoto, T. Kunugi, Y. Tsuji, Effects of very-large scale structures in a high-Reynolds turbulent channel flow on medium-high Prandtl number, *Turbulence, Heat and Mass Transfer* 6, pp.123-126 (ROME), 2009.9.14.

7. Y.Yamamoto, T. Kunugi, K. Takase, Drag fluctuations on deformed bubbles in a turbulent shear flow by means of DNS, Turbulent Shear Flow Phenomena 6, Vol.2, pp.984-989 (SEOUL), 2009.6.29.
8. S. Imayama, Y. Yamamoto, Y. Tsuji, Coherent structures and their contribution to turbulent intensity in turbulent channel flow, Turbulent Shear Flow Phenomena 6, Vol.1, pp.165-168 (SEOUL), 2009.6.28.

[図書] (計 2 件)

1. 山本義暢, 功刀資彰, 大規模直接数値計算による高レイノルズ数 MHD 乱流場の内層構造の解明, 東北大学サイバーサイエンスセンター 大規模計算システム広報 SENAC, Vol.44 No.2, pp.69-78, 2011.
2. 山本義暢, 功刀資彰, T2K オープンスパコンを用いた高プラントル数流体 MHD 乱流の大規模直接数値計, 京都大学学術情報メディアセンター全国共同利用版[広報], pp.2-5, 2011

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

山本 義暢 (YAMAMOTO YOSHINOBU )

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号 : 40377809

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし