MHD 自由界面乱流の DNS DNS of turbulent free surface flow with MHD

佐竹 信一,富山大学工学部,富山市五福 3190, E-mail: ssatake@eng.toyama.ac.jp 功刀 資彰,京都大学大学院,京都市左京区吉田本町, E-mail:kunugi@nucleng.kyoto-u.ac.jp Sergey Smolentsev, UCLA, MAE, Los Angeles CA 90095-1597, E-mail: sergey@fusion.ucla.edu Dept. of Mech. Intellectual Sys. En., Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama city, Toyama, 930-8555, JAPAN Dept of Nuclear Eng., Kyoto University, Yoshida, Sakyo, Kyoto, 606-8501, JAPAN

UCLA, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Los Angeles CA 90095-1597

Abstract A direct numerical simulation (DNS) of turbulent free surface flow with a constant magnetic field has been carried out to grasp and understand the effects of electromagnetic suppression of turbulence. In this study, the Reynolds number based on a bulk velocity and a channel width was set to be constant, Re = 2300. The magnetic field at Ha = 20.0,30.0 for the orientation of streamwise direction and at Ha = 5.0,10.0 for the orientation of spanwise direction taken from the electrical potential equation was applied to a constant magnetic field. The number of computational grids used in this study was $256 \times 128 \times 128$ in the *x*-, *y*- and *z*-directions, respectively. The turbulent quantities such as the mean flow, turbulent stresses and the turbulent statistics were obtained via present DNS. The mean velocity and turbulent intensities distributed from the wall to the free surface and is damped quickly near wall region.

1.はじめに

核融合炉工学分野における気液二相流の利用は,温度拡散 率が大きい液体金属流を用いて磁場閉じ込め核融合炉への 応用を目的に古くから研究されており , MHD 圧損の低減化 や強磁場下での液体金属流特有の伝熱性能劣化の防止が主 たる研究課題である[1] . さらに, プラズマからの運動量輸 送 (プラズマ風)に対する液膜応答性[2]や Li や Na 火災に 対する安全性などの課題もある.最近の米国における先進核 融合炉概念研究[3]や慣性核融合炉概念[4]においては,プラ ズマ対向壁の冷却 ,粒子束による損耗防止および熱応力の緩 和策として,溶融塩 Flibe を用いた液膜流冷却概念が提案さ れている.また,わが国でも核融合科学研究所のヘリカル炉 (FFHR)設計[5,6]では Flibe 液体ブランケットの採用や液膜 流冷却概念[7,8]も検討され始めている .これらの先進核融合 炉概念の設計研究に共通しているのは Flibe 液膜流の利用で ある.これは, Flibe が化学的に安定であり火災の心配が無 いこと,低電気伝導性であるため MHD 圧損が小さいこと, およびトリチウム溶解度が小さいことなどの利点を持って いるからである.本研究では,このような核融合炉内の液膜 流冷却をモデル化した流れ場に対して ,DNSを行い磁場の 影響を考察した.

2.計算手法

支配方程式は以下のような運動方程式と連続式,スカラー ポテンシャル式である.

 $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re_{t}}\nabla^{2}\mathbf{u} + \frac{Ha^{2}}{Re_{t}}(\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

 $abla^2 \mathbf{j} = \nabla \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{B}), \ \mathbf{j} = -\nabla \mathbf{j} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}$ (2) 本研究で用いたDNSコードは、Staggered格子を用いコントロ ールボリューム法をベースとしている。数値解法の詳細は佐 竹・功刀[9]を参照されたい、佐竹・功刀[9]を直交座標系に 変更して使用した、計算対象は図1のような片面に

free-slip条件を課したチャネル乱流である. また,時間離 散化に3次精度のRunge-Kutta法Crank-Nicolson法組み合わ せた方法を用いた.低磁場を仮定し,スカラーポテンシャル を解き磁場を計算する.スカラーポテンシャルの解法にも圧 力解法と同じ流れ方向,スパン方向にFFTを用いた方法を 使用した[9]. **3.計算条件**

レイノルズ数はRe_b=u_bd/n =2300であり,磁場の向きは及び 強さは,流れ方向に対してHa=20.0,30.0であり,スパン方向に Ha=5.0,10.0とした.グリッド数は流れ方向,壁方向,スパン方向 にそれぞれ256 x 128 x 128であり,これらのパラメータと解像度は, 表1に示した.



Fig. 1 Computational domain

4.計算結果

図2に平均速度分布を示す.いずれの速度分布も摩擦速度が 減少し,対数領域より上方へ現れている.スパン方向に Ha=10の磁場の強さのほうが,流れ方向にHa=20に比較し 大きく現れ,スパン方向に磁場を印加したほうが,層流化し やすいことがわかる.図3,4,5に流れ方向,壁垂直方向,ス パン方向の乱流強度の各成分をそれぞれ示す.流れ方向成分 は,スパン方向磁場の場合Ha=5のときピークが下がるが, Ha=10の場合上昇している.ピークの値及び全体の分布と して流れ方向磁場の場合Ha=20,30の両ケースとも上昇して いる.流れ方向の乱流強度に関しては,野口,笠木[10]のチ ャネル乱流に流れ方向に磁場を印加した場合のDNSデー タベースと傾向が一致している.また,Orlandia は円管乱流 DNSに流れ方向及び円周方向に磁場を印加した場合を行 っている[11].このときの流れ方向乱れ強度成分の傾向とよ く一致している.流れ方向成分が上昇してしまうのは,層流 化してしまい,ストリーク構造がつながってしまうために起 こるものと思われる.今後流れ方向計算領域の検討が必要と 思われる .壁垂直方向の乱流強度はいずれのケースもすべて 減少している.特に自由界面側ではなく,壁側の減少が著し い.スパン方向の乱流強度分布は,いずれのケースも領域全 体で減少しているものの,自由界面乱流でみられる自由界面 側で少し上昇するといった傾向は見られる .スパン方向に磁 場を印加した場合の乱流エネルギ収支式を以下に示す.



Dissipation

(3)

磁場を印加しない場合に比較し,

MHD1,MHD11,MHD2,MHD22の4項が現れる MHD1,MHD2 は速度とポテンシャルの勾配の相関 デリングにおいて重要な項である.

図 6(a),(b)にスパン方向に磁場 (Ha = 流エネルギ収支及び磁場を印加に関 布を示す.図 7(a),(b)にスパン方向に した場合の乱流エネルギ収支及び磁 を拡大した分布を示す.図 6(a)と図 マン数の増加に伴い, MHD1, MHD1 は増加する . Ha =10 においてはこれ いくらい大きな値を持っている.図 と Ha =10 の場合 Ha =5 と比較し値の大きさが4倍程度大き い.さらに MHD11 の負の寄与が大きく MHD1 が MHD11 の 分布と相似な形で正に寄与している . MHD2,MHD22 は小さ く, すなわちスパン方向に磁場を印加した場合, MHD によ る寄与は壁垂直方向からは小さいことを意味する 図 9(a),(b), 図 10(a),(b),図 11(a),(b)に磁場なし,スパン方向に磁場あり

Table 1	Computational	condition
---------	---------------	-----------

	又未,No.940-33,1994,pp.303-300.					
頃であり.MHD乱流七	[11]P.	Olrandi.	CTR,	Proc.	of	Summer
	1996.p	p.447-456.				
5)を印加した場合の乱	-	-				
連した項を拡大した分						
磁場(Ha =10)を印加						
繊を印加に関連した項						
7(a)を比較するとハルト						
1,MHD2,MHD22 の4項						
いらの項は , 無視できな						
6(b)と図7(b)を比較する						

P	Grid number	Computatio	Spatial resolution	Orientation	
Re_b	$(x \times y \times z)$	nal Domain	$(\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+)$		На
		(L_x, L_y, L_z)			
2300	256 x 128 x 128	15d, d, 2π d	8.78 , 0.24 ~ 1.73,7.36	B_{x}	20
2300	256 x 128 x 128	15d, d, 2π d	8.78 , 0.24 ~ 1.73,7.36	B_{x}	30
2300	256 x 128 x 128	15d, d, 2π d	8.78 , 0.24 ~ 1.73,7.36	B_{z}	5
2300	256 x 128 x 128	15d, d, 2π d	8.78 , 0.24 ~ 1.73,7.36	B_{z}	10

(Ha =10), 流れ方向に磁場あり(Ha =20)の場合の低圧領 域及び低速領域をそれぞれ示す.図 9(a)において磁場なしの 渦構造は計算領域全体に存在し,自由界面近傍に達している 構造もある.図 9(a)の低速ストリーク構造の数も8本程度存 在し縞構造もうねっている.これに対し図 10(a),図 11(a)に おいて磁場を印加した場合渦構造は,流れ方向,スパン方向 ともに渦構造の数は減少している.これは平均流速でみられ たような層流化していることに対応している.同様にストリ ーク構造においても図 10(b),図 11(b)に見られるように縞構 造の数は減少している.しかしながら形状として流れ方向に 磁場をかけた場合ストリーク構造は自由界面近傍まで伸び た形になっている.これは流れ方向乱流強度成分が自由界面 近傍で流れ方向に磁場を印加したほうが大きく現れている 減少に対応していると考えられる.

参考文献

- [1] 例えば、M. Takahashi, et al., Fusion Eng. Design, **27**.663 (1995)
- [2] 例えば、N. B. Morley, et al., Fusion Eng. Design, 28, 176 (1995)
- [3] M. A. Abdou et al., Fusion Eng. Design, 45, 145 (1999)
- [4] R. W. Moir, Fusion Eng. Design, 29, 34 (1995)
- [5] A. Sagara et al., Fusion Eng. Design, 29, 51 (1995)
- [6] A. Sagara et al., Fusion Eng. Design, 41, 349 (1998) [7] T. Kunugi et al., to be published in Nuclear
- Instrument and Method in Phys. Res. A.

[8] 功刀、松本、相良: 2000 年日本原子力学会秋の大会、青 森、B24 (2000)

[9] 佐竹, 功刀, 機論 B 編 64 巻 pp.65-70 (1998)

[10]野口, 笠木, 日本機械学会流体工学部門講演会, 講演論 040 50 1004 005 000

Program



Fig. 5 Spanwise velocity fluctuation

y/d

0.4

0.6

0.8

0.2



Fig. 6 Turbulent kinetic energy budgets with spanwise orientation at Ha=5; (a) all terms, (b) additional MHD terms



Fig. 7 Turbulent kinetic energy budgets with spanwise orientation at Ha=10; (a) all terms, (b) additional MHD terms

1.0

(a)



Fig. 9 3D contour surface without MHD ; (a) low pressure region (P^+ <-3), (b) low speed region (u^+ <-3)



Fig. 10 3D contour surface with MHD Spanwise orientation (Ha=10); (a) low pressure region $(P^+<-3)$, (b) low speed region $(u^+<-3)$



Fig. 11 3D contour surface with MHD Streanwise orientation (Ha=20); (a) low pressure region $(P^+<-3)$, (b) low speed region $(u^+<-3)$



(b)



(b)

