

# 下向き水平等温面からの自然対流 CFD 解析 (第 2 報 : 計算領域および境界条件の影響)

津田 和則\*・茂地 徹\*\*・桃木 悟\*

## CFD analysis on natural convection below an isothermal horizontal plate facing downwards

(Part II : Effects of computational domain and boundary condition)

by

Kazunori TSUDA\*, Toru SHIGECHI\*\* and Satoru MOMOKI\*

In the second report are presented the numerical simulations by CFD under the different computational domain and boundary condition from those in the first report. The numerical results are compared with those of the first report. It is shown that the numerical results on the velocity and temperature profiles are considerably affected by the computational domain and boundary condition.

**Key words** : natural convection, downward-facing horizontal plate, CFD, computational domain, boundary condition

### 1. まえがき

第 1 報<sup>(1)</sup>では Aihara らの実験結果との比較のため実験に近い条件で数値解析を実施した。本報ではそのような条件設定が妥当であるどうかを検証するため、計算領域の範囲と外壁の側面境界条件を変化させて数値解析を行い、第 1 報の結果と比較しながら、その影響について検討する。

### 主要記号

$g$	: 重力加速度 [m/s <sup>2</sup> ]
$\alpha_x$	: 局所熱伝達係数 [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$L$	: ストリップ長さ [m]
$Nu$	: 平均ヌッセルト数
$Nu_x$	: 局所ヌッセルト数
$p$	: 圧力 [Pa]
$Pr$	: プラントル数
$q$	: 局所熱流速 [W/m <sup>2</sup> ]
$Ra$	: レイリー数

$\theta$	: 温度
$\Delta \theta$	: 温度差 (= $\theta_w - \theta_\infty$ )
$\Theta$	: 無次元温度
$\lambda$	: 熱伝導率 [W/(m·K)]
$\mu$	: 粘性係数 [Pa·s]
$\nu$	: 動粘性係数 [m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	: 密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\phi$	: 流れ関数
$h$	: エンタルピー

### 添字

$i, j$	: X, Y 方向
0	: 基準
w	: 壁面
$\infty$	: 周囲

### 2. 数値解析

#### 2. 1 解析モデル

数値解析のモデルは基本的に第 1 報と同じであるが、図 1 に示した解析領域幅と壁面境界の熱伝達をパラメ

ータとして変化させた。

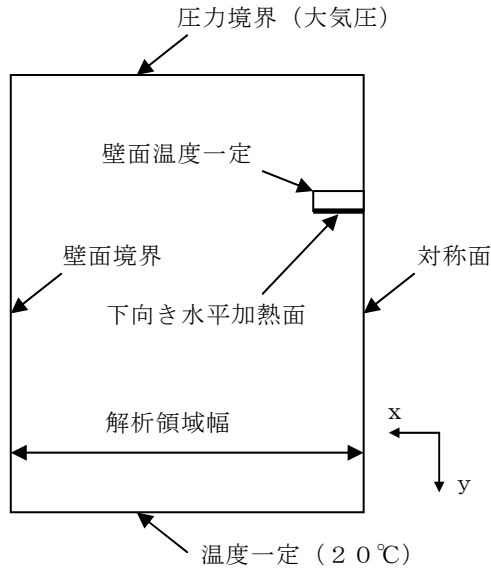


図1 2次元解析モデル

第1報と同様に、空気の圧縮性を考慮し、比熱、粘性および熱伝導率の物性値は、膜温度 $(T_w + T_\infty)/2$ で評価する。

## 2.2 基礎方程式

圧縮性流体の質量保存式と運動量保存式およびエネルギー保存式を下記に示す。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = S_m \quad (1)$$

$S_m$ : 質量ソース

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial x_j} u_i \right] = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho B_i \quad (2)$$

$\rho B_i$ : 体積力 (重力項)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right] = S_h \quad (3)$$

$S_h$ : エネルギーソース

## 2.3 熱伝達係数

下向き水平加熱面の任意の位置での局所ヌッセルト数  $Nu$  は次のように定義される。

$$Nu_x = \frac{\alpha_x L}{\lambda} = \frac{\lambda_w L}{\delta_1 \lambda} = \frac{L}{\delta_1} \quad (4)$$

$$\text{ここで } \delta_1 = -(\theta_w - \theta_\infty) / (\partial \theta / \partial y)_w \quad (5)$$

平均ヌッセルト数  $Nu$  は式 (4) より

$$Nu = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (6)$$

## 2.4 数値計算の手法

数値解析には STAR-CD (Vr.3.24) を使用し定常解析を実施した。

最小格子:  $\Delta x, \Delta y = 0.5 \text{ mm}$

最大格子:  $\Delta x, \Delta y = 10 \text{ mm}$  で不連続格子採用

a) 解析アルゴリズム : PISO 法

b) 対流項差分スキーム : UD 法

c) マトリクス解法 : AMG 法

## 2.5 解析条件と境界条件

図1に示すように水平平板は温度一定とする。また、中心部は左右対称性から対称条件、下部境界一定温度 ( $20^\circ\text{C}$ ) と仮定する。側面の外壁境界は断熱として解析するケース1と熱伝達係数を  $5.0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  とし解析領域幅を  $1/2$  にしたケース2を実施する。但し、外気温度は  $20^\circ\text{C}$  とする。上部は大気開放の圧力境界 ( $20^\circ\text{C}$ ) とする。解析条件は空気初期温度  $20^\circ\text{C}$ 、水平平板温度は  $75.2^\circ\text{C}$  とする。

表1 解析条件一覧表

No	物体温度 $[\text{C}]$	外壁の側面熱伝達係数 $[\text{W/(m}^2\text{K)}]$
1	75.2	断熱
2	75.2	5.0

## 3. 解析結果

解析結果として第1報で示した結果を(a)オリジナル、ケース1を(b)断熱境界、ケース2を(c)  $1/2$  領域 ( $\alpha=5$ ) と称して比較した結果を図2.1～図4.2に示す。

図2.1: 速度ベクトル図 (全体図、拡大図)

図2.2: 等流れ線図 (全体図、拡大図)

図3.1: 温度コンター図 (拡大図)

図3.2: 無次元等温線図 (拡大図)

図4.1: 水平平板下部の水平方向速度プロファイル

図4.2: 水平平板下部の無次元温度プロファイル

## 4. 考察

### 4.1 速度場及び温度場

図2.2の等流れ線図を見るとオリジナルの場合

(a)に比べ断熱境界(b)にすると流線が加熱部に向かって斜め上方から流れ込んでおり、加熱面上部での流れがかなり異なっていることが分る。加熱面下部ではオリジナル(a)と同様にほぼ水平方向から入りこんでいるが、オリジナル(a)とは反転領域の境界線の位置が異なり上方に上がっていることが分る。解析領域幅を1/2(c)にすると全体の傾向は似ているが、加熱領域に入り込むまでに波打つ現象は距離が短いために加熱面近傍までその影響がでており、水平方向から入り込んでいとは言えないことが分る。

速度プロファイルは、オリジナル(a)、断熱境界(b)、および1/2領域(c)の場合は速度正領域では同じ傾向を示すが、反転領域ではオリジナル(a)では実験結果と同じ傾向を示すのに対し両者は負側に大きくずれ込んでいることが分る。

温度場に関しては、図3・4の無次元等温線図を見ると、温度境界層( $\Theta=0.02$ )の位置がかなり異なっていることが分る。温度プロファイルは全体的には一致しているが $y=30\text{ mm}$ の位置でオリジナル(a)では、ほぼ0となっているが他の二つのケース(b)と(c)は0よりやや高めである。

#### 4. 2 熱伝達係数

図5は平均 $Nu$ 数と $Ra$ 数との関係を示したものである。Edwards-Haiad, Hatfield-Edwards, Nakano et al., Aihara et al.の結果および第1報の結果と比較した。本報での結果はケース1(c)ではオリジナル(a)に近い結果が得られたが、ケース2(b)では若干低い値となった。

#### 5. 結論

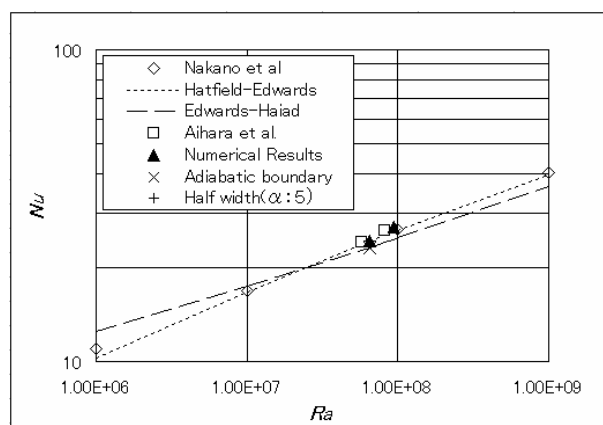
有限幅の下向き水平等温面からの自然対流をCFDソフトウェアにより数値解析し、計算領域の範囲と外壁の側面境界条件の影響を検討した。次の結論が得られた。

(1)等流れ線図をみると各条件の影響が現れており、オリジナル(第1報)の結果とは異なることが分る。加熱面領域に水平方向から流入させるにはAiharaらの実験に対応する解析領域の大きさが必要であることがわかり、壁面境界条件も断熱条件では流線を見るとかなり結果が異なることが分った。

(2)温度境界層はオリジナル以外では加熱面まわりではないところと繋がっており各条件の影響を受けていることが分った。

(3)平均 $Nu$ 数は領域が同じで断熱条件の場合の結果が若干低い値を示しているが、境界条件による影響は弱いことが分った。

(4)速度プロファイルは等流れ線図で反転層がオリジナルに比べ両者とも上方に位置していることから分かるように、負の領域でかなりのずれが生じていることが分かる。



#### 参考文献

- 1)津田・茂地・桃木, 長崎大工研報, **36**, 66(2006)
- 2)中野・茂地・桃木, 機論, **70**, 695(2004), 147-153.
- 3)T.Aihara, Y.Yamada, S.Endo, Int. J. Heat Mass Transf., **15**(1972),2353-2549.; 相原・ほか2名、第8回日本伝熱シンポジウム講演論文集,(1971),325-328
- 4)(株)シーディー・アダプコ・ジャパン:STAR-CD V.3.2 理論マニュアル, (2005).

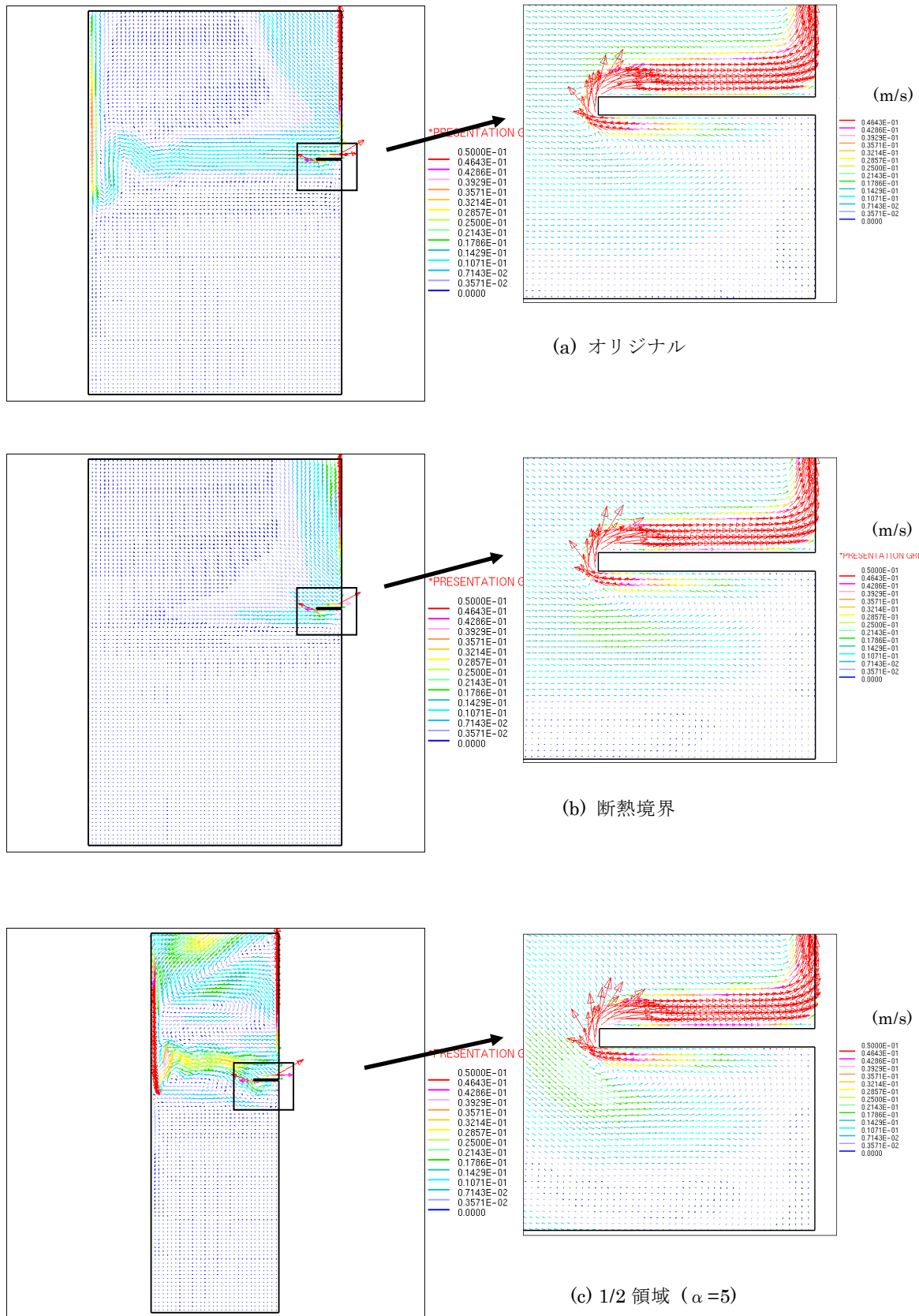


図 2. 1 速度ベクトル図

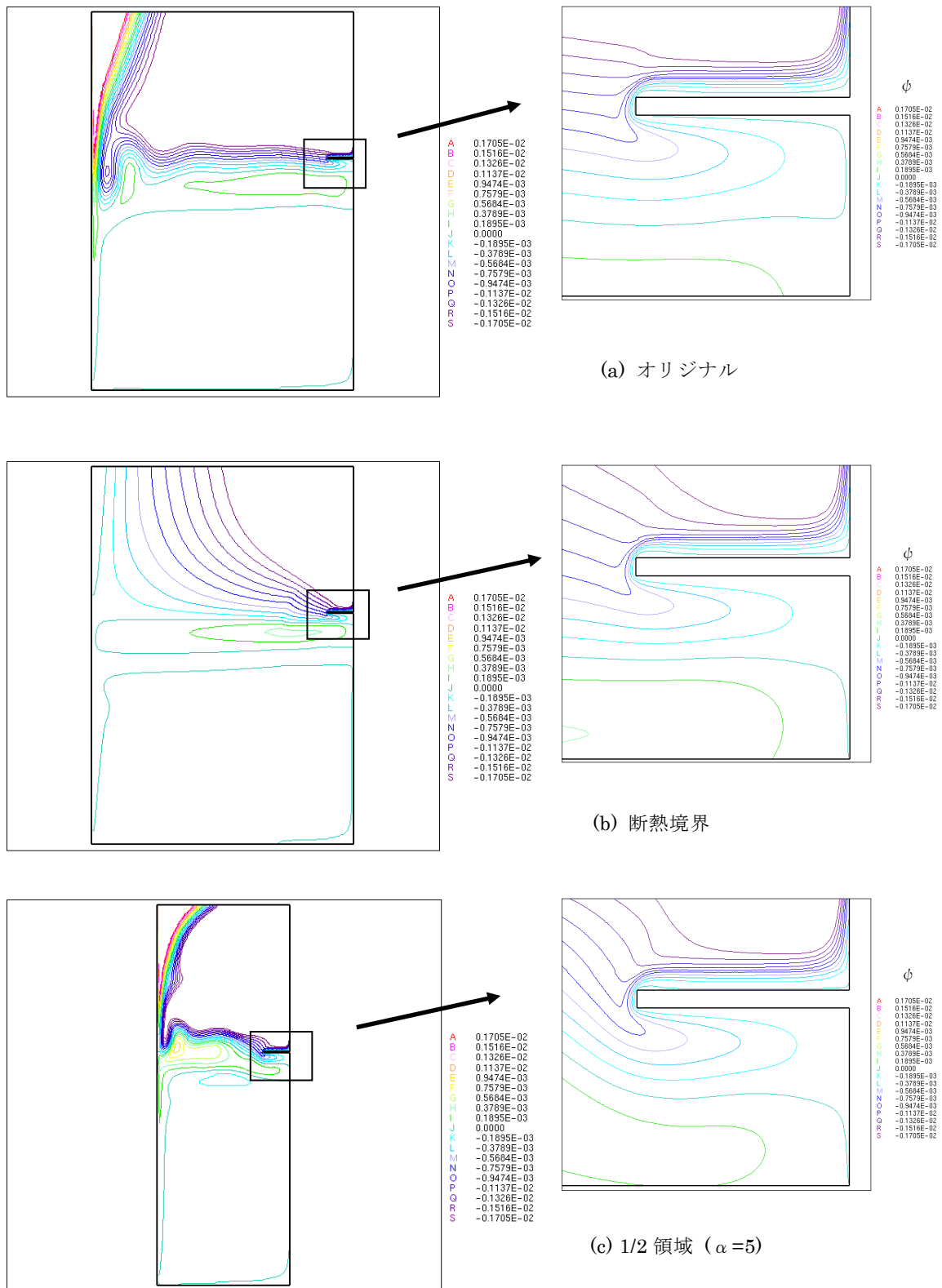
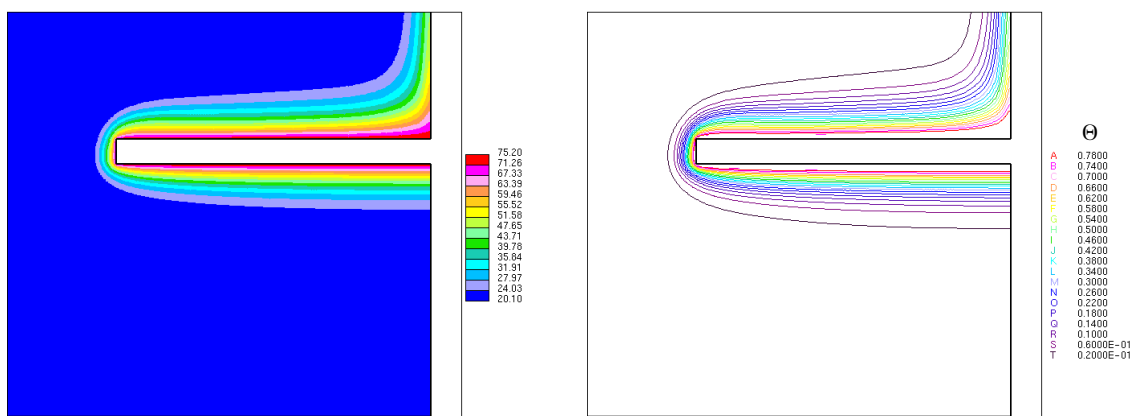
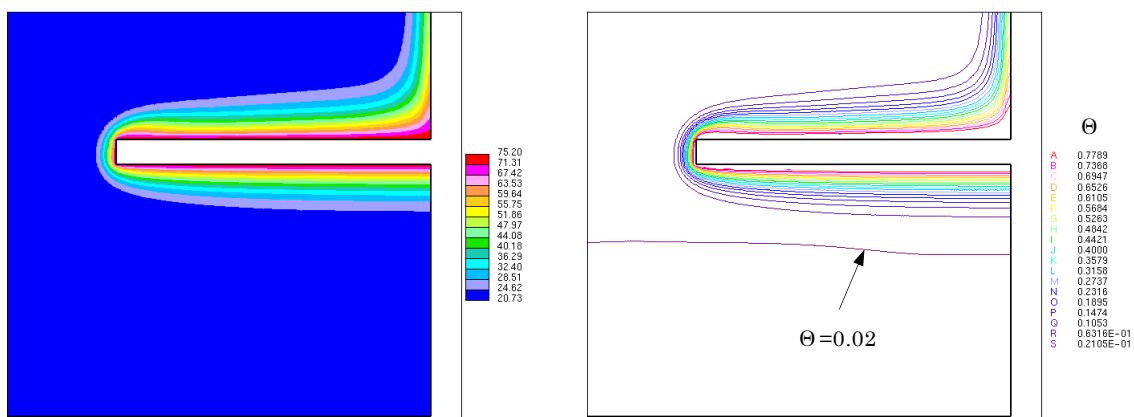


図 2. 2 等流れ線図



(a) オリジナル



(b) 断熱境界

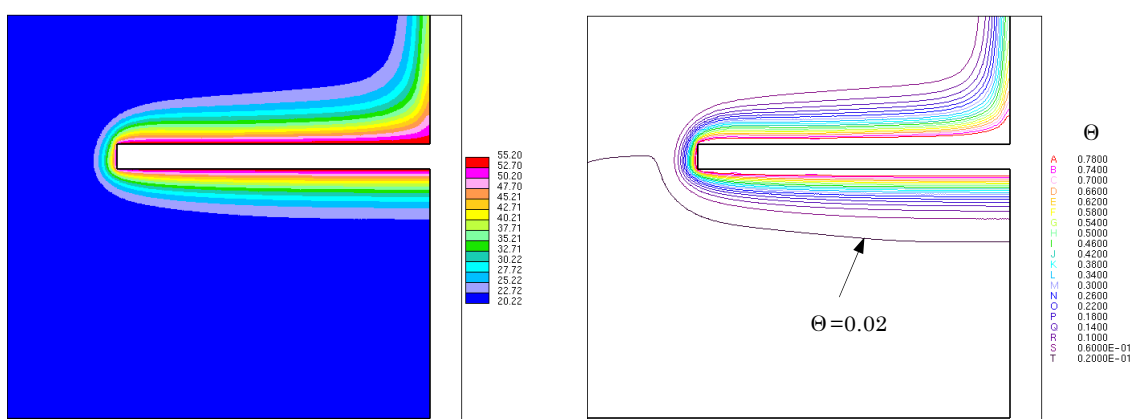
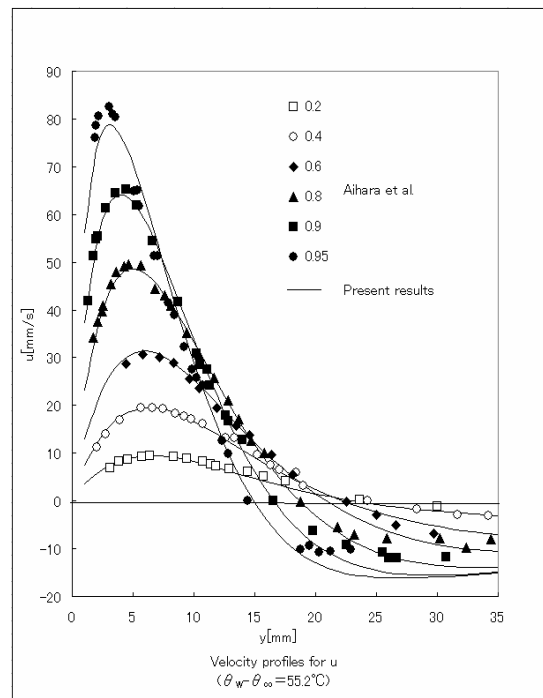
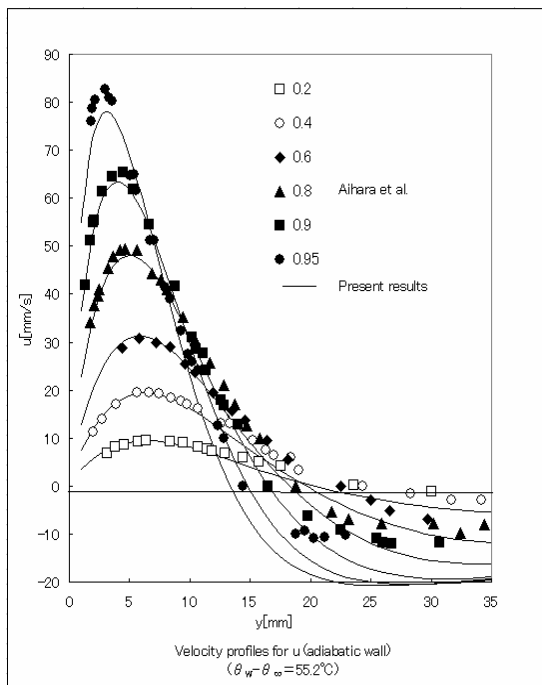
(c) 1/2 領域 ( $\alpha=5$ )

図 3. 1 温度コンター図

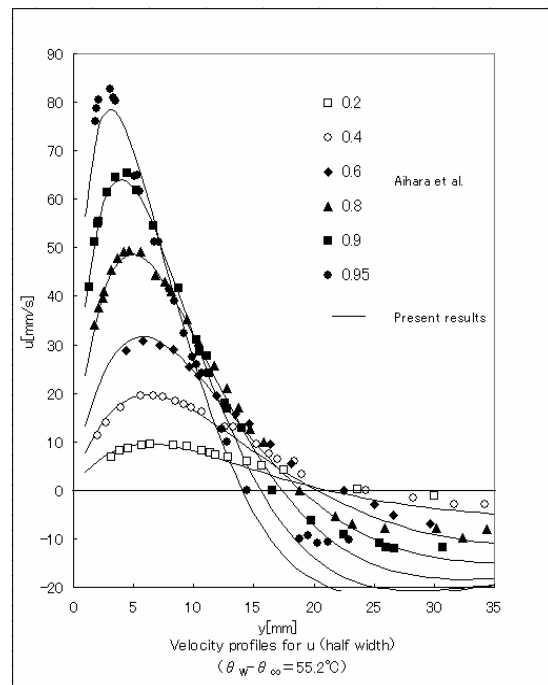
図 3. 2 無次元等温線図



(a) オリジナル

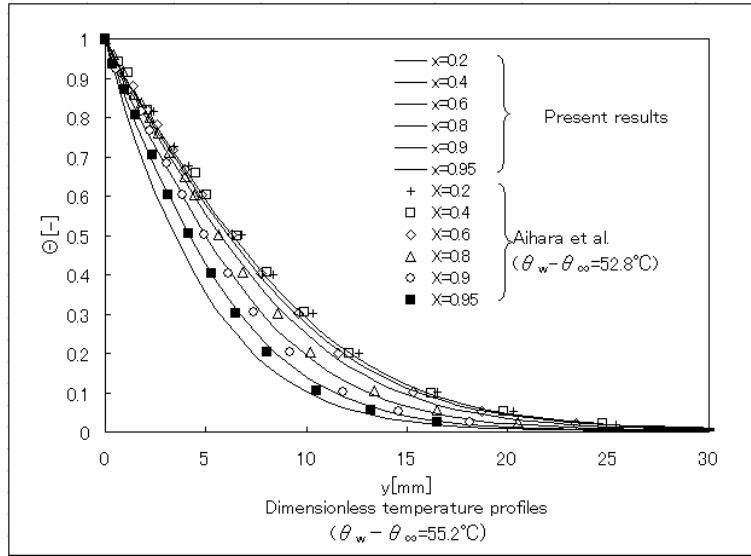


(b) 断熱境界

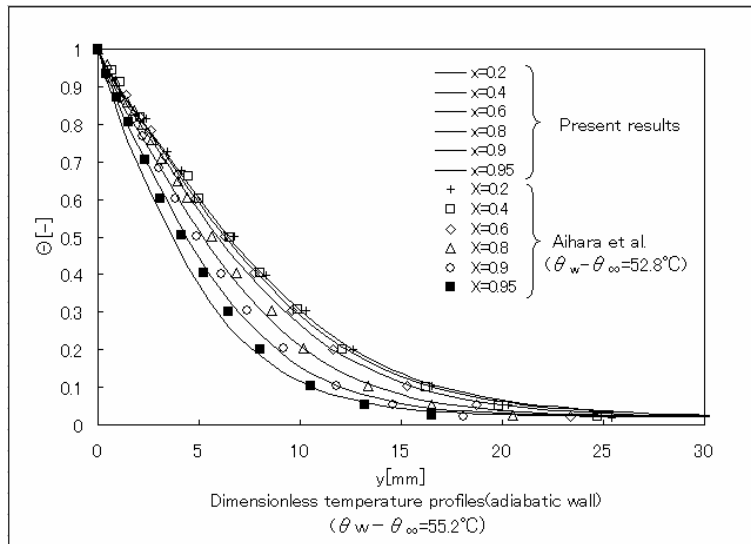


(c) 1/2 領域 ( $\alpha = 5$ )

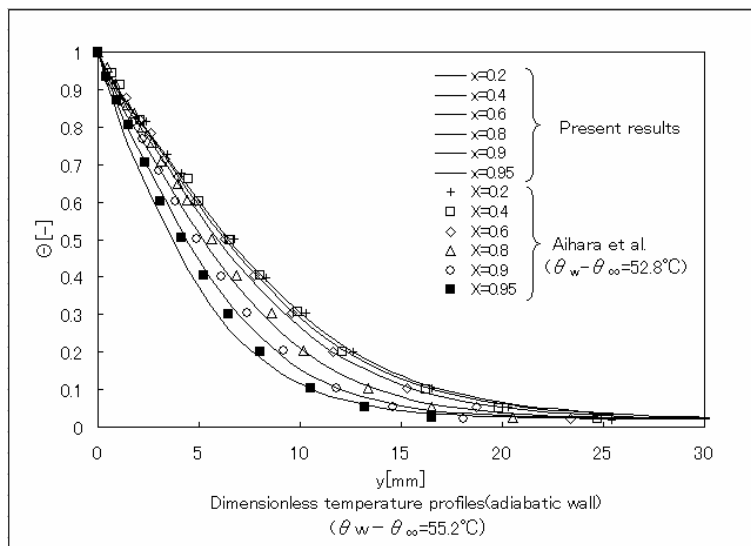
図4.1 速度プロファイル (X方向)



(a) オリジナル



(b) 断熱境界



(c) 1/2 領域 ( $\alpha=5$ )

図 4. 2 無次元温度プロファイル