

# 下向き水平等温面からの自然対流CFD解析 (第1報：Aihara らの実験結果との比較)

津田 和則\*・茂地 徹\*\*・桃木 悟\*

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

(Part I: Comparison with the experimental results by Aihara et al.)

by

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

A lot of studies on natural convection from a horizontal plate have been carried out, so far, experimentally and/or analytically. However, experimental results, particularly, flow behaviors below the downward-facing heated surface, have not been well demonstrated analytically or numerically. In this and the following reports are presented the numerical simulations by CFD analysis on natural convection below an isothermal horizontal plate facing downwards. The numerical results obtained in this report are compared with the experiments by Aihara et al. and the numerical analysis by Nakano et al. The present analysis by CFD shows good agreement with the experimental data.

**Key words** : natural convection, CFD analysis, downward-facing horizontal plate

## 1. まえがき

有限幅の水平加熱平板まわりの自然対流は半導体や電子機器等の冷却に応用されている。しかし、伝熱設計において、伝熱体が下向き水平加熱面、垂直側面および上向き水平加熱面の複数の面で構成されるため、水平加熱平板まわりの自然対流による流動と伝熱の理論的予測は容易ではない。その主な理由は、これまで数多くの実験および理論（数値解析を含む）研究が行われているにもかかわらず、有限幅の下向き水平加熱面からの自然対流の伝熱機構解明が不十分であるためである。つまり、Aihara らの下向き水平平板まわりの自然対流実験<sup>(1)</sup>で得られている伝熱面近くの特異な流動様相（境界層の外側に形成される流れの反転）を十分に説明する理論あるいは数値解析は公表されていない。最近、中野ら<sup>(2)</sup>は数値解析により初めてAihara らの実験結果を説明する数値解を求めている。しかし、中野らの研究では数値計算上の制約から解析領域の大きさに制限を設け、さらに境界条件をAihara

らの実験結果を参考にして設定しているため、この種の問題を数値解析する一般化された手法にはなっていない。

本報ではAihara らの実験を数値的に再現するため実験領域全体を計算領域とするCFD数値解析を試みた。ただし、実験では擬似的に2次元現象を実現していることから、本研究では2次元数値解析を実施した。中野らの解析は水平下部のみの加熱及び流れであり、Aihara らの実験で生じる平板全体の加熱による上部流れの影響が考慮されていない。そこで、本報ではAihara らの実験と同等の条件をCFDで再現し、水平下向き等温面の実験データとの比較及び中野らの解析結果との比較検討を行う。なお、本報では定常解を定めることを考慮し、物性値の温度依存性は中野らの研究と同様に考慮していない。また、安定化のため注目する計算領域以外は比較的粗いメッシュを採用した。

平成17年12月14日受理

<http://www.lb.nagasaki-u.ac.jp/reports/kougaku/default.html>

\*生産科学研究科 (Graduate school of Science and Technology)

\*\*機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

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
- $q$  : 局所熱流束 [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. CFD 解析

2.1 Aihara らの実験装置

実験設備の主要寸法を 3 次元的に示すと図 1 のようになる。ただし、対称性から 1/4 モデルを示す。

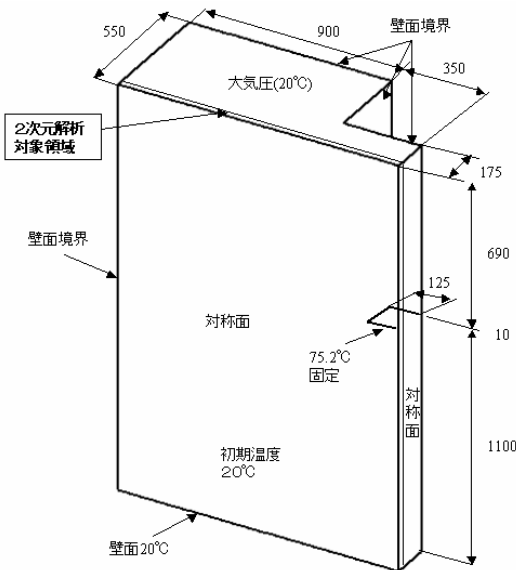


図 1 Aihara らの実験設備の主要寸法(1/4 モデル)

2.2 解析モデル

Aihara らの実験結果から装置の中央部は擬似的 2 次元現象を実現しているため、CFD による数値解析も中央部の 2 次元的モデルで実施した。

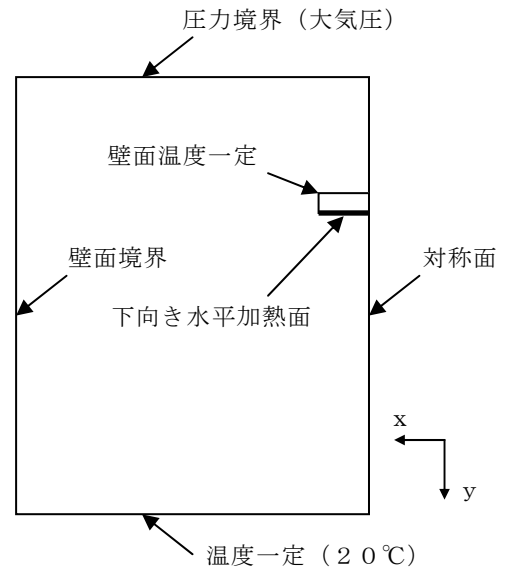


図 2 2 次元解析モデル

2.3 空気の物性

空気の圧縮性を考慮し、比熱、粘性および熱伝導率は膜温度  $(T_w + T_\infty)/2$  で評価する。

2.4 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

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

$\rho B_i$  : 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. 5 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  $Nu_x$  は次のように定義される。

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

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. 6 数値計算の手法

CFD 解析には STAR-CD (Ver.3.24) <sup>(3)</sup> 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. 7 解析条件と境界条件

図2に示すように水平平板は温度一定とする。中心部は左右対称性から対称条件、下部境界面は一定温度 ( $20^\circ\text{C}$ ) と仮定する。側面の外壁境界は実験では材質が木材であるが、種類・厚さが不明であることから外部の自然対流熱伝達係数と合わせた熱通過係数を  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  と仮定して解析する。ただし、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、空気の初期温度  $20^\circ\text{C}$ 、水平平板温度は  $75.2^\circ\text{C}$  と  $124.4^\circ\text{C}$  の2ケースとする。

表1 解析条件一覧表

No	物体温度 [ $^\circ\text{C}$ ]	外壁の側面熱伝達係数 [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]
1	75.2	5.0
2	124.0	5.0

## 3. 解析結果

解析結果としてケース1を図3. 1～図3. 6に、ケース2を図4. 1～図4. 6にそれぞれ示す。

- 図3. 1 : 速度ベクトル図 (全体図、拡大図)
- 図3. 2 : 等流れ線図 (全体図、拡大図)
- 図3. 3 : 温度コンター図 (拡大図)

図3. 4 : 無次元等温線図 (拡大図)

図3. 5 : 水平平板下部の水平方向速度  
プロファイル

図3. 6 : 水平平板下部の無次元温度プロファイル

図4. 1～図4. 6についても同様である。

## 4. 考察

### 4. 1 速度場及び温度場

(1) ケース1の場合の速度ベクトル (図3. 1)、等流れ線図 (図3. 2) では、数値解析結果は Aihara らの実験結果と加熱面付近ではよく一致している。側面付近の熱伝達のため壁に沿って上部境界からの流れが加熱板の高さ付近まで下降し、その後上下にわずかに波打ちながら加熱板付近の上昇流に引き込まれるように加熱板に向かって水平に移動する。Aihara らが示した反転層 (inversion layer) も現れ、上部方向と下部方向に流れが分かれて下部方向流れは旋回流を形成している。また、 $\Theta=0.02$  の位置を Aihara らは温度境界層と定義しており本研究でもこの定義を採用し、無次元等温線図 (図3. 4) に示している。

(2) ケース2の場合でも同様な結果を示している。この二つのケースの結果を比較すると、ケース2での結果 ( $Ra$  数が大きい) の方が、反転層と温度境界層の位置はケース1の結果に比べて若干上方へ移動している。この結果は中野らの結果の傾向と一致している。これは、高温になるほど端部の浮力による上昇流が大きくなり圧力勾配が大きくなって水平方向の速度上昇が起こる。そのため、質量保存から反転層の厚さが必然と薄くなり、エネルギー保存から温度勾配が大きくなるため温度境界層が薄くなるためである。

(3) 速度プロファイルを見ると両方の場合とも Aihara らの実験結果とよく一致し、速度が  $y$  方向の  $15 \text{ mm}$  から  $25 \text{ mm}$  付近で反転し、負の方向の速度が現れている。中野らの解析結果 (図6) はこの部分は一致しているが端部付近 ( $x=0.8\sim 0.95$ ) では本報の結果の方がよく一致している。

(4) 温度プロファイルについては解析と実験は定性的には一致しているが、速度プロファイルの場合と比較すると解析結果は実験結果よりやや低めである。

#### 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, および Aihara et al.の結果と比較しているが、本報の平均  $Nu$  数の解析結果はこれらの結果とよく一致している。

#### 5. 結論

有限幅の下向き水平等温面からの自然対流をCFDソフトウェアで数値解析し、次の結論を得た。

(1) Aihara らの実験と同様な計算領域と壁面境界条件 ( $\alpha = 5.0$ ) を仮定することで、下向き水平等温面まわりの流れを数値的に再現することが可能となった。

(2) 解析安定化のため比較的粗いメッシュと対流項差分スキームにUD(一次風上差分)法を採用したため、精度的には温度分布がやや低く予測されたが、概ね良好な結果が得られ、流れの反転領域の形成が確認できた。速度分布のプロファイルはAihara らの実験結果とほぼ一致しており、中野らの場合よりも実験結果とよりよく一致した結果が得られた。高次の対流差分スキームの使用、メッシュサイズの細分化をおこなって精度を向上させることで、温度分布の予測精度の向上を図る必要がある。

(3) 壁面温度の上昇 ( $Ra$  数の増大) により反転層と温度境界層は薄くなることがわかり、中野らの解析結果と傾向が一致した。

(4) 平均  $Nu$  数はAihara らの実験結果と中野らの解析とよく一致し、 $Ra^{1/5}$  に比例する一本の曲線上にある。

(5) 本報では流れはすべて層流と仮定して解析しているが、加熱平板の側面と上面の流れは乱れており乱流モデルを使用する解析でその影響を調べる必要がある。さらに、中野らの研究では加熱下面の影響だけの解析であるがAihara らの実験では平板は厚みを有し、上面も加熱されている。これらの因子が上昇流にどの程度影響するのかを確認する必要がある。

第2報では、計算領域と境界条件の設定の影響について報告する。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 中野・茂地・桃木, 機論(B編), **70**, 695(2004), 147-153.
- 3) (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).

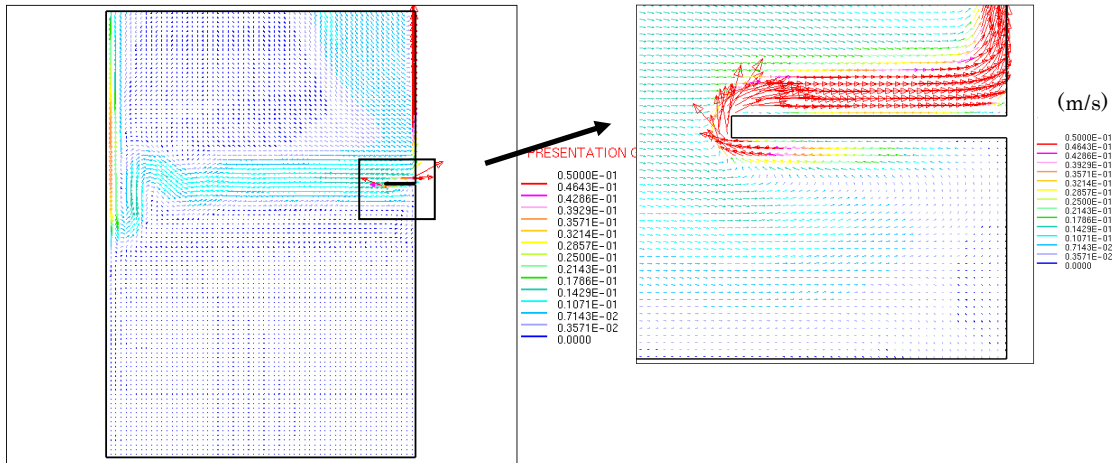


図 3. 1 速度ベクトル図

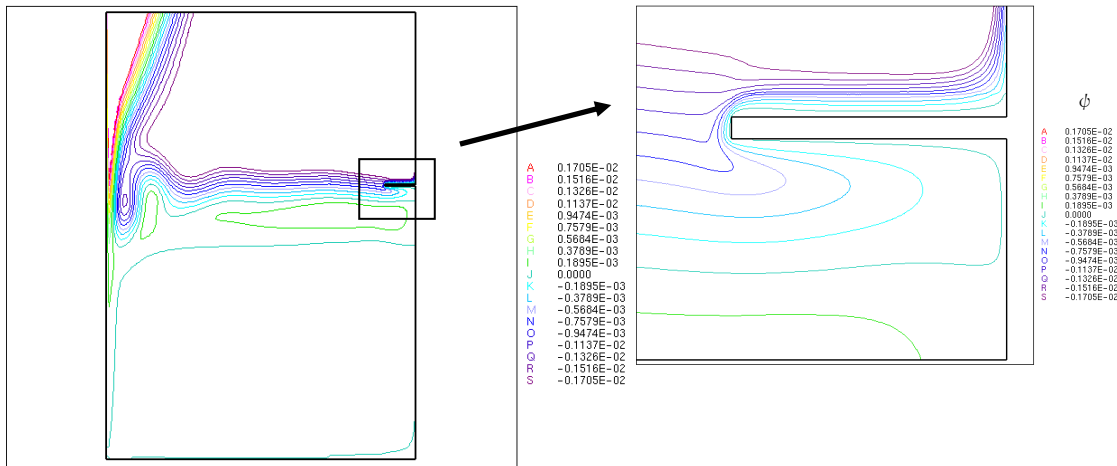


図 3. 2 等流れ線図

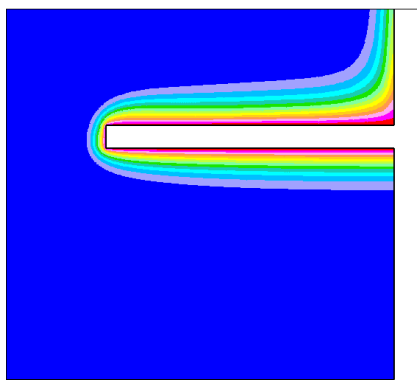


図 3. 3 温度コンター図

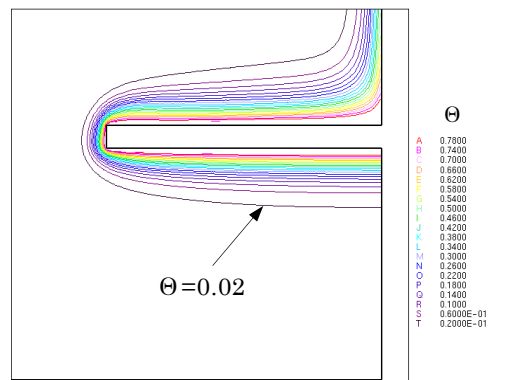


図 3. 4 無次元等温図

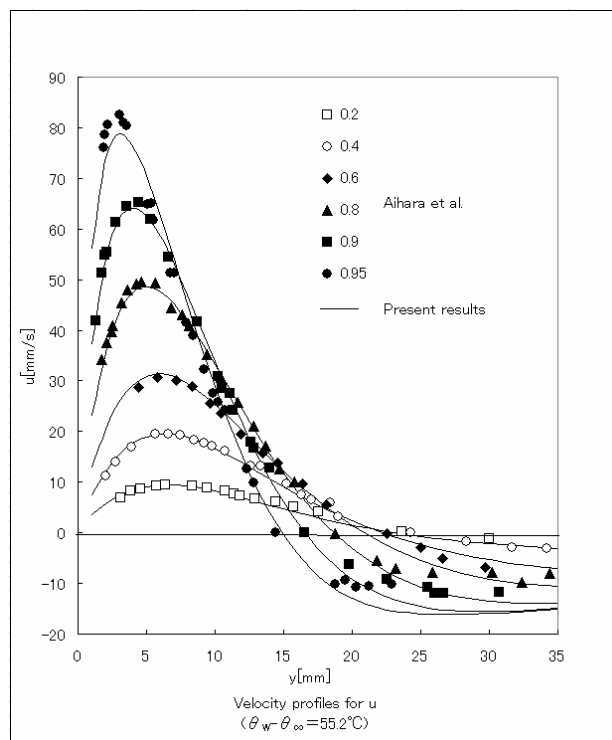


図 3. 5 速度プロファイル (X方向)

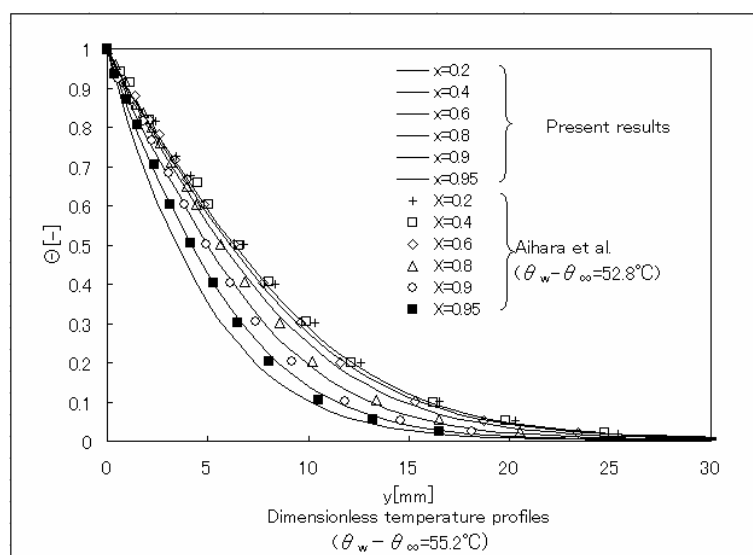


図 3. 6 無次元温度プロファイル

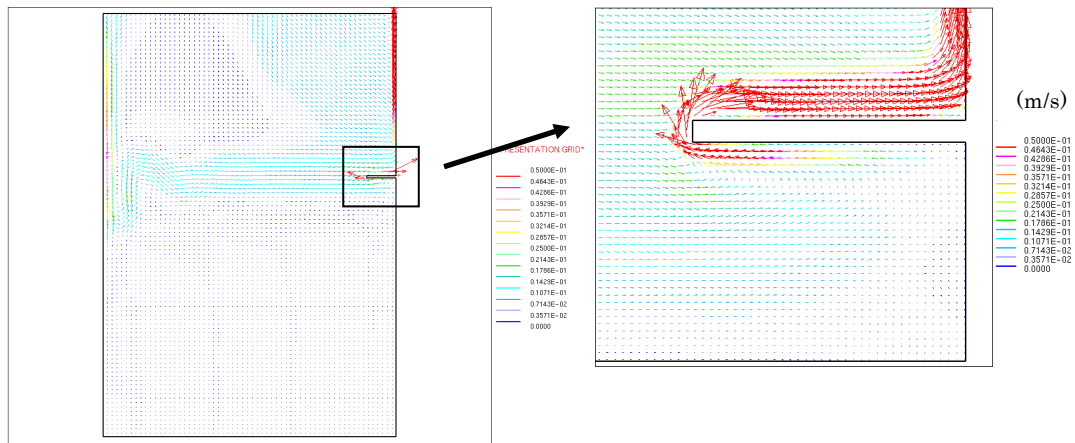


図4. 1 速度ベクトル図

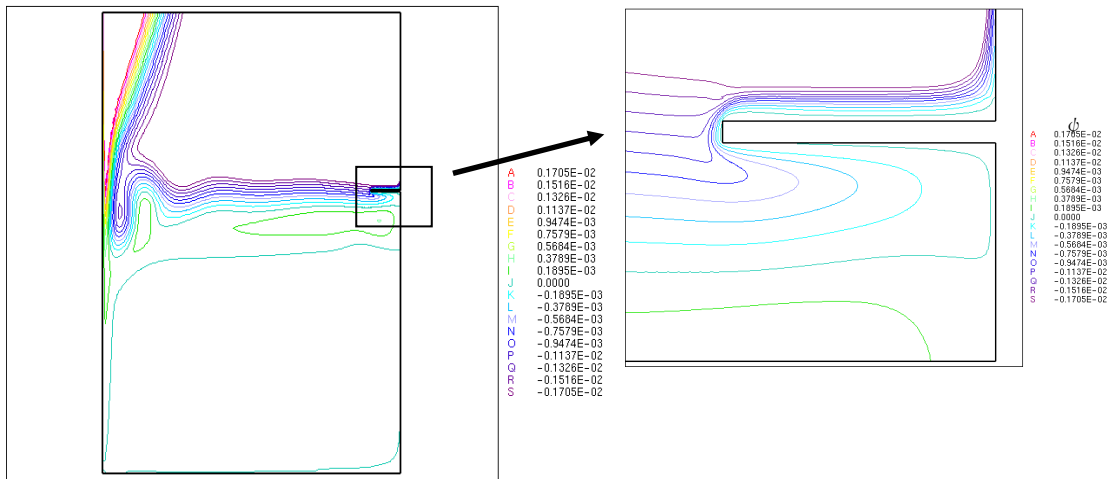


図4. 2 等流れ線図

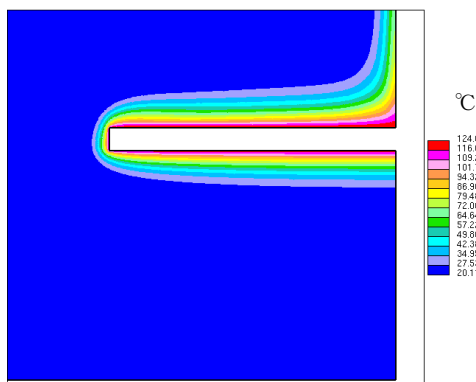


図4. 3 温度コンター図

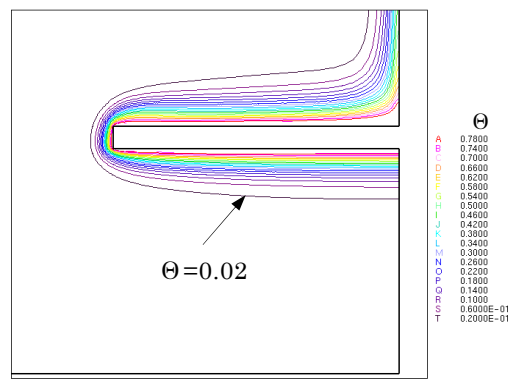


図4. 4 無次元等温図

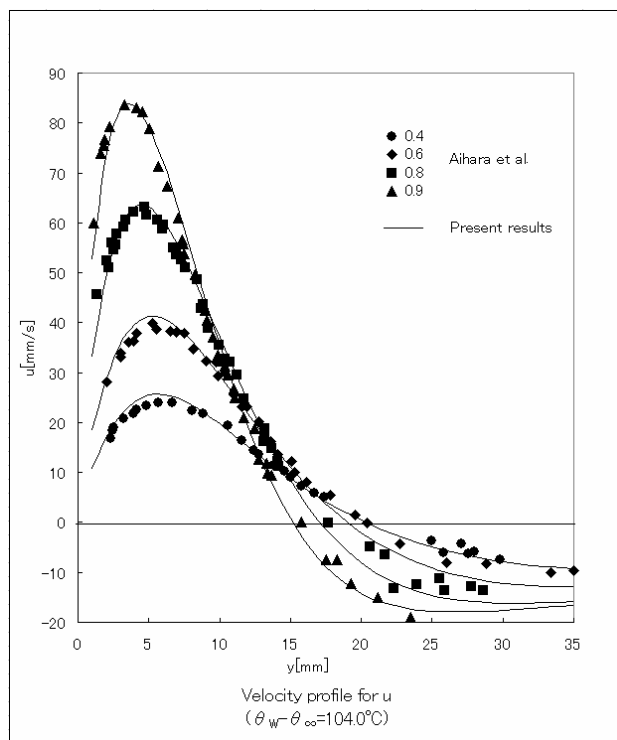


図 4. 5 速度プロファイル (X方向)

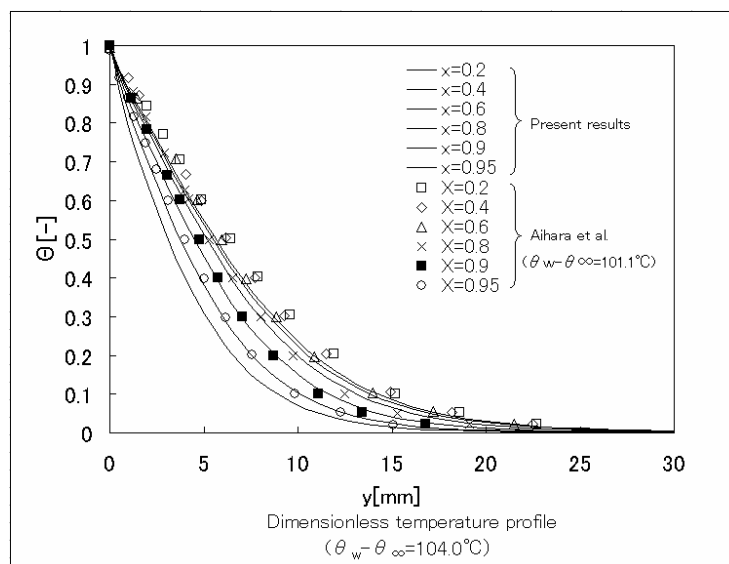


図 4. 6 無次元温度プロファイル



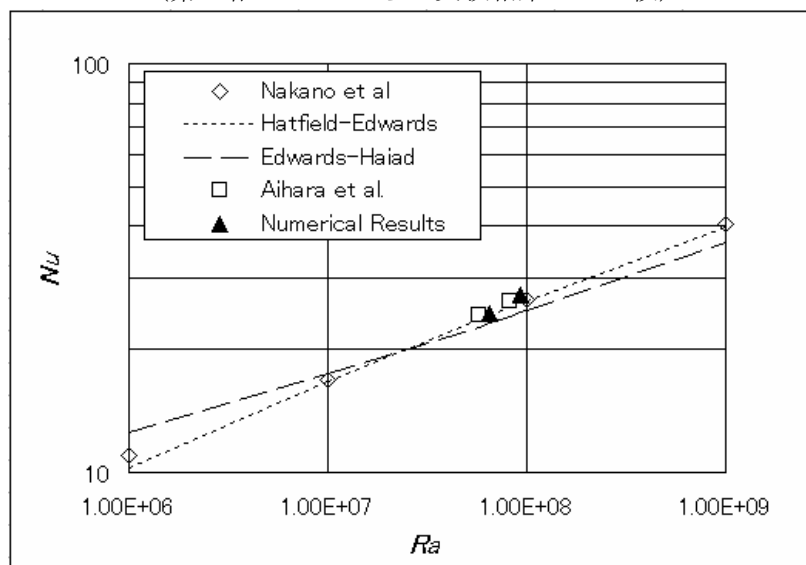


図5 平均ヌセルト数( $Pr=0.7$ )

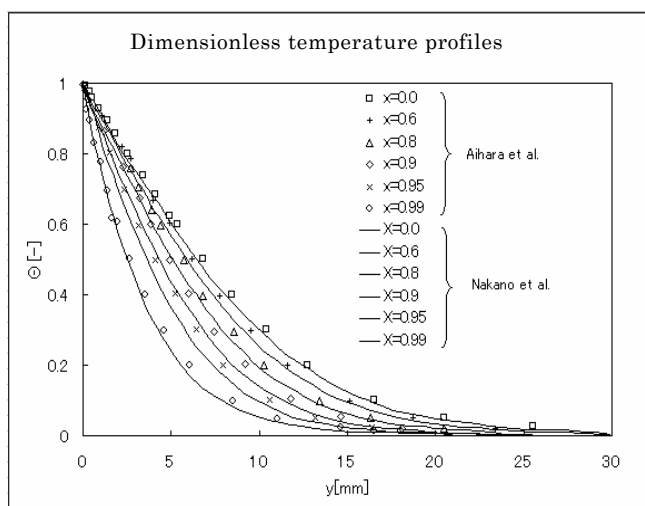
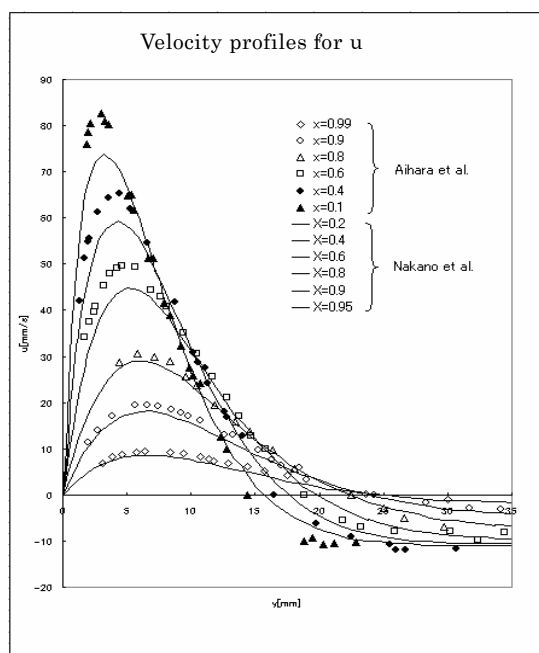


図6 中野らの解析結果