

# 水平等温面まわりの自然対流CFD解析 (第1報：薄板の場合)

津田 和則\*・茂地 徹\*\*・桃木 悟\*

## CFD analysis on natural convection around an isothermal horizontal plate (Part I : The case of a thin plate)

by

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

In the authors' previous reports, the numerical results on natural convection from a downward-facing isothermal plate were compared with the experiments by Aihara et al. The numerical analysis using a CFD code showed a good agreement with the actual flow and thermal fields obtained in the experiments. However, the analysis was limited to the fluid flow and heat transfer from a downward-facing surface of the isothermal plate as no information has given on the flow and thermal fields from the upward-facing and sideward-facing surfaces in the Aihara et al.'s experiment. In this report, the flow and thermal fields on the entire surfaces of the horizontal isothermal plate are numerically simulated using a CFD code and the numerical results are presented.

**Key words** : natural convection, isothermal horizontal plate, flow and thermal fields, entire surfaces

### 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。前報<sup>(2)</sup>で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し、かつ同等の条件でCFD数値解析を試みた。実験では擬似的に2次元現象を実現していることから、数値解析も2次元で

実施し、前報<sup>(2)</sup>では水平平下向き等温面の実験データとの比較を行ってよい結果を得ている。しかしながら、Aiharaらの実験では薄い水平平板の全面を等温加熱しているにもかかわらず、下向き面下の測定結果の整理だけにとどまっている。本報では、Aiharaらの論文では示されなかった上面と側面まわりの速度場・温度場および局所ヌッセルト数について数値解析結果を提示し、水平等温平板まわりの流動と伝熱について検討した結果を報告する。

### 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]

平成18年 6月 23日受理

\*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)

- $Pr$  : プラントル数
  - $q$  : 局所熱流束 [W/m<sup>2</sup>]
  - $Ra$  : レイレイ数
  - $\theta$  : 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
  - $a$  : 温度拡散率 [m<sup>2</sup>/s]
  - $u$  : x 方向速度 [m/s]
  - $v$  : y 方向速度 [m/s]
- 添字
- 0 : 基準
  - w : 壁面
  - ∞ : 周囲

2. CFD 解析

2.1 Aihara らの実験装置

テストセクションの主要寸法を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。

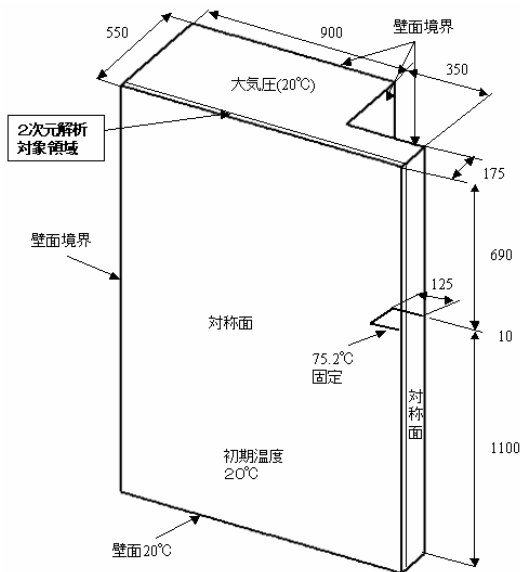


図1 テストセクションの主要寸法(1/4 モデル)

2.2 解析モデル

Aihara らの実験ではテストセクションの中央部は擬似的2次元現象を実現しているのので、CFD による数値解析も図2のような2次元モデルで実施した。

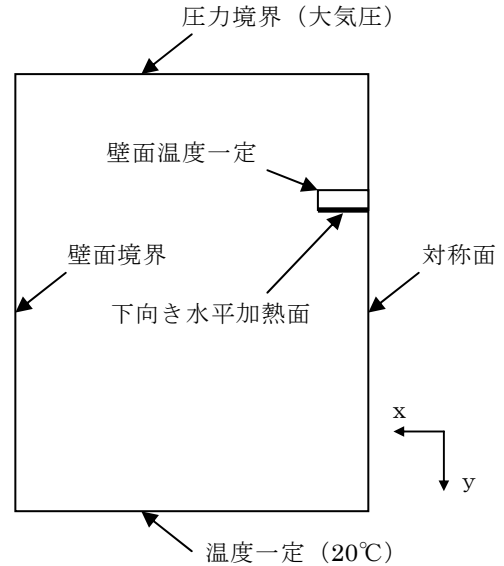


図2 2次元解析モデル

2.3 空気の物性

空気の密度、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

質量保存式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

運動量保存式

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \tag{2}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g(\rho - \rho_0)$$

エネルギー保存式

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = a \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \tag{3}$$

## 2. 5 熱伝達係数

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。

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

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

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. 6 ある数値計算の手法

CFD数値解析にはSTAR-CD (Ver.3.24)<sup>(3)</sup>を使用し、定常解を定めた。離散化には有限体積法を採用し、計算格子は、次のとおりである。

- ・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  
さらに次のような解法を用いた。
  - 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°C)と仮定する。側面の外壁境界は実験での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°C、上部は大気開放の圧力境界とする。

解析条件は、空気の初期温度20°C、水平平板温度は75.2°Cとする。

## 3. 解析結果

速度場と温度場に関する解析結果を図3.1～図3.6に示す。

- 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

## 4. 考察

### 4. 1 速度場及び温度場

(1)前報<sup>(1)</sup>において、下向き加熱面付近の速度ベクトル(図3.1)と等流れ線図(図3.2)は、Aiharaらの実験結果とよく一致していることを示した。図3.2からわかるように、上部境界からの流れは側面での熱伝達のために冷却され壁に沿って下向きに流れるが、加熱板の高さより若干低い外気温度と同程度の温度の位置付近まで下降し、その後、密度差の影響により上下にわずかに波打ちながら減衰して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らが示した流れの反転(inversion layer)も現れ、さらに、よどみ点も再現されているが、そこを境に流れは上部方向と下部方向に分かれる。上部方向流れは下向き加熱面に沿った流れとなっているが、下部方向流れは旋回流を形成している。温度場に関しては、Aiharaらが温度境界層として定義した $\Theta = 0.02$ の位置を無次元等温線図(図3.4)に示している。

(2)下向き加熱面の速度プロファイル(図4.1)はAiharaらの実験結果とよく一致している。また、側面と上面の速度プロファイルは図5に示している。側面は上下方向の速度は上端部付近を除けば、ほぼ同じ速度を示すが、上面に近いほど浮力の影響を受け速くなっている。上面では、端部近くで側面からの上向き流れの影響により壁面近くで負の速度を持つ旋回流が形成されている。

(3)温度プロファイル(図4.2)に関しては、解析結果と実験結果はほぼ一致している。図6に側面、上面の温度プロファイルを示し、図7に局所ヌッセルト数の分布、図8に局所ヌッセルト数分布を示した。側面では、上下両端(角の部分)付近で、温度境界層が薄くなるためにヌッセルト数が大きい値をとる。上面では端部で大きな値を示し、中央部は上昇流が大きく壁面に沿った流れが遅くなり、ヌッセルト数は小さな値を示している。端部に近いところでは速度プロファイルに見られるように旋回流が起きており熱伝導による熱拡散が生じてヌッセルト数が若干低い値を示している。また中心に近いところでは旋回流は起きていないが、表面近くの流速は小さく熱伝導による熱拡散が主となり、ヌッセルト数は低い値を示している。

### 4. 2 熱伝達係数

図7と図8に各面の局所ヌッセルト数と平均ヌッセルト数を示している。前報<sup>(1)</sup>で下面の熱伝達係数はAiharaらの結果とほぼ一致していることを示した。本報では側面と上面の局所ヌッセルト数を示しているが、平均ヌッセルト数は、側面で大きく、下面と上面を比

較すれば、下面の方が 20%程度大きくなっている。

## 5. 結論

有限幅の水平等温面からの自然対流を汎用 CFD ソフトウェアで数値解析し、速度場、温度場およびヌッセルトに関して次の結論を得た。

(1)前報<sup>(1)</sup>で Aihara らの実験系と同様な計算領域と壁面境界条件を仮定することで、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ことを示した。本報では、この実験で提示されていない側面と上面の速度分布と温度分布を数値的に推定し、妥当な結果を得ている。

(2)同様に、本数値解析から得られる下向き面の平均ヌッセルト数は Aihara らの実験から得られる値とよく一致している。側面と上面についても同様の手法で求めることにより推測できる。図 8 に示すように、平均ヌッセルト数は、下向き面で 24.4、側面で 25.6、上面で 20.4 となり、水平平板まわりで平均すると 22.5 となる。

## 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) 津田・茂地・桃木, 長崎大工研報, 66-36(2005)
- 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).

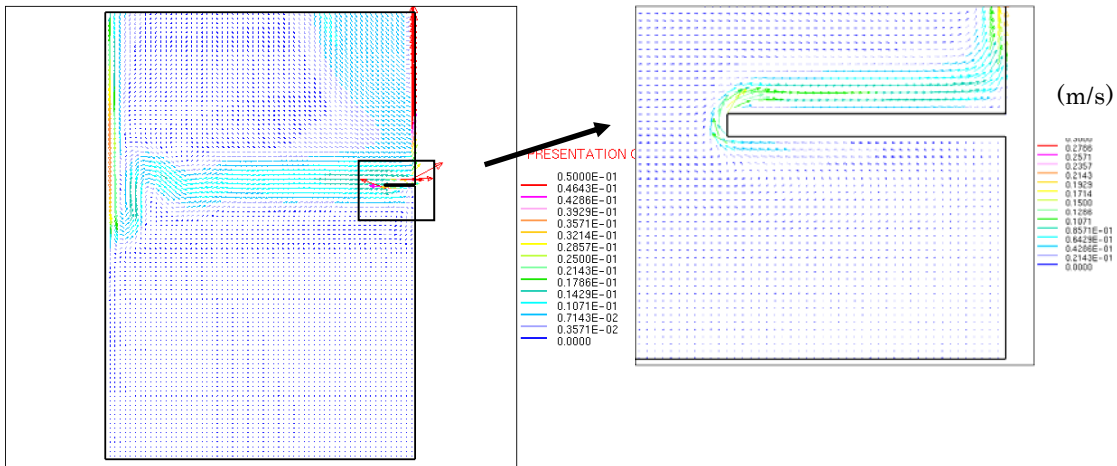


図 3.1 速度ベクトル図

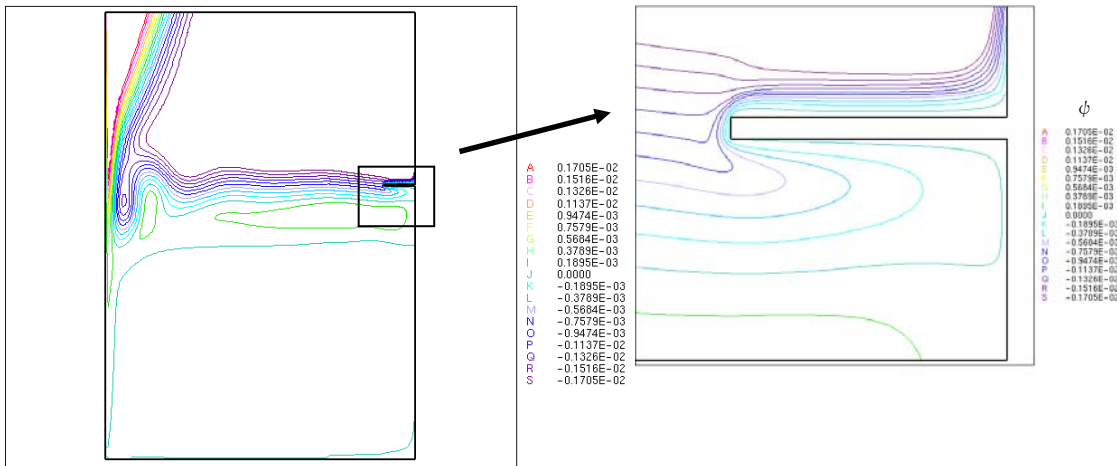


図 3.2 等流れ線図

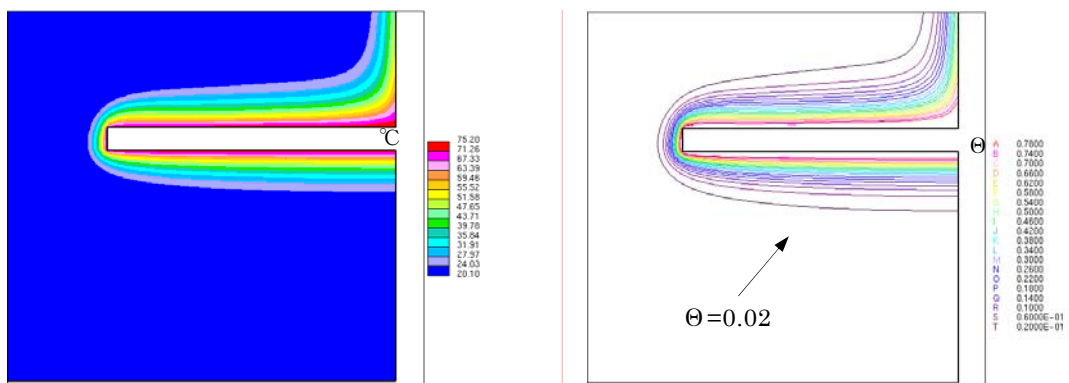


図 3.3 温度コンター図

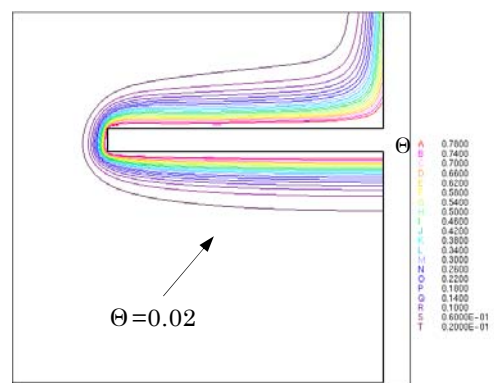


図 3.4 無次元等温図

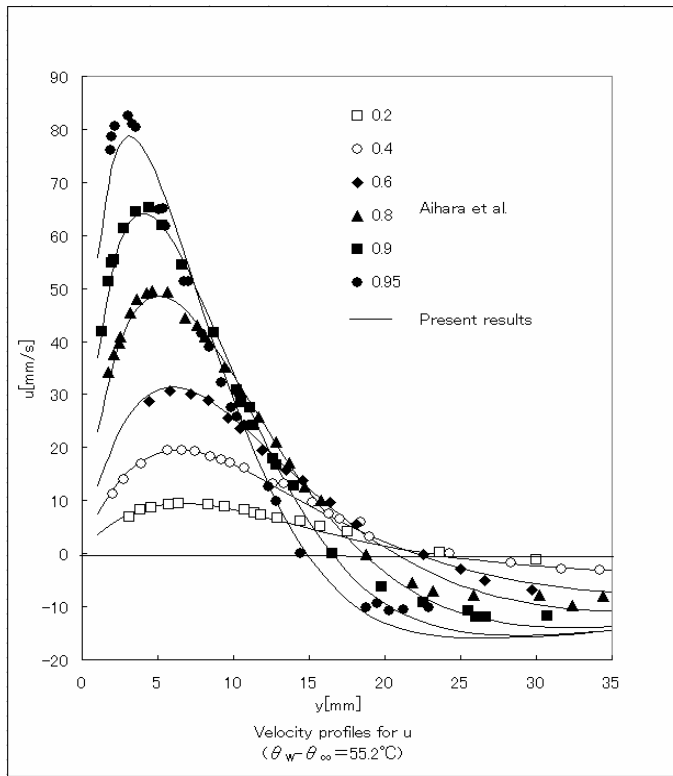


図 4.1 下向き加熱面速度プロファイル

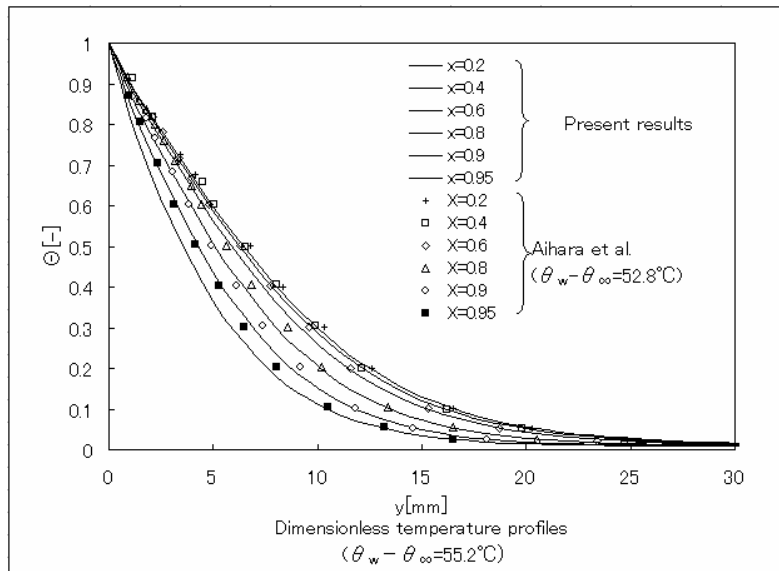
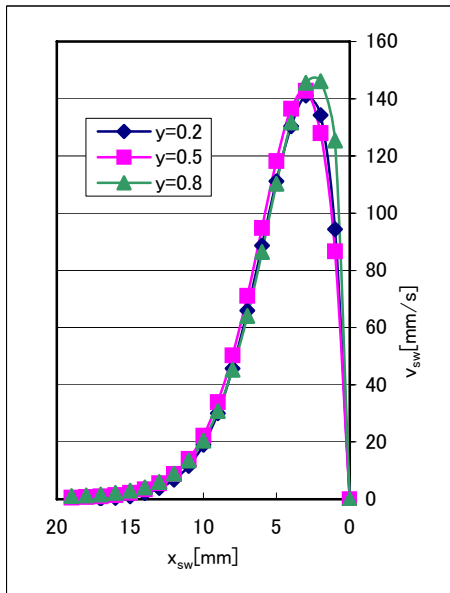
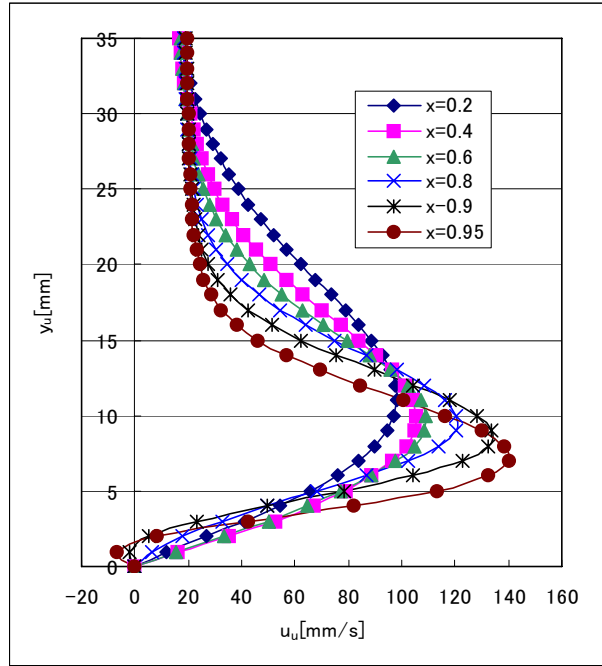


図 4.2 下向き加熱面温度プロファイル

(a)上向き面 x 方向速度プロファイル



(b)側面 y 方向速度プロファイル

(c)下向き面 x 方向速度プロファイル

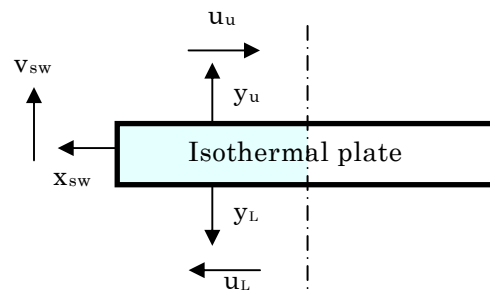
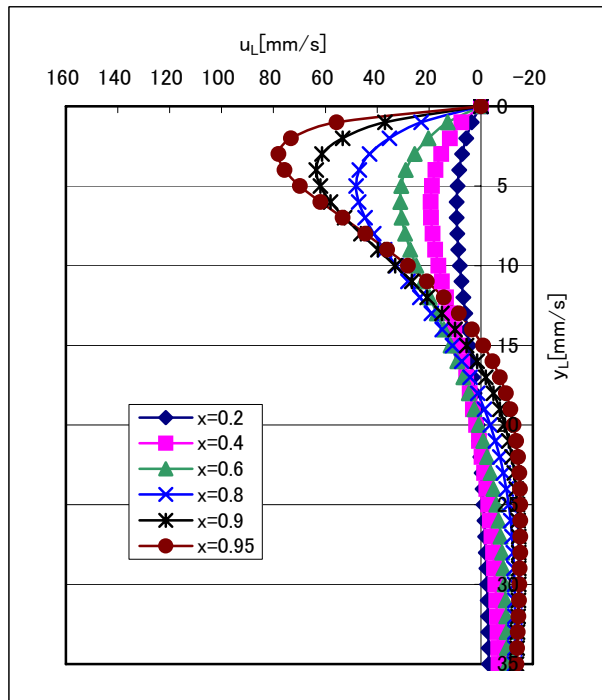
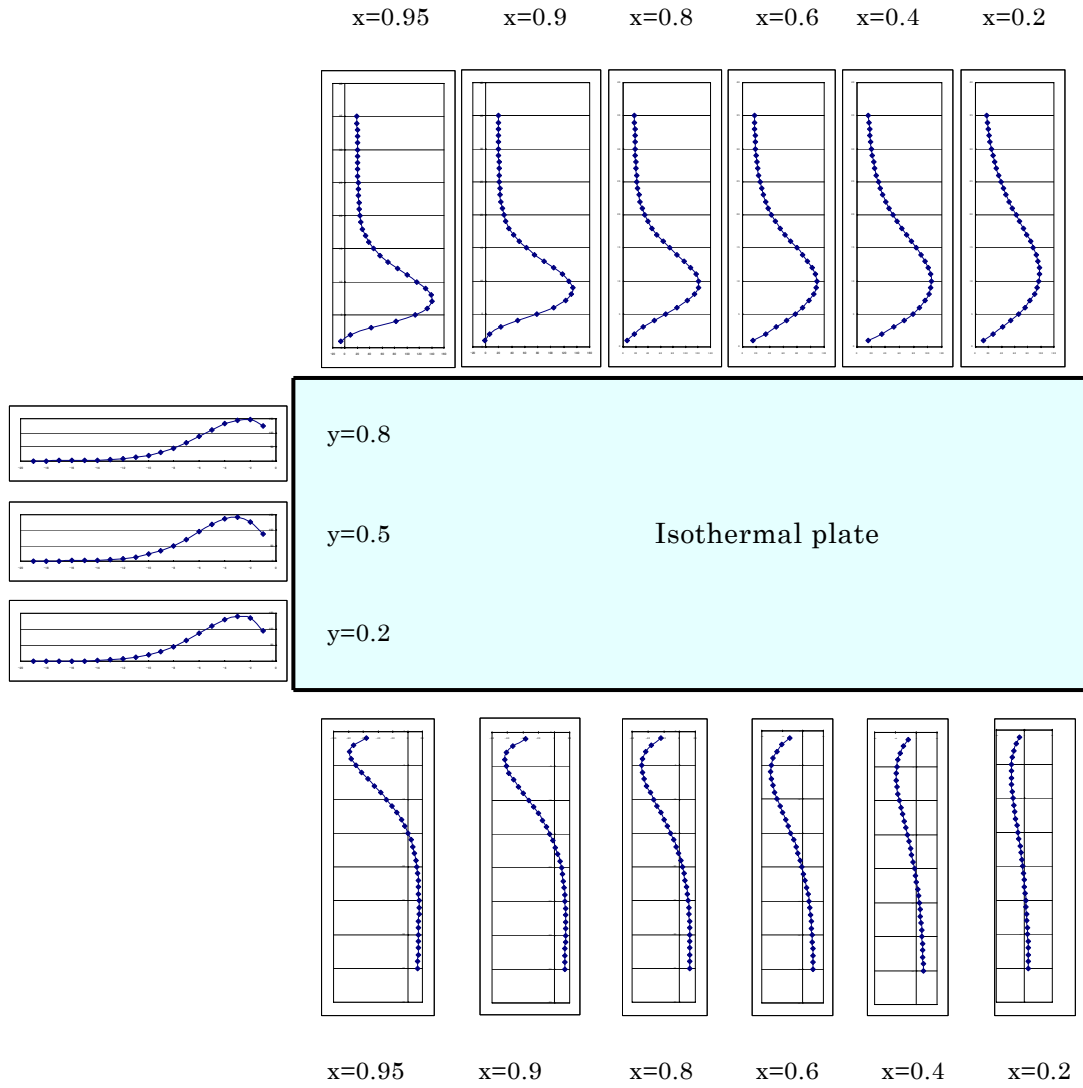


図 5.1 水平平板まわりの速度プロファイル



$x, y$ : 無次元長さ  
 $y = Y/125(\text{mm})$   
 $x = X/10(\text{mm})$

図 5.2 速度プロファイル



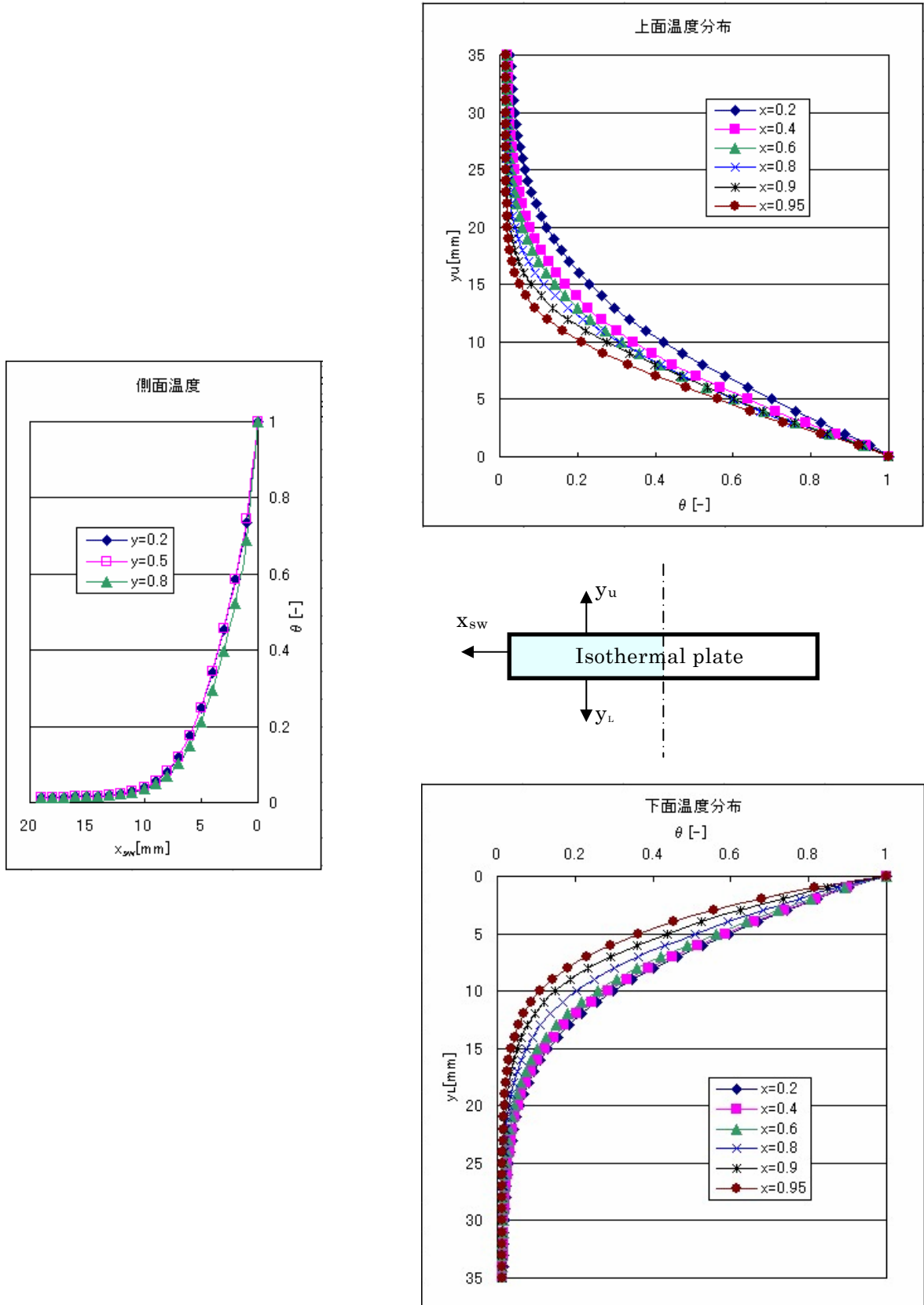


図6 水平平板まわりの温度プロファイル

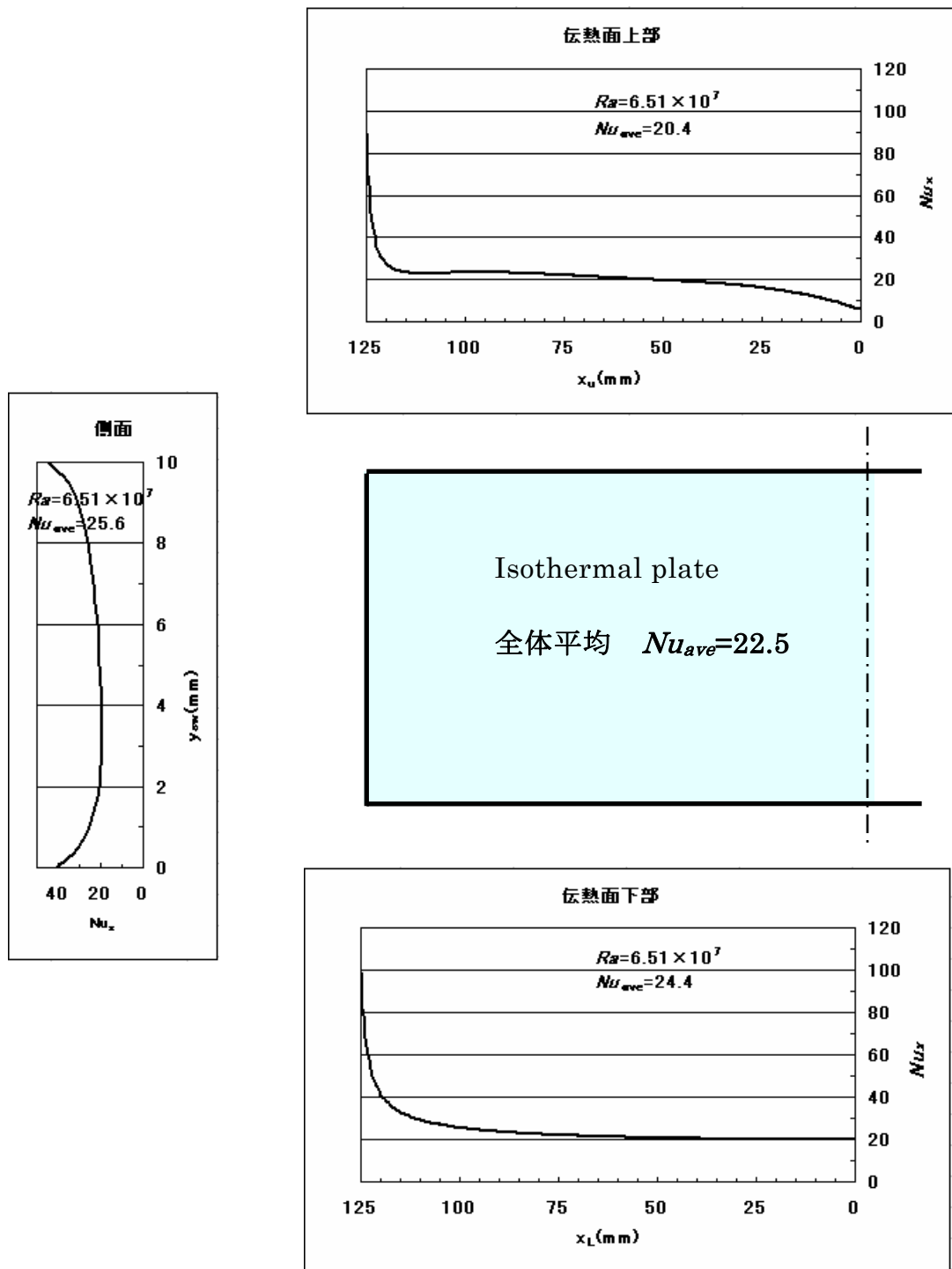


図 7 水平平板まわりの局所ヌッセルト数分布

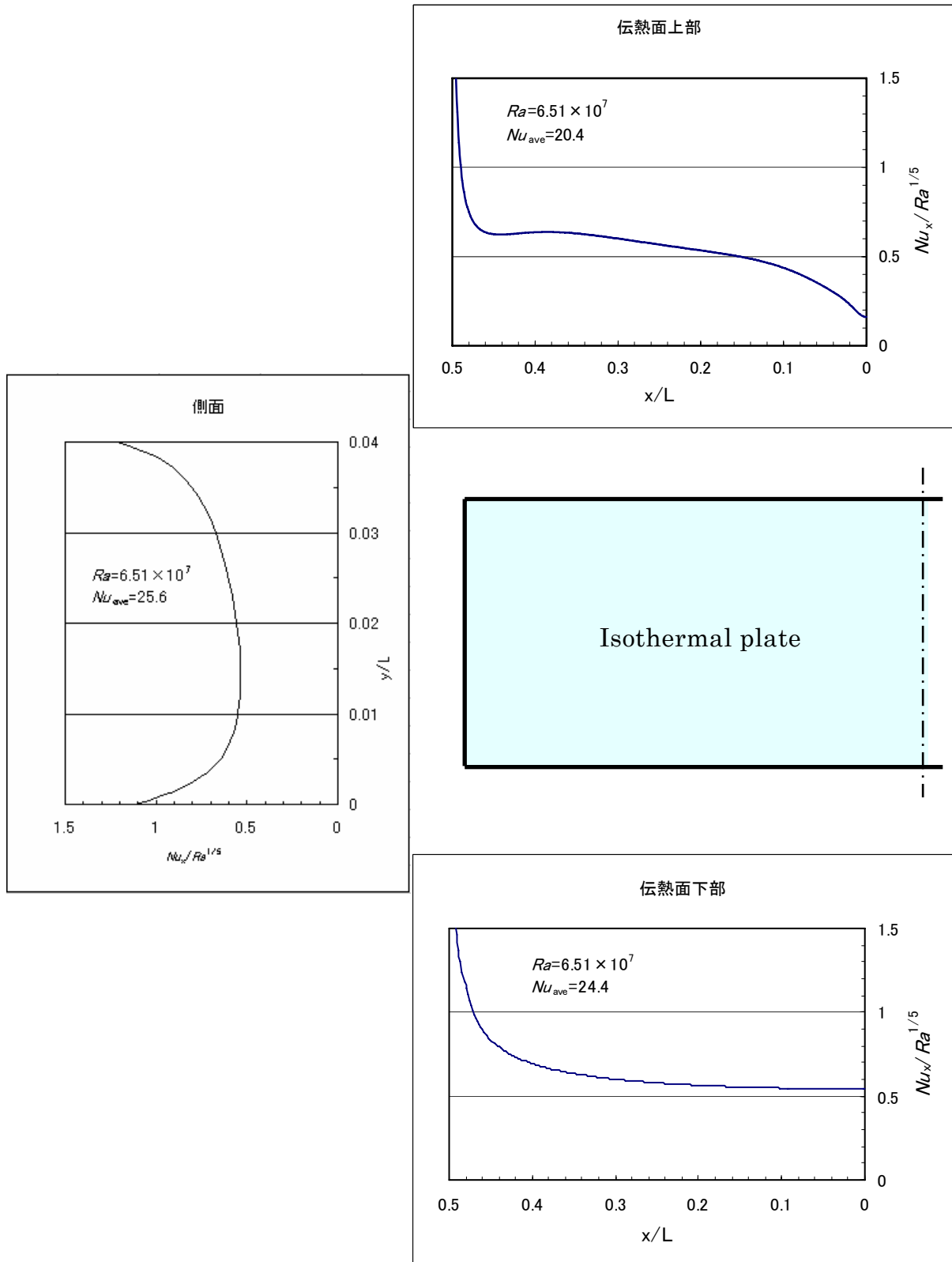


図8 水平平板まわりの局所ヌッセルト数分布 (無次元表示)