

水平等温面まわりの自然対流CFD解析 (第3報：加熱面温度の影響)

津田 和則*・茂地 徹**・桃木 悟*

CFD analysis on natural convection around an isothermal horizontal plate
(Part 3 : Effect of plate temperature)

by

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

In the authors' previous report the numerical analysis was presented on the effect of plate thickness on natural convection around an isothermal horizontal plate. There is no report that has discussed the effect of plate temperature on natural convection around an isothermal horizontal plate. This report presents the numerical results by CFD analysis on the velocity and temperature fields and the local and average Nusselt numbers for the case with a higher plate temperature than that of the previous report.

Key words : natural convection, CFD, isothermal horizontal plate, effect of plate temperature

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、伝熱体は通常、下向き水平加熱面、垂直側面および上向き水平加熱面等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⁽¹⁾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⁽²⁾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。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、2次元数値解析を実施し、水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 らの実験では薄板全面を等温加熱

しているにもかかわらず下向き面下の結果の整理だけにとどまっている。そこで、前報⁽³⁾では、この解析における壁面温度 75.2 における上面、側面の結果を整理し Aihara らの実験で示されなかった結果を示したが、本報では壁面温度 124 の場合について解析し、全面の速度場、温度場およびヌッセルト数を示し、前報⁽³⁾との比較により壁面温度の違いによる影響を明らかにする。

主要記号

a	: 温度伝導率 [m^2/s]
g	: 重力加速度 [m/s^2]
L	: 平板の長さ [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^2]
Ra	: レイレイ数
u	: x 方向速度 [m/s]

平成 18 年 12 月 14 日受理

*大学院生産科学研究科 (Graduate School of Science and Technology)

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

- v : y 方向速度 [m/s]
- x : 局所熱伝達係数 [W/(m²·K)]
- : 温度
- : 温度差 (= w)
- : 無次元温度
- : 熱伝導率 [W/(m·K)]
- μ : 粘性係数 [Pa·s]
- : 動粘性係数 [m²/s]
- : 密度 [kg/m³]
- : 流れ関数

- 添字
- 0 : 基準
 - w : 壁面
 - : 周囲
 - u : 上面
 - b : 底面
 - s : 側面
 - ave : 平均

2 . CFD 解析

2 . 1 Aihara らの実験装置⁽¹⁾

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

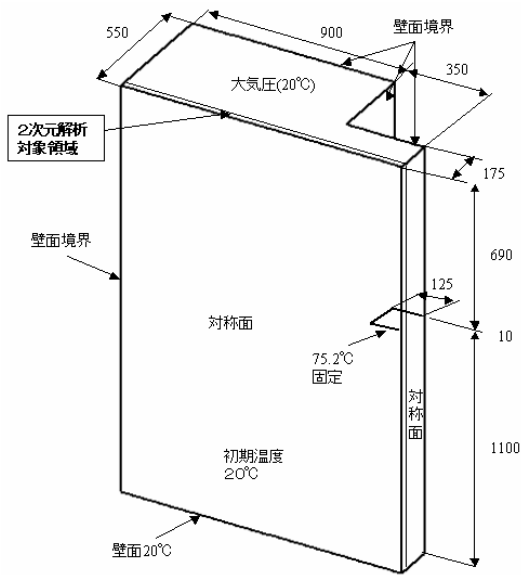


Fig.1 実験設備の主要寸法(1/4 モデル)

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ので、CFD による数値解析も Fig.2 に示す 2 次元モデルで実施した。

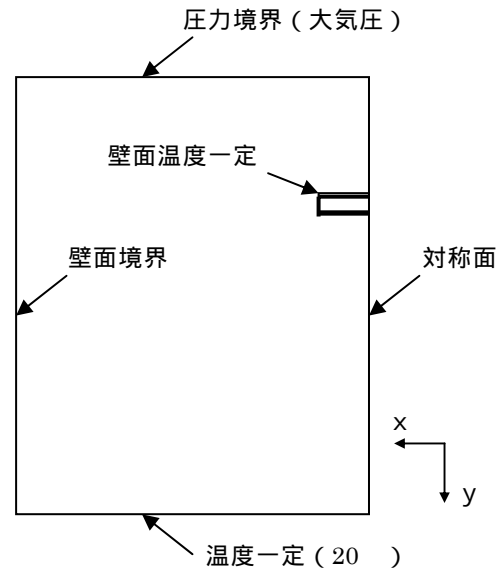


Fig.2 2次元解析モデル

2 . 3 空気の物性

浮力は空気の密度差で考慮し、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

連続の式

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

運動量の式

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

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

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 数値計算の手法

CFD解析にはSTAR-CD (Ver.3.24) ⁽⁴⁾ を使用し、定常解析を実施した。離散化手法は有限体積法。

- ・最小格子： $x, y = 0.5\text{mm}$
- ・最大格子： $x, y = 10\text{mm}$ 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

Fig.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) と仮定する。側面の外壁境界は実験では木材であるが、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 とする。上部は大気開放の圧力境界とする。

解析条件は、空気の温度 20 、水平平板温度は 124 とする。

3. 解析結果

解析結果を Fig.3.1 ~ Fig.3.6 に示す。

- Fig.3.1 : 等流れ線図, 速度ベクトル図 (全体図)
- Fig.3.2 : 等流れ線図, 速度ベクトル図 (拡大図)
- Fig.3.3 : 等流れ線図, 無次元等温線図 (拡大図)
- Fig.3.4 : 速度プロファイル
- Fig.3.5 : 無次元温度プロファイル
- Fig.3.6 : 局所および平均ヌッセルト数

また、比較のため前報⁽³⁾の水平平板温度 75.2 の計算結果を Fig.4.1 ~ Fig.4.6 に示す。

4. 考察

4.1 速度場と温度場

(1) 前報⁽²⁾で下向き加熱面の速度プロファイル (Fig.4.4) は Aihara らの実験結果とよく一致していることを示した。また、前報⁽³⁾では側面、上面の速度プロファイルも加えて Fig.4.4 に示している。側面では垂直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。上面において、端部近くでは側面からの上向き流れの影響で壁面近くで負の速度を持つ循環領域を形成している。本報でもこの傾向は同様であり、全体的に速度が速くなっている。

(2) 前報⁽²⁾では温度プロファイル (Fig.4.5) は解析結果と実験結果はほぼ一致していることを示した。前報⁽³⁾では Fig.4.5 に側面と上面の温度プロファイルを示し、Fig.4.6 に局所および平均ヌッセルト数を示した。側面では、上下両端付近でヌッセルト数が大きい値を示している。上面では端部が大きな値を示し、中央部は上昇流が大きく壁面に沿った流れが小さくなって小さな値を示している。端部に近いところでは流れの循環が起きており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流れの循環は起きていないが、表面近くの流速は小さく低い値を示している。本報においても、壁面温度 55.2 の場合と同様な傾向を示している。局所ヌッセルト数の傾向はほとんど同じであるが若干値が大きくなっている。したがって、各面の平均ヌッセルト数及び全体の平均ヌッセルト数も若干大きい値を示している。

4.2 熱伝達係数

前報⁽²⁾では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。Fig.4.6 に前報⁽³⁾の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。本報でも傾向は同様であるが、無次元等温線図 (Fig.3.3) で示すように全体的に速度が速くなっているため、温度境界層が若干薄くなっている。したがって、局所ヌッセルト数が大きくなり、平均ヌッセルト数も大きくなっている。

5. むすび

有限幅の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)加熱平板の温度が高くなる、すなわちレイレイ数が上がると、全体の速度が上昇し温度境界層($\delta = 0.02$ の位置) が薄くなることが分った。

(2)同様に前報⁽²⁾では下向き面の平均ヌッセルト数は Aihara らの実験とよく一致していることを示しており、前報⁽³⁾では側面と上面も同様の手法で求めることにより推測でき、各面の平均ヌッセルト数は下向き面で 24.4、側面で 2.6、上面で 20.4 となり、板まわり全体での平均ヌッセルト数 24.0 を得ている。本報では下向き面で 25.7、側面で 3.0、上面で 21.8 となり、板まわり全体での平均ヌッセルト数 25.8 を得ており、平板加熱面温度が上がれば各面および全体の平均ヌッセルト数も上昇していることが分る。

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,36-66(2005)6-14
- 3)津田・茂地・桃木,長崎大工研報,36-67(2006)14-24
- 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).

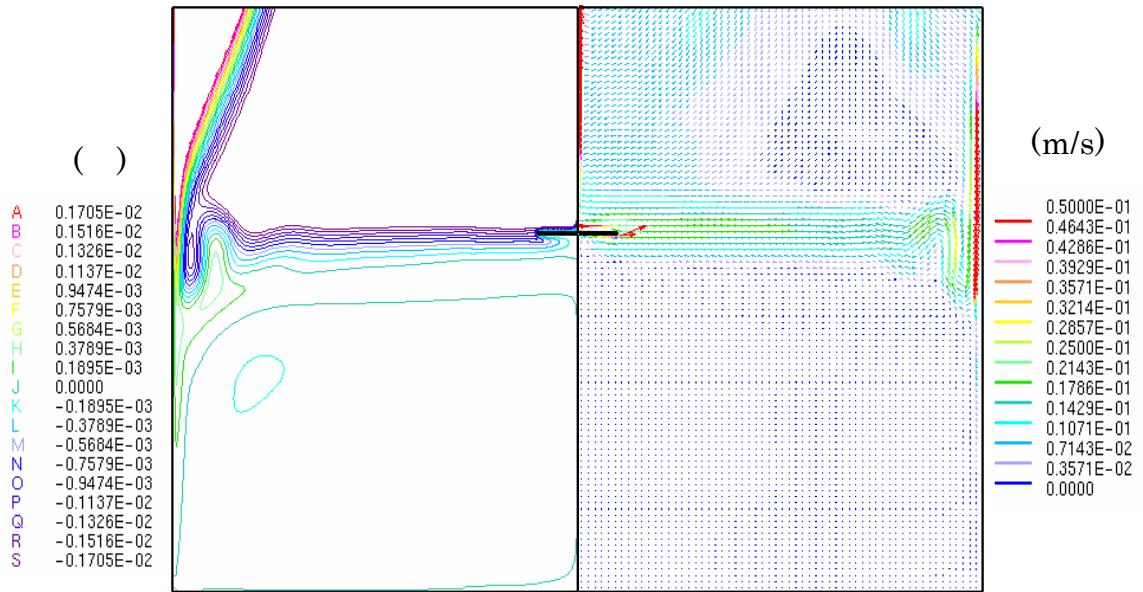


Fig.3.1 等流れ線図、速度ベクトル図(全体図)($w=124$)

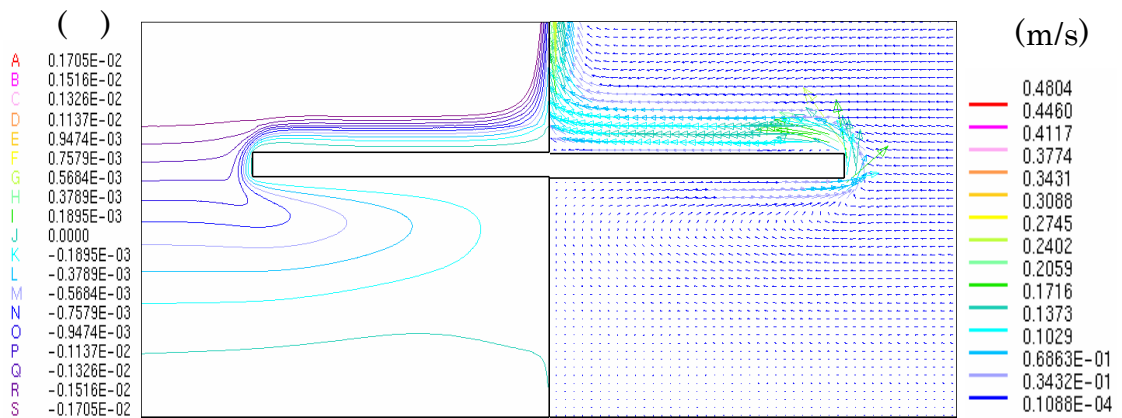


Fig.3.2 等流れ線図、速度ベクトル図(拡大図)($w=124$)

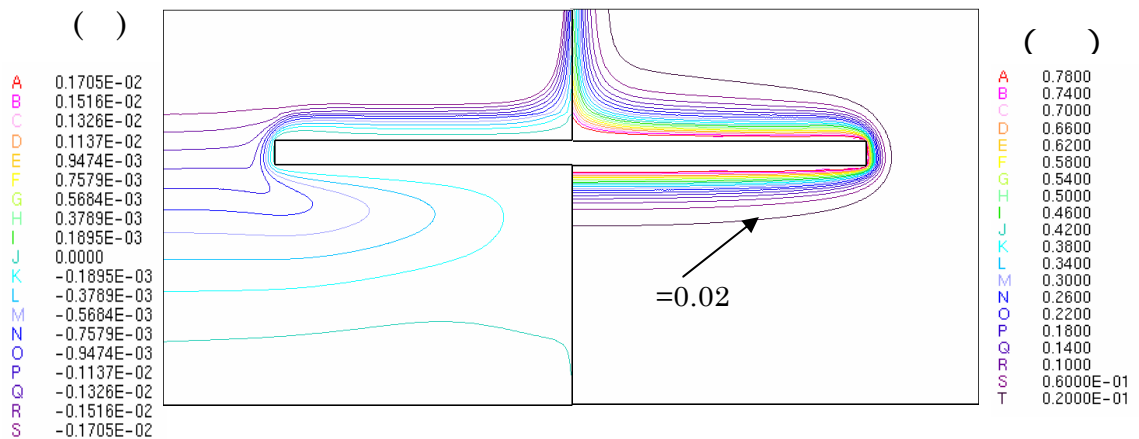
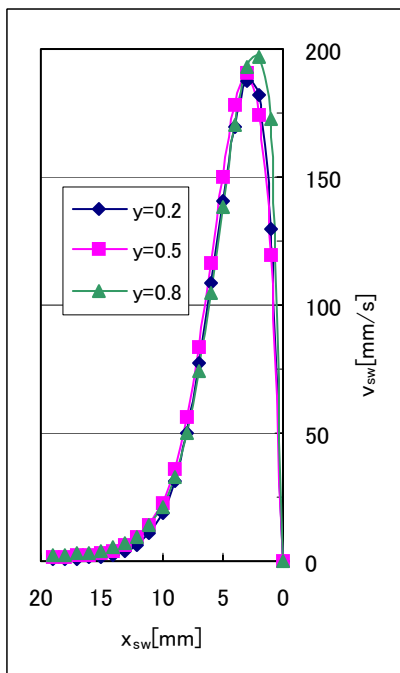
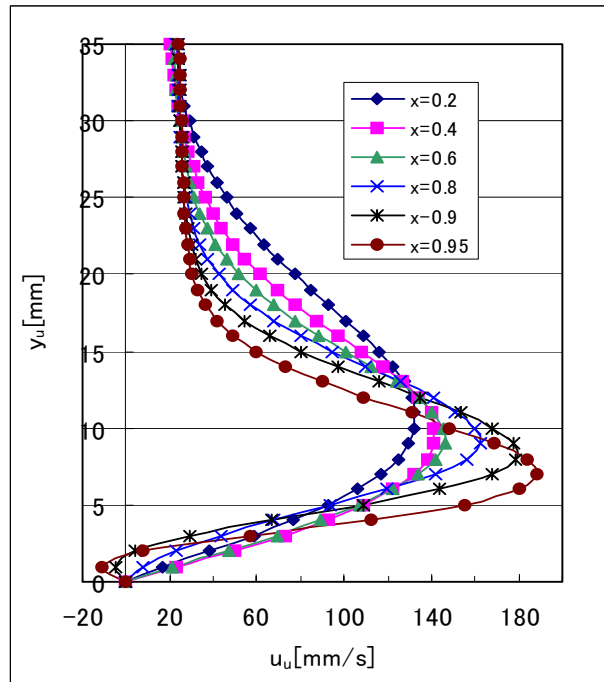
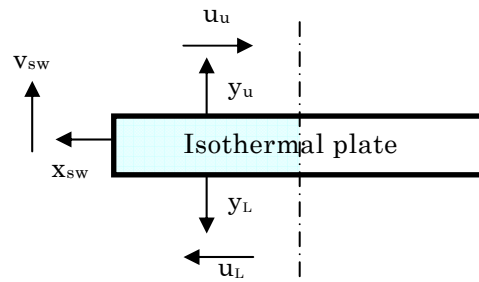


Fig.3.3 等流れ線図、無次元等温線図(拡大図)($w=124$)

(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

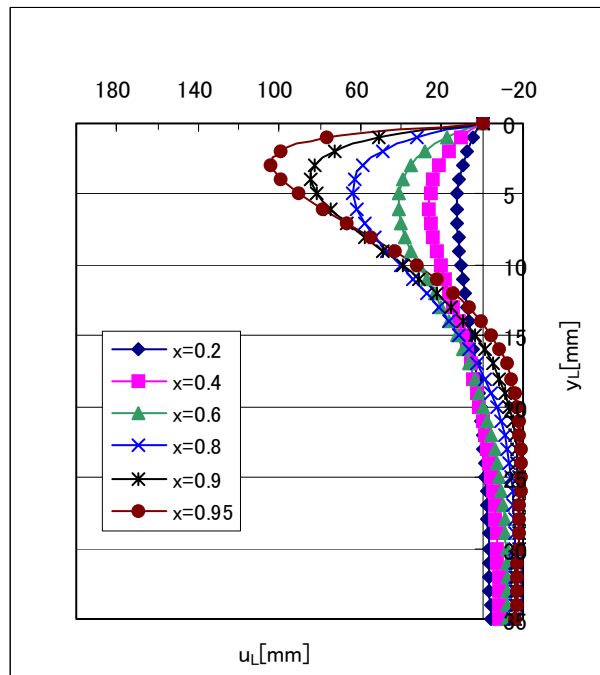


Fig.3.4 速度プロファイル ($w=124$)

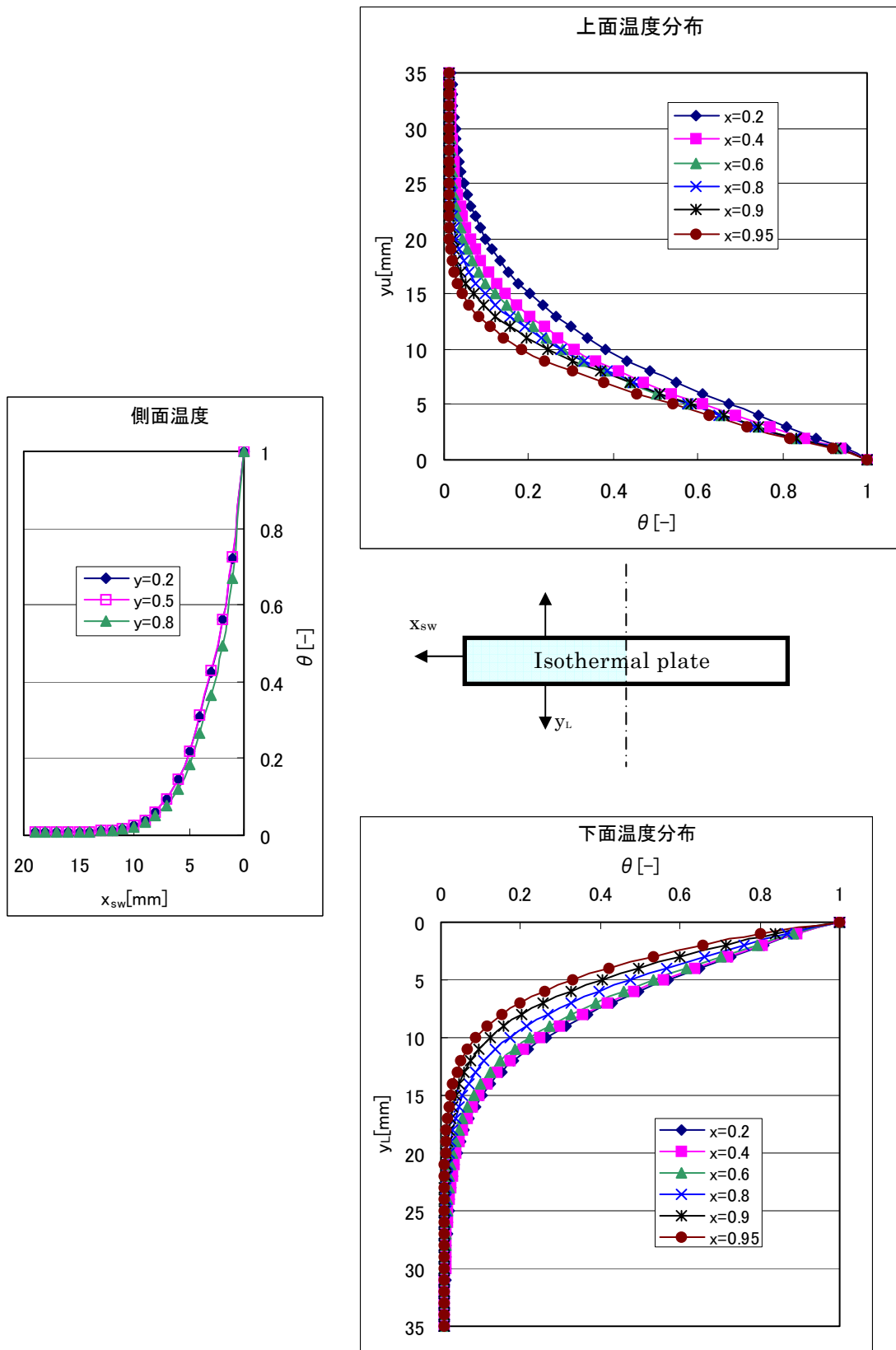


Fig.3.5 無次元温度プロファイル ($w=124$)

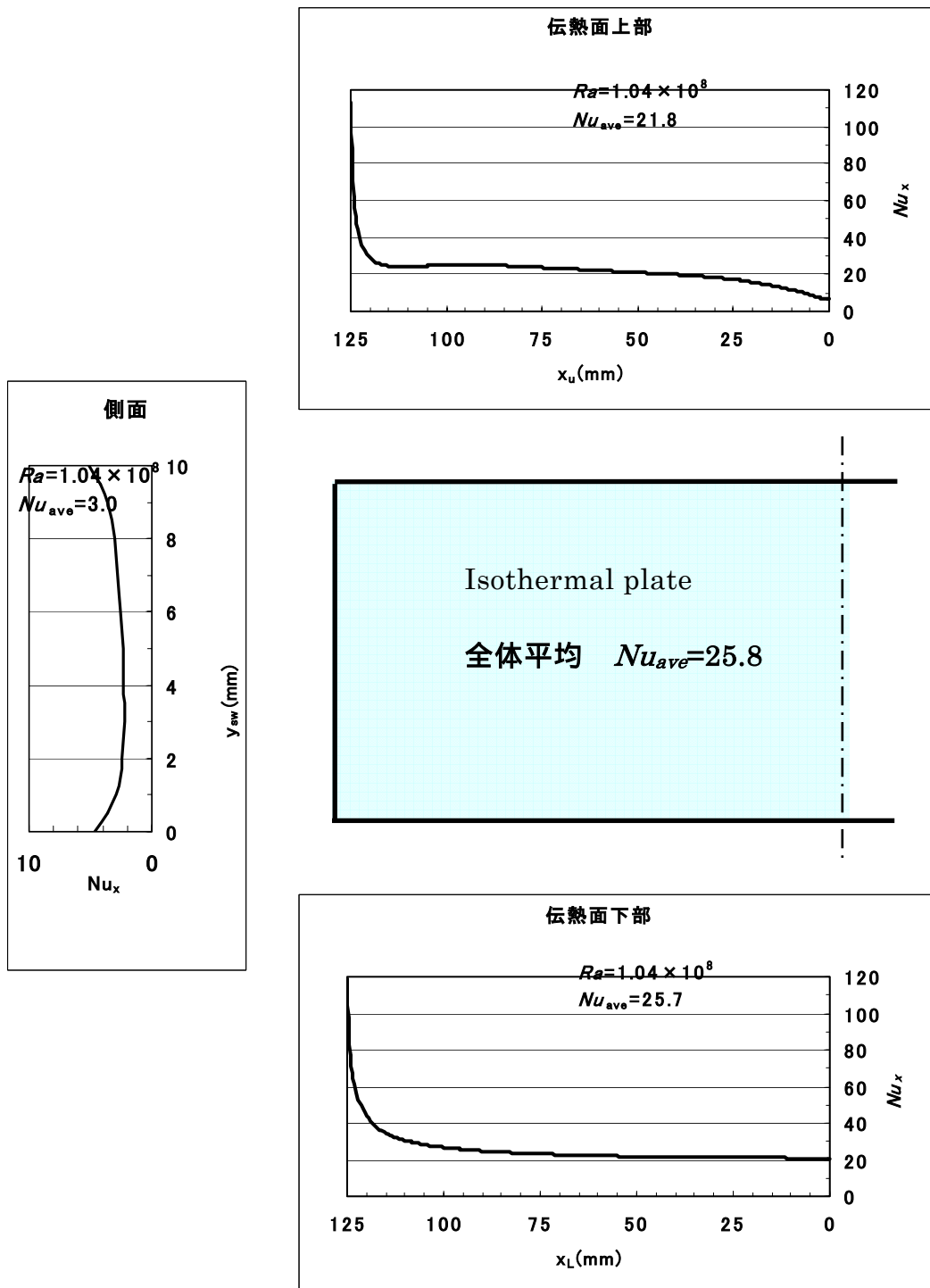


Fig.3.6 局所及び平均ヌッセルト数 ($w=124$)

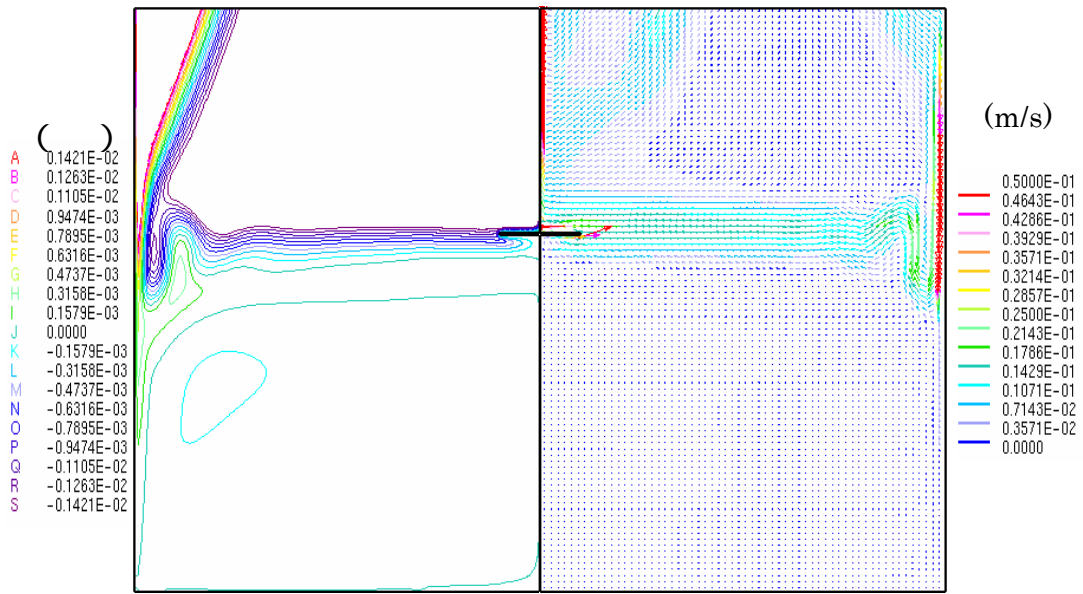


Fig.4.1 等流れ線図、速度ベクトル図(全体図)($w=55.2$)

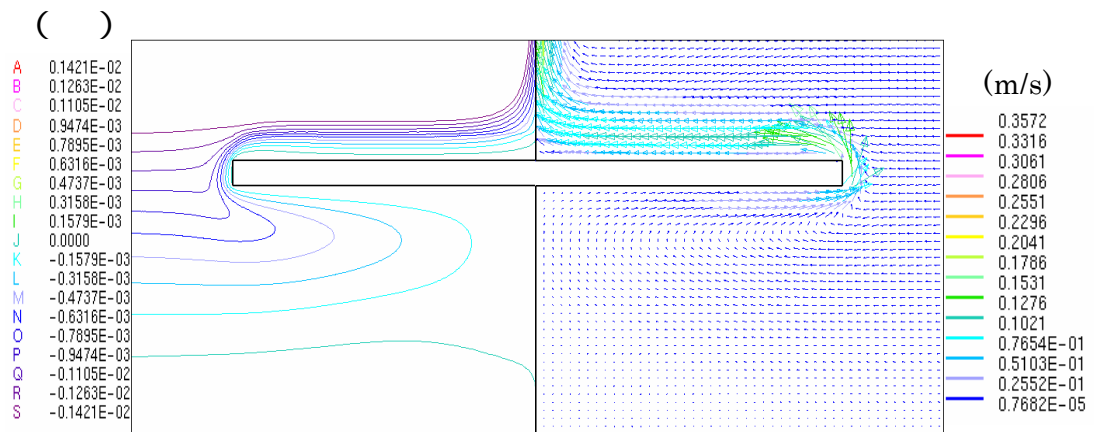


Fig.4.2 等流れ線図、速度ベクトル(拡大図)($w=55.2$)

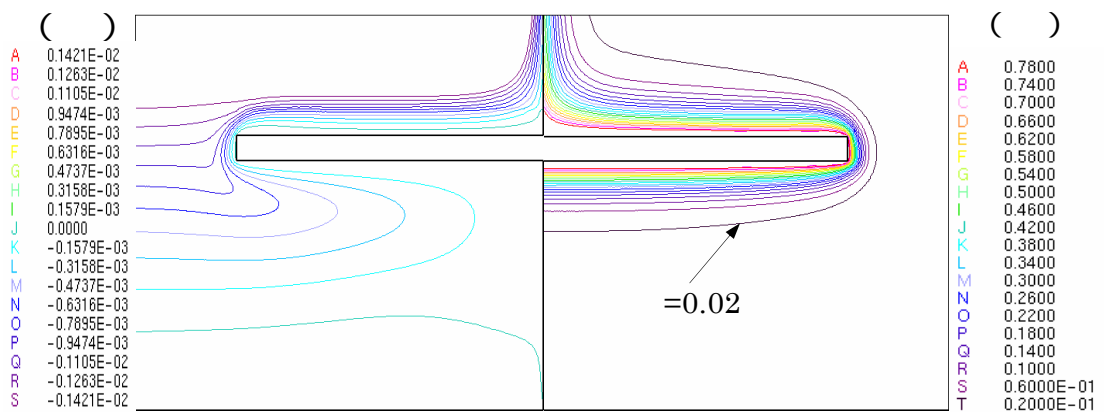
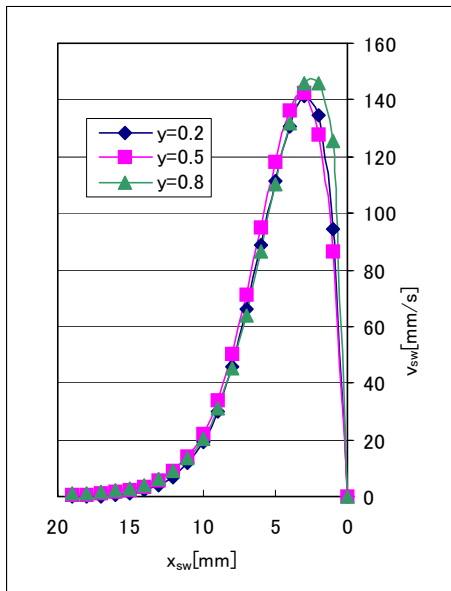
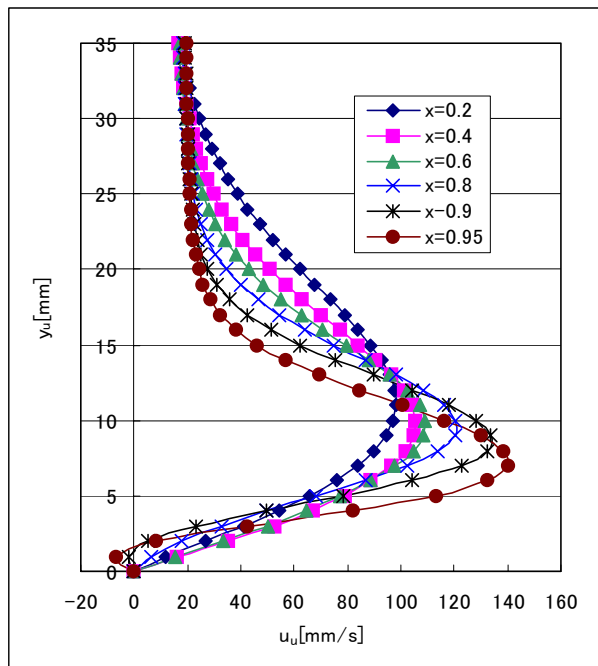
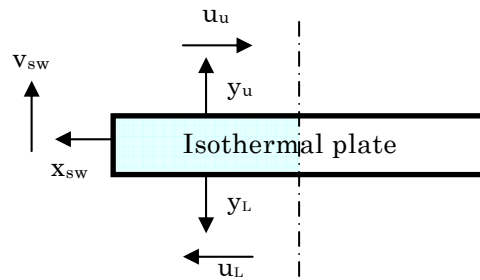


Fig.4.3 等流れ線図、温度コンター図(拡大図)($w=55.2$)

(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

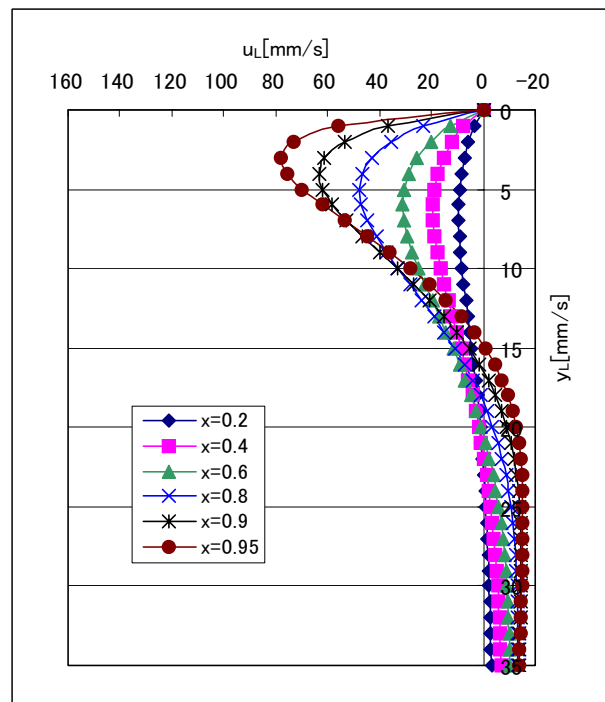


Fig.4.4 速度プロファイル ($w=55.2$)

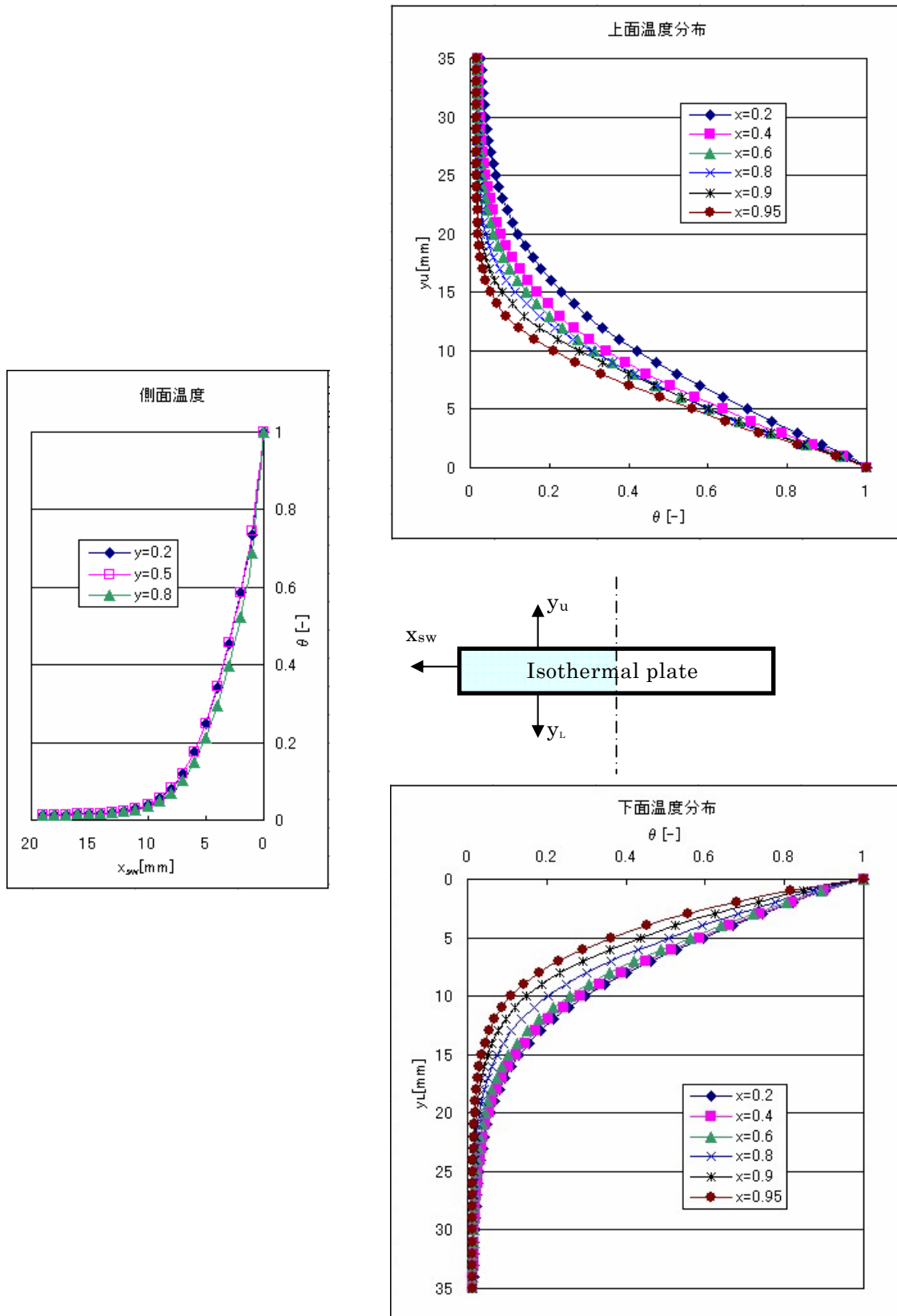


Fig.4.5 水平平板まわりの無次元温度プロファイル ($w=55.2$)

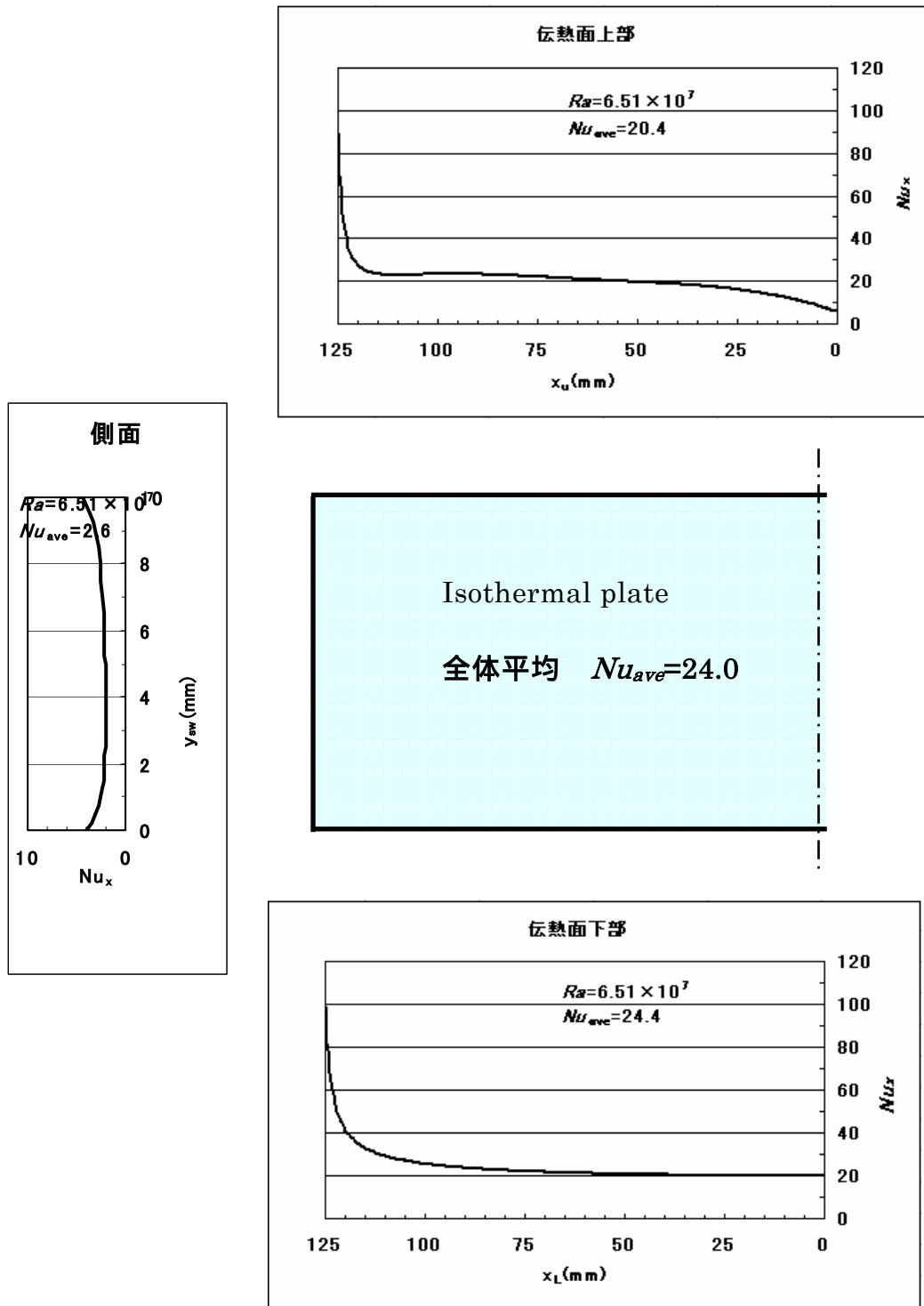


Fig.4.6 局所および平均ヌッセルト数分布 ($w=55.2$)