

鉛直平行平板間の乱流自由対流熱伝達

(Part 3. 平行流路入口をベルマウス形状にした場合)

加藤 泰生*・宮本 政英*・栗間 諄二*
兼安信太郎**

Turbulent Free Convection Heat Transfer from Vertical Parallel Plates (3rd Report, for the Case of a Bell-mouth Entrance)

Yasuo KATOH, Masahide MIYAMOTO, Junji KURIMA
and Shintaro KANEYASU

Abstract

The streamwise development of turbulence in the free convection flow between vertical parallel plates (5m long and spacing B) was experimentally studied. To control inlet disturbance, a bell-mouth entrance was installed at the lower end of the vertical parallel plate channel. The turbulence quantity profiles (velocity, intensity, turbulent heat flux and kinetic energy productions) were measured in the vertical channel at heights X (110, 820, 1690, 2630 and 3840mm) and at spacings B of 50, 100 and 200mm.

The streamwise development of intensity profiles of vertical velocity and the beginning of the transition seem to be closely related to the development of vertical velocity profiles through buoyancy effects. The measured profiles of the turbulent kinetic energy productions and the turbulent heat fluxes seem to clarify the characteristics of turbulence intensity.

1. まえがき

加熱された鉛直平行平板の鉛直流れ方向の長さを延すと、平板間に誘起される自由対流は、鉛直の単独平板に沿った自由対流境界層と同様に、単純な層流から、乱流を含む流れへと変化する。そして、このような乱流領域を含む流れの場合が実際には、重要であるにもかかわらず公表されたものは少ない。著者らは一様発熱する板と断熱板とで構成された平行平板流路(5m長さ)内、自由対流における伝熱特性と乱れ特性に関して研究を行っている [1] [2] [3]。本実験研究では、ベルマウスを取り付けた入口が、入口乱れの制御のため

めに鉛直平行平板の下端に設置されている。そしてこれは、層流から乱流への流れの遷移に大いに影響するものである。流路入口から出口近くの十分発達した乱流において、鉛直方向速度分布と乱れ強度分布の流れ方向への発達や熱伝達特性が流路距離 B が50mm, 100mm と200mm に関して明らかにされている。十分発達した乱流領域で、乱流熱流束と乱流運動エネルギー生成の測定によるプロフィールは、乱れ強度と熱伝達の特性を明らかに説明している。

2. 実験装置と測定方法

Fig. 1 に示すように、本研究で使用された平行平板流路や測定方法はほとんど本流路の入口にベルマウス入口を設置した以外は、既報の実験装置 [1] [2] [3] のそれと同じものである。さらに、ベルマウス設置によ

*機械工学科

**大学院機械工学科 (現在：日新製鋼)

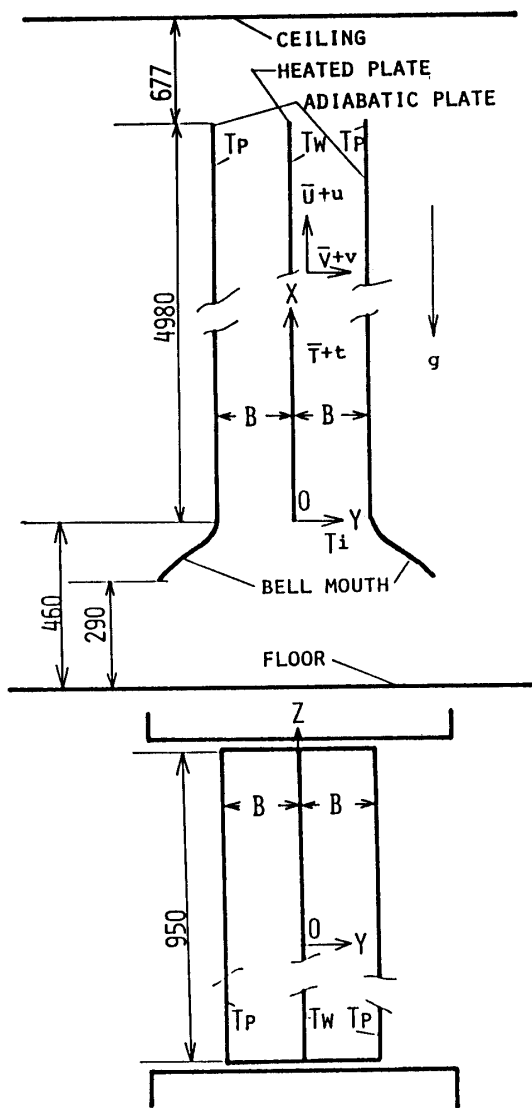


Fig. 1 Vertical parallel plate channel

り引き起こされる二次流れを制御するため、ベルマウス入口のコーナーに特殊なフィンを取り付けている[4]. 流路内速度、温度の測定は、レーザー流速計 (LDV) と $\phi 25\mu\text{m}$ 極細線熱電対をそれぞれ用いて行った. 測定は流路間隔 B (50, 100, 200mm) に対して, 入口伝熱面前縁より $X=110, 820, 1690, 2630, 3840\text{mm}$ の位置で行った.

3. 実験結果および考察

3. 1 伝熱面及び断熱面上温度分布

伝熱面上のそれぞれの条件による鉛直方向温度差分布 (Fig. 2 で示す) のピークは鉛直平板に沿った対流境界層の例に従うと層流から乱流への遷移の開始点と考えることが出来る. 同様に, その最小値の位置は B の減少とともに高い位置 (下流側) へと移動する. このように温度分布の一般的特性はベルマウスなしで行った既報の実験のそれとはそう大きく異なる. しかし, そのピークや最小値の位置は以前の実験のそれよりより明確に認められるようになり, そしてより高い位置 (下流側) へと移動している. また, 入口から遷移領域までの流れの層流域では滑らかな温度の発達が明確に見られる. これは, 入口における乱れをベルマウス口を付けることで取除くことが出来たことによる. そのことはまた, それぞれの条件で誘起される流れの温度分布へ及ぼす影響をより明確に知ることが出来る.

また同時測定された伝熱面水平方向 (Z 方向) 温度分布から側端近傍の温度の下がりを除いてほぼ流路中央での流れが二次元性を保っていることが確かめられている.

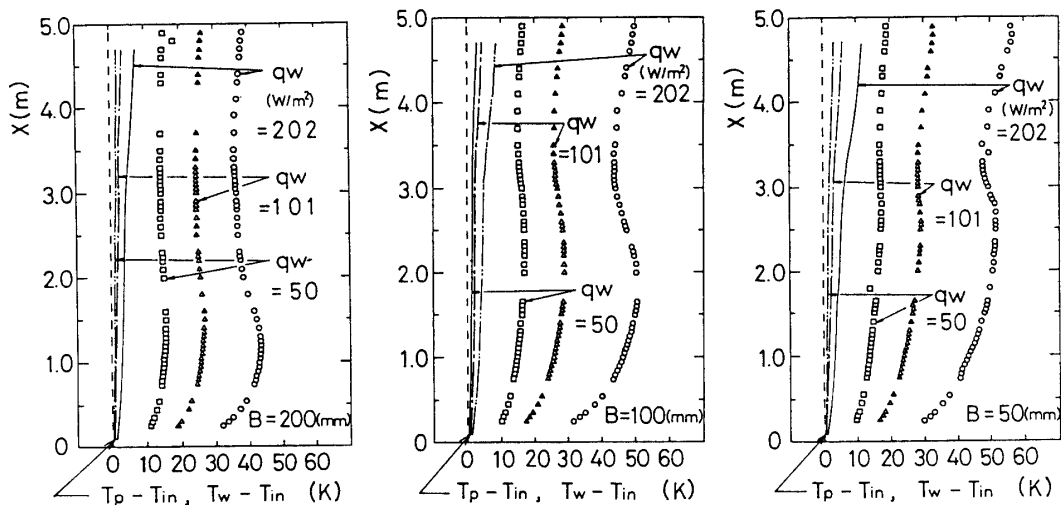


Fig. 2 Temperature excess distributions on the heated and adiabatic surfaces

3. 2 時間平均鉛直方向速度分布

Fig. 3 に示すように、入口近傍の $X=110\text{mm}$ での分布全てが、流路の主要部で水平であり流路の鉛直中心線に関してほぼ対称である。鉛直位置 110mm と 1690mm との間での速度は X の増加とともに伝熱面近傍で浮力により加速される。 $X=110, 820, 1690\text{mm}$ での全ての速度分布は、流路の中央部分は水平である。これらの水平の領域は、 B の減少とともに、また X が高くなるとともに、狭くなっていく。厳密に言えば、 B が 50mm に等しく X が 1690mm に等しいときにこの水平領域はたいへん狭くほとんど認められなくなる。加熱面近傍の速度は加速であるため、断熱壁近傍の速度は減速となる。 B が 200mm のとき、断熱面近傍での減速は $B=50, 100\text{mm}$ の場合に比べて明確に認められない。なぜなら $B=200\text{mm}$ における速度は加熱面近傍を除いて流路の広い範囲にわたって一様に減速しているからであ

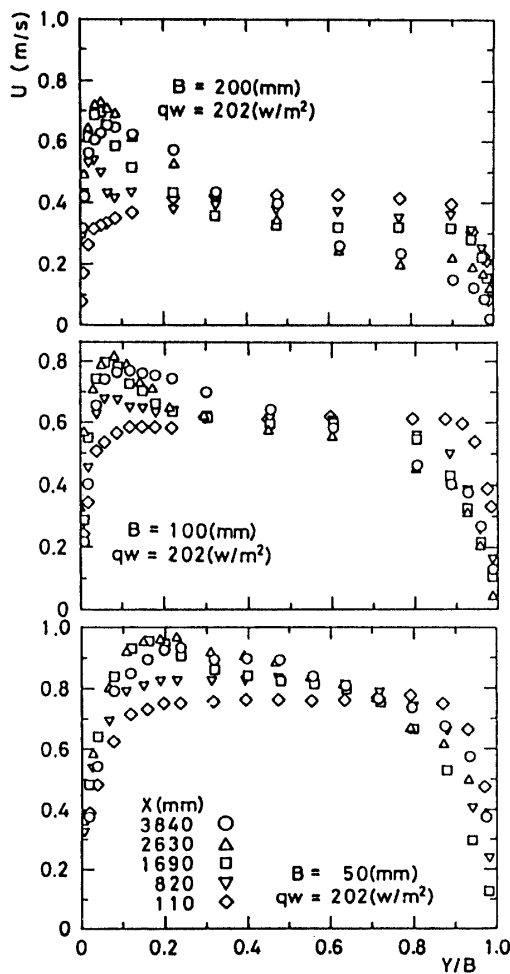


Fig. 3 Comparison of mean vertical velocity profiles

る。 $X=1690\text{mm}$ を越えると加熱面近傍の速度はむしろ変化しないか、あるいは加速より減速となるようである。(鉛直位置 $X=2630\text{mm}$ と 3840mm は遷移域にあるかあるいは加熱面の温度分布から遷移域より高い位置にある) 一般に、 $X=2630\text{mm}$ と 3840mm でののおの速度分布は加熱面からの垂直方向距離 Y の増加とともに一様に加熱面近傍の最小値から断熱面でのゼロの値まで減少する。そして流路の中心領域では水平な部分をもたない。同じ B においても $X=2630\text{mm}$ と 3840mm の分布にはそう違いがない。

3. 3 鉛直方向速度の無次元変動強度分布

鉛直方向速度の無次元変動強度分布の一般的特性は時間平均速度分布のそれと大変よく対応している (Fig. 4 に示す)。入口に最も近い $X=110\text{mm}$ で強度分布は同じ B におけるプロファイルのなかでも最も低く流路の中央部分で水平である。これらの分布は流路の鉛直方向中心線に関して対称で加熱面と断熱面の近傍に2つのピークを有する。これは流路入口近傍の強いせん断

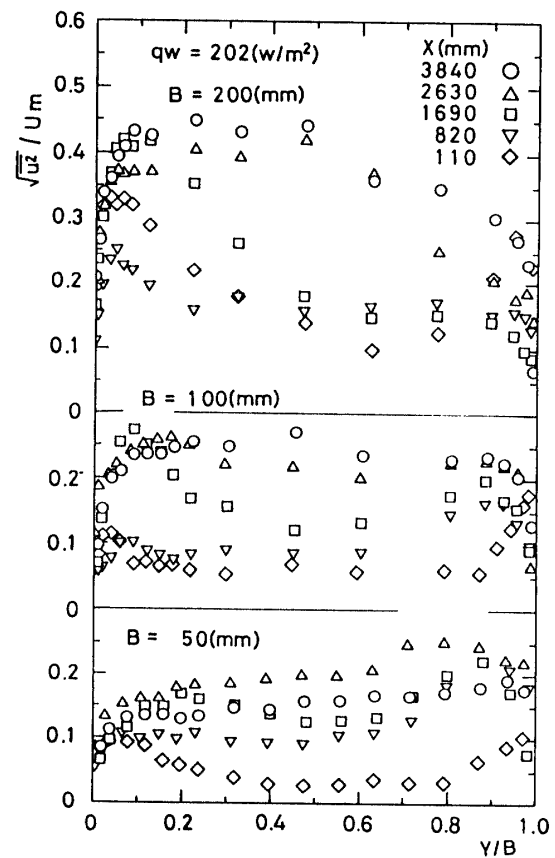


Fig. 4 Comparison of dimensionless intensity profiles of vertical velocity fluctuation

力によるものと考えられる。(B=200mm のとき分布の水平な部分が流路中央でほとんど見られなく加熱面, 断熱面近くのピークはそう低いものではない。)X の増加とともに加熱面近くで弱くなっている程度で速度変動強度は変化しないが, そこでは時間平均鉛直方向速度は明らかに加速している. 一方, B=50mm と100mm のときの速度変動強度は断熱面近傍で増加する. ここでは時間平均鉛直方向速度は明らかに減速している. Bが200mm のとき, 断熱面近傍での鉛直方向速度の減速が先に述べたように明確でないことに対応してここでの変動強度は弱くなっている.

X=1690mm 以上では, X=2630mm と3840mm での変動強度分布は, 流路の中央で一般に高い. Bが50mm のとき鉛直位置2630mm は遷移域にあり乱れ強度分布は, 3840mm におけるそれよりも大きい. しかし, B=100と200mm に関しては, X=2630mm と3840mm の位置ではその両者ともほとんど乱流域にあり同じ Bでの乱れ強度の分布は, X の位置ではそんなに異なる. 一般に, Bが50mm における乱れ強度分布は, 断熱面近傍が加熱面近傍より大きな値を有するのに対して, Bが200mm におけるそれは, 加熱面近傍の方が高い. 他方, Bが100mm における乱れ強度は, それら両者の間を取るようである.

本報のようにベルマウスを入口に付けることにより, 入口乱れの発達により明確になり, 遷移域, 乱流域での乱れ強度の発達が定性的議論のみならず定量的議論まで可能となったといえる.

3. 4 乱流熱流束とレイノルズ応力分布

加熱面 X=3840mm の位置での十分発達した乱流領域における, 乱流熱流束 $\rho C_p \overline{u}t, \rho C_p \overline{v}t$ の対流熱流束 q_c に対する比の x 方向, y 方向分布と, レイノルズ応力分布は Fig. 5, 6 で示される. 共に, B=50mm の伝熱面近傍 x 方向熱流束を除き全て伝熱面近傍のピークの存在とそれが B の減少とともに減少する事が分る. Fig. 5 からレイノルズ応力分布は, B の全てに於て, 伝熱面近傍に正の応力を有しその伝熱面から離れるに従い負に変化する. そして, それは B の幅に対応して変化している.

3. 5 乱流運動エネルギーの応力生成の分布

十分発達した乱流領域では, 乱流運動エネルギー応力生成の分布は Fig. 7, 8 で示される. 後者は, 実験条件は異なるが, これに対応する浮力生成分布 [6] よりもかなり大きい. そして, 鉛直速度強度分布の形とは一致している. しかしながら, 伝熱面近傍での応力

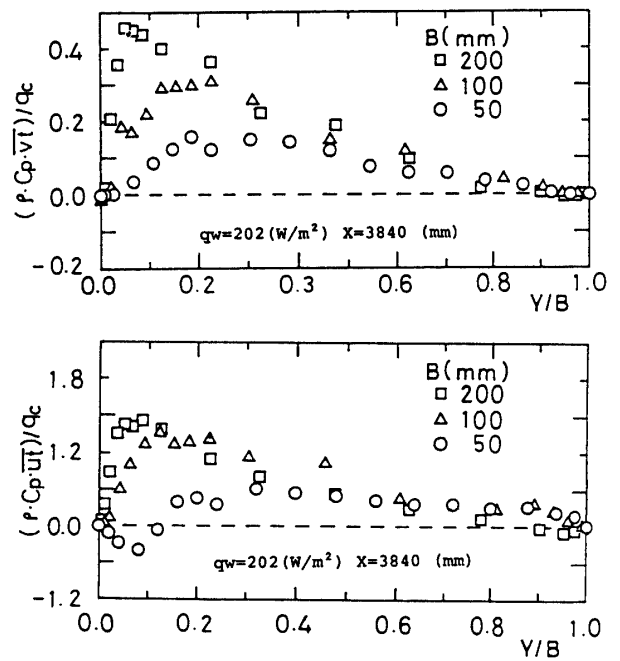


Fig. 5 Comparison of dimensionless turbulent heat flux profiles

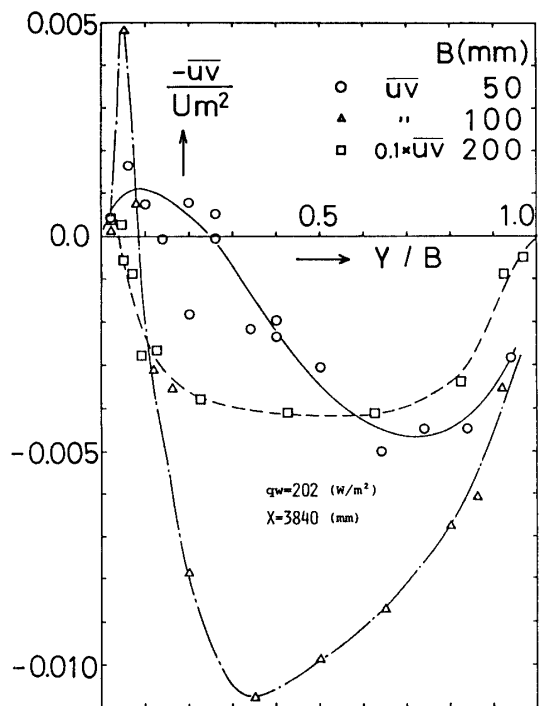


Fig. 6 Comparison of dimensionless Reynolds stress profiles

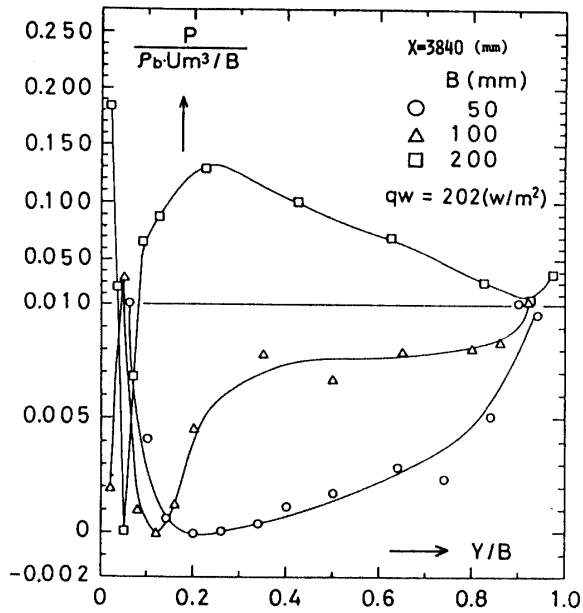


Fig. 7 Comparison of dimensionless stress production profiles of turbulent kinetic energy

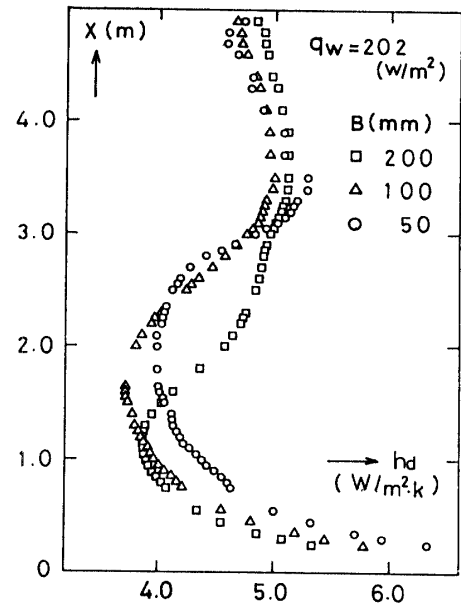


Fig. 9 Comparison of local heat transfer coefficient distributions

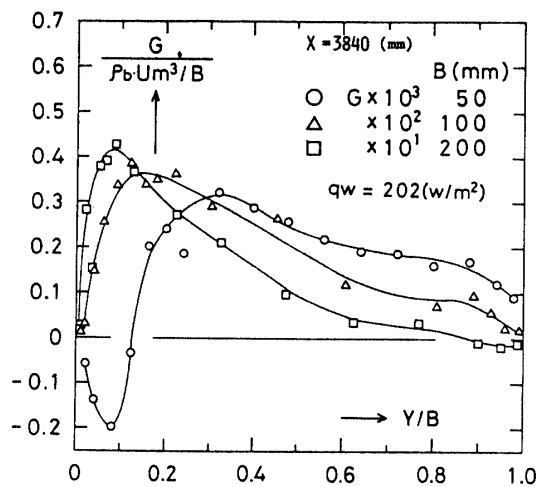


Fig. 8 Comparison of dimensionless buoyant production profiles of turbulent kinetic energy

生成は、狭い領域に複雑に入り組んでおりこの事は自由対流乱流域でのこの値の測定の高難さを示す。浮力生成項に関しては、先の乱流熱流束と対応しているため、 $B=50\text{mm}$ を除き分布のプロファイルは変わらない。

3. 6 熱伝達特性

$B=50, 100, 200\text{mm}$ の場合、それぞれの熱伝達率分布は、Fig. 9に示される。最小値が必ずしも加熱面

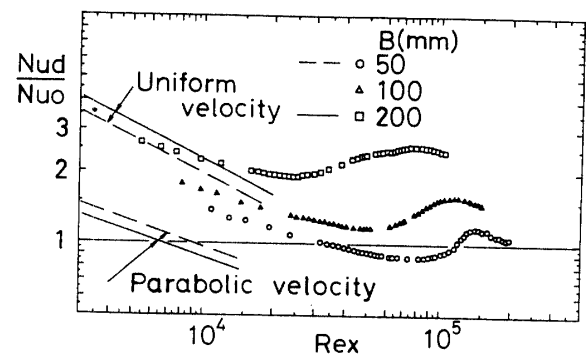


Fig.10 Comparison of dimensionless local heat transfer coefficient distributions

での温度分布に対応したピークと一致しない (Fig. 2の温度分布を参照)。

ここで、

$$\text{Nud} = q_c D / (T_w - T_b) \quad (1)$$

$$\text{Nu}_0 = 0.023 \text{Red}^{0.8} \text{Pr}^{1/3} \quad (2)$$

$$\text{Rex} = \text{Um}X/\nu, \quad \text{Red} = \text{Um}D/\nu \quad (3) (4)$$

厳密に言えば、局所熱伝達の極小値は、温度ピークより僅かに下に位置している。そして、この位置がまさに遷移点に対応しているといえる。

Fig. 10に示されるように、熱伝達率の無次元分布は、 B の減少とともに減少する。この事実は、乱流の乱れ

強度と乱流熱流束の特性が一致していることを意味する。参考のため、層流域において Uniform な速度分布と, Parabolic な速度分布を与えることで求められる熱伝達分布を併せて図上に示しているが、この対応は必ずしも良好とは言い難い。

4. 結 論

鉛直方向速度の乱流強度の流れ方向への発達や遷移の始りは、密接に、浮力の影響による鉛直方向速度分布の発達と関係がある。

一般に、速度乱れ強度は B が 200mm においては、加熱面近傍でより高くなり、一方、B が 50mm においては断熱面近傍で高くなる。また、平均速度による無次元速度乱れ強度は、全般的に B が 200mm の方が、50mm の場合より高くなる。乱流運動エネルギー生成の分布は、乱流域における乱れ強度の特性と熱伝達の特性とを明確に説明している。

使用記号

B	平行平板間距離
Cp	比熱
D	水力径
G	浮力による乱流運動エネルギー生成
g	重力加速度
hd	局所熱伝達率
Nud	局所ヌッセルト数
Nuo	管内乱流ヌッセルト数
P	運動エネルギーの応力生成
q _w , q _c	伝熱面上の生成及び対流熱流束
Rex	レイノルズ数, UmX/ν
Red	レイノルズ数, UmD/ν
T, \bar{T} , t	温度, 平均と変動成分 T = \bar{T} + t

T _{in} , T _b	入口ならびにバルクの流体温度
T _w , T _p	伝熱面温度ならびに断熱面温度
U, \bar{U} , u	鉛直方向速度, 平均と変動成分 U = \bar{U} + u
U _m	流路断面での時間平均速度
V, \bar{V} , v	面に垂直方向速度, 平均と変動成分 V = \bar{V} + v
X	伝熱面前縁からの流れ方向距離
Y	伝熱面からの垂直距離
ρ	密度
λ	熱伝導率
ν	動粘性係数

参考文献

- [1] 宮本ら他 3 名, "鉛直平行平板間の乱流自由対流熱伝達", Heat Transfer 1986(1986) 1593-1598
- [2] 加藤ら他 3 名, "鉛直平行平板間の空気への乱流自由対流熱伝達, 第 2 報", Proc. of the 2nd ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference (1987) 69-75
- [3] 加藤ら他 3 名, "鉛直平行平板間の乱流自由対流熱伝達" 日機論 B 編, 53 巻 495 号 (昭 62-11) 3370-3376
- [4] 鶴野ら他 3 名, "平行ダクトの入口領域での熱伝達" 第 21 回日本伝熱シンポジウム (1984) 610-612
- [5] 藤井ら, 他 4 名, "鉛直円筒外表面から液体への自由対流熱伝達の実験" Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.13, (1970) 753-787
- [6] W. M. To and J. A. C. Humphrey, Numerical simulation of buoyant, turbulent flow---
1. Free convection along a heated, vertical flat plate, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.29, No.4 (1986) 573-592