

## 熱的助走区間における矩形ダクト内の伝熱特性

第2報：底壁面あるいは一つの側壁面から非対称に加熱  
される自然・強制混合対流の流動状態と熱伝達

Heat Transfer Characteristics of the Thermal Entrance Region  
inside a rectangular Duct. (2nd report : Flow and heat trans-  
fer characteristics of mixed convection due to asymmetric heating  
through bottom or side wall.)

ムスタファ・ムーサ\*  
Mostafa M. MOUSA

斎藤彬夫\*\*  
Akio SAITO

宇高義郎\*\*\*  
Yoshio UTAKA

片山功藏\*\*\*\*  
Kozo KATAYAMA

## Abstract

In this paper, an attempt has been made to present basic informations concerning the buoyancy effect on both of the flow and heat transfer characteristics of the thermal entrance region for a laminar free-forced mixed convection flow inside an asymmetrically heated rectangular duct with a uniform heat flux throughout its bottom or side wall, while the other walls are kept adiabatic. Water with minute chemical compounds was used as a working fluid.

A modified electro-chemical visualization method was applied with thymol-blue as a pH-indicator and platinum wires of 0.025 mm diameter as electrodes.

It was found that, due to the effect of buoyancy, laminar flow changes into three identified regions : build-up (slightly affected), waving and turbulent. The turbulent region length extends towards the test section entrance as Grashof number increases or Reynolds number decreases. Wall temperature fluctuations were recorded along the third region length. Heat transfer promotion due to the buoyant forces effects was found of the same order of magnitude for both bottom and side heating cases, where Nusselt number increases to about 3 times of the corresponding classical forced convection value.

The present results were intended to be useful for solar field design purposes, especially when considering the solarenergy stored in the field soil as a booster source.

**Key Words** Heat transfer, Solar water desalination plants, Laminar flow, Free-forced combined convection, Asymmetric heating, Thermal entrance region, Flow visualization, pH-indicator, Flow stability, Solar fields.

## 1. 緒 言

管内の熱的助走区間における層流強制対流熱伝達については、Graetz や Kays による解析的研究が広く知られているが、浮力の効果が無視できない混合流の熱的助走区間については、工業的な重要性にもかかわらず、伝熱特性および流れの安定性の解明が未だ十分とは云えない状態にある。本研究は、前報<sup>1)</sup>に述べた "Solar field"<sup>2)</sup>への応用を対象としており、矩形ダクトが非対称加熱を受ける熱的助走区間について、自然対流と強制対流が共存する混合流の系の流動状態と熱伝達を基礎的な条件のもとで実験的に明らかにすることを目的としている。

前報で対象とした、大規模矩形予熱管が上壁面からだけ太陽日射を受けるときには自然対流の影響は小さく、管内においては簡単な強制対流だけが作用する熱伝達の系と考えることができた。しかし、実際に砂漠

あるいは乾燥地域に設置される海水からの真水製造のための予熱管においては、側面が日射を受ける場合、あるいは日没後周囲の砂に蓄熱された熱が底面から流入する場合、上面と側面が同時に日射加熱される場合などが想定され、これらの場合は上述のような混合流の系と考えられる。したがって、本研究では、これらの系の基礎となる、矩形ダクトが一つの側面あるいは底面から一様な加熱を受けるときの、内部を流れる水の浮力効果によりダクト内部の流動状態が加熱強度および管内平均速度によりどのような変化を受けるもの

\* 東京工業大学工学部機械工学科 大学院生  
Tokyo Institute of Technology Mechanical Engineering Department Graduate student

\*\* " ibid " Associate Pr.

\*\*\* " ibid " 助手 Assistant

\*\*\*\* " ibid " 教授 Professor

か、あるいはその結果として、熱伝達率の大きさにどのような変化がもたらされるものかということについて基礎的な知見を得るために実験的検討を行う。

これまで、水平な円管内における混合流の研究が多く行われてきた<sup>3), 4)</sup>が、矩形ダクト内の熱的助走区間中の混合流熱伝達についてはほとんど注目されなかつた。さらに、これらの問題に関する研究では、低プランタル数流体である空気を用いた等温条件の平行平板間流れを扱っているものが多い<sup>5), 8)</sup>。最近、Wang ら<sup>9)</sup>は、底面から一様熱流束を受ける水平開水路内の混合流に関する研究を行った。また Cheng ら<sup>10), 11)</sup>は、プランタル数の大きな流体について、全面が一様な熱流束を受ける条件のもとで解析を行っている。黒崎・佐藤<sup>12)</sup>は、一つの側壁だけが一様加熱を受け他の3面は断熱されている非対称加熱矩形ダクト内の層流熱伝達について、作動流体として空気を想定したときの自然対流を考慮した解析を行った。

一方、ここ20年ほどの間、層流熱的不安定問題が多く研究者の注目を集め、例えば Haaland・Sparrow<sup>13)</sup> および Chen・Mucoglu<sup>14)</sup> らにより研究されているが、本研究の対象とする非対称加熱を受ける矩形管内における水の混合流熱伝達については、内部の流动様式あるいは熱伝達などに関して未知な点が多く、興味深い問題を含んでいる。

以上の点を考慮して、本研究では以下の検討を行う。

(1) アスペクト比1.0(30mm×30mm)の流れの可視化および伝熱測定を可能とした非対称加熱用の矩形ダクトを製作する。

(2) 電気化学的な液の着色法を利用することにより上記(1)のダクトにおける流动水の流れの可視化を行い、非対称加熱を受ける矩形ダクト内の自然対流と強制対流の共存する混合流のうち、特に流れの不安定な底面加熱の場合について種々の条件下での流动状態について明らかにする。

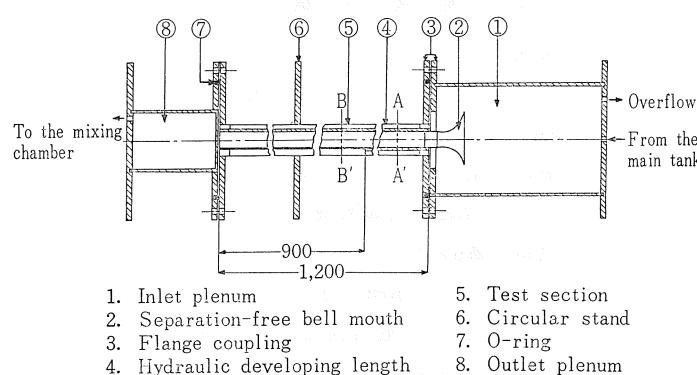


図1 実験装置全体

(3) 上記(1)に述べたアスペクト比1.0のダクトを使用して、底面あるいは一つの側面を加熱するときの、壁面温度分布およびダクト内流体の平均温度測定を行い種々の条件のもとでの熱伝達率分布を求める。

### 記号

$a$ : ダクト高さの半分 m

$b$ : ダクト幅の半分 m

$D$ : 水力直径 ( $=4ab/(a+b)$ ) m

$g$ : 重力の加速度 m/s<sup>2</sup>

$h$ : 热伝達率 W/(m<sup>2</sup>K)

$k$ : 热伝導率 W/(mK)

$q$ : 热流束 W/m<sup>2</sup>

$T$ : 温度 °C

$\Delta T$ : 壁温と流体平均温度との差 K

$U$ :  $x$ 方向平均流速 m/s

$x$ : 加熱開始位置からのダクト長手方向距離 m

$\alpha^*$ : アスペクト比 ( $=a/b$ )

$\beta$ : 体積膨張率 K<sup>-1</sup>

$\kappa$ : 温度伝導率 m<sup>2</sup>/s

$\mu$ : 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>

(無次元数)

$G_r$ : グラスホフ数 ( $=g\beta D^4 q/(\nu^2 k)$ )

$N_u$ : ヌセルト数 ( $=hD/k$ )

$P_r$ : プラントル数 ( $=\nu/\kappa$ )

$R_e$ : レイノルズ数 ( $=UD/\nu$ )

$x^*$ : 無次元長さ ( $=x/(DR_e P_r)$ )

## 2. 実験装置と方法

### 2.1 実験装置

実験には前報に用いた閉水ループの装置を改良して用いた。はじめに、実験用のダクトとして新たに流れの可視化が可能なように製作したアスペクト比1.0のものについて述べる。

図1に示すように、矩形ダクトは、アクリル製の速度助走部と、一面だけにステンレス鋼を、他の3面にアクリルを用いたテスト部とがなめらかにつながれた構造となっており、流れのはく離を生じさせないように入口部に厚さ0.2mmの黄銅製ベルマウスを取付けている。

図2(a), (b)は、助走部とテスト部の断面をそれぞれ示したものである(図1におけるA-A'およびB-B'に対応している)。

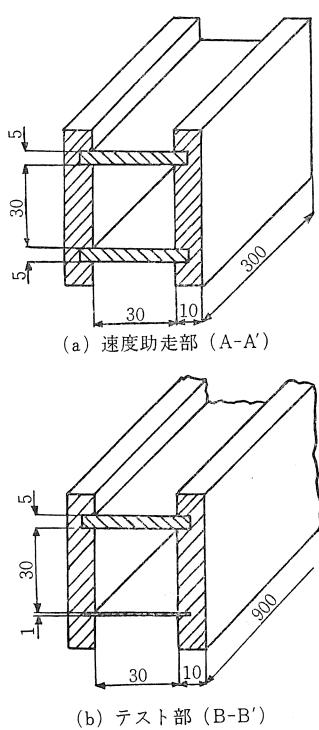


図2 矩形ダクト

ダクトの外側には、5つの等しい径の同心円盤がダクト軸に垂直に取り付けられておりダクトをこれらの円盤のまわりに回転させることにより水平面に対する加熱面の方向を任意に決められるようにした。テスト部のステンレス製壁の外側には軸方向4.5D(135 mm)の間隔で6ヶ所に線径0.1 mmの銅・コンスタンタン熱電対を軟ろう付けし、その上に薄い絶縁用フィルムをはさんで通電加熱用の0.15 mm Ni-Cr箔を密着させた。また、入口容器と主タンクの間、および出口後方の混合室における温度を銅・コンスタンタンシース熱電対により測定し、それぞれを入口および出口の平均温度とした。また、ダクト長方向の平均水温は、温度分布が直線的であると仮定し、出入口の温度から求めた。なお、加熱壁に比較的薄いステンレス鋼を採用したのは、管壁による熱伝導の影響を低く押さえ、かつダクト内部の流れを乱すことなく容易な壁温の測定を可能とするためである。

## 2.2 流れの可視化法

ダクト内部の流动状況を詳細に知るため、本研究の対象とするゆるやかな流れに対して有効な Baker<sup>15)</sup>の行った方法と類似の電気化学的可視化法を採用した。本方法では、チモールブルー( $C_{27}H_{30}O_5S$ )を反応指示薬として使った。同水溶液はpHが8より小さいときにはだいだい色、8より大きいときには青色を示す。

本研究に使用した液の製法について以下に簡単に述べる。

(1) 0.005重量パーセントのチモールブルーを水に添加する。このとき溶液はだいだい色を示す。

(2) 約0.0125重量パーセントの1N-NaOHを添加しながら滴定を行いpHを8にする。このとき、溶液は青に変色する。

(3) さらに、約0.054重量パーセントの塩酸を加え、青色からだいだい色に戻し、この状態の水溶液を実験に使用する。この溶液中の二つの電極に加電すると、Bakerの研究に示されたごとく<sup>15)</sup>、負の電極において流れによく追従する青色の変色反応が起る。著者らは上記の周知の染色法を本実験条件に適合するよう検討した結果、観察が容易で、かつ化学物質の混合割合が比較的少ない表1の組成を得た。

表1 可視化用液体の組成

item	weight ratio or quantity
Thymol-blue	0.005%
1N-NaOH	0.0125%
1N-HCl	0.054%
D-C voltage	10-15 volt
Average velocity	0.001-0.01 m/s

本実験の電極には、ダクト加熱開始点直前（速度助走部の後半部）およびダクト終点付近（加熱部長さ約29Dに対して25Dの位置）に張った線径0.025 mmの2本の白金線を用いた。各線は、ダクト中心軸と垂直かつ底面に平行に張られている。流れの観察は主に、加熱開始点直前の白金電極から定常的に発色させ、この着色液の流れ方向への移動あるいは変化の様子を追うことにより行った。なお、25Dの位置に電極を設けたのは、後述するように、ダクト後半部で特に不安定な流れが生じやすく、この部分の流动状態に関する詳細な観測を行うためである。流れの観察結果の記録には、写真撮影とビデオ収録の両者を使い分けた。

## 2.3 実験手順

実験は以下に示す手順で行った。

(1) はじめに、非加熱状態において出口バルブの調節により、ほぼ所定の流量を実現しておく。なお、流量の測定には、ばねばかりを用いる。

(2) 所定の電気加熱を行った状態のもとで、さらに流量の微調整を行い、レイノルズ数を設定値に保つ。

(3) 所定の加熱速度、レイノルズ数のもとに系が十分に安定し、定常状態が実現されるまで待った後に、伝熱面温度分布の測定を行う。

(4) さらに、前述の電気化学的方法により、白

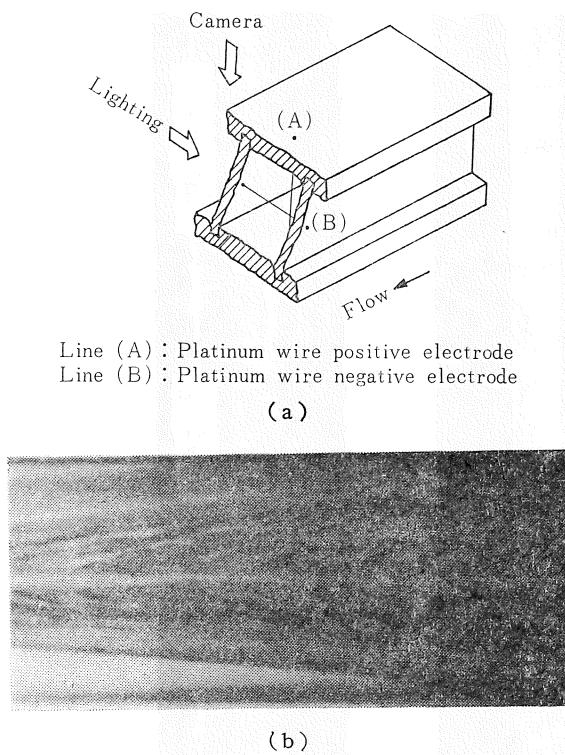


図3 非加熱時の層流流れの確認

金電極に通電することにより着色液を生成させ、その発色液の流れの様子を写真撮影あるいはビデオ撮影によって記録する。

### 3. 結果および考察

#### 3. 1 ダクト内層流流れの確認

ダクト内の加熱開始部において流体が完全に発達した層流状態に達していることを確認する必要がある。そのため、伝熱面を加熱しない状態で、図3(a)に示す水平な白金線にステップ状電圧を一定の時間間隔でくり返し入力し、上方から発色液の移動の様子を撮影した。同図(b)は、一例としてレイノルズ数が40ときの撮影結果を示したものである。乱れの全くない放物線状の速度分布が実現されていることが確認される。

#### 3. 2 流動状態の区分

ビデオ収録装置による連続記録および瞬間写真撮影を利用して、アスペクト比1.0のダクト内混合流の流動状態の観察を行った。各条件における写真撮影結果を示す前に、各種の底面加熱条件における観察に基づいた、ダクト内流動状態の統一的な模式図を図4(a)に示す。同図に示したように、本測定の条件においては、流れ方向に三つの領域に区分できる。すなわち、加熱開始位置直後には、ほとんど浮力の影響が現れな

い build-up region(第1の領域)が見られる。次に waving region(第2の領域)では、着色液はねじれたテープ状の形から数個の振巾の異なる枝波に分かれ、互いに交差しながら下流へ移動する。なお、第1および第2の領域では流れに時間的な変動は生じない。最後に、第3の最下流領域の turbulent regionに入ると、流れに複雑なゆっくりとした乱れが生じ、これらの乱れがダクト出口に向って上下方向に揺動する。この様に第3の領域では、流れは比較的不規則な周期性を伴なう。

なお、境界条件は異なるが、以上述べた現象は、Aiba-Seki<sup>16)</sup>により報告されているものと定性的に一致している。

図4(b)の(1)～(4)の写真は、全ダクト長範囲(0～29D)の撮影結果を示したものである。表2に示したように、レイノルズ数Reが50と100の2通り、熱流束qが0.218 kW/m<sup>2</sup>と0.872 kW/m<sup>2</sup>の2通りの計4通りの条件について示した。流れの可視化の明瞭ないくつかの条件について図中に上記図4(a)と同様の領域区分を記入しておいたが、これらよりReが大きくかつqが小さくなるほど第1および第2の領域が長くなっている様子がわかる。

次に、図4(c)の(1)～(3)の写真は25Dの位置に設置した白金線電極から発色させ、ダクト後端近くにおける流れの様子の時間変化を観測した結果である。表2に示したように、同図(1)は10 s、(2)、(3)は5 sの時間間隔で撮影したもので、これらの写真から上記の第3の領域、すなわち turbulent regionにおいては、流れが時間に依存して変化することがわかる。なお、図4(c)(1)の写真は、waving regionと類似して見えるが、時間的な変化を伴う点で本質的

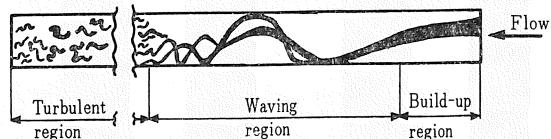
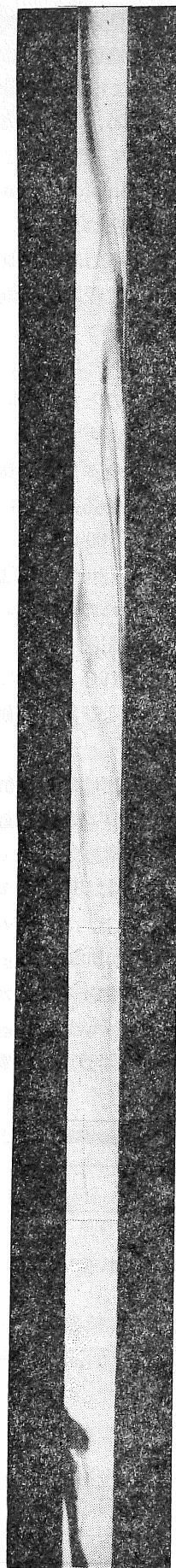


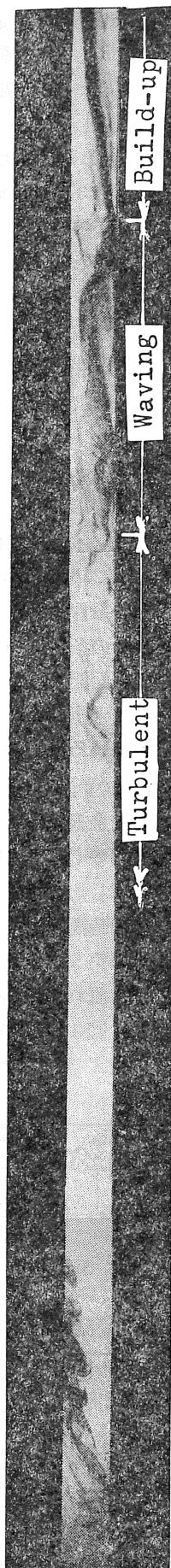
図4(a) 矩形ダクト内混合流の流動状態の模式図

表2 流れの可視化における実験条件

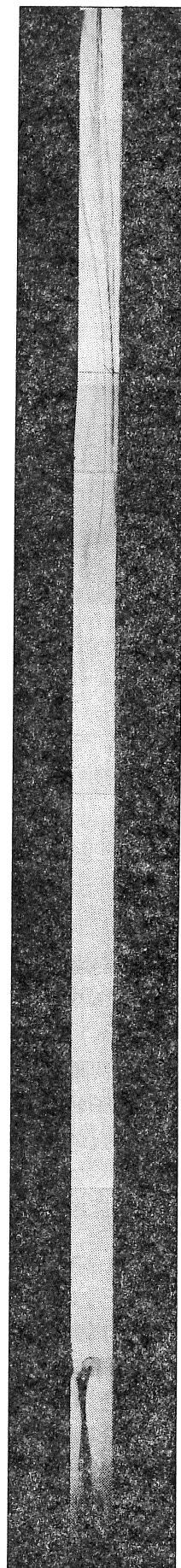
Number of figure	Re	Gr/10 <sup>5</sup>	Time interval (s)
4(b)	(1)	50	4.03
	(2)	50	16.13
	(3)	100	4.03
	(4)	100	16.13
4(c)	(1)	100	10
	(2)	100	5
	(3)	50	5



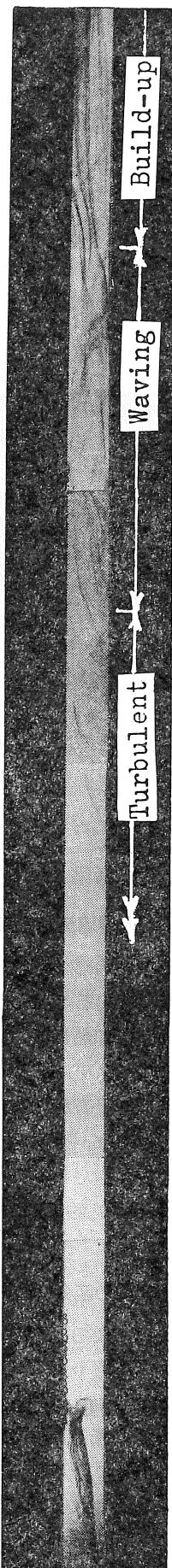
( 1 )



( 2 )



( 3 )



( 4 )

図 4 ( b ) 矩形ダクト内混合流の流動の様子

に異なっている。また、 $R_e$  が小さく  $q$  が大きなほど激しい変動が生じている。

以上述べてきたような底面加熱の場合には、加熱壁にろう付けされた熱電対の示度から比較的不規則な周期性をもった加熱壁の温度変動が測定されることがわかった。なお、例えば、図4(c)の(1)のような流れの変動の小さな場合には、ステンレス壁の熱容量などのためと考えられるが、壁温変動はほとんど検出されなかった。図5は、 $R_e=150$ 、 $q=1.55 \text{ kW/m}^2$  のときの変動の様子を例示したものであり、たて軸は熱電対出力、横軸は時間を表している。また同図中に記入し

たように、測定位置は  $x/D = 21, 24, 27$  の 3 点である。このように、第 3 の領域における壁温変動は、比較的大きな周期の変動と、さらに小さな変動成分が加わったものである。前に述べた流れの観察の結果より、これらの温度変動周期および振幅の大きさは、対流列の通過による流れの揺動およびその強度に依存するものと考えることができる。

また、片方の側壁だけを加熱した場合にも流動状態はほぼ類似のものとなるが、本測定の範囲では上述の壁温変動は測定されなかった。

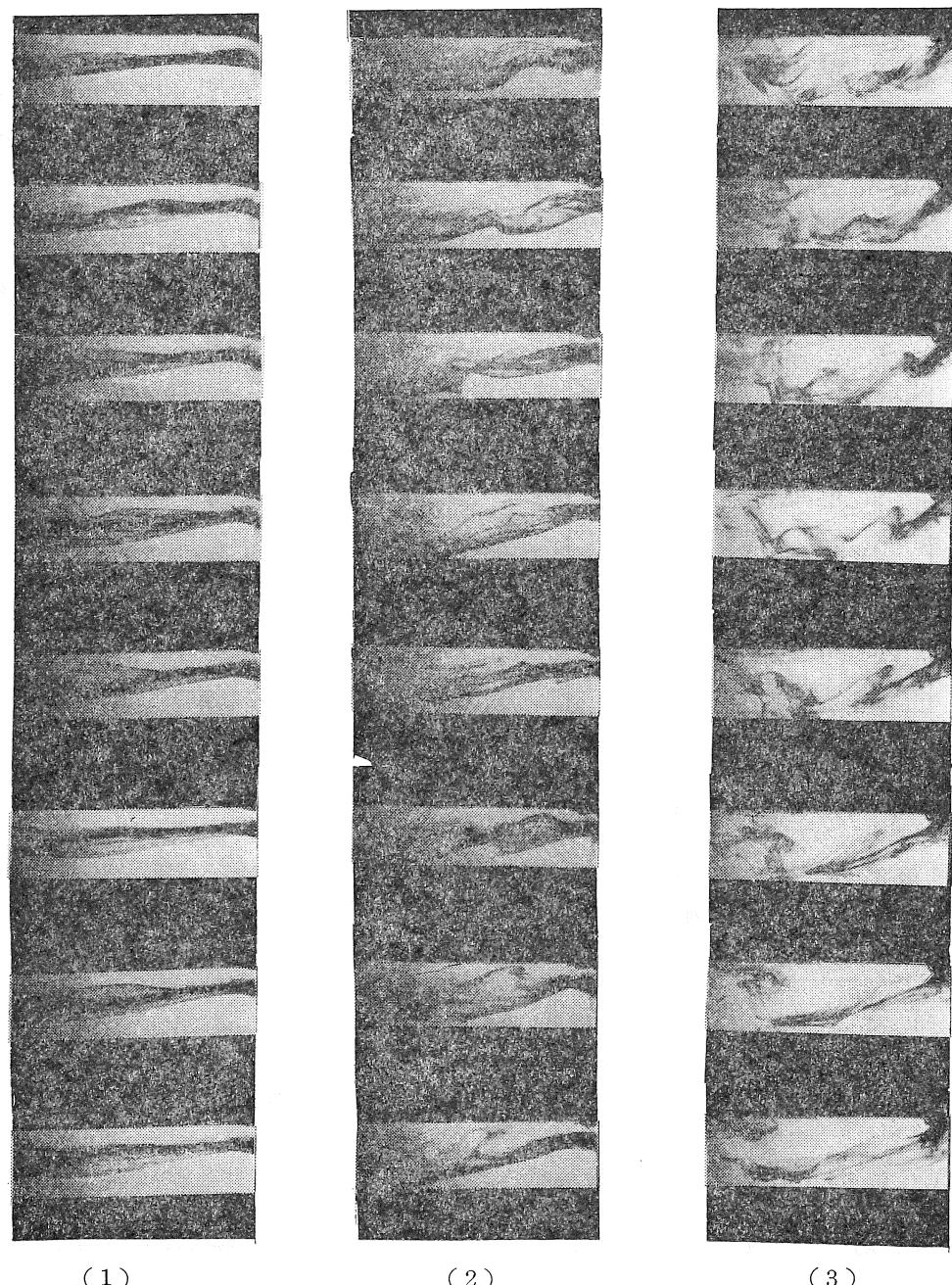


図 4(c) turbulent region における流れの時間変化の様子

### 3.3 热伝達率の測定結果

図6(a) (b)にアスペクト比1.0のときの無次元長さ $x^*$ におけるスセルト数 $N_u$ の分布を示した。なお、壁温の変動する領域では、その時間平均値を用いて $N_u$ を計算した。同図(a)は側壁だけを、また(b)は底面だけをそれぞれ加熱した場合の結果である。表3(a) (b)に測定条件およびそれから定まる無次元数の値を示しておく。ここで、表3中の無次元パラメータ、 $Gr/Re^{2.5}$ の値は、対象としている系における自然対流と強制対流の影響の比を表しており(森による文献<sup>17)</sup>参照)本測定ではこれらの値は1.0前後であり、自然対流と強制対流の影響のほぼ同等な範囲の測定条件であると考えられる。前報に示した強制対流(上壁面だけの加熱)の系では熱的助走区間内では $x^*$ に対する $N_u$ の減少率が非常に大きかった。それに対して図6(a)の底面加熱の場合には、 $N_u$ は $x^*$ の増加とともにないwaving region始端付近で急激に高まり、その後だいに減少する。また図6(b)の側面加

熱の場合には、 $N_u$ は $x^*$ の増加とともに、はじめゆるやかに増加し極大値に達した後減少する傾向を示す。さらに、 $N_u$ は、本測定条件においては前報の上方加熱の場合の約3倍程度の値を示しており、自然対流の影響の加わることによる伝熱の促進がみられる。

## 4. 結 言

底面あるいは一つの側面から非対称一様加熱を受ける矩形ダクト内の自然・強制混合対流について、熱的助走区間における流れの観察および伝熱測定を水を作動流体に用いて行い、以下のことを明らかにした。

(1) 電気化学的な着色法を利用することにより、底面加熱を受けるアスペクト比1.0の矩形ダクト内の流動状態の可視化を行い、ダクト流れ方向に3つの領域区分ができる、および第3の領域において流れおよび加熱壁温に周期変動性がみられることを示した。

(2) 上記(1)に用いたアスペクト比1.0のダクトを使い、底面加熱あるいは一方の側面加熱の場合の熱

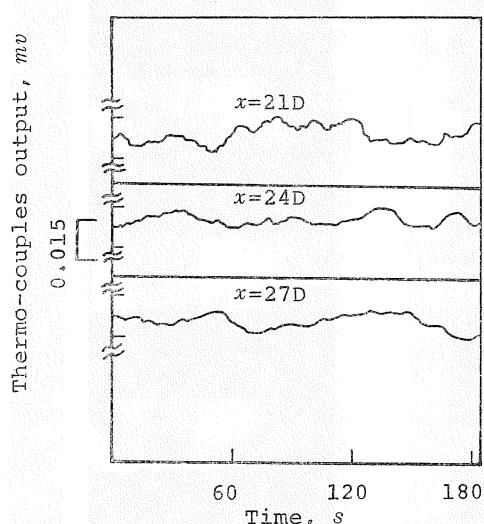


図5 turbulent regionにおける加熱壁温の変動例

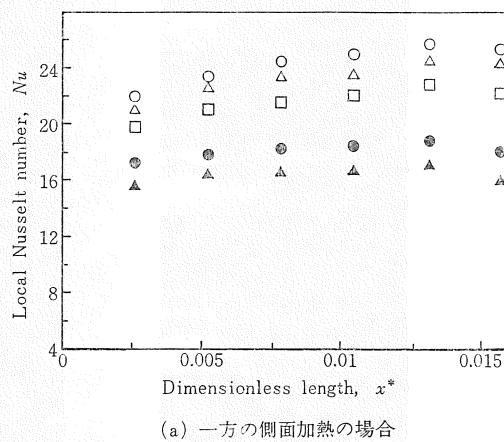
表3 実験条件

(a) 一方の側面加熱の場合

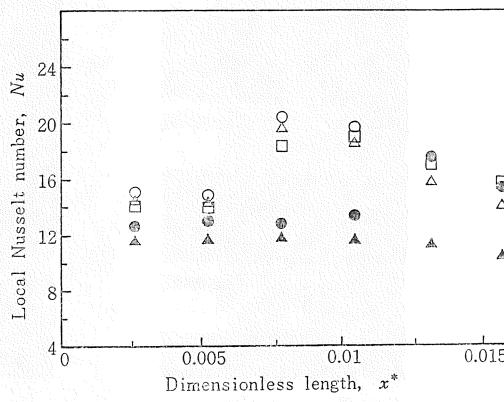
Symbol	$Gr \times 10^{-5}$	$Gr/Re^{2.5}$	$q$ (W/m <sup>2</sup> )
○	21.383	3.780	1321.0
△	17.747	3.137	1102.0
□	12.952	2.289	811.3
●	6.115	1.081	385.9
▲	3.645	0.644	231.8

(b) 底面加熱の場合

Symbol	$Gr \times 10^{-5}$	$Gr/Re^{2.5}$	$p$ (W/m <sup>2</sup> )
○	20.102	3.554	1182.0
△	18.780	3.320	1115.0
□	16.178	2.860	957.2
●	6.160	1.089	385.9
▲	2.294	0.406	148.3



(a) 一方の側面加熱の場合



(b) 底面加熱の場合

図6 矩形ダクト内混合流のスセルト数分布

伝達率測定を行った。この結果、前報の上面加熱と傾向および値が異なり、熱伝達率はダクト内部の流れのモードに依存して変化することがわかった。

おわりに、本実験に御協力を頂いた東京工業大学大学院生 服部圭輔君に謝意を表す。

### 参考文献

- 1) ムーサ, 斎藤, 宇高, 片山, 太陽エネルギー, 10-3 (1984) 37.
- 2) Rajvanshi, A.K., Solar Energy, 23 (1980) 551.
- 3) Yousef, W.W. and Tarasuk, J.D., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 104 (1982) 145.
- 4) Morcos, S.M., and Bergles, A.E., ibid, 97 (1975) 212.
- 5) Akiyama, M., Hwang, G.J. and Cheng, K.C., ibid 93 (1971) 335.
- 6) Ostrach, S. and Kamotani, Y., ibid (1975) 220.
- 7) Hwang, G.J., and Cheng-Liung Liu, The Canadian J. Chem. Engng., 54 (1976) 521.
- 8) Kamotani, Y. and Ostrach, S., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 98 (1976) 62.
- 9) Wang, G.S., Incropera, F.P. and Viskantha, R., ibid, 105 (1983) 817.
- 10) Cheng, K.C. and Hwang, G.J., ibid, 91 (1969) 59.
- 11) Cheng, K.C., Hong, S.W. and Hwang, G.J., Int. J. Heat Mass Transfer, 15 (1972) 1819.
- 12) 黒崎・佐藤, 日本機械学会講演論文集, No. 820-17 (1982) 12.
- 13) Haaland, S.E., and Sparrow, E.M., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 95 (1973) 405.
- 14) Chen, T.S., and Mucoglu, A., Int. J. Heat Mass Transfer, 22 (1979) 185.
- 15) Baker, D.J., J. Fluid Mech., 26 (1966) 573.
- 16) Aiba, S. and Seki, N., Int. J. Heat Mass Transfer, 19 (1976) 1075.
- 17) 内田, 一色, 森, 植田, 甲藤, 熱伝達特論, 裳華房 (1964) 85.

(昭和59年8月20日 原稿受理)

### — 海外情報 ① —

#### パキスタンの太陽エネルギー開発計画

306-67608 069.32.0

Ind. Trav. Outr.-m. 84-8 p.466

政府は83/84年度の第6次計画の枠内で太陽エネルギーの開発に12億ルピーを投資することになった。これはまだ電気の通じていない425の村落を電化するため、西ドイツ、日本などの企業に協力を求めており、日本は辺ぴな村落のための太陽熱設備の購入に2億4,000万円を援助した。また西ドイツのNachrichten für Aussenhandel紙によると、ニュージャージーのChronar社とラホールのSolar Utility Network社は1MWの出力の太陽光発電設備のために1,000万ドルを投資する協定を結んだ。

#### インドで再生可能エネルギー村の実験

20年前は不毛の地であったデリー郊外の20エーカーに及ぶ土地が、現在では2,000本の樹木が茂り、大量の穀物を生み出す農場に生れ変わっている。

この冒険的農場は、創立者J.C.カプールにちなんでカプール・ソーラー農場と呼ばれており、再生可能

エネルギー利用システムの実験農場として、数億インド地方民の将来の夢が託されている。

カプール・システムの主要機器は、バイオガス変換装置（動植物や人間の廃棄物をメタンガスに変換し、燃焼させて調理、照明、給湯用に供給する）、平板形太陽熱温水システム、発電用の太陽電池である。

バイオガス設備で、メタンを効率よく生産するには、適正な温度が必要である。臨界温度より低くなると太陽熱利用の温水を自動的に熱交換器に供給し、材料の円滑な消化（変質）プロセスを維持させる。このインター・コネクションにより、ソーラー/バイオガス複合設備は、年間を通じて殆んど全天候形エネルギー供給を続けることができる。

カプール農場では経済的理由で、自動制御とコミュニティ規模のシステムが最適とされている。この実験プロジェクトでは、15~20人のエネルギー需要をまかなっており、インドの多くの地域や全世界の開発途上国に広がっている厳しい森林破壊防止の見本として見守られている。バイオガス設備から出るスラリーは、窒素分に富み、土壤を改良し農業生産力アップに役立っている。（Solar Age, July 1984, p.9）

（注）Solar Ageは米国太陽エネルギー学会発行の月刊誌です。講読ご希望の方は事務局へお問い合わせください。見本誌ご希望の方は、200円切手同封で、事務局へお申込みください。