九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

鉛直平行平板群から空気への自然対流熱伝達 : 模擬パッケージ搭載の影響

藤井, 丕夫
九州大学機能物質科学研究所

儀間, 悟
九州大学大学院総合理工学研究科

富村, 寿夫
九州大学機能物質科学研究所

張, 興
九州大学機能物質科学研究所

https://doi.org/10.15017/6608

出版情報：九州大学機能物質科学研究所報告. 6 (1), pp.17-24, 1992-11-30. 九州大学機能物質科学研究所
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

機能物質科学研究所
報告 第6巻 第1号
pp. 17 ～ 24 (1992)

鉛直平行平板群から空気への自然対流熱伝達（模擬パッケージ搭載の影響）

藤井丕夫・儀間　悟*・富村寿夫・張　興

Natural Convection Heat Transfer from Vertical Parallel Plates to Air (Effects of Model Packages)

Motoo FUJII, Satoru GIMA, Toshio TOMIMURA, and Xing ZHANG

Natural convection heat transfer to air from the array of vertical parallel plane plates and/or boards with model packages has been studied experimentally. The local Nusselt numbers for both cases are obtained and compared each other and with the correlation proposed by Miyatake - Fujii for vertical parallel plane plates. The induced flow rate between the plates is estimated from the measured velocity profiles. The effects of package protrusions on the heat transfer and induced flow rate are discussed.

1．緒　言

電子機器の高性能化とともに機器の発熱密度が増加し，その冷却技術の向上が重要な課題となっている。機器の自然対流による冷却は，冷却能力が小さいにもかかわらず，信頼性が高い，騒音がない等の点から，将来の重要な冷却技術となることが期待されている。

このような状況のもとで，平行平板間の自然対流熱伝達に関する研究は，電子機器の自然冷却に本質的に関わる課題として注目されている。この問題に関して，従来より数多くの研究が行われている。例えば，垂直平行平板間の層流自然対流熱伝達に関しては，Bodoia - 0sterle[1], Aungら[2], 宮武－藤井[3], 相原[4]の報告がある。さらに，Bar - Cohen - Rohsenow[5]は最適平板間隔について検討しており，儀間ら[6]は，平行平板群に関する実験的研究を行っている。

受理日　平成4年6月30日
*　九州大学大学院総合理工学研究科

IC パッケージを実装した基板の熱伝達特性をより正確に把握するため，熱源の分散や突起（高さ）を考慮した研究結果も報告されている。Davalath ら[7]は，基板とパッケージ内の熱伝導を考慮した層流強制対流，富村－藤井[8),9)]は厚みの無い分散熱源を有する平行平板間の層流共存対流に関して解析を行っている。また，中山－広岡[10]，藤井－富村[11]，儀間ら[12]は，パッケージモデルを用いた自然対流熱伝達に関する実験あるいは解析を行っている。しかし，パッケージの突起が熱伝達におよぼす影響については未だ不明な点が多い。

本報は，鉛直平行平板群からの自然対流熱伝達に関する実験を行った結果である。電子機器などで実際に使用されているものと同形の模擬パッケージを多数搭載した基板群の場合と箔状ヒータを接着した平滑な平板群の場合について温度分布および速度分布の測定を行い，突起状のパッケージが平行平板群の熱伝達におよぼす影響を明らかにする。

使 用 記 号

A	：平板面積
b	：平板間隔
Gr^*	：修正グラスホフ数，式（2）
Gr_x^*	：修正グラスホフ数，式（4）
g	：重力加速度
l	：平板高さ
Nu_{loc}	：局所ヌセルト数，式（1）
Nu_{loc}^*	：局所ヌセルト数，式（3）
Pr	：プラントル数
Q	：平板1枚当たりの発熱量
q_w	：熱流束，式（5）
T_w	：表面温度
T_∞	：周囲温度
V	：流速
V_m	：平均流速
x	：平板に平行な空間座標
y	：平板に直角な空間座標
β	：体膨張係数
λ	：熱伝導率
ν	：動粘性係数
Φ	：無次元パラメータ，式（2）

2．実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。箔状ヒータを接着した平板あるいはパッケージを搭載した平板からなる5枚の平行平板群は，高さ460㎜，幅400㎜，奥行き350㎜のアクリルの囲い（上・下部は開放）のほぼ中央部に鉛直に設置されている。なお，平行平板群の側面はアクリル板で塞がれている。

図2にパッケージ搭載平板の詳細を示す。平板は高さ285㎜，幅237㎜，厚さ1.6㎜のガラスエポキシ製で，その片面に長さ19.3㎜，幅6.9㎜，高さ3.9㎜のパッケージを18行×8列で実装したものである。このパッケージは16ピンDIP型で，集積回路の代わりに抵抗（約110Ω／1チップ）とダイオードで構成されたチップをもつ模擬パッケージである。これに対し，もう一方の平板は，このパッケージ搭載平板と同じ寸法のガラスエポキシ板の片面に高さ285㎜，幅224㎜，厚さ0.2㎜の箔状ヒータを厚さ0.4㎜の両面テープで接着したものである。各平板についてパッケージあるいは箔状ヒータのある面を表面，反対の面を裏面と呼び，図1に示すように表面がアクリルの囲いと対向している平板から順にNo.1～No.5と番号づける。また，以下ではパッケージ搭載平板を基板，箔状ヒータを接着した平板を平滑平板と呼ぶ。

基板および平滑平板表面の温度測定点を，それぞれ，“○”印と“×”印で示した。温度測定には，素線径50μmのT型熱電対を用いた。また，自然対流による平板間の誘起流量を求めるために，No.2とNo.3平板の間の流路内の速度分布をLDV（後方散乱型）を用いて測定した。散乱粒子には蚊取線香の煙を使用した。平板群から約1m離れた位置にある内径100㎜，高さ300㎜の円筒容器内で発生させた煙は，内径15㎜

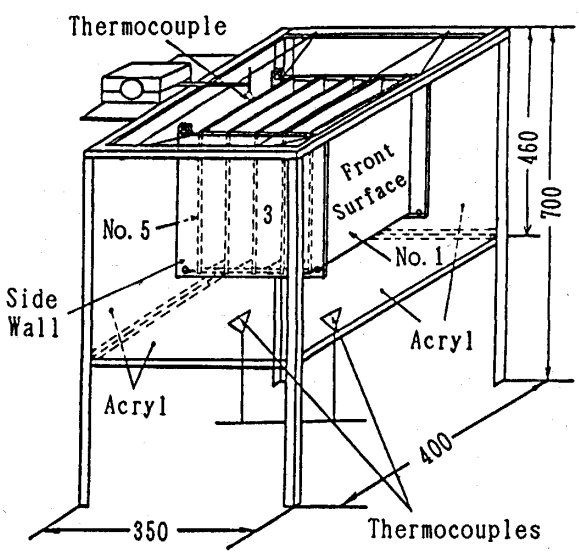


Fig.1 Experimental apparatus.

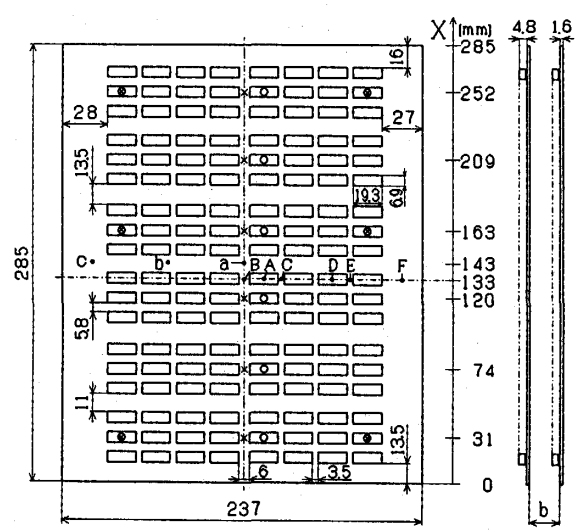


Fig.2 Detail of package board.

の導管内を通り，平板群の上流側から少流量で噴出する。その煙がレーザ光の交差部を通過するように煙の噴出口の位置を調整して測定を行った。なお，煙の初速度が平板間の速度分布に影響を与えないように，噴出口を平板群下端から十分上流側に離した。また，噴出口での煙の温度は周囲温度にほぼ等しい。測定位置は，基板の場合には図の“A～F”点，平滑平板の場合には“a～c”点である。

箔状ヒータあるいはパッケージへの電力供給は定電流電源により行った。本実験では，基板（一枚当たりのパッケージの総抵抗は約0.8Ω）に約2.7～4.1A，平滑平板（一枚当たりの抵抗は約110Ω）には約0.23～0.34Aの直流を流した。発熱量は電流と抵抗での電圧降下から求めた。

表1に実験条件を示す。平板間隔 b を9.7～34.7㎜まで4段階に変えた。図2右下に示すように，基板の場合の b は基板表面から対向板の基板裏面までの距離で定義した。表面温度と周囲温度の差が約20℃になるように，間隔 b に応じて平板一枚当たりの発熱量 Q を変えたが,各平板の発熱量は全て等しくした。

Table 1　Experimental condition

b [mm]	9.7	14.7	19.7	34.7
Q [W]	5.6	9.6	11.6	13.0
q_w [W/m²]	41.5	71.1	85.9	96.2

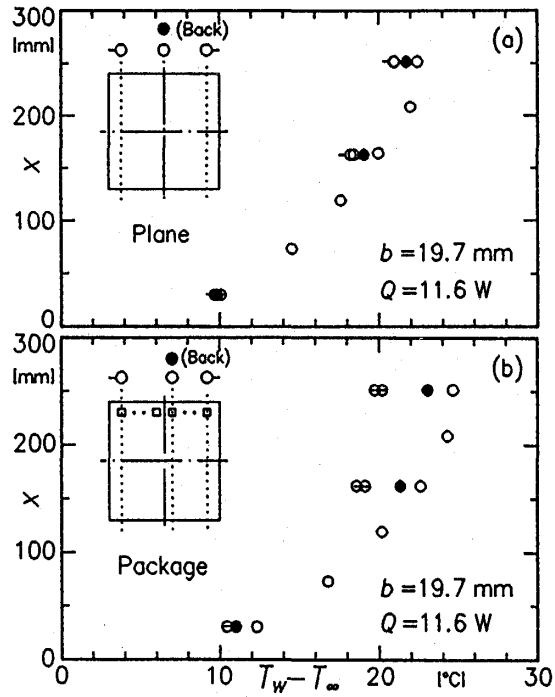


Fig.3　Temperature profiles of No.3 plane plate and package board.

3．結果と考察

3．1　温度分布および局所ヌセルト数分布

図3（a），（b）に b =19.7㎜の場合の平板群中央（No.3）にある平滑平板（Plane）と基板（Package）の温度分布を示す。横軸は表面温度と周囲温度の差で，縦軸は平板群入口からの距離である。平滑平板の場合，平板の中心線に沿う表裏の温度分布（○，●）はほとんど同じである。また，平板側面から約37㎜離れた平板両端での温度分布（–○，○–）は，中心線に沿う分布とほとんど変わらず，平板の幅方向に対してほぼ一様な分布になっている。基板の場合，基板の中心線に沿ったパッケージ表面（○）と基板裏面（●）の温度には，約1.5℃の差がある。また，基板両端のパッケージ表面温度（–○，○–）は，中心線に沿う分布より低くなっており，平滑平板の場合と傾向が異なる。この原因として，平滑平板および基板両端部の非発熱部の幅が，平滑平板では約7㎜であるのに対して基板ではその4倍の約27㎜となっており，この部分に熱量の一部が熱伝導で移動するためと考えられる。以下では，平滑平板および基板の中心線に沿う表面温度分布について整理した結果を示す。

図4（a），（b）に b=19.7㎜の場合のNo.1～No.5の平滑平板および基板の表面温度の測定結果を示す。いずれの場合も，平板群の内側にあるNo.2，3，4平板の温度分布（◐，○，◑）はほぼ等しく，外側のNo.1およびNo.5平板の分布（△，▽）に比べて高い。基板群の温度分布は，平滑平板群の分布より全体的に高い分布となっている。ここには示していないが，間隔 b が異なる場合も同様な傾向がみられ，平板群の温度は中央平板（No.3）を中心とした対称的な分布が得られている。

図5（a）～（d）に平滑平板群No.1～No.5の温

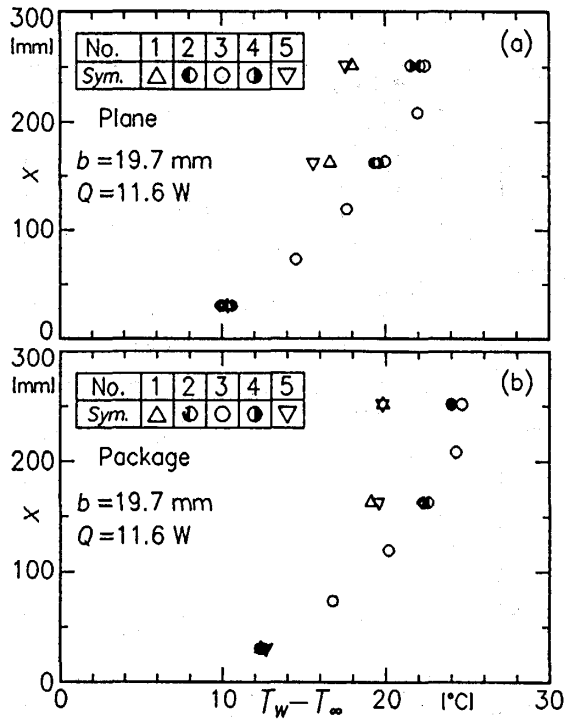


Fig.4 Temperature profiles of plane plates and package boards.

度分布を示す。図中の実線と破線は，それぞれ平行平板[3]と単一平板[13]の式（1），（3）から求めた温度分布である。

$$Nu_{loc} = \frac{q_w}{T_w - T_\infty} \cdot \frac{b}{\lambda}$$

$$= \frac{\Phi}{48^{1/2}}[1 - exp\ \{-2.84 \times 2^{3/4}\Phi^{-3/5}\}\ ] \qquad (1)$$

ここで，

$$\Phi = \frac{(b/x)\ Gr^*Pr}{[(b/l)\ Gr^*Pr]^{1/2}}, \quad Gr^* = \frac{g\beta q_w b^4}{\lambda \nu^2} \qquad (2)$$

$$Nu_{loc}{}^* = \frac{q_w}{T_w - T_\infty} \cdot \frac{x}{\lambda}$$

$$= 0.519\ (Gr_x{}^*Pr)^{1/5} \qquad (3)$$

ここで，

$$Gr_x{}^* = \frac{g\beta q_w x^4}{\lambda \nu^2} \qquad (4)$$

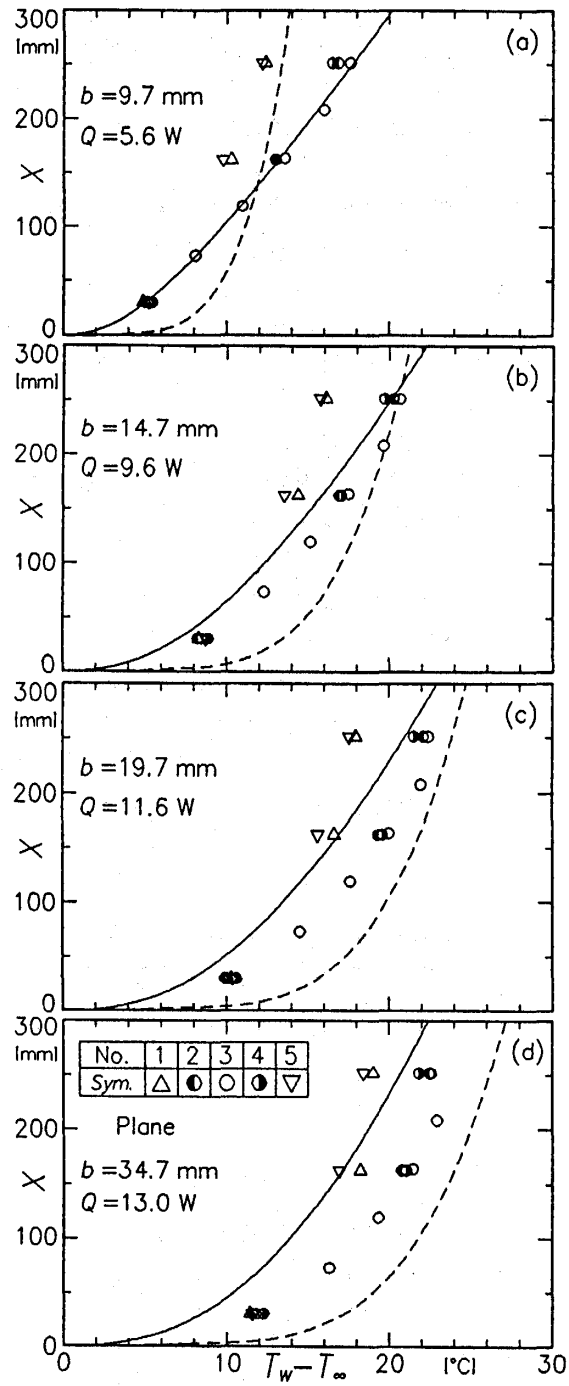


Fig.5 Temperature profiles of plane plates.

ここで，式（1），（3）の熱流束 q_w は，発熱量 Q が半々の割合で平板表裏に分布すると仮定し，次式より求めた。

$$q_w = \frac{Q}{2A} \qquad (5)$$

平板間隔がb=9.7㎜の場合，平板群中央のNo.3平板の温度分布（○）は実線で示される平行平板の分布に近い。No.3平板の温度分布は，間隔bが広くなるにつれて実線より高くなり，破線で示した単一平板の分布に近づく傾向がある。平板群の外側にあるNo.1およびNo.5平板は，単一平板の特性をもつと考えられるが，式（3）の分布とは大きく異なっている。これは，ふく射伝熱による周囲への放熱量が平板群の内側にある平板よりも大きいためと考えられる。

図6は平板群の中央平板（No.3）の場合について，平滑平板と基板の局所ヌセルト数 Nu_{loc} を比較したものである。図には宮武－藤井[3]の平滑平行平板に関する数値解にもとづく近似式（1）を実線で，また，その近似式の0.8～0.4倍となる値を2点鎖線で記入してある。測定値の整理に際して，平滑平板群および基板群のいずれの場合も，熱流束 q_w は式（5）により算出した。近似式（1）が$60<\Phi<6000$の範囲において，数値解に対して最大で約10%程度大きめの値を与える[3]ことを考慮すると，平滑平板の場合は数値解とほぼ一致しているといえる。一方，基板の Nu_{loc} は平滑平板の値より低く，間隔 b が狭くなるにつれてその差が大きくなる。平板のほぼ中央高さにおける，平滑平板に対する基板の Nu_{loc} の比を表2に示す。間隔が狭いb=9.7㎜ではこの値は0.55となり，平滑平板の場合に比べ，熱伝達の低下割合は40%以上になっている。この原因として，次節に示すように，平板間の流路内に突起状のパッケージが存在することにより流動抵抗が増加し，平板間の誘起流量が低下したためと考えられる。

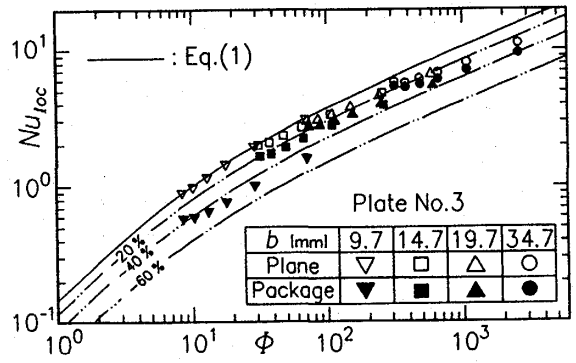


Fig.6 Local Nusselt number.

Table 2 Ratio of Nu_{loc} for package boards to that for plane plates

b [mm]	9.7	14.7	19.7	34.7
Ratio[-]	0.55	0.81	0.89	0.90

3．2　速度分布および誘起流量

図7はb=19.7㎜の場合の平滑平板間の“a～c”の位置における速度分布である。測定位置“a～c”は，平板のほぼ中央高さにある。横軸 y は流路に直角な方向の座標である。y=0㎜はNo.3平板の表面で，y=19.7㎜は対向板のNo.2平板の裏面である。各位置における測定値を記号で，またこれらを最小二乗法で近似した分布を実線で示す。さらにこの分布と間隔bを用いて算出した平均流速 V_m の値も記入してある（以下に示す基板の場合も同様）。測定位置“c”は平板側面から2㎝程度しか離れていないが，“a”での速度分布とほとんど

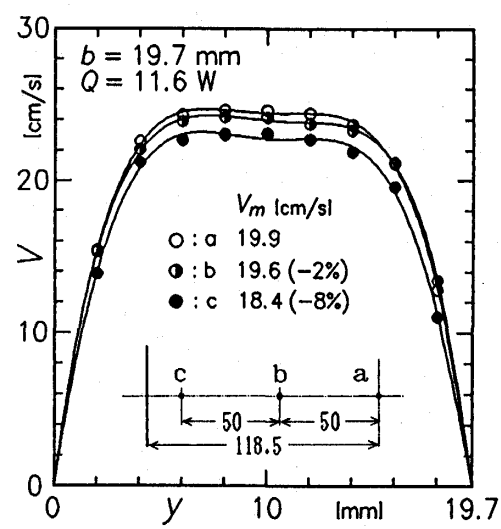


Fig.7 Velocity profiles between plates (plane plates).

変わらず，平均流速 V_m では約8%程度の差である。したがって，平滑平板の場合の速度分布は，図3（a）の温度分布の場合と同様，平板の幅方向に対してほぼ一様な分布となっており，2次元的な流れとなっている。

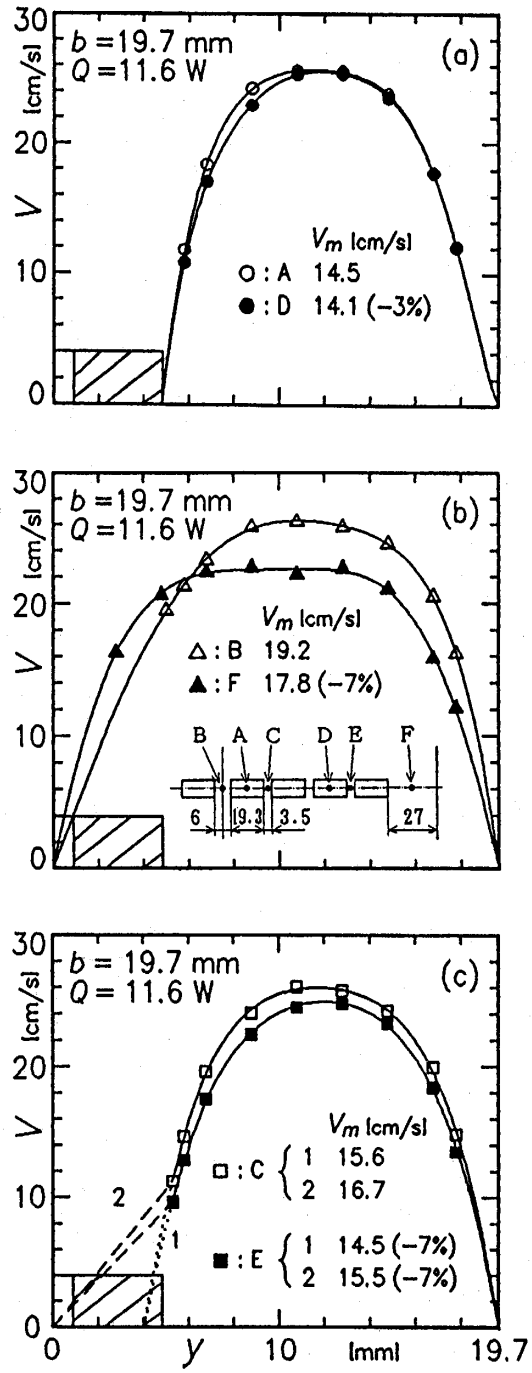
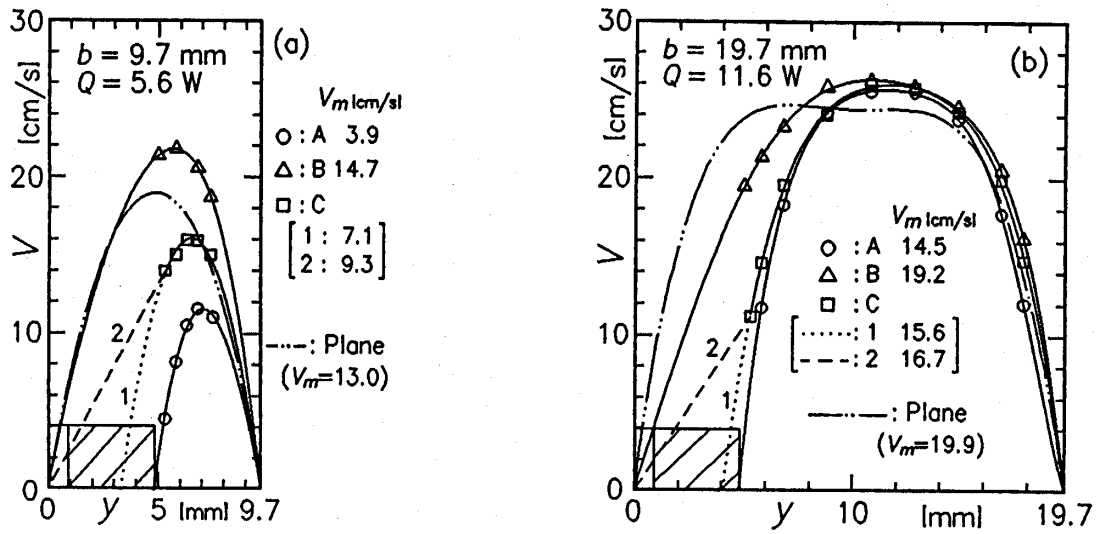


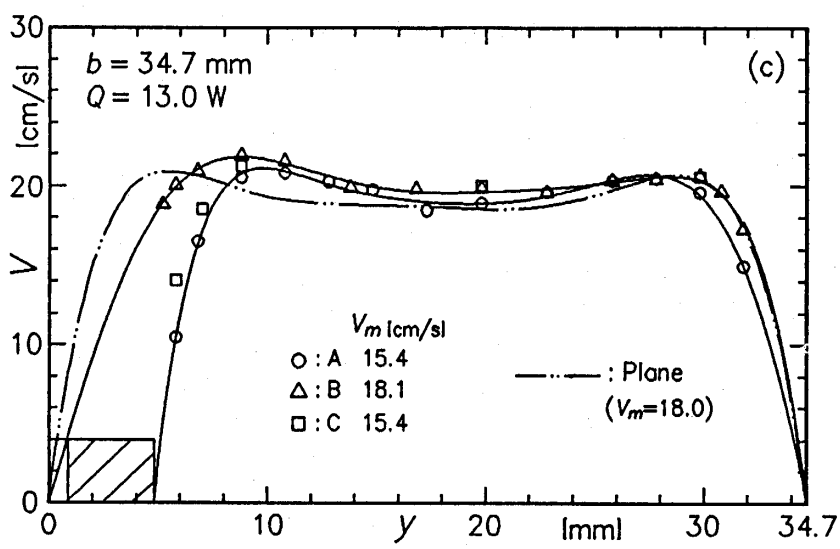
Fig.8 Velocity profiles between plates (package boards).

図8（a）～（c）にb=19.7㎜の場合の基板間の“A～F”の位置における速度分布を示す。図8（a）は，測定位置がパッケージの中央である“A”と“D”での速度分布であるがほぼ同じ分布となっている。図8（b）は，パッケージ間の間隔が比較的広い“B”と基板端部の“F”での分布である。“B”と“F”の分布には差があるが，平均流速でみると約7％程度の差である。図8（c）は，パッケージ間の間隔が狭い“C”と“E”の位置での分布であるが，ほぼ同じ分布となっている。測定位置“B”，“C”，“E”に関しては，レーザ光がパッケージにさえぎられるため，基板からパッケージ表面までの領域における流速は測定不可能である。図8（b）の位置“B”でのこの領域における速度分布は，測定値にy=0，19.7㎜で，V=0㎝／sの条件を加えて最小二乗近似した分布であるが，図8（c）の“C”と“E”での分布は次のようにして決めた。パッケージの領域における点線で示した分布“1”は測定値にy=19.7㎜で，V=0㎝／sの条件を加えて最小二乗法で近似し，その近似式をパッケージの領域で外挿したもの，破線の分布“2”はy≒5㎜の測定値から原点まで直線で近似したものである。この領域での実際の速度は，分布“1”と“2”の間にあると考えられる。以上，“A～F”までの6ヵ所の位置で測定を行った結果，“A”，“B”，“C”での速度分布は，それぞれ，“D”，“F”，“E”での分布あるいは平均流速にほぼ等しく，基板間の速度分布は大まかに3つのパターンに分けることができる。以下では，位置“A”，“B”，“C”での速度分布を対象とする。

図9（a）～（c）に間隔bと発熱量Qを変えた場合の基板群に関する位置“A”，“B”，“C”での速度分布を示す。比較のために平滑平板群の位置“a”での分布を2点鎖線で記入してある。前述のように，基板間の分布は3つのパターンに分かれている。特に“B”，“C”におけるパッケージ間での分布は大きく異なる。これは，パッケージ間の間隔が“C”では約3.5㎜であるのに対して“B”ではその約2倍の6㎜となっているため，その違いにより分布は異なっている。また，“C”での分布は，基板間隔bが広くなるにつれて“A”の分布に近くなる傾向がある。これは，bに対するパッケージ高さが相対的に小さくなるからである。2点鎖線で示した平滑平板群の場合の速度分布は，基板間のどの位置での分布とも異なっているが，平滑平板群でのV_mは基板の“B”の場合のV_mに近い。以上の3つのパターンに分類される速度分布を基板の幅方向にわたって積分し，基板間の誘起流量



(a)　b=9.7㎜ , Q=5.6W　　(b)　b=19.7㎜ , Q=11.6W



(c)　b=34.7㎜ , Q=13.0W

Fig.9　Velocity profiles between plates (package boards).

を求めた。

誘起流量の結果を表3に示す。表には宮武－藤井[3]の解析結果による流量（“－”は適用範囲外）および平滑平板群に対する基板群の誘起流量の比も記入してある。平滑平板群の b=9.7, 14.7㎜の場合の誘起流量は，解析結果に近い。一方，基板群で b=9.7㎜の場合，パッケージによる流動抵抗の増加により，平滑平板群の場合と比較して誘起流量が

Table 3 Comparison of induced flow rates

b [mm]		9.7	14.7	19.7	34.7
Flow rate [cm³/s]	Miyatake-Fujii[8]	306	686	−	−
	Plane	297	635	927	1478
	Package	162	459	739	1322
Ratio [-]		0.55	0.72	0.80	0.89

40%以上も低下している。

表2と表3を比較すると明らかなように，平滑平板群に対する基板群の局所ヌセルト数 Nu_{loc} の低下割合と誘起流量の低下割合の間には対応関係がある。このことは，基板群の Nu_{loc} の低下が誘起流量の低下によるものであることを示している。そして，基板間の誘起流量の低下割合が正しく評価できれば，基板群の Nu_{loc} は平滑平板についての宮武－藤井の近似式（1）を用いて推定できることも示している。

4．結　言

パッケージを多数搭載した基板群および箔状ヒータを接着した平滑平板群からの自然対流熱伝達に関する実験を行い，以下の結論を得た。

（1）　平滑平板群，基板群いずれの場合も平板群中央のNo.3平板の熱伝達が最も低く，平板間隔が狭くなるにつれて低下する。

（2）　平滑平板群の場合の温度分布および速度分布は，ほぼ2次元的な分布となる。

（3）　平滑平板群におけるNo.3平板の局所ヌセルト数および平板間の誘起流量は，宮武－藤井の解析結果とほぼ一致する。

（4）　基板間の速度分布は，パッケージの存在により平滑平板群の場合の分布とは異なる。

（5）　基板群の場合の局所ヌセルト数および誘起流量は，平滑平板の場合よりも低くなり，それらの低下割合はほぼ等しい。

（6）　基板間の誘起流量の低下割合が正しく評価できれば，基板群の Nu_{loc} は平滑平板についての宮武－藤井の近似式（1）を用いて推定できる。

おわりに，本研究をまとめるに際して，九州大学機能物質科学研究所・藤井哲教授に有益な御教示を頂いた。また，本研究所職員・濱野光司氏には実験装置の制作と実験に協力して頂いた。ここに記して謝意を表します。

文　献

1) Bodoia, R. A., and Osterle, J. F., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, **84**−1, (1962), 40.
2) Aung, W., Fletcher, L. S., and Sernas, V., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **15**, (1972), 2293.
3) 宮武・藤井，化学工学，**37**−8, (1973), 852.
4) 相原，東北大学高速力学研究所報告，**37**, (1976), 93.
5) Bar−Cohen, A. and Rohsenow, W. M., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, **106**−1, (1984), 116.
6) 儀間・松尾・藤井・富村，第28回日本伝熱シンポジウム講演論文集，(1991), 481.
7) Davalath, J. and Bayazitoglu, Y., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, **109**, (1987), 321.
8) 富村・藤井，九州大学機能物質科学研究所報告，**4**−1, (1990), 15.
9) 富村・藤井，機論，**57**−534, B (1991), 676.
10) 中山・広岡，第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集，(1986), 406.
11) 藤井・富村，九州大学機能物質科学研究所報告，**2**-2, (1988), 295.
12) 儀間・張・富村・藤井，可視化情報，11−Suppl., 2, (1991), 157.
13) 藤井，伝熱工学の進展　3，養賢堂，(1974)，1．