容器内の長方形断面水平加熱体からの
三次元的揺動自然対流の実験的研究*森 康夫^{*1}, 内 田 豊^{*1}
小 泉 博義^{*1}, 福 王 浩司^{*2}A Study of Three-dimensionally Oscillating Natural Convection over a
Heated Horizontal Rectangular Plate Installed in a ContainerYasuo MORI, Yutaka UCHIDA,
Hiroyoshi KOIZUMI and Koji FUKUO

The aim of this study is to clarify the existence and performance of a three-dimensionally oscillating natural convection of a standing wavetype over a horizontal heated plate of a rectangular cross section in an air container. First, by use of flow visualization and fluid temperature measurements, it was shown that the oscillation motion occurred under a certain specified condition. The main parameter which controls the wave length of the standing wave is the distance between the two side walls of the container supporting the heated plate. Second, the time-mean heat transfer coefficient of the upper surface of the heated plate was found to be about 26% higher than that without oscillation in the case of $Gr \approx 10^5$.

Key Words: Natural Convection, Confined Container, Three-dimensional Oscillation, Horizontal Heated Plate, Experimental Study

1. 緒 言

電子部品の冷却に自然対流を利用する方式は、冷却能力は強制対流や沸騰現象を用いる冷却法に比して小さいが、信頼性や騒音対策の面で優れている。また密閉容器内に設置された熱源によるこれまで知られていないような三次元的に揺動する自然対流の解明は、伝熱工学の基礎研究として重要な問題である。

本研究においてはまず電子部品きょう体として多用されている直方体容器内の空間に、加熱電子部品をモデル化した有限幅の水平加熱平板を熱源として設置した場合につき、従来の研究で仮定されている二次元ブルームが必ずしも起こらない場合があることを示す。次いで三次元で定在波動的な挙動を示す自然対流の発生ならびにその機構を明らかにし、かつこの揺動による水平加熱平板上面の伝熱特性を明らかにする。

本研究に関連した従来の主な報告としては、く形断面を有する容器内の水平な加熱細線よりブルームの揺動^{(1)~(4)}、内面加熱の二重円筒⁽⁵⁾および二重球⁽⁶⁾間の自

然対流の揺動などが存在している。以上の研究においては、いずれも水平な方向に伝ばする流れの存在が示唆されているが、その発生機構についての明確な説明はいまだ必ずしも完全になされているとはいえない。従来多くの場合ブルームは二次元的と考えられているのに対し、本研究におけるように熱源として水平加熱平板を用いた場合、加熱細線の場合より大きな振幅で発生する三次元的なブルームの揺動の発生機構とそのメカニズムは明らかにされていない。本研究では定在波動的挙動を有する三次元的揺動現象について実験的に検討する。

2. 記 号

b : 水平加熱平板の幅
 f : 密閉容器内の自然対流の揺動周波数
 g : 重力加速度
 Gr : グラスホフ数 $= g\beta\Delta T b^3/\nu^2$
 h : 容器底面からの加熱平板上面の高さ
 H : 容器の鉛直方向高さ
 L : 加熱平板に鉛直方向の容器の側壁(側壁 I)間の間隔(図 1)
 Nu : ヌセルト数 $= ab/\lambda$
 T_h : 加熱平板の表面温度

* 平成元年 4 月 5 日 第 66 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 5 月 23 日。

^{*1} 正員、電気通信大学電気通信学部 (〒182 調布市調布ヶ丘 1-5-1)。

^{*2} 学生員、電気通信大学。

- T_c : 容器壁面の平均温度
 ΔT_{cf} : 定常状態での容器壁温測定点間の最大温度差
 T_f : 揺動時の流体の温度変動振幅
 ΔT : 代表温度差 $= T_h - T_c$
 W : x 方向に垂直な側壁(側壁II)間の間隔
 (x, y, z) : 座標系(図1)
 α : 加熱平板上面の熱伝達率
 β : 流体の体膨張率
 θ : 揺動する自然対流の位相
 λ : 流体の熱伝導率
 ν : 流体の動粘性係数

添 字

- : 空間的平均値

3. 実験装置および実験結果

作動流体を空気とし、図1に可視化の実験装置を示す。伝熱実験の装置の構造も同じである。まず図1中の L の区間につき着目し実験を実施した。水平加熱板からのブルームが乱流にならない $Gr \leq 10^5$ の領域を研究対象とするため、 $b=21.2$ mm と 50 mm の2種の幅の加熱平板を用いた。 $b=50$ mm の場合では加熱平板と容器壁温の温度差 ΔT は約 6°C 程度である。図1の水平加熱板の y 方向長さは 900 mm であるが、自然対流が起こる容器の寸法を変えるため側壁 I, II の位置は可変できるようにしてある。加熱平板は2枚の厚さ 5 mm の Cu 板の間に加熱用ニクロム線電気ヒータを挟んで厚さ 15 mm とし、加熱平板表面の y 方向の温度は測定区間 L の間で平板の平均温度の約 0.5% 以内となるようにした。密閉容器としては、主として流れの可視化を目的とした容器壁がアクリル製のものと、容器壁の壁温を一定化して ΔT = 一定の条件をより厳密に満足する伝熱特性測定用のブリキ製で壁を水冷可能とした容器の2種類を用いて実験を行った。なお、容器を設置してある実験室の空気の動き、温度変化による実験状態の変動を防ぎ、かつ流れの可視化を

行いやすくするため、容器の外側にこれを囲むように、高さ 1.8 m、水平寸法 1.2×1.2 m² で外面にふく射防護用アルミニウムはくを張ったフェルト布製暗室を設置した。

3・1 可視化による実験と実験結果 まず、容器の x - z 断面寸法 W, H および加熱平板幅 b とその設置高さ h による三次元揺動が起こる条件を見いだすため $W \times H = 200 \times 100$ mm², $b = 21.2$ mm, $h = 25$ mm, および $W \times H = 400 \times 200$ mm², $b = 50$ mm, $h = 35$ mm の2種類の装置を用いたが、対流パターンについての顕著な差はなかった。

また加熱平板により誘起される自然対流の可視化実験には図2に示したごとく加熱平板下面の下 12 mm で $x=0$ の位置に設けた 0.1 mm ϕ のニクロム線に流動パラフィン塗布し、このニクロム線に瞬間的に通電することにより発生するパラフィン蒸気をトレーサとした。加熱平板上方 35 mm の位置にハロゲンランプ光源よりの幅 10 mm のスリット光を水平方向より照射し、これを z (上方向から下に向けて) 方向上部に設置したビデオカメラにより撮影した。 $Gr = 5.0 \times 10^4$ の場合の結果を図3に示す。図3中の白い部分が定在波的揺動に基づくパラフィン蒸気の存在範囲を示し、黒く見える部分は加熱平板を示す。この場合は側壁の間隔 L を 220 mm より 100 mm まで変化させることにより、 $2/3L, L, 2L$ の y 方向波長を有する3種類の定在波的揺動が図3のように観測された。なお、定在波の波長は $Gr \leq 10^5$ の範囲では Gr の値によりほと

図2 流れの可視化法

図1 可視化用実験装置概略

図3 三次元的定在波パターン

んど変化せず、波長を決定する主なパラメータは L であることが判明した。

図4は図3(c)に示した定在波的揺動の場合で、波長が $2L$ である最も基本的な揺動パターンを理解しやすいように描いた流れの模式図である。図4中で点群をつけて表されている上昇ブルームは単に x - z 面内を周回しているのみでなく、 y 方向に三次元性を有している。

3・2 容器の拡大による揺動機構の解明 容器内の流れおよび温度場の詳細な測定を行い揺動機構を明らかにするため、 $W \times H = 400 \times 200 \text{ mm}^2$, $b = 50 \text{ mm}$, $h = 35 \text{ mm}$ の装置を用い、図3(c)に示される波長 $2L$ の三次元的揺動現象の発生機構の詳細な検討を行った。このため 0.1 mm ϕ の Cu-Co 熱電対による容器内温度場の測定と、容器外部のパラフィン蒸気発生装置からパラフィン蒸気を側壁を通して 4 mm ϕ のビニール管により観測すべき位置に導入し、局所的な流れの可視化を行った。これらの熱電対およびビニール管の挿入による流れへの影響は、上記の熱電対とは別に側壁より 5 mm 内側で加熱平板上 45 mm の位置に2個のモニタ用熱電対を設置してその出力より上述熱電対などの挿入の影響のないことを確認した。

$Gr = 6.1 \times 10^4$ の場合について、モニタ用熱電対によ

図4 容器内自然対流の立体模式図

図5 f および T_f と L の関係

る自然対流の揺動周波数 f と流体の揺動温度振幅 T_f の測定結果を図5に示す。波長 $2L$ の三次元的揺動に対しては、 $L = 220 \text{ mm}$ の場合が最も揺動が生じやすく $L \leq 140 \text{ mm}$ では揺動が生じないこと、および揺動周波数 f は揺動が生じている限り同一 Gr 数下では L を変化させてもほとんど変化しないことがわかる。なお、 f と ΔT の関係は容器寸法、加熱平板幅、加熱平板設置高さなどにより変化することは判明しているが、これらを総括し一意的な関係を導出することは今後の課題である。この場合には図6に示すように f は ΔT の 0.42 乗に比例して変化するが、このことは容器内自然対流においては通常用いられている代表速度 $(g\beta\Delta T l)^{1/2}$ (l は代表長さを示す) に複雑な流動様式による影響が加わったものと考えられる。なお、3・1節で述べた寸法の小さな装置においては f は ΔT の 0.33 乗に比例する結果を得た。

本研究の目的の一つである三次元的揺動の発生原因を解明するため、 $Gr = 9.2 \times 10^4$ で y 方向波長 $2L$ を有する揺動が最も生じやすい $L = 220 \text{ mm}$ の場合につき、加熱平板長手方向 (y 方向) に $x = 10 \text{ mm}$ の位置で10個の熱電対を加熱平板上方 65 mm の位置に設置して各出力をレコーダに記録し、各出力波形の比較により三次元的揺動の各測定点における位相 θ を求めた結果を図7に示す。加熱平板中央の $y = 110 \text{ mm}$ を節とする定在波においては図7中の破線で示すように板中央で左右の位相が 180° 変化する形態をとる。実験結果をさらに詳しく見ると、両側の壁の $y = 0$ および 220 mm 近傍と中央の $y = 110 \text{ mm}$ 近傍の θ が進んでいる。この結果より両側壁近傍と $y = L/2$ 近傍での現象が三次元的揺動の生因をなしている可能性があると考えられる。さらにこの二者のうちどちらが揺動の主要発生原因であるかを明らかにするため、図8の (x, y, z) 表示で $(20, 130, 180)$ および $(5, 215, 75) \text{ mm}$ の2

図6 f と ΔT の関係

点に熱電対を設置し、ある時刻より加熱平板の加熱を開始した場合の二つの熱電対の過渡応答を比較したところ、図8の側壁Ⅰに近い後者の熱電対出力は容器内の自然対流が定常状態に達するに必要な時間(約1時間)の約1/10の時間で揺動の発生をまず示したが、加熱板長手方向中央に近い前者の出力はこの時刻では揺動を示さなかった。以上の結果より三次元的揺動の発生原因としては側壁近傍の現象が強い効果を持つものと考えられた。

さらに側壁近傍の流れ場の詳細を知るため可視化実験を行い、その結果に基づいて考察した三次元的揺動の原理モデル図を図8に示す。図8中の加熱平板上の破線は平板上面のブルーム岐点を連ねた線を示しており、これがブルームの三次元的揺動により平板の長さ方向の中央($y=L/2$)を節とする振動を行う。図8は右側の側壁Ⅰ近傍の流れの加熱板上の岐点が、 x の負の位置に存在している状態を示している。

すなわち図8において、側壁Ⅰ近傍の上昇ブルーム1は左側(x の負の側)より流量が大きく、容器上壁に達した後下向しながらその一部は x の正方向の速度成分を持って容器底面まで下降し、ブルーム2を底面に沿って y の負方向に押し戻す。すなわち容器の底面近傍では底面に沿い図8に示すような y の負方向に向かう黒塗り部にて示すごとく斜向流が発生し、これがブルーム3と合流して y が小さな部分において平板上面で x が正の部分に存在していたブルームの平板上の岐点を x の負方向に押し。次にこの岐点が左側に寄るためブルーム1の反対側(左側)の流量が増加し次の揺動の起因となる。このような流れのパターンの繰返しにより揺動が持続するものと推論した。以上の推論の妥当性をさらに実験的に確認するために、容器底面に沿う y 方向の斜向流をなくすように加熱板の

y 方向の中央部に、底から垂直に仕切板を入れた実験と、側壁Ⅰに沿って下降する流れが y の負方向に向く流れをしゃ断するよう薄板を設けた実験を行い、いずれの場合も三次元定在波的揺動が停止することを示した。

すなわち底面に沿う y 方向の流れを阻害する目的で、 $Gr=7.9 \times 10^4$ の条件下で $y=L/2$ での $x-z$ 面内に容器底面よりの高さ100 mmの邪魔板を加熱平板の両側に容器の $x-z$ 面に平行な側面と間隔を持たないように挿入したところ、三次元的揺動は停止した。なお邪魔板高さが平板上面と容器底面までの間隔と同じ35 mmの場合では、邪魔板なしの場合に比し温度振幅 T_f は76%と減少し、周波数 f は94%とあまり変化がなく、邪魔板の上を乗り越えて斜向する流れが可視化により観察された。次いで側壁Ⅰと対向壁面に沿う下降流を遮断する目的で、加熱板に垂直な両側の側壁に容器底面より140 mmの高さの位置に、 y 方向の幅が30 mmで先端に15 mmの上向きの折返し部を持つ邪魔板を水平に設置したところ、やはり揺動は停止した。上記の二つの実験により、容器底面に沿う y 方向の流れおよびその発生原因となる側壁Ⅰとこれに対向する壁に沿う下降流が、本研究で対象とする容器内の三次元定在波的揺動の発生機構となっていることが判明した。

なお、本節で用いた容器内に外径が25 mm ϕ のCu製加熱円筒を $h=35$ mmの高さに $Gr \leq 10^5$ (代表長さには円筒外径を用いた)の条件で水平に設置し実験を行ったが、この場合には L を変化させても、上述の長方形断面加熱平板の場合に発生したような三次元定在波的揺動は発生しなかった。したがって、本研究で対象とするような揺動の発生因子の一つには、加熱体よ

図7 加熱平板長手方向距離 y による θ の変化

図8 三次元的揺動の発生機構説明図

り上昇するブルームの物体上の岐点が移動しやすい形状、すなわち平板のような形状を加熱体を持つことが重要であると思われる。

3・3 三次元的揺動の有無による加熱平板上面の伝熱特性の変化 本節では密閉容器内に設置された水平平板状の加熱電子部品の冷却時に問題となる、揺動の有無による加熱平板上面の伝熱特性の変化についての実験的研究結果を述べる。なお実験に用いた容器の x - z 面断面寸法は 3・2 節におけるものと同一である。

3・1 節および 3・2 節で用いた容器壁は厚さ 2 mm の低熱伝導率の亚克力板であり、容器壁温 T_c には容器長手方向の中央部の x - z 断面に設置した 12 個の熱電対(容器上下壁には x 方向に等間隔で各 5 個および両側壁には $z=H/2$ の位置に各 1 個)の出力の平均値を用いたが、これら 12 点の温度測定点間の最大温度差を ΔT_{cf} とすると $\Delta T_{cf}/T_c$ [°C] の値は最大で約 10% 程度の値を有していた。3・1, 3・2 節では可視化をして流動状態を見る必要性から上記の装置を用いたが、揺動の有無による伝熱特性の変化を正確に測定するため、図 9 に示すとき厚さ 2.3 mm のブリキ製の外側容器と内側の伝熱特性測定用容器との間に冷却水を通せる構造の装置を製作し、側壁近傍以外では $\Delta T_{cf}/T_c$ [°C] の値を約 0.5% に減少させて伝熱実験を行った。

加熱平板上面の熱伝達率 α を測定するため、熱流束センサ(平面寸法 $12 \times 30 \text{ mm}^2$ 、厚さ 0.6 mm、応答性 0.4 Hz、感度約 0.23 kW/m^2 で 1 mV) 3 個を $h=35 \text{ mm}$ 、 $b=50 \text{ mm}$ の加熱平板の上部表面に、センサ受感部が (x, y, z) 表示で $(0, 32, 35)$ 、 $(0, 71, 35)$ 、 $(0, 103, 35)$ mm の場所に接着し、その出力をペンレコードで記録した。なお、メーカー[京都電子工業(株)]の検定によればセンサ測定精度は感度の約 1/10 でありセンサ

添付による表面熱流束の変化はほぼ無視できる程度の値である。したがってセンサ出力の補正は行っていない。

加熱平板には 3・2 節で用いたものをそのまま使用したため、図 9 に示したごとく加熱板の両端部分は容器外に出た状態となっているが、この部分よりの放熱量は平板上下面に y 方向間隔 95 mm で添付した熱電対出力の内挿値と平板 x - z 断面積ならびにその熱伝導率よりもとめた。さらに、3・2 節の実験条件に近い条件下で伝熱実験を行うため、容器内に三次元的揺動を発生させることに重要な影響を及ぼす y 方向に垂直な側壁の内側表面には、それぞれ厚さ 5 mm の断熱材に厚さ 2 mm の亚克力板を接着したものを張った。

$Gr=1.07 \times 10^5$ における三次元的揺動の有無による水平加熱板上面の Nu 数の比較実験結果を図 10 に示す。容器内の揺動を停止させる手段としては、3・2 節同様 $y=L/2$ の位置に加熱板を挟んで容器底面よりの高さが 100 mm の邪魔板を挿入する方法を用いた。この場合は $L=206 \text{ mm}$ で 3・2 節における値の $L=220 \text{ mm}$ とやや異なっているが揺動に及ぼす影響は小さい。図 10 中の黒塗りおよび白抜き印はそれぞれ揺動のある場合とない場合の時間平均測定値を示しており、各印の縦方向幅は測定値の変動振幅を示す。図 10 中の直線は 3 個のセンサ出力より求めた Nu 数の空間的平均値 $\overline{Nu}$ を示しており、三次元的揺動の発生により容器内に設置された水平加熱板上面の伝熱特性が平均値で約 26% 増大することがわかった。なお、局所的な伝熱特性は加熱平板の中央近辺で最大となっているが、これは揺動発生時では図 7 に示したごとく $y=L/2$ 近傍で上昇ブルームの揺動の位相が 180° の急変をしており、(なお、 $y=\pm L/4$ 、 $L/2$ の両位置で冷線による温度変化の測定を行ったが、温度振幅の顕著な差

図 9 伝熱特性測定用水冷装置

図 10 揺動の有無による平板上面伝熱特性の変化

は認められなかった) この近辺でのプルームせん断層の発生に基づく乱れの生成ならびに側壁近傍で下降する流体速度の低下によるものと考えられる。三次元的揺動がない場合にも加熱板上面の伝熱特性は側壁に近付くにつれて低下している。この場合には、 $x=0$ および ± 200 mm, $y=10$ mm, $z=100$ mm の位置での流れの可視化により、流体は側壁に沿って上昇することが観察されており、容器内の自然対流は二次元的になっているものと思われる。したがって、揺動がない状態での側壁近傍における伝熱特性の低下は、主として二次元的なプルームの上昇速度が側壁の影響のため小さくなっていることに起因すると考えられる。

4. 結 論

直方体容器中に有限幅の水平加熱板を設置した場合の自然対流に発生する三次元的プルームの揺動現象に関し、揺動の発生機構および揺動の発生による加熱板の伝熱特性の変化についての実験的研究を行い、以下の結論を得た。

(1) 加熱平板の長手方向に垂直な2枚の側壁の間隔、すなわち平板の長さ L を変化させることにより、長さにより種々の波長を持つ三次元定在波的揺動が発生することを実験的に示した。揺動の波長は $2L/(1+n)$, ($n=0, 1, 2, 3, \dots$) となることが予期されるが、 $n=2$ に対応する揺動までを実際に観察した。また指定された容器寸法と加熱平板の組合せの下では波長に及ぼす Gr 数の値の影響は $Gr \leq 10^5$ ではほとんどないと考えてよいことがわかった。

(2) 容器内に発生する三次元定在波的揺動の発生原因は、プルームが容器上面に衝突後下降し容器底面に沿い流れるとき平板長手方向の流れの成分が誘導され、これにより水平加熱板上面のプルーム岐点が揺動することによることを、各種の条件を変えることにより明らかにした。

(3) 三次元定在波的揺動の発生により、容器内に設置された水平加熱板上面の伝熱特性が促進されることを明らかにし、 $Gr \approx 10^5$ の場合には揺動の発生によって約26%空間平均 Nu 数が増大することを示した。

(4) 本研究の結果は直方体容器内に設置された水平板状加熱電子部品の冷却特性が、 L の適当な選択に基づく三次元的揺動の積極的な利用により促進される可能性を示しており、工業的に重要な意義を持つ。

本研究の一部は、昭和60年度本学機械工学科卒業生の高橋宏君、および61年度機械工学第二学科卒業生の矢ヶ崎言光君の卒業研究として行われたことを記し謝意を表する。

文 献

- (1) 五十嵐, 機論, 43-374 (1977), 3839.
- (2) Urakawa, K., Morioka, I and Kiyota, M., *Proc. ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, (Hawaii), 3 (1983), 215.
- (3) 能登・山崎・石田・松本, 機論, 50-457, B (1984), 2179.
- (4) Satoh, K., *Proc. ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, (Hawaii), 4 (1987), 41.
- (5) 大屋・三木・守田・福岡・長谷川, 日本原子力学会誌, 30-1 (1988), 87.
- (6) Powe, R., Warrington, R. O. and Scanlat, J. A., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 23 (1980), 1337.