

1. はじめに

Rayleigh 数が大きく乱流状態にある熱対流中には、熱的擾乱を加えている上すた下の境界より多くのプリュームが発生し、こうしたプリュームとそれを補償する流れによってセル構造が形成されている (Tamai & Asaeda¹)。Howard² は、このようなプリュームは境界付近に熱伝導によって生ずる熱境界層の安定が崩れて発生するものと考え、一度プリュームが発生すると温度分布は一様になり再び熱境界層が形成し始めるという周期的なモデルを提案した。ところが著者らの報告³では、同様に、熱伝導により形成される境界層の安定が崩れてプリュームが発生する場合でも、加熱開始当初すなわち、一様な温度分布をもつ静止した流体を底板から加熱した時にプリュームが発生するまでに要する時間と、十分時間が経過して定常状態に達した対流中に発生するプリュームの平均的な発生周期を比較すると、前者に比べ後者は約 $1/2$ になることが示された。しかも、定常状態に達した対流中に発生するプリュームは、湧昇流線とよばれる網の目状の線上から発生することも示されている⁴。これらのことより、定常状態の対流中におけるプリュームの発生機構は、プリュームが発生して熱境界層が消滅し再び、熱境界層が形成し始めるといった単純なくり返しによるものではなく、より複雑な機構に持っていることが考えられる。本研究はそうした点に着目して、底板付近に形成される熱境界層内の温度分布の変化を測定し、発生するプリュームの特性との関連性を考察したものである。

2. 実験装置および実験方法

実験には、底面が $90\text{cm} \times 90\text{cm}$ 、深さ 75cm の水槽を用いた。水槽の底板はアルミニウム板 (3mm 厚) 製であり、その下に一定の熱フラックスを供給できるシリコンラバーヒーターを備えている。水温の測定はサーミスタ・リニアライザを用いた。このセンサーは直径 1mm の棒状 (コアリングも含む) をしており、これを底板から 1mm 、 3.5mm 、 5.6mm および 55mm の高さに配置し、水温の鉛直分布を測定した。なお、後で示すように、下の3本のセンサーは熱境界層内に含まれており、 55mm の高さに配置したものは、境界層外の平均水温を測定するためのものである。水深は 12.0cm とし、底板からの熱フラックスは、 $1.54 \times 10^{-2} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ とした。さらに、アルミニウム粉末照射法を用いて、底板付近での湧昇流線の分布も同時に可視化した。

3. 加熱開始直後の熱境界層の発達

図1にそれぞれの高さでの水温の時間的変化を示す。加熱開始後、まず、 $z=1.0\text{mm}$ の水温が急激に増加し、 $z=3.5\text{mm}$ 、 5.6mm の水温変化も次第に急激になっていく。約 80 秒経過した時点でそれぞれの高さでの水温が同時に1つのピーク値をとる。著者ら³によると、加熱開始後プリュームが発生するまでの時間 t_v は

$$t_v = 33 (\nu / (\alpha F_{\text{底}} g))$$

で表わされることが示されているが、このピークまでの経過時間はほぼこれと一致しており、この時点で最初のプリュームが発生していると考えられる。なお、ここに、 ν は動粘性係数、 α は体膨張率、 $F_{\text{底}}$ は底板からの熱フラックス、 ρ は密度、 c は比熱、 g は重力加速度を示す。

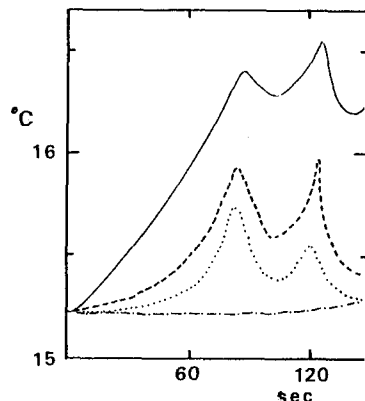


図1 加熱開始直後の水温変化
 — $z=1.0\text{mm}$
 --- $z=3.5\text{mm}$
 $z=5.6\text{mm}$
 - · - $z=55\text{mm}$
 (図2、図4においても同様の表示を行う)

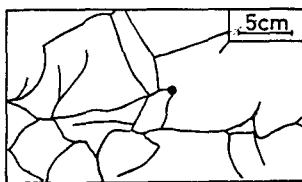
著者らによると、このように静止した流体中に最初にブリュームが発生する際には、底板付近の熱境界層の厚さが崩れた時点において一定の厚さの渦層が形成することが示されている。この厚さ δ は、

$$\delta = 14 \left\{ \frac{\mu}{(\frac{\rho}{\mu} g)} \right\}^{\frac{1}{4}}$$

で示され、本実験の場合はほぼ 9mm となる。この渦層の厚さがほぼ境界層の厚さに対応すると考えられるので、下の 3 本のセンサーはすべて境界層中に含まれていることがわかる。

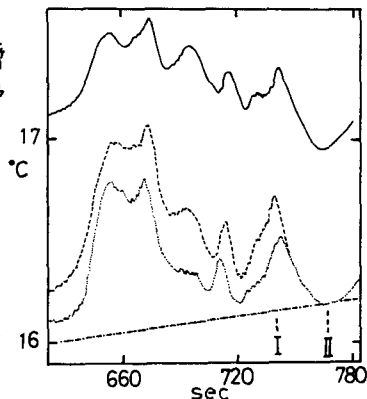
4. 定常状態の対流中の境界層の水温分布 (湧昇流線上的の水温分布)

図 2(b) は図 2(a)で示される様な湧昇流線の上で測定したそれぞれの高さでの水温の変化を示す。図中のピークの時点でブリュームが発生している。図より、温度の高い流体がブリュームをとりて上昇するとすぐに境界層内の温度が低下するために、ブリュームが一定強度で継続的に発生し得ることがわかる。



(a) 湧昇流線の分布

●は測定位置を示す



(b) 各高さでの水温変化

図 2. 定常状態の対流中の境界層内の水温
(b) 図における時間は加熱開始後のものである。

図 2(b) 中の I および II の時点における境界層内における水温の鉛直分布を示したものが図 3 である。図中の斜線で示されている部分がブリュームが発生したために温度が低下した部分である。I の時点で発生したブリュームはそれ以前に発生したいくつかのブリュームと異なり、境界層を形成していた流体の大部分が上昇した場合であるが、そうした場合においても底板のごく近傍には温度の高い流体が残されていることがわかる。こうした現象は、それ以前にみられるように頻繁にブリュームが発生している場合にはさらに顕著である。このように、底板付近に温度の高い層が残されるということは、熱が蓄積されて再び層が不安定になるまでに要する時間が、境界層内の水温分布が一様の場合に比べて短縮されることを示しており、加熱開始当初のブリュームの発生時間と比べ、定常状態に達した対流中では頻繁にブリュームが発生し得ることを示しているといえる。

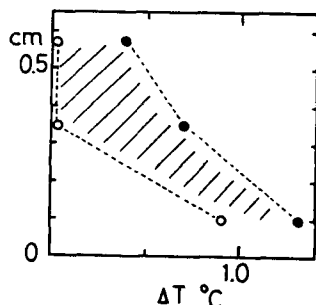
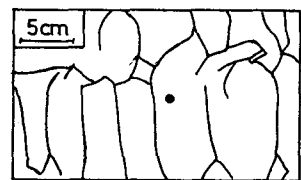


図 3. 図 2(b) 中 I, II 時点の水溫鉛直分布

●: I, ○: II



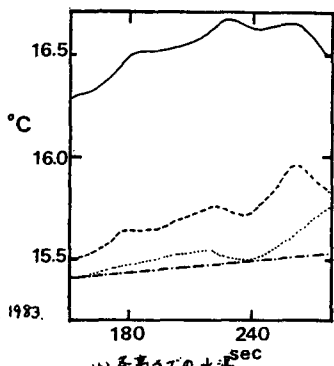
(a) 湧昇流線の分布

(湧昇流線以外の場所での境界層の水溫分布)

図 4(b) は図 4(a)に示されるような、湧昇流線以外の場所にセンサーが設置された場合の境界層内各高さでの水温変化である。図からわかるように、湧昇流線以外の場所においても、底板より 1mm の高さでの水温は境界層外の水溫より 1°C 程度高い値を示しており、底板のごく近傍には温度の高い流体層が存在していることがわかる。しかし、底板からある程度離れてくると、境界層外の水溫と変わらなくなり、熱伝導による層が発達している様子はみられない。

参考文献

1. N. Tamai and T. Asaeda: Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol. 1, part 1, 1983.
2. L.N. Howard: Proc. 11th Int. Congress Applied Mechanics, Munich, 1964.
3. 浅枝 隆, 玉井 信行: 土木学会論文報告集, 第 336 号, 1983.



(b) 各高さでの水温

図 4. 湧昇流線以外の場所での境界層内水溫