

水平流体層の乱流自然対流における温度場の特性と
熱輸送機構

京大工学部 河原全作 (Zensaku Kawara)

1. 緒言 下面加熱・上面冷却の水平流体層の自然対流は基本的な体系の自然対流のひとつとして様々な分野で多くの研究が行われているが、その乱流についての研究は流れの不安定性・乱流への遷移の研究に比べて少なく流動・熱輸送の機構が十分に説明されているとは言い難い。

Krishnamurti⁽¹⁾の流れの様相の分類によれば、水の場合には上下面温度差を無次元化したレイリー数が 10^6 をこえた範囲で乱流になる。乱流においては流体層の大部分は平均温度一定のバルク領域であり、上下面にそれぞれほぼ等しい温度差を持つ温度境界層が形成される。境界層は不安定成層状態にあり、バルク領域の流体と周期的に入れ替わることにより更新しブルーム状の流体がバルク領域に向かって放出される。伝熱面から流体への熱移動はこの境界層の更新による非定常熱伝導により行われ、バルク中の熱輸送の大部分はブルーム

によるものと考えられる。

流体が内部発熱している場合にも内部発熱率が大きくなると対流は乱流状態になり、流体層の中央に等温のバルク領域が形成される。しかしながら伝熱面での熱流束は内部発熱による分のみ上面が大きいののでそれに応じて温度境界層の温度差は上面の方が大きくなる。(図1参照)

筆者の研究室では内部発熱流体の水平流体層の乱流自然対流の熱輸送について一連の研究を行ってきた⁽²⁻⁴⁾が、その中で感温液晶を用いて流れ場・温度場の可視化を行っている。今回の研究会ではその可視化写真、ビデオの上映を中心に筆者らの研究を示した。

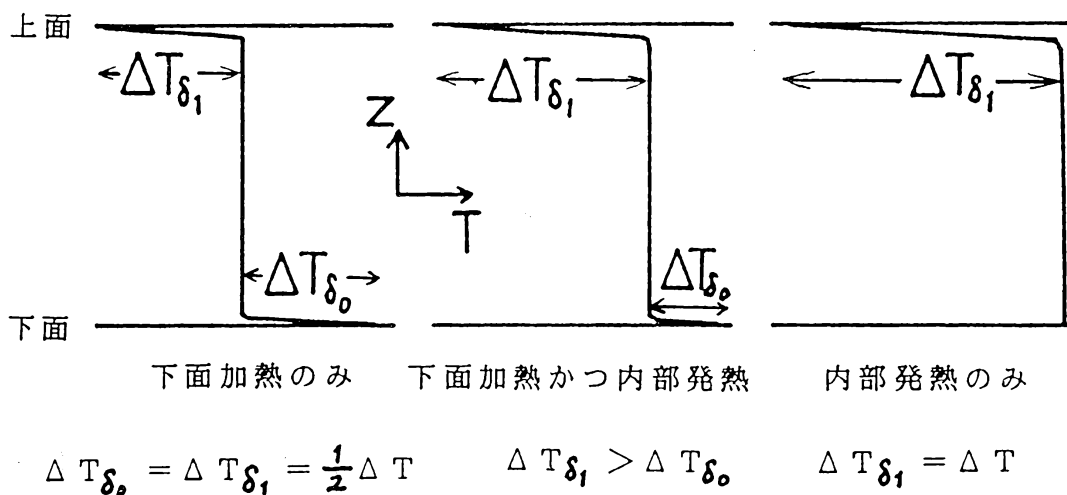


図1 内部発熱を伴う場合の温度分布

2. 実験装置及び手法 流体層の大きさは水平断面 200×210 mm、深さは、10 mm から 100 mm まで可変である。流体として水 ($Pr=7$)、シリコン油 ($Pr=100 \sim 1000$) を用いた。上下面の伝熱板は 15 mm 厚さの銅板であり、流体層は下からヒータで加熱され上面は冷水を循環することにより冷却される。ただし、温度場の可視化のときには上部伝熱面に 2 mm 厚さのガラスを用いて上面からも観察できるようにした。内部発熱の場合には作業流体として低濃度 KCl 水溶液を用い、上・下面銅板を電極として交流を印加することにより内部発熱させた。

温度の空間分布の時間変化をとらえるために、感温液晶トレーサを用いて温度場の可視化を行った。使用した液晶カプセルは、カイラルネマチック液晶をカプセル化したもの（水に使用、日本カプセルプロダクツ製、KR-32型、中心温度 32°C 、温度幅 2.5 K、比重 1.02）とコレステリック液晶をカプセル化したもの（シリコン油に使用、日本カプセルプロダクツ製、W-30型、中心温度 30°C 、温度幅 5.0 K、比重 1.02）の2種類である。液晶カプセルを流体層中に混入・分散させ（0.01% W t），スリット光を垂直もしくは水平方向に入射し、温度に応じて呈色する散乱光により2次元温度分布を観察し撮影した。ただし、液晶による観察は内部発熱のない場合のみである。

3. 結果及び考察

内部発熱を伴う場合の熱伝達

過去の研究では水平流体層の対流のマクロな特性として熱伝達の関係式を取り扱う研究が多くみられる。内部発熱のない場合には、上下面温度差を無次元化したレイリ数 Ra と流体層全体での熱伝達係数を無次元化したヌセルト数 Nu との関係式になり、

$$Nu = C Ra^m \quad (1)$$

の形で整理されることが多い。これは、上下面に形成される境界層がほぼ同じ温度差であるため、それぞれでの温度と熱流束の関係がほぼ同じ式で表わせるからである。

内部発熱を伴う場合には、境界層の温度差が異なるために上下面での温度と熱流束の関係をそれぞれ求める必要がある。

そのため、上・下面のそれぞれでの境界層温度差 ΔT_δ と熱流束 q を無次元化して

$$g \beta q L^4 / \lambda a \nu = C Ra_B^m \quad (2)$$

(ここで $Ra_B = g \beta \Delta T_\delta L^3 / a \nu$)

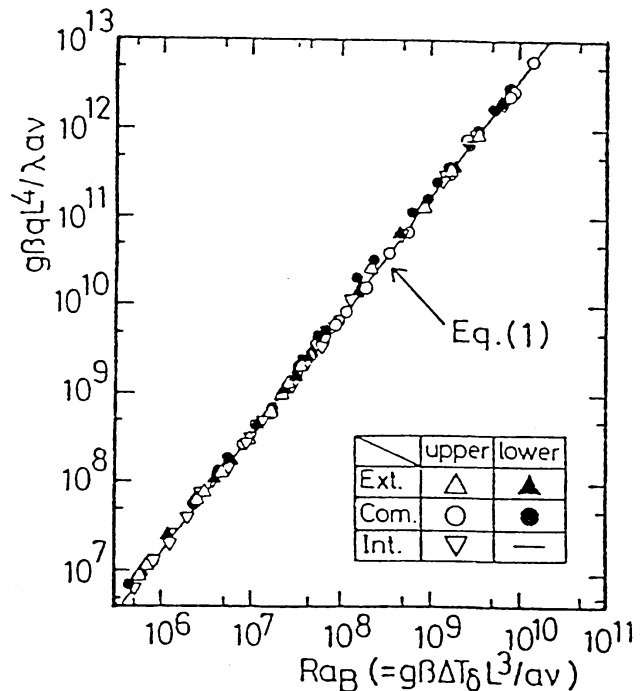


図2 内部発熱をともなう場合の熱伝達

の形で整理すれば、内部発熱と下面からの加熱が複合した場合でも整理できる⁽⁵⁾ 図2は筆者らの実験結果であるが上式の形でよく整理されている。このことは、内部発熱のあるなし、上・下面に関わらず伝熱面からの熱輸送機構が同じであることを示唆している。

液晶による可視化

内部発熱がない場合については感温液晶で可視化することができる。図3に感温液晶トレーサによる可視化像の一例を示す。高温部（青色）を黒く低温部（赤色）を白くしている。図は下部伝熱面近傍・境界層のすぐ外側での水平断面の可視化像である。水平温度分布は多角形のセル状パターンを形成しており、上面近傍も同様である。その多角形の辺に当たる部分がブルームの発生位置に相当する。ブルームの発生位置は時間的に

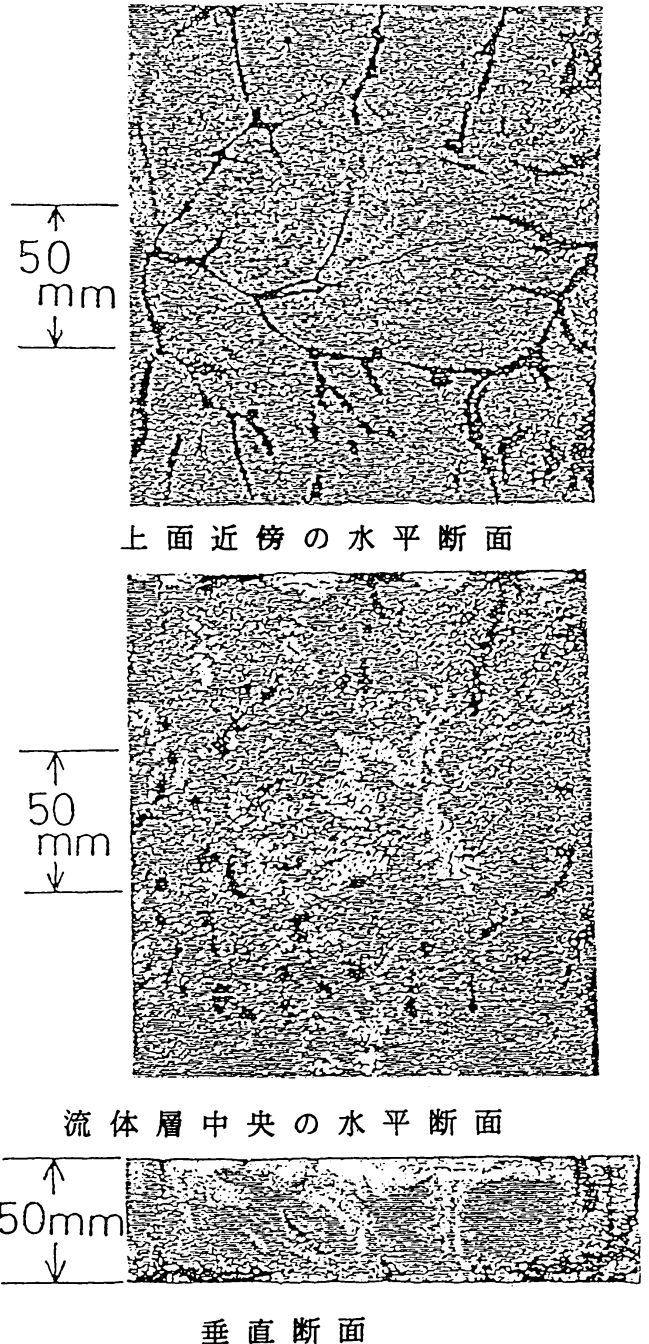


図3 感温液晶による可視化の例

変化している。膜状に発生したブルームは、バルク中を移動するにしたがい分離し、塊状になって対向面へ向かう。対向面に到達したブルームは水平方向にひろがり対向面の多角形の内部を形成する。

レイリー数が 10^7 の場合について、水およびシリコン油での温度場の観察からプラントル数による次のような相違が観察された。

(1) 伝熱面近傍でのブルームの発生位置は移動し時間的に変化するが、プラントル数が大きいほど変化はゆっくりしており、また移動距離も短い。

(2) 水の場合にはブルームの移動が一方向になりやすく、ブルームは進行方向に傾きつつ上下面で左右逆方向に移動するようになる。一度このような流れが形成されると流れの方向は逆転しない。今回みられたような水平方向のスケールが流体層全体に及ぶ大規模流についてはKrishnamurtiら⁽⁶⁾も報告している。

(3) 水の場合ブルームはそのまま対向面に到達することは稀でありバルク領域移動に対向面からのブルームとの衝突などで変形・拡散する。一方シリコン油ではほぼ垂直に移動して対向面側まで到達し温度境界層の外側に安定な成層を形成する。田中ら⁽⁷⁾によれば、水の場合ブルームが対向面に到達

するのはヌセルト数で約 8、レイリー数で 1×10^6 程度までとしているが、シリコン油のような高プラントル数流体ではさらに高いヌセルト数・レイリー数においてもブルームは対向面に到達している。

ブルームの特性

伝熱面近傍からバルク流体中に移動するブルームの特性のうちその発生周期と空間スケールについて述べる。

発生周期 流体層中に挿入された熱電対により測定された温度変動からブルームの発生周期を求めた。図 4 はブルームの発生周期 t_p を温度伝導率 a と流体層厚さ L で無次元化したものと境界層温度差 $1/2 \Delta T$ を無次元化した修正レイリー数 $Ra_B (= g \beta \Delta T L^3 / a \nu)$ とを比較したものである。図中の直線は最小 2 乗法から求めたもので

$$t_p a / L^2 = 23 Ra_B^{-0.66} \quad (3)$$

である。全体に多少のばらつきはあるものの傾きはほぼ $-2/3$ である。(3)式の両辺の L の次元を考慮するとブルームの発生周期は流体層厚さにほとんど依存しない傾向を示している。

空間スケール 液晶による可視化像を画像処理により解析して水平断面画像におけるブルームの長さ、囲む部分の面積・半径等を求めた。同様のデータは Tamai ら⁽⁸⁾も得ている。図 5 は伝熱面近くでブルームの上昇（もしくは下降）している

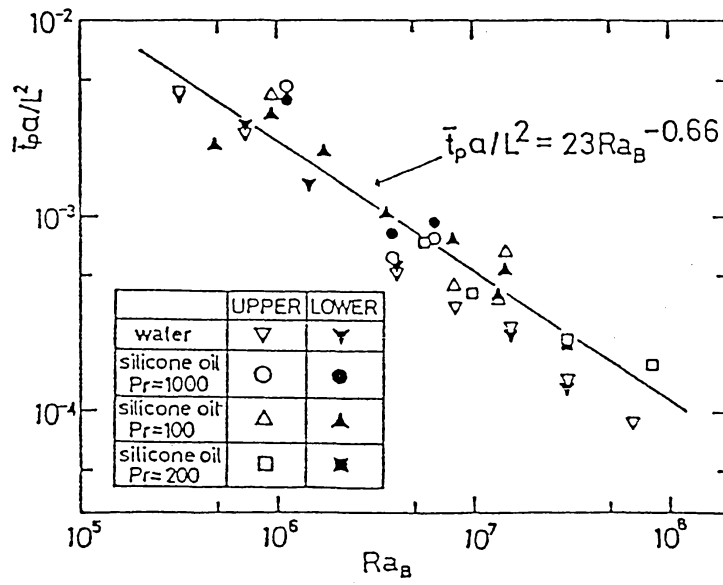


図4 プルーフの発生周期と修正レイリ数の関係

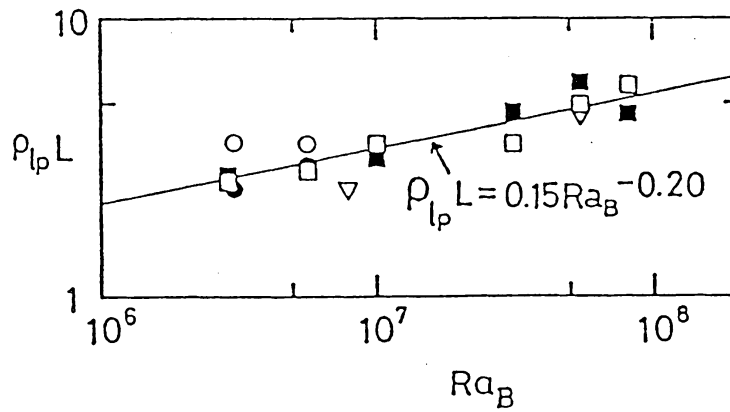


図5 プルーフに囲まれたセルの周囲長密度

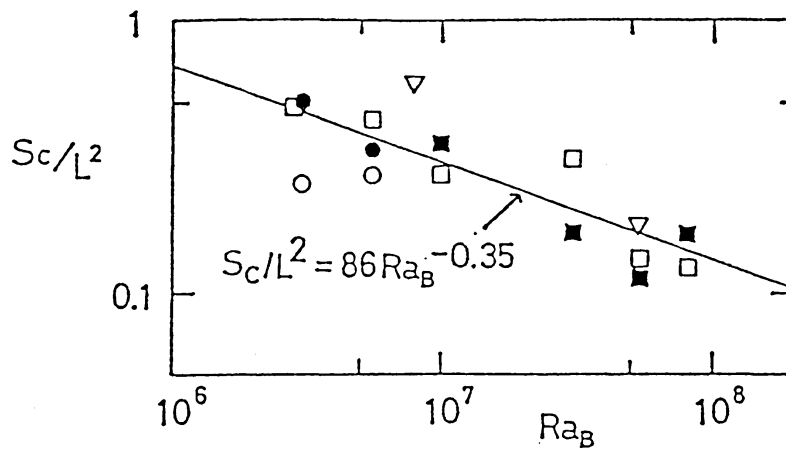


図6 プルーフに囲まれたセルの面積

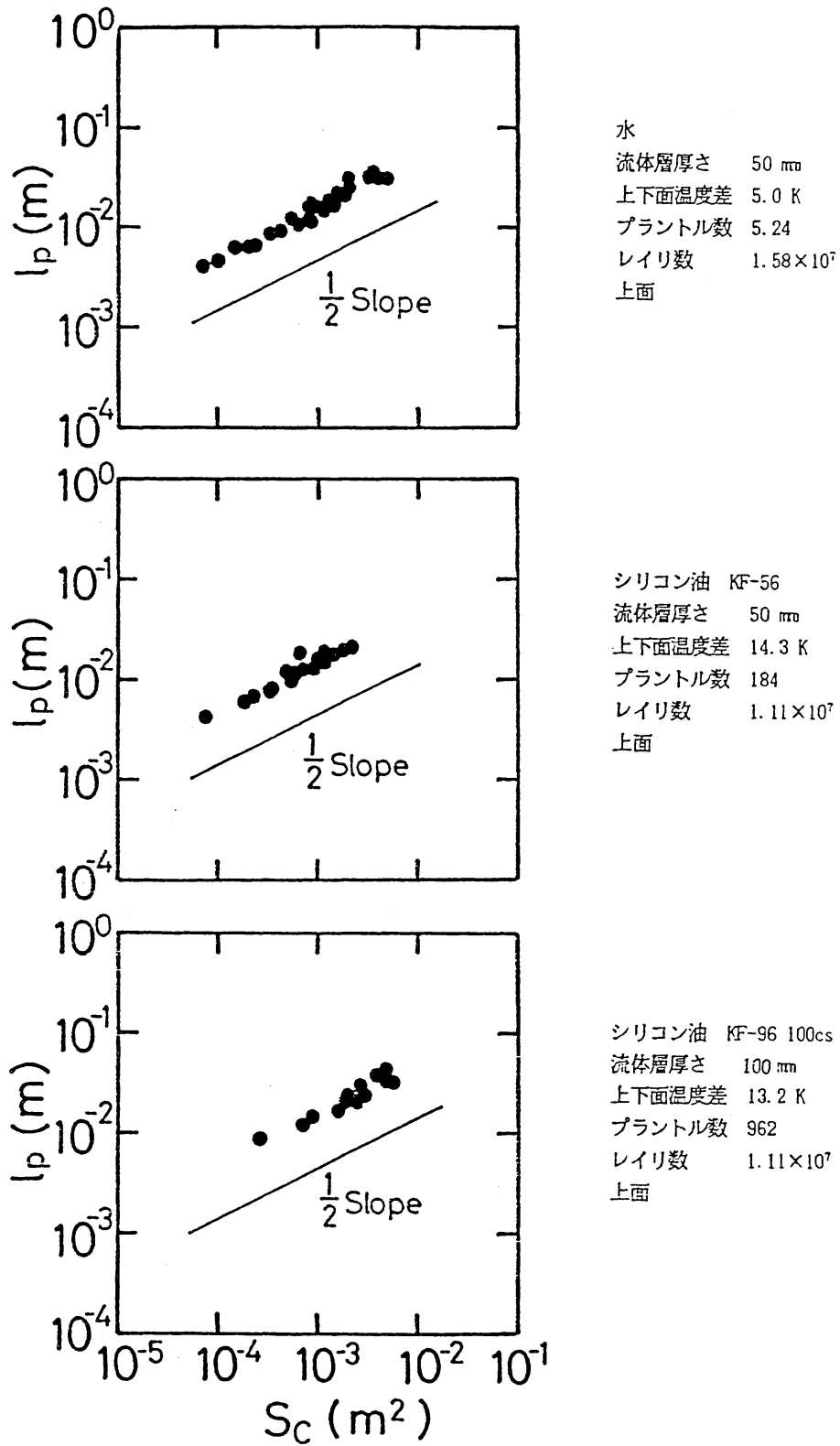


図 7 セルの面積と周囲長の関係

ところを線分として捉えその単位面積当りの長さ ρ_{1p} を求めたものである。縦軸に流体層厚さで無次元化したものを取り横軸に修正レイリ数 Ra_B をとっている。図中の直線は最小 2 乗法から求めたもので

$$\rho_{1p}L = 0.15Ra^{0.20} \quad (4)$$

である。温度差が大きいほど線密度が大きくなるが、 L の次数を考えると流体層が厚くなるほど線密度は小さくなる傾向にあるといえる。

図 6 は伝熱面近くでプルームが取り囲んでいる部分（以下セルと呼ぶ）の平均面積を流体層厚さで無次元化し修正レイリ数と比較したものである。図中の直線は最小 2 乗法から求めたもので

$$Sc/L^2 = 86Ra_B^{-0.35} \quad (5)$$

である。この関係から温度差が大きいほどセル面積は小さくなるが、流体層厚さが大きいほどセルの面積は大きくなる傾向が示される。

図 7 は各セルの面積と周囲長をプロットしたものの一例である。ほぼ $l_p \propto Sc^{1/2}$ の関係であり、周囲長と面積の関係はセルの大きさに依存していない。すなわち、セルの形状の複雑さはセルの大きさによらずほぼ同程度である。

結言

水平流体層の乱流自然対流において、内部発熱をともなう場合の熱伝達関係式の整理法、感温液晶を用いた可視化による観察での流動の特徴、伝熱面近傍で発生するブルームの発生周期、空間スケールについて述べた。

参考文献

- (1) R. Krishnamurti, J. Fluid Mech. Vol. 60, 285 (1973)
- (2) Y. Kikuchi et al., Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, 451 (1986)
- (3) Y. Kikuchi et al., Proceedings of 2nd ASME-JSME Thermal Engng. Joint Conf. Vol. 2, 203 (1987)
- (4) 菊地ら、機械学会論文集, B53-488, 1291 (1987)
- (5) Y. Kikuchi et al., Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, No. 3, 363 (1982).
- (6) R. Krishnamurti and L. N. Howard, Proc. Natl. Acad. Sci. USA Vol. 78, 1981 (1981).
- (7) H. Tanaka and H. Miyata, Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 23, 1273 (1980).
- (8) N. Tamai and T. Asaeda, J. Geophys. Res. Vol. 89, NO. C1, 727 (1984).