

熱乱流中の巨視的流動に関する実験的研究

名古屋大学・工学研究科 早川 智博, 辻 義之
(Hayakawa Tomohiro, Yoshiyuki Tsuji)
Energy Engineering and Science,
Nagoya University

1. はじめに

熱対流及び熱輸送は長い間興味ある主題であり科学や工学に多くの用途が考えられている。熱対流では上下プレートの温度差 ΔT によって対流が生じるため、この ΔT を無次元化した量は Rayleigh 数 (Ra) と呼ばれ、物理統計量のスケージングに有効であることが知られている。

$$Ra = \frac{\beta g \Delta T L^3}{\kappa \nu}, \quad (1)$$

ここで β は体積膨張率、 L は上下プレート間の距離、 κ は熱拡散係数、 ν は動粘性係数をあらわす。

熱乱流の主題のひとつは、しばしば巨視的流動と呼ばれる大規模循環と上下プレートから放出されるプリュームとの関係である。この巨視的流動は Ra 数が非常に大きいときでさえ存在する⁽¹⁾。プレート近くで発生する熱プリュームは一定の巨視的流動によって運ばれる。プリュームが通ることに関連した温度の周期振動は側壁近くで測定されてきた。温度変動のピーク周波数 f_p はべき乗の関係として Ra によってよくスケージングされる； $f_p \propto Ra^{\gamma_p}$ 。指数 γ_p はセルのアスペクト比や作動流体の Pr 数に依存することが予測されている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

巨視的流動の平均速度 U_w は、垂直方向の小さい距離 Δd 離れた 2 つの場所で測定された温度変動に基づき見積もられてきた⁽²⁾。対流の動きが巨視的流動の平均やプリュームによって引き起こされる周期的変動から成り立つなら、センサーからの温度信号が巨視的流動の平均速度を見積もるのに等しい。2 点の温度相関が時間差 Δt で最大を示すとき、巨視的流動の平均速度は $U_w = \Delta d / \Delta t$ で与えられる。 Δt がプラスかマイナスに成りうることに注意すると、プラスは上昇流、マイナスは下降流である。最近の実験で巨視的流動の方向が振動するように逆転するが周期的ではないことが報告されている⁽¹⁾。なぜ巨視的流動の方向が逆転するのか？巨視的流動の通過経路は擬似 2 次元なのか、または本当に定常なのか？アスペクト比にも依存するのか？限られたセル内での流れパターンについて、まだ多くの疑問がある。これは速度情報が空間の一点での平均速度 U_w に完全に限られているからであったし、瞬時速度のプロファイルは直接観察できなかったからである。直接測定は巨視的流動パターンを明らかにするために重要である。しかし、数多くの温度測定に対して、速度の実験的情報はむしろ限られている。Qiu & Tong⁽⁷⁾ は熱対流の速度測定を報告しているし、彼らも LDV 法によって速度情報を得ている。Burr ら⁽⁸⁾ は PIV 法を用い二次元速度場を解析した。LDV と PIV はともに透明な流体にのみ適用できる。液体金属の速度を測定するいくつかの試みはある。益子ら⁽⁹⁾ は超音波を用い、瞬時速度プロファイルを測定した。彼らは波数スペクトル、時間周波数スペクトルや確率密度分布のような統計量を解析し、不透明な液体金属に対する超音波測定技術の有用さを確認した。

また、超音波を用いてセル中心軸上で 128 点の瞬時測定が行われている⁽¹⁰⁾。 $\Gamma = 1$ の場合では巨視的流動がセルの中心軸を横切ることが結論として述べられている。これは巨視的流動の軸がセルの中心軸から θ 角傾いた楕円のパターンであったが、 θ は一定というより変動していると予測している。この変動の周波数ピーク f_p' は f_p に近く、巨視的流動の循環は定常ではないと結論付けられている。これに対して $\Gamma = 0.5$ の流れパターンは、上半分の領域で下降流、下半分の領域で上昇流であった。このため軸対称のドーナツリングが上下プレート付近で存在すると予測している。中心では上昇流や下降流が交互に存在していたが、それらは周期的ではなかった。上部プレートのプリュームと下部プレートのプリューム間を関係付ける要素はほとんどない。しかし、 $\Gamma = 2$ では、巨視的流動のパターンのはっきりしたイメー

ジをもつことができなかつた。以上が、超音波流速計を用いた測定で明らかになった水銀対流における巨視的流動パターンの概要である⁽¹⁰⁾。

著者らはこれまでに、水銀対流において超音波を用いてセル中心軸上で 128 点の瞬時計測をおこない、アスペクト比 $\Gamma = 1$ の場合では巨視的流動がセルの中心軸を横切ることを報告した。これは巨視的流動の軸がセルの中心軸から θ 角傾いた楕円のパターンであり、 θ は変動していることが原因と考えられる。この変動の周波数ピークは側壁で得られた温度変動の周波数ピークに近く、巨視的流動の循環は定常ではないと結論付けた。これに対してアスペクト比 $\Gamma = 0.5$ の流れパターンは、上半分の領域で下降流、下半分の領域で上昇流であることを報告した。中心では上昇流や下降流が交互に存在していたが、それらは周期的ではなく、上部プレートのプルームと下部プレートのプルームの間を関係付ける要素はほとんど見出せなかつた。

超音波を用いた計測では、水の場合もおこなっており⁽⁶⁾、その平均速度分布や rms 値の分布を水銀の場合と対比した。その結果、巨視的流動に基づく平均速度分布の形状は、水銀と水の場合で大きな差異は見出せなかつた。この結果から、Pr 数の異なる流体においてもアスペクト比が同一の場合、巨視的流動のパターンが大きく変化しないことが予測される。そこで本実験では、巨視的流動のパターンをより詳しく調べるために、作動流体として水を用い、粒子画像流速測定法(PIV)を用いて、2 次元な流動パターンの速度分布を計測した。本研究では、これまでの超音波による速度測定に加えて、1 点での温度の測定を行い、両者の情報から巨視的流動について考察する。また、PIV を用いた 2 次元速度分布の計測から、巨視的流動の時間変動とアスペクト比依存性について考察する。

2. 実験装置

図 1 は対流セルの模式図と測定装置の配置図である。セルは内径 $D = 100$ mm、高さ $L = 50, 100, 200$ mm の垂直円筒である。側壁、上下プレートはステンレス製であり、上プレートはプレートの上に固定した冷却部を通して冷水を通すことによって調節する。下プレートはヒートパイプによって一定の割合で一様に温める。上下プレートの温度差 ΔT はプレート内部に埋め込んだ熱電対によって測定する。作動流体には水 ($Pr = 0.71$) と水銀を用いた ($Pr = 0.024$)。実験では、下プレートの温度を変えるので、中心の水銀の平均温度は一定ではない。 Ra 数は 10^6 から 4×10^8 まで変化させ、 Nu 数との関係は $Nu = 0.095 \times Ra^{0.294}$ である。これは竹下ら⁽⁴⁾や Cioni ら⁽⁶⁾や Glazier ら⁽¹¹⁾の結果に類似している。超音波流速計(UVP)は、流体中の小さい通過粒子によって反射したエコーでのドップラーシフト周波数に基づく流体の流れの瞬時速度プロファイルを計測する。UVP のトランسدューサーは 4MHz の超音波パルスを送信し連続したパルス発信の間の時間間隔から反射したエコーを受ける。瞬時速度は超音波パルスの道に沿って 128 点の位置において得られる。粒子の位置はパルス発信後のエコーの時間差からわかる。電圧性の直径 5 mm 長さ 6 cm の超音波トランスドューサーは外表面の上に取り付けた。速度はセルの中心軸上でそれぞれ 0.74 mm 離れた 128 点の位置で瞬時に測定する。垂直軸は z と定義し、原点は上プレートとする。速度は $+z$ 方向でプラス、 $-z$ 方向でマイナスと定義される。データは 0.132 s ごとに測定され、速度分解能は約 0.7 mm/s である。測定体積、または空間分解能は直径 5 mm で厚さ 0.74 mm のディスク型となる。温度測定にはサーミスタのセンサー部の直径が 254 μ m、熱時定数が 10 ms と非常に小さいサーミスターを用いた。これをセルの中心と上プレートから 5 mm の位置に設置し、温度と速度の同時測定を行った。

また、水に用いた PIV は、Nd-YAG レーザーのシートが円筒セルに照射され、セル内に混入してあるトレーサー粒子に反射される。その反射光が 1024×1018 pixel の CCD カメラで撮影される。撮影した連続する 2 画像から 2 次元速度分布が得られる。本測定法の時間分解能は 30.0 ms、空間分解能は 0.40 mm、4032 個のベクトル成分が同時に測定される。サンプリング周波数は 1 Hz で測定した。測定面はセルの円筒中心軸を通る垂直断面とセルの中間高さ及び上から 5 mm の水平断面とした。

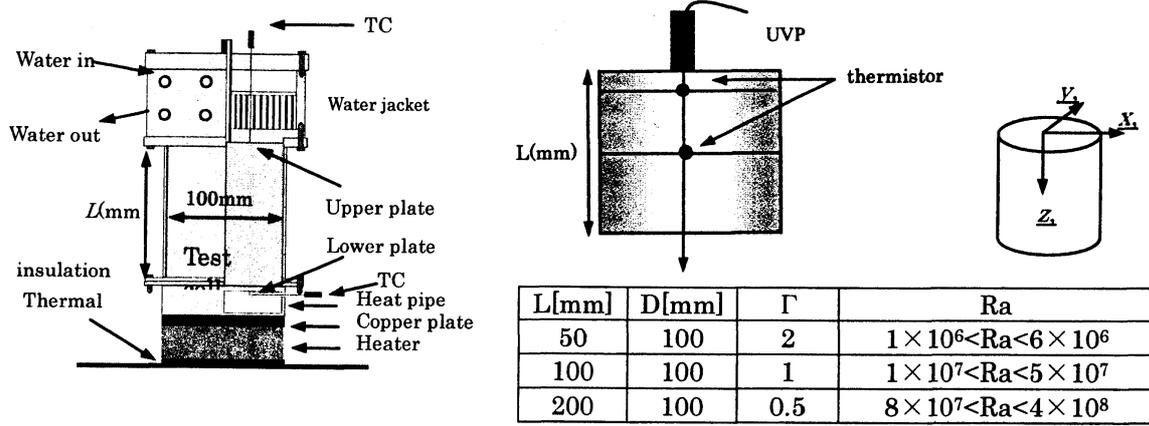


図1 Schematic view of experimental apparatus and coordinate system.

3. 結果及び考察

水の測定結果より、瞬時のベクトル分布は一見ランダムで、巨視的流動は時間的に安定して見られるわけではないこと。さらに、時系列で見てみると、強く乱れながらも大きな流れがランダム ($\Gamma = 0.5$) または周期的 ($\Gamma = 1$) に生じ、その流れが全体に影響を及ぼしていることが予想される。そして、同じアスペクト比であれば、時間平均をすることで Ra 数によらず共通した分布を示すことがわかった。図2に垂直断面の約3時間の測定を時間平均したベクトル分布を示す。暖色(赤色)は流速が早く、寒色(青色)は流速が遅いことを表す。また、時間平均した速度を大文字の U, V, W で表す。 $\Gamma = 0.5$ では上部で上昇流、下部で下降流が支配的であり、 $\Gamma = 1$ では右回りの楕円型の巨視的循環が見られる。さらに、Ra 数が高くなるほど流速は早くなる。これらの結果は水を用いた他の研究者の結果と一致する⁽⁷⁾⁽¹⁷⁾。また、水平断面を見てみると、セル上部の時間平均ベクトル分布において、 $\Gamma = 0.5$ では中心から外へ同心円状に向かう流れが見られ、 $\Gamma = 1$ では円管の一端から全体に広がる流れが見られた。

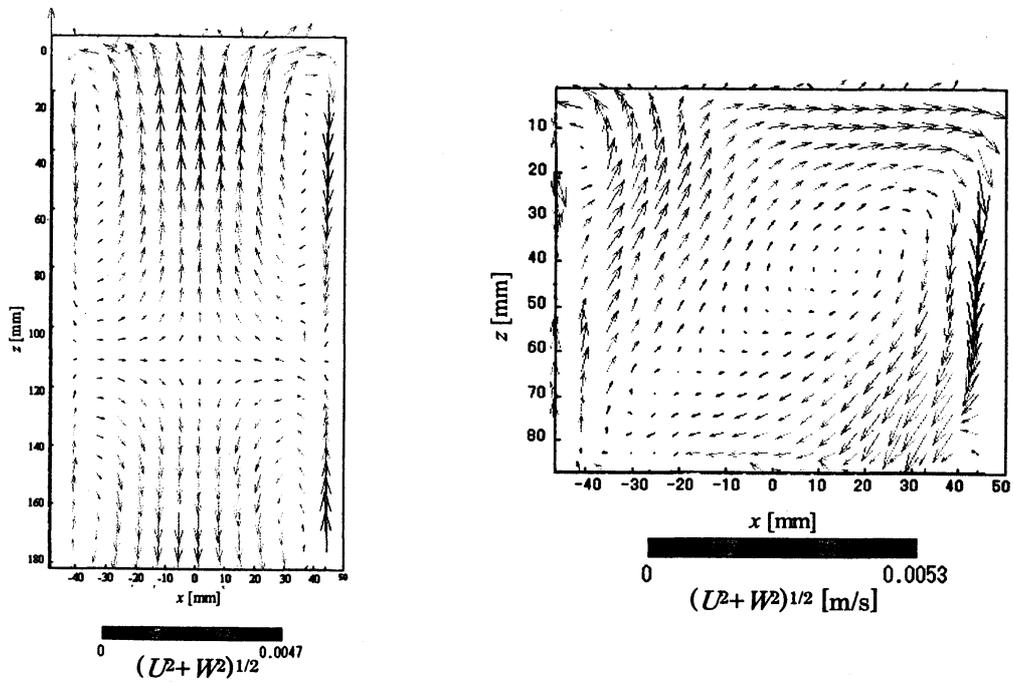


図2 $\Gamma = 0.5, Ra = 3.2 \times 10^9$ (左) と $\Gamma = 1, Ra = 7.33 \times 10^8$ (右) の垂直断面の時間平均ベクトル分布

以上の結果から、作動流体に水を用いた場合、アスペクト比の違いによる巨視的流動を図3のように予想することができる。水はPr数が高いため、熱がたまりやすく、プルームとなって移動すると考えられる。 $\Gamma = 0.5$ において、セルの下(上)隅から暖かい(冷たい)上昇(下降)流が生じる。その流れがセルの中間高さで円筒中心軸上をそのまま上昇(下降)し、反対のプレートまで達する。そして、プレート付近で側壁に向かって広がり、また逆の流れを生じさせる。しかし、その循環に周期性は見られない。さらに、中間高さの水平断面の時間平均ベクトル分布が同心円状に中心へ向かう流れが見られた。よって、円筒中心軸へ向かう流れは、ランダムに方向を変えていて、3次元的な構造を持っていると考えられる。一方、 $\Gamma = 1$ においては、セルの下(上)隅から暖かい(冷たい)プルームが側壁に沿って上昇(下降)するのは $\Gamma = 0.5$ と同じである。しかし、セルの中間高さほどで最大となり、その流れが下(上)プレート全体に広がっていく。その流れによって端に寄せられた暖かい(冷たい)プルームが反対の側壁に沿って上昇(下降)を始める。中心の U や上部の U 、側壁近くの W の変動成分にそれぞれ同じ周波数ピークが見られたことから、この流動は周期的に生じている。この流れはある方向にほとんど一定なため、2次元的な構造をしている。この2つの流動にはアスペクト比の違いが大きく影響していると考えられる。

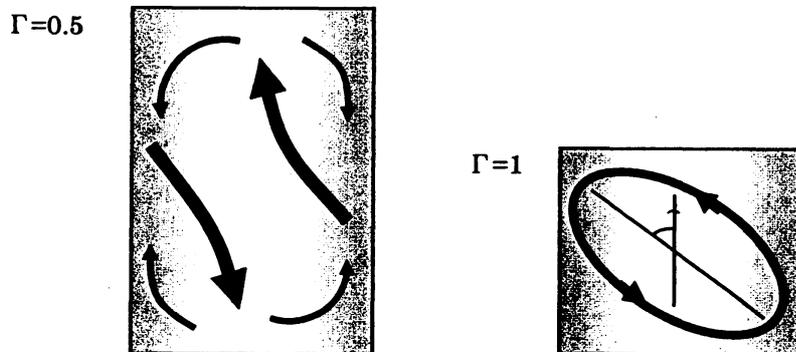


図3 予想される巨視的流動のパターン (水の場合)

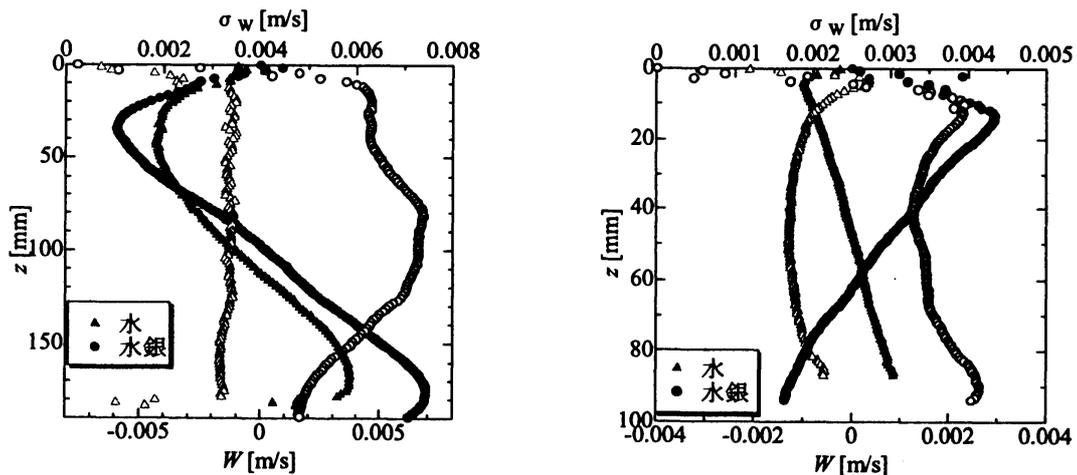


図4 円筒中心軸上におけるの水(三角)と水銀(丸)の平均速度(色つき)とrms値(白抜き)の分布の比較 (a) $\Gamma = 1$, $Ra = 3.88 \times 10^8$ の水, $Ra = 2.5 \times 10^7$ の水銀: (b) $\Gamma = 0.5$, $Ra = 3.2 \times 10^8$ の水, $Ra = 2.5 \times 10^7$ の水銀

図4に、円筒中心軸上の水（三角）と水銀（丸）における平均速度 W とその rms 値 σ_w の分布を示す。下の横軸に平均速度（色つき）、上の横軸に rms 値（白抜き）を、縦軸に上からの距離をとっている。 $\Gamma = 1$ では水と水銀の W の分布は値の大きさが違うものの正負を逆転させた分布となっている。さらに、水銀の平均速度が最大になる場所は水より中心に近いことがわかる。よって、 $\Gamma = 1$ の巨視的流動は水と水銀で異なる流動をしており、図5に示すように、縦に循環していると考えられる。この分布の違いは Pr 数が異なるためであり、水銀の場合には浮力により流体が加速を受ける領域がプレートに近い部分であるのに対して、水の場合には、反対のプレートまで影響を及ぼす。つまり、水銀はプレート付近での横方向の流れは小さく、水に比べより下に流れていく。水銀の中心領域では速度変動 W にピークが見られたことから z 軸方向に近い流れが周期的に生じていると考えられる。

$\Gamma = 0.5$ における水と水銀の分布（図4(b))を見ると、両者はよく似ているが、水銀は上部の水平断面が水で見たような分布とは異なり、中心に対し非対称になる。これより、水銀では $\Gamma = 1$ で見られたような大きな一つの楕円型の循環をしていることが予想される。作動流体の違いによる流動パターンの相違については、まだ詳細な計測をおこなう必要があり、今後は物理的なメカニズムを説明できるようにしたい。また、速度変動と温度変動の同時計測に関しては、文献(18)にまとめたので参照いただければ幸いである。

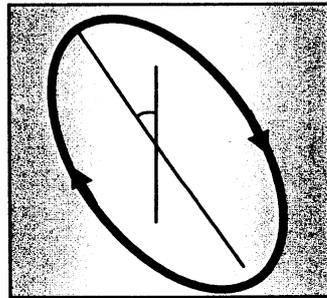


図5 予想される水銀の $\Gamma = 1$ の巨視的流動

参考文献

- (1) J. J. Niemela, L. Skrbek, K. R. Sreenivasan, and R. J. Donnelly, *J. Fluids Mech.*, 449, 169 (2001)
- (2) M. Sano, X. Z. Wu, and A. Libchaber, *Physical Rev. A*, 40, 6421 (1989)
- (3) B. Castaing, G. Gunaratne, F. Heslot, L. Kadanoff, A. Libchaber, S. Thomae, X. Z. Wu, S. Zaleski, and G. Zanetti, *J. Fluid Mech.*, 204, 1 (1989)
- (4) T. Takeshita, T. Segawa, J. A. Glazier, and M. Sano, *Physical Rev. Letters*, 76, 1465 (1996)
- (5) X.-L. Qui, S.H. Yao, and P. Tong, *Phys. Rev. E*, 61, R6075 (2000)
- (6) S. Cioni, S. Ciliberto, and J. Sommeria, *J. Fluid Mech.*, 335, 111 (1997)
- (7) X.-L. Qui, and P. Tong, *Phys. Rev. E*, 64, 036304 (2001)
- (8) U. Burr, W. Kinzelbach, and A. Tsinober, *Physics of Fluids*, 15, 2313 (2003)
- (9) T. Mashiko, Y. Tsuji, T. Mizuno, and M. Sano, *Phys. Rev. E*, 69, 036306 (2004)
- (10) Y. Tsuji, T. Mizuno, T. Mashiko, and M. Sano, *Physical Rev. Letter*, vol. 94, 034501, (2005)
- (11) J. A. Glazier, T. Segawa, A. Naert, and M. Sano, *Nature*, 398, 307 (1999)
- (12) B. Casting, G. Gunaratne, F. Heslot, L. Kadanoff, A. Libchaber, S. Thomae, X. -Z. Wu, S. Zaleski, and G. Zanetti, *J. Fluid Mech.* (1989)
- (13) T. Segawa, A. Naert, M. Abe, J. A. Glazier, and M. Sano
- (14) Y. -B. Xin and K. -Q. Xia, *Physical Rev. Letters*, 77, 1266 (1996)
- (15) R. Camussi, R. Verzicco, *Physics of Fluids*, 10, 2 (1998)
- (16) D. Funfschilling and Guenter Ahlers, *Physical Rev. Letters*, 92, 194502-1 (2004)
- (17) C. Sun, K.-Q. Xia, P. Tong, *Physical Review E*, 72, 026302 (2005)
- (18) T. Hayakawa, Y. Tsuji, Mean wind: Its velocity and temperature fluctuation in low-Prandtl-number thermal convection, *Physica D*, Available online 22 February 2010