立方体容器内に共存する互いに混ざり合わない 異種流体の自然対流の可視化*

王 塞光¹, 澤田 達男², 棚橋 隆彦²

Visualization of Natural Convection of Different Unmixed Liquids in a Cubic Container

Saiguang WANG, Tatsuo SAWADA, Takahiko TNAHASHI

ABSTRACT

Natural thermal convection of different unmixed liquids is quite different from that of a single liquid because of the existence of liquid-liquid interface. In order to clarify this phenomenon, it is necessary to know both flow and temperature fields of different unmixed liquids. In the present paper, natural convection of different unmixed liquids in a cubic enclosure with isothermal hot and cold walls was investigated. Influence of difference of kinematic viscosities and volume ratio of two liquids on flow and temperature fields were experimentally studied. Temperature distribution on a central cross section was visualized by thermosensitive liquid crystal particles. The conclusions derived from the above experiment are as follows: As the thermal movement occurs through the interface, the reverse speed of two kind of liquids near the interface was promoted. And beside the main circulation that occurred in the liquids of higher volume ratio and lower viscosity ratio, the secondary circulation was caused in the upper liquid.

Keywords: Natural convection, Different unmixed liquids, Temperature visualization, Liquid crystal particles

1. まえがき

容器内の単一流体に関する自然対流熱伝達の研究は可視化および数値解析によりきわめて多く行われてきたが、近年、異種流体が共存する場合の自然対流問題は航空宇宙用軽量材料と高性能薬品の生成や地球物理等への応用に関連して注目されてきている^{1)~3)}。これまでに、木村ら⁴⁾は異種流体間の界面形状を巨視的にとらえ、また界面での物質移動が存在せず、加熱壁あるいは冷却壁を持つ条件下で混和しない異種流体が共存する密閉容器内の自然対流熱伝達機構を差分解析により定性的に評価した。松本ら⁵⁾は界面付近で互いに混合が若干存在する二成分流体を用いて、下面加熱・上面冷却を受ける比較的薄肉の矩形容器内の自然対流に関する可視化実験並びに数値解析を行った。このほかにも二層系の熱対流の研究は数多く行われてきている^{6)~8)}。

このような自然対流熱伝達現象は、液・液界面の存在により、単一流体の場合とは大きく異なる熱流動現象となっており、その現象を解明するには二種流体の相互干渉を踏まえて流動場と温度場を明らかにする必要がある。本論文では、共存する混ざり合わない異種液体の自然対流特性を究明するために、熱移動の基礎的なモデルの一つである立方体容器内に密閉されたブドウ糖水溶液と物性の異なる五種類のシリコンオイルを用いた温度場・流動場の可視化実

験を行った。容器の一鉛直壁が一定温度に加熱（以下、高温壁と記述する）、また対向する鉛直壁が一定温度に冷却（以下、低温壁と記述する）、他の壁面を断熱壁として、自然対流を誘起させる実験を行った。液晶粒子懸濁法^{9),10)}による可視化および熱電対を用いた計測により、その内部の流れ場と温度場を調べた¹¹⁾。

2. 試験流体と実験条件

本実験では、流体密度を感温液晶粒子密度に合わせるために、下層流体には7.5% (重量濃度) のブドウ糖水溶液 (以下、Wと記述する) を、上層流体には信越化学工業 (株) 製のKF96系列シリコンオイル (以下、Sと記述する) の中の5種類 (以下、それぞれをA, B, C, D, Eで記述する) を使用した。10~40 範囲内のWとSの密度は、ポーア浮子型比重計を用いて測定した比重から算出し、動粘性係数は、逆流型ガラス毛细管粘度計を用いて測定した。その25 における密度と動粘性係数の値をTable 1に示す。密度から分かるように、常に上層流体がSとなっている。そこで、上層流体、下層流体という用語の代わりにS, Wを簡略化のために使用する。

本実験ではSとWの粘度比、体積比をいろいろ変化させた。なお、今後、単に「体積比」と記述した場合、Sの体積: Wの体積、を表すものとする。実施した実験条件をTable 2に示す。ここで、 ν_s はSの動粘性係数を、 ν_w はWの動粘性係数を表す。S13, S12, S11, S21, S31はSとWの体積比が1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1の場合の総称記号である。たとえば、S12はシリコンオイルと水の体積比が1:2のすべての実験条

* 原稿受付 1999年8月26日

¹ 日清食品 (株) 国際部

² 慶應義塾大学 理工学部

Table 1 Density and kinematic viscosity of test liquids at 25

	(m ² /s)	(kg/m ³)
W	1.17×10^{-6}	1026
A	0.64×10^{-6}	757
B	1.04×10^{-6}	815
C	2.11×10^{-6}	870
D	4.71×10^{-6}	912
D	9.62×10^{-6}	932

Table 2 Combination of test liquids and its symbol.

	s w	Volume ratio of S and W				
		1:3	1:2	1:1	2:1	3:1
A	0.545	A13	A12	A11	A21	A31
B	0.889	B13	B12	B11	B21	B31
C	1.808	C13	C12	C11	C21	C31
D	4.035	D13	D12	D11	D21	D31
E	8.239	E13	E12	E11	E21	E31

件(A12 ,B12 ,C12 ,D12 ,E12)を総称して表している．Table 2以外に，6種類の単一流体を用いた実験も行った．

3．実験装置および実験方法

実験容器および実験装置の概略をFig.1とFig.2に示す．本実験には寸法48mm×48mm×48mmの立方体容器を使用した．高温壁と低温壁は厚さ0.3mmのアルミニウム板で製作した．また，他の壁面は断熱を考慮し，厚さ10mmの亚克力板で製作した．この容器に粘度別のSとWを満たし，実験を行った．温度分布および流動場を観察するために，SとWに理化精機(株)提供の品番RX3040とKXN2535の感温液晶粒子をそれぞれ混入した．これらの感温液晶粒子のS，Wの中での呈色範囲は次の通りである．

S(RX3040)：23～33

W(KXN2535)：21～31

これらの感温液晶粒子は温度変化に伴い，低温から高温へ，黒，赤，黄，緑，青の順に色が変化する．可視化光源はカトウ光研(株)製のキセノンLS-300型光源を使用し，容器の前壁と平行している厚さ約5mmのスリット光を容器前壁より後方20mmの部分に上から照射した．光源による

Fig.1 Experimental container. **Fig.2** Experimental apparatus.

実験容器加熱防止のために，赤外線防止フィルタガラスを使用した．

実験は以下の手順で行った．最初，27℃に保った両流体を容器に注入する．流体注入による初期乱れが無くなった後，二つの恒温水槽（Temperature control unit）に保っている温度がそれぞれ31℃と21℃の水を同時に循環させ，高温壁を31℃，低温壁を21℃の一定定温にそれぞれを保ち，自然対流を誘起させた．感温液晶粒子による内部温度分布の可視化結果をビデオカメラで録画，あるいは，カメラで直接撮影(使用フィルム: ISO100, 撮影条件: F16, 2S)して温度分布変化の様子を記録した．

温度分布の可視化と併せて，内部の温度測定を行った．温度測定には，直径0.1mmの銅－コンスタンタン熱電対を用いた．熱電対による温度測定点位置は，高温壁および低温壁から0.5mmのところと容器中心軸上のそれぞれ24点(容器底部より1mm上のところから2mm間隔)である．熱電対により得られるアナログ出力信号をデータロガー，A/D変換器，GP-IBバスを介して，パーソナル・コンピュータに取り込んだ．

感温液晶粒子を懸濁した液体を前述のスリット光で照射すると色彩分布と共に粒子が微小光点として観察できる．そこで，その光点の挙動をビデオカメラで録画し，モニタ画面上の光点の動きから実験容器内の速度分布を測定した．

4．実験結果と検討

実験結果に使用されている温度 T ， x 方向の流速 V ，各座標 X, Y, Z の値はすべて以下の無次元量で整理した．

$$T^* = \frac{T - T_C}{T_H - T_C}, \quad V^* = \frac{V}{U}, \quad X^* = \frac{X}{L}$$

$$Y^* = \frac{Y}{L}, \quad Z^* = \frac{Z}{L}$$

ここで， T_C ， T_H ， U ， L はそれぞれ高温壁の温度，低温壁の温度，代表流速，立方体容器の1辺の長さである．粘性項($\mu U/L$)と浮力項($g TL$)のバランスを考え，代表

速度 U を

$$U = \frac{L^2 g \beta (T_H - T_C)}{\nu}$$

とした．なお， W と S の各流体について U は別々に評価している．異種流体が存在する場合のグラスホフ数(以後 Gr 数と記述する)の定義が困難であるので，実験条件として $S(A, B, C, D, E)$ と W の単一流体の場合の Gr 数を次式から算出した．

$$Gr = \frac{L^3 g \beta (T_H - T_C)}{\nu^2}$$

なお，体積膨張率 β は次式によって評価した．

$$\beta = \frac{\rho_m - \rho_H}{\rho_m (T_H - T_m)}$$

ただし， T_m は高温壁と低温壁の平均温度，

$$T_m = \frac{(T_H + T_C)}{2}$$

であり， ρ_m ， ρ_H は，それぞれ， T_m ， T_H における密度である． $S(A, B, C, D, E)$ および W の Gr 数は，それぞれ， $Gr(A)=2.9 \times 10^8$ ， $Gr(B)=1.0 \times 10^7$ ， $Gr(C)=2.3 \times 10^6$ ， $Gr(D)=4.5 \times 10^5$ ， $Gr(E)=1.3 \times 10^5$ ， $Gr(W)=2.0 \times 10^6$ である．

4.1 可視化結果について

定常状態の可視化写真を Fig.3 に示す．また，流れの様子の理解を助けるため，Fig.3 の A31 に対応する流線の模式図を Fig.4 に示す．写真から分かるように，全体として， S と W にはそれぞれ浮力により高温壁に沿って上昇し，低温壁に沿って下降する主循環流が生じている．また，体積比によっては，新たな二次循環流が生じる場合が見られた(たとえば，A31 の S の高温壁側近傍と低温壁側近傍の下部)．この二次循環流の生じやすい領域は S と W との体積比が大きい場合の S の高温壁側近傍と低温壁側近傍の下部である．両流体の流動に伴い，界面を通じて W から S への熱移動が生じる．界面近傍の S が低温壁側から高温壁側へ流動すると同時に温度が上昇し， W が高温壁側から低温壁側への流動すると同時に温度が下降する．この温度の上昇および下降により， S と W との界面付近にそれぞれの等温領域が形成される．これらの等温領域は近傍の流れの影響により，循環流になりやすい．その上，体積比が大きいほど S 側の等温領域が広く， W 側の等温領域が狭くなる．よって， S 側の流れが活発化し，二次循環流が生じやすくなり， W 側の流れが抑制され，二次循環流が生じにくくなる．

本実験での可視化結果より，体積比が同じであれば， S の Gr 数が大きいほど S 内の二次循環流が生じやすい傾向が見られた．一般に壁面と流体との間の移動熱量は流れが速いほど多く，遅いほど少なくなる．これは両流体の界面における移動熱量についても同様である． Gr 数が大きくなるとその流動抵抗は減少するため， Gr 数が大きい S の場合，対流速度が増加する．その結果，界面の熱伝達率が大きくなり，界面を通して W より受ける熱量が多くなる．また， S の Gr 数が大きいほど， S 側の流れが活発化して，主循環流の速度が速くなり，界面付近の流れが加速される (Fig.5, 6 を参照)．その上， S の高温壁側近傍と低温壁側近傍の下

部で流れの方向は急に変化している．この影響により，その近傍の等温領域の局部循環が生じた．一方， W 側について，界面付近に等温領域が形成されたが，流速はそれ程加速されなかったため，二次循環流が生じなかった．

4.2 中心部の速度と温度の垂直分布

体積比が 1:2，2:1 の場合の中央断面の速度分布を Fig.5 と Fig.6 に，温度分布を Fig.7 と Fig.8 に示す．ここで，図枠の右にある三角の矢印記号は S と W の界面を示している．速度分布図から分かるように，界面付近の S の流動速度は上壁付近の速度より速く， W の流動速度は底壁付近の速度より速くなっている．定常状態になった場合，界面付近の S と W には温度差があるため，界面を通して， S と W との間では熱移動が生じる．その結果， S の平均温度は初期温度より高く， W の平均温度は初期温度より低くなる (Fig.7, 8 を参照)．よって， S の平均温度と低温壁との温度差が高温壁との温度差より大きくなる．一方， W の平均温度と低温壁との温度差が，高温壁との温度差に比べて小さくなる．したがって， S では低温壁に沿って下降する流れが顕著になり， W では高温壁に沿って上昇する流れが発達してくる．それに対して， S の高温壁および W の低温壁付近の流れは，それほど活発にはならない．以上より， S と W との界面近傍に逆方向の流速が促進される．

4.3 感温液晶粒子の沈澱による影響

W 用の感温液晶粒子の密度は W とほぼ同じであるため，感温液晶粒子の沈澱が起こらないが， S 用の感温液晶粒子は， S の種類によって密度が多少異なるため，感温液晶粒子が沈澱することがある．感温液晶粒子懸濁法は試験流体内に感温液晶粒子を直接混入し，流体の温度上昇に伴う感温液晶粒子の色変化によって温度場を可視化する方法である．分子構造および熱伝達による感温液晶粒子の呈色遅れについての基礎的データはほとんど見あたらず，今後の研究を待たなければならない¹²⁾．自然対流のようなゆるやかな対流現象に関して，感温液晶粒子の沈澱による感温液晶粒子の呈色遅れの影響が十分小さくて，問題にならないと考えている．しかし，密度の低い S では沈澱速度が速くなり，定常に達しないうちに，流体内の感温液晶粒子の濃度が低くなる．この場合，温度場の可視化性能がかなり悪くなる．本実験については S 中の A, B においてその影響が顕著となっている．

次に，感温液晶粒子の沈澱による速度分布測定への影響について考察する．感温液晶粒子の沈澱は重力によって起こるから，垂直方向速度を測定する際には，測定値を感温液晶粒子の沈澱速度を考慮して補正する必要がある．しかし，水平方向速度計測においては感温液晶粒子の沈澱速度の影響はほとんど無視できる．本実験では，速度分布の測定は，水平方向成分しか行わなかったため，感温液晶粒子の沈澱による速度分布測定への影響は少ないものと考えられる．さらに，試験流体への感温液晶粒子の混入量は重量濃度にして 0.01 ~ 0.02 wt% 程度であるので，垂直方向に輸送される運動量も無視し得る程度小さいと考えられる．

4.4 高温壁付近の温度分布

体積比が 1:2，2:1 である場合の高温壁付近の温度分布状況を Fig.9, 10, 11, 12 に示す．Fig.9 ~ 12 から分かるように，高温壁付近では S の Gr 数が小さいほど温度が高く，低温壁付近では S の Gr 数が大きいほど温度が高い．一般に，

Fig.3 Temperature visualization at the central cross-section ($Z^*=0.5$). (Left side: hot wall, Right side: cold wall).

Fig.4 Sketch streamlines for A31 in Fig.3.

Fig.5 Velocity profile along the central line.
(S12: $X^*=0.5$, $Z^*=0.25$).

Fig.6 Velocity profile along the central line.
(S21: $X^*=0.5$, $Z^*=0.25$).

Fig.7 Temperature distribution along the central line.
(S12: $X^*=0.5$, $Z^*=0.25$).

Fig.8 Temperature distribution along the central line.
(S21: $X^*=0.5$, $Z^*=0.25$).

Fig.9 Temperature distribution near the cold wall.
(S12: $X^*=0.99$, $Z^*=0.25$).

Fig.10 Temperature distribution near the hot wall.
(S12: $X^*=0.01$, $Z^*=0.25$).

Fig.11 Temperature distribution near the cold wall.
(S21: $X^*=0.99$, $Z^*=0.25$).

Fig.12 Temperature distribution near the hot wall.
(S21: $X^*=0.01$, $Z^*=0.25$).

同じ条件下では、 Gr 数が大きいほど熱対流が活発になり、対流による熱伝達も促進される。したがって、高温壁付近では Gr 数が小さいほど熱対流が抑制され、流速も遅いため、鉛直方向の温度変化が少ない。

Gr 数の大きいSでは熱対流がより促進されているため、高温壁付近のSとWとの界面における温度差は、Sの Gr 数の大きい方が大きい。よって、界面を通してWからSへの伝熱量が多くなり、界面付近のWの温度は下がってくる。

4.5 二次元性について

容器内の流れ場の二次元性を解明するために、スリット光源を垂直方向(X-Y断面)に照射し、照射位置を水平方向に変化させて流動場を観察した。各垂直断面内の流動場を比較して、流動の二次元性について調べた。その結果、単一流体の場合、スリット光源に照射された可視化断面内では感温液晶粒子の光点が消滅する現象はほとんど見られなかったが、二種類の流体が共存する場合、消滅する感温液晶粒子が界面付近に存在した。したがって、界面付近の流れが三次元的であると考えられるので、水平断面内の流れを観察してみた。水平のスリット光によって、水平断面を可視化し、容器上方より観察を行った。観察の結果、前後壁の近傍を除いて、界面付近では各方向への不規則な流れが見られた。二種類の流体が共存する場合、界面付近には急激な温度差が生じている。その上、二種類の流体は互いに混ざり合わない流体であるため、上下界面間には対流が生じない。詳細については言及できないが、これらの諸要素が複雑に影響し合って、界面付近に不安定な流れが生じているものと考えられる。

5. 結 言

本研究では立方体容器内に密閉された混ざり合わない異種流体が共存する場合の自然対流熱伝達機構を流れ場と温度場を可視化することにより、定性的に明らかにした。ブ

ドウ糖水溶液(W)とシリコンオイル(S)を使用し、両者の様々な組み合わせに対して実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

1. 感温液晶粒子を用いて内部温度分布および速度分布を可視化することにより、異種流体の自然対流熱伝達を定性的に把握できた。
2. 容器内のSとWの体積比および Gr 数は両流体の流れ場および温度場の支配因子になっている。
3. SとWには高温壁に沿って上昇し、低温壁に沿って下降する主循環流が生じるとともに、上下層流体の体積比が大きく、 Gr 数が大きい場合の上層流体の高温壁側近傍と低温壁側近傍の下部には二次循環流(渦)が生じる。
4. 上下層流体の界面を通じてWからSへの熱移動が生じる。その影響のため、SとWとの界面付近では逆方向の流速が促進される。
5. SとWとの界面には著しい温度差が生じて、界面付近の流れは三次元になっている。

最後に、感温液晶粒子を快く御提供頂いた理化精機(株)とスリット光源について御協力頂いたカトウ光研(株)に謝意を表す。また、実験に協力された東城正樹君(当時、慶應義塾大学理工学部機械工学科4年生)に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Lee, M.C. et al.: Bringing space sciences to earth laboratories can yield precision hollow, coated, and filled shells for both high-tech and industrial uses, *Aerosp. Am.*, 24 (1986) pp.72-76.
- 2) Rasenat, S. et al.: A theoretical and experimental study of double-layer convection, *J.Fluid Mech.*, 199 (1989) pp.519-540.
- 3) Joseph, D.D. and Renardy, Y.Y.: *Fundamentals of Two-Fluid Dynamics (Pt.1)*, Springer (1993) pp.170-266.
- 4) 木村・ほか3名: 互いに混ざり合わない流体が存在する密閉容器内の自然対流熱伝達, 日本機械学会論文集(B編), 51(1985) pp.1251-1259.
- 5) 松本・ほか2名: 矩形容器内二成分成層流体中の自然対流, 第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集, C141, (1993) pp.190-192.
- 6) Villers, D. and Platten, J.K.: Influence of interfacial tension gradients on thermal convection in two superposed immiscible liquid layers, *Appl. Sci. Res.*, 47 (1990) pp.177-191.
- 7) 鎌倉・尾添: 鉛直二平板間における自然対流による水と水溶液の濃度成層流の研究, 第27回日本伝熱シンポジウム講演論文集, I (1990) pp.97-99.
- 8) アンヘル・ほか2名: 容器内二層流の熱対流, 第36回日本伝熱シンポジウム講演論文集, A312 (1999) pp.511-512.
- 9) 木村: 液晶による水温分布の可視化について, 第2回流れの可視化シンポジウム講演論文集 (1974) pp.99-102.
- 10) 流れの可視化学会: 新版流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店 (1986).
- 11) 王: 立方体容器内に共存する互いに混ざり合わない異種流体の自然対流熱伝達に関する研究, 慶應義塾大学修士論文 (1996).
- 12) 笠木: 感温液晶の応用, 流れの可視化, 2 (1982) pp.647-654.