垂直加熱・冷却壁による水-固体微粒子懸濁液の自然対流* (初期粒子濃度勾配の影響)

服部 篤^{*1}, 岡田 昌志^{*2}, Chaedong KANG^{*3}

Natural Convection of Water-Fine Particle Suspension in a Rectangular Vessel Heated and Cooled from Opposing Vertical Walls (Effect of Initial Distribution of Particle Concentration)

Atsushi HATTORI, Masashi OKADA^{*4} and Chaedong KANG

^{*4} Department of Mechanical Engineering, Aoyama Gakuin University,
6-16-1 Chitosedai, Setagaya-ku, Tokyo, 157-8572 Japan

A water-fine particle suspension with a uniform initial temperature and various initial concentration distributions in a rectangular vessel was heated from a vertical wall and cooled from the opposing vertical wall. The particle made of SiO₂ had a narrow size distribution (mean diameter of 2.96 μm, standard deviation of 0.023 μm). In order to observe phenomena of the natural convection, the temperature distribution, local particle concentration of the suspension and position of first interface were measured under various temperature differences between the opposing vertical walls. To make the influence of initial particle concentration on the phenomena clear, natural convection of suspension with three patterns of concentration, i.e. a naturally or artificially formed gradient, or non-gradient, was investigated. The pattern of formation of layers was classified by Grashof number. Moreover, to make the influence of initial depth of suspension clear, the suspensions with three initial depths, 50, 100 or 160 mm, were examined.

Key Words: Natural Convection, Suspension, Narrow Size Distribution, Wall Temperature Difference, Concentration Gradient, Layer, Rectangular Vessel, Grashof Number

1. 緒言

懸濁液、乳濁液の自然対流は、食品、薬品の製造プロセス、ダイナミック型氷蓄熱における過冷却水からの微細氷の生成過程ほか、生態、環境、など広い分野でみられ、そのメカニズムを解明することは重要である。しかし、この懸濁液の自然対流は温度差及び粒子濃度差による対流と粒子の沈降（粒子密度が液相よりも大きい場合）とが干渉する複雑な現象であり、従来、ほとんど解明されていない。

Cardoso & Wood⁽¹⁾ は、懸濁液の上に、懸濁液より密度が小さく、懸濁液の分散媒より密度の大きい流体を成層させたとき、懸濁液は粒子の沈降によって界面付近で分散媒だけになり、上層の流体とこの分散媒が混合する事によって対流が起こる現象を報告している。鈴木・岡田⁽²⁾ は、平均粒子径が数ミクロンのガラスビーズを水に分散させた懸濁液を矩形容器内に入れ、底面の中央部から加熱し、両側面から

冷却する自然対流の実験を行った。これにより対流層の形成・消滅の現象が見出された。陳ら⁽³⁾ は、数十ミクロンのガラスビーズをシリコンオイルとテトラリンの混合液に分散させた懸濁液を用い、鈴木・岡田⁽²⁾ と同じ境界条件における対流場をレーザ誘起蛍光粒子による PTV により可視化・計測した。これにより層が 2 層形成され消滅する機構が説明された。岡田ら⁽⁴⁾ は垂直加熱・冷却壁を持つ矩形容器内における粒度分布の広い懸濁液の自然対流の実験を行い、初期段階で、ほぼ水平の境界で隔てられた多数の対流セルの層が上下に形成される事を示した。この層形成は、粒子径の違いにより沈降過程で生じた下向きに大きくなる粒子濃度分布（勾配）に起因すると考え、Kang ら⁽⁵⁾ は粒度分布の狭い粒子からなる懸濁液を用いて、壁面温度差を変えた実験を行った。その結果、(1) 壁面温度差の小さい順に 5 種類の層の形成・消滅が起こること、(2) 粒度分布の狭い懸濁液にも流体力学的拡散⁽⁶⁾ により粒子濃度分布（勾配）が生じ、3 層以上の層形成が生じる条件が存在すること、を示した。

本研究では懸濁液中に存在する粒子濃度分布（勾配）の層形成パターンへの影響を明らかにすることを目的として以下の実験を行った。ここで、粒度分

* 原稿受付 2000 年 12 月 18 日。

^{*1} 青山学院大学大学院 (〒187-8572 東京都世田谷区千歳台 6-16-1)。

^{*2} 正員、青山学院大学理工学部。

^{*3} Seoul National University (136-1 dong, San 56-1, hillim Dong, Kwanak-gu, Seoul 151-742, Korea)。

E-mail: okada@me.aoyama.ac.jp

Fig.1 Experimental apparatus

布の狭い粒子からなる懸濁液を用いた。懸濁液に垂直方向に人工的な初期濃度勾配を付加した後加熱して自然対流を発生させる実験、沈降により自然に形成される粒子濃度分布（勾配）を初期条件とする場合および初期濃度勾配をつけない（非常に小さい粒子濃度勾配を持つ）場合の実験を行い、これらの初期条件の違いによる層形成の違いを比較検討した。また懸濁液の初期水位の層形成への影響を検討した。

記号

g	重力加速度	m/s^2
Gr	グラスホフ数	
L	代表長さ	m
m	粒子濃度勾配の近似直線の傾き	kg/m^4
T	温度	$K (^{\circ}C)$
T_l	低温壁温度	$K (^{\circ}C)$
T_h	高温壁温度	$K (^{\circ}C)$
ΔT	壁面温度差 ($T_h - T_l$)	$K (^{\circ}C)$
β	分散媒（水）の体積膨張率	$1/K$
ν	動粘性係数	m^2/s
$\Delta \rho$	分散媒の密度差	kg/m^3

2. 懸濁液の性状、実験装置及び方法

2.1 懸濁液の性状 本実験では SiO_2 粒子（宇部日東化成（株）製、ハイプレシカ UF）を用い、それを水に分散させて懸濁液とした。 SiO_2 粒子は比重が 2.15、平均粒子径 2.97 [μm]、標準偏差 0.023 [μm] の球形である。これらの値は電子顕微鏡を用いて計測された。

2.2 実験装置 図 1 に実験装置の概要を示す。実験槽は幅 40 [mm]、高さ 160 [mm]、奥行き 200 [mm] の矩形容器である。両側面は銅板でできており、左壁面は高温壁、右壁面は低温壁である。その他の壁面はアクリル板である。実験槽上部及び下部に発泡

Fig.2 Apparatus for initial particle concentration gradient

スチロール製の断熱材を取り付けた。高温及び低温の恒温槽から実験装置の高温壁及び低温壁背面の水路に、温水・冷水を流すことにより実験装置内部の壁面をそれぞれ一定温度に保った。また、高温壁、低温壁温度及び懸濁液中の温度分布を T タイプ熱電対により測定した。

2.3 実験方法

2.3.1 実験方法 本実験では懸濁液の初期粒子濃度を 10 [kg/m^3] とした。実験は以下の手順で行った。実験槽の高温壁と低温壁背面に低温水を流し実験槽を初期設定温度である 10 [$^{\circ}C$] にした。よく攪拌した 10 [$^{\circ}C$] の懸濁液を実験槽に注入し、各実験の条件に合わせた放置時間（初期の乱れを静めるため、及び初期濃度勾配作成のため）後を初期条件とした。高温側の恒温槽から高温壁背面に所定の温度の高温水を流すことにより加熱を開始した。実験開始直後から温度測定、粒子濃度の測定、写真撮影、ビデオ撮影を行った。

2.3.2 初期条件（懸濁液の初期濃度勾配）

二つの方法により初期粒子濃度勾配を作成した。一つの方法では懸濁液を注入後 5 分経った時を時刻 0 とし、2 時間または 4 時間放置し、粒子の沈降により自然に濃度勾配を形成させた。図 10 の 0, 120, 240 [min] の結果が自然形成された濃度分布を表す。下向きに大きくなる濃度勾配を持っており、これは粒子の沈降に従う流体力学的拡散（hydrodynamic diffusion）⁽⁶⁾ により生じたものと考えられる。もう一つは、図 2 に示す装置を用いて作成した人工的な方法である。得られた分布を図 3 に示す。図中の各記号は各濃度分布を初期条件として加熱を開始したあとの壁面温度差をあらわす。図中の直線は、最小二乗法による近似直線である。

人工濃度分布の作成法は以下の通りである。濃度の濃い懸濁液を満水時に全体で 10 [kg/m^3] の懸濁液

Fig.3 Distribution of artificial particle concentration

Fig.4 Transient location of the interfaces
(Initial condition (1) $\Delta T = 8.1[^\circ\text{C}]$) Fig.5 Temperature distribution(Initial condition (1) $\Delta T = 8.1[^\circ\text{C}]$)

になるように作成し、あらかじめ実験槽に注入する。その中にT字型の注入部を沈め、量を階段状に調節（実験槽底部から30mmで20cc、50mmで40cc～）しながら注射器により水を静かに注入する。最初に用意する懸濁液の濃度、水を注入する位置や量を調節して異なる濃度勾配を作成する。また、よく攪拌された10 [kg/m³]の懸濁液を容器に満水になるように注入して5分放置しただけの懸濁液を上記の2種類と区別して、標準条件の懸濁液と呼ぶ。

また、初期水位の影響を調べるために、初期水位を100 [mm]、50 [mm]として標準条件の懸濁液を用いた実験も行った。

以上をまとめると、実験は、以下の初期条件(1)～(4)に対して壁面温度差を変えて行った。初期条件(1)は既報^{4, 5)}と同じ条件であり、初期濃度勾配が小さい場合である。初期条件(3)は流体力学的拡散により生じた濃度分布を初期条件にした場合を意味する。

(1) 標準条件から加熱開始

- (2) 人工的に初期濃度勾配をつけ10分放置後加熱開始
- (3) 自然形成による初期濃度分布を生じさせるために2時間または4時間放置後加熱開始
- (4) 水位を100 [mm]、50 [mm]にして標準条件から加熱開始。

2・3・3 計測方法 実験開始直後から可動式の熱電対を用い、実験装置の中心線に沿って垂直方向に熱電対を2mmずつに上面から下面へ移動させて垂直方向温度分布を測定した。1回の測定に要した時間は240秒であった。各測定点の粒子濃度を測定するために、各点から、予め質量を測定してある小瓶に懸濁液を採取した。採取後の瓶の質量を測定し、また水分を蒸発させてから再び質量を計測した。ここから粒子濃度を算出した。質量の測定には最小目盛か0.1mgの精密天秤を使用した。

3. 実験結果と考察

Fig.6 Distribution of particle concentration
(Initial condition (1) $\Delta T = 8.1[^\circ\text{C}]$)

Fig.7 Transient location of interfaces
(Initial condition (1), (3))

3・1 初期濃度勾配の層形成への影響 初期条件 (1) (2) (3) に対して、それぞれの代表例について温度分布の経時変化を示し、層の形成・沈降の様子を検討する。層及び層境界は、実験槽上面より 1, 2 と番号をつける。壁面温度差は時間の経過に伴い $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 程度変化するが、以下は平均値を表示する。また変化の大きい場合は個別に表記する。

初期条件 (1) で壁面温度差 $\Delta T = 8.1$ の場合に対して、図 4 に層の写真、図 5 に垂直方向の温度分布、図 6 に濃度分布を、図 7 に層境界位置の経時変化を示す。図 7 には初期条件 (3) の場合も併記してある。図 4 の層の写真では 2 番目の層境界が不明瞭なので破線を記入した。図 5 における実線は写真から求めた層境界の位置を表す。図 5 において、加熱開始から 60 [min] では上方に向かって

Fig.8 temperature distribution and location of interface at 180[min] (Initial condition (1) $\Delta T = 2.0[^\circ\text{C}]$)

Fig.9 Temperature distribution
(Initial condition (2) $\Delta T = 8.6[^\circ\text{C}]$)

温度が上昇する領域は 2 ヶ所あり、循環流となる対流セルが二つ生じていることが分かる。これが層となっている。120 [min] では、1 層目と 2 層目の間に新たな層の形成が確認され 3 層となる。時間の経過とともに層境界は沈降し、下の層から消失し 2 層に変化するのが確認できる。第 1 層境界が底面に到達したとき容器内は浮遊粒子がほとんど存在しない 1 層のみとなり、この懸濁液の自然対流現象は終了する。図 6 より第 1 層にはほとんど粒子が存在しないことがわかる。図 7 から、層境界は加熱開始後から一定の速度で降下し、下の層から早く消失することがわかる。

初期条件 (1) で壁面温度差が小さい場合 ($\Delta T = 2.0[^\circ\text{C}]$) について、加熱開始より 180 [min] における層の写真と垂直方向の温度分布を図 8 に示す。図 8 の写真から 2 層の形成が認められる。又、垂

Fig.10 Distribution of particle concentration
(Initial condition (3) $\Delta T = 3.1[^\circ\text{C}]$)

直方向の温度分布により1層目は独立した循環流が起きている事が確認できる。しかし、第2層の温度分布は垂直であり2層目は伝導支配であり、温度分布を形成する対流が生じていないことがわかる。そこで、垂直方向の温度分布から対流が生じていることが認められる層を対流層と定義する。

初期条件(2)に関して、壁面温度差 $\Delta T = 8.6[^\circ\text{C}]$ の場合の異なる時間における垂直方向の温度分布を図9に示す。初期濃度分布(勾配)は図3の◆印に示されている。この例では温度差変動が $\pm 0.7^\circ\text{C}$ であった。図9において、加熱開始10[min]のとき8層を形成している。その後、初期条件(1)の場合と同様に下の層から順に沈降し、消滅した。

初期条件(3)に関して、壁面温度差 $\Delta T = 3.1[^\circ\text{C}]$ 、4時間放置後加熱開始の場合の濃度分布(勾配)を図10に、垂直方向の温度分布の時間変化を図11、第1層境界の経時変化を図7◆印により示す。図7の◇印は、他は同一条件であるが温度差が $7.9[^\circ\text{C}]$ の場合の結果である。図11中の横線は、第1層境界を示す。図10の240分の値が初期濃度分布である。図11(右図)から、加熱開始後30[min]において5つの対流層を確認できる。表1に形成された対流層の数を時間、壁面間温度差とともに示す。表1の温度差 ΔT の欄は同一温度条件として行った各実験の壁面温度差を範囲で示した。初期条件(2)に関しては、加熱開始後10分及び、対流層の最大数が観測されたときの対流層の数とそのときの時間・壁面温度差を下の括弧内に示す。初期条件(1)(3)に関しては、初期段階で安定な対流層が形成していると思われる時刻における値も記入してある。表1から初期条件(1)(3)では、壁面温度差が小さくなるにつれて対流層の数が増

Fig.11 Temperature distribution
(Initial condition (3) $\Delta T = 3.1[^\circ\text{C}]$)

加する。しかし、壁面温度差が $2.2 \sim 1.8[^\circ\text{C}]$ の範囲にある実験結果では、全ての初期条件において対流層の数が他の壁面温度差の場合に比べて少ないことが分かる。初期条件(2)では、初期条件(1)(3)の結果とは逆に、壁面温度差が増加するにつれて対流層の数が多くなることが分かる。初期条件(4)の結果から初期濃度勾配のない(非常に小さい)懸濁液において初期水位が減少すると形成される層の数も減少する傾向を示す。

3・2 層境界の経時変化 初期条件(3)で4時間放置後加熱する実験において、壁面温度差 $\Delta T = 3.1[^\circ\text{C}]$ 、 $\Delta T = 7.9[^\circ\text{C}]$ における第1層境界の経時変化を図7に示す。図中の縦線は加熱開始の点をあらわす。初期状態から加熱開始直前の240[min]まで一定の速度で沈降する。加熱を開始すると、加熱開始前より速い一定速度で沈降することがわかる。また、温度差が大きい方が加熱後の層境界面の沈降速度が速い。加熱により沈降速度が速くなるのは対流により粒子の堆積作用が加速されたためと考える。

3・3 無次元数による対流層形成の分類 懸濁液の自然対流において、対流層の形成は懸濁液中に存在する下向きに大きくなる粒子濃度勾配と、壁面温度差に起因する水の密度差による浮力の影響により起きると考えられる。そこで、初期粒子濃度勾配と壁面温度差の影響を無次元数であるグラスホフ数(式(1))を用いて検討する。

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \quad \dots (1)$$

ここで、温度差は壁面間温度差を用いる。代表長さは、初期粒子濃度勾配 m と実験槽の両壁面温度における水の密度差 $\Delta\rho$ から式(2)より算出する。

Table 1 The number of formed convection layers

Initial condition	Initial depth of suspension	Temperature difference ΔT [°C]			
		9.2 ~ 7.9 [°C]	4.9 ~ 4.1 [°C]	3.5 ~ 2.9 [°C]	2.2 ~ 1.8 [°C]
Artificial particle concentration gradient (2)	160[mm]	8 (10min, 9.2°C)	4 (10min, 4.9°C) 6 (120min, 4.9°C)	1 (10min, 3.5°C) 5 (120min, 3.4°C)	1 (10min, 2.1°C) 2 (240min, 1.9°C)
Natural particle concentration gradient (3)	Leaving for 4hours 160[mm]	3 (30min, 7.9°C)	4 (30min, 4.4°C)	5 (30min, 3.2°C)	1 (30min, 1.9°C) 3 (330min, 1.8°C)
	Leaving for 2hours 160[mm]	3 (10min, 8.4°C)	5 (15min, 4.6°C)	6 (15min, 3.4°C) 7 (60min, 3.2°C)	1 (20min, 1.9°C) 2 (240min, 2.0°C)
No particle concentration gradient (1)	160[mm]	2 (60min, 8.2°C) 3 (120min, 8.0°C)	2 (60min, 4.5°C) 4 (120min, 4.6°C)	3 (60min, 3.4°C) 5 (90min, 3.4°C)	1 (60min, 2.2°C) 2 (360min, 2.0°C)
No particle concentration gradient (4)	100[mm]	3 (60min, 8.5°C)	4 (120min, 4.4°C)	2 (60min, 3.4°C)	1 (60min, 2.0°C)
	50[mm]	/		2 (60min, 4.8°C)	2 (120min, 3.2°C)

$$L = \left| \frac{\Delta \rho}{m} \right| \dots (2)$$

但し、初期条件 (3) では、勾配が一定でないので層形成にもっとも影響があると思われる領域の粒子濃度勾配を用いる。循環流による対流セルが生じるとすると、セル内の上下の最大温度差は壁面温度差である。式 (2) の代表長さは、低温壁温度にある懸濁液が高温壁により温められたときの水の密度の減少と、懸濁液の上昇距離に対応した粒子濃度減少が等しいとしたときの上昇距離を意味する。物性値は、懸濁液中の粒子濃度が十分小さいとして、高温壁と低温壁の平均温度における水の値により代用した⁽⁷⁾。上記のグラスホフ数は安定濃度勾配をもつ水溶液を垂直壁から加熱・冷却したときの二重拡散対流における初期レイリー数⁽⁸⁾と同じ定義である。

初期条件 (2) (3) について、形成された対流層の数とグラスホフ数の結果を図 12 に示す。初期条件 (2) については、表 1 には示していない壁面温度差 $\Delta T = 15.9$ [°C] における結果も示す。この例では温度差変動が ± 0.9 °C であった。図 12 より、Gr が 5×10^3 より小さいとき対流層は 1 層のみである。

また Gr が 1×10^6 より大きい時 2 層を形成する。Gr が $5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^6$ の範囲内にあるとき、多層 (3 層以上) を形成することがわかる。

始めに壁面温度差の小さい場合を検討する。初期条件 (2)、壁面温度差 $\Delta T = 3.3$ [°C]、 2.0 [°C] の条件においては、加熱開始直後 (表 1, 10[min]) では第 1 層境界下に対流層が形成されなかった。これは、壁面温度差が比較的小さいために、濃度勾配の影響が支配的となり安定な層が形成されていると考えられる。同様に壁面温度差 $\Delta T = 2.2 \sim 1.8$ [°C] においては初期条件 (3) においても形成される層の数が少ない。これらは上記図 12 の Gr が 5×10^3 より小さい場合に相当する。

代表長さは、懸濁液が密度差によって上昇しうる高さを意味する。懸濁液中の濃度勾配が仮に等しいとすれば、壁面温度差が増加すると式 (2) より層一つあたりの対流幅が大きくなる。図 4 に示したグラフの傾き m を用いて、初期条件 (2) における壁面温度差 $\Delta T = 8.6$ [°C] と $\Delta T = 15.9$ [°C] での代表長さを求めると、前者が 0.03 [m]、後者が 0.096 [m] である。液の深さが 160 [mm] であるので $\Delta T = 15.9$ [°C] では、多くても 2 層しか形成できないことになり、実験結果と一致する。壁面温度差 ΔT

Fig.12 Relation between the number of convection by layer and Grashof

Fig.13 Temperature distribution
(Initial condition (1) $\Delta T = 10.5[^\circ\text{C}]$)

Table 2 Values for unstable region

Initial condition		Temperature difference $\Delta T[^\circ\text{C}]$	$m [\text{kg}/\text{m}^4]$	$\Delta \rho [\text{kg}/\text{m}^3]$	$L [\text{m}]$
No particle concentration gradient	10[min] after of start heating	4.3	0.21	0.87	0.0041
	20[min] after of start heating	6.0	0.16	2.2	0.013

(Initial condition (4) $\Delta T = 4.5[^\circ\text{C}]$)

(Initial condition (1) $\Delta T = 4.4[^\circ\text{C}]$)

Fig.14 Temperature distribution

$\approx 8.6 [^\circ\text{C}]$ では、代表長さが適度に短いため図 9 の 10 [min]に見られるように多くの対流層を形成した。壁面温度差が増加すると多層を形成するだけのスペースを確保できなくなり、対流層の数が減少すると考える。壁面温度差 $\Delta T = 15.9[^\circ\text{C}]$ の場合は図 12 の Gr が 1×10^6 より大きい場合に相当する。

初期条件 (1)、初期濃度勾配のない（非常に小さい濃度分布の）懸濁液において、 ΔT が 4°C 以上の場合、加熱開始直後の対流層は 2 層以下であった。これは代表長さが大きくなるために Gr が 1×10^6 より大きくなったと考える。しかし、時間の経過とともに多層（3 層以上）の層形成を確認した。多層の形成過程を以下に考察する。図 5（初期条件 (1)、 $\Delta T = 8.1 [^\circ\text{C}]$ の場合の垂直温度分布）から、

対流層の形成は、対流がすでに起きている部分から発生するのではなく、対流層の間にはさまれた、下向きに大きくなる温度勾配を持った不安定な領域から発生・成長してくる事がわかる。ここで、初期条件 (1)、 $\Delta T = 10.5[^\circ\text{C}]$ における高さ 100 [mm] 以上の範囲について垂直方向の温度分布の経時変化を図 13 に示す。図 13 より加熱開始後 10 [min] では下側に 1 層の対流層とその上に下向きに温度が上昇する不安定領域がある。20 [min] ではさらに上に対流層が 1 層できている。また、この二つの対流層の間の不安定領域に対流層を形成し始めていると思われる温度分布の乱れ部分が認められる。その後、そこから層が成長して行くのが確認でき、30 [min]にあるように 3 層を形成するにいたる。そ

ここで、加熱開始より 20 [min] を対流層形成の直前と考え、10 [min], 20 [min] のグラスホフ数を求める。計算に必要な不安定領域の濃度分布は 10 [min] おきに測定した。得られた値を表 2 に示す。また対流層の数とグラスホフ数の関係を図 12 の△, ▲印により示す。ここで、温度差は不安定領域の両端における温度差を用いた。表 2 より、時間とともに温度差が増加しそれにより水の密度差による浮力が増加すること、また濃度分布の傾きは減少することがわかる。すなわち、対流が発生しやすくなっている。加熱開始後 10 [min] でのグラスホフ数は図 12 に示すように上記の多層（3 層以上）を形成する領域 $5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^6$ の範囲より小さいが、3 層目を形成する直前である加熱開始後 20 [min] では、この領域内に入っている。

懸濁液の自然対流と水溶液の二重拡散対流を比較した場合、下向きに正の安定な濃度勾配と加熱・冷却による密度差による浮力が作用して多層を形成する点は同じであるが、粒子の沈降は懸濁液の特色であり、層境界の不安定領域から新しい層が生まれる過程は懸濁液固有の現象と考える。

3・4 懸濁液初期水位の層形成への影響 初期条件 (4) に関して、壁面温度差 $\Delta T = 4.5 [^{\circ}\text{C}]$ の場合における垂直方向の温度分布の時間変化を初期条件 (1) における壁面温度差 $\Delta T = 4.4 [^{\circ}\text{C}]$ の場合とともに図 14 に示す。図中の実線は、実験開始時の懸濁液の初期水位 100 [mm] を示す。60 [min] において、不安定領域および一番下の対流層の範囲に初期条件による違いが見られるが、温度分布のパターンはほぼ等しい。120 [min] において、共に複数（四つ）の対流層を確認でき、水面からの温度分布はほぼ一致する。また、表 1 において壁面温度差 $\Delta T = 3.5 \sim 2.9 [^{\circ}\text{C}]$ における初期条件 (1) と初期条件 (4) 初期水位 100 [mm] の場合を比較すると層の形成数に差がある。これも上記の場合と同じく水面からの温度分布はほぼ一致するが、初期条件 (1) では、下部に対流層が存在した。このために、対流層の形成数に差が生じた。水位が低い初期条件 (4) は多層を形成するだけのスペースが初期条件 (1) に比べ小さいために実験槽下部の対流層の数が抑制されたと考えられる。また、初期水位が 50 [mm] では、その影響がより顕著に現れ、2 層のみの形成になったと考えられる。

4. 結論

本研究では、垂直加熱・冷却壁を持つ矩形容器内における粒度分布の狭い懸濁液の自然対流において、初期濃度勾配と初期水位が層形成に与える影響を実験により検討し、以下の結果を得た。

- ①懸濁液中に存在する下向きに大きくなる濃度勾配と、壁面温度差に起因する溶媒である水の密度差による浮力との間に対流層を形成する条件が存在し、3 層以上の多数の対流層が形成される条件は上昇距離を代表長さとしたグラスホフ数により $\text{Gr} = 5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^6$ と表現できる。 $\text{Gr} < 5 \times 10^3$ より小さい範囲では、粒子濃度が安定に分布しているため対流層の形成が抑制され、 $\text{Gr} > 1 \times 10^6$ では上昇距離が大きくなり、懸濁液深さの制限（160 [mm] の場合）から対流層が 2 層となる。
- ②本実験で用いたグラスホフ数は、不安定領域内の対流層形成の議論にも適応できる。
- ③初期水位が減少すると、実験層下部における対流層の形成数が抑制されるが、ある時間の経過後の水面から測った垂直方向の温度分布はほぼ一致する。
- ④加熱開始後の層境界は加熱開始前より速い一定速度で沈降する。

本研究の遂行に当り、日本学術振興会未来技術開拓学術推進事業 JPSP-RFTF97P01003 の助成を受けた事を付記し、謝意を表する。

文献

- (1) Cardoso, S. S. S. and Wood, A.W., *J. Fluid Mech.*, 285(1995), 165-180.
- (2) 鈴木哲也・岡田昌志, 機論, 62-593, B(1996), 241-247.
- (3) 陳濱, ほか 2 名, 機論, 64-625, B(1998), 2852-2859.
- (4) 岡田昌志, ほか 3 名, 機論, 65-625, B(1999), 126-133.
- (5) Chaedong Kang, Masashi Okada, Atsushi Hattori and Kazuya Oyama, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 44-15, (2001), 2973-2982.
- (6) Davis, R. H., *Advances in Fluid Mechanics, Sedimentation of Small Particles in a Viscous Fluid*, (1996), 161-198, Computational Mechanics Publications, Southampton.
- (7) 近藤保・鈴木四郎, 入門コロイドと界面の科学, (1994), 12-13, 三共出版.
- (8) 日向滋, ほか 4 名, 混相流, 12-3 (1998), 233-241.