サスペンションにおける自然対流の可視化画像計測* (速度場, 温度場, 界面形状の同時計測による流動機構の解明)

陳 濱^{*1}, 三神史彦^{*2}, 西川進栄^{*3}

Visualization and PTV Study of Natural Convection in Particle Suspensions (Simultaneous Measurements of Velocity, Temperature and Interface between Particle-Free Fluid and Suspension)

Bin CHEN, Fumihiko MIKAMI and Nobuhide NISHIKAWA

Natural convection of suspension was studied experimentally using both refractive index matching and laser induced fluorescent (LIF) technique. A rectangular test section was filled with particle suspension and was heated from a horizontal bottom, and two facing vertical walls were kept at the constant temperature. The images of the fluorescent particles were captured by a CCD camera through a sharp cut filter which separates emitted fluorescence from scattered excitation light. The flow velocity fields were analyzed quantitatively using PTV. Interface between particle-free fluid and suspension as well as temperature field were visualized simultaneously. It was suggested that two-layer convection cells were driven by heating and sedimentation of particles which drives convection in the overlying layer due to the release of the heated clear fluid at the interface.

Key Words: Natural Convection, Flow Visualization, Digital Image Processing, Laser Induced Fluorescent, Suspension, Particle Tracking Velocimetry, Double Diffusive Convection, Refractive Index Matching

1. 緒 言

サスペンションにおける自然対流は懸濁粒子の沈降と温度差による密度こう配の干渉によって生じる特有な流動現象であり, 固体微粒子分散液を用いる太陽熱集熱器や, クラスレートをを用いた潜熱蓄熱システム, 2成分系の凝固を伴う材料製造過程などに見られる⁽¹⁾⁽²⁾. 底面の一部を加熱, 向かい合う二つの側壁を冷却したときの, 矩形容器内における水-固体微粒子懸濁液の自然対流が鈴木・岡田⁽¹⁾, Okada-Suzuki⁽²⁾によって調べられており, 二重拡散対流と類似した多層の対流セルの出現・消失現象などのサスペンションに特有な流動が報告されている. しかしながら, ここでは分散媒と懸濁粒子に水とガラスのマイクロビーズが用いられており, 流体は白濁して内部の速度場の詳細は得られていない.

分散媒とガラスビーズの屈折率整合によってサスペンション内部の流動を可視化する試みが, 著者ら⁽³⁾によって行われており, 2層の対流の出現と消滅の過程

の流れ場の変化が調べられている. ところが, トレーサ粒子のほかに懸濁粒子からの散乱光によるノイズが含まれるため, 速度場の計測に PTV を適用することは困難であった. そこで, 本研究では, 屈折率整合の技術によってサスペンション内部の観察を可能にしたうえで, アルゴンイオンレーザによって誘起され蛍光を発するトレーサ粒子を用い, レーザ光のみをカットするフィルタによって懸濁粒子からの散乱光を完全に除去し, 微小なトレーサ粒子の画像を得ることを試みた. また, 分散媒と懸濁液の間に現れる界面の位置と形状および容器内の温度分布を, 速度場と同時に計測することによって, サスペンションに特有な2層の対流の発生機構を界面の位置と温度分布の関係から明らかにした.

2. おもな記号

a : 温度伝導率
 $\Delta T = T_h - T_c$
 g : 重力の加速度
 Gr : グラスホフ数 $= g\beta\Delta TL^3/\nu^2$
 L : 容器の一辺の長さ
 Pr : プラントル数 $= \nu/a$
 Ra : レーレー数 $= GrPr$

* 原稿受付 1997年11月20日.

*¹ 千葉大学大学院 (☎ 263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33).

*² 正員, 千葉大学工学部.

*³ 千葉大学工学部.

- T_c : 低温壁の温度
 T_h : 高温壁の温度
 u, v : 速度の x 方向および y 方向成分
 β : 分散媒の体膨張係数
 ν : 分散媒の動粘性係数
 ρ : 分散媒の密度
 ϕ : 懸濁粒子の混入率 [= (懸濁粒子の重量)/(分散媒の重量)]

3. 実験装置および方法

3.1 蛍光粒子 本研究では、トレーサとして、直径 150~200 μm のポリエチレンビーズ(住友精化: HE-3008 粒度調整品, 比重 0.975)の表面にアルゴンイオンレーザによって誘起され蛍光を発する蛍光色の不透明アクリル樹脂絵具(ターナー色彩: アクリルガッシュ, No. 206 蛍光レッド)をコーティングしたものを使用した。ここで使用したアクリル絵具は水性であるが、いったん乾くと強い耐水, 耐薬品性を示し, 退色せず, 実験に使用する分散媒を汚染しない。励起光であるアルゴンイオンレーザは全波長発振で使用した。レーザ誘起蛍光粒子を用いた可視化の原理を図 1

Fig. 1 Laser Induced Fluorescence (LIF) particles and functions of the optical filter

Fig. 2 Distribution of glass beads diameter

に示す。蛍光粒子は励起光 λ_1 よりも波長の長い蛍光 λ_2 を発するため, 560 nm 以下の波長を遮るシャープカットフィルタ (Kenko O-56) を CCD カメラに取付けることで励起光を完全に遮断し, 蛍光粒子からの発光のみをとらえることが可能となった。

3.2 実験流体 本研究では、懸濁粒子としてソーダ石灰ガラスを主成分とする平均粒径 $57.5 \pm 6.4 \mu\text{m}$ のガラスビーズ(東新 No. 0.05, 比重 2.5, 屈折率 1.5)を用いた。図 2 に顕微鏡で実測した粒子径分布を示す。懸濁粒子と屈折率整合をするために、分散媒としてシリコンオイル(東芝シリコン TSF 451-1000, 屈折率 1.40)およびテトラリン(tetralin, 屈折率 1.54)の重量比 1:2.57 の混合物を使用した。これにガラスビーズを分散媒の重量の 3 wt% 混入し, よくかくはんして分散させた。懸濁粒子と分散媒の物性値を表 1 に示す。

3.3 実験装置 図 3 に実験装置の概略を示す。容器は一辺の長さ $L=60 \text{ mm}$ の立方体で, 実験流体

Table 1 Physical properties of the particles, suspending fluid and tracer particles used in experiments

Glass beads	
Density	2.5 g/cm ³
Average diameter	57.5 ± 6.4 μm
Refractive index	1.5
Suspending fluid	
Density	0.975 g/cm ³
Viscosity(at 30°C)	20.12 cSt
Refractive index	1.50
Thermal diffusivity	5.35 × 10 ⁻⁸ m ² /s
Coefficient of thermal expansion	0.7996 × 10 ⁻³ 1/K
Tracer particles	
Density	0.975 g/cm ³
Average diameter	161.5 ± 17.9 μm

Fig. 3 Scheme of the experimental setup

が満たされる。左右の壁面(低温壁)および底面の $60\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ の加熱部分(高温壁)は厚さ 1 mm の銅板製で、その他の部分は厚さ 10 mm のアクリル板の断熱壁になっている。低温壁の温度 T_c は、恒温槽からの恒温水を循環させることによって $T_c = 28^\circ\text{C}$ に保たれている。高温壁の銅板の下には、熱源として面状ヒータ(坂口電熱: SAMICON230N, 20 V , 30 W)が密着してある。銅板と面状ヒータの間には温度測定用の熱電対(Kタイプ)が埋め込まれており、熱電対の出力は温度計測・制御装置(CHINO: KP1160B030)へ入力される。設定温度 T_h と各時点の温度に基づいて出力される制御電圧によって直流電源装置(菊水: PAK20-18A)の面状ヒータ印加電圧を制御し、加熱面の温度 T_h を定常状態において $43 \pm 0.1^\circ\text{C}$ の範囲に制御した。実験は、低温側の温度 T_c に設定した懸濁液をよくかくはんしながら容器内に気泡が残らないように注意深く注入し、よくかくはんして一様に混ざり合ったのを確認した後、 30 s 静置して内部の流動が静止するのを待ち、高温壁の温度を設定温度に上げることによって開始した。また、容器の後壁の内側に感温液晶シート(Edmund Scientific Co., 温度範囲 $30 \sim 35^\circ\text{C}$)を張り付け、壁面温度分布を可視化した。感温液晶シートによる温度場の変化の可視化結果は、適宜カメラ(NIKON F2, レンズ: NIKKOR 135 mm , f2)によって撮影した。

3・4 可視化画像計測 本実験では、容器の正面に2台のCCDカメラを設置し、CCDカメラ1ではLIFによって速度計測用のトレーサ粒子の画像を撮影し、CCDカメラ2では懸濁粒子の沈降に伴って現れる界面の位置を撮影する。容器の背面には温度分布を撮影するためのカメラ3を設置する。撮影装置の概略を図4に示す。

Fig. 4 Visualization system

蛍光レッドのトレーサ粒子を実験流体に 0.37 g/l 混入し、レーザライトシートによって、容器の $z = 5L/6$ の鉛直断面内の流動を可視化した。トレーサ粒子の映像はレンズの前方にフィルタ(Kenko O-56)を取付けたCCDカメラ1 (SONY, XC-77RR)によって撮影される。CCDカメラはフレーム蓄積モードで使用し、レーザ光をAOM(音響光学素子)によって各ビデオフレームに1回 10 ms ずつ発光させることにより、同時刻の瞬間の画像を各フレームに記録する。レーザ光の照射タイミングは、同期信号発生器、フィールド判別回路、デジタルリタダ、およびファンクションジェネレータを使って制御し、CCDカメラと同期をとっている。トレーサ粒子の移動はビデオカセットレコーダ(SONY, SVO-5800)に録画される。撮影した画像は 1 s に 30 フレームからなるが、本現象では流れが緩慢であるため、1フレームごとの速度情報を得ることは不可能である。本実験では、 30 フレームに1回の割合(1 s おき)で画像処理装置(Nexus Qube)に画像を取り込むことにより、 1 s のトレーサ粒子の移動量から速度分布を算出した。フレーム間のトレーサ粒子の追跡には、Nishino ら⁽⁴⁾ の「三時刻パターンマッチング法」を用いた。PTVシステムを図

Fig. 5 Test section and PTV system

Fig. 6 Example of a captured video image of glass beads suspension with $\phi = 3\text{ wt\%}$

5 に示す。

フィルタを取付けていない CCD カメラ 2 によって撮影された画像はビデオカセットレコーダ(三菱, HV-S700)に録画され, 画像処理ソフト(Adobe Photo-shop LE-J)によって二値化処理される。懸濁粒子の散乱光による輝度差から, 懸濁液と上澄みの界面の位置およびその形状を知ることができる。

図 6 にカメラ 1 およびカメラ 2 で撮影された同時刻の画像の例を示す。カメラ 1 の映像では, トレーサ粒子の像のみがはっきり写っている。これに対してフィルタを取付けていないカメラ 2 の映像では, トレーサ粒子は懸濁粒子の散乱光の中に埋もれてしまっている。また, カメラ 2 の映像で, 明るい部分が懸濁液, 暗い部分が上層の分散媒のみの部分を示しており, 両者のシャープな境界(ここでは界面と呼ぶ)がとらえられている。

カメラ 3 では, 典型的な対流パターンを生じたときの感温液晶シートの色の変化を撮影した。なお, この撮影のときのみ, ハロゲンランプ(150 W)を光源として使用した。

4. 実験結果および考察

4.1 実験条件

本実験の実験条件を表 2 に示す。分散媒の動粘性係数 ν はウペローデ粘度計を用いて実測し, 表 2 の無次元数の計算には低温側の温度 T_c における値を使用した。その他の混合物の物性は文献(5)に基づいて計算した。

なお, 本研究の実験条件では, 微粒子の混入率が 3 wt%(体積分率で 1.2%)と小さいこと, また微粒子の沈降速度($\equiv$ 界面の沈降速度)が約 0.2 mm/s と小さいことから, 微粒子の沈降に伴う微粒子と分散媒との間の熱伝達の影響は無視でき, 微粒子の混入が, 懸濁液のバルク密度の変化に起因する浮力以外に与える影響は小さいと考えられる。

4.2 流れ場, 界面の形状, 温度分布の時間変化

図 7 に懸濁粒子の混入率 $\phi=3$ wt%のときの, 分散媒のみの部分と懸濁液との間に形成される界面形状, 速度分布および温度分布の変化を示す。図 7(a-1)~(a-7)中の灰色の部分が懸濁液を, 白色の部分が分散媒のみの部分を示しており, 同時に速度ベクトルを表示している。温度分布の可視化写真では, 加熱開始

前は全体が黒色であり, 加熱開始後, 温度が上昇した部分の色が変化する。図 7(b-1)~(b-7)の白い部分は温度が約 2°C 上昇した部分に相当する。

図 7 から, 時間の経過とともに, 流れのパターンに特徴的な変化が見られることがわかる。まず, 底面が加熱されることにより, 底面付近に強い対流が起こるが, 上層の分散媒のみの部分の密度のほうが小さいため, 流れは界面より上へ上昇することができない [図 7(a-1)]。温度分布は, 時間とともに下層の懸濁液の対流している部分で上昇していく [図 7(b-1)]。時間が経過すると, 図 7(a-2)に示すように, 下層の対流は弱くなっていく。このとき, 懸濁粒子の沈降によって, 界面の位置は $y/L=0.7$ 付近 [図 7(a-1)] から $y/L=0.6$ 付近 [図 7(a-2)] まで下がってくる。このことは, 下層の懸濁液の部分における粒子密度が増加することを意味し, これに伴って懸濁液のバルク密度も増加する。逆に, 密度の小さい上澄みの分散媒のみの領域が下方へ広がってくる。この結果, 底面付近の暖められた流体塊の温度差による浮力とバルク密度の増加による下向きの浮力の釣り合いから, 対流が抑制されると考えられる。図 7(b-2)と図 7(b-3)では温度が上昇した領域は底面から一定の高さにとどまり, また, 温度分布にほとんど変化が見られないが, 懸濁粒子の沈降によって界面の位置は下がってくる。図 7(a-3)では, 暖められた部分の上端を界面が通過しており, 上部で対流が引き起こされている。同時に下部では, 温度差による規模の小さい対流が起こっており, このとき, 容器内には 2 層の対流セルが形成される [図 7(a-3)]。上層の対流が開始すると, 上部の温度も上昇し [図 7(b-4)], 上層の流れによって界面が大きく変形する。界面の形状と上層の対流セルの領域には位置的な対応が見られる [図 7(a-4)]。左右の低温壁の部分で上層の分散媒のみの部分が界面の変形によって底面に至ると, 容器全体は一对の対流セルとなり [図 7(a-5)], 温度の高い部分も容器の上面の近くまで到達する [図 7(b-5)]。その後, 下層の懸濁液の部分はすべて持ち上げられ, 柱状になる [図 7(a-6)]。持ち上げられたバルク密度の高い懸濁液の部分は不安定になって崩壊し, 再び成層することなしに沈降する。このとき容器内の流れは一時的に混乱状態になる。懸濁粒子が沈降した後は, 温度差のみによる定常対流になる

Table 2 The parameters in experiments

$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	Gr	Pr	Ra	ϕ (wt%)	
15	5.81×10^4	2.40×10^2	1.42×10^7	0	3

(a-1) 47 s

(b-1) 47 s

(a-2) 1 min 47 s

(b-2) 1 min 47 s

(a-3) 2 min 27 s

(b-3) 2 min 27 s

(a-4) 4 min 21 s

(b-4) 4 min 21 s

Fig. 7(1/2)

Fig. 7(2/2) The velocity distributions, temperature distributions, and interface shapes at various times after initiation with $\phi = 3 \text{ wt\%}$, $\Delta T = 15^\circ\text{C}$

Fig. 8 The velocity and temperature distribution at 1 minute after initiation with $\phi = 0 \text{ wt\%}$, $\Delta T = 15^\circ\text{C}$

[図7(a-7)]. このとき、温度分布も定常状態になり、容器全体が暖められる [図7(b-7)].

一方、図8に懸濁粒子の混入率 $\phi=0$ wt% (非懸濁) のときの加熱開始から1 min 後の温度分布と速度分布を示す。懸濁液の1 min 47 s [図7(b-2)] のときの温度分布と比べると、温度の高い領域が直接容器の上面に到達しているのが特徴である。また、非懸濁の場合には、加熱開始から定常状態に至るまで容器全体に終始一対の対流セルを生じる。

4.3 2層の対流セル出現のメカニズム 二重拡散対流における溶液の濃度界面は、サスペンションの場合には懸濁液と上澄みの境界面に相当し、二重拡散対流と類似している部分も多い。しかし、サスペンションの場合の境界面は懸濁粒子の沈降によって時間とともに下方へ移動するため、二重拡散対流とは異なった見方が必要になってくる。4.2節で述べたように、2層の対流セルの出現には、界面の位置と、そのときの温度分布が重要な役割をしていると考えられる。図9は、加熱開始後の、界面の位置と温度上昇域の最大到達位置の時間変化を示している。界面の位置は左右の壁面における平均値 y_{lwall} と容器中央での値 $y_{lcenter}$ を計測し、温度上昇域の上端は感温液晶シートの変化が始まった部分(低温壁の温度より約2°C上昇した部分)の底面からの最大到達距離 y_r を計測した。

温度上昇域の変化は、ガラスビーズ混入率が0 wt%と3 wt%のときで大きく異なり、0 wt%のときには加熱開始後速やかに容器上面まで温度が上昇するのに対して、3 wt%のときには $y/L=0.55$ 付近でいったん一定値に落ち着いた後、再び上昇を始めて容器上面に到達する。3 wt%の場合に温度上昇域の変化がこのような経過をたどるのは、容器底面で暖められた流体が、密度が小さい上澄みに遮られるために、直接容器上面

に到達できないことが関係している。

一方、界面の位置は、粒子の沈降によって時間とともに下に移動する。壁面における値に比べて容器中央での値の変化が少ないのは、容器中央付近では巻き上げられた懸濁粒子によってつねに光が散乱しているため、壁面における値のほうが、実質的な界面の位置を表していると考えられる。

ここで注目すべき点は、加熱開始後約140 sで、壁面における界面の位置が、温度上昇域の最大高さの位置を通過しており、その前後で対流パターンが大きく変化していることである。すなわち、界面の通過後、上層の対流が引き起こされ、2層の対流セルが発生する。このとき一定値をとっていた温度の上昇域の最大高さは、界面が通過した後、上層の対流が発生することによって、再び上昇を開始する。界面の高温流体塊の通過は、暖められた懸濁液の部分から懸濁粒子のみが取り除かれることを意味し、界面の通過に伴い高温の分散媒が開放される。界面の通過前までは温度差による浮力と懸濁粒子による逆向きの浮力が釣り合っていた界面付近の部分において、懸濁粒子の消滅によって浮力のバランスが崩れ、これが2層の対流セル出現のメカニズムになっていると考えられる。

Kerrら⁽⁶⁾⁽⁷⁾ および Cardoso-Woods⁽⁸⁾ は、懸濁液の上に、懸濁液よりは密度が小さいが、懸濁液の分散媒よりは密度の大きい流体が重なっているときに、懸濁粒子の沈降によって界面の付近で上層の流体よりも軽い分散媒が開放されることによって引き起こされる対流現象について報告している。本研究における2層の対流セル出現のメカニズムも、これと同様の機構によるものと考えられる。

5. 不確かさの評価

PTVの計測で考慮すべき不確かさは、おもに計測正確度、粒子の追従性などに由来する誤差から構成される。

粒子の速度 u_i は次の式により計算される。

$$u_i = (dl_i/dt)f \dots \dots \dots (1)$$

ここでは dl は粒子の移動量、 f は倍率係数である。包括度95%での速度成分の不確かさを次の式で評価する⁽⁹⁾。

$$\Delta u_i^2 = (f\Delta dl_i/dt)^2 + (dl_i f \Delta t/dt)^2 + (dl_i \Delta f/dt)^2 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、第1項はPTVシステムの光学解像度に起因する誤差、第2項はデジタルリタードに起因する誤差であり、第3項は画像の全体の倍率係数に起因する誤差である。

Fig. 9 Time course of the height of the profile of temperature distribution and interface from the base

Table 3 Uncertainties and typical values of quantities in Eq. (2)

dl_x	7.98pixel
dl_y	6.90pixel
Δdl_x	± 0.08 pixel
Δdl_y	± 0.08 pixel
dt	1s
f	194.17 μ m/pixel
Δf	± 0.91 μ m/pixel
Δu	± 17.15 μ m/s
Δv	± 16.75 μ m/s

リターダの設定誤差 Δdt は, $(\Delta dt) = \pm (\text{設定遅延時間} \times \text{水晶精度}) + (\text{信号伝達遅延時間})$ で表される。ここで, 設定遅延時間は $1/50$ s; 水晶発振子の精度は $\pm 1 \times 10^{-5}$; 信号伝達遅延時間は 0.5 μ s である。このことから, デジタルリターダの設定誤差 Δdt は非常に小さく (0.5 ± 0.2 μ s), 第2項は他の項に比べて無視できると考えられる。そこで, 計測の不確かさは表3に示すように計算される。ここで dl_x と dl_y はそれぞれ定常対流のときの粒子の最大移動量, dt は時間間隔である。 $\Delta dl_x, \Delta dl_y$ は画像の水平および垂直解像度であり, 典型的な粒子の面積が約 1 pixel^2 ということによって計算される。

結局, 包括度 95%での瞬間粒子速度成分 u, v の不確かさは次のようになる。

$$\Delta u = \pm 0.017 \text{ mm/s}; \Delta v = \pm 0.017 \text{ mm/s}$$

粒子の流体への追従性に起因する誤差はトレーサ粒子の粒子緩和時間⁽¹⁰⁾によって評価される。本研究で使用したトレーサ粒子の粒子緩和時間は 75 μ s であり, 追従性は十分であると考えられる。

6. 結 論

立方体容器の底面の一部を高温壁, 2枚の向かい合う側壁を低温壁としたときのサスペンション特有の自然対流の流動機構の解明を目的として, 速度場, 上澄みと懸濁液の界面, および温度分布の同時計測を行い, 以下の結論を得た。

(1) 屈折率整合技術とレーザ誘起蛍光粒子を用いることにより, 懸濁粒子の散乱光ノイズのないトレーサ粒子のみの画像を得ることができ, 従来得られなかったサスペンション内部の流れ場を PTV によって計測することができた。

(2) 加熱開始後, 分散媒のみの場合はすみやかに温度上昇域が上面に達するのに対して, 3 wt%のサスペンションの場合は, 加熱された懸濁液が界面を突っ切って上昇することができず, 温度上昇域は底面からある高さの範囲に限定される。

(3) 粒子の沈降によって界面がこの温度上昇域を通過することによって上層で対流が引き起こされ, 2層の対流が発生する。

(4) 2層の対流は, 下層の懸濁液が流れによって持ち上げられた後, 不安定になって崩壊し, 再び成層することなしに沈降することによって, 1層の対流セルに遷移する。

本実験の遂行にあたって, 本大学学部生の鈴木保彦君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 鈴木哲也・岡田昌志, 機論, **62**-593, B(1996), 241-247.
- (2) Okada, M. and Suzuki, T., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **40**-13 (1997), 3201-3208.
- (3) Mikami, F., ほか2名, *Theoret. Appl. Mech.*, **46** (1997), 341-348.
- (4) Nishino, K. and Torii, K., *Proc. ISTP-6 Thermal Eng.*, **III** (1993), 339-344.
- (5) 大江修造, 設計者のための物性定数推算法, (1985), 6, 8, 9章, 日刊工業新聞社.
- (6) Huppert, H. E., ほか2名, *J. Fluid Mech.*, **226** (1991), 349-369.
- (7) Kerr, R. C. and Lister, J. R., *J. Fluid Mech.*, **243** (1992), 227-245.
- (8) Cardoso, S. S. S. and Woods, A. W., *J. Fluid Mech.*, **285** (1995), 165-180.
- (9) Adachi, T., ほか2名, *J. Flow Visualization and Image Processing*, **1** (1993), 317-335. または *Proc. ISROMAC-5*, Hawaii, USA, (1994-5), 441-460.
- (10) 神保元二・ほか5名, 微粒子ハンドブック, (1991), 115-116, 朝倉書店.