円柱形粒子の分散を伴う格子乱流場における粒子と流体の運動機構*

伊藤 靖仁^{*1}, 山名 浩史^{*2}, 小森 悟^{*1}Particle Motion and Flow Structure in Grid-Generated Turbulence
with Columnar Particle DispersionsYasumasa ITO, Hiroshi YAMANA and Satoru KOMORI^{*3}^{*3} Department of Mechanical Engineering and Science,
and Advanced Research Institute for Fluid Science and Engineering, Kyoto University,
Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501 Japan

Particle motion and flow structure were experimentally investigated in grid-generated turbulence with spherical or columnar particle dispersions. Particle motions were taken by a high-speed video camera and instantaneous streamwise and horizontal velocities were measured using a PIV. The results show that columnar particles fall without clustering in the free-falling particle experiment, whereas spherical particles form clusters during the falling process. Turbulence intensity in the grid-generated turbulence with columnar particle dispersion is larger than that in the turbulence with spherical particle dispersion. It is found by flow visualization that these differences in particle motion and fluid structure are attributed to the irregular horizontal movements and rotation of columnar particles.

Key Words: Liquid-Solid Two-Phase Flow, Flow Visualization, Turbulent Flow, Columnar Particle

1. 結 言

粒子の分散を伴う二相流は、粉体輸送、流動層などの工業装置内や、河川、雲などの環境中に頻繁に見られる現象である。したがって、粒子の分散を伴う二相流の流体の流動機構および粒子の運動機構を明らかにすることは、極めて重要である。

粒子の分散を伴う流れについては、これまでに数多くの研究がなされてきた^{(1)~(5)}。その結果、乱流中に分散する球形粒子が乱流に及ぼす影響は乱流と粒子の特性時間の比(ストークス数)および粒子の体積率により決定されることや⁽¹⁾⁽²⁾、静止流体中を球形粒子が落下するとクラスタが形成されること⁽³⁾などが明らかにされた。しかし、現実存在する粒子の形状が球形であることはむしろ希であり、多くの場合、粒子は非球形である。例えば、河川を流れる砂は扁平楕円形であることや、雲を形成する氷晶は六角柱であることなどが挙げられる。粒子の形状が異なると粒子が流体から受ける流体力も大きく異なることから⁽⁶⁾、球形粒子と非球形粒子とでは粒子の運動が異なるだけでなく、

粒子によって誘起される流体運動も大きく異なると考えられる。しかしながら、単一の非球形粒子に着目した研究例は存在するものの、多数の非球形粒子が流体中に分散する場に関する研究例は極めて少ない^{(7)~(9)}。また、これまでに粒子の分散を伴う混相流に対して多くの乱流モデルや粒子の運動予測モデルが提案されているが、上述のようにこれらのほとんどは球形粒子を対象としたものであり、非球形粒子を対象としたモデルは数少ない。また、それらの既存のモデルも信頼性が疑わしいとされている⁽¹⁰⁾。実際、粉体輸送や燃焼のシミュレーションでは、飛散粒子が球形ではないことが知られているにもかかわらず、球形粒子を仮定したモデルを用いて予測シミュレーションが行われているのが現状である⁽⁹⁾。

以上のことから、非球形粒子の分散を伴う二相流における流体の流動機構および粒子の運動機構を明らかにすることは流体工学的に非常に興味深く、また必要不可欠であると言える。そこで本研究では、球形粒子と非球形粒子の運動機構および流動機構の違いを明らかにするために、非球形粒子の一つとして比較的球形に近い形状を持つ円柱形粒子を取り上げ、静止流体中での粒子の自由沈降実験および格子乱流中での粒子の分散実験を行った。球形粒子に対しても同様の実験を

* 原稿受付 2008年3月26日。

^{*1} 正員、京都大学大学院工学研究科(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)。^{*2} 京都大学大学院工学研究科。

E-mail: komori@mech.kyoto-u.ac.jp

Table 1 Particle property

Particle shape	Material	Diameter (Length) [mm]	Specific density
Sphere	Teflon (PTFE)	3.175	2.2
Column	Aluminum	3.0	2.7

行い比較することにより、粒子形状が粒子運動や流動構造に及ぼす影響を明らかにした。

主な使用記号

- d : 乱流格子直径 ($=0.003$) [m]
 d_p : 球形粒子の直径または円柱形粒子の直径
 および長さ [m]
 M : 乱流格子間隔 ($=0.02$) [m]
 R_{uv} : 主流方向と水平方向流速変動の相関係数 [-]
 Re_p : 粒子レイノルズ数 ($=\bar{U}d_p/\nu$)
 $\bar{U}$: 主流方向平均流速 [m/s]
 St : ストークス数 ($=\tau_p/\tau_f$)
 U, V : 主流方向および水平方向瞬間流速 [m/s]
 u, v : 主流方向および水平方向流速変動 [m/s]
 $\bar{U}$: 主流方向平均流速 [m/s]
 x, y, z : 主流 (鉛直), 水平, スパン方向座標 [m]
 ν : 動粘性係数 ($=1.0 \times 10^{-6}$) [m²/s]
 ϕ : 検査領域内に存在する粒子の体積率 [%]
 ρ : 粒子の比重 [-]
 τ_f : 流体の特性時間 [s]
 τ_p : 粒子の特性時間 [s]

2. 実験

2.1 粒子の自由沈降実験 図1に、自由沈降実験システムの概略を示す。テストセクションはアクリル製で、断面が $0.1 \times 0.1\text{m}^2$ 、鉛直方向長さが 1.5m である。テストセクション内にはフィルタを通した水が貯められている。テストセクションの上部には、粒子を落下させるための振動ふるい装置と、粒子をより分散させるための立体格子が取り付けられている。振動ふるい装置は、粒子を入れるためのアクリル製容器 (断面 $0.09 \times 0.09\text{m}^2$ 、高さ 0.1m) とその上部部に接着された振動モータからなり、板ばねを介して立体格子の上部に取り付けられている。容器の底面は網目状になっており、振動モータを稼働させるとテストセクション内に粒子がほとんど偏ることなく落下する仕組みになっている。また、振動モータの回転数を変化させることにより、単位時間当たりに落下する粒子の個数 (粒子の体積率) を変化させることができる。立体格子は、直径 d が $d=0.003\text{m}$ 、格子間隔 M が $M=0.02\text{m}$

Fig. 1 Schematic of free-falling particle experiment

の格子が、鉛直方向に対してランダムに 0.005m 間隔で30段重ねられている。座標系は立体格子の下端を原点とし、鉛直下向きを x とする。

表1に本実験で用いた粒子の諸特性を示す。球形粒子として、テフロン (PTFE) 製の球形粒子を用いた。比重 ρ は $\rho = 2.2$ であり、直径 d_p は $d_p = 3.175\text{mm}$ である。一方非球形粒子には、テフロン製球形粒子と大きさおよび落下速度がほぼ等しい、直径と長さが共に $d_p = 3.0\text{mm}$ のアルミニウム製円柱形粒子 ($\rho = 2.7$) を用いた。また本実験では、粒子の体積率 ϕ を $\phi = 0.02 \sim 0.04\%$ または $\phi = 0.25 \sim 0.3\%$ とした。

粒子が落下する様子を、ハイスピード CMOS ビデオカメラ (Dantec Dynamics NanoSense MkIII 型、画像解像度: $1280 \times 1024\text{pixels}$) を用いて撮影した。光源にはハロゲンランプを用いた。なお、本論文内で示される画像には、テストセクションの壁面近傍で運動する粒子も含まれている。撮影位置は $x=1.05 \sim 1.25\text{m}$ とし、サンプリング周波数 200Hz で撮影を行った。また図を省略するが、 $x = 0.05 \sim 0.25\text{m}$ の位置においても撮影を行い、テストセクション上部において粒子が偏ることなく分散されていることを確認した。

Fig. 2 Schematic of particle-dispersion experiment in grid-generated turbulence

2.2 乱流中における粒子の分散実験 図2に、乱流実験システムの概略を示す。水は貯水タンクから縮流部、整流部を介してテストセクション下部に流入され、テストセクション部を鉛直上方に流通後、テストセクション上部に設置されたヘッドタンク部からパイプを通して貯水タンクに戻る。テストセクションの大きさは自由沈降実験で用いたものと同様である。また、テストセクションの流体流入部には、直径 d が $d=0.003\text{m}$ 、格子間隔 M が $M=0.02\text{m}$ の乱流格子が設置されている。座標系は、テストセクション流体流入部の中心軸上を原点とし、主流方向を x 、水平方向を y 、スパン方向を z とする。

粒子を $x=0\sim 0.4\text{m}$ ($x/M=0\sim 20$) の領域にほぼ均一に分散させた状態で実験を行った。用いた粒子は自由沈降実験で用いたものと同じであり、粒子の体積率 ϕ を $\phi=0.1\%$ および 0.2% とした。この状態を維持するためには、流体の主流方向平均流速 $\bar{U}$ を粒子の終末速度とほぼ等しくする必要がある。表2に、本実験で設定した主流方向平均流速 $\bar{U}$ を示す。 $\phi=0.1\%$ および $\phi=0.2\%$ の場合に対して、テフロン製球形粒子を分散させた場合にはそれぞれ $\bar{U}=0.310\text{m/s}$ および $\bar{U}=0.308\text{m/s}$ 、アルミニウム製円柱形粒子を分散させた場合には共に $\bar{U}=0.300\text{m/s}$ とした。このように主

Table 2 Mean streamwise velocity in particle-laden grid-generated turbulence

Particle	$\bar{U}[\text{m/s}]$	
	$(\phi=0.1\%)$	$(\phi=0.2\%)$
Teflon sphere	0.310	0.308
Aluminum column	0.300	0.300

流方向平均流速がほぼ等しい条件下で実験を行うことにより、粒子の形状が流体運動に及ぼす影響を定量的に評価した。なお、本実験条件下での球形粒子に対する粒子レイノルズ数 Re_p およびストークス数 St は、それぞれ $Re_p \approx 900$ 、 $St \approx 1\sim 4$ であった。

主流方向および水平方向の流体の瞬間速度を PIV (Dantec Dynamics DC-PIV システム) を用いて測定した。光源には Nd:YAG レーザ (NewWave Research SoloIII 型) を用いた。CCD カメラ (Dantec Dynamics FlowSense M2 型、画像解像度: 1600×1186 pixels) を用いて流動場を撮影し、PIV 解析ソフトウェア (Dantec Dynamics FlowManager) を用いて主流方向および水平方向の瞬間流速を算出した。トレーサ粒子にはローダミン B がコーティングされたポリスチレン粒子 (直径: $1\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$) を使い、カメラのレンズに波長が 570nm をしきい値とするハイパスフィルタを取り付けることにより、トレーサ粒子から発せられる蛍光のみを撮影した。測定をサンプリング周波数 8Hz で行った。

また粒子運動の可視化には、粒子の自由沈降実験と同様の装置を用いた。ただし、粒子のスパン (z) 方向位置を確認するために、テストセクションの中心軸を通る断面に 1.5W のシート状アルゴンイオンレーザ (ケンブリッジレーザ Model 95L-7 型) を照射した⁽¹¹⁾。また、速度場も同時に可視化するために、流体にトレーサ粒子 (メルク Iridiodin 100 Silver pearl) を混入した。

3. 結果および考察

3.1 粒子の自由沈降実験 図3に、 $\phi=0.25\sim 0.3\%$ の場合における粒子が落下する様子を示す。図3(a)より、球形粒子の場合には、粒子が筋状に並んで落下 (クラスタリング) することがわかる。また撮影された動画から、クラスタを形成した粒子は分散して落下する粒子より落下速度が速いことが確認された。これらの結果は既往研究と同様である。一方、図3(b)より、円柱形粒子はほとんどクラスタリングせず、ランダムに分散しながら落下することがわかる。また動画を見ると、球形粒子はほぼ直線的に垂直落下するのに対して、円柱形粒子は水平方向にも揺れながら落下していた。これらの相違の原因は、円柱形粒子が回転すると

(a)Teflon sphere

(b)Aluminous column

Fig. 3 Images of falling particles at $x=1.05\sim 1.25\text{m}$ and $\phi = 0.25 \sim 0.3\%$

水平方向に運動する傾向が強くなり、先に落下した粒子が放出した渦の影響を受けにくいだけでなく、円柱形粒子は面により粒子に働く抗力が変化するため、不規則な動きをしやすいことにある。なお、体積率が低い ($\phi = 0.02 \sim 0.04\%$) 場合には、粒子間距離が極めて近い場合を除いて、形状を問わず粒子は相互作用することなく落下した。

3.2 乱流中での粒子の分散実験 図 4 に、 $\bar{U}=0.3\text{m/s}$ の場合におけるテストセクション中心軸上での主流方向流速変動強度 $\overline{u^2}$ および水平方向流速変動強度 $\overline{v^2}$ の主流方向分布を示す。ただし、縦軸は主流方向平均流速の 2 乗 $\bar{U}^2$ で無次元化されている。図 4 より、主流方向および水平方向の流速変動強度は、 $x/M=4\sim 18$ の領域においてほぼ同じ値をとり x/M の-1.17 乗に従って減衰することがわかる。また、図を省略するが、 $x/M=10$ および 15 における $\overline{u^2}/\bar{U}^2$ と $\overline{v^2}/\bar{U}^2$ の水平方向分布もそれぞれ一致していたこ

Fig. 4 Streamwise distributions of turbulence intensities of streamwise and horizontal velocity fluctuations in grid-generated turbulence at $\bar{U}=0.3\text{m/s}$: $\blacklozenge$, $\overline{u^2}/\bar{U}^2$; $\square$, $\overline{v^2}/\bar{U}^2$

(a)Teflon sphere

(b)Aluminous column

Fig. 5 Images of particle dispersion in grid-generated turbulence at $x/M = 10 \sim 15$ and $\phi=0.2\%$

Fig. 6 Streamwise distributions of turbulence intensities of (a)streamwise and (b)horizontal velocity fluctuations in grid-generated turbulence at $\phi=0.1\%$: $\bullet$ and $\circ$, Teflon sphere; $\square$ and $\blacksquare$, Aluminum column

とや、 u と v の相関係数がほぼ 0 であったことなどから、本テストセクション内には等方性乱流場が形成されていることが確認された。

図 5 に、 $x/M=10\sim 15$ における粒子の分散状態を示す。図 5 より、粒子形状にかかわらず粒子が均一に分散していることを確認できる。また $\phi=0.1\%$ の場合も同様に均一分散していた。

図 6 に、テフロン製球形粒子およびアルミニウム製円柱形粒子を $\phi=0.1\%$ で分散させた場合における、テストセクション中心軸上での主流方向および水平方向流速変動強度の主流方向分布を示す。図 6 より、粒子を分散させた場合の方が粒子を分散させない場合 (格

Fig. 7 Streamwise distributions of turbulence intensities of (a)streamwise and (b)horizontal velocity fluctuations in grid-generated turbulence at $\phi=0.2\%$. Symbols as in Fig. 6

子乱流場) に比べて、特に下流域において流速変動強度が増大することがわかる。また、円柱形粒子を分散させた場合の方が、球形粒子を分散させた場合に比べて流速変動強度が大きい。図 7 に、 $\phi=0.2\%$ の場合における同様の分布を示す。図 7 より、体積率 ϕ が大きな方が流速変動強度も大きなこと、また $\phi=0.1\%$ の場合と同様に、円柱形粒子の方が球形粒子に比べて大きな流速変動を誘起することがわかる。定量的には、 $x/M=10$ における $\overline{u^2}/\overline{U^2}$ および $\overline{v^2}/\overline{U^2}$ は粒子を分散させない場合 (格子乱流場) に比べて、 $\phi=0.1\%$ の場合には、球形粒子を分散させた場合にそれぞれ 1.24 倍および 1.16 倍、円柱形粒子を分散させた場合にはそれぞれ 1.43 倍および 1.27 倍であった。また、 $\phi=0.2\%$

(a) Teflon spherical particle

(b) Aluminum columnar particle

Fig. 8 Trajectories of particle movements in grid-generated turbulence

の場合には、球形粒子を分散させた場合にはそれぞれ 1.80 倍および 1.31 倍、円柱形粒子を分散させた場合にはそれぞれ 2.12 倍および 1.53 倍であった。

円柱形粒子の方が球形粒子に比べて流体により大きな流速変動を誘起させる理由を明らかにするために、格子乱流中での単一粒子の運動の可視化を行った。図 8 に、 $x/M = 10 \sim 15$ におけるテフロン製球形粒子およびアルミニウム製円柱形粒子の運動の軌跡を示す。なお、図中の斑点状の光はトレーサ粒子であり、画像は粒子がテストセクション中心断面 ($z = 0$) 付近を運動した場合のものである。図 8 より、球形粒子を分散させた場合には、ほとんど回転せずに主流方向に対してほぼ直線的に運動するのに対して、円柱形粒子を分散させた場合には、粒子が回転しながら水平方向に激しく不規則に運動することがわかる。したがって、この回転を伴う不規則な水平方向運動が、球形粒子を分散させた場合に比べて円柱形粒子を分散させた場合の方が流体により大きな流速変動を誘起する要因となっていると言える。

4. 結 言

本研究では、球形および円柱形粒子の分散を伴う固液二相流中での粒子の運動機構および流体の流動機構を、実験により明らかにした。得られた知見は以下の通りである。

- 粒子を水中に自由沈降させた場合、球形粒子がクラスタを形成する条件下でも、円柱形粒子は分散状態を保ちながら落下する。
- 本実験条件下では、粒子の分散を伴う格子乱流場の流速変動強度は、粒子の分散を伴わない場合に比べて増大する。また、粒子の体積率が等しい場合には、円柱形粒子の方が球形粒子に比べてより大きな乱れを誘起する。これは、球形粒子は主流方向に対してほぼ直線的に運動するのに対して、円柱形粒子は回転しながら水平方向に激しく運動するためである。

これらの実験結果は、固液混相流の数値モデルの検証と開発に役立つことが期待される。

謝 辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 (課題番号 19206023) の援助を受けて行われた。

文 献

- (1) Elghobashi, S., *Appl. Sci. Res.*, **52** (1994), 309-329
- (2) Gore, R. A. and Growe, C. T., *Int. J. Multiphase Flow*, **15** (1989), 279-285
- (3) Kajishima, T., *Int. J. Heat Fluid Flow*, **25** (2004), 721-728
- (4) Kurose, R. and Komori, S., *J. Fluid Mech.*, **384** (1999), 183-206
- (5) Helland, E., Bournot, H., Occelli, R., and Tadrist, L., *Chem. Eng. Sci.*, **62** (2007), 148-158
- (6) Rajitha, P., Chhabra, R.P., Sabiri, N.E., and Comiti, J., *Int. J. Miner. Processing*, **78** (2006), 110-121
- (7) Arsenijevic, Z. Lj, Grbavcic, Z. B., Garic-Grulovic, R.V., and Zdanski, F.K., *Powder Technol.*, **103** (1999), 265-273
- (8) Chhabra, R. P. and Srinivas, B. K., *Powder Technol.*, **67** (1991), 15-19

- (9) Yin, C., Rosendahl, L., Kær, S.K., and Sørensen, H., *Chem. Eng. Sci.*, **58** (2003), 3489-3498
- (10) Langston, P. A., Al-Awamleh, M. A., Fraige, F. Y., and Asmar, B. N., *Chem. Eng. Sci.*, **59** (2004), 425-435
- (11) Ito, Y., Nagata, K., and Komori, S., *Phys. Fluids*, **14-12** (2002), pp.4362-4371
-