22 線形せん断流ダクト内の球状粒子の運動

福井大学工学部 山本富士夫[○], 福井大学工学部 幸川光雄,
渋谷工業 紋谷英樹, 信越化学工業 宮本浩幸,
福井大学学生 河本竜哉,

Motion of Particles in Linear Shear Flows through a Duct

Fujio YAMAMOTO^{*1}, Mitsuo KOUKAWA^{*1}

Hideki MONYA^{*2}, Hiroyuki MIYAMOTO^{*3}, Tatsuya KAWAMOTO^{*4}

Linear shear flows with constant velocity gradients are made through a duct by putting unequal-spacing parallel rods in it. The flow characteristics of the shear flows are measured and motion of spherical particles is investigated in the duct.

Effects of the velocity gradients of linear shear flows at a high Reynolds number on lift applied on a spherical particle are investigated by photographing trajectories of a sphere falling in upward shear flows and those of particles suspending in horizontal shear flows using a high speed video system. It is made clear that lift is applied on a sphere from the higher velocity side to the lower velocity side.

Key Words; Linear Shear Flow, Gas-Solid Two-phase Flows, Particle Motion, Lift Force.

1. 緒言

最近の固気二相流の数値シミュレーションの研究では、粉粒体に働く揚力や抗力、壁面との反発と摩擦について単相流の中で行われた実験で得られた実験値を導入し、計算の一般化をはかり、また、 κ - ε モデルを導入し気流の乱れが粒子の運動に与える影響を調べるなど、乱流特性の数値計算も行っている。このように固気二相流の数値シミュレーションはますます重要視されている。

実際の固気二相流では、管内気流は乱流せん断流をしているので、一様な単相流の中で

*1 Fukui University, Dept. of Mech. Engg., Bunkyo Fukui, 910, Japan.

*2 Sibuya Kogyo Co. Mameda-honmachi, Kanazawa-shi, 920, Japan.

*3 Shinetsu Kagaku Kogyo Co. 2-1-5 Kitago, Takefu-shi, 915, Japan.

*4 Graduate School of Fukui University.

得られた実験係数の値をそのままシミュレーションに用いるのは問題である。せん断乱流中に置かれた円柱や球に働く揚力や抗力に関する研究は、層流の場合には多く見られるが、乱流の場合には少ない。とくに、揚力の作用方向が低レイノルズ数の層流の場合と乱流の場合とでは反対になることはあまり知られていないようである⁽¹⁾。また、せん断流による揚力は無視されることが多いが、鉛直管内では揚力は粒子の横方向の運動を支配するので、それを無視するのは妥当ではない。そこで著者らは平均速度こう配が一定で数%の乱れ度を有する、いわゆる、線形乱流せん断流の二次元ダクトを作った。その流れの速度分布、乱れ度分布、レイノルズ応力分布などのダクト特性と、線形せん断流ダクト内の球状粒子の運動をステレオ写真および高速度ビデオで記録し、解析した結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

2. 1 ダクトと不等間隔格子

図1 (a),(b)に実験装置の概略図と座票を示す。座標の原点を不等間隔格子の中心にとり、気流の方向をx方向とする。気流は、y方向に直線的な速度こう配を持ちz方向には一様な二次元せん断流を有する。ダクトは、150mm×150mmの鉛直吸込み形で、写真撮影の都合上、厚さ5mmの透明アクリル板で作られている。その全長は2700mmである。ダクトの入口にベルマウスを付け一つのハニカムと5枚のスクリーンを100mm間隔に置いて、一様な気流が得られるようにした。テストセクションでは、せん断格子のない場合、一様な気流の最大平均流速は20m/s、乱れ度は1.4%である。また流速の調節にはブロウ出口に付けられた弁を用いた。線形せん断流を作るために、y方向に不等間隔で配置した直形3mmの丸棒からなる格子をテストセクションの上流250mmのところに取り付けた。各丸棒間の間隔はOwen-Zienkiewicz⁽²⁾による非粘性流体の単純せん断流の作成理論を基にしたが、そのままでは十分に一様な速度こう配が得られないため、試行錯誤的に格子の間隔と調整と速度分布の測定とを繰り返した。

Fig.1 Outline of experimental apparatuses

Fig.2 Velocity distribution in the main flow direction

無次元速度こう配 $G = \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{2y}{U_d} \right)$ が $G=0.2, 0.4, 0.6$ の一定の3種類の線形せん断流を得た。図2

に速度分布 (U は気流の時間平均速度, U_d は気流のダクト断面平均速度) を示す。いずれの速度こう配についても良好な直線性が得られている。なお、テストセクションの区間では、主流方向における速度こう配は一定に保たれた。また、断面平均流速を $U_d=12 \sim 19 \text{ m/s}$ の間で変化させても速度こう配に変化はなかった。また、粒子の軌跡をを高速ビデオを用いて撮影するに当たり、このダクトを水平に配置したが、この場合のダクト特性も前に述べた鉛直配管の場合と同様の特性を示した。流速 U の測定には標準ピトー管を用いた。また、 x 方向と y 方向の速度分布の乱れ度やレイノルズ応力の測定には、熱線流速計のI形プローブを回転させる方法を用いた。これらのデータ処理のために、熱線流速計、A-Dコンバータ、およびパーソナルコンピュータからなる自動計測システムを用いた。実験ダクトの乱れ度 T_u を図3にレイノルズ応力の分布を図4に示す。

Fig. 3 Turbulence intensity of the x component

Fig. 4 Reynolds stress distribution

2. 2 線形せん断流中の落下球の軌跡

線形せん断流中の球の運動軌跡に及ぼす揚力の影響を調べるために、落下球の軌跡をストロボで照明して付きのカメラで撮影する。供試球は直径が $d=5 \text{ mm}$ で密度 ρ が $\rho = 4470 \text{ kg/m}^3$ のガラス球である。

2. 3 粒子の運動の撮影

ダクト内を運動する粒子を追跡する方法として、本実験では、大量の粒子が高速で移動するので、高速ビデオを用いた。使用したビデオは、1秒間に400画面取り込みNTSC方式(60画面/秒)で再生される。カメラをダクトの鉛直上方に配置し、 $x/2b=6.67$ ($x=1000 \text{ mm}$, $2b$ はダクトの幅)の所を撮影した。また、使用した粒子は直径 $d=2.8215 \text{ mm}$, 密度 $\rho = 1125 \text{ kg/m}^3$ のものを使用した。また、撮影された映像からX-Yコーディネータを用いて粒子を逐次追跡して、各粒子の運動軌跡を求めた。

3. 実験結果とその考察

3. 1 鉛直ダクト内の落下球の軌跡

図5(a)~(c)は, 実験ダクト内の上向き線形せん断流の中を落下する球の運動軌跡のストロボ写真である。これらの写真より, 軌跡は落下するにつれて鉛直線より気流の低速側に偏向している。これより, 落下球は気流の高速側から低速側に揚力を受けていることがわかる。また, 軌跡の鉛直線からのずれが速度こう配 G とともに大きくなることが認められる。

Fig.5 Photograph of a sphere falling in a shear flow

3. 2 粒子に働く揚力と偏向角度 θ 図6は $x/2b=6.67$ で数百個の粒子を追跡し, 得られた結果をまとめ偏向角度の頻度をヒストグラムで表したものである。速度の高速側から低速側に移動した粒子を-で表し, これと逆方向に移動したものを+とした。これから多数の粒子がダクト内の気流速度の高速側から低速側に偏向していることがわかる。また, 図7は $x/2b=6.67$ の断面において, それぞれの場所について粒子の偏向角度を求めた図である。この図より気流の速度の高い側から低い側に移動する粒子の多いことがわかる。

Fig.6 Frequency distribution of angle θ

Fig.7 Particle number distribution for each angle θ in the y direction

4. 結言

- 1) 本実験で使用した不等間隔格子を備えたダクトにより, テストセクションにおいて, 無次元速度こう配 $G=0.2, 0.4, 0.6$ である速度こう配が一定のせん断流れを得た。
- 2) 気流と粒子の相対速度で定義された粒子のレイノルズ数が600以上の場合, 粒子は近寄り流れの高速側から低速側へ向かう揚力を受け, その方向に偏向して運動する。

参考文献

- (1) 山本, 平成元年度科学研究費補助金(一般研究C)研究成果報告書, 63550131(1990)。
- (2) Owen, P.R. and Zienkiewicz, H.K., J. Fluid Mech., 2-6(1957), 521-531.