

II-27

剪断流中の自由粒子まわりの不安定性について

北海道大学工学部 ○学生員 清水啓之  
 北海道大学工学部 正会員 森明巨  
 北海道大学工学部 フェロー会員 板倉忠興

はじめに

Gore と Crow は、流水中へ粒子混入によるの乱流強度変化に関し、 $d/l$  ( $d$ :粒子径、 $l$ :乱れスケール)をパラメーターとするモデルを提案した<sup>1)</sup>。著者らはこれの適合性を調べ、剪断流に良く適合することを見出し、また coleman らの滑面での浮遊砂実験<sup>2)</sup>について、対数則流速分布の積分定数  $A(5\sim 5.5)$ と粒子レイノルズ数  $R_p = \frac{u_* d}{\nu}$  ( $u_*$ :slip 速度)、浮遊砂濃度  $C$ との関係を調べ、 $R_p \sim 5$ のときはわずかな粒子の混入で  $A$ は2以下に低下することを示した<sup>3)</sup>。著者らは、粒子の回転により流体の混合が引き起こされ流速が低減し、乱れを生成していると考えた。

本研究は、外側のみが回転する同軸二重円筒間に粒子を投入し、回転移動する粒子が不安定を引き起こす効果について調べたものである。装置は外円筒径 15.0cm、内円筒径 3.4cm、深さ 40.5cmである。粒子にはプラスチック製の中空円筒を比重調整して用い、周辺にウランを散布し可視化を行った。

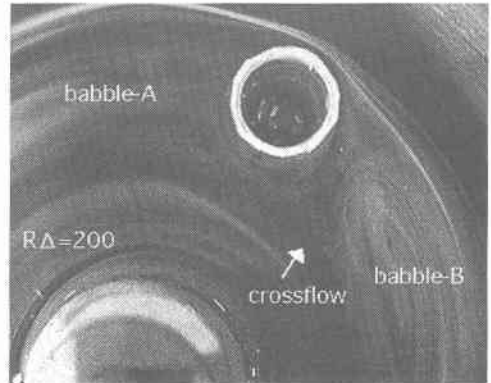
1 粒子投入による流況変化

1 粒子投入による代表的流況 (剪断レイノルズ数  $R_\Delta = \frac{\Delta u d}{\nu} = 200$ ;  $\Delta u = \frac{du}{dr} \cdot d$ )を pic.1 に示す。これは Acrivos らによる平行剪断流の数値モデル<sup>4)</sup> (fig.1:  $0 < \Omega < 1/2$ )の流況といくつかの点を除いて基本的に一致している。

第1の相違点として回転剪断流における babble-Bが無限でない点である。内側の流れが外側に反転し、babbleを作り上げている。第2は粒子の後方に外側から内側への crossflow (pic.1)が発生する点である。第3は先述の2点により乱れが発生する点である。

1点目について、babble-Bは  $R_\Delta$ によって形状を変化させ、 $R_\Delta$ の低いものは babbleの形状を保ちにくくなり、無限と有限の2つの状態を見せる。 $R_\Delta = 30$ 程度で反転は起こっても babbleを発生しなくなった。また、後方と同様に前方でも babbleを作るきっかけとなる流跡線の突起が発生したが、外側円筒の回転による粒子外側の安定性のため発達しなかった。

2点目について、crossflowは  $R_\Delta < 300$ で周期的に発生し、大きく乱れを広げていった。またレイノルズ数によって後方の渦の安定性も変動し、渦径、剥離位置などが変化する。これらの変動は、粒子の回転がかなり低速



pic.1 代表流況

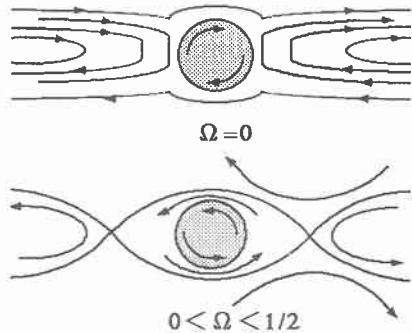


fig.1 Acrivos の数値解 Ω: 粒子回転速度

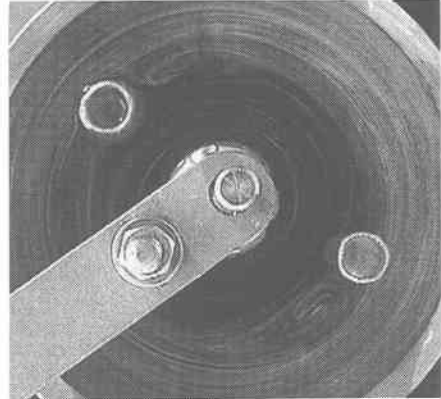
Study on the instability of the shear flow by the particle

by Hiroyuki Shimizu, Akio Mori, Tadaaki Itakura

( $0.12\text{cm/s}$ ,  $d=1.6\text{cm}$ ,  $R_\Delta = 220$ )であるため、Acivosの $0 < \Omega < 1/2$ と $\Omega=0$ の状況が交互に現れていると考えられる。このcrossflowは、両babble発生時に生じる停留点の位置が粒子上から粒子と $1/2$ 粒径程度変動するため、変動が周期の不安定性を引き出し、fig.1における側流が大流入を起こしていると考えられる。crossflowの流入の際に、粒子後方の反転位置付近では常に大きく反転を起こすことからこの2点は関係が深いと考えられる。

### 複数粒子の流況変化

ここでは、円筒間に2つの粒子の距離を変えて投入した。 $R_\Delta = 220$ で対角線上に距離を保ちながら粒子を投入した際は、1粒子のものと流況はほとんど変化はなかったがcrossflow発生頻度は低下し、babble-B端部での乱れの程度も弱くなっている(pic.2)。



pic.2  $R_\Delta = 220$

次に後方粒子(前方: I 後方: II)が接近する過程を示す(fig.3-1)。約 $1/3$ 円周程度の距離で粒子Iのbabble-Bが影響を受ける。さらに接近すると粒子Iのbabble-Bの形状が崩れる。その後、粒子IIのbabble-Aが外側、粒子Iのbabble-Bが内側になり両babbleが平行に並ぶ(fig.3-1 0.0sec)。外側のbabbleは粒子Iを追い越して流れ去る。内側のbabbleは一時的に粒子に挟まれ粒子間に漂う(fig.3-1 6.0~10.0sec)。その後、このbabbleはさらに接近する後方粒子によって内側に押し出され、粒子IIの側面を通過した後方に流れ去る(fig.3-1 18.0sec)。babbleのなくなった粒子間には、粒子Iの外側から粒子IIの内側への流れが生じる(fig.3-1 20.0sec)。この後のプロセスは、粒子が接触するかどうかで異なる。

両粒子が接触すると(fig.2-1)粒子の回転が停止し粒子の流下速度が低下する。そのため粒子後方では粒子内側の流れが大きく外側に引き出され、乱れが生じる。

接触をしないケース(fig.2-2)では、粒子Iが内側に、粒子IIが外側にはじき出され粒子IIが粒子Iを追い抜く。その際粒子IIの後方では、外側の流れが内側に大きく入り込みcrossflow型の流れが発生する。粒子I側では前方で小規模のcrossflowが内側から外側へ入り込み、流れを乱すのが観察された。

また、近接していた粒子が、離れていく過程では、わずかの距離(1粒径程度)の発生で両粒子にまたがる閉じた流域にbabbleが生じる。3粒径程度まで距離が広がると、粒子II側停留点の位置が粒子II

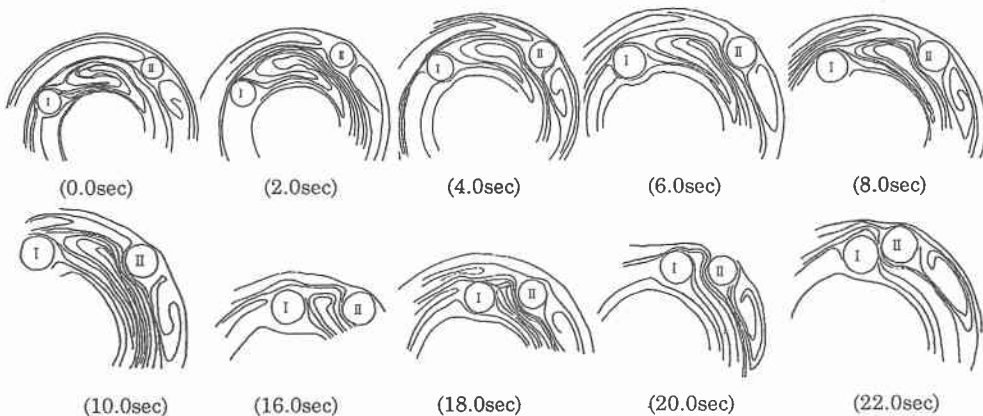


fig.2-1 2粒子接触プロセス

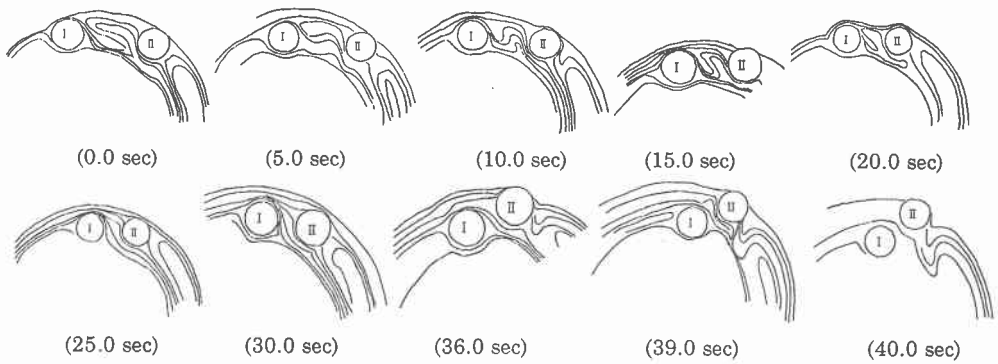
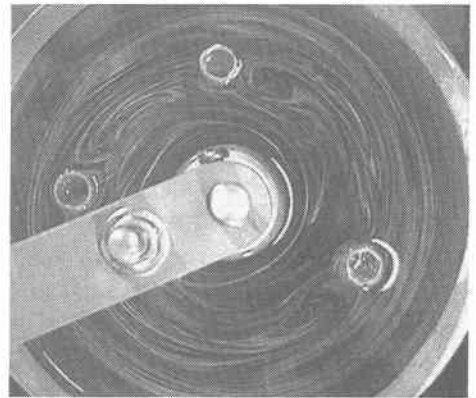


fig.2-2 2粒子通過プロセス

から間隔が開きはじめ、その部分の流跡線に内側から突起が発生する。突起部が前方に移動することにより粒子 I の bubble-B が生成される。その後粒子間の距離が広がるに従って、粒子 II 近くに停留点を持つ流れとして安定する。

また、3 粒子の投入では粒子間の距離が 2 粒子に比べ縮まるため、bubble-B の形成に影響を与え、形状が複雑化する。その際、bubble-B 付近は不安定になり crossflow が頻発するケースも見られる(pic.3 :  $R_\Delta = 100$ )。4 粒子の投入では大きく乱れたため粒子の位置も安定しなかった。



pic.3  $R_\Delta = 100$

### 考察

著者らは以前粒子を投入することにより流速分布に変曲点が現れ(fig.3)、この変曲点が乱れの発生源になった可能性と、レイノルズ数が乱れの増減に影響することを示した。変曲による速度勾配の減少は  $R_\Delta = 100 \sim 220$  のもので 2 粒子でも顕著に見られた。しかし、 $R_\Delta > 270$  で粒子投入後そのような効果は減少し(Fig.4-1,2)、流れも安定なものになった。このことは、剪断レイノルズ数  $R_\Delta$  には bubble の安定性や生成する乱れの影響の他、速度勾配の減少の効果に対し、 $R_\Delta = 220 \sim 270$  の付近に critical な値があると考えられる。しかし、複数粒子の投入で剪断レイノルズ数が乱れを発生する値であっても、乱れが減少する状況を見出した。

$R_\Delta = 220$  の流れに 1 粒子を混入すると bubble による乱れや crossflow の発生により周辺に乱れが発生する。しかし、2 粒子を投入すると周辺の流れは安定化した。粒子の投入位置は異なるが、共に速度勾配が減少している。1 粒子で速度勾配の減少を考慮に入れると  $R_\Delta = 50$  程度まで減少している。1 粒子によって生じる  $R_\Delta = 50$  が 2 粒子投入時の  $R_\Delta$  ならば、この剪断レイノルズ数の減少は乱れにとって安定の方向に働くので乱れの減少の説明がつかうと考えられる。

3 粒子以上で大きく乱れたのは、粒子それぞれの bubble-A,B が干渉する距離にあるなどの異なった乱れの

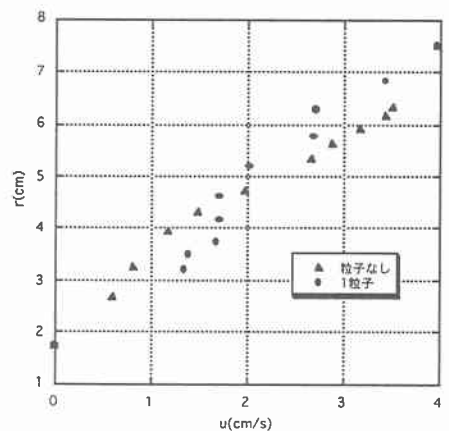


fig.3  $R_\Delta = 220$

生成機構が働いたと考えられる。

$$u = \left( \frac{u_* \cdot y}{\nu} \right) u_* = \frac{u_*^2 \cdot y}{\nu}$$

$$\left( \frac{u_*^2 \cdot d}{\nu} \right) \cdot d$$

のように近似されるので、 $R_\Delta = \frac{\nu}{u_*^2 \cdot d} = R_s^2$  となり  
 複数投入後の  $R_\Delta$  は 50 になることから  $R_s = 7$  程度になる。  
 $R_s < 7$  で流体の混合が進めば、境界層内の流速は減少する  
 ため、coleman らによる積分定数の減少と合致しているよ  
 うにみえる。

村上ら<sup>6)</sup>は平板上の剪断流に粒子投入を行い、粒子の前方  
 (流下方向側)に側壁付近の乱れを引きだした上昇流を見  
 出した。今回の実験では crossflow タイプの高速流の下降が  
 発生している。この2流況は、境界層中の上部と下部に存在  
 する粒子に相当すると考えられる(fig.4)。

実際の浮遊砂においては、流れを一様化し乱れを殺す作用  
 があることが知られている。今回の結果から、粒子の混入は  
 乱れを増加させるだけでなく、単独では乱れを発生させる  
 剪断レイノルズ数であっても複数の混入粒子が流れを混合す  
 ることが乱れを減衰させ、安定化させる可能性があることを示  
 唆している

参考文献

- 1) R.A.Gore and C.T.Crow International Jounal Multiphase Flow vol.15,No.2,1989 Effect of Particle size on Modulating Turbulent Intensit
- 2) NEIL L. COLEMAN J.of Hydraulic Reseach 19,No.3 1995 Velocity profiles with suspended sediment
- 3) 森明巨 小林知恵 板倉忠興 滑面浮遊砂流の底面近傍での乱流構造 水工論文集第40巻
- 4) CHARLES A KOSSAK and ANDREAS ACRIVOS J.Fluid Mech, vol.66,part 2,377 Steady simple shear flow past a circular cylinder at moderate Reynolds numbers 1974
- 5) G.C.POE and ANDREAS ACRIVOS J.Fluid Mech, vol.72,part 4,605 Closed-streamline flows past rotating single cylinder and spheres 1975
- 6) 村上吉剛 森明巨 板倉忠興 壁に衝突する粒子による乱流生成に関する研究 土木学会北海道支部論文集 1999 (投稿中)
- 7) P.Y.HUANG, J.FENG, H.H.HU and D.D.JOSEPH J.Fluid Mech, vol.343 Direct simulation of the motion of solid particles in Couette and Poiseuille Flows of viscoelastic fluid

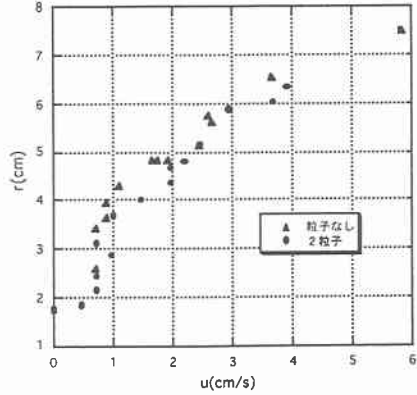


fig.3-1  $R_\Delta = 270$

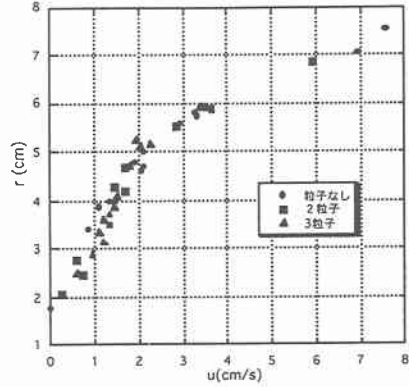


fig.3-2  $R_\Delta = 400$

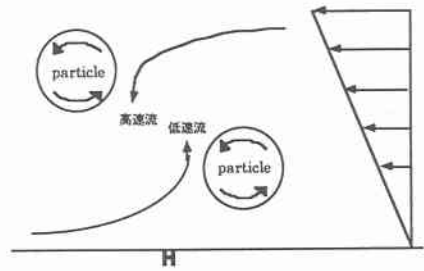


fig.4