

II - 50

回転せん断流中の自由粒子まわりの不安定機構

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

1、はじめに

Gore と Crow は、流水中への粒子混入による乱流強度変化に関し、 d/l (d :粒子径 l :乱れのスケール) をパラメーターとするモデルを提案した。著者らはこれの適合性を調べてせん断流によく適合することを見出し、また滑面での浮遊砂実験結果について、対数流速分布の積分定数 A ($=5\sim 5.5$) と粒子レイノルズ数 $Re = u_* d / \nu$ (u_* : 摩擦速度) 及び浮遊砂濃度 C との関係調べ、 $Re \sim 5$ 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。著者らは、せん断によって回転する粒子が流体を混合し流速を低減させ乱れを生成していると考えた。

本研究は、外側が回転する同軸二重円筒を作成し、せん断流中を自由に回転移動する粒子が乱れを与える効果を調べるものである。

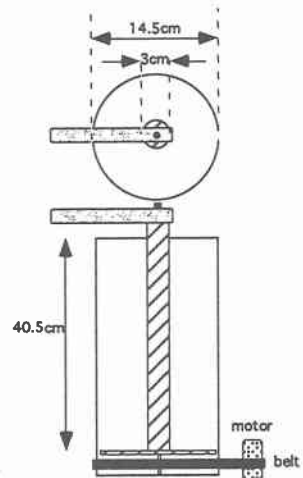


Fig.1 装置図

2、実験装置及び方法

実験に使用するせん断流は、外側が回転する同軸円筒の円筒間に発生させた (Fig.1)。混入粒子は径 1.6cm、1.1cm、0.6cm の 3 種の中空円筒を比重調整して使い、ウランを周辺に散布し流れを可視化した。Fig.2 は粒子なしで外円筒を 0.58rad/s で回転させたときの流速分布である。図中の点線は次式で与えられる理論値である (参考文献 5)。

$$v = \frac{\Omega_2 R_2^2 - \Omega_1 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} r + \frac{(\Omega_1 - \Omega_2) R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{r} \quad \dots (1)$$

(R_1 : 外径 R_2 : 内径 Ω_1 : 外側回転角速度

Ω_2 : 内側回転角速度 r : 中心からの距離)

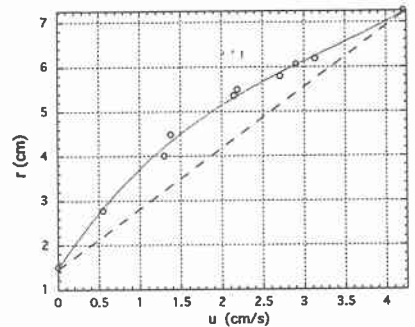


Fig.2 流速分布

理論値と実測値に若干の差がある。しかし流れにポスターカラーを注入すると、乱れの広がりとは全く視認できず、極めて安定な流れであると判断した。

3、粒子周りの基本的流れパターン

以下に径 1.6cm の粒子を投入した際の流況を示す(Photo.1)。せん断レイノルズ数 $Re = \Delta u d / \nu = 240$ である ($\Delta u = du / dr \cdot d$ d : 粒子径)。粒子を投入するとせん断によって回転する粒子の後方に渦状の伴流が現れる。これは粒子の内側を剥離し同心円上を流れていたものが、ある点で外側に張り出して突起が生じる (Photo.2)。この突起が粒径の 1/2 程度張り出したところで粒子に向かって反転し、粒子後部に流れを巻込んで渦

Turbulent moderation of shear flow by a particle

by Hiroyuki SHIMIZU, Akio MORI, Tadaoki ITAKURA

ができる。この反転時に流れは大きく乱れ、渦生成後ははっきり見えないが乱れている可能性がある。この渦は不安定で、形状を変化させるだけでなく、渦への流れの供給線が弱まることにより後部へ離脱、もしくは大きく引き伸ばされてゆく。渦が失われると剥離した流れに再び突起が誘導され、渦が生成される。これらの過程を経て渦は刻々と変化を続けながら生成—破壊を繰り返している。

この後方の渦を含む断面の流速分布を示す(Fig.3)。渦とその内側の流れに速度差が発生し、流速分布に変曲点が生じている。前述の突起は、剥離した流れの流速分布の不安定によって誘導され、乱れの生成に至ったと考えられる。

一方、粒子前方でも同様な剥離があるのに乱れは確認できない。外円筒が回転しているため、運動量が補給されて本来の安定な流速分布を維持していると推定される。

停止円柱の場合には剥離した流れに渦度が供給されるため、直ちに剥離渦が形成されるのが普通である。しかし、本実験ではせん断流によって粒子が回転しているのだから渦度の供給がない。このため、粒子上流側では剥離渦状のものが形成されているようであるが、流れはおとなしく渦度は小さいものと推測される。

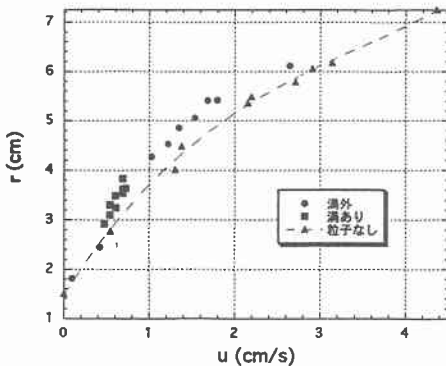


Fig.3 粒子投入時の流速分布

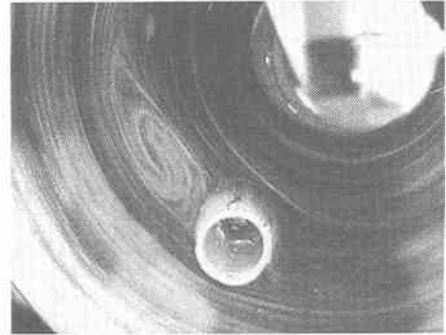


Photo.1 ($R_s=240$)



Photo.2

4、流況のせん断レイノルズ数変化

流況の R_s 変化を見るために、粒子径、および円筒回転速度を変えて粒子を投入した。 R_s は 20 から 240 の幅である。

下流側の渦を作りあげる粒子の回転によって巻込まれ剥離する粒子より内側の流れと、粒子にぶつかり渦と粒子の外側へ分岐する外側の流れを調べる。それぞれの R_s における剥離角、分岐角を Fig.4 に示す。これらは、目視の範囲でもっとも入り込んだ流れの角度を測定したものである。図のように、 R_s の増加とともに両角度ともに増加傾向にある。ともに値にある程度の幅があるのは、渦そのものが不安定で形状を刻々と変化させるためである。

Fig.5 は R_s と渦を作る際の反転の位置を粒子径で無次元化したもの、また Fig.6,7 は R_s と渦面積、 R_s と渦面積を粒子径で無次元化したものである。このように渦の規模も R_s の増加とともに大きくなっていく。

$R_s=20$ のような低い値のとき、突起付近の乱れはわずかに見られるものの渦の形成は見られない(粒子投入直後は除く)(Photo.3)。内側を剥離した流れは粒子後部で外側を通過する流れと合流している。

R_s が 30 になると渦がはっきりと現れてくる。剥離流の乱れは、 R_s が大きいほど粒子から遠い位置で発生する。また、剥離した流れの反転位置(突起発生位置)は一定でなく、突然通常の反転位置よりも粒子に近い位

置で渦の中に入り込み、渦内を大きく乱すものもある。 $Re=120$ では同時に2箇所の反転もみられた (Photo.4)。このとき渦内は大きく乱れ、引き伸ばされてうずが失われるきっかけとなった。

一方、外側の流れは常に安定であるが、粒子に付着して追隨していた渦が後方へ移動し、渦と粒子との間に距離が発生すると、外側の流れが粒子と渦の間に流入して(Photo.5)渦を離脱させる。この流れはそのまま新たな渦になるものと、さらに内側へ入り込み乱れを発生するものがある。しかし $Re=240$ (Photo.1)でこの流入は全くみられなかった。

また円筒の回転をかなり押さえたケースでは、同じような Re でも前方に渦が発生し大きな乱れが広がった。これは粒子前方への運動量の補給が押さえられた結果と考えられる。

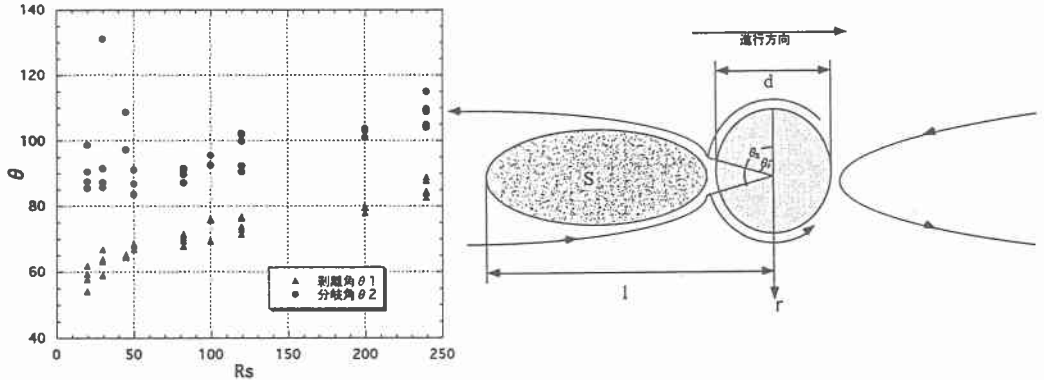


Fig.4 粒子周りの流れの剥離角・分岐角

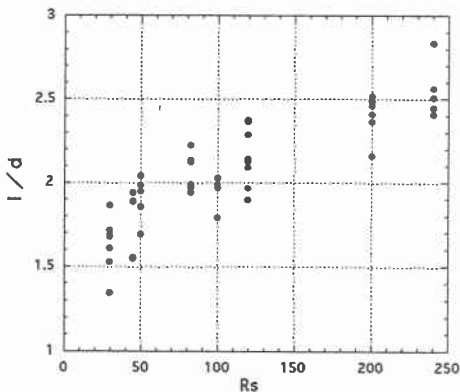


Fig.5 $Rs-l/d$

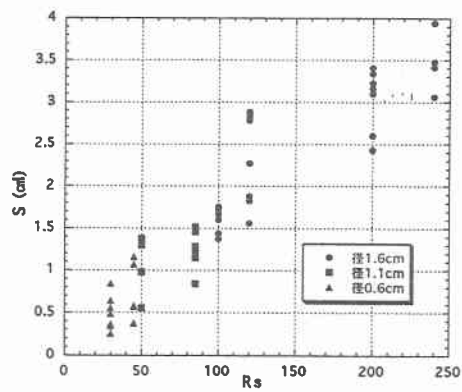


Fig.6 $Rs-S$

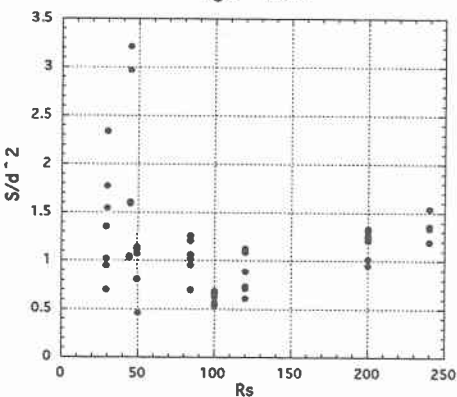


Fig.7 $Rs-S/d^2$

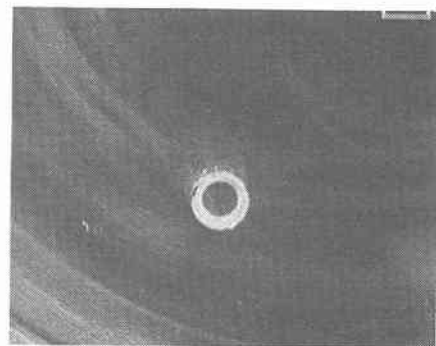


Photo.3($Re=20$)

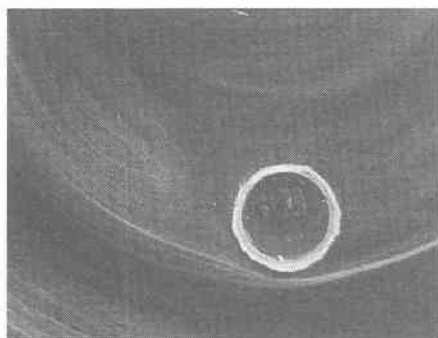


Photo.4 ($R_g=200$)

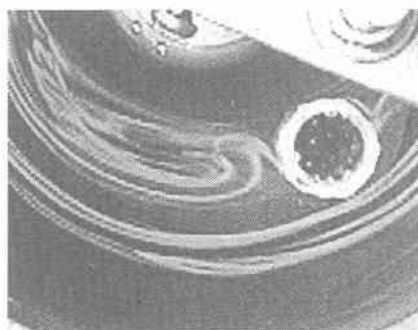


Photo.5 ($R_g=120$)

5、考察

$R_g=20$ で渦が出来なかったことや、Fig.5,7 より、 $R_g=20$ 付近に後方渦の形成限界があり、流れが質的に変化している可能性がある。また Kossack-Acrivós の粒子上下の2平面を移動させる単純せん断流に対する数値解析結果と比較すると、渦が粒子に付着して追隨するケースは数値解析による $R_g < 1$ 、粒子と渦の距離が空くケースは $R_g > 10$ の状態がともに現れていると考えられる。

実際の粘性底層においては $R_g = \Delta u d / \nu$ のうち、 $R_g = u \cdot d / \nu = 5$ 程度であり、また、 $\Delta u = u \cdot y^+ = 5$ とすると $R_g = 25$ 程度になる。また Kossack-Acrivós の結果では乱れが生じなかったにもかかわらず、今回の実験で乱れが生じたことは壁面の影響によるものと考えられる。これは実際の粘性底層でも同様であろう。

この結果は、滑面乱流の粘性底層に粒子を混入すれば、本実験と同様な流況が起こっていることを示唆している。

参考文献

- [1] 森明巨 板倉忠興 混相流における乱流強度の Gore-Crow 基準 水工論文集第 38 巻,837
- [2] 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,1145
- [3] CHARLES A KOSSACK and ANDREAS ACRIVOS J. Fluid Mech, vol.66,part2,377, Steady simple shear flow past a circular cylinder at moderate Reynolds numbers 1974
- [4] G.C.POE and ANDREAS ACRIVOS J.Fluid Mech, vol.72,part 4,605 Closed-streamline flows past rotating single cylinder and spheres 1975
- [5] L.D.LANDAU and E.M.LIFSHITZ, Course of Theoretical Physics,volume.6, Fluid Mechanics