

II - 50

同軸回転円筒における粒子混入による乱流強度変化の研究

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、 $d/l$  をパラメーターとするモデルを提案した。 $(d$ ; 粒子径  $l$ ; 乱れのスケール)  $d/l \approx 0.1$  を境とし、これより大きければ乱れは増加し小さいと減少することが示された。このような Gore と Crow のモデルは  $l$  を流れの厚さとするせん断流に適用可能と考えられる。この場の乱れの増加原因としては、まず混入した粒子が粒子の上方と下方の流速差によって回転することにより、上下層の混合が行われることによる。

小林らは、せん断流に粘性底層を適用した。粘性底層では、粒子が混入すると上下層の流体交換により流速が減少し、エジェクションの誘発により乱れが増す。これにより抵抗が増加したことが積分定数  $A$  が減少させる効果をもつのではないかと考えた。この積分定数  $A$  の変化の様子は粒子レイノルズ数  $R_c$  と底面濃度によって異なり、 $R_c$  が 5 程度のとき濃度が低い場合においても  $A$  の値は最も大きく変化した。

一方、剪断流中に 2 次元の自由回転浮遊円柱を投入した際において Robertson, Acrivos が解析解、Kossack, Acrivos が数値解を求めている。このせん断流粒子混入実験を行った Poe, Acrivos によると、Kossack, Acrivos の数値解と流況は  $R_c < 5$  においてはよく一致した。

Poe らは 2 つの逆回転するベルトの間に平行せん断流をつくり、その場に円柱を浮遊させ測定を行った。結果はレイノルズ数の増加とともに円柱の回転速度  $\Omega$  は減少した。円柱においてその流れは、 $R_c \approx 6$  まで定常を維持できたが、これを越えると  $\Omega$  の数値が上方にバラツキを示しはじめる。このバラツキは円柱の両側に発生する wake が振動し非定常の型を見せるからで、円柱回転率のわずかな増加は、水路に再環流領域が現れることに起因する。しかし  $R_c < 5$  においては Kossack らの数値解とよく一致し、予測された stagnation point の位置も数値解と一致をみせた。

Kossack, Acrivos は 2 次元の NS 式を用い、粒子レイノルズ数が  $0.047 < R_c < 70$  のレンジにおいて円柱投入の際の数値解を得た。この解は  $R_c = 0.047$  のようなかなり低いレイノルズ数においては慣性項を無視した Robertson, Acrivos の解と一致した。しかし、 $R_c = 0.047$  を越えると慣性の効果が大きな影響を与えている様子をみせ、流れは Robertson らの解析解とは異なったものとなった。この解によると以下のことがわかる。

(1) 円柱投入によって生じる閉じた流線域がレイノルズ数が増加するにつれて急激に減少する (2) 円柱の上  
 下流に 2 つの対照的な wake が出現する (3) 無次元の円柱回転速度が慣性の効果により  $R_c^{-1/2}$  に比例して 0 まで単調減少する (4) Stagnation point が出現する、である。これらのことから、たとえ  $R_c \ll 1$  においても慣性が流れに大きく作用し、その構造も  $R_c = 0$  のものとは全く異なるものになっていることがわかった。よって、乱れの増減は混入した粒子の持った粒子レイノルズ数の数値によって変化することも考えられる

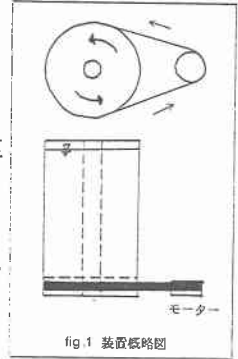
本研究では前述を踏まえ、せん断流中に粒子が混入した際の乱れの増減を可視的に捉え、流れの構造を確認することを目的とする。

Study on the flow around a cylinder rotating freely on rotating coaxial cylinders.

By Hiroyuki Shimizu, Mori Akio, Tadaaki Itakura

## 2、実験装置及び方法

せん断流をつくるにあたり、流体中に2本の同軸円筒を置き、外円筒を回転させ円筒内にせん断流を作った。fig. 1に装置の概要を示す。この構造にしたのは、安定な層流の領域を作ることが期待でき、内円筒回転より外円筒回転の方が安定な場を得られるからである。装置は外円筒径 15.0cm, 内円筒径 3.4cm, 深さ 40.5cm の塩化ビニル製の円筒を同軸に固定し、外円筒を交流モーター（三菱製 SUPERLINE SF JR）で回転させ（3.65 rad/s）せん断流を横断方向に作り出した。流体は水を用い、模擬混入粒子は径 1.6cm の中空のガラス管（比重調整をした試験管）を用いた。模擬混入粒子周辺の可視化にはポスターカラーを模擬粒子に塗布して行い、水表面



、模擬混入粒子周辺の可視化にはポスターカラーを模擬粒子に塗布して行い、水表面全体の流速の測定にはポリスチレン粒子を加熱して作った中立粒子を使用した。撮影には SONY デジタルビデオレコーダー DCR-VX1000 を装置上部に据え付け、シャッタースピード 1/60 秒でこれらの粒子挙動の撮影を行い、粒子の追跡には Graphic Converter 2.5(US)を用いた。これを回転させ、注射器でポスターカラーを1点で注入すると、円周上に広がったポスターカラーがカーテン状に沈降した。このことからこの流れは深さ方向に一樣な2次元の流れなのが見える。

## 3、円筒内の流速分布

円筒内の速度分布の定常解は2次元のNS式から簡単に得ることができる。速度分布の式は

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

となり、今回の実験ではほぼ直線分布になる。

今回の実験では装置が未完成のため低速で長時間回転させることができず、せん断流が発達し定常状態になる前に実験を行う必要があったため、非定常状態での測定を行った。fig. 2(実線)は得られた流速分布である。図によれば、速度勾配によって3つの領域に分けることができる。最も外側は速度勾配が大きく、せん断力の大きな粘性のみの非常に安定な領域。その内側には、外側よりかなり速度勾配が緩く、同程度のせん断力で乱流粘性係数  $\nu_t$  をもったせん断力が作用していると考えられるほぼ直線分布の領域。その内側には速度勾配がさらに緩く最も乱れた領域である。この中間域でポスターカラーを注入すると乱れは視認できなかったため、この部分を測定に用いる。

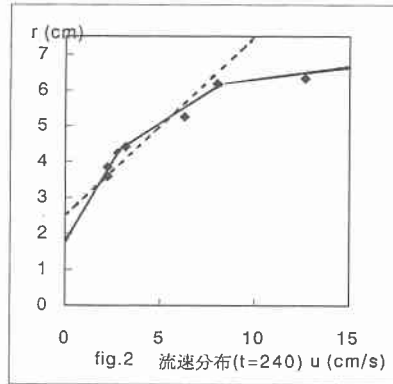


fig. 3は中間域における速度分布式の  $r = 7.5 \text{ cm}$  における流速  $u_2$  の時間変化、fig. 4は流速が0になる位置  $\tilde{r}_1$  の時間変化である。

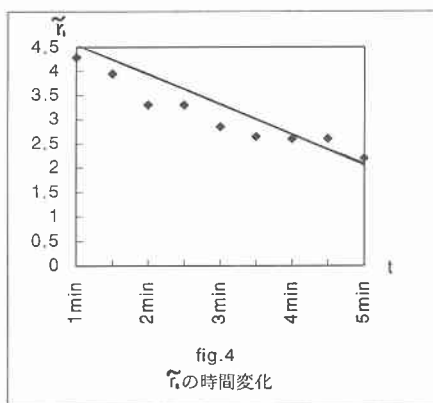
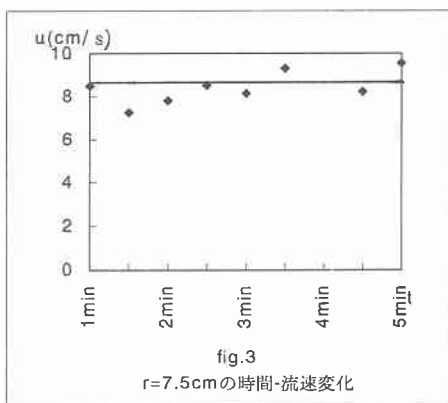
fig. 3から、 $\tilde{u}_2 = \text{const} = 8.42 \text{ cm/s}$  とする。また、fig. 4から  $\tilde{r}_1$  は直線的に減少している。これを

$$\tilde{r}_1 = -0.00885t_{(\text{scc})} + 4.65 \quad (\text{cm})$$

と近似する。よって中間域での流速分布式は

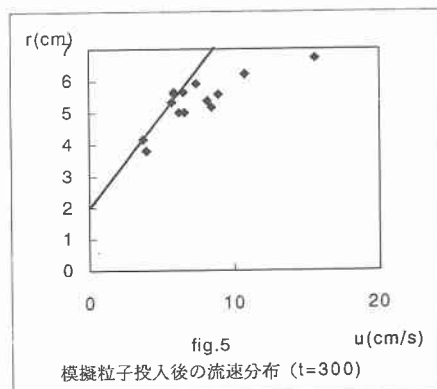
$$u = \tilde{u}_2 \frac{r - \tilde{r}_1}{r_2 - \tilde{r}_1} \quad (\text{cm/s}) \quad (\tilde{u}_2 : \text{外径位置での見かけ速度}) \quad \dots (2)$$

と近似できる。(fig. 2 破線)



#### 4、模擬粒子投入後の流速分布

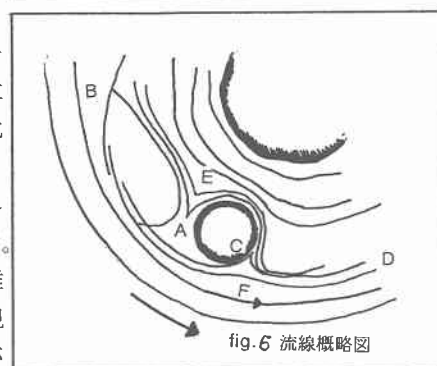
fig. 5に模擬粒子投入後の流速分布を示す。図中の実線は(2)式である。両者を比較すると模擬粒子の外側において流速が増大しているのがわかる。これは模擬粒子混入によって生じた擾乱が外側の高速の流体をまきこんでいることを示している。



#### 5、模擬粒子投入後の流況分析

写真1は模擬粒子がある場合の粒子周辺の流況で、ポスターカラーを使って可視化している。外側円筒の回転により模擬粒子は回転しながら徐々に内側に接近するが、その間形状が変化しなかったことから流線と考える。fig. 6にその概略図を示す。

模擬粒子の進行方向と逆に閉じた流線域のローラーが発生し(A, B点間)、その内部は小ローラーの集合体になっている。A点上では回転する模擬粒子表面の流れがここで遮断され剥離を起こしている。下流域のC, D点においても同様のものが観察される。(B点) これらの剥離した流れは同円周上でつながり、外側の流速の速い領域と遅い領域とを分けている。この流線を中心線と呼ぶ。回転する模擬粒子から相対的に流れを見ると中心線の左右で流れが逆になっている。



また2つの域の流れにおいて模擬粒子のすぐ側面を通過する際に流線の間隔が絞られ、通過後に再度広がっている。これは模擬粒子の側面を流体が通過する際に流速が増大し、その後減少をしていることがわかる。この流れは速度が減少するにつれ安定であった流れが乱れを見せ始めている。すぐ側面においては通過を終えた箇所(2つの三角域 点E, F)にwakeがみられ、流線の絞られかたとともに模擬粒子を中心に対称な形をとっている。

## 6、考察

5章の流線において乱れの状態を観察すると、粒子混入による乱れの発生原因は、上下方向に流体の動きがないことから、当初考えられた流速差のある流体の混合によるものではなく、粒子の側面を通過する際に絞られた流体が通過後に急拡する際に乱れを引き起こしているものと考えられる。4章で述べた流速の増加はこの急拡の際の乱れを通じて外側の高速の流れを引き出していると思われる。この乱れは粒子レイノルズ数  $R_p = \frac{\Delta u d}{\nu}$  がほとんど0の状態で行き起こされている。

実際の流れの中ではこのタイプの乱れだけでなく、粒子の移動によりローラーが粒子から引き離され、このローラーが乱れを引き起こしているとも考えられる。

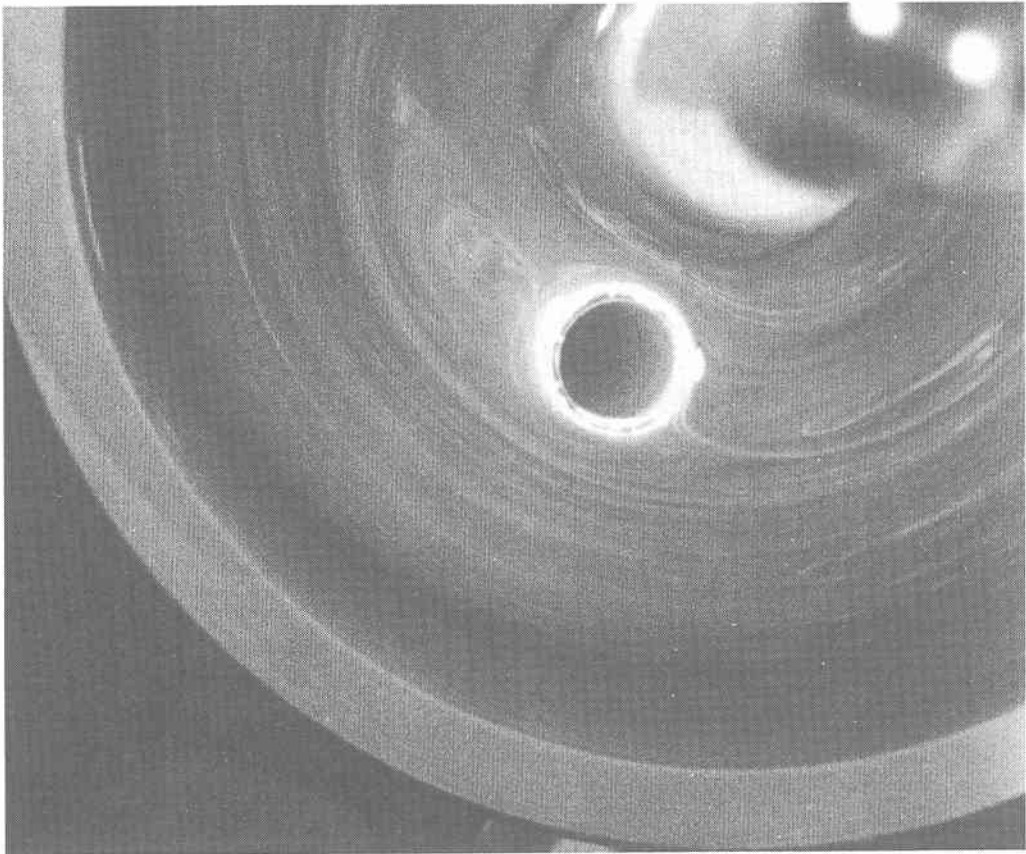


写真1 ASA400 F2.8 1/60(sec) t=230(sec)

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 森明巨 板倉忠興 根相流における乱流強度の Gore Crow 基準 水工論文集第38巻
- 3) G.C.POE and ANDREAS ACRIVOS Closed-streamline flows past rotating single cylinder and spheres
- 4) CHARLES A KOSSACK and ANDREAS ACRIVOS Steady simple shear flow past a circular cylinder at moderate Reynolds numbers