

擬似 Poiseuille 流中で見られる 2 次元自由粒子による
大規模渦状構造の発生条件

北海道大学工学部 学生員 林 和美
北海道大学工学部 正会員 森 明巨
北海道大学工学部 7xP-会員 板倉 忠興

1. はじめに

著者らは、せん断流中に適当なサイズの粒子があると、せん断による粒子の回転が流れに作用して乱れを引き起こすと予想した。特にせん断の強い境界層の粘性底層では、 $Rs = u_* d / \nu \sim 5$ 程度 (u_* : 摩擦速度、 ν : 動粘性係数、 d : 粒子径) の粒子があると、強い乱れが次々に誘発されると推測している。本研究はこのことの実験的確認を目指しているが、実験は非常に難しく、まだスタート点に立ったところである。本報告では、まず、このような考えに至った経過を述べ、次に、境界層を通過する粒子が著しい乱れを誘発し得ることを示す。

開水路浮遊砂流の特徴は、清水流に比べて乱流エネルギーの逸散が増えるため、渦動粘性係数が減少して速度勾配が大きくなることである。¹⁾ このため浮遊砂がある粗面水路では、平均流速が増加して流れの抵抗は減少するが、滑面水路では逆に平均流速が減少して抵抗が増える事がある。しかし、この場合も速度勾配が清水に比べて大きい点には変わりがない。この事は、浮遊粒子が滑底面近傍の流速を減少させる働きがあること、すなわち、滑面近傍の構造を変化させて対数流速分布の積分定数 A を減少させることを示している。これについて平井²⁾ は、粒子が乱れを増加させたためと考え、この効果を形式的に動粘性係数 ν の増加で表した。その大きさはおよそ(1)式で与えられる。粒子の効果は、 $Rs \approx 2$ のときに最大になり、このとき $\delta \nu \sim 1.5\nu$ で、この値は低濃度懸濁流に対する Einstein の公式(2)よりかなり大きく、これでは説明できない。

$$\delta \nu \sim 2Rs / \exp(Rs/2) \nu \quad (Rs = u_* d / \nu) \quad (1)$$

$$\delta \nu = 2.5 C_b \nu \quad (C_b: \text{浮遊砂の底面濃度}) \quad (2)$$

小林ら³⁾ は、底面付近の組織構造と浮遊粒子との相互干渉に着目して、 A の変化について考察した。これによると、 A を減少させるメカニズムは、浮遊粒子が底面との衝突や流れのせん断作用によって回転し、これが底面付近に進入することで、下層から低速流体を輸送して上層の U を減少させるということである。

また、さらに乱れが広がるメカニズムとして、Landahl の 2 スケールモデルにより、非線形項が無視できない強い乱れが発生すると、小スケール攪乱の非線形効果から大スケール攪乱が生じ、バーストによる攪乱がさらに下流に新たなバーストを引き起こす解析法が得られた。

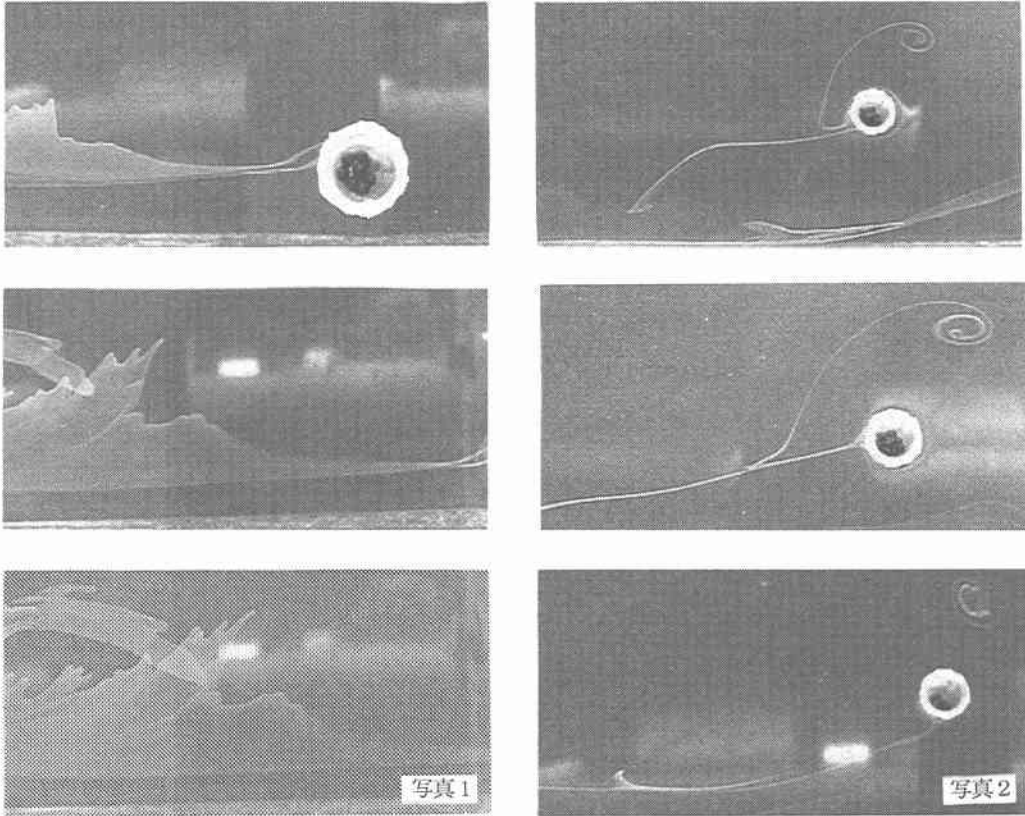
このモデルを浮遊砂流に適用すると、粘性底層内の各粒子による混合作用が大きくなり、局部的に変曲点分布が生じて強い乱れが作られ、各粒子がいわば小型のバーストを作り、そこから大スケール攪乱を生みだしてこれらが接続する。この結果、粘性底層上部の流速が広範囲にわたって低下し、 A の大きな減少を引き起こす。

清水ら⁴⁾ は、2 次元の安定した流れを作るため、外側が回転する同軸円筒中を使い、円筒間に自由に回転移動する粒子を投入して実験を行った。この実験では、混入した粒子の後方に剥離渦が発生し、渦の生成・消滅や、せん断流の速度分布に変曲点が生じることで不安定が起こることが示された。しかしこの実験では、流れの安定性のため単独の剥離渦しか生成されなかった。

本研究は、粘性底層あるいはこれと同等な流れにおいて、粒子の混入により乱れがパーストのように次々と誘発されるかどうかを調べたい。また、清水らの実験と同様に、できる限り乱れの少ない2次元な流れの中で、2次元円筒粒子を用いて実験を行いたい。本研究では、流れの概要を捉えるのに可視化が不可欠であるが、このためには、現象の時・空間スケールに適当な大きさが必要である。しかし、このような条件を満たす粘性底層は簡単には作れそうもない。そこで、上記条件から多少離れる心配があるが、実験用開水路の微流速時の側壁を研究の第一段階として用いることを考えた。これは、粒子のコントロールが比較的容易であるし、染料による流れの可視化も簡単で大変都合が良い。

写真1は test run で現れたものの一連の結果で、円筒粒子により、強い乱れがパーストの様に次々と誘発されるのが見られた。粒子を壁より離して混入すると、写真2に見られるように、渦状構造が誘発されるが写真1ほどの強い渦は発生しない。

この可視化の結果は著者らが予想していたものと思われたので、この流れを用いて実験を行うことにした。



2. 実験装置と基本流のU分布

実験装置は、幅28cm、長さ4m、水深18cmの亚克力製水路で、下流端をセキ上げて微流速にした。水が静水槽を出てからの流速分布の変化は図-1に示すとおりであり、静水槽から水路幅に進むにしたがって流速は逐次変化し、Poiseuille流に近づいている。また、乱れを小さくするために発泡スチロールを用いて縮流を作り、水路幅を6cmまで狭めて実験を行った。

水理条件は、水路中央の最大流速 U_{max} が12、6cm/sの2種

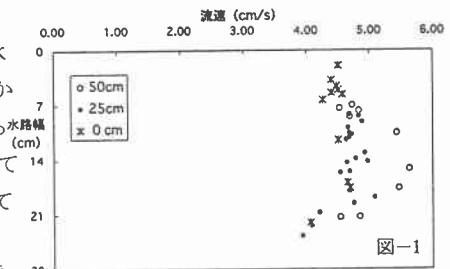
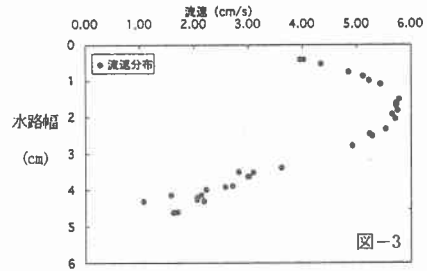
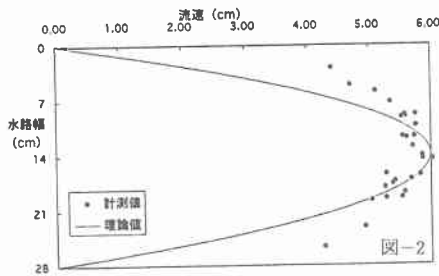


図-1

類である。図-2, 3は $U_{max}=6\text{cm/s}$ で、粒子がないときの U の横断分布である。図-2は $B=28\text{cm}$ で、実線は Poiseuille 流である。2次曲線の頂点に 1cm 程度のずれが生じ、発砲スチロール側の流速の方が速いのは、発砲スチロール側の縮流部の影響を受けて加速流が生じたためと思われる。



3. 粒子による渦の生成

1) $B=6\text{cm}$ の場合

○ $U_{max}=6\text{cm/s}$ のときの粒子混入による流体の乱れ

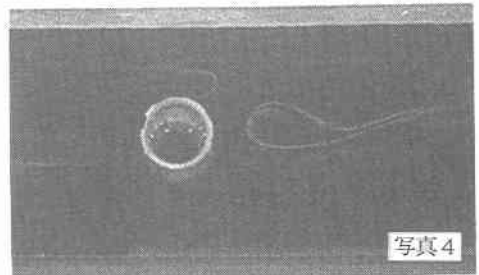
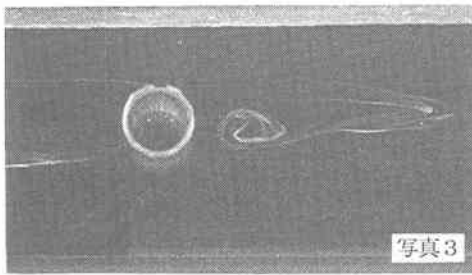


写真3, 4は、 $B=6\text{cm}$ の水路に直径 1.5cm の粒子を混入したものである。このとき、粒子は時計回りで、粒子の前方に同方向に回転する渦が発生した。粒子の後方では、a, b の2点で流れが剥離している。それより後方は安定している。

○ $U_{max}=12\text{cm/s}$ のときの粒子混入による流体の乱れ

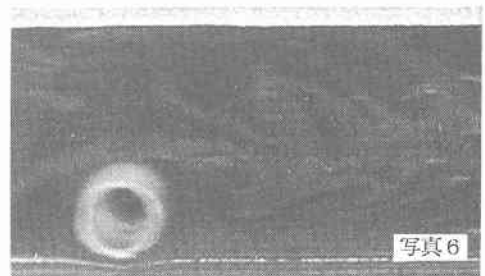
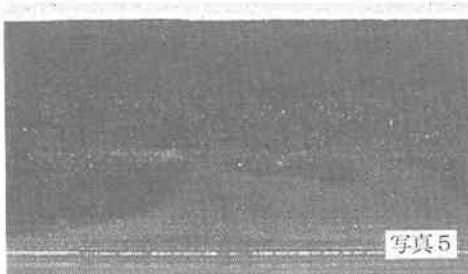
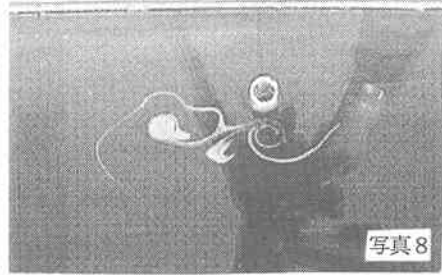
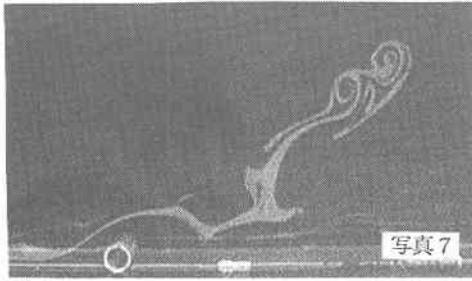


写真5は、粒子がない場合であるが、かなりの乱れがある。しかし粒子を入れると、写真6から解るように、乱れは水路全体にまで及んでいる。

2) $B=28\text{cm}$ の場合

○ $U_{max}=6\text{cm/s}$ のときの粒子混入による流体の乱れ



粒子を入れなくても乱れは生じるが、渦の生成には至っていない。粒子の効果は写真7,8に示すように壁からの距離に強く依存する。壁から近いほど、強い渦が次々に発生する。

○ $U_{max}=12\text{cm/s}$ のときの粒子混入による流体の乱れ

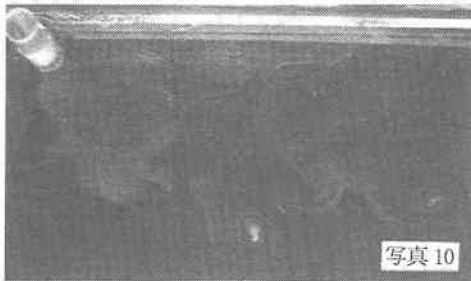
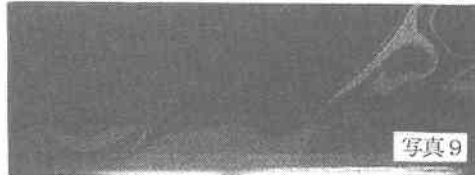


写真9～11は $U_{max}=12\text{cm/s}$ のもので、粒子を入れなくても乱れが生ずるのは(写真9)、 $U_{max}=6\text{cm/s}$ の場合と同じであるが、粒子を入れたときの渦(写真10,11)は格段に大きく、次から次へと発生している。

4. おわりに

これらの結果から、水路幅が狭くなると乱れは抑制され、たとえ広くても、乱れは壁からの距離に大きく依存し、壁面付近になるとたくさん乱れるようになることが分かった。これを粘性底層に応用すると、底面付近に粒子があると大きな乱れが起こると思われる。

参考文献

- 1) Itakura and Kishi; Open channel flow with suspended sediments, ASCE, No, HY8, 1980
- 2) 平井裕次郎; 浮遊砂の構造に関する研究、北海道大学工学研究科土木工学平成2年修士論文、1990年
- 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) 清水啓之; 回転せん断流における粒子混入による乱流構造の研究、北海道大学工学部土木工学科平成8年卒業論文、1996年
- 5) 森明巨、清水啓之、板倉忠興; せん断流中の自由粒子と剥離泡、混相流シンポジウム'97、第16回公園論文集
- 6) P. Y. HUANG, J. FENG; Direct simulation of the motion of solid particles in Couette and Poiseuille Flows of viscoelastic fluids, J. Fluid Mech, vol. 343