

小密度差固液混相流におけるスリップ速度

Slip velocities in Solid-Water Mixture Flows with
Nearly Equal Density in Pipe

佐々木 幹夫* 高橋 弘** 川島 俊夫*

by Mikio SASAKI, Hiroshi TAKAHASHI and Toshio KAWASHIMA

Solid particle velocities are observed experimentally in water slurries of solid particles slightly thinner or denser than water, and the dynamics of the mixture flows are investigated. Slip velocities given by the difference between the mean velocities of solid particles and water in a circular pipe are reported in the present study.

Keywords: mixture flow, water slurry, energy loss, slip velocity

1. はじめに

筆者等は、前報(1993)¹⁾において、管内の固液混相流における断面平均スリップ速度を実験により求めて、おおよその傾向を示した。しかし、これはわずか16ケース(管径2種類、固体比重が0.86、1.04の2種類)の実験値で判断したもので、データにもばらつきが見られ、もっと多くの実験により固体と液体の速度差を調べる必要があることを示している。そこで、本研究では、管径が4種類、固体比重が4種類の組合せの実験によるスリップ速度を調べ、前報では示し得なかった断面平均スリップ速度の特性を明らかにしている。

この研究は雪水二相流に関する研究の一環として行ったもので、固体の密度が水に近いのはそのためである。雪水二相流は流雪溝のなかで見られる流れであり、管内の固液混相流を扱っているのは流雪溝の末端に管水路をつなぎ、どんな条件の悪い街区でも流雪溝を使えるようにしようとの構想からである。すなわち、流雪溝は自然流下式の開水路であり、この末端より排水河川が低くないと流雪溝は使えないことになる。現に、地区住民からの設置要求があってもその利用は不可能としているのが現状である。

水中を流れる雪塊の比重 S は、おおよそ、 $S=0.96$ である。このなかに砂等が混じると1より大きくなり、水より重くなる。流雪溝は道路雪の処理のために利用されているので、流雪溝内の雪塊の比重は1前後になる。本研究では1の前後4つの異なる比重のポリスチレン粒子を用いているがこれらは水中を流れる雪塊の雪質に対応させたものである。

* 正会員 工博 八戸工業大学教授 工学部土木工学科 (〒031 八戸市妙字大開 8-8-1)
** 正会員 工博 東北大学助教授 工学部資源工学科 (〒980 仙台市青葉区荒巻青葉)

2. 実験方法

実験に用いた固体粒子は比重 S が $S=0.86, 0.96, 0.97$ および 1.04 であり、それらの粒径は球等価直径 d_p で $d_p=3.21, 3.22, 3.04$ 、および 3.09mm である。ここに、球等価直径とは、粒子の形状が楕円球状、円筒状、楕円筒状となっているのでこれを体積の等しい球にしたときの直径である。実験に用いた管径 D は $D=39.7, 49.7, 80.2$ および 105.2mm である。

実験は始めに適当な流速が得られるようにポンプの回転数を調節した後、混合槽にポリスチレン粒子を入れ、供試管内で定常状態が作り出されているを確認してから、エネルギー損失と固体粒子の観測を行い、これが終了した後に、固体粒子の体積濃度の測定を行った。固体粒子速度の測定を行うため、流動を撮影する部分は Fig. 1 に示したように透明なアクリル管を用いている。

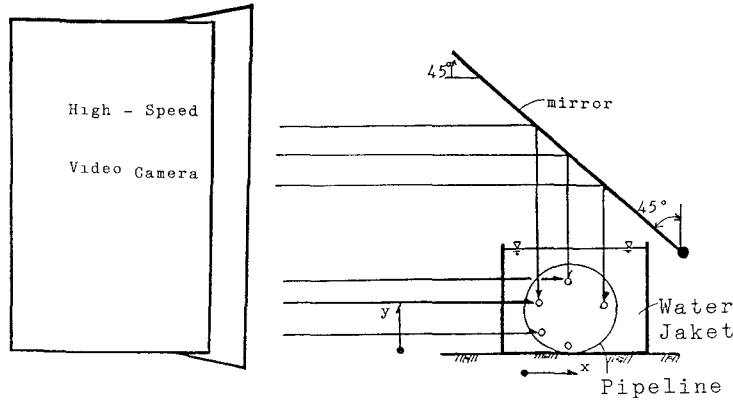


Fig. 1 固体粒子の2方向同時流動観測

3. 結果および考察

3. 1 混相流のエネルギー損失

Fig. 2 は混相流のエネルギー損失量を示したもので、図の縦軸は、動水勾配 i と清流時の動水勾配 i_w の差を i_w を基準にして示したエネルギー損失の相対量である。ここに、 i_w は滑面乱流として求めた計算値である（清流時にはどの管径においてもこの計算値 i_w と測定値は一致することを確認している）。横軸 V は平均流速であり、図中の佐々木等(1993)とあるのは前報¹⁾において示された実験値である。図より、平均流速が 1 m/s より小さくなるとエネルギー損失量は急激に増大するのに対し、 1.5 m/s 以上の場合には i_w に近くなることがわかる。低速域でエネルギー損失量が大きいのは、管内に固体の集積層が発生し、管内有効断面が小さくなるためである。ここに、集積層は固体が水より軽ければ管の上層に、重ければ下層に形成される。図において、比重 S の項に混合とあるのは比重が 1.04 と 0.96 の固体を混ぜたときの混相流である。両方の固体が混じっているときには、低速域においてはそれらは分離され重い固体は下層に、軽い固体は上層にふり分けられる。

図には固体の体積濃度 C_v が $C_v=4.3\%$ から 32.4% の実験値が示されているが、ほとんどは

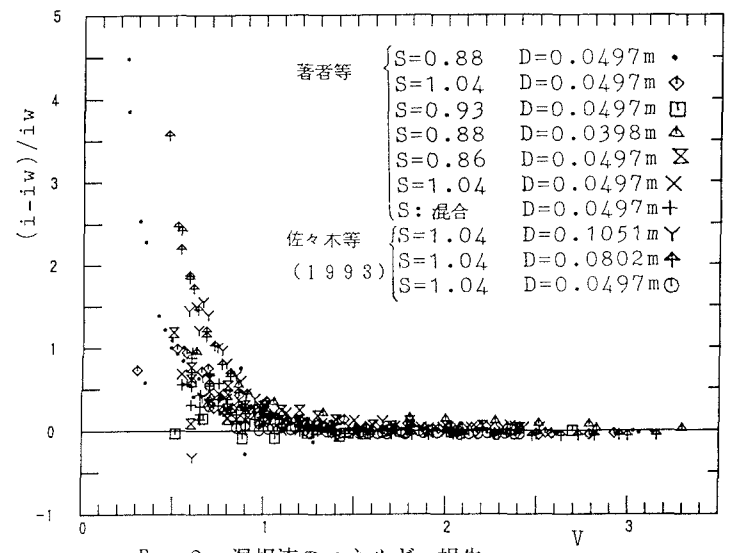


Fig. 2 混相流のエネルギー損失

10%以上の場合であり、低速域において見られるデータのばらつきはこの体積濃度の違いと管径の影響によるものと考えられる。

Fig. 3は円管の壁面摩擦係数 f の相対値とフルード数 Fr の関係を示したもので、図において、 f_w は清流時の f である。図に示されてるように、抵抗係数 f は Fr が小さくなると急激に大きくなる。極低速域の実験では何回か水路の閉塞が起きているが（固体粒子が詰まって、水は流れる）、閉塞が起こるときは瞬時であり、それは図に示しているように、低速域の f の急増が影響しているからである。実際の設計では f が使われることになるが、低速域では危険な状態が続くので、これを考慮して実験値より f を求めると、図の実線で示すようになる。すなわち、実験値の大き目の値に合うように f を考えれば良い。したがって、 f は次式のように表せる。

$$(f - f_w) / f_w = \exp (-3.21 Fr^2 - 0.40) \tag{1}$$

ここに、

$$\left\{ \begin{array}{l} Fr^2 = V^2 / gD \\ f_w^{-1/2} = 2.03 \log_{10} (f_w^{1/2} VD / \nu_w) - 0.8 \end{array} \right.$$

式（1）は水路の閉塞を避けることを条件とする場合の管の壁面摩擦係数を与えることになる。

3. 2 スリップ速度

Fig. 4は比重が1.04の固体の混相流内における固体粒子速度の観測例であり、図に示すように、平均流速が $V=1.3\text{m/s}$ と低速域から高速域へ移行する遷移領域の速度場となっている。図において、 y は管の底面から上方に取った距離であり、 x は管の側壁から取った水平方向の距離であり、 u_s は固体粒子速度、 U_{sm} は1/10の分割断面内における平均

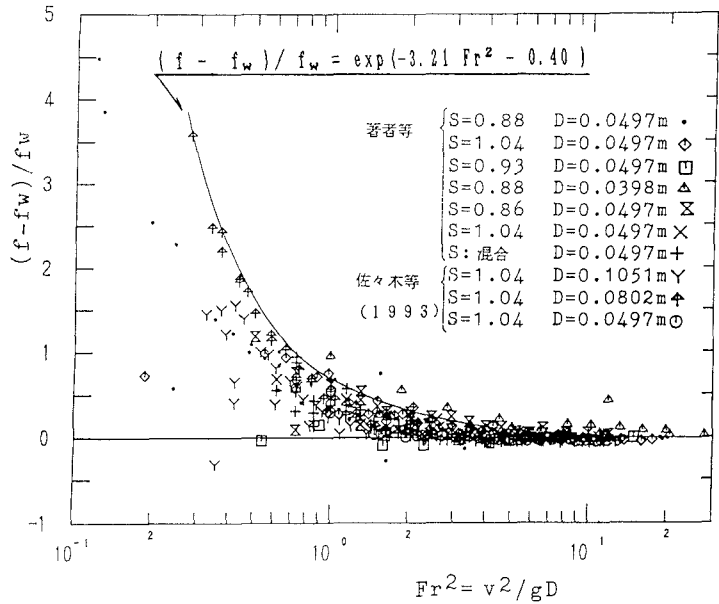
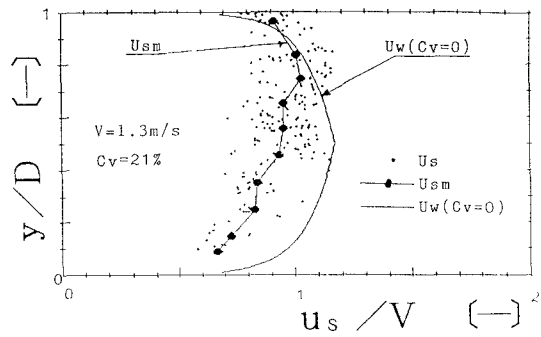
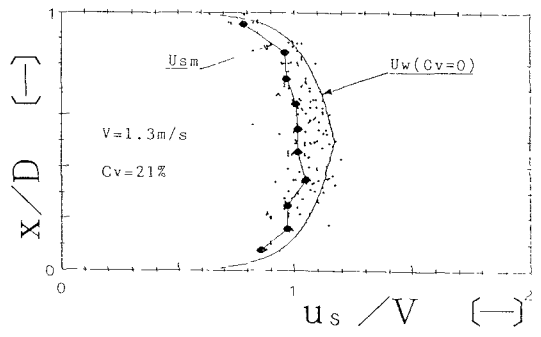


Fig. 3 固液混相流の壁面摩擦係数



(a) 鉛直方向の速度分布



(b) 水平方向の速度分布

Fig. 4 比重 $S=1.04$ の固体粒子速度の測定例

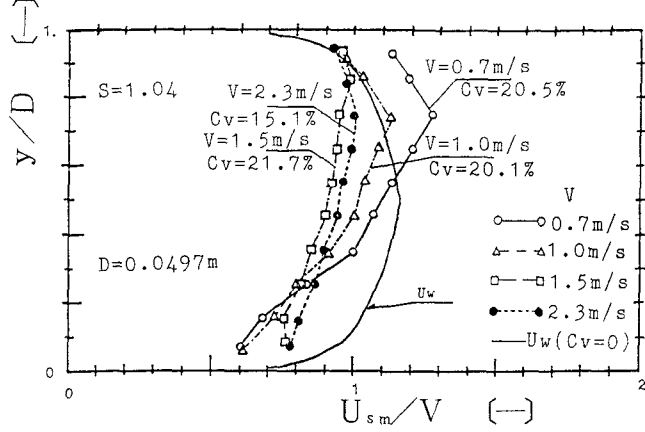
流速であり U_w は水粒子速度であり、この U_w は滑面乱流として求めた計算値である。Fig. 4 の (a) は鉛直分布、(b) は水平分布を示している。

Fig. 4 において、固体粒子速度 u_s はある幅をもって分布しているがこのばらつきは、 u_s 自体の変動と u_s の位置の測定誤差からくるものである。図にプロットされている固体粒子速度 u_s のいくつかは管軸を通る水平面上あるいは鉛直面近くの速度に対応しているので、 u_s の測定誤差は Fig. 4 の u_s の範囲内にあるものと考えられる。

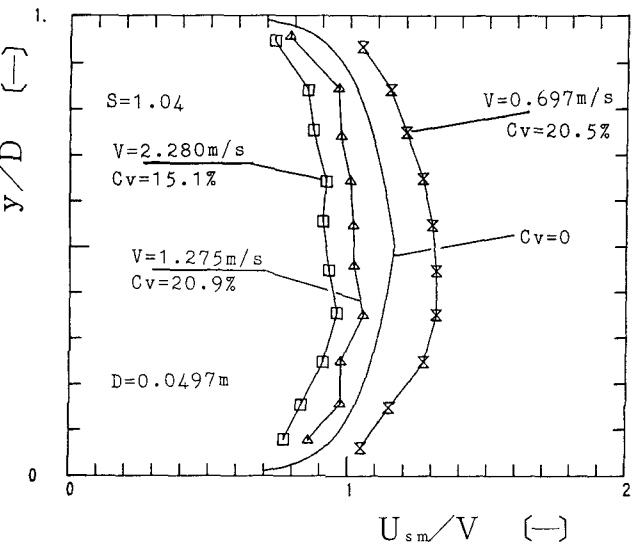
Fig. 4 (a) は下層にやや高濃度の層がまだ形成されており、このために、下層の流速が小さくなり、上層では同じ流量を流さなければならないために流速が速くなっているところを示している。一方、Fig. 4 (b) は水平分布を示したもので、中央の流速が大きく、両サイドの流速が相対的に小さくなっている。中央部の流速が大きいのは、Fig. 1 に示したように、ビデオ撮影による測定なので、図 (a) の上層の固体を拾っているためにデータとして大きい流速を与えているからである。したがって、これを加味して Fig. 4 の速度分布を考えると、図 (b) に示した速度分布はフラットな形になっているものと考えられる。

Fig. 5 は比重 $S=1.04$ と水より重い固体の混相流の固体粒子速度の分布を示したものであり、図 (a) は鉛直分布、図 (b) は水平分布である。図 (a) より、上層の流速は平均流速が小さくなると大きくなる。これは前述のように、この場合には固体が輸送流体より重いので下層に高濃度の集積層が形成されるために、流速が下がりその分流量が減ることになるが、これを上層の速い流速で補うようになっているからである。図示は省略したが、固体が軽ければ分布形はこれとは逆に、平均流速が小さくなると、下層の速度が大きくなる。ちょうど図の (a) とは上下逆の分布形になるだけである。図 (a) より、平均流速 V が大きくなれば、鉛直分布でも速度分布は次第に平らな分布形になることがわかる。

図 (b) より、低速域では $V=0.69\text{m/s}$ の分布 U_{sm} が示すように U_w よりも大きくなることがわかる。これは、上層の速い固体の粒子速度を含んでいるからである。また、 V が大きくなると、相対流速 U_{sm}/V が小さくなっている。これは、 V が大きくなると U_s と U_w の差が大きくなることを意味している。水平分布ではいずれの平均流速の場においても中央部の流速が大きくなっている。これは前述のように、上層の速い固体の流動を捕らえているからである。したがって、軽い固体の場合にはここで示している分布形とは逆



(a) 鉛直方向の固体粒子速度の分布形



(b) 水平方向の固体粒子速度の分布形

Fig. 5 平均流速による異なる固体粒子速度の分布形

に、中央の流速が小さくなる〔佐々木・川島・高橋（1993）図－6（a）〕¹⁾。このことは、水平分布はもっと平らな形状となり、水平方向にフラットな分布形を仮定しても良いことを示している。

さて、固体粒子速度の断面平均値 V_{sm} は次式で与えられる。

$$V_{sm} = \int_A U_{sm} dA / A \tag{2}$$

右辺の U_{sm} は、水平方向にはほぼ様な分布形であり、鉛直方向には Fig. 5（a）に示したような分布形で与えられる。いま、水粒子速度の断面平均値を V_{wm} とすると、断面内の平均的なスリップ速度 U_d が次式のよう表せる。

$$U_d = V_{wm} - V_{sm} = \gamma (1 - \beta) \beta^{-1} V \tag{3}$$

$$\text{ここに、} \quad \gamma = V_{sm} / V \quad \beta = V_{sm} / V_{wm} \quad \beta = \gamma (1 - C_v) / (1 - \gamma C_v) \tag{4}$$

式（2）の U_{sm} は観測により得られた測定値で与えられ、それによって、式（2）に示した断面平均固体粒子速度 V_{sm} が計算され、式（4）第1式より、 γ が求まり、式（4）第3式あるいは第2式より β が求まり、式（3）よりスリップ速度 U_d が与えられる。

Fig. 6 は、スリップ速度と平均流速との関係を示したもので、図より、 V が大きくなれば U_d も大きくなることがわかる。これは著者等が前報において示した点と一致するが、 U_d と V の関係は単純ではなく、測定値にはばらつきがみられながらも上限と下限が明確に現れており、 U_d はそれらの間に分布している。低速になると閉塞するので、低速域では単純に V に U_d が比例するとは考えられない。図の低速域で、 V が減少しても U_d が小さくならないのはそのためと考えられる。図には固体濃度 C_v が 0.2 よりも小さい場合と大きい場合の2つに分けて、濃度差によるスリップ速度 U_d を示してみたが、濃度による影響は明確には現れていない。

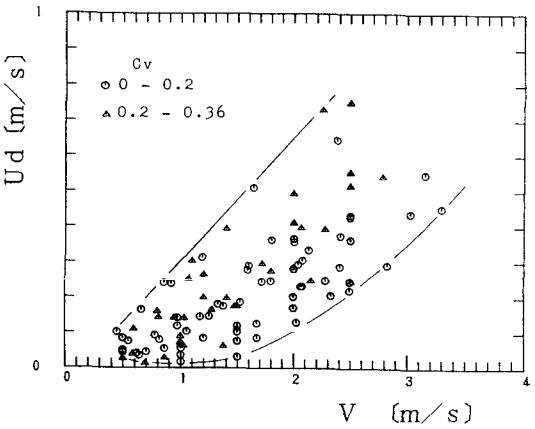


Fig. 6 スリップ速度と平均流速の関係

Fig. 7 は、 γ とレイノルズ数の関係を示したもので、ここに、 Re は $Re = VD / \nu_w$ で定義され、 ν_w は水の動粘性係数である。図より、 3×10^4 までは Re の増加とともに γ も増大するが、 3×10^4 以降は Re が増えれば γ は小さくなる傾向にあり、 γ は次式により与えられる。

$$\gamma = 1.58 - 0.14 \log_{10} Re \tag{5}$$

$$3 \times 10^4 \leq Re < 3 \times 10^5$$

Re が大きくなると相対速度 V_{sm} / V が小さくなる現象は、 Re が大きくなったときに、slip速度に起因するせん断力が大きくなることを意味している。しかし、

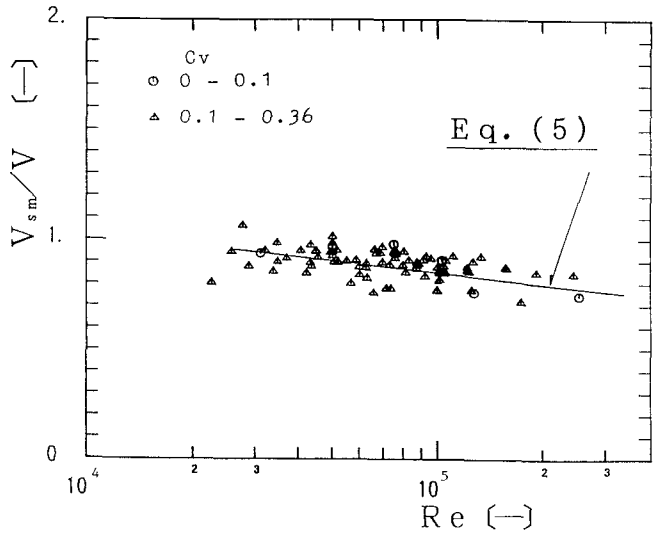


Fig. 7 V_{sm} / V とレイノルズ数の関係

Fig. 2、3で見たように、このせん断力の増加はエネルギー損失に影響を与えるほどのものにはなっていない。観測では Re が大きくなると固体粒子が管断面全体に広がり流下することが確認できる。これは中央部の流速の速いところでは流速を低下させ、壁面近くの相対的に低流速域のところでは流れを速くさせる作用を果たしていることになる。Fig. 5 で見た高速域のフラットな速度分布形はこの作用による結果と考えられる。

Fig. 8 は、 β と Re の関係を示したもので、 γ と同様の傾向がみられる。すなわち、 3×10^4 を境にそれより小さい Re 数では Re が大きくなれば β も大きくなる。しかし、 3×10^4 よりも Re が大きくなれば β は小さくなり、次式のように与えられる。

$$\beta = 1.73 - 0.172 \log_{10} Re \quad 3 \times 10^4 \leq Re < 3 \times 10^5 \quad (6)$$

Re が大きくなると V_{sm}/V_{wm} が小さくなる現象は、固体と水粒子の速度差が大きくなることを意味している。これはFig. 7で見たと同じような作用、すなわち、 Re の増大に伴う V_{sm}/V_{wm} の低下は、①slip速度に起因するせん断力の増加、②しかし、エネルギー損失量に大きく現れるほどのせん断力の増分ではなく、③固体粒子を管断面全体に拡散させ、④速度分布形を歪ませる作用をもっていると考えられる。

さて、スリップ速度 U_s は式 (3) の γ 、 β および V によって与えられる。 γ は式 (5)、 β は式 (6) で与えられ、それらは Re の値によって決まる値となっている。したがって、スリップ速度は Re と V で決まる速度となっている。

4. おわりに

固体の密度が輸送流体に近い固液混相流におけるスリップ速度について実験による観測を基にして、詳細に調べてみた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ①固体粒子速度の相対値 V_{sm}/V ならびに V_{sm}/V_{wm} は Re が大きくなると小さくなる。これは、スリップ速度に起因するせん断力を増加させるが、エネルギー損失を顕著に大きくするような増分ではない。しかし、管断面全体に粒子を拡散させる役割を果たしており、速度分布形をフラットにする働きをもっている。
- ②固液混相流における壁面摩擦係数は式 (1) によって与えられる。
- ③断面平均固体粒子速度の相対値は γ が式 (5)、 β が式 (6) によって与えられるので、スリップ速度は式 (3) により与えられる。すなわち、スリップ速度 U_s は Re と V によって与えられる。

参考文献

- 1) 佐々木幹夫・川島俊夫・高橋弘：管内固液混相流の速度分布，水工学論文集，第37巻，pp. 511-516, 1993.
- 2) 佐々木幹夫・川島俊夫・高橋弘・朱朝利：管内混相流の速度分布，混相流シンポジウム'94（第13回）講演論文集，日本混相流学会他，pp. 423-426, 1994.

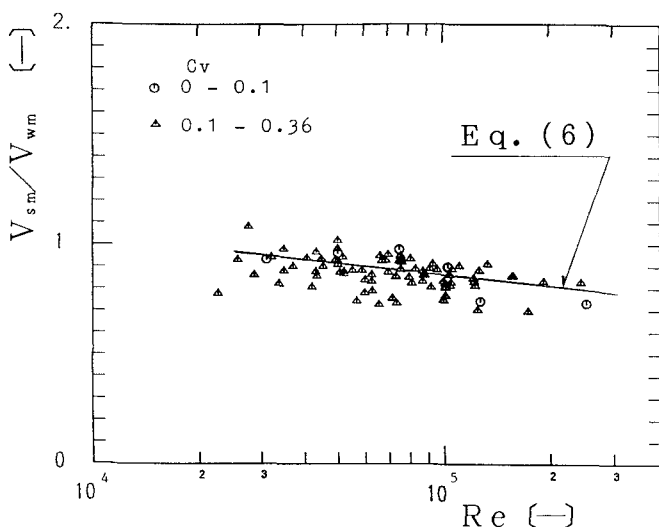


Fig. 8 V_{sm}/V_{wm} とレイノルズ数の関係