

II-303 高濃度固液混相流における固体粒子の抗力係数

東北大学 正員：○李 立亜・沢本 正樹

1. はじめに： 著者らは、シートフロー状の砂運動のモデル化にあたり、これらの固液混相流の基本的事項について実験的に再確認することを計画している。今回はその手始めとして、流体と砂との相対速度による相互作用のうち、定常成分についてできるだけ理想化された単純な条件のもとで計測することを試みた。

2. 固体粒子の抗力係数の評価： 断面積 A の鉛直に置いた管に水をはり、その底部に自然に沈降させた状態で、体積 V の固体粒子を充填し、下から流れ込む液体の流速が最小流動速度を越えると、固体粒子は分散状態となり、層全体が流動化する。この状態での、1つの固体粒子に作用する力のバランスによって、次の方程式が得られる。ただし、ここでは激しい混合を生じさせる極端に大きい流速の場合は考えていない。

$$(C_d U^2 - C_{d0} W^2) \cdot 3/(4gd) = dh/dx \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 ρ_s 、 ρ はそれぞれ固体粒子、水の密度である。 C_d が本論文で議論すべき抗力係数である。 U は流体と粒子との相対速度であり、上述の状況では、粒子の間隙を抜けて流れる水の流速であり、

$$U = (Q/A) / (1 - C) \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。粒子の間隙では、流速の分布が存在するが、ここでは、無限回の実験を行なったときの、液相のみの流速のアンサンブル平均として定義した流速として扱っていることになり、透水で言う実質流速に相当する。 W は単一粒子の静水での沈降速度である。また、 dh/dx の圧力勾配による項は、静水圧による項と、流れに起因する項の和として、次のように表わすことにする。

$$dp/dx = \rho g (1 - dh/dx) \quad \dots\dots\dots(3)$$

右辺第1項は、流れがないときの浮力項に相当し、第2項は流れを与えたことによる、いわば、余剰浮力 (buoyancy excess) である。また、 dh/dx は動水勾配と同じで、2点間のピエゾメータの差より直接測定可能な物理量である。 dh/dx は、管路の壁面で測る場合には、水と壁面摩擦、粒子と壁面との動摩擦⁴⁾などを含んだものとなる。ここでは、粒子と壁面との摩擦は小さいもの（オーダ的に小さい）として無視し、壁面摩擦については、粒子を含む流れと、含まない流れとを別個に測定し、その効果を補正している。

3. 実験装置および実験条件： 断面積 $16 \times 18 \text{ cm}^2$ の垂直管路を設け、ろ材で管路を遮断し、上と下に分けた装置を用いて、 $\rho_s = 1.55$ 、 $d = 5 \text{ mm}$ の人工真珠および $\rho_s = 2.65$ 、 d_{50} がそれぞれ 1.05 、 0.55 と 0.34 mm の3種類の砂を使用して実験を行った。実験に当たっては、バルブで流量を調整し、一定の時間が立ってから、安定した流れのもとで、粒子を分散・浮遊させ、流出量、一定流出量を流した時間、圧力勾配および体積変化量をそれぞれ測定した。それによって、平均流速、圧力勾配、濃度を算出し、抗力係数 C_d を計算した。

4. 抗力係数に関する計算式の提案： 図-1に抗力係数 C_d/C_{d0} (C_{d0} 、単一粒子の抗力係数) と固体粒子の空隙率 η との関係を示してある。 $C_d/C_{d0} = A \eta^m$ と表せることが容易に読み取れる。流れにより生じる圧力勾配の影響で、静水条件のと違って、 $m > m_0$ (m_0 : 静水で固体粒子を集团的に沈降させた時のべき数) となっている。 η は1より小さいので、固液混相流の場合の抗力係数 C_d/C_{d0} の空隙率による変化は静水条件でのものより緩やかであることを示している。

図-2にはその A 及び m 値と m_0 の値をプロットした。ここに、下記のことには注意しなければならない。本実験では濃度が極めて薄いとき（この場合、バブルが発生したり、激しい混合状態となる）のデータをいろいろの制限で取れなかったので、上式の適用範囲は $\eta \leq 0.8$ に限られる。 $\eta \rightarrow 1$ で $C_d/C_{d0} \rightarrow 1$ となるので、 $0.8 < \eta \leq 1.0$ では直線で結べば実用上問題はない。

以上をまとめると、方程式(4)のような抗力係数 C_d の計算式を提案する。

$$\frac{C_d}{C_{d0}} = \begin{cases} A \eta^m & (\eta \leq 0.8) \\ \eta^{m'} & (\eta > 0.8) \end{cases} \quad \dots\dots\dots 4$$

ここに、

$$m' = \log A / \log(0.8) + m \quad \dots\dots\dots 5$$

図-3に式(4)によって計算された抗力係数 C_d の値（破線）を示してある。比較するために Allen¹⁾に載せた固体粒子が静水で集团的に沈降した場合の値（実線）もプロットした。流れがある場合は C_d が C による増加はやや緩やかであるがほぼ一致な傾向がある。 R_{d0} が小さな粒子に対して飽和状態の抗力係数は単一粒子の百倍ぐらになる可能性があることが示された。

図-4は式(4)の計算値と実験値との比較を表わしたものである。図から分かるように、極めて高濃度、すなわち、 $C > 0.55$ ($C = C/C_0 \cdot C_m$, Scaled体積濃度²⁾)の区域を除いて、式(4)は実験値とよく一致している。この区域での計算値は実験値よりはずれ、小さい傾向があると見られた。ごく低濃度区域でのデータを欠くために比較できないが、圧力勾配(dh/dx)が急速に0に近づき、 $m' < m$ なので、図-1で C_d/C_{d0} はもっと速いスピードで1に近づくことが判断される。

5. 結論：

(5.1) 抗力係数 C_d は濃度の増加に伴い増加し、その増加する程度は粒子Reynolds数によりかなり違っているが、単一粒子に比べ、最大、オーダー的に大きくなる可能性がある。固液混相流の計算に当たって、単純に単一粒子の抗力係数を使うなら、抗力を過小に評価する恐れがある。従って、抗力係数の濃度による変化を考慮すべきである。

(5.2) 多少差があるが、約 $C = 0.55$ を境として、二区域に分けることができる。 $C < 0.55$ の区域において抗力係数は濃度に弱く依存するに対し、0.55より高濃度の区域では、濃度に強く依存する。

(5.3) 固液混相流における抗力係数は静水の場合と同じく、空隙率 η のべき乗に比例する。ただし、液体流動のため、その濃度による増加はやや緩やかである。

(5.4) 一般的には、固液混相流において、濃度が高いほど、その流動Systemのエネルギー損失は大きくなるといえるが、砂のような不均一な粒径、また、様々な外形を持つ粒子からなる混相流の場合は、相対濃度 C/C_0 が約0.90ぐらいでのエネルギー損失はピークになることが実験より分かった。

参考文献：1) Allen, J.R.L. (1985): Principle of physical sedimentology, GEORGE ALLEN & UNWIN (PUBLISHERS) LTD, UK, p.43 2) Hanes, D.M. and Inman, D.L. (1985): J. Fluid Mech., Vol.150, pp.357-380

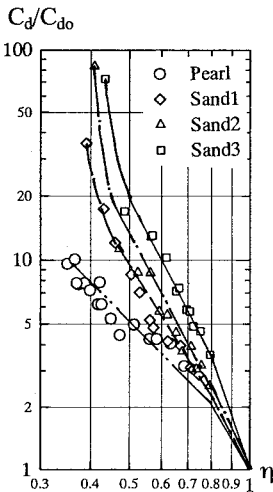


Fig.1. C_d versus η

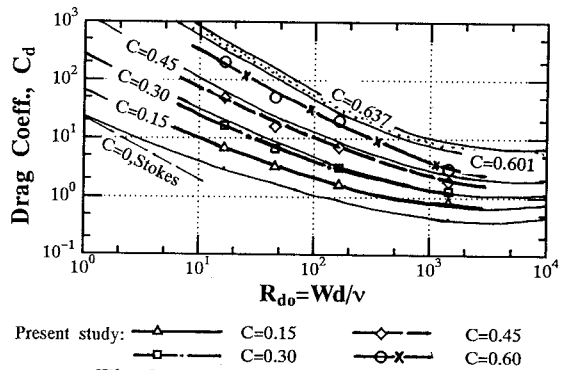


Fig.3. Increase in C_d with C

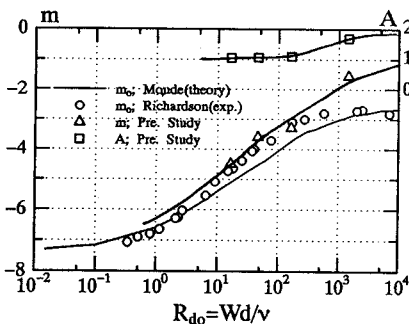


Fig.2. m, A versus R_{d0}

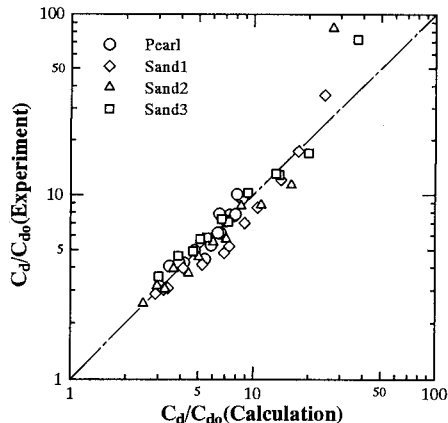


Fig.4. Comparison of cal. versus exp.