

京都大学防災研究所 正員 戸田 和男
 防災研究協会 正員 山野 邦明
 京都大学大学院 学生員 神田 昌幸

1. はじめに. 微細砂を高濃度に含む流れは、たとえ、泥流や黄河中流域で観察される高濃度流等が考へられるが、このような流れの流動機構については、固液界面での電気的力の影響が無視できず、現実の予測が難しい。従来、このような流れにおいては、ビingham流体としての性質を示すことが知られており、降伏値・塑性粘度等のレオロジー定数について数多くの研究がなされてきた。一方、黄河中流域における高濃度流については、その流速分布がほぼ訂教則に従うことから、さらに、カルマン定数、粒子の沈降速度に関する研究が行われている。そして、その結果、微細砂を高濃度に含む流れにおいては、固液界面での吸着力により形成されるフロウヤ吸着水がこれらの現象の大きな支配要因であることが指摘されているが、まだ十分には解明されていないようである。本文では、まず、高濃度固液混相流の一般的流動式をあげ、流れを支配するパラメータについて簡単な考察を加え、微細砂を高濃度に含む流れの問題点を整理する。そして、それらの問題点の中で最も基本的な問題である相対粘度と沈降速度について固液界面での両相の相互作用という観点から考察を加える。

2. 高濃度固液混相流の流動式から見た流動機構. 高濃度固液混相流の流動式は、従来の研究を整理すると、二次元せん断流に於いて、 $\tau = \tau_y + (\eta_e + \eta_s) \left(\frac{du}{dz} \right) + \rho l^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \dots (1)$ と表わされる。右辺第1項は、せん断降伏値、第2項は粘性項で、 η_e は流相のエネルギー散逸に相当するみかけの粘性係数、 η_s は粒子の衝突に起因するエネルギー散逸に相当する粘性係数、第3項は内部運動量によるレイノルズ応力の項である。 η_e は、一般に、実質せん断空間の減少から $\eta_e = f_e(c) \eta_0$ 、 η_0 : 流体の真の粘性、 $\dots (2)$ と、濃度の関数で表わされる。 η_s は、従来の粒子流に関する研究から $\eta_s = f_s(c) \sigma D^2 \left| \frac{du}{dz} \right| \dots (3)$ と表わされる。ここで、 D : 粒径、 σ : 粒子密度である。第3項の混合距離 l のスケールオーダーは、散逸力に対応するスケールが粒子の粒径オーダーであることから粒子群のオーダーとならなければならぬ。流れを支配するパラメータとしては、レイノルズ数 $Re = \rho u_m h / (\eta_e + \eta_s)$ 、及び 粒子相と流体相の散逸エネルギーの比に相当する η_s / η_e が考えられる。 η_s に関しては、かなり定量的にも明らかにされているが、 η_e については、粒子が存在することによるせん断空間の減少量と粒子実質部分のみで見積ると実際よりはるかに小さな値を示すことから、より大きなせん断空間の減少量を見積 必要性があり、粒子の実質濃度の代わりに、フロウ濃度や吸着水を含めた濃度を用いて補正しようとして試みられている状態である。また、乱れの構造が、粒子のスケールを基準として考えられるため、水のような連続流とは異なることが十分予想され、特に、粒子相と流体相の相互作用が重要な問題となる。ここでは、これらの問題のうち、固液界面での両相の相互作用に着目して、粘性係数 η_e 、及び、粒子・流体相の相互作用である粒子の沈降速度について考察する。

3. 電気二重層を考慮した相対粘度式及び沈降速度. 微細工砂が水中に含まれると、微細工砂はその表面に負の電荷を生じ、その周りに図1に示すような電気二重層を生じることが知られている。Gouy層における電位 ψ は、 ψ 電位を ψ_s として、 $\psi = \psi_s e^{-\kappa z} \dots (4)$ で与えられる。ここで κ は、Debye-Hückel のパラメータで、 $\psi_s = (4\pi \sigma_s / \epsilon) \cdot (1/\kappa) \dots (5)$ を満たすようなパラメータである。ここで σ_s は、Gouy層に関する有効面電荷密度で、 ϵ は誘電率で、(5)式の物理的意味は、電荷密度 σ_s を持つ平板コンデンサが誘電率 ϵ の空間に置かれているとき、平板の間隔が $1/\kappa$ であるという

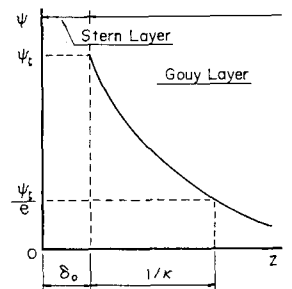


図1. 電気二重層と電位分布

ここで、一般には、 $1/\kappa$ をもって、Gouy 層の厚さと考えられている。電位 ψ は、電価を持った粒子または双極子の活性化エネルギーに対応すると考えられるので、電位 ψ と同じ分布形を持つ結合エネルギーの分布 ϕ を考える。すなわち、 $\phi = \phi_0 \cdot e^{-\kappa z} \dots (6)$ である。粒子は高濃度に流れの中に含まれているので、粒子間隔は小さく、粘性が卓越し、流れは層流が、それに近いものと思われる。そこで、そのような領域においては流れの各点において散逸エネルギー重が等しいとして取り扱っても十分であろう。いづれにしても、散逸エネルギー重は、

$$\Phi = \phi_0 e^{-\kappa z} (du/dz) + \eta_0 (du/dz)^2 \dots (7)$$

と表わされる。粒子近傍では第一項が卓越し、離れると第二項が卓越するとし、その境界で全速度が等しいとして近似計算をすると図2のような流速分布を得る。このような粒子近傍での流速の減少を粒子と共に運動する吸着水層として評価するために、図2の破線のように流速分布をモデル化する。すると吸着水層の厚さ δ は、

$$\delta = \psi \cdot (1/\kappa), \quad \psi = \log \left(\phi_0 / \Phi \sqrt{\Phi/\eta_0} \right) + \Phi / \phi_0 \sqrt{\eta_0 / \Phi} - 1 \dots (8)$$

と求められる。(8)式の性質は、 ϕ_0 が大きくなると δ は小さくなり、 η_0 が大きくなると δ が小さくなる。粒子間隔を $b \cdot D$ で表わすと相対粘度 η_r は、

$$\eta_r = \eta_0 / \eta = b / \{ b - 1 - 2 \cdot (\delta/D) \} \dots (9)$$

と表わされ、 b を Bagnold の線濃度 $\lambda = 1 / \{ (C/C_0)^{1/3} - 1 \}$ で表現すると、

$$\eta_r = (1 + \lambda) / (1 - 2\lambda \cdot \psi \cdot 1/\kappa D) \dots (10)$$

と求まり、濃度のみならず粒径にも依存し、同一濃度に対して粒径が小さくなるに従い相対粘度が大きくなるのがわかる。沈降速度は、重を粒子の沈降により失った位置エネルギーと等しいとして吸着水層厚を求め、みかけの粒径 D' を $D' = D + 2\delta$ とおくことにより求めることができる。近接粒子の影響は大島の方法¹⁾により考慮することにより、沈降速度 W_0 は、

$$W_0 = (\sigma' - \rho)g/B, \quad B = 3\pi\eta_0(D + 2\delta) \cdot \frac{6}{\pi D^3} C \cdot f(s) \dots (11)$$

$f(s) = 4(1 + 2s + 3s^2 + 3s^3 + 3s^4 + 2s^5 + s^6) / (1 + s + s^2) / (4 + 7s + 4s^2)(1 - s)$ と求められる。ここで、 σ' : 吸着水層を含めた見かけの密度、 $s = C^{1/3}$ である。

4. 実験との比較

以上の考え方の妥当性を検討するため、パーカレイ ($d_m \approx 20\mu$) を用いて沈降試験とシオメーターを用いて粘性係数の測定を行なった。図3、図4にその結果を示す。図中の実線は $\kappa = 3.0 \times 10^3 (1/cm)$, $\phi_0 = 4 \text{ erg}$ として、(10)式、(11)式からそれぞれ求めたものである。理論値は、実験値の傾向と比較的よく表現しており、本文での考察が妥当であることとを示していると思われる。

5. 寸言、 κ , ϕ_0 の決定法についてさらに考察を加えるとともに、乱流構造についても研究を続けていきたい。参考文献: 1) 大島: 機械学会論文集(2) Vol.44 No.384, P.P.2759 ~ 2764, 1978. 2) 大同: 京大 学位論文 3) 森・乙竹: 化学工学, Vol.20, No.9, 1956

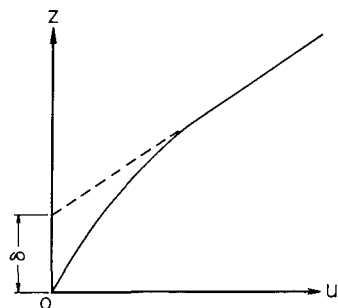


図2. 粒子近傍での流速分布

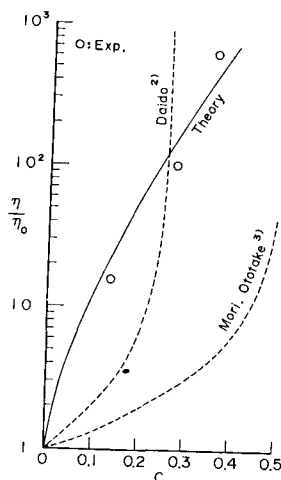


図3. 相対粘度と濃度との関係

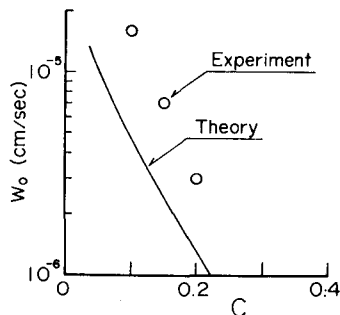


図4. 沈降速度と濃度との関係