

高濃度流れに関する研究

京都大学防災研究所 正 員 芦田 和男
 (財)防災研究協会 正 員 山野 邦明
 京都大学大学院 学生員 〇神田 昌幸

1. はしがき

黄河は図-1に示すようにその流域に広大な黄土地帯を有しており、年間の総流出土砂量は16億トンに達する。これを長江と比較すると年間総流量に対する流出土砂量の比は約70倍にもなる。その主な土砂生産源である黄河中流域においては洪水時に極めて高濃度な流れが発生し、その体積土砂濃度が30%以上にも達する場合がある。ここでは、こうした高濃度流れで見出されている現象について述べ、それを解析する第一歩として、流れの物理的性質について若干の考察を行い、さらに今後の研究方向を展望する。

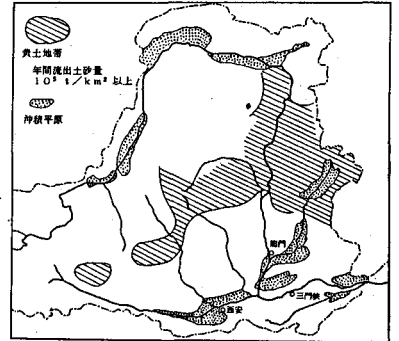


図-1 1988 1989
「黄河泥沙的来源和输移」より抜粋

2. 黄河の流れの特徴

黄河の輸送土砂は黄土レスである。黄土レスは平均粒径約50ミクロンで、100ミクロン以上の粒径の粒子は2.0%以下、1mmを超える粒径はほとんどない。また、鉱物組成は SiO_2 が50%以上、金属酸化物の Al_2O_3 10%、 Fe_2O_3 と FeO で5%、 CaCO_3 が約10%である¹⁾。

また、黄河の流れに関しては現地での広範な実測、実験等に基づく実験式が発表され、理論的な考察による現象の定性的な説明などが行われている²⁾。これらの特徴を要約すると、

- (1) 流速分布は対数則に近い分布を持つ。河床位にに関して不明確さはあるが、濃度に対するKármán定数の変化は、濃度の増加に伴い体積濃度10%程度までは減少、それ以上は増加の傾向をもつ。
- (2) 水深方向の濃度分布はほぼ一様であるが、若干の濃度勾配をもつ。
- (3) 高濃度な流れが沖積河道を通過するとき侵食堆積による数m以上の河床変動が生じる。
- (4) 洪水末期に流れが間欠的に停止と流動を繰り返すcloggingと呼ばれる現象が生じる。

これらの現象の統一的な理論的説明は、まだ十分に行われておらず、個々の現象についての説明がなされているにすぎない。

3. 高濃度流れの物理的性質について

微細粒子を非常に高い体積濃度で含有する流れを高濃度流れと呼ぶことにする。高濃度流れの力学的メカニズムを考察する場合には、まず流れの材料を流体相と固体相の二相流として取り扱うか、連続体として取り扱うかという問題がある。粒径が比較的大きく濃度もあまり高くない流れでは、粒子の沈降が顕著であり、水流中に含まれる土砂を浮遊砂・掃流砂として取り扱うのが有利である。が、平均粒径が数十ミクロンの黄土のような材料を非常に高い体積濃度で含む高濃度流れでは、河床近傍を除けば濃度はほぼ一様とみなすことができ、流れを一つの連続体として考えることができる。連続体として捉えた材料の最も

重要な物理定数は、密度、粘性係数およびせん断降伏値である。一般的には、密度は濃度と温度の関数として、粘性・せん断降伏値は濃度・温度・粒子の帯電量・水の電媒定数の関数として表現される。

高濃度流れの物性を調べるためには、まず、材料の流動特性、即ち $\tau \sim \frac{du}{dy}$ の関係を明らかにし、さらに沈降特性を明らかにする必要がある。筆者らは粒径がほぼ黄土レスと同様でかつ高濃度な流れの作成が可能な材料としてパールフレー（林化成社）を用い、実験を行った。図-2 は回転粘度計により得た流動特性の一例である。これはほぼビンガム流体としての性質を示しており、 $\tau = \tau_B + \eta \frac{du}{dy}$ と表せる。図-3 に実験結果とともに森乙竹の式、大同による森乙竹の修正式を示す。ここでデータと森乙竹の式は適合せず、大同³⁾はフロックの形成とその濃度という概念を導入して修正しているものである。しかし、フロック濃度はデータとの適合性を調整するパラメータとして与えられており、フロックの形成要因である粒子の電荷とそれによる結合力を考慮したものではない。

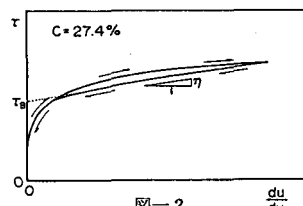


図-2

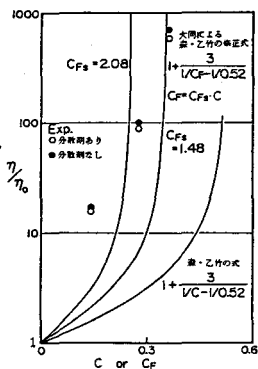


図-3

沈降試験は、濃度の経時変化を計測して行い同時に水圧を測定した。図-4~6 は初期体積濃度 20.4 % の場合のこれらの時間的变化を示す例である。図中、白丸はピエゾメーターで実測した水圧、実線は次式で表わされる懸濁液の重量による全応力の鉛直方向成分である。

$$P(z) = \int_0^z \rho(z) g dz = \int_0^z (1-C) \rho g dz + \int_0^z C \rho g dz \quad (1)$$

ここに $P(z)$ は懸濁液の密度分布、 C は粒子体積濃度。沈降開始後 240 分(図-4)では、 $P(z)$ と水圧は等しく、沈降粒子は粒子間の構造で支えられるのではない。2400 分後(図-6)では底部付近で両者に差が生じる。ここで沈降速度の時間的变化が小さいとして単一粒子についての運動方程式(2)式をたてることにより、その差が有効応力であることがわかる。

$$\frac{\pi}{8} D^3 (\sigma - P) g = 3\pi \mu W D + F_R \quad (2)$$

ここに D は吸着水層・近接粒子の影響をも含めて考えた粒子の有効な直径、 W は沈降速度、 F_R は粒子間応力の鉛直方向成分である。

4. 高濃度流れの力学的アプローチ

高濃度流れの流動機構も力学的に統一して捉えるには、流れと連続体として考え、固液混相流としての取り扱いが流動特性の解明に留めることが望ましい。が、開水路乱流でのエネルギー的なつり合いでは、流体と粒子との力の相互作用によるエネルギー消費を考慮すべきかどうかという問題が残る、Kármán 定数の評価に影響が出る。今後は高濃度流れの運動方程式をたて、また乱流構造のモデルを考案し、同時に clogging という独特の不安定現象の発生メカニズムも考慮してゆく。一方、微細粒子の帯電による水分子の結合エネルギーも定量的に評価し粘性を統一的に議論する方針である。

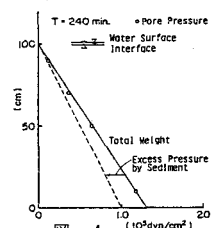


図-4

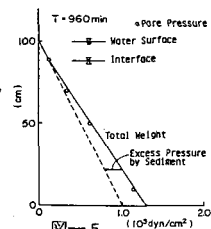


図-5

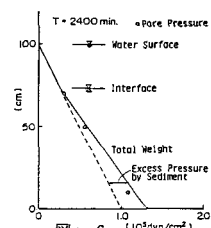


図-6

参考文献 1) 中国 科学出版社：黄河中游黄土，2) ISRS 1980 1983，3) 大同淳之：京都大学学位論文(70)