

流砂観測と流砂理論に基づく洪水中の河床材料の推定方法に関する考察

(株)建設環境研究所 ○富田邦裕、叶正興、重村一馬、益岡卓史、小田健一
京都大学防災研究所 藤田正治

1. はじめに

流砂観測はハイドロフォンや濁度計など用いて行われているが、まだ多くの問題が解決されていない。たとえば、洪水中に安定してデータが得られないなどの機器自体の問題がある場合があり、また着実に計測されたとしても、センサーの特性により計測できない粒径範囲が存在し、掃流砂と浮遊砂を含めた全流砂量が計測できない。一方、流量や水位などの水理量は比較的精度の良いデータが安定して得られる。また、流量や洪水中の河床材料の粒度分布（通常時に計測された粒度分布ではない）が明確であれば、流砂理論に基づく流砂量式から精度よく掃流砂量や浮遊砂量を推定することができ、全流砂量を求めることができるのは周知の事実である。この2つの条件のうち水理量は前述のように精度のいいデータが得られるが、洪水中の河床材料の粒度分布は一様粒径でなければよくわからない。これが流砂観測の必要な理由でもあるが、もしも、その粒度分布がわかれば流砂量式から安定して妥当な全流砂量が求められると考えられる。本研究は、ハイドロフォンによって計測された掃流砂量を直接流砂量の観測値とするのではなく、その計測値から洪水中の河床材料の粒度分布を推定して、掃流砂量式と浮遊砂量式から全流砂量を求める手法の可能性について検討するものである。

2. 用いる流砂理論

本研究の流砂理論として用いる式は、芦田・道上の粒径階別の掃流砂量式¹⁾と Egiazaroff の混合粒径の砂礫の掃流限界の式²⁾と芦田・道上の修正式³⁾である。芦田・道上式は式(1), (2), 混合粒径の砂礫の掃流限界式は式(3), (4)の様である。

$$Q_{bi} = A_i \cdot p_i \quad (1) \quad A_i = 17B \frac{u_*^3}{sg} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}}\right) \quad (2)$$

$$\frac{d_i}{d_m} \geq 0.4; \frac{\tau_{ci}}{\tau_{cm}} \left(= \frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2}\right) = \left\{ \frac{\log_{10} 19}{\log_{10}(19 d_i/d_m)} \right\}^2 \frac{d_i}{d_m} \quad (3) \quad \frac{d_i}{d_m} < 0.4; \frac{\tau_{ci}}{\tau_{cm}} \left(= \frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2}\right) = 0.85 \quad (4)$$

ここに、 Q_{bi} : 粒径階 i の砂礫の全幅掃流砂量、 B : 川幅、 u_* : 摩擦速度、 s : 水中比重、 g : 重力加速度、 τ_{*ci} : 粒径階 i に対する無次元限界掃流力、 τ_{*i} : 粒径階 i に対する無次元掃流力、 d_i : 粒径階 i の粒径、 p_i : 河床材料に占める粒径階 i の割合、 u_{*ci} : 粒径階 i に対する限界摩擦速度、 u_{*i} : 粒径階 i に対する摩擦速度、 τ_{cm} : 平均粒径の限界掃流力、 u_{*cm} : 平均粒径の限界摩擦速度、 d_m : 平均粒径である。

この流砂量式では掃流力が小さいときは粒径の効果が表れるが、掃流力が大きい場合、掃流砂量は粒径によらず摩擦速度の3乗に比例し、 $A_i = 17Bu_*^3/(sg)$ となる。したがって、掃流力が大きいときは、流砂量は水理量の計測だけから推定できる。これは流量がある一定量を超える場合、掃流砂の観測に頼らなくても掃流砂量が推定できること、精度の良い流量観測の重要性を意味するものである。

さて、ここでは、これらの式を使って、 u_* と掃流砂量の観測値から、 d_m 、 p_i を推定する。

3. 洪水中の河床材料の粒度分布の推定法

ここでは研究の第一歩として、河床材料を3粒径階に分けて、洪水中の河床材料に占めるそれぞれの割合を求めるためのロジックについて説明する。粒径階1はハイドロフォンで検出できない小さい粒径の砂礫である。粒径階2, 3はハイドロフォンで計測される河床材料を2つのグループに分けたものである。それぞれの割合を p_1 , p_2 , p_3 とし、以下に粒度分布の推定方法の手順について説明する。

① 最大粒径 d_{max} と最小粒径 d_{min}

まず、最大粒径 d_{max} と最小粒径 d_{min} は河床材料調査によりほぼ決定できる。 d_{min} は一般的な河川では 0.1 mm ~ 0.2 mm の場合が多い。どの粒径を最大粒径とするかは検討が必要である。

② 各粒径階の代表粒径

最小粒径と最大粒径の間に2つの粒径 d_a と d_b を設定する。 d_a はハイドロフォンで検出できない粒径の最大値であり、ここでは 2mm とする。

③ 平均粒径 d_m

Egiazaroff の式によると、洪水中、掃流力が増加するとき、摩擦速度が平均粒径の一樣砂に対する限界摩擦速度 u_{*cm} の $0.85^{1/2}$ 倍以上になると平均粒径の 40% 以下の細かな材料が一斉に動き始める。このときの摩擦速度を $u_{*c}(=0.85^{1/2} u_{*cm})$ とし、平均粒径の一樣砂の掃流限界に対する無次元掃流力を 0.05 とすると、式(4) から平均粒径は式(5)で推定される。 u_{*c} は観測から得られるので簡単に平均粒径が算定できる。ただし、これは河床材料が移動し始めた状態における河床材料の平均粒径であることに注意を要する。

$$d_m = \frac{u_{*c}^2}{0.05 \times 0.85sg} \quad (5)$$

④ p_1, p_2, p_3 の推定

各粒径階の代表粒径は、 $d_1 = \sqrt{d_{min}d_a}$ 、 $d_2 = \sqrt{d_a d_b}$ 、 $d_3 = \sqrt{d_b d_{max}}$ である。 d_1 はハイドロフォンで測定できないものであり、 p_1 はまず仮定する。すると、式(6)が解析の制約条件となる。

$$p_2 + p_3 = 1.0 - p_1, \quad p_i > 0 \quad (6)$$

次に、ある時刻における粒径階 2 と 3 の掃流砂量の和は式(1), (2)から次式で表される。

$$Q_B = Q_{b2} + Q_{b3} = p_2 A_2 + p_3 A_3 \quad (7)$$

この時刻のハイドロフォンによる掃流砂量の観測値を R とすると、式(7)から観測誤差を表す方程式が得られる。この誤差を掃流砂の移動開始後その周辺で求め、この誤差の和が最小になるような p_2 と p_3 を制約条件式(6)のもとに最小二乗法で計算される。つぎに、 $d_1, d_2, d_3, p_1, p_2, p_3$ から平均粒径を算定し、③で得られた平均粒径と比較して、異なれば p_1 を仮定し直す。このような方法で、 p_1, p_2, p_3 が決定される。以上より、図 1 の 4 点が③で求めた平均粒径と調和して決定され、河床材料の粒度分布の概形が決定される。

移動限界付近の状態から流砂が活発になると平均粒径や各粒径階の割合は変化する。したがって、上記の方法は平均粒径が求められる移動限界付近以外では適用できないが、たとえば、平均粒径をそのまま使ったり、 p_1 は変化しないと仮定すれば解析することができる。

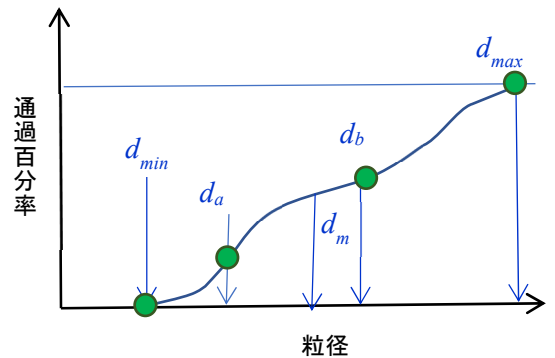


図 1 粒度分布の推定の考え方

4. 試行的解析

本手法を試行的に適用して、その妥当性を検討する。

まず、③について検討する。F 川の流砂観測結果によると掃流砂量が顕著に増大し始める時の摩擦速度は 10.8 cm/s から 15.3cm/s であり、この場合、洪水中の河床材料の平均粒径(理論値)は 1.71 cm から 3.42 cm になる。また、観測地点付近で通常時の河床材料調査結果による平均粒径は 1.69 cm から 3 cm 程度であり、掃流砂増加し始める時の平均粒径とほぼ一致する。

つぎに、 $d_{min}=0.1mm, d_a=2mm, d_b=2cm, d_{max}=20cm$ としたとき、表 1 に示す水深条件・摩擦速度に基づき、掃流砂量の観測値を仮定して、この仮定の観測値と流砂理論より算出した流砂量の誤差が最小となるように各粒径階の割合 p_2, p_3 を推定した。この推定された p_2, p_3 による粒径組成に基づき、流砂理論式による推定した流砂量(推定値)と仮定観測値の差は水深が非常に小さい場合(5cm 程度)以外は概ね 5%(近似度 95%~105%)以内である。

5. まとめ

本研究では、洪水中のハイドロフォンのデータと流量の観測により、洪水中の粒度分布を流砂理論や最小二乗法を使って推定する手法を提案した。ある程度精度の良い観測ができていればこの手法は適用可能であると考えられ、掃流砂量式、浮遊砂量式から全流砂量が推定される。今後は、実河川でのデータなどを用いて、この手法の妥当性を検討する。

参考文献：1), 2), 3) 「建設省河川砂防技術基準(案)同解説 調査編」(社団法人 日本河川協会編, H9.9) P277

表 1 試行的解析条件・結果一覧表

	水深 (cm)	摩擦速度 (cm/s)	流砂量		近似度(%) (=②/①)	p1	p2	p3
			①観測値 (cm3/s)	②推定値 (cm3/s)				
水深1	5	15.65	0.4	0.3	77.2	0.21	0.37	0.42
	10	22.14	12.3	12.3	100.0			
	50	49.50	561.8	556.3	99.0			
	60	54.22	783.0	786.9	100.5			
	95	68.23	1748.9	1745.4	99.8			
	100	70.00	1908.5	1911.7	100.2	0.21	0.16	0.63
水深2	5	15.65	0.5	0.6	120.9	0.23	0.40	0.37
	7	18.52	4.0	3.7	93.5			
	20	31.30	124.8	131.1	105.1			
	25	35.00	205.7	201.7	98.1			
	41	44.82	559.1	570.6	102.0			
	47	47.99	723.5	714.4	98.7			