

II-62

土砂物質の移送に関する研究

北海学園大学工学部 正員 山口 甲
 (株)北開水工コンサルタント ○正員 三田村 一 弘

1. はじめに

河川における土砂物質の移送については、河道計画、河川環境、土砂の海域拡散などを検討する場合において極めて重要な現象である。

現在浮遊砂量観測には定まった観測方法の基準がなく、観測値の精度の評価に統一性を欠いている。そこで本研究は精密な総浮遊砂量観測データを基に、十分な精度が維持されかつ観測点数が少なくすむ横断測線数・水深方向観測点数の基準づくりを目的に観測点数と精度について検討を行った。

また、河川で観測される浮遊砂量データは、上流から輸送されてくる Wash Load と河床から舞い上がった浮遊砂で構成され、洪水時の輸送土砂量の多くが Wash Load を含む流れと見られる。そこで、総浮遊砂量から Wash Load 量を分離することを試みたものである。

2. 土砂輸送量

河道内を流下する土砂は掃流砂・浮遊砂・Wash Load に区分される。浮遊砂と Wash Load は発生源を異にするが輸送形態は浮遊状態であり、現地の浮遊砂量の観測値は浮遊砂と Wash Load をあわせた土砂量である。そこで本文では浮遊砂量の観測値を輸送形態の浮遊砂と区分するため「総浮遊砂量」としている。

掃流砂量及び総浮遊砂量について石狩川石狩大橋の観測値¹⁾を見ると図-1のとおり流量との関係が見られ、流量が 100~3,000m³/s の範囲で総浮遊砂量は掃流砂量より 3~2 オーダー程度大きい。このことは河川の土砂輸送を論ずるとき、総浮遊砂量の量的・現象論的解明がより重要であることを示唆している。さらに図-1 では出水時期別の傾向も示したが、総浮遊砂量は融雪出水(春水)、降雨出水(夏水)では傾向に大きな差が見られ、今後の検討では出水時期について考慮する必要がある。

3. 観測方法の分析

3.1 観測資料

本研究は石狩川の石狩大橋、岩見沢大橋、砂川橋、妹背牛橋の各観測所における浮遊砂量の精密観測データ²⁾を用いた。実際の観測方法を石狩大橋 S44.4.15' を例に見ると、横断測線数は 17 本で全水面幅の約 6% の間隔で観測されている。また垂直(水深)方向には各測線で 1m 又は 0.5m 間隔、あるいは更に細かく観測されている。したがって、このデータは横断・水深方向観測点数で十分に精密な観測データといえる。

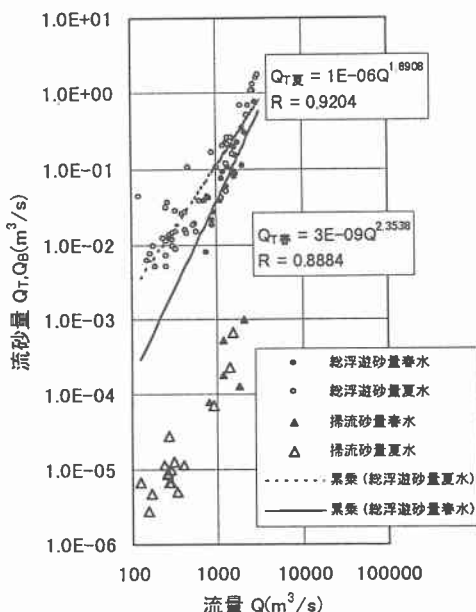


図-1 河川流量と流砂量(石狩大橋)

Study on the Sediment Transportation
 by Hajime YAMAGUCHI and Kazuhiro MITAMURA

3.2 垂直観測

総浮遊砂量の垂直分布を精度よく再現するのに必要な測定点数については、基礎データを真値とし垂直方向の測点数を減らしたときの測定誤差の検討を行う。総浮遊砂量は含砂量 C と流速 v の積で表される。

$$q_s = \int_0^h c \cdot v \cdot dh \quad (1)$$

ここに q_s : 単位幅当り流砂量 (kg/s/m), c : 含砂量 (kg/m³),
 v : 流速 (m/s), h : 全水深 (m)

垂直観測精度の検討は実測値 (単位幅当り総浮遊砂量) を真値とし、それと水面値から (水面法) そして水面から水深の 2 割と 8 割の値の平均値から (2 点法)、及び水深の 6 割の値から計算したもの (1 点法) の精度をそれぞれ比較した。水面法では真値 (精密観測値) より大きく計算され、1 点法では逆に観測値は小さい。それに対し 2 点法は図-2 に示すように真値に近い値が観測され、総浮遊砂量観測では 2 点法が有効と思われる。

3.3 横断観測

精度の検討は実測値を真値とし、測線数を順に減らしたときの総浮遊砂量との誤差を求めることで行った。横断観測誤差 E と測線間隔 b を水面幅 B で割った横断測線間隔 (b/B) の関係について誤差の分布を見ると、誤差に正負の偏りは見られない。そこで b/B を 25% (5 測線) とすると、誤差の平均値が $\pm 4\%$ の範囲で流砂量が観測できる (図-3 参照)。

3.4 観測法の提案

(1) 平水時

3.2、3.3 で述べた垂直方向 2 点・横断方向 5 点の観測法で測定精度の検討を行う。精度の検討は石狩大橋の観測例について、総浮遊砂量の実測値と上記の方法での計算値の関係を検討することで行った。図-4 に示すように、実測値と提案法による計算値には 1 : 1 の関係が見られ相関係数は 0.9988 となり、この提案法による観測で十分に精度が維持できるものと思われる。

(2) 洪水時

洪水時は現実的に水面から 8 割水深値を観測することは不可能と見られる。そこで水面観測のみで流砂量が推定できないか検討する。いま 3.3 と同様の方法で検討すると、横断測線間隔の大小に関係なく実測値との誤差は大きいことがわかった。これはサンプル数が少ないこと (7 例) と水面含砂量の変動性が大きいためと考えられる。そこで仮に水面の全測線を観測したときの計算値を真値として検討した。その結果横断測線間隔が 33% (4 測線) で誤差の平均が 10% 程度となり、総浮遊砂量の実測値とこの観測法の計算値の関係をみると図-5 に示すように若干相関性に問題は

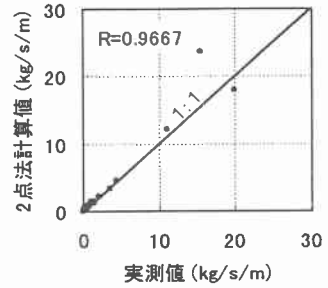


図-2 実測値-2点法計算値

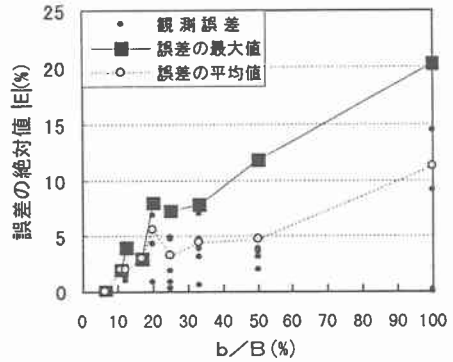


図-3 石狩大橋横断観測精度

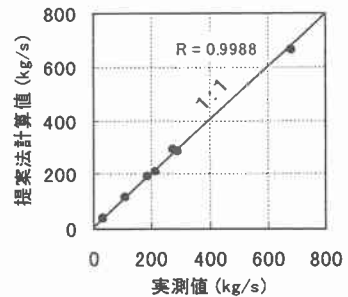


図-4 実測値と平水時提案法 (石狩大橋)

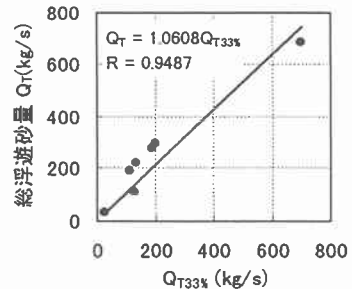


図-5 洪水時提案法と実測値 (石狩大橋)

あるが一定の関係が得られた。したがって、洪水時には水面4点の流速と含砂量の観測が有効と思われる。

3.5 河岸観測値

石狩川では3ヶ所の河岸で水質自動監視装置による連続観測が行われている。このデータから総浮遊砂量の変化を概略的につかめたいか検討したい。

そこで各観測例について、最左岸測線の水深方向平均含砂量 C_L (mg/l) と全断面平均含砂量 \bar{C} (mg/l) の関係を求めた。図-6 に示すように左岸含砂量と全断面平均含砂量には春水・夏水の関係なく一定の関係が見られ ($\bar{C} = 1.314 C_L$)、水質自動監視装置による観測が総浮遊土砂量の推定に有効であろうと思われる。

$$Q_T = 1.314 \cdot C_L \cdot Q \quad (2)$$

ここに Q_T : 総浮遊砂量 (g/s), Q : 流量 (m³/s), C_L : 河岸含砂量 (mg/l)

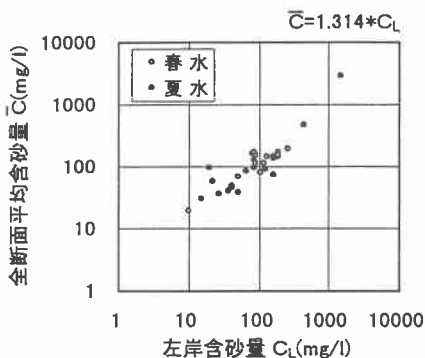


図-6 左岸含砂量と全断面平均含砂量

4. Wash Load の分析

4.1 基礎式

総浮遊砂量の垂直分布は、上流から輸送された Wash Load と付近の河床から浮上した浮遊砂で構成されている。これまでの研究は河床から浮上した浮遊砂の垂直分布について論及したものが多く、その例を示す。

Rouse の式³⁾

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{h-y}{y} \cdot \frac{a}{h-a} \right)^{\frac{w_0}{\alpha u_*}}$$
(3)

板倉の式⁴⁾

$$\frac{C}{C_a} = \left[\left(\frac{h-y}{h-a} \right)^{1+\phi} \cdot \left(\frac{a}{y} \right)^{\frac{w_0}{\alpha u_*}} \right], \quad \phi_2 = \alpha \frac{h}{L}, \quad \frac{1}{L} = \frac{\kappa g (\gamma - 1) w_0 \bar{C}}{u_*^3}$$
(4)

ここに C : 濃度, C_a : 河床から a の濃度, h : 水深, y : 河床からの距離, w_0 : 沈降速度, κ : カルマン定数 (=0.4), u_* : 摩擦速度, $\alpha=7.0$, g : 重力加速度, γ : 比重, \bar{C} : 濃度の水深方向平均値

4.2 水面含砂量を Wash Load とする場合

いま河床砂が浮上した浮遊砂は水面に到達せず、水面含砂量はすべて Wash Load によるものと仮定する。また、Wash Load は十分に攪拌されているので、Wash Load の垂直分布は河床面まで水面含砂量 C_w の値で一定と考える。この仮定のもと石狩大橋の含砂量の垂直分布形状を式(3), (4)で計算する。ここで、沈降速度 w_0 は Rubey の式⁵⁾ を用い、式(3), (4)中の C_a は次式を用いる。

$$C_a = C_{a0} - C_w \quad (5)$$

ここに C_{a0} : 河床面($a=0.05h$)実測総浮遊砂含砂量,
 C_w : 水面含砂量

式(3), (4)で平均粒径 d を変化させて計算した結果は図-7 のとおりで、Rouse, 板倉の式ともに $d=0.2\text{mm}$ とした場合に実例の垂直分布形状に近い。これは石狩大橋の実測値⁶⁾ $d_{50}=0.2\text{mm}$ とも符合する。この計算結果は、水面含砂量及び河床面含砂量の実測値から総浮遊砂量の垂直分布、更には流速の垂直分布から Wash Load 量・浮遊砂量が分離して求まることを示唆している。

4.3 Wash Load 量の分析

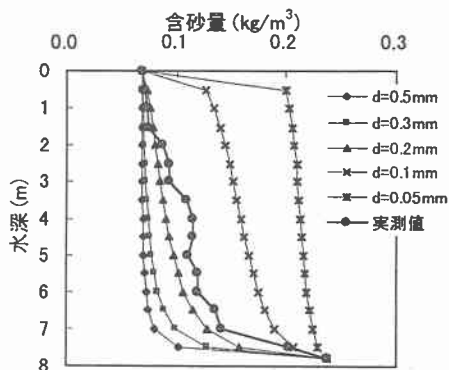


図-7 板倉分布(石狩大橋)

前節では Wash Load を仮定して浮遊砂の含砂量 C の垂直分布を計算したが、ここでは Lane と Kalinske の式から浮遊砂量を求めておき、総浮遊砂量の観測値から Wash Load 量を推定する。

Lane と Kalinske は浮遊砂量を求める次式⁷⁾を示している。

$$q_{sk} = q \cdot C_a \cdot M, \quad M = e^{\frac{15w_{s0}}{u_*^2}} \cdot P, \quad P = \int_0^1 \left[1 + \frac{2.5}{\phi} (1 + \log_e \eta) \right] \cdot e^{-\frac{15w_s}{u_*}} d\eta \quad (6)$$

ここに q_{sk} : 単位幅当り浮遊砂量, q : 単位幅当り流量, $\phi = v/u_*$ 。

総浮遊砂含砂量 C_T を(7)式で表し、また(8)式が成り立つ。

$$C_T = C_s + C_w \quad (7)$$

$$q_T = q_{sk} + q_w \quad (8)$$

ここに C_s : 浮遊砂含砂量, C_w : Wash Load 含砂量, q_T : 単位幅総浮遊砂量, q_w : Wash Load 量

いま水深方向に C_w が一定として式(8)に式(6)を代入すると

$$q_T = q \{ C_w + (C_{a0} - C_w) M \} \quad (9)$$

Lane と Kalinske の式で M を求めれば、 C_{a0} , q_T は実測値で得られているので

$$C_w = \left(\frac{q_T}{q} - M \cdot C_{a0} \right) / (1 - M) \quad (10)$$

よって、次式で Wash Load 量と浮遊砂量が求まる。

$$q_w = C_w \cdot q, \quad q_{sk} = q \cdot (C_{a0} - C_w) \cdot M \quad \text{または} \quad q_{sk} = q_T - q_w \quad (11)$$

式(10)から得られた計算含砂量 C_w と実測水面含砂量 C_w を比較すると、計算含砂量は実測水面含砂量と同じ値を示した。これは水面含砂量 C_w がすべて Wash Load であることを示唆している。また、式(11)から総浮遊砂量を分離して Wash Load ・浮遊砂が量的に求められる。図-8 に測線毎の総浮遊砂量の観測値 q_T と式(11)による Wash Load 量 q_w を示しているが、Wash Load は総浮遊砂量の 92.8% を占め、浮遊砂量は 7.2% に過ぎない。したがって、この観測データの総浮遊砂量の大部分が Wash Load であると推定される。

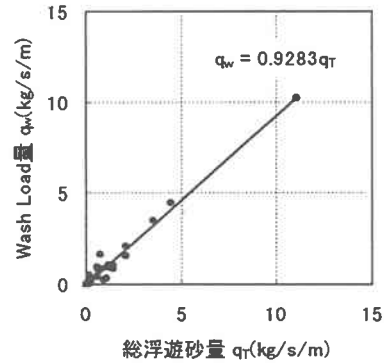


図-8 総浮遊砂量とWash Load量

5. おわりに

本研究は総浮遊砂量観測の基準づくりと総浮遊砂量から Wash Load 量、浮遊砂量の分離を試みたものである。総浮遊砂量観測法については、洪水時観測に検討の余地はあるが十分なる精度が確保できる観測法を提案できた。また総浮遊砂量の分離に関して、総浮遊砂量の大半が Wash Load であるという計算結果が得られた。今後は、観測データを充実させこの Wash Load の発現現象に関する検討を行うことが、土砂輸送量を的確に推定するために重要となる。

参考文献

- (財)北海道河川防災研究センター：生産土砂調査法，平成9年2月。
- 北海道開発局：第13回北海道開発局技術研究発表会（河川部門）河床変動に関する調査研究最終報告資料編，昭和45年2月。
- Rouse, H. : Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence, Trans. ASCE, Vol.102, pp.463~543, 1937.
- 板倉忠興：河川における乱流拡散現象に関する研究，昭和59年3月。
- Rubey, W.W. : Settling velocities of gravel, sand and silt particles, Amer. J. of Sci., 5th Ser., Vol.25, No.148, pp.325~338, 1933.
- 山口 甲：蛇行特性と河道計画，北海道開発局帯広開発建設部，昭和60年10月。
- Lane, E.W. and A.A. Kalinske : Engineering calculations of suspended sediments, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol.22, pp.603~607, 1941.