

河幅及び断面形状を考慮した掃流砂量式の導出

中央大学大学院理工学研究科

学生会員 ○浅野 文典

中央大学研究開発機構

フェロー会員 福岡 捷二

1. 序論

沖積地河川の土砂移動量を適切に把握することは、治水上、環境上重要な技術的課題である。河道における土砂移動量は、土砂の特性と河床に作用する流れの掃流力に密接に関係することから、これらの関数としての掃流砂量式が数多く提案されている。これらの式の多くは、実験室における流砂量の観測値をベースに、流路の平均的掃流力を用いて表現されており、掃流砂量式の誘導にあたっては、流砂量を規定する河幅や断面形状を直接的には考慮されていない。福岡¹⁾は、沖積地河川の安定な河道形状、河道幅は、流域の特徴を表す河道形成流量、河道勾配、河床材料(粒度分布)に支配されると考え、次元解析により日本および海外の自然河道の無次元河幅、無次元水深は流域の河道形成流量、地形特性を表わす物理量からなる無次元流量により表現できることを示している。本研究では、上述の考え方にに基づき、海外の河川で観測された掃流砂量の現地観測データ及び大型水路移動床実験データを用い、次元解析法によって河幅、断面形状の影響を考慮した実河川に適用可能な無次元掃流砂量式を導く。

2. 流砂量を規定する無次元量間の関係

掃流砂量は、安定な河道断面を形成する互いに独立な物理量によって規定され、式(1)の関係から掃流砂量が決まる。ここで、 Q_B ：掃流砂量、 Q ：流量、 B ：河幅、 h ：水深、 I ：勾配、 d_r ：代表粒径、 g ：重力加速度、 ρ ：水の密度、 σ ：河床材料の密度である。式(1)に次元解析を適用することにより、式(2)に示す無次元量間の関係が導かれる。ここで、 s は砂礫の水中比重で、 $s = (\sigma - \rho) / \rho$ で表

$$Q_B = f_1(Q, B, h, I, d_r, g, \rho, \sigma) \quad (1)$$

$$\frac{Q_B}{\sqrt{sg} d_r^5} = \phi_1 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5}, \frac{B}{d_r}, \frac{h}{d_r}, I, \frac{\sigma}{\rho} \right) \quad (2)$$

$$\frac{B}{d_r} = 4.25 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5} \right)^{0.40} \quad (3)$$

$$\frac{h}{d_r} = 0.13 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5} \right)^{0.38} \quad (4)$$

$$\frac{Q_B}{\sqrt{sg} d_r^5} = \phi_2 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5}, I \right) \quad (5)$$

表-1 米国, USGS 掃流砂データ²⁾

河川	d_{50} [mm]	B [m]	h [m]	Q [m ³ /s]	$1/I$	Q_B [m ³ /s]
Tanana River at Fairbanks	40	107~469	1.4~2.9	345~2020	1886~2439	$2.3 \times 10^{-4} \sim 3.4 \times 10^{-2}$
Wisconsin River at Muscoda	0.5	219~310	0.7~3.4	87~1240	1923~4545	$4.0 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-2}$
Black River near Galesville	0.6	72~122	0.6~1.9	13~256	2857~9091	$7.1 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-3}$
Chippewa River near Caryville	8.0	124~247	0.9~2.8	31~779	4000~10753	$2.0 \times 10^{-5} \sim 5.1 \times 10^{-3}$
Chippewa River at Durand	0.8	153~244	0.6~3.2	51~884	2778~4348	$2.2 \times 10^{-4} \sim 1.1 \times 10^{-2}$
Chippewa River near Pepin	0.5	171~277	0.8~1.8	70~399	1724~5882	$6.4 \times 10^{-4} \sim 5.5 \times 10^{-3}$

表-2 ミシシッピ川およびデモイン川の掃流砂データ^{3),4)}

河川	d_{50} [mm]	B [m]	h [m]	Q [m ³ /s]	$1/I$	Q_B [m ³ /s]
Mississippi River	0.4~0.7	120~860	2.4~7.0	317~4508	6312~12745	$9.8 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-2}$
Den Moines River	0.4~0.9	161~174	1.8~2.6	273~522	3254~4568	$3.2 \times 10^{-4} \sim 3.6 \times 10^{-3}$

表-3 土木研究所水路実験^{5),6)}

データ数	d_{50} [mm]	h [cm]	Q [l/s]	$1/I$	Q_B [cm ³ /s]
36	1.038	19.3~43.7	43~200	613~4545	0.10~25.25
64	2.21	11.4~51.5	28~350	63~1538	0.01~66.94
63	2.62	19.6~51.3	90~325	340~1667	0.21~54.31
52	3.76	18.1~51.8	80~400	352~1111	0.22~57.66
31	4.58	19.4~42.3	80~350	431~800	0.39~18.97
21	10.0	21.0~50.5	395~1443	172~245	0.80~192.80
14	18.1	23.1~50.2	540~1630	133~183	1.53~270.31

表-4 寒地土木研究所水路実験⁷⁾

	d_{50} [mm]	h [cm]	Q [l/s]	$1/I$	Q_B [cm ³ /s]
実験1	28	57.1	1000	214	165.49
実験2	27.6	55.3	1000	214	386.21
実験3	22	59.3	1000	214	230.52
実験4	23.3	56.8	1000	214	183.60
実験5	28.4	59.2	1000	214	325.10
実験6	24.6	58.6	1000	214	83.87
実験7	11.3	65.2	1500	214	610.31
実験8	30.3	64.2	1500	214	616.21

3. 現地観測データ及び水路実験データ

表-1 は、Williams & Rosgen²⁾が整理したアメリカ、USGS において観測された 127 個の掃流砂データである。表-2 は Nakato ら^{3),4)}がアメリカ、ミシシッピ川およびデモイン川で観測した 32 個のデータである。表-3 に、我が国の建設省土木研究所(当時)が、掃流砂量式の検討に用いた佐藤・吉川・芦田⁵⁾、吉川ら⁶⁾の水路実験データを示す。表-4 は、国土交通省北海道開発局寒地土木研究所⁷⁾の掃流砂量データである。表-5 は Gilbert⁸⁾によって行われた 218 個の水路実験データである。各データの詳細については、文献 2)~8)を参照されたい。

キーワード 安定河道、掃流砂量、次元解析、無次元流量

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL 03-3817-1611

4. 考察

図-1, 図-2 に無次元流量と無次元水面幅, 無次元水深の関係を示す. 図中には, 自然河川, 現地および拡幅水路実験の河道形成流量に対して導いた無次元流量と無次元水面幅, 無次元水深の関係式 (式(3), 式(4)) を示している. 現地データでは無次元水面幅, 無次元水深が福岡の式をほぼ満足していることが分かる. 一方, 無次元水路幅の実験値は, 自然河川の無次元河幅の式が示す直線より下にプロットされている. そのため図-2 の無次元水深は福岡の式が示す値より大きくなる. これは, 流量に応じて拡幅可能な河川と比較し, 固定幅での水路実験のため幅が狭く, その分, 自然河川に比して水深が大きい歪んだ断面形状となっていることを示している. 図-3 に無次元掃流砂量と勾配を乗じた無次元流量の関係を示す. 掃流砂量は局所的な流れの影響を受けることから, 横軸は河道の断面形状を規定する無次元流量と河道の局所的な水理量である勾配の積で表現されている. また, 一般に勾配が限界勾配 I_c 以下では土砂移動は生じない. そのため, 式(5)の I を $(I-I_c)$ で表現する.

$$\frac{Q_B}{\sqrt{sgId_r^5}} = 0.02 \left(\frac{Q}{\sqrt{sgId_r^5}} I \left(1 - \frac{I_c}{I} \right) \right) \quad (6)$$

ここで, 限界勾配 I_c は無次元限界掃流力 $\tau_{*c}=0.05$ とすることにより $I_c = 0.083d/h$ として算出した. 縦軸, 横軸はそれぞれ 10^6 , 10^5 の広い範囲に変化するにもかかわらず, 現地観測データの無次元掃流砂量はほぼ式(6)で表現できる. 実験データは, 式(6)に比べ若干傾きが大きい. この理由は, 図-2 に示すように実験水路では, 水路幅が固定されている影響により水深が増大し, 現地観測データに比べ若干掃流砂量が大きくなるためと考えられる. 以上のように, 現地河川と水路実験では多少の違いはあるが, 実験水路においても掃流砂量は, ほぼ式(6)の関係が成立するといえる.

5. 結論

本研究では, 次元解析より導いた無次元量に対し, 掃流砂量の現地観測データ及び水路実験データを用い, 河幅, 断面形状を考慮した実河川に適用可能な無次元掃流砂量式を導き, 実データで検証した.

参考文献 1) 福岡捷二: 招待論文, 土木学会論文集, F. Vol. 66 No. 4, pp. 471-489, 2010. 2) Williams, G. P. and Rosgen, D. L., U. S. Geological Survey Open-File Report 89-67, 1989. 3) Nakato, T. and Kennedy, J. F., IIHR Report, No. 201, 1977. 4) Nakato, T. and Vadnal, J. L., IIHR Report, No. 237, 1981. 5) 佐藤, 吉川, 芦田, 土木研究所報告, 第98号, pp. 1-18, 1958. 6) 吉川, 福岡, 馬場, 河野, 水理講演会論文集, pp. 1-6, 1975. 7) 小川, 渡邊, 水工学論文集, 第47巻, pp. 535-540, 2003. 8) Gilbert, G. K., US Geological Survey Professional Paper, 86, 1914.

表-5 Gilbert の水路実験⁸⁾

	d_r [mm]	h [cm]	Q [l/s]	$1/I$	Q_B [cm ³ /s]
A(13)	0.3	1.8~8.6	2.6~31.7	47~556	3.13~137.74
B(68)	0.4	1.1~22.4	2.6~31.7	25~667	0.49~196.23
C(53)	0.5	1.2~17.7	2.6~31.7	25~769	0.60~189.06
D(33)	0.8	1.7~15.0	2.6~20.8	36~556	0.75~142.26
E(23)	1.7	2.3~18.8	5.2~31.7	41~556	0.64~83.02
F(10)	3.2	2.3~10.5	5.2~31.7	40~135	2.57~78.87
G(11)	4.9	2.8~17.0	10.3~31.7	32~161	3.21~124.91
H(7)	7.0	5.1~15.5	10.3~31.7	34~135	2.98~83.77

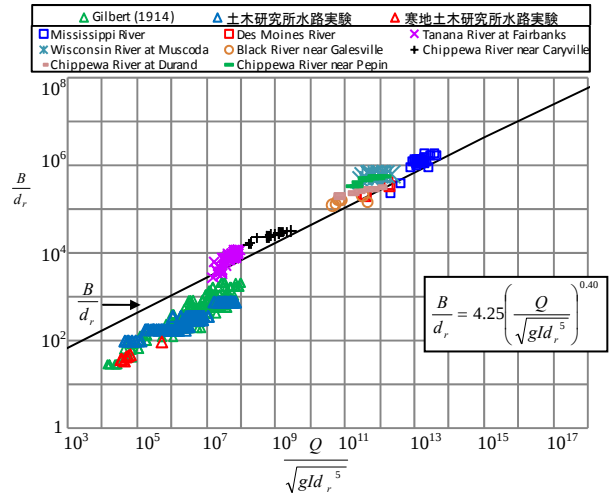


図-1 無次元流量と無次元水面幅の関係

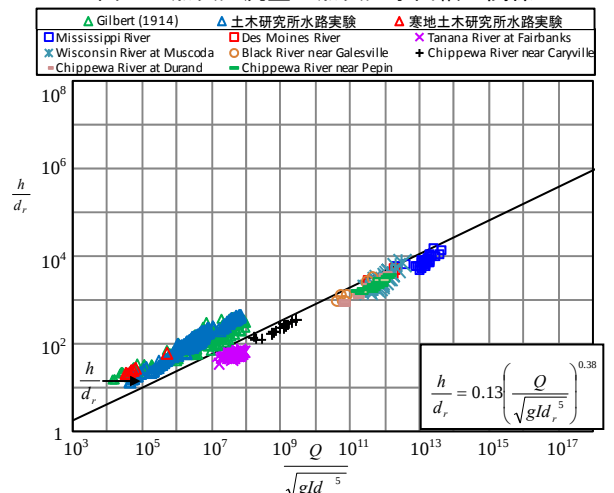


図-2 無次元流量と無次元水深の関係

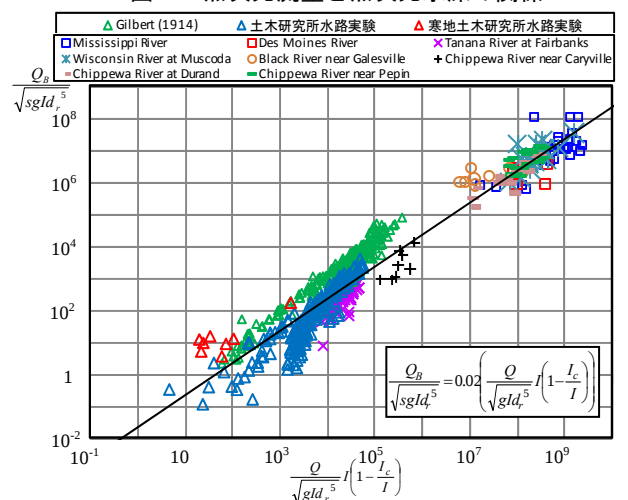


図-2 勾配を乗じた無次元流量と無次元掃流砂量

図-2 勾配を乗じた無次元流量と無次元掃流砂量