河幅及び断面形状を考慮した掃流砂量式の 導出とその適用性に関する研究 DERIVATION AND APPLICABILITY OF THE SEDIMENT TRANSPORT FORMULA CONSIDERING THE EFFECT OF RIVER WIDTH AND CROSS-SECTIONAL FORM

浅野文典¹・福岡捷二² Fuminori ASANO and Shoji FUKUOKA

1学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27) 2フェロー 工博 Ph.D 中央大学理工学部特任教授,中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

Estimation of sediment transport rate is important for flood control and river environment. In the previous studies, sediment transport formulae have been derived as functions of tractive stress at the river bed. However, the authors believed that sediment transport rate was regulated by the same mechanism as the determination of a stable cross-sectional form of rivers.

In this study, we proposed a sediment transport formula considering the effect of river width and cross-sectional form. At first, we investigated relationships among dimensionless quantities of bed load movement by the dimensional analysis. Then, we derived the sediment transport formula using field observed data of bed load in the United States and Japanese rivers. Finally, we showed that the proposed formula was useful for river course design and river improvement work by the cooperation with the existing bed load formulae.

Key Words : sediment transport rate, fukuoka's equation, river width, cross-sectional form

1. はじめに

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.しかし、現在の多くの河川では、砂利採取や河川横断構造物の影響により土砂移動のバランスが崩れ、河床低下や澪筋化、それに伴う河道内の樹林化など様々な問題が生じている¹⁰. このため、土砂移動は治水上、環境上多くの問題に密接に関係し、治水と環境の調和した川づくりを考える際の重要な検討項目となっている^{2),3)}.しかし、河川における流砂量は、その観測が容易でないこと、また、流れや断面形状、河道状況の影響を受けること等のため、治水・環境問題に応える十分な情報がないのが現状である.

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していない.

福岡^{4,5).6}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.さらに,河幅, 水深が決まればそこでの土砂移動量も決まるとの考えの もとに,河道断面の決定機構を考慮した無次元流砂量の 算定の可能性についても言及している^{5).6}.

本研究では、上述の考えを確かなものとするため、ま た、河道の設計法の基本とするために、日本および海外 の河川で観測された掃流砂量の現地観測データを用い、 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示す.次に、移動 床実験水路で得られた水理データおよび流砂量について も同様に検討し、移動床水路実験の持つ物理的意味を検 討する.最後に、導出された無次元掃流砂量式の河道計 画への利用について述べている.

河川	d ₆₀ [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-1 米国, USGS 掃流砂データ⁸⁾

表-2 ミシシッピー川およびデモイン川の掃流砂データ ^{9,10)}							
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 建設省により観測された掃流砂データ¹¹⁾

河川	d ₆₀ [mm]	B [m]	h[m]	Q[m ³ /s]	1/I	$Q_B[m^3/s]$
北上川(登米)	0.6	265	5.7~6.4	2184~2429	3955~4618	$2.4 \times 10^{-3} \sim 3.3 \times 10^{-3}$
北上川(野田橋)	9.0	122	1.0	108	1875	1.7×10^{-4}
犀川(小市橋)	0.6	122	1.6	520	500	7.1×10^{-4}
矢作川(日名橋)	2.5	308~349	2.1~3.9	1004~2518	571~1111	$6.1 \times 10^{-4} \sim 8.2 \times 10^{-3}$
雲出川(大仰)	3.5	89~91	1.7~1.8	230~238	901	$7.4 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-4}$

河川	d ₆₀ [mm]	B [m]	h[m]	$Q[m^3/s]$	1/I	Q _B [m ³ /s]
石狩川(月形)	1.4	95~105	2.3~4.2	214~758	1515~4878	$7.2 \times 10^{-3} \sim 3.5 \times 10^{-1}$

2. 流砂量を規定する無次元量間の関係

我が国の河川における発生頻度の高い洪水流量は,河 道の断面形状を規定する大規模流量である河道形成流量 よりも十分小さく,河道の流砂運動は,河道形成流量に よって定まった安定な河道断面の中で起こっている水理 現象であると考えられる.ここでいう,「安定な河道断 面」とは,流れ,土砂移動,河道の縦横断面形が相互作 用による変動の中で動的に安定するものと考える.した がって,洪水で生じる河岸崩壊や河床変動は河道形成流 量によって形成された安定な河道断面内で生じる変動で あると考えている.このことは,掃流砂量は,河道断面 形状に規定される量であり,河道断面形状を決める物理 量の従属変数となる.

このとき, 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.

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

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

ここで, *s* は砂礫の水中比重で, *s* = (*σ*-*ρ*) / *ρ*で表わされる.式(2)では,河岸侵食,上流域の土砂崩壊等の影響

を強く受ける浮遊砂量は考慮されていず,掃流砂量のみ を対象としている.式(2)右辺の第2項,第3項は,それぞ れ式(3),式(4)に示す福岡の河幅の式,水深の式^{4,5,6}より, 右辺第1項の無次元流量で表現できる無次元数であるこ とがわかる.

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

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

これより, 無次元流砂量式式(2)は, 式(5)の形で書くこ とができる.

$$\frac{Q_B}{\sqrt{sgId_r^5}} = \phi_2\left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}}, I\right)$$
(5)

次元解析法は、対象とする現象を物理的、力学的に考察 し適切な無次元量の組み合わせを導くもので⁷⁾、このよ うに導かれた式(3)、式(4)、式(5)は、力学的に導いた式 であると言える.以下では、実験データ及び現地観測 データを用いて式(5)の関数関係について検討する.

3. 現地観測データを用いた無次元掃流砂量式 の検討

(1) 現地観測データの概要

表-1は, Williams & Rosgen⁸⁾が整理したアメリカ, USGSにおいて, Helley-Smith bed load sampler を用いて 観測されたアメリカ河川の掃流砂データを示す. 93河川



で詳細な観測が行われているが、本研究では、そのうち 式(3)の形で検討可能なデータ127個を用いている.表-2 はNakatoら^{9,10)}がアメリカ、ミシシッピー川およびデモ イン川で観測した32個のデータである.ここでも流砂量 の観測にはHelley-Smith bed load sampler が用いられてい る. Nakatoらの掃流砂量データのうち, 掃流砂量が 20(tons/day)以下のデータは、中藤氏の言う観測された流 砂量が非常に少なく、データに観測上の誤差を含み、ま た、主流路に比べ小さい副流路で観測されたデータや下 流の構造物の影響を受けるデータで、誤差が大きいとい う意見に従い除外した.表-3は、1960年代に我が国の河 川で観測された掃流砂量データを建設省土木研究所が整 理したものである11). 断面形状,代表粒径等の検討に必 要なデータが揃っている5地点の14個のデータを用いた. 掃流砂量の観測にはいずれも土研式掃流砂採取器が用い られている.表-4は、北海道開発局土木試験所によって 観測された石狩川の掃流砂量に関するデータである¹²⁾. 縦断的に5地点で観測が行われているが、ここでは断面 内の観測点数の多い月形地点のデータを用いる. 掃流砂 量の観測には土研式掃流砂採取器が用いられている. 各 観測データの詳細については、文献8).9).10).11).12)を参 照されたい.

(2) 現地河川における無次元量の関係

図-1に、掃流砂量が観測された河川の観測地点における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.この図よ り、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.このことは、式(2)より式(3),(4)を 用いた式(5)の誘導過程から、式(5)の無次元掃流砂量式 を図-1に用いた河川データに対して検討することは妥当 であることを示している.図-2に表-1、表-2のアメリカ









の河川の観測データを用いた無次元掃流砂量と勾配のベ キ乗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. ここでは, 無次元流量に対 し, 無次元掃流砂量データが最もまとまる*I*¹³を乗じてい る¹³. 縦軸, 横軸はそれぞれ10⁶, 10⁵の広い範囲に変化 するにもかかわらず, 無次元掃流砂量はほぼ式(6)で表現 できる.

$$\frac{Q_B}{\sqrt{sgId_r^5}} = 0.2 \left(\frac{Q}{\sqrt{gId_r^5}} I^{1.3}\right) \tag{6}$$

図-3には、表-3、表-4の国内の河川における観測データ をプロットした結果を示す.北海道開発局土木試験所の データは式(6)に対し無次元掃流砂量が大きくなり、逆に、 建設省のデータは小さくなる.しかし、これら日本の データにおいても、ばらつき幅はアメリカの河川に比し て大きいが、式(6)でほぼ説明出来ていると考えてよい. 以下では、式(6)を福岡の掃流砂量式と呼ぶ.



(3) 既往の掃流砂量式との比較

図-4は、河床変動計算に用いられている代表的な無次 元掃流砂量式に対して、表-1~表-4に示すデータを用い た無次元掃流砂量と無次元掃流力の関係を示している. ここで、無次元掃流力は、平均水深、河床勾配、河床材 料粒径を用いて求められている.

図-4より,既往の無次元掃流砂量式は,無次元掃流力 に対してばらつきが大きく,現地観測された掃流砂量を 統一的には説明できていないように見える.一方,福岡 の無次元掃流砂量式は,流砂運動を引き起こすのは流砂 運動の場である河道の水面幅,水深を考慮したグロスな 流量,勾配,河床材料粒径からなる無次元流量と勾配の 1.3乗の積で表わされ,現地データを統一的に説明して いる.

もちろん,既往の無次元掃流砂量式を用いる河床変動 計算では,河道の縦横断面形状を考慮して流れを解くこ とにより求めた無次元掃流力分布を用いて各位置での流 砂量を求め,それを水面幅全体にわたり積分をすること によって河道を流れる全掃流砂量を求めることを行って おり,この計算過程に問題はない.既往の単位幅掃流砂 量式は,実験水路での掃流砂量実験と力学的考察に基づ き無次元掃流力の関数として表現されたものである.し かし,図-4に示すようにこの無次元掃流力のみの関数で は,現地河川では実際に生じている掃流砂量を十分説明 できていない.実験室規模でミクロな立場から力学的に 積み上げて出来る流砂量式が一般的であるが,現地河川 で生じる掃流砂量は,水面幅や,河床形態など河道構造 の影響を強く受けることから,これらを支配する要因を 考慮に入れたマクロな考察から導かれる掃流砂量式も必

表-5 土木研究所水路実験^{14),15)}

データ数	d _m [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-6 寒地土木研究所水路実験¹⁶⁾

	d _m [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

表-7 Gilbertの水路実験¹⁷⁾

d _m [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	0.75~042.26
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

要である.

福岡の無次元掃流砂量式は、このような立場に立って 導かれたものである.すなわち、全掃流砂量は局所的な 無次元掃流力分布よりもむしろ流量、勾配、河床材料と いった河道の河幅や断面形状を規定する大きなスケール の諸量の無次元組み合わせから決まっているのではない か、そのほうが、河道全体を流れる実際の掃流砂量を説 明するのではないかと述べている.

4. 大型水路実験データを用いた無次元掃流砂量 式の検討

本章では前章で導いた福岡の無次元掃流砂量式と福岡 の無次元河幅,無次元水深の式を用いて,移動床水路実 験における河幅,水深と掃流砂量がどのような物理的意 味を持つかを検討する.

(1)実験データの概要

表-5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¹⁴、吉川ら¹⁵の水 路実験データを示す.実験は開水路(幅1.76m,0.78m, 水路長114m)で行われ、掃流砂量の観測には土研式掃 流砂採取器が用いられた.ここで、流れが射流となって いるデータについては、常流の土砂移動現象とは異なる ことから、同一に検討すべきではないと考え、検討から 除外した.表-6は、国土交通省北海道開発局寒地土木研 究所¹⁶の高速循環実験水路(幅1m,長さ24m)を開水路と



して使用し測定された掃流砂量データである. 寒地土木 研究所の掃流砂量は、通水中の河床高の変化と上流から の供給土砂量を用いて算出している.表-7はGilbert¹⁷⁾に よって行われた水路実験データである.実験は長さ9.6m. 幅0.6mの実験水路で行われた.水路幅を7cm~60cmに変 化させることによって、218個のデータが観測されてい る. このデータは、水面勾配の観測データが少ないため、 勾配として河床勾配を用いている. ここでも射流のデー タは除外している. 各実験の詳細については, 文献 14),15),16),17)を参照されたい. 実河川では, 安定した河 道の流量、河幅、水深、勾配、河床材料粒径は互いに独 立量であり、これらの関係から河道断面形状が決まる. しかし、実験水路では水路幅が一定で行われているため、 実河川の河道形成機構、流砂機構とは異なっていると考 えられる. 実験水路では、流量、河床勾配、河床材料粒 径を変化させ掃流砂量を測定している.

(2) 水路実験における無次元量の関係

図-5に、福岡の無次元河幅の式、無次元水深の式に対 する表-5~表-7の水路実験に用いたデータをプロットし ている. 無次元水路幅の実験値は、福岡による自然河川 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、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. こ のことは、実験水路では実河川に比して河床に作用する 単位面積あたりの掃流力が大きくなっていることを示す. 図-6に、水路実験データと式(6)の関係を示す.実験デー タは、図中に示す式(6)に比べ若干傾きが大きい、この理 由は、図-5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、図-3の現地観測デー タに比べ若干掃流砂量が大きくなるためと考えられる. また、土木研究所のデータは勾配のベキ乗を乗じた無次 元流量が10³より小さい範囲で、無次元掃流砂量が小さ な値を示す.これは、図-7に示すように、土木研究所の



データは限界掃流力付近のものが多く、それに対し Gilbertの実験データは限界掃流力より大きい範囲のデー タであ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.

以上の考察は、移動床水路実験の持つ意味を考え、その結果を河川に適用する際に物理的な解釈を与える.水路幅が固定されている水路実験は、流れや土砂移動の基本原理を理解する上で重要である.しかし、水路実験で見出された結果が河川と同様な解釈を与え得るかどうかについては十分な考察が必要である.

5. 無次元掃流砂量式の活用による河床変動解析 と河道計画技術の向上

ここでは、新しく導かれた式(6)の掃流砂量式と従来の 掃流砂量式を適切に組み合わせて、精度の高い河床変動 計算や河道計画を立てる考え方を示す.

従来の掃流砂量式は、単位幅の無次元掃流砂量が無次 元掃流力によって決まる形をとっているために、3(3) に述べた課題を有しており,縦断的に変化する河幅,不 規則な断面形状を有する実河川での適用にあたっては注 意が必要であることを述べた.一方,式(6)は,河川の河 幅,水深を考慮した中で,流量,勾配,河床材料等,基 本的な物理量から直接的に流砂量が求まり,かつ実用的 な精度で実測掃流砂量を説明することができることを示 している.

無次元掃流力の関数である従来型の掃流砂量式を用い 行われてきたこれまでの河床変動計算は、方法論として 正しく、有効であるが、河道上流端での流れから決まる 無次元掃流力を用い、平衡流砂量を上流端の境界条件と して用いることが慣用されてきたために、実際の流入流 砂量との差異を判断できず、このことが河床変動計算の 信頼度を減じてきたと思われる.上流端の流砂の境界条 件に式(6)を採用し、上流端付近の河幅、勾配などの河道 状況と、関係する水理量を用いることにより、流入流砂 量を与えることが可能になり、流入流砂量の乖離の小さ い河床変動計算を可能にすると考えられる.また、福岡 の掃流砂量式は、計画河道に対しても、計画河幅、計画 流量等を考慮して河床変動計算をできるために、より信 頼性の高い河道計画を立てることが可能となると考える.

しかし式(6)は、流量、勾配、河床材料など断面の代表 値で与えられる式形のため、蛇行河川など横断面内の流 砂量分布が一様でない場合には、信頼度が低くなると考 えられる.この場合には、上流端の流砂の境界条件を与 えるほぼ一様な河道区間に対し、まず、福岡の掃流砂量 式で流入流砂量を求め、この流砂量が従来型の掃流砂量 式で求めた値と一致するように従来型の掃流砂量式の係 数を修正することにより、流砂量の算定精度を高め、こ れを用いた河床変動計算を行うことが考えられる.

治水と環境の両面から健全な川づくりを行うには,河 道断面形状の決定とともに流砂量を正しく把握すること が不可欠である.河川の生物にとって必要なハビタット には,土砂移動についての確かな情報が必要である.福 岡の「無次元河幅の式」,「無次元水深の式」,「無次 元掃流砂量式」の適用は,治水と環境の調和した多自然 河道計画,河川改修を行う上で,実用的に重要な役割を 果たす^{1),18)}.

我が国において、今後一層重要となる治水と環境の調 和した健全な川づくりのためには、河川の土砂移動量等 を地道に観測し、土砂移動の不確かさに起因する河川技 術、河道設計法の不十分な部分を見直し、新しい河川技 術に変えていくことが必要と考える.

6. おわりに

本研究では、掃流砂量の現地観測データを用いて、実 河川に適用可能な無次元掃流砂量式を示し、導かれた式 の河道計画への利用について論じた.以下に主な結論を 述べる.

- 米国及び日本の現地観測データを用い、河幅、断面 形状を考慮し、現地河川に適用可能な無次元掃流砂 量式を示し、この式と従来の無次元掃流力を用いた 無次元掃流砂量式を用いることで、河床変動解析の 精度向上とより信頼性の高い河道計画を立て得る可 能性を示した。
- 2) 移動床水路実験結果の持つ物理的意味を考察し、実験結果を現地河川へ適用するときの留意事項を示した.

参考文献

- 1) 福岡捷二:土砂環竟の変化に対応した洪水流と河末変動子測技術-実務上の課題と調査・研究の方向性、河川技術論文集 第14巻、pp.1-6,2008.
- 2) 福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法,森北出版, 2005.
- 3) 福岡捷二:石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋, 第44回水工学に関する夏期研修会講義集, Aコース, pp.1-25, 2008.
- 4) 浅野文典,福岡捷二:沖積地河川における安定な川幅・水深
 治水と環境の調和を目指した河道断面の決め方,水工学論 文集,第54巻, pp. 1021-1026, 2010.
- 5) 福岡捷二:巻頭言, これからの河川管理を考える―自然河川 に学ぶ, 河川, 66巻, 第3号, pp. 3-9, 2010.
- 6) 福岡捷二:治水と環境の調和した治水適応策としての河幅, 断面形の検討方法.河川技術シンポジウム,第16巻, pp. 5-10, 2010.
- 7) 本間仁,春日屋伸昌:次元解析・最小2乗法と実験式,1957.
- Williams, G. P. and Rosgen, D. L. : Measured total sediment loads (suspended loads and bed loads) for 93 United States streams, U. S. Geological Survey Open-File Report 89-67, 1989.
- 9) Nakato, T. and Kennedy, J. F. : Field study of sediment transport characteristics of the Mississippi River near Fox Island (RM 355-6) and Buzzard Island (RM 349-50), *IIHR Report*, No. 201, Iowa Institute of Hydraulic Research, 1977.
- 10)Nakato, T. and Vadnal, J. L. : Field study and test of several onedimensional sediment-transport computer models for Pool 20, Mississippi River, *IIHR Report*, No. 237, Iowa Institute of Hydraulic Research, 1981.
- 建設省土木研究所:建設省流砂観測資料集,土木研究所資料,第625号,1971.
- 12) 服部博, 宮田巌: 石狩川の掃流砂に関する資料, 北海道開 発土木試験所月報, 第99号, 1961.
- 13) 浅野文典,福岡捷二:河道特性と流砂量の関係についての 基礎的研究,第37回土木学会関東支部技術研究発表会講演 概要集,Ⅱ-67,2010.
- 佐藤清一,吉川秀夫,芦田和男:河床砂礫の掃流運搬に関する研究(1),土木研究所報告,第98号, pp. 1-18, 1958.
- 15) 吉川秀夫,福岡捷二,馬場亨,河野二夫:大粒径砂礫の掃 流砂量に関する研究,水理講演会論文集, pp. 1-6, 1975.
- 小川長宏,渡邊康玄:河川上流域の中礫を用いた掃流砂量 測定実験,水工学論文集,第47巻, pp. 535-540, 2003.
- Gilbert, G. K. : Transportation of debris by running water, US Geological Survey Professional Paper, 86, 1914.
- 18) 福岡捷二:招待論文,温暖化に対する河川の適用技術のあり方-治水と環境の調和した多自然川づくりの普遍化に向けて、土木学会論文集,F. Vol. 66 No. 4, pp. 471-489, 2010.

(2010.9.30受付)