

治水と環境の調和した沖積地河川の河幅、断面形と河道設計法の研究
 STUDY ON RIVER CHANNEL DESIGN AIMING AT THE HARMONY
 BETWEEN FLOOD CONTROL AND ENVIRONMENT IN ALLUVIAL RIVERS

土木工学専攻 1号 浅野 文典

Fuminori ASANO

1. はじめに

日本の河川の中・下流部の多くは複断面河道である。複断面河道では、洪水時の堤防付近の流速低減や平水時の高水敷利用を可能にするという利点がある一方、高水敷と低水路の比高差の増大、河道内の樹林化、みず道形成といった治水上の問題、生物環境の連続性が失われるといった環境上の問題が生じている¹⁾。さらに、地球温暖化による降雨量の増大により、洪水災害、土砂災害の強大化が懸念されており、河道の流下能力の向上が求められている。このような問題を解決する治水と環境の調和した安定な断面形は自然河川に近い断面形であると考えられ、その断面形は各河川の流域の特徴により決まる。

図-1は、安定な河道形成の力学関係を示したものである。安定な河道とは、外力によって変動が生じても、元の安定な状態に戻る河道と定義する。すなわち、河道形成流量に対し一度安定な河道断面形が決まると、それ以下の流量に対しては、洪水流と河道の平面形・縦横断面形と流砂の相互作用の中で変動はするが安定状態が継続する。また、安定な河道内で生じる土砂移動についても、上記の考え方にに基づき、現象を説明できると考える。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²⁾。しかし、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。本研究では「自然河川に学ぶ」という考え方にに基づき、流域の特徴と安定な河道断面形の関係について次元解析から導いた無次元量を用いて検討する。また、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、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. 断面形状を規定する無次元量の導出

安定な河道断面形は、洪水流を規定する量と河川構造から決まると考える。すなわち、河道の断面形状を河幅と水深で代表すると、安定な断面形は流量、河床勾配、河床材料特性等、以下の8つの独立な物理量に規定される。

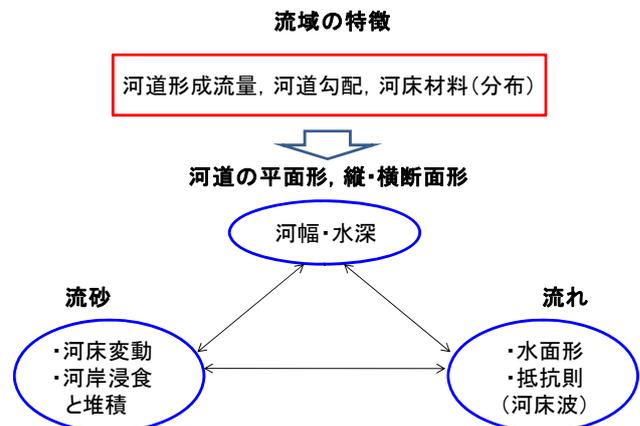


図-1 安定な河道形成の力学関係

$$f_1(Q, B, h, I, d_r, g, \rho, \sigma) = 0 \quad (1)$$

ここで、 Q : 流量、 B : 水面幅、 h : 水深、 I : 河床勾配、 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。次元解析より以下の無次元量の関係が導かれる。

$$\phi_1 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5}, \frac{B}{d_r}, \frac{h}{d_r}, I, \frac{\sigma}{\rho} \right) = 0 \quad (2)$$

第一項は無次元流量、第二項は無次元河幅、第三項は無次元水深である。これらの無次元量の関係について、日本とカナダの自然河川のデータおよび現地や実験室で行われた河道形成流量による河道拡幅実験の結果を用いて検討する。

3. 河道形成流量データ及び基本方針河道データ

自然河川として、明治時代の利根川の上・中流部の河道区間における洪水流データを用いる。当時、河道の堤防は小さく不連続堤であり、ほぼ自然河川と同じ状態であった。海外の自然河川としてカナダアルバータ州の河川データを用いる。アルバータ州の河川は常水路満杯流量に相当する2年確率流量により低水路が形成されており、この流量を用いて検討した。また、実験データとして常願寺川河川敷に作られた石礫材料からなる大型複断面水路実験、および直線実験水路での拡幅実験のデータを用いる。各観測データの範囲を表-1に示す。また、日本の一級河川の基準地点における基本方針河道(河川整備基本方針で想定している河道)に対する計画高水流量

流下時のデータを用い、無次元量の関係について検討する。

4. 治水と環境の調和した河道断面形

図-2 に上記のデータを用いた無次元河幅，無次元水深に対する無次元河道形成流量の関係を示す。図より，広く変化する無次元数の範囲において，無次元河幅，無次元水深と無次元河道形成流量の関係は図中の直線で近似した式(3)，式(4)で表現できることが分かる。

$$\frac{B}{d_r} = 4.25 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5} \right)^{0.40} \quad (3) \quad \frac{h}{d_r} = 0.13 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5} \right)^{0.38} \quad (4)$$

この関係式は，安定した河道の無次元河幅，無次元水深は，河道形成流量，河床勾配，代表粒径で表現される無次元河道形成流量， $Q/\sqrt{g}d_r^5$ が支配的な関数であることを示している。また，図-3 には，基本方針河道のデータを複断面河道と単断面河道に分けてプロットしている。無次元河幅は，複断面河道が式(3)より上側になり，単断面河道が下側になる。また，無次元水深では逆にになっている。このように，断面形状の影響によりばらつきが生じるものの，式(3)，式(4)は基本方針河道での計画高水流量に対しても成立する。これは，災害を受け，拡幅等を行ってきた日本の河道が自然河川と同様に，河道形成流量によって生じる安定な無次元河幅，無次元水深の関係になっていることを示している。図-4 に基本方針河道断面の一例として斐伊川の横断図と植生分布を，図-5 に自然河川であるミシシッピー川と斐伊川の無次元化した横断図を示す。このように，斐伊川の断面形は自然河川であるミシシッピー川と同様に，連続的な潤辺を有する形状(船底型断面形状)であることが分かる。また，図-4 から船底型断面形状にすることによって冠水頻度に応じた植生分布となる。以上より，冒頭で示した現在，河道で生じている問題を解決し，治水と環境が調和する断面形状として，自然河川で見られる船底形断面形状が望ましいと言える。

5. 掃流砂量を規定する無次元量の導出

河道の流砂量は，流れによる掃流力との関係だけではなく，河道の河幅や断面形状の影響も考慮して検討する必要がある。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(5)の関係から決まる。

$$Q_B = f_2(Q, B, h, I, d_r, g, \rho, \sigma) \quad (5)$$

ここで， Q_B : 掃流砂量である。式(5)に次元解析を適用することにより，式(6)に示す無次元量間の関係が導かれる。

$$\frac{Q_B}{\sqrt{sg} d_r^5} = \phi_2 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5}, \frac{B}{d_r}, \frac{h}{d_r}, I, \frac{\sigma}{\rho} \right) \quad (6)$$

表-1 河道形成流量データ

	d[mm]	B [m]	h[m]	Q[m ³ /s]	1/1
明治時代の利根川	0.3~40.0	340~840	4.0~6.6	2240~6960	470~5000
カナダ(アルバータ州)の河川	19.0~145.0	14~545	0.4~6.9	6~8212	67~4545
常願寺川大型複断面水路実験	80~125	7.8~9.6	0.5~1.2	3.2~14.4	130
直線水路での拡幅実験-福岡, 山坂	0.67	0.34	0.02	0.002	400
直線水路での拡幅実験-平野	0.83	0.84	0.02	0.0048	60

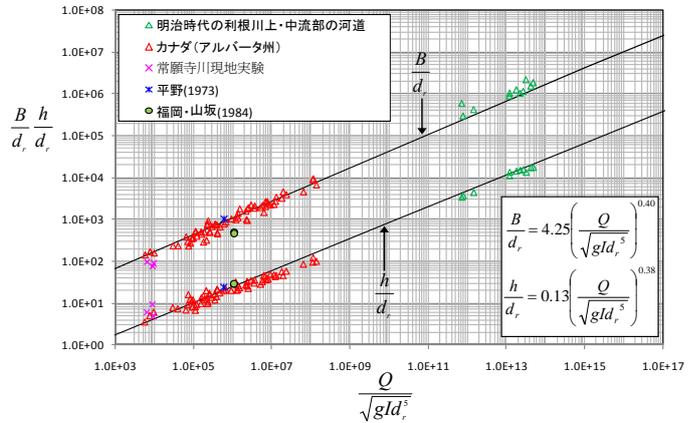


図-2 無次元河道形成流量と無次元河幅，無次元水深の関係

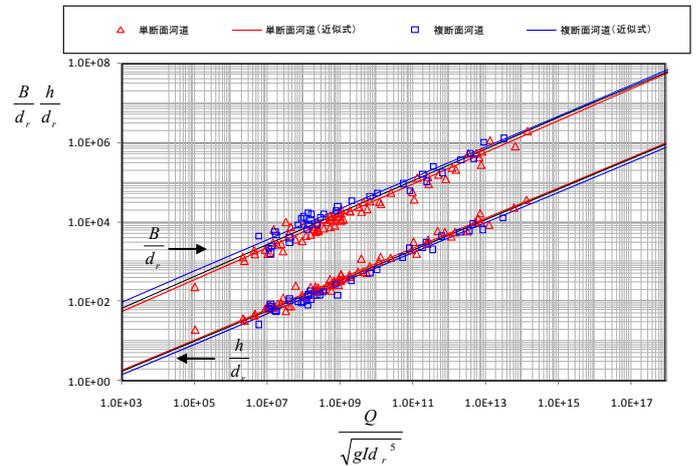


図-3 基本方針河道における無次元量の関係

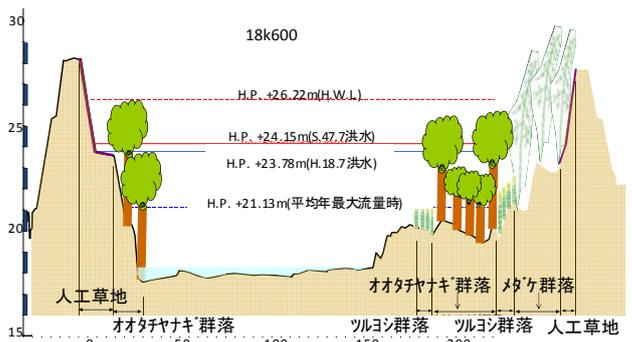


図-4 斐伊川基準地点(上島)の植生分布

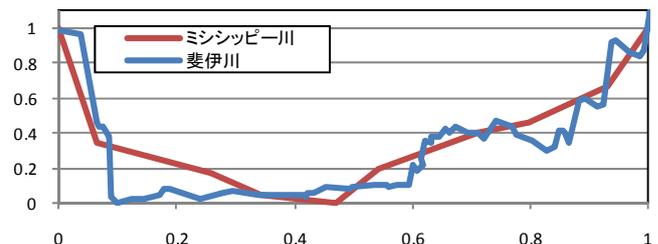


図-5 無次元断面形の比較

表-2 米国, USGS 掃流砂データ

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	$4.0 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-3}$
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-3 ミシシッピー川およびデモイン川の掃流砂データ

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-4 2010 常願寺川大規模現地実験

観測方法	d_{50} [mm]	B [m]	h[m]	Q [m ³ /s]	1/I	Q_B [m ³ /s]
H-S sampler	90	7.7	0.5	9.5	96	$7.3 \times 10^{-4} \sim 5.2 \times 10^{-3}$
掃流砂捕捉箱	15~25	8.5	0.5	6.5~9.3	97~157	$1.5 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-3}$



写真-1 H-S sampler



写真-2 通水後の掃流砂捕捉箱の様子

ここで, s は砂礫の水中比重で, $s = (\sigma - \rho) / \rho$ で表わされる. 式(6)右辺の第2項, 第3項は, それぞれ式(3), 式(4)に示す式より, 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. これより, 式(6)は, 式(7)の形で書くことができる.

$$\frac{Q_B}{\sqrt{sg} d_r^5} = \phi_3 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} d_r^5}, I \right) \quad (7)$$

式(7)は4で導いた無次元流量と河道の河幅, 断面形状の関係を考慮して導いた掃流砂量の関係式である. 以下では, 現地観測データ及び実験データを用いて式(7)の関数関係について検討する.

6. 掃流砂量観測データ

表-2は, Williams & Rosgen が整理したアメリカ, USGS において, Helley-Smith bed load sampler (以下 H-S 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(7)の形で検討可能なデータ 127 個を用いている. 表-3は Nakato らがアメリカ, 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 H-S sampler が用いられている. 表-4は 2010 年に行われた常願寺川現地実験のデータである. 現地実験水路は, 全長 190m, 高さ 1.3m の自然河岸からなる拡幅可能な単断面直線水路で, 初期河床の縦断勾配は 1/200 である. 流砂量は H-S sampler (写真-1) と水路下流端に設置した掃流砂捕捉箱 (写真-2) により観測した. 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

表-5 土木研究所水路実験

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

	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

	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

に用いた佐藤・吉川・芦田, 吉川ら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. 表-7は Gilbert 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. 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, 流砂機構とは異なることが考えられる.

7. 無次元掃流砂量式の導出

図-6, 図-7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. 現地データ及び常願寺川現地実験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, 実験室の無次元水路幅は, 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-7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変化出来ず、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-8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ため、式(7)の I を $(I-I_c)$ で表現する。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。現地観測データは、縦軸、横軸それぞれ 10^6 、 10^5 の広い範囲に変化し、無次元掃流砂量はほぼ式(8)で表現できる。

$$\frac{Q_B}{\sqrt{sgld_r^5}} = 0.02 \left(\frac{Q}{\sqrt{sgld_r^5}} I \left(1 - \frac{I_c}{I} \right) \right) \quad (8)$$

この式は、常願寺川現地実験データも説明できている。一方、実験室データは、式(8)に比べ若干傾きが大きい。この理由は、図-7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(8)の関係が成立するといえる。

8. まとめ

本研究では、図-1に示した考え方にに基づき、次元解析から無次元量の関係を導き、国内外の自然河川、日本の基本方針河道及び掃流砂量の現地観測データを用いて検討した。以下に、得られた主な結論を示す。

- (1) 次元解析により導いた無次元量の関係について、河道形成流量に対する断面形状のデータを用いて検討することにより、断面形を規定する無次元式を導き、無次元流量が断面形状に対し支配的な関数であることを示した。
- (2) 日本の基本方針河道においても河道形成流量に対して導いた無次元関係式は成立し、経験的に拡幅等を行ってきた日本の河道が自然河川と同様に、安定な無次元河幅、無次元水深であることを示した。
- (3) 治水と環境の調和した断面形状として、連続的な潤辺を有する船底形断面形を提案した。
- (4) 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いた。

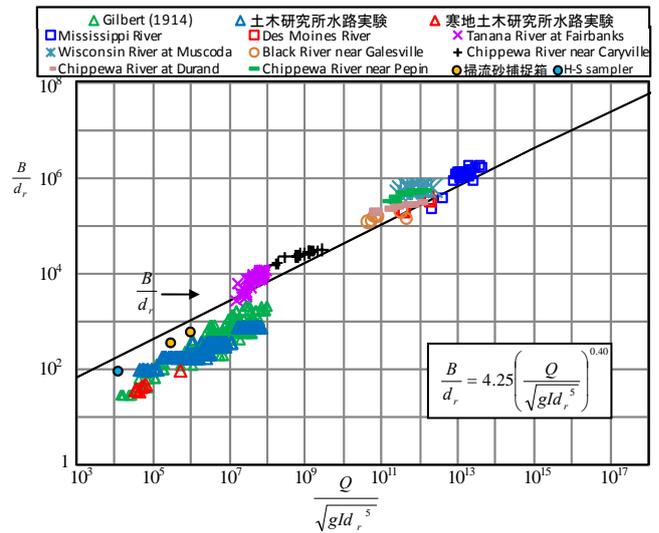


図-6 無次元流量と無次元水面幅の関係

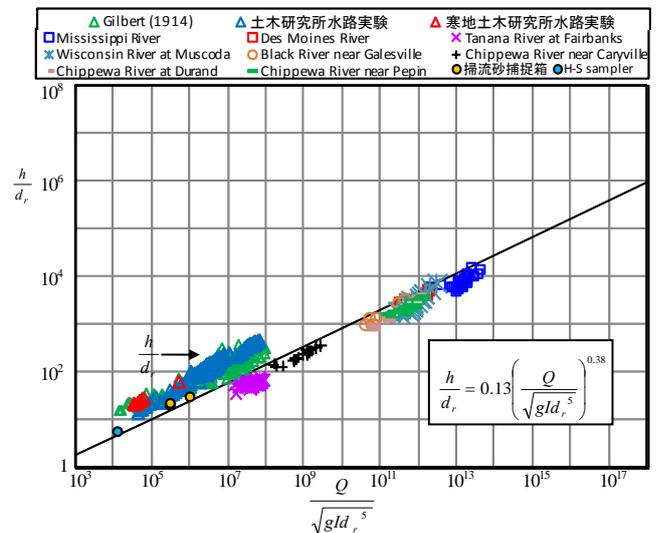


図-7 無次元流量と無次元水深の関係

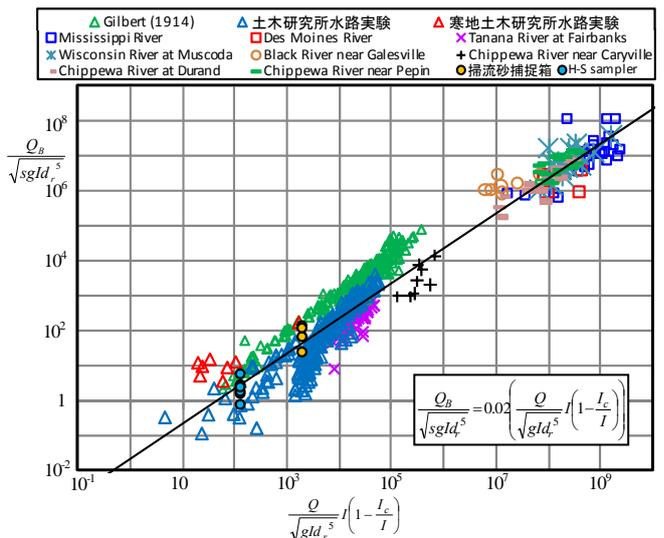


図-8 勾配を乗じた無次元流量と無次元掃流砂量

参考文献：1) 福岡捷二：土砂環境の変化に対応した洪水流と河床変動予測技術—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) 土木学会水理委員会：水理公式集〔平成11年版〕，丸善，1999。