

人為的な土砂移動を考慮した河床変動解析について

A study on numerical model for the change of river-channel form considering the human works

(株) 北開水工コンサルタント ○正員 品川 守 (Mamoru Shinagawa)

(株) 北開水工コンサルタント 正員 山口 甲 (Hajime Yamaguchi)

(株) 水工リサーチ 正員 加藤一夫 (Kazuo Kato)

1. まえがき

本支川を網羅した流域全体（流砂系）の土砂の移送現象を解明するため、フィールドにおける土砂観測システムの確立と経常的な観測データの蓄積が図られ、流砂系の土砂移送実態が明らかにされてきた。

石狩川の河道は、29箇所にわたる捷水路群の開削によって短絡され、さらに河道拡幅や堤防整備などが実施されて形成されてきたものである。

本稿は、石狩川の改修によってもたらされた河床変動を分析するため、浮遊砂と人為的な土砂移動を考慮した河床変動計算手法を提案するとともに、その解析結果と現地調査の比較から、モデルの有用性と捷水路が形成した河道の土砂動態を明らかにしたものである。

2. 石狩川の河床変動

石狩平野を流れる石狩川の河川延長は、明治 7(1874)年からこれまでに、自然短絡 16.2km、捷水路群による短絡 58.1km、計 74.3km、延長比にして 38%短縮して、121.9km となった。このことにより、水面勾配は平均 1/4,094 から 1/2,625 へと 1.57 倍になり、多様な作用の結果として河床低下がもたらされた。

土砂移送の実態は、本川 10 地点、支川 9 地点において、平成 8(1996)年～12(2000)年まで 5 年間粒径別流砂量を観測した。また、河道の状況は、昭和 7(1932)年～

平成 14(2002)年まで 9 回の河川横断測量を行っている。図 1 は、その内主要な 5 回の成果から得られた平均河床高の経年変化を示しており、河床低下が順次進行して来たことが読み取れ、測量成果からは 70 年間の河床低下量が全区間平均 4.4m に達していると算定される。

一方、石狩川においては、捷水路通水後、河道拡幅のための掘削・浚渫や中洲の砂利資源を活用するための砂利採取が行われ、大量の土砂が河道外や堤防に搬出され、河道断面の拡大に寄与している。図 2 はこれらの土量を河川工事台帳や河川管理台帳などから年度別に 1km 区間毎に集計したものであり、河道掘削は全川において、浚渫は石狩川頭首工(KP55.343)から下流区間において、砂利採取は上流区間において、それぞれ実施されている。

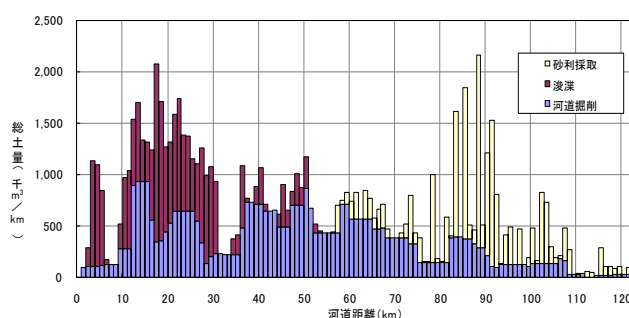


図 2 人為的な土砂移動量の区間分布

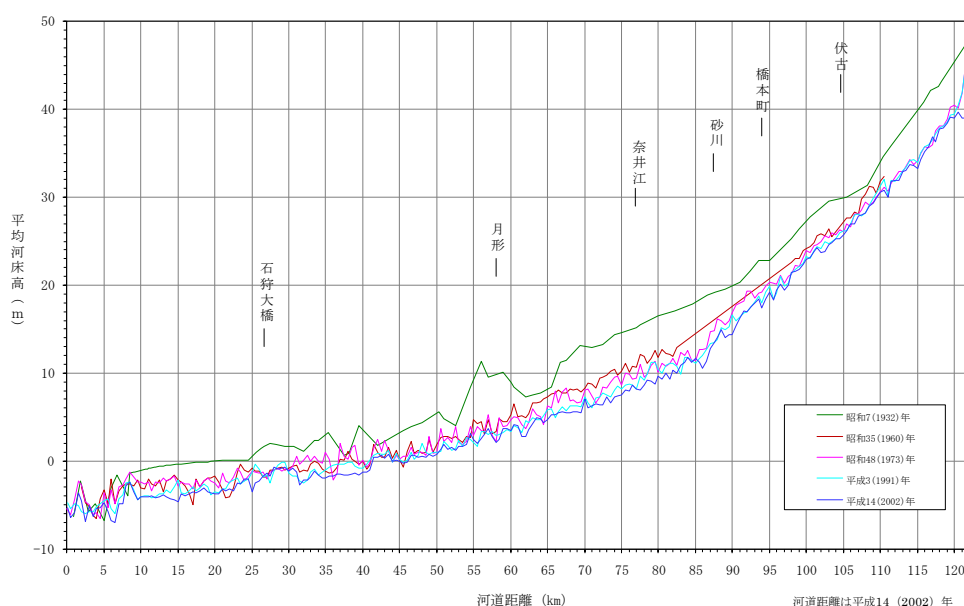


図 1 平均河床高の経年変化（石狩川）

また、表 1 は、70 年間の河道断面積の変化を 1km 区間毎の河道容積変化量として集計したものである。これによると、河道容積変化量の全体から直接搬出した土量を除いた残余量として算出される 51 百万 m^3 は短絡による拡大量と見なすことができ、断面積拡大に大きな分担をしていることが分かる。これは、年平均 73 万 m^3 /年の拡大に相当し、後述する河床変動再現計算結果からの換算値 80 万 m^3 /年とも符合している。

なお、捷水路群を開削通水したときに発生した土量 (38 百万 m^3) は、土砂の流送と関係がないので計算から除外している。

表 1 河道容積の拡大要因 (70 年間)

区 分	拡大区分	拡大量 ($\times 10^3 \text{m}^3$)	構成率 (%)
河道容積拡大		132,274	100.0
河道掘削土量	幅員拡大	40,795	48.6
浚渫土量	幅員拡大	23,465	
小 計		64,260	
砂利採取量	河床低下	16,956	12.8
短絡による拡大	河床低下幅員拡大	51,058	38.6

3. 人為的な土砂移動量を考慮した一次元河床変動計算

再現計算に用いる河床変動計算モデルは、清水らによって提案¹⁾され、数十年単位の長期的な河川縦断方向の土砂収支のアンバランスを要因とする大規模な河床変動を予測する手法として多用されているものである。

これに人為的な土砂移動を考慮するため、捷水路群による短絡は、現在の河道距離への位置の変更 (河床勾配の増加) を行うとともに、捷水路通水以後に河道から搬出した土砂移動は、掘削・浚渫土量は施工箇所の横断拡大として、砂利採取量は当該箇所の低水路高低下に換算して、それぞれ計算過程で逐次断面を補正して継続計算している。

計算の初期河道形状は、計算開始年次の測量値とし、計算断面は、複断面河道 (低水路、中水敷、高水敷を矩形近似) を対象とした。また、河床変動は、低水路のみで発生することとし、混合粒径 (浮遊砂、掃流砂) を考慮し、流砂幅 (河床のなかで土砂移動が発生する幅) は固定して、縦断方向にのみ河床高が変化すると仮定した。

境界条件として、上流端は旧花園頭首工(KP.121.4)において動的平衡状態を仮定、実測した流量-流砂量式から粒径別に土砂供給量を算定した。支川からの土砂供給量も同じ扱いであり、下流端水位は河口観測所の実測値である。

また、河床材料の初期粒度構成は、河床材料調査から求めたセグメント区分毎の回帰式によって与え、粗度係数は計画値とした。

流量は、流量観測所の実測日平均流量とし、支川合流毎に流域面積比で按分して縦断分布を与えており、再現計算期間は、捷水路群が概ね通水して現在の河道平面形となった昭和 35(1960)年～平成 14(2002)年までの 42 年間とした。

人為的な土砂移動量を考慮した一次元河床変動計算モデルの基礎式は以下の通りである。

1) 流れの基礎式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial (Au^2)}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + I_e = 0 \quad (2)$$

ここに、 t : 時間、 x : 流下方向距離、 A : 流れの断面積、 Q : 流量、 g : 重力加速度、 u : 断面平均流速、 H : 水位、 I_e : エネルギー勾配

2) 流砂の連続式

2-1) 粒径別浮遊砂濃度の連続式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{c}_i h) + \frac{1}{B} \frac{\partial (Q \bar{c}_i)}{\partial x} = q_{sui} - w_{fi} c_{bi} + \frac{q_x c_{xi}}{B} \quad (3)$$

ここに、添字 i は粒径 d_i の粒子に対する物理量であることを示し、 h : 水深、 B : 河幅、 $\bar{c}_i$: 浮遊砂濃度の水深平均値、 q_{sui} : 単位時間、単位面積あたりの浮遊砂の河床からの浮上量、 w_{fi} : 浮遊砂の沈降速度 (Rubey の式による)、 c_{bi} : 河床付近の浮遊砂濃度、 q_x : 支川等からの横流入量、 c_{xi} : 支川等からの横流入浮遊砂濃度の水深平均値

2-2) 混合粒径における粒径別流砂の連続式

$$\delta \frac{\partial P_i}{\partial t} + P_i \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{1}{B} \frac{\partial (q_{Bi} B)}{\partial x} + q_{sui} - w_{fi} c_{bi} - \frac{q_x c_{Bxi}}{B} \right] = 0 \quad (4)$$

ここに、 η : 河床高、 η_0 : 初期河床高、 δ : 交換層の厚さ、 P_i : 粒径 d_i の粒子が河床に存在する割合、 λ : 河床材料の空隙率、 q_{Bi} : 単位面積あたりの掃流砂量、 c_{Bxi} : 支川等からの横流入掃流砂濃度

2-3) 全流砂の連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{1}{B} \frac{\partial (\sum_i q_{Bi} B)}{\partial x} + \sum_i (q_{sui} - w_{fi} c_{bi}) - \frac{\sum_i (q_x c_{Bxi})}{B} \right] = 0 \quad (5)$$

2-4) 砂利採取量の換算

$$\eta_{t+\Delta t} = \eta_t - \left(\frac{V_{gd}}{B \Delta x} \right)_t \quad (6)$$

ここに、 V_{gd} : 砂利採取量

3) 流砂量式

3-1) 掃流砂量式 (芦田・道上の式)

$$\frac{q_{Bi}}{\sqrt{sgd_i^3}} = P_i 17 \tau_{*i}'^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}'} \right) \left(1 - \frac{u_{*ci}}{u_*} \right) \quad (7)$$

ここに、 d_i : 砂粒子の粒径、 s : 砂の水中比重、 τ_{*i}' : 粒径別の無次元有効掃流力 (有効河床せん断力)、 u_*' : 有効摩擦速度、 τ_{*ci} : 粒径別の無次元限界掃流力、 τ_{*i} : 粒径別の無次元掃流力 (河床せん断力)、 u_* : 摩擦速度、 u_{*ci} : 粒径別の限界摩擦速度 (Egiazaroff・浅田の式、岩垣の式による)

3-2) 浮遊砂の河床からの浮上量 (板倉・岸の式)

$$q_{sui} = P_i K \left(\alpha_* \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \frac{gd_i}{u_*'} \Omega_i - w_{fi} \right) \quad (8)$$

$$\Omega_i = \frac{\tau_{*i}' a' \int_{a'}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{B_{*i} \int_{a'}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{\tau_{*i}'}{B_{*i} \eta_*} - 1 \quad (9)$$

ここに ρ_s : 浮遊粒子の密度、 ρ : 水の密度、 $a' = B_{*i} / \tau_{*i}' - 1 / \eta_*$ 、 $\eta_* = 0.5$ 、 $\alpha_* = 0.14$ 、

定数 $K = 0.008$ 、 B_{*i} ：揚力算定の際の速度に摩擦速度を適用するための換算係数（沖らの式による）

4. 河床変動計算の再現検証

人為的な土砂移動が平均河床高の変化にどの程度影響しているのかを分析するため、砂利採取を見込まない再現計算を行った結果が図 3（図 4 は初期河床高からの変動量）である。これによると、石狩川頭首工(KP55.343)から下流では河床の変動が良く再現されているのに対し、上流区間では再現計算による平均河床高の変化は小さく算定され、実測値との差が 2m 程度にまで及んでいることから、砂利採取が河床低下に及ぼす影響が大きく、再現精度を支配していることが分かる。

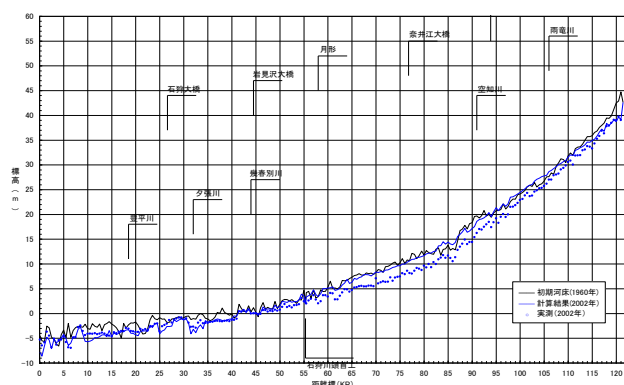


図3 平均河床高の再現 (砂利採取を考慮しない場合)

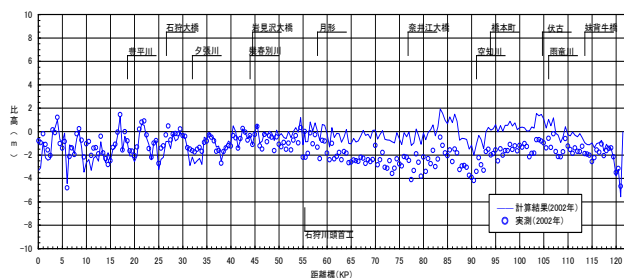


図 4 平均河床高の変動量 (砂利採取を考慮しない場合)

次に、提案する計算手法により再現計算を行った結果が図5（図6は初期河床高からの変動量）である。全川で適合性が高く、全般的な河床の低下傾向をよく再現している。また、断面個別の特性が影響して、縦断形状は一定の勾配となることはなく、河床変動の継続や局所現象も読み取ることができる。

図7は、平均河床高の変動量を実測値と比較しており、相関性は高く、河床低下側に集中している。また、図8は、年浮遊砂量を流砂量調査の関係式から推定したものと比較しており、やや計算値が小さ目ながらほぼ一致する結果が得られており、再現検証の妥当性を示している。

5. 捷水路河道の土砂動態

再現計算の過程から土砂輸送量を整理して、図 9 は、河口からの流砂量を各年毎に、流砂の粒径構成から掃流砂と浮遊砂に分けて集計したものである。これによると、石狩川河口からは 20~436 万 $\text{m}^3/\text{年}$ 、平均 82 万 $\text{m}^3/\text{年}$ （比流砂量 57 $\text{m}^3/\text{年}/\text{km}^2$ ）の流砂量が流出しており、そ

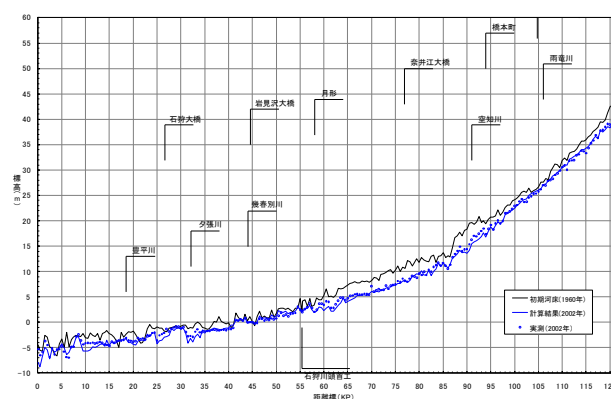


図 5 平均河床高の再現

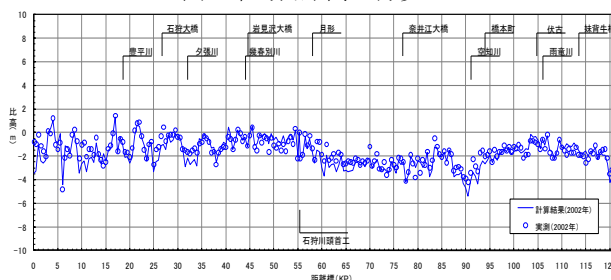


図 6 平均河床高の変動量

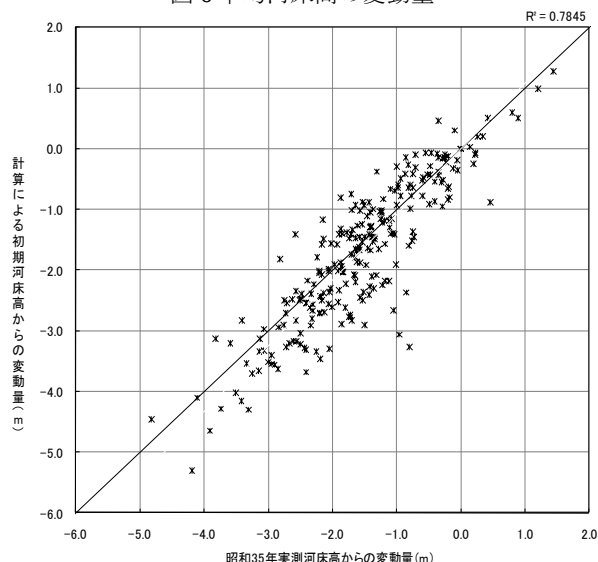


図7 平均河床高変動量の比較

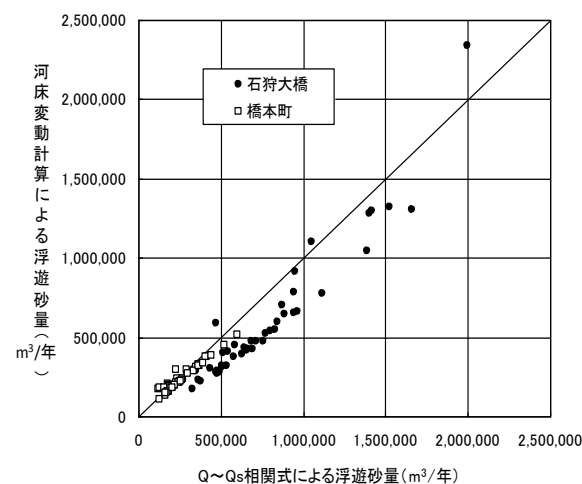


図 8 年浮游砂量の比較

のほとんどが浮遊砂であると推計されている。

また、表 2、図 10 は、主要観測所地点毎の年平均流砂量を集計したものである。大きな洪水が通過した昭和 50(1975)年や昭和 56(1981)年を除いて、流砂量の大部分がシルト分から細砂分に含まれる 0.25mm 以下（ほとんどが 0.074mm 以下）の微細粒子と算定されており、流砂量調査の実測値と同程度の粒子であった。なお、図 11 に示す通り、石狩川における流砂量調査の実測値は、我が国の河川で観測された Wash lord の場合の平均値の範囲の中位に相当している。

6. 結論

浮遊砂の卓越した河川における河道の土砂動態を解明する上で、一次元河床変動計算モデルは、詳細な現地調査に基づき人為的な土砂移動量を考慮した結果、全般的な河床の変動傾向をよく再現でき、有用な情報が提供されることを明らかにした。

石狩川河口からは平均 82 万 m³/年（比流砂量 57m³/年/km²）の流砂量が流出しており、そのほとんどが微細粒子の浮遊砂で、我が国の河川で観測された Wash lord の場合の平均値の範囲の中位に相当している。

これらのことは全川に共通しており、観測地点の上流から下流に向け流砂量は増加している。観測地点間には支川合流があるから一概には論じられないが、下流部で流砂量（浮遊砂）が増加しており、特に夕張川合流点下流の土砂動態には留意すべきである。

なお、本研究に使用した支川から本川へ合流する流量、流砂量は、寒地河川学研究会が監修した観測値である。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 北海道開発局（河道変化予知研究会）：河道設計論（案）、（財）北海道河川防災研究センター、平成元年 3 月
- 2) 清水康行：沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究、北海道開発局開発土木研究所報告 No.93,1991

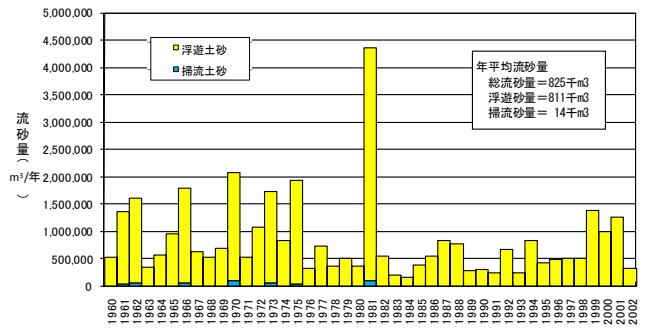


図 9 年流砂量の推移（河口地点）

表 2 年平均流砂量の縦断変化

地点名	距離標 (KP)	流域面積 (km ²)	掃流砂量 (m ³ /年)	浮遊砂量 (m ³ /年)	総流砂量 (m ³ /年)	比流砂量 (m ³ /年/km ²)	浮遊砂の占める割合
河 口	0.10	14,330.0	13,704	810,773	824,477	57.5	98.3%
石 狩 大 橋	26.60	12,697.0	24,230	604,385	628,615	49.5	96.1%
岩 見 沢 大 橋	44.50	9,405.0	40,570	341,113	381,683	40.6	89.4%
月 形	58.00	9,306.0	37,169	332,498	369,667	39.7	89.9%
奈 井 江 大 橋	76.80	8,943.0	22,473	326,658	349,131	39.0	93.6%
砂 川 橋	87.40	8,747.0	39,367	338,315	377,682	43.2	89.6%
橋 本 町	93.90	5,711.0	36,496	237,324	273,820	47.9	86.7%
伏 古	104.70	5,460.0	54,690	234,817	289,507	53.0	81.1%
妹 背 牛 橋	113.50	3,683.0	36,700	199,151	235,851	64.0	84.4%

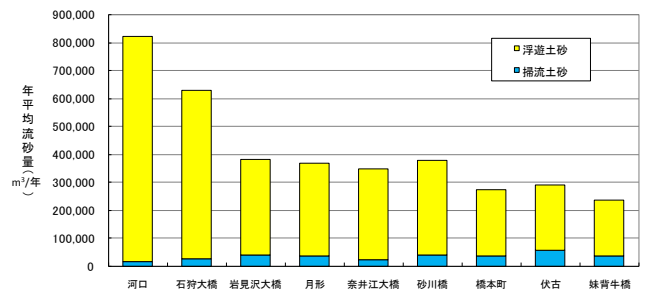


図 10 年平均流砂量の縦断変化

- 3) 寒地河川学研究会：石狩川の土砂動態、（財）北海道河川防災研究センター、2003
- 4) 清水康行、嵯峨浩、早川博、品川守：石狩川の土砂流出に関する研究、水工学論文集第 42 巻、1998
- 5) 土木学会：水理公式集 [平成 11 年版]

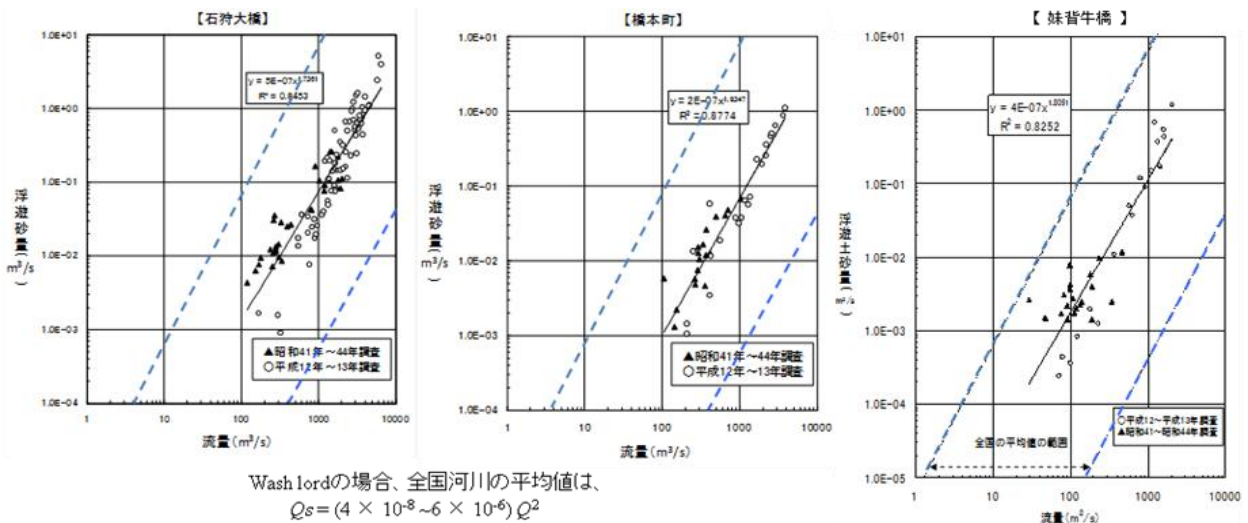


図 11 流量と浮遊砂量の関係