

早稲田大学理工学部 正会員

鮎川 登

学生会員 ○北川 善廣

1. はしがき 掃流砂量を算定するための公式として従来数多くの公式が提案されているが、ここでは水理公式集¹⁾にのせられている Einstein, Meyer-Peter-Müller, 篠原椿, 佐藤吉川・芦田, Brown および最近提案された芦田道上の式²⁾について佐藤吉川・芦田, Gilbert および木下の実験データを用いて計算値と実測値を比較した結果について述べる。

2. 掃流砂量公式

1) Einstein の式

$$\frac{g_b}{\sqrt{(s/\rho-1)gd^3}} = \frac{1}{43.5} \frac{f(\psi_e)}{1-f(\psi_e)}$$

$$f(\psi_e) = 1 - \frac{1}{\sqrt{\kappa}} \int_{-0.143 \frac{1}{\psi_e} - 2}^{0.143 \frac{1}{\psi_e} - 2} e^{t^2} dt, \quad \psi_e = U_{*e}^2 / [(s/\rho-1)gd]$$

$$U_{*e} = \sqrt{gR'I_e}, \quad \frac{U}{\sqrt{gR'I_e}} = 5.75 \log_{10} (12.27 \times \frac{R'}{d})$$

2) Meyer-Peter-Müller の式

$$\frac{g_b}{\sqrt{(s/\rho-1)gd^3}} = 8(\psi_e - \psi_c)^{\frac{3}{2}}$$

$$\psi_c = 0.047, \quad \psi_e = \psi \cdot (\eta_b/n)^{\frac{3}{2}}, \quad \psi = U_*^2 / [(s/\rho-1)gd]$$

$$\eta_b = 0.0192 d_{q_0}^{\frac{1}{2}}$$

3) 篠原椿の式

$$\frac{g_b}{U_{*e} \cdot d} = 25 \psi_e^{0.8} (\psi_e - 0.8 \psi_c)$$

$$\psi_e = \psi \cdot (y/y_0), \quad \psi_c = U_{*c}^2 / [(s/\rho-1)gd], \quad y = U/U_*$$

$$y_0 = 6.0 + 5.75 \log_{10} (R/d_{45}), \quad U_{*e} = U_* \cdot \sqrt{y/y_0}$$

4) 佐藤・吉川・芦田の式

$$g_b = \frac{U_*^3}{(s/\rho-1)g} \cdot y \cdot F(\psi_e)$$

$$n \geq 0.025 \quad ; \quad y = 0.623$$

$$n < 0.025 \quad ; \quad y = 0.623 (40n)^{-2.5}$$

5) Brown の式

$$\frac{g_b}{U_* \cdot d} = 10 \left\{ \frac{U_*^2}{(s/\rho-1)gd} \right\}^2$$

6) 芦田道上の式

$$\frac{g_b}{\sqrt{(s/\rho-1)gd^3}} = 17 \psi_{*e}^{\frac{3}{2}} (1 - \frac{\psi_{*c}}{\psi_*}) (1 - \frac{U_{*c}}{U_*})$$

$$Fr < 0.8 \quad ; \quad \frac{U}{U_{*e}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{d(1+2\psi_*)}$$

$$Fr \geq 0.8 \quad ; \quad U_{*e} = U_*$$

3. 掃流砂量公式の比較

上に示した6つの掃流砂量公式はいずれも関数形や式中の定数値を決定するために実験データを使用しているが、これらの公式の実用性を調べるためには、実際河川における掃流砂量の実測データによつてこれらの適用性を検討することが必要である。しかし、適当な実測データがないので、ここでは表1に示すような範囲の条件を含む実験データに基づいて、上記6つの掃流砂量公式の精度を比較することを試みた。

各流砂量公式を $g_b/U_* \cdot d$ と ψ_* ($=\psi$) の関係として示すと図1のようになる。ただし、 $\psi_{*e} = \psi_*$ としている。図1によると、 $\psi_* < 1$ の範囲では各式ともかなり類似した曲線を示し、実験データとほぼ一致した傾向を示すことがわかる。

表1に示した実験データについて、各流砂量公式による計算値 Q_{bc} と実測値 Q_{bm} とを比較した結果を図2に示す。図2によると、各公式の場合にも流砂量が小さい範囲 ($Q_b < 0.1 \text{ cm}^3/\text{sec}/\text{cm}$) では、点のばらつきが大きく、計算値と実測値の差が大きくなるが、流砂量が大きい範囲 ($0.1 \text{ cm}^3/\text{sec}/\text{cm} < Q_b$) では、点のばらつきが小さくなり計算値は実測値に近くなる傾向が認められる。流砂量が小さい範囲で点のばらつき計算値と実測値の差が大きくなる理由としては、移動限界付近ではわずかな条件の違いにより砂が移動しなかりし、たりし、現象

自体にばらつきが大きく、実測値がばらつくことや流砂量の計算値が限界掃流力の値によりかなり影響を受けることなどが考えられる。移動限界掃流力は岩垣公式により算定したが、佐藤らおよび木下の実験値と岩垣公式による計算値を比較すると図3のようになり、岩垣公式により算定した値は佐藤らの実験に対しては実験値より大きい値を与え、木下の実験(とくに $d = 0.38 \text{ mm}$)に対しては実験値より小さい値を与えることがわかる。篠原椿および佐藤・吉川・芦田の式の場合には通常の移動限界掃流力の0.8倍を限界掃流力としている(通常の移動限界掃流力の定義と異なり、流砂量が0の状態を移動限界と考えている)ので、これらの式による場合は、佐藤・吉川・芦田の実験については実測値と計算値の差が他の公式にくらべて小さくなる、という。流砂量が小さい範囲にプロットされている木下の実験データは $d = 0.38 \text{ mm}$ の場合のもので、Brownの式は外ないずれの公式によっても計算値が実測値より小さくなる、というのは、限界掃流力の算定に問題があったためであると考えられる(Brownの式だけは限界掃流力の影響を含まない)。現在、限界掃流力として実験値を用いて流砂量を計算し、実測値と比較することを試みている。

流砂量が大きい範囲($0.1 \text{ cm}^3/\text{sec}/\text{cm} < Q_b < 10 \text{ cm}^3/\text{sec}/\text{cm}$)では、Einsteinの式による計算値は、Gilbertおよび佐藤らの実験値より小さく、木下の実験値より大きくなり、全体としてばらつきも大きい。Meyer-Peter・Müllerの場合には全般的に計算値は実験値より小さめであり、ばらつきも大きい。佐藤・吉川・芦田の式による計算値は、全般としては実験値のほぼ平均的な値を与える(木下の実験に対しては実験値より小さい値を与える)ばらつきが非常に大きい。篠原椿の式の場合には、計算値は±100%の誤差内に入り最も良い結果を与えている。Brownの式の場合には、計算値と実測値のまじり度は非常に良いが、計算値は実測値より小さい値を与える。この範囲の流砂量に対しては $Q_{PM} = 2.0 Q_{BC}$ とすると実測値と良く合うようになる。芦田・道上の式は木下の実験に対しては大きめの値を与えるが、全体としてはよい結果を与えている。

河床に砂漣や砂堆が形成されている場合の掃流砂量を算定するためには、砂粒子に作用

表 1 使用した実験データ

実験者	粒径 (mm)	勾配	フルード数	τ_{*}	R/d
佐藤・吉川・芦田	1.038, 2.21, 2.62	0.00036	0.231	0.0452	32.9
	3.76, 4.58	~ 0.00303	~ 0.746	~ 0.164	~ 199
Gilbert	0.305, 0.375, 0.507	0.0013	0.41	0.0365	6.33
	0.727, 1.71, 3.17, 4.94	~ 0.0296	~ 3.68	~ 0.901	~ 235
木下		0.00667	0.64	0.0693	2.58
	0.381, 1.24, 1.70	~ 0.133	~ 3.00	~ 0.630	~ 22.3

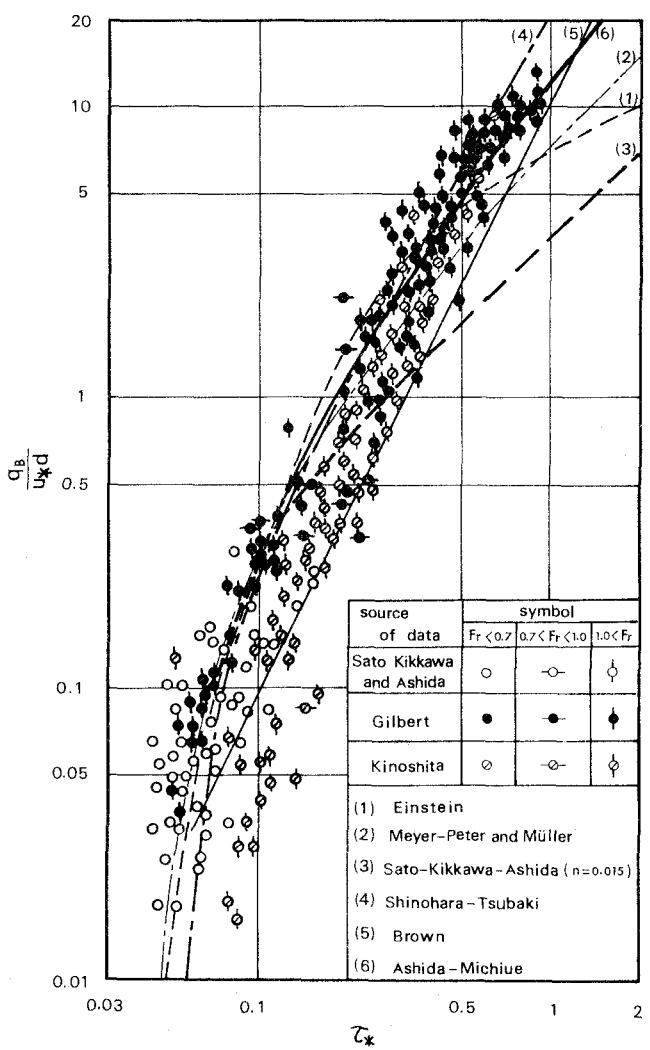


図 1 各流砂量公式の比較

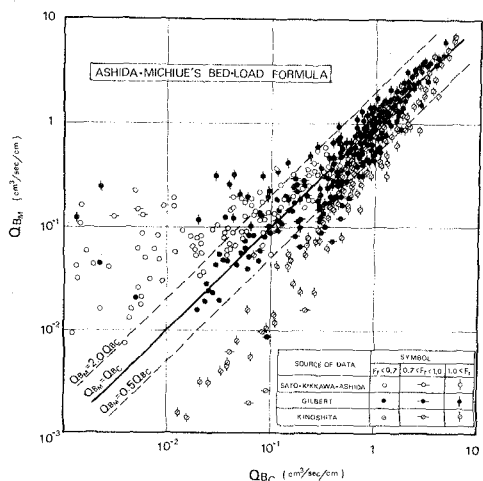
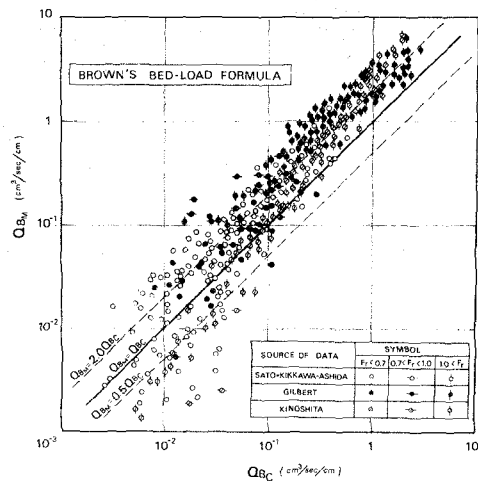
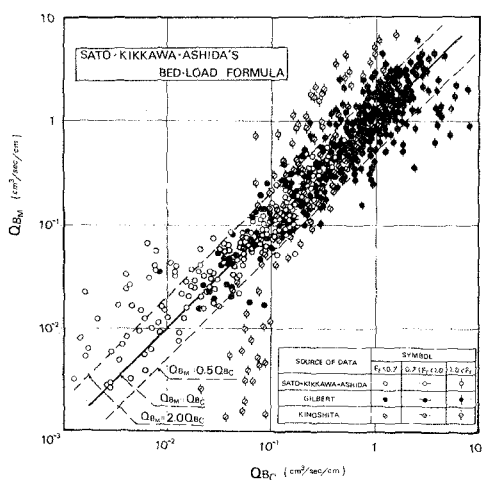
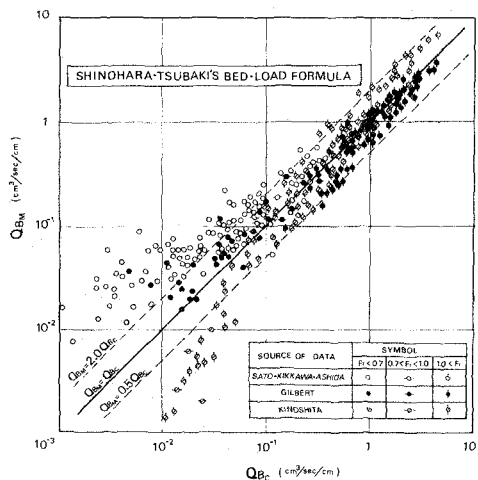
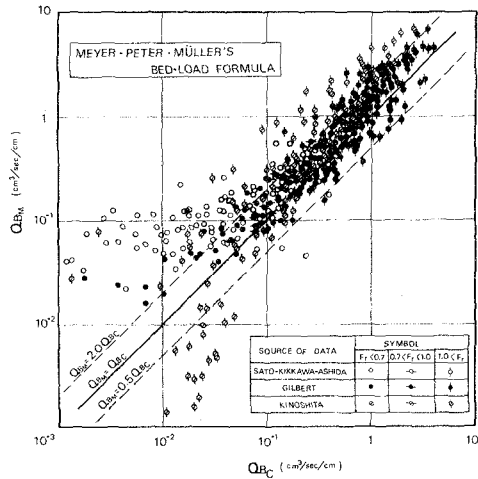
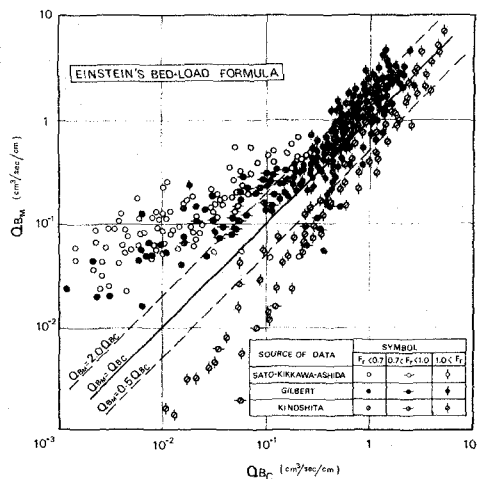


図 2 各流砂量公式による計算値と実測値の比較

する有効掃流力を求める必要がある。有効掃流力を算定する式に対しても現在もこの明確な評価が行われていない。ここでは先に示したEinstein, 篠原・橋本および芦田・道上によつて提案されている有効摩擦速度 U_{*e} の算定式の比較をした。 $F_r < 0.8$ の実験データを用いてこれらの式により U_{*e} を算定し、比較した結果を図4に示す。図4によると、Einsteinと芦田・道上の式はほぼ等しい U_{*e} の値を与え、篠原・橋本の式はこれら2式よりも大きい U_{*e} の値を与えることがわかる。篠原・橋本の式により算定した U_{*e} と U_{*c} の関係によると、 U_{*e} は $0.1 U_{*c}$ 程度まで減少することになる。

4.あとがき 広範囲の条件のもとで行なわれた実験の資料に基づいて従来提案されているものの掃流砂量公式の精度について検討した結果、流砂量が少ない場合 ($Q_b < 0.1 \text{ m}^3/\text{sec/cm}$) には、どの公式の場合にも計算値と実験値とはかなりばらつき、限界掃流力の値に大きく影響されること、流砂量が多い場合 ($0.1 \text{ m}^3/\text{sec/cm} < Q_b < 10 \text{ m}^3/\text{sec/cm}$) には篠原・橋本の式が最もよく実験値と一致することが示された。 $Q_b < 1$ の範囲では各掃流砂量公式の間には余り差異がなく、 $Q_b > 1$ の場合に違いが出てくるので、今後 Q_b が大きい場合に、よく検討することが必要である。

最後に、資料整理に協力してくれた早稲田大学理工学部土木工学科学生木村達司、高島良の両君に感謝の意を表します。

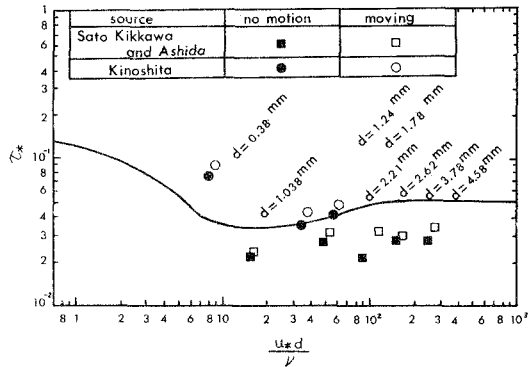


図3 C^* と $U_* d / \nu$ の関係

参考文献

- 1) 土木学会編 水理公式集 昭和46年度改訂版
- 2) 芦田・道上：移動床流の抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究 土木学会論文集，第206号，1972

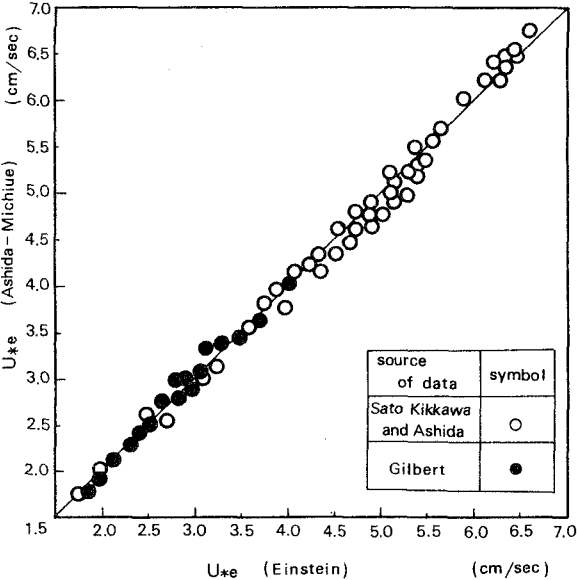


図4 有効摩擦速度の比較 (Einsteinと芦田・道上)

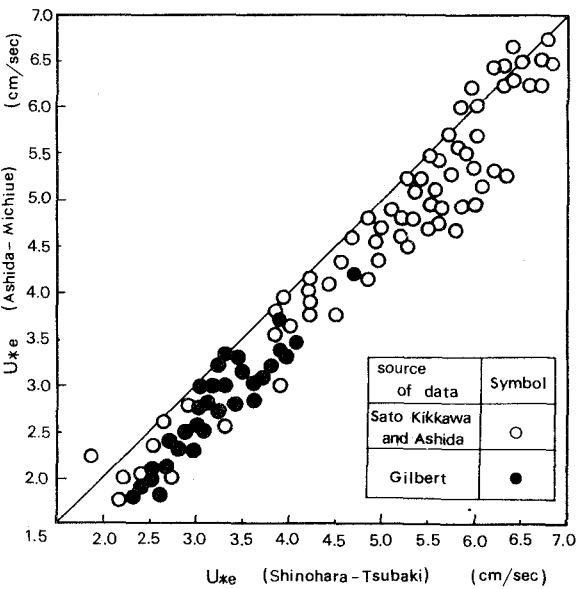


図4 有効摩擦速度の比較 (篠原・橋本と芦田・道上)