

6. 流砂特性の不連続性

流砂はその粒径の大きさ等によって、粒径が細かい方からウォッシュロード、浮遊砂、掃流砂に分類される。各運動形態は粒径だけではなく、掃流力を表す1パラメータである水深（流量、 u_* とも関係）と u_*/w_0 との関係により分類できる（「3. 土砂分級の不連続性」）。浮遊砂量や掃流砂量は掃流力の大きさによって、空間的に見ると急流部では掃流砂、緩流部ではウォッシュロードや浮遊砂が相対的に卓越している。洪水時で見ると、流量が大きいほど、相対的に掃流砂量の割合が多くなり、時間的な変動が見られる¹⁾。各流砂の割合は河道・洪水特性により異なるが、沖積河川では概ね7～8割がウォッシュロードや浮遊砂である。涸沼川においては年間土砂移動量の約9割がウォッシュロードと浮遊砂であることが確認されている。

浮遊砂量やウォッシュロード量は流量規模によらず、概ね流量 Q^2 に比例する。流域の地質が風化花崗岩である矢作川などでは大きな比例定数を持つ²⁾（図－6.1）。涸沼川観測結果では流量がピークを迎える2～3時間前にウォッシュロード的運動形態で流下する土砂濃度がピークを迎えるヒステリシスが生じる場合があることが確認されている³⁾（図－6.2）。

また、掃流砂量 Q_B については流量が少ない時は Q^2 より大きな勾配となる（流量の変化に対して、掃流砂量が大きく変化する）が、流量がある程度多くなると、掃流砂量は流量の増加ほどは増加しなくなる（ $Q \sim Q_B$ カーブの勾配が緩くなる）⁴⁾。

流砂特性としては、浮遊砂は粒径が0.2～0.3mm以上になると、鉛直方向に濃度分布を持つようになるのに対して、ウォッシュロードはほぼ一様分布を示す。ウォッシュロードや浮遊砂は水平方向にも分布を持つ場合がある。石狩川における観測では支川の夕張川が合流して4.5km下流の石狩大橋地点においても、横断方向に分布が見られた。すなわち、流砂量が多い夕張川が合流する左岸側は当地点において川幅の半分以上の範囲で大きなSSが見られた⁵⁾（図－6.3）。

また、掃流砂は岩垣公式（ $R_* \sim \tau_* c$ 、又は $d \sim u_* c$ 関係）により、その移動限界を知ることができるが、実際の河川における河床材料は混合砂であり、芦田・道上やParkerの粒径別限界掃流力の考え方の方が良く適合する。国土技術政策総合研究所河川研究室では粒径比が大きい場合の掃流砂量を流送土砂循環装置付可変勾配水路を用いて計測し、課題とされている混合粒径の流砂量式の精度向上の検討を実施している。流砂量観測の結果によると、掃流砂量は河床波の影響を受ける、すなわち同じ水理量であっても河床波のクレスト*が通過する時には流砂量が多くなる⁶⁾（図－6.4）。掃流砂量は（河床低下に伴う）河床材料の変化の影響も受けるとともに、横断方向に分布を生じる⁶⁾（図－6.5）。

*スキャニングソナーを用いれば、超音波の反射強度より洪水時の河床波の特性を捉えることができる。涸沼川における計測の結果、河床波のクレストの波高は最大で20cm、波長は1～5mであり、1～10m/h程度の速度で下流へ移動していた⁹⁾（図－6.6）

河道計画等でよく用いられているモデル等（流水のモデルは省略している）は、以下の通りである。なお、河道が大きく湾曲している場合や複列砂州河川のように空間的に掃流力が大きく異なる場合は流砂の2次元計算を行い、計算にあたっては流砂に作用する力の釣り合いより求めた長谷川の式などを用いる。

- ・河床変動に関する連続式

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) + q_{su} - C_0 w_0 \right) = 0$$

ただし、 z_B : 河床高、 λ : 空隙率、 q_{Bx} : x 方向掃流砂量、 q_{By} : y 方向掃流砂量、 q_{su} : 浮遊砂浮上量、 C_0 : 浮遊砂底面濃度、 w_0 : 浮遊砂沈降速度である。

- ・上流端からの供給土砂量 = 掃流力見合いの流砂量
- ・掃流砂量式 芦田・道上の式

$$q_B = 17 \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right)$$

ただし q_B : 掃流砂量、 τ_* : 無次元掃流力、 τ_{*c} : 無次元限界掃流力とする。

- ・浮遊砂量式 Lane-Kalinske の式

$$q_s = q C_a P \exp\left(\frac{6aw_0}{\kappa h u_*}\right) \quad P = \int \left[1 + \frac{1}{\kappa \phi} (1 + \ln \eta) \right] \exp\left(-\frac{6w_0}{\kappa u_*} \eta\right) d\eta$$

$$q_s = q C_0 P \quad , \quad C_0 = 5.55 \Delta F(w_0) \left[\frac{1}{2} \left(\frac{u_*}{w_0} \right) \exp\left(-\left(\frac{w_0}{u_*}\right)^2\right) \right]^{1.61}$$

ただし q_s : 浮遊砂量 (単位時間単位幅当たり)、 C_a : 基準面濃度、 a : 基準面高 (通常 = 0.05h)、 κ : カルマン係数、 u_* : 摩擦速度、 P : ϕ をパラメータとする関数、 h : 水深、 z : 流路床からの距離、 $\eta = z/h$ 、 $\Delta F(w_0)$: 沈降速度 w_0 なる砂粒が河床砂礫中に占める割合 (%) である。

- ・基準面浮遊砂濃度 Lane-Kalinske の濃度分布式

$$\frac{u}{v} = 1 + \frac{1}{\kappa \phi} (1 + \ln \eta) \quad , \quad \frac{C}{C_a} = \exp\left(-\frac{6}{\kappa} \left(\frac{z-a}{h}\right) \frac{w_0}{u_*}\right)$$

ただし、 u : x 方向流速、 v : y 方向流速である。

- ・長谷川の式 : 2次元流砂式

$$q_{By} = q_{Bx} \left(\frac{v}{u} - \frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_k}} \left(\frac{u_{*c}}{u_*} \right) \frac{\partial z_B}{\partial y} \right) q_{Bx}$$

ただし μ_s : 静止摩擦係数、 μ_k : 動摩擦係数、 u_{*c} : 限界摩擦速度とする。

河床形態が砂漣、砂堆 (lower regime) であるときには、河床波の影響により有効掃流力に応じた流砂量が生じているが、河床形態が平坦河床、反砂堆 (upper regime) に変化すると、水位の低下・流速の増加⁷⁾ (図 - 6.7) とともに流砂量が不連続に増加する⁸⁾ (図 - 6.8)。

参考文献

- 1) 新谷融、黒木幹男 : 流域動態の認識とその方法、p.210、北海道大学図書刊行会、2001.3
- 2) 土木学会 : 水理公式集 [平成 11 年版]、p.170、丸善、1999

- 3) 藤田光一・末次忠司・平林桂・坂野章：澗沼川洪水観測レポート [2] 1990 ～ 2000、pp.62 ～ 91、土木研究所資料、第 3798 号、2001.3
- 4) 藤田光一・末次忠司・平林桂・坂野章：澗沼川洪水観測レポート [2] 1990 ～ 2000、P107、土木研究所資料、第 3798 号、2001.3
- 5) 国土交通省：平成 13 年度国土交通省国土技術研究会指定課題、6-46、2001.11
- 6) Basil Gomez:Comments on Sampling Bedload in Small River : 5th Federal Interagency Sedimentation Conferences, pp.2-66 1991
- 7) 山本晃一：河道特性論、土木研究所資料第 2662 号、p27、1988.8
- 8) 末次忠司・日下部隆昭・谷口丞：土砂動態予測のための河床変動モデルの改良－澗沼川を事例として－、国土技術政策総合研究所資料第 69 号、p.72、2003.3
- 9) 山本浩一：河床変動観測へのヘッド回転型サイドスキャンソナーの適用に関する研究、河川技術論文集、p.301、2004

- 矢作川 日名橋
- ◊ 豊川放水路
- ✦ 吉野川 中央橋
- 白川 12.2km
- △ 木津川 飯岡
- ◉ 白川 7.0km
- 長良川 墨俣
- 筑後川 大城橋
- 常願寺川 今川橋
- ▣ 筑後川 小野橋
- ▲ 旧信濃川 亭石橋
- ◇ 仁淀川
- 天塩川 39km
- × 貫志川
- ◎ 天塩川 49km
- + 矢場川

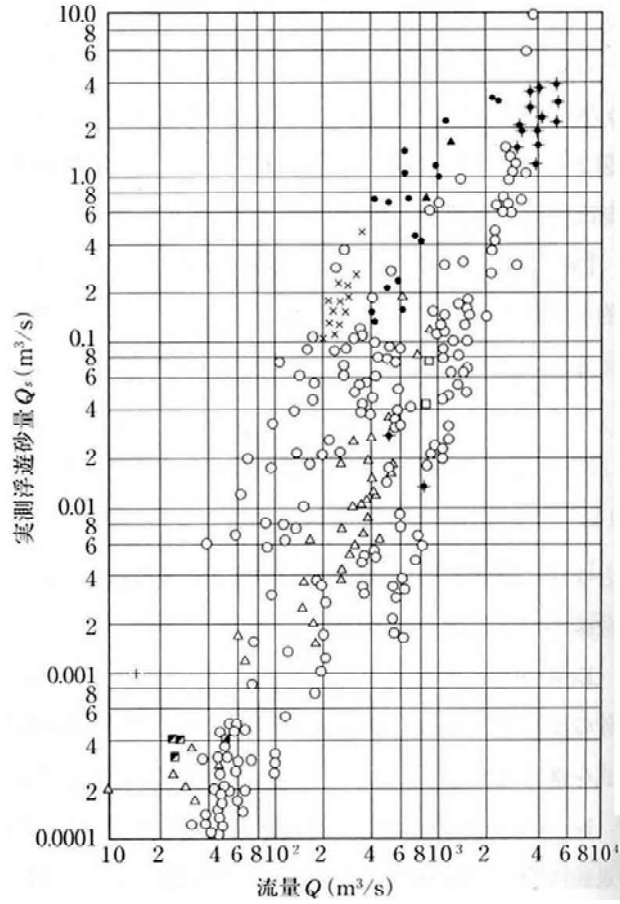


図- 6.1 実測浮遊砂量と流量との関係 (水理公式集、参考文献²⁾より)

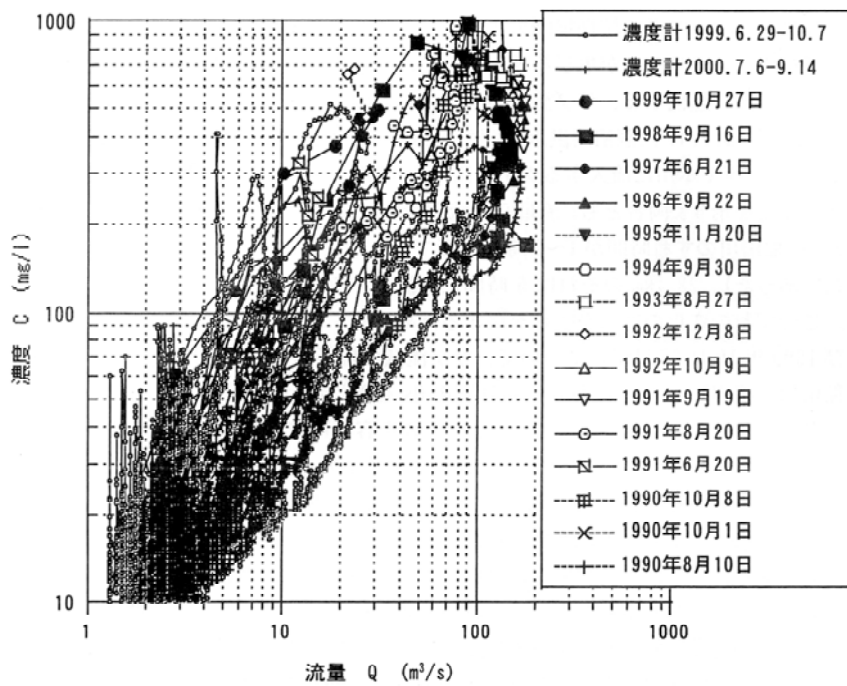
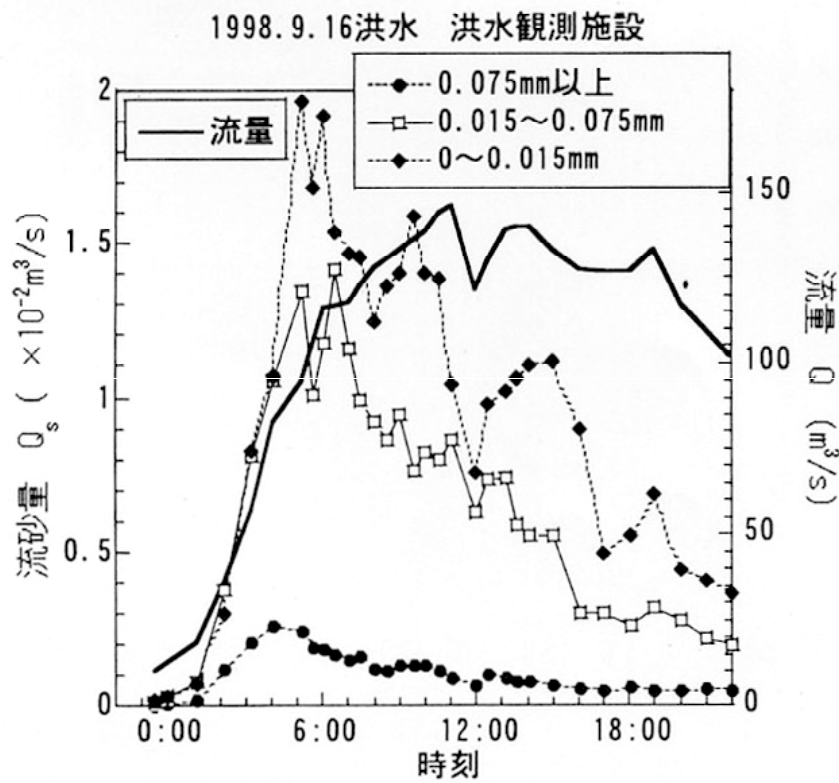
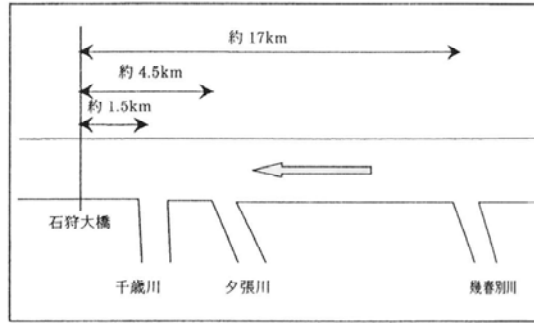
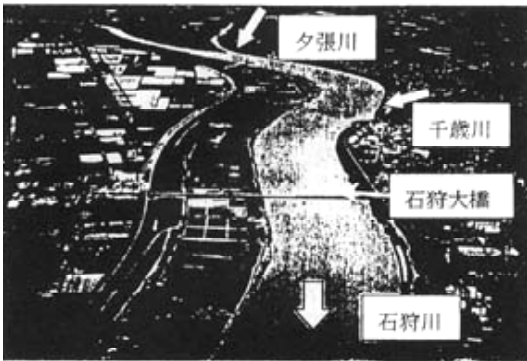


図-6.2 潤沼川観測結果 (土木研究所資料、参考資料³⁾より)

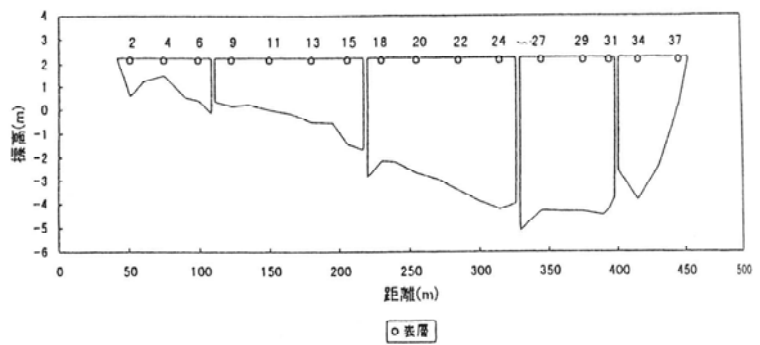


水質分布図

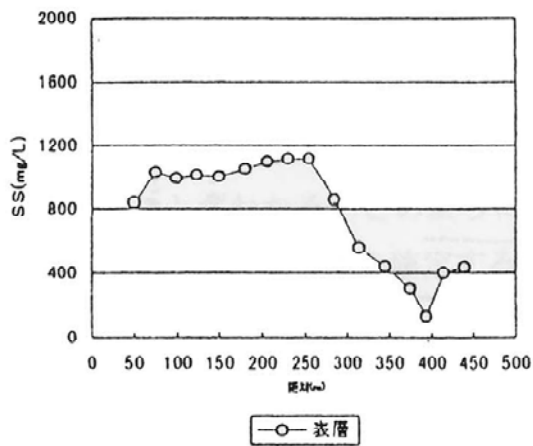
石狩大橋: 第4回

平成10年8月29日 H=2.26m

採取位置



SS



濁度

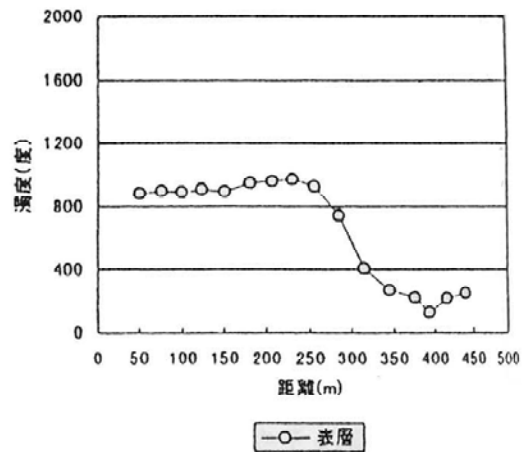


図-6.3 横断方向に土砂濃度分布を持つ事例 (参考文献⁵⁾より)

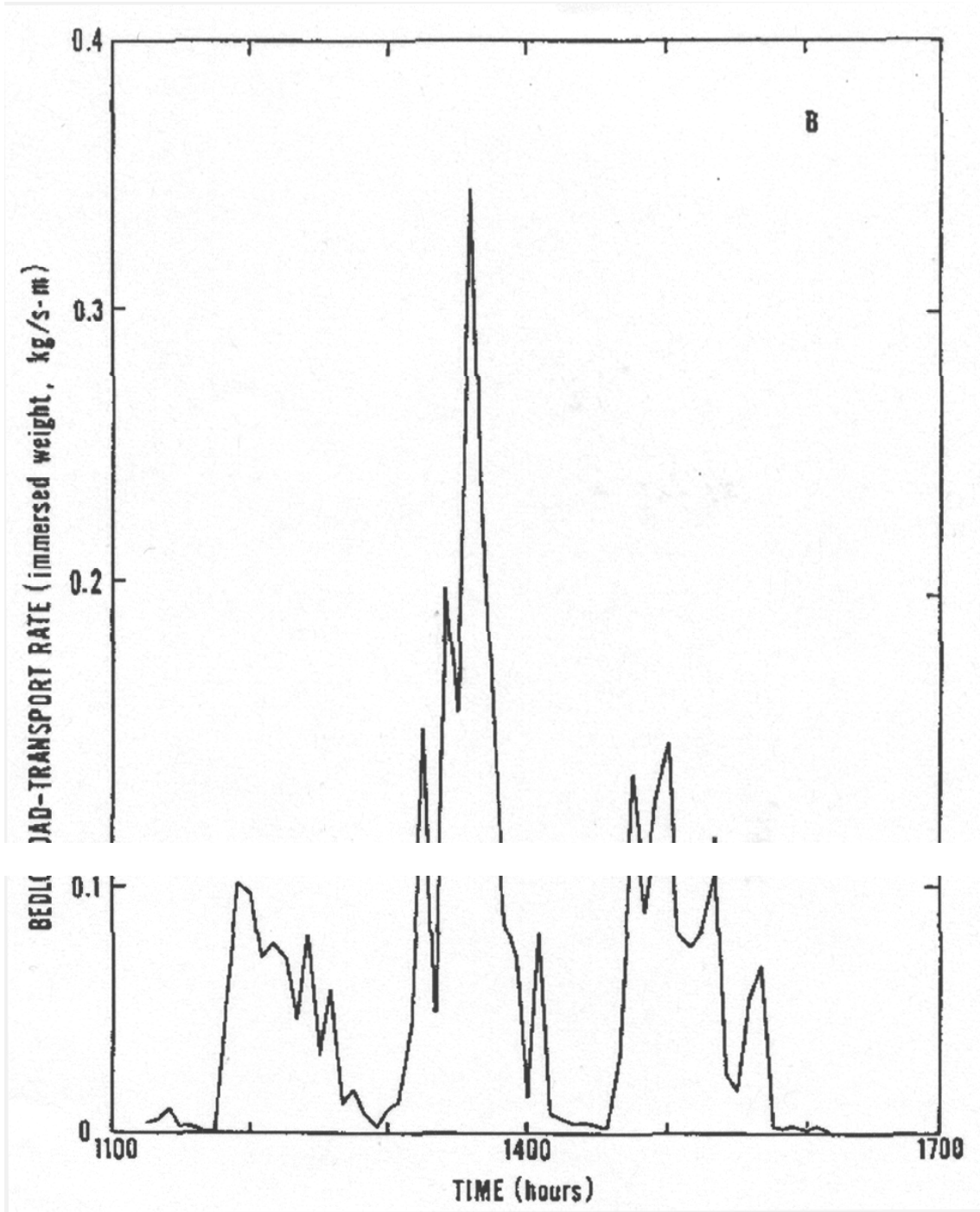


図- 6.4 掃流砂の時間的変化を捉えた観測結果 (参考文献⁹より)

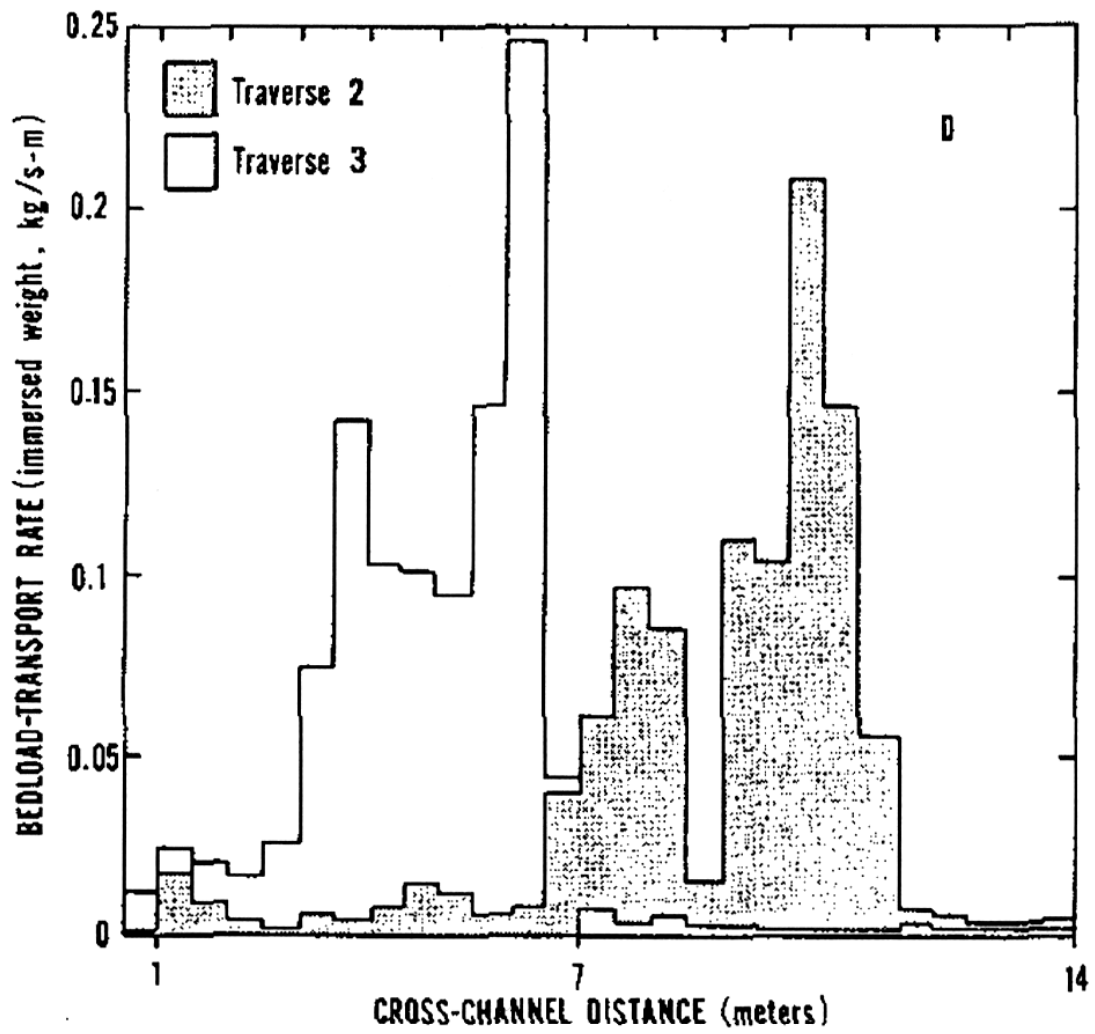


図- 6.5 掃流砂の横断分布を捉えた観測結果 (参考文献⁹より)

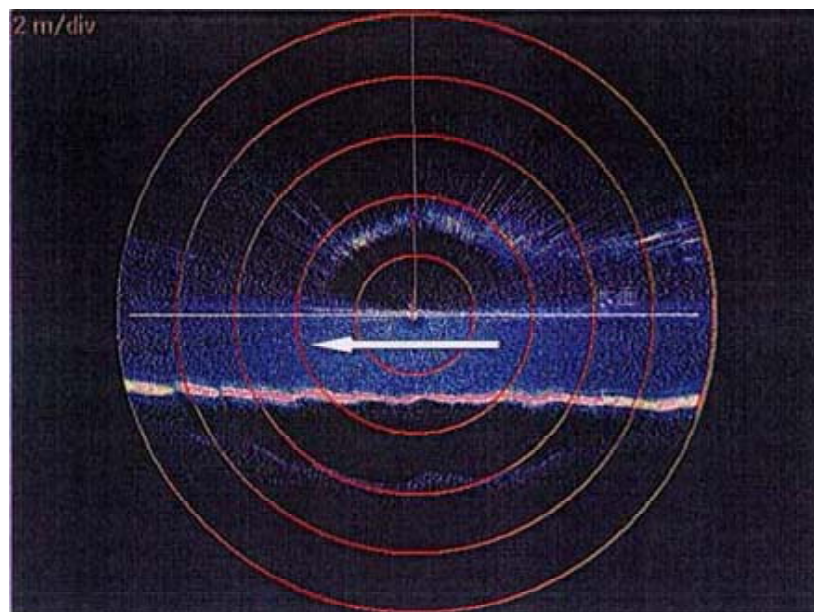
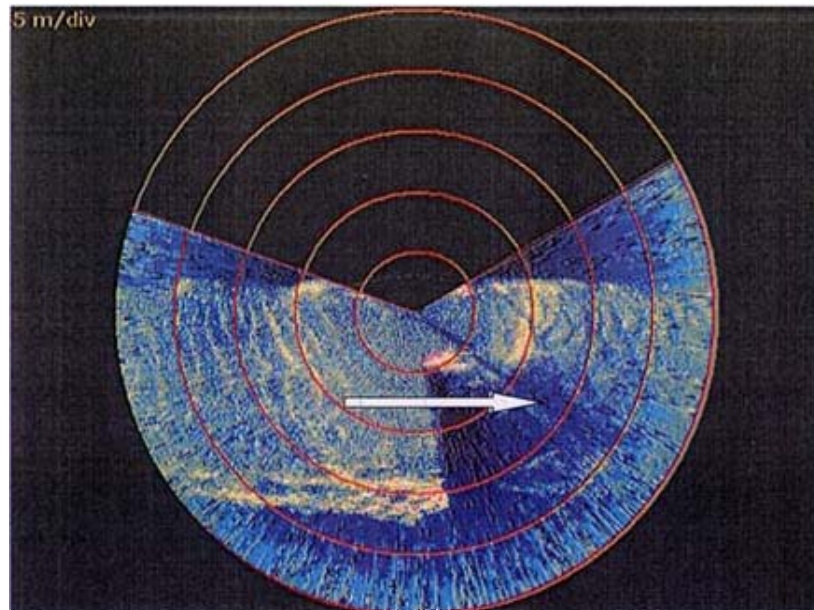
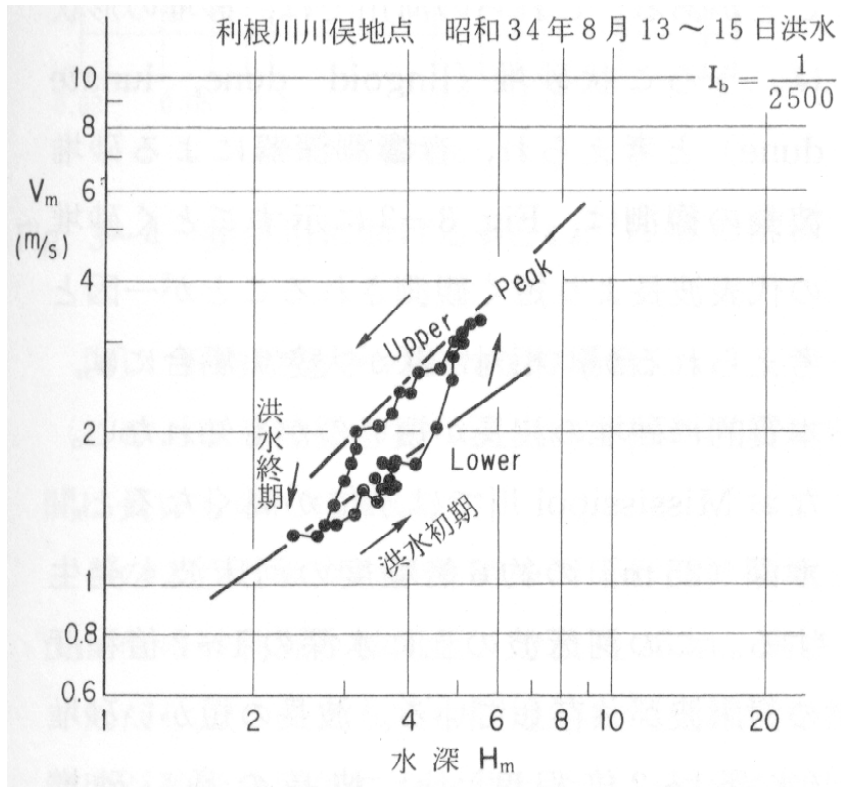


図- 6.6 スキャニングソナーでとらえた河床波（上：平面、下：縦断）
（河川技術論文集、参考文献⁹⁾より）



図－6.7 河床形態と流砂量の関係（河道特性論、参考文献⁷⁾より）

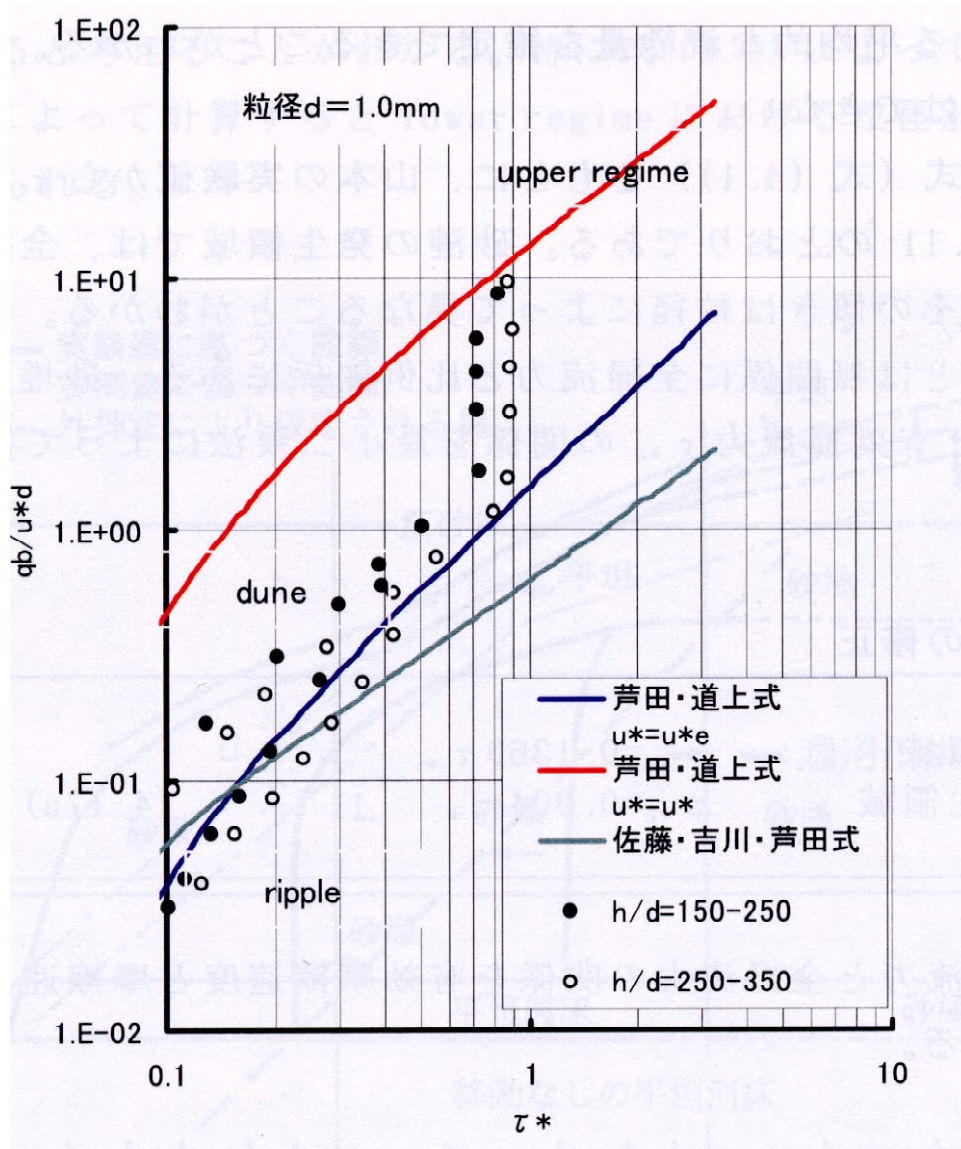


図- 6.8 河床形態と流砂量の関係
 (国土技術政策総合研究所資料、参考文献⁸⁾より)