

河床形態と河道計画

鮭 川 登

1. 概 説

移動床水路では、水力条件と河床砂礫の特性に応じて各種の河床形態(河床波: Sand waves)が形成されることが知られている。

流速が遅く、流れが常流の場合には、砂漣(ripples)や砂堆(dunes)が形成される(写真-1~3)。砂漣・砂堆は上流側は緩勾配、下流側は砂礫の安息角にほぼ等しい急勾配の斜面がらなる三角形状をしており、流れはクレストの背後で剥離する(図-1(a))。砂漣・砂堆は下流へ移動する。砂漣と砂堆の区別は明確ではないが、大きさの小さいものが砂漣、大きいものが砂堆とされている。砂堆上の流れでは、水面波と河床波が逆位相になる。流速を増すと、砂堆は掃流され、河床は高さの低い砂堆と平坦な部分とが共存する移遷河床(transition)になる。さらに、流速を増すと、平らな平坦河床(flat bed)になる。(図-1(b))。

流速が大きく、流れが射流の場合には、河床に反砂堆(antidunes)が形成される。反砂堆は正弦波に近い形状をし、水面波と同位相になる(図-1(c))。反砂堆には、上流へ移動するもの、下流へ移動するもの、および移動しないものの三種類がある。

砂漣・砂堆および反砂堆の大きさは水深のオーダーであるが、これらよりも規模が大きく、河幅のオーダーの大きさをもつ河床形態として砂州(bars)がある。砂州には、州が左右岸交互に現われる交互砂州(砂礫堆: alternate bars)や州がうろこ状にならんだうろこ状砂州(複列砂礫堆

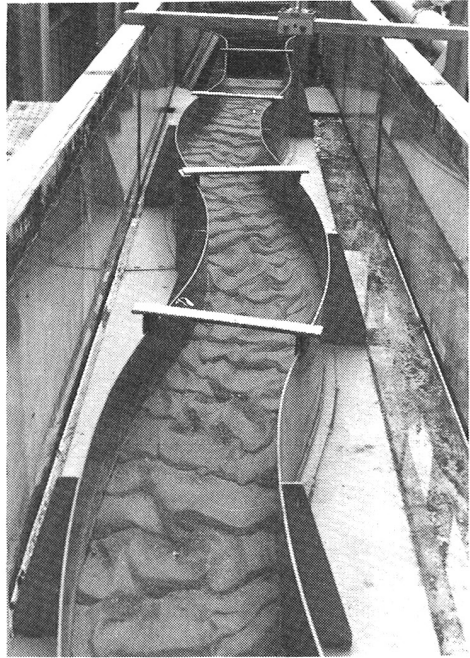


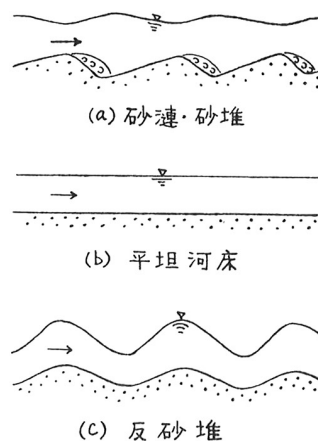
写真-1 実験水路における砂堆



写真-2 河川における砂漣(多摩川, 齊藤明朗氏撮影)



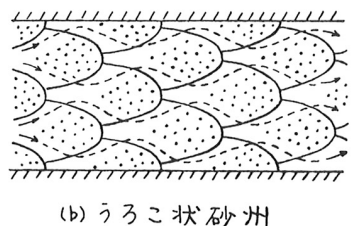
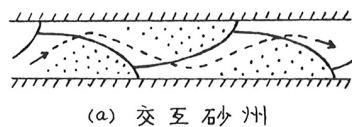
写真－3 河川における砂堆（金目川）



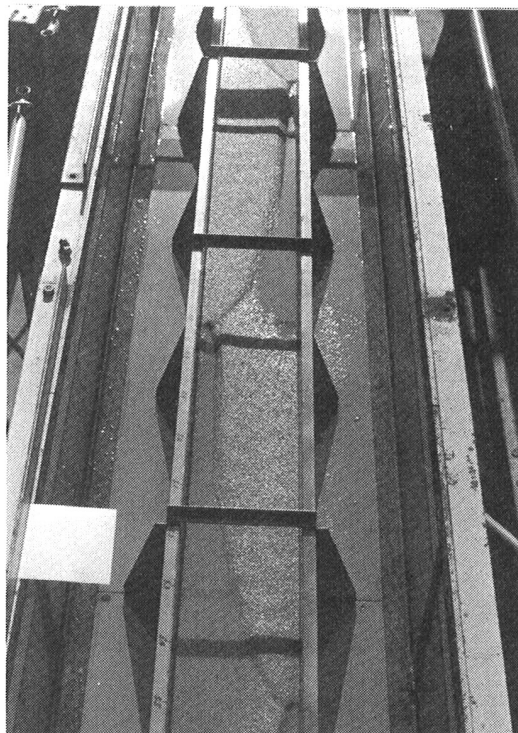
図－1 河床波の縦断形状

； linguoid bars ） などがある（写真－4～6，図2）。砂州は砂堆と同じような三角形の縦断形状をもち，下流へ移動する。砂州の上の流れは州をぬうように蛇行して流れる。

上記のような河床形態が形成されると，流れは河床形態により影響を受けるようになる。砂漣・砂堆は粗度要素として流れの抵抗に影響を与え，また河床近くの流れを変え，流砂量に影響を与える。河床に砂州が形成されると，河道内に深掘れや浅瀬，州が形成され，流れは蛇行するようになり，砂州は流路変動に影響を与えるようになる。したがって，河床形態に関しては，水理条



図－2 砂州の平面形状



写真－4 実験水路における交互砂州

件と河床砂礫の特性に対応してどのような河床形態が形成され、それらの河床形態が流れの抵抗や流砂量ならびに流路変動にどのような影響をおよぼすかを明らかにすることが重要な課題となる。ここでは、河道計画の観点から河床形態と流れの抵抗および流路変動の関係について述べる。

2. 河床形態と移動床流れの抵抗

河道断面の決定や河床変動の推定をするさいには、不等流計算を行ない、水面形を求めることが必要になる。精度のよい水面形を得るためには、河道の粗度を精度よく推定することが必要である。例えば、鶴見川で流量を $950 \text{ m}^3/\text{s}$ とし、Manning の粗度係数を 0.025 、 0.030 および 0.035 として不等流計算を行ない、水面形を求めると、**図-3** のようになり、粗度係数が 0.05 違うと、水位に約 40 cm の差がでることになる（これは流量にすると約 $130 \text{ m}^3/\text{s}$ の差になる）。

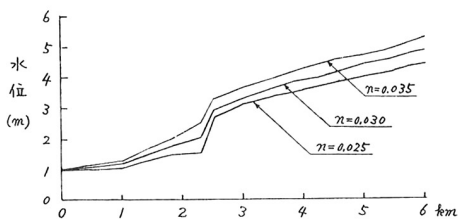


図-3 水位計算例（鶴見川： $Q = 950 \text{ m}^3/\text{s}$ ）

河川の流れの抵抗には河道の法線形状および断面形状や河床形態などが影響するものと考えられるが、ここでは河床形態との関係について述べることにする。

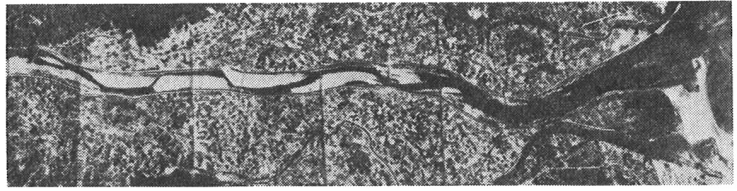


写真-5 河川における交互砂州（賀賀川）



写真-6 河川における交互砂州（滝沢川，北川善廣氏撮影）

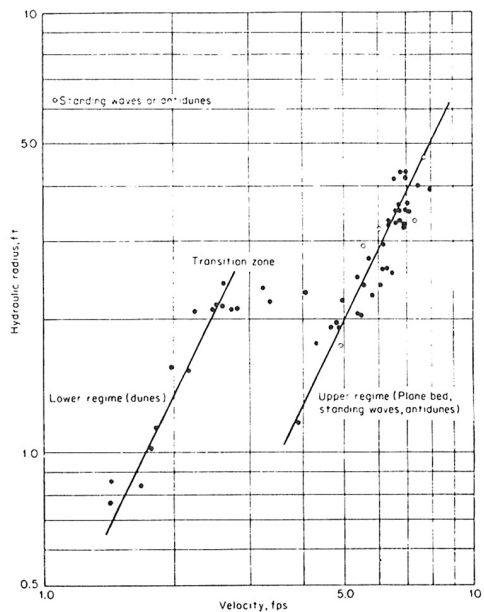


図-4 Rio Grande 川の洪水時の径深と流速の関係¹⁾

図-4はRio Grande川で観測された洪水時の径深と流速の関係を示している¹⁾。この図によると、流速が小さい場合と大きい場合では、径深と流速の関係が異なっていることが認められる。流速が小さい場合には、河床に砂漣・砂堆が形成され、それらのクレストの背後で流れが剥離するため抵抗が大きくなるが、流量の増加に伴ない流速が大きくなると、河床は平坦河床あるいは反砂堆になり、抵抗が急激に減少するためにこのような関係を示すことになるものと考えられている。このように、移動床水路では流れの条件の変化に伴ない河床形態が変化し、流れの抵抗が変わることは実験的にも示されている。したがって、移動床水路において与えられた流量に対する水深を求める、あるいは、与えられた水深に対する流量を求めるためには、まず、その条件において形成される河床形態を予測し、つぎに、予測された河床形状に対する抵抗則を使用することになる。そのためには、河床形態の形成条件と各河床形態に対する抵抗則を明らかにすることが必要である。

2-1. 河床形態の領域区分

河床形態の形成条件に関する実験的研究は数多く行なわれており、掃流力（あるいは、勾配、フルード数）が増加するにつれて、河床形態は砂漣・砂堆、遷移河床、平坦河床、反砂堆と変化すること、掃流力が同一の場合でも勾配と水深の組合せ方によって異なる河床形態が形成される場合があることなどが明らかにされている。これらの実験結果に基づいて、 τ_* と Fr 、 τ_* と I 、 τ_* と R/d 、 $I/(\sigma/\rho-1)$ と R/d などの関係によって河床形態の領域区分を行なう方法が提案されている。ここで、 τ_* は無次元掃流力で、

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{(\sigma - \rho)gd} = \frac{u_*^2}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)gd} = \frac{RI}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)d},$$

τ_o は掃流力、 σ は砂礫の密度、 ρ は流水の密度、 g は重力の加速度、 d は砂礫の粒径、 u_* は摩擦速度、 R は径深、 I は勾配である。河床形態の領域区分の一例として、 $I/(\sigma/\rho-1)$ と R/d の関係による領域区分(Garde・Raju²⁾)を図-5に示す。

2-2. 移動床流れの抵抗

河床に河床波(砂漣・砂堆)が形成されると、河床付近の流れは河床波の背面では河床に沿って流れるが、クレストの背後で剥離して渦を生ずる(図-6)。したがって、河床波が存在する場合には、流れは砂粒子による摩擦抵抗の他に、渦による形状抵抗を受け

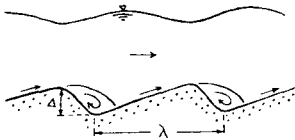


図-6 砂堆上の流れ

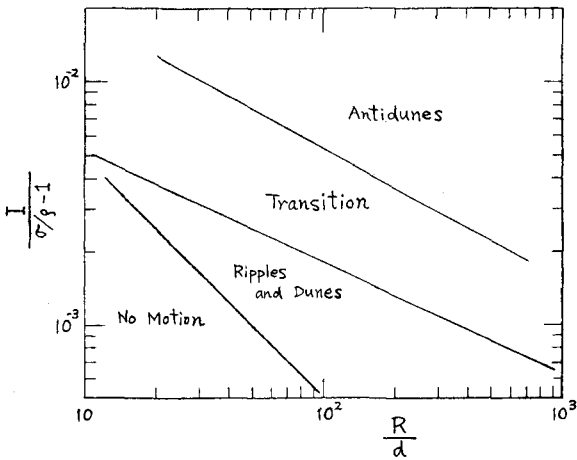


図-5 河床形態の形成領域区分図(Garde・Raju²⁾)

ることになる。河床波が存在する場合の流れの抵抗は一般に次のように表示される。

$$\tau_o = \tau_o' + \tau_o'' \quad (1)$$

ここで、 τ_o は全抵抗力、 τ_o' は砂粒子による摩擦抵抗力、 τ_o'' は河床波による形状抵抗力である。

Einstein・Barbarossa³⁾ は径深 R を砂粒抵抗に關係する径深 R' と河床波の形状抵抗に關する径深 R'' とに分割し、摩擦速度 u_* 、砂粒抵抗による摩擦速度 u_*' および河床波の形状抵抗による摩擦速度 u_*'' を、それぞれ、

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} = \sqrt{gRI}, \quad u_*' = \sqrt{\frac{\tau_o'}{\rho}} = \sqrt{gR'I}, \quad u_*'' = \sqrt{\frac{\tau_o''}{\rho}} = \sqrt{gR''I} \quad (2)$$

と表示することを提案した。(2) 式を (1) 式に代入すると、

$$u_*^2 = u_*'^2 + u_*''^2, \quad R = R' + R'' \quad (3)$$

となる。

砂粒抵抗に関しては開水路平坦河床流れの対数則が成立つものと仮定し、

$$\frac{v}{u_*'} = 5.75 \log_{10} \left(12.27 \frac{R'}{k_s} x \right) \quad (4)$$

とした。ここで、 v は平均流速、 k_s は相当粗度で、 $k_s = d_{65}$ 、 d_{65} は河床砂礫の累加粒度曲線の 65 % に相当する粒径、 x は河床面が完全に粗でない場合に対する修正係数で、 $k_s u_*' / 11.6 \nu$ の関数として数値が与えられている（粗面水路の場合は $x = 1$ となる）、 ν は流水の動粘性係数である。

河床波の形状抵抗については、 v / u_*'' は河床波の形状、大きさおよび配列の関数となるが、これらは掃流砂量の関数として表示されるであろうと考えた。河床波が存在する場合には、掃流砂量は砂粒子に作用する掃流力 τ_o' （有効掃流力）によって規定されるので、 v / u_*'' は無次元有効掃流力 τ_*'

$$\tau_*' = \frac{\tau_o'}{(\sigma - \rho)gd} = \frac{u_*'^2}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)gd} = \frac{R'I}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right)d} \quad (5)$$

の關係として表示されるものとし、河川における実測データを用いて、 v / u_*'' と τ_*' との關係を図 7 のように与えた。

Engelund⁴⁾ は移動床流れのエネルギー勾配 I は砂粒抵抗による摩擦勾配 I' と河床波の形状抵抗による損失勾配 I'' の和として表示されるものと考え、 I'' を急転によるエネルギー損失として計算し、次式のように与えた。

$$\begin{aligned} I &= I' + I'' = I' + \frac{v^2}{2g\lambda} \left(\frac{\Delta}{h} \right)^2 \\ &= I' + \frac{1}{2} F_r^2 \frac{\Delta^2}{\lambda h} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 λ は河床波の波長、 Δ は波高、 h は水深、 F_r は流れのフルード数であ

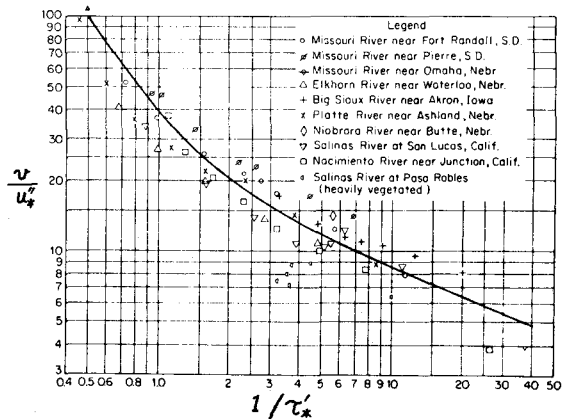


図 7 河床波の形状抵抗 (Einstein・Barbarossa³⁾)

る。Engelund は同一の河床形態をもつ二つの流れは歪模型と原型の関係にあると仮定し、移動床模型の相似則に従って、(6)式と $\tau'_* / \tau_* = I' / I$ の関係から τ_* は τ'_* の関数として表示されることを導き、実験資料に基づいて τ_* と τ'_* の関係を与える図を提示した (図-8)。ここで、 τ'_* は $\tau'_* = RI' / (\sigma / \rho - 1) d = R' I' / (\sigma / \rho - 1) d$ とし、次式により R' を求めることにより求められている。

$$\frac{v}{\sqrt{gR'I}} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R'}{2d} \quad (7)$$

Yalin⁵⁾ は τ_* と τ'_* の関係は河床波の形状だけでは決定されず、砂粒粗度の影響を受けることを指摘し、

$$\tau_* = f\left(\tau'_*, \frac{R}{d}, \frac{u_*'^2 d}{\nu}\right) \quad (8)$$

ただし、河床が粗面の場合には

$$\tau_* = f\left(\tau'_*, \frac{R}{d}\right) \quad (9)$$

とすべきであるとした。

岸・黒木⁶⁾ は広範囲の実験資料を用いて τ_* と τ'_* の関係を調べ、(9) 式の関係により実験値が整理されることを示し、 R/d をパラメータとして τ_* と τ'_* の関係を図示している。一例を図-9 に示す。この関係を用い、(7) 式を指数式で近似した

$$\varphi = \frac{v}{u_*} = 7.66 \left(\frac{R}{d}\right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{\tau'_*}{\tau_*}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (10)$$

で表わされる流速係数 φ と τ_* の関係を示すと、図-10 の実線のようになり、実験値の傾向とはほぼ一

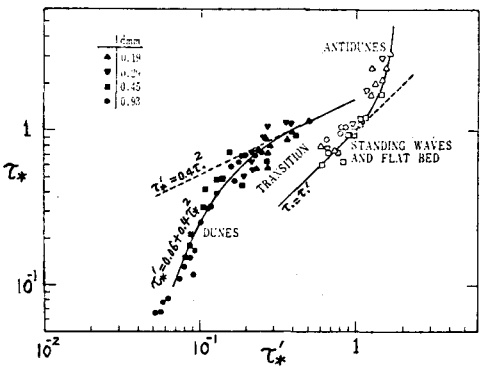


図-8 τ_* と τ'_* の関係 (Engelund⁴⁾)

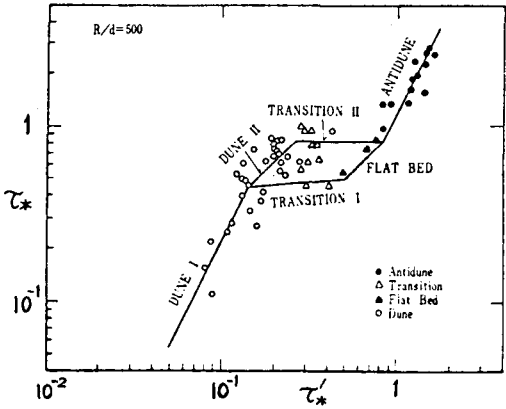


図-9 τ_* と τ'_* の関係 (岸・黒木⁶⁾)

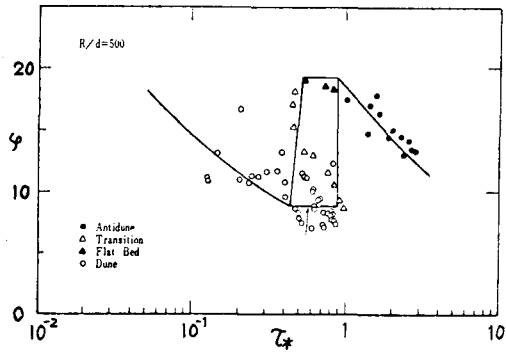


図-10 流速係数 φ と τ_* の関係 (岸・黒木⁶⁾)

致する関係が得られることを示した。図-10 の関係は掃流力が増大するにつれて砂堆が発達し、抵抗が増大し、 φ が減少するが、遷移河床の領域になると、砂堆が崩壊して河床は平坦になり、抵抗が急激に減少し、 φ が増大することを示し、流れが射流の場合には、さらに τ_* が増すと、流れが不安定になり、反砂堆が形成され、再び抵抗が増大し、 φ が減少することを示している。

石川⁷⁾は河床波の形状が与えられた場合について、河床波上の流れの流速分布と圧力分布を求め、摩擦抵抗および形状抵抗を算定する方法を提示している。

3. 河床形態と流路変動

交互砂州(砂礫堆)が形成されている河川の河床等高線図の一例を図-11 に示す。このような河川の河床形状は模式的に示すと図-12 のようになり、深みと州が左右岸交互に現われ、縦断形状は上流側

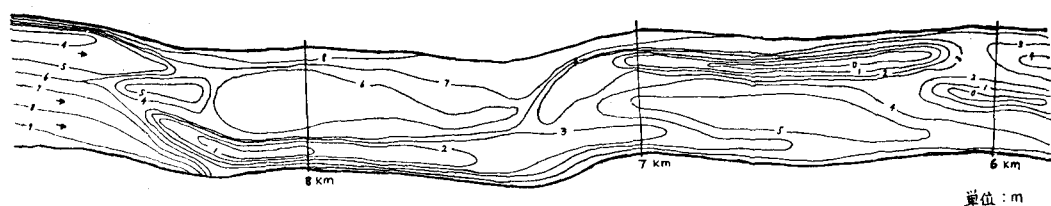


図-11 那賀川の河床等高線図(1976年1月)

が緩やかな勾配の長い斜面、下流側がきつい勾配の短い斜面からなる三角形状が連なる階段状を呈し、横断面は左右非対称な形状となる。交互砂州上の流れは深みに流れ込み、らせん流となり、反転して次第に幅の広がる流れとなり、対岸の深みに流れ込む。交互砂州が形成されている水路ではこのような流れのパターンが繰返され、流れは左右岸交互に現われる深みから深みへと蛇行する。そして、流れが集中する深みの部分が洗掘され、洗掘された土砂は流れが拡がり、水深が浅くなる部分を掃流され、斜めに形成されたクレストを越えて下流側の急な斜面に堆積する。こうして交互砂州はその形状を保ちながら下流へ移動していく。低水時には交互砂州の高い部分が水面に出、流れはそれらの間を蛇行するようになる。

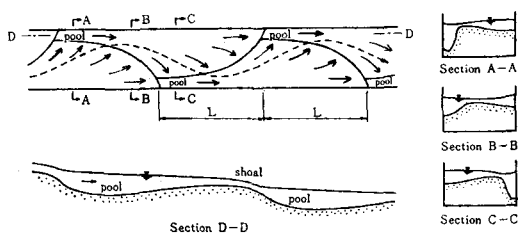


図-12 交互砂州の形状とその上の流れ

このように、直線河道においても交互砂州が形成されると、河岸沿いに深掘れや州が生じ、流れは蛇行し、水衝部が生ずることになる(写真-7)。そして、深掘れ、州および水衝部の位置は次第に下流へ移動していく。そのため河川航路の変遷、取水口の埋没、河岸の侵食、局所洗掘などの問題が生ずる。

3-1. 交互砂州と

滞筋の変遷

ヨーロッパでは、19世紀の後半の経済の発展にともない河川の交通路としての重要性が増し、河川の航行性を高めることが要請されるようになり、舟運のための河川改修がドイツ、フランス、オランダ、ロシアなどの多くの河川で実施された。当時の河川改修の考え方には二通りの考え方があった。一つはドイツで多く採用された考え方で、改修の対象とする河道区間

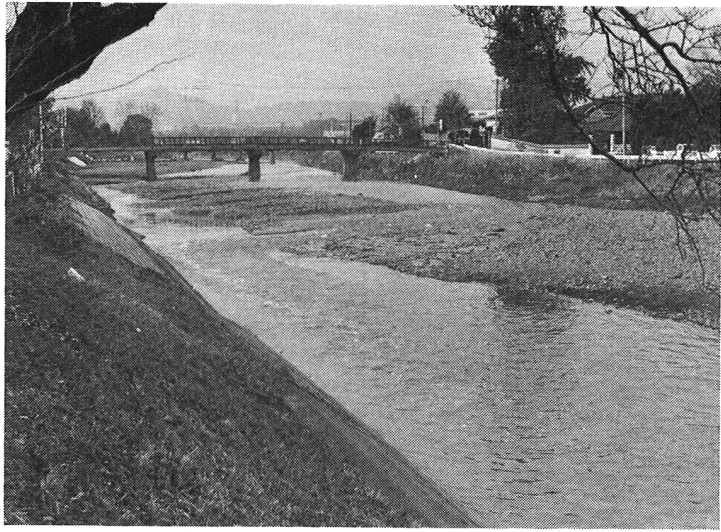


写真-7 交互砂州の形成による水衝部

を通じて水深および流速をできるだけ一様にするために、低水路の横断面形を一定にし、法線をできるだけ直線化しようとするものである。他はフランスで多く採用された考え方で、自然の状態の流路形状を重視し、低水路の法線および横断面の形状が連続的に滑らかに変化するように低水路を設定しようとするものである。例えば、河幅が広く、河道内を水流が乱流している状態の河川を航行に適するように改修する場合を想定すると、ドイツでは、多くの場合、与えられた流量と勾配から航行に必要な水深を得るための水路幅を等流の平均流速公式や経験に基づいて算定し、兩岸から水制を出し、河道のほぼ中央部に算定された幅をもつ低水路を法線ができるだけ直線的になるように固定する工事が行なわれた。このような考え方に従って実施された河川改修の例として Weichsel 川の場合⁸⁾を図-13に示す。フランスでは、河床の状態や流路の状況を観察し、自然の状態の流路形状をできるだ

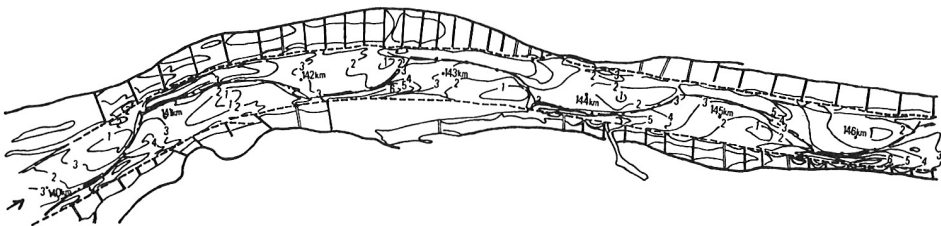


図-13 Weichsel 川の河川改修⁸⁾(図中等深線の単位はm)

け尊重し、河床に存在する深みを滑らかな蛇行曲線とつなぐように、低水路を水制で固定する工事が行なわれた。このような例として Loire 川の場合⁹⁾を図-14に示す。フランス的な考え方により低水路を蛇行させた場合には、滞筋の位置が固定され、安定した航路が得られた。これに対して、ドイツ的な考え方によりほぼ一定の幅の直線的な低水路に改修された河川では、低水路内を滞筋が蛇行し、浅瀬が生じ、それらの位置が下流へ移動するようになり、航路を維持することに苦勞することに

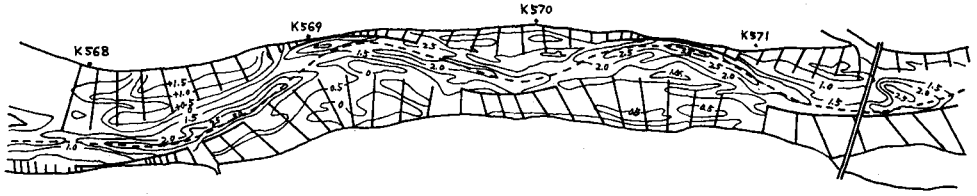


図-14 Loire 川の河川改修⁹⁾ (図中等深線の単位は m)

なった。そのため、19 世紀の後半から20世紀の初頭にかけて滞筋の蛇行や移動の現象を解明するために、直線的に改修されたドイツやオランダの多くの河川で詳細な河床測量が行なわれ、滞筋の蛇行や移動の現象と河床形状との関係が明らかにされた。^{8), 10)~12)}

Rhein川のDaxlander~Wörther 間の 1867 年と 1871 年における砂礫州と滞筋の位置および横断面形の観測結果を示すと、図-15 のようになり、直線的な河道においても滞筋が蛇行し、その位置が変化すること、および横断面は左右非対称な形状をし、縦断面は階段状をなし、一様な勾配の長方形断面に河道を改修しても実際にそのような形状に河道を維持することは困難であることが示された。図-13 に示したWeichsel 川は砂床河川で河床変動が激しいために 140 ~ 148 km 区間については 1897 年から毎年詳細な河床測量が行なわれ、河床形状が明らかにされた。これらの観測結果に基づいて、滞筋の蛇行と移動の現象や横断面形状の非対称性が河床形状(“移動砂礫州: Wandernde Geschiebänke”: 交互砂州)と密接に関係していることが示された。その後、砂礫州の移動特性や形成特性が調査され(特に、Engels⁸⁾ は実験水路で砂礫州を形成させ、砂礫州の形成過程や形成条件について検討している)、砂礫州は彎曲部や支川の合流点付近では移動せず、位置が固定されること、および砂礫州は河幅が広い場合に形成されるが、河幅を狭くすると形成されなくなること、河床が洗掘低下する区間では砂礫州は形成されないことなどが明らかにされた。

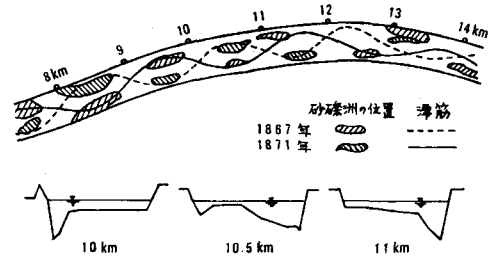


図-15 Daxlander~Wörther 間の Rhein 川の滞筋と砂礫州の位置の変化および横断面形状⁸⁾

Waal 川では、1892 年に舟運のために、水制や縦工を設置し、幅 310 m の河道に改修し、滞筋に沿って浚渫し、航路がつくられた。しかし、砂礫州が形成され、滞筋が移動し、航路の水深が浅くなった(図-16 (a))。滞筋の移動を止め、水深を維持するために、水中に数多くの水制を設置し、砂礫州の移動を止めようとしたが、砂礫州の移動は止まらず、航路は埋まり、水深を維持するために莫大な費用をかけて浚渫をしなければならなかった。必要な水深を確保するために、1909 年に河幅を 260 m に狭めることになった。河幅を狭めた結果、砂礫州は形成されなくなり、満足すべき航路が得られた(図-16 (b))¹³⁾。

フランスのGirardon¹⁴⁾は自然の河床の状態を観察し、一般に流路は直線河道においても左右岸交互に形成される深みから深みへ蛇行することを認め、低水路の法線は自然の状態の流路形状をできるだけ尊重し、蛇行させるのが良いと主張した。低水路法線を蛇行させることにより滞筋を固定すること

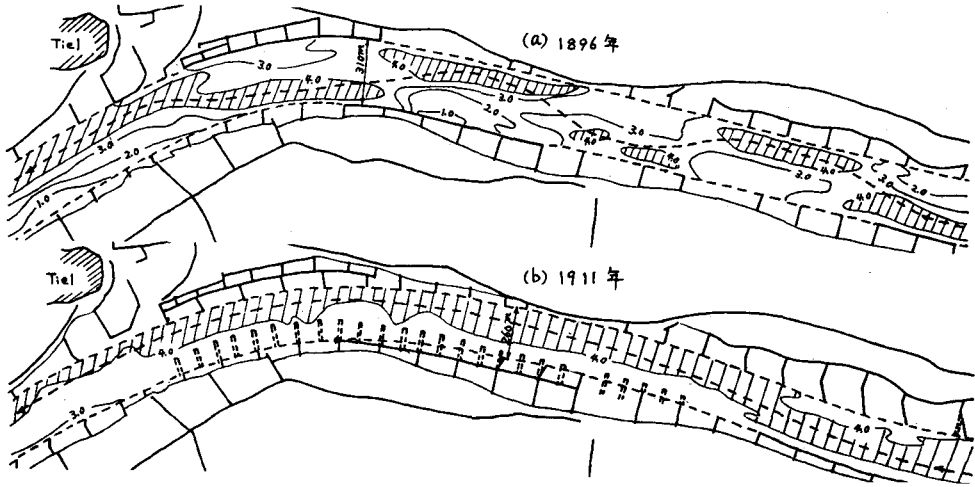


図-16 Waal 川の河川改修¹³⁾(図中等深線の単位はm)

ができ、勾配も小さくすることができるので、航路として有利であると述べている。Fargue¹⁵⁾ は Garonne 川における観測結果に基づいて、水深と河道曲率との関係を考察し、Fargue の法則としてまとめている。

以上に述べたような 19 世紀後半から 20 世紀初頭にかけてのドイツやフランスにおける研究の結果、交互砂州の形成によって生ずる諸問題に対処するためには、河幅を狭くし、交互砂州が形成されなくするか、河道を蛇行させ、交互砂州の移動を止めればよいことが示された。そこで、つぎに、交互砂州の形成条件と移動特性に関する最近の研究成果について紹介する。

3-2. 砂州の形成条件

木下¹⁶⁾ は交互砂州（砂礫堆）の形成条件について数多くの実験を行なっているが、その結果によると、交互砂州は流れが常流の場合でも射流の場合でも形成されること、水深と水路幅の比が小さい場合に形成されること、勾配が小さくなることなどが認められる。

鮭川¹⁷⁾ は水路幅の影響を考慮するため、同一の河床形態をもつ二つの水路は歪模型と原型の関係にあるものと仮定し、勾配に関する無次元量

$$\frac{u_*}{u_{*c}} \left(\frac{B}{R} I \right)^{\frac{1}{2}}$$

を導き、これと無次元掃流力 u_*^2 / u_{*c}^2 とにより交互砂州の形成領域を図-17のように区分した。ここで、 B は河幅、 u_{*c} は河床砂礫の移動限界摩擦速度である。他の条件は一定にし、水深を変化させた実験によ

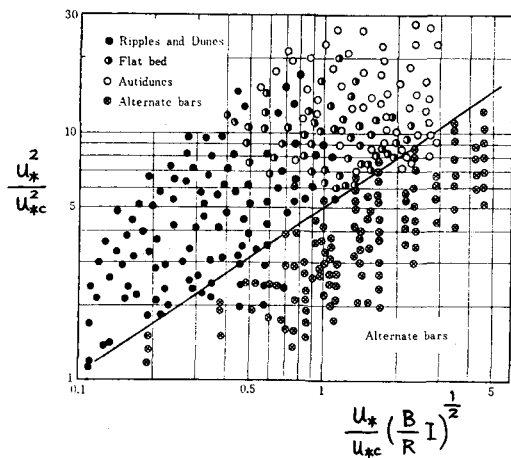


図-17 交互砂州の形成領域(鮭川¹⁷⁾)

ると、水深が小さいうちは交互砂州が形成されるが、水深が大きくなると交互砂州は形成されなくなり、条件に応じて砂漣、砂堆、平坦河床あるいは反砂堆が形成されることが観測されたので、図-17では交互砂州のデータと砂漣、砂堆などのデータを同一の図にプロットし、交互砂州の形成域を求めている。図-17によると、交互砂州の形成条件はつぎようになる。

$$\frac{R}{B} \leq 125 \left(\frac{u_{*c}}{u_*} \right)^4 I \quad (11)$$

村本・藤田¹⁸⁾は h/d と B/h を用いて交互砂州とうろこ状砂州の形成領域を図-18のように区分している。これによると、交互砂州とうろこ状砂州の形成条件はつぎようになる。

$$\text{交互砂州 : } 0.0583 \left(\frac{d}{h} \right)^{\frac{1}{2}} < \frac{h}{B} < 0.302 \left(\frac{d}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\text{うろこ状砂州 : } \frac{h}{B} < 0.0583 \left(\frac{d}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

河床には水理条件と河床砂礫の特性に対応した河床形態が形成されるが、これらの条件に対応した河床形態が発達するまでには一定の時間を必要とする。この時間は規模の小さい砂漣、砂堆、反砂堆の場合は比較的短かいが、規模の大きい砂州の場合にはかなり長いものと考えられる¹⁹⁾。河川では流量は絶えず変化しており、河床形態が水理条件に対応する形態になる前に水理条件が変わってしまう場合があるので、河川の河床形態、とくに砂州と水理条件との関係調べる場合には、その河床形態がどの水理条件に対応して形成されたものであるかについて検討することが必要である。

3-3. 交互砂州の移動特性

直線河道においては交互砂州は下流へ移動することが知られている。河川における交互砂州の移動の例として阿賀野川下流部の場合²⁰⁾を示すと、図-19のようになり、年に約80 m移動することがわかる。他の河川において観測された例によると、交互砂州の一年間の移動距離はWeichsel 川 550 m, Merwede 川 300 m, 那賀川 20 m などである。直線河道における交互砂州の移動速度は水理条件、河床砂礫の特性、交互砂州の形状などによって変化することが知られているが、それらの間の関係はまだ明らかにされていない。

蛇行河道においては交互砂州は移動しないことが知られている。このような場

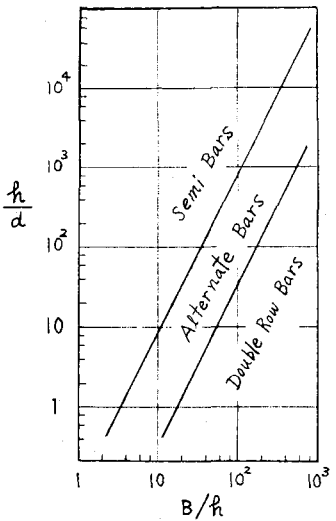


図-18 砂州の形成領域(村本・藤田¹⁸⁾)

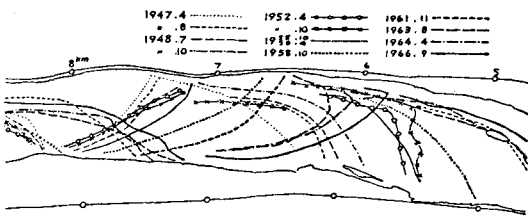


図-19 阿賀野川下流部における交互砂州の移動(木下²⁰⁾)

合の例として吉野川の場合²⁰⁾を示すと、図-20 になる。

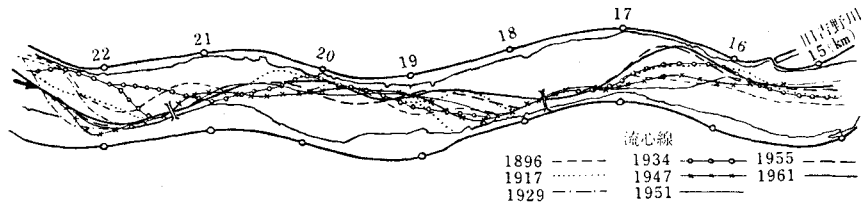


図-20 吉野川の流心線の変化 (木下²⁰⁾)

直線河道における交互砂州の形成によって生ずる種々の問題に対処する一つの対策として交互砂州の移動を止めることが考えられるが、そのためには河道を蛇行させればよいことが知られている。しかし、河道を蛇行させると、洪水の疎通が悪くなり、また彎曲部の水当りおよび洗掘が激しくなると考えられるので、交互砂州の移動を止めるために河道を蛇行させる場合にはできるだけ緩やかに蛇行させるのが望ましいと考えられる。そこで、交互砂州の移動が止まる限界の蛇行曲率を求めることが課題となる。

木下・三輪²¹⁾は交互砂州の移動、停止と河道蛇曲角度(図-21中の θ)との関係について多数の河川を調査し、図-21のような結果を得た。これによると、交互砂州の移動が止まる限界の河道蛇曲角度は河床勾配に関係なく $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ であることがわかる。また、交互砂州の移動が止まる限界の河道蛇曲角度と水路の蛇曲波長との関係をジグザグ水路を用いて実験的に検討し、図-22に示すような結果を得ている。

蛙川・三村²²⁾は交互砂州の移動を止めるような曲率および彎曲角の小さい彎曲が連続する緩蛇行水路内の流れと河床変動について実験的に検討した。その結果によると、緩蛇行水路では主流は凸岸部の上流面の水路壁にあたり、凸岸部頂点から対岸

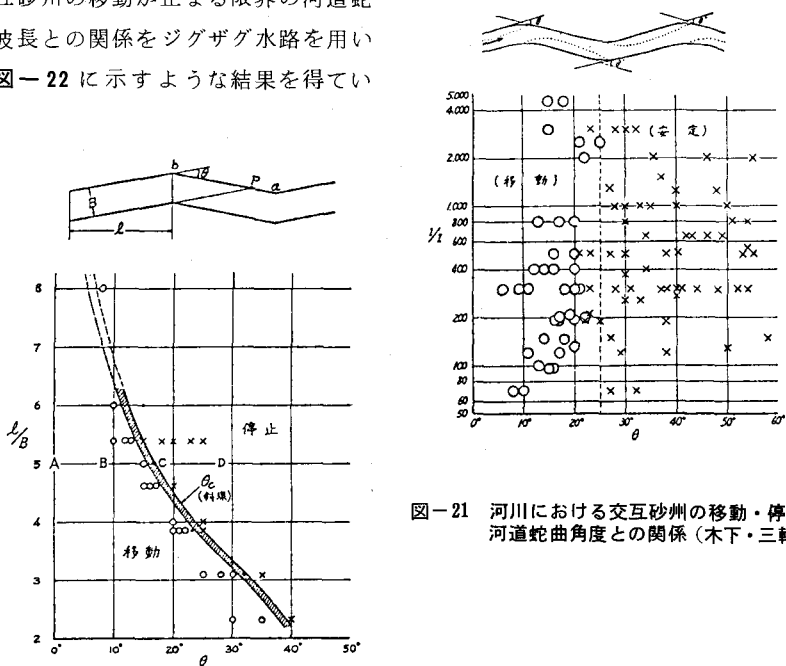


図-21 河川における交互砂州の移動・停止と河道蛇曲角度との関係 (木下・三輪²¹⁾)

図-22 ジグザグ水路における交互砂州の移動・停止の限界角度と蛇曲波長の関係 (木下・三輪²¹⁾)

の凸岸部の上流面に向い、河床は凹岸頂部のやや下流から凸岸沿いに凸岸頂部の下流まで洗掘され、洗掘された砂は水路に沿って流送され、同じ岸の凸岸下流から凹岸頂部にかけて堆積し、最大洗掘部は凹岸から凸岸への変曲点付近に生じることが示された（図-23、写真-8）。

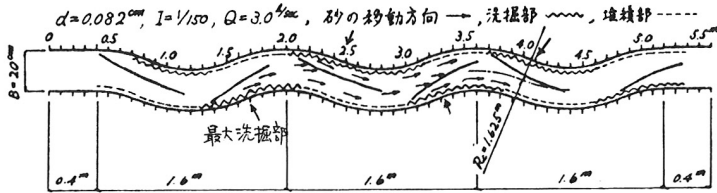


図-23 緩蛇行水路内の河床変動（鮭川・三村²²⁾）

4. 結 び

本講義では、河道計画の観点から河床形態に関する研究の必要性および研究成果の一部を紹介した。話の筋道を明解にするために研究成果の引用はできるだけ少なくした。河床形態については、すでに本研修会において多くの講義がされているので、河床形態に関する種々の課題について関心のある方はそれらの講義集^{23)~31)}を読まれることをおすすめする。

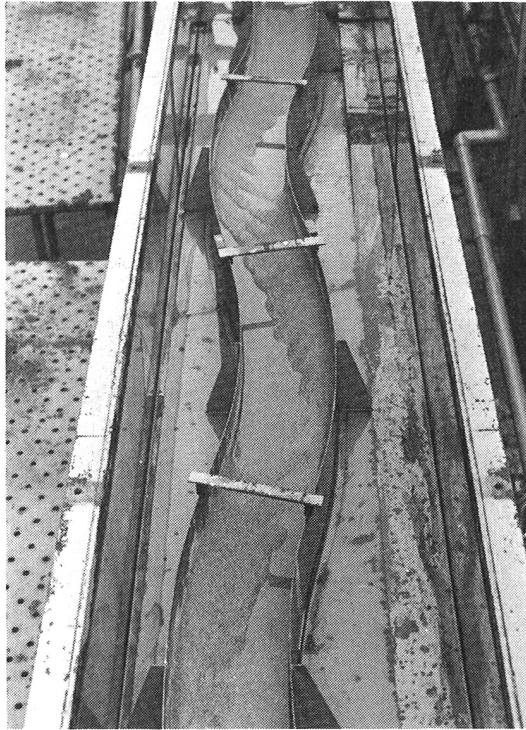


写真-8 緩蛇行水路内の河床変動

参 考 文 献

- 1) Nordin, C. F. , Aspects of flow resistance and sediment transport, Rio Grande near Bernalillo, New Mexico, U. S. Geological Survey, Water Supply Paper 1498 - H, 1964.
- 2) Garde, R. J. and R. Raju, Regime criteria for alluvial streams, Proc. ASCE, No. HY6, Nov., 1963, pp. 153 ~ 164.
- 3) Einstein, H. A. and N. L. Barbarossa, River channel roughness, Trans. ASCE, Vol. 117, Paper No. 2528, 1952, pp. 1 ~ 12.
- 4) Engelund, F. , Closure to "Hydraulic resistance of alluvial streams", Proc. ASCE, Vol. 93, No. HY4, July, 1967, pp. 287 ~ 296.
- 5) Yalin, S. M. , Mechanics of sediment transport, Pergamon Press, 1972.

- 6) 岸力・黒木幹男, 移動床流における河床形状と流体抵抗 (1), 北大工学部研究報告, 1972, pp. 1 ~ 23.
- 7) 石川忠晴, 河川の流砂に関する基礎的研究, 東京工業大学土木工学科研究報告, No 24, 1978.
- 8) Engels, H., Untersuchungen über die Bettausbildung gerader oder schwach gekrümmter Flußstrecken mit beweglicher Sohle, Zeitschrift für Bauwesen, 1905.
- 9) Kauffmann, XIIth International Congress of Navigation, Rivers improvement, Philadelphia, 1912.
- 10) Jasmund, R., Handbuch der Ingenieurwissenschaften, Dritter Teil, Der Wasserbau, Erster Band, Die Gewässerkunde, Leipzig, Verlag von Wilhelm Engelmann, 1911.
- 11) 鮎川登, 直線河道における流れの蛇行現象に関する水理学的研究, 科学技術庁資源調査所, 1971.
- 12) 高橋裕・鮎川登, 河床形状の研究に関する技術史的考察, 第16回水理講演会講演集, 1972, pp. 93 ~ 98.
- 13) Bauck, XIIth International Congress of Navigation, Rivers improvement, Philadelphia, 1912.
- 14) Girardon, III^d Congress of Inland Navigation, Frankfurt - on - the - Mein, 1888.
- 15) Fargue, L., La forme du lit des rivières à fond mobile, Gauthier - Villars, 1908.
- 16) 木下良作, 石狩川河道変遷調査 (参考編), 科学技術庁資源局資料, No 36, 1962.
- 17) 鮎川登, 実験水路における交互砂州 (砂れき堆) の形成条件, 土木学会論文報告集, 第207号, 1972.
- 18) 村本嘉雄・藤田裕一郎, 中規模河床形態の分類と形成条件, 第22回水理講演会論文集, 1978, pp. 275 ~ 282.
- 19) 鮎川登・北川善廣, 実際河川における砂礫堆の形成に関する一考察, 土木学会第31回年次学術講演会講演概要集, 1976, pp. 279 ~ 280.
- 20) 木下良作, 洪水と流路形態の現地観測, 1978年度水工学に関する夏期研修会講義集Aコース, 土木学会水理委員会, 1978.
- 21) 木下良作・三輪式, 砂れき堆の位置が安定化する流路形状, 新砂防, No 94, 1974.
- 22) 鮎川登・三村隆, 緩蛇行水路内の流れと彎曲部洗掘深, 第20回水理講演会論文集, 1976, pp. 103 ~ 108.

水工学に関する夏期研修会講義集 (土木学会水理委員会)

- 23) 井口昌平, 河川の蛇行について, 1966.
- 24) 木下良作, 航空写真による洪水時の流況測定, 1968.
- 25) 林泰造, 蛇行論, 1970.
- 26) 杉尾捨三郎, 移動床の抵抗則, 1971.
- 27) 木下良作, 河道平面計画, 1972.
- 28) 岸力, 移動床流れにおける粗度, 1972.
- 29) 芦田和男, 移動床流れの河床形態, 1972.
- 30) 村本嘉雄, 流路形態, 1976.
- 31) 木下良作, 洪水と流路形態の現地観測, 1978.