

川の流れの原理に基づく河川取水

三輪 弼

岩手大学名誉教授

川から水を取り入れることのむつかしさ

- 川は、洪水時に河床の砂礫がはげしく流動し流れと河床形を変化させる。そのような動きのある河川に取水口や堰という固定構造物を設置して水を取り入れるという基本的な難問を抱えている。
- 河川ごとに多様な違いはあっても、川の流れの基本は、左右に大きく揺れ動いて蛇行し、左右岸交互に寄洲が形成されており、その形態が洪水によって変化するという点にある。
- この基本原理に基づいて、堰の計画・設計や建設後の維持管理における問題点を考えることによって、取水堰における取水障害の改善方向を提案する。

河川取水の方法

■ 自然取水

- みお筋が沿っている河岸に取水口を設置する。

■ 堰の設置

- 固定堰 河川取水位を安定させるため横断構造物の設置する。
- 複合堰（一部固定堰） 堰の一部に可動堰ゲートを配置し洪水時に可動ゲートを開放して流下させる。
- 全面可動堰 河道全面に可動堰ゲートを配置する。取水時はゲート閉鎖して取水し，洪水時にはゲートを開放して洪水を流下させる。



鎌田堰における自然取水の取り入れ
(仁淀川, 高知県高岡郡日高村)

固定堰 洪水吐 転倒堰2門 ゲート1門 土砂吐2門



佐貫頭首工（一部可動堰, 栃木県利根川水系鬼怒川）



旭川合同堰（固定堰, 岡山県旭川）



荒川頭首工（全面可動堰, 新潟県羽越荒川）

蛇行する流れと河床の形

- 川岸や橋の上から河川を見ると、みお筋が左右岸に大きく曲がりくねり、左右交互に広い寄洲が広がっている。
- 川岸沿いの深く掘れた淵から対岸に向かい浅い瀬を越えて下流の淵に流れ込む。
- 淵から瀬と洲に向かって広がる河床形状が上下流に繰り返し現れて川を構成している。



図-1 淵と瀬が交互に連続する流れと左右岸交互の寄洲
山城大橋（淀川支流木津川）の上流域（京都府京田辺市，2020年12月9日三輪撮影）

砂礫堆の連なりによる河川形態

- 淵から瀬と洲に広がる河床形状は「砂礫堆」と呼ばれ、左右反転し前縁を共有して上下流に連なって河川が成り立っていて、流れと河床の形をきめている。
- 多摩川では、戦後の河川改修工事が進み、両岸堤防と高水敷を備えた河道になり、低水路の河床の凹凸も整正されていた。
- 昭和49年の大洪水によって左右岸一杯の蛇行流と左右交互の寄洲が出現した。

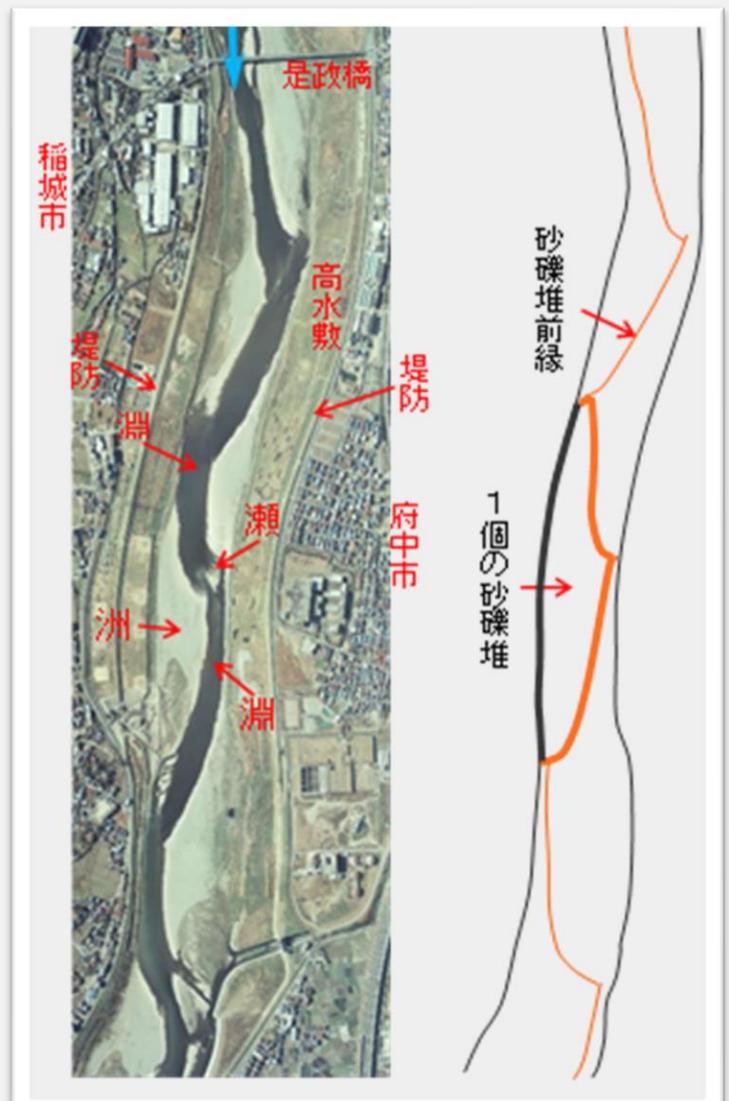


図-2 多摩川における平水時の淵・瀬・洲と「砂礫堆」との関係
府中市付近の空中写真
CKT791-C27B-26とCKT791-C27B-27の合成写真（国土地理院撮影1979/12/13）

直線平坦砂床からの砂礫堆の発生と発達

- 「砂礫堆」は、木下良作氏が蛇尾川洪水に遭遇し、洪水流の観察と洪水後の河床形状の測量を繰り返す中から見出した河床形である。氏は、全国の多数河川でも砂礫堆が上下流に連なって河川を構成していることを検証した。
- 河川洪水では、幅広い浅い流れでありながら河床の砂礫がはげしく流動する。これと類似の流れを実験水路に流下させると、直線の平坦砂床の状態から砂礫堆が発生・発達し、蛇行水流が出現する。

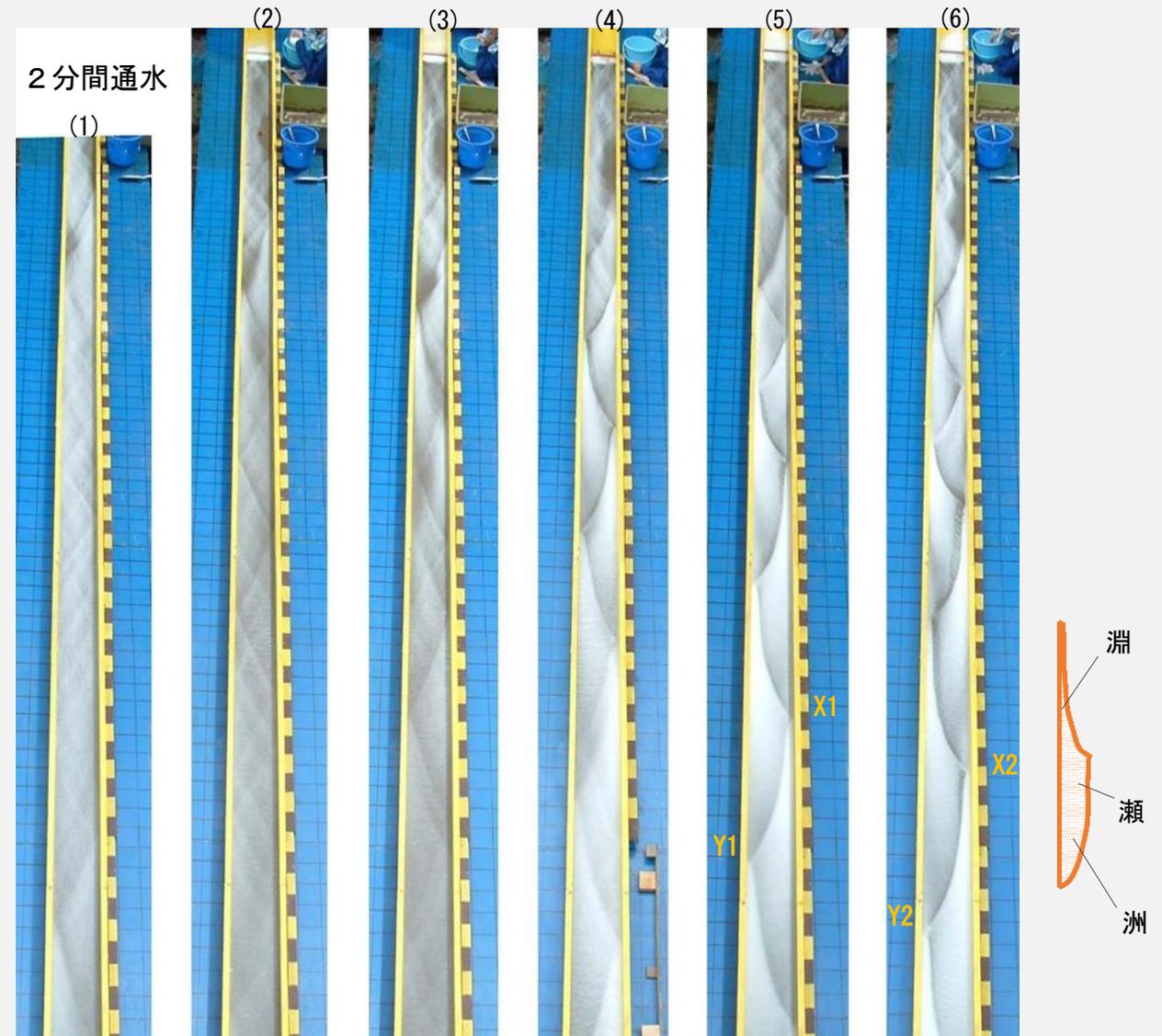


図-3 直線水路における砂礫堆の発生と発達

(20cm幅水路, 水路勾配1/70, 流量0.6L/s, 砂床粒径0.6-1.0mm, 岩手大学屋外水路)

砂礫堆の横断形状

- 停水時に白い絵具溶液を流し込んで撮影した上方からの写真で砂礫堆の形状を見ることはできる。
- より詳細に形状を知るために水路横断形状を測量した。
 - 水路壁沿いの淵は、9.7m側線に見られるように急傾斜の崖になっている。
 - 下流に向かって淵の領域が広がって砂床が高くなり、瀬と洲に変化していく様子がよくわかる。
 - 上下流に連なる砂礫堆の形状に対応して砂床形状の変化が繰り返し現れるのである。

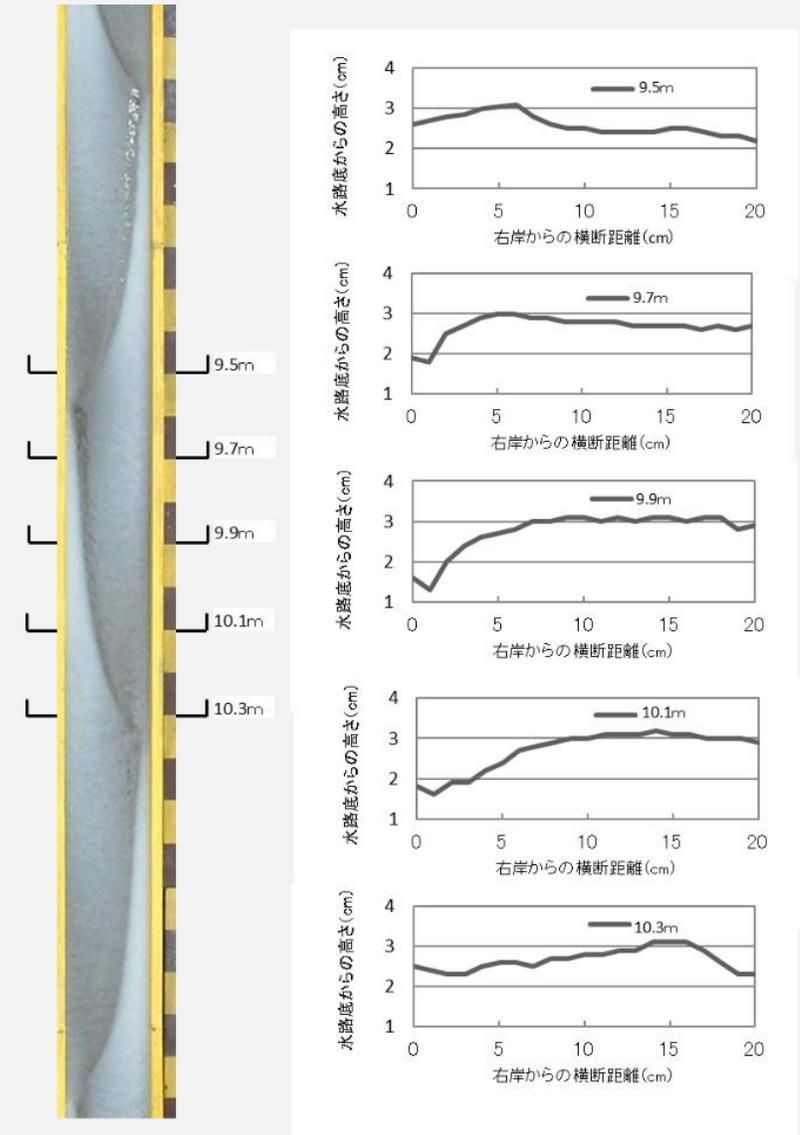


図-4 直線水路の砂礫堆横断形状

図-3の実験で通水8回後の横断測量結果

砂礫堆が形成された水路における蛇行水流

- 平坦な砂床に通水した当初は，等水深でほぼ直流して流下するが，砂礫堆が水路全域に形成されると水流は砂礫堆の形状に対応して左右に蛇行する流れになる。
- 水表面にパンチくずを散布すると，パンチくずの密集部分が淵になり分散部分が寄洲になっていることがわかる。
- 動画再生すると，パンチくずが左右に大きく揺れ動いている。砂礫堆が形成された河川における洪水流の蛇行状態を再現している。



図-5 砂礫堆を形成する蛇行水流

水路勾配1/70，水路幅20cm，流量0.6 L/s使用砂：平均粒径0.8mm，比重2.49

写真をクリックor下記リンクで動画閲覧可能

https://drive.google.com/file/d/1XVuQ2Fx9jwFkpM3aEMlh93Q8aDiXz3A5/view?usp=share_link

阿賀野川洪水時の水流蛇行と砂礫堆形成

- 淵から瀬と洲に広がる砂礫堆の形状は、数cm幅の極小水路から1 km幅の大河川まで相似した凹凸形状である。
- 実験水路において水路幅一杯を左右に大きく揺れ動く流れは、河川の洪水流蛇行を推定させる。
- 木下良作博士は、日本の主要河川の多くで洪水流の表面航空写真の撮影を敢行し、航空写真測量の技法を駆使して洪水蛇行流の実態を解明した。
- 実験水路の流れとの共通性を実証し、水路実験による砂礫堆研究の重要性が明らかになった。

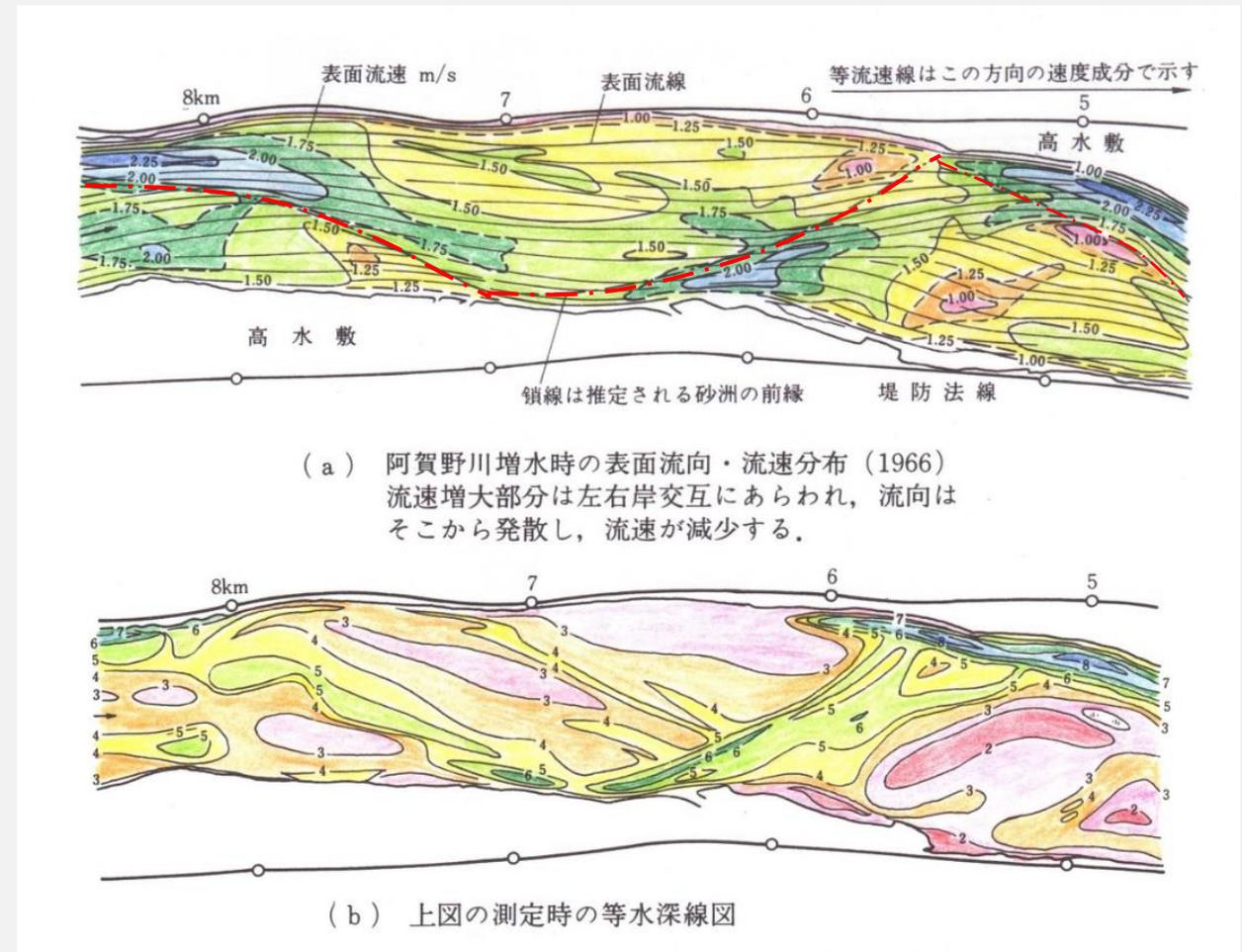


図-6 阿賀野川洪水時の水流蛇行と砂礫堆形成

昭和41年洪水流表面の航空写真画像をもとに、木下博士の指導に基づいて写真測量の技法を駆使して計測された。(原図は木下良作博士文献8)

蛇行河道における砂礫堆と低水流路の安定化

- 直線水路において砂礫堆はその配置と形状を保持したまま下流へ移動する。
- 河道が強く屈曲した区間があっても1カ所だけでは砂礫堆の移動を制御できない。
- 蛇行河道区間で、砂礫堆の移動が抑えられ安定みお筋が得られる場合がある。
- 蛇行河道でも蛇行角度が小さい場合には移動を抑えることができない。その境界を解明することが大きな課題であった。



1961年地理院撮影空中写真の合成 (MKT614-C8-16, C9-18,20,21)

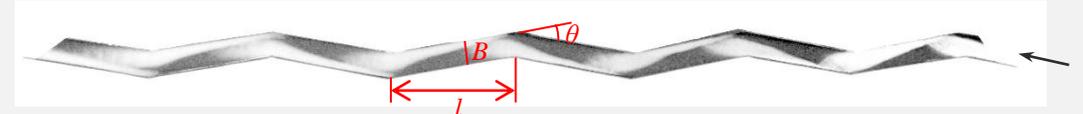


2010年地理院撮影空中写真の合成 (CKT20101-C18-17,18, C19-18,20,21,23)

図-7 蛇行河道における砂礫堆と低水流路の安定化
利根川 (群馬県玉村町付近) の蛇行河道区間における約40年間の比較

蛇行水路における砂礫堆の移動と停止の限界角度

- 木下・三輪は、多様な蛇行波長と蛇行角を組み合わせた水路において、砂礫堆の移動と停止の限界条件を解明した。
- 1本の水路においては蛇行波長と蛇行角を一定にし、一つの蛇行波長における限界蛇行角を追究した。波長の長い水路ほど、小さい蛇行角で砂礫堆の移動を抑えることができる。
- 常流の場合や水路幅を広げた場合、屈曲部に丸みを与えた場合など、各種の条件で追実験を行い限界曲線に大きな違いがないことが確認されている。
- 蛇行水路の平面形状因子だけで境界が決まるという画期的な結果が得られ、河道計画に活用できる道が開かれた。



B : 水路幅, l : 蛇行水路半波長, θ : 屈折蛇行角

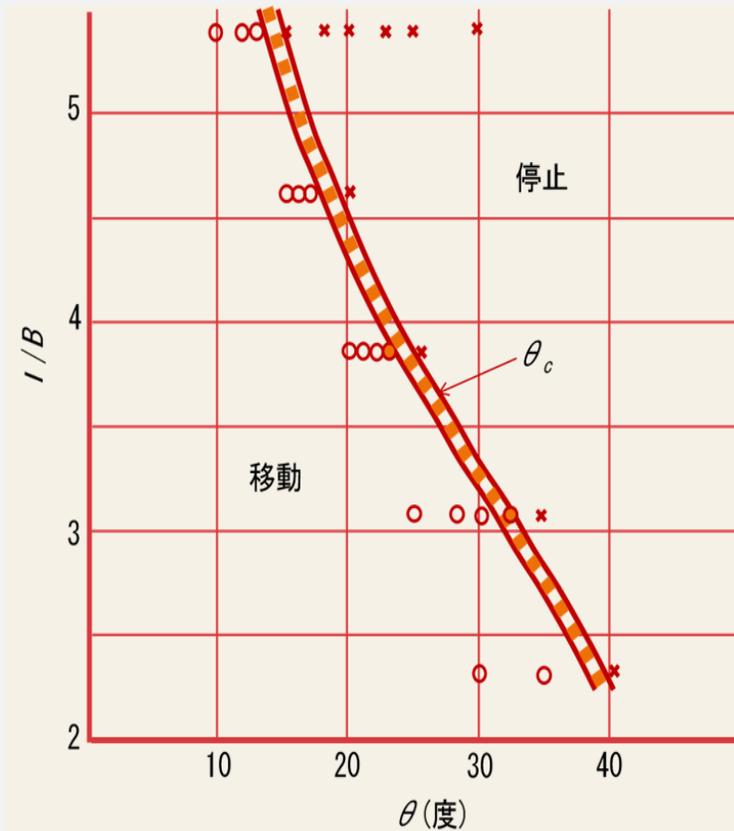
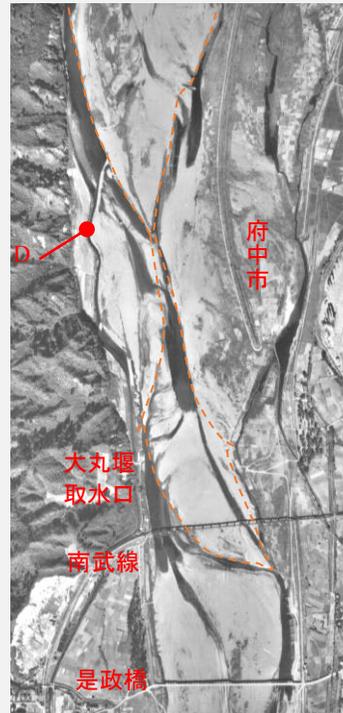


図-8 蛇行実験水路における砂礫堆の移動と停止の限界曲線
(木下・三輪, 1974)

水路幅13cm, 蛇行半波長30~70cm (10cmおき), 水路床勾配1/50, 流量0.5L/s, 水路床砂平均粒径1.24mm

複列砂礫堆の形成と 網状流路

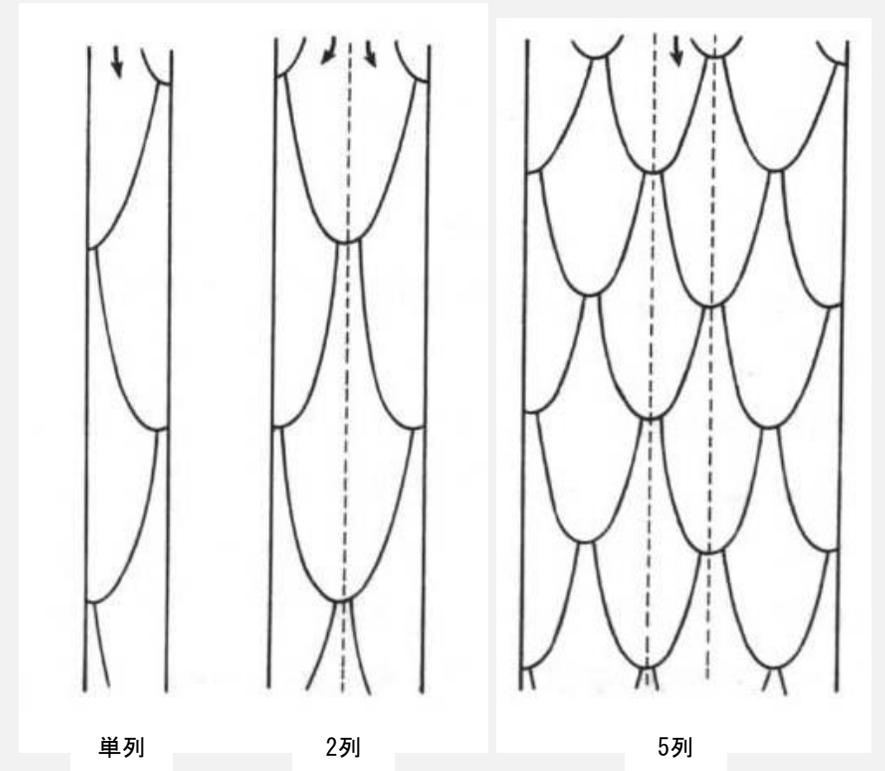
- 上下流に連結した砂礫堆は単列砂礫堆と呼ばれる。
- 単列砂礫堆が左右に折り返した状態で並列するのが2列砂礫堆である。みお筋は左右に分かれた後、河道中央に戻ってきて8の字のような流れ方をする。
- 扇状地河道で河幅が広がると分流・合流を繰り返す網状流路になる。一見乱雑な流路に見えるが、多数列の砂礫堆が形成された状態である。



多摩川の2列砂礫堆形成
94M388米軍撮影1947-8-1

----- 砂礫堆前縁線

D: 取水のための砂利仮堰
と掘削導水路



単列

2列

5列

図-9 横断方向に並列した複列砂礫堆の形成

自然取水において発生する問題

● 砂礫堆の移動による取水口の閉塞

- ▶ 淀川水系木津川の岩田揚水機取水口において、2018年10月洪水により砂礫堆が下流に移動して取水口が閉塞してしまつた。

● 河床低下による取水水位低下

- ▶ 木津川では河道掘削などによって河川水位が低下し、必要取水量が得られなくなった。ほとんどの取水口に揚水ポンプが設置されている。

● 山間部河道出口付近の淵からの取水

- ▶ 扇状地河道区間では、網状流路でみお筋変動が激しい。山間部出口付近のみお筋が安定した地点で取水し、長大な連絡水路を建設する事例も多い。



— 2017年洪水後の砂礫堆前縁線

Google Earth
2018/04/13 画像取得



← 2018年出水による砂礫堆先端の移動

Google Earth
2019/01/30 画像取得

図-10 岩田揚水機取水口（淀川水系木津川，京都府八幡市）における砂礫堆先端移動による取水口閉塞
2018年出水による砂礫堆先端の移動状況

固定堰の目的と砂礫堆形成との関係

- 自然取水の場合には，河川流量が減少して取水水位が低下すると所要流量が取水できない。堰を設けることで取水水位を維持する。
- 堰や床止め工が設置されても砂礫堆は連続して形成され，下流への移動も継続する。
- 夢前川の事例では，床止め工の下流河床が全体的に洗掘されていることからわかるように，床止め工の上下流河床に段差が付いている。それにもかかわらず，砂礫堆の形状は連続し移動も継続する。
- 砂礫堆の移動によって取水口が閉塞するトラブルも発生する。

堰兼用床止め工①
左岸取水

夢前橋

床止め工

寄洲
下流に発達中

堰兼用床止め工②
右岸取水

床止め工

低水流路



図-11 床止め工が設置された河川における砂礫堆の形成
夢前川（兵庫県姫路市）Google Earth2012/8/9画像取得

古来の斜め堰と砂礫堆形状との関係

—筑後川・山田堰—

- 古来の堰の多くは取水口から斜め上流方向に長く延ばした「斜め堰」であった。
- 斜め堰は、淵の深みを避け河床が浅くなった瀬を堰き止めて取水口に導く。洪水時には高流速域を外した位置に堰があるので、破壊されにくいという利点も持っている。
- アフガニスタンの水利開発を推進した故中村哲氏は、筑後川の山田堰をお手本にクナール川に取水堰を建設した。
- 山田堰は、河道の蛇行形状によって位置の安定化した砂礫堆上に設置されている。創設以来、約200年にわたってこの利点を持ち続けているので、堰の原型を保って取水を続けられている。

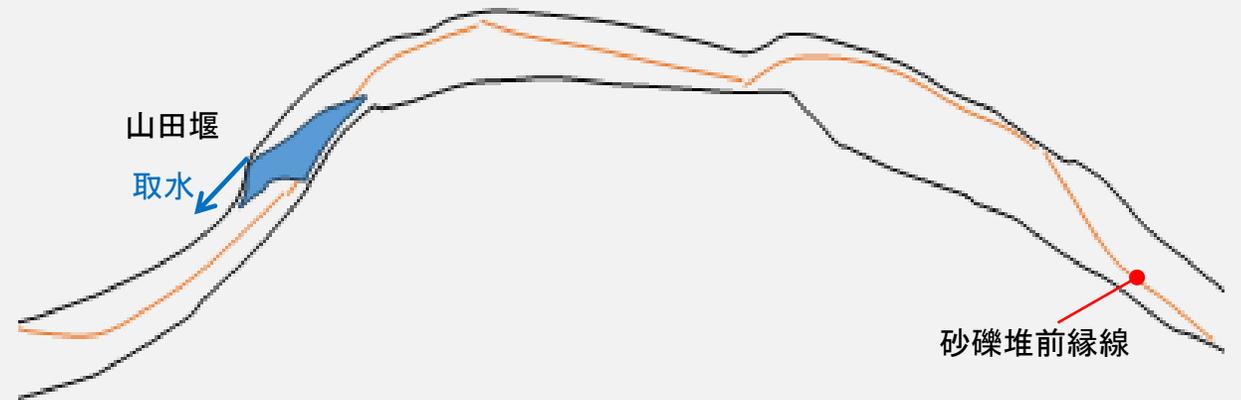


図-12 山田堰（福岡県筑後川）と砂礫堆との関係
Google Earth2020/11/13画像取得

安定した砂礫堆に設置された 複合堰（一部可動堰）の利点 —紀ノ川・小田井堰—

- 固定堰は淵部分を堰き止めるので下流河床が洗掘され河川災害が発生する。
- 複合堰は淵部に可動堰を設け洪水時にゲートを開放するので，洪水の流下阻害を起こさないという利点がある。
- 砂礫堆の位置が安定した地点で，淵部に可動堰，寄洲部には固定堰という配置にしておけば，安定した取水が可能になる。



図-13 小田井堰（和歌山県紀ノ川）
2006年9月21日 三輪撮影

全面可動堰における可動堰ゲート 閉鎖障害問題

- 河道計画において治水安全度を高めるためには、洪水の流下断面を拡大させる必要がある。河道掘削や砂利採取による河床低下は断面拡大につながる効果があるのに対し、堰などの構造物は河床高を固定化し流下断面拡大の障害になる。
- 昭和49年に起きた多摩川宿河原堰災害が決め手となって、昭和51年施行の「河川管理施設等構造令」によって全面可動堰が原則的な施設になった。
- 河川構造令の規定によって現況より低い将来計画河床高に可動堰戸当り部天端高を合わせることになり、改修工事の進捗が遅れている河川では、可動堰ゲート直下の堆砂によってゲート閉鎖トラブルが頻発し堰管理上の重要課題になっている。

恒常的な堆砂による可動堰 ゲートの閉鎖障害 — 荒川・森田頭首工 —

- 森田頭首工は、平成11年6月完成した後、洪水のたびに可動堰ゲート直下の堆砂によってゲート閉鎖に支障が生じている。
- 洪水吐ゲートの高さが1.7mであるのに対し、右写真の平成20年洪水後には1.5m厚の堆砂が見られている。
- 後述のゲートフラッシュを実行することはできず、河床掘削によって対応せざるを得ない。



図-14 森田頭首工における可動堰敷上堆砂によるゲート閉鎖不能
(那珂川水系荒川，栃木県那須烏山市，2008年11月4日三輪撮影)

全面可動堰建設時の河床掘削と現況河床との関係概要

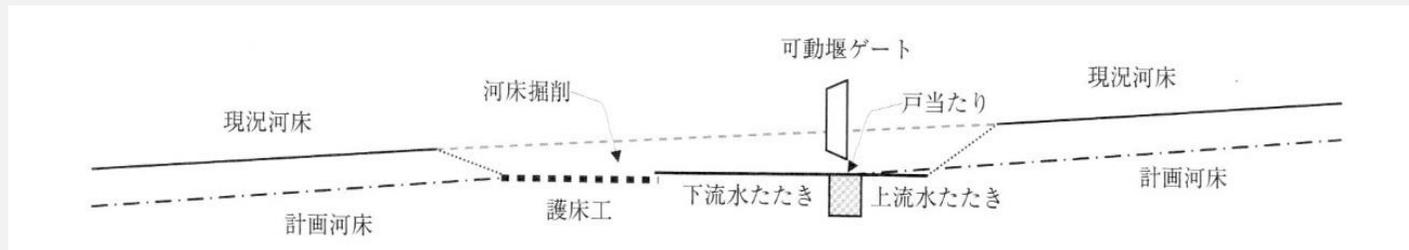


図-15 堰建設時河床掘削と現況河床との関係概略図 原図：三輪文献10)

- 河川整備基本方針においては、より大きな計画高水流量を定め洪水流下断面を拡大する計画になる場合が多い。
- 河川管理施設等構造令の規定によって、洪水流下断面内に堰の固定部を設けることはできないので、可動堰ゲート戸当り高を現況より低い計画河床高に合わせて堰上下流部河床を掘削し堰の運用が開始される。
- 洪水に見舞われると掘削区間に大量の砂礫が堆積し可動堰ゲート閉鎖の障害になる。

可動堰ゲートによる堆砂 フラッシュの試み

- 可動堰戸当たり上の堆砂によるゲート閉鎖障害に対して、ゲート流出流による堆砂フラッシュを試み、閉鎖できる場合がある。
- 北空知頭首工では恒常的に右岸側に安定した寄洲が存在する。平成23年9月の洪水後にはゲート敷上に3.5m厚の堆砂が発生し、粒径20cm程度の大きな石も見られていた。
- 堰管理者は、それまでにゲート閉鎖を可能にしてきた経験があったので、平成24年4月25日にゲートフラッシュ操作が実行された。
- 巧みに4門のゲートを操作してゲート流出流による砂礫フラッシュを継続して、ゲート閉鎖に成功した。
- 洪水吐ゲート扉高が4.9mと高いため、ゲート閉鎖中の上下流水位差を60cm程度に保つことができたことが成功の要因である。



図-16 北空知頭首工右岸側洪水吐3号ゲートにおける堆砂フラッシュ実行中

2012年4月25日 三輪撮影

寄洲部に位置する転倒堰上堆砂による起立不能問題—千種川・木津井堰—

- 建設費と維持管理コストを抑えるため、洪水吐ゲートを転倒堰あるいはゴム堰として建設される場合も多い。
- 千種川の木津井堰は、左カーブした河道区間に位置し、左岸側に安定した寄洲が存在する。転倒堰4門中左岸側の2門において起立不能障害が発生する。
- 恒常的な寄洲領域に、水平な高さの計画横断形に合わせて転倒堰を配置したことがトラブルの原因である。
- 上下流河床の掘削作業が繰り返し実行されるが、掘削範囲はせまいので転倒堰の上に堆砂する。



図-17 千種川木津井堰（兵庫県赤穂市）の転倒堰起立不能状況

Google Earth2017/11/06画像取得

久慈川・岩崎堰における堆砂障害

—2019年洪水—

- 全面可動堰における堆砂障害は、全国の多数の堰において発生しており、管理上の重大な問題である。
- 直近の令和元年洪水でも、久慈川の主要頭首工である岩崎堰と辰ノ口堰において、可動ゲートの閉鎖障害が発生した。
 - 岩崎堰は、右岸側にみお筋が寄り左岸側には寄洲が大きく広がっている。従来から寄洲部に当たる左岸よりの洪水吐ゲート直下の堆砂によってゲート閉鎖に支障が生じていた。
 - この洪水前にも堰上下流区間の河床掘削を実施し、ゲート閉鎖を可能にしていたが、洪水に見舞われ堰周辺に堆砂してトラブルが生じた。

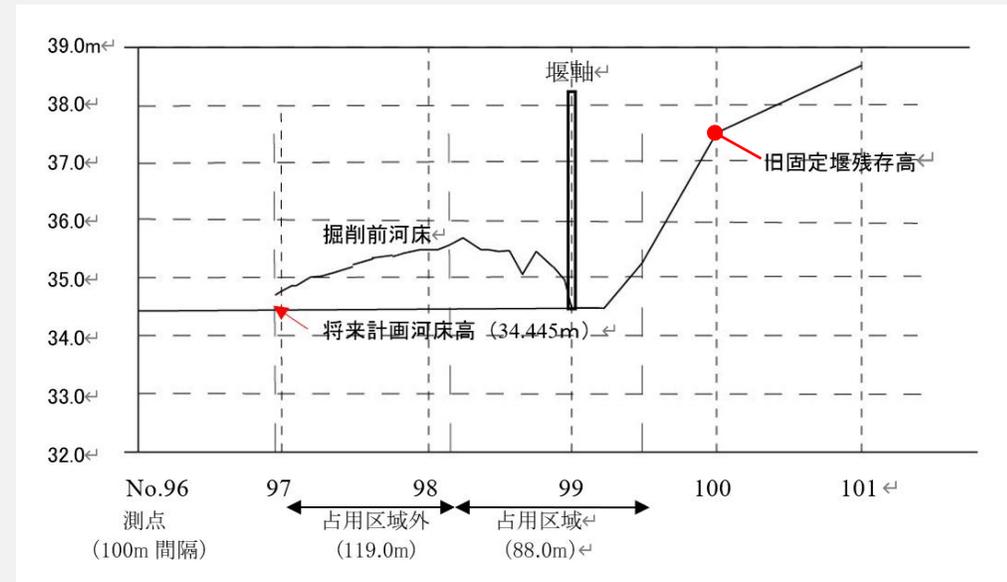


図-18 久慈川岩崎堰（茨城県常陸大宮市）土砂吐ゲート部の2019年洪水後堆砂

国土地理院2019/10/17撮影（防災・災害対応Img21834）

堆砂によるゲート閉鎖障害の軽減・解消方法①

- 河川改修工事の先行実施
 - 平成元年（1989年）に運用開始された加古川大堰（兵庫県加古川市）の建設に当たって、上流4km下流3kmの区間において改修計画に従って低水路河床掘削と護岸設置を実施した。
 - その後の洪水で掘削区間の上流部で堆砂が進行してきて、一部区間で河床掘削を実施しているが、可動堰ゲート閉鎖に支障をきたすことは無い。
- 上下流掘削区間の拡大
 - 渋海川頭首工（信濃川水系，新潟県）において平成21年に県単かん排事業で掘削区間を拡大実施した。頭首工占有区域の下流に120m延長したが，大きな効果はなく平成23年洪水によって掘削区間に大量の砂礫が堆積した。
- 定期的河床掘削の実施
 - 飯泉堰（神奈川県酒匂川）毎年2月海岸養浜事業とセットで実施されている。可動堰ゲート直下の堆砂厚を少しでも小さくすることで，洪水減水期の堆砂フラッシュ操作の成功につながっている。



補足図：渋海川頭首工堆砂縦断面図（H.21河床掘削前）
（新潟県信濃川水系渋海川，信濃川左岸土地改良区提供資料より）

ご清聴ありがとうございました。

- 本講演の詳細版「川から水を取り入れる」は、三輪のHPでダウンロードできます。ご参照ください。
 - 講演要旨集に記載のURLから入れます。
<https://miwahajime.jimdofree.com/>
 - あるいは「三輪河川」で検索すると出てきます。