

歴史的曲線斜め堰の線形に関する実験的研究

Experimental Study on the Shape of a Historical Curvilinear-Oblique Weir

大年邦雄*・松田誠祐**・篠 和夫**・清水敦史***

Kunio OHTOSHI, Seisuke MATSUDA, Kazuo SHINO and Atsushi SHIMIZU

abstract: The Kodo-Zeki that was constructed in Edo-era by Mr. Kenzan Nonaka is going to be replaced with a modern weir. A legend of "ito-nagashi" has been left because the old weir had a curvilinear-oblique shape. Such shape is quite unique among historical weirs. The aim of this study is to make clear the design concept of curvilinear-oblique weir through a hydraulic model experiment and to reevaluate the historical structures.

1. はじめに

今や「歴史的」という枕詞のつく頭首工は消滅の一途にあり、現存するものもいずれは現代の技術基準に準拠して可動堰に改築される運命にあるといえよう。高知県においても、藩政時代に野中兼山が築造した物部川の「山田堰」は1973年に一部を遺跡として残すかたちで既に撤去され、同じく兼山の築造による宿毛市松田川の「河戸堰」も旧堰は撤去されて近代的な可動堰が建設されつつある。撤去された両堰は、兼山独特の「糸流し工法」で築造されたと伝えられる利水目的の固定堰であり、営農や市民生活の生命線として長年にわたり地域の発展に寄与してきた。しかし、本来の取水機能は十分に果たしていながら治水上の要請によって姿を消したのである。

本研究で対象とする「歴史的頭首工」は、『構造材料が金属やコンクリートではなく木材や土石によって構成されており、何らかの近代的な（共通的な）技術指針などに基づかないで築造された歴史的に古い頭首工』と定義できる。したがって、明治期以前に築造されたものは全て該当するが、この定義は必ずしも明確なものではない。

歴史的頭首工は、その線形（平面形状）に基づいて、たとえば図1のように分類¹⁾されている。本研究で対象とするタイプHの「曲線斜め堰」は、Bの斜めタイプとGのように下流側に顕著な膨らみのあるタイプとの複合したものである。同図に示しているように、この種の堰は高知県においてのみみられる特殊なもので、全国的にみられる若干の曲率をもった直線形状に近い斜め堰（三輪²⁾は、これも含めて「湾曲斜め堰」と呼んだとは明確に区別されるべきものである。なお、Aタイプの堰は多数あるため所在地の図示は省略している。

本研究は、上述した曲線斜め堰の中から旧河戸堰を対象とし、その線形決定に係る技術的な根拠を水理模型実験を通じて検討し、『失われつつある農業土木の遺産』を再評価しようとするものである。

2. 糸流し工法の伝説

糸流し工法とは、「川の左右岸より一本の糸を張り、流水の作用を受けて実現する糸の形状に沿って堰を

key words: 歴史的頭首工, 曲線斜め堰, 糸流し工法, 水理模型実験

* 正会員 博(工) 高知大学農学部 南国市物部乙200

** 正会員 農 博 (同上)

*** 高知大学農学部学生 (同上)

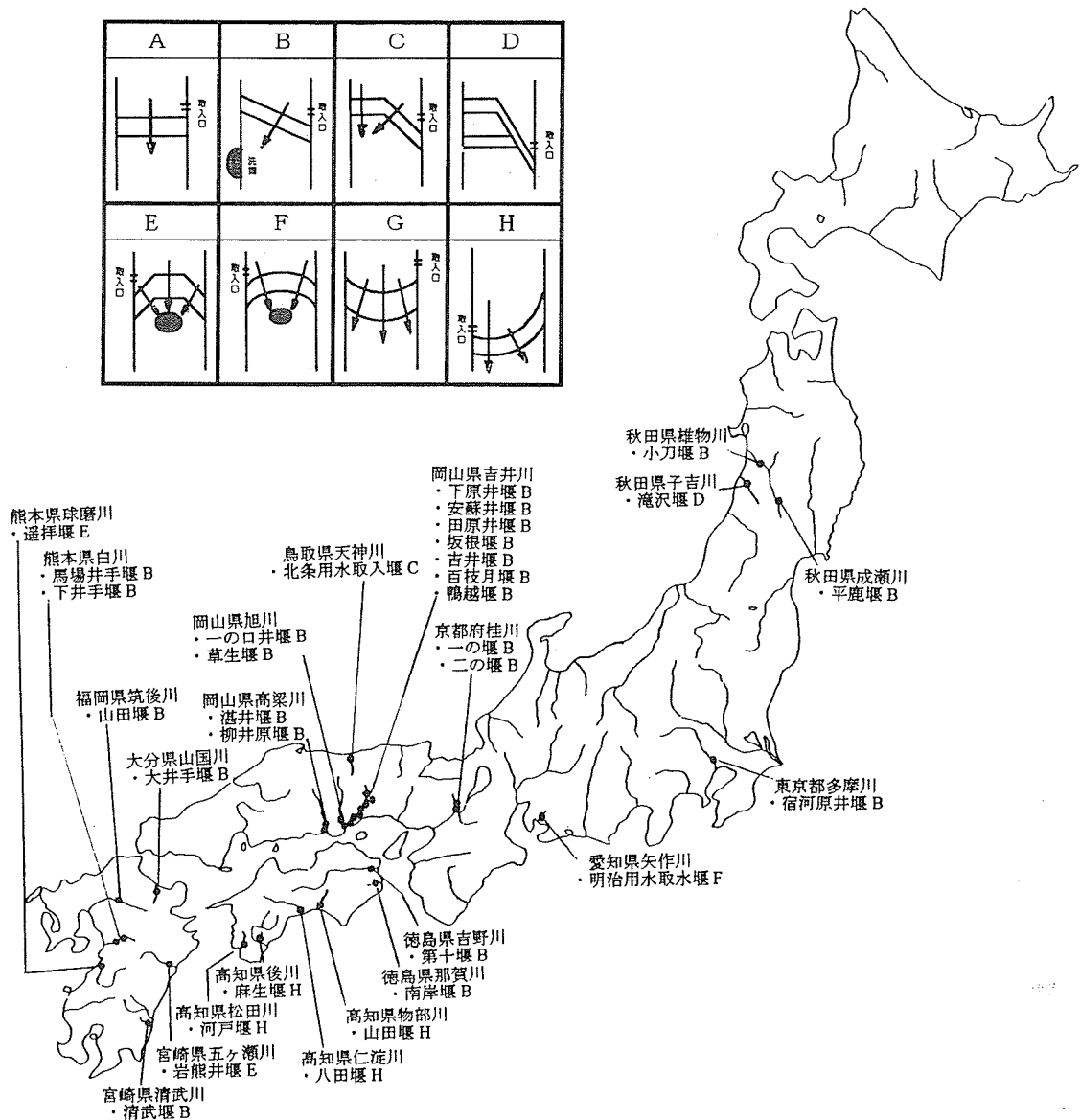


図1 歴史的頭首工の線形に基づく分類と所在地

築造する工法」といわれている。この工法によって築造されたと考えられている堰には、物部川の旧山田堰（著者は直線形状に近い斜め堰と考えている）、松田川の旧河戸堰（図2、写真1）、四万十川水系後川の麻生堰（図3、図4）などがある。確かにそれらは、あたかも糸を流したかのような線形となっている。

兼山の糸流し工法について残されている記述は、「野中兼山先生伝、細川潤次郎、明治18年」の漢文が最初のものであり、その後「偉人野中兼山、西内青藍、明治44年」の中でその和訳文が以下のように記述されている³⁾。

『兼山仁淀川を鎌田に堰き堤防を築くや、其灣曲の地點に於ける河流急にして、幾度石堤を竣工するも洪水の有る毎に崩壊して功を爲さず。一夕大に雨降るや、渠即ち簑笠して深夜微行獨り堤上に立つて水勢を視察す。偶ま一老爺あり共に起堤の事を語る、爺其兼山たることを知らず、渠に向つて曰く野中大夫世間多知智と號するも、今其起堤を見るに決して智者と稱するを得ず、兼山於是反問して曰く如何せば可なるや、爺曰く堤を起すに方り最も忌むは、水勢に逆ふ是なり。若し一條の長縄を泛べんか必ず流に従って下らん。而して其渠口に至つて如何に屈折するやを見、以て堤を起さば、必ず水勢と共に相得て功を爲さんと、兼山大に悦び厚く謝して去り、其言に従つて築堤するや自是後再び崩壊せざりしと云ふ。』

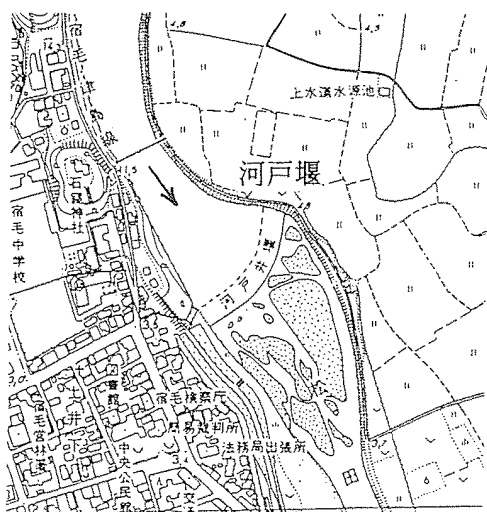


図2 河戸堰の立地場所(松田川)

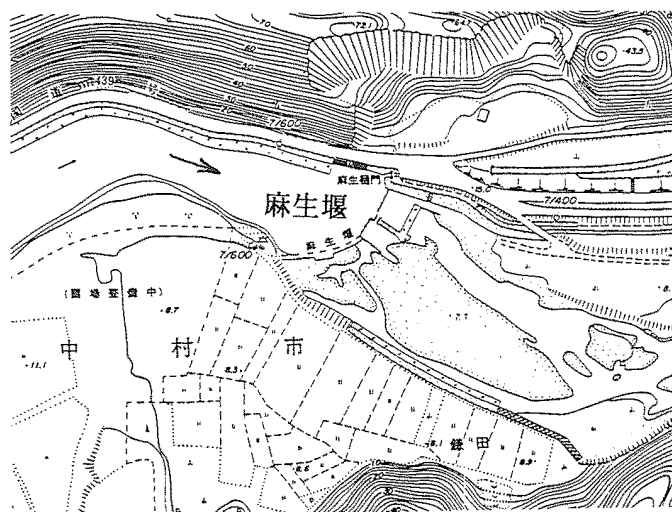


図3 麻生堰の立地場所(四万十川水系後川)

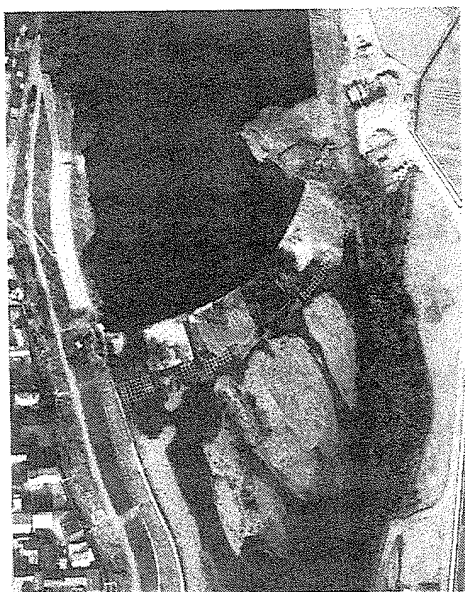


写真1 河戸堰の平面形状

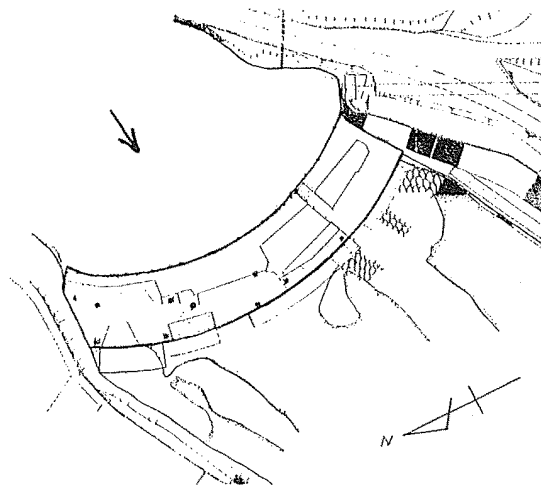


図4 麻生堰の平面形状

仁淀川の鎌田堰構築の時、老翁が「長縄を水に浮べ、長縄が渠口でどのように屈折するかを見て、その屈折の線に堤を築けば堤は壊れないものだ」と教えてくれた。兼山は早速それを実行したというのである。

糸流し工法についての伝承が記された史料は全て明治以降のもので、伝承の中には、八田堰であったり、春野の婆さんが登場したりしているが、伝承の骨子は上述の通りである。

ここで対象としている河戸堰は、1658年(万治元年)に築造されたとされている。しかし築堰に関する工学的技術史料は未だ発見されておらず、以後の改修を伝える史料も乏しい。「糸流し工法」の伝説は多くの謎とともに現在へと伝えられているのである。

3. 水理模型の概要および実験項目

模型は縮尺1/100の無ひずみフルード模型とし、現在進められている河川改修に着手する前の河道を対象として、旧河戸堰を挟む1.6km区間を表面モルタル仕上げで再現した。したがって、旧河戸堰が築造された当時の河道を厳密に再現しているとは限らないことを予め明記しておく。河床部分には粒径1.0mmの均一砂を敷き移動床とした。堰の堤体は石膏で作製している。

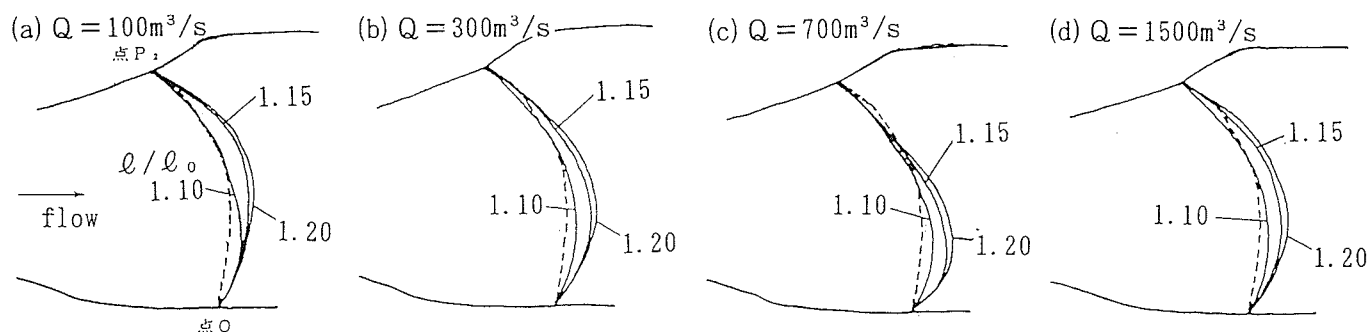


図5 糸流し工法の検証実験結果

実験目的および方法は以下の3種に分類される。

(1) 糸流し工法の検証実験

実際に築造された堰前縁線の左右端曲線距離と直線距離 l_0 との比は1.10であったので、3種の長さの糸($l/l_0=1.10, 1.15, 1.20$)を用い、流水の作用を受けて実現する糸の形状を水路上方より撮影した。この実験は、糸流しによる線形と実際に築造された堰の線形とがどの程度一致するのかを検証する目的で実施した。 $l/l_0=1.10$ の場合が実際の条件に対応する。なお、原型換算流量 $Q=100, 300, 700, 1500\text{ m}^3/\text{s}$ の各条件下で実験を行った。

(2) 流況計測実験

旧堰築造前と築造後における河川流況を把握するために、1 cm角の紙片およびおが屑をトレーサーとして種々の露光時間における水面流況を可視化した。この実験では、 $Q=100, 500, 1000\text{ m}^3/\text{s}$ の条件とした。

(3) 固定砂州形成実験

河道湾曲部内岸下流側に形成される固定砂州の発生・発達状況を確認する目的で、旧堰設置前の河道を対象として長時間通水し($Q=700\text{ m}^3/\text{s}$)、固定砂州の形成場所およびその形状を計測した。

4. 糸流し工法に関する検証実験結果

糸流しという手法によって堰の線形が実際に決定されたと断定するためには、以下に示す1)～3)の疑問に答える必要がある。

1) 左右岸の位置を何故そこにしたのか。

- ・糸を固定する両端の場所を如何なる根拠に基づいて決定したのか。

2) 糸の長さはどのようにして決定したのか。

- ・糸の長さによって線形は如何様にも変化する。糸の長さを決定した根拠は何なのか。

3) どのような流れの状態に対応する線形であるのか。

- ・糸を流したのは平水時なのか出水時なのか。河川流量によって糸の形状は異なることが予想される。

これらの疑問を全て解明することは極めて困難なことと思われる。本実験では、上記のうち3)の疑問点について検討することとした。

実験結果を図5に示している(図中の破線は実際に築造された堰の前縁形状である)。堰前縁形状は、河道右岸法線(取水口側)に対してほぼ直角の直線状であり、下流側に膨らみながら左岸に向かう形状であって、全体として「曲線斜め」となっている。一方、実験結果($l/l_0=1.10$)をみると、いずれの流量に対しても主流域(滞筋)に対応する右岸側の場所で大きく下流に膨らんでおり、実際の堰前縁形状との間には相違がある。本実験結果を素直にそのまま解釈すれば、「糸流し工法の設計思想で堰の線形が決定された」との考えには若干の無理があると判断される。

しかし、実験結果と実際の堰前縁形状との相違は顕著とはいえないこと、および前述したように本実験の

河道は旧河戸堰が築造された当時の河道を厳密に再現しているとは限らないことを勘案すると、実験結果と実際との相違を有意であると判定することは困難である。

5. 流況および固定砂州に関する実験結果

一例として堰築造前・後の河道における流況写真およびそれから読み取った流線パターンを示すと、それぞれ、写真2および図6のようである。堰築造前の河道では、流量の増大とともに流れの直進性が増し、左岸の拡幅部に顕著な剥離域が形成されている。一方、堰築造後では、堰上げ効果によって水位の増加と流速の低減があり、いずれの流量時においても流線が堰の前縁に直交するような流況を呈している。

この流線と堰前縁線との直交特性は、堰への流体力を分散・一様化しており、取水口付近に水衝りが集中せず、結果的に堰の安定性を向上させる効果をもたらしていると考えられる。

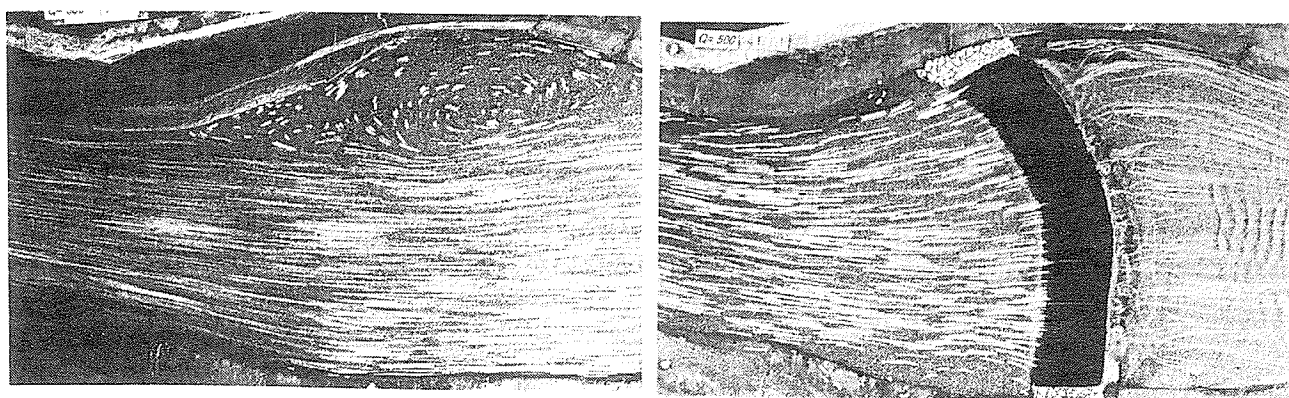


写真2 流況写真の一例 ($Q = 500\text{m}^3/\text{s}$, 左：旧堰設置前, 右：旧堰設置後)

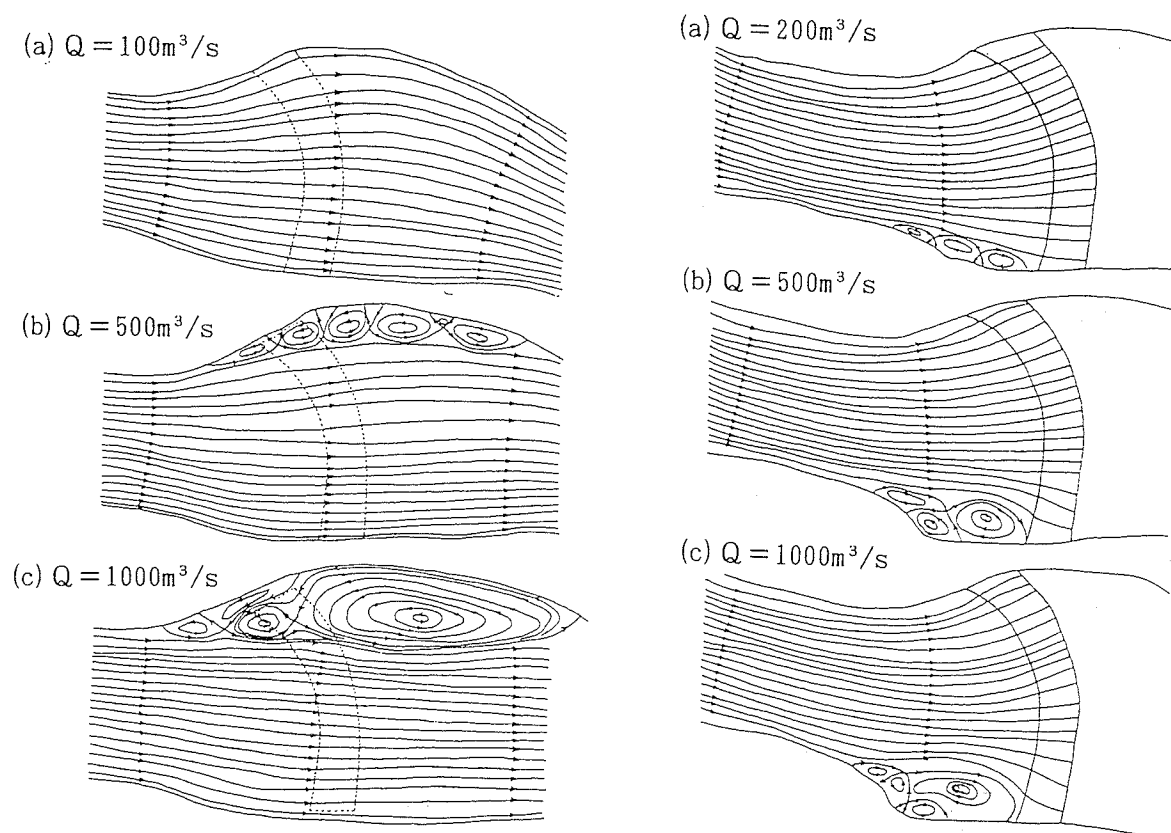


図6 流線パターン (左：旧堰設置前, 右：旧堰設置後)

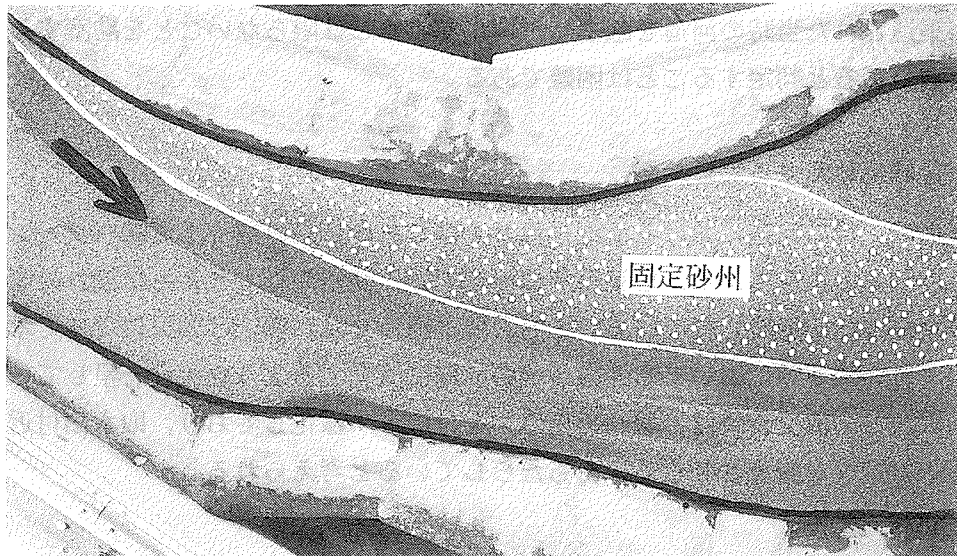


写真3 旧堰設置前の河道における固定砂州の形成状況

旧堰設置前の河道における固定砂州の形成状況を示したものが写真3である。湾曲部内岸下流側に砂州の形成が認められるが、その横方向への広がり小さく下流方向に細長い形状であった。この実験結果には河床形態に関する相似則の問題があり定量的な評価はできないが、旧堰築造ときに、場所の比較的安定した砂州が存在していたであろうことが推定できる。

6. 湾曲斜め堰および曲線斜め堰に関する従来の研究

本研究で対象とした「曲線斜め堰」は、若干の曲率をもった「直線に近い斜め堰」とは区別して取扱うべきものである。三輪²⁾は直線に近い斜め堰を「湾曲斜め堰」と呼び、砂礫堆との対応に着目して湾曲斜め堰の線形およびその水理特性を検討している。一方、曲線斜め堰の線形に関する検討はこれまで行われておらず、唯一河戸堰の発掘調査報告書³⁾に若干の推理が記述されているに過ぎない。

双方の堰の立地場所や線形などに関する従来の知見を要約すると次のようである。

(1) 三輪の見解²⁾ (直線に近い斜め堰に対する見解)

湾曲斜め堰は、位置の安定した砂礫堆を選んで、そのクレストに沿って設けられたものであって、次のような利点がある(図7参照)。

- ・洪水流が砂礫堆上で最も広がる位置にあるので、流れから受ける力は一様に小さい。
- ・河床の高まり部分を連ねてつくるので、同じせき上げ高を得るのに堰体高を低くできる。したがって、施工は容易であり、洪水流から受ける力はこの点からも小さい。
- ・上の2点より、堰直下流の河床洗掘は小さく、局所的な深掘れも生じにくい。
- ・取入れ口は、洪水の水当たりがこない堰の先端近くにつくるので安全である。
- ・堰をつくる以前の河床を変化させることが少ない。

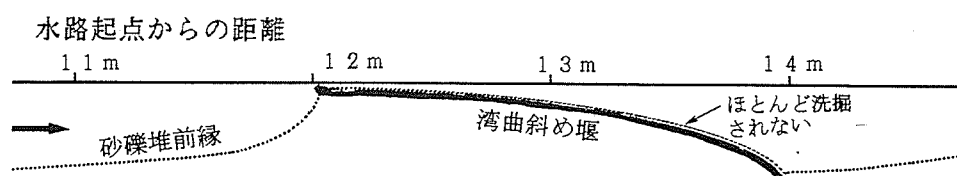


図7 湾曲斜め堰の線形説明図 (三輪²⁾より引用)

(2) 河戸堰発掘調査報告書の推理³⁾（本研究で対象とした曲線斜め堰に対する見解）

原文をそのまま引用すると次のようである。

『左岸に広がる砂州は当該地点では固定砂州といわれる安定した砂州を形成する地形であって、これを利用するのが都合がよいこと、宿毛市街との関係から決まる取入れ口の位置とから、自ずと基本的な線形は決まったと思われる。残されることは、如何に水勢に逆らずに堰を建てていくかということになるが、この左右岸のポイントと左岸の砂州および当該地点の流心が右岸寄りであるということから、流勢の弱い左岸から工事が始まったと考えよう。流れに直交して建てていくのは流れのエネルギーをまともに受けることになるから、下流側に傾けながら工事を進行していった。渇水がピークを迎えると、用意してあった固盤杵を右岸側からも一気に投入し、堰を完成させた。この結果が曲線斜め堰（原文では湾曲斜め堰）となった。』

取水地点と固定砂州との位置関係から堰の線形が定まったとの見解に対してはある程度同意できるが、流勢を避けて下流側に傾けながら工事を進行した結果が曲線斜めになったとの見解には同意できない。なぜなら、土木技術の稚拙な時代に、工事の進行方向を下流に傾けた程度で流勢を避けることができたとは考えにくいこと、また、流勢のある時期に工事を遂行したとは考えにくいからである。

曲線斜め堰の線形は、工事完了後の状況を想定して事前に決定されていたと考えるのが妥当であろう。

7. 曲線斜め堰の線形決定過程に関する推論

曲線斜め堰の典型である旧河戸堰および麻生堰は、図2および図3に示されているように、河道の湾曲部で片岸が拡幅した地点に立地しているという共通点をもっている。この立地特性と上述した旧河戸堰に関する水理模型実験の結果より、曲線斜め堰の線形決定過程（手順）に係る著者の推論を、図8の説明図を参照しながら要約すると次のようである。

(1) 河道の法線形状のみに基づく模擬流線の作図

- ・流線という概念が当時あったとは考えられないが、河道幅を等分に分割する模擬流線の作図は可能であろう。模型実験結果での流線パターンとこの模擬流線とはよく一致している。

(2) 取水地点の候補選択（P1～P3）

- ・取水後は開水路で受益地（宿毛城下町および近郊の田園地帯）に配水するため、取水地点は高所である必要がある。したがって、地形的にみて取水候補地点は限られていた、あるいは始めから決まっていたとも考えられる。

(3) 各候補取水地点から(1)の模擬流線に直交する曲線を作図（C1～C3）

- ・片岸が拡幅しているため、そのような曲線（堰の線形）は必然的に曲線斜めとなる。また、堰を越流する流れは堰の前縁線に直交することが実験で確かめられている。
- ・この流線と堰前縁線との直交特性は、堰への流体力を分散・一様化しており、取水口付近に水衝りが集中せず、結果的に堰の安定性を向上させる効果をもたらしているといえる。

(4) 総合的判断

- ・河床形態（左岸付近に形成されていたであろう固定砂州との位置関係）や流れの観察（拡幅による流速の低下および安定して取水できる渚筋に取水地点が対応していることなど）に基づいた総合的判断より、最終的に堰の線形を決定した（図8では曲線C2に対応）。

上述した過程に基づいて堰の線形が決定されたと推論した場合、その推論により決まる線形と実際に施工された堰の線形とは極めて良い一致を示している。

野中兼山（1615～1663）は水利・港湾事業に卓越した技量を発揮し、土佐藩家老としての約30年間に数々の堰や港を建設している。竣工年次のわかっている代表的な取水堰に限ってそれらを要約すると表1のようである。適切なものが入手できなかったため図や写真は省略するが、初期の宮古野堰や山田堰はどちらかと

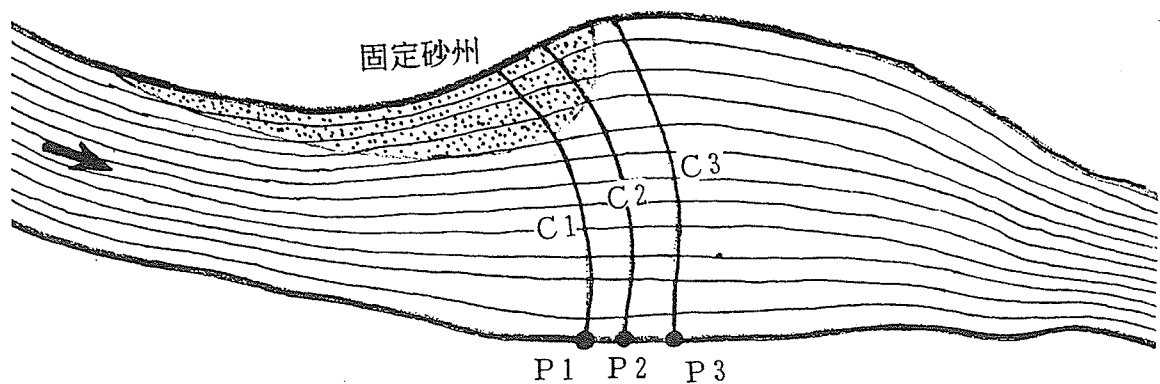


図8 曲線斜め堰の線形決定過程に関する説明図

いうと直線的な斜めである。八田堰は曲がってはいるが河戸堰ほどの曲線ではない。河戸堰や麻生堰のように、晩年の築造になるほど顕著な曲線状を呈するようになっている。兼山は、堰の築造を成し遂げるごとに「曲線堰とすることへの自信」を強めていったと考えられる。この点に関しては今後詳細に吟味してみたい。

8. おわりに

本研究は、農業土木の遺産ともいえる歴史的頭首工の中から、曲線斜め堰の典型である河戸堰を対象として、その線形決定に係る技術的な根拠を水理模型実験を通じて検討したものである。

まず、「曲線斜め堰」に伝説として付随する「糸流し工法」の真偽については、実験結果だけで判断すると、糸流しの設計思想で堰の平面形状が決定されたとの考えには若干の無理があった。しかし、前述した理由により、それは糸流し工法を単なる伝説として否定するものではない。築堰に関する技術的な史料が発見されておらず、以後の改修を伝える史料も乏しいことから、依然として謎のベールに包まれたままである。

次に、「曲線斜め堰」が「下流側に膨らみをもつ曲線であることの必然性」を合理的に説明する推論を示したが、その水理学的な特性（堰体の安定性、越流特性、河床形態への影響など）を検討するには至っていない。それについては今後の課題としたい。

本研究の主題である歴史的頭首工の再評価は、その構造物としての機能価値だけでなく、それが地域の風土や文化の形成に果たしてきた価値および古い構造物としての工学的技術価値といった種々の観点から行われるべきものであろう。本論文では、曲線斜め堰という特異な形状に対する設計思想を「考古水理学」ともいえる観点より検討したものであって、上述した再評価の一端を担っているといえよう。

参考文献

- 1) 山田堰記録保存調査委員会：山田堰，土佐山田町，1984.
- 2) 三輪式：砂レキ堆形成からみたわん曲斜めぜきの合法則性，農業土木学会論文集(76)，1978.
- 3) 高知県宿毛市教育委員会：河戸堰，1996.

表1 野中兼山築造による代表的な頭首工

建設年次	河川名	堰名
1638 (寛永15年)	吉野川	宮古野堰
1639 (寛永16年)	物部川	山田中井堰
1644 (正保1年)	物部川	野市上井堰
1645 (正保2年)	物部川	山田上井堰
1652 (承応1年)	吉野川	新井堰
1652 (承応1年)	仁淀川	八田堰
1655 (明暦1年)	仁淀川	鎌田堰
1656 (明暦2年)	物部川	父養寺堰
1658 (万治1年)	松田川	河戸堰
1661 (寛文1年)	後川	麻生堰(着工)
1663年7月28日 辞職		12月15日 死亡