

水制背後の局所的河床低下による わんど地形の形成

EMBAYED TOPOGRAPHY PROMOTED BY
LOCAL DEGRADATION OF RIVERBED BEHIND A GROIN

北村忠紀¹・山田淳夫²・辻本哲郎³

Tadanori KITAMURA, Atsuo YAMADA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工学) 名古屋大学講師 工学研究科地圏環境工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工修 (株) ハザマ

³正会員 工博 名古屋大学教授 工学研究科地圏環境工学専攻

Analyses of both aerial photographs and surveyed topography have clarified the development of embayed topography in the lower reach of the Kiso River. Longitudinal variation of roughness including vegetation is one of important factors for small-scale geomorphology in embayment, which may produce habitat diversity. The changing bed profile has been simulated using the numerical model that can describe the vertical 2-D flow pattern with the longitudinal roughness variation. The results have shown several patterns of the morphological process with different hydraulic conditions. Those have thereby explained the cause of the formation of small-scale embayed topography in the Kiso River.

Key Words : Embayment, groin, scour, vegetation, aerial photograph, numerical simulation

1. まえがき

木曽川下流域15km~25km区間には、航路確保、河岸防御を主目的としたケレップ水制群が設置されている。現在、この水制群領域は低水路の河床低下により高水敷化して、樹木群の旺盛な繁茂が観察される^{1)・2)}。また、場所によっては、水制背後が局所的に河床低下して、水制域内にわんど状の水域を形成し、その周辺では潮位変動による影響で干潟的環境をもたらすなど、独特の生物生息場を提供している。

従来より、水制等の河川構造物周辺では、構造物の存在に起因した複雑な流れによって局所的な深掘れが生じやすいことが知られている。不透過水制の場合、水制の先端部周辺と前面部に洗掘が生じる場合が多いようであり、水制そのものの安定性という観点から、経験的に洗掘量が見積もられたり³⁾、数値解析による検討もみられる⁴⁾。しかしながら、木曽川下流域の水制群における洗掘域は、水制の背後に存在しており、従来の研究にみられるような洗掘形態とは全く異なるものである。

本研究では、こうした水制背後の洗掘によるわんど地

形の形成過程について検討するものである。まず、航空写真と縦横断測量結果といった資料の分析から、水制域の経年的な変化を調べ、わんど形態のパターンと河床高さの変化の対応を調べる。これにより、わんど地形の形成には、水制域内での縦断的な粗度(植生)変化が重要な役割を果たしていることを示す。さらに、こうした縦断方向への粗度変化による河床変動を詳細に調べるため、水制域内で現象の横断方向変化を無視した鉛直2次元流れと河床変動の解析を行い、その結果をもとに実際のわんど地形形成過程との対応を議論する。

2. 資料分析によるわんど地形形成過程の推定

木曽川水制技術検討委員会による検討^{1)・2)}によれば、現在のわんど地形が出来上がる素因として、低水路の河床低下によって平水位も低下し、水制域内の河床が平水位に比べて相対的に高くなることによって高水敷化したことをあげている。図1に示す木曽川15km~25km区間の航空写真の経年変化からも、水制域内で陸域が増加し、わんど地形が変化していく様子がうかがわれた。本研究

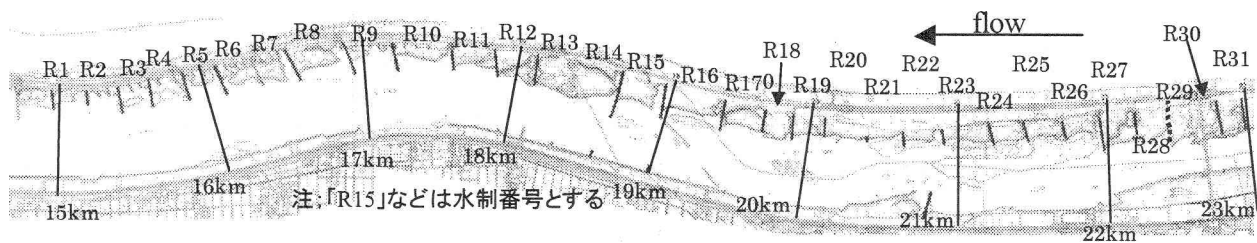


図1 木曽川下流水制群

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23	R24	R25	R26	R27	R28	R29	R30	R31
1963	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1975	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	5	3	3	2	4	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	3
1982	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	5	5	4	3	4	5	4	5	6	3	4	5	5	4	4	5	5	5	4	4
1987	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	5	5	4	3	4	5	5	5	6	3	4	5	5	5	4	5	5	5	5	4
1991	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	5	6	6	4	4	4	5	6	6	6	4	4	6	6	6	4	5	5	5	5	4
1995	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	5	6	6	4	4	4	5	6	5	6	4	5	6	6	6	4	5	5	5	5	4

図3 わんどパターンの経年変化

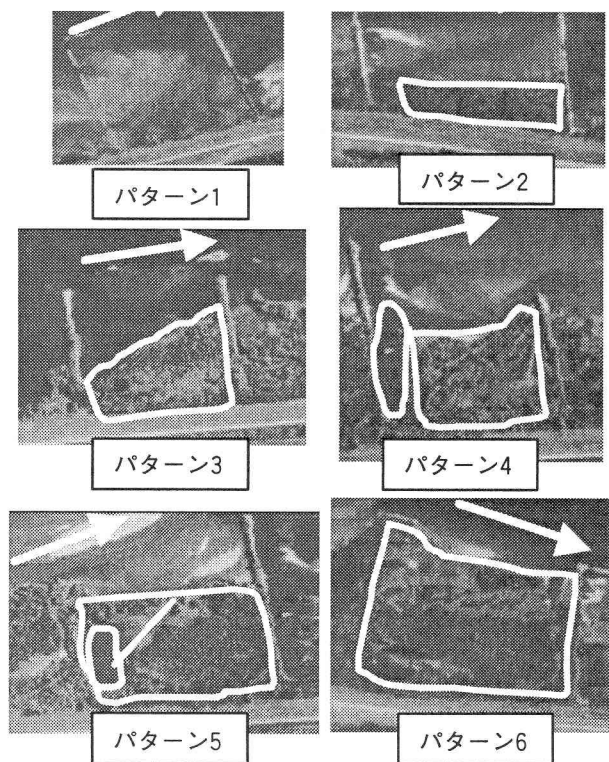


図2 わんどのパターン

では、こうした変化を水制間を一単位として図2に示す6つのパターンに分類した。分類方法は航空写真と現地踏査を参考にしており、それぞれ次のようである。パターン1：水制間領域ほぼすべてが水域、パターン2：河岸に沿って陸地化・樹林化、パターン3：後方の水制を底辺とした三角形あるいは台形状に陸地化・樹林化、パターン4：陸地化・樹林化領域が長方形であるが上流側水制背後は水域、パターン5：水制間全体が陸地化しているが、本川と連続するたまりが存在、パターン6：パターン5とほぼ同じであるが、たまりが本川と隔離している。

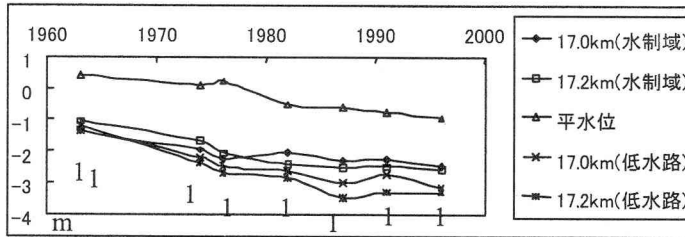
図3はこうして分類したわんど地形の河川縦断方向分布の経年変化を示したものである。図より、1963年にはいずれの水制間においてもほとんどが水域であったのが経年的にパターン1から6に発展している様子がわかる。この陸化はおおまかには上流から下流へ向かって進行しているが、パターン4～6間の変動もみられる。

このようなわんど地形の変化をより詳しく検討するために、異なるわんど形態の発展がみられるR9（17.0km付近）、R14（18.4km付近）、R23（21.2km付近）の3つの水制間を取り出し、図4に示すように上流側水制の背後と下流側水制に近い領域の河床高さの変化過程の違いをみる（なお、図中の河床高さは上流側水制の平均天端高からの相対高さとしている）。

R9においては、いずれの年代でも水制域内河床高は平水位よりも小さい。また、水制域内で上下流間の変化はそれほど大きくない。すなわち、水制背後の局所的河床低下は顕著ではない。これは、すぐ上流の水制域R10がパターン1もしくは2であることから、洪水時にはそこでの土砂輸送が激しく、水制をまたいだ流下方向への土砂輸送によってR9への流入土砂が大きくなり、水制をまたいだ流砂の連続性が保たれていることによるものと考えられる。

R14では、1976年以前は水制域内の上下流位置に関わらず経年的に河床低下が生じているが、1976年以降では上流側で洗掘、下流側で堆積傾向にある。これにより、下流側の河床高は平水位よりも大きくなっており、植生が繁茂しやすい状況になっている。すぐ上流の水制域R15では、1974年頃よりパターンが3に変化して植生の繁茂が激しく、洪水時におけるR15からR14への土砂流入が減少していたものと推定される。このことが、水制をまたいだ土砂の流下方向移動を遮断して、水制背後の洗掘をもたらしたのと考えられる。この洗掘域の河床高は平水位よりも小さく、したがって植生の進入がなく、わんど状の水域を保つことが可能となっている。

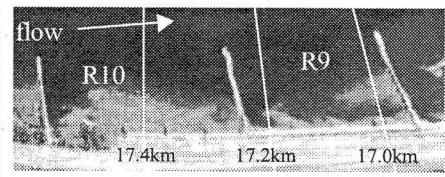
平均河床高の経年変化 その1 (R9, 17.0km~17.2km)



水制に対する平均河床高

すぐ上流側のワンド形態との比較

ワンド形態番号	1963	1974	1976	1982	1987	1991	1996
R9	1	1	1	1	1	1	1
R10	1	1	1	1	2	1	2

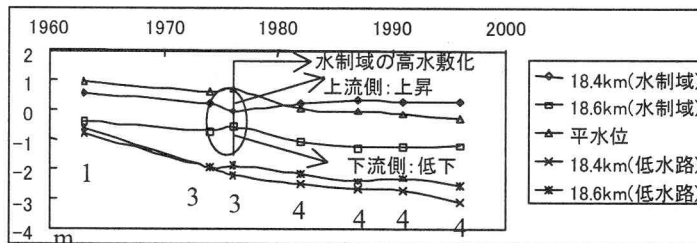


17.0km~17.4km

(1982)

R9の特徴は水制域と低水路の平均河床高の差が経年的に生じていないことである

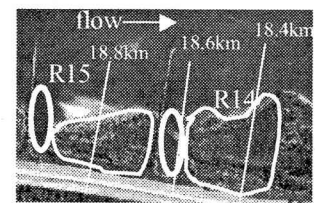
平均河床高の経年変化 その2 (R14, 18.4km~18.6km)



水制に対する河床高

すぐ上流側のワンド形態との比較

ワンド形態番号	1963	1974	1976	1982	1987	1991	1996
R14	1	3	3	4	4	4	4
R15	1	3	3	3	3	4	4

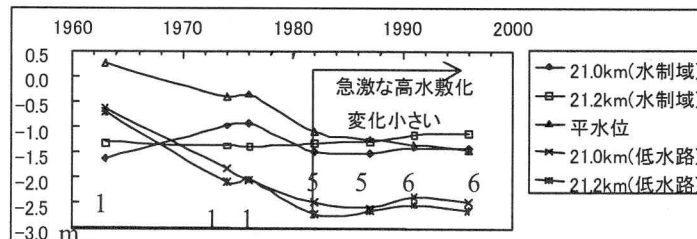


18.4km~18.8km

(1987)

R14の特徴は高水敷化の始まる1975以降、水制域の上流側で河床上昇、下流側で低下していることである

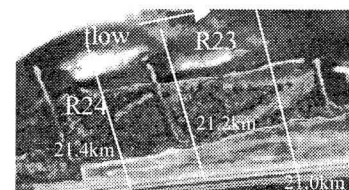
平均河床高の経年変化 その3 (R23, 21.0km~21.2km)



水制に対する河床高さ

すぐ上流側のワンド形態との比較

ワンド形態番号	1963	1974	1976	1982	1987	1991	1996
R23	1	1	1	5	5	6	6
R24	1	2	2	5	5	6	6



21.0km~21.4km

(1987)

R23の特徴は水制域内平均河床高が経年的に変化していないこと、1980年代以降急激に高水敷化したことである

図4 河床高さの変化とわんど形態

R23では、水制域内の上下流位置による河床高さの違いは小さく、したがって水制背後の河床低下は顕著ではない。この水制間では、1980年以前には、パターン1もしくは2であったのが、1980年以降、パターン3,4を経ずに急激にパターン5へと移行している。この変化が生じるのは、水制域河床高がほぼ平水位程度となった時期と対応している。このことから、すぐ上流の水制間R24が樹木に覆われて、R24からの流出土砂が減少すると同時に、R23のほとんどの領域が樹木に覆われてしまい、水

制背後の河床低下が生じる前に、河床全体が安定してしまったものと考えられる。

このように、わんど地形の形成過程には、水制をまたいだ上下流方向の粗度の変化がひとつの重要な要素となっているものと考えられる。特に、パターン4のような湾状の水域の形成には、わんど変遷過程においていったん水制背後の局所的河床低下が生じることが必要であると考えられる。図5に、こうしたわんど地形形成に関する仮説をまとめた。

各わんどパターン形成までの仮説

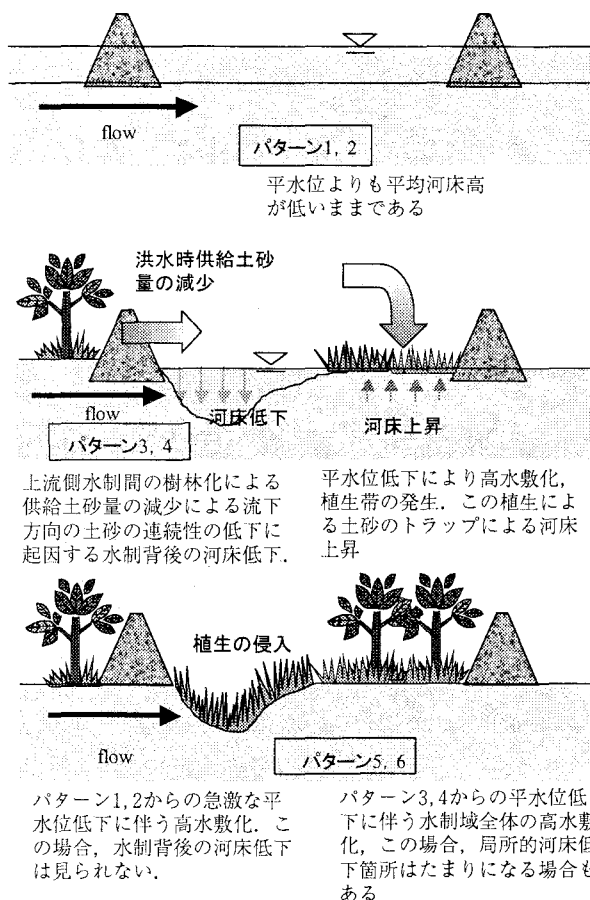


図5 わんど地形形成に関する仮説

3. 鉛直2次元流れと河床変動解析による水制背後の局所的河床低下に関する数値解析

本来、水制を伴う流れは3次元的存在であり、特に水制先端部を中心とした洗掘を議論する場合には、流れの3次元性をいかに取り扱うかが重要である。また、水制域と低水路域の流れの横断混合やそれに伴う土砂輸送を扱う場合には平面2次元的存在の議論が重要となる。しかしながら、2章での検討でも明らかになったように、本研究で議論したいわんど地形の形成には、水制をまたぐ流下方向の土砂の連続性に支配される水制背後の局所的河床低下が重要な要素となっている。そこで、本研究では水制域内で横断方向の流れの変化はとりあえず無視した鉛直2次元の流れの解析と河床変動解析を行い、2章で示した考えを検証していく。

図6に示されるような1水制間を計算領域とし、その中の植生の状態（植生密度、植生高、植生区間長）、上流からの土砂供給状態を変化させた場合の河床変動を計算する。

流れの基礎式は、Reynolds方程式と連続式であり、局所水深と摩擦速度に比例する渦動粘性係数を水深方向に

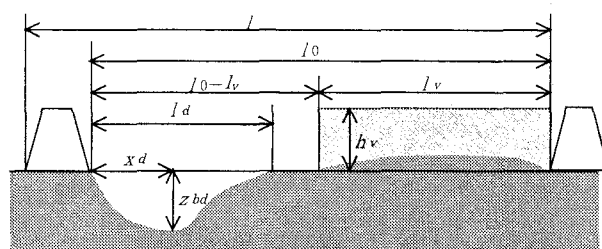


図6 計算条件概略図

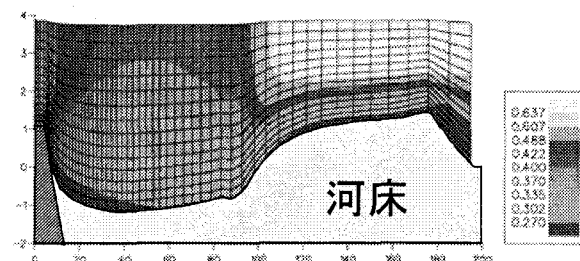


図7 計算格子例

一定として与えた。河床変動計算によって河床位置が変化してもそれに応じて格子を境界に合わせて変化させる境界適合格子（図7参照）によって基礎式を離散化し、SIMPLE法^{5), 6)}によって解いた。植生の効果は、形状抵抗項を運動方程式に付加することによって表現した⁷⁾。水面は変化しないものとして対称条件を課し、河床では所定の等価砂粗度に対する対数則を仮定した。流入部では所定の一樣流速を与えた。

流れ場の解から河床のせん断応力を得てそれをもとに平衡掃流砂量を求めて、流砂の連続式により微小時間内での河床変動量を得る。河床を変形させた後、これらを繰り返して、河床の変形挙動を調べた。なお、水制部では、河床変動が生じないものとして河床変動の計算を行っていない。流入部での流砂の条件は、1)上流側水制間が濃い植生で覆われた場合を想定した流入土砂量ゼロ、2)流出部の流砂量を流入土砂量とする周期境界の2パターンで計算を行った。なお、当初、浮遊砂による河床変動計算も行ったが、後述する計算条件では、ほとんどのケースで浮遊限界以下の条件となったため、ここでは掃流砂による河床変動を対象とする。

計算条件として、平均河床勾配 $h_0=1/4000$ 、水制間距離 $l=200\text{m}$ の平坦河床上に、高さ $h_g=1\text{m}$ 、天端長さ 5m 、斜面部の水平面からの角度 30° の水制が存在するものとした。河床砂礫は、木曽川対象地点においてBed-material loadとして流送される代表的な河床材料 0.5mm の中砂を対象とした。ただし、流れの計算の際には等価砂粗度を河床砂礫の粒径とはせず、小規模河床形態の効果も考慮して、山本³⁾を参考に抵抗係数 $C_f=0.005$ として逆算して与えた。

実際の洪水時には、水制域の水深は、低水路部の状況に大きく影響されて決定される（低水路部の水位によって決まるといってもよい）。このとき、水制域内での植

表1 計算条件表

	密度 $c_d\lambda$	植生高さ h_v (m)	植生帯長さ l_v (m)	水深 h (m)
薄いヨシ	0.3, 0.5	0.5	50~200	3~5
濃いヨシ		1.0		
薄いヤナギ		2.0		
濃いヤナギ		2.5		

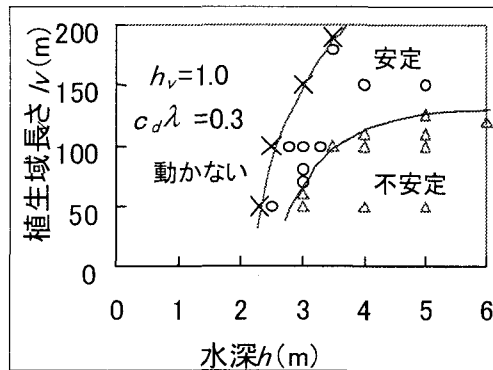


図8 河床変動領域区分

生や水制の状況によって水制域内の平均的な流れの抵抗が決まると、それに応じた流量が水制域内を流れることになる。低水路との流れの干渉をとりあえず無視して、水制域内での力のつりあいを考えることから、水制域内での水深 h が与えられた場合の水制域平均流速は次式で与えられる。

$$U = \sqrt{\frac{ghi_b}{\left(\frac{C_D h g}{2l} + C_f \frac{l-l_v}{l} + C_{fv} \frac{l_v}{l} \right)}} \quad (1)$$

ここで、 g ：重力加速度、 C_D ：水制の抗力係数、 l_v ：植生域の長さ、 C_{fv} ：植生を河床粗度とみなした場合の植生域における抵抗係数であり、辻本・北村⁷⁾による剛な水没植生に対する予測式によって与える。このように決定される平均流速を流れの計算の流入部条件として与える。

植生の条件としては、ヨシとヤナギを想定して、表1のように密度、植生高を与えた。

様々な条件を変えた計算結果から、次の3つの特徴的な状態が得られた。

- 1) 河床が全く移動しない場合：濃い植生の存在により、水制域全体の流速が小さくなり過ぎる場合に生じる。
- 2) 水制背後に安定した洗掘域が生じる場合（図7参照）：植生域が適度に存在する場合に生じる。
- 3) 河床が安定せずに変動し続ける場合：植生域が小さい、あるいは薄い植生が存在する場合に生じる。このパターンは、流入土砂の条件が周期境界条件の時にのみ生じる。

こうしたパターンを植生高 $h=1.0$ m、植生密度 $C_D\lambda=0.3$ m⁻¹のケースについて、水深—植生域長さ平面上で分類して示したのが図8である。安定した洗掘域が生じる条件が、パターン4が生じる条件となるものと考え

表2 想定パラメータ

	本川の抵抗係数 c_{dH}	密度 $c_d\lambda$ (m ⁻¹)	植生帯長さ l_v^* (m)	植生高さ h_v (m)
R9,1963	0.0015	0.0	0.0	0.0
R9,1974	0.0015	0.0	0.0	0.0
R9,1982	0.0015	0.0	0.0	0.0
R9,1996	0.0015	0.0	0.0	0.0
R14,1963	0.0015	0.0	0.0	0.0
R14,1974	0.0015	0.3	50.0	1.0
R14,1982	0.0015	0.5	150.0	2.5
R14,1996	0.0015	0.5	170.0	2.5
R23,1963	0.0015	0.0	0.0	0.0
R23,1974	0.0015	0.3	20.0	0.5
R23,1982	0.0015	0.5	135.0	2.0
R23,1996	0.0015	0.5	200.0	2.5

注) l_v^* は水制間距離を200mとした場合の植生帯の長さとした。

られるが、図より、安定した洗掘域が生じる領域は流入土砂条件が周期境界条件の場合にはそれほど大きくはない（ただし、流入土砂ゼロの場合には不安定領域も安定洗掘領域となる）。

4. わんどパターンの変化と数値解析結果の対応

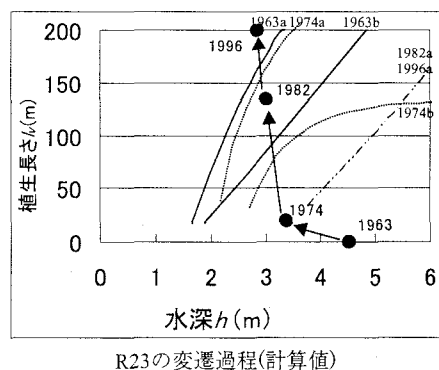
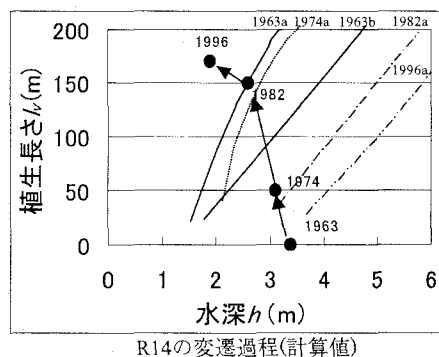
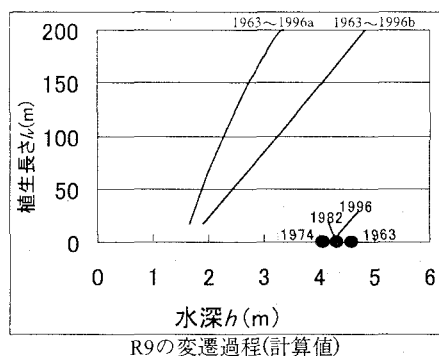
3章での解析結果を実際のわんどパターンの変化と対応させて考察する。2章で検討したR9, R14, R23の水制区間を対象として、各年代の航空写真から読みとれる水制域の状況（植生分布など）をもとに植生に関するパラメータを設定し、横断測量データとあわせて、準2次元の水理計算⁸⁾により、所定の流量における水制域における水深を求める。ここで、流量としては、過去40年間の平均年最大流量5871m³/sを用いる。想定したパラメータを表2に示す。

このとき、水深—植生域長さ平面上に、各年代毎の河床変動領域区分線を書き込み、さらに、実際の状況の変遷をプロットしたのが、図9である。

R9においては、植生に変化はなく、河床変動領域区分線は変化しない。また、実際の状況は常に不安定領域であり、これは安定した洗掘領域が生じていない現状と対応している。

R14においては、1974年以降、上流側のわんどパターンが3となるため、これ以降は上流からの給砂がゼロとみなして、不安定限界線を記入していない。1963年に不安定領域にあったものが、1974年にいったん安定洗掘領域に移行したのち、1982年以降は河床が動かない流域へと移行している。すなわち、いったん水制背後の局所的河床低下が生じる条件にあったことになり、実際のわんどパターン変化過程と対応している。

R23では、R14と同様の理由により1982年以降不安定領域線を記入していない。1974年以前は不安定領域にあるが、1982年にはいきなり河床が動かない領域に移行する。これは、いったん安定洗掘領域を経ず、したがって水制背後の水域を形成できなかったという実際のわんど



— 1963 a; 移動限界境界線
 - - - 1974 b; 安定限界境界線
 - · - · 1982
 - · - · - · 1996

図9 わんどパターンの変化
(数値解析結果と実際の対応)

パターン変化過程と一致している。

このような結果からみて、木曽川水制群に形成されたわんど地形の変遷に関する本研究の仮説はほぼ妥当なものであると判断される。

R14とR23におけるわんどパターンの違いをもたらしたのは水制域の高水敷化が一気に生じるか、じわじわ生じるかの違いにあるようである。これは、上流ほど低水路の河床低下の影響を受けて平水位が低くなりやすく、したがって速く高水敷化しやすいことから、上流でパターン5, 6が多く、下流でパターン3, 4が多い（最下流では現在でも高水敷化しておらず、パターン1, 2が多い）ことと対応している。しかし、より詳細に見ると、流下方向にパターン4~6間の周期的な変動がみられる。

これは、本研究では直接取り扱えなかった河道線形や水制設置角度による影響⁹⁾が、水制域内の高水敷化の過程においてなんらかの決定的な作用を及ぼしたのかもしれない。今後の検討課題である。

5. あとがき

本研究では、木曽川下流に設置された水制群に形成された特異なわんど地形の形成過程について、水制背後における局所的な河床低下という観点から、航空写真と縦横断面測量結果を用いた資料分析ならびに植生等による縦断粗度変化を考慮できる河床変動解析に基づいて検討した。その結果、水制背後が洗掘されて水域となるようなわんど地形が形成されるには、水制域の高水敷化が比較的ゆっくりと生じる必要があることがわかった。今後は、河道線形、水制設置角度等の影響に関する検討結果とも併せて、より総合的に考察していく必要がある。

謝辞：本研究の着想は、木曽川水制技術検討委員会（委員長：名古屋大学・辻本哲郎）による検討結果、ならびに土木学会河川懇談会共同研究「わんどの水理特性」（代表：四日市大学・木村一郎）における現地観測や研究会での議論をもとにしている。国土交通省木曽川下流工事事務所には貴重なデータを提供いただいた。名古屋大学・鷺見哲也氏には航空写真を解析するにあたって便宜をはかっていただいた。ここに、記して感謝申し上げます。

参考文献

- 財団法人国土開発技術研究センター編：平成12年第1回木曽川水制技術検討委員会資料，2000。
- 篠田孝・水谷直樹・松山康忠・辻本哲郎：ケレップ水制周辺の地形履歴から見たワンド形成過程と水辺環境の特性に関する一考察，河川技術論文集，Vol.7，2001（投稿中）。
- 山本晃一：日本の水制，山海堂，1996。
- 道上正規・檜谷治：水制周辺の平面2次元河床変動計算に関する研究，水工学論文集，第37巻，pp.487-494，1993。
- S.V.Patanker: Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corporation, 1980。
- J.F.Ferziger and M. Peric: Computational methods for fluid dynamics, Springer Verlag, 1996。
- 辻本哲郎・北村忠紀：柔軟な植生粗度を伴う流れに関する研究，土木学会論文集，No.607/II-45，pp.29-44,1998。
- 建設省河川局監修：建設省河川砂防技術基準（案）同解説・調査編，社団法人日本河川協会編・発行，山海堂，1999。
- 山下洋平・伊藤昭文・武田誠・松尾直規：木曽川ワンド群の堆積状況の支配的要因に関する研究，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，II-52,2001。

(2001. 4. 16 受付)