

木曽川感潮域に設置された水制群周辺の ワンド形成過程と河川環境に関する共同研究

COOPERATIVE RESEARCH ON MORPHOLOGICAL EVOLUTION AND
ENVIRONMENTAL FUNCTIONS OF EMBAYED TOPOGRAPHY
FORMED AROUND SPUR DIKES IN THE TIDAL AREA OF THE KISO RIVER

木村一郎¹・北村忠紀²・鷺見哲也³・武田誠⁴・鬼束幸樹⁵・庄建治朗⁶・大塚康司⁷
Ichiro KIMURA, Tadanori KITAMURA, Tetsuya SUMI, Makoto TAKEDA, Kouki ONITSUKA,
Kenjiro SHO and Koji OTSUKA

¹正会員 博(工) 四日市大学助教授 環境情報学部環境情報学科 (〒512-8512 三重県四日市市萱生町1200)

²正会員 博(工) (株) パシフィックコンサルタンツインターナショナル コンサルティング事業部
環境・水資源部 (〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5)

³正会員 博(工) 名古屋大学大学院助手 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)

⁴正会員 博(工) 中部大学講師 工学部土木工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

⁵正会員 博(工) 京都大学大学院助手 工学研究科環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁶正会員 修(工) 名古屋工業大学助手 システムマネジメント工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

⁷国土交通省中部地方整備局木曽川下流工事事務所 調査課長 (〒511-0862 三重県桑名市大字播磨字沢南81)

A series of spur-dikes were constructed in the Meiji Era to protect an embankment and maintain a ship route in the tidal area of the Kiso River. In recent years, the spur-dikes are revalued as environmental structures. The embayed topography called “wando”, which is formed around spur-dikes due to the sediment transport, provide important habitat for wide variety of flora and fauna as well as favorable scenery. A cooperative research on the wando has been carried out since 1999 by 6 researchers in universities and Ministry of Land Infrastructure and Transport. This paper presents the summary of main findings of our cooperative research focusing on two different aspects, namely, i) formation process and ii) current environmental functions.

Key Words : spur dikes, wando, tidal area, cooperative research, river environment

1. 緒言

木曽川下流域の背割堤付近には、主に明治期に設置された数十基ものケレップ水制が存在し、特異な景観を呈している。水制周辺にはワンド群が形成され、多様な生態系を育むなど、極めて良好な河川環境が出現し、特に補修等を必要とせずに長期間にわたり維持されている。近年各地で進められるようになった多自然型川づくりが未だ試行錯誤の域を脱せず、成功とはいえない例も多いことを考えると、木曽川ワンド群の形成過程、水理特性等を詳細かつ多角的に検討することは、今後の川づくりを考える上で有意義な指針を与えるものと予想される。このような考えにたち、1999年度より6人の研究者と建設省(現国土交通省)を構成員とする共同研究がスタートした。共同研究のメンバーが得意とする対象やツール

は様々であるが、これらを木曽川ワンドという一つのフィールドに結集することにより、現象を広く捉え、多角的に解明することを目指してきた。本報告は、これまで行ってきた共同研究の視点と得られた成果、および今後の課題等をまとめるものである。

2. 共同研究の概要

(1) 対象フィールドの概要

本共同研究が対象とする領域は、木曽川下流域の河口より15km~25km付近である(図1, 2)。この付近はかつて長良川、揖斐川と合わせて三川が複雑に合流していたが、明治期にデレイケらのもとで三川に分離された。木曽川と長良川の間は背割堤で区切られ、背割堤に沿って数十基のケレップ水制が築造されている。この付近は

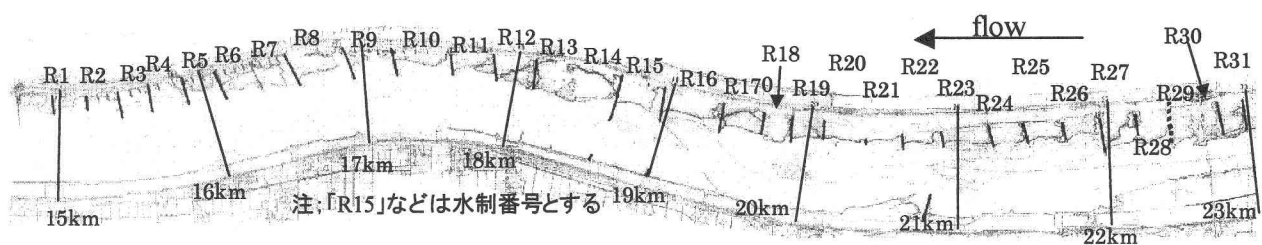


図1 研究対象区間の水制配置



図2 木曽川ワンドの様子 (22-23km付近)

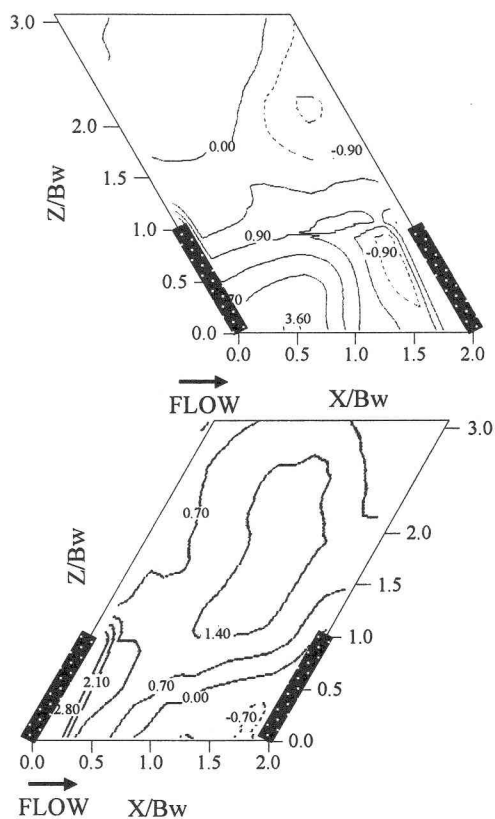


図3 斜め越流型水制の室内実験における河床コンター

26km地点の木曽川大堰までが感潮区間であり、潮汐による水位変動を受けるが、塩分遡上の影響が見られるのはおよそ17km地点付近までとされる¹⁾。また、背割堤を介して隣接する長良川の水位は河口堰の影響を受けて高く保たれ、木曽川との間には干潮時に2m前後の水位差を生じることから、これに起因する伏流水の挙動に留意する必要がある。水制間の土砂の堆積に着目すると、上流に行くほど堆積量が多い傾向が見られる。

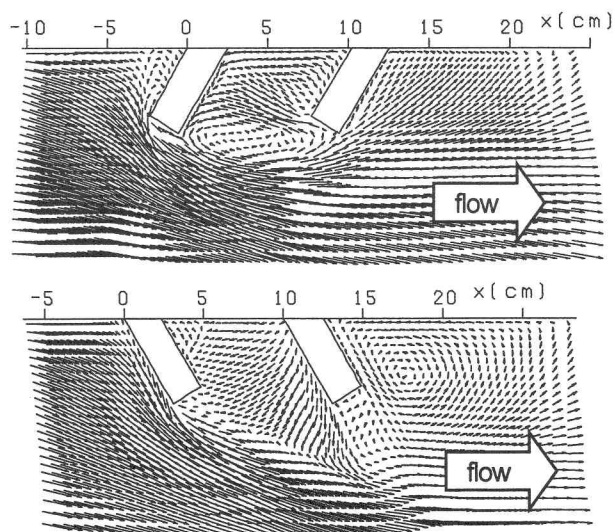


図4 斜め水制の底面付近の流れ(三次元数値解析)

本研究では約10kmにわたるワンド群全体を視野に入れながらも、18.8km地点と17km地点の2つのワンドを抽出し、重点的に観測を行っている。

(2) 研究の視点

本研究のテーマは次の2つに大別される。

テーマⅠ ワンド地形の形成、変遷過程の解明

テーマⅡ ワンド群の現在の環境水理的機能評価

テーマⅠは、水制が設置された明治期から現在、そして未来にかけての時間軸上でのワンドの変遷に視点をおく。一方、テーマⅡは時間を現在に限定してワンドの機能を評価するものである。いずれのテーマにも、感潮域という特殊性が大きな関わりをもつ。さらに、各テーマの具体的な研究課題を次のように設定した。

・テーマⅠについて

- I-1 河川線形因子と水制間土砂堆積
- I-2 水制背後の深掘れ部の成因
- I-3 ワンド内小規模流路の形成過程
- I-4 樹齢分布とワンド地形変遷

・テーマⅡについて

- II-1 ワンド周辺の三次元流況と水質
- II-2 ワンド周辺伏流水の挙動

これらのテーマは一応独立したものとして扱うが、相互に関連しあうものも少なくない。以下、テーマ毎にこれまで得られた研究成果の要約を述べる。

表1 ワンドパターンの経年変化 (ワンド番号は図1に対応)

	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	3	4	5	5	4	4	4	5	5	6	4	4
1987	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	5	5	4	3	4	5	5	5	6	3	4	5	5	5	4	5	5	6	5	4
1991	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	5	5	4	4	4	5	6	6	6	4	4	6	6	6	4	5	5	6	4	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	6	4	6

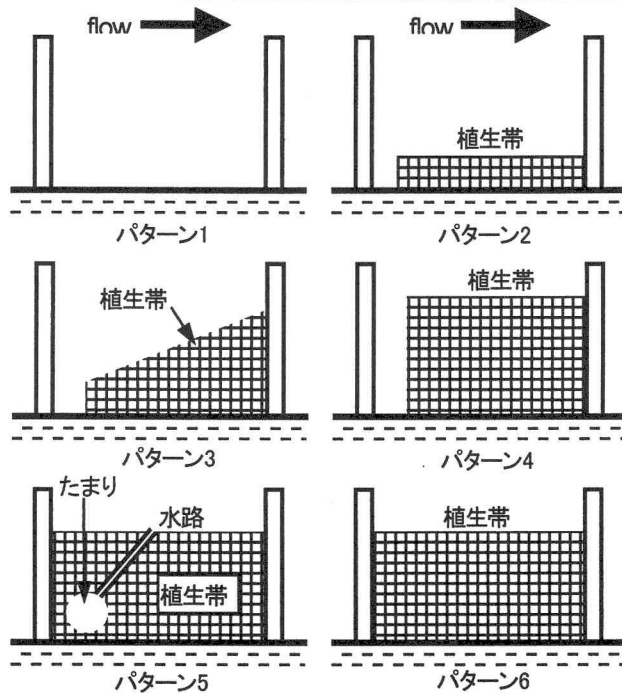


図5 木曽川ワンドパターンの分類

3. ワンド地形の形成、変遷過程 (テーマ I)

(1) 河川線形因子と水制間土砂堆積 (I-1) ^{2), 3), 5)}

ワンド形成過程を考える上で、①水制間の土砂堆積総量、②水制間の地形の多様性、の2つの着眼点からワンド地形を捕らえる必要がある。まず、①の堆積総量に着目すると、木曽川の数十のワンドにおける土砂堆積状況が均質なものではなく、地域毎に相当のばらつきがあることに気付く。そこで、河川線形因子と土砂堆積の影響を地形図と現地踏査により検討することとした。ここで、河川線形因子とは、水制と主流のなす角度、水制と主流の距離等、流れと水制の位置関係をマクロ的に捉えた各種パラメータを指している。特に、水制と主流のなす角度と水制間堆積量の関連性が指摘され、上流向き水制では下流向き水制に比べて水制間の土砂堆積が大きいという傾向が示された²⁾。この点について室内実験によりさらに検討を実施した³⁾。図3は越流型水制の室内実験における河床コンターであり、上流向き水制の方が水制間の堆積量が多い。直角水制の場合と比較すると、上流向き水制の堆積量は約1.8倍、下流向き水制の場合は約0.6倍となった。富永ら⁴⁾による越流型水制の実験結果 (PIV計測) には、掃流砂輸送を支配する底面近傍の流れが水制角度に大きく依存することが示されている。すなわち、

各ワンドパターン形成までの仮説

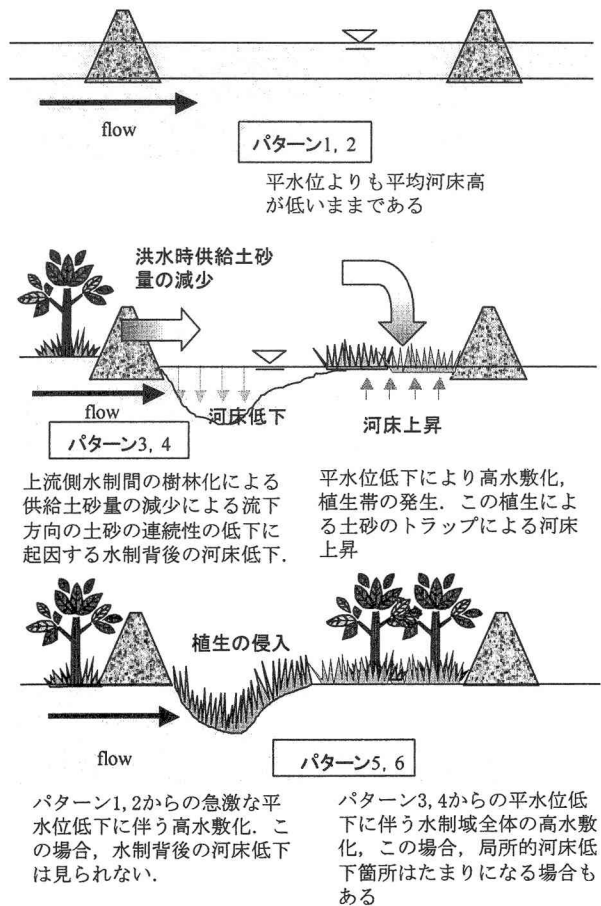


図6 各パターンのワンド地形形成に関するシナリオ

上流向き水制では水制奥部へ向かう流れが卓越し、下流向き水制では逆に水制間からの流出が卓越している。三次元数値解析⁵⁾により富永らの実験結果を再現したところ、定性的に一致する流れが再現された (図4)。これらの結果は、水制角度によりワンド内土砂量を制御できる可能性を示唆するものである。今後、現地スケールを考慮した更なる検討が必要である。

(2) 水制背後の深掘れ部の成因 (I-2) ^{6), 7)}

木曽川ワンドの特徴の一つは、水制背後に深掘れ部が存在することである。例えば、18.8km地点のワンドでは、水制直下流部に本川最深部よりも2m程度低い箇所が存在する。一般に不透水水制では水制先端周辺と前面洗掘が生じる場合が多いことを考慮すると、水制背後の深掘れは、木曽川特有のものといえよう。深掘れ部は地形の多様化の点では好ましい反面、過度の洗掘の進行に伴う夏季成層下での水質悪化が懸念される。

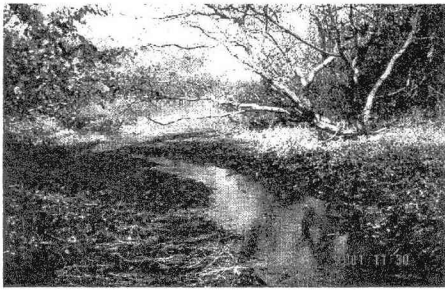


図7 水制間浸食流路の一例

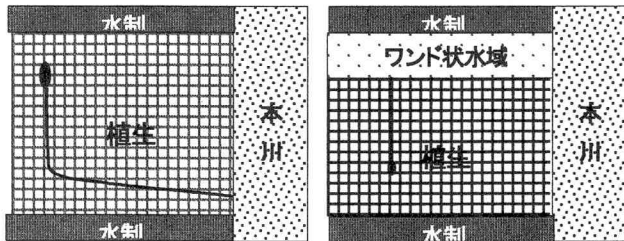


図8 侵食流路の2つのパターン

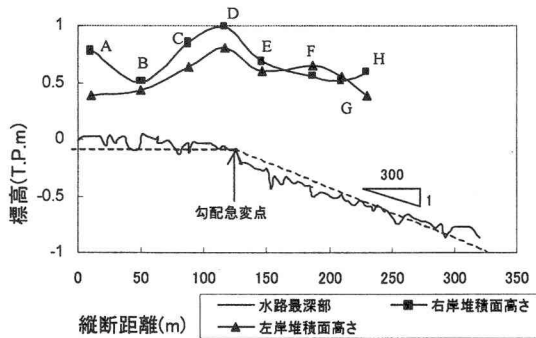


図9 侵食流路の縦断面形状の現地観測結果の一例

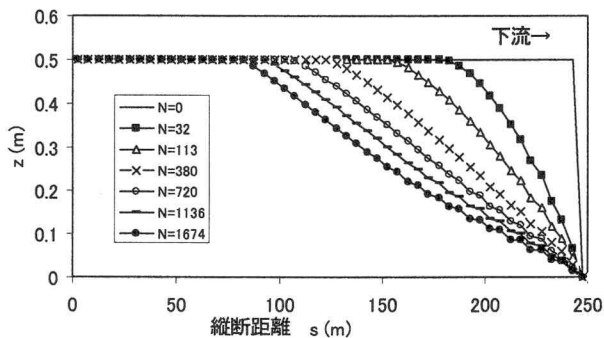


図10 水路侵食過程の数値計算結果 (N:潮汐回数)

ワンドの地形変遷を検討するため、航空写真と現地踏査をもとに、ワンドパターンを図5に示す6通りに分類した^{6,7)}。各パターンの特徴は次のようになる。

パターン1：水制間のほぼ全域が水域

パターン2：河岸に沿って陸地化

パターン3：下流側水制を底辺とする台形状に陸地化

パターン4：上流側水制背後のみに水域が存在

パターン5：ほぼ全域が陸地化、本川と接続するたまり

パターン6：ほぼ全域が陸地化、たまりが本川と隔離

表1に航空写真に基づく各ワンドの経年変化を示す。1963年には全てがパターン1であり、経年的にほぼパターン1→6の方向で陸地化している。この原因として、土砂採取、地盤沈下等により流心部河床が低下し、相対

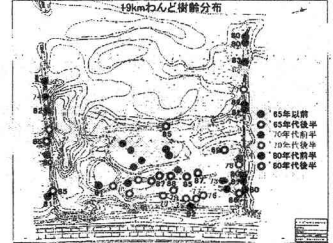
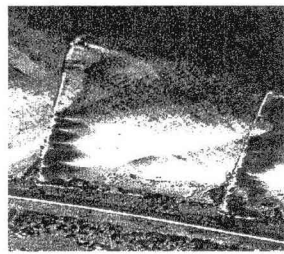


図11 航空写真と樹木分布の比較(上:1975, 下:1991)

的に水制域河床が上昇したことが挙げられる。なお、パターン変化は概ね上流から下流に向かって進行している。

このようなワンド地形の変遷過程には、水制をまたいだ上下流方向の粗度(植生)の変化が重要であると考えられる。そこで、横断方向の流れを無視した鉛直二次元モデルにより、河床変動を数値解析的に検証した。計算結果には水理条件に依存して、①河床が全く移動しない状態、②水制背後に安定した洗掘域が形成、③河床が絶えず変動する不安定状態、の3つの特徴的な状態が再現された。これらの結果を基に木曽川ワンドの各パターンの形成過程について、図6に示すような仮説を提案した^{6,7)}。

(3) ワンド内小規模流路の形成過程(I-3)⁸⁾

水制間のたまりと本川との間は、小規模な水路で接続されている場合が多い。図7にこのような水路の一例を示す。この小規模水路の存在は、水制間生息環境の多様化の一端を担っていると考えられる。

ワンド内流路の縦断面形状について、現地計測を行ったところ、河床勾配の急変点が存在すること、河床面が水路下流に向かって低下することなどが確認された(図9)。これは、水路下流側から侵食が進行してきた可能性を意味する。また、干潮時に本川水位の下がりきった時点でも水路内に流れが存在し、水位が最小となるときに最大流速が生じること、また、このときの流速は10-20cm/sで、限界掃流力を超えることなどが確認された⁸⁾。これは、干潮時に伏流水が水路内に湧出し、この湧出水流が水路形成の要因となっていることを示唆する。

水路の侵食機構を解明するため、伏流湧出水の挙動と浸食モデルを組み合わせた数値解析モデルにより検討を行った。伏流量は簡易的に飽和伏流水の平面二次元解析より評価した。図10に潮汐回数に伴う縦断面形状の変化を示す。侵食が下流から進み、勾配急変点が水路上流部に向かって移動していく様子がわかり、木曽川の観測結果と一致する。また、堆積層の透水係数が小さいほど侵

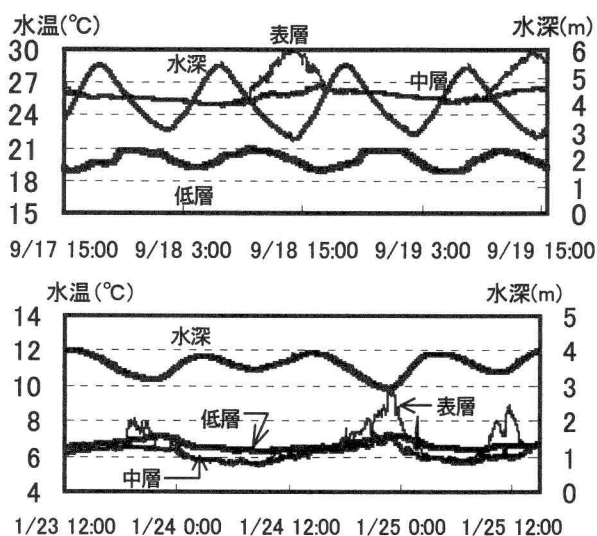


図12 水温の48時間観測(上:夏季, 下:冬季)

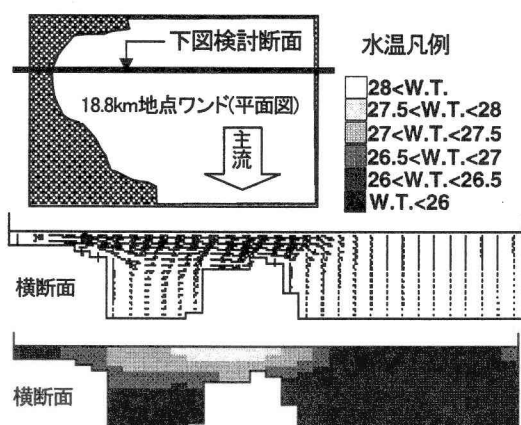


図13 下潮時の流況(上)と水温(下)の三次元解析結果

食されにくいこと、平均水位が低いほど侵食が速く進行し、侵食距離も伸びることなどが示された⁸⁾。

(4) 樹齢分布とワンド地形変遷 (I-4)⁹⁾

ワンド内の植生の繁茂は、生態系を考える上で重要であるだけでなく、ワンド地形形成にも密接に関係することは前述の通りである(テーマI-2)。また、樹齢とその地点の地形変遷とは相関があることは想像に難くなく、樹齢分布から陸地化の進行をある程度推測できると考えられる。そこで、18.8km地点を対象に生長錐を用いた樹齢調査を実施した。図11は1975年、及び1991年における樹木分布と航空写真を比較したものである。これらの図より、樹林化は下流側の水制付近から始まり次第に上流側へ進行する様子がわかり、ワンド形成のシナリオ(図6)と一致する結果が得られた。

4. ワンド群の現在の機能 (テーマII)

(1) ワンド周辺の三次元流況と水質 (II-1)^{10), 11)}

現在のワンドが周辺河川環境に及ぼす役割を理解する第一歩として、ワンド周辺の流れと水質について知る必要がある。このため、18.8km地点を対象に、ワンド内及

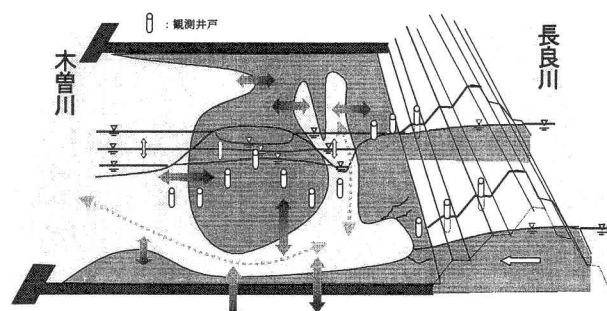


図14 ワンド周辺の伏流水挙動の模式図

び隣接本川の水質計測を継続して行ってきた。ワンド内の水質は本川と異なり、夏季には明確な成層状態が確認される。DO値についてみると、水制背後の深掘れ部(I-2参照)で夏季に4mg/l近くまで値が下がることを確認した。3年間の観測を通じて4mg/lを下回るDO値は一度も観測されず、現在のところ深刻な状況には至っていないが、ワンド地形や周辺環境の遷移等に伴う水質変化に対し、今後も注視していく必要がある。

木曽川ワンドは感潮域に位置し、平水時の水質交換を担うのは主に潮汐である。潮汐による水交換機構を解明するため、夏季と冬季にワンド内の数点で水温の48時間観測を実施した。図12(上)は夏季における18.8kmワンド中央付近の水温変化である。底面付近の水温が水面より7℃程度低く成層が発達している。興味深いのは変動周期の相違である。表層及び中層では日射の影響をうけて1日周期で変動しているのに対し、底面付近は潮汐周期で変動しており、干潮時に水温が下がる。これは、干潮時に周辺堆積土砂から低温の伏流水が湧出し、底面付近に溜まるためと考えられる。図12(下)は冬季における水温変動を同様に示したもので、成層はみられず、日射による水温上昇もほとんど生じていない。特筆すべきは干潮時の水温上昇である。特に24日深夜に急激な水温上昇が見られ、その影響は表層で最も大きい。この時の水位が観測中最も小さく、表流水より高温の伏流水が湧出し水面に浮上する影響と考えられる。

潮汐に伴う水質変動機構の解明に向けて、表流水と伏流水をカップリングした三次元数値解析モデルの構築を進めている^{10), 11)}。図13は夏季の下げ潮時の横断方向の流況と水温分布を示したもので、開口部付近のマウンドにトラップされた低温水塊がワンド内に残留する様子が再現されている。ただし、定量的な予測モデルの構築までは至っておらず、今後、現地調査との照合やテーマII-2(後述)とも組み合わせた更なる検討が必要である。

(2) ワンド周辺伏流水の挙動 (II-2)¹²⁾

ワンド周辺の伏流水の挙動を理解することは、テーマI, IIのいずれにおいても重要である点は前述の通りである。図14はワンド周辺の伏流水の挙動を模式的に示したもので、伏流水と表流水の交換、水制あるいは背割堤を横断する流れ等、種々移動形態がある。中でも表層水

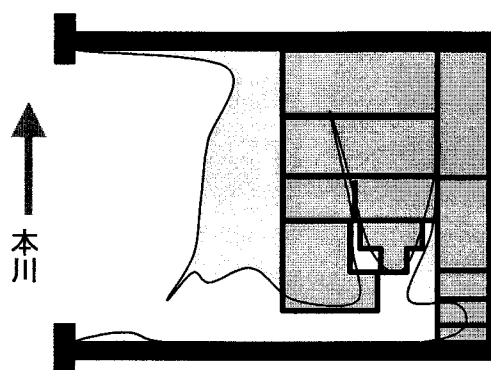


図15 陸域の単純化と短冊分け(1次元解析)

と伏流水の交換はワンドの水質を考える上で重要である。この点に着目して、18.8km地点のワンドを対象に、伏流水の検討を実施した。まず、現地において堆積層の土質構成を調査したところ、表層からシルト→砂→シルトとなっていることを確認した。次に、本川および2次流路と堆積域との境界を対象に、潮汐に伴う伏流水位の変化を調べたところ、表流水位変化の位相に比べて1~3時間程度の時間遅れが観察された。このような伏流水挙動を検討するため、現地スケールを考慮したいくつかの条件下で室内模型実験を実施し、実験と同条件で水平一次元数値解析を実施したところ、実験の伏流水挙動をほぼ再現できた。現地における伏流水交換量を定量的に評価するため、図15に示すように短冊状の領域分割を行い、各領域で水平一次元解析による伏流水交換量を求め、全領域の合計としてワンド全体の伏流水交換量を求めた。この結果、潮汐によるワンド内水交換に占める伏流水の寄与分は、およそ9%と見積もられた。

伏流水の水平方向の挙動を検討するには、平面二次元モデルが適している。ただし、平面二次元モデルでは堆積層の鉛直方向の土質構成を考慮することは困難で、全域を砂層として計算した。図16は下潮時の計算結果の一例で、水際部で一斉に伏流水が湧出する様子がわかる。平面二次元モデルによって見積もられた伏流水の水交換寄与分は7%で、一次元解析よりも小さい値となった。

5. 結 言

本報告は、1999~2001年度における河川懇談会共同研究「ワンドの水理と河川環境」における主要な成果をまとめたものである。感潮域という特殊性を考慮しつつ、ワンドの形成過程、現在のワンドの水理機能という2つの視点から多角的な検討を加えた結果、種々の新しい知見が得られたが、残された課題も少なくない。例えば、テーマⅠに関しては、潮汐や洪水規模といった外力の影響、水制の形状パラメータ等を更に整理することが重要で、これにより環境志向型水制設計のための一つの基礎資料が得られよう。テーマⅡに関しては、表流水と伏流水を一体化して扱い、定量的評価も可能な三次元数値解析モデルを構築することが望ましいといえよう。

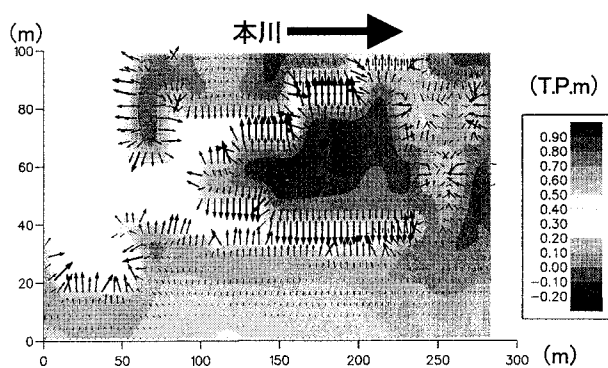


図16 下潮時の伏流挙動と水位コンター(2次元解析)

謝辞：本研究は国土交通省木曽川下流工事事務所調査課の絶大なるご支援のもとで遂行されました。また、名古屋大学辻本哲郎先生、中部大学松尾直規先生、大同工業大学久保田稔先生、名古屋工業大学富永晃宏先生の4名の先生方におかれましては、研究会にたびたびご参加いただき、多くのご助言を賜りました。ここに記して深甚なる謝意を表します。また、現地観測で共に汗を流した多くの学生諸君に対しても、心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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地形形成過程と水辺環境の特性に関する考察, 河川技術論文集, 第7巻, pp.333-338, 2001.
- 2) 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, 土木学会中部支部講演概要集, pp.237-238, 2001.
- 3) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 矢野勝士: 河床形状がわんど流れに及ぼす影響に関する研究, 水工学論文集, 第46巻, pp.559-564, 2002.
- 4) 富永晃宏, 井嶋康二, 中野義郎: 斜め越流型水制周辺の流れ構造のPIV解析, 水工学論文集, 第45巻, pp.379-384, 2001.
- 5) 木村一郎, 細田尚, 音田慎一郎: 斜め越流型水制周辺の三次元流況に関する数値解析, 第15回数値流体力学シンポジウム講演論文集(CD-ROM), pp.1-8, 2001.
- 6) 北村忠紀, 山田淳夫, 辻本哲郎: 水制背後の局所河床低下におけるわんど地形の形成, 河川技術論文集, 第7巻, pp.327-332, 2001.
- 7) 山田淳夫: 木曽川水制群のわんど地形形成に関する水理学的研究, 名古屋大学修士論文, 2001.
- 8) 金山晋吾: 感潮域河道内氾濫原における侵食流路形成に関する研究, 平成13年度名古屋大学修士論文, 2002.
- 9) 梅森裕: 樹木年輪による木曽川下流域わんどの形成過程の解明, 名古屋工業大学卒業論文, 2002.
- 10) 武田誠, 木村一郎, 松尾直規, 山崎美彦, 藤田晶子: 木曽川ワンドにおける水温変動とその数値解析モデルに関する研究, 水工学論文集, 第46巻, pp.1097-1102, 2002.
- 11) 藤田晶子, 山崎美彦: 木曽川ワンドにおける水温変動に関する研究, 中部大学平成13年度卒業研究, 2002.
- 12) 鷺津善之: 感潮域わんどにおける水域と周辺堆積域の水交換の定量評価に関する研究, 名古屋大学修士論文, 2002.

(2002. 4. 15 受付)