

城北ワンド群の水理環境に関する研究

CHARACTERISTICS OF HYDRAULIC BEHAVIOR OF SHIROKITA WANDO, THE YODO RIVER

大水 菜津子¹・中谷 貴史²・綾 史郎³

Natsuko OMIZU, Takashi NAKATANI and Shirou AYA

¹ 学生員 大阪工業大学大学院博士前期課程 工学研究科土木工学専攻 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

² 正会員 日本建設コンサルタント株式会社大阪支社 (〒553-003 大阪市福島区福島 7-20-1)

³ 正会員 博(工) 大阪工業大学 工学部土木工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

This paper investigated the flow behavior in wando, the Yodo River. Objectives of the study are to reveal the differences between the above characteristics in 1970's and those in 1990's, because the ecological features in wando was changed in the last 30 years, and the rehabilitation of the eco-system is the important and urgently resolved problem. The flows in wando, which was excited by the change of the water surface elevation of the Yodo River, was studied by the numerical method and successfully compared with those obtained in the field measurement in June 2000. The simulated results under the conditions in 1974 disclosed that the magnitude of the excited flow was large on and near the submerged groins when the river water surface elevation was changing but less at the center of wando. It was also disclosed that the flow driven by thermal effect was important between shallow wando and deep wando.

Key Words: river eco-system, wando, rehabilitation, restoration, flow regime

1. はじめに

淀川左岸下流 12km 付近に残る城北ワンド群は河川に隣接するが、河川とは少し異なった環境を有する故に、河川の生物相とともにそれとは異なった生物相が共存し、豊富な生物相を育んだ水域として知られている。また、イタセンバラの生存する水域としても著名であり、多自然型川づくりの一つのモデル事例として多くの本に紹介されている。しかし、著者らの近年の研究により城北ワンド群の近年の変貌は激しく、往時のものとはその環境も随分異なり、生息する生物群の変化にも関係していることが推測されている。このようなことから城北ワンド群を管理する国土交通省淀川工事事務所も新しい形のワンドの実験や河川水位の変動とワンドの水理との関係等を実証的に調べようとしている。

本研究ではワンドと淀川の流動と水交換の水理について数値解析的に研究を行った。水交換機構の可能性としては、1)浸透流、2)河川水位の変動に伴うワンドと河川の流出入、3)洪水時の河川流のワンドへの侵入や連行、4)洪水時の高

水敷の冠水による連行、4)熱密度流等が考えられる。本研究では平水時における流動に焦点をあて、1)、2)に対して、簡単なボックスモデルを連結して、ワンド群を表現し、淀川水位の変動に伴いワンド群内に生じる流れを明らかにした。さらに往時の淀川を模擬し、ワンド群内の流れについて検討した。4)については熱密度流の数値実験を行った。

2. 淀川と城北ワンド群

(1) 城北ワンド群の現在の形状

現在、通常「城北ワンド群」と呼ばれる水域は写真-1に示される、淀川左岸 11km~13km に広がる淀川低水路に隣接する恒常的に存在する水域である。水域はその成立に明らかなように堤防側から淀川に向かって建設された水制幹部(横工)により区分され、水位が幹部水制の天端を超えると連結され、水位が下がると水制が露出し、分割される。この分割された水域をワンドと呼び、上流側より 28 番上、28 番下、29 番~40 番南、40 番北、41 番、

42 番、43 番までの 18 個の水域に分けて呼ばれることが多い。28 番の二つの水域はかつて存在していたが、1970 年代に埋め立てられ、1999 年 8 月に国土交通省により再建された新しいワンドであり、他のワンドと異なり、素掘りの浅いワンドである（通常水位 $OP+3.0m$ で最大水深 $1m$ で、ワンド周囲から最深部へ向かっての路床勾配が緩く（ $1:20$ 程度）、浅い領域が多いのが特長である）。残りの 16 個の水域は 1970 年代後半に 40 番から 29 番のワンドを縦断するようにコンクリートブロック製の低水護岸が建設されたことを除いて、1950 年代からその形状は大きく変化していない。各ワンドの面積は $2000\sim8000m^2$ 程度とまちまちであり、また水位 $OP+3.0m$ 時の最大水深は $1.5\sim3.0m$ とやや深い。淀川本川の最大水深（ $6m$ 程度）に比べれば浅い。各ワンドは幹部水制、低水護岸、州などによって周囲を囲まれているが、それらの天端の高さは一様では無いので、各ワンドの水位は必ずしも同一ではない。また、淀川本川の水位変化に伴い、淀川の水が流出入し、淀川と連結したり、独立したりするが、これはワンドの周囲堤の標高による。

18 個のワンドのうち、42 番、40 番北、39 番、33 番ワンドは淀川と接する境界の天端高さに部分的に低い部分があったり、33 番や 39 番のように淀川と連絡する目的で境界を開いているものがある。上流の 29 番、28 番下、28 番上の 3 つのワンドは、28 番ワンドが再建された 2000 年 7 月に設けられた淀川との連絡水路により淀川と連結している。これらの 7 つのワンドを開放型ワンドと呼ぶ。一方、40 番、43 番の二つのワンドは 10 年に一度程度の高水敷にのるような大出水時を除いて、淀川や隣接するワンドとの間で表面流の流出入はなく、閉鎖型ワンドに区分される。残り 9 個のワンドは水位の変化により開放型ワンドと連結したり、独立したりする半閉鎖型ワンドである。従って、各ワンドの水位は一定ではなく、また、淀川水位と同一でもない。すなわち、淀川本川水位の変動の影響を受け、各ワンド水位と本川水位の関係およびワンド周囲堤の最低標高に応じて変化する。

（2）淀川本川の水位変動

淀川本川距離標 $10.0km$ 付近には 1897（明治 30 年）から始まった淀川改良工事により放水路として開削された新淀川との間には長柄堰が、旧淀川（大川）との間には毛馬洗堰が建設された。これにより上流側に存在する城北付近の水位は大阪湾潮位の影響を受けることは無くな

り、これらの堰の操作の影響を受けることとなった。通常時の水位は 1983 年竣工の淀川大堰への改築までは、堰の改良とともに緩やかに上昇し、 $OP+2m\sim2.5m$ 程度であったと推測される。その後、1972 年に始まった淀川工事実施基本計画の改訂に伴う一連の工事により、かつて淀川の両岸に毛馬から伏見まで設けられた水制群とそれにより形成されたワンド、タマリはほとんどが姿を消し、群としては城北、庭窪の二つを残すのみとなった¹⁾。また、下流部の河道拡幅、掘削並びに長柄可動堰の淀川大堰への改築により、淀川下流部の水位変動は著しく変化した。すなわち、平均水位がさらに、約 $0.5m$ 上昇するとともに、水位変動の形式が著しく変化した。すなわち、日平均水位で見れば、1983 年以降 $2000m^3/s$ の流量に対しても城北付近の水位はほとんど変化することはない、また、年間の水位変動幅は小さくなり、変動の頻度は著しく減少（再現期間は長期化）した²⁾。

図-1 は 1972 年から 1995 年までの日平均水位を用いて、その位況の経年変化を示したものであるが、この間に平均水位が $2.7m$ から $3.20m$ 程度へ上昇していること、1983 年以前とそれ以降では位況が全く変わり、1983 年以前には $OP+4.5m$ を越えるのが通常であった年最高水位は 1983 年以降 $OP+3.5m$ を越えることが無くなったこと、水位の周年変化の最大幅が著しく小さくなったこと、また、水位が 1 年間に $3.5m$ を越える日数も年間 3 週間程度から、1 日以下となったこと等が分かる。構造物（あるいは水域）としての城北ワンド群は保全されたが、水文・水理環境は全く異なったものとなったのである。

このような水文・水理環境の変化は本川の流速の低下、冠水によって高水敷に形成される一時水域（タマリ）の形成の機会と面積の減少をもたらしたとともに、ワンドにおける水の流動やワンドと淀川間の水の流出入や水質、底質に大きな影響を及ぼし、淀川本川とワンドの生態環境を著しく劣化させ、生息する生物種等の変化はこれらの影響を抜きに考えがたいものと思われる^{2), 3), 4)}。

このような指摘に対して、この水域の管理者である国土交通省淀川工事事務所はワンド群の生態系の回復を目標として、かつて 29 番ワンドの上流に存在した 28 番ワンド跡に 1999 年 8 月、水深の浅い実験ワンドを再建した。さらに、2000 年 6 月 8 日 10 時から 10 日 10 時の 2 日間にかけて、大堰の水門操作により水位を $OP+2.5m\sim3.3m$ に変化させる実験を行い、現在の大堰操作規則内での本川水位の人工的な変動の可能性、その城北ワンド群への

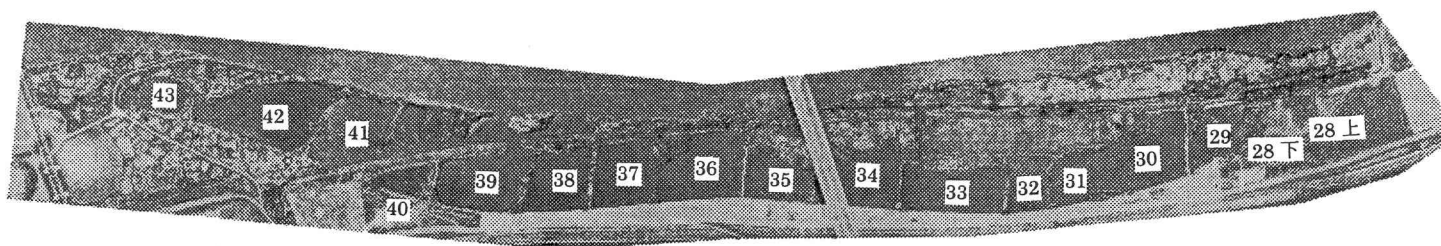


写真-1 水位低下時の城北ワンド群と淀川(2000 年 6 月, 河川環境管理財団提供)。

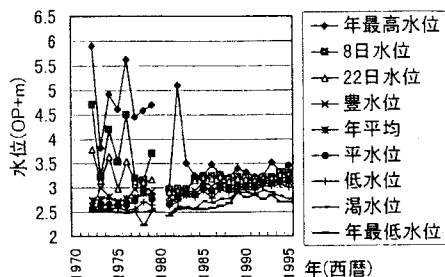


図-1 淀川水系毛馬水位観測所における位況の経年変化。

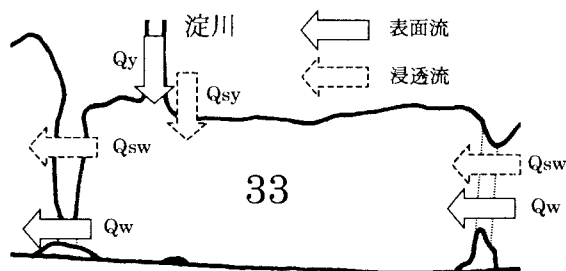


図-2 ワンドにおける流出入流量。

効果と影響を調べている。

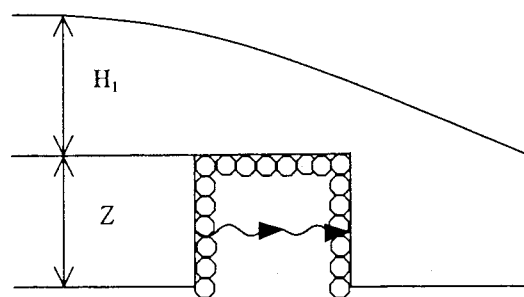
3. 城北ワンド群の数値水理モデル

(1) 数値モデル

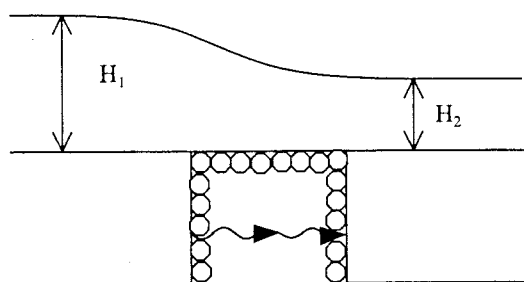
ワンド群のモデル化にあたっては、周囲を水制等によって区分される各ワンドの面積を水深にかかわらず一定とし、水位の様な貯水池とする。ワンドと淀川の間および隣接するワンド間には、淀川や隣接するワンドとの間に水位差が存在すれば、これらの水域間を流出入する流れが発生する。流出入する流れには表面流（開水路）形式のものと浸透流形式のものを考えることが出来る。従って、図-2を参照して、ワンドの水の連続方程式は、次のように書かれる。

$$\frac{d}{dt}(AH) = \sum_{i=1}^n Q_y + \sum Q_{sy} + \sum Q_w + \sum Q_{sw} \quad (1)$$

ここに、 A : ワンドの面積、 H : ワンドの水位、 Q_y : ワンドと淀川間の表面流により流出入する流量（淀川からワンドへの流入を正とする）、 Q_{sy} : ワンドと淀川間の浸透による交換流量（淀川からワンドへの流入を正とする）、 Q_w : 隣接するワンドから水制を越流して、流出入する流量（上流ワンドから下流ワンドへ向かうものを正、逆向きを負とする）、 Q_{sw} : 隣接するワンドから水制を通じて



(a) 完全越流



(b) もぐり越流

図-3 水制上の流れの形式。

浸透により流出入する流量、 t : 時間である。

次に、ワンドに流出入する流れについては以下のように考える。ワンド水位が境界の水制工の天端高さより高い時、水制を越流して流れる開水路流れ形式の流出入が生じる。これは堰上を越流して流出入する流れとしてモデル化し、本間公式⁵⁾を適用するものとすれば、図-3を参照して、次のようにまとめられる。

表面流形式の流出入流量は

$$\cdot \frac{H_1 - Z}{H_2 - Z} \geq \frac{3}{2} \quad \text{の時, 完全越流形式で流出し}$$

$$Q = -1.55B(H_1 - Z)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

$$\cdot \frac{3}{2} > \frac{H_1 - Z}{H_2 - Z} \geq 1 \quad \text{の時, もぐり越流形式で流出し}$$

$$Q = -4.03B(H_2 - Z)(H_1 - H_2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\cdot 1 > \frac{H_1 - Z}{H_2 - Z} \geq \frac{2}{3} \quad \text{の時, もぐり越流形式で流入し}$$

$$Q = 4.03B(H_1 - Z)(H_2 - H_1)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\cdot \frac{2}{3} > \frac{H_1 - Z}{H_2 - Z} \quad \text{の時, 完全越流形式で流入し}$$

$$Q = 1.55B(H_2 - Z)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

ここに、 Q :対象ワンドへの流出入流量、 H_1 :対象ワンドの水位、 H_2 :隣接するワンド/淀川の水位、 B :堰(越流)幅、 Z :堰(水制工天端)高である。水制(堰)に隣接する水域の水位がともに堰高より低くなれば、開水路形式の流出入流量は無い。次に、浸透流形式の流出入流量については、通常、自由地下水を想定し、Darcy 則の成立を仮定して、次のようにモデル化する。

・ $H_1 > H_2$ の時、浸透流形式で流出し

$$Qs = -BsHsK(H_1 - H_2)/L \quad (6)$$

$H_2 > H_1$ の時、浸透流形式で流入し

$$Qs = BsHsK(H_2 - H_1)/L \quad (7)$$

ここに、 Os :浸透流量、 K :Darcy の透水係数、 Bs :浸透幅、 Hs :浸透深さ、 L :浸透長(水域間の水平距離)である。

(2) 城北ワンド群への適用と数値計算法

(1)で示した連続方程式と運動方程式を各ワンドに適用する。未知数は28番上から43番のワンドの各ワンドの水位17個と流出入流量である(40番北は淀川への開口部が大きいので、淀川水位と同一として除去した)。28番上から39番ワンドまでは通常の水位変動の範囲内で、水位により独立/連結するので、12個の水域を含んだ一つのブロックとして扱い、各ワンドの水位12個を未知数として、連立して解く。39、40南、41、42番のワンドは浸透流を考慮して一つのブロックとして扱い、これらの4個のワンド水位を未知数として連立して解く。残る43番ワンドは周囲を高水敷に囲まれているため、独立した閉鎖型のワンドとして扱った。

ワンド面積はOP+3.0mにおける値を測量図より求め、水域の連結部の幅、路床高(堰高)は測量図から読み取るとともに、計算結果の水位を用いて補正した。浸透流については、浸透幅、浸透深さは測量図から適当に読み取り、浸透長についても淀川とワンド間については測量図から平均的距離を読み取り、ワンド間については水制工によることから、一律に8mとした。透水係数は不明なため、 $10^{-2} \sim 10^{-5} \text{m/s}$ の値⁵⁾を用いて試算し、水位の計算結果により決定している。境界条件である淀川本川の水位は、淀川大堰直上流の本川毛馬水位観測所における観測水位を流下方向には一定として与える。

数値計算にあたっては陽形式で解くものとし、未知数であるワンド水位とワンドへの流出入流量を時間的に交互に求めることとした。すなわち、連続方程式よりワンドの水位を求めた後、時間を dt だけ進め、越流公式、浸

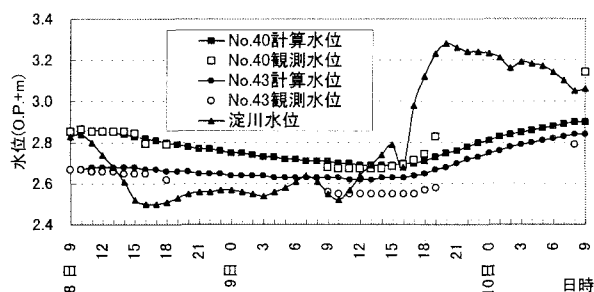
透流の公式により流出入流量を求める。次に、時間を dt だけ進め、 $2dt$ 前に得られたワンド水位と dt 前に得られた流出入流量を用いて、新たにワンド水位を求める。実際の計算に当たっては、 $dt = 0.05$ 秒の値を用いた。これは計算の安定性によるものではなく、ワンド水位が数値的な要因により振動するのを防ぐためである。

3. 淀川水位の変動によるワンドへの流出入

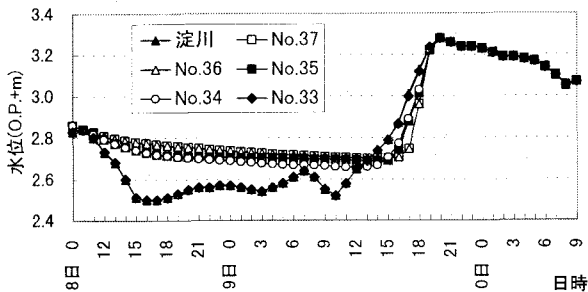
(1) 2000年6月の堰操作実験の概要とモデルの適用

淀川大堰の堰操作実験は2000年6月8日10時から10日10時に行われ、堰直上流水位を8日10時にOP+2.8mから2.5m(15時)まで下げ、翌9日10時までほぼその水位を維持した後、10時から18時にかけて水位を3.3mまで上昇させ、翌日10日9時に3.1mの通常水位まで下げた。この間、各ワンド水位の自動、あるいは目視による観測と、33番ワンドへの流出入水の流速と水質の現地計測が行われた。同時に適当な時間間隔で水温、濁度、DO、pH等の水質の現地計測、サンプリングと室内分析が行われ、水位変化に伴う魚類の移動等も調査された⁴⁾。

この観測は河川環境管理財団大阪研究所が実施を担当し、大阪工業大学水圏環境研究室が協力した。まず、ワンドの水位変化は、開放型の33、39番ワンドの水位はほぼ淀川水位に追従する。閉鎖型の40、43番ワンドは見かけと異なり、浸透流による水位変化が顕著に生じた。他の半閉鎖型のワンドでは必ずしも淀川水位まで低下しきらないものが多かった。33番ワンドの流入出水の流速はワンド水位の下降期、上昇期に観測され、淀川との連結水路で最大40cm/s、水制幹部上で70cm/s程度が観測さ



(a) 閉鎖型ワンド (40, 43 番) の水位変化.



(b) 33~37 番ワンドの計算水位の変化.

図-4 淀川とワンド群の水位変化の例.

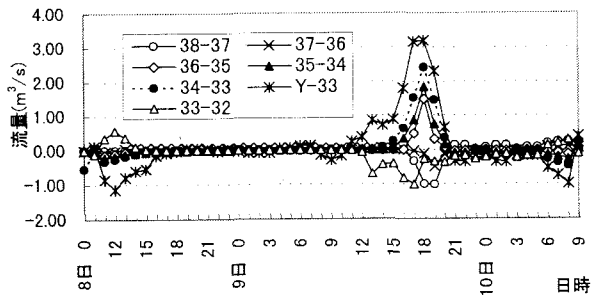


図-5 ワンドへの流出入流量の変化(33～37 番ワンド).

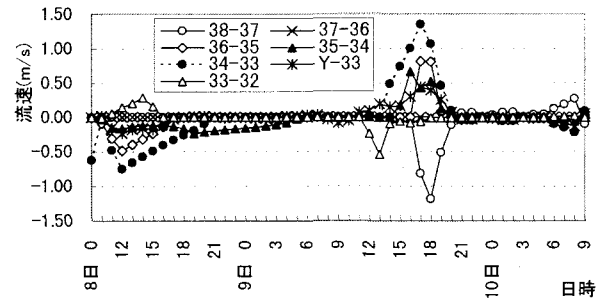


図-6 水制上の流速計算値(33～37 番ワンド).

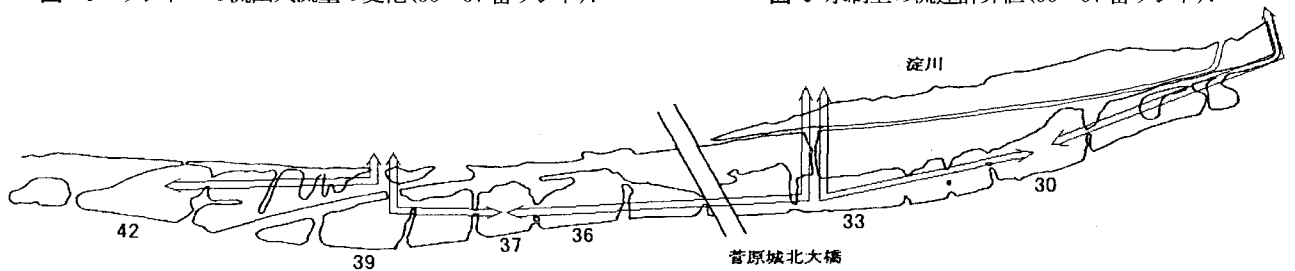


図-7 城北ワンド群に生じる流れの概略 (計算結果より推定).

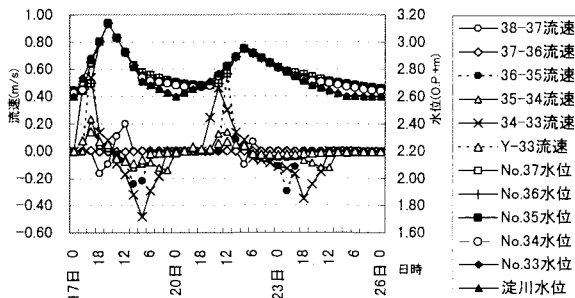


図-8 1974年6月の水制上の流速(33～37 番ワンド).

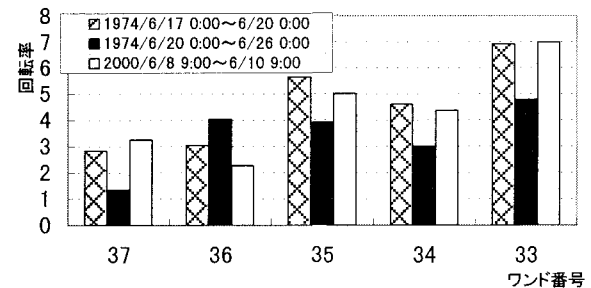


図-9 ワンド水の回転率 (1974年6月, 2000年6月).

れた。なお、有為な流速は越流部付近のみで観測され、ワンド中央ではほとんど観測されなかった。

ワンドの計算水位の時間的な変化の例が図-4に観測水位とともに描かれている。計算結果と観測値はよく一致している。閉鎖型、開放型ワンドの水位変化は前述の通りであり、半閉鎖型ワンドの水位は水制幹部の天端高と開放型ワンドとの位置関係により定まることが分かる。各ワンドへの流出入流量(開水路形式)の計算値の一例が図-5に示されている。図-6はワンドへの流出入水の計算堰上流速を示したものであるが、33番ワンド周辺での観測値と比較すると、淀川～33番ワンド間の流速は発生時期、大きさともよく一致しているが、他のものは時期は一致するが、大きさはやや計算値が大きい。しかし、水位の変化期間を中心に20cm/s～80cm/sの流速が幹部水制の天端上を中心に発生していることが分かる。以上の流速と流量の時間変化より城北ワンド群全体で生じる流れの概略を示したのが図-7である。淀川からワンド群の内部へ向かう流れが水位上昇時の、淀川へ向かう流れがほぼ水位下降時のものである。開放型ワンドを通じて淀川と各ワンドとの間で流出入があり、例えば33番ワンドに流入した河川水は二手に分かれ、32番から30

番へ、34番から37番へ流入しており、39番ワンドからは37番ワンドへ流入している。これは、各ワンドを隔てる水制工の天端高さに依存している。

(2) 1974年6月出水時のワンド水位と流動の推定

(1)で適用したモデルを淀川の水位変動がまだ大きかった1974年6月の最大流量600m³/s程度の小出水に適用した。6月17日から26日までの毛馬での日平均水位を与え、各ワンドの水位変化を数値計算により求めた。計算結果の一例として、淀川の水位と淀川～33番～37番ワンドの経路に沿った水制上の流速の経時変化を図-8に示した。この出水による水位の変動範囲はほぼ、2000年における実験時におけるものと同様であるが、9日間に渡って、水位は2.6mから3.14m(流量600m³/s)、2.95m(流量429m³/s)と二つのピークを経て、2.6mに戻っている。これに伴い、水位上昇時、下降時の合計4回に渡って、最大40.0cm/s程度の流速が生じている。

水位変動による各ワンド水の回転率を示したものが図-9である。1974年のものは2つの出水に対して、2000年のものは2日間の回転率を算出しており、その対象期間が夫々異なっているため、3者の比較はあまり意味を

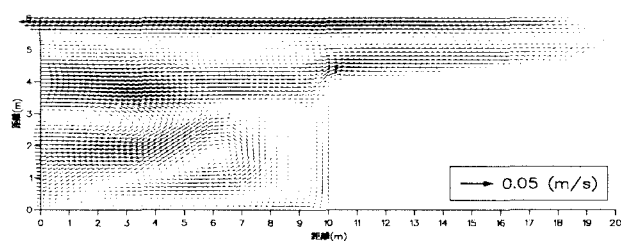


図-10 水温差による密度流 (夏期の12時頃)。

持たない。この程度の水位変化により、最も回転の大きい開放型ワンドで6回程度、最奥部の37番ワンドで2回程度の回転率となる。中間の34、35ワンドでは3~4回転する。1974年にはこの程度の水位変動は年間6回発生しており、これ以上の最大水位がOP+4.5m以上(流量1500m³/s程度以上)の中出水も3回生じており、ワンドの水の年間回転率がかなり大きいことが知れる。さらに、ワンドを隔てる水制上を中心に数10cm/s程度の流速がかなりの期間生じていたことも推察され、この流れは水制工付近の底質の分級、巻上げ、藻類の剥離等に影響を与え得るものと考えられる。

4. 水温差によるワンド間の流れ

ワンドの最大水深は1m~3m程度であり、日成層が生じる。ワンド間では水深差があることから日射の影響を受けて水温が上昇する時、あるいは風や気温の影響を受けて冷却される時、浅いワンドと深いワンドの間に水温差が生じ、さらに、淀川本川の水温はワンド水溫とは同一ではない。このように水域に水温差が存在する時、密度流が発生し、ワンド間や淀川とワンドとの間にも密度流が生じる可能性がある。ここでは密度変化を考慮した鉛直2次元の方程式を水深の異なる水域が連結されたモデル水域に適用し、夏期の日を対象として、流れと水温の数値解析を行った⁶⁾。数値解法としては香月・中山のモデル⁷⁾を用い、水表面は一定とした。

計算結果の一例として、流速分布を図-10に示した。夏期は8時頃から浅い水域(ワンド)の水表面の水温が深水域より高温になる結果、冷たい深水域の水は暖かい浅水域下層へ侵入し、浅水域表面の暖かい水塊は表層流として緩やかに深水域表面へ流出していく。その大きさは、1cm/s程度以下の大きさである。16時頃からは浅水域は水表面が冷却され、その部分の水の密度が増加して浅水域表層から低層への下降流と下降流を補償する上昇流が誘起され、セル状の流れ場が生じる。浅水域は深水域より水表面からの水温低下が急速に進むため、22時頃より浅水域は深水域より低温・高密度の水塊となり、浅水域底部には浅水域から深水域に向かう下層流が生じ、その結果、補償流れとして深水域から浅水域に向かう数cm/s表層流が生じる。

このように、ワンドと河川間に水位差がなくても水温差が存在すれば、微弱ではあるが、温度密度流が発生し、加熱期にはワンド表層から淀川表層に向かう流れが、冷却期にはワンド底層から淀川底層に向かう流れとこれを補償する淀川からワンドへ向かう表層流が生じる可能性があることが確認された。

5. 結論

城北ワンド群における流動の要因として淀川水位の変動を考え、数値計算結果と観測値と比較することによりモデルの有効性を確かめるとともに、流動の大きさ、パターンを明らかにした。次に、過去の水位記録や数値実験により、往時ワンド群内には局所的ではあるが豊かな流れが存在していたことを確かめた。城北ワンド群は単なる止水域ではなく、多様な流れが存在していたのである。さらに、ワンド間や淀川との間に水温差がある時、これらの間に温度密度流が発生する可能性のあることを数値計算により確かめた。

近年、城北ワンド群では平均水位の上昇や水位変動が減少しており、構造物としてのワンドが保存されても、水文環境が変化することにより生息生物種が変化し、ワンドの質が劣化している可能性が示された。今後、城北ワンド群の環境の復元を図るための技術的対応策についても研究して行きたいと考えている。

謝辞： 本論文の作成に当たっては、大阪工業大学水圏環境研究室に在籍した院生、学部生の協力によって得られた結果を引用した。記して、謝意を表します。また、貴重なご議論を頂いている淀川水系イタセンバラ研究会、資料の提供、収集を頂いた国土交通省淀川工事事務所、河川環境管理財団大阪研究所の各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 綾 史郎、斎藤 あずさ、福永 康彦、西谷 大輔：淀川ワンド群の形成と変遷、第4回河道の水理と 河川環境に関するシンポジウム論文集、pp. 89-94, 1998.
- 2) 松波 由佳・綾 史郎・矢田 敏晃：淀川ワンド群の形成・衰退とその生態学的意義、河川技術に関する論文集、第5巻、pp. 93-98, 1999
- 3) 河井 典彦：景観にみる城北ワンド群の変貌—水位変化のもたらしたもの—、ボテジャコ(魚類自然史研究会報)、第5号、pp. 11-19, 2001.
- 4) 中西 史尚、紀平 肇、森田 和博：淀川ワンド群の現状と環境改善対策について、第9回世界湖沼会議、2001(投稿中)。
- 5) 土木学会編：‘水理公式集平成11年改訂版’、1999.
- 6) 中谷 貴史、綾 史郎：淀川城北ワンド群の水溫構造に関する研究、第56回年次学術講演会講演概要集、2001(投稿受領)。
- 7) 香月 正司、中山 顕：‘熱流動の数値シミュレーション’、森北出版、1990.

(2001. 4. 16 受付)