

## 水位差の異なる隣接河川間で発生する湧水流に関する一考察 ～19Km 地点の木曾川と長良川を対象として～

Groundwater between adjacent rivers: Groundwater between Kiso and Nagara Rivers

鬼束幸樹\*・矢野勝士\*\*・秋山壽一郎\*\*\*・瀬津家久\*\*\*\*

Kouki ONITSUKA, Masashi YANO, Juichiro AKIYAMA and Iehisa NEZU

\*博(工) 九州工業大学工学部建設社会工学科助教授(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

\*\*修(工) 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻博士後期課程(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

\*\*\*Ph.D 九州工業大学工学部建設社会工学科教授

\*\*\*\*フェロー 工博 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授

There are two adjacent rivers, i.e., the Kiso River and Nagara River, at the middle of Japan. Those rivers are divided by a levee. The Nagaragawa Estuary Barrage was constructed 5.4Km upstream from the river mouth in the Nagara River, so that the water level in the Nagara River is not affected by the tide. In contrast, there is no weir at the river mouth in the Kiso River. At low tide, the water level at the downstream reach in the Kiso River is lower than that in the Nagara River. As a result, the groundwater flows from the Nagara River to the Kiso River. There are two kinds of coming out of the groundwater on the ground. One is a seepage flow and the other is a spring flow which comes out from a gaping hole. In this study, the velocity measurements of spring flows from the gaping holes in the Kiso River were conducted with an electromagnetic current meter and total discharge from the Nagara River to Kiso River in one phase of a tide is evaluated.

*Key Words: Wando, groundwater, field measurements, tide*

### 1. はじめに

明治時代に時の政府に雇われた外国人技師によって、木曾川や淀川に水制が設置された。設置後の水制は、一部が洪水によって破壊され、100年以上経過した現在、水制周辺には土砂が堆積し、植物が繁茂している。こうした水制が創出する水域において、平水時に本川と接続されているものは「ワンド」と呼ばれ、平水時に本川と接続されていないものは「たまり」と呼ばれている。こうしたワンドあるいはたまりの存在が水辺の生態系に良好な影響を及ぼしていることが注目され、多くの基礎的研究が行われてきた<sup>1)1)</sup>。

中川ら<sup>2)</sup>はアスペクト比(凹部の流下方向長さ/凹部の横断方向長さ)が3の流れにおいて開口幅を変化させた実験

を行い、渦のスケールおよび強度が変化することを指摘した。Muto *et al.*<sup>2)</sup>はアスペクト比が1および3の流れについて可視化計測を行い、アスペクト比が1の場合は、瞬間渦は定常的で形状が変化しないが、アスペクト比が3の場合は時間とともに瞬間渦の形状が様々に変化することを述べている。瀬津ら<sup>3)4)</sup>はアスペクト比が3, 5および10の流れをPIV(Particle Image Velocimetry)およびLDA(Laser Doppler Anemometer)を用いて計測し、アスペクト比が3の場合は瞬間渦の特性と平均渦の特性とが類似しているが、アスペクト比が5および10の場合は瞬間渦の構造と平均渦の構造とが異なることを明らかにした。木村<sup>5)</sup>は単一ワンドにおける水面変動がフルード数の関数であることを示し、瀬津ら<sup>6)</sup>は水面変動強度とフルード数の関係を明らかにした。以上の研究は主として単一凹部の研究であ

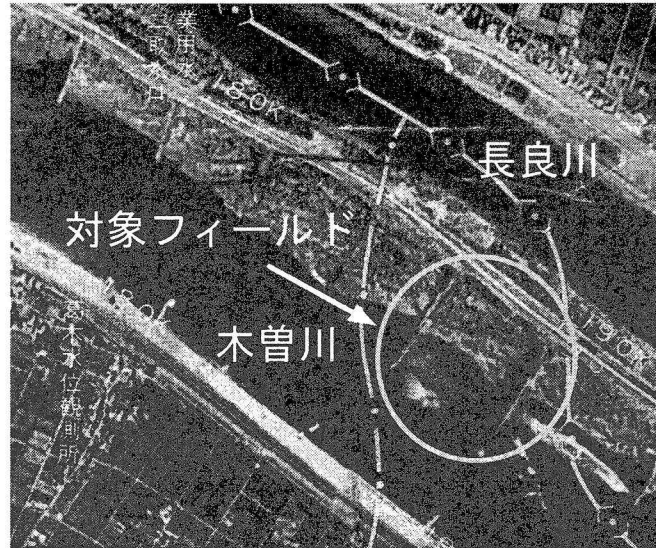


図-1 木曽川 19Km の対象ワンド

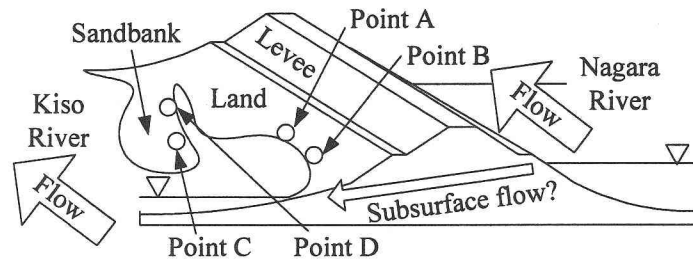


図-2 木曽川 19Km ワンドと長良川の模式図<sup>16)</sup>

るが、連続水制に関する研究も池田ら<sup>7)</sup>や瀬津ら<sup>8)</sup>によって行われている。

一方で、実際のワンドを対象としたフィールド調査も近年盛んになってきた。木曽三川水制技術検討委員会<sup>12)</sup>は木曽川のワンドの変遷を類推した。その結果、木曽川ワンドは明治時代からしばらくの間はあまり地形的変化がなかったが、最近の数十年で急激に現在の地形に変化したことを指摘した。木村ら<sup>13),14)</sup>は木曽川の河口から 19Km 地点のワンドを対象として詳細な検討を行った。このワンド内には砂州が形成されているが、感潮域であるために砂州は一日に約 2 回の潮汐の影響を受ける。満潮時前後では水が砂州に浸透するが、干潮前後では逆に砂州から水がしみ出てくる。鷺見ら<sup>15)</sup>はこれらの浸透水がワンドの水交換量の 10% 弱を占めていると推定した。また、木村ら<sup>13),14)</sup>は現地調査を進めるうちに、干潮時に木曽川の堤防にスポット状の湧水が出現することを発見した。この湧水は長良川からのものと類推されたが詳細な検討はなされなかった。

本研究は、木曽川 19Km 地点のワンドにおいて、干潮時に発生する湧水流の流速を電磁流速計で計測し、対象ワ

ンドにおいて木曽川と長良川との間で一日に交換される湧水量を推定するものである。

## 2. 対象フィールドおよび計測方法

木曽川の河口から 19km 上流付近の様子を図-1 に示す<sup>16)</sup>。図中の上部の河川が長良川で下部の河川が木曽川である。この付近は堤防を隔てて木曽川と長良川が隣接した状態となっている。木曽川には無数の水制が観察される。水制が設置されたことで掃流力が低下し、土砂が堆積している。また、土砂上に植生が繁茂している様子も観察される。

長良川の河口から 5.4Km 地点には長良川河口堰が 1995 年に建設された。そのため、図-1 に示された長良川の領域では平水時の水位が比較的一定に保たれている。一方、木曽川には河口堰がないため、図-1 に示された木曽川の領域は感潮域となっている。対象フィールドは図-1 中に丸印で示したワンドである。このワンドの模式図を図-2 に示す。ワンド内には砂州(sandbank)が形成されている。

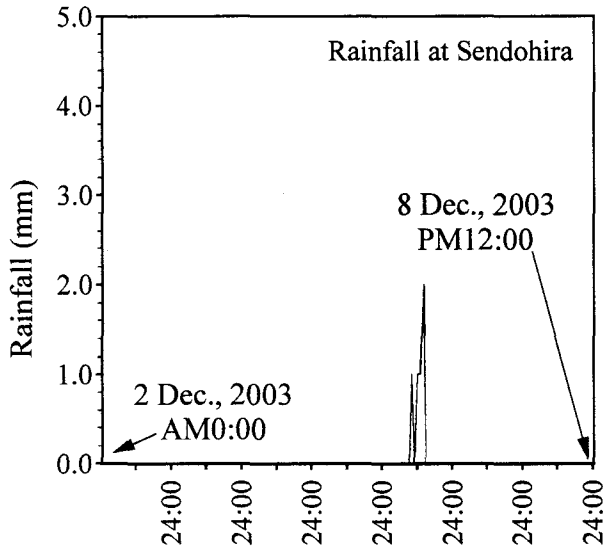


図-3 木曽川 19Km 付近の 2003/12/2~12/8 の降雨状況

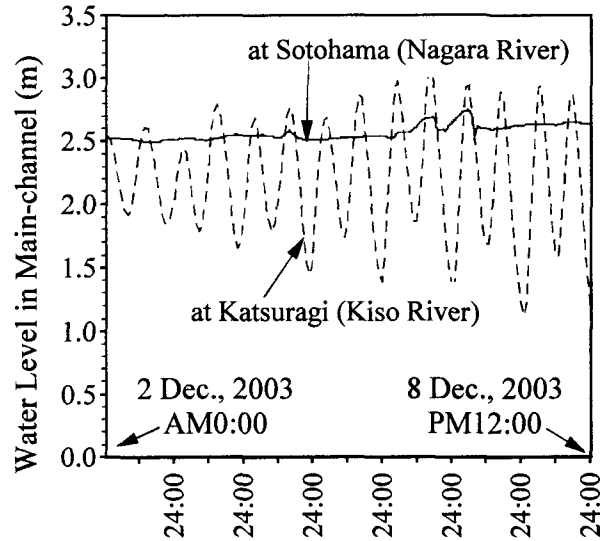


図-4 木曽川 19Km 付近の木曽川と長良川の一週間の水位変化

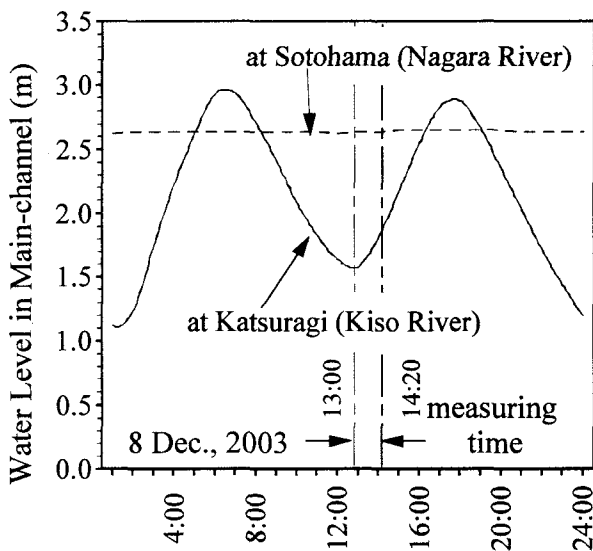


図-5 木曽川 19Km 付近の木曽川と長良川の水水位変化

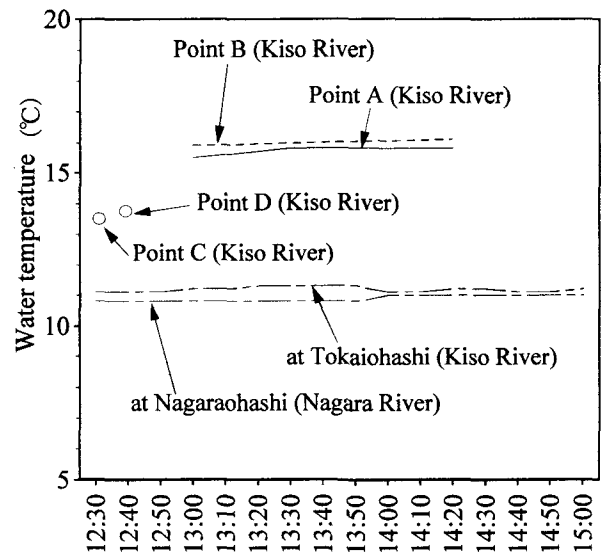


図-6 木曽川 19Km 付近の木曽川と長良川の水温度変化と Point A および Point B における湧水の水温度

計測日は2003年12月8日である。この日の天候は晴れでほぼ無風状態であった。また、最寄りの雨量観測所である船頭平観測所で計測された計測日の一週間前からの雨量を図-3に示す。同様な時期の葛木水位観測所(木曽川)および外浜水位観測所(長良川)で得られた水位を図-4に示す。両水位観測所とも対象ワンドから100m程度しか離れていない。両図より、測定日前の一週間の間にほとんど降雨がないことおよび降雨に伴う水位上昇がほとんどなかったことが確認される。

満潮時には水位が上昇するためワンド内にある砂州のかなりの部分が水没する。そのため、満潮時前後では砂州内に水が浸透していく。一方、干潮時前後には逆に砂州か

ら浸透流が流れ出る。このとき、砂州表面付近で流れが所々で集中し、スポット状の穴から流れが湧き出る。この砂州上に現れたスポットの2点を選び、Point C および D とした。

堤防に沿ったところに大きなスポットを2つ発見した。この2点を Point A および B とした。両点の間隔は約5mであった。両点の鉛直位置はほぼ同様であり図-4において約1.9mに位置する。なお、堤防に沿ったところにはこの2つ以外に大規模なスポットは発見されなかった。これらのスポットの背後はすぐに土でできた堤防となっており、砂州よりも多くの水を浸透するとは考えにくいにもかかわらず、Point C および D から流出される流量よりも顕

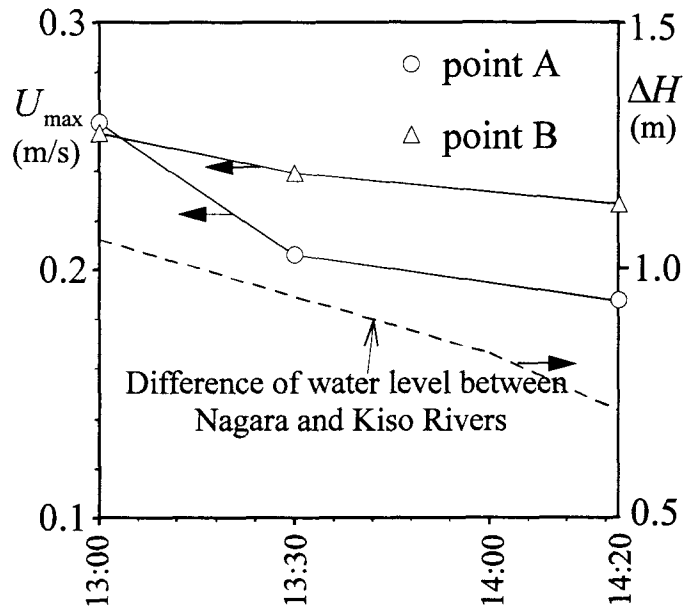


図7 木曾川19Km付近の木曾川と長良川の水位変化とPoint AおよびPoint Bにおける湧水の流速変化

著に多い流量が流出していた。そのため、この湧水は満潮時前後に堤防に浸透した水が起源ではなく、長良川から地下水として浸透してきたものではないかと推測された。2つのスポットが発見された堤防には地下水位を計測できる井戸があったが、中が詰まっており地下水位を計測することはできなかった。

Point Aにおけるスポットは天端がやや水平に近い横長の楕円で、長軸が約10cmで短軸が約5cmであった。Point Bにおける穴も同様な変形した楕円形で、長軸が約10cmで短軸が約4cmであった。これらのスポットの中心点において、水温および流速を計測した。流速の計測には2成分の電磁流速計を用いた。ただし、穴が変形していることおよび穴の奥行き方向に断面形状が変化しているため、流出してくる流れの向きを予測することができない。そのため、電磁流速計のプロープの向きを様々に変化させながら出力をモニタリングし、最も流速が速くなる向きにプロープを向けた。計測間隔を0.1s、計測時間を51.2sとした。

### 3. 計測結果および考察

#### 3.1 水位変化

今回の計測では水位の計測を行わなかったため、最寄りの水位観測所のデータを代用する。木曾川の水位を葛木水位観測所で代用し、長良川の水位を外浜水位観測所で代用

する。図-5に測定日における葛木（木曾川）および外浜（長良川）の水位変化を示し、流速計測時間の範囲を点線で示す。河口堰のある長良川の水位がほぼ一定であるのに対し、木曾川における水位が潮汐に伴って変化する様子がわかる。水位差は本測定日においては、1mにも及ぶ。また、計測が干潮から上げ潮にかけて行われたことが理解される。14:20以降ではスポットが水没したため、計測を断念した。

#### 3.2 水温に基づく湧水流の起源の推測

一般に、浸透流の水温はその滞留時間に大きく依存する。したがって、河川水温と各スポットから湧水してくる水の温度を比較することでその起源を類推することができる。各ポイントで計測された水温の時系列を図-6に示す。同図には、木曾川の東海大橋における水温および長良川の長良大橋における水温の時系列も示している。長良大橋の水温計測ポイントは対象ワンドの位置よりも数キロメートル下流であるが、長良川や木曾川のような大規模河川の水温は数キロメートル程度下流してもそれほど変化しないことから、この地点の水温を長良川の水温と捉えてもそれほど問題はないと判断した。同図より長良川本川の水温はほとんど変化していないことがわかる。これは、河口堰が存在するので本川に大量の水が存在することで水温が安定したことを意味する。一方、木曾川本川の水温は微少ながら変動している。これは、時間に伴う照度の変化によっ

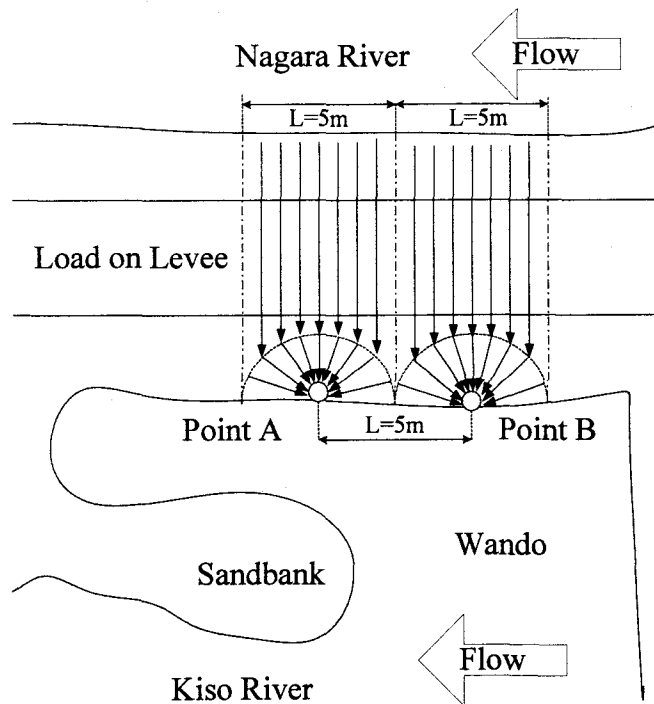


図-8 木曾川19Km付近の長良川から木曾川に向かう浸透流に対するモデル

で引き起こされたものと考えられる。

続いて、各ポイントにおける水温に着目する。Point C およびDの水温は木曾川本川の水温より高くなっている。これは、満潮時付近に本川から砂州内に浸透した水が内部で温められたためである。本川との水温差は約2.5°Cとなっている。一方、Point A およびBにおける水温はPoint C およびDにおける水温よりも遙かに高い。これは、Point A およびBにおける水の起源がPoint C およびDと異なることを示唆している。また、水温が高いことから地中に滞留する時間がPoint C およびDよりも長いことも類推される。ところが、Point C およびDが存在する砂州は主として砂で形成されているのに対し、堤防の方は主として土で形成されており、砂州よりも水が浸透しにくいと考えられ、満潮時に堤防部に大量の水が浸透したとは考えにくい。以上のことから、Point A およびBから湧水してくる水は、満潮のたびに本川から地中に浸透する水ではなく、長良川との水位差によって生じた浸透流の水であることが推測される。

### 3.3 湧水流量の計測結果

前節において、木曾川のPoint A およびBにおける湧水流が長良川との水位差によって生じていることが示唆された。図-7に木曾川および長良川との水位差 $\Delta H$  および

Point A およびBで得られた流速の時系列を示す。流速は楕円のほぼ中央で行われているため、断面内での最大流速 $U_{max}$ と考えられる。水位差 $\Delta H$ の低下に伴い最大流速 $U_{max}$ が減少している様子が観察される。このことからPoint A およびBにおける湧水流が長良川からの浸透流であることが示唆される。

Point A およびBにおける湧水量を算出するには、断面平均流速 $U_m$ を得る必要がある。計測で得られた最大流速 $U_{max}$ を断面平均流速 $U_m$ に変換するには、流速の分布形状が既知でなければならない。しかし、今回計測したスポットは変形した楕円形で、流速分布が現在のところ解明されていない。そのため、最大流速 $U_{max}$ を断面平均流速 $U_m$ に変換することができない。そこで、長軸と短軸を平均した長さを直径に有する円形断面の流速分布を代用して断面内最大流速 $U_{max}$ を断面平均流速 $U_m$ に変換する。円形断面において、直径 $D$ の中心で発生する最大流速 $U_{max}$ は次式の粗面対数則で表される。

$$\frac{U_{max}}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{D}{2k_s} + A_r \quad (1)$$

ここに、 $U_*$ は摩擦速度、 $k_s$ は相当粗度、 $\kappa$ はカルマン定数、 $A_r$ は積分定数である。変形した楕円断面流れにおけるカルマン定数 $\kappa$ および積分定数 $A_r$ は不明であるが、ここでは $\kappa=0.412$ および $A_r=8.5$ を採用した<sup>17)</sup>。一方、断面

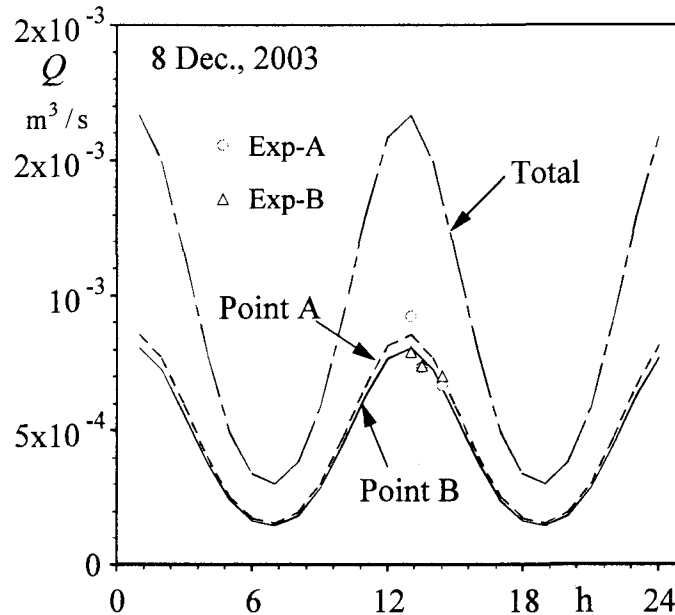


図9 木曾川 19Km ワンドの Point A および Point B における湧水量の実測値および計算値

平均流速  $U_m$  は次式で示される。

$$\frac{U_m}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{D}{2k_s} + A_r - \frac{3}{2\kappa} \quad (2)$$

式(1)および(2)から断面平均流速  $U_m$  と最大流速  $U_{max}$  の関係が求められるが、摩擦速度  $U_*$  が未知量として残る。そこで、流速係数  $\phi$  を導入すると次式となる。

$$U_m = U_{max} - \frac{3U_m}{2\kappa\phi} \quad (3)$$

$$\phi \equiv \frac{U_m}{U_*} \quad (4)$$

流速係数  $\phi$  は一般に 8~25 程度の値を有する。対象とした流れにおける流速係数  $\phi$  は不明であるが、ここでは粗面の河川における代表的な値の  $\phi=15$  を採用する。すると、式(3)から断面平均流速  $U_m$  が得られる。さらに次式から湧水量が算出される。

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} U_m \quad (5)$$

以上のように、スポット状の楕円形からわき出す湧水流に対して管路流の流速分布を代用したが、今後スポット内の流速分布を詳細に計測し、その妥当性を検討する必要がある。

### 3.4 湧水流のモデル化

木曾川 19Km 地点において、長良川と木曾川の水位差によって生じる湧水流をモデル化する。図-8 に示すように Point A および B は約 5m 離れている。そこで、Point A および B には半径 2.5m の範囲における浸透流が集積すると仮定する。また、この半円の外周には長良川から 2 次元

に水が浸透してくると仮定する。これら 2 つの現象は非定常であるが、以下に示す解析では前者を非定常、後者を定常として取り扱う。この理由については後述する。

長良川の水位変化によって自由地下水の水位  $\zeta(x, t)$  は次式のように変化する<sup>18)</sup>。

$$\zeta(x, t) = a \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\sigma K}{2}} x\right) \cdot \cos\left(\sigma t - \sqrt{\frac{\sigma K}{2}} x\right) \quad (6)$$

$$K \equiv \frac{\lambda}{kh_0} \quad (7)$$

ここに、 $a$  は長良川の水位の振幅、 $\sigma$  は角振動数、 $\lambda$  は空隙率、 $k$  は透水係数、 $h_0$  は平均水位差、 $x$  は長良川から木曾川方向の距離、 $t$  は時間である。続いて、長良川から半円の外周まで浸透してきた水は、Point A および B にそれぞれ定常的に集積するものと仮定する。ところが、層流である浸透流が一点に集積し、管路的な乱流となって流出するといったモデルは現在開発されていない。そこで、簡単に井戸のモデルを代用すると、湧水量  $Q$  は次式となる<sup>18)</sup>。

$$Q = \frac{\pi k \zeta^2}{2 \cdot 2.30 \log_{10} L/D} \quad (8)$$

式(6)~式(8)を使用する上で、空隙率  $\lambda$  および透水係数  $k$  が未知量として残される。ここで、 $\lambda=0.1$  と仮定し、透水係数  $k$  は計測で得られた断面平均流速  $U_m$  から式(5)を用いて湧水量  $Q$  を算出し、式(6)~式(8)から求めた。空隙率  $\lambda$  を 0.1 とする仮定が妥当かどうかは地質調査を行わなければならないが、透水係数  $k$  を計測値から逆算しているために、厳密な空隙率  $\lambda$  を求めても計算結果の精度が向上する効果はあまりない。

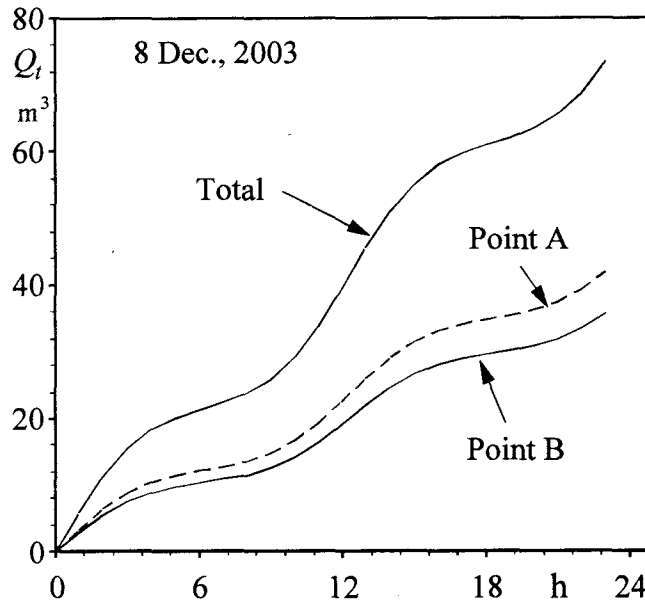


図-10 木曽川19KmワンドのPoint AおよびPoint Bにおける総湧水量の計算値

以上より、式(6)から半円の外周における水位 $\zeta(x,t)$ が計算され、続いて式(8)から湧水量 $Q$ を算出することが可能となった。

なお、長良川から半円の外周上までの流れを非定常で取り扱っているにもかかわらず、半円内での現象を定常として取り扱ったのは次のような理由に基づく。半円内での現象も非定常現象として扱うと、透水係数だけでなく、その影響範囲の半径も未知量となる。すると両現象を表す式を連立させると2つの未知量が残る、式が閉じない。一方、Point AおよびBの距離は約5mと固定されており、少なくとも両点を結ぶ直線上における影響範囲は変化しないことが証明されている。それ以外の領域では影響範囲が時々刻々と変化する可能性があるが、両点を結ぶ直線上付近では影響範囲が固定されているので、それほど大幅な変化はないと推測される。また、長良川から半円の外周までの距離が約50mであるのに対し、半円の半径は2.5mであり、半円内の現象を定常として扱ってもほとんど影響がないと考えた。

### 3.5 対象ワンドにおける総湧水量の概算

計測日の2003年12月8日の総湧水量 $Q_t$ を概算する。測定値から得られた透水係数を平均し、その透水係数が時間的に変化しないと仮定し、式(6)~(8)を用いて湧水量 $Q$ を算出した。図-9に2003年12月8日のPoint A, Bの湧水量および両者の湧水量を加算した湧水量の時間変化を線で示すと共に、実測値をプロットで示した。図-7に示した水位変化に伴って湧水量が変化することが理解される。また、水位差が急激に変化するに伴って、湧水量も変化することも理解される。図中6時および18時前後では、

長良川の水位よりも木曽川の水位が高いにもかかわらず、湧水量が正となっているのは、長良川から木曽川に浸透してくる水を式(6)のように非定常として解析したため、長良川の水位の影響が瞬間的には木曽川まで届かないために生じている。続いて、図-10に2003年12月8日0:00を基点とした総湧水量 $Q_t$ を示す。

$$Q_t = \int Q dt \quad (9)$$

Point AおよびBから一日30~35 $m^3$ もの湧水量が長良川から木曽川に流れており、対象とした19Kmワンドでは一日約75 $m^3$ の水が流れていることが示唆された。ただし、この水の起源が長良川からのものであるかは現時点では不明である。今後、さらなる調査を行い水の起源を特定したい。また、こうしたスポットがどの程度の密度でどの程度の範囲に分布しているかを調査し、長良川から木曽川に浸透している水量を把握したい。

## 4. おわりに

木曽川の河口から19Km上流のワンドにおいて、堤防付近にスポット状の湧水流が発見された。ここは堤防を挟んで長良川と隣接している領域である。湧水流の流速が長良川との水位差に応じて変化していることや、湧水流の水温が他の浸透流のものと異なることから、この湧水流は長良川から浸透してきたものと推察された。地下における水の挙動を簡単にモデル化して解析した結果、一つのスポットから一日に35~40 $m^3$ もの湧水があることが推測された。

ただし、こうした湧水が長良川からのものかは現時点で不明であり、今後調査を行い解明したいと考えている。また、同様なスポットが木曾川の他のワンドでも存在するかどうかを今後調査したい。

謝辞：本研究は土木学会中部支部調査研究委員会の一つである木曾川ワンドの形成過程と水理特性に関する検討委員会（代表：鷺見哲也）において調査の必要性が着目されて行ったものである。現地計測を行うに当たり便宜を図っていただいた国土交通省中部地方整備局木曾川下流河川事務所に謝意を表す。京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻博士後期課程の東良慶、九州工業大学大学院工学研究科建設社会工学専攻の常松智博、当時九州工業大学学部生の木内大介（九州工業大学大学院）、武田雅俊（愛媛県庁）および松本和也（九州工業大学大学院）の諸氏には現地計測に協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 中川研造, 河原能久, 玉井信行: ワンド内の流れの水理特性に関する実験的研究, 水工学論文集, 第39巻, pp.595-600, 1995.
- 2) Muto, Y., Imamoto, H. and Ishigaki, T.: Velocity measurements in a straight open channel with a rectangular embayment, *Proc. of 12th Congress of APD-IAHR*, pp.353-362, 2000.
- 3) 禰津家久, 鬼束幸樹, 池谷和哉: PIVを用いた開水路凹部流れにおける水平渦構造の解析, 土木学会論文集, No.II-55, pp.53-61, 2001.
- 4) 禰津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介: 開水路わんどモデル内の乱流特性と組織渦, 土木学会論文集, No.684/II-56, pp.11-20, 2001.
- 5) 木村一郎, 細田尚, 安永良, 村本嘉雄: 開水路流れ死水域周辺の水面振動・流体混合特性, 水工学論文集, 第41巻, pp.711-716, 1997.
- 6) 禰津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介, 矢野勝士: 側壁に凹部を有する開水路乱流の組織構造に及ぼすフルード数の影響, 土木学会論文集, No.733/II-63, pp.77-88, 2003.
- 7) 池田駿介, 吉池智明, 杉本高: 不透水制群を有する流れの構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 第43巻, pp.281-286, 1999.
- 8) 禰津家久, 矢野勝士, 光成洋二: 開水路流れにおける上流ワンドが下流ワンド周辺の質量・運動量交換特性に及ぼす影響に関する研究, 応用力学論文集, Vol.6, pp.951-958, 2003.
- 9) 藤田一郎: トレーサーを利用した実河川水制周辺流れのビデオ画像解析, 水工学論文集, 第42巻, pp.505-510, 1998.
- 10) 富永晃宏, 田本典秀: 越流型連続水制群周辺の流れ構造に及

ぼす水制設置角度の効果, 水工学論文集, 第48巻, pp.805-810, 2004.

- 11) Nezu, I. and Onitsuka, K.: PIV measurements of side-cavity open-channel flows, *J. of Visualization*, The Visualization Society of Japan, Vol.5, No.1, pp.77-84, 2002.
- 12) 木曾三川水制技術検討委員会: 平成12年度第2回木曾三川水制技術検討委員会資料, (財) 国土開発技術研究センター, 2001.
- 13) 木村一郎, 北村忠紀, 鷺見哲也, 庄建治朗, 武田誠, 鬼束幸樹: ワンドの水理と河川環境, 平成11年度~平成13年度河川懇談会共同研究報告書, 2001.
- 14) 木村一郎, 北村忠紀, 鷺見哲也, 武田誠, 鬼束幸樹, 庄建治朗, 大塚康司: 木曾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, 河川技術論文集, 第8巻, pp.365-370, 2002.
- 15) 鷺見哲也, 鷺津善之, 辻本哲郎: 木曾川わんど部での水域堆積域間水交換, 河川技術論文集, 第8巻, pp.371-376, 2002.
- 16) 建設省木曾川下流工事事務所: 木曾三川下流部空中写真, 1995.
- 17) Nezu, I. & Nakagawa, H.: *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, Rotterdam, 1993.
- 18) 椿東一郎: 水理学I, 森北出版, 1995.

(2004年4月16日 受付)