

精密自記流向流速計による地下水流動の水理解析

Analysis of under ground flow with autographical current meter in directional and velocity

名城大学理工学部 正員 前 田 都喜春
東邦地水株式会社 伊 藤 恒 雄

1. はじめに

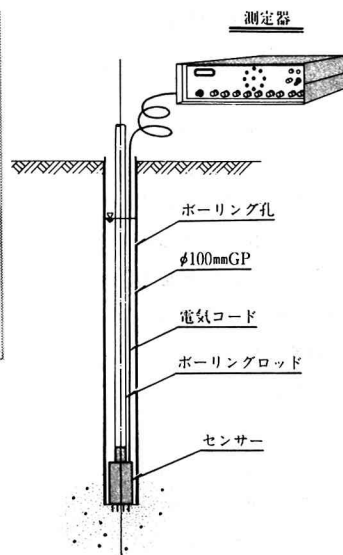
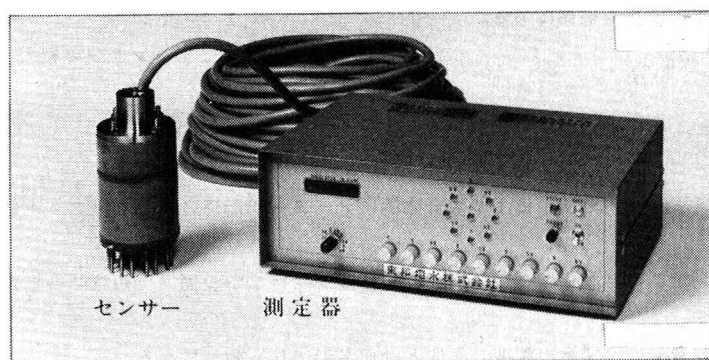
地下水流動の定量的・定性的な測定は、堤防の漏水問題や建設工事への機敏な対応などから正確な状況把握が不可欠となつている。最も初歩的かつ代表的な測定法は、揚水井と観測井による多孔式の流向・流速、および透水係数の決定法であろうが、この方法は揚水井と観測井の距離的・平面的分布の位置関係から、測定がオーソドックスで長時間にわたり拘束され、かつ流動状況の十分な把握が行われない場合があり（欠測）、調査費が高価となる等欠点も多い。このため、地層内に存在する地下水解析では必要な諸量（流速、流向、流動パターン、賦存量、涵養源など）を簡単に短時間に精度良く測定できる方法が望まれている。

これらの問題点に対して、単孔式による任意の深さの流向流速測定法が開発され、ほう素一中性子水分計による測定^{1), 2)} および塩素トレーサー法による測定^{3), 4)} が地下水の挙動観測に適用された。また、単孔式の非揚水法で水位回復法による透水係数の新たな測定器の試作⁵⁾ も行われた。しかしながら、これらの方法は原理的には好ましくても実用面での取扱い方法などに若干の問題点が残っている場合が少なくない。

本論文は、単孔法による高い測定精度を保持しつつ、上記の種々の測定法の欠点を補う流向流速測定器を考案⁶⁾ し、この流向流速計を用いて木曾川河川砂州一帯の伏流水・地下水の流動状況等の水理調査に適用した結果について報告する。

2. 精密自記流向流速計の構造

地層内に存在し流動する地下水の性状や挙動を的確に測定する精密自記流向流速計の概要を図-1に示した。また、地下水流を感知するセンサーの概要は図-2に示した。



仕 様

●センサー

外 径 …… φ84mm
全 高 …… 250mm
接続コード …… 長さ20m
上部接続 …… φ40.5mm ボーリングロッド
重 量 …… 約1.5kg (コード別)

●測定器

外形寸法 …… 巾380×高125×奥行250mm
電 源 …… DC6V (単1電池4本)
重 量 …… 約4.5kg

図-1 流向流速計の概要

(1) 測定方法

①測定しようとする帯水層までボーリングし、孔壁の崩壊を防ぐためφ100mmのケーシングパイプを挿入し孔底をさらえた後センサーを孔底に接着貫入する。

②センサー下端の8方向の電極の接地抵抗を測定器でアジャストし、次にセンサー内のバルブを開きセンサー下端中央のトレーサー放流口よりNaCl溶液を放流する。センサー回路が作動し、 $\frac{1}{10}$ sec単位でカウントを開始して5桁の液晶反応で経過時間が表示される。

③地下水流がトレーサーを運び外周の電極に到達した時点でその方向のカウントは自動的に停止（赤色のパイロットランプ点灯）し、流向流速を自動的に高精度で測定する。

④8方向全てのカウントはメモリーによつて個々に記憶されている。必要な方向にスイッチを切り換える事によつて、その方向の電極に到達した時間が簡単に読み取れる。

(2) 解析方法

①個々の方向の流速Vは次式で求める。

$$V = \frac{L}{T} \quad (\text{cm/sec}) \quad (1)$$

ここで、L：センサー中央のNaCl放流口と電極までの距離（cm）、T＝到達時間（sec）。

ただし、流れの方向は最も早く到達した方向のベクトルを中心として、その左右の速度ベクトルを合成することによつて求める。流速は最も速い流速値を採用する。

②測定器で計測される地下水流の流速は実流速であるから、ダルシーの法則による流速 V_0 （見かけの流速）とは次の関係にある。

$$V_0 = K \cdot I \quad \therefore V = V_0 / \beta \quad (2)$$

ここで、K：透水係数、I：動水勾配、 β ：有効空ゲキ率。

(3) 本器の特長

①本測定器はAC電源不用でかつメモリー内蔵機構によつて自動的にデーターが記憶され、チャンネル毎に出力が取り出せる計測器である。

②8方向の電極をもつセンサーと測定器の自動化によつて高い測定精度を保持しつつ簡便で短時間の自動観測が可能になった。

③ボーリング孔は単孔井で良く、経費も安く任意の深度の流向と流速が効率良く測定できる。

④トレーサーは少量のNaCl溶液でよく、観測井内の物理・化学的性質の変化は生じない。

3. 実河川への適用と水理調査

流向流速計の実河川流域への適用として、図-3のように木曾川上流・東加賀野井地区（愛知県尾西市）の河川砂州一帯の、主にイタセンバラ生息池に関する伏流水・地下水等の流動状況の把握とその保全についての水理調査を行った。

イタセンバラは木曾川と淀川水系に生息する天然記念物のコイ科タナゴ類の一種で、水がきれいで夏季水温の低い堤防近くの池状となつたところに生息している。河川管理面から言えば伏流水や地下水の漏水防止

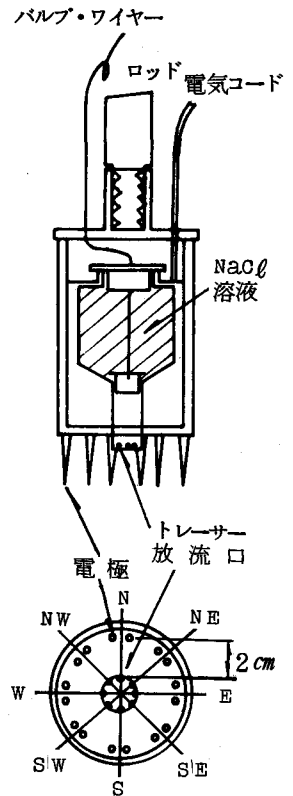


図-2. センサーの概要

上の重要な地点となるところに問題があるようである。

さて、当地域の現況は予備調査によつて次のことが明らかになっている。

①当地域はE L-3~5 m~10 mまで砂層で一部薄層のシルト、レキを含む。E L-10~20 mはシルト、それ以下は厚5 m程度の砂層、シルト層があり、さらにその下位はレキ層となつている。

②当地域の水位は本川水位よりも約40 cm高く、池は独立している。また、ボーリング孔利用のトレーサー試験では流向は不明であつた。

③イタセンバラの生息池には水温の影響があり、伏流水の供給があると考えられるが生息池の水源の現状は余り判然としていない。

このような状況のなかで、イタセンバラ生息池の保全と漏水対策の整合性を考慮すべく一連の水理調査が行われた。

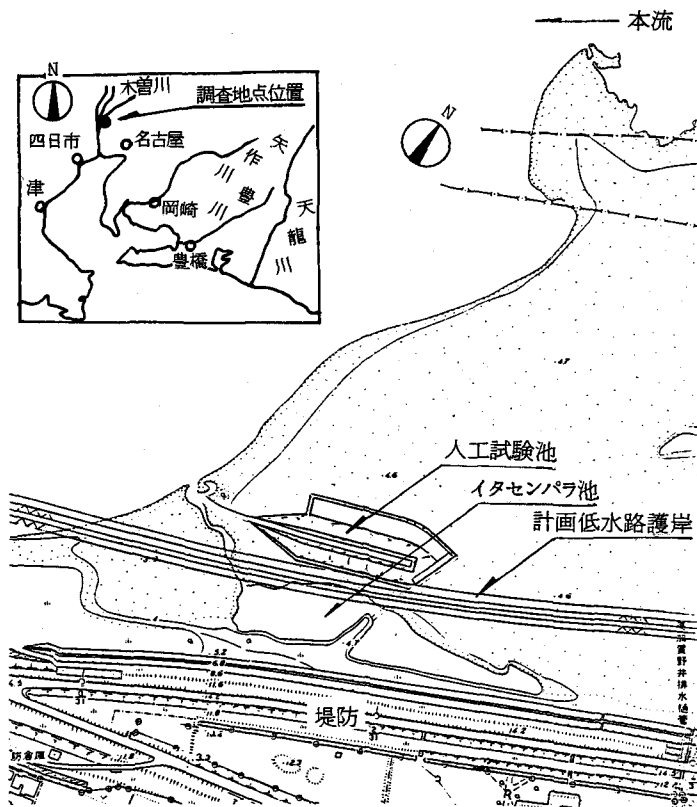


図-3 調査地点位置図

4. 水理調査結果とその考察

(1) 木曾川上流河川砂の分析

木曾川上流3.12 km地点の河川砂の粒度分析結果は図-4に示した。河川砂は均等中砂(0.25~0.5 mm~0.84 mm)の粒径が96%を占めている極めて均等粒径砂で構成され、粒径による透水係数の概略値⁷⁾は、Hazenの公式、CreagerによるD₂₀の分類から判断すると次のようになる。

$$k = 100 D_{10}^2 = 8.12 \times 10^{-2} \quad (\text{cm/sec})$$

$$k = f(D_{20}) = 3.20 \times 10^{-2} \quad (\text{cm/sec})$$

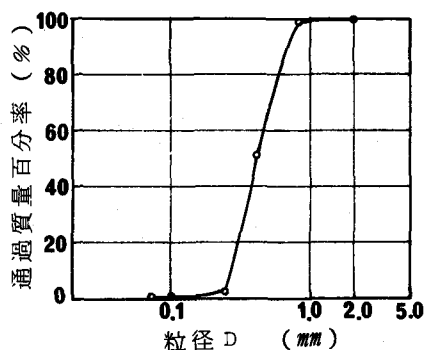


図-4 粒径加積曲線

(2) 流向流速測定結果

イタセンバラ池および人工試験池周辺の伏流水・地下水の流動状況の測定法は、まず、掘削容易な砂地盤に測定孔を広範囲に分布して自由水面の高さまで(0.5~0.8 mの深さ)掘削し、ケーシングパイプを埋込み、約20時間放置したのち精密自記流向流速計を用いて各地点の流動状況を測定した。その測定結果を表-1に示した。

これらの測定は定常時と増水時の2つに分けて行い、その結果を整理して平面的分布図にまとめたのが図-5、図-6である。図-5は昭和58年8月16日測定の定常時の流向流速を示し、図中○印のみの箇所は測定を行つたが流向流速は計測されない状態、いわゆる流れのない状況を表している。図-6(昭和58

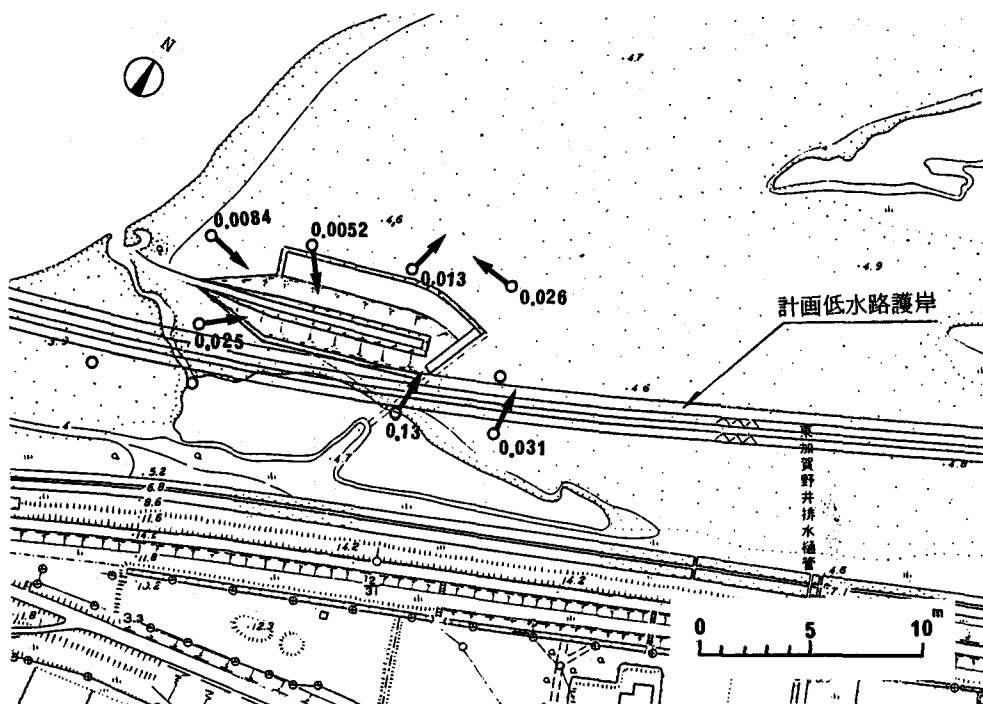


図 - 5 流向流速図 (定常時) 単位 : cm/sec

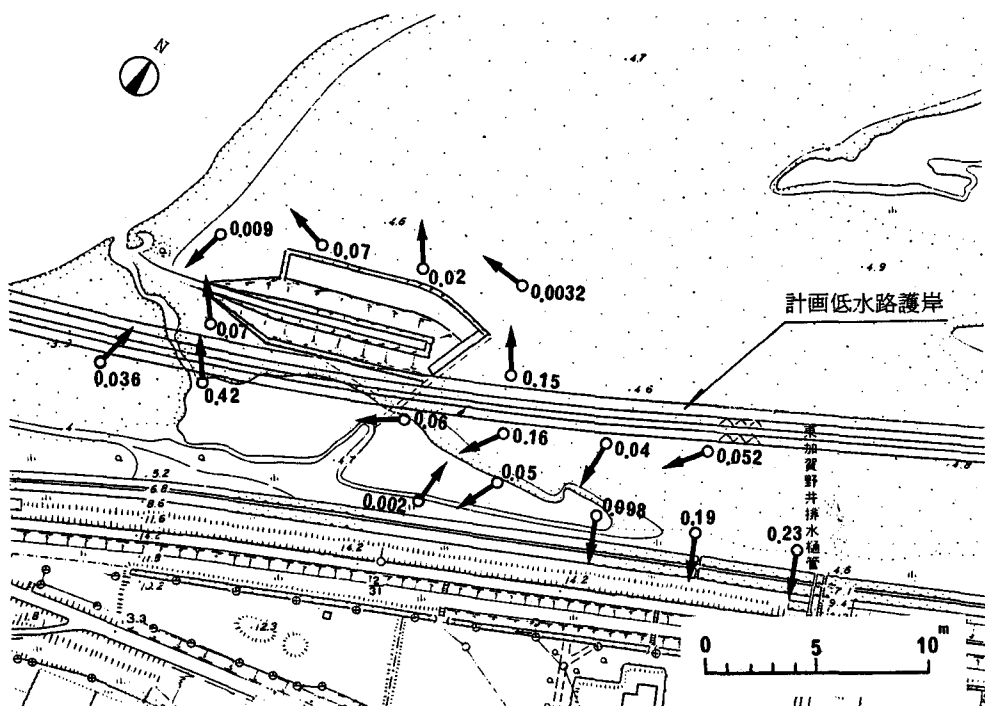


図 - 6 流向流速図 (増水後) 単位 : cm/sec

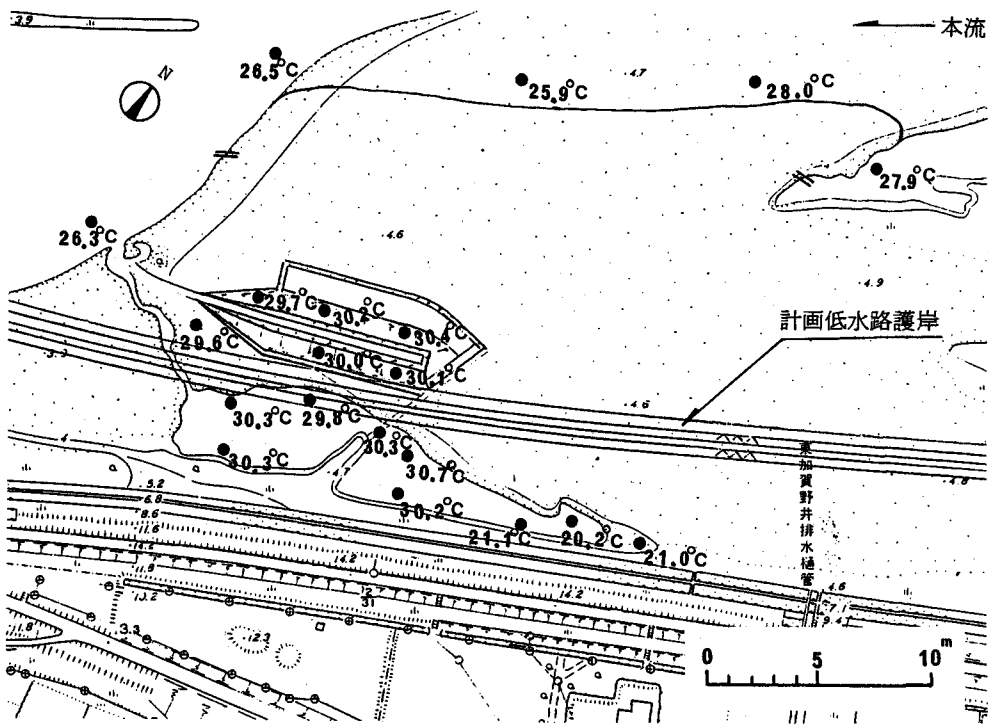


図 - 8 水温分布図

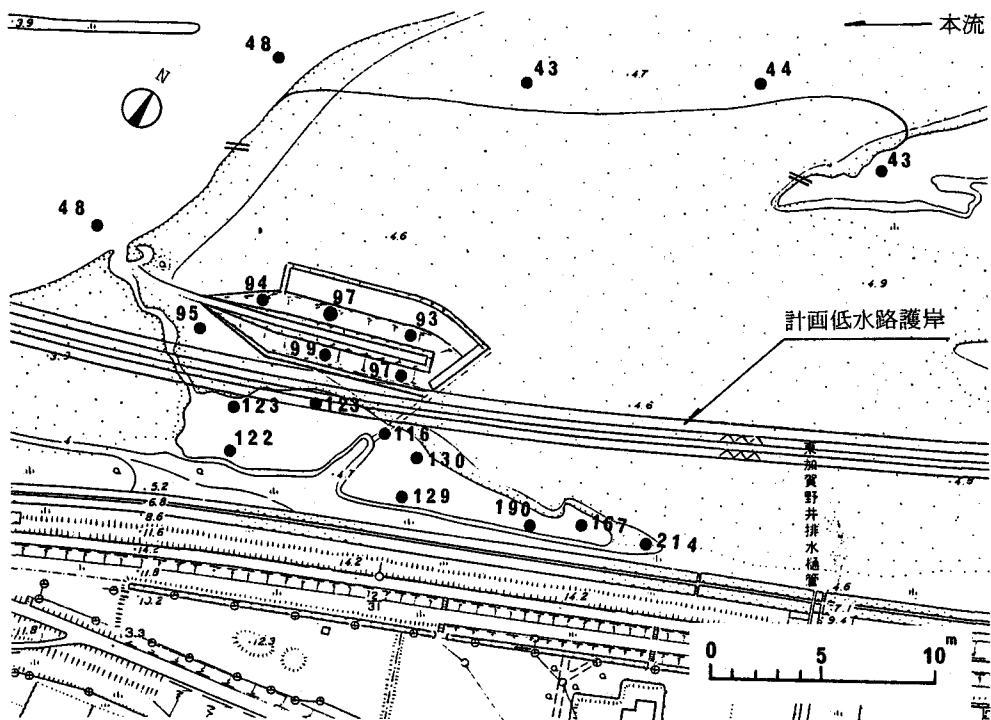


図 - 9 水の電気伝導度 単位: $\mu\text{S}/\text{cm}$

年8月19日測定)は、台風2日後の増水の影響が若干みられる状態の流向流速図である。

表-1 流向流速データシート

まず、定常時のイタセンバラ池は、渇水期の地下水流動が少い状態の流れを示し、普通一般の流れのように水位の高い方から人工試験池の水位の低い方へと判然とした伏流水の挙動がみられる。

次に、増水によつてこの流れのパターンは大きく変化し、この増水時の挙動が水理解析上の大きな要因となる。

増水時の豊富な浸透・流出水量による流向流速は、イタセンバラ池へ向う流れと人工試験池へ向う流れに分岐流出している挙動をとり、定常時のように一様な方向への流れではないことと、それらが供給源となつて2つの池の水位を上昇させている状況がわかる。

ただし、増水時の変化として、図-7のようにイタセンバラ池の水位変化は少いのに対して、人工試験池の水位変化が著しく大きいことが特徴として挙げられる。このことは、増水により本流から人工試験池への伏流水の流れが活発になつて現われている結果であり、人工試験池周辺には伏流水の流入経路が存在し、本流の流れと直結しやすい動きを見せている。

つまり人工試験池が本流からの伏流水の影響を受け易いのに対し、自然にできたイタセンバラの生息池はこのような影響を受けにくいことが明らかになつた。イタセンバラの生息条件として地下水流動の変化は少い方がよい(水温を一定に保ち易い)ようであり、後述の水温変化等と合わせて検討すれば既往の各種調査結果との総合的考察に役立つものと思される。

(3) 水温および電気伝導度の測定結果

イタセンバラ池と人工試験池周辺の水温と電気伝導度(水の純度)を調査した結果は図-8、図-9に示した。これは増水後の変化率のより大きな状況において測定した結果である。また、測定時間は昭和58年8月20日午後3時であり、一日の気温、水温の上昇後の結果である。

これによると、本流の純水度(48~48)と、イタセンバラ池の源泉部の塩化クロール量の富裕化(対本流、167~214)が対称的である。ここでは、イタセンバラ池の上流端と下流端、および人工試験池の3者の水温と水の純度を比較して検討する。

イタセンバラ池の上端は最もクロール量が多く、常時の水温も低く流入地下水の存在が確実にうかがわれる場所である。そして池の下端にいくほど本流からの伏流水の影響が入り込み、クロール量は希釈(120前後)されて水温も上昇していることが

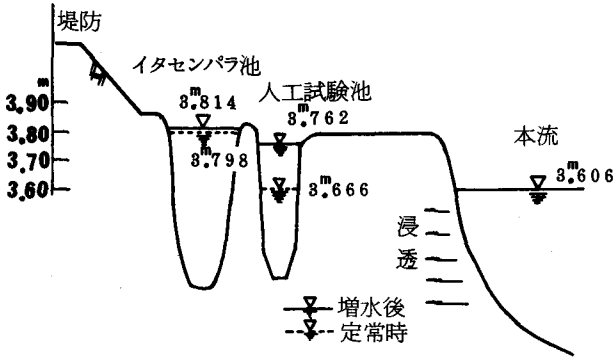
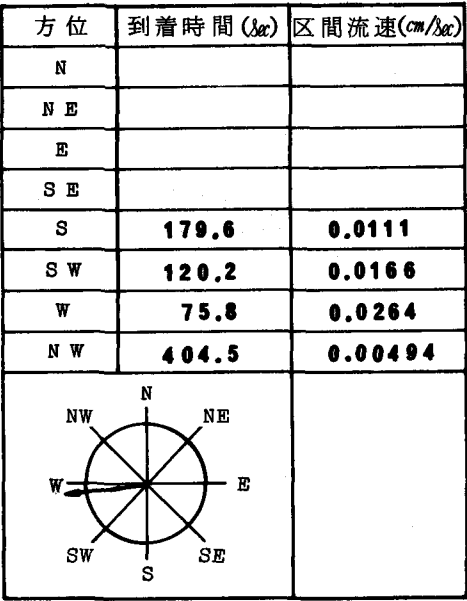


図-7 水面の高さ

わかる。

これに対して、人工試験池の水の純度は本流とイタセンバラ池の中間的な値を示し、イタセンバラ池のクロール量が浸透流出の流れに乗つてしだいに希釈されながら人工試験池周辺へ波及している状況がわかる。ただし、この付近は本流からの伏流水の経路上にあり、この流出挙動のため人工試験池の純度は希釈の度合いが強くなる結果（93～97）を示している。

表-2 代表的な水の電気伝導度

なお、電気伝導度は地下水のイオン混合溶液濃度の電気比抵抗の逆数で表われ、塩類総量の指標として用いられている。代表的な水質との関係は表-2のような値を示す。

これらのことから、イタセンバラ池上流端の源泉部付近には低温の確実な流入地下水の経路が存在して水中の植物プランクトンや藻類の生育に大きく貢献し、ひいてはこれらを食物としているイタセンバラの生息に大きな役割を果たしているものと考えられる。そして、これらの性状や挙動の特徴から、表流水や伏流水の影響を受けないようにすることがイタセンバラの生育にとつて最良の方策になるものと考えられる。この意味では、現在の人工試験池は植物プランクトンや藻類の成長に対して、これらの関係が適合しないような伏流水・地下水の挙動を示しているようである。

水 質	電気伝導度: $\mu\text{S}/\text{cm}$
純 水	0
上 水 道	50 ～ 200
海 水	10000～20000

5. 結論

今回の測定では、木曾川流域の河川砂州一帯の地下水流動を調査するため、精密自記流向流速計を用いて流動状況等の観測を行い、総合的に水理解析を行った。

地層内において流動する地下水の挙動をとらえる方法は、従来、多孔式観測が代表的であつた。多孔式観測から単孔式への転換の目的は、単孔井による高い測定精度と簡便に短時間に効率良く測定することに外ならない。その反面、多孔式観測では地層地質のある範囲の平均的な流向流速が得られていたのに対し、単孔式では地層構成の点のデータが得られるようになる。したがつて、単孔式で面的構成を補足していくためには測定位置を広範囲に分布し、点のデータの蓄積によつて地下水の挙動を解析していくことができるようになる。その場合に測定の簡便性と短時間の高精度の測定法が大きなメリットを発揮することは言うまでもない。

今回の測定を通して得られた主な知見を要約すると次のようになる。

- 1) 従来、多孔式観測の欠点である長時間のオーソドックスな作業性に対して、単孔井による精密自記流向流速計は、高精度で短時間にかつ自動的にデータが記録されるため、効率良く広範囲の観測に適用でき、地下水流の挙動解析の信頼性はより向上する。
- 2) イタセンバラ池からの流出浸透の動向は、地層構成や地下水位の高さ（増水の影響）によつて質・量ともに絶えず変化している複雑な流れを示すことが判明した。
- 3) 伏流水の流向流速は、イタセンバラ池から浸透流出する地下水の流れと、木曾川の表流水・伏流水とが複雑に相互干渉しているようである。
- 4) 池の上流端（源泉部）の水温は、表流水は勿論、伏流水に比べても非常に低い。また、池の水の電気伝導度は表流水に比べ異常に高く、これらのことから、伏流水本流とは別の方向からの流入地下水が存在するものようである。
- 5) イタセンバラは河川水よりもややクロール量の多い低温の地下水を好んで生息しているようである。このことはまた、その食物である植物プランクトンや藻の生育に好都合のようでもある。

今回の比較的簡単な現場作業と水理解析の結果から、今後の方針として次のことが指適されよう。

- ① 今後は堤内地の調査を行い、地下水の流入経過を追跡する。

- ② イタセンバラ池を移動する場合（現在の人工試験池）は、地下水の流動を従来通りに保つことが大切である。
- ③ このことから、新池と旧池を結ぶ（新しい堤防の下）導水管路等を設置する事も必要と考えられる。
- ④ 旧池は常水面まで透水性良好なレキで埋め立て、通水性を良くしておくことも大切となる。
- ⑤ イタセンバラが低温のクロール化の水質を好むとすれば、新池へ流入する伏流水の流れをカットし、水温と水質を保全する手段を考えることも必要となろう。

最後に、本調査に関して多大な御便宜を載しました建設省中部地方建設局木曾川上流工事々務所担当官の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 有泉・山本・土弘：ほう素—中性子水分計を利用した単一井による地下水の流速・流向測定法，第7回土質工学研究発表会講演集，pp 37～40，1972
- 2) 山本・石谷・土弘：小口径単一井を利用した深度別地下水流動の方向・流速測定方法，第14回土質工学研究発表会講演集，pp 53～56，1979
- 3) 渋谷・日野・平山：単孔法による地下水の流向・流速測定器の開発，第16回土質工学研究発表会講演集，pp 105～108，1981
- 4) 小松田・西村・平田・日野：流向流速計を用いた微地形の地下水の状態について，第18回土質工学研究発表会講演集2の1，pp 69～70，1983
- 5) 永木・井戸・宇都宮・駒井：現場透水試験器の構造と測定方法の紹介，第18回土質工学研究発表会講演集2の1，pp 77～78，1983
- 6) 東邦地水株式会社，精密型自記流向流速計の概要・TW-1型，実用新案申請中，1982
- 7) 土質工学会：土と基礎の設計計算演習，p 36，1979