

## 比抵抗式孔内地下水流向流速計の原理と測定例

加藤 誠\* 鹿野 快男\*\*  
平田 洋一\*\*\* 平山 光信\*\*\*

Developments of Instruments for Groundwater Flow Velocity and Direction  
Measured its Specific Resistance Change in a Boring Hole.

Makoto KATO\* Yoshio KANO\*\* Youichi HIRATA\*\*\* and Mitsunobu HIRAYAMA\*\*\*

\* Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology.

\*\* Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology.

\*\*\* Taiseikisoseitukei Co., Ltd.

## 1. はじめに

従来、地下水の流れている速さや方向を知ろうとすると、例えば、対象とする地層に達する井戸より水を汲み上げ、その井戸の周りの多数の観測井戸の水位を同時に観察し、揚水量や井戸の水位により、タイムの解析方法などにより求めた。従って、現場の地下水脈の状態を把握することは多大な労力と経費を要した。

そこで、たった1本のボーリング孔の中を横切る地下水の速度と方向を計測できる技術が開発されることが古くから望まれていた。そして、削孔された地盤を構成する地層毎の地下水の流向流速が明らかとなり、さらには、複数のボーリング孔での流向流速の測定により、地盤全体の地下水の動態をつかむ技術が開発されたのでここに紹介する。

2. 孔内地下水流向流速計の種類と特徴<sup>1)</sup>

最近、「建設省の地下水流向流速計の開発」で評価を受けた測定方法によれば、各測定機器の諸元はTable 1の通りである。

これらの調査方法の特徴は、中性子計数方式では測定流速幅が広いこと、測定時間が短いこと、放熱方式ではボーリング孔が85mmと比較的小口径で可能なことである。しかし、これらの測定流速は孔内空隙部の地下水の流れより地層内の流向流速を求めているので、孔内と地層内を通過する地下水の速さと方向が一致しているかどうか注意を要する。

また、放熱方式では、熱を放射して、周囲の水温の変化を計測するので、低流速の測定には空隙内の水の対流

などが起っていないか注意を要する。

比抵抗方式では測定に時間を要するが、測定孔内のセンサー部に研磨用の $\phi = 2$  mmのガラスビーズを詰めて測定するので、測定値と地層内の流向流速は前者らのそれより一致していると思われる。

方向の測定に関しては、放熱、比抵抗方式は、センサー部の設置の際にその方位を決めるが、方位計にホール素子を用いているので、地盤内の地磁気の影響に注意を要する。

## 3. 比抵抗式孔内地下水流向流速計の原理

3-1. 測定の原理<sup>2)</sup>

比抵抗が地下水のもの異なる溶液を孔内に注入し、地盤の地下水がその溶液を流して行く。それに従って、孔内の比抵抗の分布は変化する。孔内の最上流より最下流へと比抵抗は変化する。このような比抵抗の変化を孔内に固定された電極で測定することによって、水の速さと方向を知ることができる。この方法は、いわゆる、トレーサー法的一种で、電導度の異なる水をトレーサーに使用している。

この原理を説明するために五電極をFig. 1(a)のごとく配置した場合に、孔内の地下水の移動につれて出力電位差(V)がどのように変わるかについて説明する。

なお、Fig. 1(a)の五電極は流れに平行なものをA-A'線に、流れに垂直なものをB-B'線に、中心のものをC点に配している。

そして、Fig. 1(b)のようにブリッジ回路を構成する。Fig. 1の様に電極と回路を結線し、孔内に溶液を流すと、時間が経過するにつれてFig. 2の②から⑤のように溶液

\* 東京農工大学 農学部 \*\* 東京農工大学 工学部

\*\*\* 大成基礎設計(株)

## 比抵抗式孔内地下水流向流速計の原理と測定例

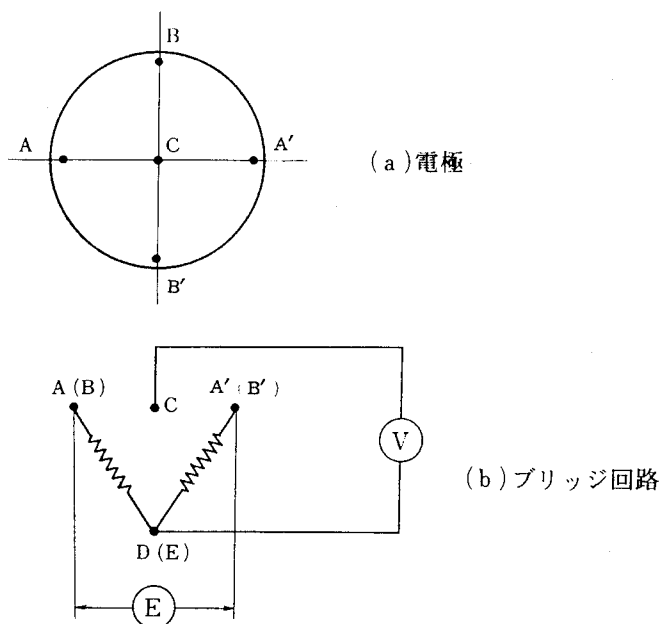


Fig. 1 測定原理の説明図 (I)

Table 1 各測定機器の諸元

調査法	中性子計数方式	放熱方式	比抵抗方式
ボーリング孔径	150mm	85mm	116mm
ケーシング内径	80mm	55~65mm	100mm
パッカー	エアパッカー	エアパッカーと ゴムパッカー	ゴムパッカー
トレーサー	ほう素水溶液	放熱	蒸留水など
方位計	機械的制御装置	ホール素子	ホール素子
使用電源	AC100V	DC12V	DC12V
観測時間 *1	3時間	3時間	8~10時間
測定範囲	$10^{-1} \sim 10^{-5}$ cm/sec	$10^{-0} \sim 10^{-3}$ cm/sec	$10^{-2} \sim 10^{-5}$ cm/sec
その他	任意深度測定可 繰り返し測定可	任意深度で繰り返し 測定可	任意深度測定可能

\*1 (深度10m1回当りの観測時間・観測井の設置は除く)

が移動し、それにしたがってFig. 2の⑥のように出力電位差が変わる。Fig. 2の①は、 $t=0$ でプローブ内に溶液が封入されている状態なので、A-C間とC-A'間の比抵抗値( $\rho$ )は同じである。従って、Fig. 1(b)のC-D両電極間の電位差は0である。

Fig. 2の②は、 $t_1$ 時間経過して、地下水の流れにより溶液の流れが $x_1$ だけ移動した状態である。A-C間の比抵抗値は地下水の比抵抗値と溶液の比抵抗値の混ざった値を示し、C-A'間では溶液の比抵抗値のままであるので、A-C間とA-C'間の比抵抗値の違いによりFig. 1(b)のD-C間に電位差が発生する。

Fig. 2の③では、 $t_2$ 時間経過して溶液がA-C電極間だけ移動した状態である。A-C間は地下水の比抵抗値を示し、C-A'間では溶液の比抵抗値を示す。この時に、Fig. 1(b)のD-C間の電位差は最大となる。

Fig. 2の④は、 $t_3$ 時間経過して溶液がC-A'間に移動した状態である。A-C間は地下水の比抵抗値であるが、C-A'間は溶液と地下水の比抵抗値の混ざった値を示す。この時に、A-C間とC-A'間の抵抗値の違いによりFig. 1(b)のD-C間に電位差が発生するが、

Fig. 2の③の電位差よりは小さい。

Fig. 2の⑤は、 $t_4$ 時間経過して溶液がプローブより流れ去った状態であるが、A-C間とC-A'間の比抵抗は地下水の比抵抗と同じで、Fig. 1(b)のD-C間の電位差は0となる。なお、B、B'電極が地下水の流向に直角に配置されているので、B-C間とC-B'間には地下水が流れていても、また、溶液が移動していても、比抵抗の変化が生じないので、Fig. 1(b)のE-C間の電位差は常に0である。

実際の測定器には、このような電極が孔断面内の円周上に12電極と中心に1電極が配置されている。

円周上の電極は30度間隔に取り付けられている。そして、中心電極と対角線上の二電極によりブリッジ回路が六組構成される。この六組の電位差の出力は6チャンネルの打点式またはペン式の記録計により記録される。

例えば、Fig. 3(a)のように、孔内の地下水の流入側に①、②、③の電極があり④、⑤、⑥の電極が流出側にあるような流れの場合にはその記録計出力はFig. 3(b)の様になる。流入側を+側に記録させれば、流出側は-側に記録される。

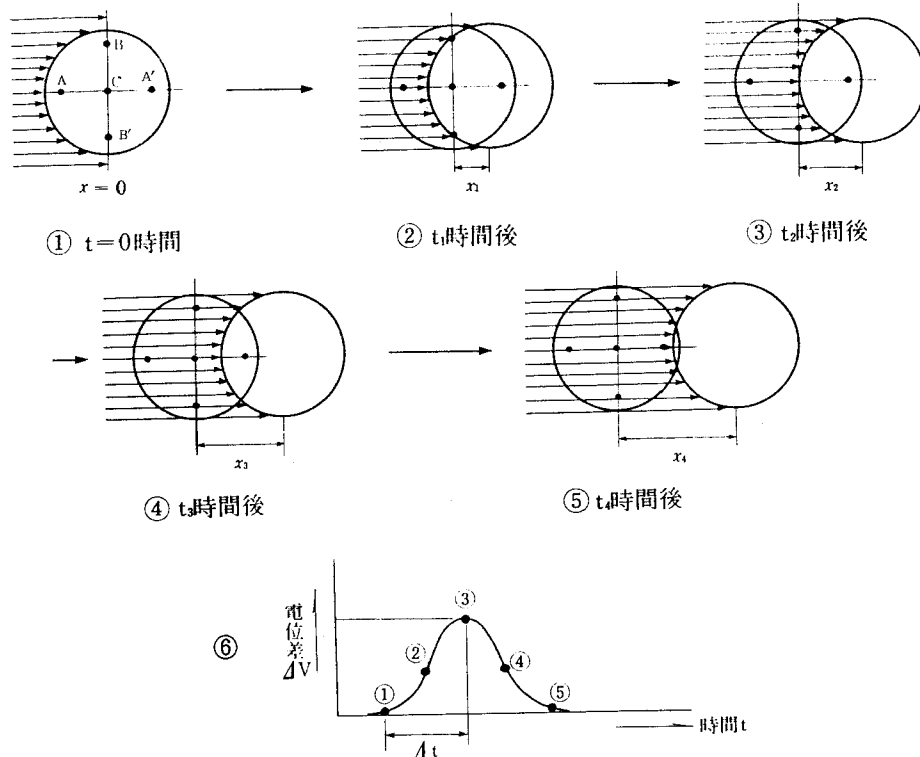


Fig. 2 測定の原理の説明図 (II)

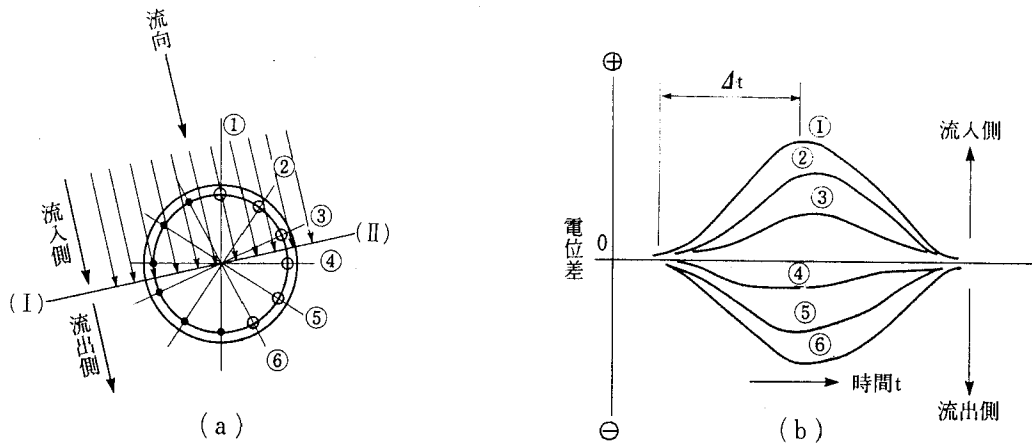


Fig. 3 測定の原理の説明図 (Ⅲ)

出力の最も大きい曲線が最大値に達するまでの時間を  $\Delta t$  と測定できたとすると、電極間  $\Delta d = 15\text{mm}$  で製作しているので、流速 ( $V$ ) は

$$V = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で求められる。

この流速はプローブ内の流速であるので、ダルシー流速 ( $V_d$ ) に変換して実用に供する必要がある。

$$V_d = \alpha \cdot n_o \cdot V \quad \dots\dots\dots (2)$$

- $V_d$  : ダルシー流速
- $\alpha$  : 計器補正係数
- $n_o$  : 有効間隙率

そして、プローブをボーリング孔へ設置する時、A電極を磁北と一致させておけば出力の大小と電極の位置とによって、地下水の流れている方向を知ることができる。

3-2. 孔内流向流速測定のための数値的解析<sup>3)</sup>

半無限に広がる砂質地盤のなかに、(a)円形断面の砂のない空隙がある場合と、(b)円形断面に地盤と異なる砂が充填されている場合とについて、円形断面中の水の流速分布を知るための数値解析は、1959年、1961年南によって発表されたのみであった。1981年になって佐野<sup>3)</sup>により発表された。

そこで、佐野の論文「多孔性媒質中に穿つ円柱状の空洞を過ぎる粘性流」について、その概要を述べる。詳

しくは原論文を参照のこと。

Fig. 4のモデル(a)においては、地盤内領域に一般化されたダルシーの方程式を用い、空隙領域にはストークスの方程式を適用している。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} P &= \mu \Delta V - \frac{\mu}{\kappa} V, \quad \nabla \cdot V = 0 \\ p &= \mu \Delta v, \quad \nabla \cdot v = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

- ここに、 $P$  と  $V$  : 媒質中の流体の圧力と流速
- $p$  と  $v$  : 空隙領域の流体の圧力と流速
- $\mu$  : 流体の粘性率
- $\kappa$  : 透水係数

また、境界条件として無限遠で、

$$\left. \begin{aligned} V_x &= U \infty, \quad V_r = 0 \\ P &= - \frac{\mu}{\kappa} U \infty x \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

空隙部境界で、

$$\left. \begin{aligned} v_r &= V_r, \quad v_\theta = V_\theta, \\ \frac{\delta v_\theta}{\delta r} &= \frac{\delta V_\theta}{\delta r}, \quad P = p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

となる。

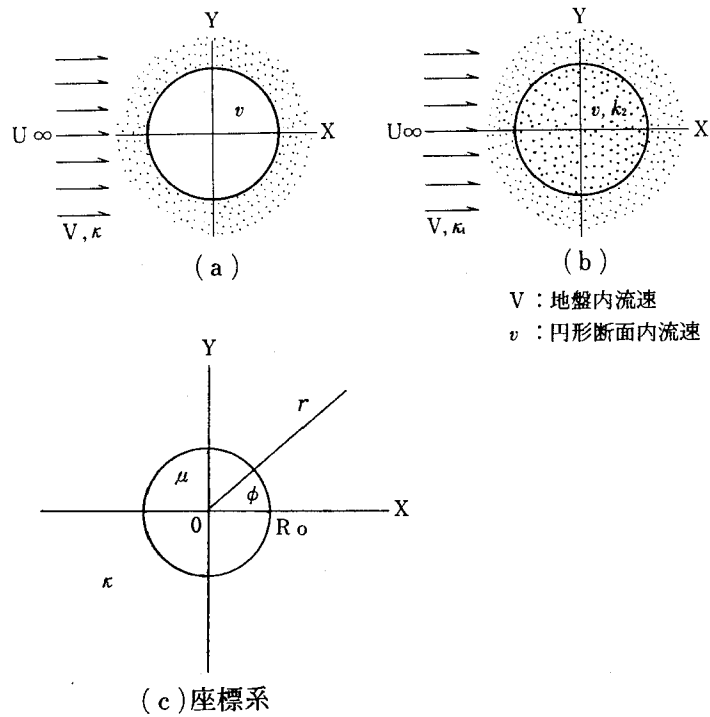


Fig. 4 解析モデル

ここに、 $U_0$  : 空隙部の中心の流速  
 $U_\infty$  : 媒質の無限遠での流速  
 これを解くと、  
 地盤内領域と空隙内領域の流速は次のようになる。  
 地盤内領域では

$$\left. \begin{aligned} V_r^* &= [ 1 + B \xi^{-2} + \sigma \xi^{-1} K_1(\xi) ] \cos \phi \\ V_\phi^* &= [ -1 + B \xi^{-2} + \sigma [ K_0(\xi) + \xi^{-1} K_1(\xi) ] ] \sin \phi \end{aligned} \right\} \dots(6)$$

となる。  
 そして、 $K_0(\xi)$ 、 $K_1(\xi)$  は変形されたベッセル関数である。  
 また、空隙内領域では、

$$\left. \begin{aligned} v_r^* &= (U_0^* + a \xi^2 / 8) \cos \phi \\ v_\phi^* &= -(U_0^* + 3 a \xi^2 / 8) \sin \phi \end{aligned} \right\} \dots(7)$$

ここに

$$\begin{aligned} \beta &= K_0(\xi_0) + 2 \xi_0^{-1} K_1(\xi_0), \quad a = 8(\beta - \alpha) / \Delta \\ \alpha &= K_0(\xi_0) + (\xi_0 + 2 \xi_0^{-1}) K_1(\xi_0) \\ \xi_0 &: \xi_0 = R_0 \sqrt{\kappa}, \quad \xi : \xi = r \sqrt{\kappa} \\ R_0 &: \text{空隙半径}, \quad \rho = -8 \xi_0^2 / \Delta \\ \kappa &: \text{透水係数 (ダルシー則単位)} \\ B &: B = \xi_0^4 (\alpha + 3\beta) / \Delta \end{aligned}$$

式中の\*印のものは、各領域の流速を $U_\infty$ で除して無次元化したものである。

空隙内のY軸に沿う中心部の流速分布は、

$$v_x^* = U_0^* + 3 a \xi^2 / 8 \quad \dots\dots\dots (8)$$

となり、Fig. 5(a) 矢印の様である。  
 これより空隙内の流速分布は(8)式で表されるように放物線型を示し、地盤内流速 ( $U_\infty$ ) の3倍となることがわかる。  
 空隙近傍の地盤流速は空隙部から遠ざかるにつれて、次の(9)式により表される。

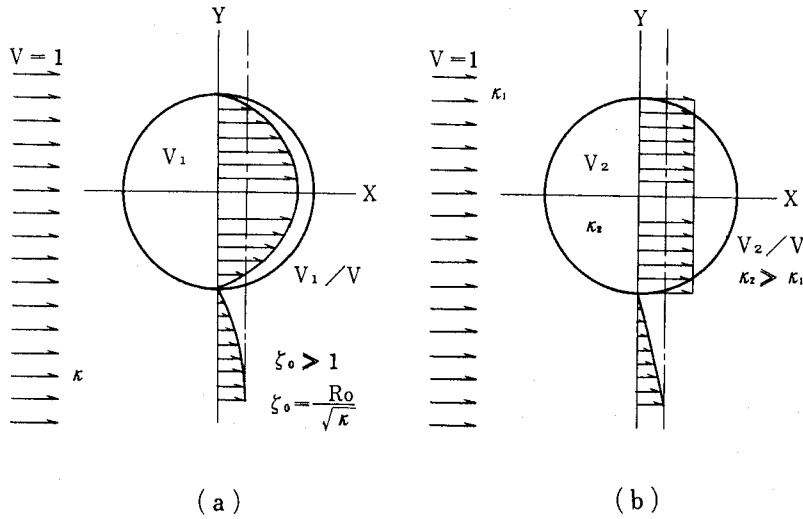


Fig. 5 解析モデルの流速分布

$$V_x^* = 1 + B\beta^{-2} + O[\xi^{-3/2} \cdot \text{EXP}(-\xi)] \quad \dots(9)$$

空隙円断面より遠ざかるに従って、指数関数的に一樣流 ( $U_\infty$ ) に漸近する。

Fig. 5(b)は、Fig. 4(b)のように間隙に透水係数の異なる砂を充填した場合のもので、ダルシー方程式に従う流れとして、

$$\begin{aligned} V_i &= -\kappa_i \nabla P_i \quad (\kappa_i = \kappa_i / \mu) \\ \nabla V_i &= 0 \end{aligned} \quad \dots(10)$$

上式を解いて、地盤内では

$$\begin{aligned} V_r &= (\kappa_1 \cdot b_1 / r^2 + U_\infty) \cos \phi \\ V_\phi &= (\kappa_1 \cdot b_1 / r^2 + U_\infty) \sin \phi \end{aligned} \quad \dots(11)$$

となる。充填内部では

$$\begin{aligned} u_r &= 2\kappa_2 / (\kappa_1 + \kappa_2) \cdot U_\infty \cos \phi \\ u_\phi &= -2\kappa_2 / (\kappa_1 + \kappa_2) \cdot U_\infty \sin \phi \end{aligned} \quad \dots(12)$$

これより

$$\begin{aligned} u_x &= 2\kappa_1 / (\kappa_1 + \kappa_2) \cdot U_\infty \\ u_y &= 0 \end{aligned} \quad \dots(13)$$

となる。

以上の様に円形断面に砂を充填した場合には、流速は地盤と孔内の透水係数に依存することがわかる。

従って、地盤内の地下水の流速は、地盤の透水係数と孔内の透水係数とからなる補正係数と孔内の流速との積としても求めるとができる。

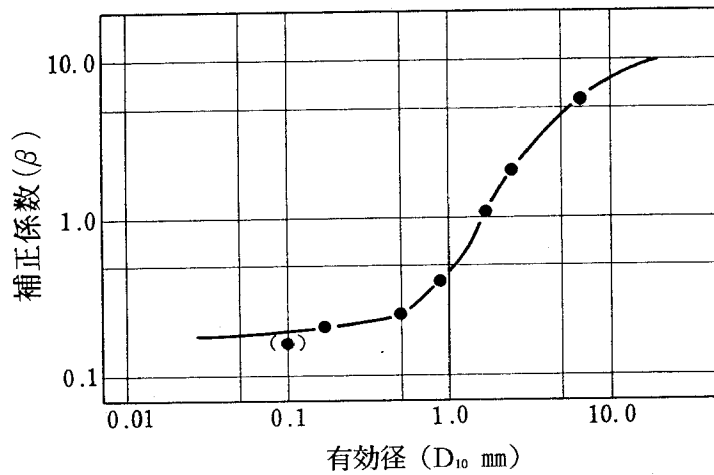
### 3-3 補正係数について

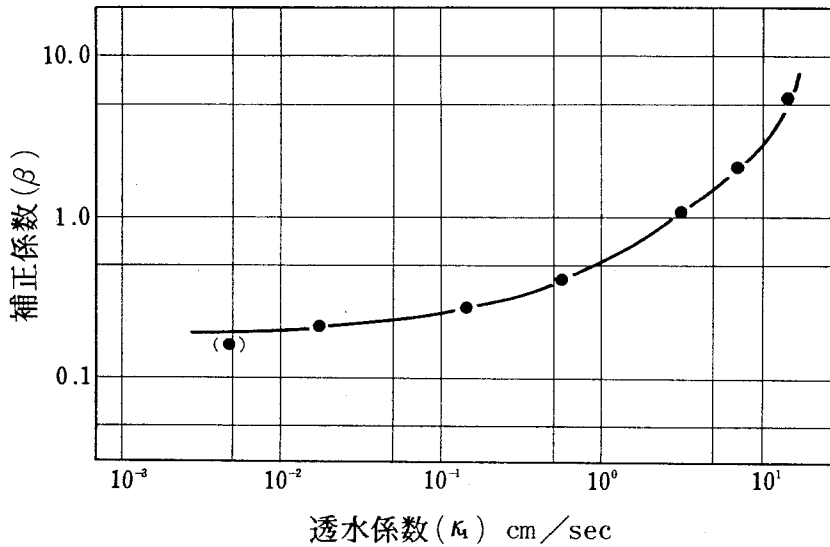
3-2項で述べたように、地盤内の地下水の流速は、孔内で測定される流速と補正係数  $\beta = 2 \times \kappa_1 / (\kappa_1 + \kappa_2)$  との積として求める。孔内に透水係数  $\kappa_2 = 3.3 \times 10^0 \text{ cm/sec}$  の研磨用のガラスビーズを詰めたので、測定を行おうとする地層の透水係数  $\kappa_1$  を予め知ることで  $\beta$  を求めておくことが便利である。

そこで、透水係数が粒径に依存していることから、直径10cm程度の玉石から直径0.1mmのガラスビーズまでの9種類の砂れき層を水槽 (260cm × 41cm × 65cm) に作り、各種の砂の  $D_{10}$ 、透水係数  $\kappa_1$  と補正係数 ( $\beta$ ) の関係を実験的に求めてみた。その結果をTable 2, Fig. 6, とFig. 7に示す。

Table 2 各種砂礫の補正係数 ( $\beta$ )

材 料	記号	$\beta$
豊 浦 標 準 砂	T	0.204
粗 砂 I	SS	0.268
粗 砂 II	MS	0.395
粗 砂 III	LS	1.059
小 礫	SG	2.004
中 礫	MG	5.556
大 礫	LG	—
$\phi 0.1$ mm ビーズ	FS	0.159

Fig. 6 有効径 ( $D_{10}$ ) と補正係数 ( $\beta$ ) の関係

Fig. 7 透水係数 ( $\kappa_1$ )と補正係数 ( $\beta$ )の関係

#### 4. 測定装置

##### 4-1 測定装置の構成

一本のボーリング孔の中で測定できる装置とするため、Fig. 8のごとく構成となっている。三脚によってボーリング孔に吊されたセンサの組み込まれているゾンデ部、それを作動させ増幅させる指示計系の地上部、および自記記録させる部分より構成されている。

なお、ゾンデ部は地下水中に没するため、耐水圧は20 kg/cm<sup>2</sup>以上である。

##### 4-2 測定回路の構成

回路の構成図はFig. 9に示す。

電源はDC12Vである。ブリッジへの電源部とその出力を取り出し増幅する部分、さらには方位計の主要素子のホール素子を作動させ表示させる回路からなっている。

##### 4-3 方位計

方位計は磁石と磁力を感知するホール素子からなっている。この感知部をFig. 10に示す。

この装置は電極部の位置を決めるためのものである。ボーリング孔の中に吊り下げられたゾンデを回転させながらフロートに浮かせられた磁石がホール素子と一致する場所を捜す。一致したゾンデの位置が流向を求めた

めの1本の電極を常にN方向にするように、ホール素子と一本の電極とが設定されている。

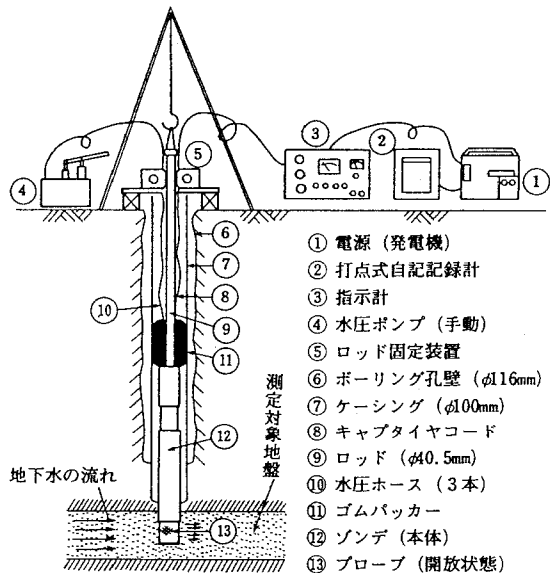


Fig. 8 測定装置の設置概要図



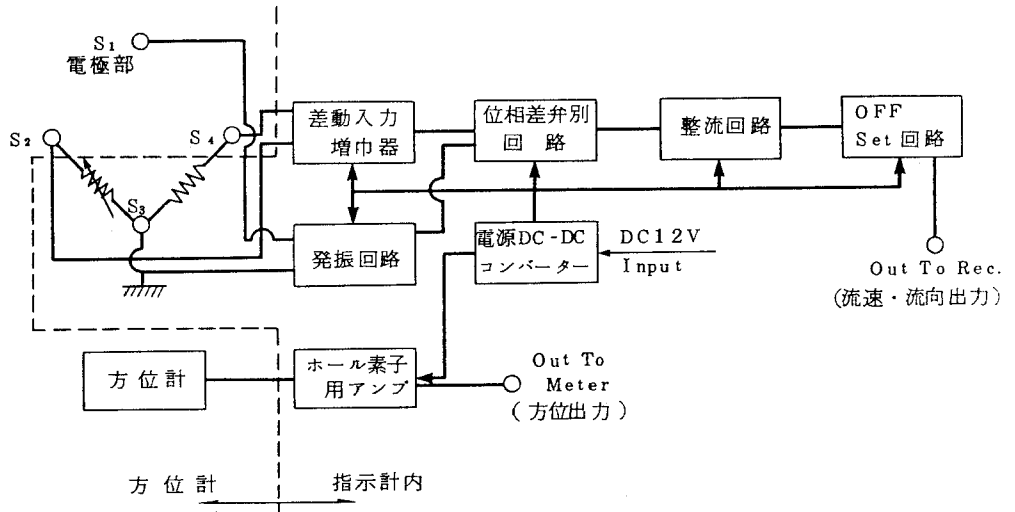


Fig. 9 測定回路の構成図

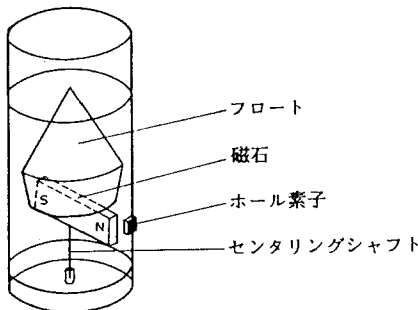


Fig. 10 方位計

## 5. 測定例

ここで述べた比抵抗式の地下水流向流速計を実際に使用した例をFig. 11からFig. 14に示した。

測定を実施した場所は、名古屋南部の0m地帯で、多数の河川が発達した沖積平野である。地層はG.L上部数十cmは盛土、表土以下に緩い沖積砂層が続いている。測定深度は-4.0mで、沖積砂層を対象とした。測定結果よりFig. 11のように地表面地形に従って、すなわち、高いところより低いところに向かって地下水は流れていることが分かる。

## 6. 改善点

### a) 測定可能流速の拡大

この測定器では、流速が、 $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$  から  $1.0 \times 10^2 \text{ cm/sec}$  の場合に、測定が可能である。実務上は、さらに  $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$  より  $1.0 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$  の場合の測定を可能とすることが望ましい。

### b) 測定器の小型化

現在のゾンデはボーリング孔の中で、しかも深い場所でも実施できるように堅牢に製作されているが、地表面付近の地下水調査にも使用できるように、小型化と軽量化を計ることが望ましい。

### c) 流向の精度の向上

ここで解説したゾンデは六組の電極を360度の配し測定している。従って、 $\pm 30^\circ$  以内の角度のものは出力の曲線のピーク出力電圧の割合から求められる。キャリブレーションにより、測定精度は $\pm 4.45^\circ$ であることを確認しているが、これをさらに向上させることが望ましい。

### d) 連続測定

孔内より流す溶液を同一孔内の同一地層に、ゾンデを再設置することなく、連続的に流出させることができるようにすることが望ましい。

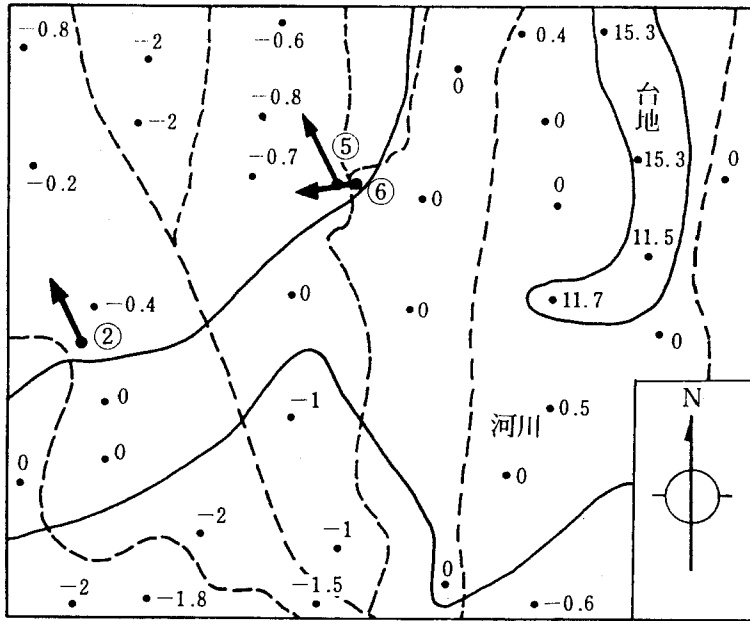


Fig. 11 実測地の地形と流向

\* 図中の数字は標高 (m)

実線は等高線

点線は河川

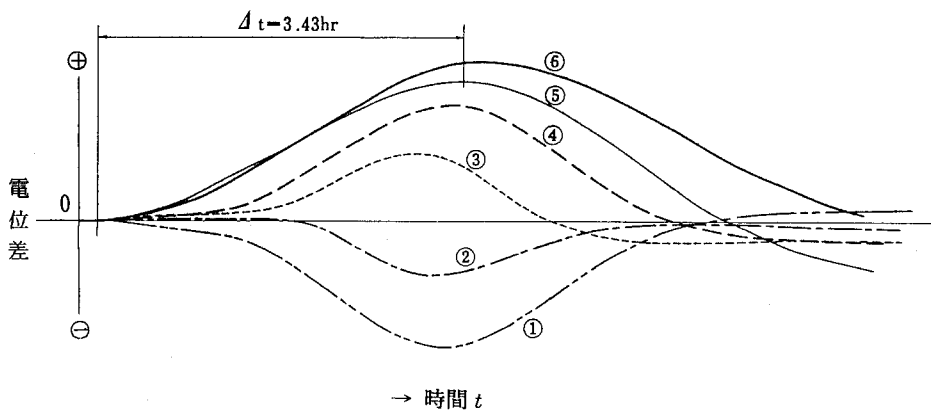


Fig. 12 場所② (Fig. 11) での実測例

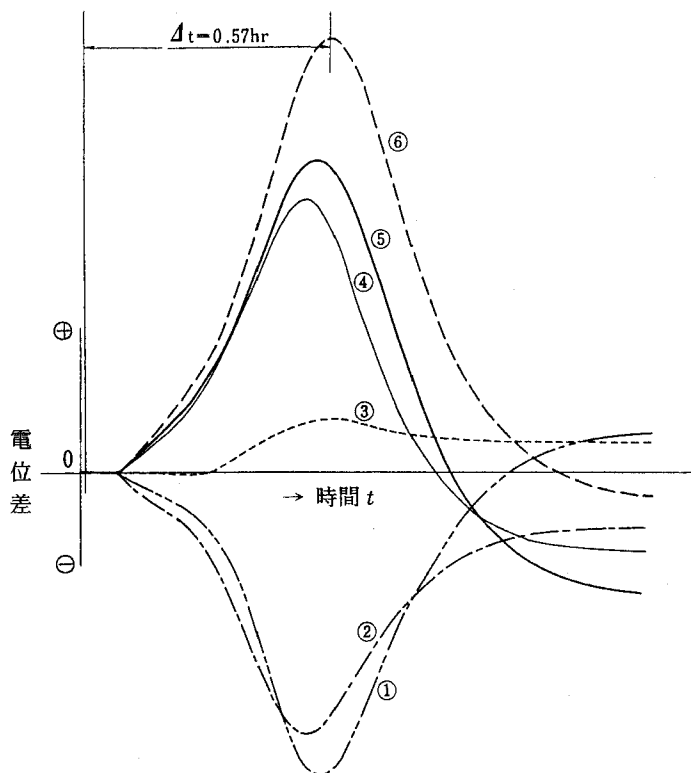


Fig. 13 場所⑤ (Fig. 11) での実測例

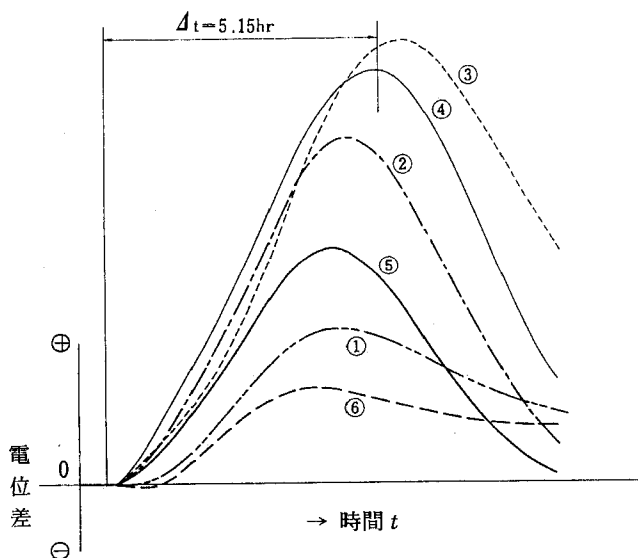


Fig. 14 場所⑥ (Fig. 11) での実測例

## 比抵抗式孔内地下水流向流速計の原理と測定例

### 7. おわりに

ここに解説した比抵抗式地下水流向流速計は単一のボーリング孔内で測定できることが特徴である。このような技術は建設関係で多く利用されている技術である。

土壌の中で地下水が「どちらの方向へ」また「どれだけの速さでながれているか」との問題については、測定する土壌がシルト・細砂から小礫までの透水係数が  $\kappa = 1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$  の地盤であれば、満足できる結果が得られると思われる。しかし、それ以上の速い流れでは流線の乱れ、あるいはそれより遅い流れでは地下水の比抵抗と異なるトレーサー溶液の濃度の違いに起因する拡散現象によって測定が不可能となる。このような問題はこの測定方法の限界かもしれない

が、なおいっそう改良に努力するつもりである。

この測定器の開発にあたって数値解析のご指導をいただきました東京農工大学の佐野 理先生に感謝致します。

### 引用文献

- 1) 技術委員会 (1988) : 孔内流向流速計について, P11~15, 技術ニュース, 関東地質業協会
- 2) 平田, 日野, 平山 (1983) : 地下水流向流速計の開発, P 5~9, 大成基礎構
- 3) 佐野 理 (1983) : 多孔性媒質中に穿った円柱状の空洞を過ぎる粘性流 (単孔法による地下水測定への応用) P252-259, 「ながれ」, 応用流体学会