

電位差方式連続型地下水流速流向計の開発

Investigation on Velocity and Direction of Groundwater Flow by Current Meter in Single Well

(財)電力中央研究所 正員 河 西 基
大成基礎設計(株) 正員 小松田 精 吉
大成基礎設計(株) 平 田 洋 一

1. まえがき

近年、地中環境問題がクローズアップされるようになり、地下水の流れの状況を詳細に調査する必要性が増している。このような背景のもと、単一孔で地下水の流速と流向が経済的かつ合理的に測定できる計器として、電位差測定方式¹⁾、中性子計数方式²⁾および放熱・拡散方式³⁾を採用したものが相次いで開発されてきている。

本研究では、蒸留水を追跡子とする電位差測定方式を用いて連続的にくり返し測定できる新しい地下水の流速流向計を開発した。特に、連続・くり返し測定を行うには、測定井戸の設置が必要であるが、井戸内外における地下水流が極めて複雑であるため未解明の問題も多い。そこで、本論文では、井戸構造と地下水流に関する基礎的実験、新しい計器の検出実験および試作器での現場試験の結果についてとりまとめ、この計器が十分な実用性を有するものであることを明らかにした。

2. 計器の特徴と基本原理

2-1 特 徴

本測定器の開発目標は以下のとおりであり、現在その目標を基本的に達成した。

1. 単一の観測井で地下水の流速と流向が同時に測定できること。
2. 経済性があること。
3. 取扱いが容易であること。
4. $1 \times 10^{-2} \sim 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 程度のダルシー流速が十分な精度で測定できること。
5. 任意の深さで連続的に測定できること。
6. くり返し測定ができること。

2-2 原 理

地下水の流れを検出する方法は電位差方式である。

電位差方式とは中心電極と左右対象に直線上に並んだ電極間で追跡子の移動する過程の比抵抗を測定した電位差を検出する方法である。以下に基本原理について説明する。

地下水が流れる地盤中に、比抵抗の異なる溶液（以下試験溶液）を特定の領域に設置すると、時間とともに地下水の流れにより試験溶液が移動し比抵抗が変化する。その変化の過程を固定された電極で測定し、流速と流向を求めるものである。

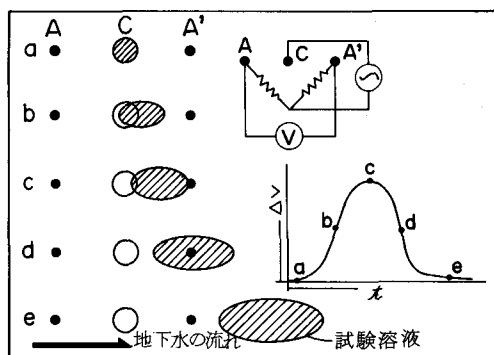


図-1 原理説明図

以上の原理を図-1を用いて説明する。図-1の左側は流れに平行な電極を例として示してあり、右側はそのデータ出力例である。また上に回路構成を示す。電極はA、C、A'の3つより成り、センター電極Cは円筒状で内部に試験溶液を注出する機構を有する。またCはストレーナ構造となっており、地下水の流れに

よって内部の試験溶液は外部に移動できる。a は試験溶液を送り込んだ初期状態であり、A-C と A'-C の間の電気抵抗は等しく、従って両者の間のブリッジにおける電位差は 0 である。地下水の流れによって試験溶液が移動すると、抵抗バランスが崩れ両者の間には電位差が発生する。図-1 の b, c, d はその過程である。時間が経過し、試験溶液が地下水流によって A' 電極の外に移ると、電極間の抵抗は再びバランスし、初期状態にもどる。図-1 では e 点に相当する。

実際の測定器は 30° ビッチに 6 対 12 本の電極が設置しており、6 本の出力曲線が得られる。流向の判定は図-2 の出力例に示すように、最も出力値の大きい測線と平行なものととして得られる。

ただし、流速が遅くなると試験溶液は拡散し、その領域が拡大するので他の測線も出力値が大きくなってくる。その場合はすべての出力データを総合判断して流向を判定する必要がある。

また流速の判定は次のように考える。
図-1 の c 点は試験溶液の濃度中央が電極 A'-C 間の中央に達した状態であるので、流速 V_0 は、次式により求めた。

$$V_0 = \frac{L}{2t} \quad (1)$$

V_0 = 測定流速
 L = 電極 A'-C 間の距離
 t = a から C の状態になるのに要した時間

2-3 試験溶液の注出機構

本測定器は $10^{-2} \sim 10^{-5} \text{ cm/sec}$ という微流速の測定を対象とするため、試験溶液注出時のわずかな水のゆがみも、測定結果に悪い影響を与える。そこで試験溶液の注出機構として二重ピストン構造による置換方式を考案した。その機構について次に説明する。図-3 に注出機構のモデル図を示してあるが、作動は地上からの空気圧によりコントロールされる。黒色の▲で示したバルブは逆止弁であり下から上への流れを防止する。上部から空気圧を送ると、溶液室を内蔵するピストンは下り、溶液室内は負圧となるので、上部から溶液が供給される。次に下部に空気圧をかけると、ピストンは上昇し、溶液室内が正圧となり、最下部のバルブを通じて溶液は電極部に送り込まれる。溶液を通す 2 本のパイプ P_1 と P_2 は同径であるので、 P_2 が上昇すると、それと同体積分の溶液が溶液室内で過剰となって電極部に移るので、電極部の体積は結果的に変動しない。以上が、溶液の注出置換機構であり、試験溶液の置換の様子を図-4 に示した。

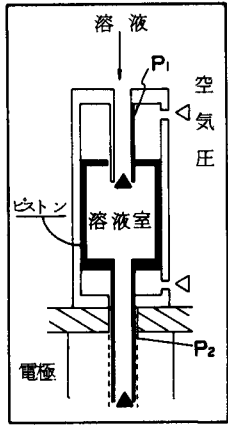


図-3 注出機構図

このように体積的な変動はないものの、溶液が移動することは避けられないので、作動速度が遅ければ溶液の慣性によるかく乱が生じてしまう。そこで、ウラン色素を用いた目視観察により、 1 cm/sec 程度の速度で作動させれば C 電極のストレーナ内に充填される事を確認した。また、1 回の注出量は 1 cm^3 とした。

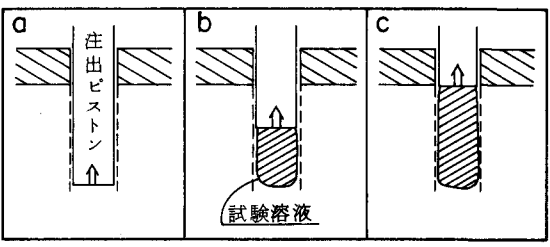


図-4 注出モデル

3. 基本特性試験 (試作装置の出力チェック)

3-1 充填電極部モデルでの出力実験

前述した基本構造にもとづき、 30° の2方向に計4本の電極を設置したモデルを作成し、実験的に出力状態をチェックした。電極の周辺条件は筆者らの過去の研究から粒状物質で空隙を埋めた充填モデルとした。

その断面を図-5に示す。このように間隙を充填したモデルは、空隙状態に比べ溶液の安定が向上し、低流速を測定する場合にきわめて有効となる。

また測定器に実験流速を与える方法は図-6に示す水槽を用いた。

出力された時間～電位差の一例を示したのが図-7であり、これらよりピークを鮮明に読み取れるデータが得られ、基本構造の妥当性が証明された。

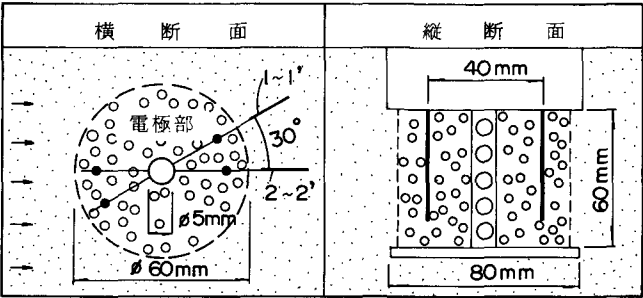


図-5 モデル電極の充填図

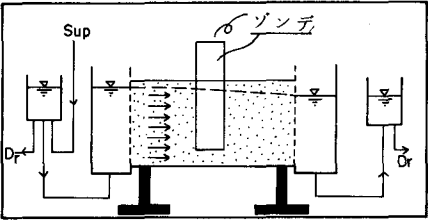


図-6 実験用水槽装置図

水槽サイズ	
幅	300mm
深さ	500mm
長さ	1,000mm

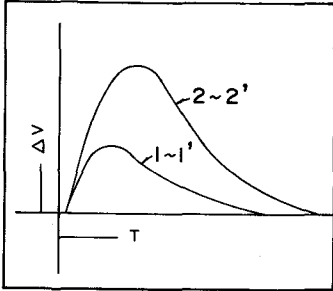


図-7 データ出力例

3-2 井戸を考慮した中空モデルでの出力実験

中空井戸(通常の井戸)内で充填物を入れない中空電極部モデル(図

8)の出力実験を行ったところ、図-9の示すような時間～電位差図が得られた。図-7と比較するとピークが判然とせず、また出力量も小さくなっている。

このように、中空電極部モデルの出力特性が不鮮明なのは、溶液が注出時にわずかな水の動きによって混合希釈されるためと考えられ井戸内で流速・流向を測定する場合でも電極部を空隙状態にするべきでないことが判る。

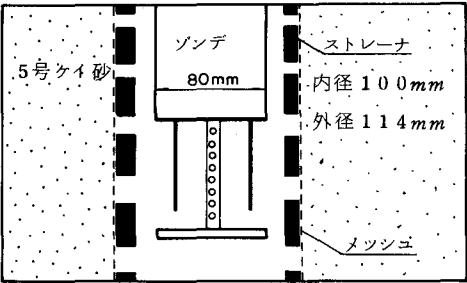


図-8 中空モデル図

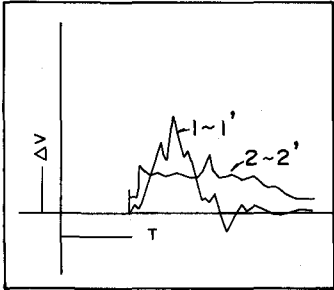


図-9 中空モデルの出力例

3-3 地下水の流れに及ぼす井戸～測定器の間隙の影響

前節で述べたように、完全な中空電極部モデルでは検出不全であったが、次に電極部を2mmビーズで充填し、図-10のように井戸との間に空隙を残した状態で実験した。

実験は底面が透明な水槽を用い、測定器の中央と周辺土(5号ケイ砂)にウラン色素を滴下し、各点の流速を求めた。また、測定器の直径dを変化させ、測定器内の流速と周辺土の流速との速度比がどのように変化するかを調べた。実験結果を表-1、図-11に示す。

通常の井戸径の $\phi 100\text{mm}$ 程度に対しては、2～3mmの間隙が存在するだけで、流速は10倍も変化する可能性のあることが明らかとなった。

実際に井戸の内径と測定器の外径を完全に一致させることは不可能である。しかし、ストレーナとの間にわずかな間隙があっても誤差の要因となるので、測定器はストレーナ内径より細くしておき、この間隙を粒状物質で充填する補助手段が必要であろう。

表-1 井戸内空隙実験一覧表

No.	測定器直径 (mm)	空隙幅 (mm)	径 比 (d/D)	流速比 (V_d/V_0)
1	85.6	0.00	1.000	0.180
2	82.9	1.35	0.968	0.771
3	79.7	2.95	0.931	2.575
4	68.4	8.60	0.799	41.57

3-4 低流速時の問題

測定器の検出原理は電位差方式であり、試験溶液の濃度の中心点の移動を測定している。地下水の流速が極めて遅くなった場合、試験溶液が拡散し出力値は低下するが、等方拡散と考えればその中心点の位置は拡散の影響を受けない。従って出力の低下が検出不能になるまでは低流速の測定は原理的に可能である。以上のことを図-12に概念として示した。試験溶液が注出された初期はC点を中心に高濃度の試験溶液が存在する。時間経過につれて拡散により濃度の最高点は低下するが、ピークの位置はa'点の方に移動してゆく。

また、低流速を実験的に確かめたところ、 $1 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ で良好な出力が得られた。それ以下の流速に関しては実験的に流速を発生させるのが難しく、今後の課題である。

3-5 井戸の開孔率に関する実験

本測定器は井戸内で流れを測定するので、井戸のストレーナやフィルターはそれを通過する流線に影響を与える。ここではストレーナが測定流速に及ぼす影響、即ちストレーナ抵抗について実験した。使用したストレーナの諸元は次のとおりである。

- 材 料 VP100 塩ビ管
(内径100mm, 外径114mm)
- 開 孔 率 5, 10, 20, 30, 40%
- ストレーナ形状 $\phi 10\text{mm}$ の丸穴 千鳥配列
- メッシュ M=32 D=400

実験は図-13のように、ストレーナ内に電極部を設置した後に空隙を水槽の実験砂と同じもので充填し、流速を測定した。

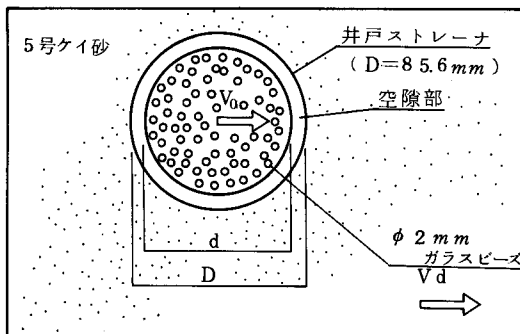


図-10 空隙が流れに及ぼす影響図

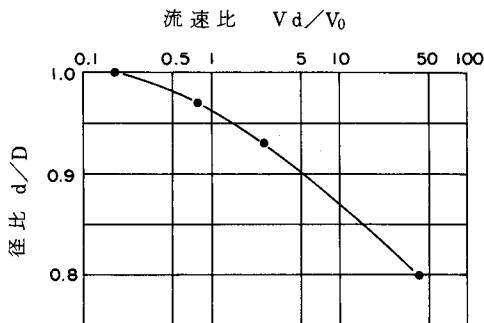


図-11 空隙と流速比の図

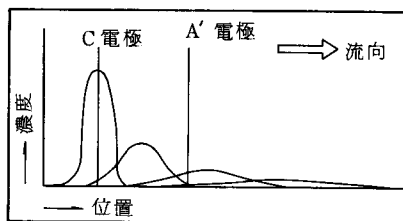


図-12 溶液濃度の変化図

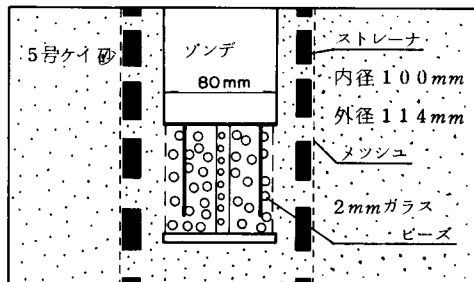


図-13 ストレーナ損失実験装置図

水槽内のダルシー流速 (V_d) は、 $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 程度とし、電極部で測定した流速 (V_0) との関係を見ると、図-14、図-15のようになった。

図-15より開孔率30%程度でほぼ開孔率100%と同程度の流速比 β となっている。これを $\beta 100$ に対する誤差で見ると表-2のようになり、30%以上の開孔率であれば誤差は5%程度に収まる。一方、開孔率が5%程度になれば、わずかな開孔率の違いによって流速比が、急変化することが示された。

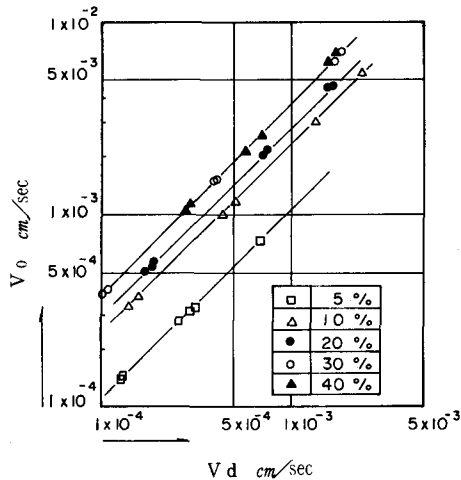


図-14 測定流速と開孔率

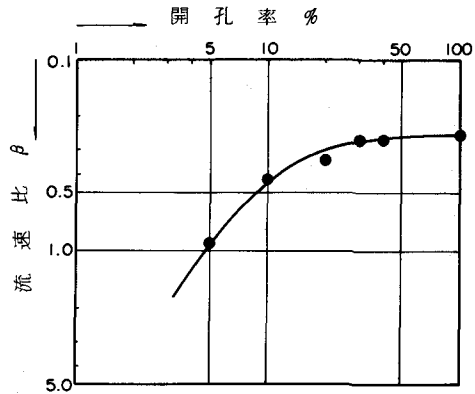


図-15 開孔率と流速比

表-2 開孔率と誤差率

開孔率(%)	誤差率(%)
100	0
40	5.2
30	4.4
20	37.7
10	69.0
5	262.3

3-6 基本実験結果のまとめ

5種の実験の結果、本測定器では次のようなことが明らかとなった。

- 1) 電極部分は間隙を充填した状態にしないと出力が不安定となる。
- 2) 井戸と測定器の電極部分の間に間隙が存在すると、流速の測定結果に大きな誤差を生じる。
- 3) 井戸の開孔率が30%以上であれば流速測定誤差は小さいが、開孔率が更に小さくなれば急に流速比が変化するので検定が必要である。

以上のことより本測定器のような単一ボーリング孔内における地下水流速(流向)測定方式では、測定用の井戸を含む全体が計測システムとして構築されるべきであると考える。

4. 現場試験例

現場は千葉県中部で、図-16に示すように開析谷の発達した洪積台地上に位置する。対象とした地層は成田砂層で、測定深度はGL-17.5mである。また、実験用に使用した井戸の諸元は次のとおりである。

- 管 径 VP125A 塩ビ管(内径: 125mm, 外径: 140mm)
- ストレーナ $\phi 12\text{mm}$ 丸穴 開孔率3.4%(既設井戸)
- メッシュ #20番 2重巻

測定結果は次のようになった。

- 流 向 S 60° E
- 測定速度 (V_0) 10cm/day

流速に関しては、その補正係数 β の研究が十分とは言えないが、著者らの過去の研究から、 $\beta = 0.2 \sim 0.3$ とし、算出すると地盤のダルシー流速 V_d は、 $V_d = \beta \cdot V_0 = 2 \sim 3 \text{ cm/day}$ となる。

一方、図-17に示した地下水位等高線図によって判断出来る流向は、S 62° Eで、流速流向計の測定結果ときわめて良く一致した。

また、流速に関しては、図-17より動水勾配は0.01程度で、測定深度附近での現場透水試験で得た透水係数 $2 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ を用いると流速は 1.7 cm/day となり本測定器による測定結果はほぼ妥当と考えられた。

以上の結果、本測定器は単一孔による地下水流速流向計として十分に実用的であることが示されたと考える。

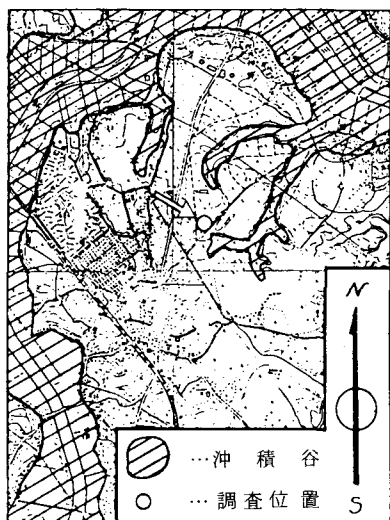


図-16 地形図

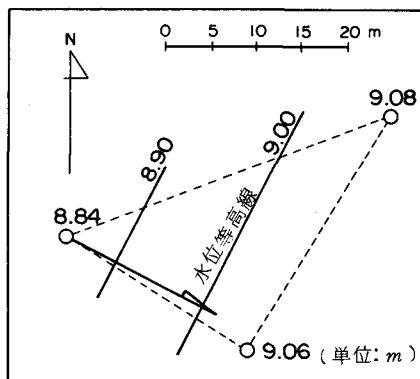


図-17 地下水位測定結果

5. まとめ

本研究では、新しく開発した単一孔による電位差方式流速流向計について、井戸構造と地下水流との関係を中心に基礎的な実験を行い、以下の点について明らかにした。

①井戸（ストレーナ）内と測定器の電極部内に粒状物質（ $\phi 2 \text{ mm}$ ガラスビーズ）で充填した計器として一体化する事により、流線を安定化させることができ、流速流向を精度よく検出することができた。

②地盤を流れる地下水の流速と、井戸及び測定器の電極部内を流れる流速は、ストレーナの開孔率によって異なるが、開孔率が30%以上であれば一定の流速比（地盤流速 / 測定流速）となる。

③試作器を用いて、これらの条件を満足させる機構と十分な操作機能をもつかどうかを現場試験で確認した。これらにより、電位差測定方式で、くりかえし連続測定するのに十分実用的であり、開発目標を達成したことの確認を得た。

参考文献

- 1) 建設技術評価書（1984）：地下水の流向流速計の開発，「建技評第83403」
- 2) 建設技術評価書（1984）：地下水の流向流速計の開発，「建技評第83401」
- 3) 建設技術評価書（1984）：地下水の流向流速計の開発，「建技評第83402」
- 4) 平田洋一・鹿野快男・日野努；流速流向計L型の原理と特徴について，原位置透水試験法および地下水調査に関するシンポジウム発表論文集，1985