

水中浮遊型カプセルプローブを用いた新しい地下水検層技術の開発

下茂道人¹・竹内真司²・竹内竜史³・後藤和幸⁴・中野勝志⁴

¹ 深田地質研究所

² 日本大学

³ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

⁴ アサノ大成基礎エンジニアリング(株)

Development of new groundwater flow logging technology using a self-driving capsule probe

SHIMO Michito¹, TAKEUCHI Shinji², TAKEUCHI Ryuji³, GOTO Kazuyuki⁴
and NAKANO Katsushi⁴

¹Fukada Geological Institute

²Nihon University

³Japan Atomic Energy Agency

⁴Asano Taiseikiso Engineering Co. Ltd.

要旨：地熱、天然ガス・石油などの資源開発、二酸化炭素地中貯留、放射性廃棄物処分などにおいては、断層や亀裂系内の地下流体の移動や物質移動の定量的な評価技術が求められる。近年、地下流体シミュレーション技術の急速な発展により、岩盤の不連続性や不均質性を考慮した解析が可能となっている。しかし、その一方で、解析技術を最大限に活かすために必要な空間分解能の高いデータを原位置で取得する試験技術の開発は十分に進んでいるとは言えない。このような現状認識に基づき、著者らは、既往の検層技術と全く異なる原理に基づいた、新たな地下水検層方法を考案した。本検層は、メモリー式水圧センサーを搭載したカプセル型のプローブを、ボーリング孔内で上昇・降下させることにより、ボーリング沿いの様々な情報を連続的に取得するものである。また、水中浮遊型プローブの移動速度は、自重、浮力、流体抵抗のバランスで決まるため、プローブの速度変化から水みちの深度や孔内流速を連続的に把握できる。同検層技術は、ロッドやケーブルなどの昇降資材や設備を必要とせず外部動力が不要なため、検層の効率性を飛躍的に向上させることができると期待される。本論文では、水中浮遊型プローブを用いた検層の基本原理と測定技術の実用化に向けて実施した基礎実験結果について示す。

キーワード：地下水検層、水中浮遊型プローブ、孔内流量、水みち、透水係数、孔壁補正係数、模擬ボーリング孔試験

Abstract: The authors proposed a new borehole groundwater logging technology using a self-driving type underwater probe equipped with a pressure data logger. The flow rate profile along the borehole can be obtained from the velocity of the probe during falling and rising in the borehole, since the probe velocity is, theoretically, a function of the fluid velocity. For the future implementation of this technology, the authors performed a laboratory test using the prototype probes and found that the probe velocity, v , is influenced both by the borehole radius, R , and the flow velocity, U , and also found that the relationship among v , R and U follow the theoretical relationship considering the “wall correction factors” λ_1 and λ_2 .

Keywords: groundwater flow logging, self-driving probe, flow rate, flow path, hydraulic conductivity, wall correction factor, simulated borehole test

1. はじめに

岩盤内には断層、破碎帯、亀裂など大小のスケールの亀裂が地下流体の支配的な流動経路いわゆる「水みち」を形成しており、不連続かつ不均質な地下流体の流動が生じる原因となっている。このため、地熱、天然ガス・石油などの資源開発、二酸化炭素地中貯留、放射性廃棄物処分においては、不均質な水理特性を考慮した流動や物質移動の評価が求められる。近年、シミュレーション技術の高度化とコンピュータの急速な進歩により、岩盤の不連続性や不均質性を考慮した解析が可能となっている。しかし、構造や材料特性が既知の人工材料と異なり、自然の産物である岩盤の亀裂構造や水理特性は、サイトごとに原位置試験を実施して把握する他はない。一般的に、岩盤の水理特性は、ボーリングを用いた水理試験により測定される(図1a)が、測定深度が深くなるにつれて試験設備の規模や孔内装置の設置回収に要する期間が飛躍的に増大するため、区間数を限定するか区間長を長くせざるを得ず、主要な水みちの把握や水理特性の評価が困難となる場合が多い。その結果、解析に本来必要な水みちに関する情報が得られず、地下水流動や物質移行の予測精度に制限を与える要因となっている。

そこで、著者らは、従来の水理試験や地下水検層と全く異なる原理に基づいて、地下岩盤内の水みちや透水性を連続的に把握する新しい検層技術を考案した。この検層方法は、図1bに示すように、本検層は、カプセル型のプローブを、ボーリング孔内で上昇・降下させることにより、ボーリング沿いの様々な情報を連続的に取得するものである。

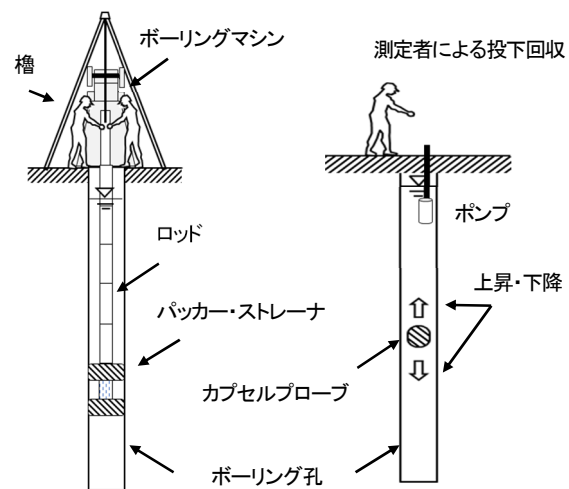
メモリー式センサー(圧力、温度、電導度など)を内蔵したカプセルプローブを、孔内で上昇・下降させることにより、ボーリング孔に沿った種々

の情報を連続的に取得することができる。また、カプセルプローブを回収後、センサー内に記録されたデータを後述する方法で分析することにより、孔内流速分布等が求められる。また、本検層を揚水と組み合わせることにより、連続的な透水(量)係数を求めることも原理的に可能である。

本検層方法には、下記のような特徴がある。

- ・プローブは、自重、浮力および孔内の流水から受ける抗力のバランスにより孔内を降下あるいは上昇するため、外部動力や昇降装置を基本的に必要としない。
- ・プローブの移動速度の変化から、孔内における水みちの深度を特定できる(図2)。
- ・プローブの浮遊移動速度 v と孔内流速 U との関係をあらかじめ求めておくことにより、ボーリング孔に沿った流速を連続的に測定できる。
- ・種々のセンサーを内蔵することにより、深度と関連づけられた情報を同時に取得できる。

本論文では、考案した検層方法の実用化に向けて、ボーリング孔内におけるプローブの挙動に関する理論的考察および実験的検討を行った結果について述べる。



a. パッカー透水試験 b. 水中浮遊型カプセルプローブ検層

図1 試験方法の比較

次節以降では、まず、プローブの基本構造に関する検討を行った後、プローブ移動速度と浮体形状、重量、ボーリング孔径および孔内流速との関係について理論的な考察を行う。次に、ボーリング孔を模擬したアクリルパイプ内において、3種類の形状の異なる試作プローブを用いて実施した孔内流速の検層結果を示す。最後に、理論解と実験結果との比較から得られた知見および本手法の孔内流速検層への適用性や測定精度の向上を図る上で今後検討すべき課題をまとめる。

2. カプセルプローブの構造に関する検討

水中浮遊型カプセルプローブには、「浮力調整」と「圧力計測」の二つの機能が求められる。プローブは、センサーの重量に見合った浮力を得るために中空構造とするとともに測定深度に対応する十分な耐圧性を有する構造とする。図3に、代表的なプローブ構造の例を示す。浮力調整の方法としては、例えば、浮体内部に流体を出し入れする方法や外側に錘を取り付ける方法、カプセルの容積を変化させる方法などが考えられる。

プローブの移動速度は、メモリー式センサーに記録された時間と圧力（から換算される水深）から求める。センサーは、その大きさや形状により、浮体に内蔵するか、浮体外側に取り付ける。水中において浮体を安定させるため、図3の例に示すように、センサーは中心より低い位置に取り付ける。水中浮遊型カプセルプローブを用いた地下水検層で得られる孔内流速分布には、センサーの精度、分解能およびサンプリング速度などが影響すると考えられる。なお、地熱開発の分野への適用においては、断熱性を有するカプセル構造のほか、密度や粘性に与える影響の補正方法などが求められる。

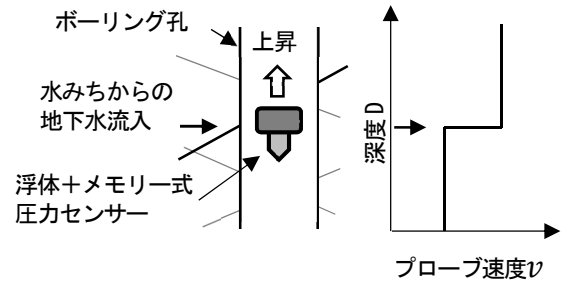


図2 カプセルプローブを用いた水みち抽出の概念。

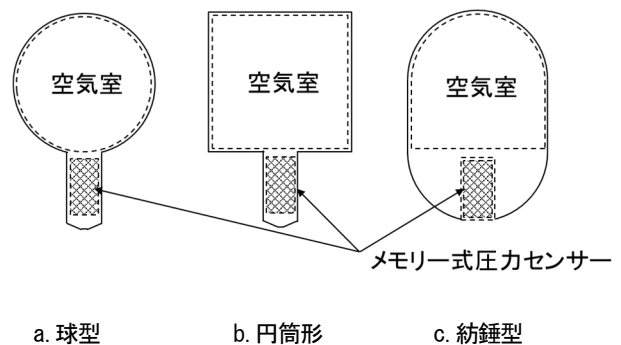


図3 カプセルプローブ構造の例。

今後、本検層技術の実用化に向けて、室内および原位置における試験データを蓄積しながら、上記課題の解決を図る予定である。

3. 検層理論に関する検討

3.1 プローブの移動速度と孔内流速との関係

本検層は、ボーリング孔内を浮遊する浮体の移動速度が孔内流速に依存して変化することに着目し、浮体の移動速度から孔内の流速分布を求めることを基本的な概念としている。

以下に、検層の基本となるボーリング孔内の浮体の挙動に関する原理について述べる。

ボーリング孔内を密度 ρ_M (kg/m³)の浮体が移動する場合、浮体には、図4に示すように、自重 mg (N)、浮力 $m'g$ (N)および孔内水からの抵抗 F_d (N)が作用する。このときの浮体の運動方程式は、

(1)式で表される.

$$m \frac{dv}{dt} = -(m - m')g - F_d \quad (1)$$

ここに, v : 浮体の移動速度 (上向きを正とする)(m/s), g : 重力加速度(m/s²), である. 浮体が半径 r (m)の球の場合, (1)式の右边第一項は,

$$(m - m')g = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_M - \rho_F)g \quad (2)$$

である. ここに, ρ_F : 孔内水の密度(kg/m³), である. 抗力 F_d は, 孔内 ρ_F の流れが遅く粘性抵抗が卓越する場合, (3)式で求められる(Haberman and Sayre, 1958).

$$F_d = 6\pi\eta r(v\lambda_1 - U\lambda_2) \quad (3)$$

ここに, U : 放物線分布 (図4) を仮定したときの孔内最大流速 (m/s), η : 水の粘性係数(Pa·s), ρ_F : 孔内水の密度(kg/m³)である. また, λ_1 および λ_2 は, 孔内の流れと無限場での流れにおける抗力の違いを補正する孔壁補正係数(Wall correction factor)であり, Haberman and Sayre (1958)は, 無限次数の連立代数方程式による厳密解および下記の近似解を得ている.

$$\lambda_1 = \frac{1 - 0.75857\alpha^5}{1 - 2.105\alpha + 2.0865\alpha^3 - 1.7068\alpha^5 + 0.72603\alpha^6} \quad (4)$$

$$\lambda_2 = \frac{1 - \frac{2}{3}\alpha^2 - 0.20217\alpha^5}{1 - 2.105\alpha + 2.0865\alpha^3 - 1.7068\alpha^5 + 0.72603\alpha^6} \quad (5)$$

ここに, α は, 浮体半径とボーリング孔半径との比 r/R である. Paine(1975)は, Haberman and Sayre (1958) の解を数値解析的に求め, 近似解(4), (5)が, α が約0.6以下の範囲では十分な精度を有することを示した.

浮体に働く力が釣り合った時の終末速度(Terminal Velocity) v_s は, (1)~(3)式および $dv/dt = 0$ より,

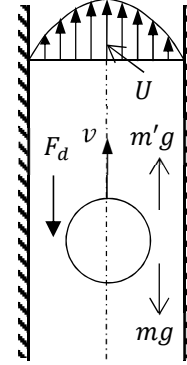


図4 孔内を移動する浮体に作用する力.

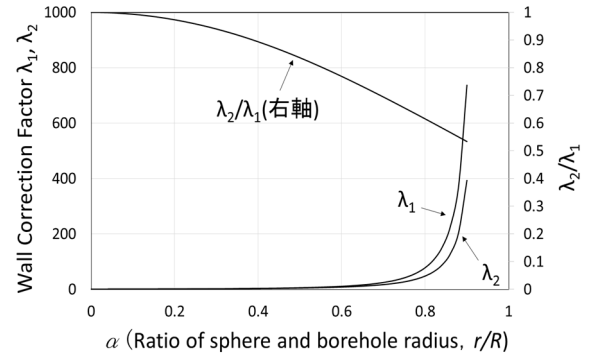


図5 $\alpha (= r/R)$ と孔壁補正係数との関係.

$$v_s = \frac{2r^2(\rho_F - \rho_M)g}{9\eta\lambda_1} + U \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (6)$$

で得られる. すなわち, 浮体の終末移動速度 v_s は, 孔内流速 U に比例する. (6)式の右边第一項は, $U=0$ のときの浮体移動速度である. 図5に, Haberman and Sayre (1958)の解による, $\alpha = r/R$ と λ_1 , λ_2 および λ_2/λ_1 との関係を示す. 同図から, λ_1 および λ_2 の値は, α が約0.8以上になると急激に増加することがわかる. これは, プローブ径が大きくなると, 壁面とプローブ間の流体抵抗が大きくなることを示している. 一方, λ_2/λ_1 は, α の増加とともに, 1から約0.5まで緩やかに低下する. 層流を仮定すると, U は孔内平均流速の2倍であるから (例

えば,日下部他, 2003), $v_s = 0.5U$ は, プローブが孔内平均流速に等しい速度で移動することを意味する.

以上から, 水中浮遊型カプセルプローブの移動速度 v_s から, (6)式を用いて各深度の孔内流速 U を求められることが分かった. また, 移動速度 v_s には, ボーリング孔径(R), 浮体直径(r), 浮体および孔内水の密度(ρ_M , ρ_F)などが関係することが示された.

球形以外の浮体を用いる場合には, (6)式における孔壁補正係数 λ_1 および λ_2 を, ボーリング孔と等しい内径を有するパイプを用いて, 以下のような方法で実験的に求める必要がある.

λ_1 は, 静水におけるプローブの終末速度 v_s を測定することにより, (6)式で $U=0$ として, 次式で求められる.

$$\lambda_1^* = \frac{2r^{*2}(\rho_F - \rho_M)g}{9\eta v_s} \quad (7)$$

ここに, λ_1^* : 実験に用いるプローブの λ_1 , r^* : 実験に用いるプローブの換算半径(m), である.

一方, λ_2 は, 孔内流速 U を種々変えた条件下で終末速度 v_s を測定し, 得られた U と v_s の関係を, (6)式でフィッティングすることにより求めることができる.

3.2 連続的な透水量係数の測定方法

本検層は, 揚水と組み合わせることにより, 孔内に沿った深度方向の透水量係数を連続的に評価することができる. 以下に, その手順を示す.

図6に示すように, 測定対象とするボーリング孔を深度方向に N 個の区間 ($i=1,2,\dots,N$) に分割する. 任意の区間 i における流量変化量 Δq_i

(区間上端と区間下端の $q(z)$ の差) は, 区間 i に単位時間内に流入または流出する水の量 (正の場

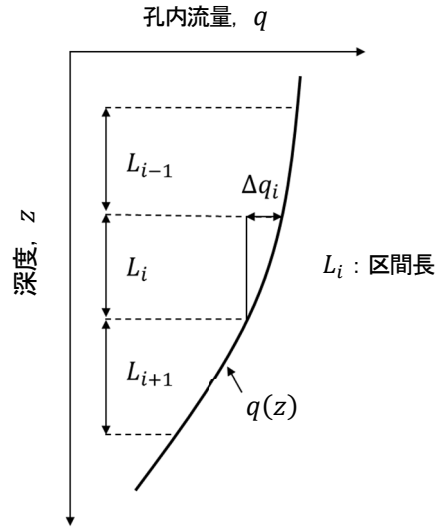


図6 透水(量)係数の孔内連続測定概念.

合は岩盤から孔内への流入, 負の場合は孔内から岩盤への流出があることを示す) を示す.

今, 2 種類の異なる流量の揚水条件下において本検層を実施すると, 孔内流量 (=孔内平均流速 $\times$ ボーリング孔断面積) の分布 $q^{(1)}(z)$, $q^{(2)}(z)$ から, 区間ごとの流入出力 $\Delta q_i^{(1)}$, $\Delta q_i^{(2)}$ が求められる. ここに, カッコ内の数字は, 揚水試験番号を示す.

一方, 測定区間 i の透水量係数 T_i とボーリング孔全体の透水量係数 T_{tot} との比は, 次式で表される(Doughty *et al.*, 2005, (1)式).

$$\frac{T_i}{T_{tot}} = \frac{\Delta q_i^{(2)} - \Delta q_i^{(1)}}{Q_2 - Q_1} \quad (8)$$

ここに, Q_1 , Q_2 は, 揚水量を示す. また, T_{tot} は, ボーリング孔全長の透水量係数であり, 揚水試験結果から, 例えば, 次のような定常井戸公式を用いて算定することができる.

$$T_{tot} = \frac{Q}{2\pi(h_R - h_{wb})} \ln(R/r_{wb}) \quad (9)$$

ここに、 h_{wb} 、 h_R は、それぞれボーリング孔内水位およびボーリングから R 離れた場所の水位であり、 r_{wb} は井戸半径である。

Q_1 、 Q_2 は既知量(任意の設定条件)であるから、 T_{tot} を(9)式で求めれば、(8)式からボーリング孔に沿った透水量係数分布 T_i を求めることができる。また、透水量係数=透水係数×区間長の定義より、各区間の透水係数 k_i は、 T_i を測定区間長さ L_i で除すことにより算定される。

4. 模擬ボーリングを用いた検証実験

4.1 実験方法および実験条件

水中浮遊型カプセルプローブを用いた孔内流速測定手法の精度確認および実用化に向けた課題抽出を目的として、模擬ボーリング孔を用いた実験を行った。実験には、図7に示すような、長さ2mの亚克力パイプを3本連結した長さ6mのパイプを用いた。孔径変化に伴う孔壁補正係数の変化がプローブ速度に与える影響を調べるため、最下部パイプは内径87mm、他2本は内径85.5mmとした。また、途中2か所(底部から1.4mおよび3.4m)に、水みちからの地下水流入を模擬した注水孔を設けた。注水には水道水を用い、タービン式流量計 vision 1000 (流量測定レンジ100～2500ml/min, 精度 $\pm 3\%$)により流量を測定しながら、バルブ操作により流量調整を行った。

プローブ用カプセル(浮体)の作製には、3Dプリンターを用い、図8に示すように、直径60mm、80mm(以上、紡錘形)および直径70mm(円筒形)の3種類の形状のものを試作した。

メモリー式圧力センサーには、Onset社のHOBO 水位・水温ロガーU20-001-01(最大水深9m, 精度 $\pm 0.05\%$ FS, 分解能0.21cm, サンプルング応答時間1s)を用いた。圧力センサーは、図8に示すように、

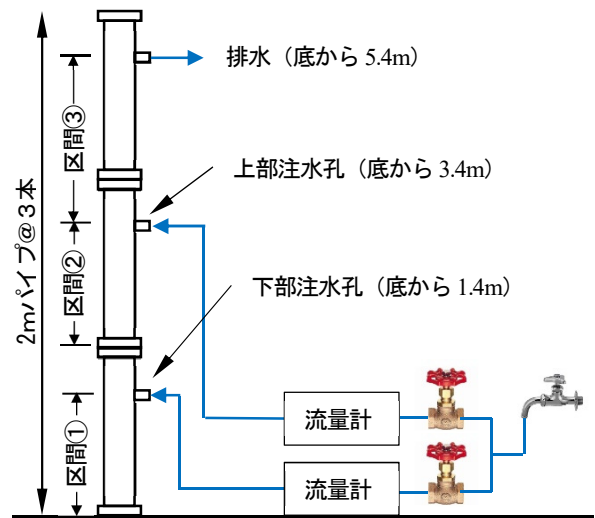


図7 実験のセットアップ。

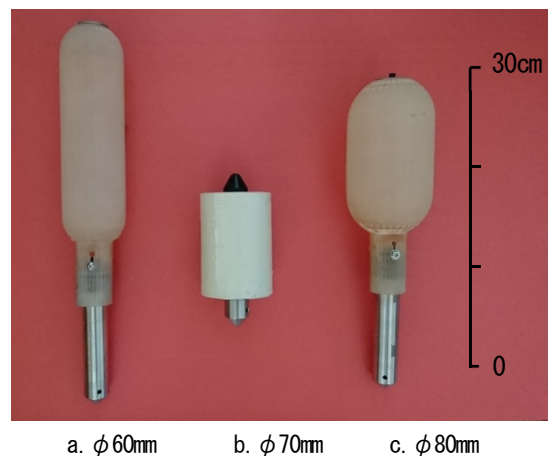


図8 実験に用いたプローブ。

表1 プローブの仕様。

項 目		Probe-a	Probe-b	Probe-c
形 状		紡錘形	円筒	紡錘形
材 料		硬質プラスチック	PLA樹脂＋ エポキシコート	硬質プラスチック
直径 (mm)		60	70	80
密度* (kg/m³)	下降	1.016	1.028	1.013
	上昇	0.995	0.996	0.994

*水圧センサーを含む

浮体の下部にねじ止めする（紡錘形浮体）か、または中央を貫通（円筒形浮体、O-ringで止水）させて取り付けた。プローブの密度は、いずれのタイプも錘の重量や浮体内の水量を変えることにより調整した。プローブの仕様を表1に示す。各プローブの密度は、降下時 $1.01\sim 1.03\text{ kg/m}^3$ 、上昇時 $0.995\sim 0.996\text{ kg/m}^3$ の範囲でほぼ等しくなるように調整した。

実験は、3種類のプローブについて、2か所の注水孔からの注水流量(ml/min)の組み合わせを、（下段, 上段）=(0, 0), (655, 0), (1280, 0), (1280, 500), (1100, 2020)の5種類に変えた、計15ケースについて、それぞれ降下と上昇の2種類の測定を行った。

降下測定および上昇測定を連続して実施するため、プローブが孔底に到達後、プローブ下部に取り付けた錘のフックが「てこ」の原理で外れ落下することにより、プローブが自動的に反転上昇するようにした。

4.2 実験結果

図9に、実験結果の例として、注水を行わないケースと注水流量が 1280 ml/min （下段）および 500 ml/min （上段）のケースについての実験結果を示す。いずれのプローブも、口元から降下を開始し、孔底に到達した時点で上昇に転じ、水面に到達した。プローブ回収後、圧力センサーに記録されたデータを読み取った。

図9より、降下および上昇速度は、プローブ径によって顕著な差があることが分かる。すなわち、降下および上昇速度とも、プローブ径が大きいほど遅い。静水条件下（ $U=0$ ）では、(6)式の第2項は0であるから、移動速度に相違が生じる要因は、浮体半径と孔壁補正係数 λ_1 の2つが考えられる。また、注水の有無によっても、プローブの降下および上昇速度に差異があることが分かる。すなわ

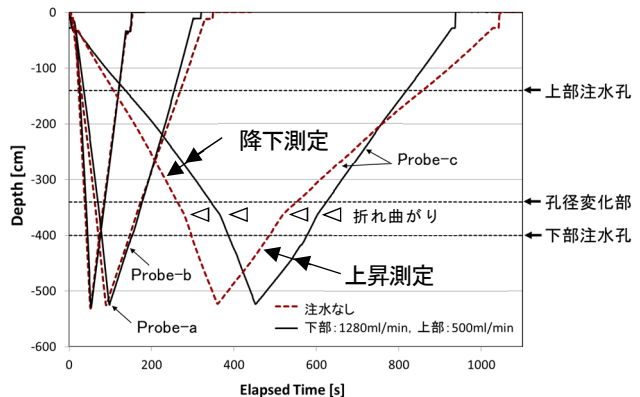


図9 実験結果の例（プローブ深度履歴）。

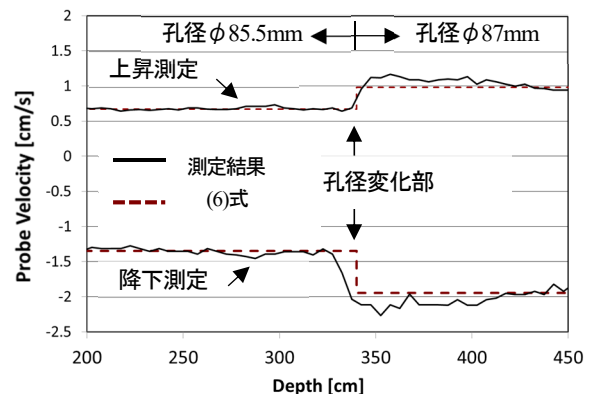


図10 孔径変化部のプローブ移動速度分布(注水なし)。

ち、注水の無い場合と比較して、注水がある場合には、プローブの降下速度が遅くなり、逆に上昇時には速度が速くなる傾向があることが分かる。これは、浮体に作用する抗力 F_d （図4）の影響と考えられる。すなわち、浮体が降下する際は、抗力 F_d は速度を抑制するように作用し、上昇する場合は逆に浮体速度を加速させるように作用する結果、上記のような傾向が現れたと解釈される。言い換えると、下降時と上昇速度の相違は、プローブの移動速度が、孔内流速に影響を受けることを示している。さらに、プローブの降下上昇曲線には、「折れ曲がり点」（図9中に”ㄷ”で示す）が見られる。例えば、 $\phi 80\text{ mm}$ プローブの「注水なし」のケースに着目すると、下部注水孔～孔径変化深

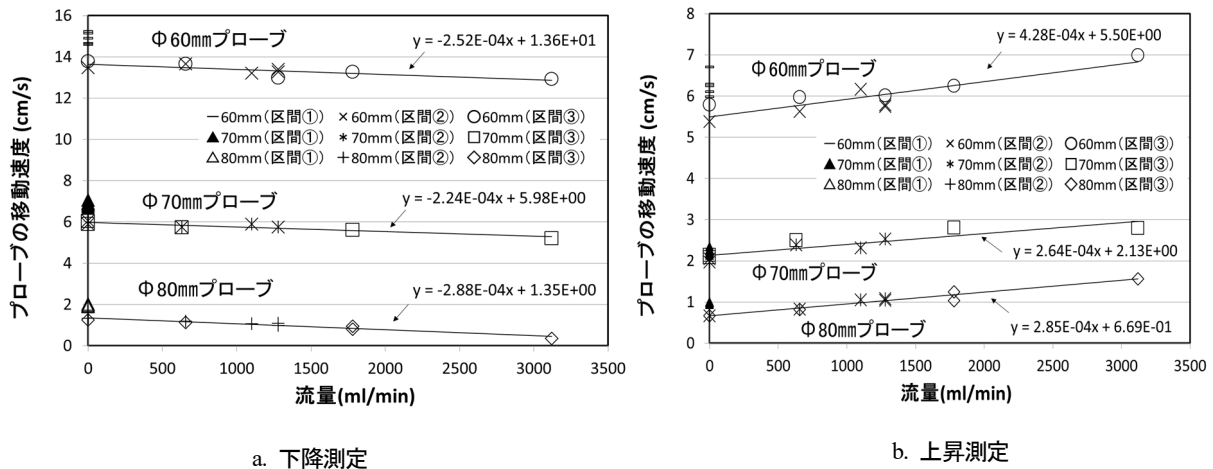


図 11 流量とプローブ移動速度との関係。

度の間で、降下時および上昇時とも勾配が変化している。注水を行っていないので、速度変化が孔内流れの変化に起因することは考えられない。

図9の「注水なし」のケースの深度履歴から計算される $\phi 80\text{mm}$ プローブの移動速度を図10に示す。同図から、 $\phi 85.5\text{mm}$ と $\phi 87\text{mm}$ の孔径変化部において、プローブの移動速度に明確な変化が見られる。すなわち、孔径 1.5mm の変化が、プローブの移動速度の変化としてとらえられることが分かった。なお、図10の横軸(水深)は、浮体中心と圧力ポートの位置がずれていることによる深度補正量 20cm を差し引いた値を用いた。

孔内流速変化によるプローブ速度への影響が上昇測定と降下測定では逆方向に現れる（上向き孔内流速の増加により降下速度が減少し、上昇速度は増える）のに対し、孔径変化の影響は上昇・降下ともに同方向である（孔径が大きくなると、降下・上昇速度とも増加する）。このことは、降下・上昇時のプローブ移動速度の変化から、孔径変化と流速変化を区別して評価できる可能性を示唆している。

すべての実験ケースについて得られた降下・上昇深度データから、図7に示す3つの区間、すなわち、区間①：下部注水口以深、区間②：孔径変

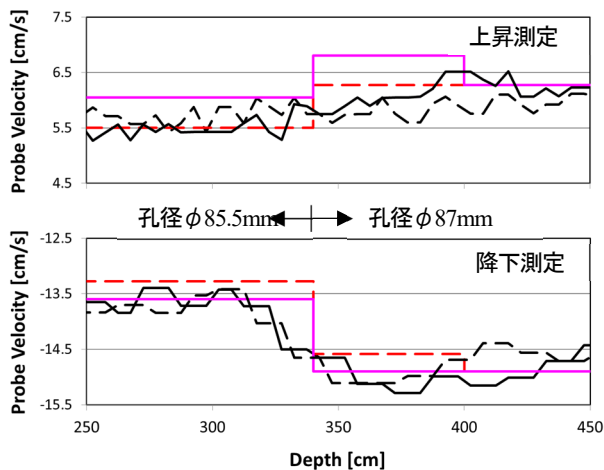
化部～上部注水口、および区間③：上部注水口～水面、について、プローブ移動速度と区間流量との関係を求めた結果を図11に示す。

同図から、 $\phi 85.5\text{mm}$ パイプの結果（区間②、区間③）には、3種類のプローブとも、ばらつきがあるものの、プローブ移動速度と区間流量との間に、図中の近似直線で示す線形関係が見られる。この結果は、プローブの移動速度と孔内流速との間に、(6)式で示したような線形関係が成立することを示している。(6)式を用いて、近似直線の切片から λ_1 を、勾配から λ_2/λ_1 をそれぞれ計算した。ただし、孔内最大流速 U は、流量を断面積で除した値を2倍して求めた。表2に、計算結果をまとめて示す。なお、区間①($\phi 87\text{mm}$)については、注水なし($U = 0$)の試験のみ行ったため、 λ_1 のみを計算した。

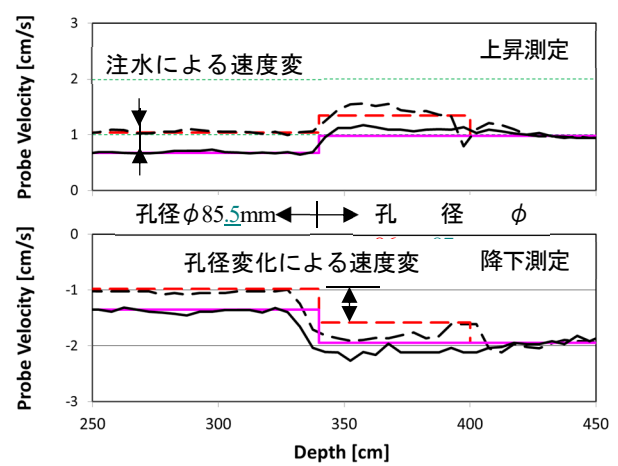
実験で得られた孔壁正係数 λ_1 および λ_2 は、同じ半径を有する球の理論解と比較して数倍～10数倍大きな値が得られた。これは、今回試作したプローブの壁面抵抗が、球形の浮体と比較して大きいことを示している。また、パイプの内径の違いに着目すると、いずれのプローブも、 $\phi 87\text{mm}$ の壁面抵抗係数 λ_1 は、 $\phi 85.5\text{mm}$ と比較して小さい。

表2 孔壁補正係数

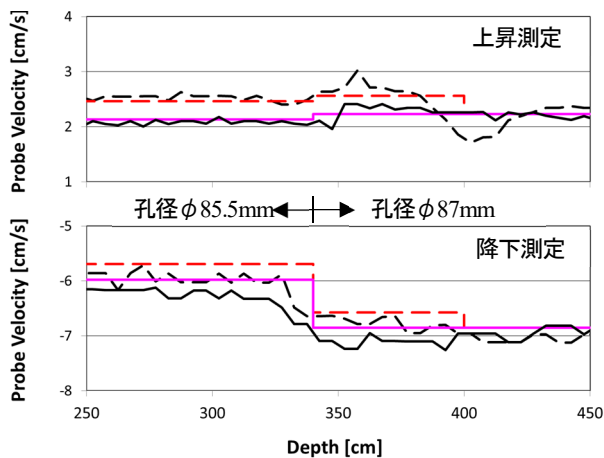
パイプ内径	測定	プローブ	r/R	終末速度 v_s	λ_1		λ_2		λ_2/λ_1	
				cm/s	理論解(球)	実験	理論解(球)	実験	理論解(球)	実験
85.5mm	下降測定	Φ60	0.702	13.60	25.37	290.82	17.60	126.23	0.693	0.434
		Φ70	0.819	5.98	103.49	1,499.21	62.19	578.43	0.601	0.386
		Φ80	0.936	1.35	1,388.01	4,382.39	729.97	2,173.94	0.526	0.496
	上昇測定	Φ60	0.702	5.50	25.37	97.15	17.60	71.62	0.693	0.737
		Φ70	0.819	2.13	103.49	241.14	62.19	109.65	0.601	0.455
		Φ80	0.936	0.67	1,388.01	1,822.92	729.97	894.86	0.526	0.491
87mm	下降測定	Φ60	0.690	14.90	22.87	265.44	—	—	—	—
		Φ70	0.805	6.86	84.91	1,307.84	—	—	—	—
		Φ80	0.920	0.67	1,093.72	3,040.20	—	—	—	—
	上昇測定	Φ60	0.690	6.27	22.87	85.22	—	—	—	—
		Φ70	0.805	2.23	84.91	230.02	—	—	—	—
		Φ80	0.920	0.98	1,093.72	1,245.69	—	—	—	—



a. Probe-a (φ60 mm)



c. Probe-c (φ80 mm)



b. Probe-b (φ70 mm)

——— 測定結果：注水なし
 - - - 測定結果：注水あり（下段：1280ml/min, 上段 500ml/min）
 ——— 理論：(6)式（表2, 注水なし）
 - - - 理論：(6)式（表2, 注水あり）

図12 プローブ移動速度分布（注水，孔径変化の影響）。

図10に、表2中の λ_1 を用いて(6)式で計算したプローブ速度分布を示す。計算値と実験結果とは良い一致がみられることから、プローブ移動速度が変化した原因が、孔径による壁面抵抗の違いに起因していることが裏付けられた。図12に、3種類のプローブについて、注水なしおよび注水あり（下段：1280ml/min, 上段500ml/min）の各ケースで得られた孔径変化部周辺の深度250cm～450cm区間におけるプローブ速度分布を示す。同図中には、表2に示した壁面抵抗係数を用いて(6)式で計算したプローブ移動速度を併せて示した。 $\phi 80\text{mm}$ の結果は、理論値と比較的良好一致が見られるが、より小さな半径のプローブについては、両者に乖離が見られる。この差異が、形状のみに起因するか、またはプローブ密度など他の要因に起因するかについては、今後、実験データを蓄積し、引き続き検討する予定である。

5. まとめ

水中浮遊型カプセルプローブを用いた新たな地下水検層の概念を提示し、理論的かつ実験的検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- ・プローブに内蔵したメモリー式圧力センサーのデータから、各深度のプローブ移動速度を求めることができる。
 - ・プローブ移動速度と孔内流速との間には、(6)式で示すような線形関係が存在する。
 - ・孔径変化（今回の実験では1.5mm）を、プローブ移動速度の変化としてとらえることができる。
 - ・球形以外の形状を有するプローブの孔壁補正係数（ λ_1 および λ_2 ）を実験的に求めることができる。
- 一方で、実用化に向けては、耐圧性、防水性、耐熱性を有するプローブ構造の検討のほか、圧力測定の高精度・高分解能化、上昇・下降の自律制

御方法、など残された課題は多い。今後は、理論的検討や室内実験によるデータを蓄積しながらこれらの課題を解決するとともに、実ボーリング孔を用いた揚水試験に本検層を適用し、3章の(2)式を用いた透水係数の連続的評価を試みる予定である。

謝辞

本研究の議論に参加頂いた日本原子力機構の澤田淳氏、尾上博則氏および実験にご協力頂いた（株）アサノ大成基礎エンジニアリングの竹延千良氏に謝意を表します。

文献

- 日下部重幸・檀和幸・湯城豊勝（2003）：水理学，コロナ社，ISBN 4-339-05507-7.
- Doughty, C., Takeuchi, S., Amano, K., Shimo, M. and Tsang, Chin-Fu, (2005): Application of multirate flowing fluid electric conductivity logging method to well DH-2, Tono Site, Water Resources Research, 41, W10401, doi:10.1029/2004WR003708.
- Haberman, W. L. and Sayre, R.M., (1958): Motion of rigid and fluid spheres in stationary and moving liquids inside cylindrical tubes, U.S. Navy David Taylor Model Basin Report, 1143, Washington D.C.
- Paine, P. L., (1975): Drag coefficient for the movement of rigid spheres through liquid-filled cylindrical pores. Biophysical Journal, 15, 1087-1091.