水中浮遊型プローブを用いた地下水検層技術の開発 -測定概念と実用化に向けた基礎実験-

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]公益財団法人　深田地質研究所（〒113-0021 東京都文京区本駒込2-13-12）
[2]日本大学　文理学部地球科学科（〒156-8550 東京都世田谷区桜上水3-25-40）
[3]国立研究開発法人　日本原子力研究開発機構（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64）
[4]㈱アサノ大成基礎エンジニアリング（〒110-0014 東京都台東区北上野2-8-7）

*E-mail: mshimo@fgi.or.jp

著者らは，メモリー式水圧センサーを搭載した水中浮遊型プローブを用いた新しい地下水検層技術を考案した．同プローブは，比重を調整することにより，孔内を上昇・降下し，深度および時間に関連づけられたボーリング沿いの様々な情報を連続的に取得することができる．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無動力での測定が可能なため，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基本的な測定概念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.

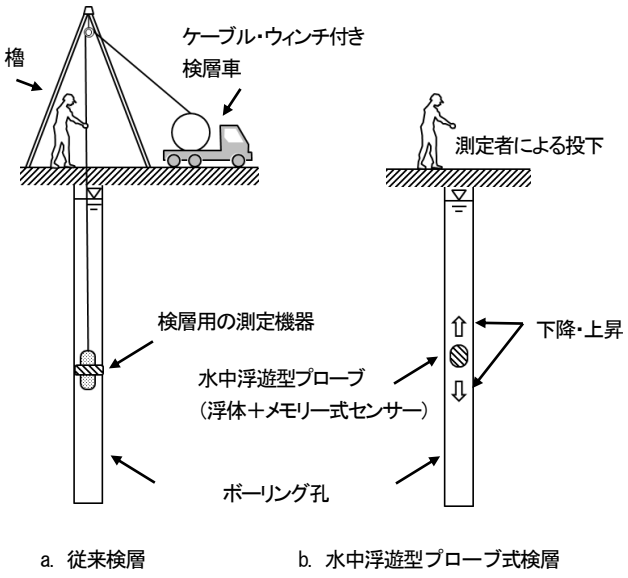
Key Words :*growndwater flow logging, self-driving probe, flow rate, wall correction factor, laboraoty test*

1. はじめに

トンネルやダム，燃料地下備蓄，放射性廃棄物地層処分，二酸化炭素地中貯留，石油・天然ガスなどの資源開発，などの計画，実施，維持管理においては，深部地盤の性状や地下水流動に関する情報を取得するため，ボーリング孔を用いた検層が行われる．従来の検層では，地上に設置した櫓を用いて，ロッドやケーブルにより検層用の測定機器を孔内で移動させながら，ボーリング孔に沿った地質情報および流速や温度などの地下水流動に関する情報を取得するのが一般的である[1)]（図−１a）.

今回，著者らは，図−1bに示すように，水中を浮遊する浮体にメモリー式センサーを内蔵したプローブ（以下，水中浮遊型プローブ）により，ボーリング孔に沿った圧力，温度など種々の情報を連続的に取得する検層方法を考案した．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，浮力および流水から受ける抗力のバランスにより孔内を下降あるいは上昇するため，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することができる（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することができる.
・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することができる.



図−1　検層方法の比較

本論文では，考案した検層方法の実用化に向けて，ボーリング孔内での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．

次節以降では，プローブの基本構造に関する検討を行った後，既往研究を参考に，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. 水中浮遊型プローブの基本構造に関する検討

水中浮遊型プローブには，「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，浮体内部に水を出し入れする方法や外側に錘を取り付け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．浮体を安定させるためには重心を低くする必要があるため，**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．水中浮遊型プローブ式地下水検層で得られる孔内流速測定結果には，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．

本論文で述べる理論検討や実験は，水中浮遊型プローブ式地下水検層の実用化に向け，最適なプローブ構造や圧力センサーに求められる性能などに関する知見を得ることを目的としている．

3. 浮体移動速度と孔内平均流速との関係

ボーリング孔内の水中を浮遊するプローブの移動速度と孔内水の流速との関係について理論的に考察する．

ボーリング孔内を密度 ρ_M (kg/m^3)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抗力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．

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

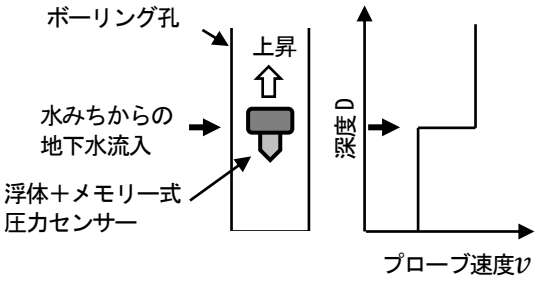


図-2　水中浮遊型プローブを用いた水みち抽出の概念

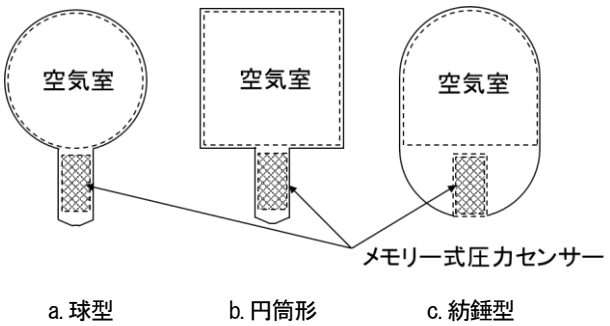


図-3　プローブ構造の例

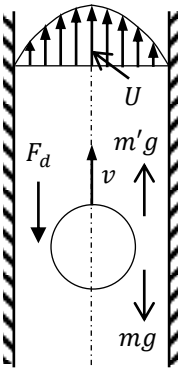


図-4　孔内を移動する浮体に作用する力

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/s^2)，である．

浮体が半径r (m)の球の場合，(1)式の右辺第一項は，

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

であり，抗力F_d は，孔内の流れが遅く粘性抵抗が卓越する場合を想定すると，(3)式で求められる[2]．

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

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/m^3)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[2] 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[3)]は，Haberman and Sayre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，

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

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に比例し，U=0のとき，(6)式の第一項に等しい．

図-5に，Haberman and Sayre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．一方，λ_2/λ_1は，αのほぼ全領域において，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，$v_s = 0.5U$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，水中浮遊型プローブを用いて浮体の移動速度v_sを求めることにより，(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，浮体移動速度v_sには，ボーリング孔径，浮体直径，浮体および孔内水の密度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，(6)式における孔壁補正係数λ_1およびλ_2を，あらかじめ実験的に求めておく必要がある．

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．

4. 模擬ボーリングを用いた検証実験

(1) 実験方法および実験条件

水中浮遊型プローブを用いた孔内流速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-6**に示す，長さ2mのアクリルパイプを3本連結した長さ6mのパイプを用いた．孔径の影響を調べるため，最下部パイプは内径87㎜，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，バルブで流量調整を行い，タービン式流量計vision 1000（流量測定レンジ100～2500ml/min，精度±3%）により流量を測定した．

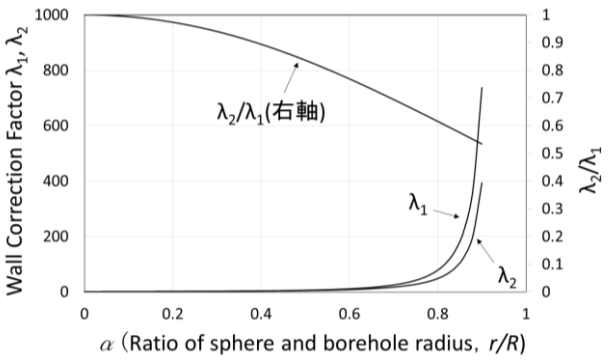


図-5　$\alpha(=r/R)$と孔壁補正係数との関係

プローブ用の浮体は，**図-7**に示すように，３Dプリンターを用いて，直径60㎜，80㎜（以上，紡錘形）および直径70㎜（円筒形）の３種類の形状のものを作成した．

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±0.05%FS，分解能0.21cm，サンプリング速度1s）を用いた．圧力センサーは，**図-7**に示すように，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，錘と浮体内の水量を変えて重量を変化させることで調整した．プローブの仕様を**表-1**に示す．各プローブの密度は，下降時1.01～1.03 kg/m^3，上昇時0.995～0.996 kg/m^{3}の範囲でほぼ等しくなるように重量を調整した．静水下および流水下での水中浮遊型プローブの挙動を確認するため

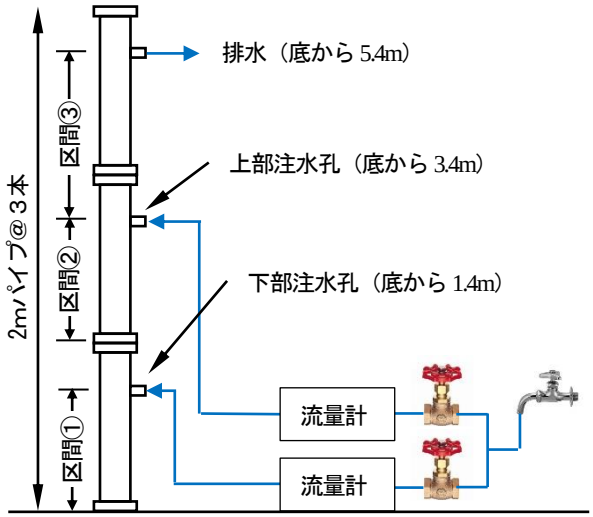
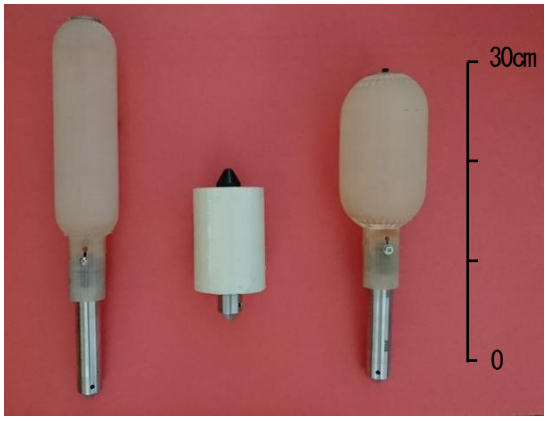


図-6　実験のセットアップ

の実験を，３種類のプローブについて，２つ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，合計１５ケースについて実施した．各実験において，下降と上昇の２種類の測定を行った．プローブ下部には重量調整用の錘を取り付け，プローブが孔底に到達後，「てこ」の原理で固定フックが外れ錘を落下させることにより，自動的に反転上昇するようにした．

⑵ 実験結果

図-8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1280ml/min（下段）および 500ml/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．各プローブの密度に大差はないが，**図-8**において下降および上昇速度には，プローブ径によって顕著な差が見られる．すなわち，下降および上昇速度は，プローブ径が大きいほど遅い．静水条件下では，(6)式の第2項は0であるから，プローブの形状により移動速度に相違が生じる理由は，浮体の断面積と孔壁補正係数λ_1の相違に起因すると考えられる．また，注水の有無により，プローブの降下速度および上昇速度に差異があることが分かる．すなわち，注水の無い場合と比較して，注水がある場合では，プローブの降下速度が遅くかつ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．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した結果，上記のような傾向が現れたと解釈される．また，プローブの下降上昇曲線には，「折れ曲がり点」（図中”◁”で示す）が見られる．φ80mmプローブの注水なしのケースに着目すると，注水を行っていないにもかかわらず下部注水孔～孔径変化深度の間で，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．φ80mmプローブのケースの結果について，**図-8**の結果から計算される上昇および下降測定時のプローブ移動速度を**図-9**に示す．なお，測定値の横軸(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てプロットした．同図から，φ85.5mmとφ87mm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の変化がプローブ移動速度の変化としてとらえられることが分かった．流量変化によるプローブ速度変化が上昇測定と下降測定の結果に逆方向に現れる（上向き孔内流速の増加により，



a. φ60mm　　b. φ70mm　　c. φ80mm

図-7　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

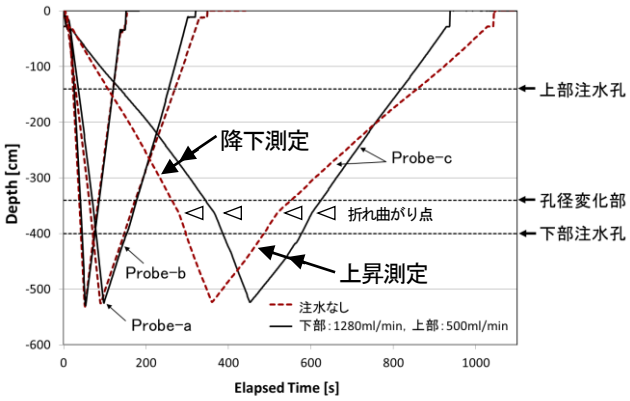


図-8　実験結果の例（プローブ深度履歴）

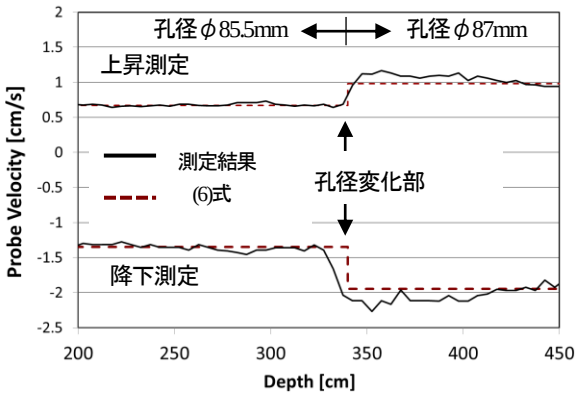
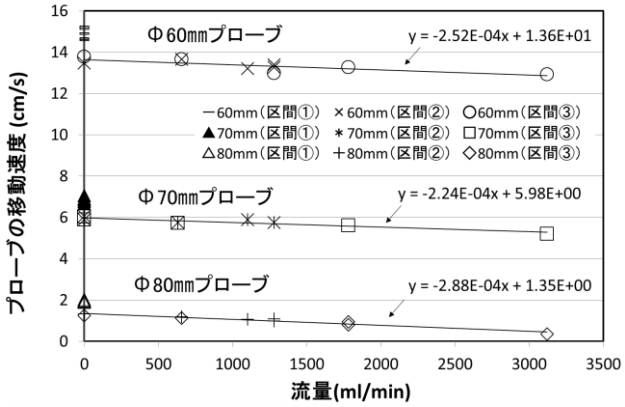


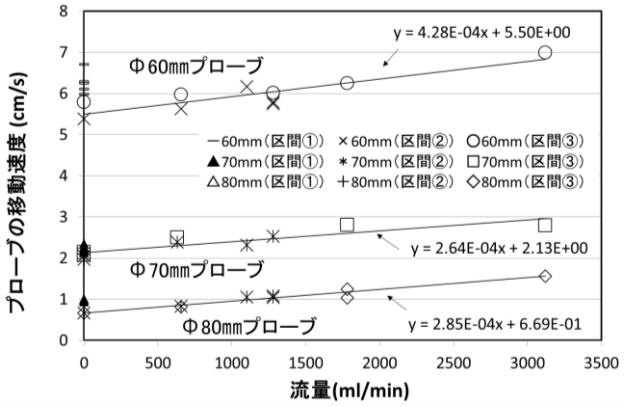
図-9　孔径変化部のプローブ移動速度分布（注水なし）

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・下降ともに同方向である（孔径が大きくなると，下降・上昇速度とも増加する）．このことは，プローブ移動速度の変化が，孔径変化，流量変化（水みちの存在）のいずれに起因するかを，速度変化パターンから判別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下降・上昇深度データから，**図-6**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，の各々について得られたプローブ移動速度と区間流量との関係を**図-10**に示す．同図から，φ85.5㎜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（流量を流速に変換するため断面積で除した後）からλ_2/λ_1をそれぞれ計算した．区間①（φ87㎜）については，今回注水なし（U=0）の試験しか行っていないので，λ_1のみを計算した結果を，**表-2**に示す．実験に用いたプローブの孔壁正係数λ_1およびλ_2は，同じ半径を有する球と比較して数倍～10数倍大

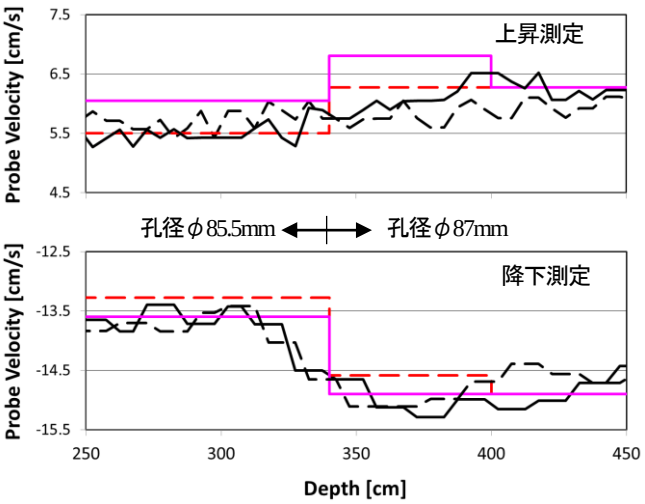


a. 下降測定

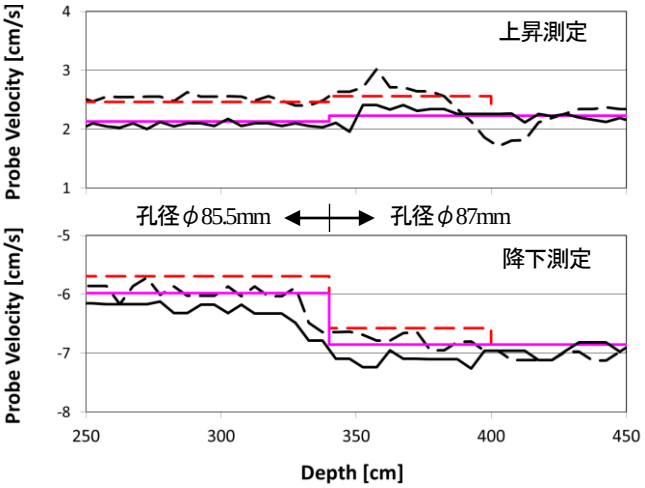


b. 上昇測定

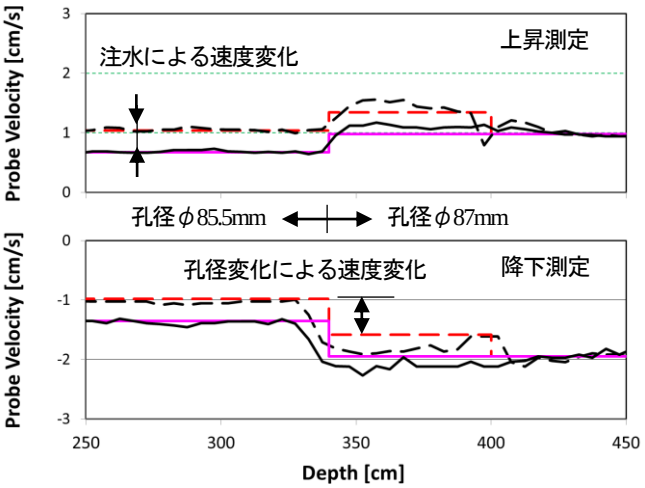
図-10　流量とプローブ移動速度との関係



a. Probe-a (φ60㎜)



b. Probe-b (φ70㎜)



c. Probe-c (φ80㎜)

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-11　プローブ移動速度分布（注水，孔径変化の影響）

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	－	－	－	－

きな値が得られており，今回試作したプローブの壁面抵抗が，球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，φ87mmの壁面抵抗係数λ_1は，φ85.5㎜と比較して小さな値が得られている．表中のλ_1を用いて(6)式で計算した速度変化は，**図-9**に示すように，実験結果と良い一致がみられることから，孔径による壁面抵抗の違いによりプローブ移動速度に変化が生じたことが理論的にも裏付けられた．

図-11中に，**表-2**に示す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す．φ80㎜の結果は，理論値と比較的良い一致が見られるが，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，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，追加実験を含めた検討が必要である．

5. まとめ

水中浮遊型プローブを用いた新たな地下水検層方法にについて，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，プローブの移動速度を測定することができる．

・プローブ移動速度に与える孔径（壁面抵抗）および流速（流体抗力）の影響を理論式（6）で評価できる．

・プローブ移動速度に与える孔径および孔内流速の影響を個別に評価する測定手法を検討する必要がある．

今後は，今回得られた知見を基に，プローブ構造やセンサーの改良および測定手法の検討を行うとともに，実ボーリングを用いた適用性確認を実施する予定である．

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．

参考文献

1) Doughty, C., Takeuchi, S.., Amano, K., Shimo, M. and Tsang, Chin-Fu, : Application of multirate flowing fluid electric conductivity logging method to well DH-2, Tono Site, *Water Resources Research*, VOL. 41, W10401, doi:10.1029/2004WR003708, 2005.
2) Haberman, W. L. and Sayre, R.M. : Motion of rigid and fluid spheres in stationary and moving liquids inside cylindrical tubes, *U.S. Navy David Taylor Model Basin Report*, No. 1143, Washington, D.C., p.67, 1958.
3) Paine, P. L., : Drag coefficient for the movement of rigid spheres through liquid-filled cylindrical pores. *Biophysical Journal*, Vol. 15, pp. 1087-1091, 1975.

DEVELOPMENT of GROUNDWATER FLOW LOGGING TECHNOLOGY using a SELF-DRIVING PROBE
– MEASUREMENT CONCEPT and VERIFICATION EXPERIMENT RESULTS -

Michito SHIMO, Shinji TAKEUCHI, Ryuji TAKEUCHI, Kazuyuki GOTO and Katsushi NAKANO

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 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 reationship considering the “wall correction factors” λ_1 and λ_2.