

◆ 土砂災害特集 ◆

溶存酸素を用いた地下水流動層把握に関する実験的検討

柳原幸希* 綱木亮介**

1. はじめに

地下水の流動状況を的確に把握することは、地すべりの発生機構を解明し、地すべり防止工において地下水排除工の設計に欠くことのできない要素の一つである。

一般的に地すべり地において地下水の垂直的な位置および流動状況を把握するために行われている地下水流動調査は、ボーリング孔内に食塩等の電解物質を投入、溶解させ、流入地下水の比抵抗値の変動より流動状況を知るものである(一般的に「地下水検層」または「食塩検層」という)。しかしながら、この方法では、計測開始時にピックアップの上下によって孔内水の攪拌が生じたり、孔底より各深度を測定する為同一時刻における評価ができない場合がある^{1),2)}。

そこで著者らは溶存酸素に着目し、これを地下水検層に応用するための手法について検討してきた^{3),4),5)}。溶存酸素は、水中に遊離のガスとして溶解しているものであり、この値は、岩石の風化・粘土化に伴う消費、また、有機物の分解などによって減少する。したがって、地下深部あるいは長期に滞水している地下水ほど溶存酸素が減少しているものと思われる。一方、溶存酸素は希釈が容易であり、水中に溶け込むと溶存酸素の流動が少ないこと、などの性質がある。本研究では、これをトレーサーとして検証のため土層を用いて模型実験を行い、食塩検層及び溶存酸素検層の整合性、傾向を確かめた。

2. 地下水流動調査方法と流速の推定方法

まず、ボーリング孔内水の深度別溶存酸素濃度を計測しておき、これをバックグラウンド値とする。その後、ボーリング孔底までセンサおよびポリエチレンチューブを降ろし、酸素ボンベで一定

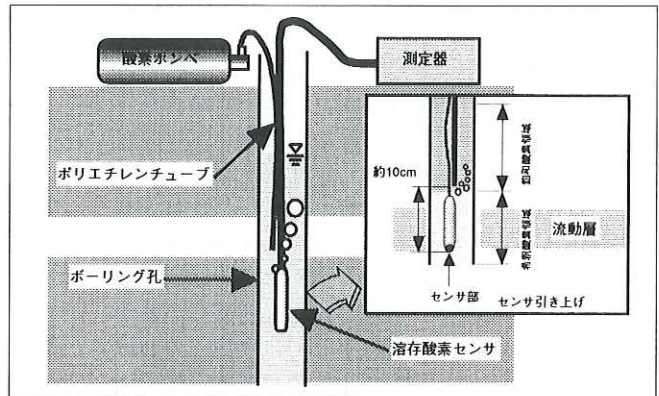


図-1 溶存酸素による地下水検層概念図

時間酸素を送り込む。孔内水が飽和溶存酸素状態になった所で、孔底からセンサを引き上げ、ある時間間隔における溶存酸素の減少濃度を計測する。常に地下水の供給がある流動層の溶存酸素は、不透水層の区間に比べ大きく減少する。したがってこの深度が地下水流動層と予測できる。計測中は絶えず酸素を供給しているため、センサより上部は常に飽和溶存酸素状態になっている(図-1)。

飽和溶存酸素状態から地下水が流入することによって溶存酸素濃度が減じられる。この際、ボーリング孔壁からセンサまでの距離により、測定値が変化するまでのタイムラグが生じる。減少量を測定するため測定値が減少を始めた後に2回計測し、それぞれの測定値の差と時間間隔から溶存酸素減少濃度を求めて流速の推定が可能である。

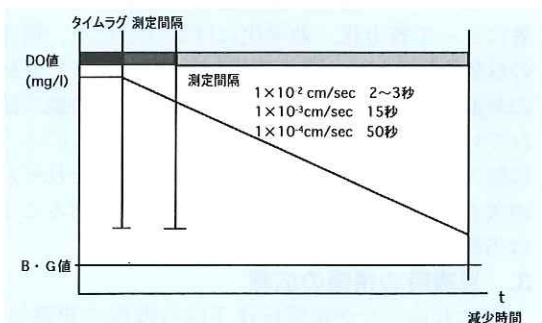


図-2 溶存酸素の現象傾向の模式図

Model Test for Groundwater Logging by the Dissolved Oxygen

ある時間間隔の飽和溶存酸素濃度減少時間は、流速によって変化し、 1.0×10^{-2} cm/sec までの早いもので 2 ~ 3 秒、 1.0×10^{-3} cm/sec で 15 秒、 1.0×10^{-4} cm/sec で 50 秒程度の時間を必要とする⁶⁾(図-2)。これまでの地すべり地における現地実験において溶存酸素の減少濃度は、流動層のある深度において 3 分以内で計測可能であった。現地で概ねの流速を推定する場合次の推定式が考えられる。

飽和状態の溶存酸素濃度が減少を始めた初期値を DO_{init} 、その後の測定値を DO_{means} 、バックグランド値を DO_{BG} とし、初期値測定とその後の測定値測定までの時間間隔を Δt とすると、溶存酸素濃度がバックグランドまで減少する時間 (t) は、次式によって求められる。

$$t = \frac{(DO_{init} - DO_{means}) \times \Delta t}{(DO_{init} - DO_{means})} \quad (\text{sec}) \quad (1)$$

また、推定式 (1) でボーリング孔壁よりセンサ中心位置までの距離を除すと流速の推定が可能である。

模型実験では、あらかじめ実験ケースごとに透水係数を調整した土層で実験を行っており、実際の流動層と実験土槽とでは透水条件が相違している。推定式 (1) は、あくまで現地試験に基づいた式であるため今回の実験には適用せず、溶存酸素検層法での流動層検出状態を検証することとした。

3. 土槽を使った検証実験

従来地すべり地で行われている地下水検層は、ボーリング孔内に食塩水等の電解質溶液を投入する。そして孔内の伝導度を上げたのちに、プローブを孔底より引き上げ比抵抗値を検出するものである。常に地下水の流入がある深度では、地下水の流入により比抵抗値の増大がみられ、流動層と判定することができる。この結果を各測定時刻によって深度別に示したものが地下水検層図となる。しかし、食塩検層では、測定時においてプローブを引き上げることによる孔内水の攪拌、また深いボーリング孔なら孔底と孔口付近まで計測した時に測定時間の経過のため同一時刻による測定値の判定はできないという場合がある。

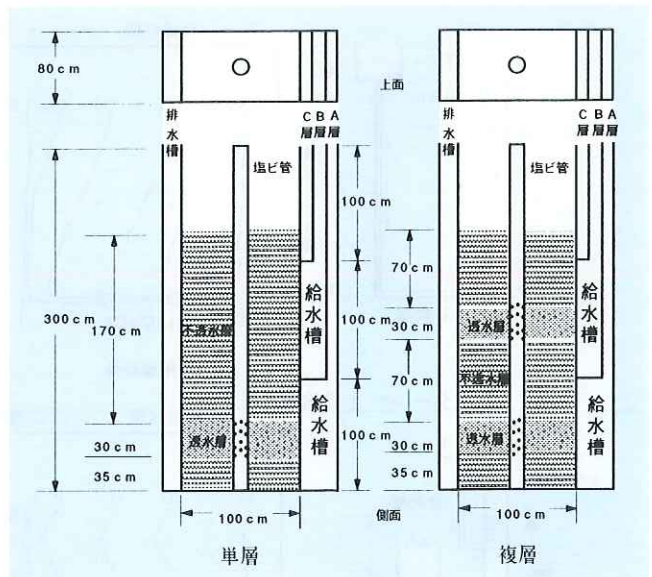


図-3 実験土槽

そこで今回提案した溶存酸素検層法でこの問題をおぎない、流動層を判定できるか比較検証実験を行った。

実験土槽は、流動層を任意に設定できる構造である(図-3)。土層は、単層・複層の透水層をそれぞれ仮定し透水層には、砂、不透水層には粘性土を使用した。また、ボーリング孔の模型としての土槽の流動層の部分にストレーナー加工を施したφ7.5cmの塩ビパイプを設置した。

今回の実験では、食塩検層が地下水流動を検出する2つのケースを想定した(図-4)。図-4において、 H_w はある特定深さにある流動層のもつ圧力水頭、 h_w はその流動層から測った孔内水位高である。 $\Delta h = H_w - h_w$ として説明すると、次のとおりである。

① パターン 1

$\Delta h > 0$ のとき孔内へ地下水が流入し、したがってこの流動層区間が検出される。 Δh があまり大きくなければ検層曲線は、時間とともに横方向に延び、流動層区間の厚みがかなり精度よく検出される。 Δh が大きいと、流入地下水は、ボーリング孔内を鉛直方向に上昇し、流動層区間は多少不明瞭となるが有圧水の存在は明らかに検出される(「上昇流状検出」という)。

② パターン 2

孔内水位高 h_w の中間区間に $\Delta h > 0$ を満足する流動層区間がある場合、この区間で希釈された

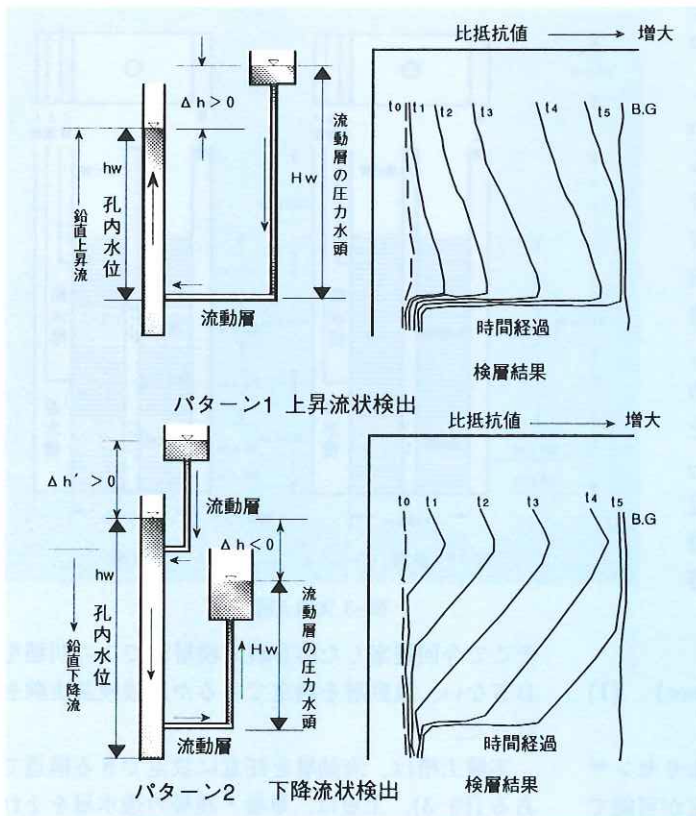


図-4 実験土槽

孔内水が、下位の流動層区間からの逸水につれてボーリング孔中を順次下降し、この鉛直下降流の下限(水比抵抗の変化が認められる最大深さ)として下位の流動層区間が検出される。ただし、それが流動層区間なのか単なる逸水区間なのか判別できない(「下降流状検出」という)。

以上のケースを考慮して表-1に示す条件で実験を行った。溶存酸素検層では、給水槽(A槽、B槽)、排水槽水位および孔内水位が定常状態になったことを確認してから、塩ビ管内のバックグランド値を測定した。次にセンサーに取り付けたポリエチレンチューブで酸素ポンプより酸素を孔内に送り込み、孔内を飽和溶存酸素状態とする。そして酸素を供給しながらプローブを孔底より引き上

表-1 土槽実験のケース数

	給水槽水位 (m)		孔内水位 (m)	排水槽水位 (m)	土層の透水係数 (cm/sec)
	A層	B層			
ケース A	1.0	—	1.3	2.0	$10^{-1} \sim 10^{-2}$
ケース B	1.0	—	1.25	2.0	$10^{-4} \sim 10^{-5}$
ケース C	1.18	0.11	1.12	2.0	$10^{-1} \sim 10^{-2}$
ケース D	1.13	0.27	1.0	2.0	$10^{-4} \sim 10^{-5}$

げ10cm間隔で溶存酸素濃度の計測を行う。

食塩検層は、孔底より各深度を測定終了後、経過時間ごとに測定する方法である。しかし溶存酸素検層では、孔底から順に各深度ごとに溶存酸素の減少開始から任意の経過時間後まで溶存酸素濃度を測定し、一回の測定で流動状況を検出する。そして次の測定深度にプローブを引き上げて次の計測を行うものである。測定方法がそもそも食塩検層と同一ではないので、同一の測定時間の比較はできない。

図-2では、各透水係数での概ねの減少傾向を示したが流速によって減少が確認できる時間間隔が違い、それにより流速が推定できると提案した。したがって3分以上計測しても減少傾向は変わらないので計測時間は、溶存酸素濃度の減少開始から30秒後、1分後、3分後とした。一方食塩検層では、溶存酸素検層の計測

終了後に、塩ビ管内の比抵抗値(バックグランド値)を10cm間隔で測定し、測定終了後に孔内に0.2%濃度の食塩水を注水する。その後孔内水を一様に攪拌し比抵抗値の測定を開始する。この測定時間は食塩投入後、5、10、15、20、25、30、40、50、60、75、90、120、150、180分とした。

4. 検層結果

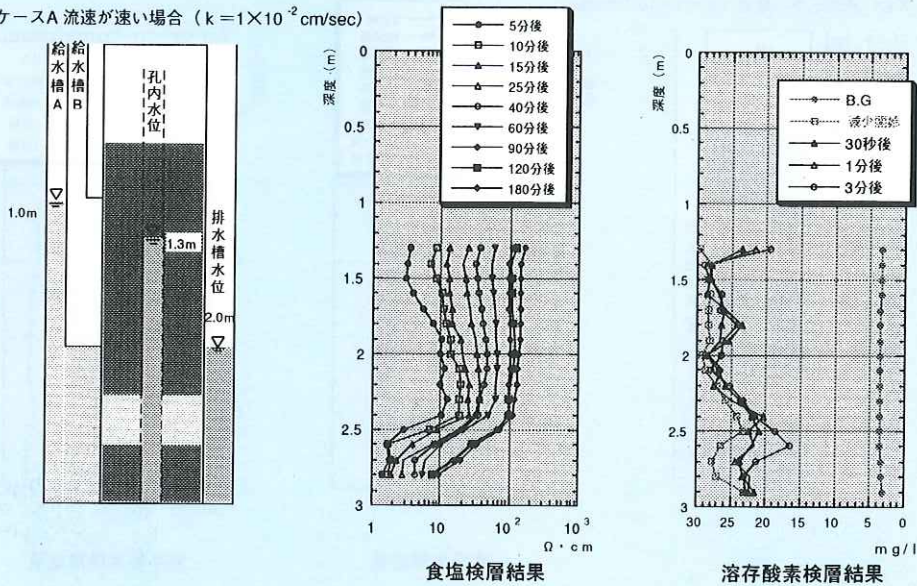
4.1 透水層が1層の場合

透水層が1層の場合の食塩検層と溶存酸素検層の結果を図-5に示す。透水層の透水係数が $k = 1 \times 10^{-2}$ cm/secと比較的流速の速い層をケースA、透水層の透水係数が $k = 1 \times 10^{-4}$ cm/secと比較的流速の遅い層をケースBとした(表-1)。

① ケース A

食塩検層では、ほぼ上昇流検出のパターン1と近似している(図-4)。食塩投入から5分後、土槽深度1.6m～2.6m区間において顕著な比抵抗の増加が見られる。土槽深度2.4m付近で比抵抗値の増大が著しく、透水層と判断

ケースA 流速が速い場合 ($k=1 \times 10^{-2}$ cm/sec)



ケースB 流速が遅い場合 ($k=1 \times 10^{-4}$ cm/sec)

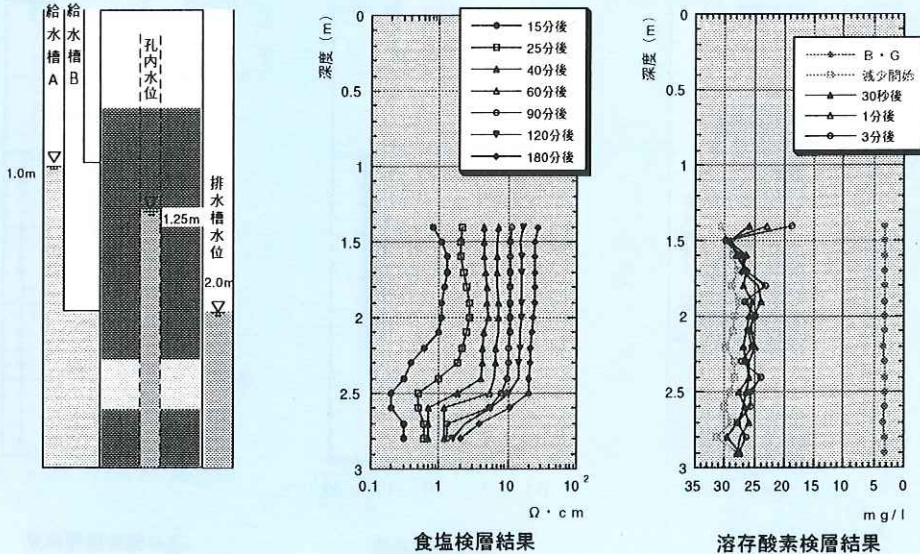


図-5 検層結果 (透水層が1層の場合)

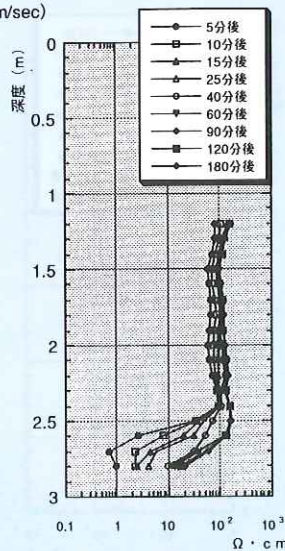
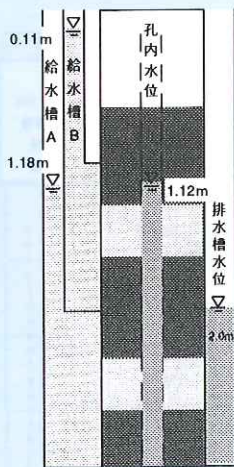
される。しかし流動層の幅は、判定できなかった。

一方、溶存酸素検層では、土槽深度 2.5m ~ 2.8m の区間において顕著な溶存酸素濃度の減少がみられた。また孔内水位 1.3m においても減少がみられた。この原因は、プローブと酸素供給用のポリエチレンチューブの間隔を 10cm と設定しており、孔内水面上では酸素の供給がない状況であった。そのため上昇流の影響を受け、減少量が增大したものと判断される。

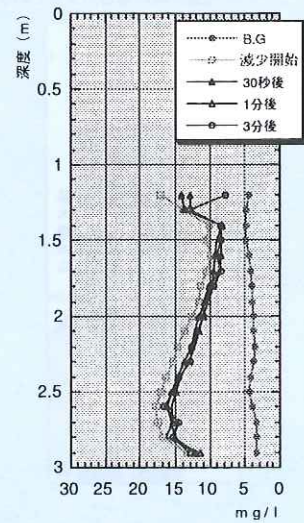
② ケース B

食塩検層では、流速が速いケース A の場合と同じく上昇流検出の傾向が見られた。土槽深度 -2.6m より、比抵抗値増加がみられ、流動層の下部と判断された。

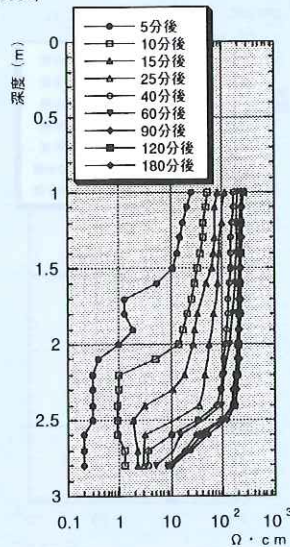
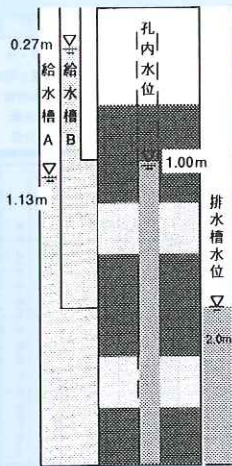
一方、溶存酸素検層では、顕著な減少量は把握できなかった。また、ケース A と同じ原因で、深度 1.3m で孔内水面上の減少量が増大したものと考えられる。

ケースC 流速が速い場合 ($k=1 \times 10^{-2}$ cm/sec)

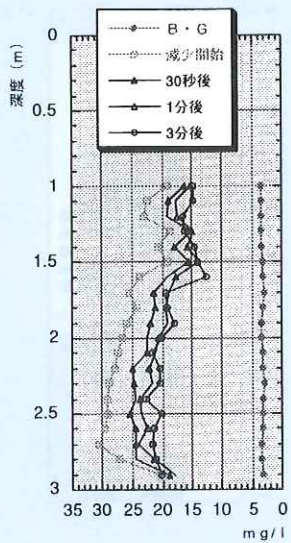
食塩検層結果



溶存酸素検層結果

ケースD 流速が遅い場合 ($k=1 \times 10^{-4}$ cm/sec)

食塩検層結果



溶存酸素検層結果

図-6 検層結果 (透水層が2層の場合)

透水層が1層の場合での両検層結果を比較すると、食塩検層では、流速の条件などに関係なく流動層が判断された。一方、溶存酸素検層では、ケースAの場合($k=1 \times 10^{-1}$ cm/sec $\sim$ 1×10^{-2} cm/sec)流入している透水層の範囲を上昇流の影響なく的確に把握できた。しかしケースBの場合($k=1 \times 10^{-4}$ cm/sec $\sim$ 1×10^{-5} cm/sec)流入範囲を特定できなかった。この場合には、測定時間内(3分)に測定できないほどの遅い流速で流入

水が流れていたため、溶存酸素濃度の減少を把握できなかったものと考えられる。

4.2 透水層が2層の場合

透水層が2層の場合での食塩検層と溶存酸素検層の結果を図-6に示す。透水層の透水係数が $k=1 \times 10^{-2}$ cm/secと比較的流速の速い層をケースC、透水層の透水係数が $k=1 \times 10^{-4}$ cm/secと比較的流速の遅い層をケースDとした(表-1)。

① ケース C

食塩検層では、土槽深度 2.7m より、顕著な比抵抗値の増大がみられた。しかしながら 5 分後以降の測定値では比抵抗値の増大がほとんどみられずバックグラウンドの比抵抗値 ($B \cdot G$ は、 $300 \Omega \cdot \text{cm}$) に近い値となった。これは、上層よりの流入水の流速がかなり速いためと判断される。

一方、溶存酸素検層では、ほとんど全層において減少量がみられず流動層が検出できなかった。

② ケース D

食塩検層では、食塩投入から 5 分後より土槽深度 1m ~ 1.7m 区間で比抵抗値の増大がみられた。土槽深度 1.7m より時間が経過するにしたがい比抵抗値が下方へ増加していることから上層の透水層より下層の透水層へ流入する下降流の現象パターン 2 (図-4) をとらえているものと判断される。

一方、溶存酸素検層では、土槽深度 1.5m ~ 1.6m 付近において顕著な溶存酸素濃度の減少がみられ上部流動層をとらえているものと判断される。しかし、上部流動層と下部流動層の間は、減少量が不明瞭となり、下降流とは判定できなかった。透水層が 2 層の場合での両検層結果を比較すると、流速が速いケース C の場合 ($k = 1 \times 10^{-1} \text{ cm/sec} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$) 両検層ともに流入水の流速が速く 2 層を判別することはできなかった。流速が遅い場合 ($k = 1 \times 10^{-4} \text{ cm/sec} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$) 食塩検層では、下降流の流動層、流出層が特定できたが、溶存酸素検層では、上部流動層のみ検出できた。

5. まとめと今後の課題

溶存酸素検槽の信頼性を検証するために食塩検槽との検証実験を行い、次のようなことが判明した。

(1) 溶存酸素検槽の結果が明瞭な場合

流速が比較的速く単一の流動層の場合には、食塩検槽に較べ溶存酸素検槽の方が的確に流動層を把握できることがわかった。

(2) 溶存酸素検槽の結果が不明瞭な場合

流速が遅い単一の流動層や流速の速い下降流現象の検出は、困難であることが明らかとなった。室内実験から、以上のような諸点が明らかとなったが、必ずしも十分な計測資料が得られてい

るわけではない。既往の方法と比較して検討を行い、地すべりの特性による適否の判定や精度の向上を図っていく必要がある。

参考文献

- 1) 申潤植：地すべり工学—理論と実践—，第 3 刷，pp.417-431，山海堂，平成 6 年
- 2) 申潤植：地下水検層についてその (1)，問題点と理論解，地すべり，Vol.13，No.3，地すべり学会，1976.
- 3) 柳原幸希、綱木亮介、吉田克美：溶存酸素をトレーサーとした地下水流動調査，土木技術資料，Vol.41，No.6，pp.48-53，1999.
- 4) 柳原幸希、綱木亮介、吉田克美：溶存酸素を用いた地下水検層，第 38 回地すべり学会研究発表講演集，pp.231-234，1999.
- 5) 柳原幸希：溶存酸素をトレーサーとした地下水流動調査，第 38 回土木研究所研究発表会論文集，土木研究所試料第 3676 号，1999.
- 6) G. A. Truesdale et al. : The Solubility of Oxygen in Pure Water and Sea-water, J. Appl. Chem., Vol.5, No, pp.53-62, 1955.

柳原幸希*

建設省土木研究所砂防部
急傾斜地崩壊研究室
Koki YANAGIHARA

綱木亮介**

同 地すべり研究室長
Ryosuke TSUNAKI