

多点温度検層法の原理と実施事例

広田 建一・戸田 和也*

竹内 篤雄**

1 はじめに

建設または土木工事の現場等でよく経験されているように、地層内に存在する地下水が一様に流動していることは希である。この地下水は地下の複雑な地質・土質条件に左右されて、それぞれ固有の水頭を有する何枚かの流動層によって構成されている場合が多い(図-1)。これらの地下水流脈の性状を平面的、立体的に把握することは、地すべりや、水資源開発などに非常に大切なことである。

ボーリング孔を利用して地下水の性状を得ようとする検層は、従来一般に実施されている塩分希釈による地下水検層法のように、孔内に水位が必要であるという欠点があった。多点温度検層法は、孔内を湯で置換するため、孔内水位の有無を問わないのが最大の特徴である。

当報告は、この多点温度検層について、その原理や実施方法を紹介し、実施例について述べたものである。

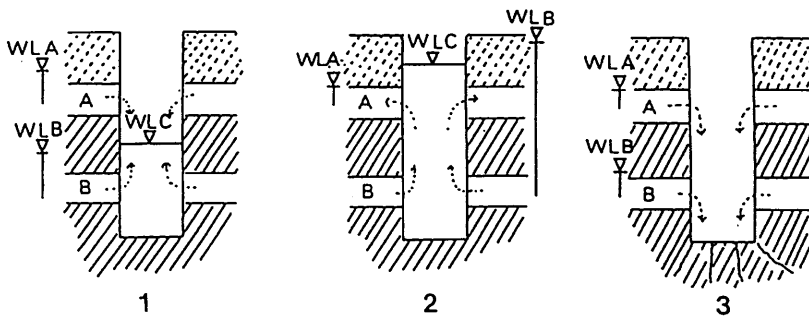


図-1 流動層の水位・水頭と孔内水位の関係

斜線部：難透水層，A，B：地下水流動層

WLA，WLB：それぞれの地下水流動層の水位・水頭

WLC：ボーリング孔内の水位

2 原理・方法と流動層の検出

2-1 原理

多点温度検層の原理は次のようなものである。まず、図-2に示すように、自然状態にある孔内に、湯を注入することにより全深度ほぼ均一な温度に変化させる。このような状態で、孔内周辺の地盤に地下水流動層が存在すれば、上昇させられ

* 中央開発株式会社北陸支店

** 京都大学防災研究所

た温度は流入した地下水によって変化させられ、自然状態の温度に回復しようとする。また、流動層がなければ、昇温させられた温度は熱伝導によって冷却される。したがって、温度上昇後の各深度における温度変化状況を経時的に把握することによって、地下水流動層の存在深度とその層厚および相対的な浸透速度の大小に関する情報を得ることが可能である。

一般的な多点温度検層の仕様を表-1に示す。

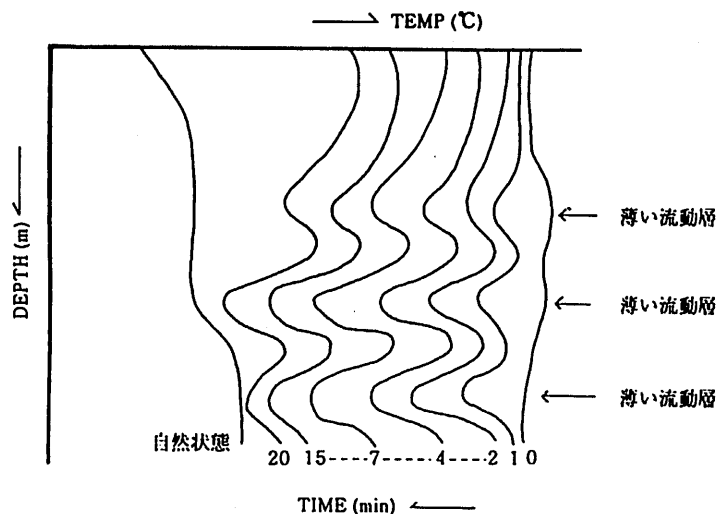


図-2 多点温度検層の原理図

表-1 多点温度計測装置仕様

センサー		計測部	
測温 点数	サーミスタ 61点(50cm毎)	点数	61点
外形 寸法	25φmax	測定範囲	0~50℃
長さ	30cm	分解能	0.02℃
外装	シリコンゴム	精度	±0.1℃
データ処理部		測定時間	8sec/61点
コンピュータ ソフトウェア	J-3100(東芝) 計測プログラム 通信プログラム	測定回数	5回
		AD変換	12bit
		インターフェース	RS232-C
		電源	AC100V ± 10V

2-2 実施方法

多点温度検層器は図-3に示すように、50 cm 毎に測温体を取り付けたセンサー、測定装置、ノート型のパソコン、蓄電池および温度上昇装置一式により構成されている。

センサーは同じ温度特性と精度を持つ測温体を 50 cm 間隔に連続的に設置したものである。このセンサーをボーリング孔内に挿入し、これを図-4に示すように、10 cm 毎に 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm, および 40 cm と持ち上げることによって、孔口から孔底までの温度を 10 cm 間隔でほぼ同時に(一回の測定時間は 48 秒)測定できる。現在製作されているセンサーは、長さ30, 50, 100, 150mのものであり、30mと50mのセンサーでは50cm毎に61点(30分)サーミスタが取り付けられており、それ以上の長さを有するセンサーでは50cm毎に21点(10分)サーミスタが取り付けられている。この温度検層器のセンサーの直径は、通常調査用試錐孔で多用されている50mmの内径を持つ試錐孔において、検層が実施できるように外径25mmに仕上げられている。

検層は次のようにして行う。

- ① まず、図-2に示したように、自然状態の温度分布を10cm間隔で測定する。
- ② 次に孔内温度を変化させるためのホースをセンサーを孔に挿入し、このホースに湯水などを注入して、孔内の水温をできるだけ一様に変化させる。
- ③ 一様に変化させた直後に一度測定する(0分後)。
- ④ その後、1~7分までは1分毎に、10~30分までは5分毎に測定を行う。

これにより、地下水の流入による温度の現状回復の程度が詳細に測定され、地下水流動層の数と存在深度、その厚さおよび相対的な浸透速度の大小を検討することができる。測定時間は、上に述べた時間が標準的であるが、各計測時間毎にそれまでの結果が図示されるので、流動層の把握ができた段階で任意の時間に計測を打ち切ることができる。

この多点温度検層法の最大の特長は、図-1の右側に示したように、試錐孔を

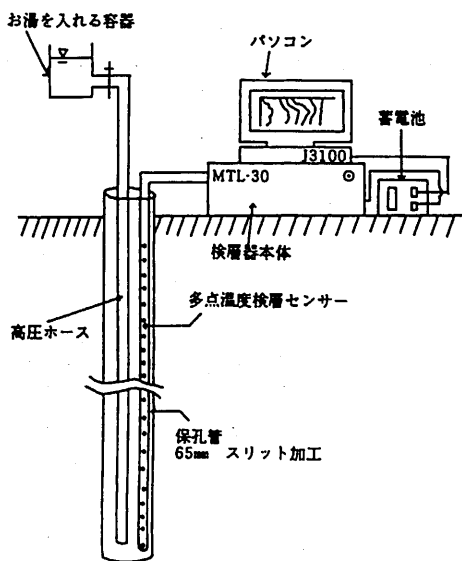


図-3 多点温度検層の装置概要

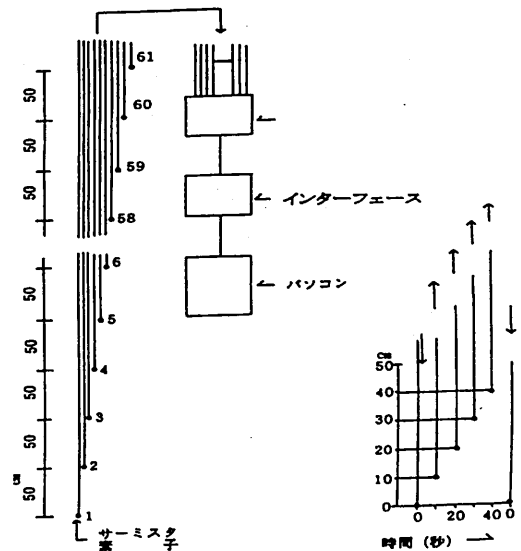


図-4 多点温度検層の構成と測定手順

最終深度まで掘削した段階で孔内水位が極端に低下した場合においても、短時間に地下水浸出層に関する情報がある程度定量的に得ることができるという点である。つまり、湯水などを注入するホースによって、孔内水位以深の水の温度を変化させるため、孔内水位よりも上部の空気層の温度も一緒に変化させることができる。このとき、孔内水位よりも上部に地下水流動層が存在する場合、変化させられた温度は地下水流動層浸出箇所では急激に地下水の温度にまで回復する。したがって、その温度変化状況を把握することができ、孔内水位以浅における地下水流動層の存在深度を検出することができる。従来の塩分希釈法による地下水検層を用いて、孔内水位よりも上部にある地下水流動層の情報を得るためには、試錐孔を掘削しながらの段階式検層を実施しなければならない。しかし、この方法は経費的および時間的にかなりの負担が掛かるなど、完全実施には難しい問題がある。

2-3 地下水流動層の検出

多点温度検層の結果は図-5に示すように「温度-深度曲線」として表現し、自然状態と上昇直後との間に記録される温度変化曲線の自然状態への復帰状況から地下水流動層の数とそれらの存在深度および各々の厚さを解釈する。実際には、孔内温度を均一に上昇させることはかなり難しく、上記の解釈が順調にできにくい場合がある。このような場合には、「温度復元率-深度曲線」(図-6)を作製し、「温度復元率」の大小で地下水流動層の把握を行う。なお「温度復元率」は次式によって求める。

$$\frac{(0分時の温度) - (任意の経過時間における温度)}{(0分時の温度 - 自然状態の温度)} \times 100 (\%)$$

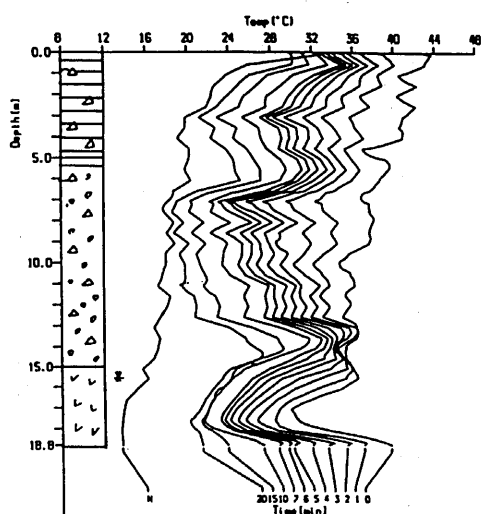


図-5 検層結果の表現方法
「温度-深度曲線」

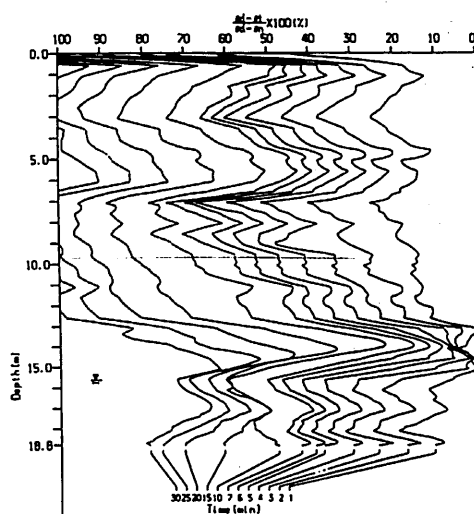


図-6 検層結果の表現方法
「温度復元率-深度曲線」

2-4 地下水流速の推定

地下水流動層内のある温度を持った地下水がボーリング孔内に流入した場合、それが孔内水とほぼ均一に混合されるとするならば、「温度復元率-時間曲線」から、その地下水流動層の流速に関する情報を得ることが可能である。

内径50mmのボーリング孔における流速をパラメーターとした「温度復元率-時間標準曲線」の例を図-7に示す。この図を現地測定結果に基づいて作成された「温度復元率-時間曲線」(図-8)と対比することにより、概略の流速を推定することができる。この場合、センサーそのものの温度によって、漸近的な温度復元を示すため、計測開始後数分間の温度低下部を用いて推定する。

なお、推定した孔内流速はボーリング孔周辺を流動している地下水の流速の約3倍であることが、初井等、佐野によって理論的、実験的に確かめられている。したがって、「温度復元率-時間曲線」から推定された流速を3分の1した値が実際にボーリング孔周辺を流動している地下水の流速となる。

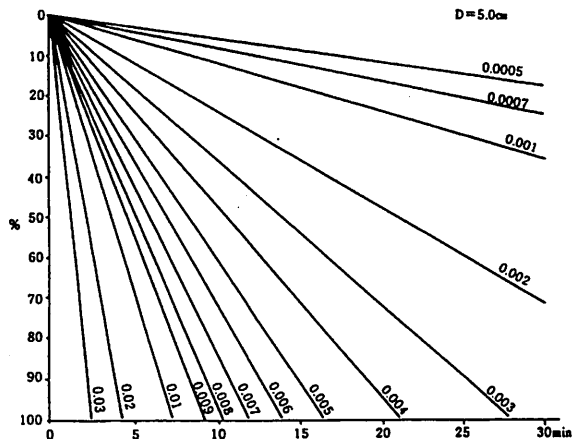


図-7 温度復元率-時間標準曲線(孔内径50mmの場合)

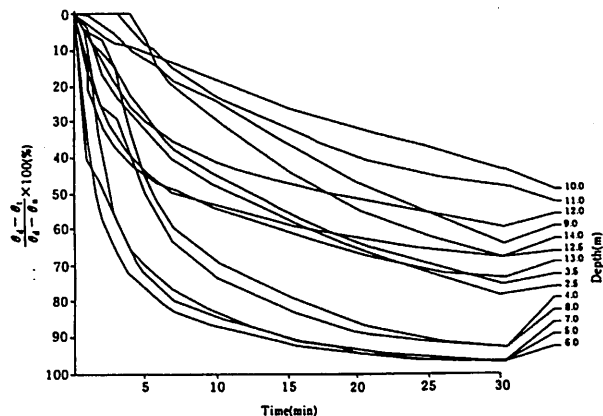


図-8 温度復元率-時間曲線(砂礫での事例)

3 活用例

3-1 地すべり調査での活用例

地すべり地で多点温度検層を行った事例を紹介する。本事例の調査孔は深度20.5mまで掘削され、最終掘削深度での孔内水位は16.45mであった。本地すべりブロックは降雨があると変動することが観測され、そのすべり面は6.0mにあることが確認されている。地すべりが発生した状況から判断して、土塊の変動に地下水が大きく影響していることは明確である。しかし、孔内水位は常にすべり面より下に存在している。そこでこの調査孔で多点温度検層を行った。その結果を図-9に示す。これによると、孔内水位以深には孔底付近に明瞭な流動層がみられるのみで、孔内水位以浅では4.5mから16.5m付近まで温度復元率の大きな区間が存在することが認められた。そこですべり面深度を考慮して、調査孔の側近に7mの観測孔を設置し水位観測を行った。その観測結果を図-10に示す。この観測孔の水位は降雨をよく反映した値を示し、水位は無降雨時には孔底付近にあるが、日降水量が50mmを越えるとすべり面よりも上まで上昇することが明らかとなった。

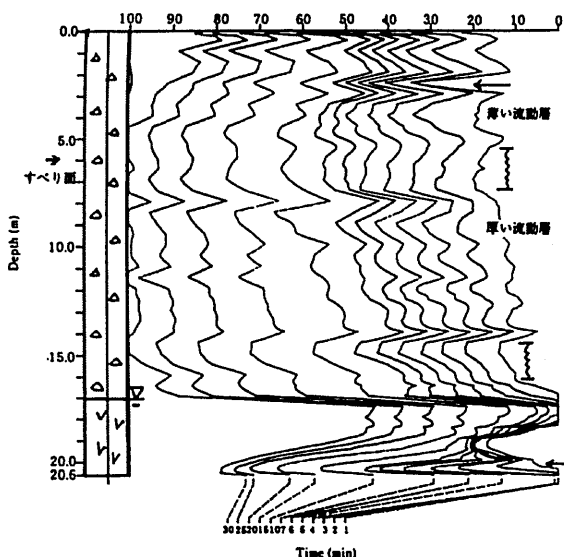


図-9 地すべり地での
多点温度検層結果

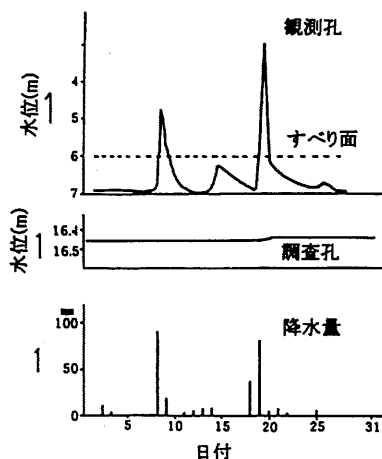


図-10 観測孔，調査孔の
水位と降雨との関係

3-3 地下水検層との比較

ここでは、地すべり地で実施した多点温度検層と地下水検層とを対比して検討する。

両検層結果を図-11に示す。これによると、孔内水位は7.5mに存在しており、地下水検層結果では10m付近を中心として急速に塩分濃度が希釈されていく区間が認められる。また、計測時間120分後の段階で16m付近まで多少希釈されていることが示されている。これらのことから、地下水流動区間は10mを中心に、8.5~16mと推定できる。

一方、多点温度検層では、孔内水位以浅の6.3mを中心として温度復元率の高い区間が認められる。この他、1.0mと3.9mにも温度復元率の高い部分がみられる。孔内水位以深では9.0~11.5m間に温度復元率の大きな部分がみられ、この区間では9.5mと11.2mを中心として流動層が構成されていると推定できる。また、13.0mでは薄い流動層の存在が推定され、さらに14.8mから15.3mに逸水している流動層によると推定される温度復元率変化を確認できる。

このように、多点温度検層では、地下水検層で得られた結果とほぼ一致した地下水流動層が認められる他、さらに孔内水位以浅での流動層を把握でき、なおかつそれらの流動区間の詳細な情報を得ることができる。

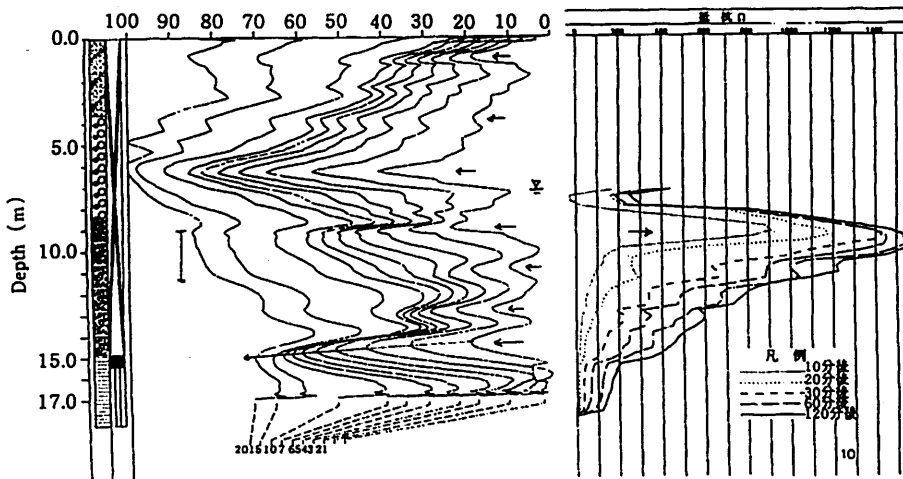


図-11 多点温度検層と地下水検層との結果の比較

3-2 温度変化から地下水流速を推定した事例

多点温度検層結果から地下水流速を推定したものを図-12に示す。その結果によれば、1.7~8.9mの間に測定開始後6分でほぼ自然状態に還元している区間が存在し、特に2.5mが最も速いようである。また、深度15.0m付近に亀裂水的な流動層が検出されている。この「温度還元率-時間曲線」を標準曲線と比較して流動速度を求めたものと、流向流速計（CCDカメラを使用し、浮遊物の動きを測定するもの）から測定した結果を表-2に示す。これによると、多点温度検層結果では、深度1.7~8.9mでは0.05cm/secと速く、その他のものは0.005~0.003cm/secと推定された。それに対し、流向流速計による測定結果は、1.7~8.9m間では5.0mで0.072cm/sec、7.5mで0.060cm/secとなり、10mでは0.029cm/secとなった。

より多くのデータを得て、対比した結果を図-13に示す。図によれば、多点温度検層から推定される流速が直接観測した結果よりも、概ね1/2~1/10程度小さく測定されている。また、流速が小さいほど両者間で差は小さく、大きいほど差がつく傾向を示している。しかしながら、両者間で有意ある相関性が認められ、概略の地下水流速の把握は多点温度検層から推定できることが示された。

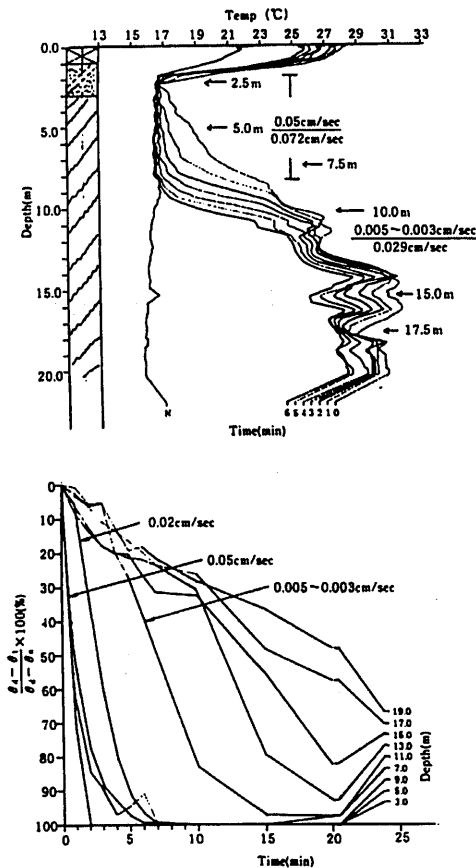


図-12 多点温度検層から流速を推定した結果

表-2 多点温度検層による推定流速と流向流速計による測定結果との対比

深度 (m)	多点温度検層による推定 (cm/sec)	流向流速計による測定 (cm/sec)
1.6	0.003	
1.7	0.05	
5.0	0.05	0.072
7.5	0.05	0.060
8.9	0.05	
9.0	0.003	
10.0	0.003	0.029

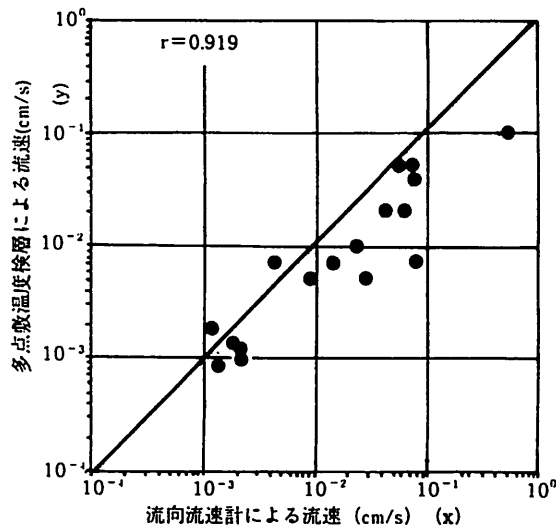


図 - 13 流向流速計による流速と多点温度検層から推定された流速との対比

4 まとめ

以上、多点温度検層は観測孔の水位に関わらず、地下水の流動状況を詳細に把握でき、さらに流速を概略的に得ることができる検層法である。

また、その原理は「孔内を湯水で満たし、温度変化を見る」という、簡潔なものである。また、測定中、コンピュータ上である程度の結果を見ながら測定できるため、現場で視覚的に把握しながら測定を続けられる。現場での準備作業も比較的容易であるが、欠点として、湯水の準備に手間取ることが挙げられ、急峻な山地での観測は、やや困難であるといえる。

現場測定上の多少の欠点はあるものの、多点温度検層から得られる情報は、これまで一般に行われてきた地下水検層よりも詳細である。この得られた情報は、地下水の存在形態の把握が必要とされる大規模地下掘削、地下水資源開発、地下水汚染、あるいは地すべり防止対策などを円滑かつ効率的に行うために非常に有用である。

筆者らは本検層法を積極的に取り入れていき、様々な現場に適用していく所存である。

参考・引用文献

- 竹内篤雄 (1996): 温度測定による流動地下水調査法, 古今書院, pp250-316
- 竹内篤雄・上田敏雄 (1990): 多点温度検層器による地下水流動層の定量的解釈, 第25回土質工学研究発表会講演要旨集, 2冊分の1, pp201-202
- 竹内篤雄・上田敏雄 (1991): 多点温度検層結果と諸地下水調査結果との対比, 第26回土質工学研究発表会講演要旨集, pp191-192
- 竹内篤雄・上田敏雄 (1992): 「多点温度検層器」その適用例, 第27回土質工学研究発表会講演要旨集, pp325-332