

第3部 1 m 深地温探査法

第1章 1 m 深地温探査による地下水流脈調査の必要性

地すべり、山崩れ、および崩壊などの山地地盤災害の多くは、大雨、長雨、および融雪期末期に数多く発生する傾向がある。そして、これらの災害の発生直後に滑落崖を観察すると、地下水が水脈状（「水ミチ」状）に湧出しているのを見ることができる。この現象から推察すると、これらの災害に直接大きな悪影響を与えている地下水は、いわゆる「地下水層」として存在しているのではなく、「水脈状」に存在している可能性が高いと考えられる。この水脈は、平常時は周辺土塊に対して何等悪影響を及ぼすことはない。しかし、大雨・長雨、融雪期等のように多量に水が供給されると、水脈内の水圧は急激に上昇する。この現象により、水脈を取り囲んでいる滞留性の地下水を媒介として周辺土塊に大きな間隙水圧が発生し、局所的な土塊変動を発生させる原因となる可能性が高い（図-3.1.1）。この局所的な土塊変動が大きな地すべり・山崩れ等の斜面災害へ発展するか否かは、その場所の地形・地質的条件およびその時の気象的条件によって大きく左右される。

したがって、このような災害を未然に防ぐためには、周辺土塊に過剰間隙水圧を発生させるような水が供給された場合に、これを速やかに水脈外に排除できるように、予め地下水排除を目的とした対策工を行っておくことが大切である。

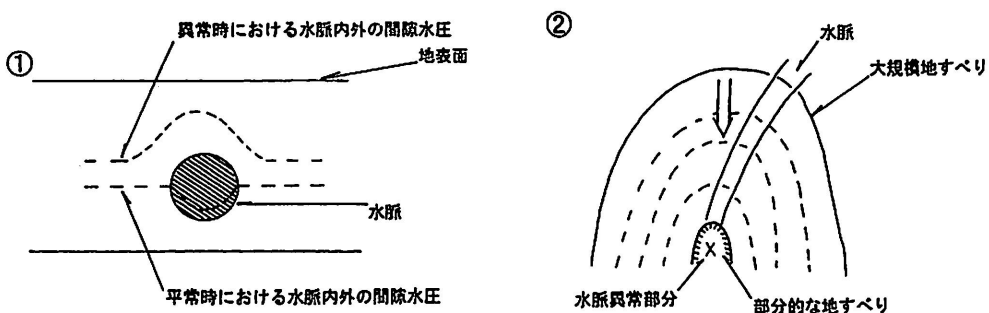


図-3.1.1 「水ミチ」に概念図と地すべり・崩壊発生模式図

このためには脈状に存在する地下水の位置をできるだけ正確に把握する必要がある。これまでは地下水（滞留水と流動水の両者を含んだもの）の分布状況や、地下水の容れ物についての情報を得るために、「土と水」との電気的性質を利用した「電気探査」と、同じく「土と水」との力学的性質を利用した「弾性波探査」とが行われてきており、それなりの成果を挙げてきている（Takada：1968，川本・岡本：1969，竹内：1970 a，b，岡本：1980，他）。しかし，図-3.1.2に示すように，前記二者の探査法は，何れも地表面の極浅い所に任意の間隔で設置された二点間の電極あるいは受振器によって地下の平均的な情報を得ることはできるが，水脈そのものについての情報を得ることは原理的に考えると難しい点がある。

今日まで，前記二方法の調査結果に基づいて地下水排除に関する工事を行っても，もう一つ満足

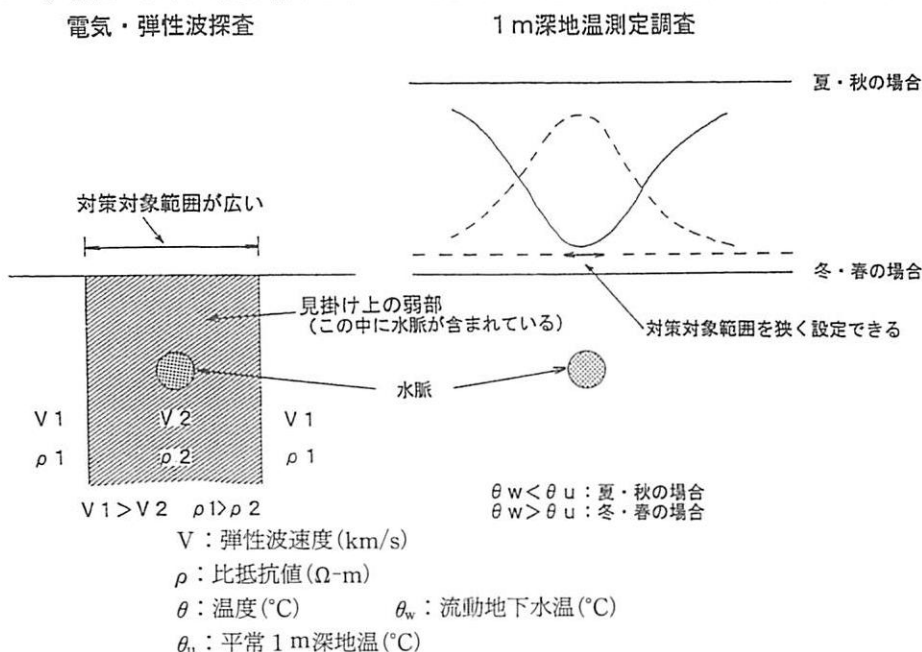


図-3.1.2 弾性波探査，電気探査による探査結果と1m深地温測定結果との対比

のゆく成果を挙げることができなかつたのは，この辺りに原因があつたのではないかと考える。このような状態を少しでも改善するために，「流れている地下水」の存在位置についての情報を得ることを目的として，これまで種々の努力がなされて来ている（防災研究協会：1967，岸本：1972，岡本：1980，他）。その一つに，最近、流れている地下水の調査法としては注目を集めつつある，「土と水」との熱的性質を利用した「地温測定による地下水調査法」がある。地温調査法そのものは従来温泉・地熱開発のための調査法として発展してきたものであり（依田：1937，福富：1951，1961，湯原：1955，浦上：1968，1970），それを地すべり地の地下水調査法の一手法として発展させたものである（山口他：1965，Takeuchi：1980，1981，竹内：1983，1996）。

第2章 地温測定による地下水調査法の原理

夏暑い最中、地すべり踏査を行うと地下水の露頭である湧水の近くで一服の清涼を得ることができるとは、多くの方が経験していることである。地温測定による地下水調査法の原理はここにある。地表面は裸足で歩くことが難しいほどに熱せられている場合でも、湧水およびその周辺ではかなり温度が下がっており、裸足で歩くと心地よいくらいである。このことは地表面の温度を丁寧に測定することによって、地下の浅いところに存在する流動性の地下水を探り当てることができることを示している。つまり、地温測定による地下水流脈調査法の原理は、図-3.2.1に示すように、地下浅層を流れる「水ミチ」によって周辺の地温が乱される現象を利用したものである。夏秋季には周辺地温が流動地下水の温度よりも高いために、「水ミチ」直上とその周囲は地温が低くなる方向に乱される。一方、春冬季には逆に周辺地温が流動地下水の温度よりも低くなるために、「水ミチ」直上とその周囲は温度が高くなる方向に乱される。

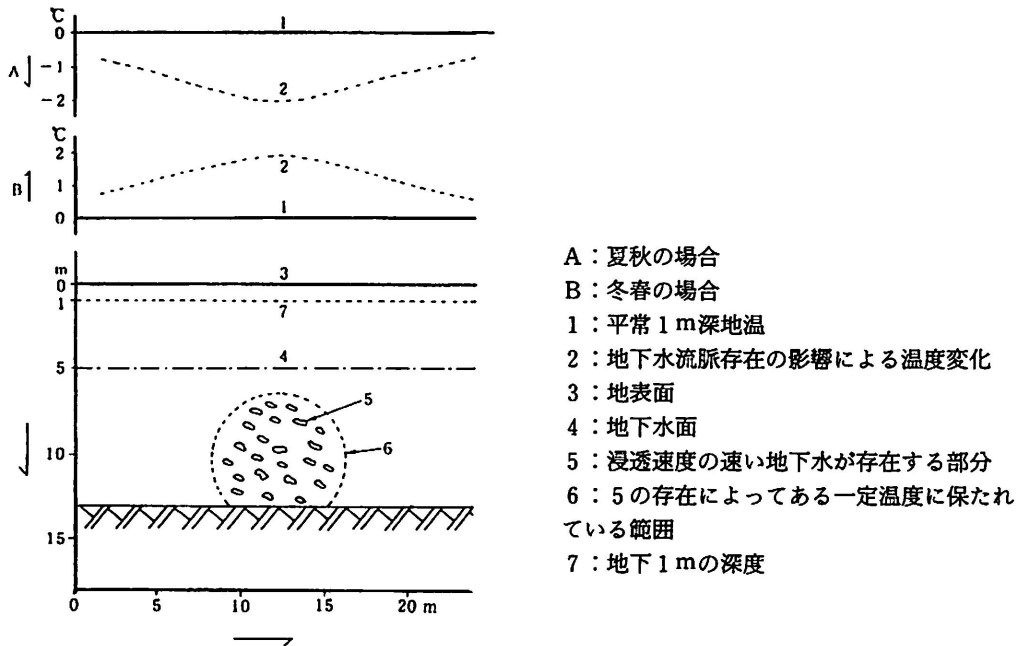


図-3.2.1 地下水流脈の存在による平常1m深地温への影響

第3章 測定時の条件と測定方法

3-1 1m深地温探査の実施時期

第2章に記したように地温測定調査法は、流動地下水温と浅層地温との温度差を利用した調査法であるために、両者が等しい温度を示す時にはこの調査法の適用は難しい。そこでいくつかの地すべり地で、1m深地温と「水ミチ」の露頭である湧水点の水温とを長期観測してみた。その結果、図-3.3.1にその一例を示すように、1m深地温はかなり大きな年変化を示すが、流動地下水のそれは1m深地温と比較すると極めて小さなものであることが示された。竹内(1983)は湯原(1955)の方法を用いて、1m深地温探査結果から「水ミチ」の規模と存在深度を計算するためには、両者の間にどの程度の温度差が必要であるかについて検討した。その結果、平常1m深地温(「水ミチ」の存在による温度の乱れを受けていないところの1m深地温)と流動地下水の温度との差は $|2.5|^\circ\text{C}$ 以上あることが望ましいことを示した。この点を考慮して、日本における1m深地温探査による地下水流脈調査の可能時期を求めると、2月を中心とした厳寒期と8月を中心とした厳暑期であることが示された。これらの時期に1m深地温探査を実施すると、よい結果を得ることができる。ただ、地表面の状況(地形、地質、植生など)が非常に均一である場合には、 $|2.5|^\circ\text{C}$ 以下の温度差で実施してもよい結果が得られたことがある(竹内他:1979)。

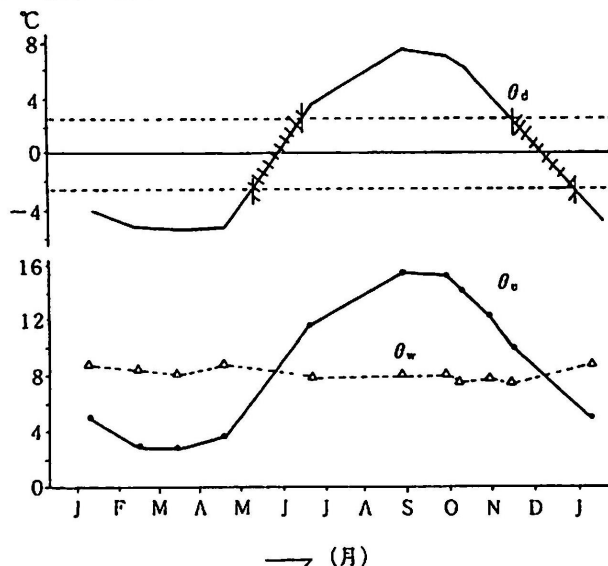


図-3.3.1 平常1m深地温(θ_g)、流動地下水温(θ_w)、および両者の差(θ_d)の年変化

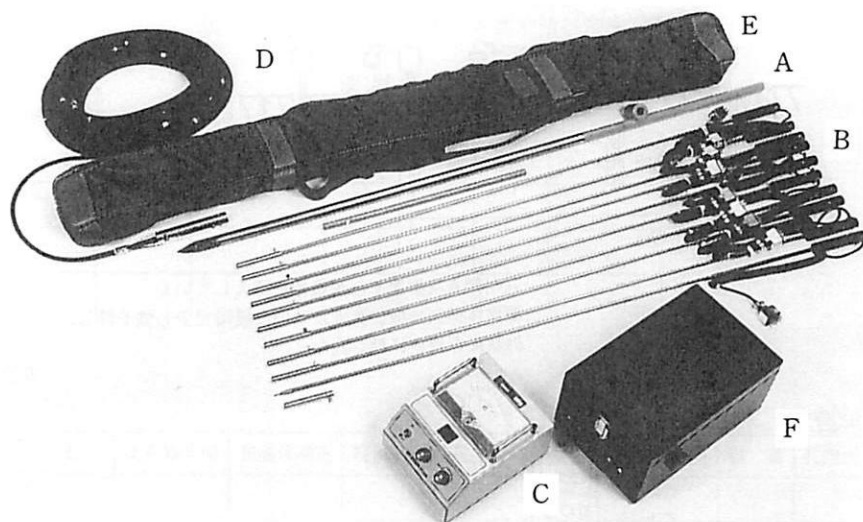
3-2 1 m 深地温探査の実施方法

3-2-1 測点設定方法

「水ミチ」の流動経路をできるだけ正確に推定するためには、調査対象地区に適切な測点網を展開しなくてはならない。これの如何によって調査結果が大きく左右されるので、現地踏査を十分に行った上で決める必要がある。

通常は1/1000あるいは1/500の縮尺の地形図を用いて測点網を描く。

測点間隔は調査対象物によって左右されるが、最大限、推定される「水ミチ」の流動経路を横断する形で10 m、流動経路と平行な方向に20 mとする。大規模な河川伏流水を調査する場合はともかく、これ以上の測点間隔の広い測点網を設定してもよい結果を得ることは難しい。規模の小さい地すべり地の場合は5×5 mのように細かい測点網を、長さ50 m程度のため池の漏水箇所を調査するような場合には2×3 m程度の測点網を設定する場合もある。また地下2～3 mに掘削された集水井の排水孔の存在場所を推定するために1 m間隔に測点を設けて調査を行い、径10 cmの排水孔の存在場所を明らかにしたこともある。



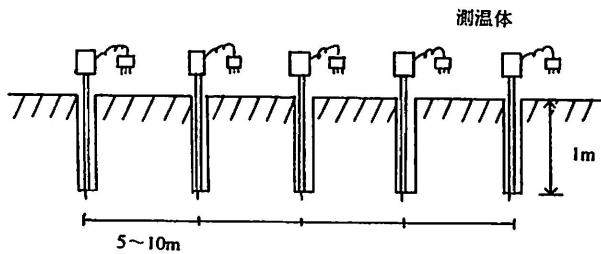
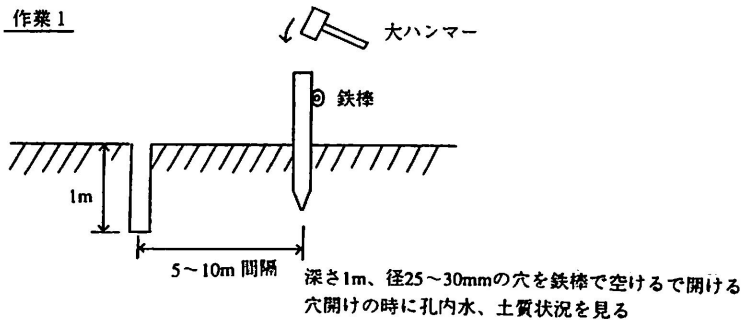
- A：1 m 深孔開け用半鋼性の鉄棒と引き抜き棒
- B：サーミスタ型測温体
- C：精密温度測定器
- D：水中用温度計
- E：測温体収納ケース
- F：測定器収納ケース

写真-3.3.1 1 m 深地温測定用サーミスタ型精密温度計 (UV-15) 一式

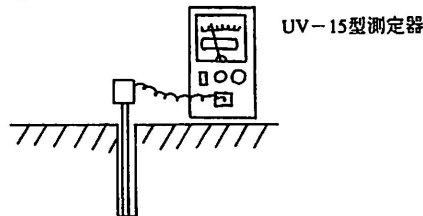
3-2-2 測定方法

(1) 測定に必要なもの

1 m 深地温探査を行うために準備すべきものは、次のものである。1 m 深地温探査を行うためには、地下水調査を目的とした測定器を使用する（写真-3.3.1）。筆者が製作したものは測定精度が 0.1°C で、測定範囲はフルスケール 10°C 、4段切り替えによって $0\sim 35^{\circ}\text{C}$ までの温度を測定することができる（エイワ電子計器製作所製、UV-15）。測温体相互間の固有誤差を $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以下に押さえた測温体を10本。孔開け用の半鋼製の鉄棒（径25 mm、長さ1.5 m）2～3本。大ハンマー（重さ3



穴が開き次第次々と測温体を挿入していく
測温体挿入の際に孔底についた段階で少し強く押し、
針状部を地中に押し込む

作業3

測温体挿入後10分経過してから温度を読み取る
地温読み取りと同時に測定点周辺の地況、地形、地下水・地表水、
等気付いたことを野帳に記録する

図-3.3.2 1 m 深地温探査法の作業手順

岩質・土質条件によって大きく異なるが、比較的平坦で、地況条件がよく、地下浅部が軟弱で粘着性が少なければ70点くらいである。地況が雑木林や藪で、地下浅部が硬く粘性土であり、地形条件が悪い場合は極端に測点数が減り、1日に30～40点と言うこともある。条件が非常によい堤防の場合は一日200点近く測定できる場合もある。

第4章 1 m 深地温探査の解析の方法

上記のようにして得られた測定値には、種々の因子による影響が含まれている。したがって、これら諸因子の影響の大きさを検討した上で、問題がある場合にはこれを取り除く必要がある。通常、測定値に関与している因子は大きく分けて2つある。1つは測定時に入り込む因子、他は測点が存在する場所そのものに関与している因子である。

測定時に関与する因子としては、測温体の固有誤差、測定深度の相違による温度変化、地温の経日変化がある。測点場所に固有な因子としては、地況(測点を中心として半径3 m以内の地表面の植生状況)、微地形、地質の相違による温度変化が上げられる。

現地で得られた測定値は、図-3.4.1に示した流れ図に沿って解析する。次に各々の因子の補正方法について簡単に述べる。

(1) 測温体補正

作業能率を高めるために、通常10本の測温体を用いる。測温体の固有誤差は測温体作成時点では $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内に納めてあるが、使用中に経年変化でどうしても多少固有誤差が大きくなる傾向が認められる。そこで、各測温体の固有誤差を予めそれぞれ求めておき、測定値に対して、各々の測温体の補正値を加える。なお、固有誤差が $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ を越えるような場合には、全測温体を整備に出した方がよい。

(2) 経日変化補正

一つの調査地で作業日数が長引く場合には、一日3回(作業前、昼食時、作業終了後)定点観測を行い、必要に応じて経日変化の補正を行う。温度変化の大きな場合には午前と午後に分けて補正を行う必要がある場合もある。

(3) 深度補正

岩質・土質条件によっては、1 m 深の同じ深度で測定することができずに、色々な深度で測定しなくてはならない場合がある。この様な場合には各々の深度毎に定点観測点を設けて、各深度の相違による温度変化を1 m 深の温度に補正する必要がある。

(4) 微地形補正

調査地の斜面傾斜方向および標高差が1 m 深地温の値に大きな

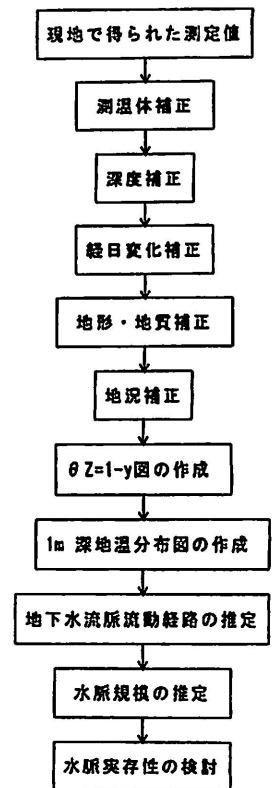


図-3.4.1 測定値解析手順

影響を及ぼす場合がある。標高差に関しては、これまでに集積された資料によると、一応 350 m 程度の標高差までは 1 m 深地温に大きな影響を及ぼさないことが明らかにされている。しかし、微地形の急変点付近では測定値に大きな誤差を含むおそれがあるので、この点に気を付けなくてはならない。例えば、石垣の側、コンクリートあるいは鉄骨などの構造物の側、急斜面などで測定には注意を要する。測点付近のこのような状況は、常にメモ覧に記入しておく、解析の際に大いに役立つ。

斜面の傾斜方向は 1 m 深地温に大きな影響を及ぼすが、地すべり地などの傾斜地の場合、一方に面した斜面が多いのであまりこの点に神経質になる必要はない。

(5) 地況補正

地況が 1 m 深地温に与える影響の大きさについては、竹内・島 (1976) によって明らかにされている。1 m 深地温の解析結果の成否は、すべてこの地況の判別の成否に掛かっていると言っても過言ではない。したがって、地況の判定は十分に注意して行う必要がある。もし、測点設定の際にどちらの地況に入れるべきか判断に迷うような場合には、明確に判断できる地況の方に多少測点を移設した方がよい結果が得られる。この点については竹内 (1983, 1984) に記されているので、それを読んで戴きたい。

地況の種類は竹内 (1983) によって次のように分類されている。

- A-A : 日当りのよい裸地 (校庭など草の生えていない場所)
 - A' : 家の北側のように日当りの悪い裸地
- B-B : 車のよく通る未舗装の道路
 - B' : 車の入れない山道、小道等あまり締め固められていない道
- C-C : 水田
 - C' : 湿地、元水田 (2, 3 年前まで水田として利用されていたところ)
- D-D : 畑地 (耕作物の種類は問わない、必要な場合は分類する)
- E-E : 草地 (耕されることのない土地、場合によっては低草、高草に分ける)
- F-F : 林地 (場合によっては広葉樹、落葉樹、針葉樹などに分ける)
 - F' : 灌木、植木、藪、茶畑等、(樹齡の小さな植林地も含む)

測定と同時に地況をよく観察し、判別して野帳にその状況を記入する。その結果に基づいて測定値を各地況毎に統計処理をし、各々に応じた補正値を算出し、各測定値に対して補正を行う。

第5章 解釈の方法

測定結果を適切な手順で解析して得られた1 m 深地温分布図を解釈する場合には、調査時における平常1 m 深地温と流動地下水温との関係を把握する必要がある。一般に両者の年変化の関係は、図-3.5.1に示すようになっている。このグラフによると、平常1 m 深地温と流動地下水温は年に2回その温度が等しくなる時期がある。これらの時期に1 m 深地温探査を実施しても地下水流脈の存在による温度変化は1 m 深地温には殆ど表れない。したがって、これらを含めて両者の温度差が±2.5°C以内の時期を「調査不適切時期」と名付けて、1 m 深地温探査を実施しないようにしている。それ以外の場合は夏期であれば、流動地下水温の方が平常1 m 深地温よりも低いので、もし地下水流脈が存在しているとすれば、その部分は平常1 m 深地温よりも低めに検出されることになる(図-3.2.1のA)。一方、冬期であれば、両者の関係は逆転するので、地下水流脈が存在する場所は平常1 m 深地温よりも高めに検出される(図-3.2.1のB)。

したがって、得られた1 m 深地温分布図に対する解釈は、夏秋期であれば低温部に、冬春期であれば高温部に着目して、地形地質構造などを考慮に入れて地下水流動経路を推定することになる。

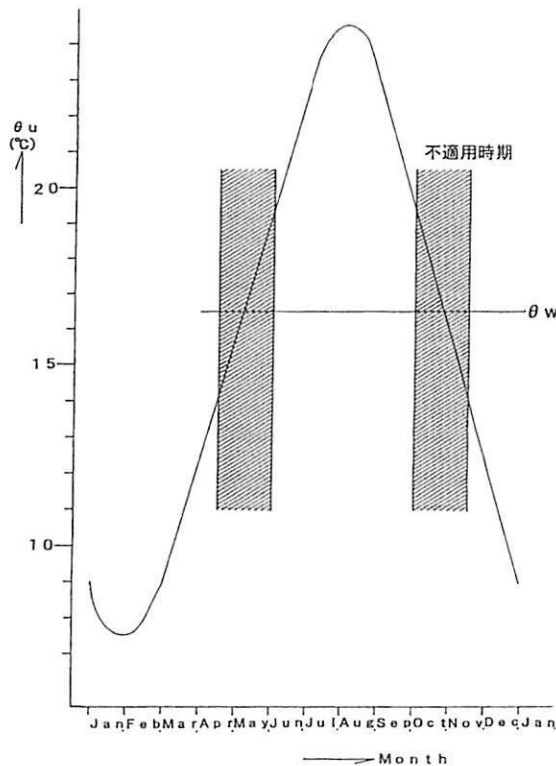


図-3.5.1 1 m 深地温の年変化と地温調査実施不適切時期(斜線部)

ただここで注意しなくてはならないことは、堤体基盤漏水調査結果に対する解釈の仕方である。すなわち、堤内地および堤外地の水位関係と流動地下水温と河川水あるいはため池の水の温度との関係、および平常1m深地温との関係を十分に検討する必要のあることである。

つまり図-3.5.2 A・Bに示すように、調査しようとする場所の河川あるいはため池の水位と地下

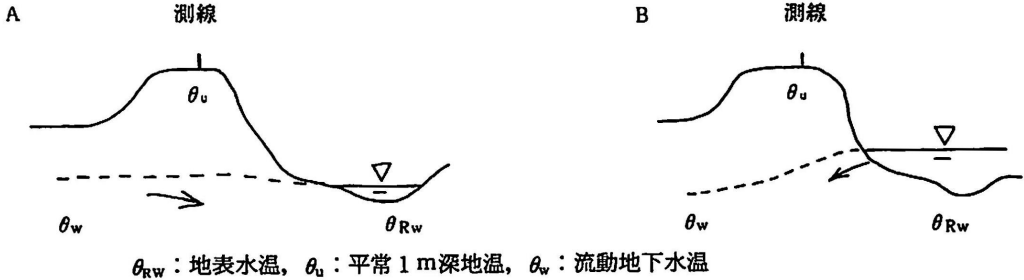


図-3.5.2 地下水位と地表水位との関係と平常1m深地温と流動地下水温および地表水温との関係

水位との関係およびそれらの温度と平常1m深地温との関係を十分に把握しておかないと、誤った解釈をしてしまうことになる。図中のAの場合には、河川水位あるいはため池の水位が地下水位よりも低いため地下水が河川あるいはため池に向かって排出されることになり、平常1m深地温は流動性地下水の温度の影響を受けることになる。一方、図中Bの場合には、河川水位あるいはため池の水位が地下水位よりも高くなっているため、平常1m深地温は河川水温あるいはため池の水温の影響を受けることになる。

このことから河川水位・ため池水位と地下水位、河川水温・ため池水温と地下水温および平常1m深地温との関係で、各種の解釈ができることになる。したがって、調査前にそれぞれの温度の関係と水位の関係を十分に把握しておく必要がある。

下記にそれぞれの水温と水位の関係による解釈の仕方を整理しておく。

温度の関係	水位の関係	水脈の影響
$\theta_w < \theta_{Rw} < \theta_u$	GWL > RWL	低温
	GWL < RWL	低温
$\theta_w < \theta_u < \theta_{Rw}$	GWL > RWL	低温
	GWL < RWL	高温
$\theta_w > \theta_u > \theta_{Rw}$	GWL > RWL	高温
	GWL < RWL	低温
$\theta_w > \theta_{Rw} > \theta_u$	GWL > RWL	高温
	GWL < RWL	高温

ここに、 θ_0 ：平常1 m 深地温， θ_w ：流動地下水温，

θ_{RW} ：河川水温あるいはため池水温

GWL：地下水位，RWL：河川水位あるいはため池水位

さらに、ため池の場合注意しなくてはいけないことは、貯水池内のどの深度の水が漏水しているかによっても、解釈が異なる場合があるので、特に注意しなくてはいけない。脚部漏水であれば、多くの場合池の底の水温を測定し、これと平常1 m 深地温を参考にして、 $\theta_{z=1}-y$ 図あるいは1 m 深地温分布図を解釈すればよいが、堤体途中から漏水している場合には、その漏水現象が認められる付近の貯水池内の水温を測定し、これに基づいて解釈しなくてはいけないことになる。

第6章 1 m 深地温探査の実施例

6-1 地 す べ り

地すべり地など傾斜地における地温測定調査は他の分野における実施個所と比較すると群を抜いて数多く実施されている。ここでは地下水流脈の規模を推定し、それに基づいて地下水排除工を施工した例と地下水流脈の盛衰と土塊活動との関係を明らかにした例について述べる。

6-1-1 地下水流脈の存在位置を立体的に推定した例

地温測定によって得られた $\theta_{z=1}-y$ 図を用いて地下水流脈の存在位置を立体的に把握し、その結果に基づいて地下水排除工を施工することを目的として、できるだけ地況、地形、および地質条件の均一な地すべり地で1 m 深地温探査を実施した。調査対象地は滋賀県の上仰木地すべり地である。当地すべり地は滋賀丘陵の中央部付近に位置する小規模な崩壊性の地すべり地である。地質的には古琵琶湖層群に属し、上部に上仰木砂礫層、下部に南庄粘土層が存在する。前者は良好な透水層となっており、後者は難透水層となっている。地すべりは両者の境界付近に滑落崖を持って発生している。上仰木砂礫層中を流れる地下水は、地形的にみて比叡山塊方面から流下していると推定されるので、地下水調査は主として上仰木丘陵西部を中心として行われた。その理由は地下水が地すべり土塊内に流入する前に排除するためである。

地下水調査として電気探査による地下水分布調査、食塩投入による地下水追跡調査、揚水試験、孔内水位観測などが実施された。それらの結果によると、地下水は図-3.6.1に示すように主として上仰木砂礫層中に存在し、主流動方向は上仰木集落内を東方へ流下するものと、南東斜面に向かうものがあると推定された。その結果、後者が地すべり活動の原因と見なされた。この調査結果に基づいて、集水井IとIIが図-3.6.1の平面図と図-3.6.2の断面図に示す位置に施工された。しかし当初期待されたような排水量および水位低下は認められなかった。

そこで、主要な地下水流脈の存在位置を推定する目的で、図中に示した4測線で1 m 深地温探査を実施した。測定は1965年9月26日に行われた。その時の平常1 m 深地温は19.9°Cで、流動地地下水温は15.4°Cであり、両者の差は4.5°Cあった。測線位置は前述の地下水調査結果に基づいて、主地下水流脈が存在すると思われる方向を直角に切るように設定すると共に、測点間隔は5 m とし、計60点で測定した。

得られた測定値に諸種の補正を施した後に描かれた $\theta_{z=1}-y$ 図を図-3.6.3に示す。これを見る

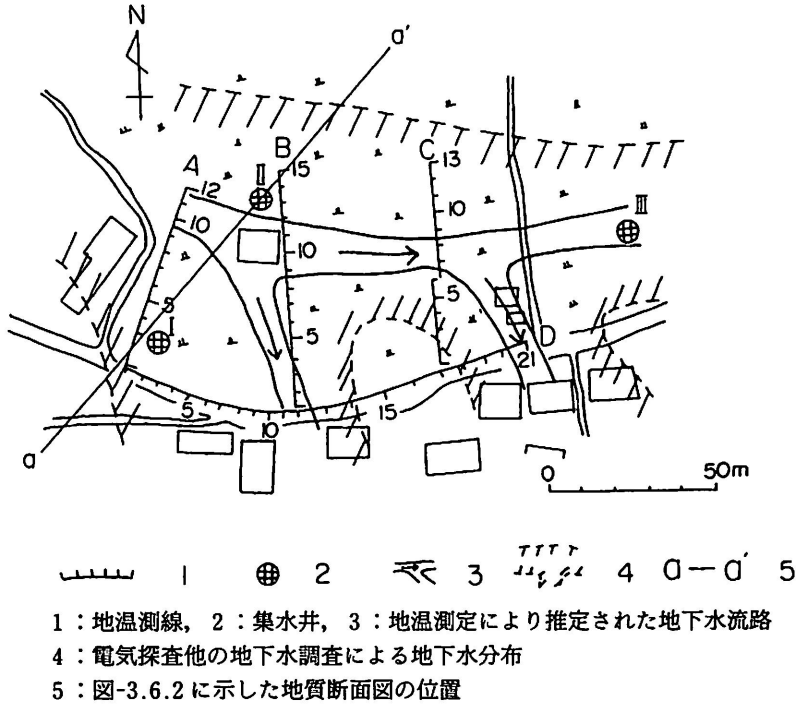


図-3.6.1 上仰木地すべり地における電気探査と1m深地温探査結果の対比

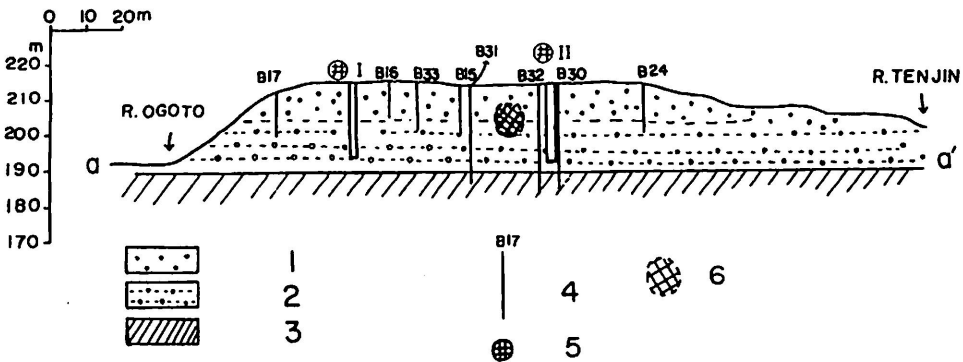


図-3.6.2 地質断面図

と、各測線とも明瞭な低温部が認められる。調査日の平常1m深地温と流動地下水温との関係は前述の通り後の方が前者よりも4.5°C低くなっている。また先行して実施された地下水追跡調査によると、主地下水流脈の浸透速度は1.3~2.0 cm/sと非常に速いものであることが示されている。したがって、もしこの速い地下水が脈状に流れているとするならば、その影響によって1m深地温は低下させられると思われる。そこで、図-3.6.3に示した $\theta_{z=1} - y$ 図を用いて流脈の規模を推定し

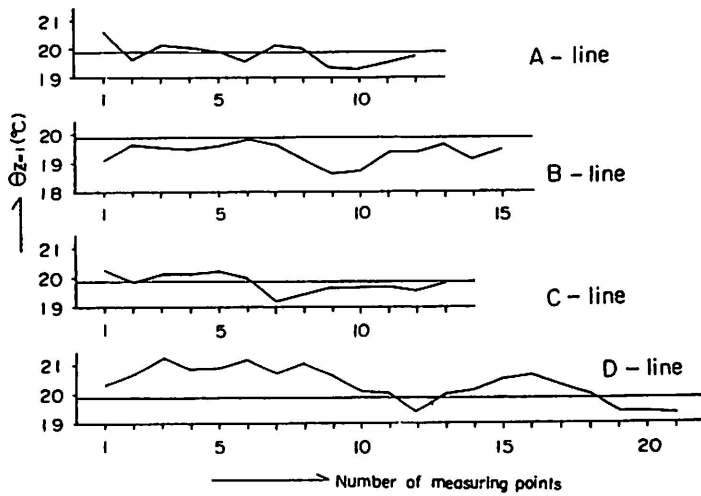


図-3.6.3 $\theta_{z-1} - y$ 図

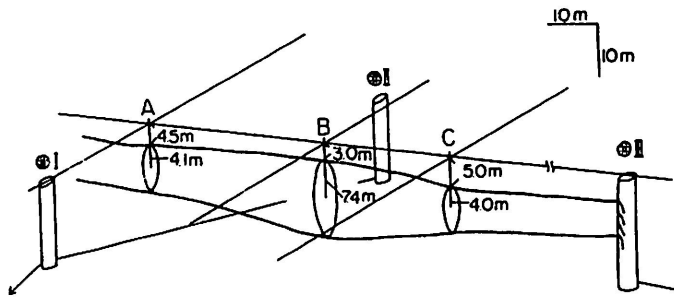


図-3.6.4 $\theta_{z-1} - y$ 図を用いて推定した地下水流脈の三次元的な位置図

たところ、平均半径 5 m の地下水流脈が地表面下 9 ~ 10 m の所に中心軸を持って存在していることが示された。これは 1967 年に実施された地下水検層および地下水追跡調査結果ともよく符合するものであった (防災研究協会, 1968)。

もちろん推定された場所に半径 r (m) を持った水脈が存在し、そこに蕩々と水が流れていることを示すものではなく、少なくとも計算によって求められた場所にある形で砂礫層中を他の場所よりも速い速度を持つ地下水が集中して流れていることを示している。推定された流脈の規模を断面図上に記入し、立体的にその存在状況を描いたものが図-3.6.4 である。この結果に基づいて、図-3.6.1 に示す位置に直径 3 m、深さ 15 m の集水井Ⅲが施工された。その結果、深度 3.5 ~ 13 m の間で地下水が多量に湧出した。その量は 51 l/min (1969 年 3 月測定) であった。一方、地温測定調査を実施する前に掘削された集水井ⅠとⅡからは合計して 35 l/min (1969 年 3 月測定) の排水しか見なかった。

このことは、水理地質的に同一の透水層と見なせる地層中においても、地下水は決して均一に流

動しているのではなく、図-3.6.2に編目状に示したように、ある場所に集中して流れている部分があることを示唆している。このような地下水流脈の存在位置は電気探査あるいは現行の地下水調査のみでは容易に把握できない。ちなみに、現行の地下水調査結果に基づいて掘削された集水井ⅠとⅡ付近に認められる地下水流脈の規模を推定したところ、各々半径0.5m、1mであり、これは集水井Ⅲを掘削した流脈に比べると、かなり小さなものであった。

6-1-2 地下水流脈の盛衰と土塊活動

降水量の多寡が地すべり活動の盛衰と有意ある関係にあることは衆知のことである。そこで、これらの関係を利用して、流脈の盛衰と土塊活動との関係を長期観測結果に基づいて述べ、地すべり活動は流脈の拡大期に発生することを示す。

調査地は新潟県の松之山地すべり地兎口地区の地下水流脈の露頭である湧水点SP-5を中心とした場所である(図-3.6.5)。図に示す位置に長さ60mの定測線を設け、3m間隔に測温体を埋設した。これらを定期的に測定して得られた $\theta_{z=1}-y$ 図を用いて流脈規模を算出した。この定測線から南東約200mの所に地中内部歪計(掘削設定深度30m、歪ゲージ貼付間隔1m、各深度毎に東西・

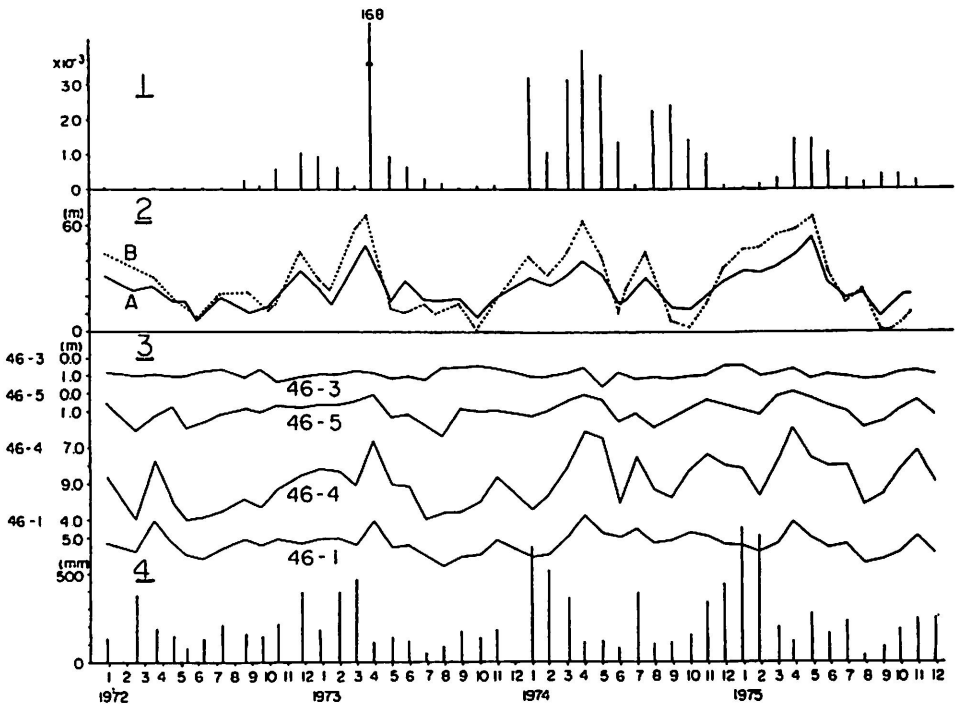


図-3.6.5 松之山地すべり地兎口地区における地温定測線

南北2方向に貼付)を埋設し、土塊内部の変動状況を把握した。さらに調査地周辺に掘削されたボーリング孔の孔内水位を測定した。これらの観測は、1972年1月～1975年12月までの4年間に月1回の割合で行われた。観測結果を図-3.6.6に示す。図中1は地中内部歪計の最も変動の大きかった深度24mの歪量を、2は推定された流脈規模の変動を、3は孔内水位を、4は前回と今回の流脈規模推定のための累積降水量を各々示す。図によると、降水量と孔内水位との関係は冬期間で約2～3ヶ月の時間遅れが認められるが、他の季節にはそれがあまり認められない。

また、孔内水位の昇降と流脈規模の盛衰との間には強い相関性が認められる。最後に流脈規模と土塊活動とを対比すると、両者にも強い相関性が認められた。特に1973年4月の流脈規模の急激な増大は土塊内部の抵抗力を著しく弱めたようで、歪量が極端に増加している。1972年末にも流脈規模の増大現象が認められ、歪量もそれに伴って増加している。両者とも最大歪方向は同一方向(N80°W)であったので、1972年末に既にすべり面は形成されつつあったものと考えられる。この様に不安定な状況にあったときに、春の融雪水が多量に流脈内に供給されたために、その周辺に過剰間隙水圧が発生して、これが誘因となって土塊変動が生じたものと推察される。

大きな歪みが観測された後、現地踏査を行ったところ、図-3.6.5に示すように、湧水点SP-5を



1：地中内部ひずみ計のひずみ量，2： $\theta_{z=1}-y$ 図から推定した流脈の規模，
3：孔内水位，4：降水量

図-3.6.6 地下水流脈の盛衰と地すべり活動

中心として馬蹄形状に多数の亀裂が発生し、局所的な土塊変動が生じたことが観察された。この年は4月以降はひどい渇水状況になったために、流脈の規模も急激に収縮し、土塊に与える影響が減少したため、その変動は終息した。この局所的な土塊変動は、その後も毎年融雪期および大雨期には流脈規模の増大にともない復活していることが図に示されている。

上記の長期観測結果によって、地すべり活動に大きな影響を持つ地下水は流脈状に存在している可能性が高く、これが何等かの原因で異常現象を引き起こすと、それが誘因となって局所的な土塊変動が生じるおそれがあることが示された。この変動が引金となって、その時の周辺の状況によっては大きな地すべり・山崩れに移行する可能性が十分にあり得ることを示唆している。周辺の状況とは、大規模な地すべり・山崩れを引き起こしやすい地形的状況、またそれらを引き起こすに必要な崩積土層あるいは風化土層がそこに存在する等の地質的状況、さらにこれらの土層の強度を十分に低下させるに必要な気象状況、等の諸状況を指す。

6-2 伏流水

6-2-1 旧小河川の伏流水流動経路調査例

調査対象とした地すべり地の末端部に掘削された調査用ボーリング孔 No. 2 は、深度 12 m 付近から珪砂を多量に含む地下水が豊富に自噴している。この自噴水の温度は、1968 年 12 月 1 日に測定したところ 8.1°C とこの付近の地下水としてはかなり低い温度を示した。一方、地すべり活動域の北東部(図-3.6.7)に位置する調査用ボーリング孔 No. 1 の地下水流動層の温度は 15.0°C (同日測定)

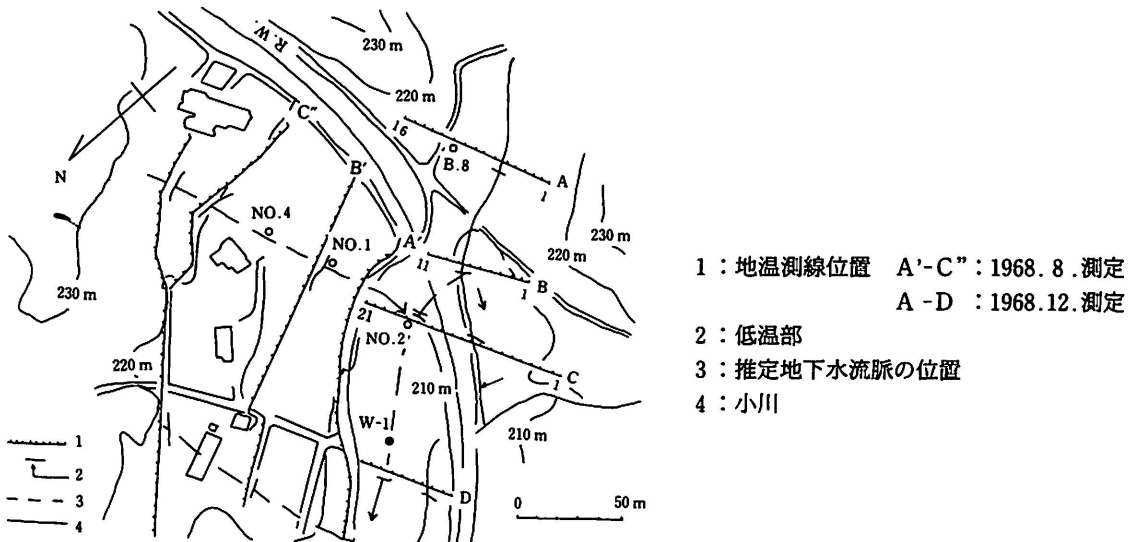


図-3.6.7 地温測定位置図

であった。No. 1の地下水がNo. 2へ流動してきていることは食塩投入による地下水追跡調査および1m深地温探査の結果によって明らかにされている(防災研究協会, 1969)。もし、No. 2に湧出している水の全てがNo. 1方向から流動してきていると仮定すると、この短い流動距離(両ボーリング孔間は約40mの距離がある)の間に15.0°Cもある水温が8.1°Cに低下することを合理的に説明することは難しい。調査地の地形図を詳細に検討すると、調査地の南からNo. 2が存在する北に向けて谷地形が認められる。この谷地形内には、従来小川が流れており、鉄道建設の際に図-3.6.8に示してある現在の場所にその流路を変更させられたと言われている。

したがって、旧小川には伏流水が現在も以前と同じように流下している可能性が高い。調査時の小川の水温は4.0°Cであった。この冷たい水が伏流水内を流動し、No. 2付近で地すべり活動域から流下して来る水と合流しているとすれば、No. 2の湧水が流動地下水の温度よりも低いことの説明が可能となりそうである。

この点を確認する目的で、鉄道線の南方にあるボーリング孔B. 8付近から北西方向にA~Dの4測線を設定して1m深地温を測定した。測点間隔は5mとし、1968年12月1日に調査は実施された。その時の流動地下水水温は8.1°C、平常1m深地温は12.6°Cであり、河川水温は4.0°C、地すべり活動域内の流動地下水水温は15.0°Cであった。12月は地温調査不適用時期に入っており、平常1m深地温と流動地下水水温がかなり接近しているはずである。しかし調査対象となっている伏流水の温度と平常1m深地温との差は+4.5°Cもあり、十分に調査可能な温度差を示すと共に、流動地下水水温の方が平常1m深地温よりも低いという夏の関係を示している。

一方、地すべり活動域内の流動地下水水温は15.0°Cで、平常1m深地温との温度差は-2.4°Cとなっており、冬期間の地温不適用時期の値としては妥当なものである。それ故に、地すべり地内で流脈位置を検出するためには、高温部を検討対象とすべきであるが、今回は調査地内の平常1m深地温よりも低い温度を示す伏流水の流動経路について検討するために調査が実施されたので、得られた資料の低温部に注意を払って解析を行った。

調査地の地況はすべて草地であり、地形は殆ど平坦であった。測定結果(図-3.6.8)によると、

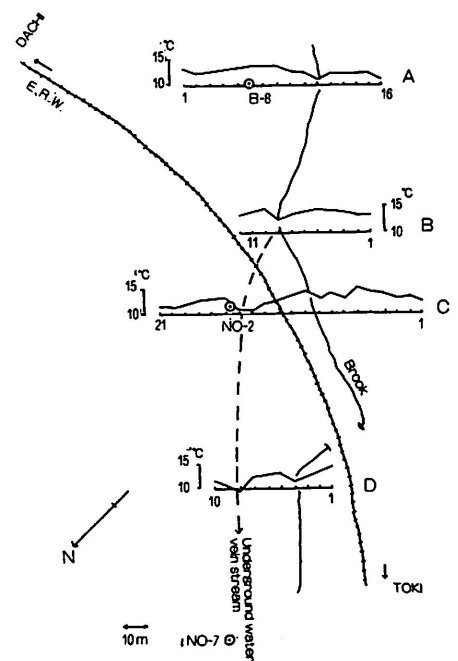


図-3.6.8 $\theta_{z=1}-y$ 図と推定地下水流脈位置図

A測線の小川に低温部が認められ、その低温部はBとC測線で小川に起因するものとNo. 2付近のものと二手に分かれ、D測線においても小川付近とNo. 2から北西に向かう部分の2箇所に認められる。平常1 m深地温と小川の水温(4.0°C)とから判断して、A、B測線とC、D測線の南西側の低温部は明らかに小川の存在による影響であると考えられる。一方、C、D測線の北東側の低温部は流動地下水温(8.1°C)が平常1 m深地温(12.6°C)よりも低いことから判断すると、流動地下水の存在を仮定すると説明がつくようである。この点を確認する目的で、B. 8に食塩を投入して地下水追跡調査を行った。その結果、No.2とその北西に位置するNo. 7にNaClが検出された。流動距離と検出時間とから地下水流速を推定すると 3×10^{-2} cm/sとなった。

C測線の $\theta_{z=1}-y$ 図を用いて流脈の規模を推定したところ、深度13 mに中心軸をもつ半径11 mの水脈が存在していることが示された。この結果に基づいて、流脈流動方向の北西延長上に集水井が施工され、No. 2の自噴停止、水位降下を始め期待どうりの成果を挙げる事ができた。

以上、実施された調査によって、No. 2に自噴していた地下水は、地すべり活動域から流下してくるものと南方の小川から流入する伏流水とによって構成されていることと、旧小川の下にはそれらの水が流動していることが明らかにされた。

6-2-2 伏流水調査の再現性

ここに示す例は、水道源として使用されている伏流水の流動経路に関する情報を得るために夏に1 m深地温探査が実施され、微地形的にも妥当性のある結果を得たが、さらに正確性を期するために冬季に再度同一測線で1 m深地温探査を実施した例について述べる。

調査対象地は一面麦畑であり、図-3.6.9に示すように北西隅の水源井が存在する。この井戸に向かって流動している地下水流脈の存在位置に関する情報を得る目的で、既存の資料を参考にして図

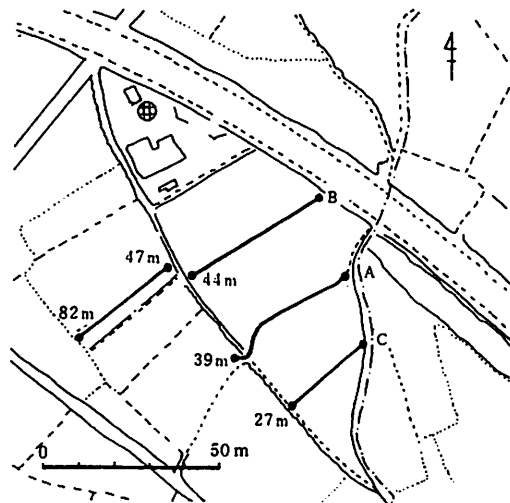


図-3.6.9 測線位置図

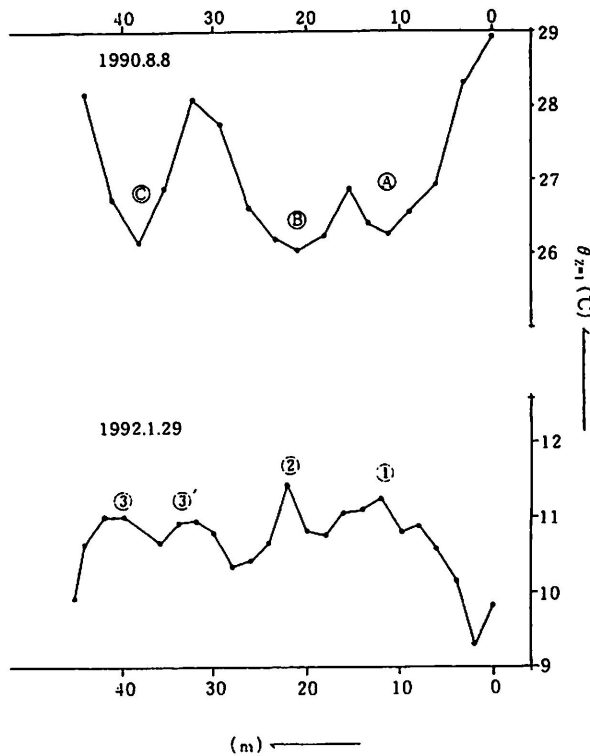


図-3.6.10 異なる季節における1m深地温測定結果の再現性

に示すように3測線を設定した。測点間隔は想定される水脈の規模から判断して2mとした。最初の調査は1990年8月8日に実施された。諸種の因子による影響を取り除いた後に得られた $\theta_{z=1}-y$ 図を図-3.6.10の上部に示す。調査時における平常1m深地温は28.5°Cであり、流動地下水温は井戸の温度から18.5°Cであった。したがって、この水温を有する水脈が存在するならば、その部分は水脈の影響を受けて平常1m深地温が低下していることになる。この観点から図を見ると、調査対象地には3本の水脈が存在することになる。この点をさらに確認するために、二回目の調査が1992年1月29日に前回と同一測線で実施された。各種の補正を行った後に得られた $\theta_{z=1}-y$ 図を図-3.6.10の下部に示した。この時の平常1m深地温は10.0°Cであり、流動地下水温は16.5°Cであった。したがって、この水温を有する水脈が存在するならば、その部分では平常1m深地温は高められることになる。この観点から図を見ると、大別して3本の水脈が存在すると推定される。

この結果を夏に実施された結果と対比すると、両者の温度異常部はほぼ同一部分に認められ、非常によく一致していることが判る。ただ、夏に検出された水脈Cは調査を実施した冬には二手に分流していることが示された。

このことから、異なる季節における再現性は十分に存在することが示されたものとする。

6-3 小さな「水ミチ」探査

小さな斜面崩壊に関与している小さな「水ミチ」の存在場所を探査して、その地下水を排除するための適切な工事を施工することは、その「水ミチ」が原因となって崩壊が拡大する可能性をなくすために非常に重要である。また、既存の集水井の排水孔の掘削位置あるいは横穴排水ボーリング孔の掘削方向や埋設暗渠の存在場所などに関する情報を得ることはその維持管理上大切なことである。さらに、各種の工事に伴って水道管の埋設位置に関する情報を求められることも多くなっている。これら小さな「水ミチ」、配水管、暗渠、埋設管、等に関する情報を得る方法は種々存在するが、ここではこれらに関する情報を得るために、1 m 深地温探査法を適用した実施例を上げてその有効性について述べる。

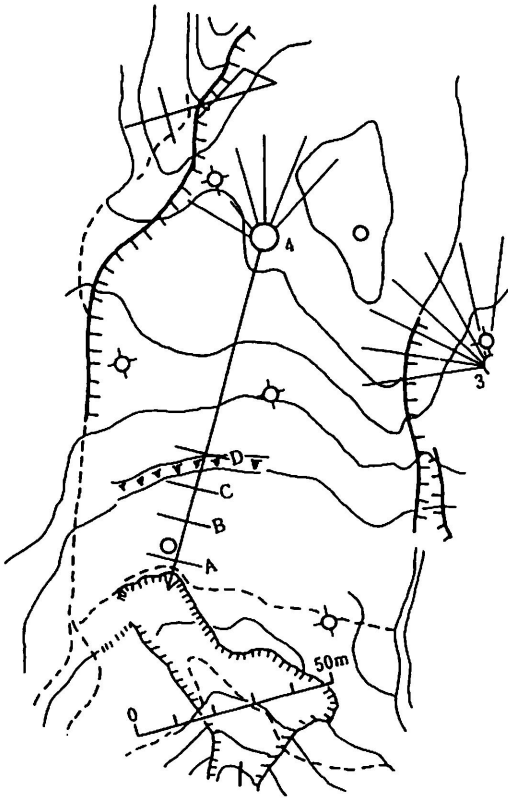
6-3-1 集水井排水管掘削位置の調査例

これまでは規模の大きな地下水流脈の調査実施例について述べてきたので、ここでは半径の極小さな集水井の排水管の様なものが検出できるか否か、および $\theta_{z=1}-y$ 図を用いてその規模を推定した場合、実際の規模および深度とどの程度一致しているかについて検討した。

地すべり防止工事の一手法として施工される集水井の排水管の掘削位置とその深度は共によく判っている。そこで、兵庫県石寺地すべり地の集水井の排水孔周辺を試験地として1 m 深地温探査を実施し、得られた $\theta_{z=1}-y$ 図から流脈と見立てた排水孔の存在位置と規模を推定し、実際の資料と対比した。

測線は図-3.6.11 に示すように、排水孔口付近から集水井に向けて4本設けた。掘削されている排水孔の直径が僅かに10 cm であることが判っているので、測点間隔は1 m とした。資料によると、排水孔の土被りは、A測線付近で2 m 程度、D測線付近では5 m 程度となっている。調査は1979年9月に実施された。調査地の状況は地形的には各測線とも平坦地に設定されており、A~D測線の標高差は5 m 程度である。さらに地質的状况は、調査地全般に極強風化の玄武岩が3~5 m の厚さで分布し、排水孔はこの地層の中に存在しているので、熱的には均一であると見なした。地況条件は全測線共に休耕地であったので、これによる補正も省略した。したがって、現地地で得られた測定値に対して、測温体補正のみを行って $\theta_{z=1}-y$ 図を描いた。その結果を図-3.6.12 に示す。

図には実際の排水孔掘削位置も記入してある。これを見ると、A・B測線では明らかに排水孔の掘削位置を中心としてほぼ対象的に1 m 深地温が乱されているのが読み取れる。一方、C・D測線では、排水孔の右手に存在していると推定される地下水流脈の影響が強く現れていて、排水孔の存在による地温の乱れが打ち消されてしまっている。図-3.6.12 に示された $\theta_{z=1}-y$ 図と調査時



A~D: 測線位置, 4: 集水井

図-3.6.11 石寺地すべり地における測線位置図

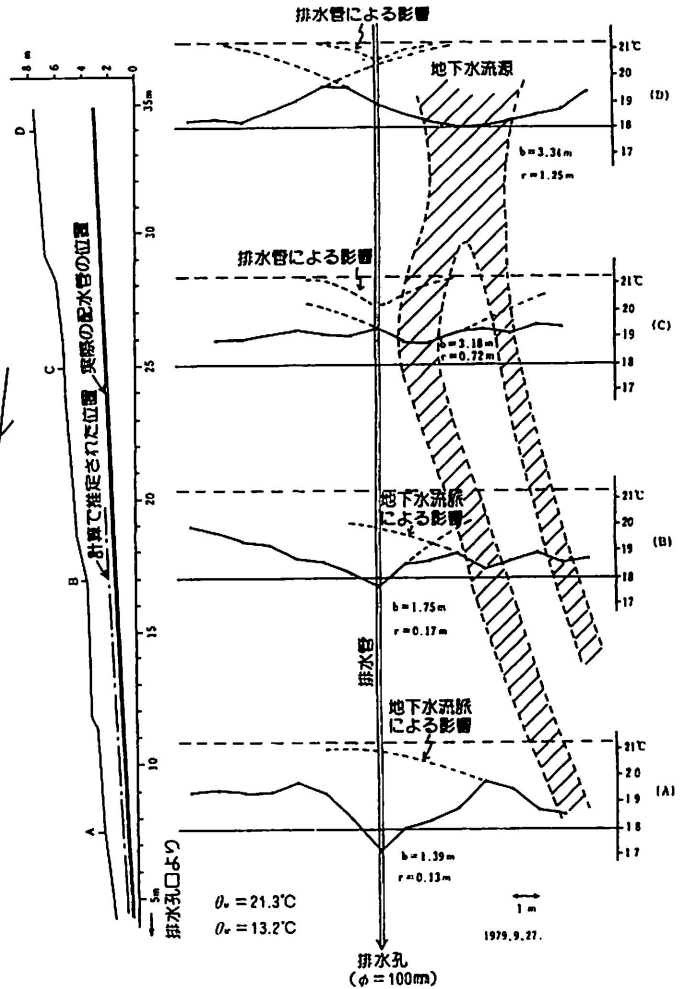


図-3.6.12 調査結果と $\theta_{z-1}-y$ 図を用いて推定した結果

の平常1m深地温(21.3°C)と流動地下水温(13.2°C:ここでは排水孔から流出している水の温度および流脈末端部の湧水の温度)とを用いて排水孔と流脈の存在深度および規模を推定した。その結果、図に示したように、排水孔の規模はA・B測線では半径が約15cm(17~13cm)、中心軸の存在深度はA測線で1.39m、B測線では1.75mであった。これを実際の排水孔掘削位置と対比すると、図の左の地形断面図に示したように、存在深度は多少浅めに、またその規模は少し大きめに推定されている。規模が大きめに推定されたことは、 $\theta_{z-1}-y$ 図を用いて推定された流脈の規模が排水孔の中を流れている水によって冷やされている範囲を表現していると考えれば容易に説明はつく。

排水孔の右に存在する流脈の規模は、C測線では半径72cm、中心軸の存在深度3.18m、D測線では同じく半径1.25m、中心軸の存在深度3.34mとなっている。この地下水流脈の存在によって、

C・D測線では排水孔の影響が打ち消されているが、もし流脈が存在していなければ、排水孔存在による影響は点線で示したようになるはずであった。つまり、A・B測線では、右側の流脈存在の影響よりも排水孔の影響が強くと $\theta_{z=1}$ に現れ、C・D測線では、流脈が排水孔に近接して存在していることと、排水孔の土被りが厚くなっているために、排水孔の存在による $\theta_{z=1}$ への影響が、流脈存在による影響によって打ち消されてしまっていることになる。この点は、図中の点線を見るとよく理解できる。

以上によって、小規模の地下水流脈（ここでは集水井の排水孔）でも測点間隔を短く取ることによって、かなりの精度でその規模と中心軸の存在深度とを推定できることが示された。

6-3-2 暗渠埋設位置探査例

道路建設の前に、X、Y両地区の谷川の伏流水が暗渠排水路によって排除されていると言われていた。Y地区のそれは現在整備中の三面張りの水路の下にその排除孔を見ることができ、X地区のその存在場所は色々な説があり、その場所の特定はなされていなかった。

これらの伏流水は質がよく、しかも量も豊富にあるので、生活用水として利用することが提案された。これらの伏流水を利用しようとする場合、その存在場所をできるだけ正確に特定する必要がある。地元住民の話によると、X地区に施工されている暗渠排水路の末端は、以前施工された法面の末端付近に存在していたと言われている。そこで問題の法面を中心として図-3.6.13に示す位置に1×2mの細かい測点網を設定して1m深地温探査を実施した。

測定結果を図-3.6.14に示す。この図を見ると、測点C-6を中心として明瞭な温度低下部が検出されている。この低温部は斜面下方に広がっている。この事から判断すると、X地区の伏流水の暗渠排水の末端部はこの測点付近に存在し、そこから流出している水は下方に流下しているものと推

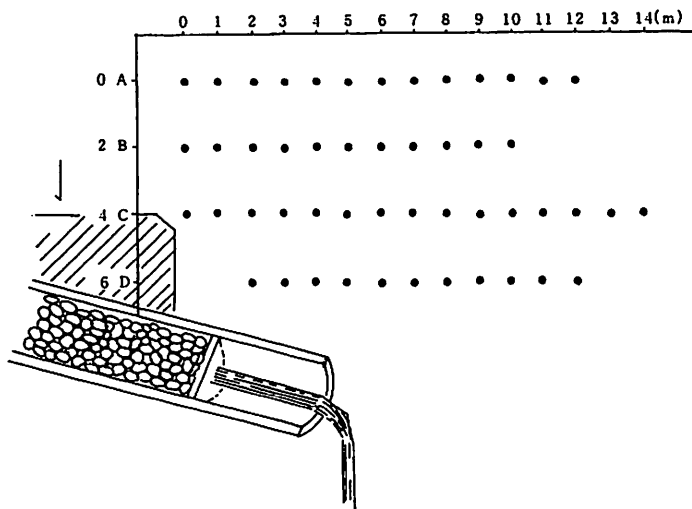


図-3.6.13 暗渠存在位置調査のための1m深地温測点網

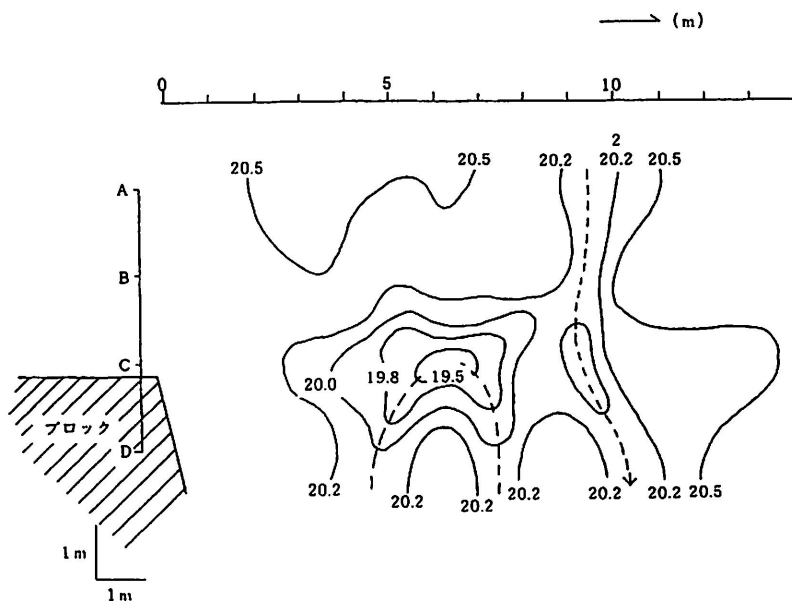


図-3.6.14 暗渠排水孔存在位置調査結果

定される。これを実証する現象として、斜面下方に設けられている水路の所に地下水の上昇流による越流現象が認められる。

この低温部とは別に測点A-9付近から測線10に沿って下方に向かう低温部の存在が認められる。この部分にも小さな「水ミチ」の存在が推定される。

今回その存在場所が推定された暗渠排水の末端は、かなり深いところに存在していることが計算上推定され、機械掘削ではそれを掘り出して利用するよりもむしろ、この暗渠末端に向けて横穴集水ボーリング孔を掘削するほうが経費的に安くしかも容易であることから後者が実施されることになった。

この様にその存在場所が不確定な暗渠排水路など小さな「水ミチ」の存在場所を特定したい場合には、1m深地温探査を細かな測点網で行うことによってかなりの成果を上げることができると思う。

第7章 1 m 深地温探査の最近の動向と今後の展望

「温度」という物理的因子を用いた地下水調査法は、最近では地すべり地など斜面災害に関わる地下水調査は勿論のこと、地下水汚染・地下水障害調査、ため池漏水・堤防漏水調査、遺跡保存調査など、他の分野へ急速にその適用分野が拡大されつつある。今後の展望としては、同じく「温度」を利用した多点温度検層、単孔式加熱型流向流速計などの併用探査によって、三次元的な地下水の流動形態に関する情報の提供に寄与することができると共に、その情報に基づいて、地下水流脈に関する定量的な解析が進められて行くものと考えている。

今後に残された課題としては、次のものが挙げられる。

- 1 水脈の規模と存在深度,
- 2 水脈内の透水係数,
- 3 水脈を構成している地下水流動層内の地下水流速,

など、1 m 深地温探査によって検出された地下水流脈についての定量的把握が上げられる。この中で、1 に関しては湯原 (1955) によって理論的検討が行われており、その手法は地下水に関しても有効であることが Takeuchi (1981) と竹内 (1983) により確認されている。また、最近では竹内・河西 (1994) によって、水脈天頂存在深度の等高線図を描くことにより、「水ミチ」の存在深度を連続的に把握する解析方法が提案されている。2 に関しては横穴排水ボーリング孔からの排水量と水平温度検層結果を基にして竹内・遠山 (1990) によって検討が進められている。また3 に関しては多点温度検層の「温度復元率—時間曲線」を利用して竹内・上田 (1992)、竹内他 (1993) によって検討がなされ、他の手法によって測定された流速との比較が行われている。さらに、最近開発された「単孔式加熱型流向流速計」(竹内・油野:1996) を用いることによって、その精度を上げることができるようになっている。しかし、これらの一部はまだ完全なものではなく、今後地下水流脈の定量的把握に関する研究を進めて行きたいと考えている。

上述したように、現在、地温探査法は地すべり地など斜面災害における地下水調査を始め、堤体漏水、伏流水、ため池漏水、トンネル湧水、遺跡保存等の調査にも適用されており、それらの実施箇所数は500箇所を越えている。上述した課題を解決して行くことにより、この調査法の適用範囲は地下水に関わる環境影響調査など、より多方面に拡大して行くものと考えている。