<報 文>

地すべり地における地温測定調査について (7)

—その適用時期および地下水流脈の年変化と
地すべり活動について—

Underground Temperature Survey in and around the Landslide Area (7)

—Period of operation of the survey and variation of scale of
vein stream of underground water in a long term—

竹 内 篤 雄*

Atsuo TAKEUCHI

Abstract

By theoretical study, the difference of temperature was in need of two or three degree between temperature of underground water and underground temperature in 1 meter depth to estimate the channels and the scale of ground water vein stream. At the Matsunoyama landslide area, the most desirable period in a year to conduct the survey was March or April in spring and September in autumn. The scale of the vein stream changed by precipitation. Increase of precipitation brought about, in general, increase of the scale. In a rainy season this phenomenon had closely connection with landslide movement. In estimating the scale of vein stream, one must pay close attention to the decision of the ordinary temperature in 1 meter depth and a style of writing of $T_{x=1}-y$ diagrams. Because errors of these factors had a large effect on the estimated scales.

§1 序

筆者は前小論¹⁾において地下 1m 地温測定による地下水流脈推定の可能性について二次元の簡単なモデルを考えて検討した。その結果、理論的にもその可能性の存在することが明らかにされた。この中で地温測定調査法の適用限界について簡単に触れたので、今回は地下 1m 地温と地下水温との差が種々に変化した場合を考慮してその適用限界について検討を加えるとともに新潟県松之山地すべり地の調査結果にもとづいて同調査法の適用可能時期を求めた。さらに同地すべり地で得られた $T_{x=1}-y$ 図を用いて地下水流脈の規模の年変化状況について検討するとともに求められた水脈の規模を用いて理論曲線を描いて実測値と対比して見た。

§2. 地下 1m 地温と地下水温との差

地下 1m 地温 (地下水流脈の影響による温度変化を受けていない場所の地温) と地下水温 (湧水点あるいは試験孔内の地下水流動層内の水温) との差の年間の変動状況を知るために、1971~1973 年にわたり松之山地すべり地兎口地区内で測定調査を行なった。その結果を図-1に示す。図には兎口地区に存在する比較的湧出量の多い三つの湧水点²⁾ (sp-2, sp-3, sp-5) についての測定結果を示した。これらによれば、地下 1m 地温 ($T_{x=1}$)

と地下水温 ($T_{u,w}$) との差 (T_b) は 3 月に負の最大 (約 -6°C) に達し、その後 T_b は徐々に減少して 5 月下旬

図-1 地下 1m 地温 ($T_{x=1}$), 地下水温 ($T_{u,w}$) および両者の差 (T_b) の年変化 (1971~1973, 松之山)。細い横線は最低必要温度差 (2.5°C) を示し、これに交差する短い縦線は地温調査不適用時期を示す。

*京都大学防災研究所

に $T_{x+1}=T_{u,w}$ となる。そして8月下旬～9月に正の最大(約 $+8^{\circ}\text{C}$)に達し、再び T_b は減少して12月中旬に $T_{x+1}=T_{u,w}$ となる。これが同調査地区の地下水温と地下1m地温との差の年変化である。なお図中の各湧水点の地下水温は $8\sim 9^{\circ}\text{C}$ と年間を通してほぼ一定な値を示しているが、このような一定水温の水を供給できる機構についてはここでは触れない。

地下 1m 地温と地下水温との温度差を利用して行なう地温測定調査は $T_{x=1} = T_{w, \infty}$ となる時期には $T_b = 0$ となり適用できなくなる。たとえ T_b が多少存在していてもその地下 1m 地温に及ぼす温度変化が温度計により検出できるに必要なものでなくてはならないとともに、もし温度計に地下水流脈の存在による温度変化をとらえたとしてもその値および影響範囲が地下水流脈を推定するに必要な大きさでなくてはならない³⁾。そこでこれらの条件を満たすに必要な温度差が求められれば地温測定調査の適用時期とその限界を定めることが可能となる。

§3. 地温測定調査を適用するに必要な温度差(T_b)と適用時期

図-2 で与えられる二次元の平無限固体中の定常熱伝導方程式は(1)式で与えられ、Newton の冷却の法則を考慮した場合の解は(2)式となる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

境界条件を

$$\left. \begin{aligned} (b-x)^2 + y^2 &= r^2 \text{ において } T = T_b \\ x=0 \text{ において } \frac{\partial T}{\partial x} - hT &= 0 \end{aligned} \right\}$$

とした場合、(1)式の解を数値計算を行ない易いように漸近級数で表わし、 $x=1\text{m}$ を代入すると次のごとくなる。

図-2 地下水流脈の二次元モデル

$$T_{x=1} \doteq \frac{T_b}{\log \frac{b+a}{b-a}} \cdot \left(\log \frac{(1+a)^2 + y^2}{(1-a)^2 + y^2} + \frac{4}{h} \cdot \frac{(1+a)}{\{(1+a)^2 + y^2\}} \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここで T =温度($^{\circ}\text{C}$), T_b =円柱表面の温度($^{\circ}\text{C}$),
 b =円柱中心の深さ (m), r =円柱の半径
(m), $a=\sqrt{b^2-r^2}$ (m), $h=h'/k$: Newton
の冷却係数 (m^{-1}) (h' =地表面の伝熱率,
 k =土の熱伝導率), y =地表面と平行で円
柱軸と直角の方向 (m), x =円柱軸と直角
で地表面と垂直の方向 (m).

前小論⁴⁾において現在使用中のサーミスター型温度計の精度は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ であり、 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以上の温度変化を平常地温に対して示したときにこれを地下水流脈の影響によるものと見なすことを提案した。また地下 1m 地温測定から得られる $T_{x=1-y}$ 図を利用して地下水流脈の規模を推定するために最小限 5 測点で地下水流脈の存在に起因する温度変化を把握することを必要条件として示した。これらを基にして通常地すべり地内外に見られる地下水流脈の規模およびその中心点存在深度を考慮して地温測定調査により地下水流脈を推定するに必要な測点間隔を求めたところ 5~10m という値が得られた。

そこで今回は測点間隔を 5m とし、 $T_{x=1}$ と T_u, w との差 T_b が図-1 を参照して 10.0, 8.0, 6.0, 5.0, 3.0, 2.0°C に各々変化した場合、各測点がどのような温度変化を行なうかを検討する。これらの点を加味して(2)式に下記の変数を代入し数値計算を行なった。

- 地下水温と地下 1m 地温との差 $T_b=10.0\sim 2.0^\circ\text{C}$
- Newton の冷却係数 $h=10.0\text{m}^{-1}$
- 地下水流脈の半径 $r=1.0\sim 50.0\text{m}$
- 地下水流脈中心軸の存在深度 $b=2.0\sim 100.0\text{m}$
- 中心軸を零とする y 方向の測線距離 $y=0\sim 50\text{m}$
- 地温測定深度 $x=1.0\text{m}$

計算結果を整理し図化したものを図-3～図-6に示す。

$T_b=2.0^{\circ}\text{C}$ で y が 10m のときは半径 4m 以下の水脈はいずれの深度に中心点が存在しても地下 1m 地温に 0.2°C 以上の温度変化を与えず、半径が多少大きなものでもそれによる温度変化は小さくしかも影響範囲が狭い(図-3)。したがって平静地すべり地内外で観測される半径 5~15m の規模の水脈を推定するには無理がある。

$T_b=3.0^{\circ}\text{C}$ で y が 10m のときは半径 3m 以上の水脈が地下 1m 地温に対して 0.2°C 以上の温度変化を及ぼし、その影響範囲も広がっている。したがって一応 $T_b=3.0^{\circ}\text{C}$ 以上であれば水流脈の規模・存在位置は $T_{x=1}-y$ 図から推定できることになる(図-4)。さらに T

$t_b=5.0^{\circ}\text{C}$ になれば $y=10\text{m}$ においては半径 2m のものも十分に推定でき (図-5), $T_b=8.0^{\circ}\text{C}$ 以上であれば $y=20\text{m}$ つまり測定間隔を 10m にしてもなお半径 4m 以上の水脈は推定できるようになる (図-6)。つまり地下水温と地下 1m 地温との差が大きくなると, $T_{x=1}-y$ 図を用いて推定できる地下水流脈の規模が小さくなるとともに中心軸の存在深度も深くなることを示している。たとえば図-7a に示すように半径 2m の地下水流脈は $T_b=2.0^{\circ}\text{C}$ では中心軸が 3m と浅い所に存在しても地下 1m 地温に 0.2°C 以上の温度変化を与える範囲 y は 6m にすぎず測定間隔 5m で地温を測定しても前述した必要条件を満たさないで地下水流脈を推定することは困難である。しかし $T_b=10.0^{\circ}\text{C}$ になると中心軸が 20m に存在してもなおその影響範囲 $y=15\text{m}$ と広いので測点間隔 5m に取って $T_{x=1}-y$ 図を描けば必要条件を

充分満たしているのを推定できることになる (図-7b)。このように $T_b=10.0^{\circ}\text{C}$ になると小規模な地下水流脈がかなりの深度に存在しても探查可能となるが, このことは逆にいうと測点間隔 5m では小さな地下水流脈の影響が大きく表われてしまい, 大規模な水脈を推定する際の Noise となる恐れがある。そこでこのような場合は測点間隔を大きく取の方が通常推定する必要がある半径 $5\sim 15\text{m}$ の水脈の探查を容易にすると思われる。もちろん小規模なものを詳細に探查する必要のある場合には測点間隔を適当に調整すればよい。

各温度差において各半径を有する地下水流脈が地下 1m 地温に 0.2°C 以上の温度変化を及ぼすに必要な中心軸の存在深度の範囲を理解しやすく図化したものを図-8a~c に示す。図中各半径に該当する中の棒状グラフは左から温度差 $T_b=2.0, 3.0, 5.0, 8.0$ および 10.0°C の場合に地下 1m 地温に 0.2°C 以上の温度変化を及ぼすに必要な地下水流脈中心軸の存在深度の範囲を示

図-3 半径 (r) をパラメーターとした $T-b$ の関係

図-5 半径 (r) をパラメーターとした $T-b$ の関係

図-4 半径 (r) をパラメーターとした $T-b$ の関係

図-6 半径 (r) をパラメーターとした $T-b$ の関係

したものである。したがって各半径のある温度差の棒状グラフの頭部を結んだ曲線は地下 1m 地温に与える温度変化 0.2°C 以上の条件を満たすに必要な最深中心軸存在深度を示すことになる。この図を用いることにより、あるときの地下水温と 1m 地温との差および測点間隔を与えれば、推定できる地下水流脈の規模を知ることができるとともに、逆にある規模の地下水流脈を推定するために必要な温度差と測点間隔も知ることができる。

以上推定すべき地下水流脈の規模によるが通常地すべ

り地内外で観測される半径 $5\sim 15\text{m}$ の水脈を探索するためには地下 1m 地温と地下水温との差は $|3.0|^{\circ}\text{C}$ 以上あることが望ましい。この温度差があれば測点間隔 5m に取った場合で最低半径 3m の水脈が推定できるからである。したがって地温測定調査に必要な最小温度差を $|2\sim 3|^{\circ}\text{C}$ に置き、この値以内の温度差（ここでは一応 $T_b=|2.5|^{\circ}\text{C}$ を基準とする）を示す時期を地温測定による地下水流脈探索実施の不適用時期と名付けることにする。これに基づいて図-1に示した松之山地すべり地における地温測定調査不適用時期を求めると図中に短い縦線で示したように、それは 11 月中旬から 12 月下旬および 5 月上旬から 6 月中旬の各 1 月半の期間となる。この期間中は地温測定調査に基づいて地下水流脈の規模を推定しても、地下 1m 地温に与える水脈による温度変化が小さくかつ狭いために誤差の大きなものとなる恐れがある。同調査法の最適用時期は図-1を見れば明らかのように温度差の一番大きな 3~4 月と 9 月である。

§4. 地下水流脈規模の変化

4-1 平常地温の決め方と推定水脈の規模の変化

現地で得られた $T_{x=1}-y$ 図を用いて水脈の規模を推定する際に図上で平常地温（地下水流脈の影響を受けていない地下 1m 地温） T_u を求める必要がある。測線長が充分に取れる場合（たとえば図-10a）は比較的簡単に T_u は求められるが、図-10d のごとく測線長が地形的影響等で充分に取れない場合は平常地温の決め方により、 $T_{y=0}^x$, $T_{y=y_0}^x$, T_b の値が各々異なり、ひいては推定される水脈の半径も異なってくる⁵⁾。現段階では後者の場合は得られた曲線を用いて漸近線を描き、それによって平常地温を推定している。そこでこの漸近線の引き方

図-7 a 地下水流脈の存在深度と地下 1m 地温に与える温度変化 ($T_b=2.0^{\circ}\text{C}$ の場合)

図-7 b 地下水流脈の存在深度と地下 1m 地温に与える温度変化 ($T_b=10.0^{\circ}\text{C}$ の場合)

4-2 変曲点位置の読み取り誤差の推定水脈の規模への影響

水脈の規模を推定するには現地で得られた $T_{x=1}-y$ 図からその曲線の変曲点を求める必要がある。変曲点の位置を図上で正確に求めることは難かしいため、前小論⁶⁾で述べたように

$$T_{y=y_i}^0 = \frac{3}{4} \cdot T_{y=0}^0 \dots\dots\dots (4)$$

から変曲点の温度を求め、その点から y 軸に垂線を下して y_i を求めた。この際に y 軸、 $T_{x=1}$ 軸の scale の取り方によっては y_i に多少誤差が含まれる可能性がある。そこで y_i に含有される誤差が推定規模にどの程度の影響を及ぼすかを検討したものが図-9である。図には y_i を用いて求める $a = \sqrt{3} |y_i|$ の誤差率 $\Delta a/a$ を横軸に、推定される水脈の規模を半径 r で表わし、その誤差率 $\Delta r/r$ を縦軸に取ってある。 a の値を過小に読むか過大に読むかによって多少の差はあるが、概ね

$$\Delta r/r \approx 2.2 \cdot \Delta a/a \dots\dots\dots (5)$$

で表わされるようである。ここで $\Delta r/r$ は水脈規模の誤差率、 $\Delta a/a$ は変曲点位置の読み取り誤差率である。したがって推定水脈誤差を減ずるために y_i の読み取り誤差をできるだけ小さくするように y 軸および $T_{x=1}$ 軸の scale を決める必要がある。

4-3 $T_{x=1}-y$ 図の実測値と理論値との対比

$T_{x=1}-y$ 図を用いて水脈の規模を推定し、その推定された値を理論式に代入して理論曲線を描いて実測曲線と対比してみた。もしこの場合両者が全く異なった曲線となった場合水脈の形を円筒形とした点および水脈の推定方法に対し再検討をする必要性が生ずるからである。そこで現地で得られた2,3の実測曲線に対し上記の作業を示したものを図-10(a~e)に示し、図中に推定された半径を示す。実線は実測曲線、点線は理論曲線である。この図を見ると水脈規模の小さい場合(a~c)はいうにおよばず、かなり大きな規模の水脈においても実測曲線と理論曲線とがよく一致していることが示されている。(図-10 d, e)。つまり水脈の推定方法および水脈を円筒と仮定して理論計算を行なったことは一応当を得ていることを示したものと考える。図-10-c, e に示されるように接近して二つの水脈が存在する場合(実際には両者は互いに重合している)でも単体の水脈として計算した結果を重ね合わせることにより実測曲線と理論曲線がよく一致することが示されている。さらに二つの水脈の影響圏が重なり合う点で実測曲線においてもこれを肯定する曲線が描かれている点は注目したい。大規模な水脈が地下1m地温に及ぼす影響が図-10 d, e に示されるように鋭いものになるということは理解しにくい点である。そこで半径40mの水脈が種々の深度にその中心軸を有した場合の $T_{x=1}-y$ 図を描いたところ図-11 のようになっ

た。つまり、かなり、大きな規模の水脈で地表面近くに水脈の頂部が存在する場合には $T_{x=1}$ に与える影響はかなり鋭く表われることになる。

4-4 地下水流脈規模の変化

地下水流脈の規模が変化していることは豊水期・枯水期における湧水量の多寡から推測できる。そこで1971年~1973年に松之山地すべり地で得られた湧水点(Sp-2, Sp-3, Sp-5)付近の $T_{x=1}-y$ 図(図-12)を用いてこの点を検討して見た。図-12を見ると湧水点付近では $T_{x=1}$ は夏・秋期には低温に、冬・春期には全く逆に高温に測定されていることが判る。冬期は2mを越す積雪にもかかわらず湧水点付近および地下水流脈周辺では無積雪かまたは溝状にくぼんでいることが観察された。(1973年2月または4月)。地下水流脈の影響による $T_{x=1}$ 温度変化の大きさは各温度差の大小により変化し、地温測定不適用時期に近づくにしたがいその変化量は小さくなっている。図中の $T_{x=1}-y$ 図および湧水温、平常地下1m地温および両者の温度差を用いて地下水流脈の規模を推定したものを図-13に示す。これを見るとSp-2に至る地下水流脈は常にほぼ一定の規模(半径2~4m)を保っているが、Sp-3, Sp-5に至る水脈は平常は半径15~20mの規模を示し、豊水期にはその規模を拡大し、枯水期には縮小することが示されている。ちなみに水脈の規模(面積)と降雨量との関係を求めたところ地温測定を実施した日から50日前と20日前の間30日間の累積降水量とかなり高い相関関係($n=32$ で $r=+0.698$)が存在することが判った。なお両者の定量的関係は後日検討する。

地下水流脈の盛衰は地すべり活動に影響を及ぼすことが考えられるので当調査地区内に埋設した地中内部歪計の測定資料を用いてこの点を検討した。図-14に1972年8月から1973年10月までの歪量の変化状況と地下水流脈の面積の変化状況とを示した。歪計は歪量とその歪方向をも合わせて示した。なお地中内部歪計(46-6)と地下水流脈推定場所(Sp-5-B)との位置の関係は前者の北方約200mの所に後者が位置している。図を見ると水脈の拡張と歪量の増減とがかなりうまく一致している。1972年11月から1973年2月までと1973年4月から6月までの歪量の増大は同期間の水脈規模の増大と一致する。特に4月の水脈増大期には歪量はそれまででない急激な増大を示し、それまでは潜在的すべり面が存在すると推測されていた深度24m付近に明確にすべり面が形成されたことを物語っている。なお歪方向にも見られるように4月の急激な活動の反動現象が6月に表われている。急激な活動期とときを同じくして46-6の歪計とSp-5湧水点との中間域一帯に大小の亀裂の発生が見られ大きなもので幅50cmの地溝状陥没現象が見られた(1973年4月19日測定)。この年の春・夏期は降水量

図-10 (a~e) 実測 T_{x-1-y} 曲線と理論 T_{x-1-y} 曲線との対比 (実線=実測曲線, 点線=理論曲線)

図-11 大規模水脈の存在深度変化に伴う $T_{x=1}-y$ 曲線の変化

図-12 各時期に得られた $T_{x=1}-y$ 曲線 (松之山)

が非常に少なかったために地すべり活動の拡大は見られず局所的な活動で治まった。

§5. 結 語

松之山地すべり地の調査結果を中心にして地温測定調査実施の不適用時期および地下水温と地下 1m 地温との最低必要温度差、さらに実測された $T_{x=1}-y$ 曲線と理論曲線との対比を行なうとともに、地下水流脈規模の変動状況を定性的に検討した。その結果次の点が明らかにされた。

- ・松之山地すべり地では地下水温の変動は小さく、温度差 T_b の変動は主として地下 1m 地温により生ずる。
- ・温度差 T_b は 3 月中に最低値 (約 -6°C) 9 月中旬に最高値 (約 $+8^{\circ}\text{C}$) を示す。
- ・理論的見地からは平静地すべり地内外に存在する地

図-13 推定された地下水流脈半径の変遷 (松之山)

図-14 水脈規模の変遷と土塊変動 (地中内部歪計による) (松之山) (点線は回帰直線より推定)

地下水流脈を測点間隔 5~10m で測定して得た $T_{x=1}-y$ 図から推定するには $T_{x=1}-T_{w}=T_b$ は $|2\sim 3|^{\circ}\text{C}$ 以上存在することが望ましい。できるならば $|5\sim 10|^{\circ}\text{C}$ は欲しい。

- ・上記の点から松之山地すべり地の地温測定調査不適用時期を求めると 5 月上旬~6 月中旬, 11 月中旬~12 月下旬の各 1 ヶ月半となる。
- ・各時期の $T_{x=1}-y$ 図を見ると地下水流脈周辺は夏・秋期は高温に、冬・春期は低温に検出されることが示されている。
- ・平常地温の決め方の誤差は水脈推定規模に対して、 $\Delta r/r=2.4 \times \Delta T_w/T_w$ の影響を与えるので、平常地

温の決め方は慎重でなくてはならない。

- $T_{x-1}-y$ 図を用いて地下水流脈を推定する場合、変曲点の読み取り誤差は $\Delta r/r=2.2 \times \Delta a/a$ の大きさで推定規模の中へ入って来る。したがって $T_{x-1}-y$ 図には変曲点読み取り誤差をできるだけ小さくするように適切な scale で描く必要がある。
- $T_{x-1}-y$ 図を用いて推定した水脈の規模を理論式に代入し理論曲線を描いて実測曲線と対比したところ両者はよく一致することが示された。したがって一応水脈を円筒状と仮定した点および水脈の規模の推定方法はあながち不当なものではないことが判った。
- 推定された地下水流脈はある基準的な規模を有し、それが降水量の多寡により拡張すること、さらにその規模は地温測定を行なった日から 50 日前と 20 日前の間 30 日間の累積降水量に左右されることが定性的にはあるが示された。
- 地下水流脈の増大は地すべり活動に大きな影響を与えることが地中内部歪計の観測により示された。

謝 辞

本小論を書くに当りましては京都大学防災研究所島教授に終始御指導を賜りましたことを記し謝意を表します。また松之山地すべり地での調査に当りましては新潟県土木部砂防課の湊元技師に大変お世話になるとも

に、現在におきましては安塚土木出張所松代分所の藤村技師および松之山現場詰所の樋口氏の手を煩わしましたことをここに記し謝意を表します。

なおこの研究を行なうに当りましては文部省科学研究費補助金をその一部に使用させて頂きました。ここに謝意を表します。

多量の数値計算および図化は京都大学大型計算機センターの FACOM-230-60 を使用して行ないました。

最後に図面作製に当っては倉内洋子氏の手を煩わせたことを記し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 竹内篤雄：地すべり地における地温測定調査について(6)——地すべり地における地温測定調査に関する理論的考察及びその適応限界——，地すべり Vol. 10, No. 1, 1973. 8. pp. 17~34.
- 2) 竹内篤雄：地すべり地における地温測定調査について(4)——地温に関する因子について——地すべり Vol. 9, No. 3, 1973. 1. pp. 13-22.
- 3) 1) に同じ
- 4) 1) に同じ
- 5) 1) に同じ
- 6) 1) に同じ

(原稿受理日 昭和 49 年 4 月 10 日)

新潟支部

地すべり地見学および討論会開催のお知らせ

1. と き 11月14日(木)~15日(金) 11月15日 8:30~12:00 討論会
2. 見学地 松之山地すべり地(新潟県松之山町) 12:00 解 散
3. 集合地 11月14日 9:30 長岡駅裏側 10:00 小千谷駅前
5. 申込み 新潟県砂防課湊元係長あて
・人数に制限がありますので到着順で締切ります(11月7日必着)。
4. 日 程 11月14日 松之山地すべり地見学
湯沢町新湯沢荘泊