<報文・論文>

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

理論的考察およびその適応限界——

Underground Temperature Survey in and around the Landslide Area (6)

——Theoretical study on the underground temperature survey and
the adaptable limit ——

竹 内 篤 雄*

Atsuo TAKEUCHI

abstract

The distributed pattern of underground temperature was controlled pretty strongly by the distributing condition of underground water vein-stream in shallow layer, accordingly the writer examined theoretically the possibility using a simple two-dimensional model. By the results, it was admitted theoretically too. And it was shown that the scale and existing depth of underground water vein-stream could be estimated from $T_x=1-y$ figure obtained in-situe. Surveyable limit of underground water vein-stream could be known from Fig. 15a-d in this paper. Interval of measured points required 5—10 meters in order to survey the underground water vein-stream. The season of execution of underground temperature survey was favorable season that there was three degree difference between underground temperature in one meter depth and underground water temperature.

1. 序

地温測定調査は主として温泉泉源の探査方法の一つとして調査研究が進められて来っており、古くは依田¹⁾、野満・山下^{2),3)}によって大分県の由布院および別府温泉において地下1m地温による温泉地温分布の調査が行なわれている。その後は福富^{4),5)}、須川^{6),7)}、湯原⁸⁾等により地下1m地温測定による温泉源探査についての理論的研究が行なわれて来ている。しかし一方温泉地域以外における浅部地温探査はあまり行なわれた例はなく Kappelmeyer⁹⁾、野村・牧野¹⁰⁾、福岡^{11),12)}等によるものが見られ、主として探鉱の分野で行なわれている程度である。

地すべり地において地温測定調査を行なったのは筆者が1963年に新潟県松之山地すべり地¹³⁾で行なったものが初めてのことと思う。その後、筆者は御殿山(兵庫)、亀ノ瀬(大阪)、神影(兵庫)、上仰木(滋賀)、山神(岐阜)、串林(滋賀)、箱根大湧谷(神奈川)、松之山(新潟)(1971~3)等で同調査法を実施し、地温測定調査の必要性¹⁴⁾および地温分布の意味するもの^{15),16)}、さらに地温分布がいかなる因子によって規制されているか^{17),18)}等について調査研究を進めて来た。その結果、地すべり地内外の地温分布状況は浅層地下水流脈の存在位置に大きく規制されている可能性のあることが明らかにされた。そこで今回はもし地下水流脈の存在により地温分布が規制されているとした場合、理論的にそれは可能であるのか、可能とされた場合、地温分布から地下水流

脈の存在深度、規模は推定できるか、さらに地温測定調査を行なう際の測点間隔の取り方および推定可能な地下水流脈の規模とその深度(探査の限界)等について検討を行なった。

2. 基礎方程式・境界条件とその解

浅層地下水流脈に規制されて地温が変動を生ずるとするならば、この問題に対する理論的考察は地表面の熱抵抗(Newtonの冷却の法則)を考慮した埋設管による地中温度分布の問題(野手1938)¹⁹⁾および地下深部に存在する熱源を地下1m地温分布から求める問題(湯原1955)²⁰⁾を応用して使用することができる。

そこが問題を次のごとく想定して理論的考察を進めることにする。

地中の熱の伝達は熱伝導のみによると考えて地下に熱源が存在するとき、定常状態で地下1m地温の分布がどのように変化するかを検討するのであるが、今、簡単に地表面を無限に広がった平面とみなすと、これは半無限固体中の定常熱伝導の問題となる。熱源の形は板状、円柱状等種々のものが考えられるが、最も簡単な例として、ある太さをもつ無限に長い円筒状の熱源(円柱表面の温度のみを問題として円柱内部の温度は考えないことにするため円筒熱源とした)が地表面と平行に円柱軸を持って地中のある深さに存在すると考える。このとき円柱軸の方向の熱伝導は考えなくてよいから、二次元の問題として取扱えばよいことになる。

今、円柱を垂直に切る断面において、 x 軸を円柱の中

* 京都大学防災研究所助手

図-1 簡単な二次元モデル

心点を通り地表面に垂直に下方にとり、 y 軸を地表面に沿って円柱軸と直角方法にとる二次元の定常状態を取ることにし、地表面上の気温を零の基準温度に選択し、地表面より $b(\text{m})$ の深さに温度 $T_b(^{\circ}\text{C})$ 、半径 $r(\text{m})$ なる円筒状の熱源を考へて、地表面においてはNewtonの冷却の法則が行なわれていると考へる。地表面の伝熱率を h' とし、 $h'/k=h$ とすると、 h の逆数は表面の気体膜が土壌の熱伝導率 k を有すると仮定した場合の気体膜の仮想厚さを示すことになる。求める温度分布を $T(^{\circ}\text{C})$ とすれば、定常伝導方程式および境界条件は次のようになる。

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

$$\left. \begin{array}{l} (b-x)^2 + y^2 = r^2 \text{ において } T = T_b \\ x=0 \text{ において } \partial T / \partial x - hT = 0 \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに

T =温度($^{\circ}\text{C}$)、 T_0 =地表面の温度であり、便宜上零とする。 T_b =円柱表面の温度であり実際は円柱表面の温度と地表面温度との差($^{\circ}\text{C}$)。 b =円柱中心点の深さ(m)、 r =円柱の半径(m)、 $h=h'/k(\text{m}^{-1})$ (h' =地表面の伝熱率、 k =土壌の熱伝導率)

(2)の条件のもとで(1)式を解き、漸近級数で表わすと次式のごとくなる⁸⁾。

$$\begin{aligned} T \approx & \frac{T_b}{\log \frac{b+a}{b-a}} \log \frac{(x+a)^2 + y^2}{(x-a)^2 + y^2} + \frac{4T_b}{\log \frac{b+a}{b-a}} \\ & \times \left[\frac{\cos\left(\tan^{-1} \frac{y}{x+a}\right)}{h\{(x+a)^2 + y^2\}^{1/2}} - \frac{\cos\left(2\tan^{-1} \frac{y}{x+a}\right)}{h^2\{(x+a)^2 + y^2\}} \right. \\ & \left. + \dots\dots + \frac{(-1)^{n-1}(-1) \cos\left(n\tan^{-1} \frac{y}{x+a}\right)}{h^n\{(x+a)^2 + y^2\}^{n/2}} + \dots\dots \right] \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

(3)式の〔 〕内の級数を n 項まで取ったときの最大誤差は

$$\frac{4T_b}{\log \frac{b+a}{b-a}} \cdot \frac{n!}{h^{n-1}\{(x+a)^2 + y^2\}^{n+1/2}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

である。ここで $a = \sqrt{b^2 - r^2}$ (3)式がNewtonの冷却の法則を考慮したときの解である。

次に地表面にNewtonの冷却の法則の適用されない場合つまり地表面が等温($h=\infty$)の場合を考えるとそのときの境界条件は次のごとくである。

$$\left. \begin{array}{l} (b-x)^2 + y^2 = r^2 \text{ において } T = T_b \\ x=0 \text{ において } T = T_0 = 0 \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

この条件で(1)式を解くときの解は次式のごとくなる。

$$T = \frac{T_b}{\log \frac{b+a}{b-a}} \cdot \log \frac{(x+a)^2 + y^2}{(x-a)^2 + y^2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで $a = \sqrt{b^2 - r^2}$

(3)式および(6)式が任意の地点 (x, y) における温度分布を示す解である。

3. 地下水流脈探査の可能性について

2. においてある円筒熱源が地中に埋設されている場合の地温分布に与える影響について二次元の定常熱伝導方程式を2つの境界条件のもとに解いた。これにより任意地点の (x, y) における地温を求めることができる。今、問題とするのは地下1mの地温であるから $x=1\text{m}$ とし、(3)式の漸近級数の第1項のみをとる近似式で表わすと次のごとくなる。

$$\cos\left(\tan^{-1} \frac{y}{x+a}\right) = \frac{(x+a)}{\{(x+a)^2 + y^2\}^{1/2}}$$

であるから、(3)式は次のごとく近似される。

$$\begin{aligned} T_{x=1} = & \frac{T_b}{\log \frac{b+a}{b-a}} \left[\log \frac{(1+a)^2 + y^2}{(1-a)^2 + y^2} \right. \\ & \left. + \frac{4(1+a)}{h\{(1+a)^2 + y^2\}} \right] \quad \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

ここで問題とする事柄は(7)式および(6)式によって与えられる任意地点 $(y, 1)$ の温度がサーミスター型精密温度計(測定精度 0.1°C)により測定できる範囲内のものであるか否かである。

今、図-2に示すように地下10mに中心点を持つ半径3mの地下水流脈が存在し、地温(地下水流脈により影響されていない地温)と地下水流脈の温度(地表面に湧出している地下水の温度または試錐孔内の水温)との差が 10.0°C あるとした場合、地下1m地温はどのように変化するかを(6)式および(7)式を用いて計算して見た。その結査を図-2および表-1に示す。これらの図表を見ても判るように、地下水流脈直上の地下1mにおける温度はNewtonの冷却の法則を考えた場合($h=30\text{m}^{-1}$)

表-1 地下水流脈と地温変化

	0	1	3	5	10	20	30	50
$h=30\text{m}^{-1}$	-1.157	-1.144	-1.051	-0.906	-0.550	-0.214	-0.106	-0.041
$h=\infty\text{m}^{-1}$	-1.123	-1.111	-1.020	-0.878	-0.532	-0.207	-0.103	-0.039

($T_b=-10.0^\circ\text{C}$, $b=+10.0\text{m}$, $r=3.0\text{m}$, $x=+1.0\text{m}$)

この場合の解は(6)式で与えられている。ここで $x=1\text{m}$ とすると(6)式は次のごとくなる。

$$T_{x=1} = \frac{T_b}{\log \frac{(b+a)}{(b-a)}} \cdot \log \frac{(1+a)^2+y^2}{(1-a)^2+y^2} \dots\dots\dots(8)$$

この式で任意の y に対して得られる $T_{x=1}$ の値は T_b , b, a をパラメーターとする y の関数となるが, $T_{x=1}-y$ 図に示される曲線の型は a の値によって変化し, T_b, b は $T_b/\log \frac{(b+a)}{(b-a)}$ として $T_{x=1}$ 軸に平行方向に曲線を伸縮する倍率としてかかるだけである。したがって

$$z \equiv \log \frac{(1+a)^2+y^2}{(1-a)^2+y^2} \dots\dots\dots(9)$$

において $z-y$ 図を描くと図-3(a)のごとくなる。 $z=f(a, y)$ は y に関する偶関数であり $|y_i|$ が増大するにつれて単調減少を示し, しかも変曲点は1つしかない。変曲点の y 座標を y_i とすると

$$\frac{d^2z}{dy^2}=0 \text{ により} \\ a^4-2a^2(1+y_i^2)-2y_i^2-3y_i^4+1=0 \dots\dots\dots(10)$$

ゆえに a, y_i 共に実数で a は正であるから

$$|y_i| \geq 1 \text{ のとき} \\ a = \sqrt{3} |y_i| \dots\dots\dots(11)$$

すなわち $z=f(a, y)$ の変曲点がわかればその曲線のパラメーターである a は決まることになる。しかし y_i

図-2 ある地下水流脈の1m深地温に及ぼす影響 (半径=3.0m, 中心軸存在深度=10.0m 温度差=10.0°C, $h=30\text{m}^{-1}$ and ∞m^{-1})

で, 1.157°C , Newton の冷却の法則を考えない場合 ($h=\infty\text{m}^{-1}$) で 1.123°C の温度変化が存在する。この温度変化量は現在使用中のサーミスター型精密温度計で充分測定できるものである。しかも表-2に示すように地下水流脈の中心軸より y 方向へ 30m 離れた所でも温度変化は 0.1°C 存在し, この地下水流脈による地温変化はかなりの幅を持って検出できることが判る。

以上の例により地下1m地温を測定することにより地下水流脈は探査できる可能性のあることが示された。

4. 1m 深の地温分布 ($T_{x=1}-y$ 図) から地下水流脈の存在深度, 水脈の大きさを推定する方法

(7)式で与えられた式は熱源と地表面の条件に対して任意の点 (x, y) の温度を示すものである。われわれが一番得たいと考えている事柄は x が一定 (ここでは1m) で任意の y に対する地温分布が実測により得られたときに適当な地表面の条件を考慮して熱源の存在深度および大きさ等に関する情報を得ることである。この問題に関しては湯原²⁰⁾によりすでに温泉流脈の探査に関連して研究がなされている。

- i) 地表面が等温で Newton の冷却の法則を考えなくてよい場合:

図-3(a) $z-y$ 図 (地表面等温の場合)

を正確に $z-y$ 図 (実際上は $T_{x=1}-y$ 図) から読み取
 ことは難かしいため、 y_i をより正確に求めるために
 次のようにする。

(8)式において $y=0$ の場合

$$T_{x=1} = \frac{T_b}{\log \frac{(b+a)}{(b-a)}} \cdot \log \frac{(1+a)^2}{(1-a)^2} \dots\dots\dots(12)$$

また $y=y_i$ において

$$T_{x=1} = \frac{T_b}{\log \frac{(b+a)}{(b-a)}} \cdot \log \frac{(1+a)^2 + y_i^2}{(1-a)^2 + y_i^2} \dots\dots\dots(13)$$

(13)式を(12)式で除し、(11)式を考慮すると

$$\frac{T_{x=1}}{T_{x=1}} = \frac{\log \frac{(1+a)^2 + y_i^2}{(1-a)^2 + y_i^2}}{\log \frac{(1+a)^2}{(1-a)^2}} = \frac{\log \frac{1+2a/(1+\frac{4}{3}a^2)}{1-2a/(1+\frac{4}{3}a^2)}}{2 \log \frac{1+1/a}{1-1/a}}$$

$a \gg 1$ のときは

$$\frac{T_{x=1}}{T_{x=1}} = \frac{2 \times \frac{2a}{1+4/3 \cdot a^2}}{2 \times 2 \frac{1}{a}} = \frac{4}{3}$$

ゆえに

$$T_{x=1} = \frac{3}{4} T_{x=1} \dots\dots\dots(14)$$

つまり実測により得られた $T_{x=1}-y$ 図において $T_{x=1}$
 が判れば(14)式から $T_{x=1}$ が判り、それに相当する y_i
 を読み取ることができる。さらに(11)式から a を知ること
 ができる。

次に(12)式より

$$\log \frac{b+a}{b-a} = \frac{T_b}{T_{x=1}} \cdot \log \frac{(1+a)^2}{(1-a)^2} \dots\dots\dots(15)$$

であるから、 T_b がわかれば、 b が求まり、熱源の半径、
 熱源の上端の深度は各々 $\sqrt{b^2 - a^2}$ 、 $b - \sqrt{b^2 - a^2}$ と
 して求められる。ここで T_b は一般に未知であるが熱源
 を地下水流脈と考えると、 T_b の取るべき範囲は限られ
 てしまう。付近に湧水または試錐孔が存在すればその水
 温を考慮して適当な温度を推定すればよい。逆に熱源の
 深さ、半径、熱源の上端の深度のうちどれか一つがなん
 らかの方法により推定されれば、他の二つおよび熱源の
 温度は推定できる。われわれは地表面を基準温度とし
 て問題を取り扱っているので、1 m 深の地温 $T_{x=1}(y)$ は
 地表面温度との差として表わされているはずである。し
 かし、ここでは地下に特殊な熱源 (ここでは地下水
 流脈) が存在する場合にその特殊な熱源により生じる温
 度について論ずれば良いので、地下に熱源が存在しない
 場合の地下 1 m の地温を基準として選べば充分である。

ii) 地表面において Newton の冷却の法則が適応され
 る場合:

この場合の解は(3)式で与えられ、その近似解として(7)
 式を用いる。地表面が等温である場合と同様に、

$$z \equiv \log \frac{(1+a)^2 + y^2}{(1-a)^2 + y^2} + \frac{4(1+a)}{h\{(1+a)^2 + y^2\}} \dots\dots\dots(16)$$

に着目して $z-y$ 曲線 (図-3(b)) の変曲点の y 座標を
 y_i とすれば、 $a, |y_i| \gg 1$ であるからこの場合にも

$$a \doteq \sqrt{3} |y_i|$$

$$T_{x=1} = \frac{3}{4} T_{x=1}$$

となる。また

$$T_{x=1} = \frac{T_b}{\log \frac{(b+a)}{(b-a)}} \cdot \left(\frac{4}{a} + \frac{4}{ah} \right) = \frac{4T_b}{a \log \frac{(b+a)}{(b-a)}} \cdot \left(1 + \frac{1}{h} \right) \dots\dots\dots(17)$$

とかけるから h の値がわかれば適当な T_b を選ぶこと
 により b を求めることができる。ここに h は地表面にお
 ける Newton の冷却係数 h' をその土地の熱伝率 k で割
 ったものである。ここに Newton の冷却係数 h' は地表
 面の状況により左右されるものであるため実験により決
 めるべきものである。また土地の熱伝率 k に関しても
 上述の理論が地下を一律な媒質とみなして取扱っている
 ため、地表近くの土の熱伝率をそのまま使用すること
 はできない。そこで筆者は現地で求めた熱伝率 k を用
 いて h を求めたところ $h=10 \text{ m}^{-1} \sim 30 \text{ m}^{-1}$ の範囲であ
 った²¹⁾。

図-3(b) $z-y$ 図(Newton の冷却の法則を考慮した場合)

5. 地温測定による地下水流脈推定法の限界について

地下 1 m 深の地温測定による地下水流脈推定の可能性が 3. で示されたので、地すべり地内外において同調査法を実施する場合どの程度までの地下水流脈が推定できるかその限界について検討すると共に、地温調査を行なう場合の測点間隔に関する検討を行なった。

まずこの検討を行なうに際しては Newton の冷却の法則を考慮した近似解(7)式を用いて行なうことにし、地表面が等温の場合は(6)式において $x=1$ m を代入して用いることにした。また(6)、(7)式の計算を行なう際の諸数値は同調査法の適応限界を見るという意味を含めて各々一般的と考えられる数値範囲より大きな範囲を取ることとした。

- ・地下水流脈の半径 (r) : 1~50 m
- ・地下水流脈中心点の存在深度 (b) : 2~150 m
- ・中心軸と直交する測線の長さ (y) : 0~190 m
- ・地下水温と 1 m 地温との差 (T_b) : 10 °C
- ・Newton の冷却法則の係数 (h) : 10, 20, 30, ∞ m⁻¹

これらの諸数値を用いて計算した結果の一部を表-2および図-4に示す。表-2は $x=1$ m, 温度差 $T_b=10.0$ °C,

$h=10.0$ m⁻¹, 水脈半径 $r=5$ m の場合であり、横方向に中心軸からの水平距離 y を取り、縦方向に水脈中心軸の存在深度 b を取っている。表中線を引いてあるのは半径 5 m, 温度差 10.0 °C を有する水流が地下 1 m 地温に 0.1 °C の変化を与えるに必要な最低中心軸存在深度を示したもので、 $y=0\sim 24$ m までは $b=60$ m, y が 26~32 m までは $b=50$ m であることが示されている。この表の一部を図化したものが図-4である。この図は半径 5 m, 温度差 10.0 °C の水流の中心軸が地下 12~20 m の間に存在する場合の地下 1 m 地温に与える影響を示したものである。 $y=23$ m 以上になるとどの深度に中心軸が存在してもほとんど地下 1 m 地温には影響を与えないことが示されている。一方水脈中心軸直上 ($y=0$ m) では 1.32~0.55 °C の温度変化を及ぼすことが判る。

このような図表を種々の条件の場合において作製し、それを基にして種々の整理を行なった。

A-type : r をパラメーターとし、 b を増大したときはどう変化するかを示すもので、ある半径を有する地下水流脈がその中心軸の存在深度を増大してゆくと、温度変化が 0.2 °C 以下になり探査不能となる深さを知るとき用いるものである。これを種々の y の値に

図-4 表-2の一部(深度12~20m)を図化したもの

表-2 計算結果の一部 (半径=5 m, 温度差=10.0°C, $h=10.0 \text{ m}^{-1}$ の場合)

$X=1.0$	$TB=10.0$	$H=10.0$	$R=5.0$	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	10.000
6.0	0.0	10.0	12.0	0.127	9.739	7.682	5.753	4.280	3.231	2.491	1.961	1.576	1.289
7.0	5.460	4.946	4.402	3.728	3.728	3.728	3.728	3.728	2.061	1.699	1.413	1.187	1.008
8.0	3.345	3.260	3.030	2.712	2.036	1.740	1.486	1.272	1.093	0.946	0.814	0.706	0.618
9.0	2.449	2.406	2.285	2.102	1.904	1.693	1.492	1.309	1.147	1.006	0.884	0.782	0.696
10.0	1.917	1.892	1.820	1.711	1.580	1.438	1.297	1.162	1.032	0.915	0.808	0.718	0.636
12.0	1.317	1.306	1.275	1.225	1.162	1.089	1.012	0.935	0.858	0.786	0.722	0.674	0.627
14.0	0.991	0.985	0.968	0.941	0.906	0.865	0.819	0.771	0.722	0.674	0.627	0.580	0.536
16.0	0.787	0.783	0.773	0.757	0.736	0.710	0.685	0.659	0.634	0.609	0.584	0.559	0.536
18.0	0.648	0.646	0.640	0.629	0.615	0.598	0.581	0.565	0.549	0.534	0.518	0.502	0.486
20.0	0.548	0.547	0.543	0.536	0.526	0.514	0.501	0.489	0.477	0.465	0.453	0.441	0.433
22.0	0.473	0.472	0.469	0.464	0.457	0.449	0.442	0.435	0.428	0.421	0.414	0.407	0.403
24.0	0.415	0.414	0.412	0.408	0.403	0.397	0.390	0.381	0.374	0.367	0.362	0.357	0.351
26.0	0.368	0.368	0.366	0.363	0.360	0.355	0.349	0.343	0.336	0.330	0.328	0.320	0.315
28.0	0.331	0.330	0.329	0.327	0.324	0.320	0.316	0.311	0.305	0.303	0.299	0.292	0.287
30.0	0.299	0.299	0.298	0.296	0.294	0.291	0.287	0.283	0.279	0.274	0.269	0.265	0.262
35.0	0.241	0.240	0.240	0.239	0.237	0.236	0.234	0.231	0.228	0.225	0.222	0.220	0.218
40.0	0.200	0.200	0.199	0.199	0.198	0.197	0.195	0.194	0.192	0.190	0.188	0.186	0.184
45.0	0.170	0.170	0.170	0.169	0.169	0.168	0.167	0.166	0.165	0.163	0.162	0.161	0.160
50.0	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.146	0.145	0.144	0.143	0.142	0.141	0.140	0.139
60.0	0.116	0.116	0.116	0.115	0.115	0.115	0.114	0.113	0.113	0.112	0.111	0.110	0.109
70.0	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093
80.0	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079	0.078	0.078	0.078
90.0	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068
100.0	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060
110.0	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
120.0	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
130.0	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043
140.0	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039
150.0	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
6.0	12.000	14.000	16.000	18.000	20.000	22.000	24.000	26.000	28.000	30.000	32.000	34.000	36.000
7.0	0.770	0.578	0.449	0.359	0.293	0.253	0.225	0.205	0.181	0.157	0.132	0.116	0.100
8.0	0.746	0.511	0.450	0.362	0.302	0.259	0.221	0.196	0.176	0.157	0.137	0.121	0.105
9.0	0.720	0.511	0.449	0.362	0.302	0.259	0.221	0.196	0.176	0.157	0.137	0.121	0.105
10.0	0.691	0.500	0.445	0.366	0.306	0.263	0.225	0.199	0.179	0.160	0.140	0.123	0.107
12.0	0.599	0.501	0.457	0.384	0.324	0.281	0.243	0.217	0.197	0.178	0.158	0.141	0.125
14.0	0.540	0.484	0.440	0.374	0.314	0.271	0.233	0.207	0.187	0.168	0.148	0.131	0.115
16.0	0.486	0.427	0.375	0.329	0.290	0.256	0.227	0.202	0.180	0.162	0.144	0.127	0.111
18.0	0.438	0.393	0.350	0.312	0.279	0.249	0.223	0.200	0.180	0.162	0.144	0.127	0.111
20.0	0.397	0.361	0.327	0.295	0.266	0.240	0.217	0.197	0.178	0.160	0.142	0.125	0.109
22.0	0.351	0.320	0.304	0.278	0.254	0.232	0.212	0.192	0.176	0.158	0.140	0.123	0.107
24.0	0.329	0.307	0.284	0.262	0.241	0.222	0.204	0.187	0.172	0.155	0.138	0.121	0.105
26.0	0.302	0.284	0.265	0.246	0.229	0.212	0.196	0.181	0.168	0.155	0.141	0.127	0.113
28.0	0.278	0.263	0.248	0.232	0.217	0.202	0.188	0.175	0.163	0.152	0.141	0.130	0.120
30.0	0.257	0.245	0.232	0.219	0.206	0.193	0.181	0.169	0.158	0.148	0.138	0.130	0.121
35.0	0.215	0.207	0.198	0.190	0.181	0.172	0.163	0.154	0.146	0.138	0.130	0.121	0.113
40.0	0.183	0.178	0.172	0.166	0.159	0.153	0.146	0.140	0.134	0.127	0.121	0.113	0.105
45.0	0.159	0.155	0.151	0.146	0.142	0.137	0.132	0.127	0.122	0.117	0.113	0.105	0.097
50.0	0.139	0.137	0.134	0.130	0.127	0.123	0.120	0.116	0.112	0.109	0.105	0.097	0.090
60.0	0.111	0.110	0.108	0.106	0.104	0.102	0.100	0.097	0.095	0.092	0.090	0.088	0.086
70.0	0.092	0.091	0.090	0.089	0.087	0.086	0.085	0.083	0.081	0.080	0.078	0.076	0.074
80.0	0.078	0.077	0.076	0.076	0.075	0.074	0.073	0.072	0.071	0.070	0.068	0.066	0.064
90.0	0.067	0.067	0.066	0.066	0.065	0.064	0.064	0.063	0.062	0.061	0.061	0.060	0.059
100.0	0.059	0.059	0.058	0.058	0.057	0.057	0.056	0.056	0.055	0.055	0.054	0.054	0.053
110.0	0.052	0.052	0.052	0.051	0.051	0.051	0.050	0.050	0.050	0.049	0.049	0.049	0.048
120.0	0.047	0.047	0.047	0.046	0.046	0.046	0.046	0.045	0.045	0.045	0.044	0.044	0.043
130.0	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.040	0.039
140.0	0.039	0.039	0.039	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038	0.037	0.037	0.036
150.0	0.036	0.036	0.036	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.034	0.034	0.033

 $X = 1.0$ $TB = 10.0$ $H = 10.0$ $R = 5.0$

ついて図化した。

B-type : b をパラメーターとして r を変化させた場合に T はどう変化するかを図示したもので、ある一定深度に中心軸を持つ地下水流脈がその半径を変化させたとき (つまり地

下水流脈の盛衰に応じて) 温度変化がどう変わるかを知るときに用いるもので、これを種々の y の値について図化した。

C-type : A type と B type の結果により b と r の関係を y をパラメーターとして描いたもの

図-5 A-type ($y=0$ m)

図-6 A-type ($y=5$ m)

で、ある半径を有する地下水流脈が地下1m地温に与える影響が温度変化0.2℃以上になるには中心軸の存在深度が何m以浅になる必要があるかを示したものである。

以上各 type の図を Newton の冷却の法則に関する係数 h を種々に変化させた場合について描いたが、ここでは $h=10\text{ m}^{-1}$ の場合を取り上げて見る。

A-type : $y=0$ つまり地下水流脈中心軸の直上で地温を測定した場合、図-5に示すように半径 $r=1\text{ m}$ のとき

は深度 $b=10\text{ m}$ で温度変化 $T=0.73\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、20 m で $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、30 m で $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度変化を示す。 $r=5\text{ m}$ になると、 $b=10\text{ m}$ で $T=1.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、20 m で $0.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、30 m で $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度変化を示す。 $r=30\text{ m}$ の大きなものを考えると $b=40\text{ m}$ で $T=1.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、50 m で $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、さらに 70 m になっても $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度変化を示すことが判る。図-5によればいずれの半径を有する地下水流脈でも深度 27 m 以浅に中心軸が存在すれば、 $y=0$ においては $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上の温度変化を示すことが判る。

図-7 A—type ($y=10\text{ m}$)

図-8 A—type ($y=22\text{ m}$)

$y=5\text{ m}$ つまり地下水流脈の中心軸より 5 m はなれた測点においては、図-6に示すように半径 r が小さく中心軸の存在深度が浅い所では地下 1 m 地温に及ぼす温度変化の様子が小さくなっている点を除くと $y=0$ の場合とほぼ同じである。

$y=10\text{ m}$ つまり地下水流脈の中心軸より 10 m はなれた測点においては、図-7に示すように、小さな半径($1\sim 3\text{ m}$)をもつ水脈では中心軸の存在深度 $6\sim 7\text{ m}$ で最高

温度変化を示し、その深度を境として温度変化は小さくなっている。

$y=22\text{ m}$ つまり地下水流脈中心軸から 22 m はなれた測点においては、図-8に示すように、 $1\sim 3\text{ m}$ の半径を有する地下水流脈はどのような深度に中心軸が存在しても地下 1 m 地温に及ぼす温度変化は 0.2°C 以下であるため、このように小さな地下水流脈の中心軸から 22 m はなれた測点では、その水脈による温度変化は把える

図-10 B-type ($y=0\text{ m}$)

ことができないことになる。

さらに測点を地下水流脈の中心軸から 50m はなした場合は図-9に示すように、半径 20m の地下水流脈でさえもどのような深度に中心軸が存在しても地下 1m 地温に及ぼす温度変化は 0.2°C 以下になってしまう。

B-type : $y=0$ においては深度 $b=35\text{ m}$ を例にとるとこの深度に地下水流脈の中心軸が存在する場合、その半径が 4m 以上あるときは温度変化 0.2°C 以上を地下 1m 地温に与えるが、それ以下になると温度変化 0.2°C 以下になり探査不能になる (図-10)。 $y=5\text{ m}$ の場合も図-11に示すように $y=0$ の場合とほぼ同様である。

一方 $y=7\text{ m}$ になると浅い深度に存在する地下水流脈は図-12に示すようにどの規模をもつものでも温度変化がかなり低下してくることが判る。 $y=22\text{ m}$ になると半径 3m 以下の地下水流脈はどの深度においても温度変化は 0.2°C 以上になることはなく、深度 45m の場合は半径 10m 以下に地下水流脈が衰弱すると温度変化は 0.2°C 以下になり探査不能となる (図-13)。 $y=50\text{ m}$ になると深度 30m 以浅に存在する地下水流脈は計算条件下の元においてどのようにその規模を変化させても、もはや地下 1m 地温に対し 0.2°C 以上の温度変化を及ぼすこともなく探査はできなくなる (図-14)。

図-11 B-type ($y=5\text{ m}$)

図-12 B-type ($y=7\text{ m}$)

図-13 B-type ($y=22\text{ m}$)

図-14 B-type ($y=50\text{ m}$)

C-type : A-type, B-type において, b, r を各々変数, r, b をパラメーターとして種々の Y における温度変化について検討したので, 次に両者を合わせて b と r との関係を Y をパラメーターとして描いて見た (図-15 (a~d))。これはある半径を有する地下水流脈が地下

1 m 地温に与える影響が温度変化 0.2°C 以上になるには中心軸の存在深度が何 m 以浅にある必要があるかを示すものである。この図を Newton の冷却の法則に関する係数 h を種々の値に変化させて描いたが, ここでは $h = 10\text{ m}^{-1}$ を例に取ってのべる。図-15 a~d を使用する

図-15(a) C—type ($h=10.0\text{ m}^{-1}$)

図-15(b) C—type ($h=20.0\text{ m}^{-1}$)

$$Tb \cong 0.20^{\circ}\text{C}$$

$$X = 1 \text{ m}$$

$$H = 30.0 \text{ m}^{-1}$$

図-15(c) C—type ($h=30.0 \text{ m}^{-1}$)

$$Tb \cong 0.20^{\circ}\text{C}$$

$$X = 1 \text{ m}$$

$$H = \infty \text{ m}^{-1}$$

図-15(d) C—type ($h=\infty \text{ m}^{-1}$)

ことにより、地温測定による地下水流脈探査の限界についての知識を得ることができる。つまり半径 $r=1\text{ m}$ の地下水流脈は深度 27 m になると、その中心軸直上においても温度変化は 0.2°C 以下になり探査不能になる。また中心軸の深度が 20 m であっても、 $y=14\text{ m}$ になると温度変化は 0.2°C を下まわってしまう。半径 $r=5\text{ m}$ の地下水流脈を考えると中心軸直上では深度 40 m に中心軸が存在しても温度変化は 0.2°C 以上を示すが、 $y=30\text{ m}$ になると中心軸存在深度 $b=18\text{ m}$ になるともはや 0.2°C 以上の温度変化は示さなくなる。さらに半径 $r=30\text{ m}$ の大きな地下水流脈について考えると中心軸上では深度 75 m に中心軸が存在してもなお 0.2°C 以上の温度変化を示し、 $y=50\text{ m}$ になっても中心軸存在深度が 48 m あれば温度変化は 0.2°C 以上存在することが示されている。

このように C-type の図を用いることにより任意の半径を有する地下水流脈の探査限界深度を知ることができると共に、ある半径を有する地下水流脈を探るに必要な測点間隔を決めるためにもこの図を用いることができる。つまりある程度大きな地下水流脈の存在を探査したいときにあまり細かな測点間隔を設けると、小さな地下水流脈の影響による温度変化が入り込むため大きな地下水流脈の影響による温度変化が乱される可能性がある。このようなときはある程度大きな測点間隔を設けて小さな地下水流脈の影響によって生ずる温度変化を除く必要がある。したがって測点間隔を適当に決めることにより不必要な地下水流脈により生ずる noise を除くことができ、一種の filter の役目を持たせることができる。

次に地下水流脈を探査するに必要な測点間隔について検討する。現在使用中のサーミスター型精密温度計はその精度が 0.1°C であるが安全にみて 0.2°C 以上の温度変化が存在すればそれを把えるとする。さらに地下水流脈の規模を推定するためには、4.でのべた方法を用いて行なうのであるが、このためには正確な $T_{x=1}-y$ 図を描く必要がある。そこで図-16に示すように中心点を含めて最低5測点は地下水流脈の存在による温度変化を受ける必要があると仮定する。このような仮定を設ければ C-type の図を用いることにより容易に最低限必要な測点間隔を決めることができる。たとえば $T_b=10.0^\circ\text{C}$ 、 $r=5\text{ m}$ 、 $b=15\text{ m}$ の地下水流脈を探査したいときは C-type の図によれば $y=26\text{ m}$ まではなれても温度変化はなお 0.2°C 以上あるので、一応最低限必要な測点間隔は 13 m となる(図-17)。したがってこの場合は測点間隔 10 m の測線を設けて地下 1 m 地温を測定すればよいことになる。地すべり地内外で今日まで試験孔等を利

図-16 $T_{x=1}-y$ 図を描くに必要な測点間隔

図-17 測点間隔の決め方の例

1: 最低限必要な測点間隔 2: 理想的な測点間隔

図-18 測点間隔の決め方の例 (半径=7.0 m, 温度差=10.0°C, 深度=12~20 m, $h=10.0 \text{ m}^{-1}$ の場合)

用し行なった地下水流層検層の結果によると地下水流脈上に都合よく試錐が掘られた場合、地下水流脈の半径は5~10 m 前後のものが多く見うけられる。そこで一応この規模前後の地下水流脈を探索するのに必要な測点間隔を求めると5~10 m となる。図-18に $r=7 \text{ m}$, $T_0=10.0^\circ\text{C}$, $h=10.0 \text{ m}^{-1}$ で、 $b=12\sim 20 \text{ m}$ に変化したときの温度変化状況を示したが、この図に見られるごとく測点は5~10 m 間隔に設ければ充分であることが判る。

6. 地温測定調査の実施時期

地下水温と地温との差は一応湧出している地下水あるいは試錐孔内の地下水の水温を測定し、地下1 m 地温には地下水の影響していないと考えられる場所の地温を基準にして決めている。地温探索はこうに地温と地下水温との差を利用して行なっているため、その差があ

る程度小さくなると地下水流脈の存在による地下1 m 地温の変化が微少になりサーミスター型精密温度計を使用してもそれを検出できなくなる時節が存在するはずである。この点を見出す目的で松之山地すべり地において1971年~1973年にわたり調査したところ 図-19に示す結果が得られた。この図を見ると、平均地温と地下水温との差は9月中旬に最高になりその差は7~10°Cに達する。この時期を頂点として地温と地下水温との差は急速に減少している。つまり地温測定調査を行なう時期としては9月が最も適していることになる。地下水温は図-19に実線で示したようにあまり大きな変動はなく8月下旬に最高水温を示している。一方地温はその振幅が大きいため、地温測定調査の最適時は地温により規制されていることが判る。図には7月~2月の間の値しか示していないので春季の地温測定の可能性について言及することは

図-19 地下1m地温と地下水温との差(新潟県松之山) Δt : 温度差(°C) T_u : 地下1m地温(°C) T_w : 地下水温(°C) 1: 地下水温 2: 地温と地下水温との差 3: 探査不適範囲(●, ×, △: 各地下水温測定場所を示す記号)

できないが、7～2月の間は地温と地下水温との差は7～11月および2月は3度以上存在するのでこの期間内では地温測定による地下水流脈推定は表-2の値を3分1すれば判るように可能である。図-19のグラフにおいて3月から6月の間を推測により補充して見ると、地下1m地温と地下水温とが等しくなる時期は6月と12月付近に存在するらしい。したがってこれらの時期を含めて両者の差が $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内の場合は地温測定による地下水流脈の推定はできないことになる。ちなみに1973年1月上旬に測定した地下1m地温と地下水温との差は -1.7°C であるのに対し、2月中旬に測定した結果ではその差は -5.4°C にもなっており2月になれば地温測定による地下水流脈探査は可能となることが示されている。そして図-20に示すように、地下1m地温と地下水温との関係は夏～秋期とは逆になり、地下水流脈の存在する場合は地温が周辺より高くなっていることが示されている。

7. 地下水流脈推測の実例

地温測定調査による地下水流脈探査をいくつかの地すべり地で実施して来おり各々成果を挙げている。ここでは岐阜県土岐市山神に位置する山神地すべり地で行なった例をのべる。

山神地すべり地は昭和37年ころから活動をはじめ昭和

図-20 地温測定の例(新潟県・松之山)

40年台地頂上部に陥没を生じ、それから台地周辺部の活動が活発となった地すべりである。当地すべり地では建設省を主体として諸調査観測がなされていたが、昭和42年より筆者もその一部に参加し、地下水調査を実施した²³⁾。この中で地温測定調査を行なったのでその結果についてのべる。

当地すべり地内外の地下水の存在状況は電気探査、地下水追跡調査等の結果によると砂礫層あるいは砂層中に流脈状に存在していることが推測された。そこでこの地下水流脈の存在位置を推測するために図-21に示す地域を含めて南西斜面一帯において地温測定調査を行なった。図に示すのはその一部でこの地域は地すべり南西斜面の南部に属しており、試錐孔 No. 2 からは深度12～13mより硅砂を含む地下水が多量に自噴しているのが見られる。この地下水の一部は北東方向から流下していることが地温測定調査および地下水追跡調査から確認されているが、地形的に見て南方向に存在する谷から流入する水も相当含まれていると考えられたのでこの点を確認するために鉄道線路の南方にある試錐孔 No. 8 付近から北西方向にA～Dの4測線を設け、測点間隔5mで地下1m地温を測定した。実施したのは1968.12.1で湧水の温度は 8.10°C であり地下1m地温は 12.59°C を示しており、その差は 4.49°C であった。また小川の水温は 4.0°C であった。地況はすべて草地である。測定結果は図-21に示してある。これを見ると鉄道南方のA測線の小川に地温低下が認められ、その低下部はB測線からC測線にかけて小川によるものとB-2孔付近の二手に分かれさらにD測線においても小川の付近とB-2孔から真す

図-21 地温測定調査の例 (岐阜県・山神)

ぐに北西方向に向かう部分の2箇所において地温低下が認められる。A, B測線およびC, D測線の南西側の地温低下は地下1m地温と小川の水温とから考えて明らかに温度の低い小川による地温の低下であると考えられる。一方C, D測線の北東側の地温低下については地温と地下水温との関係を見ると、そこに地下水流脈が存在するとなると地温は低下することが考えられるので、この地温低下は地下水流脈によるものであろうと推測した。この点を実証する目的で試錐孔 No.8 に NaCl 溶液を注入して地下水追跡を行なったところ北西方向に存在する試錐孔 No.2 およびさらに北西に位置する No.7 の試錐孔にも 10^{-1} cm/sec の流速をもつ地下流脈が存在することが認められた。このことにより No.2 試錐孔に湧出している地下水は地すべり地内から流下してくるもののみではなく南方小川からの水も加わっていることが明らかにされると共に、地温測定による地下水流脈推定の可能性も実証されたことになる。なお今回確認された地下水流脈の存在する位置は以前小川がB測線の低温部からC, D測線の地下水流脈によって生じた地温低下部に沿って流下していたといわれ、鉄道建設のときに現在の小川の流路に変更されたそうである。したがって今回検出した地下水流脈は昔の小川沿いにある伏水流脈であると考えられる。図-21中のC測線に示された地下水流脈による地温低下部を使用して地下水流脈の規模を4.にのべた方法を用いて推定して見た。その結果図-22に

図-22 地下水流脈推定の例 (岐阜県・山神)

示すように地下約13mのところを中心軸をもつ半径約11mの地下水流脈の存在が推測された。

8. 結 語

地下1m地温測定による地すべり地内外の地下水流脈探査の可能性につき検討したところ次の点が示された。①二次元の簡単なモデルを考えて理論的に考察した結果、現在使用中の温度計により充分検出できる温度変化の存在することが示された。②現地地で得られた $T_{x=1}-y$ 図を用いることにより、適当な T_b および h の値を与えれば地下水流脈の存在深度とその規模が推定できる。③地下1m地温測定による地下水流脈探査の限界は図-15を用いることにより知ることができる。④地すべり地内外に存在する地下水流脈 ($r=5\sim10$ m) を探査するに必要な測点間隔は5~10cmである。⑤地温測定調査の実施時期に対する制約は松之山地すべり地を例にとると図-19に示すごとく9月を最適とし、6, 12月を不適としてゐる。つまり地下水温と地下1m地温との差が小さいときは探査不能となる。

以上の論議は $T_b=10.0^{\circ}\text{C}$ を主体として行なったものであるが T_b が 10.0°C でないときは適当な T_b の値に応じて A-type, B-type の図を描き、それを用いて C-type を作製すれば、ある T_b に応じた探査限界が出て来るが、この点に関しては別に発表する予定である。

謝 辞

本論文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、感謝の意を表します。また松之山地すべり地の調査に当りましては新潟県土木部砂防課 湊元氏に大変お世話になりました。また山神地すべり地の調査に対しましては当時の岐阜県砂防課の方々および建設省多治見土木事務所の方々に大変お世話になりました。ここに記し謝意を表します。

理論計算を行なうに際しては京都大学大型計算センターの電子計算機 FACOM—230—60 を使用しました。

最後に小論文の清書ならびに図・表作製に当りましては倉内洋子氏の手を煩わせましたことを記し謝意を表します。

文 献

- 1) 依田和四郎：由布院温泉地帯の地温分布，地球物理 Vol. 1, No. 4, 1937. 10, pp. 285~304.
- 2) 野満隆治，山下 馨：別府市市内の地中温度分布と温泉脈，地球物理，Vol. 2, No. 3, 1938. 11, pp. 233~259.
- 3) Nomitu, T., Yamashita, K.: Distribution of the Subterranean Temperature and the Hot Spring Veins in the Old City of Beppu, the Memoris of the College of Science, Kyoto Imp. Univ., Series A, Vol. XXIII, No. 3, 1940.
- 4) 福富孝治：1 m 深の地中温度分布より温泉探査の可能性について（第1報），北大地球物理学研究報告 No. 1, 1951. 12, pp. 21~34.
- 5) 福富孝治：1 m 深地温についての 2, 3 の問題，北大地球物理学研究報告，No. 8, 1961. 3, pp. 45~53
- 6) 須川 明：各種熱源による 1 m 深の地温分布（その 1），北大地球物理学研究報告，No. 8, 1961. 3, pp. 37~49.
- 7) 須川 明：各種熱源による 1 m 深の地温分布（その 2），北大地球物理学研究報告，No. 9, 1962. 3, pp. 22~32.
- 8) 湯原浩三：引湯管による地中温度の分布と引湯の冷却，地球物理，Vol. 9, No. 2, 1951, pp. 137~148.
- 9) Kappelmeyer, O.: The Use of Near Surface Temperature Measurements For Discovering Anomalies Due to Causes at Depth, Geophysical Prospecting, Vol. 5, No. 3, 1957. 9, pp. 239~258.
- 10) 野村四一，牧野直文：地温探鉱の予備的実験結果について，日本鉱業会誌，Vol. 74, No. 839, 1958. 5, pp. 271~276.
- 11) 福岡義隆：東京西郊外における地温観測及び地温に関する統計的研究（第1報），地理学評論，Vol. 39, No. 2, 1966. 2, pp. 103~117.
- 12) 福岡義隆：東京西郊外における地温観測及び地温に関する統計的研究（第2報），地理学評論，Vol. 40, No. 11, 1967. 11, pp. 644~653.
- 13) 山口真一，高田雄次，竹内篤雄：松之山地すべり地の地下水観測について，京大防災研究年報，No. 8, 1965. 3, pp. 567~577.
- 14) Takeuchi, A.: Underground Temperature Survey in and around the Landslide Area—1—, Bulletin of the D. P. R. I. of Kyoto Univ. Vol. 21, No. 3, 1972, 1, pp. 201~216.
- 15) 竹内篤雄：地すべり地における地温測定調査について(2)，地すべり，Vol. 8, No. 4, 1972. 4, pp. 29~37.
- 16) 竹内篤雄：地すべり地における地温測定調査について(3)，地すべり，Vol. 9, No. 1, 1972. 7, pp. 32~37.
- 17) 竹内篤雄：地すべり地における地温測定調査について(4)，地すべり，Vol. 9, No. 3, 1973. 1, pp. 13~22.
- 18) 竹内篤雄：地すべり地における地温測定調査について(5)，地すべり，Vol. 9, No. 4, 1973. 5, pp. 9~16
- 19) 野平悌士：地表面の熱抵抗を考慮した埋設管による地中温度の分布について，日本機械学会誌，Vol. 41, 1938. 1, pp. 11~13.
- 20) 湯原浩三：地下 1 m 深の地温分布から地下熱源を理論的に推定する一方法，物理探鉱，Vol. 8, No. 1, 1955. 3, pp. 27~33.
- 21) 防災研究協会：松之山地すべり調査報告書，1973. 3，
- 22) 防災研究協会：山神地すべり地調査報告書，1969. 3，

(原稿受理 昭和48年6月11日)