

上嵯峨地すべり地の地下水について (続)

中 川 鮮・島 通 保

ON THE GROUND WATER IN KAMISAGA LANDSLIDE AREA (Part 2)

By Akira NAKAGAWA and Michiyasu SHIMA

Synopsis

In the first report¹⁾ we discussed on the behavior of the groundwater in the Kamisaga landslide area. In this paper we describe the same points of discussion about the variation of the groundwater in this landslide area from a few experimental data on 1977. The results in agreement with the those of the first report were obtained experimentally. The correlation was observed between the volume fluctuation of the actual water bearing mass and the 7 days rainfall.

1. ま え が き

上嵯峨地すべり(徳島県名東郡佐那河内村父ノ久保)における地すべり調査は1974年6月に開始した。開始後3年間にわたる水文関係の調査資料に基づいて、降雨と地すべり地内に形成する地下滞水域との関係について1977年に報告した¹⁾。その後1年間の観測資料が得られたので2・3の解析結果を補足して検討し、本報文を作成した。

地すべり現象の多くが、降雨、融雪などにより地すべり地内に供給される地下水に強く関連して活動することは、一般的によく知られていることである。しかし、その地すべり機構についての解釈は定性的な内容を多く含んでいるものである。現状としては定量的解釈をすべく研究が進行途上にあり、今後研究成果を踏まえて、より正確な地すべり機構の認識をする必要がある。

地すべりはそれぞれ異なった地下構造をもっており、地下水の動きの特性もいろいろな形態のものがある。降雨、地表水など地下構造の影響を直接受けにくいようなものは比較的測定し、理解しやすいが、地下部の影響を直接的に受けている孔中水位、湧水量にはいくつかの要素が混在して含まれていて、測定値の解析により変動量を単一の成分として知ることが困難ことが多い。そうしたことが原因して、定量的な解釈の精度がややもすれば低くなる。したがって地すべり地の地下水系はきわめて複雑な条件にあるため、今後解決を要する問題が多くあるといえる。

本地すべり地では、幸なことに、これまでの調査によって、地下構造がかなり詳しく判明している。また、地すべり調査、防止対策のためのボーリング孔、排水孔が何ヶ所かに設けられているため、地すべり地内に形成する地下水の一連の動きを調べ検討するうえに条件がよいと考えられる。本報文では、前報で取り扱った降雨と地下水変動の関係から、滞水域の地下水塊体積の変動形態を新しい資料を導入して考察する。また、地形的集水域を求め、降雨源の供給水量を計算し、地下水塊の増加量と比較してみる。これらが地すべりの研究を進めるために、地下構造の規制を受け、降雨と関連して形成する地下水貯留の形式を理解する一方法となれば幸である。

2. 降雨、地下水位および排水量の観測

1977年に報告した前報¹⁾では、1974年6月から1977年3月までの水文観測データに基づき、本地すべり地

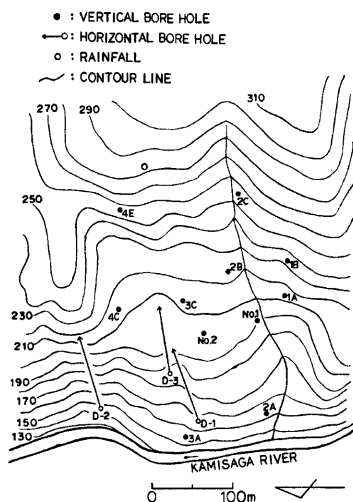


Fig. 1. Locations of hydrologic observational points in the Kamisaga landslide area.

内の地下水に関して解析・考察をおこなったものである。本報文は、1977年4月より1978年3月までの1年間に観測されたデータに基づき、前3年間の結果を合わせ取り扱った。

降雨、地下水位、排水量の各観測地点は、Fig. 1に示した位置である。降雨は、地すべり地の上部に自記式雨量計を設置して観測を行なった。地下水位は、本地すべり地に設けられている調査用ボーリングの孔中に形成している地下水位を観測した。排水量は、本地すべり地に設けられている地すべり防止対策用の水平ボーリングより排出される地下水量を観測した。各観測結果は次に記述するようであった。

降雨観測の結果について Fig. 2, Fig. 3 に日雨量として示した。1977年度の降雨の特徴は、例年多雨期となっている7月、8月にきわめて雨量が少なく、特に、7月中旬より8月下旬までは降雨が僅少で、記録によると7月17、18日の両日の合計66.0mmの降雨後、8月24、25、26日の3日間の合計191.0mmの降雨まで36日間にわずか6.0mmの降雨があったのみである。その他、例年、比較的

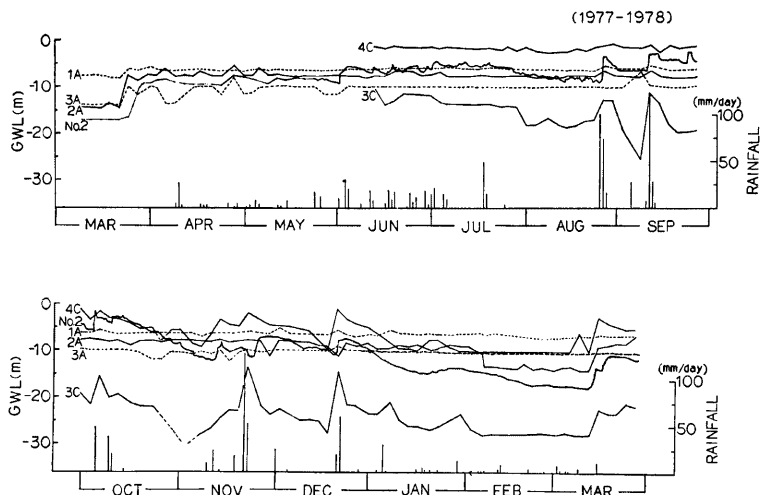


Fig. 2 (a). Variation in the groundwater level (GWL) for a daily rainfall during observation (Mar. 1977-Mar. 1978).

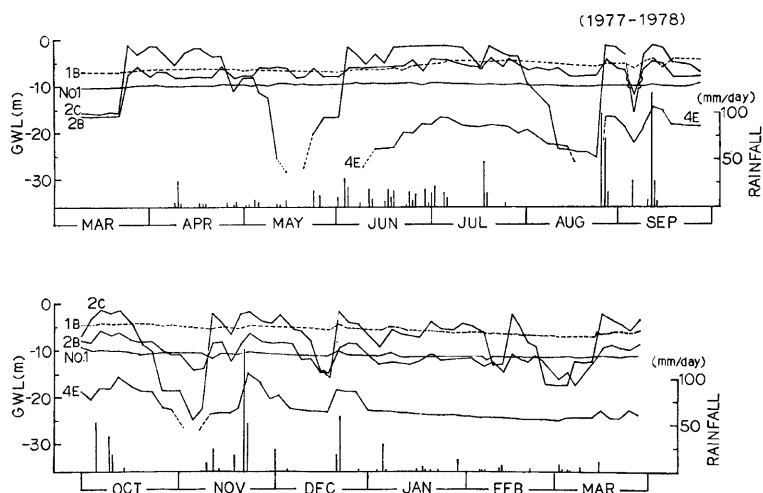


Fig. 2(b). Variation in the groundwater level (GWL) for a daily observation (Mar. 1977–Mar. 1978).

降雨があったことが目立っている。

地下水位の結果について、Figs. 2(a), (b) に示した。地下水位の変動は今年度の降雨の降りかたの影響を強く受けている。7月下旬から8月下旬にかけて降雨の少なかった時期には例年になく水位が低い。また、8月24日から3日間にわたって降った雨に対して、観測孔 3A, 4C, No. 1 以外の各地点とも鋭敏に応答した結果を得た。3地点 3A, 4C, No. 1 の観測資料をみると、降雨に対する応答状況が、それぞれ観測孔の設定場所の特性を反映しているものと考えられる。

すなわち、観測孔 3A は、本地すべりの末端に位置しており、周辺部に降った雨水は、ただちに斜面下部の河川へ流出してしまうこと、また地中を浸透してくる地下水は降雨後浸透流下に相当の時間が必要である。このことは、Fig. 2(a) の8月から9月にかけての3Aの観測資料が表わすように、降雨に対して水位上昇によるピークが遅れていることがわかる。しかし、11、12月における3Aの観測結果では降雨に対して短時

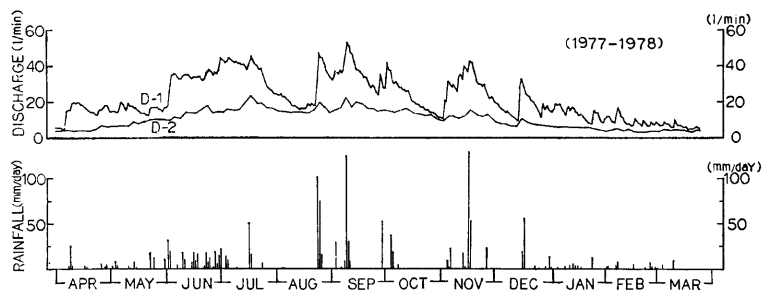


Fig. 3. Response of the discharge at lateral borehole D-1 and D-2 to a daily rainfall during the observation (Apr. 1977–Mar. 1978).

間で応答している。この異なった現象は、対象とする 1 降雨に先きだって前駆的に降った雨による斜面地盤中の地下水量の状況に影響されているためと考えられる。

観測孔 4C は、8 月の降雨の少ない時期においても水位がきわめて高い。これは、夏期に水田へ供給した水が孔中へ流入して、常に飽和状態となっていることによるものである。しかし、秋期になって農業用水の給水を止めると、水位低下が生じ、降雨に対する応答も鋭敏になっていることがわかる。

観測孔 No. 1 は年間を通して水位変動のきわめて少ないことがわかる。この観測孔の近くに小さい谷があり、地形的に谷が著しく低くなっている。地表より浸透する浅い地下水は谷へ流出して、孔中水位で表わされる深い地下水形成に関与していないものと考えられる。同じように谷に近い位置に設けられている観測孔 2B, 2C では水位変動の激しいことが認められる。

排水量の観測結果について、Fig. 3 に示した。観測地点は Fig. 1 に示した D-1, D-2, D-3 の位置で実施したが、D-3 は斜面上部に施工した集水井の排水ボーリング工事のために継続して測定できなかった。D-1, D-2 の観測結果は、それぞれ同一降雨に対する変動巾の異なった応答が認められる。D-1 は自記式量水計を設置しているが、D-2 は 3 日間毎に 1 回の手動式計器による測定である。D-1 は 1 日 1 回の午前 6 時の記録を読み取りプロットした。D-1 では波長が 2 日間位の小巾な変化を捕捉しているが、D-2 にはそれらの変化は認められない。7 月下旬から 8 月下旬にかけて降雨の少ない時期には D-1, D-2 とともに排水量が減少している。D-1 においては 11, 12 月の降雨に対しても敏感に応答して排水量が急激に増加した。D-1 における排水量の減少時の状況は、いくつかのピークの後に認められる減少曲線のようにきわめて相似な形をしていることがわかる。

3. 滞水域と集水域

本地すべり地の地下構造に関する調査結果は前報¹⁾に詳しく記述したが、基盤の形状に関する点について少し補足する。本地すべり地全域において実施した比抵抗電気探査の結果に基づいて、Fig. 4 に示したように低見掛け比抵抗帯 ($1.0\text{K}\Omega\text{-cm}$ 以下) の分布域が形成している。この地域は別に実施した弾性波探査、ボーリング調査の各結果と対比した場合、きわめて相似な形状を示すことが判明しており、本地すべり地の特徴である地下滞水域と考えられている。Fig. 4 の図中左側に数字を付した実線は地表面の等高線を表わしており、右側の数字を付した破線は基盤面の等高線を表わしている。この基盤面等高線は比抵抗電気探査によって得られた基盤の深さを標高で表わし、地表面との関係を検討できるように重ねて画いたものである。Fig. 4 において、地形を表わす地表面と基盤面とを比較してみると次のような特徴が認められる。

斜面に向かって右側にある小谷では、斜面下部において地表面と基盤面との形状が似ており、基盤が 10m 深位となっているが、上部では、基盤面に谷状の形が認められなく、また、基盤が浅くなっていることがわかる。本地すべり地の滞水域では、地表面は比較的緩斜面となっているが、基盤面も標高で 190m から 200m 位では比較的平坦面に表わされている。この地域の基盤面形状は前報で述べたように、盆状構造を形成している (Fig. 4 では表現されていない)。斜面上部では、基盤面が浅くなっており、地表面より傾斜度がいくぶん強くなっていることがわかる。比抵抗電気探査で基盤面と判定した面は、比抵抗が $3\text{K}\Omega\text{-cm}$ 以上の解析値を示す地盤である。滞水域の地盤は比抵抗 $1\text{K}\Omega\text{-cm}$ 以下の解析値なので、両地盤のコントラストは明瞭な関係にある。

本地すべり地の集水域を形づくる地形的条件についてみると次のようである。本地すべり地の後背部に標高 661.2m のピークをもつ山頂部があり、地すべり地より約 2.5km 離れている。その頂部から北西に張り出した支尾根の西側に向いた斜面の一部に地すべり地がある。地表面の形状で区画される集水域面積は北西斜面の中では小地域を構成しているにすぎない。地形による本地すべり地の集水域は Fig. 5 に示した A 域で、外側の破線で囲まれる部分であり、面積は $206,550\text{m}^2$ である。B 域は本地すべり地内に形成している滞水域の集水域を表わしており、面積は $67,500\text{m}^2$ である。C 域は地すべり地の境界を表わしており、面積は $76,950\text{m}^2$ である。

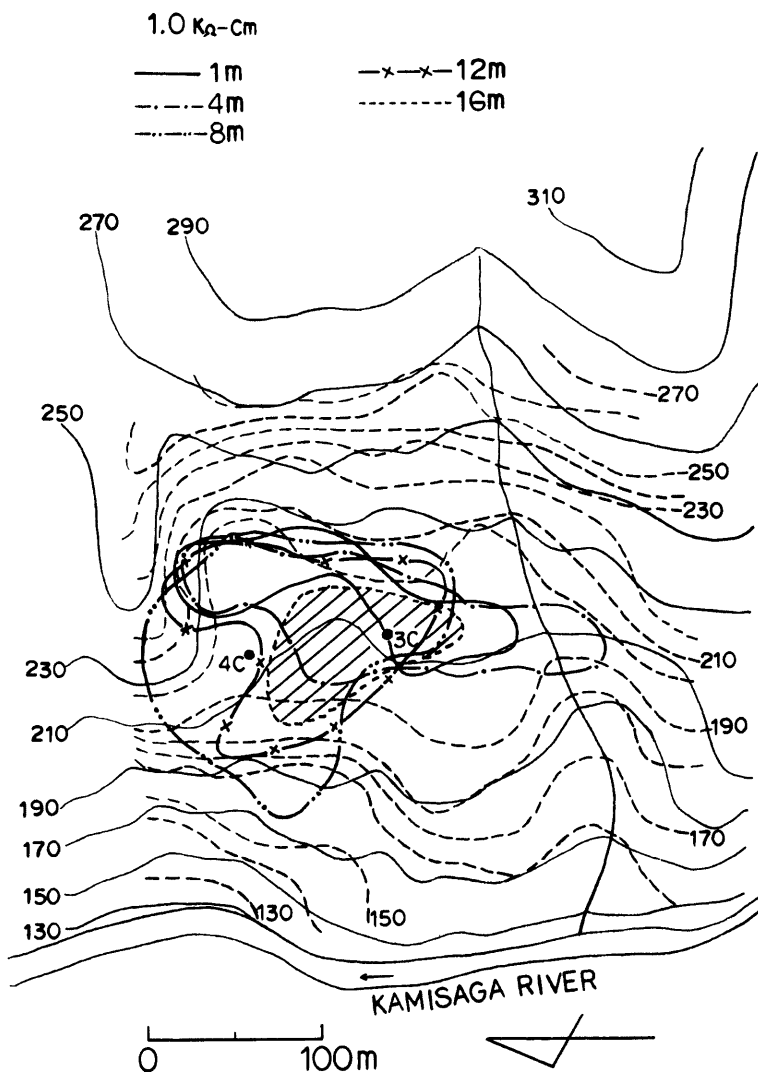


Fig. 4. The distribution area of the lower apparent resistivity values than 1.0K Ω -cm and the condition of base surface in the Kamisaga landslide area.

本地すべり地の地すべり活動が認められる C 域に比較して、集水域の面積は 3 倍にも達しない小面積なものである。地すべり地内へ流入してくる地下水の集水域は地形的集水域とは異なった拡がりをもつものと考えられ、地質構造等地下における地盤の地下水流動に關係する構造に強く規制を受けていることが当然推

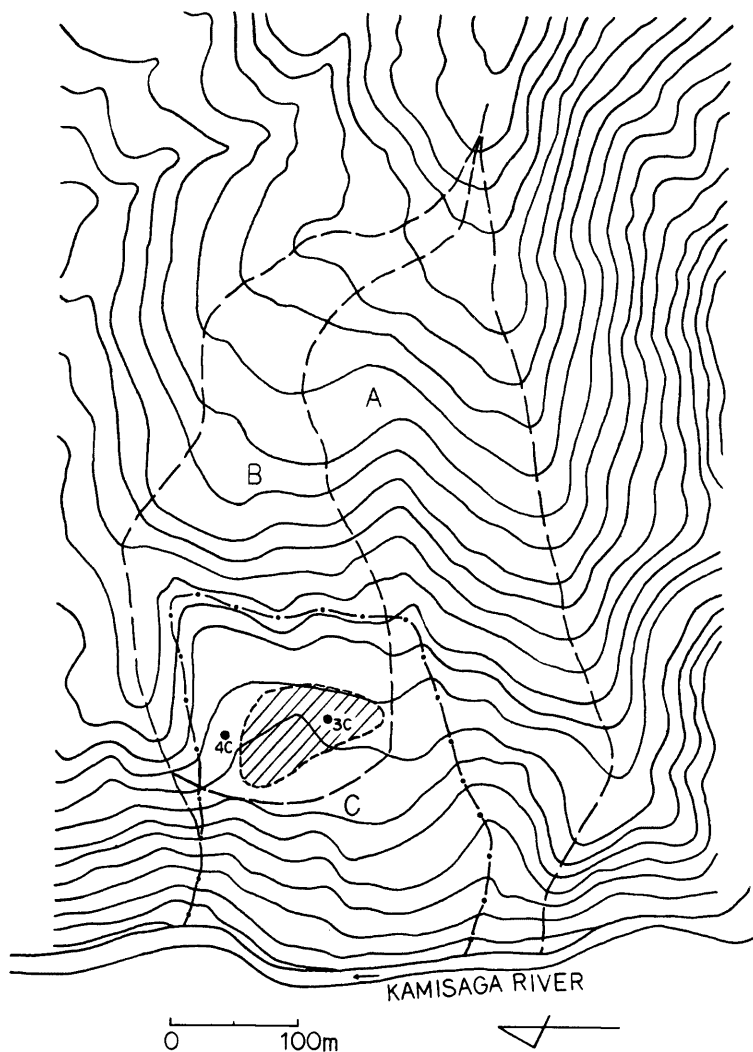


Fig. 5. Drainage area (A, broken line of out side) for the Kamisaga landslide and drainage area (B) for charge from ground surface to the water bearing mass.

定される。また、B 域によって表わされる滞水域に対する集水域は、滞水域そのものが地下部に形成されており、そこに集水される地下水は地形的集水域以外に地下構造に強く規制を受けていることが推定される。

本地すべり地に形成する滞水域の地下水塊形成の機構を定性的に考えてみると、Fig. 6 に示したようなモデルが想定される。モデルの上部は滞水域の上部地盤を意味しており、R は同地域に降る雨水である。S₁ は

地表面で集水され域外から流入する地表水である。この上部地盤では地下浸透が行なわれるが、地下水塊に到達するまでには透水係数に逆比例した時間を要し、それを t_1 で表わす。また、 R と S_1 の一部は地表もしくは表層部を経て滞水域外へ流出したり、蒸発散したりする初期欠損量の分があり、それを D_1 で表わす。したがって、滞水域の上部地盤では、雨水(R)と地表水(S_1)から流出水(D_1)を取り去ったものが地下水塊の供給分(S_3)となる。

滞水域の下部の地盤では、上部から S_3 と、滞水域外から直接地下水として流入してくる分の S_2 とを合わせて供給される。この下部地盤に形成する地下水塊は滞水域を有限の器と考えれば、地下水塊が増大し、大きく成長したときに器の貯水機能を越えることが推定される。また、貯水機能を越えるまでに、底部や斜面下部方向へ漏水することもある。それを D_2 、 D_3 で表わす。 D_2 は斜面下部で排水ボーリングで排出されるものを含むものである。また、 D_3 は基盤中に存在するキレツなどへ浸透していくものを表わす。したがって、 S_2 および S_3 として供給される地下水量から、 D_2 、 D_3 として流出される分を除いた残量が地下水塊で、その増減の指標が地下水位(h)として表わされている。なお、 h' は S_2 、 S_3 の供給量が減少したとき D_2 、 D_3 の流出量も減少するが、本地すべり地では、冬の渇水期に認められるような基底水位を表わしている。冬の渇水状態でも D_1 、 D_2 の排水状況は、5l/minの基底流量に収束して、全く無くなるということはない。

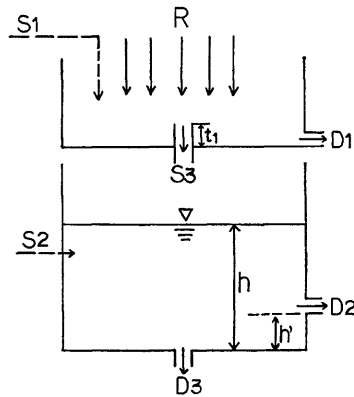


Fig. 6. Tank model of the groundwater system in the Kamisaga landslide area.

4. 考 察

前報でも行なった降雨量と滞水域の地下水位変動の関係について、1977年度観測されたデータを加えて示したものを Fig. 7 に示す。新しく加えた分は四角印でプロットした。白印と黒印は夏期と冬期によって分類したものであるが、1974年から1977年3月までのデータでは図中に引いた破線より右側に夏期のもの、左側に冬期のものを分布していた。そこでこの破線部（前報文ではやや曲線状の線によって分類した）が夏期の降雨に対する地下水塊の体積変動の上限を示しているものと解釈して地下水塊の体積計算を試みた。

新しい1977年度のデータでは夏期のものも含めて全て図中の破線より左側にプロットされて、破線によって示す夏期の最大変動の上限の関係における意味に矛盾があるように思われた。しかし、このことは1977年度夏期における気象条件の特殊性によるものであると推定された。Fig. 2 にみられるように、夏期に降雨が異状に少なく、地下水位も低い状態にあった。このことは滞水域における地下水塊の状態が、あたかも冬の渇水期と同じようになっていて、そこに降雨による水位上昇があったので変動巾が大きく現われたものと考えられる。本地すべり地の活動に関与する地下水としては、豊水期における水位上昇という変動が最も危険側にあるものと考えられるので、Fig. 7 の破線によって示した関係線を、豊水期の水位変動の上限を示していると解釈した。

Fig. 5 に示した A 域（本地すべり地の集水域）、B 域（滞水域の集水域）の各集水域は、地表から浸透形式によって地下水を涵養する面積を基本的に表わすものであるが、地下水という地下構造に最も規制を受けるものを考えるのに十分な地下水系を示すものではない。しかし、滞水域の地形的集水域となっている B 域では谷の発達はなく、地表部における浸透条件はよいように思われる。そこで過去に観測した降雨資料を用いて、B 域で受けとめられる推定雨量と滞水域の地下水塊の体積変動量とを比較してみると、Table 1 のよ

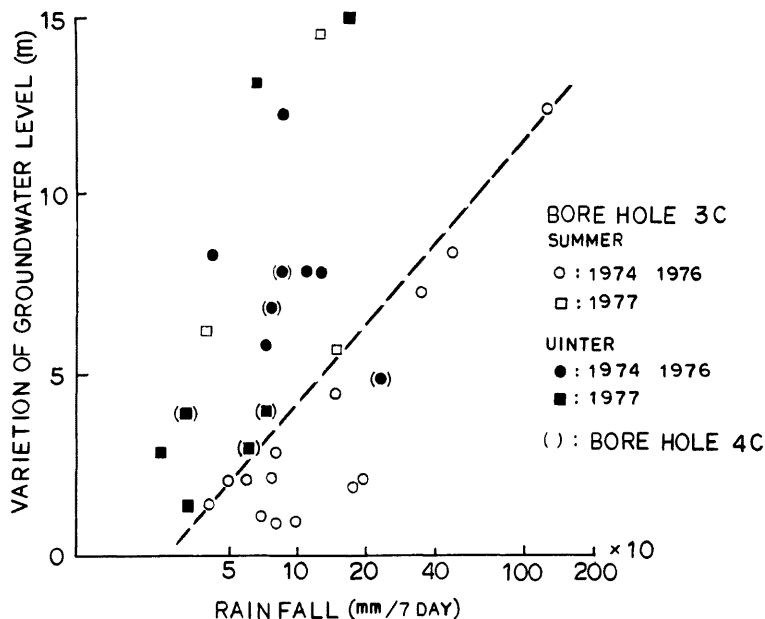


Fig. 7. Variation of the groundwater level to 7 days rainfall at borehole 3C and 4C. An example of the observation in summer and winter 1974-1978, and the broken line shows the upper boundary effect of variation in summer.

Table 1. An example of volume on the charging water and volume change of the groundwater bearing mass.

	DATE	RAINFALL mm	Q m^3	Δh m	ΔV m^3
(1)	AUG. 24-26, 1974	147.0	9922.5	0.7	8421.9
(2)	JUL. 24-31, 1975	77.5	5231.3	2.0	15468.8
(3)	AUG. 15-23, 1975	1097.0	74047.5	12.0	107968.8
(4)	SEP. 8-13, 1976	1240.5	83733.8	14.0	132968.8
(5)	NOV. 9-13, 1976	67.5	4556.3	7.0	13559.8
(6)	AUG. 24-26, 1977	95.0	6412.5	6.0	59843.8
(7)	SEP. 29, 1977	53.5	3611.3	9.0	32011.7
(8)	NOV. 16-17, 1977	144.0	9720.0	9.0	36328.1
(9)	DEC. 16-17, 1977	76.5	5163.8	8.0	18279.4

Q : the discharge from B drainage area

Δh : variation of the groundwater level

ΔV : variation of the water bearing mass

うになる。地下水塊の体積変動量は、前報で報告した比抵抗電気探査によって求められた地下水塊の平面的な拡がりをもととして、降雨前の水位面からの変動量を用いて計算した。比抵抗電気探査で求められた滞水塊の各深さにおける平面積を Table 2 に示した。地下水塊の体積変動量は飽和した地盤を表わしており、

そのうち地下水涵養により実際に増加した地下水量は滞水域の地盤が礫層で構成されていることを考慮して、標準的な間隙率として30～40%を用いて見積ってよいと思われる。**Table 1**の(3),(4)の降雨の多いときのものは、地形的集水域に降った雨水の約2分の1が滞水域に貯留される量となっている。また、降雨の少ないときの(6),(7)では逆に約3倍,(9)では約1.2倍となっている。(1)では約3分の1以下となっているが、このときの変動現象は水位の高いときに起っており、地盤は浅部まで飽和していて貯留能力が低い状態にあったと考えられる。

本地すべり地からの地下排水は、地すべり防止対策用として人為的に実施しているものの他に、自然に河川へ流出しているものもあると推定されるが、それを実測することは不可能である。人為的に排水しているもので、**Fig. 3**に示した D-1, D-2 の特徴をみると、地下水系の特性がある程度判明する。D-1 は流出量が多く、降雨に対する応答は鋭敏に現われているが、D-2 は流出量そのものも少なく、応答も緩慢に現われる。これは、D-1 が浅層に涵養された地下水を排出していて、涵養時の状況をかなり反映しているためと考えられるが、D-2 は深層地下水を排出していて、涵養時の状況は平均化されてははっきりしない。D-1 の排水量の減水状況は、20l/min 以上の時において、半減期が約2週間となっていることが認められる。D-1, D-2 ともに渇水状態になると、5l/min に収束的になるが、この排水量は基底流出量ともみなし得るもので、地形的集水域の B 域のみを涵養地下水系とするだけではないと推定される。地すべり防止対策の対象として問題視される地下水は、上述の基底流出によって排水されるものでなく、D-1 の半減期が2週間位の挙動の激しい性質のものを取り扱うべきである。

5. 結 語

本地すべり地の滞水域に形成する地下水塊については、盆状構造の地下部に降雨による地表面浸透によって涵養されるものが相当多く、地形的集水域の B 域に降る雨の約3分の1の量にあたる分だけあることがわかった。現在、B 域は森林、畑となっていて、地表面に人工的な排水路は設けられていない。今後地表排水を行えば浸透量が減り、滞水域への涵養が緩和されるものと思われる。

集水井と排水ボーリングは、滞水域の地下20m深までに貯留する地下水塊を直接排水するように計画されるべきで、D-1 の排水量20l/min 以上時のものを対象とし、半減期を短縮することが必要である。半減期を人為的に短かくすれば貯水量も少なくなり、地すべり活動のポテンシャルも低下することになる。

Fig. 6 で示した地下水系モデルは次式のように表わすことができる。

$$(R+S_2)-D_1=S_3 \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta V_h=(S_2+S_3)-(D_2+D_3) \dots\dots\dots (2)$$

(1),(2) 式で S_2, D_3 について実測することは不可能なので、他の項を決めて推定することしかできない。 ΔV_h は地下水塊の水位から求められる変動量である。

地すべり地内の地下水系の性質、規模を知ることが目的として、地下水滞水域の位置、形状、挙動を調べることが有効な方法であることがわかった。本地すべり地でも、地形的集水域を区画して地表流の測定を実施すれば、かなり定量的な検討が可能である。

Table 2. Area of horizontal section on each depth of the water bearing mass obtained by the electrical resistivity prospecting.

DEPTH	A (m ²)
1	7187.5
3	7812.5
3	11562.5
4	11250.0
5	10937.0
6	12500.0
8	15312.5
10	8750.0
12	11250.0
14	8125.0
16	6562.5
18	3984.4
20	4609.4
22	3632.8
24	2656.2
26	1835.9
28	1015.6

A: area of the water bearing zone

上嵯峨地すべりの研究を続けるために、徳島県土木部砂防課の方々、徳島土木事務所の方々に御助力をいただきました。また、佐那河内村の住民の方々にも大変お世話になりました。ここに記し感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 中川 鮮・島 通保：上嵯峨地すべり地の地下水について，京都大学防災研究所年報，第20号 B-1，1977, pp. 185-197.
- 2) 菅原正己：流出解析法，共立出版社，1972.
- 3) 桑原啓三：地下水変動による斜面崩壊の予測，土と基礎，Vol. 25, No. 12, 1977, pp. 11-17.