

地下水位変動からみた地下水賦存状態の調査 －クラスター分析による地下水の区分－

布 施 弘

はじめに

地下水の調査は、地すべり調査の重要な調査項目のひとつになっている。これまでの多くの調査・研究は、地すべりの発生と地下水位との間に高い相関があることを明らかにしてきた。それとともに、地下水のあり方を探るために、各種の調査方法が開発考案されてきた。地下水追跡試験や地下水の水質分析などで、地下水の繋がりや拡がりを明らかにしようとする試みである。しかし、これらの方法は、資料の採取やそれらの分析に多大な労力を必要とした。そのため、それらに代わって、水質分析の簡易な手法ともいえる地下水の電気伝導度調査が行われるようになった。

電気伝導度を用いた地下水の調査は、地すべり地の地下水が局所的に異なった型で存在することを示し、それは地すべり地の岩石の風化の程度を表すのではないかと期待されるようになった。たとえば、高倉地すべり地（新潟県西頸城郡能生町）の地下水の電気伝導度を測定した青木ほか（1981）は、地すべり地の地下水の電気伝導度が非地すべり地のそれに比較して高いことを報告し、同時に、この地すべり地には多様な型の水が存在していると指摘している。そして、それはこの地すべり地の岩石の風化の程度がさまざまな段階のものを含んでいることを暗示させると述べている。その後も多くの研究者や機関によって、地すべり地での地下水の電気伝導度調査が行われてきた。それらの成果は、ひとつの地すべり地内にあっても電気伝導度が局所的に高い箇所がいくつもあり得ることを示した。

このようにして、それらの調査は、地すべり地の地下水が局所的に存在していることを暗示してきた。しかし、また、それらは地下水が流下している途中で高い電解質物質を溶解してきた結果であり得ることも指摘されてきた。つまり、地下水のあり方（賦存状態及びその経路）を明らかにすることは、難しいままに残されているのである。

筆者は、地下水のあり方を推測する簡易な方法を検討してきた。ボーリング孔で観測された地下水位の変動パターンを比較し、それらの近似度を求めて区分し、地下水を類型化する方法である。それには、統計分析の一手法であるクラスター分析を用いている。この方法によって、地すべり地の地下水が、脈状であったり亀裂で通じた地下水であったりなど、その賦存状態を推測することができるようになった。また、一連の地下水の分布およびその平面的な形状を推定することが可能となった。この方法を地下水賦存状態調査ということとする。

この報告では、この方法の有効性を確認することを目的として、矢津地すべり地及び大野地すべり地での、それぞれの既存の地下水調査の結果と比較している。前者では地下水

追跡試験及び電気伝導度調査が実施されており、後者では地下水追跡試験が行われている。さらにその他の斜面での解析結果を紹介している。

なお、クラスター分析の説明およびそのプログラムとアルゴリズムの解説は、それぞれ他の専門書に譲ることにする。

1 地下水賦存状態調査の諸条件

地下水賦存状態調査の前提は、「同一の地下水は同一の変動をする」ということである。同一の、連続したひとかたまりの地下水塊（地下水脈）では、その主体的な部分でもその末端の部分でも、たとえば降雨の浸透による水位の上昇や日照りによる減衰等のパターンは同一であることを前提にしている。

この前提は、クラスター分析による地下水の類型化を可能にした。同時に、この前提に、この方法の制限性が示されている。同一の変動パターンを示す地下水であっても、必ずしも同一の地下水塊（脈）であるとは限らないのである。たとえば、同一の斜面内にありながらそれぞれ独立しているため池からの浸透水（地下水）の水位は、それぞれのため池の水位変化に応じて変化するであろう。そして、それらのため池の水位が降雨や日照りだけによって変化するときは、それらの地下水は、互いに独立しているにもかかわらず、同じ変動パターンを示すことになる。それゆえに、この調査を機械的に用いるときには、異なった地下水塊（脈）を同一のものとみなす誤った結果を導くことがある。分析の過程では慎重な態度が必要であり、分析結果を基に総合的に解析する際には、現地を熟知した経験者の判断が不可欠である。

この方法は、先に述べたように、ボーリング孔の地下水位観測結果だけを用いている。これまでの予備的な解析によると、10回程度の観測結果で解析することが可能である。また、任意の観測頻度であってもかまわないし、観測間隔が異なっても差し支えない。したがって、季節間の変動を比較するなど、任意の期間のパターンを比較することができる。ただ、観測記録についていえば、すべての観測孔での毎回の観測が、それぞれ同時に行われていることが望ましい。地下水位が自記記録されていれば、この同時性に対する要求は容易に満足される。とはいえ、最初の観測孔での観測を早朝に開始し最後の観測孔での観測をその日の夕方に終了したとしても、その間に地下水位を急激に変化させるような気象の変化がない限り、その程度の時間差は問題にならない。なお、解析結果の精度（とくに、地下水塊（脈）の幅）は、当然のことながら、観測孔の分布および密度に規制されている。

分析に先立って、観測記録に前処理を施す必要がある。この調査方法は地下水位の変動パターンだけを対象にしているのであるから、地表からの深さを表すために通常はマイナスの値として表示され、あるいは暗黙の裡に了解されている観測値の負号を無視してその絶対値を採用し、かつ、最大値（観測された地下水位の最低値）を10とし、最小値（同じく最高値）を0の無名数に換算している。この操作を筆者は標準化と呼んでいる。標準化によって、それぞれの観測孔での地下水位の深度および変動幅の大きさについての情報

を無視することになる。それによって、それぞれの地下水位の変動パターンだけを分析の対象にすることができるのである。なお、地下水位の観測値が標高で示されている場合には、それらの観測値をそのまま標準化する。

2 既存の地下水調査との比較

地下水賦存状態調査の結果を、矢津地すべり地及び大野地すべり地で実施された地下水追跡試験や電気伝導度調査の結果と比較する。

(1) 矢津地すべり地の地下水

矢津地すべり地（新潟県栃尾市）では、地下水追跡試験と電気伝導度調査が行われている※。地下水追跡試験は 1975 年及び 1976 年に、電気伝導度調査は 1975 年及び 1981 年にそれぞれ実施されている。

矢津地すべり地は、地域の中央部を南西から北東方向に伸びている尾根によって、2つの地区に分割されている。西谷川に向かう南側の地区（以下、西谷地区という。）と矢津川に沿う北側の地区（以下、矢津地区という。）である。この尾根部の地質構造は背斜構造（荷傾背斜）となっており、その南側（西谷地区）にこの背斜軸に平行した断層が推定されている（次頁、図－1）。斜面の表層は、粗粒の花崗質砂岩（大部分は角張った石英粒）で厚く覆われている。この砂岩層は著しく風化しており、固結度は非常に緩くなっている。これらの地質と地質構造は、この地域の地下水のあり方に大きな影響を与えている。

電気伝導度調査の結果によると、高い値の電気伝導度を示す区域が3箇所認められる。西谷地区と矢津地区の荷傾中学校裏及びその東側の斜面である。西谷地区の高伝導度域の地下水は断層に沿った鉱泉性の地下水であり、矢津地区では、緩い斜面となっている尾根部の雨水が浸透した地下水があるとみられている。また、その尾根部が地下水の分水嶺となっている。

地下水追跡試験は、荷傾中学校裏の斜面と尾根の東端の2箇所で行われている。トレーサーには食塩を用いている。荷傾中学校裏の斜面では、図に示すように、地下水は3方向に分かれて流下している。また、尾根の東端斜面で投入されたトレーサーは、そのまま矢津川に向かって拡散している。

地下水賦存状態調査は、1982年に行われた地下水位観測記録を用いている。それによると、その変動パターンから、3種類の地下水塊が区分される。西谷地区の地下水（A）と矢津地区の地下水（B）及び矢津川に沿う地下水（C）である。矢津地区の地下水（B）はさらに荷傾中学校裏の斜面の地下水（B－1）とその東側の斜面の地下水（B－2）に分かれている。

西谷地区の地下水（A）と矢津地区の地下水（B）とは、尾根部では、はっきりとした境界を持っている。電気伝導度調査が示したように、地形の尾根部に地下水の分水嶺があ

※ 昭和 57 年度 矢津地すべり調査総括報告書 新潟県土木部（調査者 ㈱日さく）

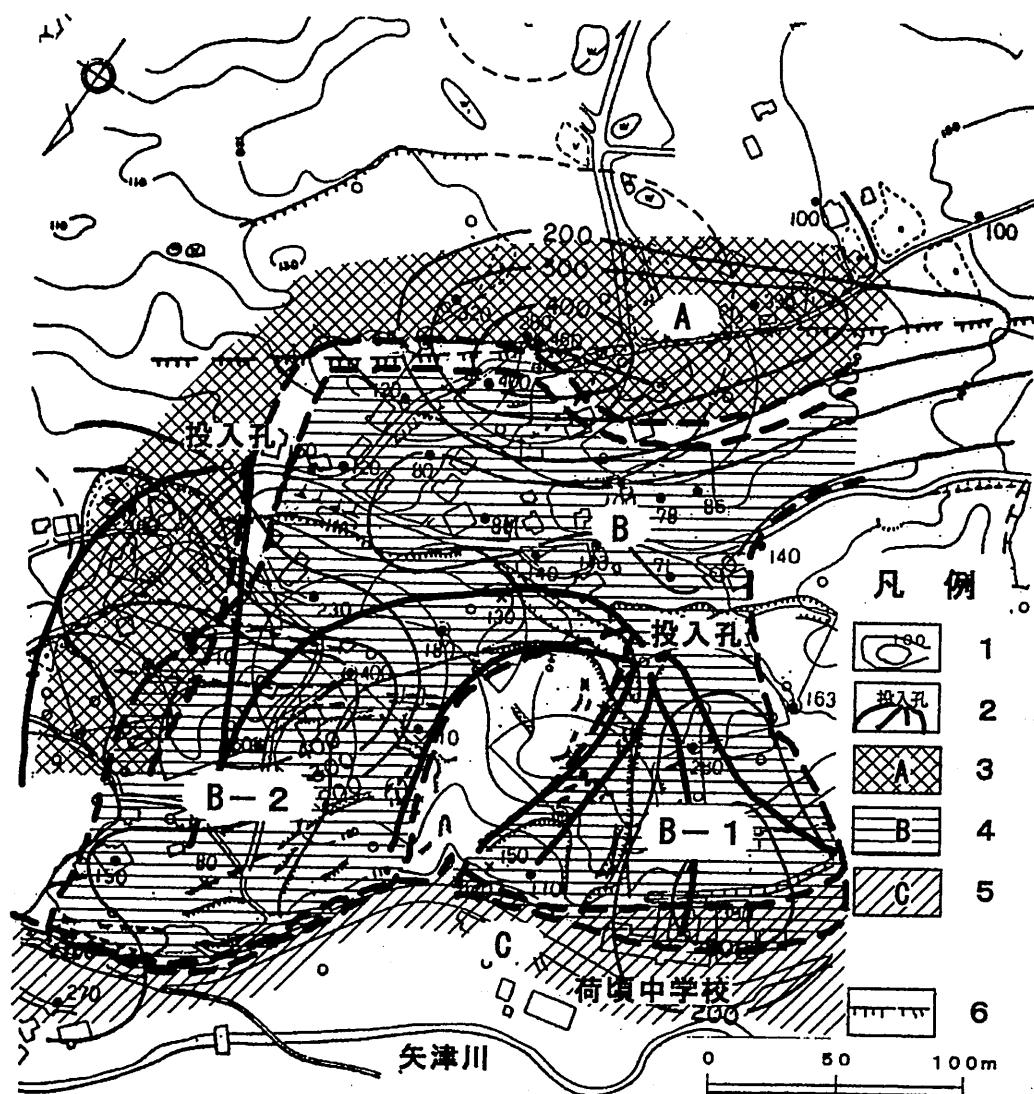


図-1 矢津地すべり地の地下水調査結果 (梶日さく原図に加筆)

1 電気伝導度調査 2 地下水追跡試験 3～5 地下水賦存状態調査による地下水塊 6 推定断層

って、それぞれの地下水塊が区別されている。地下水の分水嶺は、尾根部の東端に向かうと、明瞭ではなくなる。そこでは、西谷側の地下水が矢津地区に回り込んでいる。その周辺の花崗質砂岩層は30mを超える深さまで風化しており、地下水位が背斜軸の分水嶺効果を越えたのであろう。

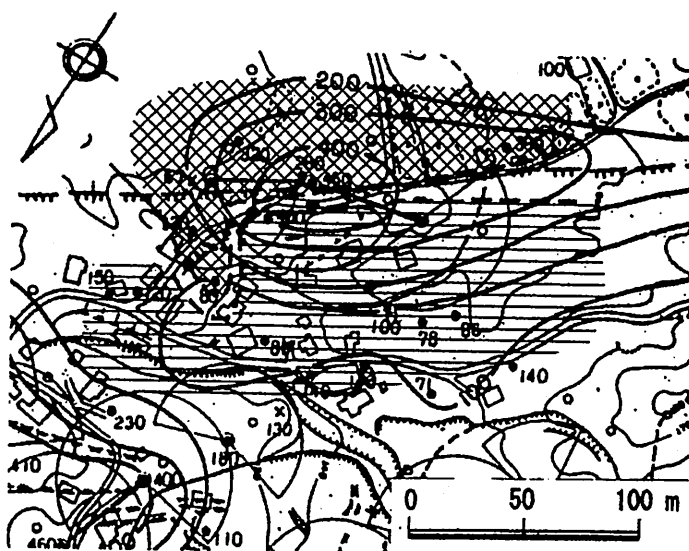
この西谷地区から回り込んできた尾根部東端の地下水(A)は、矢津地区の地下水(B)とボーリング孔VB50-2で混じりあっている。これらの地下水は、尾根部では明らかに異なったそれぞれ独立した地下水であって、混じりあうことがなかった。それにもかかわらず、ここでは、明らかに混じりあっている。そのボーリング孔の直ぐ上に1976年に施工された集水井筒(8号井)があって、両方の地下水を集めている。その結果として、両者の地下水が混在している解析結果となったのであろう。したがって、本来であるなら、

ここでもそれらはそれぞれ独立した地下水であったのであろう。

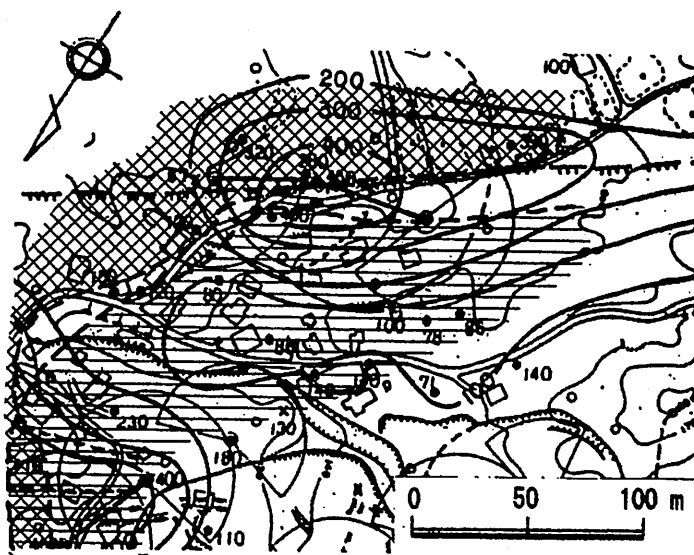
尾根の付近にある二つの地下水（A）、（B）の賦存状態を季節ごとに解析したところ、季節によってそれらの分布範囲が変化していることがわかった。春季（4月～6月）には、西谷側の地下水が断層を越えて矢津側に溢れている（図－2）。夏季（7月～9月）になると、西谷側の地下水がさらにその勢いを増し、尾根の東端から矢津地区にまで回り込んできている（図－3）。ところが秋季（9月～11月）には、それらの形勢が再び逆転する。西谷側の地下水はその分布範囲を断層の南側だけに狭めているのである（次頁、図－4）。

季節によるこの変化は、この年の8月の降雨量が極めて少なかった（47mm）こと、そして、9月以降に100mmから280mmに達する降雨があったことと無関係ではないであろう。9月以降の降雨によって、矢津側の地下水位が回復した結果である。

これは毎年の季節変化というよりも、主として降雨の状況による変動である。したがって、他の年度でも同じ結果になるとは限らない。たとえば、電気伝導度調査が行われていた1981年の夏季（7月～9月）では、西谷地区の地下水と矢津地区のそれとは、1982年の秋季（図－4）とほぼ同じ分布をしており、断層を境にして互いに独立している。この年の夏季の降雨量は、7月こそ88mmと少なかったものの、8月と9月にはそれぞれ180mm前後の降雨があった。そのため矢津側の地下水が勢力を維持し



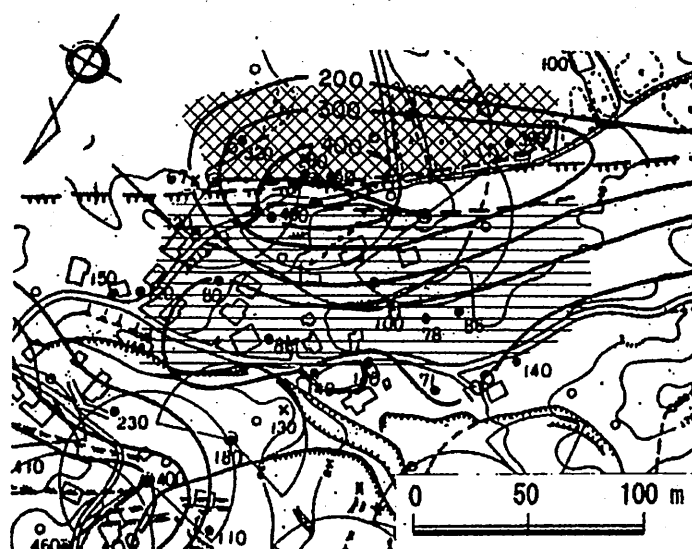
図－2 尾根部の地下水塊（4月～6月）



図－3 尾根部の地下水塊（7月～9月）

ており、相対的に西谷側の地下水が溢れなかったためであろう。この尾根部周辺の地下水は、降雨量の多寡を主な原因として、その賦存状態を変化させているのである。

矢津地区の地下水（B）が荷頃中学校裏の斜面（B-1）と尾根の東端（B-2）の2方向に分かれていることは、電気伝導度調査や地下水追跡試験の結果と合致している。地下水賦存状態調査では、荷頃中学校裏の斜面（B-1）



図一4 尾根部の地下水塊（9月～11月）

の地下水の水位変動パターン

と尾根の東端（B-2）の地下水のそれとは、クラスター分析で算出される空間距離がやや大きくなっており、区別される。

矢津川右岸の川原に沿う地下水（C）は、その変動パターンが日降雨量のパターンと一致している。矢津川から浸透した地下水である。そして、この地下水（C）は、荷頃中学校周辺の地下水（B-1）やその東の地下水（B-2）と、それぞれの斜面の末端で混じりあっている。

（2）大野地すべり地の地下水

大野地すべり地（新潟県栃尾市）でも、地下水追跡試験が行われている※。

大野地すべり地は、西谷川に沿う南向きの斜面であり、東西方向に広い横幅をもっている。斜面は、4地区に区分されている。西から東に向かって、大野館地区、名無沢地区、熊野社地区そして稻荷社地区である。これらのうち、大野館地区を除く3地区でボーリング調査と地下水位観測が行われている。

大野地すべり地の基盤地質は、新第三紀の椎谷層に相当する泥岩層を主体とし、薄い砂岩層および凝灰岩層を挟んでいる。それを覆って、段丘堆積物の砂礫層及び地すべり崩土が分布している。地すべり崩土は、表層では風化した泥岩を主体とする軟弱な粘土層であり、その下位には硬質砂岩や安山岩の礫が混入している。

地下水追跡試験は、1980年10月から11月にかけて実施された（次頁、図一5）。名無沢地区の西端で投入されたトレーサー（食塩）は、投入孔から離れている2孔（VB55-2及び3）でそれぞれ7日後と9日後に検出されている。また、投入孔に近い3孔（V

※ 昭和57年度 大野地すべり調査総括報告書 新潟県土木部（調査者 榎日さく）

B55-6、7及び8)では、投入してから11日後に検出されている。しかし、それらに隣接している他のボーリング孔、とくにVB55-4及び5では検出されていない。

地下水賦存状態調査は、1982年4月から6月までの地下水位観測記録(観測回数11回)を用いて実施した。その結果、変動の型が異なる2種類の地下水が区別された(次頁、図-6)。ひとつは4月下旬までに急激に減衰し、それ以降6月下旬まであまり変動せずに緩やかに減衰していく型(地下水1)である。もうひとつの型(地下水2)は、4月下旬までは減衰するものの、5月から6月上旬まで水位の上昇下降を繰り返し、6月下旬には再び減衰に転じている。これらの変動の特性からみて、地下水1は融雪水によって涵養されており、地下水2は、融雪水とともにその後の降雨によっても涵養されているのであろう。

それらの地下水の分布は、斜面の中腹を西から東に横切るように、膨縮しながら連なっている。またそれらは、名無沢地区から熊野社地区にかけては重なる部分が多い。しかし、東端の稲荷社地区では、地下水2が急斜面の裾に狭い分布を示しているのに対して、地下水1は緩斜面全体に広がっている。また、地下水1は途中の名無沢地区で、地下水2は名無沢地区と熊野社地区でそれぞれ下部斜面に向かって南東に流下している。なお、地下水1の分布は段丘に沿っており、したがって旧河道に沿った地下水である可能性がある。

先に示した地下水追跡試験の結果は、地下水2の分布域にほぼ含まれている。トレーサーを検出したボーリング孔(VB55-2、3、6、7及び8)は地下水2の流路に位置している。そのうち、VB55-2と3は東に向かう地下水2の本流に位置し、VB55-6と7は本流からそれて名無沢斜面を南東に流下している支流に位置している。そのことによって、トレーサー投入孔に近い後者よりも、離れている前者に先に検出されたことが説明される。また、それらに隣接しているボーリング孔(VB55-4及び5)は、地

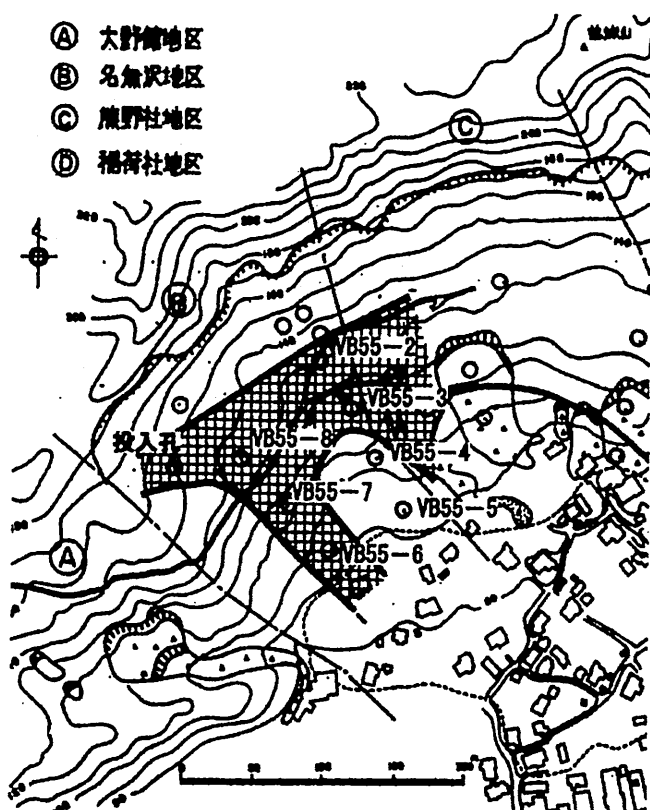
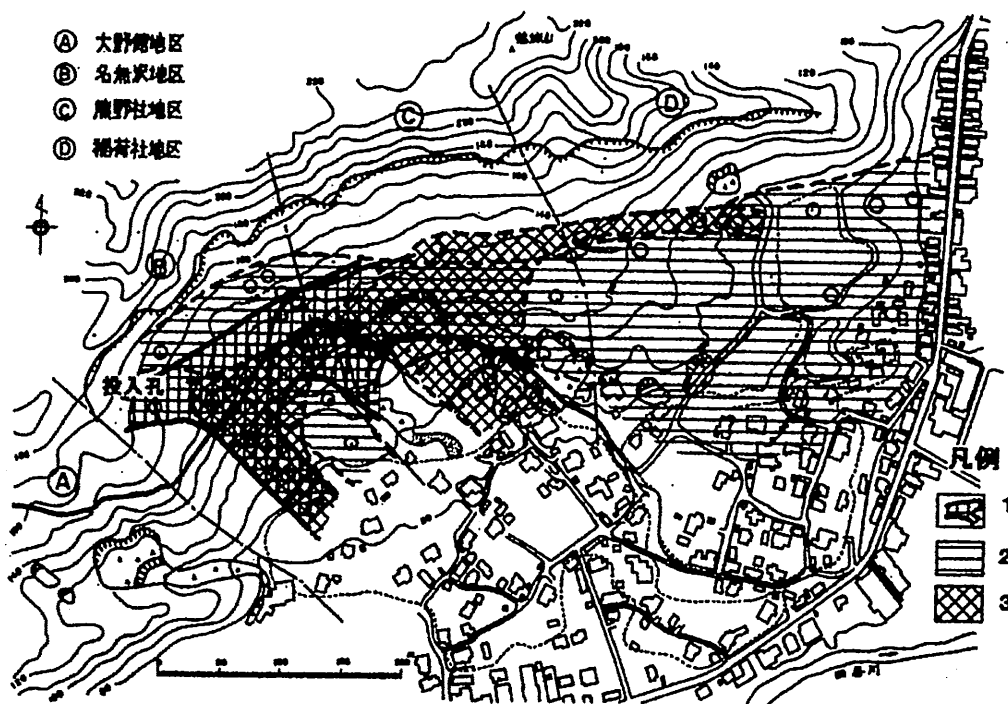


図-5 大野地すべり地の地下水追跡試験結果(関日さく原図を改編)



図一六 大野地すべり地の地下水賦存状態調査結果 (榎日さく原図に加筆)

1 地下水追跡試験 2 地下水(1) 3 地下水(2)

下水1に位置しているために検出されなかったのである。

このように、この地すべり地での地下水追跡試験の結果は、地下水賦存状態調査によって明らかにされた異なった2つの型の地下水の存在によって説明することができる。同時に、それによって地下水賦存状態調査結果の有効性が示されている。

これまで述べてきたことから、地下水位の変動パターンから解析した地下水賦存状態調査の結果は、既存の電気伝導度調査や地下水追跡試験の結果と比較しても遜色がなく、むしろ、地下水賦存状態調査は、任意の時期の解析が可能であること、さらには既存のそれらの調査や試験では読み取ることができない情報をも読み取ることができることが明らかである。

3 その他の斜面の解析事例

次に、地下水追跡試験等が行われていない斜面での地下水賦存状態調査の事例を紹介する。三面川右岸斜面は、表層を礫質土で覆われている斜面であり、五十子平地すべり地は、泥岩での地すべり地である。

三面川右岸斜面（新潟県岩船郡朝日村）で地すべり調査を目的に、多数のボーリング調査が行われており、地下水位が観測されている※。

上部斜面の表層は、岩塊や巨礫を混じえた礫質土で覆われている。斜面の中部及び下部は、礫のほか砂質土や泥質土が多く混じるようになる。頭部斜面は、小さな尾根の張り出しで、左右二つの、それぞれ馬蹄形の崖を持った斜面に分かれている。尾根に向かって右の斜面頭部には湿地が存在している。

地下水賦存状態調査は、1988年から1992年までの5年間の観測記録に基づいて行った。図-7は、1992年4月から6月までの観測記録で解析した結果である。図に示した地下水脈のほかにも、小規模な地下水塊あるいは地下水脈が存在しているが、それらは省略してある。

解析結果によると、左右の斜面でそれぞれ異なった型の地下水が存在している。左斜面には小規模な地下水脈がある。その地下水脈は、中・下部の斜面までは連続していない。

右斜面では初夏の頃まで、図に示す安定的かつ卓越した地下水脈が形成され、下部斜面にまで1km以上に亘って連続している。ところが7月以降になると、この地下水脈は縮小する。この傾向は、他の4年間（1988年～1991年）の観測記録による解析でも同様である。ただし、この卓越した地下水脈が消滅する時期や脈流の経路の細部は、それぞれの年で異なっている。

このように左右の斜面での地下水がそれぞれ異なった型を持っていることについて、この調査結果と日降雨量及びボーリング調査結果とを比較検討して、次の推論を得るにいった。

左斜面の地下水は降雨に対して鋭敏な応答を示しているのに対して、融雪期から初夏にかけての右斜面の地下水は、降雨があっても水位が上昇しないかあるいはわずかに上昇す



図-7 三面川右岸斜面の地下水賦存状態調査結果（膨縮している地下水脈）

※ 各年度の地すべり調査報告書 新潟県三面川開発事務所 （調査者 ㈱キタック）

るだけである。また、降雨後の減衰も左斜面の地下水は速やかであり、右斜面のそれはほとんど目立たない。しかし、初夏以降の右斜面の地下水は左斜面のそれとほぼ同様の応答を示している。

つまり、左斜面の地下水及び初夏以降の右斜面の地下水は、降雨がそのまま浸透した地下水である。他方、融雪期以降の春季の右斜面の地下水は、降雨からの影響を受けない、安定した地下水である。言い換えれば、それは安定して多量の地下水の供給を可能にする供給源をもっている地下水である。そして、その供給源は遅くとも夏季に入る頃には消滅している。

右斜面頭部のボーリング調査の結果によると、湿地及びその周辺では地下10数メートルから20m前後の深部にまで亀裂が発達している。その状態は、亀裂というよりもむしろ、岩塊や巨礫が積み重なっている状態といえるほどである。そこに融雪水が貯留される。つまり、この発達した亀裂群が天然の地下ダムとなって融雪水を貯留し、長期にわたって地下水を供給しているのである。それゆえに、この右斜面での春季の地下水脈のあり方は、毎年の融雪水の多寡及び融雪時期の早晚によって影響を受けているのである。

五十子平地すべり地（新潟県東頸城郡松之山町）でも、降雨への応答の仕方の違いから2種類の地下水が区別された。1989年4月から12月までの地下水位観測記録（観測回数12回）に基づいて解析した（図-8）。地下水のひとつは、降雨に敏感に応答する地下水（以下、R型地下水という。）である。他の型の地下水は、4月から9月までの降雨に対して応答が鈍い地下水（以下、S型地下水という。）である。

R型地下水は、4月中旬から下旬にかけて減衰する。そして、5月以降も水位の上昇と下降が認められる。その後、7月から8月にかけて、最低水位にまで急激に低下している。この型の地下水は、この地すべり地の斜面全体に広く分布している。なかには、4月下旬に最高水位に達する観測孔もあった。上部斜面からの融雪水が浸透したのであろう。

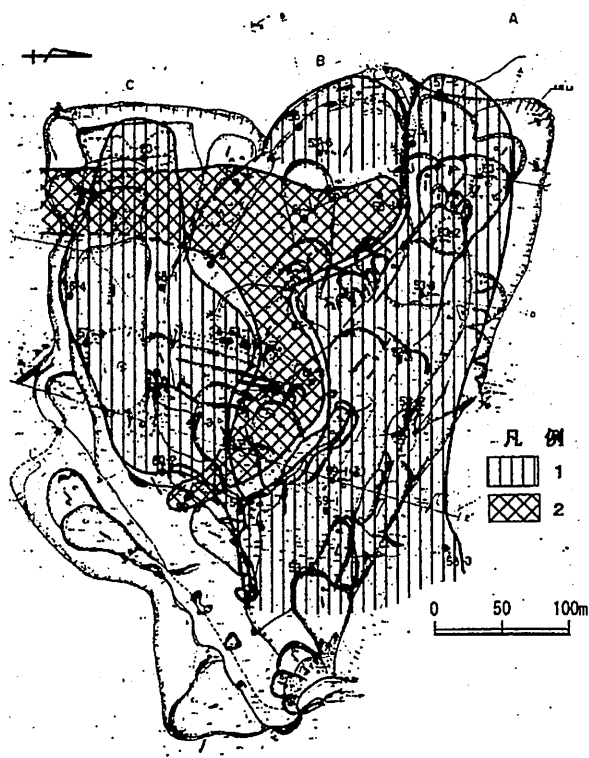


図-8 五十子平地すべり地の地下水賦存状態調査結果（棚村尾技建原図に加筆）

1 R型地下水 2 S型地下水

S型地下水は、4月下旬までに急激に減衰し、そのままゆっくりした変化で夏季の最低水位に移行している。その後は降雨で水位が回復している。この型の地下水は、斜面の中腹部から下部にかけてT字型に分布している。

このS型地下水は、南北方向の部分（T字の頭部）と東西方向の部分（T字の下部）とに分けられる。前者の地下水位が11mから18mであるのに対し、中腹部から下部斜面にかけての后者の水位は、50cmから2m程度、深いところでも4m程度である。ボーリング調査の結果でも、后者の基盤が浅くなっている。

また、東川の左岸側には、五十子平を挟んで南の下鰐池から北の坪野にまで、直線状の尾根（標高400m前後）が連なっている。その尾根の中腹、標高350m前後に、それぞれ河川的作用によって作られた地形（これを布施（2001）は河成地形と呼んでいる）が残されている。したがって、尾根の中腹部には、現在の地形からは必ずしも明らかではないが、かつて河道があったであろう。

これらのことから、S型地下水の本流は、かつての河道跡を南から北に向かって流れている地下水であろう。五十子平の斜面では、南北方向に長くなっている部分がそれに相当している。五十子平地内でのその流路は、天明時代（江戸後期1780年台）に発生したといわれている地すべり（図－8の右側の地すべり）によって遮断された。そして、その地下水の一部が流路から溢れて斜面を流れ下った。その結果として、この斜面でのS型地下水は、T字型の分布となったのである。つまり、ここでのS型地下水には、本体部分とそこから溢れた部分とがあるのである。

右側の地すべりの頭部で、豊富な水量の地下水が観測されている。尾根までの狭い集水域だけでは、その豊富な量を説明できない。S型地下水の本体部分から供給された地下水であろう。

おわりに

クラスター分析を用いた地下水賦存状態調査の有効性を、既存の地下水追跡試験や電気伝導度調査の結果と比較することで検討してきた。その結果、それらとは高い精度で整合した。それ以上に、地下水の賦存状態に関していえば、既存のそれらの試験や調査では得られなかった情報を得ることができる解析結果となった。たとえば、地下水の区分とそれらの平面的な拡がりであり、季節による地下水塊（脈）の膨縮や消長である。

この地下水賦存状態調査は、きわめて簡便な方法である。用いるデータは、地下水位の観測記録だけである。地下水位の観測は、今では地すべり調査の基本的かつ基礎的な調査項目である。そしてクラスター分析は、パーソナル・コンピュータの表計算で容易に行える。したがって、季節による地下水塊（脈）の変化を明らかにすることも、また、年次を変えて繰り返し分析することも容易である。その結果、地下水塊（脈）の興味深い多様な変化を垣間見ることができるであろう。

この方法は、簡便な方法でありながら、地下水の賦存状態を推定する上で有効な方法で

ある。しかし、この方法にはその前提からもたらされる必然的な制限性がある。互いに異なった、それぞれ独立した地下水塊（脈）を同一のものとみなす誤りを犯す危険があるのである。したがって、分析には慎重な態度が必要であり、分析結果の解析には、現地を熟知した経験者の判断が不可欠である。

これまでに解析した事例はわずかである。今後の課題として、解析事例をさらに増やす必要がある。そして、最終的には、対策工事による検証が必要である。

謝辞

これまで述べた地下水賦存状態調査結果について、株式会社村尾技建の新関敦生執行役員技術部長（技術士）には、全般的な討論をしていただき、貴重なご意見及び示唆をいただいた。また、五十子平地すべり地の解析結果について、同社の菊地昭仁調査部長、波形治技術部長及び山田一幸係長からは、現地を調査した経験に基づいた検討をしていただいた。厚く感謝申し上げます。なお、五十子平地すべり地での地下水賦存状態調査には、村尾建治社長の多大なご協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 青木 滋・佐藤 修・鈴木 幸治 (1981) : 高倉地すべりについて、新大災害研年報、no. 3、
p. 23-30
- 布施 弘 (2001) : 松代町東部地域の河成地形―洩海川・越道川筋にみる河成地形と地すべり地形―、新潟応用地質研究会誌、no. 57、p. 25-31