

日本の地すべり研究の発展と未来 —斜面変動場における地下水文・水理学の進展と今後の課題—

Development and future scope of research on landslides in Japan

—Progress and future prospects for groundwater hydrology and hydraulics in landslide areas—

松浦純生^{a)*}

Sumio MATSUURA

Abstract

Field observations of groundwater which may induce slope failures and landslides were conducted at mountain slopes from the 1960s, and various physical models were developed at around the same time. After the 1980s, measurement techniques were developed that can acquire the data of pore water pressure fluctuations during not a snow cover period but an earthquake. With the evolution of investigation technologies, the flow processes of groundwater in slopes can now be visualized. In addition, large-scale analyses using a distributed model are possible to simulate the change in spatial distribution and flow of groundwater before and after the construction of landslide control works like drainage boring, well and tunnel. In future, observed data should be classified into types and made available as open data sets. It is necessary to improve investigation technologies to clarify the hydro-geological structure and three-dimensional groundwater flow analysis in fissured and weathered slopes. A fluidized moving body, whether generated by a slope failure, deep-seated landslide or reactivated landslide, flows down over long distances and spreads widely, causing severe damage in the lower catchment. Therefore, studies on the interaction between displacement and deformation of landslides and pore-water pressure should be conducted by indoor or outdoor experiments and numerical simulations. In addition, groundwater hydrology and hydraulics in landslide areas should be established as a new research field based on the knowledge gained from previous studies.

Key words : groundwater, pore water pressure, fluidization, data set, typification, new research field

和文要旨

崩壊や地すべりなどに関わる山地斜面内部の地下水については、1960年代から山地斜面での現地観測が盛んに行われ初め、各種のモデルが多数開発された。1980年代以降は計測技術の発達により、積雪期間や地震時における間隙水圧の変動データも得られるようになってきている。最近では調査技術の進化に伴い斜面内部の地下水の流動過程なども可視化できるようになってきた。一方、解析技術の高度化と計算機の高性能化は、分布型モデルを用いた地下水の空間分布や流動方向の時間変化、さらには地下水排除工の施工による地下水位の変動解析を可能とした。今後の課題としては、これまで得られた観測データのデータベース化や類型化を進めるとともに、水文地質構造を明らかにするための調査技術や亀裂性岩盤、風化岩等における三次元地下水流動解析技術の高度化を推進する必要がある。また、表層崩壊や深層崩壊、再活動型地すべりのいずれも、流動化した土砂は長距離にわたり流下するとともに広範囲に拡散し、大きな被害を与える。このため、室内実験や数値実験により移動体と間隙水の相互作用についての研究を重点的に推進する必要がある。また、これまで得られた豊富な知見を体系化し、「斜面変動場における地下水文・水理学」という新たな分野を確立したい。

キーワード：地下水、間隙水圧、流動化、データセット、類型化、分野の確立

1. はじめに

降雨や融雪時に表層崩壊や深層崩壊、さらに地すべりなどの斜面変動が発生することから、これらの現象は斜面地盤内部の地下水と密接な関係にあると古くから認識されてきた。このため、地すべり等の斜面変動の発生機構を明らかにするとともに、斜面の安定性を確保することを目的として、斜面地盤内における地下水の経路や流動、さらに水理的な性質を明らかにするための調査や観測はもちろんのこと、斜面変動に関わる地下水の理論的な研究や流動解析技術の開発が行われてきた。なお、本論で用いる「斜面変動場」とは地殻変動や地震活動が活発に起こっている「変動帯」の狭義の場を意味するのではなく、前述のように侵食や崩壊、地すべりなど斜面地盤の変形や変位が発生する場、およびその周辺を意味する。

斜面変動に関わる地下水の研究は、主に2, 3のアプローチ

から研究がなされてきたと考えられる。一つは水循環の一過程として、斜面に到達した降水が表層土へ浸透した後、どのように流動し貯留、排出されるかといった水文学的な観点からの研究であり、もう一つは地盤工学的なアプローチからである。つまり、斜面の安定性を評価する場合、有効応力の関係から地下水の水理的な性質である間隙水圧の分布や変化を正確に捉える必要性があり、そのため地下水の調査や研究が行われてきた。

前者は主に表層崩壊や深層崩壊、後者は地すべりや深層崩壊の研究に取り入れられ、いずれも調査・観測技術の開発や解析理論の研究、さらに計算機による解析技術の発達により、長足の進歩を遂げている。また、水理定数を評価するための各種試験や地下水排除工などの施工効果に関しては、当初、平野の地下水学で発達した水理学の知見が準用され、その後、分布型モデルに組み込まれ改良されている。

本論では既往の研究を概観しつつ、これまで得られた知見を整理するとともに、残された課題を検討し、今後

* 連絡著者 / corresponding author

a) 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
〒611-0011 宇治市五ヶ庄

取り組むべきテーマについての提言を行う。なお、本論では、総説の趣旨から表層崩壊関係については主要な研究成果や流動化など地すべりに共通する成果の紹介にとどめ、地すべりに関係する地下水を中心としてとりまとめた。

2. 斜面変動に関与する地下水研究のアプローチ

2.1 水循環過程からのアプローチ

山地斜面に到達した雨水の浸透過程に関する研究の歴史は古く、1930年代に遡ることができる。Horton (1933) は斜面に到達した雨水が表面流と土壌浸透の二つの基本的な成分に分離できる理論的な考え方を示し、斜面水文学の古典的なモデルとなった。その後、1960年頃から山地表層の地盤における観測が盛んに行われるようになってきた (Dunne and Black, 1970)。ただし、それらはあくまでも水循環過程の一環として斜面地盤内での浸透、貯留、排出のプロセスを明らかにしようとする水文学的な要素が強く、崩壊発生メカニズムを主目的にするものではなかった。現地観測で得られたデータの解釈に加え、各国の研究者によって理論的な研究も精力的に行われた結果、1970年代には不飽和浸透流、飽和側方流、中間流などの斜面の表層土中における降水の浸透流出過程の概念がほぼ確立した。

日本の山地斜面は大部分が森林に覆われている。したがって、間隙に富み透水性が良い森林土壌が発達することから、いわゆるホータンの言う表面流はほとんど発生しない。すなわち、強い雨が降っても大部分は斜面内部に浸透することになるので、流出解析を行うにしても、崩壊の発生機構を明らかにするためにも、斜面内部の地下水の挙動が非常に重要な課題となる。

一方で、日本は東アジアモンスーン地帯に位置するため降水量が非常に多く、過去から洪水とともに崩壊は大きな社会問題であった。当初、崩壊発生に関する研究は降雨パターンとの関係を明らかにすることから始まったが、崩壊発生メカニズムを明らかにするためには、降雨による斜面内部の水の挙動も考慮に入れる必要性が生じ、斜面（森林）水文学における成果を基礎とする崩壊研究が主流となった。鈴木ほか (1981) はタンクモデルを用いて急傾斜地での崩壊の研究を行った。さらに、表層崩壊の発生時期の予測だけでなく、発生箇所の予測についての取り組みも行われ、沖村ほか (1985) は数値地形情報と分布型モデルを組み合わせ、表層崩壊の発生位置などを予測するモデルを作成した。その後、浸透流解析と斜面安定解析を組み合わせたモデルも開発され、様々な箇所でも適用されるとともに、モデルの改良も行われている (平松ほか, 1990; Wu and Sidle, 1995; 三隅ほか, 2004; 黒川ほか, 2007; 内田ほか, 2009)。

一方、表層土内には地下水が選択的に流れる不規則な大間隙である土中パイプが存在し (Tsukamoto *et al.*, 1982)、効率的に排水することによって斜面安定に寄与するものの、排水に伴う地下侵食によって崩壊が引き起

こされる可能性が示唆された (新藤, 1993)。その後、パイプ流を誘因とした表層崩壊の研究がモデルの開発も含め、積極的に取り組まれている (Uchida, 2001; 堤ほか, 2005)。

2.2 事前評価技術からのアプローチ

斜面水文学で深部浸透と呼ばれる表層土より下位にある基岩への雨水等の浸透は、山体深部の地下水流動を形成する。この地下水は鉄道や道路建設の支障となったり、電源開発や流域管理の重要な指標となることから、山体深部における地下水の動態を明らかにするための調査研究が古くから行われてきた。

丹那トンネル建設に伴う大出水と丹那盆地での湧水現象について、水文学的な見地から阿部 (1930) が行った観測井の水位とトンネルからの湧水量を比較した調査研究は、山体深部における地下水学の貴重なデータとなっている。一方、電源開発のために流出量調査が行われ、第四紀火山体や花崗岩地帯では深部浸透が多いことから流量が安定し、湧水時の比流量が大きいことが、菊池 (1932) によって明らかとなった。

このように、鉄道建設や電源開発、あるいは水資源開発に関連し、水文学の一分野として「山地の地下水学」が発展する兆しはあった。しかし、いずれの調査も工事の事前評価技術として継承されるに留まり、井戸の揚水理論が導入された後は、高度経済成長に伴う地下水の需要が高まったこともあり、「平野の地下水学」がほとんど「水文学」の同義語として扱われた時期もあった。ただし、前述のように、地すべり対策調査で用いられる水理定数の調査や地下水排除工の事前および事後評価には、平野の地下水を対象とした水文学や水理学で研究、開発された理論や技術が基礎となっている。

時代は下り、1980年頃からはダムの建設や貯水池からの漏水問題に対処するため、岩盤の透水性を規定する断層や節理系の空間分布と裂か水の水理学的性質についての検討がなされた (渡辺ほか, 1981; 川谷ほか, 1984; 中屋ほか, 1993)。また、各種の水理調査法を水みちの構造を把握するために総合化する手法や (杉村ほか, 1997)、水みちを管路網として表現する岩盤浸透モデル (杉村ほか, 1999) などの方法も多数提案されている。最近では、放射性廃棄物の地層処分に関係して、山体深部の地下水流動の研究が盛んに行われるようになった。

一方、鹿児島県出水市で発生した深層崩壊を契機として、山体の深部に賦存する地下水と深層崩壊の関係についての研究がなされた。地頭蘭・下川 (1998) や地頭蘭ほか (2006) は、深部浸透に関わる流域流出量調査の手法を用い、地下水位の降雨に対する応答特性から、崩壊発生機構を明らかにしようとしている。

2.3 斜面安定問題からのアプローチ

地すべりの発生に関与する地下水は、安定計算上の観点から考慮しなければならないテーマであった (Fellenius, 1927; Terzaghi, 1936)。ただし当初は、自然

斜面の地すべりを対象としたものではなく、鉄道や道路建設に伴う人工斜面の地下水で、間隙水圧は有効応力の低下を招くことから斜面の安定性を確保する意味で重要な問題であった。その後、Bishop (1955) によって、間隙水圧を考慮した解析法が提案され、有効応力理論の発展に大きく寄与した。

日本では長雨や融雪などによって地すべりが多数発生していたことから、地下水を排除する対策工の必要性は昔から考えられてきた。1933年には鳥取県で暗渠工による地下水排除工が施工されたが、当然のことながら表層の浅い地下水の排除だけでは効果はなく、工事は失敗に終わった。その際、工事は実施されたものの地下水観測などは行われていない。戦後になって、地すべり災害が大きな社会問題となるにつれ、再度地下水との因果関係が注目され、対策工事の必要性から地下水調査が始まることになる。1950年には新潟県で本格的な地下水観測が行われ、地すべり発生との因果関係が検討された（高野, 1960）。その後、地すべりの発生機構を解明するとともに、地すべりの誘因となる地下水を効率良く排除する目的で地下水調査が行われるようになる（岸本・大平, 1964；岸本, 1967；中村ほか, 1970）。

以上のように、水循環過程のうち深部浸透によって形成される地下水の研究、ならびに大規模な建設工事に伴う事前評価としての調査研究を基礎として深層崩壊に関わる地下水の研究が行われてきた。一方、地すべりに関わる地下水研究は、主に斜面安定対策技術の一環として、間隙水圧をいかに評価するかと言った地盤工学的なアプローチから取り組まれてきたと言えよう。

3. 斜面変動場の地下水を取り巻く諸問題

3.1 存在場の複雑さ

一般に沖積地盤などの地下水と比較して、山地斜面の地下水は多様性、異方性、局所性などに富んでおり、複雑な挙動を示すことは以前から指摘され（松林・望月, 1969）、現在においても大きな課題として残されている（川上, 2009）。そもそも、日本の山地における地質環境は多様だが、とりわけ崩壊や地すべりが発生する斜面変動場の水文地質環境は極めて複雑である（藤田, 2004）。

例えば火山体およびその周辺では一般に透水性は良好で、地表面に達した水は深部まで浸透する。ところが、火山噴出物は透水性の良いスコリアから不透水性の溶岩まであり、それらが重層的、複合的な構造をもつため、水文地質構造も複雑である。長野県西部地震などで発生した御岳山の大規模崩壊のように、崩壊して初めて埋没谷の存在（平野ほか, 1985）が確認され、崩壊発生の重要な素因となっていることが分かる場合もある。埋没谷は地下水の流動と涵養の場になることが多く、深層崩壊や地すべり発生の重要な素因となりうるものが以前から指摘されてきた（中村, 1972；江川, 1978）。

貫入岩体周辺も水文地質的に複雑な様相を呈する（布

施, 1977）。日本海側に広く分布する厚く堆積した第三紀層帯では、安山岩やひん岩等の貫入によって菱ガ岳や丈ヶ山などの貫入岩体が多数形成されている。これら貫入岩体の周辺は複雑な応力を受け破碎帯が発達するとともに、周辺はいわゆる流れ盤構造となっていて、地下水は深部まで容易に浸透し、断層や節理に沿って流動する。とりわけ日本海側付近では冬期間に降った雪が融雪期に多量に融けるため、大規模な地すべりの誘因となる場合が多い。

一方、紀伊半島や四国、あるいは九州の山地では生成年代が古いため岩石自体は強固なものの、付加体の形成過程における構造運動を受けて断層破碎帯が発達し、深部まで雨水が浸透しやすい環境となっている（末峯ほか, 1984；高木ほか, 1990）。このような地域では降雨強度が大きいくとも、継続時間が長く総量が大きくなると、雨水が山体の奥深くまで浸透し、深層崩壊や地すべりが発生する。2004年に台風10号によって四国で発生した災害や2005年における九州での災害、および台風12号による2011年の紀伊半島での大規模な災害が記憶に新しい。その他、過褶曲構造や断層（望月, 1977；阿部ほか, 2004）、キャップロック構造地帯（玉田ほか, 1994）などでは、いずれも複雑な水文地質構造を形成する。

埋没谷や貫入岩体等の対象論的な地下水の存在場とは別に、斜面変動の分類学的な観点から地下水が存在する場を一般化すると、岩盤、変質岩を含む風化岩、崩積土（岩屑）、粘性土、表層土などに分けられ、それぞれ特有の、あるいは複合した地下水の賦存や流動形態を示す。

以上のような地下水が存在する場の複雑さや多様性がより一層、崩壊や地すべりの発生機構の解明や効果的な防止対策を妨げる要因となる。

3.2 動的に変化する水文地質環境

日本の地すべりは過去に活動した経験を持つ、いわゆる再活動型地すべりが多い。したがって当初の水文地質構造が、地すべり活動によってさらに攪乱される場合がある。つまり、地すべりはその構成要素である斜面地盤の変位と変形を起こすため、わずかな動きでも水みちが閉塞したり新たな水みちが発生するなど、水文地質構造がダイナミックに変化するという特徴を持つ。さらに、変位と変形が進行すると地下水が存在する場そのものの消失を招く結果となる。斜面から分離した移動体内部では体積変化等に起因した過剰間隙水圧が発生し、移動体が流動化することもある。流動化した移動体はしばしば土石流となり、斜面変動場のみならず下流域にも被害を拡大させる結果となるが、詳しくは後述する。

3.3 選択的に流動する水

崩壊や地すべりなどが発生する変動場では、地下水は断層や節理、片理などの不連続面や風化した部分に発達するパイプなどを選択的に流動し、貯留、排出される場合が多い。もちろん、風化が強度に進行した箇所や岩の性質によっては均一なマトリクス流的な流れも発生する。しかし、実際に山地の斜面変動現象を支配しているのは、

大部分が亀裂流やパイプ流など斜面地盤内を選択的に流れる水と考えられる。

マトリクス流はダルシー則で表すことができるが、亀裂流に関しては水理学的な理論や解析手法の確立などが未だ不十分であるなど解決すべき点が多い。もちろん、解析スケールを大きくすると見かけの透水係数などを用いることにより、等価多孔質媒体としてのそれらしい水の流れや分布を再現することは可能である。しかし、一般に斜面変動場では、スケールに対して局所的な問題を無視することができない場合が多く、実現象の把握には困難を伴う。さらに、現在の探査技術によっても優勢な地下水が存在し流動する場である不連続面やパイプの空間分布を把握するのが困難といった現実が横たわる。

4. 地下水位および間隙水圧の調査観測事例

4.1 無積雪地帯もしくは無積雪期間における観測

地すべりの移動は間隙水圧と密接な関係があることから、間隙水圧の観測は地すべりの発生機構調査の中で重要な位置を占めている。間隙水圧の観測はカサグランデ式の井戸内の地下水位を計る方法や、間隙水圧計を直接地盤内に埋設する方法などがある。しかし、深いすべり面をもつ間隙水圧の観測には地下水検層など事前調査や正確な設置技術が必要でコストも嵩むため、表層崩壊に関与する間隙水圧あるいは自由地下水位の連続観測に比べると観測例は少ない。それでも水位観測井などを用いて、手ばかりで地下水位を定期的に観測する方法などが行われてきた（中村ほか，1970；池田ほか，1975；Kenney and Lau, 1984）。

その後、地下水位の観測は自動化が進み、様々な箇所地下水位や間隙水圧の自動観測が行われ、変動パターンが明らかになってきた。それまでは人力による観測が主体であったため測定間隔が長く、年単位の長期的な変動特性は明らかになったものの、ピークの取りこぼしなどにより、降雨イベントに対する数時間から数日間にわたる短期的な応答特性は不明な点が多かった。しかし、自動化によってより短い測定間隔の観測が可能となり、第三紀層泥岩や中生層などの地すべり地で自動観測が行われ、各地質タイプの地すべり地における降雨～間隙水圧、及び間隙水圧～変位量、並びに降雨～変位量の変動特性等が明らかになってきている（檜垣ほか，1991；近藤ほか，1992；榎田ほか，1994；丸山，1994；亀井・榎本，1996；Angeli *et al.*, 1996；田村ほか，2007；林ほか，2010）。

4.2 積雪期間における観測

一方、積雪地帯に位置する地すべり地での冬期間の観測は、厳しい自然条件のため手ばかりでの観測ですら困難であった。しかし、計測技術の発達によりデータロガーを用いた自動観測が行われ、第三紀層（Ogawa *et al.*, 1987；丸山，1993；Matsuura *et al.*, 1998；高野ほか，2007）やウェルフェンマール上のモレーン堆積物（An-

geli *et al.*, 1988），クイッククレイ堆積域（岡本ほか1999；Larsen *et al.*, 1999）での地すべり地における冬期間の間隙水圧の挙動が徐々に明らかになってきた。ただし、積雪期間における間隙水圧の動態観測は行なわれているものの、積雪底面から地すべり地に流出する融雪水量を含めた積雪環境と間隙水圧の変動に関する詳しい検討はこれからの課題となっている。

4.3 地震時の観測

地震等の外力によって埋め立て地盤だけでなく自然斜面でも過剰間隙水圧が発生することがHarp *et al.* (1984)によって報告された。日本では長野県西部地震で初めて地震時の動的な間隙水圧の変動が観測され、その結果、上下方向の加速度が過剰間隙水圧の発生に大きな役割を果たす重要な成果が得られている（Ochiai *et al.*, 1985）。その後、静的な観測でも地震時に間隙水圧が上昇する現象が報告されているものの（岡本ほか，2006），動的な間隙水圧の観測には地震動の観測に準じた周波数のサンプリングが必要なことから、実際に観測され解析が行われた事例は少ない。

一方、兵庫県南部地震を契機として、谷埋め盛土での液状化とそれに続く地すべりの発生が大きな社会的問題となった。このため、釜井（2011）は関東地域の宅地造成地盤で地震加速度と間隙水圧の観測を行い、地震時における谷埋め盛土地盤内の間隙水圧の応答特性などを明らかにした。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、谷埋め盛土に造成された宮城県内の住宅地が多数の被害を受けたことは記憶に新しい。今後、山地斜面だけでなく都市域周辺における谷埋め盛土の問題についても調査研究を進める必要がある。

4.4 その他の観測事例

地すべり等の斜面変動によって間隙水圧の応答が見られることがある。移動体の変位し変形する際の内力によって移動体内部の間隙水圧は変動することが知られている。その一般的な解釈は変形することにより、過剰間隙水圧が発生することであり（Okura *et al.*, 2002），後述する移動体の流動化に深く関与している。反対に、地すべりの大きな移動によって地下水が消散し、一時的に間隙水圧が低下する現象が観測される場合もある（Matsuura *et al.*, 2005）。地震以外の外力としては積雪荷重があげられるであろう。丸山（1993）はクイッククレイ地すべり地で、積雪荷重によって間隙水圧が上昇する場合があると報告し、日本の第三紀層地すべり地でも同様な間隙水圧の変動が観測された（Matsuura *et al.*, 2003）。

5. 地下水調査方法

5.1 地下水検層

ボーリング孔内に流出入する地下水の挙動を明らかにし、地すべり移動体に作用する間隙水圧を推定するための手法として、調査ボーリング孔を利用して行う地下水検層法がある。通常、ボーリング孔内の水位は、観測孔

のストレーナ区間に分布する各層の地下水頭が混在した結果を示し、孔内水位を形成する過程で、鉛直上昇流あるいは下降流を伴いながら、地下水の流入あるいは孔内水の流出が発生する。

ボーリング孔内でこのような地下水の流動が測定されたのは1957年で、その後、渡・酒井（1965）はボーリング孔内に食塩を投入し、地下水の比抵抗値を測定することで地下水の流動現象をとらえる方法を地下水検層として発表した。さらにさまざまな理論的な裏付けがなされ（申，1976）、現在広く一般に用いられている。地下水検層方法を用いると、直接被圧地下水の存在が確認できるとともに、その水理特性も明らかにすることが可能となる。その後も、地下水検層結果の判読方法等についての改善が試みられている（丸山，1997）。

地下水検層では、地下水の比抵抗値を測定することで孔内の流動状況が推定できるが、直接地下水の流速を計測する試みもなされてきた（羽田，1977）。1985年ころから、さまざまなトレーサや検出方法などを利用した流向・流速計が開発され、CCDカメラなどを利用して性能の向上が図られてきている（山田・荒川，1999；小林ほか，2003）。流向・流速計は地下水の流動を精度良く計測できるという長所があり、地すべり調査に有用であるが、地下水検層や温度検層との比較検討が必要である（上野，2000）。また、測定された孔内流速と実際の地盤の中を流れる地下水の流速との関係などについては、実験（粕井ほか，1989）等による研究成果があるものの、今後の検証すべき課題であろう。

5.2 電気探査

ボーリングでの調査は点での観測となるため、面的な調査を行う必要性から弾性波探査などとともに電気探査の利用が考えられ、1950年前後から実施された。当初は、すべり面の同定に期待が寄せられたが、当然そのような精度は持ち合わせておらず、一時期、重要視されなくなった。しかし、地下水を含めた定性的な予備調査に電気探査が有効であるとの考えが示され（高田，1969）、徐々に多用されるようになった（竹内，1970；田治米・村瀬，1970；竹内・長江，1990）。

電気探査には自然電位法など多くの種類があるが、現在も一般に広く用いられているのが人工電位法のうち比抵抗法であり、小島ほか（1989）は塩水トレーサを利用して岩盤内の地下水流動を画像化した。崩壊に関しては、シラス台地の降雨浸透過程を高密度電気探査によって計測した事例（和田ほか，1995）や、のり面表層部における降雨の地下浸透過程を電気探査と体積含水率の測定によって検討した事例（鈴木ほか，2002）などがある。

Park et al.(2005) は地下水の豊富な第三紀層の再活動型の地すべり地で比抵抗映像法による高密度電気探査を行い、地下水の分布特性を明らかにした。田村ほか（2007）は岩盤斜面で豪雨時の地盤深部への浸透過程を調べるため、比抵抗映像法と比抵抗トモグラフィによる

電気探査を実施し、斜面深部の比抵抗構造を精度良く探查できることを示すとともに、比抵抗の変化率を計測することで地下水の透水過程や経路を把握することが可能であることを検証している。

電気探査で留意しなければならないのは、比抵抗はあくまでも相対的な電気抵抗の大きさを示すのであって、実際に地下水の分布をそのまま表すとは必ずしも限らないことである。この技術を用いても地下水のもつ水理特性を精度よく推定することは未だ困難であるが、地盤内の地下水分布状況などをより高精度かつ客観的に画像化することが可能となり、インバージョン技術の向上とも相まって、地下水排除工などの地すべり防止対策工の効果を検証するには有力な手法となりうると考えられる。

5.3 地下水位調査

地すべりの安定に重要な影響を及ぼす地下水位の観測には、調査ボーリングに保孔管を立て込んだ全孔ストレーナ観測が頻繁に用いられてきた。しかし地すべり土塊内では複数の地下水帯水層が存在し、それぞれ賦存状態も異なることから、すべり面に作用する間隙水圧だけを観測する必要性が以前から指摘されてきたものの（岸本，1969）、実際は経済的な理由などによりまだまだ全孔ストレーナによる地下水位観測が行われているのが現状である。このような観測方法だと、孔内の水位は複数の帯水層の地下水頭（全水頭）が混在した結果を示すことになり、実際にすべり面に作用する間隙水圧（圧力水頭）を見逃すことになってしまう。

そこで、すべり面に作用する間隙水圧を観測する方法として、ボーリング孔にストレーナ区間の上下をパッカー処理した塩ビ管を立て込み、孔内に形成される水位を計測することによって間隙水圧を測定する方法が考えられた。以前はフロート式の水圧計で計測していたが、性能の良い間隙水圧計が比較的安価に入手できるようになり、今では圧力センサーを孔内に投入する方法が一般的である。一本のボーリング孔に複数のストレーナ区間を設け、それぞれに間隙水圧計を設置し、同時に異なる間隙水圧を測定する試みもなされた（桧垣ほか，1991）。この方法は、移動量が激しい地すべり地では観測孔の変形や破壊などを伴うため不適当なものの、効率的に複数の間隙水圧を観測できるメリットがある。ただし、設置の難しさや経済的な理由から、依然として全孔ストレーナでの水位観測が行われる場合が多く、根本的な解決には至っていない（上野・中里，2012）。

5.4 地下水追跡調査

水循環の過程を把握するために自然に存在する放射性同位体の $^3\text{H}(\text{T})$ 、安定同位体の $^2\text{H}(\text{D})$ および ^{18}O などを用いた調査技術が、土木工学や水文学の分野などで多用されている（田瀬，2003）。しかし地すべり地における調査では、粘土鉱物の生成に関して補助的に利用した事例（川原谷・松葉谷，1998）や、地下水の起源と混合状況、及び滞留時間に関する調査研究（川原谷ほか，2000）、

排水トンネルの抑制効果についての研究事例（石田ほか，2005）などあるが，適用例は多くない。

循環水の流出経路やその時間的な遅れなどを，渓流水のハイドログラフや水質調査などから推定する試みが水文学の分野で行われてきており，ある程度，地盤内の水の流れが推定できるなどの成果が得られている（小林・本山，1985）。地すべり地においても湧水や渓流水を化学的に分析し，地下水系および水文地質条件の違いを判定するための水質調査が行われ，一定の成果をあげてきた。

水質分析試験における地下水の採水は，地すべり地及びその周辺の湧水点，井戸及びボーリング孔等から行なわれる。湧水点は水質および水量調査の有力なポイントとなるが，これは湧水点が地下水環境を顕在化する場であることによる。湧水点などで得られたサンプルは，実験室に持ち帰り水質分析が行われるが，現地でも直接水質の計測が行われる。現場での計測では水温，pH，電導度，比抵抗，溶存酸素量等が測定され，室内試験ではpH， Na^+ ， K^+ ， Ca^{2+} ， Cl^- 他，主要成分の含有量を測定することが一般的である。このような水質調査を行うことによって，地すべり地における水質とその周辺にある安定した地盤の水質の違いが明らかとなり，潜在的な地すべり地の判定などに有効であるとされる（佐藤・青木，1990；稲葉ほか，1991；渡辺ほか，1996；古谷ほか，2005）。また，地すべり地内の各ブロックにおける水質の違いや異なる深度で採取した水質からも，すべり面付近に供給される地下水についての有用な情報が得られる可能性がある。今後，分析技術の進歩にともない，より精度の高い地すべり発生危険地の判定技術の向上が期待される。

6. 解析技術

6.1 集中型モデル

斜面変動場における地下水解析技術は大きく分けて二つの系統がある。一つは流域からの流出量を予測するための方法と，もう一つは井戸の水理学から発達してきた解析方法である。前者はいわゆる集中型と呼ばれている方法に，後者は分布型モデルに該当する場合が多い。

集中型とは，流域に到達する降水を何らかのシステムで変換し流出量を推定する方法のことで，一成分系と多成分系に分類できる。前者は実効雨量による方法が一般的で，後者はタンクモデルが代表的な手法と言えよう。なお，斜面変動場に应用される場合は，流域流出量の代わりにボーリング孔内での水位や間隙水圧の変動量を予測するために使われる。

ただし，実効雨量とは流域からの流出量予測ではなく，領域内の土壤水分量を推定するための指標で，API (Antecedent Precipitation Index) (Chow, 1964) を応用した考え方である。先行降雨などを用いて比較的簡単に地下水位の変動を予想することができるため，当初は崩壊予測に用いられた（細野，1974；鈴木・小橋，1981）。実効雨量ではなく，降雨パターンから土壤水分量を推定

し，斜面の安定性を評価した事例もある（駒村，1988）。これらはいずれも表層崩壊を対象として適用されたが，地すべりの変動予測に用いられた事例もある（増山，2008）。

集中型の多成分系であるタンクモデルは，流域からの流出機構を浸透孔と流出孔を持った数個の貯留型タンクの組合せによってモデル化することで，水収支や流出特性を容易に説明できる方法である。このモデルは1960年代に開発され（菅原，1972），適合性もよいことから流出解析に盛んに用いられてきた。タンクを複数の帯水層としてイメージできるなど，直感的にわかりやすく，定数の組み合わせで複雑に変化する水位（貯留高）も表現可能などのメリットがある。一方，同じような水位変動を再現する定数の組み合わせが一義的に決定できないことから，得られた定数がそのまま斜面地盤の水理定数に相当するとは限らないことに注意する必要がある。また，基本的に不圧地下水での水収支を基にしたモデルであるため，有圧地下水の場合は工夫が必要になる。吉松（1980）はタンクモデルを地下水変動現象の解析に用い，寺川ほか（1982）はさらに複雑な構造を持つモデルを作成した。神原（2002）はタンクモデルを用い，貯留高と地すべり移動速度を関連づけ，混在する降雨に依存した移動と材料特性によるクリープ運動の分離を試みている。

その他， Ψ 関数モデル（榎田，1992），ニューラルネットワークモデル（吉松・向，1995），カルマンフィルタなどによる方法がある。これらの集中型の特徴として計算が簡単なことや，中～小規模の地すべりの二次元断面を用いて，比較的簡単に将来の降雨イベントに対する安定性を評価することができる。

集中型ではないが，流出解析などで古くから用いられているDM (Double-Mass Curve Analysis) 解析と言う手法がある。環境変化が原因となって観測値が変化したかどうかを確かめるための手法で，これを応用して地下水排除工の施工効果を検証した事例がある（榎田ほか，1994）。

6.2 分布型モデル

一方，分布型モデルは流域を細かい要素に分割し，それぞれの要素に物理的な意味を与えて水の流れを推定する方法である。地下水流動が複数の流動系で構成されていることを解析的に明らかにしたToth（1962）以降，計算機の発達と微分方程式の数値解法技術により，分布型モデルを用いた地下水流動解析が大きく発展した。なお，本論ではダルシー則を用いた解析についてとくに浸透流解析といい，浸透流解析も含め，それ以外の法則を用いた地下水の流れ解析を地下水流動解析とする。

水の流れに関する支配方程式を解くには解析的方法の他に境界法と領域法があり，前者は境界要素法（BEM）などが，後者は差分法（FDM）と有限要素法（FEM）がある。境界要素法は従来の古典的境界積分法を引き継ぐ手法で，小回りのきく解析法といえる。この方法を用いた非定常飽和浸透流解析が吉松（1989）によって試みられ，翌年には不飽和領域まで考慮した浸透流解析が行

われた（吉松，1990）。しかし昨今では，計算機の能力の向上に伴い，より応用範囲が広い有限要素法に取って代わられている。

差分法や有限要素法は支配方程式を近似的に解く方法で，流域内を細かく分割しメッシュ毎に計算する必要がある。したがって，必然的にデータ量が多くなり計算も複雑なため計算機に対する負荷量が大きくなるものの，詳細な水文地質情報が考慮されているため再現性の高い結果を得ることができる。

なかでも，構造工学の分野に応用され発展した有限要素法は，Zienkiewicz *et al.* (1965) によって浸透流解析に導入され，日本では赤井ほか（1977）によってFEMによる浸透流解析が行われた。その後，計算機の飛躍的な性能の向上にともない，複雑な水文地質構造を持つ地すべり地でも，浸透流解析が盛んに行われている（吉松・工藤，1990；稲葉ほか，1994，若井ほか，1999；浅野ほか，2000，白木・中村，2001）。

地下水流動解析では，地下水が選択的に流動する不連続面等の空間的な分布をいかに把握するかという問題の他に，亀裂性岩盤や風化岩中に発達する水みちをどのようにモデル化するかといった問題もある。渡辺・今井（1984）は岩盤内の地中パイプを想定した解析を行い，Tsutsumi *et al.* (2005) は浸透流とパイプ流を組み合わせたモデルを提案した。山田ほか（2008）はメランジュ帯の地すべり地で亀裂，節理，断層などの断裂系を面要素としてモデル化し三次元の浸透流解析を行っている。

そもそも有限要素法などの分布型モデルは，空間的な広がりをもつ変動場全体の水の流れを検討できることから，効果的な地すべり対策工の配置や数量，諸元などの計画や設計の参考となるばかりでなく，施工効果の検証にも有効である。このため，対策工を直接モデル化して，対策前の地下水流動と地下水排除工を施工した場合の効果などの解析が可能となる。

吉松ほか（1990）は集水井の施工効果を疑似三次元モデルを用いた飽和・不飽和浸透流解析を行った。その際，対策工のモデル化については様々な工夫がされている。集水ボーリングを圧力水頭0の節点あるいは透水性の高い領域として一義的に取り扱う手法（駒田・宮口，1980；鶴飼ほか，1998；Cai *et al.*, 1998；井良沢ほか，2002）が一般的である。一方，西田ほか（2000）は，集水ボーリングを透水係数を有する一次元要素として設定し，より柔軟な手法を提案した。また，岩堀ほか（2005）や國眼ほか（2005）は，排水流量を水頭依存する流量境界として設定し，三次元有限差分法を用いて対策工の評価を行った。浅野ほか（2005）は，排水トンネルへの接続を考慮したディープウェルの節点に透水性の高い線形一次元要素を配置してモデル化し，後背地からの融雪水の流入を再現するとともに，対策工の施工効果を定量的に示した。山田ほか（2008）は，前述の面要素を用いて，集水井による地下水排除工の効果判定を行っている。

7. 地下水と変動場の相互作用

地下水と斜面変動はお互い密接な関係にある。すなわち，斜面変動は間隙水圧の上昇や地下侵食などによって引き起こされるが，一旦変動が発生すると今度は変動によって間隙水圧が変化する。両者の関係は相互作用として密接な関係にあり，とくに後者は地山から分離した移動体の流動化を促進し，さらに土石流となって長距離にわたり流下および広範囲に拡散することで，斜面変動場のみならず下流域にも被害を拡大させる結果となる。

昭和50年に発生した高知県仁淀川土石流災害の調査によって，崩壊土砂が土石流化する可能性が指摘された（小橋ほか，1976）。さらに，芦田ほか（1983）によって山腹崩壊土砂の流動機構についての研究が行われた。ここでは，移動体の破壊と上部から供給される水量との関係から検討されたものの，移動体内部の間隙水圧までは言及していない。しかし，矢澤ほか（1985）によって，移動体の構造破壊による急激な体積減少が過剰間隙水圧を発生させ，流動化をより促進するのではないかとこの可能性が示された。

その後，飽和時含水比と液性限界を用いて，崩壊した移動体の流動しやすさを判定する指標（A. M. I. : Approximate Mobility Index）が提案された（Ellen and Fleming, 1987）。この指標を用いて山本ほか（1999）は流動化した崩壊地で試料を採取し，土質試験や流動化実験なども行いA. M. I.と比較したが，流動化機構の解明には至っていない。そもそも移動体の変形にともなう流動化は，応力履歴の少ない火山性堆積物帯や溪床堆積物帯，さらに人工地盤である谷埋め盛土などの未固結な斜面地盤で発生する。その後，崩壊実験で移動体の変形にともない過剰間隙水圧が観測されたことから（王・佐々，2000；Wang and Sassa, 2001；Okura *et al.*, 2002），流動化のメカニズム研究が進展している。

一方，移動した土砂が下方にある飽和層を移動する際，すべり面付近にある土粒子が上載圧と移動により破碎，粉碎されることで過剰間隙水圧が発生し，土砂が高速で移動する場合がある。移動体内部全層で発生する流動化現象とは異なり，いわゆるすべり面液状化と呼ばれる現象で，Sassa（1996）が提唱し，リングせん断試験などでこの現象が再現された。岡田ほか（2002）は，過剰間隙水圧の発生だけでなく，土粒子の破碎等によって透水性が低下し過剰間隙水圧の発散が抑制されることも原因となり，高速移動が継続されるとしている。さらに数多くの実験等によって詳細な検討がなされ，液状化機構とそれに伴う移動体の運動範囲の予測が行われている（汪ほか，2004）。田中ほか（2005）も実際に発生した流動性の高い地すべりを対象としてリングせん断試験等を行い，すべり面液状化とそれに伴う高速移動によって流動性の高い地すべりが発生したと説明している。さらにWang and Sassa（2009）は，間隙水圧の生成と消散のバランスが重要で，累積した過剰間隙水圧は移動距離と

密接な関係にあることを示した。

秦ほか（2007）は、実際に地震によって発生した再活動型の地すべりについて液状化解析手法を用い、移動体内部の過剰間隙水圧の上昇が長距離にわたる変位をもたらすことを検証した。一方、大野ほか（2010）は、地震によって発生した大規模な地すべりについて三次元有限要素法による応答解析を行い、すべり面液状化が発生しないと大きな変位を説明できないと指摘した。

8. まとめと今後の展望

水循環の一過程として山地斜面内部における水の動きが研究され、表層崩壊や深層崩壊の発生機構に関する研究が進展した。一方、斜面の安定問題に対処する必要性から間隙水圧の調査観測が始まり、地すべりや深層崩壊の発生に関わる地下水の研究が進んだと考えられる。双方とも観測や実験、理論の開発が同時並行的に行われるとともに、計測技術の発達によって様々な現象が明らかになり、それまでの理論の修正や新しい理論の展開が行われている。

地すべり対策の必要性から、各地および各種の地すべり地で地下水の観測が行われてきた。観測方法などに改善すべき問題点は残るものの、様々な地すべり地で精度の高いデータが得られた結果、降雨に対する地下水位や間隙水圧の変動特性が明らかになってきている。さらに、計測技術の発展は、それまで不可能だった冬期間の連続観測や、地震時の動的な間隙水圧の変動をとらえることを可能にしている。

また、以前はボーリング孔を用いた点での観測であったのが、探査技術やインバージョン技術の発達により空間的なデータも容易に得られるようになり、最近では斜面内部における地下水の流動過程なども時系列で可視化できるようになってきた。

解析技術の高度化と計算機の高性能化は、分布型水文モデルを用いた地下水の空間分布や流動方向の時間変化、さらには地下水排除工の施工による地下水位の変動解析を可能とし、より合理的で経済的な対策工の計画立案や施工効果の判定に有用な手段を提供するに至っている。しかし、亀裂性岩盤、変質岩も含む風化岩などでは従来の浸透流解析では説明が難しい地下水の流動も見られるため、引き続き理論的な研究開発を進め、解析技術の高度化を図る必要があろう。加えて重要なのは、斜面変動場を選択的に流れる水の空間分布をどのように把握するかという問題である。モデル作成の成否はもちろんのこと、モデルを使った崩壊や地すべりの発生危険度の予測、それらに対する効果的な対策工の計画とも深く関係するため、斜面変動場に賦存する地下水の探査技術の向上に期待したい。

崩壊と異なり斜面変動場に移動体が残置する場合が多い地すべりの場合、対策工が施工されるため、既往の調査事例や観測データが豊富にある。対策工を施工した所

管により、調査解析の手法や用語は必ずしも統一されていないものの、これらの資料が斜面変動場の水に関する調査研究の深化と発展を促すと期待される。したがって、対策工の終了によって埋没した良質なデータの発掘と新たな切り口からの利活用を推進するため、観測データのデータベース化と類型化を進める必要があると考える。

表層崩壊、深層崩壊、再活動型地すべりのいずれも、流動化した土砂は長距離にわたり流下するとともに広範囲に拡散し、大きな被害を与える。このため、今後は室内実験や数値実験により移動体と間隙水の相互作用についての研究を重点的に推進する必要がある。しかしながら、崩壊や地すべりの流動化については、極めて短時間に現象が終結するため、観測データはほとんどない。従って、室内実験や数値実験等が謎を解き明かす有力な手法となる。流動化は単に土砂移動現象の解明だけでなく、被害の軽減という観点からも非常に重要であるので、研究資源の重点的な投入が必要と考える。

斜面変動場の地下水についての調査・解析手法の開発や進化及び、対策工技術のさらなる発展を図るためには、一連の現象に対して共通の問題意識を持ち、気象学、地質学、水文学、水理学、地盤工学、治山・砂防工学、計測工学など様々な分野からの横断的なアプローチによる積極的な議論が必要ではないかと考える。これまで得られた豊富な知見を体系化し、「斜面変動場における地下水文・水理学」についての新たな分野を確立するとともに、複雑で動的に変化する斜面変動場の地下水について研究の深化と発展を切に望みたい。

参考文献

第2章

- 阿部謙夫(1930)：水文学(Hydrology)に就て，地質学雑誌，No. 37, pp. 388－391.
- Bishop, A. W.(1955)：The Use of the slip circle in the stability analysis of slopes, Geotechnique, No. 5, pp. 7－17.
- Dunne, T. and Black, R. D.(1970)：An experimental investigation of runoff production in permeable soils, Water Resources Research, Vol. 6, No. 2, pp. 478－490.
- Fellenius, W.(1927)：Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohasion (Adhasion) und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen, Ernst & Sohn, Berlin.
- Horton, R. E.(1933)：The role of infiltration in the hydrological cycle, Transactions, American Geophysical Union, No. 14, pp. 446－460.
- 平松晋也・水山高久・石川芳治（1990）：雨水の浸透流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究，砂防学会誌，Vol. 43, No. 1, pp. 5－15.
- 地頭蘭隆・下川悦郎（1998）：1997年鹿児島県出水市針原川流域で発生した深層崩壊の水文地形学的検討，砂防学会誌，Vol. 51, No. 4, pp. 21－26.
- 地頭蘭隆・下川悦郎・寺本行芳（2006）：深層崩壊発生場予測法の提案－鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして－，砂防学会誌，Vol. 59, No. 2, pp. 5－12.
- 川谷健・北村明彦（1984）：岩盤亀裂系における浸透流のモデル化とその応用，建設工学研究所報告26, pp. 327－341.
- 菊池英彦（1932）：我国河川の流量に就て，土木学会誌，No. 18, pp. 919－938.
- 岸本良次郎・大平成人（1964）：地すべり地における地下水・地表

- 水－第1報長野県上水内郡七二会村下戸倉地区における地下流入と水理地質学的性格－，地すべり，Vol.1，No.2，pp.29-34.
- 岸本良次郎 (1967)：地すべり地における地下水，地表水 (第三報) 深さ別の地下水位・水圧変動現象の研究，地すべり，Vol.3，No.3，pp.21-39.
- 黒川潮・阿部和時・大丸裕武・松浦純生 (2007)：物理則モデルによる表層崩壊危険度評価，日本地すべり学会誌，Vol.43，No.6，pp.13-17.
- 三隅良平・小口高・真木雅之・岩波越 (2004)：分布型流出モデルを用いた表層崩壊危険域のリアルタイム予測，自然災害科学，No.23，pp.415-432.
- 中村浩之・近藤政司・白石一夫 (1970)：粘性土を主体とした地すべりでの地下水位および間隙水圧の測定例，地すべり，Vol.7，No.1，pp.1-7.
- 中屋真司・西垣誠 (1993)：地質学的情報を用いた亀裂性岩盤の透水性評価，地下水技術，Vol.35，No.9，pp.31-42.
- 沖村孝・市川龍平 (1985)：数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法，土木学会論文集，Ⅲ-3，pp.69-75.
- 新藤静夫 (1993)：斜面災害における地下水の集中流現象，第四紀研究，Vol.32，No.5，pp.315-322.
- 杉村淑人・森田豊・渡辺邦夫 (1997)：ダム基礎岩盤の水みち構造把握の試み，土木学会論文集，No.582，Ⅲ-41，pp.229-246.
- 杉村淑人・松田育子・富森毅・増本清・渡辺邦夫 (1999)：水みちネットワークモデルを用いた岩盤浸透流逆解析，土木学会論文集，638，Ⅲ-49，pp.41-50.
- 鈴木雅一・小橋澄治 (1981)：がけ崩れ発生と降雨の関係について，砂防学会誌，Vol.34，No.2，pp.16-26.
- 高野秀夫 (1960)：地すべりと防止工，地球出版(株)，pp.91-103.
- Terzaghi, K.(1936)：Effect of the type of drainage of retaining walls on the earth pressure. Proceedings：1st International Conference of soil mechanics：Cambridge, MA. 1, pp. 215-218.
- Tsukamoto, Y., Otha, T. and Noguchi, H.(1982)：Hydrological and geomorphological studies of debris slides on forested hillslopes in Japan, IAHS Publication, 137, pp. 89-98.
- 堤大三・藤田正治・Sidle, R. C., 林雄二郎 (2005)：風化基岩中の選択流を考慮した浸透計算と斜面安定解析，京都大学防災研究所年報，No.48B，pp.1-7.
- Uchida T.(2001)：Effects of pipeflow on hydrological process and its relation to landslide：a review of pipeflow studies in forested headwater catchments, Hydrological Processes, 15, pp. 2151-2174.
- 内田太郎・盛伸行・田村圭司・寺田秀樹・瀧口茂隆・亀江幸二 (2009)：場の条件の設定手法が表層崩壊発生箇所の予測に及ぼす影響，砂防学会誌，Vol.62，No.1，pp.23-31.
- 渡辺邦夫・茂木君郎・志知龍一 (1981)：破碎帯内地下水流れの特徴とその数値シミュレーション，応用地質，Vol.22，No.1，pp.104-117.
- Wu, W. and Sidle, R. C.(1995)：A distributed slope stability model for steep forested basins, Water Resources Research, Vol.31, No. 8, pp. 2097-2110.

第3章

- 阿部真郎・小松順一・森屋洋 (2004)：秋田県・鳥田目断層と地すべり，日本地すべり学会誌，Vol.41，No.4，pp.77-84.
- 江川良武 (1978)：地下水と埋没谷 (地下水の技術シリーズ-8-)，建設月報，建設広報協議会編，Vol.31，No.11，pp.82-85.
- 藤田崇 (2004)：基岩構造，地すべり－地形地質の認識と用語，(社)日本地すべり学会，地すべりに関する地形地質用語委員会編集，pp.118-132.
- 布施弘 (1977)：新潟県柿崎川流域における岩盤地すべりとフレキシユラル・スリップ褶曲 (予報)，地すべり，Vol.13，No.4，pp.19-21.
- 平野昌繁・石井孝行・藤田崇・奥田節夫 (1985)：1984年長野県王滝村崩壊災害にみられる地形・地質特性，京都大学防災研究所年報，No.28B-1，pp.519-532.
- 川上浩 (2009)：地すべり地における地下水の挙動，日本地すべり

学会誌，Vol.45，No.5，pp.351-357.

- 松林正義・望月巧一 (1969)：茶臼山地すべり地上部の地下水について，地すべり，Vol.5，No.3，pp.8-12.
- 望月巧一 (1977)：断層沿いの地すべり－長野県北部，中山，小谷，持京断層上の例－，地すべり，Vol.13，No.4，pp.11-18.
- 中村三郎 (1972)：倉並地すべり地の比抵抗値の分布と埋没谷，東北地理，Vol.24，No.4，pp.249-250.
- 末峯章・島通保・小西利史 (1984)：結晶片岩地すべり地における地温探査と地下水検層の一調査例，地すべり，Vol.21，No.2，pp.22-30.
- 高木方隆・中村忠春・宮内定基 (1990)：愛媛県の地すべり地域における地下構造と地中水，地すべり，Vol.27，No.2，pp.17-22.
- 玉田文吾・久保田昇助・布田昌司 (1994)：油谷地すべりとキャップブロック，地すべり，Vol.31，No.1，pp.64-78.

第4章

- Angeli, M. -G., Gasparetto, P., Silano, S. and Tonnetti, G.(1988)：An automatic recording system to detect critical stability conditions in slopes, Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides (ISL), Vol. 1, Lausanne, pp. 375-378.
- Angeli, M. -G., Pononi, F., Gasparetto, P.(1996)：Long-term monitoring and remedial measures in a coastal landslide (Central Italy), Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides (ISL), Vol. 2, Trondheim, pp. 1497-1502.
- 榎田充哉・市川仁士・大宅康平 (1994)：地下水位と移動量の関係に基づく地すべり移動特性とモデル解析，地すべり，Vol.31，No.2，pp.1-8.
- Harp, E. L., Sarmiento J. and Cranswick, E.(1984)：Seismic-induced pore-water pressure records from the Mammoth Lakes, California, earthquake sequence of 25 to 27 May 1980, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 74, No. 4, pp. 1381-1393.
- 林信雄・西園幸久・後田弘孝・山本征男・竹本俊夫・山本知治 (2010)：山瀬地すべり変動の発生機構と対策工，日本地すべり学会誌，Vol.47，No.1，pp.51-59.
- 桧垣大助・丸山清輝・吉田克美・吉松弘行 (1991)：地すべり地における間隙水圧変動の観測，地すべり，Vol.28，No.3，pp.9-16.
- 池田隆司・中尾欣四郎・佐倉保夫 (1975)：間けつ地的地すべりの発生要因としての地下水挙動，地すべり，Vol.12，No.3，pp.8-16.
- 釜井俊孝 (2011)：谷埋め盛土における地震動と間隙水圧の観測，日本地すべり学会誌，Vol.48，No.6，pp.334-343.
- 亀井健史・榎本雅夫 (1996)：降雨および地下水流が斜面内の間隙水圧挙動に及ぼす影響，地すべり，Vol.33，No.2，pp.10-16.
- Kenney, T. C., Lau, K. C.(1984)：Temporal changes of groundwater pressure in a natural slope of nonfissured clay, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 21, No. 1, pp. 138-146.
- 近藤観慈・吉松弘行・吉田克美 (1992)：破碎帯地すべりにおける地下水位の挙動特性，地すべり，Vol.29，No.2，pp.39-45.
- Larsen, Y. O., Grande, L., Matsuura, S., Okamoto, T., Asano, S. and Rark, S. G.(1999)：Slide activity in quick clay related to pore water pressure and weather parameters, Proceedings of the 9th International Conference and Field Workshop on Landslides (ICFL), pp.81-88.
- 丸山清輝 (1993)：地すべり地における間隙水圧の変動タイプ，地すべり，Vol.30，No.1，pp.27-35.
- 丸山清輝 (1994)：口坂本地すべりにおける間隙水圧の変動，地すべり，Vol.31，No.2，pp.32-40.
- Matsuura, S., Asano, S., Okamoto, T. and Park, S. G.(1998)：Observations of pore-water pressure and landslide movement in Tertiary soft rocks, Proceeding of 2nd International Symposium on HSSR, 2, Rotterdam, pp. 1125-1128.
- Matsuura, S., Asano, S., Okamoto, T. and Takeuchi, Y.(2003)：Characteristics of the displacement of a landslide with shallow

- sliding surface in a heavy snow district of Japan, Engineering Geology, Vol. 69, pp. 15–35.
- Matsuura, S., Niimi, Y., Kasawaki, K., Asano, S., Okamoto, T. and Takeuchi, Y. (2005) : A case study of investigation and mitigation measures in a caprock type of landslide in Kyushu Island, Japan, Journal of the Japan Landslide Society, Vol. 41, No. 5, pp. 47–56.
- 中村浩之・近藤政司・白石一夫 (1970) : 粘性土を主体とした地すべりでの地下水位および間隙水圧の測定例, 地すべり, Vol. 7, No. 1, pp. 1–7.
- Ochiai, H., Yanase, H. and Matsuura, S. (1985) : Measurement of Earthquake Motion and Pore Water Pressure at the Yui Landslide Area, Proceeding of the 4th International Conference and Field Workshop on Landslides (ICFL), pp. 203–208.
- Ogawa, S., Ikeda, T., Kamei, T. and Wada, T. (1987) : Field investigations on seasonal variations of the groundwater level and pore water pressure in landslide areas, Soil and Foundations, Vol. 27, No. 1, pp. 50–60.
- 岡本隆・浅野志穂・松浦純生・Larsen, Y. O. (1999) : クイッククレイ堆積域における地すべりの動態観測, Vol. 36, No. 2, pp. 39–47.
- 岡本隆・松浦純生・浅野志穂・竹内美次 (2006) : 活動中の地すべり地における中越地震発生時の移動及び間隙水圧変動特性, 日本地すべり学会誌, Vol. 43, No. 1, pp. 20–26.
- Okura, Y., Kitahara, H., Ochiai, H., Sammori, T. and Kawanami, A. (2002) : Landslide fluidization process by flume experiments, Engineering Geology, Vol. 66, Issues 1–2, pp. 65–78.
- 高野邦夫・進藤陽介・小野由紀光・須田大祐・永井和馬 (2007) : 狼沢すべりににおける地下水挙動と地下水排除工, 日本地すべり学会誌, Vol. 44, No. 2, pp. 97–102.
- 田村栄治・金山清一・長谷川修一・鶴田聖子 (2007) : 岩盤斜面における浅層地下水と深層地下水の挙動, 日本地すべり学会誌, Vol. 44, No. 2, pp. 103–110.
- ## 第5章
- 羽田忍 (1977) : 微流速計の利用とその解釈, 応用地質, Vol. 18, No. (1・2), pp. 26–37.
- 松垣大助・丸山清輝・吉田克美・吉松弘行 (1991) : 地すべり地における間隙水圧変動の観測, 地すべり, Vol. 28, No. 3, pp. 9–16.
- 古谷元・渡部直喜・小松原岳史・佐藤修・丸井英明 (2005) : 新潟県東頸城地域の地すべり土塊内における高濃度Na–Cl型地下水の分布とその起源, 応用地質, Vol. 45, No. 6, pp. 281–290.
- 稲葉一成・吉田昭治・佐藤修・中野敏郎 (1991) : 孔内水位の連続観測と水質調査を併用した地すべり斜面の地下水解析－東虫亀地区を例として－, 地すべり, Vol. 28, No. 3, pp. 17–24.
- 石田聡・原部男・土原健雄・今泉真之 (2005) : 中性子水分検層と環境同位体による第三紀泥岩地すべり地の排水トンネルの抑制効果の評価, 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 5, pp. 21–28.
- 川原谷浩・松葉谷治 (1998) : 酸素・水素同位体比, 鉱物組み合わせからみた澄川地すべり地のモンモリロナイトの生成環境について, 地すべり, Vol. 35, No. 2, pp. 86–90.
- 川原谷浩・松田英裕・松葉谷治 (2000) : 酸素・水素安定同位体比を利用した秋田県谷地地すべり地の地下水の混合と起源について, 地すべり, Vol. 36, No. 4, pp. 48–55.
- 岸本良次郎 (1969) : 地下水圧観測施設の一例－地すべり調査用－, 農業土木学会誌, Vol. 36, No. 10, pp. 23–28.
- 小林大二・本山秀明 (1985) : 融雪流出過程 I, 低温科学物理篇, 44, pp. 77–90.
- 小林薫・近久博志・松元和伸・熊谷幸樹 (2003) : CCDカメラを利用した単孔法による3次元流向流速測定に関する基礎的研究, 地下水学会誌, Vol. 45, No. 1, pp. 41–48.
- 小島圭二・神尾重雄・石橋弘道・内山成和・斎藤秀樹・島裕雅 (1989) : ジオトモグラフィーによる岩盤の画像化 (その2)－岩盤内の地下水の流れの画像化－, 応用地質, Vol. 30, No. 4, pp. 1–10.
- 丸山清輝 (1997) : 地すべり地における地下水検層結果の解析, 地すべり, Vol. 33, No. 4, pp. 33–39.
- 梶井和朗・神野健二・上田年比古・木村浩志・平野文昭・本田保 (1989) : ボーリング孔内の地下水流れに関する実験的研究, 地下水学会誌, Vol. 31, No. 1, pp. 13–18.
- Park, S. G., Asano, S., Matsuura, S., Okamoto, T. and Kim, J. H. (2005) : Geoelectrical laboratory and field studies in groundwater occurrence in a landslide area: a case study from Japan, Exploration Geophysics, Vol. 36, No. 1, pp. 86–91.
- 佐藤修・青木滋 (1990) : 地すべり地内外の水質の特徴－第三系泥岩の地すべり地を例として－, 地すべり, Vol. 27, No. 1, pp. 27–33.
- 申潤植 (1976) : 地下水検層について, －その(1)問題点と理論解－, 地すべり, Vol. 13, No. 3, pp. 16–21.
- 鈴木浩一・伊藤栄紀・千木良雅弘 (2002) : 風化花崗岩表層の緩みと斜面内部への降雨の浸透－物理探査と実測データを用いた検討－, 応用地質, Vol. 43, No. 5, pp. 270–283.
- 田治米鏡二・村瀬勉 (1970) : 厚岸町ピリカウタで行なった比抵抗法による地下探査, 地すべり, Vol. 6, No. 4, pp. 10–14.
- 高田雄次 (1969) : 地すべりににおける電気探査の役割, 地すべり, Vol. 6, No. 2, p. 38.
- 竹内篤雄 (1970) : 電気探査より見た高知県下の破碎帯型地すべりについて, 地すべり, Vol. 7, No. 2, pp. 19–30.
- 竹内陸雄・長江亮二 (1990) : 電気探査による地下水流動モニター法の研究, 応用地質, Vol. 31, No. 1, pp. 12–18.
- 田村英治・金山清一・長谷川修一・鶴田聖子 (2007) : 岩盤斜面における浅層地下水と深層地下水の挙動, 日本地すべり学会誌, Vol. 44, No. 2, pp. 103–110.
- 田瀬則雄 (2003) : 水文学における環境同位体の利用, 化学工業, Vol. 67, No. 2, pp. 97–99.
- 上野将司 (2000) : 地すべり地の地下水調査における微流速計の適用, 地すべり, Vol. 36, No. 4, pp. 32–39.
- 上野将司・中里裕臣 (2012) : 地すべり調査・観測の進展と展望, 日本地すべり学会誌, Vol. 49, No. 1, pp. 1–11.
- 和田卓也・井上誠・横田修一郎・岩松暉 (1995) : 電気探査の自動連続観測によるシラス台地の降雨の浸透, 応用地質, Vol. 36, No. 5, pp. 29–38.
- 渡部直喜・鷲津史也・大木靖衛・佐藤修 (1996) : 新潟県松之山地すべり地域の地下水の水質について, 地すべり, Vol. 32, No. 3, pp. 32–40.
- 渡正亮・酒井淳行 (1965) : ボーリング孔を利用した地下水垂直探査について, 地すべり, Vol. 2, No. 1, pp. 1–9.
- 山田啓一・荒川創 (1999) : CCDカメラによる孔内流向流速測定と流速の垂直分布について, 地下水学会誌, Vol. 41, No. 3, pp. 193–201.
- ## 第6章
- 赤井浩一・大西有三・西垣誠 (1977) : 有限要素法による飽和－不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集 (264), pp. 87–96.
- 浅野志穂・朴三奎・松浦純生・岡本隆 (2000) : 大規模地すべり地における融雪期の地下水流動解析, 地すべり, Vol. 36, No. 4, pp. 70–77.
- 浅野志穂・松浦純生・岡本隆 (2005) : 大規模地すべりの三次元地質構造モデルを用いた地下水流動解析, 応用地質, Vol. 45, No. 6, pp. 304–315.
- Cai, F., Ugai, K., Wakai, A. and Li, Q. (1998) : Effects of horizontal drains on slope stability under rainfall by three-dimensional finite element analysis, Computers and Geotechnics, Vol. 23, pp. 225–275.
- Chow, V. T. (1964) : Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York, p. 14–6.
- 榎田充哉 (1992) : 地すべり地における水位変動のモデル解析, 地すべり, Vol. 29, No. 2, pp. 28–38.
- 榎田充哉・大宅康平・大串浩一郎・岸原信義 (1994) : 水文諸量の時系列解析手法に関する検討 (1)－降雨と地下水位の応答解析－, 水文・水資源学会誌, Vol. 7, No. 3, pp. 177–187.

- 細野義純 (1974)：既往の降雨強度から崖くずれの発生危険を予想する方法について－とくに実効雨量計の考案に関連して－，地すべり，Vol.10，No.3，pp.28-34.
- 稲葉一成・吉田昭治・竹内伸一・中野敏郎・佐藤修 (1994)：有限要素法による地すべり斜面の浸透流解析とそれに基づいた斜面安定解析，地すべり，Vol.30，No.1，pp.1-11.
- 井良沢道也・南雲政博・大川滋 (2002)：三次元シミュレーション解析を用いた地下水排除工の定量的効果判定，地すべり，Vol.39，No.2，pp.34-44.
- 岩堀康希・吉松弘行・森屋洋・阿部真郎・西真佐人 (2005)：平根地すべりにおける地下水排除工の効果予測，Vol.41，No.5，pp.96-103.
- 神原規也 (2002)：タンクモデルを用いた滑動中の地すべり安定度評価，地すべり，Vol.38，No.4，pp.301-309.
- 國限定・林義隆・太田英将・北方泰憲 (2005)：地下水モデルを用いた地下水排除工の評価方法，日本地すべり学会誌，Vol.42，No.3，pp.32-41.
- 駒田広也・宮口友延 (1980)：湛水池地山内浸透流に対する遮水および排水に関する考察，電力中央研究所報告，3800126，pp.1-16.
- 駒村富士弥 (1988)：表層崩壊発生危険雨量の予測，地すべり，Vol.25，No.1，pp.7-12.
- 増山孝行 (2008)：実効雨量に基づいた地すべり内の地下水位解析－富山県長坂地区の事例から－，日本地すべり学会誌，Vol.45，No.5，pp.383-391.
- 西田憲司・山上拓男・蔣景彩 (2000)：排水ボーリング効果の定量的評価法，地すべり，Vol.37，No.3，pp.1-9.
- 白木克繁・中村浩之 (2001)：飽和不飽和浸透数値計算法による地すべり地地下水位変動再現計算－福島県大田地すべり地を例として－，地すべり，Vol.38，No.1，pp.30-33.
- 菅原正巳 (1972)：流出解析法，共立出版，257p.
- 鈴木雅一・小橋澄治 (1981)：がけ崩れ発生と降雨の関係について，砂防学会誌，Vol.34，No.2，pp.16-26.
- 寺川俊浩・水谷宣明・西田彰一 (1982)：谷地地すべり－とくに岩盤地すべり地における地下水の挙動，Vol.19，No.1，pp.34-43.
- Toth, J.(1962)：A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, Journal of Geophysical Research, Vol.67, No.11, pp.4375-4387.
- Tsutsumi, D., R. C. Sidle, Kosugi, K.(2005)：Development of a simple lateral preferential flow model with steady-state application in hillslope soils, Water Resources Research, Vol.41, W12420, 15pp.
- 鶴飼恵三・蔡飛・若井明彦・阪上最一 (1998)：集水ボーリング工の効果に関する定量的評価手法の提案，地すべり，Vol.35，No.3，pp.1-7.
- 若井明彦・蔡飛・鶴飼恵三 (1999)：飽和－不飽和浸透流解析による地下水位の予測と斜面の安定性評価，地すべり，Vol.36，No.4，pp.8-13.
- 渡辺邦夫・今井久 (1984)：水みちを持つ斜面内の非定常地下水流れの性質－3次元有限要素法による斜面モデル内の飽和・不飽和浸透流解析－，応用地質，Vol.25，No.1，pp.1-9.
- 山田正雄・鶴飼恵三・鎌田智・福田毅・小澤岳弘 (2008)：亀裂等水文地質構造を反映した3次元FEM浸透流解析による地下水排除工の効果判定－大平地すべり地区を例として－，日本地すべり学会誌，Vol.45，No.1，pp.45-56.
- 山田正雄・鶴飼恵三・橋本純・河原裕徳 (2008)：地盤内線亀裂を考慮した3次元FEM浸透流解析－塩の山地すべり地区を例として－，日本地すべり学会誌，Vol.45，No.3，pp.196-206.
- 吉松弘行 (1980)：地すべり地における地下水変動現象の解析，地すべり，Vol.17，No.2，pp.20-25.
- 吉松弘行 (1989)：境界要素法による三次元非定常飽和浸透流の解析，地すべり，Vol.26，No.1，pp.9-15.
- 吉松弘行 (1990)：境界要素法による飽和・不飽和浸透流解析，地すべり，Vol.27，No.1，pp.11-18.
- 吉松弘行・工藤賢二 (1990)：擬似三次元解析法による飽和・不飽和浸透流のシミュレーション，地すべり，Vol.27，No.2，pp.9-16.
- 吉松弘行・向享 (1995)：ニューラルネットワークによる地すべり地内の地下水位変動の予測，地すべり，Vol.31，No.4，pp.9-15.
- Zienkiewicz, O., Mayer, P. and Cheung, Y. K.(1965)：Solution of anisotropic seepage by finite elements, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. of the American Society of Civil Engineering, EMI, pp.111-120.

第7章

- 芦田和男・江頭進治・大槻英樹 (1983)：山腹崩壊土の流動機構に関する研究，京都大学防災研究所年報，No.26B-2，pp.315-327.
- Ellen, S. D. and Fleming, R. W.(1987)：Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay region, California, Geological Society of America reviews in engineering geology, VII, pp.31-40.
- 小橋澄治・武居有恒・福嶋義宏・水山高久 (1976)：土石流の実態とその発生条件に関する研究－高知災害を中心として，京都大学演習林報告，No.48，pp.136-148.
- Okura, Y., Kitahara, H., Ochiai, H., Sammori, T. and Kawanami, A. (2002)：Landslide fluidization process by flume experiments, Engineering Geology, Vol.66, Issues 1-2, pp.65-78.
- 岡田康彦・佐々恭二・福岡浩 (2002)：リングせん断試験地を用いたせん断ゾーンにおける過剰間隙水圧発生ポテンシャルについて，地すべり，Vol.39，No.3，pp.10-20.
- 大野亮一・山科真一・山崎孝成・小山倫史・江坂文寿・笠井史宏 (2010)：地震時大規模地すべりの発生機構－荒砥沢地すべりを例として－，日本地すべり学会誌，Vol.47，No.2，pp.8-14.
- Sassa, K.(1996)：Prediction of earthquake induced landslides, Special Lecture of 7th International Symposium on Landslides (ISL), "Landslides", Balkema, 1, pp.115-132.
- 秦吉弥・杉山仁實・新屋浩明・倉岡千郎・佐藤誠一・白石保律 (2007)：過剰間隙水圧の影響を考慮した地すべりの地震応答解析－旧山古志村東竹沢地すべりをモデルとして－，日本地すべり学会誌，Vol.44，No.1，pp.39-45.
- 田中康博・汪發武・中村佳代・松本樹典 (2005)：金沢市山科町における長雨を誘因とする流動性地すべりの特徴と運動機構，日本地すべり学会誌，Vol.42，No.2，pp.34-43.
- 王功輝・佐々恭二 (2000)：降雨による砂質斜面崩壊発生時の過剰間隙水圧と崩土の運動に関する水路実験研究，地すべり，Vol.37，No.2，pp.40-47.
- Wang, G. and Sassa, K.(2001)：Factors affecting rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests, Geotechnique, Vol.51, No.7, pp.587-599.
- 汪發武・佐々恭二・松本樹典・奥野岳志 (2004)：粒子破碎を考慮した地すべりの流動化メカニズムと運動範囲予測，日本地すべり学会誌，Vol.40，No.5，pp.377-388.
- Wang, G. and Sassa, K.(2009)：Seismic loading impacts on excess pore-water pressure maintain landslide triggered flowslide, Earth Surface Processes and Landforms, No.34, pp.232-241.
- 山本悟司・石川芳治・三好岩生・水原邦夫 (1999)：蒲原沢，針原川，八幡平で発生した土石流の土質特性と流動性，砂防学会誌，Vol.51，No.5，pp.28-34.
- 矢澤昭夫・水山高久・原義文 (1985)：崩壊土砂の土石流化に関する予察，砂防学会誌，Vol.38，No.1，p.22.

(原稿受付2012年4月4日，原稿受理2012年5月7日)