

土砂災害研究の現状と展望

渡部直喜*・丸井英明*

Recent results and future prospects of sediment disaster research

by

Naoki WATANABE*, and Hideaki MARUI*

はじめに

わが国の土砂災害発生頻度は近年においても減少しておらず、1990年代後半以降になっても大小の土砂災害が頻発している。例えば、1995年7月姫川流域土砂災害、1996年12月蒲原沢土石流災害、1997年5月秋田県八幡平地すべり・土石流災害、1997年7月鹿児島県針原川土石流災害、1998年8月豪雨による佐渡土砂災害、1998年8月末豪雨による福島県土砂災害、1999年7月広島土砂災害、2003年7月豪雨による大分県日田地方土砂災害、2003年7月豪雨による熊本県水俣土石流災害、2004年7月の新潟・福島豪雨による土砂災害、2004年7月の福井豪雨による土砂災害、2004年8月～10月の連続台風(10号, 15号, 16号, 18号, 21号, 23号)による四国地方を中心とした土砂災害、2004年10月23日の新潟県中越地震による土砂災害などが記憶に新しい。特に2004年は膨大な数の土砂災害が発生しており、正確な集計結果を待ちたい。1998年～2003年の過去7年間に限っても、全国で発生した土砂災害の発生件数は実に6,818件に上る(図-1)。また、土砂災害が発生するおそれのある危険箇所は、全国約53万箇所にも及ぶ。1995年の阪神・淡路大震災を除けば、近年の自然災害による死者・行方不明者のうち約半数は土砂災害による犠牲者で占められる。

新潟県の中山間地は多雪地域であるため、梅雨期の長雨や台風の豪雨による土砂災害のほか、融雪期の土砂災害も多い。1996年12月6日には、新潟・長野県境の蒲原沢で土石流災害が発生した(例えば、Marui et al, 1997a,b,c; Marui and Watanabe, 2001)。降雪・積雪期の土石流発生については、それまでに報告事例がほとんどなく、土石流災害の複雑化を強く印象づけた。また、北部フォッサマグナ地域(主に新潟県と長野県北部からなる)は地殻変動の非常に活発な地域でもある。こうした地形・地質学的背景もあって、表-1に示すとおり、新潟県の地すべり危険箇所は860箇

土砂災害件数

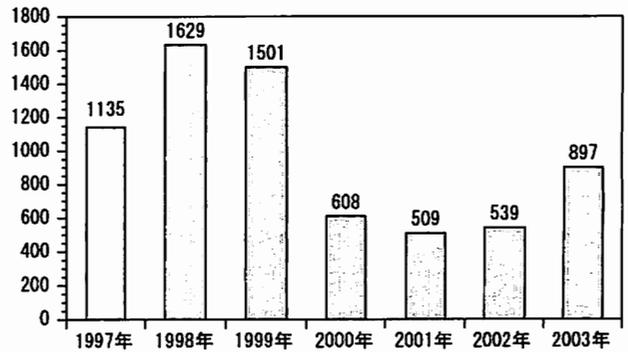


図-1 最近7年間の土砂災害発生件数。1998～2001年のデータは(財)砂防・地すべり技術センター発行「土砂災害の実態」、1997年、2002～2003年は国土交通省による

所で全国3位、土石流危険渓流(流域に人家が5戸以上ある渓流)は2,544箇所、急傾斜地崩壊危険箇所(人家が5戸以上ある箇所)は1,975箇所に及ぶ。国土交通省砂防部によれば、2002年(平成14年)に全国で発生した土砂災害は539件であったが、そのうち新潟県の土砂災害発生件数は128件(地すべり113件、崩壊・がけ崩れ15件)あり、全国1位であった。地すべり災害の発生件数に限定すると、1998年(平成10年)は33件、1999年(平成11年)も33件、2000年(平成12年)は54件で全国1位、2001年(平成13年)は17件で長野県に次ぐ2位だったものの、2002年(平成14年)は上述の通り113件で全国1位であった。2004年(平成16年)においても、7月13日の中越地域の豪雨(以下、「7・13豪雨」)、10月23日の新潟県中越地震(以下、「中越地震」)によって、合わせて5,000箇所を超える大小の崩壊・地すべりが発生しており、種々の施設に被害を及ぼした土砂災害発生件数はおそらく全国1位と

表-1 新潟県の土砂災害危険箇所数

	地すべり危険箇所 (1998年公表)		土石流危険箇所 ⁽¹⁾ (1998年公表)		がけ崩れ危険箇所 ⁽²⁾ (1998年公表)	
	危険箇所数	全国順位	危険箇所数	全国順位	危険箇所数	全国順位
新潟県	860	3	2,544	11	1,975	24

注:(1)人家5戸以上の渓流,(2)人家5戸以上の箇所

*新潟大学積雪地域災害研究センター *Research Institute for Hazards in Snowy Areas, Niigata University

なるであろう。まさに新潟県を中心とする北部フォッサマグナ地域は、「土砂災害の巢」とも言うべき地域なのである。土砂災害は、洪水災害等に比して人的被害および道路・鉄道・橋梁・建物といった重要施設の被害が大きい点に特徴があり、災害の防止・軽減が社会的に強く要請されている。災害発生危険箇所の特定にとどまらず、地すべり地、荒廃溪流あるいは急傾斜地の危険地域における災害発生予測ならびに警戒区域の設定といった防災・減災対策へ向けた危険度評価に関する調査・研究が本地域においては特に急務となっている。

積雪地域災害研究センターは平成16年度からの中期目標・中期計画に関連した研究課題の1つとして、「地球温暖化にともない新潟地域のような温暖多雪地帯で、より複雑化する雪氷・土砂災害と、都市から中山間地の複合雪氷土砂災害の発生予測と減災に関する研究」を掲げた。本論では、まず土砂災害研究における近年の取り組みと、次に土砂災害に関する最近の動向と展望を概観する。これらを踏まえて、研究課題に沿った今後の土砂災害研究の中期計画について解説する。

従来の研究経過

地水系保全分野並びに雪泥流研究分野では、斜面上の土砂移動現象の発生機構や土砂災害の進行過程の解明にとどまらず、災害の防止・軽減を図る様々な防災対策を包含した研究を行ってきた。具体的項目として、以下の課題を中心に取り組んできた。

- ① 岩石・土砂の力学的性質に着目した斜面・土砂災害の研究
- ② 山体の大規模崩壊予測と大規模崩壊に起因する土石流の研究
- ③ 地すべり多発地域の地下水挙動と水文地質構造に関する研究
- ④ 流域の瀬・淵構造の発達様式と生態環境に着目した環境調和型砂防に関する研究
- ⑤ 土砂災害の事例研究

の中で、今後の中期的な研究目標・計画と密接に関係する従来の研究(①、②および③)とそれらの研究経過を簡単に紹介する。

岩石・土砂の力学的性質に着目した斜面災害の研究

研究の背景と目的

斜面の危険度評価を行う上で、最も重要な情報の1つに岩石・土砂の力学的性質がある。ところが、潜在的な危険斜面の数は膨大であり、また個別斜面に関しても、三次元的な広がりをもって広範囲に連続する土砂について、その力学的性質を詳細に把握することは困難である。従って、比較的簡易な手法によって、岩石・土砂の力学的性質を推定することが実用上大きな意味を持つ。少量の試料を用いた密度測定、化学分析並びに鉱物分析によって得られた情報から、土の力学的性質を推定することを目的として、土の残留剪断強度に及ぼす鉱物組成の影響を検討した。

研究の成果

土の残留内部摩擦角 ϕ は主として粘土鉱物の形状に支配される。新潟地域では第三紀層泥岩の風化層で発生する地すべりが多く見られる。したがって、残留内部摩擦角 ϕ と現場でよく見られる粘土鉱物(スメクタイト、カオリナイトなど)の割合との間の関係を明らかにすることが残留強度の推定に有効である。新潟県南西部

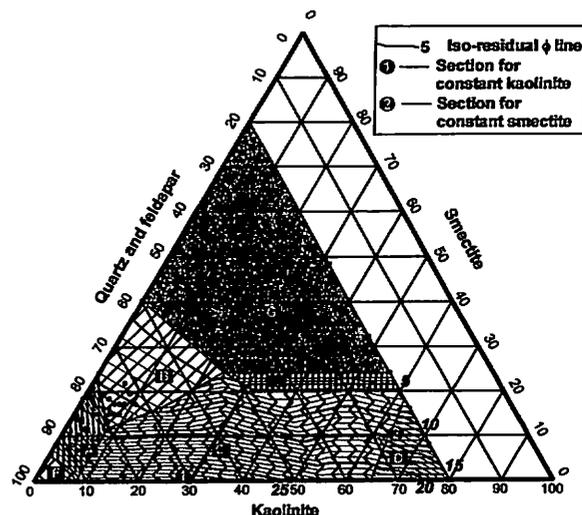


図-2 ベントナイト-カオリン-豊浦砂混合割合と残留剪断強度の関係 (Tiwari and Marui, 2002)

の東頸城地域の地すべり地から得られた土試料の主要な鉱物は石英および斜長石であり、粘土鉱物は主としてスメクタイト(モンモリロナイト)及び副次的にはカオリナイトである。このことを考慮して、豊浦砂、商業用ベントナイトおよび商業用カオリンの39種の異なる混合資料を実験室で作成し、モデル実験を行った。主な研究成果(Tiwari and Marui, 2002;2003)は、以下の通りである。

- 1) ベントナイトと砂の混合試料、ベントナイトとカオリンの混合試料、カオリンと砂の混合試料及びベントナイトとカオリンと砂の混合試料はそれぞれ異なった挙動を示した。粘土鉱物の組み合わせ、およびベントナイトの割合が残留内部摩擦角(ϕ_{min})を支配する。ベントナイトと砂との混合試料においては、ベントナイト含有割合が約50%に達すると、純粋のスメクタイトの残留内部摩擦角(ϕ_{min})を示す。一方、ベントナイトとカオリンとの混合試料においては、ベントナイト含有割合が約30%で純粋のスメクタイトの残留内部摩擦角(ϕ_{min})に達する。
- 2) ベントナイトとカオリンの割合に基づくスメクタイトとカオリナイトの割合が強い関係曲線を示した。残留内部摩擦角(ϕ_{min})の変化はスメクタイトの割合が8%以下あるいは40%以上では無視できる程度であった。遷移相における残留内部摩擦角とスメクタイト割合との関係は指数曲線で示される。3種の異なった曲線がスメクタイトとカオリナイトの割合に依存して遷移曲線上に見られる。
- 3) 残留内部摩擦角(ϕ_{min})は、スメクタイト割合に依存し、粘土鉱物の組み合わせ(スメクタイトとカオリナイト)にも依存するので、鉱物との関係を比較するよりよいアプローチとして、カオリナイト-スメクタイト-石英・長石からなる三角座標表示を提案した(図-2)。種々の混合試料を用いた剪断試験結果に基づく残留内部摩擦角(ϕ_{min})の等値曲線は、スメクタイトとカオリナイトの種々の割合によって7つの異なった領域に区分された。三角図に基づく残留内部摩擦角(ϕ_{min})の推定値と実際のせん断試験結果との誤差7%以内であった。
- 4) 他の興味深い結果として、全ての地すべり地において同じ地すべりブロックの主滑落崖の土の鉱物とより深いすべり面付近の土の鉱物、さらにはそれぞれの残留内部摩擦角(ϕ_{min})は

類似することである。このことにより、浅い剪断ゾーンの土の残留内部摩擦角 (ϕ_{min}) が深いすべりゾーンの土試料が得られない場合に代用できる。

地すべり地多発地域の地下水挙動と水文地質構造に関する研究の背景と目的

地形、地質および気象条件が類似した地域であっても、地すべりの規模や発生頻度に地域差がみとめられる。また、地すべり多発地域の中にあっても、地すべりが頻発する斜面と比較的安定な斜面が存在する。こうした差違が生じる一つの要因として、地すべり地地下水の水文地質構造に着目した。水分子を構成する酸素・水素の同位体比をトレーサーとした地下水の水文学的研究が盛んに行われるようになってきた。降水の酸素・水素同位体比は降った標高によって系統的に変化する(高度効果)ので、平均的な涵養標高や流動経路を知る上で重要な情報を与える。また、新潟の油田地域周辺では、石油探査に関連した深部熱水の酸素・水素同位体比測定によって、地下深部に化石海水を起源とするメタンガスを伴う地熱水の存在が知られている。このように、地下水の同位体比は、それらの起源を知る上でも重要である。

新潟県は全国でも有数の地すべり多発地域である。本研究では、大規模地すべり地の水文地質構造の解明を目的として、東頸城地域(松之山町、牧村、板倉町の地すべり地)並びに守門岳南西山麓(守門村～入広瀬村)の地すべり地を対象に地下水の水文地質学的研究を行った。

研究の成果

それぞれの大規模地すべり地において、特異な水文地質構造(起源の異なる地下水からなる二層構造)の存在が明らかとなった(例えば、渡部ほか, 1996; 1997; 渡部, 2000; 2003)。

- 1) 松之山のいくつかの地すべり地、牧村の宇津ノ俣地すべり、同じく沖見地すべり、板倉の地すべり地等では、高濃度のNa-Cl型地下水が見いだされた。この地域におけるNa-Cl型地下水はいずれも深層から採取された地下水であった。一方、この地域には、化石海水起源のNa-Cl型地熱水の存在が知られている(松之山温泉はその典型)。地下水の同位体組成を検討すると、地すべり地にみられるNa-Cl型地下水は、深部のNa-Cl型地熱水と天水起源の地下水(降雨・融雪水が地下に浸透して形成された地下水)との混合によって形成されたことが明らかとなった。地すべり地の深層地下水に、断層を通じて上昇している深部のNa-Cl型地熱水の寄与がみとめられた(図-3)。
- 2) 福島県境に近い新潟県南東部に位置する守門岳南西山麓(守門村～入広瀬村)には、田小屋・芋鞘新田・横根・東野名・西名といった地すべり地が破間川右岸に沿って連続的に分布する。この地すべり地帯は標高250～500m付近に分布し、後背山地として守門岳(標高1537m)を持つ。この地すべり地帯では、周辺の地下水に比べ、水温が1～4℃低い地下水が見いだされた。酸素同位体比にみられる高度効果に着目して、地すべり地および守門岳の地下水・湧水を検討した。守門岳の湧水は標高差に比べ $\delta^{18}O$ 値の変化の幅が狭く、より高所で涵養された地下水の鉛直流に近い流動を示唆する。逆に、地すべり地の地下水は標高差に比べ $\delta^{18}O$ 値の変化の幅が広

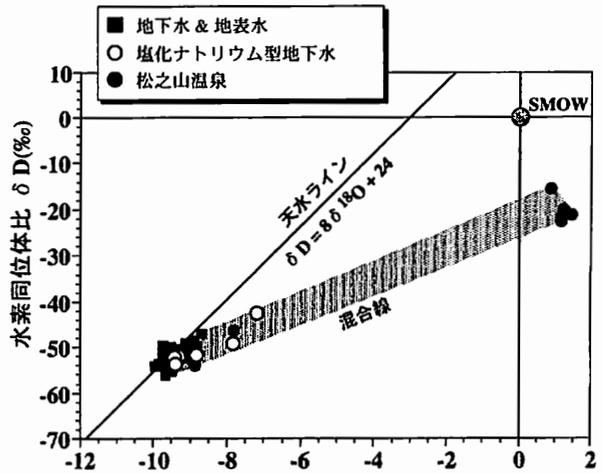


図-3 松之山地すべり地地下水の水素-酸素同位体組成

標高 (m)

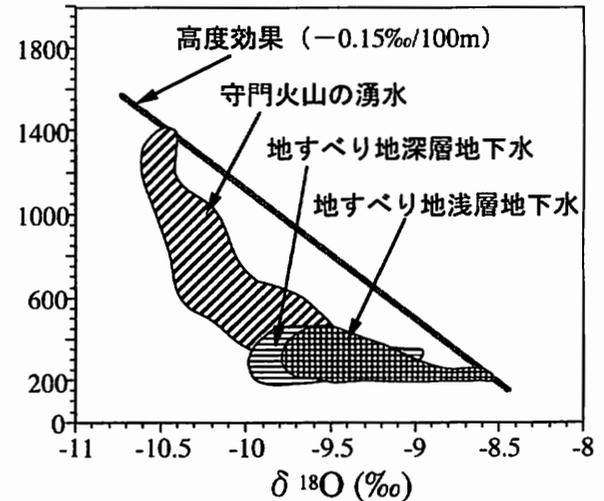


図-4 守門岳湧水および守門岳南西山麓地すべり地地下水の酸素同位体比と採水地点の標高の関係

- い。横孔排水などの浅層部の地下水は $\delta^{18}O$ 値が大きく、集水井・排水トンネルなどの比較的深層部の地下水は $\delta^{18}O$ 値が小さい傾向にある。地すべり地の深層地下水の中には、1000m以上の涵養標高に匹敵する低い $\delta^{18}O$ 値を示すものもある(図-4)。小さい $\delta^{18}O$ 値を示す地下水は水温も低く、電気伝導度及び水質も守門岳の湧水に類似している。低温で小さい $\delta^{18}O$ 値を示す地下水は、地形的分水界によって規定される涵養域からのものではなく、地すべり集水域の外部にある守門岳の標高の高い場所で涵養された地下水であると考えられる。
- 3) 深層地下水の起源は異なるものの、それぞれの大規模地すべり地域には、共通した水文地質構造がみとめられた。それは、地すべり地に降った雪や雨が地下に浸透して形成した地下水のほかに、「外来」の地下水が存在していることである。通常、多くの山地斜面においては、集水域を地形的分水界から推定する方法が簡便である。しかし、両者の大規模地すべり地域の地下水には、地形的な集水域・涵養域から見積もることのできない、明らかに過剰な「外来」の地下水が存在する。東頸城地域の場合は、化石海水起源のNa-Cl型地熱水に由来する深層地下水、守門岳南西山麓の場合は、守門岳の高所で涵

養された深層地下水である。この過剰な深層地下水は、少なくとも地すべり地域の地下水位に影響を与え、地すべり発生の素因となっていると考えられる。同程度の降雨・融雪があった場合、こうした深層地下水の存在する斜面は基底の地下水位が高いので、「危険水位」に到達しやすく、地すべりが発生しやすいと考えられる。地形、地質、気象条件の類似した地域において、地すべりの規模や発生頻度に差違が生じる要因として、水文地質構造の違いが大きく影響している可能性がある。

山体の大規模崩壊予測と大規模崩壊に起因する土石流の研究の背景と目的

姫川水系浦川は、1911年8月に発生した稗田山の大崩壊とそれに伴う大規模土石流に代表されるように、崩壊・地すべり・土石流が繰り返し発生している危険渓流である。本地域の土石流発生は、源頭部の大規模崩壊の拡大および不安定土砂の生産量と密接に関連している。国土交通省北陸地方整備局松本砂防工事事務所からの受託研究として、浦川流域の土質・地質・水質調査ならびに河床堆積土砂の測量調査を8年間にわたって行ってきた。本研究では源頭部での崩壊状況と中流部での土石流の発生状況の関連、さらに土砂生産を促進する化学的風化作用の実態を明らかにすることを目的とした。

研究の成果

これまでの調査研究(例えば、丸井ほか、1996)によって以下の知見を得た。

1) 溪床堆積物の土質特性

崩壊堆積物並びに土石流堆積物由来の溪床堆積物試料について、種々の物理特性並びに力学特性の測定を行った。リング剪断試験機を用いて流動中の動的摩擦角(残留強度に等しい)を求めると、土石流の発生源である崩壊堆積物と、相当の距離を流下後の土石流堆積物の残留強度が共に 28° で殆ど等しい値であった。各試料の物理特性や初期条件に差異があっても、大変位を受けた後の残留強度がほぼ一定の値となることは注目される。

2) 崩壊堆積物と溪床堆積物の粒度の関係

リング剪断試験前後の各試料の土粒子の状態を比較すると、土石流堆積物では、剪断前の状態でも粗い粒子が少なく、細粒分が目立つ。したがって剪断前後での粒子形状の変化が小さい。源頭部の崩壊堆積物は様々な粒径の粒子が混在しているが、剪断後には粗い粒子が減少、細粒分が増加しており、粒子破碎が生じたと考えられる。剪断前後の写真を比較すると、土石流堆積物と崩壊堆積物の粒子の状態は極めてよく似ており、両者の残留強度が類似することと調和的である。

3) 「そりモデル」による流動過程の解析

「そりモデル」は一般に摩擦抵抗を受けるすべり土塊の運動を表現する場合に用いる。この考え方を土石流の運動に適用し検討を行った。1992年に発生した100万 m^2 規模の土石流について、間隙水圧係数を既存の測定事例に基づいて仮定すると、リング剪断試験により測定した見かけの摩擦角が土石流の堆積域から発生域を見通した角度とほぼ同じ値となった。

4) 源頭部においては、変質安山岩に含まれる黄鉄鉱の酸化作用に起因する水-岩石相互作用が化学的風化作用を支配するメカニズムであった。黄鉄鉱の酸化によって生じた硫酸が表層および地

下浅所の岩石をさらに風化させ、土砂を生産しているとみられる。水質データから判断すると、浦川支流金山沢流域の化学的風化速度は、周辺の流域に比べ数倍～20倍大きい。

土砂災害に関する最近の動向

土砂災害の防止・軽減という目標に向けて、ハザードマップの作成に取り組む必要がある。ハザードマップの目的は、災害の危険性(災害の規模、種類、影響が及ぶ範囲など)を予測し、これらに関する情報を住民と行政が共有することで、迅速かつ有効な対応(主に避難行動)を行うことにある。例えば、火山については「火山噴火災害危険度予測図作成指針」(1992年)が、液状化についても「液状化マップ作成マニュアル」(1992年、1999年改訂)が策定された。洪水や津波についても、それぞれ「洪水ハザードマップ作成要領」(1994年、2000年改訂)、「津波災害予測マニュアル」(1998年)が策定されている。ところが、土砂災害に関しては、このような指針・マニュアルの整備が不十分で、過去の災害や危険とみられる斜面の位置図等が各自自治体によって作成されている程度であり、土砂災害の及ぶ危険区域あるいは警戒区域の設定(一種のハザードマップ作成)や住民への周知が大きく遅れている状態が続いてきた。その原因として、1)土砂災害の種類や災害発生のメカニズムは様々であり、それぞれにおいて危険範囲があまりにも大きく異なること、2)砂防事業や道路事業など、各種の事業によって個別に土砂災害への対応がなされてきたこと、などが挙げられる。(例えば、沖村、2004など)

このような状況を背景として、2001年(平成13年)4月に「土砂災害防止法」(土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律)が施行された。この法律は、「土砂災害から国民の生命を守るため、土砂災害のおそれのある区域(土砂災害警戒区域等)についての危険の周知、警戒避難体制の整備、住宅等の新規立地の抑制、既存住宅の移転促進等のソフト対策を推進しようとするもの」である。特に危険な区域(土砂災害特別警戒区域)では、建築構造物の補強や、場合によっては家屋を移転することによって、人的被害を生じさせないようにすることも意図している。

土砂災害警戒区域等の設定においては、土砂災害の発生予測並びに土砂到達範囲の設定等について、各行政機関(関係各省、自治体)とも難しい問題を抱えている。研究成果を地域社会へ広く還元することの重要性については論をまたないが、土砂災害の危険度評価に関する研究が今ほど防災・減災対策へ向けた地域社会の取り組みに貢献できる好機はないであろう。

研究の中期計画

土砂災害の危険度評価に関する研究は、平成16年度からの中期目標に掲げた研究課題にも包含されている「土砂災害の発生予測と減災に関する研究」とも密接に関連し、社会的要請および地域社会への貢献度も大きい研究課題である。今後の中期的研究は、以下の課題を軸に進める計画である。全体は中期的研究の計画であるが、短期で解決可能な主題も含む。

地すべり災害研究

研究の背景と目的

すでに2-1節、2-2節において述べたように、土の力学的性質と粘土鉱物組成の関係、あるいは地すべり多発地域に特有の水文地質構造については新発見や成果が得られた。簡便な手法による残留内部摩擦角(ϕ_{min})の高精度の見積りや、環境同位体を利用した地下水の涵養域や大局的な動態の把握など、これまでの研究をさらに前進させることで、地すべり災害の危険度評価に貢献できると考える。しかしながら、新たな課題も見出された。危険度評価に用いるデータの中には、数年～数十年単位の時間経過にともなって変化するものもいくつも存在し、それによって地すべり災害の危険度も少なからず変化すると考えられる。地すべりが停止し安定した斜面がある期間経過後、再滑動した事例など枚挙にいとまがない。地球温暖化による気候変動は地すべりを含む侵食作用にかかわる営力を一変させるであろうし、また、仮に地形条件・気象条件といった侵食作用にかかわる営力を一定と仮定した場合であっても、風化の進行によって、土の力学的性質は著しく変化する。調査時点における危険斜面の判定にとどまらず、ある程度の時間経過をも見越した危険度の評価が必要となる。

時間経過とともに風化が進行することによる土の力学的性質の変化に着目したい。物理的風化作用は岩石の破碎による細分化の過程であり、密度が低下する。化学的風化作用は、岩石の変質による粘土化の過程であり、化学組成・鉱物組成が変化する。密度測定、化学・鉱物分析によって、少量の試料から風化の程度を判定し、残留内部摩擦角(ϕ_{min})等の土の力学的性質を知ることができる。また、新鮮な基岩と風化土の岩石・鉱物学的データと地すべり地から流出する地表水・地下水の水質データの比較から、化学的風化速度を知ることができる。

本研究は、新潟県東頸城地域の第三紀層泥岩地すべり地を調査対象として、まず、

- (1) 地すべり地における化学風化速度を見積もる。
- (2) 風化に伴う化学組成・鉱物組成変化を露頭やボーリング試料の調査、室内における人工風化実験をもとに追跡する。

次に、

- (3) 風化の程度と土の力学的性質(主に残留内部摩擦角)の相関を解明する。
- (4) 試料の風化程度に応じた、それらの力学的性質を見積もることによって、最小限の力学試験に基づく斜面の安定解析を行う。

以上を踏まえ、簡便手法による風化作用の進行に応じた残留内部摩擦角の見積り、それに基づく時間経過をも見越した危険度評価に貢献することを目的とする。

研究の特色と準備状況

土の力学的性質が風化の程度に強く影響されることを逆に利用して、風化程度から力学的性質への変換を試みる。この手法はある程度の誤差を伴うが、採取する試料が少量で済み、多数の試料を比較的簡便かつ迅速に処理できる。土の残留剪断強度に及ぼす鉱物組成の影響について、混合試料を用いた詳細な検討をすでに行っている(2-1節を参照)。地すべり地から採取された実際の泥岩試料についても、風化程度と残留剪断強度との相関(図-5)に関する予察的研究はすでに行っている(例えば、児玉ほか、2000)。

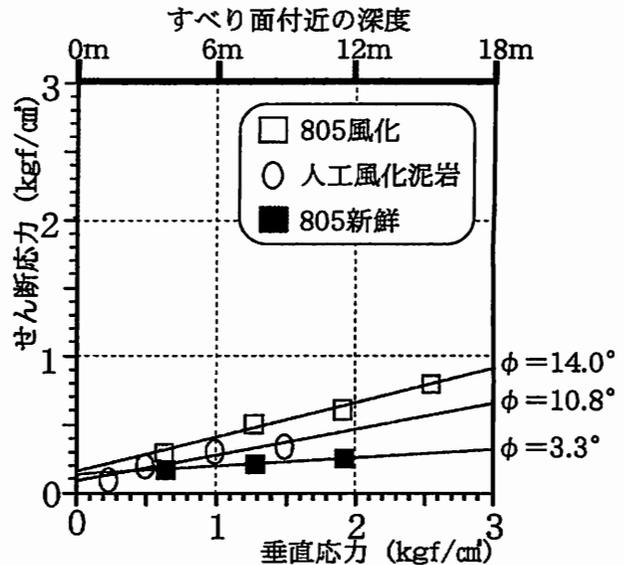


図-5 椎谷層泥岩の新鮮部分、風化部分、進行風化試料の剪断強度(児玉ほか、2000)

化学風化作用の研究は国内外に多く、化学風化の指標も数多く考案されている。しかし、地すべり地における土質力学的研究や風化作用の研究は個別に行われており、本研究のように包括的に取り扱う研究は少ない。土の力学的性質・風化程度の数値的解析に基づく研究手法をもとにして、地形、地質、地下水、植生、気象等を総合した観点から、地すべりの危険度をより適切に判定・評価する基準の確立に貢献したい。

土石流災害研究

研究の背景と目的

土石流については、河床に堆積した土砂の力学的性質(剪断強度、内部摩擦角及び粘着力など)と地形条件(河床勾配など)をパラメータとして、任意の降雨強度に対する土石流発生の有無を計算によって判定できるようになり、土石流危険度評価の観点からも有効な手法の一つである。すでに2-3節において述べたように、これまでの研究で、渓床堆積土砂の力学的性質と地形情報から推定される土石流発生域および堆積域、あるいは土砂量から推定される到達範囲は、実測のデータとも調和した結果が得られている。ところが、災害発生予測や数～数十年単位の時間経過を踏まえた災害危険度評価では、土石流災害のも地すべりと共通の問題を抱えている。

地形、地質、水文、植生ならびに気象条件の類似する近接した溪流でも、土石流の発生頻度にしばしば大きな違いが認められる。土石流の発生頻度は、溪流毎の風化速度・土砂生産量にも大きく依存すると考えられる。しかしながら、多数の溪流について、個別の堆積土砂量やその経時変化を測量等によって把握・追跡することは、それに要する時間・費用・労力の面からも、困難を極める。比較的簡便な手法を用いて、各溪流の風化速度・土砂生産量を見積もる必要がある。

数年～数十年単位の期間における土砂生産量は、地殻変動や気候変動による侵食営力の変化よりはむしろ流域の化学風化速度に規制される。数十年に一度の豪雨といった突発事項がなけれ

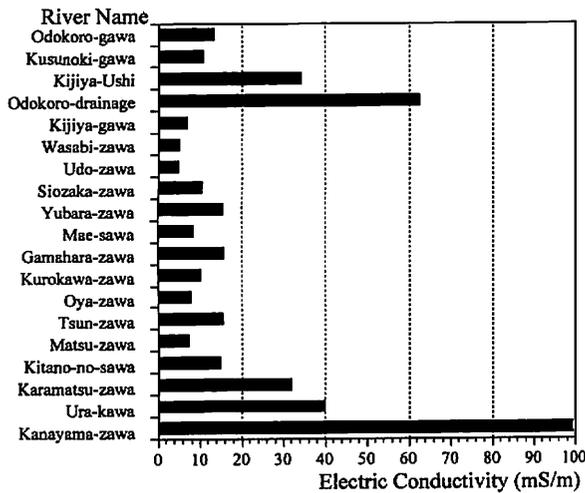


図-6 姫川中流域の渓流水の電気伝導度

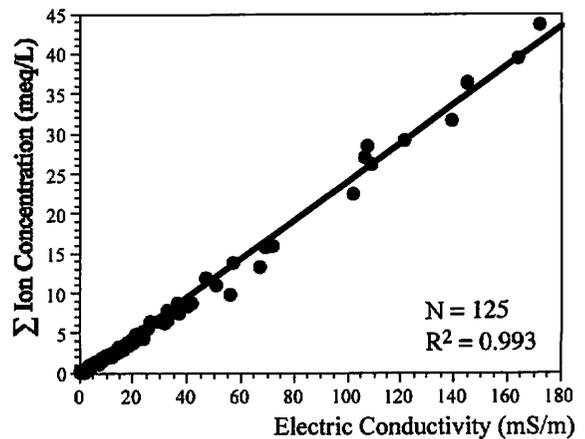


図-7 渓流水の電気伝導度と全イオン濃度の関係

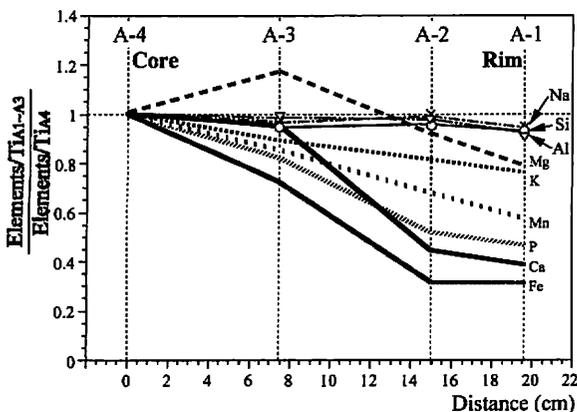


図-8 化学風化における安山岩の化学組成変化

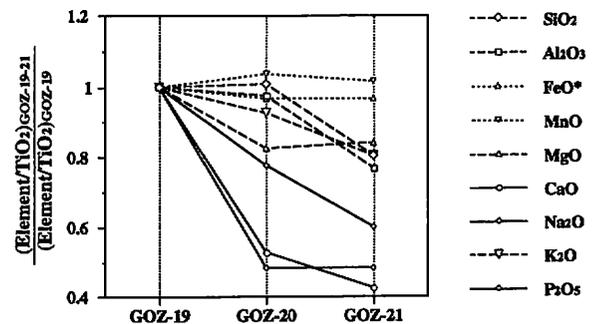


図-9 化学風化における花崗岩の化学組成変化(柚原ほか, 1998)

は、化学風化速度と土砂生産量の間には一定の相関があると考えられる。渓流の水質は、化学風化作用によって流域の土砂・岩石から溶脱された化学成分からなる(図-6、図-7)。そこで、本研究は、水質、基岩および風化土壌の化学組成(図-8、図-9)に着目して、渓流流域の化学風化速度を求め、土砂生産量を見積もることを目的とする。調査対象地域は、「土石流の巣」とも呼ぶべき姫川中流域ならびに新潟平野東縁の五頭山の各渓流である。姫川中流域における予察的研究によって求められた各渓流域の化学風化速度を図-10に示す。ちなみに、姫川中流域の基岩地質は主として安山岩であり、五頭山のそれは花崗岩である。安山岩と花崗岩の風化の様式が大きく異なるので、それぞれ個別に扱うが、調査手順・手法は次のとおり共通である。

- 1) 水質、集水域の面積、年間降水量、蒸発散量から、各渓流個別に化学成分の年間総排出量を近似する。
- 2) 新鮮な基岩と風化土壌の化学組成を比較し、化学風化作用によって損失した化学成分の量を求める。
- 3) 1)と2)から、化学風化作用によって基岩から一定量の風化土壌が形成される化学風化速度(年間の風化土壌生産量)を見積もる。

このデータをもとに、

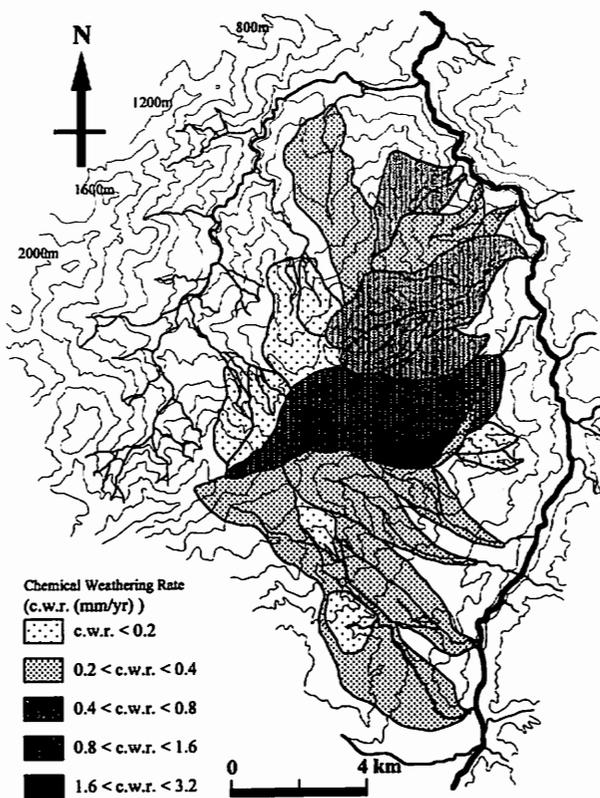
- 4) 各渓流の砂防ダムの堆砂量データをもとに、化学風化速度と土砂生産量の相関を調べる。

5) 過去の土石流被害調査資料をもとに、土石流発生頻度と土砂生産量との相関を検証する。

以上の結果をもとに、各渓流における精度の高い土石流危険度評価の確立に貢献することを最終目的とした。

研究の特色と準備状況

豪雨時にある渓流で土石流が発生するか、単に出水(鉄砲水など)となるかの分かれ目は、その渓流の河床に堆積した不安定土砂量に依存し、それは単位期間当たりの流域の土砂生産量に支配される。本研究は、土石流の準備過程の解明に力点をおいている。従来の調査手法による研究は、ある時間面における土石流の危険度判定に大きな貢献をしてきた。しかしこの種の研究だけでは、土石流として土砂を排出してしまった渓流が新たに土砂を生産し、再び土石流危険度が高まるまでの期間やプロセスが不明である。本研究は土石流危険度の経時的変化あるいは土石流発生予測の分野に貢献できると考える。測量や土砂の土質力学的試験に比して、水質調査は短期間に広範囲の調査が可能であり、定期的な採水によって経時変化も追跡できる。また、比較的簡便かつ迅速に多数の試料を処理できる。水質データから算出・近似した風化速度・土砂生産量と、土砂の土質特性、地形・地質、植生、気象、土石流発生履歴とを総合した観点から、荒廃渓流における土石流の危険度をより適切に判定する基準の確立に貢献できると考える。姫川水系浦川における8年間の調査は河床変動



図一〇 姫川中流域の各溪流の化学風化速度

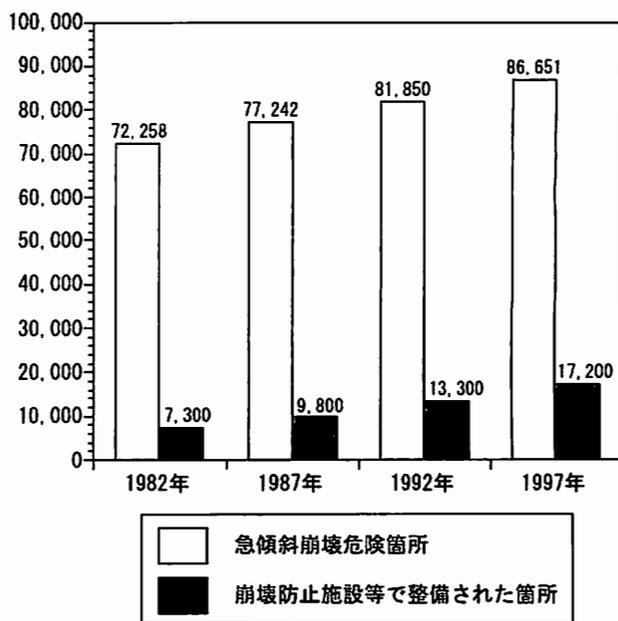
の測量等の基本的なものであるが、8年間分にもおよぶ調査結果は、実測されたある種の観測資料として、本研究にとって非常に有用である。また、姫川水系浦川においては化学風化速度・土砂生産量に関係する予察的研究をすでに行っている(相楽ほか, 1996; 柚原ほか, 1999a)。さらに、中川ほか(1998)、柚原ほか(1999b)は、五頭山における研究の基礎データとなり得る。

斜面崩壊による災害の研究

研究の背景と目的

2004年(平成16年)、新潟地域は大災害に見舞われた。7・13豪雨、10月23日の中越地震による災害である。新潟県では、斜面崩壊、地すべり、土石流といった災害が過去より繰り返し起こっているが、これら2つの災害は未曾有の大災害であった。斜面崩壊・土砂移動によって、家屋・公共施設の被害だけでなく、貴重な人命も失われた。これら2大災害における土砂災害の概要と緊急調査報告については、丸井ほか(2004)、(財)日本地すべり学会・新潟大学積雪地域災害研究センター合同調査団(2004)、川邊ほか(2004)、(財)日本地すべり学会・日本応用地質学会合同調査団(2005)等で公表されているので、参照していただきたい。

新潟県に限らず、日本は国土面積の75%が傾斜地であるから、豪雨や地震によって土砂災害が誘発される危険性については論を待たない。図-11は、「傾斜度30°以上、斜面高さ5m以上の急傾斜地で、5戸以上の家屋がある場所」で定義される急傾斜地崩壊危険箇所における1982年～1997年の危険箇所数と防災設備の整備済み箇所数の推移である。いわゆる「急傾斜地」の近傍



図一〇 急傾斜地崩壊危険箇所数と整備済み箇所数の推移

が宅地として造成・開発され、急傾斜地崩壊危険箇所が拡大する一方、防災設備の整備が追いつかない状況が見取れる。全ての急傾斜地崩壊危険箇所に防災施設が整備されるまでには相当の年月を要するし、災害は防災施設の整備を待って欲しくない。危険度の高い斜面を抽出し、優先順位をつけることができれば、警戒・避難といったソフトウェアの対応も含めて、災害の軽減に大きく貢献できる。7・13豪雨、中越地震において多数発生した斜面崩壊の調査によって得られるデータを活用し、「危険度の高い斜面抽出法」の確立の一助としたい。

研究の特色と準備状況

道路建設や鉄道建設にともなう切土法面や盛土斜面を主たる対象として、崩壊危険度は過去に得られた知見をもとに作成された採点表や統計的手法によって推定されてきた(例えば、(財)道路保全技術センター, 1996; 日本国有鉄道施設局土木課, 1974; 杉山ほか, 2000; (財)日本道路協会, 1999; 久保村・武井, 1971; 持永・福山, 1972; 南部ほか, 1975; 沖村・杉本, 1979; 北園ほか, 2001, など)。一方、下記の無限長斜面の安定計算式を用いて、斜面崩壊に対して影響の大きい要因についても検討されている(沖村・大西, 1987)。

$$F = \frac{C_s + C_r + \{q_0 + (\gamma_{sat} - \gamma_w)(h-z) + \gamma_t(H-h)\} \cos^2 \beta \cdot \tan \phi}{\{q_0 + \gamma_{sat}(h-z) + \gamma_t(H-h)\} \sin \beta \cdot \cos \beta}$$

ここに、

- F: 安全率
- C_s : 地下水位下の粘着力
- C_r : 根茎による見かけの粘着力
- ϕ : 土の内部摩擦角
- γ_{sat} : 土の飽和重量
- γ_t : 土の湿潤単位堆積重量
- γ_w : 土の単位堆積重量
- H: 基岩面からの表土層厚
- h: 基岩面からの地下水位

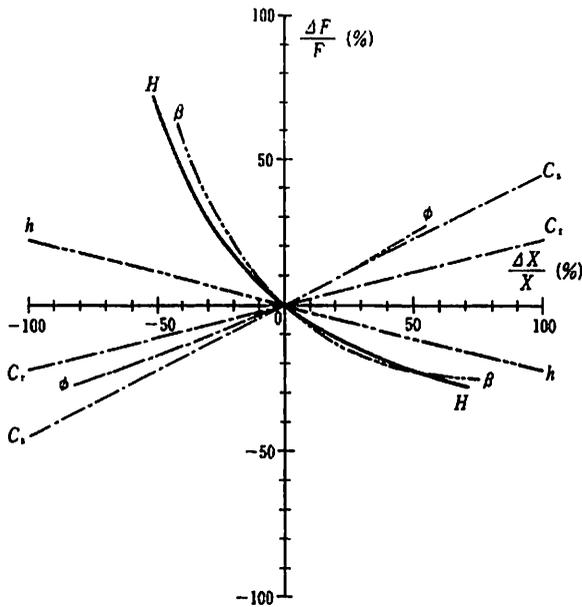


図-12 無限長斜面安定解析における各要因の感度

- z: 基岩面からすべり面までの高さ(0とする)
- β : 斜面勾配(基岩)
- q_0 : 植生による上載圧

である。上式において、各要因のばらつきによる安全率の値の変動を調べることによって、図-12に示す感度分布曲線が求められている。この図の中で、曲線の傾きが大きいものほど安全率に対する感度が大きく、安全率の値に大きく影響するパラメータである。ここで変化させたパラメータは、 ϕ 、 C_r 、 C_s 、 β 、 h 、 H であり、その中央値は $\phi = 30^\circ$ 、 $C_r = 2.5 \text{ kN/m}^2$ 、 $C_s = 5.0 \text{ kN/m}^2$ 、 $\beta = 30^\circ$ 、 $h = 0.5 \text{ m}$ 、 $H = 1.0 \text{ m}$ である。土質定数 C_s や ϕ に比して、斜面勾配 β や表土層厚 H のほうが安全率に対する影響度が大きい。このことから、現地調査では斜面形状と表土層厚の把握に重点をおく必要がある。

表土層厚の調査にはボーリング、各種の貫入試験、物理探査等の方法が有効である。しかしながら、膨大な数に上る危険斜面全体に置いて、上記の方法で表土層厚を求めることは不可能に近い。したがって、実際の斜面崩壊地の調査で得られたデータを整理・解析し、崩壊の発生した原地形斜面の形状や表土層厚の特徴や傾向を見出し、危険度の高い斜面の抽出に役立つ必要がある。7・13豪雨、10月23日の中越地震では、斜面崩壊が5,000箇所以上に及ぶ。調査や調査結果のデータ・ベース化、データの解析には、学内外の関係する研究者、研究機関、行政機関と連携が不可欠である。新潟大学の研究者からなる土砂災害研究チームには、これまでの調査結果がある程度蓄積されており、確度の高い「危険度の高い斜面抽出法」の確立に相応の貢献はできると考えられる。

おわりに

平成16年度からの中期目標に掲げた研究課題と上述の研究計画との関連について、若干の補足をしたい。

上述の研究計画では、「化学的風化作用」が1つのキーワードとなっている。化学的風化作用の多くは酸中和反応である。したがって、地球表層の土壌・岩石は、酸性雨・酸性雪および地球温

暖化をもたらす二酸化炭素ガスの中和剤として働き、化学的風化作用によってそれらを消費する。言い換えれば、酸性雨・酸性雪および大気中の炭酸ガス濃度の上昇は、土砂生産、さらには土砂災害と無縁ではない。上に述べた研究計画は、「地球温暖化にともない、より複雑化する雪氷土砂災害」の一部を間接的に扱うことになると考える。

災害危険度の評価と並び、「都市から中山間地の複合雪氷土砂災害の減災」では、減災対策としての「リスク・マネジメント」も重要となる。災害による「リスクの洗い出し」、「リスクの評価」、「リスク処理方法の検討」、「リスク処理の実施」、「効果の確認・判定」、「見直し」といった一連の「リスク・マネジメント」のなかで、リスクの「洗い出し」と「評価」に対して有用な調査研究データが求められている。これについても、上に述べた研究計画を実行する中で、対応は可能と考える。

文献

- 土砂災害の実態編集会議編(2001):土砂災害の実態2001,(財)砂防・地すべり技術センター。
- 川邊 洋,権田 豊,丸井英明,渡部直喜,土屋 智,北原 曜,小山内信智,笹原克夫,中村良光,井上公夫,小川紀一郎,小野田敏(2005):2004年新潟県中越地震による土砂災害(速報),砂防学会誌,57巻5号,39-46。
- 北園芳人・仲宗根典子・寺園忠彦(2001):地盤情報データベースの作成と斜面崩壊予測への応用,自然災害科学,20巻1号,75-87。
- 児玉貴幸・渡部直喜・丸井英明(2000):新潟県東頸城地域の第三紀層地すべり泥岩の化学風化作用とせん断強度特性,新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報,22号,17-30。
- 国土交通省砂防部ホームページ(<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/index.html>)
- 久保村圭介・武井昌博(1971):数量化法による切取りのり面の安全度解析,土木学会論文報告集,194号,141-150。
- 丸井英明・佐藤 修・渡部直喜・堀田伸之(1996):浦川流域における大規模崩壊と土石流に関する研究(I)―崩壊堆積物並びに土石流堆積物の土質特性について―,新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報,18号,43-70。
- Marui, H., Watanabe, N., Sato, O., Fukuoka, H.(1997a):Gamahara Torrent Debris Flow on 6 December 1996, Japan, Landslide News, No.10, 4-6。
- Marui H., Sato, O., Watanabe, N.(1997b):Preliminary Report on Gamahara Torrent Debris Flow on 6 December 1996, Japan, Journal of Natural Disaster Science, Vol.18-2, 89-98。
- Marui, H., Watanabe, N., SATO,O.(1997c):An Example of Landslide Triggered Debris Flow -The Gamahara Torrent Debris Flow of 6 December 1996, Japan-, International Symposium on Natural Disaster Prediction and Mitigation, December 1-5, 1997, Kyoto, Japan, 345-350。
- Marui, H., Watanabe, N.(2001): Process of Slide to Flow in the Gamahara Torrent Debris Flow, Proceedings of Conference on Transition from Slide to Flow-Mechanisms and Remedial Measures-, 25-26 August 2001, Trabzon, Turkey,157-166。
- 丸井英明,渡部直喜,川邊 洋,権田 豊,井良沢道也,笹原克夫,中村良光,安田勇次(2004):2004年7月新潟豪雨土砂災害調査報

- 告(速報), 砂防学会誌, 57巻3号, 53-59.
- 持永龍一郎・福田俊郎(1972):シラスのり面崩壊に関する要因分析, 土木学会論文報告集, 197号, 101-110.
- 中川 勉・渡部直喜・柚原雅樹・徐 輝竜(1999):新潟県五頭山西麓の湧水と水文地質構造について, 新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報, 21号, 96-107.
- 南部光広・軽部大蔵・浅野雅行(1975):統計的手法による道路用盛土のり面の安定度解析, 土木学会論文報告集, 241号, 93-103.
- 日本国有鉄道施設局土木課(1974):土木構造物の取替の考え方, 日本施設協会.
- 沖村 孝・杉本 博(1979):統計的手法による自然斜面崩壊の研究, 土木学会論文報告集, 290号, 89-97.
- 沖村 孝・大西勝則(1987):各種の要因が斜面安定解析結果に及ぼす影響, 建設工学研究所報告, 29号, 199-225.
- 沖村 孝(2004):土砂災害の減災で地盤工学が目指すべきもの, 土と基礎, 52巻1号, 29-31.
- 相楽 渉・渡部直喜・佐藤 修・丸井英明・垣原康之(1997):長野県稗田山崩壊地における安山岩の化学風化について(予報), 新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報, 19号, 83-96.
- 杉山友康・岡田勝也・秋山保行・村石 尚・奈良利孝(2000):鉄道盛土の崩壊限界雨量に及ぼす防護工の効果, 土木学会論文集, 644号, 161-171.
- (社)日本道路協会(1999):道路土工?のり面工・斜面安定工指針, 丸善, 165-180.
- (社)日本地すべり学会・新潟大学積雪地域災害研究センター合同調査団(2004):7.13新潟豪雨に伴う斜面災害調査報告, 日本地すべり学会誌, 41巻3号, 80-84.
- (社)日本地すべり学会・日本応用地質学会合同調査団(2005):2004年新潟県中越地震による斜面災害調査報告, 日本地すべり学会誌, 41巻6号, 83-86.
- Tiwari, B. and Marui, H.(2002):Influence of clay mineralogy in residual shear strength of soil, Annual report of Research Institute for Hazards in Snowy Areas, Niigata University, No.24, 37-56.
- Tiwari, B. and Marui, H.(2003):Estimation of residual shear strength for bentonite-kaolin-Toyouura sand mixture, Journal of Japan Landslide Society, vol.40, no.2, 20-29.
- 渡部直喜・大木靖衛・佐藤 修・日下部実(1996):新潟県松之山地すべり地のNa-Cl型地下水の起源, 新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報, 18号, 81-92.
- 渡部直喜・白石秀一・佐藤寿則・佐藤 修・大木靖衛・日下部実(1997):第三紀層地すべり地の深層地下水, 土と基礎, 45巻6号, 32-34.
- 渡部直喜(2000):北部フォッサマグナ地域の地すべりと地下水水質特性, (社)日本地すべり学会シンポジウム「大規模構造線周辺地域における地すべり」論文集, 平成12年5月・長野市, 12-17.
- 渡部直喜(2003):新潟県守門火山山麓の水文地質構造と大規模地すべり, (社)日本地すべり学会シンポジウム「火山地域の地すべり」論文集, 平成15年5月・東京大学, 21-24.
- 柚原雅樹・相楽 渉・高橋俊郎・渡部直喜・山岸宏光・丸井英明(1999a)長野県稗田山崩壊地周辺に分布する岩石および地表水のSr・Nd同位体比組成, 新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報, 21号, 73-82.
- 柚原雅樹・渡部直喜・中川 勉・厨川亮子・高橋俊郎(1999b):五頭山地および笹神丘陵の天然水および岩石のSr同位体比組成, 新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報, 21号, 83-95.
- (財)道路保全技術センター(1996):建設省道路局監修平成8年度道路防災総点検要領[豪雨・豪雪等].