温暖化に対する土砂災害の影響評価

Slope failure risk evaluation due to global warming

川越 清樹[1]*・風間　聡[2]
Seiki KAWAGOE[1]* and So KAZAMA[2]

[1] 福島大学大学院共生システム理工学研究科・[2] 東北大学大学院工学研究科
[1]Faculty of Symbiotic System Science, Fukushima University
[2]Department of Civil engineering, Tohoku University

摘　　要

地球温暖化による降雨量増加に伴い被害拡大の懸念される現在気候、近将来気候(2050 年付近)時の土砂災害リスクを評価した。土砂災害リスクとして、気候変動に応じた降雨情報と、地形、地質、土地利用による数値地理情報をもとに斜面崩壊発生確率、経済損失額を推算し、リスクの時空間情報を示した。降雨情報として、現在気候に既往観測データ、近将来気候に数値気候モデル(MIROC、MRI-RCM20 Ver.2)を利用した。解析による大局的なリスク分布の結果として、山地の山頂から山裾側にリスクの高い地域が拡大することが明らかにされた。特に、北海道南部、北陸地方から中国地方に至る日本海沿岸、東海地方から四国地方に至る中央構造帯は、気候変動に伴う斜面崩壊の発生確率上昇の著しい地域となる。また、栃木県、群馬県、埼玉県、富山県、石川県、福井県、広島県、鹿児島県は経済損失額が高価なため、優先的対策が提案される。

キーワード：経済損失額、再現期間、斜面崩壊発生確率、数値気候モデル
Key words：economic damage, return period, slope failure probability, global climate model

1. はじめに

IPCC AR4 (Intergovernmental Panel on Climate Change 4th Assessment Report)は、20 世紀半ばから現在に至るまでの人為起源の温室効果ガス排出量増加に伴う高温化の結果から「気候システムの温暖化は疑う余地がない」と報告している。また、いくつかの数値気候モデルのアウトプットから、地球温暖化に伴う大気中の水蒸気量、海水温の上昇に伴う蒸発量の増加による多雨の量と頻度の増加、無降雨期間の長期化に代表される極端な気象現象を指摘している[1)]。日本列島では、1998 年以降の異常多雨の頻度増加[2)]、多雨の少ない地域における降雨極値の更新[3)]が認められている。そのため、すでに地球温暖化の影響による極端な降雨量の増加が生じていると懐疑されている。**図 1** は、AMeDAS の日降雨量の極値更新年の分布図である(2008 年 11 月 30 日現在)。この結果から、熱帯気候帯に近接する静岡から鹿児島に至る列島太平洋側の広範領域で、2001 年以降の日平均気温上昇に伴う異常降雨の傾向が示されている。また、この地域以外に長野県、岩手県、北海道南部も同様な傾向が示され、沿岸部の所々で降雨極値が更新されている。

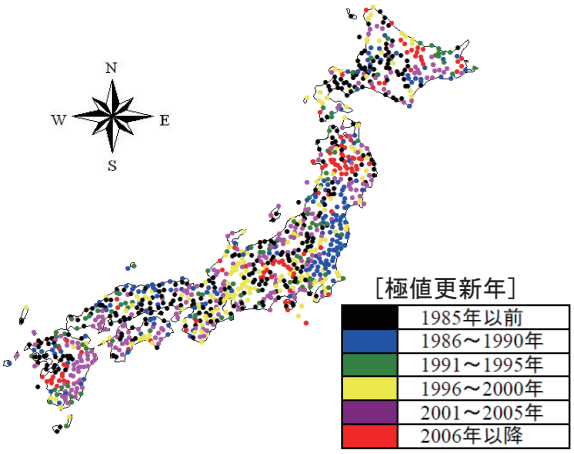


図 1　AMeDAS による日降雨量の極値更新年分布.

日本列島は、環太平洋造山帯に属し、急峻な山岳地形、断層の発達した風化劣化した地質を呈する。また、山岳地から急峻な河川を通じて水、土砂が人口や財産の集中する沖積平野に短時間で到達する地

受付；2008 年 12 月 22 日，受理：2009 年 4 月 27 日
*　〒 960-1296　福島県福島市金谷川 1 番地，e-mail：kawagoe@sss.fukushima-u.ac.jp

勢を成している。これらの国土条件に加え、モンスーンアジアの東端に位置し、台風の接近や上陸、梅雨前線の停滞に伴う短時間の多雨の発生しやすい気象条件である。これらの条件下、日本列島は、多雨の発生に伴い土砂に関連した災害が頻繁に認められてきた。土砂災害に伴う被害を防止するため、堤防やダム等の整備により国土の安全度を向上させてきたものの、計画当初の設計基準を超過する降雨量の増大が認められること、計画の対策整備まで達成していないことから、近年も 2004 年の「新潟・福島豪雨(7/12-14)」、「福井豪雨(7/17-18)」、「台風 23 号(10/18-21)」、2005 年の「台風 14 号(9/3-8)」、2006 年の「平成 18 年 7 月豪雨(7/15-24)」「平成 18 年 10 月低気圧に伴う大雨(10/4-9)」等の死傷者を伴う深刻な災害が生じている。地球温暖化に伴う多雨の頻度、および降雨量が増加した場合、これらと酷似した災害の拡大が危惧される。地球温暖化による災害の脅威に対し、持続可能な生活、および経済活動を行うことのできる安全な社会を構築するため、災害を最小限にとどめる対策を効率かつ効果的に講じていかなければならない。この課題に対し、温室効果ガスの排出削減、吸収により温暖化を抑制させる「緩和策」、温暖化に対応できる社会システムを構築して被害を回避、低減させる「適応策」が必要とされ、IPCC AR4 では「適応策と緩和策の一方だけでは全ての気候変動の影響を防ぐことができないが、両者で互いに補完しあい、リスクを大きく低減することができる」と提言している [1]。この動向を踏まえ、政府各機関は、緩和策として、温暖化ガスの安定化濃度 450 ppm(CO_2 換算)の達成を目標にエネルギー由来の排出量の削減を進めている。バイオマス、風力、太陽熱等に示される再生可能エネルギーの普及、小規模分散型エネルギー源の導入、森林による温室効果ガスの吸収源の確保が図られている。一方、既往の気象データから類推された結果、SRES (Special Report on Emission Scenario)に基づいた数値気候モデルのアウトプットを用いて地球温暖化を含む気候変動を予測し、その影響を定量かつ分布的な情報に示す取り組みがなされている [4]。この成果は、対策の工種や対策を投資すべき地域の判断に利用でき、適応策への貢献が期待できるものである。

本稿では、地球温暖化に起因する災害として土砂災害を取り上げ、斜面崩壊による被害の「防御・緩和・回避」に効率かつ効果的に利用できるリスク評価の解析モデルを構築し、気候変動に応じたリスクマップを作成した。

2. 土砂災害に対する問題と課題

平成 20 年度版防災白書 [5]でまとめられた 1998 年から 2007 年の自然災害による犠牲者(死者・行方不明者)を整理したものが **図 2** である。「風水害」、「雪害」、「地震」、「その他」に大別すると、風水害による犠牲者が 55%であり、圧倒的な占拠率を示している。豪雪や地震と比較し、風水害をもたらす台風の接近や上陸、梅雨前線の停滞は、列島各地で年間に幾度も生じる現象である。広範領域に対して頻繁に発生しうる多雨現象の特徴が犠牲者の多さに反映されていると考えられる。地球温暖化による異常多雨も台風、梅雨に関連して生じるため、対策を講じない限り将来も犠牲者の多い状態が続くと推測される。この風水害の中で、具体的な災害名で示されているものが土砂災害である。防災白書では、「近年の林地や傾斜地又はその周辺における都市化の進展など土地利用の変化と相まって、土砂災害による犠牲者は、自然災害による犠牲者の中で大きな割合を占めている」と説明している。牛山の 2004 年から 2007 年の災害分析による [6]と、土砂災害による犠牲者の 60%以上は 65 歳以上の高齢者であること、「逃げ遅れた」による犠牲者が 79%であることを報告している。これらに示された土砂災害の原因を考慮すると土地利用の規制、災害弱者への防災教育と地域防災力の向上、および豪雨情報を利用した土砂災害警戒システムの実施と導入が被害軽減に貢献できることを示唆している。2001 年に施行された「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(以下、土砂災害防止法)」でも、土砂災害による被害を受ける可能性のある区域を「土砂災害警戒区域」として指定し、危険の周知、警戒避難体制の整備、住宅の新規立地の抑制、既存住宅の移転促進等の「ソフト対策」を講じることを推奨している。土砂災害による被害の軽減策として最も有効であるのは、ダム、斜面対策工等の構造物による「ハード対策」である。しかしながら、土地利用の高度化に伴う斜面付近での開発行為から危険箇所は増加傾向にあり、いまだ構造物の対策整備率は 20%程度にとどまっている。地球温暖化の影響を考慮しなくとも短期間に全ての危険箇所にハード対策を講じることは困難であり、ソフト対策と融合させなが

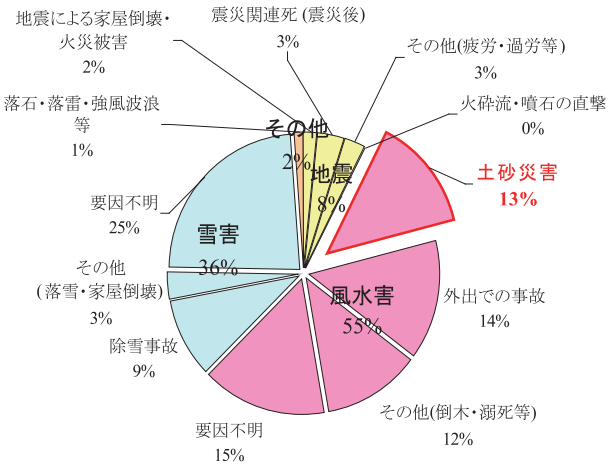


図 2　過去 10 年内の自然災害による犠牲者の分類.

ら、着実かつ効率的に土砂災害防止策を整備し、安全な社会を築かなければならない。

日本列島を包括して土砂対策を進めることは経済、かつ技術的に困難であるため、保全重要度の高い地域の対策から順次的に対策整備を進めざるをえない。また、保全重要度が低くとも「土砂災害の被害者ゼロ」という目標の場合、対策の代替となる施策を講じていかなければならない。さらに、これらの取り組みの前段として、対策に対する意思決定の判断が重要になる。また、斜面崩壊リスクとして、自然現象の危険度のみだけでなく、災害に伴う経済損失額(想定被害額)を見積もることも対策の判断に有効である。これに対し、定量かつ分布的なマップ作りは対策計画を効率化させる成果になる。現在も斜面崩壊のリスクを分布的に示す取り組みは進められているものの、対象領域が流域や市町村等の中小規模領域であり、災害履歴の多い地域や保全重要度の高い地域を中心に整備されている。また、この情報の用途は、対策を考慮するよりも災害から回避するための避難経路等を明らかにするための「ハザードマップ」を主とする。中小規模領域毎のハザードマップは地域に密着した防災体制を誘導する面で効果を発揮するものの、地域間を比較した場合に危険度の差異を生じさせる可能性もあるため、日本列島を統合した対策計画に利用することが困難である。地球規模で生じる温暖化も含めた気候変動を考慮した場合、安全と評価された地域の温暖化に伴う降雨量の増加が生じる可能性もあり、広範領域を網羅したリスクを明らかにする必要がある。これらの理由から、個別現象のリスク変動を捉える前に、広範領域を同一の視点から捉え、リスクを明らかにすることが必要である。

3. 斜面崩壊の発生機構

土砂災害は、地形、地質、水文的条件に大きく依存した斜面崩壊現象と、斜面崩壊に近接する社会基盤の分布により生ずる。地震等の地殻変動により稀に地形改変が生じるものの、一般的に地形、地質の変化は数百年から数万年の時間スケールで生じる。そのため、これらの条件は、斜面崩壊の素因と解釈されている[7]。素因に加え、外的営力が加えられることにより斜面崩壊が誘発される。この外的営力として、多雨、融雪、地震、河川による浸食作用、そして、人為的な地形改変が挙げられる。特に、台風の上陸や接近、および梅雨前線の停滞に伴う斜面崩壊は、毎年、全国各地で頻発している。**図 3** は平成 19 年版国土交通白書[8]でまとめられた 1978～2006 年の土砂災害発生件数、気候変動監視レポート 2007[9]でまとめた 1,000 地点あたりの豪雨(日降水量 200 mm 以上)発生頻度を統合したものである。豪雨頻度が高まるのと並行して土砂災害発生件数が

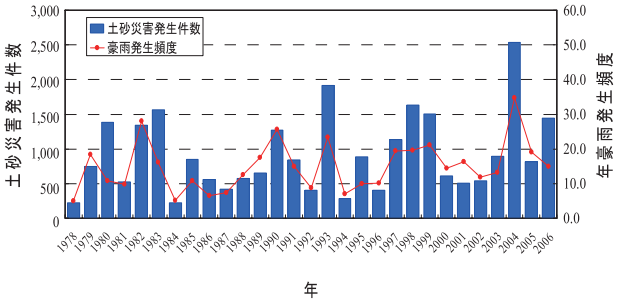


図 3　土砂災害発生件数と豪雨発生頻度の関係.

増加していることが図から見て取れる。

土砂災害を引き起こす斜面崩壊の現象として「地すべり」、「がけ崩れ(自然斜面の崩壊)」、「土石流」が挙げられるが、最も被害を与えているものががけ崩れである。国土交通白書[8]による調査結果を参考にすれば、がけ崩れによる土砂災害は、例年、土砂災害発生件数の過半数以上に達している。社会基盤の拡大に伴う人口、財産の斜面への接近と、断層や熱水変質などによる地質特性に関係なく急斜面であればがけ崩れが頻繁に発生しうること、滑落速度が速いため避難するまでの時間的猶予がないことが、原因として挙げられる。この現状を踏まえ、本研究では、斜面崩壊現象としてがけ崩れに着目し、土砂災害リスク評価を試みた。

4. 斜面崩壊発生確率評価

4.1　評価の概要

土砂災害リスク評価として、現在の気候条件を空間情報で再現したメッシュ気候値 2000(監修：気象庁)、AMeDAS による観測所の降雨量データ、数値気候モデルのアウトプットを用いて再現期間の降雨極値を類推したグリッドセル情報と、地形、地質の数値地理情報を斜面崩壊発生確率モデルに用いることで、解像度 1 km × 1 km の発生確率マップを作成した。また、気候変動に応じた降雨極値をモデルに入力することで、温暖化に対するリスクの変化を明らかにした。従来から、斜面崩壊に対する安全領域と危険領域を空間的に分類し、被害を軽減させる取り組みがなされてきた。地形、地質の情報をもとにリスクを求める手法が主体とされてきたが、多雨により頻発する斜面崩壊の状況をふまえて、水文地形や降雨の情報を利用したリスク解析の研究が進められている。例えば、ラフ集合を用い降雨時に警戒すべき崖[10]、降雨分布と水系線網から流域の斜面のリスクをマップ化する[11]事例が存在する。また、気象庁は、降水の短期予報をタンクモデルに入力させて土壌雨量指数を求め、過去 10 年間の土壌雨量指数の履歴順位と比較することにより災害の危険度を示している[12]。これらはリスクをランク等の定性的な指標で示したものである。対策の優先度を決定す

る場合、地域間の危険度の差異を明らかにするため、定量的なリスクの明示が有効になる。定量的なリスク指標として用いられているものが安全率と発生確率であり、降雨状況を考慮した無次元長斜面安定解析から安全率を求める手法[13]や崩壊有無を統計理論に組み込み発生確率を求める手法[14]が開発されている。安全率は、斜面の滑動力と抵抗力による釣合いを物理的に算定したものである。そのため、不安定化する斜面に対する計画安全率をもとに必要抑止力を導出することで、斜面対策工の規模を決定できる汎用性の高い指標になる。ただし、安全率導出で重視される要素は土質強度であり、この条件設定には慎重な議論を要する。活動的な斜面の粘着力、内部摩擦角は著しく変化しやすいことや、極限平衡法である安定解析に安定斜面の土質定数の設定が難しい等の問題を持つ。この問題を解消するためには、多くの現地の土質調査と解析事例が必要になる。そのため、広範領域を網羅する斜面崩壊の評価への適用は困難である。一方、広範領域を対象にした斜面崩壊のリスク評価では、数値地理情報で得ることのできる地形、地質、気象条件を統計的な解析手法に利用する事例が多く、厳密な土質定数の設定をする必要がない。以上の理由より、広範領域に対する斜面崩壊リスク評価には統計的な解析手法が有効である。本研究では、リスクとして斜面崩壊発生確率を統計理論から求めた。

4.2　評価方法

(1) 斜面崩壊発生確率モデル

統計理論より求められる斜面崩壊の発生確率モデルは、多重ロジスティック回帰分析を利用したものである。多重ロジスティック回帰分析は、Truettら[15]が心疾患のリスク研究から開発した統計理論による二項分布の確率モデルである。二項分布とは、ある事象に対する発生の有無であり、「0」と「1」の数値から作成される。この二項分布をロジスティック曲線で連結させることにより0から1の連続的な関数を成立させる。ロジスティック曲線を重回帰式で解くことにより、モデルが構築される。ここで得られる成果は0から1で推移する発生確率であり、ある条件下をもとに現象が生起する条件付確率として定義される。多重ロジスティック回帰分析による斜面崩壊の解析事例として、Ohlmacherら[16]による北西カンザス州の斜面崩壊の空間的評価が挙げられる。しかしながら、この評価は、地形、地質の条件にのみ依存したものであり、降雨に示される気候変動は考慮されていない。本研究では、斜面崩壊の素因、誘因である地形、地質、そして降雨量を含む水文的な条件を用いた多重ロジスティック回帰分析から構成された斜面崩壊発生確率モデル[14]を用いる。降雨量を含む水文的な条件の利用により、気候変動に応じた水文的な変化に応じた動的な発生確率を導くことができる。そのため、時空間的な発生確率分布の作成が可能になる。このモデルは、日本に分布する地質が満遍なく分布する地域であること、降雨に起因して同時多発的に斜面崩壊が発生した降雨イベントであること、斜面崩壊が広範領域に対して分布的に明らかにされていることの条件を踏まえて、日本列島の多雨に伴う斜面崩壊の模式となる降雨イベントと斜面崩壊の地域を利用して構築されたものである。既往の斜面崩壊の事例を検討した結果より、2004年7月12日～13日の新潟・福島豪雨による新潟県栃尾市の斜面崩壊事例をモデルの構築に用いた。この降雨イベントは新潟県内に3,600箇所の斜面崩壊を生じさせており、特に、栃尾市の斜面崩壊の集中が報告されている[17]。この斜面崩壊の調査結果を解像度1 km × 1 kmの数値地理情報に変換し、斜面崩壊有無の二項分布が作成された。また、この実績データに地形、地質、および降雨による水文的な複数の条件を重ね合わせ、統計的に有意になる説明変数が導かれた。斜面崩壊発生確率モデルに利用される説明変数は、地形条件の「起伏量」、水文的条件の「動水勾配」である。これらを説明変数に地質毎に斜面崩壊発生確率モデルが構築された。

地形条件である起伏量は、国土数値情報KS-META-G05-56Mに格納された最高標高と最低標高の差である。起伏量は、地形の複雑さを示す値として解釈されており、一般に、起伏量の大きな地域は、地形開析が進みやすく、活発に地形発達すると認識されている。

水文条件である動水勾配は、国土数値情報KS-META-G05-54Mの表層土壌と国土数値情報KS-META-G05-56Mの斜面傾斜度を用いて擬似二次元化した斜面に日降雨量を入力し、Richardsによる飽和不飽和浸透解析[18]を行うことで求められた。降雨発生後の最大傾斜を示す浸潤線から発生確率に用いる動水勾配を得た。動水勾配は、単位距離あたりの地下水水頭の変化率であり、降雨量が多くなるほど急勾配を呈する。急な動水勾配は、土塊の有効応力を減少させるため、斜面は不安定化する。飽和不飽和浸透解析に入力する降雨量に気候変動に応じた再現期間の降雨極値を与えることにより、現在から地球温暖化に伴う気候に対する動水勾配、および斜面崩壊発生確率を求めることができる。

地質条件に国土数値情報KS-META-G05-54Mのデータを用いる。このうち、斜面崩壊を引き起こしやすい土砂、および土砂化しやすい地質を対象に斜面崩壊発生確率モデルを構築した。対象の地質は、未固結状態である崩積土、続成期間の短い半固結状態である新第三系堆積岩、および古第三系堆積岩、造山鉱物にカオリナイトを含み粘土化しやすい花崗岩の4種類である。

式(1)に斜面崩壊発生確率モデル式、**表1**に斜面発生確率モデルの説明変数、**図4**に斜面崩壊発生確率モデルにより求められる各地質のロジスティッ

ク曲線を示す。

$$P = \frac{1}{1+\exp[-(\alpha + \sigma_h x_h + \sigma_r x_r)]} \quad (1)$$

ここで、P：斜面崩壊発生確率、α：切片、σ_h：動水勾配係数、x_h：動水勾配、σ_r：起伏量係数、x_r：起伏量である。モデルを日本列島の地形、地質、水文的条件のグリッドセル情報に適用させることで発生確率マップが作成される。

(2) 気候変動に対する降雨量

気候変動に対する斜面崩壊の発生確率を得るため、現在気候に対応した降雨極値の他に、数値気候モデルのアウトプットデータを用いて動水勾配を求めた。利用データは a) と b) である。

a) MIROC (the Model for Interdisciplinary Research on Climate：国立環境研究所・東京大学気候システム研究センター・海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター)

b) MRI-RCM20-Ver.2 (気象庁・気象研究所)

MIROC はグローバル化する SRES-A1B (化石燃料・非化石燃料のバランス重視型の高成長社会)、MRI-RCM20 Ver.2 (以下 RCM) は地域主義となる SRES-A2 (多元化型社会) によるものである。気候変動に伴う気温上昇として、SRES-A1B は気温上昇予測の中間値 (2090 年～2099 年：1.7℃～4.4℃)、A2 シナリオは気温上昇のおおむね上限 (2090 年～2099 年：2.0℃～5.4℃) を示している[1]。本研究では、現状の気象観測結果の類推より求めた現在気候 (1970 年～2000 年) と各数値気候モデルから得られる近将来気候 (2050 年頃) の再現期間 30 年と 50 年の降雨極値を対象に動水勾配を求め、斜面崩壊発生確率モデルに入力することで、気候変動に対する影響を評価した。これらの再現期間は、河川砂防における対策の設計基準に利用されることの多い時間スケールであり、対策の比較検討を行う上で基準にすることができる。

浸透解析に用いる降雨量データは日降雨量であり、日本列島全域を網羅できる日雨量分布を現在から将来にわたり作成しなければならない。本研究では、暖候期中 (4 月～11 月) の最大月降雨量平年値から再現期間の降雨極値を求める線形の変換モデルを利用して日降雨量を求めている[14]。このモデルは、暖候期降雨量と降雨極値の強い相関関係のアルゴリズムをもとに開発したものである[19]。最大月降雨平年値の発生する季節毎 (春・夏：3 月～8 月、秋：

表 1　斜面崩壊発生確率モデルの説明変数.

地質	項目	動水勾配	起伏量	切片
崩積土	係数 β	25.99	0.16	－15.97
	有意確率	0.01	0.03	0.03
	標準化回帰係数	3.25	2.96	—
新第三系堆積岩	係数 β	19.64	0.14	－19.29
	有意確率	0.01	0.02	0.03
	標準化回帰係数	2.37	1.96	—
古第三系堆積岩	係数 β	14.31	0.11	－24.97
	有意確率	0.05	0.03	0.03
	標準化回帰係数	2.15	2.02	—
花崗岩	係数 β	9.31	0.13	－35.99
	有意確率	0.04	0.04	0.05
	標準化回帰係数	1.37	1.26	—

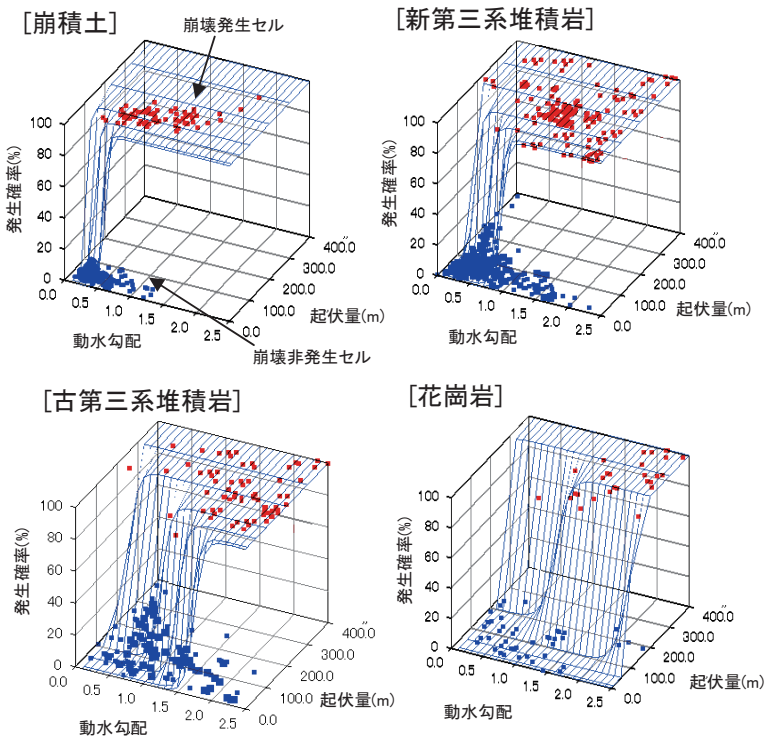


図 4　動水勾配，起状量と発生確率の関係を示した各地質のロジスティック曲線.

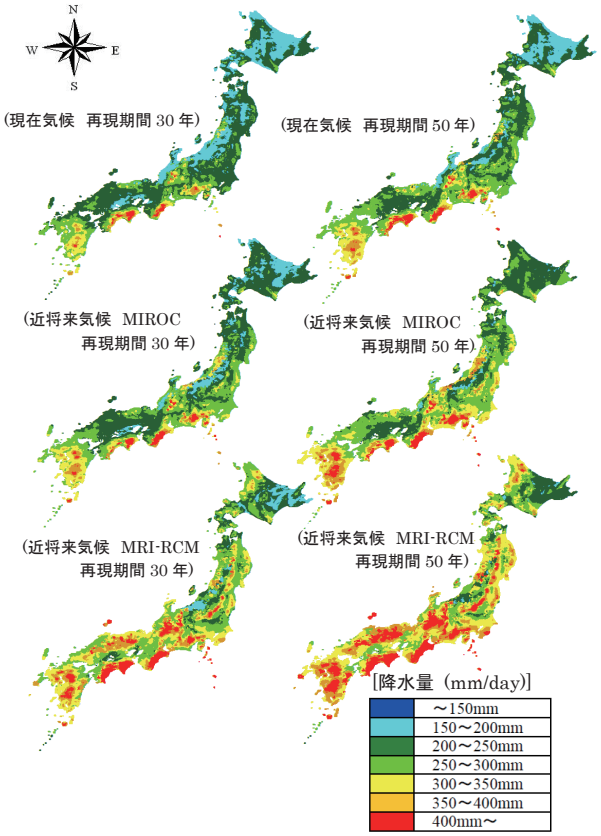


図 5　各気候モデル，再現期間の日降雨極値分布.

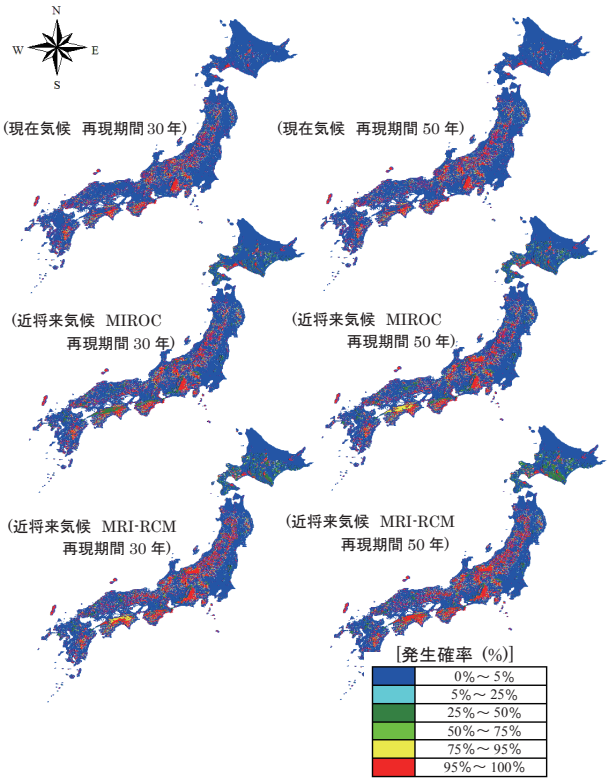


図 6　各気候モデル, 再現期間の斜面崩壊発生確率分布.

9 月～ 11 月、冬：12 月～ 2 月)に変換モデルを作成し、これらの季節タイプに応じた暖候期中の最大月降雨量平年値を用いることで再現期間の降雨極値を得ている。なお、メッシュ気候値 2000 から現在気候、西森ら[20]、および Iizumi ら[21]が統計的解析によりダウンスケーリングした MIROC、RCM から近将来気候の月降雨量平年値を取得した。

図 5 は平年値からの線形の変換式から求めた各気候の平年値再現期間 30 年、50 年の降雨極値分布である。各数値気候モデル、気候条件、再現期間ともに静岡県から鹿児島に至る太平洋沿岸の南海地域が 300 mm/day の多雨の認められる地域になる。特に三重県、和歌山県、徳島県、高知県は 350 mm/day 以上の強い降雨が発生する。その他、岐阜県北部の飛騨高地も 300 mm/day の多雨が示されている。MIROC では、東北地方から関東地方に至る沿岸地域、南東北から北関東の山間部、山形県南部から福井県に至る日本海沿岸部の降雨量増加が認められ、おおむね 300 mm/day の降水量に変化する。MIROC の再現期間が 30 年から 50 年に変化することにより、この領域は拡大する。RCM では、MIROC と比較すると降雨量が多くなることが示されている。RCM で抽出される多雨の認められる地域以外に、近畿から中国地方全域、関東地方の太平洋沿岸部、東北地方全域、また、北海道の北西部の降雨量増加が認められている。現在気候と各数値気候モデルによる近将来気候を比較すると、北海道、東北地方日本海側から北陸地方は、現在気候で 150 mm/day から 200 mm/day の降雨量であったのに対し、近将来気候に変化することで 250 mm 以上の降雨量に増加することが示されている。これらの地域は降雨の増加幅の大きい地域である。

4. 3　解析結果

起伏量、各気候における再現期間 30 年と 50 年の動水勾配と地質条件から求めた斜面崩壊発生確率分布を**図 6** に示す。各ケース共通して発生確率 95% を越えるグリッドセルの集中する地域は、奥羽山脈から越後山脈、三国山地に連続する日本海沿岸の山岳地域、糸魚川～静岡構造線に近接する日本アルプスの山岳地域、中央構造帯に近接する太平洋沿岸の南海地域である。これらの地域は、気候にかかわらず斜面崩壊の危険の高い地域である。また、中国山地における斜面崩壊の発生確率は特徴的な分布を示し、山地の頂部よりも山裾に発生確率 95% 以上の地域が集中している。中国山地裾部は、「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（以下 土砂災害防止法）」の契機になった 1999 年 6 月 29 日の土砂災害の履歴もあり、多雨発生により危険が急激に高まる、そして市街地域とも近接した要注意地域と評価される。

現在気候の再現期間 30 年と MIROC による近将来気候の再現期間 30 年を比較した場合、再現期間 30 年による発生確率 95% 以上の地域はおおむね同様だが、この周辺に分布する地域の発生確率上昇が認められる。特にその傾向の顕著な地域は、北海道南部の日高山地と夕張山地、糸魚川～静岡構造線、

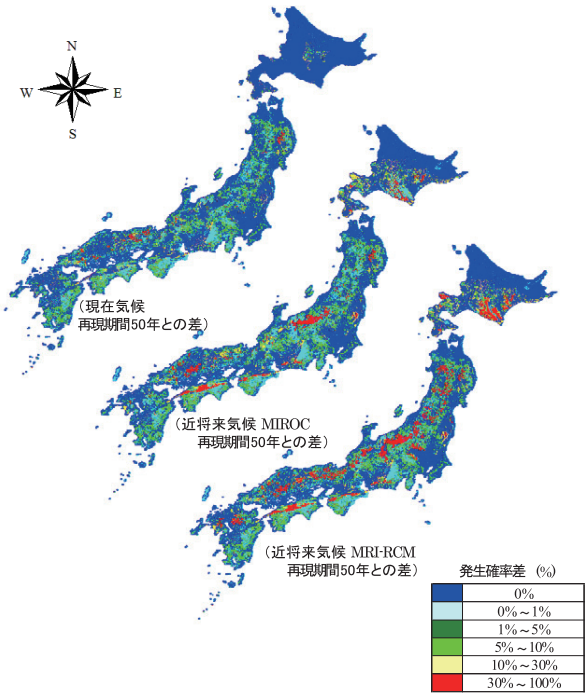


図７　現在気候の再現期間 30 年との発生確率差.

岐阜県北部の飛騨高地、中央構造帯の周辺である。

総じて、25％～ 75％までの範囲の発生確率に変化している。北海道に至っては、発生確率 95％以上に変化した地点も点在している。また、MIROC による近将来気候の再現期間 50 年を比較した場合、北陸地方の三国山地から飛騨山脈北部、中国山地の山地山頂部に発生確率 95％以上の地域が拡大する。また、四国山地の北側斜面に発生確率 75％～ 95％の地域、静岡県と愛知県の県境に位置する美濃三河高原南部に発生確率 25％～ 50％以上の地域が認められる。

現在気候の再現期間 30 年と RCM による近将来気候の再現期間 30 年を比較した場合、再現期間 30 年による発生確率 95％以上の地域が山裾側へ広がることが示されている。また、再現期間 30 年による発生確率 95％以上のグリッドセルに囲まれた領域も高い発生確率に変化する。その他、北海道南部の発生確率上昇が顕著であり、25％～ 50％以上の発生確率になる。四国山地の北側斜面には、発生確率 75％～ 95％の地域が分布する。そして、中国山地の山地山頂部に発生確率 95％以上の地域が拡大する。RCM による近将来気候の再現期間 50 年を比較した場合、再現期間 30 年の変化よりも、さらに、山裾側、発生確率 95％以上のグリッドセルに囲まれた領域の発生確率上昇域の拡大が認められる。

図７は現在気候の再現期間 30 年と各気候、各数値気候モデルの再現期間 50 年の発生確率差分布である。この図から、現在気候時に、兵庫県、京都府と鳥取県の境界付近の丹後山地、丹波高地、岩手県の北上山地北部、MIROC の近将来気候時に北海道南部、中国山地瀬戸内海沿岸、中央構造帯周辺における発生確率上昇 30％以上の地域が集中することが明らかにされた。また、RCM の近将来気候時では、MIROC で示される上昇地域に加え、秋田県から長崎県に至る日本海沿岸全域、関東北部で発生確率上昇 30％以上の地域の集中が示されている。特に、秋田県から九州地方北部に至る日本海側、静岡県と愛知県の県境に位置する美濃三河高原南部の発生確率 95％以上の領域拡大が顕著である。また、発生確率 25％～ 50％であるが関東山地、足尾山地の山裾の著しい発生確率の上昇も明らかにされた。

数値気候モデルによる斜面崩壊発生確率の解析から、近将来気候に変化することで日本列島の各地で山裾側に斜面崩壊のリスクが高まることが示された。この結果は、地球温暖化による日降雨量増大に伴い、都市近郊に斜面崩壊の被害が及ぶ可能性を示唆している。各数値気候モデルに共通して発生確率上昇の著しいグリッドセルの集中する地域として、北海道南部、北陸地方から中国地方に至る日本海沿岸部、美濃三河高原南部を含む東海地方から四国地方に至る中央構造帯が挙げられる。MIROC と RCM による解析結果を比較すると、日降雨量が多くなる RCM による発生確率が高くなる傾向であり、特に、日本海沿岸域に斜面崩壊発生確率 95％以上の地域が拡大する。

5. 考察

5.1　経済損失額評価への適用

(1) 経済損失額評価の概要

統計理論を用いて斜面崩壊の発生確率を求めたものの、土砂災害の評価をして対策を検討する場合、自然現象の危険度(hazard)だけでなく、それを取巻く社会環境として被害(disaster)を知る必要がある。被害の大小を求め、保全対象重要度を明らかにすることにより、土砂災害対策整備の優先度を決定できる。また、この優先度が、対策の意思決定につながる。そこで、斜面崩壊発生確率を利用し、経済損失額の土砂災害リスクの導出を試みた。リスクアセスメントとして利用されるリスク値は、「リスク」=「被害の大きさ」×「被害の発生確率」で算定されるのが一般的である [22]。この考えをもとに「経済損失額」=「経済価値(経済原単位)」×「規模(面積)」×「斜面崩壊発生確率」をグリッドセル毎に計算した。本研究では、国土数値情報 L03-09M-01 の土地利用データを用いてグリッドセルあたりの「市街地」、「田」、「畑地」、「森林」の面積を求め、各土地利用の経済原単位を当てはめることで経済損失額を求めた。

市街地の経済原単位は、急傾斜地崩壊対策事業の費用便益分析マニュアル [23] に準拠した居住地域と事務所地域の経済単価を合算することで求めている。国土数値情報 KS-META-A02-60M をもとに市街化調

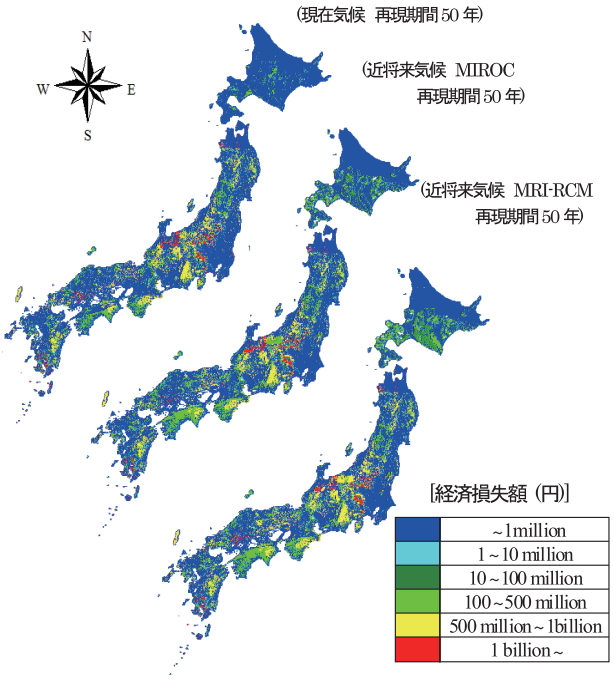


図 8　各気候モデルの再現期間 50 年に対する経済損失額分布.

整地域を居住地域、その他の市街地を事務所地域に設定した。田、畑地、森林の原単位は急傾斜地崩壊対策事業の費用便益分析マニュアルにも記載されているが、1998 年当時を基準としており、近年の価格変動により著しく経済価値が異なる可能性もあるため、近年の所得をもとに現在価値に近似する値を求めることとした。田と畑地の経済原単位は、農林水産省統計データ [24] をもとに 2000 ～ 2005 年までの平均単位あたりの生産所得額を都道府県別に設定した。畑地は複数の作物が混在するため、作物に応じた土地利用を導くことが困難になる。畑作に属するいも類、野菜、果樹等を都道府県毎に統括し、各地域の畑作所得の特徴を導いた。森林の経済原単位は、「山林素地及び山元立木価格調」[25] をもとに 2000 ～ 2005 年までの単位あたり林地生産価格を都道府県別に設定した。林地生産価格は用材林と薪炭林で分類されるが、数値地理情報上でこれらの分類は困難である。そこで、地球温暖化に伴う森林保護の動向を考慮し、森林管理の高まりにより良質な材木の生産が進む仮定を設け、単価の高い用材林を森林の経済原単位とした。

(2) 経済損失額評価の結果

本研究では、再現期間 50 年により経済損失額を評価した。経済損失額分布を**図 8** に示す。

各ケースともに足尾山地から関東山地の山裾となる栃木県、群馬県、埼玉県、飛騨高地に接する富山県、石川県、福井県、中国山地の山裾となる広島県、シラス台地である鹿児島県に、グリッドセルあたり経済損失 10 億円 /km^2 以上の経済損失額の集中する地域が分布する。栃木県、群馬県、埼玉県は市街地を若干含む畑地地帯、富山県、石川県、福井県は森林地帯、広島県と鹿児島県は市街地の土地利用に該当する。栃木県、群馬県、埼玉県は農林水産省統計データ [24] を参考にすると、麦類、野菜類の生産所得の高い地域である。さらに、首都圏に近接しており、低コストで消費者に出荷できる社会的な背景をもつ。斜面崩壊の土砂が畑地に及んだ場合、肥沃した土壌に復旧させるまで長期間を要することも考慮すれば、食品消費に甚大な被害が及ぶ可能性を示す。富山県、石川県、福井県を考慮すると、福井県は、林業生産力の高い地域である。特に、経済損失額 10 億円 /km^2 の地域は、足羽川林業地帯に該当する。この地域は国内有数の大径のスギ備蓄地帯であり、潜在的な経済損失額はさらに上昇する可能性が高い。石川県、富山県は林業以外に中部山岳、白山に示される広大な国立公園の分布する地域である。そのため、観光資源面での損害の増幅が予測される。また、観光地を訪問する市民の危険性も有している。広島県と鹿児島県は豪雨に伴う斜面崩壊の頻発しやすい地域であり、過去にも台風の接近、および上陸により多数の甚大な被害を受けた履歴をもつ。

MIROC による数値気候モデルの経済損失額分布から、北海道南部の広範囲で 1 千万円 /km^2 から 1 億円 /km^2 の経済損失額が示されている。この地域は南部がおおむね森林地域に該当し、南西部側は畑地地域である。南西部の畑地は、北海道の主要産物であるジャガイモ等の穀物類を生産している。その他の経済損失の見込まれる地域として、新潟県と長野県の県境の三国山地、鳥取県と兵庫県の県境の中国山地東部から丹後山地が挙げられる。双方ともに 1 億円 /km^2 から 5 億円 /km^2 の経済損失額が示されている。これらの地域は主にスギ、ヒノキといった樹種が豊富な森林であり、林業の被害を示している。

RCM による数値気候モデルの経済損失額分布では、高い経済損失額を示す面積が現在気候や MIROC よりもやや拡大している。ただし、北海道南部のみ面積の拡大が著しい。また、三国山地、中国山地東部から丹後山地の経済損失額が 5 億円 /km^2 から 10 億円 /km^2 に増加していることが示されている。

RCM、MIROC による数値気候モデルをもとにした検討結果から、経済損失額 10 億円 /km^2 以上を示した足尾山地から関東山地の山裾となる栃木県、群馬県、埼玉県、飛騨高地に接する富山県、石川県、福井県、中国山地の山裾となる広島県、シラス台地である鹿児島県は、保全重要度の高い地域であるため早急の対策整備の検討が必要と評価される。また、各数値気候モデルともに経済損失額の増加が見積もられた北海道南部、新潟県と長野県の県境の三国山地、鳥取県と兵庫県の県境の中国山地東部から丹後山地についても地球温暖化に対する適応策が必要と

評価される。

5.2　解析成果の利用手法

全球規模で生じる地球温暖化現象に対する土砂災害への適応策を考慮するため、日本列島を包括した土砂災害リスクの導出を試み、解像度1km × 1kmの発生確率と経済損失額を導出した。この成果は、斜面崩壊の原因になるべく地形、地質、および水文による普遍的な条件をもとに地域単位で評価したものである。しかしながら、実際の斜面崩壊の現象は、大規模なものでも数百mの単位である。そのため、1km × 1kmの解像度では個別の現象まで言及することができない。また、本地質状況も大局的な分類によるものであり、各崩壊地の固有の風化劣化した地質状況まで言及されていない。対策に関しても既に整備がおおむね達成されている可能性もある。これら全ての問題を解消できる全球規模の現象から個別現象までを網羅できるモデルの構築は、現状の計算機の能力、解析に用いるデータ、および調査の成熟度から困難である。本研究の成果は、地球温暖化も含む気候変動に対応できるマクロな視点から土砂災害のリスクを定量かつ分布的に明らかにしたものである。この評価により、地球温暖化も含む気候変動に対してリスクの高い地域を抽出することができ、対策整備の適否や代替案の検討を誘導して、地域の固有性を明らかにするための効率的な詳細調査を可能にさせる。つまり、ミクロな視点から土砂災害の精読に貢献できる。すでにハザードマップ等が作成されている場合には、気候変動に伴う土砂災害に対して脆弱な地域における危険斜面と評価でき、対策の意思決定に貢献できる。

リスクマップの作成を通じて、斜面崩壊発生確率、経済損失額を導出するためのモデル、およびアルゴリズムが構築された。この成果は、さまざまな気候条件による降雨量の入力を可能にしており、今回検討した数値気候モデル以外に対しても汎用可能なものである。不確実性を含む温室効果ガスの排出にも臨機応変に対応でき、なおかつ、直感的な感覚よりも客観的な定量評価を導くことができる。今後、さらにSRES毎の気候変動も入力して、地球温暖化に対する土砂災害のリスクの推移を明らかにし、温室効果ガスの安定化レベルを明らかにする意向である。

6.　おわりに

以下に本研究の結論を列挙する。

a)各気候共通して、奥羽山脈から越後山脈、三国山地に連続する山岳地域、糸魚川～静岡構造線に近接する日本アルプスの山岳地域、中国山地の山裾を中心に斜面崩壊発生確率95%以上のグリッドが集中する。

b)各数値各数値気候モデルに共通して山裾側に高い発生確率が拡大し、特に、発生確率上昇の著しい地域として、北海道南部、北陸地方から中国地方に至る日本海沿岸部、美濃三河高原南部を含む東海地方から四国地方に至る中央構造帯が挙げられる。

c)MIROCとRCMによる解析結果を比較すると、日降雨量が多くなるRCMによる発生確率が高くなる傾向を示し、特に、日本海側の斜面崩壊発生確率95%以上の地域拡大が顕著に示された。

d)各気候共通して、足尾山地から関東山地の山裾となる栃木県、群馬県、埼玉県、飛騨高地に接する富山県、石川県、福井県、中国山地の山裾となる広島県、シラス台地である鹿児島県を中心に経済損失額10億円以上/km^2のグリッドセルが集中した。

e)各数値気候モデルともに、北海道南部、新潟県と長野県の県境の三国山地、鳥取県と兵庫県の県境の中国山地東部から丹後山地の経済損失額の増加が顕著である。

斜面崩壊発生確率、経済損失額の解析により列挙されたこれらの地域は、優先的に対策を考慮すべき地域であり、特に、経済損失額で高いリスクを示した地域の詳細調査の実施が提案される。

今後は、より長期間の将来の気候に対する土砂災害リスクを細かなタイムステップで解読すること、他のSRES、および数値気候モデルを応用すること、普遍的な条件より求められたリスクだけでなく都道府県に存在する固有性を考慮することにより、土砂災害に対する適応策の具現化に取り組む。また、これらの結果をもとに温暖化ガス排出との関連を明らかにし、気候が安定化しうる排出レベルの解明にも努める。

謝　辞

本研究は、環境省地球環境研究総合推進費(S-4)「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合評価に関する研究」の研究助成によって行われた。ここに記して謝意を示す。

引用文献

1) 文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省(2007) IPCC第4次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約. http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/interim-j.pdf (Cited2008/12/20)

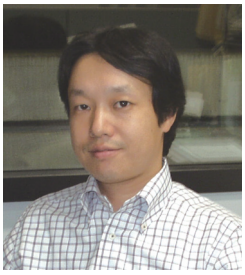
2) 気象庁(2006)異常気象レポート2005. http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate_change (Cited 2008/12/20)

3) 牛山素行(2005)2004年新潟・福島豪雨と“豪雨空

白域.”土木学会水工学論文集, 49, 445-450.
4）例えば Robert, L. T., A. Buishand, J. J. Bart, M. Van den Hurk and J. M. Marcel（2008）Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. *Journal of Hydrology*, 351, 331-343.
5）内閣府（2008）平成 20 年度防災白書. http://www.bousai.go.jp/hakusho/h20/index.htm（Cited 2008/12/20）
6）牛山素行（2008）2004 ～ 2007 年の豪雨災害による人的被害の原因分析．土木学会河川技術論文集, 14, 175-180.
7）山田剛二・渡 正亮・小橋澄治（1979）地すべり・斜面崩壊の実態と対策．山海堂.
8）国土交通省（2007）平成 19 年度国土交通白書. http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/index.html（Cited 2008/12/20）
9）気象庁（2008）気候変動監視レポート 2007. http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/monitor/2007/pdf/CCMR2007_all.pdf（Cited 2008/12/20）
10）榊原弘之・倉本和正・菊池英明・中山弘隆・鉄賀博己・古川浩平（2000）ラフ集合を用いたデータマイニングによるがけ崩れ発生要因の抽出に関する研究．土木学会論文集, 658, Ⅵ-48, 221-229.
11）Temesgen, B., M. U. Mohammed and T. Korme（2001）Natural hazard assessment using GIS and remote sensing methods, with particular reference to the landslides in the wondogenet area, Ethiopia, physics and chemistry of the Earth part C. *Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 26（9）, 665-675.
12）牧原康隆（2006）気象レーダーを利用した短時間の降水・土砂災害予報と気象業務改善の歩み．天気, 54（1）, 21-33.
13）水田敏彦・瀬尾一大（2001）数値標高モデルに基づく豪雨による斜面崩壊危険予測－長崎市を事例対象にして．自然災害科学, 19（4）, 477-491.
14）川越清樹・風間 聡・沢本正樹（2008）数値地理情報と降雨データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築．自然災害科学, 27（1）, 69-83.
15）Truett, J., J. Cornfield, and W. Kannel（1967）A multivariate analysis of the risk of coronary heart disease in Framingham. *J. Chron. Dis.* 20, 511-524.
16）Ohlmacher, G. C. and J. T. Davis（2003）Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology*, 69（3-4）, 331-343.
17）山岸宏光・アヤレウルルセゲド・大谷政敬・加藤晃司（2004）土砂災害の調査法とデータベース化に関する研究－ 2004 年 7.13 新潟中越地域による同時多発斜面災害．研究助成事業報告書，日本建設情報総合センター.
18）Richards, L A.（1931）Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1, 318-333.
19）牛山素行・寶 馨（2004）AMeDAS データによる暖候期降水量と最大 1 時間・日降水量の関係．水文・水資源学会誌, 13（4）, 368-374.
20）西森基貴・石郷岡康史・横沢正幸・鳥谷 均（2005）最新の全球気候モデルの出力結果を用いたアジア域の気候変化シナリオ．農業環境工学関連 7 学会 2005 年合同大会講演要旨集, 448.
21）Iizumi, T., M. Nishimori and M. Yokozawa（2008）Combined equations for estimating global solar radiation: Projection of radiation field over Japan under global warming condition by statistical downscaling. *J. Agric. Meteor.*, 64.（In press）
22）多々納裕一・高木朗義（2005）防災の経済分析，勁草書房.
23）国土交通省（2000）急傾斜地崩壊対策事業の費用便益分析マニュアル.
24）農林水産省（2008）農林水産統計情報総合データベース. http://www. tdb. maff.go.jp/toukei/toukei（Cited 2008/12/20）
25）日本不動産研究所（1985-2005）山林素地及び山元立木価格調.

川越　清樹
Seiki KAWAGOE

秋田県出身。東北大学大学院環境科学研究科博士課程修了後、東北大学大学院環境科学研究科産学官連携研究員として、環境省地球環境研究総合推進費（S-4）「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合評価に関する研究」に携わり、温暖化による水資源、水災害に関わる影響評価に取り組む。専門は水工学、水文学、自然災害科学。気候変動による流域環境問題に対して、土砂、水資源の量と質の影響評価モデルの開発を進めている。現職は、福島大学大学院共生システム理工学研究科准教授。



風間　聡
So KAZAMA

東北大学大学院工学研究科准教授。1990 年東北大学工学部卒業、1995 年東北大学大学院工学研究科修了博士（工学）。筑波大学講師、JICA 専門家としてアジア工科大学院赴任、東北大学環境科学研究科准教授を経て現職。専門は水文学、水資源工学。地球温暖化下での水に関連する研究を国内外を対象に行っている。特に洪水氾濫や斜面災害など水災害を中心に研究している。