第43回地すべりシンポジウム

土砂災害危険度評価と土地利用
ー土砂災害防止法と新たな課題ー

2015. 5. 15

主　催　(公社)日本地すべり学会新潟支部
共　催　(公社)地盤工学会北陸支部
後　援　新潟県
　　(一社)新潟県地質調査業協会
　　(一社)斜面防災対策技術協会新潟支部
　　新潟県地すべり防止工事士会

～～～　目　次　～～～

巻頭言 1
(公社)日本地すべり学会新潟支部　支部長　福岡　浩

＜基調講演＞
2014年広島土砂災害の影響と教訓 2
新潟大学　福岡 浩

＜ 発 表 ＞
土砂災害防止法と警戒避難 8
新潟大学　水野 正樹

土砂災害発生地の地形から見た土地利用のあり方 14
(独)防災科学技術研究所　井口 隆

斜面アセットマネジメントシステムについて 20
応用地質(株)　中村 一樹

土砂災害に関する数値シミュレーションのレビュー 26
新潟大学　王 純祥

巻 頭 言

（公社）日本地すべり学会・新潟支部長　福岡　浩

平成 26 年 8 月 20 日未明広島豪雨災害が発生し、74 名の尊い命が失われました。平成 11 年 6 月にも同じ広島市内で同様の災害が発生しており、犠牲者は両方の災害ともに小規模渓流の出口正面に開発、建設された新興住宅地で主に発生しています。平成 11 年の災害後に土砂法が制定されていたにもかかわらず、特別警戒区域等の設定が進展していなかったことが問題だという意見もありますが、土地利用のあり方と極端気象現象の頻度の増加している現状への対応の遅れが今回の災害の最大の教訓であり、新たな課題であると言えます。

近年の土砂災害、伊豆大島災害や防府市災害、庄原市災害、阿蘇市災害など、どれをとっても犠牲者が小規模渓流の出口正面で発生していることは共通しています。地形的には扇状地であり、普段ほとんど流量の無い渓流であること、渓流の長さが短いことから土石流が襲うと言うことを住民が想定、危険を認識できていないということが共通しています。海外においても開発が進展している都市域、都市化域では同様の問題が生じ始めています。

今回の新潟支部シンポジウムでは、「土砂災害危険度評価と土地利用－土砂災害防止法と新たな課題－」をテーマに、ハザードから危険度評価技術の進展、土地利用と土砂災害危険度の関係、土砂法の新たな課題等について近年の主要な研究成果をレビューするとともに、今後さらに推進すべき未解決の課題について議論を行います。多くの積極的な議論がなされることを期待します。

2014 年広島土砂災害の影響と教訓

福岡　浩（新潟大学　災害・復興科学研究所）・佐々恭二（国際斜面災害研究機構）
Hiroshi FUKUOKA（RINHDR, Niigata University）
Kyoji SASSA (International Consortium on Landslides)

キーワード：土砂災害、表層崩壊－土石流、土地利用

1. はじめに

平成 26 年 8 月 20 日早朝、広島市安佐南区を中心に集中豪雨が発生し、帯状の雨域に沿って多数の土石流が発生し下流に広がる住宅地を襲い、74 名が犠牲となった。本稿では 2014 年（平成 26 年）広島土砂災害と呼ばれることとなった本災害の影響と教訓について概要を紹介する。

2. 豪雨、土石流発生分布、地質条件

今回の極端豪雨は広島市安佐南区から可部町にかけての幅 10ｋｍ以内の線状の細長い地域に集中した。いわゆるバックビルディング現象とされているが、極端化したんは二方向からの湿舌が広島付近で合流したことにあると説明されている。その結果、広島市北部の山地に沿う中山間地において極端豪雨が降ることとなった。図 1 に安佐南区八木地区に最も近いアメダス観測点における前夜からの 10 分間雨量を示す。災害が発生した 8 月 20 日早朝 1:30 から 4:00 にかけて 10 分間雨量で 15mm、時間雨量換算で 90mm を超えることが多くあり、累積で約 250mm 降った。図 3 に産総研（地質調査所）が災害後に公表した注釈付きの地質図を示す。広島市は大半の地域が広島型花崗岩であるが、今回土石流が発生した八木地区は山頂付近にジュラ紀付加帯の堆積岩および接触変成したものも含まれるとされる。可部地区は高田流紋岩が卓越している。土石流発生を引き起こした土砂はいずれも２ｍまでの厚さの表層の風化土層が主体となったが、広島花崗岩は典型的なマサを生産しているが、堆積岩、接触変成岩および流紋岩から生成される風化堆積物層は若干粘性土を含んでいた。しかし発生頻度については明瞭な違いは見られない。表層土を崩壊させさらに土石流化させる一定程度以上の極端降雨の場合、母岩となる地質は関係ないことを示唆している。

3. 発生直後の調査

この災害では報道との同行調査を行うことができた。図 4、図 5 に発生翌日に雨天の合間に現地上空を飛行した際に撮影した写真を示す。図 4 は安佐南区三丁目斜め上空から撮影した写真、図 5 に可部町の土石流の一部を示す。明らか土石流扇状地に住宅域が進出していることがわかる。行方不明者捜索等への影響から現場直上の飛行は制限された。曇天が続いたことから国土地理院の空撮も 1 週間以上遅れ、源頭部や渓流における不安定土砂のの分布の把握に時間がかかった。行方不明者捜索段階に於ける二次災害を防ぐためには源頭部の状況の空からの迅速な把握は絶対に不可欠である。

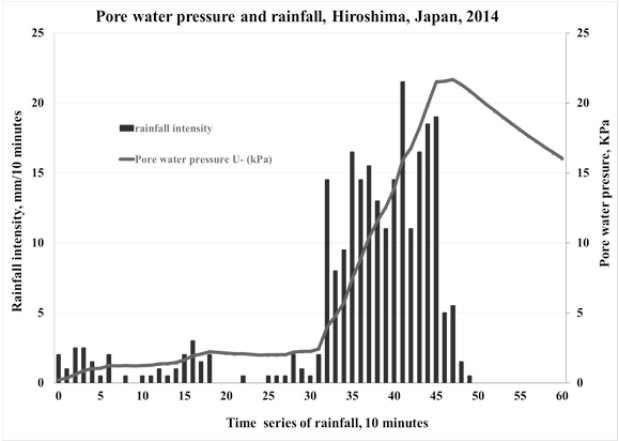


図 1　平成 26 年 8 月 19 日 20:30 からの 10 分間雨量（気象庁）。20 日 1:30 - 4:00 にかけて約 250㎜ 降った。

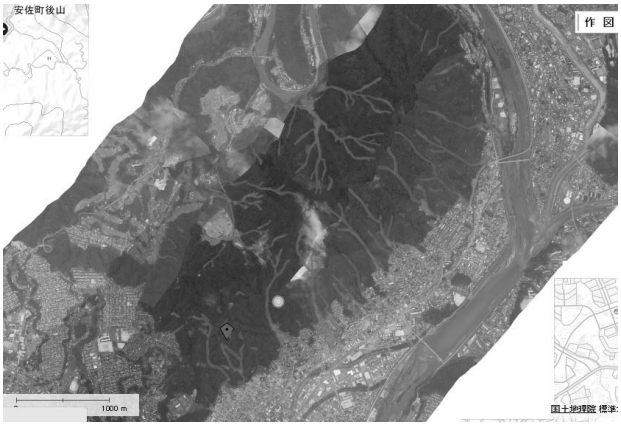


図 2　崩壊・土石流経路図。発生国土地理院が空中写真を判読して公表したもの。

図３　現場周辺の地質図（産総研）。

図６に発生翌日の八木三丁目の最も被害が甚大だった地区の状況を示す。八木三丁目では犠牲者の大半の 50 名以上が亡くなった。木造家屋をかすめた土石流によってえぐられて全壊した状況が明瞭にわかる。これより上流では基礎しか残らなかった箇所も多くあった。伊豆大島災害と同様、土砂流が木造家屋に正面から直撃する場合、被害は極めて甚大であることがわかる。しかし、この家屋のすぐ横にあった県営アパートの公民館施設は土石流の直撃を受けて、巨礫が屋上に多数残り、山側の壁面には多くの礫が衝突した跡が明瞭で草もからまっていたにもかかわらず内部には泥が多少入っていただけであり、鉄筋コンクリート建造物は土石流に対して強靭であることがわかった。

図４　発生翌日の安佐南区３丁目上空からの斜め空中写真

図５　可部町の土石流。

図６　最も被害の甚大であった安佐南区３丁目の被害家屋。

図７　八木３丁目住宅街の上部に堆積した土石流の巨礫。5 メートル以上のものも多く見られた。

図８　八木三丁目の斜面が終わる下部付近に広く堆積していたマサ。

図 7 に土石流によって運ばれ八木 3 丁目上部斜面に堆積した巨礫の例を示す。４，５メートルを超えるものも多数見られた。土砂も大量に運搬されたが、図 8 に八木 3 丁目の斜面下部に広範囲に大量に堆積していた砂を示す。典型的なマサで拡大すると石英、長石、黒雲母の鉱物粒子があることが確認できる。巨礫を伴う土石流だけでなく洪水流も住民により証言されており、そのためマサが広範囲にかつ扇状地の末端まで堆積したことにつながったと考えられる。図 9 に周辺に広がる段々畑の写真を示す。多くの礫だけでなく巨礫までも積み上げて建設したことがわかるが、これらの礫が土石流起源であることも自明であり、この斜面が土石流扇状地であり土石流が頻発するだけでなく礫が到達する危険地区であったことがわかる。

八木三丁目では渓流の出口から幅 1.5 程度の狭い流路工があり、排水を行っていた。最大流量は大きくはなく、今回の土石流は当然溢れ災害化した。また流路側面が削れた箇所もあり、図 10 に示す。流路の底面の下に礫が集積している層が見えるが、若干インブリケーションを示していて過去の土石流起源の堆積物と思われる。

4. 土地利用の変遷

図 11 に土石流災害発生前後の八木三丁目付近の空中写真の比較を示す。左が Google Earth による発生前の写真、右が国土地理院の電子国土で閲覧できる空中写真。図中、土石流通過後家屋が全壊した箇所を赤い点で示した。一方、図 12 に福岡が発生直後現地を踏査して得られた巨礫の分布範囲とマサの分布範囲を示す。特に赤色（モノクロ印刷では濃いハッチをかけた範囲）と図 11 の全壊家屋の分布範囲がほぼ一致することがわかる。災害発生後、八木三丁目だけで無く八木地区、可部地区ともに広範囲に土砂流が堆積しているが、土砂流だけで家屋が全壊した箇所はあまり見られなかった。少なくとも八木三丁目では巨礫が直撃した木造家屋に死者が集中している。

図 13 に八木三丁目における土地利用変遷を示す。国土地理院がネットで公開している 1947 年以降の空中写真から 3 枚を選び、住宅の分布範囲の山側の上限を試みでラインで示したものである。八木三丁目については約 60 年の間に渓流の出口から渓流沿いに上流に向かって開発が進展していった傾向が顕著である。1999 年の広島土砂災害では死者は渓流の出口正面に建設した新しい家屋が多かったが、今回の災害でも傾向はまったく同じであるどころか、犠牲者数はより甚大になってしまった。

図 9　八木三丁目に限らず今回土石流が流出した渓流出口付近には土石流堆積物の礫を積み重ねた畑が多く見られる。

図 10　八木三丁目の渓流出口付近で土石流によりえぐられた小規模流路工側面。流路工の下に過去の土石流起源と思われる礫が集積しているのがわかる。

図 11　平成 26 年 8 月土石流発生前後の八木三丁目付近の状況。左：発生前（Google Earth）、右：発生後（国土地理院）

図 12　八木三丁目付近の巨礫の地積域(赤＝濃)と砂の堆積域(黄＝淡)

図 13　国土地理院空中写真判読による八木三丁目付近の宅地開発の変遷。

5. 崩壊－土石流発生メカニズム

今回の土石流の発生流動機構を調べるために渓流上部の発生源東部を調査した。図 14、図 15 に八木三丁目上流に数カ所ある崩壊発生源頭部の状況を示す。図 14 に源頭部の上部、滑落崖付近であるが、縦方向にクラックが入った基岩の列が見られる。これらは八木地区の花崗岩地域において今回発生した土石流源頭部に相当程度共通している特徴である。方向は概ね付近を通る北東～南西方向の断層と平行であるが、こうしたクラックが山体深部にまで入っている場合、山頂付近に降った雨が地下水みちでつながり、水筒差から以上に大きい過剰間隙圧が発生、作用して流動を促進した可能性もある。図 15 に断面においてすべり面と認められる境界を示す。すべり面直上の砂を収集した。

図 14　八木三丁目上流の土石流発生源頭部のうち最も標高の高いものの滑落崖部分。

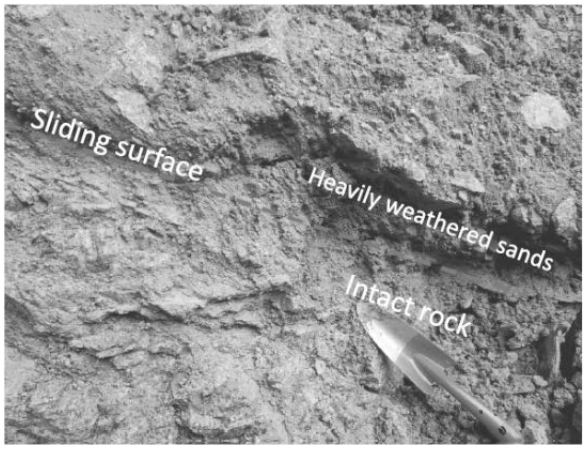


図 15　上記源頭部のすべり面付近の断面。

発生メカニズムを調べるため、上記で採取した土試料について国際斜面災害研究機構のリングせん断試験機を使用して定速度・飽和非排水リングせん断試験を実施したが、代表的な試験結果を図 16 と図 17 に示す。図 16 は応力経路で初期圧密応力を 50 kPa と 100 kPa の二つの場合について実施した試験結果を示す。どちらもピーク強度を示したあと、残留強度の破壊線添いに原点に向かって下がり、最終的にせん断抵抗にして数 kPa まで低下し、その後、定常状態に留まった。破壊線上を下がったことから典型的な「すべり面液状化」挙動と言える。図 17 に対数でとったせん断変位とせん断抵抗の関係を示す。わずか 10ｃｍ程度でせん断抵抗はピークに到達したあと、ほぼゼロに近い数 kPa にまで低下したことがわかる。極端降雨時に過剰間隙水圧が破壊に到達するほどに高まり、さらに２ｍという過剰間隙水圧が発散しやすい浅い層でも非排水状態を概ね保てる程度の短い時間に 10ｃｍ程度のせん断変位が生じた際に流動化しやすいことがこの図からわかる。

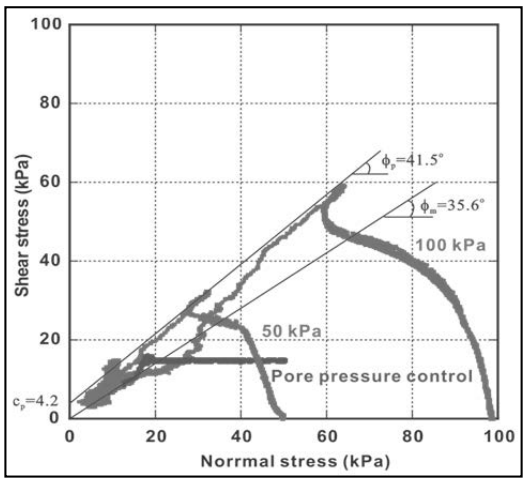


図 16　八木三丁目の土石流発生源東部の土砂について実施した、定速度飽和非排水リングせん断試験の結果。ピーク強度を示したあと典型的なすべり面液状化を示した。

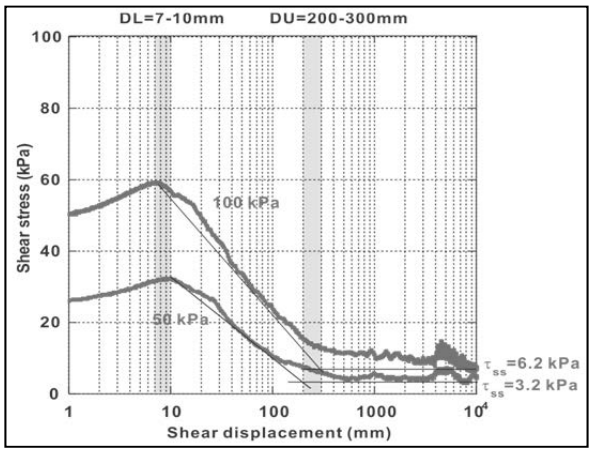


図 17　上記試験結果のせん断変位～せん断抵抗関係図。10ｃｍ程度のせん断変位で強度はほぼゼロになった。

6. まとめ

平成 24 年広島土砂災害はその 15 年前の教訓を活かすことができず､多くの犠牲者を招いてしまった。渓流の上流で発生した表層崩壊がすべり面液状化により流動化し土石流となって下流に大量の土石をともなって到達するというメカニズムが明らかにされている。今回、大災害化した要因のうち、土砂法の適用が進展していなかったことがしばしば指摘され、法律の改正もなされた。しかし、土地利用の変遷、特に危険な渓流添いを上流に向かって住宅地を開発し続けたことが脆弱性を増大させたと言うことができ、土地利用計画、変更を如何に可能にするかが今後の地すべり研究の一つの柱となるはずである。

図 18 に現在八木三丁目の渓流出口から約１００

m程度のすぐ上流に設置されたリングネットの写真を示す。リングネットは欧州では落石だけで亡く、土石流の補則にも一定程度の実績があり、設置期間が短いことで知られる。砂防ダムの建設が今回被災した渓流で推進されるであろうが、1 年以上の期間が必要で有り、その間、再度極端気象により土石流が再発した場合に備えて最低限の対策工が必要とされるため設置された。これらの施設のキャパシティについては議論の余地はあるが、住民の安全安心だけでなく、意識向上にも寄与することが自助共助による早期警戒避難を可能にすることで住民にとってより安全な地域を構築することにつながると信じたい。

図 18　安佐南区八木三丁目渓流下部に災害発生後に設置されたリングネット。砂防ダム建設までに時間がかかるため設置された。

引用文献

国際斜面災害研究機構 (2014): 国際フォーラム「都市化と土砂災害」 2014 年 8 月広島土砂災害と post-2015 国連防災枠組みへの日本の貢献プロシーディング, 122 pages.

土木学会・土木学会中国支部・地盤工学会（2014）: 平成 26 年広島豪雨災害合同緊急調査団調査報告書.

土砂災害防止法と警戒避難

水野 正樹（新潟大）*　　桂　真也（土木研究所）　　冨田 陽子（新潟県）
Masaki MIZUNO　　Shin'ya KATSURA　　Yoko TOMITA

キーワード：土砂災害防止法，土砂災害防止対策基本方針，避難勧告，避難率

1. はじめに

平成26年8月豪雨により広島市北部で発生した土砂災害等を踏まえ，土砂災害から国民の生命及び身体を保護するため，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」という）の一部を改正する法律が，平成 26 年 11 月 12 日成立し，平成 27 年 1 月 18 日施行された。

そこで，今回の土砂災害防止法改正の概要，及び土砂災害防止対策基本方針の変更の概要，そして警戒避難に重要な役割を果たす土砂災害警戒情報の発表方法を紹介する。

さらに，今回，土砂災害防止対策基本方針の中で「土砂災害警戒情報が発表された場合，直ちに避難勧告等を発令することを基本とする」と新たに記述され，今後，発令回数が増加すると考えられる避難勧告や避難指示と避難率の関係について分析した成果[1)]を紹介する。

2. 土砂災害防止法の改正

「土砂災害防止法」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について危険の周知，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するほか，重大な土砂災害の急迫した危険がある場合において避難に資する情報を提供すること等により，土砂災害の防止のための対策の推進を図ることを目的としている。改正土砂災害防止法が規定する主な事項を**表－1** に示す。

改正土砂災害防止法では，都道府県に対する基礎調査の結果の公表の義務付け，都道府県知事に対する土砂災害警戒情報の市町村長への通知及び一般への周知の義務付け，土砂災害警戒区域の指定があった場合の市町村地域防災計画への記載事項の追加等の措置が加えられた。その改正の概要を**図－1** に示す。

3. 土砂災害防止対策基本指針の変更

土砂災害防止対策基本指針[2)]は，法に基づき行われる土砂災害の防止のための対策の推進に関する基本的な方向を示すものである。

土砂災害防止法の改正に伴い土砂災害防止対策基本指針は，主に**表－2** に示すとおり変更され，

表－1　土砂災害防止法の主な条項

事　項	条 項
土砂災害防止対策基本指針	第 3 条
基礎調査	第 4 条
基礎調査に関する是正の要求の方式	第 6 条
土砂災害警戒区域 ・ 急傾斜地の崩壊等が発生した場合に住民等の生命又は身体に危害が生ずるおそれがあると認められる土地の区域。	第 7 条
土砂災害特別警戒区域 ・ 土砂災害警戒区域のうち，急傾斜地の崩壊等が発生した場合に建築物に損壊が生じ住民等の生命又は身体に著しい危害が生ずるおそれがあると認められる土地の区域。	第 9 条
警戒避難体制の整備等	第 8 条
特定開発行為の制限	第 10 条
土砂災害特別警戒区域内における居室を有する建築物の構造規制	第 24 条 第 25 条
移転等の勧告・支援	第 26 条 第 34 条
土砂災害警戒情報の提供	第 27 条
緊急調査及び土砂災害緊急情報	第 28 条 第 29 条 第 31 条
避難のための立退きの指示等の解除に関する助言	第 32 条
地方公共団体への援助	第 36 条

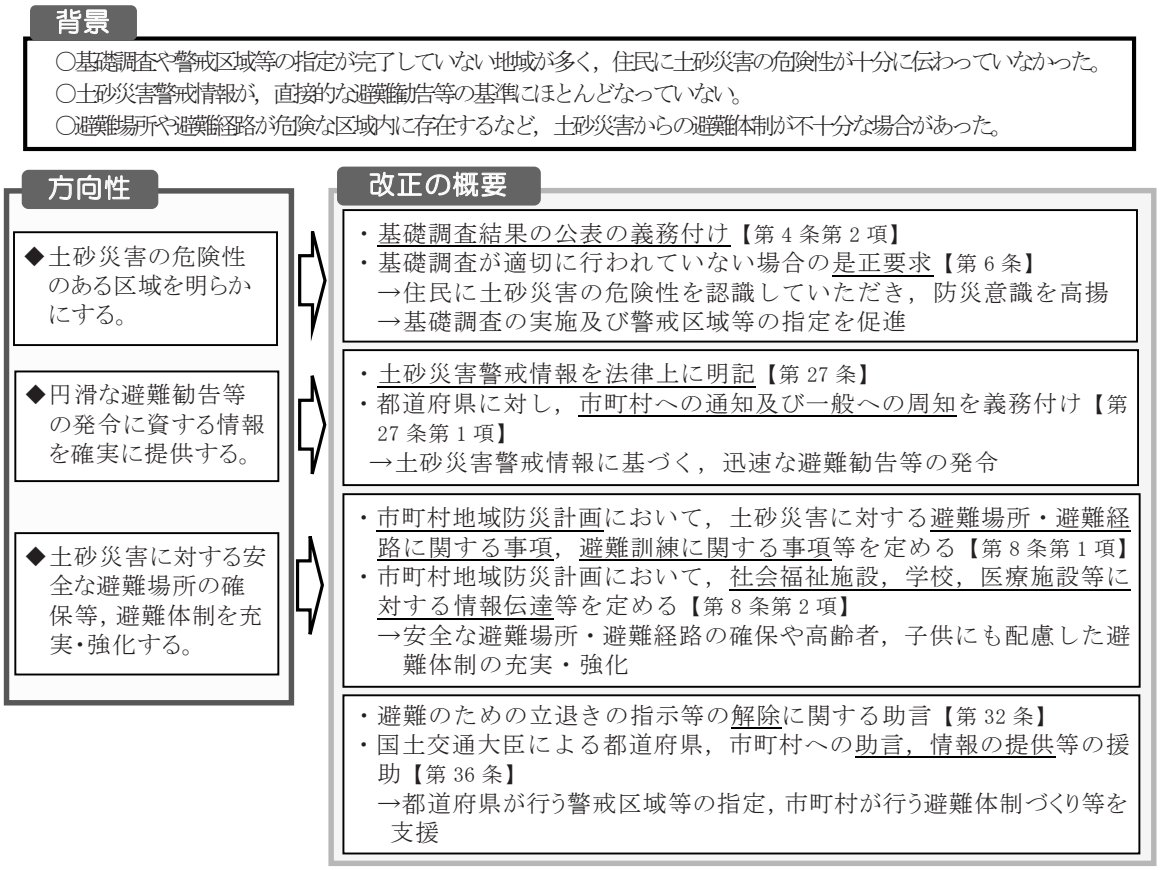
条項の凡例　　平成 26 年 11 月 12 日改正において
＿：新たに追加された条項　　‥‥：改正された条項

国，都道府県，市町村で新たに対応を要する必要事項，重要事項等が多く追加された。また，残された課題として，指針の文中に次のような記述がある。

- 土砂災害は，そのほとんどが突発的に発生する特徴を有するものであるため，発生日時を正確に予知することは未だ難しい
- 土砂災害警戒区域等の指定の範囲の特定に当たっては，斜面の深層崩壊，山体の崩壊，想定をはるかに超える規模の土石流等については，予知・予測が困難

4. 土砂災害警戒情報について

土砂災害警戒情報の発表の基準となる土砂災害警戒避難基準雨量は，RBF ネットワーク（Radial



図－1　土砂災害防止法の改正（平成27年1月18日施行）の概要〔[3]に一部加筆〕

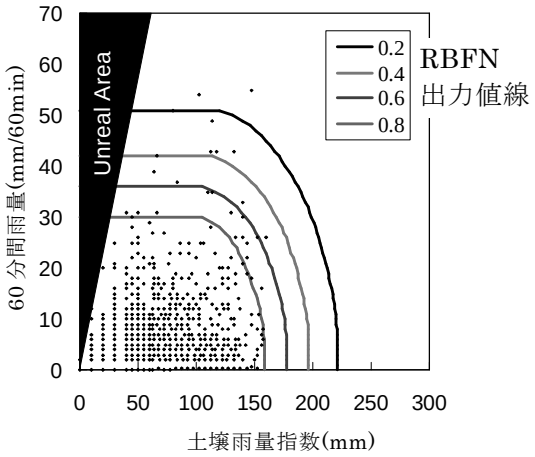
表－2　土砂災害防止対策基本指針の主な変更点〔[4]より抜粋し一部加筆〕

（平成27年1月16日付け国土交通省告示第三十五号）

◆基礎調査 ○基礎調査結果の公表については，警戒区域等に相当する範囲を示した図面により実施 ○都道府県等のホームページ，掲示板の活用，各戸配布など様々な手法により周知 ○公表後には，区域指定の手続きを速やかに進めるとともに，避難体制の検討に早期に着手 ○おおむね5年程度で基礎調査を完了させることを目標として，都道府県は実施目標を設定 ○国は，都道府県に対し，財政面，技術面などの支援を実施 ○都道府県は定期的に進捗状況を国に報告し，国は実施目標及び進捗状況を公表 ○基礎調査がおおむね5年程度の目標から大幅に遅れる場合などには是正の要求を実施 **◆避難体制** ○土砂災害に対する安全性が確保された避難場所・避難経路を選定 ○土砂災害に係る避難訓練を毎年1回以上実施 ○電子地図の提供等ハザードマップの作成を支援 ○都道府県はハザードマップの作成状況を報告し，国は公表を実施 ○ハザードマップを活用した実践的な防災訓練や防災教育を行うことで，正確な知識を普及 ○要配慮者利用施設の立地状況・ハード対策の実施状況の把握及びそれを踏まえた取組を実施	**◆土砂災害警戒情報** ○実績降雨量におおむね2時間先の予測降雨量を加味した降雨量が基準に達したときに，都道府県と気象台が連携して，土砂災害警戒情報を発表 ○市町村長に対し，ファックス，電子メール，電話等により確実に通知 ○テレビ，ラジオ，インターネット等により一般への周知 ○土砂災害警戒情報の発表単位の細分化を検討 **◆避難勧告等の発令** ○土砂災害警戒情報が発表された場合，市町村長は直ちに避難勧告等を発令することを基本とする ○国，都道府県は，メッシュ毎の土壌雨量指数や降雨情報を時系列で提供するとともに，きめ細かな雨量予測等の情報も市町村に提供 ○市町村長は，提供されたメッシュ情報等を踏まえ，危険度が高まっている区域に避難勧告等を発令 **◆住民がとるべき行動の周知** ○避難勧告等が発令された場合，危険な区域から一刻も早く立退き避難を行うことが必要 ○状況に応じた適切な判断を住民自身が行えるよう，日頃から土砂災害や土砂災害警戒情報等に関する正しい知識を普及啓発 **◆避難勧告等解除の際の助言** ○市町村に対し，保有するリアルタイム情報や災害に関する知見等から助言 ○大規模災害後は，TEC-FORCEや専門家を派遣

Basis Function Network，以下，RBFN）を用いて，土砂災害発生危険基準線（Critical Line：以下，CLという）の境界線を決める方法[5]で設定している。

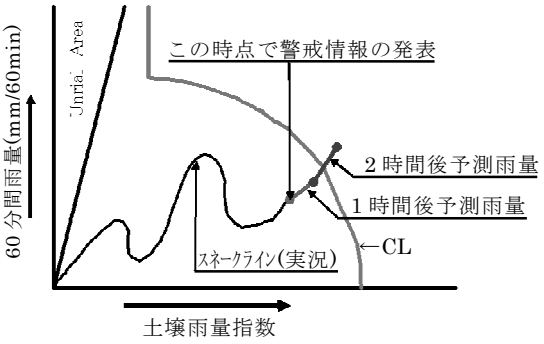
具体には，過去10年間以上の期間の降雨データを基に，非発生降雨の土壌雨量指数，60分間積算雨量をそれぞれx軸，y軸とした平面図上において，任意の点の降雨量がどの程度の確率で発現するかを表す値を表現した応答曲面から等RBFN出



図－2　応答曲面から作成した等 RBFN 出力値線の設定例[5)]

力値線を設定する（**図－2**）。ここで，**図－2** においては，原点に近い領域ほど非発生降雨が高い確率で現れる領域である。そして土砂災害の発生危険予測を行う基準として，1 本の RBFN 出力値を選定する。その際，境界が内側にあれば捕捉精度は高くなるが，逆に基準に達する頻度は増える。円滑な避難勧告等の発令に使われるよう,「適切に捕捉できるか」「基準に達する回数が過大すぎないか」等のバランスを考えて，メッシュ毎に出力値 0.1 ピッチで引いた計 9 本の候補の中から 1 本を選定する。そして，設定した曲面が実際の現象と矛盾しないよう細かな修正を行い最終的な CL としている。

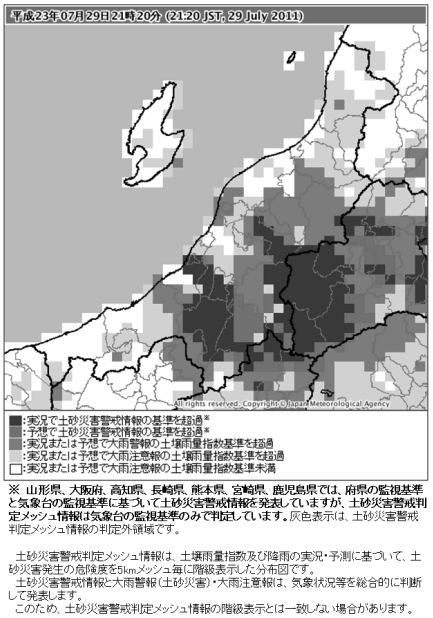
この方法は，境界線の位置，形状について，一定のルールの下で出現確率の大小として計算した結果を用いて客観的に効率良く設定できると共に，土砂災害の非発生降雨の降雨データを使用して安全領域の外縁を探す方法なので，過去の災害発生履歴が無い場合にも設定することができる。



図－3　土砂災害警戒情報発表のタイミング

大雨時には，決定した CL を用いて，現時点での実況雨量の点から概ね 2 時間後までの予測雨量を加えた点が CL 基準を超過する場合，気象台と県が，今後の状況等を勘案して対象市町村全域に土砂災害警戒情報を発表している。（**図－3**）

なお，大雨時に各地域が土砂災害警戒情報の基準を超過しているかどうかは，気象庁 HP の「土砂災害警戒判定メッシュ情報」に 5km メッシュ 10 分更新で公開されている。（**図－4**）



図－4　気象庁公開の土砂災害警戒判定メッシュ情報[6)]

5. 土砂災害に関する避難勧告等と避難率

大雨により土砂災害の発生が懸念される場合，自治体から避難勧告や避難指示が住民に対して発令される。この避難勧告等に対する住民の避難の実態について調査を行った。災害時に国土交通省では,土砂災害に関する避難勧告等の状況として，発令対象地区や発令・解除日時，避難対象世帯数・人数，実際の避難者数といった情報が記載された「災害情報」（以下,「災害情報」という）を随時公表している。そこで，土砂災害が多発した複数の災害を対象に，災害情報を用いて避難対象世帯数や発令時間帯等と避難率との関係を整理し，住民の避難の実態を分析した。

表－3　使用した災害情報

No.	対象土砂災害	災害発生時期	主な被災地	災害情報※
1	平成21年7月　中国・九州北部豪雨による災害	H21.7	山口県	平成21年7月中国・九州北部豪雨による被害状況等について（第10報）
2	平成21年8月　台風9号による災害	H21.8	西日本	台風9号による被害状況等について（第14報）
3	平成22年6月17日からの梅雨前線による災害	H22.6	鹿児島県	平成22年6月17日からの梅雨前線による被害状況等について（第1報）
4	平成22年7月2日からの梅雨前線等による災害	H22.7	西日本	平成22年7月2日からの梅雨前線等による大雨の被害状況等について（第19報）
5	平成22年10月　奄美大島における大雨等の災害	H22.10	鹿児島県（奄美大島）	奄美大島における大雨等の被害状況等について（第19報）

※国土交通省HP災害情報（http://www.mlit.go.jp/saigai/mokuji.html）より

5.1 災害情報の収集

分析の対象としたのは，災害情報に避難対象人数等の記載がある平成 21～22 年度に土砂災害を対象とした避難勧告等が多く発令された 5 つの風水害（**表－3**）である。国土交通省のホームページ（http://www.mlit.go.jp/saigai/mokuji.html）から，これらの災害に関する災害情報を入手した。

表－4　災害情報から抽出した項目

種別	抽出項目
避難勧告等の発令状況	都道府県名，市町村名，地区名
	発令日時，解除日時
	類型（避難勧告，避難指示）
避難状況	対象世帯数，対象人数，避難者数

災害情報には，避難勧告等の発令状況や避難状況として**表－4** に示すような項目が掲載されている。これらの項目を災害情報から抽出して整理し，発令対象地区ごとに避難率（避難者数を避難対象人数で除した値）を算出した。ただし，以下のようなデータは分析から除外した。

①避難対象人数，避難者数のいずれかが欠けている場合:避難率を算出することができないため，除外した。

②避難対象世帯数が欠けている場合：後述する整理・分析ができないため，除外した。

③1 世帯あたりの平均人数（避難対象人数を避難対象世帯数で除した値）が 10 人以上の場合：10 人以上の世帯はそれほど多くはなく，さらにそのような世帯が同地区に複数存在することも考えにくい。そこで，対象世帯数が 2 世帯以上であり，かつ 1 世帯あたりの平均人数が 10 人以上である場合は，データの正確性に問題があると判断して除外した。

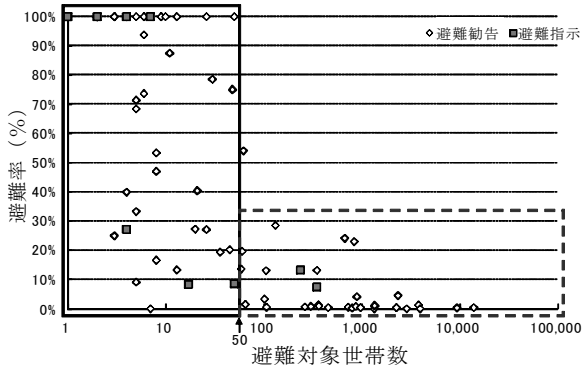
④1 世帯あたりの平均人数が 1 人未満の場合：0 人の世帯が含まれることになるため，これも正確性に欠けると判断して除外した。

⑤対象人数が推定値と考えられる場合（たとえば 10,000 人など）：誤差が大きく，避難率算出への影響が大きいため，除外した。

結果的に今回の解析に用いたのは，**表－3** に示した 5 つの風水害で避難勧告または避難指示が発令された 83 事例である。

5.2 土砂災害警戒区域等の指定状況の収集

土砂災害警戒区域や土砂災害特別警戒区域が指定されている地区では，公示前に住民説明会が開催されるほか，公示後には住民がホームページ等で区域指定状況を閲覧することが可能となるため，事前に「災害関連の知識」及び「避難関連の知識」[7)]を得る機会が多くなる。そのため，指定されていない地区と比較して避難率が高くなる可能性が考えられる。そこで，避難勧告等が発令された地区の指定状況を，各県のホームページから収集した。区域内のどの世帯に避難勧告等が発令され，実際にどの世帯が避難したかは分からないため，発令対象地区内の一部でも区域指定がなされている場合は「指定有」として取り扱うこととした。



図－5　避難対象世帯数と避難率の関係

5.3 避難勧告／避難指示の類型と避難率

災害情報をもとに，1 地区ごとの避難対象世帯数と避難率の関係を避難勧告／避難指示の類型別にプロットしたのが**図－5** である。ここから，避難勧告／避難指示の類型による明瞭な差は見られないことが分かる。実際，避難勧告による避難率データの算術平均値（以下，このようにある共通の属性を持つ避難率データの算術平均値を「平均避難率」と呼ぶ）は 45%，避難指示の平均避難率は 56%であり，t 検定の結果でも有意な差は認められなかった（$p > 0.05$）。避難指示は避難勧告より緊急性が高いと認められる場合に発令されるが，今回の解析では避難指示のほうが住民の避難を促進するといった傾向は見られないと言える。

表－5　避難対象世帯数別の事例数

対象世帯数	事例数		
	避難勧告	避難指示	計（%）
1～10	31	6	37（44.6%）
11～50	12	2	14（16.9%）
51～100	4	0	4（4.8%）
101～500	10	2	12（14.5%）
501～1000	7	0	7（8.4%）
1,001～10,000	8	0	8（9.6%）
10,001～	1	0	1（1.2%）
計	73	10	83（100%）

5.4 避難対象世帯数と避難率

今回用いた 83 事例における避難勧告等の発令単位の対象世帯数は，最も少ない 1 世帯から最も多い 13,867 世帯まで非常に大きな幅が見られた（**図－5**）。1 避難単位の避難対象世帯数別の事例数を**表－5** に整理して示す。全体としては，1 避難単位の対象世帯数が 50 世帯以下の事例が全体の約 6 割を占めており，1 つの避難単位の対象世帯を比較的限定することで危険性の低い地域（避難単位）を除外しつつ，危険性が高い複数の避難単位に対して避難勧告等を発令しているケースが多いことがうかがえる。その一方で，1 発令単位の対象世帯数が 13,867 世帯と最も多かった事例は，市全域を対象に発令されたものであり，また旧市町村全域を 1 単位として発令されたと見られる対象世帯数 1,001～10,000 世帯の事例も 8 事例見られた。

図－5 から，避難対象世帯数と避難率の関係を見ると，対象世帯数の増加に伴って避難率が低下していることが分かる。特に，対象世帯数が 51 世帯以上の場合では，1 事例を除き避難率は 30%以下であり，0%の場合も多いのに対し，対象世帯数が 50 世帯以下では避難率が 100%の場合も多く，0%は 1 事例のみであった。平均避難率を求めると，50 世帯以下で 70%，51 世帯以上で 7%であり，有意な差が認められた（$p < 0.001$）。

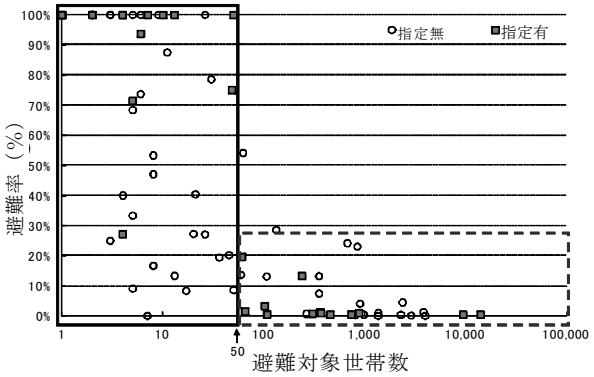
このような結果となった理由として，単位とする対象世帯数が多い場合，危険とされる範囲が広範囲に及ぶため，住民が危険性が低いと考える地域も多く含まれることとなり，住民が避難勧告等のリスク情報を身近に感じにくくなったこと(「重要性認知」[7)]の困難性）が考えられる。逆に，対象世帯数が少ない場合には，危険とされる範囲が限定されるため，住民が危険を身近に感じ，積極的に避難したものと考えられる。また，このほかにも，住民自らが各々想定する災害の規模や危険範囲に比べて避難勧告等の対象範囲が大幅に広い場合には身近な危険として認識しない人が多くなることや，対象世帯数が多いと情報の伝達が困難となること等も原因として考えられる。

5.5 発令時間帯と避難率

避難勧告等が発令された時間帯別に避難率を（**表－6**）に示す。ここで，時間帯の区分を決定するにあたっては，「午前」と「昼」のほかに，これから夜間を迎える時間帯として「夕方」，暗闇が避難行動に影響を与える可能性がある時間帯として「夜間」を設定した。「夕方」は日の入り前後の 1 時間，「夜間」は夕方後から日の出までとし，災害の集中している 6～10 月の平均から日の出時刻，日の入り時刻はそれぞれ 5:00，18:15 とした。さらに，「夜間」については，就寝の前と後とで避難行動が異なる可能性があるため，午前零時を境に「前半」と「後半」に区分した。

表－6　時間帯の区分と平均避難率

時間帯	時間	平均避難率（%）	
午前	5:00～12:00（日の出～正午）	全体	29
		50 世帯以下	56
		51 世帯以上	5
昼	12:00～17:15（正午～夕方）	全体	80
		50 世帯以下	80
		51 世帯以上	－
夕方	17:15～19:15（日の入り前後 1 時間）	全体	51
		50 世帯以下	71
		51 世帯以上	20
夜間（前半）	19:15～0:00（夕方後～午前零時）	全体	60
		50 世帯以下	87
		51 世帯以上	8
夜間（後半）	0:00～5:00（午前零時～日の出）	全体	29
		50 世帯以下	56
		51 世帯以上	2



図－6　土砂災害警戒区域等の指定の有無と避難率

対象世帯数が 50 世帯以下の事例に限って平均避難率を見る（**表－6**）と，いずれの時間帯においても 56%以上の値を示しており，平均避難率が有意に低い時間帯は得られなかった。

以上から，避難勧告等の発令時間帯が避難率に与える影響は小さいと言える。

5.6 土砂災害警戒区域等の指定の有無と避難率

土砂災害警戒区域等の指定の有無別に避難対象世帯数と避難率の関係を**図－6** に示す。避難対象世帯数が 50 世帯以下の場合，「指定有」の地区の避難率は 1 事例を除いて 70%以上である一方で，「指定無」の地区の避難率は 0%から 100%まで大きくばらついており，「指定有」のほうが全体的に避難率が高い傾向がうかがえる。一方，避難対象世帯数が 51 世帯以上の場合では，「指定有」で

も避難率が 0%の地区が多く見られるなど，50 世帯以下の場合で見られたような傾向はうかがえなかった。

表－7　土砂災害警戒区域等の指定の有無別平均避難率

対象世帯数	平均避難率（%）	
	指定無	指定有
全体	45	49
50 世帯以下	63	91
51 世帯以上	10	3

指定の有無別に算出した平均避難率を**表－7** に示す。全体では「指定無」で 45%，「指定有」で 49%と有意な差は見られなかった（$p > 0.05$）。しかし，対象世帯数を 50 世帯以下と 51 世帯以上で区分して算出すると，50 世帯以下の場合では「指定有」の地区のほうが平均避難率が 91%と「指定無」より有意に高い（$p < 0.05$）一方で，51 世帯以上ではどちらも 10%以下と有意な差は認められなかった（$p > 0.05$）。

避難対象世帯数が 50 世帯以下の場合で「指定有」の方が避難率が高かった理由として，先述のように土砂災害警戒区域等の指定により「災害関連の知識」及び「避難関連の知識」を事前に得る機会があるため，住民の避難が促進されたことが考えられる。一方，避難対象世帯数が 51 世帯以上の場合には，発令された地区の土砂災害警戒区域等内の世帯数が避難対象地区内の全世帯数と比較して著しく少ないために，警戒区域等内の世帯の住民が高い割合で避難したとしても避難率に反映されなかったものと考えられる。

また，今回の土砂災害防止法の改正等で義務付けられた基礎調査結果の公表と周知が，避難対象世帯数 50 世帯以下の場合には，同様に避難率を高める効果をもたらすと予想される。

6. まとめ

平成 26 年 8 月の広島市での土砂災害を受け，土砂災害防止法が改正(平成 27 年 1 月 18 日施行)されると共に，土砂災害防止対策基本方針が変更(平成 27 年 1 月 16 日国土交通省告示)された。これにより，国，都道府県，市町村が対応を要する事項が多く追加された。そこで，これらを踏まえ土砂災害への警戒避難を的確に行えるよう，「土砂災害警戒避難ガイドライン」[8)]が平成 27 年 4 月 17 日に改訂されており，この中に法令への対応を含む警戒避難の詳細について記載されている。

また，過去の風水害における避難勧告等の発令状況と避難率の関係を分析し，避難勧告等への住民の応答の実態を把握した結果，以下のことが明らかとなった。

① 避難勧告等の 1 避難単位の対象世帯数が 51 世帯以上の事例が全体の約 4 割を占めており，中には（旧）市町村全域を 1 つの避難単位として発令された事例もあった。

② 1 避難単位の避難対象世帯数の増加に伴い，避難率が低下する傾向が見られた。特に，50 世帯を超えると避難率が顕著に低下した。

③ 避難勧告／避難指示の類型や発令時間帯が避難率に与える影響は見られなかった。

④ 避難単位の避難対象世帯数が 50 世帯以下の場合には，土砂災害警戒区域・特別警戒区域が指定されていることにより，避難率が向上する傾向が見られた。

引用文献

1) 水野正樹・冨田陽子・桂真也・小山内信智・花田良太・安田武道（2012）: 災害情報を用いた土砂災害時の住民の避難率の分析, 砂防学会誌 Vol.65，No.3，p.29-34

2) 国土交通省砂防部（2015.1.16）: 土砂災害防止対策基本指針，国土交通省ホームページ，土砂災害防止法法令等の条文，http://www.mlit.go.jp/river/sabo/sabo_hourei.html

3) 国土交通省砂防部（2014.11）: 土砂災害防止法の一部改正について（報告），社会資本整備審議会河川分科会 気候変動に適応した治水対策検討小委員会（第 17 回），資料－4

4) 国土交通省砂防部（2015.1.29）: 広島土砂災害と土砂災害防止法の改正，中央防災会議 防災対策実行会議総合的な土砂災害対策検討ワーキンググループ（第 2 回），資料 4－1

5) 倉本和正・野呂智之・小山内信智・小林幹男・岡田憲治（2005）: 土砂災害警戒情報の作成・発表基準に用いる降雨指標の検討，平成 17 年度砂防学会研究発表会概要集，p186-187 O-071

6) 気象庁: 土砂災害警戒判定メッシュ情報の発表例，http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/bosai/doshakeikai.html

7) 木下猛・青柳泰夫・伊藤孝司・平川了治・伊藤誠記・安仁屋勉・山本晶（2010）: 風水害における避難行動に関する心理学的プロセスについての一考察, 砂防学会誌, Vol.63, No.4, p.4-15

8) 国土交通省砂防部（2015.4）:「土砂災害警戒避難ガイドライン」の改訂，http://www.mlit.go.jp/report/press/sabo01_hh_000016.html

土砂災害発生地の地形から見た土地利用のあり方

井口　隆（防災科学技術研究所　社会防災システム研究領域）
Takashi INOKUCHI（NIED）

キーワード：土砂災害、災害地形、土地利用、防災

1. はじめに

昨年 8 月 20 日に起きた広島市の土砂災害では、死者 74 名を超える甚大な被害を出した。既に多くの人が指摘している様に、今回の災害は過去から繰り返し起きてきた土石流の堆積物によって形成された土石流扇状地（沖積錐）とされる地形面上において発生したものである。土砂災害を軽減するためには，ハード的に方策によって発生そのものを食い止める方法もあるが、規模によっては難しいこともあり，まずは人々が自分の周りにある土地がどのようにして形成されたのか，また過去，どのような災害が生じてきたのかなどを理解することで、土地利用のあり方を考えるのことも不可欠である。現在より科学が進歩していなかった時代においても、経験に基づいて災害にできるだけ合わない様に土地利用を進めてきた経緯もある。

ここでは過去に起きた土砂災害の被災事例などを紹介するとともに、土砂災害によって形成される地形とその土地利用に関して述べてみたい。

2.　2014 年広島災害と被災地の土地条件

まず最新の災害である昨年の広島災害の発生場所の地形と土地利用について振り返って見たい。昨年 8 月の土石流によって最も大きな被害を生じた八木３丁目から緑井８丁目にかけての地域は、かつては住宅がほとんどなく、日本の高度経済成長期に開発が進み、住宅地とされた土地である。

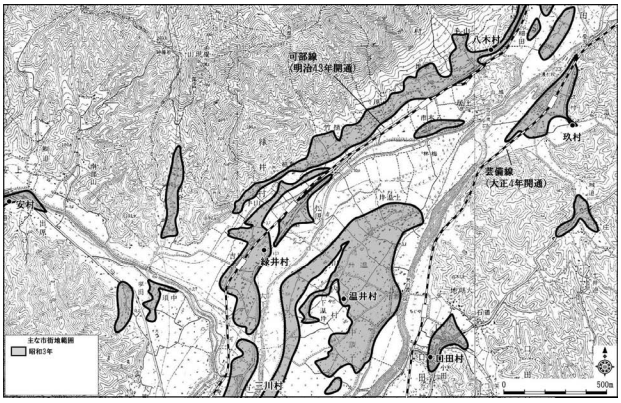


図-1　昭和初期の広島市北部の主な居住地（加藤 2015）　太実線内の灰色部が主な居住地

図－１に示した図は、国土地理院前身である陸地測量部が昭和 3 年に発行した地形図に基づいて集落の範囲を囲ってみたものである（加藤，2015）。これによると昭和初期における集落は、太田川の自然堤防の上や、明治 43 年に開通した鉄道（現 JR 可部線）沿いにまばらに分布していた。それ以外は農地として利用できた以外は未開発であった。山際に近いところはほとんど人が住んでいなかったことが分かる。今回の被災地は当時は梅林などの果樹園や畑として利用されており、居住地ではなかった。

この当時人が住んでいたのは、先祖代々から受け継がれてきた居住地，自然堤防や土石流扇状地の場合でもその末端部など比較的災害を受けにくいことが経験的にわかっている場所を選んで居住していた。

それが戦後の日本の高度成長期なると、広島の近郊では自動車工場などが立地するなど人口が大きく増加し、多数の住宅が必要となったことから、当時まだ比較的安価であった土石流扇状地（図－２の白抜きの部分）に相当する土地にまで宅地開発の対象として宅地化が進められた。　広島周辺では過去にも土石流災害が起きてきた歴史があり、一部には土砂災害を警戒する声もあった様だが、JR の可部線に近いなど交通の便の良さなどから急速に宅地化が進んだ。

図２　広島市安佐南区八木付近の地形図（白色で塗色した範囲は土石流扇状地（小林，2015）

2014 年 8 月に起きた広島市の土砂災害は過去に何度も発生した土石流堆積物によって形成された土石流扇状地(沖積錐)において発生した災害である。

土石流扇状地と一概に言っても、古い地形面がそのまま残っている場合もあり、そのような場合においては土石流の災害にあう可能性はあまりない。しかし今回広島市で被災した地域の土石流扇状地はまさに発達途上にある扇状地であった。こういった成長過程にある扇状地においては、特段の注意が必要であった。

3 そのほかの土石流災害の被災事例

2007 年の岡谷市の土砂災害

広島災害と同様の事例は、2006 年の長野県岡谷市で起きた土砂災害にも当てはまる。これは典型的な土石流扇状地を開発してできた住宅地で起きた土砂災害である。写真－1 を見ても分かる通り、山間の谷から流下した渓流が諏訪湖畔に達した地点において扇状に土砂を堆積して、扇状地状の緩斜面を作っている。そしてちょうどその範囲が宅地として開発され、数十戸の住宅が建てられている。おそらく周りに比べ傾斜が緩く、宅地として開発する適地と考えたのであろうか。しかし 2006 年の豪雨によって上流で発生した斜面崩壊によって、この写真の範囲だけにおいても数名の死者を出す土石流災害が生じている。このように誰が見ても分かる教科書的な土石流扇状地であることは明白であり、こういった地形の場所を住宅地にすることが不適であることは、ちょっと知ることで簡単に分かる。

写真－1　岡谷市湊地区の土石流被災直後の状況(アジア航測撮影・提供)

長野県南木曽町と山口県防府市の被災事例

広島災害の前月の 2014 年 7 月に起きた長野県南木曽町読書の土石流災害は同じく土石流扇状地上で起きた災害事例である。

この読書の土石流災害においては、1 人の方が亡くなったが、この方が住んでいた住宅は谷の流路が曲がった箇所のすぐ下流側に位置していた。まさに上流から流下した土石流の経路の正面という、以前から指摘されていた最も危険な地点にあった。同じ土石流段丘上でも特に危険度の高いことが明らかなこういった場所には決して住宅を建てるべきではないと考える。

同様の谷の出口の正面というと、2009 年に山口県防府市の老人ホームを襲った土石流災害の記憶も新しい。この場合も老人ホームは谷の出口の真正面に建てられていたために土石流の直撃を受けて被災している。このような場合どちらかに少し避けることで、被害の様相をかなり軽減できる可能性があり、それが難しい場合でも、建物の開口部を山側に作らないなどの対応が求められる。

今は代々同じ場所に住むことが少なくなり経験的にリスクの高い場所は分からない。しかしその土地に残された地形・地質に加え過去の災害事例の教訓を知ることでその危険性の高低を判断することができる。そして、そのためにも地学や地理に関する知識を高校までにきちんと学んでおくことも大事であると考える。また過去の災害履歴に関して記録し、それらをきちん取りまとめ、自治体や地域の図書館や公文書館などで受け継いでいくことが大事である。

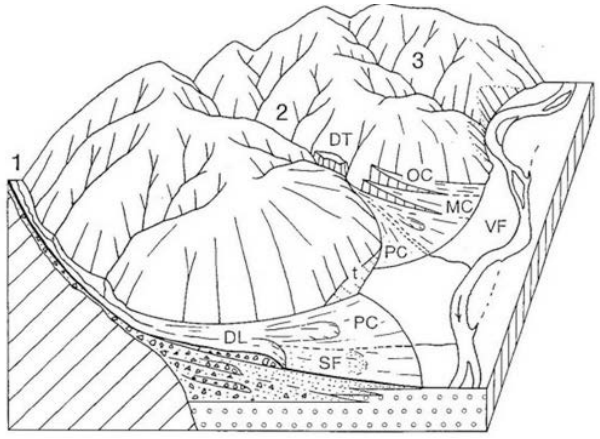
4.　土砂災害の発生場所と地形の関係

「地形は災害によって形成される」ともいわれるように、災害を起こす現象によって形成された地形は多く存在している。土砂災害は何らかの土砂移動を伴って発生するため、土砂移動によって形成される地形が残される場合が多い。そのため、そういった土砂移動によって形成される地形の存在は、過去において災害現象が起きたことを物語っており、将来も同様の現象が起きる可能性を示唆している。
土地利用を考える場合、そういった地形を手掛かりにして、その土地で起き得る災害の種類と規模や頻度などを推測し、その土地に適した土地利用を考える必要がある。

土石流扇状地（沖積錐）地形の諸相について

既に述べてきた土石流扇状地についても細かく見ると、災害の受け易さに違いがある。図－3 は、鈴木隆介氏（2000）が表わした著書から引用した図である（この図では沖積錐の地形学用語が使われている)。地形学的には同じ土石流扇状地でも形成された時代が古期のものと現成のものでは危険度に大きな

違いが認められる。図中、PC とあるのが現成の土石流扇状地で、MC が中期のもの、OC が古期のものである。古い土石流扇状地では河川による下刻など浸食作用の方が強まり、河道が扇状地面より低いため、土石流の危険度は低くなる。こういった差異は詳細な地形判読によって区別することが可能である。ちなみに図－３では１の谷が現成の土石流扇状地が発達しており、もっとも危険であるが、２の谷は少し古い形成で１と比べると危険度は低い。３の谷は人が住めるような扇状地は形成されていない。



図－３　沖積錐の諸相（鈴木，2000）
PC・MC・OC：現成・中期・古期の沖積錐，DT:土石流段丘，DL：土石流堆，SF：土砂流原，VF:河成堆積低地，　t ：崖錐

危険だということが分かりやすい用語の提唱

広島災害で被災した地域は地形用語で言うところの「沖積錐」に相当する。沖積錐という用語を用いても理解できる人は少ないだろう。これまで述べてきた様に、それを分かりやすく言い換えた「土石流扇状地」を提唱したい。「扇状地」は我々の世代は学校で習ってきて記憶に残っている人が多く、イメージしやすい名称である。また土石流の用語もかなり一般の方にも浸透している用語であり、その組み合わせた用語なら、「沖積錐」と違ってどういう成り立ちで出来た地形であるかということが理解しやすいと思う。特に高校での地学教育が十分でない今日においては理解してもらいやすい用語の使用は肝要である。

５．その他の土砂災害によって作られた地形

最近起きた土砂災害では土石流扇状地が問題となったが、それ以外にも災害と関わりのある地形は多数存在する。予稿集の枚数の関係で詳しくは紹介できないが、その一部を以下に紹介したい。

地すべり地形

一般的には（狭義の）地すべり変動によって形成された地形の総称で、地形図や空中写真判読によって抽出可能できる。1982 年より防災科学技術研究所によって 5 万分の 1 縮尺で全国の地すべり地形分布図が刊行されてきており、全国のマップが研究資料として刊行された。Web サイトにも PDF などが公開されている。【http://lsweb1.ess.bosai.go.jp】
シームレスに地すべり地形を確認したい場合は地震ハザードステーション（J-SHIS）のマップ表示画面において、地すべり地形の表示をチェック（ON）にすることで閲覧することができる。
【http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/】

崖錐

繰り返し発生する落石等によって大小の岩塊から構成された急斜面の地形であり、崖などの下部に分布している。急傾斜で耕作などに不適な岩が多く、もともとあまり利用されない場所であった。

土石流扇状地（沖積錐）

地形用語では沖積錐と言われるのは主に繰り返し起きた土石流堆積物によって形成される小型の扇状地である。

火山麓扇状地

主に成層火山を侵食する放射谷から供給された岩屑が山麓に堆積してできる地形で、その堆積は通常の扇状地同様に土石流によって形成される。

火山山麓（火山原面）

場合によっては火砕流や浅間火山で起きた土石なだれの様な大規模な土砂移動現象によって似た地形も形成される。浅間火山においては天明の噴火の際に生じた土石なだれで壊滅した地域が大規模な別荘地（北軽井沢など）として開発されている現状があるが、火山活動が活発化した際には非常に危険な地域である。
斜面勾配を測ることで、その斜面形成の成因を推測できる場合も多い。

６．地すべり地形の土地利用について

防災科学技術研究所で作成してきた地すべり地形分布図を見れば、地すべり地形の分布が分かり、土地利用の基図と重ねて見ることで、その土地利用を知ることができる。

古来より地すべり地形の斜面は棚田などの水田として利用されてきた。日本の棚田百選に指定された場所の多くは、地すべり地形である。著名な能登半島の白米千枚田、長野の姥捨てなども地すべり地形である。再活動型の地すべりの多くは変動した場合

でも、移動速度は遅く、人的被害を起こすことはまれである。また斜面の傾斜は周りの山地と比べて緩やかで、耕地として適していることから長年にわたって田畑などの耕作地として利用されてきた。
棚田として利用される地すべりはかなり開析が進み、ゆっくりと滑ることはあっても大きな被害に至らずに済む場合が多く、地すべりと上手に付き合ってきた歴史を持っていることが多い。

好ましい土地利用の一例

地すべり地形を呈する斜面がスキー場のゲレンデとして土地利用されている例は結構ある。私も若いころはスキーを楽しんだこともあるが、その時は意識しなかったが、今日考えてみると、地すべり地形の斜面は急斜面と緩斜面と変化に富んでいて、上級者コース、初心者コースなど様々な傾斜のコースを組み合わせることができる利点がある。

7.日本におけるかつての土地利用の規制策

土砂災害が頻発する様な地形や土砂移動の堆積物に覆われる場所は、古くは経験的に危険な場所だと広く認識されていて、土地利用が避けられていた。例えば 1997 年の鹿児島県出水市の針原川土石流災害で被災した場所は、江戸時代にこの地を治めていた薩摩藩によってその手前に関所を設けることで、その地を「関外」とされており、居住できない様な施策が取られていた（岩松，2004)。同じく薩摩藩では、シラス台地から出る土石流扇状地を「洗出（あれだし)」と呼んで耕作禁止地にしていた。「洗出」は現在も地名として残っているそうである。こういった措置はおそらく経験的に災害の危険な場所を知っていたためだと推測される。しかしこのような場所も、人口の増加・経済の発展に伴って、危険性が忘れ去られて人が住むようになったのではないか。

また神社が立地する場所は災害を受けにくい場所が選ばれる。神社が立地している場所は土砂災害だけでなく洪水や津波などを含めて災害を受けにくい場所に立地している例が多くみられることは東日本大震災の際にも多くの識者によって指摘がなされている。東日本大震災では神社のほとんどは津波による被災をまぬかれた。広島災害においても蛇落地伝説の絵馬で知られる光弘神社は参道の一部は土石流によって被災したが、本殿など主要な建物は全く無傷であった。

1960 年代の土砂災害が多発した時期には、当時の土砂災害の特徴を表わすのに、「分家の災害」という言葉が使われたと聞く。これは先祖代々の「本家」は、比較的安全な場所に住家を建てていたため被災しにくい。一方の分家は新たに住家を建てるのだが、その時点では危険度がより高い場所しか未利用地として残されていない。そのため、分家が被災する事例が多かった。私も調査に加わった 1981 年の長野県須坂市の土石流災害（水谷ほか、1982）では、最上流にあった集落の全 17 戸のうち段丘面の下にあった 3 戸だけが流失して被災した。この 3 戸のうち２戸は昭和になってからの分家して移転した。できるだけ危険度の低い場所を選んで居住地にするということは、古い時代の方が賢かったようにも感じる。

我々はこのような過去の教訓を参考にして、鳥利用のあり方を見直すべき時に来ているかも知れない。

8.土砂災害にかかわる土地の法規制について

広島の土砂災害で指摘された法規制の問題点について、応用地質学会の広島災害調査団報告会での発表などに基づいて紹介したい。

都市計画法

都市計画法とは、無秩序な住宅の開発を防止することを目的とした法律で、そのために市街化区域と市街化調整区域の「線引き」を行うことが定められている。この法律は昭和 44 年に施行された。（利害調整が主眼）

広島市では、昭和 46 年に「線引き」が完了したが、その区域決定以前には、業者による駆け込み的な開発用地取得が活発に行われ、山麓の開発数が増加したとされる（広島新史)。区域指定の際に市街化区域は、今回の被災地も含めて既存の開発地をカバーする形で設定された。そして、その後も土地所有者等の要請によって区域が拡張された経緯も見られる（広島 Home テレビ)。

一旦市街化区域に編入されると、固定資産税の税率が上昇するため、まだ住宅地になっていない土地に関しても、住宅地への開発の動機づけが強まる結果となり、一層の住宅建設が進む追い風となった。そのような過程で広島市郊外の住宅開発が進むという背景があった。当時の都市計画法には防災という観点はほとんどなかったらしい。

今回の広島災害から見ると、このような事態を招く結果となった法律の運用にも問題があったのではないかと思われる。

崖条例　（建築基準法施行条例）

崖条例は建築基準法の施行するための条例で、各市町村ごとに定められている。

次ページに広島市における崖条例の一部を掲載するが、他の一般的な条例に比べ広島市の場合は若干甘い設定だったことが指摘される（釜井，2015)。

釜井の指摘によると、広島市の山本 8 丁目で起きた、裏山の崖崩れで被災し、子供 2 名が亡くなった

広島市の崖条例

第四条の二　住居の用に供する建築物を建築する場合には、その敷地（災害危険区域内にあるものを除く。）が、二メートルを超える高さのがけ（地表面が水平面に対し三十度を超える角度をなす土地をいう。以下同じ。）の上にあるときにあつてはがけの下端から、**五メートル以上**の高さのがけの下にあるとき（特別警戒区域内にあるときを除く。）にあつてはがけの上端から、当該建築物との間にそのがけの高さの一・七倍以上の水平距離を保たなければならない。

２　前項の規定は、次の各号のいずれかに該当するときには、適用しない。

一　当該がけに係る**災害防止工事**について、法第八十八条第一項の規定により準用する法第七条第五項又は法第七条の二第五項の検査済証の交付があつたとき。

二　当該がけに係る災害防止工事について、都市計画法（昭和四十三年法律第百号）第三十六条第二項の検査済証の交付があつたとき。

三　当該がけに係る災害防止工事について、宅地造成等規制法（昭和三十六年法律第百九十一号）第十三条第二項の検査済証の交付があつたとき。

四　前三号に掲げるもののほか、**建築物の位置及び構造、がけの土質**並びに災害防止措置の状況により特定行政庁が**建築物の安全上支障がないと認めた**とき。

住宅は崖条例の適用外で特に対策等が不要であったここは４軒住宅が並んでいて、両側の２軒が崖条例に該当していたが、中央の２軒は勾配等が緩やかであったために、規制をまぬかれた。これは他の自治体では崖の高さを 2m以上とされているのが、広島の場合は 5m以上と緩やかで、また崖からの距離も崖の高さの２倍と、他自治体の 1.7 倍より甘い。せっかくの規制も運用が甘いと法律の実効性を低める結果となりかねない。

９　人為的な斜面不安定化の防止策の徹底

人が土地を利用する場合には、自然のままの地形を変えずに利用する場合もあるが、土地の利用の仕方によっては何らかの人為的改変を伴う場合も多い。特に近年は土木重機の大型化などによって、容易に改変できることから、その様な工事が多く行なわれている。しかし、土砂災害は地形改変など人為的行為によって引き起こされたり、もしくは斜面の不安定化を助長したことも加味されて発生したのではないかと思われる事例が散見される。

最近起きた明らかな事例としては、2014 年の横浜市緑区の崖斜面で起きた崩壊がある。ここは市の許可を得ずに盛土をした上、擁壁や水抜きなどの基本的な対策も講じていなかった。崖地には 2009 年ごろから 2010 年 3 月までに４トントラック約 40 台分の残土が搬入された。傾斜が 30 度を超える場合や高さ１m以上の盛土などは宅地造成等規制法に基づく許可が必要だが、無許可だった。似たような事例は報道されていないものを含めると結構ある。

私が調査してきた災害事例としては 1978 年 12 月に起きた茨城県水府村（当時）棚谷地すべりがある。これは道路の拡幅工事を行なうため、山側の斜面の末端を切り取る工事を進めてきた。この上にある畑地からなる緩斜面は実は古い地すべり地形であり、畑地の中にある段差は地すべりが形成した崖であったと推測された。発生した季節は降雨の少ない冬季であり、地すべり発生の要因は斜面下端の切土が主因と思われた（森脇・井口、1980）[17]。

地すべり地形は過去の地すべり変動で生じた地形であり、変動時には安定な勾配まで滑り落ちてその箇所で長らく安定を保ってきた場合が多い。そこに不安定化につながる人為的行為がなされた場合、ギリギリに近い形で安定を保ってきた斜面が再活動する場合がある。

こういった災害現象に伴って形成された地形を呈する場所においては土地利用の改変に伴う不安定化工事は避けるか、不安定化の評価を行ない、変動しない様にあらかじめ対策すべきであることは言うまでもない。

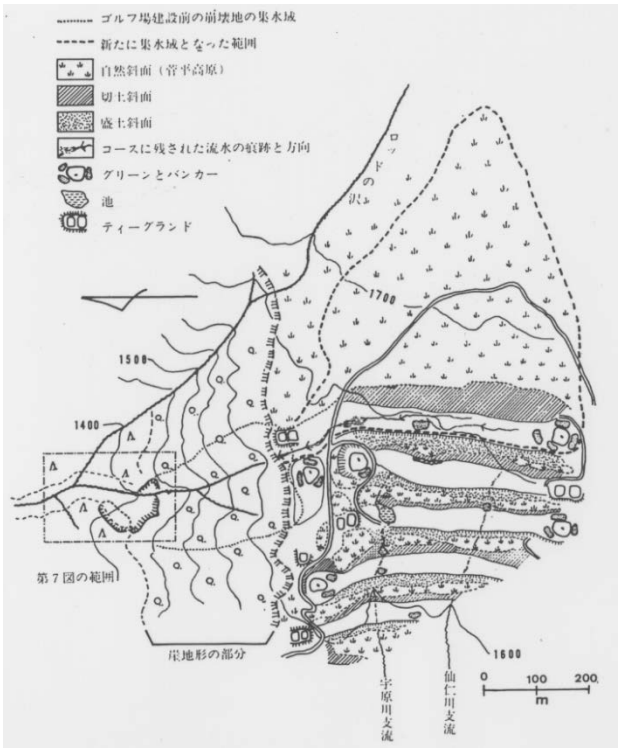
一方故意でないケースとして最近の事例では、2014 年 12 月には東京電力中津川第一発電所の導水路トンネルから溢水した水によって、土砂崩れを引き起こし、国道 405 号線を通行できなくなり、一時集落が孤立したことがあった。これは大量の降雪が水力発電所の導水路に流入したことでシャーベット状の雪が管路が詰まり、そのために点検用の横坑から水が溢れたもの。水は近くの沢沿いに流下し、国道近くで土砂崩れを起こした。違法でない場合にもちょっとした不注意で土砂災害が起きる事例も散見される。

須坂市の土石流災害の事例

これはゴルフ場の建設によって火山原面の地形を改変したことによって、流域界が変わり、多くの雨水が渓流に集中したことが崩壊発生に寄与したと考えられる事例である。

1981 年の台風 10 号による須坂土石流災害ではゴ

ルフ場建設に伴う斜面の切り盛りによる流域界の改変（図）によってこれまでより多くの雨水が谷に流れ込んだことが無視できない（水谷ほか，1982）などの事例がある。
このような失敗事例をきちんとまとめて多くの人が参考にできる様にしておくことも大事かも知れない。



図－４　ゴルフ場建設による地形改変状況（水谷ほか、1982）

以上紹介は若干の事例だけであったが、他にも似たような事例は多く指摘されており、土地利用に伴って地形を改変する事例は頻発している。そういった改変に伴って土砂災害を引き起こすことがあるので、そういった観点からの土地利用および地形改変については十分に配慮すべきである。

１０.最後に-災害地形を考慮した土地利用のあり方

以上述べてきたように、地形を知ることでその土地で過去に起きてきた災害の種類や規模を把握することが可能である。特に土石流など高速で破壊力の大きな土砂移動現象が起きてきた沖積錐（土石流扇状地）に関しては、人的被害を防ぐ意味からも住宅地などへの土地利用は避けるべきと考える。

引用文献

土木学会・土木学会中国支部・地盤工学会（2014）：平成 26 年広島豪雨災害合同緊急調査団調査報告書.
岩松　暉（2004）：土砂災害とのつきあい方．平成 16 年度防災安全中央研修会, p.117-121.
釜井俊孝（2015）：都市域の斜面災害と宅地開発．日本応用地質学会平成 26 年広島大規模土砂災害調査団報告会配布資料.
加藤弘徳（2015）：広島市の都市開発の歴史と災害リスクの変遷. 日本応用地質学会平成 26 年広島大規模土砂災害調査団報告会配布資料
小林　浩（2015）：広島市の地形の成り立ちと土砂災害のリスク. 日本応用地質学会平成 26 年広島大規模土砂災害調査団報告会配布資料，45-53.
水谷武司・森脇　寛・井口　隆（1982）：台風 10 号による長野県須坂市土石流災害調査報告．国立防災科学技術センター主要災害調査，No. 19，1-50.
森脇　寛・井口　隆（1980）：茨城県久慈地方の新第三紀層の地すべりとその分布特性. 国立防災科学技術センター研究報告，第 24 号，125-144.
鈴木隆介（2000）：建設菊術者のための地形図読図入門、第３巻段丘・丘陵・山地.」古今書院,

斜面アセットマネジメントシステムについて

Slope Asset Management System
中 村 一 樹*（応用地質株式会社/ OYO Corporation, Pacific）
Kazuki Nakamura* (OYO Corporation/OYO Corporation, Pacific)
キーワード：リスク、維持管理、アセットマネジメント

１．はじめに

1995 年の阪神淡路大震災以降、土木の分野でもリスクという言葉が多く使われるようになってきた。それまでは、構造物は地震で崩壊することがないようにより強い設計、建設が求められてきたが、阪神淡路大震災以降は、絶対安全はありえないという考えのもと、リスクを定量化し、低減する方法が考えられ始めた。その後、斜面の分野でも様々な研究が進んでいるのはご承知のとおりである。

筆者らは、道路におけるアセットマネジメントを研究する過程で、道路は線状もしくは、鎖状のインフラストラクチュアーであり、1 点でも破損したら、その全体（迂回路がある場合は、迂回できる交差点間）が使用できなくなることに着目して、いかに舗装、橋梁、トンネルを適切にマネジメントしても、斜面で問題があれば全く意味をなさないことから、斜面も他の構造物と同様に、アセットマネジメントができないものかと興味を持っていた。

本論では、どのような過程を経て、斜面のアセットマネジメントを検討するに至ったか、また完成した斜面アセットマネジメントシステムの概要をご報告し、皆様のご意見を頂戴したい所存である。

２． 地すべりにおけるリスクの定義

2.1 リスクマネジメント

リスクマネジメントとは、リスクを認識し、それを低減する具体的な方策を見つけるために、数学をはじめ様々な技術を集積し、実用的なツールとして体系化したものである。

そしてその認識すべきリスクには、様々なものがあるが、星谷ら（星谷・中村、2002）により、以下のようにまとめられた。

① 事故、災害などの危険事象、すなわち損失そのもの（心理学の分野）
② 地震、台風、災害、交通事故といった危険事象を発生させる個別の事実やその集合体（ハザード）をいう
③ 人間が生活していく上で、不都合な状況が生じる可能性の大きさ、すなわち、損失の発生確率（環境経済学）
④ 発生の確率を考慮せず、単に損失を意味する
⑤ 結果が期待値からかい離する大きさ（経済学）
⑥ 発生確率が付与された損失
⑦ 損失の発生確率と損失の積、すなわち損失期待値

上記のうち①～④は、定量的にリスクを管理することは難しいが、⑤～⑦は詳細な計算が可能で、定量化することができる。

大津は、リスクを定量化できるか否かに注目し、主観リスクと客観リスクに分離し、図１のように体系化した。（大津、2004）

本論では、特に断りがない限り、リスクとは、発生確率と被害の大きさの積で表すものを言い、リスクマネジメントとは、このリスクを低減するための方策、計画のことを言うものとする。

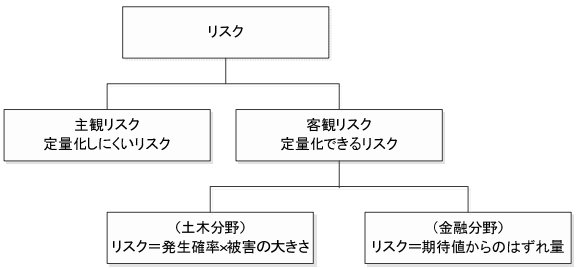


図１　リスクの分類

2.2 ハザードマップ

ハザードマップは、前述の星谷・中村のリスクの定義のうち②のリスクが発生する可能性のある場所を明示した地図のことをいう。

住民に危険を知らせるためには効果的ではあるが、主観リスクであるハザードを元データとしているため、危険性や予想される被害は一様でなく、それぞれのハザードに対して、甲乙を付けたり、優先順位を設定することはできない。

2.3 客観リスクである必要性

自治体にはハザードマップで、住民に危険性を伝える以外に、リスクを低減するための対策を行う責任がある。また、現在リスクを低減している擁壁や対策工の老朽化を把握して、適切な維持管理を続けていかなくてはならない。この中で特に重要なのは、予算は無限にあるわけでなく、限られているため（すぐに対策を必要とするものは、特別枠を設けても対策をしなくてはならないが）、それ以外は、何らかのものさしによる優先順位をつけて、予算の許す範囲で対策を順番に行っていかなくてはならない。

そのためには、斜面が崩壊する危険性と被害の大きさを数値化する必要があり、その数値化のためのリスクは客観リスクである必要がある。

３．斜面アセットマネジメント

3.1 アセットマネジメントとは

アセットマネジメントとは、元来、株などの金融資産の価値を、守り、増やしていく方策のことをいう。土木分野でアセットマネジメントというと、金融資産が、国や地方自治体の管理する土木構造物に代わり、この土木構造物の価値の減る分＝維持管理費用をできるだけ少なくする方策＝維持管理計画のことをいう。

この土木分野でのアセットマネジメントのうち、道路アセットマネジメントは、1990 年代後半から、限られた予算の中で、最大限の効果を得る対策を行う、維持管理方法として、舗装、橋梁を初めとして、アメリカで研究が始まった。（US Department of Transportation、1999）

最も典型的なアセットマネジメントは、構造物の点検を行い、点検結果から、劣化予測曲線を用いて、現在その構造物がどの状況にあるという情報から、何年後に、どのような補修が必要となるかを予測、また、その補修タイミングを逃した場合は、より大がかりな補修が必要になるなどと仮定して、数パターンの長期における維持管理費用を計算し、その中で最も費用が安価なシナリオを選択し、そのシナリオに則って維持管理を実施していくというものである。点検は数年ごとの定期点検で、点検を行う度にシナリオは見直される。

3.2 道路防災点検結果の評価

アセットマネジメントは前述のように、点検をスタートとして、評価、対策、記録を順に行って計画的な維持管理を行う。

そこで、まず、斜面のアセットマネジメントを考える上で、道路防災点検の結果を用いることができないか検討を行った。

道路防災点検では、最終評点という点数が求められる。その後この評点をもとに、専門技術者が対応なし、カルテ対応、要対策のいずれかの総合評価を行う。最終評価点と総合評価の相関性が高く、かつ最終評点の値が高いほど、危険性および緊急度が高く、対策の優先度を決定できるのであれば、この最終評点により、優先度を決定できる可能性があった。

そこで、自治体 X が管理する斜面の防災点検結果約 500 斜面のデータを分析した。その結果は図２のとおりで、現在の道路防災点検結果による評価は、定性的な評価で、リスクは主観リスクであることを再認識することとなった。

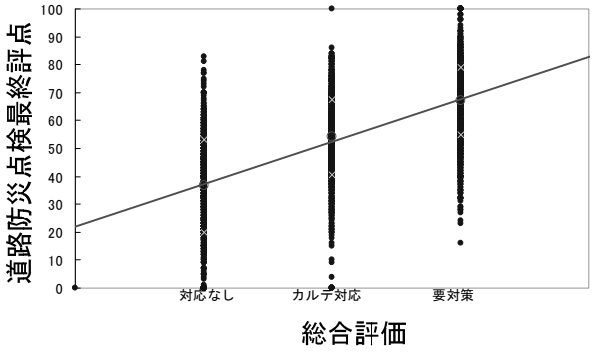


図２　最終評点と総合評価の関係
（○平均、×標準偏差１σ）

3.3 アセットマネジメントにおける斜面の特殊性

前述のように、斜面の点検結果は、定量化された値で求められるが、橋梁や舗装、トンネルの点検結果と異なり、その数値が大きいから危険性が高い、緊急性が高いということにはならない。したがって、アセットマネジメントが求める対策を行うための優先順位に関して言えば、道路防災点検結果は定性的であるとしか言えない。

そうは言え、この道路防災点検は、斜面の状況を知るに極めて有用であることは疑いようがない。そこで、この道路防災点検に、斜め空中写真判読と AHP による評点の重み付けという 2 つの要素を加え、定量的なものとする検討を行った。

1) 斜め空中写真

当時、筆者の社内の斜面の専門家と、なぜ斜面災害の約 50%（当時の自治体 X の数値）が道路防災点検で「対策が必要と判断される」または、「防災カルテを作成し対応する」となった斜面以外で発生したのか議論を重ねた。

多くは、斜面の絶対数が多い、予算、時間が限られる、必ずしも斜面を知っている（特に、地すべりが発生した斜面の前後を診た経験のあるような）技術者が点検するわけではない、点検は基本的に道路面から行われよほどのことがない限り、斜面へ登り、斜面全容の確認は行わないなど、制度面の問題であった。

その中で、最も、最終評点と総合評価の相関性を減じている重要なファクターは、斜面全容の情報であるとの検討結果から、パワードハンググライダーを用いた斜め空中写真撮影とその写真による判読結果を最終評点に盛り込むことを検討した。

写真１　パワードハンググライダー

2) AHP 法による重み付け（加藤ら 1998/木下 2000）

斜面の専門家は、地すべりの可能性がある斜面を観察する際、様々な点に注意を払い、観察を行っている。そして、医者のように、既往症、体質ならぬ地質、現在の症状、モニタリングの結果から、対策の緊急性、対策の方法を決定する。時には余命を言い当て、地すべりの瞬間をビデオに撮影できた事例もある。

その際専門家は、頭の中で様々な情報に重みを付けて、総合判定を出している。そこで、この専門家が頭の中での重み付けを再現できれば、道路防災点検の結果を総合評価に結び付けることができるのではないかと検討を行った。

各評点の重み付けを行う方法として、数量化Ⅲ類をはじめ、OR（オペレーションズリサーチ）と言われるアメリカの軍事的作戦研究から派生した方法である AHP(Analytic Hierarchy Process)、最適化、PERT、待ち行列など、また、物質的以外のものや、人間の行動、金利などの金融関係等を数値化する方法、さらに生物学、組織学的なニューラルネットワーク、自己組織化マップ等がある。

これらの方法を検討した結果、実際に使用できそうな方法としては、AHP、ニューラルネットワーク、数量化が上げられる。しかし、数量化やニューラルネットワークにより重み付けするためには、多くの既存データが必要である。

このうち AHP 法は、下記のような特徴を有している。

① 評価基準が多くあり、しかも互いに共通の尺度がないような場合でも判断が可能である

② 通常は定量分析できない不明瞭な要因を持つ問題も判断できる

③ 首尾一貫性のないデータを扱うことができ、首尾一貫性の度合いがわかるので修正が容易に行える

これらの特徴を利用して、通常は定量分析できない総合評点を求める際の、各要素の重要度を求めることとした。今後はデータを蓄積し、数量化法や、ニューラルネットワークでの検討も必要と思われるが、現段階では、AHP 法が最も適すると考え採用した。

実際に AHP により計算した未知の重みベクトル W’が、専門家が判断する際の重み付けを再現する。この重み付けを各評点に設定すれば、各評点を合計して総合評点とし、各斜面の最終的な点数とすることができ、この点数の相互比較で、複数の斜面で、優先順位の検討が可能となる。

重み付けのイメージを図３に示す。

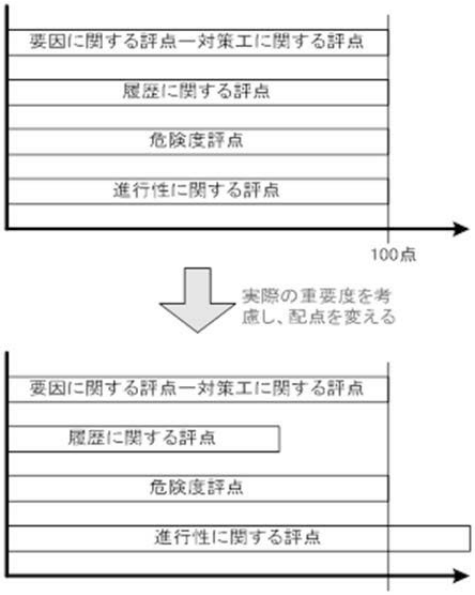


図３　評点の重み付けのイメージ

以下に、AHP 法の概要を述べる。

問題を評価基準と代替案にレベル分けを行い、階層構造とする。そして、評価基準間で求められるペア比較マトリックスから重要度を求め、代替案を決定する。今回の評価基準は、「要因の関する評点－対策工に関する評点」、「履歴に関する評点」、「危険度評点」および「進行度に関する評点」の 4 要素として、単純な 2 階層とした。またここでは、代替案を決定することが目的ではなく、評価基準間の重要度を求めることが目的である。

ペア比較マトリックスおよび各評価基準の重要度は以下のような数学的根拠に従って求めた。
階層のあるレベルの要素 A1、A2、･･･、An のすぐ上位階層の重要度 w1、w2、･･･、wn を求める場合、2 つの項目 ai、aj の項目間の重要度（今回は、斜面の専門家により設定し、既知とする）を aij とすれば、要素のペア比較マトリックスは A＝［aij］となる。もし重要度が既知である場合、ペア比較マトリックスは、式１のようになる。

$$A=[a_{ij}]=\begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccc} A_1 & A_2 & \cdots & A_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \end{array} \quad \text{式１}$$

ただし、

$$a_{ij}=w_i/w_j,\quad a_{ji}=1/a_{ij},\quad W=\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad \text{（式２）}$$

$$i,\quad j=1,\quad 2,\quad \cdots,\quad n \quad \text{（式３）}$$

である。

このとき、意思決定者（専門家）の判断が完全に首尾一貫していれば、すべての i、j、k について aij×ajk＝aik が成り立つ。

このペア比較マトリックスに重み列ベクトル W をかけると、

$$A\cdot W=n\cdot W \quad \text{（式４）}$$

となる。また、この式は固有値問題として、式５に変形できる。

$$(A-n\cdot I)\cdot W=0 \quad (I\text{は単位行列}) \quad \text{（式５）}$$

ここで、W がゼロでないためには、n が A の固有値でなくてはならない。このとき、W は A の固有ベクトルとなる。また、固有値 λi（i＝1、2、･･･、n）はひとつだけ非ゼロで他はゼロとなり、A の主対角要素の和は n であることから、非ゼロの λi を λmax とすると、

$$\lambda_i=0,\quad \lambda_{\max}=n \quad (\lambda_i\neq\lambda_{\max}) \quad \text{（式６）}$$

となる。したがって、A1、A2、･･･、An に対する重みベクトル W は、A の最大固有値 λmax に対する正規化した固有ベクトルとなる。そして、式４、式６から、

$$A'W'=\lambda'_{\max}W' \quad (\lambda'_{\max}\text{は}A'\text{の最大固有値}) \quad \text{（式７）}$$

がいえることから、ペア比較マトリックス A’から、未知の重みベクトル W’を求めた。

ここでいうペア比較マトリックス A’は、地質および道路防災を得意とする経験豊かな、専門家が意思決定者となり作成する必要がある。

実際に重み付けは、次のようにして行った。

A は点検結果の要因、B は点検結果の履歴、C は斜め空中写真判読の危険度判定、D は変状の進行性の 4 項目とし、それぞれの間で、どちらが災害発生に対して悪影響かの一対比較を行う。この比較結果には、比較を行う人の考える重要度が反映される。したがって、この比較を行う人が、経験が豊かな地質および道路防災の専門家であれば、ここで求めた重要度は、高い精度を有することとなるため、自治体 x において委員会を設置し、有識者の合議でこれを決定した。

比較は、表１に示す数値を用いた。

表１　一対比較値

一対比較値	意　　味
1	A と B が同じくらい重要
2	1 と 3 の間
3	A が B より若干重要
4	3 と 5 の間
5	A が B より重要
6	5 と 7 の間
7	A が B よりかなり重要
8	7 と 9 の間
9	A が B より絶対的に重要
上記の数値の逆数	B から A を見た場合に用いる

一対比較結果は、表２の通りとなり、各行の幾何平均を求め、重み付けを求めた結果、表３のとおりとなった。（落石・崩壊のみ掲載する。）

表２　一対比較結果（落石・崩壊）

	A	B	C	D
A:要因	1	1/3	1/7	1/7
B:履歴	3	1	1/5	1/5
C:斜め空中写真	7	5	1	1
D:進行性	7	5	1	1

表３　重み付け結果（落石・崩壊）

項　目	重要度
A:要　因	5
B:履　歴	10
C:斜め空中写真	42.5
D:進行性	42.5

3.4 斜面アセットマネジメントの概要

前述の 2 要素を取り込み、道路防災点検結果を用いて、ある自治体 X における斜面のアセットマネジメントシステムを構築した。概要を図４に示す。

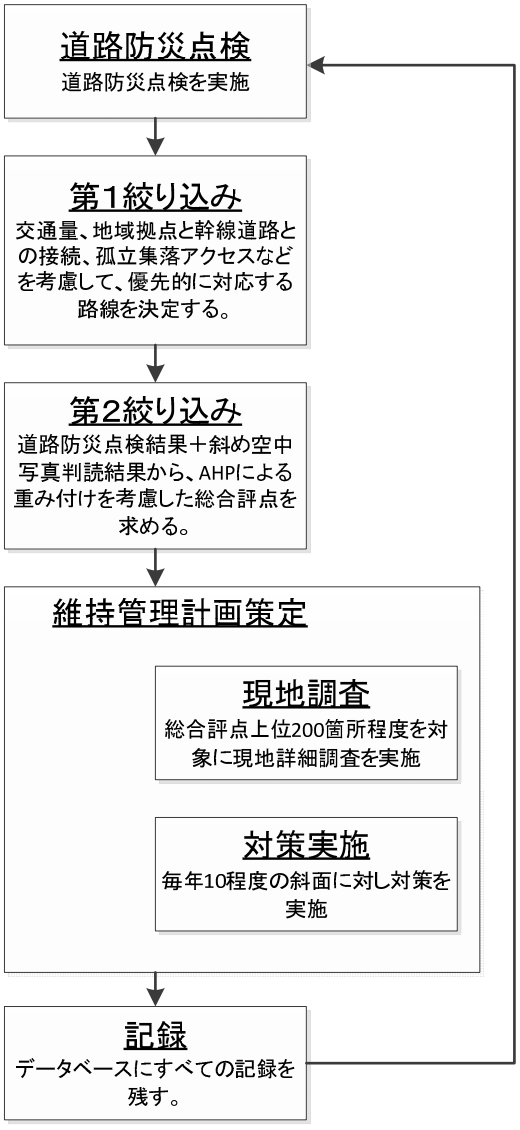


図４　自治体 X における斜面アセットマネジメントシステム

限られた予算で効果的に、道路不通のリスクを低減し、維持管理を行うために、管理している道路総延長約 3,000km から、第１絞り込みにより、概ね 300km に絞り込み、この約 300km で、斜め空中写真撮影および判読を行い、道路防災点検結果と併せて、最終評点の再計算を行い、これまで主観リスクで定性的であったものを、定量的な客観リスクとして、要対策斜面の優先順位付けを行うことができるようになった。

1) 第１絞り込み

全長 3,000km ある管理区間のうち、路線の重要度に応じて、管理方針を設定し、ランク A となった路線上の危険性のある斜面に対して積極的対策を行うこととした。表４にランクの設定方法、表５に各ランクの概要を示す。

なお、これらの表における L1 地域拠点とは、県民生活に関わる拠点で、役所、病院、消防署、港湾、駅などが含まれ、L2 地域拠点とは、県民経済に関わる拠点として、工業団地、観光地などが挙げられている。

表４　ランクの設定方法

交通量 / 地域拠点	多い 3000 台＞	中程度 3000～1000 台	少ない 1000 台＜
L1 地域拠点から幹線道路	A	B	C
L2 地域拠点から幹線道路	B	C	D
上記以外	B	D	L

表５　各ランクの概要

ランク		概　要	管理方針
A	特定重点管理路線	L1 地域拠点から幹線を結ぶ路線のうち、特に交通量の多い路線	予防保全/積極的対策
B	重点管理路線	一般的に県民が重要と考える路線	予防保全/戦略的対策
C	上位管理路線	一般的な路線のうち、Dランクより交通量が多いか、L1 地域拠点から幹線を結ぶ路線に該当する路線	通常管理
D	中位管理路線	一般的な路線のうち、Cランクと交通量が同じでも地域拠点から幹線への路線に該当しないか、Cランクより交通量が少なく L2 地域拠点から幹線を結ぶ路線に該当する路線	通常管理
L	低位管理路線	交通量が少なく、地域拠点から幹線への路線に該当しない路線	事後対応

2) 第２絞り込み

全長 3,000km から約 300km まで絞られた区間で、道路防災点検結果と斜め空中写真判読結果、さらにそれら結果に前述の AHP で求めた重み付けを考慮して、各斜面の最終評点を再計算し、優先順位を設定した。優先順位一覧を表６に示す。

表６　優先順位一覧（一部）

基本情報			道路防災点検要領			山口県点検要領案									
施設管理番号	路線名	事務所名	要因からの評点 B	履歴からの評点 C	B とCの内、大きい方 D	要因に関する評点－対策工に関する評点	履歴に関する評点	危険度評点	進行性に関する評点	要因に関する評点－対策工に関する評点×重要度	履歴に関する評点×重要度	危険度評点×重要度	進行性に関する評点×重要度	総合評点	優先順位
			75	100	100	75	100	85	0	15	40	145	0	199	1
			70	70	70	70	70	90	0	14	28	153	0	195	2
			78	40	78	78	40	95	0	16	16	162	0	193	3
			82	100	100	82	100	80	0	16	40	136	0	192	4
			78	70	78	78	70	85	0	16	28	145	0	188	5
			69	70	70	69	70	85	0	14	28	145	0	186	6
			71	70	71	71	70	85	0	14	28	145	0	186	6
			66	70	70	66	70	85	0	13	28	145	0	185	8
			55	40	55	55	40	90	0	11	16	153	0	180	9
			56	40	56	56	40	90	0	11	16	153	0	180	9
			83	70	83	83	70	80	0	17	28	136	0	180	9

以上のように、これまで定性的判定であったものを、定量的な客観リスクに変え、斜面の対策工施工の優先順位を設定することができた。自治体 X では、この優先順位上位の斜面から詳細調査を行い、必要に応じて、計測管理や、最も効果的な予防保全対策を行っていく予定である。

そうすることで、これまで、多くが事後対策であった斜面の維持管理の一部で予防保全対策が可能となり、安全・安心で災害に強い道路の管理が可能になるものと期待する。

４．今後の課題

今後は、この優先順位設定が本当に妥当であるのか、検証を進め、必要に応じ修正を加えていくことが重要であると考えている。

さらには、斜面を他の道路構造物である舗装、橋梁、トンネルと同様に、ライフサイクルコストを考慮した、アセットマネジメントが可能となり、道路全体として、最小の費用で最大の効果が得られる維持管理システムの構築を目指したい。

５．おわりに

本論は、まだまだ研究途中のものであり、さらに、著者が斜面の専門家でないこともあり、地すべり学会の皆様にとって、物足りないところもあると思われるが、私の恩師の教えである「論文は、世に論を問うために出す。」を実践し、皆様の前に報告させていただくところである。活発な議論、叱咤激励をいただければと願うところである。

引用文献

大津宏康：リスク工学と地盤工学、土と基礎、Vol52 、No.7 、2004

星谷勝、中村孝明：構造物の地震リスクマネジメント、山海堂、2002

加藤豊、小沢正典：OR の基礎 AHP から最適化まで、実教出版、1998

木下栄蔵：入門 AHP 決断と合意形成のテクニック、日科技連、2000

US Department of Transportation: Asset Management Primer, 1999.

土砂災害に関する数値シミュレーションのレビュー

Overview of Numerical simulations for landslide and debris-flow

王　純祥，福岡　浩，渡部　直喜，丸井　英明，水野　正樹（新潟大学災害・復興科学研究所）
Chunxiang WANG, Hiroshi FUKUOKA, Naoki WATANABE, Hideaki MARUI, Masaki MIZUNO
(Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University)

キーワード：数値シミュレーション，地すべり，土石流，予測，レビュー
Keywords: numerical simulation, landslide, debris flow, prediction, overview

１．はじめに

近年，極端な豪雨や巨大地震を誘因とする土砂災害が多発している。被害の最小化を図るために，数値シミュレーションに基づく土塊の移動過程，移動距離および影響範囲の予測は極めて重要である。「土砂災害」という言葉は，「土砂」の運動による災害を意味する（高橋，2004）。ここで言う「土砂」とは，「土」と「砂」に限らず，水および粘土から巨礫に至る混合物の総称である。土砂は斜面崩壊・地すべり・土石流などの自然斜面における破壊現象を起因として移動し，さまざまな運動形態を示す。多くの場合，土砂災害発生時の土塊は，大量の水を含んでおり，水の濃度が土砂のレオロジー特性に影響を与える。Coussot and Meunier(1996)は，水，土砂の濃度および材料の粘着性に着目して，土砂の運動タイプを分類した（図１）。土砂の運動は，水の流れと囲まれた土砂の流れとの中間的な力学に支配されており，その構造および運動過程は複雑である。また，複雑な地形を持つ自然斜面では運動時の時刻，場所によっても土砂構成およびレオロジー特性が変化する。そのため，多くの研究者がさまざまな特徴を持つ土砂運動の構成則を提案している。既存の土塊の移動距離および影響範囲に関する研究は，解析の手法により，①土塊の移動範囲に影響を与える属性要因から危険範囲を求める経験的モデルと②土塊の質量保存式と運動保存式を用いる数値モデルの二つ手法に大別される。さらに，数値モデルは，一次元および平面二次元に区分される。本報告では，経験的手法および平面二次元数値解析手法について概観することとする。

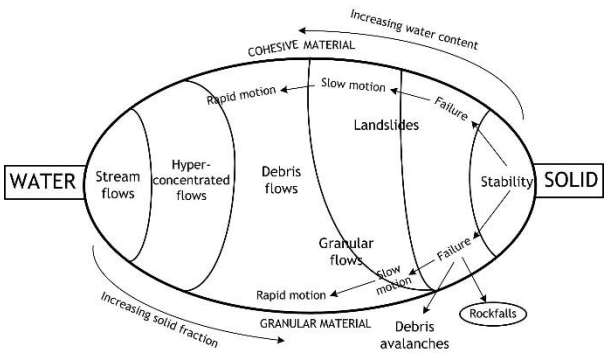


図１　水と土砂の含有量に基づく土砂運動タイプの分類（Coussot and Meunier, 1996）

２．経験的モデル

土塊の流出範囲を解析する経験的モデルは,野外調査で得られた土砂の体積,移動距離,渓流での浸食痕跡および土塊運動の形態などのデータに基づき,これらを統計的に扱うモデルである。Iversonら（1998）は，27箇所ラハール氾濫範囲の調査データを基づき，ラハール体積V，縦断面積Aあるいは平面断面面積Bの方程式を提案した(図２)。Griswold and Iverson （2008）は，土石流および岩屑流の経験方程式も提案した。

ラハールに対して，

縦断面積A　$A = 0.05V^{\frac{2}{3}}$　(1)

平面断面積B　$B = 200V^{\frac{2}{3}}$　(2)

土石流に対して，

縦断面積A　$A = 0.01V^{\frac{2}{3}}$　(3)

平面断面積B $B = 20V^{\frac{2}{3}}$ (4)

岩屑流に対して

縦断面積A $A = 0.02V^{\frac{2}{3}}$ (5)

平面断面積B $B = 20V^{\frac{2}{3}}$ (6)

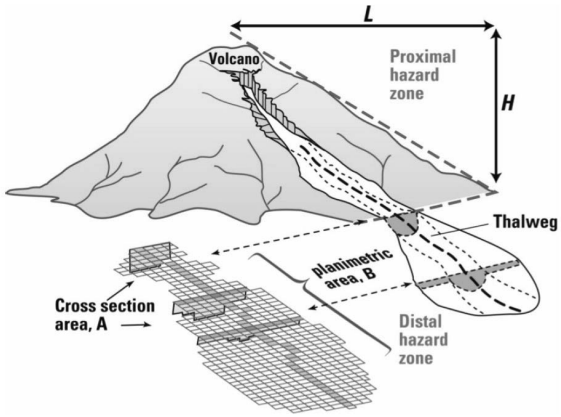


図２　LAHARZモデルの縦断面と平面断面の関係（Schilling, 2014）

Schilling (2014) は，これらの式を用いて，Pythonという開発言語を使用したArcGIS上の計算プログラムLAHARZ_pyを開発した。本報告において著者らは，LAHARZ_pyを用いて，分解能30メートルのDEMデータを用いて，エルサルバドルのSan Miguelの土石流シミュレーションを行い，土石流の流出体積，1万m^3，50万m^3および100万m^3の3つのケースを検討した。解析結果をGoogle earth上に示した（図3）。この結果より，土石流の体積が50万m^3を超えると，集落に到達し，甚大な被害をもたらすと予測した。

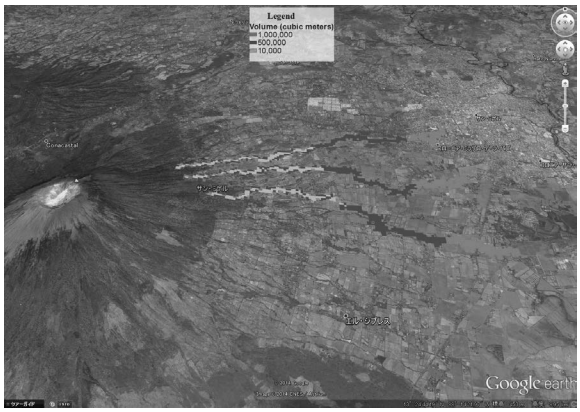


図３　Google earth上で示している解析結果

３．土砂運動の数値モデル

３．１　土石流運動の二次元構成則

土石流はその材料構成が複雑で力学的にも不明な点の多い流れである。しかし，いずれにしても流れを表現するには質量連続式と運動量方程式が必要である。土石流のシミュレーションでは，氾濫範囲・到達範囲，堆積土砂の厚さの分布など，平面的な分布を評価対象とすることが多い。よって，流れの三次元支配方程式を河床から水面までの深さ方向に積分して平均化した二次元の方程式を用いることが多い。流れの支配式は，土石流全体の質量連続式，運動方程式から構成されるが，運動方程式中の河床底面せん断応力と砂礫の輸送濃度の与え方がそれぞれの手法によって異なり，土石流の構成則も異なっている。

高橋・辻本（1984）は，土石流停止の瞬間まで土砂と水が一体となった連続流体として扱い，土石流の支配式を提案した。

連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=0 \qquad (7)$$

運動量方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\beta\frac{\partial (MU)}{\partial x}+\beta\frac{\partial (MV)}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial x}-\frac{F_x}{\rho_0} \qquad (8)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\beta\frac{\partial (NU)}{\partial x}+\beta\frac{\partial (NV)}{\partial y}=-gh\frac{\partial H}{\partial y}-\frac{F_y}{\rho_0} \qquad (9)$$

ここで，M=Uh，N=Vh，U:x方向の平均流速，h：流動深，ρ_0:土石流の密度，H= z +h，z：流動底面の標高，β：運動量補正係数，である。F_x：x方向の抵抗力およびF_y：y方向の抵抗力は，下記の通りである。

$$F_x=(\sigma-n\rho)ghC_{dn}cos\theta_x tan\alpha+k\frac{D}{d}U\sqrt{U^2+V^2}$$

$$F_y=(\sigma-n\rho)ghC_{dn}cos\theta_y tan\alpha+k\frac{D}{d}V\sqrt{U^2+V^2}$$

ここで，σ：砂礫密度，ρ：水の密度，n:微細砂が浮遊することによって生じる密度の増加係数，θ_x：x方向の地表面勾配，θ_y：y方向の地表面勾配，tanα:動摩擦係数，D:堆積域の相当粗度高さ，d：土石流中の50%粒径，である。C_{dn}:土石流中の粗粒分の容積濃度，C_d:固体分の全容積濃度。C_{dn}とC_dは，式（10）ような関係がある。

$$C_{dn} = \frac{C_d(\sigma-\rho)+(1-n)\rho}{(\sigma-n\rho)} \qquad (10)$$

上記の連続式と運動式をベースとして，高橋は，崩壊土塊の土石流化の運動モデル，天然ダムの部分的越流によって発生する土石流モデルおよび混合砂礫床における掃流砂による二次元河床変動モデルを提案し，いくつか実際発生した土石流に応用した（高橋，2004）。

江頭・伊藤（2004）は，土石流の発達過程から堆積が修了するまでの過程を追跡するために，二次元流れの質量保存則，運動量保存則および河床位方程式（静止堆積層の質量保存則）を提案した。

質量保存則

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}h) = \frac{E}{c_*} \qquad (11)$$

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \nabla \cdot (c\bar{v}h) = E \qquad (12)$$

運動量保存則

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla)\bar{v} = \bar{g} - \frac{1}{\rho_m h}\nabla P - \frac{E}{c_* h}\bar{v} - \frac{\bar{\tau}}{\rho_m h} \qquad (13)$$

河床位方程式（流砂の連続式）

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c_* cos\theta} \qquad (14)$$

ただし，

$$\nabla = \vec{\imath}\frac{\partial}{\partial x} + \vec{\jmath}\frac{\partial}{\partial y}\ ,\ \vec{v} = u\vec{\imath} + v\vec{\jmath}\ ,\ \rho_m = (\sigma-\rho)c + \rho$$

ここで，h は水深，$\vec{\imath}$および$\vec{\jmath}$はそれぞれxおよびy方向の単位ベクトル，$\vec{v}$は流速ベクトル，である。Eは河床材料の浸食速度であり，これが負の場合には堆積を示す。 c は土石流における砂礫粒子の堆積濃度，c_*は静止堆積層の砂礫の堆積濃度，θは河床面と水平面とのなす角度，τ_bは河床せん断力，である。

$$\vec{\tau}_b = \vec{\tau}_y + \rho f|\vec{v}|\vec{v} \qquad (15)$$

ここで，降伏応力 $\vec{\tau}_y$および流動抵抗係数は，それぞれ次のように表される。

$$\vec{\tau}_y = \left\{\rho g(\sigma/\rho - 1)c\left(\frac{c}{c_*}\right)^{1/n} h\cos\theta\tan\varphi_s\right\}\frac{\vec{v}}{|\vec{v}|}$$

$$f = \frac{25}{4}\left\{k_d(1-e^2)\left(\frac{\sigma}{\rho}\right)c^{1/3} + k_f\frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}}\right\}\left(\frac{h}{d}\right)^{-2}$$

江頭・伊藤（2004）は，応用例として，ベネズエラ国バルガス州のサンフリアン川で発生した土石流に関するシミュレーション結果を示した（図4）。

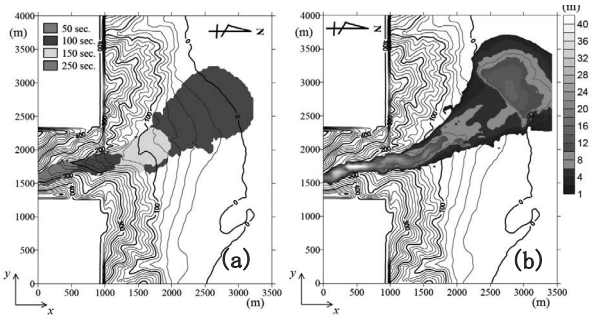


図４　ベネズエラ国バルガス州のサンフリアン川における土石流氾濫の時間的な経過(a)と最大水深の分布（ｂ）（江頭・伊藤, 2004）

３．１　地すべり発生運動総合シミュレーション（LS-RAPID）

Sassa（1988）は，地すべり土塊に作用する力に基づいた運動方程式および運動中の体積変化はないとの前提条件の連続式をベースとして，地すべり運動モデルを提案した。佐々ら（2010）は，地震，豪雨あるいはそれらの複合によって引き起こされる高速地すべりの発生過程と運動過程を統合してシミュレートできるソフトウエアLS-RAPIDを開発した。式（16），(17) および (18) は連続方程式と運動方程式である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \qquad (16)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(u_0 M)}{\partial x} + \frac{\partial(v_0 M)}{\partial y} = gh\left\{\frac{tan\alpha}{q+1}(1+\mathrm{K_v}) + \mathrm{K}_x cos^2\alpha\right\} - (1+\mathrm{K_v})kgh\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{g}{(q+1)^{1/2}}\cdot \frac{u_0}{(u_0^2+v_0^2+w_0^2)^{1/2}}\{h_c(q+1) + (1-r_u)htan\emptyset_a\} \qquad (17)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(u_0 N)}{\partial x} + \frac{\partial(v_0 N)}{\partial y} = gh\left\{\frac{tan\beta}{q+1}(1+\mathrm{K_v}) + \mathrm{K}_y cos^2\beta\right\} - (1+\mathrm{K_v})kgh\frac{\partial h}{\partial y} - \frac{g}{(q+1)^{1/2}}\cdot \frac{v_0}{(u_0^2+v_0^2+w_0^2)^{1/2}}\{h_c(q+1) + (1-r_u)htan\emptyset_a\} \qquad (18)$$

ただし，h：土塊の高さ，α，　β：地表面とxz面，yz面のなす角度，　u_0，v_0，w_0:，x，y，z方向の速度，M，N:x，y方向の流量，　k：水平土圧係数，ϕ_a:地すべり土塊底面の見かけの摩擦角，　h_c:粘着cの高さの単位での表示，である。

$q = tan^2\alpha + tan^2\beta$ ．

$w = -(utan\alpha + vtan\beta)$ ．

佐々ら（2014）は，LS-RAPIDを用いて2014年8月発生した広島土砂災害の八木地区の土石流を再現した。LS-RAPIDでの計算によれば，斜面崩壊の時刻が再現され，八木地区の土石流の平均流下速度は15.7m/sとなり，堆積した土砂の厚さは,最大5.6mとなり，住宅地への土砂の流動範囲，距離とも航空レーザー測量の結果とほぼ一致している（図5）。

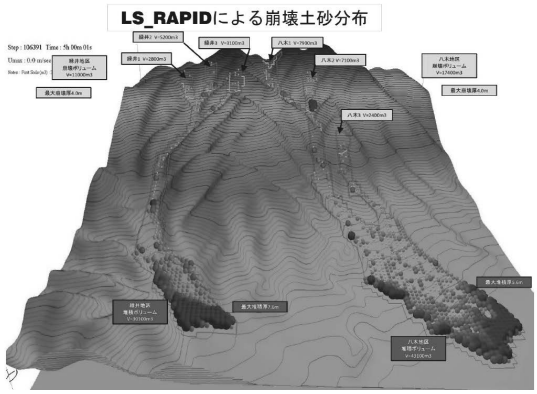


図５　LS-RAPIDによる八木地区土石流シミュレーション結果（佐々ら，2014）

４．GISをベースした土砂運動シミュレーション

４．１　GISを用いた三次元極限平衡法により土塊運動モデル

近年,GISを用いた土砂災害の評価も多く提案されるようになってきた。GISの空間解析機能を用いることにより，地形，地質，地下水，降雨量等データを容易に統合でき，土砂災害予測に関わる様々な空間情報の定量把握，さらにはシミュレーションを可能にした。Wang *et al.*（2011）は，GISソフトウエアであるArcGIS上で実行可能な三次元極限平衡法による地すべり土塊シミュレーション環境を開発した。斜面崩壊後，内部構造が完全に破壊されていない土塊は複雑な地形に沿って斜面下方へ変形運動し，やがて停止する。このような一連の地すべり滑動現象のシミュレーションを開発した。

図６に示すように，まず，地形，地層，地下水位などの空間情報をGISラスターデータに変換し，各ラスターレイヤーを作成する。次に，すべり体の範囲内の各セルに対して，それぞれのラスターレイヤーが持つ空間情報を下式に代入し，すべり方向に作用する各セルのすべり力と抵抗力を計算する。さらに，すべてのセルのすべり力と抵抗力をそれぞれ合計し，その比を三次元すべり安全率として求める。

$$F_{3D} = \frac{\sum_J \sum_I (cA + [(Z_{ji} - z_{ji})\gamma' \cos\theta - u_{ji}]\tan(\phi))\cos\theta_{Avr}}{\sum_J \sum_I (Z_{ji} - z_{ji})\gamma' \sin\theta_{Avr}\cos(\theta_{Avr})} \quad (19)$$

ここで，I, Jはすべり体範囲内のセルの行と列数，cはすべり面の粘着力，ϕは内部摩擦角，Aは柱状要素のすべり面の面積，θは各柱状体のすべり面の傾斜角度，θ_{Avr}はすべり体の主傾斜角度，Z_{ji}, z_{ji}は(i, j)番目の各柱状体の表面と底面の標高，u_{ji}は(i, j)番目の柱状体底面に作用する間隙水圧，γ'は柱状体の単位重量，である。式(19)は修正ホフランド法の式である。必要なデータを三次元安定解析モデルに代入し，安全率を計算した。安全率が１より小さいとき，土塊は運動を開始し，運動中の安全率はステップ毎に計算し，１を超えた場合は運動が停止するように設定した。図７に運動シミュレーションのフローチャートを示す。

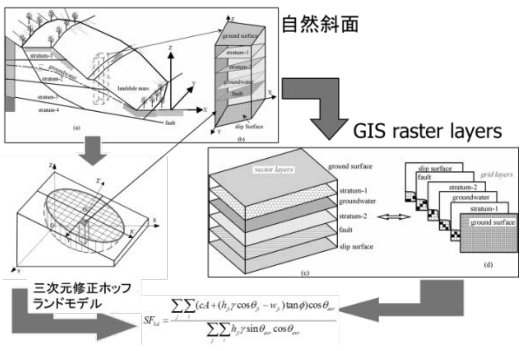


図６　三次元地すべり土塊運動モデルの概念図

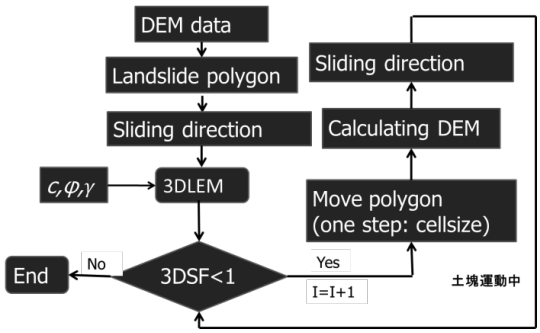


図７　地すべり土塊滑動シミュレーションのフローチャート

応用例として，中国山峡ダム上流斜面崩壊後の土塊運動シミュレーションを行った。運動過程を図８に示す。

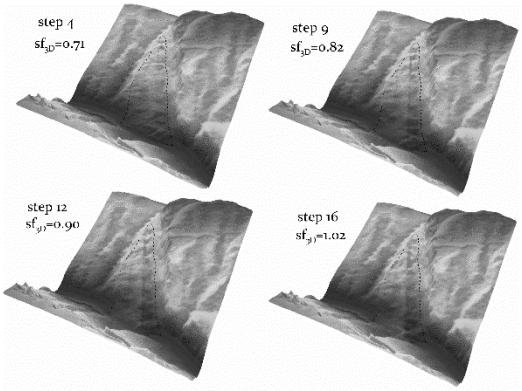


図８　地すべりの運動過程

４．２　GISを用いた土石流数値シミュレーション

Wang et al.(2008)は，ESRIの ArcGISソフトウエア上で実行可能な土砂運動シミュレーション環境を開発し，近年発生した各種の土砂流動現象の事例について適用可能性を検討してきた。

土石流の連続方程式と運動支配式は，下記の通りである。

連続方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=0 \qquad (20)$$

運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\alpha\frac{\partial(M\bar{u})}{\partial x}+\alpha\frac{\partial(M\bar{v})}{\partial y}=-\frac{\partial H}{\partial x}gh+\frac{\mu\beta}{\rho_d}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 M}{\partial y^2}\right)$$

$$-\mu\sqrt{gh}\cos\theta_y\tan\phi \qquad (21)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\alpha\frac{\partial(N\bar{u})}{\partial x}+\alpha\frac{\partial(N\bar{v})}{\partial y}=-\frac{\partial H}{\partial x}gh+\frac{\mu\beta}{\rho_d}\left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 N}{\partial y^2}\right)$$

$$-\mu\sqrt{gh}\cos\theta_y\tan\phi \qquad (22)$$

ここで，t：時間，M，N：x，y方向の単位幅当たりの流量，$\bar{u}$ と $\bar{v}$：x，y方向の平均流速，α と β：運動量補正係数，g：重力加速度，h：流動深，H：標高+h，μ：動粘性係数，ρ_d：水と砂礫の混合物の等価密度，ϕ：土塊の内部摩擦角，である。

４．３　実際の土石流の再現解析

以上に示した数値解析モデルを用いて，実際に豪雨を誘因として発生した土石流を再現する数値シミュレーションを行った。解析対象とした土石流は，2003 年 7 月 20 日に熊本県水俣市宝川内集地区で発生した土石流である。九州各地では 2003 年 7 月 18 日頃から 20 日にかけて，集中豪雨に見舞われた。この豪雨によって，20 日午前 4 時頃に宝川内集川上流で斜面崩壊に起因する土石流が発生し，下流約 1.5km に位置する集地区の集落に被害を与えた。死亡者は 15 名，住宅は全壊 13 棟，半壊 1 棟であった。

解析に用いたパラメータは，ρ_d=2.2 g/cm^3，α=1.25，β=1，μ=0.11 Pa·s，g=9.8m/s^2，tanϕ=0.6 として計算を行った。図９にシミュレーションの結果を示す。初期位置の土砂の深さは，斜面崩壊の土塊の深さを設定した。解析結果によって，土石が渓流の流路に沿って延長 1500m を 230 秒かけて流下したとの結果が得られた。平均流速は約 6.5m/s となった。

５．まとめ

土砂運動に関するシミュレーション技術は，土砂災害発生場の条件や材料特性，地形的条件，豪雨などの外力を想定すれば，ここでのいくつか実例で示したように，ある程度の精度で現象を再現，予測および評価できる状況になっている。しかし，様々な土砂運動数値シミュレーションモデルは提案されたものの，汎用シミュレータを整えていない。佐々らの開発した LS-RAPID ソフトウエアと，地すべり再現試験機等で計測された地すべり運動予測に必要なパ

ラメータを用いることで，より合理的な土砂災害危険度評価手法としての実用が期待される。また,Wangらの開発したESRI社の ArcGISソフトウエア上で実行できる土砂運動シミュレーションは，入力パラメータも少なく，LPデータとGISの高度利用を融合できる。このことにより，高精度な数値シミュレーションおよびハザードマップを高効率で作成する技術を確立できた。

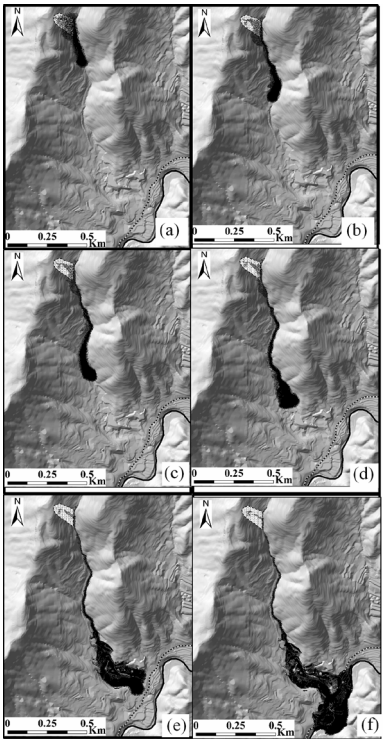


図９　2003年7月水俣土石流の再現解析結果
（a:30秒後;b:60秒後;c:90秒後;d:120秒後;e:180秒後;f：220秒後）

引用文献

1. 高橋保(2004)土石流の機構と対策，近未来社.
2. Coussot P., Meunier M. (1996) Recognition, Classification and mechanical description of debris flows. Earth-Sci. Rev., 40:209-227.
3. Iverson R.M., Schilling S.P., Vallance, J.W.(1998) Objective delineation of areas at risk from inundation by lahars: Geological Society of America Bulletin, Vol(110), no. 8, pp972-984.
4. Griswold J.P., Iverson R.(2008) Mobility statistics and automated hazard mapping for debris flows and rock avalanches: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5276.
5. Schilling, S.P.(2014) Laharz_py: GIS Tools for Automated Mapping of Lahar Inundation Hazard Zones, U.S. Geological Survey, Reston, VA. Open-File Report 2014-1073.
6. 高橋保，辻本浩史(1984)土石流氾濫・堆積の数値シミュレーション，京大防災研究所年報，第 27 号B-2, pp467-485.
7. 江頭進治，伊藤隆郭（2004）土石流の数値シミュレーション，日本流体力学会数値流体力学部門Web会誌，第12巻第2号，pp33-43.
8. Sassa, K.(1988)：Geotechnical model for motion of landslides, Proc. 5th Int. Symp. On Landslide, Vol.1, pp37-56.
9. Sassa, K. et al.(2010), An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide, Landslides, 7(3):219-236.
10. 佐々恭二ほか(2014) 高速長距離土砂流動現象の発生メカニズムと地すべり発生運動統合シミュレーション(LS-RAPID)を用いた広島土砂災害の再現。国際フォーラム「都市化と土砂災害」,京都,pp85-112.
11. Wang C., Li S., Esaki T.(2008) GIS-based two dimensional numerical simulation of rainfall-induced debris flow, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 47-58,
12. Wang, C., Esaki, T., Xie, M., Qiu, C.(2006) Landslide and debris flow hazard analysis and prediction using GIS in Minamata-Hougawachi area, Japan, Environmental Geology, 51(1): 91-102.
13. Wang, C., Marui, H., Furuya, G., Watanabe, N.(2011) Two integrated models simulating dynamic process of landslide using GIS. Proceedings of the Second World Landslide Forum, Landslide Science and Practice, Vol.3: Spatial Analysis and Modelling, pp389-395, Rome-Italy.

第43回地すべりシンポジウム
土砂災害危険度評価と土地利用
－土砂災害防止法と新たな課題－

2015. 5

編集・発行　公益社団法人日本地すべり学会新潟支部
印　　刷　株式会社　文　久　堂

（公社）日本地すべり学会新潟支部のホームページ
http://www.landslide-niigata.org