

March 2016

防災科学技術研究所研究資料 第405号

Technical Note of the National Research Institute
for Earth Science and Disaster Prevention: No.405

土砂災害予測に関する研究集会－現状の課題と新技術－ プロシーディング

Proceedings of the Workshop on the Prediction of Landslide Disasters - Issues and New Technologies -



防災科学技術研究所研究資料 第四〇五号

土砂災害予測に関する研究集会－現状の課題と新技術－プロシーディング

防災科学技術研究所

防災科学技術研究所研究資料

- 第 335 号 地すべり地形分布図 第 43 集「函館」14 葉(5 万分の 1)．2009 年 12 月発行
- 第 336 号 全国地震動予測地図作成手法の検討(7 分冊＋ CD-ROM 版)．2009 年 11 月発行
- 第 337 号 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討(付録 DVD)．2009 年 12 月発行
- 第 338 号 地すべり地形分布図 第 44 集「室蘭・久遠」21 葉(5 万分の 1)．2010 年 3 月発行
- 第 339 号 地すべり地形分布図 第 45 集「岩内」14 葉(5 万分の 1)．2010 年 3 月発行
- 第 340 号 新庄における気象と降積雪の観測(2008/09 年冬期) 33pp. 2010 年 3 月発行
- 第 341 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 27(平成 21 年 No. 1) (CD-ROM 版)．2010 年 3 月発行
- 第 342 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 28(平成 21 年 No. 2) (CD-ROM 版)．2010 年 3 月発行
- 第 343 号 阿寺断層系における深層ボーリング調査の概要と岩石物性試験結果(付録 CD-ROM) 15pp. 2010 年 3 月発行
- 第 344 号 地すべり地形分布図 第 46 集「札幌・苫小牧」19 葉(5 万分の 1)．2010 年 7 月発行
- 第 345 号 地すべり地形分布図 第 47 集「夕張岳」16 葉(5 万分の 1)．2010 年 8 月発行
- 第 346 号 長岡における積雪観測資料(31) (2006/07, 2007/08, 2008/09 冬期)47pp. 2010 年 9 月発行
- 第 347 号 地すべり地形分布図 第 48 集「羽幌・留萌」17 葉(5 万分の 1)．2010 年 11 月発行
- 第 348 号 平成 18 年度 大都市大震災軽減化特別プロジェクト実大 3 層 RC 建物実験報告書(付録 DVD) 68pp. 2010 年 8 月発行
- 第 349 号 防災科学技術研究所による深層掘削調査の概要と岩石物性試験結果(足尾・新宮・牛伏寺) (付録 CD-ROM) 12pp. 2010 年 8 月発行
- 第 350 号 アジア防災科学技術情報基盤(DRH-Asia) コンテンツ集 266pp. 2010 年 12 月発行
- 第 351 号 新庄における気象と降積雪の観測(2009/10 年冬期) 31pp. 2010 年 12 月発行
- 第 352 号 平成 18 年度 大都市大震災軽減化特別プロジェクトⅡ 木造建物実験・震動台活用による構造物の耐震性向上研究 - (付録 CD-ROM) 120pp. 2011 年 1 月発行
- 第 353 号 地形・地盤分類および常時微動の H/V スペクトル比を用いた地震動のスペクトル増幅率の推定 242pp. 2011 年 1 月発行
- 第 354 号 地震動予測地図作成ツールの開発(付録 DVD) 155pp. 2011 年 5 月発行
- 第 355 号 ARTS により計測した浅間山の火口内温度分布(2007 年 4 月から 2010 年 3 月) 28pp. 2011 年 1 月発行
- 第 356 号 長岡における積雪観測資料(32) (2009/10 冬期) 29pp. 2011 年 2 月発行
- 第 357 号 浅間山鬼押出火山観測井コア試料の岩相と層序(付録 DVD) 32pp. 2011 年 2 月発行
- 第 358 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 29(平成 22 年 No. 1) (CD-ROM 版)．2011 年 2 月発行
- 第 359 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 30(平成 22 年 No. 2) (CD-ROM 版)．2011 年 2 月発行
- 第 360 号 K-NET・KiK-net 強震データ(1996－2010) (DVD 版 6 枚組)．2011 年 3 月発行
- 第 361 号 統合化地下構造データベースの構築 <地下構造データベース構築ワーキンググループ報告書> 平成 23 年 3 月 238pp. 2011 年 3 月発行
- 第 362 号 地すべり地形分布図 第 49 集「旭川」16 葉(5 万分の 1)．2011 年 11 月発行
- 第 363 号 長岡における積雪観測資料(33) (2010/11 冬期) 29pp. 2012 年 2 月発行
- 第 364 号 新庄における気象と降積雪の観測(2010/11 年冬期) 45pp. 2012 年 2 月発行
- 第 365 号 地すべり地形分布図 第 50 集「名寄」16 葉(5 万分の 1)．2012 年 3 月発行
- 第 366 号 浅間山高峰火山観測井コア試料の岩相と層序(付録 CD-ROM) 30pp. 2012 年 2 月発行
- 第 367 号 防災科学技術研究所による関東・東海地域における水圧破砕井の孔井検層データ 29pp. 2012 年 3 月発行
- 第 368 号 台風災害被害データの比較について(1951 年～2008 年, 都道府県別資料) (付録 CD-ROM) 19pp. 2012 年 5 月発行
- 第 369 号 E-Defense を用いた実大 RC 橋脚 (C1-5 橋脚) 震動破壊実験研究報告書-実在の技術基準で設計した RC 橋脚の耐震性に関する震動台実験及びその解析 - (付録 DVD) 64pp. 2012 年 10 月発行
- 第 370 号 強震動評価のための千葉県・茨城県における浅部・深部地盤統合モデルの検討(付録 CD-ROM) 410pp. 2013 年 3 月発行
- 第 371 号 野島断層における深層掘削調査の概要と岩石物性試験結果(平林・岩屋・甲山) (付録 CD-ROM) 27pp. 2012 年 12 月発行
- 第 372 号 長岡における積雪観測資料(34) (2011/12 冬期) 31pp. 2012 年 11 月発行
- 第 373 号 阿蘇山一の宮および白水火山観測井コア試料の岩相記載(付録 CD-ROM) 48pp. 2013 年 2 月発行
- 第 374 号 霧島山万膳および夷守台火山観測井コア試料の岩相記載(付録 CD-ROM) 50pp. 2013 年 3 月発行
- 第 375 号 新庄における気象と降積雪の観測(2011/12 年冬期) 49pp. 2013 年 2 月発行
- 第 376 号 地すべり地形分布図 第 51 集「天塩・枝幸・稚内」20 葉(5 万分の 1)．2013 年 3 月発行
- 第 377 号 地すべり地形分布図 第 52 集「北見・紋別」25 葉(5 万分の 1)．2013 年 3 月発行

防災科学技術研究所研究資料

- 第 378 号 地すべり地形分布図 第 53 集「帯広」16 葉(5 万分の 1)．2013 年 3 月発行
- 第 379 号 東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良に向けた検討 349pp. 2012 年 12 月発行
- 第 380 号 日本の火山ハザードマップ集 第 2 版(付録 DVD) 186pp. 2013 年 7 月発行
- 第 381 号 長岡における積雪観測資料(35) (2012/13 冬期) 30pp. 2013 年 11 月発行
- 第 382 号 地すべり地形分布図 第 54 集「浦河・広尾」18 葉(5 万分の 1)．2014 年 2 月発行
- 第 383 号 地すべり地形分布図 第 55 集「斜里・知床岬」23 葉(5 万分の 1)．2014 年 2 月発行
- 第 384 号 地すべり地形分布図 第 56 集「釧路・根室」16 葉(5 万分の 1)．2014 年 2 月発行
- 第 385 号 東京都市圏における水害統計データの整備(付録 DVD) 6pp. 2014 年 2 月発行
- 第 386 号 The AITCC User Guide –An Automatic Algorithm for the Identification and Tracking of Convective Cells– 33pp. 2014 年 3 月発行
- 第 387 号 新庄における気象と降積雪の観測(2012/13 年冬期) 47pp. 2014 年 2 月発行
- 第 388 号 地すべり地形分布図 第 57 集「沖縄県域諸島」25 葉(5 万分の 1)．2014 年 3 月発行
- 第 389 号 長岡における積雪観測資料(36) (2013/14 冬期) 22pp. 2014 年 12 月発行
- 第 390 号 新庄における気象と降積雪の観測(2013/14 年冬期) 47pp. 2015 年 2 月発行
- 第 391 号 大規模空間吊り天井の脱落被害メカニズム解明のための Eーディフェンス加振実験 報告書 ー大規模空間吊り天井の脱落被害再現実験および耐震吊り天井の耐震余裕度検証実験ー 193pp. 2015 年 2 月発行
- 第 392 号 地すべり地形分布図 第 58 集「鹿児島県域諸島」27 葉(5 万分の 1)．2015 年 3 月発行
- 第 393 号 地すべり地形分布図 第 59 集「伊豆諸島および小笠原諸島」10 葉(5 万分の 1)．2015 年 3 月発行
- 第 394 号 地すべり地形分布図 第 60 集「関東中央部」15 葉(5 万分の 1)．2015 年 3 月発行
- 第 395 号 水害統計全国版データベースの整備. 2015 年発行予定
- 第 396 号 2015 年 4 月ネパール地震(Gorkha 地震) における災害情報の利活用に関するヒアリング調査 58pp. 2015 年 7 月発行
- 第 397 号 2015 年 4 月ネパール地震(Gorkha 地震) における建物被害に関する情報収集調査速報 16pp. 2015 年 9 月発行
- 第 398 号 長岡における積雪観測資料(37) (2014/15 冬期) 29pp. 2015 年 11 月発行
- 第 399 号 東日本大震災を踏まえた地震動ハザード評価の改良(付録 DVD) 253pp. 2015 年 12 月発行
- 第 400 号 日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討(付録 DVD) 216pp. 2015 年 12 月発行
- 第 401 号 全国自治体の防災情報システム整備状況 47pp. 2015 年 12 月発行
- 第 402 号 新庄における気象と降積雪の観測(2014/15 年冬期) 47pp. 2016 年 2 月発行
- 第 403 号 地上写真による鳥海山南東斜面の雪渓の長期変動観測(1979～2015 年) 52pp. 2016 年 2 月発行
- 第 404 号 2015 年 4 月ネパール地震(Gorkha 地震) における地震の概要と建物被害に関する情報収集調査報告 54pp. 2016 年 3 月発行

－編集委員会－		防災科学技術研究所研究資料 第 405 号
(委員長)	下川 信也	平成 28 年 3 月 31 日 発行
(委 員)		編集兼 国立研究開発法人
森川 信之	木村 尚紀	発行者 防 災 科 学 技 術 研 究 所
平島 寛行	佐々木智大	〒 305-0006
三好 康夫		茨城県つくば市天王台 3－1
(事務局)		電話 (029)863-7635
白田裕一郎	横山 敏秋	http://www.bosai.go.jp/
(編集・校正)	樋山 信子	印刷所 前 田 印 刷 株 式 会 社
		茨 城 県 つ く ば 市 山 中 152-4

© National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention 2016

※防災科学技術研究所の刊行物については、ホームページ (<http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/>) をご覧下さい。

表紙写真・・・平成 26 年 8 月豪雨により発生した土石流で埋まった扇状地から市街地方向を望む(広島市安佐南区) (平成 26 年 10 月 16 日, 山田隆二撮影)。

土砂災害予測に関する研究集会－現状の課題と新技術－プロシーディング

飯田智之*・山田隆二*・酒井直樹* 編集

* 防災科学技術研究所

要 旨

平成 27 年 12 月 3～4 日、防災科学技術研究所和達記念ホールにおいて「土砂災害予測に関する研究集会－現状の課題と新技術－」が開かれた。この研究集会は、土砂災害予測技術の現在における到達点を明らかにし、その技術を発展させて実用化するため、多くの研究者・技術者・その他ステークホルダーの情報交換をする場を設けることを目指したものである。7つのセッションに分かれた 32 件の研究発表と 2 件の特別講演、およびパネルディスカッションが行われた。平成 26 年 8 月の広島をはじめとする土砂災害が全国で多発した結果ことによる社会的関心の高まりを受け、国や大学の研究者、民間企業の実務者など約 170 名が参加した。

キーワード：プロシーディング，土砂災害，地すべり，斜面崩壊，土石流，予測技術

目 次

	ページ
■ 土砂災害予測に関する研究集会－現状の課題と新技術－	
研究集会の趣旨	4
■ 特別講演論文	
インフラモニタリング技術の斜面リスク評価への適用課題と展望	5
関西大学 大西有三	
防災科学技術研究所における土砂災害研究と今後の方向性	13
防災科学技術研究所 森脇 寛	
■ 一般発表論文	
防災科研における斜面モニタリング研究の今後の取り組み	
－ IoT 技術を活用したセンサーの開発－	21
防災科学技術研究所 酒井直樹	
モニタリングデータを用いた土砂災害発生時刻の統計的予測	27
統計数理研究所 井本智明	
土砂災害監視における衛星搭載型合成開口レーダーの利用可能性	33
リモート・センシング技術センター 古田竜一	
斜面表層の傾斜変位に基づく崩壊の早期警報とその展開	39
東京大学 内村太郎	
土中水分量による斜面安定解析手法の検討	49
日本電気株式会社 笠原梓司	
I o T 技術の自然災害監視分野への適用研究取組について	55
日本ユニシス株式会社 新井康治	
「がけ崩れおっかない指数」と ICT による住民避難の自主判断補助と自助能力向上の試み	59
新潟大学 福岡 浩	
土壌雨量指数から見た土砂災害の発生タイミング	61
気象庁 岡田憲治	
土砂災害発生予測における降雨に対する慣れを考慮した実効雨量の係数特性	71
静岡大学 林 拙郎	
実効雨量を用いた斜面崩壊発生危険度評価	75
京都大学 小杉賢一朗	
斜面の変形と地下水位の同時モニタリングに基づく表層崩壊発生予測	83
高知大学 笹原克夫	
簡易な水文モデルを用いた崩壊発生時刻予測	95
アジア航測株式会社 秋山怜子	
兵庫県で進めているリアルタイム表層崩壊予測モデルの構築と	
その過程で得られた検討結果	101
建設工学研究所 沖村 孝	
崩壊予備物質の空間分布を考慮した表層崩壊の発生場・発生時・発生規模予測	107
京都大学 松四雄騎	
治山分野における地形・地質学的知識の活用－歴史と現状－	121
森林総合研究所 大丸裕武	

2015 年ネパール・ゴルカ地震の被害と斜面災害	125
防災科学技術研究所 大角恒雄	
土砂災害の規模と地震特性－加速度・速度・周期－	133
新潟大学 川邊 洋	
地震地すべりの発生に与える先行降雨・積雪の影響	
－日本の内陸歴史地震の事例からの検討－	141
産業技術総合研究所 小松原琢	
GIS を用いた数値解析から見た地すべり・崩壊	143
国土地理院 岩橋純子	
複数時期の LP データを用いた変動斜面の把握法の検討	153
土木研究所 西井稜子	
SAR 干渉画像を用いた平成 26 年長野県北部の地震 (M_j 6.7) による	
地すべり性地表変動の抽出の試み	155
日本大学 佐藤 浩	
紀伊半島の付加体地域における深層崩壊発生場所の地質制約	161
防災科学技術研究所 木村克己	
深層崩壊による被害範囲の実態と予測手法	167
国土技術政策総合研究所 内田太郎	
移動計測による地すべり性崩壊の発生予測法－斉藤法の適用域と改良法－	173
静岡大学 林 拙郎	
日本列島における斜面崩壊発生と確率雨量との関係	181
関東学院大学 齋藤 仁	
誘因と素因による斜面崩壊発生確率モデル	185
防災科学技術研究所 飯田智之	
土砂移動分布図を利用した土石流発生流域の推定に関する一研究	191
防災科学技術研究所 若月 強	
地すべり地形分布図－その展望と課題－	201
防災科学技術研究所 大八木規夫	
地すべり地形分布図を用いた地すべり発生危険度評価－地質情報を基にして－	205
消防庁 土志田正二	
地震時の急傾斜地崩壊危険度および地すべりの危険度の評価方法	
：地震被害想定での検討事例	215
応用地質株式会社 松山尚典	
次世代型地すべり地形分布図の開発と発展的利活用	217
防災科学技術研究所 山田隆二	
■ 土砂災害の予測と防災に関するパネルディスカッション	219

土砂災害予測に関する研究集会－現状の課題と新技術－

研究集会の趣旨

2004 年の中部地震・2008 年の岩手宮城内陸地震・2011 年の紀伊半島豪雨などによる大規模崩壊(深層崩壊)、2014 年の集中豪雨による広島での土石流災害など、この 10 年ほどの間に、地震や降雨による土砂災害が多発している。その要因として、気温上昇に伴う豪雨の増加(量・頻度とも)や地震活動の活発化が考えられているが、このような大規模な自然現象に対しては、工事による対策のみならず事前の避難や移転が防災対策の基本となる。そのため、発生場所や発生時間に関する予測技術の開発が重要な課題である。その中で、防災科研の「地すべり地形分布図」は土砂災害の発生場所予測に、また「大型降雨実験施設」は土砂災害の発生時間予測に、それぞれ基礎的な研究資源として活用されることが期待される。

土砂災害予測については、これまで広域・狭域、あるいは短時間・長時間といった様々なレベルで数多くの研究がなされてきた。土壌雨量指数など、大雨警報・注意報の形で既に実用化されているものもある一方、シミュレーションによる降雨時の崩壊予測など、実用化が待たれるものもある。他方、この 30 年以上の間には、土砂災害そのものに関する研究とともに数値地図・数値地質図・レーザープロファイラによる詳細数値地図や干渉 SAR 技術など、新たな GIS 情報や各種の観測技術・計測機器・通信技術など関連技術も飛躍的に増加・進歩しており、それを用いた土砂災害のピンポイントでの発生場所予測の研究などが進められている。発生時間予測に関しても、最近、土砂災害のタイプ別に、限界降雨量や限界震度が明らかにされつつある。今後はそれらを取り込むことで土砂災害予測技術のレベルアップを図ってハザードマップなどに反映させることが望まれる。

ここでは、土砂災害予測技術の現在における到達点を明らかにし、土砂災害予測技術をさらに発展させて実用化するため、多くの研究者・技術者・その他ステークホルダーの意見交換をする場として、本研究会を企画する。

2015 年 12 月 3 日

防災科学技術研究所 山田隆二
酒井直樹
飯田智之

インフラモニタリング技術の斜面リスク評価への適用課題と展望

大西 有三*

Summary of Perspectives in Application of Advanced Infrastructure Monitoring Systems to Risk Assessment of Slopes

Yuzo Ohnishi

**Project professor, Department of Civil & Environmental Engineering,
Kansai University, Osaka, Japan and
Professor emeritus of Kyoto University, Kyoto, Japan
yohnishi@kansai-u.ac.jp*

Abstract

In the field of civil engineering, monitoring by sensors has not been recognized to be important comparing to visual observation. Sensors used in infrastructure monitoring so far have been large in size, high price and low durability. However, situation changes day by day because monitoring is requested to observe a large numbers of crucial aged infrastructures in Japan. The rapid advance of sensors often used in frontier electronic devices proved to be very useful to detect deterioration of infrastructure. This idea can be applied to risk assessment of slope. We need to provide various sensors and to measure the behavior of slope at many different locations. Reliable, cheap and easy to handle sensors should be developed and they could collect vast amount of data, so called “Big Data”. The data can be analyzed by advanced technologies such as an artificial intelligence and is comprehended to assess stability of various slopes.

Key words: Infra-monitoring, Measurement method, Risk assessment of slope, Advanced sensors, Artificial intelligence

1. まえがき

モニタリングとは、監視し、観察し、記録を取ることである。言い換えると、あらかじめ立てた計画や目標、指示についてその進捗状況を随時チェックすることになる。したがって、モニタリングは「手段」であって「目的」ではない。“意味のある”モニタリングを行うには、的確な対象を場所、時刻、最適の頻度、適切な精度などを考慮すべきで、質の高いモニタリングを常に目指す必要がある。その結果は、即座にフィードバックされ、担当者は記録を残すだけでなく、内容を理解・解釈して、次の対応策に活かさなければならない。

社会インフラのモニタリングの基本は「測る」ことであり、そこから対象物の状態が把握できる。センサーを用いた我々人間の健康診断と同じである。土木構造物を対象にした場合、いままで「測る」ことに関しては、それほど関心が高かったとは言えない。点検作業の主力は、目視であり人間の観察が最も重要と考えられてきた。計測センサーについても、土木用は、図体が大きく、価格も高い上に、構造物の寿命に比べて寿命が短いといえる。他分野のセンサー類に比べると小型化、低価格化が進んでいないのは、計測機会が少なく数量も大きくないので、ビジネスとして旨みがなく結果的に高価格だから使わ

* 関西大学環境都市工学部 特任教授、京都大学名誉教授

ない、使わないから数量が出ない、したがって価格が高くなるという負のスパイラルに陥っている感が否めない。

しかし、社会の状況は大きく変わりつつある。スマートフォンなどの小型機器に内蔵されているセンサーは、極めて小さくかつ低価格である。この流れは、IoT (Internet of Things) として突然花開いた。GE (General Electric) 社が、自社の機器に多数の小型センサーを取り付け、その計測値をビッグデータとして処理することにより、製品の性能向上、長寿命化、維持管理に活用し始めたからである。ドイツも Industry 4.0 というコンセプトを打ち出し、国を挙げて、センサー開発、高密度計測、ビッグデータ処理を一連のシステムとして考え、推進する施策を打ち出している。最近ではこの動きに、人工知能の援用が考えられており、急速な進展が見込まれている。本報告では、斜面の安定性評価における計測の重要性を示し、計測機器の最近の急速な発展の概要およびその適用性について述べる。

2. 斜面の安定性評価とリスクマネジメント

斜面の安定性を評価し、その状態を説明するには、ニュースを的確に伝えるために要求される 5W2H と同じものが必要となる (図 1 参照) が、現状ではまず不可能である。斜面崩壊が発生した後、その現場の状況を伝えることが出来ても、事前にその崩壊を予測することは、余程の好条件に恵まれない限り無理である。ましてや、どの場所でいつ、その崩壊が起こるかを見つけることは至難の業であろう。

斜面崩壊の予測? : 5W2H

What : なにが How : どのように
Where : どこで How much : どの程度の被害額か
When : いつ
Whom : なにに
Why : なぜ

何をを目指すのか?

例えば、崩落場所の特定、崩落時期の推定などなど
データを取っただけでは?

予測の困難さ → リスクマネジメント

図 1 斜面安定性評価に求められる項目

Fig. 1 Required items for prediction of slope stability assessment.

このような背景から、斜面のリスクマネジメントが必要とされている。すなわち、

- 1) 災害につながる自然現象の発生やその影響には不確実性がある
- 2) 災害の形態、発生数も様々である
- 3) 災害を防止するための財源も限られている
- 4) 事業費のコスト削減に対する社会ニーズも高まっている

リスクマネジメントの流れの中では、リスク分析、リスクアセスメント、リスクマネジメントの3つのプロセスで、5W2H などに関するシナリオを想定し、リスクの最小化、最適化を図ることが求められる。斜面に対するリスクマネジメントを的確に行うには、基礎となるデータが必要である。最も重要な項目は、何なのか、従来の研究成果を基に、斜面安定評価が行われる。

今後の斜面のアセットマネジメントに向けては、図 2 がアセットマネジメントの実施の適用性を示している。維持補修、技術開発、モニタリングが、連続的にらせん状に作業が Step by Step で構築される。さらに、モニタリングから評価・対策、データベース更新と回っていく。

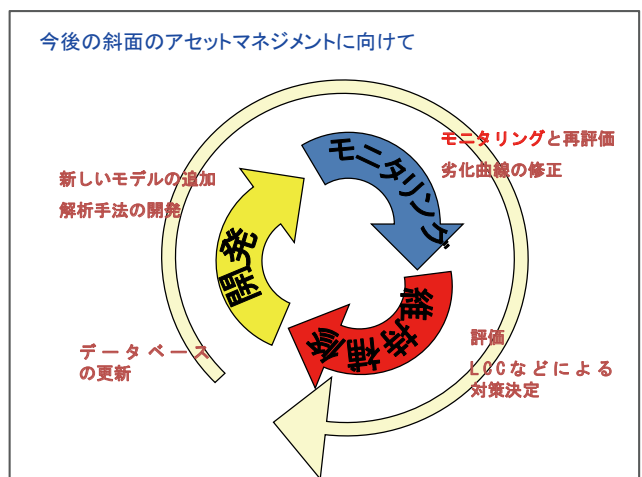


図 2 アセットマネジメントの実施の適用概念

Fig. 2 Concept of asset management procedure.

劣化曲線を得ることができれば、法面(斜面)群の使用限界に達する時期を推定し、斜面の長期維持補修に係わる計画を図 2 に示すように一通り検討することが可能となるであろう。

3. 老朽化するインフラ構造物

斜面に限らず社会に存在するインフラ全般が老朽

化しつつあることは、笹子トンネル天井板落下事故以来、広く認知されることとなった。我が国は、脆弱な地質環境にある上に、地震や台風による重大な自然災害に毎年のように見舞われている。さらに経年劣化が追い打ちをかけている。従来のインフラ構造物の主なもの、設計寿命が30年から50年程度であり、戦後の高度成長期に大量の道路などの整備がなされてから既に50年を迎えたものも少なくはない(図3参照)。



図3 社会インフラ構造物に関わる老朽化の課題
Fig. 3 Items to discuss Social Infrastructures.

このような社会インフラ老朽化に対応する最も効果的な手段は、構造物そのものの状況を詳細に計測することである。計測を行い、データを収集、現状の把握から将来予測へと進むが、予防的計測(Precautionary or preventive measures)を意識するのであれば、単に測るだけでは意味を成さない。

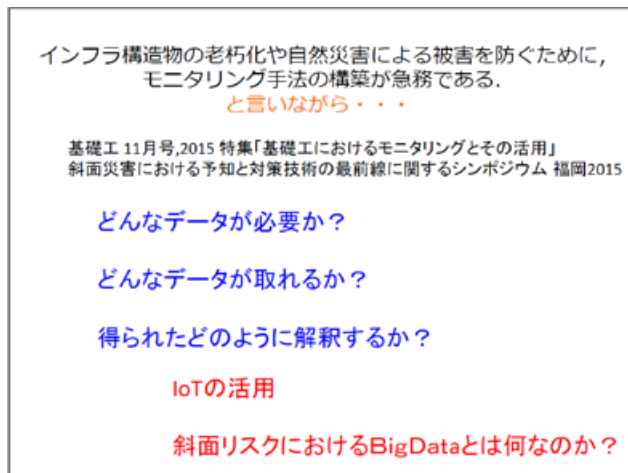


図4 モニタリングと得られるデータの解釈
Fig. 4 Interpretation of data in monitoring.

よく見受けられるように、測っておけば安心という見込みは、百害あって一利なしである。

したがって、計測データを得た後、これをいかに解釈し次のステップに活かすかがポイントである。

そのためモニタリングというアクションに注目が集まり、現場適用にあたって備わるべき要件が図5のように議論されている。

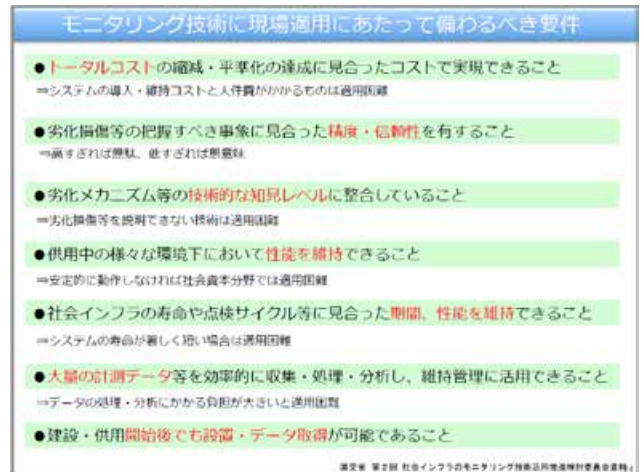


図5 モニタリング技術に現場適用にあたって備わるべき要件(国交省 第2回 社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会資料 2014)

Fig. 5 Requirement in Monitoring Structures.

4. モニタリングに使われるセンサー

モニタリングを精度良くかつ長期にわたって実施するには、センサーが必要である。土木分野で一般的に利用されるセンサーには、目的別にいろいろ分かれているが、代表的なものは、図6に示すとおりである。



図6 モニタリングに利用されるセンサーの種類
Fig. 6 Various kinds of sensors in the area of Civil Engineering.

モニタリングで測定される項目は、変位(ひずみ)、力(圧力)・水圧や土圧、温度、加速度、濃度、電圧などである。最近では、レーダーやレーザーを用いた機器が使われ、測定結果は可視化されて、3次元図形で表されている。CIMへの展開も容易になるので、設計・施工・維持管理での一貫したデータ管理が可能となる。特に、レーザースキャニング技術の発展は素晴らしく、図7のように簡単に対象物を3次元化できる。この図は、3.11東北・東日本大震災の時の被害状況を把握するために記録された映像であり、この結果を基に、被害状況を迅速に把握し、以後の復興計画が立案された。



図7 レーザースキャニング車両と画像
Fig. 7 Laser scanning Vehicle and images.

このように、最新の計測機器の発達には、高度な計測を可能にする。しかし、土木、特に斜面を対象にした計測機器を考えると、いま求められている長期間安定し、小型で安価な機器(センサー)がほとんど存在しないことがわかる(図8参照)。重くて大きいセンサーは高価で当たり前と考えられてきたが、先端技術の導入で、小型で使いやすく安価なセンサー開発が可能になりつつある。今では身近なスマートフォンには、小さくて性能のいいセンサーが数多く詰め込まれている。加速度センサー、GPS位置センサーや傾斜センサーが斜面計測に利用できることは、容易に予測できるであろう。

斜面にセンサー類を張り巡らせた時、それらを繋ぐケーブルが邪魔になる。そこで、開発されているのが図9に示すような、センサー同士で無線にてデータの受け渡しができる通信の無線化である。それと同時に並行的に検討されているのが、無線給電で

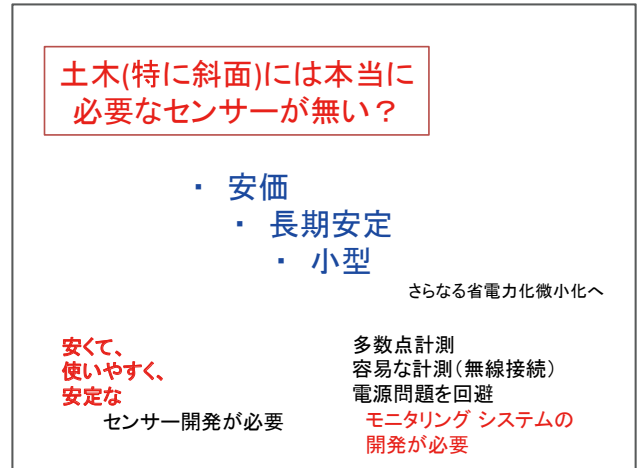


図8 土木分野に適したセンサーの要件

Fig. 8 Basic requirement for Civil Engineering sensors.

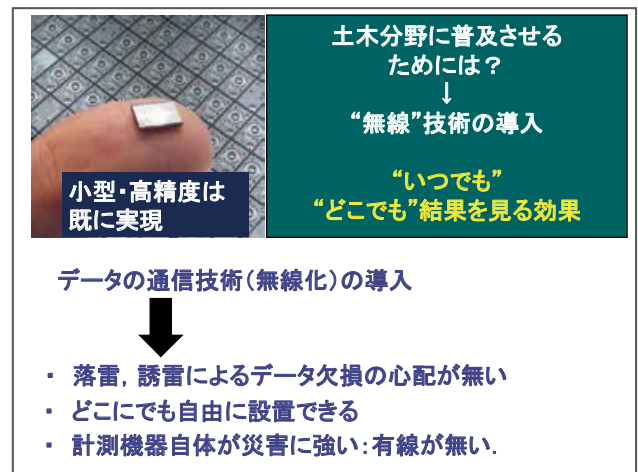


図9 データ通信の無線化(ワイヤレス化)

Fig. 9 Wireless data transmission.

ある。センサーを離れたところに設置すると、最も問題になるのが電源である。乾電池や太陽光発電による給電も考えられるが、頻繁に観測すると電力を使うため、乾電池の寿命は短くなる。一方、太陽光発電の利用は便利ではあるが、天候不順の時は電力不足に陥る可能性が高くなる。安定的に電力を供給するために、無線による電力供給が試みられている。マイクロウエーブや電波による方法は、徐々にではあるが、開発が進められている有望な技術である。

今後の自立型無線センサー開発の方向性を示しているのが、図10である。センサーは、大型から小型へ、高価から安価かつ高耐久性へと変貌する。また電源の工夫をすると共に、省電力を目指す。センサーを外部環境から守るために、パッケージが用意されるが、小型でどこにでも設置可能なものであることが望まれる。

今後のセンサー技術（自立型無線センサーシステム）		
項目	現状のセンサーシステムの課題	今後のセンサーシステムへの要求
センサ	大型、高価	小型、安価、高耐久性・高信頼性
電源	有線（設置困難、敷設コスト高い、災害時断線） 電池（寿命短い、交換大変）	自立電源（環境発電）
通信	有線（設置困難、敷設コスト高い、災害時断線）	無線、低消費電力
回路	消費電力大	低消費電力
パッケージ	設置が不自由、大型、高価	高耐久、設置が自由、小型、安価
データ処理	データ数限定	ビッグデータ処理 （多数点計測、常時計測）

国土省 第2回 社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会資料
（一財）マイクロマシンセンター 青柳 桂一

43

図 10 今後のセンサー技術の動向

Fig. 10 Trend of future sensor technology.

5. センサー技術の適用例

現在私たちの手近にあるセンサーと言えば、スマートフォンであろう。これでデジタル写真も撮れるし、そのデータを即座に送信できる。図 11 に示す例であるが、この山岳斜面の一部で崩壊が発生した場合、近隣住民の人たちが崩壊現場の写真を撮って管理事務所などに送信すれば、事務所で写真類を融合、GPS で位置を確認すると同時に 3 次元の形状データが得られる。このシステムに似たものは、既に JASIC 等によって運用されており、天気予報や台風時の細かい地点状況の把握にも利用されている。



図 11 携帯電話をセンサーとした災害情報収集システム
Fig. 11 Disaster information system with cellular phone.

近年のセンサーは小型化が進んでいる。マイクロサイズの MEMS やナノサイズ NEMS が開発され、振動計や傾斜計が作られている。図 12 はその一例で、国交省近畿地方整備局の国道協の岩盤斜面監視



図 12 岩盤斜面上の岩石ブロック挙動監視用に取り付けられた MEMS 傾斜計センサー

Fig. 12 MEMS inclinometer placed on an unstable rock block.

用に取り付けられたものである。

センサーで得られた経時的なデータは、近隣の道路管理事務所に中継器を経て送られ、常時監視される。異常値が出たときには、事務所から確認の人が派遣されるが、閾値を連続的に超える場合は、通行止めなどの措置がとられることになる。

6. 計測で得られたデータの処理・解釈

斜面安定評価で必要とされるデータは、図 1 に示したように様々なものがあり、特にどの場所が危険かを特定するには膨大なデータの蓄積が必要である。センサーが目論見通り小型化し、安価で手軽に使えることになれば、大量のセンサーの設置が可能になる。さらに、通信網の発達で、あらゆるものが繋がる、いわゆる IoT (Internet of Things: もののインターネット) 化が起これば、いかなる場所でも、蓄積されたデータバンクにアクセスが出来、斜面の安定性評価に供される。IoT については、日々変化が起こっており、技術革新のスピードには目を見張るものがある。

図 13 は、従来のインターネットネットとの違いをまとめたものである。この概念は、ドイツ産業界に端を発し、米国に伝わり、特に GE (General Electric 社) が推し進めていることは既に述べた。GE は自社の製品のあらゆるものにセンサーを取り付け、その挙動を常時モニタリングすることで、製品の異常予知、寿命の把握を行い、不具合の予防措置や製品の取り替え時期を推測してサービスとして提

IoT:
従来のInternetや企業のITシステムと何が異なるのか？

- ★ 主役が、これまでのIT部門から主要産業の「現場」に移る
- ★ リアルタイムに集まるデータを扱う
- ★ 企業活動の抜本的な改善に結びつく可能性がある・・・企業の競争力
- ★ [Power of 1 %] 節約、改善等ができれば大きな利益増に結びつく

- データ解析能力を発揮できるエンジニアの人材育成
- アメリカ 標準化団体「IIC」の設立
- ドイツ「インダストリー4.0」

図13 IoTの概念と世界の動き
Fig. 13 Concept of IoT and world trend.

供している。

ただし、規格化が進んだだけでは、IoTとして得られたデータの利活用の方法が示されるわけではない。膨大な観測データを処理し、その示す意味を解釈して理解するためには、専門的知識と別の手法が必要となる。

ここで予想外に登場したのがディープラーニング(Deep Learning)を核とした人工知能技術である。従来は一層構造であったニューラルネットワーク構造が多層化し、事象の識別能力が格段に向上した。マスコミで騒がれた、コンピュータがプロの将棋棋士に勝つとか、写真を見て何が写っているかを自動判別することが出来るようになったわけである。この新技術の適用範囲はあらゆる分野・曲面に広がっており、もちろん土木分野でも様々なデータから斜面の安定性を評価することも可能となるであろう。残念ながら現状では質の良いデータの蓄積が十分でないが、予測を的確にするためにも今後の斜面に設置する多数のセンサーでのデータ収集が望まれる。

7. まとめ

斜面の安定性評価における計測の重要性について検討を行った結果を報告した。とにかく、図1に示

す斜面安定性評価における重要項目に対応するだけの質の良いデータはほとんど無いと行ってもいい状態で、様々な試みが実行されている。

国が主導して始まった「SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)/インフラ維持管理・更新・マネジメント技術/(1)点検・モニタリング・診断技術の研究開発」での進展が期待されるが、まだ試行錯誤の域を脱していない。

インフラ点検・モニタリングの今後を整理すると、図14のようになると予測する。我が国では、これから急激な人口減少およびそれに伴う建設技術者の減少に見舞われる。その場合、老朽化したインフラ施設の人手を要する目視点検などは実施しにくくなっていく。こうした事態に対処するには、民間資格のインフラ点検士のように、点検できる多くの人を養成するか、広い意味での自動化、ロボットの活用しか無いように思われる。センサーやデジタル技術の発展は、この動きを支えてくれる。

発展しつつあるICTの有効利用、IoTの考えを取り入れたセンサーで得られた膨大なデータ(いわゆるビッグデータ)の処理・解釈を上手く行えるようになれば、斜面安定性評価にも画期的なイノベーションが起こるものと期待できる。

インフラ点検・モニタリングの今後

人口減少、建設技術者の減少
目視点検 打音検査 現地踏査
どのように取り扱うか？
調査／点検・診断の品質確保 → **インフラ調査士**
斜面???

★ **ロボットの活用**・・・点検結果のデジタル化、可視化
評価のバラツキを極力なくす
(人の主観によらないようにする)

★ **画像解析技術の応用**
★ **ICTの有効利用、IoTの考え活用(出来るようにする)**
膨大なデータを処理し、意味ある結論を出す
過去のデータとの照合・・・ビッグデータの処理

図14 期待されるインフラ点検・モニタリングの今後
Fig. 14 Expected future of infrastructure health monitoring.

要 旨

社会インフラのモニタリングの基本は「測る」ことであり，そこから対象物の状態が把握できる．我々人間の健康診断と同じである．斜面などの土木構造物を対象にした場合，いままで「測る」ことに関しては，それほど関心が高かったとは言えない．点検作業の主力は，目視であり人間の観察が最も重要と考えられてきた．計測センサーについても，土木用は，図体が大きく，価格も高い上に，構造物の寿命に比べて寿命が短いといえる．しかし，最近の状況は変わりつつある．無線 LAN，長寿命，省電力，安価を目指した機器が開発され，スマートフォンのような先端機器で用いられる小型センサーが計測に用いられるようになり，有意義なデータが蓄積されている．これらのセンサーはどのように斜面安定性評価の役に立つのか，得られたデータはどのように有効利用されるのか，最近の動きであるビッグデータ解析，人工知能などの適用を考慮しながら検討を行う．

キーワード：インフラモニタリング，センサー，計測手法，斜面リスク評価，ビッグデータ，人工知能

防災科学技術研究所における土砂災害研究と今後の方向性

森脇 寛*

Activities and Future Direction on Landslide Disaster Researches in NIED

Hiromu MORIWAKI

** Visiting researcher*

*National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
nhdj911@ybb.ne.jp*

Abstract:

We have been suffered from landslide disasters caused by earthquake, heavy rainfall and melting snow. The damage tends to be much intensified by recent global warming and activating earthquake. NIED established in 1963, has been studying on the prevention on natural disasters including landslide disasters over fifty years. As planning of next project will start soon, the author discussed future direction and appropriate themes on landslide researches, looking back past activities in NIED.

Key words: landslide disaster, Past research activities, Future direction, Next themes

1. はじめに

土砂災害による被害は近年、記録的豪雨の頻発や地震活動の活発化に伴い、ますます増加する傾向にある。この土砂災害をもたらす現象は「地すべり」、「斜面崩壊」、「土石流」、「浸食」など多岐にわたる上、発生場の事前特定がほとんど不可能なため、実現象の観測例は極めて少ない。そのため、その機構解明や予測研究は他の自然災害に比べて極めて難しい部類に入る。これらの被害を少しでも減少させるため、大学や国内の関連研究機関がそれぞれ、防災・減災に向けて鋭意努力しているところである。1963年に設立された国立防災科学技術センター(防災科学技術研究所の前身、以下、防災科研と呼ぶ)もその代表的な研究機関のひとつである。防災科研では土砂災害だけでなく、沿岸災害、雪害、地震災害などのあらゆる自然災害に対する防災科学技術の確立を目標に研究が行われてきた。設立から現在までに幾度か組織改編が行われたが、土砂災害研究者にとっ

ての大きな変換点は1990年(地球科学的研究の重点化)と2001年(独立行政法人化)である。特に2001年の独立行政法人化は、国立研究所時代とは組織、制度などが大幅に様変わりした。研究目標・波及効果を明確にし、「社会に役立つ防災・減災成果」が求められるようになった。まもなく、防災科研は第3期5年計画が終了するとともに次の第4期計画の策定に入る。そこで、その一助となるべく、これまでの防災科研における土砂災害研究の活動を振り返るとともに、今後の土砂災害研究のあり方を議論する。

2. 研究所の略歴と研究環境の変遷

2.1 研究所の略歴

防災科研は、以下に示すように1963年の設立から今日まで50年余の歴史をもつ。

1963年4月 1959年の伊勢湾台風災害を契機に国立防災科学技術センター(科学技術庁)が設立される。

* 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 客員研究員

(各省庁附置研の調整機能的役割)

- 1970年4月 大型耐震実験施設完成(筑波研究学園都市 第1号施設)
- 1974年4月 大型降雨実験施設完成(筑波研究学園都市)
- 1978年4月 本所(東京)の筑波研究学園都市移転
- 1990年6月 防災科学技術研究所に改称・組織改編(地球科学的研究を重点化)
- 2001年4月 独立行政法人「防災科学技術研究所」(文部科学省)に組織改編(防災・減災研究を重視)
- 2015年4月 独立研究開発法人「防災科学技術研究所」に改称、現在に至る。

本所のほかに支所として平塚(沿岸防災)、長岡・新庄(雪氷防災)、三木(実大三次元振動破壊実験施設)が順次、設置された。ただし、平塚支所は現在、廃止され、東大に移管されている。

2.2 研究環境の変遷

防災科研は設立当初からしばらくの間、各省庁間の調整機能的役割を担っていたため、本格的な防災研究は後年になった。また、他省庁からの出向者も多くみられたが、1978年の本所の筑波移転前後から防災科研が採用する研究者が徐々に占めるようになり、実質的な「防災研究」が始まった。しかし、1990年には大幅な組織改編が行われ、名称も国立防災科学技術センターから防災科学技術研究所に改名し、一転して「地球科学研究」を重点化することになった。そして、2001年の独法化を機に、再び「防災・減災研究」を重視されることになり、組織も研究体制も大きく変わっていった。この1990年から始まった地球科学研究の重視から、2001年に独法化するまでの10年間余は、防災科研の土砂災害研究者にとっては、粛々と研究を進めざるを得なかった期間である。いわば、苦難の時代であった。以下に組織・体制が大きく変わった2001年の独法化を境にして、その前後の研究環境の違いを概観する。

国立研究所時代の土砂災害研究は基礎研究が主で、各個人が行う経常研究が大半を占めていた。予算も少なかった。所内のチームで行う特別研究や防災科学技術総合研究費や特別研究調整費などの外部資金による研究(他機関との共同)も一部あったが、それらを得る機会は少なかった。海外留学・海外出張も制限されていた。2001年の独法化以降は、応

用研究・実用研究が重視されるとともに、従来の研究部一研究室の構成はなくなり、5年計画のプロジェクトグループ制に変わった。予算も大幅に増加した。また、研究費の年度繰り越し使用や国内外学会への参加、あるいは契約研究員の採用など、運用における融通性が広がり、研究環境は国立研究所時代に比較してかなり良くなった。しかし、同時に外部有識者による研究所の運営方針や各プロジェクト研究の成果に対する評価(毎年度及び終了年度)を受けることになり、研究成果への責任も重くなった。

3. 防災科研における土砂災害研究の活動と主な成果

3.1 研究活動

国立研究所時代の土砂災害研究は主に第三研究部(のちに防災総合研究部)の中の「地表変動防災研究室」と「降雨実験室」(のちに気象防災研究室)の2つの研究室で行われていた。前者は現場調査観測研究グループ(地形・地質学的研究)、後者は実験的研究グループ(大型降雨実験施設を用いた発生機構の解明、予測研究)である。経常的な研究のほかに、大規模土砂災害発生時には主に両研究室からなる「主要災害調査チーム」を結成して現場に赴き、その都度、災害の原因、土地環境、被害拡大の要因や今後の提言を記載した報告書をまとめてきた。実験グループにとっては、現地調査はその後の地すべり・崩壊実験を行う上で大いに参考になった。その後、独法化とともに両研究室は1つのグループとして編成され、今日に至っている。

1974年に完成した大型降雨実験施設(図1)は、世界最大の規模・能力(最大降雨強度200 mm/hr)を有



図1 大型降雨実験施設
Fig. 1 Large-scale rainfall simulator.



図2 実大規模の斜面崩壊実験
Fig. 2 Full-scale landslide experiment.

し、実物大の模型実験が可能となった(図2)。この施設の存在は動態観測例が少ない、地すべりや斜面崩壊現象などの機構解明や予測研究にとって大きな推進力となった。また、本施設は共用施設としての位置づけであるため、現在も所外の研究機関との共同研究や民間からの委託を受けて行う受託研究、あるいは施設の貸出しなど数多く活用されている。

独法化以降の土砂災害関連プロジェクト課題(各5年計画)は、以下のとおりである。第1期では土砂災害が中心とするプロジェクトであったが、続く、第2期、第3期では気象予測が主となり、土砂災害研究はその中の中課題あるいは小課題の中で行われた。

- ・第1期「豪雨による土砂災害の発生予測に関する研究」(2001-2005)

これは、ア)地すべり地形分布図作成、イ)MPレーダによる降水量推定と表層崩壊の予測、ハ)地すべり地形斜面の危険度評価からなる。いずれの中課題も土砂災害研究を目的としている。

- ・第2期「MPレーダを用いた土砂・風水害の発生予測に関する研究」(2006-2010)

これは気象予測、風水害、土砂災害の組み合わせ気象防災プロジェクトとなり、その中の中課題「土砂災害危険度評価の高度化研究」で、ア)現地試験斜面での観測とリアルタイム監視体制の確立、イ)崩壊時刻の早期予測手法、ハ)被災範囲の予測手法の開発が行われた。

- ・第3期「都市圏における複合水災害の発生予測に関する研究」(2011-2015)

これは、ア)局地的豪雨の早期予測技術の開発、イ)複合水災害の発生予測に関する研究、ウ)極端気象に伴う水災害の発生機構の研究から構成され、土砂災害研究はイ)の中の小課題「豪雨と地震による複合土砂災害の危険度評価技術に関する研究」で行われている。これは地盤情報を3次元地盤モデルで新たに構築して、豪雨と地震を加味した斜面の不安定化を考慮した危険度評価技術の開発を目的としている。

3.2 主な成果

＜基礎的な研究成果＞

風化花崗岩地帯の崩壊の特徴(大八木, 1968)に始まり、北松地すべりの構造解明(大八木ほか, 1970, 大八木・大石, 1971)、結晶片岩地帯地すべりの降雨浸透に関する実験的研究(寺島ほか, 1978)、降雨による斜面崩壊時の内部応力の変化(福園, 1978)、地すべり土塊の到達距離予測(森脇, 1983)、磐梯山の山体崩壊の構造解明(田中ほか, 1995)、一連の降雨の地盤浸透現象の解明(富永, 1990, 1994a, 1994b, 1995)、実物大斜面模型を用いた崩壊発生・流動機構の解明実験(Moriwaki, 2004)、降雨浸透に伴う地下水の発達・減水過程と崩壊の関係(森脇ほか, 2006)、地すべり地形斜面の地震時の危険度予測システム(森脇, 2011)など挙げられる。

主要災害調査報告書はこれまで発行された全48号のうち、土砂災害関連は1985年7月の長崎豪雨災害や2008年の岩手・宮城地震災害など23号を占める。

＜社会に役立つ成果＞

- 1) 全国地すべり地形分布図(防災科研, 1982-2015)

これは精緻な空中写真判読技術を用いて、過去に滑動した形跡を示す地すべり移動体と崩壊源の輪郭を抽出し、1/5万の地形図に記載したものである(図3, 図4)。防災科研の大八木規夫氏と清水文健氏を中心に作業が進められ、第1集の「新庄・酒田」(1982)から始まり、第60集「関東中央部」(2015)で全国網羅が完了した。地すべり地形分布図作成の作業開始から全国網羅まで約33年を費やした。実に息の長い作業である。なお、1982年に始まった地すべり地形分布図の作成作業は2001年の独法化第1期から加速され、地すべり地形分布図全60集のうち、15集からの45集分はこの独法化以降の作業で進められた。

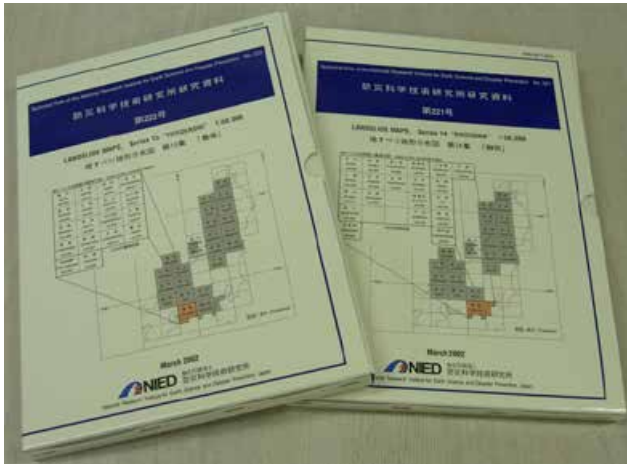


図3 地すべり地形分布図集
Fig. 3 Landslide distribution map.



図4 地すべり地形分布図「八幡平」の一部
(防災科研, 1984)
Fig. 4 Example of landslide map in Hchimantai area
(NIED, 1984).

記載された地すべり地形斜面のほとんどが古い年代に生じたものであるが、地すべり地形斜面は裾部の切り取りや斜面上部に構造物を建設などの人為的地形改変は再滑動の危険性を伴うため、この分布図は潜在的危険個所の判断資料として、行政機関や電力会社など広く活用されている。現在はHPでも公開されている。

2) 斜面崩壊時刻の予測式の開発(福園, 1985)

これは数多くの実物大地すべり模型実験のデータ解析により、地表面移動速度の逆数から崩壊時間を求める方法を開発したもの。予測線が最終的にほぼ直線状に表現されるので、視覚的に理解しやすく、山体が移動し始めた斜面の崩壊時間を推測する極めて有効な方法である。図5に示す大型降雨実験施設で行われた大規模崩壊実験(高さ5m, 幅4m, ロー

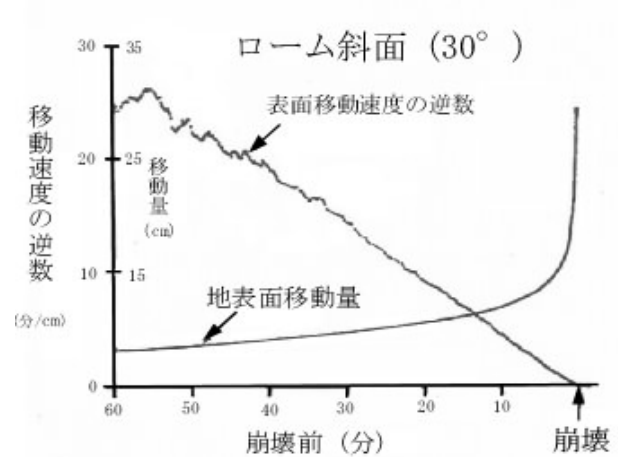


図5 ローム土を用いた崩壊実験における地表面移動量変化と移動速度の逆数曲線(福園, 1985)

Fig. 5 Surface displacement and a reciprocal of surface displacement velocity in a full size landslide experiment with loamy soil (Fukuzono, 1985).

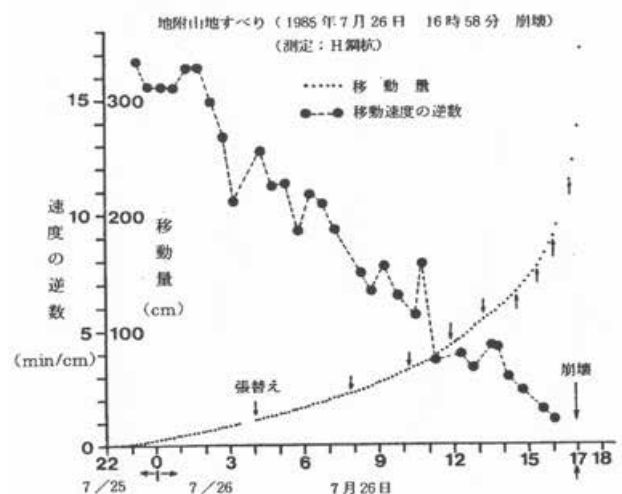


図6 長野県地附山地すべりにおける検証例
(福園, 1985)

Fig. 6 Relationship between failure time and a reciprocal of surface displacement velocity in Jizukiyama, Nagano Prefecture (Fukuzono, 1985).

ム土)の例では約20分前には予測ができています。

図6は1985年7月に発生した長野県地附山地すべりの検証例である。移動量観測データを用いて予測曲線(地表面移動速度の逆数)を表示すると、滑動初期の頃は上下の変動は激しいが、崩壊時刻に近づくにつれて、速度の逆数値が直線状になる。この直線がX軸と交差する点が崩壊予測時刻である。この地すべりでは崩壊2時間前には直線となり実際の崩壊時間と一致している。

3) 地表面移動量を指標とした斜面崩壊の危険度評価(森脇, 2001)

これは現地観測データや模型規模を変えた崩壊実験から、崩壊斜面長に対する崩壊発生までのヒズミ量は斜面の大きさに関わらず一定の範囲(図7)に収まることを明らかにし、ヒズミ量に応じた崩壊危険度を4段階(前兆領域、警戒領域、破壊領域、完全破壊領域)に分類したもの。この指標は、滑動中の斜面なら地表面移動量と斜面長との関係から、今後、どの程度の移動量で崩壊するか推定の目安となる。古い地すべり地形斜面なら安定している状態か、今後も崩壊の可能性があるかなどの判断も可能である。

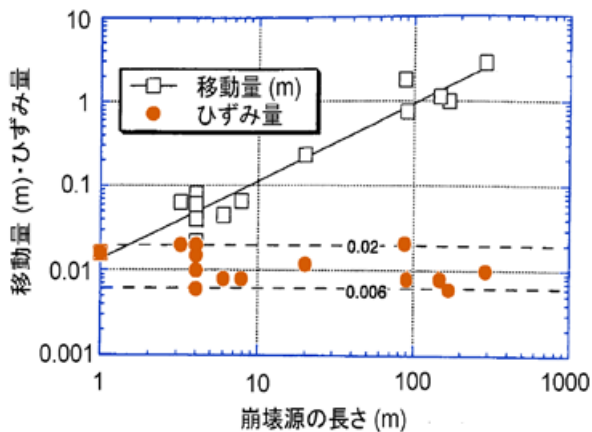


図7 各種崩壊実験および観測データにもとづく崩壊斜面長と崩壊するまでのヒズミ量の関係(森脇, 2001)

Fig. 7 Relationship between failure displacement and slope length.

図8は1982年に発生した奈良県西吉野村和田地すべり(斜面長168m)の地表面移動量の変化とヒズミ量から求めた各領域の推移を表している。和田地すべりは、8月3日の13時過ぎに近くの消防団員により山腹の亀裂が発見され、その1時間後には周辺の住民360人に避難命令が発令された。21時過ぎには、地表面移動量が50cmになり(図中A点)、ヒズミ量は前兆領域($0.006 <$)を越えて、警戒領域($0.003 \sim 0.006$)に入ったことを示している。その後、移動速度が徐々に早くなり、地表面移動量が100cmになった翌日1時(図中B点)には、山腹の樹木のゆれも激しくなったため、消防団員も全員避難した。このあと、1時間後に斜面は崩壊した。消防団全員が避難した1時にはヒズミ量も破壊領域($0.006 \sim 0.02$)

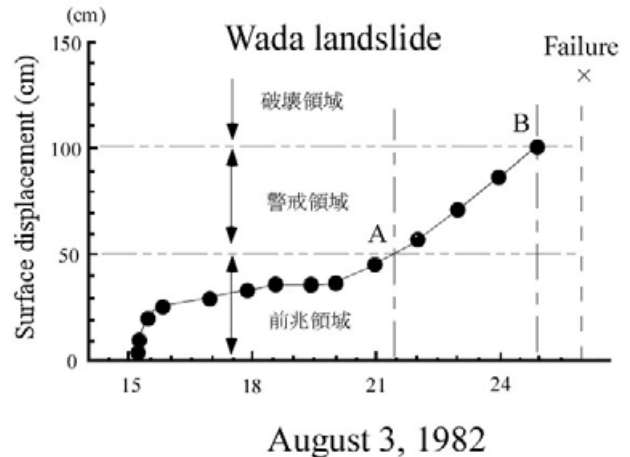


図8 奈良県西吉野村和田地すべりにおける地表面移動量と避難との関係(森脇, 2001)

Fig. 8 Examination of surface displacement and evacuation in Wada landslide, Nara Prefecture (Moriwaki, 2001).

に入ったところである。これ以降はいつ崩壊が発生してもおかしくない状況であるので、消防団員の避難は的確な判断であったといえる。

4. 研究の方向性

防災科研では、社会に役立つ成果が求められている。防災科研ならではの独自色を出しつつ、防災・減災研究を進める必要がある。そこで、今後の方向性としては、これまでに実績・経験の多い「地すべり」、「崩壊」を対象とした危険度評価手法、予知予測手法の確立あるいは高度化を主流にしたい。近年、センサーの精度や計測器・処理技術が格段に発達し、GPSによる変動観測や現地斜面のモニター観測など新たな研究開発の手法は増加している。これら計測技術の活用が今後の成果創出のカギとなる。それにはこれまでの成果や3期15年にわたるプロジェクトの吟味も欠かせない作業である。また、先頃、リニューアルされた大型降雨実験施設(最大降雨強度300 mm/hrにUP)も他研究機関には類を見ない稀有の施設である。その活用も土砂災害研究の発展には必要である。

いずれにしても、研究計画の立案には、(a)研究対象、(b)時系列な位置づけ(発生前、発生時、発生後)、(c)目的・手法、(d)中・長期的成果の見通しを明確にしなければならない。なお、地震動に伴う地すべりや斜面崩壊はほぼ地震発生と同時に発生するので、平常時の危険度評価が最重要である。

5. 今後の研究課題例

上述の考えを踏まえて、以下に今後、進められるべき研究課題をいくつか挙げる。

1) 地すべり地形斜面の危険度評価研究(地すべり地形分布図の高度化)

地すべり移動体と崩壊源の輪郭が記載されている地すべり地形分布図は、対象斜面の人為的改変等に対して極めて有効な資料となっている。しかし、現時点では抽出された、個々の地すべり地形斜面が今すぐ危険なのか、安定しているのかが評価されていない。これらの危険度の評価がなされれば、地すべり地形分布図の付加的価値は一段と高まり、防災計画の立案、対策工事の優先度の決定などに極めて有効な資料となろう。住民にとっても、日常の防災意識も高まる。まずは平常時の危険度評価が望まれるが、続いて地震規模や降雨量を入力とした誘因を考慮された評価技術の確立が望ましい。

2) 地すべり・崩壊土砂による流下堆積域の予測(現地調査＋大型降雨実験施設＋数値解析)

土砂災害は最終的には地すべり土塊や崩壊土砂の流下に伴い被害が発生する。崩壊土砂の流下堆積の予測研究は、近年、シミュレーション解析で数多く行われるようになってきたが、計算で必要な崩壊土砂と流下面との境界面における抵抗係数の数値の不明なことが研究の進展を阻んでいる最大の要因である。本研究では実験的手法と現地調査との組み合わせで進める。併せて、地すべり土塊や崩壊土砂が高速流下する場合があるが、その境界条件の解明も進める。

3) 豪雨による土砂災害のリアルタイム危険度評価研究(広域・個別斜面の同時観測)

山地に住む住民にとって、近くの斜面や山麓の危険度は最も知りたい情報である。特に豪雨時の危険度の高まりを知ることは住民の避難活動に欠かせない。ここではレーダ等を駆使した広域を対象とした崩壊危険度の評価と個別斜面(自然斜面＋人工斜面)の観測をもとに、リアルタイムで変化する危険度を評価する技術を開発する。

4) 記録的豪雨が斜面崩壊現象に及ぼす影響について(大型降雨実験施設の活用)

いままで、経験していない記録的豪雨が発生すれば、単に崩壊時間が早くなるばかりか、予想できない土砂災害の発生が予想される。例えば、崩壊土砂

は多量の水分を含んで土石流化し、広範囲に広がる現象も考えられる。この研究には実際に記録的豪雨を再現できる大型降雨実験施設が必要である。具体的には、砂質斜面、粘性土斜面を対象として、豪雨強度の影響(100 mm/hr, 200 mm/hr, 300 mm/hr など)を考慮した比較実験を行う。

5) 総合土砂災害減災システムの構築(社会科学分野との協調)

災害が予想される山地地域を対象として、仮想の災害、例えば山腹に亀裂が発見されたときに、今後どうなるのかを予測し、その後の行政担当者・住民がどのような行動をとるべきかを示唆する防災マニュアル(避難手段・経路、情報公開など)を作成して、緊急時に対応する。これには、防災科研内に新たに設立されたレジリエントグループとの協調が必要となる。

6. おわりに

現在、防災科研における土砂災害研究者が抱える課題は、プロジェクトの維持および減少傾向にある研究者数の対処である。土砂災害研究は短期間では成果の出にくい分野であるが、両課題とも研究成果(論文も含む)と密接に関係している。研究成果が出なくなればプロジェクトは縮小され、人員削減につながりかねない。研究推進を図るためには、所内研究者間の相互理解と強力な連携が必要不可欠である。防災科研が土砂災害研究の一大拠点となるよう、皆さんには一層の努力と協力を期待したい。

参考文献

- 1) 大八木規夫(1968)：島根県加茂・大東花崗岩類地帯における風化体の構造と崩壊。防災科学技術総合研究報告書「風化花崗岩地帯におけるがけくずれ・山くずれ等の機構および予知に関する研究(第1報)」, 第14号, 113-129.
- 2) 大八木規夫ほか(1970)：北松鷲尾岳地すべり構造要素。防災科学技術総合研究報告書, 第22号, 北松型地すべりの発生機構および予知に関する研究, 115-140.
- 3) 大八木規夫・大石道夫(1971)：鷲尾岳地すべり中央部と末端部の構造。防災科学技術総合研究報告書「北松型地すべりの発生機構および予知に関する研究」, 第27号, 21-30.

- 4) 寺島治男ほか(1978)：地すべり土層の雨水浸透に関する実験的研究．昭和 50-52 年度特別研究促進調整費「結晶片岩地帯地すべり発生機構に関する総合研究報告書」，科学技術庁研究調整局，271-303.
- 5) 福園輝旗(1978)：降雨による斜面崩壊と内部応力状態．国立防災科学技術センター研究報告，第 20 号，101-122.
- 6) 防災科学技術研究所(1982-2015)：地すべり地形分布図第 1 集「新庄・酒田」～第 60 集「関東中央部」，防災科学技術研究資料 No.69-No.394.
- 7) 森脇 寛(1987)：崩土の到達距離予測．地すべり，Vol.24, No.2, 10-16.
- 8) 福園輝旗(1985)：地表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時期の予測法．地すべり，Vol.22, No.2, 8-13.
- 9) 富永雅樹(1990)：ステップ状降雨入力のもとでの降雨浸透現象 - 降雨浸透現象の研究(I)-. 農業土木学会論文集，No.147, 1-14. (ほかに富永雅樹，1994a, 1994b, 1995, いずれも農業土木学会論文集).
- 10) 田中耕平ほか(1995)：1888 年磐梯山山体のボーリング掘削とすべり面．磐梯火山：防災研究の進展に向けて，科学技術振興調整費「火山地域における土砂災害発生予測手法の開発に関する国際共同研究」岩屑流発生場に関する研究分科会，防災科学技術研究所，69-78.
- 11) 森脇 寛(2001)：地表面移動量を指標とする地すべり斜面の崩壊危険度評価．地すべり，Vol.38, No.2, 11-18.
- 12) H. MORIWAKI *et al.* (2004)：Failure Process in a Full-scale Landslide Experiment using a Rainfall Simulator. Landslides, Springer, Vol.1, No.4, 277-288.
- 13) 森脇 寛ほか(2006)：雨水浸透に伴う地下水流の発達・減水過程と斜面崩壊に及ぼす影響に関する考察．日本地すべり学会誌，Vol.43, No.1, 9-19.
- 14) 森脇 寛(2011)：地すべり地形斜面の地震時危険度評価と崩壊予測システムの構築．日本地すべり学会誌，Vol.48, No.6, 1-13.

要 旨

防災科研は自然災害の防止を目標にして，これまで 50 年間余，研究活動が続けてきた．その間，大きく変わったのは 2001 年の独法化である．これ以降，社会に役立つ成果が強く求められるようになった．まもなく第 3 期 5 年計画が終了するとともに次の第 4 期計画の策定に入る．そこで，その一助となるべく，これまでの防災科研における土砂災害研究の活動と成果を振り返るとともに，今後の防災科研が目指すべき土砂災害研究の方向と研究課題について議論する．

キーワード：土砂災害研究，過去の研究活動，今後の方向，研究課題

防災科研における斜面モニタリング研究の今後の取り組み － IoT 技術を活用したセンサーの開発－

酒井直樹*

Research on Landslide Prediction by Slope Monitoring in NIED － Slope sensor based on a new IoT technology －

Naoki SAKAI

**Storm, Flood and Landslide Research Department,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
sakai@bosai.go.jp*

Abstract

This paper describes that landslide prediction using slope monitoring with a slope sensor based on a new IoT technology. We examined to verify the warning sign of MEMS-based accelerometers with a large scale-rainfall simulator. We found that the change of surface deformation data were detected by a new sensor. Then we will provide an opportunities to develop new sensors with an IoT technology among universities, institution and private company.

Key words: Landslide, Slope monitoring, MEMS-based accelerometers, IoT

1. はじめに

平成 26 年広島土砂災害では記録的な豪雨により多数の斜面崩壊や土石流により大きな被害が発生した。その主な原因として、1 時間に 50 mm を越えるような豪雨が短時間に局地的に降ったことや、また「土砂災害警戒情報」や「避難勧告」等の防災情報の伝達のタイミングが遅れたことなどが指摘され、複数の要因が重なり被害が大きくなったと見られている。一方で、全国には多数の土砂災害危険箇所があり、その情報は県や市の HP で公開されているが、そこがどの程度危険かという情報は表示されていない。

そのような事情を反映して、特に近年では地域に直接資するようきめ細かい防災情報が求められてきている。具体的には、自分の家のそばの裏山が、

どの程度危険なのか、いつ避難すればいいのかという情報が期待されている。特に避難の場合は、避難勧告等を待つだけでなく、危険を感じたら自ら避難する「タイミング」を判断することが必要になってくる。そのため周辺に発生する前兆現象を把握することが必要だが、豪雨中に、その前兆現象を探すのは、非常に困難を伴う上、自ら被災する可能性が高くなる。

そこで本稿では、斜面モニタリングにより前兆現象を把握し、その情報を事前に知ることによって斜面崩壊の予測を可能にし、きめ細かな防災情報を実現するための試みを紹介し、将来への課題を述べる。

* 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究ユニット 主任研究員

2. 前兆現象とは

2.1 危険な斜面

土砂災害危険箇所と都道府県で指定されている箇所は、全国で 52 万箇所¹⁾ ありある。例えば、図 1 に示すような家屋に隣接した斜面も含まれる。一般的にこのような斜面では、特に表面的な変状がなく、どのような崩壊が起こるのか想定し難い。このような場合はどのような対処をすればいいのだろうか？

現在、このような取り組みの 1 つとして、モニタリングによる個別斜面の崩壊リスク評価の必要性が言われている。しかし、まだ一般的で気軽に利用できる実用的なモニタリングシステムは確立されていない。

2.2 前兆現象

現状の予測技術は変状が発生した斜面にセンサーを設置して変位や地下水等を計測する手法を用いて行われる。特に、斜面の亀裂に対して伸縮計を用いて崩壊を予測する技術は実用化されており、「すべり防止技術指針及び同解説」²⁾ にも掲載されている。一方でこの手法は、変状が見られない斜面への適用は難しいことが課題である。図 2 に示されているように、斜面の不安定化進行過程³⁾ は、斜面に浸透した水の量と関係⁴⁾ しており、その量が多くなると亀裂が入ったり、斜面が膨らんできたり、斜面から濁った水がでたりという明確な前兆現象がみられるようになるが、避難時間を確保するためには、これらの現象発生前の不安定化初期の段階でのわずかな変化をとらえ住民に伝えることが重要である。では、不安定化初期の段階では、何を計測すればいいのだろうか？ここでは、模型実験を行うことにより、斜面



図 1 土砂災害危険箇所指定地の例

の崩壊メカニズムに基づいた不安定化初期過程と不安定化進行過程を分けて計測による前兆現象の把握の可能性を検討する。

3. IoT を活用したセンサー

最近では「リアルタイム」で「ピンポイント」な防災情報は重要になると考えられる。そこで、現在一般に用いられているような高精度な計測ではなく、個人で手軽で扱えるような小型で低価格で扱いやすいセンサーシステムが必要となってきた。

そこで近年では、このような課題を克服するために、新しく ICT (情報科学技術) 分野の技術を取り入れた計測手法を導入する試みが考えられている。

防災科研では、IoT モジュールを元とした MEMS 型加速度センサーと Bluetooth 通信を用い、そしてロガーとしてスマートフォンを使うモニタリングシステムを検討している。ここでは、そのシステムと計測結果の実例を説明する。まずアルプス電

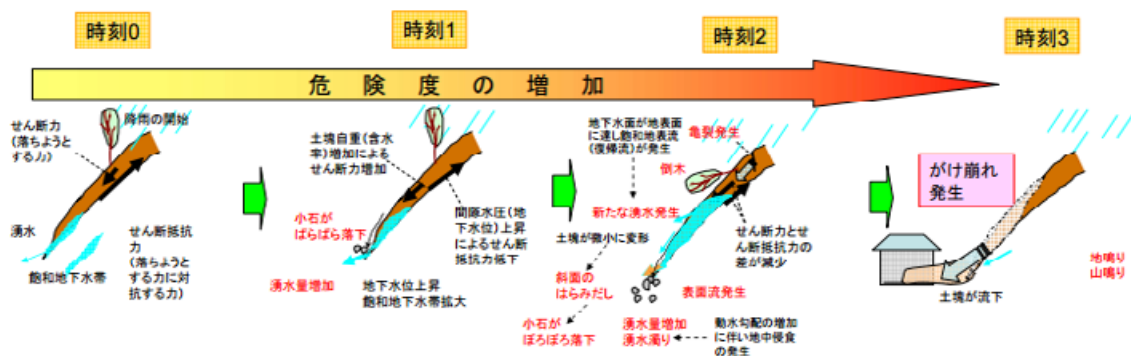


図 2 不安定化過程と前兆現象の模式図³⁾

機社製の IoT モジュールを元に、本体内にモジュールと電源を設置した。センサー部分では、加速度 (3 軸)・地磁気 (3 軸)・気圧・温度・湿度・照度・UV-A の計測が可能である。ここでは、加速度についてのみ触れる。-2G ~ +2G で 10 Hz で計測する。そのセンサーモジュールにリチウム電池 CR-V3 (公称電圧 3V, 公称容量 3300 mAh) を接続した。センサーモジュールおよび電池は、防水・防塵性のプラスチックボックス内に収め、サイズは幅 50 mm・高さ 65 mm・奥行 55 mm である (図 3 参照)。この仕様で数カ月間は計測し続けるようにしている。またセンサーからのデータは、Bluetooth Smart(BLE, Bluetooth v4.x で策定された Bluetooth の低電力版) を通じて、中継機として近傍に設置したアンドロイドスマートフォンで常時受信できるようにソフトウェアを走らせ、測定データをサーバーに送信し、任意のクライアント端末(PC・タブレット・スマートフォン)の Web ブラウザ上で閲覧できるようなシステムとした (図参照)。通信プロトコルに MQTT (Message Queue Telemetry Transport) を採用した。

実験の設置計測事例 (図 5 参照) を示す。ここでは加速度センサーの計測事例を示す (図 6 参照)。水色で示した太線は、降雨期間 (50 mm/h 一定) を示している。降雨期間中は、特に X,Y 軸方向に関して降雨によるノイズが大きいのっているのがわかる。3 軸とも、降雨期間中は、ほぼ変動を示すような動きは全く検出されていない。その後、崩壊前 18 分程度から加速度センサーが 3 軸とも動き出していることがわかる (紫の矢印)。これは別途計測している地表面変位計と同等の動きであり、この結果から斜面が不安定となった状況から崩壊に至る過程はこの計測法でも計測できることがわかった。

今後、複数のモニタリングデータをリアルタイムで分析するために、時系列データに対し統計手法を利用し、専門家以外にも判断可能な危険度評価手法として統計モデル⁵⁾を用い危険度確率として定量的な切迫性のある防災情報を創出し活用することが重要である。

一方で今回のセンサーは試作機であり、いくつかの課題として、無線通信の方法、消費電力、バッテリー等のセンシングシステムとしての組み合わせも大きな課題であり、今後これらを整理していく必要がある。

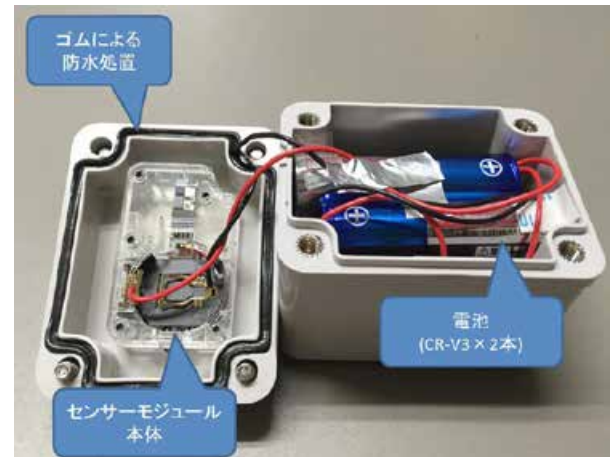


図 3 自作したセンサー内部とセンサーモジュール⁶⁾



図 4 システム概要図



図 5 大型模型時実験センサー設置例

4. 終わりに

今まで土砂災害に関する防災情報は、降雨量を指標とした情報が主であった。これは、崩壊が局所的でありメカニズムもよくわかっていない現象であることと、地盤の中を計測する手軽な手法が確立されていないという大きな課題があったため、局所的な情報はだせなかったと考えられる。

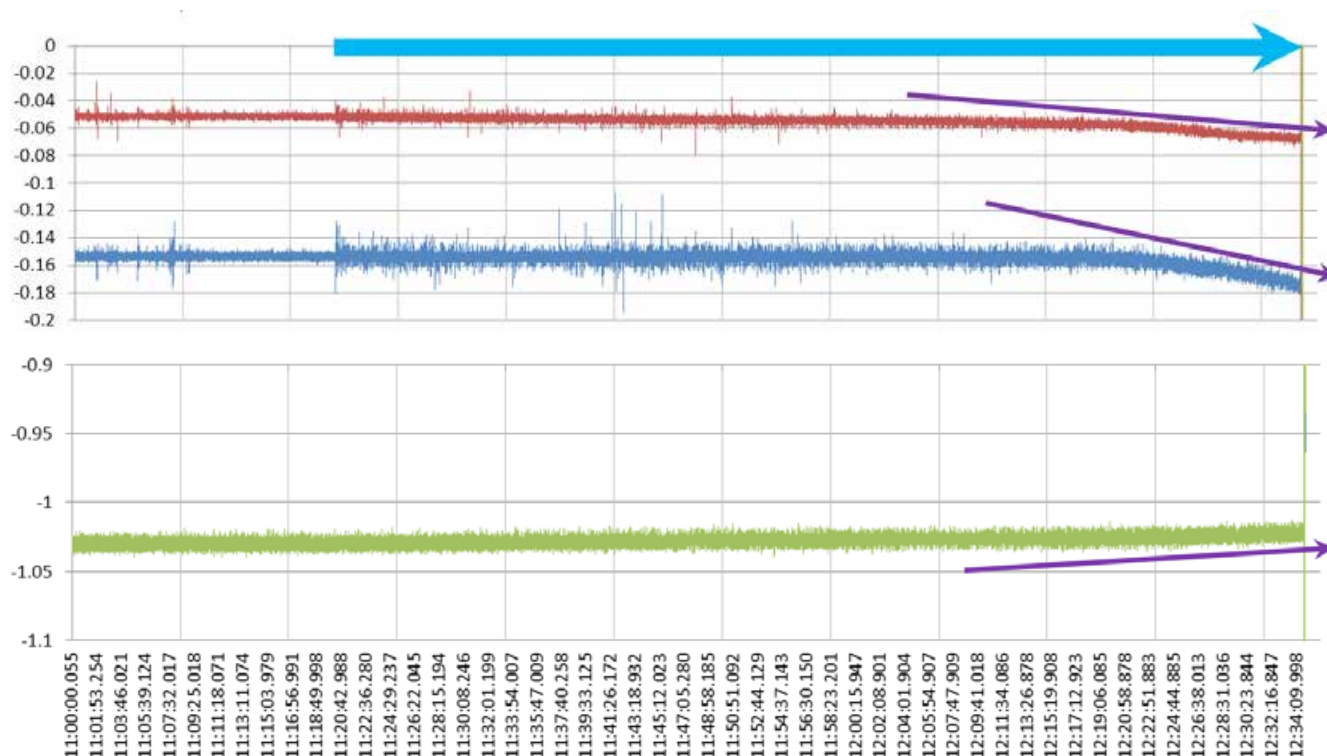


図 6 大型模型実験時の加速度計測データ事例とその解釈

そのような問題を乗り越えるために、IoT 技術により市民が必要な場所の危険度を知る手段が身近になりつつあることを示した。また今後このようなセンサーの普及と市民が自分で情報を集めるという環境が成り立つようになれば、大量のデータが集まることになる。それらビッグデータをリアルタイムで分析しながら危険度を即時に判定するためには時系列データに対し統計的な手法を用いた分析または機械学習 (AI) を用いた分析手法の確立が必要である。これらの分野の発展も大きく期待される。

現在では、このような手法は、構造物の維持管理手法としても用いられており、道路・鉄道関連における法面の維持管理分野でも用いられるようになってきた。ここに市民によるセンサーによる自主計測可能な環境が整えば、センシング技術と情報処理分析を用いた防災市場が大きく発展する可能性がある。このような大きな課題に取り組むには、防災減災の技術開発のために産官学がオープンイノベーションのもと協力し、異分野の融合を積極的に取り入れた「みんなが集う」枠組みが重要である。今後、このような枠組みを構築しながら土砂災害の防災・減災技術の確立を目指していくことが必要である。

参考文献

- 1) 国 交 省 砂 防 部, <http://www.mlit.go.jp/river/sabo/link20.html>
- 2) 地すべり防止技術指針及び同解説, 社団法人全国治水砂防協会, 平成 20 年 4 月
- 3) 土砂災害警戒避難に関わる前兆現象情報の活用のあり方について(平成 18 年) 国交省砂防部
- 4) 笹原克夫・酒井直樹 (2014): 地表面変位と地下水位のモニタリングに基づく斜面崩壊発生予測. 地盤工学ジャーナル, 9(4), 671-685.
- 5) Tomoaki Imoto, Naoki Sakai, Kunio Shimizu, Koji Kanefuji, and Satoshi Yamashita, An application of statistical time series analysis to prediction of slope failure, International Conference on Slopes, Malaysia 2015
- 6) センサネットワークモジュール開発キット, アルプス電機株式会社.
<http://www.alps.com/j/iotsmart/>

要 旨

降雨時の土砂災害を減らすためには、自治体及び住民が避難の判断をしやすくなるようなきめ細かな周辺の現況情報がまず必要である。近年では、このような課題を克服するために、IoT (Internet of Things) を用いた小型、安価、取り扱いやすいセンサーの開発が行われている。そこでは、斜面の動きや水分量や地下水位や振動などの大量のデータからわずかな動きが前兆かどうかを判定する必要がある。そこでは時系列データを統計的に分析したり、他データとの相関をとったりする機械学習の分野の研究も必要不可欠である。そこで、大型実験施設を使った実験的な取組みを持続的にを行い、産官学がオープンイノベーションのもと協力し、異分野融合を積極的に取り入れた土砂災害の防災・減災技術の確立を支援していく。

キーワード： Landslide, Slope monitoring, MEMS-based accelerometers, IoT

モニタリングデータを用いた土砂災害発生時刻の統計的予測

井本智明*・酒井直樹**・清水邦夫***・金藤浩司***・山下智志***

Statistical Prediction of a Slope Failure Through the Monitoring Data

Tomoaki IMOTO*, Naoki SAKAI**, Kunio SHIMIZU***, Koji KANEFUJI***, and Satoshi YAMASHITA***

** Risk Analysis Research Center,
The Institute of Statistical Mathematics, Japan
t-imoto@ism.ac.jp*

*** Monitoring and Forecast Research Department, Storm, Flood and Landslide Research Unit,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
sakai@bosai.go.jp*

**** The Institute of Statistical Mathematics, Japan*

Abstract

For the prediction of a slope failure, there are two general methods, deterministic and statistical. The former approach is based on mathematical models of the physical mechanisms. However, in the study of landslide, it might be difficult to construct the deterministic model because the mechanisms have not been revealed completely. The latter approach does not posit mechanisms that control a slope failure, but assumes rather that some available information can be related arbitrarily to measurable characteristics.

In this paper, we construct the statistical time series model for the velocity of surface displacement by considering the variation of elements, such as inclination, rainfall, soil and temperature, to be an error. The derived model is probabilistic, and based on the model, we can construct a confidence interval for the predicted velocity and make a probability distribution useful for the prediction of slope failure time.

Key words: ARIMA model, Fukuzono's prediction, Probability distribution, Slope monitoring, Time series analysis

* 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 統計数理研究所 リスク解析戦略研究センター

** 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 観測・予測研究領域 水・土砂防災研究ユニット

*** 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 統計数理研究所

1.

土砂災害と統計解析

土砂災害は人的被害や経済的損失の大きい災害の一つであり、警報・避難等の対策が重大な課題となってくる。

しかし、こうした災害はその発生メカニズムが十分に解明されておらず、決定論的アプローチによる予測を行うことが困難である。

- 災害の原因となる多くの素因・誘因
- 原因が複雑に絡み合う現象
- 時間経過と共に変化していく環境

一方、確率論的・統計的アプローチでは、データを基とした解析を行うため、詳細な事象発生メカニズムを考慮に入れずに利用できる利点がある。

統計的アプローチ例: 重回帰分析, パターン認識, 時系列解析, 空間統計学.

2.

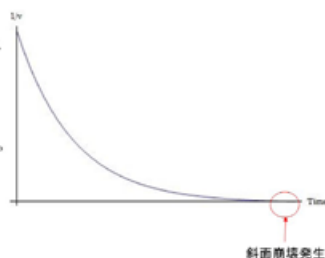
斜面モニタリングによる評価

降雨により表層崩壊の発生が予測される斜面において、斜面内の土壌水分や地下水位、そして斜面の変形を計測し、それを基に崩壊発生予測を行おうとするもの。

例：(福園, 1990)

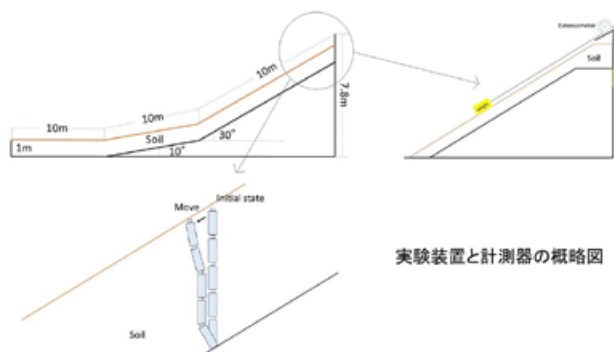
斜面崩壊は地表面変位の速度が無限に近づくときに起こる。

地表面変位の速度の逆数値がゼロに
近づくときを斜面崩壊発生時刻とみなす。



3.

防災科学技術研究所で行われている斜面崩壊実験



1.

土砂災害は人的被害や経済的損失の大きい災害の1つであるため、災害予測モデルを構成し、警報・避難等の対策を行うことが重要な課題となっている。そうした予測を行う上で統計的アプローチは解明しきれていないメカニズムを考慮に入れずに利用できる利点がある。こうしたアプローチには Ayalew and Yamagishi (2005) による素因を基にしたロジスティック回帰や川越ら (2008) による判明している物理メカニズムとロジスティック回帰を組み合わせたモデル、倉本ら (2001) によるニューラルネットワークを利用したがけ崩れ発生限界雨量線の構成などがある。

2.

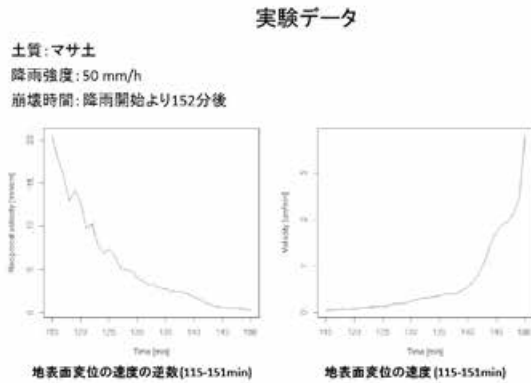
斜面での降雨による土砂災害の発生を予測する有効な手法として、斜面モニタリングがある。これは地下水位や斜面変形を計測することで斜面崩壊発生の予測を行うことを目的としている。モニタリングデータからの予測には、斜面崩壊時の地表面変位速度の逆数はゼロに近づく、という性質を用いた手法等が存在する(福園, 1990)。

そこで、地表面変位に関するモニタリング履歴から将来の地表面変位を予測することで、斜面崩壊時刻を統計的に予測する方法を本研究では考えた。

3.

本来ならば、現地斜面で得られた観測データを用いて研究を進めるべきであるが、土砂災害は突発的に発生するために実斜面での観測には困難が伴う。そこで本研究では防災科学技術研究所が所有する大型降雨実験施設内の大規模模型斜面を利用した降雨時の斜面崩壊実験のモニタリングデータを用いて研究を進めた。スライドの左上図は大規模模型斜面の概要図、右上図は地表面移動計の設置概要図、左下図は内部歪計の設置概要図である。

4.



4.

前スライドの大規模模型斜面においてマサ土を使用, 降雨入力 は 50 mm/h の一定強度で連続して散水, 総雨量約 125 mm で約 2 時間 32 分後に斜面が崩壊した, という実験データにおける地表面変位速度に関するプロットをスライドに示す (115 ~ 152 min.). この変位速度は内部歪計による測定値から地表面変位量を近似したものから得られる. 左図が速度の逆数のプロット, 右図が速度のプロットを示している. ここからも斜面崩壊時刻に近づくにつれて斜面変位速度の逆数がゼロに近づいていることが分かる.

5.

ARIMAモデル

Auto Regressive Integrated Moving Averageモデル, ARIMA(p, d, q)

$$\Delta^d X_t = m + \phi_1 \Delta^d X_{t-1} + \dots + \phi_p \Delta^d X_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}$$

X_t : 時刻 t での観測値
 $\phi_1, \dots, \phi_p, \theta_1, \dots, \theta_q$: 未知の値
 ε_t : 時刻 t での誤差

ここでは, $X_t = \log v_t$ とし, 誤差 ε_t に正規分布を仮定する。

5.

地表面変位速度の時系列モデルを構成するのにあたり, 本研究では前スライドの速度データを対数変換したのに対し, 自己回帰和分移動平均モデル (Auto Regressive Integrated Moving Average model, ARIMA model) を当てはめた。

当てはめを行う上で次数 d は $\Delta^d X_t$ が定常となるように決め, 未知パラメータは最尤法による推定, 次数 p, q は赤池情報量基準 (Akaike Information Criterion, AIC) が最大となるように選択した。

6.

モデル推定

ARIMA(p, d, q)モデルをもとに推定

$$\Delta \log v_t = 0.1245 + \varepsilon_t, \varepsilon_t \sim N(0, 0.0116), t = 116, 117, \dots$$

つまり, $v_t = v_{115} e^{0.1245(t-115) + \delta_t}, \delta_t \sim N(0, 0.0116), t = 115, 116, \dots$

残差

- Box-Ljung 検定 (独立性の検定):

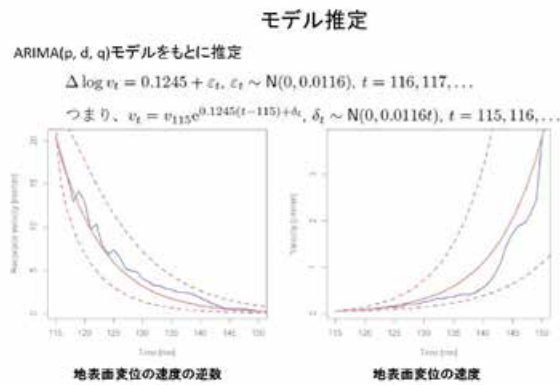
ラグ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p 値	0.8689	0.9006	0.7352	0.6767	0.7466	0.7382	0.8284	0.8901	0.8783

- Test for F 検定 (等分散性の検定): p 値 0.8042
- Jarque-Bera 検定 (正規性の検定): p 値 0.4452

6.

斜面変位速度の対数を取ったデータに対し, ARIMA (p, d, q) を当てはめた結果, $d=1$ で定常性が見られ, AIC の観点から $p=q=0$ が選択された. このモデルの残差 (実測値と推定値の差を標準化したもの) に関して, 独立性の検定では Box-Ljung 検定, 等分散性の検定では, 115 ~ 126 min. のデータ群と 141 ~ 152 min. のデータ群に対して F 検定, 正規性の検定では Jarque-Bera 検定を行った. それぞれの結果はスライドの通りであり, 残差の独立性, 等分散性, 正規性はいずれも棄却されないことがわかる。

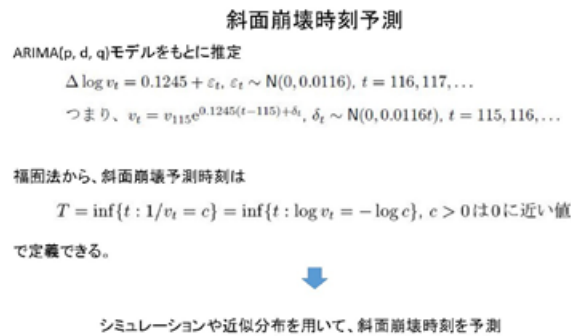
7.



7.

スライドに示されたプロットは地表面変位速度とその逆数に関するものであり、青実線は実測値、赤実線は ARIMA モデルによる推定値、赤点線による区間は 95 % 信頼区間である。

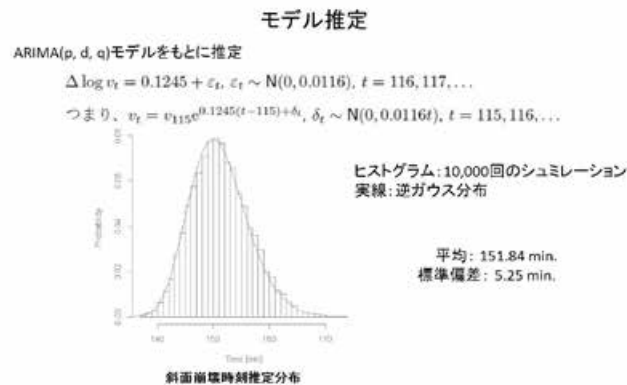
8.



8.

斜面崩壊時刻は地表面変位速度の逆数がゼロに初めて近づく時刻、つまり、x 軸への初期到達時刻と考えることができる。これを基にモンテカルロシミュレーションや逆ガウス分布を用いた近似分布により、斜面崩壊予測時刻を表す分布を構成することができる。

9.



9.

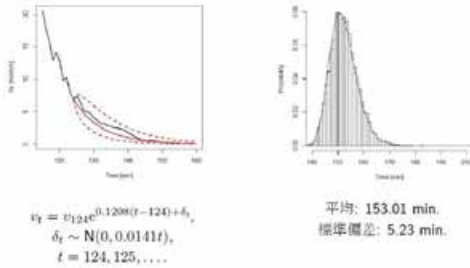
前スライドの方法を利用して得られた崩壊予測時刻分布がこのスライドに示されているプロットである。

10.

斜面崩壊時刻の予測

$\Delta \log v_t$ が ARIMA(0, 1, 0) に従うと想定。

情報が 115 ~ 124 min. 時点のものしかないとする。



10.

実際には崩壊時刻までの地表面変位速度データを全て用いて予測を行っても意味がないので、ここでは 115 ~ 124 min. の地表面変位情報しか得られないと仮定して斜面崩壊時刻の予測を行う。それらの時刻の情報を使い、速度の対数値に ARIMA (0,1,0) モデルを想定して将来の地表面変位速度を構成し、そこから斜面崩壊予測分布を導出した。結果は平均 153.01 min., 標準偏差 5.23 min. の斜面崩壊予測時刻分布が得られ、実際の崩壊時刻 152 min. を上手く表せているように見える。

11.

考察

- 斜面崩壊実験のモニタリングデータから斜面崩壊予測を行うための統計モデルの構成。
災害発生要因多くメカニズムが解明しきれていないこと → モニタリング+統計モデル
現地での災害発生時のデータの入手困難性 → 斜面崩壊実験
- 地表面変位情報からは近い将来の崩壊発生を予測することになる。
- 地下水位と地表面変位の関係 (笹原, 酒井, 2014)
降雨予測情報から地下水位の予測 → 因子を考慮に入れた時系列モデル
地下水位予測情報から地表面変位の予測
- 状態空間モデルへの拡張

11.

本研究では、モニタリングから得られる地表面変位に関する情報を基に統計モデルを構成し、そこから災害発生予測を行うための手法を考案した。斜面崩壊予測時刻は確率分布により評価され、専門家以外からも容易に危険度を察知できる。

しかし、地表面変位という情報からのみでは地表面変位が見られてからの予測しかできない上に、降雨状況の変化にも対応できない。そのため、今後のテーマとして、降雨情報からの地下水位の変化、そして地下水位の変化から地表面変位の予測を行えるようにしていきたい。また、こうしたデータが定常である確証はないため、非定常状態にも対応できるよう、状態空間モデルを用いた評価法も考えていきたいところである。

参考文献

- 1) 福園輝旗 (1990) : 平均測度の逆数による斜面崩壊発生時刻の予測－斜面崩壊発生予測に関する研究 (3)－. 防災科学技術研究所研究報告第 46 号, 45-81.
- 2) 倉本和正・鉄賀博己・東 寛和・荒川雅生・中山弘隆・古川浩平 (2001) : RBF ネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究. 土木学会論文集, Vol. 672, 117-132.
- 3) Ayalew, L., Yamagishi, H. (2005) : The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. Geomorphology, Vol. 65, 15-31.

- 4) 川越清樹・風間 聡・沢本正樹 (2008) : 数値地理情報と降雨極値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, Vol. 27, 69-83.
- 5) 植竹政樹・酒井直樹・福園輝旗 (2010) : 内部歪計による斜面崩壊発生予測法に関する研究—土砂災害消防活動時斜面監視への応用—. 防災科学技術研究所研究報告第 77 号, 49-68.
- 6) 笹原克夫・酒井直樹 (2014) : 地表面変位と地下水位のモニタリングに基づく斜面崩壊発生予測. 地盤工学ジャーナル, Vol. 9, 671-685.

要 旨

斜面崩壊の予測を行うための方法として決定論的予測手法と統計的予測手法がある. 決定論的手法では物理メカニズムを基とした予測となるが, こうした災害は事象発生メカニズムが十分に解明されているとは言い難く, 決定論的モデルを構成することが困難であることが多い. 一方, 統計的手法では観測されたデータを基とした予測となり, 詳細な事象発生メカニズムが十分に分っていなくても利用できるという利点がある.

本発表では, 地表面変位の速度に関して統計的時系列モデルを構成する. そこでは, 入手されたデータ以外の変量を誤差項とみなすことでモデルを構成できる. 導出されたモデルは確率論的モデルとなり, そのモデルを基に将来の地表面変位速度の予測とその信頼区間を構成でき, さらに, 構成された斜面変位速度予測モデルと福園の予測法を用いて, 斜面崩壊の発生予測時刻に関する確率分布を構成できる.

キーワード : ARIMA モデル, 福園の予測法, 確率分布, 斜面モニタリング, 時系列解析

土砂災害監視における衛星搭載型合成開口レーダーの利用可能性

古田 竜一*

Applicability of Space-borne Synthetic Aperture Radar for Landslides Monitoring

Ryoichi Furuta

**Research and Development Department,
Remote Sensing Technology Center of Japan
furuta_ryoichi@restec.or.jp*

Abstract

Space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) has capability to monitor landslides in all-weather condition and day-and-night time. One of the SAR application, SAR interferometry, can be measure the displacement of creep type landslides by +/- 1cm accuracy using its phase information. Author applied SAR interferometry to Japanese SAR satellite datasets and confirmed that capability to detect large scale creep type landslides in Japan and availability of factor analysis using precipitation data. However, SAR interferometric analysis cannot be applied to detection of fall type landslides, debris flow, and others. Conventional SAR image analysis technique can be detecting these kinds of landslides but its ability is influenced by polarization mode. Thus, utilization of multi polarization mode data were proposed to detect fall type landslides, debris flow, and others. Complex correlation analysis of HH and VV polarization shown high sensitivity to detect vegetation removal area and it can be applied to detect debris flow, was confirmed. And author proposed new visualization technique, Multi Polarimetric Coherence mapping (MPC), and it has successful to detect several landslides in Japan including deep-sheeted landslides in Totsukawa, Nara, Japan, that collapsed by Typhoon 12 in 2011.

Key words: Satellite, Synthetic Aperture Radar (SAR), DInSAR, Polarimetric SAR Analysis

* 一般財団法人リモート・センシング技術センター

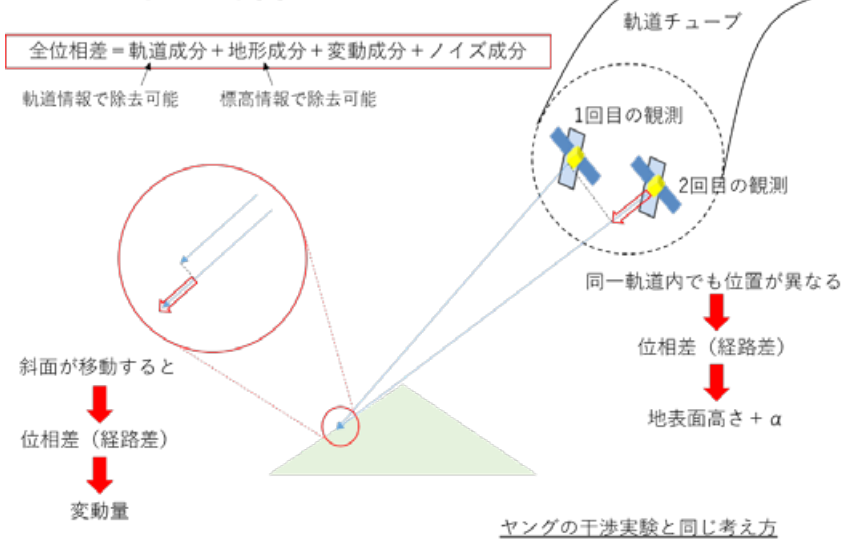
要 旨

広範に点在する土砂災害箇所を効率的・定期的に監視するために、広域性・周期性の特徴を有する人工衛星による方法を検討している。特に、降雨や被雲の影響を受けにくく、昼夜共に観測が可能である合成開口レーダー (SAR) に着目した。これまで日本は 3 機の SAR 衛星 (JERS-1/SAR, ALOS/PALSAR, ALOS-2/PALSAR-2) を運用しており、これらが取得したデータを用いて様々な解析を実施してきた。SAR の強みの 1 つは位相データによる干渉解析が可能で、差分干渉解析手法の適用により緩慢地すべりの変動抽出や計測が可能である。抽出された変動量と降雨観測データ等を組み合わせることで誘因分析等が可能になることもわかってきた。また、近年主流となってきた時系列差分干渉解析を用いると緩慢地すべりの動態が把握でき、各地すべりの挙動の特徴を把握できることがわかってきた。

一方で、崩壊型の地すべり、土砂崩壊、土石流等は差分干渉解析では抽出困難であり、総合的な土砂災害監視のためには強度画像による解析を併用する必要がある。これは、2008 年に発生したパキスタン地震の結果から明らかであり、災害時の観測において差分干渉解析と強度画像解析の併用が必要であることがわかった。しかし、強度画像における課題は、崩壊前後の後方散乱係数が観測時に用いる偏波により異なることであり、これより検出困難な崩壊地が存在する。そこで、多偏波観測された観測データの適用性を検討した。その結果、水平偏波と垂直偏波 (正確には、HH 偏波と VV 偏波) の位相 (複素) 相関解析が植生域と非植生域を明確に区別可能であることがわかった。そこで、HH - VV 偏波相関解析を崩壊地検出に適用した結果、幅 10m 程度の土石流箇所が検出できることがわかった。また、解析結果から崩壊地の判読を容易とするため、Multi Polarimetric Coherence mapping (MPC) 手法を提案した。MPC 手法では、山林は黄色系、崩壊地は青色系で表現され、崩壊箇所の判読が容易であり、既に、国内数か所の崩壊地抽出に成功した。

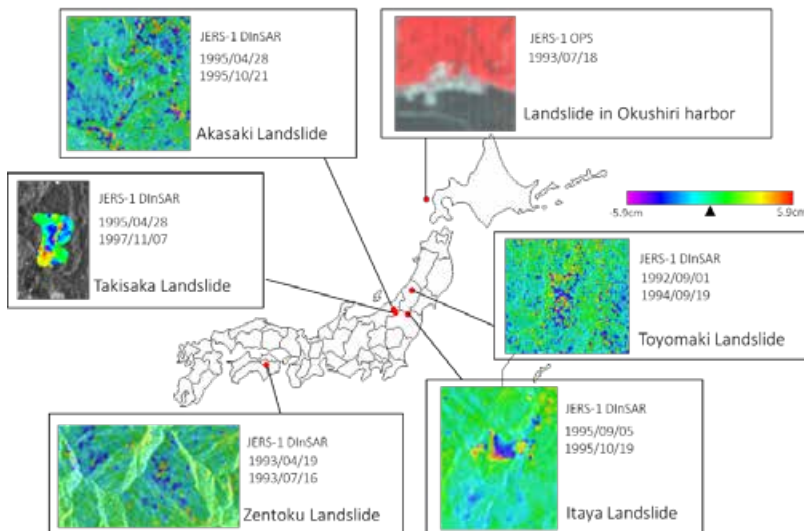
キーワード：人工衛星，合成開口レーダー，差分干渉解析，強度画像解析，偏波相関解析

差分干渉解析とは



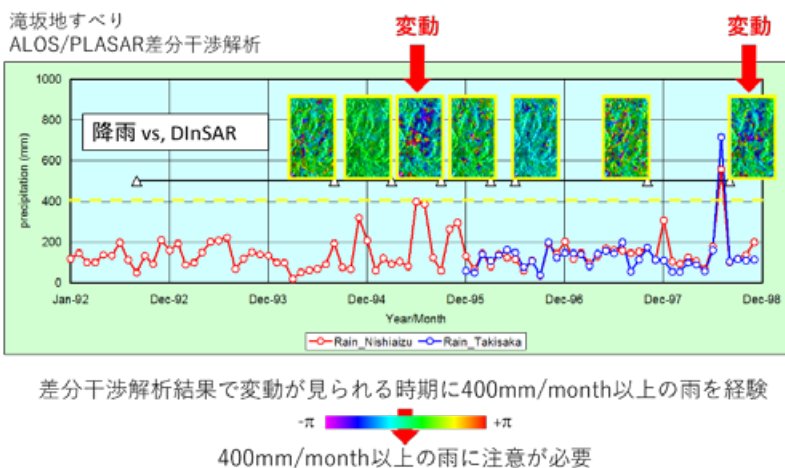
差分干渉解析とは、同じ衛星軌道から同じ観測条件で取得した2つ以上の合成開口レーダーデータを用いる解析手法で、目には見えない地面の移動(地すべりや地盤沈下)を抽出、計測することが可能である。計測精度は±1 cm程度である。合成開口レーダーは衛星から地上にマイクロ波を発射し、地上からの反射波を受信している。地すべりが発生して衛星から地上までの距離に差異が生じると、衛星と地上を往復するに必要なマイクロ波の波数に差異が生じる。これが位相差(経路差)であり、この経路差から僅かな軌道位置の違いによる成分と地形による成分を除去することで変動量が計測できる。

日本の地すべりへの適用事例



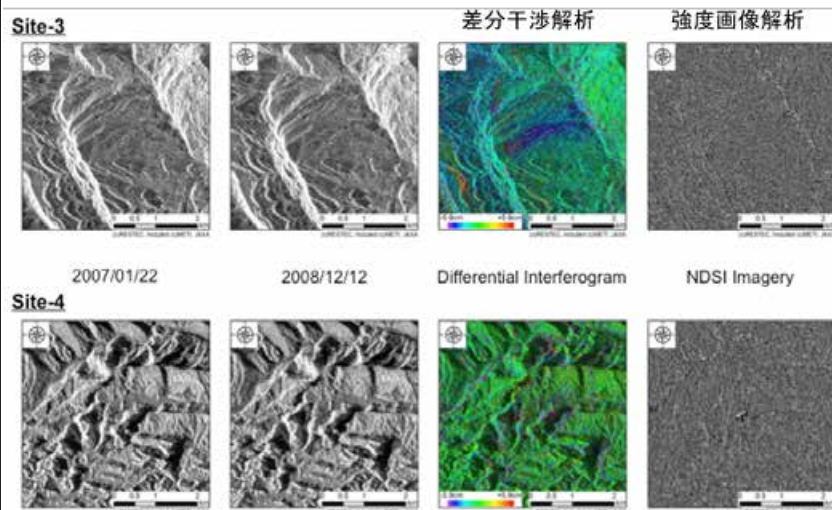
これまで、差分干渉解析手法を大規模な日本の地すべりに適用し、変動を抽出することに成功している。明瞭に変動を抽出できるものもあるが、ノイズの塊に見えるものもあり、地すべりのシグナルを捉えるためには、事例の蓄積が必要である。左図においては、緑色は無変動を示し、青色や黄色、赤色に色変化している箇所、それが連続的である場合、地すべりと判断できる。

誘因分析への適用可能性



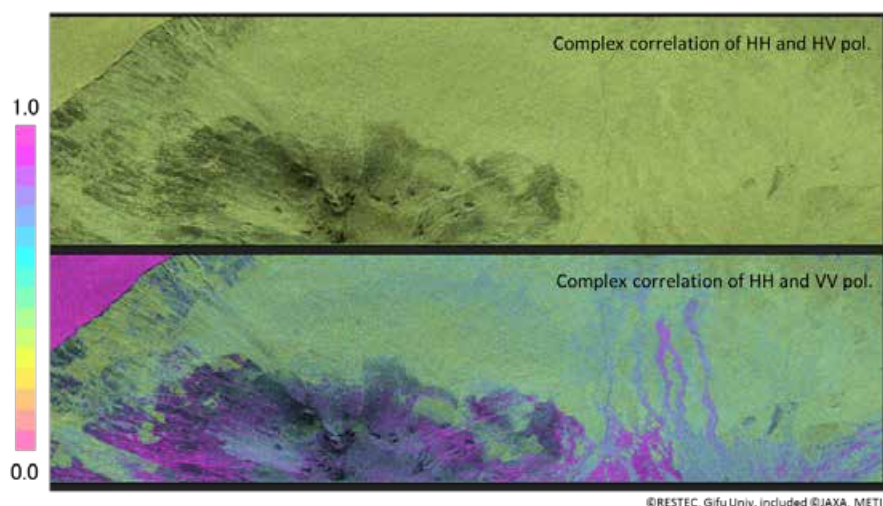
左図は滝坂地すべりを対象に差分干渉解析を実施し、滝坂地すべり周辺及び地すべり地内に設置された降雨観測所のデータを比較した結果である。差分干渉解析の結果、1994年～1995年の間と1997年～1998年の間に地すべり性的変動が見られた。その時の降雨量は月間400 mm以上で、変動が生じていない期間はそれ以下になっている。この結果においては、滝坂地すべりは月間400 mm以上の降雨で滑動する危険性があることを示唆している。これより、差分干渉解析が要因分析の一情報として利用可能性があることがわかった。

差分干渉解析だけで十分か？



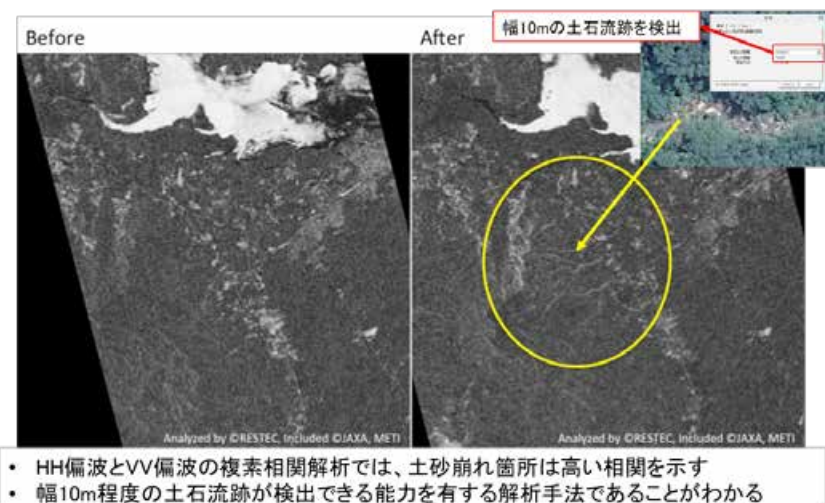
一方で、差分干渉解析は崩壊型の地すべり、土砂崩壊、土石流等は抽出困難である。総合的な土砂災害監視のためには強度画像による解析を併用する必要で、これは、2008 年に発生したパキスタン地震の結果から明らかであった。左図の Site-3 では差分干渉解析結果では明瞭な地すべり変動が抽出されているが、強度画像解析では何も抽出されていない。一方、Site-4 ではその逆になっており、災害時の観測において差分干渉解析と強度画像解析の併用が必要であることがわかった。

抽出に最適な偏波は？



しかし、強度画像解析にも課題がある。これは、崩壊前後の後方散乱係数が観測時に用いる偏波により異なることであり、用いる偏波により検出困難な崩壊地が存在する。そこで、多偏波観測された観測データの適用を検討した。その結果、水平偏波 (HH 偏波) と垂直偏波 (VV 偏波) の複素相関解析が植生域と非植生域を明確に区別可能であることがわかった。左図の下側がその結果であり、裸地が紫色に浮かび上がっている。

ブラジルの土砂崩れへの適用例

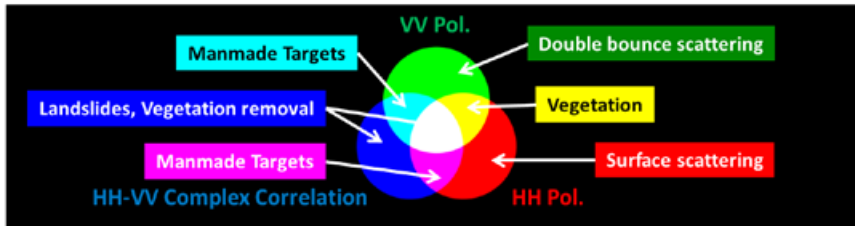


HH 偏波と VV 偏波の複素相関解析手法を 2011 年にブラジル・パラナ州で発生した土砂崩れ災害に適用した。その結果、図中黄色丸印内に白く筋状に HH 偏波と VV 偏波の複素相関が高い箇所が抽出された。これらは土石流跡であり、計測の結果、幅 10 m 程度の土石流を検出できる能力があることがわかった。

- HH偏波とVV偏波の複素相関解析では、土砂崩れ箇所は高い相関を示す
- 幅10m程度の土石流跡が検出できる能力を有する解析手法であることがわかる

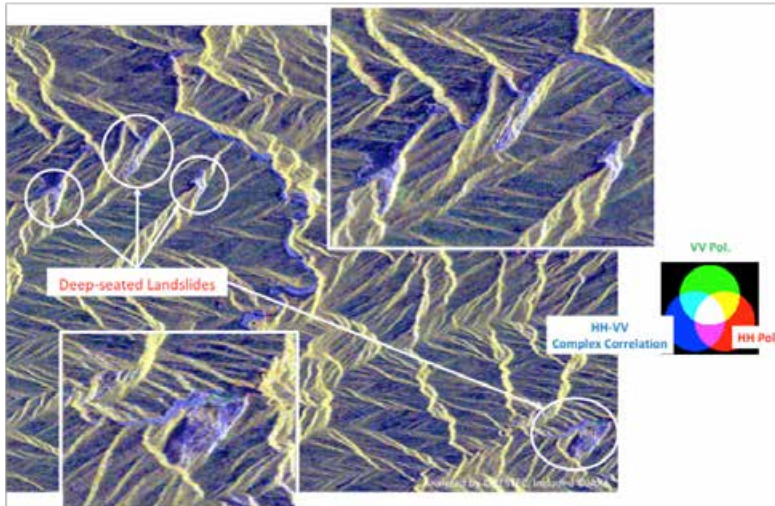
新しい表現手法（MPC）の提案

- 土砂崩壊箇所等の裸地の判読性向上のために提案
- HH偏波とVV偏波の偏波相関（複素相関）解析結果とそれぞれの強度画像をカラー合成する手法
- 土砂崩壊箇所等の裸地は青色、植生箇所は黄色に表示される
- 各情報の組み合わせから土砂崩壊箇所等の裸地自動抽出への応用も検討中



古田は、HH 偏波と VV 偏波による複素相関解析結果をより見やすく、判読し易くするため、解析結果の新しい表現手法を提案した。新しい表現手法は、Multi Polarimetric Coherence mapping (MPC) という手法で、土砂崩壊箇所等の裸地が青色で表現される。作成方法は簡単で、HH 偏波の強度画像を赤色、VV 偏波の強度画像を緑色、HH 偏波と VV 偏波の複素相関解析結果を青色に割当ててカラー合成すればよい。

平成23年台風12号被害への適用例



左図は 2011 年の台風 12 号による奈良県十津川村での深層崩壊箇所を HH 偏波と VV 偏波の複素相関解析で抽出し、MPC 手法で表示したものである。図からわかる通り、深層崩壊箇所が青色で浮かび上がっており、土砂崩壊箇所の判読が容易であることがわかる。この手法を国内数か所の土砂災害に適用した結果、観測方向に依存するが、土砂崩壊箇所の判読が容易になることが確認できた。今後、本手法の普及をはかりたいと考えている。

まとめ

- 合成開口レーダーにでき、光学センサにできないこと
 - 緩慢地すべり変動を cm 精度で検出できる
 - 地すべり変動と土砂崩壊を同一データで同時に解析できる
 - SAR 解析手法の併用、SAR/光学の併用が効果的
- 新技術の可能性
 - 時系列差分干渉解析
 - 地すべり監視への適用においては、恒久的散乱点の確保が大きな課題
 - 恒久的散乱点が存在すれば、地すべり動態の把握が可能
 - 要因分析、対策工の検討・検証に可能性あり
 - 偏波相関解析
 - 提案手法（MPC）により判読が容易になった
 - 新旧崩壊地、伐採地や掘削地との判別が課題

合成開口レーダーは、光学センサには不可能な緩慢地すべりの計測が可能で、変動を cm 精度で検出可能である。また、地すべり変動と土砂崩壊を同一データで同時に解析できるメリットがある。降雨時も同様の計測ができるメリットがあり、連続観測や緊急時の観測に効果があると考えられる。また、時系列解析は地すべり動態観測の可能性があり、予察に利用できる可能性がある。また、判読を容易とする MPC 手法により、より身近な技術となることを期待している。まだ、解決すべき課題も多いが、土砂災害観測のためのツールとして合成開口レーダーは大いに期待できると考えられる。

斜面表層の傾斜変位に基づく崩壊の早期警報とその展開

内村太郎*・王 林**

The Early Warning System of Slope Failure based on Monitoring Surface Inclination Changes and its deployment

Uchimura Taro* and Wang Lin**

**The University of Tokyo, Japan*

uchimura@civil.t.u-tokyo.ac.jp

***Chuo Kaihatsu Corporation, Japan*

wang@ckcnet.co.jp

Abstract

A low-cost and simple method of monitoring rainfall-induced landslides is proposed, with the intention of developing an early-warning system. Surface tilt angles of a slope are monitored using this method, which incorporates a Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) tilt sensor and a volumetric water content sensor. In several case studies, including a slope failure test conducted on a natural slope using artificial heavy rainfall, the system detected distinct tilt behavior in the slope in pre-failure stages. Based on these behaviors and a conservative approach, it is proposed that a precaution for slope failure be issued at a tilting rate of $0.01^{\circ}/h$, and warning of slope failure issued at a rate of $0.1^{\circ}/h$. The development of this system can occur at a significantly reduced cost (approximately one-third) compared with current and comparable monitoring methods. Given the cost reduction, slopes can be monitored at many points, resulting in detailed observation of slope behaviors, but the potentially large number of monitoring points for each slope does induce a financial restriction. Therefore, the selection of sensor positions needs to be carefully considered for an effective early warning system.

Key words: Slope failure, Early warning, Monitoring, Tilt sensors, Wireless network

* 東京大学

** 中央開発株式会社

講演要旨：

要 旨

MEMS を利用した安価な傾斜角センサーを用いて簡易に斜面崩壊を監視するシステムを開発し、国内および海外の複数のサイトに適用して、斜面崩壊の早期警報に関する研究を行ってきた。

図1のように、斜面表層に挿した鋼棒の微小な傾斜変位を常時計測し、崩壊前に継続的に生じる変形を検知して、早期警報を行う。対象とする斜面上で、どの部分が最初に変状を示すかは、地形や地質、雨の降り方など、多くの要因に影響される。これを事前に予測して、数の限られた機器を適切に配置することは非常に難しい。そこで、最近では、より安価かつ小型軽量で、運用を省力化できる機器(孫機)を開発している。これを用いた多点計測を行うことで、変状の前兆を捕捉できる確実性が向上する。

これまでに国内外の多数の現場で計測を行い、その中で斜面に変状のあったケースについて、傾斜角速度の変化速度と、崩壊までの残余時間(崩壊しなかった場合が安定までの継続時間)をまとめると、図2のようになった。特に、継続的に0.01-0.1度/時の傾斜速度が観測された時には、斜面に亀裂など何らかの変状が見つかり、また傾斜速度が0.1度/時を超えると、1日以内に崩壊するケースが多い。これらを警報の目安とすることを提案している。

キーワード：斜面崩壊，モニタリング，早期警報，傾斜センサー，警報基準

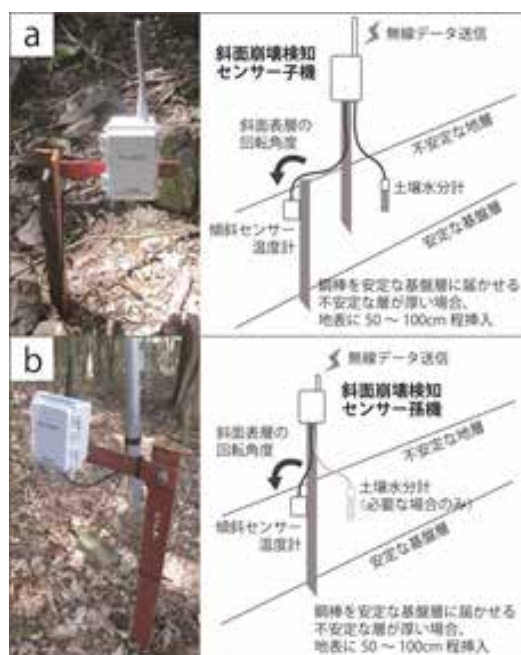


図1 斜面表層の傾斜センサー(子機と孫機)

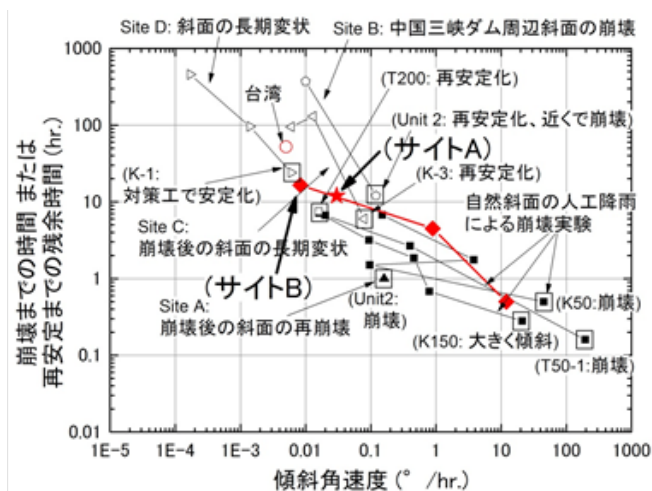


図2 崩壊までの残余時間と傾斜角速度との関係

Page 2

- ◆ 潜在箇所を含め、全国で52万箇所以上⁽¹⁾
- ◆ 斜面崩壊の90%以上は、浅層崩壊 → 主たる研究の対象
- ◆ 想定外降雨など異常気象による大規模崩壊も毎年のように発生

- ◆ 全ての斜面にハード対策の実施は、現実的に不可能
- ◆ モニタリングによるソフト対策が重要かつ現実的
 - ・ 雨量だけでは充分でない → 斜面表層部の変位、土壌水分
 - ・ 低価格で簡単に現場で設置可能な機器 → **省電力、ワイヤレス**
→ **MEMS**を用いた斜面傾斜センサーの開発&改良
 - ・ 斜面傾斜センサーを用いた場合の**警報基準が不明**
→ 実務で用いられている伸縮計や傾斜計との計測値の比較
→ 2008年より国内外でモニタリング着手
→ 早期警報などに用いる閾値の検討（現在データを集積中）

斜面崩壊感知センサー:『KANTARO』

[illegible]

– 41 –

どこで機器を設置する？

Page 5

●多点計測の適用例（想定）

伊豆大島2013.10斜面災害 2次災害の監視(2014.3～)

2014年度の実績：

崩落した範囲は広大で、複数の崩落崖があるが、予算の制約で傾斜計は10台だけ。

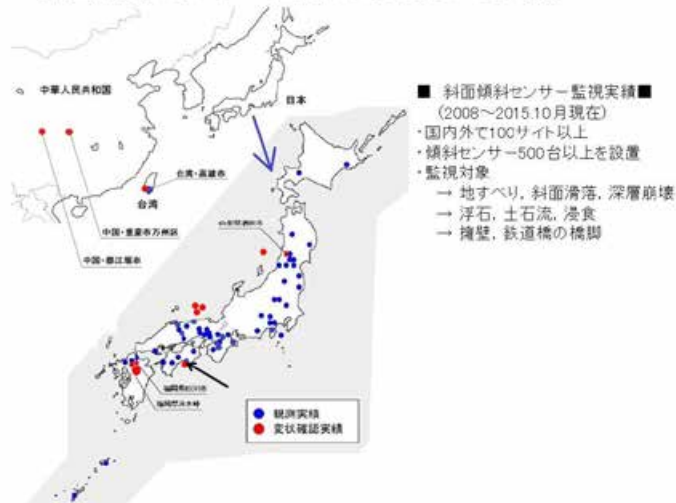
どの崩落崖が、次に崩れるか、一つの崖の中でも、どの部分が最初に動き出すが、技術者のセンスに頼って、選ばざるを得ない。

← 詳細な調査や、数値計算をしても、困難。時間もかかる。



斜面傾斜センサー監視の対象および実績

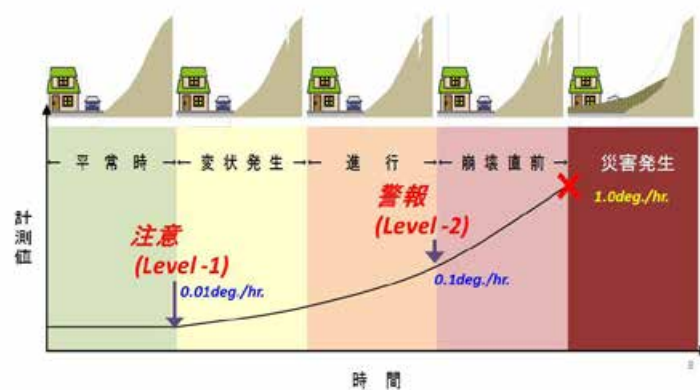
Page 7



土砂災害早期予報システム

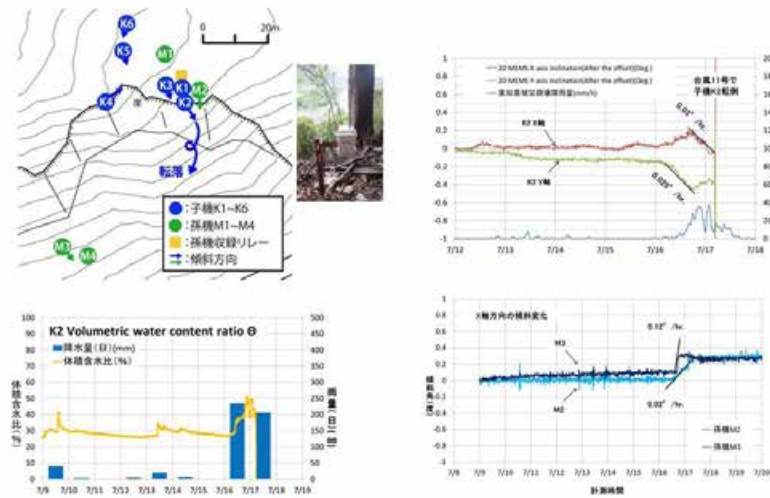
Page 8

A low-cost sensor and simple monitoring method.



大規模被災斜面でリアルタイムモニタリング(2次災害を防止) (2015/7 高知)

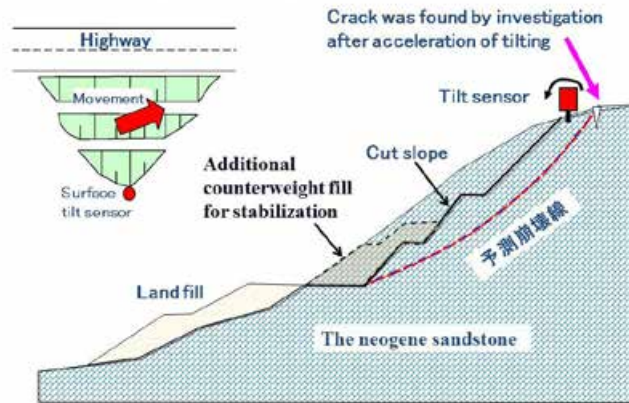
Page 10



山形県酒田高速道路の斜面切土工事

Page 21

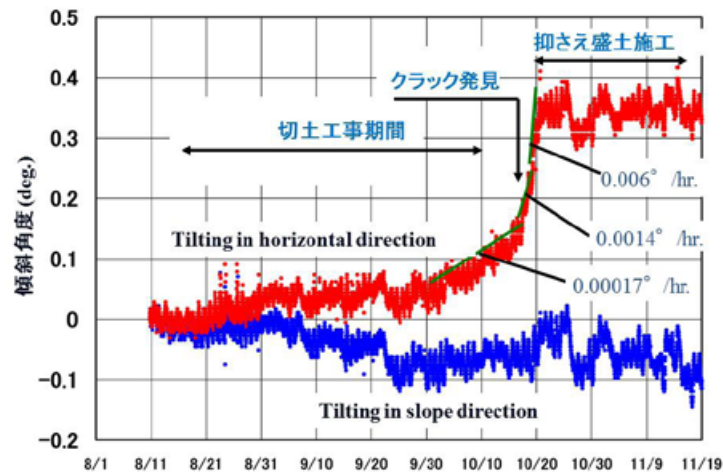
- The prevention of slope failure among national highway cutting slope construction in Tohoku district.



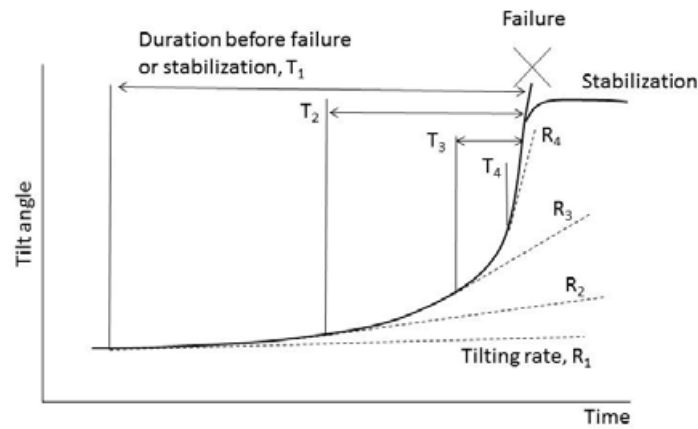
斜面切土工事による長期変形事例

斜面切土工事による長期変形事例.

Page 22



Summary of the tilting rate and duration observed on slope surface



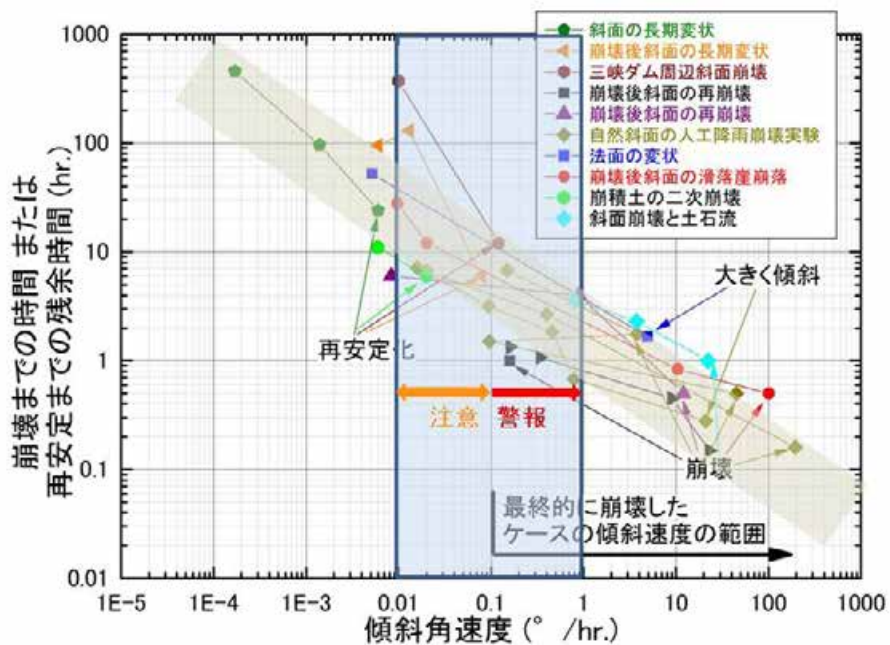
斜面表層部の傾斜角速度と継続時間の定義

25

計測速度と継続時間の定義

崩壊までの残余時間と傾斜角速度との関係

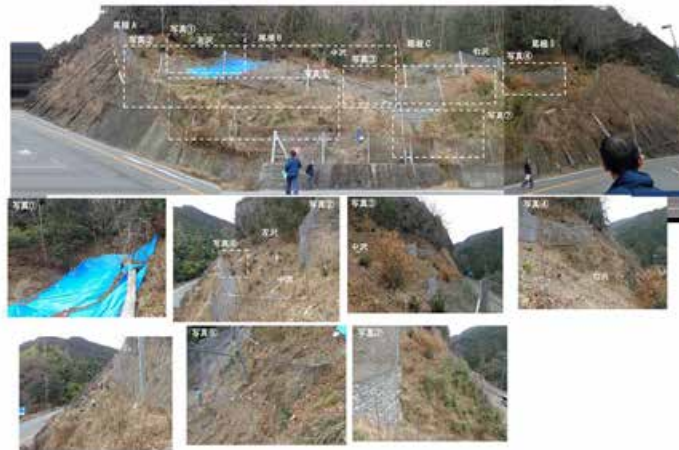
11

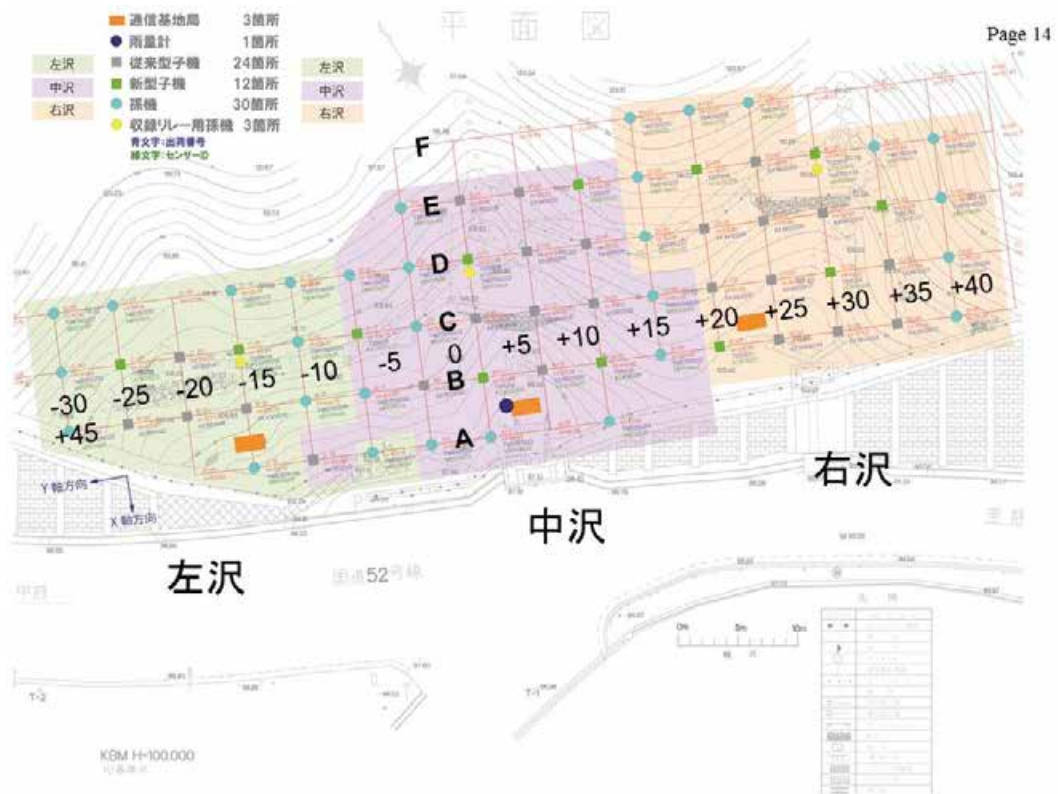


S I P（戦略的イノベーション創造プログラム）

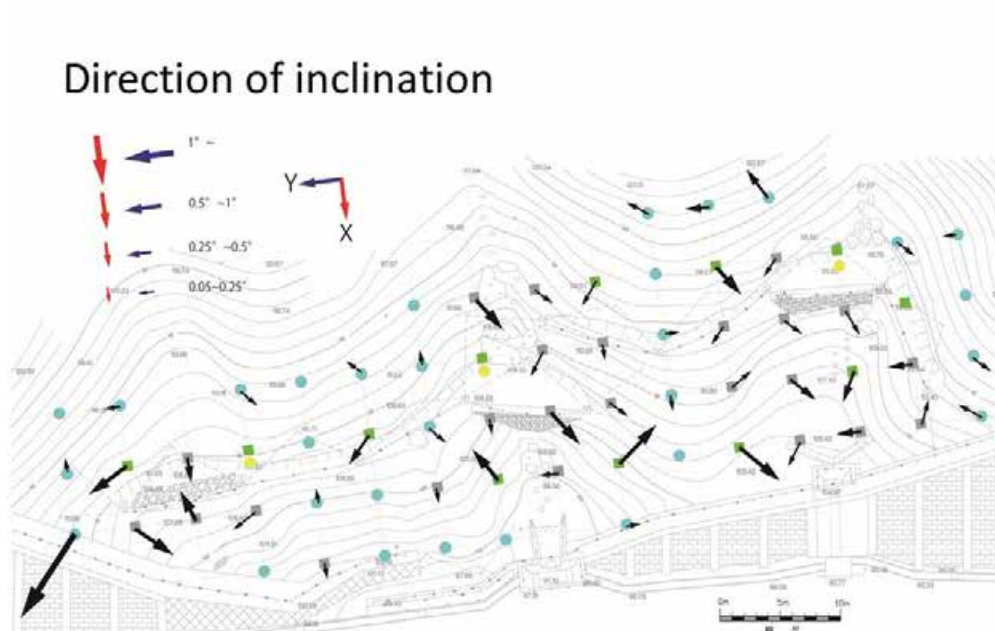
- ・「多点傾斜変位と土壌水分の常時監視による斜面崩壊早期警報システム」
- ・【概要】：個別の斜面の変状を効率よく的確に把握するため、斜面の表層に挿した鋼棒の傾斜角度を傾斜センサーを活用して多点計測することにより、斜面崩壊前の予兆現象を把握するモニタリングシステムの実証を行う。
- ・目的：
 - ①早期警報を行うモニタリングシステムの構築
斜面変動（傾斜角）と土壌水分の測定→斜面崩壊の前兆を捕捉
 - ②多点計測の低コスト化・簡略化
変状が起こる場所の不確実性がある程度カバー
→予兆の見逃しを防止
変状範囲や進行状況を面的（空間的）・時間的に把握

多点観測：山梨県万沢 国道52号





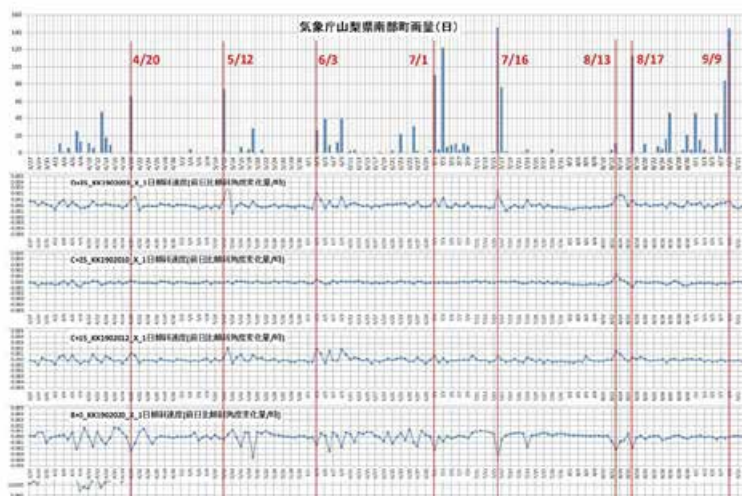
計測センサーの多点配置概要



2015 年 4 月～9 月の間における斜面の傾斜状況

降雨時における変位量

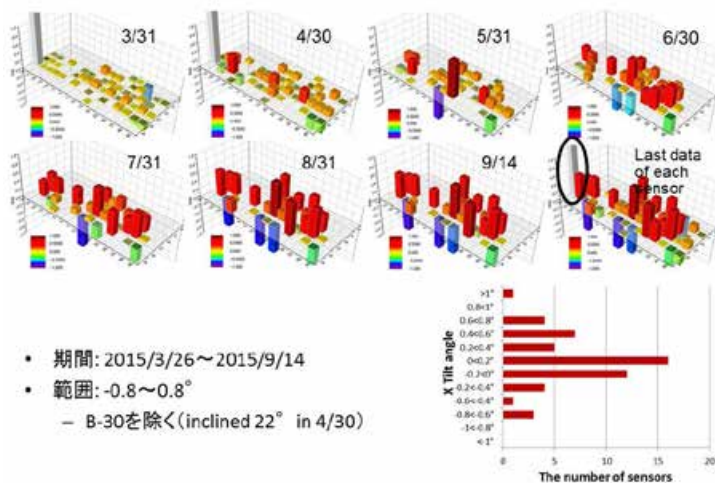
Page 15



2015 年 4 月～9 月の間における降雨量と傾斜速度の例

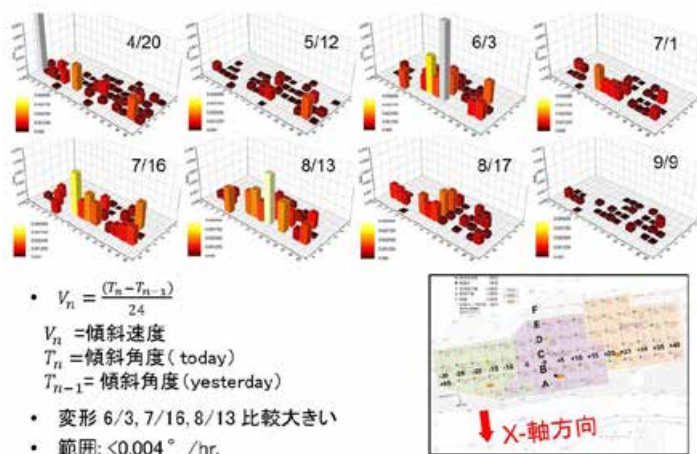
X軸方向(＋は斜面へ傾斜)の累積傾斜角度

Page 16

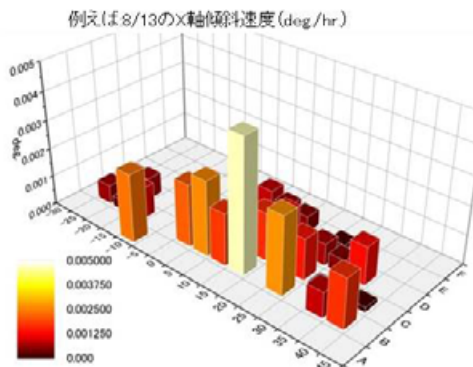


降雨時におけるX軸の傾斜速度(deg./hr.)

Page 17



多点計測における斜面警報閾値の検討



- 単一センサーの場合：
 - ┌ 局所の動き
 - └ 動物
 - └ センサー誤作動
- ≠ 斜面崩壊 → 誤報の可能性が高い
- 斜面の動きは、各センサーの平均値を用いる。
- 注意：これからの現場認証が必要。

$$V_{\text{alarm}} = \sum_{n=1}^N \left(\partial_n * |V_n| * \frac{A_n}{A_0} \right)$$

V_n = Deg./hr. (各センサーの傾斜角度速度, If > 1.0 $V_n = 1.0$)

A_n = 設置センサーの周囲面積 (Area of installation for individual sensor)

A_0 = 斜面全体の面積 (Total area of installation for array layout design of sensors)

∂_n = 設置センサーの周囲の地質・土質係数 (考慮しない場合は = 1) 、

Coefficient to be decided by the geological and soil conditions of installation point

まとめ

- ・ 安価・設置簡単な斜面モニタリング方法は、多くの実斜面の運営で有効であることは証明されており、推薦すべき。
- ・ 注意喚起の閾値： 0.01° /hr . (Suggested)
- ・ 早期警報の閾値： 0.1° /hr. (Suggested)
- ・ 今までの結果と「Know-how」を世界中の斜面防災研究者・実務者と共有して行きたい。

土中水分量による斜面安定解析手法の検討

笠原 梓司*

Study of Slope Stability Analysis Using Soil Moisture Sensor

Shinji Kasahara

* Fire and Disaster Prevention Solutions Division,
NEC Corporation, Japan
s-kasahara@hy.jp.nec.com

Abstract

Slope stability analysis is used as one of a slope failure risk evaluation method. Ordinary many people use this method with some fixed parameters in this analysis formula, because there is difficulty in measuring those parameters in real time. However, those parameters are to be known as variables according to the soil moisture percentage, and slope failure often occurred with increase of soil moisture caused by heavy rain. In this draft, we propose the highly accurate stability evaluation method based on the slope stability analysis formula, using parameters calculated by the sensor data with learned model between each parameter and the sensor data. And we report the evaluation result of our new method in some slope failure experiments.

Key words: Slope stability analysis, Slope failure, Safety factor, Soil moisture

1. はじめに

斜面の安全性評価の一手段として斜面安定解析手法が使われている。この手法では直接計測することが困難なパラメータが存在するため、一部のパラメータを固定し計測可能なパラメータを変数として安全性を評価する方法が一般的である。しかし、斜面崩壊の多くは降雨を起因とした土中水分量の増加に伴って発生しており、固定値として扱われている各パラメータも土中水分量に応じて変化するケースがあることがわかっている。本稿では、土中水分量によって各パラメータを算出するモデルを事前に学習し、対象斜面では土中水分量を計測することで、斜面安定解析式のパラメータを間接的に算出し、斜面の安全性を評価する手法を提案する。併せて、2種類の土種を用いて評価した結果を報告する。

2. 斜面安定解析式

重力により土塊を斜面傾斜方向へ動かそうとする力(滑動力)と、その力に抵抗する力(抵抗力)のバランスから斜面の安全性を評価する手段として、斜面安定解析手法があり、その1つとして修正フェレニウス法による斜面安定解析式(式1)がある。

$$F_s = \frac{\sum \{c \cdot l + (W - u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi\}}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

この斜面安定解析式は土塊重量 W 、間隙水圧 u 、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ の変数とその他の定数で構成され、斜面の安全率 F_s を求めるものである。この安全率が1を下回るとき、滑動力が抵抗力を上回ったとして斜面が崩壊するという、斜面崩壊発生の指標となるものである。

* 日本電気株式会社 消防・防災ソリューション事業部

3. 斜面安定解析式のパラメータと土中水分量の関係

式 1 を構成する変動パラメータである土塊重量、間隙水圧は斜面を構成する土の含水比に従い変動する。また、粘着力、内部摩擦角については土の強度が最大となる最適含水比よりも含水比が大きい場合、含水比の増加に対し、減少するケースがあることがわかっている。この土中の含水比は土中水分計で計測することが可能である。以上から、含水比に対する各パラメータの変動を調査した。山砂を用いて得られた結果の一例を図 1、図 2 に示す。土中水分量の増加に伴い土塊密度すなわち単位体積当たりの重量、間隙水圧は増加し、内部摩擦角は減少する。全てのパラメータが土中水分量に対し変動する結果となった。なお土塊密度、間隙水圧は漏水のない土槽にて計測し、間隙水圧計は土中水分量よりも 10 cm 低い位置で計測している。同一の深さでの計測とみなす際には 10 cm (=1000 Pa) 分の負圧を考慮する必要がある。

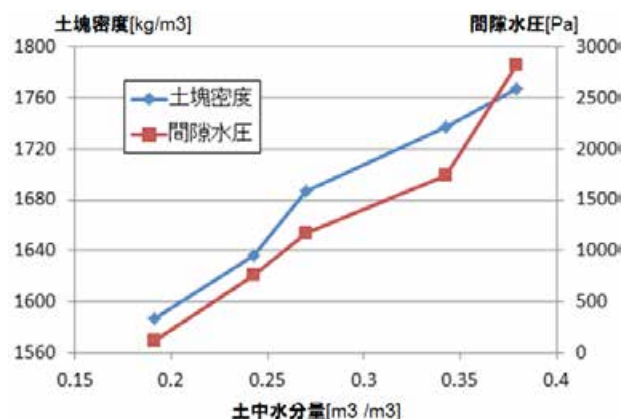


図 1 土中水分量と土塊密度、間隙水圧の関係

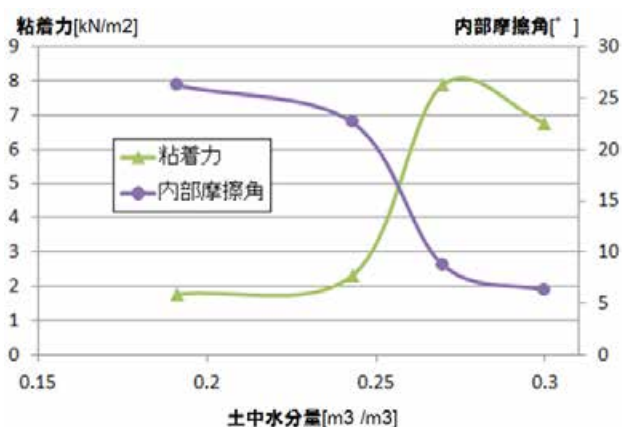


図 2 土中水分量と粘着力、内部摩擦角の関係

4. 土中水分計による斜面監視方法

土中水分量に対し斜面安定解析式中のパラメータは上記の通り変動するため、土中水分計の値から各パラメータを推算し、斜面の安定性を評価する手法を考案した。この手法は大きく以下の 2 つのステップで構成される。

4.1 ステップ 1

監視対象斜面と同一種類の土を用いて、斜面安定解析式に必要な変動パラメータと監視に用いるセンサデータを同条件で計測し、両者の間で成立するモデル式を作成する。

具体的には監視斜面と同一の土を、監視斜面と同様の条件で土中水分計、間隙水圧計、土塊重量の値を計測する。そして、複数パターンの加水量（土の含水比）における土中水分量、土塊重量、間隙水圧のデータ群を取得し、土塊重量、間隙水圧を含水比と同様に变化する土中水分量の関数としてモデル化する。さらに、間隙水圧等のデータを取得した際の含水比に設定した土塊の含水比における、粘着力、内部摩擦角のデータ群を取得し、同様に含水比が共通する土中水分量で、粘着力、内部摩擦角をモデル化する。

4.2 ステップ 2

監視対象斜面に土中水分計を埋設し、計測した土中水分量からステップ 1 で作成したモデル式を用いて、図 3 に示すように作用する斜面安定解析式の変動パラメータを算出する。さらに、算出した各パラメータを式 (1) に代入することで、安全率を算出する。このように、斜面安定解析式の各パラメータは直接計測せずに、計測された土中水分量から、間接的に安全率を算出し、定量的に斜面の安全性を評価する。

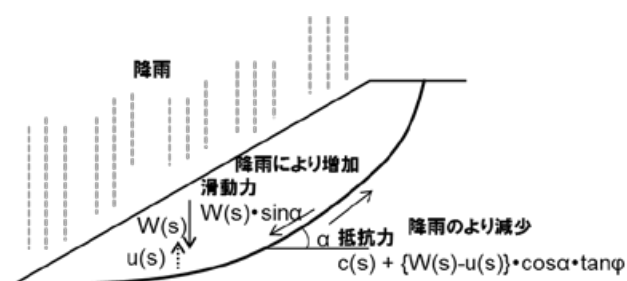


図 3 斜面における各パラメータの影響

5. 評価方法

評価実験に用いた実験設備の概略を図4に示す。実験では土砂で斜面を形成し、土中に土中水分計を埋設して、上空からの連続降雨過程における土中水分量を計測し、その変化を観察した。斜面の表層には、締固め度85%のまさど及び山砂を用い、斜面角度が30°と45°の2パターンにて40 mm/hの人工降雨を与えて崩壊させた。得られたデータから安全率の推移及び、本評価手法による安全率が1以下になる時刻と、実際の崩壊が起きた時刻の差異を確認した。ここで、土中水分計を斜面に6個設置し、計測を実施した。

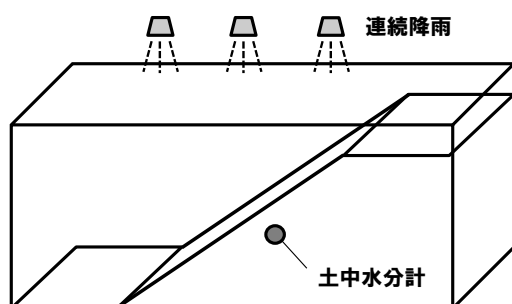


図4 実験設備の概略

6. 評価結果と考察

表1に実験毎の条件と評価結果を示す。まさどを用いて30°の斜面を形成して実施した実験では実験開始から8時間程度降雨を継続したが、崩壊しなかった。この実験を翌日再開したところ、開始2時間弱で崩壊した。対して山砂では降雨開始から8時間程度で崩壊した。また、まさどの45°斜面では実験開始から1時間強で安全率が1を下回り、2時間強で崩壊した。山砂でも2時間20分程度で安全率が1を下回り、その後20分ほどで崩壊した。

表1 実験条件と評価結果

No.	土種	傾斜	崩壊時間	検知誤差
1	まさど	30°	崩壊せず	未評価※
2	山砂	30°	約8時間	約40分
3	まさど	45°	約2時間	約60分
4	山砂	45°	約3時間	約20分

※時間内に崩壊しなかったため

図5に、斜面角度30°の条件でまさどを用いて実施した実験No1と、山砂を用いて実施した実験No.2で得られた土中水分量と安全率の推移を示す。実験開始時、まさどの土中水分量の平均値は約0.08で安全率は約2.62だった。実験時間の経過とともに土中水分量は増加し、安全率は減少したが、8時間以上継続しても崩壊しなかった。安全率も1を下回らず、最後の計測時の安全率は1.05だった。このため、崩壊はしなかったものの、安全率が1を下回らないため、崩壊も起こらないというあるべき結果が得られた。しかし、翌日降雨を再開したところ、2時間程度で崩壊しており、斜面は非常に危険な状態になっていたことが考えられる。対して山砂の場合は、実験開始時、土中水分量が約0.11で安全率が約5.21だった。時間の経過とともに土中水分量は増加し、安全率は減少していき、開始から7時間20分程で1を下回った。その後40分経たずに斜面が崩壊した。

加えて、図6に斜面角度45°の条件で実施した実験No.3と実験No.4で得られた安全率の推移を示す。実験開始時、まさどの土中水分量の平均値は約0.08で安全率は約1.52だった。実験時間の経過とともに安全率は減少し、実験開始から1時間15分程度で土中水分量が0.17のとき1を下回り、その後1時間程度で崩壊した。対して山砂は実験開始時、土中水分量が約0.19、安全率が約2.50で、経過時間とともに安全率が下がっていき、開始から約2時間20分で土中水分量が0.33のとき1を下回った。その後約20分で斜面が崩壊した。

全ての実験で、降雨に伴い安全率が下がっていく傾向が得られた。また、30°でも45°でも開始時からまさどの方が、山砂に対し安全率が小さくなっている。値の記載を省略したが、実験No.1とNo.2では実験開始時の土中水分量はNo.2の山砂の方が大きく、実験No.3とNo.4でも実験開始時の土中水分量はNo.4の山砂の方が大きかった。水分量が大いにも関わらず、安全率は山砂の方が大きくなる結果となったが、この違いはステップ1で作成したモデルに起因しており、主に土塊重量、粘着力が山砂の方が大きく、これらのパラメータが安全率に影響したためである。

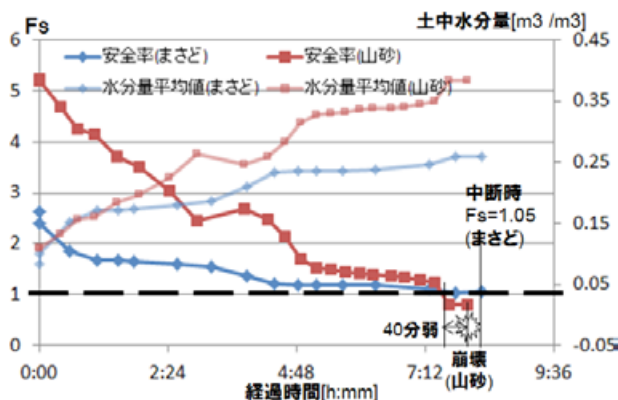


図5 安全率の推移 (実験 No.1, 2)

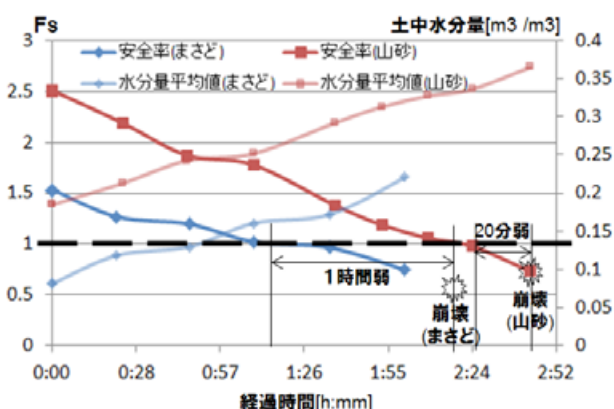


図6 安全率の推移 (実験 No.1, 2)

7. まとめ

本稿では、修正フェレニウス法による斜面安定解析に必要なパラメータを、対象斜面で計測した水分量から推定することで斜面の安全度を評価する手法を提案し、評価結果について述べた。30°斜面ではまさどの方は崩壊には至らなかったが、本実験を含めた全実験で想定通り安全率が下がっていく傾向が得られ、過去の実験含め、検知誤差が最大でも約1時間で崩壊を検知できる結果が得られた。加えて、同一降雨条件下においては山砂と比較し、まさどの方が安全率が小さくなることがわかった。今後は、誤差の原因の究明と降水量と土中水分量の関係から、未来の安全率を予測する手法の検討に取り組む予定である。

謝辞

本研究の発表機会をくださった防災科学研究所酒井直樹主任研究員、発表の手続きにてご対応くださった飯田智之研究員に感謝申し上げます。また、本研究を実施するにあたり、実験施設を提供くだ

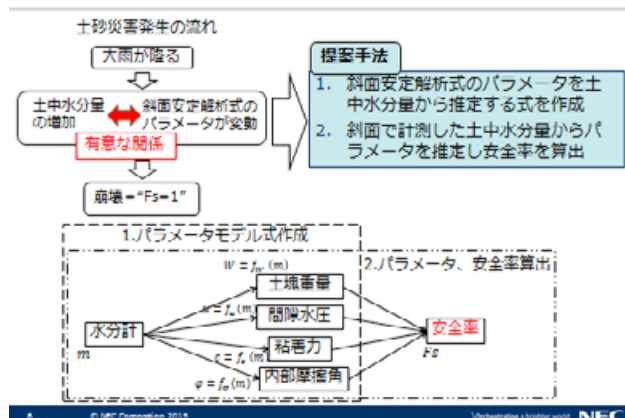
さった土木研究所様、並びに実験にて多大なご支援、ご助言をくださった東洋計測リサーチ様にこの場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 古賀博久 (2013) : 豪雨時の斜面表層領域における雨水流出浸透特性に関する研究. 京都大学都市社会工学専攻, 修士論文.
- 2) 西原晃・柴田徹 (2001) : 高含水比における年度のせん断特性, 福山大学工学部紀要, 25.
- 3) 藤澤大悟・大島昭彦・高田直俊・住武人 (1998) : まさ土の定圧一面せん断試験における含水比の影響. 土木学会第53回年次学術講演会, III-A34, 66-67.
- 4) 三浦哲彦・村田秀一・原田敬 (1983) : 含水比変動に伴う破砕性土のせん断特性変化. 土木学会論文報告集, 336, 105-112.

抜粋スライド

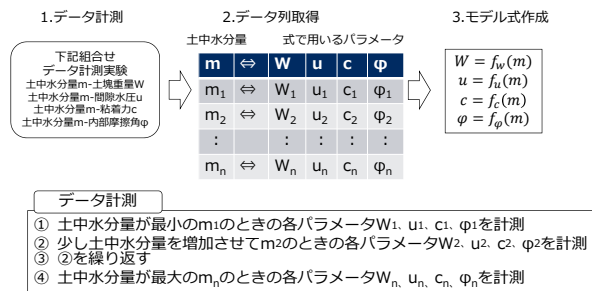
提案手法 概要



大雨が降る際に土砂災害のリスクが高くなる。これは降雨により、土中水分量が増加して、斜面の状態が変化するためである。見かけでの変化は認識しがたいものの、斜面の安全性を安全率で表現する斜面安定解析式のパラメータも土中水分量に応じて変化することが想定できる。そこで、2つのステップで構成される手法を考案した。ステップ1として土中水分量によって各パラメータを算出するモデル式を事前に学習し、ステップ2では対象斜面にて土中水分量を計測することで、修正フェレニウス法による斜面安定解析式のパラメータを間接的に算出し、斜面の安全率を算出する。

ステップ1 斜面安定解析式におけるパラメータのモデル化

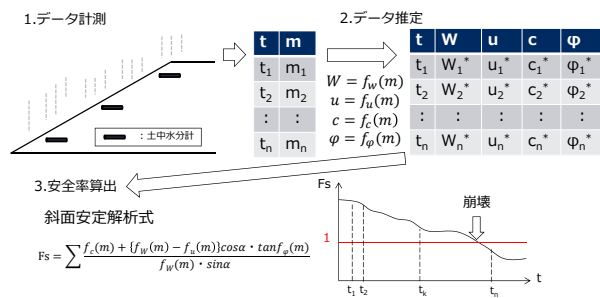
土中水分量の増加過程における各パラメータを計測し、土中水分量から各パラメータを算出するモデル式を抽出する



ステップ1では、監視斜面と同一の土を、監視斜面と同様の条件で土中水分計、間隙水圧計、土塊重量の値を計測する。対象の土塊に加水していき、各加水量（土の含水比）における土中水分量、土塊重量、間隙水圧のデータ群を取得し、土塊重量、間隙水圧を含水比と同様に変化する土中水分量の関数としてモデル化する。さらに、間隙水圧等のデータを取得した際の含水比に設定した土塊の含水比における、粘着力、内部摩擦角のデータ群を取得し、同様に含水比が共通する土中水分計の値で、粘着力、内部摩擦角をモデル化する。

ステップ2 パラメータの推定と安全率の算出

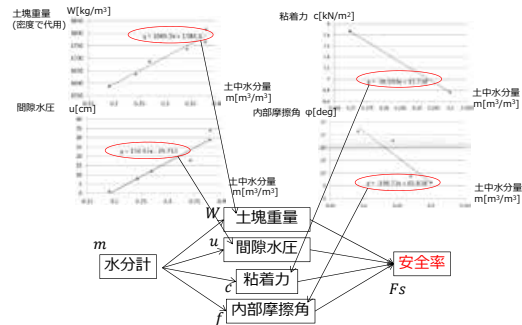
実斜面に土中水分計を埋設し、計測した土中水分計の値から各パラメータの値と安全率を算出する



ステップ2では、監視対象斜面に土中水分計を埋設し、計測した土中水分計の値からステップ1で作成したモデル式を用いて、斜面安定解析式の変動パラメータを算出する。さらに、算出した各パラメータを斜面安定解析式に代入することで、安全率を算出する。

斜面安定解析式におけるパラメータのモデル化

土中水分量の増加に伴う各パラメータの変化を事前に計測し、土中水分量と各パラメータ間に存在するモデルを抽出する（締固め度85%山砂を使用）

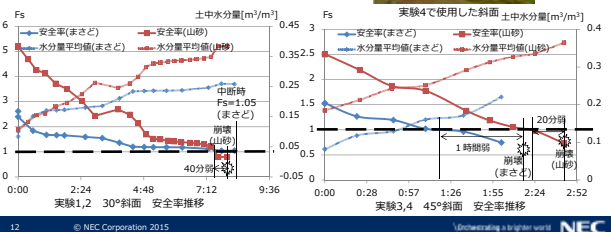


ステップ1のプロセスで得られた例を紹介する。締固め度85%の山砂では、繰り返し取得した斜面安定解析式の各パラメータと土中水分量との間に上図のような関係が得られた。

評価結果

斜面規模

- 実験1,2: 4m(幅)×6.1m(奥行)×3.5m(高さ)、30°
- 実験3,4: 4m(幅)×3.5m(奥行)×3.5m(高さ)、45°
- 使用土種: まさど(実験1,3)、山砂(実験2,4)
- 締固め度: 85%
- 評価と実測の誤差
- 実験1: 中断(中断時 $F_s=1.05$)、実験2: 40分弱
- 実験3: 1時間弱、実験4: 20分弱



ステップ2として、本手法の妥当性を検証するため、斜面崩壊実験を実施した。まさどを用いて30°の斜面を形成して実施した実験では実験開始から8時間程度降雨を継続したが、崩壊しなかった。このため、崩壊はしなかったものの、安全率が1を下回らないため、崩壊も起こらないというあるべき結果が得られた。対して山砂では、降雨開始から7時間20分程度で安全率が1を下回り、その後40分経たずに崩壊した。また、まさどの45°斜面では実験開始から1時間強で安全率が1を下回り、2時間強で崩壊した。山砂でも2時間20分程度で安全率が1を下回り、その後20分ほどで崩壊した。

全実験で想定通り安全率が下がっていく傾向が得られ、過去の実験含め、検知誤差が最大でも約1時間で崩壊を検知できる結果が得られた。

要 旨

斜面の安全性評価の一手段として斜面安定解析手法が使われている。この手法では直接計測することが困難なパラメータが用いられているため、それら一部のパラメータを固定し計測可能なパラメータを変数として安全性を評価する方法が一般的である。しかし、斜面崩壊の多くは降雨を起因とした土中水分量の増加に伴って発生しており、固定値として扱われている各パラメータも土中水分量に応じて変化することがわかっている。本稿では土中水分量によって各パラメータを算出するモデル式を事前に学習し、対象斜面では土中水分量を計測することで、斜面安定解析式のパラメータを間接的に算出し、斜面の安全性を評価する手法を検討した結果について述べる。

キーワード：斜面安定解析，斜面崩壊，安全率，土中水分，含水比

I o T 技術の自然災害監視分野への適用研究取組について

新井 康治*

昨今のゲリラ豪雨と呼ばれる短時間豪雨(時間雨量 50 mm 以上)など, 自然環境が大きく変化している中, それによる被害は年々増加傾向にあり, また災害を防ぐ立場にある方々にとっても, その難易度は益々上がっていると考えている. 一方当社は, I C T (Information and Communication Technology), * I o T (Internet of Things) 技術動向の進展を睨み, その技術を活用した自然災害監視分野での新たなサービス提供ができないか考え, 各種研究を実施している. 現在は, I o T 技術要素のひとつである機械学習機能について, 自然災害監視データへの分析適用可能性について研究を実施しており, 少しずつではあるが, 知財を蓄積してきていると考えている. 自然災害監視としてデータを取り, 分析するためには

① センサーを適切な方法で設置し, データを取得

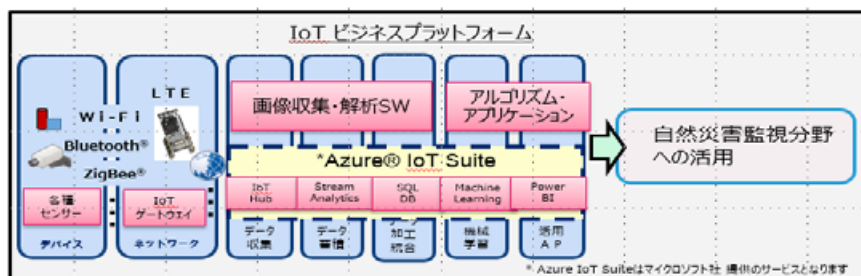
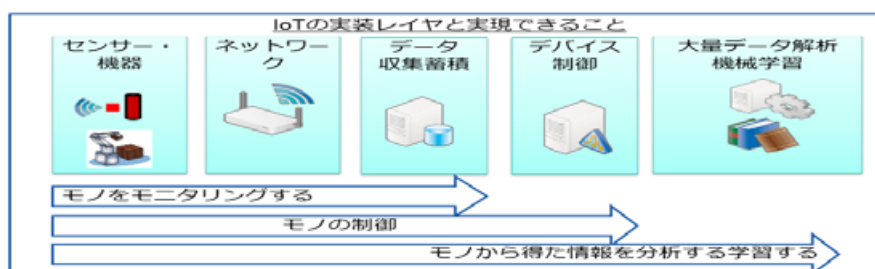
する

② 取得したデータを適切なネットワーク手法で集配する

③ データを蓄積, 加工, 分析する

が必要な機能となってくるが, 斜面状態の監視一断面をとっても様々な環境要因があり, 実際のデータ取得は中々難しく, それは, 色々な機関, 企業の得意分野を組み合わせることにより実現されるものと考えている. 当社としては, 従来より有している, 情報処理技術やネットワーク技術に加え, 機械学習やセンサー技術などの新たな技術分野を積極的に取り入れ, また, 様々な方々とのエコシステムを実現することにより, 本分野にて何らかのお役に立ちたいと考えている.

* I o T (Internet of Things): モノ(ネットワークとつながって意味のあるあらゆるもの)をネットワークに接続し相互に情報をやり取りすること



【日本ユニシスが考える I o T 基盤】

* 日本ユニシス株式会社 総合マーケティング部 I o T サービス戦略企画室

1. 適用研究概要

本研究では、斜面崩壊予測を題材にして IoT 分野における機械学習の実用性を検証することを目的とし、機械学習のクラウドサービスであるマイクロソフト社の Azure Machine Learning (以降、Azure ML) を利用した。斜面崩壊に関する各種情報に関しては、防災科学技術研究所様のご協力を仰ぎ、調査・検討を実施した。

2. Azure Machine Learning(Azure ML) とは

Azure ML は Microsoft 社の提供する機械学習のためのクラウドサービス (SaaS) である。

機械学習には蓄積されたデータからルールを作成する「学習」のステップと、そのルールに新しいデータを照らして予測を行う「適用」のステップがあるが、Azure ML では両機能をカバーする。このルールのことを専門用語で「予測モデル」と呼ぶ。

利用者は ML Studio という Web ブラウザ上の IDE(統合開発環境) からマウスで操作するだけで簡

単に予測モデルを作成でき、作成した予測モデルは、すぐに Web サービスとして公開 / 利用可能となる。また、多くのデータ処理や機械学習の手法が用意されているのに加えて、R や Python で独自の処理を記述することも可能となっている。

3. 検証方法(手法)

今回の機械学習機能の検証としては、外れ値による異常検知(通常時と比べて、異質なデータ(外れ値))を検出することで異常を検知する機能を利用した。(故障検知や侵入検知、異音検知などで利用される)⇒土砂災害警戒情報が発令されていないケースを“通常”の状態として学習し、ある時点の状態がその傾向を逸脱した“異常”な状態かを判定→実際の発令実績との比較を実施。

4. 検証データ

データは気象業務支援センターより以下のデータを入手した。

◇データ一覧・入手期間

No.	名称	期間
1	土壌雨量指数 http://www.jmbc.or.jp/hp/online/file6_idx_dojou-ryuiki.html	2012年7月～2015年6月
2	1 kmメッシュ解析雨量 http://www.jmbc.or.jp/hp/online/f-online3i.html	2012年7月～2015年6月
3	土砂災害警戒判定メッシュ情報 http://www.jmbc.or.jp/hp/online/file6_inf_dosha_mesh.html	2013年7月～2015年6月 ※

※ 気象庁が配信を開始したのが 2 年前のため期間が短い

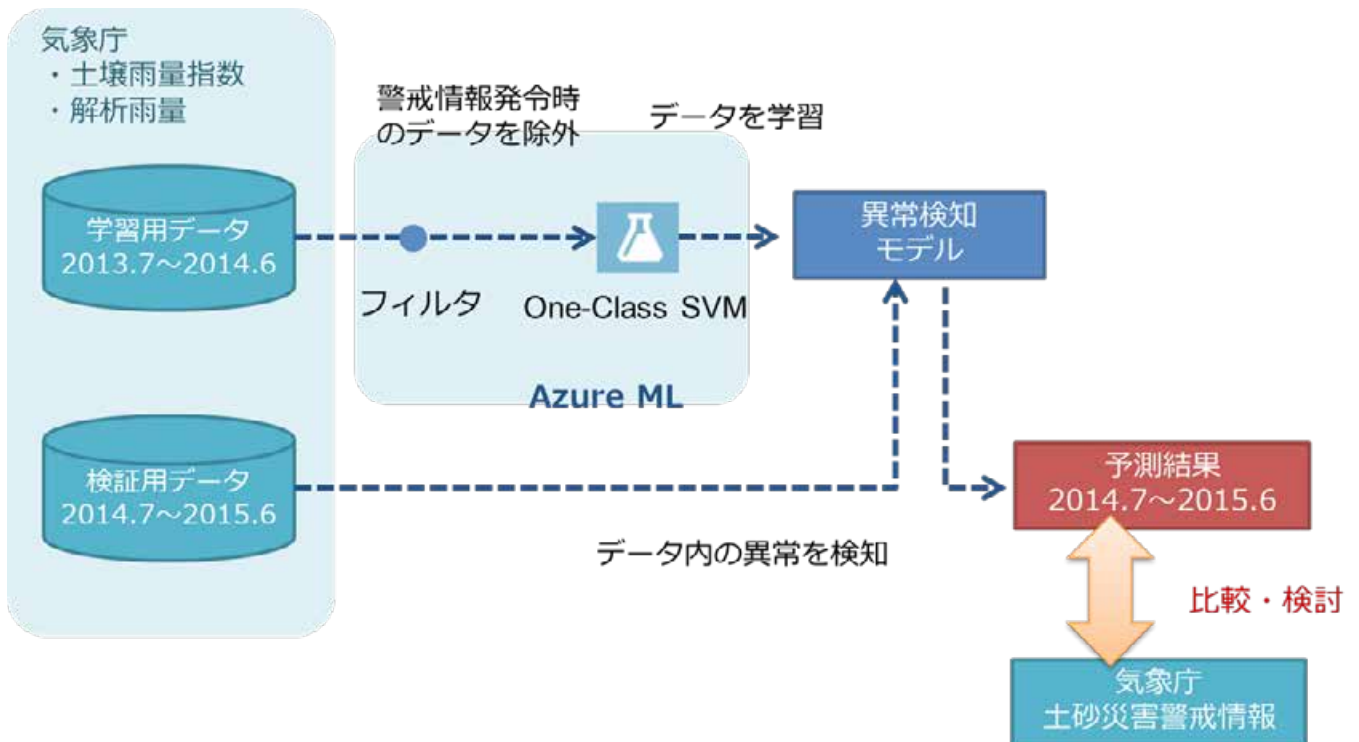
◇圧縮方式：GRIB2

◇構造(メッシュ単位)

- 土壌雨量指数：5 km × 5 km
- 1 km メッシュ解析雨量：1 km × 1 km
- 土砂災害警戒判定メッシュ情報：5 km × 5 km

5. 検証フロー

◇システム概要



◇対象データを機械学習に投入する前処理として以下のデータ処理を実施した。

■ GRIB2形式の解読

以下の資料を元に独自作成プログラム (C++) にて解読。

【参考資料】

気象庁観測部, 配信資料に関する技術情報 (気象編) 第162号, 平成16年

<http://www.data.jma.go.jp/add/suishin/jyouhou/pdf/162.pdf#search='GRIB2'>

■ メッシュ単位の調整

1 kmメッシュ解析雨量のみサイズが異なる (1km単位) ため、以下の計算により、他データ (5km単位) と統一。

【変換方法】

縦：6地点の平均、横：5地点の平均をとって5kmメッシュ化

雨量の縦横を1:1とすると (GIS第三次メッシュ)、他データは6:5に切られているので、雨量は

縦：地点(6n)～(6n+5)の平均を、他データの地点nの値とし、

横：地点(5n)～(5n+4)の平均を、他データの地点nの値とする

◇機械学習での予測結果と実データとの比較指標は以下のとおりとした。

■再現率： $A / (A + B)$

- ・「検知もれ」の少なさを表す指標。⇒正解が「異常」のデータを何%拾えているか。

■適合率： $A / (A + C)$

- ・「誤検知」の少なさを表す指標。⇒「異常」と判定したデータの何%が正解か。

■正解率： $(A + D) / (A + B + C + D)$

- ・判定した結果の何%が合っているか。



6. 考察と今後

検証結果より以下のことが今後の機械学習機能の活用において考慮する必要があると考えられる。

■対象地点ごとに適合率/再現率の高低のバランスが大きく異なる。

⇒適合率/再現率は Azure ML のパラメータによって調整可能だが、一方を上げると他方が下がるトレードオフの関係があり、両方同時には改善しない。斜面崩壊は人命に関わる事象であることから、崩壊の可能性が少しでもある場合は「異常」と判断された方が好ましい。実用シーンでは、こうした検知漏れが少なくなるよう、再現率が高くするパラメータ調整を行う必要がある。

■マルチセンサーへの応用

⇒土壌雨量指数に加えマルチセンサーで測定した土中水分量代を利用することで5kmメッシュという大きな範囲ではなく、個別の斜面についての危険度が測れることが期待できる。

■降雨予報値の利用

⇒降雨量に関しては、検証でも利用した実績値に加え、予報値を併用することで精度の向上が期待できる。

7. 最後に

今回の研究においては、国立開発研究法人防災科学技術研究所様に多大なる協力、技術指導を仰いだ。今後も従来より多くの研究をされている知財を学ばせていただく中で、IoT技術を活用したシステム・サービスを構築、提供していきたいと考える。

「がけ崩れおっかない指数」とICTによる住民避難の 自主判断補助と自助能力向上の試み

福岡 浩*・井ノ口宗成**・小林雄三***・堀松 崇***・木村浩和***

近年の土砂災害では土石流危険渓流の出口正面の住民が犠牲者になる事例が多く見られる。また土砂災害危険情報が深夜に出された場合もある。極端降雨による土砂災害から命を守るには危険情報を共有し自主避難の決定に資することが危険度軽減の手法の1つになり得ると考えた。土砂災害危険情報はスネークラインとクリティカルラインに基づく。リアルタイムにネット上で公開している自治体もあるが見方がわかる住民はまだ少ない。そこで、スネークライン上の現在の点が原点とクリティカルラインまでの間でどのくらいの位置にあるのか、原点を零とし、クリティカルラインを百として単位無しの数値として表し、さらに色も付けて表示するシステムを開発した。色についてはISO 22324 Guidelines for colour-coded alerts に基づき5色で表した。データ更

新も10分間毎に行うこととした。対象地域として2年前に崩壊災害が発生し住民1名が犠牲となり、現在も法面対策工を施工中の新潟県長岡市寺泊山田地区を選定した。この地区では住民も土砂防災に高い関心を示している。図1に住民に配布したチラシの表面を、図2に住民が携帯やスマホ、ネットにつながったタブレットでリアルタイムに見ることができる画面を示す。これまでに住民説明会を2回開き、実験実施への協力に了解を得て9月からデータ提供を開始した。行政の警戒情報が来る前に大雨の際にスネークラインがクリティカルラインに近づく様子を見ることができ、ある程度心の準備ができることは住民にとって心理的負担が軽減されるメリットが期待されている。



図1 住民に配布したチラシの表面



図2 スマホ、携帯に現れる画面の例

* 新潟大学災害・復興科学研究所

** 静岡大学情報学部

*** 株式会社 興和

土壌雨量指数から見た土砂災害の発生タイミング

岡田 憲治*

Outbreak Timing of the Sediment Disasters Judging from Soil Water Index

Kenji OKADA

**Weather Forecast Division,
Japan Meteorological Agency, Japan
kenji-okada@met.kishou.go.jp*

Abstract

Japan Meteorological Agency(JMA) has developed Soil Water Index(SWI), using Analysed Precipitation and 3-serial steps Tank Model, and has recognized deep relations to rain and sediment disasters. This paper reports outbreak timing of sediment disasters by heavy rain. Results are showed in Japanese, more deep relations with sediment disasters were closer with SWI's index history order than SWI's numerical value, and reports differences of the sediment disaster's outbreak by the earthquakes in wet season and dry season.

Key words: Soil Water Index, Tank Model, Analysed Precipitation, Risk of Sediment Disaster, Heavy rain warning

1. はじめに

土壌中に溜まっている雨の量から土砂災害の発生リスクを推定する土壌雨量指数を用い、土砂災害の誘引である雨と土砂災害の発生タイミングを検討した。

土壌雨量指数は、防災科学技術研究所で開発された直列3段タンクモデルに気象庁の解析雨量を入力して土壌中に溜まっている雨の量(指数値)を5 km × 5 km メッシュ(以下、5 km メッシュ)毎に推定し、過去に土砂災害が発生した際の指数値と比較することで土砂災害発生のリスクを予測する手法である。気象庁(地元気象台)が発表する、土砂災害に関する「大雨注意報」・「大雨警報」・「特別警報」の発表基準の他、都道府県と共同発表する「土砂災害警戒情報」の発表基準としても用いられている。

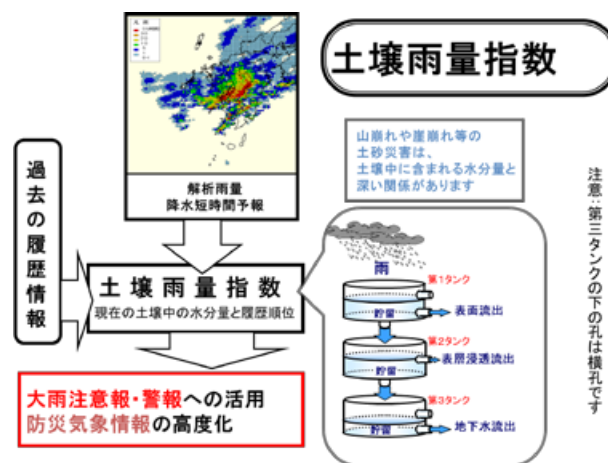


図1 土壌雨量指数の概念図

Fig. 1 Outline of Soil Water Index.

* 気象庁予報部予報課

2. 統計的に見た土砂災害との関係

平成 3 年～ 12 年に全国各地で発生した土砂災害を自治体や道路管理団体等の協力により収集し、約 87,000 件集まった。これらの土砂災害事例を中心に雨量と土壌雨量指数の統計的な分析結果を示す。

2.1 雨量との相関

発生時刻・発生地点が詳細に記録されていた土砂災害は約 1 割強の約 9,000 事例あった。集中豪雨のように土砂災害が多発した場合は総数は判明しても個々の土砂災害の詳細な記録が残っている事例は少なく、逆に雨の関与が無い、あるいは少ない場合に詳細な記録が残っている傾向があった。これは雨が降っていない場合は個々の事例が現認されやすいためと考えられる。

5 km メッシュの解析雨量を使って土砂災害発生直前の 1 時間雨量 (図 2)・3 時間雨量 (図 3)・24 時間雨量 (図 4) を検討したが、雨量のばらつきが大きいだけでなく、比較的小さな発生での発生も多く、発生・非発生を分ける目安となる閾値は見出せなかった。これは、土砂災害の発生は直前の雨量だけで判断できるものではない、つまり先行降雨の影響も加味すべきという過去の知見と一致している。

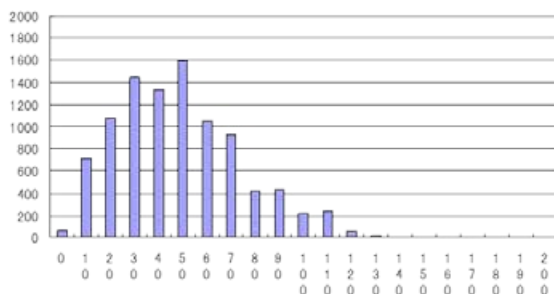


図 2 発生時 1 時間雨量(横軸)と発生件数(縦軸)
Fig. 2 1-hour precipitation and sediment disasters.

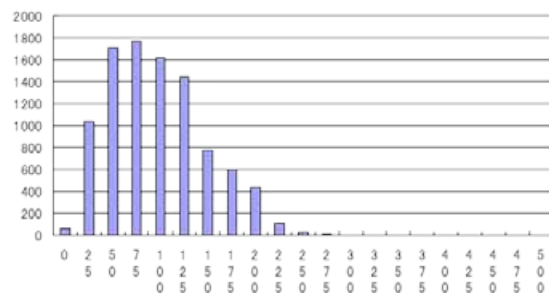


図 3 発生時 3 時間雨量(横軸)と発生件数(縦軸)
Fig. 3 3-hour precipitation and sediment disasters.

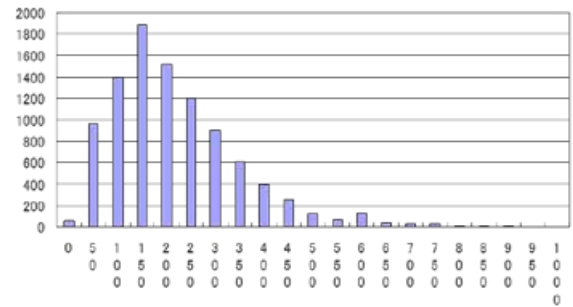


図 4 発生時 24 時間雨量(横軸)と発生件数(縦軸)
Fig. 4 3-hour precipitation and sediment disasters.

2.2 土壌雨量指数との相関

土壌雨量指数の指数値 (図 5) も値のばらつきが大きく、雨量同様、閾値は見出せなかった。そこで 5 km メッシュ毎に過去 10 年間の雨を指数値が高い順に並べた履歴順位を作成し土砂災害との相関を求めた (図 6)。

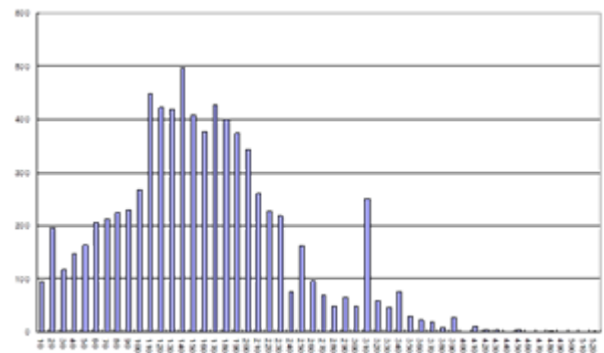


図 5 発生時指数値(横軸)と発生件数(縦軸)
Fig. 5 Numerical value of SWI and sediment disasters.

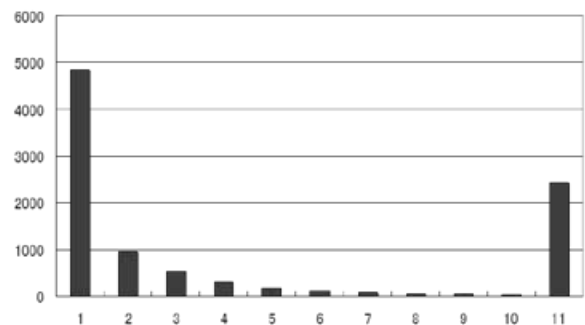


図 6 履歴順位(横軸)と発生件数(縦軸)
Fig. 6 Historical index of SWI and sediment disasters.

その結果、履歴順位と土砂災害との相関が高いこと、さらに高い履歴順位の雨ほど土砂災害の発生事例数が多いことも判明した。一方、無降水期間中の

ように雨の関与を考えにくい事例には道路損壊を中心する表層崩壊が多いことも判明した。

2.3 一雨単位・自治体単位の相関

約 87,000 事例の大部分は市町村単位・日単位で記録されていたため、市町村単位・一雨単位で履歴順位と土砂災害との相関を調べた(図 7)。

その結果、10 年間で最も指数値が高かった雨(履歴 1 位)で土砂災害全体の約 6 割が発生しており、履歴順位が下がるに連れて発生数も少なくなっていた。

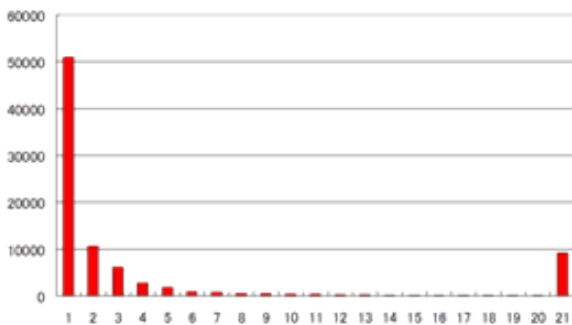


図 7 履歴順位(横軸)ごとの土砂災害発生数(縦軸)
Fig. 7 Numbers of sediment disasters by outbreak of history order.

2.4 免疫性

大雨の都度土砂災害が発生していることから、エリア内に存在する斜面の風化の位相(前回の崩壊からの期間)は様々であり、基岩が露出すると免疫性が発生して風化が進むまではその斜面は崩壊しにくい、また稀な大雨により土砂災害が多発した場合にはしばらくはエリア内で土砂災害が発生しにくいとの『免疫性』の仮説を立て、長期間の雨量と土砂災害記録が残っている兵庫県六甲山で検証したところ、10 年程度の免疫性が認められた(図 8)。これは、土砂災害の危険性を判定する場合に、大雨後はしばらくの間は閾値を上げることで空振りを減少させる可能性を示唆している。一方、宅地造成等による人工斜面が多い東京都八王子市では約 8 年という結果が得られたが、新たな人工斜面が出現しているエリアでは免疫性は適用出来ない。

2.5 履歴順位と死者との関係

平成 9 年から平成 27 年までに土砂災害により 489 人と多くの方が亡くなられた。ここでは、死者の発生地点・発生日時の 5 km メッシュの土壌雨量指数

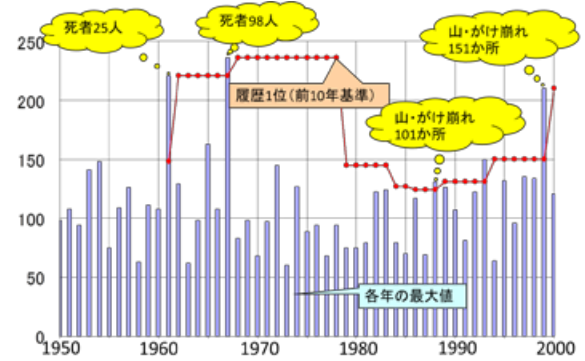


図 8 六甲山での年毎の最大指数値と土砂災害
Fig. 8 Every year's highest value of SWI and sediment disasters in the Mt. Rokko.

を前年までの過去 10 年間の雨の履歴順位と比較した結果(図 9)を述べる。例えば平成 27 年の事例ならば平成 17 年から 26 年の 10 年間との比較である。なお、工事現場での死亡事故は含まない。

約 9 割(436 人)が前年までの過去 10 年間の最大指数値を更新したタイミングで亡くなっている。これは、多雨地域・少雨地域問わず、稀な大雨による危険性の高さを如実に示している。

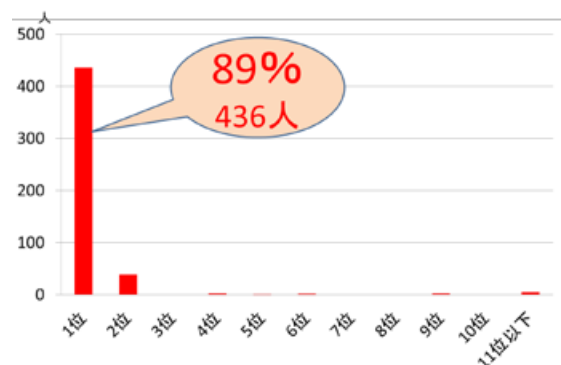


図 9 履歴順位と死者の関係
Fig. 9 Relation of historical order and the death of person.

平成 11 年 6 月に広島市内で発生した広島豪雨では過去 10 年間の最大指数値を超えた頃から土石流が多発したことから、気象庁では平成 12 年から、過去 10 年の最大指数値を更新した 5 km メッシュが出現した場合に、発表中の大雨警報を切り替えて「○○では過去数年で最も土砂災害の危険性が高まっています」と警戒を呼びかけ、これが地元気象台と県の砂防部局が共同で発表する『土砂災害警戒情報』へと発展した。

2.6 高い指数値が出現する時間帯

大規模な土砂災害が発生する目安となる指数値 200 以上の値となった 5 km メッシュの時刻別出現数 (図 10) で夜間の出現数が多いのは、積乱雲は午後から夜にかけて発達しやすく、翌日未明頃まで降り続けることが多いためである。3 時～4 時は他の時間帯よりも死者が発生したイベントの発生率は約 2 倍だが、この 2 時間に死者の約半数が発生しているのは、夜間の指数値の高まりに加え夜間避難の困難さも大きく関係していると推察される。



図 10 指数値 200 以上の出現時刻

Fig. 10 Appearance time of SWT's numerical value more than 200.

2.7 その他の特徴

- ・ 降雨強度のピーク頃は、造成後の年月が浅い道路路面や宅地路面等の表層崩壊が多い。
 - ・ 指数値の最大 (降雨終了) 前後は崩壊規模の大きい土砂災害が多い。
 - ・ 降雨終了後も第二タンク値のピーク頃まで土砂災害の発生はあり、それを過ぎると激減している。
 - ・ 第二タンク値のピーク頃に大規模な土砂災害が発生している例が多い。
 - ・ 先行降雨が無視できない土砂災害も多い。
- 等、土壌雨量指数を介することで雨と土砂災害の密接な関連性が得られた。

3. 典型的な土砂災害事例

以下に典型的な個別事例を示す。

3.1 広域事例

平成 18 年 7 月 19 日～23 日の雨により鹿児島県薩摩地方を中心に土壌雨量指数値が高まった。この一連の雨により鹿児島県内で発生した土砂災害 (鹿

児島県砂防課提供) と指数値を比較すると、図 11 のように周囲のメッシュよりも指数値が小さなメッシュでも土砂災害が発生しているが、履歴順位 (図 12) では土砂災害の発生は履歴 1 位のメッシュに集中している。これらから、履歴順位の方が土砂災害との関係が深いこと、周囲のメッシュと指数値の大小を比較して小さいから安心と考えることの危険性が示唆される。

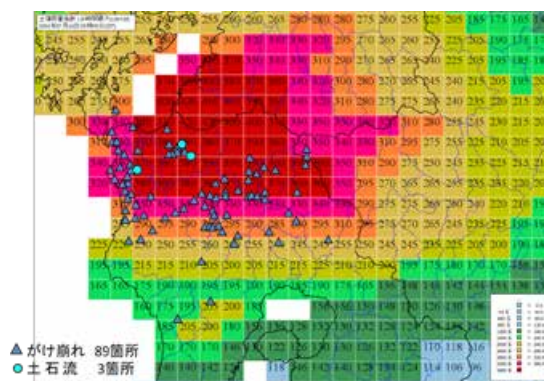


図 11 指数値と土砂災害発生数

Fig. 11 map of SWT's value and sediment disasters in Kagoshima Pref.

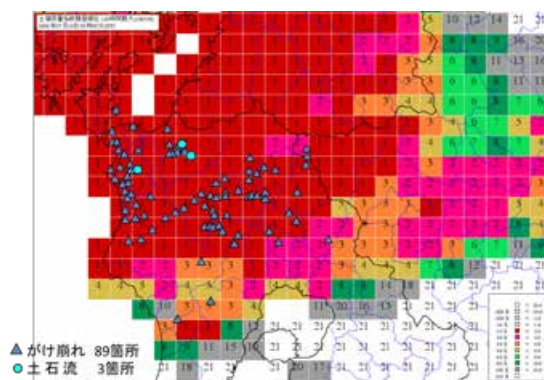


図 12 履歴順位と土砂災害発生数

Fig. 12 map of SWT's historical order and sediment disasters if Kagoshima Pref.

3.2 個々の事例

土壌雨量指数と土砂災害の関係を時系列図で示すと共に特徴を説明する。以下、時系列図では、縦軸に土壌雨量指数値、横軸に時間軸を示し、折れ線グラフが土壌雨量指数、棒グラフが雨量を示す。

3.2.1 平成 11 年広島市安佐北区の土石流

広島市内では 15 時頃から土砂災害の発生が始まり、16 時頃に土石流が多発した (図 13)。一方、呉市内では 17 時頃にがけ崩れが多発した。これらは 2 日前に降った先行降雨の影響が大きい。

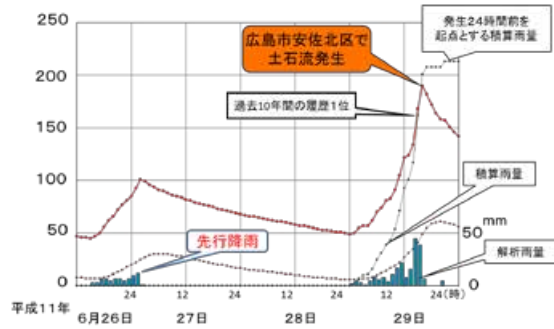


図 13 広島市安佐北区亀山地区の土壌雨量指数
Fig. 13 Chronological order of SWI in Kameyama Asakita-ku, Hiroshima-city.

3.2.2 平成 26 年広島市安佐南区の土石流

平成 11 年広島市安佐北区の土石流同様、先行降雨の影響が出ている(図 14)。19 日夜に降った雨で指数値が上昇し、20 日未明の雨で一気に指数値が高まり、平成 11 年 6 月の豪雨時よりも指数値が高くなった時点で土石流が発生した。

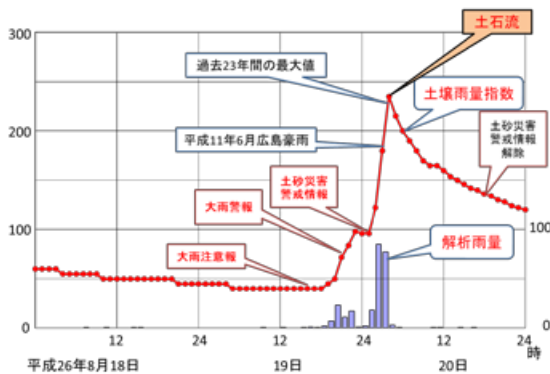


図 14 広島市安佐南区八木地区の土壌雨量指数
Fig. 14 Chronological order of SWI in Yagi Asaminami-ku, Hiroshima-city.

3.2.3 平成 27 年栃木県鹿沼市

2015 年関東・東北豪雨の際に栃木県鹿沼市で土砂崩れにより死者が発生した 5 km メッシュの時系列図を図 15 に示す。図には大雨注意報発表から大雨特別警報発表までの経過も付したので、土砂災害に関する各種防災気象情報が段階を経て発表されたことも見ていただきたい。

関東の西を北上した台風第 18 号によって形成された南からの湿った暖気の流れと、東海上の台風第 17 号によって持ち込まれた東風が関東地方上空でぶつかり、積乱雲が連なる『線状降水帯』が次々と形成される『線状の降水帯』状態となり、さらに台風

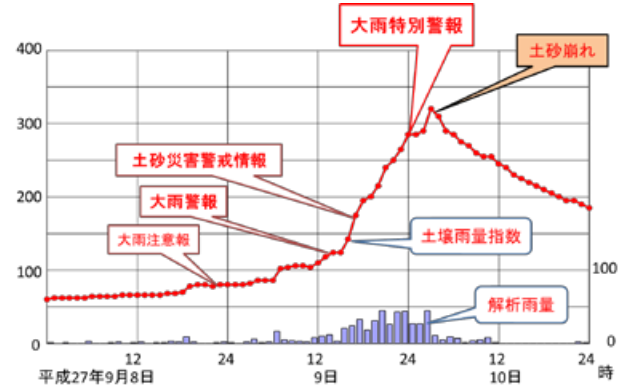


図 15 栃木県鹿沼市で発生した土砂崩れ
Fig. 15 chronological order of SWI in Kanuma-city.

第 17 号の東に停滞していた高気圧が台風第 17 号の北東進をブロックしたため、関東地方上空で数日に渡って雨が続き豪雨となった。

3.2.4 平成 17 年宮崎県鰐塚山土石流

超過確率では 400 年に一度の大雨と推定されるタイミングで大規模な土石流が発生し、崩壊量は 500 万立方メートル以上に及んだ(図 16)。普段からまとまった雨が降りやすいエリアでも極めて稀な大雨が降る可能性を示している。

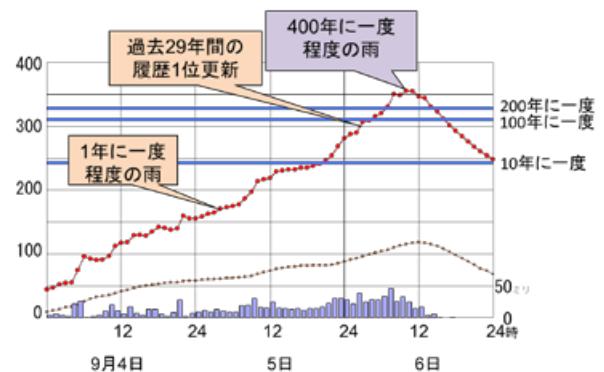


図 16 宮崎県鰐塚山の土壌雨量指数
Fig. 16 chronological order of SWI in Mt. Waniduka.

3.2.5 高知県繁藤

昭和 47 (1972) 年 7 月 6 日、旧国鉄土讃線の繁藤駅(現在の高知県香美市土佐山田町繁藤)で発生した土石流について駅設置の雨量計から土壌雨量指数を再現した(図 17)。土砂災害の発生が数回にわたって発生した場合には後の発生ほど規模が大きくなる事例が多いが、この事例では最初の 3 回の山崩れは降雨の最中に発生し、それぞれ家屋損壊等が発生した。60 人の死者が出た 4 回目の土石流は雨がほとんど止んだ時点で発生し、10 万立方メートルの大規模

な土石流となった。雨が終わった頃は住民が安心して油断しやすい時間帯でもある。大雨警報や土砂災害警戒情報が降雨が終了しても直ぐには解除されないのは、土石流等大規模な土砂災害は降雨終了直後に発生することが多いという知見による。

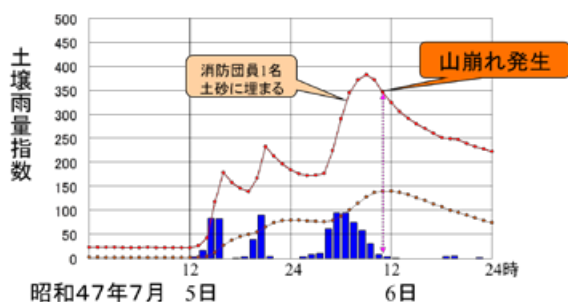


図 17 高知県繁藤の土壌雨量指数
Fig. 17 Chronological order of SWI in Shigetou.

3.2.6 八王子市の住宅街

建設されてから年月が浅い宅地造成地では法面崩壊等の表層崩壊が多発する傾向がある。図 18 に示す八王子市内の新興住宅地では平成 11 年 8 月 13 日に同一 5 km メッシュ内の 12 か所でがけ崩れが発生した。新たに建設された道路や造成地のような人工斜面では免疫性が存在しないので過去の大雨の履歴を適用することができないのが難点である。

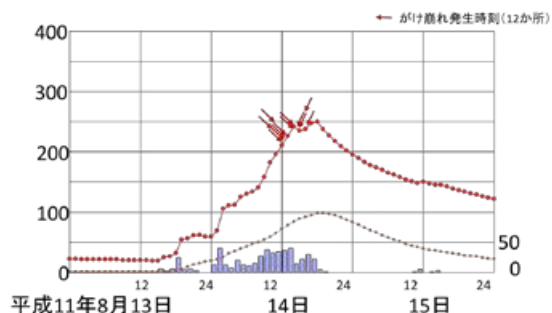


Fig. 18 八王子市内でがけ崩れが多発した事例
Fig. 18 Chronological order of SWI in Hachioji.

3.2.7 伊豆大島の土石流

この事例は、平成 25 年 8 月から発表を開始した特別警報で発表基準としている土壌雨量指数で 50 年に一度の雨がさらに 1～2 時間降り続けると数 100 年に一度という極めて希な大雨となることを示している(図 19)。

平成 12 年 11 月 21 日に降った雨により、富士山では昭和 43 (1968) 年の観測開始以来最大規模の大

沢崩れが発生し、一雨で約 2 年分の土砂が流出した。その際、富士山周辺に設置した地震計で数回に及ぶ大沢崩れの発生時間帯を知ることが出来た。その手法により、この伊豆大島の土石流でも数回の土石流発生時刻が推定された。

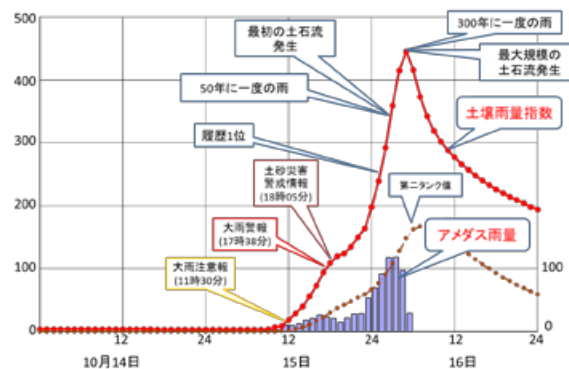


図 19 伊豆大島で発生した土石流
Fig. 19 Chronological order of SWI in Izu-Ooshima.

3.2.8 人工降雨による崩壊実験

平成 15 (2003) 11 月に森林総合研究所が筑波山近郊の斜面で実施した人工降雨による崩壊実験を土壌雨量指数で再現したのが図 20 である。3 日かけて約 900 mm の降雨を与えた時点で崩壊が発生した。

このエリアは普段から雨が少なく、この実験地を含む 5 km メッシュでは 200 年に一度の雨で指数値 200 程度、2015 年関東・東北豪雨時でも 180 なので、この実験により出現した指数値 400 は現実には極めて起こりにくい雨と考えられる。しかし、例えば道路造成等により上流部に新たな集水地形が出現した場合には、過去に土砂災害が発生していないレベルの雨であっても集水により何倍もの雨が降ったのと同じ状態となって土砂災害が発生する可能性が考えられる。

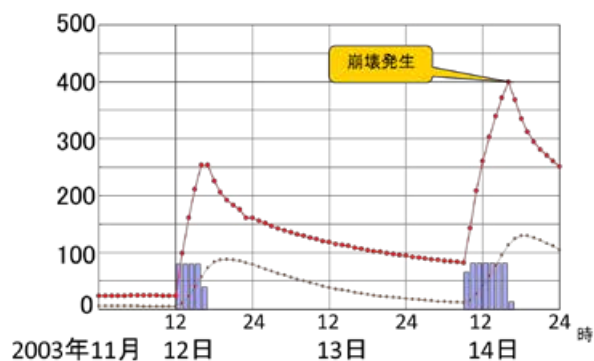
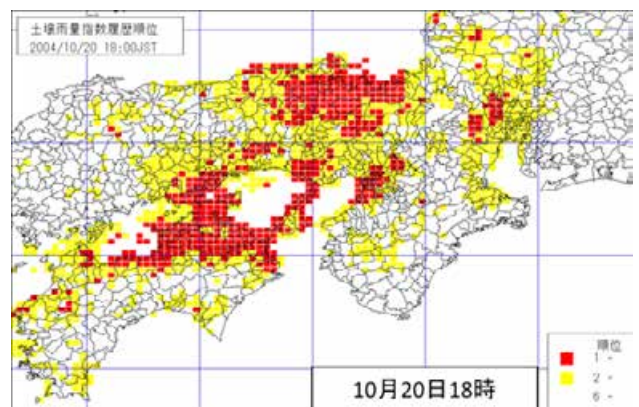
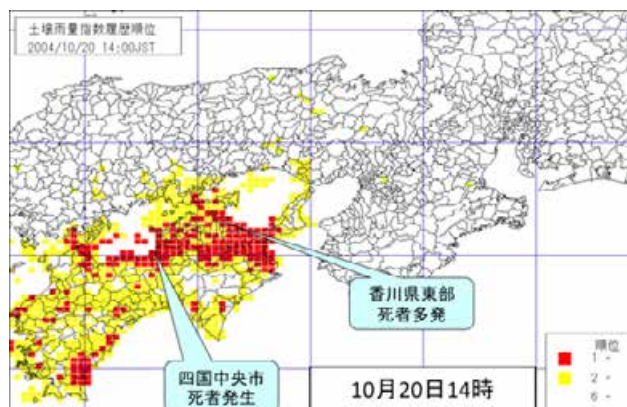
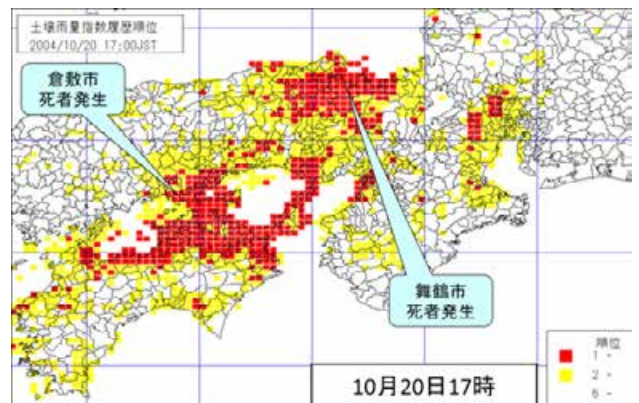
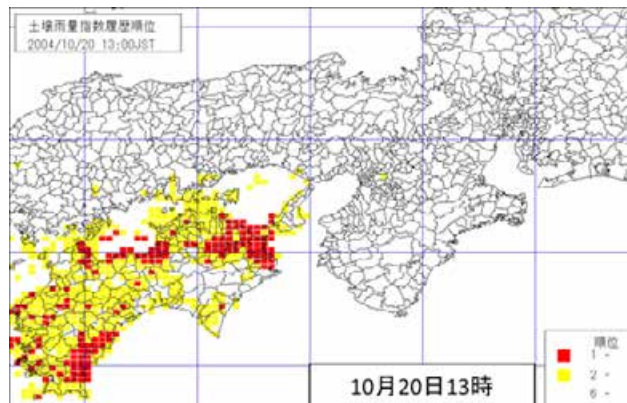
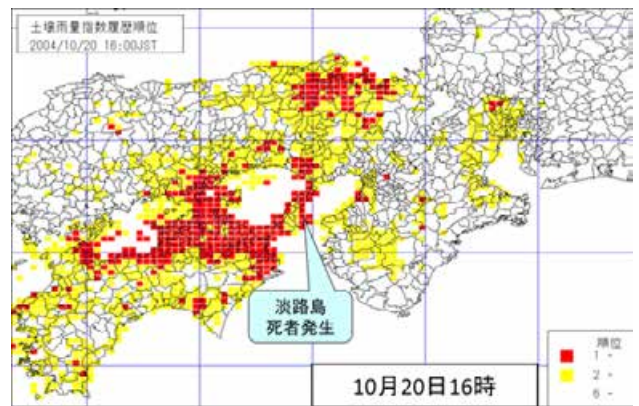
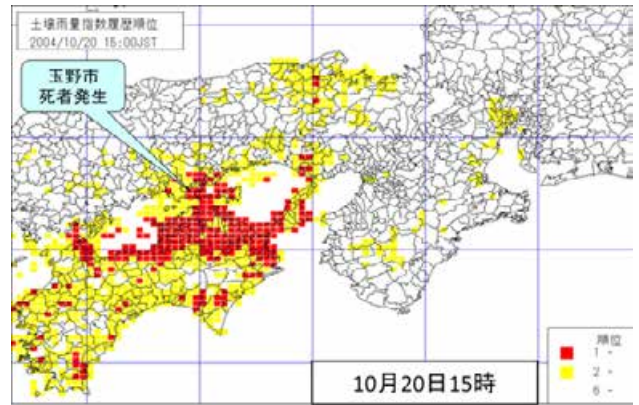
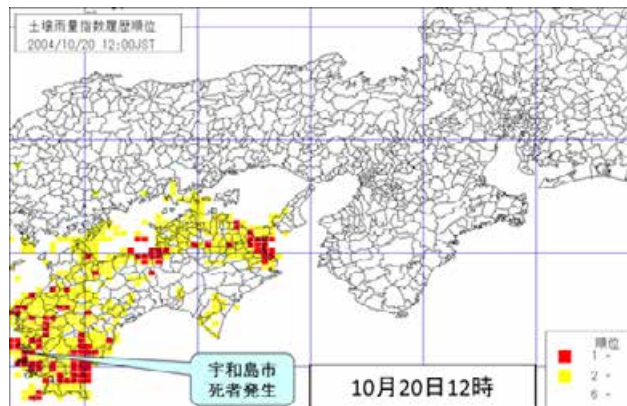


図 20 人工崩壊実験時の土壌雨量指数
Fig. 20 Chronological order of SWI in artificial collapse experiment.

3.2.3 移動災

暖湿流と寒気がぶつかって同じエリアに雨を降らせるパターンを紹介してきたが、台風のように降雨域が移動する場合もある。

この事例は平成 16 年に西～東日本にかけて大雨をもたらした台風第 16 号の履歴順位が変化の様子である(図 21)。29 人の死者はすべて赤く示した過去の履歴 1 位を更新した 5 km メッシュで発生した。



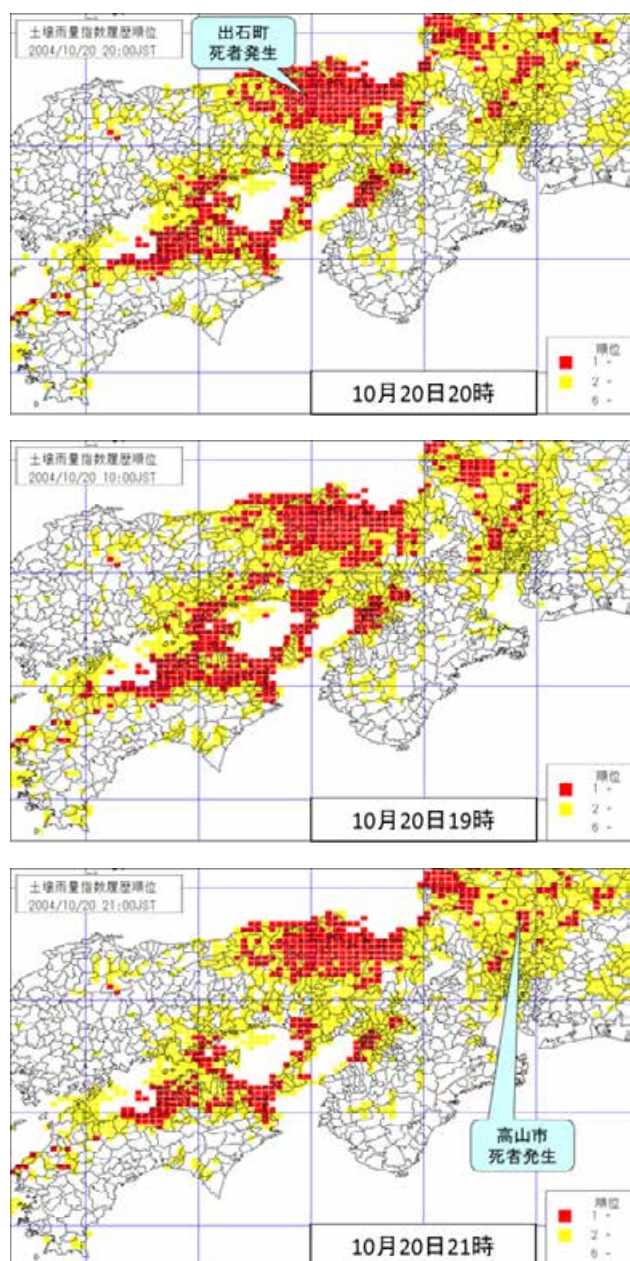


図21 履歴順位と死者発生

Fig. 21 Map of SWI's historical order and death of persons.

4. 地震と土砂災害の関係

大正12(1923)年9月1日に発生した関東大震災では直前に雨が降っていたものの、東京都内の大火に焦点が当てられることが多く、神奈川県を中心に多発した山崩れ等の土砂災害やその被害についてはあまり知られていない。

平成16年10月23日の新潟県中越地震でも土砂災害が多発した。直前に降った雨により地震発生時には土壌雨量指数値が50～60程度に上昇しており、その後群発した地震でも土砂災害が広く多発し、震

度3程度の地震動で土砂災害が発生した地域もあった。地震動に雨の影響も加わって斜面の脆弱性が増し、土砂災害の発生が拡大した可能性が考えられる。

これに対して近年に発生した大地震、例えば平成7(1995)年1月17日の阪神淡路大震災や平成23(2011)年3月11日の東日本大震災は指数値が10程度の少雨期に発生しており、土砂災害は大きな震度を観測した市町村に集中していた。

阪神淡路大震災以降全国の自治体に震度計が整備されたが、震度5強以上の揺れを観測した自治体では山崩れ・がけ崩れ等の土砂災害が多く発生し、新潟県中越地震以外は震度5弱以下の揺れだった自治体での土砂災害の発生は少ない。これは気象庁の震度毎の被害想定とほぼ一致しており、川越³⁾の調査でも同様の結果が示されている。

これらから、多雨期に地震が発生した場合は地震動による土砂災害の被害は少雨期よりも拡大し、さらにその後の雨でも発生しやすくなることが予想される。

5. タンクモデルのパラメータ

土壌雨量指数では、石原・木葉竹(1979)が決定した全国5エリアのパラメータの中で花崗岩を多く含むエリアのパラメータを用いている。

地質毎にパラメータを最適化チューニングすべきとの質問がしばしば寄せられるが、地質を考慮せずに雨と土砂災害との相関だけを高める目的でパラメータを決定することは本質的ではないこと、地質毎のパラメータは少なく、それを様々な地質が混在している5 km メッシュ毎に適用する手法がないこと、さらには土壌水分量の絶対値を算出することが目的ではないこと、履歴順位が有効なこと等からパラメータのチューニングは行わず全国一律のパラメータを用いている。

一例を示すと、地頭菌他が鹿児島県出水市の平成9年7月10日の土石流発生現場で後日観測し決定したパラメータ²⁾と土壌雨量指数のパラメータを比較した結果(図22と表1)、指数値には系統的な差があるが履歴順位では7位と8位が入れ替わっただけだった。

今後新たなパラメータが見出された場合の再計算や新たなモデルを使った再計算は可能である。今後土砂災害が多発した5 km メッシュで詳細な災害記

録が得られた場合には、雨量と災害記録から最適化チューニングを行い、それを同じような地質の他のメッシュに適用する可能性も考えられる。

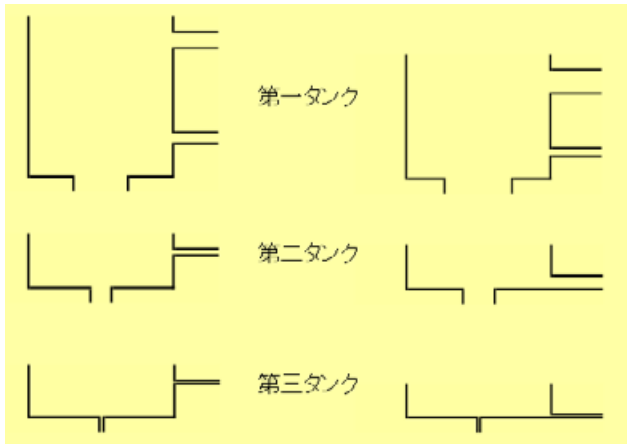


図 22 パラメータの比較 土壌雨量指数(左)と地頭菌(右)
Fig. 22 Parameter comparison between SWI and Jitousono *et.al.*

表 1 鹿児島県出水市の土石流現場の履歴順位
土壌雨量指数(左)と地頭菌(右)

Table.1 Historical order's comparison between between SWI and Jitousono *et.al.*

順位	年	月	日	時	指数値	順位	年	月	日	時	指数値
1	1997	7	9	23	297	1	1997	7	10	5	312
2	1995	7	4	7	252	2	1995	7	4	24	258
3	1993	8	1	21	233	3	1993	8	1	21	230
4	2002	6	30	11	218	4	2002	6	30	11	211
5	2000	8	18	11	212	5	2000	8	18	11	210
6	1993	8	20	11	205	6	1993	8	20	11	203
7	1996	7	7	3	182	7	1993	7	5	8	183
8	1993	7	4	16	181	8	1996	7	7	3	167
9	1991	10	1	6	168	9	1991	10	1	6	160
10	2001	6	23	15	160	10	2001	6	23	15	156

まとめ

雨は土砂災害が発生するための必要条件だが、降ったら土砂災害が発生するとは限らない、つまり雨が降ったから土砂災害が発生するとは限らない(十分条件ではない)という不確実性が土砂災害の発生予測を困難なものとしている。

一方、地質や地形の持つ脆弱性に加え、過去の災害履歴も重要であり、素因と誘因両方に絡む集水面積も無視できない。

これらを個々のものとして扱うのではなくパラメタライズ出来れば土砂災害の発生予測精度が高まる事が期待される。そのためにも雨と土砂災害の詳細なデータの蓄積と分析は今後も不可欠である。

また、地球温暖化に伴って大雨が増えるとの予想もあるので、今後の土砂災害の変化にも留意したい。

謝辞

気象庁では人災軽減(減災)に向けて、日頃から自宅周辺の地盤の情報を把握し、大雨警報や土砂災害警戒情報等が発表されたら特別警報の発表を待つことなく速やかに身の安全を確保するよう呼びかけている。

これらの防災気象情報を発表する指標である土壌雨量指数を説明する機会を与えていただいた防災科学技術研究所の皆様に厚くお礼申しあげる。

参考文献

- 1) Ishihara, Y and S. Kobatake (1979) : Runoff Model for Flood Forecasting. Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, **29**, 27-43.
- 2) 地頭菌隆・下川悦郎(1998) : 1997年鹿児島県出水市針原川流域で発生した深層崩壊の水文地形学的検討. 砂防学会誌(新砂防), **51**(4), 21-26.
- 3) 川越清樹(2012) : 東日本大震災によるため池、およびアースフィルダム被害について. 消防科学と情報, No.110.
- 4) 岡田憲治(2002) : 土壌雨量指数. 測候時報, **69**, 67-100.
- 5) 岡田憲治(2009) : 土壌雨量指数(技術手帳). 地盤工学会誌, **57**(8), 56-57.

要 旨

土壌雨量指数を用いて土砂災害を分析し、雨量よりも土壌雨量指数値の方が土砂災害との相関が高いことを確認した。さらに履歴順位を用いると危険性の高まりの推定が可能なことを示した。

指数値の最大値出現前後に大規模な事例や多発事例の発生が多いこと、降雨終了後第二タンク値のピークを過ぎると土砂災害発生が激減すること、言い換えれば雨が止んだ直後も危険なこと等の知見も得られた。

キーワード：土壌雨量指数，タンクモデル，解析雨量，土砂災害警戒情報，大雨警報

土砂災害発生予測における降雨に対する慣れを考慮した実効雨量の係数特性

林 拙郎*・山田 孝**

Characteristic of the Coefficients of Effective Rainfall Amount due to Local Accustoming Rainfall for Prediction of Sediment Related-Disasters

Setsuo Hayashi* and Takashi Yamada**

**Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards,
Shizuoka University, National Univ. Corp., Japan
hayashi-s@zvtv.ne.jp*

***Mie University Graduate School of Bioresources, National Univ. Corp., Japan
t-yamada@bio.mie-u.ac.jp*

Abstract

The effective rainfall amount is employed for the prediction of surface failures and debris flows they trigger. Although only one coefficient is used for the calculation of the effective rainfall amount, the determination method of the coefficient has not yet been established. Therefore, so far, the values of the coefficient are assumed and have been so applied in each study area. Our results show that there is a good linear relationship between the values of the coefficient characteristic of effective rainfall amount and regional rainfall amount in various sediment-related disaster areas by setting 270 mm as the critical effective rainfall amount. Recently sediment related-disasters occurred in two areas in volcanic regions and one area in a granite region. We revealed that coefficients for these areas are not dramatically different from those obtained in sedimentary rock regions.

Key words: Heavy rainfall, Surface failure, Storage, One Tank model, Pore pressure

1. はじめに

斜面における表層崩壊発生時刻の予測法を実効雨量法を用いて検討した。実効雨量法に必要な未知係数は、1 個 (林, 2008 ; 林・山田, 2011) であり、実効雨量と同義の 1 段タンクモデルを設定すれば、実効雨量は表土層底面を流れる浸透流の間隙水圧を代替させることが可能である (林・山田, 2013b, 2015b)。考慮すべき研究の背景を最後尾の [スライド 1] に示す。

これまで、実効雨量の係数は明確に決定できず、汎用的な使用ができなかった。本稿では、これまで求められた堆積岩地域の実効雨量の係数の他に、さ

らに 2012 年熊本県阿蘇地域の土砂災害と 2013 年伊豆大島の災害、2014 年広島災害に対する実効雨量の係数特性について検討したので、その結果を報告する (一部、林・山田 (2016) 参照)。

2. 実効雨量と同義の 1 段タンクモデル

筆者ら (林・山田, 2011 ~ 2015, 2013b) は、表土層内の水貯留量を表す実効雨量式と 1 段タンクモデル (図 1) の関係を鈴木・小橋 (1981) に基づき次式で示している。

$$D_i = R_i + aD_{i-1}, \quad (1)$$

$$a = 1 - b, \quad b = b_s + b_b \quad (2)$$

* 静岡大学 防災総合センター

** 三重大学 生物資源学研究科

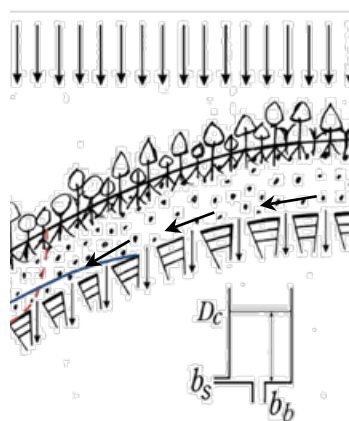


図 1 山地表土層モデル (a) と 1 段タンクモデル (b)
Fig. 1 Model of surface soil layer (a) and one Tank model (b).

ここに、 D_i ：時刻 i での実効雨量 (水貯留高)、 R_i ：時刻 i までの 1 時間雨量、 a 、 b ：係数である。これまでの研究 (林・山田, 2011, 2013b) より限界実効雨量 D_c として 270 mm が与えられている。

こうすると実効雨量は、それと連動する 1 段タンクモデルの貯留高を意味し、係数 a 、 b は、(2) 式によって結ばれることになる。この結果より、実効雨量の係数は、当該箇所にて与えられる降雨量に対し、土砂災害発生時刻にて限界実効雨量 D_c となるように試算的に求めることができる (林・山田, 2013b, 2015b)。

これまで求められた実効雨量に関連する流出・排水係数 b と地域雨量 $R_{1/2}$ との関係を図 2 に示す。図中の地域雨量 $R_{1/2}$ は、超過確率 2 年に一度の日雨量であり、直線は堆積岩他の●印のデータに対して求められたものである。データの範囲は、多雨地域である三重県宮川村災害時のデータから限界実効雨量を決める際に用いられた 2004 年福井県美山災害までのデータが含まれている。求められたデータに対して係数特性値 b と地域雨量 $R_{1/2}$ との関係は直線性を有し、その関係は良好である (林・山田, 2013b, 2015b)。

3. 火山地域他における実効雨量の係数特性値

これまで、実効雨量の係数 a は明確に決定できず、仮定に基づき議論がなされていた (鈴木・小橋, 1981)。しかしながら、図 2 のようなグラフに汎用性が与えられれば、横軸の地域雨量を当該地域に対して係数を求めることによって、先の (1) 式、ある

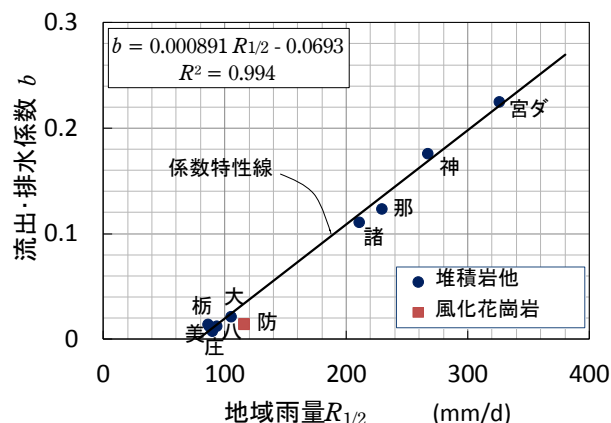


図 2 以前に求められた実効雨量の係数特性値
Fig. 2 The conventional characteristic values of the coefficient of effective rainfall amount.

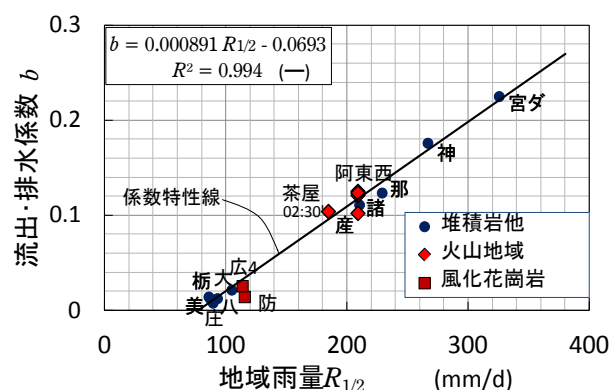


図 3 実効雨量の係数特性値 (火山地域などを追加)
Fig. 3 The characteristic values of the coefficient of effective rainfall amount (volcanic areas etc are added).

いは (2) 式より実効雨量の係数 a が求められる。それには、多雨地域から少雨地域^{注 1}までの降雨の慣れや耐性の影響、さらには地形・地質に基づく地盤の特性を考慮した日本各地における実効雨量の係数特性値 a 、 b と地域雨量 $R_{1/2}$ との関係を明らかにすることが必要となる。そこで今回は、火山地域と花崗岩地域における実効雨量の係数特性値が得られたので以下に示す。

図 3 には、先の図 2 のデータに火山地域の 2 地区の事例、すなわち 2012 年阿蘇災害 (「阿東西」に 3 カ所、「産」) と 2013 年伊豆大島災害「茶屋」および、2014 年広島災害 (「広 4」) の流出・排水係数 b の特性値が追加されている。詳細を以下に述べる。

さて、阿蘇災害時における流出・排水係数 b の値は、7 月 12 日 05 時 30 分 (「阿東西」) と 06 時 00 分

注 1：参考文献、林・山田 (2013b, 2015b) を参照

「産」を土砂災害発生時刻としたときに求められた値で、横軸の $R_{1/2}$ はアメダス阿蘇乙姫による地域雨量である。阿東西の3カ所は「立野」、「手野」、「坂梨」の各被害地であり、「産」は「産山」である（阿蘇検討委員会、2013）。流出・排水係数 b の算定には、熊本県の以下の各雨量計、「大津」・「長陽」、「城山」、「波野」、「産山」の雨量を使用した。各雨量計の位置や被害状況を[スライド2]に示す。スライド中の楕円で囲まれた区域が土層崩壊の発生域である。

伊豆大島災害時における流出・排水係数 b の特性値は、地震計の記録より10月16日02時30分を土砂災害発生時刻としたときの値で、 $R_{1/2}$ はアメダス大島による地域雨量である。流出・排水係数 b の算定には、山腹斜面上部にある「御神火茶屋」雨量計（東京都建設部）の雨量（一部、「野増」の雨量より推定）を用いた（図3中では「茶屋」と表記）。伊豆大島の各雨量計位置と等雨量線図を[スライド3]に示し、土層崩壊の発生域を楕円で示す。

「広4」の2014年広島災害における係数特性値は、8月20日03時50分を土砂災害発生時刻とし、 $R_{1/2}$ はアメダス三入による地域雨量である。実効雨量の算定には、広島県上原雨量計の雨量を用いた。また、図中の「防」は2009防府災害の係数特性値であり、土砂災害の発生時刻は7月21日12時00分である。 $R_{1/2}$ はアメダス防府による地域雨量であり、流出・排水係数 b は国土交通省「真尾」雨量計の雨量より算定された。「広4」と「防」の実効雨量の算出に用いた雨量計位置を図示していないが、豪雨域内で被害箇所に近い雨量計を使用した。

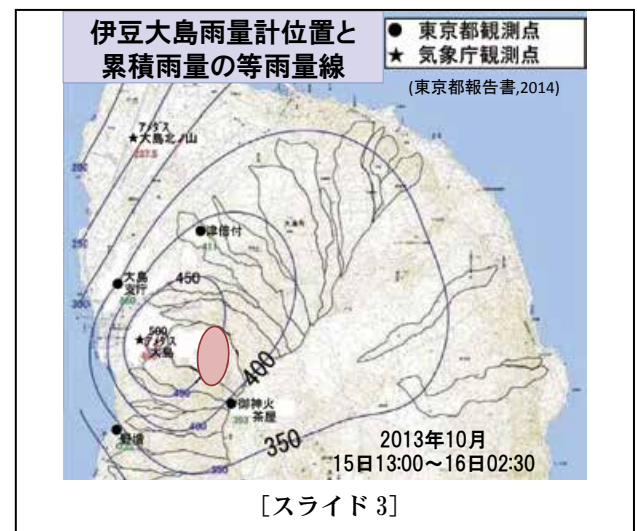
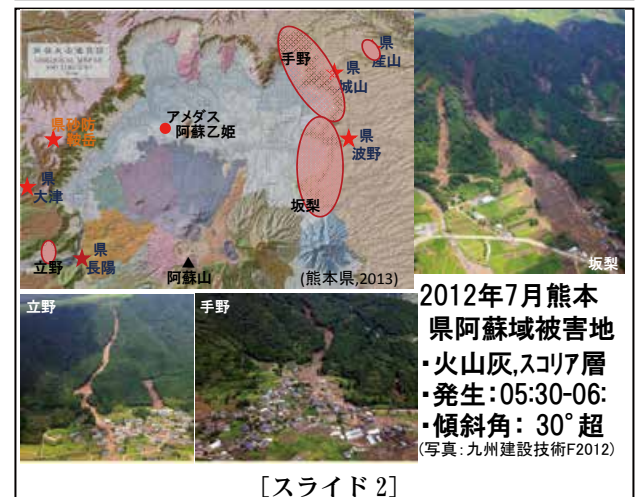
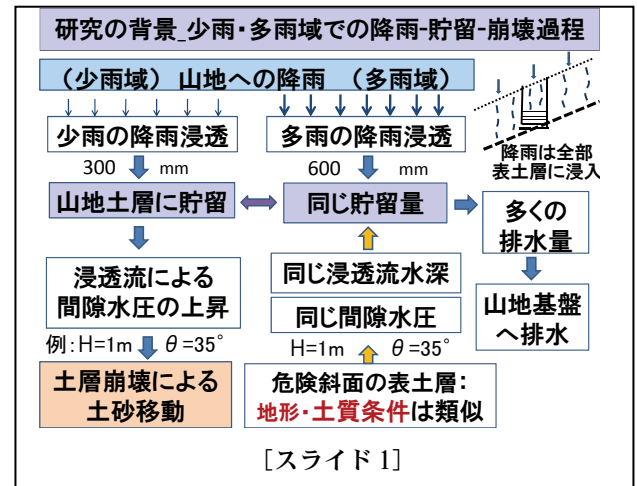
図3に示されるように、火山地域3カ所と花崗岩地域2カ所に対して求められた係数は、従来線の値に近く、堆積岩他の地域と特段の区別の必要性は感じられない。

4. まとめ

先の図3にみられる実効雨量の係数特性線と地域雨量の関係データは、地域雨量の大きい三重県宮川地区から地域雨量の少ない広島県庄原地区などの範囲までにおよび、各地域において横軸の地域雨量 $R_{1/2}$ が求められれば、実効雨量の係数特性線より係数 a 、 b が求められ、実効雨量が算定される。その後における必要な注意点は、算定された実効雨量が限界実効雨量270 mmやその前の予備的段階に到達

するかどうかをモニタリングすることにある。

実効雨量に関係する係数 a 、 b は、降雨に対する慣れによる表土層や基盤構造の耐性とも関係しており、これらの構造は、永年の降雨や地盤変動を伴う自然的過程を経て形成されて来たものと考えられる。



参考文献

- 1) 阿蘇地域土砂災害対策検討委員会 (2013) : 阿蘇地域土砂災害対策検討委員会報告書, 熊本県, 1-74, (<http://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/138/asokaigi-data.html>).
- 2) 林 拙郎 (1985) : 崩壊面積率と水文データとの二, 三の関係. 日本林学会誌, **67**(6), 209-217.
- 3) 林 拙郎 (2008) : 保全砂防学入門, 電気書院, 292pp.
- 4) 林 拙郎・山田 孝 (2011 ~ 2015) : 砂防学会研究発表会概要集.
- 5) 林 拙郎・山田 孝 (2013b) : 最近の土砂災害における実効雨量の係数の特性について. 砂防学会誌, **66**(2), 31-39.
- 6) 林 拙郎・山田 孝 (2015b) : 豪雨による斜面表層崩壊と実効雨量－斜面内土層の浸透流からの検討－. 地盤工学ジャーナル, **10**(1), 157-162.
- 7) 林 拙郎・山田 孝 (2016) : 伊豆大島および阿蘇地域における土砂災害発生に関する実効雨量式の係数特性. 自然災害科学, **34**(4), 285-294.
- 8) 菅原正巳 (1975) : 流出解析法. 共立出版, 257pp.
- 9) 鈴木雅一・小橋澄治 (1981) : がけ崩れ発生と降雨の関係について. 新砂防, **34**(2), 16-26.

要 旨

土砂災害の発生予測に用いられる実効雨量法は使用する係数が1つであるが, 求め方が確立されていなかった. そのため, 係数の値は従来より各地において仮定された値が用いられていた. 実効雨量の係数を求めるために筆者らは限界実効雨量として 270 mm を設定した. これによって, これまで堆積岩を中心とした各被災地における実効雨量の係数特性値と地域雨量の関係が明らかされた. 求められた両者の関係には良好な直線関係が認められた. 最近, 火山地域 2 カ所と花崗岩地域 1 カ所に土砂災害が発生した. そのため, この地域に対して実効雨量の係数特性値と地域雨量との関係が注目された. 今回求められたこの地域に対する実効雨量の係数データは, 従来求められていた堆積岩などの係数特性線に対して特に区別する必要性は認められなかった.

キーワード : 豪雨, 表層崩壊, 水貯留量, 1 段タンクモデル, 間隙水圧

実効雨量を用いた斜面崩壊発生危険度評価

小杉賢一朗*

Evaluation of Slope Failure Vulnerability Based on Antecedent Precipitation Index

Ken'ichirou KOSUGI

** Graduate School of Agriculture,
Kyoto University, Kyoto, Japan
kos@kais.kyoto-u.ac.jp*

Abstract

This study introduces a new method for evaluating slope failure vulnerability in steep mountainous regions by using antecedent precipitation indices (APIs). The method uses a novel two-dimensional diagram, which examine excesses of APIs over their past maximal values. The two-dimensional diagram evaluates each pair of APIs with various half-life times (HLTs). The method was applied for analyzing sediment disasters occurred recently: Kii and Shobara disasters. The former is characterized by deep and huge slope failures and the latter is well known by intensive occurrences of shallow failures. Results indicated that the method can take warnings of the occurrences of various slope failures. Since the method is simple and clear, and is based on hydrological and mechanical concepts, it has a potential to provide credible warning systems for disaster specialists as well as for local governments and residents.

Key words: Slope failure, Antecedent precipitation index, Groundwater, Warning system

1. はじめに

近年、表層崩壊の集中的な発生や大規模深層崩壊の発生が甚大な被害をもたらしている。同時に、気候変動に伴う降雨の強度や総量の増加が、この種の斜面崩壊の発生頻度や規模の更なる増大を招くと危惧されている。

斜面崩壊の発生・非発生を降雨データから予測する手法は、多くの既往研究によって検討され、その成果は土砂災害の警戒・避難に応用されてきた。ここで予測精度向上の鍵となるのは、(1) 適切な雨量指標の選定方法、ならびに(2) 適切な崩壊発生限界雨量線(CL)の設定方法だと考えられている。

(1) については、先行雨量の影響を評価するための長期的指標として積算雨量が、降雨強度の影響を

評価するための短期的指標として時間雨量が、永年用いられてきた。その後、斜面内部の雨水貯留量をタンクモデルで評価した土壌雨量指数(牧原・平沢, 1993)が提案され、長期的指標として広く使用されるようになっていく。一方、先行雨量と降雨強度の影響を単一のパラメータ(半減期)により調節できる実効雨量についても、多くの検討が加えられてきた。例えば1993年開催の総合土砂災害対策検討会(建設省)では、半減期1.5時間と72時間の実効雨量を、短期的・長期的指標に用いる方法が提案されている(寺田・中谷, 2001)。一方(2)に関しては、長期的な雨量指標と短期的な雨量指標をそれぞれ横・縦軸とするグラフ上で、安全・危険領域を過去の崩壊実績に基づき直線で区分する方法が永年用いられてき

* 京都大学大学院農学研究科

た。その後、ニューラルネットワークを用いた非線形の CL (倉本ら, 2001) などが提案され、判別精度や客観性の向上が図られている。

以上を例とする既往研究では、対象エリア内の崩壊発生・非発生実績に基づく解析を行い、崩壊発生降雨と非発生降雨の判別精度を向上させることに主眼がおかれてきた。すなわち、予測の「捕捉率」を最大に「空振り率」を最小にするのに最適な、雨量指標の選定方法と CL の設定方法を提示することが目的とされてきた。しかしながら、崩壊の発生・非発生は、対象エリア内に存在する個々の斜面の勾配、風化深度、力学強度、水文特性といった素因にも大きく依存することから、誘因である降雨で全てを説明することはできない。よって、既往の手法により「捕捉率 100%、空振り率 0%」を目指すのは無意味なことであり、「判別精度向上の追求」とは別の方向性を持った検討も必要だと考えられる。

そこで本研究では「崩壊を予測するのに最適な雨量指標と CL は、対象エリア内の個々の斜面毎に異なっている」との考えに基づき、崩壊発生危険雨量について新たな検討を試みた。

2. 方法

2.1 実効雨量の既往最大値を CL とした危険度判定

降雨に伴う斜面崩壊の誘因は、雨水の供給による斜面の水分状態の変化である。これには、含水率が増えることによる重量増加や力学強度低下も含まれるが、最も影響が大きいのは地下水位上昇による間隙水圧の増加だと考えられる。

地下水位が上昇すればするほど崩壊の危険性は大きくなる。ただし、自然斜面の土壌や基岩の強度定数(内部摩擦角や粘着力)を、その空間分布まで含めて正確に把握することは困難であることから、斜面崩壊に至る臨界地下水位を予め定めておくことは不可能である。従って、地下水位が「既往最大値」を超えて上昇している場合には、対象斜面は「いつ崩れてもおかしくない」状態に置かれていると考えるべきであろう。このことから、対象とする斜面の CL を「地下水位の既往最大値」に設定することが、土質力学的見地から最も合理的だと考えられる。

ただし、膨大な数に及ぶ危険斜面の全てで地下水位変動を計測することは不可能であるから、降雨データを用いた予測が不可避となろう。これに関し

て小杉ら(2013, 2014)は、「2 種類の実効雨量の冪数を説明変数とする重回帰モデル」を提案し、種々の斜面で観測された地下水位の再現計算を行っている。その結果は、いずれの斜面についても、実効雨量の半減期と冪数を適切に設定すれば、降雨に伴う地下水位変動を良好に再現できることを示していた。このことから、このモデルで最適化された半減期を持つ実効雨量を、対象斜面の崩壊予測に関する雨量指標とすることが、水文学的見地から最も合理的だと考えられる。そして、そのような実効雨量の既往最大値超過は、対象斜面の地下水位既往最大値超過に対応すると考えられることから、「実効雨量の既往最大値」を CL に設定することが、最も理に適っていると考えられる。

しかしながら小杉ら(2013, 2014)では、最適な半減期の値は 3.1 ~ 1400 h の範囲に分布して斜面毎に大きく異なっており、地下水位が計測されていない斜面について半減期の適値を推定する方法が、大きな課題として残されている。そこで本研究では、「全ての斜面は、最適な半減期を持つ 2 種類の実効雨量により崩壊発生の有無が説明されるが、半減期の値は斜面毎に固有の値であり、現時点では未知である」と考えることにした。この結果、崩壊発生の必要条件は「いずれかの半減期を持つ 2 種類の実効雨量の組み合わせが、既往最大値を超過すること」と考えることができる。そこで、「あらゆる半減期を持つ 2 種類の実効雨量の組み合わせについて、既往最大値超過を判定する手法」を、捕捉率の高い(漏れの少ない)、現時点では最も理に適った手法として提案した。

2.2 対象とした土砂災害

2.2.1 紀伊災害

2011 年の台風 12 号は、紀伊半島を中心に猛威をふるい、全国での被害は死者・行方不明者 98 名、重傷者 32 名、家屋損壊 4,008 棟を数えた。特に奈良県、和歌山県、三重県では深層崩壊が多発し、河道閉塞・土石流を伴って甚大な被害をもたらした(以下、紀伊災害と呼ぶ)。深層崩壊の多くは、四万十帯、秩父帯、三波川帯を地質とする地域で発生していた(松村ら, 2012)。

図 1 には、多くの深層崩壊が発生した奈良県十津川村のほぼ中央に位置する、気象庁アメダス風屋観測所(北緯 34 度 2.7 分、東経 135 度 47.2 分、標高

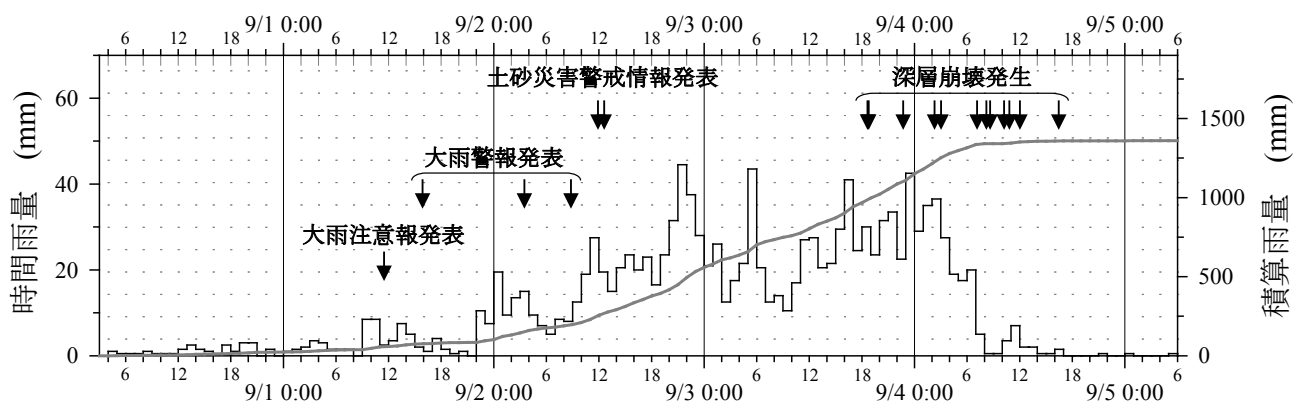


図1 紀伊災害時のハイエトグラフ

Fig. 1 Hyetograph for Kii disaster.

301 m) の雨量データを示した。降雨は約 5 日間継続し、総雨量は 1,360 mm に達した。図中には、風屋観測所を中心とする半径 20 km 圏内の深層崩壊（発生時刻が精度良く特定されている 12 カ所）について、奈良県 (2013) と千木良ら (2012) から引用した発生時刻を示している。深層崩壊は降雨後半に多発していることがわかる。これらの 12 カ所のうちの 11 箇所は、奈良県十津川村、五條市、野迫川村、天川村で発生しているが、これらの市村で大雨注意報が発表されたのは 9/1 11:17、大雨警報が発表されたのは 9/1 15:48 ~ 9/2 8:45、土砂災害警戒情報が発表されたのは 9/2 11:50 ~ 12:35 であった。

2.2.2 庄原災害

広島県庄原市川北町では、2010 年 7 月 16 日に発生した豪雨により斜面崩壊が集中的に発生し、土石流を伴って、死者 1 名、重傷者 1 名、家屋損壊 38 棟の被害をもたらした（以下、庄原災害と呼ぶ）。海堀ら (2010) によれば、崩壊斜面は火山岩、堆積岩、火山灰由来のクロボク土層が混在する複雑な地質を呈し、スギ・ヒノキ人工林、広葉樹二次林を植生とするが、伐採跡地も含まれていた。崩壊の大半は、幅 10 ~ 15 m、長さ 20 ~ 60 m、深さ 0.5 ~ 1.5 m の規模で、表層崩壊に分類される。

図 2 には、最寄りの広島県大戸観測所で観測されたハイエトグラフを示した。災害の直接の引き金となった 15 ~ 19 時の降雨イベントは、降雨強度が大きい集中豪雨であったが、海堀ら (2010) は、先行する 5 日間に累積雨量 260 ~ 270 mm 程の大雨があったことも、災害発生に大きな影響を与えたとしている。図 2 に示したとおり、庄原市に大雨警報が発表

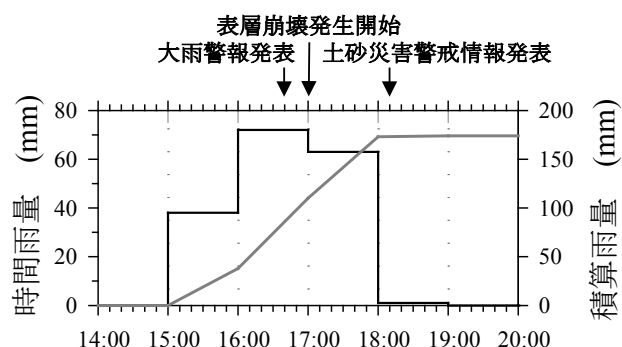


図2 庄原災害時のハイエトグラフ

Fig. 2 Hyetograph for Shobara disaster.

されたのは 7/16 16:39 であった。崩壊・土石流が発生し始めたのは、72 mm の時間雨量が降った直後の 17 時前後であったことが、目撃情報によりわかっている（海堀ら、2010）。広島地方気象台より土砂災害警戒情報が発表されたのは 18:10 であった（滝口、2011）。

2.3 雨量データ

紀伊災害に関しては、気象庁アメダス風屋観測所の雨量データ（以下、紀伊雨量データと呼ぶ）を用いて、実効雨量既往最大値の計算を行った。庄原災害に関しては、図 2 に示した広島県大戸観測所のデータは長期間に渡って遡ることができない。このため海堀ら (2010) は、被災地から約 7 km 離れた地点にある気象庁アメダス庄原観測所（北緯 34 度 51.6 分、東経 133 度 1.4 分、標高 300 m）のデータを用いて、災害を引き起こした降雨の超過確率年を算定している。本研究でもこれに倣って、庄原観測所の雨量データ（以下、庄原雨量データと呼ぶ）を用いて実効雨量既往最大値の計算を行った。

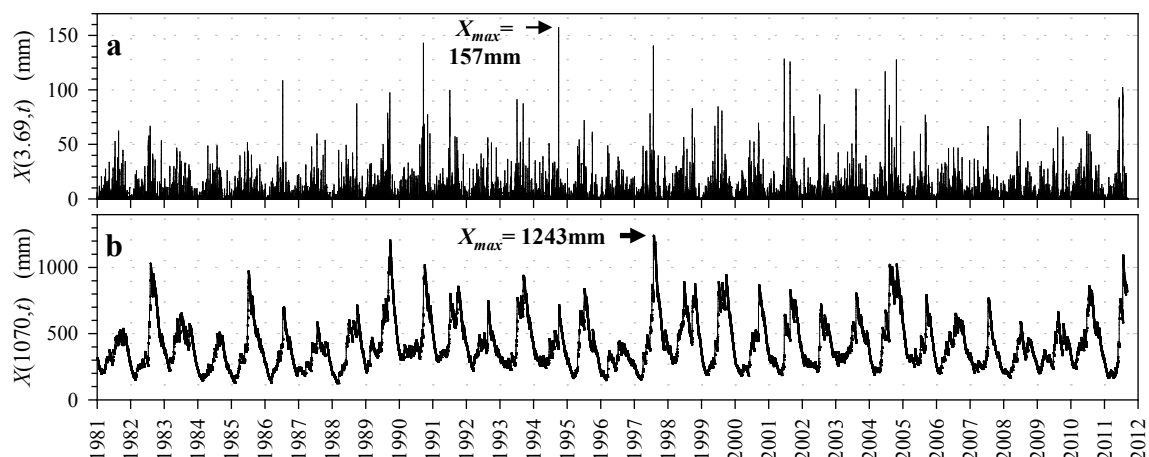


図 3 (a) 半減期 3.69 h, (b) 半減期 1070 h の実効雨量 X とそれらの既往最大値 X_{max} (紀伊雨量データ)
 Fig. 3 APIs, X , with half life times of (a) 3.69 and (b) 1070 h and their past maxima, X_{max} (Data for Kii).

3. 結果

3.1 紀伊災害

図 3a, b は, 半減期 M をそれぞれ 3.69, 1070 h としたときの, 紀伊雨量データによる時刻 t の実効雨量 $X(M, t)$ を示したものである. $M = 3.69$ h の場合の既往最大値 $X_{max}(3.69)$ は 157 mm であり, 1994 年 9 月 29 日 20 時に記録された. 一方, $X_{max}(1070)$ は 1997 年 7 月 28 日 19 時に記録され, 1,243 mm であった.

図 4 は, 図 3b に示した半減期 1070 h の実効雨量 $X(1070, t)$ を横軸に, 図 3a に示した半減期 3.69 h の実効雨量 $X(3.69, t)$ を縦軸にとって描いた, 紀伊雨量データによるスネーク曲線図である. 灰色のプロットは紀伊災害の降雨イベント直前までのデータを表している. 図中には, これらのプロットを用いて「既往範囲内」に相当する領域 N と, 「既往最大値超過」に相当する領域 A ~ D を特定した結果を示している. 更に図中の黒色のプロットは, 紀伊災害の際のスネーク曲線を表している. スネーク曲線は時間の経過に伴い領域 B に侵入し, 横軸実効雨量 $X(1070, t)$ が既往最大値を大きく超過したことがわかる. ただしスネーク曲線を詳しく見ると, 領域 B に入る直前の 2 時間は領域 A に存在していたことがわかる. すなわち, $X(1070, t)$ が単独で既往最大値を超過する直前の 2 時間は, $X(1070, t)$ と $X(3.69, t)$ のいずれもが既往最大値以下であったにもかかわらず, 両者の組み合わせで見ると既往最大値を超過していたことになる.

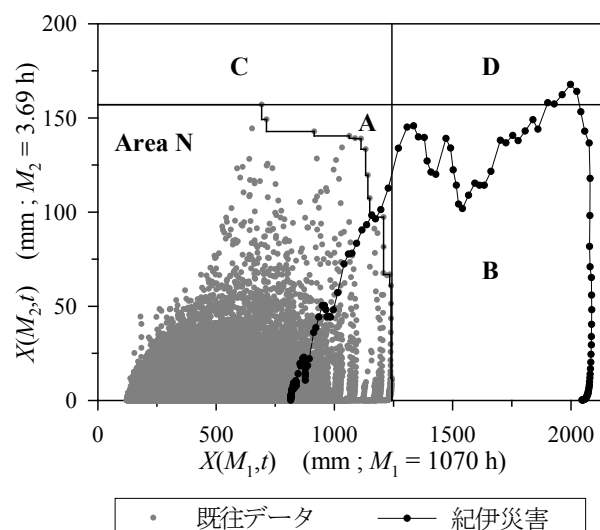


図 4 スネーク曲線図(紀伊雨量データ)
 Fig. 4 Snake line plots (Data for Kii).

図 4 は「 $M_1 = 1070$ h, $M_2 = 3.69$ h のスネーク曲線図」であったが, これと同様の解析を, 半減期 M_1 , M_2 を種々に変化させて行った結果を図 5 にまとめた. 図中の各パネルでは, 横軸と縦軸に示した半減期 M_1 , M_2 の組み合わせによるスネーク曲線図において, 紀伊災害の各時刻におけるプロットが, 領域 A ~ D もしくは領域 N のいずれに存在しているかを, それぞれの領域に対応するシンボルで表している. なお各パネルの対角線上では $M_1 = M_2$ であり, 1 種類の実効雨量を単独で見たときの既往最大値超過の有無を示している. 以下では, 図 5 中の各パネルを「二次元判定図」と呼ぶことにする.

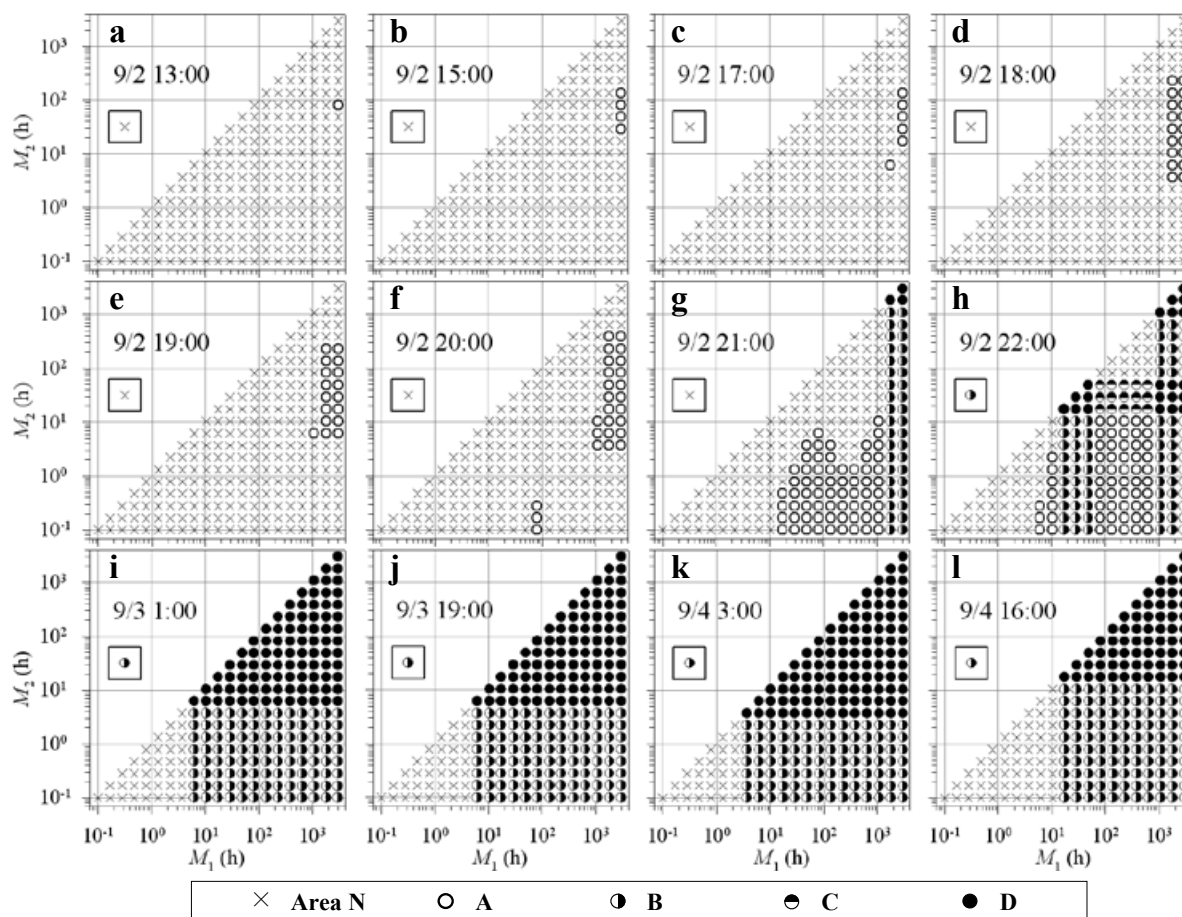


図5 二次元判定図による既往最大値超過判定(紀伊災害の結果)

Fig. 5 Evaluation of the past maximum excess by the two-dimensional diagram (Results for Kii disaster).

降雨イベント開始から 9/2 12:00 までは、いずれの M_1 , M_2 の組み合わせについてもスネーク曲線が領域 N に存在していた(図は省略)。9/2 13:00 になると、 $M_1 = 3000$ h, $M_2 = 81.3$ h のスネーク曲線図上で「領域 A」が記録され、既往最大値の超過が初めて発生した(図 5a)。この時刻は、対象地区全域で土砂災害警戒情報が出された直後に対応している(図 1)。その後、9/2 20:00 にかけて、既往最大値超過を示す M_1 , M_2 の組み合わせが次第に増加した(図 5b ~ f)が、全て「領域 A」であり、単独の実効雨量での超過は起きていなかったことがわかる。単独の実効雨量による既往最大値超過が初めて発生した 9/2 21:00 には、既に多くの M_1 , M_2 の組合せで既往最大値超過を表す領域 A, B, もしくは D が記録されていた(図 5g)。9/2 22:00 になると、半減期 17.3 ~ 48.6 h および 1070 ~ 3000 h の実効雨量が単独で既往最大値を超過し、領域 A ~ D のいずれもが多数出現した(図 5h)。更に 9/3 1:00 には $M_1 \geq 6.18$ h の全範囲が領域

B もしくは D となり(図 5i)、深層崩壊が発生した 9/3 19:00 から 9/4 16:00 にかけて、同様の状況が継続した(図 5j ~ l)。但し、既往最大値超過が最も激しかった 9/4 3:00 でも、 $M_2 \leq M_1 \leq 2.20$ h では領域 N となっており(図 5k)、半減期が短い実効雨量の組合せによる既往最大値超過は起きていなかったことがわかる。

3.2 庄原災害

庄原災害に関する二次元判定図を図 6 に示した。降雨開始から 1 時間が経過した 7/16 16:00 (積算雨量 38 mm; 図 2 参照)には、既に $48.6 \leq M_1 \leq 1070$, $0.100 \leq M_2 \leq 0.469$ の範囲で領域 A が出現し、既往最大値超過が起きていたことがわかる(図 6a)。続いて 72 mm の時間雨量が降り、土砂災害が発生した 17:00 になると、多くの M_1 , M_2 の組合せで既往最大値超過が発生した(図 6b)。ただしこの時刻には、 136 h $\leq M_2 \leq M_1$ の範囲の組合せでは既往最大値超過は発生していなかった。更に 63 mm の時間雨量が降っ

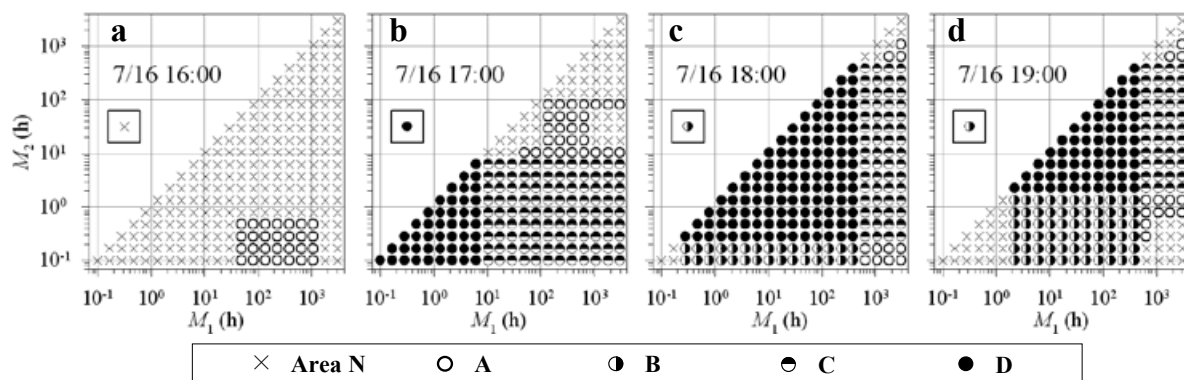


図6 二次元判定図による既往最大値超過判定(庄原災害の結果)

Fig. 6 Evaluation of the past maximum excess by the two-dimensional diagram (Results for Shobara disaster).

た18:00には、既往最大値超過は M_1 , M_2 が大きな範囲にも拡大し(図6c), 降雨終了時の19:00になると M_1 が小さな範囲で縮小した(図6d)。

4. 考察

4.1 深層崩壊および表層崩壊発生時の状況

紀伊災害で最初の深層崩壊が発生した9/3 19:00の実効雨量既往最大値超過状況は、庄原で表層崩壊発生が確認された7/16 17:00の状況と対照的である。すなわち、図5j～lに示した紀伊災害の深層崩壊発生時には、半減期が2.20 h以下の実効雨量の組合せによる既往最大値超過は起きていない。一方、庄原災害で最初に表層崩壊が確認された時点(図6b)では、半減期が136 h以上の実効雨量の組合せによる既往最大値超過は起きていない。以上の結果は、「深層崩壊の発生には積算雨量の影響が大きく、表層崩壊の発生には降雨強度の影響が大きい」という、既往研究で示された傾向(飯田, 2012)と合致している。本研究で提示した「実効雨量の半減期を細かく変化させて既往最大値超過を連続的に調べる」手法によって、この傾向が明瞭に確かめられた上、実効雨量の半減期を指標として定量化されたといえる。

更に以上の結果は、本研究の手法によって種々の崩壊形態に対応した土砂災害危険度評価を包括的に示している。図5, 6では、紀伊災害における最初の深層崩壊が発生する29時間前、庄原災害における表層崩壊発生1時間前には既往最大値超過の判定が出されており、見落としのない危険度判定を実施できたことがわかる。このように、スネーク曲線図による評価結果を一目で知ることが

できる二次元判定図は、対角線上($M_1 = M_2$)のプロットから単独の実効雨量による評価結果も知ることができ、包括的な土砂災害危険度評価において有用性が高いと考えられる。

4.2 土砂災害警戒情報の基準との比較

土砂災害警戒情報の発表には連携案方式(国土交通省ら, 2005)による基準が用いられることが多い。連携案方式では、横軸を土壌雨量指数、縦軸を時間雨量として描いたスネーク曲線が、CLを超過するかどうかで判定が行われる。このスネーク曲線図についても、2種類の実効雨量を組合わせた場合と同様の方法で、既往最大値超過の評価を実施してみた。

結果を、図5, 6の二次元判定図中のサブウィンドウ(各パネル中の実線の四角形)内に示す。紀伊災害では、9/2 21:00までは既往最大値超過はみられなかった(図5a～g)が、9/2 22:00にスネーク曲線が領域Bに入り(図5h)、横軸の土壌雨量指数が既往最大値を超過したことがわかる。その後、最後の深層崩壊が発生する9/4 16:00にかけてスネーク曲線は領域Bに留まり続けたが、縦軸の時間雨量は既往最大値を超えることはなかった(図5i～l)。一方で庄原災害の際には、7/16 17:00にスネーク曲線が領域Dに入り、土壌雨量指数と時間雨量が同時に既往最大値を超過したことがわかる(図6b)。その後、スネーク曲線は領域Bに入り、土壌雨量指数のみが既往最大値を超過し続けた。

連携案方式の縦軸の時間雨量は、半減期の短い実効雨量と等価の指標である。一方、横軸の土壌雨量指数は、3段直列型タンクモデルの各タンクの貯水量の和であり、計算式の上ではいずれの半減期の実

効雨量とも直接は対応しない。ただし、紀伊災害ならびに庄原災害の各々について、降雨イベント中の土壌雨量指数と各種半減期を持つ実効雨量の直線回帰を行ったところ、紀伊災害については半減期 17.3 h の実効雨量が、庄原災害については半減期 4.53 h の実効雨量が最も高い相関 (r^2 はそれぞれ 0.986, 1.000) を示すことがわかった。

図 5 において、 $M_1 = 17.3$ h, $M_2 = 0.1$ h 付近のプロットが示す挙動は、連携案方式についてのプロットの挙動と似ていることがわかる。図 6 の $M_1 = 4.53$ h, $M_2 = 0.1$ h 付近のプロットについても同様のことがいえる。このように土壌雨量指数は、紀伊災害のような積算雨量が大きいイベントでは半減期が相対的に長い実効雨量と似た指標となり、庄原災害のような降雨強度が大きいイベントでは半減期が相対的に短い実効雨量と似た指標になる傾向が認められた。

以上からわかるのは、連携案方式においては、図 5, 6 の M_1 と M_2 の組み合わせで表される領域のうち、限られた一部しか着目していないということである。この結果、連携案方式ではカバーできない M_1 と M_2 の組み合わせにおいて、より早いタイミングで既往最大値超過が発生していた(紀伊災害では 9 時間前の 9/2 13:00、庄原災害では 1 時間前の 7/16 16:00)。

ただし連携案方式では、「既往最大値超過」を警戒情報発表の基準とはしておらず、既往災害実績などに基づき定められた CL の超過を基準としている。実際に紀伊災害時には、土砂災害警戒情報は 9/2 11:50 ~ 12:35 の間に発表されており、これは任意の M_1 と M_2 の組み合わせで初めて既往最大値超過が記録された時刻(9/2 13:00、図 5a)とほぼ一致していた。一方、庄原災害では、土砂災害警戒情報の発表は崩壊・土石流の発生時刻よりも遅くなった。これは極めて局所的な強雨であったことも原因であるが、土砂災害が発生し始める 1 時間前の 7/16 16:00 の結果(図 6a)に着目すると、連携案方式では既往最大値超過を見落とす結果となっていたことがわかる。

庄原災害時の降り始め 1 時間(15 ~ 16 時)の雨量は 38 mm(図 2)であり、既往最大値 64 mm(1998 年 8 月 22 日に記録)の 6 割程度であった。しかしながら、先行する 5 日間に累積 271 mm の降雨が降っていた。海堀ら(2010)は、先行降雨としてかなりの雨量

を経験した状況の中で猛烈な雨が更に加わったことを、庄原災害発生の原因として指摘している。図 6a は、スネーク曲線図の半減期を連続的に変化させて先行降雨と当該降雨の影響を漏らさず評価することによって、海堀ら(2010)と同様の検討を、より客観的・定量的に実施できるものとなっている。すなわち、先行降雨の影響により $48.6 \leq M_1 \leq 1070$ h の横軸実効雨量が大きく増加したことと、15 ~ 16 時の 38 mm の時間雨量によって $0.100 \leq M_2 \leq 0.469$ h の縦軸実効雨量が増加したことの組み合わせによって、既往最大値超過が 16:00 の段階で発生したことを示すことができている。このように、本研究で提示した判定手法では、庄原災害発生 1 時間前から危険度が増加している状況を察知できており、より捕捉率の高い(見落としの少ない)適確な手法となり得ることが考えられる。

5. まとめ

本研究では斜面崩壊発生危険度予測に関して、「あらゆる半減期を持つ 2 種類の実効雨量の組み合わせについて、既往最大値超過を判定する手法」を、捕捉率の高い、現時点では最も理に適った手法として提案した。その上で、深層崩壊が多発した紀伊災害と表層崩壊が集中的に発生した庄原災害を採り上げて、提示した手法による解析を行った。得られた主な成果は、以下の通りである。

- 1) 2 種類の実効雨量の組み合わせについて、半減期を連続的に変化させた場合に、既往最大値超過状況を容易に判定することのできる、二次元判定図を提示した。
- 2) 深層崩壊と表層崩壊では、崩壊発生時に既往最大値超過を示す実効雨量の半減期が異なることが、定量的に示された。
- 3) 二次元判定図は、見落としの少ない危険度判定を行うことができ、包括的な土砂災害危険度評価において有用性が高いと考えられる。
- 4) 土壌雨量指数と時間雨量を指標とした連携案方式は、二次元判定図の一部しか着目しておらず、既往最大値超過を見落とす可能性がある。
- 5) 実効雨量の既往最大値を崩壊発生限界雨量線(CL)とする本手法は、斜面水文学的・地盤工学的合理性を有すると同時に、客観的かつ平易なものであり、市民が主体的に警戒・避難を実施

する上で有用な情報を提供し得る。また、降雨観測データの蓄積が進むことで CL が自動的に引き上げられ、空振りを次第に減らすことができると考えられる。

本研究の手法を適用するにあたり考慮しておかねばならないのは、地震、樹木の風倒、近接する斜面の崩壊、人為的な土地改変などに起因する、斜面の水文特性や力学強度の変化である。斜面に何らかの変化が生じたと考えられる場合には、降雨の既往最大値超過が発生する以前に崩壊する事が考えられ、CL を引き下げる必要が生じる。その具体的な方法については今後の研究による知見の蓄積が必要であるが、その際にも本研究で提案した手法が有効な解析ツールになると考えられる。すなわち、半減期を連続的に変化させて、降雨の長期的・短期的影響を漏らさず評価することによって、本当に既往最大値超過が発生しない状況で斜面崩壊が起こったのか、そうであるなら既往最大値をどの程度下回る降雨で崩壊が起こったのかを解析することで、斜面変化の影響を客観的かつ定量的に検討できると考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたり、科学技術振興機構 CREST ならびに科研費(課題番号 15H01796)の助成を受けた。なお本稿は、小杉・水山(2014)、小杉(2015)を元にして加筆を行ったものである。

参考文献

- 1) 千木良雅弘・松四雄騎・ツォウチンイン・平石成美・松澤真・松浦純生(2012)：2011 年台風 12 号による深層崩壊。京都大学防災研究所年報, No.55A, p.193-211.
- 2) 飯田智之(2012)：技術者に必要な斜面崩壊の知識。鹿島出版会, 237pp.
- 3) 海堀正博・杉原成満・中井真司・荒木義則・山越隆雄・林 真一郎・山下祐一(2010)：2010 年 7 月 16 日に発生した広島県庄原市の土砂災害の緊急調査報告。砂防学会誌, Vol.63, No.4, p.30-37.
- 4) 国土交通省河川局砂防部・気象庁予報部・国土交通省国土技術政策総合研究所(2005)：国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法, https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/sabo/dsk_tebiki_h1706.pdf, 参照 2014-01-10.
- 5) 小杉賢一郎(2015)：斜面崩壊の誘因となった降雨の評価手法。砂防学会誌, 67(5), 12-23.
- 6) 小杉賢一郎・藤本将光・山川陽祐・正岡直也・糸数哲・水山高久・木下篤彦(2013)：山体基岩内部の地下水位変動を解析するための実効雨量に基づく関数モデル。砂防学会誌, Vol.66, No.4, p.21-32.
- 7) 小杉賢一郎・水山高久(2014)：2014 年 7 月 9 日に発生した長野県南木曾町の土石流災害の誘因となった降雨イベントの解析。砂防学会誌, 67(4), 18-22.
- 8) 小杉賢一郎・三道義己・藤本将光・山川陽祐・正岡直也・水山高久・平松晋也・福山泰治郎・地頭菌隆(2014)：関数モデルを用いた深層崩壊の要因となる基岩地下水位変動の解析。砂防学会誌, 66(6), 3-14, 2014.
- 9) 倉本和正・鉄賀博己・東寛和・荒川雅生・中山弘隆・古川浩平(2001)：RBF ネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究。土木学会論文集, No.672/VI-50, p.117-132.
- 10) 牧原康隆・平沢正信(1993)：斜面崩壊危険度予測におけるタンクモデルの精度。気象庁研究時報, Vol.45, No.2, p.35-70.
- 11) 松村和樹・藤田正治・山田 孝・他 18 名(2012)：2011 年 9 月台風 12 号による紀伊半島で発生した土砂災害。砂防学会誌, Vol.64, No.5, p.43-53.
- 12) 奈良県(2013)：紀伊半島大水害大規模土砂災害アーカイブ, <http://shinsouhoukai.sakura.ne.jp/top.html>, 参照 2014-01-14.
- 13) 滝口季彦(2011)：平成 22 年 7 月 16 日「庄原ゲリラ豪雨」を振り返って。砂防と治水, Vol.44, No.5, p.21-25.
- 14) 寺田秀樹・中谷洋明(2001)：土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法, 国土技術政策総合研究所資料第 5 号, 国土交通省, 58pp.

斜面の変形と地下水位の同時モニタリングに基づく表層崩壊発生予測

笹原 克夫*

Prediction of an Onset of a Rainfall-induced Landslide Based on Monitoring of Deformation and Groundwater Level in a Slope

Katsuo Sasahara

**Kochi University, Japan
sasahara@kochi-u.ac.jp*

Abstract

Analysis of the monitored data on the surface displacement and the groundwater level at different locations in sandy model slope under artificial rainfall was conducted to establish time-prediction method of an onset of a rainfall-induced landslide based on the monitoring of deformation and groundwater in a slope. The analysis revealed that the relation between the surface displacement and the groundwater level can be modified as hyperbolic curve. The maximum surface displacement grew larger and maximum groundwater level was smaller at farther location from the toe of the model slope. The time-prediction based on the monitored data was proposed as following procedures. (1) To make the regression equation for the surface displacement - the groundwater level based on the monitored data at any time before the failure, (2) To make the regression equation for the time - the groundwater level based on the same data with (1), and (3) To incorporate the equation for the time - the groundwater level into that for the surface displacement - the groundwater level then to derive the time - the surface displacement relation. (4) To derive the time - the inverse of the surface displacement velocity from the equation for the time - the surface displacement relation. The equation for the time - the surface displacement and the equation for the time - the inverse of the surface displacement velocity could simulate the actual phenomena of the model slope well based on the monitored data.

Key words: Rainfall-induced landslide, Time-prediction, Surface displacement, Groundwater level

1. はじめに

社会インフラのメンテナンスのためのモニタリング技術の活用が注目を浴びている。人家裏や道路脇の斜面の変状監視においても例外ではない。実際に国土交通省の所管事業（ほとんど道路事業）では、傾斜計、伸縮計、レーザー計測や GPS(GNSS) を用いた斜面の変位（変形）の計測が多くなされているという報告¹⁾がある。

斜面の変位計測に基づく斜面崩壊発生時刻の予測については、1960 年代より斉藤²⁾や福園³⁾による

研究が実施され、実際の崩壊発生予測に多くの実績を挙げてきた。斉藤²⁾の方法は応力一定条件下の土のクリープ変形曲線における、破壊直前の第 3 次クリープ段階（図 1）の時間～変位関係を表す実験式に基づき、崩壊発生時刻を予測する方法である。また福園³⁾は一定強度の散水下の模型斜面の地表面変位計測に基づき、以下のような変位速度と加速度の関係を得ている。

* 高知大学

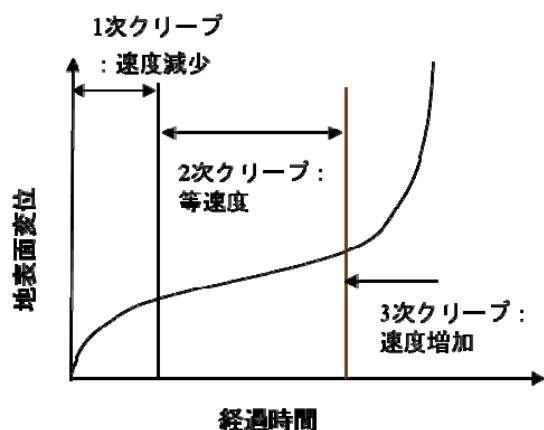


図 1 土の時間－変位の関係

Fig. 1 Time – displacement of the soil before failure.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a \left(\frac{dx}{dt} \right)^\alpha \quad (1)$$

上式で x : 地表面変位, t : 時間, a および α : 実験定数である。しかしながら特に降雨による表層崩壊のメカニズムを考えると、降雨浸透に伴う斜面中の土壌水分の増加に起因するサクション（負の間隙水圧）の減少や、地下水位の上昇に伴う間隙水圧の増加が発生する。時間～変位関係のみに着目する齊藤や福岡の理論では、これらの斜面内の応力変化を扱えない。降雨による斜面崩壊を扱う場合には、斜面内の応力変化を扱う理論が必要である。

上記の問題に対処するために、笹原・酒井⁴⁾は降雨時の斜面崩壊の発生時刻を、斜面内の間隙水圧（地下水位）と地表面変位の計測データを用いて予測する手法を提案した。この手法による予測は、(1) 簡便ではあるが力学的な根拠のあるモデルを用いる、(2) モデルの中の定数は、事前の土質試験等に頼ることなく、すべてモニタリング結果に基づいて決める、という 2 点の特徴を有する。実務を考えるとこれらの 2 点は重要な点である。本論文では、上記の予測手法の適用性を検討するために、砂質土よりなる模型斜面に散水して崩壊させ、崩壊までの模型斜面内の土壌水分や変形を計測した。このデータを用いて検討を進める。

2. 研究方法

2.1 実験装置

図 2 に示すような模型斜面を作成し、斜面内部に様々な計測装置を設置した。斜面部の幅は 0.5 m、

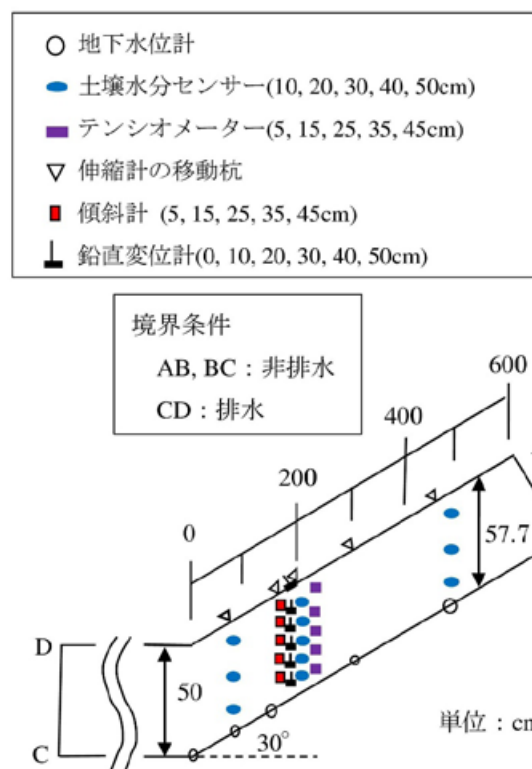


図 2 模型斜面と計測装置の配置

Fig. 2 Model slope and the arrangement of monitoring devices.

鉛直方向の深さ 0.577 m、そして長さ 6 m である。斜面の表面と底面は平行で、傾斜は 30° である。模型斜面形状は、小山内等⁵⁾による過去のがけ崩れ発生斜面の形状の調査結果を基に決定した。模型斜面は筑波山まさ土 ($D_{10}=0.064$ mm, $D_{50}=1.25$ mm, $D_{60}=1.4$ mm, $D_{max}=9.5$ mm, $U_c=21.88$) で作成した。模型底面には縦断方向に 0.5 m 毎に、高さ 1 cm の滑り止め板を横断させ、模型斜面が土槽の底板上をスリップしないようにした。また側面はガラス張りで、模型斜面の変形を可視化するために、縦断方向に 0.5 m 毎に白色珪砂柱を入れた。模型斜面から不攪乱供試体を採取して間隙比および含水比を測定すると、各々 0.60 ~ 0.61 と 6.5 ~ 7.8 % であった。模型斜面内には図 2 に示す位置に様々な計測装置を設置したが、本報告では、斜面下端から 0.75 m, 1.6 m, 2 m, および 3 m の地表面に移動杭を設置して伸縮計により計測した地表面変位と、斜面下端から 0.75 m, 1.5 m, 2 m, および 3 m の模型底面に設置した地下水位計による地下水位を検討に用いた。斜面下端から 4.5 m の位置では地下水位が発生せず、それに対応して地表面変位も変化しなかったため、検討対象からはずした。

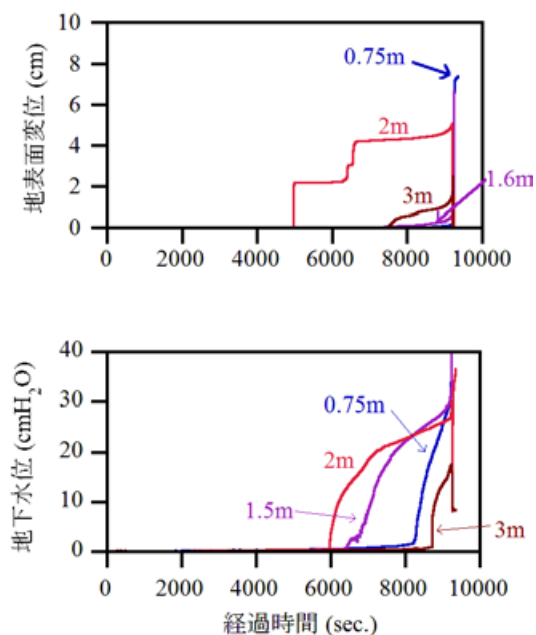


図3 地表面変位と地下水位の経時変化
Fig. 3 Time variation of the surface displacement and the groundwater level.

2.2 実験条件

自然斜面は過去に数多くの降雨の履歴を有し、それが現在の斜面内の応力状態に影響を与えていると考えられることから、今回の実験では、15～25 mm/hの一定強度で3時間の散水を4回行って事前降雨とした。事前降雨イベントは3日間の間隔を空けて与えた。そしてその後本降雨イベントとして、50 mm/hの一定強度で散水を行い、模型斜面が崩壊するまで散水を続けた。散水開始後9,220秒後に崩壊が発生した。

3. 実験結果

図3に斜面上の異なる位置における、地表面変位と地下水位の経時変化を示す。なお斜面下端から1.6 mの地表面変位に対比する地下水位として、斜面下端から1.5 mの位置のデータを用いる。斜面下端から0.75 mと1.6 mの地表面変位は、明らかに地下水位発生時刻以降から増加するが、斜面下端から2 mおよび3 mでは地表面変位の増加が地下水位の発生に先行する。特に斜面下端から2 mの位置では5,000秒に地表面変位が急増するが、その時点では地下水位が発生していない。これは表層付近の不飽和状態でのすべり(写真1のすべり面2)と考えられ、別途



写真1 崩壊後の模型斜面(側面)
Photo 1 Lateral view of the failed slope.

計測した深さ5 cmでの傾斜計が顕著な動きを示していないことから、それよりも浅い層の動きであると考えられる。このように斜面下端から2 mおよび3 mの位置では、地下水位発生以前から地表面変位は増加し始めるものの、各々6,000秒後と8,500秒後からの地下水位上昇に伴う地表面変位の増加が、地下水位発生以前に比べて顕著である。なお斜面下端から2 mの位置では、地下水位発生以降6,300秒および8,900秒の時点の2回地表面変位の急増が認められる。6,300秒では別途計測した深さ45 cmの傾斜計が動き出しており、それは8,900秒以降急増することから、これらの時点での地表面変位の急増はすべり面1(写真1)より上の土層の、地下水位上昇に伴うせん断変形によるものであることがわかる。つまり斜面下端から2 mおよび3 mなど斜面下端から遠い部位では、地下水位発生以前の不飽和状態でも地表面変位が増加するが、やはり地下水位発生以降にその上昇に伴う地表面変位増加が著しい。これらより地表面変位の増加は、地下水位の増加に依存するところが大きいと言える。

写真1は崩壊後に模型側面から撮影した写真である。白色珪砂柱の変形状況から判断すると、斜面下端から3 mより下部では、斜面浅層部と斜面底面付近に複数のすべり面が形成された。図2の斜面下端から2 mの位置の地表面変位を見ると、最終的な崩壊を含めて3回の急増が認められるが、写真2もこの複数の崩壊の発生を裏付ける。

次に斜面上の異なる位置における地表面変位と地下水位の関係を検討する(図4)。斜面下端から

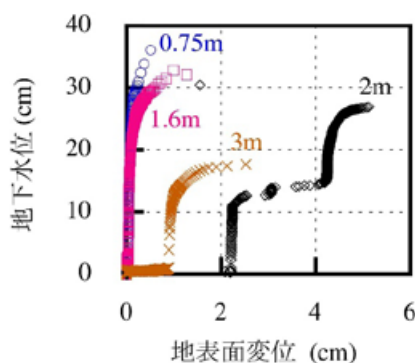


図 4 地表面変位と地下水位の関係

Fig. 4 The surface displacement – the groundwater level.

0.75 m および 1.6 m では、地下水位発生前の地表面変位の増加は見られず、地下水位上昇に伴う地表面変位の増加のみが認められるが、斜面下端から 2 m および 3 m では地下水位発生前にも各々 2 cm および 1 cm 程度の不飽和状態での地表面変位増加が認められる。しかしこれらの位置でも、地下水位上昇に伴う地表面変位の増加量の方が、地下水位発生前のそれより大きい。つまり地表面変位の増加は、斜面下端から遠い位置においても、大部分は地下水位上昇に依存するといえる。斜面下端から 2 m の位置では、複数の崩壊が確認され、変形メカニズムが他の位置より複雑であると考えられるので、これを除外して考えると、斜面下端から遠い位置ほど崩壊発生までの地表面変位が大きくなると共に、最大地下水位が小さくなる。また地下水位発生以降の地下水位と地表面変位の関係は、当初は地下水位上昇に対する地表面変位増加量が非常に小さいが、徐々に大きくなり、最終的には地下水位のわずかな変化に対して地表面変位が急増するようになる。このような地下水位と地表面変位の関係は双曲線関係で近似できる⁶⁾。

4. 地下水位と地表面変位の計測結果を用いた斜面崩壊発生時刻の予測

4.1 基本的な考え方

上記の結果を踏まえ、地表面変位と地下水位の関係を双曲線で近似することによって、ある時刻までの地下水位と地表面変位の計測データから、崩壊発生時刻の予測を行う手法と予測結果を以下に示す。そして模型斜面上の異なる位置における計測データに基づく予測結果を比較する。

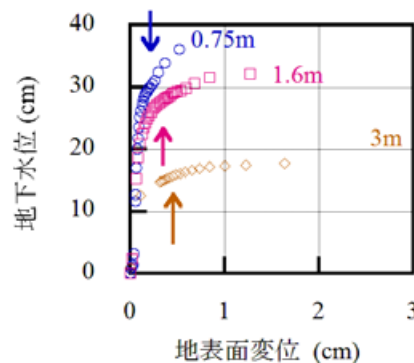


図 5 解析に用いる地表面変位～地下水位関係

Fig. 5 The surface displacement – the groundwater level for the time-prediction.

地下水位と地表面変位の双曲線関係を下記 (2) 式で表す。

$$ds = \frac{1}{G_{sur}} \frac{GWZ_{max} \cdot GWZ}{GWZ_{max} - GWZ} \quad (2)$$

ここで ds : 地表面変位, GWZ : 地下水位, G_{sur} : 実験定数, GWZ_{max} : 破壊時の地下水位 (定数) とする。予測のためには、この式の中のモデル定数である G_{sur} と GWZ_{max} を決める必要がある。

計測データそのものは計測誤差も含んでいる。そのため地下水位の計測値のばらつきが 1 cm H₂O 程度であることを考慮して、地下水位が 1 cm H₂O 以上の間隔となるように地下水位と、同時刻の地表面変位のデータを抽出する。このようにして作成したデータを用いて式 (2) 中のモデル定数を定める。ただし斜面下端から 2 m の位置のデータは 2 度の急激な変位増加があったことから、他の位置とは変形メカニズムが異なることが考えられるため、今回の検討対象からは外した。データを抽出した結果が図 5 である。図中の矢印は同色の深さにおいて、地表面変位 ds を最終の地表面変位 ds_{max} で除した ds/ds_{max} の値が 0.3 となる ds の大きさを示している。この意味は後述する。

4.2 予測方法と予測結果

本節では、図 5 に示した解析用データのうち、斜面下端から 0.75 m の位置におけるデータを用いて、予測の過程を説明し、その結果を述べる。

4.2.1 「地表面変位～地下水位」予測式の作成

崩壊発生前の任意の時刻までの地下水位と地表面変位の計測データを用いて、式 (2) のモデル定数 G_{sur} , GWZ_{max} を定めるために、非線形回帰分析を

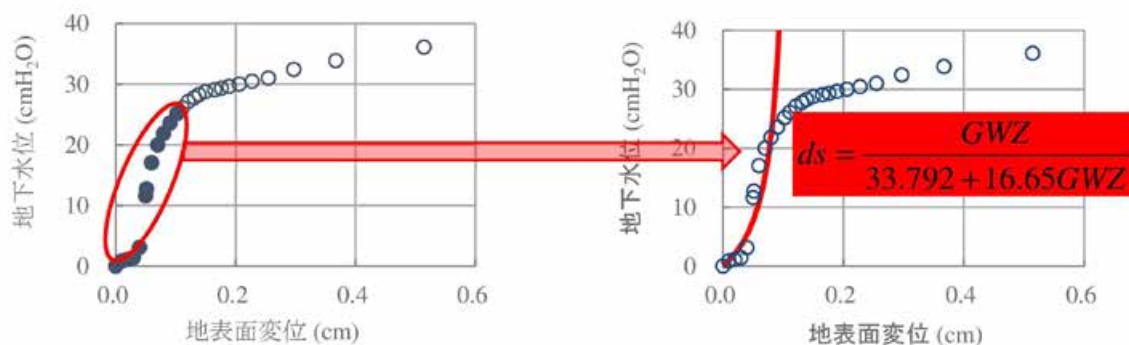


図6 「地表面変位～地下水位」予測式の作成事例（斜面下端から 0.75 m, $ds/ds_{\max} = 0.2$ ）. GWZ : 地下水位. ds : 地表面変位. $ds_{\max}$: 地表面変位の最大値.

Fig. 6 Example of nonlinear regression for the surface displacement – the groundwater level at 0.75 m from the toe of the slope ($ds/ds_{\max} = 0.2$). GWZ : the groundwater level. ds : the surface displacement. $ds_{\max}$: maximum surface displacement.

行った. 非線形回帰分析には Synergy Software 社の Kaleida Graph ver.4.1.1 の「回帰曲線」機能のうち「非線形回帰曲線」の中の双曲線を選択して行った. 本ソフトウェア中の非線形解析におけるモデル定数の最適化は, Levenberg-Marquardt 法⁷⁾が用いられている. 例として斜面下端から 0.75 m における, $ds/ds_{\max} = 0.2$ の時点までの対象データを用いた解析事例を図 6 に示す. なお $ds/ds_{\max}$ はある時点での地表面変位を, 地表面変位の最大値 (崩壊時の地表面変位) で正規化した値であり, 本論文ではこれを崩壊発生までの時刻を表す指標とする. 図 6 の例では, 地下水位発生直後のデータしか用いていないため, 回帰分析の結果はあまり芳しくない. このような方法で斜面下端から 0.75 m の位置において, 崩壊発生までの様々な $ds/ds_{\max}$ までのデータを用いて, 上記のように求めた「地表面変位～地下水位」予測式を, 実測値と対比したのが図 7 である. 凡例中の数値は $ds/ds_{\max}$ である. これを見ると, $ds/ds_{\max}$ が 0.3 以下では実測に比べて予測式で求めた地下水位が高いものの, $ds/ds_{\max}$ がそれより大きい場合予測式はよく実測と適合している.

4.2.2 「時間～地下水位」予測式

崩壊発生前の任意の時刻までの地下水位の計測データを用いて, 「時間～地下水位」予測式を, 上記と同様な非線形回帰分析により求めた. 回帰式としては以下に示す対数関数を用いた.

$$GWZ = b_1 \cdot \ln(T) - b_2 \quad (3)$$

ここで, b_1 , b_2 は定数であり, これらを回帰分析に

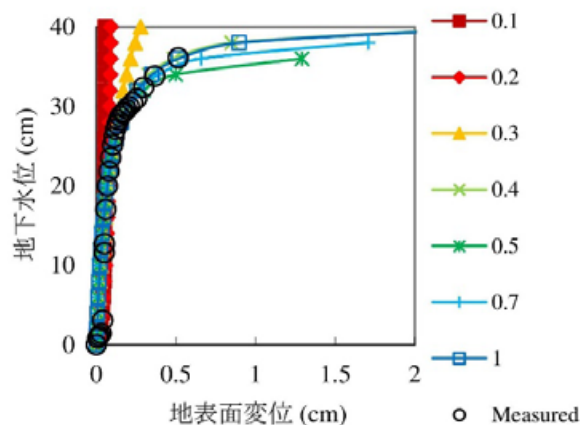


図7 様々な $ds/ds_{\max}$ の範囲のデータを用いて作成した「地表面変位～地下水位」予測式（斜面下端から 0.075 m）

Fig. 7 Regression analysis for the surface displacement – the groundwater level with the data until different $ds/ds_{\max}$ at 0.75 m from the toe of the slope.

より定める必要がある. 斜面下端から 0.75 m の位置において, 様々な $ds/ds_{\max}$ までのデータを用いて定めた予測式を, 実測値と対比して表したのが図 8 である. 凡例の数値は $ds/ds_{\max}$ である. これを見ると, $ds/ds_{\max}$ が異なっても予測式の形状はあまり変わらず, 早い時期のデータのみを用いて作成した予測式も, 崩壊直前までのデータを用いて作成した予測式とあまり変わらないことがわかる.

4.2.3 「時間～地表面変位」予測式の作成

同じ $ds/ds_{\max}$ までの計測データを用いて作成した「地表面変位～地下水位」予測式と, 「時間～地下水位」予測式を組み合わせることによって, 「時間～地表面変位」予測式を導く. 予測式は式 (2) に式 (3) を

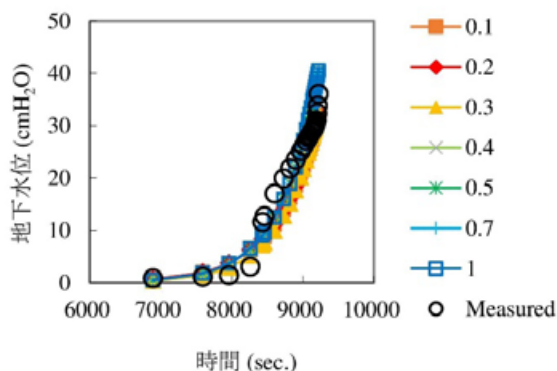


図 8 様々な $ds/ds_{\max}$ までの範囲のデータを用いて作成した「時間～地下水位」予測式 (斜面下端から 0.75 m)

Fig. 8 Regression analysis for the time – the groundwater level with the data until different $ds/ds_{\max}$ at 0.75 m from the toe of the slope.

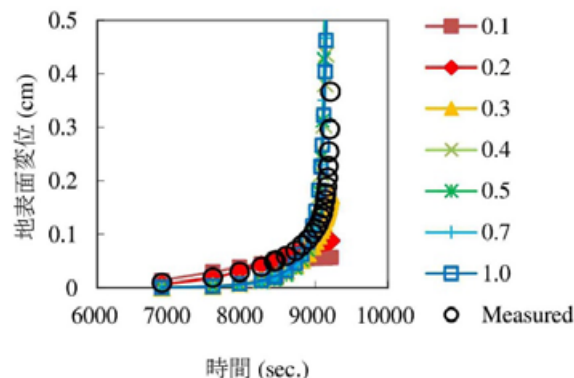


図 9 様々な $ds/ds_{\max}$ までの範囲のデータを用いて作成した「時間～地表面変位」予測式 (斜面下端から 0.75 m)

Fig. 9 Regression analysis for the time – the surface displacement with the data until different $ds/ds_{\max}$ at 0.75 m from the toe of the slope.

代入して以下のように表せる。

$$ds = \frac{1}{G_{sur.}} \frac{GWZ_{\max} \{b_1 \cdot \ln(T) - b_2\}}{GWZ_{\max} + b_2 - b_1 \cdot \ln(T)} \quad (4)$$

下端から 0.75 m の位置において、上記のように作成した予測式を、実測と対比させて表したのが図 9 である。凡例の数値は $ds/ds_{\max}$ である。 $ds/ds_{\max}$ が 0.2 以下であると、特に約 9,000 秒以降の地表面変位の予測結果が実測より大きいが、 $ds/ds_{\max}$ が 0.3 以上だと、予測式は実測に良く適合していると見なせる。

4.2.4 「時間～地表面変位速度の逆数」関係による崩壊発生時刻の予測

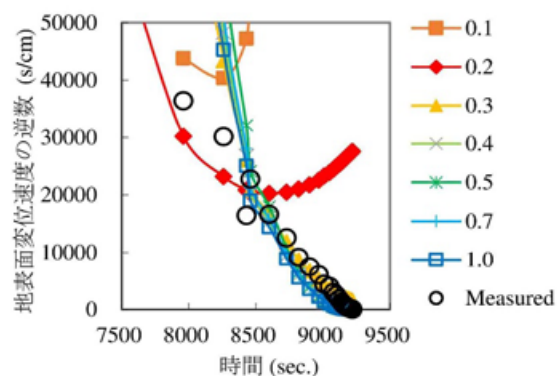
福園³⁾は大型模型盛土への散水実験の結果より、斜面崩壊の発生直前に、地表面変位の変位速度と加速度の間に式 (1) で表される関係を発見した。そしてこの関係を時間で積分して整理することにより、時間～地表面変位速度の逆数の関係を求めた。崩壊発生に近づくにつれて地表面変位が急増するため、地表面変位速度の逆数は 0 に近づく。このため地表面変位速度の逆数が 0 になる時刻を求めることによって、崩壊発生時刻の予測が可能であるとした。本論文でも式 (4) を時間で微分して変形し、以下のような「時間～地表面変位速度の逆数」の関係である式 (5) を導く。この式を用いて地表面変位

速度の逆数 (以降 $1/v$ と表記) が 0 になる時刻を求めることができる。

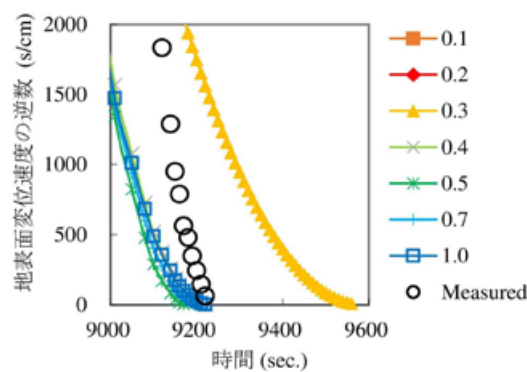
$$\frac{1}{v} = \frac{G_{sur.}}{GWZ_{\max}^2 \cdot b_1} \{GWZ_{\max} + b_2 - b_1 \cdot \ln(T)\} \cdot T \quad (5)$$

図 10 に斜面下端から 0.75 m の位置において、任意の $ds/ds_{\max}$ までの計測データを用いてモデル定数を定めた (5) 式を、実測と対比して表す。まず図 10 (a) を見ると $ds/ds_{\max}$ が 0.2 以下の場合、 $1/v$ が最低値を示した後、時間経過と共に逆に増加する。よって $1/v$ が 0 になることがないので崩壊時刻の予測はできない。しかし $ds/ds_{\max}$ が 0.3 以上になると、 $1/v$ は時間経過と共に単調減少し、ほぼ同程度の時刻 (約 9,200 秒) で 0 に漸近するよう見える。縦軸の $1/v$ の範囲を小さくした図 10 (b) を見ると、 $ds/ds_{\max}$ が 0.3 の場合は $1/v$ の予測結果は実測よりかなり大きく、9,600 秒付近で 0 に漸近する。しかし $ds/ds_{\max}$ がそれより大きくなると、ほぼ 9,200 秒付近で 0 に漸近し、実測を良く再現したといえる。

図 5 中には斜面下端から 0.75 m、1.6 m および 3 m の位置における地下水位－地表面変位の関係において、 $ds/ds_{\max}$ が 0.3 となる地表面変位を矢印で示している。この図から、 $ds/ds_{\max}$ がおよそ 0.3 を超えると両者の関係を示す曲線の勾配が急減することがわかる。曲線の勾配が急である、 $ds/ds_{\max}$ が 0.3 より小さい範囲のデータを用いて非線形回帰分析により「地下水位－地表面変位」予測式を作成すると、図 7 における $ds/ds_{\max}=0.2$ ないしは 0.3 までのデータを用いた場合のように予測曲線の勾配が小さくならず、実測に近づかない。つまり曲線の勾配が急減する範囲までの計測データを用いないと、「地下水位－地表面変位」予測式の予測精度が向上しないことが示唆される。



(a) $1/v$ の範囲が 50,000 (s/cm) 以下



(b) $1/v$ の範囲が 2,000 (s/cm) 以下

図 10 距離 0.75 m における時間と地表面変位加速度の逆数の関係。 v : 地表面変位速度。

Fig. 10 The time – the inverse of the surface displacement velocity at 0.75 m from the toe of the slope.
 v : the surface displacement velocity.

5. まとめ

地表面変位と地下水位の計測データのみを用いて、両者の力学的関係に基づく崩壊発生予測手法を提案した、そして砂質模型斜面に一定強度の散水を与えて、斜面の変形等を計測する実験を行い、その計測データを用いて崩壊発生予測を試みた結果、以下のことが判明した。

- (1) 地表面変位と地下水位の関係は双曲線関係で近似できる。よってこの関係を元に崩壊発生時刻の予測を行う。
- (2) まず任意の時刻までの「地表面変位－地下水位」の関係性を非線形回帰分析により双曲線関数で近似する。そして地下水位の経時変化を用いて、先と同じ時刻までの実測データより回帰式を作成し、「時間－地下水位」予測式とする。両者を組み合わせて「時間－地表面変位」予測式を導き、時間で微分することによって「時間－地表面変位速度の逆数」関係式を導く。この式で地表面変位速度の逆数が 0 になる時刻を崩壊発生時間と予測する。
- (3) 以上の方法で斜面上の異なる位置における計測データから崩壊発生時刻の予測を行ったところ、比較的良好に崩壊発生時刻の予測が可能であった。特に $ds/ds_{\max}$ が 0.3 程度より大きくなる時刻までの計測データを用いると良好な予測ができる。これは「地表面変位－地下水位」関係を表す双曲線の勾配が急減する時点である。つまり「地表面変位－地下水位」関係の曲線を的確に予想できるようになる時点以降の計測データを用いると、崩壊発生時刻が良好に予測できる。

参考文献

- 1) 国土交通省社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会：社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会（第 1 回）資料 3，平成 25 年 10 月 18 日。
- 2) 齊藤迪孝 (1981)：土質工学におけるレオロジー 7.2 斜面崩壊予測。土と基礎，Vol.29, No.5, pp.77-82.
- 3) 福園輝旗 (1985)：表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法，地すべり，Vol.22, No.2, pp.8-13.
- 4) 笹原克夫・酒井直樹 (2014)：地表面変位と地下水位のモニタリングに基づく斜面崩壊発生予測，地盤工学ジャーナル，Vol.9, No.4, pp.671-685.
- 5) 小山内信智・富田陽子・秋山一弥・松下智祥 (2009)：がけ崩れ災害の実態，国土技術政策総合研究所資料 第 530 号，pp.69-74.
- 6) Sasahara, K. and Sakai, N. (2014): Development of shear deformation due to the increase of pore pressure in a sandy model slope during rainfall, Engineering Geology, Vol.170, pp.43-51.
- 7) Facchinei, F. and Kanzow, C. (1997): A nonsmooth inexact Newton Method for the solution of large-scale nonlinear complementarity problems, Mathematical Programming Vol. 76, pp. 493-512.

要 旨

斜面の土壌水分や変形のモニタリングに基づく崩壊発生予測手法を検討するため、砂質模型斜面に人工降雨を与え、斜面の変形・破壊までの地下水位と地表面変位の関係をモニタリングした。その結果地表面変位は地下水位の発生とともに顕著に進行し、地下水位増加に伴う地表面変位増加量が徐々に大きくなり、崩壊時には地表面変位が無限大になることがわかった。両者の関係を双曲線形で表し、崩壊発生前の任意の時刻までの計測データから、(1)「地下水位～地表面変位」の双曲線関数を用いた非線形回帰式、(2)「時間～地下水位」の非線形回帰式を作成し、それらを組み合わせて(3)「時間～地表面変位」予測式を作成する方法を提示した。またこの式を変形して(4)「時間～地表面変位速度の逆数」式を導き、この式を用いて地表面変位速度の逆数が0に漸近する時間を求めると、それが崩壊発生時刻と予想できることになる。この方法に基づく崩壊発生時刻の予測を行ったところ、崩壊発生のかかなり前の時点の計測データを用いた予測でもかなりの精度で実現象を予測することができた。

キーワード：降雨，斜面崩壊，地表面変位，地下水位，予測

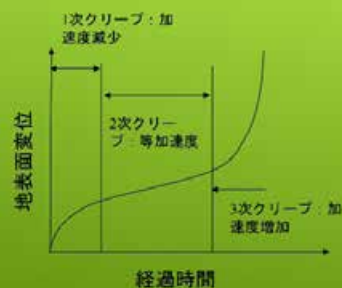
平成27年12月3～4日「防災科学技術研究所「土砂災害予測に関する研究会」 場内の経緯と新技術」
 高知大学 工学部
 16:10～17:25 セッション2 降雨・浸透水係数による表層崩壊予測

斜面の変形と地下水位の同時モニタリング に基づく表層崩壊発生予測

笹原克夫（高知大学）

〒783-8502 高知県南国市物部乙200, 高知大学農学部
 TEL/FAX 088-864-5341
 E-mail: sasahara@kochi-u.ac.jp

斜面の変位計測に基づく斜面崩壊発生時刻の予測手法として、クリープ理論に基づいた斉藤(1981)や福岡(1985)の方法がある。



地表面変位と経過時間の関係を左図のように表し、変位－時間の関係式を求めた。

福岡(1985)による3次クリープ段階における変位速度と変位加速度の関係は、

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a \left(\frac{dx}{dt} \right)^a$$

x : 変位, t : 時刻, a, a : 定数

しかしこの方法は変形データのみを用いるものであり、例えば降雨強度の変化による斜面内間隙水圧の変化など、斜面内の応力変化を考慮していない。よって斜面内応力の変化による斜面変形（地表面変位）速度の変化は扱えない。

2. 目的

クリープ理論に基づく式には斜面内の応力変化が反映されていない。

上記の問題を解決するには、斜面の変形のみならず「応力」の計測値も用いた、土の応力～ひずみ関係に基づく簡便な力学モデルが必要である。

そのために、斜面の変位と地下水位の計測データのみを用いて、

- (1) 簡単な物理モデルを仮定し、
- (2) モデル定数のある時刻までのデータを用いた近似式で定め、

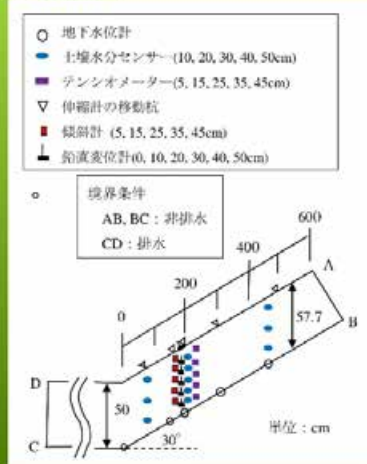
斜面崩壊発生時刻の予測を行う、ための方法を検討する。

対象：表層崩壊

（岩盤上にほぼ均一な表土層が乗っている単純な構造を想定）

2. 実験方法

(1) 実験装置



(独)防災科学技術研究所大型降雨実験施設

50歳以上の者を用いて作製。
 固相単位体積重量: 16.1~16.4(kN/m³)
 間隙比: 0.652~0.678
 $D_{50}=1.3\text{mm}$, $U_c=22.23$, $\rho_s=2.675\text{g/cm}^3$

4

(2) 実験条件

イベント	散水強度 (mm/hour)	散水開始時刻	散水終了時刻
1	15	10/24 11:04:00	10/24 14:09:50
2	15	10/27 10:27:01	10/27 13:27:01
3	15	11/1 11:01:48	11/1 14:01:48
4	25	11/4 11:06:04	11/4 14:06:04
5	50	11/10 11:17:35	11/10 13:49:45

実験は2011年に実施した。

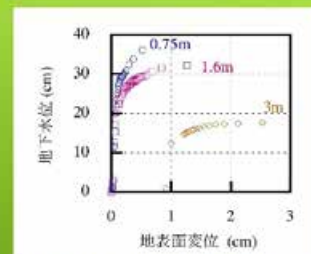
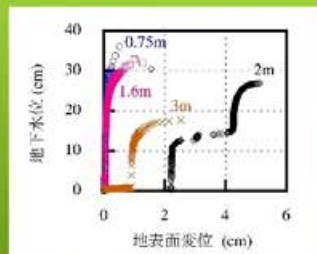
自然斜面は多数の降雨履歴を有するため、本降雨の前に複数回の降雨を与えた。
 (降雨イベント1~4は事前の降雨履歴)

本報告では、降雨イベント5における崩壊直前の斜面の挙動の検討結果を報告する。

5

3. 実験結果

地下水位～地表面変位の関係



距離2mを除いて、斜面下端からの距離が大きいほど、

- ・地下水位の非発生時の地表面変位が大きい。
- ・地表面変位の最大値が大きい。
- ・地下水位の最大値が小さい。
- ・地下水位～地表面変位は双曲線関数で近似できる。

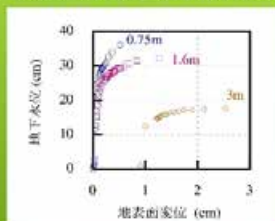
地下水位1cm毎にデータを抽出し、以降の解析に用いる。

実験結果から簡易な物性を
 得ることを目指す。

6

4. 地下水位と地表面変位の計測データを用いた崩壊発生時刻の予測

(1) 「地表面変位～地下水位」関係の予測



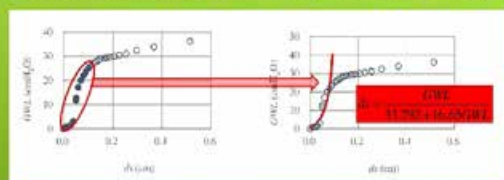
地表面変位と地下水位の計測データを用いて、Synergy Software社のKaleida Graph ver.4.1.1を用いた非線形近似により、時々刻々の地表面変位と地下水位の間の双曲線関係を求め、その関係をもとに今後の地表面変位を予測する。

$$ds = \frac{1}{G_{sur}} \frac{GWL_{max} \cdot GWL}{GWL_{max} - GWL} \quad \dots (1)$$

ここで ds : 地表面変位, GWL : 地下水位, G_{sur} および GWL_{max} : モデル定数

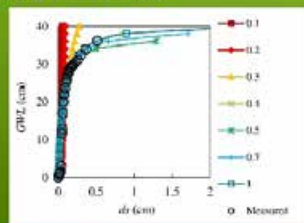
7

例えば距離0.75mにおける $ds / ds_{max} = 0.2$ までの計測データを用いた近似式は、



ここで ds / ds_{max} を崩壊発生までの時刻を表すパラメータとする。 ds_{max} は計測される最大地表面変位である。

上記の要領で距離0.75mにおける様々な ds / ds_{max} までのデータを用いて作成した近似式を以下に示す。



ds / ds_{max} が0.4以上の範囲のデータを用いて近似式を作成すると、予測性が良いと言える。

ある時刻までの計測データを用いて近似式を作成する。

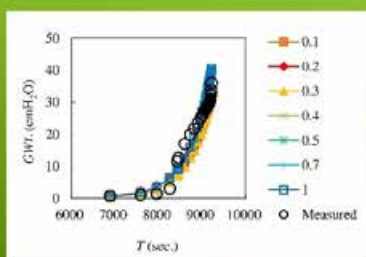
8

(2) 「時間～地下水位」の予測式

距離0.75mにおける様々な ds/ds_{max} までの計測データを用いた「時間～地下水位」近似式を作成する。

近似式の関数形は以下の指数関数を用いた。

$$GWL = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot T) \quad \dots (2)$$



異なる ds/ds_{max} までの計測データを用いて作成した「時間～地下水位」近似式はそれほど変わらない。

ある時刻までの計測データを用いて近似式を作成する。

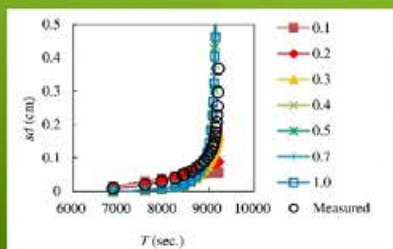
9

(3) 「時間～地表面変位」の予測式

(1)で求めた「地表面変位～地下水位」予測式(式(1))に、同一時刻までの計測データを用いて求めた「時間～地下水位」予測式(式(2))を代入して、「時間～地表面変位」予測式を作成する。

$$ds = \frac{1}{G_{\text{sat}}} \cdot \frac{a_1 \cdot \text{GWL}_{\text{max}} \cdot \exp(a_2 \cdot T)}{\text{GWL}_{\text{max}} - a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot T)} \quad \dots (3)$$

位置0.75mにおける「時間～地表面変位」予測式と実測の対比



ds/ds_{max} が0.3以上の範囲のデータを用いて作成した予測式は、比較的良好に実測を再現する。

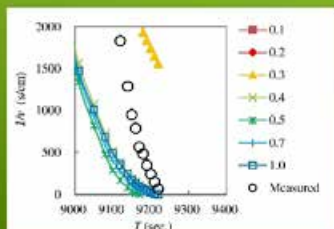
10

(4) 「時間～地表面変位速度の逆数」の予測結果（崩壊発生時刻の予測結果）

「時間～地表面変位」関係(式(3))を、時刻 t で微分し、両辺の逆数を取って「時間～地表面変位速度の逆数」(式(4))の関係を求める。

なお「地表面変位速度の逆数」が0に近づくほど崩壊発生に近づくことは自明であり、この事実を用いて、崩壊発生前のある時刻までのデータを用いて作成した「時間～地表面変位」関係から、崩壊発生時刻の予測が可能となる。

$$\frac{1}{v} = \frac{G_{\text{sat}}}{a_1 \cdot a_2 \cdot \text{GWL}_{\text{max}}} \cdot \frac{\{\text{GWL}_{\text{max}} - a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot T)\}^2}{\exp(a_2 \cdot T)} \quad \dots (4)$$



ds/ds_{max} が0.4以上の範囲のデータを用いて作成した予測式は、実測の崩壊発生時刻を比較的良好に再現する。

11

5. まとめ

- ・降雨による模型砂質斜面上の、異なる位置における地表面変位と地下水位の関係は、斜面下端から遠いほど地下水位の最大値が小さく、かつ地表面変位の最大値は大きくなる。しかしどの位置でも、両者の関係は双曲線関係で近似できる。
 - 模型実験に基づく簡単な物理モデル
- ・上記の事実を元に、崩壊発生時刻を予測する方法を以下のように提案した。
 - ① ある時刻までの地表面変位と地下水位の計測データを用いて、「地表面変位～地下水位」の関係を双曲線関数で近似する。
 - ある時点までの計測データより近似式を作成し、予測式とする。
 - ② ある時刻までの地下水位の計測データを用いて、「時間～地下水位」の近似式を作成し、予測式とする。
 - ある時点までの計測データより近似式を作成し、予測式とする。
 - ③ 両者を組み合わせ、「時間～地表面変位」の予測式を作成する。
 - ④ 上式より「時間～地表面変位速度の逆数」の関係を求める。

12