

2020.04.01

サステナブル経営 レポート <第9号>

斜面崩壊リスク簡易評価手法の開発

【本号の概要】

- 土砂災害は毎年 1,000 件程度発生しており、近年、その発生件数は増加傾向にあることが認められる。1975~2019 年の 1 時間降水量 50 mm 以上の年間発生回数は増加傾向にあり、土砂災害発生件数の増加傾向とも関連していると考えられる。将来の気候変動の影響で、今後さらに発生件数が増加していくことも予想される。
- このような背景から弊社では地圏環境テクノロジー社の協力のもと、「斜面崩壊リスク簡易評価手法」を開発した。本サービスは、地圏環境テクノロジー社の水循環シミュレーションソフトと国の公開データを活用することにより迅速で安価な提供を目指している。
- 自社敷地の斜面崩壊リスクの再点検やリスク管理に活用されることが望まれる。

1. 斜面崩壊リスクの評価に当たって

近年多発する豪雨や大型台風によって、全国各地でがけ崩れ（斜面崩壊）などのリスクが高まっている。気候変動による将来の予測においても、それらは増加傾向になると考えられる。MS&AD インターリスク総研株式会社は株式会社地圏環境テクノロジー社の協力を得て、特定地域の斜面崩壊のリスクを、例えば過去の豪雨データや将来予測されるデータによって簡易にシミュレーションする手法の開発に着手した。シミュレーションの方法としては、対象地域の表流水と地下水を同時に扱う、我が国で開発された最先端の水循環シミュレーションソフトを用いて、地盤内の水圧上昇と関連付けて危険度を評価するものである。またそれらは国が無償で公開しているデータにより安価で迅速かつ視覚的にも理解しやすいものを目指した。これは簡易的な評価ではあるが、国土交通省や各地方自治体により発行されているハザードマップを補完する形で活用することで、企業や行政の施設等が立地する敷地やそれらの地域の斜面崩壊のリスクを顕在化していくことが目的である。

2. 地上と土壌・岩石中の地下の水の流れを同時に捉える

土砂災害は主に土石流災害、地すべり災害、がけ崩れ災害、火山災害に分類される¹。がけ崩れは斜面崩壊とも言われ、表層崩壊と深層崩壊に分けられる。土砂災害は毎年 1,000 件程度発生しており、近年、その発生件数は増加傾向にあることが認められる（図 1）。図 2 は、1975 年～2020 年の 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数の推移を示したものであり、発生回数は増加傾向にあることが明らかとなっており、土砂災害発生件数の増加傾向とも関連していると考えられる。将来の気候変動も鑑みると、今後さらに発生件数が増加していくことも予想される。

¹ 国土交通省, https://www.ktr.mlit.go.jp/river/bousai/river_bousai00000078.html（最終アクセス日：2020 年 3 月 23 日）

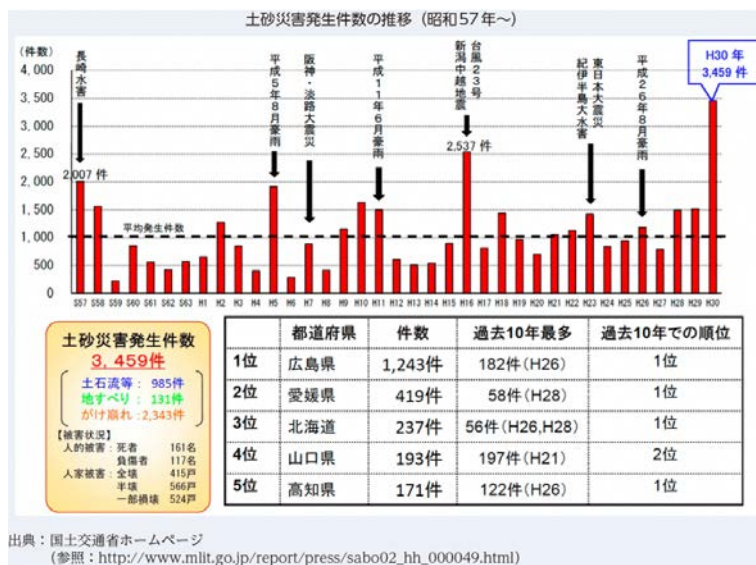
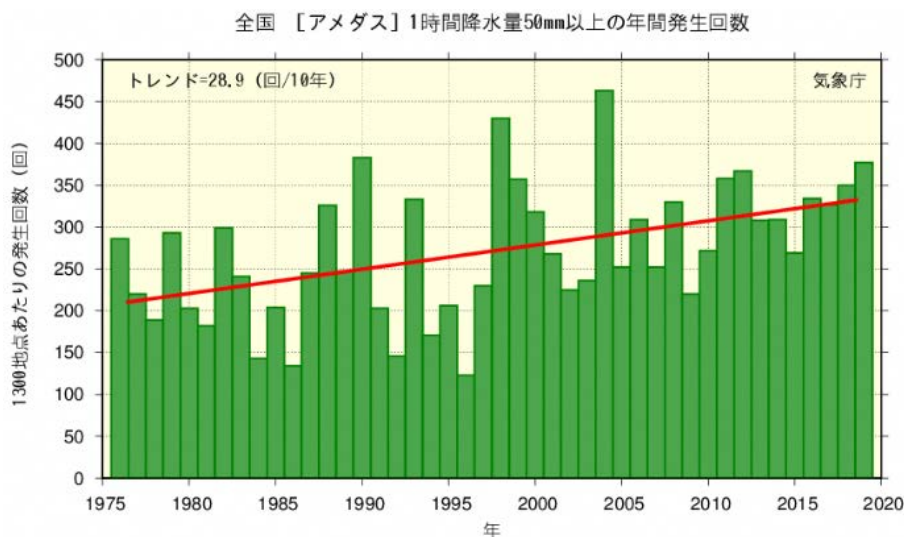
図 1 1981 年～2018 年の土砂災害発生件数の推移²図 2 1975 年～2020 年の 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数の推移³

図 1 によれば、2018 年（平成 30 年）は、その年に平成 30 年 7 月豪雨が発生したこともあり、1981 年以降で最も土砂災害発生件数が多かった年となっており、その中でもがけ崩れ（斜面崩壊）による発生件数が最も多いことが分かる。

斜面崩壊（や地すべり）の発生は、土塊に含まれる水の作用に関わる場合が多く、地表面から浸透した水が間隙水圧を増加させ、土粒子の有効応力が減少して、せん断抵抗力が低下し、せん断破壊に至るメカニズムと考えられている。そのため、斜面崩壊リスクを適切に評価するためには、せん断破壊発生トリガーの 1 つである間隙水圧の変化、つまり、地表面からの水の浸透と、地下での水の流動を時間的、空間的に正確に捉えていくことが重要となる。間隙水圧を実測によ

² 内閣府、令和元年度 防災白書、http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h31/zuhyo/zuhyo_t012.html（最終アクセス日：2020 年 3 月 23 日）

³ 気象庁、https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html（最終アクセス日：2020 年 3 月 23 日）

って把握することも可能であるが、広い範囲において空間的に密に実測計器を配置することはコスト的に現実的とは言えない。そのため、これらの現象を捉えていくに当たって数値シミュレーションは有効なツールとなり得る。次章では、豪雨時の間隙水圧の変化を捉えるために必須となる表流水と地下水の流動を物理法則に基づきシームレスに解析する最先端技術について紹介する。

3. 斜面崩壊リスクの評価事例

通常、表流水と地下水は流動の速さが大幅に異なることもあり、これらを対象とした数値シミュレーションにおいては、流動プロセスを別々に取扱うことがほとんどで、全く考慮しないか、人間が仮定した境界条件を与えることで考慮していた。しかしながら、斜面崩壊を対象とした場合、雨が降り始める前のある程度地下が乾いた不飽和な状態から、雨が地下に浸透し、徐々に飽和な状態へと変化していくことで浸透能が低下し、時には表流水が発生するなどの、表流水と地下水の連成プロセスを同時に取扱う必要が生じ、従来の方では対応が困難である。そういった理由もあって、斜面崩壊リスクを評価するに当たっては、表流水や地下水の影響をきちんと考慮することは一般的でなく、地形の傾斜や土壌・地質などの地下の固相の情報を中心に議論されてきている場合が多い。

近年、コンピュータ性能や数値シミュレーション技術の向上もあって、実用的な速度で表流水と地下水の連成プロセスを同時に計算できるようになってきている。地圏流体シミュレータ GETFLOWS^④は、表流水と地下水の流動を物理法則に基づいてシームレスに解析することが可能な世界でも珍しいソフトの1つであり、純国産で開発された最先端技術であり、これまでに1,000程度の適用事例を有している。

GETFLOWS^④を用いたシミュレーションにおいては、まず、コンピュータ内に形を歪ませたサイコロ状の多数のセルを用いて、もう一つの仮想的な世界を実験用のモデルとして創り上げる(図3の左図)。この模型のことを我々はモデルと呼んでいる。各格子に気象や土地利用・被覆、土壌・地質、人間活動などの諸条件を組み込みモデルを完成させていく。モデルを創り上げる過程で、初期の状態を模型内にどのように創るのか、モデルが実際に再現できているかをどのように検証するのか、という2つの重要なプロセスを経る必要がある。

まず、シミュレーションを行うに当たり、その初期状態を模型内にどのように創るかについて示す。ある時期を再現する場合や、将来を予測するときの初期条件は、過去から現在に至る長期の時間変動を経て形成された一時点を示すに過ぎない。この状態を再現するために、遠い過去の時点に関係付けた仮の設定から出発し、現在の状態へ近づいていく長期計算を行う。例えば、かつて海底ににあった陸域が隆起し天水に曝されてゆくシナリオをイメージし、地下地層中を水で飽和させた状態から解析を始める。この場合、地形発達や地層堆積の長期間の過程を遡ることが必要となるが、それらを正しく知ることは困難なため、現況が再現できる範囲でシナリオの簡略化を行う。図3の右図は、この長期計算によって得られた、地表面に降った雨が地表水(青)、地下水(赤)となって流下していく3次元的な流動経路を可視化したものである。

^④ Koji Mori, et al., 2015. Integrated watershed modeling for simulation of spatiotemporal redistribution of post-fallout radionuclides: Application in radiocesium fate and transport processes derived from the Fukushima accidents, Environmental Modelling & Software, 72, 126-146.

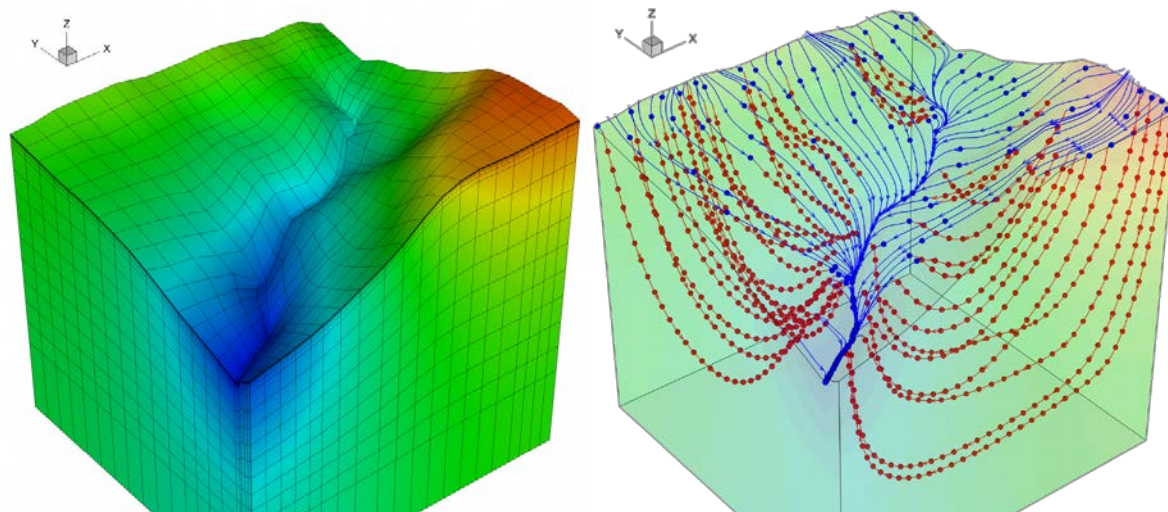


図 3 地表水・地下水連成シミュレーションのモデル（左図）と流動経路の可視化例（右図、青：地表水、赤：地下水）

次に、この手続きから得られた結果が、どの程度、実際に再現できているかを検証しなければならない。しかし、例えば、地下水の流れが、どの程度実際と近いかを検証することは、地下水が視えないため容易ではない。そこで、モデルの検証では、フィールドで実測されるより多くのデータ、つまり、河川の流量や水位、地下水位、濃度（例えば、塩分、栄養塩、同位体など）、温度等と比較することで、これらの全てを矛盾なく説明可能なモデルであることを客観的に示していく。シミュレーション結果（実験結果）と実測値に違いが認められる場合は、実際とモデルの相違点を分析し、それをモデルへ反映させて十分な精度が得られるまで実験を繰り返すことで、モデルを洗練させていく。

次章では、この技術を用いて、平成 29 年 7 月九州北部豪雨によって発生した斜面崩壊位置の再現性を検証した事例を示す。

4. 斜面崩壊リスク評価手法の検証事例

2017 年 7 月 5 日から 6 日にかけて九州北部を襲った豪雨（平成 29 年 7 月九州北部豪雨）は、福岡県朝倉市や大分県日田市の山岳域において多数の斜面崩壊を引き起こした。図 4 に、九州北部豪雨によって発生した崩壊位置を示す。これは、豪雨発生前後の標高の低下量で色分けしたものであり、測量上の誤差等が含まれることから、ある閾値（0.5m）以上の標高変化を示している。この図より、発生した斜面崩壊の大半は厚さが 1～2m 程度の表層崩壊であったと見られる。この地域の地質は、花崗閃緑岩と三郡変成岩が分布する地域であるが、分布する地質による崩壊頻度、深さなどの明らかな違いは認められない。

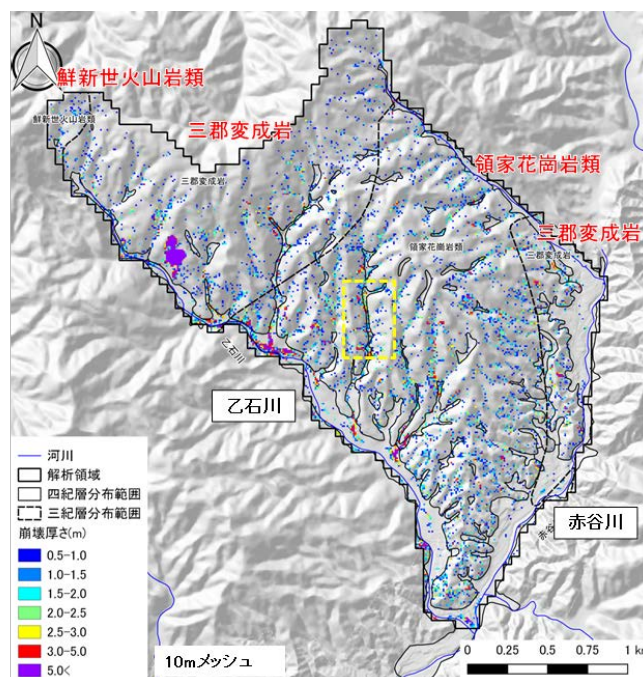
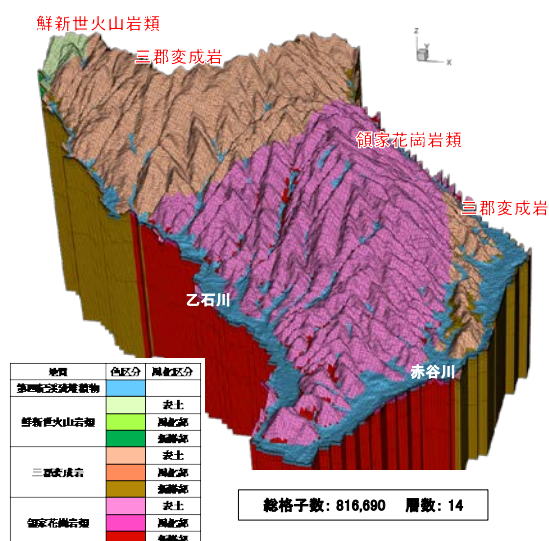


図 4 平成 29 年 7 月九州北部豪雨発生前後の標高変化（崩壊位置）⁵

ここでは、図 4 に示した赤谷川上流域を解析対象とし、水平面内を 10m×10m の規則格子で、鉛直方向には図 5 に示した厚さで標高-200m までを細分化し、図 5 に示したデータを組み込んだ 3 次元数値シミュレーションモデルを構築した。モデルの総格子数は 816,690 となった。図 5 の左図は地層区分で色分けしたモデルの鳥瞰図を示したものである。上述した手法によって初期状態を作成し、その状態を出発として、豪雨前の 10 日間と九州北部豪雨の 2 日間（2017/7/5～2017/7/6）の実降雨を与えたシミュレーションを実施した。



用途	利用した情報	出典
地形	豪雨前 LP データ	福岡県
地質	1/20 万シームレス地質図	産業技術総合研究所
土地利用	本領域は森林として扱う	-
降雨	XRAIN(250m 分解能, 1 分間隔のデータを 60 分単位で入力)。期間 2017/7/5～7/6	(財)河川情報センター ¹⁾
崩壊状況	豪雨前後の LP データ	福岡県

地質区分	風化・岩盤状況	層厚(m)	透水係数(cm/s)	有効間隙率(-)
溪流堆積物	砂礫層主体	3～10	1.0×10^{-2}	0.2
表土I	根系特に発達	0.5	1.0×10^{-1}	0.3
表土II	根系貫入	0.5	1.0×10^{-2}	0.2
強風化部	土砂状風化	2	1.0×10^{-3}	0.2
新鮮部	節理・片理密着	—	1.0×10^{-5}	0.01

図 5 平成 29 年 7 月九州北部豪雨で発生した斜面崩壊の評価用モデルと解析データ⁵

⁵ 登坂博行, 吉田堯史, 才田進, 盧涛, 末岡徹, 2018. 2017 年九州北部豪雨時の斜面崩壊分布と水理解析による統計的再現性について, 地盤工学会誌 第 66 巻 第 8 号.

シミュレーション結果を用いて、斜面崩壊発生地点の再現性についての評価を実施した。図 6(a)は図 4 中の黄色四角枠を拡大表示したもの、図 6(b)は豪雨後の地形陰影図である。図 6(c)は、(a)、(b)を利用して崩壊地特有の地形変化が認められる場所を抽出し、解析モデルの解像度と合わせ 10m 格子に示したものである。図 6(d)と(e)は、豪雨前からの水圧増加量と安全率低下量で色分けしたものである。安全率は、円弧滑りの安全率計算に用いられる修正フェレニウス法を用いて、斜面を計算格子スケールで直線的に傾斜した 1 つのセグメントとみなして算出したものである。再現性の評価に当たっては、図 6(c)と(d)、(e)を比較し、シミュレーションと実際の崩壊との相関を検討した。

解析によって得られた水圧上昇（図 6(d)）及び安定率低下（図 6(e)）と地形判読により得られた崩壊・変状範囲（図 6(c)）との間には、目視的にパターン類似性が認められる。特に図の右側（東側）部分の類似性は比較的良好。図の左側（西側）についてもおおよ(c)の位置と整合的であるが、色の付いた地点の数は(c)より少ない。図 6(a)に見られるように西側は東側より崩壊が多発しており、他の谷でも同様の傾向が認められることから、理由として当時の風向きの影響や他の要因も考えられるが実際のところは不明である。

より統計的に評価するために気象予報に使われる的中率算出方法⁶を利用してみる。具体的には、図 6(d)、(e)で色のついた格子を安定率低下大、それ以外を安定率低下小として、図 6(c)の色で塗られた崩壊・変状範囲に入るか否かを図 6 中に示した表のようにカウントした。解析領域全体としての的中率（安定率低下大の格子が崩壊・変状範囲に入った場合と、安定率低下小の格子が崩壊・変状範囲でなかった場合の割合）は $(69+38+834)/1187 \approx 0.8$ という結果となった。どのようなスケールでモデルを構築するか、シミュレーション結果から水圧増加量や安全率低下量をどのように区切るのが良いかについての一般化は今後の検討課題であるが、表流水・地下水連成技術を用いた新たな評価手法によって、実際の斜面崩壊現象に対してある程度の再現性、有用性を確認することができた。

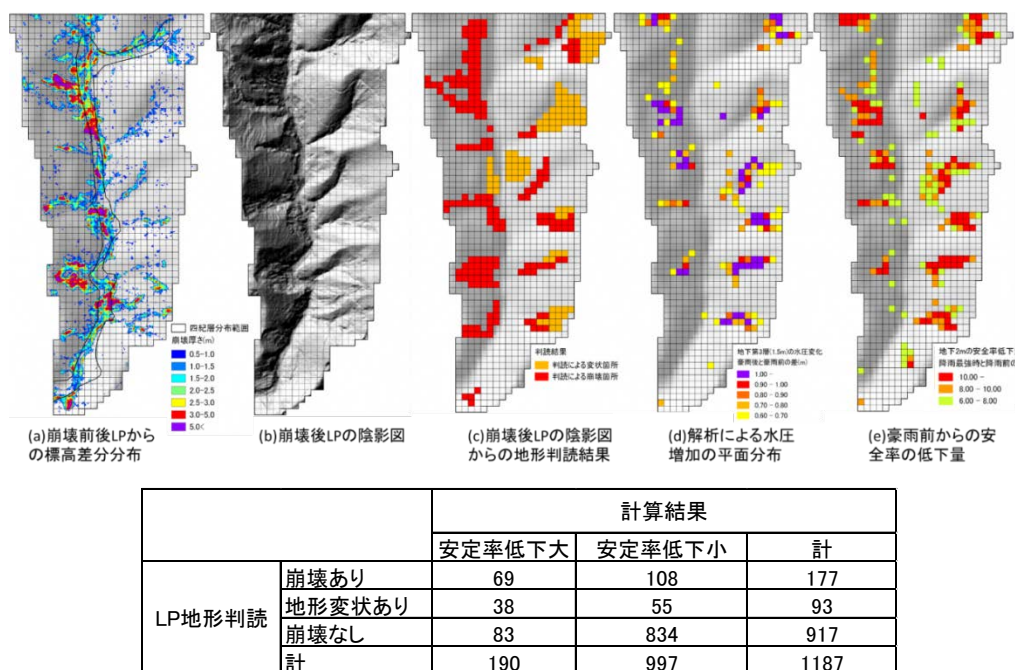


図 6 評価結果⁵

⁶ 気象庁, <https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/kensho/explanation.html> (最終アクセス日: 2020 年 3 月 23 日)

5. 斜面崩壊リスク診断事例

上記で検証された手法を用いて、集落と山間地斜面が近接する地域をサンプルサイトとして選定し、斜面崩壊のリスク診断を実施した。

サンプルサイトの水平面内を四角形格子で細分化し、図 7 に示す三次元モデルを構築した。このモデルには、気象庁（気象）、国土交通省（土地利用）、国土地理院（地形）、産業総合技術研究所（地質）から公開されているデータを搭載している。上述した手法によって初期状態を作成し、その状態を出発として、九州北部豪雨の最大雨量を全域に与えたシミュレーションを実施し、リスク診断のためのマップを作成した（図 8）。

図 8 は豪雨時の間隙水圧上昇度と安全率を示したものである。図中の左側（西側）に南北に通る道路があり、それに沿って集落が分布しているが、その北側と南側では安全率の低い斜面からやや距離があるため、崩壊の規模にもよるが、斜面崩壊によって被害を受けるリスクは相対的には低い。一方で、中央付近では安全率が 0.9 を下回る斜面が近接しており、リスクが高いことが示唆される。

ここで示したマップや自治体等が公開している土砂災害ハザードマップ類を利用することで、リスクの程度を把握し、早期の対策を考えるきっかけとなり得る。

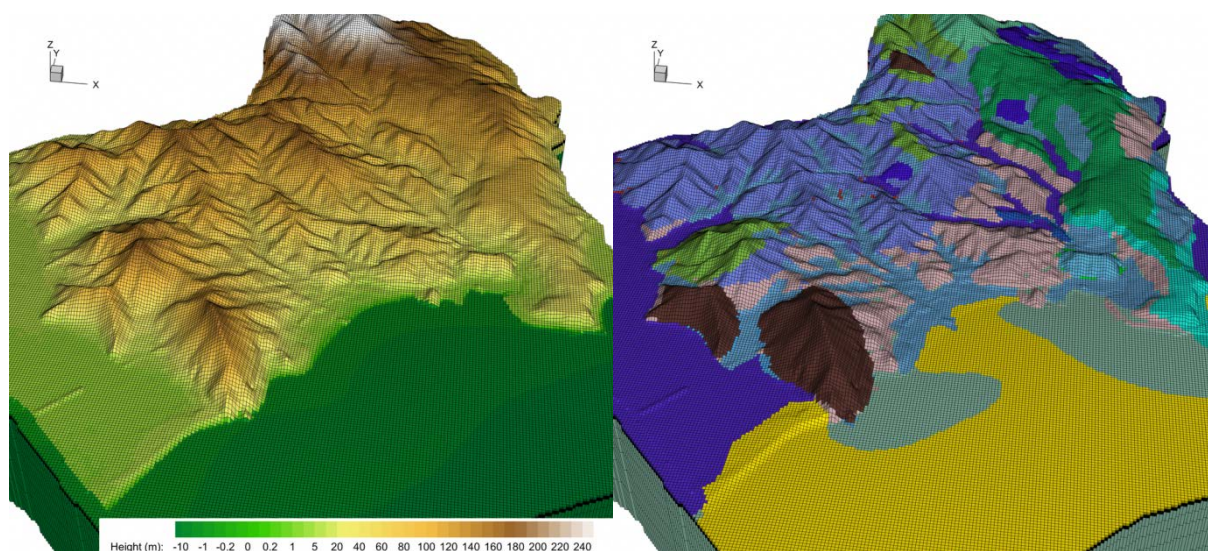


図 7 選定したサンプルサイトの三次元モデル（左：標高で色分け、右：地層区分で色分け）

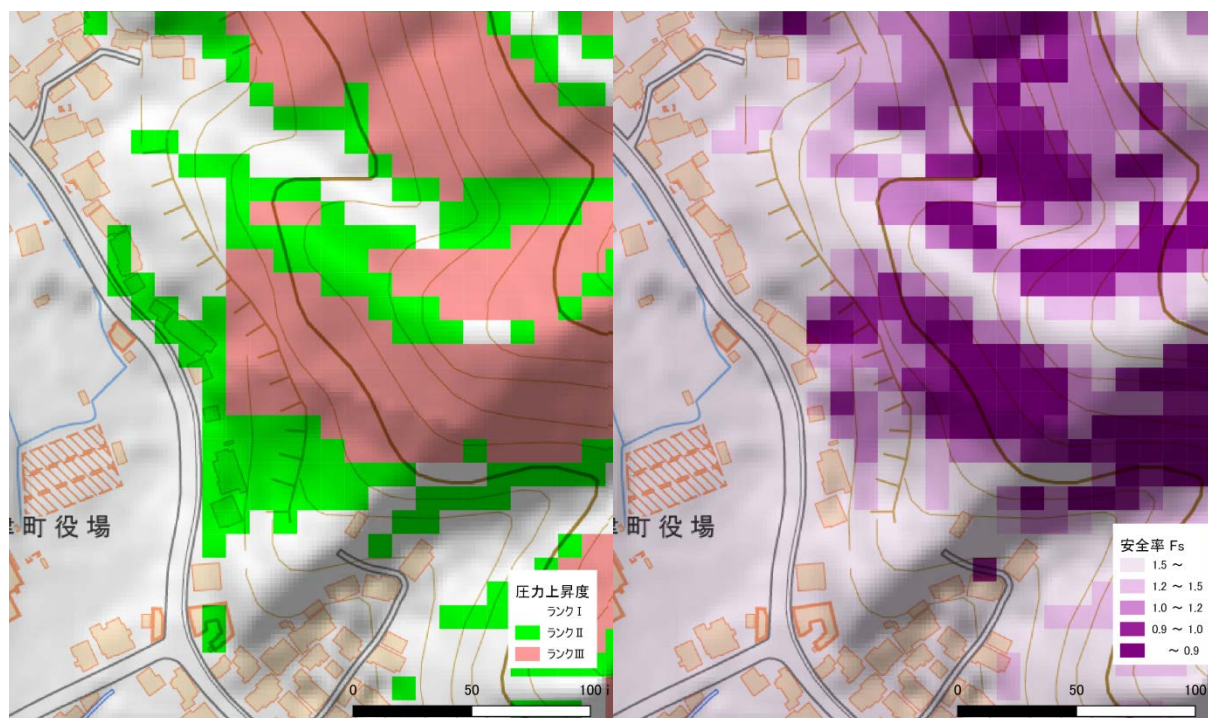


図 8 斜面崩壊リスク評価結果のサンプル（左：間隙水圧上昇度、右：安全率）

ここで紹介した評価手法は、原則公開されているデータのみで検討が可能であること、シミュレーション自体に要する時間も数時間～1 日程度であることから、比較的スピーディーに評価が可能で、かつ、それほど多大なコストを必要としないことも大きな特徴である。今後、より多くの事例に対して適用性を確認していくことや、土壌や地質など固相の情報を加味した安全率評価の高度化等によって、より精度の高い評価手法へブラッシュアップしていくことも必要であるが、斜面崩壊リスクの簡易評価手法としては実用性が高いものを開発できたと考えている。

MS&AD インターリスク総研株式会社 リスクマネジメント第三部
サステナビリティグループ マネジャー・上席コンサルタント 安齊 健雄
株式会社地圏環境テクノロジー 田原 康博

MS & ADインターリスク総研株式会社は、MS & ADインシュアランス グループのリスク関連サービス事業会社として、リスクマネジメントに関するコンサルティングおよび広範な分野での調査研究を行っています。

環境・CSRに関するリスクマネジメント・コンサルティングを実施しております。

コンサルティングに関するお問い合わせ・お申込み等は、下記の弊社お問合せ先、またはあいおいニッセイ同和損保、三井住友海上の各社営業担当までお気軽にお寄せ下さい。

お問い合わせ先：MS & ADインターリスク総研㈱

リスクマネジメント第三部 サステナビリティグループ

TEL.03-5296-8913 <http://www.irric.co.jp/>

本誌は、筆者の会議参加時の情報を基に作成しており、主観的な評価情報、時間の経過による変化が含まれることから、情報内容についての完全性、正確性、安全性、最新情報等について保証するものではありません。

また、本誌は、読者の方々に対して企業の CSR 活動等に役立てていただくことを目的としたものであり、事案そのものに対する批評その他を意図しているものではありません。

不許複製／Copyright MS & ADインターリスク総研 2020