

サフィ地区（モロッコ西部）におけるGISをベースとした
斜面崩壊発生危険度マッピングに関する研究紹介

国際委員 山田 大介

1. はじめに

今回紹介する論文は、石灰岩地帯でカルスト現象の影響を受けている海岸線地域を対象に、斜面崩壊の発生危険度を検討・マッピングした研究事例である。

2. Othmane Boualla et al. (2019)の概要

Othmane Boualla et al. (2019) は Bulletin の第 78 巻 2009~20 bivariate 26 ページに掲載されている論文で、論文タイトルは「GIS-based landslide susceptibility mapping in the Safi region, West Morocco」である。本論文の執筆者らの所属はモロッコ、エルジャディーダの Marine Geosciences and Soil Sciences Laboratory, Chouaïb Doukkali University である。

2.1 紹介論文の概要

石灰岩地帯のカルスト現象は、土石流や岩盤崩落などの様々な斜面崩壊現象の素因となる。

本研究の第一段階では、航空写真を用いた地形判読（現地の観察結果で補完）に基づく地形学的手法により、斜面崩壊分布を把握した。斜面崩壊の総数は 234 地点になり、現象の内訳は岩盤滑り 14、土石流 75、岩盤崩落 74、岩盤倒壊 71、である。斜面崩壊は、主に北西部と浸食が活発な海岸崖沿いの南部を中心に分布している。

本研究の第二段階では、GIS マトリックス法 (GMM) の二変量統計解析 (bivariate statistical method) を用いて、4種類の斜面崩壊発生危険度マップを作成した。そこでは、斜面崩壊現象は主に北西部と南部の海岸崖に沿って高い危険度が示された。非常に高い、もしくは高い発生危険度を示す地域は、歴史的建造物を含む観光活動や産業活動に関係する地域に集中した。

2.2 Introduction

斜面崩壊現象は、地質学的、水文学的、地形学的な条件、および頻繁な降水、地震活動、火山活動、人間の手によって均衡を崩した結果として、自然または人為的な斜面が不安定化することで発生する。カルスト現象に起因する斜面崩壊は世界中で確認されており、多くの研究において深刻なリスクが提示されている。

本研究の対象地域であるサフィ地域では、岩盤崩落、土石流、岩盤滑り、岩盤倒壊などの多くのタイプの斜面崩壊が発生している。これらの斜面崩壊は、住民とインフラの潜在的なリスクとなりうる。サフィ地域の北部の崖でも斜面崩壊は発生しており、特にカルスト湧水 (karst spring) 周辺や雨季の時期に多発している。サフィ地域では、このような状況にも関わらず斜面崩壊に関する調査は十分に行われてこなかった。石灰岩地帯における斜面崩壊の空間的発生確率を明らかにするために、斜面崩壊発生危険度マップの作

成が必要とされていた。

本研究では、GIS マトリックス法 (GMM) を使用した統計的アプローチを採用して、斜面崩壊発生危険度マップを作成した。この手法は、可能性のある素因および誘因を GIS 上に入力し、斜面崩壊分布図と重ね合わせることによる間接的な作図手法に基づいている。本研究の目的は、(i) 航空写真と現地での直接確認に基づいて斜面崩壊分布図を作成し、(ii) GIS マトリックス法 (GMM) を使用して斜面崩壊発生危険度マップを作成し、(iii) 各々の方法で得られた斜面崩壊現象を使用して得られたマップを検証することにある。検証により、斜面崩壊に最も脆弱な地域と、斜面崩壊を誘発する可能性がある要因について、特定することが可能となる。

2.3 調査地域の概要

本研究の対象地域に出現する地層は、上部ジュラ紀のドロマイト等や下部白亜紀のドリドラ石灰岩や碎屑性の貝殻石灰岩 (鮮新世～第四紀) などであり、カルスト現象を非常に受けやすい。また、ジュラ紀および白亜紀の地層は深いカルストを、鮮新世～第四紀の地層は浅いカルストを形成している。一方で、最も滑りやすい地層は、北部の海岸崖に局在する褐色粘土層である。

また、この地域では2つの帯水層が分布し、ドリドラ石灰岩層とジュラ紀後期の地層に多く含まれている。これらの帯水層は、海岸の崖に沿って出現する多くのカルスト湧水をなしており、斜面崩壊プロセスの誘因となっている。

2.4 素材と方法

(1) 斜面崩壊履歴のデータ

斜面崩壊分布図を用いて、斜面崩壊とその誘因の定量的関係を確立する。斜面崩壊発生危険度マッピングの基礎となるこの図面は、過去に発生した斜面崩壊の場所と特性を反映している。

斜面崩壊分布図は、地形に関する野外調査と航空写真の地形判読に基づいて作成された。野外調査は、航空写真の地形判読に基づく分布図を確認、検証するために実施した。地表変位が確認された崩壊箇所では、その位置情報を GPS によって取得した。航空写真判読では、1983 年、2006 年、2010 年にそれぞれ 1/17,500、30,000、20,000 のスケールで撮影された写真を使用した。判読結果は、ArcGIS 9.3 (ESRI) を用いてデジタル化した。

(2) 斜面崩壊発生の素因と誘因

斜面崩壊発生危険度マップを作成するために必要とされる要因は、2つのタイプに分類される (Wu and Sidle, 1995)。1つ目は、傾斜度、地形、岩相、地質、地下水などの内的要因である。2つ目は、強い降水、鉄道や道路の建設、鉱山開発などの外的要因である。本研究で採用した内部要因は、主に地形と岩相・地質である。

地形・標高・勾配などの土地の特性は、デジタル地形モデル (DTM) から抽出した。DTM (5 m 解像度) は、それぞれ平面精度 5 m / 標高精度 2.5 m に対応しており (Habib et al. 2017)、縮尺 1 : 20,000 の標高点と等高線のデジタル化によって生成され、図化作業では ArcGIS ソフトウェアの「Topo to Raster ツール」(TOPOGRID) を使用した。

地質については、縮尺 1/20 万地質図 (Roch 1930; Gigout 1954; Choubert 1956, 57) と 1/2 万地盤工学図 (Mazéas 1967) の情報について、ArcGIS を用いて図化した。その結果、

研究地域には9種類の岩相(うち8種類はカルスト性)が分布していることが分かった。

2.5 斜面崩壊発生危険度の評価とマッピング

(1) GIS マトリックス法 (GMM)

GMMは、3つのマトリックスに基づく3つのステップでの解析を基本とする。これらはそれぞれ、総合地表マトリックス(TSM)、崩壊マトリックス(LM)、および発生危険度マトリックス(SM)である(Jiménez-Perálvarez et al. 2009)。1983年5月以前に発生した斜面崩壊現象を対象として、岩盤滑り、岩盤崩落、土石流、および岩盤倒壊の発生危険度マップを作成するためにGMMを適用した。

ステップ1:TSMマトリックスでは、選択した素因間の可能なすべての組み合わせに基づき、各組み合わせが占める面積をGIS上で解析した。3つの派生図(傾斜角、標高、傾斜方位)がDTMから作成され、岩相との重ね合わせを行った。

ステップ2:LMマトリックスでは、分類された斜面崩壊分布とTSMの重なりを集計した。再分類された斜面崩壊分布には、斜面崩壊が存在しない場合は“1”を、斜面崩壊が存在する場合は“2”の属性を付与した。

ステップ3:SMマトリックスでは、LMをTSMのセル値で割ることにより、各セル値を計算した。SMセル値は、選択した素因の各組み合わせに対応する相対的な発生危険度の評価を表している。

(2) 斜面崩壊発生危険度マップの検証

斜面崩壊発生危険度マップの作成と検証は、異なる期間に発生した2つの斜面崩壊現象に基づいて行った。マップの作成では、過去に発生した斜面崩壊現象(1983年5月以前に発生)を使用した(図-1)。マップの検証では、最近発生した斜面崩壊現象(2010年4月以前に発生)を使用した。

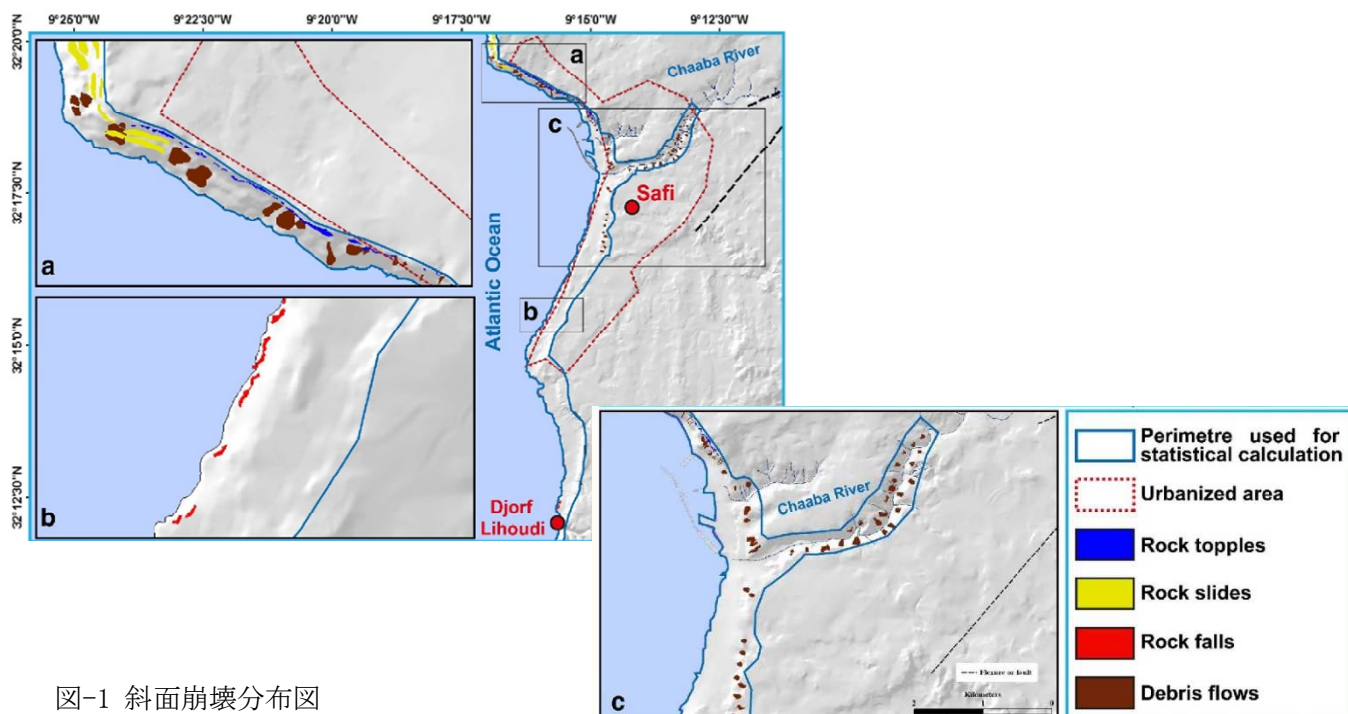


図-1 斜面崩壊分布図

(1983年5月以前に発生したもの)

2.6 研究結果

(1) 斜面崩壊履歴マップ

作成された分布図（図-1）では、主に分布する斜面崩壊タイプを岩盤滑り、岩盤倒壊、岩盤崩落、および土石流に分類した上で、主に北西部と南部の活発な海岸崖に沿って発生していることを示している。また、詳細な現地調査によって各斜面崩壊タイプの素因を特定した。

土石流は主に北部の海岸崖に分布し、そのうち 65%ではカルスト湧水の存在が関連している。カルスト湧水は、斜面上部のドリドラ石灰岩層とその直下の褐色粘土層の間から湧出し、それによる斜面浸食と急勾配により土石流が発生する。

岩盤倒壊は、北部の海岸崖のドリドラ石灰岩層と鮮新世～第四紀層の分布域で顕著となる。直下の褐色粘土層で侵食が進行し、直上の岩体で岩盤倒壊が発生する。また、岩盤倒壊の分布域の 50%でカルスト湧水が確認されており、斜面崩壊の誘因となっていることが示されている。

岩盤滑りは、褐色粘土層が海面近くで露出する地域で顕著となる。海水が褐色粘土層を浸食することで、残存した岩石が滑る。

岩盤崩落は、南部の変動が激しい海岸の崖に認められる。これらの崖は主に砂岩と砂質石灰岩によって形成され、その分布域の 85%においてカルスト現象が確認されている。カルスト化した崖の底部にノッチ（marine cavity or notch）による空洞が発達し、それにより斜面が不安定化して岩体が崩落することで、崖が後退する。また、生活排水による斜面の不安定化も確認されている。

(2) 斜面崩壊発生危険度マップ

GMMに基づいて、1983年5月以前に発生した斜面崩壊現象を使用して、4種類の斜面崩壊発生危険度マップ（岩盤滑り、土石流、岩盤崩落、岩盤倒壊）を作成した。マップでは、発生危険度を5段階のレベル（非常に低い、低い、中程度、高い、非常に高い）に分類して視覚化した。

土石流発生危険度マップを例に挙げると、北西部とチャアバ川沿いの地域に高いおよび非常に高い発生危険度が分布していることを示している（図-2）。

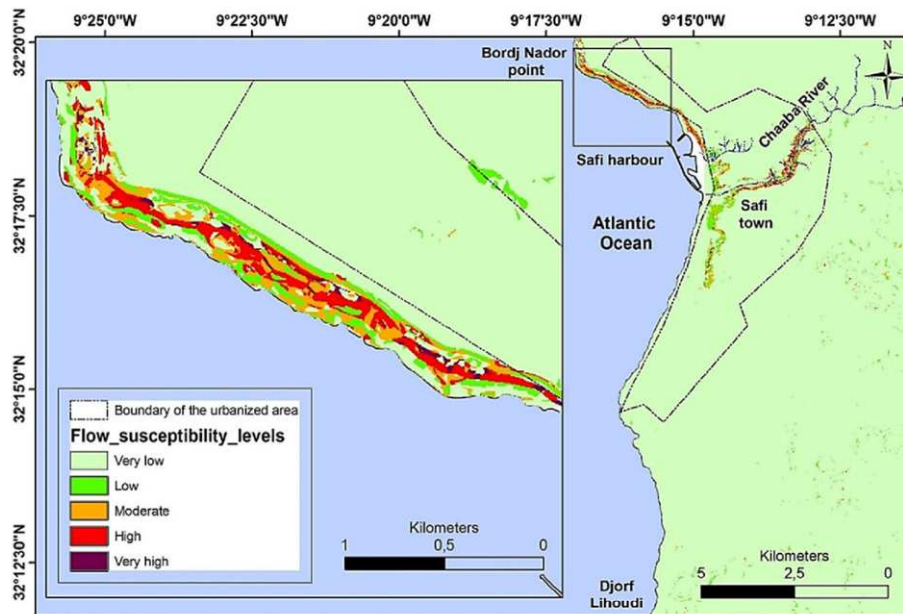


図-2 斜面崩壊発生危険度マップの一例（土石流）

Copyright 2019 Springer International Publishing AG. Part of Springer Nature.

2.7 討論

斜面崩壊発生危険度マップでは、岩盤滑り、土石流、および岩盤倒壊について、高いおよび非常に高い発生危険度レベルが調査地域の北西部に著しく集中していることを示している。この地域には2つのカルスト層（ドリドラ石灰岩と鮮新世～第四紀の地層）が含まれており、褐色粘土層の上に分布している。カルストを形成する地層ではカルスト湧水が発生し、岩盤内の深い割れ目は水の浸透を助長し、この双方が崩壊プロセスに深く関与している。岩盤崩落については、高いおよび非常に高い発生危険度レベルが南部の海岸線に集中している。これは、海面付近でカルストを形成する地層に海蝕空洞が生じることで、崖の安定性を低下させていることを示している。

2.8 結論

本研究では、地形学的野外調査と航空写真判読という従来の方法を使用して、斜面崩壊分布図を作成した。それらに基づき、岩盤崩落、土石流、岩盤倒壊、および岩盤滑りを対象とした4種類の斜面崩壊発生危険度マップを作成した。

このマップでは、非常に高いおよび高い発生危険度レベルが調査地域の全面積のうち7%弱を占めていることが示されており、さらに北部および南部の両方の海岸崖沿いの限られた地域に集中している。しかし、この狭い範囲は産業活動と観光活動の盛んな地域の大部分を含んでいる。

今回、GMMの適用結果は十分有用であることが示され、今後は地権者や土地開発事業者によって将来のリスク評価が行われる際の参考データとして、有効活用されることが期待される。

3. 終わりに

今回紹介した論文は、航空写真（過去の崩壊履歴情報）を用いた地形判読結果（詳細な現地踏査による補完を実施）に基づく斜面崩壊分布域と、地形・岩相条件に基づく特性域、この双方の範囲を GIS 上で重ね合わせて解析することで、調査地域内における斜面崩壊発生危険度を図面として可視化している。

一方、地形解析の分野においては、航空レーザ測量等により取得した二時期の地形データ解析を継続的に実施することによって、高精度な変状地域の特定が可能となり、自然保全や防災対策の優先度検討時の根拠としても活用されている。

上記手順を適用することで、現在国内外で自然の風化作用に晒されている沿岸域の観光地などの長期的保全とともに、人々の安全にも寄与することを期待したい。

4. 引用文献

- 1) Choubert G (1956) : Carte géologique du Maroc - 1/500 000. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, No70.
- 2) Choubert G (1957) : Carte géologique du Maroc - 1/500 000. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, No70.
- 3) Gigout M (1954) : Carte géologique de la Meseta entre Mechrâ Benâbbou et Safi (Abda, Doukkala et massif des Rhamna) au 1/200.000. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, No84.
- 4) Jiménez-Perálvarez JD, Irigaray C, El Hamdouni R, Chacón J (2009) : Building models for automatic landslide-susceptibility analysis, mapping and validation in ArcGIS. Nat Hazards 50, pp571-590.
- 5) Mazéas JP (1967) : Carte géotechnique de Safi au 1/20000. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, No189.
- 6) Roch E (1930) : Carte géologique provisoire des Abda et des Djebilet occidentales, au 1/200000. Notes et mémoires du Service Mines et Carte géologique. Maroc, No10.
- 7) Wu W, Sidle RC (1995) : A distributed slope stability model for steep forested basins. Water Resour Res 31(8), pp2097-2110.