

GB-InSAR を用いた斜面動態モニタリングに関する研究紹介

国際委員 菊地 輝行

1. はじめに

近年，日本国内において豪雨や地震による斜面災害件数が増えている．斜面災害の素因となる地質は短期間で大きく変化しないと考えられるが，誘因となる自然事象については，気象庁がまとめる統計¹⁾でも報告されているように降雨量の増加や雨の降り方の変化が明瞭である．地震についても，規模の大きい地震や直下型地震が都市部において発生していることが災害の規模を大きくしているといえる．この傾向は国際的にも同じことが言えるようで，IAEG Bulletin においても 2015 年，2016 年には斜面災害に関する記事が 227 件中 55 件で約 24%を占めている．これは最も多い土質・岩石試験の 72 件，約 32%に次ぐもので，その重要性が大きいことを示している²⁾．

次に斜面災害のモニタリングに関しての報告例を見ると，図-1 に示すように，1980 年代から 2000 年代にかけては 5 年間で 10~20 件程度の報告であったが，2011 年以降は倍以上の件数となり，モニタリングの必要性や需要が急激に高まったことを示している．

斜面に関わるモニタリングに関しては，古くより多くの手法が提案されており簡易なものとしては丁張りの設置などがあるが，主流は地盤伸縮計や孔内傾斜計といった現地に設置するものである³⁾．近年では，リモートセンシングを用いて変動をモニタリングする手法が開発されており，GNSS (Global Navigation Satellite System) を用いた地すべり監視体制も行われており，準天頂衛星みちびき 2 号の運用により更なる高精度化も期待できる．また有人航空機やドローンを用いた航空レーザ計測では，高精度な三次元点群データが取得できるようになっている．この多時期のデータを解析することで変動傾向を把握することが可能となっており⁴⁾など，定期的な変動計測としての役割が期待されている⁵⁾．

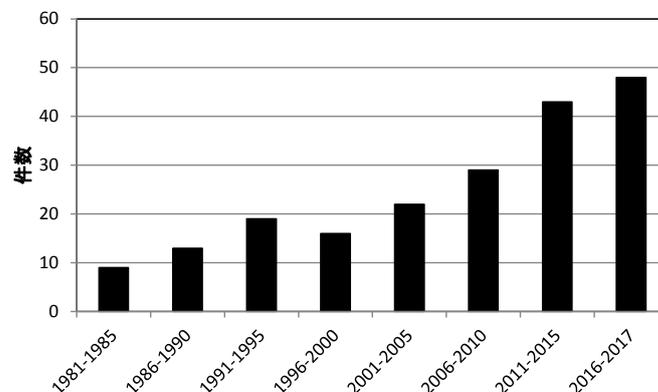


図-1 IAEG Bulletin(1980-2017)における地すべり，モニタリングの件数の変化

今回紹介する斜面動態モニタリング手法は、地すべりにおける岩盤崩落を監視したものである。岩盤崩壊の監視方法は、第三者への被害が予測される場合には、前述したような地盤伸縮計などの現地に設置するタイプの計測が活用されることが多いが、近年は無線型の計測機器として、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) による加速度計や傾斜計を設置する手法⁶⁾があり実例報告⁷⁾などが増加している。一方、非設置型の計測手法では、衛星を用いたレーダーによる計測である In-SAR (干渉合成開口レーダー: Interferometric Synthetic Aperture Radar) を地上に適用した GB-SAR (地上設置型合成開口レーダー: Ground Based SAR) の精密な計測例が報告されているため、この事例を紹介したい。なお、GB-SAR は、日本国内でも実施されており、宮城内陸地震で滑動した荒砥沢地すべりの滑落崖のモニタリング事例⁸⁾、浜松市の門島地すべり⁹⁾の事例が報告されている。

2. Di Matteo et al. (2017)の概要¹⁰⁾

Di Matteo et al. (2017) は Bulletin の第 76 巻 413~420 ページに掲載されている論文で、論文タイトルは「Rock fall analysis in an Alpine area by using a reliable integrated monitoring system: results from the Ingelsberg slope (Salzburg Land, Austria)」である。本論文の執筆者のうち、Lucio Di Matteo 氏と, Saverio Romeo 氏の所属はイタリア, ペルージャの Department of Physics and Geology, University of Perugia である。Daniel Scott Kieffer 氏の所属は、オーストリア, グラーツの Institute of Applied Geosciences, Graz University of Technology である。以下、論文の構成に沿って概要を述べる。

Introduction

- ✓ アルプスは、オーストリアの約 62%を占めており、GEORIOS (Georisiken Osterreich) data management system には 3 万箇所以上の斜面が登録されており、その 19%は岩石崩落や急傾斜地であり、斜面災害の原因となっている¹¹⁾。
- ✓ オーストリアにおける岩盤崩壊の大部分は、永久凍土層よりもはるかに低い位置で発生しており、この誘因は間隙水の静水圧の変化によるもので、春に最初の降雨が観測される時期に発生することが明らかとなっている¹²⁾。
- ✓ 気象による誘因と岩盤崩壊のメカニズムは十分に理解されるに至っていないが¹³⁾、この現象の理解のためには岩盤崩落に関する監視システムの定量化と高度化が必要である。このフレームワークは地すべりの挙動と運動現象が理解できるものでなくてはならない¹⁴⁾。
- ✓ 本研究では、岩盤崩落の挙動を把握するために、表層については地上型干渉計合成開口レーダー (GB-InSAR) を用い、深部の挙動は地盤伸縮計を設置し多機器によって計測を行い、気象条件を考慮して評価を行った。

The Ingelsberg: geological setting and landslide events

- ✓ インゲルスベルク地すべりは、ザルツブルクの約 100km 南のオーストリア中部バート・ホーフガシュタインに位置する。
- ✓ 対象地の基盤岩は、西部アルプスの南半分を占める三畳紀～ジュラ紀のペンニン帯¹⁵⁾に属し、グルックナ・ナップ¹⁶⁾の変成岩で石灰質砂泥岩、緑色片岩からなる。地すべりは、南西向きの斜面に位置し、概ね差し目の構造となっている (図-2 参照)。
- ✓ 地すべりは、岩石崩壊発生源 (ヘッドエリア)、崩壊土砂エリア、安定した岩壁で構成されている。
- ✓ 地すべりおよび岩盤崩壊イベントは、1931 年から合計 7 回発生している。特に 2000 年以降は、5 回発生しており筆者が冒頭で記載したように頻度が増加している。

図-2 インゲルスベルク地すべりの模式的な地質断面図.GB-InSAR の設置位置とヘッドエリアに設置した亀裂の地盤伸縮計¹⁰⁾

地質凡例 1 沖積堆積物; 2 モレーン; 3 黒色粘板岩; 4 緑色片岩; 5 石灰質片岩

Copyright2017 Springer International Publishing AG. Part of Springer Nature.

The monitoring system

- ✓ 図-2 に示すようにヘッドエリアから約 1.2km 離れた斜面の底部に地上干渉計合成開口レーダー (GB-InSAR) を設置した。機材とシステムは IBIS-L/IBIS-FL 型で、イタリアの IDS 社 (Ingegneria dei Sistemi) によって製造されており、17GHz 帯を使用する。気温・大気圧条件や対象物とセンサの距離などのいくつかの要因に依存するが、サブミリメートルの精度で地面変位の計測が可能であるため、非設置型でありながら面的な斜面変形マップを作成できる¹⁷⁾。
- ✓ 5 つの地盤伸縮計 (0.1mm 精度) を主要な岩盤のヘッドエリアに配置した。なお地盤伸縮計は、GB-InSAR の測線に平行に設置している。この他、気象観測小屋を設置した。

Analysis of the pre- and post-rock fall

- ✓ 監視中、2013 年 4 月 29 日 17:00 に岩盤崩落が発生し、ヘッドエリアから約 20~40m³ 崩落した。GB-InSAR データと地盤伸縮計 No.5 のデータの比較を図-3 に引用する。
- ✓ 2013 年 4 月 10 日以降、地盤伸縮計 No.5 による変位が増加する傾向があり、一方で GB-InSAR によるヘッドエリアの岩塊はマイナス方向、すなわち GB-InSAR に向かって移動している。岩盤崩落後、地盤伸縮計の変位速度は止まる傾向が認められている。

図-3 2013 年 4 月 29 日 (17:00) に発生した岩石崩壊における地盤伸縮計 No.5 と GB-InSAR による変位傾向¹⁰⁾

Copyright2017 Springer International Publishing AG. Part of Springer Nature.

Climatic analysis

- ✓ 気象解析によれば 2013 年 3 月 28 日からの降雪がこの年度最後となった。2013 年 4 月 8 日から気温は 5°C から 15°C（ピークは 22°C）へ数日で上昇し、雪は完全に融解した。この時期の地盤伸縮計（0.13mm/日から 1.52mm/日）と GB-InSAR 変位（0.46mm/日から 3.50mm/日）の両方の挙動において速度変化が認められる。この過程は、岩盤内の亀裂の凍結融解による間隙水の静水圧の上昇によって説明することができる。

Discussion and conclusion

- ✓ 遠隔監視の手法として、地表を面的に広く計測することは、地すべり現象に関する知識を向上させる。GB-InSAR と地盤伸縮計を統合させ、ほぼリアルタイムで地すべりを監視することができる早期警報システムを実施することは重要である。
- ✓ 本計測中に得られた事象（2013 年 4 月 29 日）を参考にして、GB-InSAR と地盤伸縮計 No.5 に示されている変位は、実質的な相互信頼度（相関係数 0.9）を示した。
- ✓ 本研究の成果は、GB-InSAR と地盤伸縮計の使用が地表と地中での効率的な監視を行い、地すべり挙動に関する知識を向上させた。また積雪や降雨などの気象現象が誘因となっていることが評価され、岩盤崩壊のメカニズムを理解するのに複数の現象を理解することが重要であることが示された。

3. 終わりに

複数の計測方法を組み合わせて高度化されたシステムを用いて岩石崩壊を効率良く計測を行った事例である。図-2 および図-3 に記載されている高角度の亀裂はトップリングの転倒により発生したと推察されるが、本文中では地すべり全体の挙動およびメカニズム的な議論はなされていない。特に差し目であるにもかかわらず川側に傾斜した亀裂（図-3 では点線で記されている）と片理構造との関係を知りたいところである。地盤伸縮計の変動量は、活発な時期において 1.52mm/日であるが、崩落した岩盤ブロックとの位置関係から部分的なブロックのみの崩壊ではなく、図-2 の断面図で記された高角度亀裂の最深部にトップリングによるすべり面があるのではないかと感じた。

日本に比べれば地震が少ないオーストリアであるが、温暖化により永久凍土層の融解による斜面変動が進行する可能性も高まると考えられる¹⁸⁾。本文でも指摘しているように岩盤に接触する機器と、斜面全体を把握し面的に捉える手法を融合することは、斜面変動の予測に対して有効と考えられる。

近年は計測機器の高精度化に関わる開発速度が速くなっている。一方で機材には一長一短があり、現場の状況に合わせた適切な手法を選択する必要がある。今後土木地質技術者は、高レベルな技術的判断が求められるであろう。

参考文献

- 1) 気象庁:アメダスで見た短時間強雨発生回数の長期変化について,
[<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrend.html>](最終検索日:2017/1/13)
- 2) 茶石貴夫(2017):日本応用地質学会の国際活動へ向けて-その1, 応用地質 vol.58, No.1, pp.58~60.
- 3) 社団法人 地すべり対策技術協会 「地すべり観測便覧」
- 4) 向山栄,江川真史(2009):二時期の細密 DEM から作成した地形画像解析により推定した平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震における荒砥沢ダム周辺の地表変動:応用地質学会平成21年度研究発表会講演論文集,p3-4.
- 5) 菊地輝行, 秦野輝儀, 千田良道, 西山哲(2016):航空レーザ測量を用いた斜面動態モニタリング技術の試み, 地盤工学会平成28年研究発表会
- 6) 西山哲, 大西有三, 矢野隆夫, 里 優, 吉崎互(2011):無線機器を利用した斜面変位計測法の研究,地盤工学ジャーナル,Vol. 6,No.4,pp.503-511.
- 7) 中村公一,島内哲哉,塚原健太郎,小野和行,西山哲(2014):MEMS型三軸傾斜計による計測事例から得られた傾斜速度に関する検討,第59回地盤工学シンポジウム.
- 8) 佐藤源之(2011):レーダーによる栗原市・荒砥沢大規模地滑りモニタリング,
<http://cobalt.cneas.tohoku.ac.jp/users/sato/GB-SAR-Ar.pdf>.
- 9) 松下一樹・船戸総久・水谷直樹・川上哲広・杉澤文仁・堀内成郎・吉川和男・三五大輔・野田敦夫(2014):静岡県浜松市天竜区春野町における地上設置型合成開口レーダーを用いた斜面監視について,平成26年砂防学会研究発表会 講演要旨集,pp A98-99.
- 10) Di Matteo, L., Romeo, S. & Kieffer, D.S.(2017): Rock fall analysis in an Alpine area by using a reliable integrated monitoring system: results from the Ingelsberg slope (Salzburg Land, Austria). Bull Eng Geol Environ Vol 76: pp.413-420.
- 11) Tilch N, Kociu A, Haberler A, Melzner S, Schwarz L, Lotter M (2011): The data management system GEORIOS of the geological survey of Austria, Poster presentation RocExs.
- 12) Sass O, Oberlechner M (2012): Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria? Natl Hazards Earth Syst Sci Vol. 12, pp. 3209-3216.
- 13) D'Amato J, Hantz D, Guerin A, Jaboyedoff M, Baillet L, Mariscal A (2016): Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. Nat Hazards Earth Syst Sci Vol. 16:pp. 719-735.
- 14) Romeo S, Kieffer DS, Di Matteo L (2014): The Ingelsberg landslide (Bad Hofgastein, Austria): description and first results of monitoring system (GBInSAR technique). Rend Online Soc Geol It Vol. 32: pp.24-27.
- 15) Schmid SM, Fugenschuh B, Eduard K (2004): Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogene. Eclogae Geol Helv Vol. 97:pp. 93-117.
- 16) Pestal G, Hejl E, Braunstingl R, Schuster R (2009): Erläuterungen Geologische Karte

von Salzburg 1:200.000. Land Salzburg & Geologische Bundesanstalt, pp. 1-162.

- 17) Bozzano F, Mazzanti P, Prestininzi A, Scarascia Mugnozza G (2010): Research and development of advanced technologies for landslide hazard analysis in Italy. *Landslides* 7(3), pp. 381-385.
- 18) 松岡憲知, 平川一臣, 渡辺梯二, 池田敦 (2000) : 欧州アルプス山岳永久凍土帯の斜面変動, *地学雑誌* vol.109(5), pp.746-752.