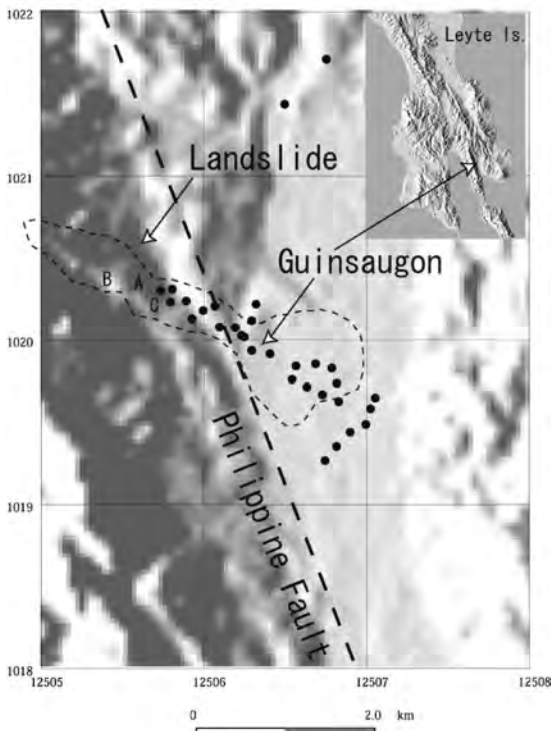


レイテ島ギンサウゴン大規模斜面崩壊合同調査

牧野 雅彦¹⁾・Allan Mandanas²⁾・Sandra G. Catane²⁾

1. はじめに

2006年2月17日に発生した大規模斜面崩壊によって、フィリピン共和国南レイテ州セントバーナード町のギンサウゴン集落(総人口 1,857人:家屋 321軒)一帯が巨石や土石流・泥流などによって埋まり、死者139名、行方不明者980名という多大な犠牲者を出し



第1図 ギンサウゴン斜面崩壊周辺における重力探査地域。黒丸は重力測点を、太い破線はフィリピン断層を、細い破線は斜面崩壊地域を示す。地形陰影はSRTM-3を用いて作成した。

た、災害から1ヶ月後、フィリピン国立大学 (University of the Philippines, UP) からの合同調査の要請が産業技術総合研究所に回ってきた。レイテ島の斜面崩壊源が尾根に位置し、深層崩壊であったことから、1997年の鹿児島県出水市の針原川土石流に近いタイプではないかと推測された。斜面災害で重力探査が用いられることは少ないが、針原川の調査事例は地下深部の構造調査における有効性を示した(牧野・遠藤, 1999)。そこで、レイテ島の崩壊地付近の地下構造を明らかにするために、UPのSandra G. Catane博士と電子メールで連絡を3月下旬から取り始めた。大規模災害に関連した地質調査では1-2年の短期で成果を出すことは難しいので長期的な視野での研究協力が要請された。4月中旬の現地調査に向けて機材、事務手続き等の準備を進めた。今回のUP合同調査では、崩壊源よりも斜面の根元を横切るフィリピン断層の地下構造に絞って重力探査を行うことになった(第1図)。

レイテ重力探査は別便で送った三脚・ヘルメットなど調査機材の一部が届かないというアクシデントがあったが、現地の方々の暖かい協力によって三脚等を貸していただき何とか遂行することができた。探査の結果、ギンサウゴン集落付近において、フィリピン断層による大きな重力異常が検出されたことを報告する。

2. 大規模斜面災害の概要

2.1 斜面災害の分類

この斜面崩壊については、本誌2006年6月号に上野・地下(2006)によって、緊急地質調査の結果が表紙、口絵とともに紹介されている。新聞・テレビなど

キーワード: 岩屑なだれ, 重力, 斜面崩壊, フィリピン断層, 地震

1) 産総研 地質情報研究部門
2) National Institute of Geological Sciences, University of the Philippines



写真1 ギンサウゴン付近に点在する巨石. 高さ, 約2m. 崩壊斜面の岩盤と同じ岩相(写真4, 5). このような巨石と流山が散在していた.



写真2 斜面崩壊の目撃者(左から一人目). ココナツの椰子畑で仕事中に崩壊が発生した. 地質調査では道案内をしてくれた.

では「レイテ島地すべり」と報道されているが、ギンサウゴン周辺の崩壊堆積物の表面に多数の小丘が点在する流れ山地形をもち、分解しきれなかった岩盤構成物の大きな塊(写真1)を多く含む等の特徴から、狭義の「地すべり」というよりは、「岩屑なだれ」が発生したと考えられる(Catane *et al.*, 2006). 岩屑なだれとしては、1888年の磐梯山、1980年のセントヘレンズ火山、1984年の御嶽山などがよく知られている事例である。

崩壊斜面横の椰子畑で働いていた目撃証言を現場で聴くことができた(写真2). 彼によると、立ってられないほどの強い地震が5秒間続いた直後、ガラガラという大きな音がしばらく鳴った。そして、爆発音と共に白い筋状の雲が立ち上がったところから、(尾根付近を指差して)山体のブロックが崩れ始めた。波がうねるように次から次へと、3つのブロックが斜面を崩れ落ちていった。最初のブロックは谷筋に沿って落ちたが、2番目と3番目は空中へ放り出されるようにして飛んでいき、斜面脚部の尾根に衝突した。衝突でブロックは粉々になり、土煙が広がるように土石流がギンサウゴン集落を埋め尽くした。すべての出来事は5分以内の短時間で起きた。この目撃男性はギンサウゴンに残っていた妻を亡くした。

京都大学防災研究所の調査グループ(<http://landslide.dpri.kyoto-u.ac.jp/Leyte-landslide-preliminary-report.pdf>)によると、ギンサウゴンで2階建ての家を建設作業中の人が、地震動が発生し、斜面を見たとこ中腹で比較的小さな地すべりが発生

しているのが見えた。2階から1階に降りて再び斜面を見たとこ大きな地すべりが発生しているのが見えたので、急いで木に登って助かったという目撃証言もある。

地震から大規模な斜面崩壊が発生するまでに、しばらくの時間が空いていること、その空白の時間に、中腹での小さな地すべりとガラガラという音がしたこと(中腹にいた目撃者の位置からは斜面下部での地すべりは死角になるので音しか聞こえない)は共通していると思われる。

斜面脚部または中腹において、小規模な斜面崩壊が地震によって発生し、この小規模な崩壊によって、脚部が取り払われて力学的不安定が連鎖的に上方へ伝わり、尾根からの大規模な斜面崩壊になったのではないかと考えられる。ドミノ倒しのように複数の斜面崩壊が発生した可能性も考えられる。

2.2 斜面災害の規模

流下土砂量は14~18Mm³、流動距離は4.1km、3.2km²の地域を土砂が覆い尽くしたと見積もられている。

崩壊源の尾根は標高700mを超える。ギンサウゴン集落は標高30m前後である。尾根から崩落した岩屑は数日前に著しく強く降った降水を大量に含んだ旧期斜面堆積物を巻き込みながら、土石流・泥流となって麓のギンサウゴン集落を襲った。その破壊力は小学校の3階建てコンクリート校舎を5~600mも移動させたほど凄まじいものであった。



写真3 崩壊斜面脚部から上流を眺める。V字谷の底に岩盤が露出して、小さな滝が点在する。崩壊斜面は中腹にも複数存在し、尾根付近の崩壊斜面は楔形である。第1図のA点にて撮影。



写真4 斜面中腹の崩壊斜面の遠景。岩盤に亀裂が多く走っている。第1図のB点にて撮影。

2.3 斜面災害の素因

崩壊地斜面の脚部はフィリピン断層が通っている。フィリピン断層はルソン島からレイテ島を通してミンダナオ島まで延びる長さ1,200km以上の大構造線である。レイテ島で、 $26 \pm 10 \text{ mm/yr}$ (Duquesnoy *et al.*, 1994) の左横ずれ変位速度がGPS観測によって得られている。レイテ島の北部では1947年にマグニチュード6.9、南部では1948年にマグニチュード7.0の地震がフィリピン断層に沿って発生している(堤・Daligid, 2006)。大規模な構造線の地殻変動としては、日本の中央構造線等よりも非常に活発な地域といえる。

地形は南南東に延びるフィリピン断層を境として西側が隆起して山地を形成している。斜面は急峻である。断層の東側は平坦な沖積低地が広がっている。この沖積は水田として利用されている。一方、斜面下部は斜面崩壊堆積物によって緩斜面が形成され、椰子畑として中腹付近まで活用されている。地形的には神戸と六甲山地の関係に似ている。六甲山地も斜面災害が多い点において共通している。

大きな河川は南のカバリアン湾に向かってヒムブンガオ川が流れている。この川はギンサウゴンを東側に迂回するように流れている。ギンサウゴンの西側にはいくつかの川が流れている。崩壊源は西に向かって延びる谷地形の谷頭に位置する(写真3)。斜面から湧出する地下水はこれらの河川に流入しギンサウゴンへ向かうが、集落の西に位置する低い丘陵によって東下するのを妨げられ向きを南に変える。巨礫

を含む岩屑なだれはこの低い丘陵を乗り越えて集落を襲った。一方、大きな土石を余り含まない泥流は丘陵を乗り越えることができず、この河川に沿って南方に流下している。

湧出する地下水は豊富であり、斜面崩壊堆積物で堰き止められて、いくつかの池を形成している。この池に水没している集落もある。

崩壊地周辺の地質は鮮新世の火成岩類 (Central Highland Igneous Complex, CHIC) が広く分布している (Dimalanta *et al.*, 2006)。CHICは安山岩、玄武岩の溶岩、火砕流堆積物から成る。崩壊地周辺には基盤岩は全く露出していないが、白亜紀の超塩基性岩類 (Malitbog Ophiolite Complex, MOC) が基盤を成していると考えられている。MOCは崩壊地の南方10km付近に露出している。ギンサウゴン集落周辺は第四紀の沖積層、斜面崩壊堆積物が堆積している。CHICの上部は石灰岩 (Dacao Limestone) が載っている。模式露頭はセントバーナード町から南西に延びる幹線道路沿いに見ることができる。

崩壊した斜面全体に亀裂、断層を見ることができる。フィリピン断層によって形成された亀裂や断層のために、全体的に脆くなっていることがわかる(写真4)。中腹の固結した凝灰岩から成る岩盤斜面では、人がすっぽりと入ることができる大きな開口亀裂があった(写真5)。急峻なすべり面は鏡面のようで凹凸が小さかった。岩盤斜面の下部またはその周辺から地下水の湧出を確認できた。湧出した地下水はV字谷を勢いよく流下し、小断層で形成された急崖で滝となっていた(写真3, 6)。斜面脚部ではフィリピン断層



写真5 崩壊斜面の巨大亀裂。人間が楽に入れるほど大きい。岩盤は熱変質等の影響が見られずフレッシュであった。第1図のB点にて撮影。



写真7 熱変質した岩盤。第1図のC点にて撮影。



写真6 崩壊斜面からギンサウゴンを眺望。V字谷の底を流れる水量が豊富であった。集落付近は崩壊土石流が堆積し、ほぼ平坦に見える。遠方の山はカバリアン火山である。第1図のB点付近にて撮影。

とほぼ平行方向で、熱水変質を受けた貫入ダイクがあった(写真7)。崩壊源付近の斜面は、2つの開口面で形成された「くさび型」をしている。それは、多田(1993)によれば、地層面と節理、断層面である。ある開口面はフィリピン断層と平行であり、その他の開口面はそれに斜交している。主すべり面下部では、すべり面と平行な亀裂があり、その亀裂を充填している断層ガウジを奥に確認できた。

2.4 斜面災害の誘因

南レイテ州東部は例年、11月から1月が雨季である

が、2006年は、ラ・ニーニャ現象によって雨季が延びた。ギンサウゴンから7km西のリバゴンでは2月1日から16日の期間で751mmの降水を記録した。これは2月平均降水量の6倍である。特に、2月10-12日は日降水量が100mmを超える激しい雨が降った。この激しい雨によって南レイテ州の各地で、表層地すべりや斜面崩落が発生した。

2月17日、ギンサウゴン周辺の住民は午前6時ころに弱い地震を感じた。午前10時36分に、それよりはやや強い地震(PHIVOLCSによれば $M_s=4.3$ 、深さ6km)がギンサウゴンから西へ5km離れた地点で発生した。推定されたマグニチュードが小さいので、この地震が直接の誘因と考えるのは困難であるが、複数の目撃証言によれば地震の後に斜面崩壊が発生した。地震波データの解析ができれば、この地震が斜面崩壊によって引き起こされたものか、断層によって引き起こされたものか識別できるはずであるが、現在のところ不明である。

ギンサウゴンでは大規模斜面崩壊が起きる3日前からは天候が回復していた。したがって、降水は斜面の亀裂・断層をゆっくりと地表から深層まで浸透していき、すべり面を力学的不安定状態にしていたと考えられる。そのため、他の地域の地すべりや斜面崩壊よりも発生日時が数日遅れたのであろう。

3. 重力探査

ギンサウゴンにおける重力探査の様子を写真8に示す。調査は2006年4月に実施したが、写真の通り天

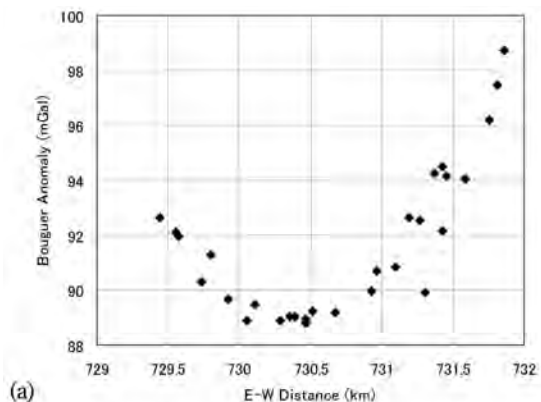


写真8 重力探査風景。

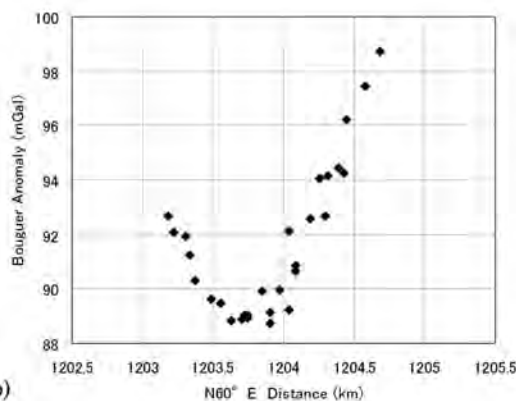
候に恵まれて順調に現場を歩いて調査を進めることができた。レイテ島ではこの時期は雨季が終わって天候が安定しているため地質調査に適しているが、調査現場は強い日差しを避ける木陰がほとんど無かった。気温が高いため熱中症にならないように注意する必要があった。なお、調査地域はフィリピン軍によって立入り規制されており、現地において事前登録が必要であった。

第1図に重力探査の測点を示す。測点の位置はGPSの高速静止測量を用いて決定した。GPSの基準点ならびに重力基点はセントバーナードの宿泊所に設置した。重力基点の値は隣接する町のカバリアンにある既存点を用いて決定した。重力測定にはLacoste & Rombergの重力計(G-911)を使用した。GPS測量にはTrimbleの4000ssiと4600LSを用いた。

第2図にギンサウゴン周辺の29個の測点のブーゲー異常を示す。地形補正にNASAの3秒メッシュ地形データ(SRTM-3)を用いた。GPSで得られた高度とSRTM-3から補間した高度値を比較すると、地形が平坦なところで±1m程度、地形が急峻なところで±10m程度の差があった。この程度の高度差は地形補正に関する支障は小さい。第2図(a)は東西方向をx軸としてブーゲー異常を投影・プロットしたものである。フィリピン断層付近で最小、断層両側でブーゲー異常が増大する。第2図(b)はN60°E方向をx軸として、つまり、フィリピン断層に直行する方向を軸として投影・プロットしたものである。a図において断層の東側で散布していた重力値が、b図では直線上にそろって分布した。この結果は断層による基盤構造が重力



(a)



(b)

第2図 ギンサウゴン周辺のブーゲー異常。密度2.3 g/cm³。(a)東西プロファイル。(b)N60°E方向プロファイル。

異常に強く影響を与えていることを意味する。被災地のギンサウゴンはブーゲー異常の谷間で、その東側は1kmで約10mGalも増大する重力急傾斜を持つ。

このような重力分布から推定できる地下構造のひとつの可能性として断層運動によって地殻が破碎されて密度低下を起こしていることが考えられる。しかし、10mGalもの重力異常を作る大きな破碎が現実的であるかどうか疑問である。別の可能性として、断層で基盤が急激に沈降して、小さい密度の斜面崩壊堆積物等が埋めていることも想定できる。

詳細な基盤構造モデルの構築には、第2図のデータだけでは不十分である。重力探査の範囲をさらに周囲に拡大することが必要である。また、重力異常から推定されるkm級の断層構造を明らかにするための掘削データも必要であろう。

4. おわりに

今回の重力探査によって崩壊した斜面の脚部に位置するフィリピン断層が大きな低重力異常を持つことが明らかになった。断層周辺の重力異常は急傾斜であり、斜面の深部構造としても不安定であろう。フィリピン断層周辺の地下構造の解明はスタートしたばかりで、これから様々な科学データを蓄積していくことが肝要であろう。

筆者はフィリピン地質学会主催の2006年4月17日に開催されたレイテ島地すべりに関するコロキウムにオブザーバーとして参加する機会を得た。そこでは政府機関、国立研究所、フィリピン国立大学等による研究発表が行われ、ハザードマップに関する概要と問題点等も熱心に討議されていた。地質学会長からは12月に開催する学会で重力探査の結果を発表するように招待された。翌4月18日にはフィリピン国立大学の学長会議(全国の主要都市にあるキャンパスの学長たちの会議)を表敬した。それぞれのキャンパスの敷地内に存在する断層と地すべりが議題であった。フィリピンも日本と同様に自然災害が多く、その原因の解明に関心が非常に高い国である。日本からも大学やJICA等によって多くの現地調査が行われている。今後も両国の研究協力の発展を願う。

謝辞: 合同調査にあたり、産業技術総合研究所国際部門研究セキュリティ管理部、フィリピン国立大学、セントバーナード町民の関係各位に大変御世話になりました。地質情報研究部門の小松原琢氏にはレイテ島地すべり、中澤 努氏には海外調査に関する情報

をいただき、駒澤正夫氏にはSRTM-3による地形補正やフィリピン重力探査経験など貴重な助言をいただきました。合同調査の機会を与えていただいた宇井忠英北海道大学名誉教授や、現地調査に行くように励ましていただいた同僚の方々を始め、関係者の皆様に、深く謝意を表します。

文 献

- Catane S. G., Cabria H. B., Tomarong Jr, C. P., Saturay Jr, R. M., Zarco, M. A. H. and Pioquinto W. C. (2006) : Catastrophic rock-slide-debris avalanche at St. Bernard, Southern Leyte, Philippines, Landslides, (SpringerLink), DOI 10.1007/S10346-006-0050-3.
- Duquesnoy, T., Barrier, E., Kasser, M., Auerelio, M., Gaulon, R., Punongbayan, R.S., Rangin, C. and French-Philippine Cooperation Team (1994) : Detection of creep along the Philippine fault : first result of geodetic measurements on Leyte island, central Philippine, Geophys. Res., Lett., 21, 975-978.
- Dimalanta, C.B., Yumul, G.P. and Tamayo, R.A. (2006) : Geology of Southern Leyte : Contribution to the understanding of the St. Bernard Landslide, a colloquium on The February 17, 2006 St. Bernard Landslide & related phenomena : scientific views & policy suggestions, Geological Society of the Philippines.
- 牧野雅彦・遠藤秀典(1999) : 鹿児島県出水市針原川土石流地域の重力探査, 物理探査, 52, 153-160.
- 多田元彦(1993) : くさび型岩盤斜面崩壊の簡易安定解析法とその適用例, 応用地質, 34, 25-33.
- 堤 浩之・Daligidig, J. A. (2006) : 中央構造線とフィリピン断層帯 - 東アジアの島弧中央横ずれ断層の比較 -, 月刊 地球/号外, No.54, 59-63.
- 上野宏共・地下まゆみ(2006) : フィリピン共和国レイテ島地すべりと地質, 地質ニュース, no. 622, 41-48.

MAKINO Masahiko, Allan Mandanas and Sandra G. Catane (2007) : Joint research of the Guinsaugon huge landslide, Southern Leyte, Philippines.

< 受付 : 2006年10月11日 >