

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700945

研究課題名(和文) 広域微地形マッピングに基づく山体重力変形と活断層の相関関係の解明

研究課題名(英文) Relation between gravitational slope deformation and active fault based on regional mapping of small geomorphic features

研究代表者

金田 平太郎 (Kaneda, Heitaro)

千葉大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30415658

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：美濃山地西部全域の航空レーザー測量データを実体視判読することにより、同山地の植生下に計1万以上もの山体重力変形地形が隠されていることを明らかにした。活断層、地形、地質等の各種パラメータとの比較から、山体重力変形地形の分布密度は、活断層および地形(標高と尾根谷度)の影響を強く受けていると考えられる。また、根尾谷断層北端近傍で発見された山体重力変形地形集中域における掘削調査から、これらの地形は最終氷期最盛期以降に形成されはじめたこと、その後も複数回、変形が進行するイベントがあったことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Stereoscopic interpretation of high-resolution LiDAR DEMs reveals that as many as more than 10,000 sacking (deep-seated gravitational slope deformation; DSGSD) features are hidden under forest canopies in the western Mino Mountains, central Japan. Our analysis suggests that the density of sacking features is controlled by presence of active faults as well as topography (altitude and ridgeness). We also conducted trilling and pit excavation studies at sacking features concentrated adjacent to the northern tip of the active Neodani fault and found that those features began to be created after the last glacial maximum, with multiple deformation episodes since then.

研究分野：変動地形学

キーワード：航空レーザー測量 山体重力変形 活断層 地理情報システム

1. 研究開始当初の背景

変動地形・古地震研究は、国内外を問わず、これまで段丘面や沖積平野面の詳しい観察・調査を中心として発展してきた。一方、こうした平坦面に乏しい山地では、活動履歴などの詳しい活断層情報が精度良く得られることは少ない。しかるに、我が国の国土の7割以上を山地が占め、世界的に見ても、地震の多発する変動帯では山地の卓越する国や地域が多い。平坦面がなければ仕事ができないという現状を乗り越えて山地の変動地形・古地震研究を発展させることは、地震発生予測の観点からも、外的・内的営力のせめぎ合いの結果としての地形を探求する本来の変動地形学・地形学を発展させる意味でも、非常に重要である。

折しも、21世紀以降、航空レーザー測量技術によって、各地の山地で植生下に隠された微地形の存在が明らかになりつつある。研究代表者が2007年に根尾谷断層北部を対象として実施した高密度航空レーザー測量では、断層近傍に膨大な数の山体重力変形地形（低崖地形・線状凹地）が存在することが明らかとなり、活断層運動が山体重力変形地形の形成・成長に大きな影響を与えていることがわかった（Lin et al., 2014）。このことは、山体重力変形地形の形成・成長時期から活断層の活動時期を推定できる可能性を示唆するものであり、山地の古地震学における新しい研究手法として着目される。

しかしながら、山体重力変形は地震に伴って発生するものばかりではない。これらの発生に対する活断層の影響を正しく評価するためには、活断層の分布しない地域を含む広域の山体重力変形地形マッピングを行って、その分布の特徴を詳しく検討することが不可欠である。しかし、従前の空中写真判読では植生に覆われた山地における微地形の網羅的マッピングは不可能であったことから、広域の山体重力変形地形の分布が完全に明らかにされたことは、世界的にもこれまでなかった。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究では、高精度・高密度の航空レーザー測量データがいち早く整備された美濃山地西部（越美山系）を例に、広域の山体重力変形地形の分布を詳細に明らかにし、その形成要因、とくに活断層との地理的相関関係を明らかにすることを第一の目的とした。活断層の影響については、重力移動の誘因として多くの研究で検討されてきた強震動に加え、活断層運動に伴う周辺地殻の静的な歪みの影響についても検討する。強震動および静的歪みは、ともに断層からの距離とともに減衰するが、後者は、断層端部・屈曲部・ステップ部などの周辺に局所集中するという特徴がある。

一方、形成年代決定に適した山体重力変形地形においては、掘削調査等の現地調査を実

施して、年代的な面から実証的に活断層運動と山体重力変形の関係性を検討することも目的とした。

3. 研究の方法

(1) 山体重力変形地形のマッピング

国土交通省越美山系砂防事務所が2007年～2011年に取得した航空レーザー測量データ（1mメッシュの数値標高モデル）を基に、研究地域全域（面積約820km²）の赤色立体地図ステレオペア画像（Lin et al., 2014）を計313組作成し、これらをコンピュータ画面上で実体視判読して、研究地域の山体重力変形地形および活断層地形分布図を作成した。判読結果は、地理情報システムソフトウェアArcGISを用いてデジタル化した。

(2) 山体重力変形地形と活断層の関係の解析

山体重力変形地形の分布密度（線密度）と活断層（強震動、静的歪み）、地形（標高、起伏量、尾根谷度）、基盤地質、年間降水量の関係を解析した。

研究地域内の活断層が活動した際の強震動については、Kanno et al. (2006)の距離減衰式によって各地点の最大加速度（PGA）を計算し、過去1万年間に研究地域内およびその周辺の活断層運動によって生じる最大加速度の積算値PGA（gal）を求めた。活断層が活動した際の周辺地殻の静的歪みの影響については、山体重力変形を発生させるすべり面（正断層面）のクーロン応力変化（ ΔCFF ）を計算することにより、そのすべり面での正断層すべりが促進される度合いを数値化した。具体的には、半無限弾性体（Okada, 1992）を仮定して走向が15°ずつ異なる12の純粋正断層（走向-82.5°～82.5°、傾斜60°）のクーロン応力変化（ ΔCFF ）を計算し、そのうちの正の応力変化について、対象領域内（半径1500m以内）の尾根の卓越方向で重み付けした平均値を求めたうえで、過去1万年間の正の応力変化の積算値 ΔCFF （MPa）を求めた。

(3) 山体重力変形地形の形成時期の調査

航空レーザー測量データの判読によって検出された山体重力変形地形のうち、根尾谷断層北端近傍の稜線上で発見された山体重力変形地形の異常集中域において、重力性凹地の地下構造やその形成・成長年代を明らかにするためのハンドオーガー掘削調査および手掘りによるピット掘削調査を行った。

現地で採取した堆積物試料については、研究室でテフラ分析（火山ガラスの含有率分析および火山ガラスの屈折率測定）を実施するとともに、採取した有機物試料の放射性炭素年代測定を行った。放射性炭素年代測定については、日本原子力研究開発機構東濃地科学センターの夏期休暇実習に学生を派遣して実施するとともに、一部については、株式会社加速器分析研究所に外注した。

4. 研究成果

(1) 山体重力変形地形の数と分布

航空レーザー測量データを用いたマッピングの結果、研究地域内には、山体重力変形地形（山向き低崖および谷向き低崖）が普遍的に存在し、その総数は10486に達することが明らかとなった。空中写真判読に基づく従前の地すべり地形分布図（清水ほか、1998）に記載された同地域内の山体重力変形地形の数は134であるので、実に98%以上の山体重力変形地形が植生下に隠されていたことになる。今回検出された重力性低崖地形の総延長は716 kmに達し、研究地域全体の平均の線密度は0.87 km/km²となる。一方で、半径1500 m以内のローカルな線密度は場所によって大きく異なり、最も低い場所で0.13 km/km²、最も高い場所で2.74 km/km²である。全体的な傾向としては、活断層に乏しい研究地域中南部で山体重力変形地形の分布密度が低く、活断層の密集する根尾谷断層北部周辺で特に分布密度が高い結果となった（図1）。

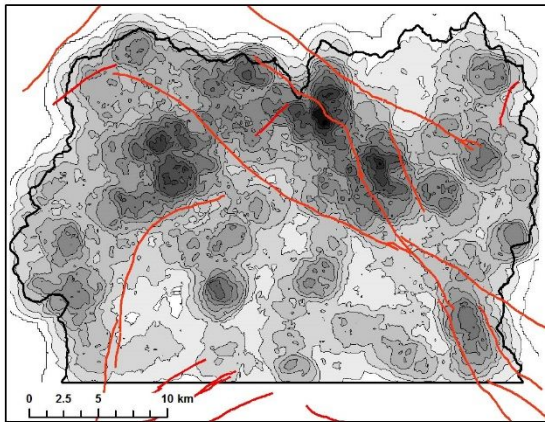


図1. 研究地域内の山体重力変形地形の分布密度（半径1500 m以内の線密度）。コンター間隔は0.2 km/km²。濃い色ほど高い密度を表す。赤線は活断層。

(2) 山体重力変形地形の分布密度の規定要因

山体重力変形地形の分布密度とPGA（強震動）、 Δ CFE（静的歪み）、標高、起伏量、尾根谷度、年間降水量（半径1500 m以内の平均値）との相関係数を表1に示す。最も高い相関係数を示したのは Δ CFE、次いで標高、尾根谷度、PGAの順となり、おおまかには、活断層の存在と地形が山体重力変形地形の分布密度を規定していると言える。対象地域の重力ポテンシャルを表していると考えられる起伏量には、ほとんど相関が認められなかったが、本研究地域では、大部分の場所が少なくとも300 mの起伏量を示すことから、これ以上起伏量が大きくなっても山地斜面の不安定性にはほとんど影響しないことを示しているのかもしれない。年間降水量については、降雨が斜面の不安定性をもたらすという一般的理解とは逆の傾向が認められた。したがって、この傾向は他のパラメータの影

響による見かけのものであり、本研究地域内においては、年間降水量は山体重力変形地形の発生にはほとんど影響していないと考えられる。

一方、基盤地質ごとの重力性低崖の平均分布密度は、最も高い砂岩で1.03 ± 0.38 km/km²、最も低いチャートで0.64 ± 0.33 km/km²であるが、これらは±1 σ の範囲で互いに重なり合い、山体重力変形地形の発達度合に基盤地質による顕著な相違は認められなかった。

表1 山体重力変形地形の分布密度と各パラメータの相関係数

| | 分布密度との相関係数 |
|---------------------------|------------|
| PGA (gal) (強震動) | 0.190 |
| Δ CFE (MPa) (静的歪み) | 0.407 |
| 標高 (m) | 0.317 |
| 起伏量 (m) | -0.066 |
| 尾根谷度 (°) | 0.227 |
| 年間降水量 (mm/yr) | -0.204 |

以上の結果は、山体重力変形地形の分布密度と各パラメータとの間の単相関を示しているに過ぎず、各パラメータ相互の相関の影響を取り除くことができていない。山体重力変形地形の分布密度に対する各パラメータの効果を正しく評価するには、多変量解析を行うことが必要である。本研究では、山体重力変形地形の分布密度を目的変数、その他のパラメータを説明変数とする線形重回帰分析等も試みたが、PGA - Δ CFE、標高 - 尾根谷度の間にはともに一定の相関（相関係数約0.6）が認められるため、いわゆる多重共線性の問題が生じて、これらのパラメータの効果を厳密に区別することができていない。この点については、本研究の論文化に向けた今後の課題である。

(3) 山体重力変形地形の形成・成長時期

航空レーザー測量データを用いた地形判読により、根尾谷断層北端近傍の稜線上には、山体重力変形地形が異常集中し、大小30ほどの重力性凹地が形成されていることが明らかとなった。そこで、本研究では、そのうち5つの凹地を対象として、ハンドオーガ掘削調査（深度約1.5~3.4 m）およびピット掘削調査（深度約1.5 m）を実施し、各凹地の形成・成長年代と断層活動との関係性について検討した。

凹地を埋める湿地・湖沼堆積物から採取した葉片、種子、小枝等の放射性炭素年代および火山灰分析結果から、調査した全ての凹地は最終氷期最盛期以降に形成されたことが明らかとなった。このことは、氷期の終焉に伴う降水量の増加によって谷の下刻が進み、斜面が不安定化して山体重力変形が生じたはじめたことを示唆する。

しかし、凹地によって形成年代は大きく異

なり、最も古いものは 11000～12000 年前に形成されたと推定される一方、K-Ah 火山灰降灰（約 7300 年前）前後に形成されたと考えられる凹地や、K-Ah 火山灰降灰よりも明らかに新しい時代に形成されたと考えられる凹地も存在することが明らかとなった。さらに、2 箇所の凹地で実施したピット掘削調査では、いずれの調査においても凹地を埋める堆積物が複数回の変形を受けている痕跡が確認された（図 2）。これらのことから、最終氷期最末期に山体重力変形が生じて以降も調査地は何度も山体重力変形を受けており、そのたびに新しい凹地が形成されたり、既存の凹地が成長したりしてきたと推測される。各凹地における変形イベントの年代については、データ不足もあって十分に絞り込むことができなかったが、1 つの凹地では、490～310 cal BP の年代を示す木片を含む湖沼堆積物が変形をしており、この変形イベントは、根尾谷断層が活動した 1891 年濃尾地震に対応する可能性がある（図 2）。

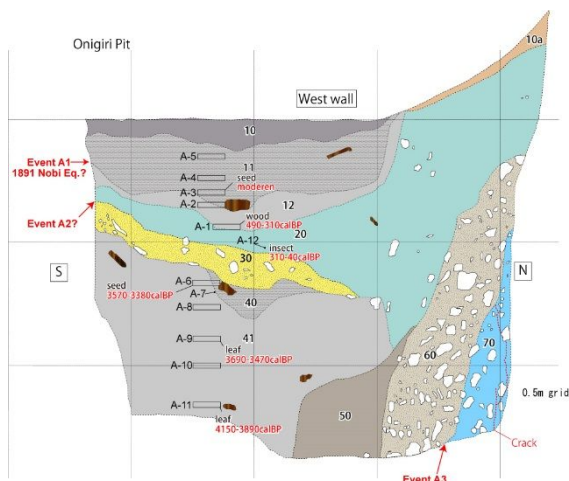


図 2. 根尾谷断層北端近傍に集中する重力性凹地のひとつ（「おにぎり」凹地）で実施したピット調査の壁面スケッチ。グリッド間隔は 0.5 m。灰色系の地層は湿地堆積物、青系の堆積物は湖成堆積物、黄色の地層は河成堆積物（砂層）を示す。湖成堆積物の撓み上がり（20 層、70 層）、砂層の撓み下がり（30 層）、colluvial wedge の存在（60 層）など複数回の変形イベントの痕跡が確認された。

今後さらに調査を行って当調査地に分布する各凹地の形成・成長年代を精度良く明らかにするとともに、根尾谷断層そのものの活動履歴を高精度・高確度に明らかにすることも必要であるが、当調査地が完新世に複数回の変形を繰り返したことは、先行研究によって明らかにされている根尾谷断層の活動間隔（約 2000-5000 年）と矛盾しない。年代的な面からも、活断層運動に伴って山体重力変形が起きている可能性を指摘することができる。

< 謝辞 >

国土交通省越美山系砂防事務所には、研究地域の航空レーザー測量データ（詳細数値標高モデル）をご提供いただいた。日本原子力研究開発機構には、夏期休暇実習を通じて、無償で放射性炭素年代測定をしていただいた。ここに記して感謝の意を表する。

< 引用文献 >

- Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, Y. Fukushima (2006), A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96, 879–897.
- Lin, Z., H. Kaneda, S. Mukoyama, N. Asada, T. Chiba (2013), Detection of subtle tectonic–geomorphic features in densely forested mountains by very high-resolution airborne LiDAR survey, *Geomorphology* 182, 104–115.
- Okada, Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82, 1018–1040.
- 清水文健・井口 隆・大八木規夫（1998），1:50000 地すべり地形分布図「冠山」「能郷白山」「横山」「能郷」，防災科学技術研究所防砂科学技術資料，No. 184。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 2 件）

丹羽良太・小嶋 智・岩本直也・金田平太郎・大谷具幸（2013），岐阜福井県境，冠山北西の二重山稜間の凹地を埋積した堆積物の AMS-14C 年代とテフラ年代，名古屋大学加速器質量分析計業績報告書，24，159-167。（査読なし）

Lin, Z., H. Kaneda, S. Mukoyama, N. Asada, T. Chiba (2013), Detection of subtle tectonic–geomorphic features in densely forested mountains by very high-resolution airborne LiDAR survey, *Geomorphology* 182, 104–115, DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.11.001（査読あり）

〔学会発表〕（計 14 件）

Kaneda, H. and T. Kono, Seismic impact on long-term gravitational slope deformation, International Union for Quaternary Research (INQUA) XIX Congress 2015 (2015/7/31 予定), 名古屋国際会議場, 名古屋.

Komura, K., H. Kaneda, S. Kojima, N. Iwamoto, and H. Hayashi, Development history of concentrated sackung features adjacent to an active fault: a case study of the Neodani fault, central Japan, based on sediment cores and pit excavations, International Union for Quaternary Research (INQUA) XIX Congress 2015 (2015/7/31 予定), 名古屋国際会議場, 名古屋.

小村慶太郎・金田平太郎・小嶋 智・岩本直也・林 星和，根尾谷断層北端部に集

中する山体重力変形地形の発達史,日本地球惑星科学連合 2015 年大会(2015/5/27 予定),幕張メッセ,千葉.

金田平太郎・河野太陽,山体重力変形の発生に活断層が与える影響 - 航空レーザー測量データに基づく美濃山地西部全域の山体重力変形地形マッピング -,日本地球惑星科学連合 2013 年大会(2013/5/24),幕張メッセ,千葉.

Kaneda, H. and T. Kono, Tectonic controls on gravitational deformation in the Mino Mountains, central Japan: a regional sagging-feature mapping in forested mountains using high-resolution airborne LiDAR, American Geophysical Union Fall Meeting 2012 (2012/12/7), Moscone Center, San Francisco, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金田 平太郎 (KANEDA, Heitaro)
千葉大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：30415658

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

小嶋 智 (KOJIMA, Satoru)
岐阜大学・工学部・教授
研究者番号：20170243