

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 21 日現在

機関番号：82116

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：22500994

研究課題名（和文） 活褶曲地帯における地震に伴う斜面変動と地形発達過程に関する研究

研究課題名（英文） Research of slope collapse by earthquake in active fold zone and landform evolution processes

研究代表者

小荒井 衛（KOARAI MAMORU）

国土地理院・地理地殻活動研究センター・地理情報解析研究室長

研究者番号：50419876

研究成果の概要（和文）：

芋川流域で火山灰分析に基づく段丘編年を行った。芋川流域で最も高位の段丘から浅間草津火山灰（As-K）が検出されなかったことから、この段丘面は 16,500 年以降に形成された面と推察される。段丘形成年代から小松倉背斜の成長速度の見積もると、 $0.8\sim 1.9\times 10^{-6}$ /年となり、西山丘陵の活褶曲の成長速度や小千谷地区の活褶曲の成長速度と、オーダー的には同程度である。長野県・新潟県県境付近の地震では、逆断層の上盤側で、地質、地質構造、既存活断層の分布等に支配される形で地盤災害が集中しており、今回の地震に伴い松之山背斜が成長した可能性が指摘できた。

研究成果の概要（英文）：

The age of formation of oldest terrace along Imo River is detected to be younger than 16,500 year ago, because the terrace is not covered with Asama Kusatsu tephra. The growth rate of the Komatsugura anticline is estimated $0.8\text{-}1.9 \times 10^{-6}$ /year by terrace formation age. This value is same order as the growth rate of active fold in Nishiyama Hills and Ojiya district. In the Nagano Niigata border Earthquake, the foundation disaster was concentrating in the hanging wall side of a reversed fault, in the form governed by distribution of geology, geological structure, and active fault, etc. And it has pointed out a possibility that the Matsunoyama anticline grew in connection with this earthquake.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,500,000	191,000	1,691,000
2011 年度	1,100,000	120,000	1,220,000
2012 年度	800,000	90,000	890,000
総計	3,400,000	401,000	3,801,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：地理学

キーワード：活褶曲、斜面変動、地形発達過程、中越地震、中越沖地震、長野県・新潟県県境付近の地震

1. 研究開始当初の背景

平成16年(2004年)新潟県中越地震(以下、「中越地震」とよぶ)と平成19年(2007年)新潟県中越沖地震(以下、「中越沖地震」とよぶ)では多くの斜面変動が生じたが、特に中越地震では谷壁斜面の比高が大きな芋川中流部で大規模な深層地すべり運動が多く発生した一方、谷壁斜面の比高が小さな芋川上流部や朝日川・屋柄川上流部では地すべり運動は比較的少なかった。また、中越沖地震では西山丘陵において活褶曲の成長と考えられる帯状隆起帯が干渉 SAR により観測されたが、隆起量が芋川流域と比べて1桁小さかったため、同様の地質であったにも関わらず、斜面崩壊の個数は芋川流域と比べてかなり少なかった。これが示唆するように、活褶曲地帯の斜面変動には、起伏量や斜面の比高などを介して地殻変動が密接に関係している可能性が高い。

また、2011年3月11日に発生した平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(M9.0)の翌日に、それに誘発されるように長野県と新潟県の県境付近でM6.7の地震(以下、「長野県・新潟県県境付近の地震」とよぶ)が発生し、これまでの内陸直下型地震と同様、斜面崩壊や地表変形、構造物被害等が多発した。この地震も褶曲地帯における逆断層型地震という意味で、中越地震や中越沖地震と地殻変動・斜面変動・地震災害の面で共通する部分も多く、活褶曲の成長と斜面変動の関連性について検討するのにふさわしい。

2. 研究の目的

中越地震、中越沖地震、長野県・新潟県県境付近の地震の地殻変動域を対象として、地形発達史的観点から地震に伴う斜面変動の発生場が準備される過程と、それに対する地殻変動の寄与について検討する。

本研究では、①地殻変動と基準面高度変化、②地すべり運動発生場とそうでない場の斜面微地形と表層地質、③斜面変動に関わる地形量と基盤地質構造、④最近の地震に伴う斜面変動の4項目とそれらの関係を明らかにし、地震時―地震間サイクルにおける斜面地形発達過程と地殻変動が与える役割を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 中越地震

中越地震で斜面崩壊が多発した東山丘陵の芋川流域を対象に、①段丘面の編年と表層地質の風化・変状および地質構造に関する試料取得のための地表踏査と火山灰分析、②空中写真と高精度DEMを用いた判読による地形分類、③GIS・リモートセンシングを用いた地形特性、植生特性、表層・基盤地質およ

び地震時斜面変動に関する解析を行った。

①の段丘編年は、中越地震地殻変動地域に断片的に分布する段丘面について、被覆層中の火山灰を検出・同定し、周辺地域の既往研究より明らかにされている段丘面と対比することによって行った。検出されたテフラを予想される給源近くまで遡って対比を検討するなど、魚野川周辺の段丘編年をより明確化することにより、活褶曲の成長速度の計算など、地殻変動と地形発達史の関連性の解明に努めた。

表層地質の風化・変状の調査は、河川沿いや地すべり滑落崖などに連続して露出する地層の構成物質・地質構造のほか風化程度・重力や岩盤移動に伴う変形構造・割れ目密度・風化生成物・湧水の有無などの項目について記載すると同時に、露頭の弾性波速度を測定した。

②の地形分類は、地震前に撮影された空中写真と地震後の航空レーザ測量より作成された高精度DEMを用いて行った。この作業では、特に大八木(2006)の地すべり地形判読基準と、河川作用や土壌匍行などの諸作用を考慮した丘陵斜面地形分類基準(たとえば羽田野, 1986)を併用し、成因に着目して斜面微地形を分類した。予察調査によって地震時の深層地すべり運動と関連が深いと想定される地すべり性斜面下方の斜面や地すべり性斜面を開析する低次谷の形態、および地震前の地すべり滑落崖上方の亀裂には特に注意を払った。

③GISによる解析は、既存地質図を基にした基盤地質(層準・岩相・地質構造の分布)と、本調査に基づく表層地質特性、地形特性の相互の関係および地震時斜面変動とそれらの関係を解析することに主眼を置いた。地形特性としては、起伏量などマクロな地形量、斜面の方位・傾斜などのほかに、地すべり性斜面を含む尾根上から谷底に至る断面を描き、地すべり性斜面上方の亀裂・斜面下方の谷壁斜面の傾斜と比高、開析する低次谷などに特に着目して、地震時斜面変動を生じた場所とそうでない場所の地形特性を比較した。また、リモートセンシングデータを活用したGIS解析の立場から、地殻変動地域での土地条件識別を目的に、人工衛星データの差分データ作成方法を検討した。

(2) 中越沖地震

中越沖地震についての現地調査を行ったが、地形面がほとんど存在せず、地震による地表変状の痕跡が西山丘陵内でほとんど残されていないことから、既存の文献の取りまとめる形で活褶曲の成長について検討した。

(3) 長野県・新潟県県境付近の地震

2011年3月12日に発生した長野県・新潟県県境付近の地震について、中越地震や中越

沖地震と似たような被害状況だったことから、斜面崩壊と地表変状の現地悉皆調査を行い、地質、地質構造、活断層の分布、干渉 SAR で把握した地殻変動量の大きな地域等との関連性を検討した。

以上により、活褶曲地帯における地震時—地震間サイクルにおける斜面地形発達過程を総合的に解釈し、地震時斜面変動のポテンシャル評価に資する地形・地質特性の抽出に関する基礎的知見を提示した。

4. 研究成果

(1) 中越地震

① 段丘編年

魚野川周辺の段丘区分・編年について、幡谷ほか(2006)による段丘区分を基にまとめ直した段丘区分案を図1に示す。

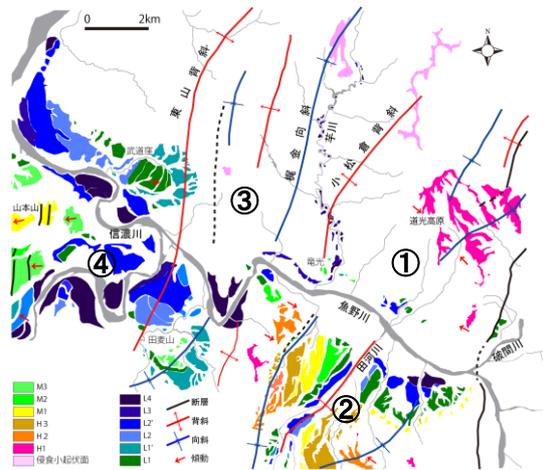


図1 魚野川周辺の段丘区分と地質構造

対象地域の段丘面を地形面の開析の程度から大きく H 面 (高位面) 3 面, M 面 (中位面) 3 面, L 面 (下位面) 4 面に区分した。H1 面は魚野川右岸側の道光高原に広く分布しており、この面を覆う厚さ 3~4m のローム層の地表から 140cm の層準に約 13 万年前に噴出した飯綱上樽テフラ (In-Kt) が存在することから、ロームの堆積速度を一定と仮定すれば、H1 面は 30~40 万年前に離水したと考えられる。M1 面は In-Kt テフラに覆われ、最終間氷期に形成された段丘面である。M2 面は鬼界葛原火山灰 (K-Tz, 95ka), 阿蘇 4 火山灰 (Aso-4, 85~90ka) に覆われる。M3 面はローム層の下部からは大山倉吉火山灰 (DKP, $\geq 55ka$) が検出されている。L1 面は始良 Tn 火山灰 (AT, 26~29ka) に覆われる地形面であるが、AT がローム層に含まれる場合を L1 面に、AT がフラッドロームに含まれる場合を L1'面としている。L2 面は浅間草津火山灰 (As-K, 15~16.5ka) に覆われる地形面であるが、同様に As-K がローム層に含まれる場合を L2 面に、As-K がフラッドロームに含まれる場合を L2'面としている。Choi

et al. (2002) が破間川沿いの低位段丘面から検出した Ab-t1 火山灰に対比可能なローカルテフラに覆われる段丘面を L3 面, ローム層に覆われない完新世の段丘面を L4 面としている。

芋川流域について、航空写真判読と航空レーザー測量による 1m 間隔等高線図の読図により連続平坦面の区分を行い、河床縦断面図を作成した。また、芋川沿いの主要な段丘面に載るローム層のサンプリングを行い、火山灰分析を行い、その結果を基に芋川流域の段丘編年を行った (図2)。

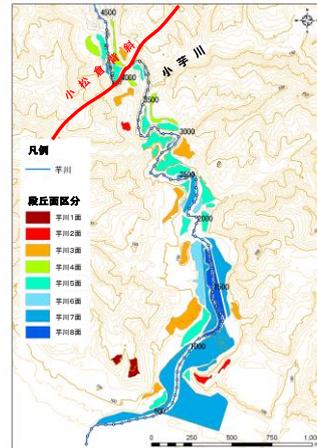


図2 芋川流域の段丘面分布図

芋川流域の段丘は上位から芋川1面~芋川8面の8段に分かれ、連続性の良い段丘面が最低でも3つ確認できた。芋川7面や芋川5面にはテフラは認められず、芋川3面のローム層の下部に火山ガラスや斜方輝石が認められた。屈折率の測定や化学分析の結果 (図3)、このテフラは約 15~16.5ka 前後に浅間火山から噴出した浅間草津火山灰 (As-K) や立川ローム上部ガラス質火山灰 (UG) の可能性は否定された。このテフラは、破間川沿いの低位段丘から検出された Ab-t1 に対比される可能性がある。魚野川との合流部に近い芋川1面から検出されたテフラは、UG 標準サンプルや As-K (浅間火山近傍の浅間大滝や中室田で採取した軽石) と分析値が一致し、これらに対比可能である。芋川3面では7千年程度前に降下した K-Ah が検出され、UG や As-K 以前のテフラはみられないため、3面は L3 面となり、7~16.5ka に形成された面と推察される。周辺の道光高原には 30~40 万年前の古い地形面が存在するのに、芋川流域には新しい地形面しか存在しないのは、芋川流域の隆起速度が極めて大きいためと考えられる。

図1を見ると、この地域の段丘面分布の特徴から4つの地域に区分可能である。①道光高原周辺の H1 面のみが広く分布する地域、②魚野川左岸の H1 面から L4 面までの段丘が発達する地域、③芋川周辺から西側の地すべ

りが発達し段丘がほとんど存在しない地域、④信濃川と魚野川合流点付近の低位面のみが何段にも発達している地域。③④の地区については、H面やM面などの古い地形面が全く残されていないことから、かなり隆起量が大きく侵食基準面の低下が激しいことが予想される。

実際に中越地震で発生した地殻変動と斜面変動について考えてみると、地形発達の違いと調和した現象が認められる。地震前後の水準測量、三角点変動、写真測量と航空レーザの差分の結果からは、中越地震で東山背斜軸部を中心に1m程度の帯状の隆起があったことはほぼ間違いない。地震断層モデルから中越地震による地殻変動量を推定すると、逆断層の上盤側に相当する芋川周辺から西の地域での隆起量が大きく、その場所は地震による斜面変動が多発した場所とも一致する。また、この地域は既存の地すべり地形が高密度で分布する地域でもある。中越地震による隆起量の大きな地域が③と④に一致し、地すべり地形が高密度で分布して地震での斜面変動が多発した地域が③に一致する。

芋川3面(L3面)の現河床との比高差は、下流の魚野川合流点付近と上流の小芋川合流点付近とで約10mある。小松倉背斜は小芋川合流点付近を通り、魚野川合流地点から750m程度離れているので、小芋川合流地点の現河床からの比高が大きいのは小松倉背斜の成長によると仮定すると、小松倉背斜の成長速度 = (比高/水平距離) / 段丘形成年代 = $0.8 \sim 1.9 \times 10^{-6}$ /年となる。小千谷地区の活褶曲の成長速度については $1.0 \sim 1.2 \times 10^{-7}$ /年 (Aso-4 を載せる小栗田原面) ~ 1.1×10^{-6} /年 (As-K を載せる小千谷面) となるので、オーダー的には同程度である。

弾性波探査による露頭の風化度調査では、中越地震の崩壊地の露頭と中越地震では崩壊していない切土の露頭とで比較を行い、5m離れた弾性速度が崩壊地および地すべり土塊の近傍で遅いことを確認した。

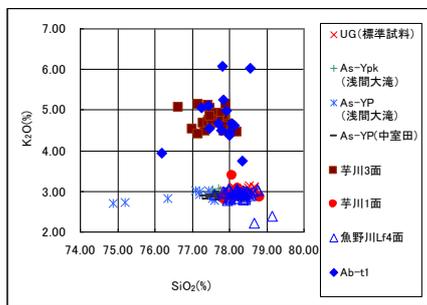


図3 テフラの化学分析の結果

②地形分類

山古志地区における既存の地すべり分布と中越地震での地すべり・斜面崩壊分布と地質構造を重ね合わせたものを図4に示す。東

山背斜の軸部では大規模な地すべり地形が発達するが、中越地震での地すべり・崩壊の発生が少ない。一方、東山背斜の翼部に当たる芋川周辺や魚沼山地西縁では、相対的に大規模な地すべり地形は少ないものの、中越地震での地すべり・崩壊の発生は多かった。芋川本流周辺では地すべり地形を開析する谷壁斜面が発達しているのに対し、東山背斜軸部周辺では谷底まで地すべり性緩斜面が発達している。東山背斜周辺は背斜山稜を成し、隆起の初期段階で地すべりが発生して大規模地すべり地形が形成されたが、その後は河川による強い下刻作用を受けていない。このことが中越地震時に地すべり・表層崩壊が少なかった素因の1つである。

地震時における斜面変動の密度の違いは、地すべり地形の発達に伴って低起伏の地形が作り出されたか、河谷による下刻・側刻作用によって起伏量の大きな地域が形成されていたかという地形発達段階の違いが大きく関与していると考えられる。活褶曲を伴って隆起しつつある丘陵の斜面地形発達過程を模式的に表現したものを図5に示す。

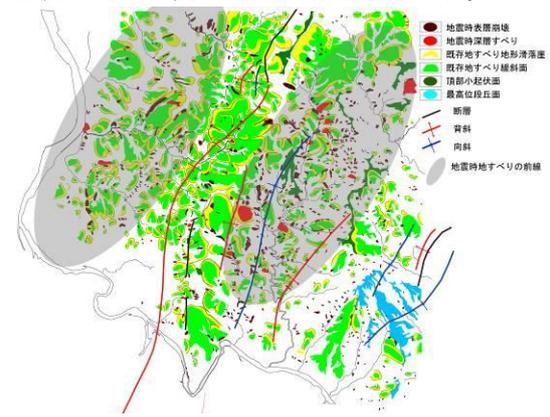


図4 中越地震の斜面変動場と地すべり地形

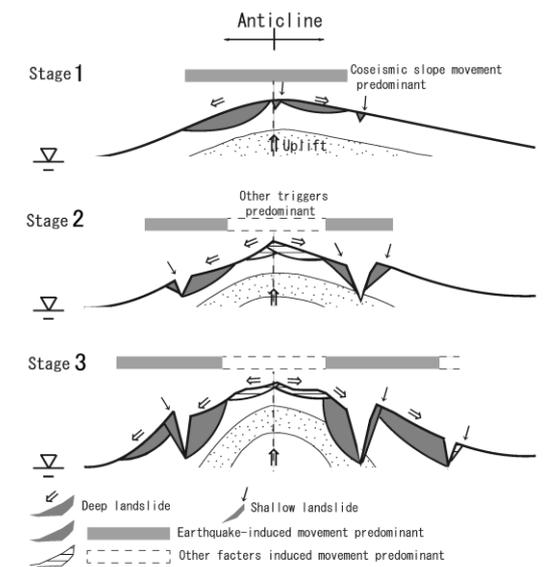


図5 活褶曲での斜面地形発達過程の模式図

③GISによる解析

活褶曲の観点で見ると、大規模な斜面崩壊は背斜軸と向斜軸の間で起伏量が相対的に大きく最も斜面が不安定な場所で発生しやすかった。流域及び水系の観点で見ると、大規模な斜面崩壊は1次谷が発達する起伏量大の範囲で発生しやすく、起伏量小の2次以上の谷近傍と起伏量中の流域境界付近では発生しにくかった。この地域は、活褶曲による隆起や侵食が起伏量を高め、そこに地震が誘因となって規模の大きい斜面崩壊が生じてきた歴史を持つと考えられる。

断層モデルの走向に平行な線からの距離と崩壊との関係を図6に示す。斜面崩壊が逆断層の上盤側に集中し、かつ背斜軸と向斜軸の間に集中する傾向が認められる。また、大規模地すべり集中域の東側は道光高原の古い地形面が存在するなど、地すべり等の斜面変状が余り起きていない。中越地震では道光高原より東側の小平尾で地表地震断層が出現したが、斜面変状の集中は地表地震断層の位置より上盤側で起きたのではなく、断層モデルの断層面をそのまま地表方向に延長した場所より上盤側で発生している。図4の東側の地震時地すべりの前線の東縁がその境界に一致する

地震前後のASTERデータを組み合わせ、教師付最尤法による斜面崩壊の効率的な分類方法を検討し、分類結果を分布図に変換し斜面崩壊と活褶曲との関連を議論した結果、最尤法分類において2時期のコンポジット衛星データを使用すると単独衛星データよりも分類精度が高まり、また構成するバンド数が多いほど分類精度は高まることが判った。

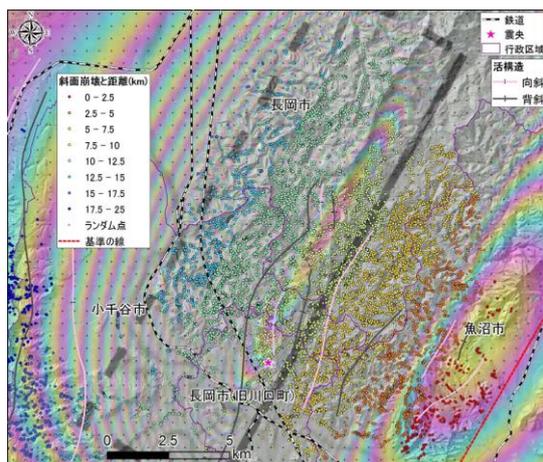


図6 基準線からの距離と斜面崩壊との関係

(2) 中越沖地震

ALOS/PALSARの干渉SARにより、中越沖地震と同期した小木ノ城背斜の10cm弱の隆起（活褶曲の成長）が報告されている。Nishimura et al.(2008)は、中越沖地震の断層運

動によるクーロン応力の変化から、西山丘陵の西縁にある常楽寺断層が受動的に活動して小木ノ城背斜のある西山丘陵が隆起したものと説明した。小荒井ほか(2010)は、中越沖地震による西山丘陵の活褶曲の成長に関連して、小木ノ城背斜の西翼での灰爪層の基底の高度差(1000m)と年代(120万年前)を利用して、 8.3×10^{-7} /年と見積もっている。

(3) 長野県・新潟県県境付近の地震

SAR干渉画像に主な被害分布を重ねたものを図7に示す。地表変形や斜面崩壊は、本震及びその30分後に発生した最大余震に伴う地殻変動を示すSAR干渉縞の範囲で多発している傾向が見られる。地震による変状は特定の地域や地質に集中して認められる。斜面崩壊は新第三系堆積岩や火山岩の急傾斜部に集中して発生している一方、新第三系堆積岩の分布域は傾斜が緩く表層崩壊は少ないが、大規模な地すべりが発生していた。震源から最も遠いエリアでは、流れ盤になっている正面倉山東斜面で大規模な層理面すべりが集中しており、地質構造との関連性が顕著である。道路の変状等の分布は東北東-西南西方向に並んで分布しているところが多く、松之山断層の周辺や背斜軸、向斜軸の近傍に集中している。電子基準点「松之山」の変動からは23cmの隆起が観測されたが、これから示唆される逆断層の上盤側のドーム状の隆起や、背斜・向斜構造に支配された変状の分布から判断すると、地震時に松之山背斜が成長した可能性が示唆される。

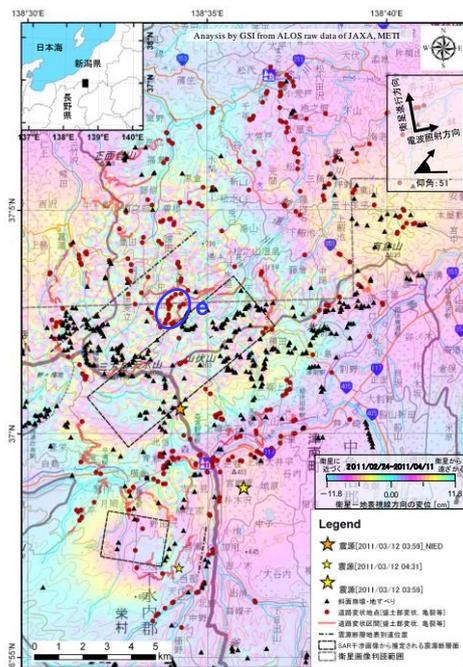


図7 地盤災害分布とSAR干渉画像

(4) 3つの地震の比較

斜面崩壊の発生の程度は、地震による隆起

量（活褶曲の成長量）との対応が良い。隆起量は中越地震で 1m 程度、長野県・新潟県県境付近の地震で 20cm 強、中越沖地震で 10cm 弱であるが、斜面崩壊の発生密度もその順番が多い。なお、同じ東山丘陵内でも斜面変動量に差が出ているが、一義的には地震による隆起量が効いていると考えられるが、地すべり地形末端の下方谷壁斜面における浸食量の違いなど、地形発達史的な視点での斜面形成過程のステージの違いなど、地形的な素因も影響していると考えられる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① 中埜貴元、小荒井衛、乙井康成、小林知勝、2011 年 3 月 12 日長野県・新潟県県境付近の地震に伴う災害の特徴、国土地理院時報、査読無、123 巻、2013、35-48

〔学会発表〕（計 13 件）

- ① 小荒井衛、新潟県中越地方芋川流域の段丘編年、日本地理学会 2010 年春季学術大会、2011 年 3 月 29 日、明治大学
- ② 黒木貴一、地形量解析による平成 16 年新潟県中越地震で生じた斜面崩壊地域の推定、日本地球惑星科学連合 2011 年大会 2011 年 5 月 24 日、幕張メッセ
- ③ 小荒井衛、活褶曲地帯の地形発達と斜面崩壊の関連、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 25 日、幕張メッセ
- ④ 小荒井衛、GEOMORPHOLOGIC RESEARCH USING LIDAR DATA、第 25 回国際地図学会議、2011 年 7 月 5 日、パリ国際会議場（フランス）
- ⑤ 中埜貴元、2011 年長野県北部地震における被害分布の特徴、日本地理学会 2011 年秋季学術大会、2011 年 9 月 24 日、大分大学
- ⑥ 小松原琢、2004 年中越地震時の地すべりと山地斜面の発達過程、日本地理学会 2012 年春季大会、2012 年 3 月 29 日、首都大学東京
- ⑦ 中埜貴元、2011 年 3 月 12 日長野県・新潟県県境付近の地震に伴う地盤災害の特徴、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、2012 年 5 月 20 日、幕張メッセ
- ⑧ 黒木貴一、平成 16 年新潟県中越地震で生じた斜面崩壊地域の起伏量、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、2012 年 5 月 23 日、幕張メッセ
- ⑨ 小荒井衛、中越地域における地震による活褶曲の成長と斜面変動、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、2012 年 5 月 25 日、幕張メッセ

- ⑩ 小松原琢、新潟県中越地震被災地域・芋川中流域の斜面微地形分類と地震性斜面変動多発地域特性、日本地形学連合 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 23 日、大阪教育大学
- ⑪ 黒木貴一、平成 16 年新潟県中越地震で生じた斜面崩壊と起伏量、平成 24 年度日本応用地質学会研究発表会、2012 年 11 月 2 日、朱鷺メッセ
- ⑫ 小荒井衛、活褶曲地帯における地震による斜面変動について、第 22 回環境地質学シンポジウム、2012 年 12 月 7 日、産業技術総合研究所
- ⑬ 小荒井衛、魚野川・芋川流域のテフラについて、日本地理学会 2013 年春季学術大会、2013 年 3 月 30 日、立正大学

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小荒井 衛 (KOARAI MAMORU)
国土地理院・地理地殻活動研究センター・
地理情報解析研究室長
研究者番号：50419876

(2) 研究分担者

小松原 琢 (KOMATSUBARA TAKU)
産業技術総合研究所・主任研究員
研究者番号：50357026

黒木 貴一 (KUROKI TAKAHITO)
福岡教育大学・教育学部・教授
研究者番号：40325436

(3) 連携研究者

岡谷 隆基 (OKATANI TAKAKI)
国土地理院・地理地殻活動研究センター・
地理情報解析研究室・主任研究官
研究者番号：20581606

中埜 貴元 (NAKANO TAKAYUKI)
国土地理院・地理地殻活動研究センター・
地理情報解析研究室・研究官
研究者番号：60511962