

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 科学研究費助成事業

## 研究成果報告書



平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282076

研究課題名(和文) 山岳地形変動システムの統合的理解 - 欧州アルプスと日本アルプスの比較研究 -

研究課題名(英文) A unified understanding of alpine landscape dynamics

研究代表者

松岡 憲知 (MATSUOKA, Norikazu)

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：10209512

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000 円

研究成果の概要(和文)：日本(V字谷)とスイス(U字谷)の比較を通じて、総合的観測と衛星画像のGIS解析による現在の斜面変動、樹木年輪の損傷に基づく過去の地形変動の分析を行い、山頂部から山麓部まで山岳地形変動システムの統合的な理解を試みた。

V字谷では、落石・土砂生産のトリガーの発生条件が高解像度で判明し、土砂移動は流域内に存在する不安定土砂量に依存することがわかった。U字谷では、岩石氷河と氷河の挙動と斜面変動への影響、落石・土石流の発生期・運動様式・トリガーと各地形変動のリンクを解明した。V字谷とU字谷では、地形変動の履歴と地質構造により斜面傾斜の頻度分布に大きな差が生じ、対照的な地形変動システムが生じている。

研究成果の概要(英文)：Toward a unified understanding of alpine landscape dynamics, we compared a series of geomorphic processes between V-shaped valley (Japanese Alps) and U-shaped valley (Swiss Alps), through multi-method onsite monitoring and remote-sensing analysis of contemporary processes, and recent slope history constrained by tree injuries.

In V-shaped valleys, high resolution monitoring shows the triggering conditions of mass movements, and the significance of the amount of unstable debris in the catchment in controlling debris transport. In U-shaped valleys, our analysis highlights the instability of glaciers and permafrost which contributes to slope dynamics, as well as the link between the timing, trigger and character of rockfalls and debris flows. Geological structure and geomorphic history combine to determine the distribution of slope gradients, which produces the contrasting valley systems.

研究分野：地形学，凍土学

キーワード：地形変動 土砂災害 環境変動 自然現象観測・予測 国際比較 U字谷 V字谷

### 1. 研究開始当初の背景

山地の短期的地形変動に関する研究は、風化・崩壊・土石流など個々のプロセスを研究対象とする例が多く、流域レベルでの地形プロセスの連携に注目し、土砂生産・移動・堆積システムとして地形変動を統一的に理解する視点に欠けている。山岳流域全体の土砂収支を見積もる試みは少なくないが、物理的背景を考慮しない量的計算にとどまっている。また、山地の長期的地形変動については、地形の新旧や堆積物層序と年代資料を組み合わせ、流域内で発生した地形イベントを時間軸にのせて定性的に関連づける段階にとどまっている。

流域レベルで地形変動システムを理解するには、規模や地質条件が同等で、気象条件や基盤地形条件が対照的な山岳間での比較研究が有効である。日本アルプス(V字谷)とスイスアルプス(U字谷)の両山地は地質(堆積岩・深成岩等)が類似し規模が同等の谷系で刻まれており、気象条件や地形履歴の違いが対照的な地形変動システム(図1)を生じており、研究条件にかなう。そこで、両山地を比較して、山頂部から山麓部まで山岳地形変動システムの統一的な理解をめざす研究を着想した。山岳地形変動の総合的研究のために、地形変動観測、気象水文観測、地球物理探査、地盤調査、森林植生調査、樹木痕分析等の本研究に有用な多種多様な技術をもつ研究者で研究組織を構成した。

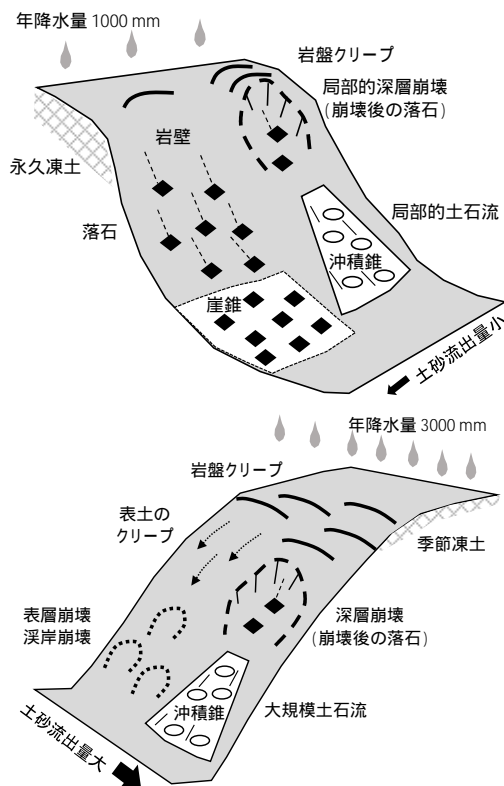


図1 スイス(上)と日本(下)の谷壁斜面プロセスの模式図

### 2. 研究の目的

V字谷の大井川上流域(日本)とU字谷のマッターバレー(スイス)を対象に、谷壁頂部から谷底にかけて、短期(<10年)および長期( $10^1 \sim 10^3$ 年)の地形変動を起こす主要な地形プロセスとその制御要因に関する総合的な現地調査・観測を行う。季節変動から数年スケールの変動については直接観測、数十年から数百年スケールの変動については樹木痕分析により把握する。観測・調査結果に基づいて各流域斜面での現在の地形変動システムを分析し、各システムを制御する要因を定量化する。最終的に、V字谷とU字谷の地形変動システムを統一的に説明できるモデルを構築する。

性格の異なる二流域を比較対象とするのは、規模や地質が同等でも、環境条件、特に降水量と凍土条件の違い、最上部が急で下方に向かって緩くなるU字谷斜面とその逆のV字谷斜面、解氷後の表土発達未成熟なスイスと表土発達が十分な日本、という対照的な地形形成条件にあり、結果的に土砂流出量(削剥速度)にも大きな差が生じているからである。これらの条件の影響を精査することで、地形変動システムを制御する諸因子の貢献度を評価した。

### 3. 研究の方法

同規模の起伏(稜線と谷底の高度差が1500~2000m)と類似した地質条件を有する大井川上流域(V字谷)とマッターバレー(U字谷)を対象に、谷頭から谷底にかけて、短期地形変動の観測、長期地形変動に関する調査を実施した(図2)。観測・調査結果を解析し、各山岳域での現在の地形変動システムを定量化・図式化し、各システムを制御する要因を考察した。また、地形変動史の復元結果を加えてV字谷とU字谷の長期地形発達モデルを提案した。平成26年度は日本・スイス両方の観測地設置と観測開始、年輪分析、平成27~28年度は観測データの回収と観測地の拡大、衛星画像解析と現地調査に基づく流域斜面の精密地形分析、年輪分析に基づく長期変動史の調査に重点をおいた。

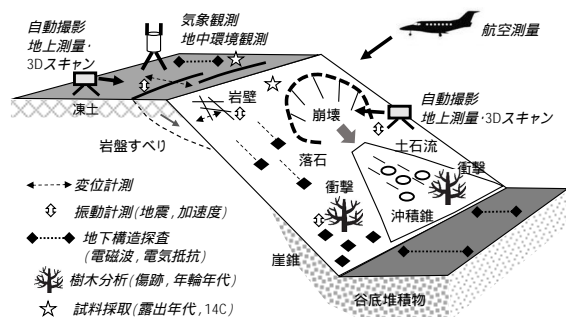


図2 観測・調査の模式図

主な調査・観測項目は以下の通りである。

- ・岩盤の凍結破砕・落石：亀裂変位計による破壊，自動カメラと振動センサによる落石観測
- ・凍結融解による表土移動：変位計と自動カメラによる地表物質の三次元移動観測
- ・永久凍土の動態観測：地温と GPS による三次元変位観測
- ・岩盤クリープ・崩壊：伸縮計と自動カメラによる岩盤崩壊および崩壊地周囲の岩盤変形の観測
- ・土石流・渓床変動：土石流検知センサと自動ビデオカメラによる可視化・移動体積・速度の観測
- ・環境要素：気温・湿度・積雪深・降水量・風向風速の気象要素，地温・土壌水分の地中環境要素の観測
- ・堆積地形（崖錐，沖積錐）の樹木痕分析：樹木の年輪を抽出し，衝撃痕から衝撃を与えた地形プロセスの種類・強度・影響範囲・発生年・季節を特定
- ・地質構造・岩盤調査：現地を踏査し，岩種・層構造・岩盤強度を調査
- ・衛星画像解析：時期の異なる衛星画像の InSAR 解析により，広域の地形変位を解析
- ・航空写真解析：地形分類図作成
- ・GIS による地形分析：傾斜分布図の作成，他の手法で判明した，地形・地質・地盤情報の組込

観測項目において，無人観測では通年の連続データ（1 時間～1 日間隔）を記録し，有人観測は年 1～3 回実施した。

#### 4. 研究成果

(1) 概要：本研究計画を「UV プロジェク

ト」として立ち上げ，日本・スイスの両国で同等な斜面変動総合観測システムを設置して観測を実施するとともに，谷壁斜面の地形変動史の解明をめざす総合研究を行った（以下に詳述する）。その他の活動として，初年度には UV プロジェクトの国内および国際的展開をめざして，国際学会発表での紹介，ミニ国際シンポジウムの開催と現地での技術講習会を行った。また，今後の研究拡張を展望して，2 年目には南アルプス鋸岳地域，3 年目には北アルプス穂高地域と中央アルプス駒ヶ岳地域において，スイス側研究者や国内研究者（信州大・京都大）とともに，地形変動や地質・森林条件の概査を実施した。

(2) V 字谷での短期地形変動の観測：大井川上流域の間ノ岳と東河内地区において，2 年間の観測データに基づいて，落石・土砂生産の発生時期と発生時の地温・含水条件を高解像度で解明した（図 3）。安倍川上流域の大谷崩における現地観測の結果，渓流内の土砂流出形（特に土石流）は流域内に存在する不安定土砂量の影響を受けることを明らかにした。複数時期の LP データを用いた斜面変動抽出法を比較し，侵食・堆積域が重複する土砂移動タイプには PIV 解析，重複しない土砂移動には標高差解析が有効であることがわかった。

(3) V 字谷での長期地形変動の調査：研究協力者マルクス・ストッフエル氏と T ダニエル・トラップマン氏をスイス・ベルン大学から招へいし，現地の研究協力者山川陽祐氏とともに大井川や安倍川流域の森林下の斜面，崖錐や沖積錐など堆積域において，自然林や 50 年以上を経過した植林を対象に樹木痕の調査を行い，約百年間の地形変動の履歴を。

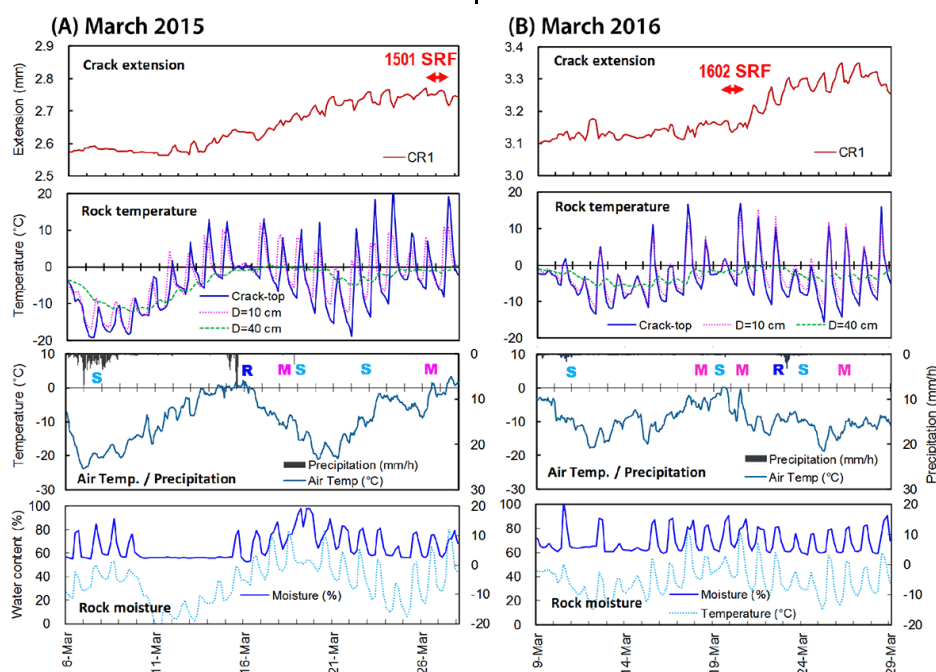


図 3 日本アルプスの V 字谷頭における観測結果の一例：岩壁表面における亀裂変位・温度・含水率，気温，降雨降雪量を比較して，岩石が剥がれ落ちる条件を解読する。



把握した。精密な三次元地形モデルに空中写真・現地調査で抽出した各地形種を重ね合わせて、各地形の分布条件を分析した。InSAR解析が、他の手法では確認されない地すべりの検出に有効であることがわかった。

(4) U字谷での調査・観測：毎年夏にスイス・マッターバレーにおいて、大井川と同等な調査観測を開始・継続・拡張した。岩石氷河、岩盤崩壊、土石流堆積地に設置した観測システムからこれまでに2年間の観測データを回収し、岩石氷河の移動量、落石・土石流の発生期と運動様式・トリガーを解明した。一部の岩盤では、凍結破碎や落石発生条件も判明した。岩盤からの土砂生産が活発な領域で土石流が頻発することがわかった。InSAR解析により、崖錐や岩石氷河の微小な地形変動が推定できることがわかった(図4)。

(5) V字谷とU字谷の比較：両者において、InSAR解析は土砂移動システムの広域な把握に有効な手段であることがわかった。土砂生産が土石流の発生に影響を及ぼす点も双方に共通する。両者では地形変動の履歴と地質構造により斜面傾斜の頻度分布に大きな差が生じ、それがさらに対照的な地形変動システムを生み出しているといえる。

(6) 研究成果の公表：日本アルプスの山地斜面や大崩壊地における凍結融解性土砂移動・落石・土石流の動態観測と分析の結果、衛星画像解析とGISによる地形分析結果をGeomorphology, Earth Surface Processes and Landforms等の国内外の学術雑誌に公表した。また、スイスと日本をはじめとする山岳地域の岩石風化・崩落プロセスを解説した総説を地学雑誌、極地や地球外も含めて、周氷河地形プロセス研究を総括した総説を地学雑誌とPermafrost and Periglacial Processes誌に公表した。現在の地形変動動態観測と長期地形変動史の編年の研究成果全般について、国際学会(欧州地球科学会、国際第四紀学会、国際永久凍土学会)におい

て報告した。

## 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23件)

1. 松岡憲知・藁谷哲也・若狭 幸, 2017. 岩石の物理的風化 - 実験・観測・自然現象のリンク - 地学雑誌, 126(2), 369 - 405. 査読有. doi:10.5026/jgeography.126.000
2. Nishiguchi T, Tsuchiya S, Imaizumi F, 2017. Detection and accuracy of landslide movement by InSAR analysis using PALSAR-2 data. *Landslides*, in press. 査読有. doi:10.1007/s10346-017-0821-z
3. 今泉文寿・堤大三・中谷加奈ほか7名, 2017. 大規模土砂移動に伴う災害の特徴整理と影響範囲の予測および対策に向けた課題. 砂防学会誌, 70(1), 389-398. 査読有. <http://www.jsece.or.jp/indexj.html>
4. Imaizumi F, Suzuki O, Togari-Ohta A, 2017. Seasonal changes in the sediment flux on steep hillslopes in a humid diurnal frost environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 389-398. 査読有. doi: 10.1002/esp.3982.
5. 西口尚希・今泉文寿・土屋智・逢坂興宏, 2017. 干渉 SAR 解析における観測条件と干渉性の関係の検討. 中部森林研究, 65, 127-1130. 査読有. <http://www.chubu-shinrin.jp>
6. Imaizumi F, Trappmann D, Matsuoka N, Tsuchiya S, Ohsaka O, Stoffel M, 2016. Biographical sketch of a giant: Deciphering recent debris-flow dynamics from the Ohya landslide body (Japanese Alps). *Geomorphology*, 272, 102-114. 査読有. doi:10.1016/j.geomorph.2015.11.008

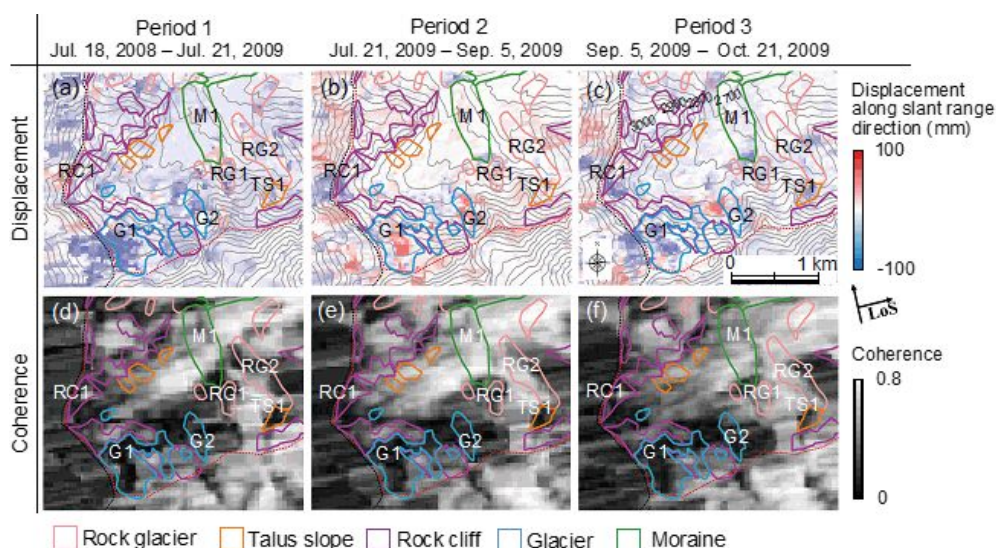


図4 InSAR解析によるマッターバレー高山域の斜面変動域の抽出

7. Christiansen HH, Matsuoka N, Watanabe T, 2016. Progress in understanding the dynamics, internal structure, and palaeoenvironmental potential of ice wedges and sand wedges. *Permafrost and Periglacial Processes*, 27, 365–376. 査読有 . doi: 10.1002/ppp.1920.
  8. Watanabe T, Matsuoka N, Christiansen HH, Cable S, 2016. Soil physical and environmental conditions controlling patterned ground variability at a continuous permafrost site, Svalbard. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28, 433–445. 査読有 . doi: 10.1002/ppp.1924.
  9. Imaizumi F, Tsuchiya S, Ohsaka O, 2016. Behavior of boulders within a debris flow initiation zone. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 9, 91–100. 査読有 . doi.org/10.13101/ijece.9.91
  10. 西井稜子, 2016. 複数時期の LP データを用いた変動斜面の把握法の検討. 土砂災害予測に関する研究集会 現用の課題と新技術 プロシーディング (防災科学研究所研究資料), 153–154. 査読無 . <http://www.bosai.go.jp/event/2015/20151203-1204.html>
  11. 松岡憲知, 2016. 火星表面の永久凍土と周氷河作用. 地学雑誌, 125, 63–90. 査読有 . doi:10.5026/jgeography.125.7
  12. 松岡憲知, 2016. 極地や高山で地表の動きを測る. 科学, 86, 521–523. 査読無 . <https://www.iwanami.co.jp/kagaku/KaMo201606.html>
  13. 経隆 悠・堀田紀文・今泉文寿・早川裕弐, 2016. 大規模崩壊地における土石流の流下と地形変化の関係. 中部森林研究, 64, 117–120. 査読有 . <http://www.chubu-shinrin.jp>
  14. 増井健志・今泉文寿・土屋智・逢坂興宏, 2016. 2015 年 8 月 6 日の短時間強雨により大谷崩一の沢で発生した石礫型土石流. 中部森林研究, 64, 115–116. 査読有 . <http://www.chubu-shinrin.jp>
  15. 野坂大樹・今泉文寿・西井稜子・上野健一, 2016. 山岳域における植生条件, 微気象が土砂移動に与える影響. 中部森林研究, 64, 111–114. 査読有 . <http://www.chubu-shinrin.jp>
  16. Yamagishi C, Matsuoka N, 2015. Laboratory frost sorting by needle ice: a pilot experiment on the effects of stone size and extent of surface stone cover. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 502–521. 査読有 . doi: 10.1002/esp.3653.
  17. Imaizumi F, Nishii R, Murakami W, Daimaru H, 2015. Parallel retreat of rock slopes underlain by alternation of strata. *Geomorphology*, 238, 27–36. 査読有 . <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.030>
  18. Imaizumi F, Sidle RC, Togari-Ohta A, Shimamura M. 2015. Temporal and spatial variation of infilling processes in a landslide scar in a steep mountainous region, Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 642–653. 査読有 . doi: 10.1002/esp.3659
  19. Imaizumi F, Tsuchiya S, Ohsaka O. 2015. Field observations of debris-flow initiation processes on sediment deposits in a previous deep-seated landslide site. *Journal of Mountain Science* 13, 212–222. 査読有 . doi:10.1007/s11629-015-3345-9
  20. Ueno K, Kurobe K, Imaizumi F, Nishii R, 2015. Effects of deforestation and weather on diurnal frost heave processes on the steep mountain slopes in south central Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 2013–2025. 査読有 . doi: 10.1002/esp.3776
  21. Matsuoka N, 2014. Combining time-lapse photography and multisensor monitoring to understand frost creep dynamics in the Japanese Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 25, 94–106. 査読有 . doi: 10.1002/ppp.1806.
  22. Imaizumi F, Miyamoto K, 2014. Pore water pressure in two-dimensional slopes with multi-layer soil structure. In *Proceedings of 5th International Workshop on Multimodal Sediment Disasters*, 9–17. 査読有 . [www.dprc.ncku.edu.tw/MSD2014](http://www.dprc.ncku.edu.tw/MSD2014)
  23. 今泉文寿・外狩麻子, 2014. 山岳斜面における土砂移動の現地観測. 中部森林研究 62, 77–80. 査読有 . <http://www.chubu-shinrin.jp>
- 〔学会発表〕(計 22 件)
1. 今村友則・池田 敦: 三国山脈平標山の雪食裸地における夏季の侵食プロセス. 日本地理学会 2017 年春季学術大会, 筑波大学 (茨城県つくば市), 2017 年 3 月.
  2. 松岡憲知・渡邊達也・池田 敦・HH. Christiansen: スピッツベルゲンにおける永久凍土動態観測 10 年 (2) 極地型岩石氷河の運動. 永久凍土の変動とそのモニタリングに関する研究集会. 国立極地研究所 (東京都・立川市). 2017 年 1 月.
  3. 松岡憲知・HH Christiansen・渡邊達也: スピッツベルゲンにおける永久凍土動態観測 10 年 (1) アイスウェッジの破壊. 低温研共同研究集会「永久凍土の動態解明のための多角的アプローチ」. 北海道大学 (北海道札幌市). 2016 年 11 月.
  4. Imaizumi F, Tsuchiya S, Ohsaka, O. and five authors: Observations of River Bed Deformation by SfM Using Time Lapse Cameras, Joint Workshop of 2016

- International Debris-Flow Workshop and 6th International Workshop of Multimodal Sediment Disasters, A-03, 京都大学(京都府宇治市), 2016 年 11 月.
5. Matsuoka N: A multi-method approach to detecting high-mountain rockfall activity. 第 11 回国際永久凍土会議. ポツダム(ドイツ), 2016 年 6 月.
  6. Matsuoka N, Watanabe T, Ikeda A, Christiansen H.H., Humlum O, Slow, but steady movement of an Arctic rock glacier: 10 years of movements and thermal conditions. 第 11 回国際永久凍土会議. ポツダム(ドイツ), 2016 年 6 月.
  7. 松岡憲知: 南アルプスにおける落石の発生時期・規模・原因 - 多様な手法による分析 -. 日本地球惑星科学連合 2016 年度連合大会, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 2016 年 5 月.
  8. 今泉文寿, 宮本邦明: 2013 年伊豆大島土砂災害における崩壊発生メカニズム. 中部森林学会, 三重大学(三重県津市), 2016 年 5 月.
  9. 今泉文寿, 逢坂興宏, 堤大三ほか 8 名: 大規模土砂移動の影響範囲の予測と対策手法の整理. 平成 28 年度砂防学会研究発表会, 富山県民会館(富山県富山市), 2016 年 5 月.
  10. 池田 敦: 造山帯と大地形 数値標高モデルを用いた再検討. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 2016 年 5 月.
  11. 青木慎弥・池田 敦・田中健太・小林 元: 木曽山脈の森林限界移行帯において相観植生を支配する地形的要因. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 2016 年 5 月.
  12. Tsunetaka H, Hotta N, Imaizumi F, Hayakawa YS: Influence of topography on debris flow development in Ichino-sawa subwatershed of Ohya-kuzure landslide, Japan. AGU, サンフランシスコ(米国), 2015 年 12 月.
  13. Ikeda A: Glacial and permafrost landforms during the last glacial period in the southern Japanese Alps. XIX INQUA Congress, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市), 2015 年 7 月.
  14. 西井稜子・石井靖雄・森永高行ほか 6 名: 多時期の航空レーザー測量データを用いた不安定斜面の 3 次元変位量の検討—早川流域アレ沢崩壊地の例—. 平成 27 年度砂防学会研究発表会, 栃木県総合文化センター(栃木県宇都宮市), 2015 年 5 月.
  15. Imaizumi F, Hayakawa YS, Hotta N, et al.: Interactions between accumulation conditions of sediment storage and debris flow characteristics in a debris-flow initiation zone in Ohya landslide, Japan, EGU General Assembly, ウィーン(オーストリア), 2015 年 4 月.
  16. Hayakawa YS, Imaizumi F, Hotta N, Tsunetaka H: Terrestrial laser scanning and structure from motion for analysis of landform changes by debris flows in Ohya-kuzure landslide, central Japan. AOGS 11th Annual Meeting. ロイトン札幌(北海道札幌市), 2014 年 7 月.
  17. Matsuoka N: From kinematics to dynamics: significance of field and laboratory approaches to understand periglacial mass movements. 第 4 回ヨーロッパ永久凍土会議. エヴォラ(ポルトガル), 2014 年 6 月(招待講演).
- 〔図書〕(計 2 件)
1. Hayakawa YS, Imaizumi F, Hotta N, Tsunetaka H, 2016. Toward long-lasting disaster mitigation after huge landslide: High-definition topographic measurements of sediment production by debris flows in a steep headwater channel. In Meadows ME and Lin J-C eds., *Geomorphology and Society*, Springer, pp. 125–147.
- ## 6. 研究組織
- ### (1) 研究代表者
- 松岡 憲知 (MATSUOKA, Norikazu)  
筑波大学・生命環境系・教授  
研究者番号: 10209512
- ### (2) 研究分担者
- 今泉 文寿 (IMAIZUMI, Fumitoshi)  
静岡大学・農学部・准教授  
研究者番号: 80378918
- 池田 敦 (IKEDA, Atsushi)  
筑波大学・生命環境系・准教授  
研究者番号: 60431657
- 西井 稜子 (NISHII, Ryoko)  
国立研究開発法人土木研究所・つくば中央研究所・研究員  
(現・新潟大学・研究推進機構・助教)  
研究者番号: 00596116
- ### (3) 研究協力者
- マルクス ストッフエル(STOFFEL Markus)  
ベルン大学(スイス)・地質科学系・准教授  
(現・ジュネーブ大学・環境科学系・教授)
- ダニエル トラップマン(TRAPPMAN Daniel)  
ベルン大学(スイス)・地質科学系・研究員
- 山川 陽祐(YAMAKAWA Yosuke)  
筑波大学・生命環境系・助教
- 西口 尚希(NISHIGUCHI Naoki)  
静岡大学・農学研究科・院生
- 橋本 遥佳(HASHIMOTO Haruka)  
筑波大学・生命環境学群地球学類・学生