

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04649

研究課題名（和文）雪泥流下経路の自動推定システムの開発と信頼度評価：富士山を対象として

研究課題名（英文）Development and Reliability Evaluation of an Automatic Estimation System for Snow and Mud Flow Paths: A case study at Mt. Fuji

研究代表者

青山 裕 (Aoyama, Hiroshi)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：30333595

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）：富士山で発生する雪泥流を対象として震動や音波の連続観測を実施したほか、地震波データを入力とする震動源位置推定システムの作成を行った。毎年12～5月に富士スバルライン沿いを中心に観測機材を展開して、2018年から連続データを取得した。あいにく、本課題開始後の2シーズンは雪泥流がほぼ発生せず、当初予定どおりには雪泥流の観測データを収集できなかったが、最終年度の2021年3月21日にスバルライン一帯でも雪泥流が発生したので、データ回収が待たれるところである。観測と並行して地動振幅の空間分布を利用した震動源位置推定システムの開発と実装作業も行い、富士山研究所と北海道大学で試験運用を進めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

荒天時に発生することが多い雪泥流の発生と場所をいち早くつかむには、富士山体上に展開されている震動観測点の地震波データを利用することが効果的である。地震波データに表れる連続的な震動の発生位置を逐次探索することで、時間帯や天候に大きく左右されずに雪泥流と疑われる震動を検出でき、防災・復旧対応の初動に生かすことができる。本研究の探索ソフトウェアは火山活動に伴う地震や微動の発生源位置探索にも応用でき、防災と火山学の両面で活用できる。

研究成果の概要（英文）：We conducted continuous observations of ground vibration and sound waves excited by slush flow occurring on Mt. Fuji and developed a source location estimation system for seismic signals. The observation equipment was deployed mainly along the Fuji-Subaru line from December to May every year from 2018. Unfortunately, slush flows did not occur for two seasons after the start of this project, and we could not collect the data as originally planned. However, on March 21, 2021, the last year of the project, slush flows occurred along the Fuji-Subaru line, and we are waiting for the final data collection. In parallel with the field observations, we have also developed and implemented a source location estimation system for seismic signals using the spatial distribution of ground motion amplitudes, which is being tested at the Mount Fuji Research Institute and Hokkaido University.

研究分野：火山地震学

キーワード：雪泥流発生位置推定 土石流 地震動 空気振動 冬季観測

1. 研究開始当初の背景

雪泥流は「スラッシュ雪崩」とも呼ばれる現象で、融雪期の大雨等により発生した大量の水を含む雪崩が、斜面を流下中に土壌を浸食して土石流化するものをいう。特に富士山では雪泥流が毎年のように発生し、登山道の侵食や構造物の損壊、自動車道への土砂の堆積といった被害を引き起こすことから、地元行政や施設管理者には雪泥流への対策が課題となっている。大規模な雪泥流の発生後には地上調査や航空機等による上空観察が行われ、土砂移動の経路や構造物への被害状況が把握されている。

雪泥流の発生・流下機構を理解して土砂災害の軽減に役立てるためには、発生時の気象条件を明らかにする従来の研究に加え、地質学的な現地調査により個々の雪泥流の開始点、到達地点、流下経路、土砂移動量等のパラメータを決定し、それらのパラメータと気象条件や地形・地質条件との関係を、十分な数の事例に基づいて統計的に検討することが効果的である。しかしながら、雪泥流は一般に荒天時の現象であることから監視カメラ等で発生を把握することが難しい上、流下経路の確認も天候回復後の上空観察に頼るところが大きく、十分な調査事例数を確保できていないのが現状である。調査事例を増やすためには、従来よりも小規模な雪泥流の発生を検出して調査対象とすることが求められる。

雪泥流の観測研究で富士山を対象とすることの利点は、主に以下の3点である。

- ① 2018年度まで毎年のように一定規模以上の雪泥流が報告されており、現象の発生頻度が高く多くの事例を収集できると期待されるため、検出能力や推定精度などの性能評価に適している。
- ② 冬期にも入山者があることに加え、道路や構造物等のインフラへの被害が確認されていることから、災害対応や即応調査の観点からも有用な情報となり得る。
- ③ 富士山には火山活動の把握を目的とした防災科学技術研究所や気象庁の地震観測施設が整備されており、リアルタイムで配信されているこれらの施設からのデータを活用できる。実際に、本研究課題の採択前に西斜面を流下した雪泥流に伴う震動を調べたところ、山頂から山麓まで複数の既設地震観測施設で明瞭な信号がとらえられていた。

また、山梨県富士山科学研究所の研究者が研究分担者として本研究に参画していることも利点の1つである。現地に自治体の研究者がいることで作業や調査の機動性が高く、事象発生時の行政対応などにも本研究の進捗や成果がスムーズにフィードバックできる。

2. 研究の目的

本研究では予備的研究に引き続き富士山で発生する雪泥流を対象として、地震計や空振計を用いた雪泥流の震動・音波観測を実施するとともに、連続震動データを用いた雪泥流発生位置の自動推定システムの開発・実装と推定結果の信頼度評価を研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 臨時地震・空振観測による雪泥流データの蓄積

富士山には地震観測施設が整備されているとは言え、山体が大きいため観測点の空間密度は必ずしも高くない。雪泥流の検出能力を高めるために、既設観測施設の間を埋めるように臨時の地震・空振観測点を設け、中・小規模の雪泥流からの信号検出を目指す。富士山の中標高域に広く観測点を展開できる北山腹の富士スバルライン一帯で観測を行う。

(2) 震動発振源自動推定システムの開発・実装

雪泥流を効率よく検出するには、リアルタイムで配信される震動データ（地震波データ）を自動的かつ連続的に解析し、時々刻々の震動源位置（雪泥流の流下位置）を表示するシステムの運用が望ましい。この自動解析システムを開発して北海道大学で動作試験を進めた後、富士山科学研究所の解析システムの一部として試験実装する。

(3) 流下経路の推定精度および検出能力の評価

現地確認が可能な領域で発生する雪泥流に対し、現地での調査結果と震動データの解析による流下推定位置を比較することで、推定精度の検証と検出能力の評価を進める。

4. 研究成果

(1) 冬期間の臨時地震・空振観測

富士山北斜面の富士スバルライン沿いにおいて、2018、2019、2020年の各年度の12月から5月にかけて、計3回の臨時の地震・空振観測を実施した。スバルラインの吉田口5合目から大沢駐車場までの区間や、東側の佐藤小屋付近でも頻りに雪泥流の被害が出ていることを踏まえ、既設の連続観測点の配置を考慮して、スバルライン沿いから滝沢林道沿いの図1に示す6地点（標高2000m~2300m）に短周期地震計を配置した。空振計については、青草洞門や5合目周辺に小スパンのアレイを構成するように、年ごとに配置を工夫しながら展開した。また、複数の地表高の温度を記録するプローブ式の温度計を青草洞門近傍（2018年度冬）と吉田口7合目（2019年度冬）に設置し、積雪温度観測も試みた。

2018-2019年および2019-2020年の冬季シーズンは、それ以前の数年に比べて一定規模以上の雪泥流の発生報告が極めて少なく、地震計で得られた地動記録（既設地震観測施設および臨時観測点）からは、明瞭に雪泥流と判断できる震動を見いだすことが出来なかった。一方、空振計ではアレイ観測のエレメント間の相関解析により「音波信号」と考えられるイベントが複数回認識された。2018-2019年シーズンでは46回の事例が抽出され、このうち4回のみ地震波形にも振幅の増大が認められた（図2）。これらの「信号」事例が全て雪崩による音波や地震波を反映しているかどうかは分からないが、小規模な雪崩は土砂を巻き込むことなく表層を滑走するため、地震動よりも空気振動に効果的に信号が現れるためと考えられる。2019-2020年シーズンでは5合目の小御嶽神社一带に展開した空振計アレイで29回の事例が特定でき、音波の到来方向を推定したところ、このうち26回は5合目より北側（斜面下側）方向と推定されたが、3回的事例については5合目より上方や東または西方向からの到来が推定された。これらの雪崩の可能性がある「信号」事例が現れた時期は、いずれも降雪中や降雪の直後、もしくは融雪期に集中していた。

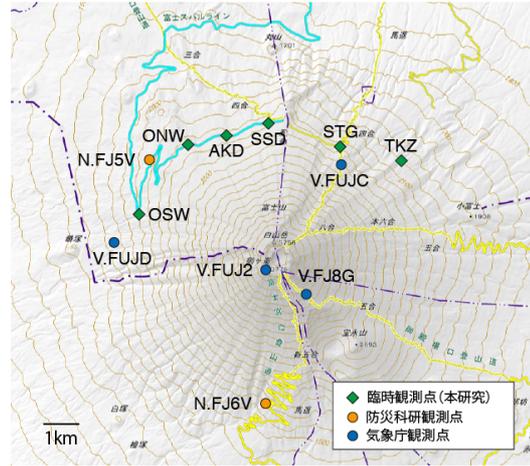


図1. 富士山周辺の既設地震観測施設と本研究で展開した臨時地震観測点の配置図。

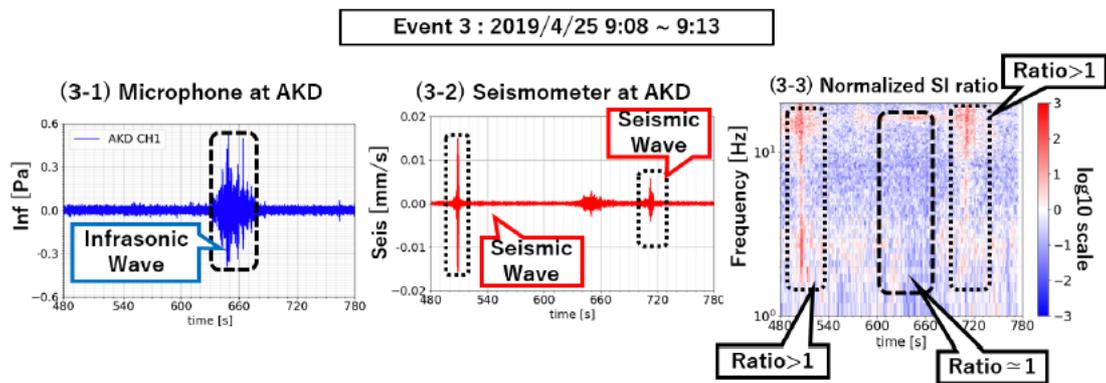


図2. 音波と地震波がともに現れた事例 (Ikeda, 2021). Seismic wave と示された波群は近傍あるいは富士山の地震による震動と考えられ（空気振動が励起されない）、660秒付近に見られる波群が音波と共に現れる地震動に対応する。

2018-2019年および2019-2020年の観測期間中に、空振記録の解析に基づいて雪崩の可能性が指摘された地震動は、いずれも振幅が小さい。該当する時間帯について、既設観測施設の地震波データを調べてみたが、信号はほとんど認識できなかった。

(2) 発振源自動推定システムの開発・実装

ある点から放射された地震動は、発振源からの距離に応じて振幅が小さくなるとともに、伝搬する媒質の非弾性・散乱特性によっても減衰する。十分な数の震動観測点で信号が捉えられ、これらの観測点における増幅特性を補正した上で震動振幅の空間分布を適切に評価できれば、この地震波の伝搬減衰特性を利用することで、震動の発生場所を探索できる (Battaglia and Aki, 2003)。2016年2月に発生した雪泥流について、本システムの元となる試験プログラムを用い、既設観測点のデータのみを利用して振動源位置の推定を実施したところ、図3のような結果が得られた。この雪泥流が発生した時間帯には一部の観測点で観測が停止しており、利用でき

るデータが限られていた。にもかかわらず、富士山の西斜面の大沢付近に振動源が推定されたことから、解析に利用できる観測データが増えれば推定精度の向上が図れると期待される。

この試作プログラムは、ファイル上に保存された地震波データを利用する『事後解析』を想定した構成で作成した。データファイルの完成には現象の発生から数分の遅延が生じることから、本研究では伝送されるデータをリアルタイムで処理する方法に拡張し、あわせてブラウザ上で推定結果を確認できる GUI の開発も行った (図 4)。解析の動作モードは「連続」もしくは「イベント」に設定することが可能で、「連続」の場合は雪泥流や地震などの震動発生時以外の雑微動についても解析を実施する (推定結果は意味を持たない)。「イベント」の場合は、複数観測点で振幅の増大を検出すると解析を実施し、振幅が設定基準を下回るまでの間で、振動源の位置探索を行う。振動源の位置は時間と共に変わるため、ブラウザ上では最新の推定結果を自動更新で表示するモードと、過去時間の推定結果を参照するための時間送りや巻き戻しが行えるモードを実装した (図 4)。

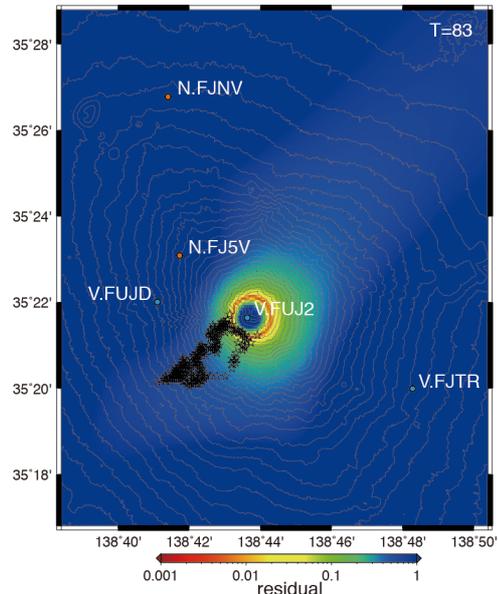


図 3. 2016 年 2 月 14 日に発生した雪泥流の流下位置 (振動源位置) の推定結果。

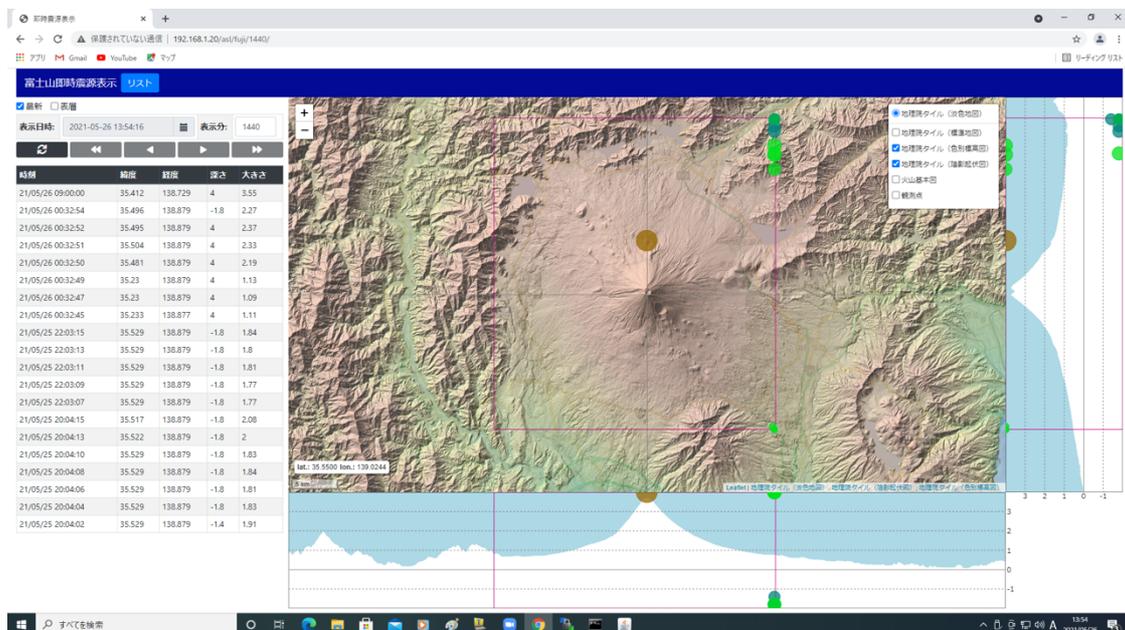


図 4. 本研究で開発したシステムの解析結果表示画面例。設定パラメータのチューニング前の画面のため、推定結果が探索領域の端に集まっている。

(3) 推定精度および検出能力の評価

開発した解析プログラムと結果表示システムは、富士山科学研究所および北海道大学において試験運用している。研究期間中に解析に適した雪泥流震動が発生しなかったことから、雪泥流発生位置の推定やその精度評価は実施できなかった。現在は火山性地震等のデータを用いながら解析パラメータの調整作業を進め、本格運用の準備を行っている。本研究課題の終了後となるが、2020-2021 年観測期間中の 2021 年 3 月 21 日に大沢方面ほか多数の雪泥流の発生報告があったことから、データ回収の後に本システムでの震動発振源解析と精度評価を引き続き進める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 池田 航, 市原美恵, 本多 亮, 青山 裕, 酒井慎一
2. 発表標題 空振計および地震計を使用した冬季富士山の雪崩観測 (2018-2019冬シーズン)
3. 学会等名 JpGU2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田 航, 市原 美恵, 本多 亮, 青山 裕, 酒井 慎一, 吉本 充宏
2. 発表標題 空振計および地震計を使用した冬季富士山の雪崩観測 (2019-2020冬シーズン)
3. 学会等名 雪氷研究大会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryo Honda
2. 発表標題 Slush avalanches and its observation plan at Mount Fuji
3. 学会等名 International symposium on snow and avalanche in Niseko (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	吉本 充宏 (Yoshimoto Mitsuhiro) (20334287)	山梨県富士山科学研究所・火山防災研究部・主任研究員 (83501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	本多 亮 (Honda Ryo) (70399814)	山梨県富士山科学研究所・火山防災研究部・研究員 (83501)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	池田 航 (Ikeda Wataru)		
連携研究者	市原 美恵 (Ichihara Mie) (00376625)	東京大学・地震研究所・准教授 (12601)	
連携研究者	酒井 慎一 (Sakai Shin'ichi) (00251455)	東京大学・大学院情報学環・学際情報学府・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関