

桜島での光ファイバセンシング(DAS)を用いた土石流モニタリング手法

(株)エイト日本技術開発 ○八木笙太

国土交通省国土技術政策総合研究所 海老原友基・赤澤史顕・鈴木啓介

1. はじめに

国土交通省では土砂災害に対する警戒避難や流域管理に係る多角的な取り組みが進められており、災害リスクの低減および迅速な対応の実現に向けた体制整備が急務となっている。このような背景の中、土砂災害の早期検知は被害の最小化に資する重要な課題であり、国土技術政策総合研究所では各種センサを活用した前兆現象の検出技術の開発に取り組んでいる。近年、モニタリングの新たなアプローチとして、光ファイバケーブルを用いた分布型音響計測システム(Distributed Acoustic Sensing; DAS)が注目されている。

DASは光ファイバケーブルをセンサとして用い、微小な歪み変化を数メートル間隔で連続的に検出することが可能な技術である。パルスレーザーを光ファイバに入射し、後方散乱光の位相変化を解析することで、細かな変化をリアルタイムでの把握が可能で、簡便な設置性や高い耐環境性、低コストでの広域観測といった利点がある。

本研究では、DASを用いた桜島での土石流モニタリング手法の有効性と実用性の検証を行い、土砂災害への迅速な対応および被害の低減に寄与する新たなモニタリング技術の実現を目指す。

2. 観測について

2.1 観測区間

本研究の観測は、国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所桜島砂防出張所内を始点とし、桜島南岳から約2 km西方に位置する野尻川域に、管理用道路沿いに敷設された光ファイバケーブルを利用して実施した。観測区間を図-1に示す。

2.2 観測方法

観測にはLazoc社製のDAS計測システムを用い、全長約4,400 m、測定間隔約2.0 m、ゲージ長10 m、サンプリング周波数2,000 Hz、総観測点数2,500点の観測条件で実施した。観測期間は2024年9月6日から9月30日までの25日間であり、その期間中に2件の地震イベントおよび5件の土石流イベントを観測した。9月22日10時台に発生し、野尻川7号堰堤(約4,260 m地点)に設置されたワイヤーセンサーの1段目(高さ60 cm)の切断が確認された土石流イベントの1時間のひずみ速度($\mu\text{E}/\text{s}$)波形の時空間マップを図-2に示す。図より上流から下流まで約20分かけて土石流が流下していることが確認できる。336 m~416 m区間は野尻川の橋梁部となって

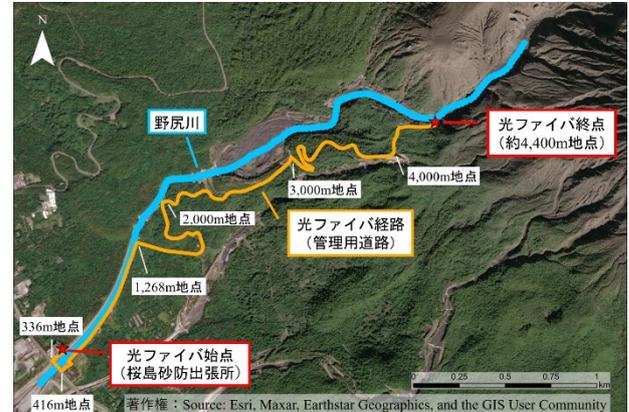


図-1 観測区間 (野尻川と光ファイバ経路図)

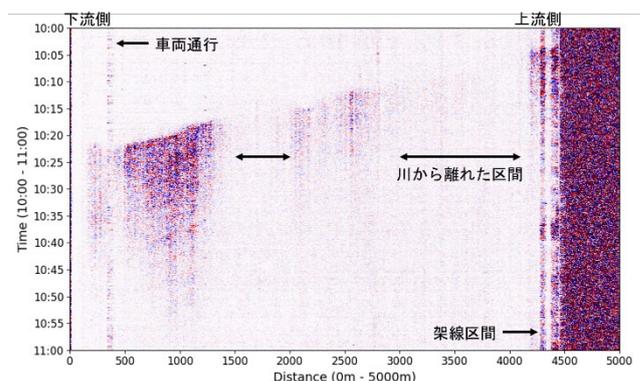


図-2 2024/9/22 10時台の土石流のひずみ速度マップ

おり、通行車両の振動が記録されている。4,260 m~4,400 mの上流側の一部区間では光ファイバケーブルが架線となる区間があり、土石流の発生に関連せずにひずみ速度が大きい値で記録されている。また、1,500 m~2,000 m, 3,000 m~4,100 m内の光ファイバ経路が川から離れている区間は値が小さくなっている。なお、光ファイバの全長約4,400 mを超えた区間のデータは計測システム上記録されたノイズデータである。

3. 土石流検知と震源推定手法

3.1 土石流検知手法

土石流の検知には、STA/LTA法¹⁾に基づく手法を適用した。まず取得したひずみ速度の時系列データに対して、得られた振動成分が弱い区間では10~30 Hzのバンドパスフィルタを適用して、土石流に起因する振動成分を強調し、不要な低・高周波成分による影響を低減する。その後、1秒間隔で信号のエネルギーを示すRMS(二乗平均平方根)を算出

し、観測点ごとに各秒の局所的な信号レベルを評価する。

得られた RMS 値を基に移動窓法を用いて短期間平均 (STA) と長期間平均 (LTA) を算出し、STA/LTA 比を求める。STA 窓は 2 秒、LTA 窓は 60 秒と設定し、STA/LTA 比があらかじめ定めた閾値を超過した場合に土石流イベントとして検知する。さらに、短時間の閾値超過のみでは誤検知のリスクがあるため、一定時間以上連続して閾値が保持された場合に最終的な検知結果を確定する連続性判定を導入して判定した。

3.2 土石流震源推定手法

3.1 による土石流検知後の震源推定および追跡手法として ASL 法 (Amplitude Source Location method) を用いた^{2,3)}。ASL 法は、観測点における振幅の情報と、各観測点と候補震源との距離等に応じた補正を組み合わせることで、震源位置の探索を試みるものである。

前提として野尻川の河道上 (図-1 青線上) に土石流の検知震源候補 i を 200 点配置した。次に 3.1 で得た各観測点 j の土石流検知時刻 t を基準に、各検知震源候補からの距離 r を考慮した時刻の最大振幅を読み取る。その後、読み取った各観測点の振幅 $A_j(t)$ から下式に基づき検知震源候補の振幅 A_i をそれぞれ算出し、その分散が最も小さい候補を震源と推定し追跡を行った。

$$A_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{A_j(t)}{C_j} \sqrt{r} e^{\frac{\pi f}{Q\beta} r} \right\}^2$$

ここで、 N は観測点数、 C_j は観測点 j のサイト増幅特性^{2,3)}、 f は周波数、 Q は内部減衰、 β は波速を示す。波速は振幅の分散が最も小さくなる値を推定し、各観測点に一律で適用した。また、各観測点のサイト増幅特性は、観測期間中に得られた 2 つの地震イベントの S 波のコーダ波より推定した。

4. 土石流検知と震源推定結果

土石流の検知結果を図-3 に示す。トリガー検知継続時間を 20 秒に設定したことで、地震や車両通行等のイベントの検出が抑制された。また、バンドパスフィルタ処理により土石流の振動の弱い区間においても流下に伴う振動の検知を確認できる。

震源推定では STA/LTA の検知結果を約 100 m 毎のウィンドウで、秒単位のトリガー検知割合を基に検知時刻を決定した。ウィンドウは約 20 m ずつシフトさせながら解析を行い、決定したトリガー検知時刻と場所を元に周辺 100 観測点を利用して震源推定を行った。図-4 に示すように、時間の経過とともに震源が上流から下流へと移動しており、監視カメラ映像と比較しても時間のずれは見られなかったことから、推定された震源は土石流の先頭を的確に捉えているといえることが確認された。

また、地震イベントから全観測点での信号の増幅傾向を簡単に把握できることを確認した。

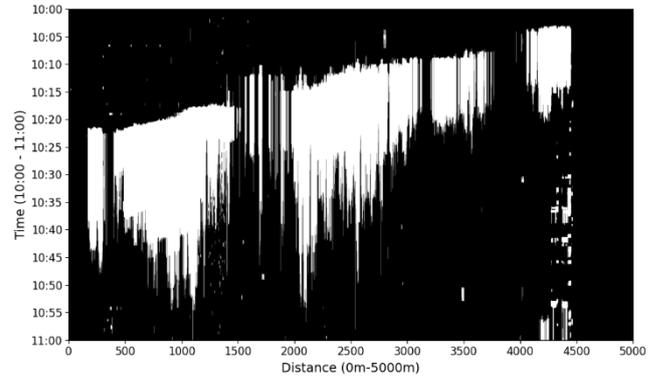


図-3 2024/9/22 10 時台の土石流の STA/LTA 検知結果 (白: 検知, 黒: 非検知)



図-4 2024/9/22 10 時台に発生した土石流の STA/LTA 検知時刻からの震源推定結果

5. おわりに

本研究では、桜島における土石流のモニタリングに DAS を適用し、野尻川の上流から下流にかけて土石流の流下現象と発振位置を推定した。これにより土石流の先頭を時空間的に追跡できたことは、災害リスク低減および迅速な対応体制の構築に向けた新たなモニタリング技術として DAS の有用性を示すものである。

今後は、多環境下での実証やリアルタイム検知等によるシステムの強化を目指す。

謝辞: 本研究の実施にあたり、大隅河川国道事務所および桜島砂防出張所には、テストフィールドや各種施設、情報のご提供を賜り、深く感謝申し上げます。また東北大学の西村教授にも、貴重な助言および情報をご提供いただき、深く感謝申し上げます。

参考文献: 1) 松村正三ら: 地震前兆解析システムにおける地震データ (高速採取データ) の処理, 国立防災科学技術センター研究報告, 第 41 号, pp.44-64, 1988.

2) Battaglia, J., Aki, K., Location of seismic events and eruptive fissures on the Piton de la Fournaise volcano using seismic amplitudes. Journal of Geophysical Research 108, 2364, 2003.

3) Nishimura, T., et al., Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acoustic sensing system. Scientific Reports, 2021.