

論文 光ファイバーセンシングを用いた落石検知検証

長谷川 明紀¹・Thein Lin Aung²・小久保 達生³・岸田 欣増⁴・鈴木 亨⁵

¹正会員 東海旅客鉄道株式会社 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545-33)

E-mail: akinori.hasegawa@jr-central.co.jp

²正会員 ニュープレクス株式会社 情報処理システム部 (〒650-0023 兵庫県神戸市中央区栄町通 1-1-24)

³正会員 ニュープレクス株式会社 フィールドエンジニアリング部 (〒650-0023 兵庫県神戸市中央区栄町通 1-1-24)

⁴正会員 ニュープレクス株式会社 代表取締役 (〒650-0023 兵庫県神戸市中央区栄町通 1-1-24)

⁵正会員 東海旅客鉄道株式会社 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545-33)

E-mail: tooru.suzuki@jr-central.co.jp (Corresponding Author)

鉄道沿線における落石災害は発生予測が困難であり、岩石の規模によっては脱線転覆など重大事故に直結する恐れがある。現在は危険箇所の抽出や定期検査に加え、落石防止工等のハード対策および検知線によるソフト対策が講じられているが、獣害や草木による誤検知や維持管理負担が課題である。本研究では、既設の通信用光ファイバーを用いた落石検知の可能性を検証した。人工斜面において4～52 kgの岩石を落下させ、施工基面を模擬した3計測ラインで分布型光ファイバー計測を実施した結果、今回の環境では全ての石で振動を検知することができた。落石と歩行の判別については、ヒートマップでは明確な差異は確認できなかったものの、100 Hz未満の周波数成分において差異が確認された。また、オートエンコーダを用いた異常検知手法を適用することで、暗振動以外の振動について異常判定することに成功した。今後はさらに教師データを蓄積し、落石の自動検出と精度向上を行う。

Key Words: Rockfall, Fiber optic cable, DAS

1. はじめに

鉄道沿線における落石災害は、山地部を通過する路線において恒常的に存在するリスクであり、発生頻度は高くないものの、一度発生すれば列車の脱線や転覆などの重大事故に至る可能性がある。このため、鉄道の安全安定輸送を確保する上で、落石対策は重要な課題の一つである。

現在の落石対策は、落石対策技術マニュアル^{注1)}に基づき、主に予防的措置と事後対応措置の組合せにより構成されている。予防的措置としては、地形・地質条件や風化状況等を踏まえた落石危険箇所の抽出および定期的な現地踏査が実施され、不安定岩塊に対してはワイヤーロープ掛け工や根固め工等

のハード対策が講じられている。また、線路側への到達を想定し、落下エネルギーの算定に基づき落石防止柵や落石覆い等を設計・設置することで、被害の低減が図られている。これらのハード対策の代表例を図-1に示す。

一方、これらの対策を講じても、想定外の規模や位置で落石が発生する可能性を完全に排除することは困難である。このため、実際に落石が発生した際に列車を速やかに停止させる手段として、落石防止柵上などに落石検知線を張設する方式が導入されている。検知線概念図を図-2に示す。本方式は、銅線の断線を検知して停止信号を現示するものであり、構造が比較的簡易で確実性が高いという利点を有する。しかしながら、検知原理が物理的断線に依存し



図-1 落石ハード対策

(左：ワイヤーロープ掛け工，右：落石防止柵)

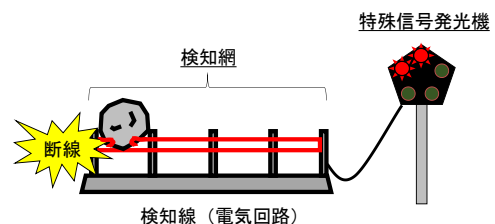


図-2 落石検知線による列車停止

ているため、獣害や草木の接触、倒木等の落石以外の要因による断線が多く発生している。また、断線箇所の特長が容易でないことや、復旧には現地での張替え作業が必要となることから、維持管理に多大な労力を要する。さらに、復旧作業中は列車運行への制約が生じる場合があり、斜面近傍での作業に伴う二次災害のリスクも指摘されている。これらの課題を解決するためには既存の設備を活用しながら、誤検知を抑制しつつ、広範囲を連続監視可能な検知手法が求められる。

近年、分布型光ファイバーセンシング技術^りは、長距離かつ連続的に振動情報を取得できる手法として、土木構造物の健全度評価や地盤挙動の把握などへの応用が進められている。DAS (Distributed Acoustic Sensing) インテロゲータを用いて光ファイバーケーブルにレーザー光を照射すると、ファイバー内の不純物に反射して後方散乱光が生じる。ファイバーが振動などによって伸び縮みすると、その箇所の位相が変化する。散乱光のうち、レイリー散乱光を連続的に記録し、位相差を演算することで、光ファイバーのひずみに変換することができる。DASの測定原理を図-3に示す。

鉄道沿線には既に通信用光ファイバーケーブルが付設されており、その空き心線を活用することで、新たなセンサーを設置することなく広範囲の監視を実現できる。このような既設インフラの活用は、導入コストおよび維持管理コストの低減の観点からも

有効と考えられる。

しかしながら、落石によって生じる振動特性や、他の振動イベントとの識別可能性については十分に明らかになっていない。また、実際の落石挙動に近い条件での基礎的検証も十分とは言えない。

そこで本研究では、既設通信用光ファイバーを用いた落石検知の実現可能性を基礎的に検証することを目的とした。具体的には、試験場内の人工斜面を自然斜面に見立てた落石模擬実験を実施し、分布型光ファイバー計測によって取得した振動データを解析することで、落石の検知可能性および他イベントとの識別可能性について検討した。さらに、機械学習手法を用いた異常検知の適用可能性についても評価を行った。

2. 実験概要

愛知県小牧市の研究施設内の人工的な斜面を自然斜面に見立てて、質量4~52 kgの岩石を落下させる模擬実験を実施した。実験概要を図-4に示す。斜面の盛土の高さは6.1 m、法面勾配は1:1.5 (約34°) で、のり長は12 m、表層土の土質は山砂・山土 (細粒分混じり砂質礫: GS-F) が用いられている。表面に張コンクリート等は設けておらず、盛土材が露出している斜面である。

検知に使用する光ファイバーケーブルは実際の鉄道通信用に使用している多心ファイバーケーブル (208心のうち最外層の1心使用) と、ニューブレックス製ひずみ計測用エンボスケーブル (2心のうち1心使用) を用いた。通信用ケーブルで検知できるか検証しつつ、エンボスケーブルは高感度なひずみ応答を取得することを目的として使用した。208心ケーブルは線路直角方向に3 m間隔、線路方向の延長で3計測ライン (Line1, Line2, Line3) 設けた。それぞれの延長は、Line1: 24 m, Line2: 22 m, Line3: 18 mとした。また、斜面から落下最中の石

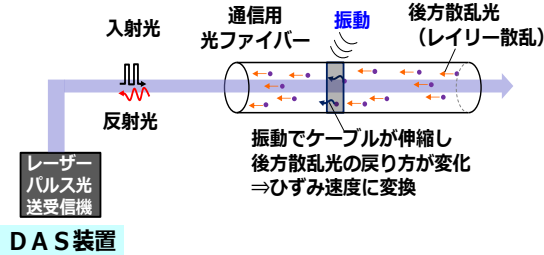


図-3 光ファイバーセンシング装置(DAS)測定原理

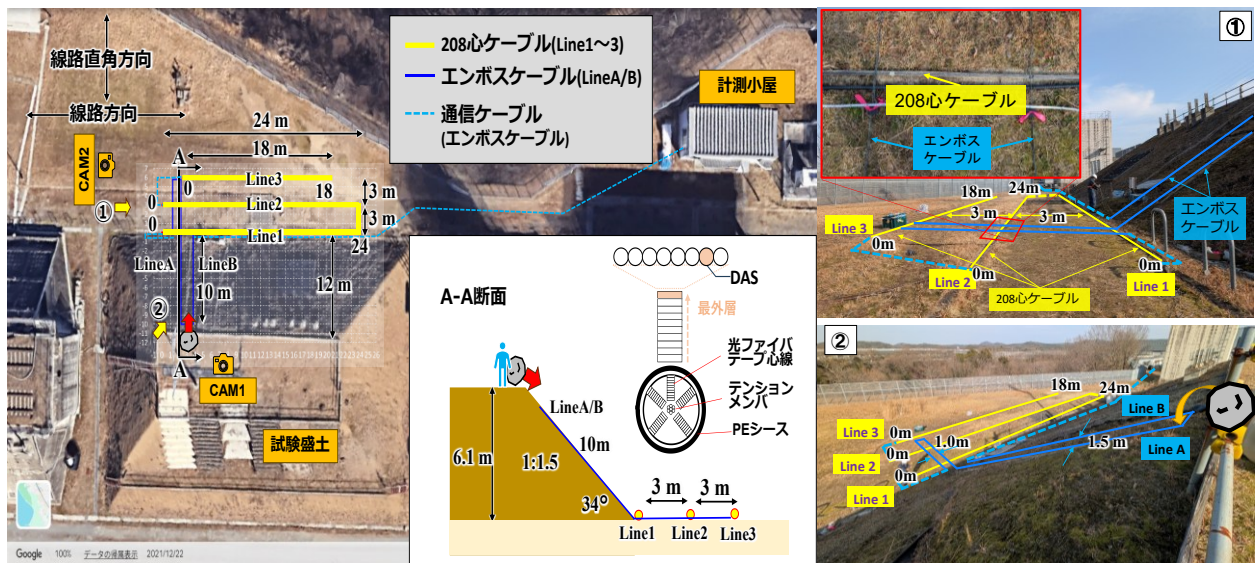


図-4 落石実験概要 (左図 航空写真: Google Earth, © Google, 図は著者加筆 右図: 配線状況)

表-1 落下実験に使用した石の諸元

石番号	寸法 (cm×cm×cm)	重量 (kg)	投てき回数(回)
No.1	15×12×15	4.0	9
No.2	25×18×16	5.8	9
No.3	23×20×18	10.0	9
No.4	30×45×25	22.1	9
No.5	40×35×24	21.1	6
No.6	42×37×28	52.4	2


図-5 左：実験に使用した石の外形
右：No.6 計量 (52.42kg)

の振動も捉えるため、線路直角方向の法面上にエンボスケールを配線した。全ての光ファイバケーブルは計測装置 1 台で全計測ラインを連続的に計測できるよう、光ファイバケーブルを直列接続した。実験に先立ち、ファイバ位置を同定するためタップテストを実施した。

使用した計測装置は、ニューブレクス製 DAS インテロゲータ (DAS-S4100) を用いた。計測のパラメータは、空間分解能 1.0 m, ゲージ長 1.0 m, 空間間隔 20 cm, サンプル周波数 500 Sps とした。落下実験に使用した石についての諸元を表-1, 図-5 に示す。なお、落下挙動のばらつきを測定するため、同一の石について複数回の投てきを行った。

3. 実験結果

(1) 落石実験

DAS 装置の計測データはひずみ速度 (Strain rate, 単位: $\mu\text{e/s}$) である。まずは、ひずみ速度データの周波数成分に基づく指標として Frequency Band Energy (FBE) を用いて落石時の傾向を分析した。FBE 値は、ひずみ速度データにおける高サンプリングレートの時間サンプルを、低サンプリングレートのエネルギー値 (強度) へと圧縮できるため、DAS の解析に用いられている。このデータ削減により、特に長距離 (100 km 程度) 計測において、データの保存、処理、および可視化が容易となる。さらに、対象とする周波数帯域を選択することで、ノイズの抑制も容易に行うことができる。

FBE 値は、各 DAS チャンネルにおけるひずみ速度時系列信号に対して短時間フーリエ変換 (Short-

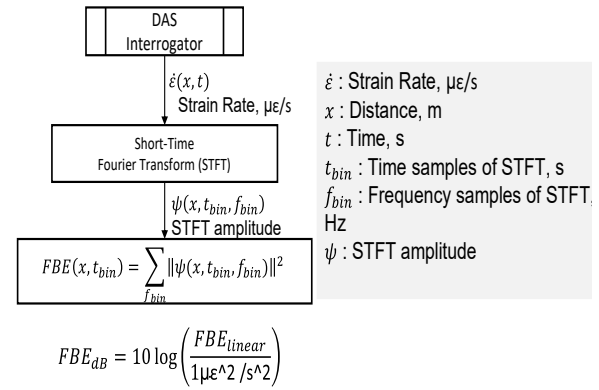


図-6 FBE 算出フロー

Time Fourier Transform: STFT) を適用し、得られたフーリエ振幅を二乗した後、所定の周波数帯域にわたって総和することにより算出する。FBE の算出フローを図-6 に示す。

本研究での FBE 計算パラメータは、窓長 64 点 (0.128 s), オーバーラップ 48 点 (75%) とした。FBE 図に斜面からの落下挙動を適切に記録するため、短い時間窓を採用した。

落石実験の様子の一例を図-7(a), 図-7(b)に示す。図-7(a)は、No.2 の石を投てきした際の状況で、カメラ映像から石の軌跡を赤線で加筆した。図-7(b)は、No.2 投てき時の Line1~3 の 14 秒間の FBE ヒートマップで、横軸に時刻、縦軸に各計測ラインにおけるファイバ延長である。上から計測ライン Line1, Line2, Line3 の順で並べて示している。今回全てのケースにおいて、0~4 秒は落石開始前における環境ノイズ、約 4~11 秒は落石中の振動、約 11~14 秒は落石停止後の残留振動が収録されていたため、一律 14 秒間のデータを分析した。

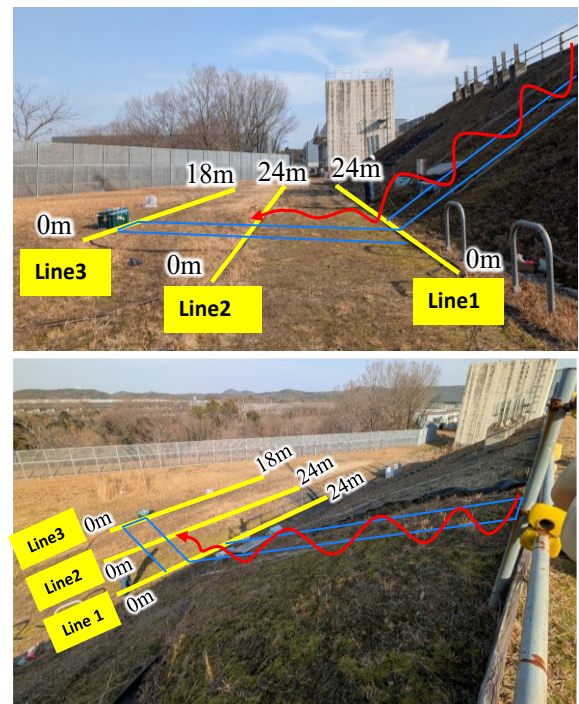


図-7(a) 落石実験時一例 (石 No.2 落下軌跡を加筆)

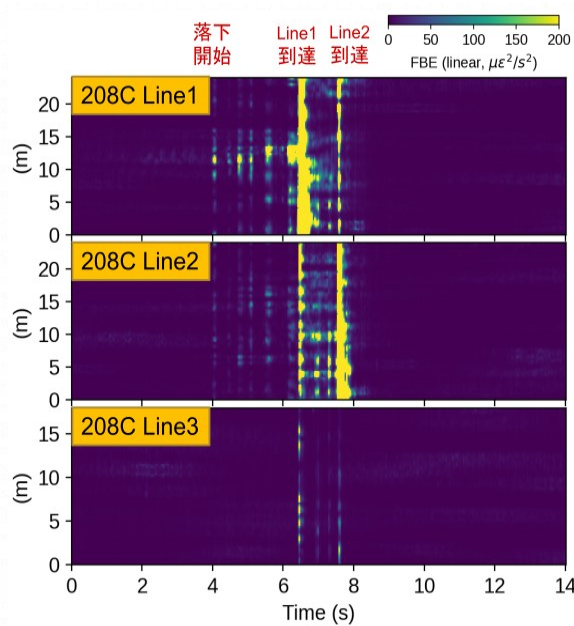


図-7(b) 落石実験時一例 (No.2 Line1~Line3 FBE)

No.2の石での投てきでは、データを記録を開始し、4秒時点で斜面上部から石が投げられ、約2.5秒間で斜面を転動し、6.5秒時点で斜面下端の平地 (Line1) に到達した。その後、石は平地を転がり、時刻8秒でLine2上に停止した。FBEデータを見ると、斜面に最も近いLine1、軌道中心相当のLine2ではいずれも4秒~6.5秒までの間に斜面をバウンドしながら転がった振動が捉えられている。6.5秒目付近でLine1上に到達したため、Line1の全区間に渡って強い振動が明瞭に検出された。続いて8秒の時にLine2に到達した際は、Line2の全区間に渡って同様に強い振動が明瞭に検出された。このケースではLine3までは石は到達していないものの、Line3では時刻6.5秒と8秒付近に振動が確認でき、Line1やLine2付近の平地部分を転がって停止するまでの地面の振動をLine3で計測できていることが分かる。

次に、斜面から落下する過程の振動を捉える目的で線路直角方向に設置したエンボスケープルで計測した振動と線路方向の208心ケーブルで計測した振動との関連性を分析した。一例として、石No.6投てき時のFBEを図-8に示す。線路方向のLine1と直角方向のLineAとの交差している箇所をXP1とし、当該位置を図にプロットした。また投てき開始時刻の石の位置を星印、石の軌跡を平面図上とLineA・BのFBE上に赤矢印で示す。

直角方向のLineA・Bではどちらも石が徐々に移動していく様子が確認できる。しかし、該当データにおいては、LineAとBで挟む領域内を転がらず、LineAの外側1m付近の方向に石が転がった。このため、LineAの方が移動の様子が明瞭に確認できる。4~8秒付近の斜面落下中の振動について、Line1およびLine2は全区間で振動が観測されており、XP1付近だけが強く振動している様子は見られない。Line1・Line2で計測した斜面落下中の振動は、交差

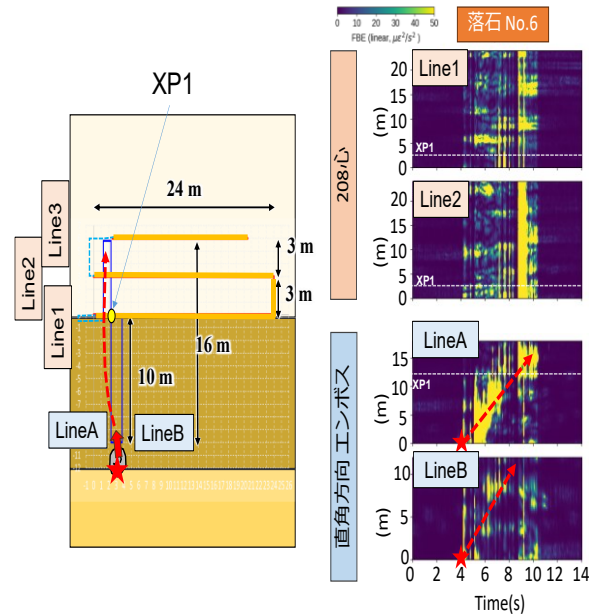


図-8 石No.6実験時FBE (赤矢印は落石の軌跡)

したケーブルの影響は受けずに、地面から伝わる石の振動を直接捉えている。なお、このケースではNo.6の石がバウンドし、Line1を飛び越えてLine2付近に落下したことから、Line2では8.7秒付近に強く振動しているのに対して、Line1の振動はそれほど大きくない。このように、同一の石であっても転がり落ちる方向、バウンドする回数、位置などによって、検出パターンが変わる可能性があることに留意が必要である。

続いて、線路方向の識別能力について分析を行った。図-7(b)や図-8で示したFBEにおいては、線路方向のファイバー延長の24mの全ての区間で同時に振動しているように可視化されており、目視で落下地点を特定することは難しい。そこで、振動伝搬の様子をより詳細に確認した。図-8で示した石No.6の投てき時の計測において、Line2上に石が落下した時の8.70秒から8.90秒の間のひずみ速度の生データを図-9に示す。Line2において、落下した箇所付近 (星印) から光ファイバーに生じたひずみが伝搬している様子が確認できた。

Line1とLine2は約50mの同一ケーブルを折り返す形で測線として構成している。このため、Line2付近に落下した振動が24m付近まで伝搬した後、Line1の24m側から折り返す形で伝搬していることが確認できる。したがって、Line1で現れた振動は、Line2付近に落下した際の地面の振動に加えて、Line2側からファイバー内を伝搬してきた両方の振動が含まれていることになる。Line2を伝搬した振動について考察すると、約20mのファイバー延長を約0.02秒で伝搬していることから、伝搬速度は概ね1000m/s程度と推定される。落石の振動がどの程度の延長まで伝搬するかは今回の検証では明らかにならなかったが、データを拡大して分析することで、落下場所をピンポイントで特定できる。

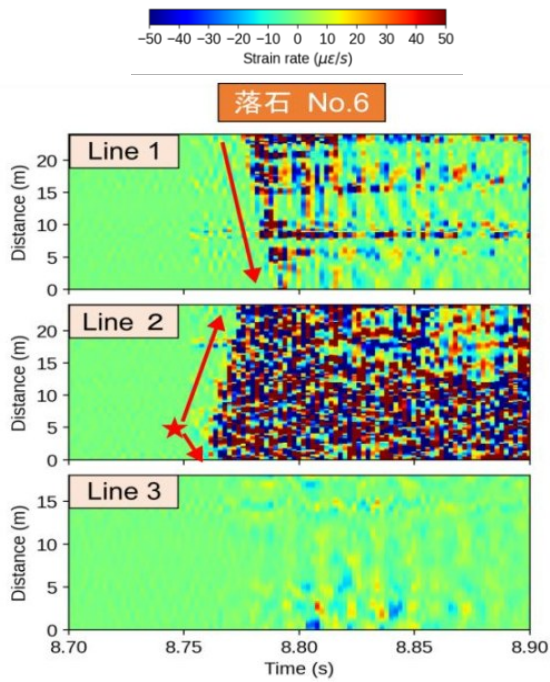


図-9 石 No.6 実験時のひずみ速度ヒートマップ

次に、落石の大きさによる違いがどの程度捉えられているのか比較を行った。FBE について、石のケースごと、Line ごとに、Line 全長での FBE の平均値（Channel-averaged FBE）を算出した。算出例として、No.1 と No.6 の石において、Line1 の FBE および Channel-averaged FBE を図-10 に示す。このケースで比較すると、石の重量の重い No.6 の方が No.1 よりも Channel-averaged FBE の最大値は大きな値となっている。

全てのケースについてばらつき程度を検証するため、全計測時間（14 秒間）の Line 全長における振

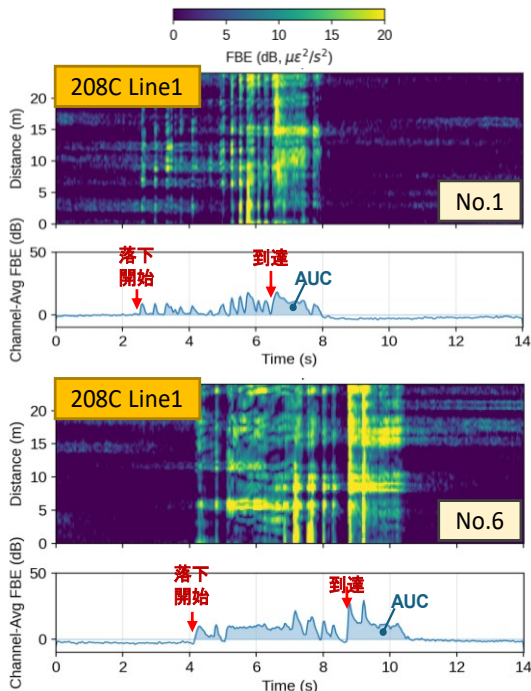


図-10 Line 全長の Channel-averaged FBE

動強度の指標値として、Channel-averaged FBE を積分し、AUC（Area Under the Curve：曲線下面積）を算出した。図-11 に Line1～Line3 ごと、石の種類別に、すべてのケース（最大 9 回投てき）の AUC 平均値を示す。Line1 や Line2 では、大きな石ほど大きいパワーが生じる傾向が見られるが、Line3 のように石が到達しない計測ラインでは、AUC に目立った差異はなく、石の大小は判別が難しい。また、同じ計測ラインであっても毎回石の落下パターンが均一ではなく、跳ねる回数、転がるタイミング、停止する位置が異なるため、このパラメータだけで石の大きさを特定することは難しい。今回投てきた石よりも大きな石で AUC の値で識別できるか今後検証が必要である。

(2) その他のイベントとの比較

落石を自動検出する検知システムとして実装する際、列車の運転に支障のある石かどうかの識別の他、落石かそれ以外のシグナルかを計測値から判別する必要がある。そこで、今回の実験では他の様々な振動波形のデータについても取得を行った。取得したのは、ゆっくり歩行した場合、その場でのジャンプ、および暗振動（バックグラウンドノイズ）である。

一例として歩行実験中の様子（カメラ映像）および落石（No.6）時と歩行時の FBE を図-12 に示す。歩行の実験では、Line1 の近傍を 24m 地点から 0m 地点に向かって線路方向に歩行した。歩行時の FBE を見ると、落石の時とは明らかに異なり、Line1 に沿って一定の間隔で振動が移動している様子が確認できる（図中 Line1 白矢印）。また、Line2 では僅かに歩行時の周期的な振動が見られ、Line3 では歩行位置から離れており、振動は確認できなかった。

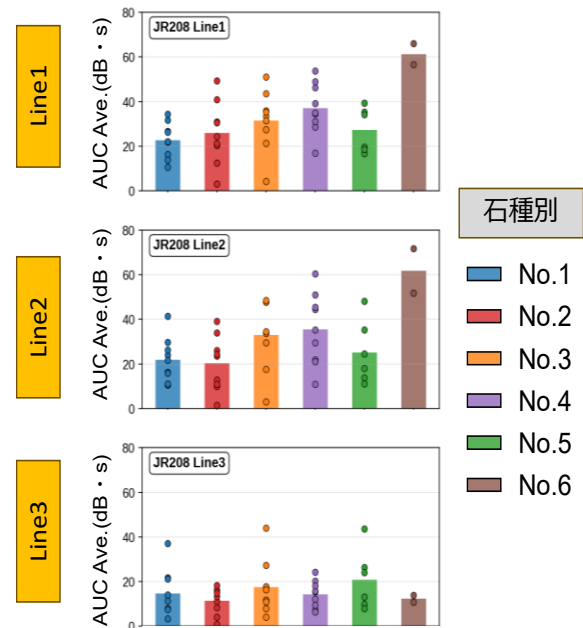


図-11 Line 毎の石種類別 AUC 平均値
棒グラフは各石の AUC の全ケース平均値
●は各石での各ケースの AUC 値プロット

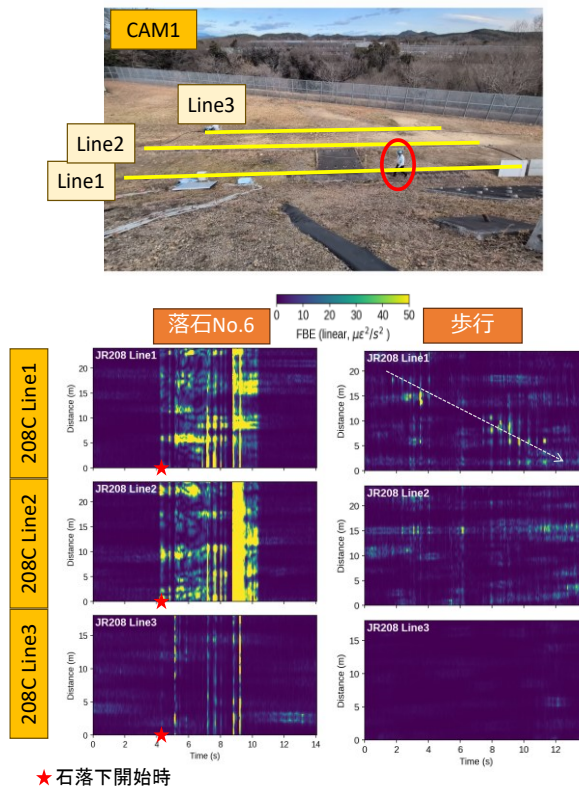


図-12 上：歩行実験時のカメラ映像、
下：落石時 (No.6) と歩行時の FBE

続いて、それぞれのイベントにおける周波数成分の時間変化 (スペクトログラム) を分析した。一例として、Line1 の 12 m 地点における落石 (No.1, No.3, No.6) 時、歩行時、ジャンプ時、暗振動の時の周波数スペクトルのヒートマップと、各周波数の

波の振幅の 8 秒間での平均値および各時間の周波数平均値を図-13 に示す。落石 (No.1, No.3, No.6) 同士と比較すると、時間平均において 100 Hz 以上の高周波成分での違いは見られなかった。しかし 100 Hz 未満で比較すると 50 Hz 付近で山がある場合など、石の重量により僅かに周波数成分の違いが見られた。

ジャンプ時と暗振動は明らかに落石とは異なる周波数ヒートマップを示した。歩行については、図-12 の FBE で振動源の移動が見られるなど明瞭な差異が見られたが、周波数スペクトルヒートマップでの際立った差異は確認できなかった。

今回は 1 地点、1 ケースの比較ではあるため、今後他の地点、他のケースでの再現性や差異について慎重に分析を行っていく。落石特有の周波数分布が得られれば、これらを教師データとして、落石か、それ以外のイベントかの識別は可能と考えられる。

4. AI による異常検出検討

鉄道沿線環境では、車両通過、降雨、風による振動、保守作業や工事などに起因する多様な環境振動が常時発生している。DAS は、これらの環境振動を微弱なものまで検知可能な高い感度を有している。その反面、実際の落石事象に伴う信号が他の信号で覆い隠されたり、ノイズなどで歪められたりする可能性がある。周波数帯域エネルギー (FBE) の単純な閾値処理に基づく自動検知手法では、周波数スペクトルの形状を対象とはせずに、エネルギーの積分値を閾値として用いる。そのた

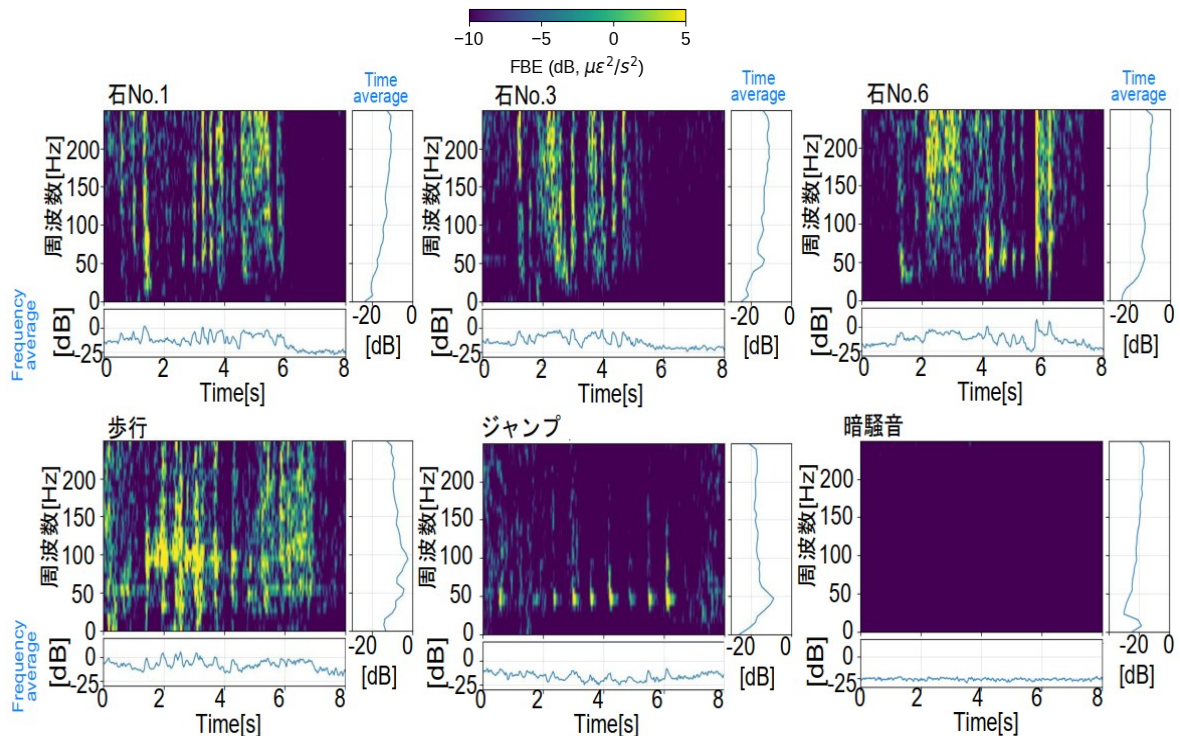


図-13 各実験データにおけるひずみ速度の周波数スペクトルヒートマップと時間平均および周波数平均 (dB スケールの基準=1με²/s²)

め、通過列車のような顕著なノイズ源は比較的容易に除去できる一方で、不規則な外乱は、その原因の特定・識別まですることは難しい。この課題に対して、機械学習（ML）あるいは人工知能（AI）に基づく信号分類を組み込むことで、改善が期待される。機械学習手法は、一般に教師あり学習と教師なし学習に大別される。教師あり学習では、落石、列車振動、野生動物、倒木などの各振動データに対してラベル付けされた大量の学習データから判別する手法である。一方、教師なし学習は、データ内に内在するパターンを抽出する手法である。異常事象に関するラベル付けされた大量のデータを収集することは、コストおよび時間の観点から非現実的である。

そこで、本研究では教師なし異常検知フレームワークを採用し、検証を行った。具体的には、図-14に示すオートエンコーダモデル²⁾を用いた。

オートエンコーダモデルは、今回の落石実験後に連続計測を行って取得した主に夜間に取得した14.8時間分のDAS環境ノイズ（バックグラウンドノイズ）データを用いて学習した。なお、実験した小牧市の研究施設周辺は郊外に位置し、周辺の道路、鉄道などの交通振動や住宅や工場などの生活振動もない静かな環境である。

学習データは前処理として、各Lineにおいて20cmごとに出力される各DASチャンネルのデータから3秒間の時間窓を切り出し正規化を行った後、スペクトログラムへ変換する処理を施した。学習過程において、オートエンコーダは通常的环境振動に内在する特徴的パターンを学習した。学習後、モデルは入力されたスペクトログラムを再構成し、入力信号と再構成信号との間の平均二乗誤差（Mean Squared Error : MSE）（式(1)）を算出することで、正常事象と異常事象の識別を行った。本モデルは正常な環境信号のみを用いて学習されているため、正常信号に対してはMSEが低く、落石や人の活動などの異常信号に対してはMSEが高くなることが期待され、式(2.1)、(2.2)に示す、あらかじめ設定された異常判定閾値により、異常の発生を判定することができる。また、MSEの絶対値から異常発生の確率を算出することも可能である。

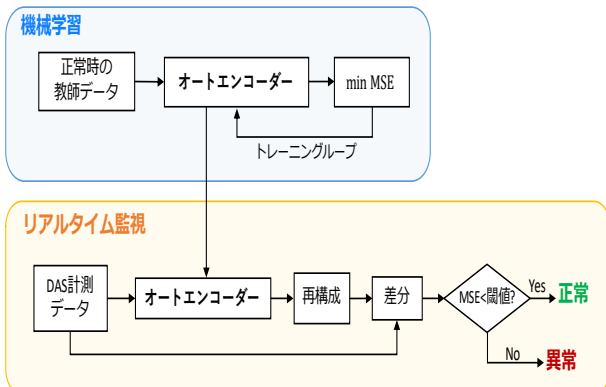


図-14 オートエンコーダによる異常検知原理

$$MSE = \frac{1}{n \times m} \sum_j^m \sum_i^n [x(t_i, f_j) - y(t_i, f_j)]^2 \quad (1)$$

n : 時間ビンの数

m : 周波数ビンの数

x : 入力スペクトログラム

y : 再構成スペクトログラム

$$MSE \leq \text{異常閾値} \rightarrow \text{正常} \quad (2.1)$$

$$MSE > \text{異常閾値} \rightarrow \text{異常} \quad (2.2)$$

落石 No. 2 試験時の DAS の FBE 上に MSE を算出して異常と判定した結果を重ね合わせた結果を図-15に示す。岩塊が斜面を下降する過程で生じる微小な振動であっても、Line1 および Line2 において適切に検知されていることが確認できる。

各事象について2000サンプル（1チャンネル×3秒／サンプル）を用いてMSEによる異常判定評価した結果を表-2に示す。その結果、本モデルは異常信号の98%以上を正しく検出し、誤検知率は約0.1%であった。なお、現時点で作成したモデルでは、落石と人の動きなど、異なる種類の異常事象

表-2 各事象の評価結果

Event	Total	Anomalies	Error
環境	2000	2 (0.10%)	2 (0.10%)
石 No. 1	2000	1965 (98.25%)	35 (1.75%)
石 No. 2	2000	1968 (98.40%)	32 (1.60%)
石 No. 3	2000	1995 (99.75%)	5 (0.25%)
石 No. 4	2000	1988 (99.40%)	12 (0.60%)
石 No. 5	2000	1999 (99.95%)	1 (0.05%)
石 No. 6	2000	1993 (99.65%)	7 (0.35%)
歩行	2000	1984 (99.20%)	16 (0.80%)

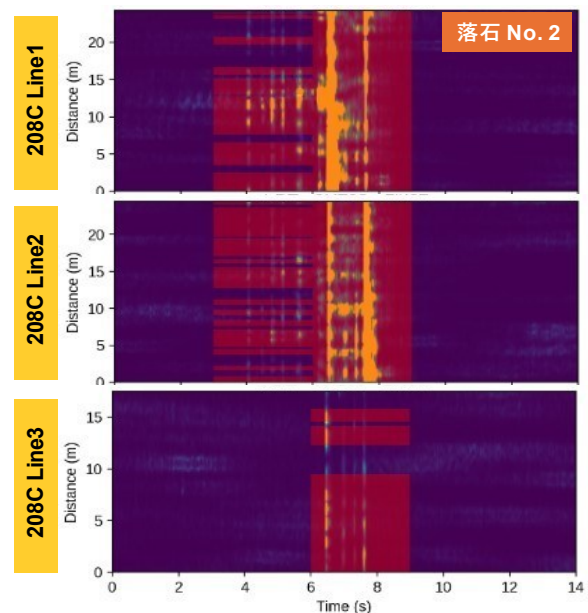


図-15 落石 No. 2 に対する異常検知結果（赤枠）

を識別する機能は有していない。今後は、本異常検知フレームワークの出力を、追加の AI ベース分類部分と組み合わせることで、落石、獣害、土砂流入、地震などの事象分類を可能にすることが期待される。

5. まとめ

本研究では、既設通信用光ファイバーを用いた落石検知の実現可能性を検証することを目的として、人工斜面を自然斜面に見立て、質量 4~52 kg の岩石を落下させる模擬実験を実施した。また、歩行や暗振動など他の振動イベントとの比較を行い、DAS による落石検知の基礎的特性について検討した。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 今回の試験条件では、既設通信用光ファイバーケーブルに DAS インテロゲータを接続することで、4 kg 程度の小さな岩石から 50 kg 程度の岩石まで、いずれも落石に伴う振動を検知可能であることを確認した。
- (2) 落石による振動は地盤を伝搬して光ファイバー全体で観測され、本実験規模（約 24 m）では落石による振動は減衰することなく到達した。データを拡大することで、落下位置を特定することは可能である。列車を止める必要のある落石の振動が光ファイバー延長でどの程度まで減衰せずにどの程度伝搬するかについては、今後検証していく。
- (3) 落石時の振動とジャンプ、暗振動など他イベントでは、ヒートマップでは明確な差異は確認できなかったものの、100 Hz 未満の周波数成分において差異は確認された。
- (4) 今回の試験条件では、オートエンコーダを用いた異常検知手法を適用することで、暗振動に対してそれ以外の振動を異常と検出することに成功した。

以上より、既設通信用光ファイバーと DAS を組み合わせることで、鉄道沿線における落石検知システムとして活用できる可能性が示された。

今後は、より規模の大きい岩の落下や、異なる斜面でのデータを取得する。また、実際の鉄道沿線では列車振動や交通振動などの影響を受けることが予想される。さらに、今回の実験では地表面に通信用光ファイバーケーブルを置くだけの検証であるが、実際の通信用光ファイバーケーブルは線路脇のコンクリート製のケーブルトラフ内に設置されている。そのため、実際の鉄道沿線に付設された通信用光ファイバーケーブルでの計測での適用性を検証する。落石以外にも、土砂流入、なだれ、土石流、倒木、獣害、橋桁衝突など安全安定輸送に影響を及ぼす沿線の事象についても検知可能性を検討する。

NOTES

注1) 公益財団法人鉄道総合技術研究所「落石対策技術マニュアル」1999（平成 11）年 3 月。

REFERENCES

- 1) Benioff, H.: A linear strain seismograph. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25(4), pp.283-309. <https://doi.org/10.1785/bssa0250040283>, 1935.
- 2) Xie, Y.; Wang, M.; Zhong, Y.; Deng, L.; Zhang, J. Label-Free Anomaly Detection Using Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing. *Sensors* 2023, 23 (8). <https://doi.org/10.3390/s23084094>.

(Received March 31, 2026)

(Accepted June 12, 2026)

VERIFICATION OF ROCKFALL DETECTION USING OPTICAL FIBER SENSING

Akinori HASEGAWA, Thein Lin Aung, Tatsuo KOKUBO, Kinzo KISHIDA and Toru SUZUKI

Rockfalls along railway lines are difficult to predict and, depending on their size, may lead to serious accidents such as derailment or overturning of trains. Current countermeasures include the identification of hazardous locations and periodic inspections, as well as structural measures such as rockfall protection works and non-structural measures such as rockfall detection wires that trigger train stops upon breakage. However, these systems face challenges including false detections caused by wildlife or vegetation and the burden of regular maintenance. In this study, the feasibility of detecting rockfalls using existing telecommunication optical fiber cables was investigated. Field experiments were conducted on a test embankment simulating a natural slope. Rocks weighing between 4 and 52 kg were dropped, and distributed optical fiber sensing measurements were performed along three measurement lines that simulated the construction base surface. The results confirmed that rockfalls were detectable under all tested conditions. Furthermore, differences were observed in the frequency spectra between rockfall events and other types of disturbances, indicating that event discrimination is feasible based on spectral characteristics. Future work will focus on accumulating additional training data to enable automatic rockfall detection, improving detection accuracy, and establishing appropriate threshold criteria for practical implementation.