

分布型光ファイバセンサによる河川堤防の 観測方法の検討について

中村仁美¹・中島健¹・加未穰¹・森啓年¹・千田裕司²・重宗宏次³・東屋俊²

¹山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²中国地方整備局 山口河川国道事務所 河川管理課 (〒747-8585 山口県防府市市衛1-10-20)

³元 中国地方整備局 山口河川国道事務所 佐波川出張所 (〒747-0056 山口県防府市古祖原18-43)

本研究は、河川堤防の維持管理に適した分布型光ファイバセンサの観測手法を提案することを目的としている。佐波川右岸上右田地区に敷設した光ファイバを用い、越水に対して「粘り強い河川堤防」を計測した結果、降雨や温度変化に伴う変形を観測することができた。長大な河川堤防を対象として、堤防縦断方向に敷設した分布型光ファイバセンサにより、リアルタイムの被災箇所を検知などに適用できる可能性が示された。

キーワード 河川堤防, 光ファイバセンサ, モニタリング

1. 序論

河川堤防は、近年の気候変動により増加する集中豪雨に伴う河川の出水から、人命や資産を守る重要な社会インフラの一つであり、その維持管理が重要であることは論を俟たない。

その維持管理に資するため長大な河川堤防を縦断方向に連続的に観測し、その変状をリアルタイムに把握できる観測技術として、分布型光ファイバセンサ（以下、光ファイバ）の適用が検討されている。しかし、実際の河川堤防で観測した事例は少なく、河川堤防の観測技術としてどの様な計測手法が適切であるか、十分な知見が蓄積されていないのが現状である。

本研究では、河川堤防に適した光ファイバの観測手法を提案することを目的に、佐波川の越水に対して「粘り強い河川堤防」に敷設した光ファイバを用いて、降雨や温度変化などによって生じる堤体の変形について計測を行った結果を報告する。

2. 光ファイバの計測原理

(1) 計測原理

光ファイバはコア層、クラッド層、保護層の3層から構成され、アナライザから入力されたパルス波は、コア層とクラッド層では屈折率の違いにより全反射しながら損失することなく光ファイバ内を進行する。界面やコア層内部にわずかなひずみが生じた場合、パルス波が透過する際に後方にも散乱する「後方散

乱光」の強度や波長に変化が生じる（図-1）。後方散乱光の強度分布からその位置の温度やひずみを、帰還時間からその位置を計測することができる。

(2) 後方散乱光

計測に活用する後方散乱光はアナライザから入射されたパルス波の波長からの波長差によって、図-2に示す様に3種類（レイリー散乱光、ブリルアン散乱光、ラマン散乱光）あり、それぞれ特性が異なる。

これまで、道路斜面などへの適用の検討¹⁾には、ブリルアン散乱光を用いた手法が主に用いられてきた。また、実際の河川堤防でのモニタリング²⁾では、FBG方式を用いた手法が用いられた。しかし、その計測精度、分解能、速度には限界があり、社会資本の観測技術としての適用は未だ限定的である。一方、レイリー散乱光は、光の波長よりも小さい粒子によって発生し、光ファイバの密度の変化により発生するものである。ブリルアン散乱光やラマン散乱光と比べ強度が高く、また分子振動など動的な現象によるものではない為、非常に高い精度でひずみ分布を得られることが特徴である。

しかし、レイリー散乱光によるひずみ計測には、光の波長幅が狭く、絶対波長が安定した光源等、要求を満たす光の部品と実用的な時間で大量の光のスペクトルを処理可能なプログラムが必要なため、これまでレイリー散乱光による高精度、高分解能かつ高速なひずみ計測は実用化されてこなかった。

本研究では、近年の光ファイバによる計測技術の発達により、新たに開発された高精度かつ高速なレ

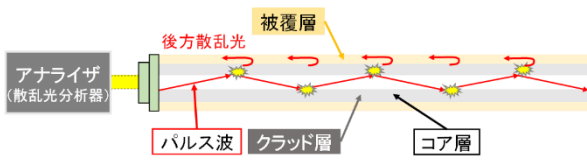


図-1 光ファイバの計測原理

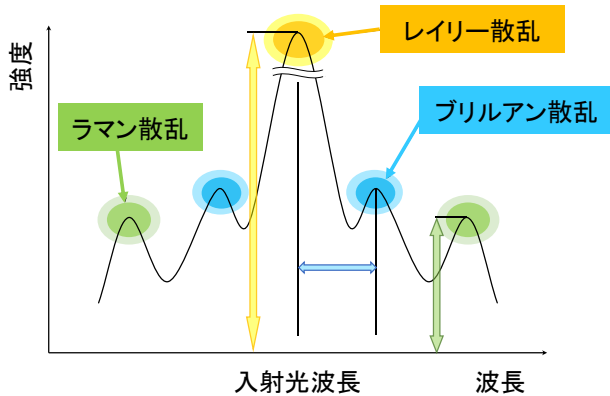


図-2 後方散乱光の種類

レイリー散乱光を用いた計測（以下、レイリー計測）が可能な機器（Neubrex 社、NBX-7031）を用いて実際の河川堤防の観測に適用した。

表-1に光ファイバを用いたひずみ計測に関するレイリー計測と従来のインフラ計測に用いられてきたブリルアン計測の特徴を示す。なお、ラマン散乱光は温度計測に用いられるのが主であり、ひずみ計測には通常用いられていないため本表からは除外している。

(3) 光ファイバセンサの構造

本研究のひずみ計測では、温度補正のためひずみ計測用光ファイバと温度計測用光ファイバの2種類の構造の光ファイバを用いた。

図-3 a) に示すひずみ計測用光ファイバは、幅4.3 mmの幅広の構造をしており、補強材であるテンションメンバが両端にあり、その間に光ファイバが配置されている構造となっている。計測対象物の伸縮ひずみを計測することができるが、計測値に光ファイバ自体の温度変化によって生じる伸縮ひずみも含まれる。また、図-3 b) に示す温度計測用光ファイバは、直径2 mmのステンレス鞘管の中に光ファイバ素線が挿入されており、計測対象物の伸縮ひずみが光ファイバに伝わらない構造となっている。そのため、温度変化によって生じる光ファイバ自体の伸縮ひずみを計測できる。

本研究では、ひずみ計測用光ファイバの計測値を、温度計測用光ファイバの計測値を用いて補正した上で使用している。

表-1 後方散乱光の特徴

	レイリー計測	ブリルアン計測
計測精度	±1μ程度	±50μ程度
計測分解能	0.05m	1.0m
計測速度	数秒～数分	数分～数十分

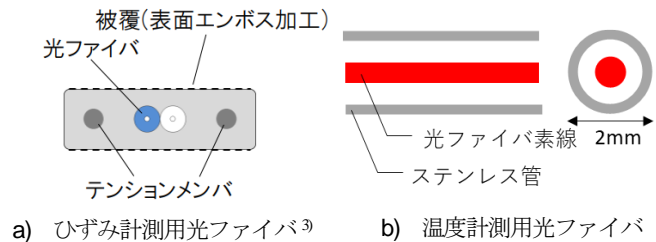


図-3 光ファイバの構造

3. 佐波川の計測方法と外力状況

(1) 計測位置

次に実際の河川堤防を計測した結果を報告する。佐波川右岸上右田地区に建設された、表面被覆型の越水に対して「粘り強い河川堤防」を対象として、現地に敷設した光ファイバによる計測を2022年7月から行った。図-4に計測対象の河川堤防の位置と観測機器の設置状況概略図を示す。

(2) 光ファイバ敷設方法とアナライザ

図-5に示す様に、光ファイバは表層の大型コンクリートブロック下の土被り0.3 mに、ひずみ計測用光ファイバ、温度計測用光ファイバを同じFEP管（内径φ50 mm）の中に挿入し、モルタル充填をした上で埋設した。図-6 a) に示す様に、粘り強い河川堤防を対象として、現地に敷設した光ファイバによる計測を2022年7月から行った。図-6 b) に示す様に、粘り強い河川堤防の下流側の7k700～8k000区間において、光ファイバを延長280 m、川裏法肩・法面・法尻の3測線に敷設した。光ファイバの計測に使用するアナライザは、上流側200 mの位置にある計測小屋に設置し、計測区間から計測小屋までは通信用の光ファイバを敷設した。

平面図とひずみ計測用光ファイバと温度計測用光ファイバの配線図を図-6 b) に示す。なお、ひずみ計測用光ファイバと温度計測用光ファイバによる川裏法肩・法面・法尻の光ファイバの総延長は3.4 kmとなっている。

使用したアナライザは、レイリー計測を20分毎に行った。なお、本研究の計測条件は、分解能10 cm、計測間隔2.5 cmとした。



図4 観測位置と観測機器の設置状況

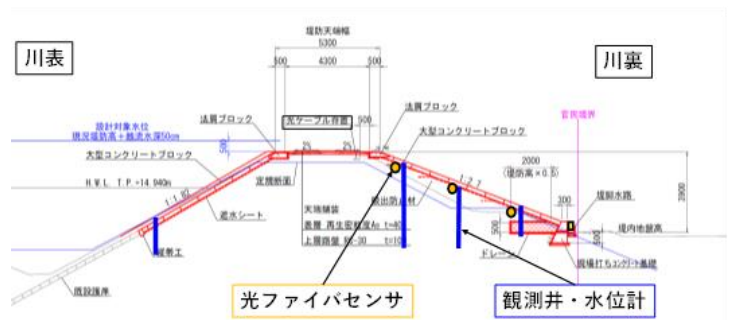
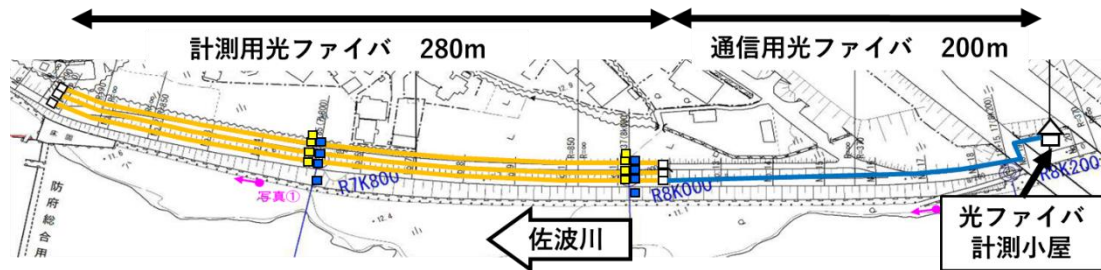
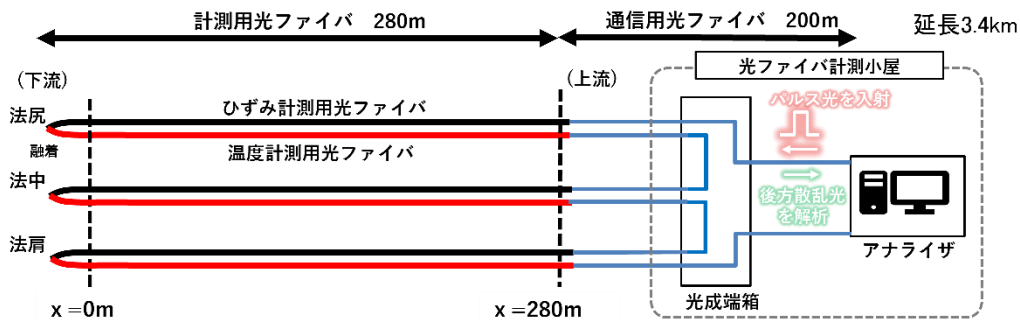


図5 光ファイバの設置状況（横断面）



a) 光ファイバ敷設図



b) 光ファイバ配線図

図6 光ファイバの設置状況

(3) 河川水位と降雨、堤体内水位の状況

光ファイバとあわせて、図-5に示す様に右岸7k800, 8k000の川表の法面、川裏の法肩、法面、法尻に観測井を設置し、それぞれの観測井に絶対圧式水位計を合計8台設置した。あわせて、8k000の川裏の法肩に大気圧補正用のバロメータを1台設置した。

河川水位と降雨、堤体内水位の状況の一例として、2022年台風14号接近時の河川水位と降雨、堤体内水位の観測値及び河川水位最高時（2022年9月19日13時）の堤体内水位の分布を図-7及び図-8に示す。

堤体内水位の観測結果から裏法面は大型コンクリートブロックで被覆されているものの、降雨の影響が顕著であり、川裏法肩や法面の水位が上昇していることが確認できる。現地を確認したところ、大型コンクリートブロック間にすき間が発生しており、そこから浸透したものと推察される。一方、河川堤防の安全性に大きな影響を及ぼす川裏法尻の水位は

ドレーンの排水効果により低く抑えられていることもあわせて確認された。

4. 計測結果

(1) 台風接近時

前節で示したとおり2022年台風14号の接近により、最大30mm/hr程度の降雨が発生し、河川水位も堤内地盤高よりやや上まで上昇した。その際のレイリー計測による伸縮ひずみの計測結果を図-9に示す。縦軸第1軸をひずみ、第2軸を気温、横軸を距離とした。この計測結果は、各計測結果の直前に計測した計測結果から発生した累積ひずみ量を図化したものである。30mm/hr程度の降雨が観測された2022年9月18日21時18分には光ファイバに局所的に最大±0.002%程度の伸縮ひずみが発生していることが確認出来る。これは、前述の様に、大型コンクリートブロック間のすき間

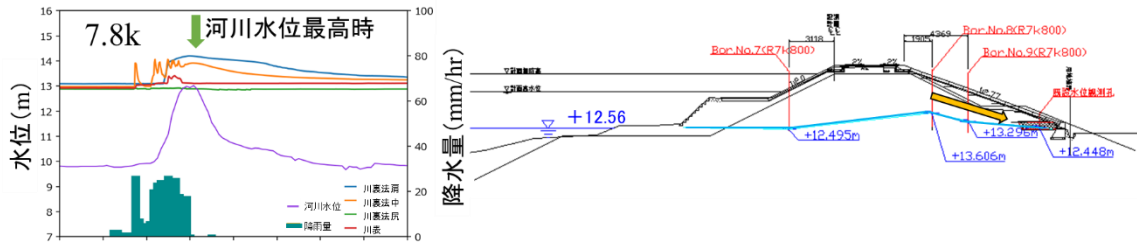


図-7 右岸 7k800 堤体内水位観測結果 (横断面は河川水位最高時 : 2022年9月19日13時)

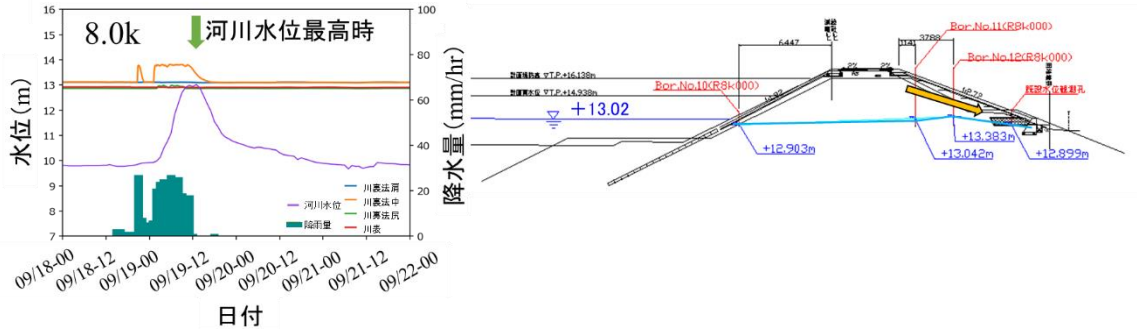


図-8 右岸 8k000 堤体内水位観測結果 (横断面は最高水位時 : 2022年9月19日13時)

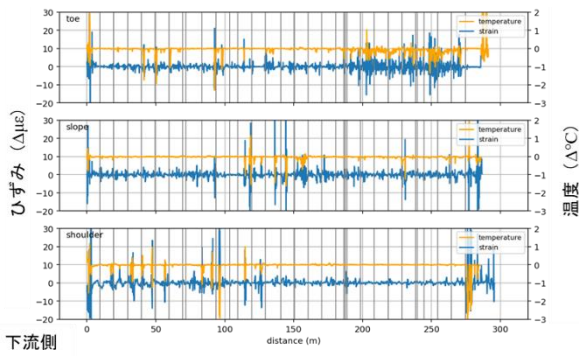


図-9 台風接近時のレイリー計測結果
(降雨時 : 2022年9月18日21時9分)

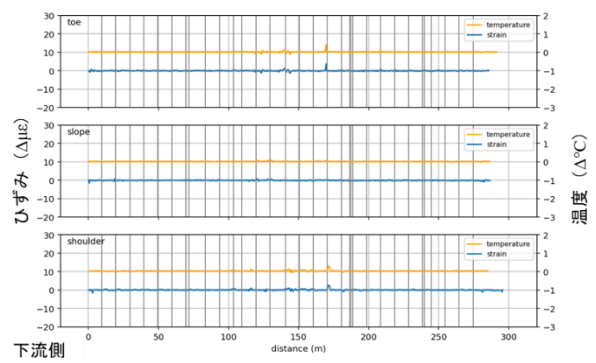


図-10 台風接近時のレイリー計測結果
(降雨無・最高水位時 : 2022年9月19日13時8分)

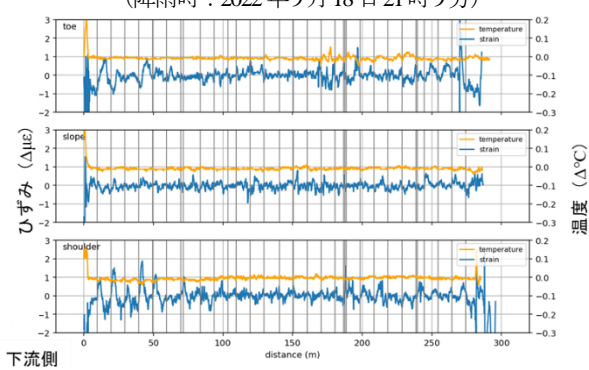


図-11 平常時のレイリー計測結果
(2022年9月17日12時13分)

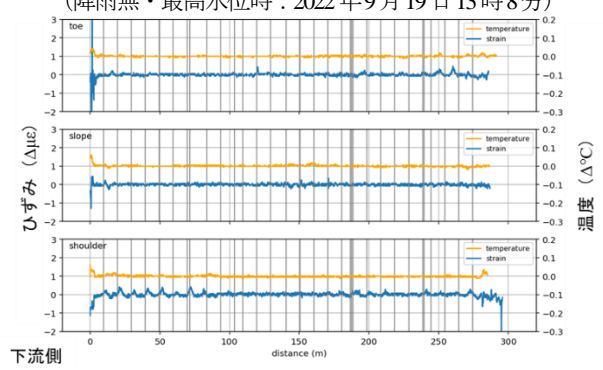


図-12 平常時のレイリー計測結果
(2022年9月17日23時55分)

から降雨が浸透することによる温度変化により、局所的な堤体の伸縮ひずみが発生したためと考えられる。

また、台風通過後の2022年9月19日13時53分の伸縮ひずみ分布を図-10に示した。前述の降雨による伸縮ひずみはほとんど残留せずに、台風接近前の状態に戻っていることが分かる。

以上から、降雨時や台風接近前後の堤体に発生する伸縮ひずみを±1μmのオーダーで高精度に計測できることが確認された。

(2) 平常時

次に、降雨などの外力が発生しない平常時の河川堤防に生じる伸縮ひずみをレイリー計測によって観



図-13 河川管理用光ファイバと鞘管

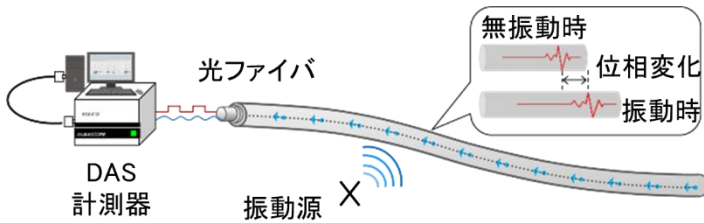


図-14 DAS 計測の原理

測したものを図-11, 12 に示す. 2022 年 9 月 17 日 00 時 11 分～23 時 55 分の間に発生した伸縮ひずみであり, 微小な伸縮ひずみを表示するためその範囲を $\pm 3\mu$ に縮小して表示している. これから, 降雨などの外力が観測されない場合も光ファイバに $\pm 0.0001\%$ 程度の伸縮ひずみが, 台風接近時の降雨の際とは異なる場所に発生していることが確認出来る. これは, 図中の縦線で示される大型コンクリートブロック同士の変形を吸収する樹脂製ジョイント (エラス) 位置近傍である. 大型コンクリートブロックにより表面が被覆されている「粘り強い河川堤防」が温度変化により, エラスの位置に伸縮ひずみが発生していることが確認出来る.

5. 河川管理用光ファイバの活用

これまで, 計測のために新たに敷設した光ファイバを用いた結果について紹介してきた. しかし, 新たに光ファイバを敷設するためには河川堤防の掘削を伴うことから, 長大な河川堤防の管理区間全体を観測対象とするのは困難である.

そこで, 河川管理用光ファイバのうち, 使用されておらず空線となっている「ダーク・ファイバ」を使用することで管理区間全体をモニタリングすることができる可能性に着目した.

(1) 試行方法

図-13 に示す様に河川管理用光ファイバは鞘管の中



図-15 佐波川河川管理用光ファイバ設置図

に敷設されており, 張力が掛かっていないことから, 従来の静的ひずみ計測手法の適用が困難である. そこで, 本研究の計測では大型の堤防模型実験などで実績のある DAS (Distributed Acoustic Sensing) と呼ばれる振動計測手法の適用を検討した. DAS とは, 図-14 に示すようにアナライザから光ファイバにパルス波を一定周期で繰返し入力し, 光ファイバに加わる振動に応じて変化する後方散乱光の位相検出により振動を計測する技術である. 伝搬距離によって異なる光の往復時間を測定して位置情報を取得し, 各位置における計測信号に対して $1 \sim 2.5 \text{ kHz}$ の周波数範囲でサンプリングを行うことで光ファイバに沿った振動分布を計測することができる. 今回の計測条件は, サンプリング周波数 500 Hz , 計測間隔 0.2 m (空間分解能 2.8 m)で行った.

試行においては図-15 に示す佐波川出張所から堀通信局舎までの右岸, ケーブル長約 $24,000 \text{ m}$ のダーク・ファイバを対象とした. DAS のアナライザは佐波川出張所の光端末に接続した (図-15). 対象区間には堤体に埋設された「地中部」と, 無堤区間に電柱などを使用し設置された「架空部」が存在する. ここでは, ダーク・ファイバによる異常振動検知技術の

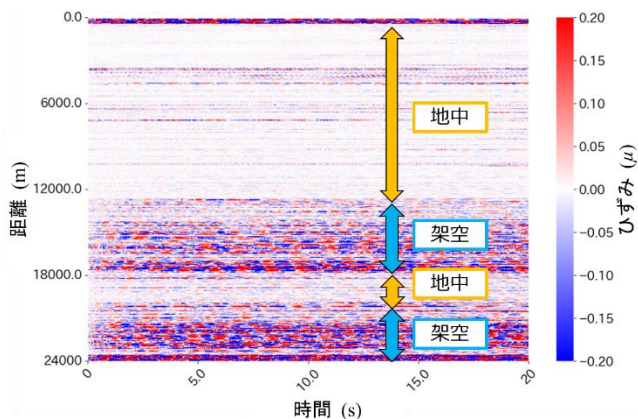


図-16 地中部分と架空部分の振動特性

確立を目指し、その基礎的な知見を得るために①地中部と架空部の振動特性、②車両走行の振動特性について計測した。

(2) 試行結果

試行結果を図-16, 17 に示す。横軸は時間を示し、今回は測定対象によって10~30秒間測定している。縦軸は佐波川出張所のアナライザ接続部を0 mとして振動を検知した光ファイバの距離を示している。また、光ファイバによる計測した動的ひずみ（振動）の強弱をスペクトラム表示している。

図-16 は地中部分と架空部分における振動特性の違いを示している。架空部分は電柱間を空中や橋梁に付帯する鋼管内に特に固定されることなく敷設されているため、風や交通による振動の影響を受けやすいことが確認された。一方、堤体に埋設された地中部分は振動が相対的に小さくなっており、河川堤防の挙動をモニタリングするために微小な振動を計測できることが窺える。

次に、図-17 は堤防天端に車両を走行させた場合、の振動特性である。ダーク・ファイバの鞘管が埋設されている埋戻し箇所の直上を車両走行させた。計測した振動は比較的大きく、車両の走行にあわせて、振動位置が移動する様子を確認できる。これは車両の走行といった断続的に堤防天端で発生する振動を高精度で把握可能であることを示唆している。一方、ダーク・ファイバの埋戻し箇所の直上から数cm 離れると車両の走行に伴う振動が微弱となり、DAS を用いて計測することが難しいことも確認された。

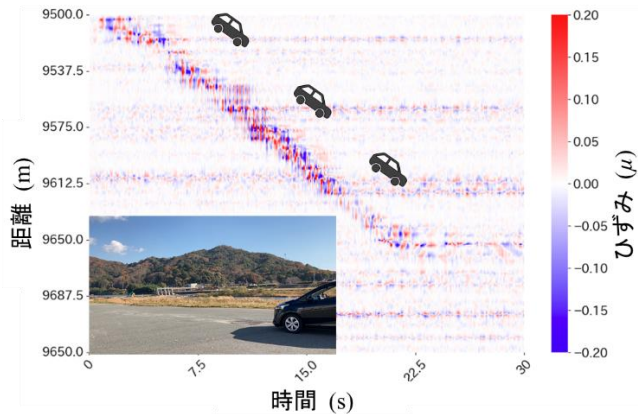


図-17 車両走行箇所の振動特性

このことから、DAS によって計測可能な振動は、ダーク・ファイバの埋設状況と振動発生位置の関係に大きく左右されると考えられる。

6. 結論

本研究の結果、光ファイバによる計測で、降雨や温度変化によって発生する河川堤防の微小な変形を計測可能であり、より精度の高い計測が可能であることを確認した。また、河川管理用光ファイバの活用により、河川管理区間全体を経済的かつ、比較的容易に計測できる可能性についても示した。

降雨時や出水時における河川堤防の変形を観測し、維持管理に資する基礎データの取得を目指すとともに、DAS 実用化に向け、埋設状況に関わらず一定の計測感度を確保する方法や計測データの適切な処理・分類方法などの確立を目指す所存である。

参考文献

- 1) 土木研究所：光ファイバセンサを活用した道路斜面モニタリングに関する共同研究報告書「光ファイバセンサを活用した斜面崩壊モニタリングシステムの導入・運用マニュアル」、土木研究所共同研究報告書第292号, 2003.6
- 2) 佐古ら：計測機器を用いた河川堤防の変状検知モニタリングシステムの開発（第一報）、河川堤防シンポジウム, 2016.11.1
- 3) ニューブレックス「エンボス型センシングケーブルカタログ」https://www.neubrex.jp/pdf/FN-SILL-3_Emboss_J.pdf 2023年7月11日