

河川堤防の維持管理に関する光ケーブル空き芯の有効活用研究

佐々木 瞳羽¹・利根川 哲朗¹

¹阿賀野川河川事務所 流域治水課 (〒956-0032 新潟市秋葉区南町14番28号)

近年、光ファイバをセンサとして利用する光ファイバセンシング技術の利用が進んでおり、特にファイバの軸方向の歪を短時間で極めて高密度に計測する分布型音響センシング（DAS : Distributed Acoustic Sensing, ; 以下「DAS」という。）技術の発展が著しい。本論文では河川堤防の維持管理の高度化および効率化を図ることを目的に、堤防に埋設されている光ケーブルの空き芯を用いて行ったDASによる試験研究について報告する。

キーワード 河川堤防, 河川管理, 災害, 光ケーブル, DAS

1. はじめに

国土交通省では、公共施設の管理を目的とした光ファイバ及び収容空間のネットワーク化を進めており、道路に埋設する「情報BOX」や「電線共同溝」、河川沿いに敷設する「河川管理用光ファイバ収容空間」等の整備を行っている。整備にかかるコストや情報通信技術の発展に伴い、埋設管内には未使用の空き芯が存在しており、その一部を民間事業者に貸し出すことでさらなるネットワーク構築に寄与している。

本論文では、埋設済みの光ファイバを用いて堤防の点検や異常検知の高度化および効率化を図ることを目的に、光ファイバをセンサとして利用する分布型音響センシング（DAS : Distributed Acoustic Sensing）を用いた阿賀野川での試験計測について報告する。

2. DAS計測について

(1) DASのしくみ

DASは光ファイバ自体をセンサーとして振動を計測する技術であり、光ファイバに沿って数10 kmという長距離かつ数 m 間隔という高密度でデータを取得できるという利点がある。

図-1に模式的に示したように、インテロゲータと呼ばれる計測器から光ケーブルに光パルスを入射し、後方散乱によって計測器に戻ってくる微小な光信号を計測する。光パルスの後方散乱光には、ラマン散乱、ブリルアン散乱、レイリー散乱といういくつかの種類があるが、そのうちDAS計測ではレイリー散乱光を計測している。光ファイバの主な材料である石英ガラスの不均質性（屈折率の不均一性）により、光ファイバのあらゆる位置で発生

するレイリー散乱光は、外部からの振動で光ファイバにひずみが生じることで変化する。その微小な変化量を計測器で検知することで、光ファイバに加わった振動として計測することができる。また、光パルス発射時間から散乱光が戻るまでの時間を光の伝播速度を用いて距離に換算することで、加わった振動の位置（計測器からの距離）がわかる。このようにして、光ケーブルに沿って、知りたい位置の振動を計測することができる。

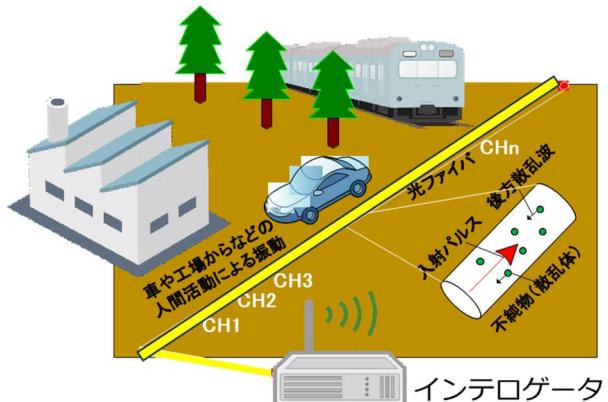


図-1 DAS計測のイメージ

(2) DASの利用

近年、DASは重要施設や国境の警備、パイプラインの監視のための振動モニタリングに利用されているほか、道路交通量の把握、海底ケーブルを用いた稠密地震観測、火山性地震の観測など様々な目的に利用されている。さらには高速道路盛土でのヘルスモニタリングや崩壊斜面でのDAS計測によって地盤の物性評価を評価した例なども報告されている²⁾。

主要な河川堤防沿いにおいては、監視カメラ等の通信

用に光ケーブルが設置されており、そのうちダークファイバと呼ばれる未使用の芯線を利用することができれば、数10 kmにわたる堤防沿いの振動を一度に計測できる。DAS計測によって河川堤防沿いの振動計測が可能になれば、地震動の稠密な観測ができるほか、常時微動を用いた微動アレイ探査によって河川堤防沿いのS波速度構造が推定できる可能性がある。また、それらの結果を用いることによって堤防の健全性の評価や土質構造の推定、軟弱地盤の存在把握による地盤リスクの低減にも有用と考えられる。そこで、河川堤防沿いに設置された既存の光ケーブルを用いたDAS計測により河川堤防沿いのS波速度構造を推定可能かどうかの実証試験を実施した。

3. 現地計測

(1) 計測内容

2023年11月27日～12月1日にかけて、阿賀野川堤防左岸18.2～32.8KP および早出川堤防左岸・右岸の0～2.4KP（阿賀野川合流地点から太田川排水機場まで）においてDAS計測を実施した。事務所内に計測器（Sintela社のONYX）を設置し、光ファイバ成端箱からダークファイバに繋がるコネクタを取り出し計測器に接続して計測を行った。図-2にDAS計測対象とした光ファイバの位置と計測器の設置位置を示す。赤線で示した区間は架空線であるため、計測対象外とし、黄色線で示した区間をDAS

計測対象とした。そのうち上流側の青線で示した区間を地盤のS波速度構造推定区間とした。

DAS計測のサンプリング周波数は500Hzとし、DAS計測において空間分解能を決める重要なパラメータであるゲージ長とチャンネル間隔はどちらも6.38mに設定した。

図-3にウォーターフォールと呼ばれるDAS計測の記録例を示す。縦軸を時間、横軸を計測器からの距離とした表示で、歪が大きい部分が黄色く表示されている。図-3に見られる斜めの線は堤防道路を走行している自動車の動きを感じたもので、この線の傾きから自動車の移動速度を推定することも可能である。

(2) タップテスト

DAS計測によって得られる記録は、図-3に示すように計測器からの距離に対する振動波形として得られる。したがって、実際の位置を決めるためには、事前にタップテストと呼ばれる試験を行って、計測器からの距離と実際の位置との関係を把握しておく必要がある。具体的には、ハンドホールのように光ケーブルの埋設位置が確実にわかる位置において、小型のハンマーで人工的に振動を発生させ、計測器からの距離と位置の対応付けを行う。図-4にタップテストの実施状況とその記録例を示す。なお、今回のDAS計測区間内では、21箇所でタップテストを実施した。



図-2 光ファイバの設置位置図

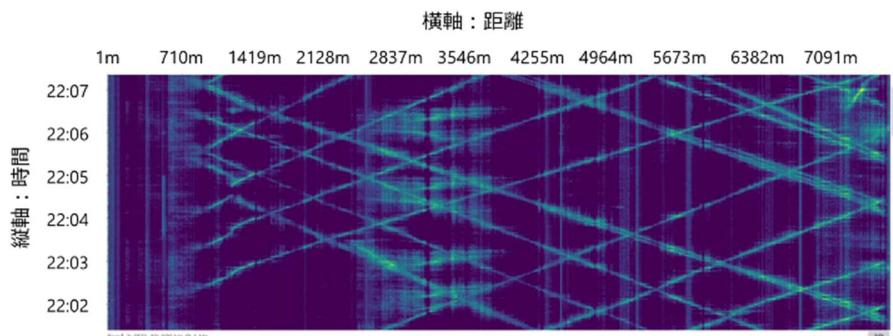


図-3 DAS計測のウォーターフォールプロットの例



図4 タップテストの実施状況と記録例

(3) 従来手法との比較検証

DAS計測によって得られる結果の比較検証を目的として、早出川堤防上のDAS観測実施区間のうち、図-2に示す約0.3 km区間において地震計を用いた微動アレイ探査および表面波探査を実施した。微動アレイ探査は、OYO製McSEIS-ATと固有周波数2 HzのSunfull製ジオフォンを使用した。受振点を5 m間隔で15箇所設置し、5箇所をオーバーラップさせる方法で、測線方向に設置場所を移動させながら、合計7回の測定を行った。各測定時間は約15分間とした。表面波探査はGeometrics製Geodeとランドストリーマーを使用した。ランドストリーマーにはジオフォンが1 m間隔で24個設置されており、それを移動しながら2 m毎にカケヤによる起振を行いデータ取得した。図-5に微動アレイ探査と表面波探査の計測状況と解析の模式図を示す。

比較検証用の物理探査実施位置を含む約1260 mの区間ににおいて、DAS計測によって得られた常時微動のデータを用いて、CMP-SPAC法による微動アレイ探査の解析を行いS波速度の二次元断面を推定した。解析に用いたDAS計測のデータは夜間の30分間のデータである。測定区間ににおいて20 m毎に1次元のS波速度構造を求め、それらを並べることで2次元S波速度断面とした。ジオフォンによる微動アレイ探査は約300mの区間で10m毎に、ランドストリーマーによる表面波探査は約300mの区間で2m毎に、1次元のS波速度構造を求め、それらを並べて2次元S波速度断面とした。

DAS計測とジオフォンによる微動アレイ探査、表面波探査結果を比較したものを図-6に示す。S波速度構造を求めた間隔が手法によって異なるため、DAS計測によるS波速度構造の分解能が若干悪いように見えるが、得られたS波速度の値はおおよそ同じであり、DAS計測でも地震計で計測した時と同じように地盤のS波速度を計測できることができた。

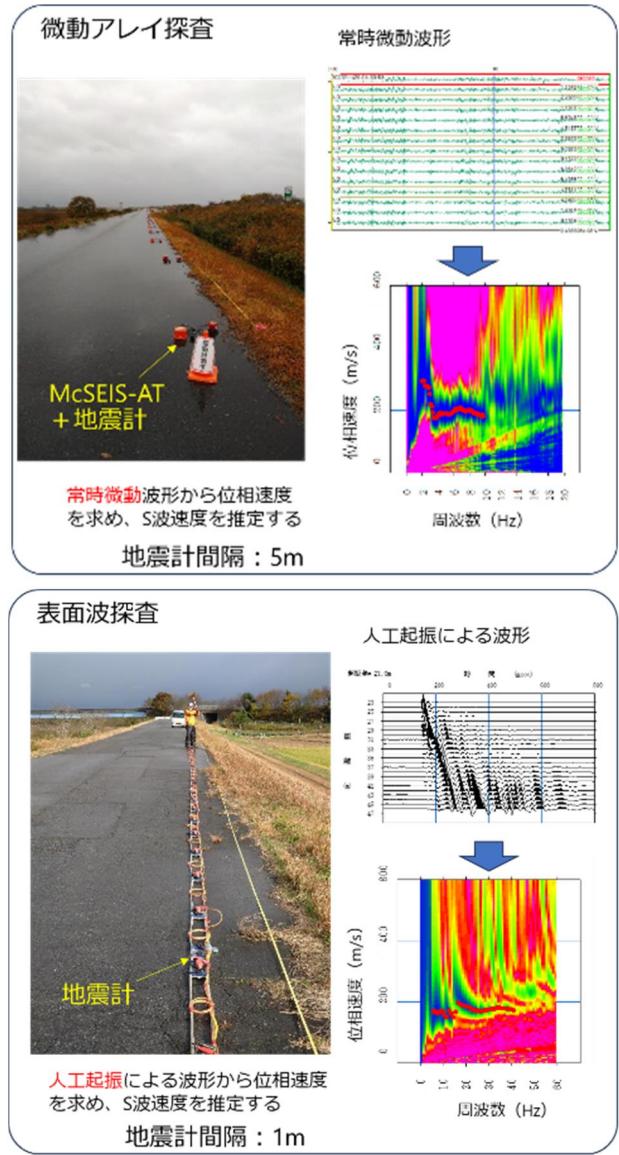


図5 微動アレイ探査・表面波探査の計測状況および模式図

(4) DAS計測結果

前述の通り、DAS計測のデータを微動アレイ探査の解析に利用できることがわかった。そこで、計測器を設置した事務所から約15 km離れた地点を始点として、図-2の青線で示した堤防沿いの約9 kmの区間ににおいて、S波速度構造を推定した。解析に利用したデータは30分間の常時微動である。得られた深度50 mまでのS波速度構造断面を図-7に鳥瞰図として示す。

図-7に示したS波速度構造のうち、区間を4つに分けて抜き出したものを図-8に示す。これらの図には、ボーリングによる土質柱状図とN値の結果が重ね書きされている。土質柱状図で水色が粘土、黄色が砂、茶色が砂礫を表している。S波速度は暖色系が低い値を、寒色系が高い

い値を表しており、土質柱状図との対比では、砂礫で高いS波速度、粘土で低いS波速度となっていることがわかる。つまり、ボーリングデータと組みあわせることで、S波速度構造から概略的な土質構造を推定できていることがわかる。

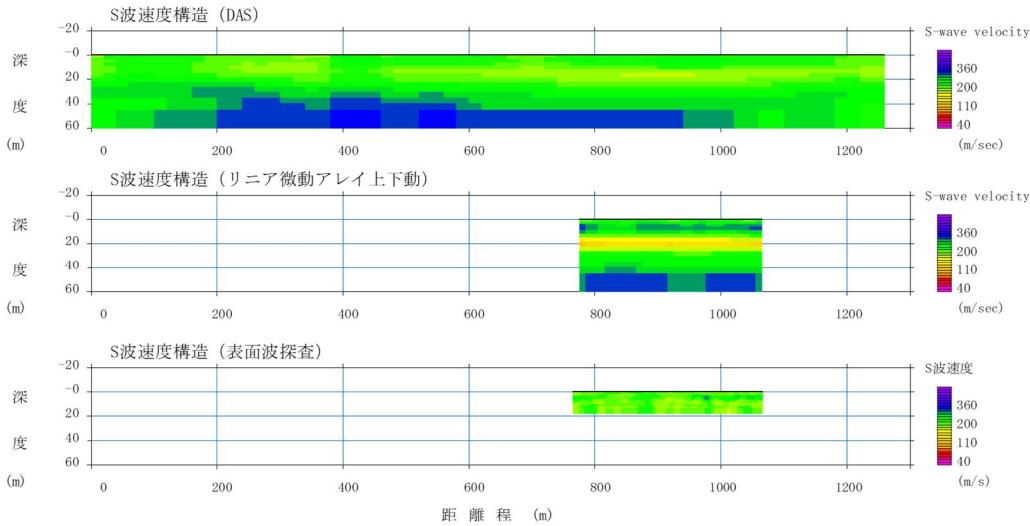


図-6 DAS計測と地震計による微動アレイ探査・表面波探査によって推定したS波速度断面の比較

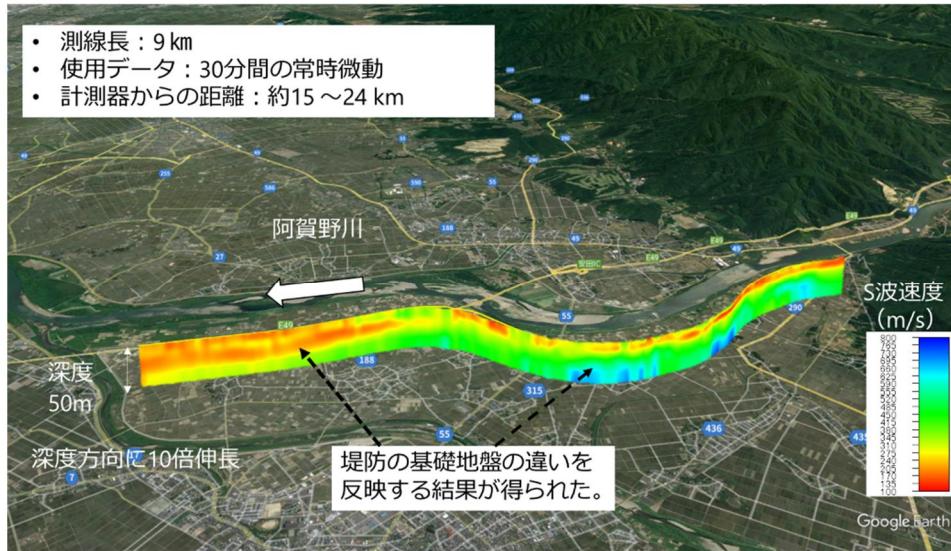


図-7 DAS計測によって推定したS波速度断面の鳥瞰図（断面の深度は10倍に伸長）

4. 考察

今回のDAS計測により、浅部の低S波速度層の層厚が河川の上流側から下流側にかけて厚くなっていくという概略のS波速度構造を捉えることができた。しかし、N値の変化のように深度方向に細かい変化を捉える事はできなかった。ただしこれはDAS計測に限った課題ではなく、地表からの物理探査全般に共通する薄層検出能力の限界によるものである。

DAS計測では一旦計測器を設置すれば、数10 kmの長大区間のデータを一度に取得でき、わずか30分間のデータから深度数10mまでのS波速度構造を推定できる。一方、従来のように地震計を用いた計測であれば1日に計測できる距離はせいぜい1kmである。したがって、計測時間だけを考えれば、従来の数十倍の効率化が図れる事になる。さらに、計測のために現地に向かう必要がなく、計測器を設置した事務所内から遠方のデータを取得できることから、作業の省力化や効率的な災害対応に有

用と考えられる。

ただし、今回のDAS計測のデータはゲージ長、チャンネル間隔ともに6.38mで取得されたものであり、堤体基礎地盤のS波速度構造は把握できるが、堤防自体のS波速度構造を把握するためには、分解能が不足している。現状よりも高分解能の結果を得るためにには、ゲージ長、チャンネル間隔ともにもう少し小さくする必要があると思われる。

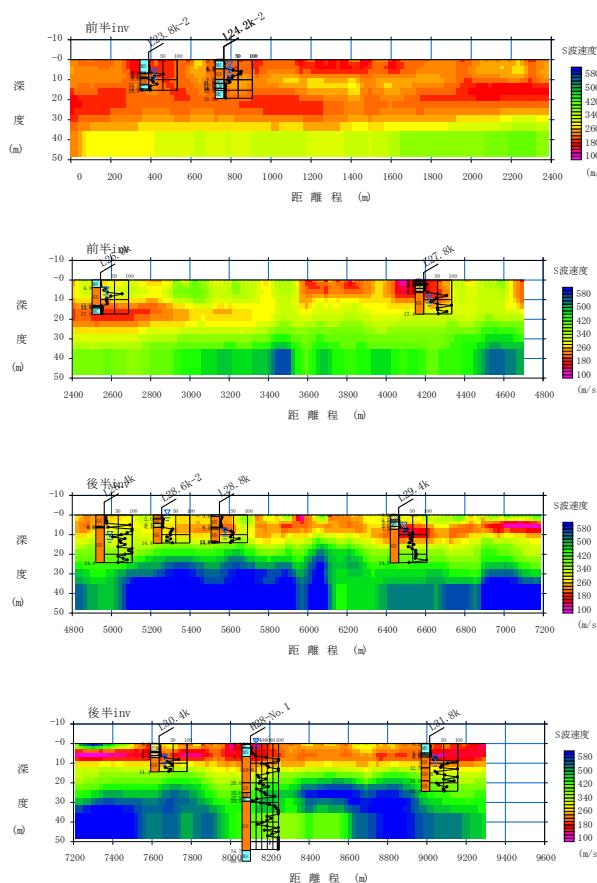


図-8 DAS計測によって推定したS波速度断面
(上から測線0~24km, 2.4km~4.8km,
4.8km~7.2km, 7.2km~9.3km区間)

5. まとめ

河川堤防に設置されている既存の光ケーブルの空き芯を用いたDAS計測の実証試験を行い、常時微動を用いた解析によってS波速度構造が推定可能なことを示した。S波速度構造が推定できれば、ボーリングデータとあわせて概略的な土質構造が推定できると考えられる。この結果は、地盤沈下や液状化の対策範囲の把握といった目的には有用といえる。しかしながら、堤防自体の管理のためには、もう少し高い分解能のS波速度構造を求めることが必要であり、ゲージ長を短くした計測が必要である。一方で、ゲージ長を短くすると高周波数部分でのデータの品質が低下することが予想される。今後、高周波部分での解析精度の向上に向けて、ゲージ長とサンプリング間隔の最適化についての検討が必要と考えている。

このように堤防の維持管理においてDAS計測の実用化にはまだ課題が残るが、目視による点検と併用することで、点検内容の精査や見逃しの防止につながると期待できる。また定期点検のみならず、地震等の災害発生時に堤防の異常を早期に検知する手段としても有効と考えられる。本研究で示したDAS計測は既設の光ケーブルの空芯(ダークファイバ)を活用できることが大きな利点であり、初期投資のコストを抑えられるとともに、調査にかかる時間も大幅に削減できる。当面は目視点検の補助的手段としての運用が想定されるが、条件の検討と試験データの蓄積が進めば解析精度が向上し、将来的には維持管理の高度化および効率化が期待できると考える。

謝辞：本論文の執筆にあたり、応用地質株式会社様ならびに防災科学技術研究所様には多くのデータとご助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小西千里, 小川直人, 鈴木晴彦, 櫻井健, 内藤昌平, 中村洋光, 藤原広行: 光ファイバDAS計測による河川堤防沿いの土質構造の推定, 第12回河川堤防技術シンポジウム, p.49-52, 2025
- 2) 中島康介, 藤岡一頼, 上野慎也, 八嶋厚, 山崎充, 沢田和秀, 村田芳信, 小西千里, 林宏一, 町島祐一, 交通規制を伴わない高速道路土構造物ヘルスモニタリングへの挑戦, 土木学会論文集, Vol. 80, No.5, 23-00249, 2024