

光ファイバセンサを用いた モニタリング技術開発について

永谷 英基¹

¹鹿島建設株式会社 技術研究所 土質・地盤グループ

新たな光ファイバセンシング技術が開発され、性能が大きく向上した結果、インフラセンシング分野に大きな変化が起こりつつある。見えなかったところを“見える化”することによって、老朽化したインフラの増大や頻発する自然災害、少子高齢化などの社会課題に対するインフラ維持管理の課題解決を目指し、光ファイバセンサを用いた新たなインフラモニタリングの技術開発について報告する。

キーワード：光ファイバセンシング，レイリー計測，ブリルアン計測，DAS

1. はじめに

分布型光ファイバ計測技術は、光ファイバセンサケーブルを構造物と一体化するように実装することで、目に見えないひずみ、温度、振動を10km以上の分布で計測（見える化）でき（図-1）、長期にわたって計測可能な耐久性も有する。これまでインフラへの実装においては、精度や適用範囲で制約が多かったが、近年のコンピューター処理速度や光学センサの進歩、並びに実装面での技術革新により、その適用範囲は拡大しつつある。光ファイバの素材はガラス製で寿命が長く、通信用と同じものを活用でき安価である。また、構造物計測用の光ファイバを通信用の光ファイバに直接接続することも可能であり、遠隔からの監視やデータ収集を、既存通信網を駆使して行うこともできる（図-2）。インフラに光ファイバ網が張り巡らされれば、あたかも構造物に神経を張り巡らせバイタル化したインフラに例えることができ、構造物の品質の常時見える化、構造物の劣化や地震時の損傷の場所と度合いの即時特定、ひいては構造物の維持管理の効率化に貢献することができる。

以上を踏まえ、分布型光ファイバ計測技術を施工管理から維持管理まで一気通貫に活用し、次世代のライフタイム管理（図-3）や防災・減災・BCP、さらには計測データを用いた新たなサービスを確立すべく、実工事や構造物へ適用してきた¹⁾。本報では、インフラ構造物の維持管理への適用に向けた技術開発の一端を紹介する。

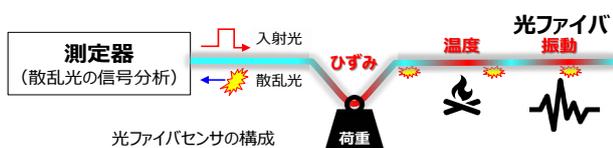


図-1 分布型光ファイバ計測イメージ

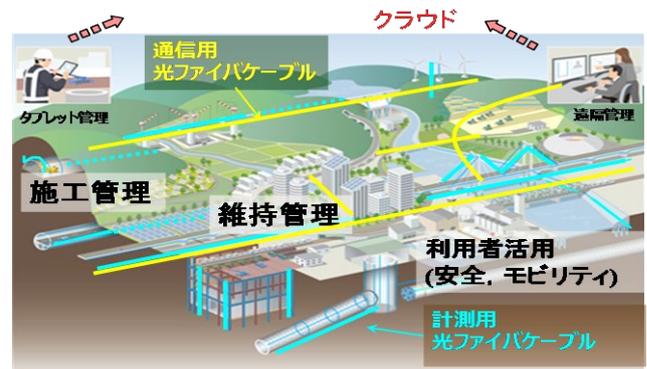


図-2 インフラ展開イメージ

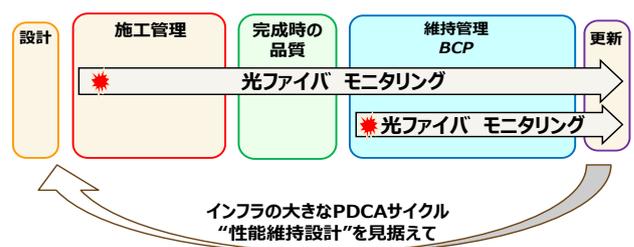


図-3 光ファイバ計測によるライフタイム管理

2. 分布型光ファイバ計測技術

分布型光ファイバ計測は、光を入射したときに生じる光ファイバ内の散乱光を利用している。散乱光は、通信用途においては光の透過量が減じる原因であるが、散乱箇所の情報を含むため計測用途においては有益である。これまでのインフラモニタリングでは、主にBOTDR（Brillouin Optical Time Domain Reflectometer）に代表されるブリルアン散乱光を用いた方式が使われてきた。ブリル

アン散乱光は、光ファイバを構成する分子振動に起因し、その光強度は極めて弱い。そのため、ひずみ計測精度は±数10 μ 程度であり、散乱光の観測を繰り返して加算平均する必要がある計測時間がかかる。

一方、今回新たに実用化したレイリー散乱光を用いた計測方式において、レイリー散乱は光ファイバの密度などの不均質性によって生じ、その光強度は非常に強い。そのため、ひずみ計測精度は1 μ 以下で達成可能であり、専用のソフトウェアと昨今のコンピュータを用いれば短時間での計測も達成できる。レイリー散乱を利用した計測方式のなかでも、インフラのモニタリングに必要な数100m～数kmの長距離計測可能なTW-COTDR (Tunable-Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry) 方式を基に、同時に複数本の光ファイバを数秒で計測可能な計測装置を開発し、施工現場におけるリアルタイム計測が可能となった。図-4に光ファイバの計測原理(利用する散乱光)、図-5にレイリー計測の精度検証結果を示す。

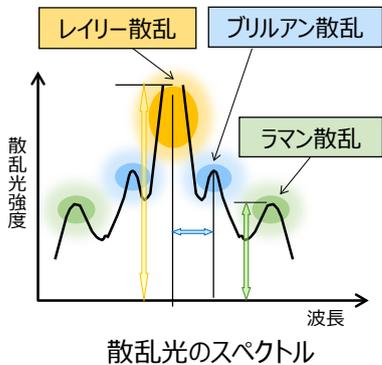


図4 光ファイバの計測原理 (利用する散乱光)

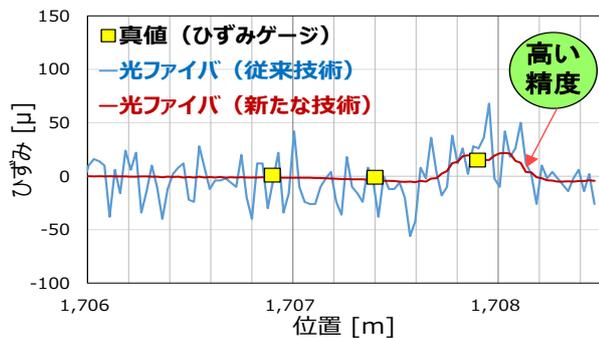


図5 レイリー計測の精度検証

また、近年注目を浴びているのが振動を分布計測するDAS (Distributed Acoustic Sensing) である。計測器から光ファイバにパルス光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、各位置の計測信号に対して1～2.5kHz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。図-6にDASの振動計測原理を示す。

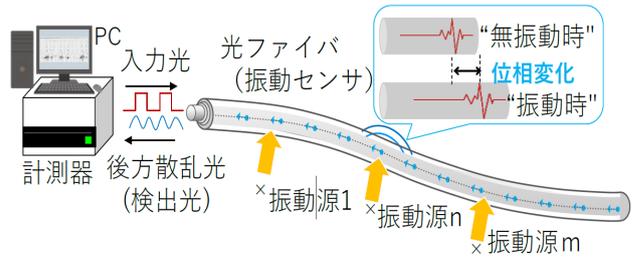


図6 振動計測の原理

3. 山岳トンネルへの適用

(1) 概要

山岳トンネルでは建設完了後に地山劣化による変状が発生することがある。このような変状は路盤の隆起など顕著な異常により顕在化することが多く、供用後の調査や計測では、変状や応力状況の正確な評価ができなかった。これに対し、長期耐久性に優れる光ファイバを利用することで、覆工やインバートの応力状態を建設直後からモニタリングすることが可能となる。これにより、変状調査の合理化と、正確な情報に基づいた合理的な設計と対策工が可能となると考えられる。

(2) 実装方法

これまでにトンネルの維持管理を目的として、光ファイバを実装した事例はほとんどなく、施工中のトンネルと実規模の模擬トンネルを利用した実証試験を実施した。以下は、国土交通省の建設技術研究開発助成制度 (JPJ000094) 成果の一部である。

建設中のトンネルの覆工およびインバートのコンクリート内の地山側と内空側の2つの深度に光ファイバを設置すれば、軸力と曲げモーメントの発生応力の計測が可能となる。実装試験を建設中の新名神高速道路宇治田原トンネルで実施した。光ファイバは、図-7に示すようにガイドとなる鉄筋を使って正確な位置に設置した。なお、光ファイバの設置は、補強鉄筋の組立てなどの通常作業と並行して実施できるため、工事工程は阻害しない。

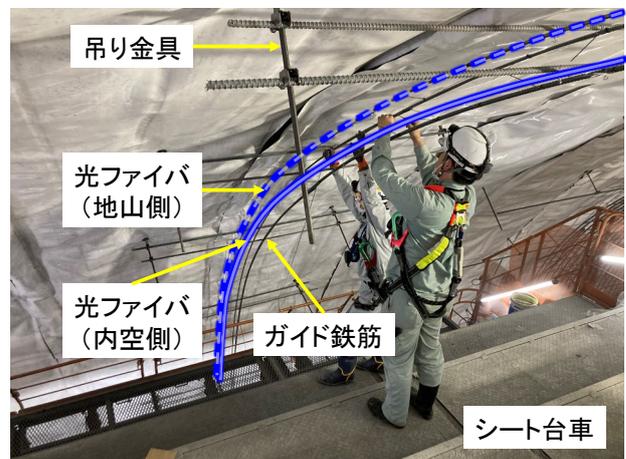


図7 覆工トンネルへの設置状況

(3) 計測実績

既設トンネルの覆工表面への実装試験を実物大の模擬トンネル（施工技術総合研究所）で実施した（図-8）。20mの光ファイバを、高所作業が可能なトンネル点検車を使用して設置し150分で設置を完了した。さらにひずみゲージを天端、肩部2箇所、SL高さ2箇所に設置し、トンネル上に土のうを使って最大47tの载荷を行った。図-9に47tを载荷した時の計測結果を示す。この結果、全体に圧縮ひずみが生じており、肩部に最大の圧縮が発生している。このような傾向は、数値解析で確認できるモードと一致し、計測値はひずみゲージと同等であった。また、建設中に盤ぶくれが顕在化する場合、底板岩盤に地中変位計が設置される場合がある。従来の地中変位計は限られた深度の変位を数mピッチで計測するが、光ファイバでは数cm間隔で地盤の変位の把握が可能となる。また、長期耐久性に優れているため、供用後も残置し、維持管理時のモニタリングに利用することが可能である。

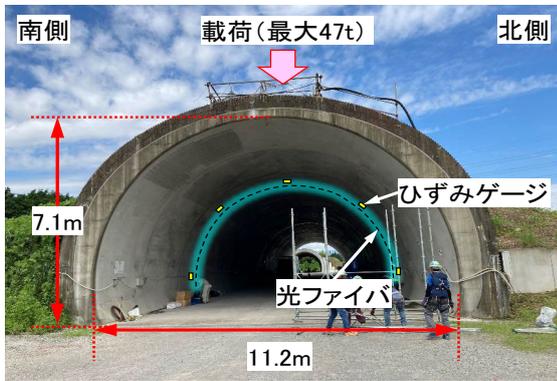


図-8 覆工トンネルへの設置状況

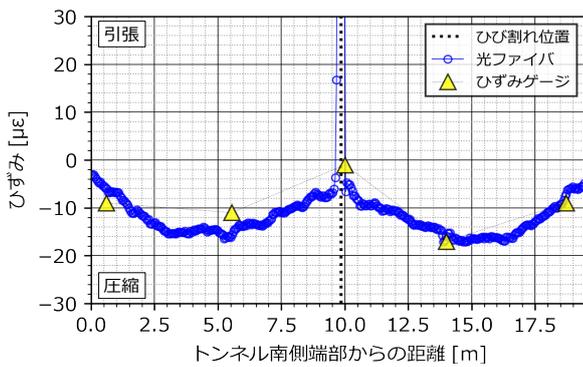


図-9 覆工トンネルへの設置状況

(4) 変状対策及び補強設計の合理化

一般に、変状が発生した山岳トンネルでは、変状後の計測結果や設計時との差等に基づき、覆工やインバートの発生応力を予測解析し補強設計を実施する。これについて、前述の図-7のように光ファイバを設置しておけば、常時応力と余剰耐力を把握し、補強が必要とされた時点で、計測値に基く合理的な設計が可能となる。維持管理時に外力変化に起因する変状が懸念されるものとしては以下のようなケースが考えられ、光ファイバ計測により、

維持管理の効率化が期待できる。

- ①道路トンネルの1期線に変状した箇所2期線建設時
- ②地すべり地形や極端な偏圧が作用する坑口部
- ③トンネル直上で盛土や切土等の地形改変がされる箇所
- ④掘削時にDIIパターン以上の支保構造を要した箇所

4. 河川堤防への適用

(1) 概要

河川堤防は洪水リスク管理に不可欠な社会インフラであり、その役割の重要性と維持管理のために効率的なモニタリング技術が求められている。光ファイバは延長方向に高分解能での計測が可能であり、耐久性が高く安価である。さらに長期にわたる現場計測や長大な建造物の計測に適していることから、河川堤防のモニタリング技術との親和性が高いと考えられる。そこで、防府市を流れる一級河川・佐波川の7.7K～8.0K区間、右岸側堤防で計測実験を行っている（図-10）。

盛土層の土質区分は礫混り砂である。本区間は堤防強化対策区間に指定されており、図-11に示すように、裏腹付けとドレーンの設置、さらに3面をコンクリートブロックで覆う堤防強化工事が実施された。光ファイバは堤防強化工事に合わせて設置し、出水期となる2022年6月から計測を開始した。計測頻度はTW-COTDRでおよそ20分毎、PPP-BOTDAでは1週間毎とした。光ファイバは、温度計測用とひずみ計測用の2種類を堤内側法肩、法中、法尻の3測線、各280m敷設した。その他、水位計と、表面変状計測のためのワイヤレス傾斜計を7.8Kおよび8.0Kの2断面各4か所に設置した。



図-10 佐波川での計測状況

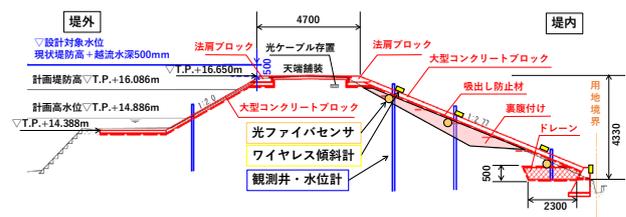


図-11 強化堤防構造と計測配置

(2) 実装方法

計測用の光ファイバは3 測線を集約し、通信用光ファイバを介して計測小屋内のアナライザに接続されている。堤防強化工事に際して光ファイバが断線するリスクを回避するため、堤防の転圧面を基準に、法面から土被り300mm を確保する位置2)に埋設管 (FEP50) を敷設し、コンクリートブロックの設置後に光ファイバを挿入した。光ファイバと堤体の一体性を確保するため、埋設管の内部をセメントベントナイトによって充填した。図-12に堤体内への挿入敷設状況を示す。

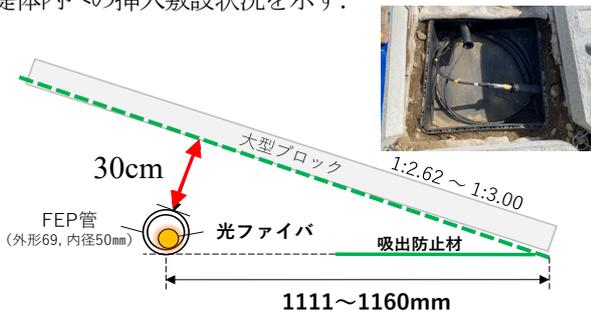


図-12 堤体内への挿入敷設状況

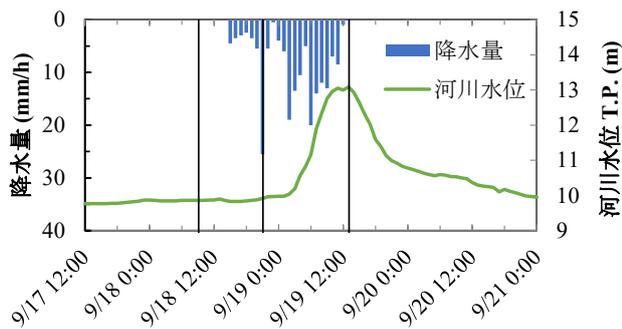


図-13 河川水位と降水量 (R4 年台風 14 号)

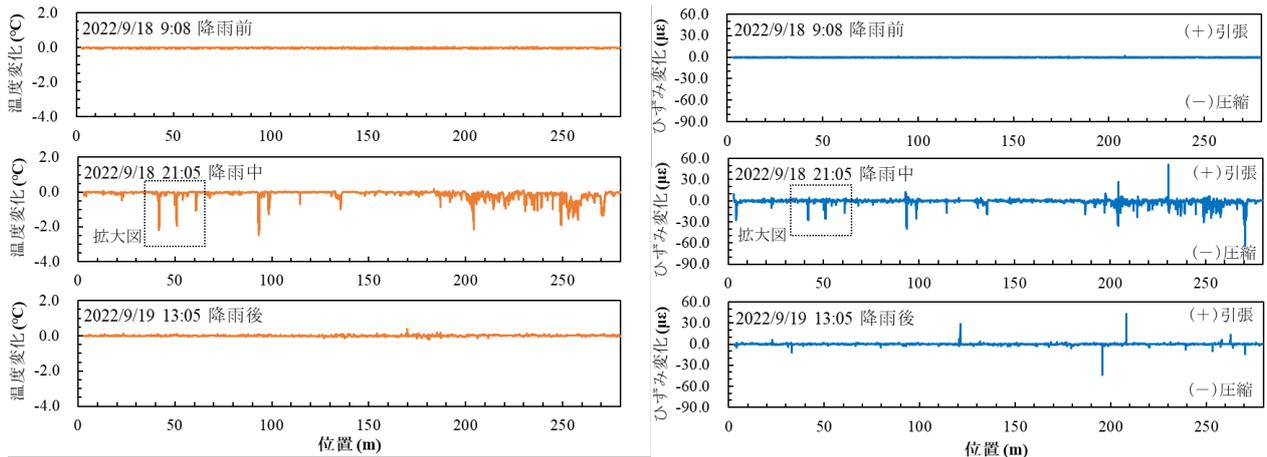


図-14 時間毎の温度とひずみの変化量の分布 (法尻, 左: 温度変化, 右: ひずみ変化)

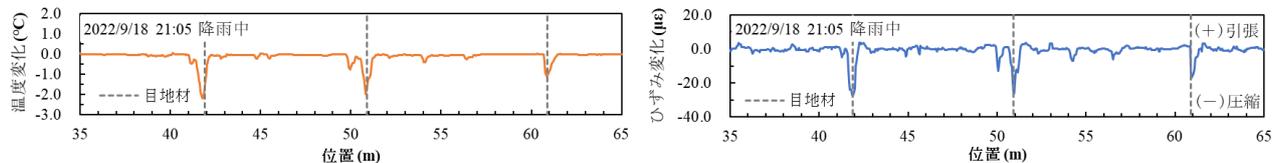


図-15 温度とひずみの変化量の分布 (降雨中, 拡大図)

(3) 計測実績

計測開始以降、本計測区間では目立った変状は生じておらず、PPP-BOTDA の計測結果では有意なひずみを確認できなかった。一方、TW-COTDR による計測では、降雨浸透に伴う局所的な温度変化とひずみ変化を検知できた。R4 年台風14 号 (NANMADOL) 通過時の、佐波川の河川水位と防府市の降水量を図-13に示す。この時、法尻の光ファイバで計測した時間毎の温度変化とひずみ変化の分布を図-14 に示す。ただし縦軸は、測定時刻の20 分前からの変化量を表す。降雨前は温度とひずみの変化は見られないが、降雨中には、最大で -2.2°C の温度低下と $-63\mu\epsilon$ の局所的なひずみの発生を検出した。降雨後にはほとんど変化が見られないことから、降雨を主要因とした温度変化とひずみ変化を検知できたとと言える。降雨時に局所的な変化が生じていた区間の拡大図を図-15 に示す。局所的な温度変化とひずみ変化が生じていた地点は一致しており、さらに、コンクリートブロック間に挿入されている目地材の位置ともほぼ一致していることから、目地材付近から降雨が局所的に浸透し、堤体内の温度変化とひずみ変化を発生させたと考えられる。以上より、堤体内に敷設した光ファイバを用いたTW-COTDR による計測は、降雨浸透による堤体内の温度変化や微小なひずみ変化までも検知できることが明らかとなった。

河川堤防モニタリングへの光ファイバ計測の適用性の検討を目的に、強化堤防での常時計測を行った結果、降雨に伴う堤体内の温度変化と微小なひずみ変化を検知できることが分かったことから、運用方法の最適化や、リスク管理のためのデータ評価手法の確立を進めて行く。

5. 道路（舗装）への適用

(1) 概要

自動車道路の交通状況や路面状態の異常は、道路管理者の定期的なパトロールによる目視確認やカメラ監視、ドライバーの苦情等によって把握しているが、情報の正確性やリアルタイム性に欠けることが課題であった。特に、道路の健全性を評価するためには走行車両の重量測定が有効であるが、トラックスケールなどの車両重量計を道路内に設置するのは困難である。そこで、DASによる振動分布計測を用いた走行車両の重量推定に取り組んでいる。道路構造物は長大な線形構造物であることから、安価で長距離に敷設の可能な光ファイバセンサの親和性は高い。供用中の道路に敷設した光ファイバの計測結果を用いて走行車両重量の推定を試みた。

(2) 実装方法

図-16に道路での計測配置を示す。今回は料金所を始点とした路肩の区画線65mに敷設した光ファイバによるDAS計測で動ひずみを計測した。図-17に示すとおり、の光ファイバを接着剤で区画線上に貼付固定し、表面をテープで防護した。併せて、料金所屋上に取り付けられたカメラで車両の走行状況を確認し、DAS計測データと照合することで走行車種を判定した。

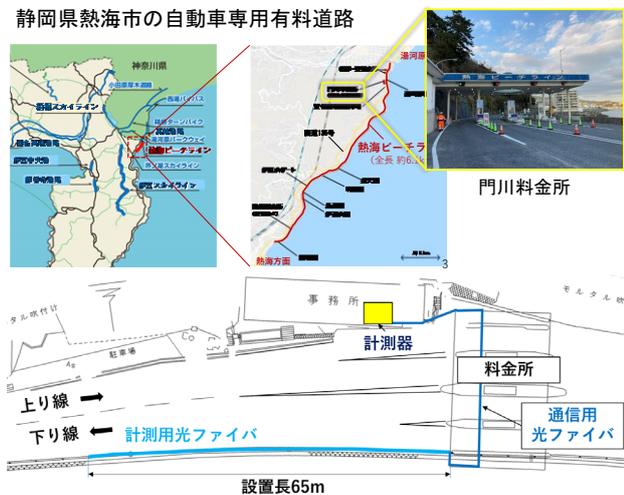


図-16 計測配置（熱海ビーチライン）



図-17 舗装面敷設状況

(3) 計測実績

a) 振動分布による交通流の判定

図-18に車両通行時の振動分布を示す。振動分布の縦軸は料金所からの距離、横軸は時間を示し、光ファイバに作用する動ひずみを2D コンター図で示している。25秒間の計測時間において、距離0~65mにかけて大きな圧縮・引張ひずみが交互に発生する挙動が2回生じており、乗用車2台が連続して走行したことが窺えた。併せて、料金所屋上に取り付けられたカメラ映像によると、光ファイバ貼り付け部付近を乗用車2台が通行したことが確認できた。なお、距離と走行時間から、乗用車の平均走行速度を計算したところ、1台目が時速32km、2台目が時速33kmであった。

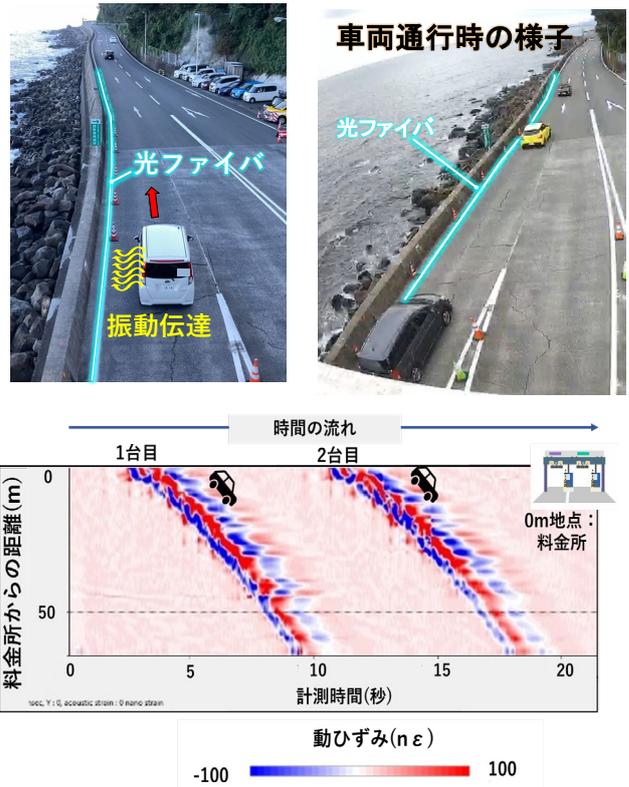


図-18 車両通行時の振動分布

b) 走行車両の重量推定

図-19(上段)に大型車両(車重約10 t)、図-19(下段)にバイク2台(車重約200kg)と乗用車2台(車重約1.6t)が走行した際の料金所からの距離が7m地点における動ひずみの時系列グラフを示す。光ファイバの敷設位置を車両が通行すると動ひずみが圧縮側と引張側に交互に発生し、通過後に徐々に動ひずみの絶対量が小さくなる現象が確認された。動ひずみの振幅で比較すると、大型車は $\pm 1500n\epsilon$ 、バイクは $\pm 200n\epsilon$ 、乗用車は $\pm 600n\epsilon$ であり、車両重量と動ひずみに相関があることが確認できた。

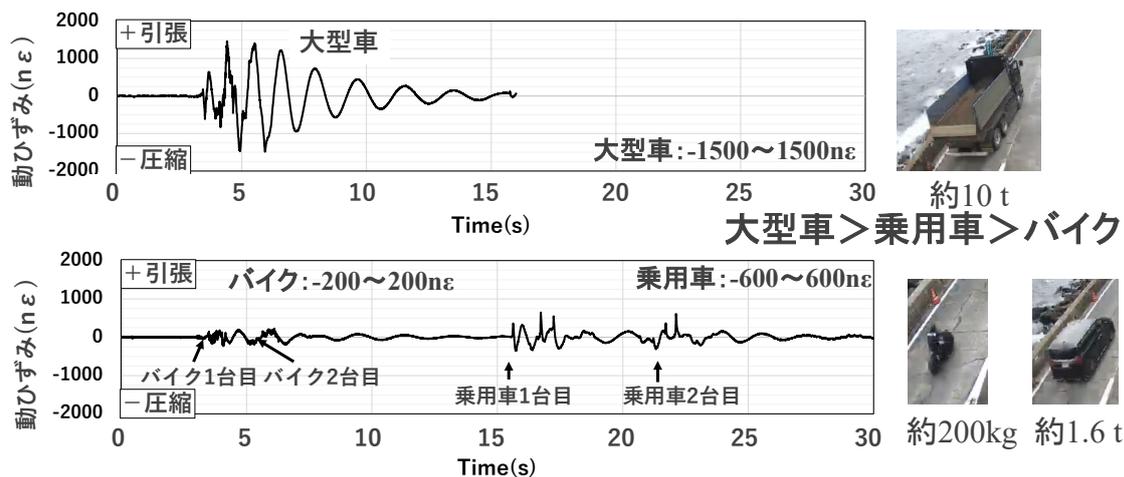


図-19 距離7m地点における動ひずみ時系列グラフ

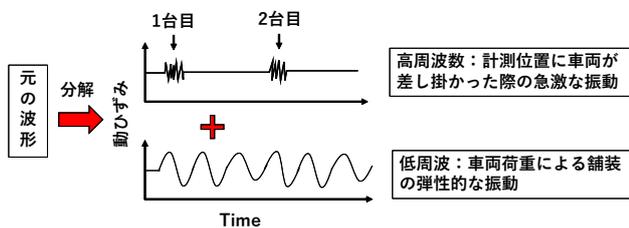


図-20 走行車両判定イメージ

さらに、図-19に示すような同じ車種が続けて走行する場合の車両台数の判別イメージを図-20に示す。2台目の車両が光ファイバ位置に差し掛かる際に発生する急激な振動で発生する周波数の高い波形が、1台目の車両による振動で発生した動ひずみが減衰した波形に重なっていると推察されるため、波形を高周波と低周波に分解することで走行車両台数を判別できる可能性があると考えられる。供用中の道路の区画線上に接着剤と保護テープを用いて光ファイバを簡易的に敷設し、DASによる走行車両の判定を試みたところ、走行車両の交通流、速度、車種に応じた車両重量を評価できた。今後は光ファイバの検知範囲や反対車線を走行する車両から発生する振動の影響など、実際の道路環境を加味した上で、光ファイバを用いた自動車道路監視システムの構築を進めていく。

また、例えば道路に光ファイバを実装すれば、交通状況（交通状態、車種）や道路の状態（凍結等天候による影響）等インフラ利用者にとって有用な情報を常時発信することも可能となる。このように光ファイバは新しいアイデアを駆使した活用が可能であり、インフラの付加価値の増大に貢献する。

6. まとめ

現在、画像計測や3Dレーザスキャンなど、高速、高精度、広範囲で計測可能な“見える化技術”の革新が進みつつあり、インフラ分野でも導入が進んでいる。こうした最新のIT計測技術群の中で、今回報告した「分布型光ファイバ計測技術」は、構造物内部や地盤内部等の“目に見えない部分”を長期間、見える化・定量化”する技術と位置づけられる。この特長を最大限に生かすことにより、光ファイバ計測の進歩は、単に計測技術を効率化するに留まらず、他の技術とも複合しながらインフラ分野の施工管理、維持管理の方法の革新をもたらすものと考えている。また、光ファイバ計測の手法としては、温度、ひずみの高速・高精度計測、DASと呼ばれる振動計測技術があり、その機能性、実用性が高まりつつあり、様々なインフラ構造物で実装して活用できる可能性が大きく広がっている。今後も技術開発を推進しつつ、施工や供用後の維持管理の効率化、スマート化に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 今井ら(2022). 革新的光ファイバ計測による躯体や地盤の見える化, 土木施工, 2022. 5, pp. 90-93.