

河川堤防の変状検知システム実験結果  
(光ファイバによる検知)

令和3年3月

一般財団法人エンジニアリング協会

株式会社レーザック

横河電機株式会社

株式会社物理計測コンサルタント

株式会社ダイヤコンサルタント

## 目 次

1. 背景・目的		1
2. 想定される技術		4
3. 実験の概要		6
4. 提案システムの性能確認結果		
4. 1 振動計測	株式会社レーザック	1 2
4. 2 振動計測	一般財団法人エンジニアリング協会	4 0
4. 3 温度計測	株式会社物理計測コンサルタント	5 1
4. 4 歪計測	横河電機株式会社	6 6
5. まとめ		
5. 1 総合評価		7 9
5. 2 今後の課題と提案		8 3

## 1. 背景・目的

笹子トンネルの事故や河川堤防の決壊事故等、我が国の社会インフラの老朽化を踏まえ政府では、インフラ維持管理に関する次に述べるような施策に取り組んでいる。

ここで提案している「堤防に埋設された光ファイバーを用い、①越水時や堤体破壊時に発生する振動、②堤体に浸入する水温と堤体温度との温度差、③異常個所の歪変化を検知することにより河川堤防の変状を検知するシステム」は、いずれの政策及び長期ビジョンにも合致している。(重要指摘事項に下線)

### 1) インフラ長寿命化計画

社会インフラ老朽化に対する問題意識が高まり、笹子トンネルの事故調査委員会の報告から、適切な維持管理・更新が課題として浮き彫りとなった。今後、建築後50年を経過する社会インフラの割合が急激に増加する。従来、社会インフラの維持管理業務は地方自治体が主体であることが多く、予算、人材、情報共有、作業環境等の課題のため実施上の困難が生じており、早急に対応が必要であることが指摘され、国として府省庁横断の施策として「インフラ長寿命化計画」が平成25年(2013年)11月に決定されるにいたった。

そのインフラ長寿命化計画は、目指すべき姿として3つの柱で構成し、

- ・安全で強靱なインフラシステムの構築
- ・総合的、一体的なインフラマネジメントの実現
- ・メンテナンス産業によるインフラビジネスの競争力強化

としている。

その中で、「これまで、様々な分野において、センサやデータ解析などの個別の要素技術の開発・活用が進展している一方、それらをインフラの維持管理・更新等に活用する取り組みは始まったばかりである。」、「維持管理・更新等に関する取り組みは個別性が高い課題との認識の下、専門分化が進んできた結果、主に施設分野毎、管理者毎に知識と技術が蓄積され、相互の情報共有が十分とは言えない状況にあり、今後、更なる成熟化や体系化が求められている。」と指摘している。

そして、必要施策の方向性として、点検・診断、修繕・更新、基準類の整備、情報基盤の整備と活用、新技術の開発・導入などを示している。

### 2) 日本再興戦略

一方、日本再興戦略において、個別の社会像と実現に向けた取り組み6)の中で、安全で強靱なインフラが低コストで実現されている社会について、「非破壊検査技術等の活用により、公共インフラ等の損傷程度をデータとして把握・蓄積・活用することにより、早期の異常検知により事故を未然に防ぎ、最適な時期に最小限のコストによる補修によってト

タルライフサイクルコストが最小化されている社会を実現する。」としている。同時に、「新技術の安全性・信頼性・経済性も確立しておらず、点検・補修の大半は人によって行われている状況にある。」という認識を示している。そして、「交通情報等公共データのオープン化やビッグデータ化、衛星開発・整備による地理空間情報の充実も課題である。」としている。

### 3) 最後の警告について

そして、国土交通省は「最後の警告—今すぐ本格的なメンテナンスに舵を切れ」7) と題する提言を平成 26 年 (2014 年) 6 月にまとめた。

その中で、「今や、危機のレベルは高進し、危険水域に達している。ある日突然、橋が落ち、犠牲者が発生し、経済社会が大きな打撃を受ける…、そのような事態はいつ起こっても不思議ではないのである。我々は再度、より厳しい言い方で申し上げたい。今すぐ本格的なメンテナンスに舵を切らなければ、近い将来、橋梁の崩落など人命や社会システムに関わる致命的な事態を招くであろう。」と、極めて厳しく強い表現で警告を発している。

さらに、「笹子の警鐘を確かな教訓とし、荒廃するニッポンが始まる前に、一刻も早く本格的なメンテナンス体制を構築しなければならない。そのために国は、道路管理者に対して厳しく点検を義務化し、産学官の予算・人材・技術のリソースをすべて投入する総力戦の体制を構築し、政治、報道機関、世論の理解と支持を得る努力を実行するよう提言する。」とまとめた。

### 4) 防災・減災、国土強靱化のための 5 か年加速化対策

国民の生命と財産を守り抜くため、事前防災・減災の考え方にに基づき、強くてしなやかな国をつくるための国土強靱化(ナショナル・レジリエンス)に関し、関係府省庁が情報交換・意見交換を行い、連携を図るとともに、総合的な施策を検討・推進するため、国土強靱化の推進に関する関係府省庁連絡会議が開催されている。

直近では、国土強靱化年次計画 2021 の策定方針が令和 3 年 1 月 19 日 (火) に開催され、防災・減災、国土強靱化のための 5 か年加速化対策のフォローアップがうたわれている。

防災・減災、国土強靱化のための 5 か年加速化対策の重点的に取り組むべき対策は、

- ・ 激甚化する風水害や切迫する大規模地震等への対策
- ・ 予防保全型インフラメンテナンスへの転換に向けた老朽化対策

である。同時に、この対策を効率的に進めるためのデジタル化等の推進として、

- ・ 国土強靱化に関する施策のデジタル化
- ・ 災害関連情報の予測、収集・集積・伝達の高度化

となっている。

このような背景を受け、ここで提案した河川堤防変状検知システムが国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室の求める技術要件を満足すれば政策的インパクトは大きく、

国家プロジェクト等として取組むべきであると考える。

堤防に埋設された光ファイバを用いるという観点は今までにない全く新しい発想であり、できるだけお金を掛けずに河川堤防変状検知システムが完成し、氾濫発生に関するリアルタイム情報が得られるのであれば、これまでの維持管理の常識を覆す極めて大きな効果を発現することとなる。

このため、光ファイバを用いて越水や侵食に伴う河川堤防の変状を捉える変状検知システムを提案し、性能確認のための実験を実施するものである。

## 2. 想定される技術

### 1) 技術の概要

堤防に埋設された光ファイバを用い、①越水時や堤体破壊時に発生する振動、②堤体に浸入する水温と堤体温度との温度差、③異常個所の歪変化を検知することにより河川堤防の変状を検知するシステムである。

### 2) 技術の特徴

近年、開発が進み実用化されてきた光ファイバセンシング技術である。この技術は、光ファイバ内に光を入射することにより発生する各種散乱光を検知するものである。散乱光の特性を図 2.1 に示す。

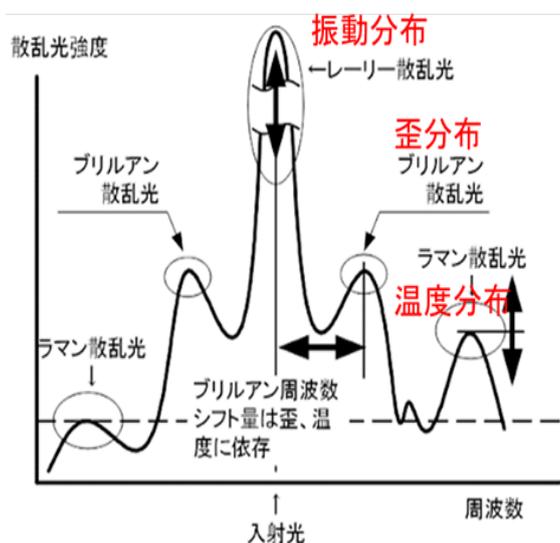


図 2.1 各種散乱光と計測対象

図 2.1 に示す各種散乱光を用いて、①レイリー散乱光：振動計測 (DAS)、②ラマン散乱光：温度計測 (DTS)、③ブリルアン散乱光：歪計測 (BOCDR) を行おうとするシステムである。

レイリー散乱光により振動を計測する DAS は区間内の平常時の振動と洪水などの影響を受けた異常時の振動の変化を検知することができる。

ラマン散乱光により温度を計測する DTS は、河川水温と堤防地温の差異を検知ことができ、堤防内への浸水等が検知できる。

ブリルアン散乱光により歪を計測する BOCDR は、越流や河岸侵食により堤防内の応力が変化した場合、歪としてその変化を検知することができる。

この 3 つの変状検知情報を詳細に解析することにより、河川堤防の変状検知システムが



### 3. 実験の概要

#### 1) 実験の目的

国土技術政策総合研究所水管理・保全局は、堤防の決壊を目視によらず早期に確認することを目的として、越水や侵食に伴う河川堤防の変状を捉える「変状検知システム」を公募し、応募のあった技術のうち選考された技術について、性能確認のための試験を実施することとした。

その変状検知システムに求める技術は、

A 堤防天端高が 10 cm 程度低下することを即時に検出可能なシステム

B 堤防天端が 1m 程度欠損することを即時に検出可能なシステム

としている。

以下に述べる提案した技術が選考されたので、その性能確認を行うものである。

#### 2) 実験計画

当初、越水による深さ 100mm 程度の洗掘が直ちに検出できるように光ファイバを裏法肩に深さ 100mm に配置する実験計画を立案した。

この光ファイバにより、越水による振動が DAS 手法により計測できるので、越水位置を特定することができる。同時に、堤体と河川水とでは数度の温度差があると考えられるのでこれを DTS 手法により温度検知する。さらに、洗掘による堤体の応力開放を BOCDR 手法により歪で検知することとしていた。

具体的には、下図のように提案した。

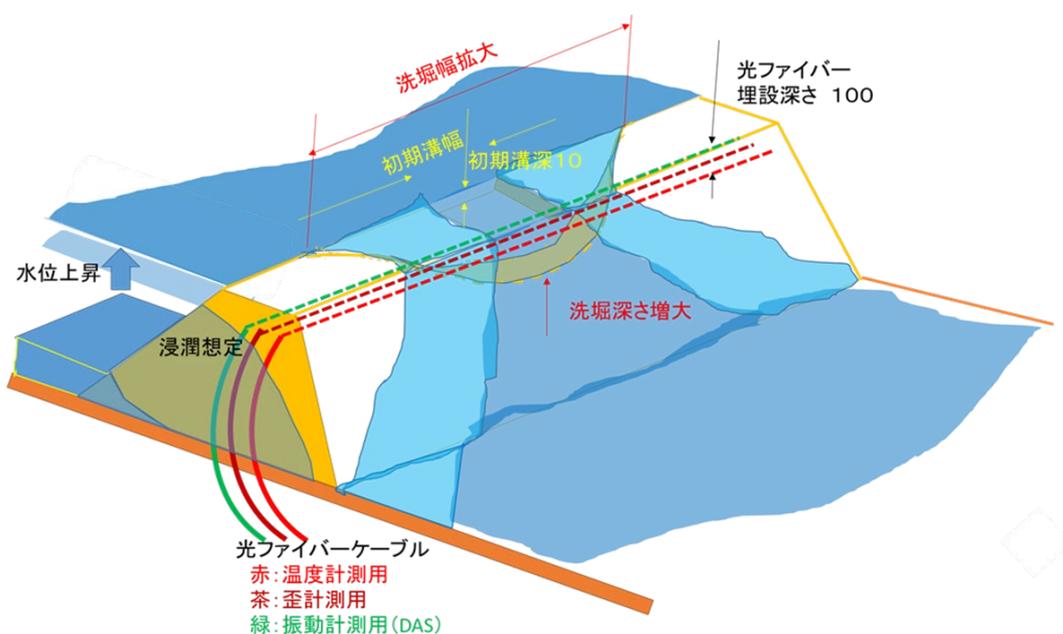


図 3.1 実験計画概念図

堤体天端の不陸により、少し低くなったところから越水すると考えられ、越水により洗掘が始まり、同時に洗掘幅が拡大すると想定される。このため、初期に堤防天端に幅 100 mm、深さ 10 mm の溝を設置する。河川水の水位が上昇し、設置した溝に集中的に河川水が流れ込むので、ここが弱点となり堤防天端の洗掘が始まる。想定される越流による堤体の洗掘状況を図 3.2 に示す。初期の洗掘のイメージを図中オレンジ色の点線で示し、100 mm 深さに埋設した光ファイバに洗掘が進行した場合のイメージを赤色の点線で示し、洗掘がさらに進行し光ファイバが浮き上がる状態のイメージを青色の点線で示した。

温度計測値は、最初堤体の温度のものが水の侵入に伴い河川水の温度まで低下する。温度が一定になったところが水温と一致すると考えられるので、洗掘幅・深さが拡大する状況が温度計測で得られる。

一方、DAS 及び BOCDR の計測値は、静置の状態ではない洗掘による振動や歪の解放を検知し、徐々に時間にずれを生じながら周辺に広がる状態を示すと考えられる。このように異常個所の特定と洗掘幅拡大の状況が検知できると考えた。

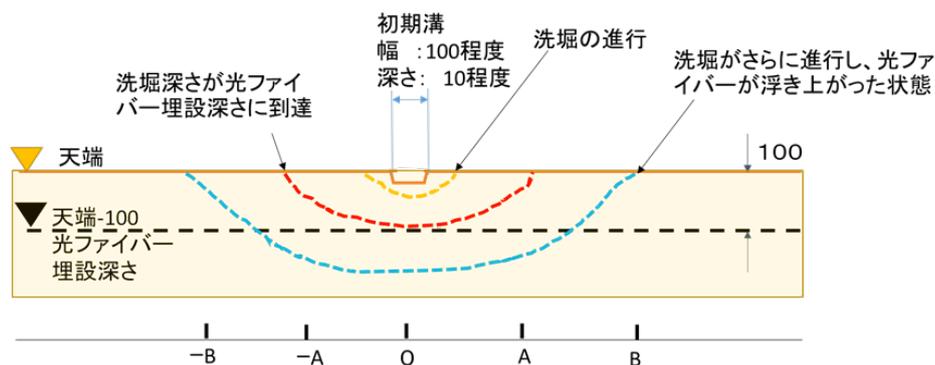


図 3.2 洗掘の進行状況想定図

### 3) 実施日程

選定通知後、当初実施日程は令和 3 年 1 月 18 日～1 月 22 日であったが、コロナ禍の中で非常事態宣言がされ、出張などの対応ができない等の事由で河川研究室に申し込み、次のとおり変更された。

#### 【 越水実験及び河岸侵食実験の日程 】

令和 3 年 2 月 15 日 (月)	準備
令和 3 年 2 月 16 日 (火)	光ファイバ敷設及び計測機器設置
令和 3 年 2 月 17 日 (水)	越水実験 計測
令和 3 年 2 月 18 日 (木)	河岸侵食実験 計測
令和 3 年 2 月 19 日 (金)	撤去

#### 4) 実施概要

実験に当たっての作業実施体制は、次のとおり。

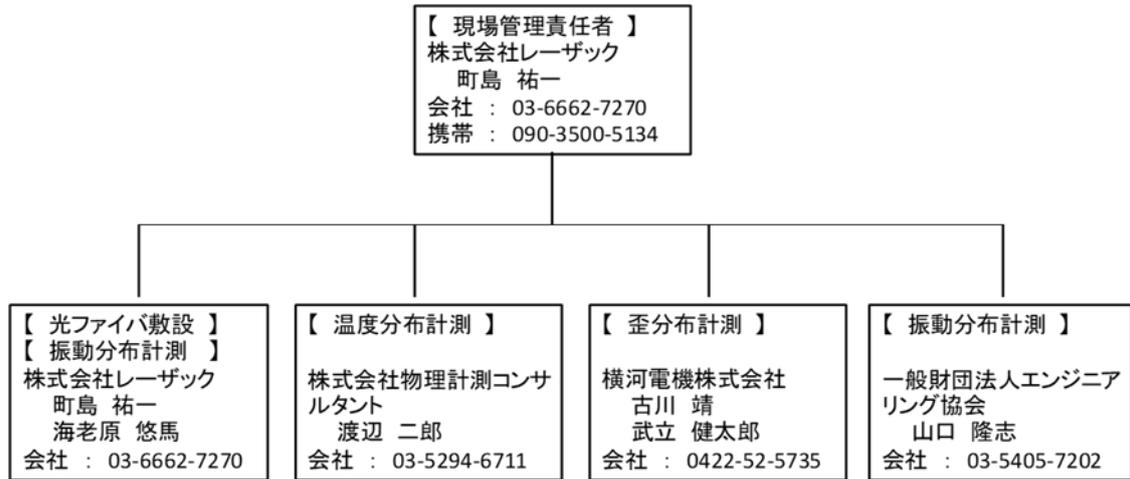


図 3.3 作業実施体制

計測機器の配置として次のとおり。

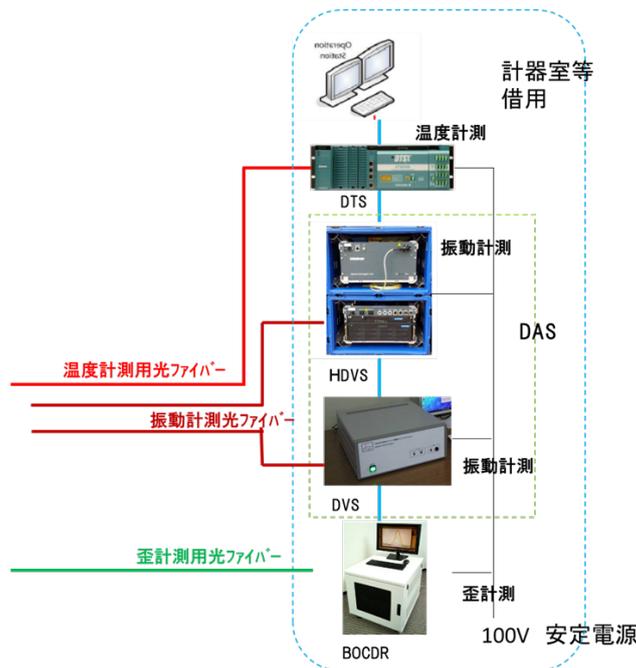


図 3.4 計測機器の配置

光ファイバの配置は図 3.5 のとおり。ここで計測用に 0.9 mm の光ファイバ心線をそのまま地中に埋め込むこととする。光ファイバは、越水実験、河岸侵食実験共に埋設深さ 100 mm とし、図 3.6 に越水実験の光ファイバの埋設状況、図 3.7 に河岸侵食実験の光ファイバの埋設状況を示す。

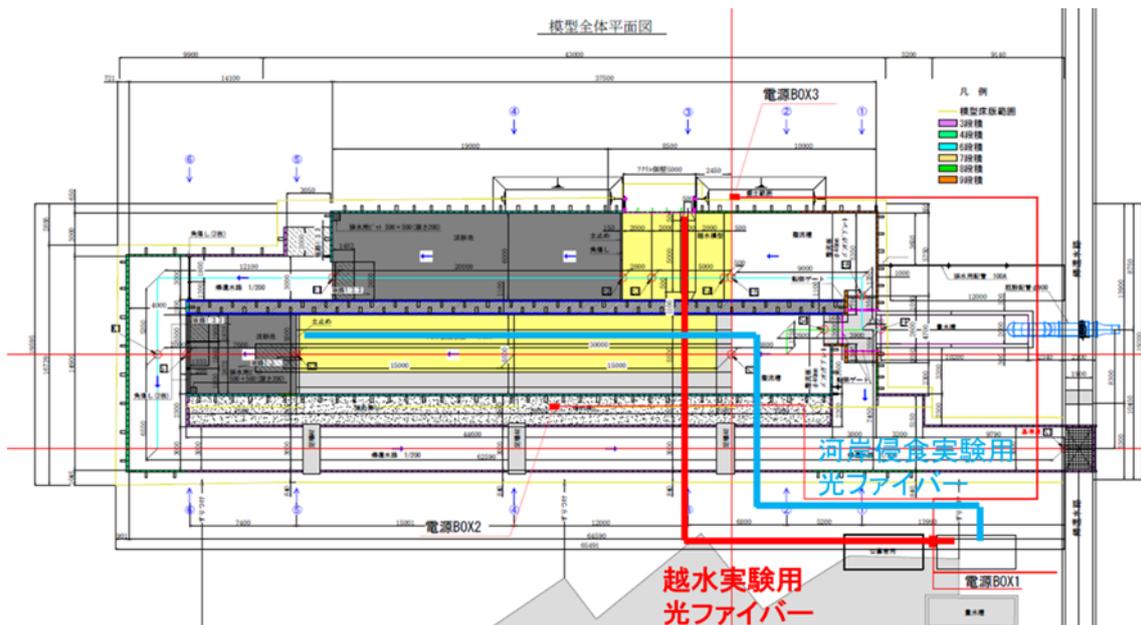


図 3.5 光ファイバの配置図

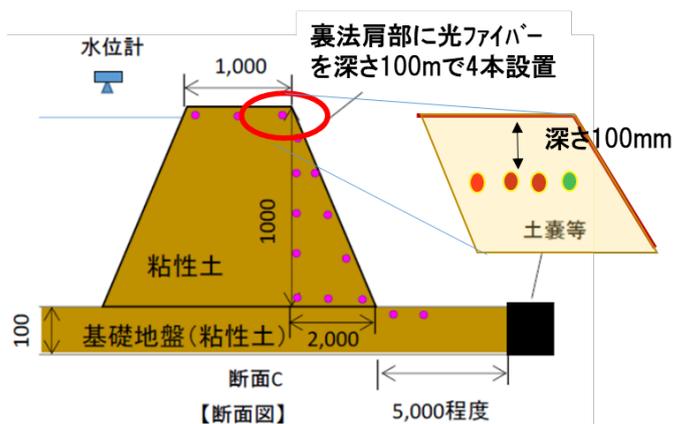


図 3.6 越水実験の光ファイバの埋設状況

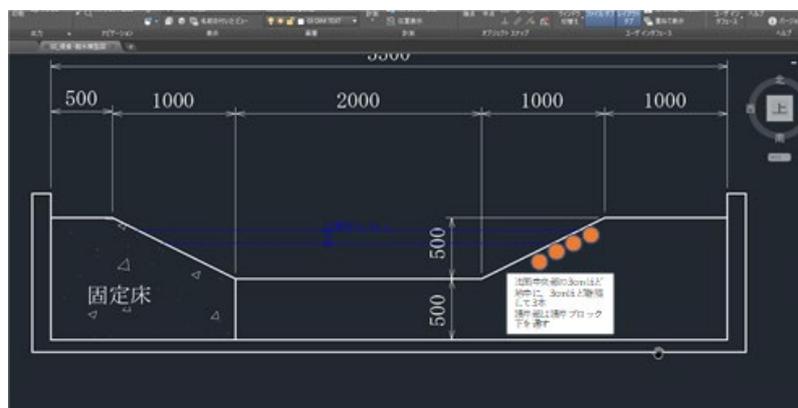


図 3.7 河岸侵食実験の光ファイバの埋設状況

## 5) 実験概要

実験の詳細は、各計測の報告によるが、ここでは実験時の主要なイベントを概要として実験日程に従い記載する。

2月15日 雨 作業ナシ

2月16日 晴 光ファイバ敷設、計測機器設置

2月17日 晴 越水実験

12時 注水開始 12時20分 注水停止 気温8度、水温14度  
12時33分 越水 74L/sec 水位は天端+5cm 30分保持  
隣の河岸侵食実験水路での重機運転中止～13時40分  
ぐらいに再開  
13時03分 流量増 水位は天端+10cm 60分保持  
14時03分 流量増 水位は天端+12.5cm 壊れるまで  
14時17分ごろ 堤防近端部切り崩し 変状検知  
～ 各計測で変状検知  
15時34分 実験終了

2月18日 晴 河岸侵食実験

12時55分頃 注水開始 13時01分オーバーフローし水路へ浸水  
13時15分 一般部の水制設置 即露出 13時17分ファイバ水没  
13時30分頃 橋台・護岸部を除いて全ライン露出・部分水没  
13時45分 一般部の水制撤去、橋台部の水制設置  
14時14分 橋台部の水制撤去、橋台・護岸部の水制設置  
～ 各計測で変状検知

2月19日 撤去

## 6) 実験時の水位の変化

入手した実験時の水位変化を以下に示す。

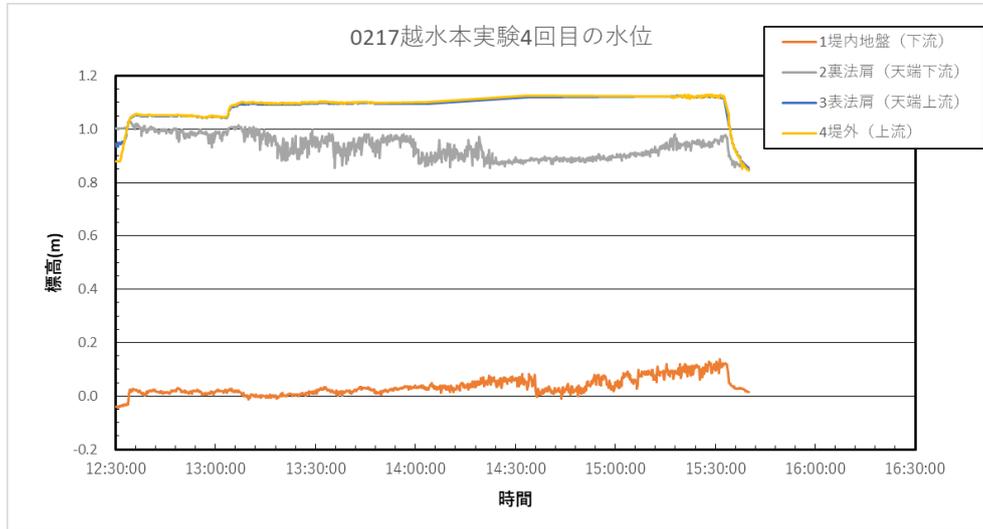


図 3.6 越水実験時の水位変化

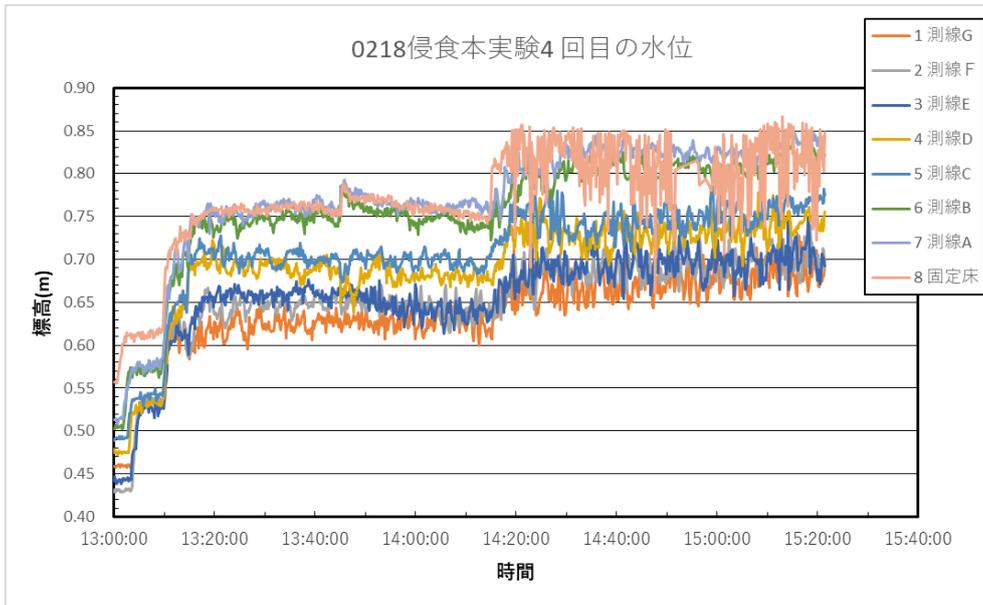


図 3.7 河岸侵食実験の水位変化

#### 4、提案されたシステムの性能の確認結果

##### 4.1 株式会社レーザック（性能検証製品：光ファイバ振動分布センサ）



###### ・システムの概要

1本の光ファイバで長手方向の振動分布が直視でき、振動分布の時間変化をモニタ、記録できる装置である。堤防や河岸の埋設された光ケーブルを用いて、豪雨時等、人やドローンが容易に現地確認できない際にこのシステムを稼働することで、遠隔に現地の状況を推測することができると考えている。

###### ・システムの原理

1本の光ファイバ上に作用する振動を分布的に検出するには、一般にC-OTDR (Coherent-OTDR) という技術を用いる。振動分布検出用途のC-OTDRはDAS (Distributed Acoustic Sensor)、或いはDVS (Distributed Vibration Sensor) とも呼ばれ、パルス光の往復時間で振動の位置を割り出す一方、基準光との干渉法を用いて振動の大きさを求める技術である。振動分布センシングに用いるC-OTDRにはレイリー散乱光の位相変動を検知する方式が一般的である。レイリー散乱光の位相を検知するC-OTDRの構成例を示す(図4.1-1)。

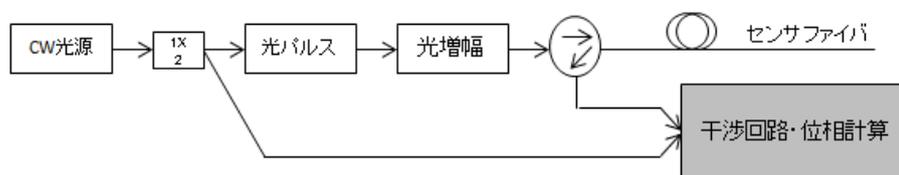


図 4.1-1 位相を検知する C-OTDR 例

###### ・システムの仕様

表4.1-1に当システムの性能及び仕様を示す。

表4.1-1 性能仕様

項目		仕様	備考
測定項目		振動分布測定	単位は速度で表示
光ファイバ	長さ	最大 5Km	
	種類	SM ファイバ	
	光コネクタ	FC/APC	
振動測定 (距離)	測定距離レンジ	5Km	測定レンジにより変わる
	空間サンプル分解能	0.2～5m	
	空間分解能	5m	
振動測定 (時間)	サンプル分解能	1KHz、2KHz、4KHz	近傍の場合
	ノイズフロア	$3.2\mu\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ typical	
波形表示機能	表示波形	3D、2D 振動波形	2D 波形は 3 箇所を同時に表示
	リアルタイム表示	最大 10 秒間を連続表示	
	波形記録時間	最大約 2.8 日	1KHz サンプル、HDD 空き 1TB の場合
電源	電源電圧	AC100V	
	消費電力	30VA	
レーザ安全		クラス 1M	
外形寸法		450X177X430mm	突起物は含まず
質量		11Kg	PC は別
添付品		専用 PC、制御ソフト等	

#### ・技術の特徴

- ① 光ファイバ振動分布センサ DVS は、空間分解能 5m、空間サンプル分解能 20cm、サンプリング速度 1kHz の性能により、区間内の変状を昼夜・天候を問わず、リアルタイムに検知ができる。変状の特定は、変状箇所及び振動の大きさによる。すでに上市されており、種々の現場に試験適用が開始され、計測精度も確認されている。
- ② システム(計測装置および光ファイバセンサケーブル)は耐候性および耐久性を備えている。計測装置は、耐候性および耐久性を備えた屋外キャビネットに備えることで実現する。光通信業界同様、光ケーブルは屋外仕様のものを使うことで長期使用が可能である。ケーブルは概ね 10000 $\mu$  程度までの引張り強度に耐える。

・現場実装で想定する配置方法

- ① 計測装置の配置は、電源供給および通信手段を確保した場所とする。LAN 環境があれば、遠隔操作・監視が可能である。消費電力も 30VA と小さいため、太陽電池及び蓄電池等の自立型電源も可能である。
- ② 光ファイバセンサケーブルは堤体の天端もしくは護岸法面に埋め込むため、河川利用や交通の妨げにならない。
- ③ 維持管理について、屋外用光ファイバセンサケーブルは耐腐食性・耐雷性・耐水性を備えており、メンテナンスフリーである。光ファイバ自体の破断確率は一般的な敷設環境で約 20 年 (100, 000km に 1 箇所割合)とされており、長寿命である。計測装置は半導体レーザ他、電子回路で構成されているため、その寿命は使用環境 (温度湿度) に依存するが、推測 5~10 年レベルである。システムの主な維持管理項目は、レーザの出力光量や基準信号入力による動作の確認である。
- ④ 当該システムの機器購入費は 2500 万円であり、計測は 5km 可能なので、100m 当たり 50 万円程度と見積られる。なお、今回提案した振動、歪、温度を合わせて 300 万円 / 100m 以下の検討は、全体の評価にて整理する。

・実験の計画 (システムの配置、センサー位置 等)

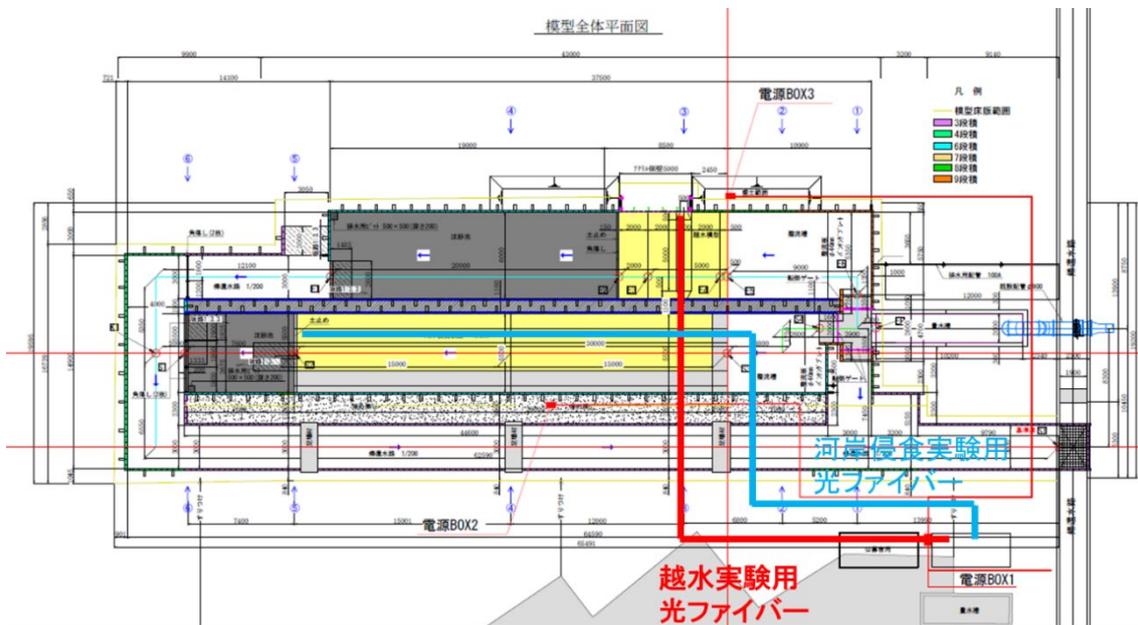


図4.1-1 光ファイバ配置全体概要

・実験での検証結果

試験に際しての計測条件は表 4.1-2 の通りである。越水試験は堤防中央部の 1 箇所、河岸侵食試験は一般部、橋台部、橋台・護岸部の 3 箇所に着目してデータを整理した。

なお、各箇所のデータはその位置を中心とする前後 2.5m（計 5m）の振動値である。越水堤防は幅 6m であったため、堤防中央部は最も的確に堤防の挙動を捉えていると考えられる。データは 5 秒毎の振幅値の標準偏差（ $1\sigma$ ）で整理した。

表 4.1-2 計測条件

項目	仕様
サンプリング速度	1kHz
空間サンプル分解能	0.2m
空間分解能	5m

### ① 越水実験

光ファイバの設置位置を図 4.1-2 に示す。まず図 4.1-3 で、越水試験全体の振動分布をコンターで示す。横軸に時刻、縦軸に光ファイバ上の位置、コンターで振幅の強さである。同図下ではさらに堤防中央部を 0m とした振動分布を示した。単純のため、図 4.1-4 では堤防中央部に限定して振幅の時間経過を示した。14 : 43 頃に光ファイバが露出して直接越流水が当たり始めたが、その時刻より振幅が急上昇しており、明瞭に光ファイバの露出が検知できていることがわかる。

さらに初動検知の状況を確認するために、図 4.1-5 において、図 4.1-4 の堤防中央のデータの縦軸を拡大した。上は生データ、下は明瞭のため 60 秒の移動平均を行ったものである。これによって、以下の事象が検知できていることが確認できた。なお、振幅の分解能は  $0.1\mu\text{m/s}$  未満であるため、流量増加に伴う振幅の増加も捉えられていると考える。

12 : 00 頃	注水中の振動
12 : 33 頃	堤防を越流開始（この時の流量、天端上 5cm 目安）
13 : 03 頃	流量増加（天端上 10cm 目安）、振幅で $1\mu\text{m/s}$ の増加
14 : 03 頃	流量増加（天端上 12.5cm 目安）、振幅で $0.8\mu\text{m/s}$ の増加
13 : 42~14 : 00 頃	隣接する侵食試験部での重機運転音が混入
14 : 23 頃	人為的な崩落促進作業による振動
14 : 43 頃	光ファイバ露出

実際のイベントとの照合のため、上記の時刻の画像を図 4.1-6~図 4.1-9 に整理した。

次に、図 4.1-10 で堤防中央部のデータに FFT 処理を施し、周波数の強さをコンターで整理した。水流による周波数は 24Hz 付近にピークがあることがわかる。水流増加によって振幅が増えても、この周波数は変化しなかった。但し、14 : 43 頃から直接光ファイバが水流に

暴露されると、ほぼ全周波数帯域にまたがる広帯域な振動になっていることがわかる。

13:42~14:00 頃の間、隣接する侵食試験部で重機が稼働し、運転音が混入したため、稼働停止を依頼した。その際の重機音の特徴周波数を確認するために、図 4.1-10 のデータ縦軸を拡大したところ（図 4.1-11）、19Hz と 29Hz 付近にピークを持つ振動が確認できた。

水流時の特徴周波数（24Hz）と重機稼働時の特徴周波数（19Hz と 29Hz）は異なるものの、比較的近い周波数帯域であり、単純な分離は難しいが、図 4.1-12 に示す通り、波形の形状が異なるため（重機音は突発的な波形）、機械学習のようなツールが有効である可能性がある。

また、14:23 頃より堤防を人為的に壊すために棒で突く作業を行ったが、その際の波形の例を図 4.1-13 に示す。水流の特徴周波数（21, 25Hz）と作業振動の特徴周波数（21.5Hz と 25Hz）はほぼ同様の周波数であり、単純な分離は難しいが重機音同様、波形の形状から機械学習のようなツールが有効である可能性がある。

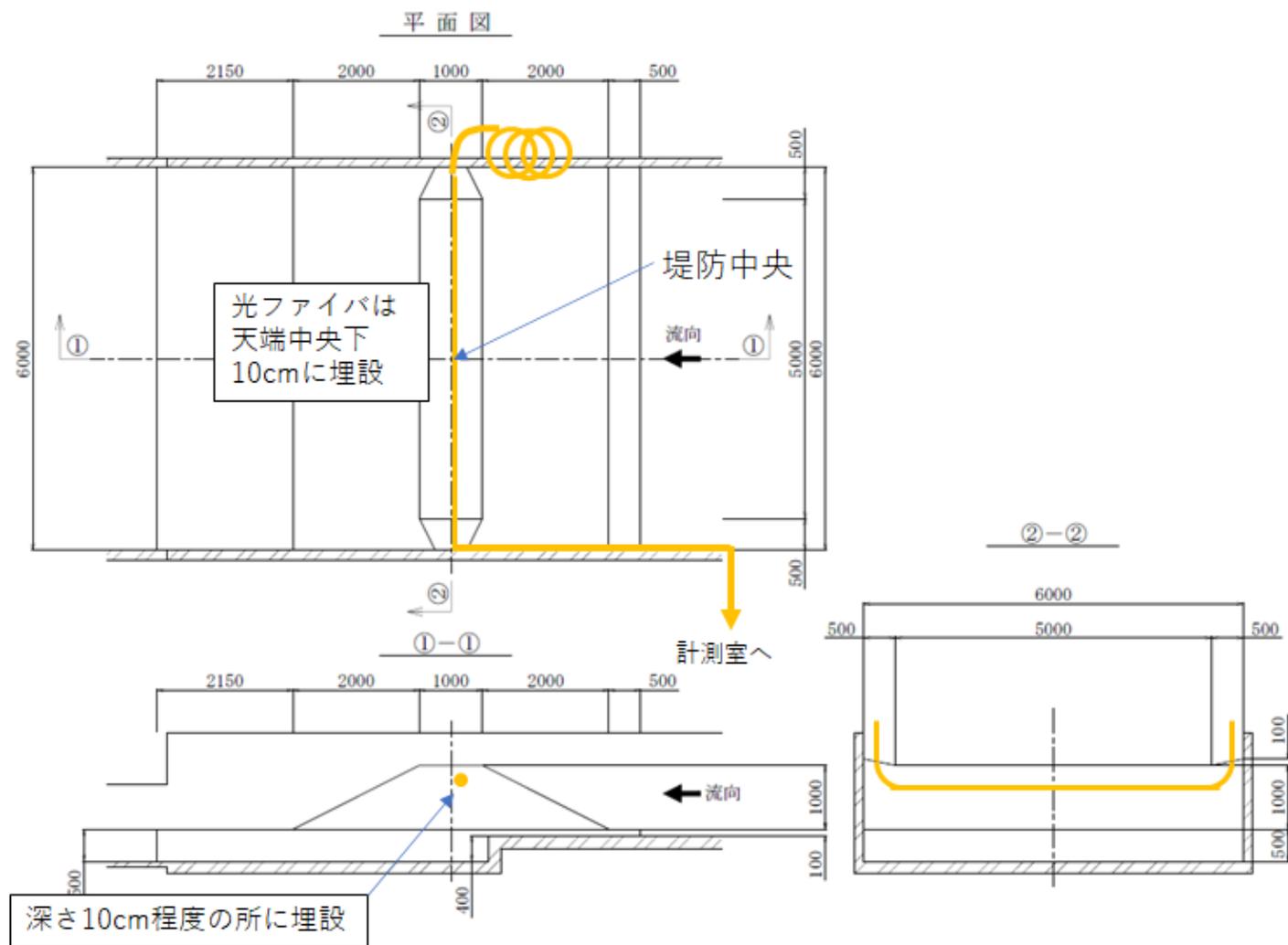


図4.1-2 光ファイバの設置位置

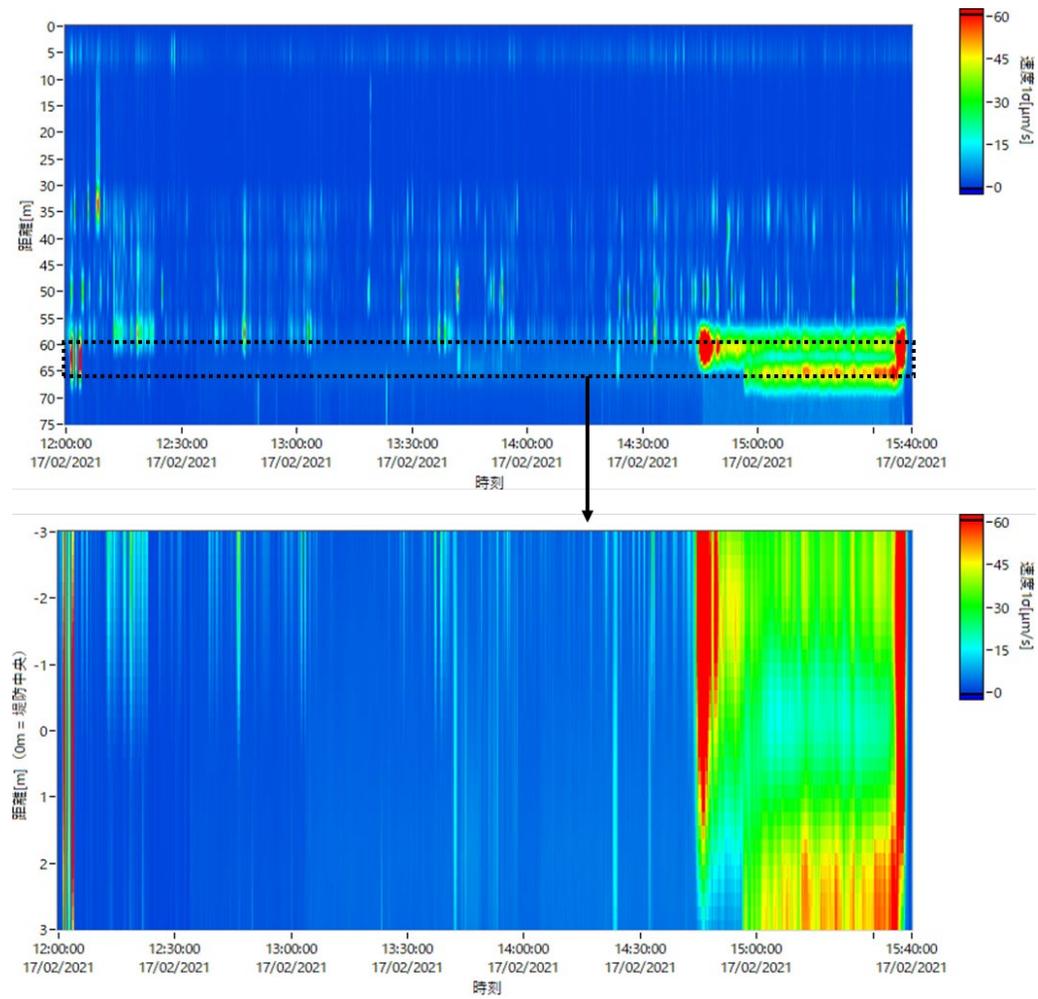


図4.1-3 越水試験の振動分布 測定全長（上）堤防部（下）

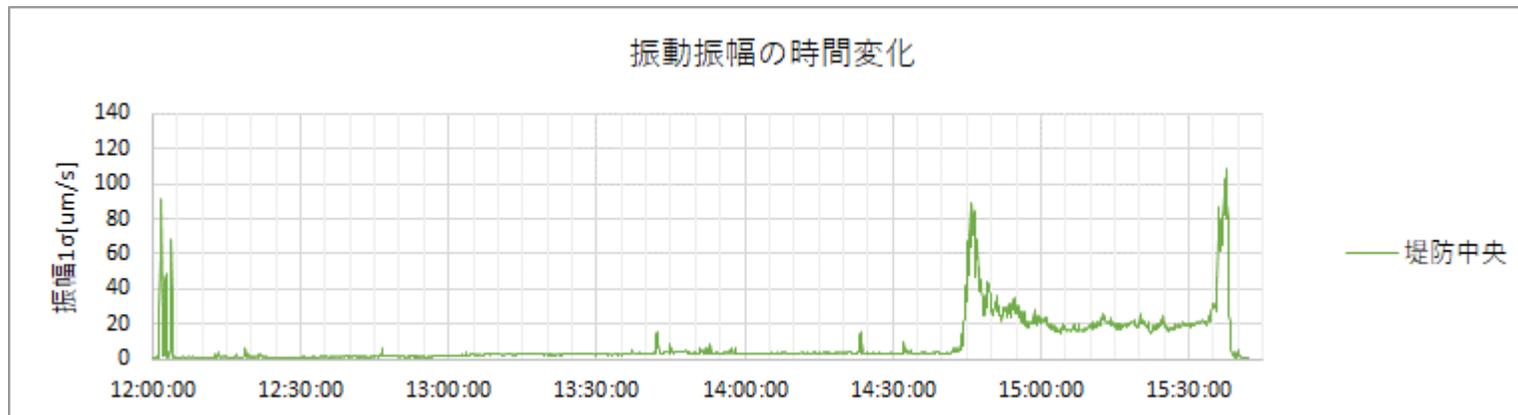


図4.1-4 越水試験\_全経過時間のデータ

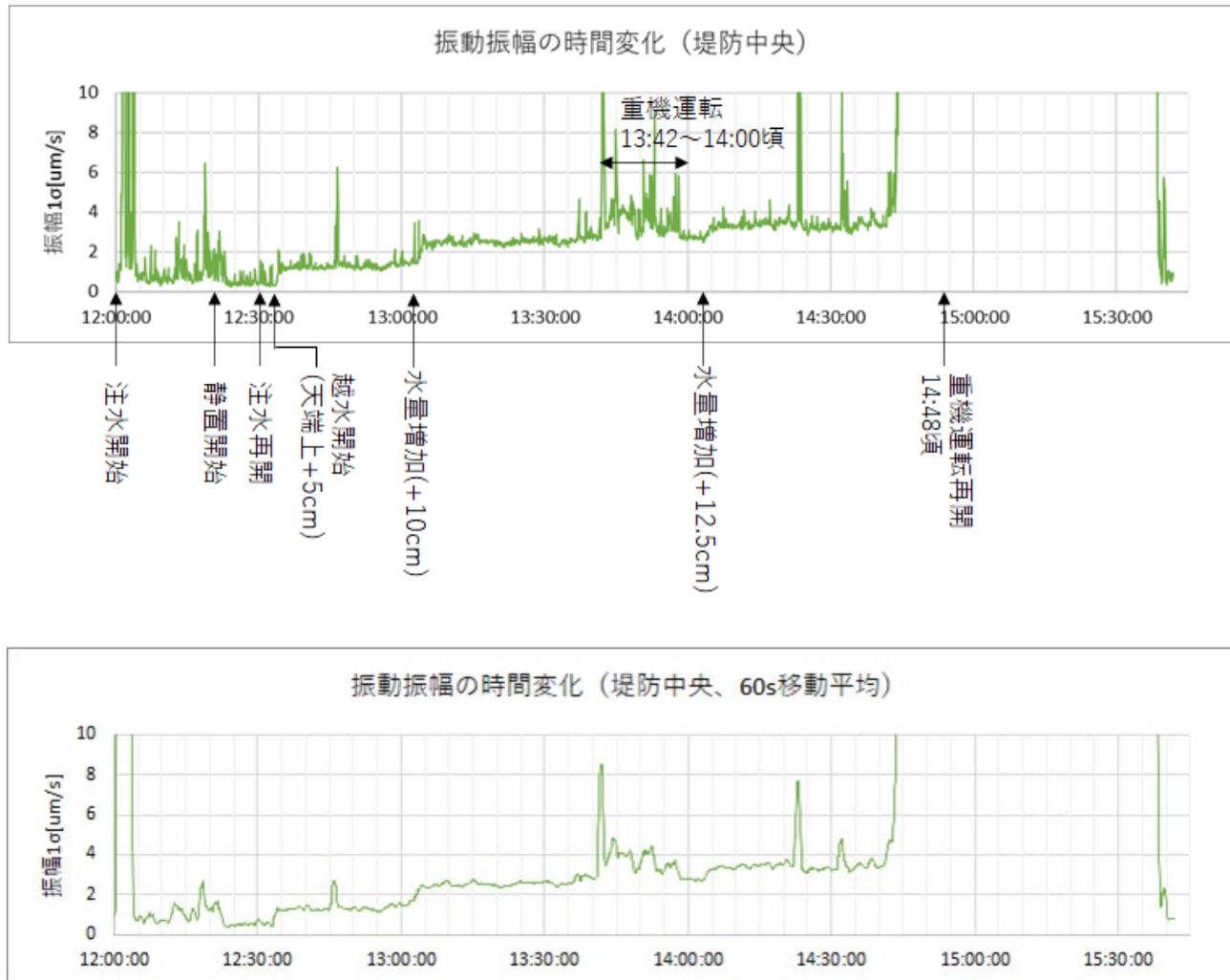


図4.1-5 越水試験\_図4.1-4の縦軸拡大 (全経過時間、上：生データ、下：60秒移動平均)



図4.1-6 越流開始

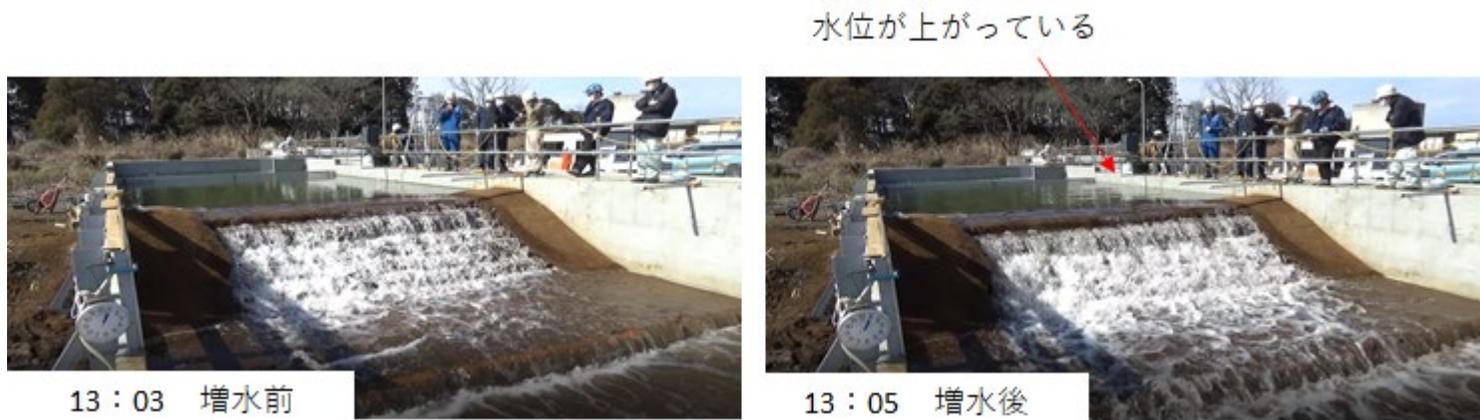


図4.1-7 流量増加前後



14 : 23

図4.1-8 堤防の崩落作業



同時刻頃に天端上から撮影した画像（うっすらと黄色い光ファイバが見える）

14 : 43

図4.1-9 光ファイバの露出

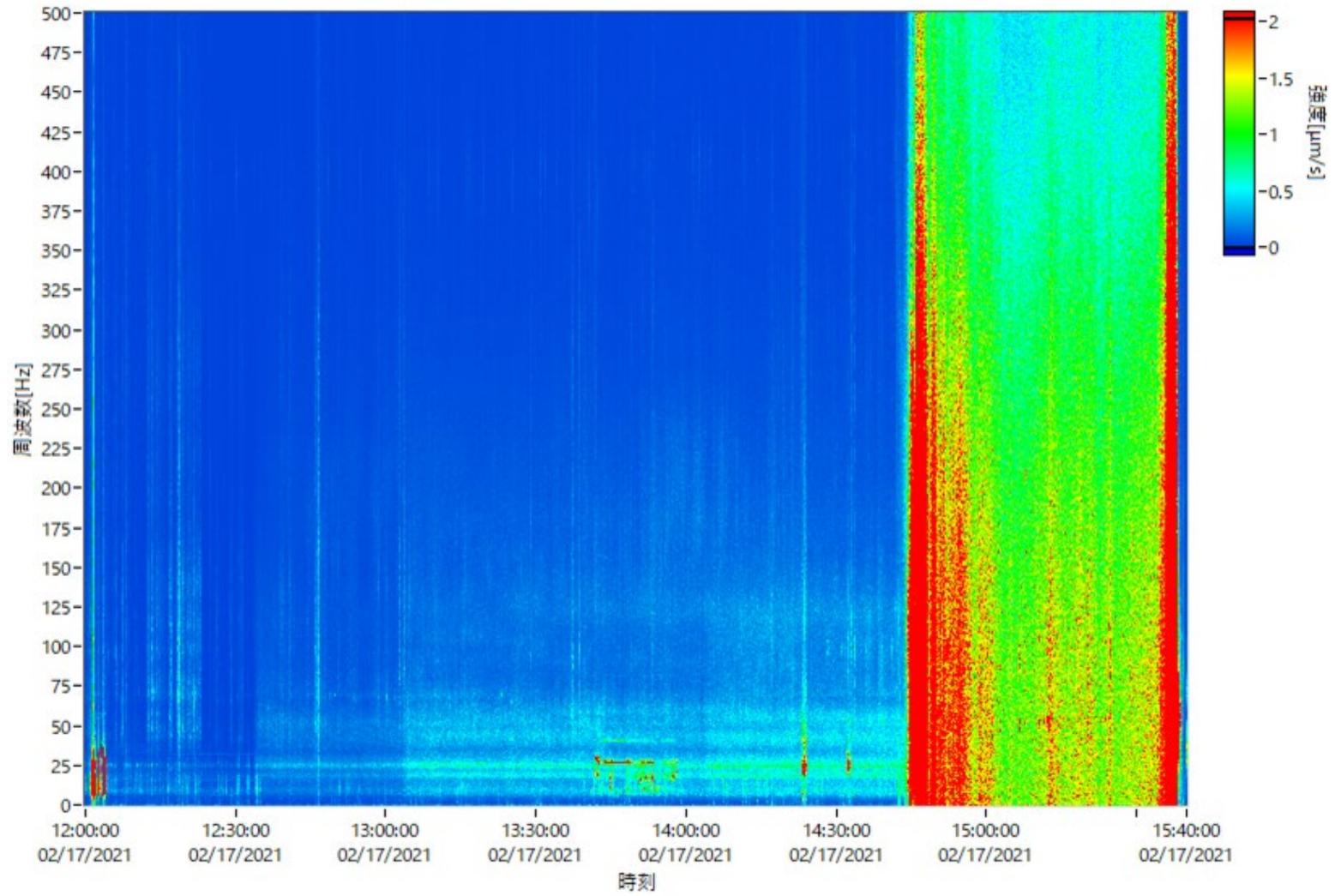


図4.1-10 越水試験\_周波数の挙動

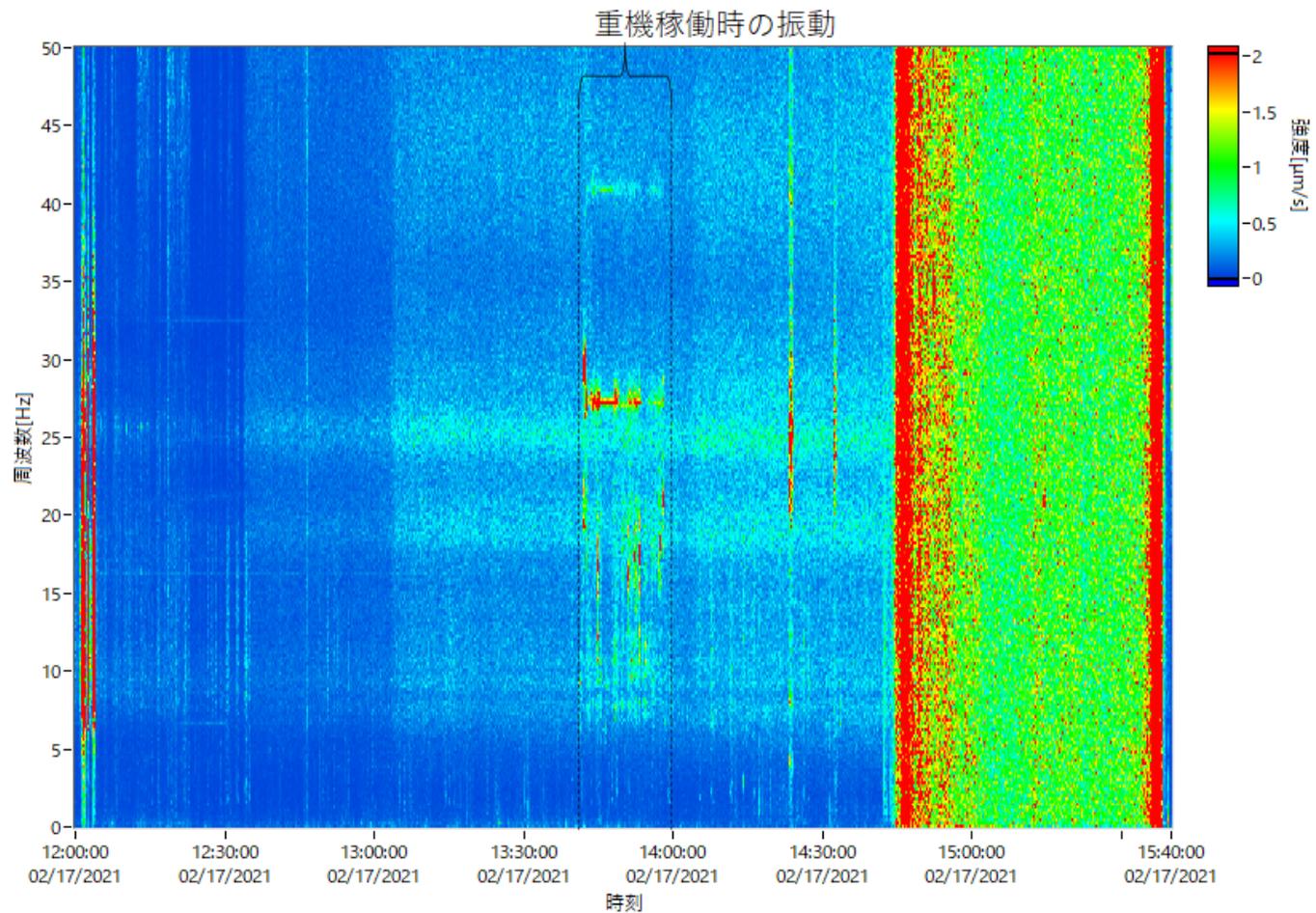


図4.1-11 越水試験\_図4.1-7の縦軸拡大

2/17 13:42

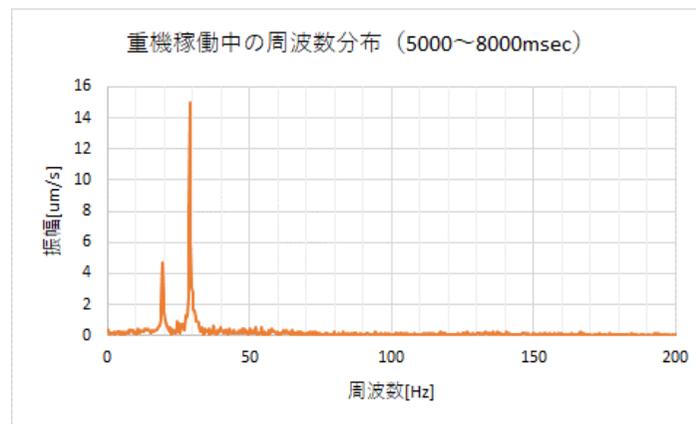
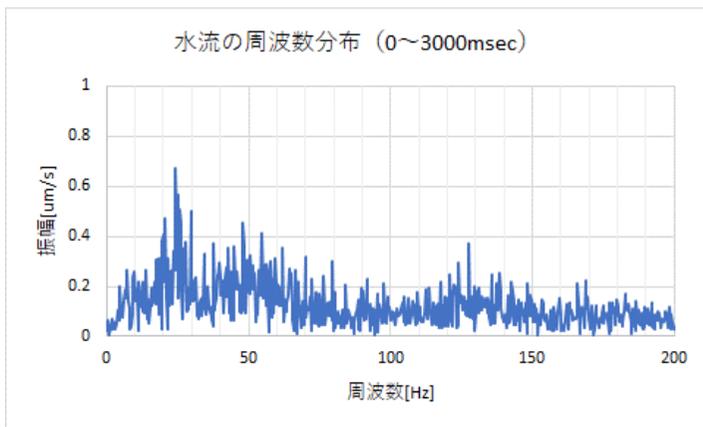
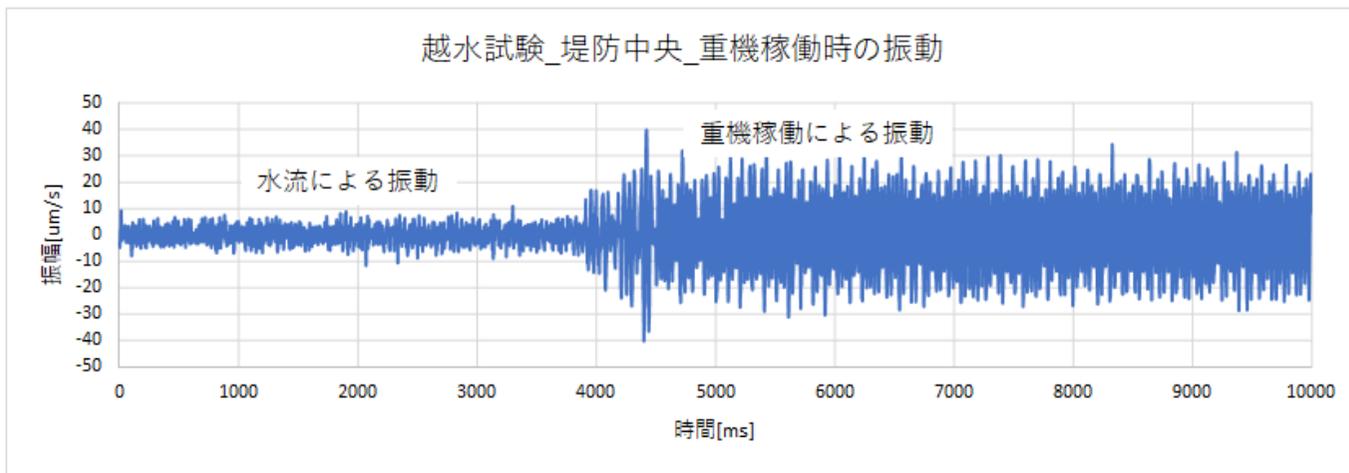


図4.1-12 越水試験\_重機稼働時のノイズ波形例

2/17 14:23

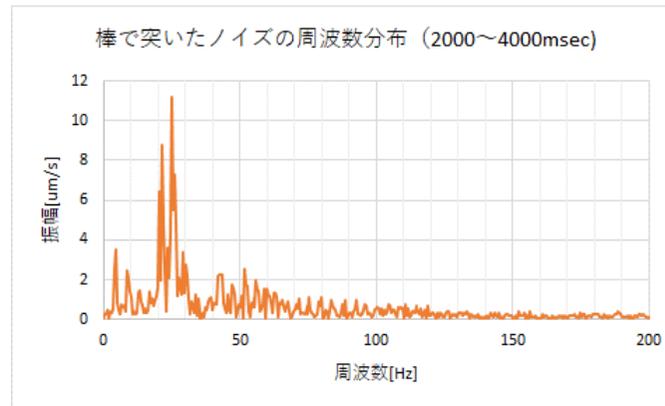
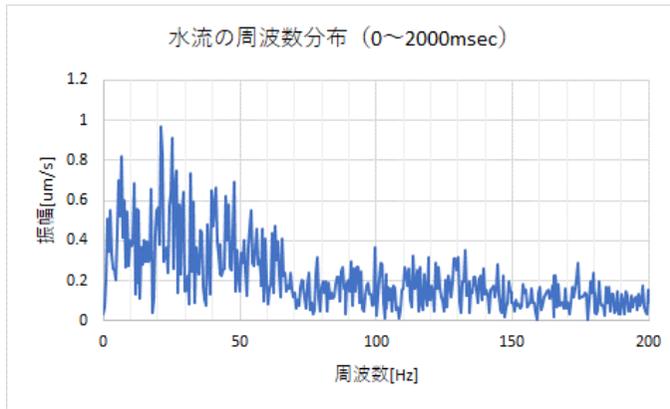
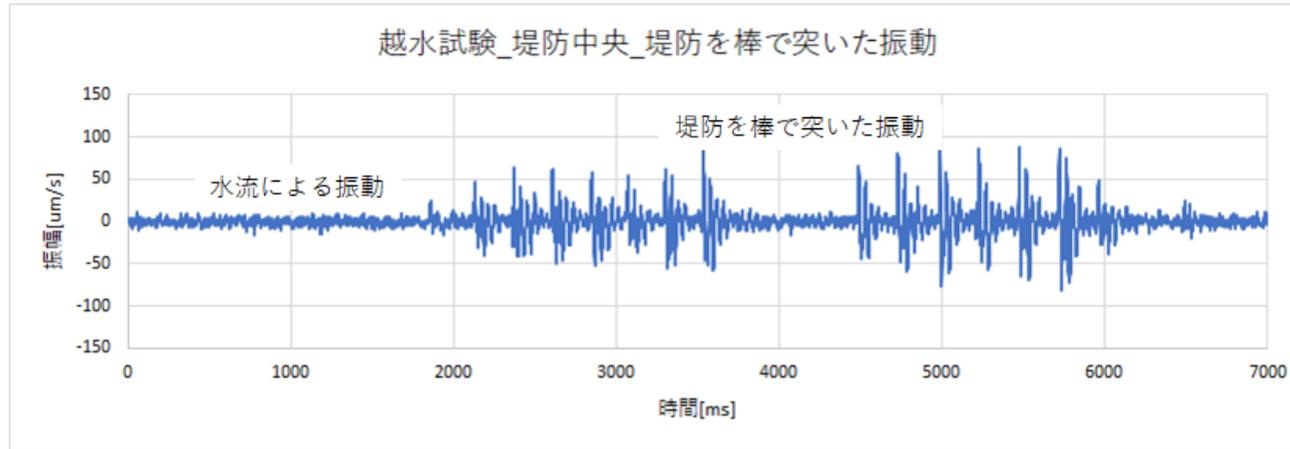


図4.1-13 越水試験時\_堤防を人為的に壊すために棒で突いた時のノイズ波形の例

## ② 河岸侵食実験

光ファイバの設置位置を図 4.1-14 に示す。まず図 4.1-15 で、侵食試験全体の振動分布をコンターで示す。横軸に時刻、縦軸に光ファイバ上の位置、コンターで振幅の強さである。同図下ではさらに上流側端部を 0m とした振動分布を示した。

図 4.1-16 では 3 箇所振幅の時間経過を示した。当初は下流側の振動が大きく、後半は上流側が大きい。また、以下の通り水制を設置すると振動が増すという現象がマクロにわかる。また、図 4.1-16 の縦軸を拡大した (図 4.1-17) ことも合わせて、以下の事象が検知できていることが確認できた。

- |           |  |
|-----------|--|
| 13 : 15 頃 | 一般部近傍の水制設置に伴い、数分後に光ファイバが露出、一般部振幅が急上昇       |
| 13 : 26 頃 | 橋台部近傍の光ファイバが水制設置の前に露出、橋台部の振幅が急上昇           |
| 14 : 15 頃 | 橋台・護岸部近傍の水制設置に伴い、数分後に光ファイバが露出、橋台・護岸部振幅が急上昇 |

実際のイベントとの照合のため、上記の時刻の画像を図 4.1-18～図 4.1-20 に整理した。

図 4.1-21 から図 4.1-23 において、データを FFT 処理し、周波数の強さをコンターで整理した。まず図 4.1-21 の一般部を見ると、13 : 15 の水制設置から概ね 25Hz～200Hz 程度の振動として光ファイバの露出が観察されている。この現象は図 4.1-22 の橋台部、図 4.1-23 の橋台・護岸部にも同様である。

図 4.1-24 で、橋台・護岸部で越水側築堤作業のノイズ (ドンドンという可聴音) を検知している。その波形例を示す。この時の水流の周波数が 7, 20, 35Hz 付近であり、これに対して作業振動の周波数は 27, 33Hz である。これも比較的近い周波数帯域であり、単純に分離は難しいが、突発的な波形の形状から機械学習のようなツールが有効であると思われる。

参考までに、2月17日の越水試験終了後に、翌日の侵食試験用につなぎ替えた際に取得したデータを図 4.1-25 に示す。これが通常、ユーザーインターフェースとして画面で見られる画面であるが、横軸に計測中の時間、縦軸に位置 (距離)、振幅をコンターで示し、いつでもどこで、どれくらいの振動が発生したのか、これを見て計測する。越水試験装置の向こう側で稼働していた重機からの振動が、コンクリート基礎を伝わって、侵食試験装置の法面に埋設されている光ファイバに、時間的に伝播していく様子が観察できる。

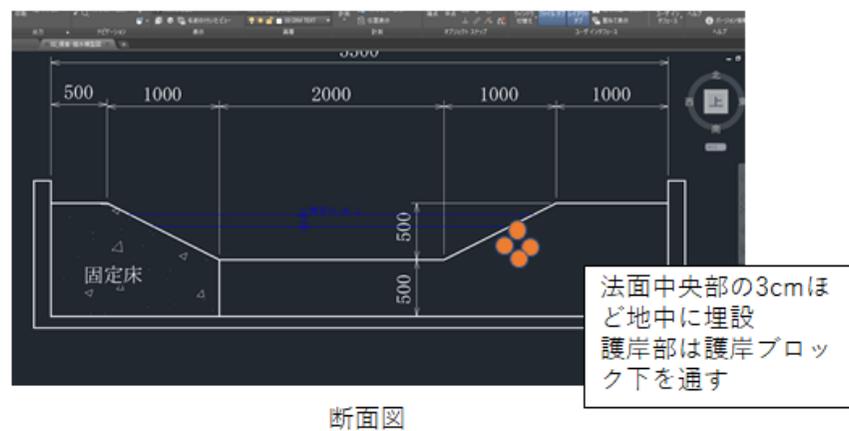
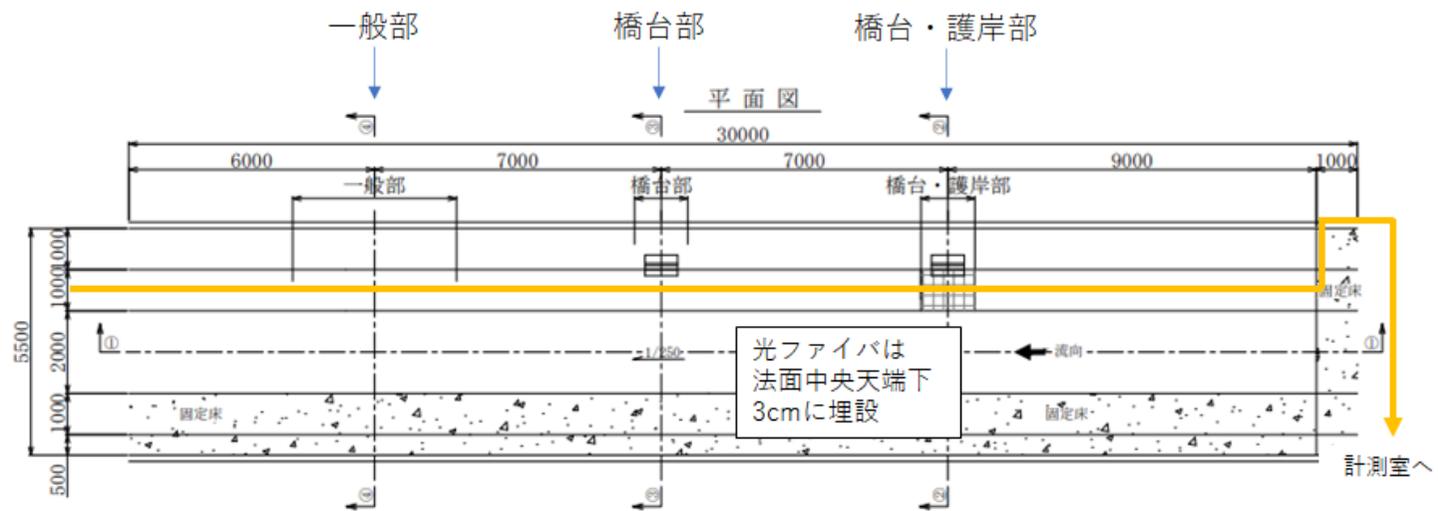


図4.1-14 光ファイバの設置位置

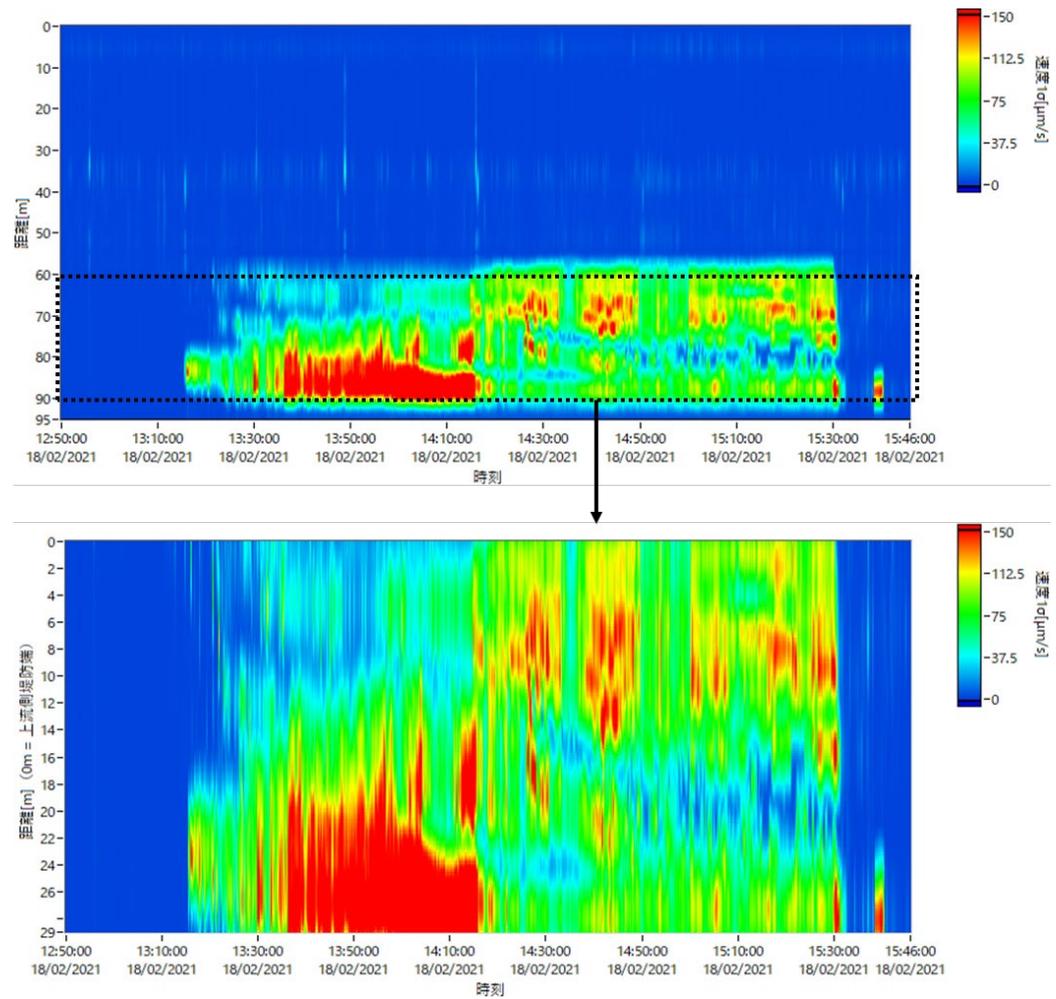


図4.1-15 侵食試験の振動分布 測定全長 (上) 堤防部 (下)

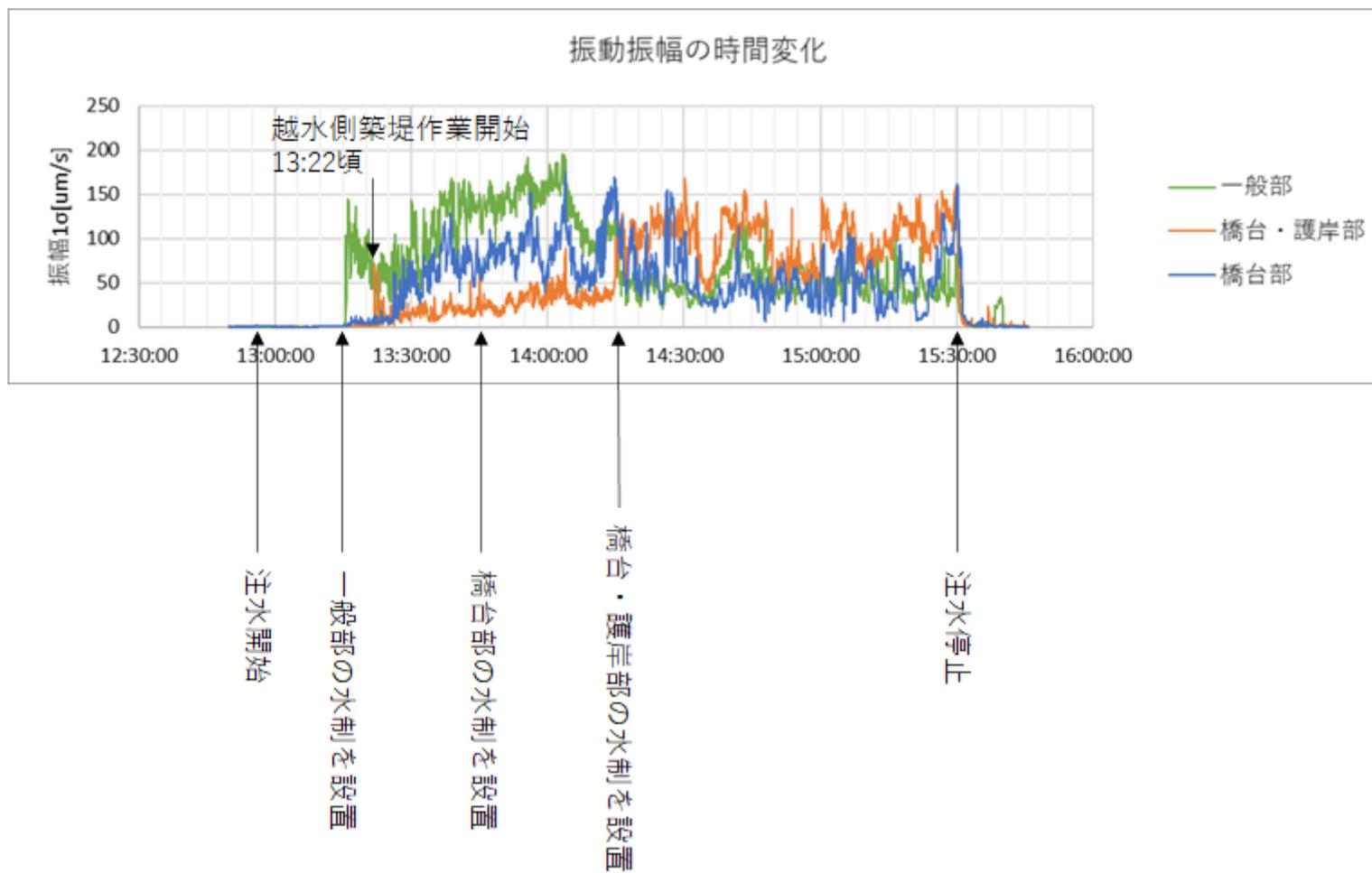


図4.1-16 侵食試験\_全経過時間のデータ

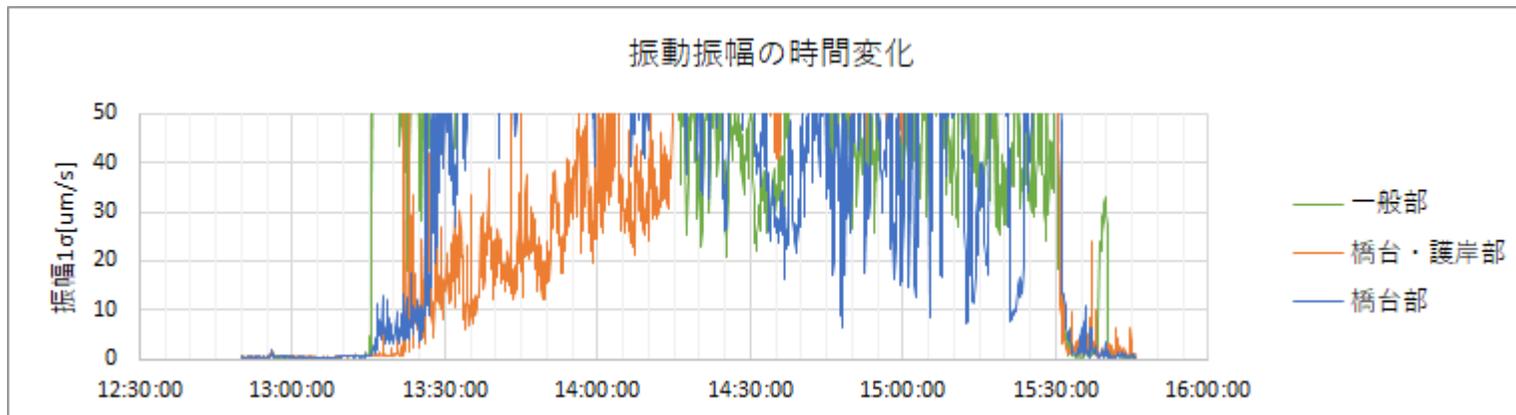


図4.1-17 侵食試験\_図4.1-12の縦軸拡大 (全経過時間)

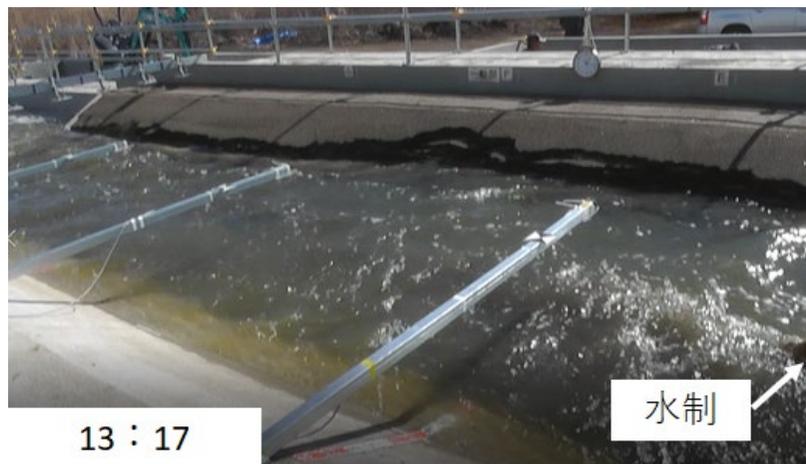


図4.1-18 一般部近傍の光ファイバ露出



図4.1-19 橋台部近傍の光ファイバ露出

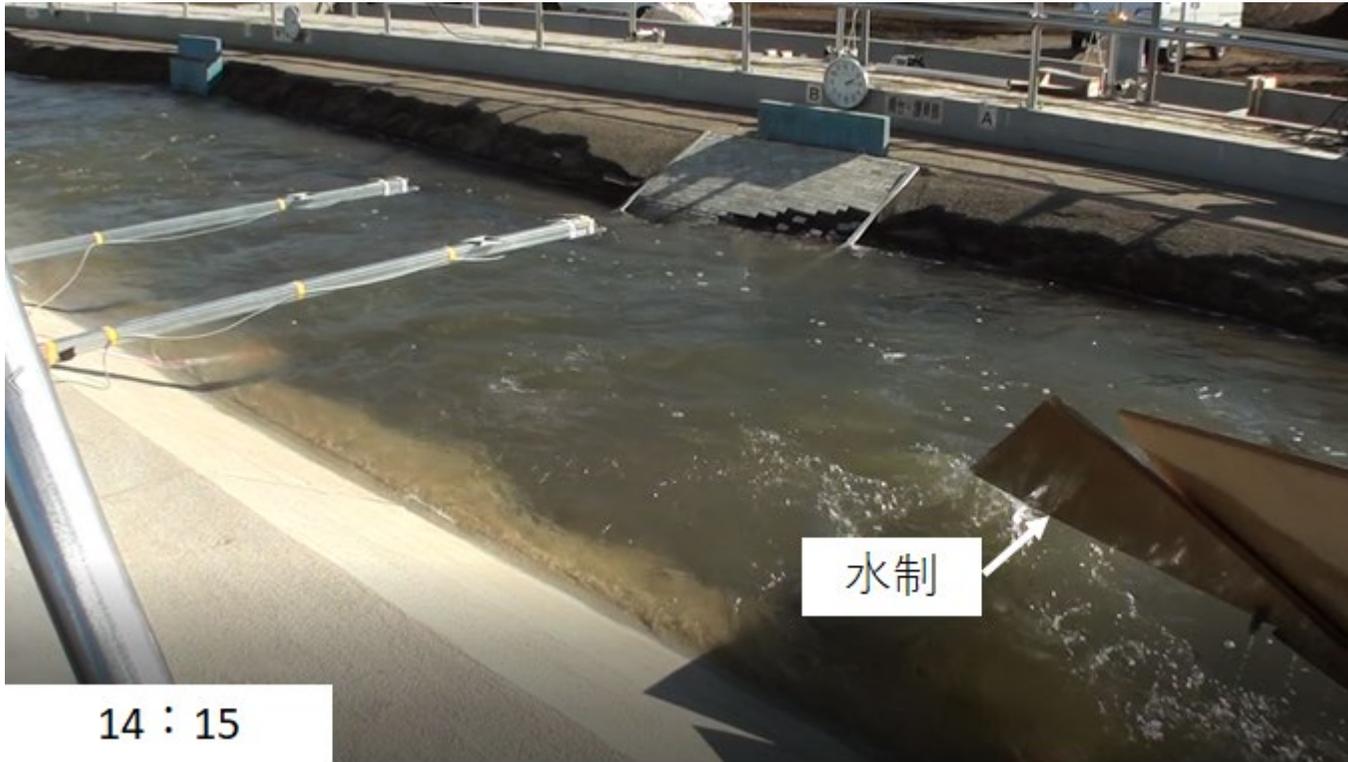


図4.1-20 橋台・護岸部近傍の光ファイバ露出

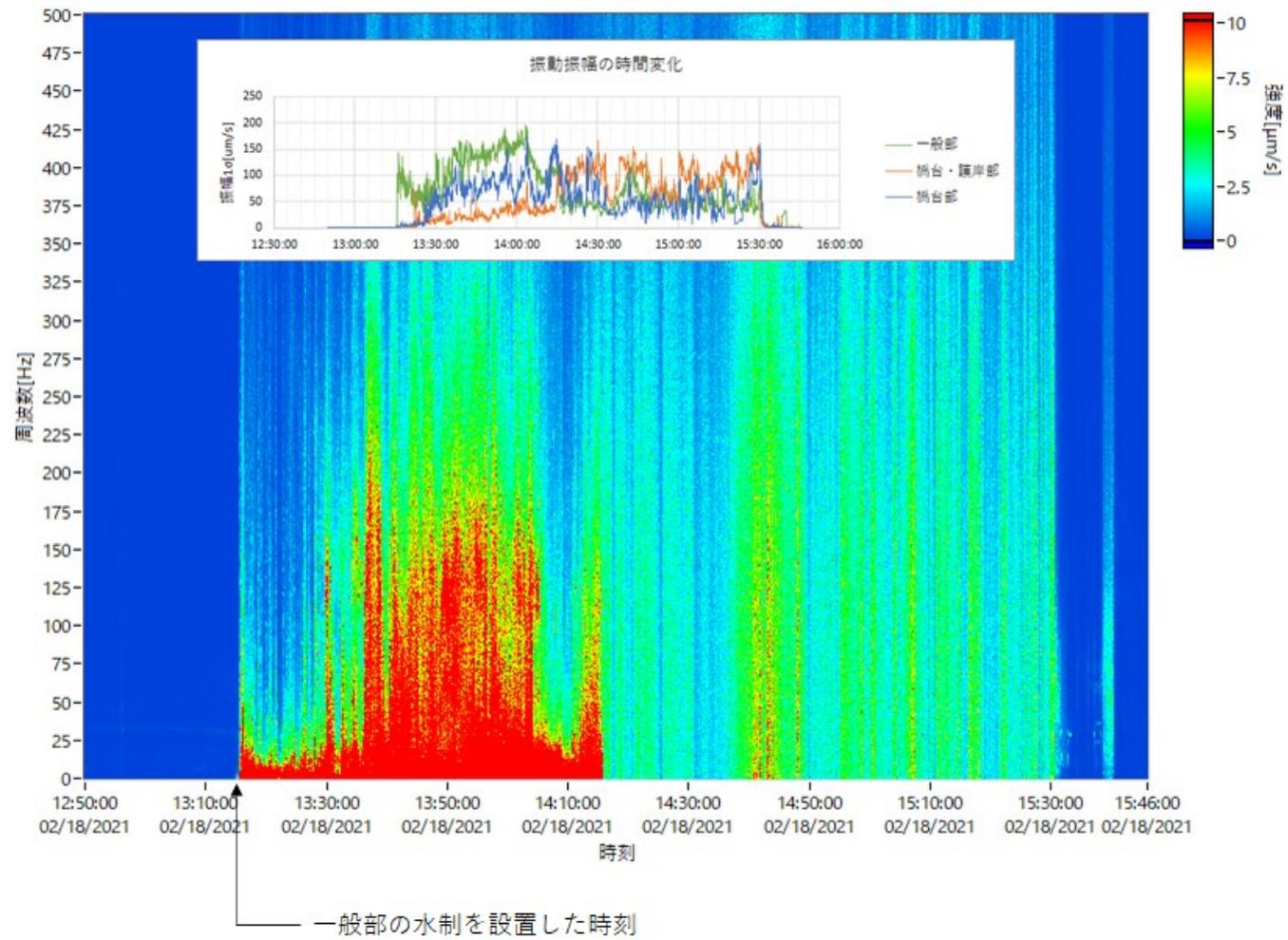


図4.1-21 侵食試験\_周波数の挙動（一般部）

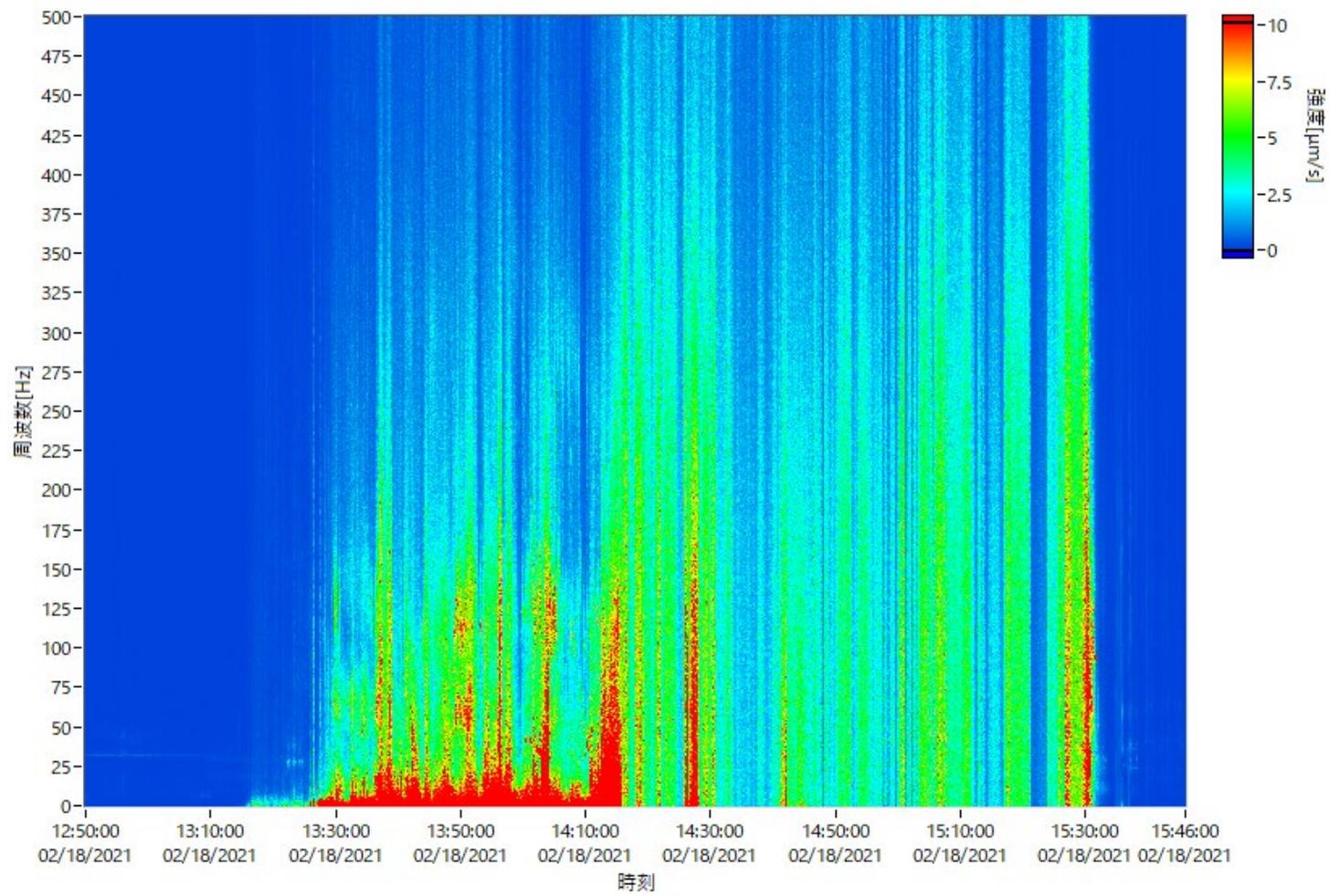


図4.1-22 侵食試験\_周波数の挙動 (橋台部)

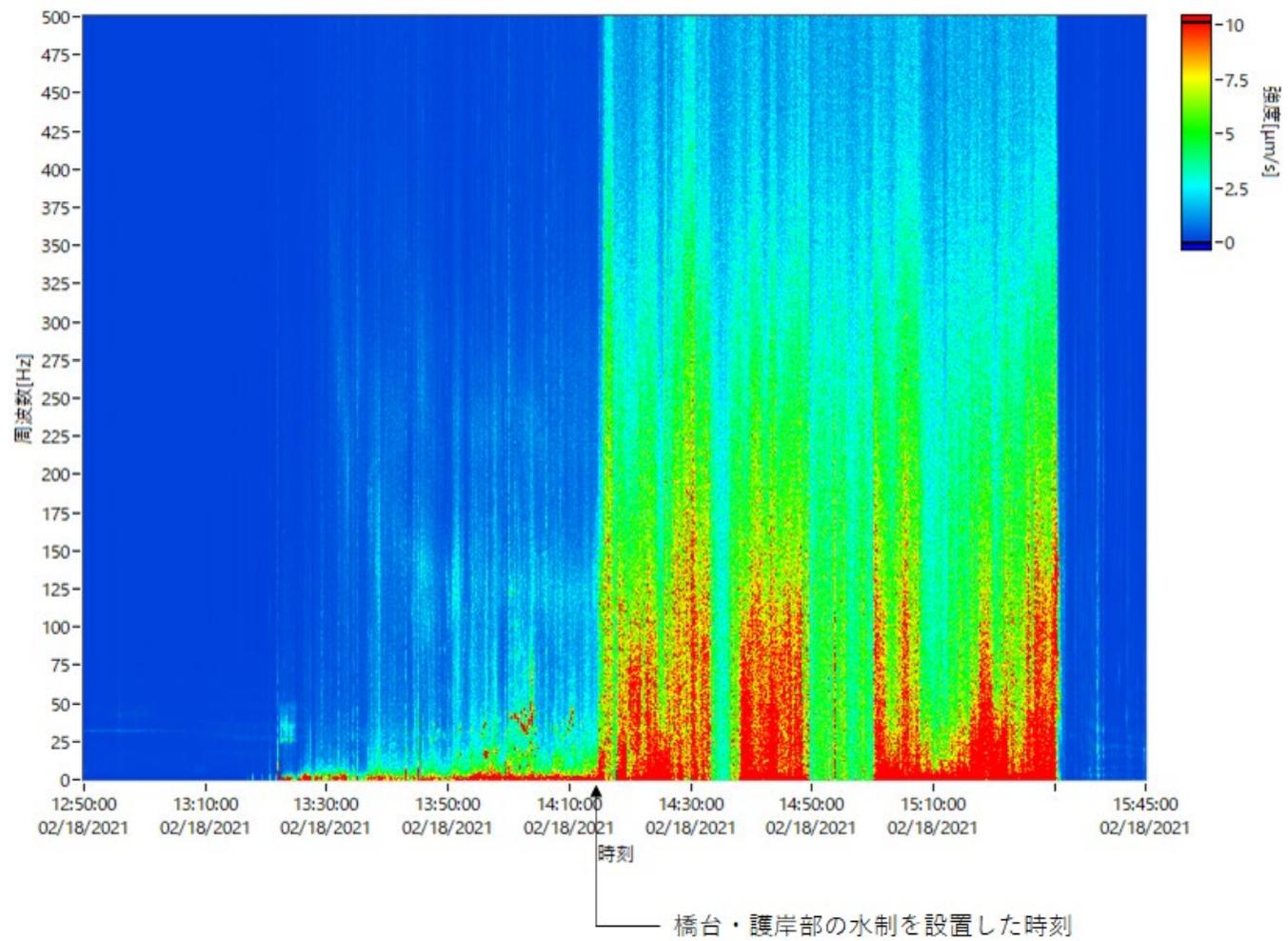


図4.1-23 侵食試験\_周波数の挙動 (橋台・護岸部)

2/18 13:23

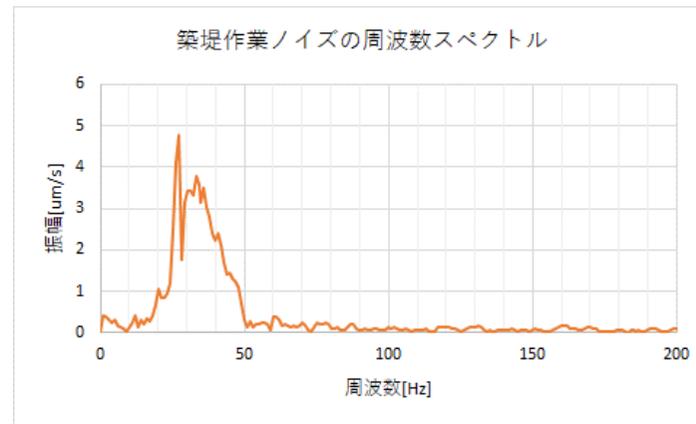
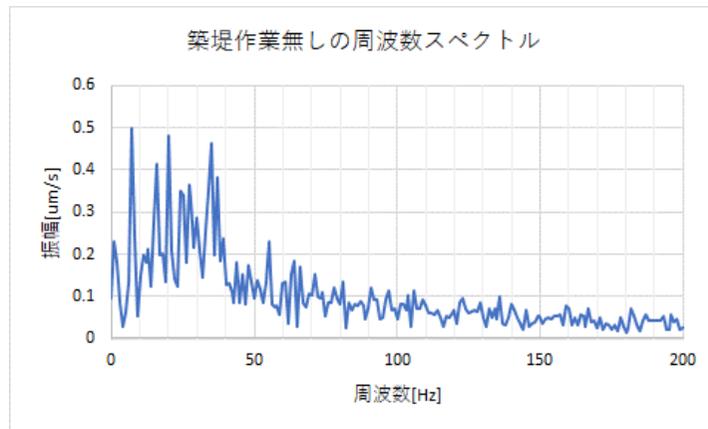
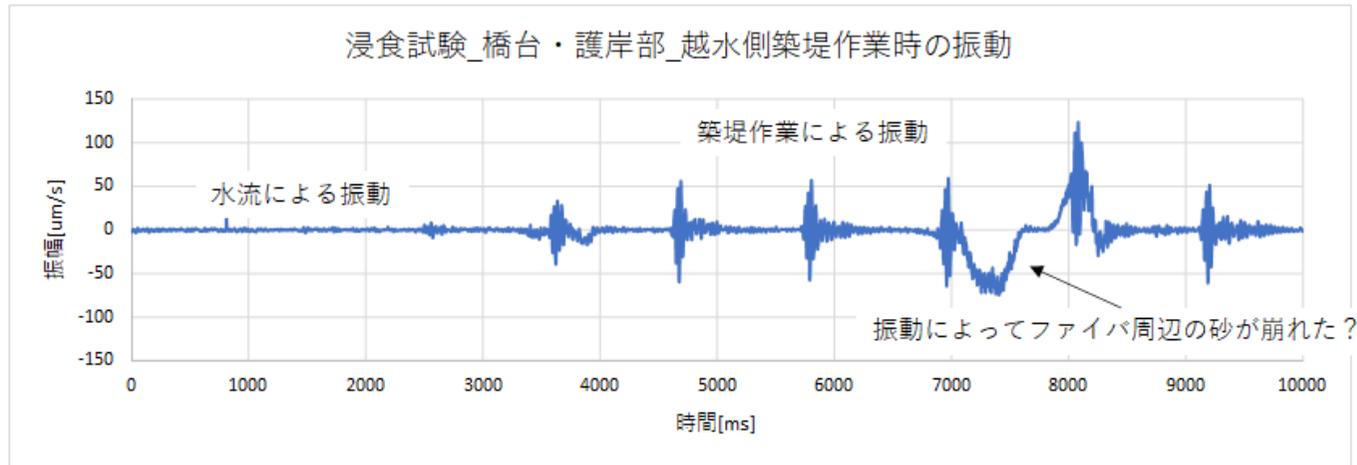


図4.1-24 侵食試験\_築堤作業時のノイズ波形の例

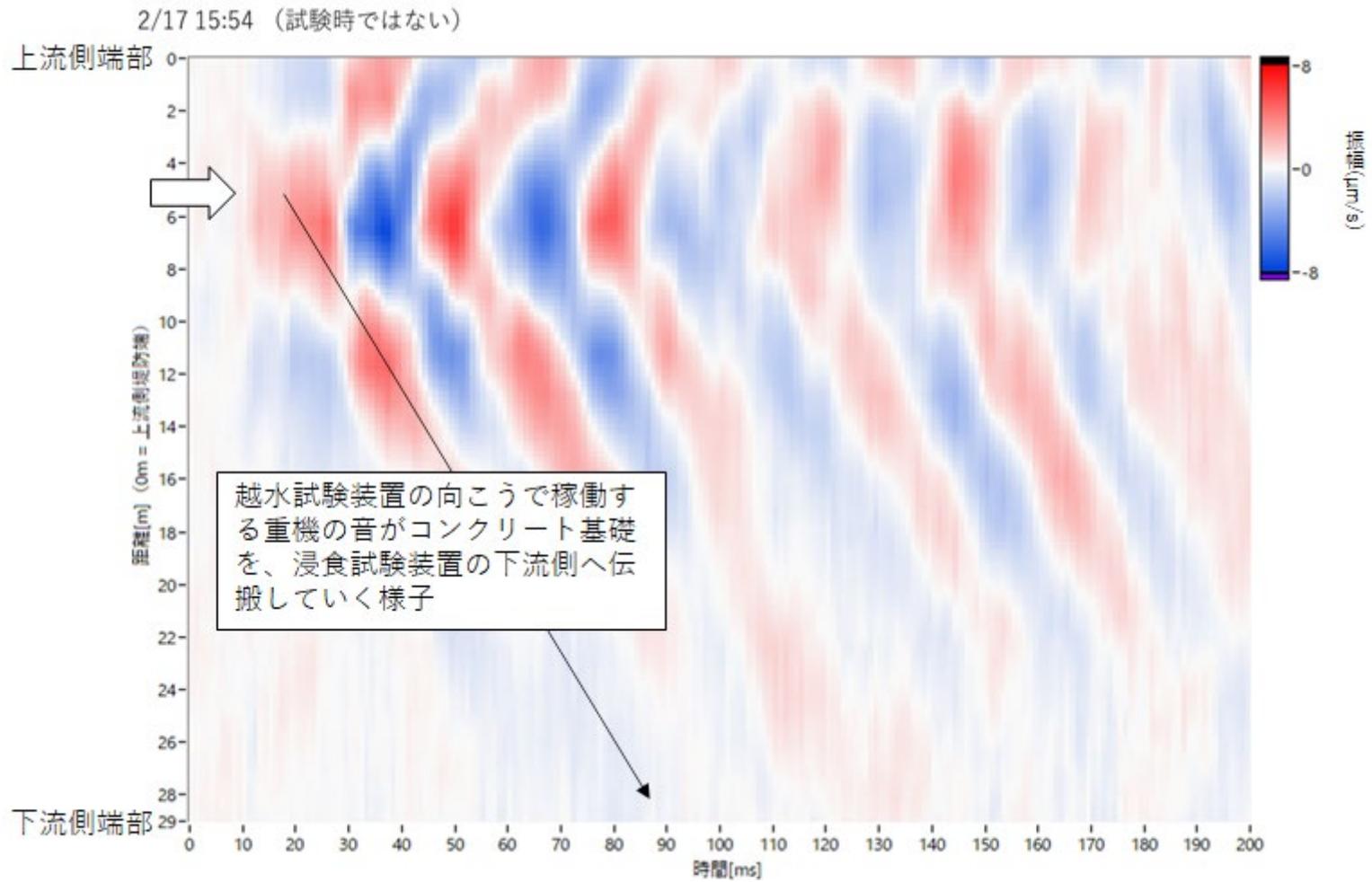


図4.1-25 侵食試験の堤防を伝搬する重機の振動

### ・結果の整理、考察

越水試験では、天端下 10cm に埋設された光ファイバの露出に伴い、広帯域な周波数の、非常に大きな振動が生じ、明確に検知できた。

河岸侵食試験においても、法面中央部に埋設された光ファイバの露出に伴い、同様に広帯域な周波数の、非常に大きな振動が生じ、明確に検知できた。

少なくとも、光ファイバの露出については、閾値がなくても、振幅の上昇率が非常に大きいため（無損傷時に比べて、50 倍以上）、明確にわかると思われる。また、侵食の検出に必要なケーブル方向の欠損長さは、光ファイバ振動分布センサで言えば、1m 以上の露出があれば検知可能と推定する。この根拠は、50 倍の振幅上昇 ÷ 5m = 10 倍 / 1m という概算から、10 倍の変化は検知できるであろうと考えるからである。

課題として認識されるのは、センシングを行う光ファイバの実装方法である。聞き知る限りでは、これまで堤防の多くに設置されてきた通信用光ファイバは、堤防天端に U 字溝を埋設し、その中に敷設されているとのことで、この場合、振動を検知するために重要な地盤とのカップリング（接合性）が不十分である可能性がある。

また、環境ノイズの弁別のため、周波数による区別や機械学習のような演算処理を施す必要がある。

4.2 振動計測 一般残団法人エンジニアリング協会（光ファイバ振動分布センサ：  
DAS/hDVS)

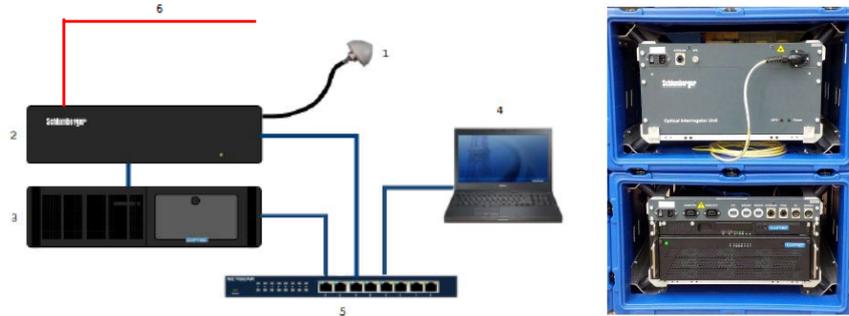


図4.2-1 hDVS外観図

・システムの概要

光ファイバケーブルを使いレイリー散乱を用い分散された歪を振動として計測する。DAS において、光ファイバは、それ自体がセンサ素子となり、測定が行われる。光電子装置により、音響周波数領域の歪信号（振動）として、約 50 km 程度の測定をすることが可能である。そもそも、石油ガス田の開発において、地震探査、坑内喧騒として開発された技術である。このため、過酷な環境下で検出することを可能にしている。

・システムの原理

Distributed Vibration Sensing – Heterodyne (hDVS)

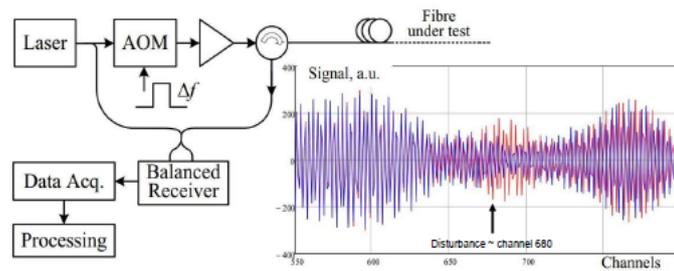


図4.2-2 システムの原理図

・システムの仕様

表4.2-1に当システムの性能及び基本仕様を示す。

表4.2-1 性能基本仕様

項目		仕様	備考
測定項目		振動分布測定	
光ファイバ	長さ	最大50Km	SEGY : 地球物理データを保存するために米国物理探査学会(SEG)によって開発された標準  FBE : 周波数帯域のエネルギー解析
	種類	SMファイバ	
	光コネクタ	FC/APC	
振動測定 (距離)	測定距離レンジ	50Km	
	ゲージ長	1.5m~5m	
振動測定 (時間)	サンプル分解能	1KHz、2KHz、4KHz	
	ノイズフロア	0.4pε /√Hz 10m当たり	
波形表示機能	出力形式	SEGY FBE	
	リアルタイム表示	最大30秒間を連続表示	
	サンプル時間	0.25ms,0.5ms,1ms,2ms,	
電源	電源電圧	AC100V	
	消費電力	30VA	
レーザ安全		クラス1M	

なお、今回、インフラ維持管理の観点で、実験の計測に当たっては、以下の使用としている。

- ・ 空間サンプル分解能： 0.13m
- ・ ゲージ長： 1.53m
- ・ 光パルスレート： 10kHz
- ・ データサンプリング： 1ms
- ・ 1ファイル当たりの計測時間： 10sec
- ・ High-pass Filter： 1Hz

・技術の特徴

- ③ 最長 50km 区間までの振動計測が可能である。
- ④ 計測器を計器室に設置し、光ファイバは屋外型を用いることにより昼夜・天候を問わず振動計測が可能である
- ⑤ 既に製品化されており、計測精度も確認されている
- ⑥ 計測装置及びシステムに対抗性と耐久性がある

・現場実装で想定する配置方法

DAS装置の購入費は、仕様により幅があるが、おおよそ2000万円～3000万円程度である。石油ガス田で開発された装置なので、インフラ維持管理に即応しているか否かは別途検証する必要があるが、既存開発品を河川堤防変状検知システムとして応用展開可能と判

断している。今回の実証実験においても、越流実験において変状を検知しており、目標とする300万円/100mは十分クリアしうるものと考えられる。

国土交通省では、平成13年3月に政府において策定した「e-Japan重点計画」に掲げられている「世界最高水準の高度情報通信ネットワークの形成」を積極的に支援するため、これまで、公共施設管理用光ファイバ収容空間等の整備、開放を推進してきており、高度情報通信ネットワークの形成をより一層進めるため、平成14年6月に政府において策定した「e-Japan重点計画2002」等を受け、収容空間等の整備、開放に加え、平成14年度から国の管理する河川・道路管理用光ファイバについて、施設管理に支障のない範囲内で、電気通信事業者等に開放している。その中で、・事務所、出張所、約5km間隔の事務所等で指定するクロージャ又は光成端箱（以下「指定クロージャ等」と呼ぶ。）間で開放している。このように、河川堤防管理用の既存の光ファイバが5kmで貸し出されており、2500万円を5kmに1台設置として、イニシャルコストは50万円/100mとなる。

#### ・実験の計画（システムの配置、センサー位置 等）

光ファイバの全体配置、越流実験の機器配置、河岸侵食実験の光ファイバの配置を図4.2-3、図4.2-4、図4.2-5に示す。

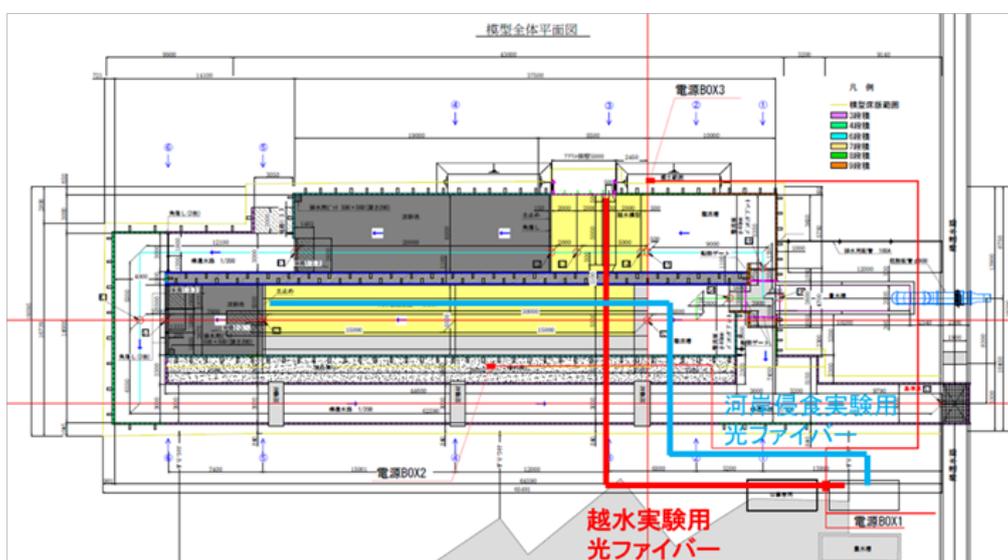


図4.2-3 光ファイバ配置全体概要

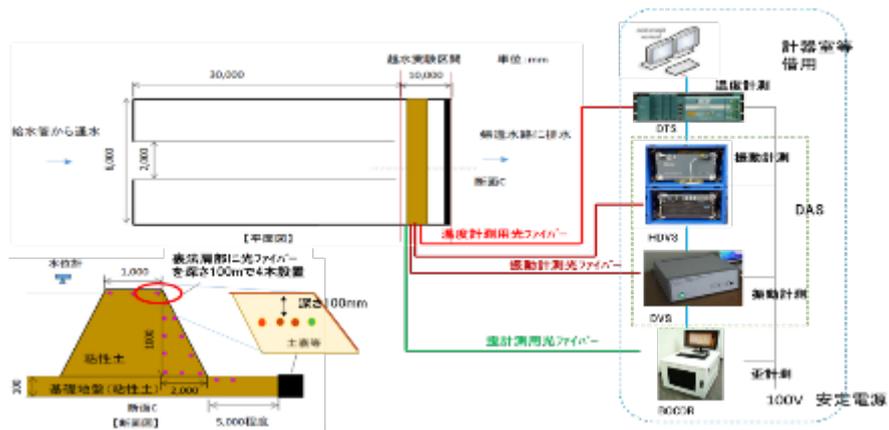


図4.2-4 越水実験の機器配置図

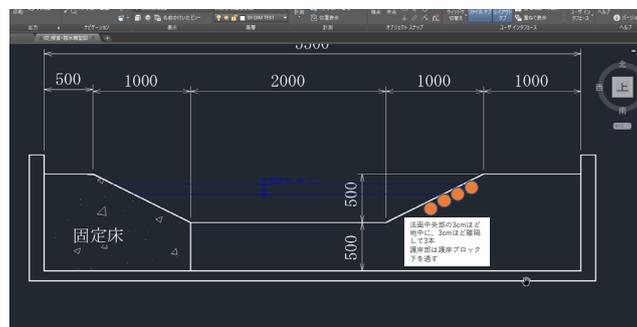


図4.2-5 河岸侵食実験の法面光ファイバ配置図

### ・実験での検証結果

越水実験は、予定通り12時30分頃から行われ、14時03分から堤防天端+12.5cmまで順調に水量は増加し、その後堤防が壊れるまで連続して越水する予定であった。

しかし、堤防天端の洗掘が大きく進まず、このまま放置するか、人工的に光ファイバの深さまで溝を造り、その変状を検知することにするか議論したところ、14時17分より人工的に溝を計測小屋に近い側の堤防天端（近端部）に造ることとした。この作業は、約20分程度続き、溝切りされ、洗掘が始まった。その状況を図4.2-6、図4.2-7に示す。なお、図4.2-7は、14時26分の写真であるが、この時点ではまだ光ファイバは見えていない。



図4.2-6 堤防天端の人工的溝切り作業



図4.2-7 堤防天端の溝切り洗掘部（14時26分）

一方、この反対側、すなわち、計測小屋から遠い堤防の天端（遠端部）が15時前に洗掘されたことが確認されている。

遠端部は深さ100mm、幅1000mm程度、近端部は深さ100mm、幅500mm程度である。この堤防両端部の実験後の形状について、図4.2-8に示す。



図 4.2-8 実験後の堤防の状況 (15 時 41 分)

近端部及び遠端部の変状を hDVS で検知できたかどうか、データで示す。

図 4.2-9 は、実験の全データを FBE (Frequency Band Energy) にて解析した結果である。堤防位置における FRE の時間変化として、高いエネルギーを赤で、低いエネルギーを青で示している。この結果、光ファイバが大きな振動を受けるのは 14 時 45 分頃であり、ここで光ファイバが露出したと考えられる。図中上側 (堤防近端部) から大きな振動が続き、図中の下側 (堤防遠端部) も大きな振動が 14 時 56 分頃発生している。VTR においても、14 時 50 分頃に遠端部の土塊が流れ落ちるのが確認できる。横軸は時間 (世界標準時間) である。

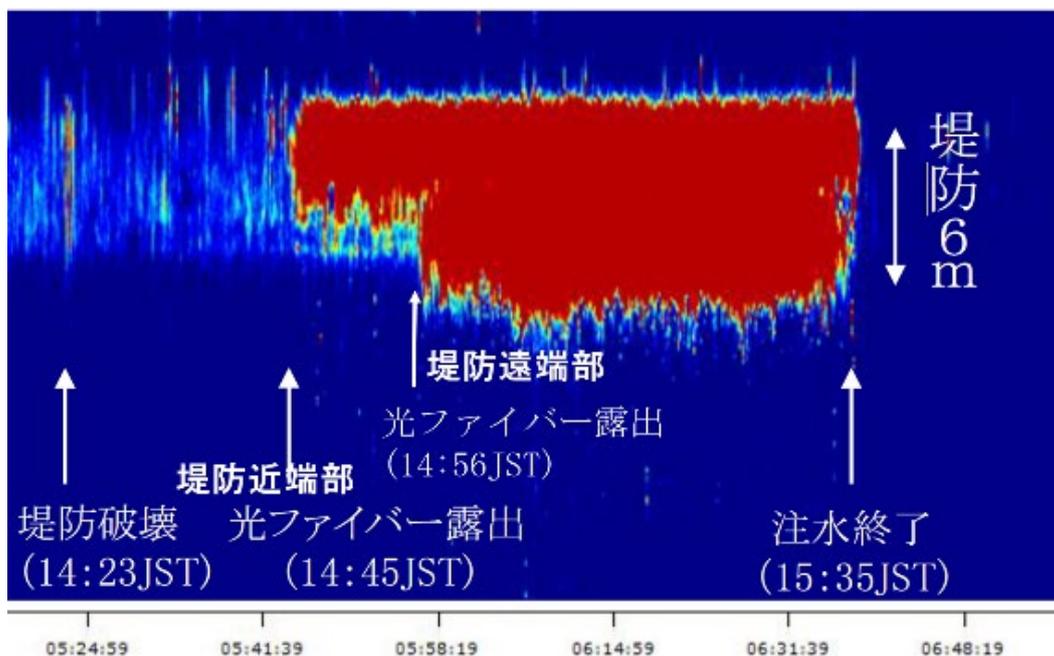


図 4.2-9 越流実験の FBE 解析

これを堤防近端部の振動の振幅の変動としてみると図 4.2-10 に示すようになる。横軸は、時間で 14 時 15 分を 15 としている。この図に示されたように、14 時 45 分までは大きな変動はないが、14 時 45 分から光ファイバ上部の土が洗掘されていき露出し、14 時 46 分～14 時 47 分の間に完全に露出し、その後、水の流れに従い揺れを起こしていることと想定される。

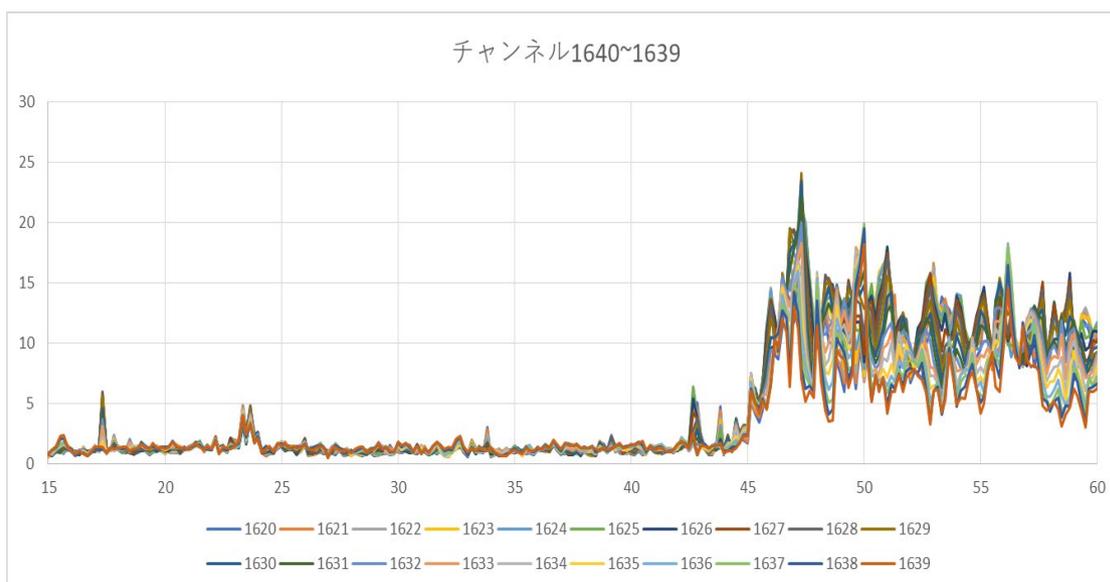


図 4.2-10 堤防近端部の振幅の変動

一方、堤防遠端部において、同様に横軸は14時15分から始まっているが、14時56分～14時57分の間で遠端部の塊が流され、その後洗掘が始まり露出した光ファイバの振幅が大きく増加していくことが見て取れる。

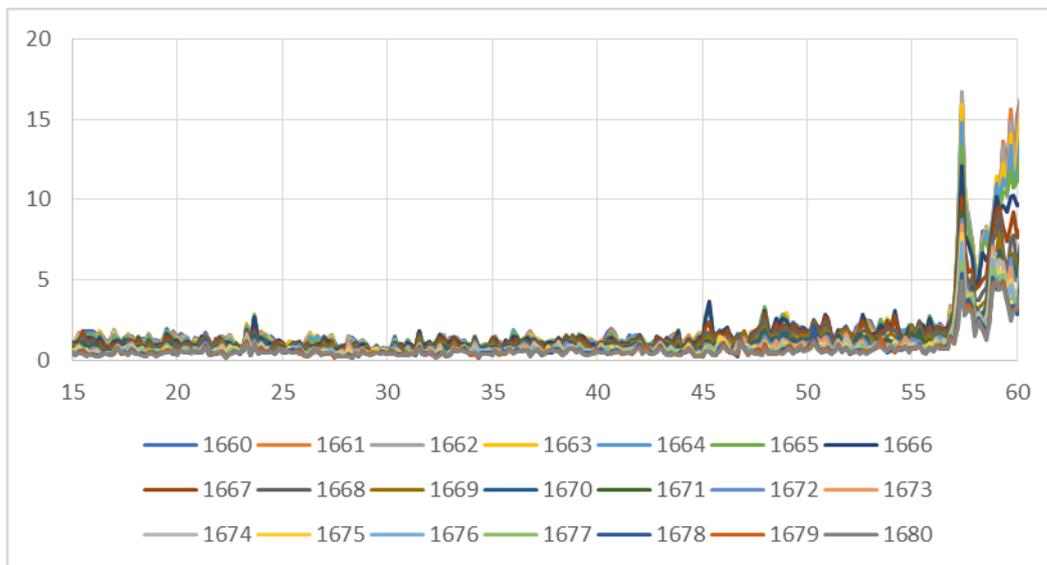


図 4.2-11 堤防遠端部の振幅の変動

さらに、振動強度の変化として、振幅の標準偏差、及び、振幅の絶対値のメディアン値として図示した場合、図 4.2-12、図 4.2-13 のようになる。

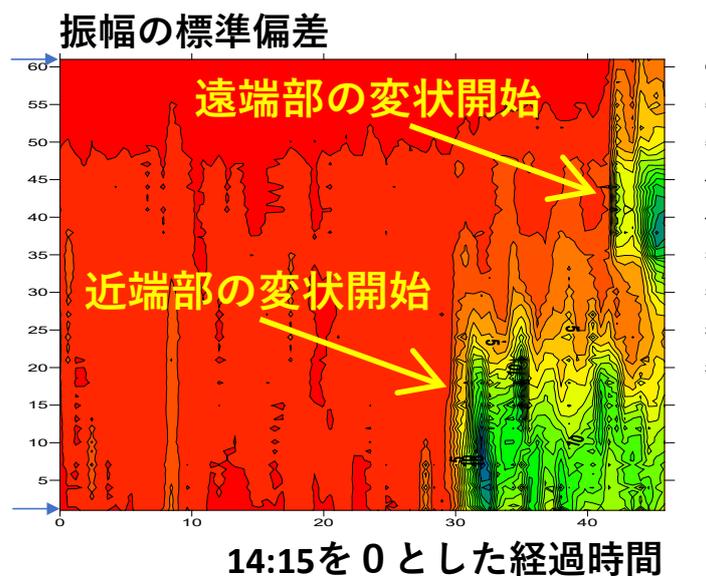


図 4.2-12 振動の強度変化 振幅の標準偏差

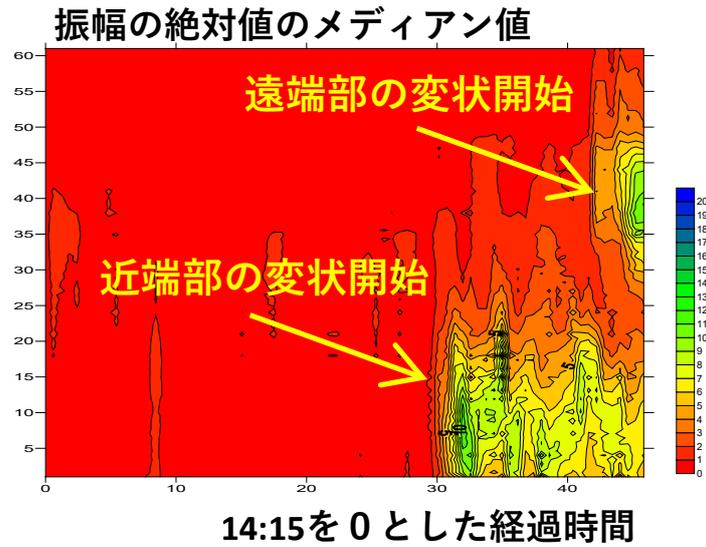


図 4.2-13 振動の強度変化 メディアン値

以上により、越水実験において、時系列的に記載すると、

- |          |  |              |                              |            |
|----------|--|--------------|------------------------------|------------|
| 12時      | 注水開始                                       | 12時20分       | 注水停止                         | 気温8度、水温14度 |
| 12時33分   | 越水開始                                       | 74L/sec      | 水位は天端+5cm                    | 30分保持      |
|          |  |              | 隣の河岸侵食実験水路での重機運転中止～13時40分頃再開 |            |
| 13時03分   | 流量増  | 水位は天端+10cm   | 60分保持                        |            |
| 14時03分   | 流量増  | 水位は天端+12.5cm |                              |            |
| 14時17分ごろ | 堤防近端部切り崩し開始                                |              |                              |            |
| 14時45分ごろ | 堤防近端部で100mm深さに埋設した光ファイバの振幅が大きく変化したことを検知した。 |              |                              |            |
| 14時56分ごろ | 堤防遠端部で100mm深さに埋設した光ファイバの振幅が大きく変化したことを検知した。 |              |                              |            |
| 15時34分   | 実験終了                                       |              |                              |            |

次に、河岸侵食実験の結果を示す。図 4.2-15 は、河岸侵食実験の全データを FBE (Frequency Band Energy) にて解析した結果である。横軸に時間、縦軸に光ファイバのチャンネル数を示し、高いエネルギーを赤で、低いエネルギーを青で示している。図 4.2-16 は、変状を示す時間帯の拡大図である。

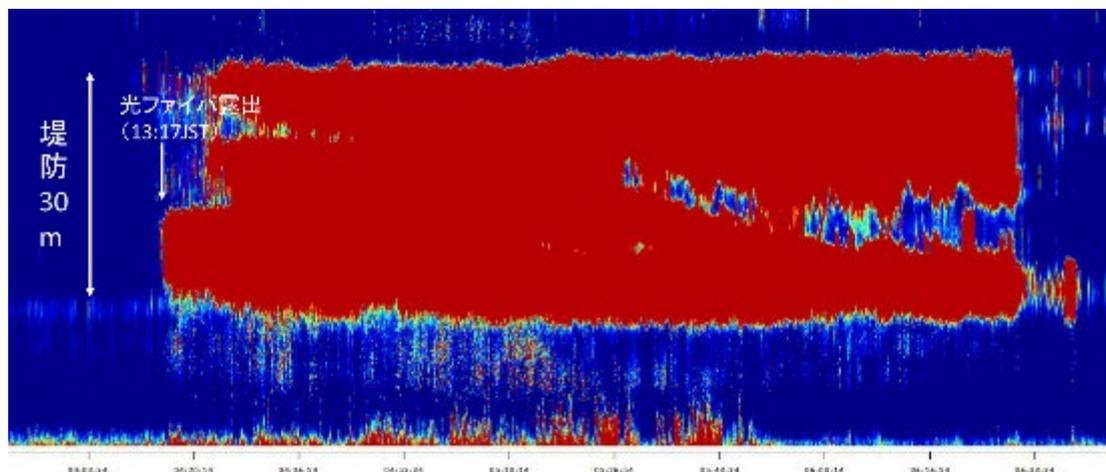


図 4.2-14 河岸侵食実験の FBE 解析



図 4.2-15 河岸侵食実験の一般部水制設置の全面の法面状況 (13 時 17 分)

越流実験とは異なり、河岸侵食実験では注水開始直後から堤防の法面は崩れだし、法面の中央に埋設していた光ファイバは 13:17 頃には露出していた。その後、光ファイバに直接水が当たり始めたようで、大きな振動が捉えられている。

特徴的なのは、FBE 解析で赤になったり、青になったりする様が見て取れる。これは振動を受けたり受けなくなったりする状態を示している。

これは、光ファイバが水中に落ち、その後法面の土砂が光ファイバの上に載り直接水が当たらないという状態を繰り返していることと考えられる。

実際、実験終了後の光ファイバは河川床にあり、部分的に露出しているところがあり、大部分は土砂に覆われているところとなっていた。

以上により、越水実験において、時系列的に記載すると、

12 時 55 分頃	注水開始	13 時 01 分	オーバーフローし水路へ浸水
13 時 15 分	一般部の水制設置	即露出	13 時 17 分ファイバ水没
	一般部の水制設置前面の堤防法面での振幅が	13 時 17 分頃	大きく変化した。
13 時 30 分頃	橋台・護岸部を除いて全ライン露出・部分水没		
13 時 45 分	一般部の水制撤去、橋台部の水制設置		
14 時 14 分	橋台部の水制撤去、橋台・護岸部の水制設置		
～	各計測で変状検知		

#### ・結果の整理、考察

越水試験では、光ファイバが大きな振動を受けるのは両端部であり、ここに埋設している光ファイバは露出した。VTRにおいても、大きな振動が得られた同時刻に土塊が流れ落ちるのが確認できた。

河岸侵食試験では、水を流し始めてただちに法面崩壊が起こり埋設された光ファイバの露出がみられ、大きな振動が検知できた。

課題としては次のとおり。

#### ✓ データ取得の必要性和変状検知の定義付け

今回、越水実験にて実験の経過を知っており、実際に起こったことと振幅などの変化の整合性が取れたということまでである。

実河川堤防において同じ計測を行った場合、振幅の変化が把握できても、それは越水であるか近傍における工事震動なのか、までの判断はまだできない。

このため、今後、多くのデータ取が必要であり、その評価を行い、得られた振動が異常振動であり変状とみなされるような定義付け等を行う必要がある。

#### ✓ 研究開発の必要性

ノイズから信号を取り出すためには、計測技術のみならず、周波数解析等の解析技術の高度化が必要である。また、上記に述べたように、多くのデータ取得による変状検知の定義付けのためには、今後、機械学習や AI 等の知見を活かした研究開発を行う

必要がある。

このため、河川研究部を中心に、ここで提案しているような光ファイバを用いた変状検知システムの研究開発を立ち上げて欲しい。

✓ 既存の堤防監視システムとの相互補完の必要性

既に多くの堤防監視システムが存在するので、例えば、監視カメラとの整合性等、相互補完システムの志向も必要である。

### 4.3 DTS (Distributed Temperature Sensing) システム

#### ・システムの概要

DTS システムは、光ファイバを使用した温度計測方法の一種で、光ファイバ全体を温度センサとして使用する分布型温度計測システムである。

#### ・実験に使用した機器

今回の実験には、横河電機株式会社製の DTS インテロゲータ（モデル：DTSX200）を使用した。図 4.3-1 および表 4.3-1 に DTS インテロゲータの外観と仕様を、図 4.3-2 に実験に用いた光ファイバの外観を示す。



図 4.3-1 DTS インテロゲータ (DTSX200)

表 4.3-1 DTS インテロゲータ仕様

項目		仕様
距離	測定距離レンジ	1 ~ 6km
	サンプル分解能	10cm ~ 1m
	空間分解能	1m
温度	測定温度範囲	-200 ~ 800°C (光ファイバに依存)
	温度分解能	1km 0.07°C Typical
		3km 0.15°C Typical
		6km 0.5°C Typical
		(1σ、サンプリング分解能1m、DTSX200にセンサ用ファイバを接続した条件にて)
光	コネクタ、ファイバ	E2000/APC、50/125GI 光ファイバ
インターフェイス	Modbus	Serial、Modbus/TCP
	LAN	10BASE-Tまたは100BASE-T
一般仕様	動作温度範囲	-40 ~ 65°C
	電源電圧	用途に合わせた電源が選択可能
	消費電力	10W (全温度範囲)
		2W (パワーセーブ時)
	レーザー安全	IEC60825-1 Class 1M
		PDA 21CFR Part 1040.10
	寸法(W×H×D)	65.8 × 130.0 × 160.3mm
重量	0.64kg	



図 4.3-2 光ファイバ (約 50m×2 本)

・ DTS システムの原理

DTS インテロゲータからレーザーパルス光を光ファイバの一端に入射すると、光ファイバのガラス分子から各種の微弱な散乱光を発生しながら透過し、散乱光の一部は後方散乱光として入射端に戻る。これらの散乱光は、光ファイバに力が作用したり、温度が変化したりすると、入射光とは異なった波長 (周波数) に変化する性質を持っている。散乱光には、レーリー散乱、ブリルアン散乱、ラマン散乱があり、それぞれに波長と強度の関係がある (図 4.3-3)。

このうちのラマン散乱光は、その強度が温度に対して感応性の高い反ストークス光 (波長は短波長側にシフト) と感応性の低いストークス光 (波長は長波長側にシフト) の 2 種類が存在する。この温度感応性の強度比から測定箇所の温度を求めることができる。

また、レーザーパルス光をケーブルに入射してから生成した散乱光が戻ってくるまでの時間は、測定点の距離に比例する。後方散乱光測定と同時に到達時間を測定することにより、温度測定箇所の位置 (深度) を特定できる (図 4.3-4)。

測定された散乱光は微弱であるため、S/N 比を改善する処理を行い温度値として出力される。

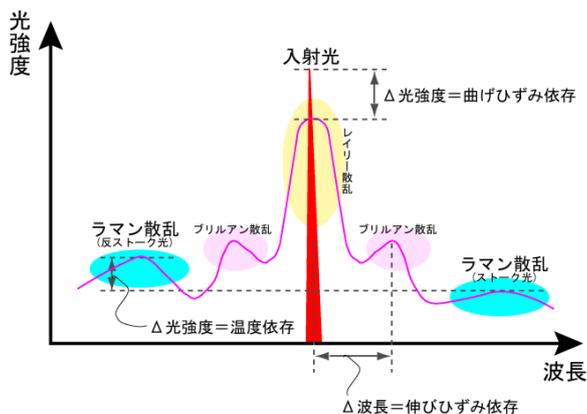


図 4.3-3 光ファイバ内の各種散乱光

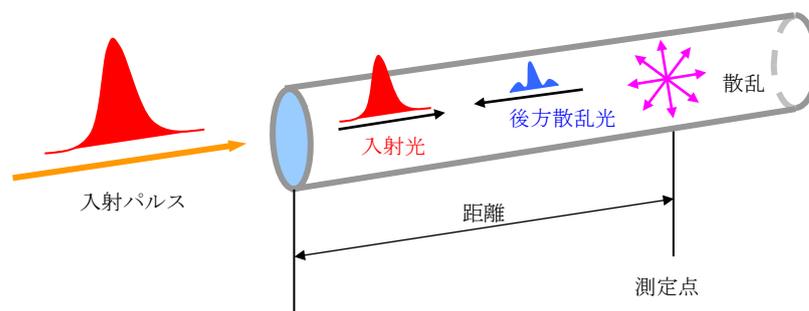


図 4.3-4 光ファイバ内の散乱概念図

#### ・技術の特徴

DTS システムは、光ファイバを敷設するだけでシンプルかつ経済的に広範囲の温度監視システムを構築できることが大きな特徴である。今回の実験で使用した DTS インテロゲータは、6km までの光ファイバ長に対応しているが、機種によっては、最長 50km の光ファイバ長まで対応可能である。屋外で使用される光ファイバは、その外面に被覆を施したものを使用することで、防水性、耐久性を得ることができる。

DTS は、距離方向に沿った連続的な分布データを得る独特の概念の温度計測器であるためその特性値についても独特な項目がある。そのひとつである距離応答性（距離分解能）は、距離方向に沿った実際の温度分布に対する再現性を表す特性値である。

DTS では、光ファイバ光路を移動するレーザーパルス光が温度計の感温部に相当するため、各温度測定値は当該点前後影響を受けた移動平均値に近くなることが避けられない。距離応答性は、主に入射するレーザーパルス長に比例し、レーザーパルス長を短くするほど鋭敏に応答するが、信号エネルギーの低下により温度分解能も低下する。このように、距離応答性と温度分解能はトレードオフの関係にあることを理解し、温度評価をしなければならない。

DTS の性能を評価する上で、もう一つの重要なパラメータが前述の距離応答性とトレードオフ関係にある温度分解能である。DTS では、温度の均一な一定区間の温度測定値の標準偏差を温度分解能と定義している。測定時間の大部分は、繰り返し測定による平均化処理に費やされているため、ある区間の温度分解能は測定時間に強く依存し、概ね測定時間の平方根に反比例している。

#### ・現場実装で想定する設置方法

DTS システムを河川堤防変状検知システムとして現場実装するには、センサとなる光ファイバと地上装置（DTS インテロゲータ、データ収録・処理 PC）、地上装置への供給電源が必要になる。商用電源が供給できないような場所では、複数のバッテリーとソーラーパネルにて電源を供給し、システムを稼働することは可能である。しかしながら、約 2 ヶ月に 1 回

の頻度でバッテリーの交換は必要である（外気温の影響によりバッテリー容量に変動はある）。また、地上装置は屋内に設置することが望ましいが、防水ボックスに収納することで対応することも可能である。取得されたデータは、DTS インテロゲータに内蔵された SD カードもしくはデータ収録・処理 PC にストレージされるが、定期的なデータ回収が必要になる。しかし、インターネット回線に接続できる環境下であれば、データ伝送装置を新たに設置することで遠隔地でもデータをリアルタイムに監視することは可能となり、定期的なデータ回収も不要となる。

DTS システムの導入コストは、光ファイバ 100m 当たり 100 千円程度である。商用電源が供給できる場所での運用の場合、電源供給のためのバッテリー交換が不要のため維持管理コストはかからない。

#### ・実験工程

実験工程を表 4.3-2 に示す。

表 4.3-2 実験工程

内容	2月16日		2月17日		2月18日		2月19日	
	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM
地上機準備	■							
光ファイバ敷設(越水・浸食)		■						
実験準備			■		■			
越水実験				■				
河岸浸食実験						■		
地上機・光ファイバ撤収						■	■	

図 4.3-5 に観測ハウスからの光ファイバ敷設経路図、図 4.3-6、図 4.3-7 に実験設備への光ファイバ敷設位置図を示す。

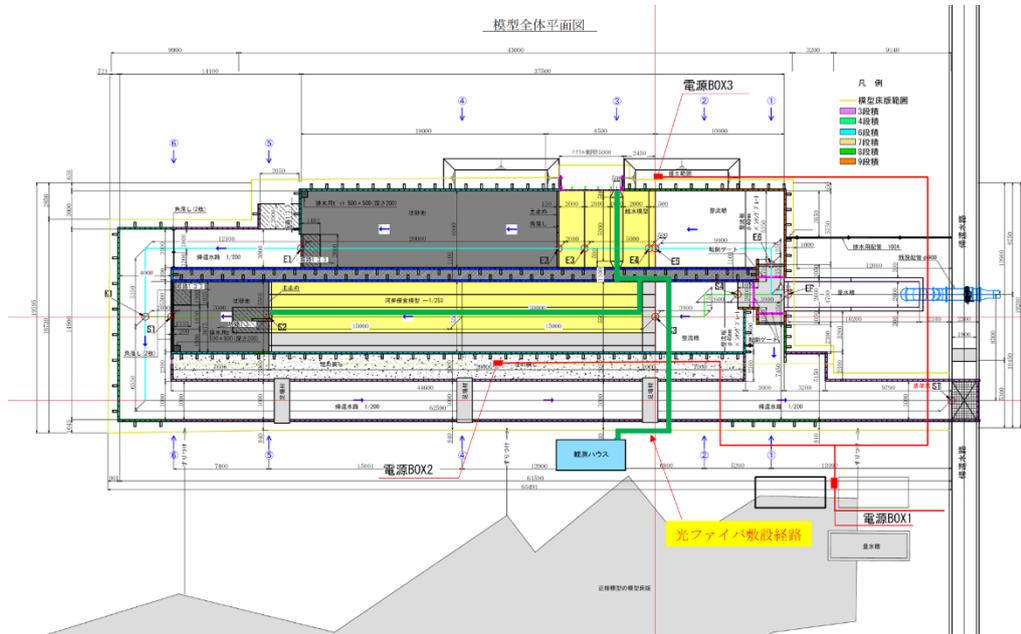


図 4.3-5 観測ハウスからの光ファイバ敷設経路図

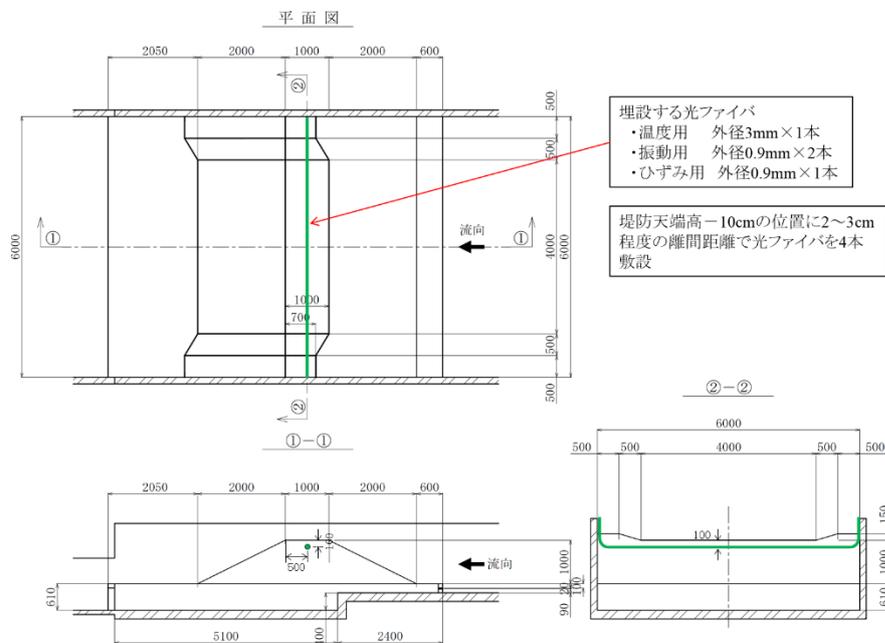


図 4.3-6 越水実験設備への光ファイバ敷設位置図

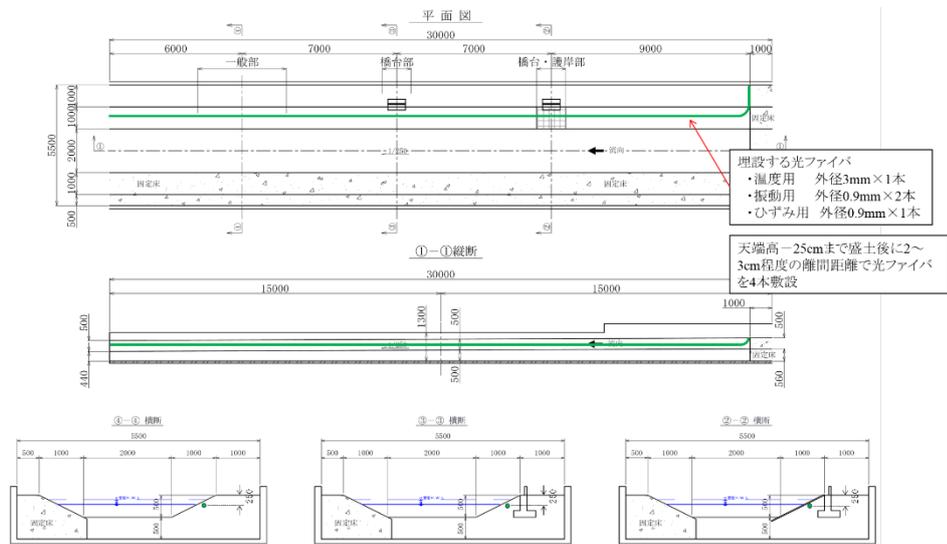


図 4.3-7 河岸侵食実験設備への光ファイバ敷設位置図

光ファイバ敷設作業等を写真 4.3-1~4.3-6 に示す。



写真 4.3-1 光ファイバ敷設 (越水)

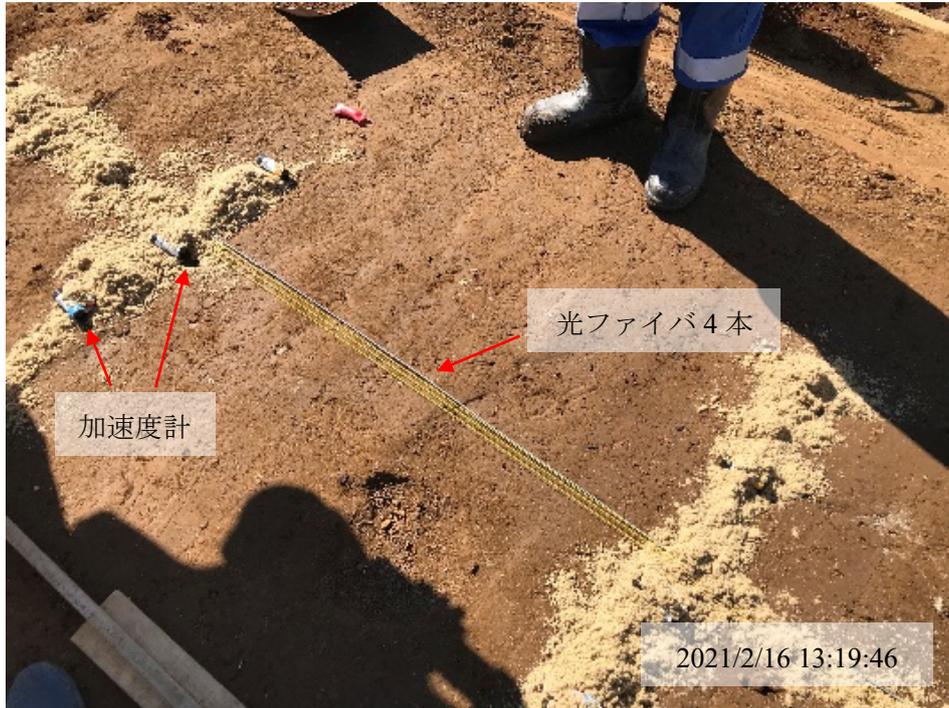


写真 4.3-2 光ファイバ敷設（越水）



写真 4.3-3 光ファイバ位置出し



写真 4.3-4 光ファイバ敷設 (侵食)



写真 4.3-5 光ファイバ敷設 (侵食)

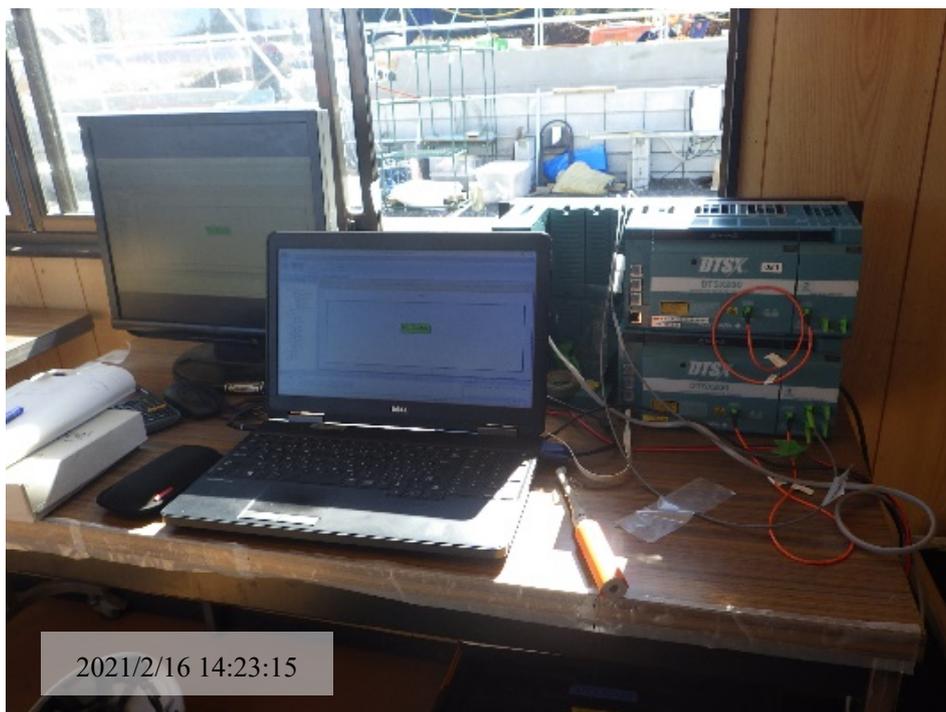


写真 4.3-6 DTS システム

#### ・実験での検証結果

DTS 温度は、空間方向に 1m、時間方向に 2 分の範囲のデータの最大・最小値から 10%のデータを除外した上で平均化の処理をした値とした。時間方向の範囲については 1 分間の平均値では、別途測定した水温計による温度ばらつき 1℃に比べて約±0.5℃と大きかったため、2 分間の平均値を取ったところ±0.2℃に落ち着いたため、2 分間の平均値を使用することとした（後述の図 4.3-15 参照）。

#### 【越水試験】

越水試験の模式図を図 4.3-8 に、温度変化を図 4.3-9～図 4.3-11 に示す。図 4.3-9 より埋設部分と空気中では温度コントラストがあるものの、水温と堤防部分に明瞭な温度差がなく、水温も 1℃程度値が変動している（図 4.3-11 黒線参照）。図 4.3-10 より越水開始から試験終了までやや温度上昇する傾向がみられ、試験終了時には上流側水温計の温度と埋設した堤防部分の温度が同じ程度になっている。14:50 頃より堤外地側の端の部分で温度低下が認められ、14:59 に同箇所付近の堤防が欠損している。

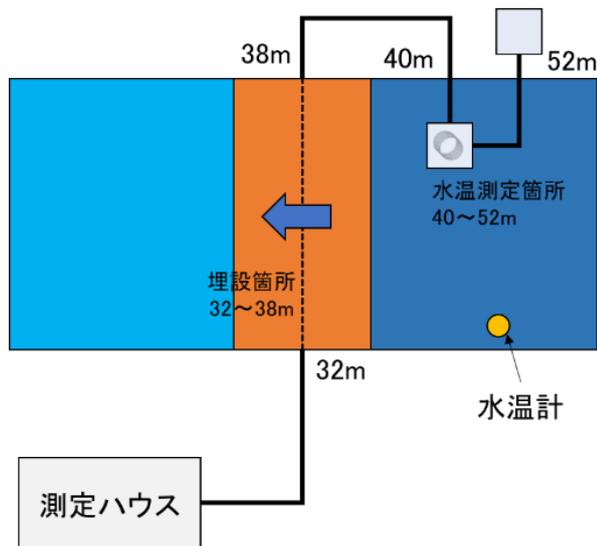


図 4.3-8 越水試験 DTS 計測用光ファイバ配置模式図

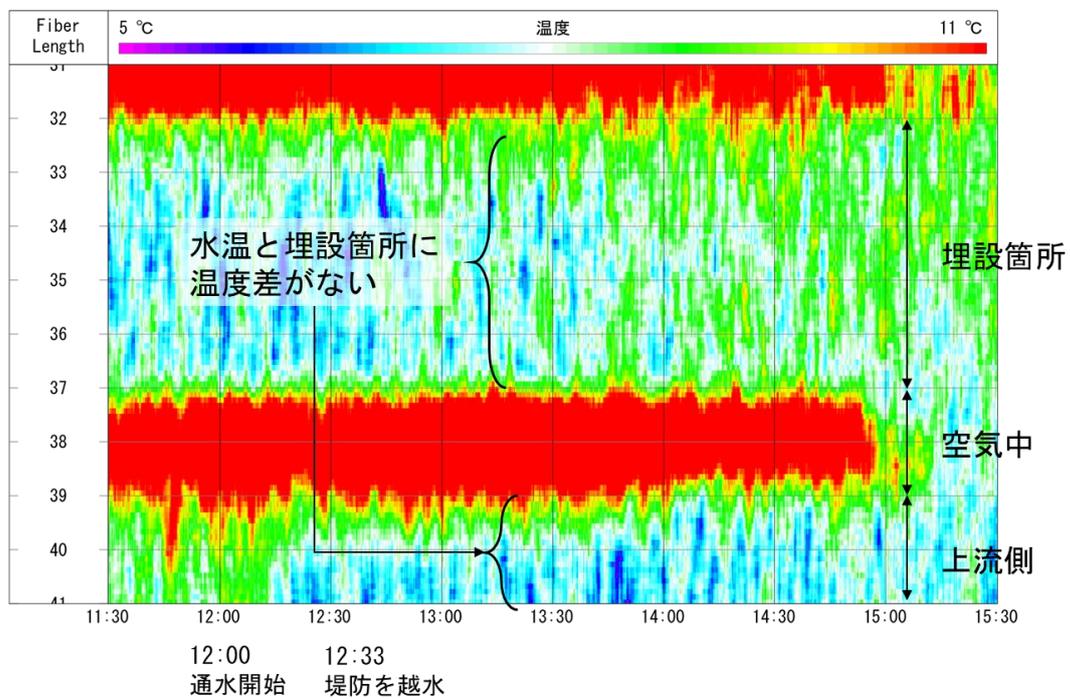


図 4.3-9 越水試験 DTS 測定結果

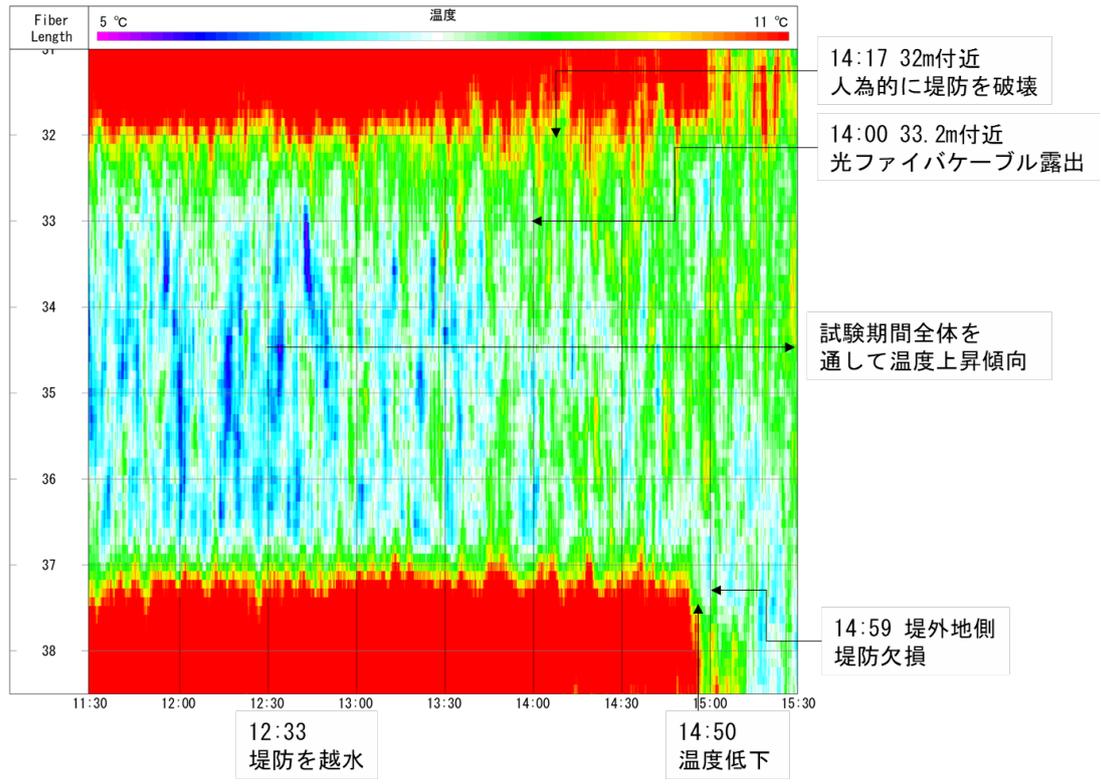


図 4.3-10 越水試験 DTS 測定結果 堤防箇所拡大図

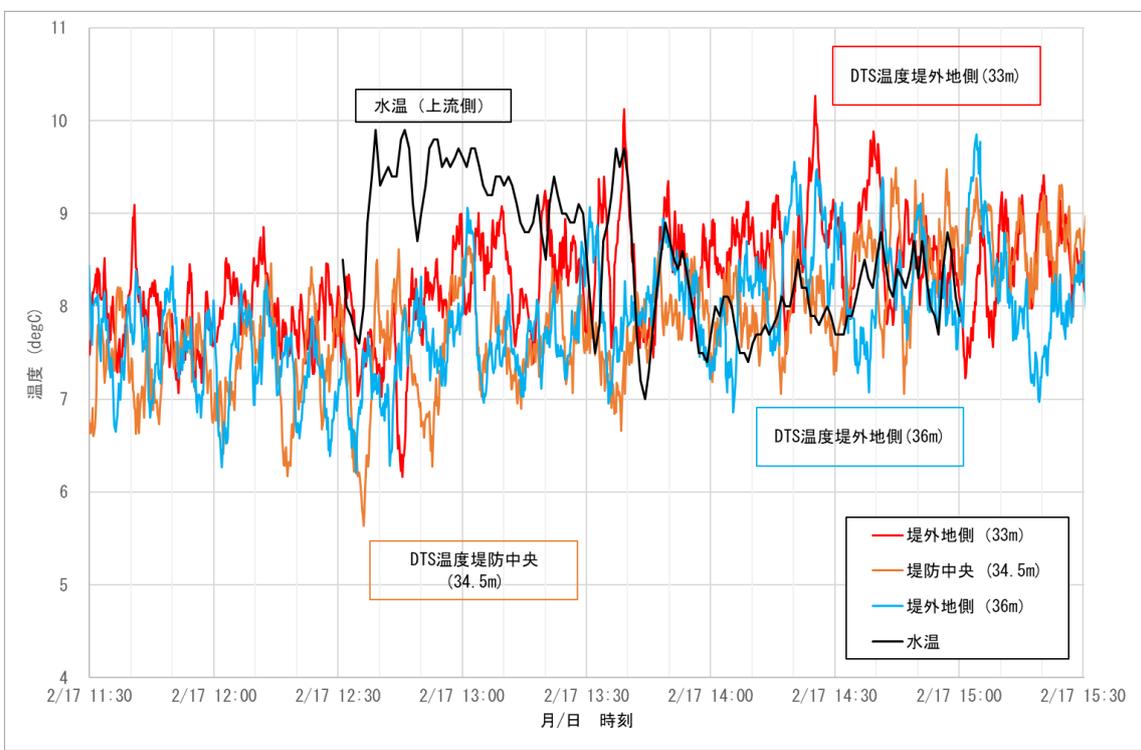


図 4.3-11 越水試験 DTS 測定結果 2

### 【侵食試験】

侵食試験の模式図を図 4.3-12 に、温度変化を図 4.3-13～4.3-15 に示す。試験開始前に埋設箇所、空気中および下流側で明瞭な温度コントラストが確認されており、設置環境による温度差を示している。また埋設区間では時間経過および設置場所で温度が変化するため埋設箇所によって日照・埋設などの条件が異なることが考えられる。

注水開始後、下流側の水温を測定する区間(光ファイバ長 60～81m)で温度変化があり、流水が下流側のケーブルへ到達したことを示している。この時の下流側光ファイバケーブルの温度は、上流側に設置した温度計とほぼ同じ値を示しており、流水はほぼ温度変化なく上流から下流に達していると考えられる。

13:15 頃に下流側で発生したケーブルの露出と対応するように光ファイバ長 45m 付近で温度低下が発生し前後の区間にも徐々に温度低下の傾向が確認された。

13:25 頃から光ファイバ長 38～43m 付近、続いて光ファイバ長 35m 付近で温度低下が発生している。また、光ファイバ長 23～33m 間の広い範囲でも温度低下が発生しており、これら区間の上流側には 13:30 頃にケーブル露出が発生していることから河岸欠損による温度変化と考えられる。

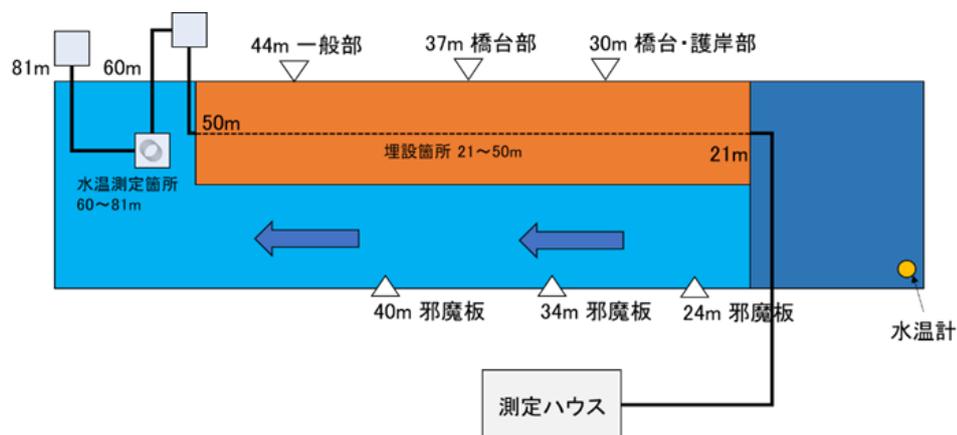


図 4.3-12 侵食試験 DTS 計測用光ファイバ配置模式図

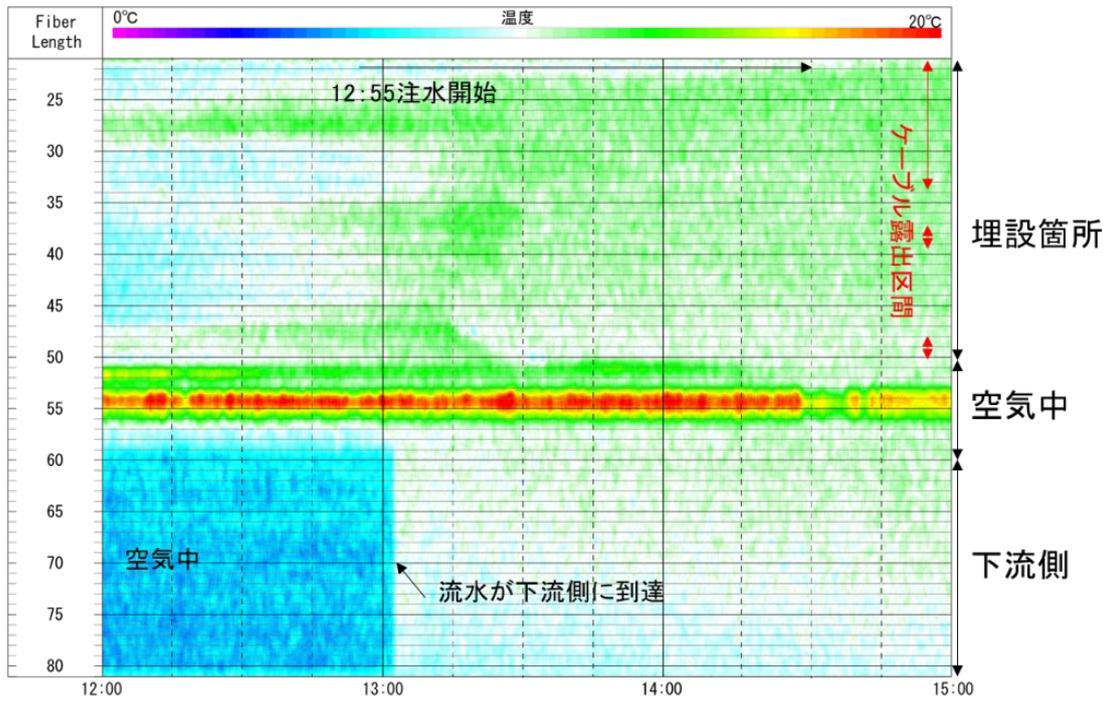


図 4.3-13 侵食試験 DTS 測定結果

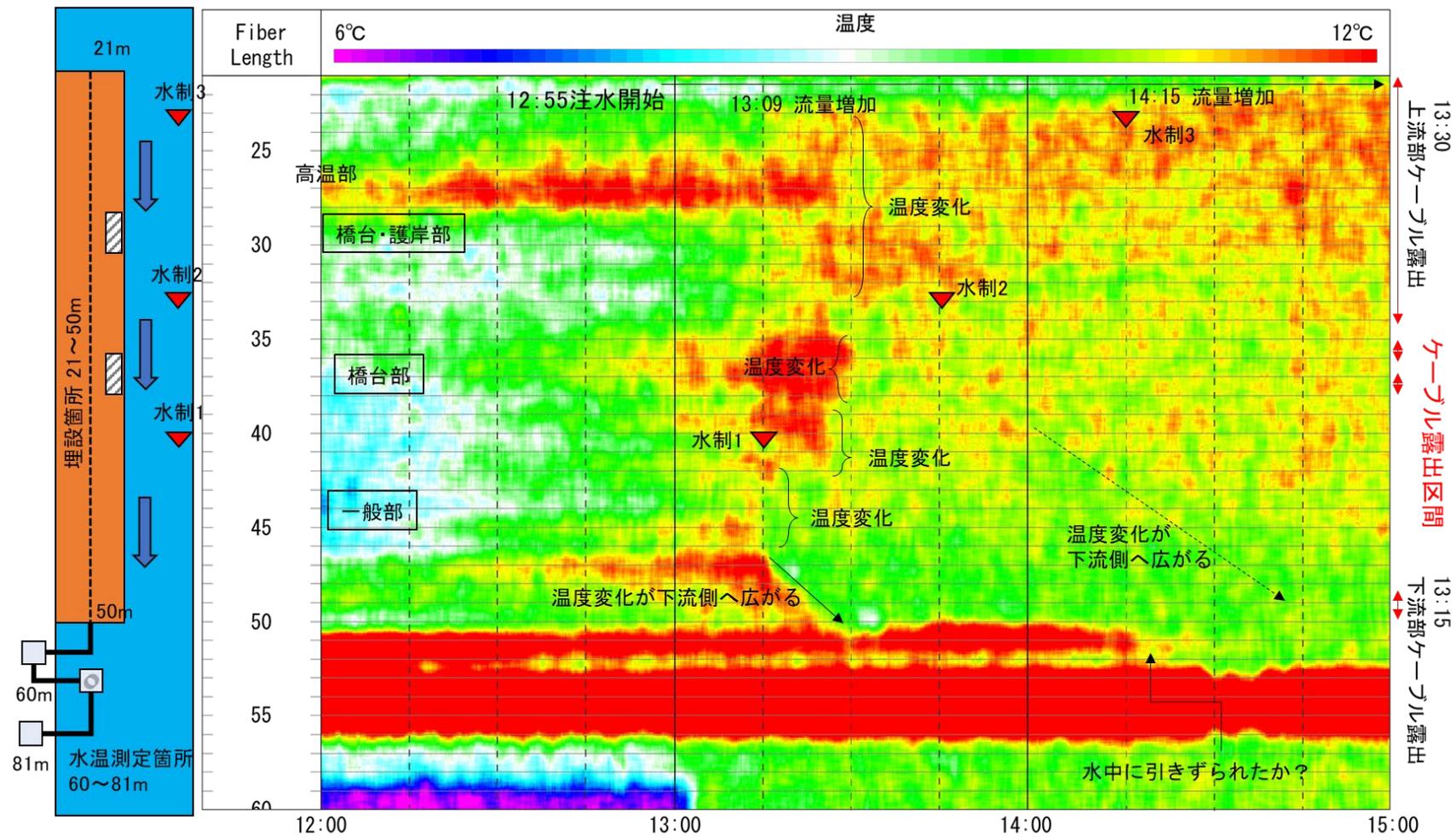


図 4.3-14 侵食試験 DTS 測定結果 堤防箇所拡大図

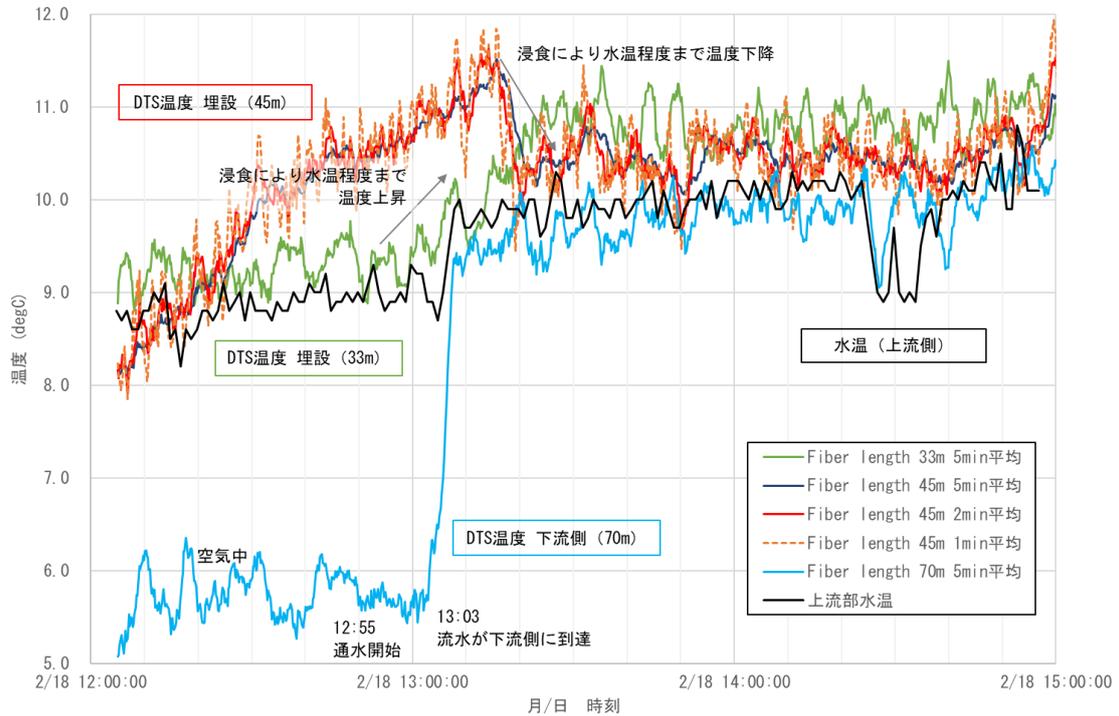


図 4.3-15 侵食試験 DTS 測定結果 2

・結果の整理、考察

温度の時間変化を記録することで、堤防が徐々に侵食されていく過程を確認できる可能性が高い。ただし、水温と地温の温度差が小さい場合は検知が難しい。

また、設置場所の環境（日照・降雨）により温度差が生じた場合に越水・侵食との判別がつけることが難しい。気温・水温などのデータを把握し、関連性についてのバックグラウンド計測をすることで判別可能になると考えられる。

#### 4.4 歪計測 横河電機株式会社

##### ・システムの概要

横河電機は、光ファイバひずみセンサ BOC DR (Brillouin Optical Correlation Domain Reflectometry) を用いた堤防の変状検知システムを提案する。BOC DRは、光ファイバ内の Brillouin 散乱光周波数を測定し、これに所定の係数を乗算することによって、ひずみ (光ファイバの伸縮) を取得する。空間分解能 10 cm で堤体欠損箇所を識別・特定することが可能である。

測定位置と空間分解能を任意にプログラミング可能なため、通常監視時には数 m 程度の粗い分解能で数 km 範囲を監視し、異常が疑われる位置の発見時には当該位置の周辺のみを 10 cm の高空間分解能で詳細測定することが可能である。



図4.4-1 外観図

表4.4-1 仕様<sup>1</sup>

項目	仕様
距離レンジ	1 km (標準値, 延長可能)
距離分解能 <sup>2</sup>	10 cm (標準値, 拡大可能)
距離サンプリング分解能 <sup>3</sup>	1 cm (標準値, 通常は空間分解能の1/2)
測定ひずみ分解能 <sup>4</sup>	±20 μ (標準値) / ±1 μ (長時間平均時)
測定ひずみ範囲	0 μ ~ +6000 μひずみ
測定チャンネル数	1 (光スイッチオプションで拡張可能)
光コネクタ	FCコネクタ APC研磨 (FC/APC) ナローキー
光ファイバ	SMF (シングルモード光ファイバ) に対応
通信インターフェース	10/100/1000BASE-T Ethernet
外形寸法 (突起部を除く)	W 600 mm × H 558 mm × D 700 mm

1 試作品の仕様は暫定の値である。

2 測定値を平均する区間を意味する空間分解能のこと。

3 データを読み取るサンプル点間隔。サンプル点 ± 空間分解能/2 の範囲の歪を測定する。

4 測定距離、測定点数、測定時間などの測定条件によって分解能は異なる。

## ・システムの原理

### ① ひずみ測定の原理

光ファイバひずみセンサBOCDRは、波長 $1.55\ \mu\text{m}$ のレーザー連続光を周波数変調し、その一部をプローブ光として光ファイバセンサケーブル(FUT)に入射する。シリカガラス製の光ファイバ内では、プローブ光の周波数から約 $11\ \text{GHz}$ シフト(ブリルアン周波数シフト, BFS)した周波数に自然ブリルアン散乱光が発生し、その一部が後方散乱光として入射端へ戻ってくる。後方散乱光は、周波数変調された光源の一部と合波してヘテロダイン検波され、そのスペクトルのピーク周波数からBFSが測定される。BFSは光ファイバセンサケーブルの受けたひずみ及び温度に比例して変化するため、BOCDRはBFSに所定の変換係数を乗算することでひずみを測定できる。

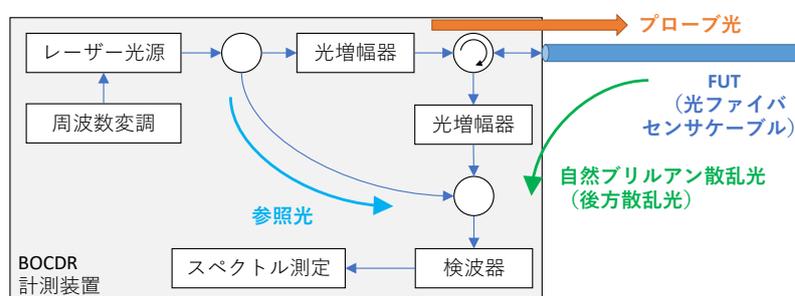


図4.4-2 原理図

### ② 計測精度

光ファイバひずみセンサBOCDRは、空間分解能 $10\ \text{cm}$ (読み取り位置 $\pm 5\ \text{cm}$ のひずみを識別する性能)で、任意の指定位置におけるひずみを測定する。ひずみ分解能( $1\sigma$ )は数十 $\mu\text{m}$ 程度(計測時間による)である。

### ③ 機器の配置

光ファイバセンサケーブルを、越水実験においては天端の $10\ \text{cm}$ 下に埋め込み、河岸侵食実験においては河床から $25\ \text{cm}$ の高さかつ河岸の土砂表面から $10\ \text{cm}$ 下に埋め込む。越水実験の測定条件は、測定周期1分、空間分解能 $10\ \text{cm}$ とし、堤体幅 $6\ \text{m}$ 以上にわたって $5\ \text{cm}$ 毎にひずみを読み取る。河岸侵食実験の測定条件は、測定周期1分、空間分解能 $10\ \text{cm}$ とし、堤体長 $29.15\ \text{m}$ 以上にわたって $5\ \text{cm}$ 毎にひずみを読み取る。

### ④ 電源供給および通信方法

光ファイバセンサケーブルへの電源供給は不要である。また、光ファイバセンサケーブルそのものが伝送媒体となるためセンサ部分(FUT)との通信は不要である。計測装置本体は、計測小屋にて $100\ \text{VAC}$ 電源で動作し、Ethernet通信機能を備えている。

### ⑤ 変状検知の原理

図4.4-3に示すように、微視的には平坦ではない堤体上に光ファイバセンサケーブルを敷設し、土砂を堆積して圧接すると、光ファイバセンサケーブルは堤体に沿って伸び、ひず

みを生じると考えられる。堆積した堤体が欠損すると、光ファイバセンサケーブルが元の無ひずみ状態に戻る。このひずみ変化から堤体の変状を検知するのが測定の原理である。

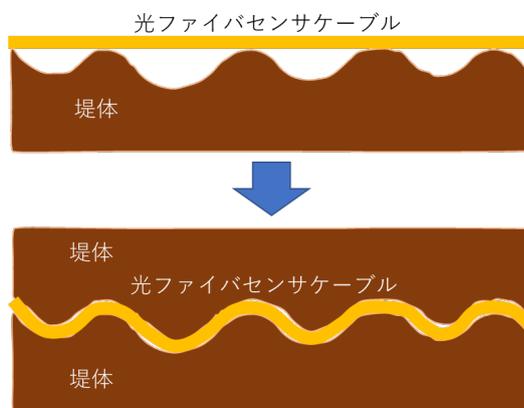


図4.4-3 微視的な光ファイバセンサケーブルの伸び

#### ⑥ 変状検知の原理、ひずみと変位の関係

ひずみは光ファイバセンサケーブルの長さ方向の変化であるから、ひずみの積分によって長さ方向の変位が得られる。しかしながら、堤体天端高の変化方向は光ファイバセンサケーブルの長さ方向と直交である。図4.4-4に示す関係から導かれる(4.4-1)式より、光ファイバセンサケーブルの直交方向の最大変位を概算することができる。

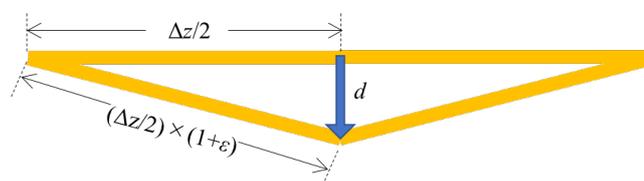


図4.4-4 空間分解能、ひずみ、変位の関係

$$d = \sqrt{\left[\frac{\Delta z}{2}(1 + \varepsilon)\right]^2 - \left(\frac{\Delta z}{2}\right)^2} \quad (4.4-1)$$

ここで、 $\Delta z$ はBOCDRの空間分解能、 $\varepsilon$ はひずみ、 $d$ は垂直方向変位である。ただし、図4.4-4の構造（距離 $\Delta z$ 毎に変位 $d$ ）が図4.4-3のように周期的に繰り返される場合は、堤体の欠損幅が広くなっても変位は $d$ のみである。よって、堤体天端高の変化量と(4.4-1)式で得られる変位 $d$ の定量的関係は、本実験の敷設状況等によって異なる。

## ・技術の特徴

### ① 検知性能

光ファイバひずみセンサBOCDRは、昼夜・天候を問わず検知可能である。試作したBOCDRの性能は、空間分解能10 cmを実現しており(任意の読み取り位置 $\pm 5$  cmのひずみを検知する)、これは光ファイバひずみセンサとしては世界トップクラスの性能である。ひずみ分解能( $1\sigma$ )は数十 $\mu$ 程度(計測時間による)であり、本実験で示すように堤体変状の有無をとらえるのに十分な精度を備えている。数百 mから数 km区間にわたって遠隔監視を行い、区間内で変状が発生した場合、その箇所を即時に特定するとともにEthernet通信ネットワークにより即時通知可能。

### ② 耐候性および耐久性

システム(計測装置および光ファイバセンサケーブル)は耐候性および耐久性を備えている。計測装置は、耐候性および耐久性を備えた屋外キャビネットに備えることで実現する。光ファイバセンサケーブルは、芯線のガラスは耐腐食性・耐薬品性などの優れた耐候性を有し、芯線を保護する被覆材によって機械的な耐久性を備える。ケーブルは概ね10000  $\mu$ 程度までの引張り強度に耐える。

## ・現場実装で想定する配置方法

### ① 計測装置の配置

計測装置の配置は、電源供給および通信手段を確保した場所とする。ただし、横河電機の光ファイバセンサ(計測装置)は、屋外キャビネット内に設置、電源配線なしでソーラーパネルと電池による動作、無線通信での遠隔操作の実績がある。BOCDRは試作品のため製品化時に対応見込み。

### ② ケーブル敷設

光ファイバセンサケーブルは堤体の天端もしくは護岸法面に埋め込むため、河川利用や交通の妨げにならない。

工事において、堤体の形状に合わせて光ファイバセンサケーブルの向きを柔軟に曲げるなどの処置が可能である。曲げにともなう光信号の減衰はBOCDRの測定に影響しないため、BOCDRは光ファイバセンサケーブル敷設工事の影響を受けにくい。

### ③ コスト

導入コスト100 mあたり300万円を満たす見込みである(BOCDRは試作品であるため試算金額)。距離1.5 kmのとき、導入コスト2900万円(計測装置2000万円+ケーブル含む設置費900万円)、維持管理費年間400万円の見込み。距離が長いほどコストパフォーマンスが良くなる。

## ・実験の計画

システムの配置を図4.4-5に示す。BOCDRは図中「計測装置」の位置に配置する。越水測定用ケーブル(全長約150 m)を青色実線で、河岸侵食測定用ケーブル(全長約170 m)を橙色破線で表示した。

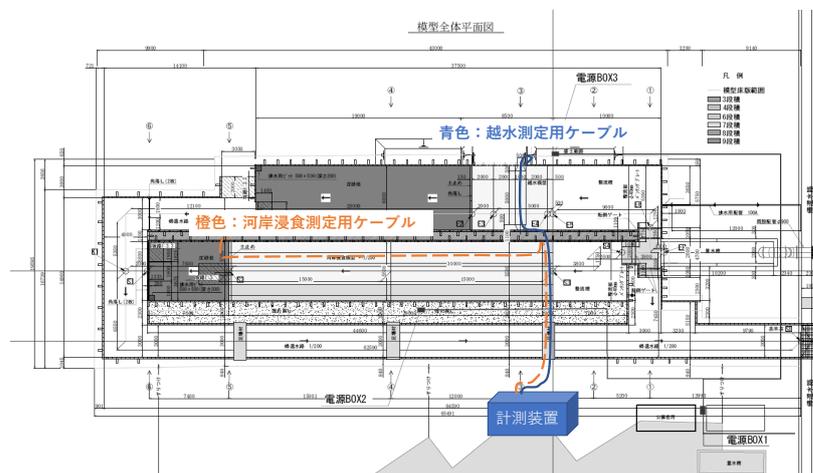


図4.4-5 配置図

越水測定用ケーブル(全長約150 m)のうち、計測装置との接続位置を起点として127.9 mから134.4 mまでの6.5 m区間(堤体両端における埋め込み深さ分を含む)が堤体部である。

河岸侵食測定用ケーブル(全長約170 m)のうち、計測装置の接続位置を起点として129.2 mから158.3 mまでの約29.1 m区間が堤体部である。

実験条件について主要な値を下表にまとめる。

表4.4-2 実験条件と結果まとめ

項目	越水	河岸侵食
測定距離	7.0 m	29.9 m
空間分解能	0.10 m	0.10 m
読み取り間隔	0.05 m	0.05 m
測定点数	141点	599点
測定周期	約1分	約1分
測定誤差	20 $\mu$ (代表値)	100 $\mu$ (代表値)

## ・実験での検証結果<sup>5</sup>

越水実験と河岸侵食のいずれにおいても、変状を検知するとともに、空間分解能10 cm(データ読み取り位置は5 cm毎)で堤体欠損位置を特定し、その位置毎に欠損の進行状況を連続的に測定できた。また、変状発生前に堤体の一部にひずみが蓄積する様子も観察できた。これらは、他社のひずみ計測装置(ひずみゲージや、他社の低分解能光ファイバひずみセンサ)では実現できず、横河電機のBOCDRでのみ得られるひずみ分布データであり、ユーザーの堤防変状検知にとって有益である。以下に詳細を述べる。

実験結果について主要な値を下表にまとめる。

表4.4-3 実験条件と結果まとめ

項目	越水	河岸侵食
測定誤差	22.2 $\mu$	93.2 $\mu$
判定閾値	44.4 $\mu$	186.4 $\mu$
検知時間	最短5分/最長5分	最短 1分/最長11分

表4.4-4 越水の変状時刻まとめ

構造部位置	変状位置 <sup>6</sup>	ビデオ	BOCDR
堤体近端	1.0 m	14時17分	14時22分
堤体遠端	5.3 m	14時56分	15時01分

表4.4-5 河岸侵食の変状時刻まとめ

構造部位置	変状位置 <sup>7</sup>	ビデオ	BOCDR
橋台・護岸部	9.0 m	14時14分	14時15分
橋台部	16.0 m	13時30分	13時33分
一般部	23.0 m	13時16分	13時27分

<sup>5</sup> データ処理に関する注意事項：データはすべて、距離軸方向に3点の中央値フィルタを適用した。変状検知時刻を判断するにあたり、時間軸方向に7点の移動平均を適用した。三次元表示は、5点の二次元テッセレーション処理を施した。

<sup>6</sup> 計測小屋側の堤体端からの距離

<sup>7</sup> 計測小屋側(上流側)の堤体端からの距離

### ① 越水実験

光ファイバひずみセンサBOCDRで測定したひずみ分布の俯瞰図を図4.4-6に示す。俯瞰図の距離原点0 mおよび6 m（実際の光ファイバ距離128.15 mおよび134.15 mに相当）は堤体端である。俯瞰図において、赤色はひずみが加わっている箇所、青色はひずみがない箇所を示す<sup>8</sup>。同図は、時間経過とともに堤体天端の欠損が進行した位置・時刻を連続的に示している。写真と突き合わせた堤体欠損位置（例：1.0 m、5.3 m）は一致し、時刻は欠損後5分以内だった。

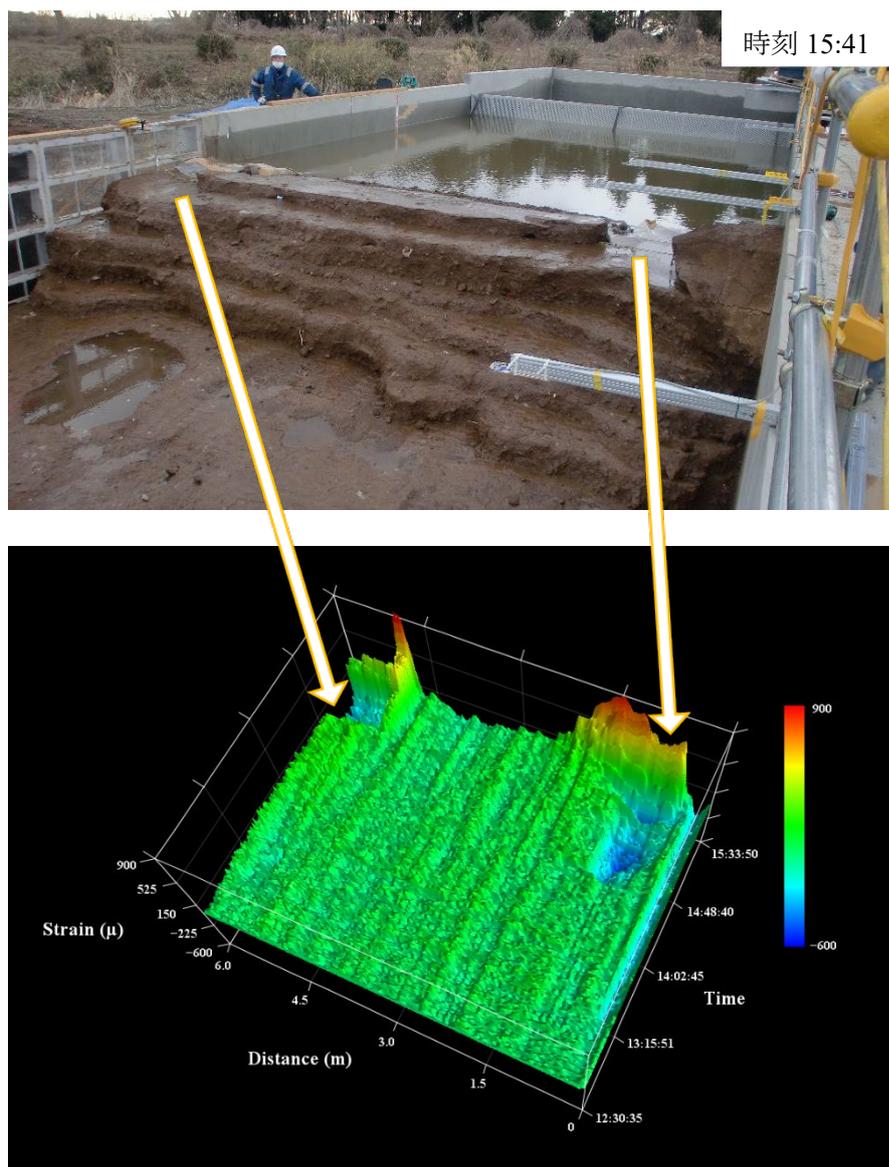


図4.4-6 越水実験ひずみ分布(俯瞰)

<sup>8</sup> 測定開始時の堆積土砂の与圧でひずみが加わった初期状態をひずみ0として表示しており、図中青色の-600  $\mu$  は初期状態に対する相対値であり圧縮ひずみではない。

BOCDRの測定誤差は、堤体が欠損しなかった堤体中央（3.0 m地点）において30分間のひずみを平均することにより、22.2  $\mu$ と計算した。これより $-2\sigma$ 相当の $-44.4 \mu$ のひずみを越水時の堤体変状の閾値とした<sup>9</sup>。

下図に示すのは、BOCDRで測定したひずみ(実線)、その7点移動平均(破線)、および閾値(点線)である。ひずみの移動平均値が閾値を下回る交点から、変状の発生時刻を得た。変状発生から5分以内に変状を検出した。BOCDRは、堤体端から1 m近辺(距離129.15 m)にて、14時22分頃に変状を検知(図4.4-7)、堤体端から5.3 m近辺(距離133.45 m)にて、15時01分頃に変状を検知した(図4.4-8)。

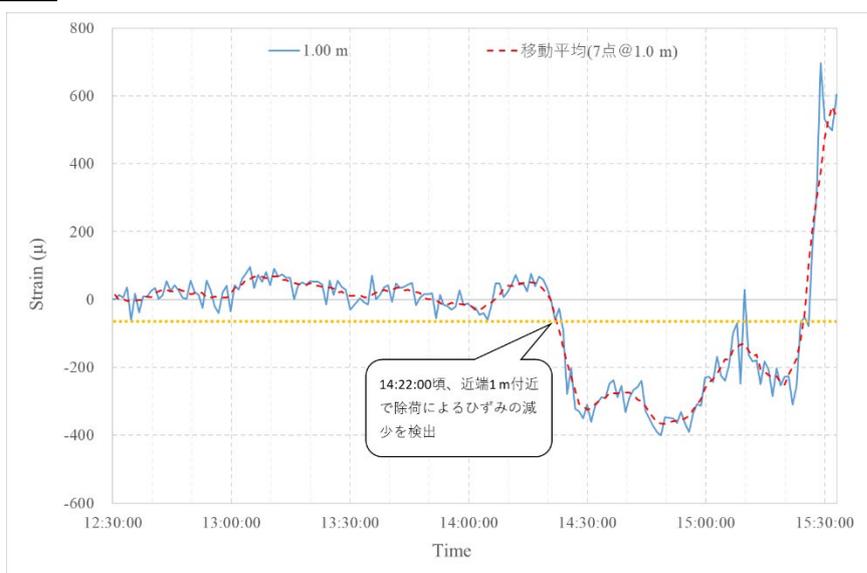


図4.4-7 近端側（計測小屋側）

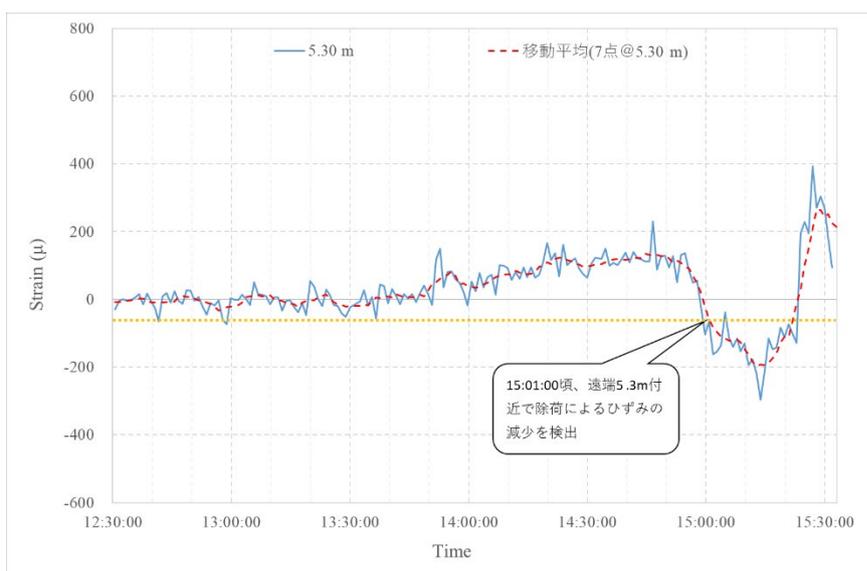


図4.4-8 遠端側（アクリル板側）

<sup>9</sup> 閾値を $-3\sigma$ にすれば偽陽性の誤検知は減るが、検知が遅くなる。

堤体の天端高が低下した位置（例：1.0 m、5.3 m）での光ファイバセンサケーブルの垂直方向変位は、(4.4-1)式から幅10 cmあたり約1 mmであり、欠損幅を考慮すると最大7 mmと概算され、この数値は築堤時の状況からみて合理的な範囲と思われる。堤体最上段はある程度まとまって欠損し、天端高から光ファイバセンサケーブル埋め込み深さまでの詳細な変位量を知る術はないため、光ファイバセンサケーブルの垂直方向変位との定量的関係は明らかにならなかった。定性的には、堤体の欠損が光ファイバセンサケーブル埋め込み位置に到達することによって変状を検知できた。

上記の天端高低下位置にて、ひずみはいったん低下した。これは、光ファイバセンサケーブル上に堆積していた土砂の圧迫がなくなり、ひずみの減少を検出したためである。その後、15時22分頃以降にひずみが増加したのは、堤体欠損が進んで光ファイバセンサケーブルの露出が増え、水中でケーブルが自由に動けるようになり、流向へ水を受けて弓状に引張られることでひずみを増したと考えられる(図4.4-9)。



図4.4-9 越水実験で露出し水圧を受けるケーブル

## ② 河岸侵食実験

光ファイバひずみセンサBOCDRで測定したひずみ分布を二次元コンター表示したものを図4.4-10に示す。図の距離原点0 mおよび29.2 m（実際の光ファイバ距離129.2 mおよび158.4 mに相当）は上流および下流の堤体端である。図4.4-10において、赤色はひずみが加わっている箇所、青色はひずみがない箇所（すなわち土砂が侵食された箇所）を示す<sup>10</sup>。河岸侵食発生によって光ファイバセンサケーブルが露出してひずみが低下している。同図は、時間経過とともに河岸侵食による法面の欠損が進行していく過程を連続的に示している。写真と突き合わせた堤体侵食位置は一致し、時刻は侵食後11分以内だった。同図に補助線として加えた白色点線は、河川下流側から上流側へ向かって欠損が進行していく様子を明確に示している。

<sup>10</sup> 測定開始時の堆積土砂の与圧でひずみが加わった初期状態をひずみ0として表示しており、図中青色の-1600  $\mu$  は初期状態に対する相対値であり圧縮ひずみではない。

図4.4-10において、土砂が侵食された箇所(例：図中の4 m付近や、13 m付近)でひずみが無くなった時刻の直前に、上流へ2 m離れた地点(例：図中の2 m付近や、11 m付近)では逆にひずみが増加している(赤色で表示)。この蓄積したひずみを開放するために下流側の土砂侵食が引き起こされていると考えると、ひずみの強い赤色部分は侵食の予兆である可能性がある。

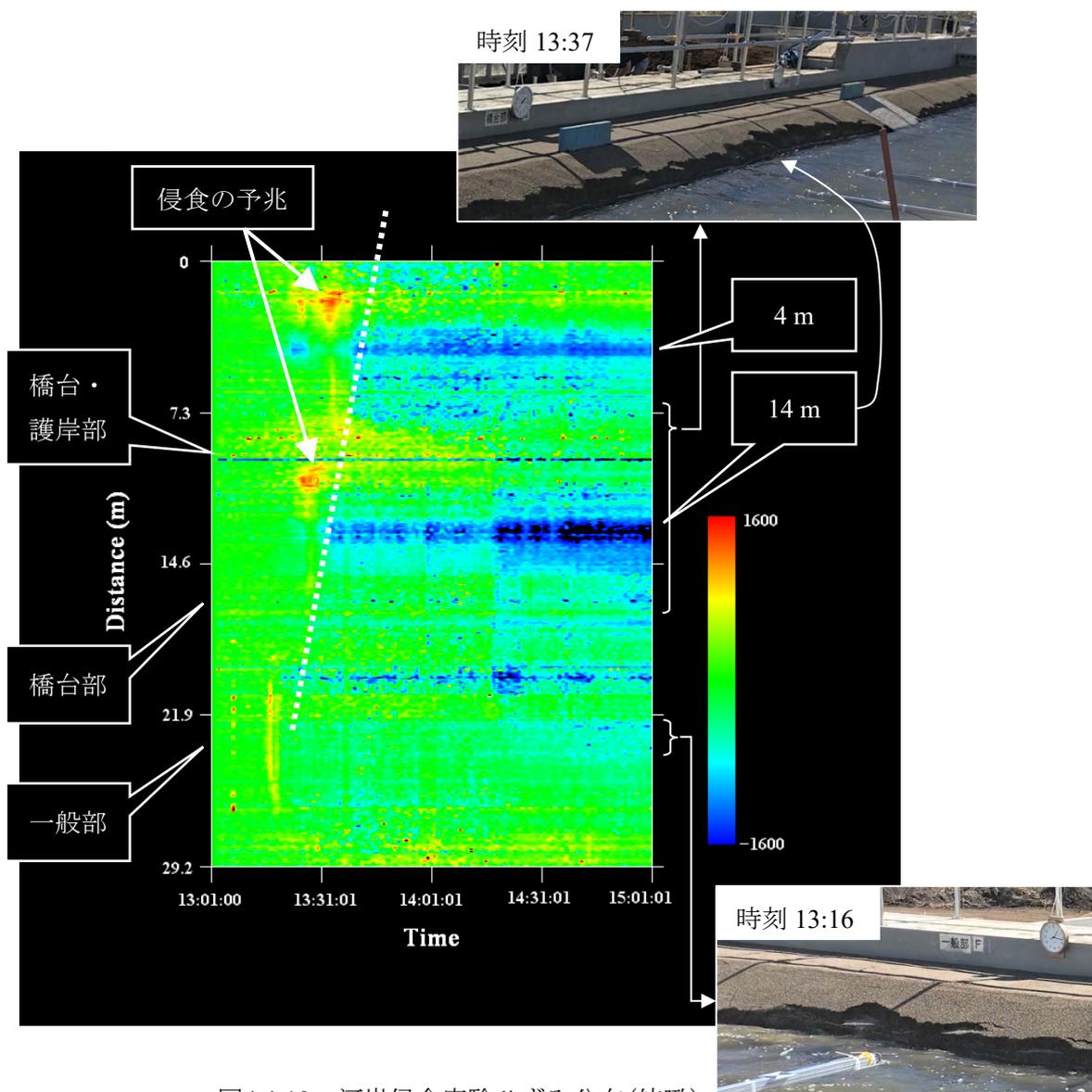


図4.4-10 河岸侵食実験ひずみ分布(俯瞰)

BOCDRの測定誤差は、堤体の侵食が少なかった堤体遠端(29.15 m地点)において30分間のひずみを平均することにより、 $93.2 \mu$ と計算した。これより $-2\sigma$ 相当の $-186.4 \mu$ のひずみを越水時の堤体変状の閾値とした<sup>11</sup>。

<sup>11</sup> 閾値を $-3\sigma$ にすれば偽陽性の誤検知は減るが、検知が遅くなる。

BOCDRで測定したひずみが正から負へと変化する様子から、変状の発生時刻が得られた。変状発生から11分以内に変状を検出した。BOCDRは、堤体上流端から23.0 m近辺(距離152.2 m)の一般部にて、13時27分頃に変状を検知(図4.4-11)、堤体上流端から16.0 m近辺(距離145.2 m)の橋台部にて、13時33分頃に変状を検知(図4.4-12)、堤体上流端から9.0 m近辺(距離138.2 m)の橋台・護岸部にて、14時15分頃に変状を検知した(図4.4-13)。

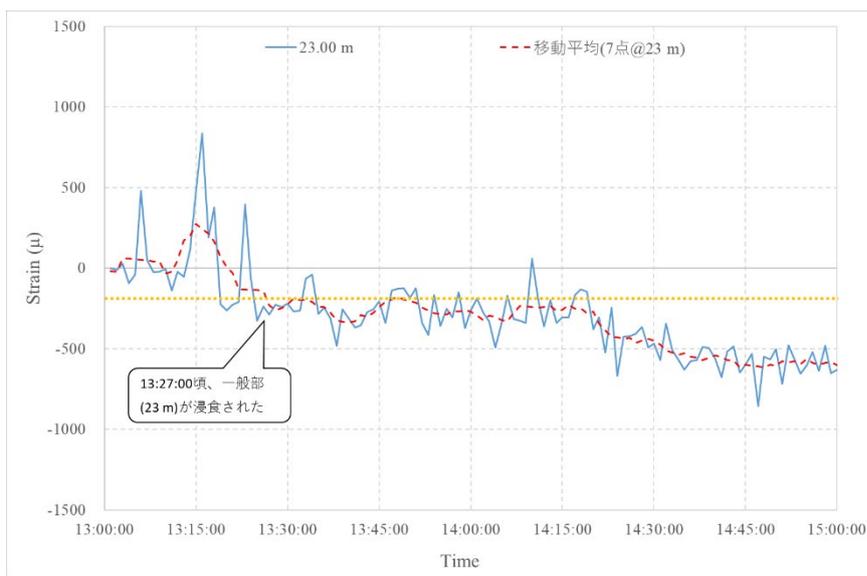


図4.4-11 一般部

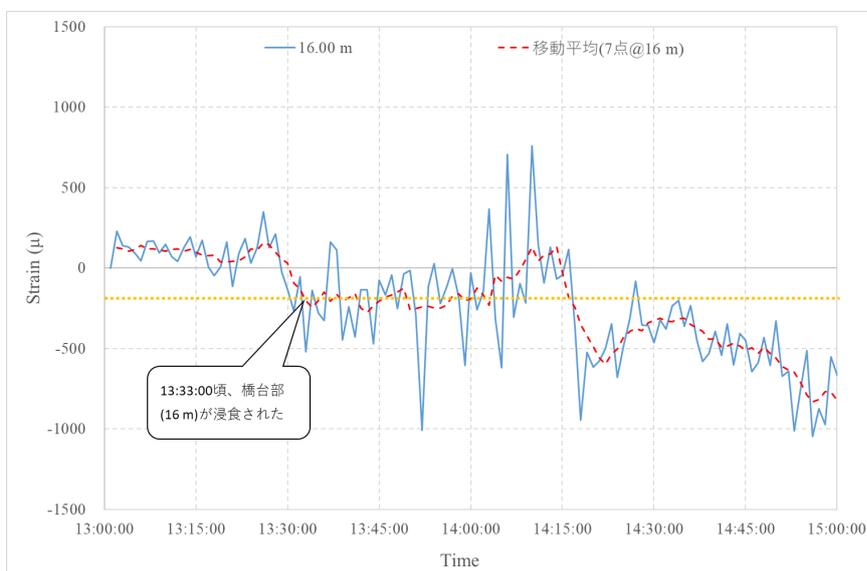


図4.4-12 橋台部

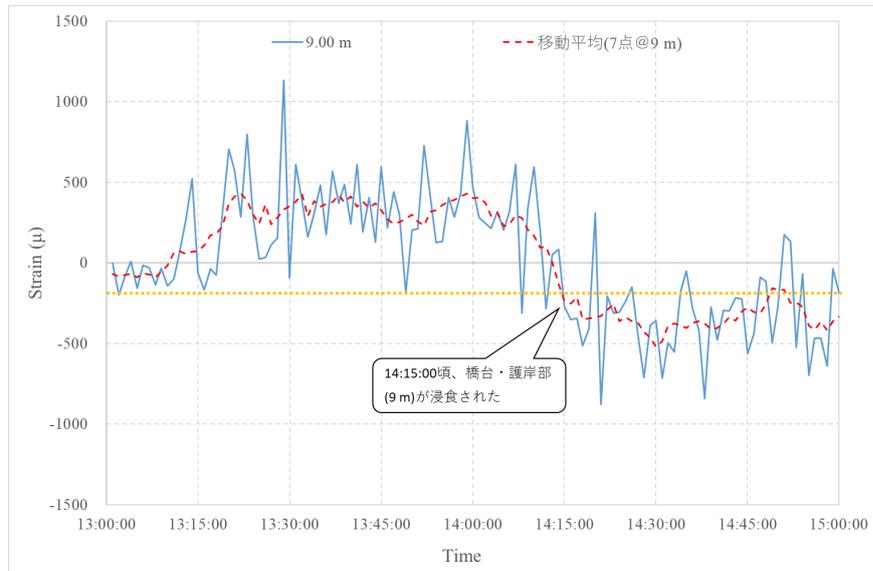


図4.4-13 橋台・護岸部

堤体の法面が侵食された位置（一般部23 m、橋台部16 m、橋台・護岸部9 m）での光ファイバセンサーケーブルの垂直方向変位は、(4.4-1)式から幅10 cmあたり約2 mmであった。実験時の侵食された幅が1.5 mの崩落について垂直方向に最大30 mmの変位があったと概算され、この数値は実験時の撮影動画と突き合わせてみて合理的な範囲と思われる（図4.4-14）。堤体法面はある程度まとまった大きさで崩落し、天端高から光ファイバセンサーケーブル埋め込み深さまでの詳細な変位量を知る術はないため、光ファイバセンサーケーブルの垂直方向変位との定量的関係は明らかにならなかった。定性的には、堤体の侵食が光ファイバセンサーケーブル埋め込み位置に到達することによって変状を検知できた。



図4.4-14 一般部の法面崩落

- **結果の整理、考察**

越水実験において、堤体欠損による水流が光ファイバセンサケーブルの埋め込み深さに到達したときに越流を検知した。光ファイバセンサケーブルの埋め込み深さを浅くすることで早期検知が期待できる。

河岸侵食実験において、良好な検知結果が得られた。ひずみの蓄積を解釈するアルゴリズム開発により侵食の予兆検知が期待できる。

## 5. まとめ

### 5.1 総合評価

「堤防に埋設された光ファイバを用い、①越水時や堤体破壊時に発生する振動、②堤体に浸入する水温と堤体温度との温度差、③異常個所の歪変化を検知することにより河川堤防の変状を検知するシステム」が、河川研究部河川研究室の技術要件および要求事項に合致したのか、ここで総合評価を行う。

#### ①技術要件

##### A) 堤防天端高が 10 cm 程度低下することを即時に検出可能なシステム

###### ①越流実験の計測結果

振動計測は 2 つの方法で計測したが、DVS 法において 14 : 43 頃から直接光ファイバが水流に暴露されると、ほぼ全周波数帯域にまたがる広帯域な振動になったこと、また、hDVS 法においても 14 時 45 分頃同様に振動が大きく変化したことを検知した。

温度計測では、水温、地温、気温の差が少なく明確な差異は見られなかった。

歪計測において、堤防近端部 14 時 17 分頃歪の変化を検知した。

###### ②越流実験の計測評価

光ファイバを堤防天端から 10 cm 深さに埋設し、越水試験で堤防天端高が 10 cm 程度低下する 2 か所の欠損が発生したことを即時に振動計測、温度計測、歪計測で検出することができた。

###### ③河岸侵食実験の計測結果

振動計測は 2 つの方法で計測したが、DVS 法において 13 : 15 頃一般部近傍の水制設置に伴い、数分後に光ファイバが露出、一般部振幅が急上昇した。また、13 : 26 頃橋台部近傍の光ファイバが水制設置の前に露出し橋台部の振幅が急上昇した。さらに 14 : 15 頃橋台・護岸部近傍の水制設置に伴い、数分後に光ファイバが露出し、橋台・護岸部振幅が急上昇した。また、hDVS 法においても 13 : 17 頃一般部近傍の水制設置に伴い、一般部振幅が急上昇することを検知している。

温度計測において、13:15 頃に下流側で発生したケーブルの露出と対応するように光ファイバ長 45m 付近で温度低下が発生し前後の区間にも徐々に温度低下の傾向が確認された。

さらに歪計測において、一般部 13 時 16 分、橋台部 13 時 30 分、橋台・護岸部 14 時 14 分に歪の変化を検知した。

###### ④河岸侵食実験の計測評価

光ファイバを堤防法面の表面から 10 cm 深さに埋設し、河岸侵食実験において、法面 10 cm 程度侵食（崩落）することを即時に振動計測、温度計測、歪計測で検出

することができた。

以上により、本システムは、堤防天端高が 10 cm 程度低下することを即時に検出可能なシステムと考える。

## B) 堤防天端幅が 1m 程度欠損することを即時に検出可能なシステム

### ①越流実験の計測結果

振動計測において、hDVS 法にて 14 時 56 分ごろ堤防遠端部で 100 mm 深さに埋設した光ファイバの振幅が大きく変化したことを検知した。

温度計測において、14:50 頃より堤外地側の端の部分で温度低下が認められ、14:59 に同箇所付近の堤防が欠損していることが確認された。

歪計測において、14 時 56 分ごろ歪の変化を検知した。

### ②越流実験の計測評価

越水実験で遠端部の堤防天端幅が 1m 程度欠損したが、これを振動計測、温度計測、歪計測で検出することができた。

### ③河岸侵食実験の計測結果

振動計測において、DVS 法にて 13:15 頃一般部近傍の水制設置に伴い、数分後に光ファイバが露出、一般部振幅が急上昇した。また、13:26 頃橋台部近傍の光ファイバが水制設置の前に露出し橋台部の振幅が急上昇した。さらに 14:15 頃橋台・護岸部近傍の水制設置に伴い、数分後に光ファイバが露出し、橋台・護岸部振幅が急上昇した。また、hDVS 法にて一般部の水制設置前面の堤防法面での振幅が 13 時 17 分頃大きく変化した。

温度計測において、13:15 頃に下流側で発生したケーブルの露出と対応するように光ファイバ長 45m 付近で温度低下が発生し前後の区間にも徐々に温度低下の傾向が確認された。さらに、13:25 頃から光ファイバ長 38~43m 付近、続いて光ファイバ長 35m 付近で温度低下が発生している。また、光ファイバ長 23~33m 間の広い範囲でも温度低下が発生しており、これら区間の上流側には 13:30 頃にケーブル露出が発生していることから河岸欠損による温度変化と考えられる。

歪計測において、一般部 13 時 16 分、橋台部 13 時 30 分、橋台・護岸部 14 時 14 分に歪の変化を検知した。

### ②河岸侵食実験の計測評価

河岸侵食試験において、法面 10 cm 程度侵食(崩落)することを即時に振動計測、温度計測、歪計測で検出することができた。

以上により、技術要件 A) 堤防天端高が 10 cm 程度低下することを即時に検出可能なシステム、B) 堤防天端幅が 1m 程度欠損することを即時に検出可能なシステムであるとする。

## ②要求事項

- A) 数百 m から数 km 区間に設置することを想定しており、区間内で変状が発生した場合、その箇所を即時に特定することが可能なこと。
- ・各計測機器の性能として、振動計測：5 km～30 km、温度計測：5 km、歪計測：1.5 km であり、それらの区間内で変状が発生した場合、即時に特定することが可能である。
- B) 実験で性能を確認できるもの
- ・振動計測、温度計測、歪計測ともに、越水実験および河岸侵食実験で各々の性能を確認した。
- C) 昼夜・天候を問わず、変状を検出可能なこと。
- ・各測定計器は計器室等に設置し、光ファイバは屋外型を用いるので、昼夜・天候を問わず計測が可能である。
- D) アイディア段階のものではなく、システムを中心となる計測装置がすでに試作され、計測装置の計測精度が確認されているもの。
- ・ここで提案する機器は、既に開発完了のものであり一部市販されているものである。
- E) 計測装置およびシステムに耐候性と耐久性があること。
- ・計測装置は室内環境とし、屋外光ファイバは既に 30 年以上の実績があり、超長期の耐久性がある。

## ③期待する要件

- A) 天端高の低下が進行していく過程または天端幅の欠損が進行していく過程を連続的に検知できること。
- ・越水実験において、堤防の近端部および遠端部の独立した堤防天端の欠損が振動計測、温度計測、歪計測で検知できた。  
この欠損の進行に関しては解析時間が短く類推であるが、振動や歪の分布幅の広がりから進行していく有様はイメージできた。
  - ・河岸侵食実験において、初期段階からの法面侵食状況の変化を連続的に振動計測、温度計測、歪計測で検知することができた。その中で、歪計測においては、堤体内に発生する応力の変化も経時的に把握できた。
- B) 導入コストが低価格であること。導入コストは設置費込みで 100m あたり 300 万円以内とする。また、維持管理コストが低価格であること。

- ・各報告にて、イニシャルコストを記載したが、ここではトータルシステムとして検討し評価する。その際、ここで提案している 3 つの技術の組み合わせを次のように考え、コスト評価する。

ケース 1：変状の即時検知性の高い振動計測と侵入水／地温の差異を把握する温度計測の組み合わせ

ケース 2：変状の即時検知性の高い振動計測と変状の正確な把握に優れる歪測定  
の組み合わせ

ケース 3：各特性が総合的に評価できる振動計測＋温度計測＋歪計測の組合せ

表 5.1 導入コスト試算 単位千円

ケース 1	振動計測＋温度計測	1,452 千円／100m
ケース 2	振動計測＋歪計測	2,870 千円／100m
ケース 3	振動計測＋温度計測＋歪計測	3,000 千円／100m

この内訳は添付資料に記載する。

#### ④総合評価

ここで提案した「堤防に埋設された光ファイバを用い、①越水時や堤体破壊時に発生する振動、②堤体に浸入する水温と堤体温度との温度差、③異常個所の歪変化を検知することにより河川堤防の変状を検知するシステム」は、上記のごとく河川研究部河川研究室の技術要件、要求事項、期待する要件を満足する。

## 5.2 今後の課題と提案

- ◆ 技術的な課題
  - 光ファイバの実装方法について  
光ファイバを堤防のどの位置にどれだけの深さで埋め込むことが最適なのか、また、光ファイバと堤体とのカップリングをどうすべきか等の実装方法の検討が必要である。例えば、歪計測において、光ファイバセンサケーブル埋め込み深さを浅くすることにより、非常に早く検知することが期待できる。
  - 既存光ファイバを利用したコスト低減について  
堤防管理用に既に光ファイバは堤防の法肩等に設置されている。これを用いることにより経済性が大幅に向上する。しかし、U字溝等に設置されているため、どの程度の信号が得られるか不明である。このため、研究開発が必要と考えられる。
  - 研究開発の必要性について  
ノイズから信号を取り出すためには、計測技術のみならず、周波数解析等の解析技術の高度化が必要である。また、上記に述べたように、多くのデータ取得による変状検知の定義付けのためには、今後、機械学習や AI 等の知見を活かした研究開発を行う必要がある。  
このため、河川研究部を中心に、ここで提案しているような光ファイバを用いた変状検知システムの研究開発を立ち上げて欲しい。
  - 関連する堤防監視システムとの相互補完システムについて  
既に多くの堤防監視システムが存在するので、例えば、監視カメラとの整合性等、相互補完システムの志向も必要である。
- ◆ 提 案
  - 今後、光ファイバを用いた計測技術の必要性は増すものと考えられる。河川堤防変状検知システムの低コスト化を促進するためには、積極的に河川研究部河川研究室が、ここで提案する計測機器の購入含め検討いただき、その武器で研究開発を推進すべきである。
  - 同時に、各河川事務所への PR をいただき、研究開発の場の提供をお願いしたい。

## 謝辞

私共が提案する「堤防に埋設された光ファイバを用い、①越水時や堤体破壊時に発生する振動、②堤体に浸入する水温と堤体温度との温度差、③異常個所の歪変化を検知することにより河川堤防の変状を検知するシステム」の実証確認として、越流実験並びに河岸侵食実験を令和3年2月15日～19日にかけて行わせていただき、誠に貴重な経験をさせていただきました。この間、河川研究部河川研究室の福島室長、高橋研究員にご指導いただき、また、株式会社建設技術研究所土方次長に現場で実験の調整いただきましたことに感謝申し上げます。今後、私共の提案する技術高度化を目指し、安全安心な社会の構築に邁進してまいります。

【 添付資料 】

1. 導入総低コスト試算

【ケース1】 振動+温度 概算積算 (100m 当たりの単価を算出)

DAS 計測機器	25,000 千円/5,000m	= 500 千円/100m
温度計測機器	5,000 千円/5,000m	= 100 千円/100m
光ファイバ埋設		600 千円/100m

(工事 200 千円、光ファイバ 400 千円)

研究開発費	60,000 千円/1,000km	= 6 千円/100m
通信・記録装置	855 千円/1,500m	= 57 千円/100m
合計		= 1,263 千円/100m
持管理コスト		= 189 千円/100m
総合計		= 1,452 千円/100m

【ケース2】 歪+温度 概算積算 (100m 当たりの単価を算出)

DAS 計測機器	25,000 千円/5,000m	= 500 千円/100m
歪計測機器	20,000 千円/1,500m	= 1,333 千円/100m
光ファイバ埋設		600 千円/100m

(工事 200 千円、光ファイバ 400 千円)

研究開発費	60,000 千円/1,000km	= 6 千円/100m
通信・記録装置	855 千円/1,500m	= 57 千円/100m
合計		= 2,496 千円/100m
持管理コスト		= 374 千円/100m
総合計		= 2,870 千円/100m

【ケース3】 振動+温度+歪

DAS 計測機器	25,000 千円/5,000m	= 500 千円/100m
温度計測機器	5,000 千円/5,000m	= 100 千円/100m
歪計測機器	20,000 千円/1,500m	= 1,333 千円/100m
光ファイバ埋設		600 千円/100m

(工事 200 千円、光ファイバ 400 千円)

研究開発費	100,000 千円/1,000km	= 10 千円/100m
通信・記録装置	855 千円/1,500m	= 57 千円/100m
合計		= 2,600 千円/100m
持管理コスト		= 400 千円/100m
総合計		= 3,000 千円/100m