

令和 6 年度 防衛装備庁  
安全保障技術研究推進制度

# 研究成果報告書

## 光ファイバDASと微動探査による 地盤モニタリング手法の開発

令和 7 年 5 月

国立研究開発法人 防災科学技術研究所

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、国立研究開発法人防災科学技術研究所が令和4年度から令和6年度にかけて実施した「光ファイバDASと微動探査による地盤モニタリング手法の開発」の成果を取りまとめたものです。

## 1. 委託業務の目的

大都市が立地する堆積平野の地盤リスク評価手法の高度化のためには、高い精度の地盤モデルの作成のための高密度・高精度な地盤モニタリング技術の開発が不可欠であり、特に地震波の増幅特性に大きい影響を与える浅部地盤の不均質性をどこまで正確に推定できるかが課題となっている。これまでに、K-NET, KiK-netをはじめとする多様な地震観測網を整備し、関東地方など特定地域では1 kmメッシュ・250mメッシュで微動探査を行い、地盤モデルの高度化を図ってきた。しかしながら、実際には、地盤情報の空間分解能の不足等により、増幅特性を過小評価してしまう場合もあり、250 mメッシュの地盤モデルでは実際の地盤の不均質を十分に再現できていないと考えられる。この地盤情報の空間分解能の不足を補う手法として、地中に埋設された光ファイバをセンサーとして用いたDistributed Acoustic Sensing（以下「光ファイバDAS」という。）による地盤振動の観測・解析技術が、有望な技術と考えられている。

本研究では、光ファイバDASを用いて、従来よりも高密度・高精度で地盤の振動特性を把握し、様々な目的にも応用可能な地盤モニタリング手法の確立を目標とする。まず、光ファイバDASの計測での課題を抽出し、10 m以下の非常に高密度の間隔で地盤の揺れを計測できる技術を確認することを目指す。次に、高密度の振動計測を長期間モニタリングすることにより取得される膨大な計測データを効率的に処理するための技術の開発を目指す。さらに、光ファイバDASの非常に高密度なデータと微動探査データを活用した、50 mメッシュ以下の高い分解能の広域地盤モデルの作成手法を開発することを最終目標とする。

これらの目標達成のための要素課題として、（１）光ファイバDAS による地盤振動の高密度計測調査、（２）光ファイバDAS による長期間連続モニタリング技術の確立、（３）光ファイバDAS と地震波干渉法を組み合わせた解析手法の確立の３つを設定する。

### （１）光ファイバDASによる地盤振動の高密度計測調査

光ファイバDAS でどのような振動記録が得られ、この技術により目標達成に必要なデータが取得できるかを確認する。光ファイバDAS ではラディアル成分（水平に光ファイバを埋設した場合はその方向）の振動しか計測することができないが、空間分解能に関しては通常の地震計による観測をはるかに凌駕する手法である。

本要素課題では、理想的な状態で新たに埋設する光ファイバや既存の光ファイバを利用し、同時に測定する微動計データとの対応関係を把握し、10 m以下の間隔で地盤の揺れを計測・データ処理可能な技術開発を目指す。

### （２）光ファイバDAS による長期間連続モニタリング技術の確立

光ファイバケーブルは一度設置してしまえば、必要なのは計測器とその電源のみであり、長期のリアルタイムモニタリングに適したシステムである。光ファイバDAS では大量のデータ（例えば、1本の光ファイバで100 TB/月程度）が蓄積されていくが、これら大量のデータを手作業で、ある一定の時間を要して解析しているのではモニタリングの本来の目的には不適切である。

そのため、本要素課題では、データの取得・整理・解析の一連の処理の自動化（エッジ処理やクラウドコンピューティング等）及びビッグデータの解析方法の構築を目指す。また、車両等の振動源が移動する状況を計測した光ファイバDASデータから抽出し、連続モニタリングより振動源の位置・速度などを推定可能かどうか確認した上で、この解析手法を、試験場で実施する実験データで実証する。

### （３）光ファイバDAS と地震波干渉法を組み合わせた解析手法の開発

光ファイバDAS の利点は、受振点間隔を10 m程度の高密度に設定できること、それにより数多くの仮想の地震計を光ファイバ上に作成できることにある。

本要素課題では、光ファイバDASのデータに地震波干渉法を適用し、多数の地震計の組み合わせをつくることで、浅部地盤モデルの分解能を50 mメッシュ以下に向上させるモデル化手法の開発を目指す。

## 2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

本研究では、「光ファイバDASを用いて、従来よりも高密度・高精度で地盤の振動特性を把握し、様々な目的にも応用可能な地盤モニタリング手法の確立」を最終目標としており、研究目標は100%達成された。以下、要素課題ごとの達成度について述べる。

### (1) 光ファイバDASによる地盤振動の高密度計測調査

本要素課題では「理想的な状態で新たに埋設する光ファイバや既存の光ファイバを利用し、同時に測定する微動計データとの対応関係を把握し、10 m以下の間隔で地盤の揺れを計測・データ処理可能な技術開発」という目標を設定しており、以下の成果が達成されたことにより達成度を100%とする。

- ① 試験場において複数の光ファイバケーブルを埋設して、並行に設置した複数台の微動計との比較観測を行った。計測の空間分解能を表すゲージ長は5 m以下に設定して測定を行った。結果、地盤とのカップリングが良好な状態であれば、約1 Hz以上の周波数帯域におけるスペクトル振幅は同様であり、いずれも地盤振動計測に利用可能であることが明らかになった。また、光パルス計測装置であるインテロゲータについては異なる3つの製品を利用した比較観測を行った結果、インテロゲータの種類によらず、約1 Hz以上の周波数帯域における地盤振動計測に利用可能であることが明らかになった。
- ② 茨城県の国道6号（測線長約57 km）、国道50号（同約63 km）それぞれに沿って埋設されている既存の光ファイバケーブルを使用し、それぞれ10日間以上にわたるDAS測定を実施した。計測の分解能を表すゲージ長は9.57 mに設定した。微動ラインアレイ観測を12箇所で行ったところ、各記録により推定された位相速度は整合的な結果になった。また、各50 km以上の区間においてS波速度構造断面図を作成することが出来、空間分解能25 m間隔の地盤増幅率を推定することができた。さらに一部の地域（恋瀬橋、長岡橋）では高精度なインテロゲータを使用した観測記録を用いることにより、空間分解能10 m間隔のS波速度構造を推定した。以上からDASを利用して従来の250mメッシュ地盤モデルに比べて飛躍的に分解能が高い地盤モデルの作成が可能であることが明らかになった。

### (2) 光ファイバDAS による長期間連続モニタリング技術の確立

本要素課題では「データの取得・整理・解析の一連の処理の自動化（エッジ処理やクラウドコンピューティング等）及びビッグデータの解析方法の構築を目指す。また、車両等の振動源が移動する状況を計測した光ファイバDASデータから抽出し、連続モニタリングより振動源の位置・速度などを推定可能かどうか確認した上で、この解析手法を、試験場で実施する実験データで実証する」という目標を設定しており、以下の成果が達成されたことにより達成度を100%とする。

- ① 光ファイバ DAS による観測データを長期間にわたってモニタリングするリアルタイムシステムの開発を行った。計測サイトで動作するエッジ処理機能として、波形入力処理、ノイズリダクション処理、ダウンサンプリング処理、データ出力処理を開発し、インテロゲータからリアルタイムで出力される波形データファイルの処理が可能であることを確認した。データセンタで稼働するストレージ処理機能として、データ登録・蓄積機能、データ検索機能を開発し、エッジ処理で処理されたデータを受信し、それらをファイルとして蓄積およびデータベースに登録することで、利用者が必要なデータを取得することが可能であることを確認した。
- ② 構築したリアルタイムモニタリングシステムの実証実験を行った。国道6号および国道50号では光ファイバDASで計測したデータを入力として、エッジ処理、ストレージ処理の検証を行った。結果、複数の光ファイバのデータに対して、60秒長データに対し最大16秒でエッジ処理が完了し、データセンタで稼働するストレージ処理により受信・蓄積されデー

データベースへ格納されることを確認した。

- ③ 振動源の検知に関しては、国道50号沿いの光ファイバDAS計測データを使用して、ひずみ時刻歴と撮影した動画を突合し、トラック等の交通移動体検知の可能性を検証した結果、DAS記録を用いた車両通行による軌跡の検知や、ひずみ速度振幅を元に算出した指標値による車種の識別が可能であることが明らかになった。

### (3) 光ファイバDAS と地震波干渉法を組み合わせた解析手法の開発

本要素課題では「光ファイバDASのデータに地震波干渉法を適用し、多数の地震計の組み合わせをつくることで、浅部地盤モデルの分解能を50 mメッシュ以下に向上させるモデル化手法の開発を目指す。」という目標を設定しており、以下の成果が達成されたことにより達成度を100%とする。

- ① 国道6号沿いの恋瀬橋周辺、長岡橋周辺の2箇所において、光ファイバDAS観測記録と微動アレイ探査を組み合わせた地震波干渉法による解析を行い、微動計による上下動速度記録とDAS記録の相互相関関数（グリーン関数）を高密度に求めること（高密度グリーン関数）により、表面波の位相速度を推定することが可能であることを明らかにした。また、高精度なインテロゲータ（ONYX peta Mode 9）を使用することにより、空間分解能10 mの高密度グリーン関数を推定することが可能であることを確認した。また、光ファイバDAS観測記録のみを用いた相互相関関数を求め、さらに光ファイバから100～200 m程離れた地点に微動計を設置して上下動速度波形を取得し、光ファイバDAS記録との相互相関関数を求めることにより、面的グリーン関数（水平、鉛直を含めた3次元におけるグリーン関数）を算出可能であることを確認した。
- ② 試験場における継続的観測として、15日間のDAS観測時に土壌水分計・温度計の同時測定を実施し、これらの指標の変動はグリーン関数に大きな影響を与えないことを確認した。一方、保護管の有無により位相速度が測定できる高周波数側の範囲が減少することが分かった。またDASの計測データから自動で微動の位相速度およびS波速度構造断面を自動推定する手法を開発した。

## 3. 委託業務における研究の方法及び成果

### (1) 光ファイバDASによる地盤振動の高密度計測調査

#### ① 試験場における DAS 計測

DASによる地盤振動の計測性能を評価することを目的とし、茨城県つくば市にある試験場に光ファイバケーブルを埋設し、ケーブル種類、インテロゲータ種類、およびカップリング条件（保護管の有無）を変化させた場合における試験計測実験を実施した。なお、試験場の用地は、地盤情報が既知で、地盤構造が比較的平坦で大きく変化していない場所を選定した。

#### a) 保護管のない光ファイバケーブルを用いたDAS計測

地盤とのカップリングが理想的な状態におけるDAS記録の特性把握を目的に、R4年度の実験では保護管のない状態の光ファイバケーブルを直接埋設した。試験場に深度30 cmの溝を長辺105 m、短辺25 mのL字型に掘削し、5種類の光ファイバケーブルを直接地盤に設置した。設置位置を図1.1に示す（内藤ら、2025）。

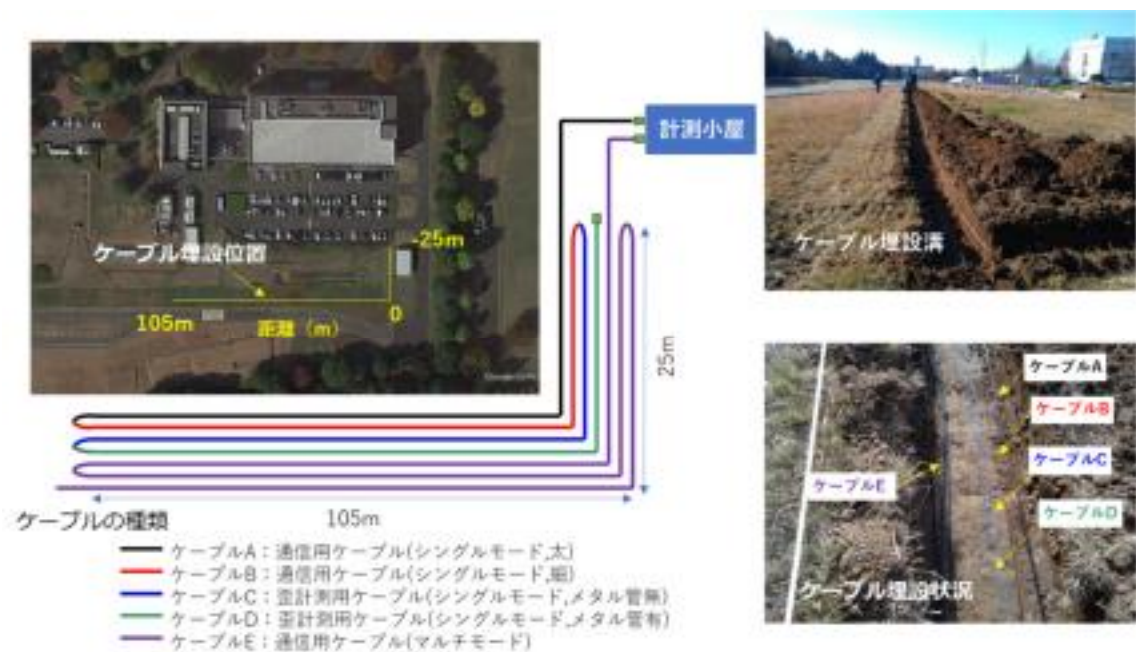


図1.1 試験場の光ファイバケーブル埋設位置（R4年度）

設置した光ファイバケーブルは、シングルモードの通信用光ファイバケーブル2種類（ケーブルA,B）、歪計測用光ファイバケーブル2種類（ケーブルC,D）、およびマルチモードの通信用光ファイバケーブル1種類（ケーブルE）である（表1.1）。シングルモードの光ファイバケーブルの長さはそれぞれ150 mで、全て融着により連結し、長さ約600 mの1本のケーブルとした。マルチモードファイバは長さ500 mのケーブルを折りかえて同じ位置を3度通過するようにした。

マルチモードファイバは、シングルモードファイバよりもコア径が太いファイバである。シングルモードよりも光の直進性が悪く伝送距離が短くなるため、長距離通信ではあまり利用されていない。ただし、光ファイバセンシング用としては温度計測（DTS）に利用されている。インテロゲータの多くはシングルモードファイバの計測を前提にしている。そのため、敷設したマルチモードファイバにシングルモード用のコネクタを融着させ、シングルモード用のコネクタのみ有するインテロゲータでもDAS計測が実施できるようにした。インテロゲータに関しては、マルチモードファイバを計測するための特別な工夫は実施しなかった。

光ファイバケーブルを設置した後、実際の位置と光ファイバケーブルの長さの関係を調べる試験（タップテスト）をおこない、現地発生土で埋め戻した。

表 1.1 令和 4 年度に埋設した光ファイバケーブル一覧

| 種類 | モード  | 用途   | ケーブル径   | 特徴                      |
|----|------|------|---------|-------------------------|
| A  | シングル | 通信用  | 11.5 mm | 100 芯テープタイプ, メタル管なし     |
| B  | シングル | 通信用  | 4 mm    | 4 芯, 耐環境型, メタル管あり       |
| C  | シングル | 歪計測用 | 2.8 mm  | 1 芯, 耐環境型, メタル管なし       |
| D  | シングル | 歪計測用 | 3.2 mm  | 1 芯, 耐環境型, メタル管あり       |
| E  | マルチ  | 通信用  | 13.5 mm | 8 芯テープタイプ, GI 型, メタル管なし |

DAS計測は製造業者が異なる3種のインテロゲータ（イ,ロ,ハと称す）を使用した。使用したインテロゲータの写真を図1.2に、主な仕様を表1.2に示す。なお表中のゲージ長とは、波形の空間分解能に関するパラメータの一つであり、歪みを計測する基準長を表す。

計測した振動は、かけやを用いて人工的に起振させた振動および常時微動とした。比較検証を目的に、図1.2（左）に示す3成分微動計を光ファイバケーブルの埋設位置に設置し、同時に振動を計測した。かけやによる起振状況と常時微動計測状況を図1.2（中央）、図1.2（右）に示す。

今回使用した3種類のインテロゲータのうち、2つが歪みを出力する方式、1つが歪速度を出力す

る方式である。動的な変化である振動を評価するには歪速度での比較が適しているため、歪みデータを時間微分して歪速度に変換し、比較検討した。

表1.2 インテロゲータの主な仕様一覧

|           | イ              | ロ                  | ハ              |
|-----------|----------------|--------------------|----------------|
| 出力        | 歪み             | 歪み                 | 歪速度            |
| 最大ファイバ長   | 200 km         | 65 km              | 5 km           |
| サンプリングレート | 0.5～10 kHz     | 500 Hz～40 kHz      | 1～4 kHz        |
| ゲージ長      | 2.05～205.4 m   | 3.19～23.93 m       | 1～10 m         |
| チャンネル間隔   | 1.027～10.27 m  | ゲージ長の半分            | 0.2～5 m        |
| 寸法        | 268×441×712 mm | 132.5×482.6×453 mm | 450×177×430 mm |
| 重量        | 31 kg          | 17 kg              | 11 kg          |
| 消費電力      | 150 W          | 100 W              | 100 W          |



図1.2 左：微動計設置状況 中央：かけやによる起振状況 右：常時微動計測状況

#### ➤ 異なるシングルモードファイバケーブルによる振動波形の違い

4 種類のシングルモードファイバケーブルを連結したケーブルに対し、「ハ」のインテロゲータを用いてかけや起振の振動を取得した。サンプリング周波数 1 kHz、ゲージ長 5 m、1 m 間隔で計測した記録例を図 1.3 に示す。

図 1.3 より、どのケーブルでも起振によって発生した振動が遠方まで伝わっている様子が明瞭であり、ケーブルの違いによらず良好な記録が得られていることがわかる。

図 1.4 では、図 1.3 の記録から各光ファイバケーブルに対する同一地点における波形を表示した。各波形の類似性は高いが、ひずみ計測用のケーブル C と D の振幅が通信用のケーブル A と B よりも若干大きい。ケーブル D の最大振幅値はケーブル A のおおよそ 1.5 倍となっており、ひずみ計測用のファイバの感度が若干高いことを示唆している。しかしながら、起振した際に発生するような比較的大きな振幅の振動を計測する際には、通信用のケーブルでも問題なく計測できるといえる。また、他の 2 種類のインテロゲータを使用した場合でも同様に、4 種類のケーブルすべてで良好な記録が得られた。

図 1.5 は、試験場での光ファイバ DAS の計測中に、4 種類のシングルモードの光ファイバケーブルおよび微動計で観測された自然地震の記録である。なお振幅を比較するにあたり、微動計の記録は、鈴木他（2019）による固有周波数、減衰定数、地震計感度およびフィルタ特性に関する補正をした上で、隣同士の微動計記録の差分を微動計間の距離で除すことでひずみ速度に変換した（以下、この記録を微動計差分記録とよぶ）。4 種類の光ファイバ DAS 記録と微動計差分記録の振幅スペクトルは、形状と振幅ともに 1 Hz 以上で概ね一致している。

これらの結果より、理想的な状態で埋設され、地盤とのカップリングが良好な状態であれば、計測用の光ファイバケーブルでなくとも、通信用の光ファイバケーブルで十分に光ファイバ DAS

により周波数 1 Hz 以上の振動の計測が可能であるといえる。

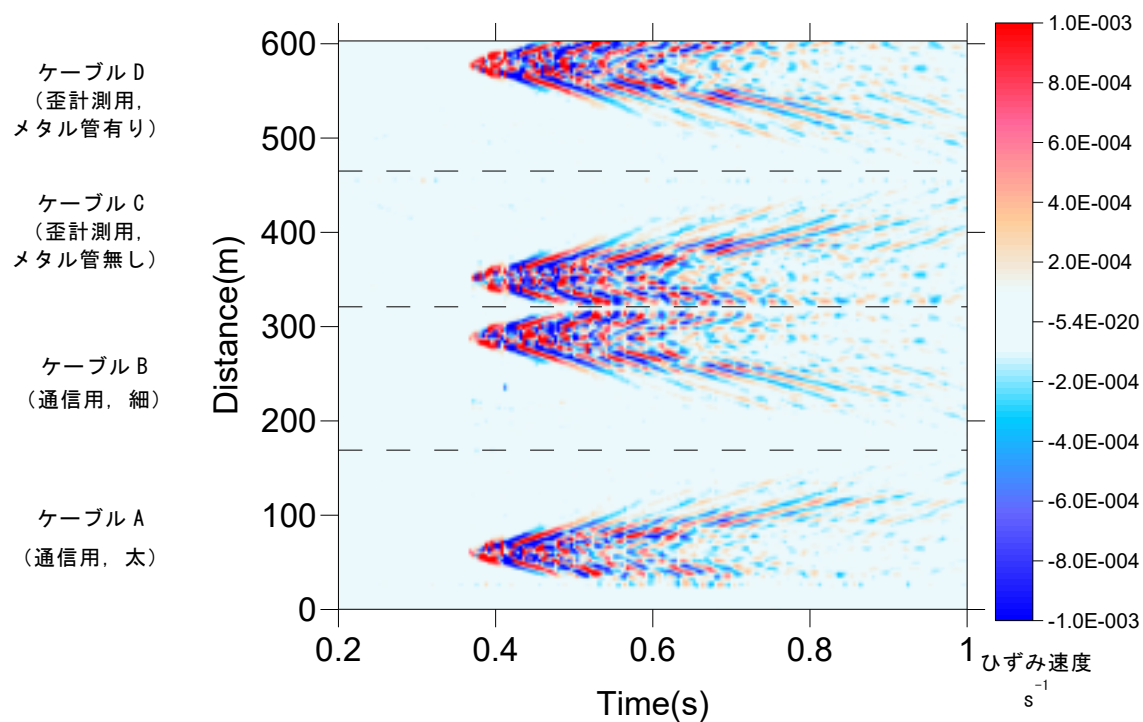


図1.3 4種類のシングルモードの光ファイバケーブルによって得られた起振記録の例

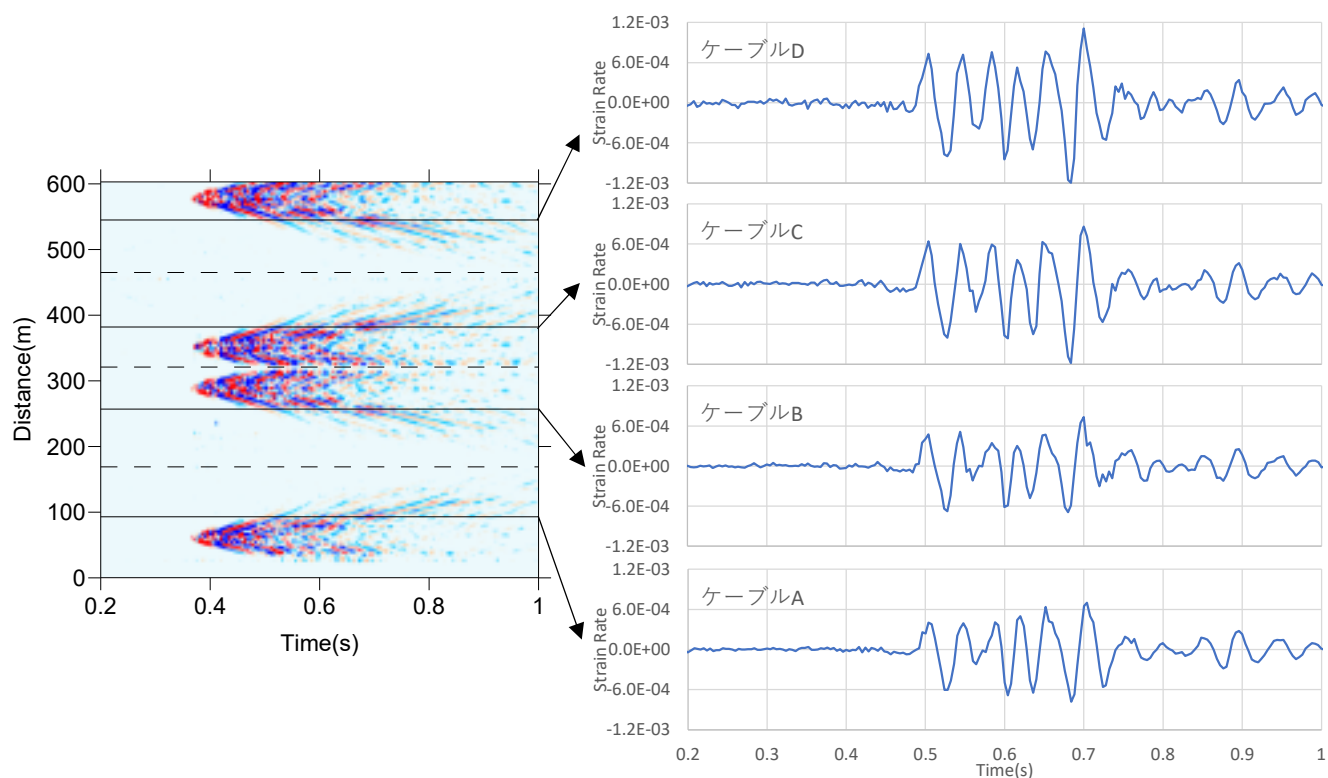


図1.4 同一地点における4種類のシングルモードの光ファイバケーブルによって得られた波形

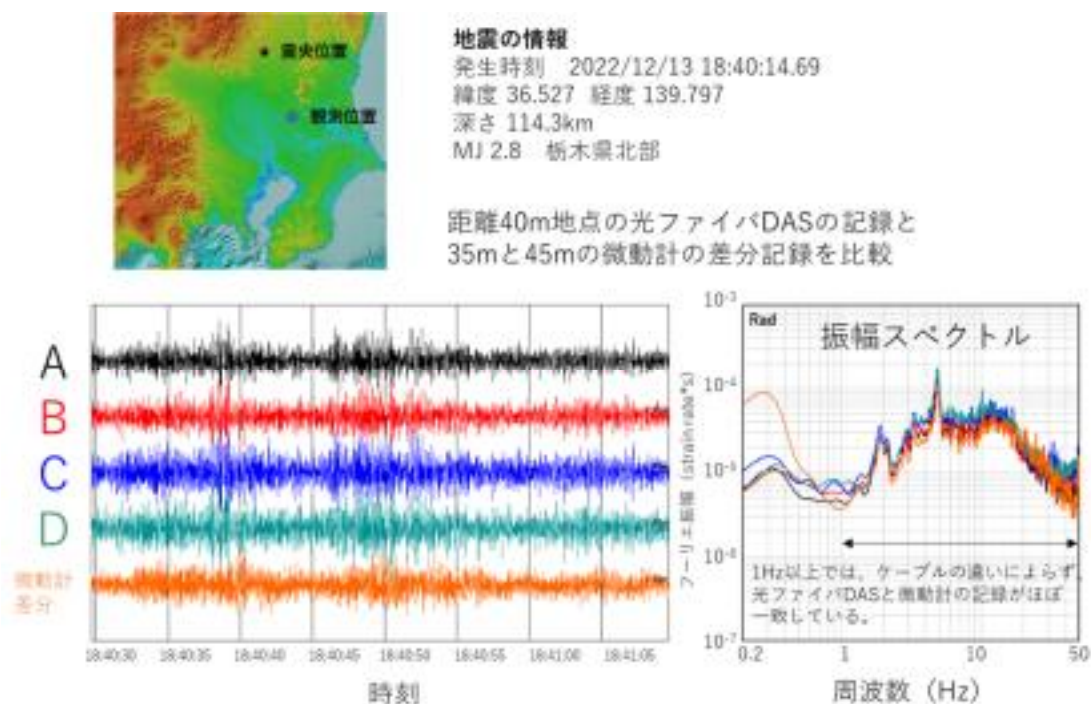


図1.5 試験場において光ファイバDASと微動計によって観測された自然地震の記録例

#### ■ マルチモードファイバケーブルによる地盤振動測定への適用性評価

前節で使用したインテロゲータはいずれもシングルモードファイバでの計測を想定しているが、マルチモードケーブルを用いた場合においても同様に地盤振動が測定可能かどうか検証するため、適用性評価を実施した。

#### ➤ 起振記録の評価

「イ」のインテロゲータを用い、マルチモードファイバケーブルで計測した、起振位置 61.3 m のかけや起振の DAS 記録を図 1.6 に示す。ゲージ長は 2 m に設定した。なお、マルチモードファイバケーブルは同区間を 3 度通過するように設置したため 1 回の起振で 3 つの記録が得られるが、そのうちの 1 つの記録を図示した。得られた記録をみると、表面波の伝播の様子が明瞭であり、十分な品質の記録が得られていることがわかる。

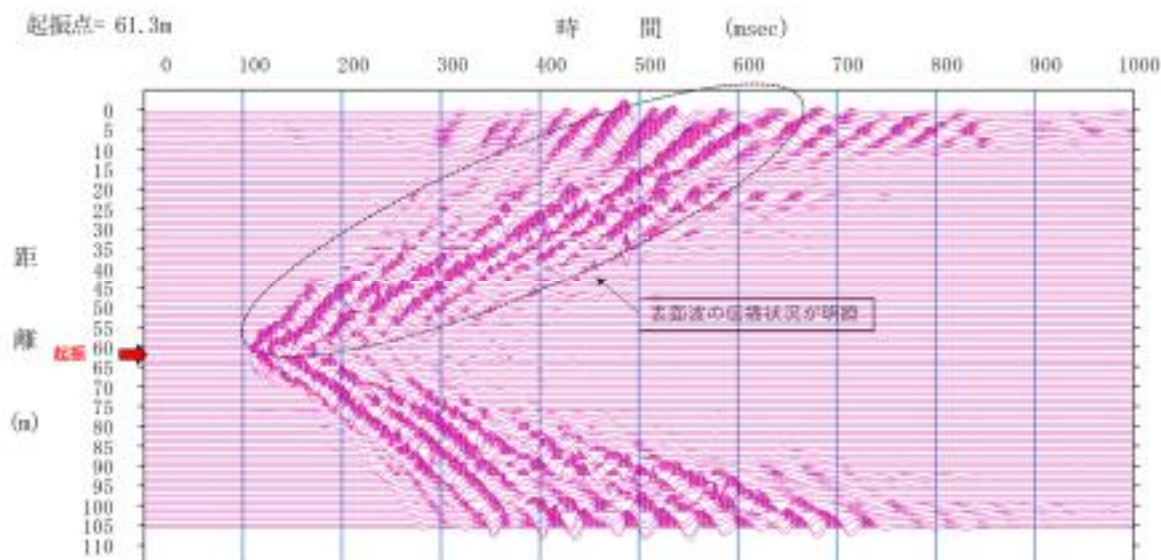


図1.6 光ファイバDAS (マルチモードケーブル) の記録例  
 (かけや起振、1-100 Hzのバンドパスフィルタ適用後)

➤ 常時微動観測記録の評価

「イ」のインテロゲータを用い、距離 82.5 m でのマルチモードファイバでの DAS と微動計による常時微動の波形とスペクトルの比較を図 1.7 に示す。ゲージ長は 4 m の記録である。DAS 記録は、周波数 2Hz 以上で、微動計の差分記録と同様のスペクトル形状を示した。

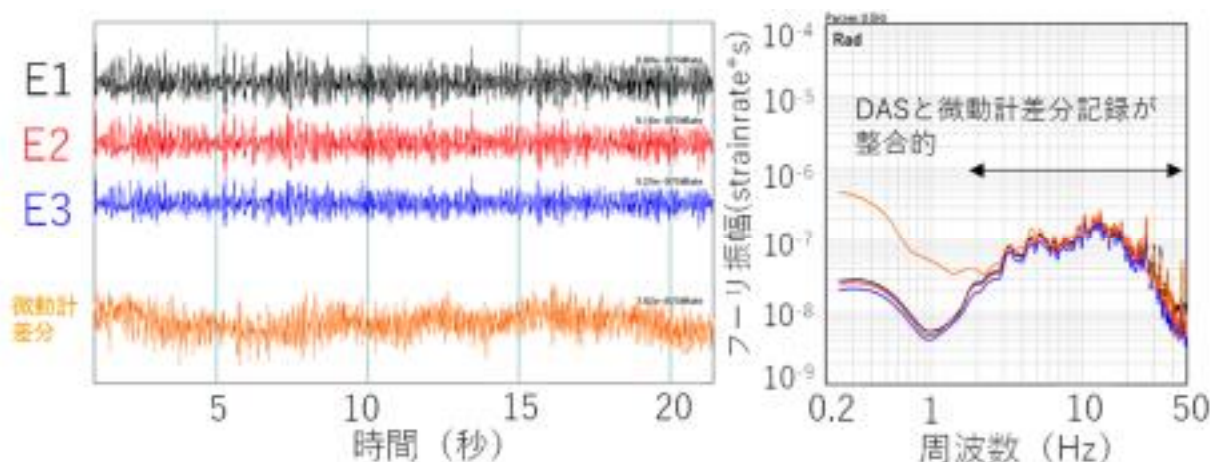


図1.7 マルチモードケーブルおよび微動計による常時微動観測記録の比較

以上より、マルチモードファイバでも、地盤とのカップリングが良好な状態であれば、起振記録のように比較的振幅の大きな振動から微動のような微小な振動まで計測可能であることが示された。

■ 異なるインテロゲータによる振動波形の違い

➤ かけや起振記録の比較

3種類のインテロゲータを用い、通信用の光ファイバケーブル（ケーブルA）で計測した、起振位置61.3 mのかけや起振のDAS記録と微動計による水平動の記録の記録を図1.8に示す。なおゲージ長は、イが2.05 m、ロが3.19 m、ハが1.0 mとした。

3種類のインテロゲータ全てで、起振によって発生した表面波の振動が光ファイバケーブルの端部まで伝播したことを確認した。また、同じ起振位置で得られた微動計による波形と比較しても、光ファイバケーブルによって表面波の位相速度を推定するために十分な品質の記録が得られていることがわかる。

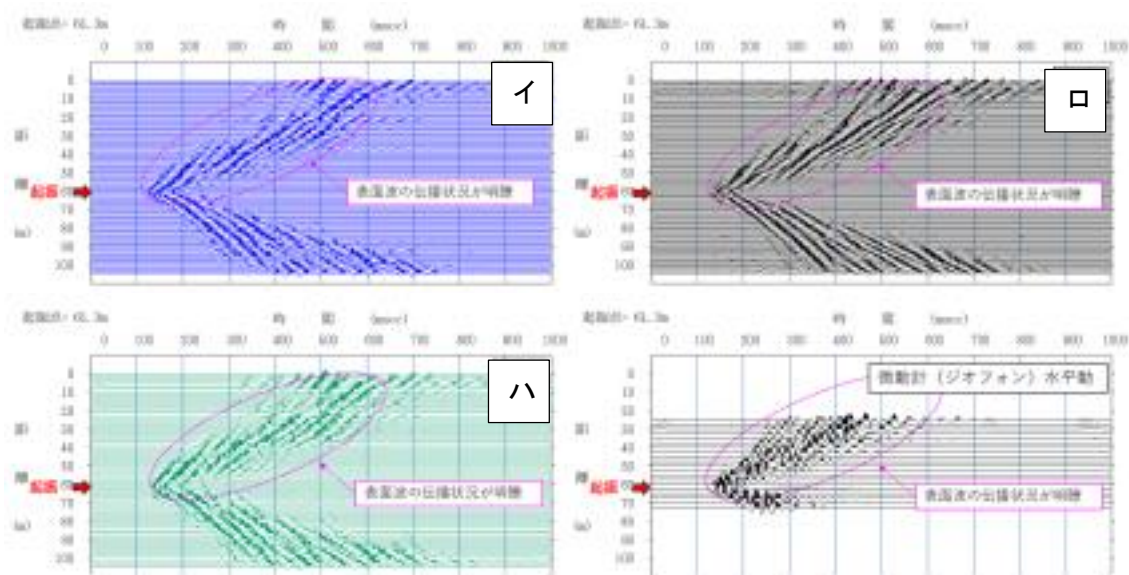


図1.8 3種類のインテロゲータによる光ファイバDASの記録と微動計の記録例（かけや起振，ケーブルA，1～100 Hzのバンドパスフィルタ適用後）

### ➤ 常時微動記録の比較

3種類のインテロゲータを用い、4種類のシングルモードの光ファイバケーブルで計測した距離60 m付近の常時微動の記録と微動計の差分記録を図1.9に示す。ゲージ長はインテロゲータ「イ」が10.0 m、「ロ」が9.57 m、「ハ」が10.0 mである。フーリエ振幅スペクトルをみると、「イ」の場合、ひずみ計測用のケーブルの振幅の方が最大値で1.7倍程度通信用のケーブルよりも大きくなっている。ただし、「ロ」、「ハ」の記録ではひずみ計測用と通信用ケーブルの振幅に顕著な差は見られない。3つとも、ケーブルの種類によらず1 Hzもしくは2 Hz以上で微動計の差分記録と同様のスペクトル形状を示している。1 Hz以下では微動計の差分記録よりも振幅が有意に小さくなっている。

これらの結果より、今回使用した3つのインテロゲータでは、インテロゲータの種類によらず、起振記録・常時微動ともに、1 Hzもしくは2 Hz以上の周波数帯域において光ファイバによる計測が可能であるといえる。

### シングルモード ゲージ長10m相当 (60m地点)

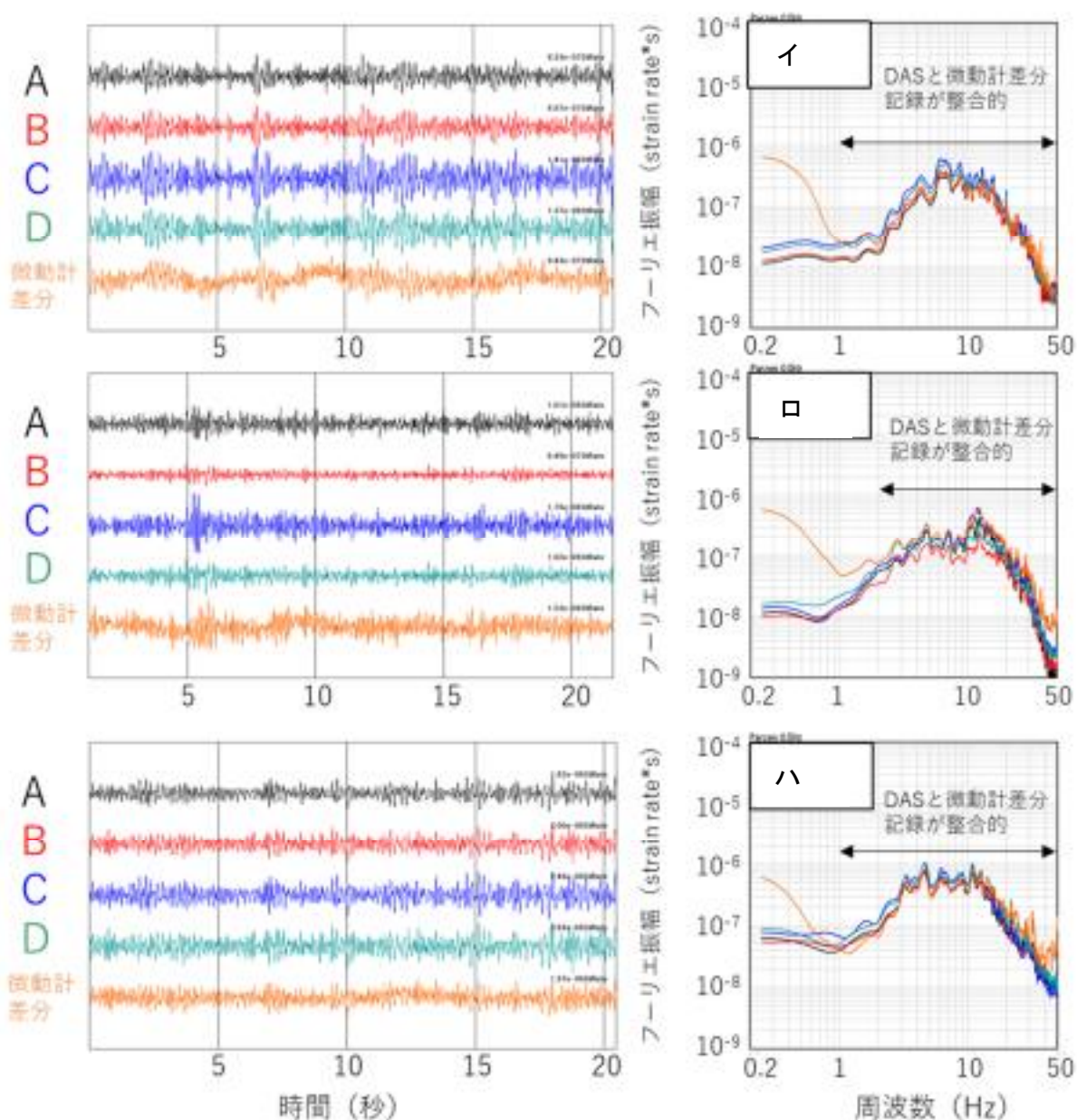


図1.9 3種類のインテロゲータによる光ファイバDASと微動計による常時微動の波形とスペクトルの比較

■ 異なるインテロゲータによる地盤振動特性の抽出性能の違い

➤ かけや起振記録を用いた結果の比較

かけや起振のデータに対し、3種類のインテロゲータのDAS記録から推定した表面波の位相速度と、2.5 m間隔で設置した微動計の差分記録から推定した位相速度を比較した。ゲージ長が4～5 mと同程度の記録を用い、周波数毎に最も確からしい速度をスペクトル強度で表した周波数一位相速度イメージを計算した。微動計の差分波形を用いて得られた周波数一位相速度イメージと比較した結果を図1.10に示す。周波数一位相速度イメージはスペクトル強度をカラーで表示しており、寒色系ほどスペクトル強度が高い。したがって、寒色系の部分を読み取ることで周波数毎の位相速度（分散曲線）が得られる。赤点で示したように位相速度が推定された。周波数10～20 Hzの範囲では、光ファイバケーブルA,Cの記録から推定される位相速度は微動計の差分記録から推定される位相速度と概ね等しいことがわかる。なお、光ファイバケーブル、微動計の差分記録ともに、20 Hz以上では基本モードと想定される位相速度は得られなかった。なお、図に示す波長5 mのラインは、微動計の間隔2.5 mの2倍となるナイキスト波長に対応しており、サンプリング定理に基づく計測可能な最大周波数である。

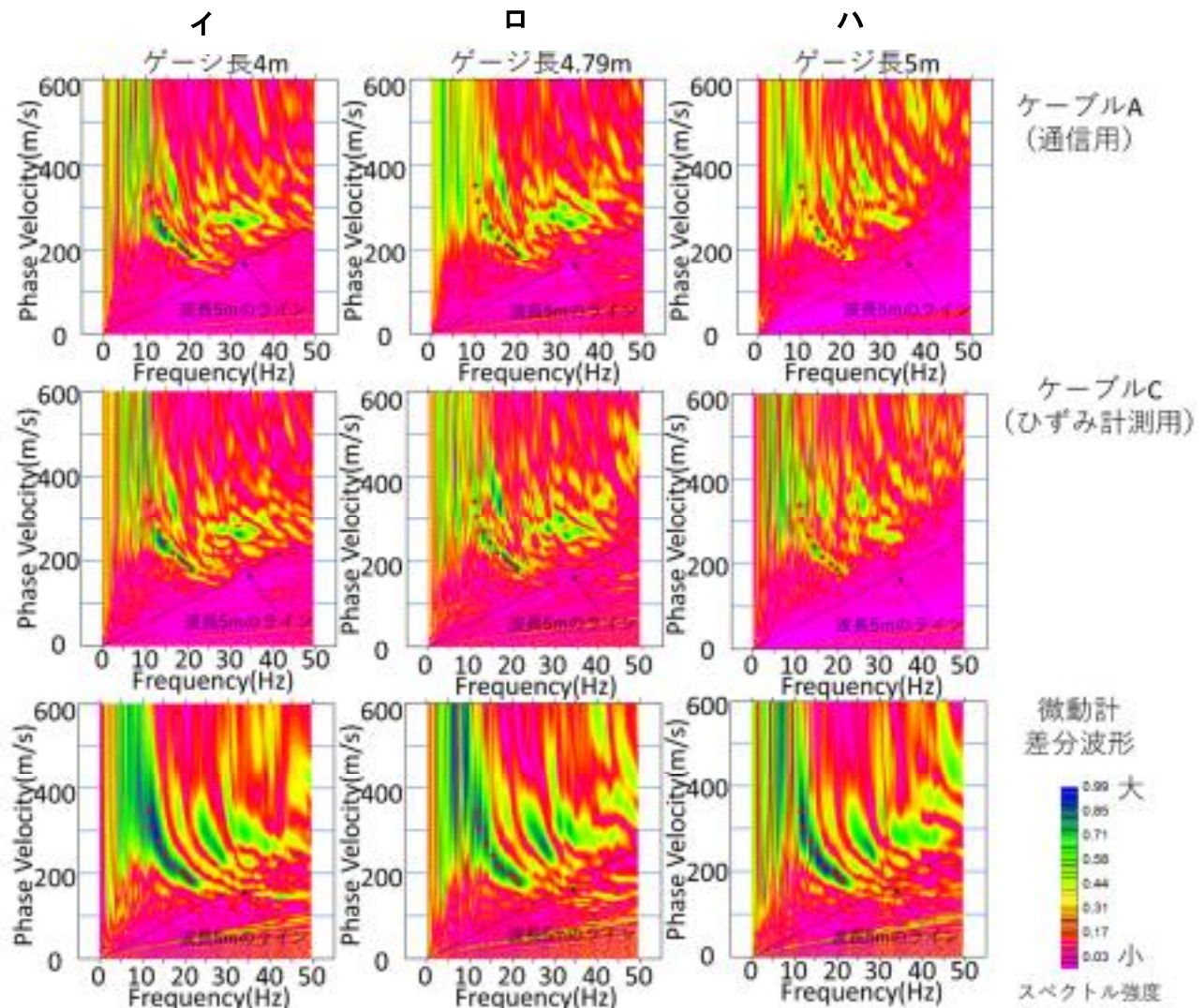


図1.10 カケや起振記録の位相速度イメージの比較例（0～50 Hz）

➤ 常時微動記録を用いた結果の比較

常時微動記録に対して、直線アレイとしてSPAC法(Aki,1957；岡田，1990)を用いて周波数一位相速度イメージを計算し、DAS記録と微動計差分記録の比較をおこなった(図1.11)。なお、常時微動で得られる周波数一位相速度イメージは、かけや起振の場合と異なり、観測値と理論値の残差をカラーで表示する。残差が小さいほど確からしい位相速度であることを意味しており、寒色系の部分を読み取ることで周波数毎の位相速度(分散曲線)が得られる。

3種類のインテロゲータを用いて、常時微動記録から計算した周波数一位相速度イメージを図1.11に示す。常時微動記録を用いることで、かけや起振記録よりも低い周波数帯域で、微動計の差分記録に対応する位相速度が推定できた。3種類のインテロゲータの結果を比べると、2Hz以下の周波数帯で、「ハ」の結果が「イ」、「ロ」、微動計の結果と異なっており、位相速度の推定が困難であった。

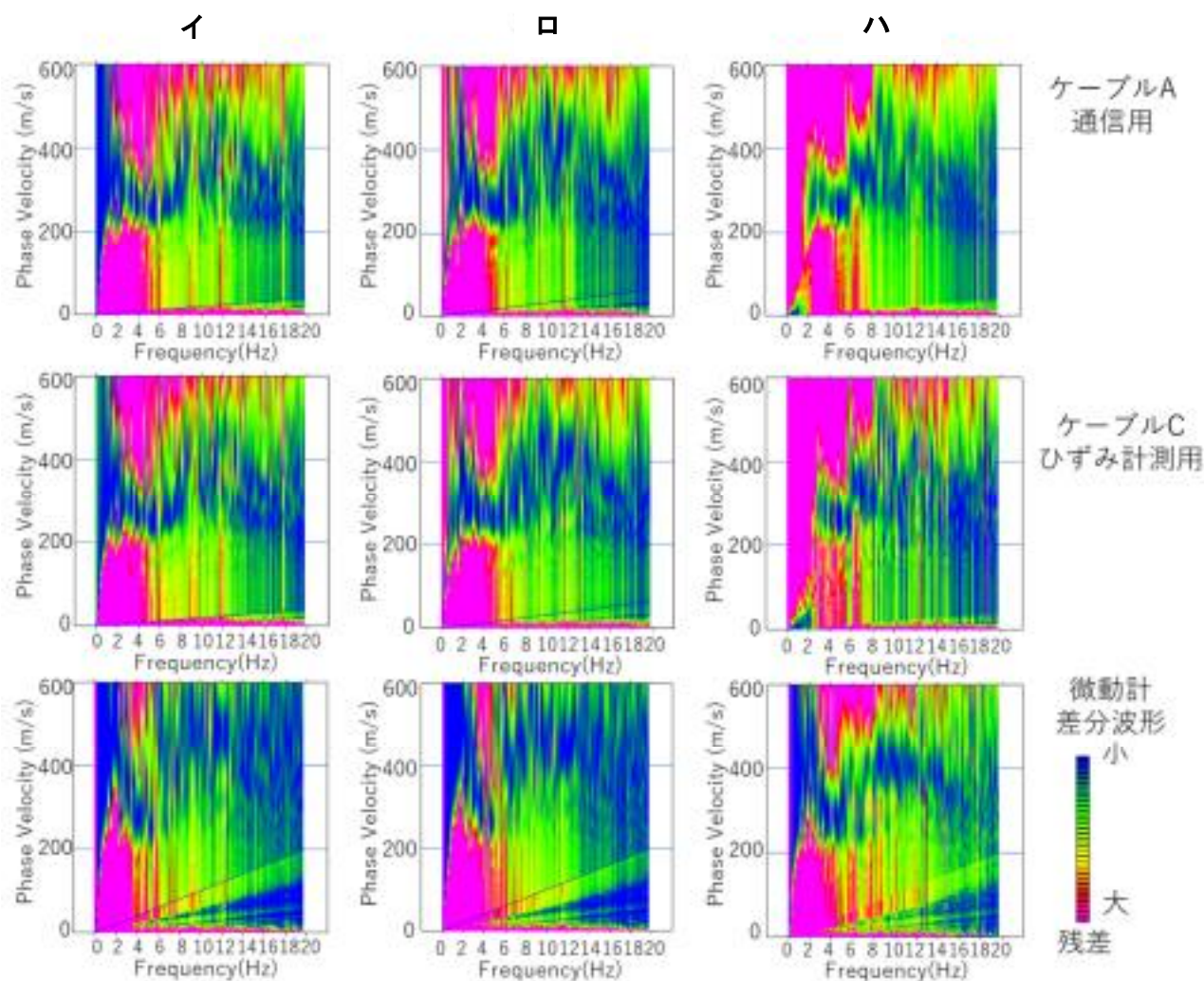


図1.11 微動記録の位相速度イメージの比較例 (0~20Hz)

以上から、位相速度イメージングの観点からは「ハ」から推定可能な周波数範囲が、他よりもやや狭域であったが、いずれの製品を使用した場合においても、微動計の差分波形から推定される位相速度と同様に位相速度が推定可能であった。

■ 異なるファイバケーブルによる地盤の S 波速度構造推定結果の違い

3種類のインテロゲータのうち、「ロ」のインテロゲータのDAS記録を使用して、常時微動記録から地盤のS波速度構造を推定し、ケーブル間で比較をおこなった。比較対象として、微動計設置間隔5mの3次元微動アレイ探査結果を用いた。

ゲージ長4.79 mの設定で、5種類の光ファイバケーブル（ケーブルA～E）による常時微動計測を実施し、CMP-SPAC法 (Hayashi *et al.*, 2015)を用いて周波数一位相速度イメージを計算した。距離程50m付近における周波数一位相速度イメージを図1.12に示す。周波数一位相速度イメージから寒色系の部分を読み取ることで周波数毎の位相速度（分散曲線）が得られる。

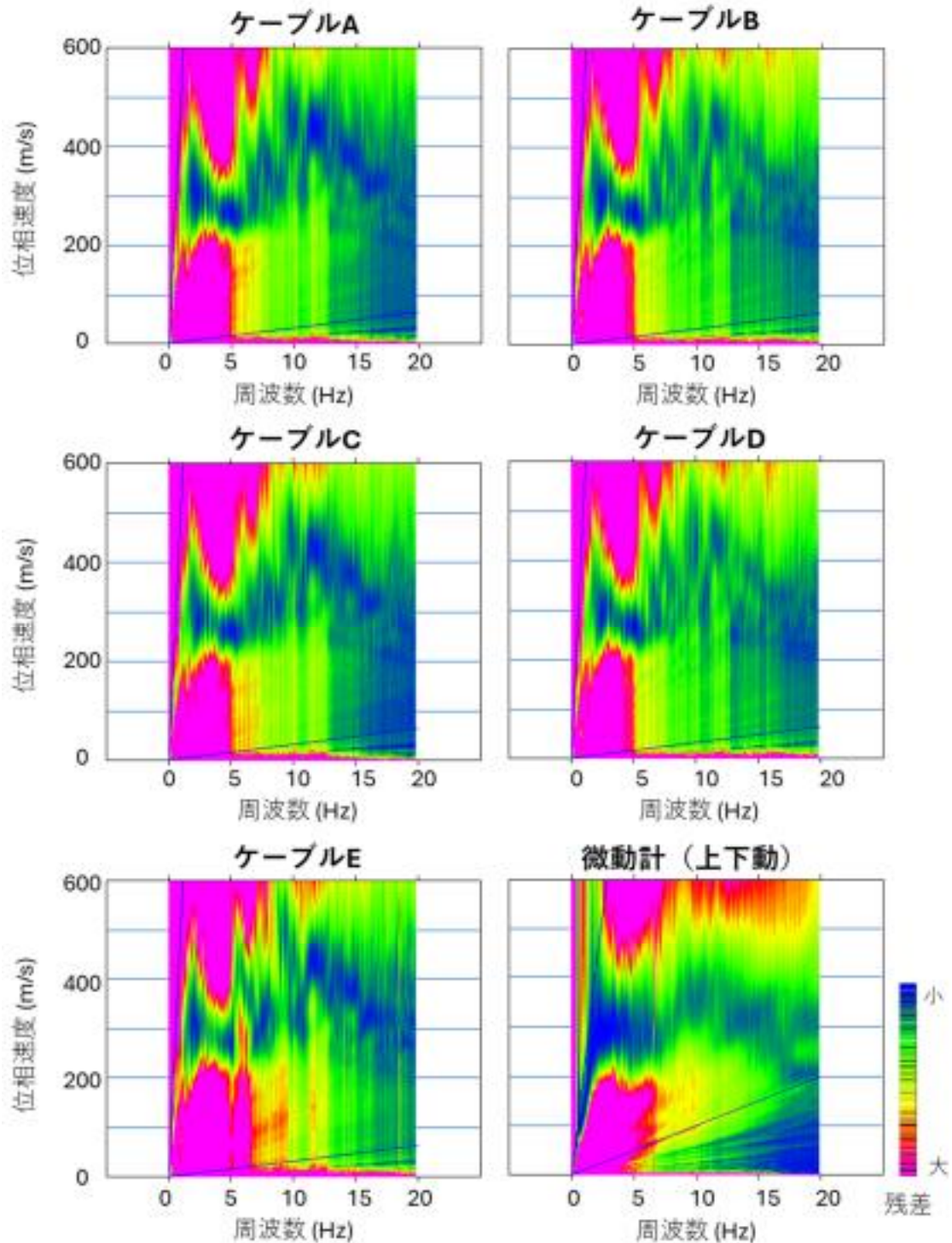


図 1.12 異なるケーブルによる周波数一位相速度イメージ (0~20Hz)  
(ロ, ゲージ長 4.79 m, 距離程 50 m 付近)

図1.12の2～5Hzにおいて、微動計から得られた結果とDASから得られた結果（ケーブルA～E）の違いは少ない。この周波数帯において微動計の周波数一位相速度イメージにはRayleigh波の基本モードが見えることから、いずれのケーブルによるDAS記録からも2～5 HzではRayleigh波の基本モードが抽出されたと推定される。一方、5 Hz以上の高周波帯では、DAS記録から得られた周波数一位相速度イメージは、微動計から得られたものと比較して、大きく位相速度が変化している。これは、DAS記録からはRayleigh波の高次モードもしくはLove波が混合した位相速度が抽出されたと推定される。

周波数一位相速度イメージから抽出される分散曲線を用いて、2次元S波速度構造を推定した。推定したS波速度構造を図1.13（ケーブルA～C）、図1.14（ケーブルD,E,微動計）に示す。いずれのケーブルによる構造でも、深度7 m以浅でS波速度が300 m/sを下回り、深度7～15 m程度に存在する高速度層が推定された。ケーブルEでは高速度層が他のケーブルと比較してやや厚いが、これはRayleigh波の高次モードもしくはLove波が混合した位相速度の影響が、他のケーブルよりも低周波帯にまで及んでいるためと考えられる。表層部のS波速度は微動計から得られた結果の方がやや低速度である。これは、比較対象とした3次元微動アレイ探索結果は、かけや起振による高周波成分を含んでおり浅部の分解能が向上した結果であるためと考えられる。

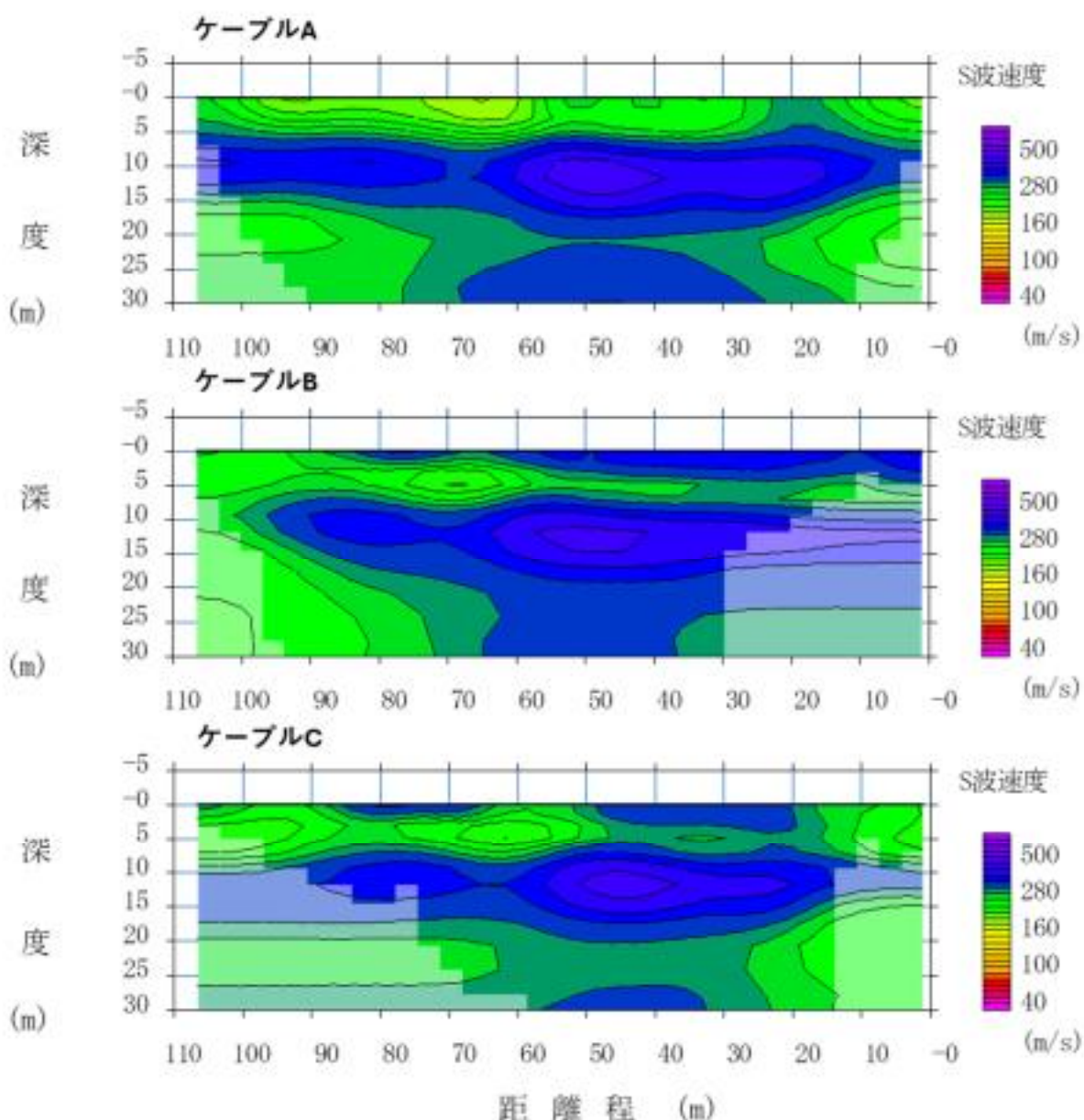


図 1.13 異なるケーブルによる 2 次元 S 波速度構造（ケーブル A, B, C）  
（ロ，ゲージ長 4.79 m）

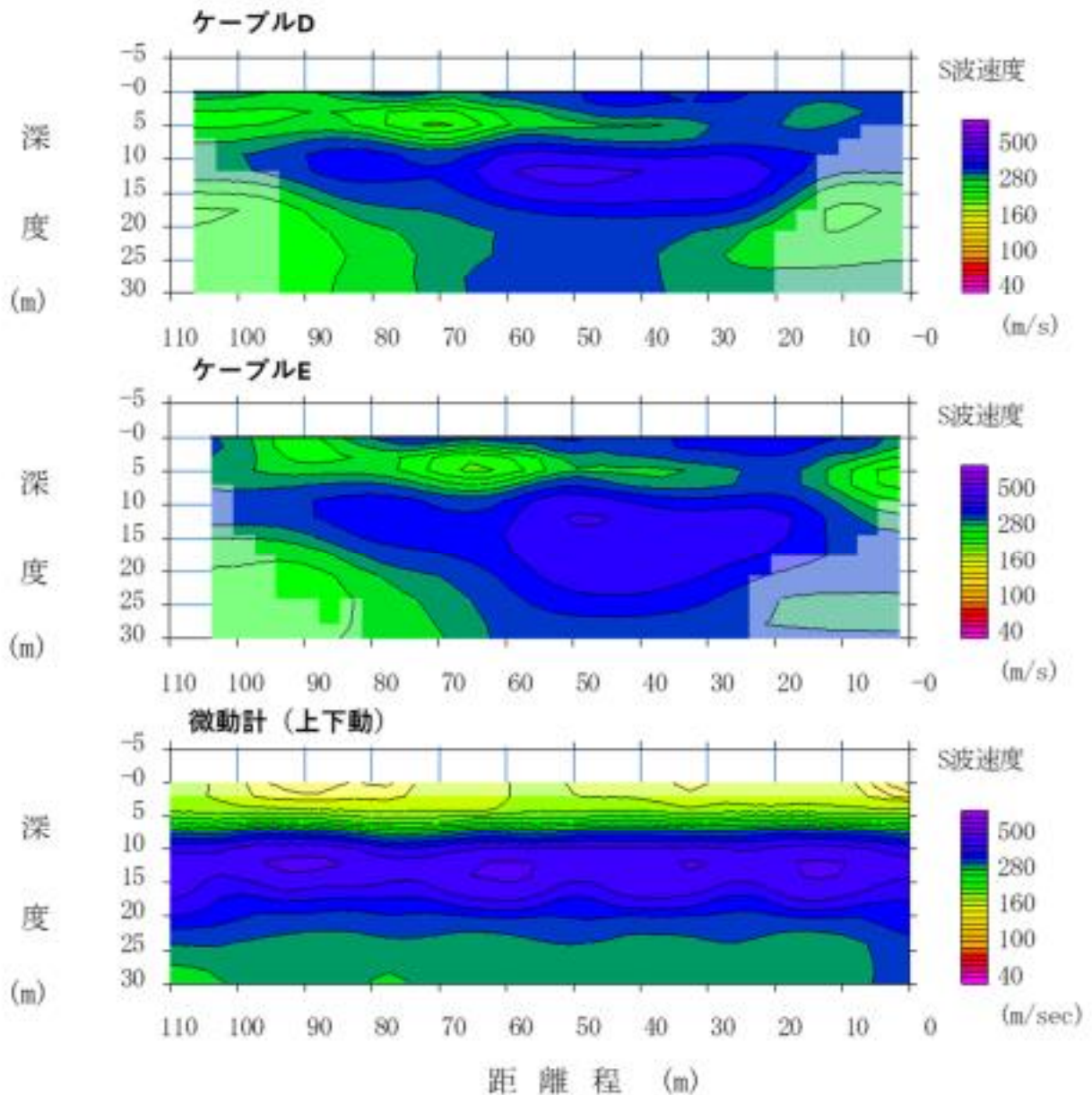


図 1.14 異なるケーブルによる 2 次元 S 波速度構造 (ケーブル D, E, 微動計)  
(ロ, ゲージ長 4.79 m)

以上をまとめると、周波数一位相速度イメージについて、いずれのケーブル (A~E) でも 2~5 Hz では Rayleigh 波の基本モードと思われる位相速度が抽出されたものの、5 Hz 以上の高周波帯では DAS 計測では Love 波が混合した可能性のある位相速度が抽出されており、Rayleigh 波のみを計測する微動計 (上下動成分) の結果とは一部整合的ではないことがわかった。DAS 記録に Love 波が混入することは、DAS は原理上ケーブル軸方向 (今回の場合は水平 1 軸方向) のみを計測するために生じる。そのため、Love 波の影響が無視できない場合、Rayleigh 波のみを抽出する微動計 (上下動成分) とは抽出される位相速度が異なることがある。S 波速度構造について、いずれのケーブルでも深度 7 m 以浅で S 波速度が 300 m/s を下回り、深度 7~15 m 程度に存在する高速度層が推定されているものの、深度 15 m 以深の構造が異なることが影響しているものと考えられる。なお、表層部の S 波速度の違いは振動源による違いと考えられるため、S 波速度構造比較の対象とはしていない。

#### ■ 異なるゲージ長による地盤の S 波速度構造推定結果の違い

前節の解析によりケーブルによる周波数一位相速度イメージおよび S 波速度構造の違いは少ないことが示された。そこで、既設の通信用光ファイバケーブルで計測する状況を考え、通信用シングルモードファイバであるケーブル A で計測したデータを用いて、ゲージ長の違いによる影響を解析した。「ロ」のインテロゲータを用いて、3.19 m、4.79 m、9.57 m の 3 つのゲージ長で計測を実施した。

異なるゲージ長による距離程 50 m 付近における周波数一位相速度イメージを図 1.15 に示す。0~20 Hz において、ゲージ長 3.19 m~9.57 m では周波数一位相速度イメージに明瞭な違いはみられない。微動計（上下動成分）から得られた周波数一位相速度イメージは、DAS による記録と同様に、2~5 Hz は基本モード、5 Hz 以上の高周波では高次モードが抽出されている。

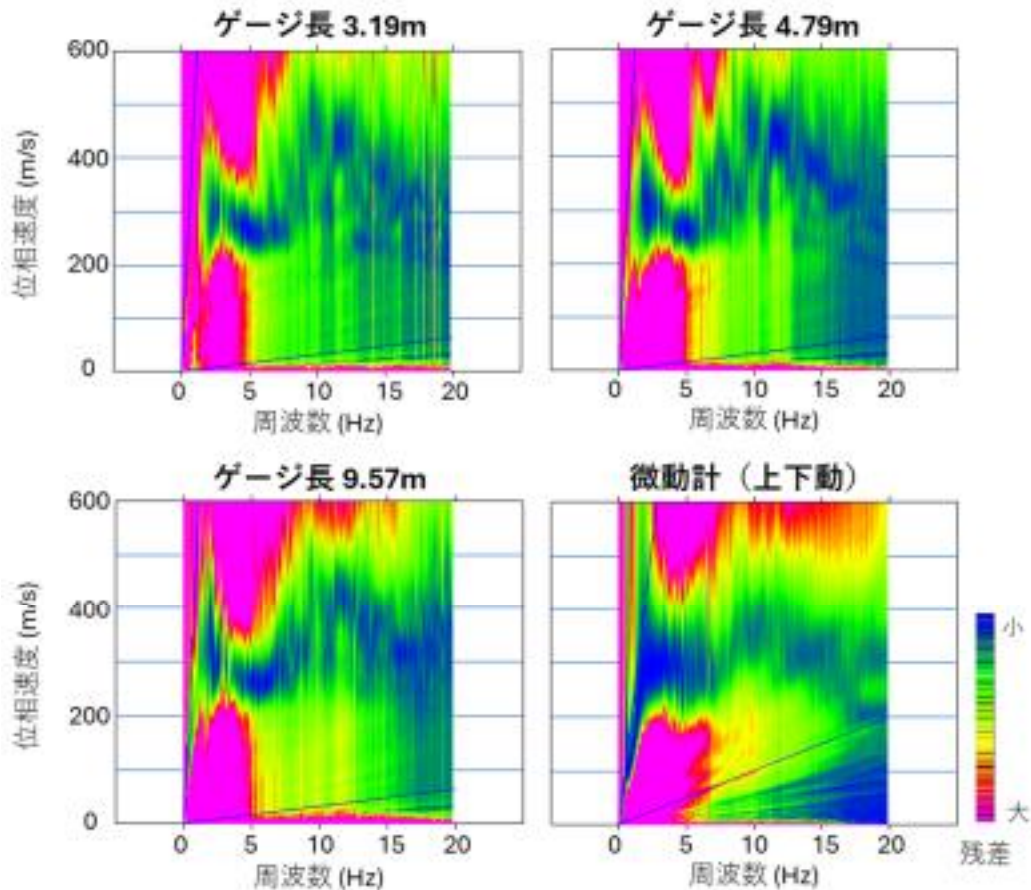


図 1.15 異なるゲージ長による周波数一位相速度イメージ（0~20Hz）  
（ロ、ケーブル A、距離程 50m 付近）

周波数一位相速度イメージから抽出される分散曲線を用いて、2次元 S 波速度構造を推定した。推定した S 波速度構造を図 1.16 に示す。いずれのゲージ長による構造でも深度 7~15 m 程度に存在する高速度層が推定されている。ゲージ長よりも短い波長の波は計測できないことから浅部の分解能は悪く、ゲージ長 9.57 m では浅部も 300 m/s の高速度となっている。

以上をまとめると周波数一位相速度イメージについて、いずれのゲージ長でも 2~5 Hz では Rayleigh 波の基本モードと思われる位相速度が抽出されたものの、5Hz 以上の高周波帯では DAS 計測では Love 波が混合した可能性のある位相速度が抽出されており、Rayleigh 波のみを計測する微動計（上下動成分）とは異なることから、微動計の結果と比べて一部整合的ではない結果が得られた。また、S 波速度構造については、いずれのケーブルでも深度 7m 以浅で S 波速度が 300 m/s を下回り、深度 7~15 m 程度に存在する高速度層が推定されているものの、深度 15 m 以深の構造が異なるため微動計の結果と比べて一部整合的ではない結果が得られた。なお、表層部の S 波速度の違いは振動源による違いと考え、S 波速度構造比較の対象としなかった。

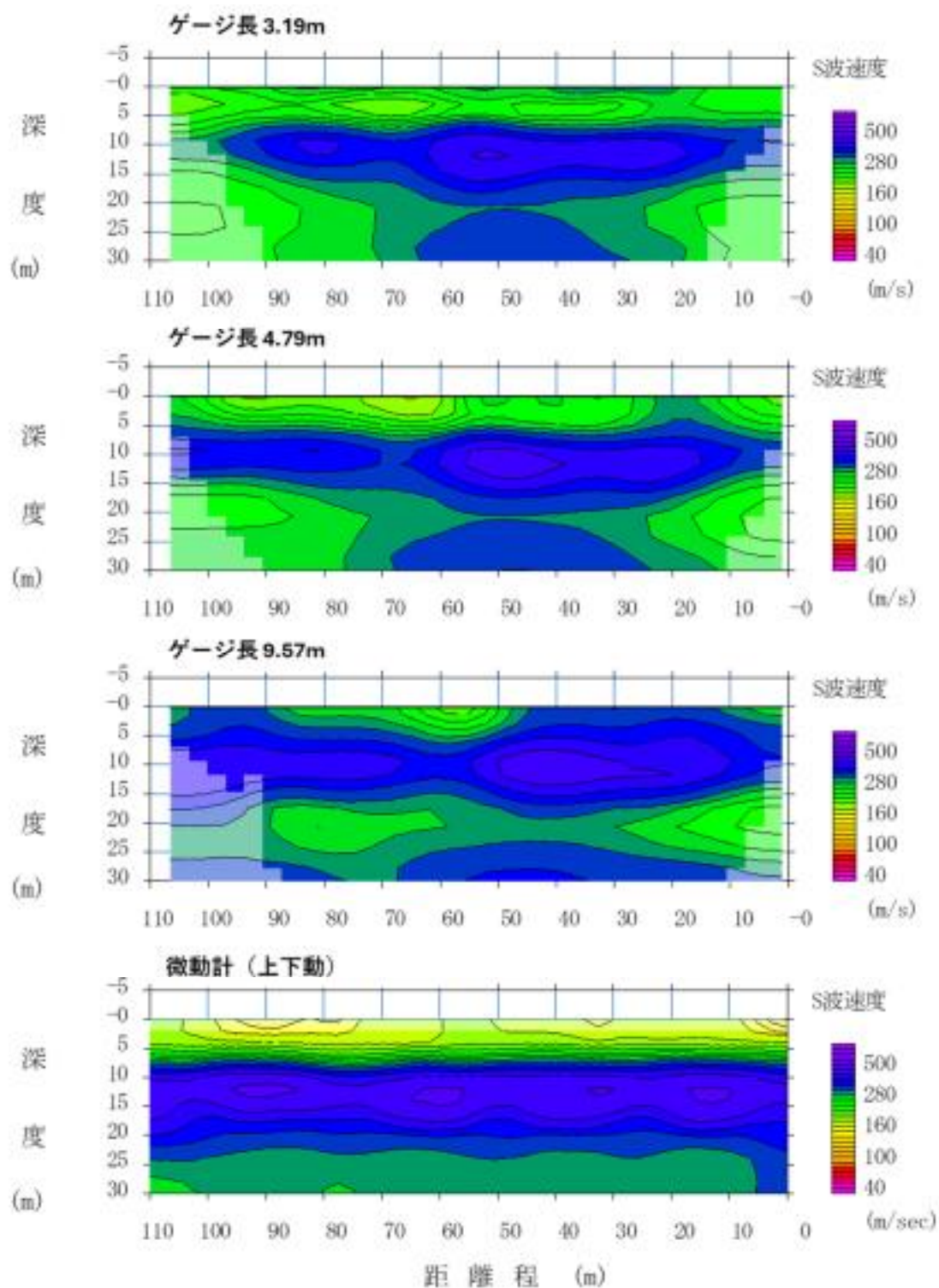


図 1.16 異なるゲージ長による 2 次元 S 波速度構造 (ロ, ケーブル A)

b) 保護管に被覆された光ファイバケーブルを用いた DAS 計測

地中埋設された通信用光ファイバケーブルは、保護管内に敷設されていることがほとんどである。この保護管の DAS 計測への影響を調査するため、R6 年度には試験場に新規にトレンチを掘削し、管で保護されたシングルモード光ファイバケーブルを埋設した。保護のパターンは、保護管はなく光ファイバケーブルを直接地面に埋設するパターン、FEP 管（波付硬質ポリエチレン管）内に光ファイバケーブルを挿入して埋設するパターン、光ファイバケーブルを挿入した FEP 管を VP 管（硬質塩ビ管）でさらに保護する二重管状態で埋設するパターンの、計 3 パターンの状況を作成し、比較を行った。埋設した光ファイバケーブルおよび保護管の仕様を表 1.3 に示す。

表 1.3 R6 年度の埋設物仕様一覧

|                  |                                                    |
|------------------|----------------------------------------------------|
| 光ファイバケーブル        | 芯数：24 芯<br>外径：8.5 mm<br>重量：65 g/m<br>延長：250 m      |
| FEP（波付硬質ポリエチレン管） | 外径：54 mm<br>内径：42 mm<br>重量：0.3 kg/m<br>延長：79.2 m   |
| VP（硬質塩ビ管）        | 外径：140 mm<br>内径：125 mm<br>重量：4.5 kg/m<br>延長：31.2 m |

掘削したトレンチは長辺 80 m、短辺 22.5 m の L 字型とし、深度は 30 cm とした。光ファイバケーブルはトレンチ内で折り返し、片側では保護管はなく、もう片側では FEP 管および VP 管内に挿入し、FEP 管のみの区間は約 44 m、FEP 管と VP 管の二重管区間は約 31 m となった。R4 年度に埋設した光ファイバケーブルとの離隔は、長辺では 1 m、短辺では 5 m である。FEP 管および VP 管の端部は、土壌および地下水の進入を防ぐために、パテで閉塞した。埋設位置および埋設状況を図 1.17 に示す。

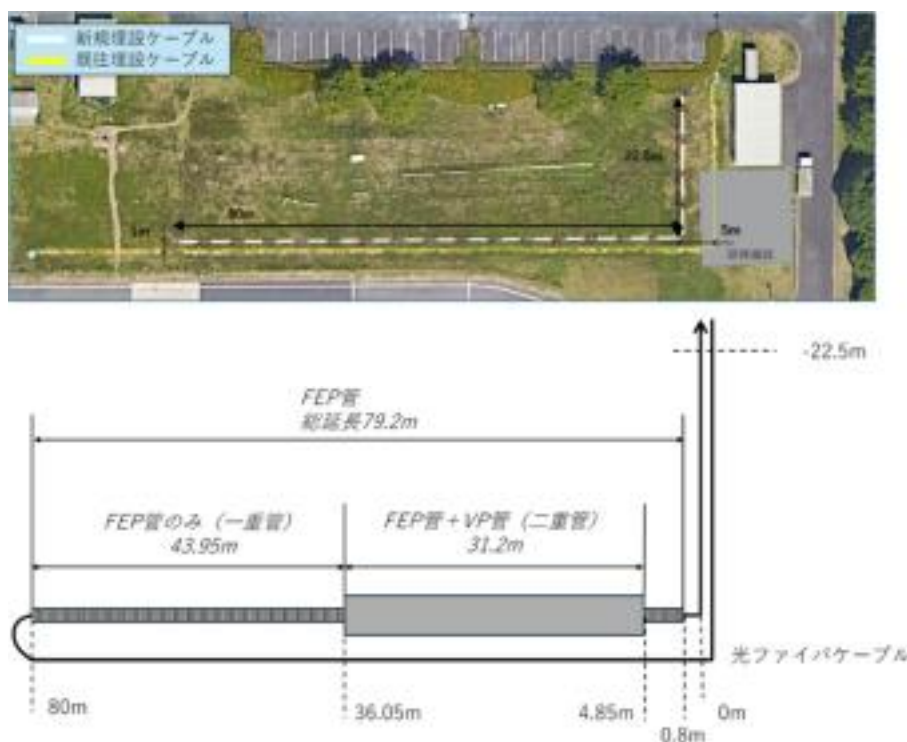


図 1.17 光ファイバケーブル埋設位置および埋設模式図

## ■ 異なる保護管状況による振動波形の違い

埋設した光ファイバケーブルに対し、「ロ」のインテロゲータを使用して DAS 計測を実施した。計測は、チャンネル間隔 0.7 m、サンプリング周波数 500 Hz、ゲージ長 1.4 m に設定して実施した。

保護管の有無による DAS 計測値へ与える影響を評価するため、距離程 6～36 m の二重管区間および同距離の保護管なし区間、距離程 40～70 m の FEP 管区間と同距離の保護管なし区間の 4 つの区間における、常時微動の振幅スペクトル（幾何平均）を算出した。スペクトルは、2024 年 12 月 12 日 0:00～1:00 の 1 時間データを用い、9 点移動平均をかけ平滑化した。また、保護管によるスペクトルの変化を評価するため、保護管なしのスペクトルで保護管のあるスペクトルを除し、スペクトル比を求めた。幾何平均スペクトルおよびスペクトル比を図 1.18 に示す。

二重管は 40 Hz 以下で、FEP 管は 30 Hz 以下で保護管よりも振幅スペクトルが低下し、概ね 4 Hz～20 Hz で二重管ではスペクトル比が 0.4～0.5、FEP 管では 0.3～0.4 となった。17 Hz 以下では二重管よりも FEP 管でスペクトル比が小さくなる理由は、現時点では不明である。

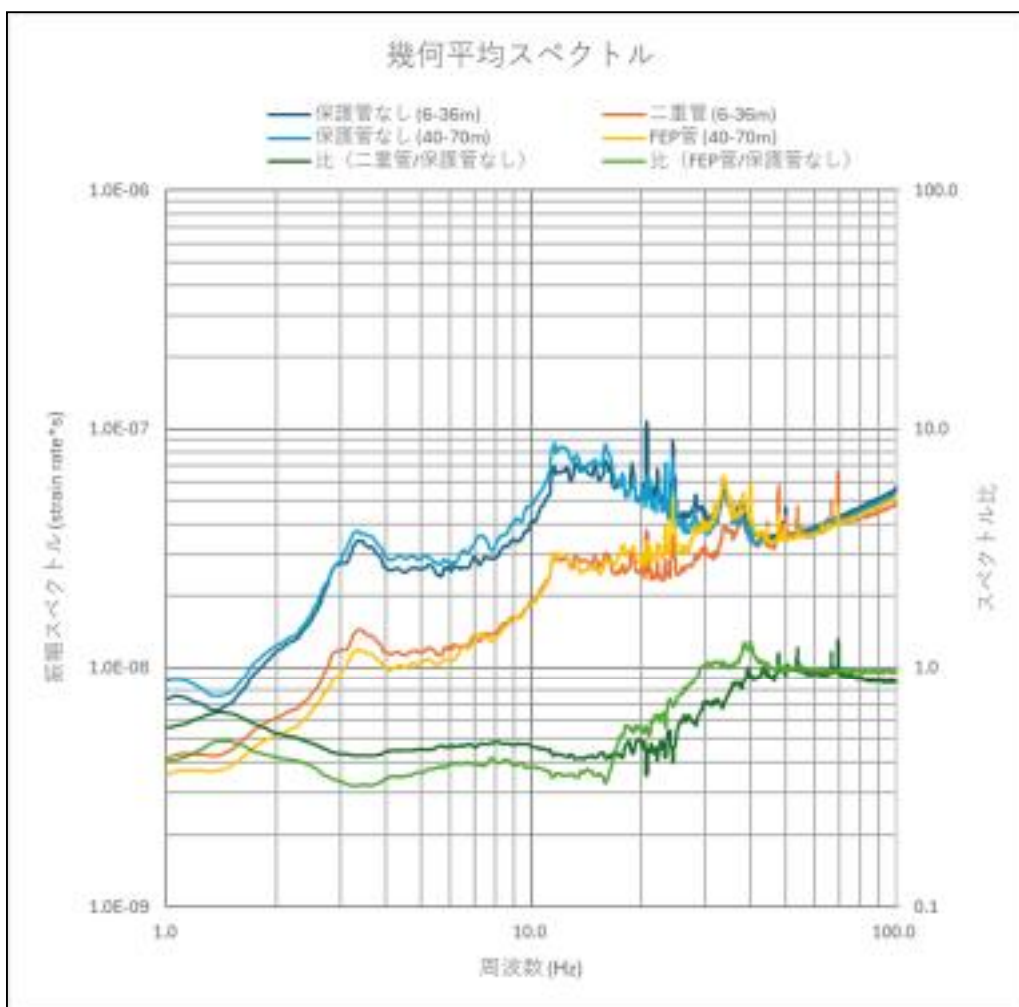


図 1.18 常時微動の振幅スペクトルおよびスペクトル比

■ 異なる保護管状況による地盤振動特性の抽出性能の違い

2024年2月12日0:00～1:00の1時間データからSPAC法を用いて微動アレイ解析を実施した。距離程6～36 mの周波数位相速度イメージを図1.19に、分散曲線を図1.20に、距離程40 m～70 mの周波数位相速度イメージを図1.21に、分散曲線を図1.22に示す。分散曲線の斜線は等波長線である。

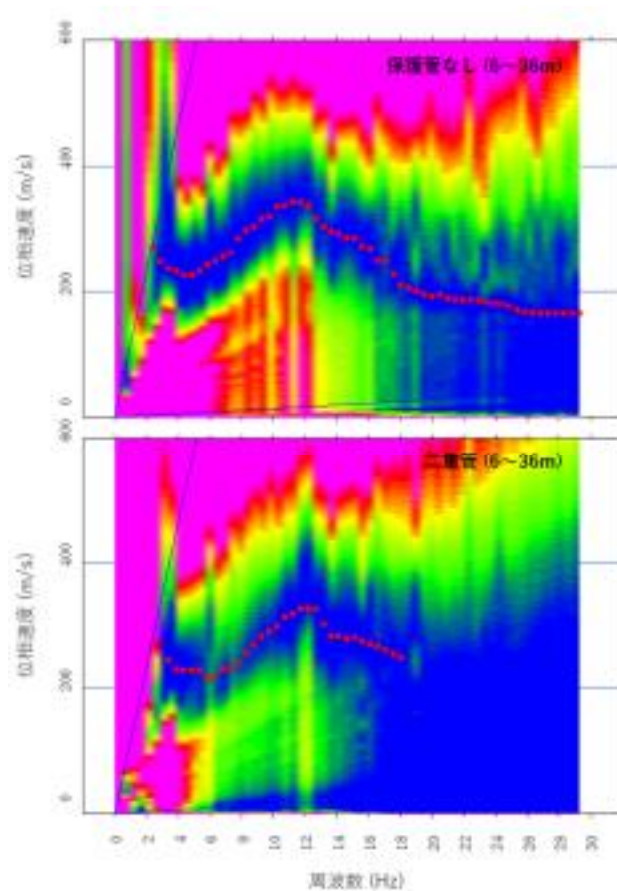


図 1.19 距離程 6～36 m の周波数位相速度イメージ（上：保護管なし、下：二重管）

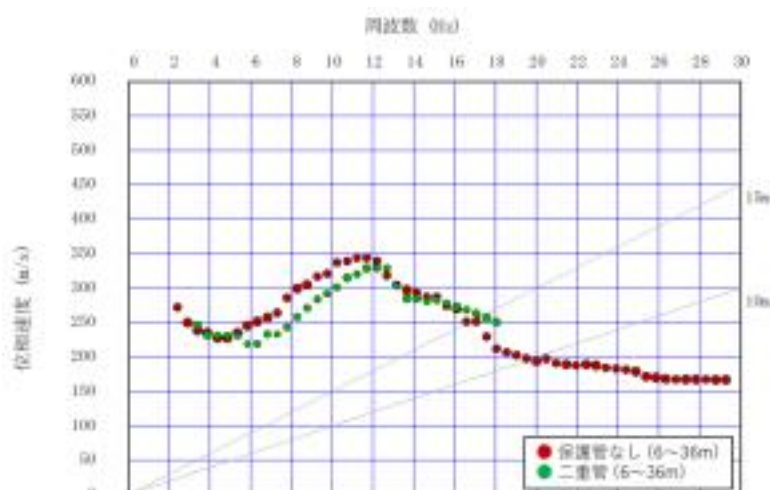


図 1.20 距離程 6～36 m の分散曲線

保護管のない記録では最大 24 Hz～29 Hz 程度まで分散曲線を抽出した。一方、二重管の記録では最大 18 Hz まで、FEP 管の記録では最大 10 Hz までの分散曲線を抽出した。保護管の影響により、分散曲線を抽出できる最大周波数が低下した。特に FEP 管では高周波側の分散曲線の抽出は困難であり、抽出した 3～11 Hz の位相速度も保護管なしの位相速度よりも低速度を示した。

保護管内の光ファイバケーブルでは高周波側の分散曲線が抽出できず、浅部の S 波速度構造の推定が困難になることが考えられる。

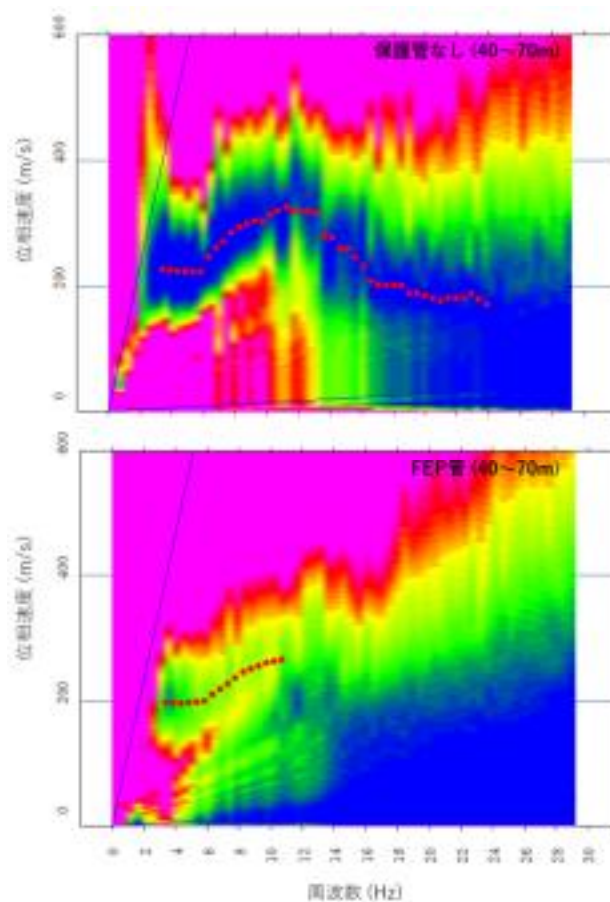


図 1.21 距離程 40～70 m の周波數位相速度イメージ（上：保護管なし、下：FEP 管）

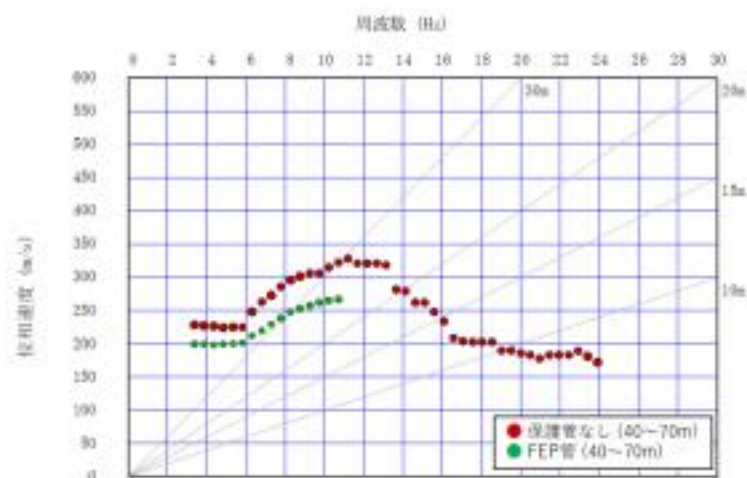


図 1.22 距離程 40～70 m の分散曲線

## ② 既設の光ファイバを用いた DAS 計測

### a) 鉛直ボーリング孔内のマルチモードファイバを用いた自然地震観測

R4年度に防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）の真岡観測点（栃木県真岡市）における鉛直ボーリング孔内に設置されたマルチモードの光ファイバケーブルを用いて、3種類のインテロゲータによるDAS計測を実施した。観測の諸元を表1.4に示す。

表1.4 真岡観測点での観測諸元

| インテロゲータ    | イ                                                     | ロ                                                       | ハ                                                     |
|------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 観測期間       | 2023/2/2 12:30<br>～<br>2023/2/3 13:00<br>(24 時間 30 分) | 2023/2/13 15:00<br>～<br>2023/2/14 15:00<br>(24 時間 00 分) | 2023/2/8 15:00<br>～<br>2023/2/9 15:00<br>(24 時間 00 分) |
| 計測ファイバ長    | 1.7 km                                                | 1.7 km                                                  | 1.7 km                                                |
| チャンネル数     | 1,740                                                 | 1,110                                                   | 1,000                                                 |
| ゲージ長       | 2 m                                                   | 4.79 m                                                  | 5 m                                                   |
| チャンネル間隔    | 1m                                                    | 1.6 m                                                   | 2 m                                                   |
| サンプリング周波数  | 1,000 Hz                                              | 1,000 Hz                                                | 1,000 Hz                                              |
| 1 ファイルのサイズ | 140 MB (60 秒)                                         | 261 MB (60 秒)                                           | 236 MB (60 秒)                                         |

それぞれ24時間程度の計測期間中に自然地震が観測された。図1.23はボーリング孔底に設置されたHi-netの地震計で観測された2023年2月9日0:33:29の地震波形であり、図1.24は、「ハ」のインテロゲータで得られた同時刻のボーリング孔沿いのDAS記録を示す。地上部の光ファイバの長さが不明であるため、縦軸は光ファイバ長で表示しており、おおよそ深度に対応する。DAS記録は1-10 Hzのバンドパスフィルタを施した後の歪速度波形を示す。ボーリング孔沿いに多数の記録が得られ、ボーリング孔の下方から上方に伝わった地震波が地表で反射している状況が確認できた。他の2種類のインテロゲータを用いた観測でも自然地震が観測された。

今回の観測結果より、1.7 km程度の長さのマルチモードファイバあれば、いずれのインテロゲータを利用した場合においても自然地震観測が可能であることが明らかになった。

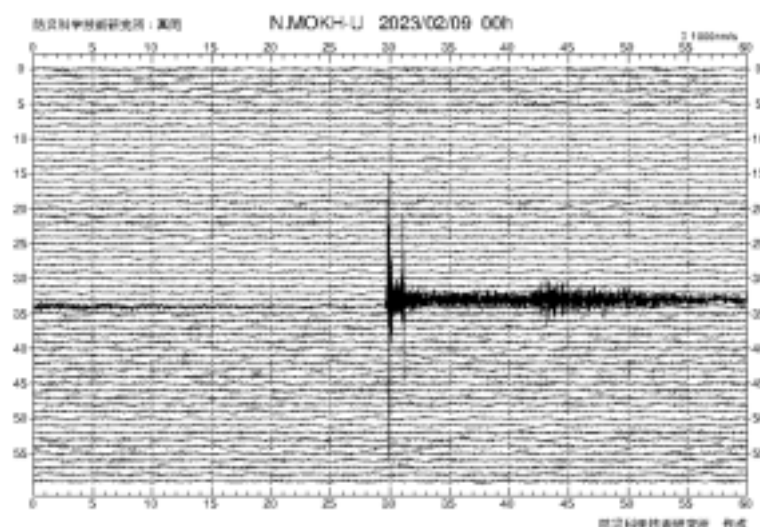


図1.23 Hi-net 真岡の地震波形（2023年2月9日0時台の連続波形）

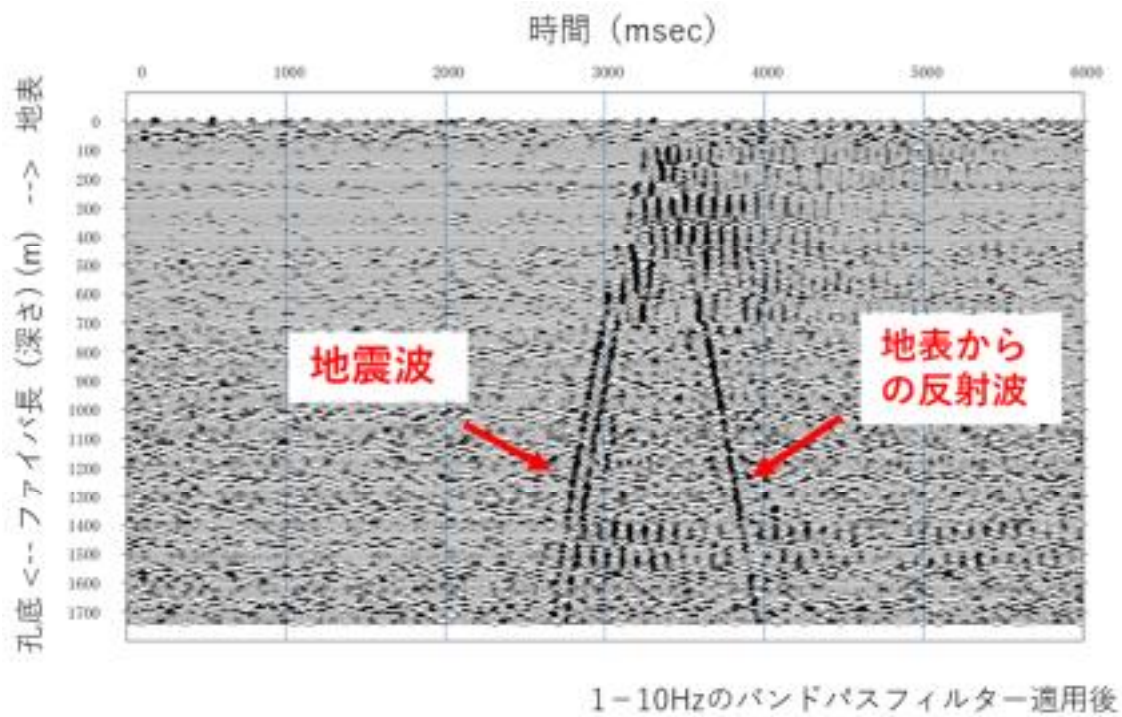


図1.24 マルチモードファイバで得られた光ファイバDASの記録例  
(2023年2月9日0:33:29の地震に対応)

b) 国道 6 号および 50 号における微動観測

R5 年度に国道 6 号および 50 号沿いに埋設されている通信用光ファイバケーブルを用いた DAS 観測を実施した。表 1.5 に観測諸元を示す。インテロゲータは「ロ」を使用し、計測パラメータは、ゲージ長 9.57 m、サンプリング間隔 4.79 m、光パルスレート 2kHz、サンプリング時間 2ms、ハイパスフィルター0.01 Hz に設定した。

|         | 計測期間               | 距離 (観測点数)             | ファイル容量       |
|---------|--------------------|-----------------------|--------------|
| 国道 6 号  | 2023/09/12 00:00～  | 水戸方面 (10593) 48.75 km | 水戸方面 26.1 TB |
| 土浦国道    | 2023/09/25 09:45   | 柏方面 (1747) 7.91 km    | 柏方面 4.4 TB   |
| 出張所     | (13.4 日間)          | 合計 56.66 km           | 合計 30.5 TB   |
| 国道 50 号 | 2023/09/25 17:40 ～ | 水戸方面 (7569) 34.15 km  | 水戸方面 14.0 TB |
| 岩瀬国道    | 2023/10/06 10:00   | 小山方面 (6371) 28.68 km  | 小山方面 11.7 TB |
| 出張所     | (10.6 日間)          | 合計 62.82 km           | 合計 25.7 TB   |

表 1.5 国道 6 号及び 50 号での観測諸元

図1.25は国道6号における、図1.26は国道50号における、それぞれ光ファイバケーブルの位置を示す。前者ではインテロゲータを土浦国道出張所に、後者ではインテロゲータを岩瀬国道出張所にそれぞれ設置した。なお、使用したインテロゲータは2方向の同時計測が可能のため、各出張所を挟んで北・南、東・西両方向の光ファイバケーブル (Fiber1, Fiber2) の計測を同時に実施した。多数の地点で計測チャンネルとケーブル位置の対応を規則的な加振により確認するタップテストを行った。また、地点6-1から6-6、地点50-1から50-6の計12箇所では微動ラインアレイ探査を実施した。



図1.25 国道6号における観測点位置

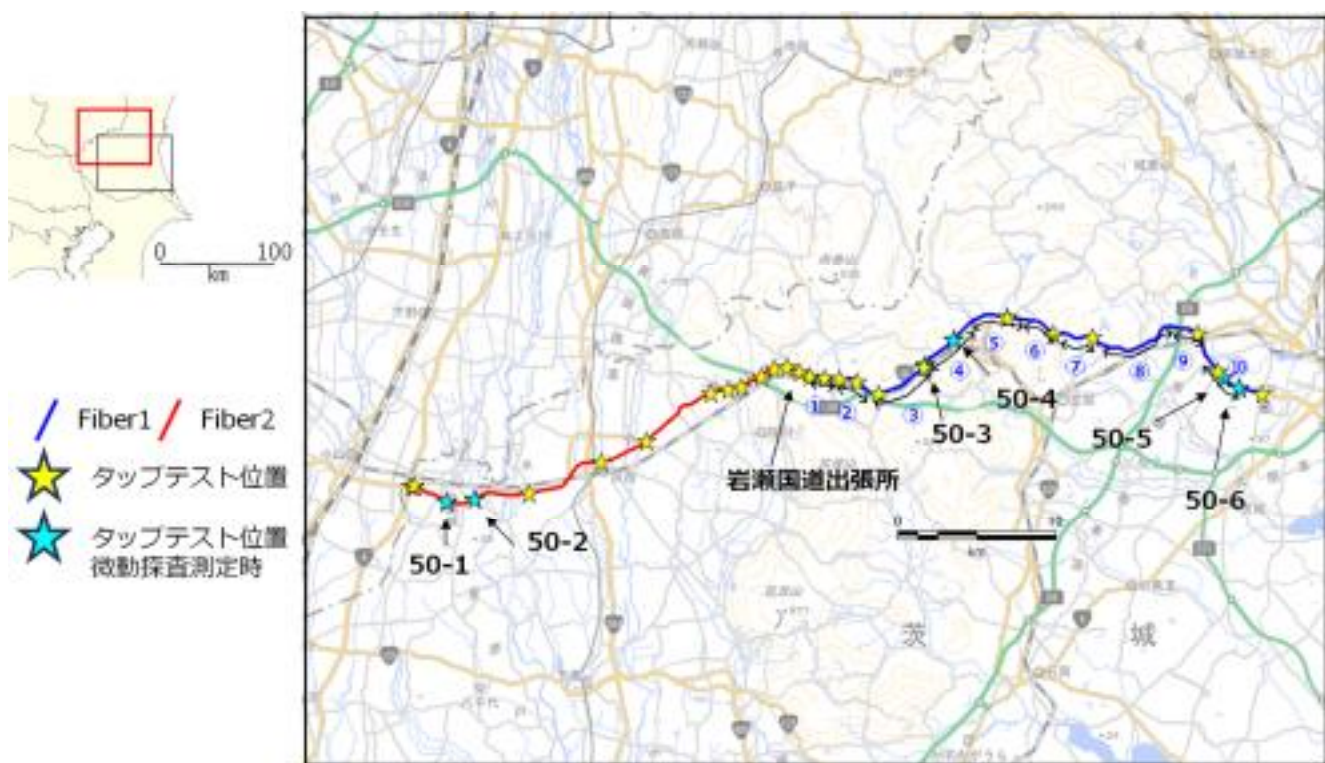


図1.26 国道50号における観測点位置

図 1.27 は微動ラインアレイ探査記録を用いて算出した位相速度と DAS 記録の UD 成分を用いて算出した位相速度との比較を計測地点毎に比較した図である。黒の実線が微動アレイ探査の UD 成分を用いて算出した記録であり、黄色や青の三角が DAS 記録を用いて算出した、隣り合うチャンネルの記録である。なお、地点 6-5,6-6 はケーブル長が長く S/N 比が十分でなかったため DAS による位相速度の読み取りができなかった。これらを見ると、いずれの地点も微動アレイ探査により読み取った位相速度と概ね整合的な結果が得られている。

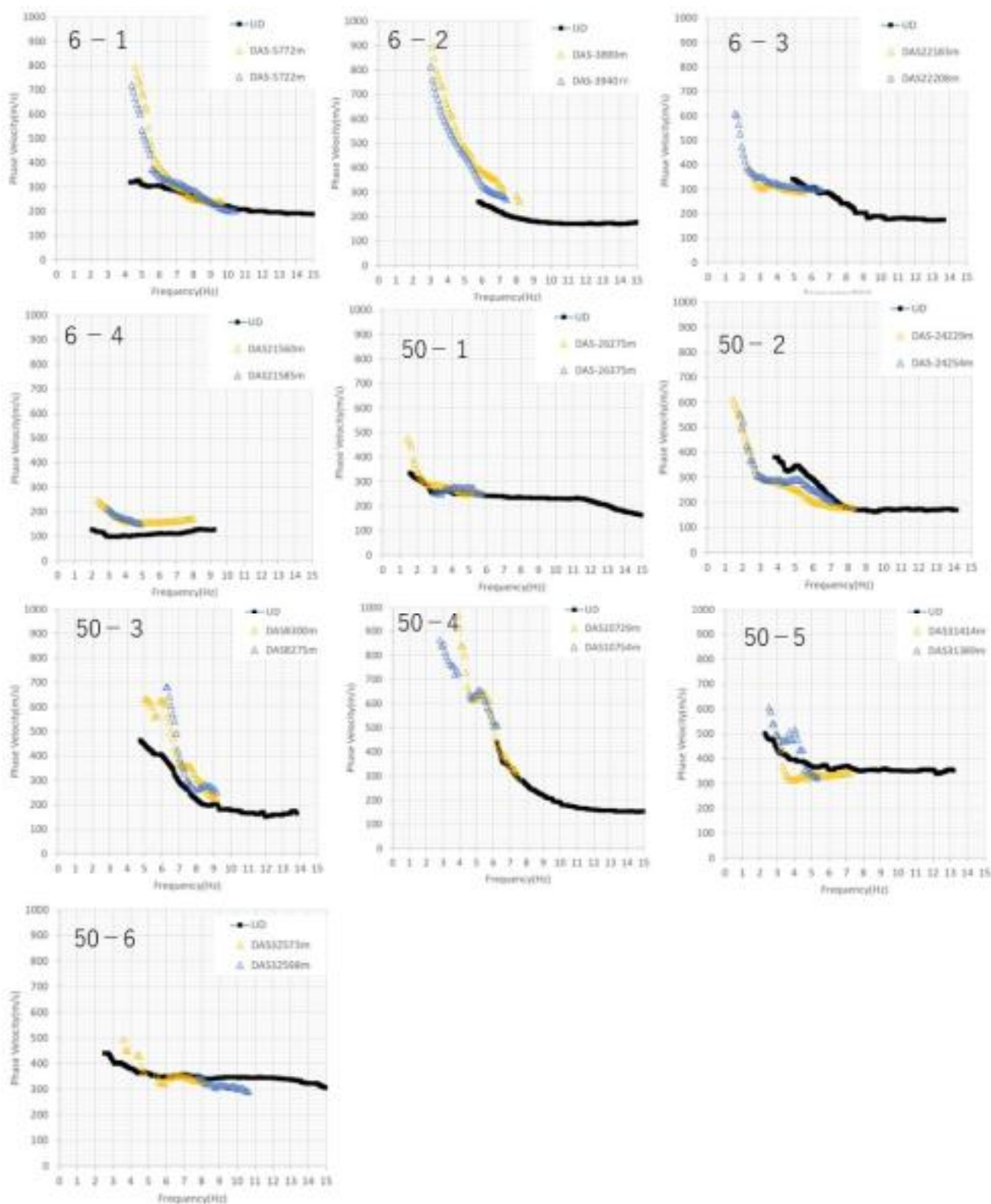


図 1.27 国道 6 号、50 号における DAS および微動アレイ探査を用いて算出した位相速度

防災科研が関東地方の地盤モデル作成のために実施した小規模微動アレイ探査 (防災科研 2021, 先名ら 2023)結果を用いて算出した位相速度と、今回の DAS 観測により算出した位相速度との誤差を近傍のチャンネルにおいて比較した (図 1.28)。誤差は微動アレイ探査と DAS による位相速度データが共通で得られている周波数範囲において、両者の位相速度の差を求め、アレイ探査による位相速度で除した値を平均して算出した。結果、高次モードの混入により DAS 記録の読み取りがうまくできなかった 2 点 (誤差 50 %以上) を除けば、誤差は 20 %以内に収まるものが大半であった。

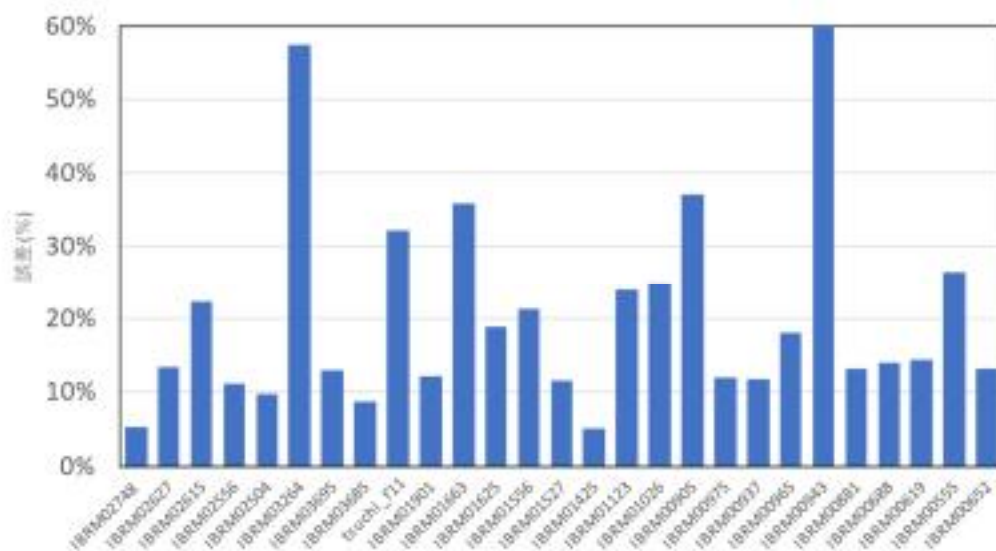


図1.28 小規模微動探査との誤差 (横軸は微動アレイ探査の地点番号)

国道6号、国道50号の各DAS観測記録から算出した位相速度を用いて、CMPCC法 (Hayashi, et.al, 2015) によりS波速度構造を推定した。推定方法は、波長の3分の1の深度に位相速度をプロットし、深度約80 m以浅を15層に区分して初期モデルを作成した。続いて最小二乗法により、S波速度構造断面図を作成した (図1.29)。空間解像度を示すパラメータであるビンサイズは25 mに設定した。いずれも、水平方向50 km以上の区間において、深さ100 m程度までのS波速度構造断面が得られており、例えば国道6号では南側に行くほど、国道50号では西側に行くほど、それぞれVs値の低い堆積層が厚くなっている傾向を確認することができる。

なお、(3) ①で後述するが、R6年度はより高精度な計測が可能なインテロゲータを使用した実験を行っており、R6年度のデータを用いることにより空間解像度 (ビンサイズ) 10 mでS波速度構造断面図を作成することが可能であることを確認している (図3.2、図3.4)。

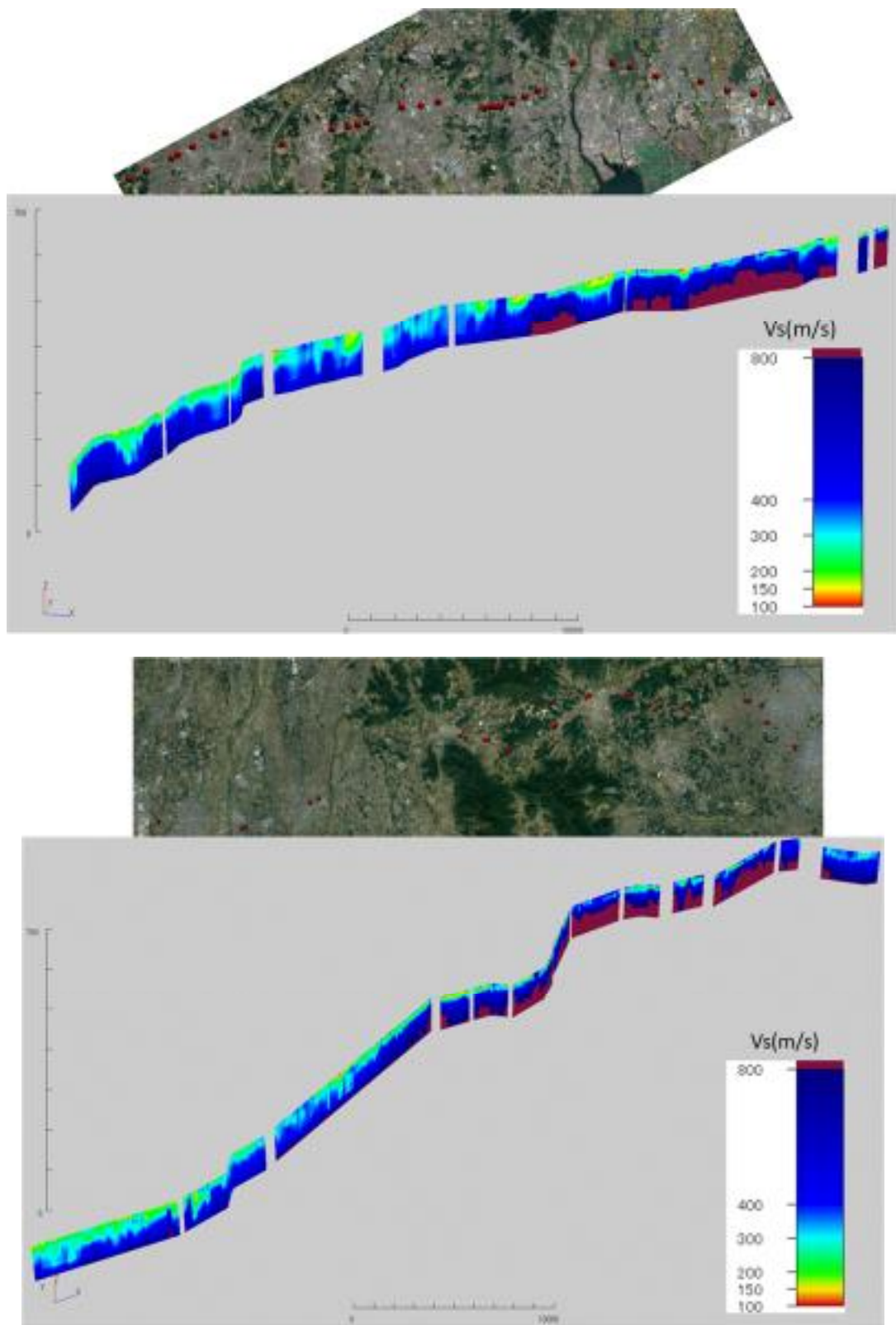


図1.29 推定されたS波速度構造断面図（上図：国道6号 下図：国道50号）

次にDAS観測記録を用いて、波長40mにおける位相速度の値をその地点の深度30 mまでの平均S波速度（AVS30）とみなし、AVS30と基準地盤S波速度400 m/sに対する最大速度増幅率（ARV）に関する以下の関係式を用いて地盤増幅率を推定した（長尾・紺野,2002、藤本・翠川, 2006）。

$$\log_{10}(ARV) = -0.852 \cdot \log_{10}\left(\frac{AVS30}{400}\right)$$

図1.30の背景データはJ-SHIS（防災科研, 2025）による250 mメッシュ地盤増幅率であり、図の丸印はDAS記録を用いて算出した増幅率を表している。これらと比較すると、DASによる増幅率とJ-SHISによる増幅率は全体的には概ね整合的であるが、DASによるデータ解析は、空間解像度25 m間隔で行っているため、DASによる増幅率のほうがより細かい地盤構造の違いを反映している可能性がある。

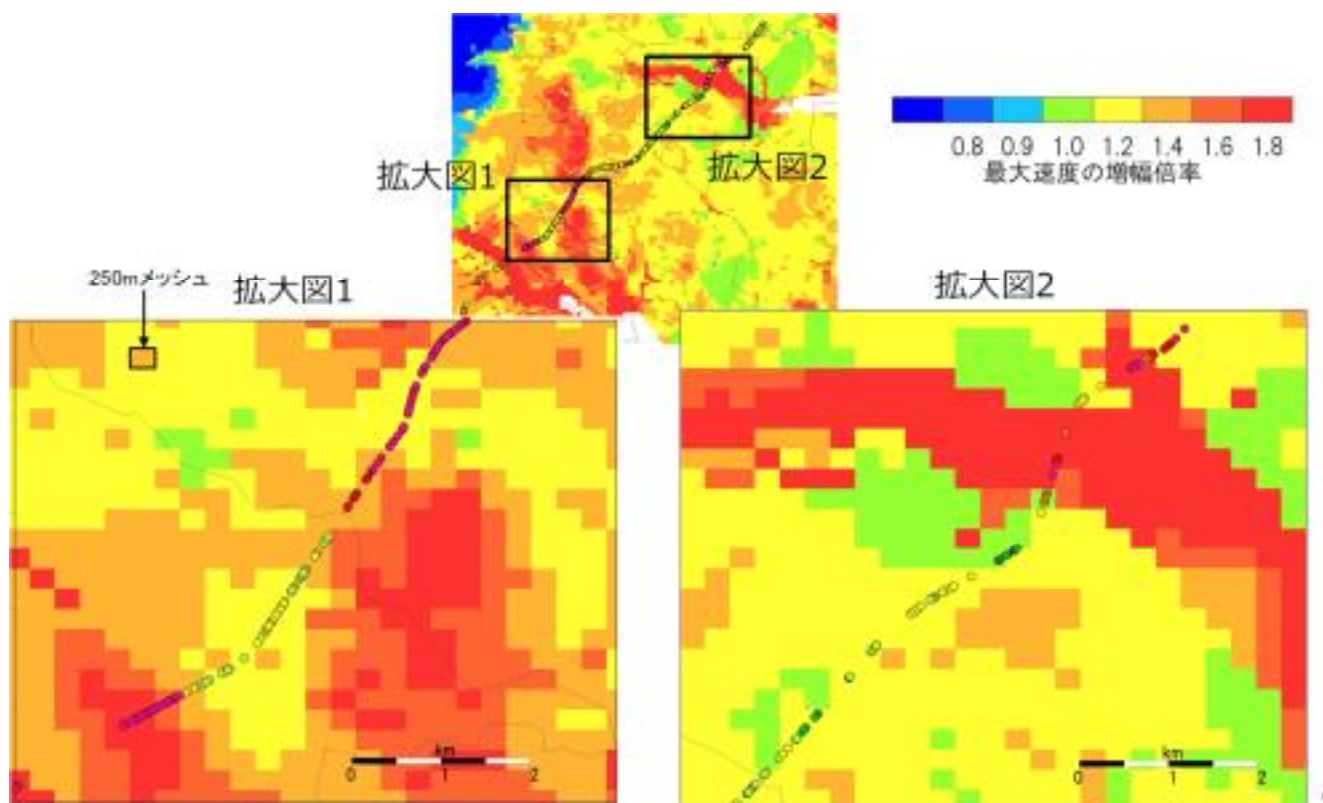


図1.30 J-SHISによる250 mメッシュ地盤増幅率との比較

## ■参考文献

- 内藤昌平, 藤原広行, 中村洋光, 鈴木晴彦, 櫻井健, 小西千里, 小川直人, 武部真樹 (2025) : 複数の光ファイバおよびインテロゲータを用いた DAS 試験観測による地盤モニタリング性能比較, 日本地震工学会論文集, Vol.25, No.4, pp.206-219.
- Aki, K. (1957): Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol.35. pp. 415-456.
- 岡田 広(1990) : 広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法,物理探査, 43, 6, 402-417.
- 鈴木晴彦・石塚 理・棚澤美秋・林 宏一・太田賢治 (2019) : 可搬型三成分地震・微動観測システムの開発, 物理探査学会第140回学術講演会論文集, 217-219.
- Hayashi, K., Craig, M., Kita, T. and Inazaki, T. (2015): CMP spatial autocorrelation analysis of multichannel passive surface-wave data, SEG Technical Program Expanded Abstracts: No. 2200–2204. DOI: <https://doi.org/10.1190/segam2015-5913708.1>
- 先名重樹, 藤原広行, 前田宜浩, 森川信之, 岩城麻子, 河合伸一, 谷田貝 淳, 佐藤 将, 鈴木晴彦, 稲垣賢亮, 松山尚典 (2023) : 強震動評価のための浅部・深部統合地盤構造モデルの構築, 防災科学技術研究所研究資料, No.498, 259p.
- 防災科研 (2021) : 関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデルの構築, [https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/JSHIS2/data/DOC/Report/report\\_SDstruct2021.pdf](https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/JSHIS2/data/DOC/Report/report_SDstruct2021.pdf)
- 長尾毅, 紺野克昭 (2002) : 常時微動アレー観測に基づく表層地盤の平均 S 波速度推定精度に関する研究, 土木学会論文集, No.696, I-58, pp.225-235.
- 藤本一雄, 翠川三郎 (2006) : 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論文集 Vol.6, No.1, pp.11-22.
- 防災科研 (2025) : 地震ハザードステーションJ-SHIS : <https://www.j-shis.bosai.go.jp/>

## (2) 光ファイバDAS による長期間連続モニタリング技術の確立

### ① リアルタイムモニタリングシステムの開発

光ファイバDAS観測データを長期間にわたって連続的にモニタリングするシステムとして、計測サイトで動作するエッジ処理機能と、データセンタで動作するストレージ処理機能からなるリアルタイムモニタリングシステムを構築した。システムの全体構成を図2.1に示す。(図2.1)。

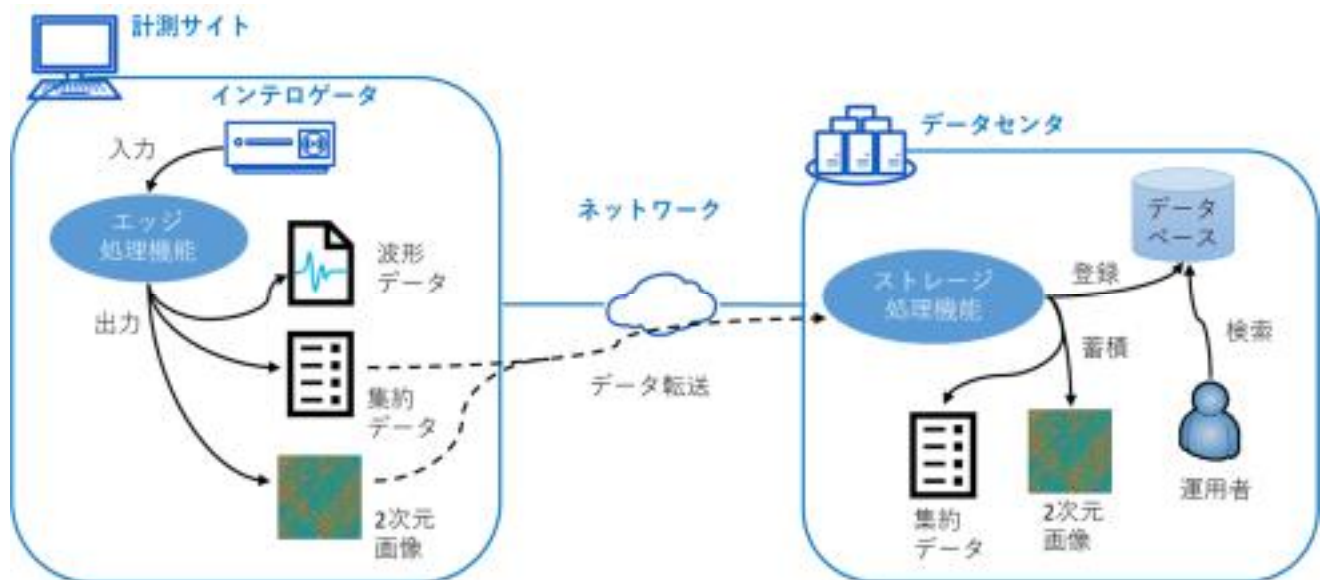


図2.1 リアルタイムモニタリングシステムの全体構成

#### a) エッジ処理機能について

エッジ処理の構成を図2.2に示す。

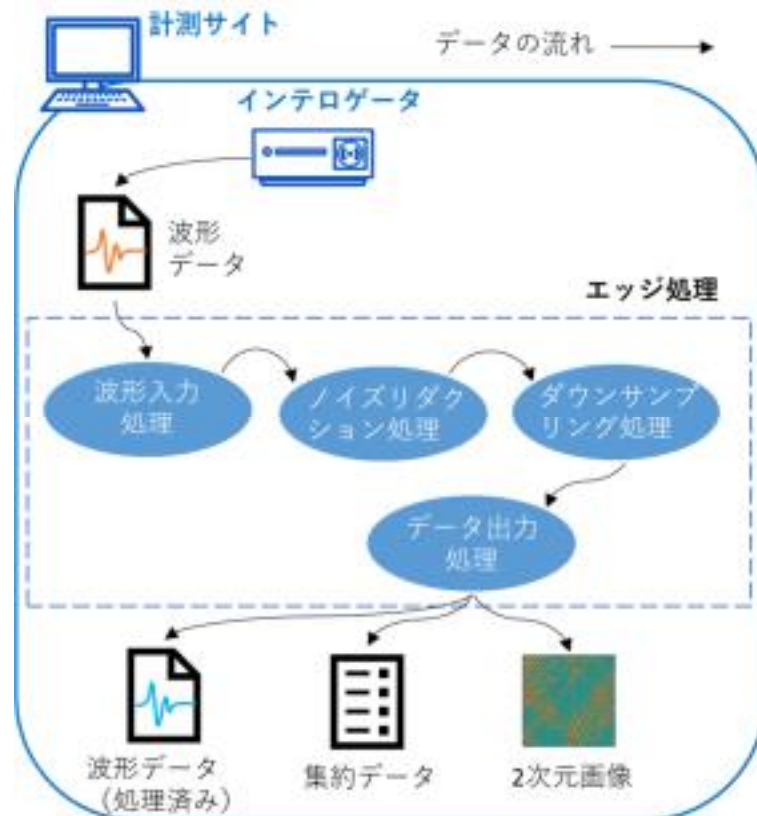


図2.2 エッジ処理の構成図

エッジ処理ではインテロゲータによって計測された波形データファイル(ひずみまたはひずみ速度)を波形入力処理により読み込み、ノイズリダクション処理、ダウンサンプリング処理を行い、データ出力処理で波形データ(処理済み)、集約データ(図2.3)、2次元画像を出力する(図2.4)。各処理の内容を表2.1に、エッジ処理が出力するデータの内容を表2.2に示す。

表 2.1 エッジ処理の内容

| 処理名         | 内容                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 波形入力処理      | インテロゲータからの波形データファイルの出力を監視し、ファイル出力を検知した際に、該当ファイルを読み込み、後段処理であるノイズリダクション処理、ダウンサンプリング処理、データ出力処理を実行する。                                                                                                                      |
| ノイズリダクション処理 | 波形入力処理で読み込んだ時系列の波形データに対し、100 Hz のローパスフィルタを適用することによりノイズ除去を行う。リアルタイム処理することを想定し、逐次的かつ計算量、遅延が少ない IIR (Infinite Impulse Response) フィルタを用いる。本処理は、処理性能向上のためチャンネル単位で並列処理が可能である。                                                |
| ダウンサンプリング処理 | 波形入力処理で読み込んだ時系列の波形データ (500 Hz サンプリング) に対し、100Hz サンプリングに間引き処理を適用することによりダウンサンプリング (リサンプリング) を行う。リサンプリング後にローパスフィルタを適用し帯域外の高周波成分を除去する。ローパスフィルタは IIR (Infinite Impulse Response) フィルタを用いる。本処理は、処理性能向上のためチャンネル単位で並列処理が可能である。 |
| データ出力処理     | ノイズリダクション処理およびダウンサンプリング処理を実施した波形データ (処理済み) を出力する。また、波形データ (処理済み) から、集約データ (1 秒、100 ch 単位で集約) および 2 次元画像を出力する。波形データから集約データを生成するイメージ図を図 2.3 に記載した。                                                                       |

表 2.2 出力データの内容

| 処理名          | 内容                                                                                                                                                  |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 波形データ (処理済み) | ノイズリダクション処理、ダウンサンプリング処理後の波形データを WIN32 形式ファイルとしてファイル出力する。WIN32 形式ファイルは東京大学地震研究所により規定された地震波形データを取り扱う WIN 形式フォーマット(東大地震研, 2015)を拡張したフォーマットを有するファイルである。 |
| 集約データ        | 波形データ (処理済み) から、時間方向を 1 秒単位、チャンネル方向を 100 ch 単位で集約し、その最大値、中央値、平均値をカンマ区切りで出力した CSV ファイルである。                                                           |
| 2 次元画像       | 集約データをもとに、ひずみまたはひずみ速度の大小をカラーマップで表示した画像形式である。横軸はチャンネル番号 (観測位置に対応)、縦軸はデータ時間とし、2 次元画像の出力例を図 2.4 に示す。                                                   |

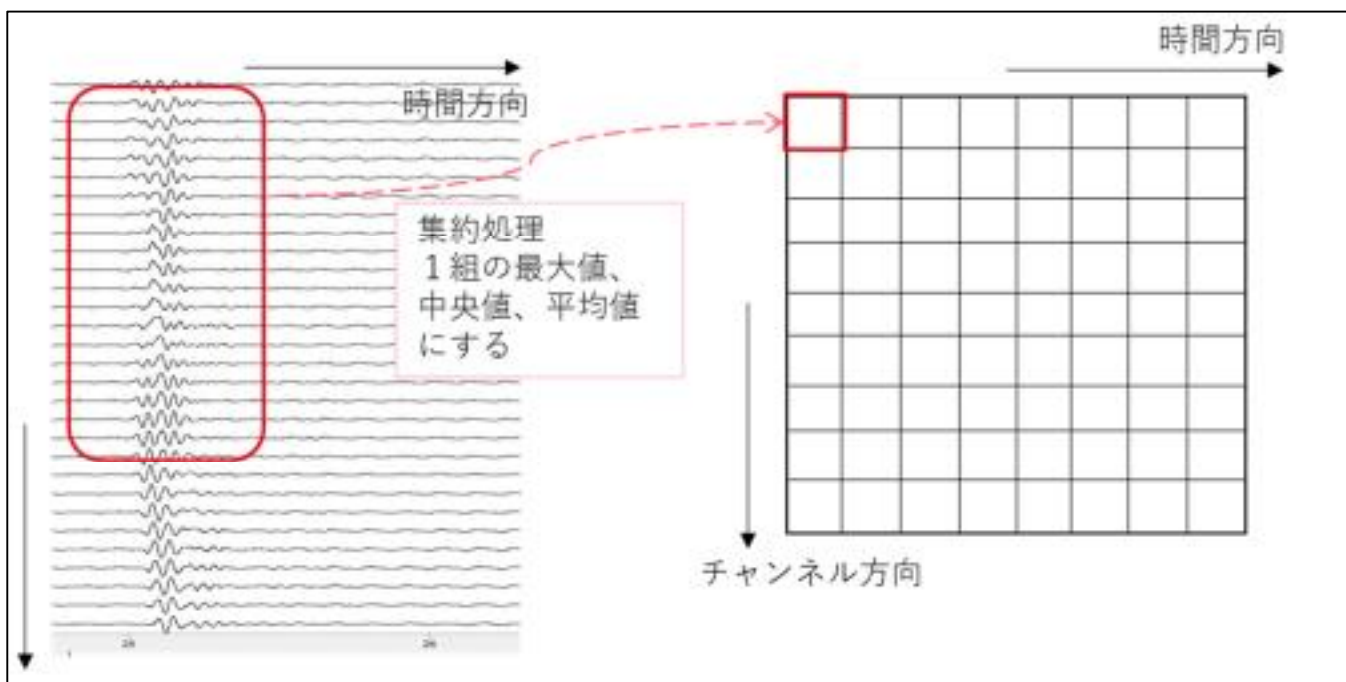


図2.3 波形データから集約データを生成するイメージ図

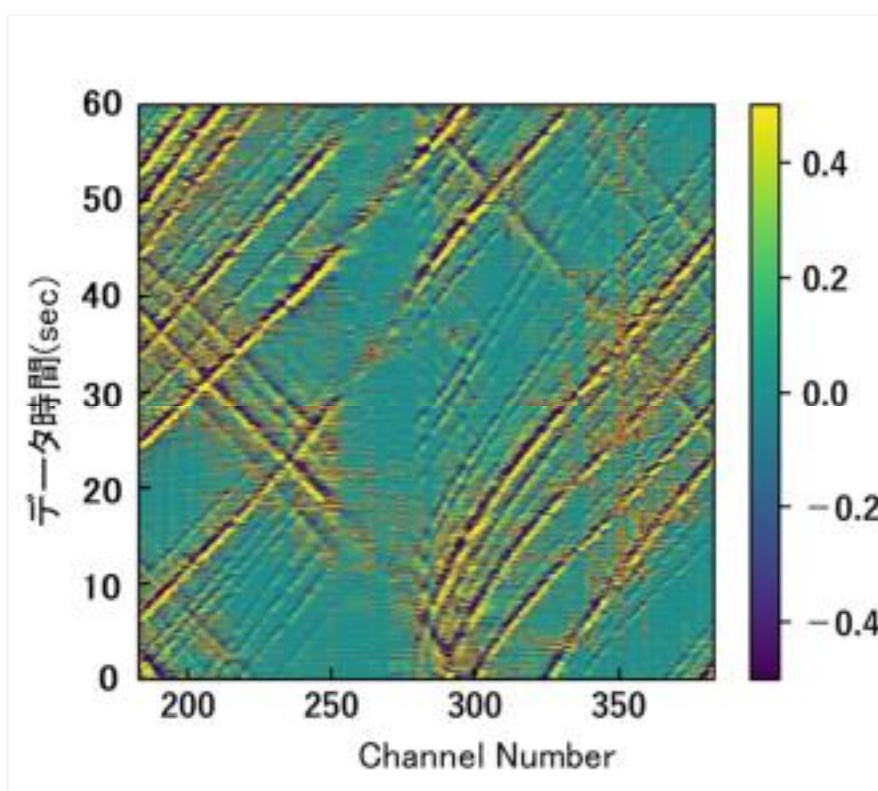


図 2.4 2次元表示したひずみ画像の出力例

b) ストレージ処理機能について

データセンタ内にて稼働し、エッジ処理からのデータの受信、蓄積および検索を行うストレージ処理を構築した。ストレージ処理の構成を図2.5に示す。

ストレージ処理では、データ登録・蓄積機能によるデータの受信およびデータベースへの登録、データ検索機能によるデータファイルの検索および取得が可能である。各処理の内容を表2.3に示す。

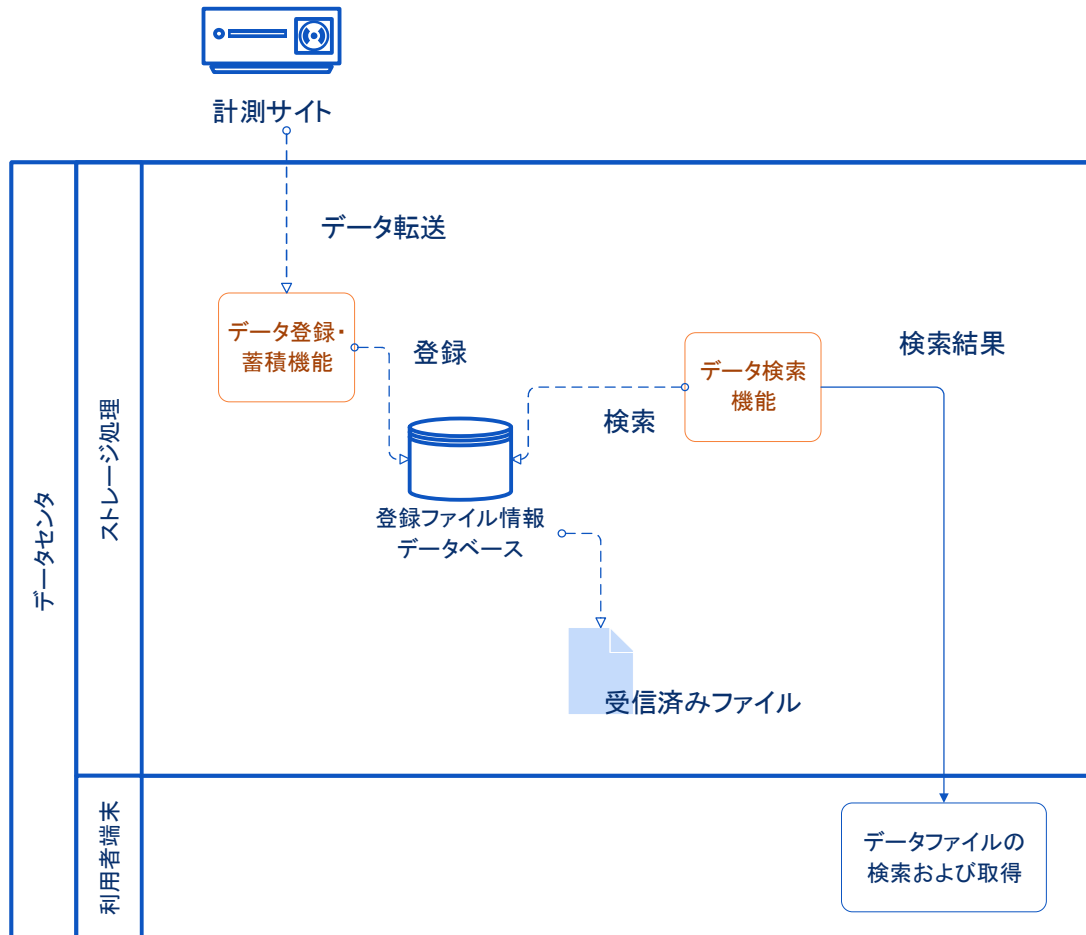


図2.5 ストレージ処理の構成図

表 2.3 ストレージ処理の内容

| 処理名        | 内容                                                                                                                     |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| データ登録・蓄積機能 | エッジ処理サーバシステムより受信する波形データファイル、集約データファイルおよび2次元画像ファイルに対し、ファイルの記録先、集約データファイルの内容をデータベースに登録する機能である。                           |
| データ検索機能    | データベースに登録された情報より、データ要件に合わせた検索を行う機能である。データ要件（観測点情報、計測期間、最大ひずみ量や最大ひずみ速度など）を入力とし、対象となる連続データまたはイベントデータを検索し結果をテキスト形式にて出力する。 |

## ② リアルタイムモニタリング実証実験

上記で構築したリアルタイムモニタリングシステムに対して、実際の計測環境を想定した実証実験を行いリアルタイム処理性能およびデータアクセス性を検証した。実証実験は「国道6号および国道50号における光ファイバDAS計測データを用いた実験」および「試験サイトにおけるインテロゲータを用いた実験」の2通りを実施した。以下にそれぞれの実証実験の内容と結果を示す。

### a) 国道6号および国道50号における光ファイバDAS計測データを用いた実験

R5年度に国道6号および国道50号において、実際に光ファイバDASにより計測されたデータを用いて実証実験を行った。動作環境の概念図を図2.6に示す。本実証実験において、システムへの入力インテロゲータを模擬したプログラムにより実行し、一連の処理における動作性能を評価している。利用した国道6号および国道50号の計測データの詳細を表2.4に示す。

また本実証実験を行う環境として計測サイトへ設置することを見込み、標準的な性能を有するデスクトップ端末にて実験を行った。デスクトップ端末の性能を表2.5に示す。

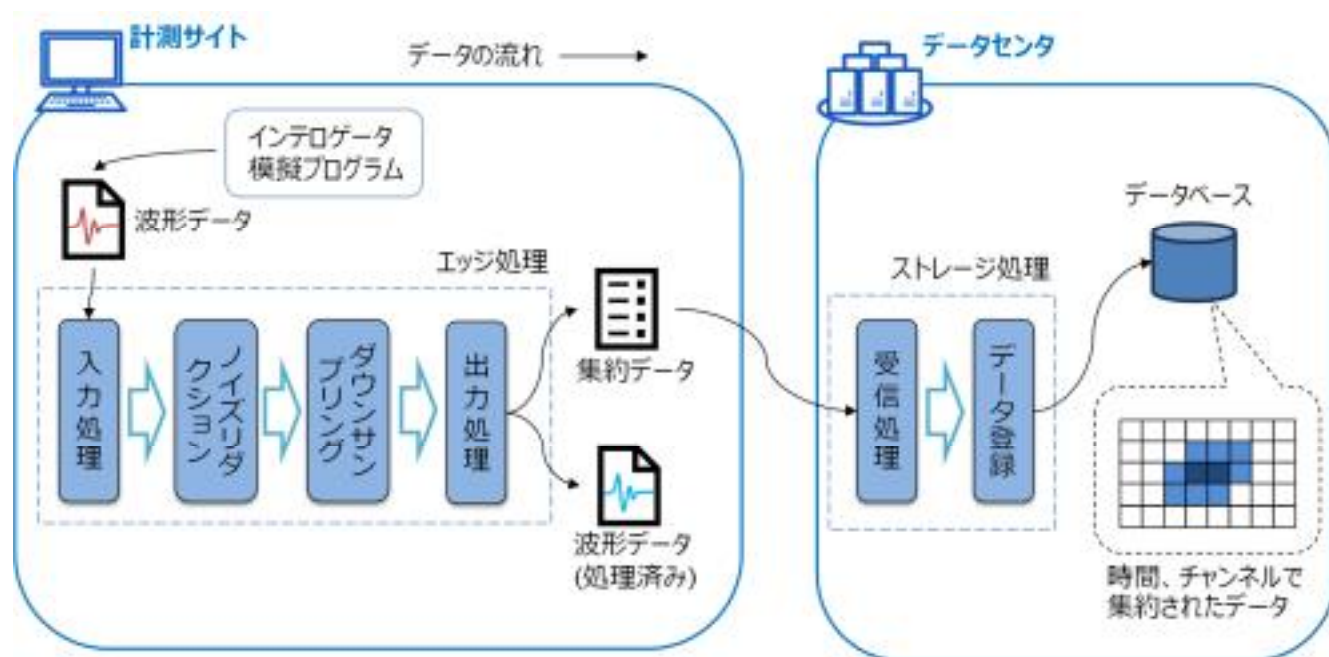


図2.6 リアルタイムモニタリング実証実験の動作環境

表2.4 リアルタイムモニタリング実証実験に使用した計測データ一覧

| 内容                          | 距離<br>(km) | チャンネル<br>数 | 1 ファイルの<br>データ長(秒) | 1 ファイルの<br>データサイズ(GB) | 計測期間                                  |
|-----------------------------|------------|------------|--------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 国道 6 号<br>土浦国道出張所<br>～水戸方面  | 48.75      | 10593      | 60                 | 1.2                   | 2023/09/12 00:00～<br>2023/09/25 09:45 |
| 国道 6 号<br>土浦国道出張所<br>～柏方面   | 7.91       | 1747       | 60                 | 0.2                   | 2023/09/12 00:00～<br>2023/09/25 09:45 |
| 国道 50 号<br>岩瀬国道出張所<br>～水戸方面 | 34.15      | 7569       | 60                 | 0.9                   | 2023/09/25 17:40～<br>2023/10/06 10:00 |
| 国道 50 号<br>岩瀬国道出張所<br>～小山方面 | 28.68      | 6371       | 60                 | 0.7                   | 2023/09/25 17:40～<br>2023/10/06 09:45 |

表2.5 リアルタイムモニタリング実証実験を行ったデスクトップ端末

| 項目      | 内容                           |
|---------|------------------------------|
| 機種      | HP EliteDesk 800 G4 SFF      |
| 処理 CPU  | Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 |
| CPU コア数 | 6 (ただし並列数は 4)                |
| メモリ     | 16 GB                        |
| 製造年月    | 2018 年 11 月                  |

継続的かつリアルタイムなモニタリングを可能とするためには、時系列データのデータ長未満（今回の実証実験で使用するデータは60秒長データのため、60秒未満）でエッジ処理の入力から出力までを完了する必要がある。

表2.4で示した各データに対し連続試験した結果を図2.7に示す。計測サイトにおけるエッジ処理に関して、60秒長データに対し処理時間は最大でも16秒程度で処理が完了しており、サンプリング周波数500 Hz、観測点10000 ch程度において、リアルタイムの継続的な処理が問題なく実行可能であることを確認できた。

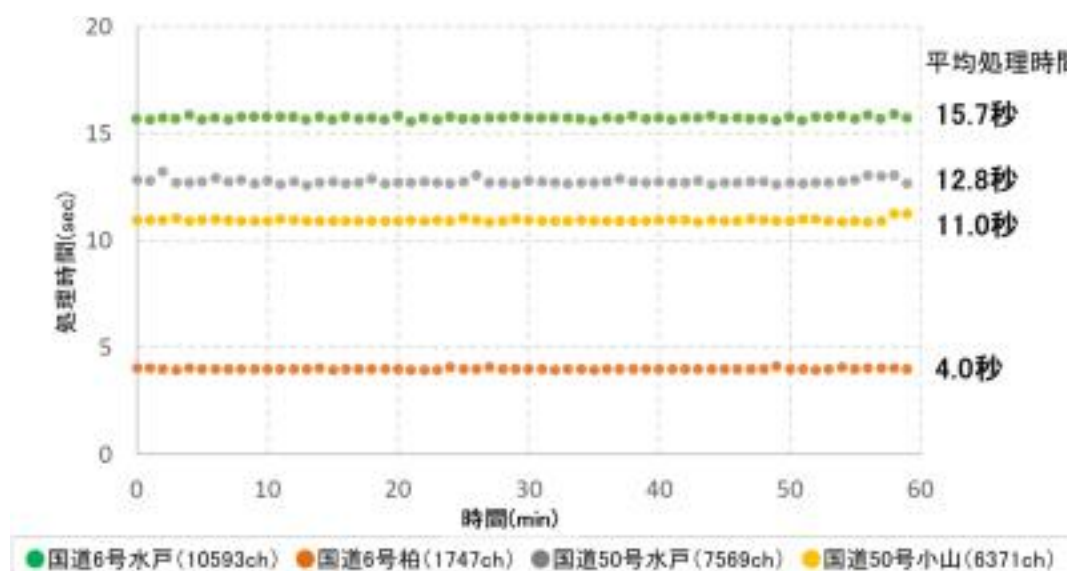


図2.7 1ファイル60秒間のデータに対する処理時間

また、データベースに登録された集約データの一例として、国道6号における24時間分の記録を図2.8および図2.9に示す。計測サイトでリアルタイムに動作するエッジ処理によって生成された集約データは、データセンタで稼働するストレージ処理によって受信・蓄積され、継続的にデータベースへ格納されることを確認した。この集約データは、インテロゲータから出力される生データのサンプリング周波数を500 Hzから1 Hzにチャンネル数を10593CHから106ブロックに集約し、全体として1/50000程度に圧縮し、かつ24時間記録の図中から時間的および空間的にひずみ速度の概況を捉えることが可能である。

これにより利用者は特定の事象について、おおよその期間やチャンネル番号を特定でき、その情報をもとに計測サイト側の詳細な波形データを取得することも可能となる。本システムでは、データセンタにおいて十分なデータアクセス性が確保されていると考えられる。

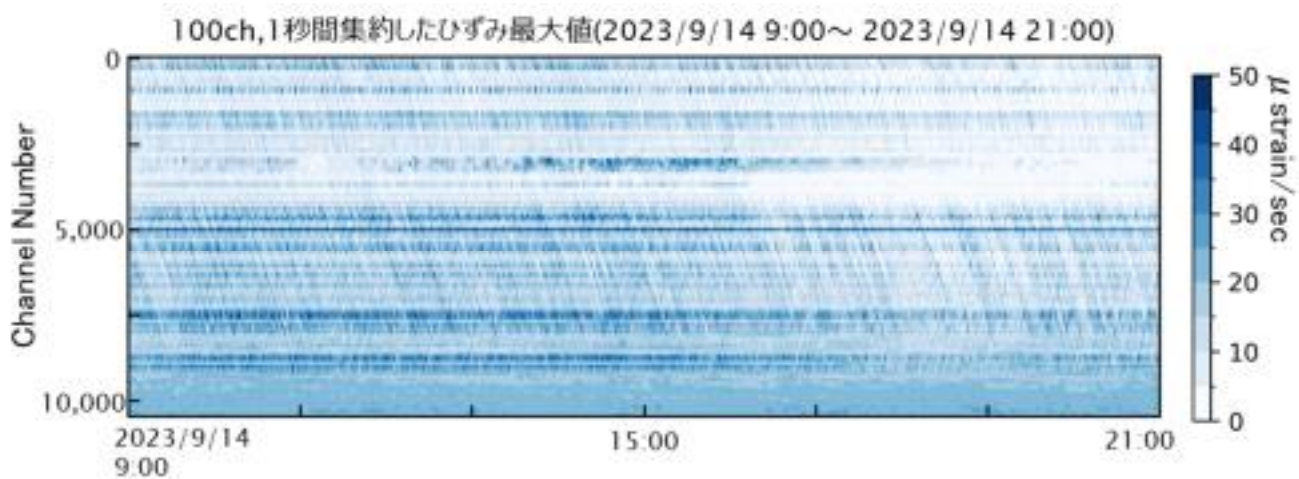


図2.8 100ch、1秒間に集約したひずみ最大値（国道6号 2023/9/14 09:00～21:00）

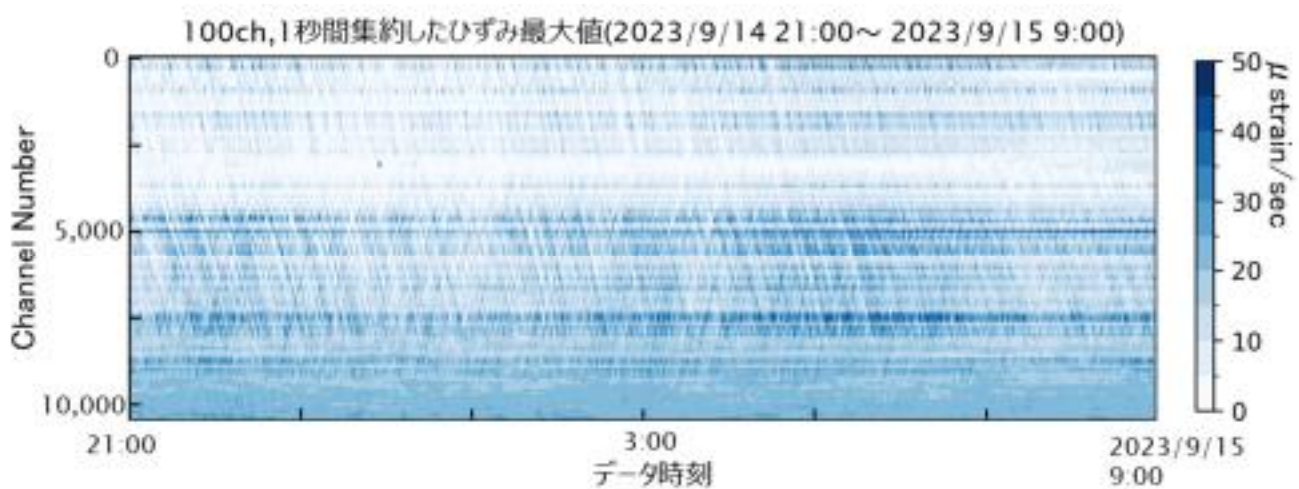


図2.9 100ch、1秒間に集約したひずみ最大値（国道6号 2023/9/14 21:00～2023/9/15 9:00）

b) 試験サイトにおけるインテロゲータを用いた実験

R6年度に茨城県つくば市内の試験サイトにおいて、実際のインテロゲータと接続したリアルタイムシステムを構築し一連の動作を検証する実験を行った。システムへの入力方式に対し2種類の実験を行った。1つ目はファイルベースの入力方式で、インテロゲータから計算端末に対して60秒間の計測データファイルを連続的に出力し、それをシステムが同期的に取得してエッジ処理を行う構成である。

2つ目は、現地でのリアルタイム処理を想定したストリーミング入力方式で、パケット通信（TCP）を用いてインテロゲータからネットワーク（LAN）経由で秒単位のパケットをシステムに送信し、処理を行う構成である。主流であるファイルベース入力方式に対し、秒単位でよりリアルタイム性の高いエッジ処理が実現可能かどうかを検証した。

実験の概要図を図2.10に、入力方式の説明を表2.6に記載する。

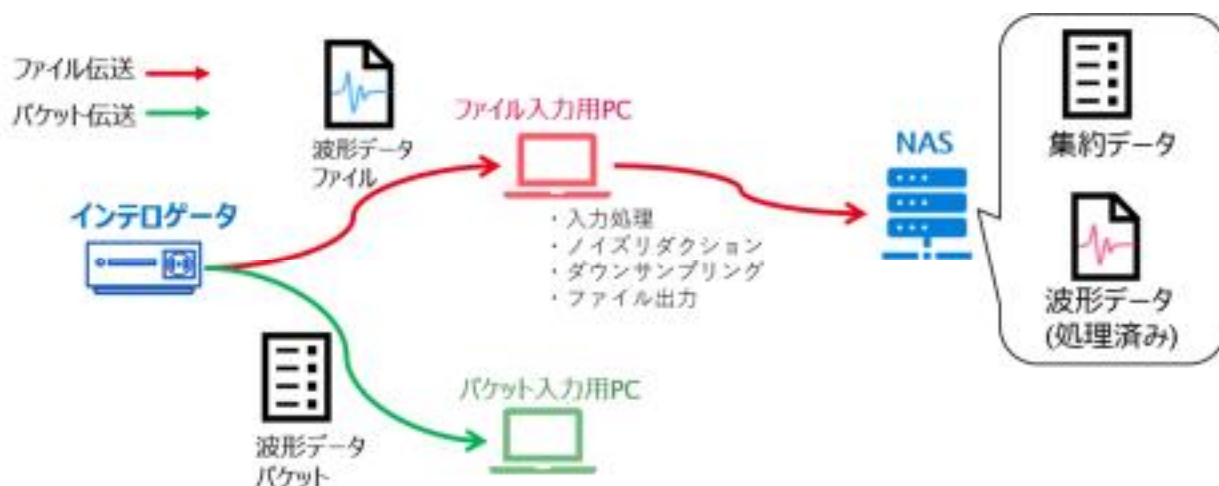


図2.10 実験の概要図

表2.6 入力方式の内容

| 入力方式             | 内容                                                            |
|------------------|---------------------------------------------------------------|
| ファイルベースの入力       | インテロゲータより60秒長の計測データファイルを継続的に出力し、リアルタイムシステムからの同期的な読み込みを行う。     |
| パケット通信によるストリーミング | インテロゲータより1秒長のパケットデータをTCP通信にて連続的に送信し、リアルタイムシステムはネットワーク経由で受信する。 |

稼働実験の条件を表2.7に記載する。実験に用いたデスクトップ端末は表2.5と同等の性能である。また実証実験にて配置したインテロゲータ(Sintela社製 ONIX peta)を図2.11に、光ファイバケーブルを図2.12に、実験に用いたシステムを稼働させる機器一式を図2.13に示す。

表2.7 実験条件

| 項目        | 内容                     |
|-----------|------------------------|
| 日程        | 7/9～7/18（7/13～7/15は停止） |
| 実験場所      | つくば市内 屋内スペース           |
| インテロゲータ   | Sintela社製 ONYX peta    |
| ファイバ長     | 1000 m                 |
| チャンネル間隔   | 0.71 m                 |
| ゲージ長      | 1.42 m                 |
| 総チャンネル数   | 1472                   |
| サンプリング周波数 | 500 Hz                 |



図 2.11 インテロゲータ(sintela 社製 ONYX peta) 図 2.12 光ボックス(ファイバ長 1000 m)



図 2.13 システムを稼働させる機器

#### ■入力形式がファイルベースの実験結果

入力方式をファイルベースにした際のデータ長 60 秒の各ファイルに対する処理時間を図 2.14 に示す。1 ファイルに対するデータ処理が 5 秒程度で完了しており、データ長に対し処置時間が 10 %程度であることから現地でのエッジ処理に関して継続的かつリアルタイムの稼働が可能と考えられる。またエッジ処理後にリアルタイムにチャンネル-経過時間の 2 次元画像化した結果の例を図 2.15 に示す。

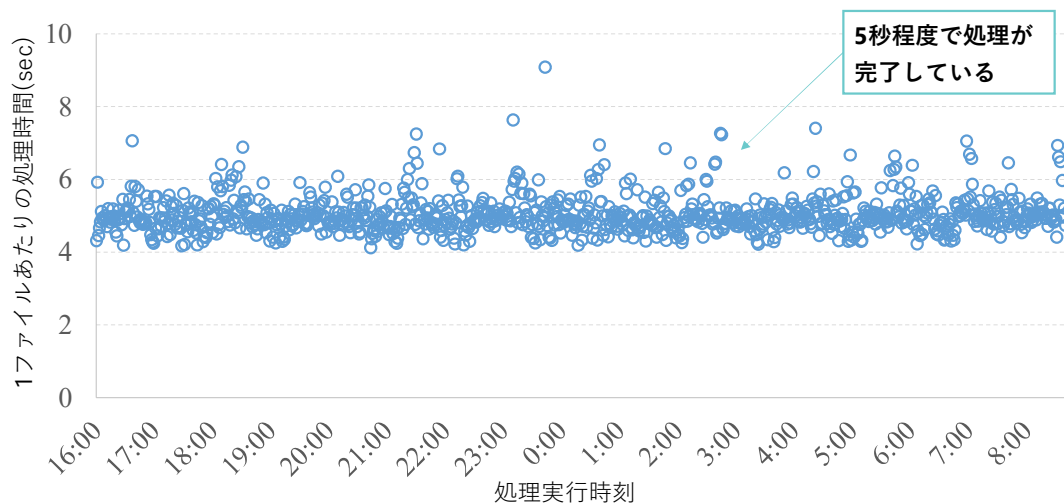


図 2.14 データ長 60 秒のファイルに対する処理時間

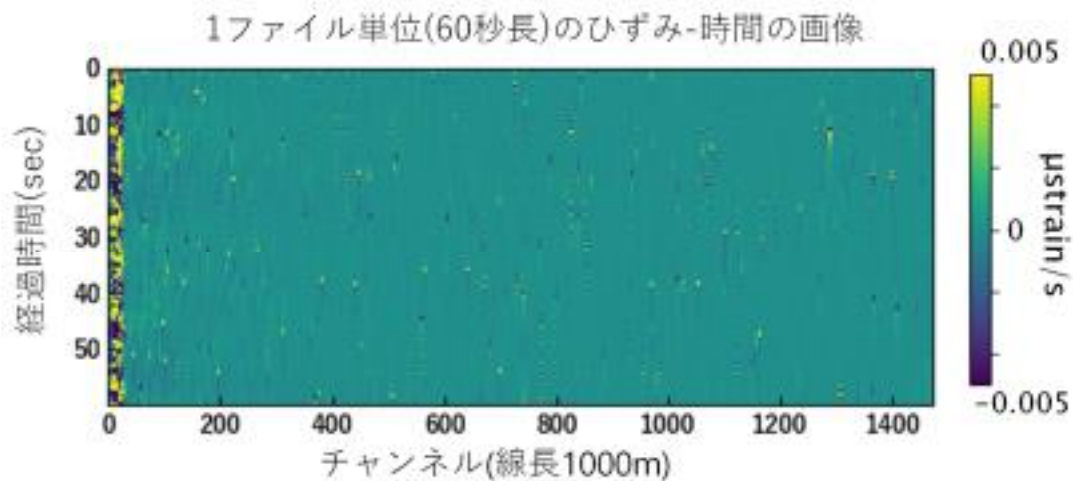


図 2.15 チャンネル-経過時間の 2 次元画像

■入力形式をパケット通信にした場合の実験結果

入力方式をパケット通信にした際のデータ長 1 秒のパケットに対する処理時間を図 2.16 に示す。0.38 秒程度でデータ処理を完了していることが確認でき、データ長に対し処置時間が 40 % 程度であることから、現地でのエッジ処理に関して継続的かつリアルタイムの稼働が可能と考えられる。また光ファイバケーブル付近において、図 2.17 に示すように人が踏み込んだ際の挙動を、チャンネル-経過時間の 2 次的にリアルタイムで可視化した例を図 2.18（平常時）、図 2.19（踏み込み時）に示す。

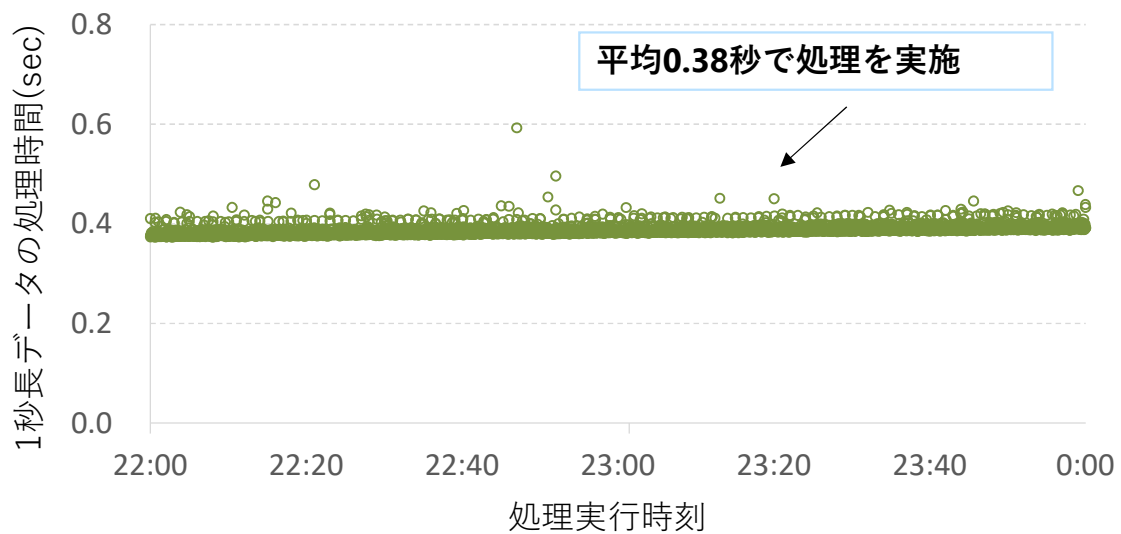


図 2.16 データ長 1 秒のパケットに対する処理時間



図 2.17 光ファイバケーブル付近の人による踏み込みの様子

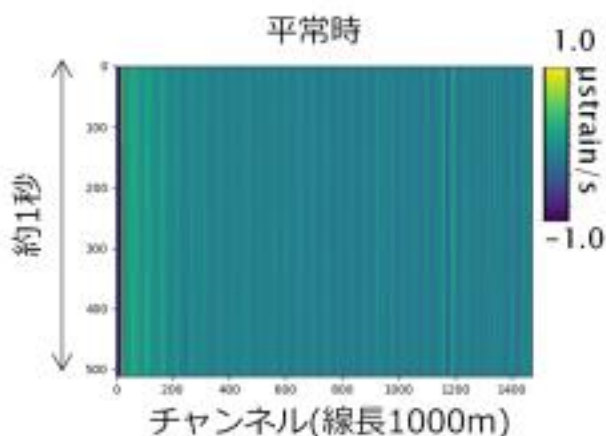


図 2.18 平常時の可視化

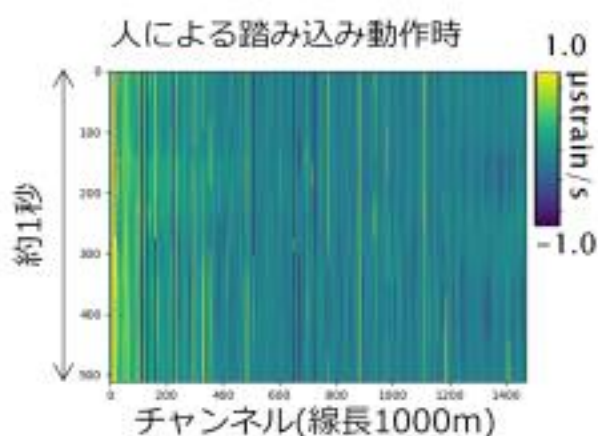


図 2.19 踏み込み動作時の可視化

1 秒パケットは、インテロゲータから送出される際に TCP 通信プロトコルに従って複数のパケットに分割され転送される。本実験においては、1 秒パケットが平均して約 9 個のパケットに分割され、システムで受信されることが確認できた。データ分割のイメージを図 2.20 に、各パケットの到達時間およびデータ量の関係を図 2.21 に示す。各パケットのサイズは約 500 KB であり、分割されたパケット群の受信に要する時間は約 0.03 秒程度であることが分かった。これはリアルタイム処理において十分に許容可能な遅延時間であり、実用上の問題は生じないと評価される。また受信システムにおいては、これら分割されたパケットを正確に受信・待機し、結合する処理が必須となる。本実験により TCP 通信によるストリーミング入力方式でも、適切なシステム設計によりリアルタイム処理が実現可能であることが分かった。

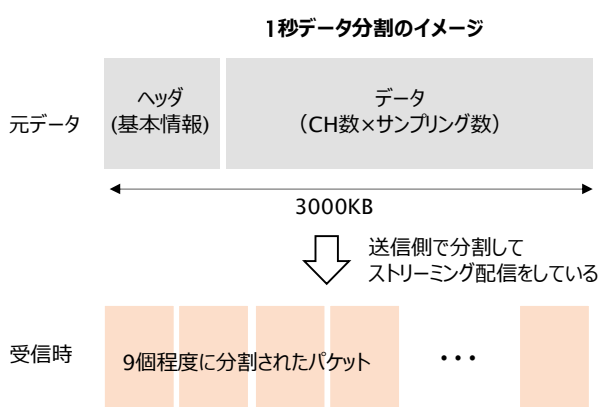


図2.20 パケットの分割のイメージ

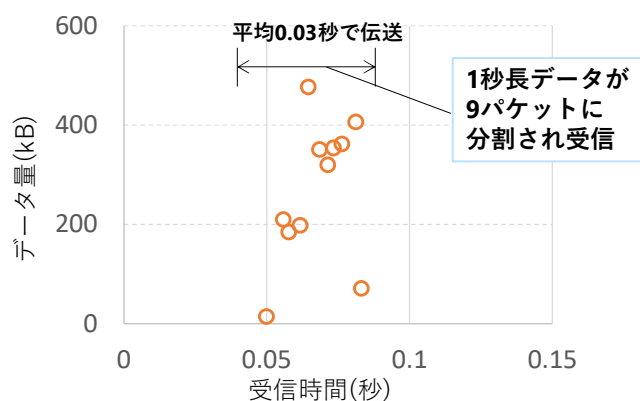


図2.21 到達時間とパケットのデータ量の関係

c) リアルタイムシステムにおける地盤解析処理の実現可能性の評価

R6年度に本システムがデータ入力およびデータ処理を行った後に、後段に地盤解析処理を組み込むことを想定し、面的データの計算規模に対するリアルタイム性を評価した。具体的にはシステムの後段にてF-K解析を行う処理（以下、F-K解析処理）を試作し、10秒単位の面的な光ファイバDAS計測の模擬データに対する処理時間を確認した。

試作したF-K解析処理の概要を図2.22に、各処理内容を表2.8に示す。システムにおいてパケット解析処理を実施し、10秒間のデータが蓄積できた後にF-K解析処理へ入力データとして引き渡す構成とした。なお入力とするデータは、実際のインテロゲータ(Sintela社 ONYX petaを想定)の出力データフォーマットに準ずる形式とした。

模擬した光ファイバDASの敷設状況を図2.23に示す。光ファイバのセンサ（1チャンネル単位の計測点）が格子状に配置され、軸心2成分の光ファイバ2本が1つのインテロゲータに接続される想定とした。また、今回模擬した光ファイバDAS観測設定を表2.9に示す。計測対象の空間範囲として、チャンネルの総数が10000点、20000点、40000点の3パターンを想定した計測を実施した。

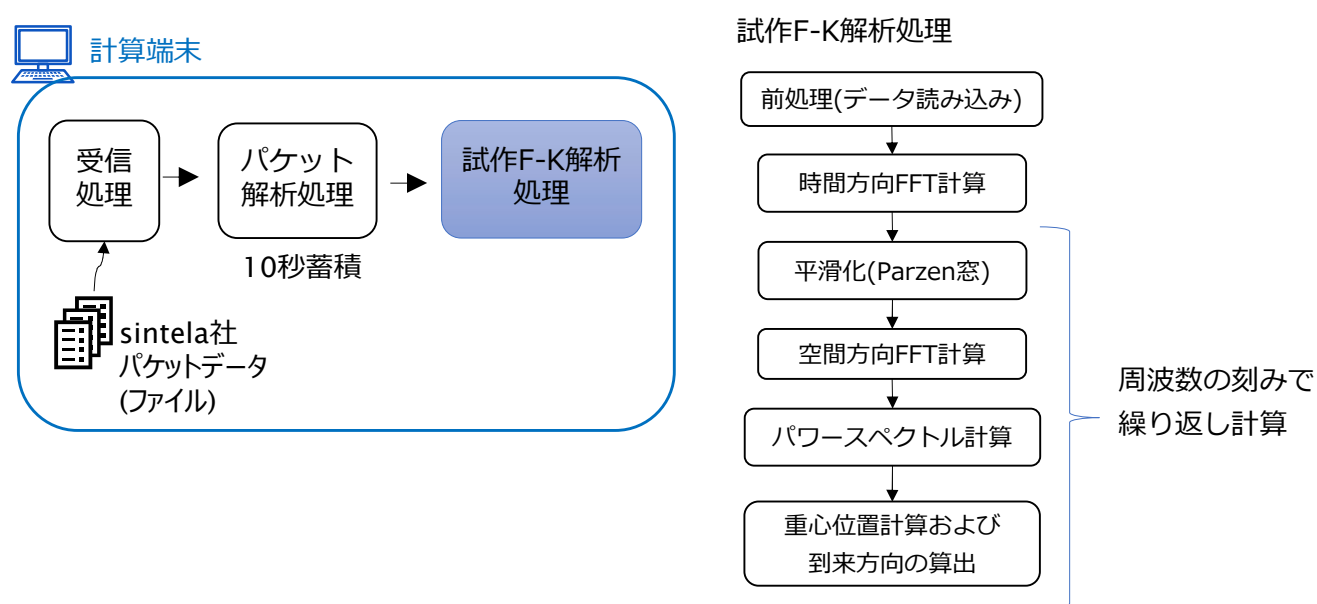


図2.22 F-K解析処理の概要

表 2.8 F-K 解析処理の内容

| 処理名           | 内容                                                                                                              |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 前処理（データ読み込み）  | システムで蓄積されたデータをファイルベースにて受信し、オンメモリ上に読み込む。                                                                         |
| 時間方向 FFT 計算   | 周波数領域への変換として高速フーリエ変換を行う。計算手法として Cooley-Turkey アルゴリズムを使用した。本アルゴリズムにおける計算量は、データの長さが $N$ であるとき $O(N \log N)$ である。  |
| 平滑化（Parzen 窓） | データのノイズ成分を低減し、スペクトルの平滑性を向上させるため、Parzen 窓関数を用いたスペクトル平滑化処理を行う。                                                    |
| 空間方向 FFT 計算   | 波数領域への変換として高速フーリエ変換を行う。FFT の計算手法は時間方向 FFT 計算と同一とした。                                                             |
| パワースペクトル計算    | 時間方向の FFT 計算および空間方向の FFT 計算により得られた振幅スペクトル分布（frequency-domain および wavenumber-domain spectrum）に基づき、パワースペクトルを算出する。 |

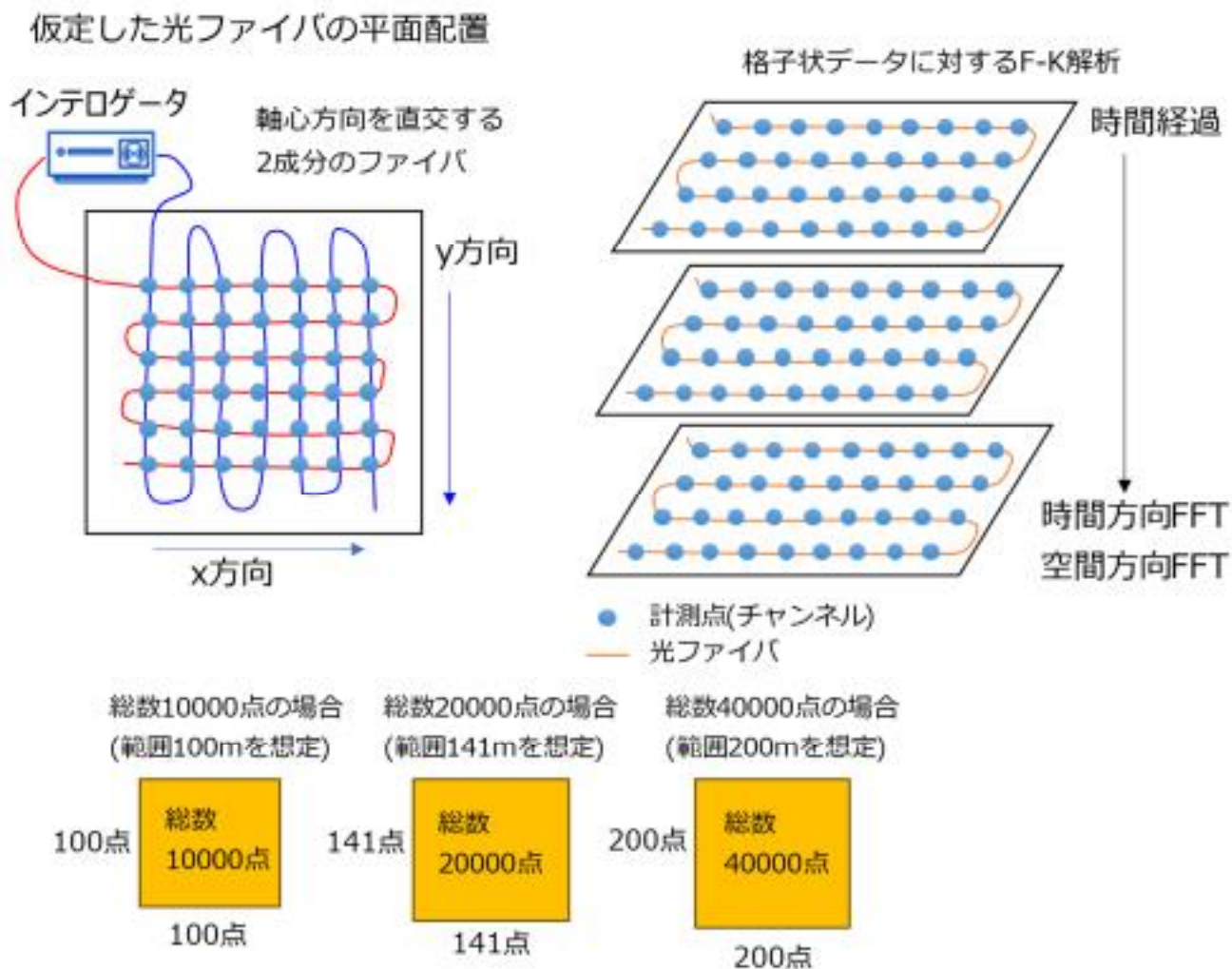


図2.23 模擬した光ファイバDASの敷設状況

表2.9 模擬した光ファイバDAS観測設定

| 項目         | 内容                                   |
|------------|--------------------------------------|
| チャンネル総数    | 以下の3パターンを設定。<br>10000点、20000点、40000点 |
| チャンネル間隔    | 1 m                                  |
| サンプリング周波数  | 500 Hz                               |
| データ長       | 10秒                                  |
| 仮定した波の到来方向 | 方位角30度（正弦波）                          |

光ファイバDAS計測データの規模に対するF-K解析の処理時間を計測した結果を図2.23に示す。システムの継続的な稼働のためには、少なくともデータ長である10秒以内にデータ読み込み処理およびF-K解析処理を完了する必要がある。本試験ケースにおいては、総チャンネル数が10000点のデータ規模であれば、F-K解析の処理時間がデータ長（10秒）未満に収まっており、リアルタイムかつ継続的な稼働が可能であることが確認された。一方で、チャンネル数が20000点以上となる場合には、処理時間が10秒を超過する傾向が見られ、同一の計算環境ではリアルタイム処理が困難となる可能性がある。

これに対し今後はGPUを用いた並列計算手法などを導入することで、さらなるチャンネル数の拡張に対応しつつ、リアルタイムかつ継続的な処理を実現できる可能性がある。

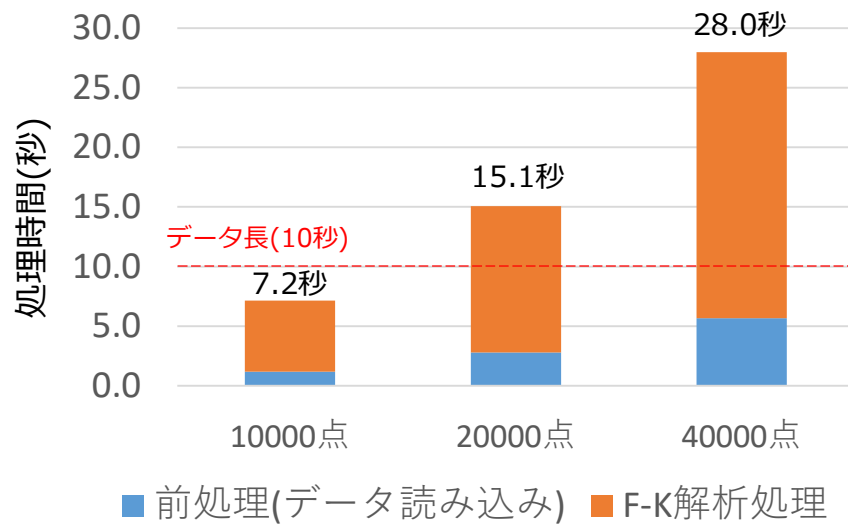


図2.23 光ファイバDAS計測データ規模に対する処理時間

### ③ 振動源（交通移動体）の検知に対する検証

茨城県内の国道50号にて敷設されているダークファイバを借用し、R5年度に岩瀬国道出張所から水戸方面へ34.15 km、小山方面へ28.68 kmの合計62.80 kmのDAS計測を行った（ゲージ長9.57 m、観測点間隔4.79 m、サンプリングレート500 Hz）。同期間に撮影した動画を用いて交通移動体の検知の可能性について検討した。図2.24に光ファイバDASの観測位置（左図）と実際の動画の一例（右図）を示す。

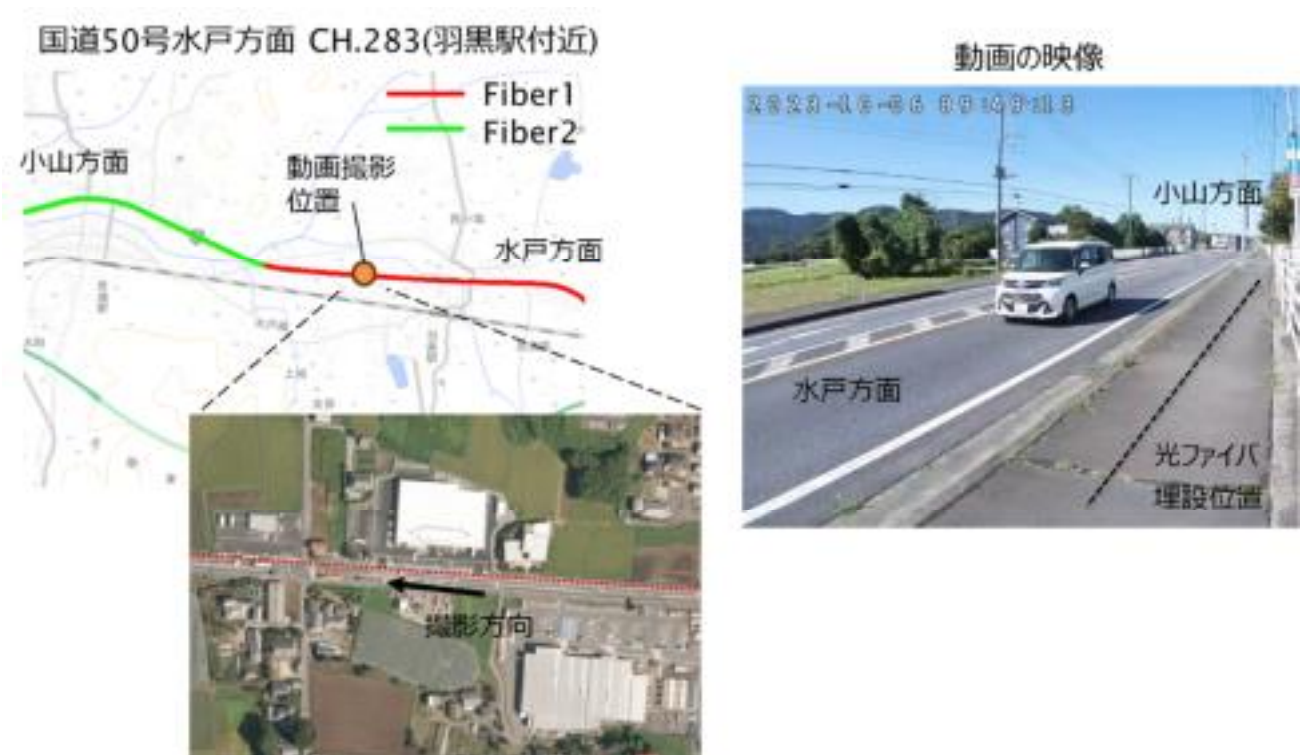


図2.24 光ファイバDASの観測位置（左図）と動画の映像（右図）

光ファイバDAS観測によって得られたひずみ時刻歴と撮影された動画から抽出したトラックの位置を重ねたグラフを図2.25に示す。光ファイバDAS観測によって得られたひずみ時刻歴の直線状の軌跡と動画から取得したトラックの位置（赤丸）はほぼ一致しており、光ファイバDAS観測によって得られたひずみ時刻歴から軌跡を抽出することで、交通移動体の検知が可能であることが確認できた。

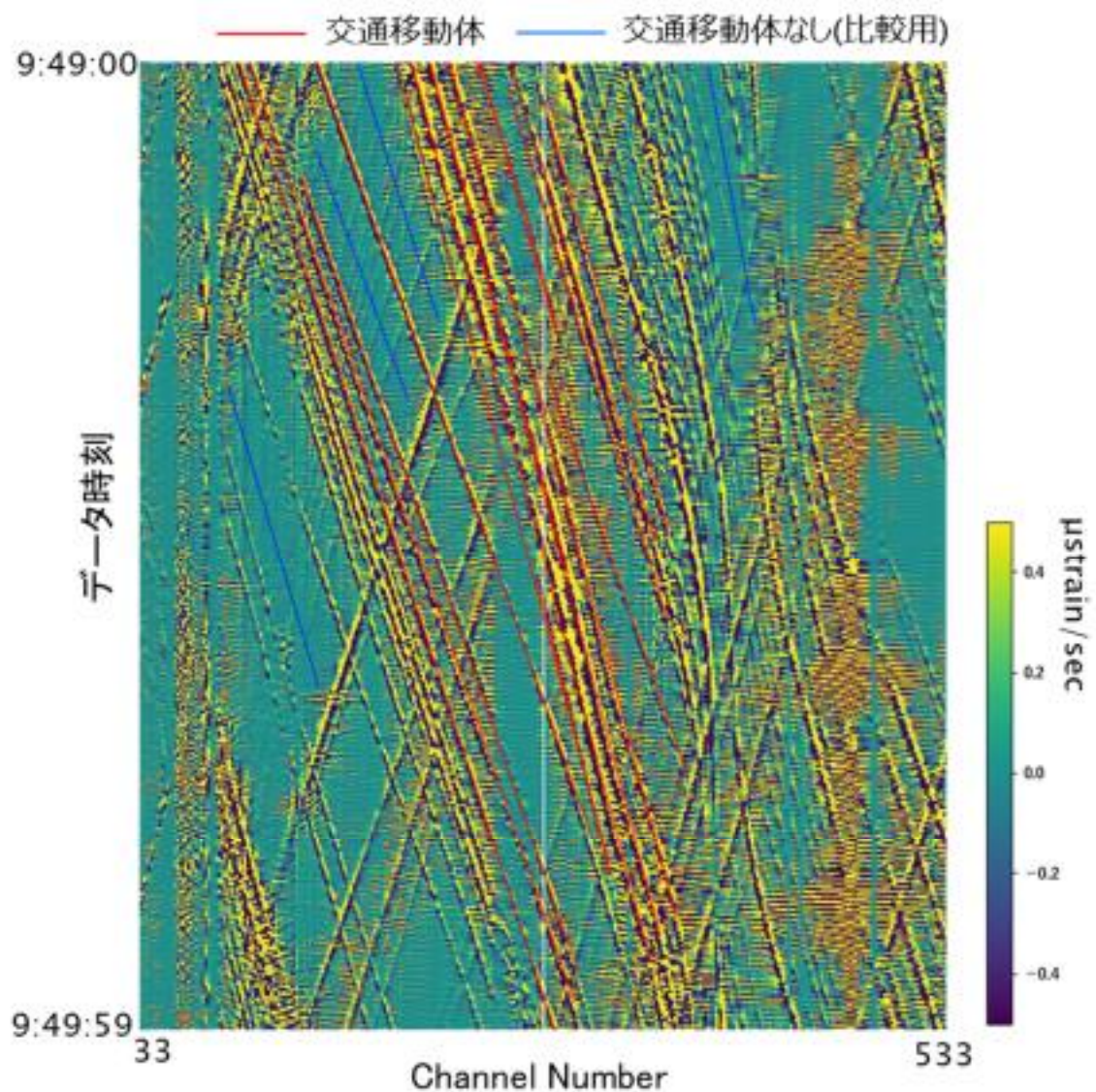


図2.25 画像解析によって検出した交通移動体のひずみ軌跡（赤線）

表2.10 図2.25の時刻に対応する期間を目視で確認した際の交通移動体の車種

| No. | 動画時刻    | 車種    |
|-----|---------|-------|
| 1   | 9:49:01 | トラック  |
| 2   | 9:49:05 | トラック  |
| 3   | 9:49:07 | 乗用車   |
| 4   | 9:49:12 | 乗用車   |
| 5   | 9:49:14 | 乗用車   |
| 6   | 9:49:20 | トラック  |
| 7   | 9:49:22 | 乗用車   |
| 8   | 9:49:24 | トラック  |
| 9   | 9:49:28 | トラック  |
| 10  | 9:49:32 | 乗用車   |
| 11  | 9:49:38 | 乗用車   |
| 12  | 9:49:49 | 軽トラック |
| 13  | 9:49:52 | トラック  |
| 14  | 9:49:57 | トラック  |
| 15  | 9:49:59 | 乗用車   |
| 16  | 9:50:00 | トラック  |
| 17  | 9:50:02 | トラック  |

図2.25および表2.10より交通移動体の車種とひずみ時刻歴を元に算出した指標値との関係を調査した。指標値はひずみ速度の最大値および平均値、二乗値の最大値および平均値、分散値、パワースペクトル密度の最大値とした。交通移動体の車種を横軸とし各指標値を縦軸にプロットしたグラフを図2.26から図2.31に示し、また各指標値に対する交通移動体車種ごとの平均値を表2.7に示す。

各指標において重量の重い車種であるトラック、重量の軽い車種である乗用車や軽トラックおよび交通移動体がないデータを比較したところ、重量と指標値の相関が確認できた。例えば表2.11において二乗値の最大値であれば、トラックは乗用車の7倍程度、乗用車は交通移動体がないデータに対し60倍程度となる結果が得られた。したがって、光ファイバDASによる計測データから、交通移動体の車種を識別することが可能であると考えられる。

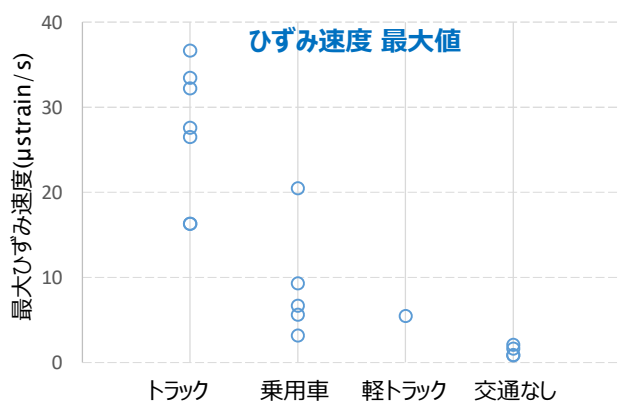


図2.26 ひずみ時刻歴の最大値

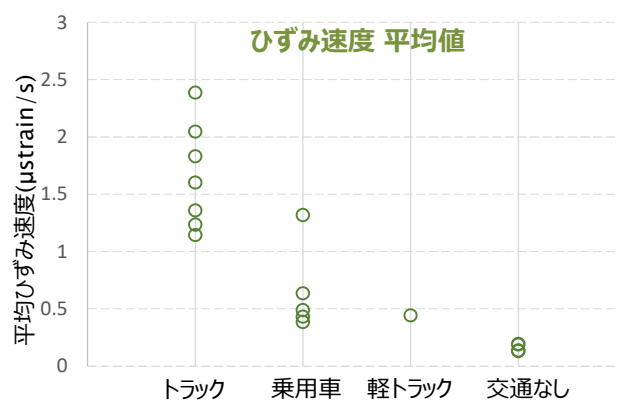


図2.27 ひずみ時刻歴の平均値

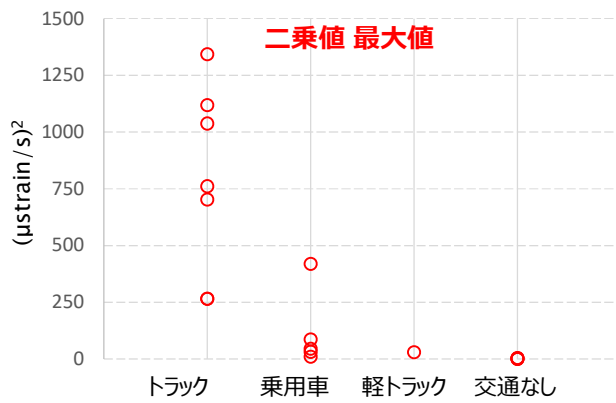


図2.28 ひずみ時刻歴の最大値

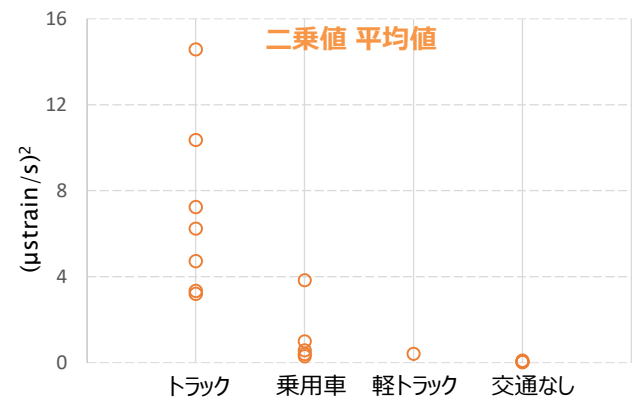


図2.29 ひずみ時刻歴の平均値

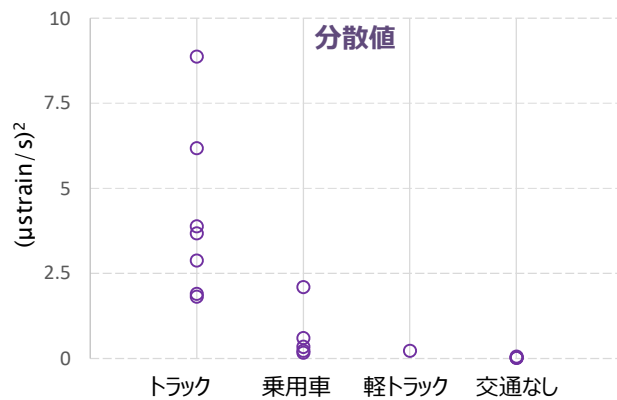


図2.30 ひずみ時刻歴の分散値

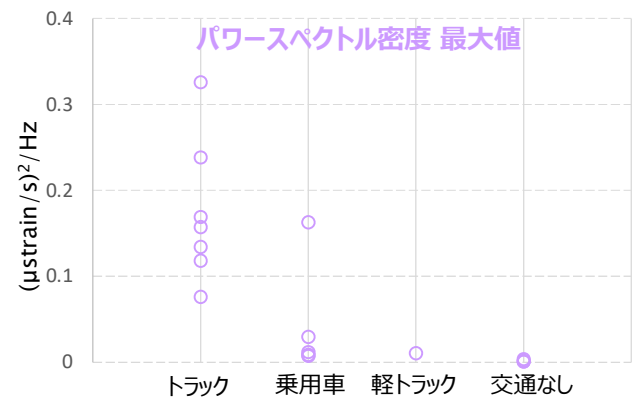


図2.31 ひずみ時刻歴のパワースペクトル密度最大値

表2.11 各指標値に対する交通移動体車種ごとの平均値

| 車種    | ひずみ速度<br>最大値<br>(μstrain/s) | ひずみ速度<br>平均値<br>(μstrain/s) | 二乗値<br>最大値<br>(μstrain/s)² | 二乗値<br>平均値<br>(μstrain/s)² | 分散値<br>(μstrain/s)² | パワースペク<br>トル密度<br>最大値<br>(μstrain/s)²/Hz |
|-------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|------------------------------------------|
| トラック  | 27.00                       | 1.66                        | 785.10                     | 7.10                       | 4.17                | 0.17                                     |
| 乗用車   | 9.04                        | 0.65                        | 118.38                     | 1.23                       | 0.68                | 0.04                                     |
| 軽トラック | 5.46                        | 0.44                        | 29.85                      | 0.42                       | 0.22                | 0.01                                     |
| 交通なし  | 1.35                        | 0.16                        | 2.10                       | 0.06                       | 0.03                | 0.00                                     |

■参考文献

東京大学地震研究所(2015):WINフォーマット, <https://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/WIN/man.ja/winformat.html>

### (3) 光ファイバDAS と地震波干渉法を組み合わせた解析手法の開発

#### ① 国道における観測実験

##### ■ 高密度グリーン関数の推定

本節では、DAS記録を用いて地盤の振動特性を示すグリーン関数を従来以上に高密度に推定すること（高密度グリーン関数の推定）を試みる。R5、R6年度において、国道6号（57 km区間）における測定を実施した。R5年度はインテロゲータとしてSintela社製ONYX Mode8を用いた測定、R6年度はインテロゲータとして同社製ONYX peta Mode9を用いた測定を行った。なお、Mode9はMode8に比べて微小振動帯域におけるS/Nが改善されている。

国道6号恋瀬橋周辺(路線距離21.5～21.9 km)および長岡橋周辺(路線距離42.2～42.7 km)において、位相速度の比較、S波速度構造の比較を行った。図3.1に比較を行った地点を示す。R5年度調査では位相速度を求める間隔（ビンサイズ）は25 m、R6年度調査では10 mとした。



図3.1 R5年度記録とR6年度記録の比較を行った地点  
(背景図：淡色地図，国土地理院)

図3.2に恋瀬橋周辺のS波速度構造断面図を示す。図3.3には位相速度の比較を示す。R6年度の位相速度を見ると周波数10 Hz以上の高周波数帯域で位相速度を推定することができている。また、S/Nが向上しているため位相速度を推定できている地点数が増加していることが確認できる。

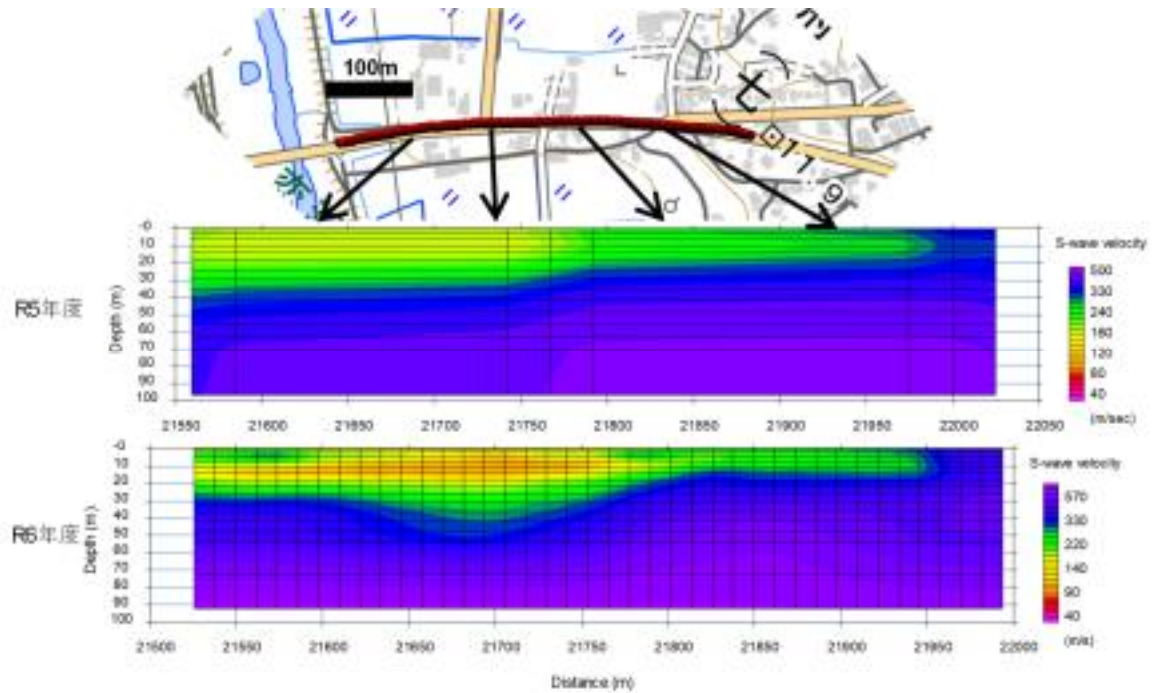


図3.2 恋瀬橋周辺のS波速度構造（背景図：標準地図，国土地理院）

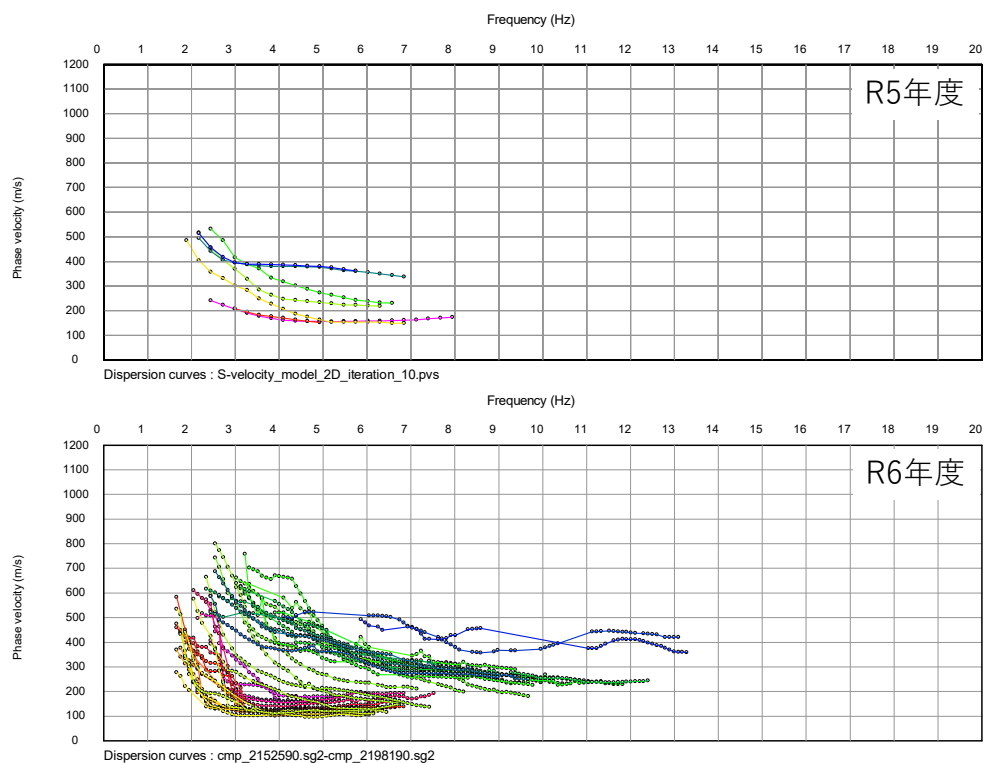


図3.3 恋瀬橋周辺の位相速度の比較（暖色：距離程小 寒色：距離程大）

図3.4に長岡橋周辺のS波速度構造断面図を示す。図3.5には位相速度の比較を示す。R6年度の位相速度は周波数2.5 Hz以下や7 Hz以上の帯域で位相速度を推定することができた。

上記の結果から、ONYX peta Mode9による測定を行うことにより空間分解能10 mの高密度グリーン関数（相互相関関数）を推定することができた。

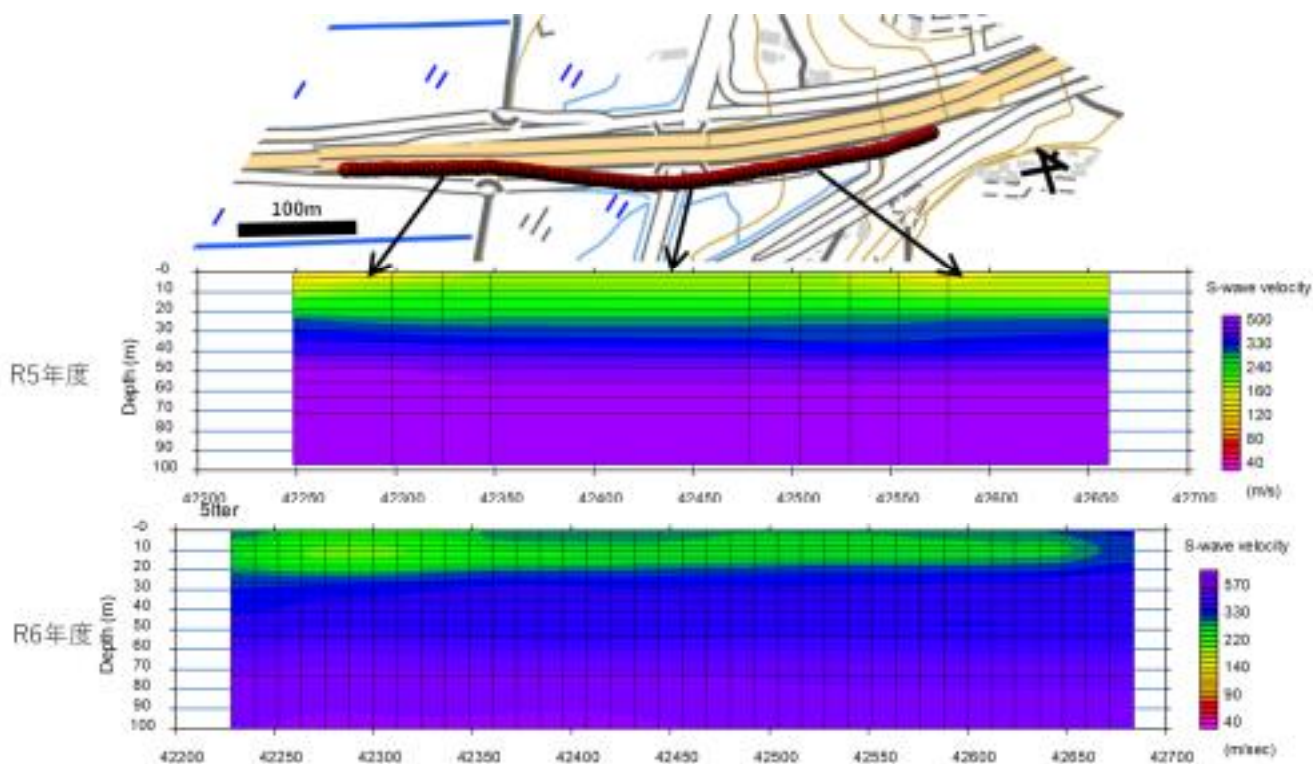


図3.4 長岡橋周辺のS波速度構造の比較（背景図：標準地図，国土地理院）

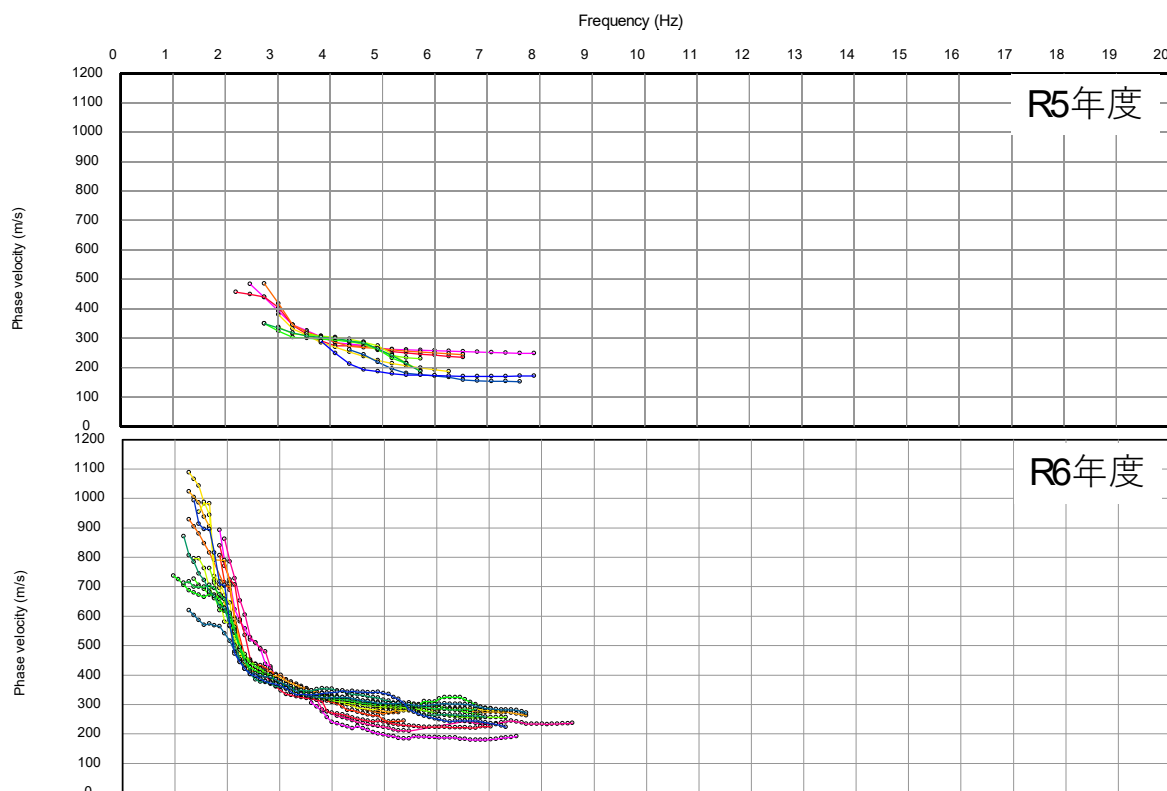


図3.5 長岡橋周辺の位相速度の比較（暖色：距離程小 寒色：距離程大）

### ■ 微動計とDASの組合せによる面的グリーン関数の推定

R6年度に恋瀬橋、長尾橋周辺において、微動アレイ探査とDASを組み合わせた観測を行い、面的グリーン関数の推定を行った。推定にあたってはFukushima et.al(2024)を参考にし、微動計による上下動速度波形（参照点）とDASによる水平動のひずみ速度波形の相互相関関数（つまりグリーン関数）を求めることによりレイリー波の位相速度を推定した。

なお、本項目における計測結果については、別途論文発表を予定しているため、別冊において記載し、ここでは詳細を割愛する。

結果としては、微動計で観測された上下動の速度記録とDASにより観測された水平動のひずみ速度記録を用いた相互相関関数（グリーン関数）を求めることにより、表面波の位相速度を推定することができ、DASケーブルからオフセットしている観測点を参照点とした場合、微動計から1 km離れた地点においても、表面波が伝播する様子を確認することができた。

### ■ 高精度の3次元地盤構造モデル化手法の開発

3次元地盤構造モデル化手法としては、光ファイバDAS記録のみを用いた相互相関関数（グリーン関数）を求め、さらに光ファイバから100～200 m程離れた地点に微動計を設置して上下動速度波形と光ファイバDAS記録の相互相関関数を求め、面的グリーン関数（水平、垂直を含む3次元の相互相関関数）を求める方法である。図3.6に3次元グリーン関数の計算方法の概念図を示す。ただし、光ファイバのみを用いた相互相関関数ではファイバ軸方向の相互相関関数を求めるが、一般的にはラブ波の影響を考慮する必要がある。一方、上記で示したように光ファイバのみを用いた相互相関関数による位相速度と上下動速度波形と光ファイバDAS記録の相互相関関数による位相速度が概ね整合的であること、国道などにおける測定では振動源（走行する自動車）がファイバ軸方向に分布していることなどから観測される記録にはレイリー波が優勢であると考えられる。このことから実用的には光ファイバDAS記録のみの相互相関関数を用いることでレイリー波の位相速度を推定できると考えられる。

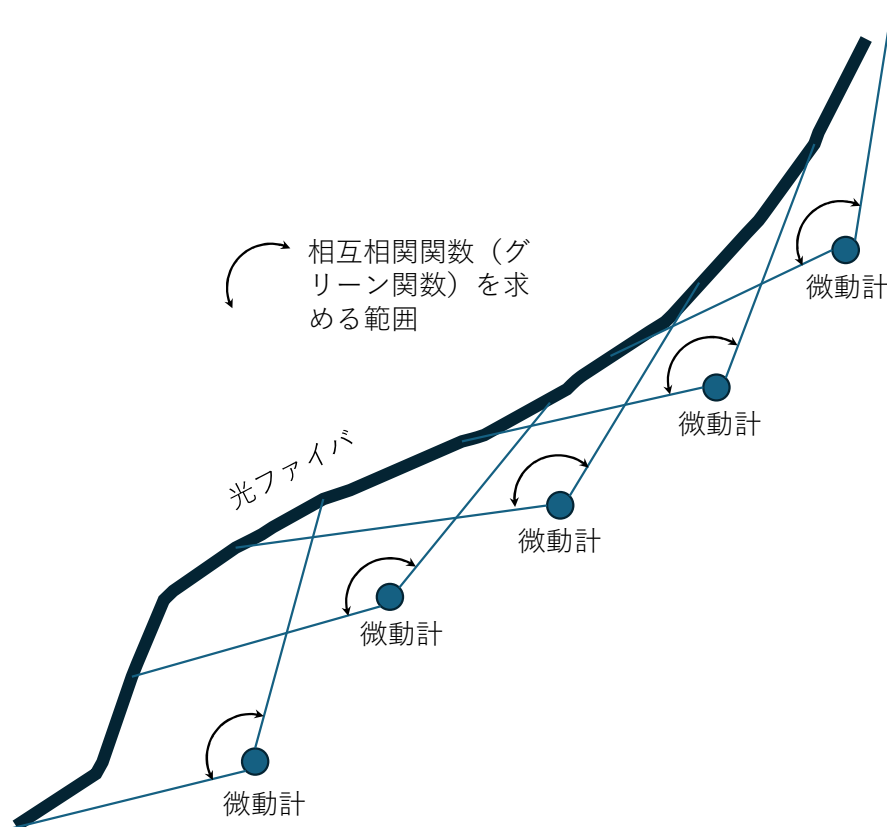


図3.6 3次元グリーン関数の計算方法の概念図

## ② 試験場における観測

### ■ 継続的測定によるグリーン関数の変動の推定

本研究課題では、R4からR6年度にかけてつくば市内の試験場において表3.1に示す長期観測を実施した。ただし、R5年度の国道の測定ではS/N比がやや悪いMode8での測定であり、R6年度の国道の測定では観測期間中にゲージ長やパルスレートを変更した測定を実施しているため、継続的測定による相互相関関数（グリーン関数）の変動を推定することはできなかった。

一方、R6年度の試験場での測定では15日間の測定の中に土壌水分計・温度計のデータの同時測定を実施しており、相互相関関数（グリーン関数）から求められる位相速度の変化を確認した。本実験は、保護管の有無に関し3パターンの状況で測定を実施している。図3.7にDAS測定中の温度および水分量データを示す。観測期間中に土中温度がやや低下している。土中水分量は深度1.7 mおよび2.0 mにおいてやや減少しているが深度1.1 m、1.4 mではほぼ変化はなかった。降水量は期間中において0 mmであった。

表3.1 主な長期観測の一覧

| 観測地点      | 観測日数 | 観測期間               |
|-----------|------|--------------------|
| 国道6号      | 13日間 | 2023年09月12日～09月25日 |
|           | 17日間 | 2024年08月07日～08月23日 |
| 国道50号     | 10日間 | 2023年09月25日～10月06日 |
| 真岡観測点     | 1日間  | 2023年02月02日～02月03日 |
|           |      | 2023年02月13日～02月14日 |
|           |      | 2023年02月08日～02月09日 |
| 相模湾海底ケーブル | 2日間  | 2023年01月30日～02月01日 |
|           |      | 2023年02月06日～02月08日 |
| 試験場       | 15日間 | 2024年12月11日～12月25日 |

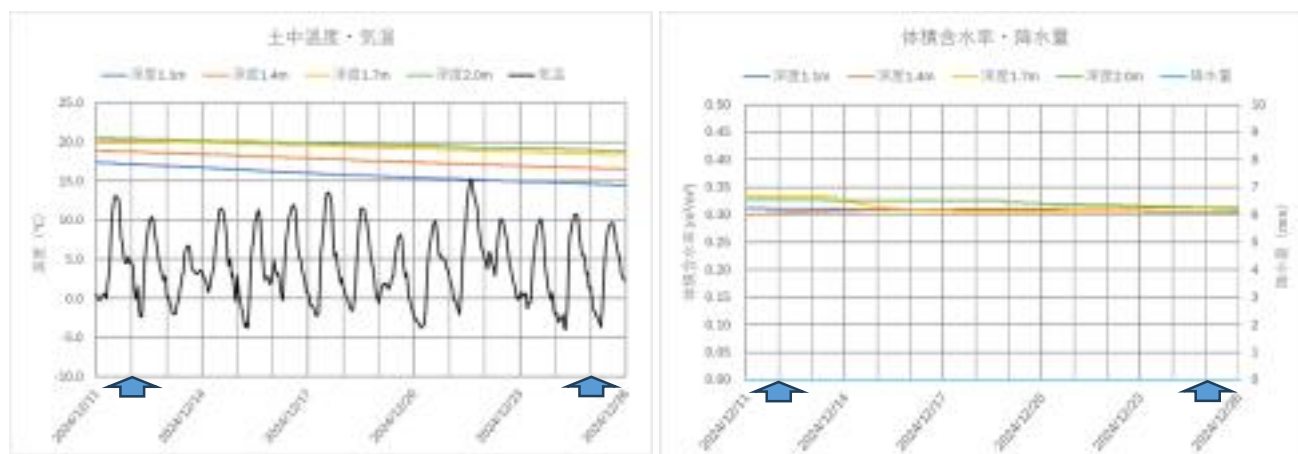


図3.7 DAS測定中の温度および水分量データ

(左図：土中温度・気温 右図：体積含水率・降水量 矢印は位相速度推定した時刻を示す)

図3.8に周波數位相速度イメージを、図3.9に位相速度分散曲線の比較図を示す。周波数12 Hz以上の分散曲線では、いずれの分散曲線も抽出できた周波数帯において同等の位相速度を示している。特に、2024年12月12日および25日における保護管なしの分散曲線はほとんど変化のないことから、土中温度の3℃程度の変化は、地盤のS波速度構造に影響を与えないことが推定される。12月25日の二重管では、分散曲線が抽出できる周波数は最大16Hz程度に減少した。二重管では直接埋設の場合に比べ位相速度が測定できる高周波数側の範囲が減少することが確認できた。

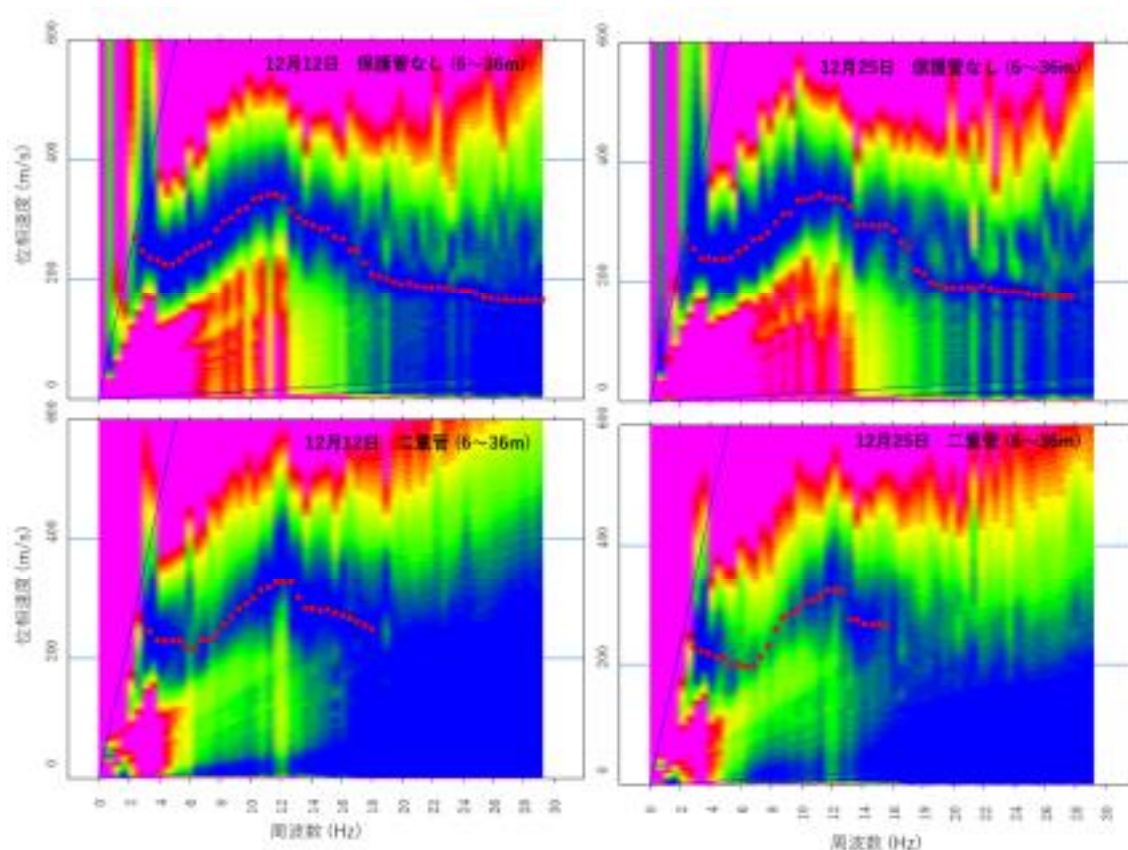


図 3.8 周波數位相速度イメージ

(左上：12月12日の保護管なしの記録、左下：12月12日の二重管の記録、  
右上：12月25日の保護管なしの記録、右下：12月25日の二重管の記録)

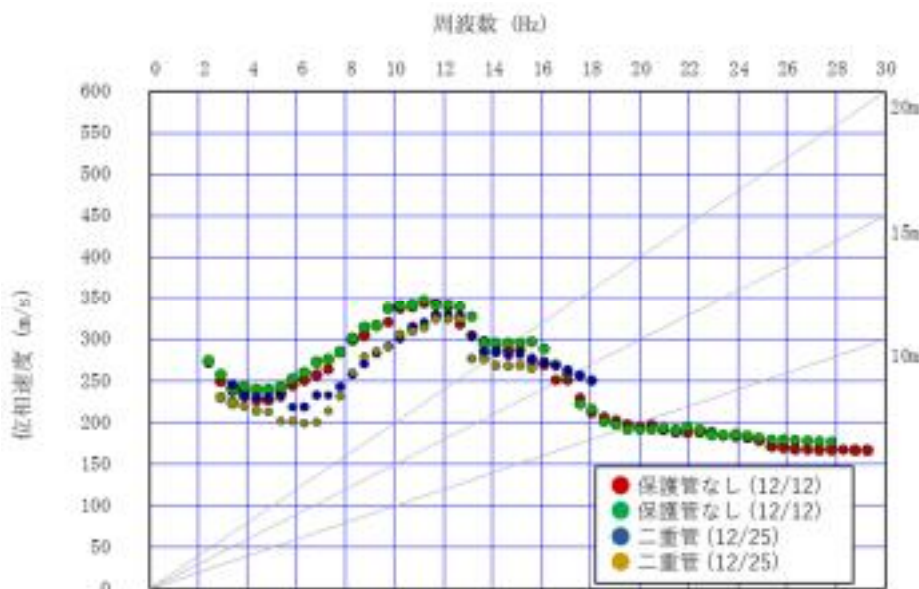


図 3.9 位相速度分散曲線の比較図

## ■ グリーン関数の自動推定

グリーン関数の変動を推定するためにはより長期間の測定が必要であると考えられる。また、測定データから相互相関関数（グリーン関数）の連続計算、位相速度イメージの連続計算、位相速度データの自動読み取りが必要である。そのため本研究では、DASの計測データから自動で微動の位相速度およびS波速度構造断面を推定する手法を開発した。図3.10に解析フローを、以下に解析の方法を説明する。

1) インテロゲータにより保存されたHDF5ファイルに対し、指定したチャンネル間隔および時間間隔で分割し波形ファイル（SEG2形式）を作成する。また、相互相関関数の計算に必要なパラメータファイル②を生成する。

2) 波形ファイル（SEG2形式）に対してすべてのチャンネルの組み合わせの相互相関波形ファイルを計算し、時間領域ファイル（\*.amp4）と周波数領域ファイル（\*.coh4）を保存する（相互相関波形①）。

3) DASデータのチャンネルと座標（距離）を対応づけたファイル（CSV形式）から、相互相関波形①のチャンネルに対応する座標ファイルを生成する。また、相互相関波形のスタックに必要なパラメータファイル④を生成する。

4) 相互相関波形①をスタックし、距離情報を書き込んだ波形ファイル（\*.8hd）を生成する。

5) 共通中点重合法による相互相関波形②を作成する（SEG2形式）。そこから、周波数一位相速度への変換し、位相速度を自動で読み取り、初期モデルとしてS波速度構造断面（\*.pvs）を作成する。

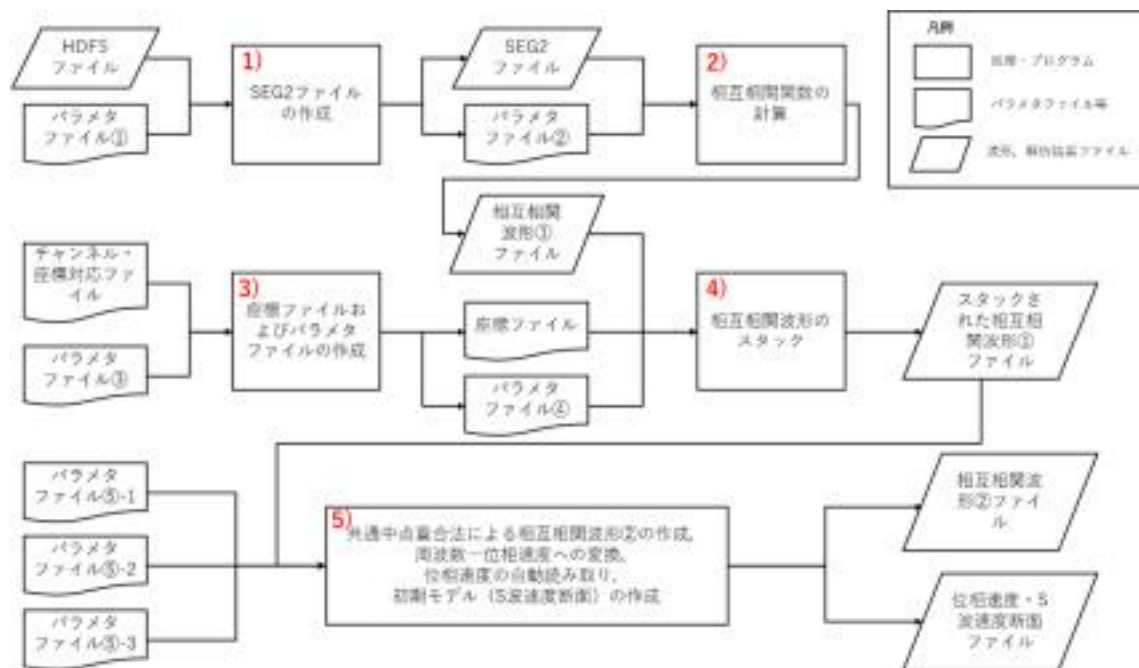


図 3.10 DAS データの自動解析のフロー

※赤字の数字は文中の解析手順の番号と対応

図3.11はR6年度に国道6号において測定したデータに対して、自動処理システムを適用して得られた周波數位相速度イメージを示す。周波数5Hz以下で測定ノイズから位相速度が低下している、また周波数8Hz以上において高次モードの影響による位相速度の不連続がみられる。現時点ではこのようなデータは目視により取り除いてS波速度構造を推定しているが、長期間の連続データへ適用する場合には、ノイズや高次モードの影響を自動的に取り除く処理方法の開発が必要であると考えられる。

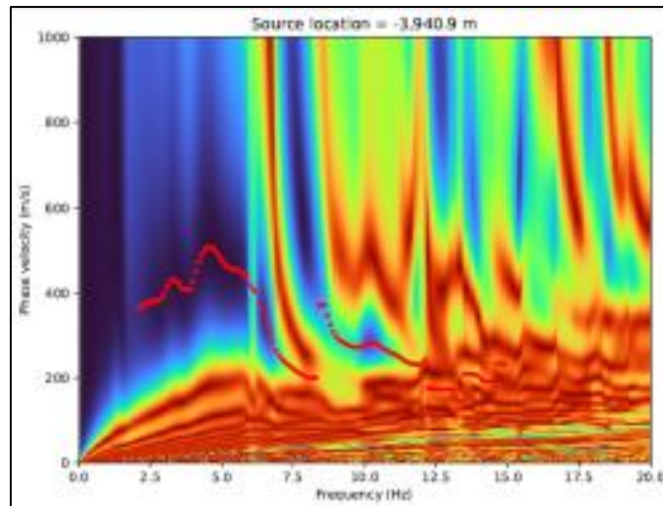


図 3.11 自動処理システムで得られた周波数位相速度イメージ（国道 6 号 R7 年度測定データ）

#### ■参考文献

- Fukushima S., M. Shinohara, K. Nishida, A. Takeo, T. Yamada and K. Yomogida (2024): Retrieval and precise phase-velocity estimation of Rayleigh waves by the spatial autocorrelation method between distributed acoustic sensing and seismometer data, *Geophys. J. Int.*, 237, 1174-1188.
- Hayashi K., M. Craig, T. Kita, T. Inazaki (2015): CMP spatial autocorrelation analysis of multichannel passive surface-wave data, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*.

## 4. 委託業務全体の成果

### 4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

本研究を通じて光ファイバDASを用いることにより、従来よりも高密度な10m以下の間隔で地盤の振動特性を把握すること、50mメッシュ以下の高分解能の広域地盤モデルを作成することが可能であることが示された。当初予見していなかった副次的成果としては、以下のような知見を得ることができた。

- ・ 格子状に配置された光ファイバを用いた面的な地盤振動特性把握においても、例えばF-K解析の手法を適用することにより総チャンネル数が10000点のデータ規模であればリアルタイムかつ継続的な観測が可能である。
- ・ 車両等の移動する振動源の検知、車両種別の分類、交通量の変化、および事故の検知といった都市活動モニタリングの分野においても、DAS観測記録を活用することにより現象を高精度かつリアルタイムに検知することが可能である。

### 4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

本研究の取り組みを通じて、光ファイバDASは既設の光ファイバケーブルに計測器を接続するだけで、数 m間隔の超高密度な地盤振動計測を、数十 kmの長大区間にわたり可能になるセンシング技術であることが示された。この技術を適用することにより、例えば令和7年1月に埼玉県八潮市で発生した陥没事故のように、都市地下のインフラ老朽化に伴う異常を早期に発見し、対策を推進する目的で活用できる可能性がある。また、通信用光ファイバは都市の地下等において水平、鉛直方向に多数張り巡らされており、これら複数本のケーブルを用いた同時観測を行うことにより、都市の異常検知などを目的とした3次元のモニタリングが可能になると考えられる。

### 4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

産官学各機関においてDAS観測に携わる研究者・技術者との交流を目的として、2024年2月には「光ファイバセンシングによる都市モニタリングの可能性」、2025年2月には「都市の安全を支える強震観測と光ファイバセンシング技術の展望」というタイトルで、パシフィコ横浜において「国土セイフティネットシンポジウム」を開催して、本研究成果の広報や、今後の研究開発に関する意見交換を行った。また、展示会等での成果発表を6件行った。

## 5. プロジェクトの総合的推進

### 5. 1 研究実施体制とマネジメント

防災科学技術研究所において研究プロジェクトチームを立ち上げ、各要素課題に関する研究の進捗管理や課題等の共有、要素課題間の連携を図ることを目的として会議を定期的（月1回程度）に開催し、総合的に推進することで当初計画通り研究を進捗することができた。成果については、国内学会の大会6件、海外学会の大会2件で発表を行った。

### 5. 2 経費の効率的執行

実施計画に基づき、研究プロジェクトチーム内で情報共有し、経費の効率的な執行に努めた。

## 6. まとめ、今後の予定

本研究における取り組み全体を通じて、光ファイバDASを用いて、従来よりも高密度・高精度で地盤の振動特性を把握し、様々な目的にも応用可能な地盤モニタリング手法の確立という研究目標が達成された。今後は本取り組みを発展させ、複数の光ファイバを組み合わせたDASアレイ観測に基づくモニタリング技術や、都市において様々な時間スケールで発生する異常現象をリアルタイムに検知する技術に関する基礎的な研究開発を行う予定である。

## 7. 研究発表、知的財産権等の状況

### (1) 研究発表等の状況

| 種別   | 件数 |
|------|----|
| 雑誌論文 | 1件 |
| 学会発表 | 8件 |
| 展示   | 6件 |
| 図書   | なし |
| プレス  | 2件 |
| その他  | 3件 |

### (2) 知的財産権等の状況

該当なし

### (3) その他特記事項

該当なし