

地震波干渉法に基づく切羽予報の現場適用

村山 秀幸 池田 奈央
荒井 靖仁 長江 優介

概 要

筆者らは、山岳トンネルにおいてリアルタイムに切羽前方の地質情報を提供できる弾性波探査法として地震波干渉法に注目し開発を進めてきた。この取り組みから切羽近傍作業で発生する様々な振動を前方探査に活用することを試行し、掘削発破の振動を用いて毎日の切羽性状を天気予報のようにリアルタイムに予測する切羽予報と称するシステムを実用化した。一方、発破を用いない現場における切羽予報として、切羽から坑口間で発生するノイズ振動であるずり出し時に注目しさらなる開発を進めている。本報告では、従来からの地震波干渉法に基づく切羽予報に関して技術情報を整理すると共に、切羽予報としての切羽の状態を予測し公開するシステムについて述べる。

Tunnel face forecasting based on seismic interferometry at tunnel construction sites

Abstract

The authors have been developing a seismic exploration technique based on seismic interferometry, which can provide real-time geological information ahead of the face in mountain tunnels. As part of this effort, we attempted to utilize various vibrations generated during excavation work near the tunnel face for forward exploration. This led to the practical implementation of a system called *tunnel face forecasting*, which predicts daily face conditions in real time, like a weather forecast, by using seismic waves generated by blasting. Alternatively, for sites where blasting is not employed, we have focused on vibration noise generated during muck hauling between the tunnel face and entrance, further advancing the development of an alternative forecasting method.

This report organizes technical information on tunnel face forecasting based on seismic interferometry and describes the system that predicts and publishes tunnel face conditions in real time as part of the forecasting framework.

キーワード：切羽前方探査、地震波干渉法、自己相関
処理、切羽予報、掘削発破、ずり出し

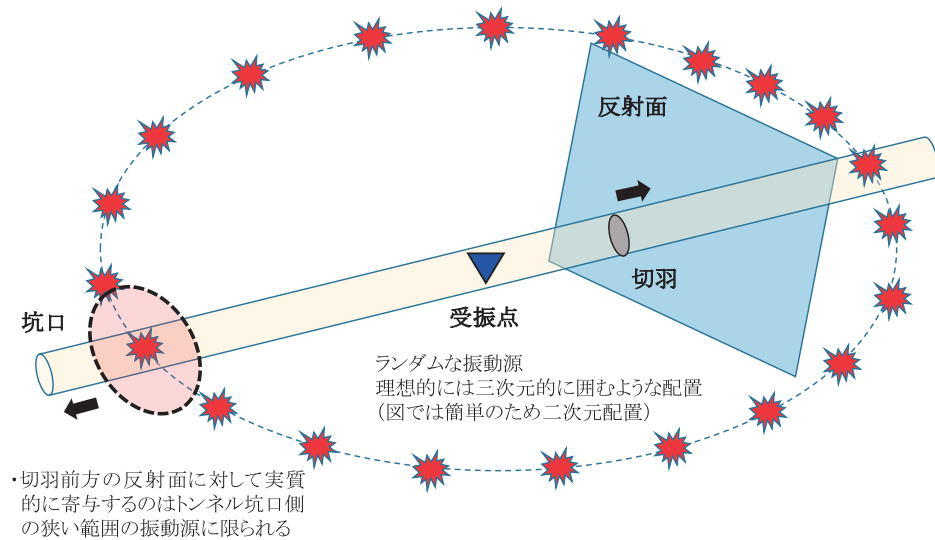


図1 一般化された地震波干渉法とトンネル掘削における特殊な地震波干渉法概念図¹³⁾

§1. はじめに

近年、山岳トンネルでは切羽崩落災害が増加する傾向に転じており、その背景として我が国の地質の複雑さや熟練技術者の減少などを挙げることができる。一方、トンネルの計画・調査段階では、各種の制約により地質調査の実施が限定的とならざるを得ないことから、施工時に地質データの不足を補い、安全かつ合理的に施工を進めるために、削孔調査や物理探査を応用した地山調査法が様々な実用化されてきた^{1) 2)}。

筆者らは、トンネル坑内に高精度の刻時装置（原子時計）を用いた観測機器を常設し、掘削発破を震源に活用することで施工サイクルに影響を与えない切羽前方探査手法（連続SSRTと称す）³⁾ を実用化してきた。しかしながら、本手法では20発破程度の振動データを蓄積してから波形処理（VSP）を行う必要があり、観測開始から結果が得られるまでに10日程度のタイムラグが発生する。一方、地震波干渉法の原理を導入すれば、最低1つの受振点において1回の発破振動から切羽前方の反射イメージが得られ、結果の即時性と観測機材の簡素化が期待できる。

そこで、坑内で発生しノイズとして扱われてきた様々な地盤振動の切羽前方探査への有用性を検証してきた^{4) ~ 9)}。その結果、地震波干渉法に適切な震源として、

- ①切羽における掘削発破の1段目からの2段目の段間時刻における振動記録
- ②受振点後方の重機振動、例えばずり出しダンプ等の

走行振動ノイズの連続波形記録

の自己相関処理において、切羽前方予測が可能であることが示され切羽予測^{10) ~ 13)}と称し開発を進めてきた。

本報告では、これまでの地震波干渉法に基づく切羽予測に関して技術情報を整理すると共に、切羽予測としての切羽の状態を天気予報のように予測し公開するシステムについて述べる。

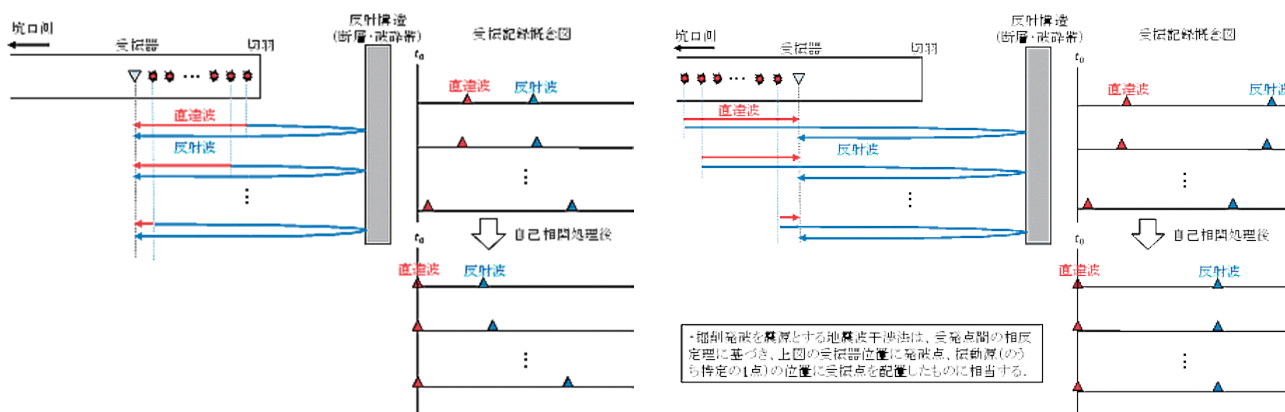
§2. 地震波干渉法に基づく切羽前方予測に関する技術情報の整理

2.1 坑内における地震波干渉法適用の概要

図1に、一般化された地震波干渉法とトンネルにおける地震波干渉法概念図¹³⁾を示す。

一般化された地震波干渉法は、受振点を3次元的に取り囲むような位置を振動源とする振動データを用い、これらの寄与を積分することで受振点位置を仮想的な受振点とする反射波記録を合成する手法である。ここで、トンネル坑内における適用として反射面が切羽前方の垂直面のみであることと仮定すると、受振点を取り囲むあらゆる方向の振動源のうち受振点後方（坑口側）の振動源のみが前述の積分結果に寄与し、それ以外の位置の振動源からの寄与は積分によりキャンセルされる。したがって地震波干渉法の特殊なケースとして、反射面が切羽前方の垂直面のみであると仮定することで受振点後方（坑口側）の振動源（ずり出しや坑口付近での作業に伴う振動ノイズ等）を用いた地震波干渉法が可能となる。

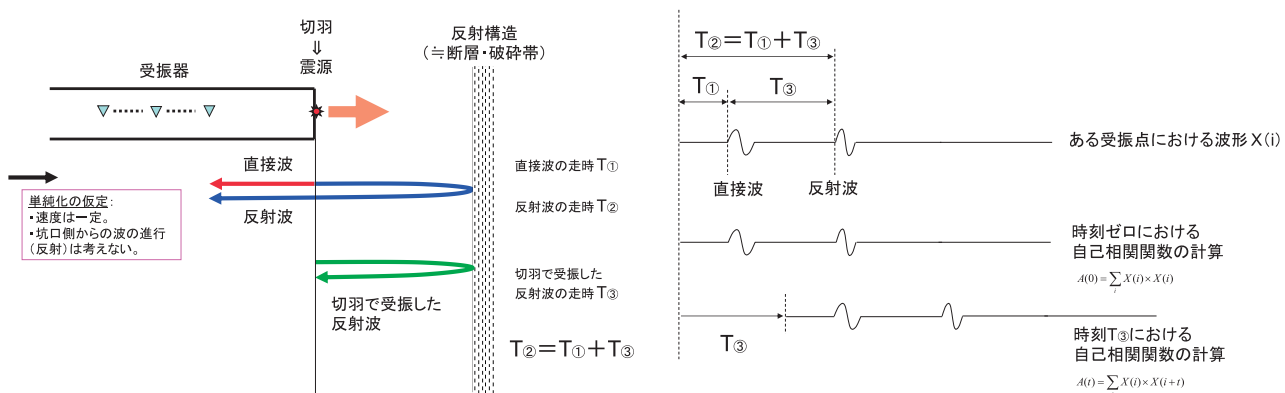
トンネル坑内で発生する振動データを用いて地震波



(a) 振動源が受振器から切羽間の場合

(b) 振動源が受振器から坑口間の場合

図2 トンネル内での振動発生位置における地震波干渉法（自己相関処理）適用の概念図



(a) 振動源が切羽（発破）である場合

(b) 受振点波形と切羽（発破点）での自己相関処理

図3 切羽における発破振動への地震波干渉法（自己相関）適用の概念図

干渉法（自己相関処理）を適用する場合、坑内での振動源としては、大きく以下の3つのケースが考えられる。

- (1) 受振点前方（切羽側）の振動（振動源不確定）：切羽の掘削作業で発生する振動であり、これらは自己相関処理後に足し合わせても受振点位置を仮想的な受発振点とする合成反射記録が得られない（図2 (a) 参照）。
- (2) 受振点後方（坑口側）の振動（振動源不確定）：坑口側で発生する重ダンピング走行（ずり出し）等に伴う振動であり、これらに自己相関処理後に足し合わせることで受振点位置を仮想的な受発振点とする合成反射記録を作成することができる（図2 (b) 参照）。
- (3) 切羽における発破：発破は受振点前方（切羽側）の振動源であり振動源は切羽位置で確定している（図3 参照）。従って、受発振点間の相反性を用いて受振点、発振点の位置を読み替え、坑口側で発生した振動として扱うことが可能となる。切羽進行によって発破位置が前進することは、前述の相反性により坑口側の振動

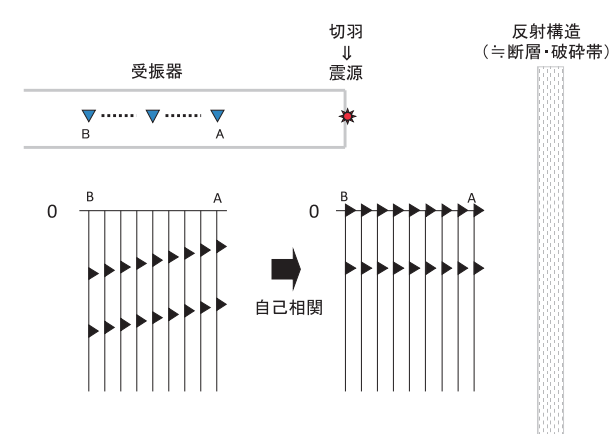


図4 切羽発破を震源とする複数受振点での自己相関処理の重ね合わせ概念図

源が後退することと読み替えることができる。そのため上記（2）のケースに帰着し、切羽位置を仮想的な受発振点とする合成反射記録を得ることができる（図4 参照）。この考え方を採用した手法が掘削発破を震源とする切羽予測である。

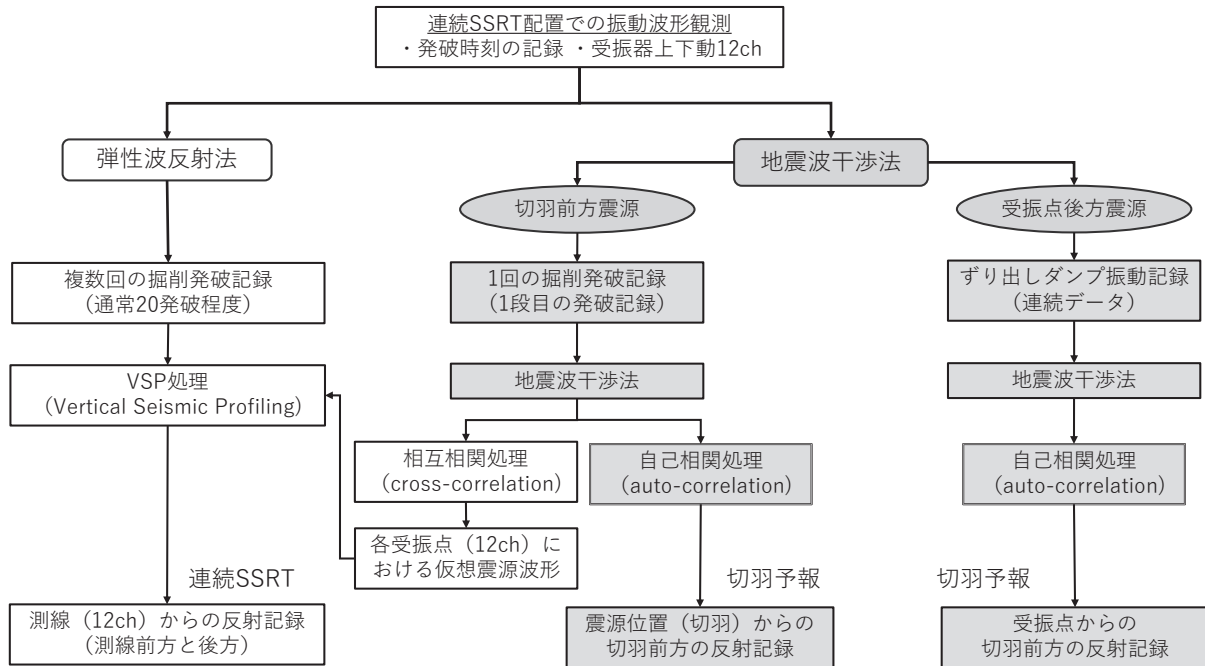


図5 連続SSRT配置での波形観測における弾性波反射法（連続SSRT）と地震波干渉法（切羽前方震源と切羽後方震源）の関連性

2.2 連続SSRTと地震波干渉法の相違点

図5に、従来からの連続SSRTにおける振動波形観測配置において、弾性波反射法に基づく波形処理（VSP：Vertical Seismic Profiling）と、地震波干渉法に基づく波形処理（自己相関：auto-correlation、相互相関：cross-correlation）と得られる結果の相違点を示す。

連続SSRTでは、トンネル坑内においてトンネル縦断方向に上下動12chの受振器を測線として常設配置（トンネル側壁脚部）し、発破時刻を原子時計で記録する。従来の連続SSRTでは複数回の掘削発破記録（通常20発破程度）がVSP処理するために必要となる。掘削発破のように震源を切羽とする地震波干渉法では、図3、4で示したように、切羽位置を仮想的な受振点とする合成反射記録を得ることができる。その場合、相互相関処理を施せば1回の発破で受振器12ch分の仮想震源波形が得られるためその結果をさらにVSP処理することによって、測線前後の反射記録を得ることができる。一方、自己相関処理を施せば、12ch全ての処理結果が同じ記録となるはずであり、1つの受振記録を処理すれば、震源位置（切羽）からの切羽前方の反射記録を得ることができ、切羽予報としてシステム化が可能となる。

一般化された地震波干渉法に基づく受振点後方震源とする自己相関（図1、2参照）では、切羽での発破

のような限られた時刻における単発的な振動ではなく、重ダンブ走行時の振動のように、連続的に移動するノイズ震源を扱うことになる。しかしながら、処理するデータ長に関する適切な判断基準がなく、現状では1分間の連続記録を1データ長として処理を試行している。

山岳トンネルの掘削工法は、中硬岩以上の地山に対して発破（爆薬）を、軟岩に対しては機械（自由断面掘削機など）を使用することが基本であり、切羽予報システムを多くのトンネルに適用するためには、受振点後方の振動ノイズをいかに活用するかが今後課題となる。

2.3 振動波形の自動化処理における優位性

自動的に振動波形を回収～処理～処理結果の表示等をするためには、発破振動を自動的に取得すること、初動を自動で読み取りデータを切り出すこと、切り出したデータに対して自己相処理と処理結果を自動的に表示するなど様々な機能が必要となる。掘削発破は、これらの自動処理を行う上で次の点で優位となる。

- ・振動エネルギーが非常に大きいため大きな振幅を有する波形となり坑内ノイズデータとの区別が容易である。
- ・トリガー設定機能（振幅値に対してしきい値を設定ししきい値以上のデータを自動的に保存する機能。

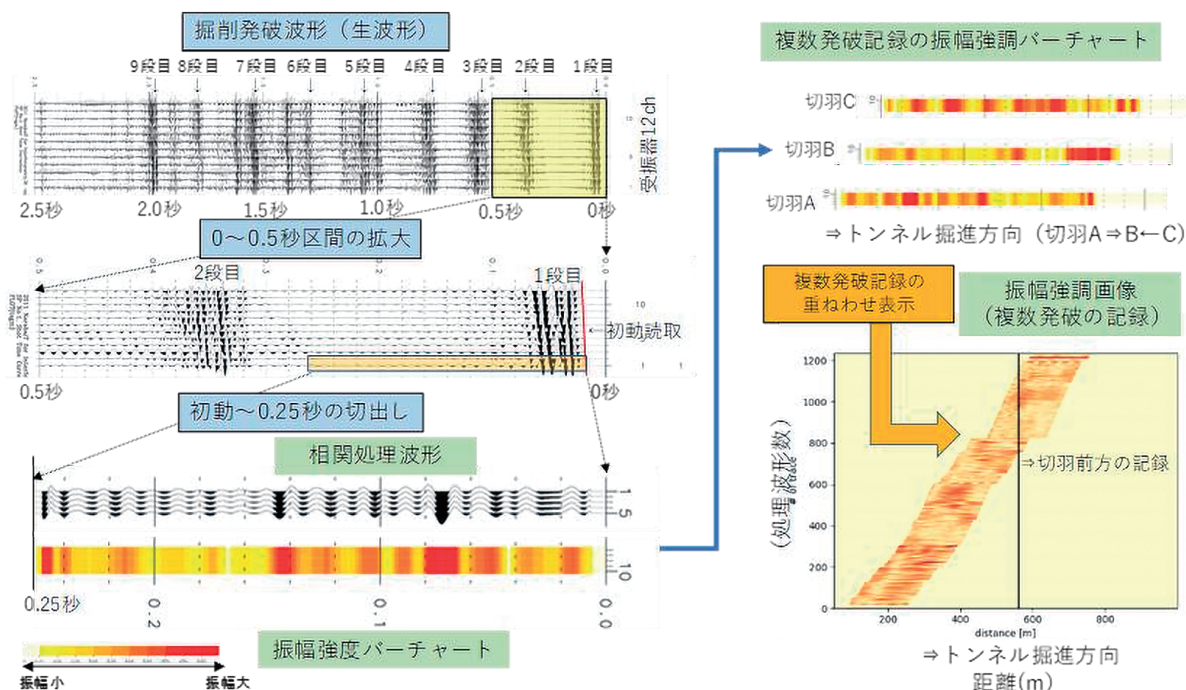


図6 掘削発破から自己相関処理波形を自動的に取得する手順

汎用的な振動記録装置に通常備わっている機能）を用いて発破振動を自動的に保存できる。

- ・火薬消費日報として、発破切羽位置、発破時刻、使用雷管の段数と数量、薬量などを発破ごとに記録することが義務付けられており、これらの発破諸元が波形処理において活用できる。

現在、以上の自動処理における掘削発破の優位性から、発破震源を用いる手法を先行して、切羽予測システムの構築を行っている。受振点後方のノイズ振動を用いる手法は、上記のような自動化処理に対する優位性がほぼないことから、さらなる工夫が必要となると考えている。

§3. 切羽予測システムの開発

3.1 掘削発破波形の自己相関処理の自動化

図6に、掘削発破から自己相関処理波形を自動的に取得する手順を示す。図6の掘削発破の波形は、見やすさのため連続SSRTにおける12ch分の生波形を示している。図6から、5段目（発破後約1.0秒）以降に先行発破の坑内反響波と思われる波形が観測されているが、ほぼ220~260m秒（DS雷管の公称段間時間250m秒）毎に大きな振動が記録されており9段の段発発破であることが分かる。この波形は振動記録装置のトリガー機能で自動的に指定のフォルダに保存される。このデータを回収し初動時刻を読み取り、初動から250m秒までを切出し自己相関処理波形を得る。

得られた処理波形から直達波の影響を除去するために、初動から一律20m秒を除去する。さらに、地山弾性波速度を用いて距離換算した自己相関波形に対して振幅を強調したバーチャートを作成する（振幅は絶対値を採用）。

得られた振幅強調バーチャートは、発破切羽位置を起点とした切羽前方地山の硬軟変化（地山の弾性波インピーダンスの相違）を表していることになる。最後に、複数の振幅強調バーチャートを発破毎に切羽から発破毎に表示し、連続的な振幅強調波形を得る。

3.2 切羽予測における判断基準

切羽予測システムは、天気予報のように掘削発破から切羽前方地山を毎日予測し、「晴れ（地山変化が少なく安定している）」、「雨（地山変化が激しく要注意である）」、「晴れ／曇り～曇り（地山変化が中程度である）」を判断し、切羽予測（本日の予報、昨日の予報、明日の切羽予測、長期予報）として関係者に公開・周知するシステムである。

3.3 切羽予測システムの構築

切羽予測を決定するためには、前方地山の変化を自動的に判断する必要がある、得られた複数の発破記録を重ねた振幅強調波形を画像データとして捉え、画像処理によって自動処理することとした。

図7に、振幅強調画像の二値化処理から切羽予測を

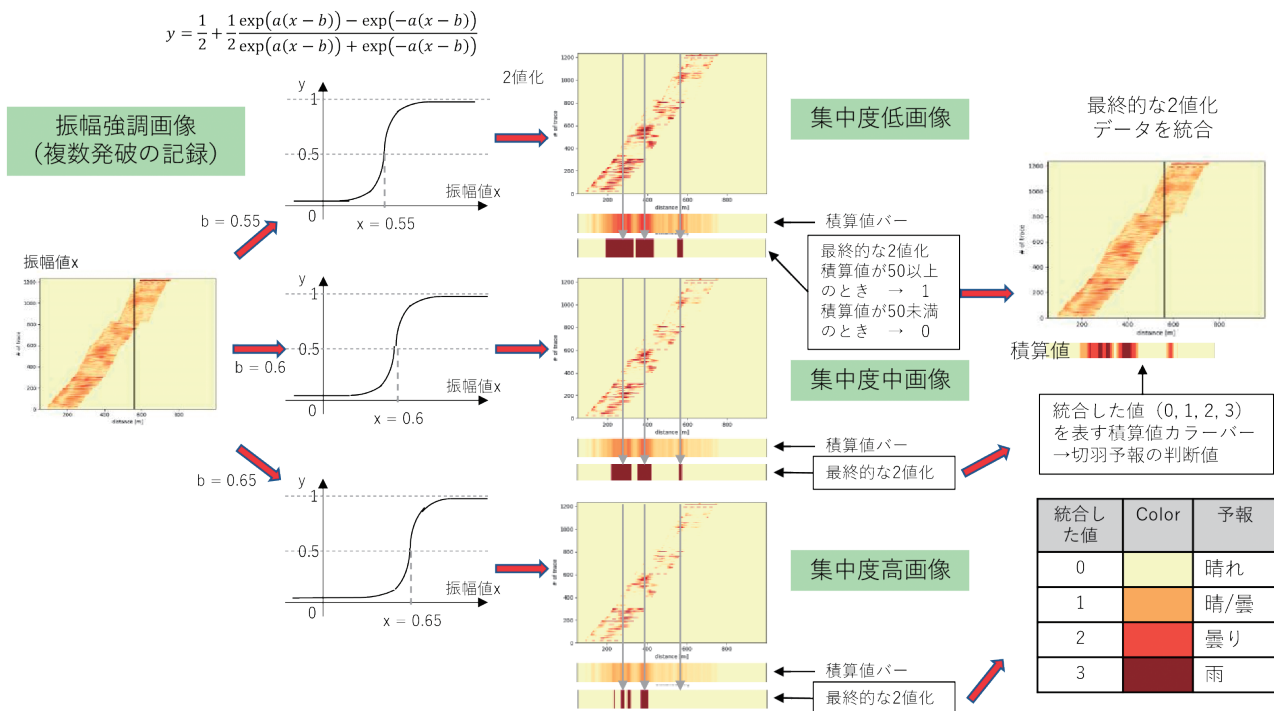


図7 振幅強調画像の二値化処理から切羽予測を確定する手順

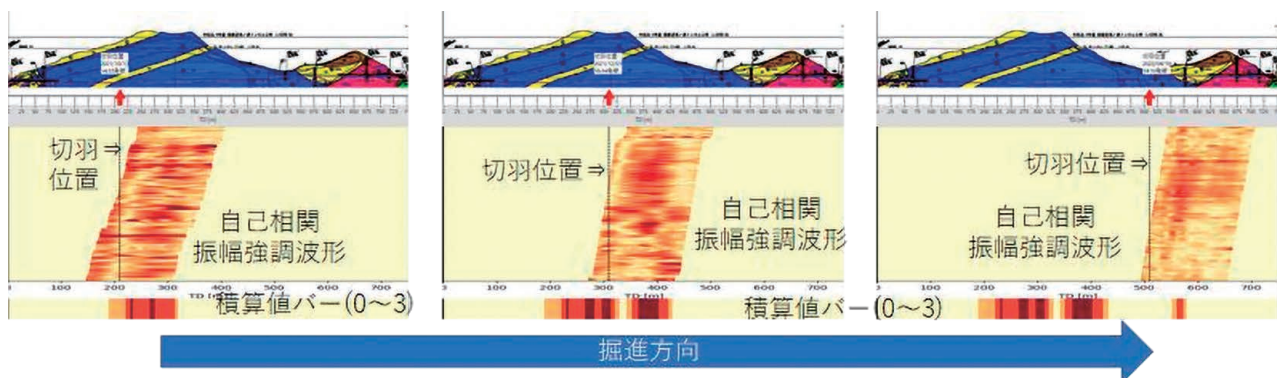


図8 切羽進行に伴う掘削発破による振幅強調波形と画像処理による積算値の変化

確定する手順を示す。図7より、二値化を行うパラメータ b 値を0.55、0.60、0.65として3種類の二値化画像を作成する。ここでは一般的な二値化ではなく、穏やかな二値化を採用している。一般的な二値化と緩やかな二値化の差に関しては後述する(3.4節参照)。

これらの二値化画像は、振幅強度の集中度の違いを表しており、高い集中度の画像＝地山変化が顕著な箇所、中程度の集中度の画像＝地山変化が中程度の箇所、低い集中度の画像＝地山変化が少ない箇所を抽出していることになる。パラメータ b 値は試行錯誤的に決定した。

次に、各々3つの画像の切羽位置で画素数を積算し、積算値が50以上の場合「1 (画素が集中している)」、50未満の場合「0 (画素が集中していない)」として二

値化バーを3つ作成する。最後に、切羽位置で3つの二値化バーを統合して最終的な積算値バーを作成(最小0、最大3)して、積算値が「0」の場合「晴れ」、「1」の場合「晴れ/曇り」、「2」の場合「曇り」、「3」の場合「雨」として切羽予測を確定する。本日の切羽予測は、切羽前方5mまでの積算値の平均値、明日の予測が5m～10m、長期予測が10m～30m区間の平均値として予測を確定する。切羽の進行に伴い新たな掘削発破データが加わることで、これらの予測は適時変化することになる。図8に、切羽進行に伴う振幅強調波形と二値化積算値の推移を示す。切羽進行に伴い振幅強度波形が蓄積され二値化により積算値バーが変化していることが分かる。

3.4 一般的な二値化と緩やかな二値化の比較

図9に、二値化処理の手法としきい値パラメータを示す。一般的な二値化では、しきい値**b**以下に0、**b**以上に1の値を与える。緩やかな二値化は、パラメータ**a**を固定値として、しきい値**b**により**b**以下には0～0.5、**b**以上には0.5～1.0の値を与える処理となる。よって、中間値を扱う緩やかな二値化処理は、より詳細な定量化が期待できる両手法を比較検証した。

図10に、一般的な二値化と緩やかな二値化による統合値バーを比較して示す。図より、両手法による差は小さく、しきい値パラメータを3つ用いて反射波の集中程度を重み付けすることが有益であることから、切羽予測では緩やかな二値化を採用している。

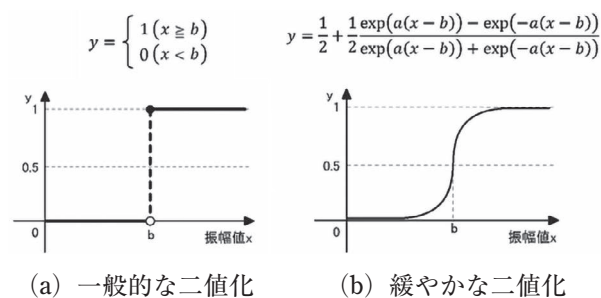


図9 二値化処理の手法としきい値パラメータ

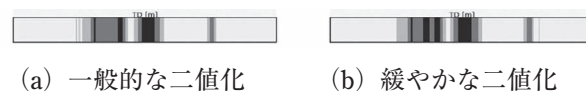


図10 異なる二値化による統合値バーの比較

3.5 切羽予測システムの概要

図11に、現場観測から波形処理・表示を自動化する全体システムの概要を示す。坑内観測機器は、坑内の無線LANおよび有線LANで公衆インターネット回線とつながっており、ネットワーク上に自動処理する波形処理専用サーバーを設置し、発破データの回収から切羽予測の発令（WEB更新）までを一括で実施している。現場と遠隔地の接続は専用ルータを用いたVPN接続を採用しセキュリティに配慮した。

§4. 現場運用

4.1 適用現場の概要

切羽予測の運用は、四国横断自動車道（阿南～小松島）令和元～4年度横断道羽ノ浦トンネル工事（トンネル延長753m、国土交通省四国地方整備局徳島河川国道事務所発注）で実施した。本トンネルは、起点側（小松島側）から延長600m区間に中生代白亜紀の秩父帯北帯に属する砂岩、泥岩およびその互層が分布し発破掘削が計画されており切羽予測をこの区間で運用した。運用区間には、一部断層破碎帯が想定されるが比較的安定な地質と想定されており、終点側（阿南側）の153m区間には黒瀬川帯の蛇紋岩が分布し機械掘削となっている。

4.2 切羽予測の現場運用

図12に、現場における発破データの取得から切羽予測までの波形処理フローを示す。発破振動は、坑内に常設する受振器（ジオフォン10Hz）と振動記録装置（原子時計付き）において、ある一定値以上の振幅レベルの振動を自動的に取得し保存する（トリガー設定、サンプリングレイト0.5ms、データ長10秒）。本現場では、受信器をトンネル軸方向に2m間隔で4か所に設置

し、この4chに対して波形処理を実施した。

本現場では、図12に示したシステム図における波形処理専用サーバーを現場坑外の詰所に設置した。専用サーバーは10分毎に振動記録装置に新たな発破データが保存されていないかをチェックし、保存されていれば自動回収する。この発破振動データに対して初動ピックアップを適用し初動時間を確定する。

掘削発破はDS雷管を用いており、1段目の発破記録を初動時間からデータ長20～250m秒で切り出し、地山弾性波速度から距離換算した振幅強調波形を得る。さらに、別途入力される発破情報（発破位置、薬量、段数など）と紐づけされ、切羽前方の振幅強調画像を得る。

最後に、切羽予測を図7、12の手順で確定し毎日現場で行う昼の安全作業打合せまでに関係者に周知するために、毎日9時に専用WEBに表示する切羽予測を自動更新して公開することとした。

4.3 重ダンブ走行の振動を用いた地震波干渉法の試行

本現場では、受振点後方震源を用いた一般化された地震波干渉法の試行として、ずり出し重ダンブ走行の振動データのうち、まずは夜間のずり出し時間帯における振動データに絞って自己相関処理を実施した。夜間のずり出し時間帯に限定した理由は以下である。

- ・昼間と比較して環境ノイズレベルが小さくずり出し以外の作業振動も小さいため、ずり出し振動がより明瞭に取得できると期待されること。
- ・ずり出し時間帯以外とのコントラストがより明瞭になることが期待されること。

地震干渉法処理は、2022/4/20 0:00～5:00の1分間WINデータ（連続データ）を5秒間データに分割し、

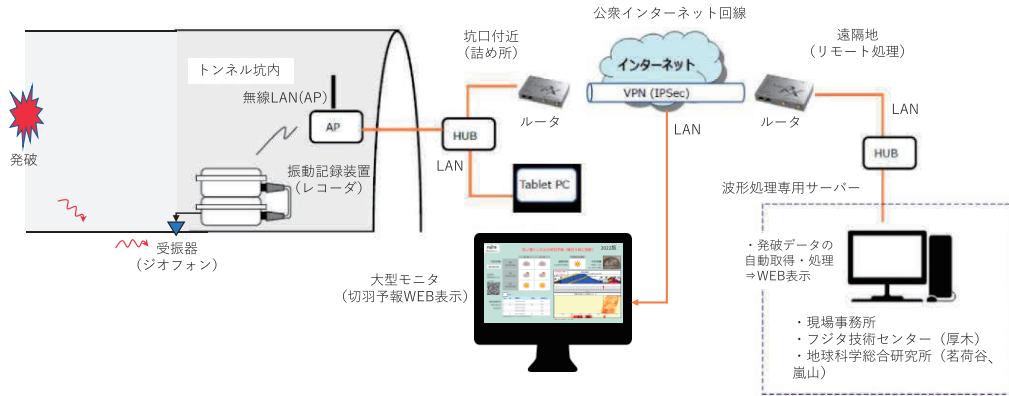


図 11 現場観測から波形処理・表示を自動化する全体システムの概要

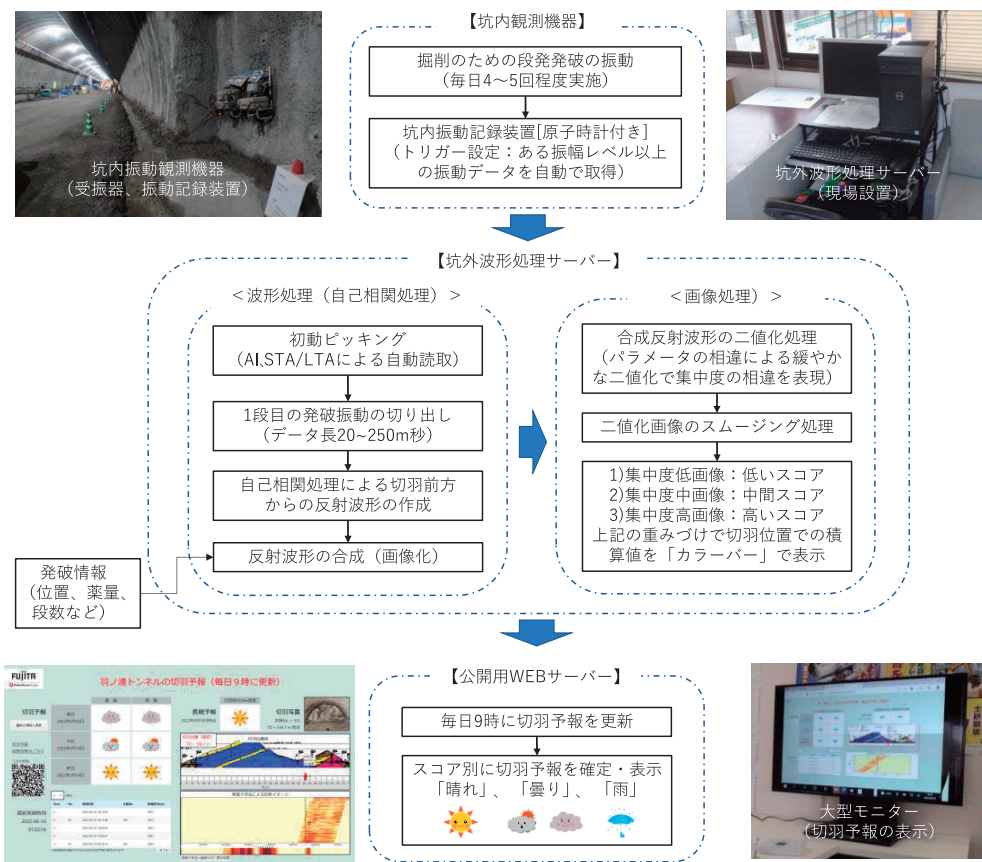


図 12 掘削発破を震源とする地震波干渉法（自己相関）のモデル計算結果

それぞれに対して適用した。図13に、ずり出し振動を含む夜間の地震波干渉法の適用とスペクトル強度分布図（受振器ch 4、弾性波速度 $V_p 4,000\text{m/s}$ ）を示す。図13より、切羽予報結果のカラーチャート（反射面の位置）や切羽変化点の変化点とずり出し振動を用いた干渉法処理結果（自己相関処理）による反射イメージは、ある程度調和的と言えそうである。なお、図中の破碎帯とは、事前の弾性波屈折法で想定した破碎質地山（低速度帯）であるが、切羽での地質観察、切羽予

報による反射面分布においても大きな変化は見られないため、図13で反射がないことがその検証となる。

一方、ずり出しにおける重ダンプ走行時間は、1掘削サイクルあたり概ね2～3時間（掘削断面積 70m^2 程度）であり、この間、連続的に振動データを取得し処理することとなり、扱うデータ量が発破を用いる場合（10秒データ）より格段に多くなる。よって、振動観測装置と波形処理系において、取り扱うデータの選別方法が今後の課題と言える。

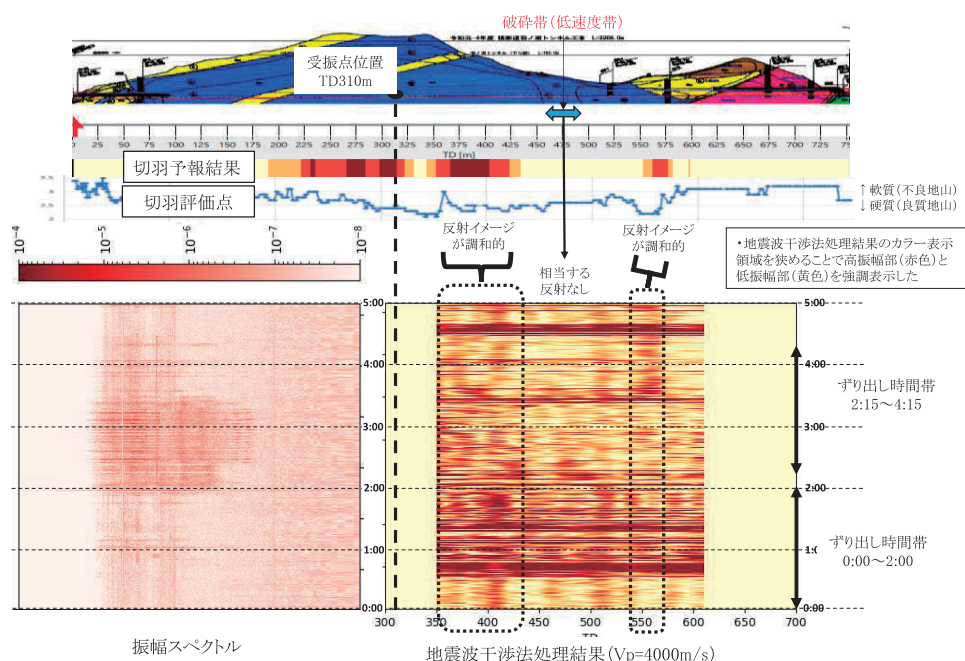


図 13 ずり出し振動を含む夜間データへの地震波干渉法の適用とスペクトル強度分布図 (受振器 ch4、弾性波速度 $V_p4,000\text{m/s}$)

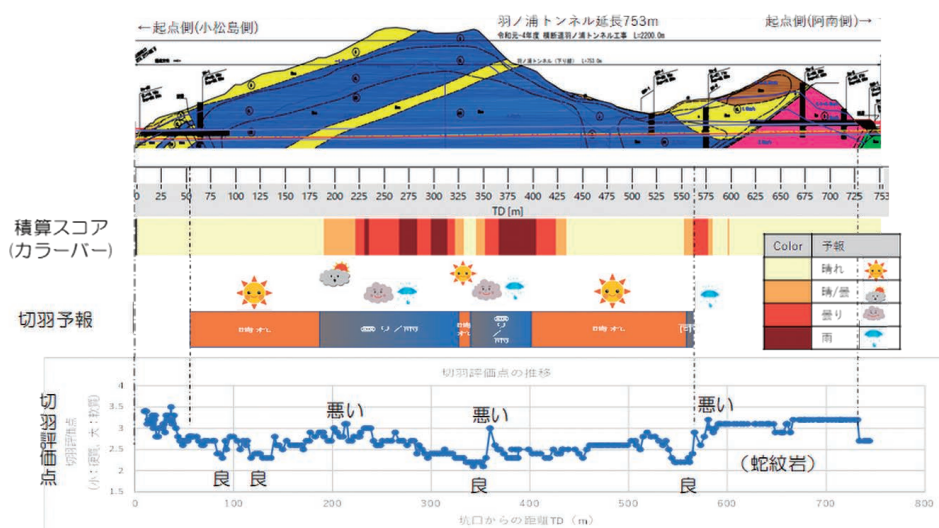


図 14 切羽予測と切羽評価点の対比

4.4 まとめ

図14に切羽予測と切羽評価点（国交省方式）を比較して示す。切羽予測は、発破掘削区間であるTD60m付近からTD560m付近までの延長約500m区間で運用した。図14より、切羽予測と切羽の地質性状の変化傾向がよく一致しており、切羽予測の現場での有用性が示されたと言える。

なお、現状の切羽予測システムは、切羽発破の振動記録のみの処理結果であり、受振点後方震源における処理結果を重ね合わせて評価するなど予測精度を向上させる試みが今後の課題となる。

§5. おわりに

本稿では、地震波干渉法に基づく切羽予測に関して従来からの技術情報を整理すると共に、切羽予測としての切羽状態を予測し公開するシステムについて述べた。すなわち、坑内作業で発生する振動のうち地震波干渉法に基づく切羽前方探査に有効な振動発生源として掘削発破振動の優位性を示すと共に、ずり出し時の振動ノイズ可能性と課題について検討した。さらに、毎日掘削のために使用する発破の振動を活用し、切羽の地質情報をリアルタイムに提供、共有化することを

目的として開発した切羽予報システムの現場運用による実用化について述べた。

山岳トンネルでは、毎日繰り返しの作業となるなかで切羽災害が発生しており、一見すると見落としがちな切羽情報の変化を関係者で共有することが減災に繋がると考え、切羽予報はその一環であると考えている。

通常天気予報では、当日朝の予報が雨の場合でも20%は降らないこと、さらに1週間前の長期予報では50%程度の的中率しかないことが統計的に示されている¹⁴⁾。この天気予報の的中率の良否はさておき、天気予報のようにトンネル関係者がいつも気になる情報となり、作業前に常に切羽予報を確認する習慣がつけば、切羽災害の減災に繋がると考え信頼性の向上に注力したい。

切羽予報で用いている坑内波形観測装置は、連続SSRTの専用器を準用しており、既に開発から15年以上が経過し老朽化や陳腐化が顕著となっていることから、一般的な汎用機を活用するシステムの開発を現在進めている。

謝辞

本研究は、地球科学総合研究所との長年に及ぶトンネル探査に関する共同開発の成果である。一方、現場観測において弊社広島支店羽ノ浦トンネル作業所各位に多大なるご便宜を賜った。ここに関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 村山秀幸、岡崎健治、山崎秀策、倉橋稔幸、亀村勝美：切羽前方地質の調査手法と地山評価における現状と課題に関する考察、土木学会第29回トンネル工学研究発表会、土木学会トンネル工学報告集、第29巻、I-9、2019
- 2) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針、pp119-123、2009
- 3) 村山秀幸、丹羽廣海、大野義範、押村嘉人、渡辺義孝：ルビジウム刻時装置を用いた連続的な切羽前方探査の開発と適用、土木学会トンネル工学報告集、第20巻、pp.51-58、2010.11
- 4) 村山秀幸、野田克也、石川浩司、藤原明、清水信之：切羽前方探査における地震波干渉法の試行、土木学会トンネル工学報告集、第22巻、pp.169-176、2012.11
- 5) 村山秀幸、丹羽廣海、野田克也、新部貴夫、東中基倫：切羽前方探査における地震波干渉法の適用性検証、土木学会トンネル工学報告集、第23巻、pp.11-18、2013.11
- 6) 村山秀幸、丹羽廣海：トンネル前方探査における地震波干渉法の試行、フジタ技術研究報告、第52号、pp.15-26、2016
- 7) 村山秀幸、新井智之：トンネル前方探査における地震波干渉法の試行（その2）、フジタ技術研究報告、第53号、pp.9-18、2017
- 8) 川崎慎治、田中康久、村山秀幸、新井智之、菅原宗、今野正明、由井紀光、東中元基倫、小沢光幸：AI初動キングを利用したトンネル切羽前方探査の自動化に向けて、第141回（2019年秋季）物理探査学会学術講演会、pp.17-20、2019.10
- 9) 村山秀幸、池田奈央、川崎真治、今野正明、由井紀光：掘削発破を活用する地震波干渉法による切羽地質の評価について、土木学会トンネル工学報告集、第30巻、I-14、2022.11
- 10) 村山秀幸、池田奈央、野正裕介、由井紀光、齋藤秀雄、太田芳宏：掘削発破を用いた地震波干渉法による切羽予報の現場運用について、土木学会トンネル工学報告集、第33巻、I-29、2023.11
- 11) 村山秀幸、池田奈央、野正裕介、正木重雄、由井光紀、齋藤秀雄、太田芳宏：地震波干渉法による切羽予報の現場運用について、土木学会第78回年次学術講演会、Ⅲ-169、2023.9
- 12) 村山秀幸、荒井靖仁、池田奈央、由井紀光、齋藤秀雄：地震波干渉法を用いたトンネル切羽予報における地質変化の定量化について、土木学会第79回年次学術講演会、Ⅲ-258、2024.9
- 13) 村山秀幸、長江優介、池田奈央、荒井靖仁、由井光紀、齋藤秀雄：地震波干渉法に基づく坑内重機振動を活用した切羽予報の試行について、土木学会第80回年次学術講演会、Ⅲ-174、2025.9
- 14) 気象庁：天気予報の精度の例年値とその特徴、https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/kensho/expln_reinen.html [2025/8/8確認]

ひとこと

ここ数年間地震波干渉法に拘って研究を進め、ずり出しダンブ等の振動の処理結果を導入できれば切羽予報は結実します。SSRTを出発点として約25年の切羽前方探査の研究開発が、ライフワークとして終着点に達します。そこで後人への技術伝承が急務です。



村山 秀幸