

地震波干渉法に基づく坑内ノイズ振動を用いた切羽前方探査

—切羽予報の現場運用システムの開発—

村山 秀幸 池田 奈央
荒井 靖仁

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。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た結果、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。本稿は、切羽予報の現場運用による実用化とずり出し時の振動を切羽予報に適用するための課題を述べる。

Geological survey ahead of tunnel face based on seismic interferometry using seismic noise waves while tunnel working

— development for on-site operation system of tunnel face forecasts —

Abstract

The authors have been developing seismic interferometry as a seismic exploration that can provide geological information ahead of a mountain tunnel face in real time. As a result of trial studies to utilize various seismic waves generated around a tunnel face for tunnel forward exploration, we had put into practical use a system called tunnel face forecasts that predicts daily face properties in real time like a weather forecast using the seismic waves of drill blasting. On the other hand, as for tunnel face forecasts in a tunnel works that does not use blasting, we are focusing on seismic noise waves generated between the tunnel face and entrance at the time of mucking works, and further development is being promoted. This paper describes the practical application of tunnel face forecasts on site operation and the challenges of applying the seismic waves during mucking works to tunnel face forecasts.

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

§1. はじめに

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）¹⁾ 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、1つの受振点で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、従来坑内作業で発生する振動はノイズとして扱われてきたが、様々な振動ノイズの切羽前方探査への適用性を検証してきた^{2~7)}。

本稿では、坑内で発生する振動ノイズ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を検証し、そのうち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の探査可能性と課題について考察する。さらに、毎日掘削のために使用する段発発破の振動ノイズを活用し、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る^{8~10)}。

§2. 坑内振動ノイズの適用性検証

2.1 各種坑内振動ノイズの適用性検証の概括

表1に、各種坑内作業で発生する振動発生源と観測機器の配置を作業状況写真と併記して示す。各種の振動ノイズは、ずり出し作業におけるダンプ走行、ベルトコンベア搬出を除き、切羽近傍で発生しており観測機器を切羽後方100~300 m付近に配置することを基本とした。地震波干渉法としては、自己相関処理（auto-correlation）を実施し切羽前方地山の反射イメージを得ている。自己相関処理では、同一の波形記録において過去の波形が現在の波形とどれだけ似ているかを示しており、ある時間ごとに自己相関が大きくなるとは、元の波形はその時間で周期性・類似性（繰り返し現象）を持つことを示している。

表2に、各種振動ノイズの切羽前方探査への適用性とその評価を示す。本検証は、①モデル波形を用いた音響シミュレーションによる検証、②現場観測データを音響シミュレーションの入力波形として用いた検証、③現場観測データを自己相関処理し従来の連続 SSRT

表1 各種坑内作業における振動発生源と観測機器の配置

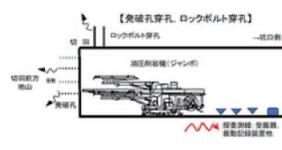
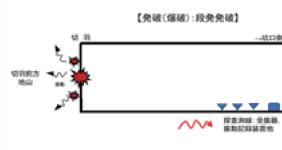
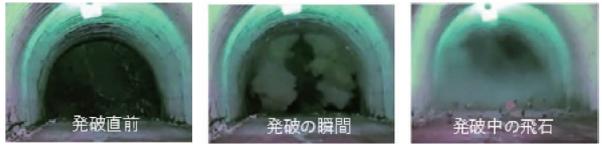
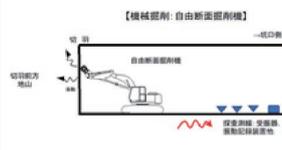
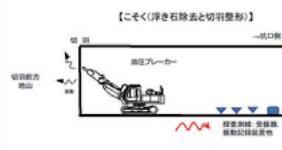
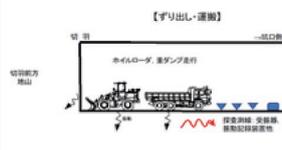
坑内作業	振動発生源	振動源と観測機器の配置	作業状況写真
削孔：発破孔、ロックボルト孔	油圧削岩機（ジャンボ）		
	発破（爆薬）：段発発破（DS雷管）		
掘削：発破、機械	機械：油圧ブレイカー、自由断面掘削機など		
	ずり出し（こそく）	[切羽近傍] ホイールローダー、油圧ブレイカー	
[坑内~坑外搬出] ダンプ走行、ベルトコンベア搬出			

表2 各種振動ノイズに対する切羽前方探査への適用性検証方法とその評価

坑内作業	振動発生源	実施した検証手法	切羽前方探査への適用性評価
削孔：発破孔、ロックボルト孔	油圧削岩機	・切羽近傍での観測データを音響シミュレーションの入力波形として検証実施	× (不適)：油圧削岩機の打撃周波数から切羽前方探査には不適、音響シミュレーションで反射を検出不可
掘削：発破、機械	[発破 (爆薬)] 段発発破 (DS 雷管)	・単発、段発のモデル波形を入力波形として、音響シミュレーションで検証 ・現場観測データの自己相関結果と従来手法 (連続 SSRT) の反射記録との対比	○ (良好)：1 段目波形 (段間 250 ms) の自己相関処理で切羽前方を検知可能 ※現場での連続観測 (約200発破) から有効性を確認⇒「発破干渉法 (切羽予報)」として検証中
	[機械] 油圧ブレーカー、自由断面掘削機など	・現場観測データの自己相関結果と切羽観察結果の対比	? (不明確)：観測データ数が少なく検証が不十分
ずり出し (こそく)	[切羽近傍] ホイールローダー、油圧ブレーカー	・切羽近傍での観測データを音響シミュレーションの入力波形として検証実施	× (不適)：切羽近傍での振動発生源が様々であり、音響シミュレーションで反射を検出不可
	[坑内～坑外搬出] ダンプ走行、ベルトコンベア搬出	・現場観測データの自己相関結果と従来手法 (連続 SSRT) の反射記録との対比	△ (可能性あり?)：観測データ数が少なく検証が不十分であるが、原理的には可能性あり

表3 段発発破と主な掘削機械で発生する振動ノイズの周波数と探査可能距離の目安

機械や発破による振動発生回数	想定周波数 λ	地山弾性波速度 $V_p=4000$ m/s における往復到達距離 $[(V_p/\lambda)/2]$
油圧削岩機 (3000回/分)	50 Hz	40 m
油圧ブレーカー (300～600回/分)	5～10 Hz	200～400 m
段発掘削発破 (DS 雷管：公称段間時間：250 ms)	4 Hz (250 ms)	500 m
	5 Hz (200 ms)	400 m
	3.3 Hz (150 ms)	300 m

における反射記録や切羽観察記録との比較などで実施した。

油圧削岩機の振動ノイズは、油圧ハンマーの打撃によって発生しており周期性があり、②による検証から切羽前方数 10 m 付近に強い反射イメージが出現した。表3に示す段発発破と主な掘削機械で発生する振動ノイズの周波数と探査可能距離の目安より、油圧ハンマーの打撃周波数から切羽前方 40 m 付近に強い反射が出現し、それ以深の探査が不能となることがわかる。すなわち、油圧削岩機の振動は切羽前方探査に「不適」となる。

機械掘削で用いる油圧ブレーカーや自由断面掘削機が発生する振動は、③による検証から有意な反射イメージは得られなかったが、現況における検証データ数が少なく、ここでは適用性の採否を「不明確」とした。

ずり出し作業時の切羽近傍でのホイールローダーや油

圧ブレーカーが発生する振動は、様々な振動源からの波形が重なり合い、②による検証から有意な反射イメージが得られなかったため切羽前方探査に「不適」とした。一方、ずり出し作業時における切羽から坑口間で作業となるダンプ走行やベルトコンベアからの振動ノイズは、既存報告¹¹⁾から切羽前方探査に有益な可能性がある。ずり出し時の振動源は坑内を移動することから、表1に示した観測機器の配置において、切羽側で発生する振動はキャンセルされ、坑口側の振動から切羽前方側の反射イメージを抽出できる可能性が示唆される (後述2.3参照)。よって、その適用性としては「可能性あり」とした。

なお、油圧ブレーカーは様々な坑内作業で使用され表3より、振動ノイズの周波数が5～10 Hzで探査距離が400～200 mに相当することから、油圧ブレーカー単独の振動であれば前方探査への適用性はあると

考えられる。

DS 雷管を用いた段発発破は、①と③の検証から適用性が「良好」であり（後述2.2参照）、切羽予測として実用化に注力している。DS 雷管の公称段間時間は250 m 秒であり、誤差を考慮して200 m 秒を自己相関処理のデータ長としても表3 から探査可能距離は400 m となるが、自己相関処理ではデータ長の半分が有効となり、有効な探査可能距離は200 m (400 m/2) 程度となる。

2.2 掘削発破振動の優位性について

掘削の段発発破振動を震源とする地震波干渉法の技術成立性については、音響場シミュレーションにより検証している^{3,4,7)}。図1 に、音響場シミュレーションによる段発発破の1 段目のみの振動を含むゲート長150 ms の自己相関の計算結果を示す。図1 より、段発発破を震源とする地震波干渉法では、1 段目の波形のみで2 段目以降の波形を含まないゲート長で処理すれば、切羽前方の反射イメージが得られることが示されたと言える。

次に、リアルタイムに処理結果を得るためには、振動データの回取～波形処理～処理結果の表示等を自動化する必要がある。そのためには、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関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。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。

以上の自動処理における掘削発破の優位性を考慮し、切羽予測システムの構築を行っている。

2.3 ずり出し振動ノイズの可能性について

図2 に、ずり出し作業に発生する振動ノイズを坑内で観測した場合の自己相関による走時モデルを示す。図2 より、受振器から切羽間で発生する振動ノイズは、キャンセルされ切羽前方の反射イメージに反映されないことがわかる。一方、振動源が受信器から坑口側にある場合は、切羽前方の反射イメージが強調されて得ることができる。すなわち、受振器から後方となる坑口側での振動ノイズを観測していることがずり出し作業におけるノイズ振動を切羽前方予測に活用するための条件となる。ただし、トンネル線形が適用区間で直線であることなどの制限があることがわかる。

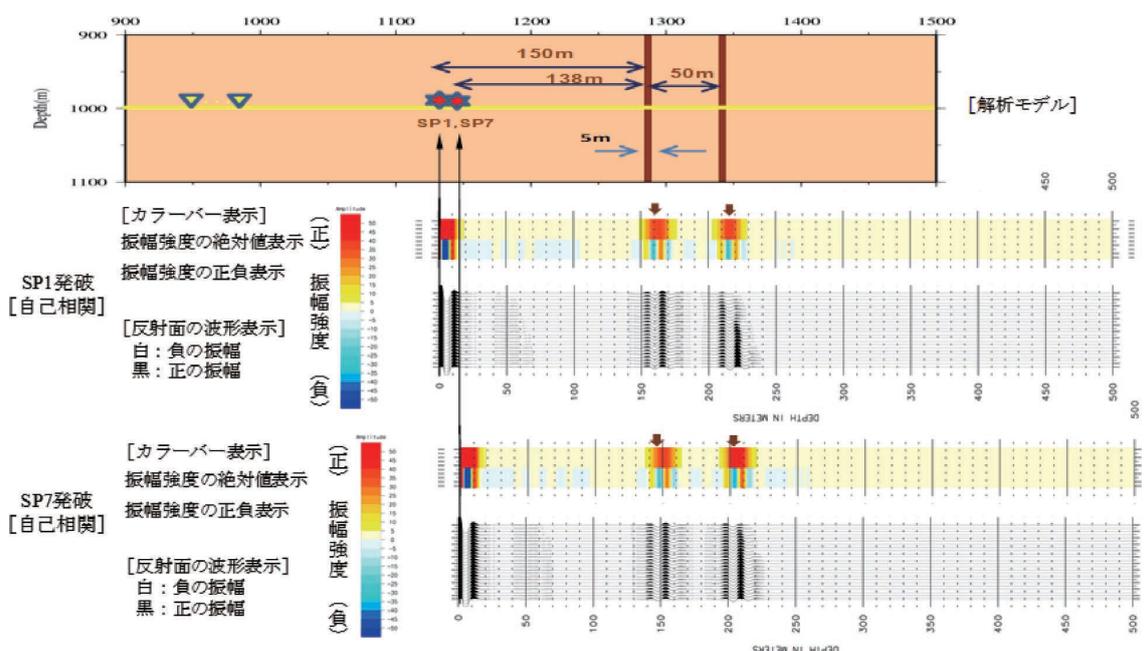
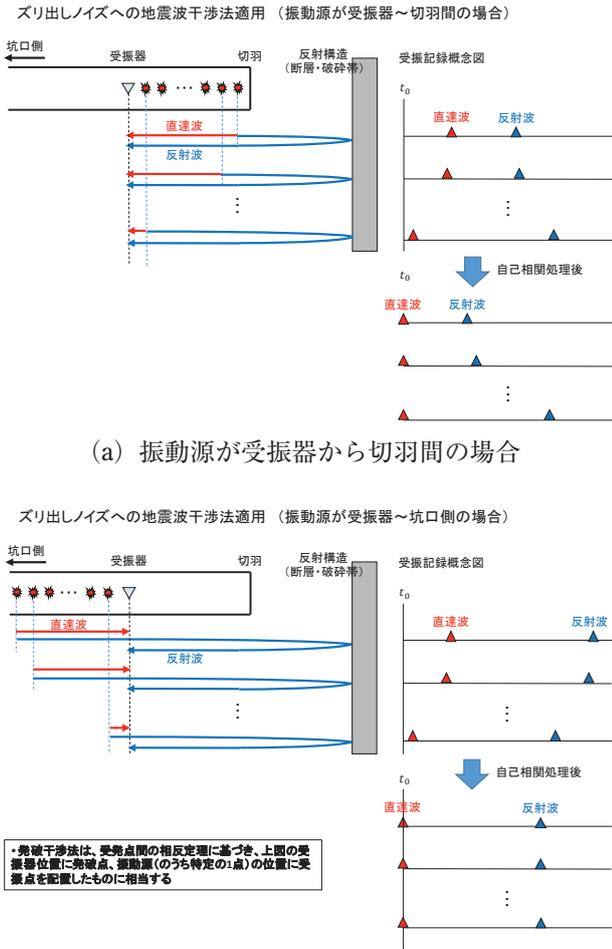


図1 音響場シミュレーションによる掘削発破を震源とする自己相関の計算結果（ゲート長 150 ms）



(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側の場合

図2 ずり出し時の振動ノイズを用いた自己相関による走時モデル

なお、ずり出し作業時の坑内におけるダンプの走行やベルトコンベヤからの振動は、掘削発破のような自動化処理が難しいと考えられる。しかしながら、発破を使用しないトンネル（機械掘削トンネル）での地震

波干渉法を用いた切羽予報の適用を考える場合、実用化が急務と言える。

§3. 切羽予報の現場運用による実用化

3.1 切羽予報システムの概要

図3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報（WEB更新）までを一括で実施している。

図4に、現場における発破データの取得から切羽予報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・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）。現場では、受振器をトンネル軸方向に2m間隔で4か所に設置し、この4chに対して自己相関処理を実施する。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キングを適用し初動時間を確定する。

DS雷管を用いた掘削発破は、1段目の発破記録を初動からデータ長200～250ms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、発破情報（発破位置、火薬量、段数など）と紐づけられ、切羽前方における振幅強調画像を得る。

切羽予報システムは、天気予報のように切羽前方地山を毎日予測し、「晴れ（地山変化が少なく安定）」、「雨（地山変化が激しく要注意）」、「晴れ／曇り～曇り（地山変化が中程度）」を判断し、切羽予報（昨日・本

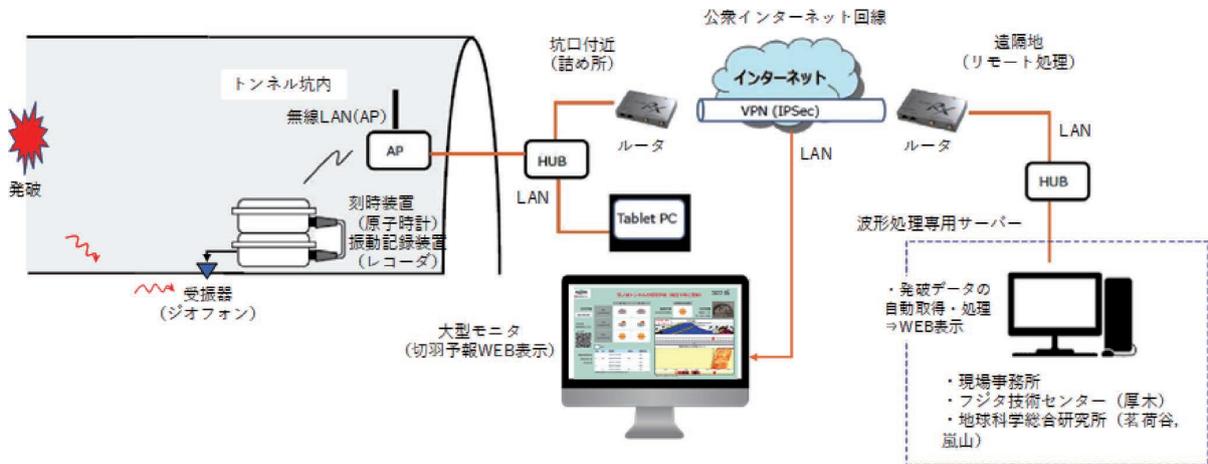


図3 現場観測から波形処理・表示を自動化する全体システムの概要

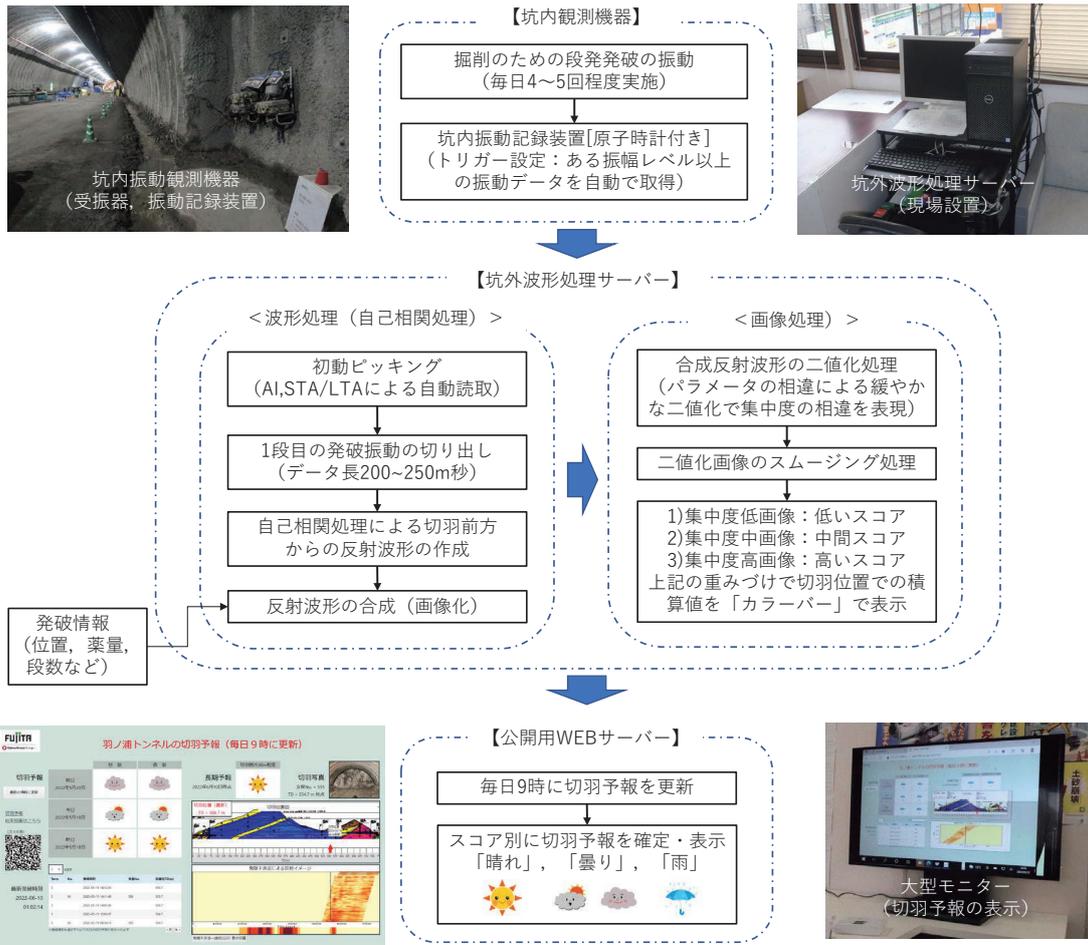


図4 現場における発破データの取得から切羽予報までの波形処理フロー

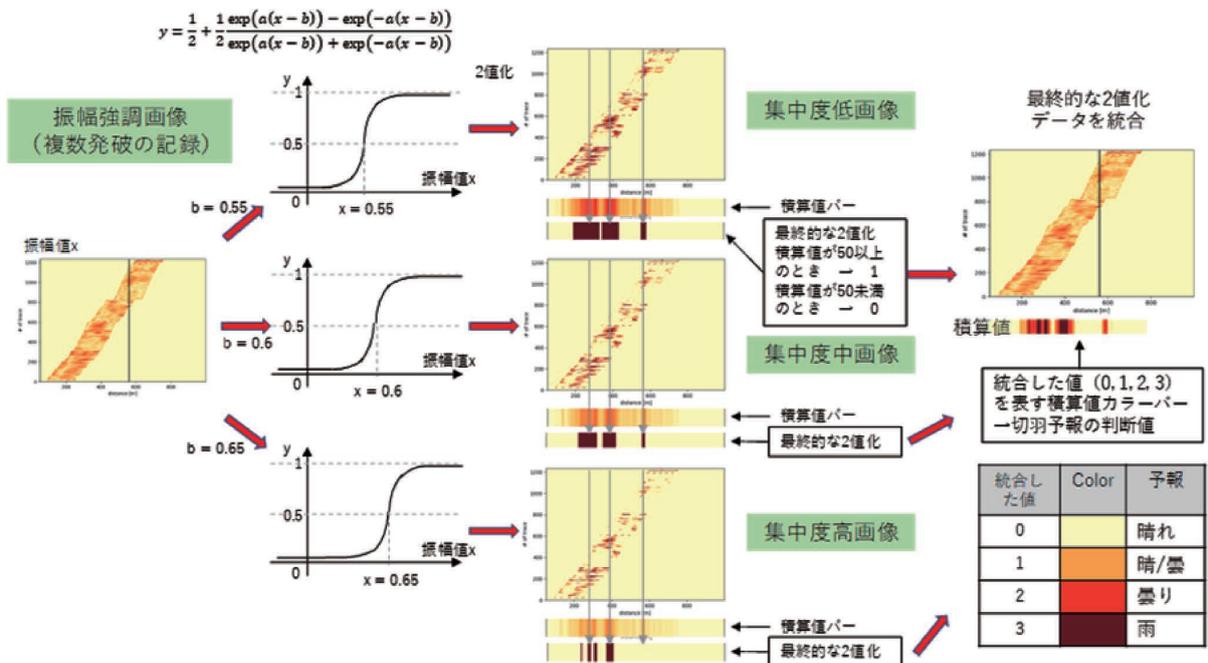


図5 振幅強調画像の二値化処理から切羽予報を確定する手順

日・明日の予報、長期予報)として関係者に公開・周知するシステムである。

切羽予報では、前方地山の変化を自動的に判断するために、発破振動から得られた複数の反射イメージを重ねた振幅強調波形の画像を画像処理によって自動処理する。

図5に、振幅強調画像の二値化処理から切羽予報を確定する手順を示す。図5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。これらの画像は、振幅強度の集中度の違いを表わしており、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ている。

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」として切羽予報を確定する。

本日の切羽予報は、切羽前方5mまでの積算値の平均値、明日が5~10m区間、長期が10~30m区間の平均値として予報を確定する。切羽の進行に伴い新たな処理画像が加わることで、これらの予報は適時更新される。

3.2 適用現場の概要と考察

切羽予報の運用は、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報をこの区間で運用した。運用区間には一部断層破砕帯が想定されるが比較的安定な地質と想定されていた。なお、終点側(阿南側)の153m区間には黒瀬帯の蛇紋が分布し機械掘削となっている。

切羽予報は、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、夜勤作業での発破を含めて毎日9時に専用WEBに表示する切羽予報を自動更新して公開することとした。

図6に切羽予報と切羽評価点(国交省方式)を比較して示す。切羽予報は、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6より、切羽予報と切羽の地質性状の変化傾向がよく一致しており、切羽予報の現場での有用性が示されたと言える。なお、切羽予報はあくまでも地山性状の相対的な評価を天気予報的に予測するシステムであり、切羽性状を絶対評価することは困難である。一方、本現場において「雨」と予報された区間には、相対的に切羽性状が不安定であったものの大きなトラブルは発生していない。

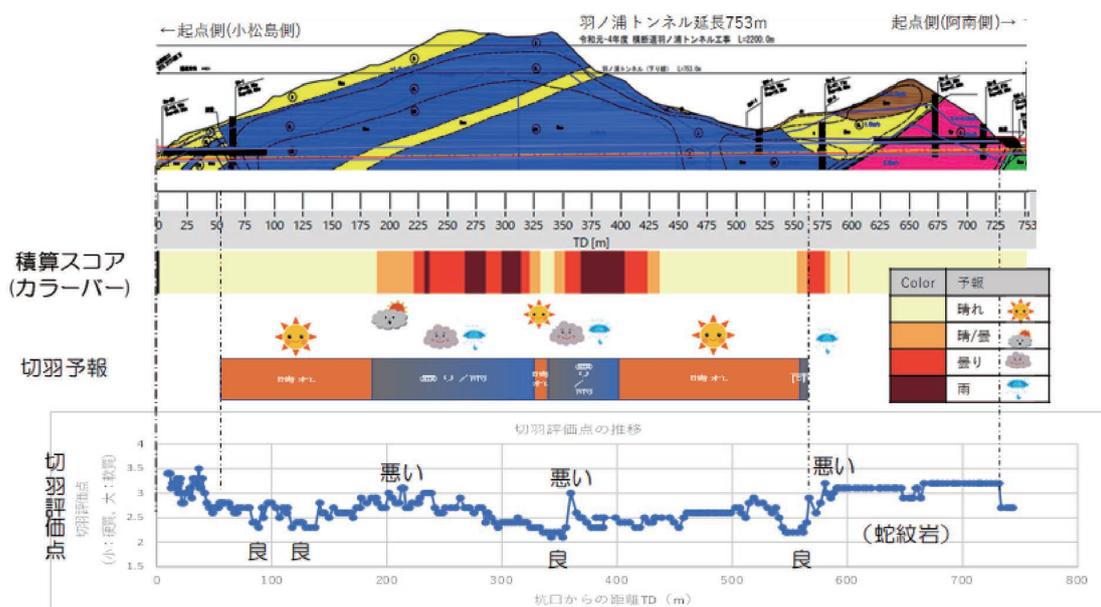


図6 切羽予報と切羽評価点の対比

§4. おわりに

本稿では、坑内作業で発生する振動ノイズ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を検証し、そのうち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の探査可能性と課題について考察した。さらに、毎日掘削のために使用する発破の振動ノイズを活用し、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%程度の中率しかないことが統計的に示されている¹¹⁾。この天気予報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実用化に注力したい。

謝辞：本研究は長年に渡る株式会社地球科学総合研究所とのトンネル探査に関する共同技術開発の成果である。一方、現場観測においては、弊社広島支店羽ノ浦トンネル作業所所属の関係者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、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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.

- 6) 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.
- 7) 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、2020.11.
- 8) 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.
- 9) 村山秀幸、池田奈央、野正裕介、由井光紀、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、2023.11.（投稿中）
- 10) 伊東俊一郎、相澤隆生、松岡俊文：地震波干渉法によるトンネル地山の可視化、土木学会トンネル工学報告集、第20巻、pp. 59-62、2010.11
- 11) 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 [2023/8/29確認]

ひとこと

ここ10数年間地震波干渉法に拘って研究を進め、ようやく切羽予報として結実しました。今後ずり出し振動の活用がうまくできれば、SSRTからの一連の弾性波探査による切羽前方探査手法の研究開発がライフワークとして終着点に達すると思えます。



村山 秀幸