

トンネル前方探査における地震波干渉法の試行（その2）

村山 秀幸 新井 智之

概 要

前報では、トンネル施工中に実施する切羽前方探査に対する新しい概念として、地震波干渉法の考え方とその適用性を検証した。地震波干渉法では特別な震源が不要であり、従来ノイズとされてきた坑内作業で発生する様々な振動を切羽前方探査に活用できる可能性が示唆されると同時に、坑内観測機器の簡素化が期待できる。一般に、地震波干渉法で取り扱う振動ノイズは、一見すると無相関でランダム性が高く非定常な波動が適していると言われおり、処理するデータ長はなるべく長い方がよいとされているものの、地震波干渉法に適した振動ノイズに対する定量的な評価がなされていない。本報告では、地震波干渉法を用いたトンネル前方探査の実用化を目的として、坑内作業に伴い発生する振動ノイズの特性を検証した。また、地震波干渉法に適した振動ノイズを判定する指標として波形のランダム性を表す *NRI* 値を導入し、ホワイトノイズを比較し *NRI* 値の妥当性を検証した。さらに、*NRI* 値を用いて自己相関処理における適切なデータ長を検証すると共に、初期反射における立ち上がりを理論的に除去する方法について提案する。

An application study of seismic interferometry ahead of tunnel faces (II)

Abstract

The previous paper described an application study of the seismic interferometry method as a new idea for surveys ahead of tunnels and examined the suitability of this method. Seismic interferometry can be applied to tunnel surveys without the need for special seismic sources, and it is thought that it could also be applied to the various noises that occur with tunnel work and help to simplify the measurement system in tunnels. The seismic noise associated with the seismic interferometry method appears at first glance to be highly random and without correlation, and therefore it is generally said that irregular waves are suitable. Although it is held that data for processing should be as long as possible, quantitative evaluation of seismic noise using the seismic interferometry method has not yet been conducted. This paper describes the suitable seismic noise generated during the tunnel work process for geological surveys ahead of tunnel faces using seismic interferometry, in the aim of making seismic interferometry practical for surveys ahead of tunnel faces. We propose an *NRI* value that shows the randomness of seismic noise, and we compared the white noise and inspected the validity of the *NRI* value. We also estimated the suitable data length on auto-correlation processing using this *NRI* value, and we theoretically proposed how to mute the early time rising of auto-correlation waves.

キーワード：トンネル切羽前方探査、地震波干渉法、
自己相関、シミュレーション

§1. はじめに

筆者らは、山岳トンネルの施工時調査手法として弾性波反射法のVSP処理に基づくトンネル浅層反射法探査(Shallow Seismic Reflection survey for Tunnels、以下SSRTと称す)を開発し、様々な現場で検証を進めてきた¹⁾。SSRTでは人工震源として、機械震源である油圧インパクト(P波とS波)やバイブレータ(P波とS波)、探査用の小質量発破が必要となる。連続SSRT²⁾は、切羽掘削に用いる段発発破を震源に活用するため人工震源が不要となり掘削作業を中断することなく探査できることがメリットである。なお、SSRT、連続SSRT共に、得られた振動波形をVSP処理し切羽前方の反射構造をイメージングすることに相違はない。

地震波干渉法とは、自然地震や従来ノイズと考えられていた微小な振動を用いて地下構造のイメージングを行う探査手法である^{3),4)}。具体的には、観測された振動ノイズに対して相互相関処理(cross-correlation)あるいは、自己相関処理(auto-correlation)を実施する。相互相関では、二点間で観測された波形がどれだけ似ているかを、自己相関では、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すことができる。

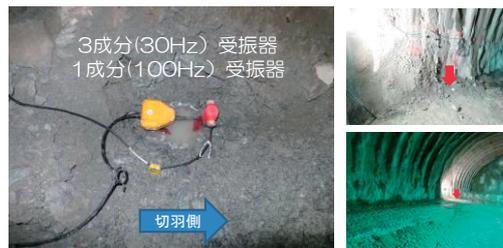
連続SSRTの坑内観測配置では、各受振点(12ch)における発破振動記録を自己相関処理すると、発破点である切羽を仮想受振点とする切羽前方地山の反射記録を受振点毎に得ることができ、処理が平易で1回の発破で切羽前方の反射イメージが得られることがメリットとなる^{3),4)}。

表-1に、連続SSRTと地震波干渉法を比較して示す。地震波干渉法は、連続SSRTと比較して坑内観測機器の簡素化と即時性の向上等が期待できることがわかる。さらに、例えば地下水探査を念頭においたP波とS波探査において観測機械が劇的に少なくなりP波とS波探査を簡便に行える可能性も示唆される。

前報告⁴⁾では、音響場シミュレーションを用いて単発発破と段発発破の自己相関処理に適するデータ長(ゲート長)に関する考察を実施すると共に、現場観測記録から地震波干渉法の課題を考察した。本報告では、地震波干渉法において、坑内作業で発生する振動ノイズを活用するための基礎的な検討を実施した結果について述べる。

表1 連続SSRTと地震波干渉法の比較

	連続SSRT	地震波干渉法(自己相関)
発破時刻(高精度時計)	GPS信号光伝送装置、原子時計時刻装置等が必要。	基本的には必要ない。 ※発破時刻を正確に検知する必要はないが、坑内常設の振動記録装置の時計精度の確保が必要。
解析に必要なデータ	20発破程度(1週間~10日)のデータを蓄積して解析。	単発や段発の発破、ある一定期間の機械振動や作業ノイズで処理可能。
測線(受振点)	受振器12chが基本配置。	原理的には受振器1つで処理可能。
処理方法	VSP処理 [データ長1秒以内]	自己相関処理 [必要データ長等の詳細が不明確]
データ回収と即時性	坑内ネットワークで回収 2~3週間で処理結果	坑内ネットワークで回収 数時間で処理可能
P波/S波(地下水探査の可能性)	3成分の受振器を設置すると単純に3倍=36chの機器が必要。	最低3成分の受振器を1箇所=3chの機器が必要。 ⇒P/S波の導入が簡便



(a)受振器設置、埋設状況



(b)受振器埋設箇所と切羽作業の位置関係

写真1 坑内作業ノイズの観測状況(受振器)

§2. 坑内作業ノイズの振動特性

2.1 坑内作業ノイズの取得

坑内の掘削作業で発生する振動ノイズを取得するため作業中のトンネル切羽近傍の脚部に、写真1に示すように、3成分受振器(卓越周波数 30Hz)と1成分受振器(卓越周波数 100Hz:連続 SSRT 用標準ジオフォン)を埋設し、掘削サイクルに伴い発生する様々な振動を約 30 時間連続で観測した。観測期間中に 5 回の掘削発破が実施され 4 サイクル(発破孔削孔→発破→ずり出し・こそく→一次吹付け→鋼製支保工設置→二次吹付け→ロックボルト削孔)の振動ノイズを取得した。

写真2に、振動記録装置の坑内設置状況を示す。振動記録装置としては、新たに開発したセシウム原子時計搭載型4ch振動記録装置(MS3000-4ch+CS/CLOCK-TL)と称する高精度時計を搭載した振動記録装置を使用した。本装置は、坑外でGPS信号によって数時間時刻校正すれば、坑内で長期間連続的に使用することができる。セシウム原子時計搭載型4ch振動記録装置は、連続SSRT用の12ch振動記録装置2台に対して同時に時刻情報を供給することができ、装置内部の時計を随時校正できる仕様としている。なお、写真2に示したように、本測定では切羽後方の発破点火小屋近傍に連続SSRTの探査測線を配置しており、12ch振動記録装置2台も設置している。

本観測では、発破時刻と各作業サイクルにおける振動ノイズをサンプリング間隔0.5msで記録した。

2.2 坑内作業ノイズの振動特性に関する検証

(1) 削孔作業における振動ノイズ

坑内作業で最も振動エネルギーが大きいと考えられる油圧削岩機(ジャンボ)による発破孔およびロックボルトの削孔時の振動ノイズを検証する。図1にロックボルト削孔時の振動ノイズ波形を示す。図より、削孔時のノイズ波形は顕著に周期性を有しており、50Hzの倍数で振幅スペクトラムにピークが確認できる。ここで、削岩機に搭載されている油圧ドリフタの打撃回数が毎分約3,000回であることを考慮すると、その周波数は50Hz(3,000回/60秒)となり、観測された記録と一致する。よって、図1の周期的な波形は、油圧ドリフタの打撃周期と一致していることがわかる。

前報⁴⁾では、音響場シミュレーションモデルの入力波形を発破としたが、今回は、ロックボルト削孔時の振動ノイズを入力波形として自己相関処理を実施する。図2に、連続SSRT配置における音響場シミュレーションモデルを示す。地山弾性速度は4,000m/s、発破地点(切羽の振動発生箇所)から前方150mと200mに弾性波速度が3,500m/sとなる破砕帯を幅5mで想定したモデルである。

図3に、ロックボルト削孔時の振動ノイズを入力波形とした場合の震源からの波動伝播状況を示す。図より、震源から規則的な波形が干渉縞状に地山に伝播していることが明確であり、その周波数はほぼ50Hzが卓越し油圧ドリフタの打撃周波数と一致することがわかる。



写真2 坑内作業ノイズの観測状況(振動記録装置)

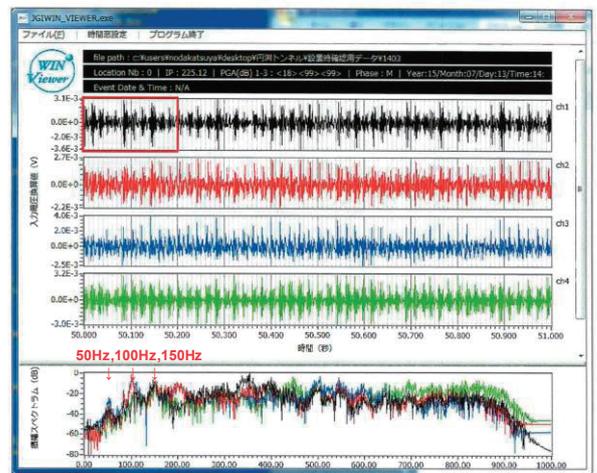


図1 ロックボルト削孔時の振動ノイズ(1秒間)
(上段: 生振動波形、下段: 振幅スペクトラム)

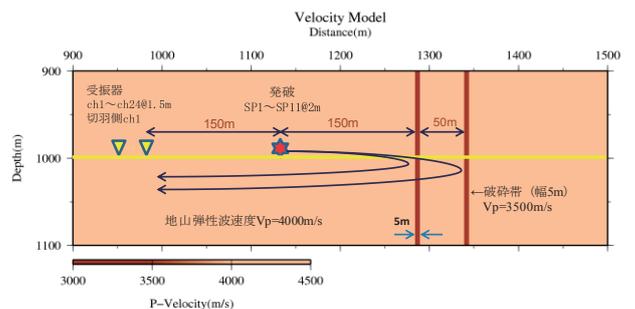


図2 音響場シミュレーションモデル⁴⁾

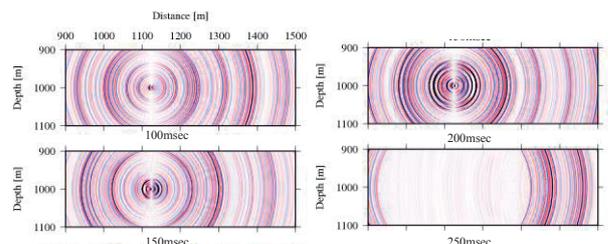


図3 ロックボルト削孔時の振動ノイズを入力波形とした場合の震源からの波動伝播状況

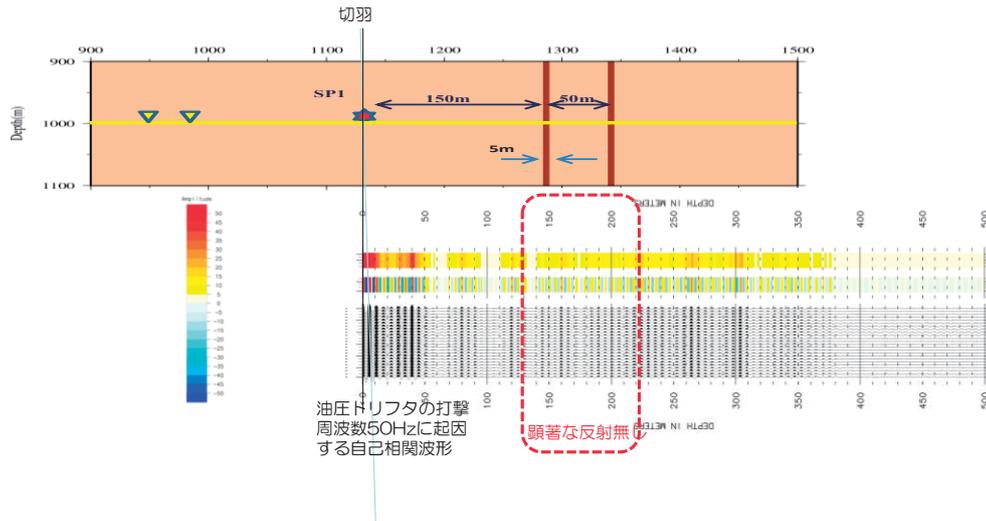


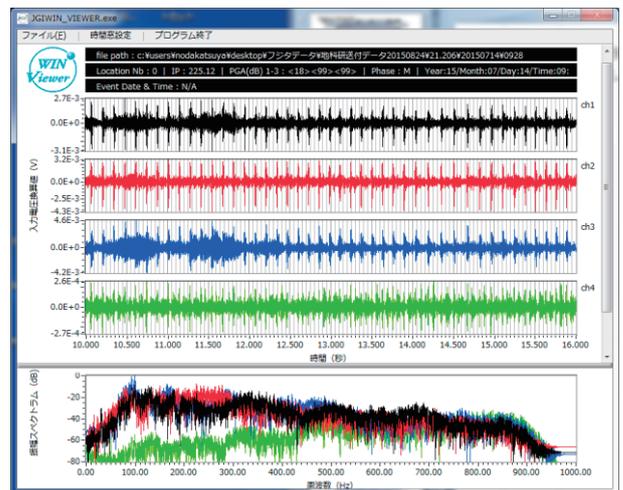
図4 ロックボルト削孔の振動ノイズを入力波形とした音響場シミュレーション結果

図4に、ロックボルト削孔の振動ノイズを入力波形とした音響場シミュレーション結果を示す。自己相関処理では、元波形の周期性や類似性(繰り返し現象)に依存することから、油圧ドリフタの打撃周波数50Hzに起因した反射が深度0~50m区間で非常に強く確認できる。ここで地山弾性波速度が4,000m/s、周波数が50Hzから、往復走時を考慮して、40m((4,000/50)/2)がその分布範囲と考えられ、図4の規則的な反射分布位置と整合する。一方、この浅深度における強い反射の影響を受け、それ以深の破碎帯想定位置に顕著な反射が識別できないことがわかる。

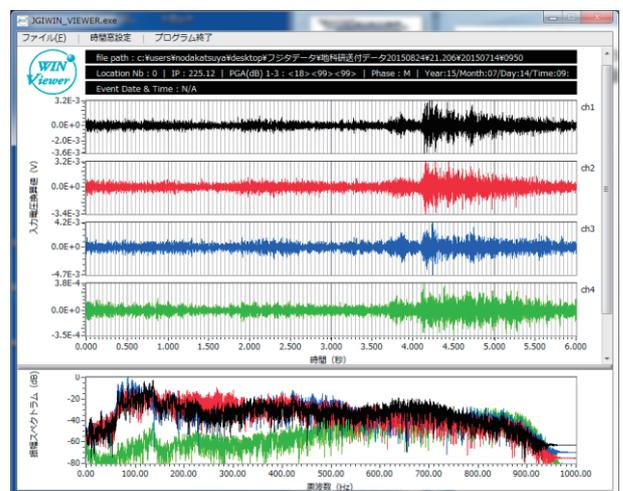
以上から、油圧削岩機を用いた削孔時の振動ノイズは、油圧ドリフタの周期的な打撃振動の影響を強く受け、地震波干渉法による切羽前方探査に不適切であると言える。

(2)ずり出し・こそく作業における振動ノイズ

坑内作業のうち削孔時の次に、振動エネルギーが大きいことが期待されるずり出し・こそく作業における振動ノイズを検証する。図5に、典型的な振動ノイズ記録として、周期性を有する波形と周期性が少なくランダムと思われる波形を対比して示す。図5(a)の周期性のある波形は、発破8分後の作業初期段階であり周波数は7.0~7.5Hzである。一般に、油圧ブレーカの打撃数は1分あたり300~600回とされており周波数は5~10Hzとなる。よって、この周期性のある波形は、周波数的には油圧ブレーカとほぼ整合するものの、ずり出し初期段階では油圧ブレーカを用いたこそく作業は実施しておらず不可解で振動源を特定できない。



(a)発破8分後における周期性を有する波形(6秒間)



(b)発破30分後における周期性の少ない波形(6秒間)

図5 ずり出し・こそく作業における振動ノイズ

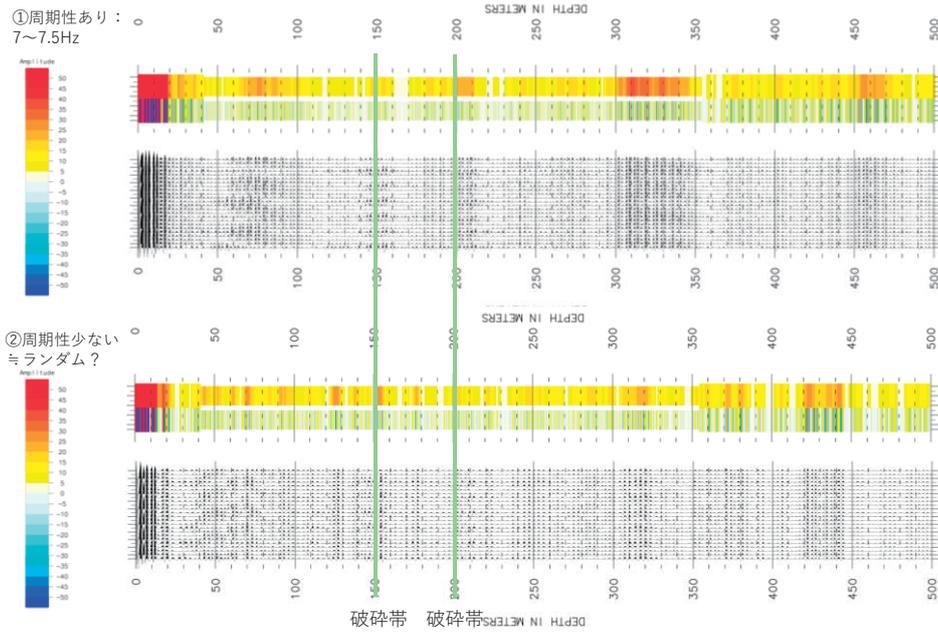


図6 ずり出し・こそく作業における振動ノイズを入力波形とした音響場シミュレーション結果

図6に、削孔時の振動ノイズと同様に、ずり出し・こそく作業における振動ノイズを入力波形とする音響場シミュレーション結果を、周期性のある波形(7.0~7.5Hz)と周期性の少ない波形で対比して示す。図6は、図4と比較してメリハリのある反射波形となっており、破碎帯想定位置でも弱い反射が、特に周期性のある波形で確認できる。一方、地山弾性波速度4,000m/sにおける周波数7.0~7.5Hzの繰り返し波形に相当する反射波は、深度270~285m($(4,000/7.5)/2 \sim (4,000/7)/2$)に出現すると考えられ、周期性のある波形において深度300~350mでやや顕著に確認される反射がこの影響である可能性が示唆される。

以上から、削孔時の振動ノイズよりずり出し・こそく作業で発生する振動ノイズの方が地震波干渉法処理に適しており、切羽前方が予測できる可能性が高いと言える。

なお、ずり出し・こそく作業において振動が発生する箇所は、切羽近傍に限定されず切羽後方50m程度の区間で重機(ホイールローダ、重ダンプ、油圧ブレーカや油圧シャベル等)が稼働することによって発生しており振動発生源を一義的に特定することが難しい。すなわち、ずり出し・こそく作業における振動ノイズを自己相関処理に用いる場合、図6で示した深度0m地点(自己相関におけるタイム0点)をどこと設定すべきか判然としないという課題がある。

表2 段発発破と主な掘削機械で発生する振動の周波数

発破、重機における打撃回数	想定周波数 λ	地山弾性波速度 V_p 4,000m/s における距離 $[(V_p/\lambda)/2]$
段発発破 (DS雷管@250ms)	4Hz	500m
油圧ブレーカ (300~600回/分)	5~10Hz	200~400m
油圧削岩機 (3000回/分)	50Hz	40m

(3)まとめ

表2に、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を示し、その周波数で地山弾性波速度4,000m/sにおける自己相関処理により反射が出現する切羽からの距離を併記して示す。段発発破(DS雷管)は段間時間250msから周波数を算出した。表2から、切羽近傍に周期性のある振動ノイズに相当する反射の出現が予測される油圧削岩を用いた発破孔やロックボルト削孔時の振動ノイズは、自己相関処理による切羽前方予測に不適切であり、油圧ブレーカや段発発破など想定周波数が10Hz以下の規則的な振動ノイズの発生が想定される坑内作業であれば切羽前方数100mの予測が可能であると考えられる。

なお、地震波干渉法で取り扱う振動ノイズは、一見規則性のないランダムな波形とされており、表2で示した振動源は規則性のある波形であり、本来自己相関処理に適さない可能性が示唆されるため、次章で振動ノイズのランダム性に関する指標の提案とその効果について述べる。

§ 3. *NRI* 値の導入とその効果

3.1 *NRI* 値の定義

自己相関処理とは、「ある時系列データについて時間 t (τ をラグタイムと称す) だけずらしたとき、ずらす前の時系列データとどの程度似ているか(類似性)を定量化するための操作」である。図7に自己相関処理の概念図を示す。図7(a)に示すように、タイムラグ τ だけずらした自己相関処理結果は、時刻 $t=0$ を振幅のピークとして正負対称に分布する。ここで、図7に示したように、時刻 $t=0$ における最大振幅を *Amp.peak* とし、後続波における振幅の平均値を *Amp.rms* とし、*NRI* 値 (*Noise Random Index*:ノイズランダム指標) を以下のように定義する。

$$NRI = \text{Amp.peak} / \text{Amp.rms}$$

なお、*RMS* は以下で定義される。

$$RMS(x_t) = \sqrt{\frac{\sum_{t_1}^{t_2} (x_t)^2}{N}}$$

x : 時系列、 N : サンプル数

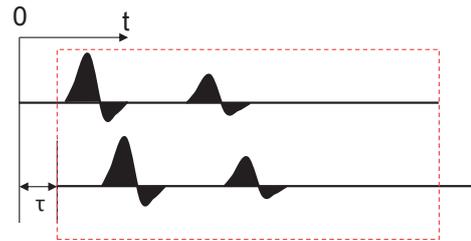
ランダム波であるホワイトノイズの自己相関処理では、時刻 $t=0$ で振幅が最大となり、後続波には規則性(=類似性)がないと考えられることから後続波の振幅は小さくなり、*NRI* 値が大きくなる。逆に、時刻列データに規則的な波形が含まれる場合、後続波の振幅がその規則性に相当する周波数に応じた時刻で大きくなるのが想定され *NRI* 値が小さくなるのが期待できる。

以上から、自己相関処理に適した振動ノイズ波形のランダム性を評価する指標として *NRI* 値を導入する。

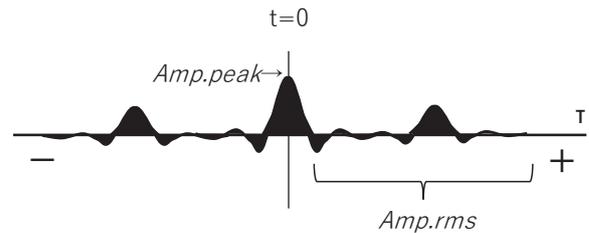
3.2 *NRI* 値によるデータ長の検証

NRI 値は、波形のランダム性を表す指標であるが自己相関処理するデータ長にも依存すると考えられること、および処理できるデータ長に限界があることから、ホワイトノイズ波形を用いてデータ長と *NRI* 値に関する検討を行った。

ホワイトノイズ波形は、ランダム関数生成のアルゴリズムやサンプル数の違いにより *NRI* 値が異なることが検討の過程で明らかとなったため、自己相関処理の簡便性等を考慮してサンプリング間隔を 4ms (対象周波数 0~125Hz) とし、データ長の相違による *NRI* 値の違いを検討した。

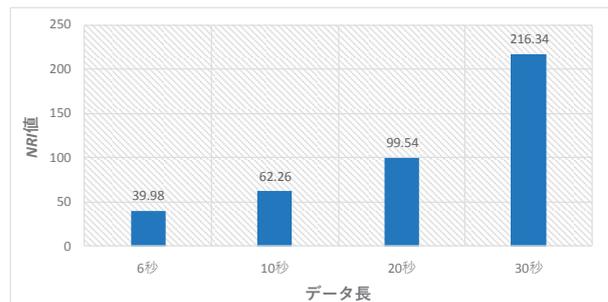


(a) 時刻列データ(ラグタイム τ すらし)

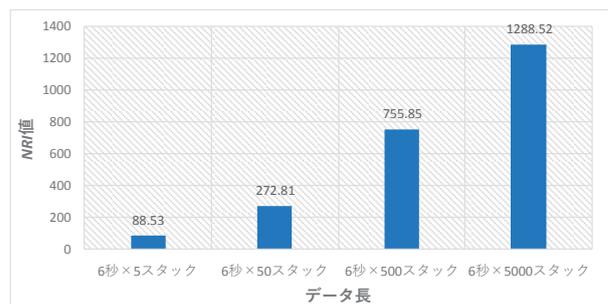


(b) 自己相関処理結果 ($t=0$ に対して正負で対称)

図7 自己相関処理の概念図



(a) データ長と *NRI* 値



(b) スタック(重合)時の *NRI* 値

図8 ホワイトノイズのデータ長と *NRI* 値

図8に、ホワイトノイズのデータ長と *NRI* 値の関係を示す。ホワイトノイズの生成においてはランダム関数のアルゴリズムを12パターン設定して各々 *NRI* 値を計算しその平均値を示した。データ長は6秒、10秒、20秒、30秒と単純に長くしたケースと、6秒データを基本としてそのランダム性向上

トンネル前方探査における地震波干渉法の試行(その2)

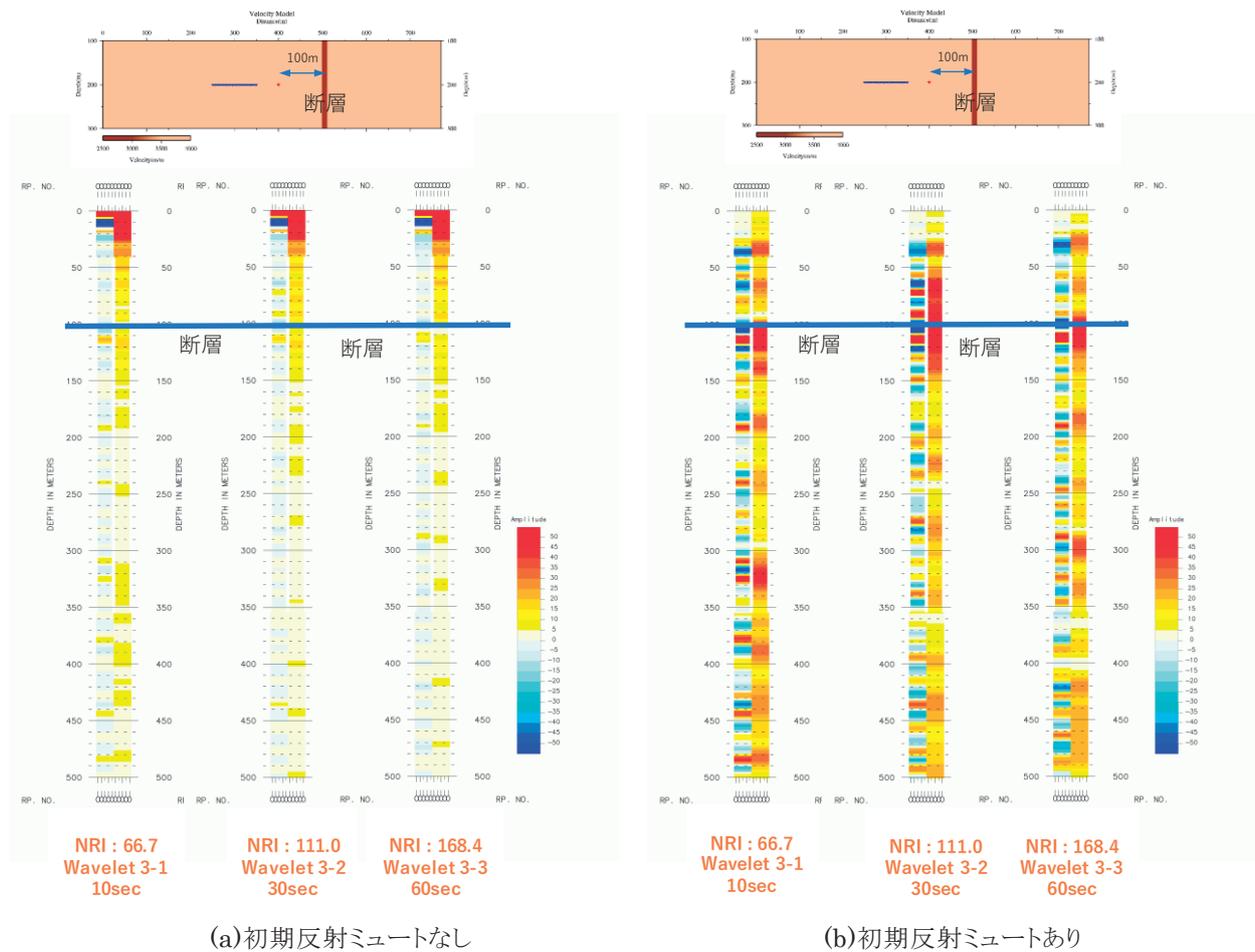


図9 ホワイトノイズを用いた音響場シミュレーション

のためスタック(重畳)させた場合の NRI 値の変化を確認した。図8より、データ長が長くスタック数が多いほど NRI 値が上昇し波形のランダム性が向上することがわかる。一方、データ長30秒と6秒×5スタック(計30秒分)の NRI 値を比較するとデータ長30秒の方が NRI 値は高い。よって、ランダム性は、スタッキングで向上が期待できるものの同じ6秒のデータを30秒分重ねてより単純にデータ長が長い方が自己相関処理に有利であると言える。

図9(a)に、切羽前方100mの位置に断層がある音響場シミュレーションモデルにおいて、ホワイトノイズを入力波形とした場合の結果を、データ長10秒、30秒、60秒の3ケースで示す。図9(a)より、初期反射が強いものの断層想定位置付近に断層に相当する反射が弱いながらも3ケース共に確認できる。一方、データ長が長くなり NRI 値が向上すると断層想定位置以降の後続波が少なくなり、ランダム性の向上によって偽像が減少したと考えられる。なお、図9(b)には、後述する初期反射ミュートを実施した場合の音響シミュレーション結果を示す。

ーション結果を示す。

以上から、地震波干渉法に対する適切なデータの評価指標として NRI 値が有効であることを示した。一方、図9より自己相関処理に用いるデータ長は、偽像と考えられる後続波が少ないこと、処理の簡便性等を考慮し30秒程度が適切であると考えられる。さらに、スタック(重畳)を併用することも有益と考えられる。

3.3 初期反射のミュートの考え方

図9(a)では、初期反射が非常に強くそれ以降の後続反射が判別しづらいため、初期反射のミュート(除去)する方法について検討する。

理想的なホワイトノイズは、全周波数帯域にわたってフラットなスペクトルであり、自己相関関数はランダム関数である。今回ホワイトノイズ作成時に用いたランダム関数は、周波数バンドが限定されており、得られる自己相関関数はバンドパスフィルターの自己相関数と考えることができる。そ

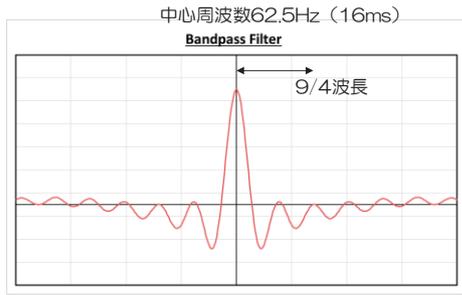
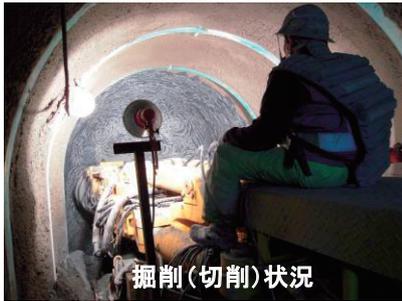


図10 バンドパスフィルターの自己相関波形



写真3 自由断面掘削機(S-100)の外観



掘削(切削)状況



掘削(切削)状況



写真5 観測機器の坑内配置

写真4 切羽での掘削(切削)状況

ここで、図10に示すバンドパスフィルターの自己相関波形において、およそ2つめのサイロブの0クロス位置となる9/4波長分をミュート長と設定する。今回生成したホワイトノイズの中心周波数は62.5Hz(周期16ms)であり、16ms×9/4波長がミュート長に相当する。

図9(b)に、図9(a)に示した音響シミュレーション結果に対して初期反射ミュートを実施した結果を示す。図9(b)に示したように、ミュートによって後続波の反射が明瞭に示され反射構造を評価し易いことがわかる。ただし、今回導入した初期反射ミュートによって、切羽距離0～40m程度の区間は評価できないこと、初期反射ミュートは後続の反射構造を強調表示するだけであり処理結果は何ら変わらないことに注意が必要となる。

§4. 機械掘削振動を用いた地震波干渉法の検証

4.1 掘削機械振動の観測概要

適用した現場は小断面の機械掘削トンネルである。写真3に、掘削機械である自由断面掘削機(S-100)の外観を示し、写真4に切羽での掘削状況を示す。自由断面掘削機は、ブーム先端のビットを装着した円筒状のドラムを切羽に押しつけドラムが回転することによって、岩片を剥ぎ取

りながら切削していく。この切削時に発生する振動ノイズは不規則であることが予測され、切羽後方での観測を実施した。写真5に観測機器の配置状況を示す。観測機器は、第2章で述べたセシウム原子時計搭載型4ch振動記録装置を用い、受振器は3成分ジオフォン(卓越周波数30Hz)、サンプリング間隔は4ms(対象周波数0～125Hz)とした。

4.2 機械掘削振動ノイズの自己相関処理結果

図11に、現場観測に基づく自己相関処理結果を切羽掘削が80m進行した場合と対比し、P波成分、SV成分、SH成分に区分して示す。自己相関処理における掘削(切削)時の振動ノイズは、前章までの検討結果を考慮しランダム性の向上と処理の簡便性から600秒(5分間)の連続データを30秒ずつ切り出し、10データをスタック(重合)して自己相関処理した。よって、データ長としては30秒である。また、初期反射のミュートを実施した。

図11より、観測データのNRI値はデータ長が30秒であることから、図8より200程度が期待されたが100以下であり、ホワイトノイズと比較してランダム性がかなり低いと言える。一方、初期反射のミュートを実施したこともありメリハリのあ

る反射が各成分で確認できるが、掘削後に確認した地質性状として、多少の硬軟の相違はあったものの大きな変化

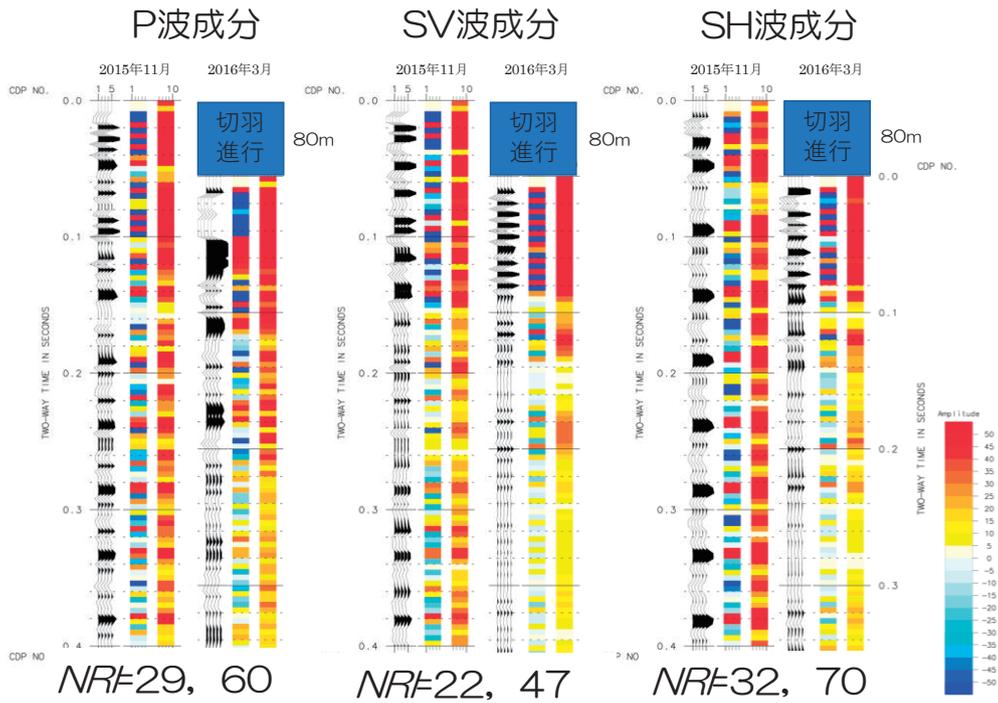


図11 現場観測に基づく切羽進行を考慮した自己相関処理結果(P波成分、Sv成分、SH成分)

はなく、得られた反射記録の妥当性評価が困難である。

以上から、前章までの地震波干渉における検証結果に基づき、坑内作業で発生する振動ノイズうちランダム性が高いと考えられる機械掘削振動ノイズの自己相関処理を実施したが、切羽地質変化と対比して処理結果を評価するまでには至らなかった。

§5. おわりに

地震波干渉法による切羽前方探査の実用化を目的として実施した、本稿での検討内容と得られた知見を以下にまとめて示す。

- 坑内作業で発生する機械振動ノイズのうち、振動エネルギーが比較的大きいと考えられる油圧削岩機を用いた削孔時と、ずり出しとこそく時の振動ノイズを対象として地震波干渉法に対する適用を検証した。

- 削孔時には、油圧削岩機のドリフタ打撃に起因する周波数50Hz程度の顕著な周期性を有する波形が確認され、この影響で切羽浅部しか探査することができない。よって、削孔時の振動ノイズは、自己相関による切羽前方探査には不適切であることを示した。

- ずり出しとこそく時には、発生源が不明確であるが周期

数7.0~7.5Hzの規則的な波形が確認されたものの周波数領域が低いため、自己相関による切羽前方100m程度の探査には適用可能であることを示した。なお、主にこそく時に用いる油圧ブレーカの打撃周波数も5~10Hzと想定されることから切羽前方探査が可能であると考えられる。ただし、ずり出しとこそく作業は切羽後方50m付近での作業であり振動ノイズの発生源が移動するため、自己相関処理での原点位置の同定に苦慮するという別の課題がある。

- DS雷管を用いた段発発破の周波数は4Hzであり、自己処理で切羽前方数100mの探査可能であると言える。

- 自己相関処理に適した周期性のないランダムな波形であることを評価する指標として、時刻 $t=0$ における最大振幅を後続波における振幅で除した値を NRI 値(ノイズランダム指標)として定義した。この NRI 値の妥当性をランダム波であるホワイトノイズで検証した。

- 自己相関に適したデータ長に関して、ホワイトノイズを入力波形とし NRI 値を用いて検証した。ランダム性が高く NRI 値が大きな振動ノイズを得るためには、データ長が長いこととスタック(重合)回数を増やすことが有効であり、特にデータ長が長いことがより有効であると言える。しかしながら、データ処理の簡便性等からデータ長として30秒程度が適切であり、スタック(重合)を併用することも有効であ

る。

・自己相関結果において、初期反射のミュート方法を理論的に考察し提案した。

・現場において機械掘削の振動ノイズを観測し、データ長30秒(600秒の連続データを30秒で切り出し10データをスタックしたデータ)で自己相関処理を実施し、比較的明瞭な切羽前方の反射イメージを得ることができた。しかしながら、切羽地質との対比にはまだ課題が残った。

以上のように、本稿では地震波干渉法における様々な課題を整理して、切羽前方探査に適した坑内作業で発生する振動ノイズを評価する道筋を整えるところまで研究開発が進んだことを報告した。よって、今後さらに現場観測データ収集し、地震波干渉法を用いた切羽前方探査の実用化に至りたい。しかしながら、現場の実観測データには予期せぬ様々な要素が含まれおり、実用化までの障壁はまだ低くないと考えている。

謝辞: 本研究は長年継続している株式会社地球科学総合研究所とのトンネル地盤探査に関する共同開発の成果であり、研究全般に関して清水信之氏、川崎慎治氏、解析処理に関して東中基倫氏、藤原明氏、菅原宗氏、田中康久氏、数値シミュレーションに関して新部貴夫氏、観測機器に関して保立正氏など多数の方々にご教授、ご尽力を頂いている。さらに、現場観測においては、弊社東北支店土木工事部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) 例えば、村山秀幸、末松幸人、萩原正道、間宮圭、清水信之：異なる起振源を用いたトンネル切羽前方探査の比較実験について、土木学会トンネル工学研究報告集、第15巻、pp.227-234、2005.12.
- 2) 例えば、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.
- 3) 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.
- 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



村山 秀幸

ひとこと

地震波干渉法で取り扱う振動データは、従来の弾性波探査における震源データに対するS/N比の向上という考え方が全く異なり、フレキシブルな発想が肝要となるが老齢化著しい筆者には難敵であり苦慮している。