

高精度弾性波測定システムの開発およびその適用性に関する研究

Development of highly precise elastic wave measurement system and study about the application properties

石山 宏二*	吉野 修**	引間 亮一***
Koji Ishiyama	Osamu Yoshino	Ryoichi Hikima
松井 裕哉****	佐ノ木 哲*****	榊原 淳一*****
Hiroya Matsui	Satoru Sanoki	Junichi Sakakibara

要 約

トンネルや放射性廃棄物の地層処分坑道などに代表される地下空洞において、その安定性や遮蔽性は空洞周辺の岩盤の物理的性質、地質環境変化に大きく影響をうける。例えば、岩盤の弾性的性質は、岩盤を構成する基質部、空隙、またその空隙内の含水状況等により変化するが、これらの変化を非破壊で捉える手法の1つに弾性波測定が挙げられる。そこで、地質環境の経時変化を高精度で把握でき、数百m以上の長距離測定が可能な弾性波測定システムの構築を目指し、超磁歪材震源を利用した高精度弾性波測定システムの開発を行った。また、当該システムの現場適用性や妥当性・有効性を検証する目的で日本原子力研究開発機構と共同研究を行い、瑞浪超深地層研究所の地下坑道内において実証試験を行った。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 高精度弾性波測定システムの概要
- § 3. 予備実験による超磁歪材発振子の特性評価
- § 4. 原位置計測による評価検証
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業において、可能な限り地質環境に擾乱を与えない非破壊で、地下深部に至る処分坑道の建設に伴う地下水圧等地質環境の変化の程度や範囲を把握する、あるいは操業時・閉鎖後に発生した巨大地震等の外力による数 km 規模の広さを有する地層処分システムへの影響を地上からのモニタリング技術で把握する技術は、事業の安全性評価、信頼性向上の観点から重要である。

そこで、地質環境の経時変化を高精度で把握でき、数百m以上の長距離測定が可能な弾性波測定システムとして、超磁歪材震源により比較的高周波の連続波形を断続的に発振し、計測・評価が可能な高精度弾性波測定システムを開発した。

開発したシステムは、日本原子力研究開発機構（以後、JAEAと称す）と共同研究契約を締結し、図一1に

示す岐阜県瑞浪市に位置するJAEAの瑞浪超深地層研究所の深度500m研究アクセス坑道において原位置計測を実施し、システムの妥当性・有効性等を検証した。



図一1 瑞浪超深地層研究所研究坑道レイアウト¹⁾

* 技術研究所
 ** 技術研究所土木技術グループ
 *** 技術研究所技術戦略グループ
 **** 日本原子力研究開発機構
 ***** (株)地層科学研究所
 ***** JFE シビル(株)

§ 2. 高精度弾性波測定システムの概要

開発した測定システムは、図-2に示すように、発振側の超磁歪材発振子と超磁歪用電源、受信側の加速度計とアンプ、そして波形発生機能付きの記録計(4ch)と波形データを収録・解析する装置(PC)から構成される。計測方法は、処理フローにあるように、波形発生機能付きの記録計から任意の波形を発生させると同時に記録(1chを使用)し、超磁歪用電源を介して超磁歪材素子が忠実に波形を再現・振動することで岩盤等へ発振・伝播させる。この波形を加速度計、アンプで受信し記録(3chを使用)することで、発振波形と受信波形の周波数、振幅、位相差等について比較分析評価が行われる。

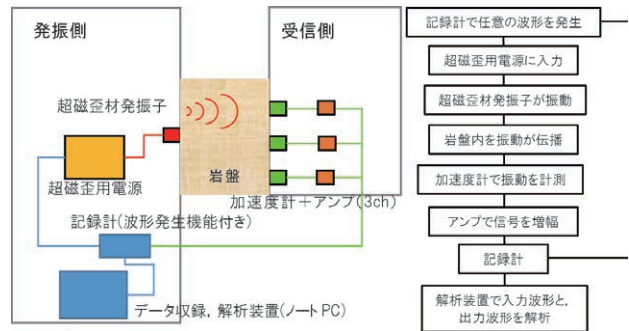


図-2 測定システムの概念図と処理フロー

§ 3. 予備実験による超磁歪材発振子の特性評価

本測定システムは、多くが市販品で構成されているが、写真-1および表-1に示す超磁歪材発振子のみ、注文作製したため、室内実験にて事前に特性評価を行った。



写真-1 超磁歪材発振子外観

3-1 超磁歪材とは

磁歪とは、磁性材料が外部からの磁界の影響で弾性変形する物理現象のことで、変形の大きさは一般的に数十ppmレベルのものを磁歪材と称す。それに対し、原理は同様だが、磁歪が約2,000ppmと従来と比べて約2桁大きい材料を超磁歪材と称しており、TerfenolD (Tb(テルビウム)-Dy(ディスプロシム)-Fe系合金)がそれに当たる²⁾。

特長としては、大きな弾性変位・力が得られ、応答速度が速く耐久性も高いが、過剰入力電流や連続使用に伴う温度上昇により、場合によってはコイルの損傷、磁歪効果を喪失する等のリスクが懸念されていた。

表-1 超磁歪材発振子の主な仕様

型番	湘南メタルテック社製特注品
超磁歪素子	TerfenolD 素子 φ10×25L×2 本
最大出力変位	±20 μm(印加電流±2A 時)
最大 Dynamic force	±780N
寸法	直径 56 mm×高さ 140 mm

3-2 超磁歪材発振子の性能確認試験

(1) 発振子のインピーダンスの把握

超磁歪材発振子は、内部素子に巻き付けたコイルに発振波形に相当する電流を入力することで励起される磁場により駆動するが、コイルを含む回路は発振周波数によりインピーダンスが変わる。特にインピーダンスが下がる周波数では大電流が流れるリスクがあるため、原位置計測で計画していた周波数帯域(1kHz~20kHz)にて超磁歪材発振子のインピーダンスの周波数特性を確認した。

その結果、図-3に示すように9kHzで特異点が認められたものの、計測に使用する上で特に大きな問題にならないものと評価した。

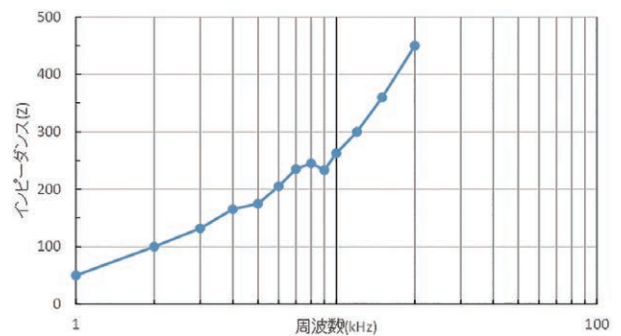


図-3 発振子のインピーダンスの周波数特性

(2) 発振子の発熱試験

超磁歪材発振子は、連続駆動を行うと発熱し内部が高温になるリスクがあるため、周波数を変えながら連続駆動し発振子の表面温度を計測した。なお、原位置計測で発振子に対し冷却水の使用など冷却手段が取れないことを想定し、発振子を紙の筒内に覆う気中で試験を行い、駆

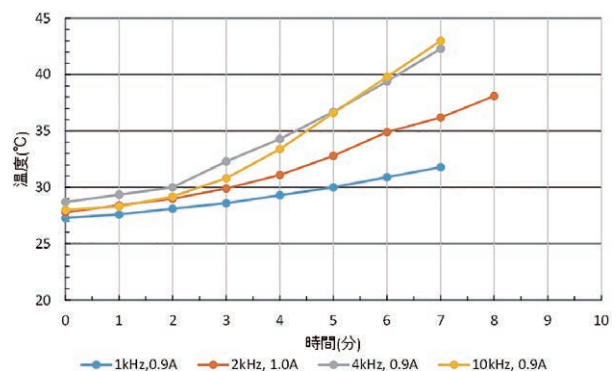


図-4 発振子の駆動時間と表面温度の関係

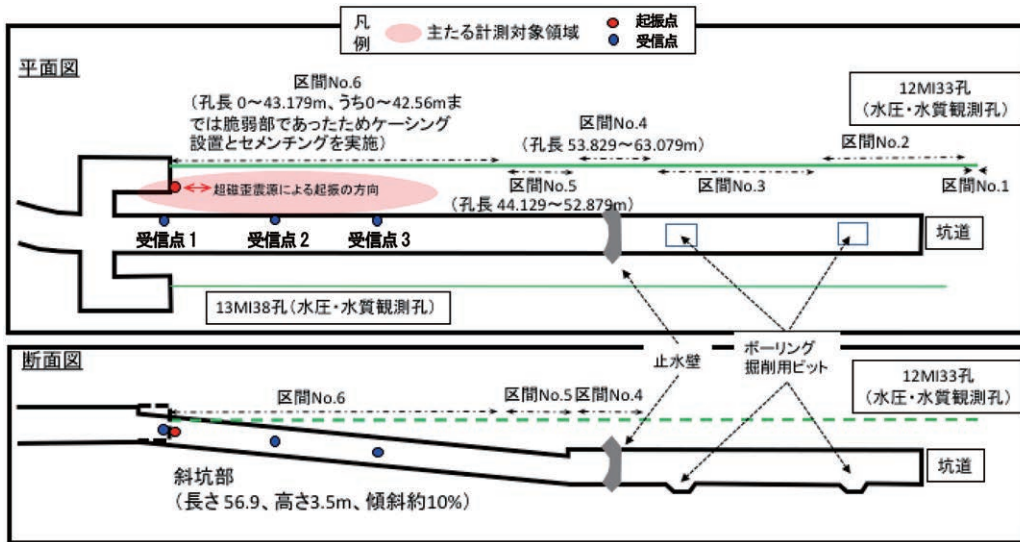


図-5 原位置計測レイアウト (冠水坑道)

動時間と発振子の表面温度の関係を確認した。

その結果、図-4 に示すように発振周波数 1 kHz から 2 kHz では温度上昇は緩やかであるが、4 kHz を越えると温度は急に上昇することがわかる。超磁歪材発振子が安全・確実に駆動する第一段階の閾値を仮に 40℃ と設定するならば、連続運転時間は 4 kHz 以上では 6 分以内、2 kHz では 9 分程度、1 kHz ではほとんど駆動時間を気にする必要が無いことがわかる。

上記の結果から、原位置計測に向けて超磁歪材発振子の表面あるいは内部温度が計測できるような改良と何らかの冷却手段の準備を検討することにした。

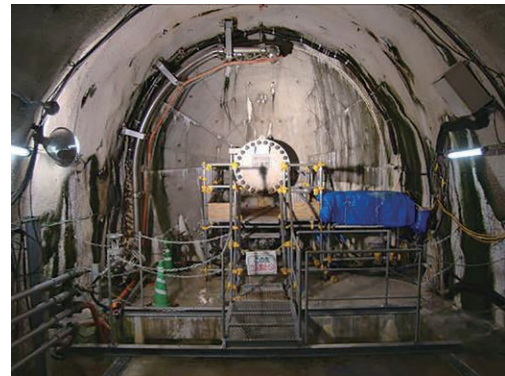


写真-2 冠水坑道止水壁

§4. 原位置計測による評価検証

共同研究を行った JAEA は、瑞浪超深地層研究所内外で地下空洞の坑壁地質観察や長期にわたる岩盤挙動に関する調査、水圧のモニタリング等を実施しており、新たに開発した手法の適用性評価に必要な地質環境のバックグラウンド情報やその経時変化に関するデータや知見を有している。

本共同研究に基づき、高精度弾性波測定システムの原位置計測を 2 回に分けて実施し、計測システムの妥当性・有効性を検証した。

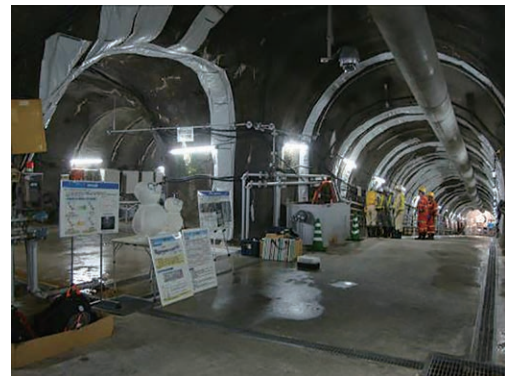


写真-3 深度 500 m 研究アクセス北坑道 (右側：冠水坑道，左側：57 m ボーリング西横坑)

4-1 再冠水試験による地下水流動場の変化の把握

(1) 原位置計測概要

図-1 に示す深度 500 m 冠水坑道において、JAEA で予め計画されていた再冠水試験³⁾に合わせ、1 回目の原位置計測を計画・実施した⁴⁾。図-5 に原位置計測レイアウトを、写真-2~6 に冠水坑道内での計測状況を示す。

再冠水試験では、図-5、写真-2 に示す止水壁より奥側の冠水坑道内に地下水を一旦貯留・冠水させ、それに伴う間隙水圧等周辺地質環境の回復状況を観測した。その後、地下水の全排水に伴う周辺岩盤中の水理場変化を

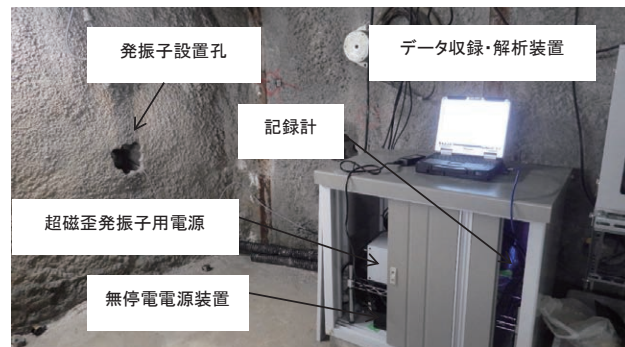


写真-4 57 m ボーリング西横坑内に設置した計測装置

把握するため、図一5に示す既設水圧観測孔（12 MI33）と斜坑間の区間（幅3m程度の着色部）のエリアを対象とした弾性波測定を行った。受信点は冠水坑道の側壁約35m範囲内に3ヵ所、発振点は冠水坑道に隣接する深度500m研究アクセス北坑道57mボーリング西横坑の切羽とし、いずれも吹付けコンクリートを除去後に岩着・設置した。また計測装置は発振点に隣接して配置した。

全排水に伴う変化は連続的かつ急激に生じると想定されたため、超磁歪材震源により正弦波の連続波を断続的に起震し、かつ狭い区間で有意な観測結果を得つつ近傍に設置された地震計への干渉を避けるため、発振周波数は比較的高周波数の10kHzとし、最大測線長を30m程度に設定した。なお、本計測は冠水坑道からの全排水開始直前に機器の設置・調整を終え、全排水完了後の約2ヶ月間実施した。

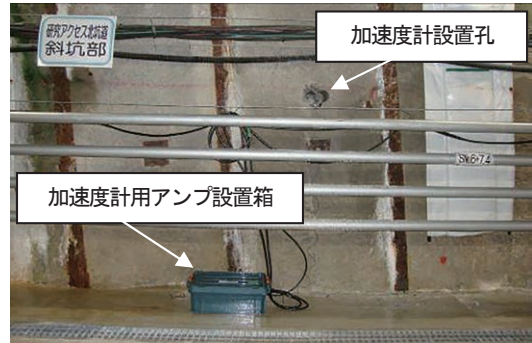
(2) 計測結果および考察

計測した波形データの例を図一6に示す。現場で発生するノイズ等により一収録時のスタッキング回数を増やすことはできなかったため、今回は試行錯誤的に200回のスタッキングを1サイクルとし、それを重ね合わせて処理することで20万回のスタッキング処理を施す処理を行った。これにより、起振している正弦波と対比可能なレベルの波形が得られかつ発振点から最も遠い受振点3で10kHzの周波数の卓越が確認できるレベルとなった。以降の処理では図一6に100kHzのローパスフィルターをかけている。なお、ハンマリングで計測した対象領域の弾性波速度は約5.8km/sであり、再冠水試験前の調査等で得られた健岩部の速度検層結果⁵⁾とほぼ同等であった。

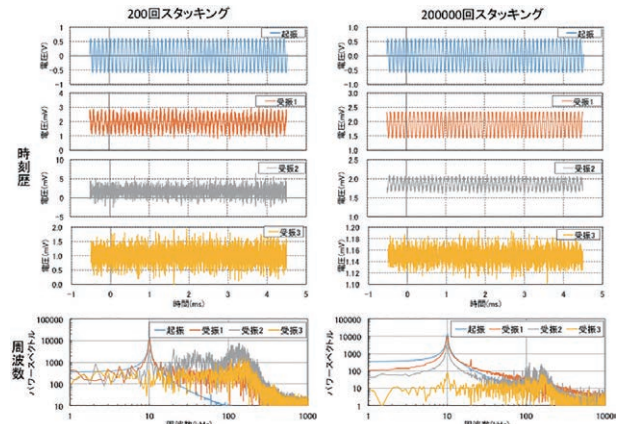
既往の同種の研究⁶⁾では、土岐花崗岩の含水率の高まった部分でP波速度が増大した可能性があること、結晶質岩を対象とした岩手県釜石鉱山での研究事例⁷⁾は、DTT (Differential Travel Time, 初動到達時間)も岩盤の飽和度変化に伴い変化する可能性があることが指摘されている。これらを踏まえ、今回の測定結果を初期からの弾性波の位相差変化として整理し、それと12 MI33孔の水圧観測データと比較したものが図一7である。区間6 (P6)は全排水後急激な水圧変動を示しているが、区間4,5 (P4, P5)は相対的に変化が小さく、数十mの間で水理地質構造的な違いがあることが想定される。一方、両者の水圧変動程度の違いはあるが、冠水坑道の全排水に伴う水圧変化と呼応する形で、受信点1と受信点3では初期からの位相差の変化はマイナス、つまりP波速度が相対的に速くなる一方、受信点2では、位相差の変化がプラスつまりP波速度が相対的に遅くなる結果が得られた。現場の状況変化とし、受信点2は機器設置時よりも地下水が多く流出している反面、受信点1は減少していることも観察されていることから、既往の研究同様、P波速度は岩盤中の飽和度変化と共に変化し、その結果、測定波形の位相差も相対的に変化していったと考えられる。



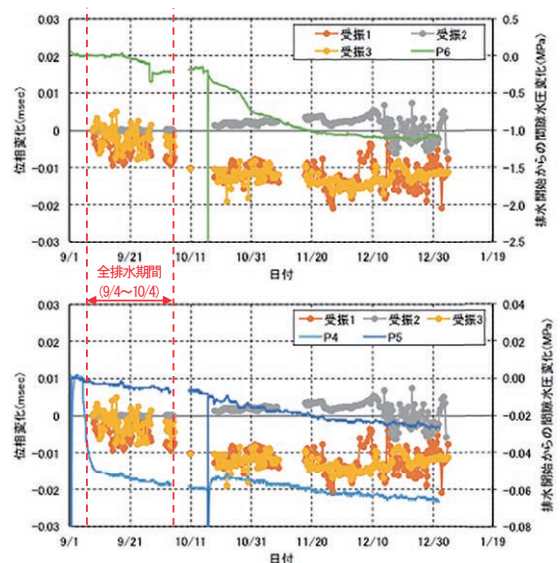
写真一5 岩盤に設置した超磁歪材発振子



写真一6 冠水坑道側壁に設置した受信点1



図一6 データ処理方法の違いによる計測波形・周波数



図一7 全排水に伴う位相から求めた速度変化と水圧変化

より詳細なデータ分析は必要であるが、このような地下水流動場の変化は、明らかに冠水坑道の全排水により生じたものであることから、高周波数の連続波で弾性波速度変化を計測することにより岩盤の力学的な性質の変化のみならず地下水流動場の変化も把握できる見通しが得られたと考えている。

4-2 地質脆弱部の存在の把握

2回目の原位置計測は、正弦波だけでなく疑似ランダム波⁸⁾の連続波を採用し、受信波形の振幅減衰から測線長を長くした際の計測システムの妥当性・有効性を検証するとともに、受信点区間毎の速度と振幅減衰量から地質脆弱部の存在把握が可能であるか検証した⁹⁾。

(1) 疑似ランダム波とは

疑似ランダム波は特定のデータ長を持つ連続波であり、この範囲ではランダムな性質を持つこと、相関関数の計算により正弦波の周波数に依存した波長のパルス波に復調できること、パルス圧縮と呼ばれる信号圧縮法によりパルス波に比べて送信信号全体のエネルギーを大きくできるといった特長を有す。

図-8に原位置で計測された疑似ランダム波の例を示す。図中(a)が発振波、(b)が受信波、(c)は発振波と受信波の相関関数計算後の波形であり、到達時間と受信振幅が読み取れる。

(2) 原位置計測概要

図-1に示す深度500m研究アクセス南坑道において、図-9に示すレイアウトで原位置計測を実施した。写真-7に示すアクセス南坑道の20mボーリング横坑に発振点を1ヵ所、受信点は写真-8、写真-9に示すアクセス南坑道西側壁部に5ヵ所(受信点①~⑤)と125m計測横坑の北側壁先端部に1ヵ所(受信点⑥)、計6ヶ所配置した。発振には発振器内部に熱電対を新たに組込む改良を行った超磁歪材震源を用い、写真-10に示すように水囊や扇風機で表面を冷却し長時間の連続使用にも耐えうる工夫、温度管理をしながら、図-2に示す処理フローにしたがい計測を行った。

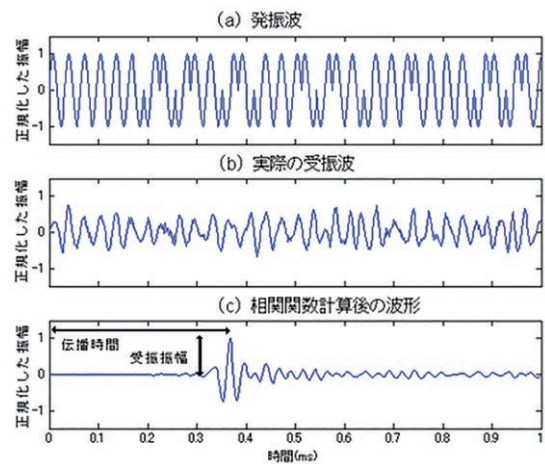


図-8 疑似ランダム波の計測・処理事例



写真-7 研究アクセス南坑道(左)と20mボーリング横坑(右)



写真-8 アクセス南坑道西側壁に設置した受信点②

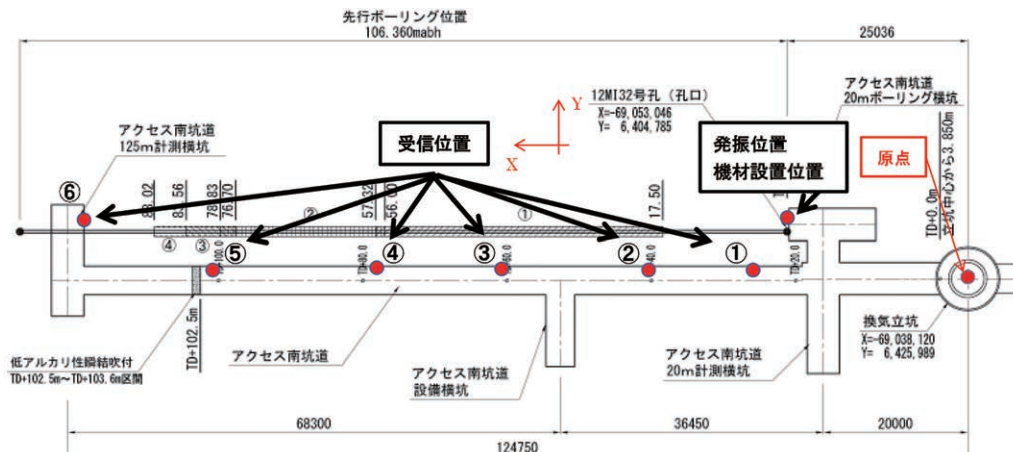


図-9 原位置計測レイアウト (研究アクセス南坑道)

なお、発振点と各受信点は、岩盤にアンカーボルトを打設後、ネジ締めで超磁歪材発振子および加速度計（写真一11 参照）を設置した。超磁歪材発振子については、写真一10 に示すように別途設けた2か所のアンカーボルトに支持を取り発振子背後から変動を拘束した。

(3) 計測結果および考察

図一10、図一11 に発振点・受信点間距離（測線長）と



写真一9 125 m 計測横坑北側壁に設置した受信点⑥

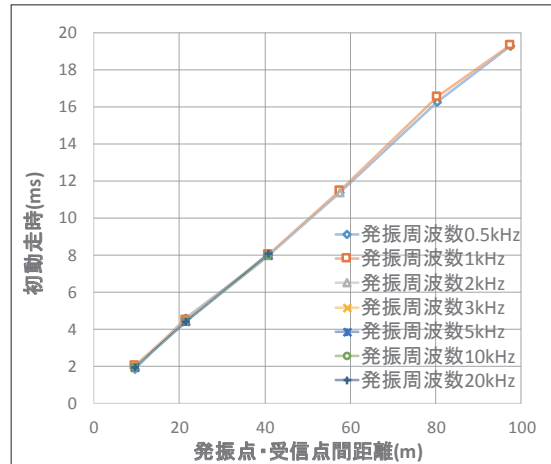


写真一10 岩盤に設置した超磁歪材発振子

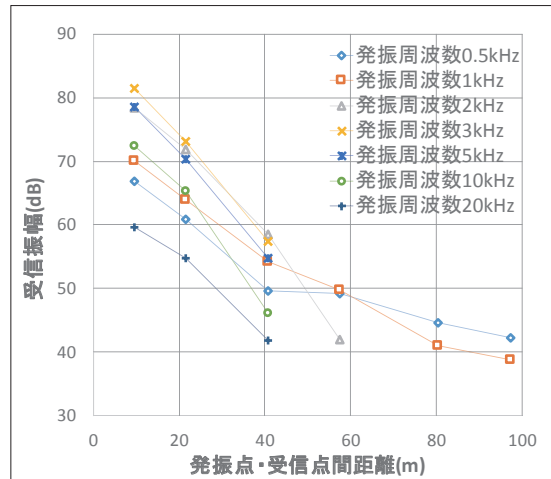


写真一11 ネジ締めで岩着した加速度計（受信点③）

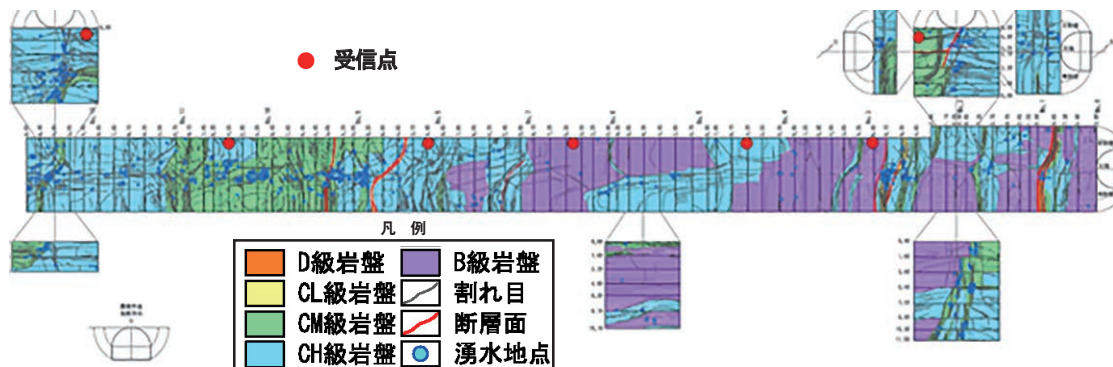
初動走時および受信振幅の関係を示す。発振周波数 0.5 kHz から 1 kHz までは最遠受信点⑥（測線長：97.5 m）まで到達波を確認できたが、高周波になると到達波が確認できなくなり、5 kHz 以上は受信点③までしか到達波を確認できなかった事がわかる。図一10、図一11 とも線形に凹凸が見られることから、本計測で得られた速度・振幅の変化と地質状況を比較するために、坑道掘削時に得られた図一12 に示す岩級分布図¹⁰⁾（受信点を赤丸で加筆）と発振周波数 1 kHz における受信点区間ごとの (a) 速度、(b) 振幅減衰量を図一13 に示す。なお、区間ごとの振幅減衰量とは、以下の式(1)に示すように受信振幅が



図一10 測線長と初動走時の関係



図一11 測線長と受信振幅の関係



図一12 岩級区分壁面展開図

ら距離の影響を除いた値である。

$$\text{振幅減衰量} = (S_1 - S_2) - 20 \log_{10}(d_2/d_1) \quad \text{式(1)}$$

ここで、 S_1, S_2, d_1, d_2 は受信点①, ②における受信振幅 (dB), 測線長 (m) を表す。

図-12, 図-13 の比較から、岩級区分が悪くなると速度が低下し振幅減衰量が大きくなる傾向が読み取れる。特に受信点④-⑤区間は CM 級の岩盤が出現し、この区間で速度が最小、振幅減衰量が最大となることから、速度と振幅減衰量を調べることで地質脆弱部が把握できる可能性が示された。

また、図-14 に示すように発振周波数 1 kHz 時の測線長 (D) と受信振幅 (SPL) の関係を基に当該現場のノイズレベルを 40 dB 程度と仮定し、測線長を 200 m, 500 m とした場合に必要な振幅増分を算出した結果、各々 58.4 dB, 195.2 dB となった。この増分を仮にスタック数で補うとした場合、図-15 に示す現場で得られた受信点⑤ (測線長: 80.4 m) のスタック数と SN 比の関係から、測線長 200 m で 3.9 万回 (測定時間: 66 時間), 500 m で 43.1 万回 (測定時間: 736 時間) 必要であることが分かった。

§5. まとめ

以下にまとめを示す。

- (1) 地下水流動場の変化や地質脆弱部の存在等、地質環境の(経時)変化を把握可能な高精度弾性波測定システムを開発した。
- (2) JAEA の超深地層研究所において 2 度の原位置計測を実施し、開発システムの妥当性・有効性を検証した。
- (3) 開発システムにより測定範囲が 100 m 程度であれば非破壊の物理探査手法として広く適用が可能である。
- (4) 開発目標としてきた 500 m を超える測線長に対しては発振エネルギー不足であり、超磁歪材素子、超磁歪用電源の増強等、対策が不可欠であることが分かった。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構東濃地科学センター HP(参照日: 2020.04.17): <https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu/topics/9.html>
- 2) 株式会社モリテックス HP (参照日: 2020.04.17): <https://www.moritex.co.jp/products/func/terfenol-d.php>
- 3) 西尾ら: 平成 29 年度東濃地科学センター地層科学研究情報・意見交換会資料集, pp. 3-4 & pp. 43-46, 2017.
- 4) 松井ら: 高精度弾性波測定システムを利用した地下水流動変化の原位置計測, 土木学会第 73 回年次学術講演会, CS7-024, pp. 47-48, 2018.
- 5) 露口ら: 深度 500 m 研究アクセス北坑道における

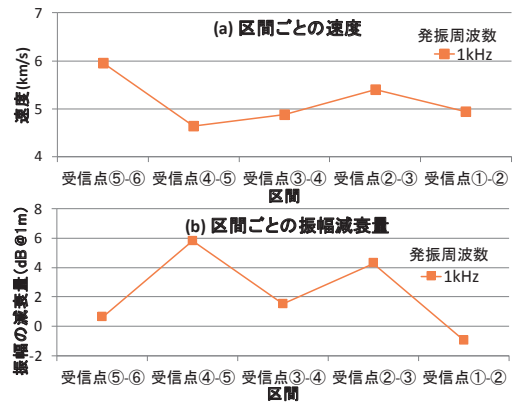


図-13 区間毎の速度と振幅減衰量

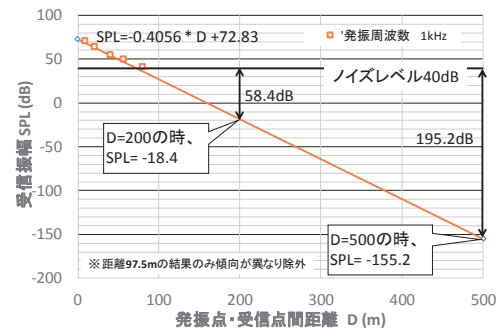


図-14 測線長 200 m, 500 m 時の推定受信振幅

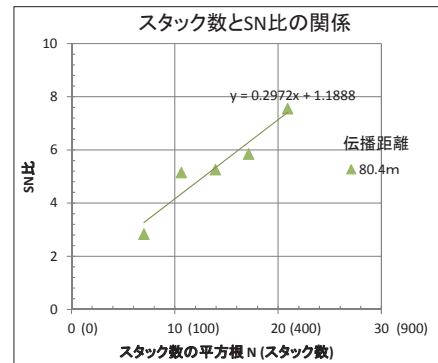


図-15 80.4 m の時のスタック数の効果 (発振周波数 1 kHz)

- 先行ボーリング調査報告書 (12 MI27 号孔, 12 MI33 号孔), JAEA Technology 2013-044, pp. 36-38, 2013.
- 6) 東濃地震科学研究所: 平成 28 年度 東濃地震科学研究所事業報告書, pp. 21-22, 2017.
- 7) 経済産業省資源エネルギー庁: 平成 26 年度地層処分技術調査等事業処分システム評価確認技術開発, pp. 4-34-4-39, 2015.
- 8) 榊原ら: 高周波数の弾性波を用いた高精度地盤調査手法の開発, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp. 97-106, 2009.
- 9) 石山ら: 疑似ランダム波を使った原位置計測による高精度弾性波測定システムの評価検証, 土木学会第 75 回年次学術講演会, 投稿中, 2020.
- 10) 川本ら: 超深地層研究所計画瑞浪超深地層研究所深度 500 m ステージの壁面地質調査データ集, JAEA-Data-Code 2014-014, p. 2&pp. 21-26, 2014.