

マルチ光計測プローブを用いた 幌延深地層研究センターの立坑掘削損傷評価

畑 浩二^{1*}・丹生屋 純夫²・青柳 和平³・藤田 朝雄³

¹株式会社大林組 技術研究所地盤技術研究部（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸四丁目640番地）

²株式会社大林組 原子力本部原子力環境技術部（〒108-8502 東京都港区二丁目15番2号）

³国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構（〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2）

*E-mail: hata.koji.ro@obayashi.co.jp

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターにおいて、深度350m以深の立坑掘削時から掘削後の維持管理段階で掘削損傷評価のための長期モニタリングを実施中である。計測ツールには、光式AEセンサ、光式間隙水圧センサおよび光式温度センサを1本のボーリング孔内に設置可能なマルチ光計測プローブを開発し利用した。AE、間隙水圧および温度を測定した結果、立坑壁面に近いほど変化は大きく、掘削の影響が明らかになった。また、AE震源位置標定解析結果から、立坑壁面1.5m未満までが掘削損傷領域と評価した。

Key Words : optical sensor, multi optical measurement probe, excavated damage zone

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における地下施設や、トンネル、地下発電所等に代表される岩盤内構造物周辺の掘削損傷領域を把握する手段として、アコースティック・エミッション（以下、AE）の計測が挙げられる。この方法は、応力再配分や外力変化に伴い生じる微小き裂を検知することに優れており、規模別頻度や位置標定およびメカニズム解析を駆使すれば、影響範囲や損傷度を評価することが可能になる^{1)~3)}。また、近年の地下インフラ構造物における維持管理においては、施工中から供用期間の長期にわたり変状やき裂などの損傷発生をモニタリングする必要がある、地盤や岩盤を対象にした場合、水分による絶縁抵抗の低下や可燃性ガスを伴う地質環境下における爆発などのリスクを回避することが求められる。そこで、著者らは従来の電気式計測系では対応困難な高含水地山や、可燃性ガスが停滞したり噴出する地山でも長期モニタリングが可能な光式AEセンサ⁴⁾を開発し、波方国家石油ガス備蓄基地における岩盤部分の健全性評価に活用している⁵⁾。

一方、高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、掘削損傷領域内部の透水性の増大した領域が、放射性核種の移行経路になり得ると想定される。したがって、地層処分の安全評価の観点から、坑道周辺の割れ目の進展

といった力学的な検討に加え、水理的な物性変化についても、長期的にモニタリングすることが重要となる。これらの検討の際には、計測による岩盤への力学的・水理学的な擾乱を避けるため、計測用のボーリング孔数をできる限り少なくさせる技術が求められる。

これらの背景を踏まえ、光ファイバー技術を利用したAE、間隙水圧、温度の3種類の計測を、1本の計測プローブで対応できる装置であるマルチ光計測プローブを開発して、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構と略す）の幌延深地層研究センターにおける立坑掘削時の掘削損傷領域モニタリングに供した。本報告では、開発したマルチ光計測プローブの仕様、幌延深地層研究センターの立坑において観察されたAE波動の特徴と分析方法について述べるとともに、立坑掘削中から掘削完了後の維持段階にわたる期間に観察されたAE発生頻度、AE震源分布、間隙水圧および温度の経時変化に基づき、立坑周辺に生じる損傷の広がりや水理環境の変化を述べる。

2. マルチ光計測プローブの特徴

(1) 光式センサの特徴

計測プローブに組み込む光式センサの仕様を表-1に示

す。光式AEセンサは「光のドップラー効果」を利用している。図-1に示すように、長さ65mの光ファイバーを楕円型の積層構造に固めた形状をしている。図中下部は、エポキシ樹脂製の拘束具であり、この面がAEの受波面となる。測定対象物に固定したセンサに伝播してきたAEが入波すると、センサ湾曲部の変位速度に比例して入光したレーザー光の周波数が変化する。この周波数変調を、光ヘテロダイン⁹⁾と称する周波数がわずかに異なる2つの波を重ね合わせる干渉法で検出する。

一方、光式間隙水圧センサと光式温度センサは、ファブリ・ペロー干渉方式⁷⁾である。この方式のセンサでは、光ファイバー内のセンサ感応部がキャビティー（空間）によって隔てられた2つの平行ミラーから構成される。圧力や温度が変化すると、このキャビティー長さが変化し、その結果ミラーで反射した光には周波数変調が生じる。これを干渉計で検知する。

(2) マルチ光計測プローブの構造と特徴

地下での岩盤挙動をモニタリングする場合、種々な計測センサをそれぞれ独立して設置することが多い。しかし、ボーリング孔数が多くなると、ボーリング孔同士の干渉や水みちの新たな形成によって真の岩盤挙動や地下水情報が得られにくい状況になることが想定される。したがって、エネルギー備蓄や放射性廃棄物地層処分などのモニタリングでは、可能な限りボーリング孔の数を少なくすることが肝要である。そこで、著者らは1台の計測プローブに、上述した光式 AE センサ、光式間隙水圧センサおよび光式温度センサを適切に配置するために、以下の工夫を施した。プローブの全景を図-2に示す。

a) 設置方式

岩盤の硬軟、含水比および地下水圧等によりグラウト埋設方式、加圧装置による押付け方式が選択可能である。

b) プローブ構造

φ86mm ボーリング孔に設置可能な仕様とした。ダブルパッカーにより区切られた空間で水圧や水温を計測する。また、パッカー内には貫通ラインやグラウトライン等を内蔵している。

c) 拡張性

図-2に示すプローブでは、3種類の光式センサを組み込んでいるが、さらに光式ひずみセンサ（計測ライン含む）を組み込むことが可能なように設計している。

3. 計測対象領域の岩盤特性

AE 計測では、計測対象物の弾性波伝播および減衰特性が大きく影響する。当該地点は、稚内層の珪質泥岩であり、花崗岩のような硬質岩に比べれば、AE の伝播距

表-1 各光式センサの仕様

	検出方式	仕様
AE センサ	光ドップラー方式	周波数帯域：10～200kHz ピーク感度：130dB±4dB 耐圧：5MPa
間隙水圧 センサ	ファブリ・ペロー方式	測定範囲：最大 7MPa 分解能：<1.4kPa
温度 センサ		測定範囲：-40℃～+85℃ 分解能：0.1℃ 耐圧：5MPa

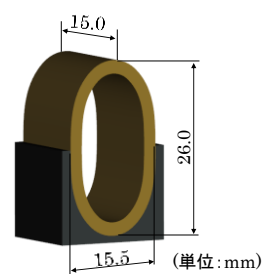


図-1 光式 AE センサの形状

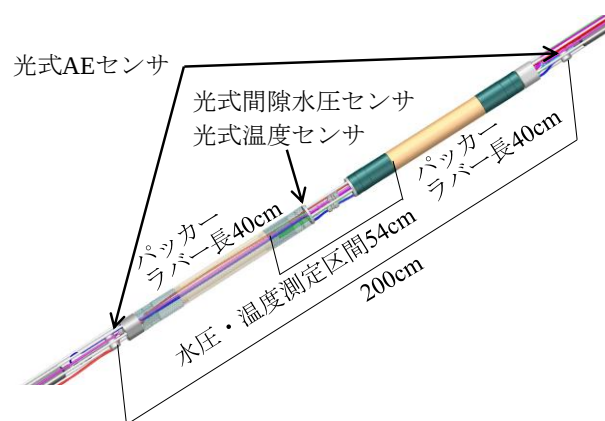


図-2 マルチ光計測プローブ

離は小さくなることが予想される。そこで、計測箇所近傍の既設水平坑道側面において、打撃点から離間 1m 毎に光式 AE センサと同程度の感度特性を有する 30kHz 共振型圧電式 AE センサ⁴⁾を設置し、ハンマー打撃による疑似 AE 波を用いて伝播特性および減衰特性を調べた。図-3 に測定結果の一例を示す。図中の矢印は、初動読み取り位置を示す。打撃点から離れる毎に、受振信号の最大振幅は漸次小さくなり、離間 5m に達すると当該地点の環境雑音 1.5mV に近接し、伝播 AE の初期初動が読み取りにくくなった。これらの結果を、伝播距離と最大振幅の関係で整理したものが図-4 である。打撃点からの離間によって、0.2 倍/m で疑似 AE 波は減衰することが明らかになり、当該岩盤では AE 発生源から離間 5m 程度までが AE 計測可能領域と考えられた。

一方、地上からのボーリング調査⁹⁾によると、最大主応力は 7.3MPa、最小主応力は 5.0MPa で、最大主応力はほぼ東西方向である。したがって、最小主応力方向にほ

ば合致する連絡坑道軸線方向に空洞掘削損傷領域（ゆるみ域）が卓越すると予想された。

4. マルチ光計測プローブの設置と計測システム

東立坑の壁面周辺の掘削損傷領域のモニタリングを目的に、図-5 に示すようにマルチ光計測プローブを連絡坑道底面直下に削孔した鉛直ボーリング孔内に埋設固定した。3つの鉛直ボーリング孔 S1, S2, S3 は一辺 2.6m の三角形の頂点に位置し、立坑に最も近接する S1 孔、S3 孔は掘削壁面から約 1.5m、最遠部の S2 孔は約 4m の離間とした。それぞれ、削孔径 86mm、削孔長さ 23m である。光式 AE センサは各ボーリング孔の上段（深度 368.5m）、中段（深度 370.0m）、下段（深度 372.0m）の3点に埋設し、通常の発生頻度による評価のほか3次元震源位置評定やメカニズム解析を行う。一方、光式間隙水圧センサと光式温度センサは S2, S3 孔の中段と下段の間に設置する。S1 孔は S3 孔と立坑壁面からの離間が同一なので間隙水圧と温度計測は省略した。光式 AE 計測 9 チャンネル、光式間隙水圧と温度計測はそれぞれ 2 チャンネル、合計 13 チャンネルの計測システムであり、ブロックダイアグラムを図-6 に示す。

5. AE計測データの弁別

計測開始直後から多数の AE を観測した。立坑掘削には機械掘削方式が採用されたこと、岩盤中からメタンガスの噴出が確認されていることから、掘削に伴う岩盤からの AE 以外に雑音が多く含まれると考えられる。計測結果を分析するためには、これら雑音を取り除かなければならない。

得られた AE 波形は、図-7 に示す 5 種類の形状に分類できた。著者らによる原位置 AE 計測の実績^{1)~3)}から、

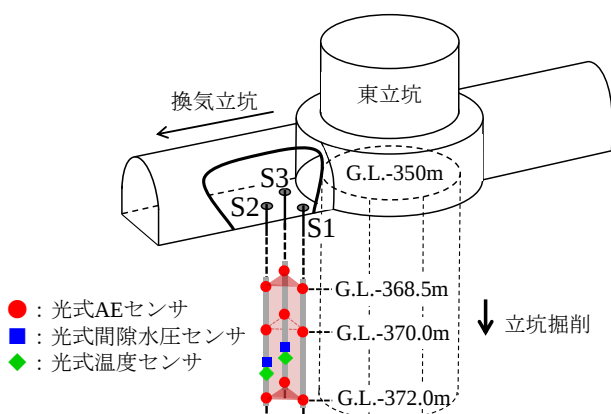


図-5 マルチ光計測プローブ設置位置

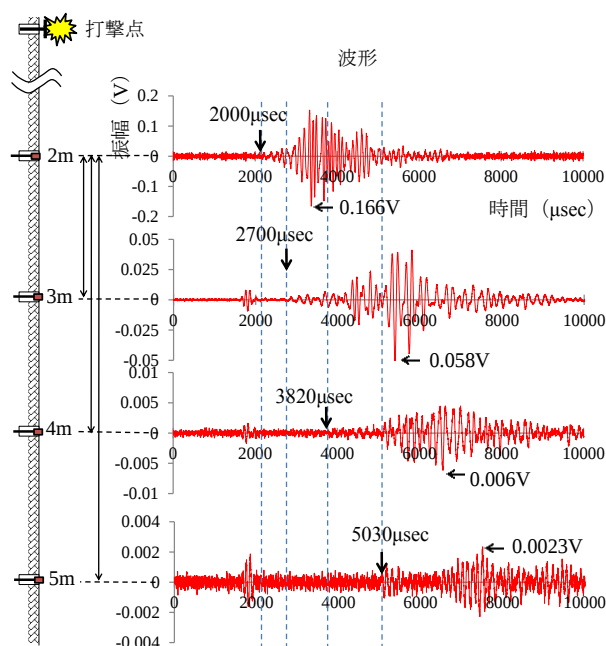


図-3 疑似 AE 波による伝播減衰試験結果

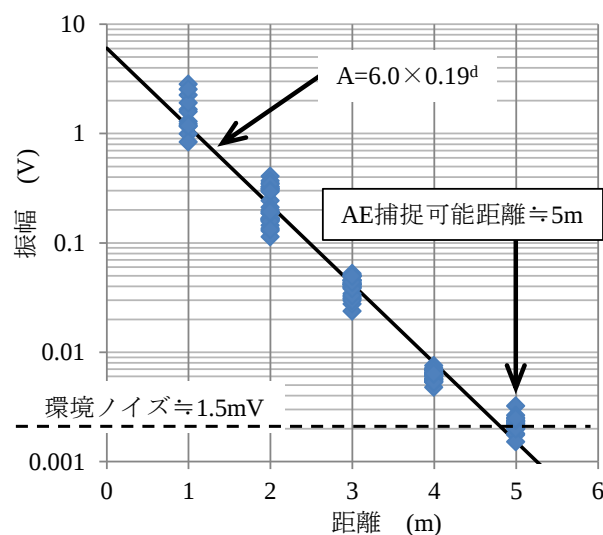


図-4 AE 検知限界

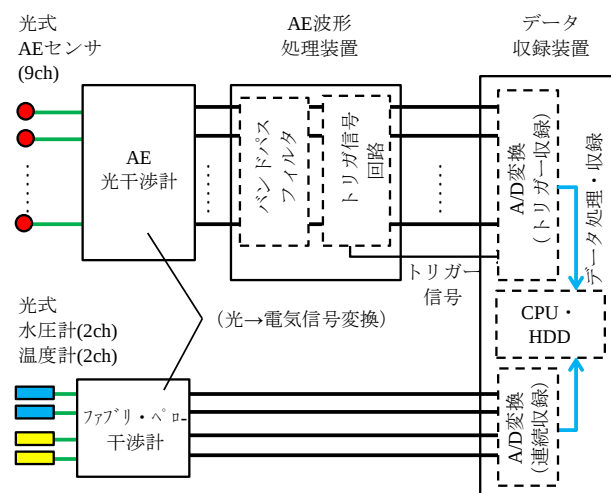


図-6 計測システムのブロックダイアグラム

①のような AE 波形は応力再配分に伴い岩盤から発生したものと判断できた。一方、②の重複波形は、施工サイクルから掘削機械による打撃や掘削作業によるものと判断できた。他方③～⑤は、現段階での原因特定は十分ではないが、メタンガス噴出と地下水流動によるものと考えられた。そこで、波形の特徴による分類を効率的に行うため、ピーク周波数、波形形状特性および共振特性の3つのパラメータに着目した。波形形状特性は波形持続時間を最大振幅で除した値、共振特性はスペクトルピークを最大振幅で除した値と定義した。上記①～⑤を適切に弁別するには、表-2 に示すようにピーク周波数 > 25kHz、波形形状特性（継続時間／最大振幅）< 0.5 および共振特性（スペクトルピーク／最大振幅）< 0.15 の条件が得られた。弁別の一例を図-8 に示す。上図の AE 信号波形は、ピーク周波数 52kHz、波形形状特性 0.12、共振特性 0.04 となり、岩盤から発生したものと弁別した。

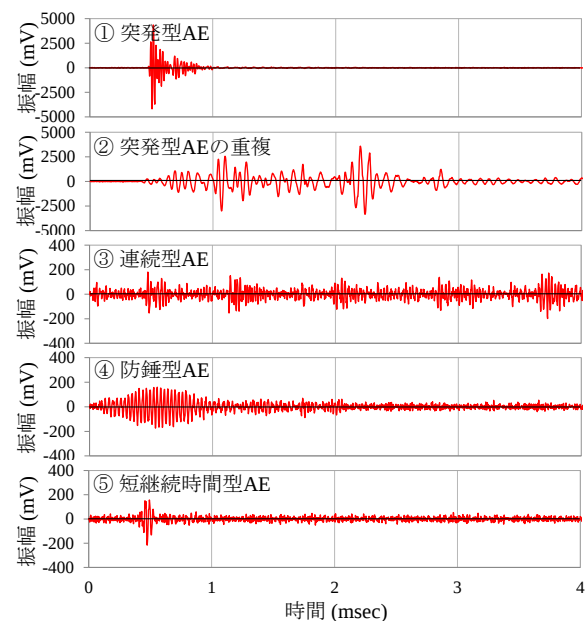


図-7 計測 AE 信号波のパターン分類

6. 計測結果および解析結果

マルチ光計測プローブを所定の深度に設置した後、東立坑の掘削を開始した。計測は、掘削開始直後から行い、掘削完了後の維持管理段階に引き継ぎ、現在も継続中である。計測結果の内、AE、間隙水圧および温度を時系列でまとめたものが図-9 である。上位 3 つの図は、AE 発生数の時間推移、最下図には間隙水圧と温度の時間推移を示す。また、掘削進行状況を併記した。

(1) 立坑掘削時における計測結果

深度 350m から 380m の立坑掘削中に、約 2,700 万の AE を記録したが、5 章に示した自動弁別により①の分類となる約 14 万波形の AE を得た。計測結果を図-9 の立坑掘削中範囲に示す。

AE 計測では、立坑に近接した S1 孔で掘削に伴い上段から下段方向に向かって AE 発生数は推移する傾向を得た。立坑壁面からの距離が S1 孔と同距離にある S3 孔でも、S1 孔に比べて AE 発生数は少ないものの上段から下段に推移しており類似の発生傾向を得た。したがって、立坑掘削進行に伴い AE 発生源が上段から下段に推移することが明らかになった。一方、S2 孔では、これらに比べて発生数は少なく明確な推移傾向は得られなかった。これは、岩盤中の弾性波伝播の減衰影響により、大振幅 AE のみの受振となり、推移傾向が明瞭にならなかったためと推定される。

間隙水圧計測では、S3 孔で 4 回急増する現象を確認した。これは、AE 発生数の急増直後に生じたことから、局所的な応力集中と緩和により微小き裂が発生・進展・閉塞し、その結果として間隙水圧変化が生じたものと考えられる。

表-2 AE 信号波の弁別条件

波形形状	ピーク周波数 >25kHz	波形形状特性 <0.5	共振特性 <0.15
①	○	○	○
②	×	×	○
③	○	×	○
④	○	×	×
⑤	○	×	○

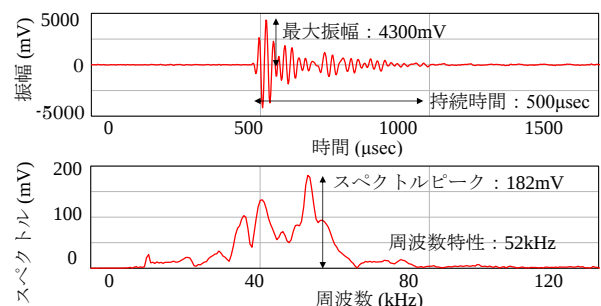


図-8 岩盤からの AE と認識された一例

えられる。

温度計測に関しては、S3 孔で 1.35℃上昇する変化が認められたが、S2 孔では 0.18℃とほとんど変化が無かった。立坑掘削により空気温度の変化が岩盤に伝播し近接部で影響が生じたものと考えられる。

(2) 立坑掘削後における計測結果

計測結果を、図-9 の立坑掘削後範囲に示す。AE 計測では、立坑に近接した S1 孔および S3 孔では、上段と中段ではほとんど AE を検知していない。立坑掘削後の時間経過の中で空洞周辺地山は安定域に達しており、外力変化に伴う微小変化は生じていないものと推察される。

一方、下段部では、散発的ではあるが AE の発生が検知されている。しかし、時間の経過に伴い発生頻度は低下し、S1 孔で 6 ヶ月、S3 孔で 3 ヶ月を過ぎる頃には AE はほとんど発生しなくなった。これは、上段、中段では立坑周辺は円形状の地山形状であり応力再配分が滑らかに推移し完了しているものと考えられるが、下段部では掘削底盤が近接にあることから、隅角部でわずかに残っている局所的な応力集中や応力緩和の影響により、掘削後も AE が検知されたものと推察される。最遠部の S2 孔では、掘削時と同様に AE は散発的であり、空洞掘削の影響は及んでいないものと推察される。

間隙水圧計測では、立坑最近接の S3 孔で漸次低下し 0.06MPa まで低下した。このことから立坑壁面周辺の微小割れ目の発生進展により、地下水は低下した可能性が大きい。一方、最遠部の S2 孔では若干の上下動は有るものの、地下水位は当初設置時の 1.17MPa 前後で一定に保たれていると考えられる。

温度計測に関しては、S2 孔 S3 孔共に漸次低下し続ける傾向を得たが、特に立坑に近接した S3 孔の低下度合いは非常に大きく、7.0℃にも達した。一方 S2 孔においても 2.7℃とその差は大きかった。これは、季節変動により坑内換気温度が低下することで地山と地下水温度が

低下したものと推察される。

(3) AE 震源位置評定解析結果

震源位置評定可能な AE 信号波を、掘削期間中に 37 組、掘削終了後に 16 組取得した。これらのデータを用い、震源位置を推定した結果を図-10 に示す。掘削中は、赤点線で囲った立坑壁面から離間 1.5m 程度に AE 震源が集中する傾向を得た。一方、掘削完了後は、青点線で囲った 1.5m の外側領域に分散し発生する傾向となった。AE 発生数と同様、掘削進展に伴って AE 震源が下方へ移動していく傾向を得た。

7. おわりに

1 本のボーリング孔内で AE、間隙水圧、温度を連続計測できるマルチ光計測プローブを開発し、原子力機構の幌延深地層研究センターで立坑掘削に伴う周辺岩盤の長期モニタリングに適用を開始した。立坑掘削から掘削後の維持管理段階において計測した結果、記録された AE には機械掘削および水流やガス泡に起因する雑音が多く含まれることがわかり、周波数や波形形状を基に弁

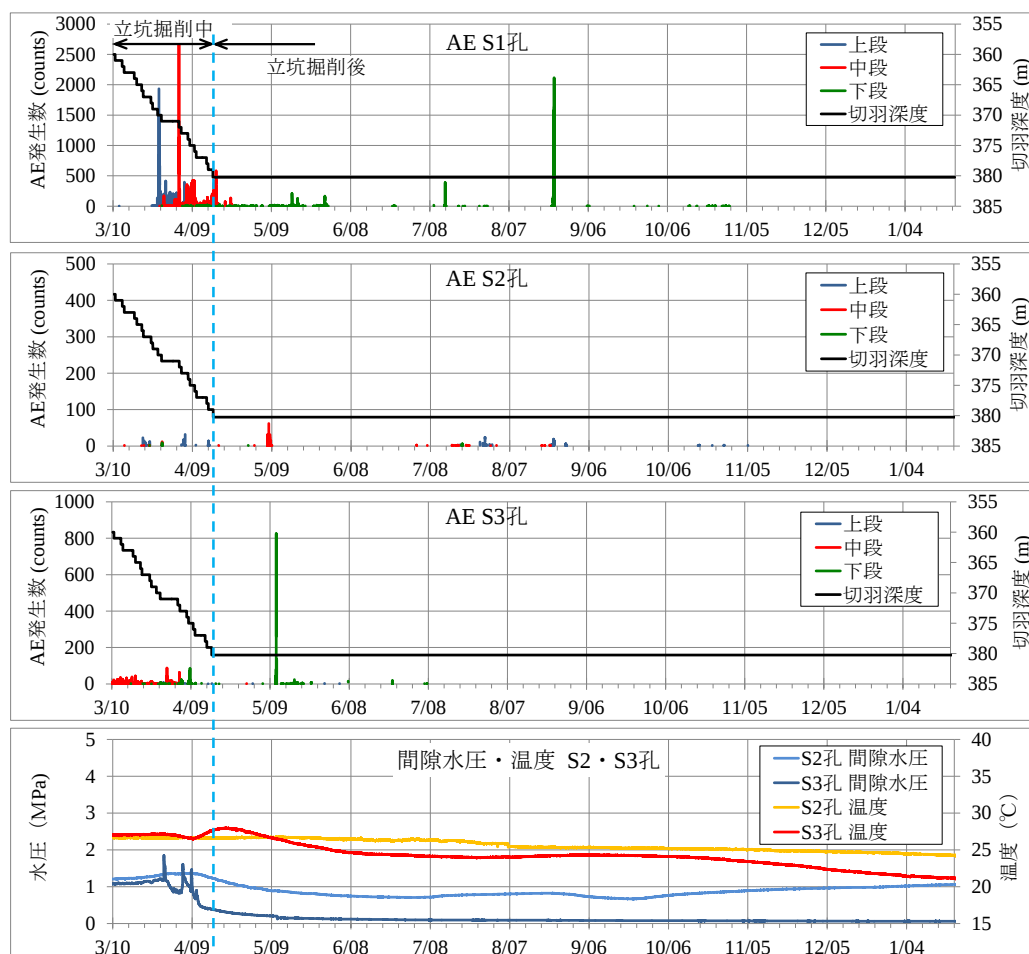


図-9 AE、間隙水圧、温度計測結果

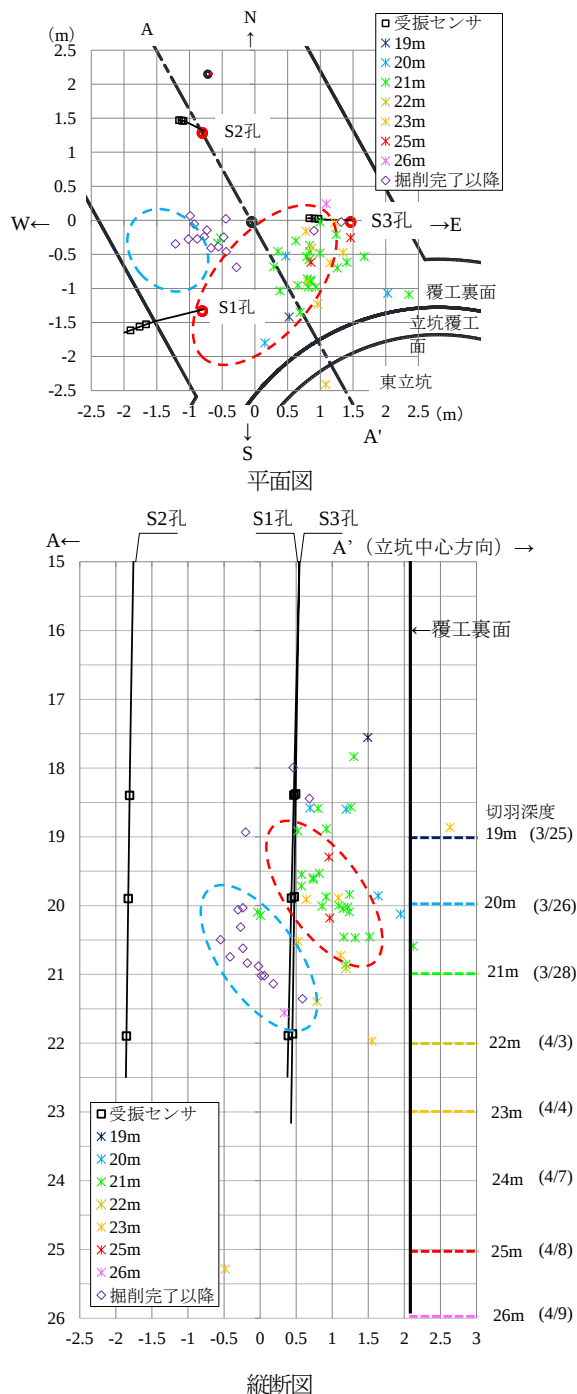


図-10 AE震源位置標定解析結果

別を行った。その結果、立坑壁面からの距離によってAE、間隙水圧および温度変化に違いがあり、立坑壁面に近いほど変化は大きく、掘削の影響が明らかになった。また、AEの震源位置標定解析を実施した結果、立坑掘削時には壁面から1.5m未満にAE発生が集中したことから、掘削損傷領域を評価できた。今後は、AE震源の規模ならびにき裂進展メカニズムを考慮し、より詳細に立坑掘削損傷領域の評価を行う予定である。

謝辞：本計測に関して、(株)レーザックの藤井宏和氏にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 畑 浩二, 吉岡尚也, 木梨秀雄：原位置 AE 計測に基づいた岩盤ゆるみ域の評価, 材料, 第 47 巻, 第 5 号, pp.489～494, 1998
- 2) 畑 浩二, 松井裕哉, 木山英郎, 木梨秀雄：AE 法を利用した地下空洞掘削影響領域評価に関する研究, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp.251～262, 2002
- 3) 畑 浩二, 宮崎裕光, 小笠原光雅, 前島俊雄, 青木謙治：AE 法を用いた波方 LPG 岩盤貯槽掘削におけるゆるみ域評価, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.139～144, 2010
- 4) 畑 浩二, 宮崎裕光, 田仲正弘, 藤井宏和, 斉藤義弘, 布谷勝彦：光ファイバーを利用した原位置 AE センサの開発, 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.109-114, 2011
- 5) 畑 浩二, 二島 建, 大久保秀一：光式 AE センサによる波方国家石油ガス備蓄基地での岩盤健全性評価, 第 68 回土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-191, pp.381～382, 2013
- 6) 藤井陽一：光ヘテロダイン検出方法, 生産研究, 33 巻 4 号, pp.1-4, 1981
- 7) 鈴木達朗：応用工学 I, 朝倉書店, pp.83-86, 1982.
- 8) 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱 克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗：幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階) 研究成果報告書分冊「深地層の科学的研究」, JAEA-Research 2007-044 2007

EVALUATION OF EDZ(EXCAVATED DAMAGE ZOON) BY MULTI-OPTICAL MEASUREMENT PROBE IN HORONOB UNDERGROUND RESEARCH CENTER

Koji HATA, Sumio NYUNOYA, Kazuhei AOYAGI and Tomoo FUJITA

Long-term monitoring and EDZ (Excavated damage zoon) evaluation is carried out by this multi-optical measurement probe in the depth of 350m vertical shaft of Horonobe Underground Research Center project of the Japan Atomic Energy Agency. We have developed a multi-optical measurement probe incorporating an optical AE sensor, an optical water pressure sensor and an optical temperature sensor. Result of the measurement of AE, water pressure and temperature, it was made clear the influence of the shaft excavation. And from the source location analysis, it was found EDZ was less than 1.5m from shaft wall.