

光式AEを利用した地下空洞における長期モニタリング技術の開発と適用

畑 浩 二

Development and Application of Long-Term Monitoring Using Optical Acoustic Emission Technology for Underground Cavern

Koji Hata

Abstract

Acoustic emission (AE) technology is used to observe micro-fracture phenomena. An optical AE sensor with a long-lifetime was developed, along with a multi-optical measurement probe incorporating an optical AE sensor, an optical water pressure sensor, and an optical temperature sensor. Long-term monitoring and excavated damage zoon (EDZ) evaluation were carried out using this probe to a depth of 350m in a vertical shaft of the Horonobe Underground Research Center project of the Japan Atomic Energy Agency. The following conclusions were drawn. (1) The AE occurrence distribution changed with the shaft excavation. (2) A local pressure fluctuation occurred in the vicinity of the shaft. (3) The changes in the groundwater temperature were small, and depended on the area around the shaft.

概 要

岩石や岩盤、コンクリートをはじめとする固体材料の破壊現象を観察する方法としてアコースティック・エミッション (AE) 技術がある。この技術に光センシング技術を応用し、長寿命で防爆構造を兼ね備えた光式AEセンサを開発した。感度特性および周波数特性ともに、従来のピエゾ式AEセンサより高性能である。この光式AEセンサに、光式間隙水圧センサと温度センサを組み合わせたマルチ光計測プローブを用いて、日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターで立坑掘削時の掘削影響評価と長期安定性評価に適用を開始し、以下を確認した。(1)立坑掘削に伴いAE発生分布が移動する。(2)立坑近傍で局所的な水圧変動が生じた。(3)立坑から離れるほど地下水温度の変化が少ない。

1. はじめに

インフラにおける防災・減災を考える場合、何らかのモニタリングを活用することで、経年変化に伴う現況の把握が容易になる。通常、モニタリングでは、ひずみや荷重を対象にした計測が行われているが、いずれも局所的であり損傷の全容を評価するには多数の測点が必要になる。一方、固体材料が変形、および微視的・巨視的破壊に至る際に弾性エネルギーを放出する現象としてアコースティック・エミッション¹⁾ (Acoustic Emission, 以下AEと略す) が知られている。この現象を防災・減災モニタリングに利用すれば、損傷の度合いや広がりを2次元もしくは3次元的に評価することが可能になる。したがって、AEを活用する意義は高いと考えられる。

一方、計測システムを選定する場合、対象物の環境条件やモニタリング期間を考慮しなければならない。トンネルや地下構造物では高湿度や可燃性ガス噴出などの特殊条件となる場合が少なくない。また、近年では数十年もの長期間に渡るモニタリング要請があり、従来方法での対応は難しい。そこで、非電気式の光計測技術に注目が集まり、OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) やFBG (Fiber Bragg Grating)²⁾が開発され、ひずみや温度計測に適用されている。光計測の利点は、使用するセン

サや計測ケーブルに電気が流れないため、絶縁抵抗の低下に繋がる計測不良は皆無であること。また、防爆構造であり可燃性ガス環境下でも特別な措置を講ずることなく計測可能であること。また、雷などによる電磁ノイズの影響を受けないことである。

本報では、光計測の特徴を勘案し原位置で適用可能な光式AEセンサの開発と、実構造物への適用事例を示す。

2. 光式AEの原理 (光ドップラー効果)

近年、変位やひずみ、温度計測に光ファイバーセンサが注目されることが多くなってきた。従来型の各種センサに比較して、利点は以下の通りである。

- ① 長距離、広範囲な分布計測が可能である。
- ② センサへの電源供給が不要である。
- ③ 雷、高圧線などの誘導による電磁ノイズの影響を受けない。
- ④ 高絶縁性、耐腐食性、長寿命、軽量に優れる。

特に、②と④の長所は、他の電気式計測ツールには無い利点である。

従来の光ファイバーセンサは、主に分布型と多点型に分類される。分布型は、通信用光ファイバーの保守技術を応用したもので、ブリルアン散乱光などの後方散乱光

を利用してひずみや温度の変化している箇所を見つけるもので、ファイバー全体がセンサとなる特徴を有する。多点型は、測定箇所のコア部に予めグレーティングと称する回折格子を作成し、反射光の波長変化からひずみや温度を計測するもので、計測を多点に設定することが可能である。

一方、光式AEセンサは「光のドップラー効果」に着目した全く新しい計測方法である。ドップラー効果は、音源と観測者の相対運動が原因となり、音源の周波数が異なって観測される現象であると広く知られている。例えば、音源が観測者に近づけば周波数は高くなり、逆に遠ざかると周波数は低くなる。影山ら³⁾は、測定対象物に固定した湾曲形状の光ファイバーが振動した際、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現象、すなわち導波路を伝播する光にもドップラー効果が存在することを発見し、光ファイバーを音響センサに活用できる事を示唆した。光式AEセンサでは、対象物から発せられる振動エネルギーの検出を行う。計測対象物が振動すると、Fig. 1に示した固着センサ部(図中、赤点線枠内)に振動が伝わり、その振動に合わせてセンサ部が微小に伸び縮みする。その時、光ファイバーの一端から周波数 f_0 の波を入力すると、センサ部経路長の伸縮により伝播する光波の波長が変化することになる。すなわち、光の伝播速度は一定であるから周波数が f_d だけ変化することになり、他端から出力される光波の周波数は $f_0 \pm f_d$ となる。これは、我々が日常的に経験している音源の移動によって聞こえる周波数が変化する現象であるドップラー効果が光にも当てはまることを示す。この周波数変調量 f_d は、光ファイバーの伸縮、すなわち計測対象物の変位量の変位(ひずみ)速度に比例することから、 f_d を検知することができれば、計測対象物の振動を捉えることができることになる。

したがって、光ファイバーが伸縮する際に、ファイバー内のドップラー効果により生じる周波数変調は(1)式で示される。

$$f_d = -\frac{1}{\lambda} \frac{dL}{dt} \quad (1)$$

- f_d : センサ部で生じる周波数変調
- λ : 光波の波長
- dL/dt : 光ファイバーの変位速度
- 負号 : 変位速度の増大により光の周波数が低下することを意味

(1)式に示すように、周波数変調 f_d と変位速度 dL/dt は比例関係となる。この周波数変調 f_d は光ヘテロダイン干渉法⁴⁾を用いて検出でき、周波数/電圧変換器(FV変換器)によって電圧 V に変換される。周波数がわずかに異なる2つの波を重ね合わせることで、それぞれの波の山と谷が干渉しあい新たな合成波形が作り出され「光ビート」と称される「うなり」が生じることになる。このうなりか

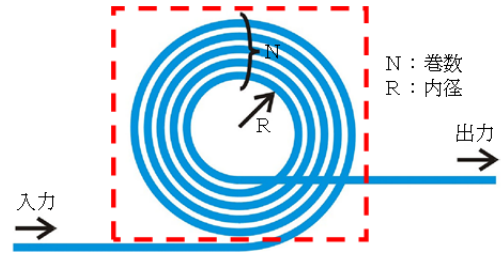


Fig. 1 光式AEセンサ部(赤点線枠内)
Fiber Optical AE Sensor (in Red Spot Line Frame)

ら光の振幅や位相などの情報を高精度に取り出す技術が、光ヘテロダイン干渉法である。

変換された電圧 V と変位速度 dL/dt の関係は、 $K (= -k/\lambda)$ を比例定数とすると(2)式ようになる。したがって、光式AEセンサは検知した変位速度を電圧で出力するセンサであり、変位速度が大きくなると電圧出力が大きくなるという特性を持つ。

$$V = kf_d = -\frac{k}{\lambda} \frac{dL}{dt} = K \frac{dL}{dt} \quad (2)$$

3. 光式AEセンサの開発

影山ら³⁾は外径15mm、内径10mm、巻数 $N=10$ の第一世代の光式AEセンサを試作し、接着鋼板の引張り試験に適用した結果、AEセンサとしての適用可能性を明らかにした。その後、藤井ら⁵⁾は感度向上を目指し、外径30mm、厚さ2mmの円筒積層型に改良した第二世代の光式AEセンサを開発し、従来のピエゾ式AEセンサと同程度の卓越周波数150kHzを満足する性能を実現した。

著者は、光式AEセンサを原位置で利用することを想定している。この場合、卓越周波数が150kHzと高いと、監視領域が広くとれずセンサを密に配置しなければならずコスト増になり不都合である。そこで、著者がこれまで地下空洞を対象にしたAE計測の実績^{6), 7), 8)}を勘案し、測定対象周波数を20~90kHz(ピーク周波数を30kHz)程度となるような光式AEセンサを開発することとした。この程度の周波数であれば、岩質によって異なるものの概ね5~10m程度の領域を監視することが可能であると経験的に理解している。

(2)式に示すように、光式AEセンサはセンサ部の長さ L が長くなればなるほど出力電圧 V が高くなる特性がある。出力電圧が高くなるということは、感度が高くなることを表している。そこで、上記した第二世代の円筒積層型光式AEセンサを基に、周波数応答解析を用いてセンサ形状の最適化を検討し、試作品による感度および性能試験を実施した。

3.1 周波数応答解析によるセンサ形状の最適化

センサは、その形状に合わせて固有的な振動を呈する。光ファイバーはフレキシブルであるため、任意形状の製

作が可能であり振動特性をかなり可変に選定することが可能である。ただし、光ファイバーの曲げ限界などの制約から、第二世代の円筒積層型光式AEセンサ形状を元に、製作可能であることを条件にFig. 2に示した6つの形状を選定した⁹⁾。

まず、これらの形状で固有値解析を行い、0~100kHzの範囲における固有振動の確認を行う。この解析により、低周波成分の固有値を有するか否かを判断できる。次いで、周波数応答解析により振動を与えた際の固有周波数（共振点）の変化を確認し、目的のピーク周波数30kHz近傍を確保できているか否かの評価を行う。光式AEセンサの受波面は金属管内に固定設置することから完全拘束（接着剤等で固定することを想定）した受波面を加振点とする。モデルの挙動はひずみ速度で評価する。なお、周波数応答解析では、センサ形状による振動特性を評価することは可能であるが、統一的に出力感度を評価することはできないため、次節の感度試験で確認することになる。

各種形状における周波数応答解析結果の一例をFig. 3に示す。それぞれの形状の内、円筒形と円錐台形①、②はいずれも50kHz以上の高い周波数領域でピークがあるため、原位置での使用には適さないと考えられる。残りの楕円形横置き、楕円形縦置きおよび円筒形縦置きは、いずれも30kHz以下の低周波領域でピークが得られることから、原位置計測には適する結果となった。特に、楕円形縦置きと円筒形縦置きモデルは、同様に10kHzでピークが来ると同時に、それより高い周波数領域の複数箇所でもピークが来る特異な周波数応答特性を得た。一例として、楕円形縦置きにおいて生じた4つのピーク時のセンサ変形モードをFig. 4に示す。この複数あるピークに関しては、変形モードを解析した結果から、不必要な変形モードを低減するような拘束具を取り付ける工夫を施すことでピーク周波数の制御が可能であることが明らかになった。そこで、これら3形状の内、測定対象周波数に最も合致し、ピーク特性を数多く有する楕円形縦置き形状が、原位置計測を行う上で最も可変性が高くかつ適用性能が高いと考えられた。したがって、楕円形縦置き形状を最適と判断した。

以上、解析による最適形状の検討を基に、Fig. 5に示す原位置専用の光式AEセンサを試作した。センサ下部にはピーク周波数を制御するエポキシ樹脂製の拘束具を取り付けており、この面がAEの受波面となる。拘束具形状は、30kHz程度の低周波数領域でピーク特性が生じるよう選定したものである。光式AEセンサ本体の仕様は、ファイバー長さ65m、長径26.0mm、短径15.5mm、厚さ15.0mmからなる楕円積層型である。

3.2 感度試験

数値解析の検討では、低周波数帯域でピーク周波数を有する形状になったが、受波面へ取り付けられた拘束具の効

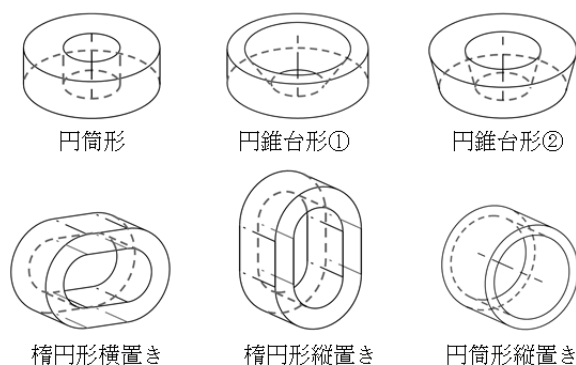


Fig. 2 形状検討モデル
Shape Study Model

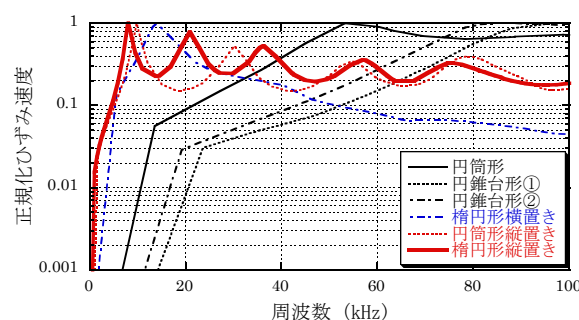


Fig. 3 周波数応答解析結果
Example of Frequency Analysis Result

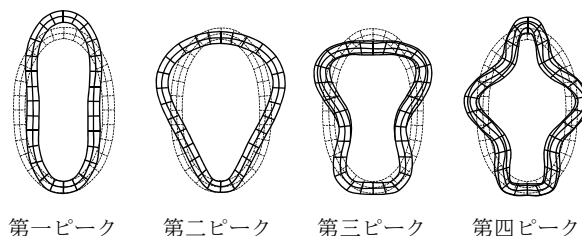


Fig. 4 周波数ピークの変形モード
Example of Transformation Mode Analysis Result

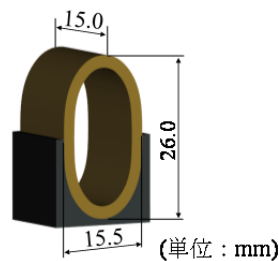


Fig. 5 光式AEセンサ形状
Optical AE Sensor

果や実際の感度特性を数値解析で完全に確認する事は難しい。そこで、下記に示す感度試験とコンクリート供試体を利用した性能試験による検証を行った⁹⁾。

まず、試作センサの実質周波数特性をface to face試験法（接触法）で確かめた。計測装置のブロックダイアグラムをFig. 6に示す。発振センサと受振センサ（試作センサ）を直接接合させ、入力に対するセンサの出力感度を調べるものである。発振には、原位置AE計測で実績のある30kHz共振型ピエゾ式AEセンサを用い、振幅一定の連続正弦波をファンクションジェネレータで作成して発振した。また、比較のため、30kHz共振型ピエゾ式AEセンサも感度試験に併用した。

測定結果をFig. 7に示す。図中、赤点線で円筒形縦置き（外径19.2mm、内径8mm、厚み6mm）、赤太実線で楕円形縦置きの光式AEセンサの感度特性結果を、黒点線で30kHz共振型ピエゾ式AEセンサの感度特性結果をそれぞれ示す。その結果、楕円形の方が円筒形より50kHz以下の感度特性に優れること、ピエゾ式AEセンサと比較しても楕円形光式AEセンサは感度特性に遜色が無いばかりか、50～80kHzの周波数帯域においてはむしろ感度が高い特性が明らかになった。

以上の結果から、楕円形光式AEセンサは従来のピエゾ式AEセンサと比べ同等以上の性能を発揮できるものと考えられる。

3.3 性能試験

前節の感度試験では、人工的に作った信号波による感度特性の把握である。したがって、実材料から発振されたAEを検知し、その性状を確認しておくことが重要になる。そこで、コンクリート供試体を使用し、一軸圧縮載

荷中に供試体内部から発生するAEを、従来試験に使用しているピエゾ型AEセンサと併用計測し、発生頻度や検知波形の違いを精査し、光式AEセンサの性能を評価した。試験要領をFig. 8に示す。使用した供試体はコンクリート角柱体（10×10×53cm）である。破壊に至る単調的な一軸圧縮荷重および繰り返し荷重時にAEを検知するものである。図に示す通り、供試体側面の4箇所に試作した光式AEセンサを設置した。その内、3か所については30kHz共振型ピエゾ式AEセンサを併設し、両者の受振特性を精査し、性能評価に資した。

破壊に至る単調的な一軸圧縮荷重試験を一例として、Fig. 8左面上部に設置した両センサでの測定結果をFig. 9に示す。図は、応力-荷重時間-AE発生数-最大振幅値累積の比の関係をそれぞれ示す。両センサは感度が異なるため、感度の影響を強く受けるAE発生個数や振幅値を直接比較し、その優劣を評価する意味は乏しい。そこで、

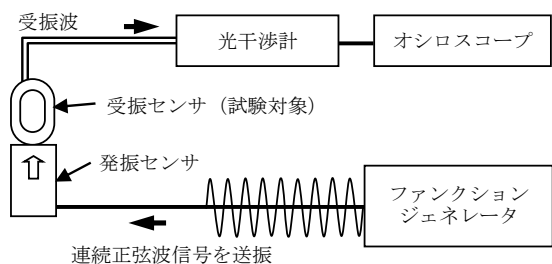


Fig. 6 感度試験要領
Block-Diagram of Sensitivity Test

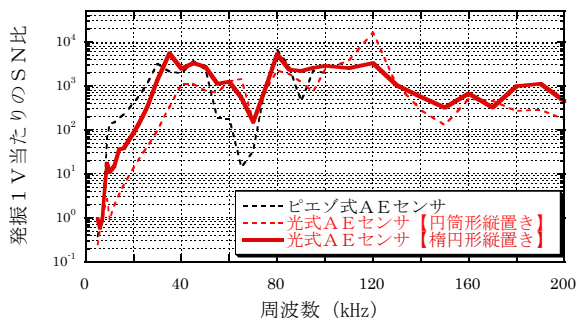


Fig. 7 感度試験結果
Result of Sensitivity Test

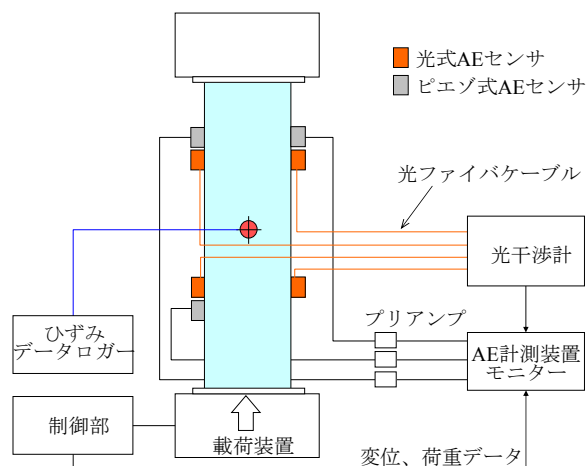


Fig. 8 コンクリート供試体による性能試験要領
Block-Diagram of Concrete Uniaxial Test

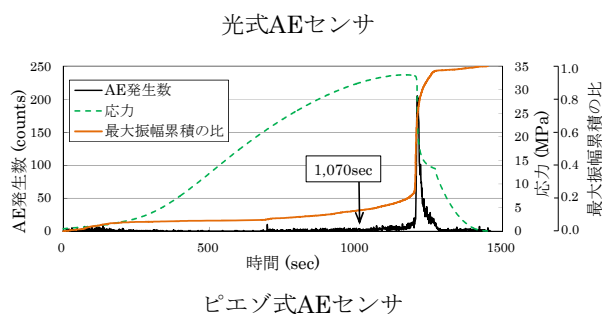
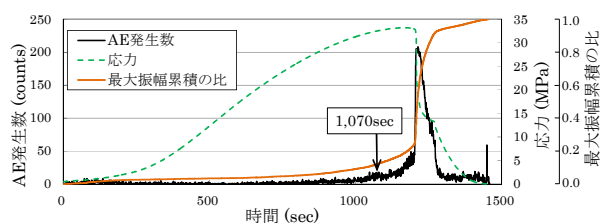


Fig. 9 一軸圧縮荷重条件下でのAE試験結果
Result of Uniaxial Concrete Test

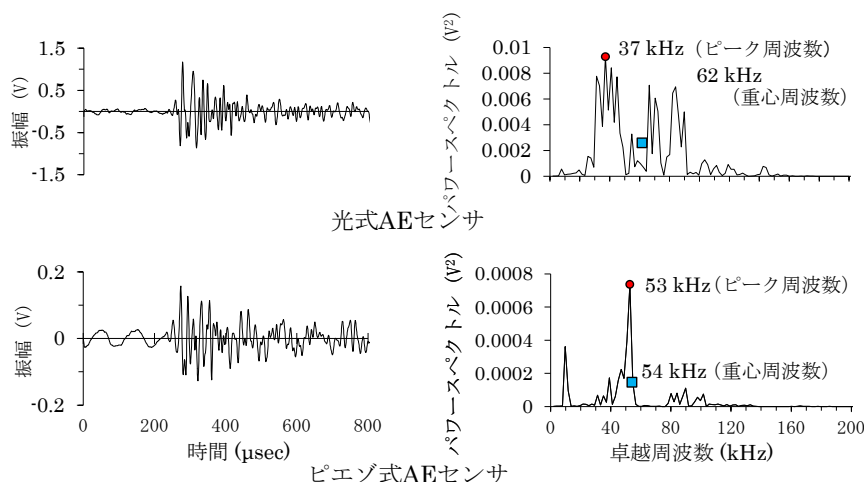


Fig. 10 受振AE波形と周波数解析結果の一例
Result of AE Waveform and FFT

これらの項目に関しては、事象の生じるタイミングや範囲および分布を比較することで、評価とする。まず、AE発生頻度について、最大荷重34MPaの約10%前(約30MPa)からAE発生が顕著になり、破壊に至る過程でAEが急増する特徴が、両センサで認められた。また、最大振幅値を累積し最大値で正規化した推移曲線から、破壊直前のAE急増に伴い振幅値が急激に増加する傾向が、両センサで認められた。これらの特徴は、岩石やコンクリートのAE破壊実験で一般的に観察される事象であることから、光式AEセンサの適性を示すことができたとと言える。

ついで、記録したAE信号波の周波数に着目する。応力挙動が非線形性を示し始め、併せてAE発生数が増加し始める場所(図中、載荷時間1,070sec)での受振AE波形とその周波数解析結果をFig. 10に示す。両センサとも、AEの持続時間が300μsec程度と非常に短い突発的AEの特徴を検知できている。また、周波数解析結果として、ピーク周波数と重心周波数を示しているが、特にセンサの感度や周波数特性にあまり依存しない重心周波数は、両センサで概ね一致した。さらに、光式AEセンサは20~90kHzの広い範囲に分布しているが、ピエゾ式AEセンサは20~60kHzと光式AEセンサに比べて狭い範囲に限られており、60kHz以上の周波数帯の感度が低い結果となっている。したがって、相対的に光式AEセンサの方がピエゾ式AEセンサより高感度に仕上がっていると評価できた。

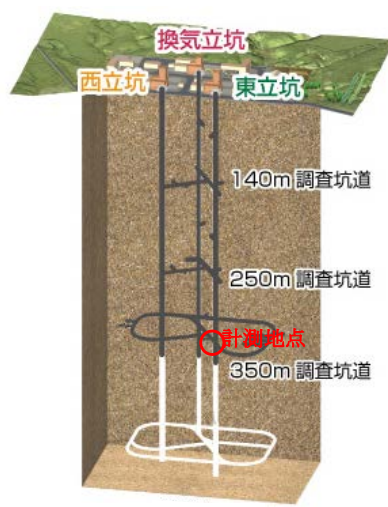
4. 光式AEセンサを組み込んだ光計測プローブの現場適用

地下空洞での長期モニタリングを目的に、開発した光式AEセンサを現場に展開する。現在までに、波方国家石油ガス備蓄基地におけるプラグコンクリートの長期健全性評価と、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影響領域の長期挙動モニタリングに活用中

である。前者は、光式AEセンサ単体を岩盤に埋設し、作業トンネル水没時¹⁰⁾、および漏気試験中の空気圧によるプラグコンクリート周辺岩盤への影響を評価した。現在は、運用段階に入り、液化天然ガス圧作用時の影響および健全性をモニタリング中である。一方、後者では空洞掘削過程および掘削完了後の長期挙動モニタリングに使用中である。当該地点ではAE挙動の他、地下水挙動と温度挙動の時間推移評価が求められたため、光式AEセンサに光式間隙水センサと光式温度センサを加え3種類の諸量計測を行っている^{11), 12)}。以下、詳述する。

4.1 計測概要

Fig. 11に示す北海道幌延町に位置する原子力機構の幌延深地層研究センターでは、高レベル放射性廃棄物の地層処分に係わるニアフィールド長期挙動モデル開発のた



※ このイメージ図は、今後の調査研究の結果次第で変わることがあります。

Fig. 11 地下施設概要¹³⁾
Shaft System

め種々の研究を実施している。その一環として、深度350m以深の立坑を対象に掘削前から掘削完了後の長期期間にわたって立坑周辺に形成される掘削影響領域の挙動のモニタリングと評価が求められた。また、地下に空洞を掘削すると、空洞周辺地山では力学的・水理学的性状が変化する。したがって、地山の力学的挙動を光式AEセンサで、水理学的挙動を光式間隙水圧センサと光式温度センサでモニタリングすることを考えた¹¹⁾。

4.2 微小き裂と地下水の連成挙動を計測するための工夫

地層処分場のモニタリングでは、計測機器設置に伴う地質環境の擾乱をできるだけ小さくすることや経済性を勘案することが望ましい。そこで、1本のボーリング孔内に今回開発した光式AEセンサの他、地下水挙動の変化を計測する光式間隙水圧センサおよび光式温度センサを組み込んだ計測プローブ（以下、マルチ光計測プローブと称す）¹⁴⁾を開発し、適用した。Fig. 12にマルチ光計測プローブの外観を示す。光式間隙水圧センサと光式温度センサは、光式AEセンサとは異なり、ファブリ・ペロー干渉方式¹⁵⁾による。この方式のセンサでは、光ファイバー内に空間（キャビティー）によって隔てられた2つの平行ミラーから構成される。圧力や温度変化により、このキャビティー長さが変化するとミラーで反射した光には周波数変調が生じる。したがって、この周波数変調量を計測することでキャビティー長さがわかり、圧力や温度の評価が可能になる。上下2個の光式AEセンサに囲まれた範囲に、ラバー製パッカーで閉鎖されかつ地下水が自由に行き来できる空間を作り、そこにこれらのセンサを配置した。当プローブはボーリング孔径86mm用に挿入固定できるよう製作しているため、光式AEセンサは最大3個まで組み込むことが可能である。なお、各種センサを近接配置することで、各センサから得られる挙動の連関性がより明白になることが期待できる。

4.3 マルチ光計測プローブの設置場所と根拠

当該地点は、稚内層の珪質硬質泥岩であり、割れ目は比較的少ない。地上からのボーリング調査¹⁶⁾の分析によると、一軸圧縮強さは平均20MPa、弾性波速度はP波で平均2.2km/s、S波で平均0.9km/s程度である。また、最大主応力は7.3MPa、最小主応力は5.0MPaで、最大主応力は東西方向である。これらのデータを参考に、3次元FEMによる深度350m以深の逐次掘削解析で力学挙動を評価したところ、Fig. 13の局所安全率を得た。したがって、局所安全率が1.0を下回る赤網掛領域の片側（換気立坑側）を今回の計測対象領域と定めた。また、光式AEセンサの設置間隔については、岩盤の弾性波伝播および減衰特性が大きく影響する。そこで、ハンマー打撃による疑似AE波で伝播特性および減衰特性の試験を実施し、Fig. 14の結果を得た。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

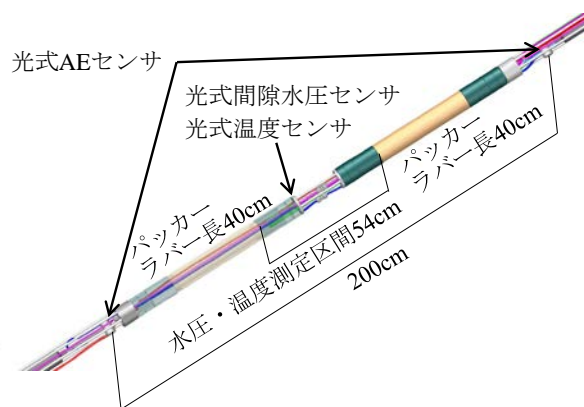


Fig. 12 マルチ光計測プローブ
Multi-Optical Measurement Probe

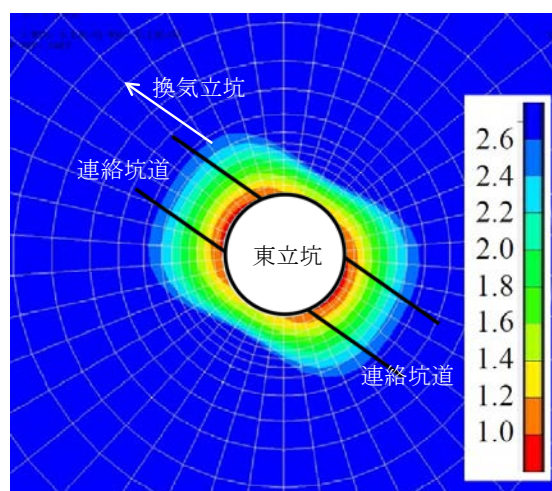


Fig. 13 3次元FEM解析結果
Result of 3D-FEM

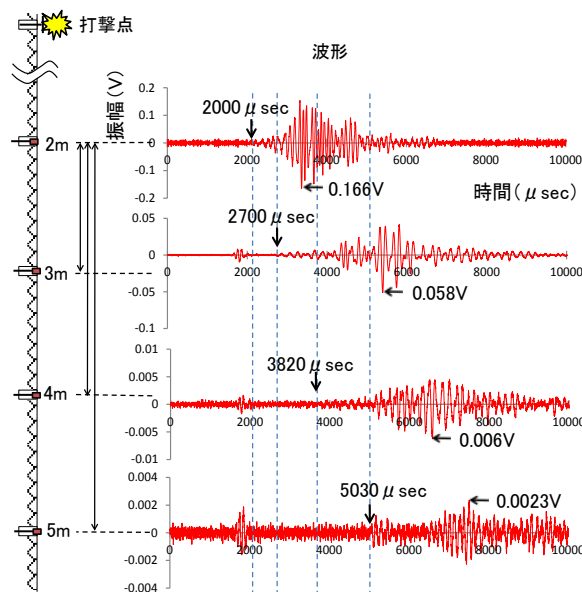


Fig. 14 疑似AE波による伝播減衰試験結果
Result of AE Propagation and Attenuation

境雑音1.5mVに近接した。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Fig. 15である。そこで、光式AEセンサ間距離が概ね5m以下になるよう配慮した。Fig. 16に示すように、マルチ光計測プローブを東立坑から換気立坑に繋がる連絡坑道底面から立坑に平行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1.5mの離間とした。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、光式間隙水圧センサと光式温度センサは中段と下段の間に設置するようにマルチ光計測プローブを配置した。

4.4 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、マルチ光計測プローブによる連続計測を実施した。立坑掘削は機械掘削方式による。

掘削完了までに約2,700万のAEを記録した。AEには、掘削機械による雑音やメタンガスが岩盤中を移動する時の雑音が混入するため、弁別が必要である。得られたAE波形は、Fig. 17に示す5種類の形状に分類した。著者らによる原位置AE計測の実績^{6), 7), 8)}から、①のAE波形は岩盤から発生したものであり、②～⑤のAE波形は岩盤から発生したものは無いと判断した。そこで、記録されたAEを自動弁別するため周波数特性 $>25\text{kHz}$ 、波形形状特性（継続時間/最大振幅値） <0.5 および共振特性（スペクトルピーク値/最大振幅値） <0.15 の条件でふるい分けを行ったところ、約14万の①の形状となるAEを得た。弁別したデータを元に、立坑掘削時におけるAE、間隙水圧および温度の時間推移をまとめたものがFig. 18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。

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いるなど類似の発生傾向を得た。すなわち、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、岩盤の伝播減衰に影響を受け、大きな振幅のAEしか到達していないことに起因していると考えられる。間隙水圧計測では、S3孔で急増する現象を確認した。AE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。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℃とほとんど変化がなかった。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¹²⁾。

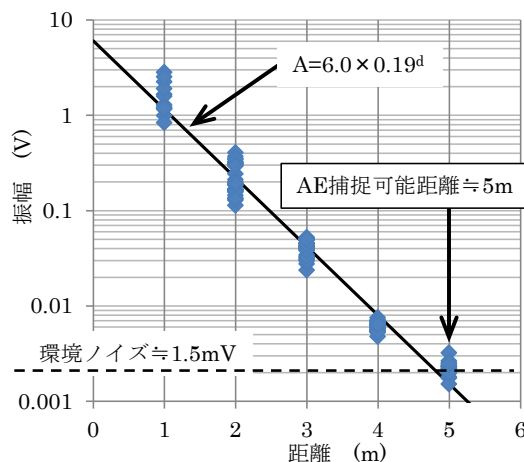


Fig. 15 AE検知限界
Result of AE Detection

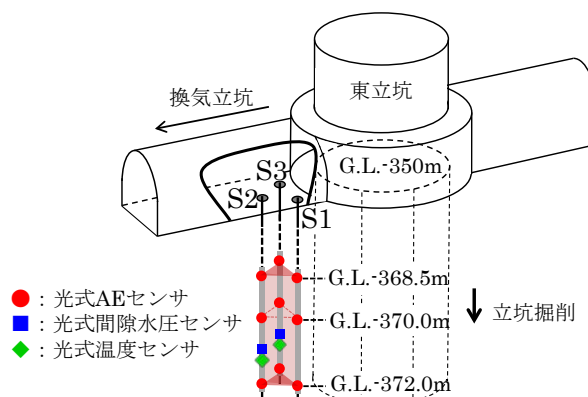


Fig. 16 マルチ光計測プローブ設置位置
Measurement Probe Installation Position

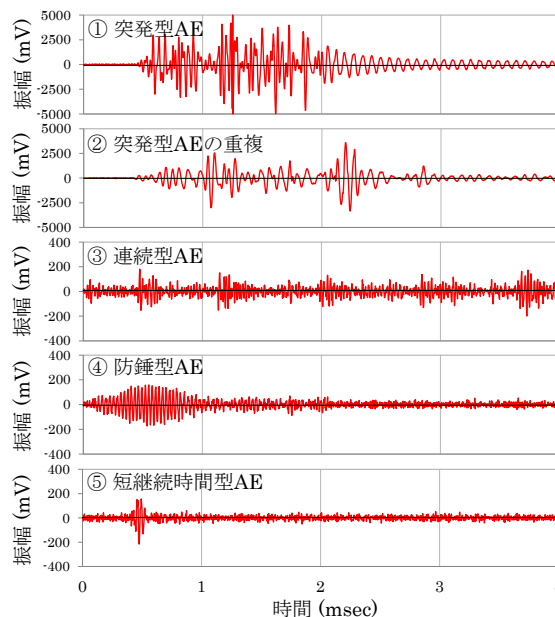


Fig. 17 計測AE信号波のパターン分類
Pattern Classification of AE Signal Wave

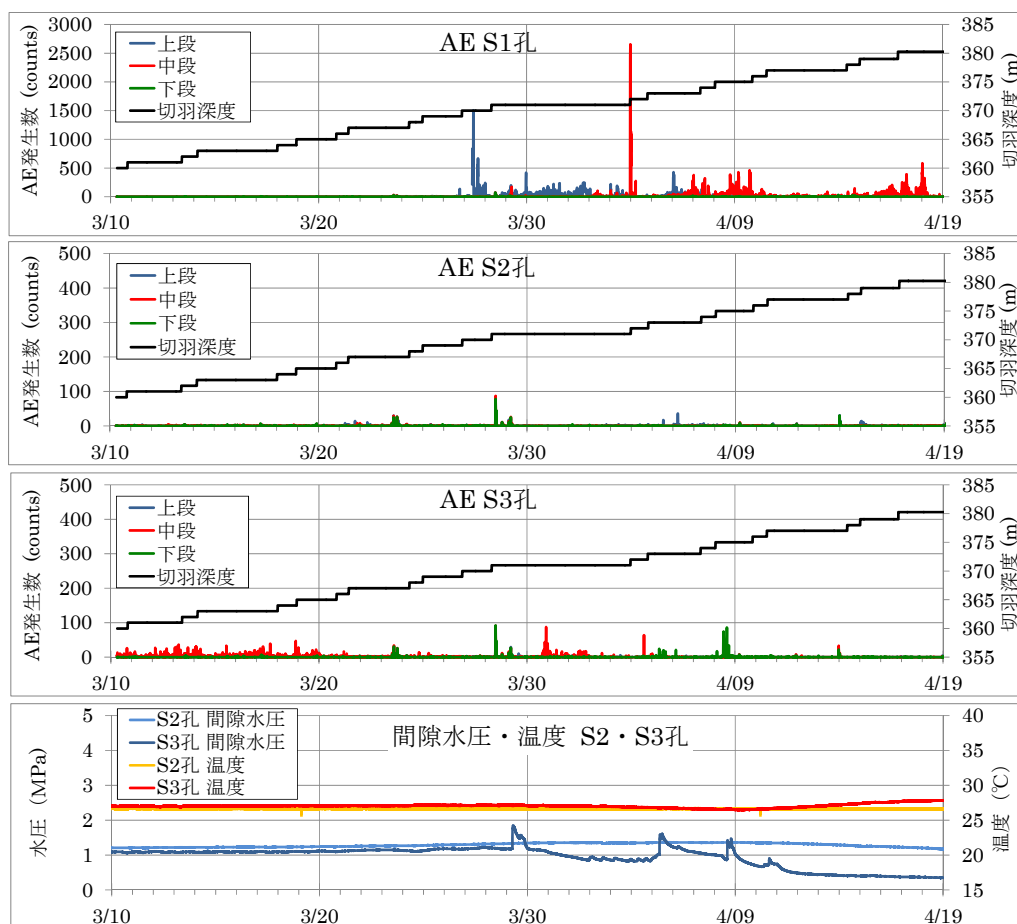


Fig. 18 立坑掘削時のAE, 間隙水圧, 温度計測結果
Result of AE, Water Pressure and Temperature under Excavated Shaft

5. おわりに

周波数応答解析によるセンサ形状の最適化検討を基に、受波面に拘束具を有した楕円形縦置き方式の光式AEセンサを開発した。さらに、この光式AEセンサと光式間隙水圧センサおよび光式温度センサを組み合わせ、1本のボーリング孔内で力学的・水理学的挙動を同時に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における立坑掘削影響領域の長期挙動モニタリングに適用を開始した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 開発した光式AEセンサは、感度試験ならびにコンクリート供試体による性能試験から、従来原位置で使用したピエゾ式AEセンサと性能面で遜色無いことを明らかにした。むしろ、ピエゾ式AEセンサより高い周波数領域にも優れた感度特性を有するとともに、広帯域型に近い周波数特性を有している。
- 2) 原子力機構の幌延深地層研究センターで立坑掘削時に計測した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元に弁別ができた。
- 3) 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。

今後は、複数配置した光式AEセンサの特徴を生かし、震源位置評定や掘削によるき裂発生進展のメカニズム解析を通して、より詳細に立坑掘削領域の評価を行う予定である。また、現在は立坑掘削が既に完了し、引続き長期モニタリング期間に入っていることから、地震等の外部インパクトによる構造物全体の健全性評価にも繋げていきたい。

本報で示した光計測技術は、高湿度条件下での耐腐食性や特別な手段を講ずることなく防爆性に優れた特性があることから、インフラにおける防災・減災に寄与できる長期モニタリング技術として期待できる。開発・展開を促進していきたい。

謝辞

原位置で計測可能な光式AEセンサの開発に関しては、(株)レーザーックとの共同研究であり、同社の町島祐一氏、藤井宏和氏にご助力いただいた。また、幌延深地層研究センターにおける実適用は原子力機構との共同研究であり、同機構の藤田朝雄氏、青柳和平氏にご配慮いただいた。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) 最新AE技法, 応用技術出版, pp.222-223, 1980.
- 2) 藤井陽一, 村山英晶: 光ファイバセンシング総論, プラントエンジニア, 10月号, pp.52-57, 2009.10
- 3) 影山和郎, 金原 勲, 鈴木敏夫, 大澤 勇, 村山英晶, 犬養泰彦: レーザドップラ光ファイバセンサによるAE波検出の試み, 日本機械学会第75期通常総会講演会講演論文集(Ⅱ), No.98-1, pp.94-95, 1998.1
- 4) 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, 1981.4
- 5) 藤井宏和, 森 孝之, 斉藤義弘, 田仲正弘, 町島祐一: 光ファイバ式AEセンサ(FOD)による硬岩と軟岩の破壊時のAE特性, 第17回アコースティック・エミッション総合コンファレンス, pp.99-102, 2009.8
- 6) 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, 1998.5
- 7) 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, 2002.9
- 8) 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, 2010.1
- 9) 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, 2011.1
- 10) 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 第VI部門, pp.381-382, 2013.9
- 11) 畑 浩二, 丹生屋純夫, 津坂仁和, 青柳和平: 幌延深地層研究所におけるマルチ光計測プローブを用いた立坑掘削影響領域の長期モニタリング計画, 第69回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.73-74, 2014.9
- 12) 畑 浩二, 丹生屋純夫, 青柳和平, 藤田朝雄: 幌延深地層研究センターの立坑掘削における力学的・水理学的影響評価, 第70回土木学会年次学術講演会講演概要集 共通セッション, CS12-003, pp.5-6, 2015.9
- 13) 幌延深地層研究センター, 平成27年10月21日(水)の地下施設坑道掘削長, http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/shisetsuseibi_kouji.html, (参照2015-09-014)
- 14) 畑 浩二, 藤井宏和: マルチ光計測プローブの開発, 第69回土木学会年次学術講演会講演概要集 CS9, pp.69-70, 2014.9
- 15) 鈴木達朗: 応用工学 I, 朝倉書店, pp.83-86, 1982.8.
- 16) 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, 434p., 2007.3