

光ファイバ型 AE センサによる状態監視／スクリーニング法の研究

Condition Monitoring and Damage Screening by Fiber-optic AE Sensor

(株)レーザーック
東京大学

町島 祐一 Yuichi MACHIJIMA Member
村山 英晶 Hideaki MURAYAMA Member

FOD (Fiber Optical Doppler) sensor, that can measure elastic wave in wide-band frequency, has been invented and developed, which utilizes Laser Doppler effect within an optical fiber. In particular, FOD sensor can detect acoustic emission (AE), which is sometimes very useful parameter to monitor in-situ damage at various equipments. Report herein is its measurement principle and its application for field use.

Keywords: Fiber-optic Sensor, Acoustic Emission(AE), Condition Monitoring, Damage Screening

1. 緒言

原子力プラントにおける保全方式が、時間基準保全 (TBM) から状態基準保全 (CBM) へと移行が進められている。TBM では主に人手による検査が主体となっており、検査員個人の技量や検査体制・管理が重要となるが、CBM ではセンサを利用した状態監視評価システムが重要な要素である。

これまで構造物の健全性に関わる情報を取得するセンサには電氣的な方式が用いられることが一般的であったが、1990 年代以降、航空機の CBM とも言える構造ヘルスマモニタリング (SHM) への適用、あるいは橋梁の SHM への適用を目指して、光ファイバセンサが注目を集め、盛んに研究されるようになった。現在ではその有効性が認められ、航空機、船舶や橋梁のほか様々な構造物やプラントに適用されるようになってきている。また、国内外で原子力プラントへの適用について検討した例があり、今後この分野での適用範囲や効果的な利用について検討の必要がある。

光ファイバセンサは従来の電気原理式センサに比べ、

- ①信号減衰が少なく長距離伝送が可能
- ②電磁気ノイズの影響を受けにくい
- ③光ファイバは耐水性・耐腐食性に優れている
- ④本質的に防爆である

等の利点を有している。

アコースティックエミッション (AE) とは、材料内で

発生した微視的な亀裂や剥離等に伴って、内部で蓄積性された応力が開放されることにより放出される微小弾波であり、古くより金属・セラミック・コンクリート・岩盤・強化プラスチック等の材料強度の評価手法として使用されている。近年ではコンピュータ技術の発展により、ノイズ処理を始めとする高速解析技術も大きく進展し、様々なノイズの多い稼働中の現場でも損傷現象をリアルタイムに把握できることから、定期的な (機器によっては常態的な) 状態監視によって、「当該機器を稼働停止させ、精密検査や緊急補修が必要であるか」を割り出すための「スクリーニング技術」として注目を集めている。

ここでは新たに開発した光ファイバ型 AE センサの検出技術の原理とその適用事例を報告する。

2. 光ファイバ AE センサ

2.1 光ファイバ AE センサの測定原理⁽¹⁾

光ファイバはコアとクラッドの2層構造になっており、光波はその境界周辺で全反射を繰り返しながら伝播する。測定に際しては、光ファイバ線の一部を被計測物に固着する。この固着部がセンサ部になり、被計測物が振動するとセンサ部もその振動に併せて伸縮する。そして、固着部の一端から周波数 f_0 の光波を入力している場合、入力端から出力端までの経路内に存在するある瞬間のレーザー光の波数は一定であることから、経路長が伸縮すれば波長が伸縮する、すなわち、伝播速度は一定であるから周波数が f_d だけ変化する。これをレーザドップラ効果と呼び、他端から出力される光波の周波数は $f_0 - f_d$ となる。この周波数変調量 f_d は光ファイバの伸縮、すなわち被計測物の変位 (ひずみ) 速度に比例する。

光ファイバが伸縮する際の、光ファイバ内のドップラ

効果により生じる周波数変調は式(1)で示される。 f_d はセンサ部で生じる周波数変調、 λ は光波の波長、 dL/dt は光ファイバの変位速度である。ここで負号は、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している。

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

周波数変調を検知するための光干渉計を図1に示す。システムはセンサ回路と計測回路から構成されている。計測回路はヘテロダイン干渉法を用いて周波数変調量を検出する回路である。同図より、光源 (Light source) から入射された周波数 f_o のレーザー光は、センサ回路と計測回路に分波される。センサ回路では、計測対象物の振動によってファイバ部が微小伸縮すると、それに伴いファイバの光路長が時間的に変動する。その結果、レーザー光には光路長の時間的変化である dL/dt に比例した周波数変調 f_d が生じ、センサから出力されるレーザー光は $f_o - f_d$ となる。一方、計測回路では AOM (周波数変調器) により周波数 f_M (80MHz) の基準光を加え $f_o + f_M$ に変調される。そして、センサ回路からのレーザー光と計測回路からのレーザー光の周波数の差 $f_M + f_d$ が導かれ、検知器 (Detector) で f_d が検出され、周波数/電圧変換器 (FV) で電圧値に変換される。

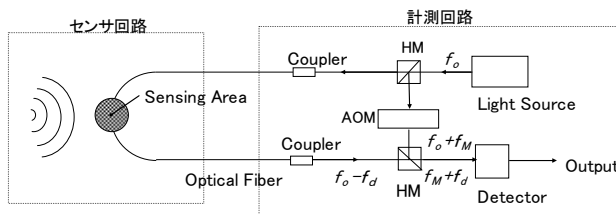


図1 レーザドップラ干渉システム

以降、この光ファイバ AE センサの名称を「光ファイバドップラセンサ」とし、略して FOD (Fiber Optical Doppler) センサと呼ぶ。式(1)より、この FOD センサには大きく2つの特徴がある。

- I. dL の L 、すなわちセンサ部の光ファイバ長を長くすればするほど、感度 (f_d) が向上すること
- II. dt の t 、すなわち変化時間が短ければ短いほど、言い換えれば、周波数が高ければ高いほど、感度 (f_d) が向上すること

2.2 AE センサとしての FOD の感度

上記 II の特徴を活かす使用方法として、人間の耳には

聞こえない周波数領域 (超音波) で、様々な構造材料の微視的な破壊音を捕らえる AE センサとしての現場利用がすでに始まっている。

AE センサとしての実用感度を実証するために、(社)日本非破壊検査協会が校正規格として定めている「相互校正法によるアコースティックエミッション変換子の絶対感度校正方法」(NDIS 2109-1991; 縦波法)に従って校正試験を実施した。校正を行った FOD センサを図2に示す。なお、校正の周波数帯域は、鋼鉄製立方体のサイズ (センサ間の距離 400mm) において反射波の影響が出ない 60kHz から 300kHz までを対象とした。

AE 測定に使用している FOD センサは、センサゲージ長が 65m であり、ボビン形状に積層して巻いている。



図2 FOD センサ

結果を図3に示す。参考までに、従来より AE センサとして使用されている圧電素子のピエゾ型 AE センサ (PZT: 40dB アンプ付き) の感度データも併記している。FOD センサはピエゾ型 AE センサと同等の感度を有していることがわかる。

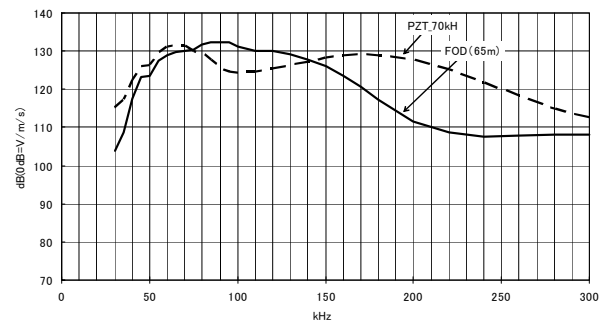


図3 FOD センサと PZT センサの比較校正

3. 光ファイバ AE センサの適用事例

3.1 岩盤破壊

地下発電所等の大規模岩盤地下空洞の掘削時には、空洞の安定性や周辺岩盤のゆるみ領域を評価する手段として AE モニタリングが適用されてきた^{2), 3)}。さらに今後、

原油及び液化石油ガスの地下備蓄、高レベル放射性廃棄物処理や二酸化炭素の地中貯留等、地下200mから1,000mに及ぶ大深度地下利用プロジェクトが多く計画・実行されている。また、従来利用されてきた花崗岩や古生層の堆積岩等、いわゆる「硬岩層」から、より固結度の低い堆積岩などの「軟岩層」においても大規模空洞の建設が進むことが予測されている。そもそも地下岩盤層における微小破壊音の観測（AE計測）には、高感度・長期信頼性・（時に）防爆性が求められる。そこで、これまではAE伝播過程での距離減衰が大きいがゆえにAE検出が困難とされてきた軟岩を対象にして、FODセンサの性能検証を実施した。試験では、代表的な軟岩である凝灰岩（大谷石）を用いて圧縮破壊時のAEを測定し、代表的な硬岩である花崗岩のAE特性と比較した。

図4は圧縮試験における各岩石における応力-ひずみ曲線図にAEの発生数と周波数変化を併せて示したものである。まず、同図上段(1)の花崗岩の一軸圧縮試験結果をみると、軸ひずみ0.65%、軸応力130MPaで脆性的に破壊している。AEは軸ひずみ0.5%程度から発生し始め、破壊時で最大180個/秒程度と急増している。AE波形の周波数は破壊前には400kHz程度であるが、破壊直前には250~300kHzまで低下している。次に、中段(2)の花崗岩の三軸圧縮試験の結果をみると、供試体は軸ひずみ0.9%、軸差応力290MPaで破壊し、その後残留状態を維持している。AEは軸ひずみ0.3%から発生し始め、破壊時には急増するが、残留時にも同程度のAE発生が継続している。周波数については破壊前に300kHz以上であったが、破壊近傍では200kHz程度と大きく低下し、残留時ではさらに150kHz程度と低下している。

最後に、下段(3)の大谷石の結果をみると、供試体は軸ひずみ0.75%程度、軸応力が12.6MPaで破壊している。AEは花崗岩と異なり载荷開始から発生し、軸ひずみ0.6%付近から徐々に増加し、破壊時では100個/秒程度に達する。残留時では180個/秒以上（最大で1800個/秒に達した）と破壊時より多く発生している。周波数については载荷当初は100kHzであったが、载荷の進行に伴って150kHzまで上昇する傾向が伺われる。その後、破壊時には周波数は低下し、残留時に一定値の傾向を示す。

FODセンサを用いて硬岩である花崗岩と軟岩である大谷石の供試体を用いて、破壊に伴うAE特性を測定し、軟岩のAEも感度よく捉えることが確認できた。また、硬岩と軟岩のAE特性にはAE発生状況と周波数帯に差異があることがわかった。

実際のトンネル現場でのAEデータは現状非公開となっており、本稿での報告は困難であるが、掘削現場でボーリングにより採取した原位置岩盤をこうした室内試験で評価することにより、応力-AE特性を事前に把握しておく作業が繰り返し行われている。実計測現場では、収録されたAEデータより、どの程度の応力が掘削近傍岩盤に作用し、またどの程度まで岩盤破壊が進行したかを推定している。さらに建設中から供用中に至るまで、緊急避難対策として常態的にAE計測を行い、空洞の安定性評価の指標としても利用されている。

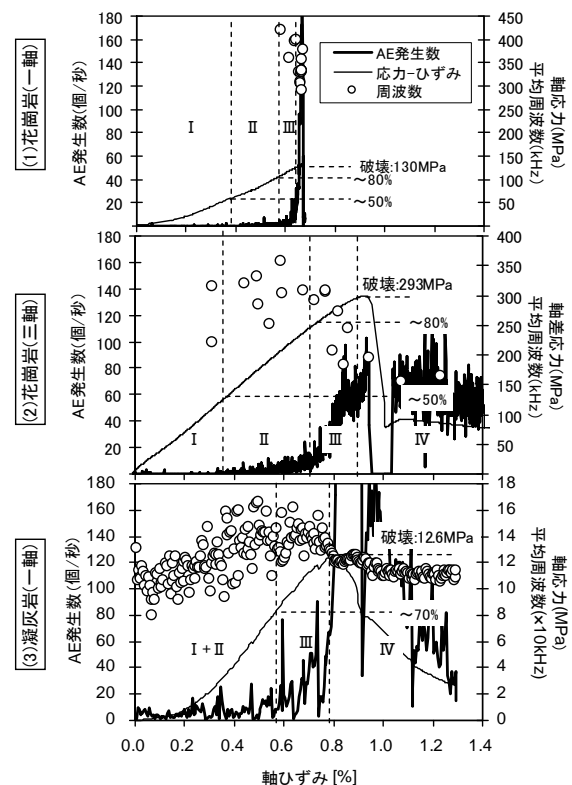


図4 各岩石の圧縮応力下でのAE発生状況

3. 2 保温材下腐食

炭素鋼製の機器・配管における保温材下腐食は、長年稼動している化学プラントにおいて重点管理が必要とされている深刻な劣化現象の一つである。特に屋外配管についてはパイプラック上への設置など、外面からの目視点検が難しいのに加え、総延長距離が長いために保温材を取り外しての目視検査以上に有効なCUIの検査手法が確立されていない。また、これらの検査費用のうち70~80%

が足場と保温材解体に占められており、多額の費用をかけて全面解体検査を行ったとしても腐食が発見されるのは、1000系統の内2~3系統程度であり、非常に効率が悪いことが問題とされている。一方、腐食が存在する場合、錆こぶの剥離等により微小な弾性波が発生することが知られている⁴⁾。そこで、保温材解体可否を判断するための「腐食の有無を診断するスクリーニング手法」として、FODセンサによる腐食AE検出技術の開発を室内・現場双方で継続している。

図5にモックアップ配管試験装置で行ったAE測定結果を示す。最長約4000mmでもAEを捕捉可能であり、これは左右8,000mmの範囲を一つのセンサで検査可能であることを示している。

また、腐食度の異なる時期に収録したAEデータを比較したところ、腐食度が進行している際のデータの方が単位時間当たりのAE発生数が大幅に増加することが確認された。その結果を図6に示す。腐食に伴うAE源は主に、錆こぶの体積の増加により錆こぶ内部の応力的な開放（例えば乾湿の繰り返し等）とされており、その結果を反映している。

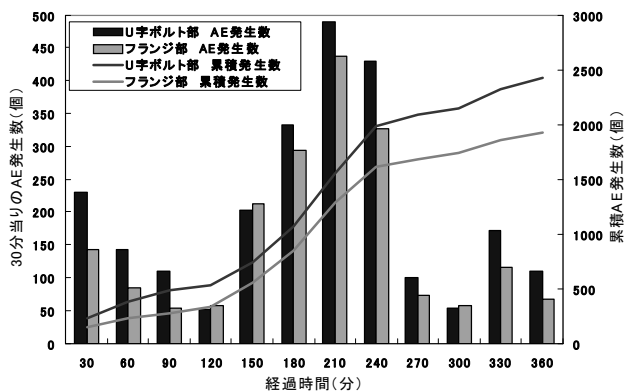


図5 FODによる腐食AE測定

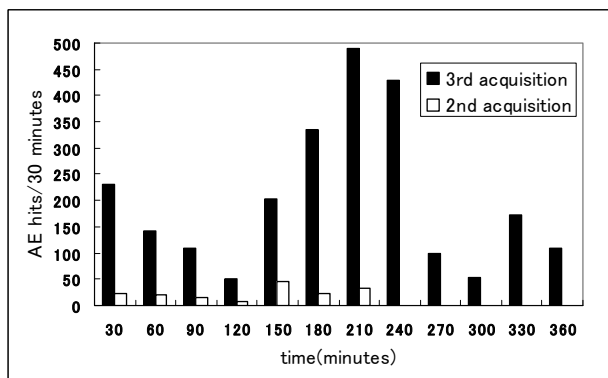


図6 腐食進展に伴うAE活性化

次に、図7に示す円筒型の実機反応器（内径φ3.8m、塔長：28m、代表部の肉厚15mm）でも実証試験を実施した。一部の保温材を取り外し、その周方向に90°ピッチで4個のFODセンサを取り付けた。センサ近傍には深さ3~5mmの深刻な腐食が事前に確認されており、錆除去作業の前後におけるAEデータを比較した。図8にデータを示す。錆除去前後でAE発生数に明瞭な違いが観測できた。現在、他実機でも実証データを積み重ねている。

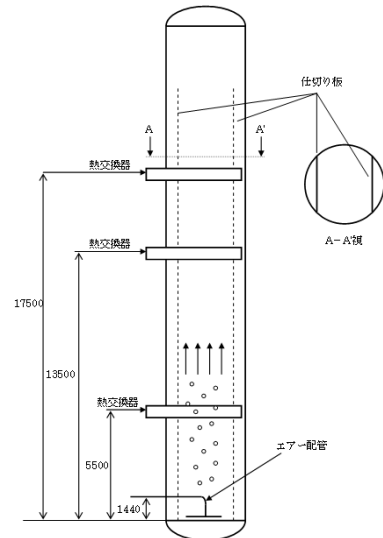


図7 実機反応器

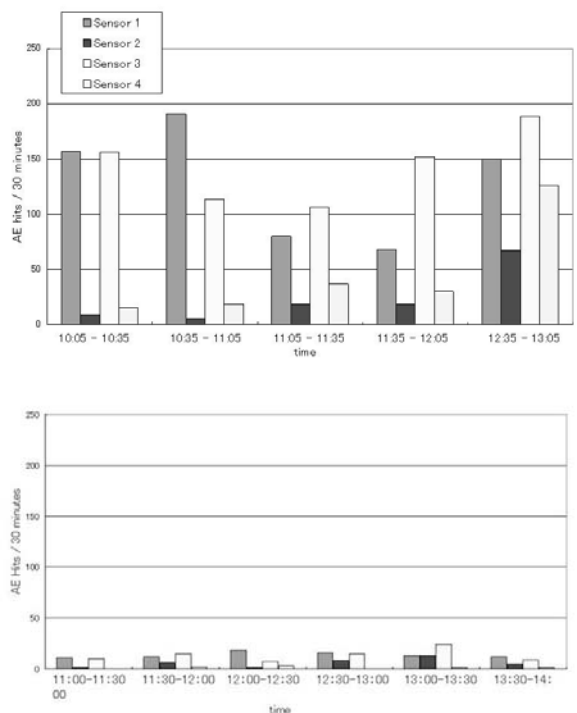


図8 実機AEデータ（上：錆除去前、下：除去後）

3. 3 配管減肉

火力、原子力発電所や石油、化学プラントなどの設備トラブルの多くは配管部で発生しており、配管肉厚管理は設備維持の為に重要である。そこで、FOD センサを受信子として用いるオンライン計測が可能な配管肉厚測定システムの開発を行っている。本方式は保温材を除去する必要が無く、連続的な配管状態監視が出来る利点がある(図9)。

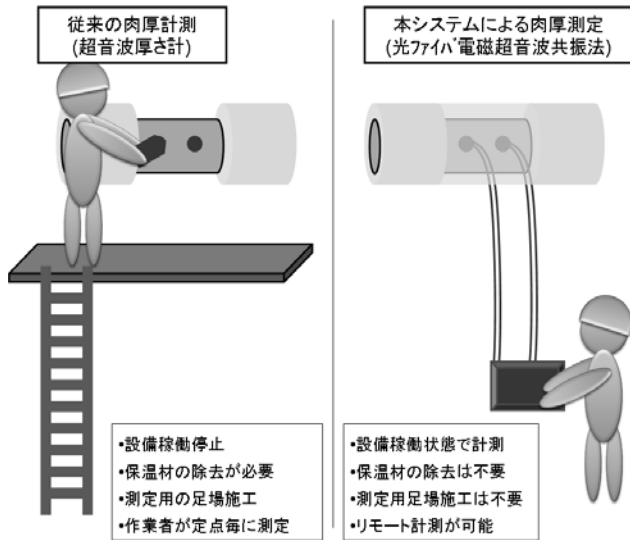


図9 オンライン配管肉厚測定システム

電磁超音波発振子(EMAT)を用いて、非接触で直接金属材料中に超音波を励起する電磁超音波共振法を用いたものであり、受信側に光ファイバセンサを用いることでEMATのみで送受信を行うよりも高感度の受信信号を得ることが出来る。さらに従来では困難であった1次共振モード周波数の計測が可能となるため、得られた共振周波数から直接板厚値を求められるという利点がある。これを用いれば、従来の定期点検毎に肉厚値を測定する方法よりも設備点検コストを低減出来ると考えられる。

電磁超音波共振法とは、永久磁石と電気コイルで構成された超音波発振子 EMAT(Electric Magnetic Acoustic Transducer)を用いて、図10に示すように静磁場と渦電流によって金属などの磁性体中にローレンツ力を誘起させ、間接的に金属材料中に超音波を伝搬させることで超音波の反射波長が板厚の整数倍(n)時に多重反射により強め合う共振効果を利用したものである。板厚は式(2)に示す式によって得られ、共振振動周波数(f_r [Hz])と金属中の音速(v [m/sec])から金属板厚(d [mm])を求めることができる。

$$d = \frac{n \cdot v}{2 \cdot f_r} \quad (n: \text{次数}) \quad (2)$$

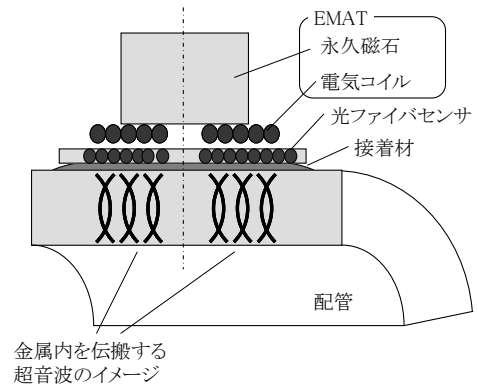


図10 センサ構造

実際の配管形状での肉厚測定検証のためエルボ配管試験体を用いて肉厚測定を行った。試験に用いた試験体は図11に示す材質 STPT49、250A エルボ配管と、材質 SGP、100A エルボ配管の2種類を用いた。光ファイバセンサ/EMATプローブはそれぞれの配管の端部分に、250A 配管は半円周方向90° 間隔で3箇所、100A 配管は背側(外側)と側面の2箇所に配置して試験を行った。図12、13にそれぞれの配管で測定した結果を示す。250A 配管は同一部を超音波厚さ計、マイクロメーターで測定した値との比較結果を示し、100A 配管についてはマイクロメーター測定値と比較した。この結果より、肉厚約13mmの250A 配管、肉厚約6mmの100A 配管エルボの両方において本手法を用いて測定した肉厚値は、超音波厚さ計、またはマイクロメーターの値と一致していることから、配管エルボのような曲率を有する形状においても肉厚計測が可能であることを確認した。



図11 試験に用いた配管エルボサンプル (奥側:250A、手前側:100A)

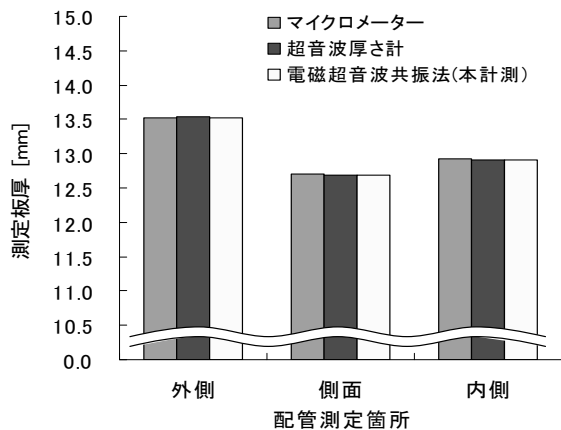


図 12 250A エルボ配管の肉厚測定結果

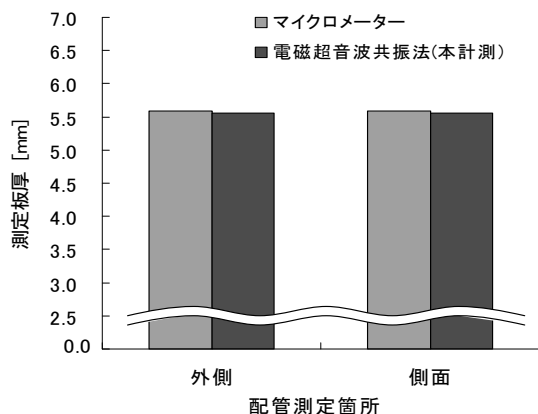


図 13 100A エルボ配管の肉厚測定結果

光ファイバセンサと EMAT を用いた電磁超音波共振法により金属材料の肉厚を従来手法の超音波厚さ計と変わらない 0.1mm 精度で正確にエルボ形状の配管肉厚の測定ができることを確認した。現在、実機火力発電所において、耐久性評価試験を実施中である。

4. 結言

光ファイバ AE センサを用いた適用事例を 3 件（地下岩盤破壊、保温材下腐食、配管肉厚）報告した。AE を用いた状態監視は今後の CBM にも大きく貢献していく可能性が高いと思われる。今後も AE 法の研究、特に光ファイバの特徴を活用した様々な損傷スクリーニング診断手法の開発に取り組む所存である。

参考文献

- [1] Kazuro Kageyama et.al : Doppler Effect in Flexible and Expandable Light Waveguide and Development of New Fiber-Optic Vibration/Acoustic Sensor, JOURNAL OF LIGHTWACE TECHNOLOGY, vol.24, NO.4, 2006
- [2] 金川忠,打田靖夫,浦山克,田仲正弘,石田毅 : AE 波形の周波数変化に着目した空洞掘削時の岩盤挙動の推定, 第 9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集,pp.701~706,1994
- [3] 田仲正弘,金川忠,小山俊博,森 孝之 : 空洞掘削時の AE 自動計測による岩盤安定性監視技術,第 22 回西日本岩盤工学シンポジウム 2000 講演論文集,pp.47-52,2000
- [4] (社)日本高圧力技術協会 : AE 法による石油タンク底部の腐食損傷評価手法に関する技術指針, HPIS G 110 TR 2005