

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)レーザック 町島 祐一 Yuichi MACHIJIMA Member
東京大学 村山 英晶 Hideaki MURAYAMA Member

FOD (Fiber Optical Doppler) sensor, that can measure elastic wave in wide-band frequency, has been developed, which utilizes Laser Doppler effect within an optical fiber. In particular, FOD sensor can detect Acoustic Emission (AE), which is a useful parameter to monitor in-situ damage at various industrial equipments. AE is caused mainly by very initial micro-crack within a structural material due to over-stress, material-aging, etc. When taking advantage of fiber-optics, that are long signal transmission capacity, immune to electro-magnetic noise, and water-resistive, we will be able to take into account remote condition-monitoring in the industry, which enables us to implement damage screening where/when to inspect precisely or to repair. Report herein describes its measurement principle and 3(three) sample applications of monitoring on field, that are rock collapse, corrosion under insulation, and metal thickness.

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気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、船舶や橋梁の他、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のセンサに比べ、

- 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に優れており、多少の水分混入があっても機能は持続する
- ④本質的に防爆である

等の利点を有している。

一方、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、内部で蓄積された応力が開放されることにより放出される微小弾性波であり、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の利用法が確立されている。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、様々なノイズが混在する稼働中の実機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 3 件報告する。

連絡先: 町島祐一 〒113-0033 東京都文京区本郷 3-40-9、
(株)レーザック、電話: 03-3816-3864、e-mail:
machijima@lazoc

2. 光ファイバ型 AE センサ

2.1 光ファイバ型 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の光ファイバもその振動に併せて微小に伸縮する。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学回路を Fig.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_0 のレーザ光は、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光は $f_0 - f_d$ 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、 $f_0 + f_M$ に変調される。そして、センサ回路からのレーザ光と計測回路からのレーザ光の周波数の差 $f_M + f_d$ 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。

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

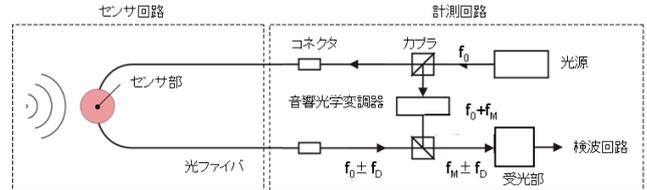


Fig.1 FOD optical interferometric flow

2.2 AE センサとしての FOD の感度

上記 II の特徴を活かす活用方法として、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 Fig.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。



Fig.2 FOD sensor

結果を Fig.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。

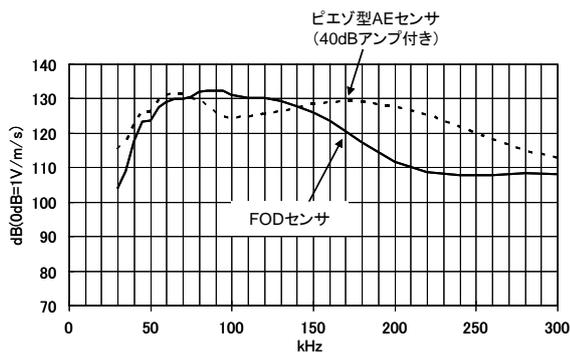


Fig.3 Calibration data of FOD and PZT sensors

3. 光ファイバ型 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な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、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 1,000m に及ぶ大深度地下利用プロジェクトが計画されている。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等の「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。そこで AE の距離減衰がゆえに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。

Fig.4 は圧縮試験における各岩石の応力-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 293MPa 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直後から発生し、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。実際の掘削工程では、掘削前の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し、応力-AE 特性を事前に把握する。掘削工事の段階で収録された AE データを活用し、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測することが可能である。また地下空洞が供用に入った段階でも常態的に 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。

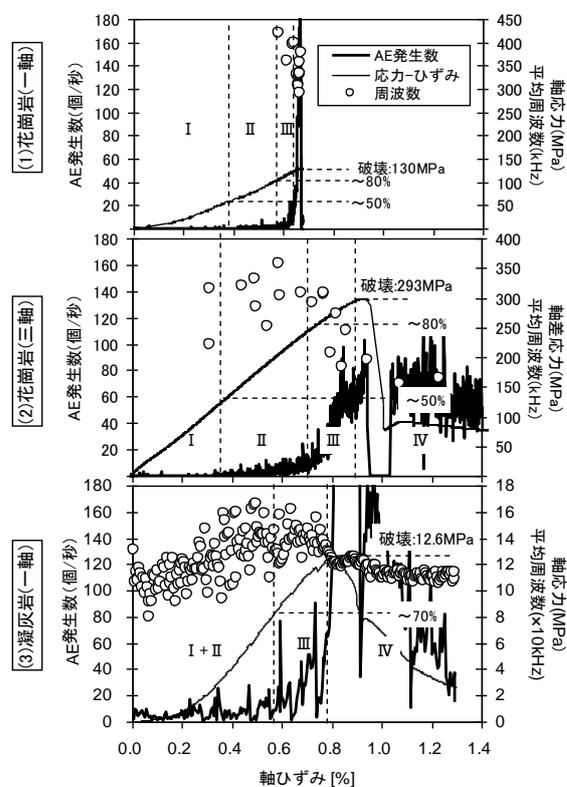


Fig.4 AE data under compression test

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、長年稼働している化学プラントにおいて深刻な劣化現象の一つである。特に保温材で覆われているがゆえに外面からの目視点検が難しく、全面解体検査以外に有効な検査手法が確立されていない。また、解体検査費用のうち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系統程度であるということが問題視されている。一方、腐食が存在する場合、錆ご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。

Fig.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。約4000mm位置のフランジでも AE が捕捉可能であり、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データの方が単位時間当りの AE 発生数が増加することが確認された。その結果を Fig.6 に示す。

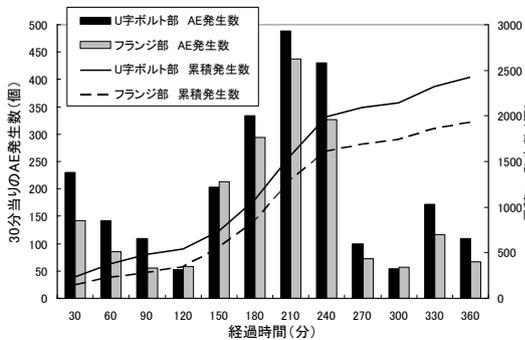


Fig.5 Corrosion detection by FOD

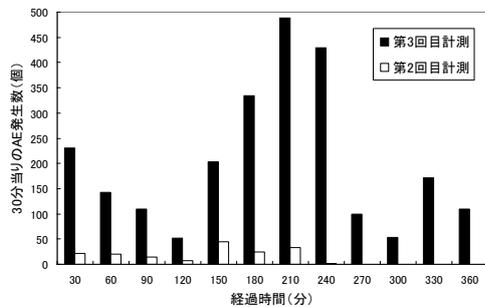


Fig.6 AE activeness by corrosion progress

次に、Fig.7 に示す円筒型の実機反応器（内径φ3.8m、塔高：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。Fig.8 に取得した AE 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。

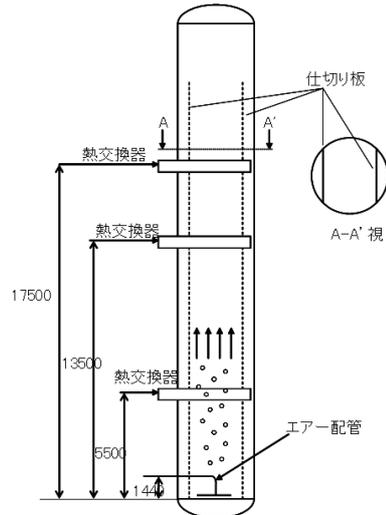


Fig.7 Tower on site

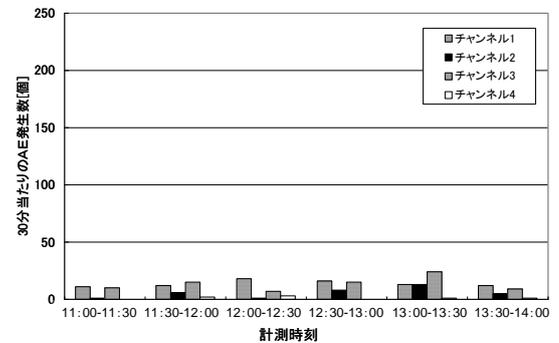
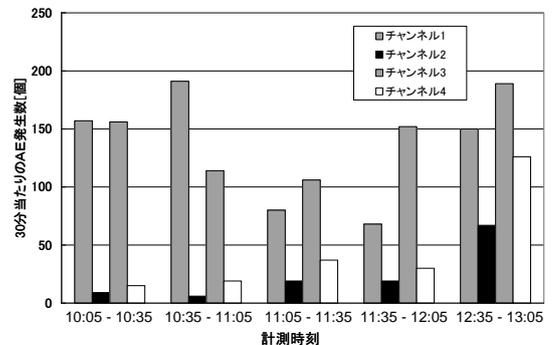


Fig.8 AE data (up/down; before/after removal of corrosion)

3. 3 配管減肉

火力、原子力発電所や石油、化学プラント等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 (Fig.9)。

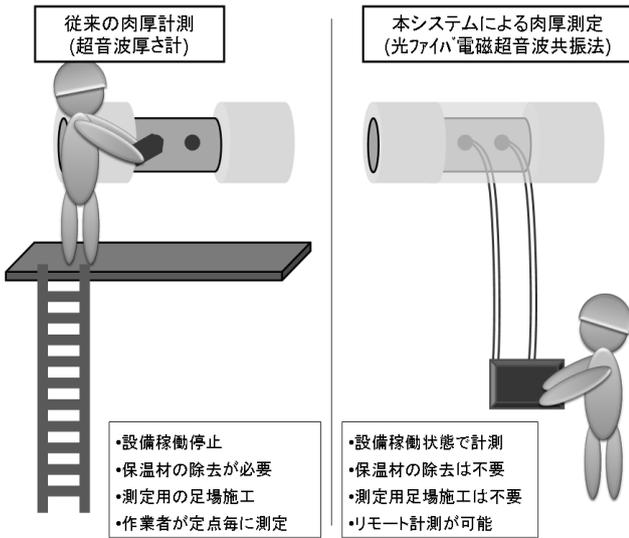


Fig.9 Online pipe thickness measurement system

電磁超音波発振子(EMAT: Electric Magnetic Acoustic Transducer)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できると考えられる。

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 を用いて、Fig.10 に示すように静磁場と渦電流によって金属等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)の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。

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

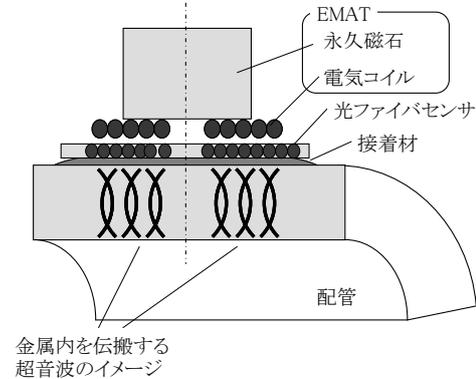


Fig.10 EMAT/FOD sensor

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 Fig.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。EMAT/FOD 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。Fig.12、Fig.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、直管のみでなく、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。



Fig 11 Elbow pipe sample

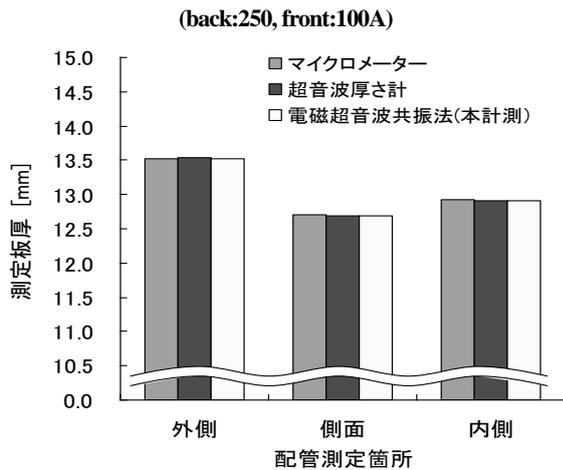


Fig.12 Result of 250A Elbow pipe

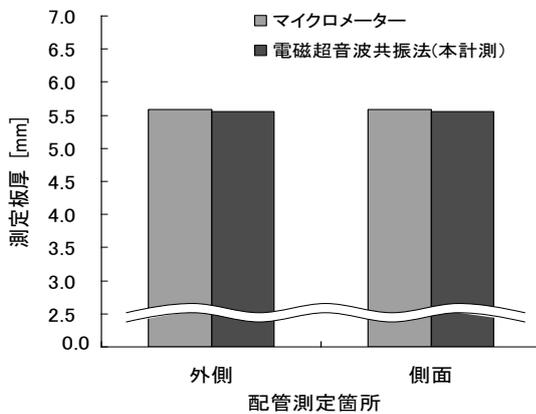


Fig.13 Result of 100A Elbow pipe

FOD 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（地下岩盤空洞、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