

光ファイバ式アコースティックエミッションセンサを用いた大型構造物の状態監視

Structural Monitoring by Fiber Optic AE sensor

町島 祐一

Yuichi Machijima

株式会社レーザック

Lazoc Inc.

E-mail: machijima@lazoc.jp

We have developed fiber optic Acoustic Emission (AE) sensor for structural health monitoring. Acoustic emission monitoring is utilized for monitoring of underground rock stability, so-called “micro seismic”. We report on its field application sample, which is seismic monitoring of hugely-excavated underground cavern to store Liquefied Petroleum Gas.

1. はじめに

光ファイバセンサを用いた構造ヘルスマニタリングが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。

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。また、AE は大規模岩盤地下空洞の安定性や周辺岩盤のゆるみ領域を評価する手法としても適用されてきた歴史がある^{[1][2]}。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おり、地下岩盤挙動の可視化につながる AE 技術の発展に対する要請は高い。

2. 光ファイバ AE センサの原理

2.1 光ファイバ型 AE センサの測定原理^[3]

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 (F-V Converter) 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。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

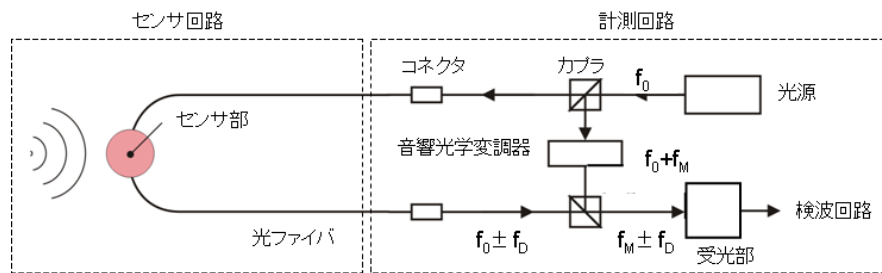


Fig.1 FOD optical interferometric flow

2.2 AE センサとしての FOD センサの感度

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。校正を行った光ファイバ AE 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。この光ファイバ AE 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。光ファイバ AE 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。

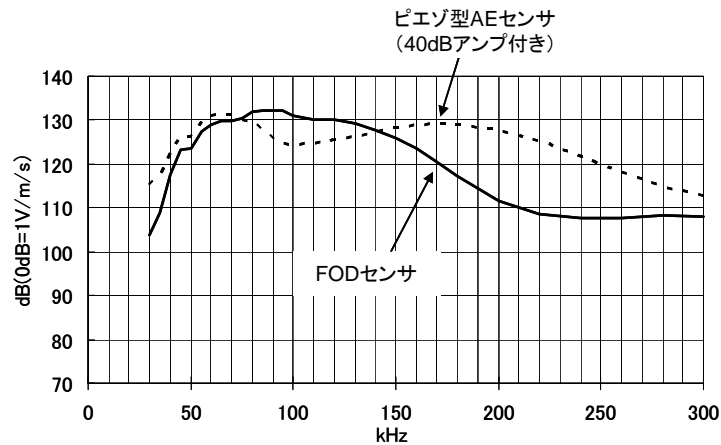


Fig.3 Calibration data of FOD and PZT sensors

3. 原位置での適用

3. 1 国家石油ガス地下備蓄基地における地下貯槽の安定監視

国家石油ガス備蓄の地下基地として、倉敷（岡山県）及び波方（愛媛県）において、作業時の貯槽周辺岩盤の安定性監視を目的として、従来式の AE センサに代わり、防爆性に優れ、長距離伝送性に有利な光ファイバ技術に注目し、FOD センサが採用された。同システムを用いた安定性監視の一例として、貯槽アクセストンネルの水没作業時の貯槽プラグ部を対象とした計測実績について報告する。

3. 2 原位置 AE 計測システムの概要

原位置サイトは高水圧条件下であるため、新たに防水性や耐久性を有する岩盤埋設型のセンサを開発した。Fig.4 にセンサの概要を示すが、センサ筐体とケーブル接続部は防水構造かつ耐久性構造とした。適用した AE 計測システムは Fig.5 及び Table.1 に示すように、「FOD センサ」、光信号を電気信号に変換する「光干渉計」、AE 波形データを記録・処理する「AE 計測装置」で構成される。

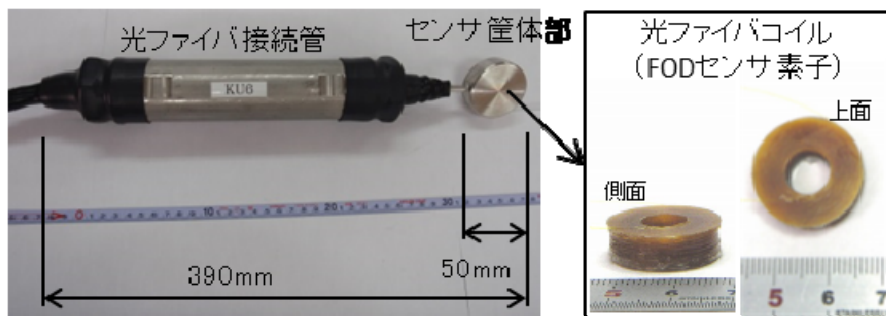


Fig.4 Field-applied FOD sensor

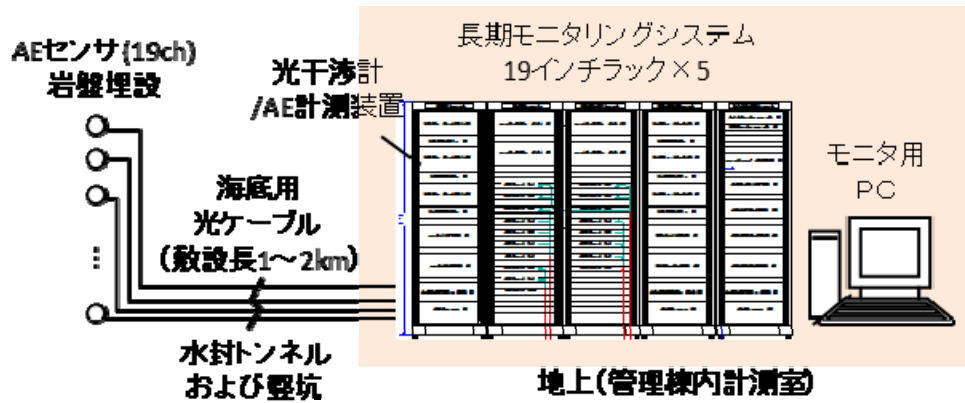


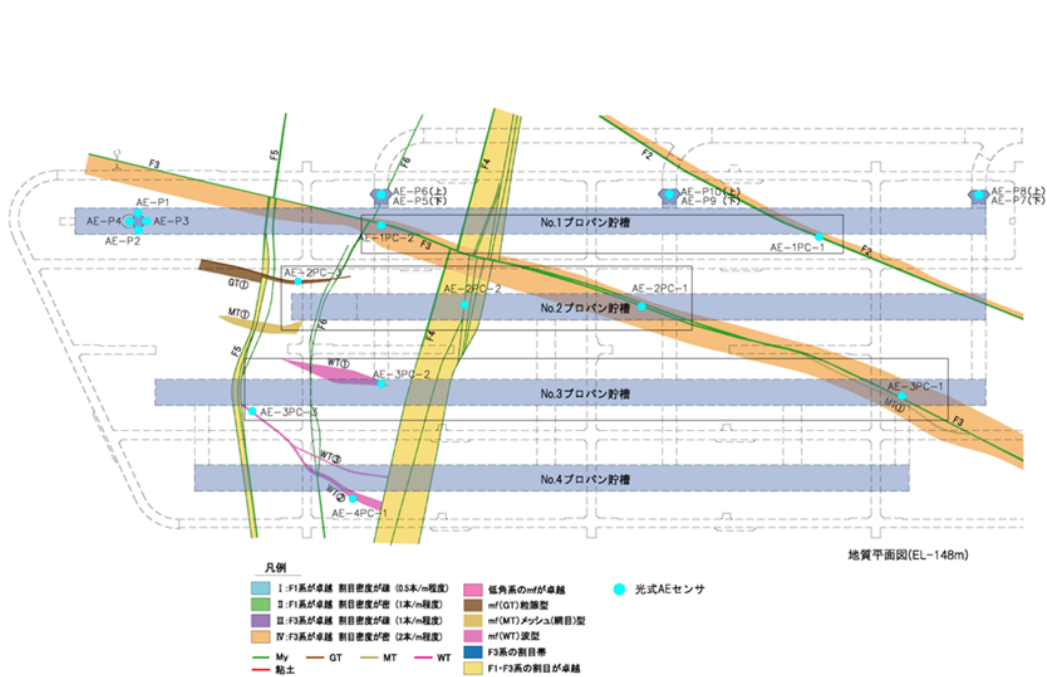
Fig.5 Field-applied FOD sensor system

Table.1 Outline of AE logging system

目的	プラグ部, 地質不良部の安定性監視
形式	光式AEセンサ
計測ch数	19ch
測定周波数帯域	10kHz~200kHz
サンプリングレート	1MHz
波形記録長	2048usec

3. 3 計測配置

AE センサの配置を Fig.6 に示す。地下空洞の周辺岩盤に、監視対象箇所としてプラグ部や地質不良部にセンサを埋設した。岩盤内に埋設されている各センサからの AE 信号は、貯槽アクセストンネル、水封トンネルならびに豎坑に敷設された光ケーブルを通して地上の管理棟計測室まで 2~3km の距離で伝送される。



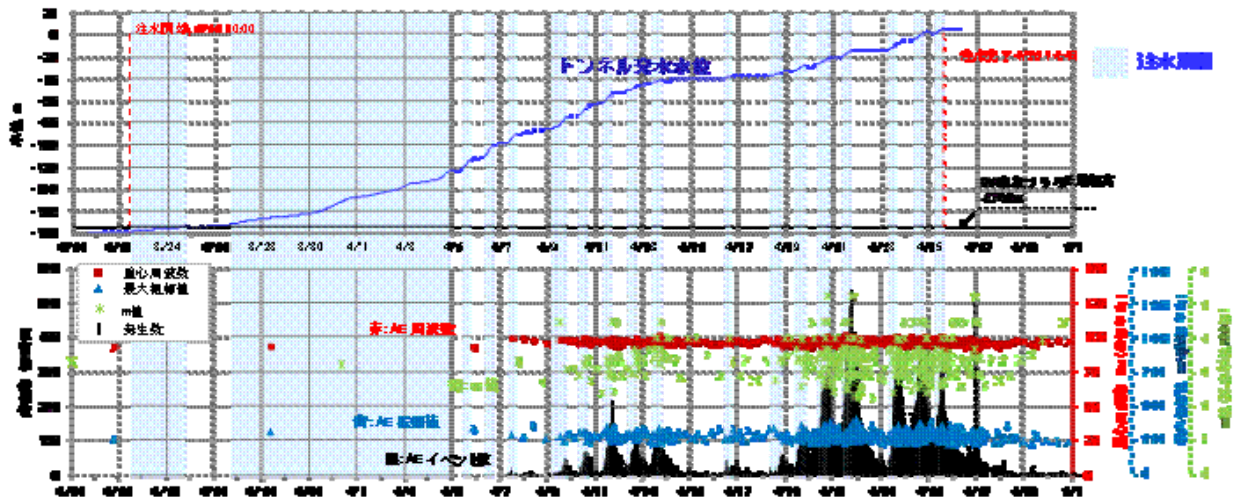


Fig.7 AE Data

参考文献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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