

〔 解 説 〕

光ファイバAEを用いたCUI検査技術の開発

<光ファイバドップラーセンサを用いたCUIモニタリング技術>

住友化学株 多田 豊和・末次 秀彦・森 久和
Toyokazu Tada Hidehiko Suetsugu Hisakazu Mori
青山学院大学 長 秀雄 / ㈱レーザーック 町島 祐一
Hideo Cho Yuichi Machijima

1. はじめに

1-1 保温材下腐食に関する国内外の対応状況
欧米先進国や国内の化学プラント、石油精製プラント、発電所等において保温材下腐食 (Corrosion under Insulation、以下「CUI」) が大きくクローズアップされたのは1980年代からである。これは、1973年の第一次オイルショック以降、それまで149℃以上の箇所で使用されていた保温材が100℃以下の低温域でも使用されだしたことによるようである。国内では1988年に高圧ガス保安協会 (以下、KHK) より外面腐食に関する報告書が提出され、2007年から2011年にかけて、(財)エンジニアリング振興協会 (以下、エン振協) で非破壊検査技術とモニタリング技術の適用についての検討が行われている。2007年度のエン振協報告によれば、ガイド波超音波法、リアルタイム放射線法、パルス渦流法等の非破壊検査技術が開発され現場適用されてきたが完全なものではなく、そのため、優先順位を定めて保温材を全長、全面剥がしての目視検査が推奨されている⁽¹⁾。

1-2 当社での対応状況

2007年度以降の当社の対応状況を以下に示す。2007年度には、写真1に示すようなモックアップ配管 (模擬配管) を作製して実験室にて光ファイバAEセンサによる錆びこぶ検出の適用化検討を行い、2008年度以降では、現場適用も含めて環境ノイズの弁別技術の開発に取り組んでいる。2008年度にはさらにモックアップ配管を用いて防食対応保温材構造 (外装板構造) の検討、そして、60～100℃の温度範囲においての最適な下地塗装材の選定検討を行ってきた。2009年度についても引き続きこれらの検討を行ってきたところであるが、ここでは光ファイバアコースティックエミッション (Acoustic Emission、以



写真1 光ファイバAE法を用いたCUI検査技術の開発⁽²⁾

下「AE」) センサを用いた検査方法の開発状況について述べる。

炭素鋼製の機器・配管におけるCUIは、長年稼働している化学プラントにおいて近年特に深刻化してきている劣化現象の1つである。特に屋外配管については高所の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、総距離が長いために、保温材を取り外しての目視検査よりも有効な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いることも大きな問題の1つである。したがって、保温材の取り外し作業を必要とせず、かつ防爆要求の多いプラント設備に対応した配管のCUI検査技術の開発が強く求められている。我々は、光ファイバドップラーセンサ (Fiber Optical Doppler、以下「FOD」) が元々防爆性能を有していることに着目し、新しいCUI検査手法の開発を試みた。

2. 従来の配管でのCUI検査手法の比較と課題

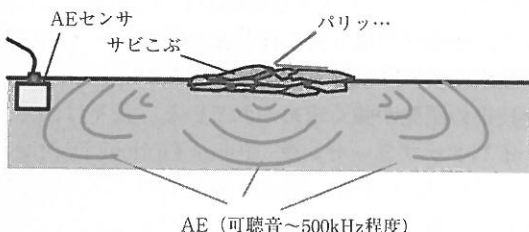
これまで配管に適用されてきた各種検査手法の特徴を第1表に示す。検査精度の良い手法では、短距離の検査しかできず、長距離の検査(5m程度)が可能な手法では検査精度が悪い。そのため、先述したように断熱材を取り外しての検査を多くの事業所では行っているが、多額の費用をかけて全面解体検査を行ったとしても腐食が発見されるのは、1,000系統の内2~3系統程度であり、非常に効率が悪いことが問題とされている。

第1表 配管での各CUI検査手法の比較

項目/検査手法	超音波法	渦電流法	放射線透過法
	ガイド ウェーブ法	パルス 渦電流法	リアル タイム
内部流体の影響	有り	無し	有り
長距離の探傷	○	×	△
断熱解体	要	不要 (80mm以下)	不要
検出可能な腐食形態	局部腐食(断面積の10% 深さ程度)	凹状 全面腐食	局部腐食 (2φ程度)
検査精度	悪い	悪い	良

3. FODを用いたAEモニタリングの原理⁽³⁾

配管CUIの有効な検査手法を確立するため、腐食とAEの関係に注目した。第1図にAEの発生メカニズムのイメージ図を示す。まず活性な腐食の進行により、局所的に腐食生成物(サビこぶ)の剥離や割れが発生する。その際に内部に蓄えていたひずみエネルギーが微小な弾性波として放出される。この弾性波のことをAEという。AEは可聴音から500kHzの比較的低周波数の弾性波であるため、広い範囲に伝播することが知られている。したがって、このようなAEセンサで、腐食剥離や割れに起因するAEを検知することによって、腐食の存在を感知す



第1図 AE法のイメージ

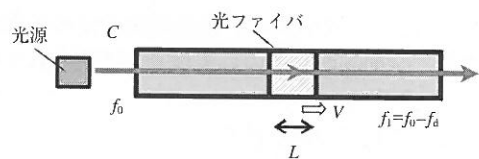
ることができる。すなわちAEの観測された配管のみ保温材の解体・目視検査を行うことで、CUI検査の効率を向上することができると考えられる。

AE法は腐食のモニタリングに優れており、タンクの底板の腐食損傷評価などには一部で既に適用されているが、実際には様々な問題がある。AE法にはこれまでピエゾ型のセンサが用いられてきたが、

- ① 風、振動、騒音、内部流体の擦過音などの影響を受けやすい
- ② センサの感度を高くしようとすると、測定範囲が狭帯域となるため、ノイズの周波数帯域と重なったときに弁別できない
- ③ ケーブルの耐電磁ノイズ性が悪いいため長距離の使用ができない
- ④ 非防爆性である
- ⑤ 適用温度範囲に限られる

などといった問題点がある。そこでこれらの問題を解決するために、近年開発された光ファイバAE技術に着目した。

光ファイバは通信システムのイメージが強いが、光ファイバのドップラー効果を利用することによって、センサとして用いることができる。今、光ファイバ内に光源から音速 C 、周波数 f_0 の光波が入射されたときに、光ファイバが速度 v で長さ L 伸びたとする(第2図参照)。このときドップラー効果により、周波数 f_0 が f_1 に変化すると、変化後の周波数 f_1 はドップラー効果の公式により、式(1)のようにあらわすことができる。



第2図 光ファイバのドップラー効果のモデル図

$$f_1 = \frac{C-v}{C} f_0 = f_0 - \frac{v}{C} \cdot f_0 \quad \dots(1)$$

したがって、変化後の周波数 f_1 を、入射前の周波数 f_0 から f_d 分変調したとして考えると、 f_d は式(2)となる。

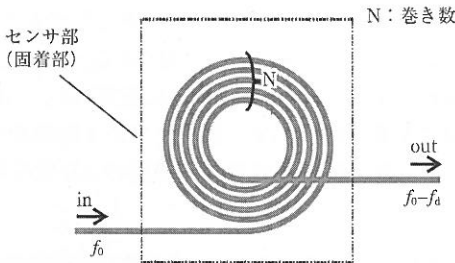
$$f_d = f_0 \cdot \frac{v}{C} \quad \dots(2)$$

これと式(3)に示した波の公式により、 f_d は式(4)のように表すことができる。

$$C = f_0 \cdot \lambda \quad \dots(3)$$

$$f_d = f_0 \cdot \frac{v}{C} = \frac{f_0}{C} \cdot v = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{dL}{dt} \quad \dots(4)$$

式(4)は、光ファイバの伸縮速度を光波の周波数変調として検出することができることを示している。すなわち、光ファイバの周波数変調 f_d を読み取ることによって、光ファイバに加わった、ひずみ（弾性波や応力変化等）を検知することが可能となる。このような光ファイバが伸縮した際のドップラー効果を利用したセンサとして FODセンサが開発されている（第3図参照）。このセンサは、感度を高め、かつ全方位からの受信を可能にするため、光ファイバをコイル状に巻いたもので、ファイバの伸縮速度



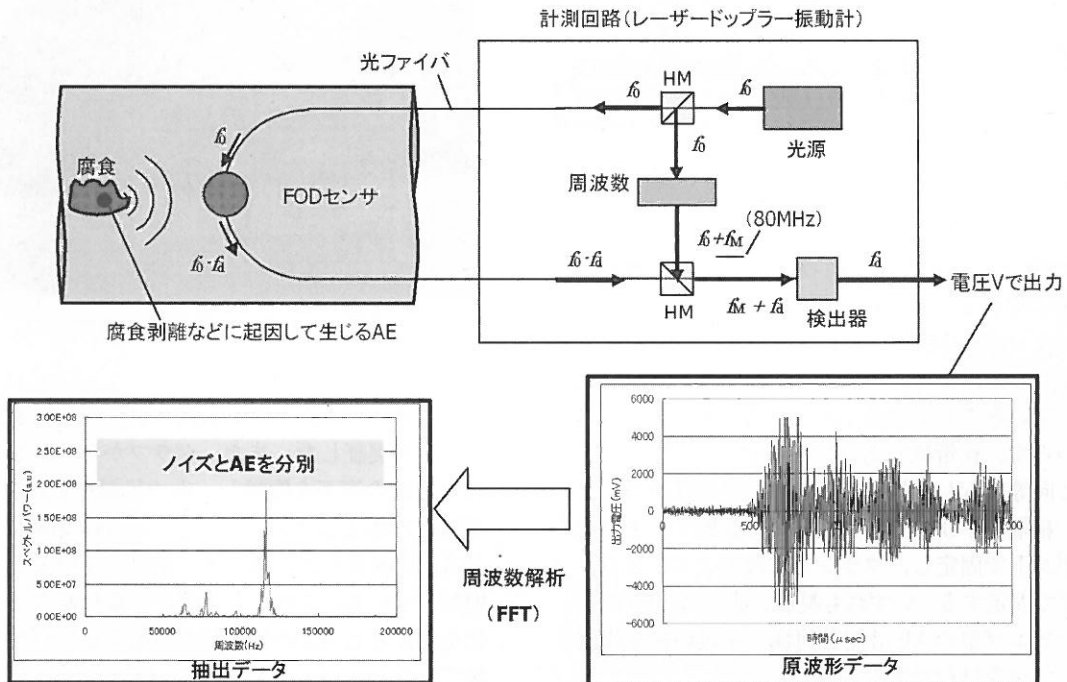
第3図 FODセンサの原理

に比例した出力が得られること、1Hz～1MHzと受信帯域が広帯域であること、-200℃から250℃までと広い温度範囲を持つことなどが特徴として挙げられる。また、FODセンサの利点については

- ① 高絶縁性である
- ② 耐電磁ノイズ性が高い
- ③ 防爆性で電気火花が発生しない
- ④ 長距離測定が可能
- ⑤ 広い使用環境を持つ

などが挙げられる。したがって、FODセンサを用いることで、上述した従来のピエゾ型AEセンサの欠点②～⑤については原理的に解決することができる。

第4図に配管CUIの光ファイバAEモニタリングシステムのイメージ図を示す。まず計測回路のレーザードップラー振動計の光源から周波数 f_0 の光波が入射される。FODセンサに入射された光波は腐食剥離や割れなどに起因して生じるAEを受信して周波数が $f_0 - f_d$ に変調する。一方、計測回路で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。具体的には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、検知器で f_d が検出され、FV変換器によって電圧Vに変換され

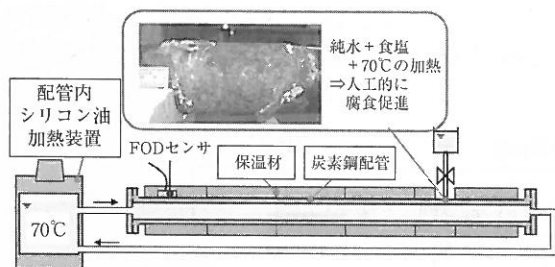


第4図 配管CUIの光ファイバAEモニタリングシステムのイメージ図

て出力される。このとき得られた原波形データに周波数解析 (FFT) を用いて、横軸が周波数、縦軸がスペクトルパワーとなる抽出データに変換する。このような波形解析も、ノイズと腐食起因のAEを弁別する技術として重要である。

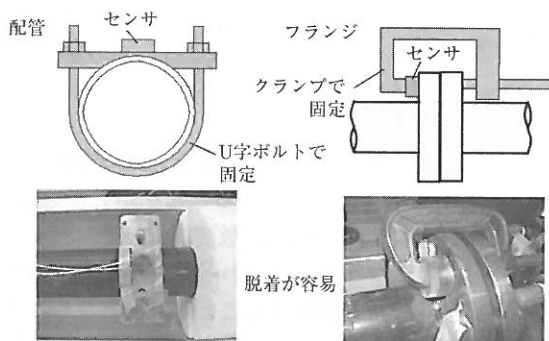
4. CUI検査検討のためのモックアップ配管

これまで光ファイバAEは地下貯槽掘削に伴う岩盤のゆるみ領域の評価などでの実績はあるが、CUIの評価に用いられた実績はない。そこで、このような光ファイバAEによるCUI検査技術の開発が可能であるかを検討するために、第5図に示すようなモックアップ配管を作製した。5mの炭素鋼配管に保温材をとりつけ、配管の内部には、加熱装置によって加熱されたシリコン油を循環させている。またCUIを効率よく発生させるために、ちょうど濡れ乾きが生じる程度に滴下量を微調整した純水と、食塩、さらにシリコン油による60~70℃の加熱によって、人工的に腐食を促進させる。FODセンサをこのモックアップ配管の任意の位置に設置して、この腐食部位からのAEに関するデータを収集した。



第5図 CUI検査検討のためのモックアップ配管

今回の検討には、65mの光ファイバを積層のコイル状に積み上げた、市販の積層型のFODセンサを用いた (第6図参照)。このセンサは積層型に光ファイバを設置することによって、感度が非常に高くなっていることが特徴である。広帯域であるにもかかわらず、狭帯域である従来のピエゾ型のAEセンサと同等、もしくはそれ以上の受信感度を持っている。積層型FODセンサは配管に設置するときはU字ボルトで固定し、フランジに設置するときはクランプで固定する。いずれも脱着が非常に簡単であり、またピエゾ型のAE計測と同様、市販の接触媒質を介して送受信ができる。



第6図 FODセンサの設置方法

5. モックアップ配管での測定結果⁽⁴⁾

5-1 腐食初期段階でのAE検出検討結果

2007年11月に腐食初期段階でのAE検出検討に関する実験を行った。この時点での配管の腐食状況を写真2に示す。まだサビこぼは発生しておらず、白く見えているのは再結晶した塩である。FODセンサは腐食部位から300mmに位置に設置した。AEの検出結果を第7図に示す。棒グラフが1時間あたりのAE発生数、折れ線グラフが累積のAE発生数を示している。

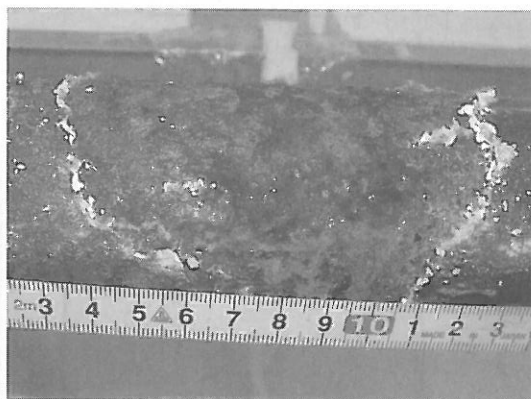
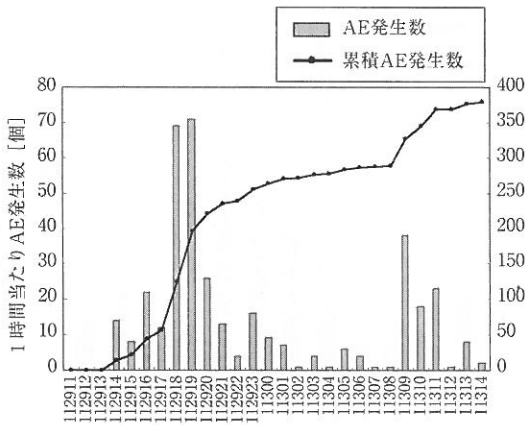


写真2 2007年11月の配管の腐食状況

このように腐食初期の段階でAEが計測可能であることを実証した。また、グラフからわかるように純水と塩の滴下を開始し、かつ昇温をした後にAEは急激に増加している。また、ある程度時間がたつとAEは収束していき、また油温を下げるとAEが増加している。このように錆びに濡れ乾きや温度変化を加えるとAEの発生数が増加するのが大きな特徴である。

また今回収録したAE波形は、第8図に示すよう



第7図 腐食初期のAE発生状況

に、周波数が100kHz超のもの、50k~100kHzのもの、10k~50kHzのものという3つのパターンに分類された。これは光ファイバAEが広帯域の受信が可能であるがゆえの結果といえる。実機の計測ではこれらの3つのパターンの周波数のうち、測定ノイズと重ならない周波数帯域のAEを選択的に受信することが重要となる。またAEは低周波ほど遠くに伝播するが、測定ノイズは低周波側に発生しやすいため、なるべく低い周波数でかつノイズとは重ならないパターンのAEを計測する必要がある。

5-2 AEの検出可能距離の検討結果

2008年1月にAEの捕捉可能な距離の検証を行った。この時点での配管の腐食状況を写真3に示す。サビこぶが発生し、腐食の進行が見てとれる。FODセンサは腐食部位から2,000mm、3,000mm、3,900mmの位置に設置した。3,900mmの位置でのAEの検出結果を第9図に示す。このように最大3,900mmでも十分な感度でAEの検出が可能であることが確認された。また、3つのAEパターンのうち、50k~100kHzの周波数が最も多く捕捉されていることがわかった。これは今後の課題となるが、実機での測

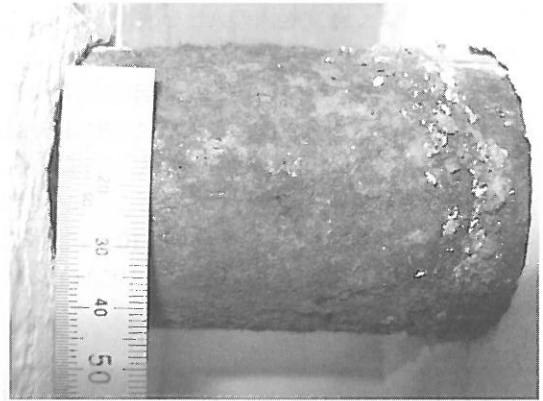
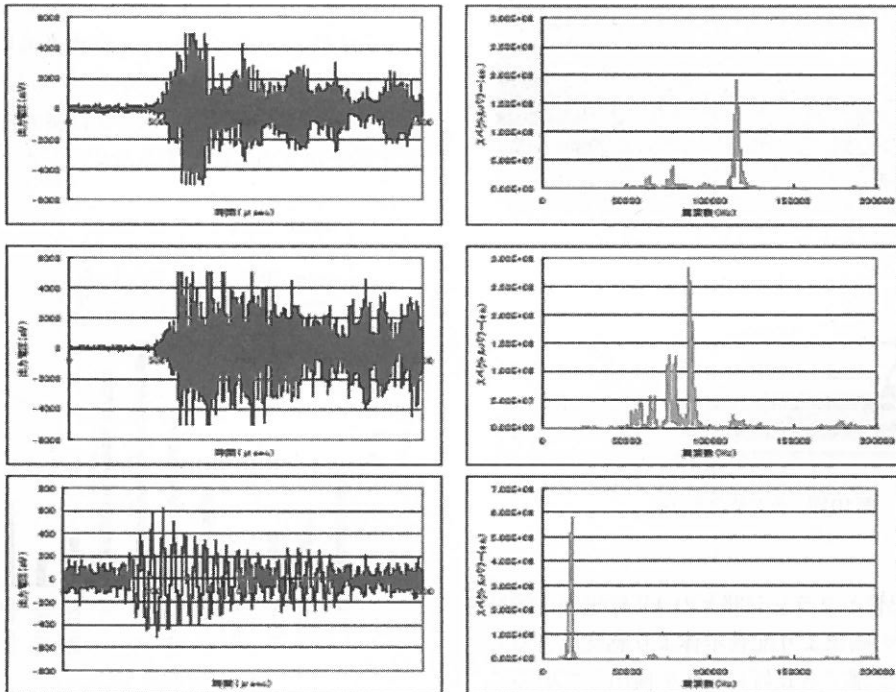
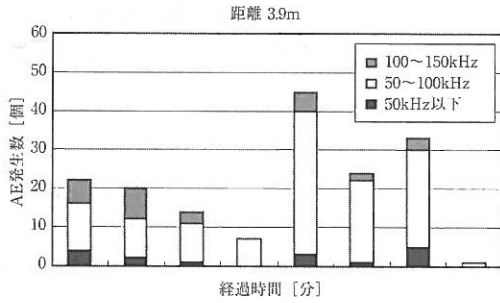


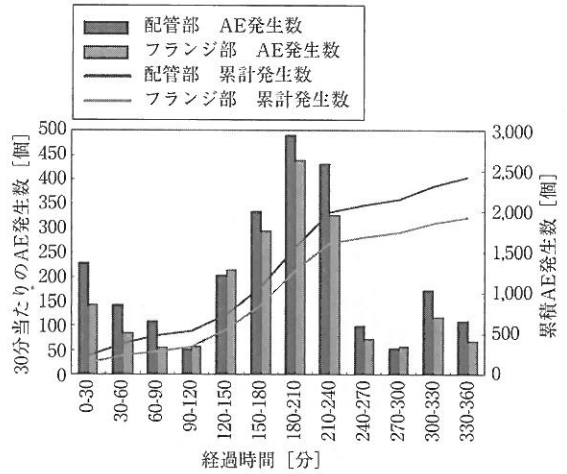
写真3 2008年1月の配管の腐食状況



第8図 AE原波形と周波数スペクトルのパターン



第9図 距離3,900mmでのAEの発生状況



第11図 配管とフランジ部のAE発生状況の比較

定においてこの範囲の周波数にノイズが存在していなければ効率よく腐食起因のAEを検出することが可能となる。

5-3 配管とフランジ部のAE検出結果の比較

2008年3月に配管とフランジ部のAE検出の比較を行った。この時点での配管の腐食状況を写真4に示す。サビこぶがさらに成長し、サビこぶに一部亀裂が発生している。FODセンサは第10図に示すように腐食部位から3,900mmの配管と3,950mmのフランジ部に設置した。

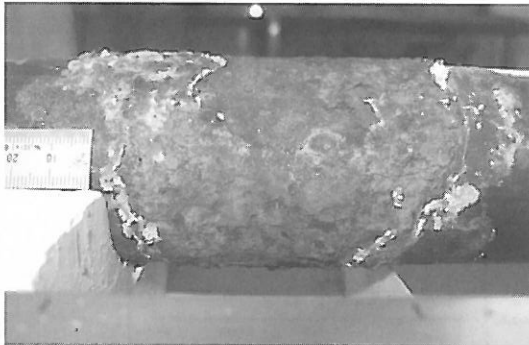
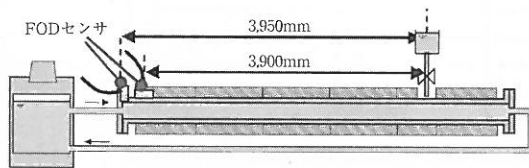


写真4 2008年3月の配管の腐食状況



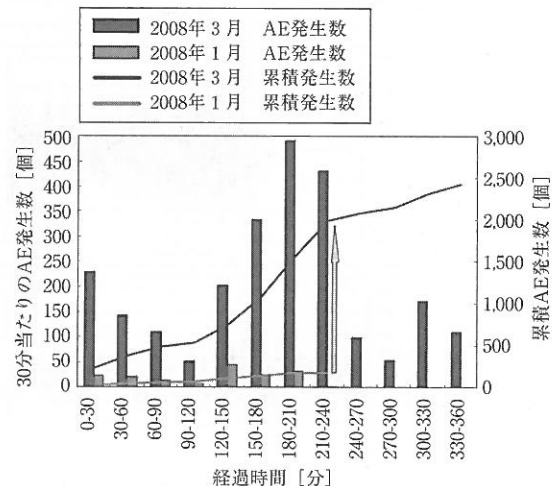
第10図 センサ設置位置

第11図に配管とフランジ部とのAE検出の比較結果を示す。この結果より配管本体より感度は劣るものの、フランジ部でも良好にAEを検出していることが確認された。フランジでAEが検出できるなら

フランジ部のみの保温材の解体で、AEを計測することが期待できる。

5-4 腐食進展度とAE発生数の検討

2008年1月時点での腐食部位からのAE発生数と、さらに腐食が進展した2008年3月時点での腐食部位からのAE発生数とを比較するため、同じ3,900mmの位置にFODセンサを設置して計測した結果を比較した。その結果を第12図に示す。ただし、2008年1月のAE計測は240分までしか計測していない。この図からも明らかなように、3月のAE発生数は1月に比べて、腐食進展に伴って明らかに増加していることがわかる(240分の時点でAE総発生数は10倍程度)。AE法は腐食面積や減肉深さを定量化することはできないが、サビこぶの体積



第12図 2008年1月と3月のAE発生数の比較

が増加するとAEの発生する確率が増加することから、AE発生数をカウントすることによって、腐食進展度とある程度相関性を持って評価できると考えられる。

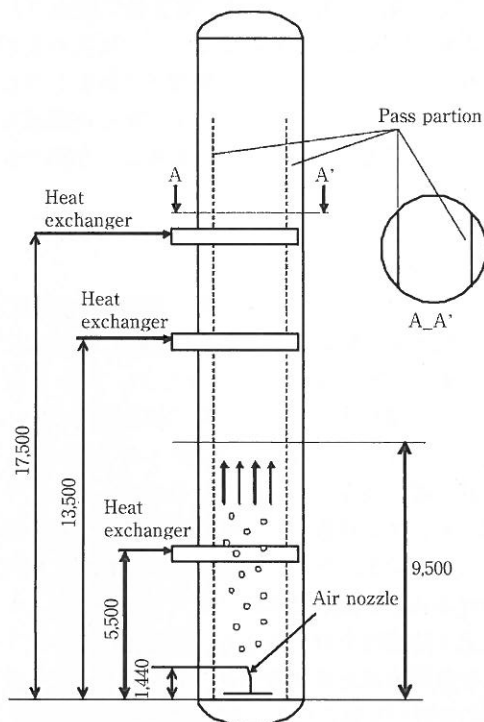
6. 実機での光ファイバAE測定⁽⁵⁾

6-1 静機器の選定と環境ノイズ弁別

配管では先述したように、完全とはいえなまでも保温材を解体しないでも検査は可能であるが、機器については保温材を解体しての目視検査以外の方法がない。そこで、CUIが顕在化していると思われる稼働中の縦型反応器（内径3.8m、塔長約28m）を測定対象機器として選定した。本機器では塔全面の断熱材を取り外して、CUIによって生じた錆びのケレンによる除去作業が計画されていた。従って、この工事にあわせてFODセンサを設置し、錆びの除去前後でAE計測を行い、内部流体による環境ノイズが含まれる条件下で、腐食からのAEの弁別性について検討することとした。尚、縦型反応器のような静機器に対して目視検査以上の有効なCUIの検査手法が確立されれば、足場の設置および保温材の解体が不要となり大きなコストメリットが得られる。

6-2 縦型反応器へのFODセンサ取り付け

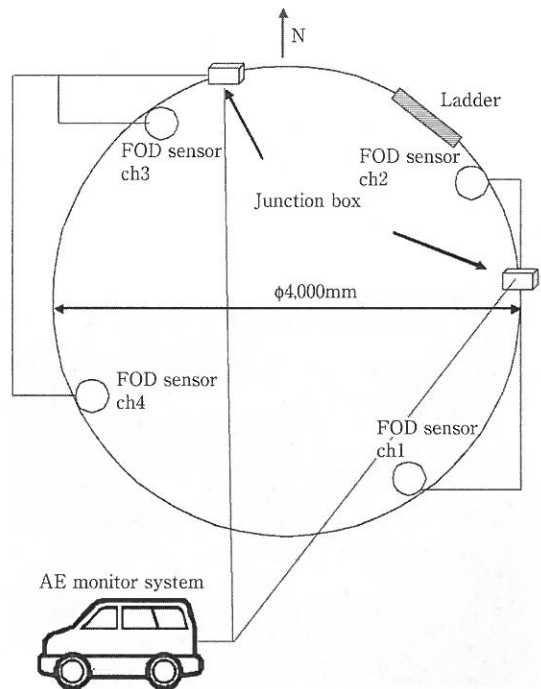
縦型反応器へのFODセンサの取り付け位置を第



第13図 縦型反応器の構造

13図および第14図に示す。高さ方向は反応器本体の下鏡と胴体との周溶接線を基準として9,500mmの位置とし、周方向には90°ピッチの約3,000mm間隔で4個（4ch）のFODセンサを取り付けた。

写真5に示すように、FODセンサを防水ケースで保護し、反応器外表面の塗装をサンドペーパーで除去した後、耐熱エポキシ樹脂系接着剤を用いて接着して、その上からアルミテープを用いて固定した。各FODセンサから伸びた信号ケーブルはch1とch2、ch3とch4をそれぞれジャンクボックスに集約し（写真6参照）、そこから地上までケーブルを伸ばしている



第14図 縦型反応器へのFODセンサ取り付け位置

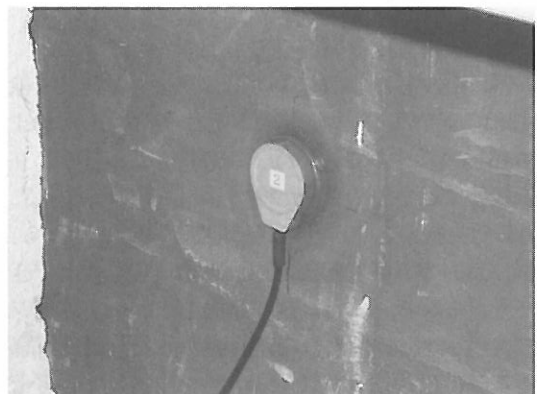


写真5 FODセンサの取り付け状況

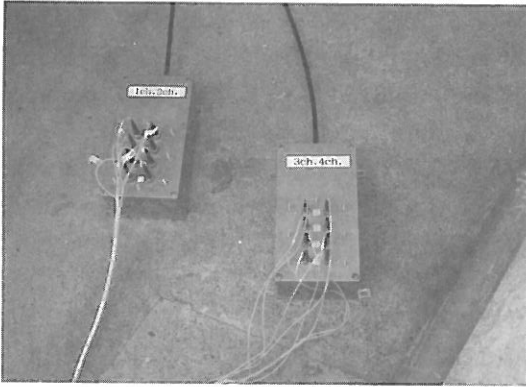


写真6 4chのFODセンサとジャンクBOXへの接続

る。AE測定を実施する時は、地上部に設置された端子ボックスと車に設置したFOD干渉計をケーブルで接続する(写真7参照)。このように、FODセンサを一度実機に取り付ければ、センサから遠く離れた地上部からでも容易に検査を実施できることも本手法の大きな利点の1つといえる。

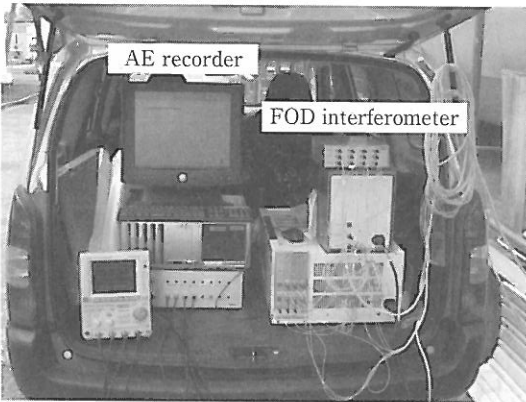
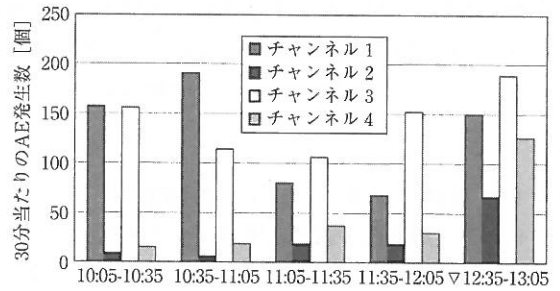


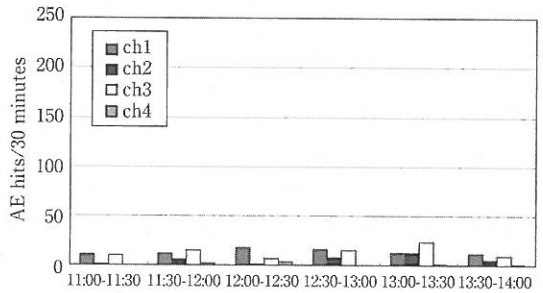
写真7 FOD干渉計、収録解析装置等を車へ積載してのAE計測状況

6-3 腐食部改修前後のAE測定結果

機器に発生したCUIによる錆びをケレン作業で除去する前後でのAE測定結果をそれぞれ第15図および第16図に示す。この結果、CUIによる錆びが存在する状態では多くのAEが検出され、錆び除去後にはAE発生数が1/10程度に激減していたことから、実機においても腐食起因と思われるAEを検出できたと考えられる。また、錆び除去前において各センサでAEの検出数に大きな差異があった。断熱材取り外し後の目視検査で多数のAEを検出しているセンサ近傍には複数の腐食箇所の存在が確認された。



第15図 錆び除去前に得られた30分当たりのAE発生数



第16図 錆び除去後に得られた30分当たりのAE発生数

このように実機を用いた実施試験でも錆びの状況とAEの発生状況に良い相関関係があることを確認できた。

ただし、第16図に示す錆び除去後に検出されたAEは腐食起因によるものではなく、現状の波形処理技術によるフィルタリング処理では除去しきれなかった環境ノイズと思われる。本技術を現場適用するにはこの環境ノイズをいかに精度よく弁別できるかが極めて重要となる。

7. おわりに

錆びこぶから発生したAEを、概ね10~150kHzの周波数範囲で捕捉した。また最長約4,000mmでもAEを捕捉可能であることを示した。これは左右8,000mmの範囲を1つのセンサで検査可能であることを示しており、感度に余裕があったことから、さらに長距離の検査も可能と考えられる。またフランジ部にセンサを設置しても配管部同様にAEを捕捉することができ、さらに実機においても腐食起因と思われるAEを検出できた。光ファイバ型AEセンサは元々防爆性を有するため、石油化学プラントのような防爆地域を有するプラント内においてもセンサ部の常設が可能となる。今後更にデータを蓄積し、早急に実用化を進めたい。

<参考文献>

- (1) 原 修一・山本勝美：防錆管理, 26 (2009)
- (2) 多田豊和・森 久和・長 秀雄・町島祐一：日本非破壊検査協会秋季大会講演概要集, 243 (2008)
- (3) K. Kageyama, H. Murayama, K. Uzawa, I. Ohsawa, M. Kanai, Y. Akematsu, K. Nagata and T. Ogawa, Journal of Lightwave Technology, 24, 1768 (2006)
- (4) 住友化学株, 特許出願中
- (5) 住友化学株, 特許出願中

【筆者紹介】

多田豊和 (昭和54年5月8日生)

住友化学株 生産技術センター
材料設備技術グループ
〒792-8521 愛媛県新居浜市惣開町5-1
TEL : 0897-37-1734 FAX : 0897-37-3153
E-Mail : tadat2@sc.sumitomo-chem.co.jp

末次秀彦

住友化学株 生産技術センター
材料設備技術グループ 主席研究員
〒299-0195 千葉県市原市姉崎海岸5-1

森 久和

住友化学株 生産技術センター
材料設備技術グループ 主席研究員
〒792-8521 愛媛県新居浜市惣開町5-1
TEL : 0897-37-1734 FAX : 0897-37-3153

長 秀雄

青山学院大学 理工学部 機械創造工学科 准教授
〒229-8558 相模原市中央区淵野辺5-10-1
TEL : 042-759-6202 FAX : 042-759-6502

町島祐一

株レーザーック 代表取締役社長
〒113-0033 東京都文京区本郷3-40-9 石狩ビル3F
TEL : 03-3816-3864 FAX : 03-3816-3867