

発表番号 4

## 光ファイバーAEモニタリングシステムを用いた 製塩装置の腐食モニタリングと製品汚染防止

助成研究者 竹本幹男 (青山学院大学 理工学部 機械創造工学科)

共同研究者 長 秀雄 (青山学院大学 理工学部 機械創造工学科)

光ファイバーを用いるアコースティックエミッション(AE)モニタリングシステムを開発し、腐食が誘起する損傷を検出し、ひいては腐食による製品の汚染を防止することを目的とする。開発システムは、ホモダイナミック・ツェンダー型干渉計で、2本のシングルモード光ファイバーとダイオードレーザ、ホトダイオードと特別に製作されたフィードバック回路から構成されている。

ダイオードレーザは、参照ファイバーとセンサーファイバーの2本に伝達され、ファイバ端でホトダイオードによって結合される。AEは、参照ファイバーとセンサーファイバーを通過したレーザの干渉による光の強さとして検出される。このシステムは、安定性とS/N比が、特別にデザインされたフィードバック回路によって著しく改善され、ラム波AEが検出できることが実証された。

開発したシステムの性能を、通常の圧電素子(PZT)センサーとレーザ超音波システムを用いて検証した。すなわち、鋼板表面に照射したパルスレーザのアブレーションが励起する高周波の分散性ラム波(板波)を、レーザ干渉計(面外変位計測)とPZTセンサー、光ファイバーセンサーで検出してその検出成分を比較した。システムは、バンドパスフィルタのため、150kHz以下のラム波Aoモード波を検出し、ウェーブレット変換で求めた群速度分散(速度の周波数依存性)は、理論的に計算されるそれと極めてよく一致することを確認した。

開発システムの特筆すべき特徴は、通常のPZTセンサーが面外方向の弾性波振動を検出するのに対し、面内振動を検出することである。そのため、ファイバーセンサを配管に巻きつけて使用すると円筒波AEを検出することに優れている。通常のPZTセンサーが振幅の大きなFモード波AEしか検出しないのに対し、振幅の小さなLモードAEを検出することである。

本研究による注目すべき成果は、高い指向性をもつ液中浸漬型AEセンサーが作成できたことである。このシステムは、色々なタイプの容器や貯蔵タンクの腐食損傷からの液中縦波を検出する。センサーは防爆であるので、燃焼性の燃料タンクにも使用できる。

研究助成者らは、開発システムは、オーステナイステンレス鋼パイプや製塩プラントから採取されたクラッド鋼板の塩化物応力腐食割れからのAEが検出できることを証明した。AEは、SCC破面の摩擦やSCC内に生成した錆の破壊によって生成するが、それらは部材に極めて微弱な熱応力や外部応力がされたときに頻繁に発生した。

AEは、SCCや隙間腐食、孔食などによって生成された酸化物すなわち錆の破壊によって発生するので、開発システムはこれらの腐食の発生や進展のモニタリングを可能にする。



6

助成番号 0406

## 光ファイバー-AE モニタリングシステムを用いた製塩装置の 腐食モニタリングと製品汚染防止

助成研究者 竹本幹男 (青山学院大学 理工学部 機械創造工学科)

共同研究者 長 秀雄 (青山学院大学 理工学部 機械創造工学科)

### 1. 緒言

多重効用缶型製塩装置では、応力腐食割れ、隙間腐食、孔食、ガルバニック腐食など実に色々な腐食が発生し、重大な問題にいたることはもちろん、製品の汚染につながることにもなる。密閉された製塩装置内や保温材に下で起こるこれらの腐食をオンラインで検出することが出来れば、製塩装置の健全性診断に貢献する。腐食モニタリング法としては、電気化学ノイズ(腐食電位揺動)などがあるが、電極を挿入しなければならないことなど、必ずしも実用化技術になっていない。

製塩装置では、クラッド鋼が多用されていることがかんがみると、耐食クラッド層が腐食損傷を受けると基材炭素鋼とのガルバニック効果によって激しい発錆を伴い、製品汚染を引起こす。錆の発生と成長は、体積膨張によって超音波(アコースティックエミッション, AE)を発生する。錆が発生する AE は、大型石油貯槽タンク底板の腐食診断に使われている。適切に AE を検出し、その音源位置標定を行うと損傷発生箇所も標定できる。腐食による AE は、通常圧電素子を用いるセンサで検出されるが、各センサの信号はケーブルを介してそれぞれ信号処理装置に送られる。すなわち、10個のセンサを使用する場合には、10本のケーブルを信号処理装置に接続しなければならない。このため、大型装置の腐食診断を行うためには、大掛かりな設備と労力が必要となり、製塩装置に適用するにはいたっていない。

本研究は、通信用光ファイバーを AE センサとする新しい AE モニタリング装置を開発し、腐食損傷の検出を行わんとするものである。低周波数の振動を計測するいわゆる“光ファイバー振動計”は市場化されているが、超音波を検出できるものは少ない。光ファイバーを超音波センサーとして使用する開発中の方法には、いくつかの方法がある。産業総合技術研究所が行っている方法は、屈折率の異なるブラッグセルを多数切り込んだ光ファイバーに広帯域のレーザを導入し、それぞれのセルからの反射レーザのスペクトルを解析する方法である。この方法は、解析に時間がかかること、光スペクトルアナライザや FGB などの高価な装置やファイバを使用するため十装置の AE 検出には応用できない。そこで、2本の光ファイバーを透過するダイオードレーザ

の干渉を利用する方法を開発した。この方法の基本特許は 2000 年に出願しているが、S/N 比が悪く AE センサーとして使用できるものではなかった。そこでシステムの安定化を行って腐食損傷による AE を検出した。

## 2. 光ファイバーAE モニタリングシステムの開発

AE を検出する光ファイバーシステムとしては、1 本の光ファイバーに単波長のレーザを一方向に伝播させ、端面で反射されたレーザとの干渉を利用するマイケルソン型干渉計と、2 本のファイバー（レファレンスファイバーとセンサーファイバー）にレーザを透過させ、位相干渉を利用するマッハ・ツェンダー型干渉計がある。

開発したシステムは、周波数変調しないマッハ・ツェンダー型干渉計で、フィードバック回路を自作して時間ドリフトを低減させ、AE が検出できるようにした。開発したシステム構成を Fig. 1 に示す。

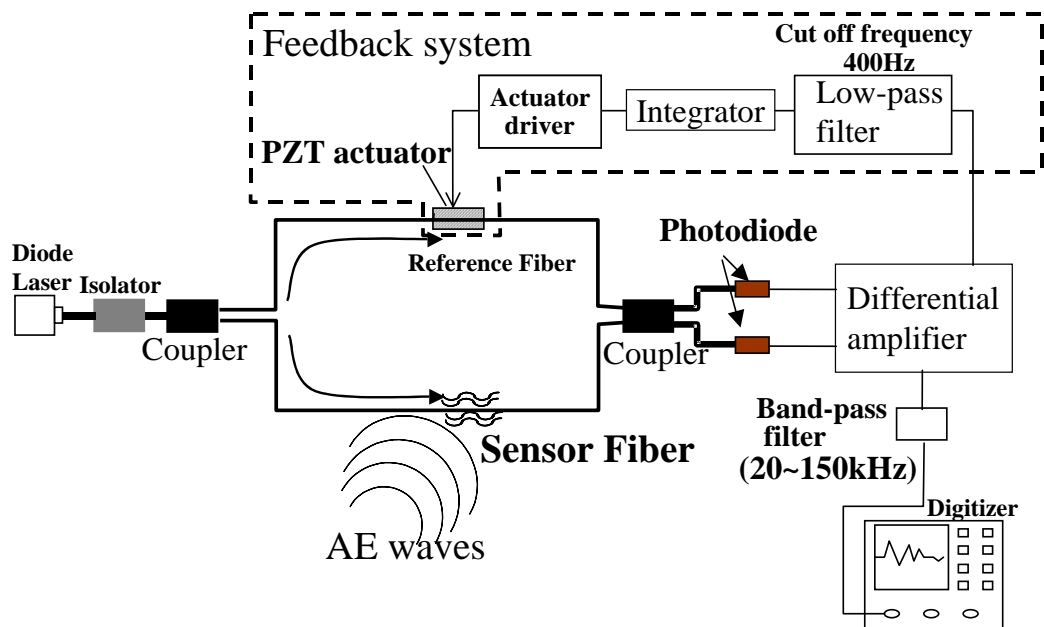


Fig.1 Improved optical fiber AE monitoring system with a feedback control system using PZT actuator

システムは測定部とフィードバック部（破線枠内）から構成されている。測定部は、入射から検出部まで光が一方向に伝播するマッハ・ツェンダー型であり、参照光に周波数変調を与えないホモダイン干渉システムである。すなわち、ピグテイル付レーザダイオード（三菱半導体社製、FU-427SLD）から発射された 1.3 mm 帯のレーザは、アイソレータ（応用光電研究室社製：AMS-1310-F-S-N）を介した後、1 x 2 カプラによってセンサ（物体）光と参照光に分岐されて 2 本のファイバ内を伝播する。光ファイバはコア径 9 μm、クラッド径 125 μm の PVC ジャケット付シングルモードファイバである。

センサ用ファイバは、ジャケット材をはがさずにそのままの状態では接着剤や押しつけにより測定対象物に取りつけられる。ファイバは、伝搬波動によって伸縮させられるため、センサ用ファイバ内を伝搬するレーザ光は位相変調を受ける。2本のファイバは2x2カプラで結合されて干渉光になったのち、再び2本のファイバに分岐されて別々のフォトダイオード(Thorlabs社製:PDA400)によって検出される。一般的に2x2カプラでの出力の位相はずれる<sup>3)</sup>ため、差分回路を用いて信号の増幅および直流成分を除去する。差分増幅された信号は、所定のフィルタを通過したのちディジタイザによって離散化され、デジタルデータとしてコンピュータに保存される。このシステムではレーザ光は光ファイバ内のみを伝播するため、光軸調整や光学定盤による振動制御は一切不要で、現場向きのシステムである。

光ファイバは温度変動や空気振動などの影響を受けて低周波で伸縮するため、システムは不安定になりやすい。また、光の干渉を利用して高感度の計測を行うためには、センサ光と参照光の位相を $\pi/2$ ずらした状態(quadrature)を保つことが必要である。そこで圧電アクチュエータ(NEC-TOKIN社製 AE0203D08, 20L x 3W x 2T mm)を用いたフィードバック制御を行った。差分回路からの信号をフィードバック信号として分岐し、ローパスフィルタ(遮断周波数400 Hz)を用いて低周波雰囲気ノイズを抽出する。その後積分回路を用いて quadrature 条件に適した信号に変換した後、アクチュエータ・ドライバを介して長さ20 mmの矩形圧電アクチュエータを伸縮させる。アクチュエータの長手方向と平行になるように参照光用ファイバをエポキシ系接着剤で強固に固定し、アクチュエータとともに光ファイバを伸縮させる。これによって雰囲気ノイズを補償し、光ファイバセンサを常に quadrature の状態に保つことができる。

### 3. フィードバック制御の効果

試作したフィードバック制御の効果を検証した。はじめに、センサ用光ファイバを床に静置し、フィードバック制御の有無によってどのような波形が検出されるかを調べた。

Fig. 2 に示すように、フィードバック制御を行わなかった場合(a)には、1 Hz以下の大きな揺らぎが検出された。

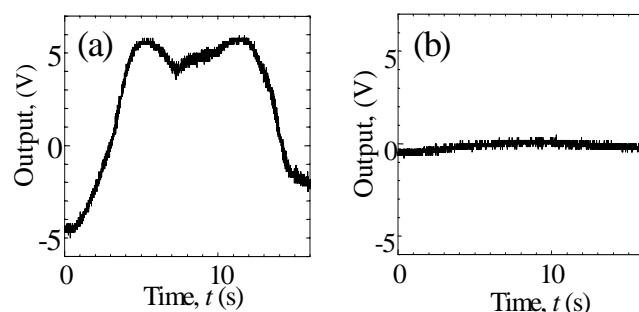


Fig.2 Comparison of system outputs with(b) and without(a) a feedback control.

この揺らぎによって検出感度は常に変化しており、システムは不安定になっている。一方、フィードバック制御を行った場合(b)、高周波の小振幅ノイズは存在するが、低周波の大きな揺らぎはなくなり quadrature の状態が保たれている。すなわちフィードバック制御した光ファイバセンサシステムは、安定した計測を可能にする。

#### 4. 改良光ファイバ AE 計測システムの特性評価

改良した光ファイバ AE 計測システムが測定する物理量および周波数帯域の評価を Fig. 3 に示す装置を用いて行った。

Q スイッチ Nd-YAG パルスレーザ(Continuum 社製: NY60-10, 波長 1,064 nm, パルス幅 50 ns) をアルミニウム板 (0.5 mm 厚) に線状 (8 mm 長) に集光して照射し、断熱膨張によってレーザ線法線方向に指向性をもつラム波を励起した。レーザ照射位置から所定の距離 (150 mm ~ 200 mm) 離れた位置にセンサ用光ファイバを線状レーザ光と平行にシアノアクリレート系接着剤で 10 mm 長さに着着しラム波を検出した。ガス漏洩による AE 波や大型構造物での健全性モニタリングには減衰の小さな低周波を感度良く検出する必要があるため、ここでは 20 ~ 150 kHz のバンドパスフィルタを用いた。

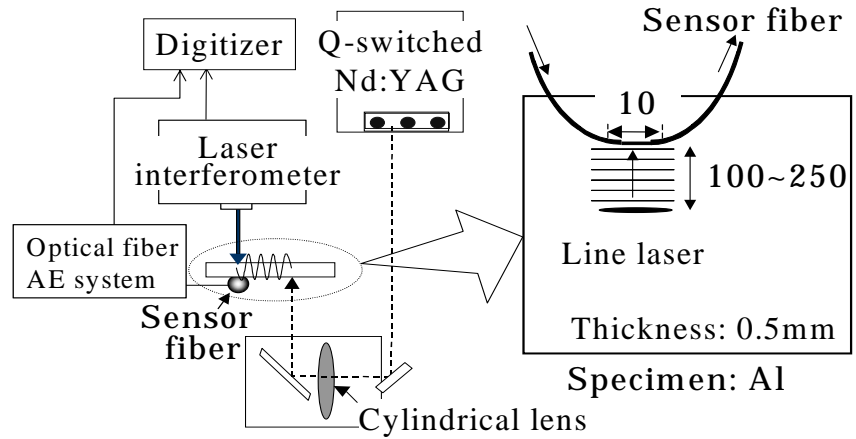


Fig.3 Experimental setup for evaluating performance of the optical AE system.

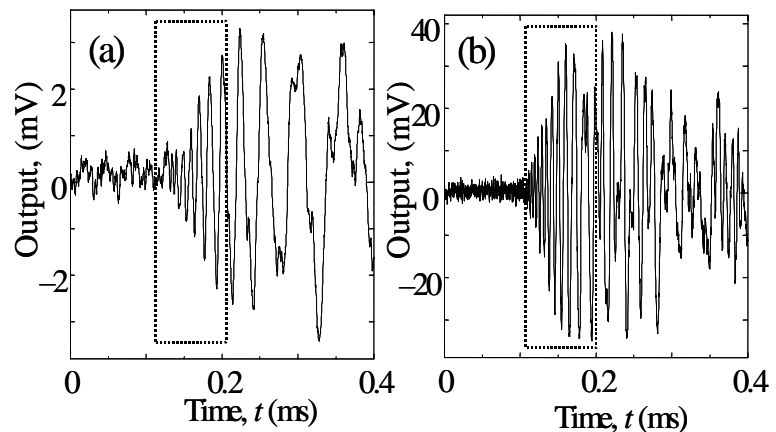


Fig.4 Detected waves by the developed system (a) and commercial laser interferometer (b)

また、計測システムの測定物理量を検討する目的で、センサ用光ファイバ貼付け部裏面での面外変位を市販ヘテロダイン型レーザ干渉計 (BM Industry 社製: SH-140、測定周波数帯 20 kHz ~ 45 MHz) を用いて検出し、波形を比較した。Fig. 4 に伝搬距離 150 mm における光ファイバ AE 計測システム(a)および市販干渉計(b)による検出波形を示す。測定では 60 回の加算平均を行った。

開発システムではバンドパスフィルタを用いているため市販干渉計の検出波形よりも低周波成分を検出しているが、低周波が遅れて到達するラム波  $A_0$  モード (非対称基本モード) の特徴を示している。それぞれの検出波形にウェーブレット変換を施して

求めた群速度分散を Fig.5 に示す .

なお図中の実線は、厚さ 0.5 mm のアルミニウム板(ヤング率 63 GPa、ポアソン比 0.32、密度  $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) から計算したラム波 Ao モードの群速度曲線である。開発システムから得られた群速度分散は、フィルタの上限周波数である 150 kHz まで解析的分散曲線や市販干渉計の速度分散とほぼ一致しており、ラム波 Ao モードを検出している。

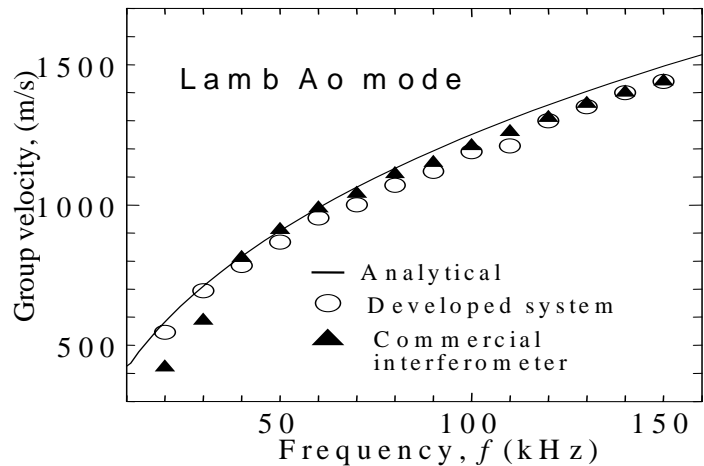


Fig.5 Group velocities of Ao mode Lamb wave measured by the developed system and commercial laser interferometer.

つぎに測定物理量の検討を行うため、Fig. 4 の点線で囲まれた領域を拡大して Fig. 6 にオーバーラップして示した。

開発システムでの検出波形 (Developed) と裏面における面外変位波形 (市販干渉計で破線) の位相は逆になっている。なお、市販レーザ干渉計と開発システムの変位方向については、市販レーザ干渉計では圧電素子の面外変位を、開発システムではファイバ長手方向に伸縮する圧電アクチュエータを用いてあらかじめ校正を行い、同位相になっていることを確認している。分散曲線計算ソフト (IC Consultants 社製 : Disperse) により計算された 100 kHz ラム波 Ao モードの深さ方向の振動変位分布 (Fig. 7) では、面外変位は深さにかかわらず同位相であるのに対して、面内変位は表面 (図の上) と裏面 (下) では逆位相になっている。

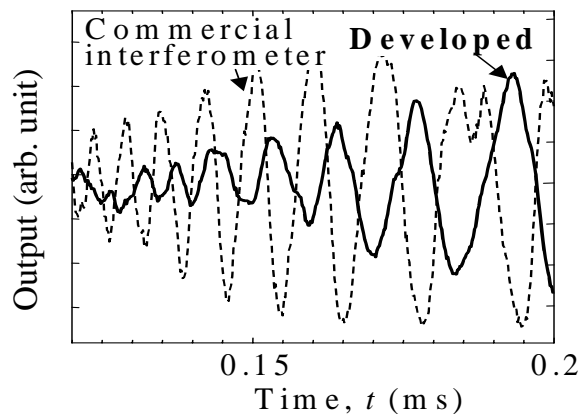


Fig. 6 Overlapping of the first portion of lamb wave in Fig.4

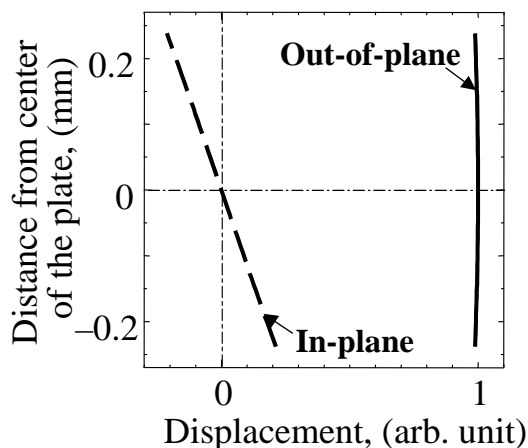


Fig.7 Comparison of in-plane and out-of-plane displacement of Lamb Ao mode through plate wall at  $f=100\text{kHz}$

すなわち、開発システムは面内変位成分を検出している。つまり、弾性波の面内振動によってセンサ用ファイバが伸縮し、それに

伴う光の位相変化を検出していると考えれば光の干渉原理に従った説明がつく。

つぎに、センサファイバの検出感度指向性について検討した。光ファイバは柔軟であるため曲面や凹凸面にも貼付けて計測できるが、貼付け形状や長さによって感度に指向性があると予想される。そこで、10 mm 長さの光ファイバを直線状にアルミニウム板に貼付けた場合の感度指向性を調べた。測定は、Fig. 7 に示すように直線状光ファイバと線状パルスレーザが平行になる角度を  $\theta = 0^\circ$  とし、レーザ照射位置を変えて  $\theta = 30, 60, 90^\circ$  (直交) 方向のラム波を 150 mm の位置で検出した。

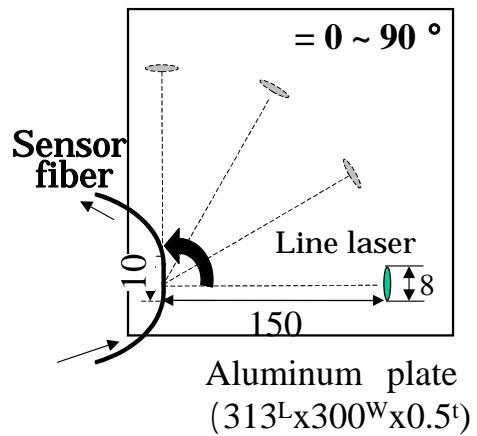


Fig. 8 A method for studying the directivity of line optical fiber sensor's sensitivity.

Fig.9 に  $\theta = 0^\circ$  および  $90^\circ$  における検出波形を示す。

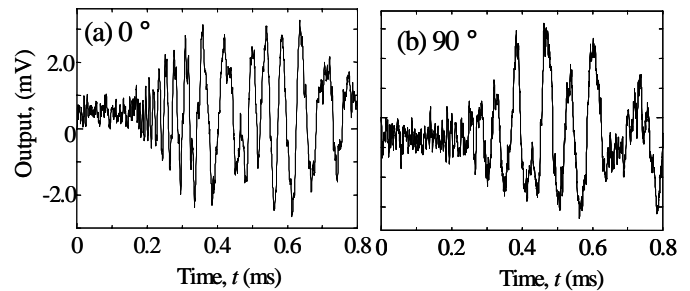


Fig.9 Comparison of Lamb waves detected by optical sensor fiber parallel (a) and perpendicular (b) to the source laser line.

$\theta = 0^\circ$  では時間とともに高周波から低周波に連続的に遷移する波動分散を示し、理論的に予測されるラム波  $A_0$  モード波形であるのに対し、 $\theta = 90^\circ$  では波形がみだれ低周波成分が多くなっている。Fig. 10 に 30, 50, 80 kHz におけるウェーブレット係数と伝搬方向の関係を示す。なお振幅は、各周波数における最大値で基準化して示した。いずれの周波数でも  $\theta = 90^\circ$  の振幅がもっとも大きかった。 $\theta = 90^\circ$  ではラム波伝搬方向とセンサ用光ファイバが平行であるためラム波はファイバ長さで積分されて検出されるため、振幅は大きくなるが、位相は一致せず、波形がみだれたと思われる。

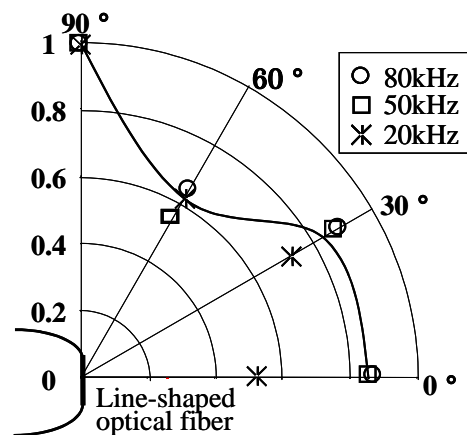


Fig.10 Sensitivity distribution of line-shaped optical fiber sensor

### 5. 液中浸漬 AE センサとしての応用

一般に貯槽(製塩プラントでは塩溶解槽)の腐食を AE でモニターする場合、貯槽の側壁外側や底板に多くの AE センサを設置してラム波(板波)モニターする。この検査方法は、相当の経費を必要とするので、溶解槽の腐食モニタリングなどには使用できない。しかし、液中に光ファイバセンサを浸漬して、腐食(錆の破壊)による液中



縦波をモニタリングすれば、極めて安価なモニタリング法になる。

そこで、Fig. 11 に示すような指向性センサ・ホルダーを作成して、液中縦波が検出できるか、音源位置（腐食箇所）が標定できるかを調べた。指向性センサは、中空アルミ円筒の一部を平面にし、面上に光ファイバーを多重巻きしたものである。液中を伝播した縦波は、面上のコイル状光ファイバーセンサによって検出される。センサ・ホルダーを回転すれば、音源位置が標定可能である。中空円筒を用いたのは、センサ背面からくる縦波を除去（減衰）させるためである。AE の検出感度はファイバーの巻数を多くすればよくなる。このセンサを用いて円筒容器の側壁に人工音源（縦波用圧電素子）を与えた時の振幅分布を Fig. 12 に示す。

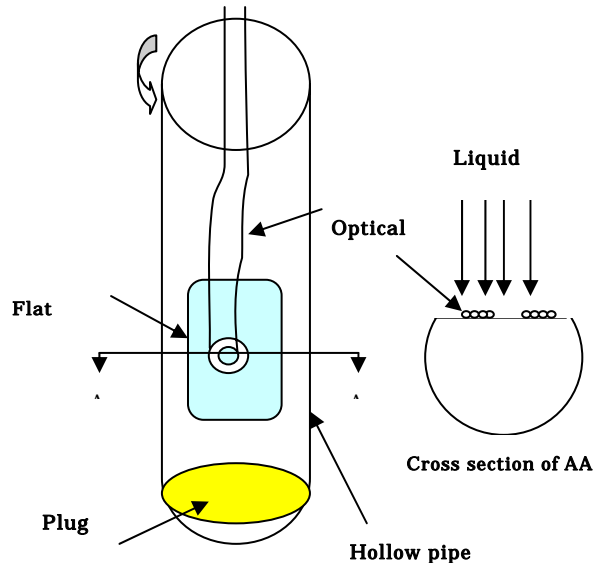


Fig.11 In-water type AE sensor with high orientation sensitivity

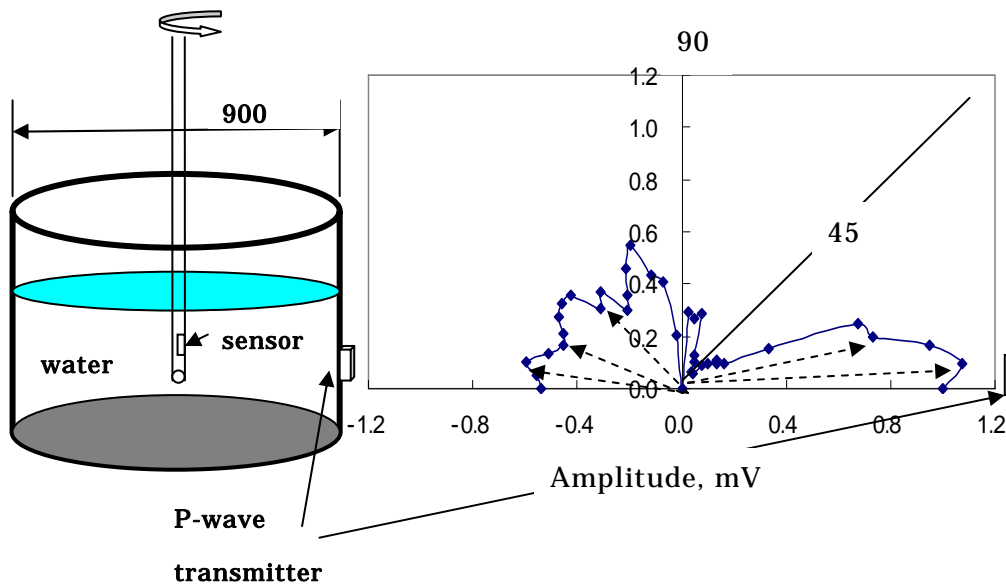


Fig.12 Distribution of water-born P-wave produced by transmitter

縦波振幅は、音源のある方向で最大値を示し、30°以上では極めて小さくなっていることから、音源（腐食）位置が標定できる。

## 6. SCC モニタリングセンサとしての応用

ステンレスクラッド鋼やステンレス配管を使用している製塩プラントでは、SCC は最も起こりやすい腐食現象である。SUS304 の粒内型 SCC そのものは、活性経路アノード溶解型であるためか、AE はほとんど放出しないが、温度や微弱な圧力変動がある場合には破面の摩擦、SCC 内に錆が生成する場合（クラッド鋼では特に著しい錆の発生が生じ、錆の体積膨張によって別方向の SCC を発生する）には錆の破壊による AE が検出できる。この場合の AE は出力があまり大きくないので、SCC の起こりやすい場所に AE センサーを設置することが必要になる。圧電型 AE センサを使用する AE システムでは、センサー 1 個ごとに重い同軸ケーブルが必要になり、マルチチャンネル化するのは大変である。しかし、光ファイバーセンサーを使用すると、SCC が懸念される場所、たとえば溶接では熱影響部（HAZ）に設置しておけばよい。光ファイバーセンサーのもつ特徴を最大に発揮できる一例として、突合せ溶接 SUS304 鋼管の SCC を Fig. 13 のようなシステムで外面 SCC をモニターした。この溶接管には HAZ 域に目視が難しい ESCC が発生しているが、この管にシリコンゴムの膨張によって内圧を負荷し AE を検出した。光ファイバーは HAZ 域から少し離れた位置に 10 回巻きつけた。

また圧電素子センサー 4 個（#1～#4）を SCC を取囲むように設置した。

右の図は、ゴムに負荷した圧縮力と周方向ひずみ曲線に、光ファイバーセンサーが検出した AE の発生タイミングを矢印で示した。

AE は、70 マイ

クロストレイン（0.007%）という低いひずみから検出されている。すなわち SCC が存在すると、熱応力やわずかの圧力変動などによって SCC のある場所から AE が発生するので、SCC が検出できる。

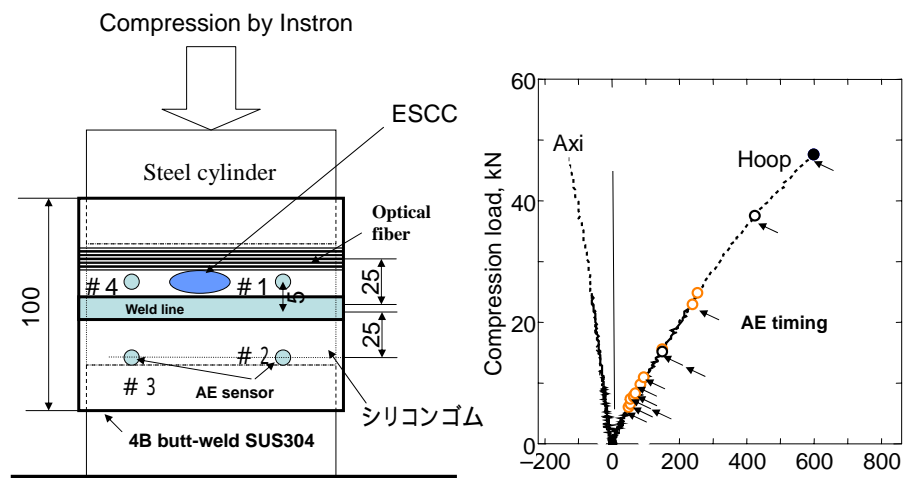


Fig.13 AE monitoring from ESCC on butt-weld SUS304 tube and test result(the right)

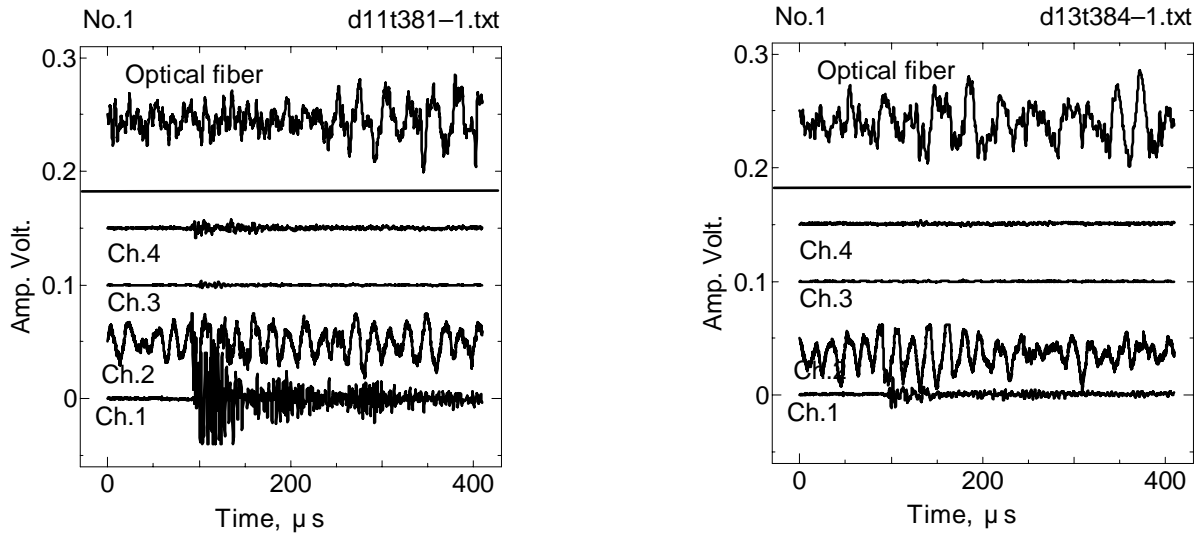


Fig.14 Example of AE waveform detected by optical fiber sensor and conventional PZT sensors (#1, 2, 3, 4)

Fig. 14 は、検出された AE 波形の一例である。最上段の光ファイバーセンサが AE を検出しているにも、PZT センサのうち no #3 と #4 は十分な振幅の AE を検出していない。すなわち、PZT センサは音源 (SCC) の近くに設置していないと AE が検出できないが、光ファイバーは円周に巻かれているので円周上の何処で SCC が発生しても AE を検出する。巻きつけた光ファイバーは、円管の半径方向振動 (円筒波の longitudinal と呼ばれる通常の PZT センサでは検出の難しい波動) を検出できる。

#### 7. クラッド鋼 (製塩装置蒸発缶) に発生した SCC から AE モニタリング

ステンレスクラッド蒸発缶で発生した SCC から AE が、外側から光ファイバーセンサで検出できるかを調べた、このサンプルは多重効用型製塩装置から採取されたもので、激しい発錆を伴っている。これは Fig. 15 に示すように SCC が基材炭素鋼まで貫通し、ガルバニック腐食によって激しい錆が SCC 中に成長し、外に漏れだしたためである。このような SCC は、錆の破壊 (体積膨張による自壊) によって AE を放出することが予想される。

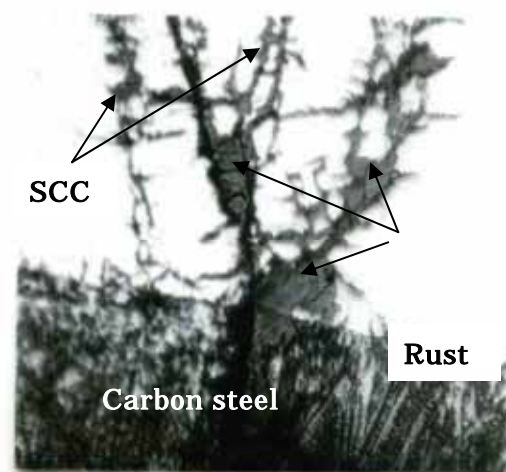


Fig.15 Transverse section of SCC in SUS304 clad steel in salt producing plant

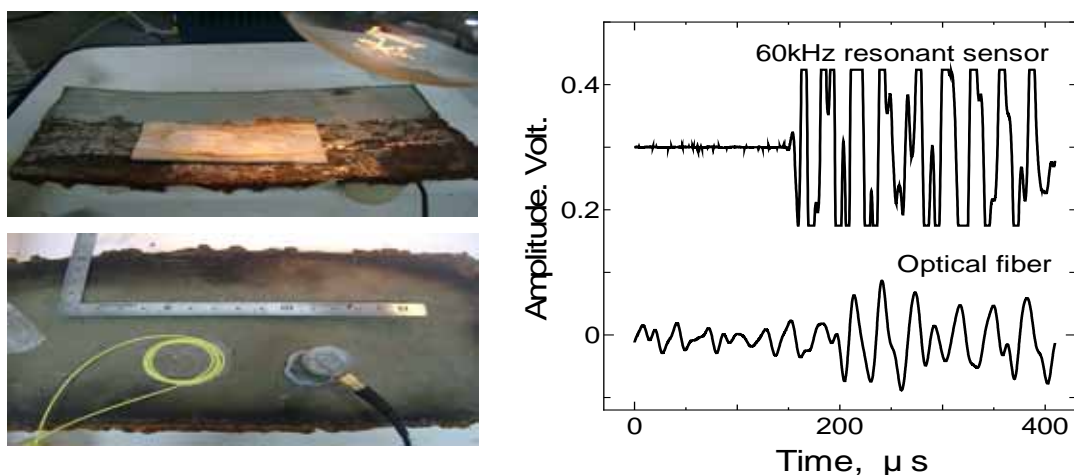


Fig.16 AE monitoring method from chloride-SCC on SUS304 clad steel in salt producing plant

そこで，Fig. 16 に示すように炭素鋼（外側壁）に光ファイバーセンサと PZT センサを設置し，赤外線ランプでわずかに加熱して AE を検出した． 35°C まで加熱すると，右に示すような AE が頻繁に検出された．光ファイバーシステムの感度は，PZT センサよりも悪いように見えるが，これは増幅していないからである．一方，PZT センサは 40 dB（100 倍）増幅している．SCC 検出センサとして作動することが確認できた．

## 8.まとめ

装置を停止することなく損傷発生をモニタリングする方法として，光ファイバーをセンサとする新しい AE モニタリングシステムを構築し，腐食損傷発生やそれらの場所を同定した．結果は以下のように要約される．

- 1) 開発したシステムは，ホモダイン・マッハ・ツェンダー型干渉計で，独自のフィードバック回路を用いてシステムの安定化と S/N 比の改善を行い，アコースティックエミッション（AE）を検出することを可能にした．光ファイバーは弾性波動による面内振動を計測する．
- 2) 液中浸漬型指向型 AE センサホルダーを試作した．このホルダーは液中を伝播する縦波を高い指向性をもって検出するので，発火性燃料中にも浸漬して使用することも出来，埋設タンクなど検査の難しい装置の腐食損傷の検出や方向の標定を可能にする．
- 3) 製塩装置で問題となっているオーステナイステンレス鋼の SCC が検出できるかいなかを調べたところ，極めて微弱なひずみを与えられると SCC から放出される AE が検出できることがわかった．

## Corrosion Monitoring and Contamination Mitigation in Salt Producing Plant by Optical Fiber Acoustic Emission Monitoring System

Mikio Takemoto and Hideo Cho

Faculty of Science and Engineering , Aoyama Gakuin University

### Summary

Study aims to develop an optical fiber acoustic emission (AE) monitoring system and detect corrosion-induced damages in salt producing plant and thence to mitigate the product contamination by corrosion damages. The system is a homodyne Mach-Zhender interferometer and consists of two single-mode optical fiber, diode laser, photodiode detector and feed back system. Diode laser was transmitted into two optical fibers; one as reference fiber and another a sensor fiber, and coupled at the fiber end by a photodiode. AE was detected as a laser intensity due to the interference of two lasers through reference and sensor fibers. This system was significantly improved in its stability and S/N ratio by utilizing a specially designed feed back circuit, and demonstrated to detect the Lamb wave AE. Characteristic feature of this system is the detection of in-plane motion of elastic wave while the conventional PZT type AE sensor measures the out-of-plane motion. Thus the system is specially excellent in cylinder wave AE monitoring when the sensor fiber was round on the tube surface. It can measure the weak longitudinal mode of cylinder wave AE while the conventional system measures the strong flexural mode wave.

A noticeable achievement by this research is a development of in-water AE sensor with high directivity . The system monitor the water-bron longitudinal AE from corrosion damages of various type container and storage tanks. The sensor is explosion-proof sensor and can be utilized even in flammable fuel tank.

We also demonstrated that the system can detect AEs from SCC of austenitic stainless steel pipe and stainless clad plate taken from salt producing plant. AE were frequent generated by friction of SCC and fracture of solid rust in SCC when a very light thermal and external stresses are applied to the members.

As the AEs were generated by the fracture of oxide or rust produced by SCC, crevice corrosion and pitting corrosion, the system can make the monitoring of the initiation and progression of these corrosion damages possible.