

AE による円筒貯蔵タンクの腐食診断

Corrosion Monitoring of Cylindrical Storage Tank by Acoustic Emission

青山学院大学	長 秀雄	Hideo CHO
青山学院大学	松尾 卓摩	Takuma MATSUO
青山学院大学	竹本 幹男	Mikio TAKEMOTO

This study discusses what we can do for the corrosion monitoring of storage tanks by acoustic emission (AE) technique. AEs from rust fractures were monitored by AE sensors mounted on terrace of annular plate (annular sensor) and side wall (side wall sensor) using two AE systems developed by us (ADAS) and commercially available. Percentages of AE signal counts classified by eye-inspection were less than 10 % of the total events monitored by the ADAS and less than 0.92 % by the commercial AE system. These AE activities suggested an extremely low corrosion risk parameter, however the signals counts classified by the fractal analysis according to the recommended practice by HPIS G110TR suggested an extremely high risk parameter, suggesting difficulty only from AE activities. Source locations estimated from the Lamb wave AE signals detected by sensors on the annular plates agreed fairly well with the wall reduction portion measured by the point-to-point ultrasonic thickness measurement.

Keywords: Acoustic Emission, Storage Tank, Lamb Wave, Corrosion, Source Location, Wall Reduction

1. 緒言

日本には現在約 77,800 基の屋外タンクがあるが、そのうち 1000 kl 以上の屋外特定タンクは約 8,800 基あり、屋外特定タンクでは 7 年から 15 年に一度の開放点検（肉厚検査）が義務付けられ、許容減肉は定点肉厚計測データの場合には設計肉厚の 20% である。本邦におけるタンク検査は、time based inspection (TBI) に基づいて行なわれているが、AE を用いて供用中タンク底板の状態を監視しながら、開放点検時期等をタンクオーナーが自主的に判断する保安体制に向けた動きがある^[1,2]。2006 年に高圧力技術協会による技術指針 (HPIS-G110TR2005) が発行された^[3]。この技術指針では、“側壁に設置した 1 センサの 1 時間あたりの有意な信号数 (AE activity) から腐食リスクパラメータ (Corrosion Risk Parameter, CRP (mm/year)) が推定できる” ことになっているが、筆者らは短時間計測で得られた

AE 数から腐食速度の推定は難しいという結果を得た^[4,5]。また、その腐食速度がどの部分腐食に対応するのかが不明である。つまり、今後のタンクの保守において AE で出来ることと出来ないことを計測データに基づいて定量的に議論する時期にあると考える。

なお、AE によって腐食状態をモニタするという原理は、錆の破壊（体積膨張による自壊や外部負荷（温度、圧力）による破壊）が AE を放出することにある^[6]

2. AE によるタンク底板検査の現状

タンクの検査法として TANK-PAC^[7,8] と呼ばれる方法があり、ヨーロッパを中心に多くの検査が行われている。この方法では、側壁に設置した多くのセンサ（以後、側壁センサという）で AE を検出し、タンクの状態を評価する。雨風のない日の 1 時間で検出される AE の発生頻度や振幅、持続時間等からタンクの状態を 5 段階に評価している。

しかし、大型タンクの AE 計測では、60~80dB の増幅をかけるので、ノイズの多い屋外装置では膨大な数のノイズを検出する。その一つに固定屋根方式のタンクにおける屋根結露水の落下によるノイズがある。こ

◆連絡先: 竹本 幹男

神奈川県相模原市淵野辺 5-10-1
青山学院大学 理工学部機械創造工学科
E-mail: takemoto@me.aoyama.ac.jp

のノイズは側壁センサではセンサを 2 段に設置し、3 次元の AE 音源位置標定を行えば排除できるが、このように素性のはっきりとしたノイズは決して多くはない。そのためノイズと信号を厳密に区別しなければ、信頼性のある診断が難しいが、どのような AE 計測装置も、ノイズと信号とを完全に判別できる機能はもっていない。一般には、しきい値を変更したり、風の強いときにはモニタリングを中断するなどの措置が取られるが、現状の信号処理技術ではノイズを完全に除去することは難しく、検出 AE 数は測定条件に大きく左右される。そこで、著者らのグループは、これまでに 6 タンク (1 万~7 万 kl) の AE モニタリングを行ってきたが^[2,9,10]、本報では、2005 年 11 月におこなった 7 万 kl の原油タンク (浮き屋根方式) の AE データを基に、AE で出来ることとは何か、何が難しいかを議論することを目標に、市販 AE 計測システムを用いた AE 計測およびノイズ処理法での腐食損傷評価と AE 波形の到達時間や波形を見比べて (目視観察で) 信号とノイズの区別し、できるだけノイズを除去した場合での評価結果とを比較した。また、AE 計測から得られる最も信頼性の高い情報として AE 源位置、すなわち腐食損傷位置の標定精度を検討し、現状の AE 計測法の問題点を明らかにすることを試みた。

3. 7 万キロリットルタンクでの AE 計測

2005 年 11 月 24、25 日に行った 7 万 kl の原油貯蔵タンク (直径 67.8m、高さ 29.26m、浮き屋根方式) の AE 計測結果、HPIS G110TR に基づいた CRP の推定を行うとともに、有意な信号の音源位置標定と超音波厚さ計による肉厚データとの照合を行った結果を示す。

AE は、Fig.1 に示すように共振周波数が 30kHz の 16 個の圧電型 AE センサを 22.5° おきにアニュラ板テラスおよび側壁に設置し、市販 AE 装置で 16 個のセンサを用いて検出した。このとき、奇数 8 個のセンサ出力は研究室で開発した ADAS で解析した。ADAS はすべてのイベントをデジタルデータとして貯蔵し、目視観察による波形解析を行う。なお、市販 AE 装置の不感時間 (イベントとイベントの最小時間) は 5ms、ADAS のそれは 10ms である。後者の不感時間は 30ms 以下で、現場装置の AE 計測装置に要求される仕様を満足している。

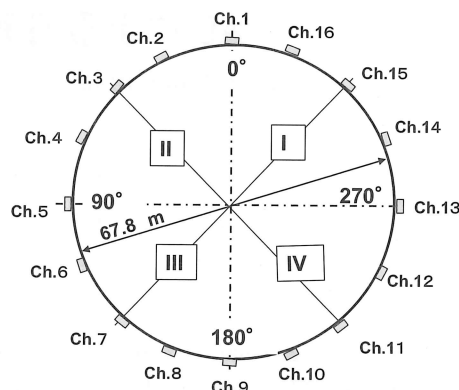


Fig.1 Sensor layout for AE monitoring of cylindrical tank with 67.8 m diameter.

4. 計測結果

4.1 AE 計測数の比較

Table 1 には、計測日の気象条件、データ番号、計測時間、市販 AE 装置による検出総イベント数 (ノイズも含む)、信号数 (しきい値を用いた自動標定法で位置標定できたイベント数)、信号数の総イベント数に対する割合、1 時間・1 チャンネルあたりの信号数 (AE activity) を示した。データ番号の S-は Side wall センサを、A は Annular センサを意味する。両日とも晴れで、最大瞬間風速は 3.2m/s、気温は 16~18°C であった。

Table1 Detail of AE monitoring and data obtained by commercial AE system

Date	Nov. 24		Nov. 25		
	Weather	16°C, Wind: 3.0/0.8 m/s	19/15°C, Wind: 3.2/0.7 m/s		
Data number	S-01	S-02	A-01	A-02	A-03
Sensor location	Side Wall	Side Wall	Annular	Annular	Annular
Start time	14:15	15:25	9:35	10:55	11:55
Finish time	15:18	16:25	10:35	11:55	12:55
Monitoring hour	1	1	1	1	1
Threshold, mV	50	50	50	15	12
Total events	517,664	472,912	18,992	39,520	39,808
Total signal	2,894	3,546	48	430	367
Percentage of signals to total events	0.56	0.75	0.25	0.1	0.92
Signal counts per one channel sensor for 1 hour	160	221	3	27	23

市販 AE 装置における側壁センサ (しきい値 40dB) では 1 時間あたり 50 万個ものイベントを、アニュラセンサ (40~35dB) では 2 万から 4 万イベントを検出しているが、信号数の総イベント数に対する割合は 0.92% 以下である。

Table 2 には、ADAS で解析したイベントと信号数を示した。信号数は 282 個以下で、もっとも高い割合は 35.3% (S-02) であった。

Table2 Detail of AE data obtained by ADAS system

Data number	S-01	S-02	A-01	A-02	A-03
Threshold, mV	50	50	50	15	12
Total events	2,845	2710	253	3124	5716
Total signals	63	282	34	30	51
% of signal/events	2.2	10.4	1.3	0.9	0.9
Signals per one sensor for one hour	7.8	35.3	4.3	3.8	6.4

なお Table 2 における Total signals は、検出したすべての波形を目視観察し、1) 各センサの到達時間が放物線上に乗っているか、2) 十分な S/N 比を持ったラム波の特徴を持っているかなどを調べて分別した。

Fig.2 には ADAS による S-02 と A-01 データの総イベント数と信号の経時変化を示す。この図における“signal”は、位置標定ができた有意な信号という意味で、Table 2 の total signal よりも少なくなっている。S-02 では発生速度はほぼ一定（累積数は直線的）であるが、A-01 ではステップ状の発生曲線を示している。紙面の都合でデータは示さないが、S-01 では最初の 10 分で頻繁な発生が検出されたが、その後の発生はなかった。また A-03 では、最初の 30 分の発生率は 100 イベント/hr であったが、後半の発生率は 22 イベント/hr まで低下した。

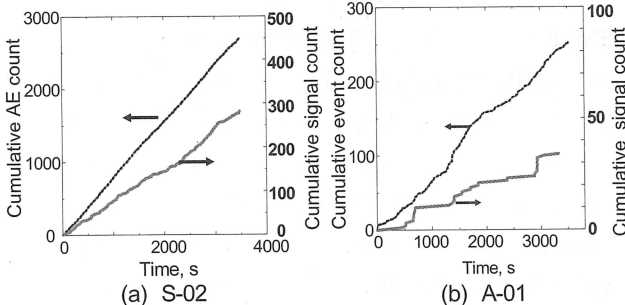


Fig.2 Change of cumulative event counts and signal counts with monitoring time

次に、1 時間 1 チャンネル当たりの信号数 (AE activity) を、HPIS G110TR による CRP 線図にプロットした。Fig.3 は、HPIS の技術指針に掲載されたデータの上に今回得られたデータをプロットしたものである。ADAS による AE activity は S-02 を除けば 100 以下であるので、CRP は 0.01mm/year で腐食はほとんど進行していないことになる。また HPIS G110 では、信号とノイズの判別法として、AE 振幅分布のフラクタル性を利用した方法を提唱しているが、例えば S02 データは Fig.4 に示すように、振幅分布の勾配は 40~80dB の振幅変化に対して一定であった。このグラフは HPIS G110TR においてノイズの可能性のある現象を考慮し

た後のものである。

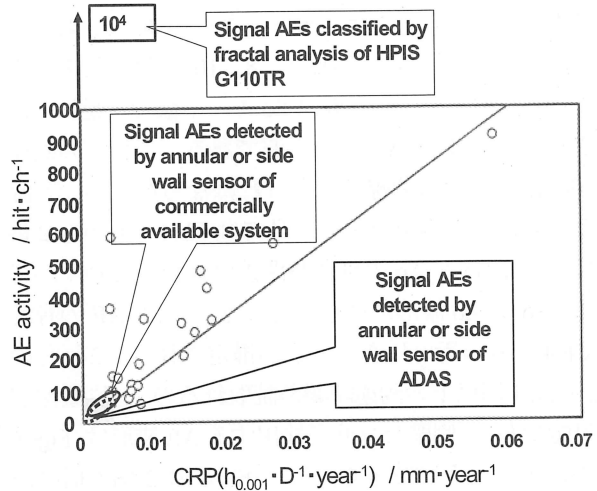


Fig.3 Data plot on the relationship between AE activity and corrosion risk parameter CRP by HPIS G110

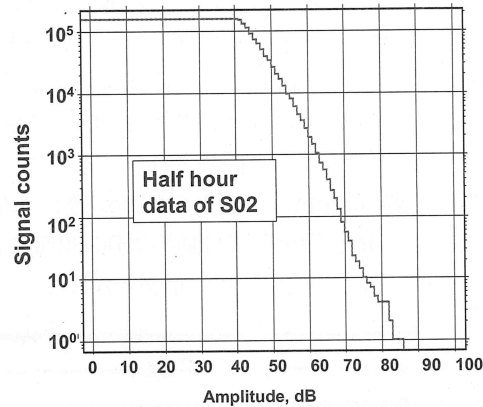


Fig.4 Amplitude spectrum of AE data (S02) detected by side wall sensor and AMSY-5 system

すなわち、市販 AE 装置で検出された総イベント数 (47 万個~52 万個) はすべて信号と判断され、HPIS G110TR では Fig.3 を外挿すると約 2mm/year に相当する。しかし、後述する底板肉厚検査では深刻な腐食損傷は見つかっておらず、この場合 Fig.3 の CRP 推定曲線の結果とは大きく食い違っていた。

4.2 信号 AE の波形と位置標定

4.2.1 信号波形

腐食場所を標定するには、最低でも 3 個のセンサ出力から信号の到達時間が読み取ることが必要である。アニュアルセンサはラム波を、側壁センサは液中縦波を検出すると考えられているが、それぞれのセンサがどのような波を検出しているかを示して、どんな方法で位置標定するのがよいのかを検討した。

Fig.5 は、ADAS によるアニュラセンサ検出波形の一例である。左の信号では、チャンネル (Ch.) 2、4、5、8、16 が、右の信号では 4、6、8、10 がラム波を検出している。楕円で示した波は So モード波で、遅れて検出されている波が Ao モード波である。これらの到達時間は滑らかな双曲線上になければならないが、音源がセンサに近い場合 (左の信号では Ch.4 (上から2番目)) には、So と Ao の到達時間差はきわめてわずかである (So は Ao 波形に埋もれている)。左の AE の音源は Ch.4 か 6 の近くにあることが推定される。これらの AE では 4 個以上の到達時間が読取れるので、位置標定が可能である。側壁センサが検出する AE 波形は、Figs.6 と 7 に示すように複雑である。Fig.6 の 2 個の信号波形は、ラム波の特徴を示している。すなわち、底板で発生した AE は、底板から側壁を伝播したラム波として検出されていると考えられる。一方 Fig.7 では、多くのパルス波も混在している。鏝破壊の AE 音源が単発現象の場合であれば、液中縦波はパルス波状になるはずであるが、必ずしもそうではない。また右の信号に示したように、パルス波がいくつも観察されているので、どのパルス波の到達時間を使うべきかの判断が難しくなる。このため、しきい値を設定して自動的に到達時間を読取る市販システムでは、誤差を生む可能性がある。

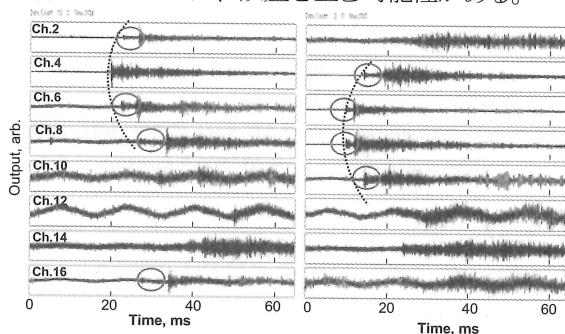


Fig.5 Example of signal waveforms detected by annular sensors of ADAS system. Data No. A01

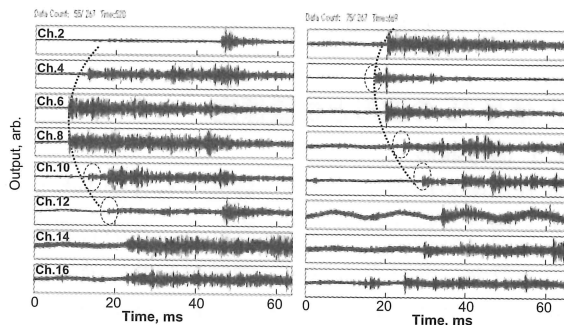


Fig.6 Examples of signal waveforms detected by side wall sensors of ADAS system. Data No. S-01

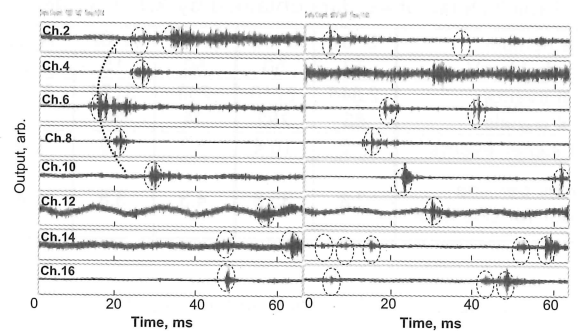


Fig.7 Examples of signal waveforms detected by side wall sensors. Data No. S-01

4.2.2 音源位置評定結果

音源位置標定は、次の 4 つの方法で行った。

方法 A: アニュラセンサ出力 (ラム波) に対して、目視で So および Ao 初動波の到達時間を読取り、4 個以上の到達時間差から 2 次元位置標定 (双葉曲線法) を行う。目視で到達時間を読取る方法を ADAS 法という。So モードの初動波に対しては 5400m/s を、Ao モードの初動波に対しては 2300m/s の群速度を使用した。以前に直径 32.92m の空タンク (点検中) に対して人工音源で励起したラム波に対し、方法 A によって音源標定した結果、最大の標定誤差は 3m であった^[9]。

方法 B: アニュラセンサ出力の到達時間を、しきい値から自動的に読取る 2 次元位置標定法。市販システム法という。一般には振幅の大きな Ao モードの到達時間を読んでいると考えられるが、So モードの振幅が大きい場合にはこの波の到達時間を読取っている可能性もあるが、チェックは出来ない。すなわち、検出した AE を異なる伝播速度を用いて位置標定している可能性がある。

方法 C: 側壁センサ出力に対して目視で到達時間を読取り、液中縦波速度 (1500m/s) を使用する ADAS 法。

方法 D: 側壁センサ出力からしきい値を用いて到達時間を読取り、液中縦波速度を使用する市販システム法。

Fig.6 に示したように、側壁センサはラム波を検出していると思われるものも多かったが、今回は液中縦波を検出していると考えられる HPIS G110 に従って位置標定を行い、各方法の精度を議論した。以下にはこれらの方法で標定された音源位置評定結果を示す。

Fig.8 には、方法 A による結果をデータ番号 (A01、A02、A03) 別に 3 個、またそれらを総括したデータ (A01-A03) も示した。

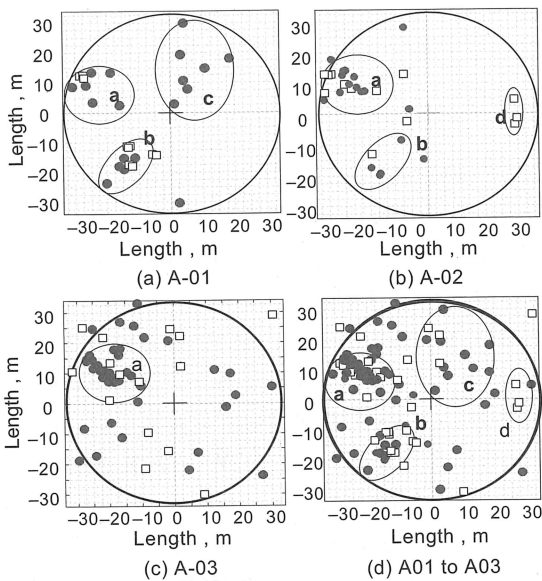


Fig.8 Source location results of signal AEs detected by eight annular sensors and estimated by method A

記号□はSoモード波、●はAoモード波の到達時間差から求めた音源位置である。A01では、楕円で示したa、b、c領域に、A02ではa、b、dに、A03ではa以外の広い領域に標定されており、計測時間によって音源位置が動いていることを物語っている。方法Bによる結果をFig.9に示した。図中には、Fig.8で示したa、b、c領域を示したが、a領域に集中しているほか、第I、II、III象限に広く標定されている。

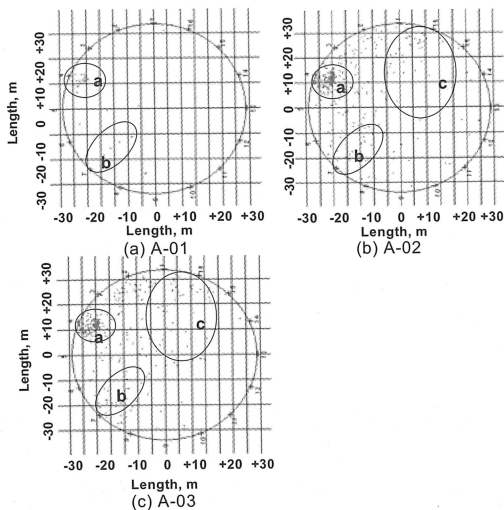


Fig.9 Source location results of signal AEs detected by eight annular sensors and estimated by method B

側壁センサ出力を用いた結果をFigs.10, 11に示した。方法Cによる結果 (Fig.10) では、タンクのほぼ左 (第II、III象限) に標定されている。S01では、タンクの外

に標定されたAEがあるが、1)到達時間が正しく読取れていないため、2)センサが液中縦波を検出しているとしたためと思われる。

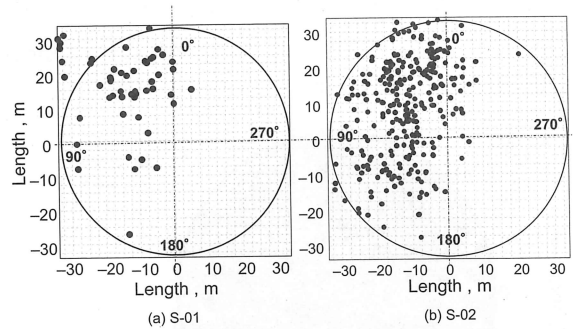


Fig.10 Source location results of signal AEs detected by eight side wall sensors and estimated by method C

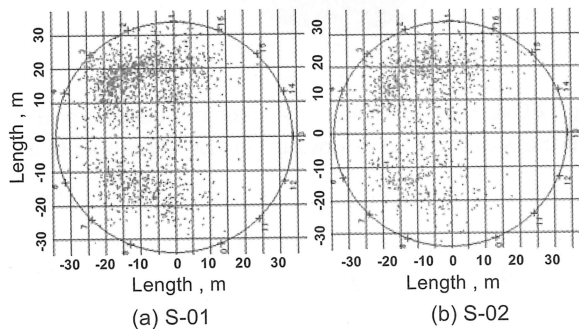


Fig.11 Source location results of signal AEs detected by side wall sensors and estimated by method D

方法Dによる結果 (Fig.11) では、左半分に広く標定されているが、特に第II象限に集中している。

4.3 AE位置標定結果と減肉箇所の照合

このタンクは、2006年5月に超音波によって定点肉厚測定がされ肉厚分布データが提供されたので、音源位置標定結果と照合した。定点肉厚検査で測定された最低肉厚は7.7mmで、設計肉厚9mmの86%で法定肉厚を下回る箇所はない。Fig.12には、方法Aによる音源位置を肉厚データの等高線図にオーバーラップして示した。なお、位置標定データはすべて (A01-A03) の結果である。またグレースケールの淡いほど減肉量が大きいことを示しており、残存肉厚が8.0mm未満の部分を小さな楕円で示した。

多くのAE源が減肉のある場所やその近傍に標定され、両者は比較的良好に一致しているといえる。本タンクはアニュラ部でやや大きな減肉が多数検出されているが、すべての箇所が標定されていたとはいえない。例えば、第I象限や第III象限のアニュラ部の減肉箇所

に標定された AE は少ない。これは、1)計測時間が短かったこと、2)アニュラ部の音源位置はやや内側に標定される傾向があること^[10]などによるものと考えられる。Fig.9に示した AE 音源位置はほぼ Fig.12 のそれらと近かったため、底板センサを用いてラム波 AE を長時間検出すれば、腐食箇所はほぼ推定できるものと考えられる。

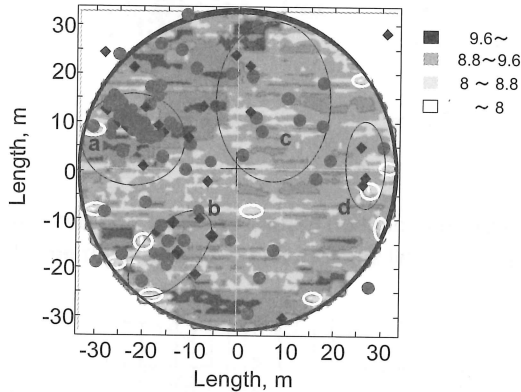


Fig.12 Overlapping of AE source location by method A on the wall thickness contour map by ultrasonic test

一方、方法 C (側壁センサデータの到達時間目視読み取り法) による位置標定結果と減肉マップをオーバーラップして表示すると Fig.13 のようになる。

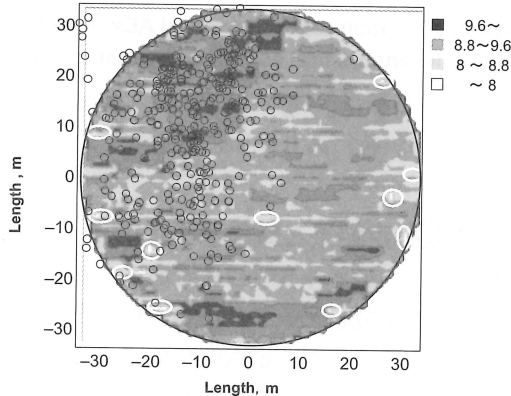


Fig.13 Overlapping of AE source location by method D on the wall thickness contour map by ultrasonic test

減肉量の少ない第 II 象限に標定された AE が多く、減肉のある部分に標定された AE は少ない。方法 C と D の音源位置はほぼ同じ領域を示している。つまり、方法 C や D では、側壁にセンサを設置した場合は、底板の腐食損傷によって発生した AE 波では伝播可能な経路が複数存在しており、そのすべての経路の波形を一つの伝搬経路 (この場合は液中) を仮定しているため、この場合は異なった結果を示したと思われる。そのため、側壁に取付けた場合は、伝搬経路を同定する

必要がある。

5. 考察

AE 計測を、晴れて微風の 2 日間にわたって計 5 時間計測したが、発生頻度は計測時間によって、また計測時間帯中でも変化した (Fig.2)。11 月 25 日におけるアニュラ板テラスの第 II 象限の温度は、日照によって 18°C から 21°C まで上昇したが、第 III 象限は日陰であったため温度はほとんど上昇しなかった。実験室試験では、錆破壊による AE は温度変動など外乱を受けるとき発生しやすいことがわかっている^[5]。第 II 象限に音源位置をもつ AE が多く検出されたのは、温度の影響であった可能性もある。しかしタンク全周が日照によって加熱されることはなく、人工的な外乱 (圧力や熱) をタンクに与えることは出来ない。従って、危険箇所を正しく標定するためには長期間にわたって連続あるいは間欠的に AE をモニタする以外にない。現段階では、長期間がどの程度の月日を要するのかわかっているが、例えば 1 年を 4 季に分けた季節ごとの 1-2 週間の間欠モニタリングが必要ではないかと思われる。この期間中でしきい値などのサンプリング条件が同じに設定できる気象条件のときにモニタリングする必要がある。しかし、今回用いたような並列システムでは、そのつど高価な計測装置を持ち込んで、センサの設置とキャリブレーションを行う必要がありコスト高になるという問題がある。

圧電型センサを並列に設置して AE をモニタリングするという技術には、この 30 年間大きな進歩はなかったように思われる。今後は、半永久的に設置できる安価な使い捨てセンサの採用、多くのセンサを直列に設置できるシステム (直列マルチ・センサシステム)、安価な計測システムの採用が不可欠である。AE 信号を電波で送受信できるシステムも大型現場装置の AE モニタリングでは不可欠な技術になると思われるが、いずれも防爆性が保証されなくてはならない。可燃物貯蔵タンクの常時モニタリングには本質防爆性が必要であり、現状では光ファイバを用いたシステム^[11,12]が適用性があると考えられる。

6. 結論

7 万 kl 原油貯蔵タンクの AE モニタリングを行い、

AE で出来ることと、将来の AE 計測システムについて議論した。結果は以下のようにまとめられる。

- 1) アニュラ板テラスおよび側壁に設置した AE センサを用いて鏽破壊による AE を検出し、市販および開発システム(ADAS)を用いて信号処理を行った。市販 AE 装置は膨大なイベントを検出したが、位置標定ができた総信号数は総イベント数の 0.1~0.75%、ADAS による信号は総イベント数の 35.3~3.8%であった。波形観察から得られて有意な AE 数に対する HPIS G110TR に基づいた腐食リスクパラメータ(CRP)は、0.01mm/year 以下という極めて低い値になったが、フラクタル解析による有意な信号数は 104 にも達し、腐食速度は 2mm/year に達した。CRP の推定に使われる AE 活性度は、計測装置や気象条件、信号の分別法によって大きく異なるので問題があると考えられる。
- 2) アニュラセンサが検出したラム波 AE の音源位置は、超音波肉厚検査で減肉ありとされた場所のいくつかに標定されたが、側壁センサが検出した AE の多くは減肉のない場所に標定された。側壁センサは液中縦波を検出すると考えた標定法に問題があると思われる。
- 3) 腐食進展をモニタするためには、長期間にわたる AE モニタリングが必要であるが、圧電センサを用いる並列型 AE システムによる現場モニタリングには限界がある。可燃物貯蔵タンクの長期間のモニタリングには、本質防爆性を持ったモニタリングシステムが必要になる。

謝辞

本研究は、石油連盟との共同でおこなわれた、タンクを提供され、肉厚データを提供された会社に感謝する

参考文献

- [1] S. Yuyama, M. Yamada, K. Sekine, and S. Kitsukawa, Verification of AE evaluation on floor conditions in above ground tanks by comparison of AE data and floor scan inspection, JSNDI, Progress in Acoustic Emission, (2006) pp. 381-388
- [2] H. Cho, T. Matsuo, H. Suzuki and M. Takmeoto, AE Analysis for bottom plate corrosion of oil tank, JSNDI, Progress in AE, (2006) pp.389-396
- [3] 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法に関する技術指針 HPIS G110TR (2006)
- [4] 長秀雄, 竹本幹男, 米津明生, 池田隆二, 鈴木裕晶, 中野正章, 石油タンク底板腐食によるラム波 AE の検出と位置標定-超音波肉厚測定結果との対応-非破壊検査, 54-6(2005) pp.318-323
- [5] 竹本幹男, 長秀雄, 松尾卓摩, アコースティック・エミッション (AE) による腐食の検出-AE で出来ること, 出来ないこと-検査技術, 11(1),(2006)pp.1-8
- [6] 竹本幹男:大気鏽の成長・破壊によるアコースティック・エミッション, 材料と環境, 51(6), pp.256-261, (2002)
- [7] P.T.Cole and P.J.Van de Loo : Listen to Your Storage Tanks to Improve Safety and Reduce Cost, Acoustic Emission Beyond the Millenium, ed. by T.Kishi, M.Ohtsu and S.Yuyama, Elsevier, pp. 169-178, (2000)
- [8] 山田實, 桶川重郎, 湯山茂徳, 裕谷篤志, 関根和喜, 丸山裕章: AE 法による石油タンクの腐食挙動, 圧力技術, 40(4), pp.222-227,(2002)
- [9] 長秀雄, 竹本幹男, 米津明生, 池田隆二, 鈴木裕晶, 中野正章, ラム波 AE を用いた円筒タンク底板腐食損傷位置の標定-人工音源を用いた位置標定精度, 非破壊検査, 54-5,(2005)pp.259-264
- [10] 長秀雄, 渡部剛, 米津明生, 鈴木裕晶, 竹本幹男, アコースティック・エミッションによるタンク底板の腐食診断, 材料と環境, 55-9,(2006)pp.406-412
- [11] 長秀雄, 成瀬孝司, 松尾卓摩, 竹本幹男, 多チャンネル光ファイバ AE 検出システムの開発と音源位置評定, 非破壊検査, 55(6),(2006)pp.295-300
- [12] K.Kageyama, I. Ohsawa, M. Kanai, Y. Tanma, T. Nakanishi, M. Shimomuto, K. Nagata and F. Matsumura, Application of new optical fiber sensors to reinforced concrete structure for AE detection/monitoring, Structural health monitoring and intelligent infrastructure, Wu and Abe (eds.), (2003) pp.285-290

(平成 19 年 2 月 7 日)