

# AEによる貯蔵タンクの状態監視—AEのできること、出来ないこと—

## Condition Monitoring of Storage Tank by AE- What can AE technology do?-

青山学院大学  
青山学院大学

竹本 幹男 Mikio TAKEMOTO  
長 秀雄 Hideo CHO

Member  
Non-Member

This study discusses what we can do for the condition monitoring of storage tanks by acoustic emission (AE) technique. We first introduce our attitude to the tank inspection by AE by and then the advanced method for source location of signal AEs detected by the AE sensors mounted on the terrace of annular plates. Emphasis is laid on the accurate location of integrity loss in the tank floor plates. At the last portion of this paper, we discuss drawbacks of conventional parallel-type AE monitoring system and propose a new cascade multi-sensing AE system which makes long term continuous monitoring possible.

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

### 1. 緒言

日本には現在約7万基の屋外特定タンクがあるが、7年から12年に一度の開放点検(定点肉厚検査)が義務付けられ、許容減肉は設計肉厚の20%である。2004年における漏洩事故は345件と報告され、多くは腐食が原因である。

本報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。国によって規則や法令が異なり、AEに要求される情報の質も異なる。わが国では、腐食が起きているか、またどのくらい減肉しているかを調べることになるが、AEで出来ることと出来ないことがある。

本報では、2003年から行われてきた屋外特定タンクのAEモニタリングを基に、AEで出来ることとは何か、将来のAE技術はどうあるべきかを議論する。なお、AEを用いてタンクの腐食状態をモニタするという原理は、腐食によって生成した錆の破壊(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[1]。

### 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[2]と呼ばれる方法がある。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システムである。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5段階に評価している[3]。しかし側壁センサは燃料中を直接伝播する縦波(以後液中縦波という)を検出していると考えた位置標定を行なうと、標定精度はかなり悪くなる。側壁センサは、色々な経路を伝播したAEを検出し、液中縦波の振幅は小さく到達時間が正しく読み取りにくいからである[4]。ちなみに、液中縦波の伝播速度は1500m/s(水中)から1300m/s(油)で、ラム波(板波)Aoモード(非対称振動するモード波でAnti-symmetric modeといい、0次のモード波をAoという)の60kHzにおける群速度は板厚6mmから8mmでは約3000m/sである。Soモードの最速速度(シート速度)は、板厚に関係なく鋼では5400m/sである。

タンクオーナーがAE計測に期待する情報は、タンクの何処がどの程度腐食されているかということである。しかし、減肉量や減肉進行速度を現行のAE法で測定することは不可能に近い。AE検査法は、タンク危険度のスクリーニング手法にすぎない。

錆は温度変動や濡れ・乾きを受けるときにAEを頻繁に発生するので、AE発生率や振幅は必ずしもAE測定時における腐食速度や腐食減肉量と直接的相関をもっていない。AEを発生するような錆はかなり厚く成長する必要があるので、数年前に起こった腐食で生成した古い錆が割れていることもあるし、現在成長中の新しい錆が割れないこともある。

またノイズの多い屋外装置では、AE信号のみを検出することは極めてむづかしい。ノイズと信号を

連絡先:竹本幹男、〒229-8558 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、電話:042-759-6202、e-mail: takemoto@me.aoyama.ac.jp

区別しなければならない。どのような AE 計測装置も、ノイズと信号をリアルタイムに判別する機能はもっていない。またノイズを取込んでいる間は、信号を検出しない。そのため取込んだ AE の 90%以上がノイズであるということもある。沿岸地帯に多くの屋外タンクをもつわが国では、風の弱い日は、特に冬季では 2 週間の内に 1 日あればよい方である。筆者らは、多くのセンサが検出した波の到達時間や波形を見較べて（目視観察で）分別しているが、数日を必要とする作業になり、合理的な方法ではない。解決しなければならない問題のひとつである。

現在の AE 計測システムは並列型である。このため、16 個程度のセンサを設置して感度校正を行うのに 4 時間程度かかり、1 日に AE 計測できる時間は、撤収のための時間も入れると 1 時間程度に限られる。また、現在の AE センサは圧電型センサで、防爆認定が取りにくいこと、ノイズに弱いことなども問題である。AE で出来ることと、AE に期待されることは、研究者や機関、検査会社などによってかなり異なっている。

### 3. AE 計測法と信号処理

側壁センサがもつ問題を避け、音源位置標定精度をあげる一方法は、アニュラ板テラスに設置した AE センサ（以後、底板センサと呼ぶ）を用いて、底板を伝播するラム波 AE を検出することである。

ラム波には、分散性（周波数によって速度が変化）の複数モード波があるので音源位置標定アルゴリズムにはそれなりの工夫が必要である。実際のタンクでは、So モード波が検出されることもあれば、Ao モードしか検出されないこともあるので、どの波のどの周波数成分の到達時間を正しく読取れるかと、伝播速度をいくらにするかによって標定精度が左右される。しかし検出波の性質はわかっているので、標定精度を改善できるほか、風が強くてもノイズを拾いにくいというメリット、内容物がなくてモニタリングできるというメリットもある。

### 4. 開放タンクを用いた音源位置精度の検証

ラム波 AE からどの程度の標定精度が得られるかを、開放点検中の直径 32.93m、高さ 13.755m の円筒空タンクを用いて試験した。Fig.1 は検査法である

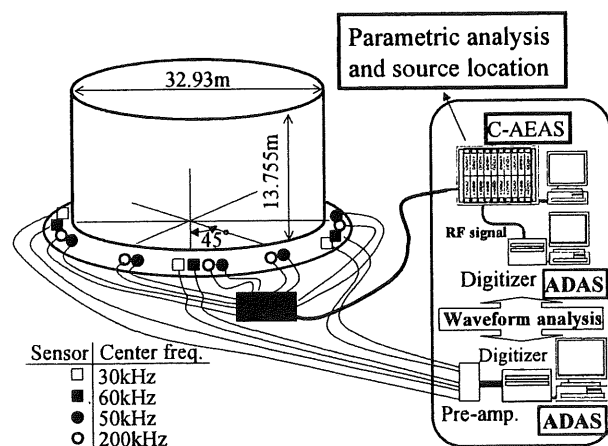


Fig.1 Monitoring of Lamb wave AE from the floor plate of a cylindrical storage tank by sensors mounted on the terrace of an annular plate

詳細は割愛するが、腐食のおこりやすいとされるアニュラ板近傍の音源位置は、Fig.2 の左に示すように最大誤差 3m 以内に標定される[5]。一方、市販システムに使われているしきい値から到達時間差を決める方法では、右に示すようにタンク中央方向に大きくずれる。後者の大きな誤差は、到達時間決定法と使用すべきセンサの組合せが適切に行われていないためであった。

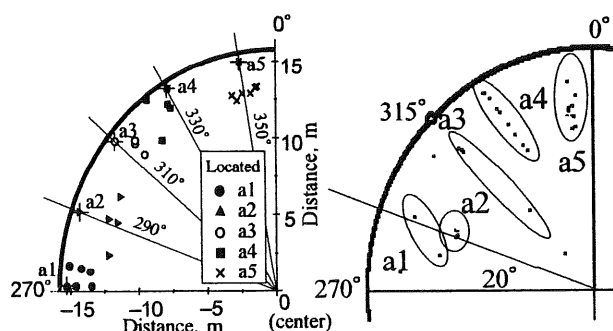


Fig.2 Source location results of artificial sources on the floor plates of open tank

自動化された信号解析技術では、迅速な情報の提供は出来ても、必ずしも精度や信頼性が保証された情報ではないこともある。

### 5. 10,000kl タンクの腐食源位置評定

4 節で示したタンク底板の腐食（錆破壊）による AE を、2003 年 11 月（空タンク）と 2005 年 2 月（補修後にナフサタンクとして供用中）に底板センサを用いてモニタした。使用したセンサ（共振周波数）やチャンネル数が異なるが、ノイズと信号数の割合、

音源位置評定結果のみを紹介する。Fig.3は、2003年での信号 AE 累積数の経時変化(1時間)である。AE は後半の 30 分で多く発生しているが、信号総数(85 個)は総検出イベントの 5%である。

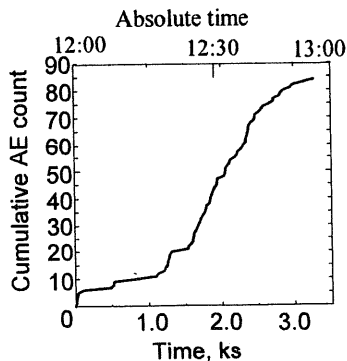


Fig.3 Cumulative signal counts used for source location  
信号 AE の Ao ラム波初動波到達時間差と適切なセンサ組合せを用いて、音源位置を行うと Fig.4 の様になる。なお図には 2003 年 10 月に行われた超音波肉厚検査による残存肉厚検査も示した。AE 音源は、比較的大きな減肉が見られた第 3 象限の限られたゾーンに標定されている。このタンクについては、午後 1 時間の計測を行ったが、同じ位置に標定された。このタンクはアニュラ板を補修後、ナフサタンクとして使用されたので、2005 年 2 月 8,9 日に再度 AE モニタリングをおこなった、2003 年の検査から 1 年 2 ヶ月後の検査になる。この検査では、共振周

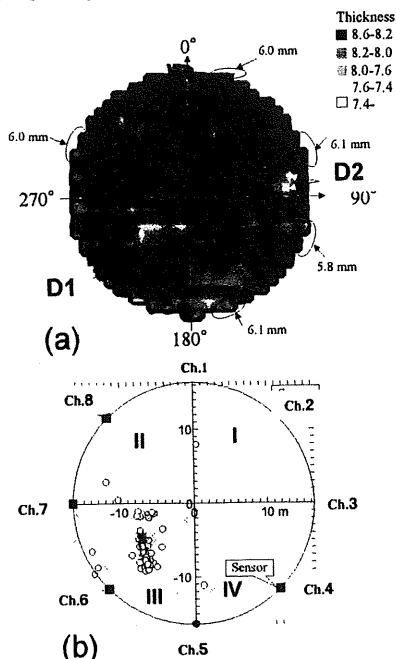


Fig.4 Located AE sources (left) and contour map of wall thickness of the tank in 2003.

波数が 30kHz と 50kHz のそれぞれ 8 個のセンサをアニュラ板と側壁につけて都合 7 時間の計測をおこなった。モニターされたイベント波形の丁寧な目視観察によって信号とノイズを分別し、かつ信号についてはランク分けをおこなって位置標定し、標定確度を詳細に調べた。Table 1 には、気象条件、使用したセンサと設置場所、計測時間、総イベント数(ノイズも含む)、有意な信号数、また最下段には信号数の総イベント数に占める割合を示した。なお、グレーの欄は底板センサによるデータである。Data Number の、例えば 3-30A は、3 回目の計測で、30kHz センサを底板に設置したことを意味する。最後 S は side wall の意味である。両日との 2 月としては暖かい穏やかな日であったが、総イベント数に占める信号の割合は、最大で 11.4%、最低で 2.1%である。風速が低いにもかかわらず、信号検出率が低かったのは、スチム配管からの衝撃音である。ノイズとしては、風雨のほか、スチムハンマ、電磁波(バイクや高圧電線、無線)、ポンプ、作業音があるが、スチムハンマについて対策は取れない。2 日間の計測で音源位置標定に使用できる信号はデータ 3-30A と 3-50A である。

Table 1 Weather condition, monitoring method and signal counts

Date	Feb. 9, 2005				Feb. 10, 2005			
	Temp.: 12° C, humidity: 63%, Wind: 2m/s							
Weather	Temp.: 15° C, Humidity: 46%, Wind: 2.5m/s							
Monitoring No.	No.1		No.2		No.3		No.4	
Data Number	1-30A	1-50S	2-30A	2-50S	3-30A	3-50A	4-30S	4-50A
Sensor Type	30kHz	50kHz	30kHz	50 kHz	30kHz	50kHz	30kHz	50kHz
Sensor Location	Annular	Side wall	Annular	Side wall	Annular	Annular	Side wall	Annular
Start Time	13:30		14:31		8:57		11:28	
Finish Time	14:30		18:31		10:57		13:28	
Monitoring hour	1 hour		2 hour		2 hour		2 hour	
Total Events	530	65	1100	95	1800	220	1100	190
Total Noises	483	60	1077	89	1722	195	1058	178
Total Signals	46	5	23	9	84	25	42	11
% of signals to total events	8.70%	7.70%	2.10%	9.50%	4.70%	11.40%	3.80%	5.70%

Fig.5 には、3-30A データの中からある程度の信頼性(偶数および奇数の 4 センサのうち 3 個以上が S/N 比の高い信号を検出)を持って位置標定が出来る波形の一例を示した。これらの AE では、So モード波が検出されており、初動波到達時間差が正確に読みとれる S-1 波については正しい音源位置ができるが、このような信号は 84 個のうち 33 個である。標定された音源位置の確度(そこに AE を発生する錆があるはずであるという確率)は、開放点検での肉厚検査と照合する以外にないが、最低でも 7 年先である。

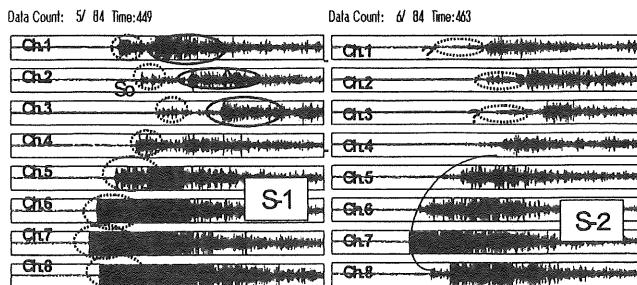


Fig.5 Examples of AE signals detected by 30kHz annular sensor . Data No.3-30A

そこで、偶数番号と奇数番号センサの出力を使用して標定された位置の距離誤差が 1m 以内にあるものを確度の高い位置とした。 Fig.6 には、2003 年の肉厚等高図の上に、データ 3-30A の音源位置で確度の高いところを破線の楕円で示した。

○ch1,3,5,7 rank 1 ●ch2,4,6,8 rank 1

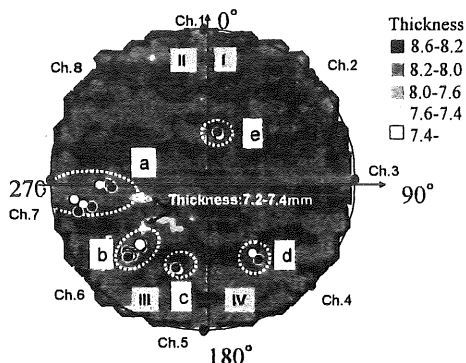


Fig.6 Source location results of AE signals (Data No. 3-30A) on the contour map of wall thickness inspected in 2003.

確度の高いゾーンは a-e の 5 箇所であるが、このうち b は、もっとも肉厚の低いところに近い。 a と c は、第 3 象限にはあるが、最も肉厚の低いところから離れている。このタンクは、2003 年の補修のときジャッキアップされているので、割れやすい錆が脱落した可能性もあるが、腐食は広がっている可能性がある。その他のデータの位置標定結果も Fig.6 とほぼ同じ位置にあった。

Fig. 7 は、商用計測装置による AE のエネルギー分布を示している。音源位置は、しきい値到達時間差法を用いているため、正確さを議論することは難しいが、高いエネルギーのゾーンは第 3 象限に集中している。いろいろな情報を総合的に判断して、確度の高いゾーンを決める必要がある。

## 6. 5,000kl タンクの腐食源位置評定

ナフサ貯蔵タンク (1968 年製, 内径 20m, 高さ 16m, フローティンルーフ) の AE 検査結果を紹介する。この検査は、2004 年 12 月 8,9 日に行なわれた。

Table2 には、気象条件、モニタリング法、信号数などを示した。中心周波数が 30kHz と 50kHz センサをそれぞれ 8 個を用いた計測である。8 日は穏やかな曇りであったが、9 日は風が強くと計測には不向きな日であった。このため、総イベント数に占める信号数は、8 日は最大 52% であったが、9 日は 1% 以下であった。

Table 2 Data number and their detail with weather condition of AE monitoring in Dec. 2004

Date	8, Dec					9, Dec				
	Weather									
Weather	Cloudy, Max. temp.:16 C, 1.5m/s wind					Cloudy with shower, Max. temp.:10 C, 6 m/s wind				
Data Number	1-30	1-50	2-30	2-50	3-30	3-50	4-30	4-50	5-30	5-50
Sensor Type	30kHz	50kHz	30kHz	50kHz	40kHz	50kHz	30kHz	50kHz	30kHz	50kHz
Sensor location	annular	side wall	annular	side wall	annular	annular	side wall	annular	side wall	annular
Start time	12:15	12:15	14:13	14:13	8:56	8:56	10:40	10:40	11:41	11:41
End time	13:15	13:15	16:13	16:13	9:56	9:56	11:40	11:40	12:51	12:51
Threshold, mV	7.8	9	7.8	9	15.6	16	23.4	16	39.1	12.5
Total events	94	293	309	1016	601	2152	719	1822	1221	2383
Wind noise	0	128	0	65	160	114	227	95	659	110
Another noise	61	142	150	878	297	2011	498	1711	553	2245
AE Signal	33	23	159	73	44	27	4	16	9	8
Percentage of signals to total events	35.1	7.8	51.5	7.2	8.8	1.3	5.6	0.78	0.74	0.34

底板センサは側壁センサに比べて風ノイズの影響を受けにくいので、しきい値は 9mV よりも低い 7.8mV に設置している。この計測で得られた信号についても 4 段階 (Type-A,B,C) に分類した。すなわち Type-A は 4 個 (偶数および奇数センサー) のセンサが高い S/N 比の信号を検出したもので、確度が比較できるもの、Type-B は 3 個のセンサが信号を検出したもの、Type-C は 2 個のセンサのみが信号を検出したものである。Table 3 には、Type-A,B,C の数を示した。8 日の計測データのみが位置標定に使用できる。No.2 は 2 時間計測であるので、1 時間あたりの Type-A 信号の数は、底板センサで 50 個以下、側壁センサでは 30 個以下である。色々な方法で位置標定の確度が検討されたが、総合判定すると、Fig.8 のようになった。確度の高いゾーンを破線の楕円で、アニュラー板については太い実線で示した。また 2005 年 2 月に行われた肉厚測定結果に基づく肉厚の薄い (法定肉厚を切るゾーンはない) 領域を D1-D5 で示した。提供したデータに基づいて 2 月には再度詳細な肉厚検査がなされた。その結果、A2 領域に存在する 3 枚の底板のうち、2 枚の肉厚は 9.7-9.8mm であったが、1 枚の端部では 9.4mm であった。

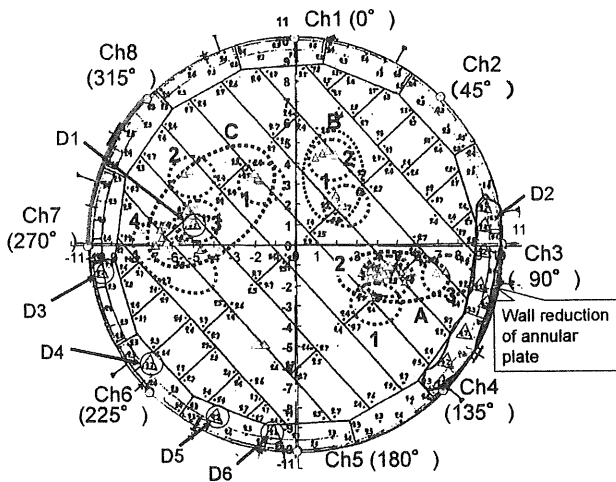


Fig.7 Summary of AE source location results of all signals detected by 3 hours monitoring on Feb.8 on the wall thickness data

B2領域の1枚の底板の厚さは9.6-9.8mmで異常はなかった。C4領域に存在する2枚の底板の肉厚は9.7-10mmで異常はなかったが、この場所にはルーフトレーンサポートがあることがわかった。C4領域ではサポートからのノイズを計測していた可能性がある。減肉箇所とAE音源位置評定箇所はかならずしもよく一致しているとは言えない結果となった。このタンクはよく管理されたタンクであることがうかがえた。

## 7. 将来型AE計測システム

リスクの高いタンクについては、連続あるいは間欠的なAEモニタリングを長い期間行なう必要があるが、装置が高価であることなどが短時間計測を余儀なくしている。使捨て型の安価なセンサと計測装置が必要である。筆者らは、通信用ファイバをAEセンサとする直接マルチセンシング機能をもつ干渉計型のAE計測システムを開発した。Fig.8にシステム概要を示す。自作のフィードバック回路で安定化されたマッハ・ツェンダー型レーザ干渉計で、防爆性に優れ、また使捨てセンサとして使用可能である。一本のセンシングファイバを直径の異なるセンサホルダに巻きつけホルダの共振周波数を利用して音源位置評定をおこなう。1本のファイバを8個程度に分割することが可能で、一台の計測装置ですむので長時間の計測が可能になる。リスクの高いタンクについては、減肉速度や危険度到達時間を推定することが必要であるが、これを可能にする。

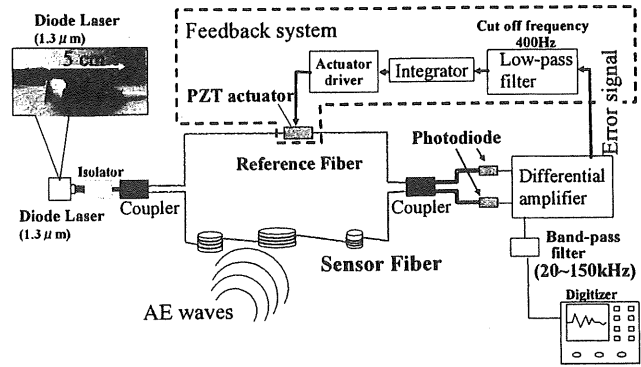


Fig.8 Cascade multi-sensing optical fiber AE monitoring system

## 8. 結言

タンクのAE診断について、AEで出来ることとは何であるかを紹介した。有意な信号についての確度の高い位置標定こそがタンクオーナーに提供できる情報である。また次世代の計測法が必要になっている。

### 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]竹本幹男:大気錆の成長・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)
- [2]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)
- [3]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)
- [4]曾我部隆洋, 松浦健児, 竹本幹男:屋外暴露貯水円筒タンクの底板腐食によるアコースティックエミッションの検出と音源位置標定, 非破壊検査, 53(1), pp.35-39, (2004)
- [5]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
- [6]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