

AE法による実タンク底板の 稼動中腐食損傷評価

—実タンクに対するAE法の適用と板厚測定結果との相関関係について—

In-operation Evaluation for Corrosion in Bottom Floor of Oil Storage Tanks by Acoustic Emission Method

—Application of Acoustic Emission Method to Field Tanks and Relationship
between AE Signal Parameters and Plate-thickness Measurement Data—

日本高圧力技術協会

橘川 重郎 (Shigeo KITSUKAWA)

消防研究所

山田 實 (Minoru YAMADA)

日本フィジカルアコースティックス

湯山 茂徳 (Shigenori YUYAMA)

石油公団

丸山 裕章 (Hiroaki MARUYAMA)

横浜国立大学大学院工学研究院

関根 和喜 (Kazuyoshi SEKINE)

This paper discusses some noise factors affecting the AE evaluation of external corrosion on bottom plate of real oil storage tanks, and also the relation of the AE parameters examined during in-operation to the current local corrosion state

(statistical corrosion rate) estimated from thickness measurement data. The inner oil flows, oil or water drops from corn type roof and natural wind has been investigated as the typical and important sources of noise in in-operation real tank. In order to establish the diagnostics for degradation state due to corrosion on bottom plates, the measured AE signals have been compared with the parameters determined by the "risk curve for corrosion" derived from ultrasonic plate thickness measurement data as the current progress rate of corrosion in the much more corroded area. The result has shown the feasibility and applicability of the AE method for the in-operation evaluation of corrosion state in real oil storage tanks.

Keyword : Acoustic emission, In-operation inspection, Oil storage tank, Back-side corrosion of bottom plate, Risk curve

1. 緒言

稼動中のタンク底板の腐食評価・診断技術としてAE法が注目されている。この手法はタンクを開放すること無く、油中を伝播してきたAE波を計測することによって、その時点での石油タンク底板の全体的な腐食状況を非破壊で短時間の内に把握しようとするものである。既に欧米では、多数のプラント所有者からなるAEのユーザーズクラブが結成され、3000件にもおよぶ測定が行われている。フランスでは、石油工業連盟が公布したタンクメンテナンスに関する指針・規格をベースとしたタンク底板の評価試験方法としてAE試験が正式に認可されており、更にオランダ、ベルギーでも正式に認可され実用化されている。

AE法で腐食管理を行うには、本法を構成する主要な2つの技術を各々確立させる必要がある。その1つは、タンク底板からの腐食に伴うAE波の計測方法と解析、もう1つは、それらの結果を用いた底板全体の腐食の評価・診断ロジックである。前者については、ノイズの影響を排除したAE信号の入手が不可欠であり、後者については、AE計測データと開放後の腐食検査データとを照合して得られるデータベースと、これを元に作成される診断システムが求められることになる。既に欧米で本法が運用されている背景には、実際の試験に基づき作成された推奨手順と、得られた結果に基づいて作成された診断システムが、欧米の従来からのタンクの運用、管理に適合するような形で作られていることが挙げられる。この診断・保安技術は、欧米における自主保安体制に基づくものであり、必ずしも我が国の保安全管理に適合するものとは言えない。本手法を我が国に導入するには、ノイズの影響を排除したAE信号の測定手順と、我が国の状況に適合した独自のデータベースの作成、これに基づく独自の判定方法を確立することが必要と考えられる。

独自のデータベース、判定方法を作成するためには、AEの計測データと、開放後の腐食状況を調べたフォローアップデータを比較し、両者から

如何なる項目を抽出し対応させるかが重要となる。AE信号の発生源として、活性腐食の進行に伴う腐食生成物の剥離、割れ等が考えられている²⁾、が明確ではない。しかし、いずれにしても、その測定原理より、計測時に何らかの腐食活性の度合いを反映した点の信号を捉えているものと思われる。従って、AE信号と対比させるデータは、腐食の進行度が積分された結果生じる板厚減少量よりも、むしろ腐食速度に対応するものが望ましい。しかし、通常、我々が得られるのは、一般に超音波厚さ計測法によって測定された法規に基づく離散的ポイント板厚データである。仮に、前回開放時の板厚との差および開放間隔から見かけ上の腐食減肉速度が求められたとしても、その多くは、離散的なデータに基づくものであるため、正確さに欠ける。従って、底板全体のうち、侵食度の大きな領域での腐食減肉量やその領域での平均的な腐食速度を、従来行われている超音波による離散的ポイント板厚計測データ群から推定することができれば、それはまさにAE診断法の有効性のチェックや評価診断システム構築に役立つことになる。

そこで、本報告では、まず、実際に稼動中のタンクにAE法を適用し、測定する際のAE信号への影響因子を明らかにすることを試みる。次に開放時の離散的板厚計測データ群を用いて、タンク底板全体としての腐食の進行度(減肉速度)を推定する新しい統計的分析手法を提案し、その結果から求められた、腐食速度に相当するパラメータとAE計測値との対応関係を検討することとした。

2. 腐食に伴うAE法の計測パラメータ

AE測定において使用する主なAE法計測パラメータには、カウント(count)、エネルギー(energy)、ヒット数(hit)、振幅値(amplitude)、信号立ち上がり時間(rise time)、信号継続時間(duration)および位置評定(location)がある。それぞれの持つ意味は、以下の通りである。カウント：閾値を超えたAE波の振動回数を数えたものであり、事象の振幅の重み付けとしての

意味を持つ。

エネルギー：入力された AE の包絡線検波波形の面積。

ヒット数：センサーに入力した AE 信号波のひとかたまり。これを1ヒットと数える。割れや変態など突発型 AE 事象を生ずる AE 源の発生頻度や発生形態を知るのに適したパラメータであると言われている。

振幅値：AE を生じた事象がセンサーに与える振動の大きさ。

信号立上がり時間：信号が入力した時、最初のしきい値クロス時から最大振幅値に至るまでの時間。

信号継続時間：信号入力時、最初の閾値クロス時から最後の閾値クロス時までの時間。

位置評定：センサー間の信号到着時間差をもとに AE 発生源の位置を求めること。

ここでは、腐食速度に直接的に対応するものとして、ヒット数に注目する。通常、AE の測定は、測定時間がほぼ一定なので、その間のヒット数は、底板の腐食活性度に比例するものと考えられる。しかし、ヒット数は、発生した AE 事象が1個であっても複数個のセンサーに信号が入力される場合、その個数分だけヒット数が計測されることになる。そこで、今回の考察では、ヒット数をチャンネル数で除し、これと、AE 計測直後の開放時に計測された離散的板厚データを用いて、統計的分析から推定された腐食速度に対応するパラメータとを比較することにした。

これとは別に、欧米における評価手順に従って、各タンクを A, B, C, D, E にグレード分けすることを試みた。各グレードは、下記の損傷度を有すると報告されている³⁾。

A：腐食損傷は存在しないと考えられる。

B：80% 程度の確率で腐食損傷は存在しない。

C：60% 以上の確率で腐食損傷が存在しうる。

D：85% 程度の確率で軽微なものを含め腐食損傷が存在しうる。

E：90% 程度の確率で腐食損傷が存在しうる。

またこの時、60% 以上の確率で大規模な補

修あるいは底板の一部交換などを必要とする重大な損傷が存在しうる。

3. 板厚データを用いた統計的分析手法による腐食速度の導出⁴⁾

災害統計分析で用いられるリスク曲線とは、災害の規模 X を変数にとった時の災害事象発生に関する超過頻度分布 $F(h) = CF(X \geq h)$ 、又は上側累積分布関数 $P(h) = Pr(X \geq h)$ として定義される^{5)~7)}。いま、“タンク底板の腐食現象”を複雑な確率過程 (stochastic process) によって支配される“災害事象の一種”とみなす。そうすると、事象の結果の大きさを表現するスケールとして、腐食減肉量を確率変数 X に対応させることができる。ある対象とするタンク一基について、 $h(mm)$ 以上の腐食減肉を有する局部腐食の存在頻度 (又は確率) を $F(h) = CF(X \geq h)$ と表すと、 $\log F(h) - \log h$ のグラフがタンク底板の腐食に関する“リスク曲線”となる。災害統計分析では、このリスク曲線の両対数グラフ上で直線性を示すテイル部の傾きの絶対値 D は、対象となるシステムの安全管理の程度を一元的に表すスカラー量とみなされる⁵⁾。“腐食現象”を考えた時 D は、腐食の危険性、すなわち、その時点での対象構造物全体としての“統計的腐食速度”の大小を明示するパラメータと解釈される。石油タンク底板の超音波板厚計測データから構成した底板裏面腐食のリスク曲線の典型例を Fig. 1 に示す。このようなリスク曲線では、ほとんどの場合、侵食度の比較的進んだ領域、すなわち減肉量 h の大きい

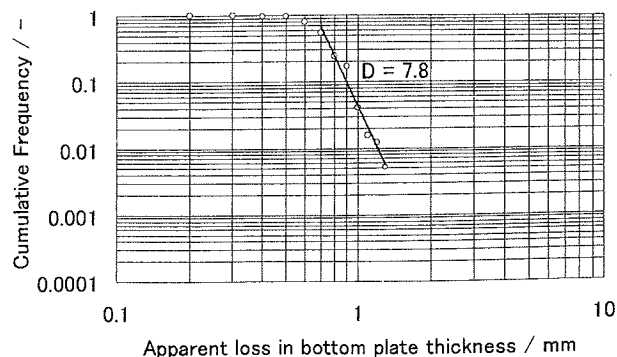


Fig.1 A typical risk curve for bottom floor of oil storage tank

分布のテイル部では、直線性が得られるのが特徴である。

いま、タンク底板腐食のリスク曲線のテイル部の傾きの絶対値を D とすると、

$$D = \frac{\partial \ln F}{\partial \ln h} = - \frac{\frac{\delta F}{F}}{\frac{\delta h}{h}} \quad (1)$$

となる。したがって、

$$\delta h = - \frac{1}{D} \frac{\delta F}{F} h \quad (2)$$

式(1)、及び(2)は、現時点 ($t=0$) での腐食減肉の頻度分布関係を表すものである。現時点から微小時間 (Δt) 後に、 h 以上の減肉量をもつ局部腐食部の存在頻度は、

$$F(\Delta t) = F + \delta F \quad (3)$$

となる。ここで $F(h)$ は上側累積頻度を考えているので、必ず $\delta F \geq 0$ である。

h 以上の減肉をもつ局部腐食の存在頻度の増分 δF は、 Δt を微小とすれば、それは現時点 ($t=0$) での上側累積頻度 F と時間増分 Δt に比例するものと考えてよい。すなわち、

$$\delta F = k F \Delta t \quad (4)$$

(ただし、 k は確率過程の種類によって決まる比例定数)

式(2)と(4)から、現時点以降の腐食減肉量の時間変化 $h(t)$ は、

$$\frac{h}{\langle h \rangle} = 1 - \exp\left(-\frac{k}{D} t\right) \quad (5)$$

となる。ここで、 $\langle h \rangle$ は、局部腐食が進んだ領域での腐食減肉量分布に対する現時点での減肉量 h の統計的代表的値である。(5)式は、タンク全体としての統計的な腐食進行を明示する発展式とみなせる。よって、腐食が進んだ部位における、現時点 ($t=0$) でのタンク全体をみたときの統計的腐食減肉量の変化は、

$$\left. \frac{\partial h}{\partial t} \right|_{t=0} = k \cdot \frac{\langle h \rangle}{D} \quad (6)$$

と与えられる。ここで、 k は、先に示したように確率過程の種類によって決まる比例定数なので、

タンク底板の腐食のみを考える場合、一定として扱える。従って、 $\langle h \rangle / D$ が現時点でタンク底板において相対的に腐食の厳しい領域の、統計的腐食速度に対応するスカラー量であると定義できる。

4. 実験方法

AE 信号の検出、信号処理、データ解析には PAC 社製 SPARTAN AE 計測装置を用いた。AE センサーは、30kHz 共振型のものを使用した。これをタンクの円周上に、等間隔となるように、底板より 1~2m の高さの所にカプラントを介してマグネットホルダーで取り付けした。使用する個数は、3 の倍数個で、円周長さに応じて 3~21 個とした。原油タンクで 24 時間以上、15m 以上の直径を有する製品タンクで 12 時間以上、また加温されていない直径 15m 以下の通常の製品タンクでは 6 時間以上内容物を静止させた後、リークモニターを用い、タンクに連結されたパイプ、あるいはバルブ等で、リークがないことを確認した。ただし、ノイズの影響を検討するために受入れ流入後 30 分後の AE 計測も行っている。その後、シャープペンシル芯の圧折による疑似 AE 信号を用い、すべての AE センサーが ± 2 dB 内のピーク感度範囲内にあることを確認した後、静止中のタンクにおける腐食 AE 信号を 1 時間計測した。AE 信号は、プリアンプで 40dB 増幅後、コンピュータに入力し、信号処理後、2. に記述された各種 AE 波信号パラメータを計算・導出した。

5. 実験結果および考察

5.1 AE 測定に影響を与える各種雑音の評価

欧米で推奨されている AE 測定では、その測定データの信頼性を維持するため、ノイズの発生源と考えられる事象については、指示された手順に従うことにより、予め排除されるように構成されていると考えられる。しかし、具体的な雑音源の排除項目、排除作業は、その手順内には、明確にされていない。我が国の実情に合致した計測法へと再構築するにあたり、その点を明確にするため

に、現場での AE 測定時に、影響を与えるような各種雑音について、以下に示されるような各要因の影響度を調べることにした。

(1) 貯蔵物の受払いによる雑音

AE 波測定前の静止時間の影響を見るために、貯蔵物の受払直後の AE 発生状況を観察した。通常、流入終了後、タンクの容量に応じて所定の時間以上経過した時、液体は静止していると思われ、AE 計測を行っている。ここでは、静止時間が不十分な場合として、受け入れ流入終了後 30 分後に AE 波測定を行い、その影響を調べた。対象としたのは、ガソリタンク (容量 934kl, 直径 12.0 m) である。結果をタンク底板の AE 源発生位置の分布の形式で表示した。これを Fig. 2 に示す。計測時間が 22 秒と短いにもかかわらず、極めて多量の AE 波信号が流体の流れに沿ったような形で検出されている。受け払い直後のような、静止時間が不十分な時、正確な AE 計測を行うことが不可能であることがわかる。

(2) 固定屋根式タンクにおける雑音

固定屋根式タンクの場合、貯蔵物を十分に静止させても、水滴・油滴が屋根から落下し、これが雑音源となることが考えられる。この雑音は、主に水滴・油滴が液面へ落下した時の衝撃で発生する。通常の AE 測定では、センサーはタンクの一辺高さの円周上に等間隔で配置されている。この

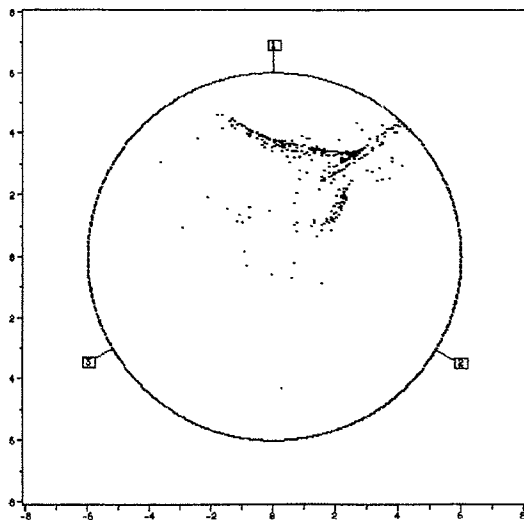
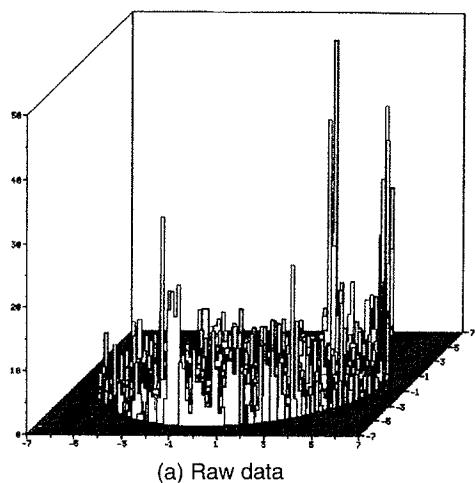


Fig. 2 Effect of inner flows on the AE signals in oil storage tank with floating type roof

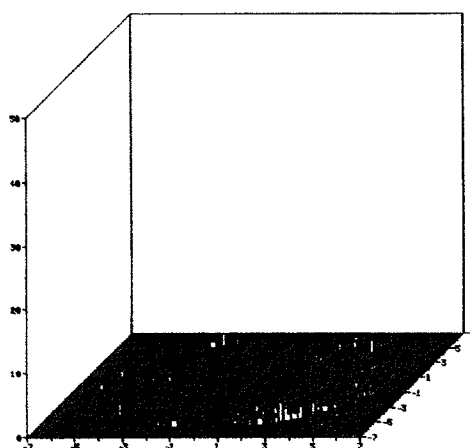
高さとは異なる高さの円周上に、もう 1 組のセンサーを配置すれば、水滴落下による雑音は、まず液面に近い上部センサーで検出され、一定時間後に他の下部センサーで検出されると考えられる。このような信号セットをフィルタリング除去した場合と、センサーを通常に配置したままで測定を行った場合を比較し、固定屋根の影響を検討することとした。対象としたのは、容量 1000kl, 直径 11.64m, 高さ 7.64m の固定屋根式工水タンクである。フィルタリングの補助センサー群は、通常センサーの上方約 2.5m に取り付けられた。なお、水滴落下による信号は、タンク内で多重反射を繰り返すため、多くのエコー信号が連続して計測される。その継続時間は通常の、腐食によって生じるとされる一般的な信号よりもはるかに長い。エコー信号の継続時間は、タンクの大きさに依存するが、今回は、100ms 程度になると判断された。そこで、この値をエコー信号を除去するための閾値とした。Fig. 3 にその結果を示す。Fig. 3 は、底板各位置で得られた AE イベント数が鳥瞰図の形で表示されている。Fig. 3 の (a) 図は、通常配置の信号からの解析結果、同 (b) 図は、立体配置によるフィルタリングを施した後の解析結果である。両者の差は大きく、固定式屋根での測定の場合、屋根部からの水滴が大きなノイズ源になりうる事がわかる。

(3) 風の影響による雑音

風速が大きくなると、風に起因する雑音が増加し、有効な AE 信号を検出するのに大きな障害となると考えられる。そこで平均的な風速が 0.5~4.0m/s の状況下で AE 測定を行い、その影響を調べた。対象としたのは、容量 560kl, 浮き屋根式、直径 11.64m の工水タンクである。この状況下での AE 源位置評定結果を Fig. 4(a) 図に示す。この時の結果において風速 2.5m/s 以上の時に検出された AE 信号を除去し、再度解析を行ったところ、AE ヒット検出数は、32706 ヒットから 23476 ヒットと約 2/3 に減少した。これに対応して位置評定されたイベント数も減少した。これを Fig. 4(b) 図に示す。両者の差より、風が大きなノ



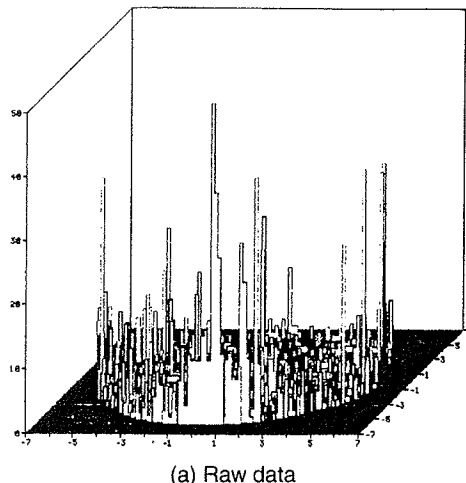
(a) Raw data



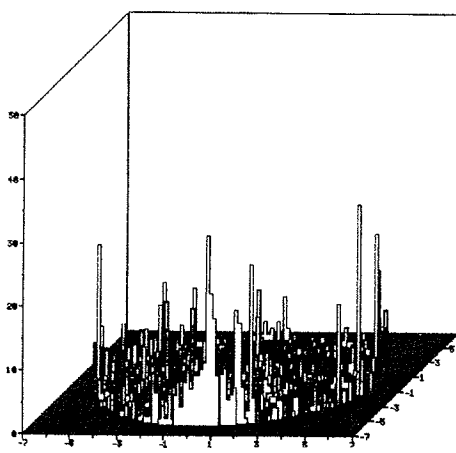
(b) After filtering

Fig. 3 Effect of water drops on the AE signals in water storage tank with corn roof

イズ源となりうる事がわかる。なお、今回の操作によって除去した後も、ヒット数は比較的高い値になっているが、これは、腐食によるものではなく、風圧の変動差など、今回の操作だけでは除去しきれない、風の影響が残されているためと考えられる。



(a) Raw data



(b) Eliminate the data at wind velocity upper 2.5m/s

Fig. 4 Effect of wind on the AE signals in oil storage tank with floating type roof

5.2 AE試験結果と開放後の板厚計測データを用いた統計的分析結果の比較・検討

前項の5.1で検討したノイズ源を配慮しつつ、5基の実タンクについてAE波計測を行った。対象としたタンクの諸元をTable 1に、また、AE

Table 1 Specification of oil storage tanks examined in this study

	Tank No.				
	1	2	3	4	5
Contents	Crude Oil	Naphtha	Gasoline	Kerosene	Water
Volume / kl	110,000	32,000	943	900	200
Diameter / m	81.5	47	12	12	6.7
Thickness / mm	Bottom plate	12	8	6	6
	Annular plate	21	-	6	-
Used period / year	15	22	43	31	24

Table 2 Parameters in AE measurement and factors for corrosion rate derived from risk curve

	Tank No.				
	1	2	3	4	5
Number of Sensors (Ns)	21	12	3	3	3
Threshold / dB	40	40	43	40	40
Overall Data					
Number of hits (Nh)	2530	1211	976	1281	1700
Nh / Ns	120	101	325	427	567
Grade	A	A	B	B	C
Potential Leak Data					
Number of hits (Nh)	393	145	77	289	849
Nh / Ns	19	12	26	96	283
h _{0.01}	1.0	1.4	2.0	1.4	5.2
D	7.9	18.4	5.3	4.6	9.8
h _{0.01} / D	0.13	0.08	0.38	0.30	0.53

の測定条件および結果を Table 2 に示す。ここで Overall data は、検出された全ての AE 信号を処理したものである。Potential leak data は、欧米の評価方法で使用されているもので、Overall data から、信号継続時間が長く大きなエネルギーを持つ AE 信号を抽出したものに相当する。孔食などの活性な腐食、リークなど、危険度の大きな AE 発生源に対応すると言われている。Potential leak data は、具体的には、各ヒットデータに対し、カウントと信号継続時間の相関をグラフ化し、その中にカウントと信号継続時間が共に大きな値を持つグループが現れた場合は、それらのデータとして、明確なグループ分けができなかった時は、便宜的にカウント数が 150 を超える信号として定義されている。Table 2 に示したように、No. 3 タンクの AE 計測における閾値が他より高いのは、計測時にノイズが多く発生したためである。他のタンクに比べ、ヒット数が相対的に少なくなっている可能性がある。

同一のタンクについて、AE 波の測定後、タンクを開放することによって、超音波法による板厚測定を行い、これをもとに底板腐食に関するリスク曲線を作成した。結果の一例を Fig. 5(a), (b) に示す。(a)は Tank No. 1, (b)は Tank No. 3 の例である。このようにして求めた曲線のテイル部の

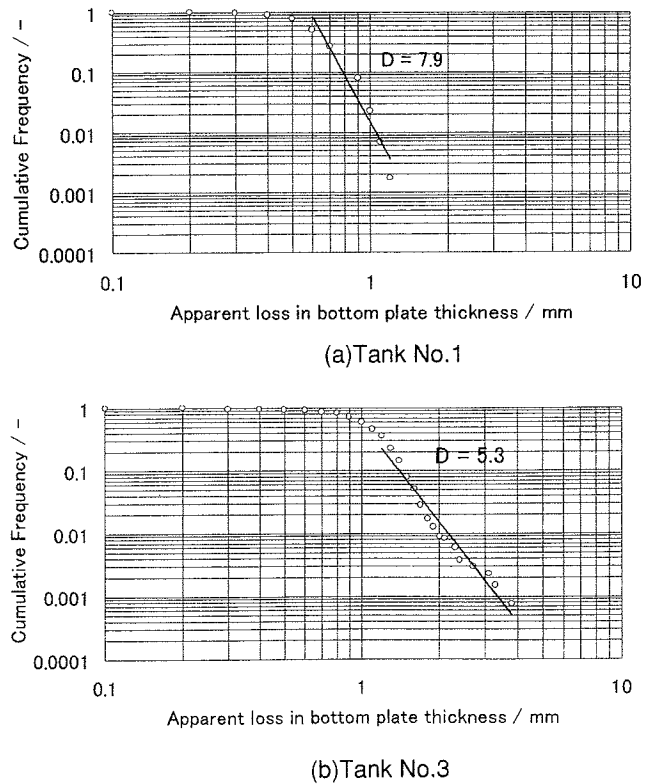


Fig. 5 Examples of risk curve constructed from plate - thickness data measured by UT method

傾きを同じく Table 2 に示す。なお、Tank No. 1 については、アニュラー板と底板について、それぞれリスク曲線が得られるが、ここでは、面積の広い底板の値で代表させた。また、Tank No. 4

は、板厚測定が全面に渡って行われたため、広い板厚分布をもった。しかし、初期公称板厚が 6.0 mm であることより、リスク曲線を求める際には、全データ数の 90% となる、6.3mm 以下の値を使用している。

リスク曲線から現時点での侵食度の大きい領域での統計的腐食速度を求めるためには、テイル部の傾き D と $\langle h \rangle$ を定める必要がある。 $\langle h \rangle$ は、厳密には、リスク曲線テイル部での減肉量分布の統計上の期待値を取ればよいが、侵食のより進んだ局部腐食領域を対象とするなら、便宜上、累積確率 $F=0.01$ での h の値、 $h_{0.01}$ などをこれに代表させればよいと考えられる。そうすれば、腐食減肉速度の大小は、 $h_{0.01}/D$ に支配されると考えられる。リスク曲線から求めた $h_{0.01}$ の値を同じく Table 2 に示す。この場合、 $\langle h \rangle$ として、標本数に左右される計測群の最大腐食量を取るのとはタンク全体としてのグローバル診断という意味で適切でない。

以上の結果求められるセンサー当たりのヒット数と $h_{0.01}/D$ の値の関係を Fig. 6 に示した。両者には強い負の相関が認められる。特に Overall data に関しては、ほぼ線形の関係が得られた。欧米のデータベースから判定されたグレードを同

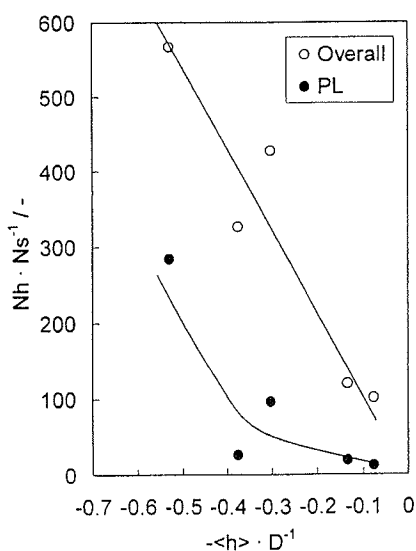


Fig. 6 Relationship between the AE signals (hit number) and corrosion rate parameters ($-\langle h \rangle \cdot D^{-1}$) derived from risk curve

じく Table 2 に示したが、グレード A と判定されたものは、Fig. 6 中で $\langle h \rangle / D$ および hits/ch が低い領域に、グレード B と判定されたものは、それより $\langle h \rangle / D$ および hits/ch が高い領域にと、順次プロットされている。

以上の結果より、AE 計測法から得られる AE パラメータ値と現在用いられている超音波厚さ計測データとは相関性があり、稼動中 AE 診断技術は、消防法で規定されている離散的超音波厚さ計測による腐食管理技術を担保するものであるといえる。

6. 結 言

我が国の実情に合った AE 法によるタンク底板腐食のグローバル診断技術を確認することを目的とし、基礎的知見を得るために、実タンクに対し AE 測定を行った。現場で問題となり得るノイズ源およびその影響を調べるとともに、AE 測定で得られる結果と、超音波厚さ計測データによる腐食速度を反映するパラメータ $\langle h \rangle / D$ の導出に基づき、リスク曲線を利用することを検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 測定直前の受け払いの影響を示し、測定前に十分な静止時間を取ることの重要性を示した。その測定原理から予想されるとおり、AE 計測時に、風は大きな影響を与え、ノイズ源となることを示した。また、構造上のノイズ源として、屋根が固定屋根である時、恒常的なノイズが生じうる事を示した。
- (2) AE 測定における Overall data のチャンネル当たりのヒット数と、板厚データのリスク曲線から求められる $\langle h \rangle / D$ の間には、強い相関があることが判明した。この関係は、欧米のデータベースに基づくグレード分けの傾向ともほぼ一致した。リスク曲線を用いる方法は、我が国で通常、法規で行われている離散的な板厚測定から AE 測定の結果に対応付けられるパラメータが導出できる可能性を示しており、我が国独自の AE 診断システムにおけるデータベース構築とそれに基づく評価方法の確立に関し道が開

けた。

参考文献

- 1) Guide pour L'inspection et Maintenance des Reservoirs Metaliques Aeriens Cylindriques Verticaux D'hydrocarbures Liquides en Raffinerie, Edition Aout 2000, Union Francaise des Industries Petrolieres (2000)
- 2) 湯山茂徳, AEに関する最近のおもしろい話題 (実構造物の腐食損傷評価), 検査技術, 2-6, pp. 58-63 (1997)
- 3) P. T. Cole : European and American Experience of Acoustic Emission Applications in the Chemical Industry, PAC Technical Report, (1996)
- 4) 関根和喜, 橘川重郎, 山田 實: 石油タンク底板裏面腐食のフラクタル分析法, 日本高圧力技術協会平成14年度春季講演会概要集, (2002), pp. 11-12
- 5) 関根和喜, 泉太郎, 斉藤玄人, 吉川郷生: 災害事象生起のフラクタル的特性とその事故統計分析への応用, 圧力技術, 32 (5), (1994), pp. 240-248
- 6) 関根和喜, 泉太郎, 吉川郷生: リスク曲線に基づく大規模災害事故発生特性の極値統計論による分析, 圧力技術, 33 (3), (1995), pp. 147-153
- 7) 関根和喜: フラクタル理論を用いた産業災害事故生起特性のモデル化とその災害統計分析への応用, 日本機械学会誌, 99 (1), (1996), p. 69