

HPIS

HPIS G 110 TR

AE 法による石油タンク底部の 腐食損傷評価手法に関する技術指針

Recommended Practice for Acoustic Emission Evaluation of Corrosion Damage
in Bottom Plate of Oil Storage Tanks

HPIS G 110 TR 2005

2005 年 5 月制定

社団法人日本高圧力技術協会
High Pressure Institute of Japan

HPIS G 110 「AE 法による石油タンク底部の腐食損傷評価手法に関する技術指針」

原案作成委員会構成表

| | | |
|------|-------|--|
| 委員長 | 関根 和喜 | 横浜国立大学大学院 工学研究院 |
| 幹事 | 山田 實 | 独立行政法人 消防研究所 プロジェクト研究部 |
| 幹事 | 湯山 茂徳 | 日本フィジカルアコースティクス(株) |
| 委嘱委員 | 北條 英光 | 日本大学 生産工学部 管理工学科 |
| 委嘱委員 | 田島 邦久 | 元 危険物保安技術協会 |
| 委嘱委員 | 石井 正義 | 元 日石エンジニアリング(株) |
| 委嘱委員 | 田村 一彦 | 東京消防庁 予防部危険物課 |
| 委嘱委員 | 内田 喜訓 | 危険物保安技術協会 タンク審査部 |
| 委嘱委員 | 三宅 裕隆 | 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油備蓄機動グループ |
| 委嘱委員 | 小幡 義彦 | 日本大学 生産工学部 機械工学科 (日本非破壊検査協会) |
| 委嘱委員 | 宮崎 修治 | 三菱化学(株) 鹿島事業所 設備技術部工務グループ (石油化学工業協会) |
| 一般委員 | 芳賀 啓之 | 旭化成エンジニアリング(株) プラントライフ事業部 MAP 事業推進グループ |
| 一般委員 | 鈴木 裕晶 | 千代田アドバンスソリューションズ(株) 経営企画室 |
| 一般委員 | 飯田 英男 | 東京電力(株) 火力部 火力エンジニアリングセンター |
| 一般委員 | 諸藤 浩一 | 東京ガス(株) 生産部 生産エンジニアリンググループ 技術開発センター |
| 一般委員 | 佐藤 謙 | 新日本石油精製(株) 技術部工務技術グループ |
| 一般委員 | 吉田 光夫 | (株)ジャパンエナジー 精製部 工務担当 |
| 一般委員 | 八島晋之介 | 日陽エンジニアリング(株) タンクシステム部 |
| 一般委員 | 野崎 幸次 | 日本防蝕工業(株) 東京支店 |
| 一般委員 | 中村 英之 | 石川島検査計測(株) 技術研究所 |
| 事務局 | 大西 平太 | (社)日本高圧力技術協会 特別研究員 |
| 事務局 | 橘川 重郎 | (社)日本高圧力技術協会 特別研究員 |

制 定：平成 17 年 5 月 1 日

原案作成委員会：(社)日本高圧力技術協会 EST-4-3 委員会

(委員会委員長 関根 和喜)

審議委員会：(社)日本高圧力技術協会 標準化委員会

(委員会委員長 恩澤 忠男)

ま え が き

この規格は社団法人日本高圧力技術協会 EST-4-3 委員会で作成され、標準化委員会の議決を経て、理事会により承認された社団法人日本高圧力技術協会のテクニカルレポートである。

目 次

| | ページ |
|--|-----|
| 1. 総論..... | 1 |
| 1.1 適用範囲..... | 1 |
| 1.2 構成..... | 1 |
| 1.3 作成の趣旨..... | 1 |
| 2. AE 試験方法..... | 2 |
| 2.1 試験原理..... | 2 |
| 2.2 計測機器..... | 2 |
| 2.2.1 AE 計測装置..... | 2 |
| 2.2.2 AE センサ..... | 3 |
| 2.2.3 データ解析項目..... | 3 |
| 2.3 計測実施のための条件..... | 4 |
| 2.4 AE 試験手順..... | 5 |
| 2.5 AE データ解析法..... | 5 |
| 2.5.1 AE 計測データの内容..... | 5 |
| 2.5.2 雑音の除去..... | 7 |
| 2.5.3 AE 活動度（ヒット数）の算出方法..... | 7 |
| 3. タンク底部の腐食損傷評価..... | 11 |
| 3.1 AE 活動度と腐食リスクパラメータとの相関関係..... | 11 |
| 3.2 管理上の想定腐食速度..... | 11 |
| 3.3 精度の向上..... | 12 |
| 附属書 1 海外における AE の適用状況..... | 14 |
| 1. 海外の現状..... | 14 |
| 1.1 イギリス／オランダの状況..... | 14 |
| 1.2 フランスの状況..... | 15 |
| 1.3 ドイツの状況..... | 15 |
| 1.4 イタリアの状況..... | 15 |
| 1.5 アメリカの状況..... | 15 |
| 2. 規格化の動向..... | 16 |
| 2.1 ヨーロッパの現状..... | 16 |
| 2.2 アメリカの現状..... | 16 |
| 3. まとめ..... | 16 |
| 附属書 2 AE 法によるタンク底部の腐食損傷診断における雑音処理方法..... | 18 |

| | |
|---|----|
| 附属書 3 AE 活動度の算出方法 | 29 |
| 附属書 4 腐食リスクパラメータ (CRP) の理論的背景 | 31 |
| 附属書 5 底部板厚データの収集・解析とデータベースの構築 | 33 |
| 1. 底部板厚データの基本条件 | 33 |
| 2. 計測データの項目 | 33 |
| 3. 板厚データの解析 | 34 |
| 附属書 6 腐食リスクパラメータ (CRP) と実際の腐食速度との関係 | 36 |
| 附属書 7 用語解説 | 38 |

日本高圧力技術協会規格

AE 法による石油タンク底部の腐食損傷評価手法 に関する技術指針

Recommended Practice for Acoustic Emission Evaluation of Corrosion Damage in Bottom Plate of Oil Storage Tanks

1. 総論 本技術指針の目的は、地上置きタンク（石油タンクなど）におけるグローバル診断技術の一つとして、AE 試験を実施することにより、タンク底部の腐食損傷状態を総合的に評価・判定し、腐食管理の優先度を選択するための指針を提示することである。但し、この診断法は、AE 試験データから、底部の腐食減肉量の絶対値を評価することを目的としたものではない。

1.1 適用範囲 本技術指針は、石油タンクなどの底部（アニュラー板、および底板）に適用し、内面がライニングされている場合は外面、されていない場合は外面あるいは内面の腐食損傷状態を、供用中に評価するために適用される。なお、タンクの側板部や屋根部は本指針において、対象としていない。

一方、ステンレス鋼製タンク、加温タンク、および電気防食を施工したタンクは、本指針の適用外である。また、本技術指針で示される AE 試験で検出される損傷形態は、腐食減肉や孔食などの腐食損傷であり、応力腐食割れ（SCC）や、溶接欠陥は含まれない。

1.2 構成 本指針は、1.1 に記述した適用範囲に適合する石油タンク底部の腐食損傷評価に関する技術的な内容について述べたものである。

本指針は 3 章からなり、1 は総論、2 は AE 試験方法、3 はタンク底部の腐食損傷評価について示してある。さらに、附属書として、「1. 海外における AE の適用状況」、「2. AE 法によるタンク底部の腐食損傷診断における雑音処理方法」、「3. AE 活動度の算出方法」、「4. 腐食リスクパラメータ（CRP）の理論的背景」、「5. 底部板厚データの収集・解析とデータベースの構築」および「6. 腐食リスクパラメータ（CRP）と実際の腐食速度との関係」を追加し、最後に附属書 7 として「用語解説」を付けてある。

本指針全体の構成を示す流れ図が図 1 に与えられている。

1.3 作成の趣旨 固体内で生ずる割れ、変形などの局所的微視変化を探る手段として有力な AE 法は、工業技術の一つとして 30 年以上の歴史を持ち、現在多くの分野で実用化されている。欧米では、多数のプラント所有者からなる AE ユーザーズグループが結成され、定期的に情報交換のための会議を開催し、新たな計測法の開発や、信頼性の高いデータベースの構築に努力を重ねている。

こうして作成されたデータベースの一つとして、石油タンク底部の腐食損傷診断を行うために開発されたものがある。これを基に、欧米において、石油・石油化学プラントで実構造物の損傷診断法として AE 法が用いられ、維持・管理経費節約の手段として、有効であることが示されている。

タンク底部の状態評価に用いられる AE 試験法、評価法が発達したのは、イギリス／オランダを中心とするグループにおいてである（附属書 1 参照）。1989 年、イギリスにおいてメジャー系石油会社の要請により、タンク底部の状態を評価する手法として、AE 試験の適用が試みられた¹⁾。これにより、適切な AE センサ／計測法を用いれば、底部で発生する微弱な AE 信号を検出できること、また採取された AE データは、底部の腐食損傷状態

と強い相関を持つことが明らかになった。その後、1990年代半ばまでに、石油メジャー各社、また大手化学会社の数十社からなる AE ユーザーズグループが結成され、試験結果のデータベース化が行われるようになった。1998年には、ユーザーズグループが実施した 157 の試験事例からなるデータベースを基に、タンク開放前に実施された AE 試験結果と、開放後の磁束漏洩試験（MFL）による底部全面検査結果の照合が行われ、両者には良好な相関のあることが確認された。この結果をもとに、AE ユーザーズグループにおいて AE 試験の信頼性が検証されたものと考えられ²⁾、以後欧州においてタンク底部の腐食損傷状態を検査する標準試験法として、AE 試験が適用されるようになり、現時点で毎年 1,000 基以上のタンクに対して AE 試験が実施されている³⁾。

この技術に基づく試験手順が、1999 年我国に導入された⁴⁾。以来（社）日本高圧力技術協会^{5,6)}（石油公団（現石油天然ガス・金属鉱物資源機構）委託研究）、（財）石油産業活性化センター⁷⁾（新エネルギー・産業技術総合開発機構委託研究）、消防研究所⁸⁾、石油連盟など複数の研究機関・グループにより、基礎および実用研究が行われてきた。2005 年春までに、直径数 m の製品タンクから、直径 97m の大型原油タンクに至るまで、80 基余りの実タンクに対して AE 試験が実施され、データベースが作成されている。

我国では欧米と異なり、1000kl を超えた貯蔵能力を持つタンクに対して、その容量に応じて開放周期が定められ、定期的な内部開放検査を実施し、離散的な板厚測定を行うことによりタンク底部の腐食管理が実施されている。一方、これまでに得られた AE 試験データと、従来の法定板厚測定結果を統計的に処理して評価される経年劣化を考慮した腐食量／腐食速度のデータとを比較対照することにより、両者の間に良好な相関のあることが我国で確認されている。すなわち、検出された AE 信号（ヒット）数などのパラメータを利用して、腐食量・腐食活性度に関する定量的情報を得るための検量線が与えられることが示されている。このことは、AE 計測を実施し、そのデータを適切に処理すれば、検量線を基に計測時点におけるタンク底部の腐食活性度に関する情報が、開放検査を行うことなしに得られることを意味している。この状況が図 2 に示されている。ここで、AE 計測を実施することにより、現状の板厚測定で確保される安全性と同等の安全性を、タンクの供用中に担保し得る様子が模式的に表されている。

本技術指針は、上記に示される AE および板厚のデータベースを基に、実用的なタンク底部の腐食損傷診断方法として AE 試験が一般的に適用可能なように、我国の法体系や維持・管理体制など、実情に合った試験手順と評価・判定法を提示することを目的としている。

2. AE 試験方法

2.1 試験原理 タンク底部の腐食損傷評価を行う際、検出される AE 信号の発生源は、底部内面、あるいは外面の腐食で生じた生成物のはく離、あるいは割れであると考えられている。すなわち、活性な腐食により新たな腐食生成物が生ずる際に大きな体積膨張を伴うため、既存の腐食生成物が剥離したり割れたりするという、瞬時に起こる物理的な微小変化に起因して AE の発生することが検証されている。

検出される AE 信号の活動度は、腐食の進行速度と相関し、腐食速度と単位時間（1 時間）あたりに検出される AE ヒット数は相関関係にあることを示す検量線が与えられている。

腐食に起因する AE 波は貯蔵物中を伝播し、タンク側板上に取り付けた AE センサで検出される。検出された AE データを、我国で作成された AE および板厚のデータベース（以後データベースと略）と参照し、タンク底部の腐食損傷状態を評価・判定する。

2.2 計測機器

2.2.1 AE 計測装置 計測には、NDIS 2106（アコースティック・エミッション試験装置の性能測定及び表示方法）

に従って校正された市販の AE 計測装置を用いる。この装置は、実時間での計測・解析が可能ばかりでなく、雑音除去や AE 活動度の評価を行うために、採取した AE データの信号履歴解析、振幅分布解析、相関解析など後処理が適用できるものでなければならない。

2.2.2 AE センサ 計測に使用する AE センサは、ISO 12713 (Non-destructive testing - Acoustic emission - Inspection - Primary calibration of transducers) あるいは NDIS 2109 (相互校正法によるアコースティック・エミッション変換子の絶対感度校正方法) に従って校正されたもので、30kHz 付近の周波数帯域に共振周波数を持ち、背景となる電気雑音が小さく、計測に必要な感度を有したものでなければならない。計測時の感度は、NDIS 2110 (アコースティック・エミッション変換子の感度劣化測定方法) で規定された標準 AE 発生源であるシャープペンシル芯の圧折などによる擬似 AE 信号を用いて確認する。

2.2.3 データ解析項目 計測に用いる AE 信号処理パラメータは、カウント、エネルギー、ヒット数、信号の最大振幅値 (振幅分布)、信号立上り時間、信号継続時間、イベント (信号発生位置) などである。図 3 に、信号処理パラメータの定義が模式的に示してある。使用する AE 計測システムは、これらの信号処理パラメータとともに、風速に関するアナログ信号を入力し、解析できるものでなければならない。計測に適用する AE 信号処理パラメータの持つ意味と特徴を以下に示す。

- a) **カウント数 (COUNT)** しきい値を越えた弾性波 (AE) の振動回数をすべて数える。事象の振幅の重み付けとしての意味を持つが、波形は、伝播媒体やセンサの周波数特性に大きな影響を受けるため、そのカウント数もこれらに強く依存する。弾性波発生箇所および計測箇所が同じ場合には、一般にカウント数の大きなものほど大きいエネルギー (最大振幅値) を持つと考えてよい。
- b) **エネルギー (ENERGY)** 検出波の包絡線検波波形の面積と定義される。便宜的に 10V のピーク値が 1 ミリ秒続いたときの波形、すなわち高さ 10V、長さ 1 ミリ秒の矩形波が入力したときに 1000 カウントのエネルギーを持つと定め、これを参照値として用いている。発生した事象のエネルギーを相対的に比較するのに最適なパラメータである。一般的にカウント数と類似した挙動を示す。
- c) **ヒット (HIT)** センサに入力した検出信号の一かたまりを 1 ヒットと数える。従って、発生した事象が一個であっても複数個のセンサ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。割れや変態など突発型事象を生ずる発生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。ただしヒットそのものは入力した信号のエネルギーには全く関係しないため、発生したエネルギーの比較を行うのには不向きである。
- d) **最大振幅値 (AMPLITUDE)** 弾性波を生じた事象がセンサに与える振動の大きさ、すなわち地震の震度に相当する情報を与える。統計的処理を施すことにより振幅分布が得られ、発生した事象間の相対的エネルギーレベルの比較が行える。これを用い、異なる発生機構を識別できる場合がある。また、振幅分布上において、直線部を外れる領域にみられる高振幅事象の連続発生は、有害な欠陥の成長に対応している可能性がある。このように最大振幅値は事象の危険度を知る重要な尺度である。ここで、振幅値 (dB) は以下のように定義される。

$$\text{dB} = 20 \cdot \log V / V_0$$

V : 検出した電圧値

V₀ : 基準となる参照電圧値

ただし、通常用いられるセンサ出力換算の場合、V₀ = 1μV、また波形解析等、波形収録時に用いられるプリアンプ増幅後の場合は、V₀ = 100μV、(プリアンプゲイン 40dB の時) となる。

- e) **信号立上り時間 (RISE TIME)** 信号が入力したとき、最初のしきい値クロス時から最大振幅値にいたるまでの時間のことである。各信号の立ち上がりの鋭さに関する情報を与える。この情報をもとに、本来の信号と機械的雑音などの識別を行える場合がある。
- f) **信号継続時間 (DURATION)** 信号入力時、最初のしきい値クロス時から最後のしきい値クロス時までの時間、すなわち 1 ヒットの継続時間と定義される。この値と信号立ち上がり時間、および最大振幅値を総合して、入力した信号のおおまかな波形に関する情報を得ることができる。この情報をもとに、異なる発生源を識別できる場合がある。
- g) **イベント (EVENT)** センサ間の信号到達時間差をもとに AE (弾性波) 発生源の位置を求めることができる。通常、直線状標定の場合には、2 個、また平面標定の場合には 3 あるいは 4 個のセンサでグループをつくり解析を行う。グループ内のセンサ全てに信号 (ヒット) が入力したときに初めてこうした計算が可能となり、AE イベントが発生したと見なされ、その発生位置を標定することができる。したがって、信号が小さくグループ内のセンサ全てがそれを検出しないときには、この方法で位置を決定することはできず、またきわめて短時間内に集中して AE が発生する際には計算結果が混乱するなど、不都合の生ずる可能性がある。このような場合には、センサ間信号到達時間差に基づかない、例えばゾーン標定法などを用いる必要がある。なお、位置標定は音速の等しい同じモードの信号到達時刻が得られない場合には、著しく精度が劣る可能性があり、標定そのものが不可能となることもある。
- h) **平均信号レベル (ASL)** 入力した信号の振幅絶対値の総和から求めた、信号継続時間内の平均値 (単位: dB)
- i) **信号計測しきい値 (THR)** 信号を計測するためのしきい値 (単位: dB)
- j) **風速** 風速に関するデータを AE データとともに記録する。

2.3 計測実施のための条件 AE 計測は、タンク内容物の対流などに起因する雑音を除去するために一定時間タンクを静置させ、また雨、風などによる環境雑音や、接続した配管の振動などに起因する外部雑音の混入しない環境下で実施する必要がある。以下に計測実施のための条件を列記する。

a) 必要静止時間

原油タンク: 24 時間

製品タンク: 12 時間 (直径 15m 以上)、6 時間 (直径 15m 未満)

b) 有効 AE 計測時間 1 時間

c) 液面高さ 50%以上の液面レベルを推奨

d) 気象条件 降雨が無いこと。風の影響が無いこと。

e) AE センサの配置 AE 試験は、センサを底部から適切な高さの側板上に、円周方向に対して等間隔に配置して行う。

f) 必要なセンサ数の目安

| タンク径 (m) | 必要なセンサ数 |
|-----------|---------|
| 12.5 未満 | 3 |
| 12.5～25.0 | 6 |
| 25.0～37.5 | 9 |
| 37.5～50.0 | 12 |
| 50.0～62.5 | 15 |

| | |
|-----------|----|
| 62.5～75.0 | 18 |
| 75.0～87.5 | 21 |
| 87.5～ | 24 |

但し、上記センサ数は浮屋根式タンクの計測に対応する。固定屋根の場合、屋根部に結露した液滴落下に起因する雑音を除去する目的で2段階配列をとるため、必要なセンサ数は基本的に2倍となる。

AE試験は、石油タンクの腐食に関する知識とAE技術に関する知識を併せ持ち、試験を行うのに十分な技量を有する技術者が実施することが望ましい。

2.4 AE試験手順 AE試験は、下記の手順で行う。

a) 試験前準備

- 1) 試験を行うタンクの所有者、あるいは管理者は、**表1**に示すタンクに関する必要事項の情報を試験実施者に提供する。
- 2) 試験実施者は、1)に与えられた情報をもとに必要とされるAEセンサチャンネル数、配置、およびAE計測装置の設置位置を決定する。

b) 試験の実施

- 1) 試験実施者は、現場到着後、あらかじめ定めたAEセンサ配置に従い、底部上の適切な高さにAEセンサを、接触媒質を介して取り付ける。なお、十分な感度が得られるように、センサ取付け面（直径5cm程度）の塗料を適切な方法で剥がし取る。
- 2) 試験実施者は、AE計測時に貯蔵中の内容物が完全に静止するように、受け払いの停止、あるいはバルブの遮断、ポンプの停止等をタンク管理者に要請する。
- 3) 試験実施に際しては、タンクに連結されたパイプ、あるいはバルブ等から混入する外部雑音がないことを確認する。
- 4) **NDIS 2110**（アコースティック・エミッション変換子の感度劣化測定方法）で規定された標準AE発生源であるシャープペンシル芯の圧折などによる擬似AE信号を用い、すべてのAEセンサが±2dB内のピーク感度範囲内にあることを確認する。
- 5) 完全静止状態で、基本データとなる背景雑音レベルを測定する。なお、強風時（風速およそ4m以上）あるいは雨天時は、極めて大きな環境雑音が混入するため、通常の計測は不可能となる。
- 6) 障害となる環境雑音が発生していないことを確認後、適切なしきい値を設定してAE計測を実施する。有効AE計測時間は、原則1時間とする。

2.5 AEデータ解析法

2.5.1 AE計測データの内容 AE活動度を算出するために必要なAEデータの内容は、以下の通りである。

- a) **FILE NAME（ファイル名）** AEデータのファイル名である。
- b) **TEST BEGIN DATE & TIME（検査年月日および時刻）** 検査を実施した年月日および時刻を示す。年は西暦で記述し、検査月、検査日、そして検査開始時刻を分まで示す。
- c) **Diameter（タンク直径）** 試験を実施したタンクの直径をメートル単位で示す。
- d) **Operation Temp（タンク操業時の内容物温度）** タンク操業時の内容物温度を示す。
- e) **Content（貯蔵物）** タンクに貯蔵される内容物を示す。
- f) **Roof Type（屋根形式）** 浮き屋根、あるいは固定屋根など、屋根の形式を示す。
- g) **Base（基礎の種類）** アスファルトサンド、オイルサンドなど基礎の種類を示す。

- h) Columns (支柱の有無) タンク内の支柱数を示す。
- i) Lining (内面ライニング) 内面ライニングの有無、そして種類を示す。
- j) Year Built (建設年月) タンクが建設された時期を西暦年および月で示す。
- k) Anodes/CP (電気防食) 電気防食の有無、そして種類を示す。
- l) AE Test Temp (AE 試験時の貯蔵物の温度) AE 試験実施時の貯蔵物の温度を摂氏で示す。
- m) AE Test Level (AE 試験時の液面高さ) AE 試験実施時の液面高さをメートル単位で示す。
- n) Sludge Level (スラッジ高さ) AE 試験実施時のスラッジ高さを、メートル単位で示す。
- o) Weather (天候) 試験実施時の風速 (m/s 単位)、天候、そして気温 (摂氏) を示す。
- p) Setting Time (静置時間) 試験実施時までのタンク静置時間を、時間単位で示す。
- q) Sensor (センサ) 試験に使用した AE センサの種類を示す。
- r) Sensor Channel No. (1st Array/Height) (センサのチャンネル番号、1 段目配列の高さ) 1 段目に配列した AE センサのチャンネル番号と、底部からの高さ (メートル単位) を示す。
- s) Sensor Channel No. (2nd Array/Height) (センサのチャンネル番号、2 段目配列の高さ) 2 段目に配列した AE センサのチャンネル番号と、底部からの高さ (メートル単位) を示す。
- t) HH:MM:SS.mmmuuun PARA1 CH RISE COUN ENER DURATION AMP ASL THR (AE データ) 表記の如く採集される基本 AE データに関する内容の説明は、下記の通りである。
 - 1) HH:MM:SS.mmmuuun (AE 信号検出時刻) AE 計測開始後における AE 信号 (ヒット) 検出時刻を、時間 : 分 : 秒 : ミリ秒、マイクロ秒、ナノ秒 (100 ナノ秒単位) の形式で示す。
 - 2) PARA1 (風速) AE 信号検出時の風速を、メートル/秒の単位で示す。
 - 3) CH (チャンネル番号) AE 信号が検出されたチャンネル番号を示す。
 - 4) RISE (信号立ち上がり時間) 信号立ち上がり時間を、マイクロ秒の単位で示す。
 - 5) COUN (カウント数) 検出されたカウント数 (無単位) を示す。
 - 6) ENER (エネルギー) 検出された AE エネルギー値 (無単位) を示す。
 - 7) DURATION (信号継続時間) 信号継続時間を、マイクロ秒の単位で示す。
 - 8) AMP (振幅値) 振幅値を dB 単位で示す。
 - 9) ASL (平均信号レベル) 平均信号レベル、あるいはそれに相当する量を dB 単位で示す。
 - 10) THR (しきい値) AE 計測しきい値を、dB 単位で示す。

データベースとなる基本 AE データファイルの例

FILE NAME: 00000001

TEST BEGIN DATE & TIME: Tue Aug 31 1999 13:21:03

Diameter: 12m

Operation Temp : Ambient

Content: Gasoline

Roof Type: Fixed

Base: Sand

Columns: 1

Lining: Yes

Year Built: 1956

Anodes/CP: None

AE Test Temp : 25 C

AE Test Level : 5m

Sludge Level: 0

Weather: Wind 2m/s/cloudy/28 C

Settling Time: 24 h

Sensor: 30kHz Resonant

Sensor Channel No. (1st Array/Height): CH1, CH2, CH3/0.8m

Sensor Channel No. (2nd Array/Height): CH4, CH5, CH6/2.3m

| HH:MM:SS.mmmuuun | PARA1 | CH | RISE | COUN | ENER | DURATION | AMP | ASL | THR |
|------------------|-------|--------------|------|------|------|----------|-----|-----|-----|
| | m/s | | us | | | us | dB | dB | dB |
| 00:00:00.0000000 | | Test running | | | | | | | |
| 00:00:03.3987955 | 0.00 | 3 | 21 | 10 | 78 | 349 | 46 | 27 | 43 |
| 00:00:03.3992765 | 0.00 | 6 | 2 | 1 | 59 | 3 | 43 | 23 | 43 |
| 00:00:09.3785357 | 0.00 | 5 | 4330 | 57 | 381 | 10023 | 52 | 25 | 43 |
| 00:00:09.3806260 | 0.00 | 6 | 2755 | 29 | 315 | 8968 | 47 | 24 | 43 |
| 00:00:09.3840370 | 0.00 | 2 | 2 | 1 | 86 | 3 | 44 | 25 | 43 |
| 00:00:10.1818053 | 0.00 | 5 | 43 | 4 | 82 | 63 | 45 | 26 | 43 |
| 00:00:10.9056255 | 0.00 | 3 | 2 | 3 | 72 | 21 | 45 | 27 | 43 |
| 00:00:10.9061213 | 0.00 | 6 | 1 | 1 | 62 | 2 | 44 | 25 | 43 |
| 00:00:14.3254500 | 0.00 | 6 | 2990 | 27 | 213 | 3788 | 55 | 23 | 43 |
| 00:00:14.3259487 | 0.00 | 5 | 3892 | 75 | 350 | 8112 | 56 | 25 | 43 |

2.5.2 雑音の除去 AE 信号には、計測装置の熱雑音や環境雑音の影響により、背景雑音が存在する。こうした背景雑音を除去し、本来目的とする有意な信号を計測するために、適切な計測しきい値（通常は S/N（信号 / 雑音）比は 6dB（2 倍）程度にとる。）を設定する。

また、しきい値を越えて検出された AE 信号で構成されるデータに、有意な信号と雑音が含まれる。不用な雑音は、信号履歴解析、振幅分布解析、相関解析などを用いて除去する（**附属書 2** 参照）。

2.5.3 AE 活動度（ヒット数）の算出方法 AE 活動度は、以下の定義より算出する（**附属書 3** 参照）。

AE 活動度 = 全チャンネルで 1 時間あたりに検出されたヒット数 / 計測に使用したチャンネル数

表 1 タンク諸元に関する必要記入事項

| | | | |
|----------------|--|--------------|--|
| タンク番号 | | 直径 | |
| 貯蔵物 | | 容量 | |
| スラッジ高さ | | 屋根型式 | |
| 支柱位置 | | ライニングの 有無 | |
| 操業温度 | | 電気防食の有無 | |
| 建設時期 | | 補修履歴 | |
| その他の注意事項 | | | |
| 管理者名と所在地 | | | |
| 連絡先 | | | |
| タンクの敷地内 配置図 | | 電源の有無 | |

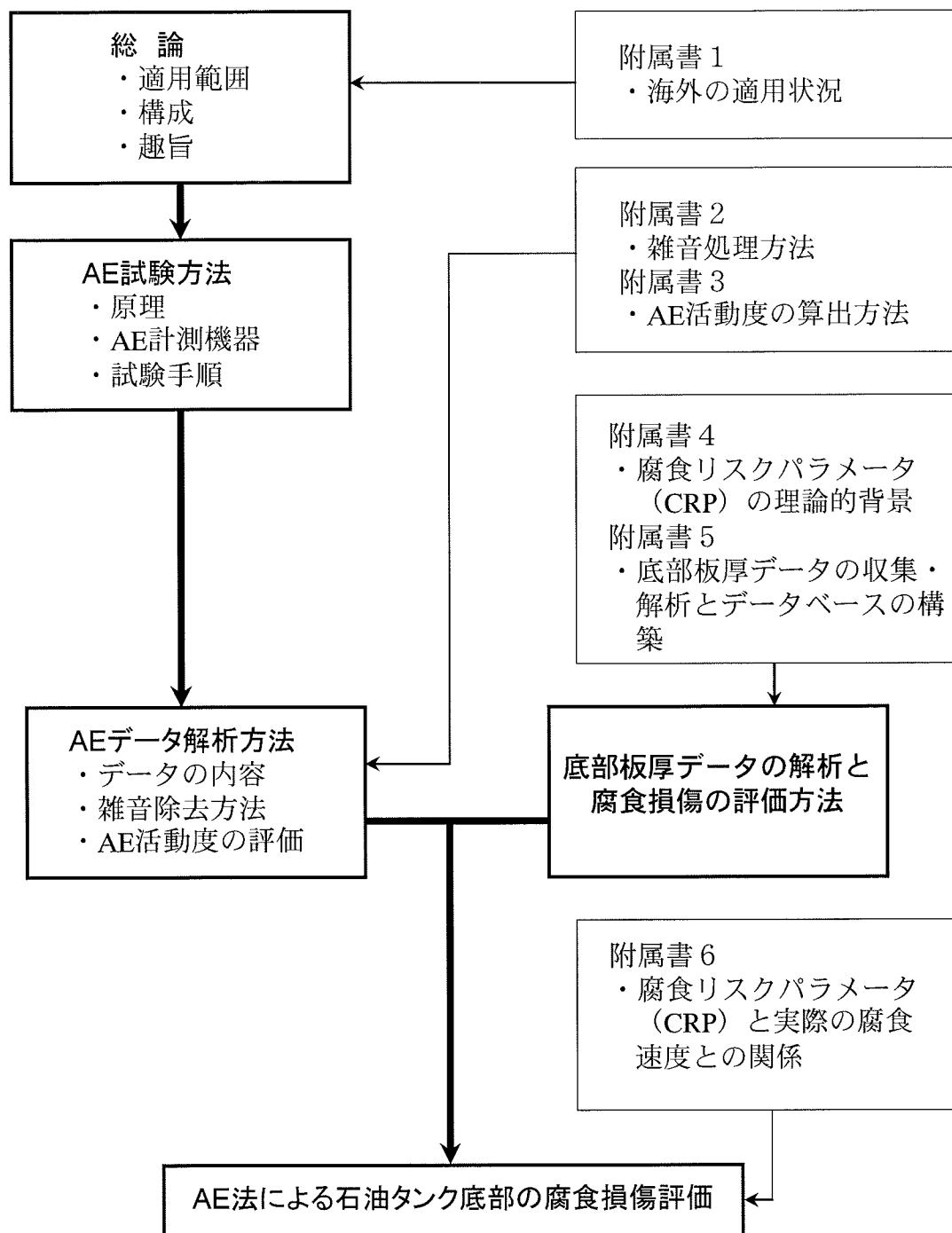


図 1 AE 法によるタンク底部の腐食損傷状態の評価・判定

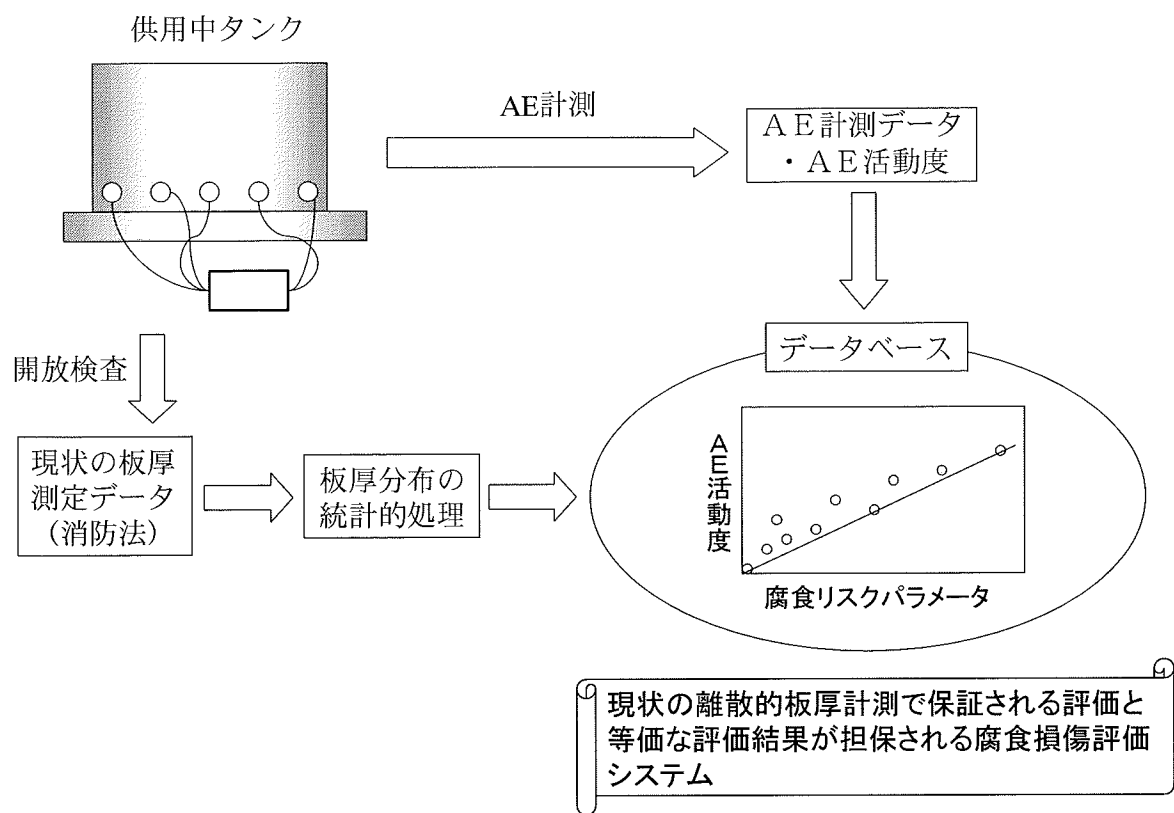


図2 AE法によるタンク底部の腐食損傷評価の考え方

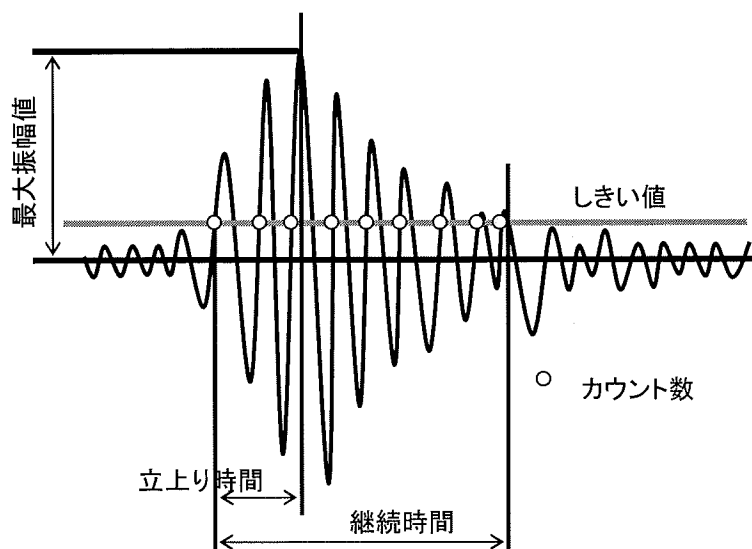


図3 AE信号処理パラメータの定義

3. タンク底部の腐食損傷評価

3.1 AE 活動度と腐食リスクパラメータとの相関関係 タンク底部の腐食損傷の評価には、AE 計測による AE 活動度と離散的板厚測定から求めた腐食リスクパラメータ（CRP）の間に一般的に相関関係があることを利用する。腐食リスクパラメータとは、法規に基づき行われている超音波法による離散的板厚計測結果をフラクタル分析の概念に基づき整理・導出したもので、測定時点で腐食が最も活性な領域の腐食の程度の指標となる。腐食リスクパラメータ（CRP）についての詳細な議論は**附属書 4**を参照されたい。

AE 活動度と腐食リスクパラメータ（CRP）の間の相関関係は、次のようにして求める。まず、AE 計測を行ったタンクについて、AE 計測直後の開放時の板厚測定結果を入手し、これを整理することによって腐食リスクパラメータ（CRP）を導出する。これを様々なタンクについて行い、AE データベースと対となる板厚データベースを作成する。板厚データベースとしての整理例を**附属書 5**に示す。多くのタンクについて以上の操作を行い、1つのタンクを1つの点として腐食リスクパラメータ（CRP）を横軸に、AE 活動度を縦軸としてプロットする。この時、両者には、ほぼ下限線を示すような形で相関が見られる。その一例を**図 4**に示す。本図は、直径 6.7m～83.3m の各種内容物タンク 23 基について整理したものである。新たに、あるタンクに対し AE が測定された場合、両データベースによって本図のような相関関係が事前に得られていれば、測定によって得られた AE 活動度の値から、この下限線を利用して腐食リスクパラメータの値を読み取ることができる。これが、このタンクの推定される腐食リスクとなる。

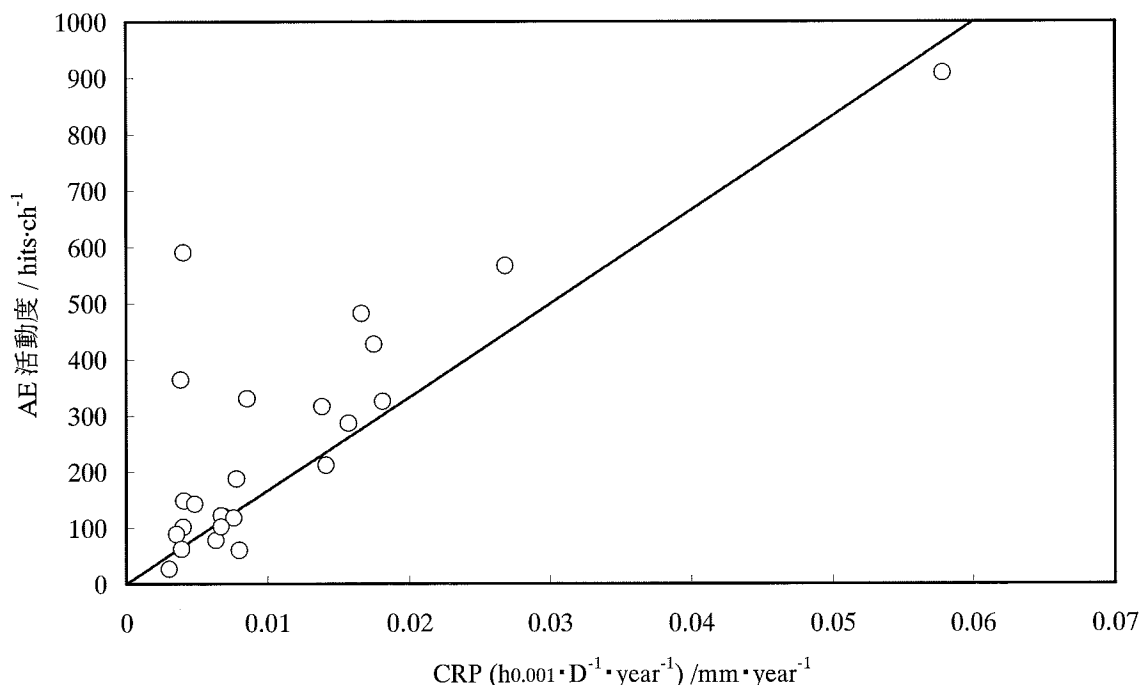


図 4 腐食リスクパラメータと AE 活動度との関係

3.2 管理上の想定腐食速度 腐食リスクパラメータの単位は mm/year となるが、その値を 12 倍したものは、タンク底部で現在最も激しく腐食が進行している箇所での腐食速度（mm/year）にほぼ相当するものとなる。従って、腐食リスクパラメータに設置環境、操業状況、過去の検査結果、補修履歴などを考慮した適切な安全係数を掛けたものによって当該タンクの管理上の想定腐食速度を見ていくことが可能となる。

$$\text{管理上の想定腐食速度 (mm/year)} = \text{安全係数} \times 12 \times \text{腐食リスクパラメータ (mm/year)}$$

以上、AE 法によるタンク底部の腐食損傷評価の流れを図 5 に示す。腐食リスクパラメータと実際の腐食速度の関係については、附属書 6 を参照されたい。

ここで腐食リスクが高いと判定された場合は、高い腐食速度を持つ領域が存在することが予想されるので、このように判定されたタンクは、開放検査等により底部の状況を確認することが推奨される。管理上の腐食リスクが低いと判定されたタンクは、「高い腐食速度をもつ可能性が低い」ので、事業者は、その時点での損傷発生リスクと開放による支出のバランスを考慮し、さらには現在までの検査結果の履歴等も参考にした上で、腐食管理の優先度を選択していくことになる。

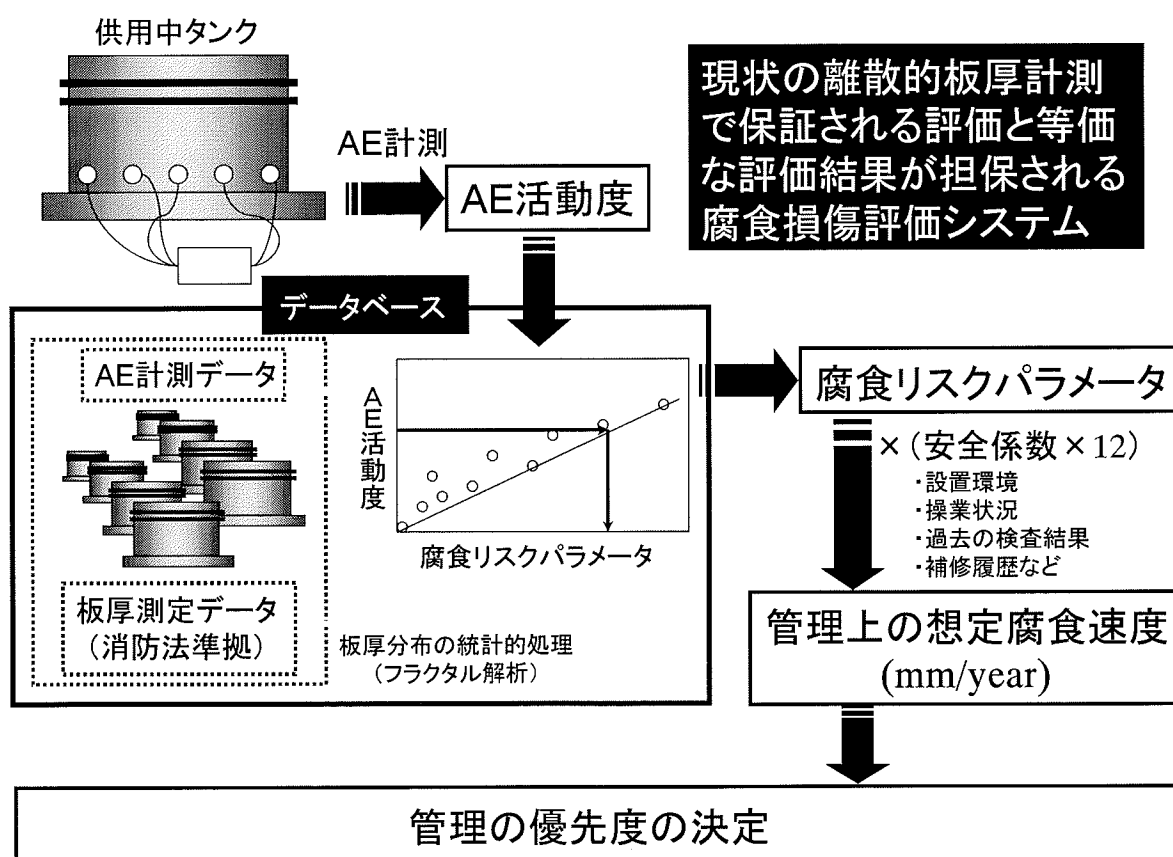


図 5 AE 法によるタンク底部の腐食損傷評価の流れ

3.3 精度の向上 AE 活動度は AE 測定時の雑音を除去したもので求めるが、それでも除去しきれない雑音の影響等で、図 4 の直線関係から外れる点が出てくる可能性がある。事前に得られている下限線で評価する時、雑音を含むデータは、実際の活動度よりも見かけ上高い活動度を示すので、安全側の評価が行われることになる。しかし、評価に用いる下限線を引く際の精度向上を目指すには、このようなデータをいくつか入手し、精緻な分析・考察を行い、補正し得るものは補正し、場合によってはデータベースへの採用の有無を検討する必要がある。同

様にタンクの大きさの違い、油種の違い、タンク基礎の違い、タンクの周囲の状況等も、相関関係に影響を与える可能性がある。本手法の評価精度を上げるには、多種多様のデータを継続的に入手し、データベースを充実させ、それぞれのパラメータ毎の分析を行い、その影響を精査していくことが必要である。

参考文献

- 1) P. T. Cole and P. J. Van de Loo: Listen to your Storage Tanks to Improve Safety and Reduce Cost, Acoustic Emission - Beyond the Millennium, T. Kishi., M. Ohtsu and S. Yuyama editors, Elsevier, pp.169-178 (2000)
- 2) Guide pour L'inspection et la Maintenance des Reservoirs Metaliques Aeriens Cylindriques Verticaux D'hydrocarbures Liquides en Raffinerie, Edition Aout 2000, Union Francaise des Industries Petrolieres (2000)
- 3) 湯山茂徳, 山田實, 関根和喜: タンク底板の腐食損傷診断における国内外の AE 試験適用の現状, 圧力技術, 40 (4) pp.176-184 (2002)
- 4) 関根和喜, 橘川重郎, 山田實, 湯山茂徳: タンク底板の AE 法による腐食損傷診断, 保守検査シンポジウム講演論文集, pp.77-82 (2001)
- 5) (社)日本高圧力技術協会: 石油公団委託 平成 10~12 年度 経年変化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術に関する調査研究委員会報告書概要(1999-2001)
- 6) (社)日本高圧力技術協会: 石油公団委託 平成 13~15 年度 経年タンクの供用中グローバル診断技術と開放検査の最適化に関する調査・研究委員会報告書概要(2002-2004)
- 7) 森田一郎, 荒川敬弘, 畠中宏明, 荻原 実: 石油タンク底板の腐食 AE 波検出に関する研究, 圧力技術, 40(4) pp.203-212 (2002)
- 8) (独)消防研究所: AE 法による石油タンク底部の腐食モニタリング技術に関する共同研究報告書, 消防研究所研究資料第 52 号(2001)

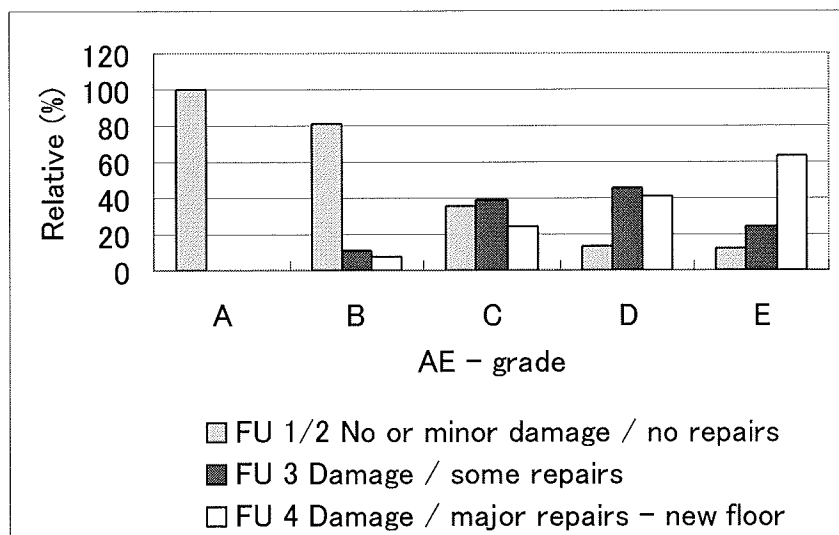
附属書 1 海外における AE の適用状況

1. 海外の現状

1.1 イギリス／オランダの状況 タンク底部の状態評価に AE 試験を適用しようとする試みは、欧米各国で 1980 年代末頃より行われてきた¹⁾。こうした中で、今日確立されている試験法、評価法が発達したのは、主としてイギリス／オランダを中心とするグループにおいてである²⁾。

1989 年、イギリスの Physical Acoustics Ltd. (PAL) 社は、Shell 社や BP 社、Exxon 社などメジャー系石油会社の要請により、タンク底部の状態を評価する方法として、AE 試験の適用を試みた。これにより、適切な AE センサ／計測法を用いれば、底部で発生する微弱な AE 信号を検出できること、またそれは底部の腐食損傷状態と強い相関を持つことが明らかになった。この知見の公表は大きな反響を呼び、1990 年代半ばまでには、石油メジャー各社、また大手化学会社の数十社からなる AE ユーザーズグループが結成され、試験結果のデータベース化が精力的に行われるようになった。

1998 年には、**附属書 1 図 1** に示されるように、Shell 社、Dow Chemical 社などの 157 の試験事例からなるデータベースを基に、タンク開放前に実施された AE 試験結果と、開放後の磁束漏洩試験 (MFL) による底部全面検査結果との照合データが公表された。これは、AE 試験で得た全 AE データによる底部の状態評価結果 (グレード) と、開放検査時の調査で得た底部の腐食損傷状態を比較・対照したものである。



附属書 1 図 1 イギリス、およびオランダのデータベースに基づく、AE 試験結果のグレード分けとタンク開放後に検証された損傷度との対応

ここで、採取された AE データに対して下記に示される A, B, C, D, E のグレード分けが行われている。

- 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。

図中、灰色で示される棒グラフ（FU1/2）は、開放時に補修を必要としなかった事例を、黒塗りのグラフ（FU3）は軽微な補修を必要とした事例を、また白色のグラフ（FU4）は、大規模な補修、あるいは底板の一部交換など重大な損傷が存在した事例に対応している。ここで、グレード A と判定された場合には補修の必要な事例は全く認められず、またグレード B においても、その 80% 程度は補修を必要としなかった。一方、グレードが C, D, E と変化するにつれ、補修の必要比率は高まり、グレード E においては、90% 程度が補修を必要としていた。したがって、AE 試験によるグレード分けは、底部の損傷状態とよく相関し、実用的評価を実施する際に有効な情報を与えることが理解される。

このように、AE 試験結果と、開放検査時における底部の状態評価結果には、良好な相関のあることが確認された。この結果をもとに、AE 試験の信頼性は検証されたものと考えられ、以後その適用数は世界各国で急速に増加することとなった。

イギリス／オランダにおいて、毎年 250 基程度のタンクに対して AE 試験が適用され、これまでに 3000 以上の試験が実施されたと報告されている。

1.2 フランスの状況 フランスにおいてタンク底部の AE 試験適用が始まったのは、1990 年代の初頭である。その後、フランス石油工業連盟と Euro Physical Acoustics（EPA）社が中心となり、試験結果のデータベース化が行われた³⁾。2000 年までには、試験を実施したおよそ 700 基のタンクのうち、78 基について開放検査時に底部の詳細調査を行い、AE 試験の評価結果と底部の検査結果に、良好な相関のあることが確認された。

これにより AE 試験はフランス工業界に広く受け入れられるようになり、現在フランスやスペインなど西欧・南欧諸国において、毎年 250 基以上のタンクに対して AE 試験が実施されている。

1.3 ドイツの状況 ドイツでは、タンクに対して開放検査が義務付けられ、いわゆる「Time-based Maintenance（TBM）」が実施されている。このため、タンク底部の状態評価を基に、開放検査の必要性を判断するという「Condition-based Maintenance（CBM）」に関連する AE 試験の適用は、他の西欧先進諸国に比べ大きく遅れていた。しかしながら、近年 EU の経済統合による地域経済の一体化が進み、様々な分野で競争が激しさを増す中で、維持・管理費用の節減を目指す目的で、CBM の TBM に対する優位性が明らかになるにつれ、状況が急速に変化しつつある。

ドイツにおいて、ここ 1～2 年あまりの間に、Shell 社や Dow Chemical 社を中心に、百数十基のタンクに対して AE 試験が実施され、データベース化が進行している⁴⁾。AE 試験の全データ解析で得た評価（グレード）と、開放検査時の調査で得たタンクの腐食損傷状態が比較され、イギリスやフランスで構築されたデータベースにおける場合と同様に、両者の間には、良好な相関のあることが確認された。こうした結果に基づき、ドイツにおいても、AE 試験の適用は今後急速に進むものと予想される。

1.4 イタリアの状況 イタリアにおいても、ドイツの場合と同様、タンクに対する AE 試験の適用は、イギリスやフランスに比べ遅れていた。しかし、近年シシリー島にある 126 基のタンクを持つ大型タンク基地において、組織的な AE 試験プロジェクトが、実行されている。これにより、2003 年初頭の時点で、70 基以上のタンクに対する試験結果からなる、データベースが構築されている。

1.5 アメリカの状況 アメリカにおいて、タンクに対する AE 試験の適用は、ヨーロッパの場合と比べ、大きく異なっている。AE 計測装置、計測方法、計測手順に関する限り、ヨーロッパと全く同一であるにも関わらず、AE 試験を実施するのは、タンク底部の状態評価が第一目的ではなく、環境規制の厳しい州において、重大な漏洩発生事故を未然に防ぐことを主な目的としている。こうした漏洩の未然防止、早期発見を目的として、年間 100～200 基のタンクに対して、AE 試験が実施されている。

一方 2003 年以来、メジャー系の石油会社で、RBI の概念に基づき、製油所内に多数存在するタンクの危険度に関して順位付けを行い、検査を優先的に実施すべきタンクを選び出す方法として、AE 試験を組織的に適用しようとする試み

が始まった。これに関連し、カリフォルニア州にある製油所において、およそ 4 ヶ月間で合計 75 基のタンクに対して AE 試験が適用された。またヒューストンのある事業所では、384 基の全タンクに対して AE 試験が実施されようとしている。したがって、今後 AE 試験の適用は、アメリカにおいて急速に一般化することが予想される。

2. 規格化の動向

2.1 ヨーロッパの現状 AE 試験の適用事例が増加するにつれ、規格化の動きが各国で広まりつつある。フランス石油工業連盟は、2000 年の夏、タンクの維持・管理に関する指針・規格³⁾を公布した。その中で、タンク底部の活性腐食、および漏洩検出法として AE 試験を推奨している。

またオランダ、ベルギーにおいては、2002 年の春、タンク底部の状態評価試験法として、AE 試験の適用が地方政府から正式に認可された。これにより、タンクの維持・管理業務を行うための有効かつ合理的な一手法として、AE 試験を一般的に適用することが可能になった。

一方、この試験方法発祥の地であるイギリスにおいては、構造物の維持・管理は基本的にすべて自主保安を前提として行われる。したがって、試験方法に関する規格は現時点で存在せず、タンク所有者ならびに管理者の自主判断により AE 試験が実施されている。

2.2 アメリカの現状 アメリカにおいて、地上装置の漏洩を防止・管理するための新たな規制が、EPA (Environmental Protection Agency) により、2002 年 12 月に公布された⁵⁾。この規制で、地上タンクの健全性に関する事項として、地上タンクの健全性診断のために、目視検査と水張り試験や、放射線透過試験 (RT)、超音波試験 (UT)、そして AE 試験などの非破壊検査方法を併用して、タンク殻の検査を行わなければならないことが明記されている。さらに、タンク支柱や基礎部も検査を行い、履歴比較の目的でその記録を残すことが義務付けられている。

この事項で、タンク底部の検査については直接言及されていないが、タンク全体の健全性を保つという観点に基づけば、底部の検査に関しても当然同じ内容が適用されるべきものと考えられる。したがって、アメリカにおいてタンクの検査方法として、AE 試験の適用が、今後広く検討される可能性が高いと考えられる。

3. まとめ

イギリス、フランス、オランダなどの西欧主要国においては、現時点でタンクの底部状態評価試験法として AE 試験が一般的に利用されており、試験規格などが整備されつつある。また適用が遅れていたとされるドイツやイタリアにおいても、試験実施数が急激に増加しており、データベースの構築がかなりの速さで進んでいる。したがって、西欧において、タンク底部の腐食状態評価試験法として AE 試験が一般的に受け入れられ、標準試験方法の一つになったと考えて差し支えない。

一方、アメリカは西欧と異なり、漏洩の未然防止を第一目的として AE 試験が実施されている。2002 年 12 月に EPA (アメリカ環境庁) が交付した環境保護規制の一項目に、地上タンク貯蔵物の外部への流出を防止するため、目視検査と、UT、RT、AE などの非破壊検査方法を併用すべきことが明記されている。また 2003 年以来、メジャー系石油会社の製油所で、RBI の一環として検査を優先的に実施すべきタンクを選び出す方法として AE 試験の適用が始まった。したがって、今後 AE 試験の適用が、広く始まるものと考えられる。

欧米では、自主保安が一般的なため、必ずしも法制化することが試験を適用するための必要事項というわけではない。例えば、タンクの AE 試験が初めて開発されたイギリスでは、完全な自主保安が実施されているため、関連した諸規制・法律は全く存在しないにも関わらず、国内で年間百数十件以上の AE 試験が行われている。

しかしながら、フランス、ドイツ、オランダなどのヨーロッパ大陸諸国は、イギリスと少し事情が異なる。すなわち、

我が国とかなり類似した点があり、規格・制度をある程度整備しながら AE 試験を適用しようとしている。典型的な事例はフランスで、石油工業連盟主導のもとに、AE 試験に関するガイドラインが設定され、その規格に基づき、フランス国内を中心に年間 250 件程度の試験を行っている。またドイツでは、タンクの開放検査が義務付けられているため、AE 試験の適用は英仏に比べやや遅れていた。しかし、EU 統合の下、経済的な競争力を維持するためにタンクの維持・管理費用の削減は避けられず、最近になりかなりの速さで AE 試験適用のためのデータベース構築の動きが進んでいる。さらにアメリカでも、メジャー系石油会社で RBI 適用の一環として、大掛かりな AE 試験に関するプロジェクトが 2003 年以来実施され、今後急速な進展が予想される。

こうした現状から、とりわけ欧州ではタンク底部の腐食損傷評価に対する AE 試験の適用は標準的なものであり、一般化しているとみなして差し支えないと考えられる。

参考文献

- 1) 湯山茂徳, 山田 實, 関根和喜: タンク底板の腐食損傷診断における国内外の AE 試験適用の現状: 圧力技術, 40(4)pp.4-12 (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 Millennium, Kishi, T., Ohtsu, M., and Yuyama, S. editors, Elsevier, pp.169-178 (2000)
- 3) Guide pour L'inspection et la Maintenance des Reservoirs Metaliques Aeriens Cylindriques Verticaux D'hydrocarbures Liquides en Raffinerie, Edition Aout 2000, Union Francaise des Industries Petrolieres(2000)
- 4) Physical Acoustics Group (PAC グループ) 社内資料, 2002 年 12 月
- 5) 40 CFR-CHAPTER I-PART 112: Federal Register Dated December 18, 2002, US Environmental Protection Agency

附属書 2 AE 法によるタンク底部の腐食損傷診断における雑音処理方法

本附属書は、本文の 2.5.2 において述べられている、不用な雑音を除去する方法について説明するため、社団法人日本非破壊検査協会発行の機関誌「非破壊検査」(第 53 巻, 11 号, pp. 693-700, 2004 年)に掲載された研究調査資料を、同協会の許可を得て全文転載したものである。

1. 緒 言

固体内で生ずる割れ、変形などの局所的微視変化を探る手段として有力な AE 法は、工業技術の一つとして 30 年以上の歴史を持ち、現在多くの分野で実用化されている。欧米では、多数のプラント所有者からなる AE ユーザーズグループが結成され、定期的に情報交換のための会議を開催し、新たな計測法の開発や、信頼性の高いデータベースの構築に努力を重ねている。

こうして作成されたデータベースの一つとして、円筒型貯蔵タンク底部の腐食損傷診断を行うために開発された「TANKPAC」がある。このデータベースを基に、欧州において、石油・石油化学プラントで、供用中の実タンクに対する底部損傷診断法として AE 法が用いられ、維持・管理経費節約の手段として、極めて有効であることが示されている^{1),2),3)}。

この技術に基づく試験手順が、1999 年に我国に導入された⁴⁾。以来(社)日本高圧力技術協会^{5),6)}(石油公団(現石油天然ガス・金属鉱物資源機構)委託研究)、(財)石油産業活性化センター⁷⁾(新エネルギー・産業技術総合開発機構委託研究)、消防研究所⁸⁾など複数の研究機関・グループにより、基礎および実用研究が行われ、我国の実情に合った試験手順と評価・判定法を確立する目的で、データベース化が進行している。また、実験室において、腐食に起因する AE の発生機構⁹⁾や、モデルタンクを用いた AE 源位置標定¹⁰⁾に関して、詳細な検討が行われている。

AE 法によるタンク底部の腐食損傷診断は、腐食に起因する信号を評価対象とし、雑音を検出しないことが原則である。しかし、微弱な AE 信号を捉えるために、計測装置が極めて高い感度に設定され、環境雑音の影響を除くことは困難である。また、タンクは屋外に置かれ、操業条件などの原因により、AE 計測の際に風雨や電気雑音をはじめ様々な環境雑音の混入が避けられない。

実構造物の AE 試験において、異なる AE 発生源を識別し、有意な信号と雑音を区別する方法として、地震学の分野で発達した振幅分布解析¹¹⁾が用いられる。本稿では、最初にその理論を簡単に述べ、実タンクにおける適用例を示してある。さらに、石油公団の委託研究による試験結果をもとに、タンク底部の腐食損傷診断に対して AE 試験を実施する際によく現れる雑音発生状況とパターンの実例を列記し、雑音の識別法および除去対策について検討する。

2. 振幅分布解析の理論

地震学の分野では、ある地点における地震動の最大振幅を A としたとき、最大振幅が A から $A+dA$ の範囲にある地震の数を $n(A)$ とするなら、

$$n(A) = kA^{-m} \dots\dots\dots (2.1)$$

という、石本－飯田の統計式¹²⁾の成立することが知られている。

一方、一定の地域、期間に起る地震で、マグニチュードが M までの地震の総数を N とするとき、 M と N (その規模以下の地震の累積頻度) の間には、

$$\log N = a - bM \dots\dots\dots (2.2)$$

という経験式 (Gutenberg-Richter の公式と呼ばれる¹³⁾。) が成立し、式(2.1)と(2.2)は、全く等価なものであり、式(2.2)の係数 b は、式(2.1)の $(m-1)$ に対応することが知られている。

ところで、従来適用されるマグニチュードの定義は、震央から 100km の地点に設置された標準地震計が記録した記録紙上の地震の最大振幅 A をミクロン単位で読み取り、常用対数をとった、

$$M = \log A + C \dots\dots\dots (2.3)$$

で与えられるので、式(2.2)は、地震の発生総数 N と振幅値 A を両対数グラフ上に描くと、ほぼ一直線で表わされることを意味する。ここで、傾きが $-b$ と負であることから、大きな振幅の地震発生数は少なく、より小さな振幅の地震はより多く発生する。ある地域で解放される地震のエネルギーが有限であると考えらるなら、その傾き b は異なったとしても、この関係が一般的に成立することが容易に理解される。

全く同様の解析が、検出された AE 信号に対しても行われる。すなわち、AE 信号の振幅値に関する頻度分布が、検出されたデータの解析・評価法として、広く用いられている。AE 振幅分布の多くの測定例では、AE 発生源が同一と考えられる場合、雑音や計測系の飽和がないかぎり、ある特定振幅にピークを生じることはなく、振幅の増加につれて計数量が単調に減少するようなスペクトルが計測されるのが一般的である¹⁴⁾。また、連続型 AE や流体雑音のようにガウス分布状の振幅分布になる場合を除き、突発型の AE 信号では、比較的広い範囲の振幅値領域において両対数表示で負勾配 m の直線分布を示すことが多い。すなわち、式(2.1)で示されるような線形分割による微分型の分布を $f(x)$ とすると、線型表示では、

$$f(x) = c x^{-m} \dots\dots\dots (2.4)$$

また、両対数表示では、

$$\log f(x) = -m \log x + \log c \dots\dots\dots (2.5)$$

となる。なお、AE 振幅分布の測定時に、このような対数直線分布にならない場合は、計測系のダイナミックレンジ、直線性、雑音除去などに問題があることや、計測性能の限界以上に AE 計数率が高い場合がある。

一方、異なる振幅値レベルの分布を持つ、複数の AE 発生要因からなる AE 信号の振幅分布においては、その発生要因ごとにある特定振幅にピークが分離して観察されることや、それぞれの AE 発生源に対応して異なる傾き m の見られる場合がある¹⁵⁾。こうした特徴をもとに、異なる AE 発生要因を識別することが、しばしば行われる。

次に、振幅値分割が線形ではなく対数分割の場合には、

$$y = \ln x \dots\dots\dots (2.6)$$

と置くことにより、 $dy/dx = 1/x$ から、

$$dF(x) = c x^{-m} dx = c x^{-m+1} dy \dots\dots\dots (2.7)$$

となるので、この場合のスペクトル関数 $g(y)$ は、 $dF(y) = g(y) dy$ より、

$$\ln g(y) = (-m+1)y + \ln c \dots\dots\dots (2.8)$$

で与えられる。すなわち、線形分割時の $f(x)$ の場合と同様に、 $g(y)$ も両対数表示で負勾配 $(m-1)$ の直線分布となる。

上記のような微分型の AE 振幅分布に対して、ある振幅値 x 以上の事象数 $F(x)$ についての積分型の AE 振幅分布は、

$$F(x) = \int_x^{\infty} f(x) dx \dots\dots\dots (2.9)$$

で定義される。したがって、式(2.4)で示したような対数直線分布の場合には、

$$f(x) = \int_x^{\infty} cx^{-m} dx = \frac{cx^{-m+1}}{m-1} \dots\dots\dots (2.10)$$

(ただし、 $m>1$) となり、微分型の場合と同様に両対数表示で負勾配 $(m-1)$ の直線分布となる。ここで定義から明らかなように負勾配 $(m-1)$ は式(2.2)における負勾配 b に対応する。

ところで、AE に限らず種々の応用面で測定したデータを解析しようとする時、両対数グラフ上にデータをプロットすると、ほとんどの場合に直線状の関数関係が得られることが、経験的によく知られている。このように、両対数グラフ上で負勾配の直線分布となるスペクトル形状が、「フラクタル」と呼ばれる¹⁶⁾。すでに述べたように、AE 信号の振幅分布は一般的に式(2.5)で与えられるごとく両対数表示で負勾配 m の直線分布を示す。したがって、検出信号の大きさ別の度数分布である振幅分布はフラクタル特性を有することになる。

AE 振幅分布がフラクタルとしてのべき乗則分布を示すことの利用法として、正規分布型の各種雑音から AE 信号を選別できることがある。AE 法は受動的な聴診器診断法であるため、原理的に雑音の選別が難しい。それゆえ、スペクトル形状から雑音の選別ができることは、AE 振幅分布の利用の大きな優位点となる。さらに、両対数表示をした振幅分布スペクトル上で、AE のべき乗則分布は負勾配の直線状になるので、雑音成分があっても直線部を探して、その範囲内で直線勾配と切片を求めれば、一義的に振幅分布形が定まり、AE 活動度の評価ができることになる。

ところで、センサ感度、周波数領域、増幅度等の AE 計測条件の相違や、AE 源－センサ間距離による信号減衰は、AE 振幅分布では振幅値 x が kx に変化したことに対応する。したがって、これらの振幅変化に対して振幅分布スペクトルの勾配 m 値が不変であることは、 m 値が AE 計測条件や信号伝播減衰に影響されないということを意味する。それゆえ、種々の試験条件で求めた AE データを、 m と c (通常は AE 計測しきい値に対応する計数値) の二つのみの値で表わしておけば、相互に定量的な比較をすることができるため、統一化されたデータベースを構築することが可能となる。こうした特性を利用し、実構造物の AE 試験で検出されたデータにおいて、不要な雑音を除去し、有意な信号のみを解析することにより構造物の健全性を評価することが行われている¹⁶⁾。

3. 実タンクで観察される振幅分布

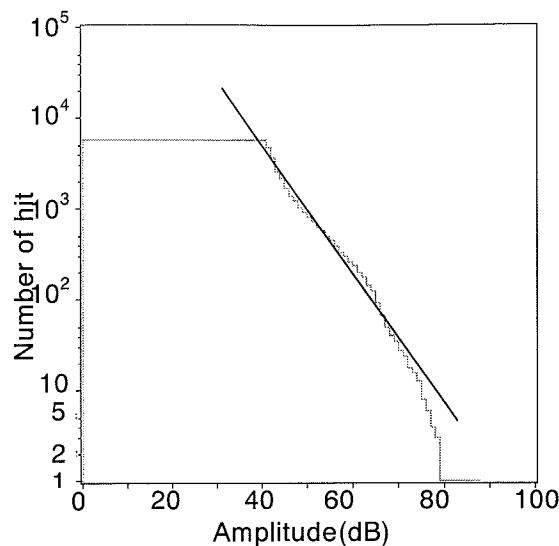
AE 信号には、計測装置の熱雑音や環境雑音の影響により、背景雑音が必ず存在する。こうした背景雑音を除去し、本来目的とする有意な信号を計測するために、適切な計測しきい値 (通常は S/N (信号/雑音))

比は 6dB (2 倍) 程度にとる。) を設定する。欧州で開発された試験手順によれば、AE 計測の標準しきい値は、40dB (センサ出力換算で 1 μ V、但しこの試験手順において、センサ出力信号の増幅率は、60dB が適用される。) としている^{1),2)}。したがって、このしきい値で検出された AE 信号数が、判定基準値として用いられる。

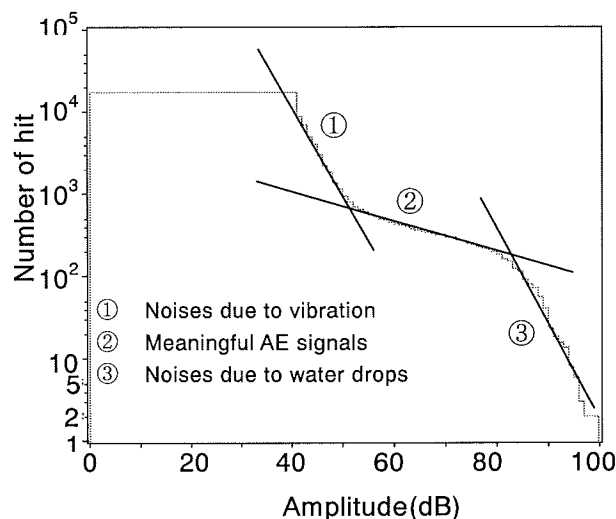
実際の AE 試験に際し、しきい値を 40dB 以下に設定できる場合は、判定を行ううえで問題を生じない。しかしながら、環境条件などにより、しきい値を 40dB 以上に設定せざるを得ない場合には、適切な処理を行い、判定に必要なデータを求めることになる。

これまで実タンクに対して実施された試験において、大型原油タンクに対する計測では、しきい値を 40dB 以下に設定することが一般的に可能であり、**附属書 2 図 1** に一例を示すように、ほとんどの場合、振幅分布上で一つの直線状分布のみが観察された。実際、石油公団委託による (社) 日本高圧力技術協会の調査・研究において、合計 23 基の大型原油タンクに対して試験が行われている⁹⁾。その中で振幅分布が単一の直線分布を表示しない事例は、強風下で計測された場合と、種々の雑音が混入して計測された場合の 3 例のみであった。

一方、製油所における製品タンクの試験時には、風や操業条件など様々な原因により、しきい値を 40dB 以上に設定せざるを得ない場合があった。こうした際、検出された AE 信号データが、振幅分布上で一つの直線を示す場合には、唯一の分布を形成すると仮定し、そのしきい値で得たデータを 40dB まで外挿することにより解析を実施する。しかし、検出された AE データが、複数の分布で構成されている際には、判定の基礎となる信号検出数に、かなりの誤差を生じ、誤った判定結果を与える可能性がある。このような事例として、**附属書 2 図 2** が与えられている⁹⁾。振幅分布上で異なる AE 発生原因により、3 つの傾きを持つ直線部が観察され、その発生源はそれぞれ、①配管を伝わって入力した振動に起因する外部雑音、②有意な AE データ、③固定屋根部から落下する水滴に起因した雑音、であると考えられた。したがって、①および③に起因する AE 信号をデータ採取後の処理により除去し、有効な AE データのみを利用して解析・評価が行われた。



附属書 2 図 1 大型原油タンクで観察された典型的な振幅分布



附属書 2 図 2 製品タンクで観察された 3 種類の AE 発生源 (①配管の振動、②有意な AE 信号、③水滴の落下) に対応して生じたそれぞれ異なる 3 つの傾きを示す振幅分布

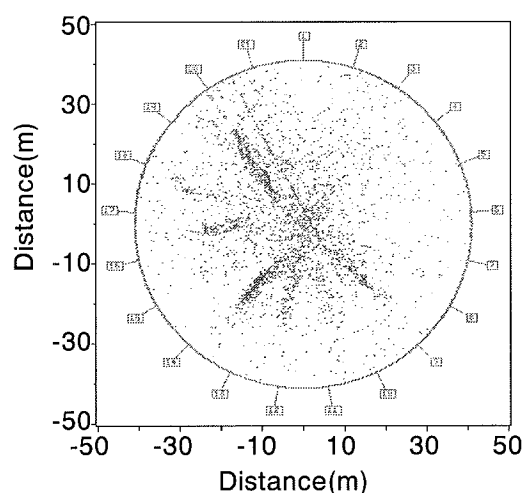
4. 実タンクで検出された雑音実測例⁵⁾⁶⁾

2003 年末までの時点で我国において、直径数 m の小型製品タンクから同 97m の大型原油タンクにいたるまで、60 基余りの地上タンクに対して AE 試験が実施されている。採取されたデータには、有意な信号のみならず、様々な要因による雑音が混入しているため、前述したように振幅分布解析などを利用し、有意なデータのみを抽出してデータの評価・判定が行われる。

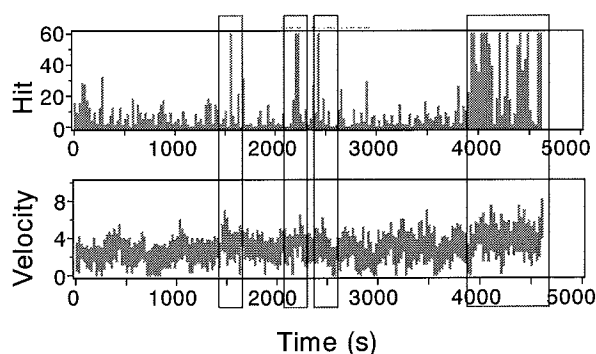
AE 試験を、信頼性の高い実用的な検査技術として確立し、実タンクに適用するには、AE 計測時に観察される雑音の発生挙動やパターンを正しく認識し、有意な信号を正確に抽出できることが重要である。ここでは、実タンクの AE 計測時に典型的に観察される雑音例を列記し、雑音除去を実施する際の基本資料としてまとめている。

4.1 風による雑音 風の影響は、一般的に風速 4m/s 以上で現れると報告されている^{3),7)}。10m/s の最大風速下で検出された風に起因する雑音信号の、欧州の試験手順^{1),2)}に基づく位置標定結果の一例を、**附属書 2 図 3** に示す。底板の上 1.2m の側板上に、円周方向に等間隔で配置された AE センサ配列で検出された、1 個の AE イベントに起因するとみなされる AE 信号セットにおいて、最初の 3 番目までに検出された AE 信号の信号到着時間差に基づく一次近似解に対して、反復法で収束解として得られた平面位置標定結果である。

こうした計測で、風の状況を把握するために風速計を設置し、その出力を AE 計測装置の外部パラメータとして記録することができるが、風速計の設置場所とタンク周辺とは状況が異なり、さらにタンクの周囲でも場所により風速に差がある。このため、パラメータ信号として計測した風速データと、風に起因する雑音とは必ずしも対応せず、後処理でこうした雑音を除去することは困難である。しかし、実時間で風の状況を観察することにより、突発的な強風による雑音の発生時刻を記録しておき、後処理で除去することができる。**附属書 2 図 4** は強風に起因した雑音検出の一例である。ここで、上図にヒット計数率の、また下図に風速（縦軸最大値は 10m/s）の履歴が与えられている。枠で囲まれた部分は風速 6m/s 以上の風が記録され、高い AE ヒット計数率と対応している。



附属書 2 図 3 直径 82m の原油タンクにおいて、強風下で採取された AE データに対して TANKPAC 試験手順に基づいて得られた AE 源位置標定結果

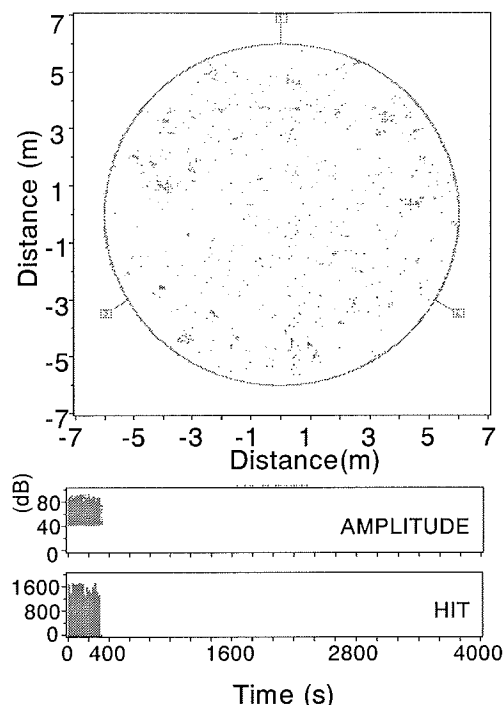


附属書 2 図 4 直径 83.3m の原油タンクにおいて観察された、AE ヒット発生率（上）、および風速（下）の履歴。大きな AE 活動度が、枠で囲まれた部分で示される強風に対応して検出されている。

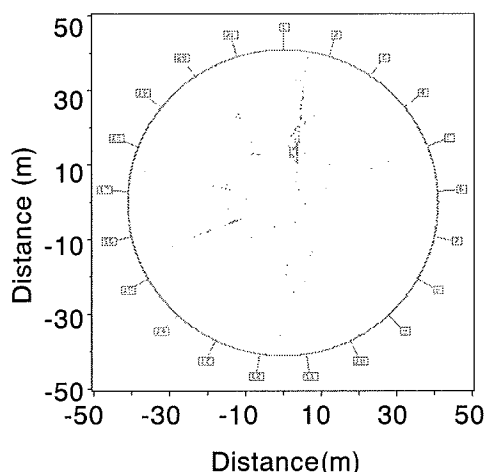
4.2 降雨による雑音 附属書 2 図 5 に示すように、降雨による雑音信号は振幅値が最大 80dB 以上に至り、信号発生位置がタンクの全域から平均的に検出されるとともに、集中発生箇所も所々に見られる。また、雨による影響は降雨時に止まらず、タンク屋根に滞留した雨水の流出が終わるまで続く。特に、直径 80m 程度の大型タンクでは、一度雨が降ると、その影響が 24 時間以上残存することがある。附属書 2 図 6 は、降雨終了後 24 時間経過時の計測結果の一例で、線状に集中発生が検出され、その位置が屋根部から底部に向けて配置された排水管の設置位置に対応するため、雨水の流出によるものと考えられた。

4.3 鳥がタンク屋根上を移動した際の雑音 附属書 2 図 7 に、AE エネルギー計数率（上図）、振幅値（中図）、そしてヒット計数率（下図）が示されている。図から明らかなように、計測開始後 2600s～2700s の間に高い AE ヒット率で数多くの信号が検出された。この時間帯に、数羽のカラスがタンクの屋根上を移動するのが観察されたため、AE 信号の増加はカラスによるものと確認された。このような雑音は後処理で削除することが可能であるが、AE 試験を行う時に、タンク周辺の状況を常に確認することが重要である。

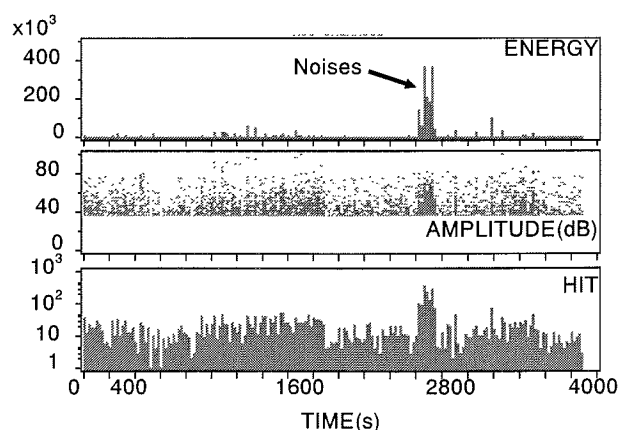
4.4 結露による水滴の落下に起因する雑音 タンク屋根部に結露した水滴の落下に起因する信号は、2 段のセンサ配置により、上段のセンサで必ず最初に検出されるため容易に識別でき、除去可能である。附属書 2 図 8 に示す位置標定結果では、AE 発生源が 842 個検出され、幾つかの集中発生も見られる。一方、屋根部に結露した水滴の落下による信号を除去すると、附属書 2 図 9 のように、AE 発生源は 80 個しか残



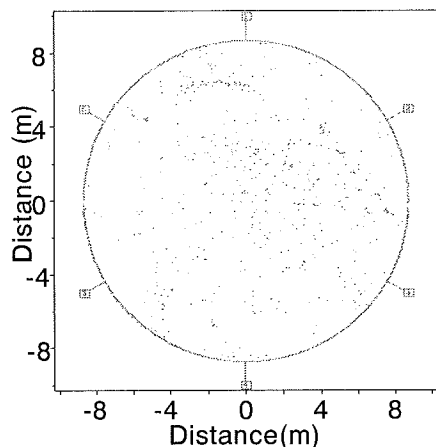
附属書 2 図 5 降雨下の製品タンク(直径 12m)で採集された AE データの位置標定結果(上)。同じ AE データに対する、振幅値(中)、および AE ヒット発生率(下)の履歴が与えられている



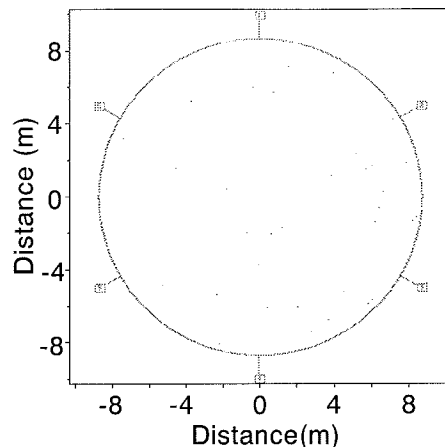
附属書 2 図 6 直径 82m の原油タンクにおいて、降雨停止後 24 時間経過した時点で観察された、排出管内を流れる水に起因した雑音



附属書 2 図 7 直径 61m の原油タンクにおいて、屋根上における鳥の移動に起因して観察された雑音



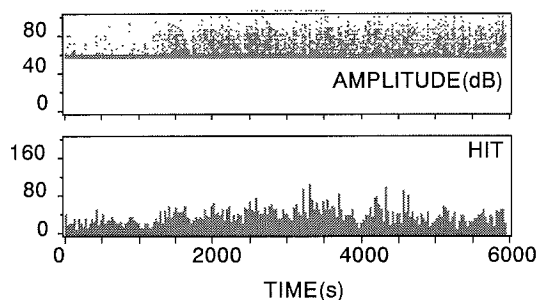
附属書 2 図 8 直径 17m の水タンクにおいて検出された、タンク屋根内面からの水滴落下による AE 信号を含んだ AE データの、AE 源位置標定結果



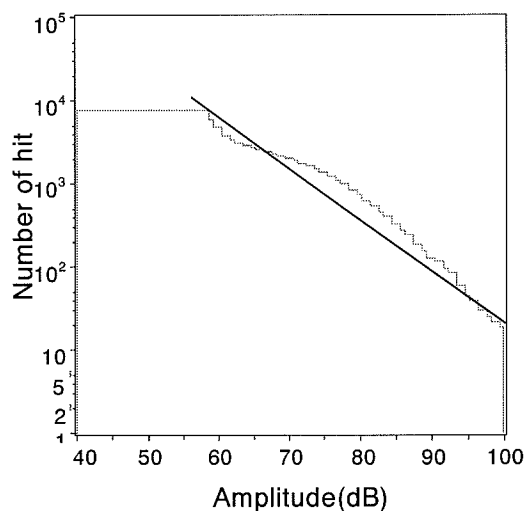
附属書 2 図 9 直径 17m の水タンクにおいて、タンク屋根内面からの水滴落下による AE 信号を除去した AE データに対して得られた、AE 源位置標定結果

らず、集中発生箇所も存在しなくなった。

4.5 接続する配管から伝わる振動雑音 AE 法によるタンク底部腐食損傷診断を行うために、対象タンクの払出し・受け入れを前もって停止し、貯蔵物およびタンクの大きさによって、6 時間～24 時間以上静置することが求められる^{1),2)}。さらに、AE 検査を実施する際には、対象タンクに接続した配管や、それに連結した外部配管の作動を停止する必要がある。附属書 2 図 10 に、振幅値（上図）とヒット計数率（下図）の履歴が示されている。この計測例では、配管から伝わる振動がかなり強く、しきい値を 58dB に設定しても 60dB 以上の信号が数多く検出され、雑音の混入が避けられなかった。この時観察された振幅分布が附属書 2 図 11 に示されている。振幅値が 60dB を越え、100dB に至る多くの AE 信号が検出されている。

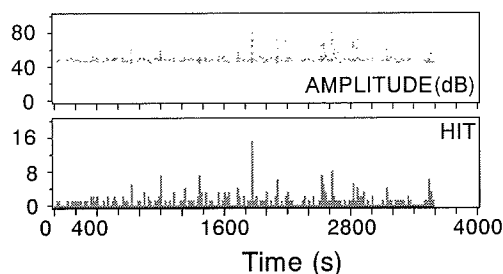


附属書 2 図 10 直径 4.8m のコーン型屋根を持つタンクで観察された、配管の振動に起因する雑音の振幅値(上)、および AE ヒット発生率(下)の履歴

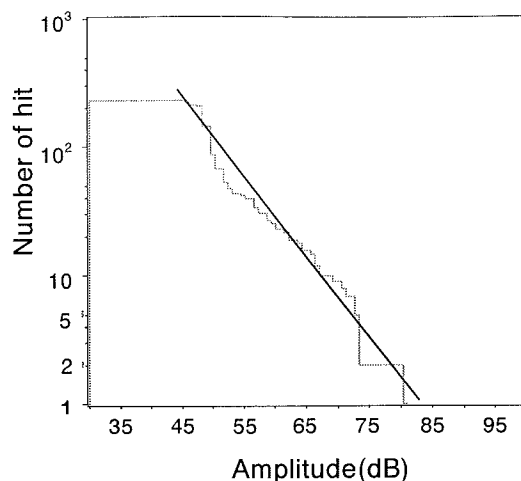


附属書 2 図 11 配管の振動による雑音を含んだ AE データの振幅分布

一方、附属書 2 図 12 に示す結果では、配管の振動がそれほど大きくなかったため、48dB のしきい値で計測・評価ができた。これに対応する振幅分布が、附属書 2 図 13 に与えられている。附属書 2 図 11 に比べ両対数グラフ上に示される分布の傾きが大きく、また検出された信号の最大振幅値は 80dB 程度であり、全体として信号の振幅値は小さい。しかしながら、この計測においても配管の振動に起因する雑音を完全



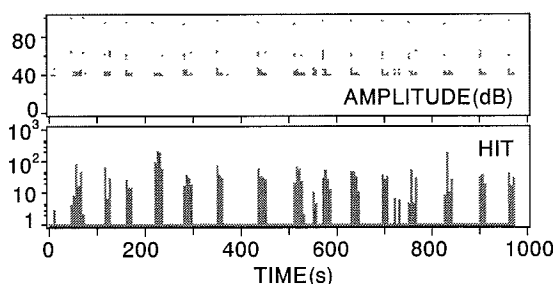
附属書 2 図 12 コーン型屋根を持つ直径 11.6m のタンクにおいて、高いしきい値を設定することにより、配管の振動に起因する雑音を除去した AE データで観察された、振幅値(上)、および AE ヒット発生率(下)の履歴



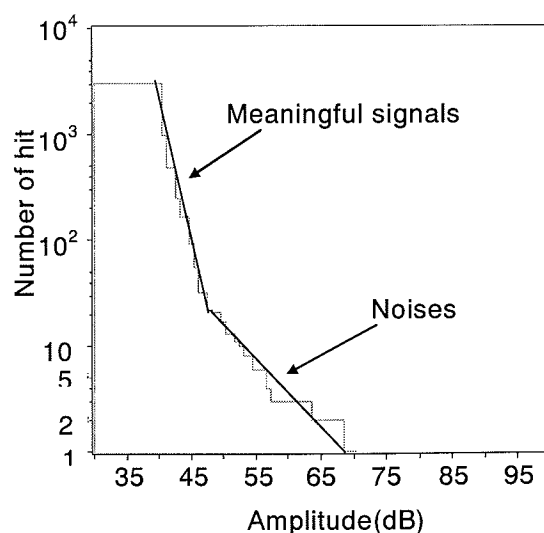
附属書 2 図 13 低雑音条件で検出された AE データの振幅分布

に除去することは困難であり、正しい評価ができない可能性も存在した。したがって、こうした雑音の混入を防ぐには、配管振動が全くない状態で計測を実施するのが基本であり、そのためにタンク管理者の協力を得て、配管の作動を一時的に停止する必要がある。

4.6 周期的に発生する雑音 ドーム式固定屋根を持つタンクでは、温度などの変化に対応してタンクの内圧が変化する場合、窒素ガスを流入させたり、流出させたりすることにより、タンクの内圧を一定に保つ場合がある。しかし、AE 計測を行う際に、窒素ガスの流入により附属書 2 図 14 に、振幅値(上図)そしてヒット計数率(下図)として観察されるように、周期的な雑音源となることがある。この場合には、窒素ガスの流入による雑音は、約 60s の間隔で発生し、一回の流入に対して 18s 程度持続していた。ここで観察された振幅分布が、附属書 2 図 15 に示されている。傾きの異なる 2 つの分布が明確に見られ、大きな振幅値で構成される傾きの小さい方の分布は、窒素ガスの流入に起因する雑音と判断された。このような周期的に発生する雑音は、窒素ガス流入口付近にガード・センサ(附属書 2 図 14 に示す振幅値 90dB を超えた信号を検出)を設置することにより、後処理で取除くことが可能である。しかし、こうした雑音



附属書 2 図 14 直径 13.5m のドーム型屋根を持つタンクにおいて観察された、窒素ガスの注入による内部圧力制御に起因する定期的な雑音発生を示す振幅値(上)、および AE ヒット発生率(下)の履歴

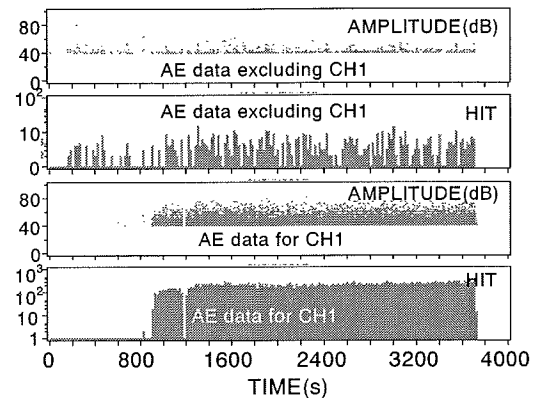


附属書 2 図 15 有意な AE 信号と窒素ガス注入に起因する雑音で構成される AE データの振幅分布(傾きの小さな部分で与えられるデータが、窒素ガス注入に起因する雑音に対応する。)

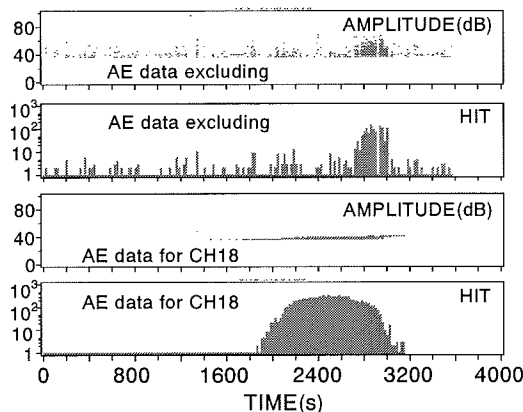
がかなり短い周期で頻繁に発生し、有効な評価データが細かく分離され、時間的に不連続となる場合には、評価結果に影響を及ぼす可能性を完全には否定できない。したがって、なるべく外気の温度が安定し、窒素ガスの流入・流出に起因する雑音発生を最大限抑制できる時間帯を選んで、AE 計測を実施することが推奨される。

4.7 個別センサで検出される雑音 タンクの AE 試験を行う時に、場合によって不特定のセンサで多くの信号が検出されることがある。その一例として、**附属書 2 図 16(a)～附属書 2 図 16(c)**に、振幅値そしてヒット計数率の履歴が示されている。ある原油タンクを 3 回計測したところ、それぞれ 1 個のセンサから他のセンサに比べ、2 桁多くヒット信号が検出された。これらの発生原因は明らかにされていないが、信号発生の不特定性から、一種の雑音であると判断された。

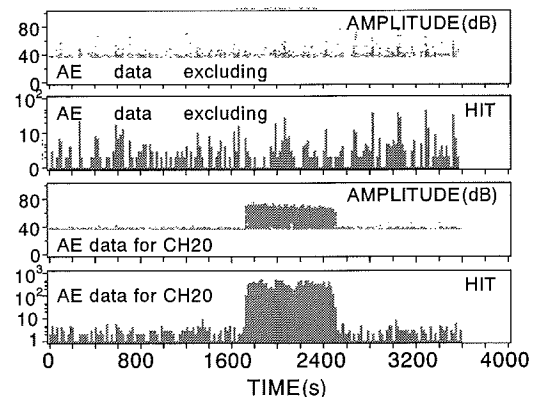
AE 法によるタンク底部の腐食損傷評価試験は、通常 1 時間の計測で実施される^{1),2)}。しかし、個別センサで雑音信号が検出される場合には、計測時間を延長し、雑音のない時間帯のみを用いて解析する必要がある。さらに長時間の計測を実施することにより、データの再現性が確認され、試験結果の信頼性を高めることが可能である。



附属書 2 図 16(a)直径 82m の原油タンクにおける第 1 回計測で、CH1 以外で検出された AE 信号の振幅値(上)、と AE ヒット発生率(中上)の履歴、および CH1 で検出された振幅値(中下)と AE ヒット発生率(下)の履歴



附属書 2 図 16(b)直径 82m の原油タンクにおける第 2 回計測で観察された、振幅値、および AE ヒット発生率の履歴。雑音に起因する高い AE 活動度が、CH18 のみで観察されている。



附属書 2 図 16(c)直径 82m の原油タンクにおける第 3 回 AE 計測で観察された、振幅値、および AE ヒット発生率の履歴。CH20 のみにおいて、雑音に起因する大きな AE 活動度が検出されている。

4.8 特定の時間帯に複数のセンサで検出される不連続信号 4.7 で述べた雑音信号は、不特定な一つのセンサに限って検出されたものであるが、**附属書 2 図 17**に示すのは、特定の時間帯に複数のセンサで検出された不連続信号である。ここで、振幅値(上図)、およびヒット計数率(下図)の履歴に見られるように、計測開始後約 620s～680s、700s～1000s、1160s～1620s、3860s～4030s、4180s～4230s、4380s～4503s という 6 つの時間帯に、著しく多くの信号が検出された。しかしながら、それに対応する AE 発生源を特

定することは出来なかった。またこの AE 信号は、屋根部に結露した水滴落下に起因する信号とも異なっていた。さらに**附属書 2 図 18** に示すように、不連続信号の発生時間に対応する AE 源の位置標定結果によれば、ここで得られた AE イベントにおいて、特定した発生集中箇所は存在しなかった。

通常の AE 計測において、こうした特定の時間帯のみに不連続的に発生する信号が、腐食に起因するものとは考えにくい。したがって、本例では AE 源の位置標定結果を調査したうえ、AE ヒット計数率が安定して検出された時間帯で得たデータのみを使用して、解析・評価が行われた。

5. 結 言

実構造物の AE 試験において、異なる AE 発生源を識別し、有意な信号と雑音を区別するのに有効な振幅分布解析の理論を述べ、適用例を示した。また、実タンクの AE 計測時に典型的に観察される雑音の検出例を列記し、雑音除去を実施する際の基本資料としてまとめた。

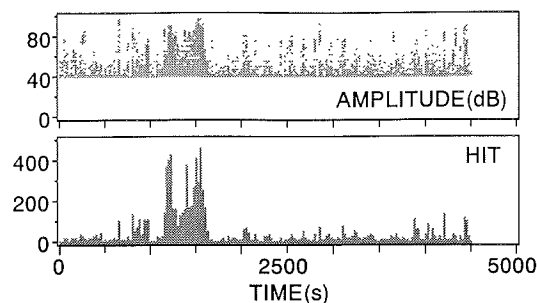
微弱な腐食に起因する信号を捉えようとする、AE 法によるタンク底部の腐食損傷診断試験は、計測装置が高い感度に設定されているため、雑音の影響を受けやすい。したがって、試験を行う際に、雑音の識別と対策が不可欠であり、タンク管理者の協力を得て、作業による雑音を最大限低減したうえ、計測中にも異常信号の発生とその原因などに対して、十分に配慮することが重要である。

現在、イギリス、フランス、ドイツ、オランダなどの欧州諸国において、年間 1000 基以上のタンクに対して AE 試験が実施されている。さらにアメリカでも、大手石油会社で RBI (Risk Based Inspection) 適用の一環として、大掛かりな AE 試験実施のプロジェクトが 2003 年に始まり、今後急速な進展が予想される。こうした現状から、とりわけ欧州ではタンクの底部評価に対する AE 試験は標準化され、一般的な検査方法として確立されたものとみなして差し支えないと考えられる⁶⁾。

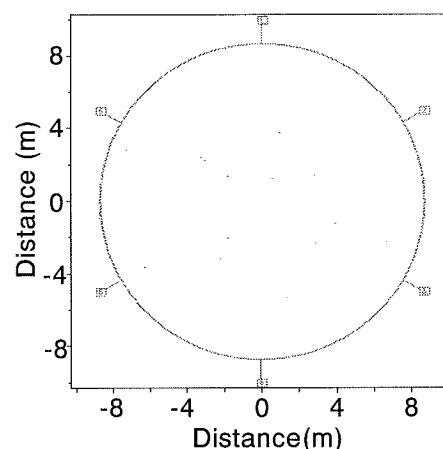
我国においても、AE 試験のデータベース化が進行中であり、我国固有の維持管理体制、および法体系に即した AE 試験手順、そして評価・判定基準を策定しようとする作業が進んでいる¹⁷⁾。今後 AE 試験を信頼性の高い実用技術として確立するため、さらにデータベースの充実が期待されている。

参考文献

- 1) P. T. Cole and P. J. Van de Loo: Listen to your Storage Tanks to Improve Safety and Reduce Cost, Acoustic



附属書 2 図 17 直径 17m の水タンクにおいて観察された振幅値(上)、および AE ヒット発生率(下)の履歴。複数のセンサにおいて、一定の時間(試験開始後 1,160 秒～1,620 秒)に、大きな雑音発生が確認される。



附属書 2 図 18 直径 17m の水タンクにおいて、1,160 秒～1,620 秒の期間に検出された AE データの AE 源位置標定結果。AE クラスター(AE 発生集中源)は観察されていない。

- Emission - Beyond the Millennium, T. Kishi., M. Ohtsu and S. Yuyama editors, Elsevier, pp.169-178 (2000)
- 2) Guide pour L'inspection et la Maintenance des Reservoirs Metaliques Aeriens Cylindriques Verticaux D'hydrocarbures Liquides en Raffinerie, Edition Aout 2000, Union Francaise des Industries Petrolieres (2000)
 - 3) 湯山茂徳, 山田實, 関根和喜: タンク底板の腐食損傷診断における国内外の AE 試験適用の現状, 圧力技術, 40 (4) pp.176-184 (2002)
 - 4) 関根和喜, 橘川重郎, 山田實, 湯山茂徳: タンク底板の AE 法による腐食損傷診断, 保守検査シンポジウム講演論文集, pp.77-82 (2001)
 - 5) (社)日本高圧力技術協会: 石油公団委託 平成 10~12 年度 経年変化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術に関する調査研究委員会報告書概要(1999-2001)
 - 6) (社)日本高圧力技術協会: 石油公団委託 平成 13~15 年度 経年タンクの供用中グローバル診断技術と開放検査の最適化に関する調査・研究委員会報告書概要 (2002-2004)
 - 7) 森田一郎, 荒川敬弘, 畠中宏明, 萩原 実: 石油タンク底板の腐食 AE 波検出に関する研究, 圧力技術, 40(4) pp.203-212 (2002)
 - 8) (独)消防研究所: AE 法による石油タンク底部の腐食モニタリング技術に関する共同研究報告書, 消防研究所研究資料第 52 号 (2001)
 - 9) 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)
 - 10) 曾我部隆洋, 竹本幹男: 円筒タンク底板の音源位置標定精度改善のための AE 検出・解析法, 非破壊検査, 53(1) pp. 29-34 (2004)
 - 11) 大津正康: アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版株式会社, p.36 (1988)
 - 12) 金森博雄: 地球科学 8, 地震の物理, 岩波書店, p.236 (1978)
 - 13) B. Gutenberg and C. F. Richter: Seismicity of the Earth (2nd ed.), Princeton University Press, Princeton, p.310 (1954)
 - 14) 仲佐博裕: AE 振幅分布とその信号処理, 非破壊検査, 27(4) pp. 236-244 (1978)
 - 15) 湯山茂徳, 岸 輝雄, 久松敬弘: すきま腐食-SCC 発生の AE 法による検知とその解析法, 鉄と鋼, 68(14) pp. 2019-2028 (1982)
 - 16) 仲佐博裕: フラクタル技術とその応用, 非破壊検査, 42(8) pp. 425-440 (1993)
 - 17) 関根和喜: AE 法による石油タンク底部の腐食損傷評価手法に関する指針作成委員会の立ち上げに関する趣意書, エネルギー貯槽安全研究委員会, (社)日本高圧力技術協会 (2003)

附属書 3 AE 活動度の算出方法

AE 活動度を評価する方法のひとつとして、**附属書 2** に理論を示す振幅分布が一般的に用いられる。したがって、本技術指針においても、AE 活動度を表す指標を算出するため、振幅分布解析を適用する。

振幅分布は、フラクタル特性を示すことが知られている。ここで、フラクタル現象は、以下の式で表される。

$$y = kx^{-b} \dots\dots\dots(3.1)$$

これを両対数表示にすると

$$\log y = -b \log x + \log k \dots\dots\dots (3.2)$$

となり、両対数グラフ上で切片 $\log k$ を持ち、負の傾き b を有する直線で表わされることになる。

AE 振幅値の大きさを横軸に、またその頻度数を縦軸にとった時に得られる積分型振幅分布は、一般的に上記(3.1)および(3.2)式を満たすフラクタル現象であることが知られている。この振幅分布は、傾き b 、そして切片 $\log k$ を確定できれば、ある現象を一義的に記述することが可能なため、AE 源の識別、雑音除去などの目的で AE データの解析・評価・判定法として広く用いられる。

いまタンク周囲に配置された n 個のセンサで、AE 信号を検出することを考える。ここで i 番目の検出点 (AE センサ) で得た AE 信号の振幅分布は、

$$y(i) = k(i) x^{-b} \dots\dots\dots(3.3)$$

となる。

異なる検出点 (AE センサ) において、AE データとして検出される元 AE 源は、全ての検出点に対して共通かつ唯一なため、各検出点で同一なフラクタル現象を与えるとみなされる。したがって、いかなる検出点において得られた振幅分布でも、傾き b は同一の値が保たれることになり、重ね合わせの原理により、全ての検出点で得られたデータで構成される振幅分布は、

$$Y = \sum y(i) = \sum k(i) x^{-b} = K x^{-b} \dots\dots\dots(3.4)$$

となる。したがって、両対数表示にすると、

$$\log Y = -b \log x + \log K \dots\dots\dots (3.5)$$

となり、振幅分布上でしきい値を定めれば、切片 $\log K$ を求めることは容易に可能となる。

(3.5)式で与えられる振幅分布を構成するデータにおいて、全データ個数 X は、元となる AE 源のデータ個数を N とすると、

$$X = nN \dots\dots\dots (3.6)$$

で与えられるので、 X を検出点数 n で除することにより、 $X/n = N$ が成立する。したがって、その分布を考えると(3.4)式より、

$$N = X/n = (K/n) x^{-b} \dots\dots\dots(3.7)$$

よって、

$$\log N = -b \log x + \log (K/n) \dots \dots \dots (3.8)$$

となり、両対数上で切片 $\log (K/n)$ を求めれば、 N が与える分布は一義的に定まることになる。ここで、AE 計測時のしきい値を A_{th} とすると、(3.8)式は、

$$\log N_{th} = -b \log A_{th} + \log (K/n) \dots \dots \dots (3.9)$$

したがって、 A_{th} に対応する N_{th} を求めることにより、 $\log (K/n)$ が得られ、この振幅分布を定める特性値となる。

ここで、 N_{th} はタンク底部の AE 計測において、しきい値を A_{th} に設定した際に、1 個の AE センサあたりで検出されたヒット数に他ならない。

一方、いかなるタンクにおいても AE 発生源となる腐食現象がフラクタル特性を示し、傾き b が一定の値を保持しながら、上記の振幅分布上に変換されて表わされると仮定するなら、前述した K/n は、腐食現象を規定する特性値となる。

附属書 4 腐食リスクパラメータ (CRP) の理論的背景

“タンク底板の腐食現象”を複雑な確率過程によって支配される“災害事象の一種”とみなし、ある対象とするタンク底部に分布している各ポイントでの腐食減肉量を考え、その座標 \bar{x}_i における値を $X(\bar{x}_i)$ とする。 $h(mm)$ 以上の腐食減肉を有する局部腐食点の存在頻度 (又は確率) を $F(h) = CF(X(\bar{x}_i) \geq h)$ と表すと、 $\log F(h) - \log h$ のグラフがタンク底部の腐食に関する“リスク曲線”となる。

一般に分布のテイル部分、すなわち腐食が進んだ h の大きい範囲は、逆べき乗則に従う。このテイル部分は腐食管理において直接対象となる重要な部分で、その分布特性はリスク曲線テイル部の傾きの絶対値 D で代表される。すなわち、板厚データからリスク曲線を描いた時、そのテイル部の傾きの絶対値 D が小さければ、そのタンクは腐食速度の高い領域を持ちうる事、絶対値 D が大きければ、腐食速度は全般に低い事が予想される。

今、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、テイル部において

$$D = \frac{\partial \ln F}{\partial \ln h} = - \frac{\delta F}{F} \bigg/ \frac{\delta h}{h} \dots\dots\dots (4.1)$$

が成立する。これより、

$$\delta h = - \frac{1}{D} \frac{\delta F}{F} h \dots\dots\dots (4.2)$$

となる。式(4.1)、及び(4.2)は、現時点($t=0$)での腐食減肉の頻度分布関係を表す。ここで、現時点から Δt 時間の微小時間後の減肉量の分布を考える。 Δt 時間後には、 h 以上の減肉量をもつ局部腐食部の存在頻度は、

$$F(\Delta t) = F + \delta F \dots\dots\dots (4.3)$$

(超過累積頻度だから、必ず $\delta F \geq 0$)

となる。 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、

$$\delta F = kF\Delta t \dots\dots\dots (4.4)$$

と、考えられる。ただし、 k は確率過程の種類によって決まる比例定数であり、ここでの解析では、底部の腐食を扱うということで、 k はほぼ一定と考えられる。底部の式(4.2)と(4.4)から、腐食減肉量 h の現時点以降の時間変化 $h(t)$ は、

$$\frac{h}{\langle h \rangle} = 1 - e^{\left(\frac{-k}{D} t \right)} \dots\dots\dots (4.5)$$

となる。ここで $\langle h \rangle$ は、現時点、すなわち開放時での局部腐食が進んだ領域の腐食減肉量分布に対する統計的代表値である。さらに、現時点以降の“統計的”腐食速度の時間変化 $(\partial h(t) / \partial t)$ は、

$$\left(\frac{\partial h(t)}{\partial t} \right) = \langle h \rangle \frac{k}{D} e^{\left(\frac{-k}{D} t \right)} \dots\dots\dots (4.6)$$

として与えられる。

腐食が進んだ部位での現時点での統計的局部腐食速度は、式(4.6)から

$$\left| \frac{\partial h(t)}{\partial t} \right|_{t=0} = k \frac{\langle h \rangle}{D} \dots\dots\dots (4.7)$$

と与えられる。 $\langle h \rangle$ は、厳密には、リスク曲線で表される減肉量分布の統計上の期待値であるが、腐食の進んだ局部腐食領域が対象であり、本手法では累積確率 $F=0.001$ での h の値、 $h_{0.001}$ で、代表させる。さらに、 $\langle h \rangle$ には、観測期間という概念が含まれるので、 $\langle h \rangle$ を供用期間 y で除した値を用い、これより、腐食減肉速度の大小は k を定数とすれば、 $h_{0.001}/(D \cdot y)$ に支配されることになる。

よって、現時点($t=0$)での腐食減肉速度、すなわち、底部全体としての腐食速度は、次式で表され、これを腐食リスクパラメータ (CRP) とする。

$$\text{腐食リスクパラメータ(CRP)} = \frac{h_{0.001}}{D \cdot y} \dots\dots\dots (4.8)$$

附属書 5 底部板厚データの収集・解析とデータベースの構築

1. 底部板厚データの基本条件

底部板厚データとしては、超音波厚さ測定計により法規に準拠する形で行われた離散的板厚測定結果およびこれに基づく解析結果を使用する。板厚測定結果が連続法による全面測定によるものである場合は、法規に準拠する形で行われる板厚の測定法を模し、その間隔に合わせた部分のデータのみ抽出し取り扱う事が望ましい。

2. 計測データの項目

板厚測定結果に関するものとして、以下の項目について情報を取得する。その書式は各項目に示す通りである。

- a) **FILE NAME (ファイル名)** AE データベースのファイルネームと共通とする。純然たる通し番号であり、タンクの構造、内容物の種類、所属、管理形態などが特定できるような番号付けは行わない。AE 測定が行われていないタンクに対しては、仮称のナンバーを与える。
- b) **File size (ファイルサイズ)** データベースをスプレッドシートのファイルにした時の、コンピュータ上でのファイルの容量を示す。
解説 ファイルネームの項目と実際のタンク名(所属会社、そこでのタンクナンバー)の対応付けを確認する際に、チェックを手助けすることを目的としている。
- c) **TEST DATE (検査年月)** 年は西暦で記述し、検査月まで示す。複数回目の開放である時は、TEST DATE (n) (ただし n は開放数) として表記するとともに TEST DATE (n-1) の検査月も示す。建造年月あるいは前回検査との差により、供用年数が求められる事になる。
- d) **Diameter (タンク直径)** 対象となったタンクの直径をメートル単位で示す。
- e) **Capacity (タンク容量)** 対象となったタンクの容量をキロリットル単位で示す。
- f) **Content (貯蔵物)** タンクに貯蔵される内容物を示す。
- g) **Lining (内面ライニング)** 内面ライニングの有無を示す。建造時にライニングが施されておらず、その後施されたときは、その時の年・月を記述する。
解説 内面ライニングが無い場合は、内容物によっては内面からの腐食も考えられる。ライニングが施されることにより、その進行はほとんどの場合停止することになる。この時、それまでの減肉は現状の腐食を反映するものとはならないので、これを考慮するために記述する。
- h) **Construction Date (建造年月)** 年は西暦で記述し、検査月まで示す。
- i) **Measuring points (測定箇所)** 板厚測定時の測定箇所、可能であれば測定間隔も示す。
- j) **Thickness (nominal) (設計板厚)** タンク建造時に記録されている値をミリメートル単位で示す。可能であれば公差も示しておく。
- k) **Thickness (板厚)** 法規に準拠する形で超音波厚さ測定計により行われた離散的板厚測定結果から得られた各板厚。ミリメートル単位で示す。
- l) **Measured number (測定件数)** 各板厚に対する測定点の数。
- m) **Note (注釈)** 板厚が測定された際、これに何らかの影響を与えるような因子があった時に記述する。また、リスク曲線を求める際にこれに何らかの影響を与うる因子がある時も記述する。また、2 回目、3 回目など開放回数の数値がわかるものはその旨記す。

また、現時点で不明な項目はブランクとしておく。

3. 板厚データの解析 2 のデータに基づき、腐食リスク曲線を描き、腐食リスク評価に使用する各種パラメータを導出する。解析手順は以下の通りである。

まず、2 のデータから以下の項目について整理・計算を行う。

a) **Thickness (板厚)** 内容は2 に示した通り。これを板厚データの最小値から最大値を 0.1mm 単位で分割して、測定件数と共に小さい順に連続的に示す。最小値から最大値の間で測定件数が 0 のものがあったとしても省略しない。

解説 測定件数が 0 のものは、リスク曲線を求める際には不要であるが、その部分のデータがエラーで落とされたわけではなく、確かに「0」、すなわち無い事を明確にするために記入する。

b) **Thickness (nominal) - Thickness (設計板厚との差)** 設計板厚から各板厚の値を引いた値。各板厚に対応させて示す。

c) **Exceedance cumulative number (上側累積件数)** ある板厚以下で存在する測定件数の累積件数。

解説 例えば、最小板厚が 7.0mm で、7.0mm の測定点数が 1 点、7.1mm が 3 点、7.2mm が 0 点、7.3mm が 5 点の時、それぞれの累積件数は、7.0mm で 1、7.1mm で 4、7.2mm で 4、7.3mm で 9 となる。

d) **Exceedance cumulative probability (上側累積確率)** ある板厚の累積件数を上側累積件数の最大値で除した値。

e) **y (供用年数)** 前回の開放検査と今回の開放検査の間の期間。単位は年。初回開放の場合は、建造年月との差から求める。

以上の整理した項目をもとに、横軸を「設計板厚との差」、縦軸を「上側累積確率」として両対数プロットを行う。この時、描かれた曲線が腐食リスク曲線となる。腐食リスク曲線の「設計板厚との差」の値の大きな部分を「腐食リスク曲線のテイル部」と呼ぶ。腐食リスク曲線のテイル部の直線性が見られる部分の傾きを求め、その絶対値を D とする。傾きを求める際に用いた点、得られた直線は明示しておく。この曲線より、 D も含め、以下の値を求める。

f) **D** リスク曲線のテイル部における直線部分の傾きの絶対値。

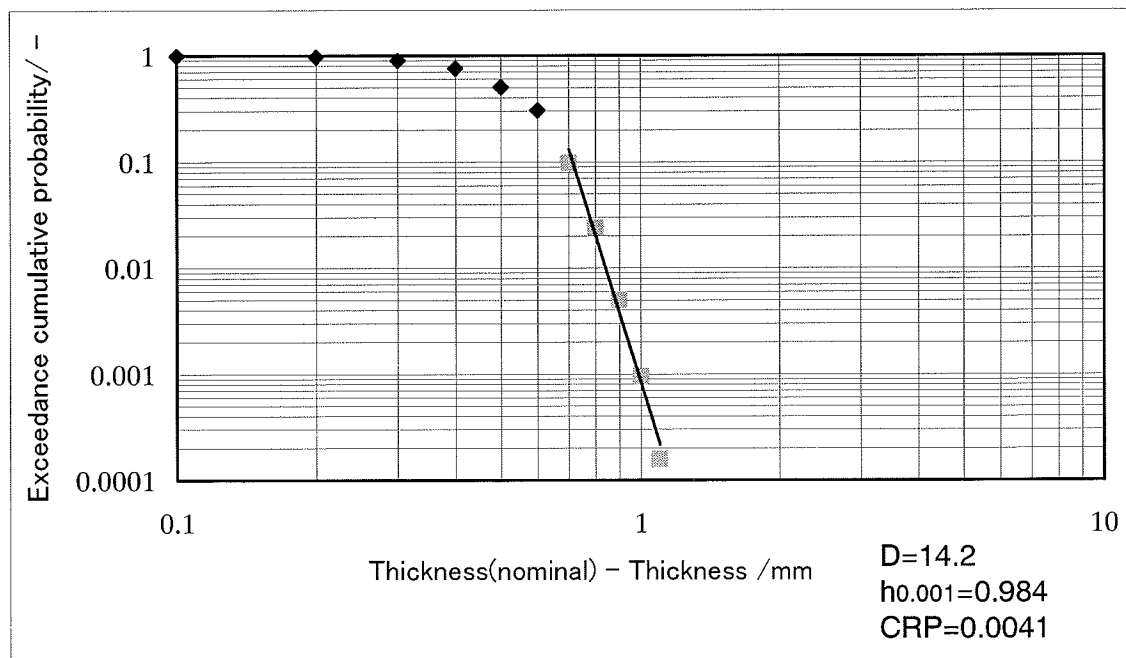
g) **$h_{0.001}$** リスク曲線において上側累積確率が 0.001 の時の「設計板厚との差」の値。ミリメートル単位で示す。

h) **CRP (腐食リスクパラメータ)** $h_{0.001}/(D \cdot y)$ 、すなわち上側累積確率が 0.001 の時の「設計板厚との差」の値である $h_{0.001}$ をリスク曲線のテイル部における直線部分の傾きの絶対値 D および供用期間 y で除した値。 $\text{mm} \cdot \text{year}^{-1}$ で示す。
当該タンクの腐食リスクを表す。

以上のデータ収集および解析によって得られた板厚データベースの一例を**附属書 5 図 1**に示す。

FILENAME 00000018
 Filesize 43520
 TEST DATE 1995年7月
 Diameter 82.37m
 Capacity 110000kl
 Content 原油
 Lining 有
 Construction Date 1978年8月
 Measuring Points 底板部
 Thickness(nominal) 12.0mm
 D 14.2
 $h_{0.001}$ 0.984
 CRP 0.0041
 Note

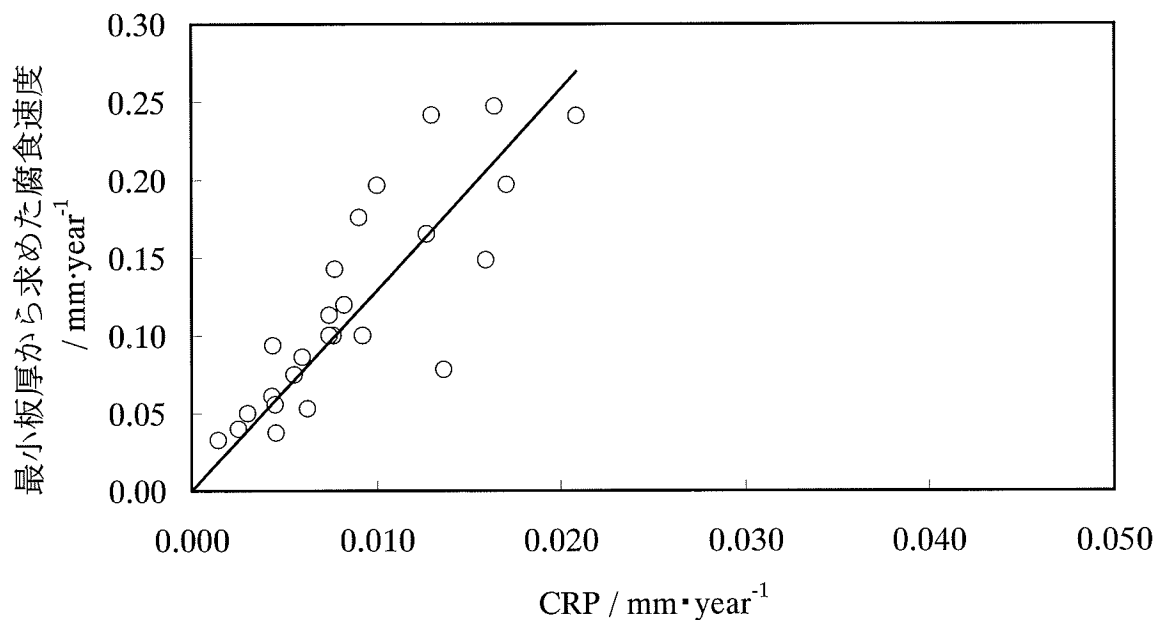
| Thickness (板厚) | Thickness(nominal) - Thickness (設計板厚-測定板厚) | Measured number (測定件数) | Exceedance cumulative number (上側累積件数) | Exceedance cumulative probability (上側累積確率) |
|-------------------|--|------------------------------|--|---|
| /mm | /mm | | | |
| 10.9 | 1.1 | 1 | 1 | 0.000156912 |
| 11 | 1 | 5 | 6 | 0.000941472 |
| 11.1 | 0.9 | 26 | 32 | 0.005021183 |
| 11.2 | 0.8 | 121 | 153 | 0.024007532 |
| 11.3 | 0.7 | 470 | 623 | 0.097756159 |
| 11.4 | 0.6 | 1309 | 1932 | 0.303153931 |
| 11.5 | 0.5 | 1267 | 3199 | 0.5019614 |
| 11.6 | 0.4 | 1614 | 4813 | 0.755217323 |
| 11.7 | 0.3 | 877 | 5690 | 0.892829123 |
| 11.8 | 0.2 | 433 | 6123 | 0.960772007 |
| 11.9 | 0.1 | 150 | 6273 | 0.984308803 |
| 12 | 0 | 64 | 6337 | 0.994351169 |
| 12.1 | | 25 | 6362 | 0.998273968 |
| 12.2 | | 11 | 6373 | 1 |



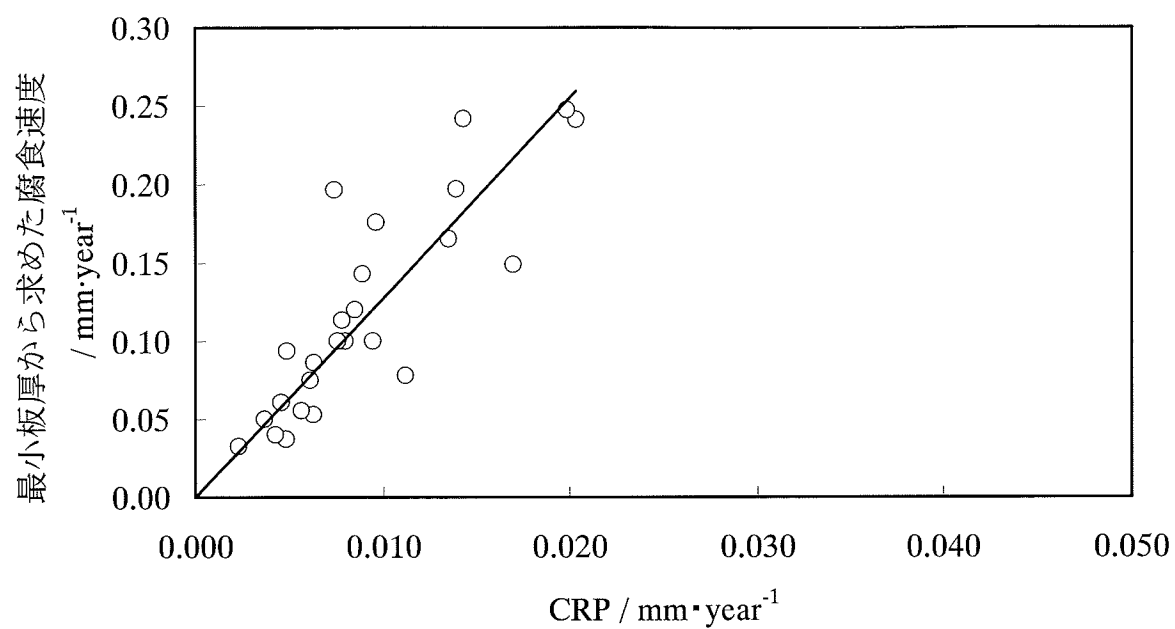
附属書 5 図 1 データベースの一例

附属書 6 腐食リスクパラメータ (CRP) と実際の腐食速度との関係

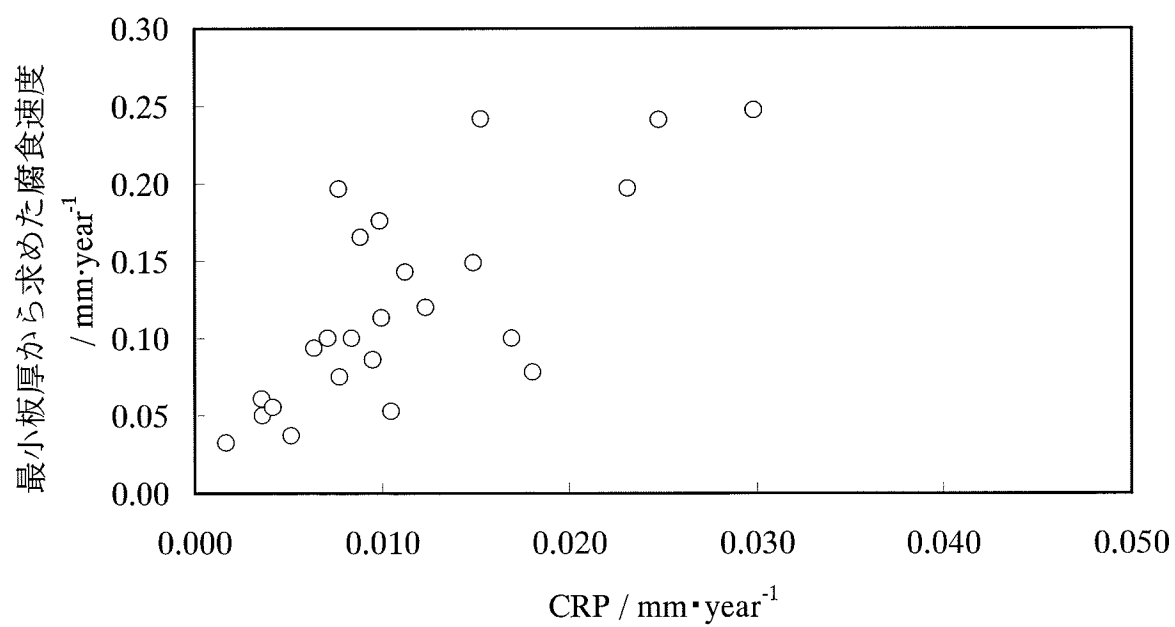
本手法では、AE 計測によって得られた AE 活動度から、本文中の図 4 に示したような相関関係を用い、当該タンクの評価のために、その腐食リスクパラメータ CRP を求めている。この腐食リスクパラメータ CRP と実際の腐食速度との間には、相関関係が見られる事が見出されている。これを附属書 6 図 1 に示す。本図は、底板板厚を全面測定した時に得られたデータに基づき、この時得られた板厚最小値を供用期間で除して求めた腐食速度と、同じく全面測定データから求めた腐食リスクパラメータ CRP との関係を示したものである。板厚最小値の部分の全てが、現在最も腐食活性度の高い箇所であるとは限らないが、両者には、相関関係が見られる。腐食リスクパラメータの値を約 12 倍したものは、タンク底板の、見かけ上、最も激しく腐食が進行している所の腐食速度にほぼ相当している。ここでの全面測定は、5mm ピッチのものであるが、これを元に 30mm ピッチでデータを抽出して CRP を求めた場合や 100mm ピッチでデータを抽出して CRP を求めた場合も全体の傾向は大きく変わらない。これをそれぞれ附属書 6 図 2 および附属書 6 図 3 に示す。法定測定の条件に近づくにつれ、すなわち測定点数が少なくなるにつれ、最小板厚部分が見落とされる確率が増えるので相関関係から外れる点も出てくるが、両者は、本質的に附属書 6 図 1 に見られるような相関に収斂するものと考えられる。この関係から、腐食リスクパラメータ CRP を実際の腐食速度に置き換えて考えていくことができる。



附属書 6 図 1 5mm ピッチのデータから求めた CRP と
全面計測の最小板厚から求めた腐食速度との関係



附属書 6 図 2 30mm ピッチのデータから求めた CRP と
全面計測の最小板厚から求めた腐食速度との関係



附属書 6 図 3 100mm ピッチのデータから求めた CRP と
全面計測の最小板厚から求めた腐食速度との関係

附属書 7 用語解説

アコースティック エミッション、AE

材料内で起こる変形、変態、微小破壊の発生や成長など局所的、且つ急速な微小変化に起因して発生する非定常的な弾性波。

参考 タンク底部の腐食損傷で発生する AE の発生源は、底部内面、あるいは外面の腐食で生じた生成物のはく離、あるいは割れであるとされる。

AE 活動度

タンク底部の腐食損傷評価において、全チャンネルで 1 時間あたりに検出されたヒット数を、計測に使用したチャンネル数で除した値。

AE 信号

AE センサで検出された電気信号。

AE 信号処理パラメータ

AE 信号を処理し、数値化することにより信号の大きさや強さ、あるいは波形形状に関する情報を与えるパラメータ。

AE センサ

弾性波によって生じる粒子運動を電気信号に変換するための検出器。

参考 通常は、圧電方式により運動を電気信号に変換する。

イベント

センサ間の信号到達時間差をもとに、計算により AE 発生源の位置を求めること（位置標定）が可能な AE 信号セット。

参考 信号到達時間差による計算が不可能な場合、センサで検出された AE 信号をイベントとみなすゾーン標定が用いられることがある。

エネルギー

検出された AE 信号の包絡線検波波形の面積。

参考 計測装置により、最大振幅値の 2 乗、あるいは最大振幅値と信号継続時間の積と定義される場合もある。

カウント

検出された AE 信号において、計測時に設定されたしきい値を超えた振動回数。

最大振幅値

検出された AE 信号の最大電圧値。

信号立ち上がり時間

最初のしきい値クロス時（AE 信号の開始）から、最大振幅値に至るまでの時間。

信号継続時間

最初のしきい値クロス時（AE 信号の開始）から、最後のしきい値クロス時（AE 信号の終了）までの時間。

接触媒質

AE 計測の際に、音響エネルギーの通過を良くするために、AE センサ表面とセンサ取り付け面間の隙間を埋めるために用いられる材料。

参考 通常は固体と液体の中間的な性質を持つ、グリース状の物質が用いられる。

ヒット

検出された AE 信号を、包絡線検波して得られる一かたまりに対応する。データを加算する単位として用いられる。

HPIS G 110 TR 2005

AE 法による石油タンク底部の腐食損傷評価手法に関する技術指針
Recommended Practice for Acoustic Emission Evaluation of Corrosion Damage
in Bottom Plate of Oil Storage Tanks

平成 17 年 5 月 1 日

社団法人日本高圧力技術協会
High Pressure Institute of Japan (HPI)

〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間町 1-11

TEL : 03-3255-3486

FAX : 03-3255-3488

E-mail : hpi@hpij.org
