

配管の AE による腐食損傷評価

日本フィジカルアコースティクス株式会社
湯山茂徳、西本重人、辻 啓一、李 正旺

1. AE 法による地下埋設配管の腐食損傷診断

1.1. はじめに

石油の精製、移送、および貯蔵設備の中で、配管は大きな部分を占めている。したがって、その状態を把握し、適切な保安全管理によって内容物の漏洩を防止することは、安全・防災のみならず、大気汚染防止や水質汚濁防止という環境保全の観点からも重要である。

製油所の防油堤貫通配管などの地下埋設配管は、埋設部分に直折接触することが不可能なため、超音波探傷(UT)、放射線探傷(RT)、あるいは目視検査(VT)など通常の非破壊検査方法を適用し、腐食損傷状態の診断など構造物の健全性評価を供用中に実施することは困難である。

割れの発生・進展や腐食損傷、あるいは気体・液体の漏洩に起因する波動を検出する AE 法は、複数個のセンサを適切に配置することにより構造物のグローバル診断が可能であり、また位置標定機能を用いることにより AE 信号が発生した場所をある程度特定化できるという特徴を利用して、地上タンクの底部腐食損傷診断方法⁽¹⁾として、また地下タンクの早期漏洩検知方法⁽²⁾として適用が期待されている。地上タンクに関しては、欧州において底部の腐食損傷状態の診断を供用中に行うための検査方法として標準化され、これをもとに世界各地で年間 1000 件以上の試験が実施されており、我国でも日本高圧力技術協会により、平成 17 年 5 月にタンク底部の AE による腐食損傷評価に関して、技術指針⁽³⁾が制定された。

本節では、腐食に起因する AE の発生特性や配管における AE 波の伝播特性を調べ、さらに実配管で得た AE 試験結果と UT、VT などの試験結果を比較することにより、埋設配管における AE 法の腐食損傷診断への適用性を検討した結果を報告する。

1.2. 試験手順と結果

1.2.1 腐食に起因する AE の評価

腐食試験のため、供用中のタンク屋根部から写真 1 にあるように、4 個の短冊型試験片を切り出した。このうち 1 個の試験片(No.1)は、金属光沢が得られるように表面上の腐食生成物を全て除去した。一方、残り 3 個の試験片(No. 2~4)は、切り出したままの状態を保ち、表面上には厚い腐食生成皮膜が形成されている。

腐食に起因する AE 信号の特徴を調べるため、これらの試験片を 3(重量)%食塩水(水道水と市販の食塩で製造)中に浸漬した。また、AE 信号の検出には、3

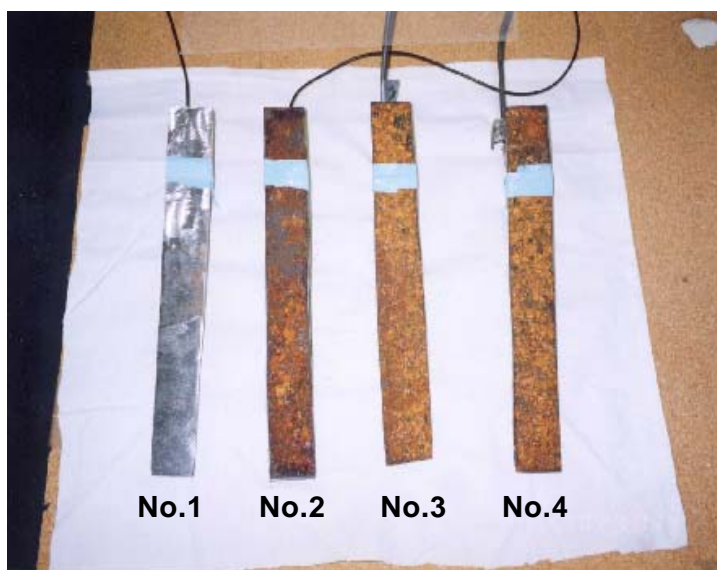


写真 1. 腐食試験に供した試験片 (No.1: 腐食生成物除去、No.2~4: 腐食生成物有り)

AE 法適用による構造物のグローバル診断

種の異なる周波数特性を持つ AE センサ(R3I: 30kHz 共振型、R6I: 60kHz 共振型、R15I: 150kHz 共振型)を用意した。

試験 1 において、4 個の試験片にそれぞれ 1 個の R15I センサを取り付け、55 日間に渡り AE 発生を連続監視した。図 1 に、この試験で得られた AE 振幅値の履歴と振幅分布が示されている。厚い酸化皮膜の形成された試験片(No. 2~4)では、80~90dB を超える振幅値を持つ大きなエネルギーをもつ AE 信号が検出されているが、酸化皮膜を除去した試験片(No.1)では、検出された信号の大部分が 60dB 以下の振幅値を有することがわかる。

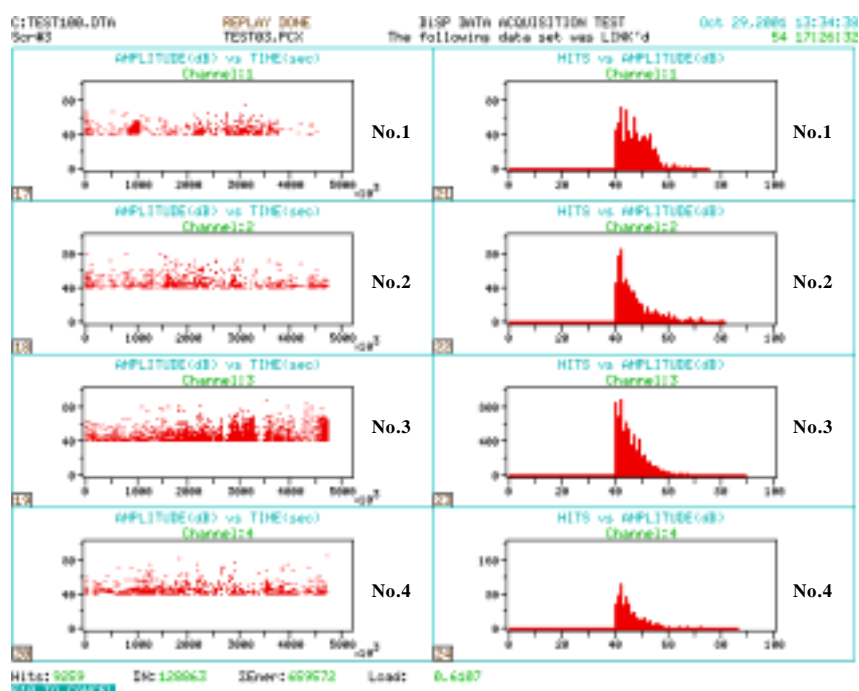


図 1. 試験 1 の結果 (振幅値の履歴と振幅分布)

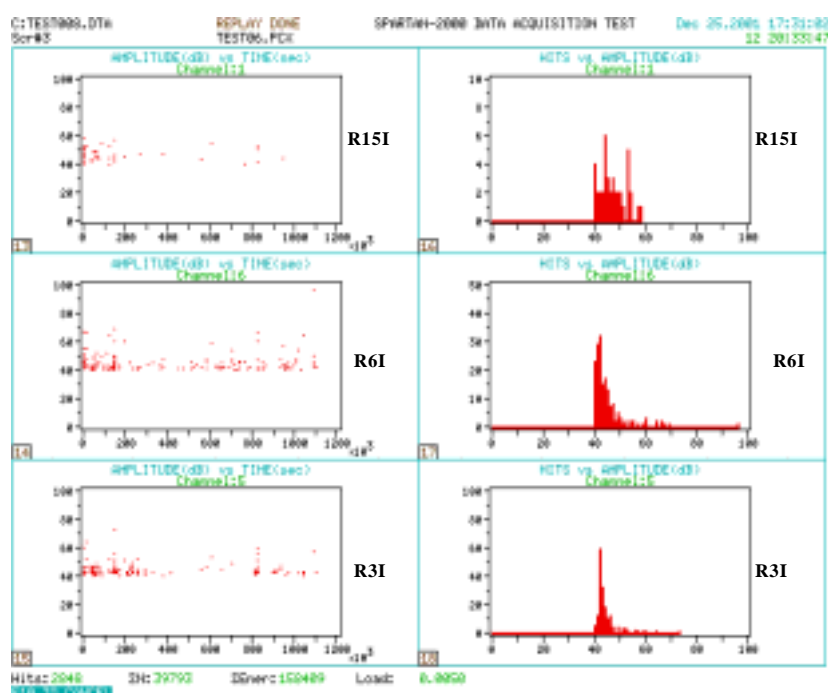


図 2. 試験 2 の結果 (上 : R15I センサ、中 : R6I センサ、下 : R3I センサ)

AE 法適用による構造物のグローバル診断

試験 2 では、試験片 No.1 に R3I(周波数帯域：20～60kHz)、R6I(周波数帯域：30～100kHz) および R15I(周波数帯域：100～300kHz) センサを取り付け、13 日間に渡り腐食進行下で発生する AE 信号を計測した。図 2 に、試験結果が与えられている。R15I センサで検出された AE 信号の振幅値は 60dB 以下であるにも関わらず、R3I および R6I センサでは、70～75dB に至る振幅値を持つ信号が検出されている。R15I で検出されたヒット(信号)数は 40 であるが、R3I および R6I ではおよそ 160 のヒット数が検出されている。したがって、腐食に起因する AE 信号は、明らかに 20～100kHz の比較的低い周波数帯域に主な周波数成分を持つことが、定性的に示されたと考えられる。

1.2.2. 配管における AE 波減衰特性の調査

AE 波伝播試験を、異なる条件下にある配管で実施した。標準音源となるシャープペンシル芯の圧折で起振した AE 波を採集するため、異なる周波数特性を持つ 4 個の AE センサ(R1.5I: 15kHz 共振型、R3I、R6I、R15I) を配管上に設置した。空、および満液状態の地上配管、そして土嚢で囲むことにより、埋設状態を模擬した状態にある配管で波形を採集した。写真 2 に、模擬埋設配管における試験実施状況が示されている。



写真 2. 模擬埋設配管上に取り付けられた AE センサ

図 3 に、空状態の地上配管に対する減衰曲線が与えられている。配管壁内の AE 波伝播は、複雑な経路を取るため、単純な板波の伝播として取り扱うことはできないが、経路の影響が少ない初動波部分に注目し、 A_0 波に相当するとみなされる AE 波形データから得た結果をまとめてある。R15I センサにおける高周波数帯域(100～300kHz)では、17m の伝播に対して約 30dB 減衰しているが、低い周波数帯域(R1.5I: 10～30kHz、R3I: 20～60kHz、R6I: 30～100kHz)における減衰は、10～15dB 程度である。

図 4 に、満液状態の地上配管における減衰曲線が示されている。減衰は空状態の場合に比べやや大きく、8m 伝播した際におよそ 10dB 減衰している。

防食用保護テープを持たず、空状態にある埋設配管における減衰曲線が、図 5 に示されている。また、図 6 に保護テープで被覆された、空状態の埋設配管で得られた曲線が与えられている。減衰はこの場合が最も大きく、4m の伝播に対しておよそ 30dB 減衰している。前節で、腐食生成物で覆われた試験片が、腐食過程で 80～90dB に至る振幅値を持つ AE 信号を発生し得ることが示されている。したがって、AE 波伝播による減衰を考慮したとしても、発生源から 4m 程度離れた位置で腐食に起因する AE 信号を、しきい値を超えて十分検出可能と考えられる。それゆえ、しきい値を 40dB 程度に設定するなら、保護テープで被覆された埋設配管において、センサ間距離を 4m 程度に設定したとしても直線状位置標定が可能と推察される。

AE 法適用による構造物のグローバル診断

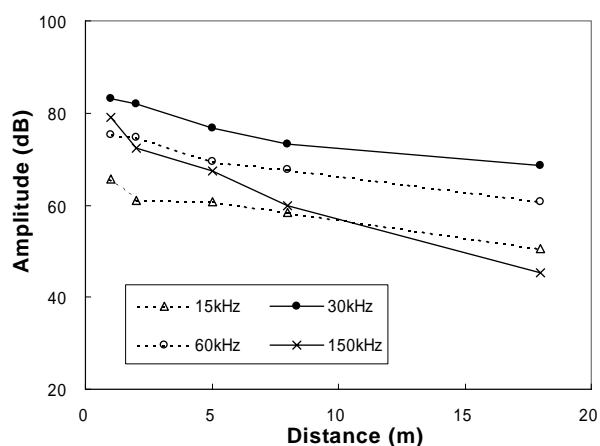


図 3. 空状態の地上配管における減衰曲線

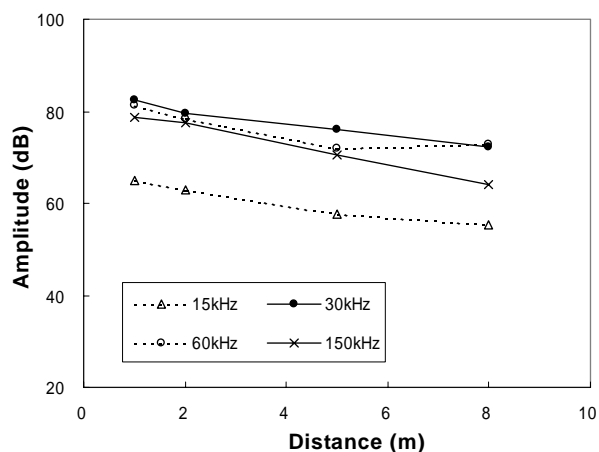


図 4. 満液状態の地上配管における減衰曲線

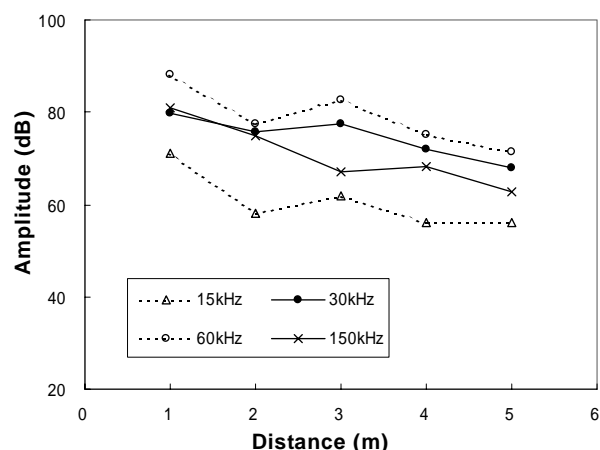


図 5. 空状態の埋設配管(防食用保護テープ無し)における減衰曲線

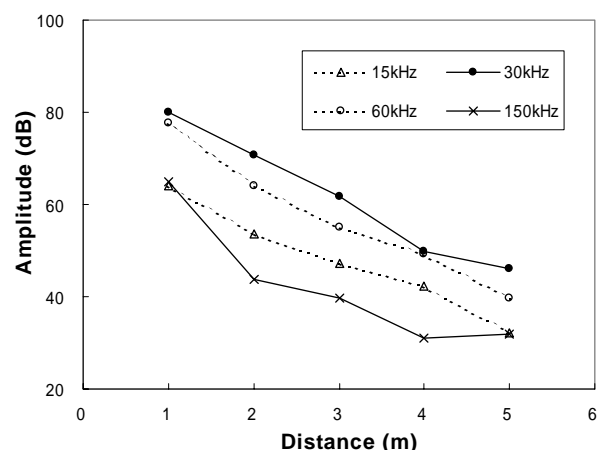


図 6. 空状態の埋設配管(防食用保護テープで被覆)における減衰曲線

1.2.3. 製油所の異なる 13 種の配管における AE 計測結果

製油所において、写真 3 に示される 13 本の配管に対して、AE 計測を行った。表 1 に、その配管番号、大きさ(直径)、流体、流量、そして流速がまとめられている。13 本のうち 10 本(番号 02~11)は、中仕切り部で長さ約 3m 分について埋設されている。また、3 本(番号 12~14)は地上に設置されており、蒸気加温され断熱材で全体が被覆されている。

AE 計測に際し、R3I、および R6I センサを 2 個ずつマグネットホルダーで配管上に取り付け、標準計測として 30 分間データを採集した。2 個のセンサは、埋設部分を挟むようにそれぞれ 4m 離れ



写真 3. AE 計測を実施した製油所の配管

AE 法適用による構造物のグローバル診断

表 1. AE 計測を実施した配管

番号	直径 (インチ)	流体	流量(Kl / h)	流速(cm / s)
02	6 ^B	脱硫ナフサ	204	310.1
03	6 ^B	脱硫軽質ガソリン	48	73.1
04	6 ^B	改質ガソリン	20	30.5
05	6 ^B	脱硫灯油	71	108.1
06	6 ^B	脱硫軽油	112	170.6
07	8 ^B	直留重質ガソリン	204	174.7
08	2 ^B	不明	-	-
09	4 ^B	流動接触分解重質サイクルオイル	51	174.7
10	6 ^B	間脱軽質軽油	28	42.6
11	6 ^B	ジェット燃料	0	0
12	18 ^B	副生重油	0	0
13	18 ^B	中質副生重油	0	0
14	24 ^B	中硫黄重油	0	0

た位置に設置し、直線位置標定を実施した。

図 7 は、配管 02 において R3I センサで計測された結果である。各チャンネルに対する検出ヒット総数、両チャンネルに対するヒット計数率、ヒット数、および振幅値の履歴、位置標定結果、そしてイベント数の履歴がまとめられている。両チャンネルで合計 280 のヒット数が検出され、

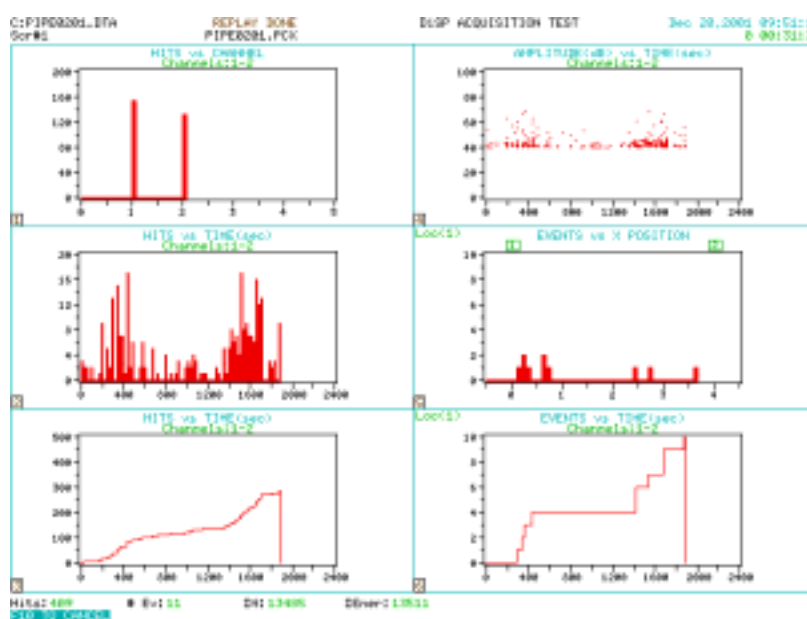


図 7. 配管 02 において、R3I センサによる計測結果

AE 法適用による構造物のグローバル診断

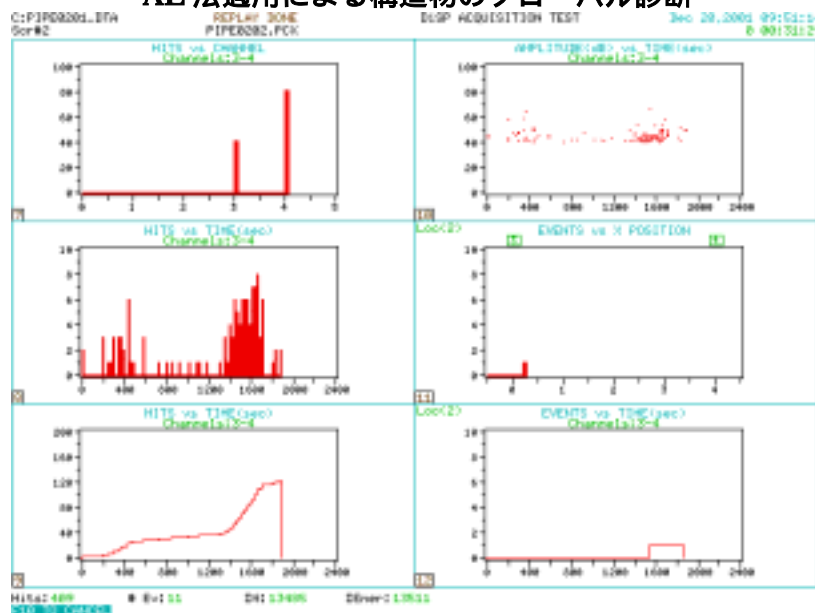


図 8. 配管 02 において、R6I センサによる計測結果

表 2 . AE 計測結果と厚み測定および目視検査 (VT) との比較

配管番号	AE 計測結果 (ヒット数 / イベント数)	厚み測定結果	目視検査結果	備考
02	280 / 10 (R3) 120 / 1 (R6)	N 側に厚みの最小値 ()	N 側防食テープ境界部に顕著な腐食 ()	N(左)側に AE イベントの発生集中部あり
03	300 / 13 (R3) 100 / 0 (R6)	顕著な減肉無し(x)	顕著な腐食無し(x)	R3 センサの計測結果は左右両端付近にイベントを検出(厚み測定および VT 結果と不一致)
04	650 / 18 (R3)	減肉無し(x)	腐食見られず(x)	センサでイベントを検出(連続雑音の影響)
05	480 / 45 (R3)	減肉無し(x)	腐食無し(x)	連続雑音の影響?
06	70 / 0 (R3)	減肉無し()	腐食無し()	信号検出数は少ない
07	90 / 2 (R3)	減肉無し()	腐食無し()	信号検出数は少ない
08	16 / 0 (R3)	減肉無し()	腐食無し()	信号検出数は少ない
09	120 / 0 (R3)	減肉無し()	腐食無し()	信号検出数は少ない
10	70 / 0 (R3)	減肉無し()	腐食無し()	信号検出数は少ない
11	36 / 5 (R3)	減肉無し()	腐食無し()	信号検出数は少ないが、数個のイベントを検出
12	700 / 220 (R3)	減肉無し(x)	腐食無し(x)	スチームに起因する雑音の影響
13	190 / 42 (R3)	減肉無し()	腐食あり(詳細 B C 40- 参照)()	AE イベントの集中位置にほぼ対応(スチーム)
14	2500 / 600 (R3) 190 / 50 (R6)	減肉無し(x)	腐食無し(x)	スチームに起因する雑音の影響

表 2 . AE 計測結果と厚み測定および目視検査 (VT) との比較

AE 計測結果との対応 : 良好 : とちらともいえない x : 不良

AE 法適用による構造物のグローバル診断

最大振幅値は 70dB を超えている。また、合計 10 個のイベントが得られ、AE 信号発生集中箇所(クラスター)が、埋設部の北側位置に観察される。

R6I センサで計測された結果が、図 8 に示されている。合計 120 のヒットが検出されたが、位置標定可能なイベントは 1 個のみであった。したがって、共振周波数が 30kHz (R3I) の場合に比べ、60kHz(R6I)で検出された AE 信号数ははるかに少ない。

全配管に対する試験結果が、表 2 にまとめられている。検出されたヒット数、イベント数、計測時の備考が、配管番号、およびセンサ種類と共に与えられている。ここで、配管番号 12 ~ 14 では、蒸気加温に起因する蒸気の漏洩により、環境雑音の極めて大きな条件下で AE 計測が実施されたことに留意する必要がある。

1.2.4 AE 計測結果と UT 厚み測定、および VT 検査結果との比較

AE 計測結果の有効性を検証するため、UT 厚み測定と VT 検査が各配管に対して実施された。その結果が表 2 にまとめられている。配管 02 では、AE 計測結果と、UT / VT の結果は非常に良く一致している。すなわち、UT、および VT により、配管埋設部の北側部分に顕著な腐食減肉が認められ、これは AE 計測で得られた AE 発生源の集中箇所(クラスター)の位置に対応していた。配管 06 ~ 11 では、検出ヒット数が小さく、UT および VT でも腐食減肉は発見されなかった。したがって、これらの配管においても、AE 計測結果と UT および VT 試験結果は、良好な相関関係を提示していると見なしてよい。

しかしながら、配管 03 においては、AE クラスターが埋設部の両端付近に検出されたにも関わらず、顕著な腐食は観察されなかった。したがって、この場合 AE と UT、および VT の間に相関は見られない。また、配管 04 と 05 において、原因不明の連続雑音を検出されたため、有意な AE 信号を検出することは非常に困難であった。これらの配管では、多くの AE ヒットが検出されたにも関わらず、顕著な腐食は認められなかった。さらに、配管 12 ~ 14 では、蒸気漏洩に起因する連続環境雑音の影響で、有意な AE 信号を検出することは不可能であった。

したがって、8 本の配管に対して、良好な環境下で AE 計測を実施することができた。この中で、7 本の配管において AE 計測結果と UT、および VT 間に良好な相関関係が認められた。一方、相関の全くない事例(配管 03)が一例見られたが、安全側の評価(腐食が無いにも関わらず AE 信号が多く検出され、何らかの異常を示す兆候が指摘された。)を与えていることから、構造物の健全性を評価する診断法として、受け入れ可能な余地を残す結果であると考えられる。

このように、埋設された配管の腐食損傷診断を供用中に行う検査方法として、AE 法の適用性は高く、今後データベースなどの充実により、信頼性をさらに高めることが可能と考えられる。しかしながら、現場で計測を実施する際には、有意な信号を検出するために環境雑音ができる限り小さく、良好な条件下で AE 計測を実施する必要がある。

1.3 まとめ

腐食に起因する AE の発生特性や、配管における AE 波の伝播特性を調べ、さらに実配管で得た AE 試験結果と UT、VT などの試験結果を比較・対照するなど、組織的な調査を実施することにより、埋設配管における AE 法の腐食損傷診断への適用性を検討し、以下の結果を得た。

(1) 室内で実施した実験により、表面に厚い腐食生成皮膜の形成された試験片の、食塩水中における腐食進行過程で、80dB を超える振幅値を持つ AE 信号の発生することが確認された。ま

AE 法適用による構造物のグローバル診断

た、腐食過程で発生する AE 信号の主周波数成分は、20～100kHz の周波数帯域にあることが示された。

- (2) 異なる条件下にある配管における AE 波伝播試験により、防食用保護テープで被覆された埋設配管において、2 個のセンサ(例えば 30kHz 共振型)を 4m のセンサ間距離で配置することにより、直線位置標定が適用可能であることが示された。
- (3) 製油所において、供用中の 13 本の実配管に対して AE 計測を実施し、その後超音波(UT)厚み測定、および目視(VT)検査を実施し、AE 計測結果と比較・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確認された。したがって、埋設された配管の腐食損傷診断を供用中に行う検査方法として、AE 法の適用性が高いことが示された。

2. AE 法による地上配管の腐食損傷診断

2.1. はじめに

配管設備は、家庭用のガス配管から、原子力発電所、化学プラントのような大型設備まで、さまざまな設備に使用されている。配管設備は人間で例えると血管に相当し、内部媒体の漏洩は、設備の稼動に大きく影響するばかりでなく、漏洩した流体の損失や環境の汚染などを考えるとその影響は大きい。配管の漏洩原因として、ほとんどが接続部の不良や腐食に起因すると報告されており、設備を安全に運用するために、配管設備の健全性評価技術の開発が望まれている。しかし、接続部不良が原因で発生する漏洩の検知方法については、ガス検知器による方法や AE 法による方法が報告され実用化が進められているが⁽⁴⁾、配管の腐食評価技術については、内部腐食や配管支持部の腐食などのように、直接アクセスが困難な場所に生じることが多く、さらに配管は広範囲に敷設されていることから、有効な評価手段がないのが現状である。

本節では、配管における腐食進行と、腐食位置の特定に AE 法の適用を試み、その結果、AE 法が配管の腐食損傷評価に有効な手段であることが明らかになった事例を、報告する。

2.2. 基礎試験

配管の腐食進行時に発生する AE の特徴を把握するために、塩水による腐食試験を実施し、発生する AE の挙動を検討した。

2.2.1 試験装置

SPG 配管の表面に注射器で塩水の水滴を定期的に塗布し、腐食進行に伴い発生する AE を連続的に計測した。計測条件を表 3 に示す。腐食損傷過程における AE 発生源については、すでに基礎的研究により明らかにされているため⁽⁵⁾、AE センサおよびフィルタの選定は、これを参考にし、30kHz を中心とする周波数帯域が計測できるように設定した。AE センサは、配管に直接取り付けてもよいが、この状態では配管表面が曲面であるので、検出部が線接触となり感度が大幅に低下する。そこで、センサの検出面に信号採取用の治具を取り付けて検出面積を大きくして計測した。

表 3 試験条件

項目	条件
配管	SGP 8B
塩分濃度	1%
AE センサ	30kHz 共振型
HPF	10kHz
LPF	2MHz

2.2.2 試験結果

試験時間と発生した AE の振幅および発生数の関係を図 9 に示す。塩水滴下直後は、AE の発生数が多く、さらに振幅の大きな信号発生が観察されるが、時間経過とともに発生数が減少した。特に、滴下した塩水の水分が蒸発すると、AE 発生は急激に低下した。これは、塩水滴下直後は腐食活動が比較的大きいが、水分が蒸発すると腐食の進行が低下するので、AE 発生もこの腐食活動度に相関して変化したものと考えられる。

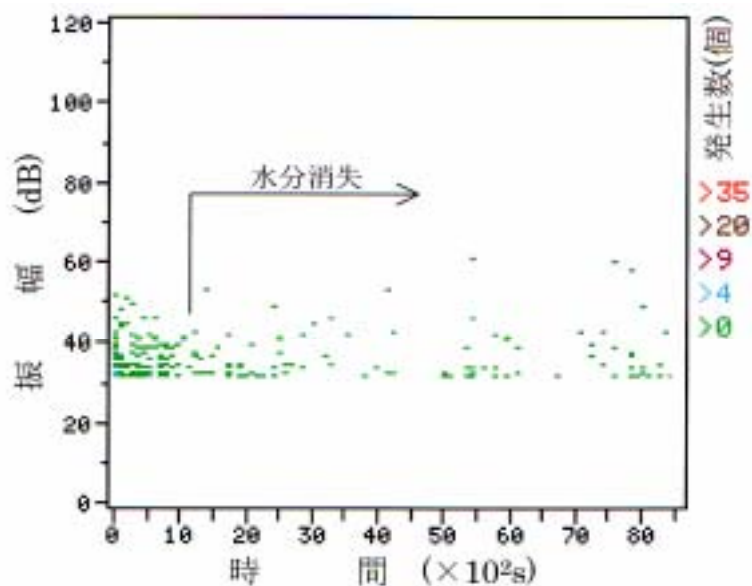


図 9 振幅及び発生数の変化

腐食進行量は非常に微量であるので、定量的に評価することが困難である。そこで簡易的に、腐食活動が時間経過と相関があると仮定し、腐食活動度と AE との相関を検討した。図 10 に、試験時間と発生した AE エネルギー総量との関係(履歴)を示す。試験時間の経過とともに AE エネルギー総量(印)が増加し、活性な腐食と AE のエネルギー総量との間に、相関が認められる。AE エネルギー総量曲線の傾きは、時間の経過に対して増加傾向を示している。これは、時間経過に伴い、腐食領域が滴下位置から外側に向けて広がり、腐食範囲が拡大した影響であると推察される。

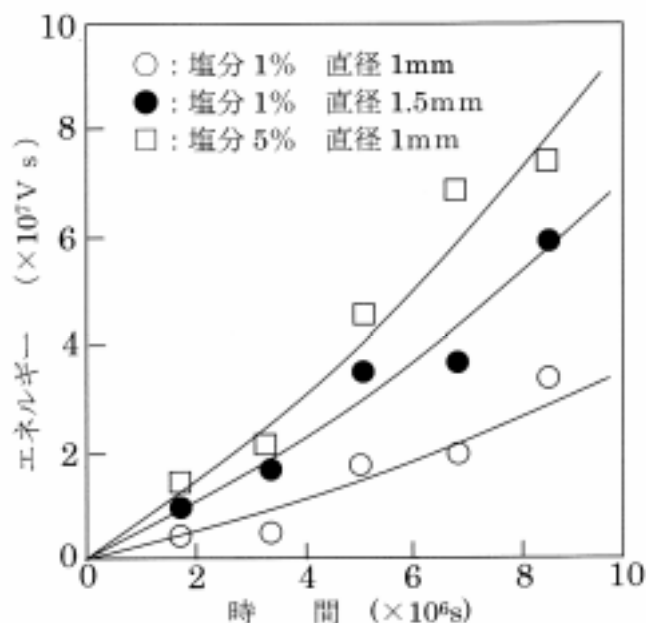


図 10 試験結果

さらに滴下量を増やし、塩水と試験配管表面との接触面積を、増加させた条件下で試験した。結果を図 10 の中の印で示す。接触面積の増加に伴い、検出される AE エネルギーも増加している。また、塩水濃度を増やし、腐食環境を変化させて試験した。結果を、図 10 中の印で示す。塩水濃度の増加、すなわち、腐食環境の変化に伴い、AE エネルギーが増加している。このように、腐食進行(活動)と AE エネルギー総量との間に相関が認められ、腐食の進行を、検出される AE エネルギーから推測できる可能性が認められた。

2.3. 実配管における腐食評価

上述のように、腐食活動と AE エネルギー総量との間に相関が認められたため、実配管に

AE 法適用による構造物のグローバル診断

おける腐食評価の可能性を検討する目的で、実配管を用いて AE を計測し、配管の腐食状態との対応を調べた。

2.3.1 計測内容

計測対象は、M社事業所プラント内のアンモニア、スチレン、酢酸エチル等の危険物配管で、200mを選定し、計測を実施した。計測した配管の一例を図 11 に模式的に示す。これはアンモニア配管設備 8m で、AE センサ S2 から 1m の部分に支持部があり、全面が保温材で被覆されている。AE センサは、配管フランジ部の保温材を取り除き、センサ検出表面にシリコングリースを塗布した後に取り付けた。

AE センサ S2 において検出された AE 振幅値の時間履歴を、図 12 に示す。多数の AE 発生が観察され、しばしば 70dB に至る大きな振幅値を持つ信号が検出されている。

図 13 に、検出された AE 信号の、位置標定結果を示す。AE センサ S2 から約 1m の位置に、AE 発生が集中する部分が観察される。AE 計測終了後に保温材を取り除いて目視観察した結果、写真 4 に示すように、配管支持部で腐食が観察され、AE 計測結果と一致していた。

計測対象となった 200m のうち、AE イベントの発生が集中（例えば 100 以上のイベント

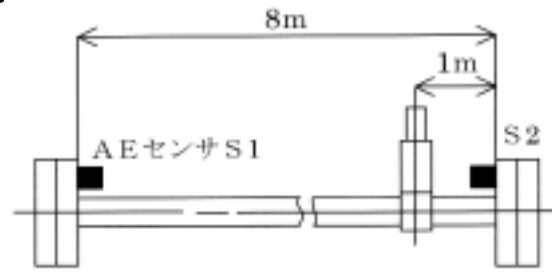


図 11 計測対照の配管

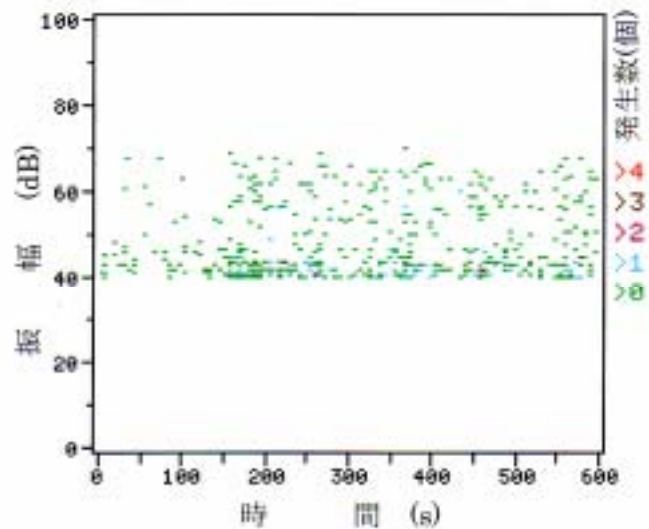


図 12 実配管における AE 発生状況

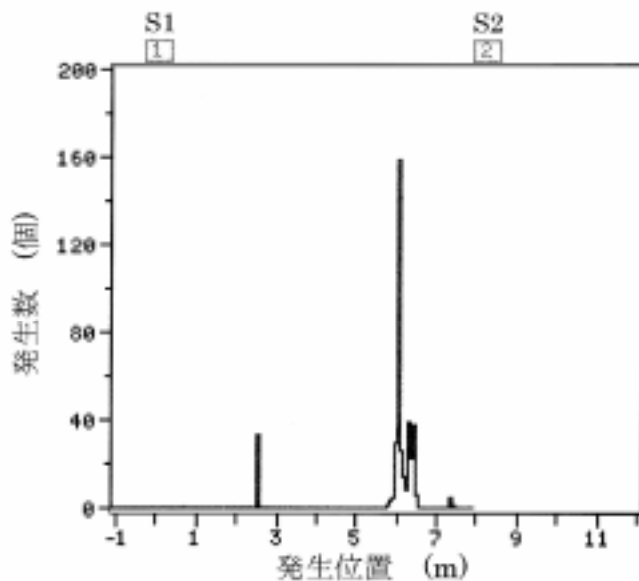


図 13 AE 発生位置



写真 4 計測対象配管の外観

AE 法適用による構造物のグローバル診断

を 10 分間で検出)する配管が 5 本発見され、これら配管の全てに腐食が観察された。現時点で、実配管の腐食量を定量的に評価することは困難であるが、腐食面積と、検出された A E エネルギー総量に、相関が認められた。

なお、計測対象 200m の配管のうち、ポンプ等の稼動設備の近傍に位置し、ノイズが 50dB 以上と大きく、計測困難な配管部の長さは、20m であった。

2.4. まとめ

配管の腐食進行に伴う A E 挙動を調べた結果、腐食活動度と検出された A E エネルギー総量との間に、相関が認められた。

また、実配管において AE 法による腐食検出の可能性を検討した結果、AE 計測により、腐食部を検出し、その部分の位置標定が可能であることが確認された。したがって、AE 法による配管の腐食損傷評価に対する実用性は、高いと考えられる。

腐食損傷評価において、腐食面積の評価が重要であるが、腐食深さ(減肉量)の評価も重要である。現在、A E 発生量と実配管との腐食損傷度との相関を確認するため、データベースを構築中である。今後、信頼性の高いデータが十分に蓄積され、評価方法や判定基準が確定できることが大いに期待される。

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、第 40 巻、第 4 号、pp.176-184, 2002.
- (2) 総務省消防庁、「地下に埋設される危険物施設の安全・環境対策に係る調査報告」、平成 14 年度報告書
- (3) HPIS G110 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、(社)日本高圧力技術協会、平成 17 年 5 月
- (4) 西本重人、竜王晋、海陸力他：気体リークの AE 計測と専用装置の開発、平成 17 年度秋季大会公演概要集(日本非破壊検査協会)、pp.195-199, (1995)
- (5) 湯山茂徳：アコースティックエミッション(AE)法による腐食損傷評価、防食技術、Vol.35, pp.163-170, (1986)