

配管における AE 源位置標定精度の定量的評価と実構造物への適用

湯山茂徳¹、李 正旺¹
山田 實²、林 高弘³

Quantitative Evaluation of AE Source Location Accuracy in Pipes during Field Application

Shigenori Yuyama, Zheng-Wang Li, Minoru Yamada, Takahiro Hayashi

概 要

製油所や化学プラントなどの配管における腐食損傷診断法として、AE 法が適用されている。AE 試験は、複数の AE センサーを適切に配置することにより可能な位置標定機能を利用し、AE 源となる腐食損傷部の位置をある程度特定化し、抽出するためのスクリーニング試験として用いられる。AE 試験を効果的に適用するには、実構造物における位置標定精度を、予め定量的に評価しておく必要がある。本研究では、石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）による、日本高圧力技術協会（HPI）への委託研究として行われた、配管における AE 源位置標定精度の定量的評価と、実配管への適用事例について報告する。

キーワード：AE、位置標定、スクリーニング試験、配管、腐食

1. はじめに

配管全体の健全性を評価する目的で、構造物全体をグローバルに診断でき、活性な腐食が存在する部位を抽出し、およその位置を評価可能なスクリーニング検査技術として、化学プラントや製油所の配管において、AE 法が適用されている⁽¹⁾⁽²⁾。

AE 試験を効果的に使用するには、実構造物における位置標定精度を、予め定量的に評価しておく必要がある。本研究では、石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）による、日本高圧力技術協会（HPI）への平成 18 年度委託研究として行われた、配管における AE 源位置標定精度の定量的評価と、実配管への適用事例について報告する。

2. 試験方法

2.1 直線（1次元）位置標定

モデル配管（2B、直径 2 インチ）を用い、シャープペンシル芯の圧折による擬似 AE

¹日本フィジカルアコースティクス株式会社、〒150-0011 東京都渋谷区東 2-17-10 岡本 LK ビル 8F、Nippon Physical Acoustics, Ltd. Okamoto LK Bldg. Higashi Shibuya-ku Tokyo, 150-0011

²消防庁 消防研究センター、〒181-8633 東京都三鷹市中原 3-14-1 National Research Institute of Fire and Disaster, 3-14-1 Nakahara Mitaka Tokyo 181-8633

³名古屋工業大学、〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 Nagoya Institute of Technology, Gokiso - cho Showa-ku Nagoya Aichi 466-8555

信号入力を与えた際に検出される AE 信号セットの、位置標定精度（誤差量）について定量的な評価を行った。

試験には、それぞれ R3I（30kHz 共振）、R6I（60kHz 共振）、そして R15I（150kHz 共振）AE センサーを 2 個用意し、モデル配管上で 2m の距離を隔てて（CH1 および CH2）設置した。CH1 からの距離が、0.2m、0.4m、0.6m、そして 0.8m の位置でシャープペンシル芯を圧折することにより擬似 AE 信号を入力し、デジタル AE 解析装置（PAC DiSP システム）に付属する、標準ソフトウェアを利用して直線位置標定を実施した。

2.2 平面（2次元）位置標定

国家石油備蓄基地などに存在する大口径の配管においては、配管側面が大きく広がる円筒面としての形状を持つため、単に長手方向の位置情報を与える直線位置標定では、平面的に分布する AE 源に関して十分な情報を得る事が出来ない。したがって、こうした大口径配管において、円筒面上の平面位置標定を適用し、擬似 AE 信号の入力に対する標定誤差を定量的に評価することにより、その適用性を検討した。

図 1 は、34B-B9 配管（直径 34 インチ）において、円筒面上の平面位置標定を実施するための AE センサー配置である。円周方向に等間隔（120°毎）に設置された 3 個の R6I センサーで構成されるセンサー配列 2 組を、互いに 2.5m の距離に設置した。図 2 に、試験実施状況が示されている。

2.3 腐食損傷部を有する実配管（水配管）の AE モニタリング

R3I、R6I、そして R15I センサー 5 個を、それぞれ 1.0m、2m、3m、3.5m の間隔で配置して連続 AE モニタリングを行った。

3. 試験結果と考察

3.1 直線（1次元）位置標定

図 3 に、CH1 から 0.4m の位置で擬似信号を入力し、音速として 5,000m/s（配管で伝播するガイド波において L(01)波の音速に近い速度）を用いた場合の位置標定結果が示されている。図中で横軸は配管の長手方向の位置を与え、X=0 が CH1 に、また X=2.0 が CH2 の位置に対応している。図中で、位置標定された AE イベントの位置が、棒グラフとして与えられている。

同様の解析を、音速 3,000m/s（F(01)波に近い速度）を用いて実施すると、音速として 5,000m/s を用いた場合に比べ、標定された AE イベント位置のバラツキが、やや大

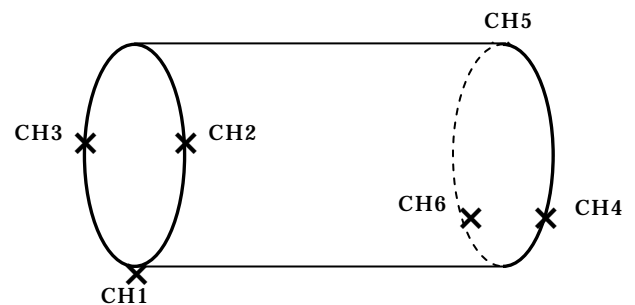


図 1 円筒面上において平面位置標定を実施するための AE センサー配置



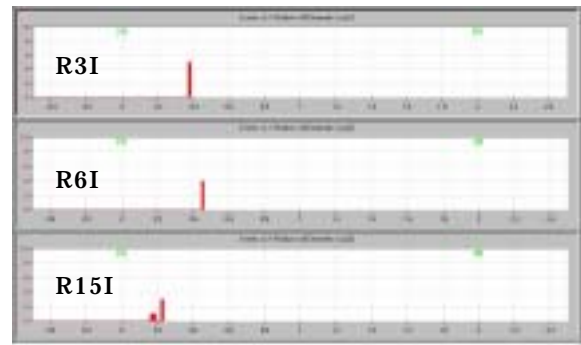
図 2 円筒面上における平面位置標定の精度評価を実施した国家石油備蓄基地における大型（34B-B9）配管

きくなる傾向のあることが確認された。

表 1 に、こうして得られた位置標定結果を基に、真の位置と標定位置との差をセンサー間距離（2m）で除し、百分率で示した相対誤差が、異なる音速（2,000m/s～5,000m/s）に対してまとめられている。音速として 5,000m/s を適用した場合には、いずれのセンサーで得られた結果でも誤差は数%程度である。しかしながら、音速が小さくなると、誤差は徐々に大きくなり、その傾向はとりわけ擬似信号入力位置が、センサー間の中心部から遠くなるほど（CH1側に近づくほど）顕著になる。

位置標定を実施した際に標定誤差を生ずる原因として、いくつかの要因が考えられ

表 1. モデル配管(2B)において、異なるシャープペンシル芯圧折位置（擬似信号入力位置）に対して、標定された位置の相対誤差



信号入力位置

図 3 擬似信号入力で検出された AE 信号の位置標定結果（音速：5000m/s、信号入力位置：CH1 から 0.4m）

入力位置	0.2m		0.4m		0.6m		0.8m	
	実験値 (平均値)	相対誤差 (%)	実験値 (平均値)	相対誤差 (%)	実験値 (平均値)	相対誤差 (%)	実験値 (平均値)	相対誤差 (%)
V=5000m/sec								
R3I	0.219	0.937	0.381	0.975	0.564	1.813	0.770	1.521
R6I	0.224	1.188	0.449	2.469	0.627	1.350	0.807	0.325
R15I	0.194	0.313	0.207	9.650	0.474	6.313	0.719	4.031
V=4000m/sec								
R3I	0.363	8.145	0.504	5.210	0.651	2.540	0.800	0.005
R6I	0.383	9.145	0.559	7.965	0.701	5.072	0.845	2.255
R15I	0.235	1.756	0.365	1.735	0.579	1.060	0.775	1.230
V=3000m/sec								
R3I	0.538	16.920	0.628	11.410	0.738	6.908	0.862	3.087
R6I	0.537	16.865	0.670	13.476	0.776	8.805	0.865	3.274
R15I	0.417	10.831	0.463	3.134	0.666	3.283	0.803	0.136
V=2000m/sec								
R3I	0.692	24.612	0.752	17.605	0.826	11.275	0.908	5.392
R6I	0.692	24.575	0.780	18.983	0.851	12.540	0.910	5.517
R15I	0.611	20.553	0.642	12.089	0.777	8.853	0.869	3.425

* 相対誤差 (%) = 100 × 誤差の絶対値 / 最大センサー間距離

る。それらは、例えば：

不適切な位置標定アルゴリズムの適用で生ずる誤差、

測定された各センサーへの信号到着時刻（すなわちセンサー間の信号到着時間差）が誤差を含むことにより生ずる標定誤差、

不適切な音速の適用により生ずる標定誤差、

などがある。直線位置標定を実施する際に用いられるアルゴリズムは、極めて単純であるため、本結果において が誤差を生じた主な原因になるとは考えにくい。したがって、表 1 に定量的にまとめられた標定誤差を生じた主な原因は、あるいは に起因するものと考えられる。

3.2 平面（2次元）位置標定

口径の大きな配管（例えば直径 34 インチ、あるいは 46 インチなど）においては、検出される AE 波の初期部分に関する限り、配管の長手方向に伝播するガイド波としての影響はほとんど無いと考えられる。したがって、伝播する波動をラム波として取り扱える。ここで対象となる周波数帯域（20～100kHz）に存在するモードは、分散曲線上で、いずれの場合でも S0（音速は約 5,300m/s）、および A0（音速は 2,700～3,000m/s 程度）となる。

図 4 に、配管の円筒面上におけるシャープペンシル芯圧折で検出された AE 源の平面（円筒面の展開図）位置標定結果が示されている。ここで位置標定計算には、ラム波の S0 モードの音速にほぼ等しい 5,300m/s を適用し、市販される標準的な平面位置標定ソフトウェアを用い、しきい値クロス時間より算出されるセンサー間信号到着時間差に基づく標定を実施した。

表 2 に、擬似 AE 信号入力位置、円筒面上の位置標定によって得られた AE 源位置、そして両者の差で規定される誤差（絶対値、および相対値）がまとめられている。ここで相対誤差（絶対誤差 / 最大センサー間距離 × 100%）は、最大でも 5% 以下であり、一般的に知られた、「平面位置標定における誤差は、最小でも最大センサー間距離の 5% 程度である。」という事実とよく一致している。

一方、ラム波の A0 モードの音速に近い、3,000m/s を適用して求めた位置標定結果によると、S0 モードの音速から得られた結果に比べ標定誤差が大きく、見かけの AE 発生源位置がばらついていることが確認された。したがって、本試験で行った平面位置標定において、S0 モードの音速を適用することが適切と考えられる。

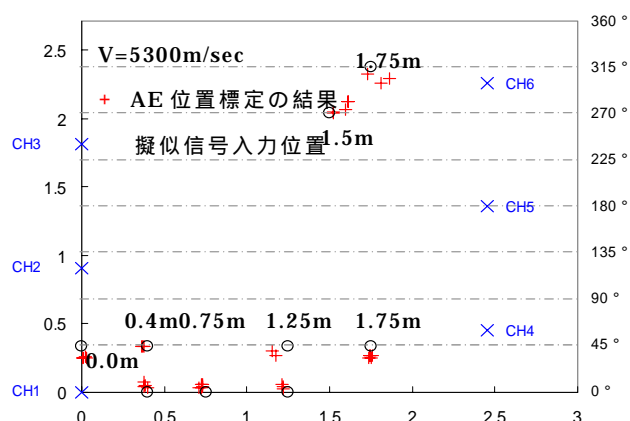


図 4 34B-B9 配管の円筒面上におけるシャープペンシル芯圧折による擬似信号入力で検出された AE 信号の平面（円筒面の展開図）位置標定結果

表.2 34B-B9 配管における円筒面上の平面位置標定で観察された誤差の一覧（但し、音速として 5,300m/s を利用した場合）

擬似AE信号の入力位置			実験値(平均値)		誤差(絶対値)		相対誤差(%)	
V=5080m/sec	x (m)	y(m)	x(m)	y(m)	x(m)	y(m)	x	y
0°	0.400	0.000	0.385	0.048	0.015	0.048	0.548	1.783
	0.750	0.000	0.724	0.046	0.026	0.046	0.972	1.702
	1.250	0.000	1.217	0.041	0.033	0.041	1.235	1.503
45°	0.000	0.339	0.017	0.255	0.017	0.085	0.621	3.136
	0.400	0.339	0.277	0.253	0.123	0.087	4.572	3.207
	1.250	0.339	1.163	0.283	0.087	0.056	3.225	2.092
	1.750	0.339	1.745	0.261	0.005	0.078	0.170	2.895
270°	1.500	2.035	1.571	2.078	0.071	0.043	2.632	1.601
315°	1.750	2.374	1.800	2.291	0.050	0.083	1.853	3.074

* 相対誤差(%) = 100 × 誤差の絶対値 / 最大センサー間距離

3.3 腐食損傷部を有する実配管の AE モニタリング

図 5 に、モニタリング結果の一例が示されている。R6I センサーで 10 分 52 秒間の連続計測で得られた AE 活動度を示したもので、5 個の AE センサーの連続配置による直線位置標定結果、AE イベント数の履歴、そして AE ヒット数の履歴である。

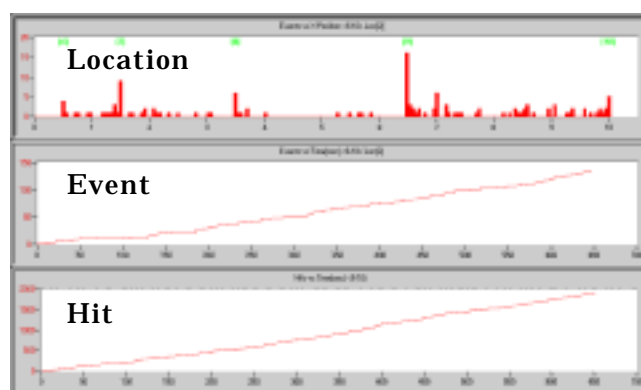


図 5 腐食損傷部を有する実配管における R6I センサーによる AE モニタリングの結果

位置標定結果に注目すると、イベントが局所的に集中している部分が存在し、R3I センサーおよび R6I センサーにおいて、集中位置はほとんど一致していた。AE 計測終了後、目視でその部分を観察すると、著しい腐食の生じていることが確認された。

検出された AE イベント数は、R3I センサーで 97、また R6I センサーではおよそ 130 で、両者に大きな差はない。既存の研究成果⁽²⁾によると、腐食生成物の破壊やはく離など、腐食に起因する AE 信号の主な周波数帯域は、20kHz ~ 100kHz にあることが報告されている。本試験で用いた R3I および R6I センサーの周波数帯域は、いずれもこの帯域に含まれるため、検出された AE 信号数に大きな差が生じなかったものと推察される。

一方、これらのセンサーより高周波数領域に感度特性を持つ R15I センサーの場合には、全体として位置標定結果に大きな違いは見られないが、検出されたイベント数は 18 のみであり、R3I あるいは R6I センサーに比べ桁近く小さな値であった。

図 6 に、R6I センサーで検出された、腐食に起因すると考えられる AE 波形セットの一例が示されている。位置標定が可能な信号セットとして、2 個のセンサーで検出されたものである。これらの波形は、極めて大きな信号継続時間を持ち、腐食に起因する典型的な AE 信号の特徴を有している。同一の信号セット（イベント）に対して R3I および R15I センサーでも波形セットが検出されたが、R15I では振幅値、エネルギー、信号継続時間いずれのパラメータ値も、R3I や R6I の場合に比べ非常に小さかった。

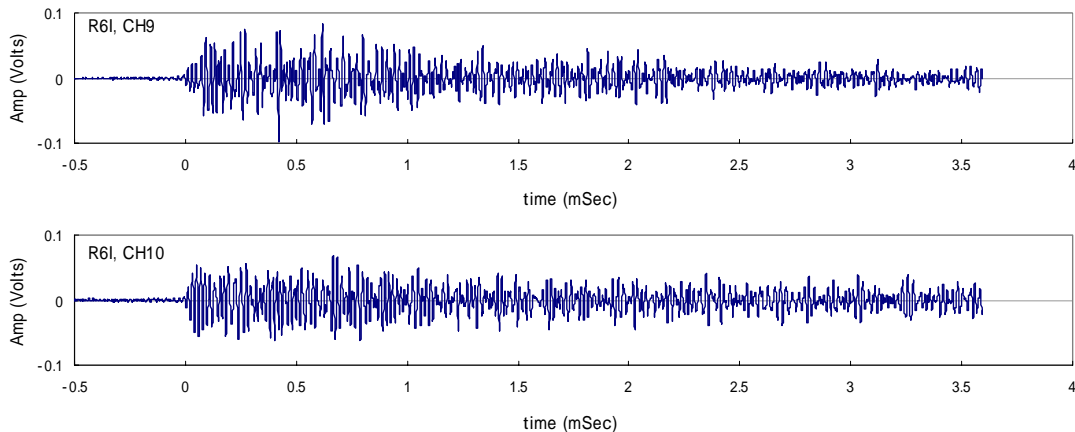


図 6 R6I センサーで検出された腐食に起因すると考えられる典型的な AE 波形

4. まとめ

モデル配管、および国家石油備蓄基地の大口径配管を用い、AE 計測時における直線、および平面位置標定の精度について定量的に評価し、さらに腐食損傷が存在する製油所の実配管（水配管）において AE 計測を行い、以下の結果を得た。

- (1) モデル配管（2B、直径 2 インチ）を用い、シャープペンシル芯の圧折による擬似 AE 信号入力を与えた際の相対誤差は、音速として 5,000m/s を適用した場合に、いずれのセンサーで得た結果でも、数%程度であることが明らかになった。
- (2) 国家石油備蓄基地の大口径配管（直径 34 インチ）において、円筒面上の平面位置標定を実施した結果、市販される平面位置標定ソフトウェア（しきい値クロス時間より算出されるセンサー間信号到着時間差に基づくアルゴリズムを利用）を用い、ラム波の S0 モードに相当する音速を適用することにより、極めて精度の高い（相対誤差は 5% 以下）位置標定の行えることが明らかになった。
- (3) 腐食損傷を有する製油所の実配管（水配管）において、AE モニタリングを実施した結果、腐食に起因すると考えられる AE 信号が 20～100kHz の周波数帯で顕著に検出され、AE 発生源の位置標定が可能であることが示された。

文献

- (1) 湯山茂徳、西田玉城：AE 法による地下埋設配管の腐食損傷診断、第 14 回 AE 総合コンファレンス論文集、2003 年 11 月（熊本）、日本非破壊検査協会、pp. 101-108
- (2) 湯山茂徳：配管の AE 検査の現状、第 7 回エネルギー貯槽等技術基準と安全性（HPI 技術セミナー）、pp.1-11、平成 18 年度