

配管における AE 波の伝播・減衰に関する基礎的検討

湯山茂徳¹、李 正旺¹
山田 實²、林 高弘³

Fundamental Studies of AE Wave Propagation and Attenuation in Pipes

Shigenori Yuyama¹, Zheng-Wang Li¹, Minoru Yamada², Takahiro Hayashi³

概 要

製油所や化学プラントなどにおいて、信頼性の高い配管の腐食損傷診断法の確立が望まれている。活性な腐食を検出する検査方法として AE 法は、配管の腐食損傷部の評価技術として使用されつつある。AE 法を配管に適用するには、配管における AE 波の伝播特性を正確に把握しておく必要がある。配管中を伝播する弾性波はガイド波として知られ、これまでに詳細な理論的解析がなされ、特性が明らかにされている。本稿では、擬似 AE 波の入力による AE 波の配管中における伝播特性を、ガイド波の理論に基づいて解析し、様々な波動モードの音速、減衰特性などについて、基礎的に検討した結果を報告する。なお本研究は、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実施されたものである。

キーワード：AE、音速、ガイド波、減衰、スクリーニング試験、配管、腐食、分散曲線

1. はじめに

地上および埋設配管には、タンクのような定期開放検査の義務はなく、使用者の自主保安により維持管理がなされ、健全性が担保されている。例えば、地上配管においては、自主検査として超音波（UT）による定期的な板厚の定点測定が行われているが、離散的な測定で、最大腐食損傷部（最大減肉部）を必ずしも検出できるとは限らない。したがって、配管全体の健全性を評価するためには、多少精度が低くても、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、またそのおよその位置を評価可能なスクリーニング検査技術が非常に有効と考えられる。

本研究では、配管の腐食損傷評価において、グローバル診断・スクリーニング検査技術として期待される AE 法の適用性を調査するため、製油所の配管および国家石油備蓄基地の配管に対して、擬似 AE 信号の入力で検出される実測 AE 波形を詳細に解析し、数値計

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

算で理論的に得られる波形モードや音速と比較・対照することにより、実配管における AE 波伝播に関する基礎的な検討を行った。なお本研究は、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実施されたものである。

2. 試験方法

2.1 製油所の配管

製油所設備の一部である実配管を用い、シャープペンシル芯の圧折あるいは圧電パルサーへのスパイク状電気信号の入力により、配管表面で擬似 AE 信号を発生させ、異なる距離に設置した AE センサーで AE 波を検出して、配管中を伝播する AE 波の減衰評価を行い、また音速を導出した。表 1 に、試験に供した配管の緒元がまとめられている。AE 波の計測には、内部が原油で満たされた状態と、空状態の 2 つの異なる条件下にある配管を用意した。

表 1 AE 波伝播試験に用いた製油所配管の緒元

配管寸法	設計厚	種類の記号	計測対象
4 B	4.5	SGP	空配管
6 B	5.0	SGP	空配管、水配管、原油配管
8 B	5.8	SGP	空配管、原油配管
10 B	6.6	SGP	空配管、原油配管

AE 波の検出には、R3I（30kHz 共振型）AE センサー、R6I（60kHz 共振型）AE センサー、そして R15I（150kHz 共振型）AE センサーを用いた。また、擬似 AE 波の発生には、シャープペンシル芯の圧折と、30kHz 共振型（R3）、60kHz 共振型（R6）、および 150kHz 共振型（R15）パルサーをそれぞれ用いた。

2.2 国家石油備蓄基地（国備）の配管

国家石油備蓄基地設備の一部である実配管を用い、圧電パルサーへのスパイク状電気信号の入力により、配管表面で擬似 AE 信号を発生させ、異なる距離に設置した AE センサーで AE 波を検出して、配管中を伝播する AE 波の減衰を評価し、音速を導出した。表 2 に、試験に供した配管の緒元がまとめられている。なお AE 波の計測は、内部が原油で満たされた状態で行われた。

表 2 AE 波伝播試験に用いた国備配管の緒元

配管寸法	設計厚	材料	塗装の有無	断熱材の有無
46 B	12.7	API 5LX Gr.X46	有	無
34 B	9.5	API	有	無
16 B	7.9	API	有	無

3. ガイド波の理論

活性な腐食を発生源とする AE 波は、配管中を弾性波として伝播する。こうした配管中を伝播する波動は、非破壊検査の分野でガイド波として知られ、理論的な解析が行われて

いる⁽¹⁾。

ガイド波の音速は、配管径、管厚、材質、周波数などに大きく依存し、音速の異なる多数のモードが発生する。それぞれのモードは周波数により、音速の異なる分散性を示し、位相速度と群速度を与える。腐食に起因する AE 信号、および擬似 AE 信号の発生源として用いたシャープペンシル芯の圧折、あるいは電気パルスの圧電パルサーへの入力は、いずれもパルス波（波束）として伝播するので、実用的には AE 波の伝播には、群速度を適用することが適切と考えられる。

検査現場や研究現場におけるガイド波理論の問題を解決するために、ガイド波に関する数値計算ソフトウェアが開発されている⁽¹⁾。数値計算には、半解析的有限要素法という長手方向には要素分割しない有限要素法の特殊解法が利用されている。これにより、ガイド波解析に必要な、位相速度、群速度の分散曲線を導出することが可能である。本研究では、このソフトウェアを、AE 波伝播の実測を行った配管に適用し、分散曲線を求めることにより、配管中の波動伝播について、理論的側面より考察した。

ガイド波のモードは、便宜的・慣例的に T モード、L モード、F モードという名前が付けられている。多くの説明では、T はねじり（Torsional）、F は屈曲（Flexural）、L は縦（Longitudinal）を表すとされている。ここで、縦波振動は面内運動であるため AE センサーで検出されたとしても感度が低いと推察される。したがって、実測で観察される AE 波は、主として屈曲振動の横波音速程度以下のモードを捕らえている可能性が高いと考えられる。本解析では L、および F モードの群速度分散曲線のみを取り扱った。

図 1 に、一例として 6B（直径 6 インチ）配管における L、および F モードの群速度分散曲線が与えられている。一方、口径の大きな 34B-B8（直径 34 インチ）および 46B-B6（直径 46 インチ）配管においては、ラム波として解析し、群速度（配管中ガイド波の L、F モードに対応）を求めた。図 2 に、一例として 34B-B8 配管に対して求めたラム波の群速度が、示されている。

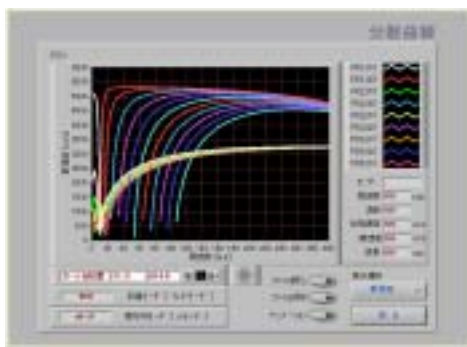


図 1 配管 6B の L モードと F モードに対する群速度

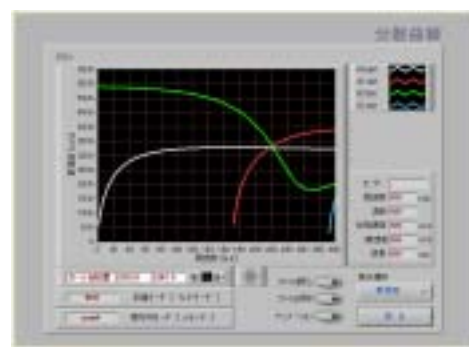


図 2 配管 34B-B8 における、ラム波の群速度

4. 試験結果

4.1 製油所の配管

人為的に起振された AE 信号は、その発生位置から、0.5m（CH1）、1.5m（CH2）、3.5m（CH3）、6.5m（CH4）、および 10.0m（CH5）の距離に設置した同種類の AE センサーで検

出し、デジタル AE 解析装置を用いて波形データとして記録した。

図 3 に、R3 パルサーで擬似 AE 信号を入力した際に、異なる位置に配置した R3I センサーで検出された AE 波形セットの一例を示す。AE 波の伝播距離が大きくなると共に AE 波のセンサーへの到着時刻が遅れ、また一つの波形中に異なるモードの存在することが観察される。図 4 は、図 3. に示される CH1 で検出された波形の横軸を拡大した部分波形で、音速が異なる（信号到着時刻が異なる）すなわちモードの異なる第 1 波、第 2 波、そして第 3 波の到着が明確に識別できる。

図 5 は、原油配管 6B において、R3 パルサー / R3I センサーの組み合わせで得られた減衰曲線である。横軸に擬似 AE 信号発生位置から信号の検出された位置

（各センサーの設置位置）までの距離を、また縦軸に第 1 波、第 2 波、第 3 波の目視読み取りによる振幅値が示されている。さらに参考のため、AE 計測装置で自動的に読み取られる、1 波形データを 1 ヒット（信号）とみなした場合の振幅値データが与えられている。

原油配管6B横センサー (R3パルサー音源、R3Iセンサー)

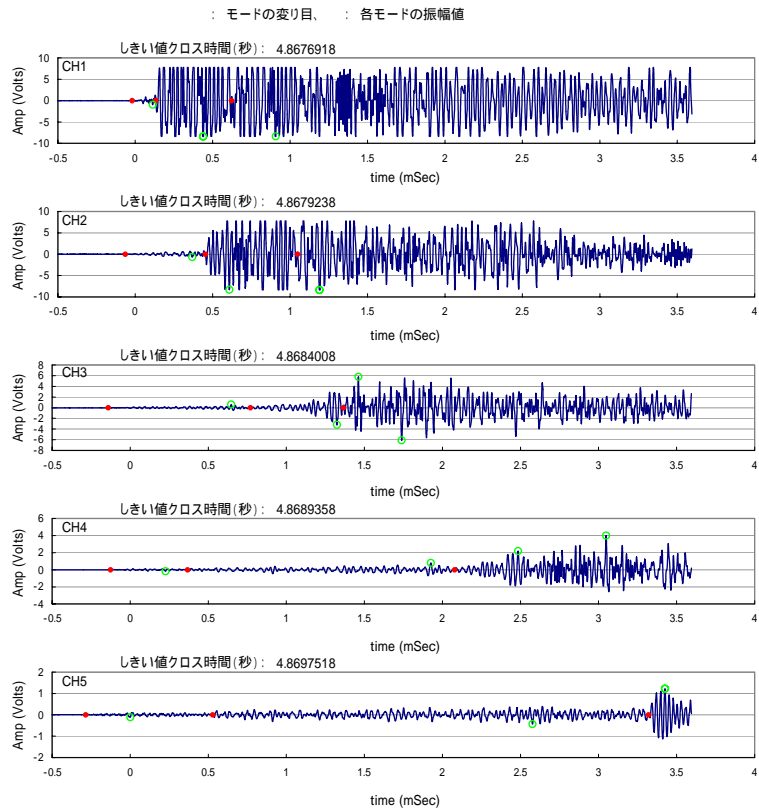


図 3 原油配管 6B において擬似信号 (R3 パルサー入力) の入力により R3I センサーで検出された波形セット例

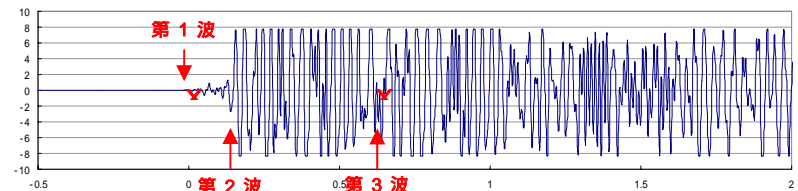


図 4 図 3 に示される CH1 の拡大波形

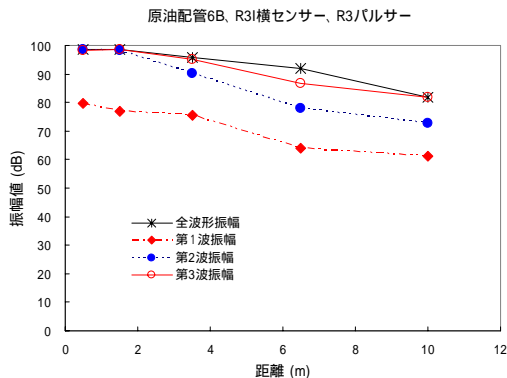


図 5 原油配管 6B における減衰曲線

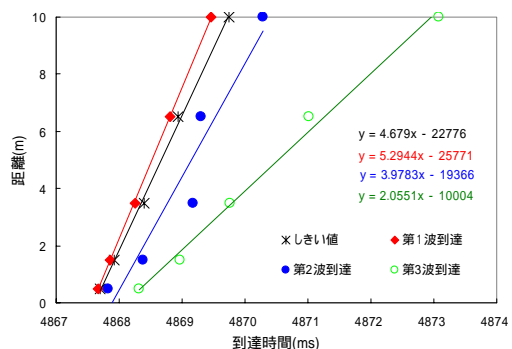


図 6 原油配管 6B における音速導出図

この図から、原油で満たされた 6B 配管における、30kHz 付近の周波数帯域における AE 波の減衰は、伝播距離が小さいうちは極めて小さく、10m 程度伝播した場合に、15～20dB 程度であることが確認される。

図 6 は、横軸に AE 信号が各センサーで検出された時間（波形観察による目視読み取り値）を、また縦軸に擬似 AE 発生源から信号が検出されたセンサー位置までの距離を示してある。モードの異なる第 1～3 波のデータに加え、通常の AE 信号処理で行われるしきい値クロス時間に基づく時間データも示されている。本図は AE 信号の伝播距離と、伝播に要した時間との関係を表すもので、その傾きが対象となる波動モードにおける見かけの音速を与えることになる。図中に示されるように、第 1 波の見かけの音速は約 5,294m/s、第 2 波は 3,978m/s、第 3 波は 2,055m/s、そしてしきい値クロスデータに基づく音速は 4,679m/s であることが確認される。

表 3 に、本試験で AE 波形の実測を行った全ての配管において得られた、見かけの音速がまとめられている。

表 3 製油所配管において擬似 AE 源に起因する AE 波入力で得た見かけの音速

配管	音源/ AEセンサー	音速(m/sec)			
		しきい値	第1波到達	第2波到達	第3波到達
空4B	R3/R3I	5231	5170	3115	2690
	R6/R6I	5055	4805	3707	3046
空6B	R3/R3I	4968	5240	2805	2382
	R6/R6I	4070	5329	2919	2656
	R15/R15I	4032	4243	3132	2857
	Pencil/R3I	2626	3297	2370	1879
	Pencil/R6I	2687	2838	2795	2441
	Pencil/R15I	2742	2871	2867	2949
空8B	R3/R3I	5009	4875	2804	3823
	R6/R6I	5014	5359	3052	2468
空10B	R3/R3I	5202	5377	3502	3169
	R6/R6I	5224	5374	4125	4269
原油6B	R3/R3I	4679	5294	3978	2055
	R6/R6I	3885	5290	1786	1740
	R15/R15I	2987	5328	1966	1891
	Pencil/R3I	2635	4608	1796	1539
	Pencil/R6I	1800	2421	1780	1770
	Pencil/R15I	1736	1906	1833	1766
原油8B	R3/R3I	4880	5276	1798	1892
	R6/R6I	5010	4766	1861	1554
原油10B	R3/R3I	4658	5277	3656	1986
	R6/R6I	5321	4747	2360	1945
水6B	R3/R3I	4596	5348	2107	1977
	R6/R6I	2875	5376	2118	1806
	R15/R15I	1746	1696	1758	1699
	Pencil/R3I	2867	3860	2175	2116
	Pencil/R6I	2141	5236	2094	2081
	Pencil/R15I	1715	1919	1723	1657

4.2 国家石油備蓄基地の配管

人為的に起振された AE 信号は、その発生位置から、0.5m (CH1)、1.5m (CH2)、3.5m (CH3)、6.5m (CH4)、および 8.5m (CH5) の距離に設置した同種類（共振周波数が同一）の AE センサーで検出し、デジタル AE 解析装置を用いて波形データとして記録した。表 4 に、本試験で AE 波形の実測を行った、全ての配管において得られた見かけの音速がまとめられている。

表 4 国備配管において擬似 AE 源に起因する AE 波入力で得た見かけの音速

配管	音源/ AEセンサー	音速(m/sec)			
		しきい値	第1波到達	第2波到達	第3波到達
原油46B-B6	R3/R3I	5284	5307	3335	2003
	R6/R6I	5251	5295	5077	3548
原油34B-B8	R3/R3I	5244	5302	1980	1413
	R6/R6I	5304	5354	5338	1508
原油16B-C10	R3/R3I	5308	5327	2115	1925
	R6/R6I	5309	5338	2072	1759

5. 考察

表 2、および表 4 中にまとめられた音速値を全体的に眺望した場合、通常の配管（2B～16B 程度の口径を持つ配管）における第 1 波の音速は、高周波数帯域の計測を行う R15I センサーの場合以外、ほとんどは 5000m/s 以上の値を与えている。これは、分散曲線上に示される数値計算で理論的に求められた L(01,01) の音速と、ほぼ一致している。また第 2 波の音速は、大きく分けて 2,000m/s 前後、及び 3,000m/s 前後の 2 つのグループに分けられるが、これらは F(01,01) に対応している可能性がある。しかしながら、第 2 波以降の波形では、波束到着時刻の読み取りに誤差が混入する可能性が高いため、波形実測値から求めた音速が、必ずしも精度の高い解析に基づくものでないことに注意を要する。

口径の大きな配管（34B-B8、および 46B-B6）においては、伝播する波動をラム波として取り扱った。理論的音速値と、実測結果で得られた音速値を比べると、第 1 波が S0 モードに対応する事は明らかであるが、第 2 波が必ずしも A0 に対応するとは言えない値を示している。

5. まとめ

製油所、および国家石油備蓄基地の実配管において、AE 波伝播に関する基礎的な検討を行った。以下にその結果をまとめてある。

- (1) 合計 10 種の配管において、シャープペンシル芯の圧折、およびパルサーによる擬似 AE 信号を入力し、検出された実測波形を用いて減衰曲線を求め、さらに分離して観察される異なるモードの波形に対して音速を評価した。
- (2) 半解析的有限要素法という長手方向には要素分割しない有限要素法の特殊解法に基づく数値計算ソフトウェアを用いて、群速度の分散曲線を導出した。また大口径配管（34B）においては、ラム波の分散曲線を導出した。
- (3) 実測結果と理論解析結果を比較することにより、通常の配管（16B 以下の口径）及び大口径の配管において、実測波形から導出された第 1 波が、数値計算により理論的に得られる L(01,01)、および S0 モードに対応する事が明らかになった。

文献

- (1) 林 高弘：配管検査のためのガイド波理論と将来技術、非破壊検査第 54 巻 11 号、p.p.590-594、(2005)