ニューラルネットワークを利用した鋼板の腐食位置標定*

稲葉 藍子^{*1}, 本間 恭二^{*2}, 村上 小百合^{*2}
小池 卓二^{*2}, 山田 實^{*3}

Corrosion Source Location in Plate of Steel Using Neural Network

Aiko INABA, Kyoji HOMMA^{*4}, Sayuri MURAKAMI,
Takuji KOIKE and Minoru YAMADA^{*4} Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications,
1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

A new technique to locate a defect, combining acoustic emission and neural network, is proposed to assess the condition of the storage tank floor. Artificial acoustic emission source by means of a pencil lead break and acoustic emission source cause of corrosion in steel plate is located using neural network trained by time lag of artificial acoustic emission, P-wave, S-wave and Rayleigh wave. It turned out that artificial acoustic emission arrived at sensor is P-wave and acoustic emission course of corrosion is S-wave or Rayleigh wave. Same experiment is made on a specimen of bottom plate of real tank. As a result, corrosion source location using neural network is possible steel plate extended corrosion.

Key Words: Acoustic Emission, Neural Network, Nondestructive Inspection, Corrosion, Location

1. 結 言

屋外石油タンクの腐食損傷による危険物の漏洩を防ぐため、タンク底板の腐食の進行をモニタする技術開発が求められている¹⁾。その一つとしてアコースティック・エミッション (AE) 法が注目されており²⁾、AE 発生数から腐食の活性度を測定できることなどが知られている³⁾。また、ニューラルネットワーク (NN) を利用したパイプの欠陥位置検出技術の開発も試みられており^{4)~6)}、位置標定に有効であることが確かめられている。

そこで、本研究では、危険物貯蔵施設の健全性確保を目指して、鋼板が腐食することで発生する AE を計測し、NN を利用した腐食源位置標定の可能性を調べた。

始めに、ピットを設けた鋼板を用いて、擬似 AE 波と腐食のときに発生する AE 波の種類の違いを調べた。次に、NN の学習点数が位置標定精度に与える影響について調べ

た。

2. 鋼板の腐食 AE 源位置標定

位置標定は AE 波が最初にセンサへ到達する時刻を求めることが必要となる。このとき AE 源で発生した波の種類や大きさによって、センサで受信する波形は異なるため、最初に到達する波がどのようなものであるかを調べた。

2.1 試験片と実験装置 石油タンク底板に使われている SS400 の板材 (200mm×250mm×6mm) に、腐食ピットを想定したものを 2 箇所 (Pit 1: 直径 10mm, 深さ 3mm, Pit 2: 直径 3mm, 深さ 1.5mm) 作製した。試験片を図 1 に示す。4 つの AE センサ (R15, PAC 製) に真空グリスを塗布し、マグネットジグを用いて試験片の四隅に固定した。プリアンプ (1220A, PAC 製) により AE 波形を 40dB 増幅し、AE 測定器 (Disp-TRA, PAC 製) に取り込んだ。

2.2 NN を用いた位置標定 NN の計算はニューラルネットワークシミュレータ (SNS) を使い、学習アルゴリズムはバックプロパゲーション法とした。

* 原稿受付 2004 年 4 月 20 日。

^{*1} 電気通信大学大学院電気通信学研究科 (〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1)。

^{*2} 正員、電気通信大学知能機械工学科。

^{*3} 正員、独立行政法人消防研究所 (〒181-8633 三鷹市中原 3-14-1)。

E-mail: homma@bio.mce.uec.ac.jp

Fig. 1 Specimen with etch pit

NNへの入力にAE波の各センサへの到達時間差，出力はAE発生位置とし，式（1）により各データの正規化を行った。

$$x = x_0 / x_{\max} \times 0.6 + 0.2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

x_0 : 個々の到達時間差（入力）と座標（出力）

入力値の $x_{\max}$ には x が 0.8 を超えないような任意の値を設定し，出力値の $x_{\max}$ はセンサ間の最大距離を用いて，データが 0.2～0.8 の範囲に入るよう正規化を行なうことで最適化した。

2・3 波動の種類 シャープペンシルの芯を圧折することにより発生する擬似 AE 波と，腐食により発生する AE 波とは波動の種類やエネルギーが大きく異なる。そこで，それぞれの AE 波が，ある一定距離を伝播してセンサに到達したとき，縦波，横波，レイリー波のいずれの波動であったかを調べた。

2・3・1 擬似 AE の位置標定 ビット内でシャープペンシルの芯を圧折することで擬似 AE を発生させ，その位置標定を行なった。NN の学習には以下の 3 通りの学習データを用い，波動の種類を推定した。また，NN の学習回数は 1 万回とした。

- (1) 擬似 AE 到達時間差
- (2) 縦波理論音速から計算した到達時間差
- (3) 横波理論音速から計算した到達時間差

学習点は 47 箇所とした。図 2 (1)～(3) にそれぞれの場合の位置標定結果を示す。

擬似 AE 到達時間差および縦波理論音速（5960[m/s]）を用いて学習を行なった場合はピット位置に標定されたが，横波理論音速（3240[m/s]）を用いた場合はピットの遠方に標定された。このことから，擬似 AE 発生によりセンサに到達した波は縦波であると推定される。

2・3・2 腐食 AE の位置標定 ビット内に鉄粉，木炭等の触媒を添加した 3%NaCl 水溶液を加えて腐食を促進させた場合と，3%NaCl 水溶液のみを加えて腐食を促進させた場合に発生した AE を計測して位置標定を

行ない，結果を比較した。NN の学習には次の 4 通りの学習データを用いた。

(1) Artificial AE

(2) P-wave

(3) S-wave

Fig. 2 Presumed source location of artificial AE

(1) Artificial AE

(2) P-wave

(3) S-wave

(4) Rayleigh wave

Fig. 3 Presumed source location

- (1) 擬似 AE 到達時間差
- (2) 縦波理論音速から計算した到達時間差
- (3) 横波理論音速から計算した到達時間差
- (4) レイリー波音速から計算した到達時間差

結果を図 3 に示す。触媒を入れた場合の結果を Acc, 3%NaCl 水溶液のみの場合の結果を Aq として表した。

擬似 AE 到達時間差と縦波理論音速 (5950[m/s]) を用いて学習した場合、ピット遠方に標定点が集中し、ピット位置にはほとんど標定されなかった。しかしながら、横波理論音速 (3240[m/s]) とレイリー波音速 (2980[m/s]) とを用いて学習した場合は、ピット近傍に標定された。このことから、腐食 AE では横波もしくはレイリー波 (データからは判別できない) がセンサに到達したことがわかった。腐食 AE は擬似 AE と比較して波のエネルギーが非常に小さいため、減衰の大きい縦波が消失したものと考えられる。

これらの結果から、擬似 AE と腐食 AE では種類の異なる弾性波を検出していることがわかった。

2.4 学習点数が精度に及ぼす影響 学習点数を 15 点、9 点と減少させ、学習点数が精度に及ぼす影響を調べた。NN の学習回数は 1 万回とした。

2.4.1 擬似 AE の位置標定 図 1 に示した試験片において、22 箇所の位置で擬似 AE を 1 点 1 点発生させた。発生位置を図 4 の×印で示す。これらのうち、15 箇所又は 9 箇所が発生させた擬似 AE の到達時間差を NN への入力値として NN の学習を行なった。その後、学習点を含む 22 箇所の擬似 AE について位置標定を行ない、その精度を比較した。標定結果を図 5 に示す。

どちらの学習でも擬似 AE 発生位置はほぼ同じ位置に標定されており、学習点間隔を 100[mm]程度としても、その間にある点の標定が可能であることが定性的に確かめられた。

これらの標定誤差は式 (2) により求めた。ただし、 x, y は学習後の出力値、 X, Y は擬似 AE 源の正しい座標、 D はセンサ間の最大距離を表す。

$$Err[\%] = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2} / D \times 100$$

..... (2)

新たに 47 箇所の学習を加えて誤差を比較したものを表 1 に示す。最大誤差、平均誤差を比較すると 15 箇所の学習の誤差が最も小さくなった。47 箇所の学習と比較して、学習箇所を減少させた場合においても、定量的にも著しい違いはなかった。これらの結果より、学習点と離れた位置に関しても著しく標定精度が落ちることはないことがわかった。

Fig. 4 Training point, actual point, sensor arrangement and pit location

Training point : 47

Training point : 15

Training point : 9

Fig. 5 Presumed source location (×:Actual point, ◆:Presumed point of Training point, —:Presumed point)

Table 1 Comparison with a major of error

	Training point: 47		Training point: 15		Training point: 9	
	distance[mm]	error[%]	distance[mm]	error[%]	distance[mm]	error[%]
max.	17.35	5.42	15.03	4.69	17.40	5.44
ave.	8.44	2.63	7.38	2.31	7.71	2.41
min.	1.99	0.62	1.18	0.37	0.44	0.14

2.4.2 腐食 AE の位置標定 図 1 に示した試験片のピット内に、触媒を添加した 3%NaCl 水溶液を加

えて腐食を促進させ、発生した腐食 AE を計測して位置標定を行なった。

2・3 節より得られた擬似 AE と腐食 AE での受信波の種類の違いを考慮して、学習データにはレイリー波速度から求めた到達時間差を用いた。学習点を 15 箇所とした場合と 9 箇所とした場合について位置標定を行なった。学習回数は 1 万回とした。標定結果を図 6 に示す。また、式 (2) により求めた誤差の比較を表 2 に示す。

15 箇所、9 箇所と学習点を減少させたが、どちらの場合もピット位置に多く標定点が見られた。また、表 2 より、定量的にも著しい違いは見られなかった。これらの結果より、腐食位置近傍に多くの学習点を配置しなくても腐食位置標定が可能であることがわかった。

Fig. 6 Presumed source location of corrosion

Table 2 Comparison with a major of error

	Training point : 15		Training point : 9	
	distance[mm]	error[%]	distance[mm]	error[%]
max.	87.88	35.15	89.85	35.94
ave.	14.72	5.89	15.81	6.32
min.	0.37	0.15	0.36	0.14

2・5 実タンク底板の腐食位置標定 腐食の進行した実タンクの底板を切出した試験片において、鉄粉、木炭等の触媒を添加した 3%NaCl 水溶液を加えてさらに腐食を促進させた (図 7)。そのとき発生した AE を計測して位置標定を行ない、有効性を検討した。

(a) の試験片は、比較的腐食が進行しておらず、表面に赤錆が多く見られた。(a) について、NN の学習に次の 3 通りの学習データを用いて位置標定を行なった。

- (a-1) 擬似 AE 到達時間差
- (a-2) 横波理論音速から計算した到達時間差
- (a-3) レイリー波音速から計算した到達時間差

一方、(b) の試験片はかなり腐食が進行しており、錆こぶや貫通穴の箇所も見られた。この試験片は腐食面

の凹凸が激しいため、腐食面へのセンサの設置が困難なことから、センサを腐食面の裏面に設置し、NN の学習に次の 3 通りの学習データを用いて位置標定を行なった。

- (b-1) 縦波理論音速から計算した到達時間差
 - (b-2) 横波理論音速から計算した到達時間差
 - (b-3) レイリー波音速から計算した到達時間差
- それぞれの位置標定結果を図 8 (1)~(3)、図 9 (1)~(3) に示す。

この結果、試験片 (a) については横波、レイリー波の理論音速から計算した学習データを用いた場合は腐食位置とその近傍に多く標定点が見られたが、擬似 AE 到達時間差を学習データとして用いた場合は腐食位置より離れた点に標定された。試験片 (b) については、試験片 (a) の場合と同様に、縦波理論音速から計算した学習データを用いた場合は腐食位置から離れた点に標定されたが、横波の理論音速から計算した学習データの場合は、腐食位置とその近傍に多く標定点が見られた。しかしながら、レイリー波音速を用いた場合は、腐食位置近傍に標定されたものの腐食位置に標定された点はなかった。この原因として、表面波であるレイリー波は媒質の表面に沿って伝わることから、腐食面の裏面に設置したセンサに直接に到達したのではなく、端面から反射した波が到達したことが考えられる。

これらのことから、試験片の腐食状態に関わらず、腐食 AE としてセンサに到達する波は横波もしくはレイリー波であることがわかった。また、腐食が進行している場合においても NN を利用して腐食位置標定が可能であることがわかった。理論音速を用いて NN の学習が可能であることから、屋外石油タンクなどの擬似 AE を発生させることが困難な場合にも利用できると考えられる。

(a) Initial corrosion (b) Extended corrosion
Fig. 7 Specimen (Bottom plate of real tank)

3. 結 言

屋外石油タンクの底板に用いられている鋼板を対象として、その腐食ないし擬似 AE で発生する AE 波を 4 つの AE センサで計測し、波の到達時間差と位置の情報を NN で学習することにより、AE 波の種類ならびに AE 発生位置を標定した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 鋼板上に設定した学習点からセンサまでの AE 波の理論到達時間差を用いて NN の学習を行ない、AE 源の位置標定を行なったところ、シャープペンシルの芯の圧折による擬似 AE の場合は、縦波がセンサに到達していることがわかった。また、人為的に発生させた腐食 AE を標定した結果、腐食 AE の場合はレイリー波（もしくは横波）がセンサに到達していることがわかった。
- (2) 腐食の進行した実タンク底板から切出した試験片で人為的に発生させた腐食 AE の位置標定を行なった結果、腐食がかなり進行している場合でも腐食位置標定ができることがわかった。
- (3) 本実験の範囲では NN の学習点の数は位置標定精度に影響を与えないことがわかった。

参考文献

- 1) 湯山茂徳ほか, 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 (2002), pp. 176-184
- 2) 山田實ほか, AE 法による石油タンク底部の腐食損傷評価, 圧力技術, 40-4 (2002), pp. 222-227
- 3) Ferrer F. *et al.*, Acoustic Emission study of active-passive transitions during carbon steel erosion-corrosion in concentrated sulfuric acid, Corrosion Science, 44 -7 (2002), pp. 1529-1540
- 4) 消防研究所, ニューラルネットワークを用いた AE 源位置標定, 消防研究所報告第 89 号 (200. 3)
- 5) 消防研究所, ニューラルネットワークによる模型タンク底板の AE 源位置標定, 消防研究所報告第 91 号 (2001. 3)
- 6) 真家敦子ほか, ニューラルネットワークによる AE 源の位置標定およびその誤差評価に関する研究, 日本機械学会論文集, 65-634, A (1999), pp. 1187-1192
- 7) 岡村由香ほか, ニューラルネットワークを利用したエルボ型管継手の擬似 AE 源位置標定, 非破壊検査, 51-11 (2002), pp. 726-732
- 8) Salvatore B. *et al.*, Leak Detection in Liquefied Gas Pipelines by Artificial Neural Network, AIChE Jomal, 44-12 (1998), pp. 2675-2688

Fig. 8 Presumed source location of corrosion (specimen (a))

Fig. 9 Presumed source location of corrosion (specimen (b))