

内面の粗さと曲率を考慮した電磁超音波共鳴法による配管減肉評価

Evaluation of pipe wall thinning with electromagnetic acoustic resonance method considering effects of roughness and curvature of inner surface.

| | | | |
|------|-------|------------------|----------------|
| 東北大学 | 木村 周平 | Shuhei KIMURA | Student Member |
| 東北大学 | 武田 翔 | Sho TAKEDA | Member |
| 東北大学 | 内一 哲哉 | Tetsuya UCHIMOTO | Member |
| 東北大学 | 遊佐 訓孝 | Noritaka YUSA | Member |
| 東北大学 | | Gildas DIGUET | Non-member |

Abstract

Electromagnetic acoustic resonance (EMAR) method is useful for measuring thickness of pipe. But in the case of thickness changing complicatedly in part of pipe wall thinning for various factor, accurate thickness measurement is difficult. In this study, thickness of specimens of pipe corroded under various conditions is evaluated by EMAR. The error of thickness evaluation is investigated in view of maximum value of spectrum and roughness and curvature of pipe. As a result, it is suggested that signal strength is important factor in EMAR measurement accurately.

Keywords: Electromagnetic acoustic resonance method , Electromagnetic acoustic transducer, thickness measurement, Flow Accelerated Corrosion, pipe wall thinning

1. 緒言

2004年8月の美浜原子力発電所での配管の破断事故は流れ加速型腐食が原因によるものであり[1], このような事故を未然に防ぐため, 配管の減肉を適切に評価することで設備の安全性と信頼性を保つことが重要である.

一般的な配管減肉検査手法の一つとして圧電探触子を用いた超音波試験がある. しかしながら, この試験法は接触媒質を必要とするため高温等の極限環境下にある配管に対して適用するのは困難であり, 非接触で配管肉厚を評価可能な方法が求められている. そこで超音波試験に代わる試験手法として, 電磁超音波探触子 (Electromagnetic acoustic transducer, EMAT) の配管肉厚の評価への適用が試みられている[2]. EMAT は非接触で試験が可能のため, 検査面に影響されずに肉厚を測定できるという利点がある. また, 圧電探触子に比べ信号強度が弱く SN 比が小さいという点を改善するため, EMAT を用いた電磁超音波共鳴法 (Electromagnetic acoustic resonance method, EMAR) も提案されている. この手法では, 共鳴周波数の間隔から試験片の肉厚を精度よく測定することができる.

腐食によって表面形状が複雑に変化している場合には EMAR を適用しても超音波が散乱し共鳴周波数から肉厚を評価することが困難となるが, このような時の信号処理法として N 周期加算法 (Superposition of nth Compression, SNC) が提案されている. SNC は共鳴周波数が基本周波数の整数倍に現れることを利用した信号解析手法であり, スペクトルが複雑でも基本周波数を評価し, 肉厚を推定することができる[3]. 一方で, SNC による EMAR 信号処理に関する研究は板材に対する検討にとどまっており, 実際の配管に近い曲率を持った試験片に関しては未だ調査が進んでいない[4].

本研究では, 曲率を持った試験片に対し, 内側の粗さとうねりが EMAR の共鳴スペクトルに及ぼす影響を調べることを目的とする. 内側を腐食させることで種々の粗さを有する曲率を持つ試験片を作製し, EMAR による減肉評価を行う.

2. 実験方法

本研究では, 圧力配管用炭素鋼鋼管 STPG90ASch40 を試験片として用いた. 外径 101.6 mm, 肉厚 5.7 mm の鋼管

を軸方向長さ 50 mm に切断し, 更に周方向に 6 等分した. 試験片の曲率は 19.7 m^{-1} である. これらを塩化鉄(III)溶液 (サンハヤト社, H-1000A) に 50°C にて種々の時間浸漬し, 腐食減肉度合いの異なる 60 種類の腐食試験片を作製した. キャリパーゲージで試験片の中央部分 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ の領域に対して 9 点計測した平均値を厚さと定義する. 試験片の表面の粗さはワンショット 3D 形状測定機 (VR-3000, KEYENCE) にて測定し, 算術平均高さ S_a を取得した. EMAR 試験では, パルサーレシーバー (RPR-4000, RITEC) により, 送受信コイルにバースト波を 1 MHz から 4 MHz まで 0.01 MHz 刻みで掃引しながら印加する. 図 1, 図 2 に使用した EMAT プロブとレーストラック型送受信コイルの概念図をそれぞれ示す. コイルは単層で導線の直径は 0.1 mm である. 送受信コイルの上には長さ 10 mm, 奥行き 20 mm, 高さ 20 mm 直方体型のネオジウム磁石を二つ組み合わせ, 腐食試験片の曲率に合わせて表面を研磨加工したものを設置する. コイルによる誘導電流と永久磁石による静磁場の相互作用によって板厚方向に超音波を腐食試験片表面近傍で発生させ, 底面から反射してきた超音波信号を送信コイルと同じコイルで受信する. 受信した信号は再びパルサーレシーバーにより取得する. また 0.5 kHz ごとに同期検波を行い, 共鳴周波数を取得する.

SNC 法は共鳴周波数が整数倍に現れることを利用し EMAR により取得した信号に対し周波数軸を $1/n$ に圧縮し, 複数のピークを基本共鳴周波数に重ねることで肉厚を測定する方法である. SNC 法の原理を以下に示す.

$$f_1 = \operatorname{argmax} \left\{ \sum_n x(nf) \right\} \quad (1)$$

(1)式において, f_1 は基本共鳴周波数, $x(f)$ はスペクトル強度, n はスペクトルを取得した周波数範囲での共鳴次数, argmax は最大値における引数である. 求めた基本共鳴周波数 f_1 および材料の横波速度 V を用いることで, 減肉部の厚さ d を $d = V/2 \times f_1$ より計算することができる. 本研究では, 非減肉試験片に対して行った EMAR 試験とキャリパーゲージで測定した肉厚の結果から得られた横波速度 $V = 3270 \text{ m/s}$ を材料の横波速度とする. また, 最大ピークである周波数を基本共鳴周波数として肉厚を計算する.

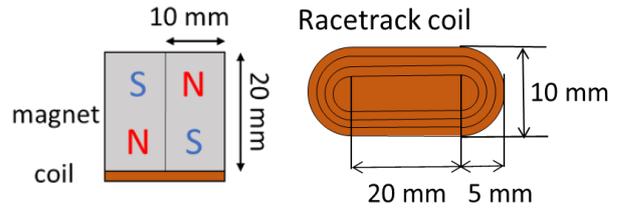


Fig. 1 EMAT probe.

Fig. 2 Coil dimensions

3. 実験結果および考察

代表的な試験片として, 腐食があまり進まなかった試験片を A, 腐食がより進んだものを B とし, 図 3 に光学顕微鏡により観察した試験片表面像を示す. 試験片 B は A と比較して表面により大きな凹凸形状が見られる. また, これらの試験片について形状測定機を用いてカットオフ周波数 λ_c を 5 mm として算術平均高さ S_a を算出した結果, それぞれ $16 \mu\text{m}$, $42 \mu\text{m}$ であり, 光学顕微鏡での観察結果と同様に試験片 B の方がより表面が粗いことが確認された.

代表的な EMAR 測定結果として, 試験片 A, B の測定結果を図 4, 図 5 にそれぞれ示す. 試験片 A に対して B のスペクトルは複雑かつそのピーク強度が全体的に低いことがわかる. これらの測定結果に SNC 法を適用した結果を図 6, 図 7 にそれぞれ示す. 試験片 A の基本共鳴周波数は(1)式より 0.279 MHz で推定肉厚は 5.86 mm であった. このとき, キャリパーゲージによる実測値は 5.81 mm であり SNC による推定肉厚とほぼ一致した. 一方, 試験片 B の推定肉厚は 6.24 mm であり, 実測値の 5.37 mm と

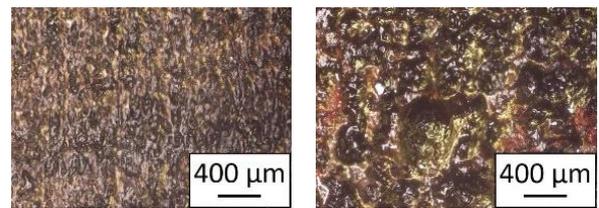


Fig. 3 Optical microscope images of specimen surfaces.

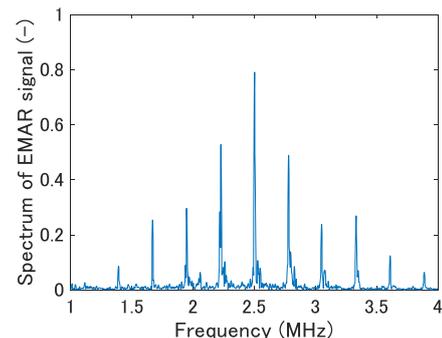


Fig. 4 EMAR spectrum of specimen A.

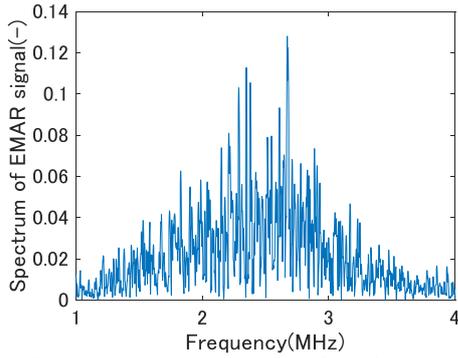


Fig. 5 EMAR spectrum of specimen B.

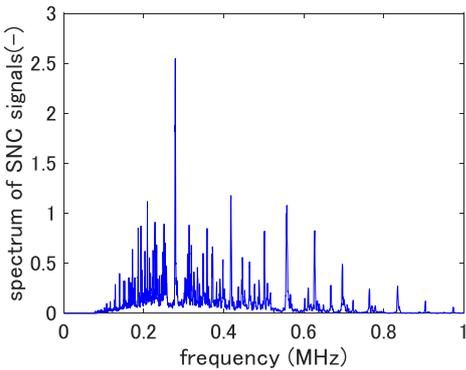


Fig. 6 SNC result of specimen A.

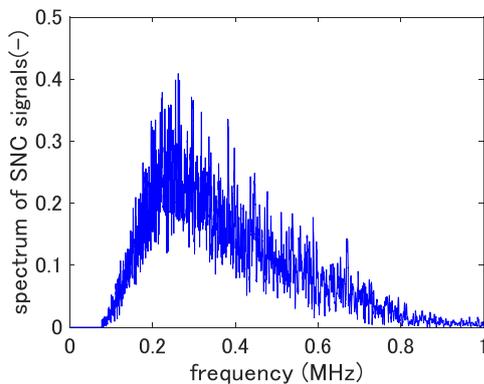


Fig. 7 SNC result of specimen B.

は10%以上の誤差があった。また、60個すべての腐食試験片におけるキャリパーゲージによる実測値とSNCによる推定値との関係を図8に示す。二乗平均誤差は0.62 mmであり実測値と平均値は高い精度で一致したが、一部の試験片には誤差の大きいものも存在することがわかった。

誤差の生じる要因を明らかにするために、SNCによる推定値とキャリパーゲージによる実測値との絶対誤差を実測値で割った相対誤差を算出し、粗さのパラメータである算術平均高さ S_a とスペクトル強度の最大値との関係をそれぞれ調べた。図9に算術平均高さ S_a と誤差との関係を、図10にスペクトル強度の最大値と誤差との関係を示す。誤差が大きい試験片は、いずれも算術平均高さ

S_a が $30 \mu\text{m}$ 以上であった。一方、誤差が10%以上の試験片では、スペクトル強度の最大値がいずれも0.14未満となることがわかった。続いて、算術平均高さ S_a スペクトル強度との関係性を評価した。図11に粗さとスペクトル強度との関係を示す。粗さが大きくなると信号強度が弱くなる傾向が見られた。この結果は、腐食が進行し、材料表面の粗さが大きくなると、表面での超音波の散乱が大きくなり信号強度が弱くなることを示している。

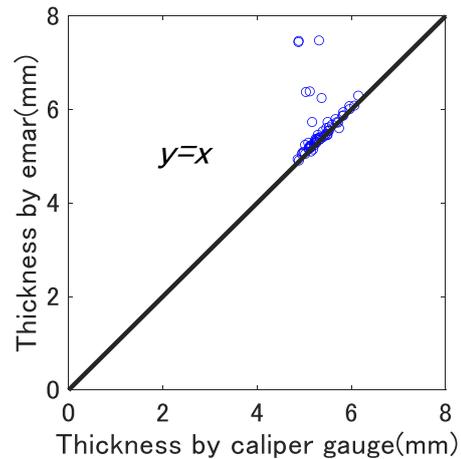


Fig. 8 Comparison of samples thickness measured by EMAR and caliper gauge.

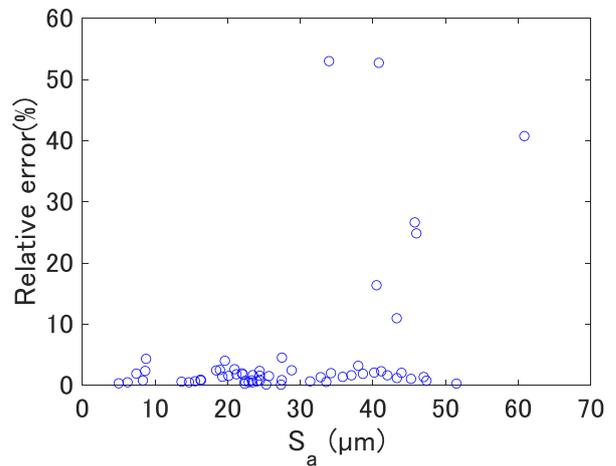


Fig. 9 Correlation between S_a and relative error of samples.

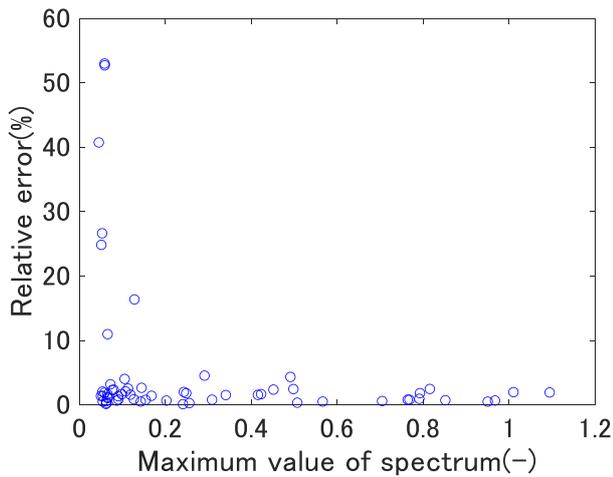


Fig. 10 Correlation between maximum value of spectrum and relative error of samples.

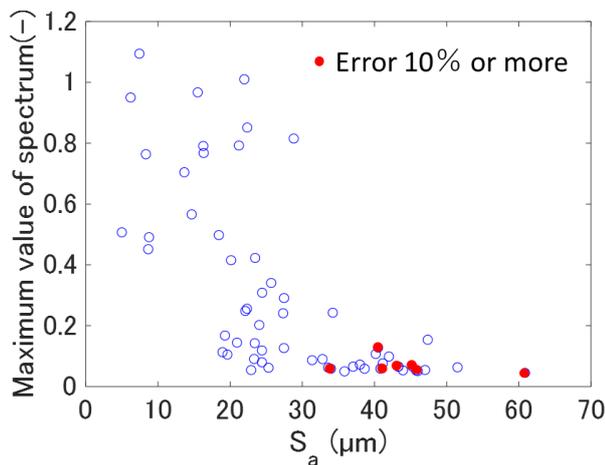


Fig. 11 Correlation between maximum value of spectrum and S_a .

4. 結言

本研究では、曲率を持った腐食減肉試験片に対し、内側の粗さがEMARによる共鳴スペクトルに及ぼす影響を調べることを目的とした。内側を腐食させることで種々の粗さを有する曲率を持つ試験片を作製し、EMARを用いて減肉評価を行った。その結果、曲率を持った腐食減肉試験片でもSNC法を適用することで二乗平均誤差0.62 mmの高い精度で肉厚を推定可能であることが明らかになった。また、試験片の粗さが測定精度とスペクトル強度の最大値に影響を与えているため、信号強度を調べることによって測定結果の信頼性を評価し、信頼性の低い測定結果を除外することでより高い精度で肉厚を評価できることが示唆された。本研究においては、EMAR信号の最大信号強度が0.14以上の測定結果のみを抽出した場合、二乗平均誤差0.10 mmの高精度な肉厚測定結果を得られることが明らかになった。今後は、 S_a 以外の粗さのパラメータや異なるカットオフ波長に関して検討を行うことで、表面形状や曲率がEMAR試験に及ぼす影響について更なる検討を進める。

参考文献

- [1] 原子力安全・保安院「関西電力株式会社美浜発電所 3号機二次系配管破損事故について (最終報告書) 平成17年3月30日(2005).
- [2] R. Urayama, et al., Online Monitoring of Pipe Wall Thinning by Electromagnetic Acoustic Method, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol. 5, (2013), 155-164.
- [3] H. Sun, et al., Effect of Scaly Structure on the Measurement of Pipe Wall Thickness using EMAT, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.9, (2017), 15-25.
- [4] D. Iwata, et al., Investigation of the Factors Determining Spectrum of Electromagnetic Acoustic Resonance on Thickness Measurement of Corroded Carbon Steel Specimen, Seventeenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, October 28-30, 2020.