

電磁超音波共鳴法を用いた配管減肉検査における底面形状の影響

Influence of bottom shape in the pipe wall thinning inspection using an electromagnetic acoustic resonance method

| | | | |
|------|----------|------------------|-----------|
| 東北大学 | 浦山 良一 | Ryoichi URAYAMA | Member |
| 東北大学 | ジョンマンチョル | Jeong Man Chul | No Member |
| 東北大学 | 原 翔一郎 | Syoichiro HARA | No Member |
| 東北大学 | 高木 敏行 | Toshiyuki TAKAGI | Member |
| 東北大学 | 内一 哲哉 | Tetsuya UCHIMOTO | Member |
| 東北電力 | 丹治 和宏 | Kazuhiro TANJI | Member |

Abstract

Electromagnetic acoustic transducer (EMAT) provides non-contacting measurements and is often applied to monitoring in high temperature environment. Electromagnetic acoustic resonance method (EMAR) is transmits an ultrasonic burst wave, and the driving frequency of burst wave is swept. Then signal amplitude of each frequency is computed by the superheterodyne processing at the interval. Pulse-EMAR method is transmits an ultrasonic pulse wave propagating, but the pulse wave is not swept. Then echo waves received is analyzed by Fast Fourier Transform. Finally, the superposition of the nth compression (SNC) for data processing is applied to evaluate wall thickness for two methods. In this study, the influence of bottom shapes is evaluated using EMAR method and Pulse-EMAR method. And therefore the specimens of three types which are with inclined bottom, R shape and scale-like shape are prepared. Influence of bottom shape appears as an attenuating of peak value of SNC, a widening of the full width at half maximum, and peaks of multiple.

Keywords: electromagnetic acoustic resonance, pipe wall thinning, thickness measurement

1. 緒言

原子力・火力発電設備の配管において、経年化が進むことにより流れ加速型腐食や液滴衝撃エロージョンによる配管減肉が問題となり、その管理が課題となっている。非接触による肉厚測定が可能な電磁超音波探触子 (Electromagnetic acoustic transducer, EMAT) を用いた電磁超音波共鳴法 (Electromagnetic acoustic resonance method, EMAR) を配管減肉のモニタリングに適用する研究がなされている[1, 2]. EMAR 法は板厚方向に伝播する超音波が共鳴する現象に基づくもので、受信信号を増幅し SN 比を改善することができる。また、探傷表面の状態に左右されにくく、高温環境下での肉厚測定にも使用されている[3,4,5].

しかし、肉厚が複雑に変化する減肉部においては、超音波が散乱して共鳴スペクトルの振幅が低下し、また底

面の凹凸や傾斜により複数の共鳴周波数を検出することとなる。そのため、肉厚の評価が困難となる場合がある。そこで、筆者らは、電磁超音波共鳴法の信号処理法として N 周期加算法 (Superposition of nth compression, SNC) を提案している[6].

本研究は、送信するバースト波の周波数を掃引して周波数ごとの受信信号のスペクトル解析する EMAR 法とパルス波を送信し受信されるエコー波から高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform, FFT) によりスペクトル強度を得る Pulse-EMAR 法の二種類の測定法を用いる。また、底面形状試験片として傾斜面、R 形状面、鱗片状の凹凸を用いて底面の影響を評価する。

2. 試験方法

バースト波を試験体に入射すると、超音波は試験体の両面で反射を繰り返す、波長が試験体内の伝播距離の整数倍のとき入射波と反射波の位相がそろうため共鳴現象が生ずる。この現象を用いた測定法が EMAR である。本研究では、試験周波数範囲を 1.5 MHz から 3.5MHz とし

10kHz 間隔でバースト波を 100 μ s 間送信して、発信終了後 25 μ s~225 μ s 間の受信信号を同期検波により 0.5kHz ごとのスペクトル強度を得る。

一方、Pulse-EMAR 法は、試験体にパルス波を送信すると底面と表面で超音波が反射してエコー波が繰り返される。本研究では試験周波数を 2MHz とし、送信パルスを 1 パルス、送信後の 25 μ s~1,025 μ s 間の受信信号を FFT 解析により 0.5kHz ごとのスペクトル強度を得る。

これらの得られた信号に対して SNC 法により基本共鳴周波数を求める。SNC 法は、共鳴周波数が整数倍の時に周期的に現れることを利用した解析法である。すなわち、EMAR の測定結果の周波数軸を $1/n$ だけ縮小することで、 n 次の共鳴周波数 f_n の強度を基本周波数 f_1 の強度に重ね合わせることができる。下式に表すように、EMAR の測定結果の周波数を $1/n$ とした波形を重ね合わせたスペクトル強度の平均の最大値から、基本共鳴周波数 f_1 を求め、さらに音速を用いて肉厚に変換することができる。このときの最大スペクトル強度を SNC ピーク値とする。

$$f_1 = \arg \max_f \left\{ \sum_n x\left(\frac{f}{n}\right) / m \right\}$$

ここで、 $x(f)$ は SNC スペクトル強度、 $\arg \max$ (argument of the maximum) は SNC スペクトル強度が最大の時の周波数、 m は重ね合わせた共鳴周波数の数である。また、厚さ 10mm の平坦部の SNC ピーク値を 1 とし標準化する。

なお、本研究に使用する EMAT は発信コイルが直径 10mm (巻数 40) で、受信コイルが直径 20mm (巻数 80) の上に永久磁石 10 \times 20 \times 20mm³ が配置されている。

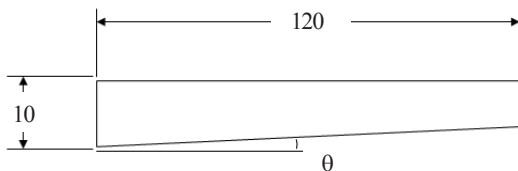


Fig.1 Schematic of the specimens with inclined bottoms.

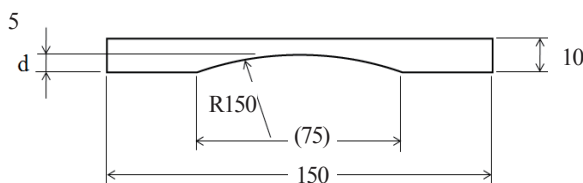


Fig.2 Schematic of the specimen with R shape bottom.

3. 試験片

材質が SS400 の三種類の試験片を用意する。図 1 に傾斜底面、図 2 に R 形状底面、図 3 に鱗片状底面のそれぞれの試験片形状を示す。傾斜底面試験片は底面の傾きを 1 $^\circ$ 、2 $^\circ$ 、3 $^\circ$ 、4 $^\circ$ 、5 $^\circ$ として長さ方向に 15mm 間隔の位置で肉厚測定をする。R 底面試験片は R 形状の中央を 0 として外側に 5mm 間隔で肉厚を測定する。鱗片状底面試験片は厚さ 10mm の板に直径 3mm のボールミルで深さ 0.4mm の球状の穴を 2mm 間隔で加工してあり、鱗片形状の中央で肉厚測定する。鱗片形状は美浜発電所 3 号機二次系配管破損事故に関する原子力安全・保安院関西電力(株)の報告書の破断個所での形状を模している。

4. 肉厚試験結果

4.2 傾斜底面測定結果

傾斜底面試験片の測定結果は、傾斜が 1 $^\circ$ ~3 $^\circ$ では EMAR 法と Pulse-EMAR 法の誤差の RMS は両者ともに 0.05mm と精度よく評価した。しかし、4 $^\circ$ ~5 $^\circ$ では EMAR 法の最大誤差が 0.95mm、誤差の RMS は 0.43mm であり、Pulse-EMAR 法ではそれぞれ 0.38mm、0.16mm であった。両者とも傾斜が 3 $^\circ$ を超えると誤差が大きくなる傾向があるが、Pulse-EMAR の方が誤差は小さい。

図 4、5、6 は Pulse-EMAR による傾斜試験片 1 $^\circ$ 、3 $^\circ$ 、5 $^\circ$ の厚さ 9mm 程度の部分での SNC 解析結果のピーク値をグラフにしたものである。角度が大きくなるにつれて SNC ピーク値が減衰し、3 $^\circ$ と 5 $^\circ$ では基本共鳴周波数の SNC ピークと同等程度の強度を持つ二つのピーク値が現れている。SNC ピーク値の半値での周波数範囲である半値幅 (FWHM : Full Width Half Maximum) を厚さに換算した値は 1 $^\circ$ で 0.12mm、3 $^\circ$ で 0.27mm、5 $^\circ$ で 0.5mm と傾斜がきつくなるに従い大きくなっている。

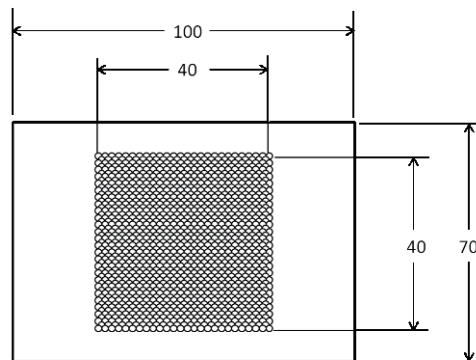


Fig.3 Schematic of the specimen simulating scale-like shape.

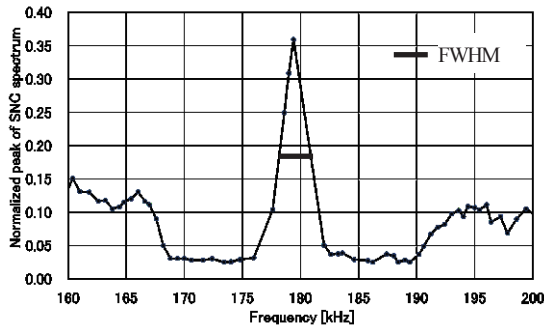


Fig.4 SNC signal of inclined bottom (angle 1°)

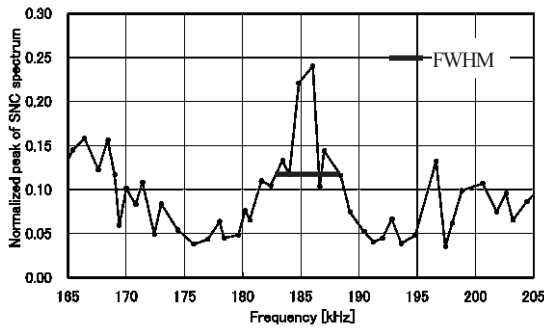


Fig.5 SNC signal of inclined bottom (angle 3°)

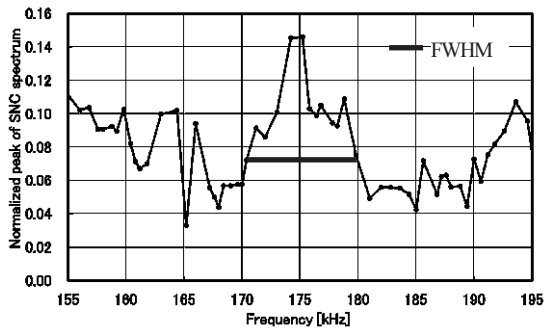


Fig.6 SNC signal of inclined bottom (angle 5°)

4.1 R 形状底面測定結果

R 形状底面測定結果は EMAR 法の最大誤差と誤差の RMS は 0.54mm と 0.19mm であり, Pulse-EMAR 法では 0.15mm と 0.09mm であった. Pulse-EMAR 法が安定した肉厚評価が出来ている.

中央から 10mm と 25mm の Pulse-EMAR の FFT 強度の測定結果を図 7 と図 8 に示す. 中央から 10mm 地点の肉厚は 5.33mm で 25mm 地点での肉厚は 7.10mm である. 10mm では共鳴周波数の繰り返しを確認できるが SNC ピーク値付近に複数のピークが存在している. 25mm ではピークが全体的に現れ共鳴周波数の繰り返しが不明確である.

図 9 と図 10 にそれぞれの SNC 解析結果を示す. 中心から 10mm の地点では半値幅が 0.28mm であるが, 25mm

では半値幅がノイズレベルまで低下して明確な半値幅を確定できない. 中心から 10mm 地点の R 面の角度は 3.8° で送信コイルの直径 10mm の範囲の肉厚変化量は 0.63mm である. 25mm の地点での角度は 9.6° で肉厚変化量は 1.69mm ある.

R 曲面では, 送受信コイルの範囲で傾斜が変化しているので, 直線的な傾斜に比べると受信信号が複雑となり SNC のピークが多数存在している.

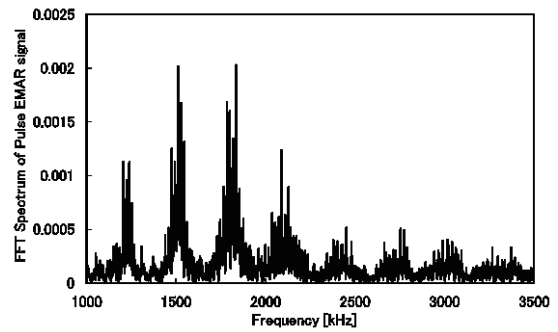


Fig.7 Pulse-EMAR signal of Pulse-EMAR at 10mm

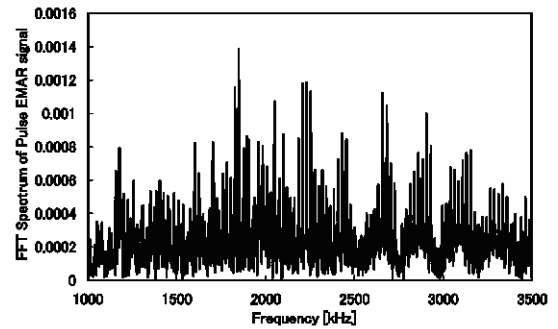


Fig.8 Pulse-EMAR signal of Pulse-EMAR at 25mm

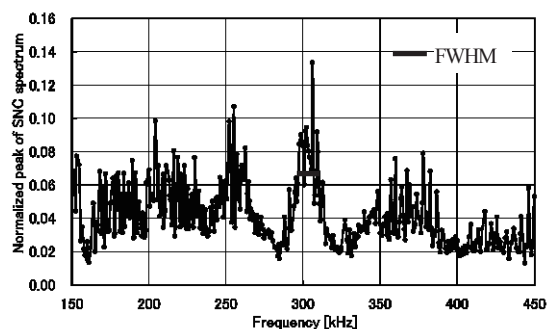


Fig.9 Normalized SNC signal of Pulse-EMAR at 10mm

4.3 鱗片状底面測定結果比較

鱗片状底面の減肉部での測定結果は, EMAR では SNC ピーク値が平坦部と比較して 28%に減少し, 肉厚評価で 0.1mm の誤差で評価できた. 一方 Pulse-EMAR では SNC

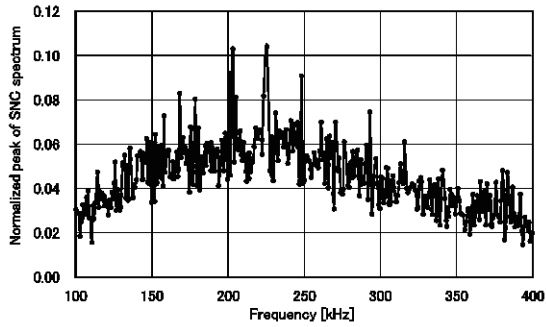


Fig.10 Normalized SNC signal of Pulse-EMAR at 25mm

ピーク値が 65%に減少し、板厚評価で 0.1mm 以下の誤差で評価できた。Pulse-EMAR は EMAR と比較して底面の影響が少ない。

図 11 に Pulse-EMAR の鱗片状凹凸の中央での SNC 解析結果を示す。傾斜底面と R 底面と比較して鱗片状底面の試験片は底面の変化が小さいこともあり半値幅が狭く、複数のピークがでる影響はなかった。

5. 結言

本研究では、EMAT を用いて EMAR 法と Pulse-EMAR 法により傾斜底面、R 形状底面および鱗片状底面の試験片の肉厚を測定し、さらに SNC 解析により肉厚評価と信号に対する影響を評価した。

①EMAR と Pulse-EMAR の比較では、Pulse-EMAR がいずれの底面形状に対しても肉厚評価の安定性を示した。

また、底面形状の Pulse-EMAR の信号への影響は、

②傾斜底面では傾斜角が 3°までは誤差の RMS は 0.05mm であり、5°でも誤差の RMS は 0.16mm と精度よく評価できた。受信信号への影響は傾斜角度の増加に伴い SNC 解析による SNC ピーク値の減衰と半値幅の拡大が観測された。これは、EMAT の送信コイル及び受信コイルの面積内に傾斜があることにより多重の反射が起きていると考えられる。

③R 形状底面では、傾斜が一定である傾斜底面よりもさらに複雑な信号変化を示している。R 形状の角度が大きくなるとピーク値の減衰に伴い半値がノイズレベルまで低下し、半値幅を特定できなくなる。また、送信コイル及び受信コイルの面積内で傾斜が変化することにより、SNC 解析結果では基本共鳴周波数を示す SNC ピークの前後に多数のピークが存在する。

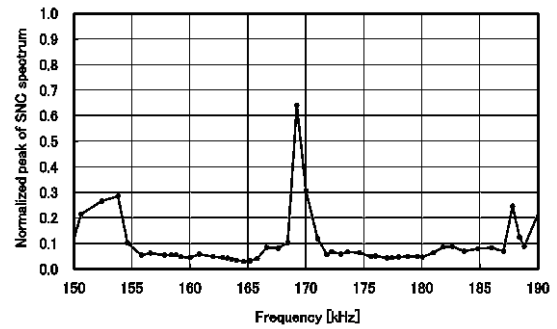


Fig.11 Normalized SNC signal of Pulse-EMAR at center

④鱗片状底面では、SNC ピーク値が減衰するが、半値幅が小さく明確な一つのピークとして確認できる。

以上のことから、SNC 解析による SNC ピークの半値幅の広がりから傾斜角度を、また SNC ピークの前後に現れる基本共鳴周波数のピーク以外のピークの状態から底面の R 形状の状態を予想出来る可能性を示した。

謝辞

本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会の研究拠点形成事業 (A.先端拠点形成型)「省エネルギーのための知的層材料・層構造国際研究拠点」として実施した。

参考文献

- [1] D. Kosaka, F. Kojima, H. Yamaguchi, “Quantitative evaluation of wall thinning in pipe wall using electromagnetic acoustic transducer”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.33, 2010, pp.1195-1200.
- [2] A. Tagawa, K. Fujiki, F. Kojima, “Investigation of an on-line pipe wall defect monitoring sensor”, *International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics*, Vol.33, 2010, pp.639-647.
- [3] N. Yamagata, M. Takahashi and N. Ahiko, “Thickness Measuring Technology for Pipes of Thermal Power Plants”, *Toshiba Review* (in Japanese), Vol.63 (4), 2008, pp.46-49.
- [4] R. Urayama, T. Uchimoto, T. Takagi, “Application of EMAT/EC Dual Probe to Monitoring of Wall Thinning in High Temperature Environment”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.33, 2010, pp.1317-1327.
- [5] F. Hernandez-Valle and S. Dixon, “Pulsed electromagnetic EMAT for ultrasonic measurements at elevated temperature”, *INSIGHT*, Vol.53, No.2, 2011, pp96-99.
- [6] R. Urayama, T. Uchimoto, T. Takagi, S. Kanemoto, “Quantitative Evaluation of Pipe Wall Thinning by Electromagnetic Acoustic Resonance”, *E-Journal of Advanced Maintenance*, Vol.2, 2010/2011, pp25-33.