

電磁超音波共鳴法による配管減肉の計測と評価

Measurement and Evaluation of Pipe Wall Thinning by Electromagnetic Acoustic Resonance

会津大学コンピュータ理工学部	兼本 茂	Shigeru KANEMOTO	Member
東北大学流体研	浦山良一	Ryo-ichi URAYAMA	Non-Member
東北大学流体研	内一哲哉	Tetsuya UCHIMOTO	Member
東北大学流体研	高木敏行	Toshiyuki Takagi	Member

Electromagnetic acoustic transducer (EMAT) provides non-contacting measurements and is often applied to monitoring in high temperature environment. One of drawbacks of EMAT is its low sensitivity and S/N ratio. One way to overcome the drawback is to introduce an Electromagnetic acoustic resonance method (EMAR); it has a high capability of evaluating thickness or ultrasonic velocity, and it is applied to the measurement of thickness, elastic constants, damping properties and so on. Since the principle of the method is based on the resonances of bulk waves in plates, that is, thickness oscillations, targets are usually limited to ones with simple geometry. In this study, pipe wall thinning, where the thickness changes on the curved surface, is evaluated by EMAR. For the purpose, several data processing methods are applied to extract thickness information from EMAR spectral responses. Measured spectra are obtained by an experiment using a carbon steel pipe with two-dimensional thinning machined by milling, and results of the data processing are compared in view of accuracy and stability. Finally, the data processing method is applied to the EMAR spectra of a pipe specimen cut from a mock-up test loop.

Keywords: EMAT, EMAR, Pipe Wall Thinning, Thickness Measurement, Signal Processing

1. 緒言

原子力・火力発電設備において、経年化に伴い流れ加速型腐食や液滴衝撃エロージョンなどによる配管減肉の進展が問題となっている。これらの減肉管理では、圧電探触子による超音波板厚計が用いられているが⁽¹⁾、計測前の養生など手間がかかる点が問題となる。これを解決する一手段として、非接触型の電磁超音波素子 (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT) があり、接触媒体を必要とせず探傷面の状態に左右されにくいという利点があり、高温環境下での肉厚測定にも使用されている⁽²⁾⁽³⁾。しかし、パルス送受信型の EMAT は SN 比と感度が低いいため、電磁超音波共鳴法 (Electromagnetic Acoustic Resonance, EMAR) の適用可能性を検討した。これは、材料内で伝播する超音波が共鳴する現象を利用する方法で、材料の弾性定数や板厚の測定に使用されている⁽⁴⁾。平板等の単純な形状では、底面からの反射波が共鳴を繰り返すことから、明確な共鳴周波数が計測でき、その間隔から板厚を精度良く評価できる。しかしながら、配管の減肉部のよ

うな板厚変化が複雑な曲面では、超音波が拡散してしまい共鳴スペクトルの振幅が低下し、また複数の反射波を検出するため、板厚の評価が困難となる可能性がある。本研究では、配管の板厚計測に適した EMAR プロブを試作して、配管に曲面加工を施した模擬配管試験片や、実際の減肉形状に近い二相流試験装置で作成した模擬減肉試験体に適用し、その計測精度を評価した。さらに、計測信号の特性に合わせて複数の信号処理方法を用いて、それらの計測精度への影響を評価した。

2. 電磁超音波共鳴法

Fig.1 に EMAT の構造と原理を示す。図中のコイルに高周波パルス電流を流すと、試験体の表面近傍には渦電流が誘導される。ここに、永久磁石により試験体表面に垂直な静磁場を印加すると試験体表面に平行なアンペール力による超音波が発生し、試験体内を伝播する。また、磁性材料ではコイルの誘導磁場と永久磁石による静磁場により磁歪が周期的に変化する磁歪効果により超音波が発生する。超音波の受信は上記の逆過程によりコイルに発生する電圧を検出することで行う。この送受信の過程により、EMAT は接触媒体を使用せず非接触での測定が可能になる⁽⁵⁾。

連絡先: 兼本茂, 〒965-8580 会津若松市一箕町鶴賀, 会津大学コンピュータ理工学部, 電話: 0242-37-2502, E-mail: kanemoto@u-aizu.ac.jp

また、パルス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。EMAR は、拡散により減衰した振幅の小さなエコー波を増幅させることが出来るので、小さな出力で厚さ計測が可能となる。

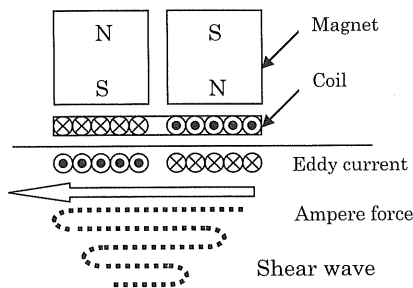


Fig.1 Schematic drawing of structure of EMAT emitting.

下式に共鳴周波数と厚さとの関係を示す。共鳴周波数は基本共鳴周波数の整数倍である。基本共鳴周波数は試験体内部の音速と試験体厚さにより決まる。

$$f_n = n \times f_1 = n \times \frac{v}{2d} \quad (1)$$

ここで、 f_n : 共鳴周波数、 f_1 : 基本共鳴周波数、 n : 共鳴次数、 v : 音速、 d : 試験体厚さである。

3. 模擬減肉試験体の測定

EMAR 計測性能の確認のための基礎試験で用いる模擬減肉試験体は、後に記述する二相流試験装置で作成した模擬減肉試験体と同等のもので、材質は STPT370 (高温配管用炭素鋼鋼管) 50A Sch80、内径 46.5mm、外径 60.5mm、公称肉厚 5.5mm、長さ 120mm とした。さらに、その内面に、フライス加工により深さ 0.5mm、幅 20mm の溝状の模擬減肉を施した。Fig.2 に計測試験体系を示す。

電磁超音波の測定システムは、パルス波を送受信するパルサーレーザ (RPR-4000 RITEC 社製)、検出周波数のフィルタとして広帯域ディケードフィルタ (FV-628B NF 社製)、オシロスコープ (DP04104 TEKTRONIX 社製)、および出力波形データを保存する PC である。プローブのコイルの寸法は、送信コイルの線径が 0.1 mm、直径 10mm で巻き数 40 回、受信コイルが直径 20mm 巻き数 80 回、永久磁石を幅 10×長さ 20×高さ (励磁方向) 20mm のサマリウムコバルト磁石を

2 個組み合わせて使用した。なお磁石は減肉配管外周に合わせた形状に加工して、プローブを配管の周方向に沿って走査可能な形にした。

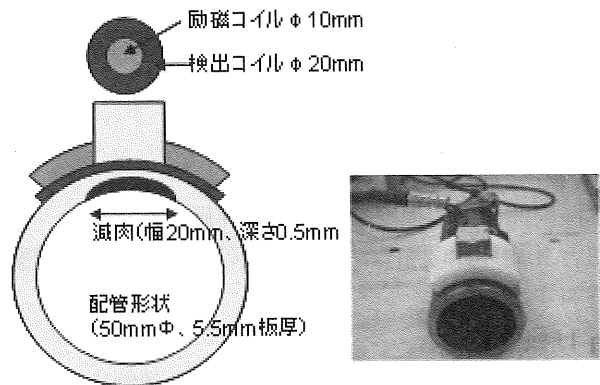
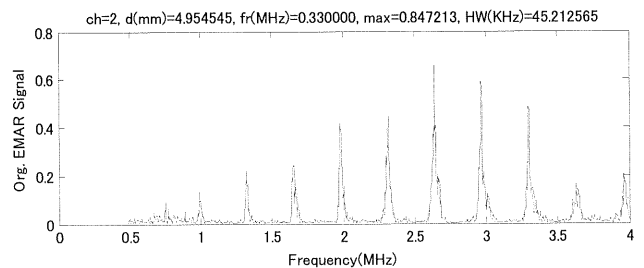
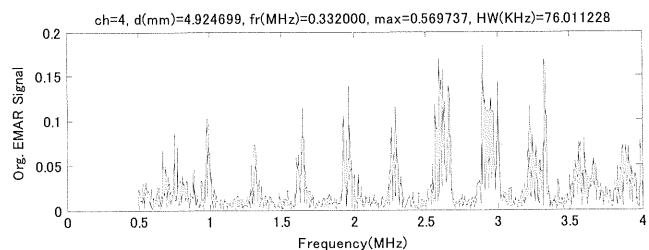


Fig.2 Mockup Test for pipe wall thinning measurement by EMAR

送信周波数を 0.5~4.0MHz、掃引間隔を 10kHz とし、受信信号にスーパーヘテロダイン処理を施して 1kHz 毎の周波数成分を検出する。測定間隔は減肉中心から 2.5mm 間隔として、中心部より 0mm、2.5mm、5.0mm、7.5mm、10mm (減肉端部)、12.5mm、15mm の位置で測定を行った。



(a) Center of the wall thinning.



(b) 5mm distance from center of wall thinning.

Fig.3 EMAR spectra of pipe specimen with simulated wall thinning.

Fig.3 に測定結果として、送信周波数毎の振幅スペクトルを示す。Fig.3(a)の減肉中心部での計測では、3~10 次の共鳴ピークが明確に観測されている。一方、Fig.3(b)の減肉中心から 5mm 離れた位置での計測では、

共鳴スペクトルの振幅が減衰し、また周期的な共鳴ピークの周りに複数のピークが検出され、複雑なスペクトル形状となっている。これは減肉曲面で超音波が散乱し複数の反射経路の波が計測されているためであり、このような結果から、共鳴ピークから板厚を評価することが容易ではないことが予想される。

4. 厚さ評価法の検討

減肉曲面での板厚を精度良く評価するために、相関法と N 周期比例加算法の二種類の信号処理法を提案し検討する。

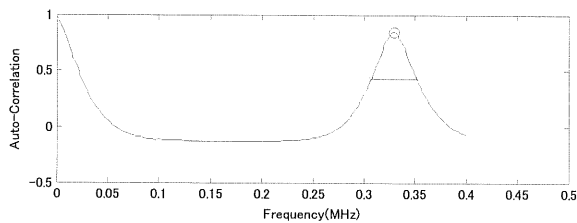
4.1 相関法

相関法は、共鳴ピークの平均間隔を評価するためのもので、基本スペクトルと周波数をシフトした位置のスペクトルの掛け算として、以下のように定義される。

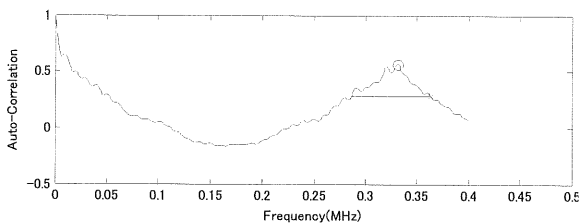
$$d = \frac{v}{2\Delta f} \quad (\text{板厚})$$

$$\Delta f = \arg \max_{f_s} \sum_f x(f - f_s) * x(f) \quad (2)$$

ここで、 $x(f)$ は共鳴スペクトル、 f_s はシフト幅である。この最大振幅位置が、共鳴ピークの周波数間隔に相当する。これを Δf としたとき、板厚は音速を考慮すると上記の d として求めることができる。ここで、音速は 3270m/s とした。



(a) Center of wall thinning.



(b) 5mm distance from center of wall thinning.

Fig.4 Auto-correlation function as a function of shifted frequency.
The peaks are observed around the fundamental resonance frequency.

Fig.4 に、減肉中央部と 5mm 離れた位置 (Fig.3(a)(b) に対応) の EMAR 計測値から求めた相関関数の結果を示す。図中の丸印は共鳴スペクトルが最大値をとる点であり、その下の横直線が半値幅 (振幅が半分になる周波数帯域幅) を示している。この幅が広いことは、反射エコーの伝播時間にばらつきがある、すなわち、裏面の減肉形状が複雑であることを示している。Fig.4 (a)では半値幅が狭く、Fig.4 (b)では半値幅が広がっており、また、ピークの絶対値 (相関の大きさ) も小さくなっていることが分かる。これは、5mm 位置ではプローブ下部の減肉が斜面の形状になっており、超音波の反射が拡散していることを示している。このような計測結果は、裏面の減肉形状が平面でない複雑な形状になっていることも意味している。

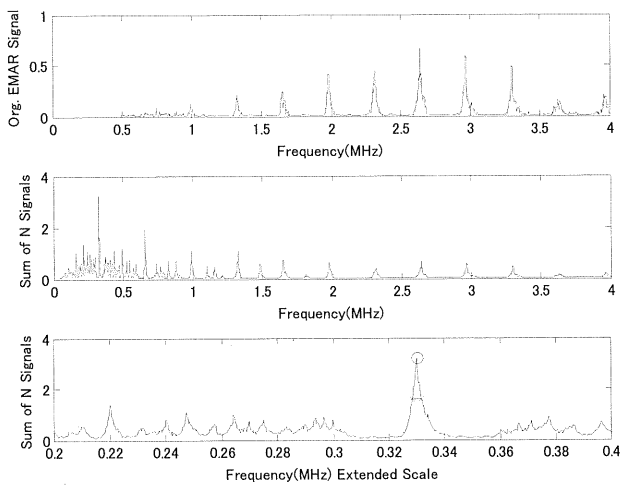
4.2 N 周期比例加算法

基本波形に対して $1/N$ だけ周波数を縮小することで、 N 次の共鳴周波数 f_N を基本周波数 f_1 に重ね合わせることができる。下式のように、この重ね合わせた波形の最大値から、基本周期 f_1 を求め、さらに音速を用いて板厚に変換することができる。以下では、これを、N 周期比例加算 (SNC) 法と呼ぶことにする。

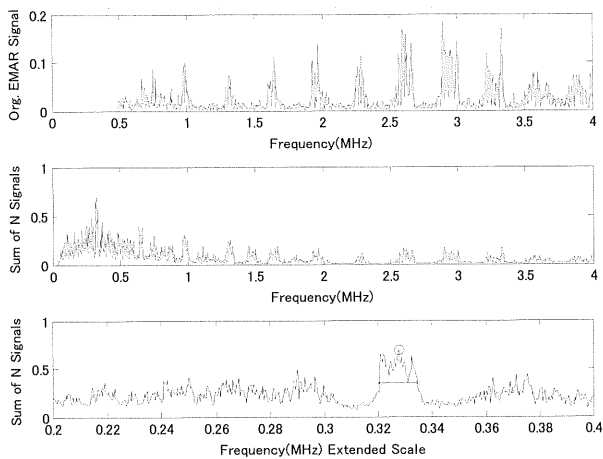
$$d = \frac{v}{2f_1} \quad (\text{板厚})$$

$$f_1 = \arg \max_f \left\{ \sum_n x\left(\frac{f}{n}\right) \right\} \quad (3)$$

Fig.5 に N 周期比例加算法による EMAR 解析結果を示す。図の上から、EMAR 測定原波形、N 周期比例加算波形、この加算波形の拡大図を示している。図中の丸印と横線は、最大ピーク値と半値幅である。減肉中央部と 5mm 離れた位置の結果を (a) (b) で示しているが、相関法と同様に、5mm 位置での解析結果では波形が乱れるため、ピーク位置が不明瞭になり、また、半値幅も広がっていることが分かる。



(a) Center of wall thinning.



(b) 5mm distance from center of wall thinning.

Fig. 5 The original spectra, superposition of n th compression (SNC) and magnification of SNC at the peak.

4.3 評価法の検討

Fig.6 に、減肉中央部から 2.5mm ピッチでプローブを動かして減肉計測を行った結果を示す。図には、前述の相関法と N 周期比例加算法による板厚推定結果を比較して示す。これらの結果は、4.9mm から 5.4mm まで滑らかに変化しており、破線で示した 0.5mm 深さの楕円状模擬減肉の形状と比べても、妥当な計測結果となっている。5mm 位置で、相関法と N 周期比例加算法の結果に違いが見られるが、Fig.4(b)、Fig.5(b)に示したように、小さなピークが複数あり、板厚の判定が難しくなっているためと考えられる。この点は、ピー

ク判定に最大値ではなく重心法を用いるなどで改良できる可能性はある。

Fig.7 には、N 周期比例加算法の加算波形の半値幅とピーク値の計測位置依存性を示しておく。裏面の減肉の傾斜が最もきつくなる 5mm 位置で、半値幅が大きく、振幅のピーク値が最小になっていることがわかる。傾斜がきつくなることで超音波の散乱が大きくなって EMAR の計測波形が乱れるという傾向が読み取れる。これは、半値幅や振幅情報が、裏面の減肉形状の複雑さに関係していることを示している。

二つの信号処理を比較すると、N 周期比例加算法が、減肉傾斜の大きい減肉中心から 5mm 位置で実際の肉厚よりも薄く評価され、保守側を示している。このことから N 周期比例加算法を以下では採用することとした。

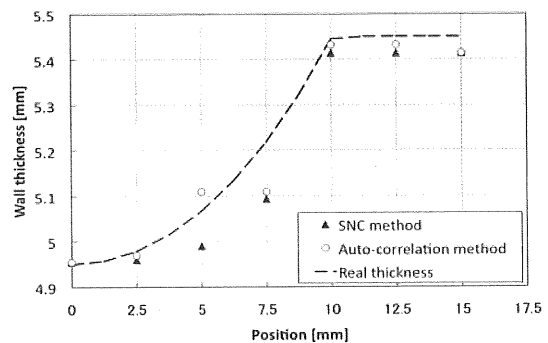


Fig.6 Comparison of thickness profiles evaluated by the present signal processing methods

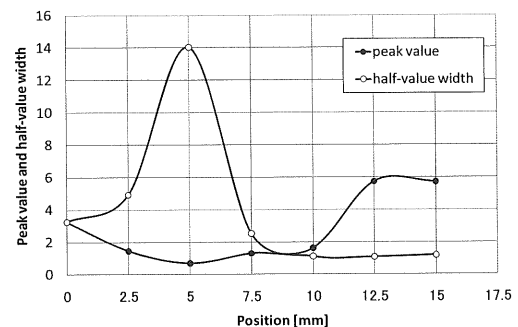


Fig.7 Profiles of half-value width and peak value in the SNC method.

5. 二相流試験装置による模擬減肉試験体計測

ここでは、実際の減肉形状に近い減肉を施した模擬減肉試験体（二相流試験装置で作成）を使用して、N 周期比例加算法で減肉部の板厚を評価する。

5.1 試験配管体と実験方法

試験配管は材質 STPT370、50A sch80、内径 46.5mm、

外径 60.5mm、公称肉厚 5.5mm である。二相流模擬減肉試験装置では、試験配管の手前にエルボによる曲がり部とオリフィスによる絞り部を設け、試験配管の内部に二相流を発生させ減肉を加速させている。下から上の方向へ流体が流れる状況となっている。温度 165℃、流速 4m/s、溶存酸素濃度 < 1ppb (脱気条件) で、約 1420 時間の減肉試験を実施した。試験配管は試験後に装置から取り出し、減肉の発生している直線部 (長さ 1350mm) を切り出して減肉計測を行った。試験配管と EMAR プローブの概観を Fig.8 に示す。

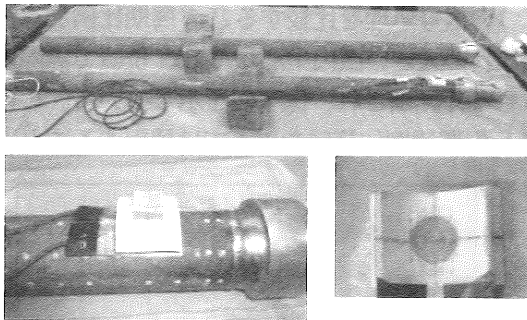


Fig.8 EMAR probe setup and pipe specimen cut from a mock-up test loop.

測定位置は配管の周方向を 8 等分し、試験配管上流に設置されたエルボの背側を a と定義して 8 点 (a, b, ..., h)、また、軸 (長手) 方向にはオリフィス下流 40mm の位置から、20mm 間隔で 15 点 (1, 2, 3, ..., 15) とした。ただし、本実験では、この中より減肉量が大きいと想定される箇所を中心に 59 点を選んで測定した。使用した測定装置、プローブ及び EMAR の測定条件は 3 章に記述したものと同様である。

5.2 測定結果

Fig.9 に周方向 a (背側) と e (腹側) の軸方向 2 ラインにおいて、オリフィス部を起点とした肉厚分布を測定した結果を示す。図中の実線は模擬減肉試験体の破壊後にマイクロスコープ (KEYENCE 社製 VHX-500) を使用して 0.5mm 間隔で測定した実測厚さである。一般的な傾向として流れ加速型腐食は、1~2D 付近で減肉が最大となり、4D 付近まで顕著な減肉が現れるとされているが、本実験でも同様の傾向がみられた。また、最大減肉面付近では流れ加速型腐食特有の鱗片状の大きさ約 200 μm 、深さ 50~60 μm の凹凸が観察されている。

N 周期比例加算法による EMAR の測定結果は実測値とほぼ同等である。Fig.10 には、周方向 (a~h) を Y

軸に、軸方向を X 軸にとった平面図で N 周期比例加算法による板厚計測結果の分布を示した (黒色部は未計測部を示す)。周方向では背側近辺の g, h 方向が最も減肉が進んでいることが分かる。

Fig.11 には、マイクロスコープでの測定厚さと超音波厚さ計の探触子直径 9mm と 14mm 及び N 周期比例加算法による EMAR の測定値の比較を示す。超音波厚さ計は、探触子直径が 14mm のものが 9mm に比べて誤差が大きく、探触子の大きさによる誤差が確認された。EMAR の計測厚さの誤差は -0.1~+0.2mm であり、探触子直径 9mm の超音波厚さ計と比較して同等程度の厚さ評価で、ばらつきも同等であることがわかる。

以上の結果から、配管減肉の曲面において N 周期比例加算法による EMAR の測定は超音波厚さ計と同等の性能であるといえる。

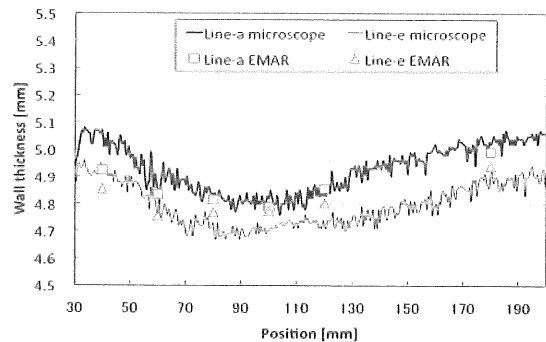


Fig.9 Profiles of wall thickness evaluated by EMAR with the SNC method.

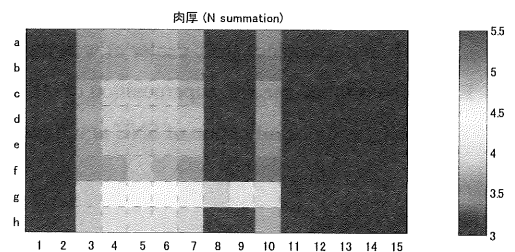


Fig.10 Two-dimensional profile of wall thickness evaluated by EMAR with the SNC method (Dark parts were not measured).

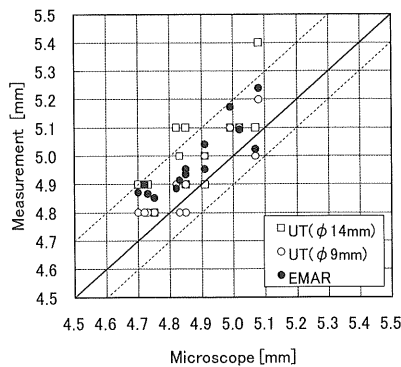


Fig.11 Accuracy of thickness evaluation by EMAR with SNC method and conventional ultrasonic thickness gauge.

6. 結言

本研究は、電磁超音波共鳴法を用いた配管減肉の曲面での定量的評価法の確立を目的として、1) 配管に曲面加工を施した模擬減肉試験体を作製し測定、2) 測定結果からの板厚評価法を提案、3) 得られた板厚評価法を用いて実際の減肉形状に近い二相流試験装置で作成した模擬減肉試験体の測定評価を行い、以下のような結論を得た。

1) 模擬試験体の EMAR 測定結果から、相関法及び N 周期比例加算法という二つの板厚評価法を提案してその有効性の評価を行い、N 周期比例加算法が EMAR の減肉曲面に有効である結果を得た。

2) 実際の減肉形状に近い二相流模擬減肉試験装置を用いた模擬減肉試験体を EMAR により測定し、N 周期比例加算法を用いて板厚を評価した。その結果、超音波厚さ計と同等の厚さ評価が可能であることを示した。

以上の結果から、N 周期比例加算法による EMAR は、複雑な減肉曲面を持つ配管の減肉計測・評価に有効であることが示された。非接触型という特徴を生かしたより効率的な減肉管理や、運転中検査のような高温下での計測などの利用が期待できる。

謝辞

本研究は、原子力安全・保安院の平成 21 年度高経年化対策強化基盤整備事業（経年劣化事象の解明等）、東北大学グローバル COE プログラム（流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点）の一部として行われたものである。また、研究遂行にあたり二相流模擬減肉試験装置による模擬減肉試験体の提供は東京電力株式会社技術開発研究所の支援に基づくものであり、ここに感謝を表します。

参考文献

- [1] The Japan Society of Mechanical Engineers ed., Codes for Nuclear Power Generation Facilities: Rules on Pipe Wall Thinning Management for BWR Power Plants, (2006), 7-49, The Society of Mechanical Engineers.
- [2] N. Yamagata, M. Takahashi and N. Ahiko: Thickness Measuring Technology for Pipes of Thermal Power Plants, *Toshiba Review* (in Japanese), 63 (4), (2008), 46-49.
- [3] 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*, (2010) in press.
- [4] M. Hirao and M. Ogi, EMATS for science and industry: noncontacting ultrasonic measurements, Kluwer Academic Publishers, (2003).
- [5] R. B. Thompson, Physical principles of measurements with EMAT Transducer, *Physical Acoustics Vol.XIX*, Academic Press Inc., (1990), 157-200.