



配管厚さ測定への電磁超音波探触子の適用

Measurement of Pipe Wall Thickness using Electro Magnetic Acoustic Transducer

神戸大学大学院	小坂 大吾	Daigo KOSAKA	Member
神戸大学大学院	小島 史男	Fumio KOJIMA	Member
神戸大学大学院	梅谷 浩介	Kousuke UMETANI	Non Member

This paper is concerned with quantitative evaluation of pipe wall thickness using Electro-Magnetic Acoustic Transducer. Various test specimens are fabricated to simulate Flow-Accelerated Corrosion (FAC). First, measurements by Electro-Magnetic Resonance (EMAR) technique are examined. It is found that the resolution of thickness measurements is superior to the Pulse-Echo method. On the other hand, the measurement by EMAR is time-consuming because it requires long range of sweeping frequencies. Secondly, for the purpose of saving the processing, a new method using a wide band exciting voltage is proposed. Finally, the proposed method is applied to evaluate mock FAC specimens.

Keywords: Nondestructive Test, Condition Monitoring, On-line Monitoring, Flow-Accelerated Corrosion, Cavitation

1. 緒言

発電プラントの配管は日本機械学会が定める減肉管理規定^[1]に基づき、定期的に配管の肉厚測定を行って配管の健全性を担保している。特にオリフィス下流には流れ加速型腐食 (Flow-Accelerated Corrosion : FAC) が発生することが知られており、定期点検時に超音波探触子を用いた厚さ測定を行っている。プラントのより安全で効率的な運転のために、定期点検だけではなく、運転中の常時監視技術など配管肉厚測定に関する検査技術の開発が求められている。電磁超音波探触子 (Electro Magnetic Acoustic Transducer : EMAT) は、測定時にカプラントが必要なく高温環境での動作が望めることから、探触子を断熱材の内側に常時配置して減肉をモニタリングすることが期待されている。EMAT は静磁場を発生させる磁石と、交流磁場を送受信するコイルによって構成されている^[2-6]。また、共振を利用することで、すぐれた厚さ測定分解能を得ることができる^[7,8]。これを利用して、材質の疲労評価などにも用いられている^[9]。

一方で、これまで研究されている EMAT を用いた研究において、実機に生じる減肉の形状についての考察を行っているものは多くはない。そこで本研究では、EMAT を配管厚さ測定に適用するための問題点を確認し、その解決方法を提案する。

最初に EMAT の板厚測定における基本性能を評価し、十分な厚さ測定分解能があることを確認する。次に配管減肉をマクロ的、ミクロ的に模擬した試験

体を測定し、問題点を確認する。最後に実機模擬環境によって作成した流れ加速腐食試験体を測定し、圧電素子型の超音波探触子と比較することで、実機適用が期待できることを確認する。

2. 実験方法

2.1 試験装置

EMAT はコイルと磁石によって構成される超音波探触子である。ここでは横波垂直型の EMAT を用いた。その構造を Fig. 1 に示す。EMAT における送信は、コイルに任意の周波数のバースト波を印加することで行う。バースト波により試験体表面に発生する渦電流 (交流磁場) と磁石 (静磁場) によるローレンツ力、磁歪等により、試験体表面に任意の周波数の超音波を発生させることができる。受信は送信と逆のプロセスで行い、送信に用いたのと同じコイルで受信が可能である。EMAT は超音波の発生に電磁場を用いることから、試験体に非接触での厚さ測定が可能であり、カプラントを必要としない。

装置全体の構成を Fig. 2 に示す。EMAT (センサ有効面積 10×20mm)、バースト電源、プリアンプ (40dB)、バンドパスフィルタ (500kHz - 5MHz)、A/D 変換器 (±4mV, 10bit) とパソコンで構成され、パソコンにより装置の制御、データ収集および信号処理を行う。なお、評価値の比較のため、超音波厚さ計 (GE Inspection Technologies 社 DM4, センサ面積約 3×3mm) を用いた。

2.2 共振法による厚さ測定

EMAT は、電磁場によって試験体表面に直接超音波を発生させるため、超音波の周波数は EMAT の固有振動数に依存しない。そのため圧電素子型の探触子と比較して広い周波数域での使用が可能である。使用した EMAT はおおよそ 500kHz から 6000kHz の周波数帯で使用することができる。この特徴を利用し、本実験では厚さ測定に共振法^[7,10]を用いる。

共振法は、試験体表面に導入した超音波が、厚さに対してユニークな周波数であったとき、超音波の減衰が極端に小さくなる、「共振」を利用した測定法である。まず、SS400 材、厚さ 5.00mm の校正試験体で測定を行う。EMAT に印加するバースト波の周波数を、ある程度の周波数範囲で掃引する。ここでは 1000kHz から 2000kHz を 1kHz 間隔で掃引した。Fig. 3 に、バースト波を停止した後の EMAT の検出信号を示す。ここでは 1280kHz と 1294kHz で比較するが、わずかな周波数の違いによって検出信号が大きく異なる。1294kHz では試験体内部で超音波が共振していることが確認できる。共振状態は、非共振状態と比較すると極端にエネルギーが大きい状態であり、検出信号 v_i から次式を用いることで共振エネルギー R を判定することが可能である。

$$R = \sum_{i=1}^n (v_i)^2 \quad (1)$$

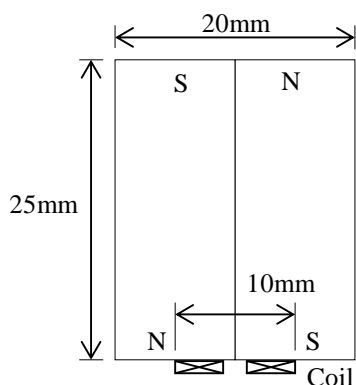


Fig. 1 Schematics of the EMAT

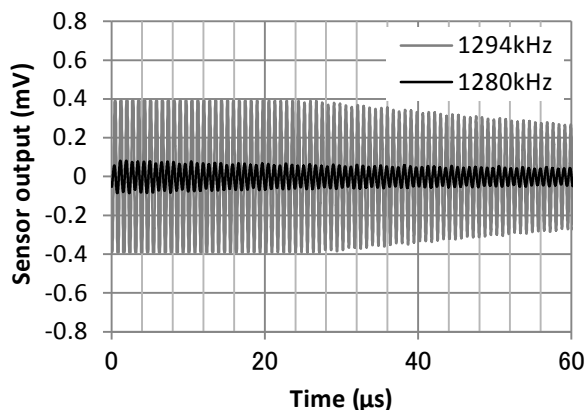


Fig. 3 Resonance waveform

Fig. 4 は掃引して得られた EMAT の検出信号を (1) 式を用いてまとめた結果である。エネルギーの高い周波数、つまり共振周波数は 1294,1618,1942kHz であった。 Δf は 324kHz であることから、1294kHz は 4 次の共振周波数であることがわかる。共振周波数 f と次数 n 、試験体材料の音速 v から厚さ T は次式で求めることができる。

$$T = n \frac{v}{2f} \quad (2)$$

事前に被試験体の大よその厚さが分かれば次数と共振周波数は推定でき、その周辺の周波数で励磁すればよいが、そうではない場合は Δf が必要であるためある程度広い周波数域で励磁を行う必要がある。 Δf から、 T は次式で求めることができる。

$$T = \frac{v}{2\Delta f} \quad (3)$$

本研究では、測定システムに汎用性を持たせるため、 Δf を測定することとする。5.00mm の校正試験体を用いたので、(3)式より $v=3.24\text{km/s}$ となった。以降、音速はこの値を用いる。

つぎに厚さ測定分解能を、圧電素子型の探触子と同等の 0.1mm 以下とすることを考える。健全部の厚さを 10mm 程度とすると、0.1mm の分解能を得るためには、厚さ T に 3 桁の有効桁が必要である。その

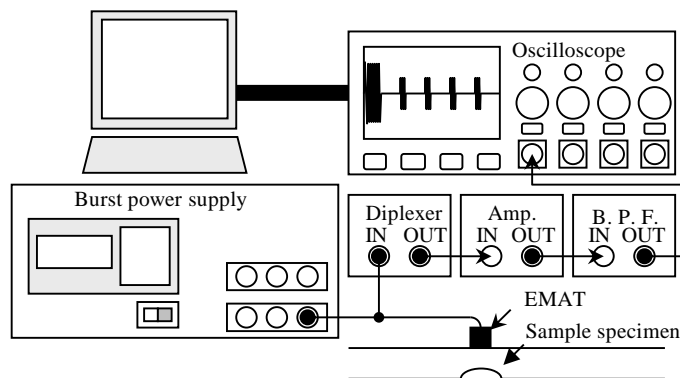


Fig. 2 Experimental setup

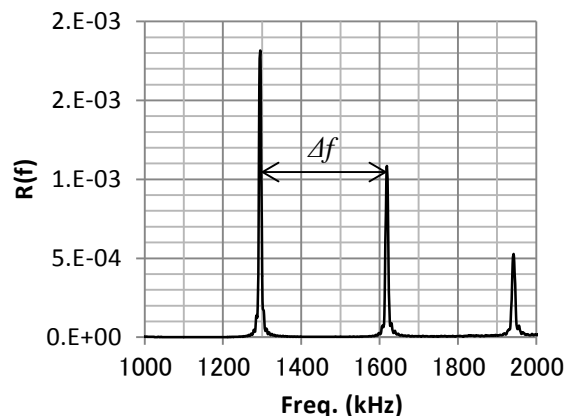


Fig. 4 Resonance spectrum with 5mm

ためには(1)式から v , Δf の有効桁が 3 桁以上必要になる。本実験で用いた SS400 の場合、共振周波数間隔は 5mm 前後だと数百 kHz になるので、有効桁を 3 桁とするには励磁に用いるバースト波の掃引間隔を 1kHz 以下とする必要がある。共振周波数間隔を測定するには最低でも 2 つの共振状態、一般的には 3 つ以上の共振状態を得る必要があり、これは 1MHz 程度の範囲を、1kHz 間隔で掃引する必要があることを示している。ここで問題になるのは、1 か所の厚さ測定に数千回の励磁、検出、演算が必要になることである。研究室実験においても、実機適用においても手間がかかるので、本研究では広帯域検出法を提案する。

2.3 広帯域検出法

EMAT はコイルで構成されていることから、実効成分と虚数成分を持っている。これにより励磁電流波形に歪みが生じるが、試験体表面に発生する超音波は励磁電流に比例するため、励磁電流波形の歪みは超音波の歪みに繋がる。超音波が歪むということは、特定の周波数で励磁しても、送信された超音波はある程度の周波数帯を持つことを意味している。

共振状態を判定する式として(1)式を挙げたが、この式では受信波形に含まれるすべての周波数成分の共振エネルギーを評価している。1 回の測定波形から周波数成分ごとの共振の程度を得る手法として FFT の様な周波数分析の手法が必要である。しかし EMAT で得られる共振信号は Fig. 3 に示したように数百 μs であり、FFT では 1kHz 以下の周波数分解能を得ることができない。そこで、同期検波技術を用いた。

同期検波は測定信号における基準周波数成分 f の振幅と位相を精度よく取り出す手法である。ここでは振幅、つまり共振している超音波のエネルギー $R(f)$ を評価する。これにより、ナイキスト定理の許す限り、励磁周波数によらず、受信波形に含まれる任意の共振周波数成分を取り出すことができる。必要に応じて細かく周波数成分を取り出すことが可

能であるが、ここでは検波に用いる基準周波数は 1kHz 刻みとした。

次に本実験に用いた測定系がどの程度の周波数帯を持つのかを確認する。超音波は励磁電流に比例するため、励磁電流の周波数成分を測定することで測定系の持つ周波数帯を知ることができる。電流を測るにはシャント抵抗や電流プローブを用いればよい。しかし励磁波形は高周波かつ高電圧であり、さらに受信する信号は微小電流であることから、これらの手段で共振信号を得ながら励磁電流を測定することは容易ではない。そこで、測定が容易かつ、電流プローブのように新たな測定器を必要としない方法で、測定系の周波数帯を測定する方法を提案する。

まず、共振周波数 f_R が既知の試験体(もしくは配管の健全部)を用いて、 f_R の前後の十分な範囲で測定を行う。通常は同期検波の検波周波数と励磁周波数 f は同じ周波数を用いるが、 f が異なるすべての測定結果に対して f_R を用いて同期検波を行う。SS400 材、厚さ 5.00mm において測定した、励磁周波数 f 、検波周波数 $f_R=1294\text{kHz}$ である $R_{1294\text{kHz}}(f)$ を Fig. 5 に示す。縦軸は最大値で正規化した。この特性曲線からは、励磁周波数が f_R と一致した時、最大値を取り、その前後 25kHz の励磁周波数で約 1/10 になっていることが分かる。これは $f=f_R \pm 25\text{kHz}$ のとき、受信波形には f_R が 10% 含まれていることを意味する。 f_R は共振周波数であるから他の周波数成分と比較して減衰は極めて小さい。よって $f=f_R \pm 25\text{kHz}$ の送信波形にも f_R が同程度、つまり 10% 程度含まれていると言える。この周波数特性は、その EMAT が有効な周波数帯において同様な傾向を示した。つまり、信号強度が 1/10 になることに問題がなければ、励磁周波数の $\pm 25\text{kHz}$ の範囲の共振エネルギー $R(f)$ を、1 回の測定で得ることができることを意味する。掃引間隔を 50kHz として測定した共振スペクトルを Fig. 6 に示す。これから Fig. 4 と同じ Δf を得ることができた。従来 1kHz 間隔で千回の測定が必要だったのが、その 1/50 の回数で測定で可能になったことになる。こ

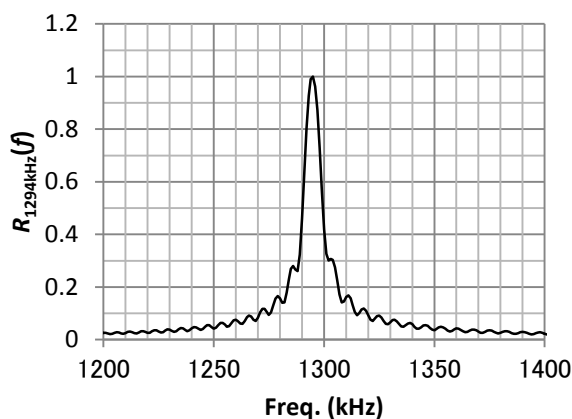


Fig. 5 Frequency characteristic on using devices

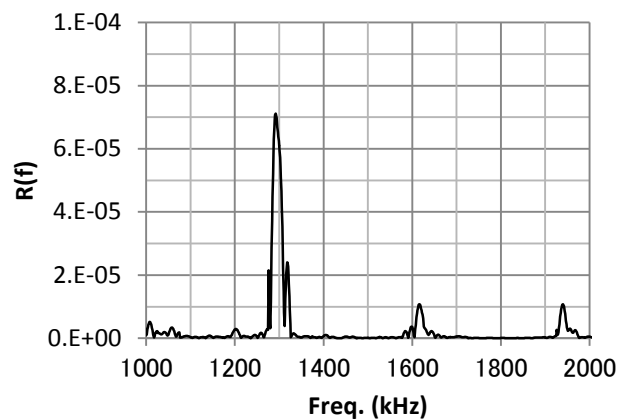


Fig. 6 Resonance spectrum with wide detection method (50 kHz)

の手法を”単一周波数励磁による広帯域検出法”(以下、単一周波数励磁)とする。本手法の結果(Fig. 6)は、Fig. 4 のスペクトルと Fig. 5 のスペクトルを掛け合わせた結果になる。したがって、Fig. 5 を用いて補正することでより正確な厚さを評価することができるが、本論文では補正をせずに評価を試みた。

このように、単一周波数で励磁しても、実際には広い周波数帯を持っているということは、エネルギー効率が悪いともいえるが、Fig. 4,6 に示すように十分に高い SN 比を持っていることから、実機環境においては、Fig. 5 に示す周波数特性を考慮して掃引間隔を調整することで、短時間での測定が可能である。また、励磁電流波形の歪みは測定系の電磁気的な結合の度合いで決まる。EMAT を変えれば当然であるが、同じ EMAT であってもケーブル長が異なったり、試験体が異なったりすることで測定系のインピーダンスが変わる。つまり試験体に EMAT を設置しないとインピーダンスが分からない。本手法のように、測定器を必要とせず試験体に EMAT を設置した状態で Fig. 5 に示す周波数特性を測定できる方法は、広帯域検出法を実機に適用するために有効な手法である。

次に、この特徴をより積極的に利用し、パルスエコー法のように1回の測定で Δf を求めることができる手法を検討する。まず 1000kHz から 2000kHz の正弦波を重ねたインパルス波形(Fig. 7)を、EMAT に印加する。次に得られた受信結果に対して、1kHz ごとに同期検波を用いる。この結果と励磁電圧波形の周波数成分を Fig. 8 に示す。励磁波形の持つ周波数帯域内に複数の共振周波数がある。このように励磁にインパルス波形を用いることで、必要とする範囲の共振周波数を1回の測定で得ることができる。この手法を”多重周波数励磁による広帯域検出法”(以下、多重周波数励磁)とする。インパルス波形を用いて信号解析する手法は一般的な手法であるが、UT の場合、十分な信号強度を維持して適用できる周波数帯域が狭く、 Δf が大きくなる板厚が薄い場合は適用が困難である。同様な効果を狙った手法として、チャ

ーブ波を用いた手法がある。

これにより、広帯域検出法を用いない場合は、1000kHz から 2000kHz を測定するのに数十分かかっていたのが、単一周波数励磁を用いることで、1 分程に、多重周波数励磁を用いることで、1 秒かからずに共振スペクトルを得ることができる。よって広帯域検出法を用いることで、分解能と測定時間の両立を図ることができる。広帯域検出法は、任意の周波数検出が可能な同期検波技術と、使用可能な周波数帯域が数 MHz と広い EMAT を用いることで適用可能な手法である。

一方で、1 回の測定で EMAT に与えることのできるエネルギーは有限であるので、広帯域の励磁を行うほど、1 周波数当たりのエネルギーは減少する。単一周波数励磁(同 50kHz)と多重周波数励磁(周波数帯域 1000kHz)の測定結果を比較すると、信号成分は 1/200 程度に小さくなっているのが確認できる(Fig. 9)。管内部の減肉量を測定する場合、超音波の反射が小さくなることが予想される。よって励磁方法は試験体の状況によって使い分ける必要がある。

以後の測定では指定しない限り多重周波数励磁を用い、SN 比が悪化して検出が困難な個所では単一周波数励磁を用いる。

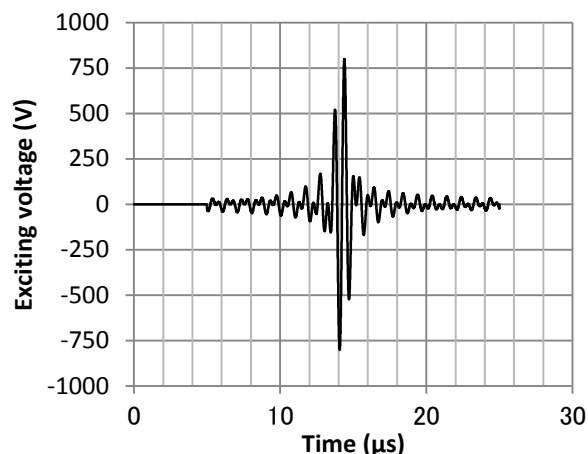


Fig. 7 Impulse exciting waveform

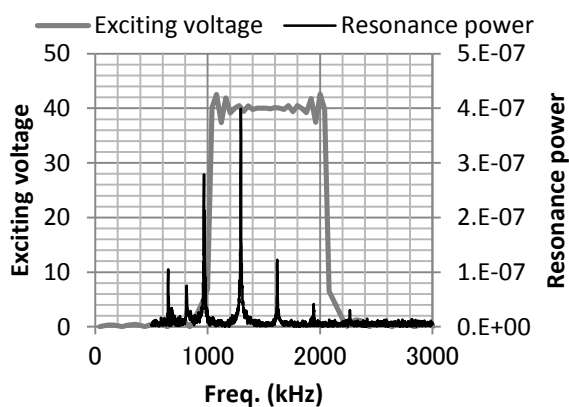


Fig. 8 Resonance spectrum with multiple frequency method

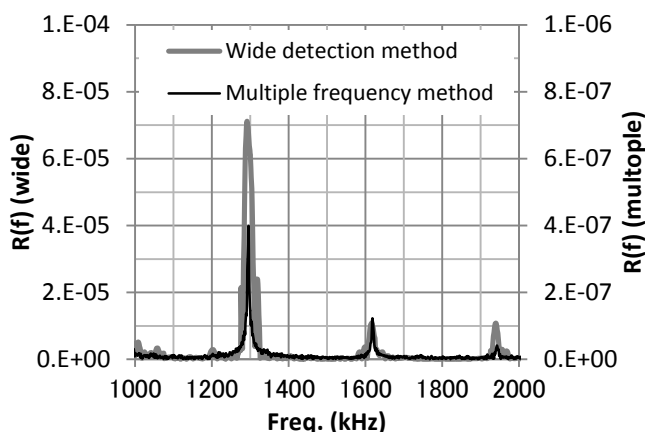


Fig. 9 Resonance spectrum with wide detection method and multiple frequency method

3. 実験結果

3.1 厚さ測定分解能

まず、使用した EMAT の測定範囲が十分な広さを持つことを確認するため、SS400 材の厚さ 3.00, 5.00, 10.00, 15.00, 20.00mm の平板を単一周波数励磁により測定した。3.00mm と 20.00mm の共振スペクトルを Fig. 10 に示す。3.00mm, 20.00mm の Δf はそれぞれ 540kHz, 80kHz であり、板厚に応じた Δf が確認できる。3.00mm と比較すると、20.00mm の共振エネルギーは約 1/2 になっている。しかし、十分に評価可能な SN 比を維持している。3.00mm から 20.00mm の評価結果を Fig. 11 に示す。図中ではノギスで測定した結果を実線で結び、それを真値とした。3.00mm から 20.00mm まで、 Δf は線形に変化しており、十分な測定範囲を持っていることを確認できた。

次に、分解能を確認するため、厚さ 3.50, 4.00, 4.40, 4.70, 4.90mm の平板の測定を 5 回行った。4.90mm と 5.00mm の共振スペクトルを Fig. 12 に示す。4.90mm, 5.00mm の Δf はそれぞれ 332kHz, 326kHz であり、0.10mm 差による Δf の違いを確認できる。判定結果と真値(ノギスでの測定結果)との比較を Fig. 13 に示す。最大誤差は 0.04mm であり、真値と測定結果はほぼ一致している。十分な厚さ測定分解能を持っていることを確認した。

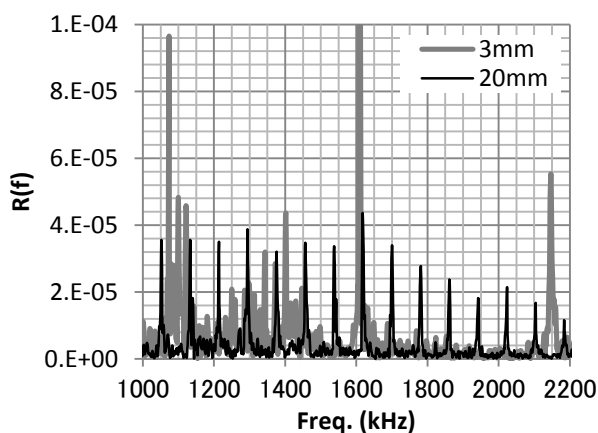


Fig. 10 Resonance spectrum on 3mm and 20mm

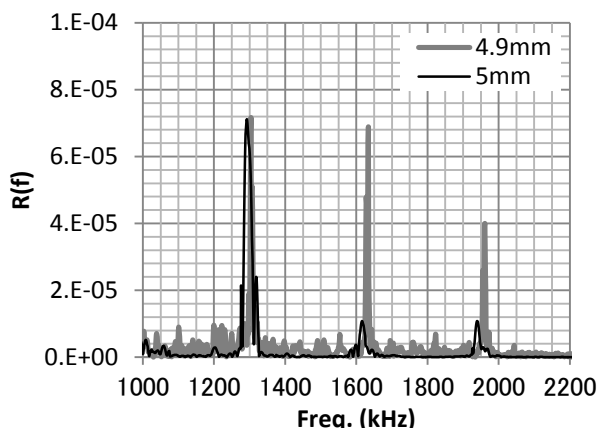


Fig. 12 Resonance spectrum on 4.9mm and 5mm

3.2 模擬 FAC 試験体

Fig. 14 はオリフィス下流に生じる FAC のマクロ的な形状を模擬した試験体である。旋盤を用いて配管内側を切削し、配管と同軸の減肉を加工した。FAC の減肉カーブを軸方向の円弧で模擬している。この試験体を、模擬流れ加速腐食試験体(以下模擬 FAC 試験体)と呼ぶ。試験体母材は、材質 STP370、配管呼び径 2B(公称 60.5mm)、呼び厚さは公称 5.5mm で、円弧のパラメータは $a=60\text{mm}$, $b=0.4, 0.5, 1.0\text{mm}$ とした。加工寸法は、母材の公差(0.1mm 以上)と同等の誤差を含む。 a は減肉の軸方向長さで、 b は健全部と減肉部の厚さの差、減肉量となる。

試験体の測定結果を Fig. 15, 16, 17 に示す。減肉はグラフの中央に存在している。グラフの両端は健全部である。UT, EMAT は、減肉の軸方向長さ a を同等にとらえている。EMAT がわずかな厚さの変化を UT と同程度に測定できていることを示している。減肉端から減肉中央にかけて、減肉面(超音波の反射面)は急になっていく。その間、共振エネルギーは超音波の反射が困難になるため減衰するが、本試験体ではすべての点において十分な SN 比で Δf を評価することができた。 b についても EMAT は UT と同等に評価できた。同じ減肉形状でも、小口径管になるほど減肉面が急になり、測定が困難になると考えられるが、今回用いた 2B 配管において、十分な SN 比

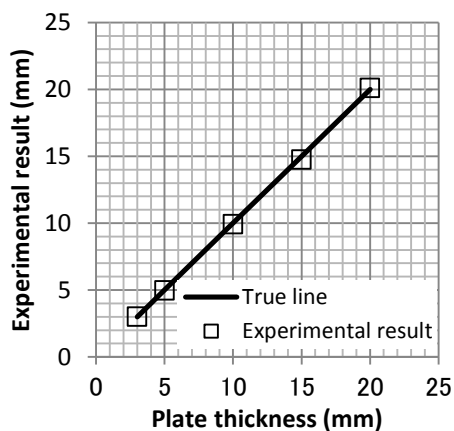


Fig. 11 Performance of dynamic range

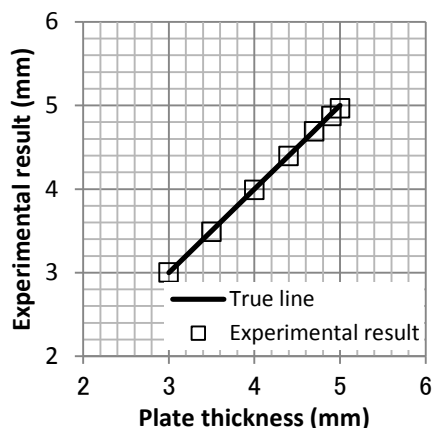


Fig. 13 Performance of resolution

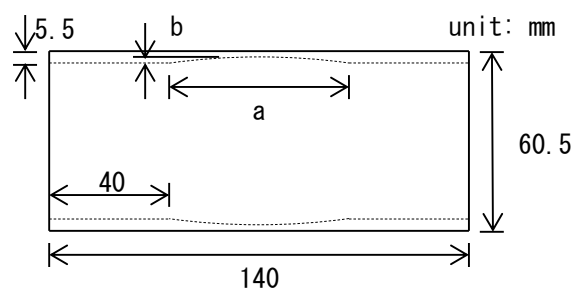


Fig. 14 Mock-up of FAC

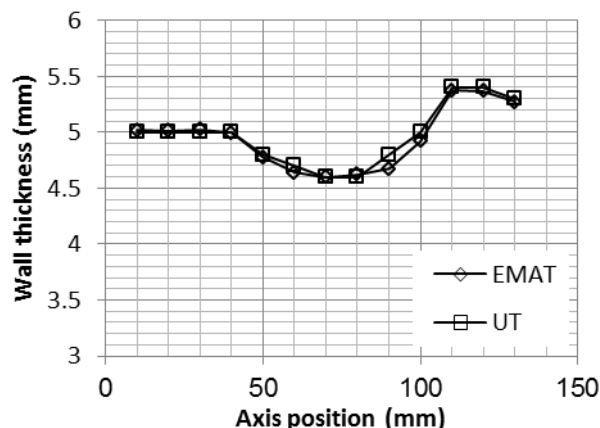


Fig. 15 Measurement result on a60b0.4

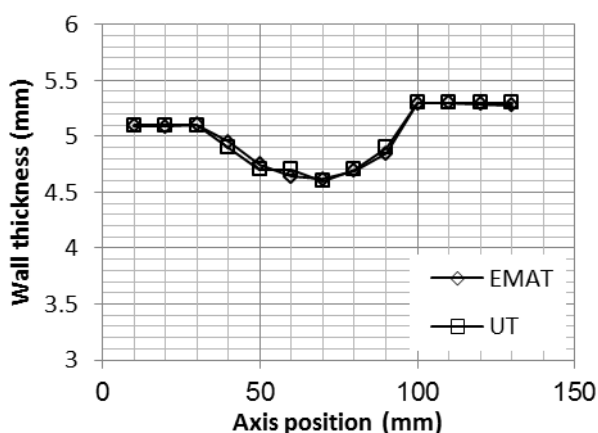


Fig. 16 Measurement result on a60b0.5

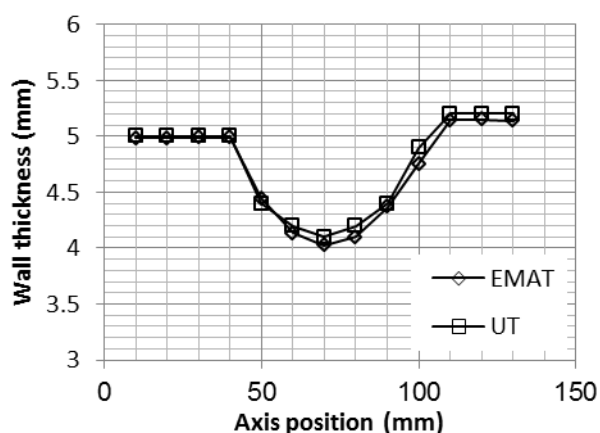


Fig. 17 Measurement result on a60b1.0

で UT とほぼ同様の測定結果が得られたことから、2B 配管以上で同様な結果が得られることが期待できる。

3.3 模擬鱗片試験体

実際の FAC では、減肉面に鱗片状の凹凸を持つことが知られている。一方、3.2 では管内部に凹凸を加工することが困難であるため、なめらかな減肉面を持つ試験体を用いた。ここでは、減肉面に凹凸がある場合の問題点の 2 つについて確認を行った。1 つ目は、減肉面の凹凸が信号に与える影響、2 つ目は最も減肉が進んでいる箇所の厚さの評価、である。

Fig. 18 は FAC のミクロ的な形状を模擬した試験体 (以下、模擬鱗片試験体) である。これは、減肉面に生じる鱗片模様を模擬している。平板にボールエンドミルで隙間なく球状の窪みを加工している。材質は SS400、健全部の厚さは 10.00mm の 2 体の平板である。これに対して切削深さ 1.00mm、鱗片半径 1.00mm または 50.00mm の加工を行った。模擬鱗片の形状を Fig. 18(b) に示す。模擬鱗片試験体は球状の加工面を持ち、球の径を R 、加工面直上から見たときの加工穴の半径を r 、加工穴の最も深い位置の板厚を t とした。実際の鱗片は、 $r=10\text{mm}$ よりも十分小さいと思われる。

単一周波励磁を用いて得られた共振スペクトルを Fig. 19 に示す。t09R1r1 は板厚を評価する Δf が明確に確認できる。これは減肉面に凹凸があると、Fig. 20(a) に示すように、傾きが大きい場合は、超音波は入射面に戻って来ず、凹凸の凸部頂上付近のように、入射面に対して平行な部分でのみ超音波は戻ってくるためと考えられる。一方、t09R50r10 では Δf を確認できない。Fig. 20(b) のように全体にわたって傾きが緩やかな場合は、厚さの異なる位置で、超音波が入射面まで戻ってきており、共振が発生しないことが予想される。鱗片の形状によって測定の可否が分かれるが、以上により、測定可能な場合の測定結果は、減肉の最も進んだ箇所の板厚を評価している可能性が高いと言える。UT でも同様なことがいえるが、UT のセンサ面積は EMAT に比べて十分小さいことから、鱗片の影響を受けにくい。鱗片の影響を小さくするには、信号強度を維持しつつ、UT と同程度にセンサ面積は小さい方が好ましい。一方で、実際の鱗片に近い $r=1\text{mm}$ の試験体において良好な測定結果を得られたことから、起こりうる鱗片模様をさらに検討する必要があるが、鱗片状の減肉面においては、現状の EMAT 形状で良好な測定結果が得られることが期待できる。

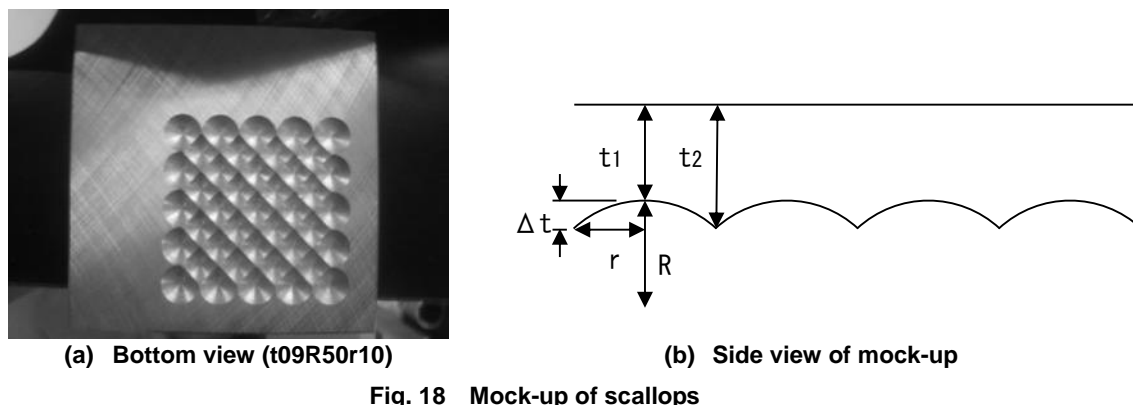


Fig. 18 Mock-up of scallops

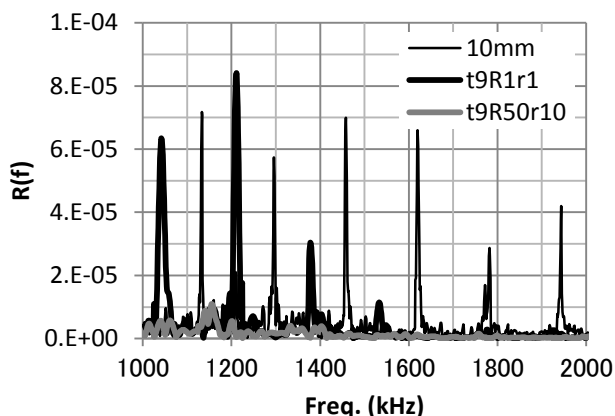


Fig. 19 Resonance spectrum on scallops

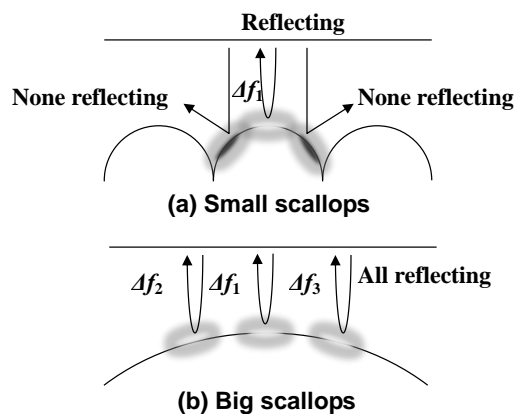


Fig. 20 Reflection on scallops

3.4 FAC 試験体

実機環境を模擬した減肉環境において作成した試験体の測定を行った。この試験体はオリフィスを持っており、オリフィス下流に FAC が存在している。この試験体を FAC 試験体と呼ぶ。母材は 3.3 で用いたものと同じである。試験体の測定位置を Fig. 21 に示す。日本機械学会の減肉管理規格では、小口径管の周方向測定点は 4 点としているが、本研究では、より多くのデータを得るため、周方向に 8 点測定した。同様の理由で軸方向にも 20mm 間隔で測定した。

Fig. 22 に減肉部"a04"と健全部"a16"の共振スペクトルを示す。FAC 試験体において、十分な SN 比で厚さを評価することができた。Fig. 23 に UT と EMAT による評価結果を示す。a 軸 3-9 付近に最大 0.3mm の減肉が確認できる。双方とも、同様な傾向を示しており、FAC において EMAT は UT と同等の評価が可能であることを確認した。

4. 結言

本研究により、EMAT は一般的な配管厚さ 3mm から 20mm の範囲で、周波数分解能 0.1mm 以下で厚さの評価を行うことができることを確認した。

FAC を模擬した円弧状の減肉において、EMAT による測定は UT と同様の測定結果を得られた。鱗片を模擬した試験体において、最薄部の厚さを精度よ

く得ることができた。さらに、実機模擬環境において作成した FAC 試験体において、UT と同等の測定結果を得ることができた。

以上のことから EMAT は FAC を対象にした測定において、UT と同等の性能を持っており、UT で測定が困難である測定箇所への補完(例えば常時監視システムのセンサ等)として、検討に値する手法だと言える。

今回の FAC 試験体においては測定可能であったが、減肉部において信号の減衰がみられることから、今後は FAC における鱗片状の凹凸と測定信号との関係や、実機への適用を見据えた、複数のセンサの配置および信号処理方法、高温環境への対応について検討を行う。

謝辞

本研究は経済産業省原子力安全・保安院の「平成 21 年度高経年化対策強化基盤整備事業」において実施した研究である。FAC 試験体は東京電力(株)様に提供いただいた。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 日本機械学会, ” 発電用設備配管減肉管理に関する規格”, 日本機械学会, 2005
- [2] B.W. Maxfield and C.M. Fortunko, The design and use of electromagnetic acoustic wave transducers,

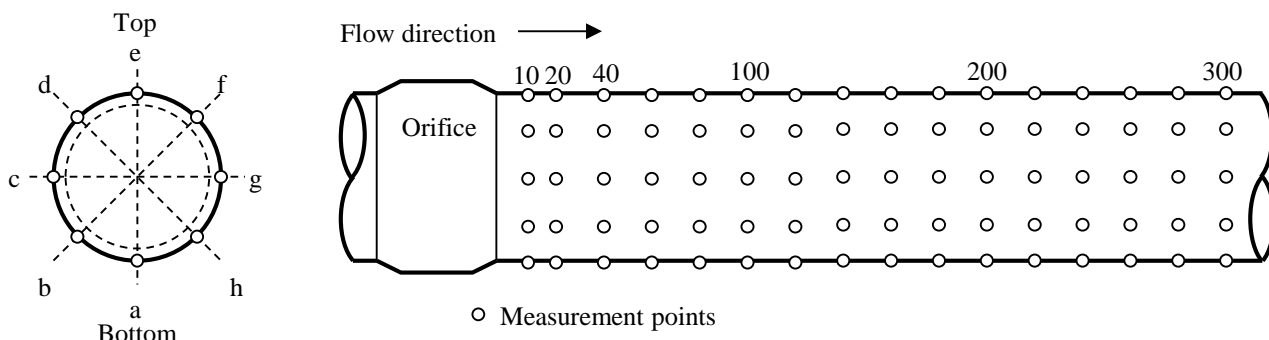


Fig. 21 Test piece with FAC

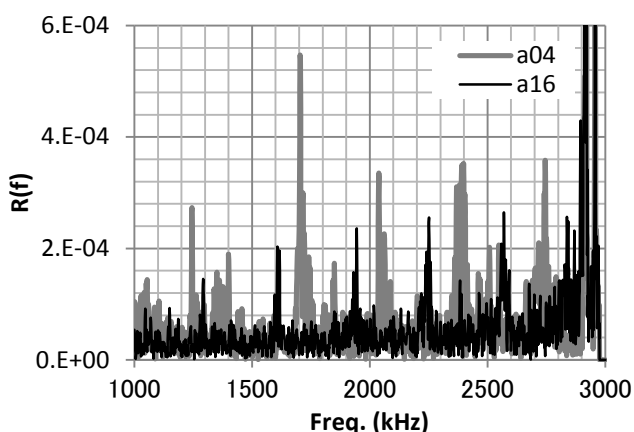


Fig. 22 Resonance spectrum on FAC

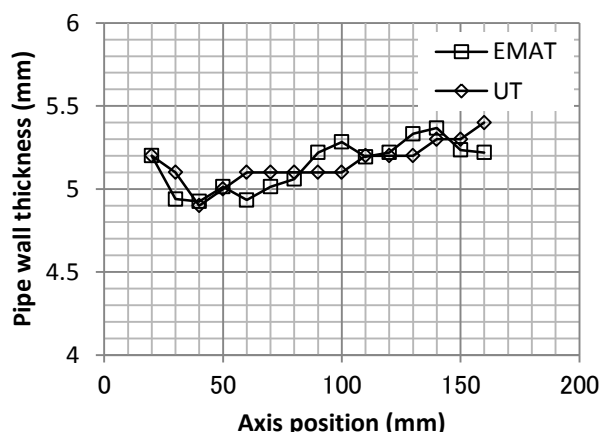


Fig. 23 Measurement result on 'a'

in: Material Evaluation, Vol.41, 1983, pp1399-1408.

- [3] R.B. Thompson, "Physical principles of measurements with EMAT transducers", in: Physical Acoustics, Vol.19, Academic Press, New York, 1990, pp. 157-200
- [4] K. Mirkhani et al., "Optimal design of EMAT transmitters", NDT&E International, Vol. 37, 2004, pp. 181-193.
- [5] 山崎友祐, 河部大輔, 大谷俊博, 平尾雅彦, "電磁超音波センサを用いた最適波形法による鋼管の減肉検査", 日本機械学会論文誌(A編), Vol. 67, No. 659, 2001, pp. 169-174
- [6] Smith, B.J., Martin, R. and Holt, R.P., "The use of EMATs for wall thickness measurements on corroded pipes", Proc 6th Int Conf on NDT Methods, Strasbourg, 1986, p. 49

- [7] K. Kawashima, "Very high frequency EMAT for resonant measurement", Proc IEEE Ultrasonic Symposium, No. 2, 1994, pp. 1111-1119.
- [8] H. Ogi, "Field dependence of coupling efficiency between electromagnetic field and ultrasonic bulk waves", J. Appl. Phys. 82 (8), 15, 1997, pp. 3940-3949
- [9] 平尾雅彦, 萩博次, "電磁超音波共鳴による疲労過程の非接触モニタリング", 非破壊検査, Vol. 51, No. 2, 2002, pp. 79-82
- [10] 丹波登, "超音波計測", (株)昭和堂, 1982, pp. 169-170

(平成 23 年 3 月 2 日)