

点集束型電磁超音波センサの SUS304 鋼におけるスリット検出性能の評価

芦田 一弘*, 滝下 峰史*, 中村 暢伴*, 荻 博次*, 平尾 雅彦*

Evaluation of the Slit Detectability of the Point-focusing Electromagnetic Acoustic Transducer in SUS304 Steel

Kazuhiro ASHIDA*, Takashi TAKISHITA*, Nobutomo NAKAMURA*
Hirotsugu OGI* and Masahiko HIRAO*

Abstract

A point-focusing electromagnetic-acoustic transducer (PF-EMAT) was developed and the slit detectability was evaluated. Based on the Lorentz force mechanism, this EMAT generated shear-vertical (SV) waves from concentric line sources on the top surface of a stainless steel plate, and the SV waves were focused on the focal point on the bottom surface of the plate in phase. The focusing effect improved the spatial resolution and detectability of slit defects located on the bottom surface. An artificial slit as shallow as 0.05-mm deep was well detectable at 2 MHz. Effect of the in-plane incident angle of the SV waves to the slit face, reproducibility of the measurements, and the liftoff effect were evaluated.



Key Words

Point-focusing electromagnetic acoustic transducer, Ultrasonic testing, Lorentz force, SV wave, SUS304 steel, Slit detection

1. 緒言

長年にわたり、老朽化した原子力発電所に対する高経年化対策の充実が、安全かつ安定的に運転するための最重要課題となっている。原子力発電所の压力容器や配管にはステンレス鋼材が使われるが、その溶接部には応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking, 以下 SCC とする) が発生することが知られている¹⁾。ステンレス鋼材は表面に強固な不動態皮膜を有するため腐食が発生しにくい、溶接施工の際に高温環境に曝されると Cr 濃度が大きく低下して溶接部近傍が腐食に対して鋭敏化する²⁾。この鋭敏化は、材料中の炭素濃度が高いほど発生しやすい傾向にあり、溶接施工に伴う残留応力の発生と、内部流体の溶存酸素の環境影響との重複作用によって SCC が発生する。

SCC は配管等の内面側に発生した場合、当該溶接部の切断等の破壊処置を施さなければ、目視による確認ができない。このような SCC に対しては圧電型斜角探触子を用いた超音波探傷試験 (Ultrasonic Testing, 以下 UT とする) が使われ、試験規程に基づいて SCC からの反射波の有無からその発生および進展を評価する³⁾。しかし、探傷面上に圧電型斜角探触子を接触させる試験では、探傷結果が表面状態 (グラインダー加工等による凹凸)、接触媒質量、押し付け圧力等の要因に影響を受けやすく、かつ、試験員の技量等による差異が発生しやすい。このような要因により、探傷現場では再現性の高いデータが採取できない場合が多い。

一例として、接触媒質量を 0.01 ml から 0.30 ml まで変化した時の圧電型斜角探触子 (周波数 2MHz, 公称屈折角 45°) でのスリットからのエコー高さの計測例を Fig.1 に示す。試験片は厚さ 12.7 mm のステンレス鋼材で深さ 1.0 mm のスリットが加工されている。Fig.1 (b) より、接触媒質量が 0.10 ml

以上ではエコー高さはほぼ一定だが、0.10 ml 以下になると接触媒質量の減少とともにエコー高さが小さくなる。探傷時には探触子を手動または自動で走査するため、接触媒質量が変化することがある。これが再現性の低下の一因となっている。

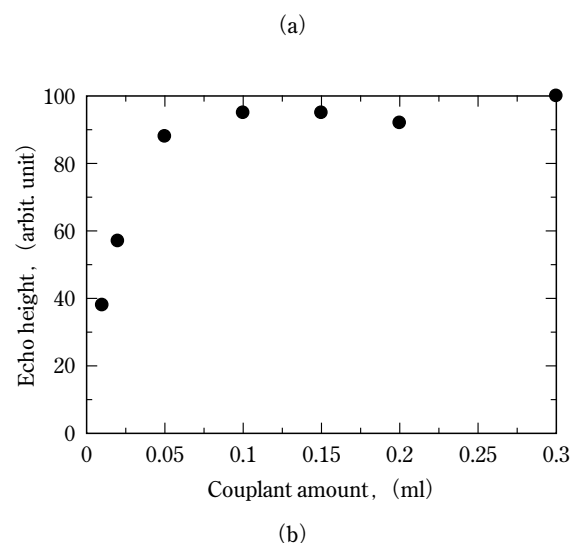
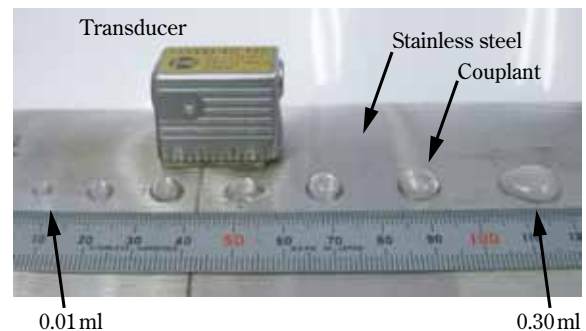


Fig.1 (a) Piezoelectric transducer, specimen, and couplant (b) Echo heights measured with different amounts of couplant at 2 MHz

原稿受付: 平成 27 年 4 月 30 日 掲載決定: 平成 27 年 11 月 17 日

* 大阪大学大学院基礎工学研究科 (大阪府豊中市待兼山町 1-3)
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

接触媒質や表面状態の影響を除去できる非接触での超音波計測法としては、レーザ超音波⁴⁾、空気伝搬超音波⁵⁾、電磁超音波^{6)–9)}等の手法がある。本研究では、これらの中でも電磁超音波に注目する。この手法は超音波の送受信に電磁超音波センサ (Electromagnetic Acoustic Transducer : EMAT) を用いる。EMAT は小型かつ設置が容易であり、音源を直接試料内に発生させるため試料の表面状態の影響を受けにくい。レーザ超音波のような光学系の精密な管理が不要であり、空気超音波のように現場の大気や湿度、対流の影響を受けることもない。一方で、圧電型探触子に比べると送受信効率が低い欠点がある。特にステンレス鋼のように電気抵抗が大きい材料では、発生する渦電流の浸透深さが大きくなり、励起超音波の波長に近づくため送信効率が低下する。また、ジュール損失も大きく、これも送受信効率を低下させる。

EMAT の送受信効率を高めるために、著者らのグループでは線集束型 EMAT (以下、Line-Focusing (LF)-EMAT とする) を開発した¹⁰⁾。これは複数の線音源から発生した SV (Shear Vertical) 波を材料中の焦点で同位相にて集束させ、送受信効率と空間分解能を高めたセンサであり、アルミニウム合金や鋼に対して適用された^{10), 11)}。鋼においては、30mm 厚さの平板の底面に導入した深さ 0.05mm のスリットを検出することに成功している¹¹⁾。

しかし、LF-EMAT では 20mm ~ 30mm 程度の長さの焦点線上に超音波を集束させるため、実際問題となる長さの短い SCC やピット状の欠陥に対して十分な強度の信号を得られていない。そこで、SV 波を材料中の一点 (焦点) に同位相で集束させ、送受信効率と空間分解能をさらに高めた新たな点集束型 EMAT (以下、Point-Focusing (PF)-EMAT とする) の開発に取り組んでいる。その結果として、これまでに PF-EMAT を試作し、その集束性能を評価してきた¹²⁾。

原子力発電所では、日本機械学会が策定した「発電用原子力設備規格 維持規格」を国が技術評価し、我が国の原子力発電所の維持のための指針として適用している。この規格では、UT の検出限界は、配管溶接部の割れに対しては深さ 1.5mm¹³⁾ とされている。本研究ではこの寸法よりも小さな割れを再現性良く検出することのできる検査技術の確立を目的としている。本論文では、0.05mm ~ 1.45mm 深さの割れを模擬したスリット入り試験片に対して、PF-EMAT のスリット検出性能を従来の圧電型斜角探触子と比較しながらより詳細に評価する。併せて、スリットに対する SV 波の入射角度の依存性、リフトオフの影響、ならびに計測の再現性について評価する。PF-EMAT はローレンツ力を利用したセンサであり、非磁性の金属材料への適用を想定して設計されている。原子力発電所の配管には SUS304 や SUS316 といった非磁性のステンレス鋼が用いられており、本論文ではその代表的な鋼材である SUS304 を試験片として使用する。

2. 点集束型電磁超音波センサの作動原理

2.1 基本原理

EMAT にはローレンツ力を利用した駆動方式と磁歪効果を利用した駆動方式があるが、非磁性材料であるステンレス鋼に対しては前者を用いる。集束型 EMAT の概念図^{10), 11)}を Fig.2 に示す。探傷面上に配置した蛇行コイルに高電圧の交流信号を与えると、材料内に渦電流が発生する。蛇行コイルの

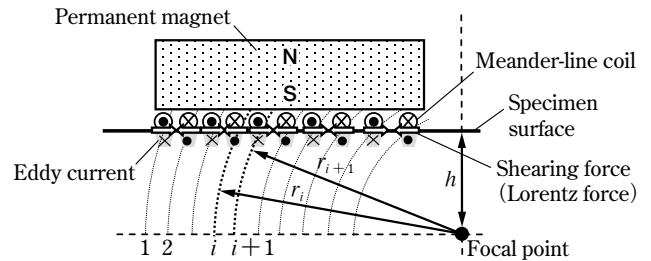


Fig.2 Schematic of designing the SV wave focusing EMAT

上に永久磁石を設置しておく、渦電流と静磁場との作用によってローレンツ力が材料表面に平行かつコイルと垂直方向に発生する。これが音源となって SV 波が材料中を斜め方向に伝搬していく。

Fig.3 に文献¹⁴⁾ を参考にして計算した単一線音源から放射された SV 波の入射角と振幅および位相の関係を示す。これはステンレス鋼材に対する計算結果である。約 32° に強い指向性を示しており、この角度までの位相はほぼ一定であるが、40° 以上の入射角では振幅が著しく低下する。PF-EMAT では、この指向性の強い SV 波を同位相で重ね合わせ、なおかつ材料中の一点に集束させることにより、さらに指向性と空間分解能を高める。Fig.2 に示す蛇行コイルの隣り合った線の直下から送信される SV 波は、互いに位相が π だけずれている。各音源から焦点までの距離が半波長ずつずれるように式 (1) を使って蛇行コイルの間隔を設計すると、焦点位置において全ての SV 波が同位相になる。

$$r_i - r_{i+1} = \frac{C}{2f} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 C は横波の音速、 f は周波数である。 r_i は音源 i から焦点までの距離である。実際に製作した PF-EMAT は 7 つの線音源を有しており、板厚 20mm のステンレス鋼材での使用を想定して試料表面から焦点までの距離が $h = 20\text{mm}$ 、 $r_i = 20.6\text{mm}$ となるよう設計した。音速は 3100m/s、周波数は 2MHz とした。このとき試験片表面において蛇行コイルの i 番目の線と焦点直上の点の距離は $\sqrt{r_i^2 - h^2}$ となる (Fig.2)。永久磁石には直方体形状 (50mm × 20mm × 30mm (磁化方向)) のネオジウム磁石を用いた。従来の LF-EMAT では蛇行コイルを用いて、材料中の焦点に SV 波を集束させてきた (Fig.4 (a))。

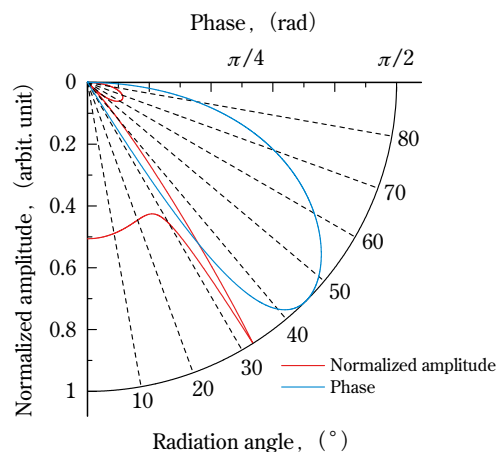


Fig.3 Amplitude and phase distribution of SV waves generated from a line source calculated for stainless steel

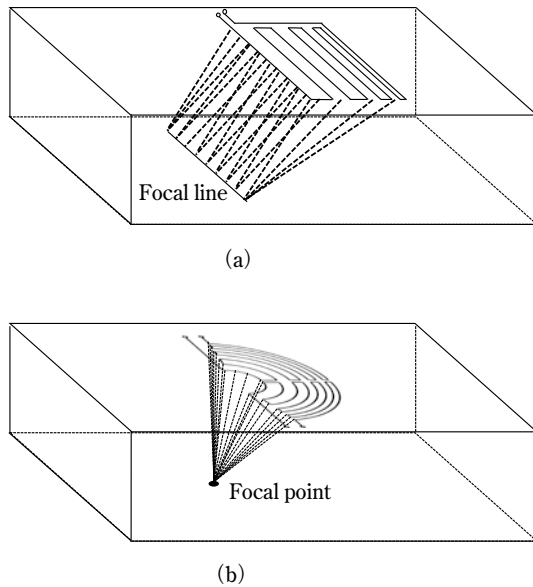


Fig.4 Schematics of (a) meander-line coil for line-focusing EMAT and (b) concentric meander-line coil for point-focusing EMAT

しかしながら、LF-EMATではステンレス鋼に発生する微細な欠陥に対する検出感度が低い。

そこで、LF-EMATのコイルを同心円弧形状（全開き角 160° ）とし、Fig.4 (b)に示すような面内にもSV波を点集束させるPF-EMATを作製した。送信用と受信用にコイルを分離している。送信用・受信用蛇行コイルの大きさはともに約 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ である（コイル全体の大きさはおよそ $30\text{mm} \times 15\text{mm}$ ）。主な改良内容は以下のとおりである。

- (1) コイルを曲線化することにより面内にも一点に集束させて集束効果を高めた。
- (2) LF-EMATでは、周波数 4MHz であったが、伝搬効率の向上を目的に周波数を 2MHz とし、材料中の結晶粒による散乱減衰の影響を低下させた。
- (3) 周波数を低下させたことによりEMATのインピーダンスが低下するため、コイルの巻き数を増加させた。

これらの改良により、Fig.4 (b)の形状は高い送受信効率を有する。焦点から見て鉛直方向の角度 13° から 37° の範囲にある、7本のコイル線から励起されたSV波を一点に集束させる。一方、受信ではその特定の一点にある散乱体（例えばスリットや割れ）で散乱した全ての波のうち、 2MHz のSV波のみを選別し、同位相で重畳させて強い信号を形成する。なお、これ以外の散乱波もPF-EMATは受信するが、位相が揃っていないため互いに打ち消しあい、有意な信号とはならない。

2.2 超音波送受信システム

超音波送受信システムは、高出力スーパーヘテロダインスペクトロメータ（RITEC, RAM-10000）、プリアンプ、インピーダンスマッチングのためのコンデンサ、電流逆流防止のためのダイプレクサ、超音波反射波形の観察のためのオシロスコープ、そしてPF-EMATで構成される。

PF-EMATに入力する信号は駆動周波数 2MHz 、サイクル数12回、バースト幅 $6\mu\text{s}$ のバースト波である。受信信号はプリアンプで増幅した後にスーパーヘテロダインスペクトロメータに送られ、受信信号に対してヘテロダイン処理を行い、振幅を計測する（平均回数100回）。受信信号はオシロスコー

プにも送られ、平均化処理（平均回数16回）後の波形を観察しながらPF-EMATを走査してスリットを探傷する。受信信号の解析では、ヘテロダイン処理を行うことで 2MHz の成分のみの振幅を計測できる。

3. 実験内容

試験片はステンレス鋼材 SUS304 であり、放電加工により深さの異なる表面に垂直なスリット（深さ $0.05\text{mm} \sim 1.45\text{mm}$ 、幅 0.5mm 、長さ 10mm ）を7ヶ所に導入した。なお、試験片寸法は、長さ 500mm 、幅 140mm 、厚さ 20mm である。

PF-EMATでのスリットの検出性の確認、圧電型斜角探触子を用いたUTでの検出性との比較、さらに、現場での探傷時に想定される影響を評価する。具体的には次の実験を行った。

- (1) ステンレス鋼材に加工されたスリットの、PF-EMATによる検出性の評価。
- (2) (1)での試験片に対する圧電型斜角探触子による検出性の評価。
- (3) 現場探傷で予想される影響の評価（センサの傾きによるSV波の入射角度への依存性、リフトオフの影響、および再現性）。

4. 実験結果と評価

4.1 点集束型電磁超音波センサのスリット検出性

各スリットに対して直交方向（Fig.6の挿入図に示すy方向）にPF-EMATを走査してスリットの検出を試みた。各スリットで最大振幅を示す代表波形をFig.5 (a) ~ (d)に示す。この結果より、各スリットは明瞭に検出できることが確認できた。

超音波探傷では反射面の大きさに比例して反射波の振幅が大きくなるのが一般的であるが、 $d = 0.80\text{mm}$ のスリットの振幅値が最も高くなった。これは、スリット先端とコーナ部（根元）からの散乱波が受信されるときに、 $d = 0.80\text{mm}$ のスリットでは両者の位相差が小さくなり、重複することが原因として考えられる。

次に、PF-EMATをスリットに対し直交方向（y方向）に 1mm ごとに走査し、振幅値を計測した結果をFig.6に示す。これは、Fig.5に示すゲートで切り取った受信信号に対してヘテロダイン処理を施した結果である。これより、スリットの前後方向に対して $\pm 3\text{mm}$ 程度の集束範囲を有していることが分かる。

4.2 UTとのスリット検出性の比較

原子力発電所の供用期間中検査では、JEAC4207³⁾に基づく方法で各圧力容器や配管の溶接部に対してUTを実施している。ここでは、JEAC4207³⁾に規定されている方法でPF-EMATとのスリット検出性を比較した。具体的には、非集束型圧電型斜角探触子（SV波、周波数 2MHz 、公称屈折角 45° ）を用いたUTにて、各スリットからの最大エコー高さを求めた。なお、非集束型圧電探触子と比較したのは、第一段階の探傷で使用し、主に探傷のみを目的とする探触子であるためである。

圧電型斜角探触子で得られたエコー高さとPF-EMATで得られたスリットの振幅をFig.7に示す。UTではエコー高さがCRT画面上に相対強度で表示され、PF-EMATでは振幅が表示される。よって、両者とも $d = 1.45\text{mm}$ のスリットからのエコー高さと振幅からの低下の程度をdB単位に換算し比較した。

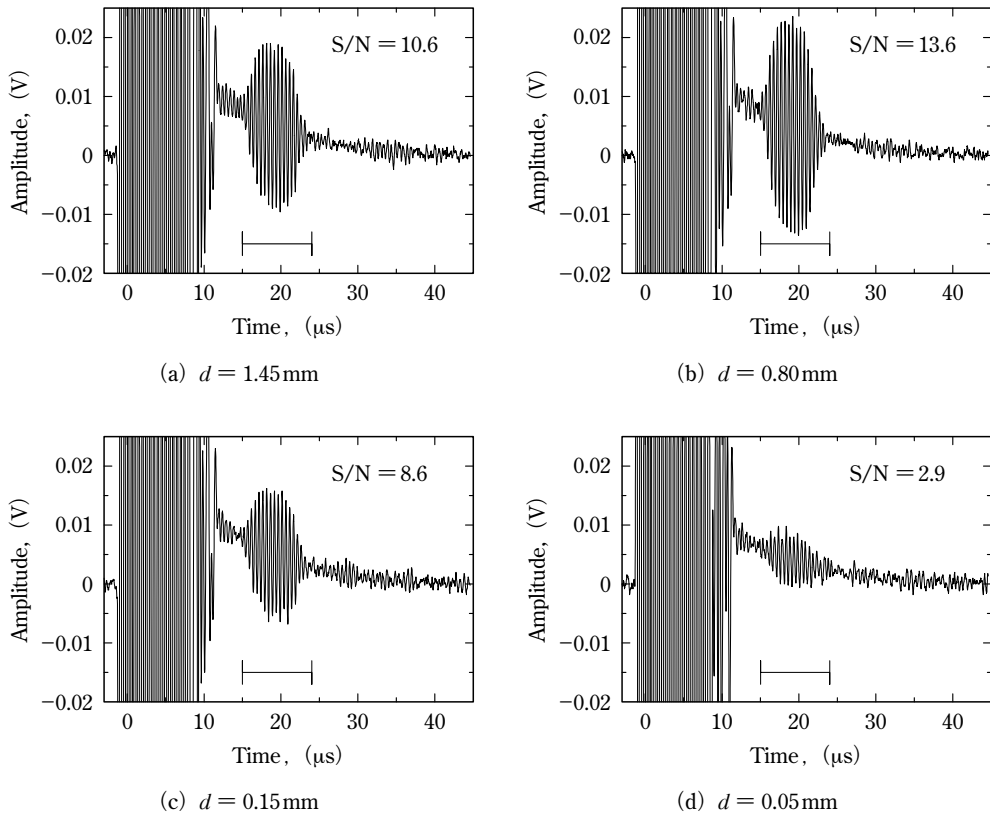


Fig.5 Typical waveforms measured with slits (a)~(d) by the PF-EMAT. Bars indicate the gate position used in the superheterodyne measurement

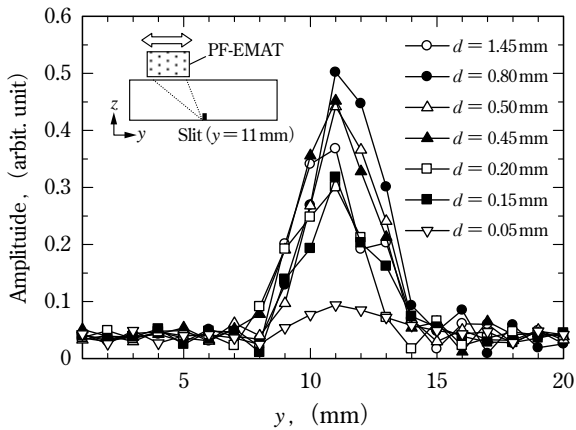


Fig.6 Amplitude profile in the y direction

Fig.7より、UTではスリットが小さくなるにしたがって、エコー高さは顕著に低下するが、PF-EMATでの振幅の低下傾向は小さい。なお、Fig.7中の Estimation (γ) は次式で

$$\gamma = d \sin \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda R_0}} \dots\dots\dots (2)$$

与えられる¹⁵⁾。これは、直線溝形状の割れに対する形状反射能率であり、圧電型斜角探触子による音圧反射率を表している。ここで、 λ は横波の波長、 R_0 は探触子からスリットまでの距離、 θ は入射角を示す。同式はUTでの振幅低下がスリット深さに比例することを示している。

以上のことから、PF-EMATは検出限界値が小さい。このことは、PF-EMATが小さい割れを高感度で検出できることを示唆している。

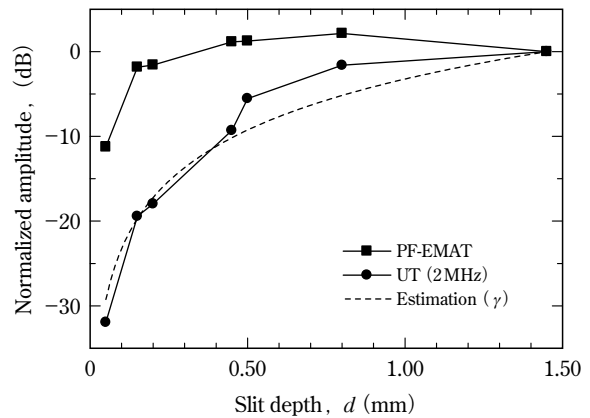


Fig.7 Comparison of normalized amplitudes measured by the PF-EMAT and the piezoelectric transducer. Dashed line indicates the estimation from the reflectivity of flaw geometry (γ)

4.3 探傷現場で予想される影響の確認

4.3.1 センサの傾きによる影響

現場探傷を考慮した場合、割れに対するセンサの傾きによる振幅変化、表面凹凸によるリフトオフの影響、計測の再現性の問題が主に想定される。

まず、スリット ($d = 0.80\text{mm}$) を用いて、Fig.8に示すようにPF-EMATが傾いた場合の振幅変化を5°間隔で計測した。その測定結果を Fig.9に示す。

Fig.9の結果より、 $\theta = 0^\circ$ において振幅が最大となり、 $\pm 55^\circ$ 以上の範囲ではノイズレベルまで低下することが確認できる。振幅が-6dB以上になる範囲は $\pm 25^\circ$ 程度である。ノイズレベルが約0.05であることからSN比が2以上になる範囲は $\pm 40^\circ$ 程

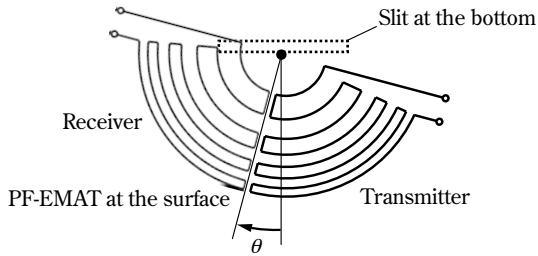


Fig.8 Measurement setup to evaluate the effect of oblique angle of the PF-EMAT

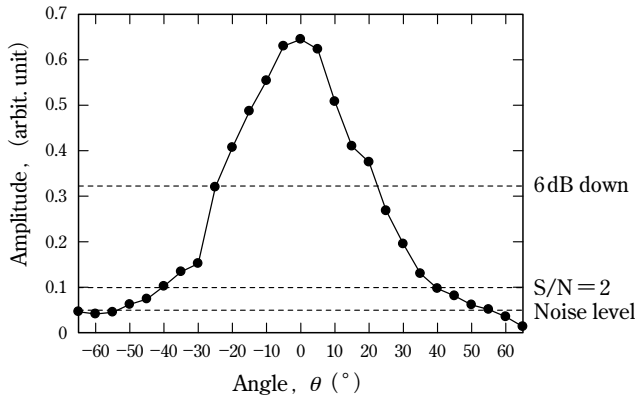


Fig.9 Leaning angle dependence of echo amplitude for the $d = 0.80$ mm slit

度である。UTでは±15°程度¹⁶⁾の範囲で探触子を走査することが一般的である。PF-EMATをこの範囲で走査した時の振幅変化の割合は4dB程度であり、実用的には問題ないものとする。

4.3.2 実験員ごとの再現性の確認

PF-EMATの実験に従事している実験員1名とPF-EMATに触れたことがない実験員4名の計5名(Examiner 1～Examiner 5とする)で、ブラインドテスト方式にて各スリットの最大振幅値をヘテロダイン処理で計測し、再現性を評価した。各々の最大振幅値の計測結果をTable 1に示す。

この結果から、異なる実験員による各スリットからのエコー高さのばらつきは最大でも1.15 dBであり、PF-EMATによる探傷は技量に依存せず、高い再現性を可能にすることが期待される。

4.3.3 リフトオフの影響の確認

PF-EMATと探傷面の間に厚さ0.1mmのアクリルシートを

Table 1 Maximum amplitudes measured by five examiners

		Slit depth (mm)						
		1.45	0.80	0.50	0.45	0.20	0.15	0.05
Amplitude (arbit. unit)	Examiner 1	0.447	0.607	0.501	0.499	0.365	0.351	0.120
	Examiner 2	0.440	0.601	0.507	0.510	0.364	0.357	0.127
	Examiner 3	0.429	0.607	0.518	0.505	0.382	0.360	0.131
	Examiner 4	0.434	0.608	0.502	0.503	0.382	0.366	0.133
	Examiner 5	0.431	0.608	0.525	0.518	0.383	0.368	0.137
Difference of amplitude (dB)		0.360	0.100	0.290	0.320	0.440	0.410	1.150
Average of difference (dB)		0.44						

挟み、リフトオフを模擬した間隔を付与する。その間隔を変えながら $d = 1.45$ mm のスリットに対してスリットと直交する方向 (y 方向) に PF-EMAT を走査し、1 mm ごとに振幅を計測した。なお、コイルには、コイル保護と固定を目的とした絶縁テープ (厚さ: 約 0.1 mm) が貼付されているため、実際のリフトオフはさらに 0.1 mm だけ大きい。

リフトオフを変えたときのスリットからの振幅高さを Fig.10 に示す。この結果より、リフトオフが 0.3 mm 以下であれば、スリットの検出が可能である。

UT では寸法が保証された人工欠陥を導入した対比試験片を用いて、探傷を実施している。しかし、管理された対比試験片は表面状態が良好であるが、現場対象物の表面状態は加工に伴うきずや腐食等の影響により、対比試験片と同等の表面状態である場合は極めて少ない。このことにより、探傷時にはエコー高さが低下し、検出できる欠陥には制限が与えられる。

ここで示したように、本研究での PF-EMAT ではリフトオフが 0.3 mm 程度までのスリットからの超音波信号の識別が可能である。これは、PF-EMAT が現場探傷において表面状態の影響を受けにくい手法であることを示唆している。

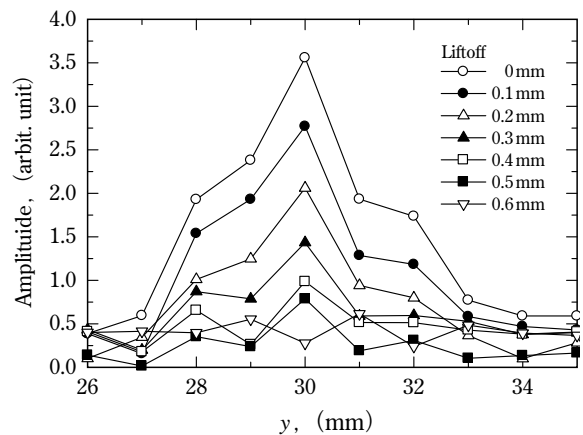


Fig.10 Lift-off dependence of echo amplitude

5. 結言

本研究において、以下の新たな知見を得ることができた。

- (1) 開発した PF-EMAT により、超音波の伝搬特性が低下するステンレス鋼材に対しても、深さ 0.05 mm のスリットを明確に検出できることが確認できた。
- (2) PF-EMAT ではエコー高さがスリット深さに比例しなかった。これは、スリット先端とコーナー部 (根元) からの散乱波の干渉によって、 $d = 0.80$ mm のスリットの振幅値が最も高くなったことが原因として考えられる。
- (3) 現場探傷を考慮した場合、割れに対してセンサが傾く場合も想定される。この確認を行った結果、SN 比が 2 以上となるセンサの傾きは ±40° 程度の範囲であり、現場探傷には影響を与えないことが分かった。
- (4) 実験員が変わった場合のスリット検出のばらつきは最大でも 1.15 dB 以内であり、高い再現性を実現することができた。また、PF-EMAT を用いた探傷では技量の程度に依存しにくいことも分かった。
- (5) リフトオフ量が 0.3 mm 以下であればスリットの検出が可能である。



以上のことより、PF-EMATのスリットの検出性能が確認された。PF-EMATは検出限界値が小さく、探傷現場で予想される表面粗さ等の影響についても、非接触で接触媒質を用いないPF-EMATの優位性が期待できる。よって、PF-EMATは探傷現場においても割れの検出能力が高い手法となりうる可能性が高い。

本研究結果を踏まえて、今後はSN比とヘテロダイン処理を用いた超音波反射信号の識別だけで、SCCの検出ができるPF-EMATの適用方法を探傷現場に提案したく考えている。

参 考 文 献

- 1) 矢川元基：原子力プラントのエイジングと寿命評価，原安協ブライマー，No.7, pp.19-20, (2008)
- 2) 溶接学会編：溶接・接合技術特論，産報出版，pp.176-178, p.202, (2003)
- 3) 日本電気協会：軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程，JEAC4207-2008
- 4) 落合 誠，三浦崇広，山本 智：レーザー超音波探傷技術の開発と原子炉内保全への適用，東芝レビュー，61(1), pp.44-47, (2006)
- 5) H. Nishino, T. Asano, Y. Taniguchi, K. Yoshida, H. Ogawa, M. Takahashi and Y. Ogura：Precise Measurement of Pipe Wall Thickness in Noncontact Manner Using a Circumferential Lamb Wave Generated and Detected by a Pair of Air-Coupled Transducers, Japanese Journal of Applied Physics, 50(7S), p.07HC10, (2011)
- 6) R. B. Thompson：A Model for the Electromagnetic Generation of Ultrasonic Guided Waves in Ferromagnetic Metal Polycrystals, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, SU-25, pp.7-15, (1978)
- 7) G. A. Alers and D. T. MacLauchlan：High Frequency, Angle Beam EMATs for Weld Inspection, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, ed. D. O. Thompson and D. E. Chimenti (Plenum, New York, 1982), 2A, pp.271-281, (1983)
- 8) W. B. Maxfield and C. M. Fortunko：The Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers (EMATs), Materials Evaluation, 41(12), pp.1399-1408, (1983)
- 9) K. Kawashima：Electromagnetic Acoustic Wave Source and Measurement and Calculation of Vertical and Horizontal Displacements of Surface Waves, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, SU-32, pp.514-522, (1985)
- 10) H. Ogi, M. Hirao and T. Ohtani：Line-Focusing of Ultrasonic SV Wave by Electromagnetic Acoustic Transducer, Journal of Acoustical Society of America, 103(5), pp.2411-2415, (1998)
- 11) H. Ogi, M. Hirao and T. Ohtani：Line-Focusing Electromagnetic Acoustic Transducer for the Detection of Slit Defects, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 46(2), pp.341-346, (1999)
- 12) T. Takishita, K. Ashida, N. Nakamura, H. Ogi and M. Hirao：Development of Shear-Vertical Wave Point-Focusing Electromagnetic Acoustic Transducer, Japanese Journal of Applied Physics, 54, p.07HC04, (2015)
- 13) 日本機械学会：発電用原子力設備規格 維持規格，JSME S NA1-2008
- 14) G. F. Miller and H. Pursey：The Field and Radiation Impedance of Mechanical Radiators on the Free Surface of a Semi-Infinite Isotropic Solid, Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 223(1155), pp.521-541, (1954)
- 15) 日本非破壊検査協会編：超音波探傷試験Ⅲ，pp.69-71, (2001)
- 16) 日本規格協会編：JISハンドブック，43, 非破壊検査，p.767, (2012)