

自作した電磁超音波探触子による欠陥の画像化

Visualization of Defects by Self-produced Electro-Magnetic Acoustic Transducer

京都大学エネルギー科学研究所 大下 敬之 Takayuki OHSHITA

京都大学エネルギー科学研究所 松本 英治 Eiji MATSUMOTO Member

京都大学エネルギー科学研究所 琵琶 志朗 Shiro BIWA Member

The Electro-Magnetic Acoustic Transducer (EMAT) consisting of magnets and coil can transmit and receive ultrasonic waves without contact to the specimen. So, it is expected to be used for remote testing/monitoring of structures in severe condition. This paper discusses techniques of ultrasonic flaw detecting suitable for EMAT, e.g., waveform processing of the received signal and ultrasonic imaging technique. We next evaluate the characteristics of a self-produced Lorenz type EMAT such as the amplitude distribution, the directivity and the lift-off dependence of the transmitted wave. Scanning the EMAT over the surfaces of specimens with several kinds of defects and employing the above techniques, we obtain ultrasonic images which can identify the position, the size and the shape of each defect.

Keywords: Electromagnetic Acoustic Transducer, Nondestructive Evaluation, Ultrasonic Testing, Ultrasonic Imaging

1. 緒言

原子力プラントをはじめとするエネルギー関連施設の非破壊評価技術は保全技術の中でも重要な位置を占めている。欠陥の探傷法として、超音波は透過性がよいので広範囲に応用されているが、圧電素子や磁歪素子による従来の方法は、滑らかな面を持つ評価対象に結合剤を介して接触させなければならないなどの制約がある。それに対して、コイルと永久磁石から構成される電磁超音波探触子(EMAT)は、非接触で超音波の送受信が可能である。そのため、対象物が運動中や表面が塗膜や錆に覆われている対象や、高速スキャンや遠隔操作が可能なため、高温、狭隘、放射線下などの過酷な環境での非破壊評価に応用が期待されている[1]。しかし、既存の EMAT は送受信効率の低さ、送信波のモードの複雑さや指向性が原因で、微小な欠陥の同定やサイジングなど実用的な探傷のためには制約が多く、多数の EMAT を配列したアレイタイプをもちいて単一の EMAT の性能を補うことが行われている。そこで、EMAT による超音波送受信の理論・実験・シミュレーションを通じて、その最適設計法、受信波形の処理技術、欠陥の画像化技術を確立するとともに、欠陥探傷に適した EMAT を製作して、より広範囲に応用が可能な欠陥検査技術の確立を目指す。

連絡先: 松本英治、〒606-8501 京都市左京区吉田本町、京都大学エネルギー科学研究所、電話: 075-753-5247、e-mail: matumoto@energy.kyoto-u.ac.jp

EMAT には、コイルによる渦電流と磁石からの静磁場により生じるローレンツ力を利用する方法と、励磁コイルによる変動磁場下の強磁性体の磁歪を利用する方法がある[2][3]。ローレンツ型 EMAT の基本原理は Ludwig ら[4]や Thompson [5]により研究され、Ogi ら[3]により有限要素法を用いた数値解析も行われている。また Mitsuda ら[6]により EMAT による受信機構を含めての超音波探傷のシミュレーション、船岡ら[7]により EMAT による欠陥の超音波画像化がおこなわれている。

本研究では自作 EMAT を用いた人工欠陥の探傷をおこなった。2 章では EMAT の送受信機構を示し、3 章では EMAT による受信波に対する波形処理法や超音波画像化法を示す。さらに 4 章では自作した EMAT の基本的性能および、探傷試験の結果を示す。

2. EMAT による超音波の送受信機構

EMAT の基本構成は、静磁場を発生させる永久磁石と変動磁場を励起あるいは検出するコイルからなる。Fig.1 は横波用のローレンツ型 EMAT の概略図である。コイルに紙面と垂直な方向に高周波電流が流れると、コイル周辺に変動磁場が発生し、導体試料表面近傍では電磁誘導の法則により、この変動磁場を打ち消す向きに渦電流が生じる。その際に永久磁石によるバイアス磁場下で渦電流の担い手である自由電子にローレン

ツ力が働く。このローレンツ力の影響を受けた自由電子が試料内のイオンと衝突することにより弾性波が発生する。一方、受信過程は送信過程とは逆の過程をたどる。送信過程で生じた弾性波が試料内を伝ばし、欠陥や試料底部で反射した後に EMAT 側の試料表面部分に戻り、表面を振動させる。その振動が永久磁石による静磁場下で起こることにより試料表面近傍に渦電流が生じる。この渦電流の時間変化が周囲の磁場変動を起こし、電磁誘導の法則により EMAT コイルに電圧変化が生じる。このときのコイルの電圧変化が EMAT による超音波の受信信号となる。

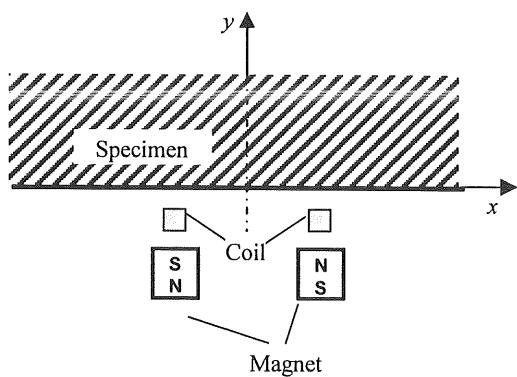


Fig.1 Sketch of EMAT

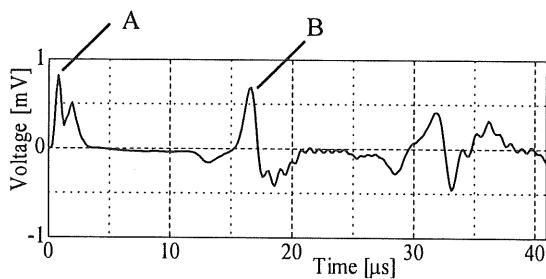


Fig.2 Simulated received waveform by EMAT

このような EMAT による超音波の送受信過程を支配する方程式は電磁場方程式と運動方程式からなる。ここでは、EMAT による探傷が x - y 面の 2 次元問題に帰着する場合を考える。電場と磁束密度および導体試料表面近傍に生じる渦電流密度は、スカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルにより以下のようにあらわされる。

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi$$

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (1)$$

このとき、電磁場を支配する Maxwell 方程式は次のようになる。

$$\Delta \mathbf{A} - \mu \sigma \left(\nabla \phi + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \times \mathbf{B}_0 \right) = 0$$

$$\nabla \cdot \sigma \left(\nabla \phi + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \times \mathbf{B}_0 \right) = 0 \quad (2)$$

EMAT 近傍の静磁場と試験片中の渦電流密度から決定されるローレンツ力が弾性波を励起する。試験片の各点における変位を $\mathbf{u}=(u_x, u_y)$ とすると、運動方程式は

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}_e \times \mathbf{B}$$

$$\rho_m \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \mu \Delta \mathbf{u} + (\lambda + \mu_m) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mathbf{F} \quad (3)$$

で与えられる。これらの基礎式に対して、静磁場と渦電流解析をそれぞれ有限要素法、運動方程式を差分法を用いて解いて、式(1)からコイルに生じる起電力を求めると、Fig.2 のような受信波形が得られる。

3. EMAT による欠陥の超音波画像

EMAT を試料表面に沿って直線的に走査して、欠陥の探傷と画像化のシミュレーションを行う。EMAT は左右対称に 2 つのコイルと 2 つの永久磁石を配置する。一边が 3.0mm の正方形状の永久磁石を 4.0mm 離れた場所に平行に、1.0mm × 1.0mm のコイルをその上側に配置し、コイルと試料の間隔が 1.0mm となるようにした。EMAT の駆動電流は、振幅 $1.0 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 、周波数を 1.0MHz とする正弦波 1 周期を左右のコイルで符号が逆になるように与える。Fig.3 は計算で求めた受信波形を、EMAT の位置から縦方向に濃淡の直線として描いた超音波原画像である。原画像では、欠陥と試料表面における波の多重反射や、波が拡散して斜めに欠陥に到達、帰還することによる欠陥端から斜め上方に伸びるゴーストが現れ、欠陥像が明瞭に現れていない。また、入射波のパルス幅により、欠陥像の奥行きも広がって見える。

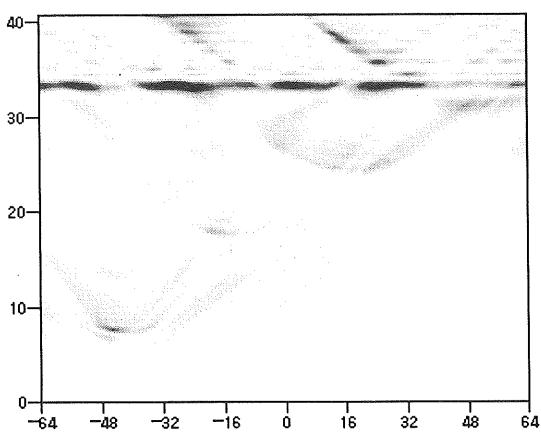


Fig.3 Simulated original ultrasonic image by EMAT

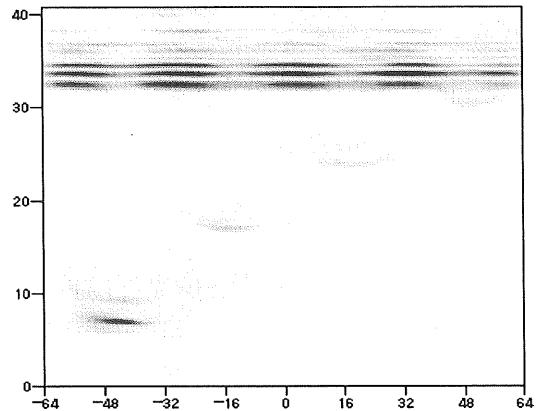


Fig.4 Improved ultrasonic image by ALOK method

そこで欠陥の画像を明瞭化するために受信波形にデコンボリューション処理を施す。これは、反射波と入射波のフーリエスペクトルの比を逆フーリエ変換することにより、受信波形に含まれる入射パルスと同形のパルスの位相差を正確に求め、低周波の入射波形による欠陥像をより鮮明にすることができます。さらに、探触子から斜め方向に入射し、反射してくる波も受信波形に含まれていることを考慮に入れ、材料内部の反射点の位置を探触子から同心円状に配置する。さらに、EMAT が波を送受信する感度には方向性があることを考慮して、中心方向で最大値となる重み関数をかける ALOK 法を採用する。このような処理をおこない、EMAT の拡散性と指向性を考慮した結果を Fig.4 に示す。原画像の欠陥端から伸びているゴーストが減少し、欠陥像がより明瞭になることが分かる。

3. 自作 EMAT による欠陥探傷

ここでは、EMAT コイルとして 0.2mm 径のポリウレタン皮膜銅線をトラック状に 44巻きしたものを作成した。銅線を厚さ 0.08mm の粘着シートに貼り付けながらコイル状に巻き、永久磁石として NEOMAX-48BH (磁束密度 1.143T、 $10 \times 15 \times 6$ mm) を用いた (Fig.5)。自作 EMAT の特性を Fig.6–Fig.8 に示す。なお、送信波の中心周波数は約 2.5MHz である。Fig.6 からは、送信波面において、波の強度がほぼ一定の平面が伝ばすることが分かる。Fig.7 からは波の指向性は良好であることがわかる。Fig.8 は、送信波の強度とリフトオフとの関係を示す。この図からは、EMAT は非接触で超音波の送受信が可能であるが、できるだけ検査対象に近づけた方が変換効率がよいことが分かる。

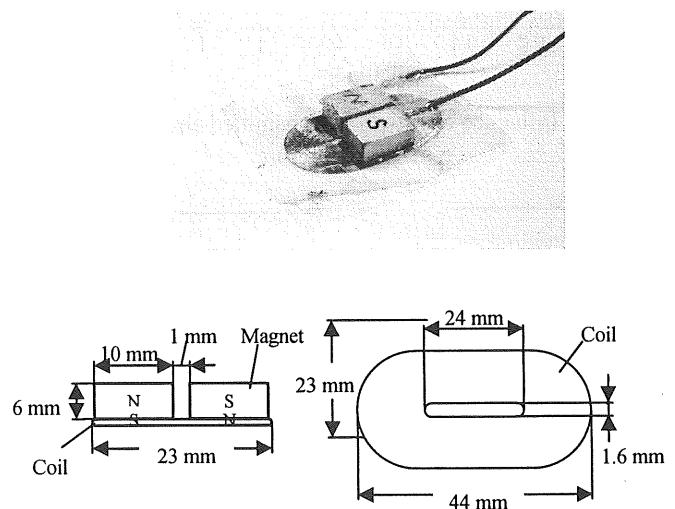


Fig.5 Shape and size of self-produced EMAT

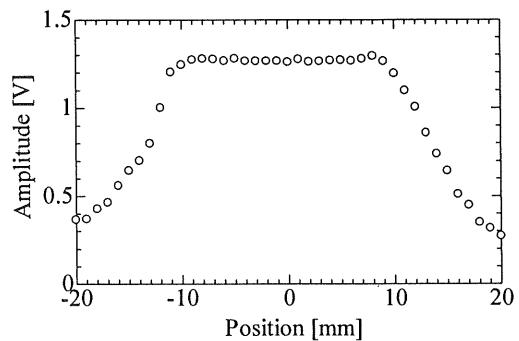


Fig.6 Beam width by EMAT

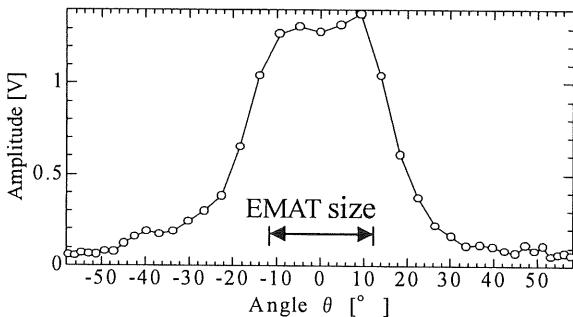


Fig. 7 Directivity of transmitted wave by EMAT

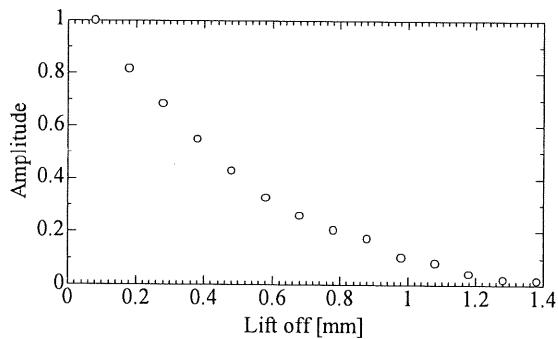


Fig. 8 Influence of lift-off to transmitted amplitude

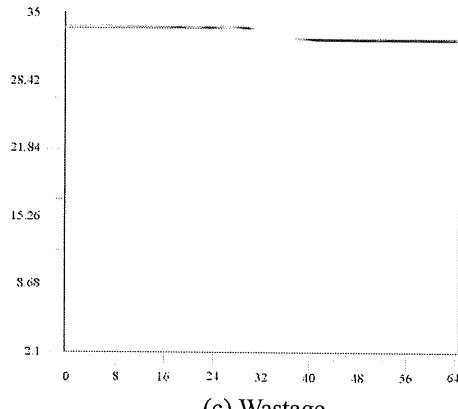


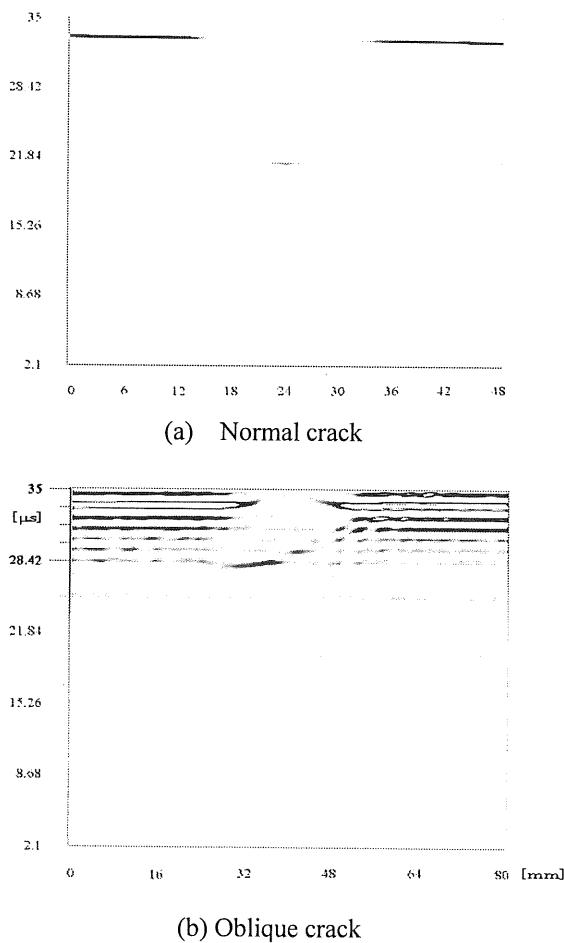
Fig. 9 Ultrasonic images of defects by self-prepared EMAT

最後に、Fig.9 に自作 EMAT による欠陥の探傷例を示す。それぞれの欠陥像やそのサイズなどが比較的よい精度で同定できることができた。今後は、さらに高精度な探傷のために、シミュレーションを援用した EMAT の最適設計と製作をおこなう予定である。

謝辞

本研究は経済産業省革新的実用原子力技術開発提案公募事業（フィージビリティスタディ分野）「原子力発電所の保全品質高度化に関する技術開発」の成果の一部である。

参考文献



- [1] 日本材料科学会編, 先端材料シリーズ, 超音波と材料, 袞華房, 1992.
- [2] 超音波便覧編集委員会編, 超音波便覧, 丸善, 1999.
- [3] H. Ogi, M. Hirao, K. Minoura and H. Fukuoka, Quasi-Nonlinear Analysis of Lorentz-Type EMAT by Finite Element Method, Trans. JSME, Vol. 61A, pp. 638-645, 1995.
- [4] R. Ludwig and X.-W. Dai, J. Appl. Phys., Vol.60, pp.89-98, 1991.
- [5] R. B. Thompson, Physical Acoustics 19, Academic Press, New York, 1988.
- [6] Takahiro Mitsuda and Eiji Matusmoto, Numerical Analysis of Ultrasonic Inspection using Electromagnetic Acoustic Transducer, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 23, pp.60-67, 2002.
- [7] 船岡, 松本, 電磁超音波探触子を用いた内部欠陥の画像化シミュレーション, 日本AEM学会誌, Vol.10, No.4, pp.378-383, 2002.
- [8] 坪井始編著, 数値電磁解析法の基礎, 養賢堂, 1994.