

電磁超音波探触子による探傷の解像度

Resolution of searching defects by electromagnetic acoustic transducer

京都大学大学院 大下 敬之 Takayuki OSHITA Non-Member
 京都大学 松本 英治 Eigi MATSUMOTO Member

This paper studies the resolution of defects by a Lorenz type of Electro-Magnetic Acoustic Transducer on the basis of simulation of ultrasonic imaging. Transmission and reception processes and propagation of induced ultrasonic wave are formulated and numerically solved by FEM and FDM. It is shown that the smallest defect with the size of the special division of FDM can be detected from the ultrasonic image using ALOK method. It is also shown from similarity rules that the resolution of defects becomes $1/n$ times if we use $1/n$ times smaller EMAT and n times larger driving frequency.

Keywords: Electromagnetic acoustic transducer, resolution of defect, ultrasonic detecting, ultrasonic imaging, visualization of defects.

連絡先: 松本英治, 〒606-8501 京都市左京区吉田本町, 京都大学大学院エネルギー科学研究科
 Tel: 075-753-5247, E-mail: matumoto@energy.kyoto-u.ac.jp

1. 緒言

製品の品質向上やプラントの安全かつ安定操業には構成部品や部材の信頼性や安全性が必要とされる。それらを評価する技術として目視や触診などの人的検査以外に放射線, 電磁場, 超音波などを用いた非破壊評価法がある。これらの方法は試験対象を破壊することなく内部の情報を得ることができるが, 放射線を用いた方法は安全性や簡便性において, 電磁場を用いた方法は透過限界における制約がある。一方, 超音波は透過性がよく, 試料内に存在するき裂やボイド, 複合材料の接合部における剥離などの欠陥の検出に応用されている。さらに, 様々な物性の変化が伝播速度に影響を与えるため, 密度や力学的性質, 応力などの非破壊測定にも応用されている。ただし, 圧電素子や磁歪素子による超音波を用いた従来の方法は, 滑らかな面を持つ評価対象に結合剤を介して人為的に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, コイルと永久磁石で構成される電磁超音波探触子 (Electromagnetic Acoustic Transducer) は, 評価対象内に直接超音波源を作るため非接触で超音波の送受信が可能である。そのため, 対象物が高温, 動いている, 表面が塗膜や錆に覆われているなどの場合でも使用

できる。さらに高速スキャンや遠隔操作が可能のため, 過酷な環境での非破壊評価に応用が期待されている [1]。

本研究の EMAT は, コイルに流れる電流が金属材料内に渦電流を生じ, この渦電流と磁石による静磁場からローレンツ力が生じ, 超音波が励起される方法 (ローレンツ型) である [2], [3]。このローレンツ型 EMAT による超音波の送信機構は 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。Mitsuda ら [6] は 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を行った。さらに船岡ら [7] は EMAT による受信波形から欠陥の超音波画像を得る方法を示した。

本研究では, 上記の船岡らにより提案された欠陥の超音波画像化法を基に, ローレンツ型 EMAT による欠陥探傷の解像度について議論する。

2. EMAT の送受信機構の基礎方程式

2.1 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。コイルに高周波電流(紙面と垂直な方向)が流れると、コイル周囲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で弾性波が発生する。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は試料内を伝ばし、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.2 参照)。

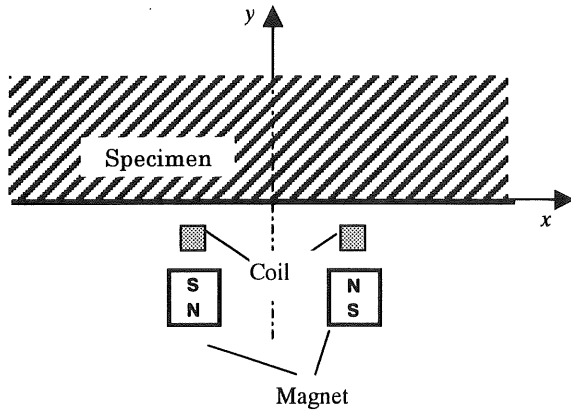


Fig. 1 Two dimensional sketch of EMAT

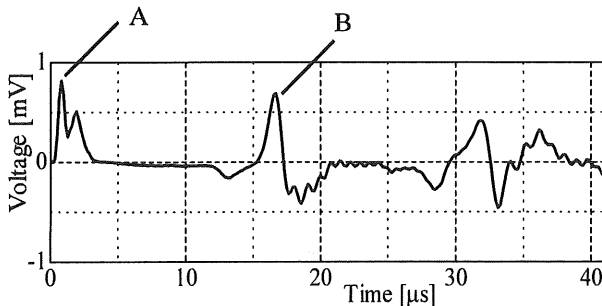


Fig. 2 Received waveform by EMAT

2.2 EMAT の支配方程式

ローレンツ型 EMAT の解析には、電磁場解析と弾性波の伝ば解析が必要である。本節では、文献[7],[8]に従い、基礎方程式を示すに留める。

(i) EMAT コイル近傍の動的電磁場

EMAT の送受信過程の支配方程式は次式で与えられる。

$$\Delta \mathbf{A} - \mu \sigma \left(\nabla \phi + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \times \mathbf{B}_0 \right) = 0 \quad (1)$$

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

このとき電流密度は次式で与えられる

$$\mathbf{J} = \sigma \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \times \mathbf{B}_0 \right) \quad (3)$$

ただし、送信過程の支配方程式は上式において、 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0$ の項を除いたものである。ここで ϕ , \mathbf{A} , \mathbf{E} , \mathbf{B}_0 , \mathbf{J}_0 , \mathbf{J} , μ , σ はそれぞれスカラーポテンシャル、ベクトルポテンシャル、電場、バイアスの磁束密度、強制電流、渦電流、電流密度、透磁率、導電率であり、試料は μ , σ 一定の均質材料とする。

(ii) 導体表面近傍の渦電流分布

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} = \sigma \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi \right) \quad (4)$$

(iii) ローレンツ力は

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}_e \times \mathbf{B} \quad (5)$$

(iv) 波動方程式

弾性波伝ばによる変形を 2 次元のであると仮定し、変位を $\mathbf{u}=(u, v)$ と表す。また Fig.1 よりローレンツ力は 2 次元面内にあるので、SV 波(変位の向きが入射面内にある横波)と P 波(縦波)が生じる。

$$\rho_m \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \mu \Delta \mathbf{u} + (\lambda + \mu_m) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mathbf{F} \quad (6)$$

ここで λ , μ_m はラーメの弾性定数, ρ_m は物質密度である。

3. EMAT による探傷のシミュレーション

3.1 シミュレーション条件

Fig.1のモデルの永久磁石, EMAT コイルにより生じる静磁場, 電磁場を有限要素法(解析領域を1次三角要素で分割)で求め, 試料中を伝ばする弾性波は差分法により計算する。なお, 静磁場, 電磁場, 弾性波の解析領域の最小長さを $L=0.5\text{mm}$ とする。EMATの構成はFig.1のようにコイル($1.0\text{mm}\times 1.0\text{mm}$)を試料表面から 1.0mm 離し, 6.0mm の間隔で設置し, 磁極を互いに逆にした2つの永久磁石($3.0\text{mm}\times 3.0\text{mm}$)を 4.0mm の間隔で平行に配置する。また永久磁石には一様な磁束密度 1.0 [T] を与え, EMATコイル(銅)には最大振幅 $10^7\text{ [A/m}^2\text{]}$, 周波数 1.0 [MHz] の正弦波駆動電流を与えた。

3.2 内部欠陥の画像化

EMATを試料(アルミニウム)表面に沿って直線状に走査し, 欠陥の超音波画像化のシミュレーションを行う。本解析はEMATを試料の中心から 0.5mm 間隔ずつ左右に 64mm の範囲で走査させたとき, それぞれの位置でのEMATコイルに生じる電圧変化を求めた。Fig.4(a), (b)は試料中央から左に 52mm と 16mm , 右に 12mm と 48mm 移動したそれぞれの位置に左から順に $1.0\text{mm}\times 1.0\text{mm}$, $1.5\text{mm}\times 1.0\text{mm}$, $2.0\text{mm}\times 1.0\text{mm}$, $2.5\text{mm}\times 1.0\text{mm}$ の4種類の異なる大きさの欠陥を横方向(スキャン方向)に配置し, さらに上記の4つの欠陥を試料表面から奥(縦方向)に向かって 25mm の位置に配置したときの超音波画像である。Fig.4(c), (d)は試料中央から左に 45mm と 15mm , 右に 15mm と 45mm 移動し, さらに左から順に試料表面から奥に向かって 10mm , 25mm , 35mm , 45mm の位置にそれぞれ $0.5\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ の欠陥を配置したときの超音波画像である。これらはFig.2で与えられる受信波形を, 横軸がEMATの位置(mm), 縦軸が時間(μs)となるようにとり, 受信波形の変位を

濃淡で表現している。

Fig.4(b), (d)のように超音波の拡散性とEMATの指向性を考慮した(Fig.3のように垂直方向に最も感度がよい感度分布をもつ)ALOK法を用いると欠陥の検出のみならず, 欠陥の大きさも判別できることがわかる。また欠陥以外の像は, 試料の底面での反射波である。次に欠陥の大きさと反射波のピーク(Fig.2のB)の関係を4つの異なる深さ(試料表面から欠陥までの距離)で調べた。Fig.5(a)から, 等しい距離にある欠陥サイズと反射波のピークには比例関係があることが認められ, ピーク比と距離を知ることにより欠陥の大きさを推定することができる。なおFig.5(a), (b)の縦軸は入射波のピーク(Fig.2のA)に対する反射波のピーク(Fig.2のB)の比を表し, Fig.5(a)の横軸は欠陥の大きさ D を表している。一方Fig.5(b)の横軸は, 試料表面から欠陥までの距離 C と欠陥の大きさ D を $\tan \theta(D/2C)$ で表している。この図から, EMATより大きな欠陥に対して反射波のピーク比は, 欠陥の大きさにあまり依存せず, EMATから見た欠陥の角度幅に比例することが分かる。

本研究により, 探触子の $1/20$ 程度の大きさの欠陥を検出することが可能であることと, 微小な欠陥に対してもALOK法が有効であることが分かった。ただし今後の課題として, 欠陥の形状をより明確化させるために解析領域をさらに細かく分割し, より解像度を高める必要がある。

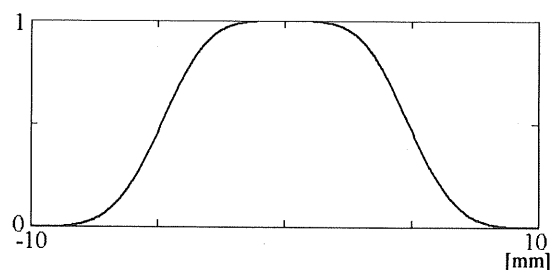


Fig.3 Directivity of EMAT

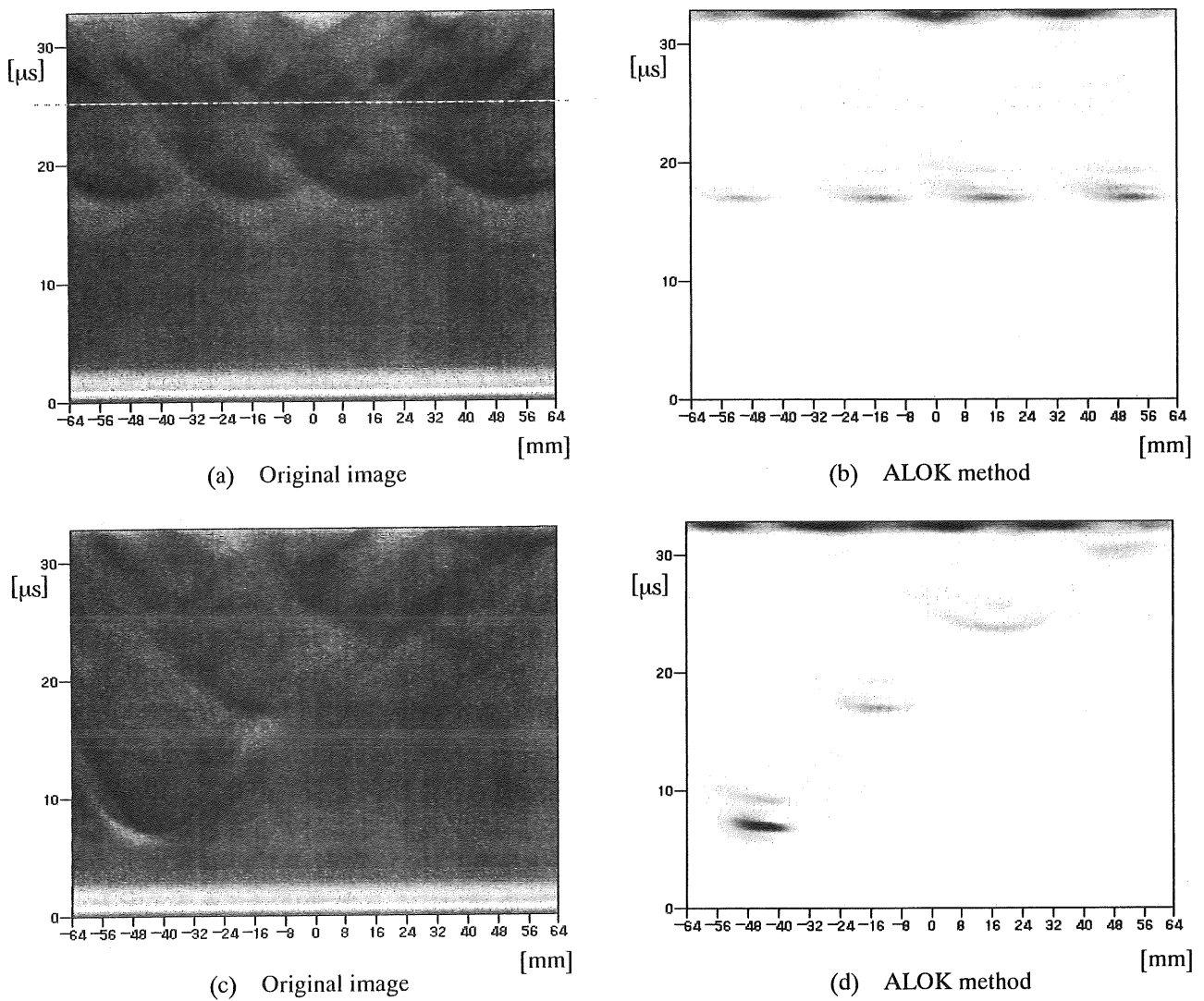


Fig. 4 Ultrasonic image of defects by EMAT

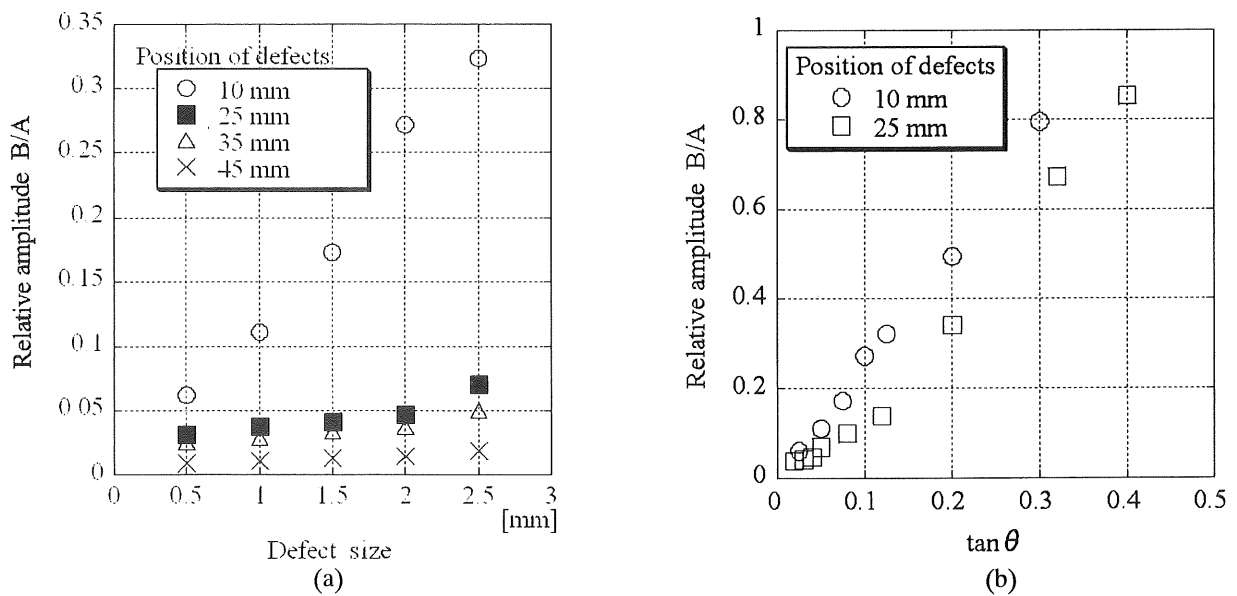


Fig. 5 Relation between defect size and peak ratio of incidence and reflective waves

4. EMAT の相似則について

前章で示した欠陥の超音波画像や欠陥サイズと受信波形の関係は 3.2 節で示した特定のサイズの EMAT, 試料, 欠陥および特定の周波数の駆動電流について得られたものである。これらの尺度を変化させた場合でもそれらが適当な関係 (相似則) を満たせば, 前章で得られた結果をそのまま適用することが可能となる。

Fig.1 における座標を (x, y) , 時刻を t として, これらを次のように変換する

$$x' = ax, \quad y' = ay \quad (7)$$

$$t' = bt \quad (8)$$

ここで a, b は定数である。このとき(7)式と(8)式を(6)式の波動方程式に代入すると

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}'}{\partial t'^2} = \left(\frac{a}{b}\right)^2 \left\{ \frac{\mu}{\rho_m} \frac{\partial^2 \mathbf{u}'}{\partial x'^2} + \frac{(\lambda + \mu_m)}{\rho_m} \frac{\partial^2 \mathbf{u}'}{\partial x' \partial y'} + \frac{(\lambda + 2\mu_m)}{\rho_m} \frac{\partial^2 \mathbf{u}'}{\partial x'^2} + \mathbf{F} \right\} \quad (9)$$

となる。上式から

$$a = b \quad (10)$$

を保ったまま空間と時間のスケールを変換しても同じ形の方程式が得られることが分かる。言い換えれば $a=b=0.1$ とすれば, 前章で得られた結果は空間座標を $1/10$ とした結果と見なすことができる。ただし EMAT の寸法も $1/10$ にしなければならないことに注意する。

上の計算では時間のスケールも $1/10$ としたので, 波の伝ば時間も $1/10$ となっているはずである。しかしながら前章の結果は特定の周波数 (1MHz) の入射波についての結果であった。したがって空間のスケールが $1/10$ で周波数が 1MHz の問題に適用するためには, 元のスケールの問題を 0.1MHz の入射波に対して解かなければならなかった。逆に前章の結果をそのまま適用するためには, 周波数が 10MHz の波であると見なせばよいことになる。(9)式をみれば相似則 (10)式が成立する場合に弾性波の伝ば速度は, 空間と時間のスケールを変換した後でも一定であることが分かる。このことから波の波長と振動数の関係

$$l = \frac{v}{f} \quad (11)$$

を用いれば振動数が 10 倍の波の波長は変換後に $1/10$ となることが分かり, 空間のスケール $1/10$ に変換しているので空間と波長との比を保ったままスケールが変換されていることが分かる。ここで l は波長, v は弾性波の速度である。

以上の相似則を用いれば, 前章で得られた欠陥の解像度を $1/10$ にするためには EMAT のスケールを $1/10$ に駆動電流の周波数を 10 倍にすればよいことが分かる。

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, 裳華房, 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.