

数値解析による EMAT の超音波特性評価 —送受信特性の周波数依存性—

Evaluation of Ultrasonic Characteristics generated from EMAT by Numerical Analysis
—Frequency Dependence of Transmitting and Receiving Characteristics—

京都大学エネルギー科学研究科
京都大学エネルギー科学研究科
京都大学エネルギー科学研究科

北村 信二 Shinji KITAMURA Student
琵琶 志朗 Shiro BIWA Member
松本 英治 Eiji MATSUMOTO Member

An Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) consisting of magnets and a coil can transmit and receive ultrasonic waves without contact to the object. So, it can be used for remote monitoring of metallic products and structures. In this paper, we carried out numerical analysis for transmitting and receiving processes of EMAT with different frequencies of impressed current. As a result, it is shown that eddy current and reflected echo decrease according as the transmitting frequency increases.

Keywords: EMAT, Frequency Characteristics, Eddy Current, Ultrasonic Wave.

1. 緒言

超音波を用いて試験対象を破壊することなく安全性や信頼性を評価する非破壊評価は、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用いられている。永久磁石とコイルから構成される電磁超音波探傷子 (EMAT) は、試料中に直接超音波源を発生させるため、音響結合剤を必要とせず非接触での超音波送受信が可能になる。そのため対象物が高温、移動している、表面が塗膜やさびに覆われている場合でも使用でき高速スキャンや遠隔操作が可能のため、高温、放射線、狭溢など過酷な環境での非破壊評価に応用が期待されている [1]。

EMAT にはローレンツ型と磁歪型の 2 種類がある [2][3]。ローレンツ型 EMAT は励磁コイルにより導体内に生じる渦電流と静磁場から生じるローレンツ力が超音波を励起させる。また磁歪型 EMAT は励磁コイルによる強磁性体の変形を利用する。ローレンツ型 EMAT の基本原理は Ludwig ら [4] や Thompson ら [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シミュレーションが、船岡ら [7] や大下ら [8] により EMAT による欠陥の超音波の画像化がおこなわれている。

本研究では、Mitsuda らにより提案された解析手法を用いて、ローレンツ型 EMAT の超音波の送受信過程の

解析を行った。2 章では EMAT の送受信機構の説明を行い、3 章では異なる周波数の印加電流に対して、超音波の発生、伝ば、受信過程における解析結果を示す。

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、静磁場をあたえるための永久磁石と変動磁場の励起、検出をするコイルからなる。Fig.1 はローレンツ型 EMAT の概略図である。コイルに高周波電流を (紙面と垂直な方向に) 印加すると周囲に変動磁場が生じ、さらに導体試料表面付近では電磁誘導により渦電流が流れる。このとき、永久磁石による静磁場下において渦電流の担い手となっている自由電子にローレンツ力が働く。このような自由電子が他の電子、イオン、分子に衝突することによって試料内に超音波を発生させる。超音波の受信機構は送信機構と逆の過程となる。すなわち試料表面部分が振動することによって渦電流が発生し、周囲の変動磁場によって EMAT コイルに電圧変化が生じる。

2.2 EMAT の支配方程式

本節では、文献 [7]、[9] に従い、ローレンツ型 EMAT により生じる電磁場の支配方程式を示す。電場 E およ

連絡先:北村信二、〒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科、電話: 075-753-3565、
e-mail:shinji@system.energy.kyoto-u.ac.jp

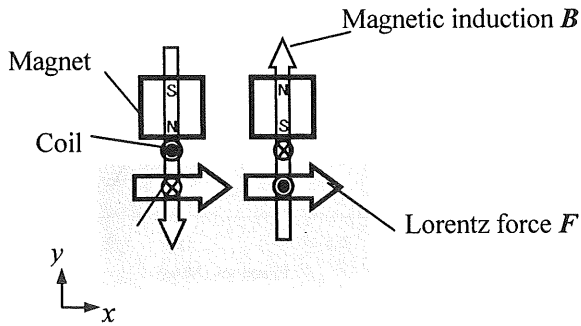


Fig. 1 Two dimensional sketch of EMAT

び磁束密度 B に対し、電気スカラーポテンシャル ϕ および磁気ベクトルポテンシャル A を導入すると、EMAT コイル周囲の電磁場は次式に支配される。

$$\Delta A - \mu\sigma \left(\nabla\phi + \frac{\partial A}{\partial t} \right) - \mu J_0 = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot J_e = \nabla \cdot -\sigma \left(\nabla\phi + \frac{\partial A}{\partial t} \right) = 0 \quad (2)$$

ここで、 J_0 は強制電流、 J_e は渦電流、 μ は透磁率、 σ は導電率である。このとき、導体表面近傍の渦電流分布は次式で与えられる。

$$J_e = \sigma E = \sigma \left(-\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla\phi \right) \quad (3)$$

静磁場に対しては、強制電流項 J_0 や磁気ベクトルポテンシャルの時間依存項 $\partial A/\partial t$ を無視すると、ポテンシャル A はラプラス方程式に支配される。このとき渦電流と永久磁石による静磁場から生じるローレンツ力は次のように与えられる。

$$F = J_e \times B \quad (4)$$

2.3 超音波伝ばの支配方程式

式(4)のローレンツ力により導体試料表面付近に弾性波が発生する。このとき、振動の向きが入射面内にある横波および振動の向きが入射面に垂直な縦波が生じる。Fig.1 のように試料が2次元のとみなすことができれば弾性波伝ばによる変形もまた2次元であると仮定することができる。弾性波による変位を $u=(u, v)$ とすると、次の波動方程式に支配される。

$$\rho_m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \mu \Delta u + (\lambda + \mu_m) \nabla(\nabla \cdot u) + F \quad (5)$$

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。

2.4 EMAT の受信過程の支配方程式

EMAT 側の試料表面近傍に超音波が帰還すると、そ

の振動と永久磁石による静磁場との相互作用により試料中に渦電流が生じる。この渦電流の時間変化が周囲に変動磁場を引き起こし、電磁誘導の法則により EMAT コイルに電圧変化が生じる。前節で示した超音波の伝ばによる粒子速度を v とすると、この受信過程は $v \times B$ 項を運動起電力として式(1)、(2)の電場に加えればよい。このとき、コイル中に生じる電圧変化が EMAT による超音波の受信信号となる。

3. EMAT の超音波伝ばシミュレーション

3.1 シミュレーション条件

解析には Fig.2 のように EMAT および試料が2次元な場合を考える。印加電流には最大振幅 4×10^7 [A/m²] で、異なる周波数 (0.5~2.0MHz) の正弦波一周期のパルスを用いた。また Table 1 に今回の有限要素モデルで用いる設定値を示す。

Table 1 Parameters of simulation

	透磁率 μ [H/m]	導電率 σ [S/m]
導体試料 (アルミ)	1.26×10^{-6}	3.64×10^7
コイル (銅)	1.26×10^{-6}	5.99×10^7
真空	1.26×10^{-6}	0.0
要素の最小長さ	0.5 [mm]	
永久磁石の磁束密度	1.0 [T]	

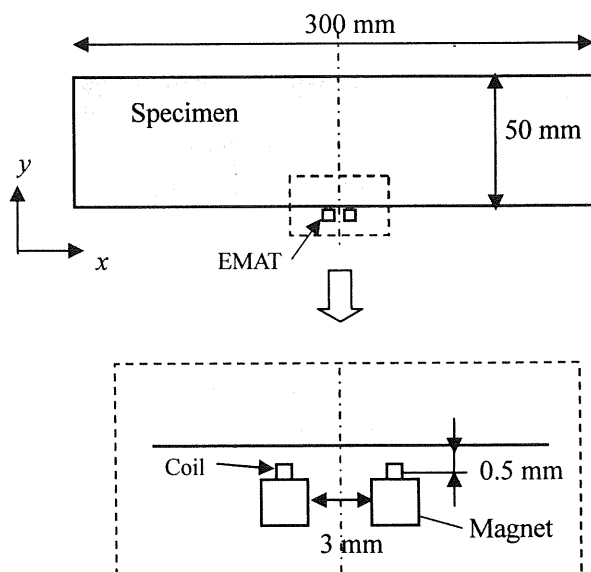


Fig.2 Arrangement of EMAT and Specimen

3.2 印加電流と渦電流密度変化

Fig.3 はコイルに電流を印加した際に試料中に発生する渦電流密度の分布である。コイルの近傍かつ試料表面で渦電流が最大となっている。この部分における渦電流密度とコイルの印加電流の時間変化を Fig.4 に示す。(a)-(c)はそれぞれ印加電流の周波数が 0.5, 1.0, 2.0MHz の場合である。Fig.4 よりパルスの印加電流に対して渦電流密度のピークが90度遅れて最大となっていることがわかる。Fig.5 は渦電流の最大値と周波数の関係である。これを見ると印加電流の周波数が高くなるほど渦電流は減少している。EMAT においては発生する渦電流が大きいかうが超音波への変換効率は大きくなる。しかし、渦電流を大きくするために超音波の周波数を低くすれば、解像度が低くなり探傷用の波として適さなくなることが予想される。

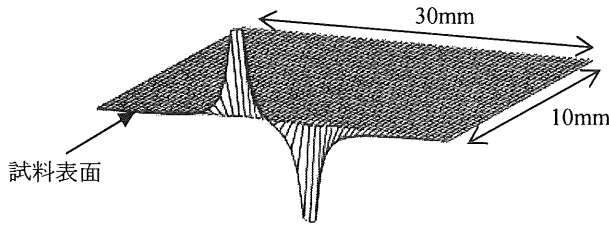


Fig.3 Eddy current density induced by EMAT

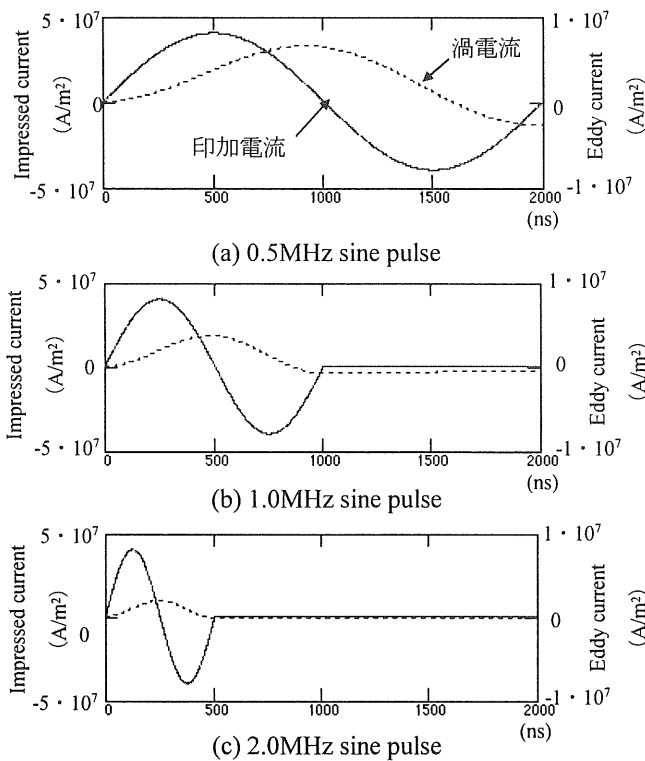


Fig.4 Eddy current induced by impressed current

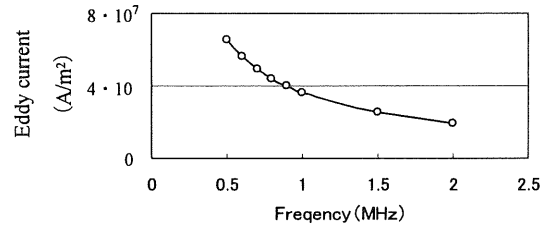


Fig.5 Relation of eddy current to frequency

3.3 ローレンツ力の分布

Fig.6 はある時刻における試料中に発生するローレンツ力の分布である。x方向のローレンツ力は横波(SV波)を、y方向のローレンツ力は縦波(P波)を発生させる。また、コイルと磁石の対称性から、x方向成分は2つの対称なピークをもち、y方向成分は反対称となることがわかる。今回想定しているモデルは横波を発生させる目的のコイルと磁石の構成であるが、横波成分と比べてその大きさは小さいものの、縦波も発生することがわかる。この場合、式(4)からローレンツ力の時間変化は Fig.4 の渦電流と同じく、印加電流に対して位相が遅れて変化する。

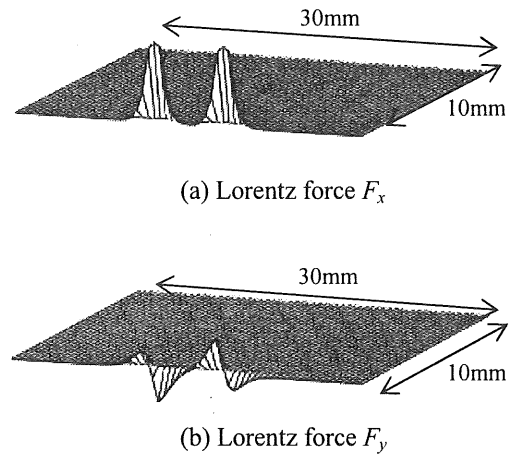


Fig.6 Distribution of lorentz force by EMAT

3.4 超音波の伝ば解析

3.3節で示したローレンツ力によって励起される超音波の伝ば解析を行った。解析には差分法を適用し、時間差分を $\Delta t=10\text{ns}$ 、空間差分を $\Delta x=\Delta y=0.5\text{mm}$ とし、コイルの印加電流の周波数は 1.0MHz とした。超音波発生から $7\mu\text{sec}$ 後の変位の横波成分(変位の回転 $(\nabla \times u)_z$) を Fig.7 に示す。EMAT から深さ方向に横波が

伝ばしていくが、同時に EMAT を中心に横波が拡散していく様子もわかる。

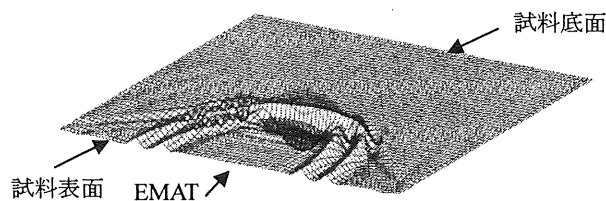


Fig.7 Propagation of SV wave

3.5 EMAT による超音波の受信

3.2 節で求めた 3 つの異なる周波数 (0.5, 1.0, 2.0MHz) の正弦波パルスに対する渦電流密度から式(4)を用いてローレンツ力を計算し、3.4 節に従って超音波の伝ば解析を行った。さらに 2.4 節で述べた受信過程の解析方法によってコイル中に生じる電圧変化を計算する。Fig.8 はこのようにして求められたコイルに生じる電圧の時間変化である。いずれも 33 μ sec 付近で底面から反射して帰還したパルスが確認できるが、周波数が高いほど反射エコーが小さくなるのがわかる。これは、3.2 節で述べたように周波数が高くなると生じる渦電流が小さくなり、結果試料内に発生する超音波が小さくなったためである。また Fig.9 は印加電流の周波数と受信した反射エコーのピーク電圧 (Fig.8 における R の値) の関係である。周波数が高くなるほど受信電圧は減少し、0 に近づくことがわかる。

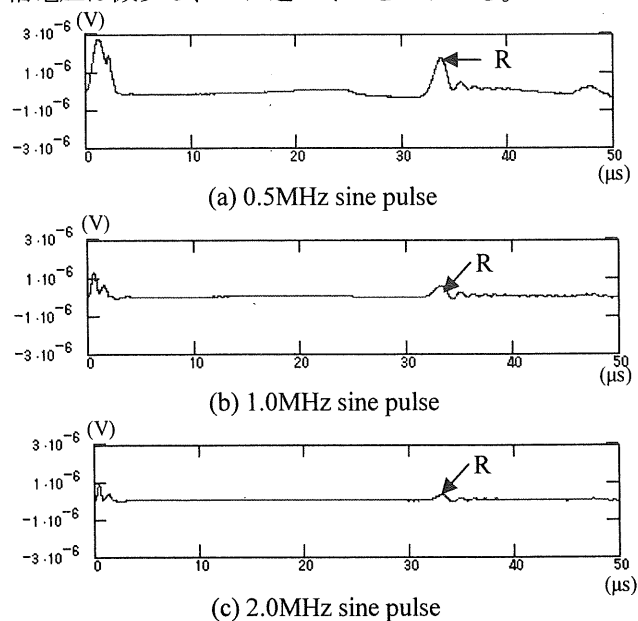


Fig.8 Received voltage of ultrasonic wave by EMAT

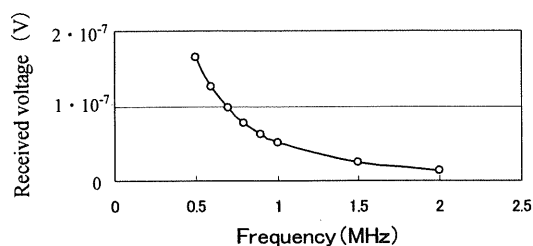


Fig.9 Relation of received voltage to frequency

4. 結言

ローレンツ型 EMAT について、超音波の送受信過程の数値解析を行った。印加パルスの周波数が高いと発生する超音波が小さくなり、受信信号としてコイルに生じる電圧も小さくなった。今後は欠陥を有する試料について同様の解析を行い、欠陥の検出やサイジングに対して印加電流の最適な周波数を求めることが課題となる。

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 Matsumoto, Numerical Analysis of Ultrasonic Inspection using Electromagnetic Acoustic Transducer, *Studies in Applied Electromagnetic 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] 大下, 松本, 電磁超音波探触子による探傷の解像度, 第 11 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, 93-98, 2002.
- [9] 坪井始編著, 数値電磁解析法の基礎, 養賢堂, 1994