

EMAT による超音波の送受信に関する 電磁相互作用を考慮した FEM シミュレーション

FEM simulation with consideration of electromagnetic interaction
for transmitting and receiving ultrasonic waves with an EMAT

発電技検 東北大学	山本 敏弘	Toshihiro Yamamoto	Member
発電技検 東北大学	浦山 良一	Ryoichi Urayama	
	古川 敬	Takashi Furukawa	Member
	高木 敏行	Toshiyuki Takagi	Member

The purpose of this study is to establish a computational procedure to support the optimization of an EMAT configuration. In this study, computer simulations were performed to obtain the propagation behavior of ultrasonic waves generated by an EMAT and the signals received with an EMAT. The simulation results were compared with the corresponding experimental results to validate the simulation method. The simulation results reasonably matched the corresponding experimental results.

Keywords: electromagnetic transducer, EMAT, simulation, finite element method, FEM

1. はじめに

電磁超音波探触子 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) は、静磁場を作る磁石と渦電流を誘導させるコイルを組み合わせて作られた超音波探触子であり、電磁相互作用により超音波の送受信を行う。そのため、試験対象は導体である必要があるが、試験面と探触子間の隙間を無くすための接触媒質を使用せずに超音波の送受信が可能である[1]。この特長は、高温環境での検査など、接触媒質を使いにくい検査で利点となる。その一方で、EMAT による電気信号から超音波へのエネルギー変換効率は悪く、圧電探触子と比べて受信信号の信号対ノイズ比 (SN 比) は著しく低い。EMAT は、磁石やコイルの種類や配置を変えることで送受信特性を変えることができ、低い SN 比を補うためにも、用途にあわせた様々な EMAT の構造が提案されている。しかし、これらの構造が想定通りに機能しているかを確認し、また、さらなる改良を行うには詳細な分析が必要であり、それには数値シミュレーションが有効であると考えられる。

本研究の目的は、EMAT の構造の最適化のためのシミュレーション方法を確立することであり、そのため、任

意の EMAT の構造に対応できる有限要素法 (FEM) シミュレーションが行える ComWAVE を利用して EMAT による送受信それぞれのシミュレーションを行い、シミュレーション結果とそれに対応する実験結果を比較することによってシミュレーション方法の妥当性の確認を行った。本稿では、試験対象の材料が非磁性体の場合のみを扱い、磁歪を考慮しない。

2. 計測による超音波伝搬の可視化

EMAT が発生する超音波の伝搬挙動のシミュレーションの妥当性を確認する上で、シミュレーション結果の比較対象として計測による超音波伝搬の可視化を行った。

図 1 は、計測に使用した EMAT の構造である。コイルは、レーストラック形のコイルで、径 0.12 mm のコイル

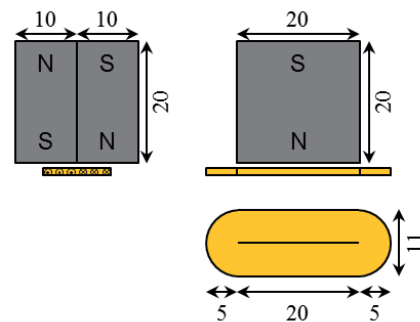


Fig. 1 EMAT configuration

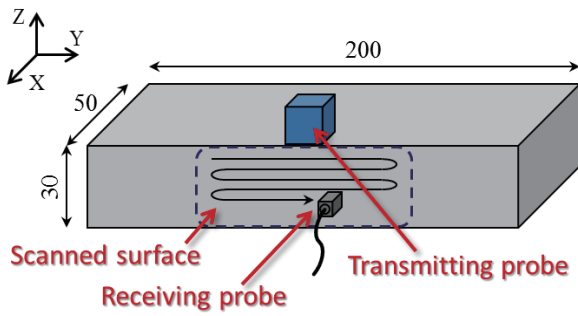


Fig. 2 Visualization setup

線を1層のみ40回巻いている。磁石は、2個のサマリウムコバルト磁石を極性が互いに上下逆になるようにして組み合わせたものである。このEMATが発生する超音波を文献[2]で発表された手法で可視化した。

この可視化手法では、図2に示すように、試験体の上面から送信探触子（ここではEMAT）で超音波を入射しつつ、試験体側面を小型の受信探触子で2次元走査する。このとき、なるべく超音波ビームの中心軸に近い伝搬挙動を得るため、図のように送信探触子は走査面に寄せて設置する。各走査点で得られた受信信号の時間変化を集めて再構成することにより、各時刻の走査面における信号値の分布を画像化して得ることができる。これらの画像は、各時刻の超音波による変位の分布に相当する。送信探触子をEMATにしてこの可視化手法を適用したときの具体的な装置の構成については文献[3]を参照されたい。

このEMATの構造は軸対称でないため、上記の側面走査による可視化を行うとき、図3に示すA面を走査面に向けたときとB面を走査面に向けたときで観測される超音波伝搬の様子が異なる。A面からEMATを見たとき、磁石の底面では磁石のN極からS極に向かって弧を描くように磁場が生じ、また、試験体表面にはコイルの直線部分のコイル線に平行な渦電流が発生する。よって、フレミングの左手の法則から、ローレンツ力はEMATの底面を中心とする放射状の方向に働く。これはA面に平行なそれぞれの断面で同様に起こるので、試験体には波面が円筒状の縦波が発生する。この縦波は、A面からは波面が半円状に広がっていくように見え、B面からは中央で直線的な波面が進んでいくように見える。

超音波の可視化に使用した試験体は、長さ200 mm、幅50 mm、厚さ30 mmのオーステナイト系ステンレス鋼SUS316のブロックで、その上面からEMATで超音波を入射し、ブロックの側面を受信探触子で2次元走査して受信信号を記録した。EMATのコイルには2 MHzの3周

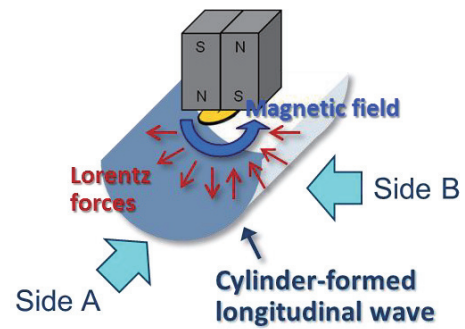


Fig. 3 Different propagation behaviors observed from different sides

期分の正弦波パルスを入力して、受信探触子には公称周波数が2 MHzで圧電素子の振動子寸法が1 mm×1 mmの縦波探触子を使用した。実際のところ、縦波探触子でも縦波以外の変位も検出するため、各変位方向に対する感度に差があるものの、ある程度任意の振動方向の超音波を受信することができる。また、受信探触子による側面走査では0.2 mm間隔で受信信号を記録している。

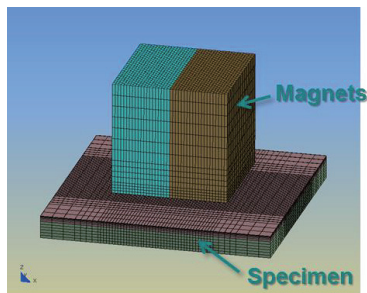
計測による超音波伝搬の可視化の結果は、次節のFEMシミュレーションの結果との比較で紹介する。

3. FEMシミュレーションによる超音波伝搬の可視化

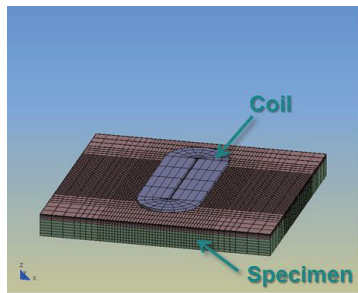
著者らは、これまでも市販のFEMシミュレーションソフトを使用したEMATのシミュレーションを行っており、文献[4]では、EMSolution（サイエンスソリューションズ社）によりEMATが発生するローレンツ力の分布を計算し、超音波を発生させる力としてこのローレンツ力を入力してComWAVE（伊藤忠テクノソリューションズ社）により超音波の伝搬を計算した例を紹介している。EMSolutionとComWAVEの組合せによるEMATが発生する超音波の伝搬挙動のシミュレーションの妥当性は確認できたが、この組合せではEMATによる受信が計算できないことが課題として残された。

ComWAVE-EMは、EMATによる超音波の送受信を含んだ超音波シミュレーションをComWAVEで行うための電磁気計算の支援プログラムであり、伊藤忠テクノソリューションズにより新たに開発された。以下では、ComWAVE-EMとComWAVEを使用することにより前節の計測を再現したシミュレーションについて記述する。

図4は、ComWAVE-EMで電磁気計算を行うための形



(a) Static magnetic analysis



(b) AC electromagnetic analysis

Fig. 4 Shape model for ComWAVE-EM

状モデルである。ComWAVE-EM が行えるのは定常解析および交流解析のみであり、過渡解析は行えないため、ComWAVE-EM では磁石が作る静磁場を計算する静磁場解析とコイルにより誘導される渦電流を計算する渦電流解析を別々に行い、その後、両者の結果からローレンツ力を計算する。

形状モデルの磁石とコイルの寸法は図 1 と一致させ、コイルの厚さおよびコイルの上下にある隙間の距離は単純化して 0.5 mm とした。EMAT の直下にある金属ブロックについては、EMAT から強い影響を受ける部分を切り出して 40 mm×40 mm×4 mm とし、材料は SUS316 とし、導電率を 1.35×10^6 S/m、比透磁率を 1 と設定した。磁石の磁化の大きさは 795775 A/m (1 T に相当) とし、2 個の磁石の磁化の向きをそれぞれ鉛直上向きおよび下向きとした。実際上の問題として、この構造では磁石の表面にもローレンツ力が生じて超音波が発生し、これが EMAT の受信信号に影響を与えるが、計測では磁石の底面にアルミ箔を貼って磁石に生じるローレンツ力を抑えている。この計算では、磁石の導体としての影響は無視できると仮定し、磁石の導電率を 0 S/m、比透磁率を 1 とした。コイルは、他の形状メッシュとは独立した電流源として扱っており、直接電流を設定し、物性値は与えていない。コイルの電流は、ComWAVE-EM では正弦波しか扱えないため、1 周期分の 2 MHz の正弦波とし、電流振幅は 1 A の 40 回巻相当として 40 AT とした。

ComWAVE-EM によりローレンツ力を計算した後は、この結果を ComWAVE に取り込み、図 2 の試験体に対応する 3 次元のブロックにおいて超音波が伝搬するシミュレーションを行った。ブロックの縦波音速は 5790 m/s、横波音速は 3100 m/s、密度は 7.91×10^3 kg/m³ とした。

図 5 と図 6 は、前節で説明した計測による超音波伝搬の可視化とこれを再現した FEM シミュレーションの結果を比較したものである。FEM シミュレーションの結果として、上述の ComWAVE-EM と ComWAVE を使用したものの他、文献[4]の EMSolution と ComWAVE の組合せで得られたものも比較のために加えた。計測による可視化の結果では、超音波の入射開始から特定の時間経過後の走査面の各点での信号値を負の最小値から正の最大値まで黒から白への濃淡で表している。FEM シミュレーション結果では、上記の条件に対応する時間と面上での各点の変位の絶対値を色で表している。図 5 と図 6 では、比較のために、対応する経過時間での計測による可視化の結果と 2 種類の FEM シミュレーション結果を横に並べており、図 5 は EMAT の A 面を走査面に向けたときの結果で、図 6 は EMAT の B 面を走査面に向けたときの結果である。座標の原点は、EMAT の中心軸と SUS316 ブロックの EMAT の設置面との交点としている。計測による可視化での受信探触子の走査面は EMAT の中心軸より X 軸正方向へ 10 mm 離れており、シミュレーション結果でもこれに対応する面を表示している。

シミュレーション結果を見ると、先行する縦波に対して、横波が後を追う様子が確認できる。また、縦波が底面で反射するときモード変換により横波が生じている。任意波形を扱える EMSolution では励磁電流を計測と同様に 2 MHz の 3 周期分の正弦波パルスとしているのに対して、ComWAVE-EM では 1 周期分の正弦波としているため、ComWAVE-EM と ComWAVE を使用したシミュレーション結果では各波束の構成が単純化されているが、経過時間ごとの波面形状とその位置は両方のシミュレーション結果でほぼ一致している。

計測による可視化では、やや不鮮明ではあるが、伝搬するそれぞれの波束の先頭の波面の形状が確認できる。これらの波面形状がシミュレーション結果で再現されていることから、ComWAVE-EM と ComWAVE を使用したシミュレーションは、設計した EMAT が発生する超音波の特性を調べる用途などで活用できると考える。

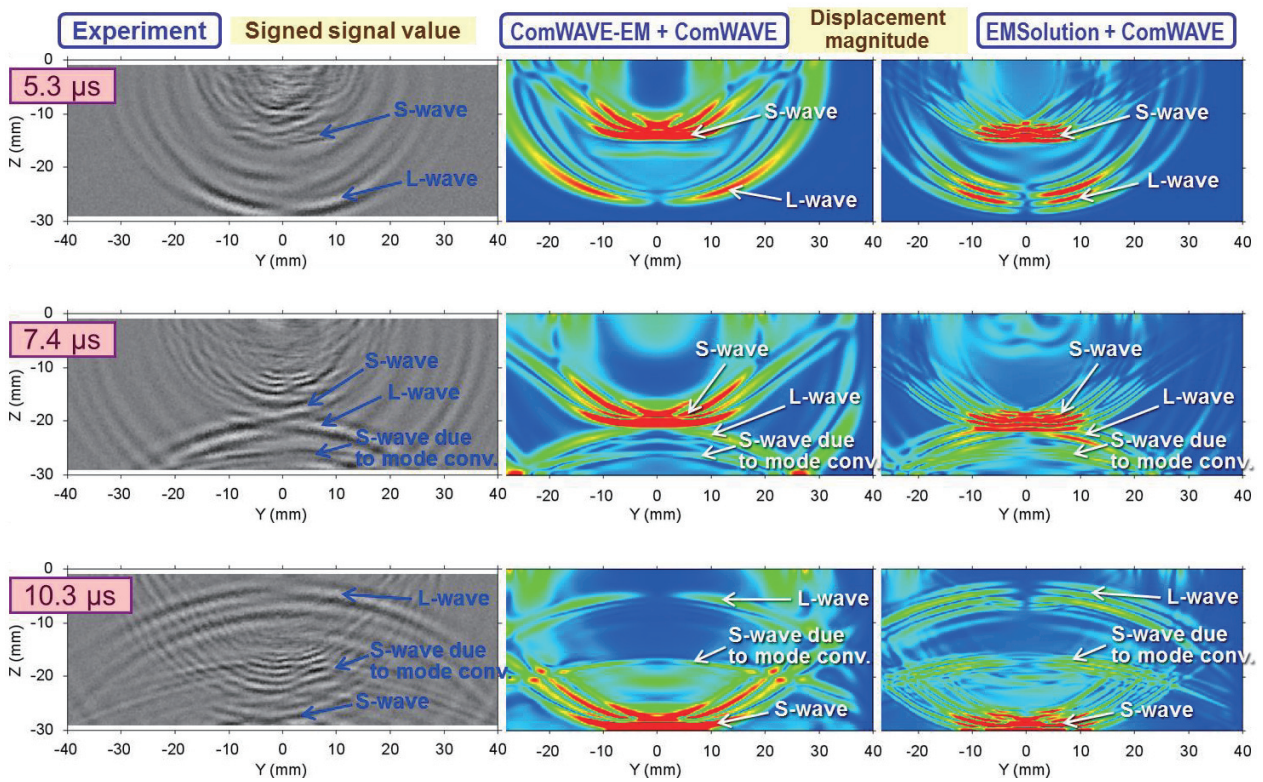


Fig. 5 Comparisons between experiment and FEM simulation (Side A)

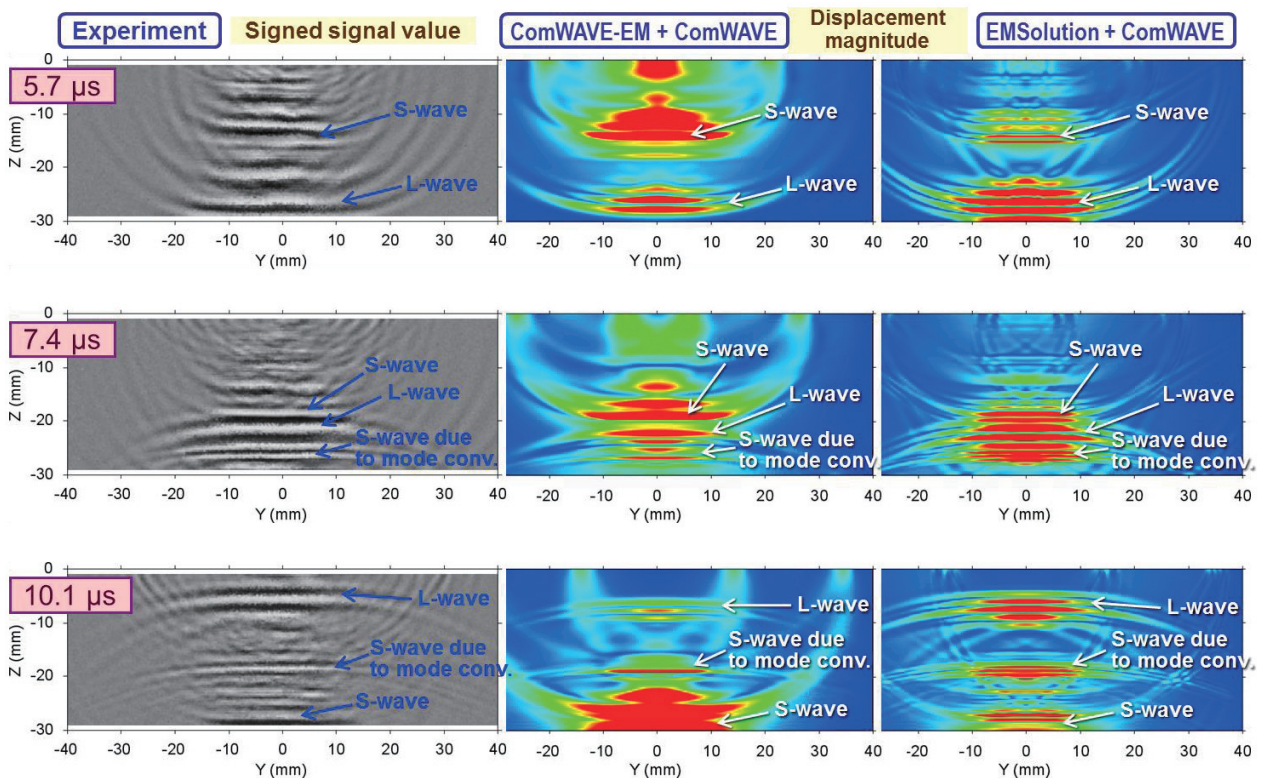


Fig. 6 Comparisons between experiment and FEM simulation (Side B)

4. EMAT による超音波の受信に関する FEM シミュレーション

EMAT による受信過程は、送信過程の逆過程と言え、モーターの原理に対応する。磁石が作る静磁場の中に超音波が伝搬して変位を変化させる力が生じると、磁場と力により電流が誘導される（フレミングの右手の法則）。この電流が作る磁場の寄与で磁場が変化し、磁場変化によってコイルに誘導電圧が生じる。この誘導電圧が EMAT の受信信号となる。

しかし、上記の過程を汎用の電磁気シミュレーションソフトウェアで計算しようとするとう問題が生じる。これらのシミュレーションソフトウェアでは一般的に節点ごとに変位が変化することを想定していないため、超音波の伝搬による各点の変位の変化を与えることができないからである。仮に、静磁場と変位変化によって誘導される電流の電流密度分布を別の方法で求めたとしても、電磁気シミュレーションソフトウェアにこの電流密度分布を試験体内の電流として与えることはできない。電磁気シミュレーションで強制的に電流を与える場合は、コイルなどの独立した部品に設定するのであって、電流と磁場が相互作用して共に変化していく試験体などの領域の一部の各点で時刻ごとの電流密度を特定の値に設定するという条件付けは通常行えない。

ComWAVE では、このような問題の他にも、一般に受信される超音波の変位は時間とともに複雑に変化するのに対して ComWAVE-EM で過渡解析ができないこともあり、受信信号を原理通りに計算するのではなく、受信信号と相関があると考えられる別の計算を行うことで擬似的に受信信号を求める。図7にこの計算手順を図示する。

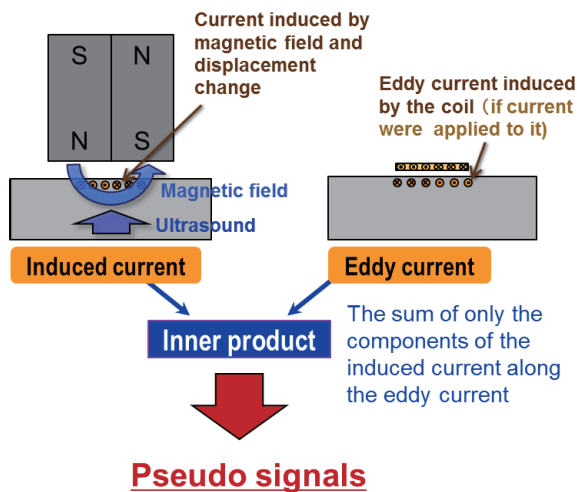
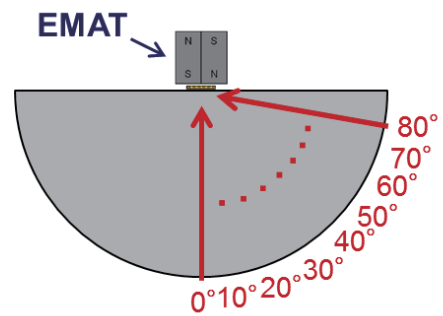


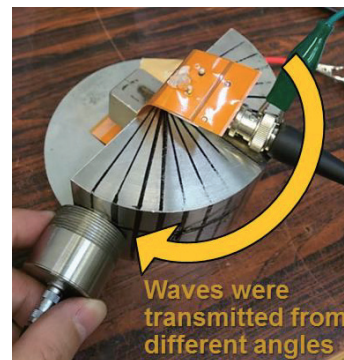
Fig. 7 Receiving process in ComWAVE

磁石が作る静磁場と超音波伝搬による変位変化の組合せで誘導される電流を計算するまでは原理通りであるが、その後、コイルに電流を流したと仮定するときには試験体に誘導される渦電流を計算する（いま受信過程について考えているので、本来はコイルに電流を流さない）。そして、得られた誘導電流と渦電流の内積を計算し、これを擬似的な受信信号とする。渦電流との内積を取ることによって、誘導電流のうちコイルに誘導電圧を生じさせやすい成分を取り出していると考えられ、ComWAVE ではこの内積の値を受信信号に相当するものとしている。ただし、物理量としては本来の受信信号とは別物なので、絶対的な値に意味はなく、相対的な変化を確認するものとして利用する（ComWAVE では圧電探触子の電気機械変換を再現していないので、このことは圧電探触子を想定した超音波シミュレーションにも言える）。

図8は、ComWAVE-EM と ComWAVE により計算される受信信号の妥当性確認のために行った EMAT の受信指向性を調べる試験の手順を表したものである。図8(a)に示すように、半円柱状のオーステナイト系ステンレス鋼試験体の中央に EMAT を配置し、圧電探触子により円柱面から入射角度を変えつつ EMAT に向けて超音波を送った。このときの入射角度の変化に対する EMAT による受



(a) Illustration of procedure



(b) Experimental procedure

Fig. 8 Confirmation of reception directivity

信号の変化を実験とシミュレーションで比較した。

図 8 (b) は実験での測定の様子である。試験体の直径は 100 mm で、取り回しの都合上、厚さ 40 mm の半円部と厚さ 15 mm の全円部で構成される。圧電探触子は、縦波の入射に B2C25N、横波の入射に 2Z20×20SN を使用した。EMAT には図 1 と同等の仕様のものを使用したが、手作業でのコイル作製の手間を省くために、フレキシブルプリント基板によるコイルを導入した。基板は 2 層構造で、ワイヤ幅 0.2 mm、ワイヤ厚さ 0.033 mm で、コイル巻数は片面ごとに 19 回で合計 38 回としている。

また、ComWAVE-EM と ComWAVE によりこの実験に対応する FEM シミュレーションを行った。このとき、ComWAVE-EM の計算については、EMAT の仕様がほぼ変わらない第 3 節での静磁場と渦電流の計算結果をそのまま利用した（受信過程でローレンツ力は使用しない）。ComWAVE では、試験体に対応する半円柱状の立体の円柱面に振動子を配置して変位振動させ、超音波を入射した。振動子の寸法は、縦波と横波の場合のそれぞれで実験に使用した圧電探触子の仕様に合わせ、振動波形は 2 MHz の 3 周期分の正弦波パルスとした。半円柱状の立体の物性値は、第 3 節の試験体のブロックと同じ設定にした。

図 9 は、縦波探触子により超音波を入射した場合の

EMAT の受信波形を実験とシミュレーションで比較した結果である。図 9 (a) および (c) は、それぞれ実験およびシミュレーションで得られた受信波形であり、入射角が 0°、10°、20° のときのものを描いている。受信波形の中で 9 μs に表れる波束は縦波、16 μs に表れる波束は横波である。縦波探触子で超音波を入射しているため EMAT で受信されるのは主に縦波で、これに比べて横波はかなり小さい。ここでは、送信部と受信部を分離しているため本来であれば送信直後に受信される波はないはずであるが、実験では測定機器の性質上、受信信号にも送信ノイズが乗ってしまっている。図 9 (b) および (d) は、それぞれ実験およびシミュレーションで得られた EMAT の縦波の受信指向性のグラフであり、横軸は入射角度で、縦軸は受信波形の中の縦波の最大振幅である。実験およびシミュレーションともに、縦波の最大振幅が入射角度 0°（垂直入射）でほぼ 0 であり、入射角度の増加とともに急激に大きくなりその後指数的に減少していくという傾向が見られる。垂直入射のときに EMAT で受信される縦波の最大振幅がほぼ 0 になる理由は、図 5 の超音波の変位分布において縦波が中央で弱くなる理由と同じで、使用している EMAT の構造にある。図 1 に示した EMAT の構造では、図 1 の左上の図の左側と右側で発生する縦波が互いに逆位相になる性質があり、中央ではこれらの縦波が打

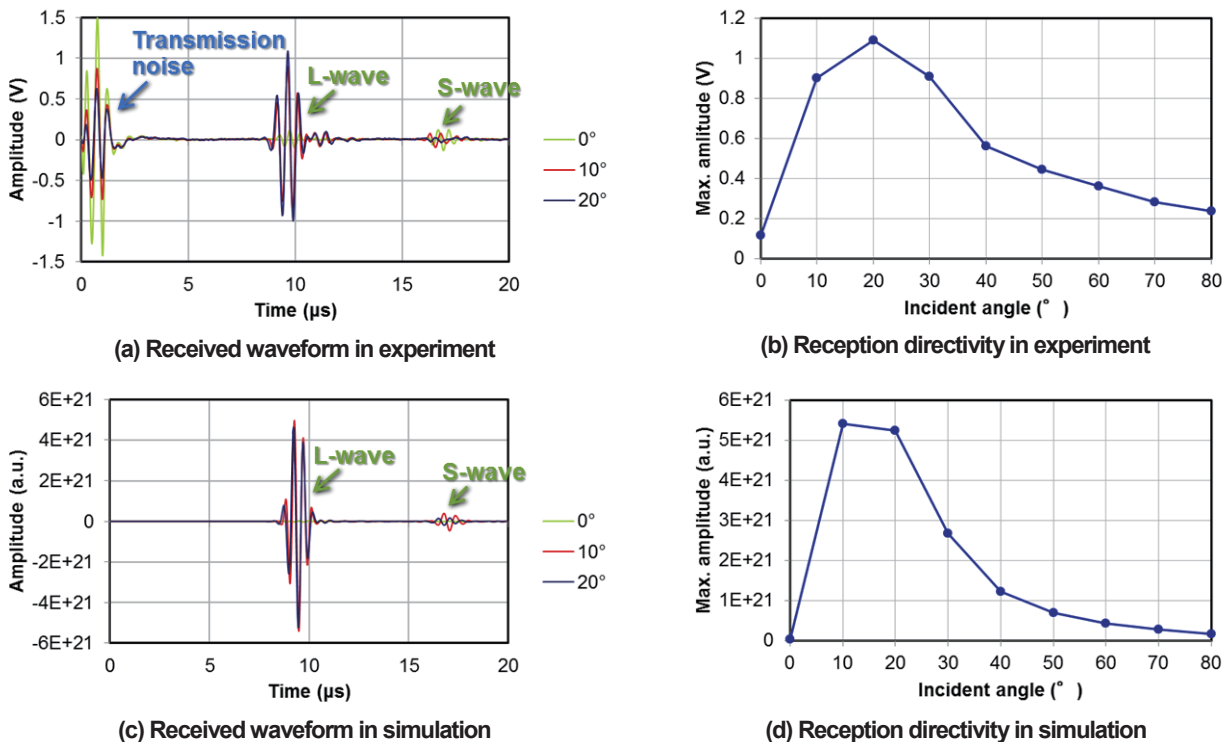


Fig. 9 Reception directivity for longitudinal waves

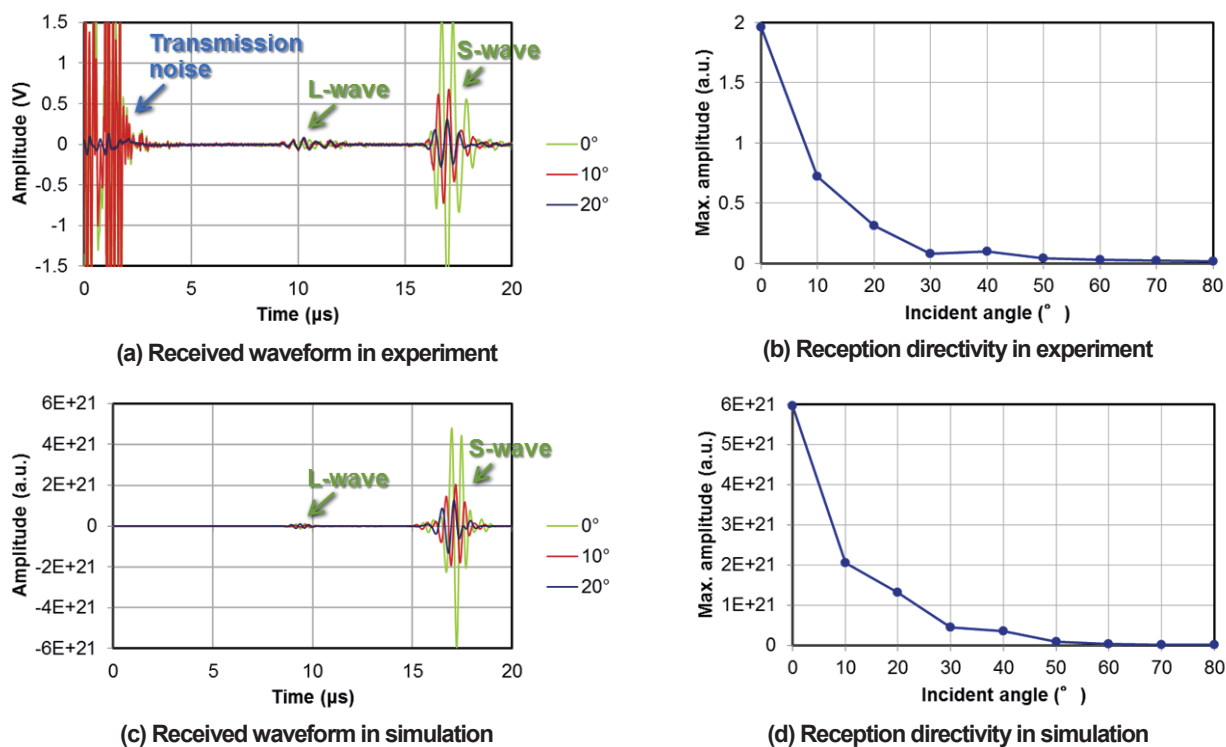


Fig. 10 Reception directivity for shear waves

ち消しあう。受信でも同様に、EMAT に対して左右対称の縦波が入射される時、コイルに生じる誘導電圧はほぼ0となる。

図 10 は、横波探触子により超音波を入射した場合の EMAT の受信波形を実験とシミュレーションで比較した結果である。図 10 (a) および (c) は、それぞれ実験およびシミュレーションで得られた受信波形であり、入射角が 0° 、 10° 、 20° のときのものを描いている。図 9 と同様に、受信波形の中で $9\ \mu\text{s}$ に表れる波束は縦波、 $16\ \mu\text{s}$ に表れる波束は横波である。横波探触子で超音波を入射しているので EMAT で受信されるのは主に横波で、縦波は小さい。実験で得られた受信波形には送信ノイズが乗っている。図 10 (b) および (d) は、それぞれ実験およびシミュレーションで得られた EMAT の横波の受信指向性のグラフであり、横軸は入射角度で、縦軸は受信波形の中の横波の最大振幅である。実験およびシミュレーションともに、横波の最大振幅が入射角度の増加とともに指数的に減少していくという傾向が見られる。

以上の結果より、EMAT により得られる受信信号の特性が ComWAVE-EM と ComWAVE を使用したシミュレーションで再現できることを確認した。

5. まとめ

本稿では、ComWAVE-EM と ComWAVE を使用した FEM シミュレーションを EMAT の構造の最適化のためのシミュレーション方法の候補とし、その妥当性の確認を行った。

EMAT が発生する超音波の伝搬を ComWAVE-EM と ComWAVE を使用して再現した例では、ComWAVE-EM が単一成分の正弦波しか利用できないため、各波束の構成が単純化されているが、経過時間ごとの波面形状とその位置は計測による超音波伝搬の可視化とほぼ一致しており、設計した EMAT が発生する超音波の特性を調べる用途などで活用できると考える。

EMAT で超音波を受信する場合のシミュレーションにおいて ComWAVE-EM と ComWAVE により計算されるのは、受信信号そのものではなく、受信信号と相関があると考えられる擬似的な信号であるが、実験で確認された EMAT の受信指向性の特徴がシミュレーションで再現された。

これらの結果から ComWAVE-EM と ComWAVE を使用した FEM シミュレーションにより EMAT での送受信の特徴が再現されることを確認し、このようなシミュレーションによって EMAT の最適化の支援が行えると考える。

参考文献

- [1] M. Hirao and H. Ogi, EMATs for science and industry: Noncontacting ultrasonic measurements, Kluwer Academic Publishers, 2003, pp. 39–42.
- [2] 古川敬, 米山弘志, 堀井行彦, 上杉信夫, “オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波伝搬の測定”, 日本非破壊検査協会 平成 11 年度秋季大会講演概要集, 1999, pp. 23–24.
- [3] 山本敏弘, 古川敬, 古村一郎, 浦山良一, 内一哲哉, 高木敏行, “EMAT が発生する超音波の可視化”, 溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー, Vol. 9, 2013, pp. 17–21.
- [4] 山本敏弘, 上山芳教, “有限要素法シミュレーションによる EMAT が発生する超音波の伝搬の可視化”, 超音波 TECHNO, Vol. 29, No. 3, 2017, pp. 10–16.