

点焦点型電磁超音波探触子の開発

常田 萌斗^{*1} 大森 征一^{*1} 鳩 昌洋^{*1}
Tsuneda Moeto Oomori Seiichi Hato Masahiro

電磁超音波探触子 (Electro Magnetic Acoustic Transducer: EMAT) はコイルと磁石により構成された超音波探触子である。コイルに電流を流し、検査材の表面に渦電流を生じさせると、試験片表面には、磁石による外部磁場と直交する方向にローレンツ力が発生する。コイルに流れる電流をコントロールすることで、機械的振動を起こし、材料内に超音波を発生させる。通常、EMAT は垂直探傷試験で多く用いられており、斜角探傷試験での実績は少ない。

そこで本稿では、本手法を用いた斜角探触子を製作し、きずを模擬したスリットの探傷試験を実施した。検出した信号を解析した結果、深さ 1.0mm スリットの検出が確認できた。

キーワード：EMAT、斜角探傷、橋梁、非接触、塗装の上探傷

1. はじめに

非破壊検査には、物体表面の欠陥を探す「表面検査」と物体内部の欠陥を探す「体積検査」がある。このうち、体積検査方法として一般的に超音波探傷試験 (UT) と放射線透過試験 (RT) が使われている。一般に、RT は立ち入り禁止区画を設ける必要があるが、UT はその必要がないことからさまざまな箇所で UT が適用されている。しかしながら、超音波の入射には、探触子と検査材表面の接触面に接触媒質を塗布する必要がある。加えて、探傷結果は探触子と探傷面の接触の程度に影響を受けやすいため、自動探傷に対しては課題が多い。

これらの課題を解決する手法として EMAT に着目した。

EMAT は接触媒質が不要であり、原理上探触子と試験片の接触による影響がないため、自動探傷への適用が容易であると考えた。自動探傷ができれば高速道路鋼床版のき裂検査など、1 次スクリーニング検査として使用することで検査コストを抑えることが期待できる。

EMAT は非接触検査が可能だが、分解能や感度が悪く探傷への適用例が少ない。そこで EMAT の中でも分解能が良い点焦点型 EMAT⁽¹⁾ の適用を検討した。点焦点型 EMAT の原理を図 1 に示す。点焦点型 EMAT の設計では、検査対象物の材料音速、焦点深さに合わせてコイルの条件を定める必要があるが鋼床版への適用はまだ報告がない。

本稿では鋼床版のき裂検査を対象にコイル条件を検討し、EMAT の送受信可否と屈折角を確認した。

*1：検査事業部 技術部 NDE グループ

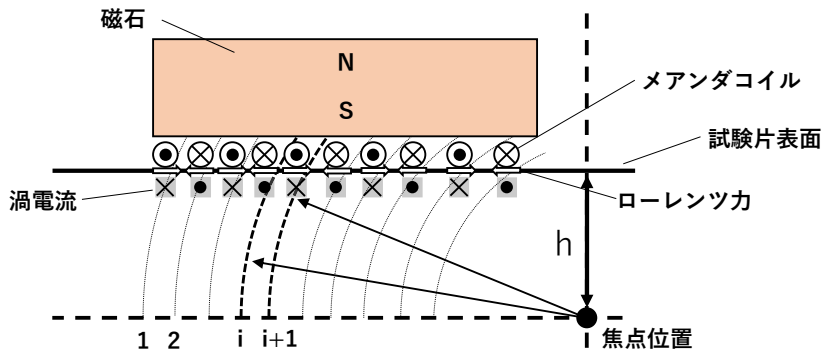


図1 点焦点型 EMAT

2. 点焦点型 EMAT の開発

2.1 コイル条件比較検討試験

(1) 試験方法

感度良く超音波信号を得られるコイル条件を調

査するため、条件を変えた EMAT を試作し、試験した。コイル条件としては、コイルの線径、高さ方向巻き数、平面方向巻き数、弧の数に着目し、それぞれの影響を確認した。比較検討の実施項目を表 1 に、コイル外観とコイル断面図を表 2 に示す。

表 1 実施項目一覧

実施項目	線径 (mm)				高さ方向巻き数 (段)			平面方向巻き数 (巻き)			弧の数	
	0.05	0.1	0.2	0.32	1	5	10	1	2	3	10	21
試験 1	0.05	0.1	0.2	0.32	1			1			10	
試験 2	0.1				1	5	10	1			10	
試験 3	0.1				1			1	2	3	10	
試験 4	0.1				1			3			10	21

表 2 コイル条件検討用コイル一覧

	線径検討用コイル	高さ方向巻き数検討用コイル	平面方向巻き数検討用コイル	弧の数検討用コイル
コイル外観				
コイル断面図				

図2に装置構成、図3に探触子配置を示す。送信探触子は超音波パルサーレーザーと接続し、試験片に接触させ超音波を発生させる。受信探触子はプリアンプとオシロスコープに接続し、送信探触子と向かい合わせて配置する。

探触子はEMATと圧電素子を用いた一般的な射角探触子を用い、EMATを送信側とした場合と受信側とした場合、それぞれを試験する。送信探触子から発した超音波を試験片底面に反射させ、受信探触子で受信した超音波の信号強度を測定する。その他の試験条件を以下に示す。

試験片寸法：200×150×t12mm

試験片材質：SS400

確認用探触子：ピエゾ斜角探触子(屈折角45°)

装置構成：超音波パルサーレーザー、オシロスコープ、プリアンプ

印加電圧：EMAT送信時400～1000V

ピエゾ斜角探触子送信時70V

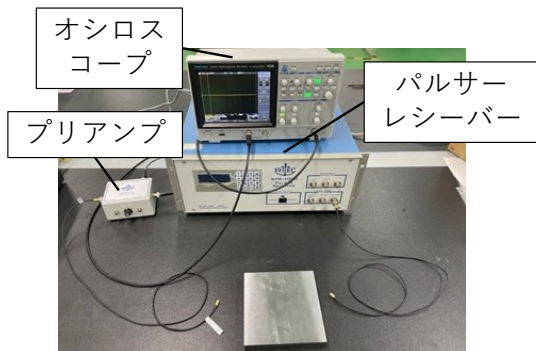


図2 装置構成

入力信号：正弦波、2MHz、5波

図4に受信エコーの一例を示す。図4は送信探触子から発信された超音波が受信探触子で受信できていることを示す。

(2) 試験結果

・試験1：線径の比較

試験結果を図5に示す。なお、φ0.05mmは図5(b)のデータ取得後に断線した。線径が細すぎることで耐久性に問題があると考え、図5(a)のデータ取得では検討から除外した。

・試験2：高さ方向巻き数の比較

試験結果を図6に示す。

・試験3：平面方向巻き数の比較

試験結果を図7に示す。

・試験4：弧の数の比較

試験結果を図8に示す。

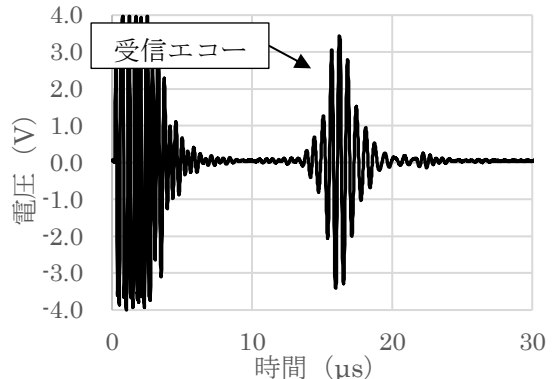


図4 取得波形の一例

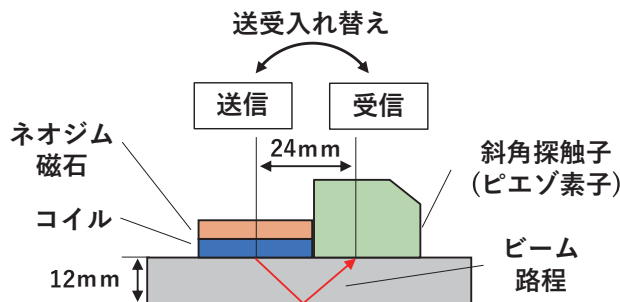


図3 探触子配置

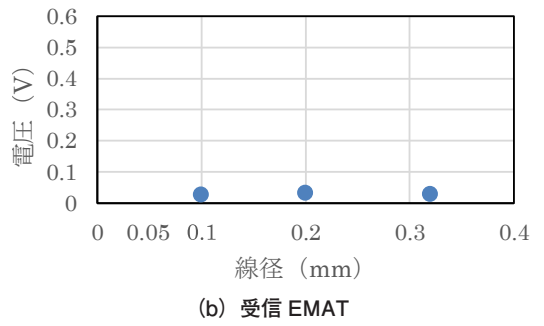
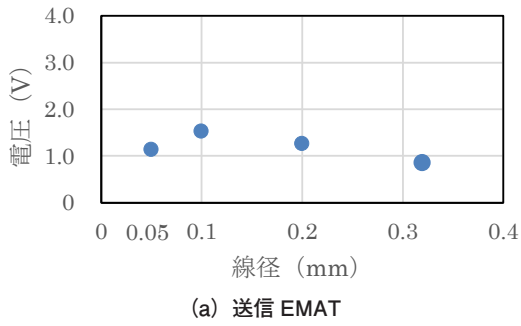


図5 線径検討結果

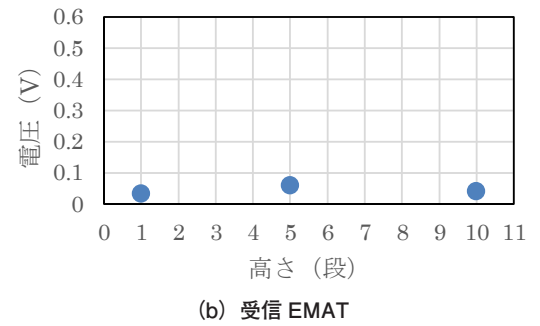
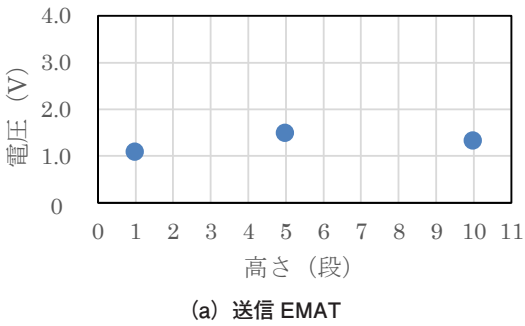


図6 高さ方向巻き数検討結果

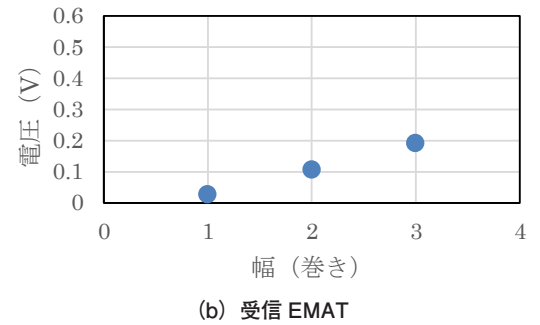
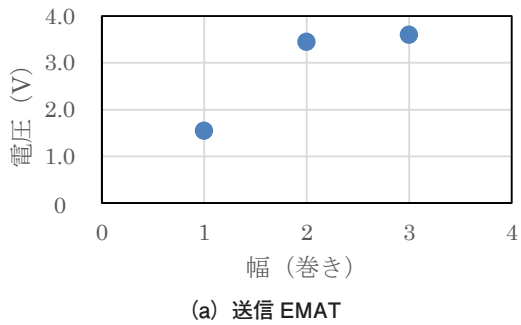


図7 平面方向巻き数検討結果

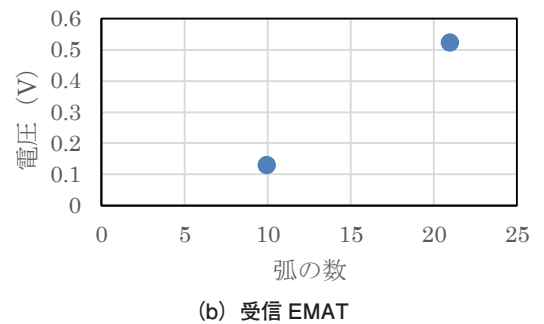
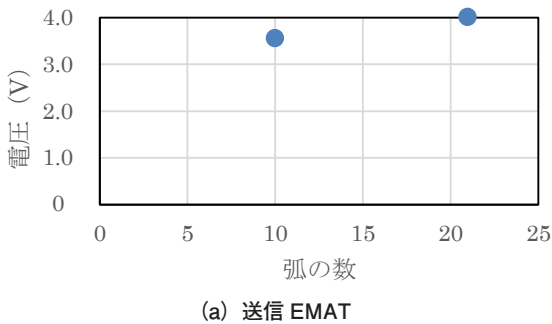


図8 弧の数検討結果

(3) 試験結果まとめ

・ 試験 1：線径の比較

線径の違いによる信号強度の差はほとんど生じないことがわかった。細い線径の方がより多く巻けるが $\phi 0.05\text{mm}$ は耐久性に問題がある。そこで試験条件の中で適切な線径は 0.1mm とした。

・ 試験 2：高さ方向巻き数の比較

高さ方向巻き数による信号強度の差はほとんど生じないことがわかった。巻き数を増やすと製作時間やコストが増えるが、強度向上の効果がないため、試験条件の中で適切な巻き数は1とした。

・ 試験 3：平面方向巻き数の比較

平面方向巻き数を増やすと信号強度が増加する傾向が確認できた。今回の試験条件の範囲では適切な巻き数は3とした。

・ 試験 4：弧の数の比較

弧の数10よりも弧の数21が高い信号強度を得られた。特に受信 EMAT では弧の数21の EMAT は試験を通じて最大の信号強度を得られた。そこで今回の試験条件の中で適切な弧の数は21とした。

以上の結果から定めたコイル仕様を表3に示す。

2.2 確認試験

コイル条件比較検討結果をもとに EMAT を製作し、屈折角および送受信を確認した。装置構成は2.1節と同様である。検討には2つの試験片を用いた。試験片の外観を図9に示す。それぞれの仕様は以下の通りである。

・ 屈折角確認試験

寸法：半径 48mm、長さ 70mm

形状：半割れ丸棒

材質：SS400

・ 送受信確認試験

寸法：200×200×24mm

形状：平板

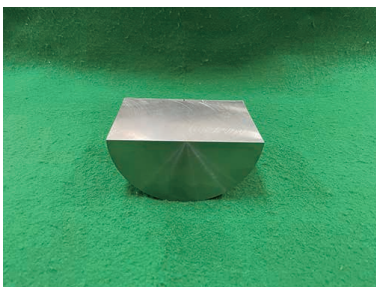
材質：SS400

(1) 屈折角確認試験

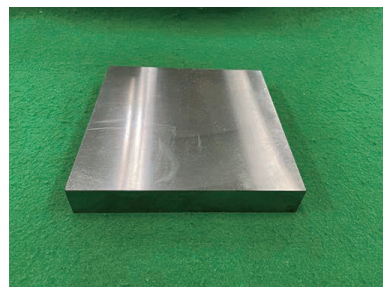
送信を EMAT、受信を横波垂直探触子（ピエゾ素子）にて屈折角を確認した。EMAT の位置は固定し、横波垂直探触子を 10° ピッチで EMAT から送信された超音波を受信し、信号強度を確認する。また、高い信号強度が得られる領域は 5° のデータを補完した。探触子配置の模式図を図10に、計測結果を図11に示す。

表3 コイル仕様

線径 (mm)	高さ方向巻き数 (段)	平面方向巻き数 (巻き)	弧の数
0.1	1	3	21



(a) 半割れ丸棒試験片



(b) 平板試験片

図9 確認試験使用試験片

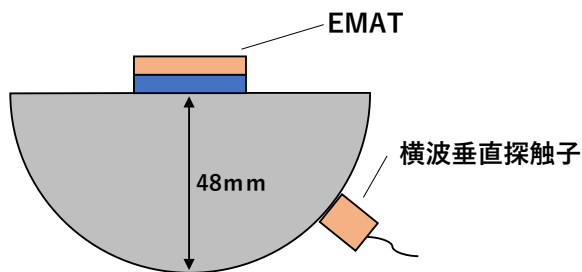


図 10 角度試験探触子配置

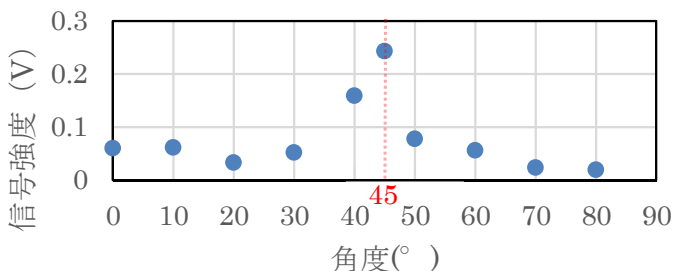


図 11 角度確認試験結果

この結果より、45°近傍で最も高い信号強度が得られると考え、以下の試験は屈折角 45°の条件で検討する。

(2) 送受信確認試験

屈折角が 45°、板厚が 24mm の場合、探触子の距離 48mm が最適となり、ビーム路程は 67.9mm となる(図 12)。鋼材横波音速 3240m/s として式(1)に示す通り計算すると、信号到達時間は約 21μs となる。

$$\text{時間 } h = \frac{\text{ビーム路程 } W}{\text{音速 } C} \quad (1)$$

送受信の EMAT 中心間距離を 48mm とし、送受

信を向かい合わせて波形を確認する(配置 A: 図 13 (a))。また、比較のため送受信の EMAT を同じ方向に向けて送受信できないよう配置した場合の波形を確認する(配置 B: 図 13 (b))。その結果を図 14 に示す。

確認試験の結果から、図 14 (a) の波形にのみ、約 20μs の位置に受信エコーが現れ、図 14 (b) では現れなかった。また受信エコーの位置は板厚 24mm の試験片を屈折角 45°、一回反射のビーム路程計算値とおおむね一致していることから、製作した EMAT にて超音波の送受信ができていると考えられる。

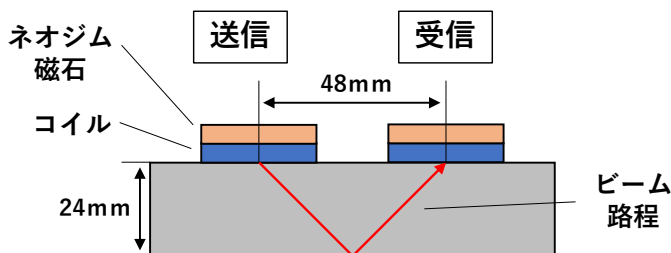
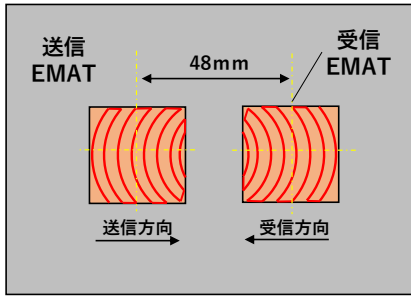
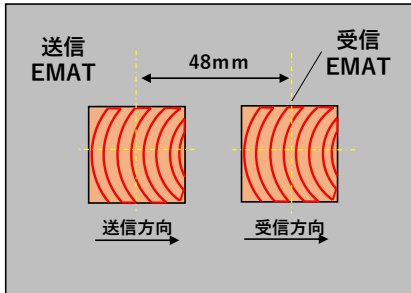


図 12 探触子配置 (断面図)

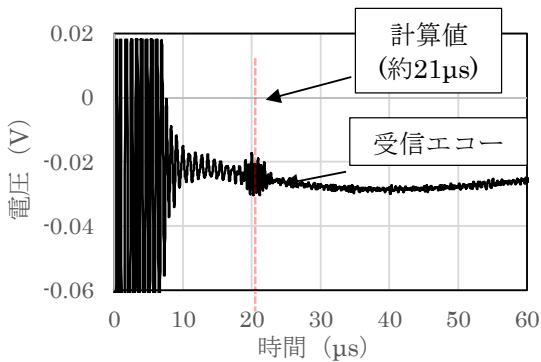


(a) 探触子配置 A (向かい合わせ)

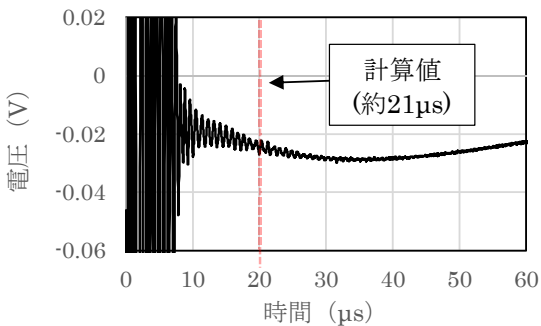


(b) 探触子配置 B (同じ方向)

図 13 探触子配置 (上面図)



(a) 探触子配置 A (向かい合わせ) 結果



(b) 探触子配置 B (同じ方向) 結果

図 14 送受信確認試験結果

3. 鋼床版検査への適用検討

2章での検討で製作した EMAT において送受信波形および屈折角を確認することができた。3章では、実機適用に向けた探傷条件を検討する。

(1) 試験内容

検討には図 15 に示す試験片を用いる。試験片仕様は以下の通りである。

寸法：300 × 600 × 12mm

形状：模擬きず入り平板

模擬きず：放電加工により導入 (3 本)

スリット長さ 20mm

スリット深さ 1.0・3.0・5.0mm

材質：SS400

まず、探触子の配置を検討するため図 16 に示す V 型配置と I 型配置を比較する。ここでは試験片の模擬きずのない箇所を用い、板の底面からの反射エコーではなく板の端面から反射エコーを対象とする。探触子配置位置から算出されるビーム路程は、それぞれ V 型配置 135.8mm、I 型配置 169.7mm となり、信号到達時間は V 型配置約 42 μ s、I 型配置 52 μ s となる。

その結果を図 17 に示す。

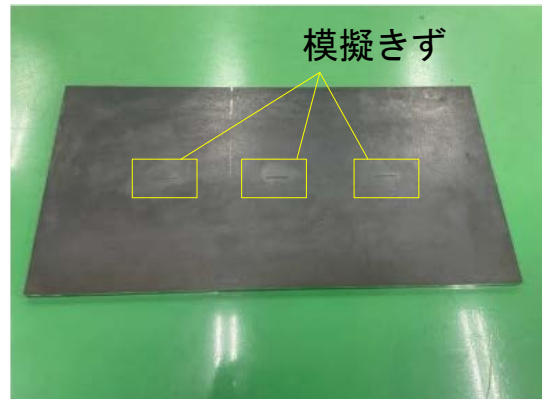
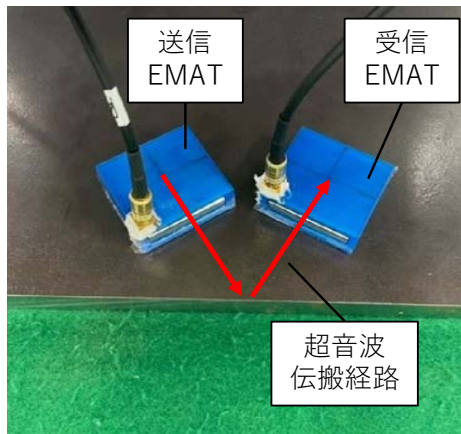
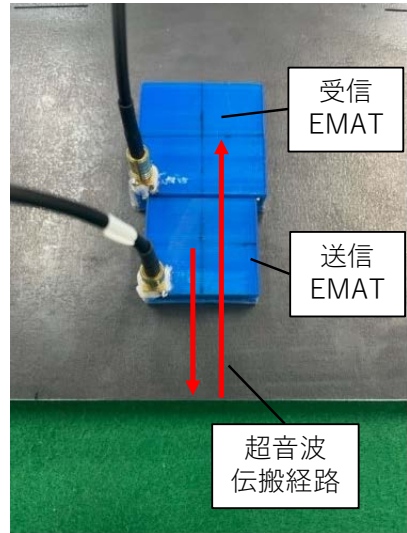


図 15 模擬きず試験片

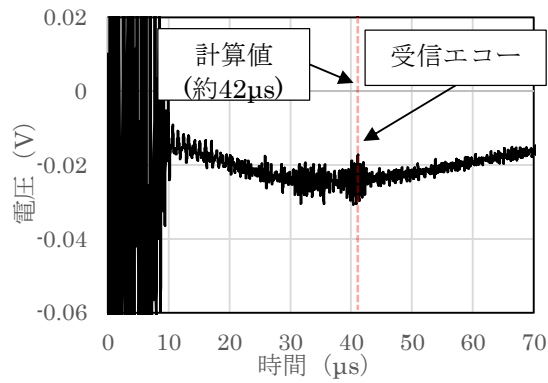


(a) V型配置

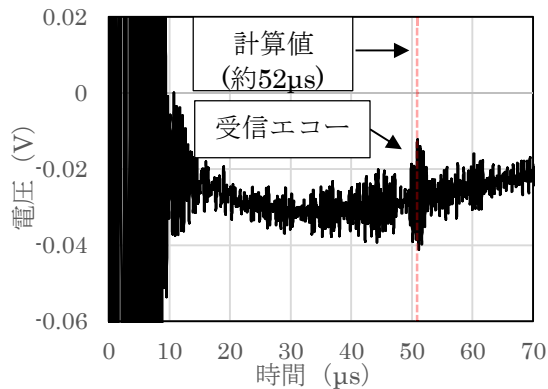


(b) I型配置

図 16 探触子配置



(a) V型配置試験結果



(b) I型配置試験結果

図 17 配置検討確認試験

図17(a)の波形から、約42 μ sの位置に受信エコーを確認することができた。これは計算値とおおむね一致していることから、V型配置では送信EMATから送信されたエコーが試験片端面にて反射し、受信EMATで受信することができていると考えられる。一方図17(b)の波形から、約52 μ sの地点に受信エコーが確認された。こちらも計算値とおおむね一致していることから、I型配置においても端部に反射したエコーを受信できたと考えられる。

いずれの配置でもEMATにより送受信が可能であることが確認されたが、実機に適用する場合V型配置は探傷方向に対して探触子の配置幅がI型配置より広いため、構造物との干渉が起りやすい。そこでI型配置にて、模擬きず試験片について検討する。

(2) 試験結果

探触子はI型配置に設定し、模擬きずから送信EMAT中心までの距離を48mmとした。この場合のビーム路程は168mm、信号到達時間は52 μ sとなる。

この配置で各模擬きずからの反射エコーを確認した。探触子配置を図18、試験結果を図19に示す。

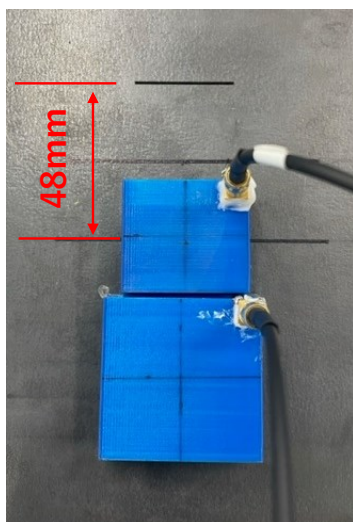
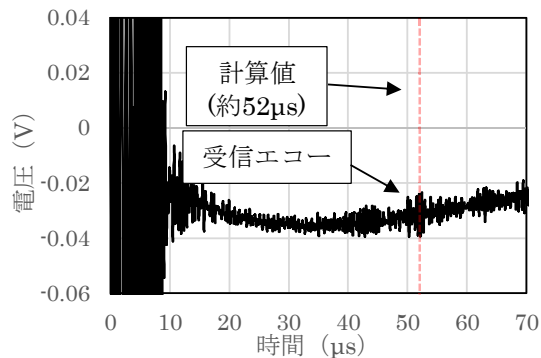
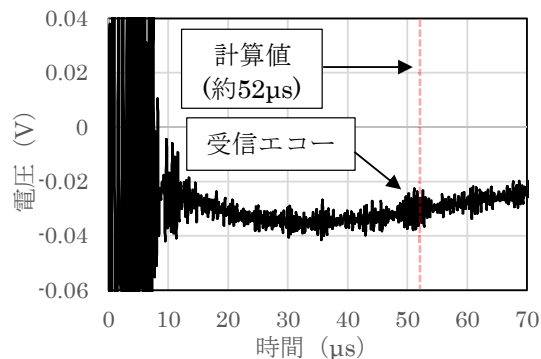


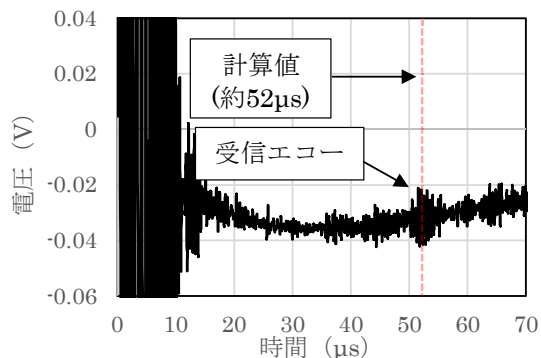
図18 探触子配置 (48mm)



(a) 模擬きず深さ 1.0mm



(b) 模擬きず深さ 3.0mm



(c) 模擬きず深さ 5.0mm

図19 模擬きず試験片探傷結果

図19に示す通り、模擬きず深さが1.0mm、3.0mm、5.0mmいずれも計算値とおおむね一致する位置に受信エコーが認められた。したがってI型配置を用いることで、長さ20mm、深さ1.0mm以上のきずが検出できると考えられる。

4. まとめ

点焦点型電磁超音波探触子のコイル条件を最適化し、実機適用を前提に送受信に EMAT を用いる際の配置を検討した。その結果模擬きず(長さ20mm、スリット深さ1.0mm)からの反射エコーを確認できた。高速道路鋼床版などの自動探傷への適用を目指し、今後も実用化のための検討を進める。

参考文献

- (1) Takashi Takishita, Kazuhiro Ashida, et al :
Development of SV-wave point-focusing
electromagnetic acoustic transducer, Proceedings
of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.35,
2014, pp.9-10



検査事業部
技術部
NDE グループ
常田 萌斗
TEL. 045-759-2120
FAX. 045-759-2146



検査事業部
技術部
NDE グループ
大森 征一
TEL. 045-759-2120
FAX. 045-759-2146



検査事業部
技術部
NDE グループ
鳩 昌洋
TEL. 045-759-2120
FAX. 045-759-2146