

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360211

研究課題名（和文）非接触非破壊検査法による土木構造物の新たなモニタリング戦略の構築

研究課題名（英文）NON-CONTACT NONDESTRUCTIVE TESTING METHODS FOR INNOVATIVE MONITORING OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES

研究代表者

廣瀬 壮一（HIROSE SOHICHI）

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：00156712

研究成果の概要（和文）：

本研究では非接触超音波法として電磁超音波法と空気超音波法を取り上げ、まず、時間域境界要素法による波動解析コードを開発し、それらの波動特性を明らかにした。その後、得られた波動特性を基礎実験によって確認するとともに、開口合成法によって試験体中の欠陥の画像化を試みた。さらに、新しい超音波法としてガイド波による逆散乱解析による欠陥形状の再構成法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

In the present research, two non-contact nondestructive ultrasonic methods of electromagnetic acoustic transducer (EMAT) and air-coupled ultrasonic method are considered. For these two non-contact ultrasonic methods, numerical codes of time domain boundary element methods are developed to investigate wave characteristics, which are verified in basic experiments. Also images of defects in experimental specimens are reconstructed from measured wave data by means of the synthetic aperture focusing technique (SAFT). Furthermore, an innovative inversion method is proposed for shape reconstruction of defects using guided waves in a plate.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2010 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2011 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
総計	11,300,000	3,390,000	14,690,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：非接触超音波法，電磁超音波，空気超音波，時間域境界要素法，板波，逆解析

## 1. 研究開始当初の背景

道路や鉄道等の交通インフラ施設は社会の基盤をなすことからその維持管理は極めて重要である。日本では昭和 30 年代に始まる高度成長期頃を中心に道路橋が多く建設され、近々建設後 40～50 年が経過しようとしている。全国で 2015 年に建設後 40 年を超える橋梁の数は 6 万橋にも及ぶと予想され、それらの橋梁を客観的な指標を用いて順

序づけて計画的に補修，補強する必要性に迫られている。そのために構造物の健全度を長期間に渡って的確に診断，評価できる信頼性の高いモニタリング技術の開発が求められている。

現在，インフラ施設の通常点検や定期点検は目視を主体として行われている。しかし，目視による判定は点検員の個人差に左右され易いほか，内部に発生する損傷を検出する

ことができない．内部の損傷を検出できる定量的な非破壊検査手法としては，超音波と X 線が代表的であるが，X 線は安全管理上の問題があり現場での使用は推奨されない．したがって，構造物内部の定量的な診断に対しては超音波法が唯一の方法となる．超音波法に関する研究は多く行われており，欠陥のサイジングなど詳細な損傷の評価では成果を挙げつつある．しかし，超音波法を構造物のモニタリングに用いた例はほとんどない．その原因は従来の超音波法が探触子を構造物に直接接触させて検査を行う接触法であるためである．接触法では接触条件を同じに保って検査をすることが必要であるが，長期間に渡って接触条件を安定させることは困難であり，検査効率も悪い．もし，接触条件を考慮する必要のない非接触超音波法を利用できれば接触法の欠点が克服され，超音波を用いた新たなモニタリングの提案が可能になるものと考えられる．

## 2. 研究の目的

上述の背景のもとに，本研究では非接触超音波法として電磁超音波法と空気超音波法を取り上げ，それらの基本的特性を明らかにした上で，土木構造物への適用性を検討し，新しいモニタリング方式を提案するものである．単に実験的な検討を行うだけでなく，数値シミュレーションコードの開発ならびに数値解析モデルの構築といった基礎研究からスタートし，数値解析をベースとしてモニタリングに適した超音波法を検討する．

## 3. 研究の方法

### (1) 電磁超音波法

まず，非接触非破壊検査法の一つとして取り上げた電磁超音波法について解析及び基礎実験を行う．電磁超音波では，超音波や電磁波の両方の波動場を扱える波動解析ツールが必要であるが，本研究では積分方程式法を用いる．演算子積分(Convolution Quadrature Method, CQM)時間領域境界要素法を基本として，高速多重極法や新しい積分変換法など，最新の数値解析技術を用いた解析手法を開発し 2次元及び3次元解析を行う．解析結果に基づいて最適な電磁超音波センサーの配置等を検討し，室内の基礎実験によって性能を確認する．

### (2) 空気超音波法

次に，空気超音波の解析ならびに基礎実験を行う．空気超音波の場合には，空気と構造物のインピーダンスが大きく異なるため，扱う方程式を適切に正規化するなどの工夫が必要である．具体的な数値解析手法は電磁超音波と同様，時間領域境界要素法を用いる．最近，空気超音波探触子の性能が向上してきたが，接触法に比べて空気超音波法のS/N比は低く，

探触子から試験体への適切な入射角の選定や集束方式の採用など，空気超音波の探傷条件には工夫が必要であるため，数値計算によるパラメトリック解析によって最適な探傷条件を検討し，実験によって検証する．

### (3) ガイド波の逆散乱解析

空気超音波法に関する解析結果に基づき，板内を伝搬する表面波である板波を用いた逆散乱解析手法を開発する．これによって遠隔からの非接触非破壊検査によって構造物材の定量的な損傷度評価が可能となる．

## 4. 研究成果

### (1) 電磁超音波法

超音波や電磁波の両方の波動場を考慮できる2次元及び3次元時間領域境界要素法プログラムを開発した．具体的には，電磁超音波の送信過程の解析モデルとして，まず解析解によって静磁場を求め，その後，電磁場解析によって渦電流を得た．そして，渦電流と静磁場の相互作用によりローレンツ力を計算し，それを物体力とみなして弾性波動の運動方程式を解析した．この内，渦電流解析と弾性波動解析では時間依存の積分方程式を解く必要がある．例えば，渦電流解析では，空気領域 $D^a$ と固体領域 $D^s$ における磁気ポテンシャルを $A^a, A^s$ とすると，それぞれ以下の積分方程式を満足する．

$$\begin{aligned} c^a(x)A^a(x, t) &= \int_{D^a} (V(x, y)Q^a(y, t) - W(x, y)A^a(y, t))dS_y \\ &+ \int_{D^s} F(x, y)J(y, t)dV_y \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} c^s(x)A^s(x, t) &= \int_{D^s} (G(x, y, t) * Q^s(y, t) \\ &- H(x, y, t) * A^s(y, t))dS_y \end{aligned} \quad (2)$$

ここに， $c^a, c^s$ は自由項であり， $Q^a, Q^s$ はそれぞれ $A^a, A^s$ の法線微分である．また， $\mu$ は透磁率， $J$ は電流密度， $V$ と $W$ はそれぞれ，ラプラス方程式の基本解とその二重層核， $G$ と $H$ はそれぞれ，拡散方程式の基本解とその二重層核である．式(2)の\*は時間に関する合成積であり，弾性波動解析においても合成積の計算が現われる．そのような合成積の計算はLubichによって提案された演算子積分法によって評価した．これによって，時間領域の解析においても安定した高精度な解を得ることができるようになった．図1は解析例として，非磁性固体内を伝搬する電磁超音波の水平，鉛直方向の変位の時間変化を示している．なお，電磁超音波の受信過程を送信過程と逆の順序と考えることによって，受信電圧波形を求めることもできる．

解析結果を基に，SH波を選択的に送受信するSH用電磁超音波探触子を作成し，基礎実験を行った．入力電圧をチャープ信号とし，受信信号にパルス圧縮法などの信号処理を

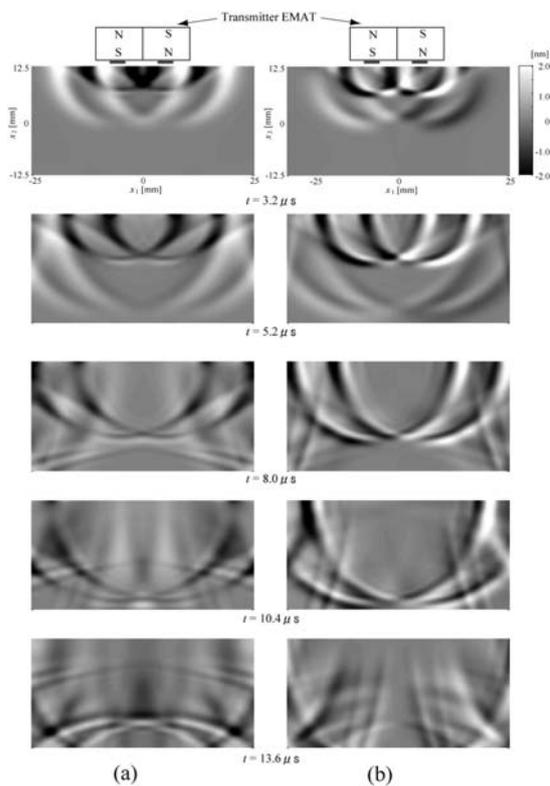


図1 電磁超音波解析例．非磁性固体内における(a)水平変位と(b)鉛直変位の時間変化．

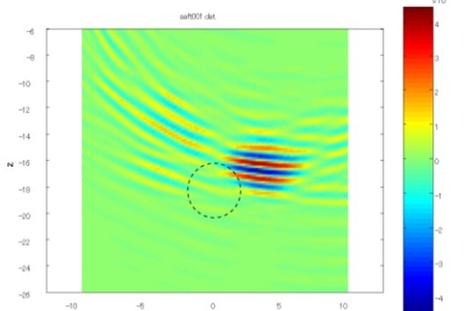


図2 電磁超音波によるアルミニウム試験体内の4mmの横穴に対する開口合成画像．

施して、電磁超音波の受信信号のS/N比を向上させた．その結果、図2に示すように、電磁超音波によってアルミニウム試験体内のきずを画像表示することができた．

## (2) 空気超音波法

空気超音波法の解析では、空気中の音響波と固体中の弾性波の連成問題を解く必要がある．音響波と弾性波をそれぞれ時間域積分方程式によって用いて表すと、時間に関する合成積が現われるが、そのような合成積に関する計算は、電磁超音波法に場合と同様、Lubichによって提案された演算子積分法によって評価した．これによって安定した高精度な解を得ることができた．なお、空気中の音響波と固体中の弾性波に対する積分方程

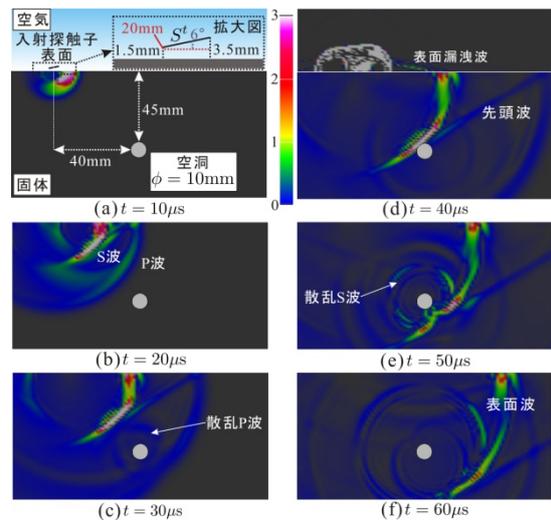


図3 空気超音波法の解析例．空気領域では圧力振幅、固体領域では変位振幅を図示．

式は時間域において直接連成させることができないため、解の表現をフーリエ像空間で表す改良型演算子法、及び、音響波の積分中の時間微分にNewmark-法を適用する近似法によって、空気と固体の境界条件を満足させることができた．その際、空気と固体のインピーダンスの差異による方程式の解の不安定は生じなかった．

開発した手法を用いて空気領域から固体(モルタル)への超音波入射の解析を行った．解析例を図3に示す．その結果、固体におけるP波が全反射する臨界角を超えた入射角(約 $6^\circ$ )で最も効率よくS波が固体内に入射され、空洞や介在物などの散乱現象が顕著に発生することがわかった．また、固体から空気領域への表面漏洩波も確認することができた．

解析結果を参考にして、内部に鉄筋と空洞を有するモルタル供試体を作成し、供試体表面近傍に設置した二個の空気超音波探触子を用いてピッチキャッチ法により超音波波形を計測した．供試体表面に沿って移動させながら複数の点において計測した波形に、空気超音波の広がり考慮した開口合成法を適用し、供試体内部の鉄筋と空洞の画像化を行った．図4に開口合成画像の例を示す．鉄筋と空洞のいずれの反射源に対しても大凡の位置推定が可能であるが、十分な解像度を持った画像は得られなかった．また、空洞

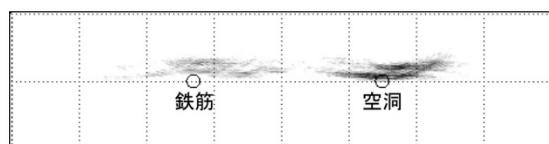


図4 空気超音波法によるモルタル供試体内の鉄筋と空洞に対する開口合成画像．

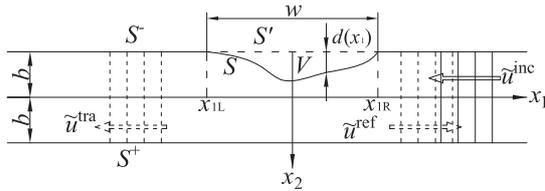


図5 減肉部における板波の反射モデル。

に比べて、鉄筋による散乱波は小さく、得られた画像は不鮮明なものとなった。今後、波形処理を併用した画像の解像度の向上が望まれる。

### (3) ガイド波の逆散乱解析

空気超音波法に関する解析より、非接触超音波法では固体表面に沿って伝搬する表面波を安定的に発生できることが分かった。このような性質は板や配管などのガイド波を用いる検査に有用である。そこで、ここでは、板波による板の損傷評価を念頭に、板の欠陥部による反射板波の積分表現を用いて特定の板波モードの反射係数から欠陥部の形状を再構成する逆散乱解析を提案する。

図5に示すように、板厚 $2b$ の均質等方板の上面が領域 $V$ だけ減肉しているとする。板の右側から時間調和なある単一モードのガイド波を入射し、減肉部 $V$ に反射された反射波 $u^{ref}$ は次のように積分表現される。

$$u_p^{ref}(x) = \int_S n_\alpha(x) C_{\alpha\beta\gamma\delta} \frac{\partial}{\partial x_\beta} U_{\alpha\gamma}(x, X) u_\delta(x) dS_x \quad (4)$$

ここに、 $S$ は減肉部の表面、 $n_\alpha(x)$ は点 $x$ における法線ベクトル成分、 $C_{\alpha\beta\gamma\delta}$ は弾性定数、 $U_{\alpha\gamma}(x, X)$ は動弾性問題の基本解である。反射波の観測点 $x$ が減肉部 $V$ から遠方に位置し、減肉部による散乱は弱散乱で境界 $S$ 上の波動場 $u_\delta$ は入射波による変位 $u^{in}$ で近似できる(Born近似)とする。さらに、入射波の振幅スペクトル $A^{in}$ 及び入射波と同じモードの反射波の振幅スペクトル $A^{ref}$ を計測できたとすると以下の表現を得る。

$$a(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G^{-1}(\omega) c^{ref} e^{-2i\omega x} a(\xi) d\xi \quad (5)$$

ここに、 $c^{ref}$ は $c^{ref} = A^{ref}/A^{in}$ で定義される反射係数である。式(5)より、反射係数が得られれば、それを逆フーリエ変換することにより、減肉形状を表す関数 $d(x_2)$ が再現できることがわかる。

図6は、減肉部の形状が最大深さ $d_{max} = 0.05b$ 、 $w = b$ の正弦半波形である場合の、様々なSH板波モードの入射波に対する反射係数を横軸に周波数を取って示したものである。

図7は、図6に示した反射係数の内、低次の3つの板波SHモード( $n=0, 1, 2$ )の反射係数

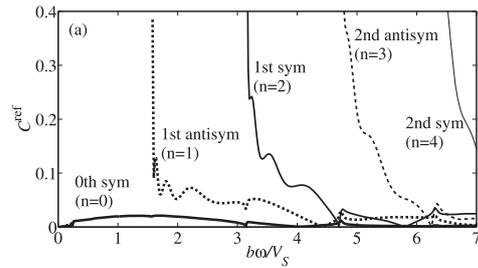


図6 様々なSH板波モードの入射波に対する反射係数

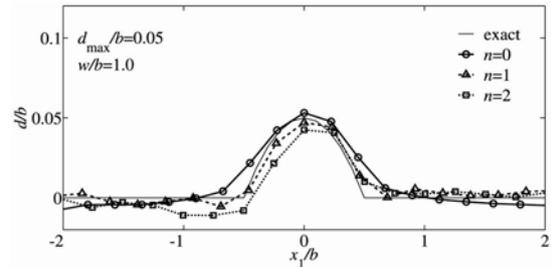


図7 低次板波SHモード( $n=0, 1, 2$ )の反射係数から再現された板の減肉形状

を式(5)に代入して再現された減肉形状 $d(x_2)$ である。仮定した板の減肉形状がよく再現されていることがわかる。これ以外にも種々のパラメータを変化させて数値シミュレーションを実施した結果、板波を用いて板の損傷位置だけでなく、その形状まで再現できることが明らかとなった。ただし、本手法の実用化においては、非接触非破壊検査によって板波モード別に反射係数の計測が可能であるか等、今後解決すべき課題が残されている。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

丸山泰蔵, 齋藤隆泰, 廣瀬壮一; 空気超音波法に対する波動伝搬解析(研究速報), 非破壊検査, 査読有, 61, 2012, 111-112.

T. Saitoh, S. Hirose; New time-domain boundary element method based on the convolution quadrature method for 2-D wave propagation problems, Theoret. Appl. Mech. Japan, 査読有, 60, 2012, 307-315.

廣瀬壮一, 王彬; ガイド波による板の減肉形状の逆解析, 非破壊検査, 査読有, 61, 2012, 54-59.

齋藤隆泰, 瀬川尚揮, 石田貴之, 廣瀬壮一; 並列化された演算子積分時間領域高速多重極境界要素法を用いた大規模多重散乱解析, 計算数理工学論文集, 査読有, 11, 2011, 95-100.

廣瀬壮一, 王彬; ガイド波を用いた平板減肉の逆解析, 超音波テクノ, 査読無, 23, 2011, 5-8.

齋藤隆泰, 丸山泰蔵, 廣瀬壮一; 流体-

固体連成問題のための演算子積分時間領域境界要素法および空気超音波シミュレーションへの応用, 土木学会論文集 A2, 査読有, 67, 2011, 1\_145-1\_152.

T. Saitoh and S. Hirose; Parallelized fast multipole BEM based on the convolution quadrature method for 3-D wave propagation problems in time-domain, Materials Sci. Eng., 査読有, 10, 2010, No.012242.

天間祐輔, 工藤圭, 齋藤隆泰, 廣瀬壮一; 演算子積分法を用いた時間領域境界要素法による電磁超音波の解析, 応用力学論文集, 査読有, 13, 2010, 187-194.

Sohichi Hirose, Yusuke Temma, Saitoh Takahiro; Application of Convolution Quadrature Method to Electromagnetic Acoustic Wave Analysis, Advances in Boundary Element Techniques, 査読無, Vol.11, 2010.

[学会発表](計 21 件)

丸山泰蔵, 齋藤隆泰, 廣瀬壮一; スカラー波動・弾性波動連成問題のための演算子積分時間領域境界微積分方程式法, 第 61 回理論応用力学講演会, 2012.3.9, 東京.

齋藤隆泰, 中畑和之, 木本和志, 廣瀬壮一; EFIT・BEM ハイブリッド解法による電磁超音波のシミュレーション, 第 19 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 2012.1.27, 東京.

齋藤隆泰, 廣瀬壮一; 演算子積分境界要素法を用いた電磁超音波の励起シミュレーション, 第 24 回機械学会計算力学講演会, 2011.10.8, 岡山大学.

Worawit Padungsriborn, 廣瀬壮一; 超音波アレイ探傷システムを用いた鋼板裏面の損傷の画像化, 土木学会第 65 回年次学術講演会, 2011.9.9, 愛媛大学.

丸山泰蔵, 齋藤隆泰, 廣瀬壮一; 空気-固体連成問題のための演算子積分時間領域境界要素法, 土木学会第 65 回年次学術講演会, 2011.9.7, 愛媛大学.

Sohichi Hirose, Takahiro Saitoh; Boundary element approach for simulation of electromagnetic acoustic transducer, Review of Progress in QNDE, 2011.7.20, バーモント大学, 米国.

Sohichi Hirose, Bin Wang; Shape reconstruction of defects using ultrasonic bulk and guided waves, 2011 Far East Forum on Nondestr. Eval./Testing (招待講演), 2011.6.1, 杭州、中国

Bin Wang, Sohichi Hirose; The quantified detection and reconstruction of plate thinning using reflection coefficients of ultrasonic Lamb waves: a numerical

approach, 2011 Far East Forum on Nondestr. Eval./Testing, 2011.6.1, 杭州、中国.

丸山泰蔵, 齋藤隆泰, 廣瀬壮一; 空気超音波法に対する波動伝搬解析, 日本非破壊検査協会平成 23 年度春季大会, 2011.5.26, 東京.

仁科直也, 木本和志; 差分法を用いた薄板中欠陥による漏洩 Lamb 波の散乱解析, 平成 23 年度日本非破壊検査協会春季講演大会, 2011.5.25, 東京.

仁科直也, 木本和志; ガイド波を使った表面き裂の画像化に関する数値解析的研究, 第 63 回土木学会中国支部研究発表会, 2011.5.21, 岡山.

丸山泰蔵, 齋藤隆泰, 廣瀬壮一; 時間領域境界要素法による空気超音波の解析, 超音波による非破壊評価シンポジウム, 2011.1.28, 東京

工藤圭, 齋藤隆泰, 廣瀬壮一; 時間領域境界要素法を用いた電磁超音波探傷法の 3 次元解析, 超音波による非破壊評価シンポジウム, 2011.1.28, 東京

廣瀬壮一, 天間祐輔, 齋藤隆泰; 時間領域境界要素法による電磁超音波の数値シミュレーション, 第 15 回計算工学講演会計算工学論文集, 2010.5.27, 九州大学.

天間祐輔, 廣瀬壮一, 齋藤隆泰; 演算子積分法を用いた時間領域境界要素法による電磁超音波の解析, 第 17 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 2010.1.29, 東京.

[その他]

ホームページ等

<http://www.cv.titech.ac.jp/~hiro-lab/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

廣瀬 壮一 (HIROSE SOHICHI)  
東京工業大学・大学院情報理工学研究所  
・教授  
研究者番号: 0 0 1 5 6 7 1 2

### (2) 研究分担者

木本 和志 (KIMOTO KAZUSHI)  
岡山大学・大学院環境学研究所・准教授  
研究者番号: 3 0 3 2 3 8 2 7

齋藤 隆泰 (SAITOH TAKAHIRO)  
東京工業大学・大学院情報理工学研究所  
・助教  
研究者番号: 0 0 5 3 5 1 1 4