

平成 23 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760358

研究課題名(和文) 電磁波レーダを用いた非破壊検査の新しい定量的評価基準の確立に関する研究

研究課題名(英文) ESTABLISHMENT OF NEW QUANTITATIVE NDE WITH ELECTROMAGNETIC RADAR

研究代表者

吉川 仁 (YOSHIKAWA HITOSHI)

京都大学・大学院情報学研究科・講師

研究者番号：90359836

研究成果の概要(和文)：時間域境界積分方程式法を用いた波動解析により、電磁波レーダ非破壊計測における電磁波の伝播を詳細に数値的に表現した。また、ルービックの演算子積分法を用いることで、検査対象物内部での電磁波の減衰も再現可能となった。詳細な計算結果を用いて、対象内部の散乱体の情報を定量化したパラメータと、計測データとの関連付けを可能とした。

研究成果の概要(英文)：Propagation of waves in electromagnetic nondestructive testing is represented numerically by solving wave problems with time domain boundary integral equation method. The attenuation of electromagnetic waves in target objects is also represented with time domain BIEM with Lubich's convolution quadrature method. Using accurate numerical results, we are able to correlate quantitative parameters of the scattering body in the target objects to the measured data.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

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：電磁波レーダ非破壊評価、波動解析、波動減衰、定量的非破壊評価、時間域境界積分方程式法

1. 研究開始当初の背景

電磁波レーダは以前より地中探査(地下空洞や埋蔵物など)や遺跡調査に用いられてきた。土木や建築分野においては、コンクリート構造物内の鉄筋の有無や鉄筋かぶり厚測定などの非破壊計測に電磁波レーダが用い

られている。電磁波レーダによる非破壊検査では、電磁波パルス信号を送信アンテナから送信し、地中やコンクリート構造物内の空洞や鉄筋など散乱体で反射して返ってくる散乱波を受信アンテナで捉え、送信から受信ま

での電磁波パルスの往復伝播時間を測定することにより、空洞や鉄筋までの距離を推定する。また、送受信アンテナを対象物表面で走査させる事で、空洞や鉄筋までの距離情報を収集し、空洞や鉄筋形状を構成する。しかし、現状の電磁波レーダ非破壊評価では、散乱波の波形の時間履歴が受信アンテナにより計測されているにもかかわらず、散乱波の到達時間のみを検査対象内部の情報決定に用いているに過ぎない。つまり、受信電磁波波形に含まれる多くの散乱体に関する情報（例えば、鉄筋の位置や形状など）が計測されているにもかかわらず未利用のまま残されている。例えば、受信アンテナにより計測される散乱波の振幅に散乱体の情報が含まれているのは明らかであるが、その情報は散乱体の決定に直接利用されていない。

また、本研究では、波動の解析に時間域の境界積分方程式法を用いる。時間域の電磁波波動解析を境界積分方程式法を用いて行った例は国内外でも数は少ない。特に、電磁波レーダ非破壊計測の定量評価に時間域境界積分方程式法の電磁波波動解析を適用した例は申請当時、本研究以外になく、世界的にも類を見ない。

2. 研究の目的

電磁波レーダ計測において得られる受信波形データに含まれる到達時間以外の情報の利用可能性について検討する。電磁波レーダ非破壊計測において受信アンテナの出力として得られる波形データを数値的に復元すれば、検査対象物内部の散乱体の情報(位置や形状やサイズ、散乱体の誘電率など)をパラメータで表現し、それらのパラメータ毎に散乱電磁波動場を計算する事で、電磁波レーダ計測波形と各種パラメータとの関係を明らかにする事ができる。さらに、電磁波レーダ計測波形と内部散乱体情報の関連付けが行われれば、電磁波レーダ計測により得られる計測波形データからより多くの内部散乱体情報を定量的に決定可能となる。

電磁波レーダ非破壊評価への適用を見込んだ電磁場解析を行うにあたり、考慮しなければならない条件の一つとして、検査対象である地中やコンクリート構造物内での波動の減衰が挙げられる。電磁波計測の対象となるコンクリート構造物には水分が含まれ、また、地中探査においては地下水の存在が無視できない。計測対象内に含まれる水分の影響で電磁波は伝播とともに減衰する。時間域の境界積分方程式法により、減衰を伴う波動伝播の様子を正確に数値的に表現する事も目的の一つである。

3. 研究の方法

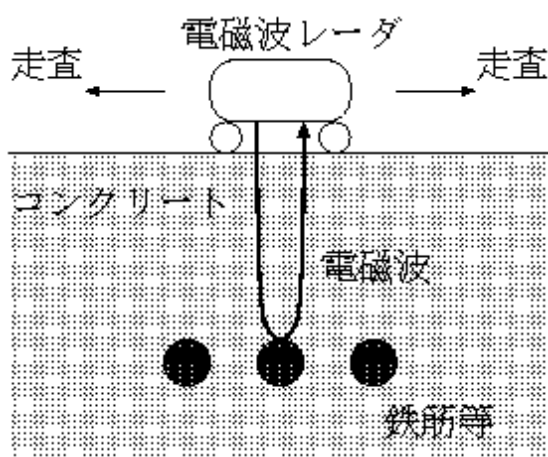


図1 電磁波レーダ計測



図2 送受信アンテナ

電磁波波動問題の数値解析には時間域の境界積分方程式法を用いる。境界積分方程式法は、解くべき問題の基本解を導入することで、解を対象領域の境界での値のみで表現できる数値解析手法である。有限要素法や有限差分法などが領域型の数値解析手法と呼ばれるのに対し、境界積分方程式法は境界型の数値解析手法と呼ばれる。一方、非破壊検査において計測されるデータは検査対象の表面で得られる情報のみである。計測することができない対象の内部の解を、数値的に構成しても意味をなさない。これより、表面を走査し計測された情報から内部情報を決定する非破壊検査（図1）の解析には、境界の情報のみで解が構成される境界積分方程式が適していると言える。

また、電磁波レーダ非破壊検査を考える場合、送信用のアンテナ(図2)から発信される電磁波はパルス波である。パルス波を複数の周波数の波の足し合わせで構成することは困難で

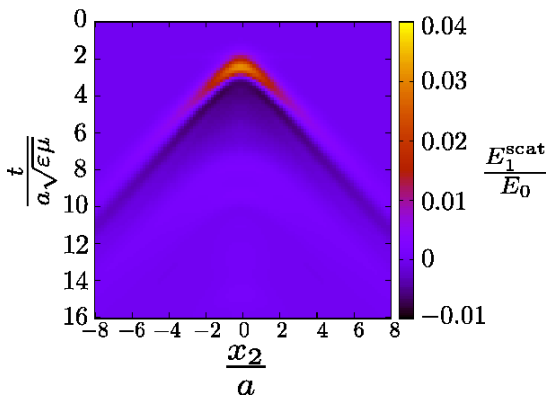


図3 散乱電磁場 (減衰なし)

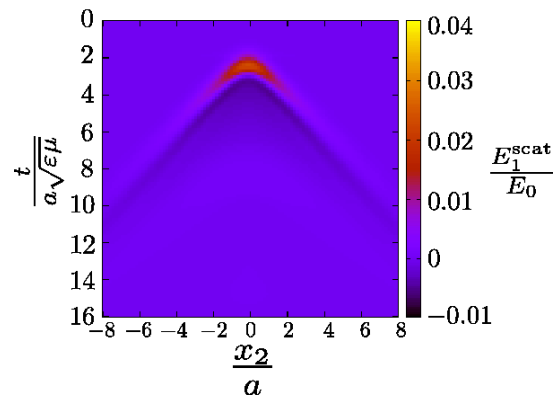


図4 散乱電磁場 (減衰あり)

ある。パルス波を正確に表現するには膨大な量の周波数解析を行い、それらを重ね合わせる必要がある。このため本研究では、波動問題を周波数域の問題としてではなく、時間域の問題として解く。波動問題を時間域の問題として解く事は至極もっともな発想であるにもかかわらず、時間域の解析、特に時間域の境界積分方程式法はコードの作成が困難と考えられており、敬遠されており研究例もあまり多くない。

さらに、電磁波動は計測対象材料内を伝播するにつれ、振幅は減衰する。特に、土木分野における電磁波非破壊計測は、水分を含むコンクリート材料や地下水が存在する地中の探査を対象としており、対象材料内を伝播する電磁波動の減衰は顕著である。波動の減衰を考慮した数値解析を行うために、ルービッチの提案した演算子積分法 (Convolution Quadrature Method (CQM)) を用いる。ルービッチの演算子積分法を用いれば、時間域の境界積分方程式法に表れる時間についての畳み込み積分を、基本解の Laplace 変換を利用して書き表すことができる。減衰を考慮した Maxwell 方程式の基本解は Laplace 変換した形であれば、容易に得る事ができる。ルービッチの演算子積分法を用いた境界積分方程式解析は、波動問題、粘弾性波動問題、中性子拡散問題へ適用されているが、減衰を考慮した電磁波動問題への適用例は見られない。本研究では、ルービッチの演算子積分法を用いた時間域境界積分方程式法の定式化を行い、既知の散乱体が存在する領域での電磁波散乱問題を解き、波動の減衰が正確に表現可能かを調べ、手法の有用性を証する。

4. 研究成果

コンクリート構造物の非破壊評価や地下探査では、弾性波の減衰が大きいため弾性波を用いた非破壊評価は適しておらず、電磁波を用

いた非破壊評価が行われている。本研究では、電磁波レーダ計測において得られる受信電磁波波形データに含まれる散乱波の到達時間以外の情報の利用可能性について検討した。マクスウェル方程式に支配される内部散乱体として完全導体を持つ電磁場における波動解析を時間域の境界積分方程式法を用いて数値的に行い、電磁波レーダ非破壊計測において受信アンテナの出力として得られる波形データを数値的に復元した。検査対象物内部の散乱体の情報(位置や形状やサイズなど)をパラメータで表現し、それらのパラメータ毎に散乱電磁波動場を計算する事で、電磁波レーダ計測波形と各種パラメータとの関係を明らかにした。また、実際の非破壊評価では検査対象物内において伝播する電磁波は減衰する。特に、検査対象がコンクリート構造物や地中である場合、含有水分や地下水の影響から電磁波の減衰は顕著である。このため、電磁波の減衰を考慮した数値解析手法を提案した。具体的にはルービッチの演算子積分法を用いた時間域境界積分方程式法を電磁波散乱問題に適用した。提案した手法を用いて、実際のコンクリート構造物内部の鉄筋の配筋検査を想定した数値解析を行った。対象物内部を減衰しながら伝播する電磁波波動を数値的に表現できた。減衰のない場合の散乱電磁場の数値結果を図3に、減衰を考慮した散乱電磁場の数値結果を図4に示す。これらの図からも電磁波の減衰が数値的に表現できていることが確認できる。電磁波動の減衰を考慮することで、より現実の電磁波非破壊計測に近いモデルや境界条件のもとでの数値解析を実現した。新しい定量的非破壊評価の確立に大きく近づいたと言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. 吉川仁、宇都本彰夫、西村直志、電磁波レーダ非破壊評価のための波動減衰を考慮した時間域境界積分方程式法、土木学会応用力学論文集、査読有、14 巻、2011、投稿中、掲載決定
2. 吉川仁、宇都本彰夫、西村直志、電磁波非破壊検査のための時間域境界積分方程式法、土木学会応用力学論文集、査読有、13 巻、2010、179-186
3. 飯盛浩司、吉川仁、西村直志、3 次元動弾性学の周期多重極とその平面 2 周期構造による散乱問題への適用、土木学会応用力学論文集、査読有、13 巻、2010、169-178
4. 飯盛浩司、新納和樹、吉川仁、西村直志、3 次元動弾性学の周期多重極における Calderon の式に基づく前処理について、計算数理工学論文集、査読有、10 巻、2010、43-50

[学会発表] (計 2 件)

1. 吉川仁、宇都本彰夫、西村直志、電磁波非破壊検査による定量的評価のための時間域 BIEM、日本機械学会第 23 回計算力学講演会、2010 年 9 月 23 日、北海道
2. 吉川仁、宇都本彰夫、西村直志、電磁波非破壊検査のための時間域境界積分方程式法、土木学会第 13 回応用力学シンポジウム、2010 年 8 月 31 日、北海道

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉川 仁 (YOSHIKAWA HITOSHI)
京都大学・大学院情報学研究所・講師
研究者番号：90359836