

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560348
 研究課題名（和文） 電磁波レーダを用いたコンクリート構造物の高精度可視化アルゴリズムの開発
 研究課題名（英文） Development of High-Accuracy Visualization Algorithm for Concrete Structure with Electromagnetic Radar
 研究代表者
 田中 充（TANAKA MITSURU）
 大分大学・工学部・教授
 研究者番号：30091341

研究成果の概要（和文）：柱状及びスラブ状のコンクリートに、それぞれ、多周波及びパルス電磁波を入射し、測定された散乱データに着目してコンクリートの構造パラメータ（媒質定数、形状、寸法、位置）を可視化するアルゴリズムを導出した。損失性誘電体円柱及び内部に円柱状の散乱体が存在するコンクリートの構造パラメータの推定について数値的検討を行った結果、提案した可視化アルゴリズムは良好な再構成結果を与えることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Iterative reconstruction algorithms of visualizing the material parameters inside a concrete structure are presented. The scattered electromagnetic wave from the concrete structure is obtained by using the moment method or the FDTD method. Numerical results for a lossy dielectric cylinder and a dielectric scatterer inside a homogeneous concrete show that the proposed algorithms provide good reconstructions of the material parameters.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子デバイス・電子機器

キーワード：電磁波逆散乱問題 コンクリート構造物 非破壊検査 可視化アルゴリズム
非線形最適化 マルチグリッド最適化法 FDTD法

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物は安価でその寿命が半永久的と考えられ、我が国の高度成長期に大量に建設された。しかし、実際には建設された場所の周囲の環境や不適切な施行により、構造物の劣化が急速に進むことがある。

コンクリート構造物の耐震強度の偽装問題が発覚し、深刻な社会問題になったことは記憶に新しい。現在、コンクリート構造物の耐用年数は50年～60年といわれており、高度成長期前後の建設物だけでなく、今後建設される構造物の維持・管理は大きな問題になる。

既設のコンクリート構造物が劣化する時期を予想することは補修・補強の時期を検討する上で重要であり、安全かつ簡便な方法に基づくコンクリート構造物の非破壊検査技術の確立が強く望まれている。現在用いられている非破壊検査法として、超音波、弾性波、赤外線、電磁誘導、電磁波レーダ等を用いる方法がある。しかし、各検査法には一長一短がある上、それぞれの技術が個別に進歩してきたため、試験方法や試験結果の評価とその信頼性が担当者の知識や技量に依存している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、データ収集の高速性、遠隔測定も可能な機動性、可視化画像の高解像度性、金属・非金属物体への適用可能性等を勘案し、電磁波レーダ用の高精度可視化アルゴリズムを開発することである。具体的には、周波数変調された連続波をコンクリート表面より入射して構造物の内部状況の可視化を行う電磁波逆散乱問題に対する精密な解法を提供し、広範な適用可能性を持つ可視化アルゴリズムを導出する。この可視化アルゴリズムを電磁波レーダに組み込むことによって、コンクリート表面から鉄筋までのかぶり厚だけでなく、従来の検査装置では可視化が困難であったかぶり厚より深い所にある生活用配管や電線も非破壊検査できるようになる。

3. 研究の方法

(1) 柱状コンクリートの周囲に送受信アンテナを配置した場合を想定し、入射波の周波数を変化して得られた多周波散乱データを用いて物体の構造パラメータ（媒質定数、形状、寸法、位置）を推定する周波数領域電磁波逆散乱問題について考察した（図1参照）。周波数ホッピング法、共役勾配法、マルチグリッド法によって構成されたマルチグリッド最適化法を適用し、電磁波逆散乱問題の解析に必要な数学的定式化を行った。具体的には、電磁波逆散乱問題を散乱波の測定値と計算値との残差ノルムを最小化する非線形最適化問題に帰着させ、構造パラメータの推定を反復的に行う可視化アルゴリズムを導出した。

(2) 柱状コンクリートの高精度な可視化を実現するため、マルチグリッド最適化法を構成する周波数ホッピング法を改良し、重み付き修正周波数ホッピング法を提案した。この手法は、より高い周波数に切り替えるたびに、過去に用いた低い周波数に対する散乱電界の測定値と計算値との残差ノルムに重みを付けて汎関数に加える方法である。また、このようにして得られた散乱電界に関する残差ノルムと正則化項の和として汎関数を定

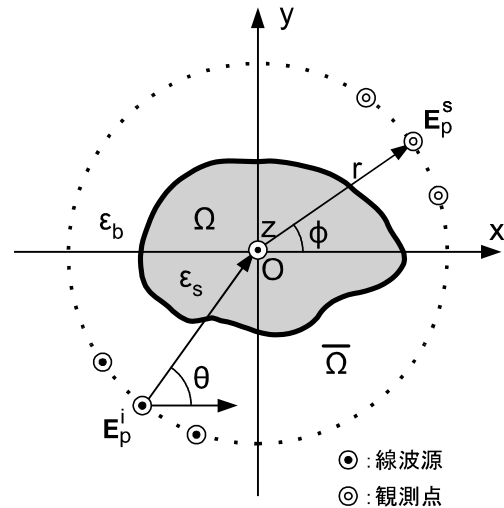


図1. 周波数領域における問題の設定

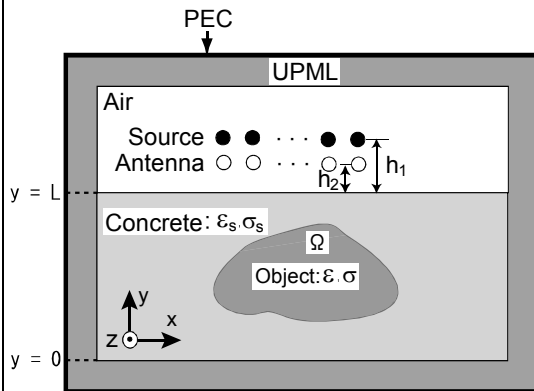


図2. 時間領域における問題の設定

義し、残差ノルムの値に応じて正則化項を動的に変化させる適応型正則化法を適用した。

(3) パルス電磁波を用いてスラブ状のコンクリート内部を可視化する時間領域電磁波逆散乱問題の解析を行い、Forward-Backward Time-Stepping (FBTS) 法に基づく可視化アルゴリズムを導出した（図2参照）。散乱電磁界の計算に際しては、Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法を適用した。散乱電磁界の残差ノルムによって汎関数を定義し、これを最小化する非線形最適化問題に共役勾配法を適用した。また、可視化アルゴリズムの推定精度を向上させるため、エッジ保存平滑化を適用した。

4. 研究成果

(1) 通常の周波数ホッピング法を用いた可視化アルゴリズムの適用可能性について検証するため、均質及び不均質な誘電体円柱の比誘電率の推定について数値シミュレーションを行った。その結果、提案した可視化アルゴリズムは高精度な再構成結果を与え、その有用

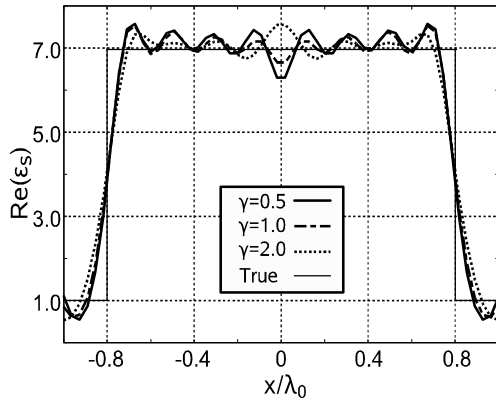


図3. 複素比誘電率の実数部の再構成結果

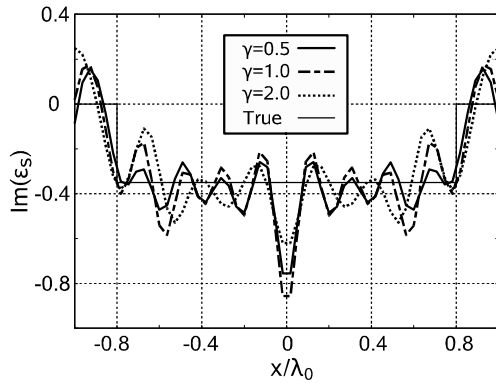


図4. 複素比誘電率の虚数部の再構成結果

性が確認された。また、単一周波数及び多周波の入射波を用いた場合の可視化について数値的検討を行い、多周波散乱データを用いることによって比誘電率の大きい物体を精度良く可視化できることを明らかにした。

(2) 重み付き修正周波数ホッピング法に着目した可視化アルゴリズムの有用性を明らかにするため、均質及び不均質な損失性誘電体円柱を例に取り、重み係数及び周波数の切り替え時期を変化して数値計算を行った。その結果、周波数の切り替え時期にかかわらず、重み係数 γ を0.5とした場合に最も高精度な再構成結果が得られることが示された(図3, 4参照)。また、線波源と観測点の個数及び使用周波数の組合せを変化した場合の損失性誘電体円柱の比誘電率の推定精度について数値シミュレーションを行った。その結果、散乱データに含まれるノイズの有無によらず、線波源と観測点の個数及び使用周波数の組合せが比誘電率の推定精度に影響を与えることが明らかになった。更に、適応型正則化法の有効性について検討するため、損失性誘電体円柱の複素比誘電率の推定について数値的検討を行った結果、適応型正則化法は通常の正則化法と比較して高速かつ高精度な再構成結果を与えることが示された。

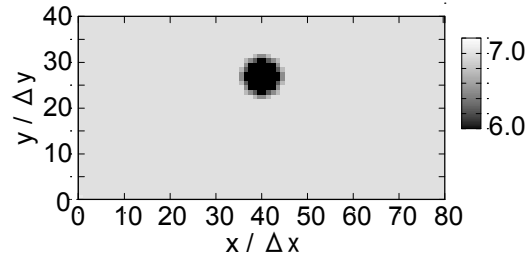


図5. 比誘電率の真値

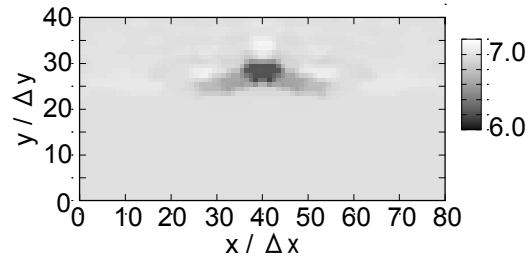


図6. 比誘電率の再構成結果

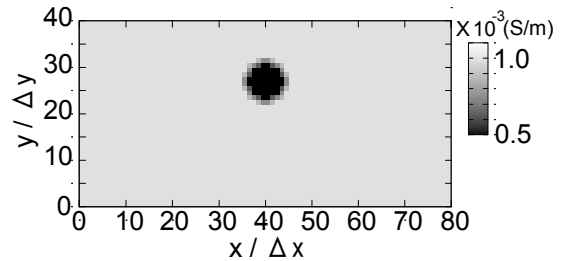


図7. 導電率の真値

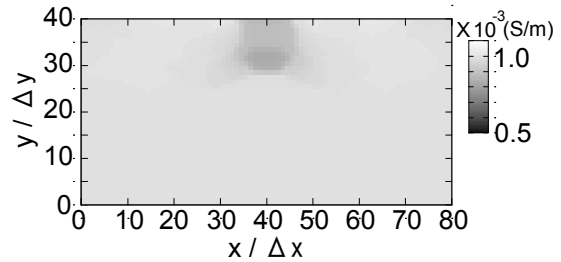


図8. 導電率の再構成結果

(3) パルス電磁波を用いたスラブ状コンクリートの可視化アルゴリズムの有効性について検証するため、均質なコンクリート内部にある円柱状散乱体の比誘電率及び導電率の推定について数値的検討を行った。その結果、比誘電率については良好な再構成結果が得られた。一方、導電率の推定では、エッジ保存平滑化を適用することによって推定精度が向上することが明らかになった(図5~8参照)。

(4) 重み付き修正周波数ホッピング法及び適

応型正則化法は本研究代表者の独創に基づくものであり、従来の周波数ホッピング法や通常の正則化法を用いた場合と比較してコンクリートの構造パラメータを高速かつ高い精度で可視化できる。また、エッジ保存平滑化の手法は、再構成結果の解像度の向上を実現できる。これらの手法は、柱状及びスラブ状のコンクリート構造物だけでなく、各種物体の非破壊検査、生活用埋設管や地雷の探査、生体の医用診断等への応用が可能である。

(5) 損失性物体の可視化では、散乱データより誘電率及び導電率を再構成する必要がある。一般に、導電率は比誘電率と比較して小さいため、導電率の再構成精度が十分でなくても散乱界に関する汎関数が減少する。このことは、導電率の再構成を難しくし、可視化アルゴリズムの高精度化を阻害する原因になる。今後、重み付き修正周波数ホッピング法における重み係数の選択法、適応型正則化法やエッジ保存平滑化の改善、共役勾配法において必要なステップサイズの新たな計算法の開発等について検討し、可視化アルゴリズムの更なる改良を行いたい。

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11件)

- ① 楠敦志, 田中充, コンクリート内部構造の可視化に関する検討, 電気学会電磁界理論シンポジウム, 査読無, EMT-09-130, pp. 39-44, 2009.
- ② 楠敦志, 田中充, 時間領域におけるコンクリート構造物の可視化, 電気学会電磁界理論研究会資料, 査読無, EMT-09-76, pp. 99-103, 2009.
- ③ M. Tanaka, M. Sano, A. Kusunoki, Performance improvement of a reconstruction algorithm in electromagnetic inverse scattering problem, Proc. 2008 International Symp. Antennas and Propagation, 査読有, pp. 1-4, 2008.
- ④ T. Takada, M. Tanaka, A. Kusunoki, Application of multigrid optimization method to reconstruction of lossy dielectric cylinders, Proc. 2007 International Symp. Antennas and Propagation, 査読有, pp. 544-547, 2007.
- ⑤ M. Tanaka, K. Yano, T. Takada, A. Kusunoki, Multigrid optimization method for inverse scattering of a lossy dielectric cylinder, Proc. 2007 URSI-B International Symposium on Electromagnetic Theory, 査読有, EMTS122, 3 pages, 2007.
- ⑥ M. Tanaka, A. Kusunoki, Iterative

reconstruction method for microwave imaging of lossy dielectric cylinders, Proc. 2007 Japan-Indo Workshop on Microwaves, Photonics, and Communication Systems, 査読有, pp. 152-157, 2007.
他5件

[学会発表] (計13件)

- ① 楠敦志, 田中充, 画像処理を組合せたコンクリート構造物の可視化アルゴリズム, 2010年電子情報通信学会総合大会講演論文集, C-1-14, p. 14, 2010. 3. 16, 東北大学(宮城県).
- ② 楠敦志, 田中充, コンクリート構造物の時間領域電磁波逆散乱問題, 2009年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, CS-1-1, pp. S-1-S-2, 2009. 9. 18, 新潟大学(新潟県).
- ③ 田中充, 佐野雅彦, 楠敦志, 適応型正則化法を用いた損失性柱状誘電体の比誘電率の再構成, 2009年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, C-1-7, p. 7, 2009. 9. 17, 新潟大学(新潟県).
- ④ 佐野雅彦, 田中充, 電磁波逆散乱問題における正則化法の検討, 2009年電子情報通信学会総合大会講演論文集, C-1-30, p. 30, 2009. 3. 20, 愛媛大学(愛媛県).
- ⑤ 田中充, 佐野雅彦, 楠敦志, 電磁波逆散乱問題における再構成精度の改善, 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, C-1-25, p. 25, 2008. 9. 18, 明治大学(神奈川県).
- ⑥ 楠敦志, 田中充, 高田俊行, 散乱データに雑音が含まれる場合のマルチグリッド最適化法の有効性に関する検討, 2007年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, CS-1-5, S-45, 2007. 9. 14, 鳥取大学(鳥取県).

他7件

[その他]

ホームページ等

<http://www.oita-u.ac.jp/menu/m11kenkyusha.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 充 (TANAKA MITSURU)
大分大学・工学部・教授
研究者番号: 30091341

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし