

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14757

研究課題名（和文）入射波の事前情報が不要な三次元逆散乱解析法の開発

研究課題名（英文）Development of 3D Inverse Scattering Analysis with No Prior Information on Incident Field

研究代表者

圓谷 友紀 (TSUBURAYA, Tomonori)

福岡大学・工学部・助教

研究者番号：50782330

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：対象物体の位置、形状、電気定数分布を求める逆散乱問題を解くには、散乱波だけでなく入射波の情報も必要となる。そこで、過去の研究において、観測円上で測定された電磁界から入射波を推定する手法を提案した。対象物体への入射波は、物体の探査に使う電磁波と携帯電話などからの不要電磁波が合成されたものである。そこで、本研究では、不要電磁波が混在した場合で、観測円上で測定された電磁界から提案手法を用いて入射波情報の抽出を試み、さらに電界のみから入射波情報を抽出する手法を提案した。また、周波数領域解析と高速フーリエ変換を活用した方法を検討し、層状媒質の散乱波をFDTD法よりも高速に求めることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、これまで報告されていなかった不要電磁波が混入した場合の検討、電界データのみで入射波抽出する方法について新たに提案した。査読付き論文として発表できたことから、本研究の意義があったと考えられる。

また、層状媒質の比誘電率分布の推定、媒質内の空隙の推定などで機械学習を利用する場合、大量の学習データが必要となる。本研究の高速化手法は、大量の学習データの効率的な作成に大きく貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Solving the inverse scattering problem of determining the position, shape, and electrical parameter distributions of a target object requires information not only on the scattered waves but also on the incident waves. A method to estimate the incident field from the electromagnetic field measured on the observation circle has been proposed. The incident wave to an object is a composite of the electromagnetic wave to probe the object and the unwanted electromagnetic wave from mobile phones and other sources. In this research, we applied proposed method to the extraction of incident wave from the electromagnetic field measured on the observation circle in the presence of unwanted electromagnetic waves, and also proposed a method to extract incident wave from electric field alone.

We also leveraged frequency domain analysis and FFT techniques to create the scattered wave from a layered medium. This approach allows for significant time savings in computation compared to FDTD method.

研究分野：ものづくり技術（機械・電気電子・化学工学）・計測工学

キーワード：電磁波工学 シミュレーション 非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

日本に数多くあるコンクリート構造物の安全性が、近年問題視されている。そこで本研究では、インフラ設備の保守・管理をより便利に行うために、マイクロ波トモグラフィに基づく高精度、かつ高速な内部構造の可視化技術の開発を行う。トモグラフィとは、ハンディ装置などで計測した電磁波データをコンピュータに受け渡し、内部の材料分布（誘電率、透磁率、導電率）を数値的に求め、内部の断面画像を得る方法である。電磁波を用いる既存の「X線撮影法」や「電磁波レーダ法」の利点を兼ね備えており利便性が高い。しかし、トモグラフィでは逆問題を求解するので、実用化に向けた課題が多くある。

逆散乱問題では、入射波の情報を用いて電磁波解析を行う必要がある。しかし、検査対象となる構造物には、図1のように、携帯などの不要電磁波と不要散乱体からの散乱波が混入するため、正確な入射波情報を測定により事前に取得できない場合がある。そこで、観測データから対象物体に入射する波を抽出する数値解析法を新たに提案し、その方法を逆解析に問題なく応用できることを示した。

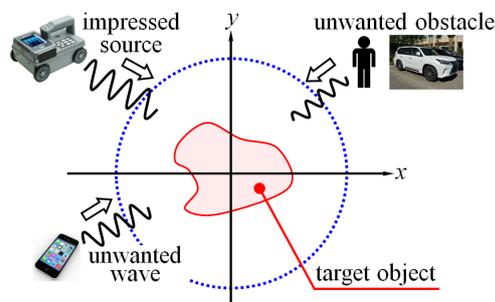


図1 対象物体に入射する波

2. 研究の目的

これまでの研究により、入射波の測定データがなくても、逆解析を行えるようになった。実用的には、三次元トモグラフィへの応用が必須であるので、これまで行ってきた研究を三次元へ拡張できた方がよい。また、不要電磁波が混入した場合の提案手法の妥当性が未知だったので、これについても明らかにする必要がある。そこで、本研究では、入射波の事前情報が不要な逆散乱解析の三次元化、不要電磁波が混入した場合の入射波抽出について検討する。さらに、電波散乱解析の高速化手法も検討し、解析時間の削減を図る。

3. 研究の方法

(1) 入射波の事前情報が不要な逆散乱解析の三次元化

三次元問題における波動方程式の一般解が必要なので、その導出について調査する。入射波抽出の際、対象物体からの散乱波が必要であり、本研究では、厳密解が求められる完全導体球を対象物体として検討を行う。その際、球ベッセル関数などの特殊関数が必要なため、その計算方法、級数展開による入射波の計算精度について確認する。さらに、これまで提案した二次元問題での入射波抽出法を参考にして、三次元の場合の定式化を検討する。

(2) 不要電磁波が混入した場合の入射波抽出

本検討は、二次元問題で考える。観測円内に完全導体円柱を配置し、アンテナからの入射波を円筒波、不要電磁波を平面波として、二つの波が完全導体円柱に入射したときの散乱波を波動方程式の解を利用して求める。次に、観測された電界、及び磁界を用いて、これまで提案した円筒波展開に基づく入射波抽出法により、入射波の抽出を試みる。このとき、測定データは電界だけでなく磁界も利用しているが、磁界を測定するセンサは比較的サイズが大きく、測定する際にセンサ周囲の電磁波に影響を与えやすいことなど、測定の容易さと手間の観点から電界のみで入射波を抽出できるとより便利になる。そこで、観測円を二つ設けて、それぞれの円で観測した電界データのみを用いた入射波抽出を検討する。

(3) 電波散乱解析の高速化手法の検討

電波散乱の数値解析手法として、時間領域有限差分 (FDTD) 法がよく用いられる。時間を更新する毎に解析領域全体の電磁界を更新するため、受信点で観測する波形データを大量に作成するのに効率が悪く、時間がかかる。さらに、入射パルスに高い周波数成分が含まれる場合や媒質の比誘電率が大きい場合では、解析空間と時間の刻み幅を小さな値に設定する必要があり、解析時間は大幅に増える問題がある。そこで、周波数領域における平板層状媒質の反射応答を利用する解析法を導入する。本手法では、励振パルスを含む入射波形に対して高速フーリエ変換 (FFT) を適用し、周波数ごとに反射応答を求め、そのスペクトルに対して逆 FFT を適用することで電界の時系列データを作成する。数値実験を通して、周波数領域解析法で求めた波形の妥当性を示す。

4. 研究成果

研究方法の (1) については、具体的な成果を公表できなかったため、引き続き検討を進めていく。(2) と (3) について得られた成果を以下にまとめる。

(1) 不要電磁波が混入した場合の入射波抽出

図2に示すように、半径 a の導体円柱を囲むように全電界を測定する半径 R_1 の内円と半径 R_2 の外円を配置する。観測円の外にある波源より、円筒波を導体円柱に入射し、さらに不要電磁波である平面波も左から入射する状況を考える。このとき、求める入射波は円筒波と平面波が合成されたものとなる。観測された電界のみを使って、文献(1)にある円筒波展開の係数 α_n の計算を行い、これを用いて入射波 E_z^{inc} を求める。数値例を図3に示す。(a)と(b)はそれぞれ、求めた入射波の実部と虚部を示しており、(c)と(d)は実部、虚部それぞれの誤差を表している。これより、円筒波と平面波が混在しても、提案手法で入射波を抽出できることが分かった。また、20 dBのノイズがある場合の実験を行ったところ、図4の結果が得られた。図3に比べて誤差は大きいですが、入射波が概ね抽出できた。

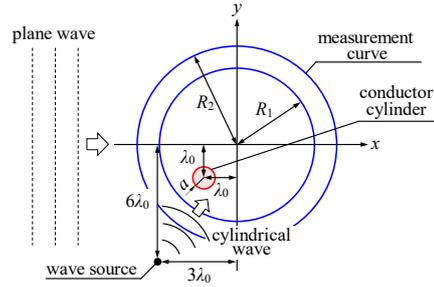


図2 二つの円で観測した電界データに基づく入射波抽出の問題設定

本研究では、これまで報告されていなかった不要電磁波が混入した場合の検討、電界データのみで入射波抽出する方法について新たに提案した。査読付き論文として発表できたことから、本研究の意義があったと考えられる。

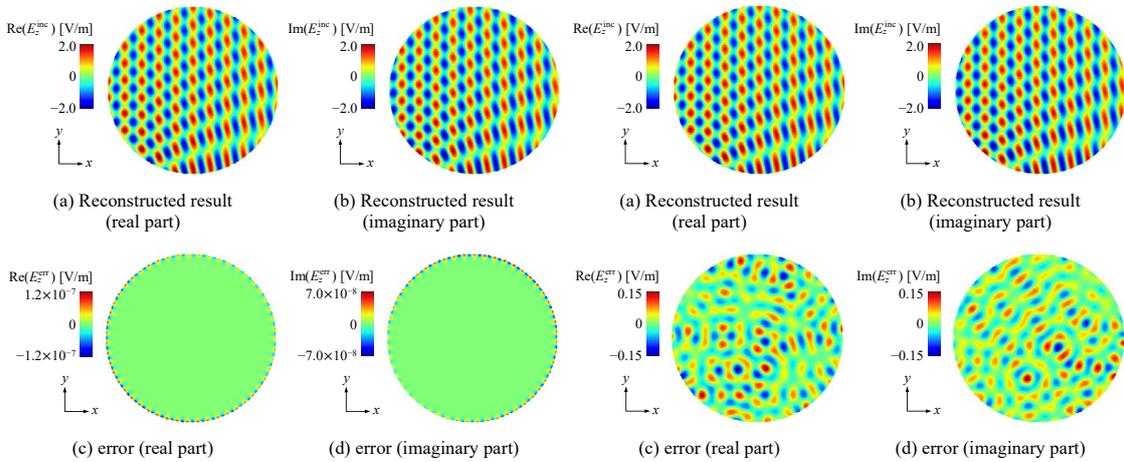


図3 入射波抽出の数値結果 ($R_1 = 5\lambda_0$, $R_2 = 5.3\lambda_0$)

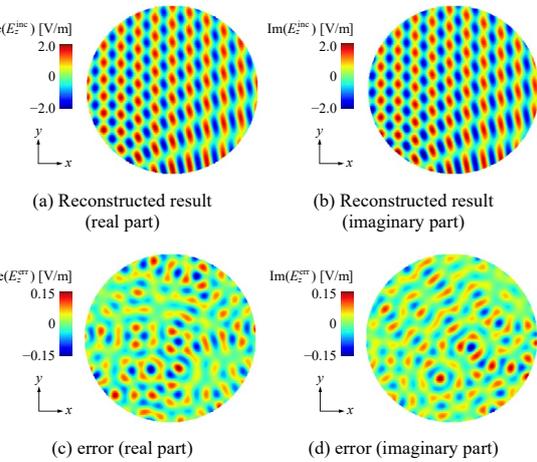


図4 ノイズが混入された観測データに基づく入射波抽出の数値結果 ($R_1 = 5\lambda_0$, $R_2 = 5.3\lambda_0$)

(2) 電波散乱解析の高速化手法の検討

図5に示す n 層の平板層状媒質に平面波を垂直入射したときの反射応答について考える。ここで、 ϵ_n , σ_n , d_n はそれぞれ第 n 層の誘電率、導電率、厚さを表す。第 0 層は自由空間とし、距離 d_0 離れた位置にパルスの励振点および観測点を配置する。解析空間すべての透磁率は自由空間の透磁率 μ_0 とする。

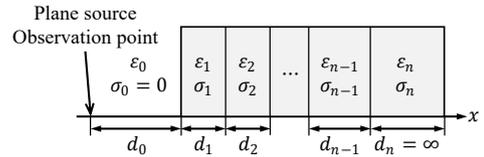


図5 層状媒質モデル

直流成分を含まない正弦波で変調されたガウスパルスを入射波とし、文献(2)に記載の手順により、求めた反射波の一例を図6に示す。なお、FDTD法で求めた反射波も同図にプロットしている。両者がよく一致していることから、上記手順で行う解析法は妥当なことが確認できる。図6の波形を作成するのにかかる時間は、FDTD法では約0.1秒、周波数領域解析法では約0.002秒となり、後者の方が高速であった。本研究では入射波を平面波としているが、円筒波や球面波を用いる場合は平面波を用いて級数展開することが可能であり、円筒波や球面波を入射する場合でも、本論文の考え方は利用できると思われる。

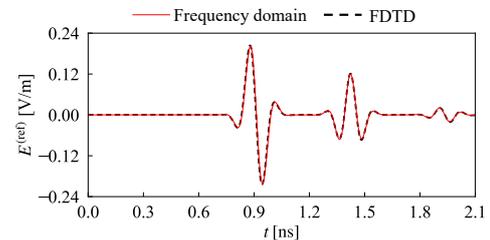


図6 計算結果の一例

層状媒質の比誘電率分布の推定、媒質内の空隙の推定などで機械学習を利用する場合、大量の学習データが必要となる。本研究の高速化手法は、大量の学習データの効率的な作成に大きく貢献できる。

<引用文献>

- ① 上水流直紀, 圓谷友紀, 孟志奇:「人工ニューラルネットワークによるコンクリート中の空隙調査に関する検討」, 電気学会論文誌 A, Vol. 144, No. 7 (2024) (掲載決定)
- ② 濱村昌弘, 圓谷友紀, 孟志奇, 竹中隆:「妨害電波が混入された測定データから入射波情報を抽出する技術」, 電気学会論文誌 A, Vol. 143, No. 8, pp. 273-279 (2023)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 上水流直紀, 圓谷友紀, 孟志奇	4. 巻 144
2. 論文標題 人工ニューラルネットワークによるコンクリート中の空隙調査に関する検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 孫啓瑾, 圓谷友紀, 孟志奇	4. 巻 143
2. 論文標題 人工ニューラルネットワークを用いた平板層状媒質の比誘電率分布推定に関する基礎研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 284 ~ 291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.143.284	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 鈴木健文, 圓谷友紀, 孟志奇	4. 巻 143
2. 論文標題 電磁散乱波形の機械学習によるコンクリート中の空隙検出に関する基礎研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 267 ~ 272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.143.267	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 濱村昌弘, 圓谷友紀, 孟志奇, 竹中隆	4. 巻 143
2. 論文標題 妨害電波が混入された測定データから入射波情報を抽出する技術	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 273 ~ 279
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.143.273	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Q. Sun, T. Tsuburaya, Z. Meng
2. 発表標題 Effect of conductivity on permittivity distribution estimation of a layered medium by using AI
3. 学会等名 The XXXVth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 孟志奇, 圓谷友紀, 孫啓瑾, 鈴木健文, 上水流直紀, 山崎優輝
2. 発表標題 電波散乱逆問題の解法として人工ニューラルネットワークを利用する試み
3. 学会等名 電磁界理論研究会 (第52回電磁界理論シンポジウム)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 孫啓瑾, 圓谷友紀, 孟志奇
2. 発表標題 人工ニューラルネットワークを用いた弱導電性を有する平板層状媒質の比誘電率分布の推定精度に関する検討
3. 学会等名 2023年度 (第76回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上水流直紀, 圓谷友紀, 孟志奇
2. 発表標題 人工ニューラルネットワークを用いた均質媒質中に含まれる空隙の厚さ・位置の推定
3. 学会等名 2023年度 (第76回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山崎優輝, 圓谷友紀, 孟志奇
2. 発表標題 人工ニューラルネットワークを用いたコンクリート内の鉄筋のサイズ・かぶり厚さ推定に関する基礎検討
3. 学会等名 2023年度(第76回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上水流直紀, 圓谷友紀, 孟志奇
2. 発表標題 周波数領域解析法を用いた層状媒質の時間領域散乱シミュレーションに関する基礎検討
3. 学会等名 2022年度(第75回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱村昌弘, 圓谷友紀, 孟志奇
2. 発表標題 電磁界の観測データに基づく多重入射波の再現
3. 学会等名 2022年度(第75回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 孫啓瑾, 圓谷友紀, 孟志奇
2. 発表標題 不均一の厚さを有する層状媒質の比誘電率分布の推定における人工知能の利用
3. 学会等名 2022年度(第75回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木健文, 圓谷友紀, 孟志奇
2. 発表標題 二次元媒質に含まれる空隙検出のためのAI利用に関する基礎検討
3. 学会等名 2022年度(第75回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木健文, 孫啓瑾, 圓谷友紀, 孟志奇
2. 発表標題 電磁散乱波形のAI識別による層状媒質の空隙有無判定
3. 学会等名 2021年度(第74回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 孫啓瑾, 鈴木健文, 圓谷友紀, 孟志奇
2. 発表標題 人工知能を用いた層状媒質の比誘電率の再構成に関する初歩的な研究
3. 学会等名 2021年度(第74回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------