

FDTD法およびデータ同化を用いた地中レーダのアンテナモデルの逆推定

Ground Penetrating Radar Antennas Using FDTD Method and Data Assimilation
Inverse estimation of model

光永宏希¹⁾, 山本佳士²⁾

Koki Mitsunaga and Yoshihito Yamamoto

1) 法政大学 デザイン工学研究科

(〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33, E-mail:koki.mitsunaga4m@stu.hosei.ac.jp)

2) 博(工) 法政大学 デザイン工学部 教授 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33, E-mail: y.yamamoto@hosei.ac.jp)

Research has been conducted to visualize cracks in reinforced concrete using AI, but the generalization performance is low. However, the generalization performance did not improve as expected due to the discrepancy between the actual experimental images and the simulated images created by the simulation. One of the reasons for this discrepancy is considered to be the inadequate reproduction of the transmitting antenna model in the simulation. Therefore, as a fundamental study to improve the simulation accuracy, we attempt inverse estimation of the antenna model using the finite time domain difference (FDTD) method and the ensemble Kalman filter (EnKF), one of the data assimilation methods. In the present study, we assume that the antenna model information is known to some extent and attempt to identify the values of the model parameters.

Key Words : Data assimilation, Ensemble Kalman filter, FDTD, GPR

1. はじめに

現在、既設コンクリート構造物の点検手法はコストや効率性を考慮して目視、打音点検が主流となっている。しかし、これらの方法では構造物内部の情報を取得することは困難である。内部ひび割れの性状によって、構造物の残存耐力や変形性能は大きく変化するため、安全性を正確に評価するために、表面ひび割れの情報だけでなく、内部のひび割れの情報を効率的に得られる検査手法が望まれている。

コンクリート構造物の非破壊検査手法の一つに電磁波レーダ法がある。この手法は簡便で、検査速度が速いという利点があり、現在はコンクリート構造物内部の鉄筋や空洞を探索する手法として利用されている。光谷らおよび山本ら[1-4]は敵対的生成ネットワーク(Generative adversarial networks: GAN)の応用技術の一種であるpix2pixを用いてレーダ画像から逆推定を行い、コンクリート供試体内部の欠陥の有無、位置、形状、寸法(長さおよび厚さの情報)、角度の情報を含む断面画像を再構成する手法を提案している。提案手法は、ひび割れの有無だけでなく、位置、寸法、角度等の幾何情報までを良好に再現できるものの汎化性能に課題を残していることが分かっている。汎化性能の向上のための方法の一つとして有用な学習データを大量に取得することが考えられる。しかし、実験等で学習データを取得するには時間やコストが大きくかかるため難しい。そこで、光谷ら[3]は有限時間領域差分法(FDTD法)を用いたシミュレーションによって内部欠陥を有するコンクリートのレーダ画像を再現することで有用

な学習データを大量に生成し、汎化性能の向上を試みている。しかし、現状では実際の実験によって得られる実験画像とシミュレーションによって得られる画像には乖離が生じており、大幅な汎化性能の向上は見られていない。この原因としては、1)コンクリート内部に分布する粗骨材、細骨材、セメントペースト、水分等の比誘電率分布の再現が十分でないこと、2)送信アンテナモデルの再現精度が十分でないことが考えられる。そこで、山本ら[5]はFDTDシミュレーションとデータ同化手法の一種であるアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)を用いてコンクリート内部の比誘電率分布に関する基礎的検討を行った。結果は単純なモデルを用いた検討ではあるが、レーダ試験を模擬したシミュレーションの特徴を考慮して、観測データ数は1つであっても、レーダの移動過程を対象とすることで、内部の複数の異なる骨材の比誘電率分布を良好に推定できる可能性を示した。同様の手法は、送信アンテナモデルの推定にも適用できる可能性がある。

以上のような背景から、本研究では、FDTDシミュレーションおよびデータ同化を利用して送信アンテナモデルを推定することを試みる。データ同化手法は、様々な存在するが、FDTD法への実装が容易であることと、比較的計算効率が良好であることから、本研究では、前述の山本らの手法と同様にアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)を適用する。具体的には、電磁波レーダ試験を模擬した、簡単なモデルに対する電磁波伝播問題を対象とした数値実験によりアンテナモデルを構成するパラメータの値を逆推定することを試みる。

2. 解析手法

本研究では、以下に示すマクスウェル方程式を離散化したFDTD法[9]による電磁波伝播解析に対してEnKFを適用する。

$$\text{div}\mathbf{D} = \rho \quad (1)$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\mu\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\text{rot}\mathbf{H} = \sigma\mathbf{E} + \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{E} :電場(V/m), \mathbf{H} :磁場(A/m), \mathbf{D} :電束密度(C/m²), \mathbf{B} :磁束密度(Wb/m²), μ_0 :真空の透磁率(H/m), μ :透磁率, σ :導電率(S/m), ε_0 :真空の誘電率(F/m), ε :比誘電率である。マクスウェル方程式を空間・時間領域で差分方程式にし、展開して逐次計算することで電場・磁場の値を得ることができる。なお、本研究のレーダ試験は2次元の電磁波伝播問題としてモデル化しており、電磁波の伝播方向をxy平面内にとり、z軸方向には一様とする波であるTE波(変数は電場のz方向成分および磁場のxy方向成分のみ)を仮定した。

次に、本研究で用いたアンテナモデルについて説明する。本研究では、地中レーダのアンテナモデルとして最も一般的なモデルであるガウスパルス波をアンテナモデルとして用いた。ガウスパルスの式は以下のように表される。

$$p(t) = A \times e^{-a\left(\frac{t-t_0}{T}\right)^2} \quad (5)$$

A は振幅に関するパラメータで、 a および T は波形の勾配に関するパラメータ、 t_0 は位相に関するパラメータである。本研究では逆推定の対象となるアンテナモデルのパラメータを A , a および T とした。アンテナからの送信は、無限長線状電流源を与え、ガウスパルスで電磁波を励振することでモデル化した[10]。

つづいて、EnKFの概要について説明する[6-8]。EnKFでは、数値モデルの状態変数ベクトル \mathbf{x} と観測変数ベクトル \mathbf{y} について以下のような状態空間モデルを考える。

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{H}\mathbf{x}_t + \mathbf{W}_t \quad (7)$$

ここで、 \mathbf{x}_t は時刻 t における状態変数ベクトル、 \mathbf{f} は非線形を有するシステムモデルであり、本研究ではFDTDシミュレーションを指す。 \mathbf{y}_t は時刻 t における観測変数ベクトル、 \mathbf{H} は線形の観測演算子である。また、 \mathbf{v}_t はシステムノイズ、 \mathbf{W}_t は観測ノイズである。本研究では、状態ベク

トルを以下のように設定した。

$$\mathbf{x}_t = [E_{z1} \cdots E_{zn} | H_{x1} \cdots H_{xn} | H_{y1} \cdots H_{yn} | A | a | T] \quad (8)$$

ここで、 E_z はz方向の電場、 H_x および H_y はそれぞれx方向およびy方向の磁場を示し、それぞれ末尾の n は格子点数である。また、 A , a および T は前述のガウスパルスの式を構成するパラメータである。また、 \mathbf{y}_t はレーダ試験における受信アンテナ位置で得られる電場方向のz方向成分 E_z である。

EnKFではモデルの確率密度分布をモンテカルロサンプリングによって生成した多数のアンサンブルで近似する。このときの状態ベクトルの平均値および共分散は以下のように近似される。

$$\bar{\mathbf{x}}_t \approx \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{x}_t^i \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_t \approx \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\mathbf{x}_t^i - \bar{\mathbf{x}}_t)(\mathbf{x}_t^i - \bar{\mathbf{x}}_t)^T \quad (10)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{x}}_t$ は状態ベクトルの平均値、 \mathbf{P}_t は状態ベクトルの誤差共分散行列、 m はアンサンブルメンバー数である。各アンサンブルメンバーの状態ベクトルは各時間ステップにおいて以下のように更新される。

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{K}_t(\mathbf{y}_t - \mathbf{H}_t\mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{W}_t) \quad (11)$$

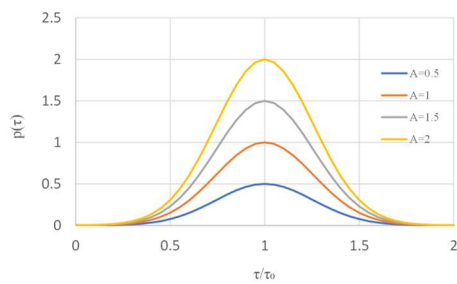
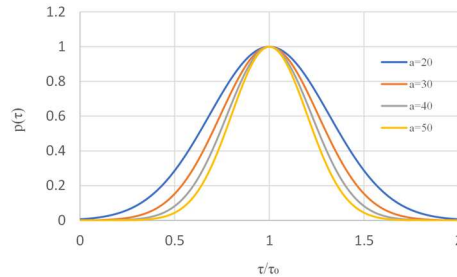
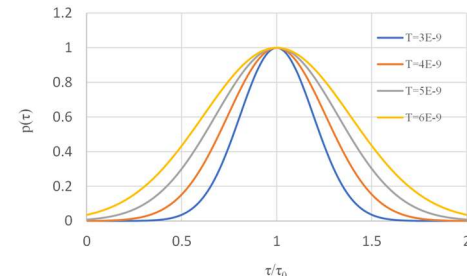
$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_t\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}_t\mathbf{H}^T + \mathbf{R}_t)^{-1} \quad (12)$$

ここで \mathbf{K}_t はカルマンゲイン、 \mathbf{R}_t は観測誤差共分散行列である。本研究ではシステムノイズとしては初期のアンテナモデルのパラメータに一度だけノイズを与えたが、観測ノイズは観測値を得るたびに与えた。また、本研究では各状態ベクトル間の数値のオーダーが異なることから、各時間ステップにおける予測時の状態ベクトル \mathbf{x}_t の各成分を、 \mathbf{x}_t の各成分のアンサンブル平均およびその標準偏差を用いて標準化し、標準化した \mathbf{x}_t を用いて誤差共分散行列 \mathbf{P}_t を計算した。観測変数ベクトルの各成分は、予測時の状態変数ベクトルの成分のうち、観測点と同じ位置における成分のアンサンブル平均で減じ、その標準偏差で除することで正規化を行った。

3. 模擬観測データを用いた数値実験による検証

(1) レーダ試験を模擬した数値実験の概要

ここでは、まずアンテナモデルであるガウスパルスの式中のパラメータ A , a および T が変化した場合のガウスパルス波形の変化の様子をグラフに示す。

図-1 パラメータ A が変化した際のガウスパルス波形図-2 パラメータ a が変化した際のガウスパルス波形図-3 パラメータ T が変化した際のガウスパルス波形

上記のグラフは A の値を0.5から0.5ずつ変化させた場合、 a の値を20から10ずつ変化させた場合、そして T の値を 3×10^{-9} から 1×10^{-9} ずつ変化させた場合の波形の変化を表したグラフである。図から分かるように、 A は波形の振幅に影響を与え、 a および T は波形の時間方向の勾配に影響を与えるパラメータである。

次に、提案手法の妥当性を検証するために実施した数値実験の概要について説明する。数値実験の概要を図-4に示す。図中の白い格子点は空気層、灰色の格子点は奥行き方向に一樣に延びた鋼棒を示している。また、緑色の点がレーダの送信アンテナおよび赤色の点が受信アンテナを示している。空気層の比誘電率は1.0、透磁率は0、また、鋼棒の比誘電率を100、透磁率を 1×10^7 と設定した。このようなモデルに対して、まず、模擬観測データを作成するために、送信アンテナから、所定のパラメータ A, a, T を設定したガウスパルス波を送信し、受信アンテナの位置で反射電磁波の応答を取得する。この反射波応答を模擬観測データとし、また、この時のパラメータ A, a および T を推定するべき真値とする。つづいて、真値とは異なる A, a および T を初期推定値として設定してEnKFを含むFDTDシミュレーションを実施し、アンテナモデルのパラメータの値の推定を試みる。ここで、模擬観測データ作成時のシミュレーションにおけるアンテナモデルの真値は園田ら

[10]が既往研究で用いた値を設定した。具体的には、パラメータ A, a および T の真値は10, 30および 4×10^{-9} とし、初期推定値は9, 27, および 3.6×10^{-9} と設定した。

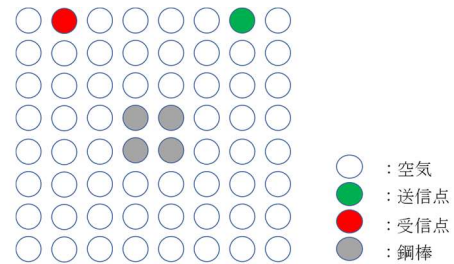
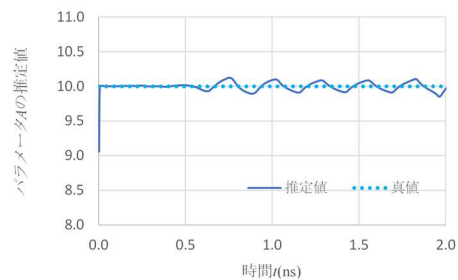
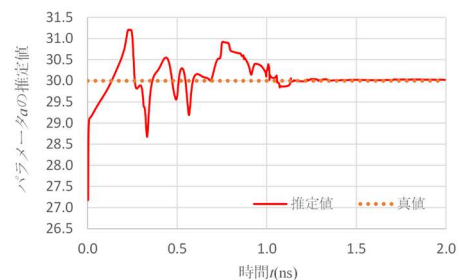
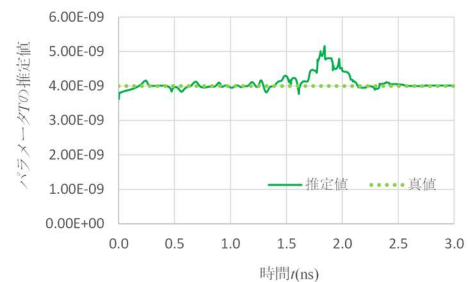


図-4 解析モデル

(2) 1つのパラメータのみを推定する検証

a) 解析概要

まず、基礎的な検証として、3.(1)で示したように、アンテナモデルのパラメータの真値は既往の研究で園田らが用いた値を設定した。また、初期推定値は事前情報があるような状況を想定して、真値からおよそ10%誤差があると仮定して設定した。FDTDの格子間隔は10mm、時間刻みは 1×10^{-12} secとし、吸収境界条件は完全吸収境界(8層PML)とした。また、データ同化解析時のアンサンブルメンバー数は200と設定した。

図-5 A の推定結果図-6 a の推定結果図-7 T の推定結果

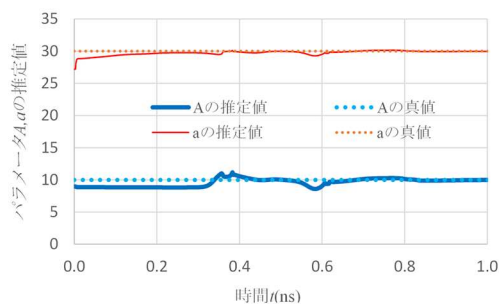
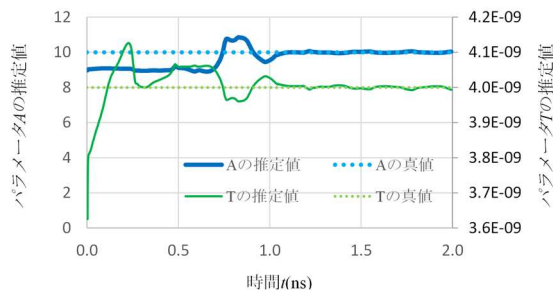
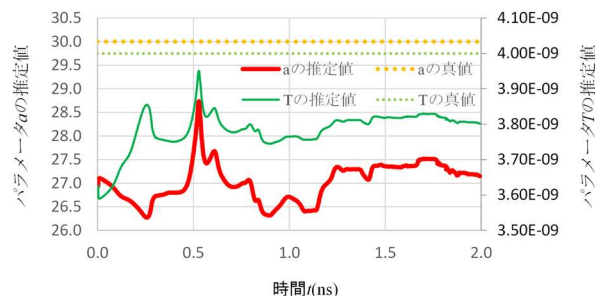
b) 解析結果

図-5, 図-6, 図-7 にデータ同化の過程で更新されて得られたアンテナモデルのパラメータの推定値と時間の関係を示す。なお、図中の実線は推定値を示しており、破線は真値を示している。図より、初期推定値から時間が進行するにしたがって、真値に収束していく様子が確認できる。すなわち、同定対象が1つであれば、提案手法を用いてパラメータの同定が可能であることが分かった。

(3) 2つのパラメータを同時推定する検証

a) 解析概要

つづいて、2つのパラメータを同時に推定する検証を行った。FDTDの格子間隔、時間刻み、吸収境界条件、アンテナモデル、初期推定値等は前節のものと同じである。ここでも、アンサンブルメンバー数は200と設定した。

図-8 パラメータ A と a の同時推定結果図-9 パラメータ A と T の同時推定結果図-10 パラメータ a と T の同時推定結果

b) 解析結果

図-8, 図-9, 図-10に各パラメータを2つずつ同時推定した場合における各パラメータの値と時間の関係を示す。先ほどのグラフと同様に実線はパラメータの推定結果を表しており、破線はパラメータの真値を表している。また、パラメータ A , a については第1軸の値を反映しており、パ

ラメータ T は第2軸の値を反映している。図-8, 図-9よりパラメータ A と a , A と T を同時推定した場合は初期推定値から時間が進行するにしたがって、真値に収束していく様子が確認できる。しかし、図-10よりパラメータ a と T を同時推定した場合においては推定値と真値が大きく乖離していることが分かる。

以上の検討結果をまとめると以下ようになる。同定対象のパラメータが1つの場合は本手法を用いて真値を推定することができた。2つのパラメータを同時に推定する場合、パラメータ a と T の組み合わせの場合のみ真を推定することができなかった。これは、パラメータ a および T が波形に与える影響が同様であることが原因であると考えられる。

4. まとめ

レーダ試験を対象とした FDTDシミュレーションにおけるアンテナモデルのパラメータを、アンサンブルカルマンフィルタにより推定することを試みた。単純なモデルを用いた数値実験による検討の結果、推定するモデルパラメータが1つのみの場合には良好に推定することができ、2つのパラメータを同時に推定する場合でもパラメータによっては良好に推定できることが分かった。

今後は、前述のように現実の条件や状況に近い状態での検討を実施していく予定である。

参考文献

- [1] 光谷和剛, 山本佳士, 園田潤, 木本智幸: レーダ画像およびGANを用いたコンクリート内部欠陥の幾何情報推定, AI・データサイエンス論文集, 1巻, J1号, pp. 498-507, 2020.
- [2] 光谷和剛, 山本佳士, 園田潤, 木本智幸: レーダ画像およびGANを用いたコンクリート内部欠陥の位置・寸法情報の可視化に関する基礎的検討, 日本計算工学会論文集, 2021巻, 1号, pp. 20211001, 2021.
- [3] 光谷和剛, 山本佳士, 園田潤, 木本智幸: GANおよびFDTD法を用いたレーダ画像からの内部欠陥推定手法の高度化に関する検討, AI・データサイエンス論文集, 2巻, J2号, 2021.
- [4] 山本佳士, 光谷和剛, 金澤靖, 徳重海都, 園田潤, 木本智幸: 準3次元情報を用いたpix2pixによるレーダ画像からの内部欠陥の幾何情報推定, AI・データサイエンス論文集, 3巻, J2号, pp. 1042-1052, 2022.
- [5] 山本佳士, 久保洸太, 藤森竣平, 園田潤: データ同化を用いたコンクリート内部の比誘電率分布推定に関する基礎的検討, 土木学会論文集, 79巻, 15号, 22-15018, 2023.
- [6] 山本真哉, 本多眞, 櫻井英行: 地下水流動の逆問題におけるデータ同化技術の応用, 第63回理論応用力学講演会講演論文集, 2014.

- [7] 山本真哉, 本多眞, 櫻井英行: アンサンブルカルマンフィルタによる地下水流動モデルの逐次データ同化, 清水建設研究報告, No.96, pp.27-34, 2018.
- [8] 淡路敏之, 蒲地政文, 池田元美・石川洋一: データ同化 観測・実験とモデルを融合するイノベーション, 京都大学学術出版会, 2009.
- [9] 宇野亨: FDTD法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998.
- [10] 小関勇氣, 園田潤, 昆太一, 佐藤源之: FDTD法を用いたGPRシミュレーションのGPU実装による高速化, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 111 pp. 37-42, 2011.