# 研究成果報告書

# マルチアングル3次元ホログラフィックGB-SARによる 不均質媒質内埋設物の高分解能な立体形状推定に関する研究

令和2年5月 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進 制度による委託業務として、国立研究開発法人 宇 宙航空研究開発機構が実施した平成31年度「マルチ アングル3次元ホログラフィックGB-SARによる不均 質媒質内埋設物の高分解能な立体形状推定に関す る研究」の成果を取りまとめたものです。

#### 1. 委託業務の目的

本委託業務では、地下の不均質媒質中に埋設された物体の立体形状を地中レーダで推定するため、入射 角変化をさせたレーダ波の各入射角における地下埋設物周囲からの散乱波の角度分布(ホログラムマトリ クス)を計測し、この結果を解析することにより、埋設物を立体視する新しい3次元ホログラフィックレ ーダを提案し、不均質媒質中に埋設された物体の立体形状の推定精度を改善する基礎的研究を行う。実施 期間の3年間の業務において、3次元ホログラフィックレーダで地下の埋設物の立体形状を精度良く推定 し、専門家の判断を必要としない地中レーダ画像による埋設物の識別を目標とする。

研究課題の達成基準は以下の通りである。

- 3次元ホログラフィックレーダ実験装置を製作し、多層不均質媒質中にある埋設物の立体視実験を実施する。この実験結果から、測定パラメータの違いによる形状推定精度を明らかにする。
- 2)地中におけるレーダ波の散乱・多重反射過程の明確化と多層不均質媒質中における体積散乱過程に よる影響を取り込んだ数学モデルを構築する。この結果を3次元ホログラフィックレーダの計測結 果に反映することにより、散乱・多重反射の影響排除、および埋設物の電気的物性(誘電率、電気 伝導度)の推定を行い、これを3次元ホログラフィックレーダの測定結果に適用することで、立体 形状推定精度を向上させる。
- 3)3次元電磁界解析手法を用いて、ホログラフィックレーダによる地下立体視のシミュレータを作成し、 3次元ホログラフィックレーダの測定結果と比較することにより、予測精度を明らかにするとともに、 測定結果と一致するように土壌を含む埋設物の数学モデルの修正を行い、これを3次元ホログラフィ ックレーダの測定結果に適用することで、立体形状推定精度を向上させる。
- 1.1 研究開始時に設定した研究目標の達成度
- 平成29年度はJAXA所有の2次元走査型フルポラリメトリックレーダ散乱計に付加的装置を追加して 地中レーダの実験を実施するために必要な追加設備の設計検討を行った。検討の結果、既存のアンテ ナ走査と直交する面(垂直)に参照波送信用の2次元アンテナ走査機構を新たに設け、レーダのバイ スタティック化を行うとともに、実験試料から広角度範囲の散乱波を得るために試料を回転させる機 構を設ける方針に至った。本研究で設計した室内地中レーダ実験設備は国内最大級のものである。→ [100% 達成]
- 2) 地中レーダ実験用の埋設試料の検討を行い、誘電体ブロックを組み合わせたもの(多層媒質)と、実際の土砂を使った模擬土壌(不均質媒質)の2種類を検討し用意した。また、現場における土壌の誘電率を測定するために、共振周波数と共振抵抗による推定方法等による誘電率推定(遠隔測定)と同軸プローブ法(直接測定)を行い、相互に比較する計画にした。さらに、形状推定アルゴリズムの性能を確認するために、比較検証用地中レーダの準備(JAXA所有のものに外部トリガ装置の付加)を完了させた。→[100%達成]
- 3)実験試料からの散乱波を予測する3次元ホログラフックシミュレータの事前準備として、3次元電磁 界解析により地中レーダのレーダBスコープデータを予測するソフトウェアを開発した。→[100% 達成]
- 4) 平成 30 年度は平成 29 年度の基本設計に基づき、設備追加の詳細設計と設備拡張工事を行った。JAXA 所有のフルポーラリメトリックレーダ散乱計(2次元走査型)に2偏波の送信が可能な2次元アンテ ナ走査を垂直に設置する工事とアンテナの設置高の変更工事を完了するとともに、試料回転台を床面 に設置し、これらの制御装置の追加も完了させた。→[100%達成]
- 5) 3次元電磁界解析(FDTD法)を用いて、実験環境を含む多層媒質からの散乱波によるレーダAスコー プとレーダBスコープデータを予測するソフトウェアを農工大で開発し、JAXAのレーダ散乱計で取

得した多層誘電体板の散乱波との比較を行った。また、散乱波を予測するプログラムは今後のモデル の複雑化を見越して高速演算が可能な Multi-Region 法による FDTD である。また、JAXA 側でも従来 の FDTD 法でレーダ散乱波を行い、クロスチェックを行った。→ [100% 達成]

- 6)実験用の媒質として、砂、多層媒質ファントム、媒質容器、誘電体丸棒(ベーク)の調達を完了させた。また、散乱波を予測するため、拡張工事の合間に2次元走査型のレーダ散乱計による多層誘電体板のレーダ散乱波の取得と散乱波の予測も完了させた。さらに実験で使用する誘電体試料の複素誘電率の実測を完了させた。→[100%達成]
- 7) 広帯域アンテナから放射される電磁界の予測を確実に行うため、パルスの送信と受信波形の取得し、 予測結果との対比を行って送受信用広帯域アンテナの数学モデルの修正を行った。モデルの修正を繰り返した結果、予測精度が向上し、広帯域アンテナのモデリングが完了した。→ [100% 達成]
- 8) 平成30年度は実際の実験を見据え、実際の実験状況を考慮した数学モデルの作成を行った。アンテナは実際に用いられるアンテナをコンピュータ上で再現し、その特性のシミュレーションを行った。その結果は実際のアンテナの特性をよく模擬できていた。さらに、これらシミュレーションは非常に多くの計算時間がかかるが高速化する手法を示した。→[100%達成]
- 9) 2次元走査型フルポラリメトリックレーダ散乱計に付加した機構と試料回転台を用いて、不均質媒質として用意した砂利、多層媒質ファントム、媒質に埋設された試料(ベーク棒)のイメージング実験を実施した。イメージングの結果から、レーダシステムのポラリメトリックな校正を行った後にイメージングに最適な測定パラメータを確定することが出来た。特に合成開口処理のパルス圧縮時にハニング窓を適用し、レンジ圧縮の逆フレネル変換を適応して Gori のサンプリング定理を満たす条件に設定し、300MHz~3GHz の測定周波数により不均質媒質中(砂,砂利)に埋設された円柱形状のベーク棒の配置と形状を高精度に画像化することに成功した。→ [100% 達成]
- 10) レーダの空間分解能より小さな媒質の不均質性は画像化に影響を与えないことを実験により確認した後、実験システムに用いる広帯域アンテナの詳細な素子形状とアンテナの配置、散乱体の誘電率とその配置と形状、実験空間を詳細に取り込んだ数学モデル(FDTDの解析モデル)を構築した。この数学モデルを用いたFDTD解析を行い、実験空間やアンテナ、試料間の多重反射を含む合成開ロレーダで得られたレーダAスコープ波形について予測と実測との比較を行い、数学モデルを見直しながら予測精度を限界まで向上させた。→[100%達成]
- 11) 10)で作成した地中レーダの実験系の詳細な数学モデルを使って3次元電磁界解析(FDTD)を行い、 得られたアンテナ各位置における複数のレーダ複素散乱スペクトルから合成開口処理を行って埋設 物のイメージングを行うシミュレータを作成した。実験で使用する試料や媒質は全てプローブ法によ り複素誘電率を実測しており、その結果を数学モデルに反映してイメージング形状の推定精度を向上 させることに成功した。参照波を別の角度から送信して埋設物イメージを得るホログラフィックレー ダの実験と解析については実験時間が十分に確保出来なかったために実験が途中で中断し、成果とし てまとめることが出来ていない。→[60%達成]

1.2 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)や目標を超える成果 模擬土壌の砂や砂利の媒質の数学モデル化については、計算機のメモリの制約からリアルなモデル の構築が難しかったが、実験で得られた媒質の画像を確認すると媒質は一様に映っており、レーダの 分解能以下の媒質の空隙等は無視(一様分布)として良いことがわかった。これは予測のための数学 モデル中に含まれる媒質の空間分布が広範囲に広がっていることから、地中レーダに実装する等の上 で重要な知見だと考えられる。

1.3 研究課題の発展性(間接的成果を含む)

地中レーダにおいて埋設物の形状を決定するためには高分解能なレーダシステムを使用して、面的 かつ立体的なイメージングを行うことが極めて重要であることがわかった。本室内実験設備では 20mm ピッチの細かな面的サンプリングを行い、逆フレネル変換によるアジマス圧縮処理を含む合成開口処 理による高い空間分解能を持つ地中レーダを実現しているが、実際のフィールドにおいてはアンテナ の機械的走査を伴う機構を可搬式にして用意することは容易ではない。また、アンテナを機械的に走 査しているため測定時間も必要である。

一方で地中レーダでは広範囲を高速で探査することが求められており、広範囲を面的サンプリング するためにフェイズドアレイアンテナ等によるビームの電子走査を行う地中レーダやビームの電子走 査を持つ合成開口レーダをドローンや航空機に搭載する地下レーダの研究が必要だと考えられる.

1.4 論文、特許、学会発表等の研究の成果

各年度の成果報告書における「3.成果の外部への発表及び活動」の中で特筆すべき成果・活動に該 当する成果は特に無い。

1.5 研究実施体制とマネジメント

解析を分担した東京農工大との定期的な研究打合せの開催場所は実験場所である宇宙航空研究開発 機構と農工大を交互に設定して、互いの研究環境を直接確認出来るように工夫した。新型コロナウィ ルスの影響を受けて BCP となった後はオンライン会議を中心に研究打合せを開催する工夫を行った。

- 1.6 経費の効率的執行 無駄のない経費の執行について、研究期間中に実施した特筆すべき取組みは無い。
- 2. 平成31年度(報告対象年度)の実施内容
  - 2.1 平成31年度の実施計画
    - ①(実施項目1)3次元ホログラフィック地中レーダ実験設備の整備
       (3次元ホログラフィック地中レーダ実験設備のバイスタティック化の拡張工事は昨年度までに
       完了したので今年度は実施しない)
    - ②(実施項目3)整備した実験設備を用いた不均質媒質内埋設物の複素散乱特性ホログラムの収集 3次元ホログラフィック地中レーダ実験設備を用いて、地下埋設物を含む模擬土壌の複素散乱特 性ホログラムを多数ケース収集し、収集した多数のホログラムマトリクスを用いて、媒質の影響を 可能な限り取り除いた地下埋設物の立体形状を推定する手法(誘電率推定結果を適用した埋設物体 の形状推定アルゴリズム)を開発する。なお、複素散乱特性の収集ケース数は、埋設物の大きさ、 形状、分布、深さ、媒質の違いや、散乱方向などにより決定する。また、形状推定精度の算出は、 埋設物の立体形状と推定画像から求めた立体形状の比較で行うが、形状推定アルゴリズムには、③ で予測された散乱波と測定された散乱特性の違いが最少になるようなモデルの同定を含む。併せて、 従来法との比較のために模擬土壌に埋設した物体の地中レーダ画像も収集し、両者の比較も行う.

また、分担機関と連携し、再委託によって、以下の③~④の研究開発に取り組む。

- ③(実施項目 2)3次元電磁界解析による不均質媒質内の散乱過程に基づいた地下埋設物の識別法の開発と散乱特性の予測(再委託先:国立大学法人東京農工大学)
   ②で収集したホログラムマトリクスの代表的な実験ケースに対応する多層媒質試料(水、砂利、砂に埋設したコーナリフレクタ及び誘電率が異なる誘電体ブロック)からの散乱波について、3次元ホログラフックシミュレータによる3次元電磁界解析により予測し、その結果を埋設物体の形状推定アルゴリズムに提供するとともに、シミュレータの高速化も行う。
- ④ (実施項目 4) 多層不均質媒質数学モデルの修正(再委託先:国立大学法人東京農工大学)
   3 次元ホログラフックシミュレータを用い、②で収集した複素散乱特性のホログラムマトリクスと③で推定された散乱波特性とを比較しながら多層媒質試料の立体数学モデルについて修正と再予測を繰り返し、予測精度の確認と立体形状推定精度の改善を行う。

### ⑤ プロジェクトの総合的推進

2ヶ月に1回程度、研究連絡会と研究打合せを設けて研究の打合せとプロジェクトの研究の進捗 と連携・調整にあたる。また、必要に応じて外部有識者の意見を聞くなどして研究の方向性を確認 する。本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、 本研究の更なる進展に努める。なお、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従い事前 に発表内容等を通知する。

### 2.2 平成31年度の研究実施日程

業務項目				実	-	施	F	1	程			
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
(ア) 3次元												
ホログラフィ												
ック地中レー					( 3	<u></u> 嫯備完	ר)					
ダ実験設備の												
整備												
(イ) 整備し												
た実験設備を												
用いた不均質												
媒質内埋設物												
の複素散乱特	←							•				
性ホログラム												
の収集												
(ウ) 3次元												
電磁界解析に												
よる不均質媒												
質内の散乱過												
程に基づいた												
地下埋設物の	-											$\rightarrow$
識別法の開発												
と散乱特性の												
予測												
(エ) 多層不												
均質媒質数学												
モデルの修正	-											
(オ) プロジ												
ェクトの総合	-											
的推進(連絡												
会)												

2.3 平成31年度の研究成果の説明

① (実施項目1)3次元ホログラフィック地中レーダ実験設備の整備

(3 次元ホログラフィック地中レーダ実験設備のバイスタティック化の拡張工事は昨年度までに 完了したので今年度は実施していない)

②(実施項目3)整備した実験設備を用いた不均質媒質内埋設物の複素散乱特性ホログラムの収集 整備した地中レーダ実験設備を用いて、地下埋設物を含む模擬土壌の複素散乱特性ホログラムを 多数ケース収集した。収集した多数のホログラムマトリクスを用いて、逆フレネル変換を使用した 2D-GBSARにより収集したデータのイメージング処理を行い、地下埋設物の立体形状を推定する手法 案を検討した。検討の結果、1) 不均質媒質である礫やその間の空隙の粒度がレーダの空間分解能よ り小さい場合は一様と見なして良く、2) 但し、媒質の礫の誘電率が異なる場合は画像に影響を与え るため、地層の場合、層構造をモデル化する等で近似できることがわかった。

埋設した複素散乱特性の取集は実験試料の種類(ベーク棒)、大きさ(大小の2種類)、媒質(砂、 砂利)、埋設物の深さを変えて行った。実験ケースと同様な実験ケースで数学モデルを作り、予測 された散乱波と測定された散乱特性の違いが最少になるような数学モデルの同定を行った。併せて、 従来法との比較のために地中レーダを用いて埋設物のイメージングも行い、両者の比較も実施した。

また、分担機関と連携し、再委託によって、以下の③~④の研究開発に取り組んだ。

③(実施項目 2)3次元電磁界解析による不均質媒質内の散乱過程に基づいた地下埋設物の識別法の 開発と散乱特性の予測(再委託先:国立大学法人東京農工大学)

②で収集した多層媒質試料(砂埋設に埋設した誘電率が異なる誘電体ブロック)からの散乱波に ついて、3次元電磁界解析により予測し、その結果を埋設物体の形状推定アルゴリズムに提供した。 同時に、電磁界解析にシミュレータの高速化も行う。②で収集したホログラムマトリクスの実験ケ ースに対応する多層媒質試料(砂に埋設したコーナーリフレクタ及び誘電率が異なる誘電体ブロッ ク)からの散乱波について、3次元ホログラフックシミュレータによる3次元電磁界解析により予 測し、その結果を埋設物体の形状推定アルゴリズムに提供するとともに、シミュレータの高速化も 行う。

④ (実施項目 4) 多層不均質媒質数学モデルの修正(再委託先:国立大学法人東京農工大学)

地中レーダ実験設備の広帯域の送受信アンテナから放射される電磁界の予測を確実に行うため、 パルスの送信と受信波形の取得し、予測結果との対比を行って送受信用広帯域アンテナの数学モデ ルの修正を完了させ、高速演算化のための Multi-Region 法による FDTD 演算モデルに実装を行って 散乱波の予測精度の検証を終えた。Multi-Region 法による FDTD 演算により計算速度を 2 倍高速化 することに成功した。

⑤ プロジェクトの総合的推進

1 ヶ月に1回以上、研究連絡会と研究打合せを設けて研究の打合せとプロジェクトの研究の進捗 と連携・調整にあたった。新型コロナウィルス対策で BCP が発令された後もオンライン会議で研究 打合せを続けた。

2.3 平成31年度研究成果の説明

3次元ホログラフィック地中レーダ実験設備の整備

3 次元ホログラフィック地中レーダ実験設備のバイスタティック化の拡張工事は昨年度までに 完了したので今年度は実施していない。参考として昨年までに整備した地中レーダ実験設備の概 要を以下に簡単に述べる。

平成 30 年度に完成している地中レーダ実験設備を図1に示した。JAXAの既設2次元ガントリ ー部(水平走査)のアンテナを実験試料の直上で2次元走査出来るように走査部の構造を拡張し た。本地中レーダ実験の観測ターゲットは土壌等に埋設された物体である。設備では大型の樹脂 製の角型水槽に媒質を入れ、その中に実験試料を埋設して2次元の合成開ロレーダで画像化を行 う。媒質を入れる角型槽の大きさは2600×1270×690 mmである。バイスタテックな散乱波の送受 信と側面から埋設物を撮像するケースも想定し、垂直にアンテナを2次元走査することが可能な 走査機構を付加している。また、試料のあらゆる方向の側方散乱特性も取得できるように電動の 回転台を用いて試料を回転することも可能である。



3次元ホログラフィック地中レーダ実験設備 (右上:垂直走査部アンテナ拡大,右中央:水平走査部アンテナ拡大,右下:制御卓,測定器)

② 整備した実験設備を用いた不均質媒質内埋設物の複素散乱特性ホログラムの収集

②-1 多層誘電体板からの反射波の予測

再委託先(農工大)のシミュレーション結果との整合性を確認するため、有限差分時間領域法 による3次元電磁界解析に用いる立体数学モデル(実験設備、環境、散乱体)を作成して、多層 誘電体板からの複雑な散乱波の時間応答をシミュレーションして、GB-SAR処理の健全性も確認し た。シミュレーションでは、送受信アンテナをステップ移動させ、上記の時間応答シミュレーシ ョン(FDTD解析)を実験時のサンプル数分繰り返し、受信アンテナの受信電圧の時間応答(レー ダAスコープ)を測線状に並べてレーダBスコープを計算し、実験値との比較を行った。さらに 多層誘電体板の立体数学モデルを修正しながらFDTD解析と比較を繰り返してモデルの同定を行 った。シミュレーションフローを図2に示した。

作成した立体数学モデルを図3に、立体数学モデルに入れ込んだ広帯域アンテナのモデルを図4に示す。立体数学モデルは実験環境の実寸法に合わせて作成した。多層誘電体板は誘電率の異なるものを用意(テフロン板、ABS板、アクリル板、フェノール板、ポリカーボネート板)した。 送受信用の広帯域アンテナは製作図面寸法を数学モデルに入れ、基板の絶縁体の誘電率を入れている。

多層誘電体板の散乱波シミュレーション結果を図5に示す。図5は広帯域アンテナからパルス 波が送信されて多層誘電体に入射して散乱する時間応答波形の様子がわかる。

図1 地中レーダ実験設備(平成29年~30年度整備)



図2 シミュレーションの処理フロー



図3 多層誘電体板実験の立体数学モデル



図4 立体数学モデルに取り込んだ広帯域アンテナの素子寸法



図5シミュレーション結果(散乱波の時間・空間応答)



ABS, Acryl, PC, Phenol, Teflon板からの反射波

図6 にシミュレーションにより得られた多層誘電体板からの散乱波のレーダAスコープを示す。図 は実験試料として用意した誘電体板とその下に置いたアルミ板からのレーダAスコープデータを全て

重ねたものである。この結果から、誘電体板表面からの反射とアルミ板からの反射波のレベルを求め、 その差から誘電体透過損失と反射損失を算出し、予測と実験の結果の比較を行った。結果を図7に示 す。図は FDTD 解析のAスコープから計算した誘電体の透過損失(左図)と反射損失(右図)の比較で あり、赤が実験値を青が解析値を示す。予測と実験の比較結果から、反射損失は絶対レベルに違いが あるが傾向は一致している。解析値と実験値から求めた損失が完全に合わない理由は未確認であるが、 レーダのイメージングに影響は与えないものとして立体数学モデルは検証された判断とした。



図7 多層誘電体板の立体数学モデルを用いたシミュレーションの検証結果 (解析結果から推定した誘電体の透過損失と反射損失)

②-2 地中レーダ実験設備のポラリメトリック校正

地中レーダシステムは偏波レーダであるため偏波校正を行った。本研究の地中レーダシステムは 送信アンテナと受信アンテナにそれぞれ水平偏波(H)、垂直偏波(V)を送受信する機能が有る。こ れにより、水平偏波で送受信した HH(受信偏波、送信偏波)偏波信号、水平偏波で送信/垂直偏波 で受信した VH 信号、垂直偏波で送信/水平偏波で受信した HV 信号、垂直偏波で送受信した VV 信号 の各偏波信号が入力することになる。このようにして、偏波合成開ロレーダ装置では、送受信の偏 波の組み合わせから HH, HV, VH, VV の4 つの散乱行列データを得ることができる。

本地中レーダは合成開口で埋設物の画像化を行うためにHH、HV、VH、VVの散乱係数からなるデー タが得られる。しかし、レーダで観測した直接の散乱行列データには、偏波間の振幅と位相に関し て送受信アンテナ間の配置、各種信号の経路長、機器の振幅・位相特性に起因する誤差が含まれて いる。そのため、偏波レーダとしてこの誤差を除去することを行った。

偏波校正は2面コーナーリフレクタを利用する方法で実施した(図8)。この方法は金属平板で構成された2面リフレクタの反射特性を持つ較正ターゲットを回転させて各リフレクタの反射信号の 強度、位相を観測し、較正パラメータを求める手法である[Gau, J.-R. J., and Burnside, W. D.].





		<b>Orientation</b> A	ngle	Pola	rimetry	Ampl	tude (dB)	Phase (	deg)
		0 deg	R <sub>HH</sub>		-64.56		-55.09		
	$\wedge$		R <sub>vv</sub>		-67.04	1	99.03		
		45 deg				-77.76 -66.7		-91.33	
		(Countercloc	R <sub>HV</sub>		178.52				
	$\mathbf{v}$			R <sub>VH</sub>		-66.83	3	-132.12	
0 deg	45 deg			R <sub>vv</sub>		-70.2		-23.2	
	(Counterclockwise)	Orientation Angle		0 deg		45 deg		(Counterclockwise)	
	(Ooumerciockwise)	Comparison C		alibrated		Theoretical	Calibrated		Theoretical
_		ltem	Amplitu	ude	Phase (deg)		Amplitude	Phase (deg)	
	$\wedge$	S <sub>HH</sub>	3	1.13	-178.86	-1	0.07	146.27	0
		S <sub>HV</sub>	)	0.36	-103.68	0	1.06	-1.19	1
		S <sub>VH</sub>	)	0.36	-119.38	0	1.06	-1.19	1
0 deg	45 deg	S <sub>VV</sub>		1.20	-3.85	1	0.07	-112.78	0
	(Counterclockwise)	Orientation Angle	15	deg (	Countercl	ockwise)	30 deg (	Countercl	ockwise)
~	<b>^</b>	Comparison	c	Calibrated		Theoretical	Calibrated		Theoretical
A	$\langle \rangle \rightarrow$	Item	Amplit	ude	Phase (deg)		Amplitude	Phase (deg)	
		S <sub>HH</sub>	1	0.93	-177.44	-0.87	0.50	179.87	-0.50
-	÷ /	S <sub>HV</sub>		0.60	-45.48	0.50	0.84	-15.19	0.87
15 deg	30 deg	S <sub>VH</sub>	1	0.56	-27.74	0.50	0.85	-7.18	0.87
(Counterclockwise)	(Counterclockwise)	S <sub>VV</sub>		1.35	12.11	0.87	0.28	-94.74	0.50

図9地中レーダシステムの偏波校正結果

図9に地中レーダシステムの偏波校正結果を示す。偏波校正時にアンテナに対して厳密にコーナ リフレクタの角度を測定、決定することは困難であったが、校正後に2面コーナリフレクタの回転 させて確認した振幅と位相は理論値にかなり近くなった。

②-32次元合成開口レーダによる地下埋設物のイメージング処理
 [本地中レーダの合成開口処理法について]

本地中レーダ実験設備用に開発した地中の画像化処理は通常の合成開口レーダ(SAR: Aperture Synthetic Radar)とは異なる。衛星や航空機の合成開口では、レンジ方向をレーダ波のパルス圧縮で行い、アジマス圧縮(衛星の進行方向)をレーダ波のドップラー周波数を使って合成開口処理を行い、2次元(面的)な空間分解能を実現している。本方式は測定時に送受信アンテナを静止させているので、ドップラー効果は生じない。本合成開口の方式は地下の深度方向の分解能をパルス圧縮処理で行い、面的(アンテナ走査面方向のアジマス圧縮)の分解能は逆フレネル変換による合成開口を行っている。そのため、面的な分解能はアンテナの走査範囲で決定される。

本地中レーダ実験設備の分解能を向上させるために、使用するアンテナはブロードな指向性を持

ち、かつ、パルス圧縮での分解能を向上させるために広帯域なアンテナを使用している。さらに、 地表面付近でアンテナを走査するために、アジマス圧縮処理はフーリエ変換ではなく、近傍界を考 慮した逆フレネル変換により行っている。

[パルス圧縮処理]

本地中レーダ実験設備の距離方向のレーダ分解能はパルス圧縮処理により決定される。ここでは パルス圧縮の原理を以下に述べる。図 10(a)に示すように、送信パルス幅Tにおいて、周波数を線形 的に変化させる(図 10(b))。一方で、受信信号を図 10(c)に示す様な周波数対遅延時間特性(低い 周波数ほど遅延時間が長くなる)を持ったフィルタを通過させる。このフィルタによって、低い周 波数の信号は最も高い周波数 $f_2$ の信号の到着を待って出力されることとなる。つまり、出力は図 10(d)に示すような包絡線波形を持ち、パルス幅が圧縮されることを示している。この時の振幅の 倍率とパルス幅 $T_p$ はそれぞれ

$$\sqrt{BT}$$
$$T_P = \frac{1}{R}$$

となる。ここで、Bは掃引周波数幅である。これにより、パルス圧縮処理よりレーダシステムから 短いパルスが発射されたことに相当する。

アンテナ位置( $x_i, z_{ant}$ )おける周波数 $f_{i_f}$ の複素振幅応答を $s(x_i, f_{i_f})$ とすると、そのアンテナ受信する距離 $r_i$ からの信号は、

$$S(x_i, r_i) = \sum_{i_f=0}^{n_f} s\left(x_i, f_{i_f}\right) exp\left(j\frac{4\pi f_{i_f}r_i}{c}\right) \Delta f$$

となる。即ち、 $t = \frac{2r_i}{c}$ の関係があるので、この式は周波数応答を逆フーリエ変換すればインパルス 応答が得られるということを表している。



図 10 パルス圧縮処理

[窓関数]

パルス圧縮処理において逆フーリエ変換を用いると受信信号が信号帯域制限により不連続になりレ ンジサイドローブが加わることになる。その影響を軽減するために逆フーリエ変換で窓関数を用いた。 窓関数w(x)とは有限区間以外では0になる関数である。適切な窓関数を逆フーリエ変換の際に適用す ると高いダイナミックレンジと周波数分解能を持ったパルス圧縮波を取り出すことができる。本地中 レーダにおいてはパルス圧縮の際にハニング関数

$$w(x) = \begin{cases} 0.5 \ (1 - \cos 2\pi) & (0 \le x \le 1) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

を用いた。図11にパルス圧縮で用いたハニング関数を示す。



図 11 ハニング関数

[アジマス圧縮処理]

地中レーダ実験設備の場合、埋設物とアンテナの距離が比較的近距離(近傍界)になり、アンテナ から平面波が照射されていると見なすことが出来ない.そのために、アジマス圧縮においては一般的 に議論されている合成開口レーダのアジマス圧縮処理が使えない。そこで、以下のフレネル変換を用 いたアジマス圧縮処理を行う。

図 12 で示すように、 $x_i$ で受信する $(x_t, z_t)$ からの電波は位相が以下になる。

$$\frac{4\pi f}{c}r_i = \frac{4\pi f}{c}\sqrt{R_0 + \frac{(x_i - x_t)^2}{2R_0}}$$

ここで、

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_t)^2 + R_0^2} \approx \sqrt{R_0 + \frac{(x_i - x_t)^2}{2R_0}}$$
 where  $(x_i - x_t) \ll R_0$ 

であるので、この位相変化は伝搬関数h<sub>F</sub>を用いて表すと、

$$h_F(x_i - x_t) = exp\left(-j\frac{4\pi f}{c}\sqrt{R_0 + \frac{(x_i - x_t)^2}{R_0}}\right)$$

となる。この伝搬関数を用いて

 $g(x_t, z_t) = \sum_{i=0}^{n} h_F^*(x_i - x_t) S(x_i, z_t) \Delta x$ に示す、逆フレネル変換を行うとターゲットが結像することになる。



図12 各アンテナ位置におけるインパルス応答(パルス圧縮の結果)

[フレネル変換におけるエリアシング]

フレネル変換におけるアジマス圧縮時にはエリアシングが生じるので、レーダの空間サンプリング 間隔には注意が必要である。ここで $f(\xi)$ のフレネル変換が $\hat{f}_{\alpha}(x)$ が

$$\hat{f}_{\alpha}(x) = \sqrt{j\alpha} \int_{-\infty}^{\infty} C \frac{g(\xi)}{r^2} exp\left(-j\frac{4\pi r}{\lambda}\right) d\xi$$

で与えられる場合、ターゲットの存在範囲が $|\xi| \leq \xi_0$ に限られて観測面でのサンプリング間隔を $\Delta x \leq 1/2|\alpha|\xi_0$ とすればエリアシングは生じない。

これを合成開口のアジマス圧縮に適用することを考える。ターゲットのx座標 $\xi$ 、アンテナ走査面からの距離を $R_0$ とすると、受信される信号は

$$S(x_i) = \int_{-\infty}^{\infty} C \frac{g(\xi)}{r^2} exp\left(-j\frac{4\pi r}{\lambda}\right) d\xi$$

where

$$r = \sqrt{(x_i - \xi)^2 + R_0^2}$$

と表せる。ここで、フレネル近似により、

and

$$\begin{split} \mathrm{S}(x_i) &\approx \frac{c}{R_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi) exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} \left\{R_0 + \frac{(x_i - \xi)^2}{2R_0}\right\}\right) d\xi \\ &= \frac{c}{R_0^2} exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\right) \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi) exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda R_0} (x_i - \xi)^2\right) d\xi \\ &= \frac{c}{R_0^2 \sqrt{j\alpha}} exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \hat{g}_{\alpha}(\xi) \\ \hat{g}_{\alpha}(x_i) &= \sqrt{j\alpha} \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi) exp[-j\pi\alpha (x_i - \xi)^2] d\xi \end{split}$$

where

$$\alpha = \frac{2}{\lambda R_0}$$

と表すことができる。

よって、アンテナ走査面から $R_0$ 離れたターゲットが $-L/_2$ から $L/_2$ の範囲に限って存在しているとき、  $\xi_0 = L/_2$ であるのでアンテナ走査面でのサンプリング間隔 $\Delta x$ は、

$$\Delta x \le \frac{1}{2|\alpha|\xi_0} = \frac{\lambda R_0}{2L}$$

となる。即ちアンテナ走査面から $R_0$ 離れたターゲットが $-\frac{L}{2}$ から $\frac{L}{2}$ の範囲に限って存在している場

合にはサンプリングの間隔を $\lambda R_0/_{2L}$ より小さくしなければならない。

#### [地中レーダ実験設備の画像化の検証]

上記、地中レーダ実験設備における画像化が正しいかどうかシミュレーションと地上設置のコーナ リフレクタのイメージングで逆フレネル変換による合成開口処理の検証を行った。シミュレーション では図 13 に示すように、アンテナ位置( $x_i, z_{ant}$ )おける、周波数 $f_{i_f}$ の複素振幅応答 $s(x_i, f_{i_f})$ を以下の式 で与えた.



図 13 シミュレーションにおける複素振幅応答の与え方

合成開口処理の検証を行うため、図 14 に示す配置で一辺が $a = 0.1 \text{ m} \ge a = 0.2 \text{ m}$ の方形のコーナー リフレクタを 2 個ずつ観測して画像化する実験を行った。コーナーリフレクタの大きさは、+x方向か ら順に、0.2 m、0.1 m、0.2 m とし、高さは0.67 m、ターゲットの間隔はすべて0.6 m とした。



図14 検証実験におけるコーナーリフレクタの配置



図 15 検証実験時のコーナーリフレクタの様子

実験で用いた 2 つのコーナーリフレクタの RCS の違いから画像化の性能評価を行う。コーナリフレ クタの一辺の長さaを用いると、光学近似によって

$$\sigma = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$$

と求まる。よって、a = 0.2 mのコーナーリフレクタを基準としたときの、a = 0.1 mのコーナーリフレクタからの受信強度は、

$$\Delta\sigma = 10 \ \log_{10} \frac{0.1^4}{0.2^4} = -12.0 \ \text{dB}$$

となる。

以下図 16 に実験結果、図 17 にシミュレーションの結果を示した。ここで、図のカラースケールは いずれもターゲットからの反射と考えられるものの内、最も強い信号を.0 dBとして正規化している。 シミュレーションにおいては、*a* = 0.1mのコーナーリフレクタからの受信信号は、*a* = 0.2mのコー ナーリフレクタからの受信信号に比べ-12.5 dB、画像化の実験においては-9.8 dBであった。







図 16 コーナーリフレクタの画像化シミュレーション結果



a)パルス圧縮の結果

b)アジマス圧縮の結果

図17 コーナーリフレクタの画像化実験結果

②-4 2 次元合成開口レーダによる地下埋設物のイメージング実験

開発が完了した逆フレネル変換による2次元合成開口処理による地中レーダ実験設備を用いて、 埋設物の画像化実験を行った。

[砂埋設コーナリフレクタの画像化]

大型の水槽に砂を入れ、その中にコーナリフレクタを埋設して、本地中レーダ実験設備により散 乱波のデータ収集と画像化を試みた。埋設したコーナリフレクタの種類は(大;a=0.2m,小;a=0.1m) で小は2個異なる深さに配置して、大は水槽中央に配置した.図18に実験の様子と埋設時の様子を 示した。



砂埋設CRの測定時の水槽の様子



埋設CR小1(a:0.1m), 深さ30cm



埋設CR大(a:0.2 m), 深さ45 cm



埋設CR小2(a:0.1m), 深さ5cm

図18砂埋設コーナリフレクタの画像化実験の様子



図 19 砂埋設コーナリフレクタの配置

埋設したコーナリフレクタの深さは CR小1(a=0.1m)が深さ 30cm、CR小2が深さ 5cm、CR大(a:0.2m)が深さ 45cm である。図 20~図 28 に本地中レーダ実験設備で観測した水槽周辺を含む埋設コーナリフレクタの画像化の結果を示す.図中にある 8 枚の画像の配置は合成開口処理で使用した観測周波数範囲(上段図:300MHz~3GHz,下段図:1GHz~3GHz)を示しており、左側 4 枚はクイク偏波を示し、右側 4 枚はクロス偏波で画像化したものを表している。



図 20 砂埋設コーナリフレクタの画像(CR小1付近の X-Z 断面)





図 21 砂埋設コーナリフレクタの画像(CR小2付近の X-Z 断面)



## 図 22 砂埋設コーナリフレクタの画像(CR 大付近の X-Z 断面)





図 23 砂埋設コーナリフレクタの画像(CR小1付近の Y-Z 断面)

Y-Z断面図 X=2100mm

†z [	Co-Polar	Co-Polar	Cross-Polar	Cross-Polar		
	S21	S43	523	S41		
	300MHz-3GHz	300MHz-3GHz	300MHz-3GHz	300MHz-3GHz		
Γ Υ −	Co-Polar	Co-Polar	Cross-Polar	Cross-Polar		
	S21	S43	S23	S41		
	1.002GHz-3GHz	1.002GHz-3GHz	1.002GHz-3GHz	1.002GHz-3GHz		



# 図 24 砂埋設コーナリフレクタの画像(CR 大付近の Y-Z 断面)



図 25 砂埋設コーナリフレクタの画像(CR小2付近の Y-Z 断面)





図 27 砂埋設コーナリフレクタの画像(CR小2付近の X-Y 断面)



図 28 砂埋設コーナリフレクタの画像(CR小1付近の X-Y 断面)

[砂利埋設誘電体の画像化]

大型の水槽に砂利を入れ、その中に誘電体ブロック(円柱のベーク棒)を埋設して、本地中レー ダ実験設備により散乱波のデータ収集と画像化を試みた。埋設した誘電体ブロックの種類は(大; a=0.2m,小;a=0.1m)で小は2個異なる深さに異なる配置して埋設した.図29に実験の様子と埋設 時の様子を示した。



砂の深いところに 砂埋設布ベーク棒(大)を2本

Z



砂の表面付近に 砂埋設布ベーク棒(小)を1本



全て埋設した状態

図 29 砂利埋設誘電体ブロックの画像化実験の様子



図 30 砂利埋設誘電体ブロックの配置図(X-X 平面, Y-Z 側面配置)

図 30 に埋設した誘電体ブロックの配置を示した。

図 31~図 38 に本地中レーダ実験設備で観測した水槽周辺を含む砂利埋設誘電体ブロックの画像化の結果を示す.図中にある8枚の画像の配置は合成開口処理で使用した観測周波数範囲(上段図:300MHz~3GHz,下段図:1GHz~3GHz)を示しており、左側4枚はライク偏波を示し、右側4枚はクロス偏波で画像化したものである。



図 31 砂利埋設誘電体ブロックの画像(誘電体ブロック付近の深さの X-Y 断面 Z:-100mm)



図 32 砂利埋設誘電体ブロックの画像(誘電体ブロック付近の深さの X-Y 断面 Z:-150mm)



図 33 砂利埋設誘電体ブロックの画像(誘電体ブロック付近の深さの X-Y 断面 Z:-200mm)



図 34 砂利埋設誘電体ブロックの画像(誘電体ブロック付近の深さの X-Y 断面 Z:-250m



図 35 砂利埋設誘電体ブロックの画像(誘電体ブロック大付近の X-Z 断面)



図 36 砂利埋設誘電体ブロックの画像 (誘電体ブロック小付近の X-Z 断面)



図 37 砂利埋設誘電体ブロックの画像(誘電体ブロック大付近の X-Z 断面)



図 38 砂利埋設誘電体ブロックの画像(誘電体ブロック付近の Y-Z 断面)

砂利に埋設した誘電体ブロック(小)は合成開口で実現できるレーダの分解能と同程度である。図 30~図34の画像は得られた撮影画像から各深度でスライスしたものを平面表示したものである。この 画像には3つの誘電体ブロックの像がはっきり写っており、形も含めて配置も撮影されていることが わかる。この結果から、本地中レーダ実験設備を用いた埋設物の立体形状推定は可能であることがわ かる。

従来の地中レーダでは直線状の観測側線に亘る深度方向の画像しかないため、物体の形状や配置までわからないが、本研究で開発した合成開口による地中レーダで高分解能な地下の面的な観測を行うことで、埋設物の形状、その深度と配置が合成開口の空間分解能程度の精度(約10cm)で推定可能であることを示している。これは、本地中レーダ実験設備ではフレネル変換による合成開口によりエリアシングを考慮して、適切なサンプリング間隔の半分の細かさ(20mm)でデータを取得していることに関係する。

媒質に関しては砂も空隙が多い砂利(異なる誘電率が分布する)でも像は一様である。そのため、 シミュレーションによる予測においては、分解能以下の媒質のモデルは層的なものを除いて考慮しな くても問題ないと考えられる。偏波については全ての実験において、ライク偏波の方がクロス偏波に 対して像の S/N が良く見えた。但し、クロスの偏波でも像としては撮影されているので、正規化表示 をして比較すべきかも知れない。周波数については 300MHz からの低周波とすると媒質表面の像が強調 される傾向があった。但し、媒質を含めて媒質内は 300MHz の低周波を使う方が良いと言える。図では 示さなかったが、地中レーダシステムの偏波校正の有無の影響も実験で比較した。その結果、校正の 有無が撮影画像に与える影響は少ないことがわかった。

一方、図 35 以降の深度方向の断面を見ると、平面の断面画像で確認出来たように、直径 15cm の誘 電体ブロックの円柱の方向も画像化されていることがわかる。この事は地中レーダでは高分解かつ面 的な観測を行うことが重要であることを示している。つまり、埋設物の形状の推定は地上側からの観 測で可能である、従って、地中レーダ装置を高解像度で 2 次元合成開口化し、撮像を短時間で実現す る地中レーダ装置を開発することが有効であることを示している。 ③ 3 次元電磁界解析による不均質媒質内の散乱過程に基づいた地下埋設物の識別法の開発と散乱特 性の予測

本年度の実施目標は地中レーダ実験ケースに対応する数学モデルをコンピュータ上で正確に再現し、 実験状況を予測する事である。本研究の室内地中レーダ実験では世界最大級の 6m×6m×3m の空間を実 験空間として使うことが出来る(GB-SAR 処理のためのアンテナ走査可能領域)。そのため、これまで の研究で用いていた電磁界解析手法(FDTD 法)では本研究の数学モデルでの解析計算に時間がかかる ことが分かってきた。そこで、FDTD 法による不均質媒質内の散乱過程を高速にシミュレーション する手法の開発を行った。

③-1 MR-FDTD 法による電磁界解析法の開発



(b) Multi-Region FDTD 法

図 39 通常の FDTD 法と Multi-Region FDTD 法

図 39(a)に通常の FDTD 法の概念を示す。本研究の実験コンフィグレーションはエアランチ型の地中 レーダであるためにアンテナと散乱体(ターゲット)が離れている状況になる。このため、アンテナ と散乱体間の空間の電磁界も計算しないといけない。これは電磁界解析上、計算の無駄であると考え られる。そこで、Multi-Region FDTD 法を適用して、図 39(b) に示すように領域を分割して 解析を行う。この様に領域化を行うことで、アンテナとターゲットの間は解析をしないこ とになり、大幅に計算時間を削減できる。

以下に Multi-Region FDTD 法の説明を行う。解析領域のひとつの座標をR', もう一つの 領域の座標をRとすると、R'から解析領域Rへ放射される電磁界 E(r,ω), H(r,ω)はラブの等価 定理を用いて、

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},\omega) = \int_{S'} \left[ -j\omega\mu \{ \hat{\boldsymbol{n}}' \times \boldsymbol{H}'_{S'}(\boldsymbol{r}',\omega) \} G(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}') - \{ \boldsymbol{E}'_{S'}(\boldsymbol{r}',\omega) \times \hat{\boldsymbol{n}}' \} \times \nabla' G(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}') + \{ \hat{\boldsymbol{n}}' \cdot \boldsymbol{E}'_{S'}(\boldsymbol{r}',\omega) \} \nabla' G(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}') \right] dS'$$

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},\omega) = \int_{S'} \left[ -j\omega\varepsilon \left\{ \boldsymbol{E}'_{S'}(\boldsymbol{r}',\omega) \times \hat{\boldsymbol{n}}' \right\} G(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}') + \left\{ \hat{\boldsymbol{n}}' \times \boldsymbol{H}'_{S'}(\boldsymbol{r}',\omega) \right\} \times \nabla' G(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}') + \left\{ \hat{\boldsymbol{n}}' \cdot \boldsymbol{H}'_{S'}(\boldsymbol{r}',\omega) \right\} \nabla' G(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}') \right] dS'$$

と表すことが出来る。ただし、**r**, **r**'は解析領域**R**, **R**'における座標, **E**'<sub>s'</sub>(**r**, $\omega$ ), **H**'<sub>s'</sub>(**r**, $\omega$ )は解析領域**R**'における積分面上の電磁界, **î**'は積分面上の単位法線ベクトル, *G*(**r** – **r**')は自由空間のスカラグリーン関数である.ここで、電磁界を等価面電流 **J**'<sub>s'</sub>と等価面磁流**M**'<sub>s'</sub>を用いて、

$$\boldsymbol{J}'_{S'}(\boldsymbol{r}',\omega) = \hat{\boldsymbol{n}}' \times \boldsymbol{H}'_{S'}(\boldsymbol{r}',\omega)$$

$$M'_{S'}(\mathbf{r}',\omega) = \mathbf{E}'_{S'}(\mathbf{r}',\omega) \times \hat{\mathbf{n}}'$$

と表す。また、 $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|, R = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$ として、 $\nabla' G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$ を表すと、

$$\nabla' G(\boldsymbol{R}) = \nabla' \left( \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-jkR}}{R} \right) = \frac{1}{4\pi} \left( j\omega + \frac{1}{R} \right) \frac{e^{-jkR}}{R} \frac{\boldsymbol{R}}{R}$$

となる。これを逆フーリエ変換すると、

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t) = -\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{S'} \frac{\mu}{R} \boldsymbol{J}'_{S'} \left( \boldsymbol{r}', t - \frac{R}{c} \right) dS' + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{S'} \frac{1}{R^2 c} \boldsymbol{R} \times \boldsymbol{M}'_{S'} \left( \boldsymbol{r}', t - \frac{R}{c} \right) dS' + \frac{1}{4\pi} \int_{S'} \frac{1}{R^3} \boldsymbol{R} \times \boldsymbol{M}'_{S'} \left( \boldsymbol{r}', t - \frac{R}{c} \right) dS' + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{S'} \frac{1}{R^2 c} \boldsymbol{R} \left\{ \hat{\boldsymbol{n}}' \cdot \boldsymbol{E}'_{S'} \left( \boldsymbol{r}', t - \frac{R}{c} \right) \right\} dS' + \frac{1}{4\pi} \int_{S'} \frac{1}{R^3} \boldsymbol{R} \left\{ \hat{\boldsymbol{n}}' \cdot \boldsymbol{E}'_{S'} \left( \boldsymbol{r}', t - \frac{R}{c} \right) \right\} dS'$$

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t) = -\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{S'} \frac{\varepsilon}{R} \boldsymbol{M}'_{S'} \left( \boldsymbol{r}',t - \frac{R}{c} \right) \mathrm{d}S'$$
  
$$-\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{S'} \frac{1}{R^2 c} \boldsymbol{R} \times \boldsymbol{J}'_{S'} \left( \boldsymbol{r}',t - \frac{R}{c} \right) \mathrm{d}S' - \frac{1}{4\pi} \int_{S'} \frac{1}{R^3} \boldsymbol{R} \times \boldsymbol{J}'_{S'} \left( \boldsymbol{r}',t - \frac{R}{c} \right) \mathrm{d}S'$$
  
$$+\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{S'} \frac{1}{R^2 c} \boldsymbol{R} \left\{ \hat{\boldsymbol{n}}' \cdot \boldsymbol{H}'_{S'} \left( \boldsymbol{r}',t - \frac{R}{c} \right) \right\} \mathrm{d}S' + \frac{1}{4\pi} \int_{S'} \frac{1}{R^3} \boldsymbol{R} \left\{ \hat{\boldsymbol{n}}' \cdot \boldsymbol{H}'_{S'} \left( \boldsymbol{r}',t - \frac{R}{c} \right) \right\} \mathrm{d}S'$$

となる。さらに時間微分項を差分近似し、時刻を解析領域R'に合わせると、

$$E\left(\mathbf{r},t'+\frac{R}{c}-\frac{1}{2}\Delta t\right) = -\frac{1}{4\pi}\int_{S'}\frac{\mu}{R\Delta t}\mathbf{J}'_{S'}(\mathbf{r}',t')\mathrm{d}S'$$
$$+\frac{1}{4\pi}\int_{S'}\frac{1}{R^{2}c\Delta t}\left[\mathbf{R}\times\mathbf{M}'_{S'}(\mathbf{r}',t')+\mathbf{R}\left\{\hat{\mathbf{n}}'\cdot\mathbf{E}'_{S'}(\mathbf{r}',t')\right\}\right]\mathrm{d}S'$$
$$E\left(\mathbf{r},t'+\frac{R}{c}\right) = \frac{1}{4\pi}\int_{S'}\frac{1}{R^{3}\Delta t}\left[\mathbf{R}\times\mathbf{M}'_{S'}(\mathbf{r}',t')+\mathbf{R}\left\{\hat{\mathbf{n}}'\cdot\mathbf{E}'_{S'}(\mathbf{r}',t')\right\}\right]\mathrm{d}S'$$

$$\begin{split} E\left(\mathbf{r},t'+\frac{R}{c}+\frac{1}{2}\Delta t\right) &= +\frac{1}{4\pi}\int_{S'}\frac{\mu}{R\Delta t}J'_{S'}(\mathbf{r}',t')\mathrm{d}S'\\ &\quad -\frac{1}{4\pi}\int_{S'}\frac{1}{R^2c\Delta t}\left[R\times M'_{S'}(\mathbf{r}',t')+R\left\{\hat{\mathbf{n}}'\cdot \mathbf{E}'_{S'}(\mathbf{r}',t')\right\}\right]\mathrm{d}S'\\ H\left(\mathbf{r},t'+\frac{R}{c}-\frac{1}{2}\Delta t\right) &= -\frac{1}{4\pi}\int_{S'}\frac{\varepsilon}{R\Delta t}M'_{S'}(\mathbf{r}',t')\mathrm{d}S'\\ &\quad +\frac{1}{4\pi}\int_{S'}\frac{1}{R^2c\Delta t}\left[-R\times J'_{S'}(\mathbf{r}',t')+R\left\{\hat{\mathbf{n}}'\cdot \mathbf{H}'_{S'}(\mathbf{r}',t')\right\}\right]\mathrm{d}S'\\ H\left(\mathbf{r},t'+\frac{R}{c}\right) &= \frac{1}{4\pi}\int_{S'}\frac{1}{R^3\Delta t}\left[-R\times J'_{S'}(\mathbf{r}',t')+R\left\{\hat{\mathbf{n}}'\cdot \mathbf{H}'_{S'}(\mathbf{r}',t')\right\}\right]\mathrm{d}S'\\ H\left(\mathbf{r},t'+\frac{R}{c}+\frac{1}{2}\Delta t\right) &= +\frac{1}{4\pi}\int_{S'}\frac{\varepsilon}{R\Delta t}M'_{S'}(\mathbf{r}',t')\mathrm{d}S'\\ &\quad -\frac{1}{4\pi}\int_{S'}\frac{1}{R^2c\Delta t}\left[-R\times J'_{S'}(\mathbf{r}',t')+R\left\{\hat{\mathbf{n}}'\cdot \mathbf{H}'_{S'}(\mathbf{r}',t')\right\}\right]\mathrm{d}S' \end{split}$$

となる。ここで、*c*は光速、Δ*t*は微小時間である。



図 40 MR-FDTD 法の計算手法

この手法を用いて解析した結果を図 41 に示した。解析領域は図 40 に示すように、Region1 は Region2 に対して 45°傾いている。Region1 に半波長ダイポールアンテナを設け、Region2 は自由空間とした。 このとき、半波長ダイポールアンテナの中心は Region1 の中心と一致している。また、入力をデルタ ギャップ給電による 1GHz の正弦波とし、Region1 と Region2 の中心間距離を 0.3m とし、PML 層を 8 層 とした。 Region1 のセルの 1 辺を 3mm とし、Region2 のセルの 1 辺を 3mm, 6mm, 9mm と変化させた。 図 41 のように解析領域を傾けた FDTD 法と Region2 中心の電界を比較したものを図 42 に示した。図 42 において、FDTD 法による解析結果を赤色の実線、MR-FDTD 法でセルサイズ比が 1:1 の解析結果を青 色の破線、セルサイズ比が 1:2 の解析結果を緑色の×印、セルサイズ比が 1:3 の解析結果を紫色の四 角で示した。ただし、Region2 の電界 |E|は絶対値で表している。また、Region2 のセルサイズを 2 倍、 3 倍と変化させた場合でも精度よく再現できていることがわかった。



図 41 MR-FDTD 法を用いた解析モデル



図 42 MR-FDTD 法を用いた解析結果

## ③-2 MR-FDTD 法の高速化

本項では MR-FDTD 法の高速化を述べる。まず通常の MR-FDTD 法では、FDTD 法のタイムステップ毎 に各領域を結合させる計算を行う必要がある。この計算に多くの計算時間がかかっている。この処理 の計算量は解析領域の大きさと比例している。本研究では従来より広い解析空間を扱う必要があり、 さらに MR-FDTD 法の計算を高速化させる必要があった。本高速化では FDTD 法の計算を通常通り行い、 複数領域を結合する計算についてのみ見かけ上のセルを大きくする手法を開発した。その概念を図 43 に示す。



図 43 MR-FDTD 法の高速化を用いた解析結果 (左:通常の FDTD 法のセル,右:見かけ上のセルを大きくした提案手法)

開発した手法では、図 43(右)に示すように、解析領域は同じまま見かけ上のセルを大きくする。 この様にすることで、計算量は解析領域を小さくしたのと同じことになり大幅に計算時間を削減でき る。

次に見かけ上のセルを大きくする手法について説明する。まず、FDTD 法は時間領域の解法であるた めに、アンテナから出た電波が散乱体にあたって散乱が収束するまで解析を行う。その際、アンテナ から電磁波が出た瞬間や散乱体に電波が当たった瞬間に電磁界が大きく変動し、それ以外の時は電磁 界の変化は緩やかである。一方、MR-FDTD 法は電磁界の変化と関係なく、すべての時間においてすべ てのセルからの電磁界寄与を別の領域へ計算していた。そこで、電磁界の変化が緩やかな際は、図 14 (右)に示すように複数のセルを結合しそれぞれのセルの平均値を用いる。このセルの拡大方法は 4 分木分割と呼ばれ画像処理などで画像を圧縮する際に用いられている手法である。本研究では、この 4 分木分割を MR-FDTD 法に導入している。4 分木分割では分割の大きさを近隣する 4 つのセルの電磁界 の変化が大きいかどうかを評価し、分割するサイズを変える。例えば、隣り合う 4 個のセルの電磁界 の変化が大きいかどうかを評価し、分割するサイズを変える。回えば、隣り合う 4 個のセルの電磁界 の変化が大きい際には、電磁界の結合に用いるセルを大きくすることは無く、逆に変化が緩やかな際 はセルを大きくする方法である。この分割方法のイメージを図 14 に示した。地中レーダの解析モデル は 3 次元モデルであり、Multi-Region FDTD 法による計算により各領域の等価面(2 次元)の電磁界計 算を行っている。本研究ではさらに計算を高速化するために 4 分木分割を用いてセルの数を少なくし た。



# 図 44 MR-FDTD 法の高速化を用いた解析結果

(通常の FDTD 法のセル: 左,まず大きく4つに分けてセル内の電磁界の分布をみる:中,電磁界分布 が緩やかな場所は見かけ上のセルを大きくする:右)

提案手法では、まず、図44(左)のように4分木セル内部の積分面上の電磁界の分散を計算する。 そして、図44(中)のように分散が閾値より高ければセルを4等分し、新しいセルに対して再帰的に 同様の処理をする。また、図44(右)のように分散が閾値より低ければセル内部の平均をそのセルの 値として電磁界の結合の計算を行う。本手法ではこのようにFDTD法の各タイムステップにおいてこの 操作を行い、見かけ上のセルを適宜変化させる。拡大した後とその前の電磁界の分布を次に示す。



図 45 4 分木分割を適応した結果 (電界の変化が大きい時:上,電界の変化が緩やかな時:下左, 電界の変化がやや緩やかな時:下右)

図 45 に実際の FDTD 法における 4 分木分割について示す。図 45(上)は電界の変化が大きい時、左側 は 4 分木分割を用いたセル、右側の図は通常の FDTD 法のセルである。また図 45(下左)は電界の変化 が緩やかな時の 4 分木分割と通常の FDTD 法のセル、図 45(下右)は電界の変化がやや緩やかな時の 4 分木分割と通常の FDTD 法のセルである。このように通常の FDTD 法は電磁界の変化が大きい時は分割を 細かくし、そうでないときは分割を粗くすることで計算量を削減する。



次に、この手法を用いた実際の計算例を示す。本方式の解析モデルを図 16 に示す.

# 図 46 解析モデル

解析モデルは図 46 に示すように、ダイポールアンテナとターゲットの領域が 30cm ほど離れているモデルとした。解析結果を図 47 に示す。この結果は、図 46 に示すターゲットの領域の中心における電界の時間変化を示したものである。図 47 において、青線は通常の FDTD 法の結果を示している。また、赤線は提案の4分木分割を用いた結果である。この結果より提案手法は計算量が少ないにもかかわらず通常の FDTD 法と同精度の解析精度が得られていることが分かる。また、解析時間は通常の FDTD 法において 32 分かかっていた計算時間が提案手法を用いる事で 17 分とほぼ半分の時間で計算を終えることが出来た。



図 47 4 分木分割法による解析結果(時間領域) (通常の FDTD 法:青,4 分木分割法による FDTD 法:赤)

④ 多層不均質媒質数学モデルの修正

④-1 実験を模擬したシミュレーションの高精度化

前年度までかけて試料を含む実験環境を模擬した多層不均質媒質数学モデルを開発してきたが、今年度 は更なる高精度化を目指して数学モデルの修正を行った。まず、数学モデルの基礎的検証行う上で必要と なる基本実験データの取得を JAXA と独立にして行った。実験の状況を図 48 に示す。実験は写真に示すよ うに農工大の電波暗室で行った。アンテナは実際に実験で用いるものを使用した。また、ターゲットは銅 板を使用している。さらに実験の状況を模擬した数学モデルを図 49 に示す。



図 48 実験の様子



図49 実験を模擬して作製した数学モデル



図 50 反射電界実験に用いた入射パルス (数学モデルによる予測:青,実験:赤)

本検証実験のアンテナとターゲットとの間隔は 60cm とした。実験ではネットワークアナライザのタ イムドメイン機能を使用したレーダを使用した。入射波としては半値幅 800 psec のガウスパルスを用 いた。図 50 が数学モデルによる解析と実験との比較を示す。図のグラフから結果は良く一致しており、 妥当な数学モデルを作成できていることが分かる。 次のステップとして、図 51 に示す不均質なモデルでの実験およびシミュレーションを行った。数学 モデルによる解析と実験との時間領域の受信電界を図 52 に示す。図 51 においては、図 49 に示すター ゲットの銅板のみの結果と誘電体があるモデルとの比較を行っている。このように不均質モデルと比 較することによりアクリル板などの誘電体板の反射の応答の違いを比較している。



図 51 実験を模擬して作製した不均質な数学モデル



図 52 実験を模擬して作製した不均質な数学モデル

④ -2 実験結果および数学モデルを修正した結果との比較

④-1 で開発を行った数学モデルを実験結果と整合するように再計算をしながら修正した。さらに JAXA で行った実際の実験環境を数学モデルに取り込む形でコンピュータの中に再現して解析を行 った。解析モデルを図 53 に示す。



図 53 モノスタティック実験のシミュレーションモデル

図 53 はモノスタティックレーダの実験を模擬したシミュレーションの数学モデルである。解析では 入射波をガウスパルスとしている。ターゲットは銅製のコーナーリフレクタとした。シミュレーショ ン結果を図 54 に示す。図 54 はアンテナからのガウスパルスがターゲットから反射してきた電界を見



ている。

図 54 モノスタティック実験のシミュレーション結果(レーダ B スコープデータ)

図 54 より二つのコーナーリフレクタからの反射が見られていることが分かる。

次に JAXA の実験コンフィグレーションと同じバイスタティックなアンテナ配置時の数学モデルに よるシミュレーションを行った。解析モデルを図 25 に示す。



図 55 バイスタティック実験のシミュレーションモデル



図 56 アンテナのバイスタティックレーダのシミュレーション結果 (レーダ B スコープデータ)

図56に示すようにバイスタティック実験のシミュレーションではコーナーリフレクタを2個配置している。シミュレーション結果から、レーダBスコープを合成したものを図58に示した。この結果より、コーナーリフレクタを2個イメージング出来ていることが分かる。

④-3 埋設物体の形状推定のための数学モデル

④-2 で開発を行った数学モデルを使ったシミュレータを使って、媒質内の埋設物体の画像化シミュレータを構築する。

シミュレーションにより、散乱波から埋設物画像を合成するために、JAXA 側の実験ケースと合わ せた条件で開発した FDTD を用いてシミュレーションを行い、レーダA スコープを計算し、実験にお けるアンテナ走査と同じように、数学モデルのアンテナと試料の相対位置を移動させながら逐次 FDTD 解析を行ってレーダB スコープを計算する。図 57 に数学モデルと画像化の計算結果を示す。



図 57 3 つのコーナリフレクタの形状推定のためのシミュレーション結果 (数学モデル: 左, レーダ B スコープ画像:中央,シミュレーション合成画像:右)

次に JAXA の実験ケースに合わせて、誘電体ブロック(ベーク丸棒)を砂に埋設した状態での画像 化シミュレーションを行った。媒質(砂)内埋設物(ベーク棒)からの散乱波から埋設物画像を合 成するために、JAXA 側の実験ケースと合わせたベーク棒の配置条件とし、開発した FDTD を用いて シミュレーションを行い、レーダA スコープを計算し、数学モデルのアンテナと試料の相対位置を 移動させながら逐次 FDTD 解析を行ってレーダ B スコープを計算した。図 28 に数学モデルとレーダ B スコープデータを、図 59 に画像化の計算結果を示す。



図 58 3 つの砂埋設ベーク棒の形状推定のためのシミュレーション結果(1) (数学モデル:左,レーダBスコープ画像:右)



図 59 3 つの砂埋設ベーク棒の形状推定のためのシミュレーション結果(2) (数学モデル:左,シミュレーション合成画像:右)

図 59 のベーク棒の合成画像の通り、レーダの空間分解能に限界があるので、実験ケースではベー ク棒の配置の詳細(傾き等)情報は得られないことがわかる。但し、ベーク棒の個数、配置、形状 (球でなく平面がある)の情報は得られていることがわかる。また、JAXAの地中レーダ実験設備で 得られたレーダ散乱波から画像合成を行う逆フレネル変換を含む 2D-GB-SAR の処理が正しいことも 確認出来ている。

この計算の電磁界解析のために作成したモデル(立体数学モデル)は、試料などの実際サイズと その物性値を含み、解析の空間は実験環境を模擬する必要がある。そのため、本研究の室内実験環 境を解析するためには大きなメモリ空間と計算時間が必要であり、今までは高速な演算が行えるス パコンなどを必要とした。

本研究で開発した4分木法を適用したMR-FDTD法により、広い実験空間の地中レーダ解析が可能 となった。この様な巨大な実験空間の地中レーダ実験を電磁界解析した例は極めて少ないと考える。

### 3. 成果の外部への発表及び活動

研究開始から終了までの全期間を通じた、論文投稿(国内/国外)、学会発表(国内/国際)、それ ぞれ個別の表として以下に記載した。

研究論文投稿 (海外)	_
研究論文投稿 (国内)	[1] Kei Asahi, Takuji Arima, Akihisa Uematsu, Toshiyuki Nishibori, "Space-time Adaptive Processing Concept for Calculation Speed Improvement In MR/FDTD Method", IEICE Communications Express, 2020. (投稿中)
学会発表 (海外)	<ul> <li>[1] Takuji Arima, Toshiyuki Nishibori, Akihisa Uematsu, and Toru Uno, "An Efficient FDTD Method Modeling Technique for Multi Angle Bi-Static Rader Using Equivalent Currents", Proc. The 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2018), 2018. 10.</li> <li>[2] Takuji Arima, Toshiyuki Nishibori, Akihisa Uematsu, and Toru Uno, "Multiple-Region FDTD Method for Multi-Angle Bi-Static Ground Penetrating Radar", Proc. 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting, 2019. 7.</li> <li>[3] Uematsu, A., T. Nishibori and T. Arima, Detection and identification of buried target objects based on multi-angle bistatic ground penetrating radar experiment with synthetic aperture radar technique, Proc. SPIE Remote Sensing 2019, Strasbourg, 2019.</li> </ul>
学会発表 (国内)	[1] 朝日 慧, 宇野 亨, 有馬卓司, 西堀俊幸, 植松明久, "四分木分割 を用いたMR/FDTD法の高速化手法", 2020年電子情報通信学会総合大会 講演集, B-1-63, 2020.3.

#### 4. まとめ、今後の予定

平成29年度秋から令和元年末にかけ、地中レーダの基礎的研究として「マルチアングル3次元ホログラフィックGB-SARによる不均質媒質内埋設物の高分解能な立体形状推定に関する研究」に取り組んだ。昨年度まではJAXA所有のフルポーラリメトリックレーダ散乱計(2次元走査型)に2偏波の送信が可能な2次元アンテナ垂直走査機構を設置する工事とアンテナの設置高の変更を完了させるとともに、試料回転台を床面に設置し、これらの制御装置の追加を行って、実験設備のテスト、レーダ偏波校正作業を完了させた。

その研究と並行して、3次元電磁界解析(FDTD法)を用いて、実験環境を含む多層媒質からの散乱波によるレーダAスコープとレーダBスコープデータを予測するソフトウェアを農工大で開発し、JAXAのレーダ散乱計で取得した多層誘電体板の散乱波との比較と数学モデルの合わせこみを行った。また、散乱波を予測するプログラムは今後のモデルの複雑化を見越して高速演算が可能なMulti-Region法によるFDTDを開発し、JAXA側での実験に合わせた数学モデルの開発を行って、埋設物に形状に起因する散乱波の観測波形の特徴を示した。また、JAXA側では逆フレネル変換を含む2次元合成開口による地中レーダ処理ソフトの開発検証と従来のFDTD法でレーダ散乱波を予測してクロスチェックを行った。確認では多層誘電体板のモデルを使った実験と実験デバイスやレーダ装置の数学モデルの合わせこみを行った。

以上の準備を本年度に完了させ、年度末にかけて、大型の樹脂製水槽全体に砂や砂利を満たし、その中 にコーナリフレクタと誘電体ブロックを埋め込んで本地中レーダ実験設備を用いて埋設物イメージング実 験を行った。 実験用は媒質の上に多層媒質ファントム(平成30年開発)を重ねて載せ、伝搬損失が大きい状態や不均 質な媒質を模擬した環境で地中レーダ画像の影響を確認した。

広帯域アンテナから放射される電磁界の予測を確実に行うため、パルスの送信と受信波形の取得し、予 測結果との対比を行って送受信用広帯域アンテナの数学モデルの修正を行った。モデルの修正を繰り返し た結果、予測精度が向上し、広帯域アンテナのモデリングが完了した。

再委託先の農工大ではJAXAでの実験を見据え、実際の実験状況を考慮したシミュレーション手法の開発 および数学モデルの作成を行った。アンテナは実際に用いられるアンテナをコンピュータ上で再現し、そ の特性のシミュレーションを行った。また、地中レーダの特徴を効率よくシミュレーションできるMR-FDTD 法の開発を行った。さらに、これらシミュレーションは非常に多くの計算時間がかかるが高速化する手法 を示した。高速化手法としては、アンテナそのものを等価電磁流として置き換える手法と、解析領域をア ンテナとターゲットの2種類に分ける方法で、それぞれの手法の有効性を示すことができた。また、本研究 の対象としている多層構造誘電体のモデル化についても検討を行った。その結果、多層誘電体モデルを妥 当にモデル化できることがわかった。最後に実際に作成した数学モデルによって、AスコープおよびBスコ ープの取得を行った。Bスコープについては、農工大の暗室内で実際に用いられるアンテナを用いた実験を 行った。実験でのターゲットは銅板とし、ネットワークアナライザのタイムドメイン機能を用いて、Bスコ ープの取得を行った。その結果、数学モデルを用いたものは実験結果とよく一致することがわかった。最 後に開発した数学モデルを用いてAスコープの解析を行い妥当な結果が得られることがわかった。

以下に本研究で得られた研究成果を挙げる。

- ✓ 逆フレネル変換を取り込んだ2次元合成開口型の地中レーダを用いて面的な地中レーダ観測を行う ことで地下の埋設物の形状情報が良く把握できることが分かった。本地中レーダ実験設備では機械 的にアンテナを平面走査して合成開口を実現しているため測定時間を要しているが、アンテナビー ムの電子走査と組み合わせる方法で本方式を実現できれば従来に無い地中レーダシステムが開発出 来る.この方式を取り込むことで、従来は側線上にしか観測を行わない地中レーダ画像からの埋設 物の形状確認が画期的に改善されると考える。
- ✓ 合成開口レーダの空間分解能以下となる媒質の分布や形状に関しては一様と見なされ、シミュレーションに用いる数学モデルに取り込まなくても予測誤差は少ない。空間分解能から無視出来ない媒質の層構造のみ考慮すれば良いと考えられる。
- ✓ 地中レーダ実験システムの偏波校正や装置校正は画像化影響を大きく与えない。よって、地下埋設物の画像化が主目的であれば、校正無しで問題ない。

平成31年度(令和元年度)の年度末は新型コロナウィルス対策の影響を受けて地中レーダ実験が出来な くなった。この影響で、当初予定していたアンテナ垂直走査機構を使った側方からの合成開口による埋設 物のレーダ画像の取得や側方散乱特性を使った埋設物の画像化をまとめることが出来なくなった。今後は 評価会まで自主的に実験を続け、研究成果外ではあるが付録的に結果を示す予定である。

本研究得られた知見を元に以下の研究提案を企画中である。

- 1. 地下埋設物の形状把握に特化した合成開口地下レーダによる観測側線に関する研究
- 2. 電子走査型アンテナによる2次元合成開口地中レーダの研究

本研究の取り組みにより得られた知見をまとめるためにも、今後も地中レーダ実験設備での実験を補う 実験と解析を行い、評価会で参考公表する予定である。