

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（1年目の研究対象）】

①研究代表者		氏名（ふりがな）		所属		役職	
		木寺 正平		電気通信大学 情報理工学研究科		准教授	
②研究 テーマ	名称	マイクロ波レーダとトモグラフィの融合による複素誘電率定量イメージングを用いた空洞・鉄筋腐食識別についての技術研究開発					
	政策 テーマ	[主テーマ] 【領域8】道路資産の保全		公募	タイプII		
		[副テーマ] 【領域7】防災・災害復旧対策		タイプ			
③研究経費（単位：万円）		令和3年度	令和4年度	令和5年度	総合計		
※R3は受託額、R4以降は計画額を記入。端数切捨。		1,069	1,040		2,109		
④研究者氏名（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）							
氏名				所属・役職			
木寺 正平				電気通信大学 情報理工学研究科・准教授			
⑤研究の目的・目標（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）							
<p>本委託研究は、マイクロ波複素誘電率イメージング法と多偏波データ深層学習を統合することにより、コンクリート内部に存在する空洞や鉄筋腐食の探知・識別法を構築し、道路及びトンネル内部での非破壊検査における実用化を目的とする。令和2年度では、レーダとトモグラフィ方式を融合させることで、非破壊検査においてコンクリート内部に存在する空洞や鉄筋腐食の誘電率及びそれらの空間的分布を高精度に推定する手法を検討した。令和3年度では、同課題の実用化をさらに加速させるため、3次元問題CSI法の導入、深層学習を用いた実験データキャリブレーション法、多偏波データによる深層学習による物体識別などを検討する。実際のコンクリート床板を想定した数値計算モデル、供試体での実機実験データ、または実際の道路・トンネルにおける実散乱データに基づき、本手法の評価を行う。</p>							

⑥これまでの研究経過

(研究の進捗状況について、これまでの研究目標の達成状況とその根拠(データ等)を必要に応じて図表等を用いながら具体的に記入。また、研究の目的・目標からみた研究計画、実施方法、体制の妥当性についても記入。)

① レーダとトモグラフィ統合による複素誘電率分布の画像化法の開発

【A】RPM法とCSI法の統合アルゴリズムの改良

本課題では、まずRPM(Range Points Migration)法に基づくレーダ画像化法とトモグラフィ法(CSI(Contrast Source Inversion)法)を融合するために、RPM法によるROI(Region of Interest)制限と複素誘電率の同時推定アルゴリズムの完成度を高める手法を検討した。

前年度までの検討では、RPM法により関心領域を事前推定して絞り込むことで、CSIの未知数を大幅に減らすことに成功した。しかし同手法のROIの推定精度はまだ不十分であり、所望の複素誘電率推定精度を達成することができていない。

同問題を解決するため本年度では、RPM法によるROI選択基準とコスト関数の収束速度に着目したROI更新法を新たに導入する。図1及び2に、本手法の概念図を示す。まずRPM法による得られた点群画像から、ガウスカネル関数を用いて連続的な強度分布を有する画像 $I(x, y)$ に変換する。同画像に対して、設定閾値を上回る領域をROIとして選択する。提案法では、正しいROIが与えられる場合に、CSIのコスト関数の収束が早いことに着目する。 χ を固定したCSIにおける、一定更新回数後のコスト関数を各閾値で評価し、同コスト関数が最小となる閾値、すなわちROIを決定する。上記より得られたROIを用いて再度CSIを適用し、目標の複素誘電率分布を得る。

数値計算による原理検証を示す。FDTD法により受信電界を作成する。雑音は考慮しない。背景媒質はコンクリート(比誘電率7.00, 導電率0.001 S/m)であると仮定する。27個の送受信アンテナを30mm間隔で配置する。送信信号の中心周波数は2.45 GHzであり、帯域幅は2.7 GHzとする。図3に黒錆付近の比誘電率分布の再構成結果を示す。同

結果からROIの更新精度及び誘電率の推定精度を大きく改善が確認することがわかる。従来の技術はCSI法における初期誘電率値に依存していたが、本手法は同推定値を用いていないため、より一般的な前提条件の下での適用を可能にする。これは実用上において非常に重要な性質であり、従来法の問題点を本質的に改善することができている。

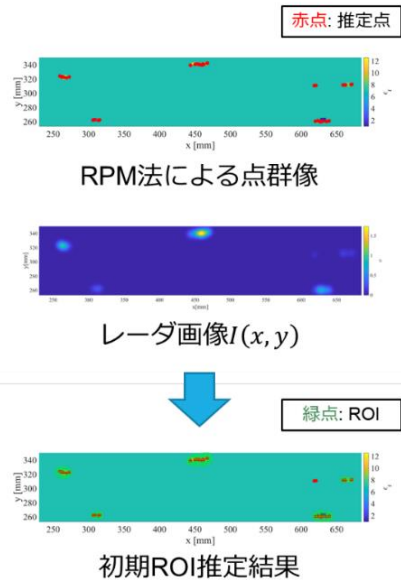


図1：レーダ画像によるROI制約

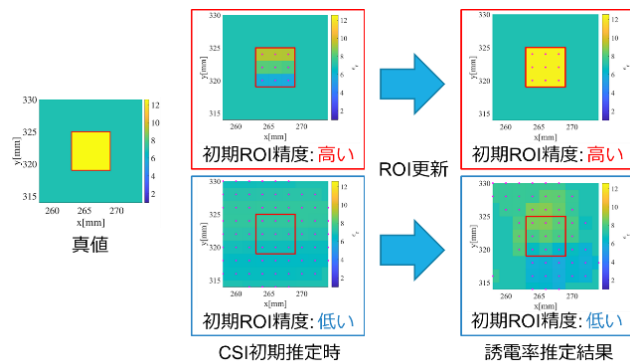


図2：ROI精度と誘電率再構成精度

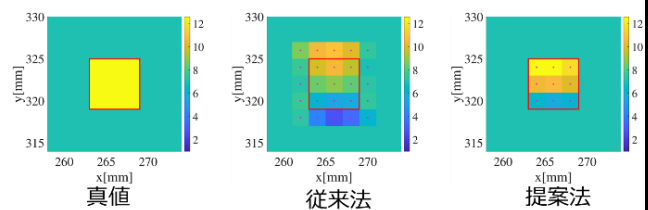


図3：従来法と提案法によるROI及び誘電率再構成結果

[B] 3次元CSI法の拡張

前年度までのCSI法は2次元問題のみを扱っているため、実環境で適用するためには、3次元問題への拡張が必要となっている。CSI法では、ROI内の全てのセルにおいて全電界成分を変数として割り当てるため、未知数が爆発的に増大し、かつ観測方向が限られる非破壊モデルでは極めて劣悪な不良設定問題を解く必要がある。本課題では、周波数領域でのゼロパディング補完による未知数削減法を適用する。

CSI法は積分方程式核である全電界成分を最適化により求めるため、計算負荷の高い順問題解析法の繰り返しが不要である。一方でROIの全てのセルの全電界を求める必要があるため、未知数及びデータ処理量が膨大となる。

上記の問題を解決するため、空間周波数領域でのゼロパディングによる補間法を提案する。フーリエ変換を利用すると、全電界成分の空間分布を再現するためには、波長の半分以内で空間的にデータを標本すれば良い。このため、セルサイズを誘電率と波長で設定される上限まで設定し、空間的なデータをサンプルする。同全電界データを $E^T(x, y, z; \Delta S_{sparse})$ と定義する。同データに対して、 (x, y, z) 空間に対して3次元フーリエ変換を適用し、 $E^T(k_x, k_y, k_z; \Delta S_{sparse})$ を得る。その後、 (k_x, k_y, k_z) 空間において高い空間周波数にゼロパディングを実施し、逆3次元フーリエ変換により、密にサンプルされた散乱電界 $E^T(x, y, z; \Delta S_{dense})$ を得る。CSI法におけるデータ方程式及び状態方程式の積分の評価では、密にサンプルされた全電界データを利用することで積分計算の精度を保持させるとともに、未知数を大幅に減らす(図4)。

3次元FDTD法による数値計算結果を示す。予備実験と同様のモデルを仮定し、300mm直径の円柱型コンクリート内部に50mmの直径の円柱空洞を持つモデルを仮定する。誘電特性は、外部誘電体をコンクリート(比誘電率: 7.00)、内部空洞は真空をそれぞれモデル化したものとする。3次元FDTD法によって受信電界を作成し、雑音は考慮しない。セルサイズを2mmとする。背景媒質は真空と仮定する。送信信号の中心周波数は2.45GHzであり、帯域幅は2.7GHzとする。コンクリート媒質内の中心波長は約124mmである。図5に、提案法による全電界データ補間の結果を示す。同データより、 $\Delta S_{sparse} = 8\text{mm}$ でも2mmの全電界データをある程度再現できていることがわかる。未知数は1/64に削減することが可能であるため、大規模かつ3次元解析には必須の技術である。上記の検討は、数m四方の領域を効率的に解析するために未知数及びメモリを飛躍的に削減するために必須の検討であり、今後はCSI法による3次元問題での誘電率再構成を検証する。

原理:

空間周波数領域でのゼロパディングによる補間法

1. 波長の半分以内で空間的にデータを標本
2. 同データに対して3次元フーリエ変換
3. 高い空間周波数にゼロパディング
(実空間上のSinc関数による内挿補間に相当)
4. 逆3次元フーリエ変換
→FFT, IFFTにより高速かつ高精度に全電界分布を補間可能

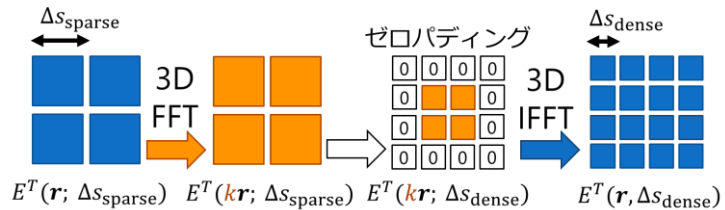


図4: 3D-CSIのための全電界分布補間法の原理

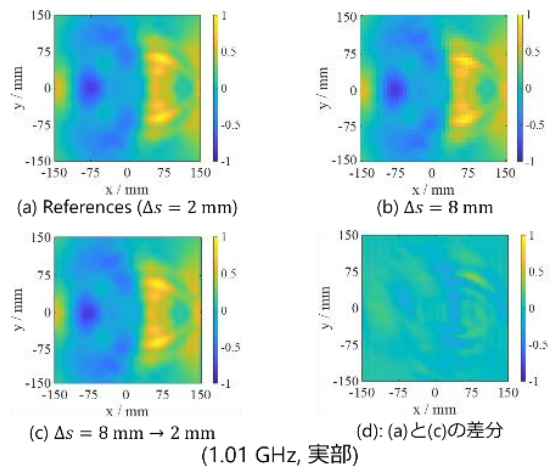


図5: 全電界成分の補完結果

② 多層構造背景媒質を想定した高精度レーダ画像法と誘電率分布推定法の確立

前年度までは、単一層での背景媒質を想定していたが、実際の道路においてはアスファルトと床板等の複数の層からなる媒質の中の空洞・腐食等を識別する必要がある。どう識別を実現するため、まず多層構造の背景媒質の各厚み及び複素誘電率を同時に推定する手法を導入する。

本課題では多層構造モデルを想定したCSI(Contrast source inversion)法を導入する。同手法ではCSI法のコスト関数を用いて各層の誘電率を推定し、かつ同誘電率値を用いて内部に存在する異物の誘電率も推定する。

非破壊モデルにおけるCSI法の問題点に対し、コンクリート内部構造を多層構造と仮定したCSI法を提案する。提案法では、CSI法のコスト関数を各誘電率の組合せで評価し、最小となる組合せを抽出する。提案法ではまず、コンクリート内部を図6のように均質な誘電特性を有する多層構造を仮定し、未知数を大幅に削減する。次に最適化された背景媒質の誘電率を用いて、全領域にセルを割り当てCSI法により誘電率および導電率の空間分布を推定

FDTDを用いた数値計算に基づく性能評価を示す。図7に示す素子配置およびモデル構造を用いる。FDTD法により受信電界を作成し、雑音は考慮しない。背景媒質は真空とする。送信信号は中心周波数0.50 GHz、帯域幅0.40 GHzとする。図7に従来CSI法と提案法の比較を示す。従来CSI法では、未知数が多大であるために各層の誘電率が高い精度で推定できず、異物以外の部分に応答が出ている。一方提案法では初期段階で3層の誘電率を推定しているため、凡そ各層で適切な誘電率が推定できており、かつ異物付近の誘電率もある程度の精度を保持していることがわかる。同手法は3次元問題にも拡張可能であり、実験データにでも適用予定である。

また本課題では、上記のCSI法の副次的結果としてROIの全てのセルにおいて全電界成分が得られることから、同情報を利用して従来のレーダ画像を高精度化する検討も実施した(トモグラフィからレーダへの処理)。図8に従来DASとCSI法によるグリーン関数推定を導入したDASを示す。従来レーダ画像化においては、伝搬モデルにおいて均質媒質を仮定しているため、各層の多重散乱波が虚像として生成されることがわかる。一方、提案法においては、CSI法の推定において、背景媒質における多重散乱波の影響を考慮したグリーン関数を推定できることから、同情報を用いて異物の箇所だけにレーダ画像をフォーカスできることがわかる。同レーダ手法は、トモグラフィ処理を積極的に利用した手法であり、世界的に見ても例のない重要な成果である。特に多重散乱波の虚像を抑圧できるという点は、床板・アスファルトモデルにおいて非常に重要な性質である。

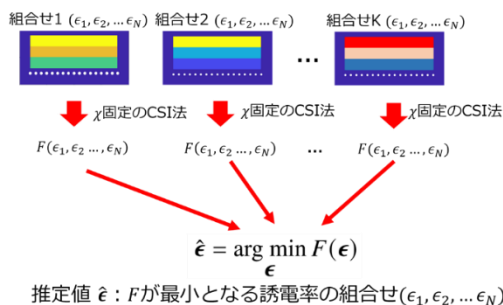


図6：多層構造媒質におけるCSIのコスト関数を用いた誘電率推定原理

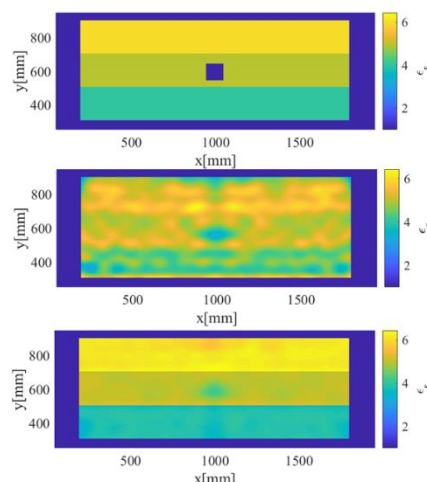


図7：従来CSIと提案CSIの比較(上：真値、中段：従来CSI、下段：提案CSI)

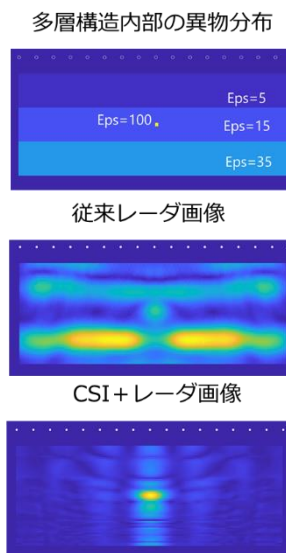


図8：CSIを用いたレーダ画像の改善

③多偏波ングネチャの深層学習による異物識別法の開発

多偏波データから複素誘電率の情報を、深層学習を用いて抽出する方法を多偏波データの深層学習モデルに拡張させる。同深層学習と①の課題との統合に向けて、理論的な検討を実施する。具体的には、多偏波データによる深層学習により推定された誘電率・導電率をトモグラフィ方式における複素誘電率値の初期値として設定し、機械学習での推定結果において電磁界散乱問題からのフィードバックを与えることで、データ依存性を解消させ、より高い信頼度の識別を実現させる。内部に空洞や鉄筋が存在する小型コンクリート試供体を用いた実験において、多偏波データを取得し、空洞等の誘電率推定について定量的な検証を実施する。

後述する④のヒアリングを踏まえて、本研究ではまず実験データを適切な信号処理を用いて、不要波を抑圧した後、特にアスファルトと床板の間で生じる信号の変動を検出するアルゴリズム（機械無し学習）を導入する。

具体的には、図9に示す神奈川県清水橋においてひび割れ状態を含む各領域の道路上面でGSSI社のストラクチャスキャンと呼ばれるレーダ装置でBSCANデータを取得した。

異常検出のためにまず、各レーダ位置で取得された信号を周波数領域に変換し、特徴的な周波数における複素信号をガウス平面内で散布図として表現する。異常箇所は正常箇所と比べてサンプル数が少ないという仮定の下、同

2次元散布図から各サンプル点のマハラノビス距離（多次元の主成分を考慮した距離）を基準に、X-Y平面にマッピングを実施した。同マッピング結果と目で確認できるひび割れ（道路表面）の関係を図10に示す。同図より、ひび割れ位置とマハラノビス距離が大きい応答の位置が一致することがわかる。これは、正常データに対して、ひび割れ位置のデータが異常なデータを示すことに起因する。

また、ひび割れは道路表面であるが、事前の信号処理により、表面からの反射波はほぼ完全に抑圧されている。また鉄筋の応答も抑圧されている。

このため信号にはアスファルト内のクラック・異物と床板からの反射のみがあるため、同異常値は表面ひび割れが原因ではなく、アスファルト内部または床板の状態を反映していると判断できる。ひび割れ位置が確認できない場所でもMDが大きい個所があり、これは内部で床板の状態が変動している可能性が高いと考えられる。

同手法は単純にレーダデータを識別したのみであるが、極めて簡単にかつ教師データを用いずに判断できるため、異常個所の自動判別アルゴリズムとしては有用であると考えられる。

今後は、誘電率情報などを組み入れることで、特に床板表面位置の水や空洞の状況などをより正確に識別できるような手法を構築する

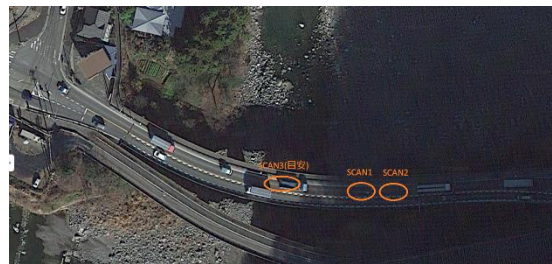


図9：神奈川県清水橋における解析範囲

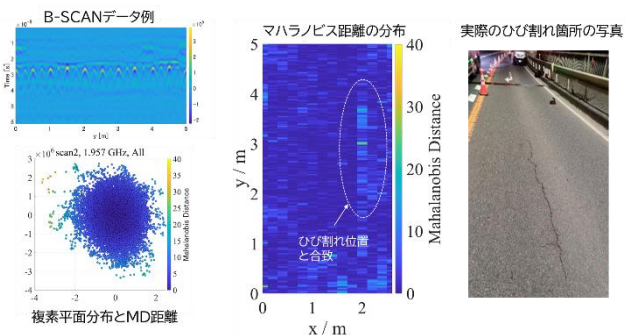


図10：ひび割れ部分を含むSCANデータとマハラノビス距離による異常検出

③ 情報収集

本委託研究を遂行するにあたり必要な情報の収集、整理を実施した。特に道路管理者や維持管理技術者へのヒアリングを通して、現場のニーズを把握し、提案技術の優位性が顕著となる適用例を確認する。また現場で必要とされる仕様（適用条件、機器の大きさ、接触or非接触計測、画像化領域、分解能、計測時間、精度等）を明確にし、他の既存技術の差異を明確にする。

2021年12月13日に関東地整道路部、関東道路メンテナンスセンター、横浜国道事務所、東京国道事務所、高崎河川国道事務所等の各地域の橋梁点検者及び補修判断を実施する事務所の各担当者を交えて、上記のヒアリングを実施した。

上記のヒアリングにおいて、現在の橋梁道路の点検においては、国土交通省が策定している点検要領に従って実施しており、道路表面と裏面の部分を目視でひび割れや、石灰融解による突起物を見ることにより、補修の判断としている。クラックに関しては幅が0.2mm程度のものから検査対象となり、最初は一方向にクラックが入るが、劣化が進むと多方向にクラックが入る。また床板とアスファルトの境界面に空洞ができ、水がたまるようになると土砂化により、道路がわずかに陥没していく状況が起きる。現時点では、事後保全として電磁波（レーダ）を用いた内部の詳細調査が実施されているが、コストや時間の問題から事前保全としては活用されていない。今後レーダ装置の低コスト化、または非接触計測等により大規模な領域をスピーディーに検査することで、コストパフォーマンスを上げることができれば、事前保全としての導入の可能性もあると思われる。

レーダでの探査においては、受信される信号応答が舗装内部、舗装と床板の境界面、また鉄筋の応答かの識別が難しいとの指摘があったが、信号処理や特徴抽出及び機械学習により、上記も問題はある程度解決できると思われる。また機械学習などにより異常個所をある程度特定することで、その領域に絞り込んだ、詳細調査（打音調査）ができるため、作業効率が向上する可能性がある。更にレーダデータなどから、時系列変動を予測することができれば、将来的な点検の参考となる。等のコメントがあった。

上記のヒアリングより、現時点で電磁波探査で求められている仕様は、コスト的な問題が解消できれば、内部の応答に基づく異常個所の検出が最も優先度が高いと判断できる。ただし、より定量的かつ信頼性の高い識別手段としては、複素誘電率分布は有効であり、将来的な技術としては研究を進めていくべきだと判断する。

⑦特記事項

(研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の見通しや進捗についての自己評価も記入。)

課題①： 本課題では、RPM法の画像から、ROIに変換する方法において従来の問題点（初期誘電率推定値に大きく依存）を本質的に解決する手法を提案し、従来よりもROIを高精度に推定し、その結果さらに誘電率推定値を改善させる手法を考案し、同効果を数値計算により示した。これは基礎的な検討であるが、実験データにも直ちに適用できる手法であるため、取得した実験データを用いて定量評価を実施する予定である。同手法に基づいた論文をIEEEのジャーナルに投稿済みである。

課題②： 多層構造モデルは、アスファルト床板などのモデルに相当し、同モデルにおける高精度なレーダ画像化法を構築することはこれまで極めて困難であった。その要因は、各位置における伝搬モデルグリーン関数を解析的に求めることが困難であり、また数値的に求めることもFDTD法などの高精度な順問題解析ソルバーが必要となり、非現実的であった。本課題では、CSIによる複素誘電率に加えて各セル位置での全電界成分が抽出できることに着目し、同電界成分からグリーン関数を導出することに成功した。同グリーン関数を用いることで、任意の背景媒質（多層構造、不均質）においても正確な伝搬モデルをFDTD法等の順問題ソルバーを使わずに推定できる。同手法は、特にアスファルトと床板の二層構造における背景媒質において内部の異物の形状・位置を従来よりも飛躍的に正確に抽出できることが可能となり、実用上において重要な進展と言える。同手法・成果に基づく論文をIEEEのジャーナルに投稿予定である。

課題③： 実道路環境において、 $2.5\text{m} \times 15\text{m}$ という広い範囲をレーダデータで正確なジオメトリで計測したのは、大きな進展であるといえる。また同データから異常検出をするために、教師なし学習の一つであるマハラノビス距離を用いた外れ値検出を導入し、ひび割れ位置との高い相関を得た。重要な点は、同データは表面ではなく、内部の応答から抽出されたものであり、目視では確認できない内部構造の異常（ひび割れによる空洞、雨水の停留）を定量的に示す方法として、より実用的かつユーザニーズにこたえることができる手法であると評価する。

研究の見通し及び・自己評価：

3次元モデルにおいてのトモグラフィ方式においては計算時間等の問題により、詳細な解析は完了できていないが、深層学習との統合により解決可能性があると考え。また、多層構造モデルにおいては、グリーン関数を用いた新たな画像化手法を発見し、大きな学術的進展が得られたと考える。また実道路での異常検出に関しても、妥当性が確認できたため、本課題の遂行において概ね順調に進展していると考え。今後は、トモグラフィ方式の実現のために導入した計算機サーバを最大限活用して、実道路の床板表面の異物を検出できるように引き続き検討を継続する。