

## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発

## 【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属		役職
	木寺 正平 (きでら しょうへい)	電気通信大学 大学院情報理工学研究科		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 [副テーマ]【領域7】防災・災害復旧対策	分科会/ 公募タイプ	タイプII/ ソフト分野
③研究経費 (単位:万円)	令和2年度	令和3年度	令和4年度	総合計
	810万円 <small>※端数切り捨て。実際の研究期間に応じて記入欄を合わせる こと</small>	1069万円	979万円	2858万円
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。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 (※令和5年3月31日現在)			
工藤 高裕	富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術 研究センター センシング技術研究部・主査 (定年退職前)			
仲村 慎吾	富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術 研究センター センシング技術研究部・研究員			
⑤研究の目的・目標	(提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<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レーダデータの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。特に 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複素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構築する。またレーダデータの深層学習に基づく異常識別法を構築し、特に舗装と床板間の空洞、滞水等の異常状態を迅速に識別できる処理技術を構築する。上記手法の有効性を実際のコンクリート床板を想定した数値計算モデル及び、既存の2GHz帯超広帯域レーダを用いて道路供試体及び実道路における観測データを用いて評価する。</p>				

## ⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

(研究の進捗や目的の達成状況、各研究者の役割・責任分担、本研究への貢献等(外注を実施している場合は、その役割等も含めて)について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記入下さい。)

### 研究の目的

道路や橋梁等を対象とした、従来のマイクロ波探査では、レーダ方式が主流である。同方式では、コンクリート(背景媒質)に対して、空洞や鉄筋、そのほかの異物の複素誘電率が有意に異なることを用いて、対象からの反射波から目標の位置やサイズ等を計測する方法である。同技術は位置・形状をある程度予測はできるが、複素誘電率の情報を抽出できないため、同レーダ画像から空洞、鉄筋腐食等の物性識別をすることが極めて難しい。一方、コンクリート、空洞・水・鉄筋錆等の各目標は特徴的な複素誘電率値を有することがわかっている。このため、複素誘電率分布を高精度に再構成することで、同技術における識別性能が格段に向上すると予測する。複素誘電率イメージングを実現する方法としてトモグラフィ法がある。しかし、既存のトモグラフィ法では、観測方向が制限される非破壊検査モデルにおいて、不良設定性が顕著となり、十分な精度が得られないことがわかっている。

上記の問題を解決するため、本課題では、独自のレーダ方式(RPM: Range Points Migration法)と、最新のトモグラフィ法を有機的に統合する技術基盤を構築する。具体的には、レーダ(RPM)画像から目標(空洞・他の異物)が存在する関心領域(ROI: Region of Interest)をターゲット近傍に絞り込むことで飛躍的に未知数を減らし、かつROI領域も逐次更新させることで、極めて劣悪な逆問題において、高精度形状推定(10mm以内)と複素誘電率推定(相対誤差10%以内)の両方を実現させる。また多偏波データ等の統合により、多元的な画像情報を提示し、埋設物の物性識別精度を飛躍的に高めることを目的とする。以下に各課題の進捗及び達成状況について述べる。

### 進捗及び目的の達成状況

上記の目的を達成するため、本研究では、マイクロ波によるコンクリート内部画像化に関する課題において、「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】及び【多層構造背景媒質を想定した高精度レーダ画像法】の統合」、 「②深層学習による異物識別法の開発」「③情報収集」を実施した。以下にその詳細を示す。

「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】及び【多層構造背景媒質を想定した高精度レーダ画像法】の統合」:

同課題では、まずRPM法に基づくROI制約を従来のトモグラフィ方式(CSI法)に導入することで、未知数を大幅に減らすことが可能となり、道路内部の空洞や水の領域における複素誘電率推定精度を大幅に改善させた。これは、精緻な数値解析法(FDTD法)及び道路試供体を用いた実機レーダ装置で取得された実験データにより検証済みであり、従来技術では困難であった複素誘電率推定を既存のハードウェアを用いてソフトウェアの力のみで実現させることが可能となった。

一方で上記の複素誘電率推定精度はROIすなわちレーダ画像化精度に大きく依存する。アスファルトや床板は誘電特性が若干異なるため、同差異による虚像がレーダ画像の精度に大きく影響する。これを解決するため本課題では、多層構造媒質中におけるレーダ画像の精度を、トモグラフィを用いたグリーン関数推定等により、レーダ画像の推定精度を大幅に改善させることに成功した(トモグラフィ⇒レーダ)。

更に、同レーダ画像を用いてトモグラフィ法におけるROI制約を入れることで、対象の内部の複素誘電率の再構成精度を改善させた。更に実試供体モデルにおいて、同手法を適用した。特に収束を速めるために、CSIコスト関数に基づく初期値推定

と、実データからコンクリートの誘電率を求めるアルゴリズムを導入し、同試供体モデルにおいて、レーダ画像によって位置・形状推定誤差を 30mm 以内に抑え、また R O I 制約に基づく C S I 法を適用することで滞水エリアに対して、20%以内での複素誘電率推定精度を実現できることを示した。

また上記の課題は、研究責任者が主体として実施し、共同研究者（富士電機 工藤、仲村、2021 年度末まで実施）は、試供体における実験データの取得及びデータ解析に従事した。

#### 「②深層学習による異物識別法の開発」

本課題では、レーダデータから直接的にアスファルトと床板境界領域における異常箇所を識別させるため、教師なし深層学習等を用いた識別法を導入した。同課題については、まずは異常応答識別のために、伝達関数に基づく鉄筋応答抑圧法を導入した。従来の窓関数法の場合、鉄筋付近の異常応答を除去してしまい、また浅い領域での消え残りがあったが、本手法では上記の問題を解決できる。同抑圧法を適用することで、非常に強い鉄筋応答を除去して異常識別が可能となることで、床板及びアスファルトの境界領域の異常検出の精度を格段に向上させることができる。

同レーダデータに対しては、マハラノビス距離、時間周波数解析、畳み込みオートエンコーダや非線形異常識別の一種である DBSCAN 等の各種の異常検出法を適用し、その有効性を実際の点検・補修が必要な道路において評価した。

また、正常領域のデータを用いた相関係数等の導入により、準教師あり学習を導入することが可能となった。神奈川県清水橋、花水橋、茨城県新利根川橋における各種の実道路におけるデータ解析により、道路亀裂に起因する内部の異常識別ができることを示した。特に遊離石灰箇所が判明している新利根川橋における解析では、同箇所の異常識別のみならず、他の場所の異常があることを示唆し、内部構造の異常識別として有用であることを示した。更に鉄筋応答抑圧の際に付随的に得られる鉄筋応答を用いて、鉄筋に関する異常識別法の基礎検討を示し、床板とアスファルト、及び鉄筋を分離した上での異常識別が実現できる可能性を示唆した。

上記の手法は、計算コストが極めて小さく、ハードウェアの改変を必要としないことから、直ちに現場でも活用できる手法である。今後はより確度の高い、定量的な異常識別を実施するため①で提案した複素誘電率推定法を異常箇所に適用することが考えられる。また上記の課題は、研究責任者及び統括する研究室の博士前期課程学生らを主体として実施された。

#### ③ 情報収集

2021 年度から 2022 年度にかけて、主に関東地整道路部や、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、情報収集を実施した。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 0.2 mm 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。これらは将来的な鉄筋腐食や土砂化による道路沈下等の要因となるため、この床板と舗装境界の異常を定量的かつ迅速に識別できることが最も重要な課題である点が共有された。

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。

## ⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

(中間・FS評価における指摘事項を記載するとともに、その対応状況を簡潔に記入下さい。)

FS評価においては、主に以下の事項の指摘があった。

- ・鉄筋腐食等の箇所を特定する原理的な技術の開発は概ね順調に進んでいる。
- ・技術の適用対象とする構造物や部材のイメージが明確でなく、また、どのような内部欠陥等を検出するために用いるのか等、目標設定が明確でない部分がある。
- ・現場への導入を見据え実証実験を行う等、実用化に向けた課題抽出が期待される。
- ・現場の問題点の抽出とその解決策を明確にする必要がある研究開発は順調に進んでいるが、実現場での適用方法・判定基準等を含めた実用化に向けた研究開発を進める必要があることから、指摘事項に留意しながら現行の通り推進することが妥当であると評価する。
- ・3次元問題CSI 法や多偏波データによる深層学習による物体識別などの精度の現状を踏まえて、今後の研究計画において精度向上の技術的可能性を踏まえた内容を示してほしい。各手法で得られる情報とその精度向上、および、各データの統合方法について論理構造を踏まえた計画とされたい。
- ・道路構造物のどの部材を対象として実証実験等を行うのかについて、道路管理者等へのヒアリングを再度行い、研究計画を見直したうえで、次年度の研究を進めるのがよい。

これに対する対応として、まず、「技術の適用対象とする構造物や部材のイメージ」としては、上記のコメントにもある、「道路管理者である関東地整へのヒアリング」及び、土木研究所におけるCAESARとの専門家の意見から、鉄筋の腐食の要因となる、舗装と床板の間の空洞に水が溜まっているかどうかの定量的な判断が最も重要であるという意見から、腐食探知よりも床板表面の空洞・漏水探知を最優先事項として取り組んだ。

また実現場での適用方法、判定基準等、実用化に向けた取り組みとして、実際の橋梁上の道路のデータを3か所(清水橋、花水橋、新利根川橋)で実施し、実道路でのデータに対して、深層学習に基づく異常識別法を適用した。実道路では道路内部の状況(真値)を完全に把握することができないため、合わせて内部の異常が既知である実道路を模擬した試供体を用いて複素誘電率推定等を適用している。同適用結果により、レーダとトモグラフィの双方向融合によって従来では達成することが難しかった、試供体内部の水の誘電率を推定誤差10%程度かつ位置精度10mm程度で再現できることを実証しており、本技術の実用可能性を示した。同成果は、本学術分野において世界に先駆ける成果であり、また実用展開上においても、これまでレーダ画像中心であったマイクロ波モニタリング技術の優位性を大きく向上する基盤の技術となると考えている。

最終的には、新利根川橋の道路において遊離石灰箇所(補修が必要な箇所)の上面道路のデータに対して提案する複素誘電率イメージング法を適用し、内部の複素誘電率分布を正常箇所と比較しながら検証することで、実用化に向けての課題や可能性を検証することが可能となった。特に本課題で開発した手法は、既存のハードウェアで取得されたデータを用いているために、新たなハード設計等は不要であることから、実用展開への可能性は非常に高いと考える。また上記の検討の中で、鉄筋応答抑圧法を新たに提案し、これにより、個別の鉄筋応答の異常を評価できる可能性があることも示唆しており、新たな研究展開となる成果も得ることができたことは、評価できると考えている。

## ⑧研究成果

(本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

### 「本研究で得られた知見、成果」

#### 課題①：レーダとトモグラフィの双方向融合に基づく複素誘電率推定法

##### 【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。まず2020年度のFeasibility Study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2021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した。図1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、ガウスカーネル関数を用いて連続的な強度分布を有する画像に変換する。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。 $\chi$ 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。

数値計算による検証結果を以下に示す。ここで数値データはFDTD法により生成し、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)であるとし、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2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。

また、土木研究所のCAESAR(構造物メンテナ

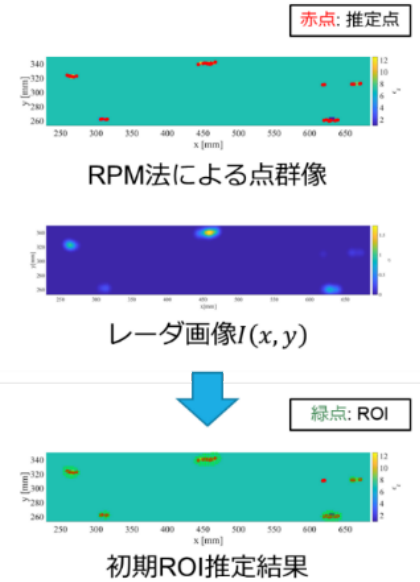


図1：レーダ画像によるROI制約

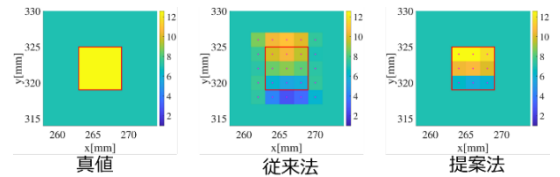


図2：ROI及び誘電率再構成結果

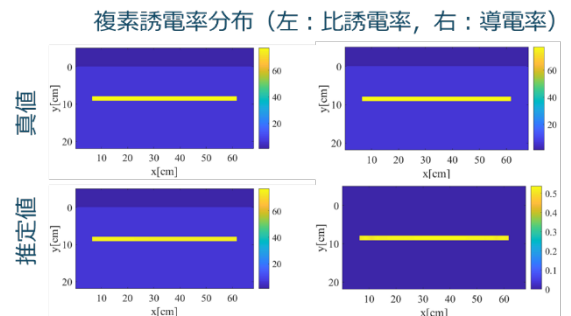
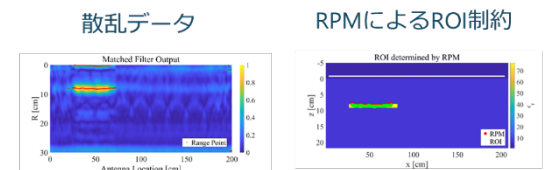


図3：上段：レーダデータとRPMによる位置推定，中段：水の複素誘電率の真値，下段：ROI制約CSIによる誘電率推定結果

ンス研究センター)の協力を得て、コンクリート試供体(アスファルト下のコンクリート床板モデル)における実機実験でのデータ取得及び解析を実施した。具体的には、図5に示すコンクリートと床板の間に空洞及び水を入れた試供体を作成し、その誘電率推定の解析を実施した。レーダ装置は既存のハードウェア(GSSI社製 SIR-EZ)であり、周波数2-3GHz帯である。厚さ80mmのアスファルトの下に200mmのコンクリート床板を配置し、その上面に10mm厚さの空洞に水を満たした領域を設けている。図3にRPMによるROI推定及びROI制約付きのCSI適用例を示す。同図から、RPM法によりターゲットの位置が正確に推定できていることが分かる。同図から、複素誘電率においても真値にほぼ近い値が推定されていることがわかる。

### 【B】CSIのための背景及び初期誘電率値法

上記に述べる同推定法においては、トモグラフィ法であるCSI法において、初期誘電率を空洞や水、それぞれにおいて文献値から経験的に適切な値を設定したことが課題としてあった。実際には同初期誘電率値をデータから推定する必要がある。また、背景誘電率においても文献値を用いていたが、最終的な誘電率再構成結果は同背景誘電率値にも依存するため、この値もデータより推定する手法が必要であった。同問題に対して、以下の課題を検討した。

- ① CSIコスト関数に基づく初期誘電率値の決定法
- ② レーダ画像の結像応答に基づく背景誘電率の決定法

各課題の詳細：①：道路内の異物は、空洞や水等さまざまであるが、その誘電率・導電率値の範囲はある範囲に収まっている(誘電率：1から100，導電率：0から10程度)。一方、従来のCSI法では、背景であるコンクリートの誘電率値(5程度)から最適化を始めるため、特にデータが少ない場合は、不良設定性により、その精度が劣化する。このため、レーダ画像で異物の領域であるROIを誓約した後に、同ROI内では複素誘電率は均質であると近似して、ROIの平均的な誘電率・導電率を求め、その値を初期値とする方法を導入する。具体的には、特定の誘電率・導電率の組合せパターンにおいて、コントラスト関数を固定したCSI法を適用し、ROI内部の全電界のみを更新することで、各組合せにおけるコスト関数を最小化して求める。実際の誘電率・導電率を与えた場合には、そのコスト関数は最小になると考えられるため、その組み合わせを用いて誘電率・導電率を決定する方法を導入した。さらにそれを初期値誘電率・導電率として、今度はコントラスト関数を変動した上でCSIコスト関数を最適化し、より詳細な誘電率・導電率分布を得た。同手法を試供体データについて適用した結果が図4である。同図より、異物があると判断されるROIにおいて、誘電率が70，導電率が1[S/m]と推定され、水の誘電率及び導電率(75,0.8[S/m])とほぼ一致した結果が得られている。これまで反射応答のみを想定していた非破壊計測モデルでは、誘電率推定精度が確保できないことが多数の文献で示されていたが、レーダによるROI制約によって、誘電率コントラストが高い、水の誘電率推定を推定できたことは特筆に値する。ただし、ROI推定精度に大きく依存するため、更なる精度改善のためには、レーダ画像の

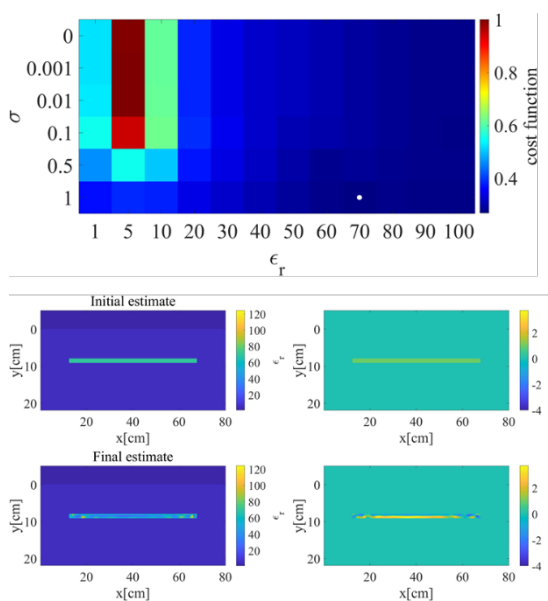


図4：誘電率初期値推定の結果(上)及最終的な誘電率・導電率推定結果(下)



推定精度の改善が必要となると考える。

各課題の詳細 ②：レーダ画像化法の一種である合成開口処理等の画像化精度は、一般に想定する背景の誘電率値に大きく依存する。また、上記の①や通常の CSI 等では、背景誘電率値が変わると最終的な誘電率推定値にも大きく変わり、正確な背景誘電率値を推定 する必要がある。従来は文献値等から求めた値を背景誘電率に設定していたため、その精度は不十分であった。また他にも誘電率値を求める方法があるが、鉄筋応答の深さが既知である等の先見情報が必要であり、その精度に依存する問題があった。本課題では、鉄筋応答のレーダ画像における結像度を評価することで、背景誘電率値を求める手法を提案した。これは、本来の背景誘電率値を用いた場合は、断面画像では、点状である鉄筋応答の本来の点の位置にエネルギーが集中し、その応答が最大になるためである。この手法は、極めてシンプルな手法で実装可能であり、また鉄筋位置や深さの先見情報が必要でない、等のメリットがある。同手法の有効性も試供体データに対する実験データを評価した。結果より、誘電率によってレーダ画像における鉄筋応答像の結像度が変動し、導入した指標が最大値となるところで最も結像度が高くなり、この評価から最適な背景誘電率値を決めることが可能となった(図5)。同手法は鉄筋の深さの情報を一切必要としないため、汎用性が高く、また個別の鉄筋応答における評価を導入することで、平均的なコンクリートの誘電率の空間分布を構成することが可能となり、簡易的な誘電率推定法としても有望である。

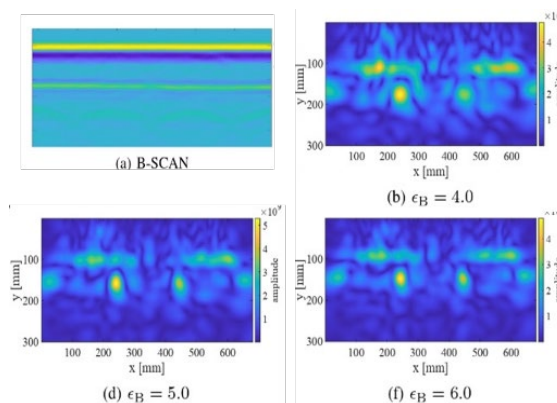


図5：レーダ画像の誘電率依存性

### 【C】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

【A】及び【B】の手法では、コンクリートが単一層であることを想定していたが、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。このため多層構造媒質中におけるレーダとトモグラフィの双方向処理に基づく複素誘電率推定法を検討した。本手法では、多層構造を想定し、CSI法の全電界成分から多層構造媒質内のグリーン関数を高精度に推定し、また不均質性に起因する不要応答を抑圧することで従来のレーダ画像を大幅に改善している。更に同レーダ画像を用いてトモグラフィ法における誘電率推定精度を高める手法を導入した。【A】では、レーダ画像を用いて事前にROIを目標近傍に絞り込み、未知数を削減することで不良設定問題を改善し、埋没目標の複素誘電率再構成精度を改善している。しかし、同手法では均質な背景媒質を仮定したレーダ画像化法を用いているため、多層構造の背景媒質では同手法の精度は劣化すると考えられる。また、領域積分方程式で用いる伝搬モデルも、多層構造の背景媒質の場合には正確な伝搬モデルを与えることは一般に困難であり、誘電率再構成精度の劣化に繋がる。本手法では、多層構造を仮定し、レーダ画像化法とCSIを統合した誘電率推定法を提案した。同手法ではまず、CSIによって最適化される全電界を用いてグリーン関数及び不要波抑圧を適用し、埋没物のレーダ画像を得る(図6)。次に、

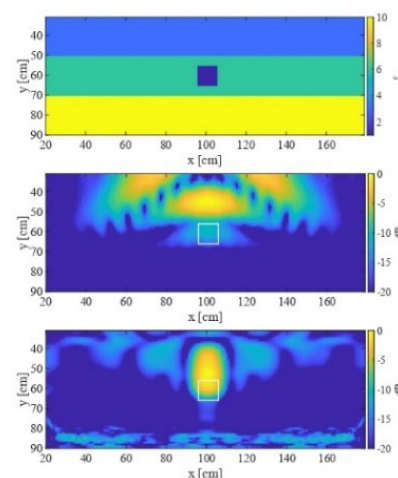


図6：真の分布(上)従来レーダ画像(中)、トモグラフィ⇒レーダ画像(下)

同レーダ画像に基づき、ROI を目標近傍に絞り込んだ上で、CSI 法を適用し、埋没目標の複素誘電率を再構成する。ここで、CSI における状態方程式で用いるグリーン関数を均質な背景媒質で定義されるハンケル関数で近似することで、計算量を大幅に削減する。また、未知数が大幅に削減されているため、ROI 制限を適用しない従来の CSI 法と比して高精度な推定が期待される。2 次元 FDTD 法に基づく数値計算を用いた性能評価によって、3 層構造媒質において、レーダ画像による ROI 制限により、従来の制限なし CSI と比して飛躍的に誘電率推定精度を改善していることがわかる。ROI をレーダ画像で推定し、グリーン関数をハンケル関数に近似とした場合、すなわち FDTD を一切用いない手法であっても、埋没物の推定精度が改善していることが分かる(図7)。上記の手法は、多層構造媒質におけるレーダとトモグラフィの双方向融合というこれまでにないアプローチであり、アスファルトと床版などの層構造を成す媒質やそのほかの不均質な媒質においても正確なレーダ画像を提供し、かつ ROI を制約することで従来では達成できなかった誘電率推定精度が得られたことを示しており、本技術の実用化に向けて重要な基盤技術が確立されたと認識する。

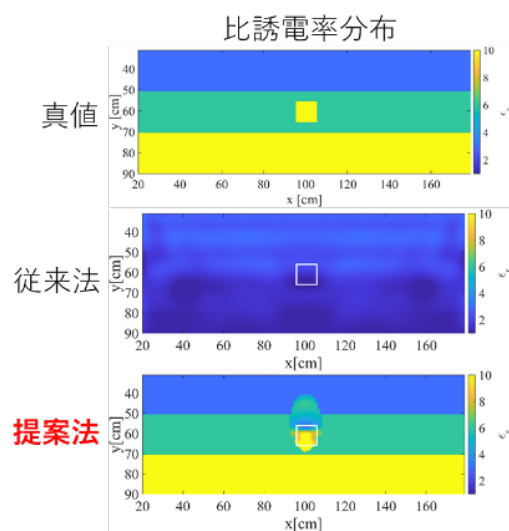


図7：従来法及び提案法（レーダ→トモグラフィ）による誘電率・導電率推定結果

## 課題② 深層学習による異物識別法の開発

上記で提案する画像解析に基づく手法では、特にトモグラフィ方式による複素誘電率推定においては大規模な領域(数十m)程度を現実的な時間(数時間)で解析することが難しい。このため、レーダデータから深層学習を用いて直接的に異常箇所を特定し、その後異常箇所についてトモグラフィ方式による複素誘電率推定法を適用することで効率的なモニタリング技術を構築する。道路管理者らとの複数回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。

2021 年度では、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視で確認できるひび割れ(道路表面)の関係を図8に示す。同図より、ひび割れ位置とマハラノ

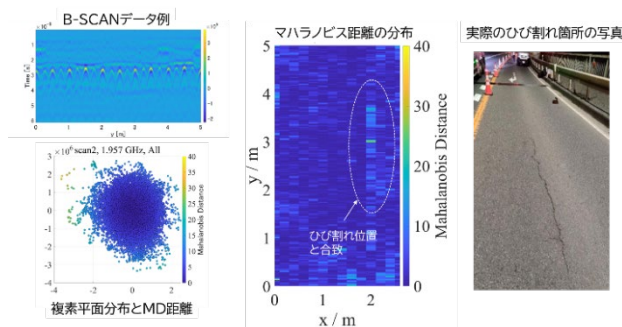


図8：ひび割れ部分を含む SCAN データとマハラノビス距離による異常検出



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。

#### 鉄筋応答抑圧法とその活用：

床版には路面と平行に格子状の鉄筋が埋め込まれている。鉄筋はコンクリートと比較して強い応答を示すため、床版上面の異常個所の応答と干渉し、誤検出の要因となる。先述の手法ではコンクリート床版中の鉄筋よりも浅い領域を検査対象としており、窓関数に基づく鉄筋抑圧フィルタを導入していた。しかしながら、実際には鉄筋よりも深い領域にも異常は存在するため、同手法による異常検出の性能は限定的である。これに対して、今年度では伝達関数推定に基づく鉄筋応答抑圧を導入した。まず、正常箇所の受信信号から鉄筋 1 本分の参照応答を抽出する。同参照鉄筋応答の伝達関数に基づく畳み込み演算により、鉄筋応答の推定と抑圧を行う。同手法により、鉄筋よりも深部にある異常応答も抽出することができる（図 9）。同手法の性能評価は、清水橋における実データを用いて評価した。同評価により、鉄筋応答が正確に抽出できることがわかり、特に鉄筋と同じ深さ付近にある異常応答をもれなく検出することができたことは特筆に値する。また、上記の鉄筋応答抽出における極大応答の極大値を空間的にマッピングした。鉄筋にさび等の劣化がある場合には導電率が有意に下がり、極大強度が低下すること、また鉄筋付近に異常な亀裂等があれば、それに起因する双曲線応答のひずみが生じ、そのひずみも同強度に反映されるため、極大応答のマッピングは、以上鉄筋応答のマッピングとして有効であることを示した（図 10）。

次に異常検出法としては、周波数応答に基づくマハラノビス距離を用いた方法、時間周波数領域における異常個所と正常箇所の相関係数を比較する方法、時間周波数データの畳み込みオートエンコーダ(CAE: Convolutional Auto Encoder)に基づく深層学習による特徴量ベクトル圧縮データを用いた方法、非線形外れ値検出の一つである DBSCAN(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)に基づく手法を適用した。特に相関係数に基づく手法では、平均化された正常箇所のデータとの相関係数を評価することで、異常個所を正確に推定する手法を構築した。最後に上記の複数の異常検出結果を統合し、最終的な異常個所の判断を実施した。神奈川県清水橋、花水橋、茨城県新利根川橋の実橋梁道路に対する実機実験データを用いて、各手法の定量評価を実施した。特に新利根川橋では、同

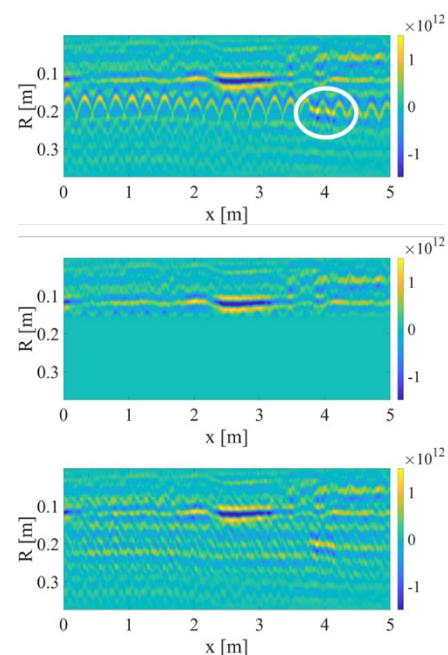


図 9：新利根川橋の鉄筋抽出結果と異常応答評価

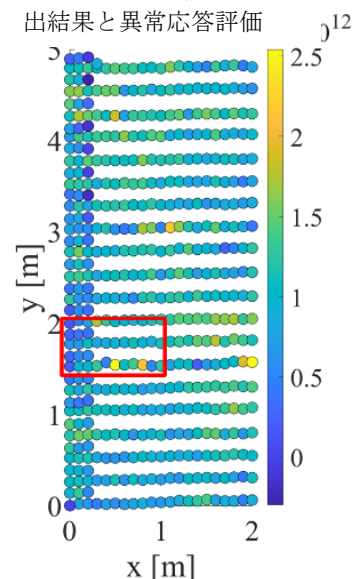


図 10：新利根川橋の鉄筋抽出結果と異常応答評価  
赤枠：遊離石灰箇所

橋梁の道路において、遊離石灰が道路下部から確認できる領域を含む箇所データの取得した。同評価によって遊離石灰箇所で顕著な異常応答および識別が可能であることがわかり、またその近傍領域の箇所でも異常応答が確認することができる(図11)。同領域は床版内部に漏水、空洞等の異常がある可能性が示唆され、将来的に遊離石灰等が発生する可能性があると考えられる。同手法は、正常箇所のデータを有していれば、大規模な領域できわめて迅速に以上識別が可能であり、鉄筋応答を抑圧することで、床版内部の異常を抽出するのみならず、抽出された鉄筋応答から鉄筋の異常応答も判別できる。このため、床版および鉄筋の両方において有用な異常識別法を確立できたことは予想外の進展であると考えられる。仕様書記載の時点では、ベイズ推定に基づく教師あり深層学習を導入する予定であったが、関係機関から、実際の道路内部を確認できる状況での試験を実施することが難しいことが判明したので、教師なし学習に基づく異常識別法の高精度化を目標とした。今後は①で提案するトモグラフィ方式との融合により、より確度の高い異常識別法を構築することが課題である。

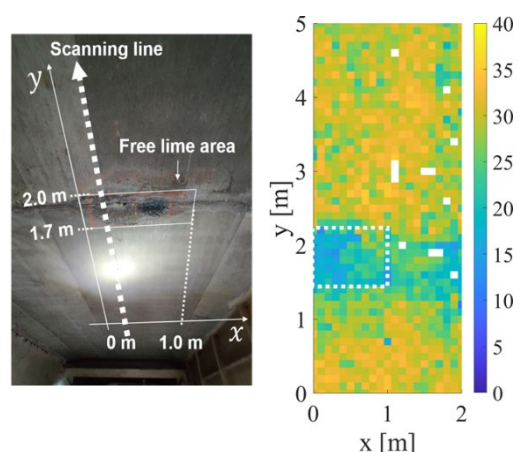


図11：新利根川橋の遊離石灰箇所(左)を含む実機データを用いた異常検出結果(右)

### 「学内外へのインパクトについて」

本研究課題は、マイクロ波による道路内部非破壊診断技術として、従来のレーダ方式では得られなかった道路内部の異物の複素誘電率を推定するものである。トモグラフィ方式は既に理論的な枠組みが出来上がっていたが、特に非破壊診断等の観測方向が制限される状況では不良設定性により全く精度が得られないことが分かっていた。また、誘電率の情報を正確に得るためのデータ較正等の課題を抱え、実応用に耐えうる技術としては認知されていなかった。一方で本課題で得られた成果は、実道路の試供体モデルで既存のハードウェアで複素誘電率を推定できることを示しており、これは道路モニタリング技術の信頼性向上という社会的な貢献に留まらず、マイクロ波画像解析法における学術的な貢献も著しく大きい。また深層学習に基づく異常識別法においては、効率的な鉄筋抑圧法により異常識別の信頼性を大幅に改善させたのみならず、抑圧過程で得られる各鉄筋応答の抽出結果を用いて個別の鉄筋の状態を定量的に評価できる枠組みを提示できたことは、特筆すべき成果であり、簡易的な誘電率推定と組み合わせることで、より実応用に適した画像化技術を提示できる可能性が高い。

上記手法においては、まだ解決すべき課題が幾つかあるものの、本研究期間で得られた研究成果は、今後さらに発展する可能性を有しているものであり、極めて重要な研究成果が得られたものとして評価している。

また外部への発表実績においてもIEEE等のトップジャーナルへの学術論文が5件、国際会議論文4件、国内会議5件等の成果を残し、同学術分野においても注目を集め、高い評価を得ている。また同基盤を基に展開したレーダとトモグラフィの双方向融合による多元的画像化技術に関しては、科学技術振興機構(JST)の創発的研究支援事業(FOREST)に採択される等、今後もその成果の実用化に向けて、着実に展開していくことが期待されている。

## ⑨研究成果の発表状況

学術誌掲載論文（査読有）：

- [1] Yoshihiro Yamauchi and Shouhei Kidera, "Contrast Source Inversion for Objects Buried into Multi-layered Media for Subsurface Imaging Applications", IEICE Trans. Electron., Vol. E106.C, 2023.
- [2] Shuto Takahashi, Katsuyuki Suzuki, Takahiro Hanabusa and Shouhei Kidera "Microwave Subsurface Imaging Method by Incorporating Radar and Tomographic Approaches", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 70, no. 11, pp. 11009-11023, Nov. 2022
- [3] Takahiro Hanabusa, Takahide Morooka and Shouhei Kidera. "Deep Learning Based Calibration in Contrast Source Inversion Based Microwave Subsurface Imaging", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 19, pp. 1-5, 2022.
- [4] Hayatomomaru Morimoto, Yoshihiro Yamauchi and Shouhei Kidera "Contrast Source Inversion Based Multi-layered Object Analysis for Terahertz Wave Imaging", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 19, pp. 1-5, 2022.
- [5] 木寺正平."マイクロ波イメージングによる複素誘電率推定—レーダとトモグラフィの融合—" 可視化情報学会誌 (Journal of the Visualization Society of Japan), vol. 40, no. 159, pp. 136-139, Oct. 2020 (招待論文) .

国際会議（査読有）：

- [6] Yoshihiro Yamauchi and Shouhei Kidera,"Inverse Scattering Enhanced Synthetic Aperture Imaging for Multi-Layered Ground Media", The 2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Sydney, Australia, Oct., 2022.
- [7] Katsuyoshi Suzuki and Shouhei Kidera, "Radar Enhanced Contrast Source Inversion Method for Microwave Nondestructive Evaluation", The 2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Sydney, Australia, Oct., 2022.
- [8] Shouhei Kidera, "Radar and Tomography Based Microwave Imaging for Non-destructive Subsurface Applications", 2021 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA) @ Virtual (Invited)
- [9] Yoshihiro Yamauchi and Shouhei Kidera,"Contrast Source Inversion Based Object Reconstruction Buried in Multi-layered Background for Microwave Subsurface Imaging", The 2021 IEEE AP-S Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (IEEE APS/URSI 2021), Singapore, Singapore, Dec., 2021.

国内研究会論文

- [10] 秋山夏樹・木寺正平, "マイクロ波道路非破壊検査のための鉄筋応答抑圧と異常検出に関する検討", 電子情報通信学会技報, vol. 122, no. 408, SANE2022-100, pp. 64-69, 2023年3月.
- [11]山内啓宏・木寺正平, "地中レーダによる多層構造異物識別のためのレーダとトモグラフィを統合した複素誘電率画像化法", 電子情報通信学会技報, vol. 122, no. 408, SANE2022-100, pp. 7-12, 2023年3月.
- [12] 諸岡貴英, 木寺正平, "マイクロ波非破壊道路モニタリングのための深層学習を用いた異常検出法", 電子情報通信学会技報, MW, 2022年3月, 信学技報, vol. 121, no. 400, MW2021-134, pp. 128-133, 2022年3月.
- [13] 鈴木克禎, 木寺正平, "マイクロ波非破壊検査のためのRPM法及びCSI法を統合した複素誘電率イメージング法" 電子情報通信学会技報, MW, 2022年3月, 信学技報, vol. 121, no. 400, MW2021-133, pp. 122-127, 2022年3月.
- [14] 山内啓宏, 木寺正平,"マイクロ波地中レーダによる逆散乱解析法を用いた多層構造物の誘電率推定", 電子情報通信学会技報, vol. 121, no. 168, AP2021-66, pp. 53-58, 2021年9月.

## ⑩研究成果の社会への情報発信

大学が実施する年3回（6月，7月，11月）のオープンキャンパスにおいて，マイクロ波道路探索レーダのデモンストレーションを実施し，本成果について広く広報している。

## ⑪研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

各課題の今後の展開及び展望について以下に記す。

課題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】においては、レーダとトモグラフィの双方向融合により、数値解析及び試供体を用いた実験データにより、所望の数値目標を実現した。一方で特に誘電率推定精度についてはまだ改善すべき誤差があると考えられる。同推定誤差の要因としては、キャリブレーションによる要因や抑圧不完全で重合った鉄筋応答の影響または不良設定性に起因する誤差などが考えられる。特にROIの推定精度に大きく依存することが判明したため、今後は更同推定の精度改善手法を確立する必要がある。

また非線形性に起因する誤差の解消法としては、背景媒質を更新することで線形問題に近づけるアプローチが有効であると考えられる。課題①におけるROI制限でのトモグラフィ方式では、不均質な背景媒質においても、提案するグリーン関数を導入することで、推定精度が改善できることが分かっているため、同事実に基づき、更なる複素誘電率推定精度を改善できると考える。また解析時間については、初期値推定において数時間程度必要であるが、現実的な適用を考えると数十分程度での処理時間が望まれる。同計算時間は全電界成分の最適化が主要な部分であるため、内挿補間による未知数削減等による計算時間の圧縮が今後必要となる。迅速かつ大規模な領域を効果的にモニタリングするためには、後述の課題②異常識別法との統合が必須である。

同技術の完成度を高めることで、迅速かつ大規模な領域の道路内部の状況を、マイクロ波を用いて、定性的ではなく定量的（複素誘電率値）に推定する技術として実用化させることが可能であると考えられる。これにより、現在目視で確認している道路の剥離、遊離石灰箇所のみだけでなく、それらの原因となる内部の滞水、空洞亀裂を空間的な分布として提示することで、道路の質を長期的に保全するためにより効率的かつ高い信頼性でモニタリングする技術を確立できると考える。

課題②【多層構造背景媒質を想定した高精度レーダ画像法】においては、異常応答識別のために、伝達関数に基づく鉄筋応答抑圧法を導入した。従来の窓関数法の場合、鉄筋付近の異常応答を除去してしまい、また浅い領域での消え残りがあったが、提案手法では上記の問題を解決できる。また、正常領域のデータを用いた相関係数等の導入により、準教師あり学習を導入することが可能となった。神奈川県清水橋、花水橋、茨城県新利根川橋における各種の実道路におけるデータ解析により、道路亀裂に起因する内部の異常識別ができることを示した。特に遊離石灰箇所が判明している新利根川橋における解析では、同箇所の異常識別のみならず、他の場所の異常があることを示唆し、内部構造の異常識別として有用であることを示した。更に鉄筋応答抑圧の際に付随的に得られる鉄筋応答を用いて、鉄筋に関する異常識別法の基礎検討を示し、床板とアスファルト、及び鉄筋を分離した上での異常識別が実現できる可能性を示唆した。上記の手法は、計算コストが極めて小さく、ハードウェアの改変を必要としないことから、直ちに現場でも活用できる手法である。よって課題②については、既に取得されたレーダデータに対して、直ちに適用することが可能であるため、本解析法を実際の点検などで評価することが期待される。

また、今後はより確度の高い、定量的な異常識別を実施するため①で提案した複素誘電率推定法を異常個所に適用することが考えられる。

## ⑫研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

先の⑪でも述べる通り、課題②については、既に取得されたレーダデータに対して直ちに適用可能であり、既存のハードウェアで対応可能であるため、迅速な研究成果の実務への反映を期待することができる。課題①については、実用レベルに達するには、課題②による領域の絞り込み、より大規模な領域での解析のための高速化が必要であるが、何れも既存のハードウェアで取得されたレーダデータに対して適用可能であるため、有望であると考えられる。またより簡易的、実用的な複素誘電率推定として、鉄筋応答の特性に着目した手法を課題①で提案しており、鉄筋が存在する上部のかぶりの誘電率をある程度推定することで、異常領域の概要をとらえることができると考える。この付加的に得られた技術(レーダ画像を用いた誘電率推定)は、大規模な領域であっても分割して処理することができ、またレーダ画像処理に基づくため処理時間を数秒程度にまで短くすることが可能である。

これらの手法を適用することで、現在のレーダ画像では得られない内部の誘電率の平均値を定量的に評価することで、内部の空洞・漏水の有無の判断に活用することができる。

今後は実際のレーダデータに対して同手法を適用し、その有効性を検証していくことも必要であると考えられる。本課題の実施によって、非接触での道路モニタリング技術によって内部の複素誘電率分布を効率的に画像化することができれば、モニタリングに関するコストや労力を飛躍的に改善でき、特に交通量が多く、地震の可能性の高い都市部における道路・橋梁・トンネルにおいて、より頻度の高い定量診断技術として道路の質の向上に貢献できると考える。

## ⑬自己評価

(研究目的の達成度、研究成果、今度の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

本課題は従来のマイクロ波道路検査技術では、得ることが非常に難しかった道路内部の複素誘電率の分布を推定するという課題であり、極めて挑戦的な課題であったと認識している。同課題の中で、レーダとトモグラフィの双方向融合という独創的な手法を用いて、対象の複素誘電率を相対誤差 20 %程度で推定することを実試供体かつ既存のハードウェアで取得されたデータで実証できたことは、非常に大きな前進であったと考える。一方で当初は3次元モデル及び偏波を含めたイメージングや深層学習という目標項目については、その必要性が高くないことを考慮して、より重要性の高い背景媒質の誘電率推定や異常識別における鉄筋抑圧法などに課題をシフトすることとなり、この点は当初の研究計画を変更する必要があったことは留意すべき点であったと認識している。

また課題①では、研究開始当初では予定していなかった、トモグラフィ⇒レーダの作用として、CSI法の特徴を最大限に生かした、多層構造モデルにおけるグリーン関数推定及び不要波抑圧に基づく新たな画像化手法を発見し、その有用性を数値解析及び実験データに実証することができたことは、予想以上の進展が得られたと考える。特に鉄筋応答を用いた誘電率推定法は実用性が高く、既存のハードウェアで簡単に実装できる点は高く評価することができる。また実道路での異常検出に関しても、鉄筋応答抑圧の課題に対して、単なる窓関数ではなく、伝達関数を用いた信号処理法を駆使することで、鉄筋応答と異常信号を高い確度で分離することができたことも特筆に値する。これは鉄筋応答を抑圧して、床板等の異常識別の精度を上げるのみならず、抽出された個々の鉄筋応答に対して正常鉄筋応答との比較をすることで、鉄筋の異常(腐食や周囲亀裂)を定量的に評価できる枠組みを構築できたことは予想外の成果であり、簡易的な鉄筋異常識別に非常に有効に働く技



術を開発できたと評価する。

また本課題の成果が、IEEE トップジャーナルに5件採録（追加で3件を投稿済み）され、国際会議4件、国内会議5件を発表するなど、十分な対外発表成果が得られたと評価する。また本課題の継続的な推進のために、新たな競争的資金としてJST創発的研究支援事業に採択されており、7年から最長10年間の長期的な支援を得ながら、本課題を推進していくことが可能である。

上記のことから、一部の研究計画の変更はあったものの、当初の目標は実現されており、複数の予想外の進捗が得られたことから、当初の目的に対して十分な成果を得ることができたと判断する。