

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(令和2年度採択)
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.2010-10	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	電気通信大学 教授 木寺 正平

マイクロ波による道路内部非破壊定量検査を実現するため、レーダとトモグラフィ及び深層学習の統合法の構築を研究目的として道路内部の空洞・漏水等の異常を識別し、かつ目標の複素誘電率と位置・形状情報を高精度に推定する画像解析法を構築し、道路試供体や実道路を想定した実験データで検証する研究開発。

1. 研究の背景・目的 (研究開始当初の背景・動機、目標等)

マイクロ波による道路非破壊内部計測は、非接触計測を可能とするために迅速かつ大規模な領域のスクリーニング技術として有望である。一方、道路や橋梁等を対象とした、従来のマイクロ波探査であるレーダ方式では、空洞や鉄筋の位置・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。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。上記の問題を解決するため、本課題では、レーダ方式とトモグラフィ方式を機能的に統合する技術基盤を構築し、高精度形状推定(10mm 以内)と複素誘電率推定(相対誤差 20%以内)の両方を実現させる。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、マイクロ波による革新的道路内部検査技術を確立する。

2. 研究内容 (研究の方法・項目等)

上記の目的を実現するため、本課題では【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】及び【②深層学習による異物識別法の開発】の2課題を並行して実施した。まず①においては、まず対象の関心領域をレーダ画像で絞り込み、同領域内でトモグラフィ法を適用することで、データ数が未知数に対して少ない不良設定性を解消することで誘電率推定精度を改善させる。更にトモグラフィ法での最適化で付随的に得られる結果を用いてレーダ画像の精度を改善することでレーダとトモグラフィの双方向処理を実現し、誘電率と位置・形状を同時に推定する。課題②においては、レーダデータから直接的に床板と舗装の間の空洞や漏水を識別するため、効果的な鉄筋応答抑圧法を前処理として、時間周波数変換や深層学習に基づくデータ圧縮及び非線形クラスタリング法を用いることで、道路内部の異常を定量的に評価する。

3. 研究成果 (図表・写真等を活用し分かりやすく記述)

課題①においては、RPM 法に基づくレーダ画像化から CSI 法と呼ばれるトモグラフィ法を適用することで、従来の複素誘電率推定精度を大幅に改善した(図1)。更に実試供体における評価では、CSI 法のコスト関数に基づく初期誘電率評価を入れることで、不良設定性に起因する局所最適化問題を解消することができることを示した(図2)。同結果より、舗装と床板の間の滞水領域の誘電率を誤差 10%程度で推定し、かつ形状・位置も誤差 20mm 程度で推定できることを確認した。これは従来のトモグラフィ方式単体では実現しえない精度であり、定量診断等において水か空洞化を色部するには十分な精度である。

課題②においては、伝達関数に基づく鉄筋抑圧法を導入し、床板と舗装間の異常識別法を茨城県新利根川橋の

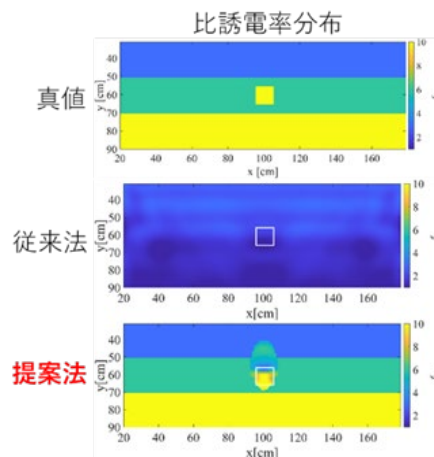


図1：従来法及び提案法(レーダ⇒トモグラフィ)による誘電率・導電率推定結果

道路（下部に遊離石灰箇所あり）に適用することで、道路内部の漏水や亀裂に起因する異常箇所を定量的に評価できることを既存ハードウェアで取得されたデータに対して確認した。これらの結果は全て既存のハードウェアで取得されたデータで実現されており、実応用への迅速な展開が期待される。

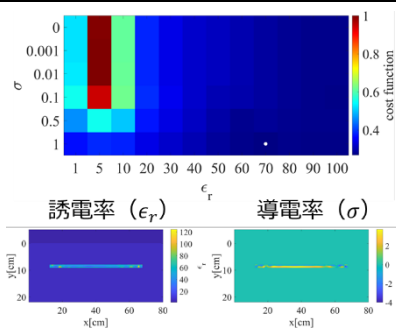


図 2: 誘電率初期値推定の結果(上)
誘電率・導電率推定結果(下)

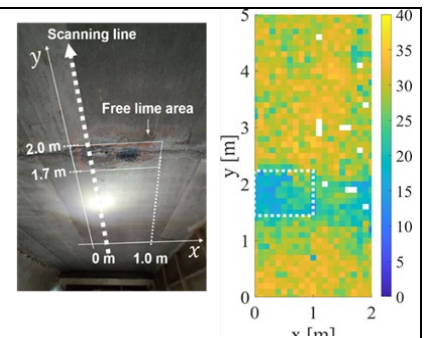


図 3: 新利根川橋の遊離石灰箇所(左) 異常検出結果(右)

4. 主な発表論文（研究代表者はゴシック、研究分担者は下線）

- [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.

5. 今後の展望（研究成果の活用や発展性、今後の課題等）

課題①の成果から、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期待される。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することができる。

また課題②で開発する手法は、レーダデータから直接的に異常識別をするため、処理時間を抑えることができ、かつハードウェアの変更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。また、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も構築することが可能である。このため、課題②については、既を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。

6. 道路政策の質の向上への寄与（研究成果の実務への反映見込み等）

5でも述べる通り、課題②については、既を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。

7. ホームページ等（関連ウェブサイト等）

<http://www.ems.cei.uec.ac.jp/>