

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（FS研究対象）】

		氏名 (ふりがな)	所属		役職
①研究代表者		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		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 領域	[主領域] 【領域8】	公募	タイプ II	
		[副領域] 【領域7】	タイプ		
③研究経費 (単位:万円)		令和2年度			
※受託額を記入。		961万円			
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			
工藤 高裕		富士電機株式会社技術開発本部・主査			
仲村 慎吾		富士電機株式会社技術開発本部・一般			
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>本研究では、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で、コンクリート内部の空洞及び水の位置形状推定及び複素誘電率定量評価法を確立し、革新的な道路・トンネル内部非破壊検査技術を創出し、その実用化を目指す。本課題の革新性は、独自のレーダ方式とトモグラフィ法を双方向に統合することにある。具体的には、レーダ画像から目標(空洞・他の異物)が存在する関心領域(位置・形状)を絞り込むことで、複素誘電率推定問題における未知数を飛躍的に減らし、かつ位置形状情報も逐次更新させることで、極めて劣悪な逆問題において、高精度位置形状推定(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深層学習と統合させることにより、埋設物の物性識別精度を飛躍的に高める技術と統合させることで、同技術の実用化を目指す。</p>					

⑥ F S 研究の結果

成果の概要: 本 FS 研究では、まず独自のレーダ画像化法(RPM: Range Points Migration)と最新のトモグラフィ法である CSI(Contrast Source Inversion)法を統合し、レーダ画像化法で絞り込まれた目標の存在領域(ROI: Region of Interest)を逆散乱問題における非線形最適化の反復処理で逐次更新させることにより、**複素誘電率と ROI(目標のサイズ・位置)の両方を高精度に推定させる双方向処理を実現させた**。非破壊検査モデルを想定した数値計算において、空洞等の複素誘電率を相対誤差 10%程度で推定させることを確認した。また、既存のレーダ装置を用いた実機実験では、実際の道路を模擬した試供体を構築し、厚さ80mmのアスファルト下にある床板(コンクリート)内部の空洞及び水に対して、レーダとトモグラフィ法を融合させることで**10mm の位置精度及び相対誤差 20%の複素誘電率推定値で実現させた**。上記のレーダとトモグラフィの双方向処理は、世界的にも他に類をみないアプローチであり、またこれを既存のハードウェアを用いた実環境で実証したのは、**本研究課題が世界初であると認識している**。また、**ベイズ因子分析**に基づく雑音抑圧フィルタを導入し、目標の応答を保持しつつ、ノイズを効果的に抑圧させる技術を導入し、実機実験データにおいてその有効性を確認し、**有効到達深度を大きく改善させる指針を得た**。更に、多偏波データを用いた深層学習による複素誘電率推定法を構築し、特に**偏波シングネチャ画像を CNN(Convolutional Neural Network:畳み込みニューラルネットワーク)の枠組みで学習させ**、誘電率及び導電率を高精度に推定する手法を構築し、数値計算及び実験データによりその有効性を確認した。

本 FS 研究では新型コロナウイルスの影響があつたにもかかわらず、上記に記載する通り、ほぼ当初予定通りの成果を得ることができ、本格課題への基盤を確立できたと評価する。

以下に各課題について詳細を述べる。

【①レーダとトモグラフィ統合による複素誘電率イメージング法の確立】(担当: 木寺)

本課題の 2020 年度の達成目標として、「レーダとトモグラフィ統合による理論的枠組みを完成させ、コンクリート内部空洞・腐食を想定した、大規模かつ精緻な 2 次元電磁界シミュレーション(FDTD: Finite Difference Time Domain 法)による、原理検証・精度の確認する。また同改良を加え、複素誘電率を相対誤差 10%及び同形状推定精度 10mm 以内で実現させる」ことを掲げていた。

上記の目的を達成させるため、まずはレーダ法として RPM 法を用いて空洞等の対象を推定精度 10mm 以内で推定できることを直径 500mm のコンクリート円柱の中に空洞(100mm)を含む試供体を用いた予備実験で検証し、その性能を確認した。更に、複素誘電率推定精度に関しては、シミュレーション及び簡易的な実験環境において、床板内部の水分量によって誘電率が変動することを想定し、空洞及び食塩濃度の異なる水に対して、10%から 20%程度の推定精度で複素誘電率を再現できることを確認した。図1に実験の様子と、塩分量を変えた場合の複素誘電率の周波数特性を示す。同図より、塩分濃度により、特に実部は 10 から 80 と大きく変動することがわかる。これを正確に推定することで塩分濃度の推定にも利用できることがわかる。

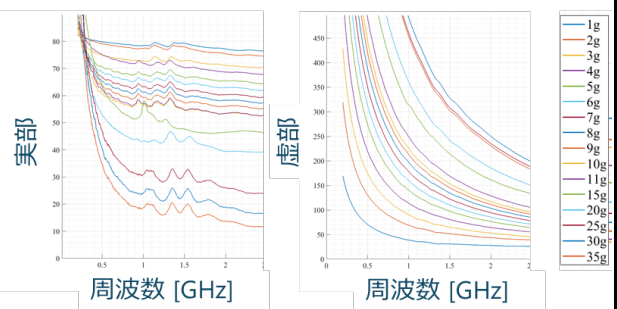


図 1 : 実験状況 (上) と塩分量を変えた水の複素誘電率特性 (下)

また、本課題ではシミュレーションと実験間におけるアンテナ特性、不要波、送信信号特性、ケーブル特性などの差異を高精度に補正するため、**深層学習(DNN: Deep Neural Network)**に基づくキャリブレーション法を提案した。図2に DNN によるキャリブレーション結果の一例を示す(特許出願中)。各塩分量における実験データをシミュレーションデータに変換できていることがわかる。また図3に各塩分濃度における CSI の結果を示す。同図より、各塩分濃度に対する誘電率をある程度の精度で再現できていることがわかる。誤差は 10-20%程度であり、その要因はキャリブレーション法による補正誤差及び3次元問題と2次元問題との乖離などがあげられる。

更に土木技術研究所の CAESAR(構造物メンテナンス研究センター)の協力を得て、研究協力者(富士電機株式会社 研究員)らにより、実際の環境に近い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4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4右下図のレーダの散乱データが示す通り、水有の場合には散乱強度が高くなっていることがわかる。一方、同強度情報のみでは水であるか、空洞であるかの定量的な判断はできない。図5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。

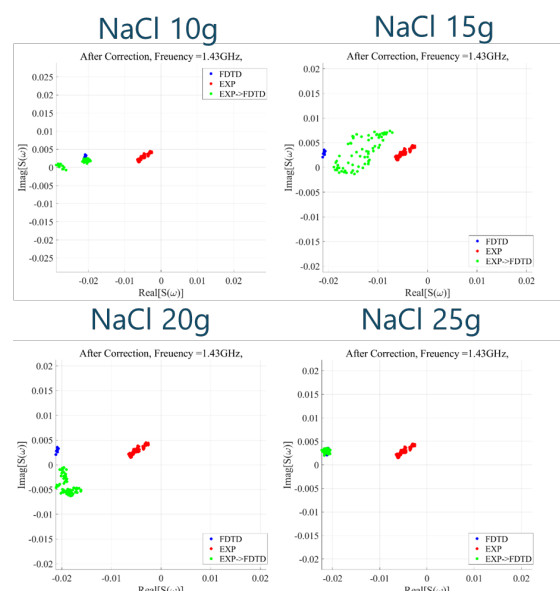


図2: 実験データ(DNN補正なし: 赤、DNN補正有: 緑)及びシミュレーションデータ(青)

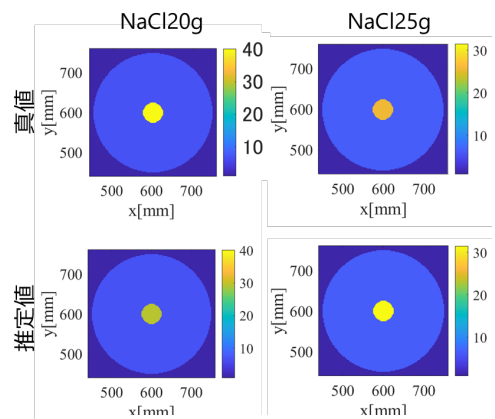


図3: CSIによる誘電率推定

- <測定諸元>
- ・測定機器: Structure Scan
 - ・周波数: 2-3 GHz
 - ・測定範囲: 60×60cm
 - ・測定した走査線の間隔: X、Y共に5cmピッチ

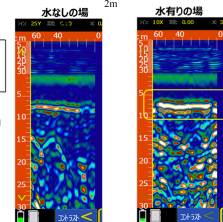
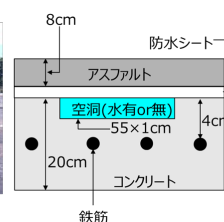
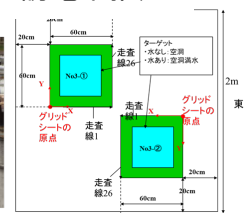


図4: コンクリート試供体における実験
右下図: 水有り無しのレーダデータ

ただし、誘電率推定では、原理検証のために CSI では真の ROI を与えている。実際には ROI はレーダ手法で与えられ、かつ初期値依存性もあるため、実用化においては上記の点の解決が必要である。また、同手法のキャリブレーション法は線形モデルを用いており、現在は深層学習を用いた非線形キャリブレーション法を導入することで更なる高精度化を検討している。

本課題で実施しているレーダとトモグラフィを融合させた複素誘電率分布推定法を実際の道路内部の欠陥モニタリングは、世界に先駆けた技術であり、今後標準化や新興国への技術移転を含めて国際展開も積極的に推進し

ていきたいと考えている。特に床版上の空洞や水分量を複素誘電率に基づいて定量的に評価することは、道路の強度評価において極めて重要で、有用であるという認識が土木研究所の専門家から指摘されている。本 FS 研究で得られた成果を基盤として、本格研究課題において更に研究を推進させて、問題点を解決していくことで数年後の実用化を実現させることは可能であると判断する。

【② 革新的レーダ画像・信号処理によるコンクリート深部の高速・超分解能イメージング】

本課題の 2020 年度の達成目標は、「RPM 法を非破壊検査モデルへ拡張し、更に高速化を図る。3次元の実際のコンクリート内部を想定した規模の3次元イメージングにおいて、30mm 以内の分解能で深度 50cm の空洞・腐食等を 1 分以内で推定する手法を確立する」ことを掲げていた。

まず最初に所望の到達深度を改善させるために必要となるノイズ抑圧法を検討した。ここではベイズ因子分析法と呼ばれる手法を導入した。同手法は、目標信号の統計的な特徴を逐次推定しながら雑音のみを抑圧する手法であり、ほかの特異値分解等に比べ、多様なノイズを適応的に抑圧することができる。同手法を評価するため、名古屋大学ニューブリッジで取得したデータについて、数値的に発生させたガウス性ノイズを抑圧させる評

価を実施した。図6は、抑圧前後の信号応答を示す。処理前の信号にはノイズが相当卓越しており、特に深い部分の応答がノイズにマスクされてしまうことがわかるが、ベイズ因子分析法を適用することでノイズを抑圧し、かつ素子位置に依存するターゲット応答を保持できていることがわかる。

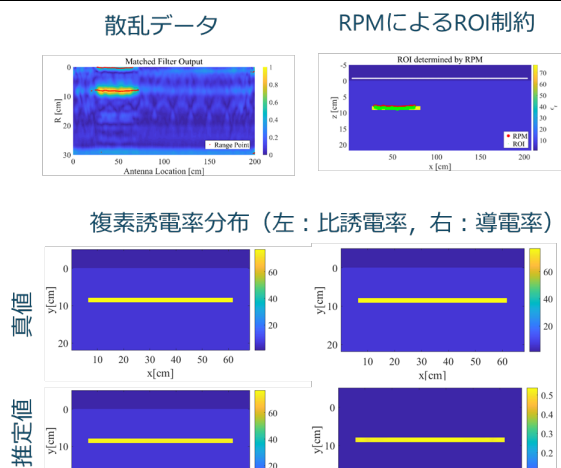


図5：上段：レーダデータとRPMによる位置推定，中段：水の複素誘電率の真値，下段：ROI制約CSIによる誘電率推定結果

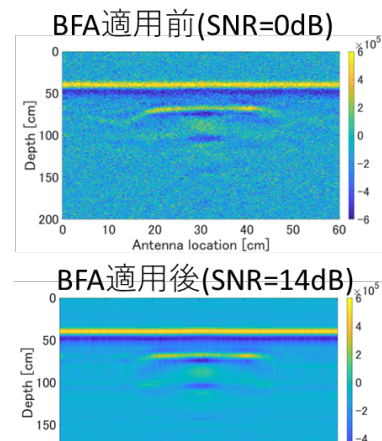
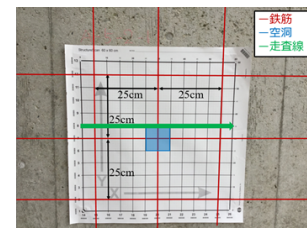


図6：コンクリート試供体（上）とBFA適用前後によるレーダデータ解析

また、レーダ方式である RPM 法は極めて高精度に目標位置形状を画像化することができるが、アンテナを無指向性と仮定しており、同仮定から逸脱した際に誤差が生じることが判明している。特に実機実験で用いるレーダ装置は指向性を有しているため、まずは指向性を考慮した RPM 法を確立させた。3次元電磁界シミュレーションによる評価により、指向性を考慮した RPM 方が高い精度を保持していることがわかる。また、同手法を名古屋大学ニューブリッジでの実験データに適用した結果を図7に示す。同図より、空洞及び鉄筋の位置をある程度の精度で推定できていることがわかる。分解能及び精度においては、**数値計算では10mm程度、実機実験では30mm程度**を実現できることを確認している。一方、上記の実験では深さ10cm程度の空洞の評価しかできていない。50cmの到達深度の評価のために、1m四方のコンクリート試供体での評価を予定していたがコロナの影響で製作が遅れており、1月ごろに完成する見込みであるので、データを今年度中に取得し、すでに開発しているベイズ因子分析や特異値分解などを用いた雑音抑圧法を適用することで50cmの深度にある空洞を3次元画像化することを予定している。

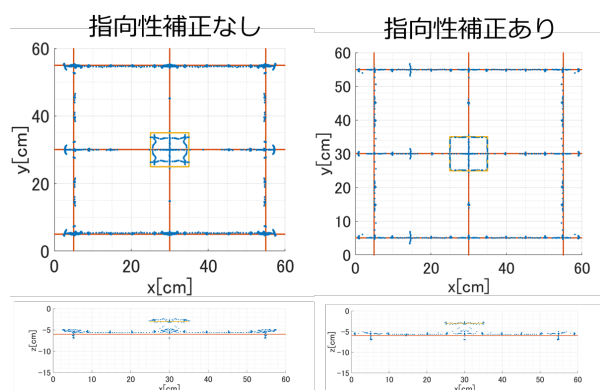


図7：空洞を含むコンクリート試供体 t に対する RPM 法の適用例

【③ 多偏波データの深層学習による異物識別法の開発】（主担当：木寺（電通大））

本課題の2020年度の達成目標は「多偏波データを深層学習に利用することで、未知の形状を有する空洞及び鉄筋腐食に対して、80%の識別精度を確保すること」であった。本年度では、多偏波データを AlexNet 等の CNN の画像入力に対応させるため、データを偏波シグネチャ画像に変換させ、同情報から誘電率・導電率を直接的に推定する CNN の枠組みを構築した（図8）。典型的なコンクリート非破壊モデルでの3次元 FDTD 解析データにより、各誘電率・導電率を相対誤差10%以内で推定することを確認した。また簡易実験モデルにおいてデータを取得し、適切な信号変換を導入することで、円柱内部の空洞・金属を識別することを可能とした。今後は、多偏波データから複素誘電率分布を推定させる方法に拡張し、①の課題と統合させることで、複素誘電率推定精度及び異物の識別確立を向上させていくことを検討している。

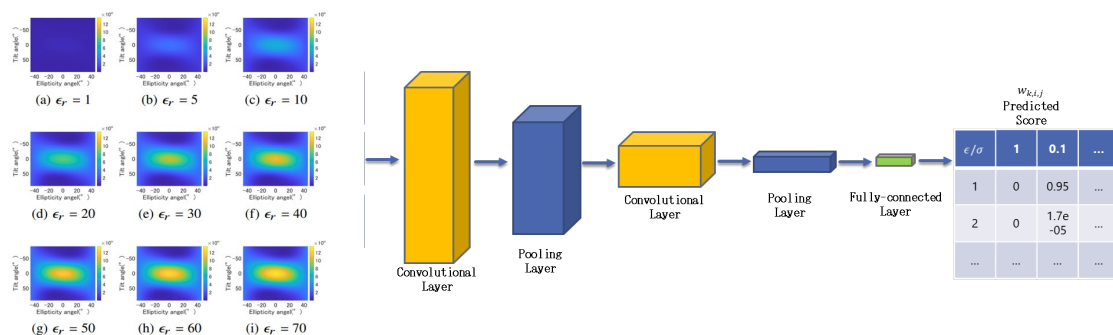


図8：偏波シグネチャ画像の CNN による誘電率及び導電率推定

⑦本格研究の見通し

(FS研究の結果を踏まえた本格研究における研究成果の見通し、今後の研究目標の達成見込み、成果の活用方法、手段、今後の展開等を記入。この際、提案書(当初計画)からの変更点があれば、分かるように工夫すること。)

【① レーダとトモグラフィ統合による複素誘電率イメージング法の確立】

FS研究では、実際のコンクリート床板を模擬した試供体において、ROI及び複素誘電率分布をある程度の誤差内で推定できることを確認することができ、着実な成果を得ることができた。本格研究では、当初の予定通り、まずは2021年度において、GSI法を3次元問題に拡張させ、更にROI制限及びフーリエ基底等を用いたk空間領域での処理などを導入することで、未指数を飛躍的に削減させる。また、同手法を電磁界シミュレーション及び実際のレーダ装置を用いた実機実験(土木研究所の提供する試供体または独自に作成している試供体)により、**複素誘電率の相対誤差20%及び同形状推定精度50mm以内を実現**させる。また、2022年度では、上記の精度をさらに改善させるため、ROI分布を事前確率分布として与えるベイズ最適化、スパース正則化やTV(Total Variation)正則化等の最新の最適化法を導入して再構成精度を改善させる。同年度末には、以下の最終目標を実機実験で達成させる。

最終目標: 深度50cm以内に存在するコンクリート内部の空洞及び水分の**複素誘電率を相対誤差10%及び同形状推定精度10mm以内**で実現させる。

またFS研究によって、より適切なキャリブレーション法が精度改善には必要不可欠であることが分かったため、現在進めている深層学習によるキャリブレーション法を更に進化させて、実機検証または実用化への道筋をつけていくことも並行して検討する。

【②革新的レーダ画像・信号処理によるコンクリート深部の高速・超分解能イメージング】

FS研究では、雑音等の確率分布を逐次推定するベイズ因子分析によるノイズ抑圧効果により、50cm程度の深度の目標からの応答を識別することを実現させた。本格研究では、当初の予定通り以下の課題を実施する。

2021年度では、到達深度を1m程度まで達成させるため、AR(Auto Regression)スペクトル推定等を利用して、極限までノイズ耐性を高める信号処理法を導入する。同年度末までに、シミュレーション及び実機実験において到達深度1mの目標を10mm以内の空間分解能で10秒以内に推定する方法を確立する。また、①のトモグラフィ法で得られる複素誘電率分布の結果をフィードバックすることで、ノイズ・不要波のデータを予測し、極限まで抑圧することで、従来の到達深度限界を超える。これは、マイクロ波のみならず、他の波長帯においてもその応用範囲を格段に広げることができるため、重要かつ、実用化に向けて必要不可欠な課題である。

2022年度の達成目標: 高速化を実現させるため、最適化アルゴリズムの改良を行う。具体的には、RPM法においても交点抽出から標本点抽出モデルへ拡張し、また仮想波源モデルを用いることで1秒以内での3次元イメージングを実現させる。また同手法を課題①のレーダ画像として採用し、①の手法との相互相乗作用により、以下の最終目標を実現させる。

最終目標: 深度1m以内に存在するコンクリート内部の空洞・鉄筋、その他異物の形状を**10mm以内の空間分解能**で画像化し、かつ**1秒以内の処理時間**で実現する。

【③ 多偏波データの深層学習による異物識別法の開発】

FS研究においては、多偏波データにより生成される偏波シグネチャ画像をCNNで深層学習させることで、誘電率・導電率を定量評価できる枠組みを完成させた。

本格研究では、より直接的な識別を実現させるため、2021年度では、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。また床板内の空洞や水の存在の識別において、実環境データにより、80%の識別精度を確保する。

2022年度では、多偏波解析データによる深層学習と①でのトモグラフィ法を統合する。非線形最適化問題に適する深層ニューラルネットワーク(DNN)を取り入れることで、トモグラフィ方式における非線形性に起因する誤差を解消させる(図9)。機械学習のみでは、判別精度が教師データ選択に強く依存するため、その結果を逆散乱解析へとFeedbackさせることで、物理的に不整合が生じない判定法を導入し、以下の最終目標を達成させる。

最終目標: 水平及び垂直偏波を用いた多偏波シグネチャ情報を入力データとした深層学習と①で開発する複素誘電率イメージング法を統合させて、空洞・腐食等の検出確率(真陽性)95%以上、かつ誤検出確率(偽陰性)30%以内を実現させる。

特に、同手法を実際の試供体モデルでの実験データに適用し、空洞・水・金属等の物性の識別を高精度に実現する技術を実用段階まで発展させる。

本格課題の実施による波及効果

コンクリート非破壊検査において、本課題により複素誘電率の空間分布を高い精度・分解能で実現することができれば、空洞・含水率・土砂化・腐食を客観的かつ定量的に評価することが可能となり、道路・トンネル・橋梁モニタリングの技術革新が創出される。土木技術研究所の専門家との協働を継続し、コンクリート内部構造の解明や腐食の時間的发展、コンクリート強度変化等に関する定量的な画像情報を解析するための確度の高いセンシング情報を提供し、コンクリート断裂、崩落、崩壊等のメカニズムの解明に貢献し、より高度な交通インフラ基盤を創出するための革新的なセンシング技術を実現させることができると考える。

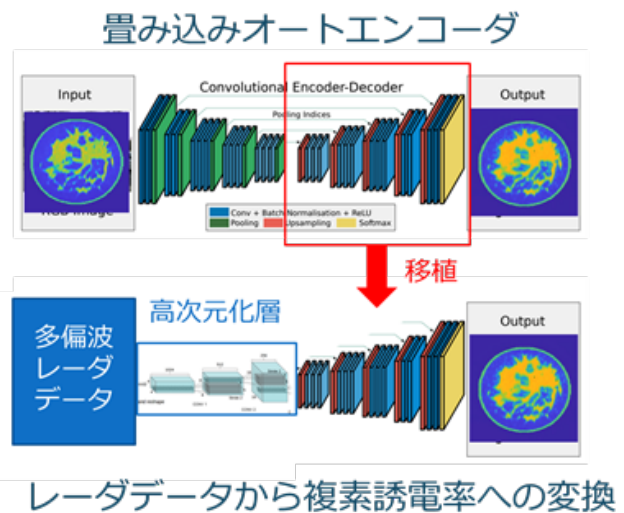


図9：多偏波データから誘電率分布への変換

⑧特記事項

(本FS研究から得られた知見、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、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入。)

研究成果のインパクト 本FS研究で実施された、コンクリート内部の空洞、水等のトモグラフィ方式により複素誘電率を推定させた研究結果は世界的に見てもほとんど例がなく、学術の見地からしても画期的な成果である。また、応用展開としても従来のレーダ方式のみによる識別性能を格段に押し上げる方法であり、実際のコンクリート試供体における、床板内の空洞や水などの複素誘電率をある程度の精度で推定することができたことは、実用化における実現可能性が非常に高いことを示しており、社会展開へのインパクトも大きいと考える。また、試供体作成や本手法の実用性等について、土木研CAESAR等の専門家からも有用性が認知されつつあることも本FS研究の重要な成果である。一方、CSI法による複素誘電率推定においてはキャリブレーション法が精度を左右する重要な位置づけとなる。同手法に対して、これまで線形近似法や深層学習を用いた方法を提案しており、その一部を特許として出願済みである。

また、FS採択時に評価委員会で指摘された事項等における対応について、以下の通りに実施した。

①「現状では実際のコンクリート構造物に対して単純化した要素試験を実施している段階であり、実務への適用性が不明確である。そのため、構造物に関する専門知識を有する者を含めた体制を構築した上で、まずはFSにより実用化の見通しを明確化すべき。」

上記への対応として、土木研究所CAESAR等の構造物に関する専門知識を有する研究者との議論により、まずは実際の道路における床板内の空洞や水分量を識別することを検証した。議論においては、特にアスファルト下のコンクリート床板表面における空洞領域に、水がどれくらい溜まっているか、については現状のレーダ画像から識別することは極めて困難である、という問題意識により、これを複素誘電率情報で紐づけることにより、水分量が定量的に評価できるのであれば、識別率を向上させる極めて有望な技術であるという点を共有した。

実際のアスファルト及び床板コンクリート試供体モデルを、いくつかのパターンで作成し、それに対してデータを取得し、レーダ方式及びトモグラフィ方式の有効性を確認している。キャリブレーション法等でまだ改善の余地があるものの、実際の道路を模擬した環境でかつ既存のハードウェアを用いて上記を検証できたことは、今後の実用化へ大きな進捗となったと考える。

②「トンネル等の各変状項目(背面空洞やうき、はく離、鉄筋腐食等)への適用性や現場での適用方法(調査方法・時間、附属物による阻害の影響等)の観点から、実用化への見通しについて検討を行う。」

上記への対応として、現時点ではトンネルではなく道路を模擬した試供体での評価ではあるが、現場への適用性に関しては上記に示す通り、すでに確認している。調査方法としては、非接触型のUWBレーダ装置を平面もしくは直線走査することになる。走査に要する時間は1m四方の試供体に対して、手動で1分程度である。また装置はコンパクトであり、車両に搭載することで高速化は可能である。またレーダ装置には筐体やそれ以外の電子機器が搭載されているが、あらかじめ同データを含む形で信号を受信し、差し引くことで問題ないことを確認している。また鉄筋の応答がある場合には、空洞や水分の誘電率推定にある程度の影響があることを実地実験で確認しており、適切なフィルタリングで同応答を減弱することで精度が保持できることも確認している。