偏波及び多重散乱解析を用いた超分解能内部画像化レーダに関する研究

Research for Super-resolution internal radar imaging method exploiting fully polarimetric data and multiple scattering effects

研究代表者　電気通信大学　准教授　木寺正平
Shouhei Kidera

This research focuses on the development of microwave based super-resolution imaging method by exploiting fully polarimetric data and multiple scattering components. The authors have already proposed a promising imaging method as range points migration (RPM) for accurate and high-speed boundary extraction assuming the ultra wideband short range radar. This researches developed the extension of this method to the specific applications, such as non-destructive testing or microwave based image diagnosis or treatment for breast cancer. As notable achievement, the authors demonstrated that the proposed method achieves very accurate boundary extraction for small air cavity or cancer with the order of mm (1/100 wavelength) using appropriate extension in realistic experiment or numerical simulations.

要旨

低周波側マイクロ波帯（1GHz-10GHz）の超広帯域(Ultra Wideband: UWB)電磁波は，高い距離分解能(数cm級)を有し，誘電体内部透過性に優れ，「乳癌検知等の非侵襲生体内部モニタリング」「壁・道路内部の腐食・亀裂検査等の各種非破壊計測」・「地雷・資源・遺跡探査のための地中探査」などの応用に有望である．しかし，同技術の重大な欠点として空間分解能がcm程度であることが挙げられる．既存の内部画像化法では，この問題を解決することができないため，本研究では，申請者が独自に考案した画像化理論RPM法:(Range Points Migration法)と多重散乱波や偏波等の特徴量を融合することで，全く新しいイメージング法を開発する．

1．　まえがき

マイクロ波帯のUWBレーダは，特に医療画像診断において，従来の内部計測技術における問題点（超音波：高周波減衰による分解能の制限・精度の弾性率依存，X線：被験者の被曝等，MR:装置の大型化・高コスト，テラヘルツ波 or OCT：到達深度が数mm程度）を解決する技術として注目を集めている．特に，癌細胞の誘電率・導電率が正常細胞のそれと著しく異なることを利用し，乳癌の早期発見・治療のための画像診断技術に有望である．従来の乳癌診断技術として，X線によるMammographyがあるが，被曝及び乳房が強く圧迫される等の身体的負担が大きく，受診率は15%程度に留まる．また癌細胞の初期状態（石灰化）を発見することが難しいなどの問題点がある．一方，マイクロ波帯のUWB電磁波（ミリ波・テラヘルツ波帯では誘電体透過特性が相対的に劣化）では，被曝等の身体的負担が無く，内部透過信号から癌細胞の散乱周波数特性や誘電率・導電率等の特徴量を定量的に抽出することが可能であり，特に初期の石灰化の検出精度の向上が見込まれる．また同技術は，災害後の水道管・ガス管破裂探知や老朽化した道路や橋の亀裂腐食探知等の災害予防・復旧技術としても有用であり，社会的需要も極めて高い．しかし現時点では，「空間分解能」・「位置決定精度」・「処理速度」等において，上記応用の要求性能を満たす技術は確立されておらず，革新的なレーダ内部センシング技術が待望されている．

本研究では，申請者が独自に提案する「周波数干渉計を用いた波長限界を超える超分解能画像化法(RPM法:Range Points Migration法)」と「多重散乱波を用いた不可視領域イメージング原理」を内部画像化へ拡張し，領域積分方程式に基づく逆散乱問題解析等と融合させることで，特に多層誘電体構造において「1/10波長分解能」及び「1/100波長精度」を実現する内部レーダセンサ技術を開発する．また，偏波や散乱周波数特性等の特徴量から，対象（癌細胞等）の電磁気的・化学的情報量を抽出する手法も提案し，革新的な誘電体内部計測技術を確立させる．

申請者は既に空間計測を対象として，以下の二つの独自の原理に画像化手法を構築している．

①RPM(Range Points Migration)法：RPM法は目標境界面における反射点と距離点（観測距離と素子位

置のセット）が一対一に対応することに着目し，同逆問題を目標境界面抽出へと転化させ，かつUWB信号の超広帯域性に着目した周波数干渉計により，波長限界を超える超分解能（波長の1/10の分解能・1/100波長の位置決定精度）画像化を実現する．

②多重散乱波合成：　多重散乱波は直接散乱波に含まれない散乱点位置情報を含むため，画像領域拡大に有用である．同散乱波を積極的に利用し，超波長分解能技術と融合させることで，不可視領域を高精度に再現することに成功している．

①及び②の手法は極めて独創性・完成度が高く，従来性能を打ち破る次世代レーダ理論として，当該分野の世界最高レベルの成果として評価されている．

本研究では①及び②の手法を適切に内部画像化技術へ拡張する．特にRPM法（境界抽出に特化）の「距離点群積分」原理を内部画像化に導入することで，波長限界を超える内部の誘電体層構造の画像化を実現し，SARやビームフォーマ法に比して，空間分解能・精度（SARの分解能：1/2波長程度）を本質的に超えることができると考える．また，多重散乱波を積極的に利用する画像化原理を同問題に導入することによって，これまで抽出することが困難であった内部目標の情報を抽出できる可能性がある．また，生体・壁等の誘電体内部計測においては，多層構造の誘電率分布が想定されるが，先述の通り，従来の領域積分方程式に基づく逆問題解析法では，特に層境界部分の不連続性に起因する精度劣化が問題となる．これに対し，RPM法及びRPM-HD法は誘電体境界構造(及び内部一層目の構造)を高分解能(1/10波長程度)かつ高精度（1/100波長程度）に推定可能であり，同境界位置情報を領域積分方程式の境界条件等に組み入れることで，複数層構造を超波長分解能で推定し，かつ誘電率分布推定精度及び収束速度を大きく向上することが可能と予測する．

以下では２．コンクリート内部非破壊検査を想定した高分解能内部画像化の確立とＢ．マイクロ波による乳癌検知及び治療のための画像化法について報告する．

２．コンクリート内部非破壊検査を想定した高分解能内部画像化の確立

報告者は現在まで，従来のレーダ技術の画像化性能（空間分解能・精度・再現領域）を超える複数の独創的な画像化理論及びアルゴリズムを構築してきた（RPM法及び多重散乱波画像化理論）．本研究課題では，上記手法を内部画像化へ拡張し，従来技術では達成困難な精度・分解能を得ることを数値計算及び実験により実証した．また，多層誘電体構造や不均質誘電体構造に対しても従来技術の知見を活かしながら，適切に手法を拡張し，多様な用途に適する複数の画像化手法を提案し，その有効性を示した．以下の課題毎に，その成果の詳細を述べる．

既にRPM法を均質誘電体内部目標の境界推定に拡張している（RPM-HD(RPM for Homogeneous Dielectric medium)法）．RPM-HD法は，RPM法の原理を内部イメージングに拡張したものであり，誘電体境界構造(及び内部一層目の構造)を高分解能(1/10波長程度)かつ高精度（1/100波長程度）に推定可能である．

しかし，同手法では，誘電体内の平均誘電率を既知としている．従来の誘電率推定法として領域積分方程式の数値解析に基づく手法が提案されているが，多大な計算量を必要とし，十分な精度が得られていないのが現状である．本課題では，RPM 法の推定点群及び同法線ベクトルを用いた伝搬経路推定に基づく高速な誘電率推定法を提案する．

図１にシステムモデルを示す．送受信素子#1を配置する．素子#1に対して目標の反対側に受信素子#2を配置する．目標を固定し，素子#1と#2をその位置関係を保ちながら，図の円周上で走査する．素子#1では誘電境界と内部目標境界からの反射波が得られるため，同データから上記の外部及び内部境界を推定する．素子#2では誘電体内部透過波が得られるため，同観測データから誘電率を推定する．

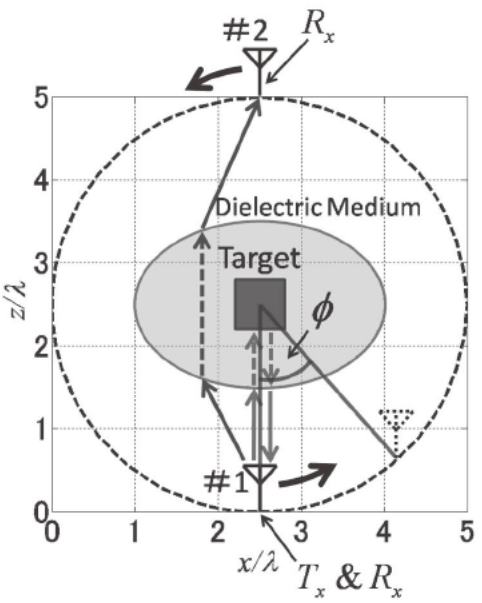

図１：誘電体推定のための観測モデル

本手法では，まず素子#1 で得られる反射波の第一到来波により距離点群を抽出し，RPM 法より外部誘電体境界を推定する．次に素子#2 で受信される信号より，誘電体内部の誘電率を推定する．但し，一般に素子#2 で観測される信号には透過波の他に，外部誘電体境界を回り込む表面波（クリーピング波）が受信される．外部誘電体形状によっては，同表面波が透過伝搬遅延推定に深刻な影響を及ぼす場合がある．

同問題に対応するため，表面波抑圧手法を導入する．具体的には，RPM 法により高精度に推定される外部誘電体境界と同法線ベクトルを用いることによって，各素子で受信される表面波伝搬経路を図２のように求める．同伝搬経路で推定される伝搬遅延量を観測伝搬遅延量から除去することで，誘電体透過に起因する伝搬遅延量のみを抽出し，透過伝搬遅延量を計算する．

上記処理では，伝搬遅延のみを用いているために高速に誘電率を推定することが可能である．一方，同精度は伝搬遅延推定精度に依存する．一般に誘電体の大きさが UWB 信号の中心波長オーダ（数十 cm）である場合，各波長でのフレネルゾーンの違いから，同透過波は周波数特性を有する．このため，送信波形に対して，受信波形が歪み，波形整合(Matched Filtering)等を用いた距離推定では，波形歪み対する距離誤差が生じる．このため，比誘電率推定精度にも大きな影響を与える．

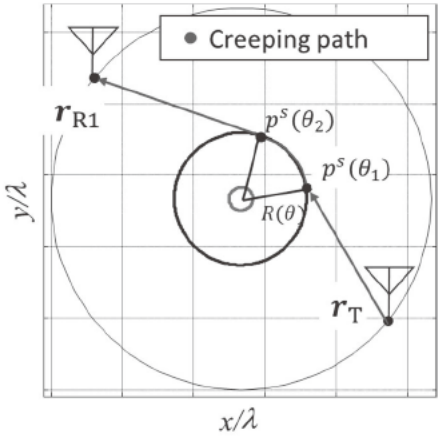

図２：表面波伝搬経路推定

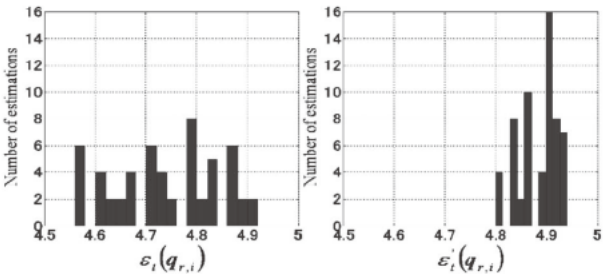

図３：推定比誘電率の頻度分布(左：補正前，右：補正後)

これを解決するため，本手法では更に，初期推定誘電率と推定誘電体境界を用いて FDTD 法により受信データを再生成し，同波形との相関処理によって同距離誤差を補正し，同補正量より誘電率を再計算する．ここで FDTD 法とは，Maxwell の方程式を差分近似で解く手法であり，十分な空間・時間サンプルが得られれば，ほぼ厳密な電磁界散乱場を計算する．最後に素子#1 で観測された誘電体内部境界からの反射波を用いて，RPM-HD 法により内部目標推定を行う．

数値計算による性能評価：

図３に同距離補正前後の各素子で推定される誘電率のヒストグラムを示す．但し，真の比誘電率は 5.0 である．同図から，補正前では推定比誘電率分布は真値より低い側に広がっており，同平均値から求める誘電率推定精度も約７％にとどまる．一方，補正後の分布では，凡そ真値付近に推定が集中しており，同精度も約２％にまで改善した．同推定精度は，特に波長規模での誘電体サイズにおいては，従来法では達成困難な推定精度を実現している．

また，同推定比誘電率と反射波から得られる距離情報を用いて，RPM 法を内部画像化に拡張した RPM-HD 法を適用した結果を図４（図５：内部目標拡

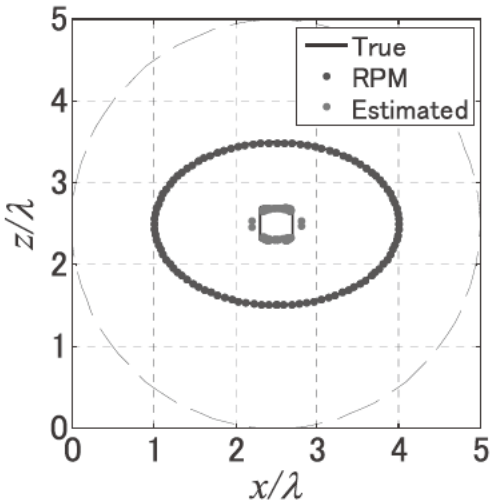

図５：誘電体及び内部境界推定例

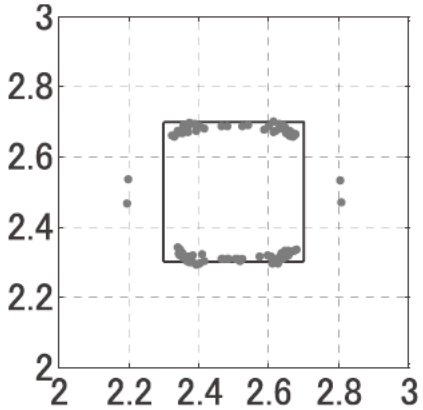

図６：内部境界推定像（拡大図）

大図）に示す．同図より，極めて高精度に内部目標を推定可能であることが分かる．各推定点と目標境界との推定精度の最頻値は約1/100波長であり，極めて高精度な推定精度が得られることがわかる．但し，目標の側面側の推定像が得られていないことがわかる．これは，同領域からの散乱波が得られないためである．

次に，本手法の実験的検討について述べる．　実験図７に実験外観を示す．誘電体目標を，基準点中心で回転させる．送信素子Txを固定する．目標回転中心に対称な位置に受信素子Rx2を一つ配置する．送信素子の隣接位置にも受信素子Rx1一つを配置する．Rx1は#1に相当し，誘電境界と内部目標境界からの反射波が得られるため，同観測データは上記の外部及び内部境界推定に用いる．Rx2はシステムモデルの素子#2にあたり，誘電体内部透過波が得られるため，同観測データより誘電率を推定する．

垂直に設置したダイポールアンテナを用いる．送

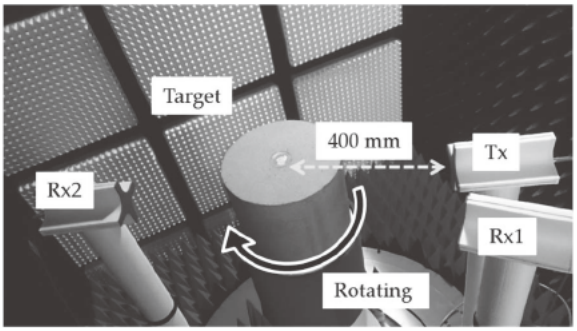

図７．実験外観

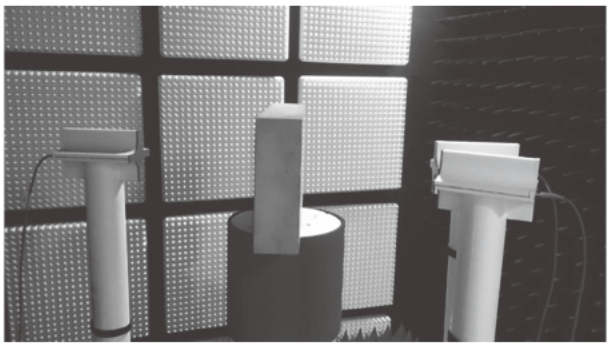

図８：コンクリート誘電率真値計測

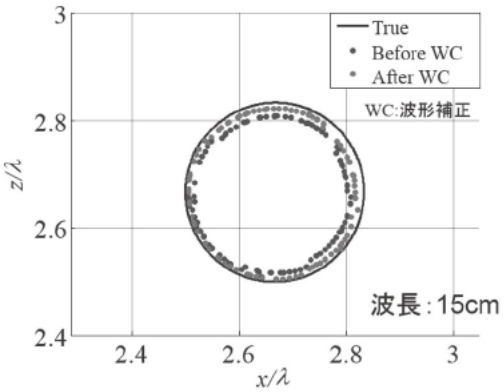

図９：波形補正前後の誘電率推定結果を用いたRPM-HD法による内部アルミ目標境界推定結果

受信信号はRF切り替えスイッチでTx-Rx1及びTx-Rx2の信号を切り替える．外部誘電体はセメント，内部目標はアルミである．両方の形状は円柱であり，高さは25cm である．VNA(Vector Network Analyzer)により，50MHz から5．55GHz までを10MHz 刻みで周波数掃引する．実効中心波長は15cm であり，距離分解能は7.5cm である．同データを逆フーリエ変換し，受信信号を得る．素子を固定し，目標を回転させることで等価的に円周上での素子走査を実現する．回転中心から素子までの距離は40cm である．

外部誘電体誘電率真値を9．07 とする．但し，外

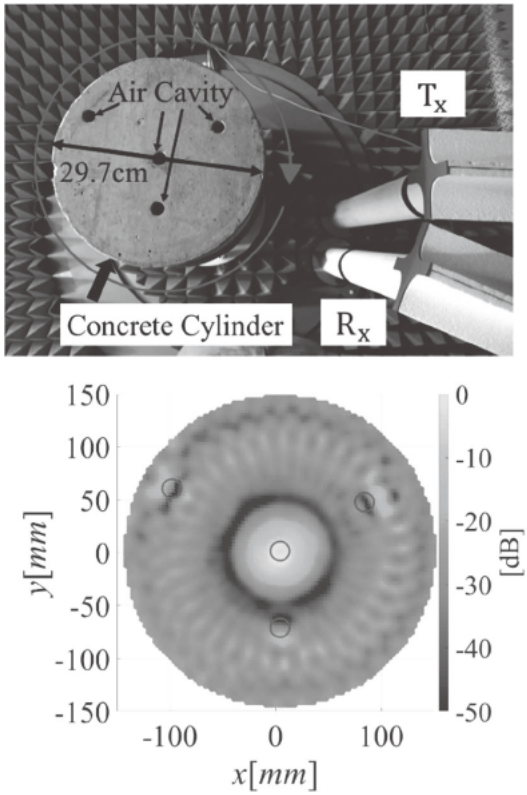

図10：左：実験風景，右：SARによる画像化

部誘電体の真値は，直方体形状の同誘電体を計測し，伝搬遅延量により推定する（図８参照）．また，波形補正においては，FDTD 法で得られる再構成波形から伝達関数を計算し，実験での送信波形に同伝達関数を適用し，再構成波形を得る．波形補正前の推定誘電率は8．56(推定誤差5．3 %)，波形補正後の推定誘電率は8．84(推定誤差2．5 %）であり，波形補正が有効であることが実験でも示された．図９に波形補正前後で推定された誘電率を用いてRPM-HD法により推定された内部境界を示す．同図より提案法が高精度な内部目標推定像を実現していることが確認できる．波形補正前後の目標境界の推定誤差RMS値はそれぞれ1．98×10^{-2}波長，0．97×10^{-2}波長であり，極めて高精度な推定が可能であることが確認できた．これは当該分野では実施者が調べた限り報告されていなかったレベルの再現精度であり，本研究成果の重要な一部である．

更に本研究課題では，計算時間の短縮と更なる高精度化に向けてアルゴリズムを改良した．

従来の拡張RPM法は，候補曲面と呼ばれる散乱点の候補点群が解析的に計算できないため，計算量が膨大となっていた．これに対して，外側の領域を

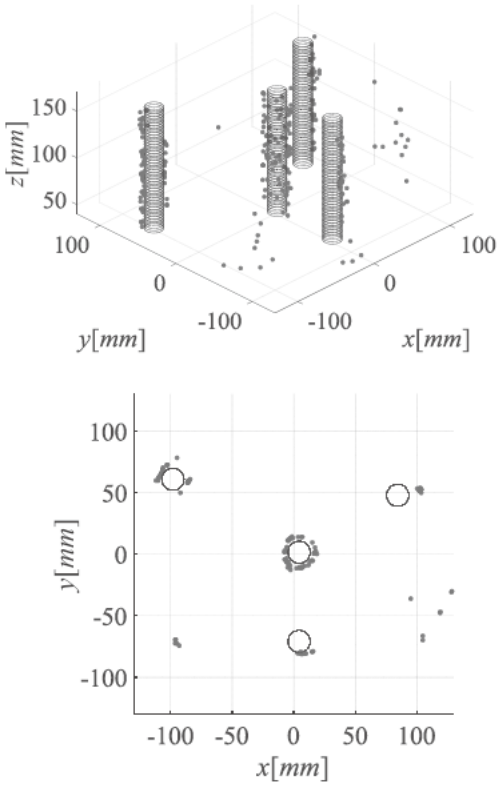

図11：上：RPM法による3次元画像化，下：同断面

Envelope法という手法で高精度に推定し，かつ同手法の特徴を利用すると，候補曲面を直接的に求めずに，同曲面同士の交点を計算することができることが分かった．これに着目することで，精度及び計算時間を飛躍的に改善させると予測される．

図10に実機実験モデルを示す．円柱のコンクリートの中に4本の直径10mm程度の円柱型空洞を空ける．中心周波数は3GHz，帯域幅は2GHzのマイクロ波を用いる．送受信素子を目標に対して円柱状に捜査して3次元的な画像を得る．図10は従来の合成開口処理(SAR)による推定結果，図11は改良されたRPM法の結果を示す．計算時間は従来のRPM法で約3万秒，改良RPM法で760秒である．また同図より，SARでは分解能が悪いため，十分な精度が得られていないことがわかる．一方，RPM法の像では4本の空洞円柱の3次元像が高精度に得られていることがわかる．同誤差のRMSEは2mm程度であり，約1/100波長の精度を実現している[1,3]．

３．マイクロ波による乳癌検知及び治療のための画像化法

に関する研究成果を述べる．

本研究課題では，内部画像化応用としてマイクロ

波による乳癌検知システムへの応用も検討した．

3.1　不均質媒質におけるRPM法を用いた超分解能画像化法

まず，本年度では高精度・高分解能画像化法であるRPM法を不均質・分散性媒質へ拡張した．従来の画像化法(SARやBeamforming)法では，その分解能は高々3cm程度程度であり，がん細胞の大きさや形等を性格に把握することは困難である．癌細胞は特徴的な形状（針葉状，突起状形態）を有していることが報告されており，同形状を正確に抽出することはがん細胞検知精度の向上に直接的に寄与すると考えられる．

しかし，一般に背景媒質が不均質・分散性媒質における画像化は非常に難しい．これは背景媒質の誘電特性に応じて伝搬モデルを決定する必要があるためであり，今までにこれに対する有効な手段は考案されていない．同問題に対して，背景媒質が既知であるもしくはデータベース化された典型的なモデルに近いという条件のもとで，申請者が独自に提案するRPM法を用いて目標形状を高精度に推定する方法を検討する．

以下に同手法の詳細を示す．がん細胞等の背景に対して高い誘電コントラストを有する対象からは，卓越した後方散乱信号が得られる．同後方散乱信号を適切なフィルタ（Wiener フィルタ）を用いて反射信号の遅延時間を高い精度で計算することができる．送受信一体型のモノスタティック計測においては，位相停留となる伝播経路は往復で同じ経路をとることがわかっているため，同遅延時間の半値は，送信点から放射された電磁界分布の等位相面が目標境界に到達した時間に相当することがわかる．この性質に着目し，高精度な電磁界解析法FDTD法を用いて到達時間における電界分布を計算し，同電界分布の等位相面を抽出する．ひとつの等位相面のみでは，反射点がどこにあるかを決定することができないため，複数の送受信位置での遅延時間についても同様の処理により電界分布から等位相面を求める．同等位相面から本来の反射点を抽出するために，ＲＰＭ法の原理を導入する．ＲＰＭ法は候補となる曲線から，適切な点を抽出するために，他の候補曲線（等位相面）との交点の集積度を評価することで，統計的に優位な点を抽出することができる．具体的には集積度を評価する関数としてガウスカーネルを用い，カーネル密度推定に類似する原理により，分布関数を決定する．同分布関数の最大となる点を反射点と決定する．これにより，各送受信位置において得られる反射点をその位置と紐付けをしながら，がん細胞境界を表現し，形状推定を可能とする．

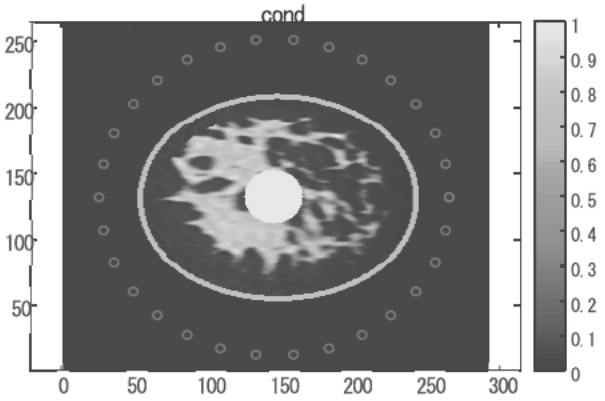

図12：MRIベースの乳房モデル及びがん細胞の配置

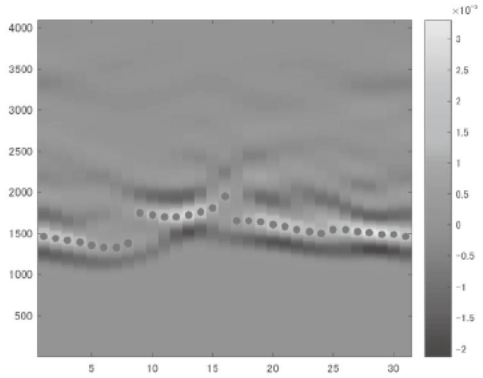

図13：各素子での癌細胞からの反射応答と抽出される距離点

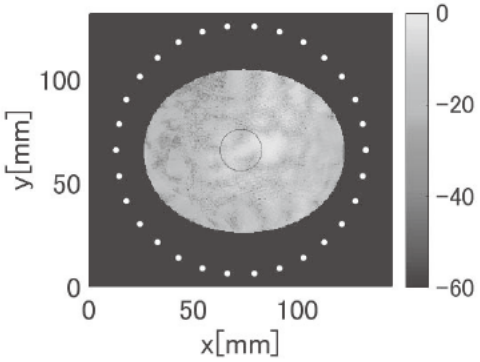

図 14：ビームフォーミングによる画像結果

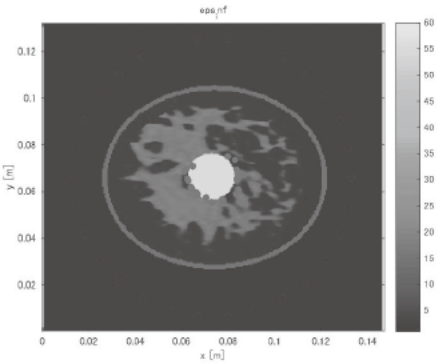

図 15：提案手法による画像結果

数値計算による性能評価について述べる．中心周波数 2.45GHz，帯域幅 2.7GHz ガウス変調パルスを送信波形とする．2 次元問題，TE 波（Transverse Electric）を仮定する．乳房媒質の平均的な誘電率での距離分解能は約 10mm である．素子走査サンプル数は３６ とする．図 12 に想定する乳房の導電率分布(MRI 画像から作成)及び FDTD 法を用いた同等位相面の例を示す．図 12 に示すように MRI ベースの画像により決定される誘電特性を用いた精緻な乳房モデル(Class３）を仮定する．Class3 は乳腺が発達した乳房であり，不均質性が強く非常に画像化難しい例の典型である．各組織のの複素誘電率の周波数特性は，単極 Debye モデルを仮定した分散性 FDTD 法を用いて散乱データを取得する．同データは University of Wisconsin-Madison の Hagness 教授らが実際の乳房標本を用いて，100 以上のサンプルから統計的に導出された数値に基づいている．

図 13 左に各素子位置で受信されるがん細胞からの応答と抽出される遅延時間を示す．ただし，背景クラッタは完全に抑圧されていると仮定する．図 14 に FDTD 法による到来波面抽出に基づくＲＰＭ法を用いたがん細胞形状推定例を示す．同図から再現された反射点は真のがん細胞境界付近に推定され，同形状・サイズを正確に把握できることがわかる．一方，図 15 は従来のビームフォーミングによる手法での再現結果である．同手法では背景媒質が完全に既知であると仮定し，処理をしている．同図より，背景クラッタが完全に抑圧され，かつ背景媒質の完全な情報を与えているにもかかわらず，同画像化による形状推定は非常に困難であることがわかる．これは，同画像処理法が点状の目標形状を仮定しながら，フォーカスさせる処理に基づいているため，各素子で反射点がことなるようなボリュームのある形状ではその原理が破綻するため精度が大きく劣化するためである．

FDTD 法を用いた等位相面抽出をイメージングに利用する試みは著者の知る限り，今までにない試みであり，またそれを独創性の高いＲＰＭ法に導入することは世界初の試みであり，学術的な先端性は非常に高く，また従来の画像化法であるビームフォーミング等にくらべて格段によい精度を得ることができる．ただし，遅延時間抽出には背景クラッタ等を適切に取り除く必要があり，これには計測の時間差（一定期間をおいて同一被験者の乳房を計測，健康状態のデータを保存し，逐次的に検査をし，その差分）をみることによりクラッタ抑圧が可能となり，また差分データから腫瘍の有無の判定等の精度が改善されると考えられる．

3.2 マイクロ波アブレーションモニタリングのためのリアルタイムイメージング法の開発

生体組織は導電率が高いため，マイクロ波のエネルギーを吸収し，熱に変換される．がん細胞は特に導電率が高いため，マイクロ波を照射することで対象領域を焼灼し，がん細胞を死滅させることができる．これは Microwave ablation という治療法であり，最小限の侵襲施術でがん細胞を確実に除去できるため，有望ながん治療法として注目されている．マイクロ波アブレーションは，特に肝臓がんの治療として用いられてきたが，乳がん治療への応用も注目されている．これは乳房を切除せずに，最小限の施術で癌治療を実施できるためであり，患者の手術後の精神的・肉体的負担を飛躍的に減らすことがで

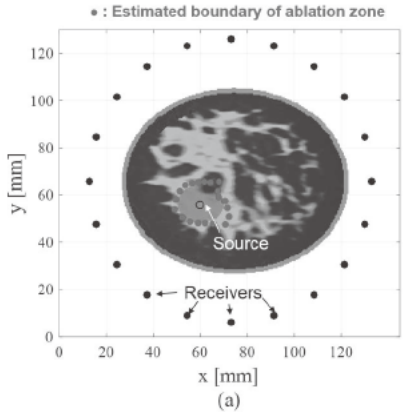

図 16：TDOA 推定に基づくアブレーション範囲推定例

きるためである．

一方で，がん細胞以外の正常細胞を焼灼しないため，同領域の範囲を逐次モニタリングして，エネルギー量を調整しなければならない．誘電体の誘電特性（誘電率・導電率）は温度依存性を有しており，それを推定することにより，生体内の温度上昇率や，またマイクロ波焼灼の空間的広がりや温度分布も推定することができる．具体的には，組織の温度が 100 度近くに達すると，その誘電率及び導電率は本来の 60～70％程度に減少することが報告されている．

レーダによるイメージングには，同誘電特性を基にした伝播モデルが必要となるが，マイクロ波焼灼の場合は，その前後でデータを取得できるため，それらのデータの相対的な情報の差異により，正確な生体組織の誘電分布を求めることなく推定範囲を決定できると予測される．本課題では，相互相関による各周波数での位相回転量，即ち到来時間差（TDOA:Time Difference of Arrival）を基に焼灼範囲を推定する手法を新たに開発した．具体的には，アブレーション前の時間応答とアブレーション後の時間応答の相互相関関数のピーク値より，ＲＦプローブから各受信センサへの到来時間の差（TDOF）を推定する．同遅延時間差から，ソースから発生した電磁波がアブレーション境界に到達した時間を算出できる．アブレーション領域は一般に乳腺組織であるので，同組織の誘電率から伝搬速度がわかる．このため，同伝搬速度と前後の誘電率の変化量を温度でモニタリングすることで，高精度にアブレーション境界を推定することができる．図 16 に領域推定例を示す．使用した数値計算ファントムは，共同研究先の研究グループが有する MRI 画像から抽出された精緻な乳房の誘電率特性（分散性を考慮）を用いた．周波数は 2.45GHz，帯域幅は 1.9GHz のガウス変調パルスをソースより送信し，31 点で受信する．アブレーション領域の温度は 99 度とし，その際の誘電率変化は元の６０％程度として文献値を参考に決定する．同図より，境界を正確に抽出できることがわかる．

同誤差の RMSE は，SNR0dB という劣悪な雑音環境下でも約 2mm 程度を保持し，ロバスト性と精度を両立することを確認した．また計算時間は通常のＰＣで 0.1 秒以内であり，リアルタイム性も十分に確保できることが確認された．本成果は，当初の研究計画にないものであるが，報告者の信号処理に関する知見と共同研究先のアブレーションに関する知見が適切に融合した成果であり，国際会議では非常に高い評価を受けている（Best paper Finalist に選出）．また同手法は非常に実用性が高く，マイクロ波によるアブレーションと同モニタリング技術を大きく前進させる成果であると確信する．

４．まとめ

本研究課題ではマイクロ波による超分解能内部画像化法を拡張し，非破壊計測及び乳癌検知等の社会的需要の高い応用モデルに対して，従来手法よりも飛躍的に精度や分解能を高めることを可能にした．今後は，企業との共同研究等を通して，同技術の実用化のために基盤・応用の両面で研究を推進したい．

発表論文

[1] S. Takahashi and S. Kidera, "Acceleration of Range Points Migration Based Microwave Imaging for Non-destructive Testing", IEEE Antenna Wireless Propagation Letters, 2018 (in press)

[4] S. Kidera and K. Noritake, "Boundary Extraction Based Imaging Method by Incorporating FDTD Based Wavefront Analysis for Microwave Mammography," IEEE Proc. of ICEAA 2017, Sep., 2017, (Invited lecture).

[3] A. Yamaryo, T. Takatori, S. Kidera, and T. Kirimoto, "Range Points Migration Based Image Expansion Method Exploiting Fully Polarimetric Data for UWB Short Range Radar", IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing, Apr. 2018 (in press).

[4] S. Kidera et al, "TDOA-Based Microwave Imaging Algorithm for Real-Time Microwave Ablation Monitoring ", Int. Jnl. Microwave & Wireless Technologies, Cambridge University Press., Nov. 2017.