

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月20日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06325

研究課題名（和文）レーダ画像変位を応用した誘電体材料の複素誘電率計測システムの開発

研究課題名（英文）Measurement System for Complex Permittivity of Dielectric Material Applying Radar Image Displacement

研究代表者

小林 弘一（Kobayashi, Hirokazu）

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：00588303

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：マイクロ波ミリ波帯における従来の誘電率計測法は、伝送線路あるいは空間内での試料の有無による電気的变化から算出している。本研究ではレーダと金属ターゲットの間に置かれた被測定物の有無によるレーダ画像の遅延変位を応用した新しい誘電率計測法に関する研究である。一般の壁透過レーダによる画像では、壁の遅延位相による画像の位置ずれを補正するためには壁の等価的な誘電率と厚みが必要である。逆に壁が無いときの画像位置と比較することで、壁の電気諸元を割り出すことができる。本研究により、最適なレーダ画像生成法が考案され、電気諸元が未知の壁があるときの等価的な複素誘電率および厚みを計測する新しい評価法が確立できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球上の大半の物体が誘電体で占められており、その誘電率を知ることは基本的で重要な研究項目となる。材料の誘電率は、生体内部の医療画像処理、空港セキュリティでの危険物探知処理など、様々な分野での設計、シミュレーションの際の基本パラメータとなっている。近年では、植生などの空間に分布した物体、あるいは建物の壁などの多層平板による複合物体の等価的な誘電率も、その評価法の実用化が望まれている。また、植生あるいは土壌等の等価誘電率は、地球規模での森林、土壌に含有する水分量と相関があり、近年、地球温暖化に伴う環境変化のパロメータとして高い関心が集まっている。

研究成果の概要（英文）：The conventional permittivity measurement for microwave and millimeter wave is evaluated from electrical change due to presence or absence of sample under test in transmission-line or space. In this investigation, we are studying a novel measurement method of dielectric permittivity by using delay displacement of the radar image between the radar and the metal target.

For image by wall penetrating radar, it is generally necessary to know equivalent permittivity and thickness of the wall in order to compensate displacement of the image due to the delay phase in the wall. Conversely, it is possible to determine electrical specifications of the wall by comparing with the image position when there is a wall or not. In this study, we investigated the optimal radar imaging method and established a new evaluation method to measure the equivalent complex permittivity and thickness when the electrical specification has unknown wall.

研究分野：レーダ画像処理、電磁界理論、アンテナ

キーワード：レーダ画像 電磁波遅延 複素誘電率 誘電率計測 等価誘電率

## 1. 研究開始当初の背景

導波管線路等による従来の誘電率評価法では、管内に試料を充填させたときの電氣的变化量から誘電率を算出している。そのため、植生など元々の形状のままでの計測は現実的に不可能である。また、送受信アンテナ間に置かれた試料による反射、透過係数の変化から誘電率を算出する自由空間法では、不安定な S/N 比に依存して計測精度に限界があり、さらに多層誘電体での各層個別の誘電率計測は原理的に不可能である。

植生あるいは土壌等の等価誘電率は、地球規模での森林、土壌に含有する水分量と相関があり、近年、地球温暖化に伴う環境変化のバロメータとして高い関心が集まっている。これらの(等価的な)誘電率を計測できる評価法確立は、リモートセンシング分野等から根強い要求がある。報告者が既に考案、提案していたレーダ画像変位による誘電率評価法では、植生などの空気層を含む物体、空間内に物体が分布しているときの等価的な誘電率、あるいは建築物における壁などの多層に重なった誘電体平板などの各層の個別誘電率などの誘電率が伝送路法による精度と同程度で得られる可能性がある。しかも、受信電力差から損失を算出することにより複素誘電率の評価も可能である。

材料の誘電率は、生体内部の医療画像処理、空港セキュリティでの危険物探知処理など、様々な分野での設計、シミュレーションの際の基本パラメータとなっている。近年では、植生などの空間に分布した物体、あるいは建物の壁などの多層平板など複合物体の等価的な誘電率も、その評価法の実用化が望まれている。

壁透過などの近距離レーダでは、機械的あるいは電氣的にアンテナを走査することで前方物体の画像を取得することができる。この際、壁(誘電体)の遅延位相による画像の位置ずれを補正するためには、壁の等価的な誘電率と厚みの情報が必要である。逆に、壁が無いときの画像位置と比較することで壁の電氣緒元を割り出すことができる。この原理が本研究の骨子である。

## 2. 研究の目的

地球上の大半の物体が誘電体で占められていることを考えると、その誘電率を知ることは基本的に重要な研究項目となる。マイクロ波ミリ波帯における従来の誘電率計測法は、伝送線路あるいは空間内での誘電体試料の有無による電氣的变化から算出する方法が主流となっている。

以上に対し、本研究ではレーダと金属ターゲットの間に置かれた被測定物の有無によるレーダ画像の遅延変位を応用した新しい誘電率計測法の確立を目的としている。報告者は基礎理論と部分的な実測結果を既に学会発表しており、この部分的な成果を総合的な評価計測システムとして構築し、計測精度、適用範囲の精査、簡便性等を検証実証することを目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究は平成 28-30 年度にわたって行われ、具体的には以下の項目を実施した。

(1) まず、画像を得るための CW レーダとアンテナ走査系をコアとする評価計測システムの基本設計を行い、同時にこれらを制御しデータを取得するソフトウェアを作成した。

(2) 一方、計測で得られるデータから画像を生成するコードを作成した。これは既に学会等で発表したアルゴリズムを基に、アンテナビームの影響、多重反射、電力損失等、誘電率算出精度の改善につながる要因を総合的に考察している。

(3) 以上の理論をシミュレーションで確認するために、ターゲットの 3 次元的な散乱界を定式化し、コードを作成した。

(4) また、多層の誘電体平板に対する各層の誘電率は、厚みと誘電率が既知の平板を付加的に張り付けることで、算出することができた。

上記に引き続き、誘電率算出理論の改善を継続しつつ、開発作成した評価計測システムによって、各種誘電体の実測を行った。具体的には、以下の項目を実施している。

(5) 初年度に開発した画像生成コードおよび 3 次元ターゲット散乱界コードによってシミュレーションを継続、これにより誘電体評価の算出理論の妥当性、精度を確認でき、必要に応じて改善を図った。

(6) 一方、開発した評価計測システムを使って実際の計測を行い、画像生成、誘電率算出理論の妥当性を確認した。

(7) 多層誘電体平板、植生等の空間に分散した物体による計測を行い、文献等の公表算出値と比較検証した。

(8) レーダ画像生成は本研究で考えているアレイファクターによる方法の他に伝統的な合成開口処理(SAR)によるコードを作成し、精度改善のための比較検証を行った。

## 4. 研究成果

### (4-1) アレイフォーカシング(AFF)によるレーダ画像

アレイファクター(AF)によるレーダ画像生成の考え方は、実測信号の位相情報と照射領域内の目標物からの理論的なエコー信号の位相情報の相関性をみる方法である。この相関性は簡単な位相の級数計算で行うことができ、一種の合成開口処理とみなすことができる。電波を送信し、そのエコーを受信するためには、アレイの各素子を全て用意する必要はない。ターゲットとレーダの位置関係が相対的に固定されている、あるいは処理レート内ではほぼ移動していない、などが仮定できると、1 個のアンテナを機械的に走査してもよい。

また、送受信アンテナは回路の複雑さを避けるため、別々に用意する方が測定系も簡単になる。例えば、汎用のネットワークアナライザなどを送信源および受信系に用いる場合、送受信のアイソレーシ

オンを取るために送信と受信のアンテナを空間的に離す構成も可能である。また移動する送信の位置座標数と受信のそれは違っていてもよく、送信ポイントの方が受信よりも少ない構成はコスト効率が高いと思われる。

今、複数の波源が形成する電磁界に対して、その波源を点として捉え等方性の放射パターンを仮定する。そして、各波源(アンテナ)はその位置で給電の位相は同じであるとして、遠方での電磁界を各アンテナの座標による位相差を考慮した波動の単純な重ね合わせで表現する。これを AF と呼んでおり、波源配列座標が平面の場合には Fourier 級数と同じ形となる。実際の各アンテナは指向性があるので、これを AF に重畳すると、アレイ全体の合成放射パターンが評価される。ただ、アンテナ間の空間相互結合を無視しているので、条件によっては実際と合わない場合も発生する。このような考えで、空間内の任意座標に点波源が孤立して配列されているときの AF を求めると、球座標の角度変数を $(\theta, \phi)$ として、基本式

$$f(\theta, \phi) = \sum a_n \exp\{jk(x_n u + y_n v + z_n w)\}$$

が得られる。ここで、 $(x_n, y_n, z_n)$ は  $n$  番目素子の 3 次元空間座標( $u=\sin\theta\cos\phi, v=\sin\theta\sin\phi, w=\cos\theta$ )であり、 $a_n$ は  $n$  番目素子の複素振幅である。上式は空間に存在する  $n$  個の孤立点状波源が遠方につくる電磁界であり、例えば、この点波源を近傍界のサンプルデータとすると、アンテナあるいは RCS 測定という近傍界遠方変換に適用でき、かつ平面サンプル以外の円筒、球面走査の場合にも容易に計算が可能となる。また後述するように、上式は 3 次元座標で表されるので、3 次元の画像生成も可能となり、サンプル(送受信アンテナ)座標も任意で良いことが予想される。

上式に関連してもう少し詳しく見るために、画像を意識した位置座標変数の散乱界モデルを

$$e^s(x, z) = \sum_{m=1}^M A_m \cdot \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_m)$$

と表す。ここで、 $\mathbf{r}, \mathbf{r}_m$ は各々波源と観測点の位置ベクトルであり、Dirac の Delta 関数  $\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_m)$ がいわゆる画像のピクセル座標に対応していると考えられる。Delta 関数をフーリエ変換した関係式を使うと、波数ベクトル空間  $\mathbf{k}$  での散乱界  $E^s(\mathbf{k})$ の逆フーリエ変換したものが上式になる。従って、Delta 関数の上記表示式をフーリエ変換すると、

$$E^s(\mathbf{k}) = \sum_{m=1}^M A_m \exp\{-j(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_m)\}$$

が得られる。上式で例えば、 $x$ - $z$  面での画像( $z$ はレンジ方向)は  $\mathbf{r}_m=(x_m, z_m), \mathbf{r}=(x, z), \mathbf{k}=(k_x, k_z)$ となる。上式はレーダで得られる受信データの形となっており、先の AF と類似した表示式となっており、これらを基に近傍ターゲットの焦点化と送受信化操作を行えば、ターゲット座標の画像データが得られることになる。

このため、まず遅延位相を考察する。水平面内の角度方向、方位と距離および高さ方向の座標を直角座標系 $(x, y, z)$ で表す。図 1 に示すように、 $m$  番目における送信アンテナの座標を  $\mathbf{r}_m^t=(x_m^t, y_m^t, z_m^t)$ とし、 $n$  番目における受信アンテナの座標を  $\mathbf{r}_n^r=(x_n^r, y_n^r, z_n^r)$ とする。一方、画像データの変数となる目標散乱物の座標を  $\mathbf{r}_p=(x_p, y_p, z_p)$ と表す。 $m$  番目の送信アンテナからの信号は、焦点と仮定する目標物の座標 $(x_p, y_p, z_p)$ で反射散乱した後、 $n$  番目の受信アンテナに戻る。このときの光学的な経路長は、これを  $r_{mn}=(x_p, y_p, z_p)$ とすると、

$$r_{mn}(x_p, y_p, z_p) = |\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_m^t| + |\mathbf{k}_n^r - \mathbf{r}_p|$$

で与えられる。空間波数は  $k$  であるので、アンテナとターゲット間に障害物が存在しない場合の位相経路は  $kr_{mn}$  に換算される。この焦点化操作となる位相変化を AF に考慮すれば、ターゲット画像が得られることになる。

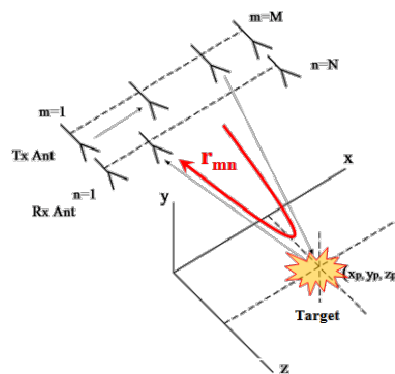


図 1. AFF によるレーダ画像

#### (4-2) 透過レーダと AFF 画像化処理

レーダの送信周波数には連続波形を想定し、周波数をステップ状に掃引させる。アレイの  $m$  番目の送信アンテナから送信して  $n$  番目の受信アンテナで計測された  $l$  番目のステップ周波数  $f_l$ での受信強度を  $P_{lmn}(f_l, r_{mn})$ とする。このとき、ターゲット座標  $\mathbf{r}_p$ を画像領域での変数  $\mathbf{r}(x, y, z)$ に置き換えると、レーダ前方の電磁界強度は

$$Q_0(\mathbf{r}) = \sum_{\ell=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N P_{\ell mn}(f_\ell, r_{mn}) \exp\left\{j2\pi \frac{f_\ell}{c} r_{mn}(x, y, z)\right\} \cdot \exp(j\phi_\ell)$$

で評価できると考えられる。ここで、 $M, N, K$ は各々送信と受信アンテナ数、周波数ステップ数である。ここで、位相  $\phi_l$ は測定システムあるいはレーダ系の内部遅延量であり、レーダのセッティング時に導体球などの標準校正ターゲットでこの量を補正すれば良い。上式の座標関数を変数  $\mathbf{r}(x, y, z)$ として直接描画すれば、対象領域の画像データ、しかも場合によっては 3 次元画像が得られることになる。

以上のように AFF 画像は、受信々号と対象領域の相関性の度合いを位相の整合性として表現したものと考えることができる。これはターゲット領域を走査する  $\mathbf{r}$  座標とターゲット座標  $\mathbf{r}_p$ の差  $\mathbf{r}-\mathbf{r}_p$ が非常に小さい値をとるターゲット近傍で、 $Q_0(\mathbf{r})$ は最も強くなり空間スペクトラムのピークを呈する。

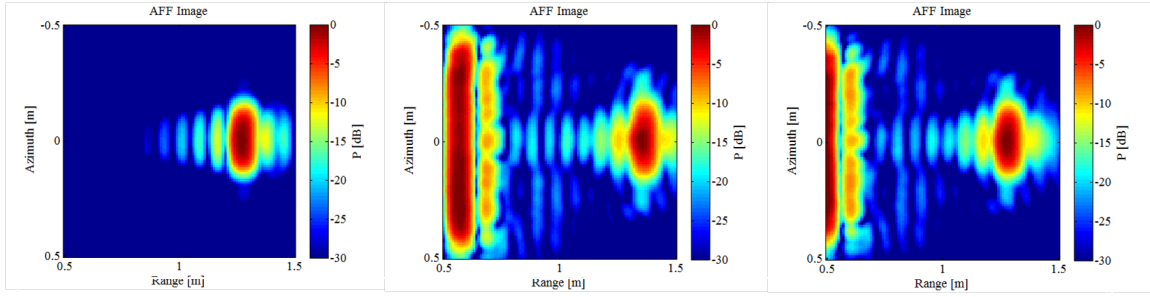


図 2. 1 層誘電体の AFF によるレーダ画像：左より誘電体無し、補償無し、有り

上式は一樣な空間内にターゲットが孤立して置かれたときの表示式である。従って、土中などの埋設物あるいは壁透過などを意識すると複数の異種媒質の誘電率の違いに依存する経路差を考慮することも必要となる。また、フォーカシング画像の生成過程から推測できるように、上式は平面アレイの Fourier 級数形となっているので、クロスレンジ画像分解能は開口長に依存するビーム幅の半分ほどとなることが予想される。壁透過あるいは埋設物検知用のセンサーでは、レーダとターゲット間に不要の障害物が存在する。これは所謂クラッタとして見做すこともできる。多層誘電体層を透過壁のモデルとすると反射と透過係数を受信々号に取り入れてその存在を考慮できる。AFF によるレーダ画像は、とりわけ近距離において有益である。透過係数の入射角依存性および周波数依存性が、どの程度画像の質に影響を与えるかは重要な確認事項である。

さて、壁を多層の誘電体平板として扱うと、波動はこれらの内部で多重の反射と透過の後、波動の進行方向には最終の透過係数を伴ってターゲットに伝搬する。一方、アレイの送受信点は随時変わるので、この多層平板への入射角は固定されていない。このとき、一つ問題になるのが誘電体内での波動の遅延量である。ターゲットと正対しているときを基準とすると、それ以外の入射角をもって入射する波動は常に遅延している。近傍領域でのレーダセンサでは、この遅延量はかなり大きくなる場合があると予想される。特に、アレイ開口長がターゲット長より大きく、入射角が数十度を超える場合の遅延量は距離に換算してセンチメートルのオーダーとなる。多層の誘電体平板による位相遅延を計算する簡単な表示式は Snell の法則を用いて誘導できる。この最終結果を次式に示す。

$$Q(\mathbf{r}) = \sum_{\ell=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N G_{\ell mn}^t(f_\ell, r_{mn}) \cdot T_{\ell mn}^t(f_\ell, r_{mn}) \cdot \exp\{jkD^\ell(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}, \mathcal{N})\} \cdot G_{\ell mn}^r(f_\ell, r_{mn}) T_{\ell mn}^r(f_\ell, r_{mn}) \cdot \exp\{jkD^r(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}, \mathcal{N})\} \cdot P_{\ell mn}(f_\ell, r_{mn}) \cdot \exp\left\{j2\pi \frac{f_\ell}{c} r_{mn}(x, y, z)\right\} \cdot \exp(j\phi_\ell)$$

ここで、 $D^\ell(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}, \mathcal{N})$  と  $D^r(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}, \mathcal{N})$  は各々送信側とターゲット側から入射したときの  $\mathcal{N}$  層の誘電体壁による挿入経路長を表しており、 $T_{\ell mn}^t, T_{\ell mn}^r$  は文献[9]で厳密に定式化している  $\mathcal{N}$  層誘電体による透過係数であり、各々送信側から入射したときとターゲット側から入射したときの係数である。また、 $G_{\ell mn}^t, G_{\ell mn}^r$  は各々送信と受信アンテナの空間パターン(利得)特性であり、これがターゲットからの散乱電力に重みのように作用するので、特に近傍領域では無視できない補正となる。

#### (4-3) 画像を利用した壁の等価誘電率と厚みの評価

まず、1 層の壁があるときの測定結果について例を示そう。壁は厚さ 6 cm のコンクリート壁で構成し、アンテナとターゲット間距離は 100 cm、アレイ開口長とターゲットである金属平板の幅は各々 90, 22 cm、中心周波数は 4.1 GHz で比帯域幅は約 48% である。図 2 はコンクリートの比誘電率を  $\epsilon_r=5.4$  としたときの AFF 画像である。この図ではシステム遅延量  $\exp(j\phi)$  の補正前なので、レンジ方向 127 cm のところにターゲット中心が表れている。上式による補正後の画像(同図(右))は(中)に比べ幾分改善されているのが分かる。クロスレンジ(Az)方向とレンジ方向の断面変化を詳しくみると、予想される通り、中心部よりも周辺部の方でその効果が明確に見られることが確認できる。上記モルタルコンクリートの比誘電率は壁が無いときのターゲット画像のピーク値あるいは中心座標と壁があるときのそれを比較し、ターゲット全体の画像をレンジ方向に移動させて、誘電率を逆算して求めることができる。

取得画像の位置ずれを補正できる場合、つまり対象物の(等価的な)誘電率の計測ということの主眼とすると、応用上、この計測法はこれ自体で重要な評価法となる。一般に、誘電率の計測は同軸線路、導波管、空洞共振器などの伝送線路を利用して誘電体実装前後の変化より行う方法、そして空間での反射係数の変化から求める方法等がある。前者は正確な誘電率が求められるが、空間に分布している大きな物体などには不適である。後者の空間定在波法は、電波吸収体の反射係数測定に良く用いられる空間定在波法であるが、反射係数の S/N 比が不安定になる、あるいは反射係数がアンテナボアサイト方向のビーム近軸に依存している、などの欠点がある。ここでの画像変位による方法は、本研究でいう画像生成処理 AFF 法の派生的な計測法として、森林などの空間に分散した比較的大きな物体の等価的な誘電率に対しても、それなりの安定した環境計測としての精度が期待できる。

さて、以上は 1 層コンクリート壁の場合である。この 1 層のコンクリートの両側に別の物質の誘電体平板を張り付けた 3 層の壁の場合にも同じように、等価的な誘電率を求める方法も可能である。壁の有無による 2 巡の計測方法は厚みと誘電率が既知か未知かで二者択一的であった。しかし、壁の有無というのは、その前後で誘電体が異なっているということに他ならない。2 回計測を実施してもいいという前提では、壁透過レーダに直接応用できる可能性がある。不特定の壁の(等価的な)誘電率および厚み



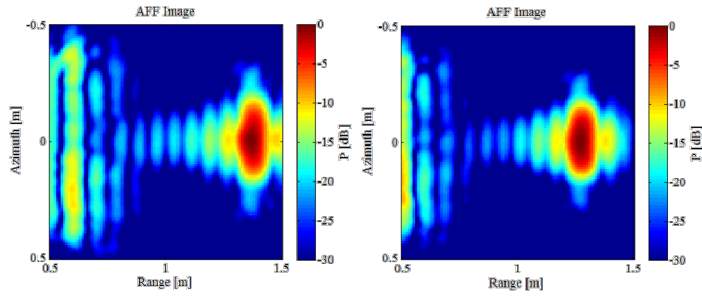


図 3. 3層誘電体の AFF によるレーダ画像：左は補償前、右は補償後

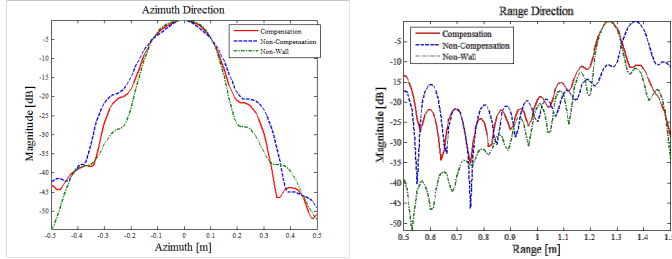


図 4. 図 3 のクロスレンジ方向(左)とレンジ方向(右)の最大断面

は一般に未知である。そこで、1 回目の計測で対象物を測り、2 回目の計測でこの対象物に予め用意した誘電率と厚みが既知の平板を貼り付けて計測する。得られた画像の画像変位量を補正すれば、対象物(壁)の等価的な誘電率と厚みが評価できることになる。このときに必要なのは、前述の多層誘電体平板による反射・透過理論であり、経路長補正アルゴリズムである。

経路長補正(AFF)に際しての理論背景と画像変位法の定式化を行う。誘電率が  $\epsilon$ 、透磁率が  $\mu$  の媒質中の伝播速度は  $v=(\epsilon\mu)^{-1/2}$ 、真空中では光速  $c=(\epsilon_0\mu_0)^{-1/2}$  で与えられる。比誘電率  $\epsilon_r$  と比透磁率  $\mu_r$  を導入すると、媒質中の波動の速度は  $v=c/(\epsilon_r)^{1/2}$  となる。ただし、非磁性体媒質( $\mu_r=1$ )を想定している。このときの媒質中の波数は  $k=(\epsilon_r)^{1/2}\omega/c$  で与えられる。一方、座標  $z$  の正の方向に進む誘電体内の波動は伝送線モデル(TLM)より、

$$E_z = E_0 e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)}, \quad jk = \alpha + j\beta$$

で表される。 $\alpha$ 、 $\beta$  は各々を減衰定数、位相定数と呼ばれており、媒質が無損失であるとする  $k=\beta$  となる。これから明らかのように、媒質中の波動は上式より

$$\Delta\phi = k_0\sqrt{\epsilon_r} z_0 - k_0 z_0 = k_0(\sqrt{\epsilon_r} - 1) z_0$$

だけ経路長が伸張する。これが画像生成時の位置変位量  $\Delta\phi/k_0$  となる。上式で  $z_0$  は誘電体平板の厚みに対応している。位相挿入長に換算すれば、画像上で  $L$  の位置変位に対し、 $\Delta\phi=k_0L=k_0[(\epsilon_r)^{1/2}-1]z_0$  だけの位相が経路の片道(1-way)に追加されたことになる。これより、

$$\epsilon_r = \left(\frac{L}{z_0} + 1\right)^2 \geq 1$$

という評価式が導かれる。得られた画像からターゲットの移動量  $L$  を何らかの方法で求める際、その読み取り誤差を  $\pm\Delta L$  とすると、第 1 項まで残して、

$$\epsilon_r \rightarrow \epsilon_r \pm \sqrt{\epsilon_r} \cdot \frac{\Delta L}{z_0}$$

と変化する。これより、 $z_0$  が相対的に大きい程その誤差の影響は低下し、 $(\epsilon_r)^{1/2}$  の大きさが大きいとき程その影響が大きくなることが分かる。

図 2 の実験例では、既知量である誘電体厚みが  $z_0=6$  cm、画像上の位置変位量が  $L=8$  cm であり、 $\epsilon_r=5.4$  が算出される。読み取り誤差を  $\pm 0.5$  cm とすると、凡そ  $\Delta\epsilon_r=\pm 0.2$  の誤差が付帯することになる。なお、マイクロ波回路理論でいう同軸モード(TEM mode)波の変化から誘電率を計測する同軸管法にて同コンクリートを計測すると、 $\epsilon_r=5.1$  となった。文献[10]ではドライコンクリートの比誘電率は  $\epsilon_r=4$  から 10 であると記述されている。

アンテナ位置を固定した通常のレーダの場合でも、その反射信号の中には挿入位相情報が含まれており、上述の操作が可能である。しかし、ここで述べる画像情報を使って誘電率あるいは厚みを計測すると、非常に安定した S/N 比で計測できるというのがポイントとなる。特にパルスレーダ等の高度なレーダを使わなくても良い、クロスレンジ方向の位置特定もできるというのは大きなメリットである。複素誘電率の虚部もまた、壁の有無による受信電力量を比較することで算出できる。壁に照射した反射電力分は考慮できないが、多層平板の反射・透過理論で虚部の数値を追い求めることができる。図 2 のコンクリートの実測例では、 $\epsilon_r=5.4-j0.29$  となった。

実測の 2 番目の例として、3 層コンクリートの場合を示す。3 層壁にはコンクリートサンプルの両側に厚さ 9.6 mm の石膏ボードを張り付けている。このとき取得した AFF 画像を図 3 に、その断面強度を図 4 に示す。石膏ボードの厚み 9.6 mm は事前に計測して既知であるが、誘電率は不明である。コア部のコンクリートの厚みと比誘電率は前述の 60 mm と評価値  $\epsilon_r=5.4$  である。これらの情報と AFF 画像の移動量を多層誘電体の反射・透過理論[9]に適用し、両壁の石膏ボードの誘電率を算出すると、 $\epsilon_r=4.0$  となった。一般の教科書には石膏ボードの誘電率はドライコンクリートとほぼ同じとなる  $\epsilon_r=5$  前後と記載されている。

#### (4-4) 議論とまとめ

壁透過レーダなどの応用状況を想像すると、壁の厚みとか誘電率は一般に未知数である。しかし、本研究の事実を用いると、この未知数は等価的な1個の誘電体平板として計測できる。つまり、既知の誘電体平板を壁に貼り付けて、貼り付け前と比較すればよいことになる。さらに、諸元が未知の多層壁は外部から諸元が既知の複数種の誘電体を貼り付けて各々計測する(計  $N$  回)ことにより、誘電率と厚みの組合わされた諸元は求められる。問題は誘電率と厚みの分離であるが、これは、次のような考察ができる。今、空気層は考えないで壁構成が  $N$  層あるとする。このとき、層と層の境界では複雑な波動の反射および屈折が予見されるが、各層の挿入位相を近似的に  $k_0(\epsilon_i)^{1/2}z_i$  で与える。 $\epsilon_i$  と  $z_i$  は  $i$  番目の層の比誘電率と厚みである。これに法線から測った壁に対する入射角  $\theta_0$  も考慮すると、 $k_0(\epsilon_i)^{1/2}z_i \sec\theta_0$  となる。従って、各層での遅延した挿入位相を単純に加えると、前記と同じ形の関係式が導かれる。

壁などの障害物によるターゲット画像の位置ずれは壁の誘電率および厚みに依存する。従って、壁の有無の画像位置と比較すると壁の等価的な誘電率と厚みが推測できる。この測定法は比較的大きい物体に向いており、例えば、空間的に分散した森林などの等価的な誘電率測定も非現実的な話ではない。これらは森林等のバイオマス計測にも適用できる可能性がある。本研究の画像変位法により、その誘電率と奥行きの評価が実測で求められる(測定範囲などの標準化が前提)。より高精度な計測は相対的な画像変位量  $L$  の評定精度を増すことである。前述の壁の厚み  $z$  を可能な限り厚めのものを採用する以外に、反射体サイズはより小さい点状ターゲットにする、そして、周波数帯域を広げるなどの対策によって改善できることも確認している。また、誘電率と厚みの分離に関しては、層数が少ない場合、近似的な方法で各々独立した測定値を得られることも確認できた。

#### <参考文献>

- [1] D. Mensa, High Resolution Radar Cross-section Imaging, Artech House, 1991.
- [2] M. Leigsnering and A. Zoubir, Fast Wideband Near-field Imaging using the Non-equispaced FFT with Application to Through-wall Radar, 19th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2011), pp.1708-1712, 2011.
- [3] H. Kobayashi, Y. Yamaguchi and Y. Cui, "Simple Near-field to Far-field Transformation Method Using Antenna Array Factor," Journal of Wireless Networking and Communications, Vol.2, No.4, pp.43-48, August 2012. Online URL: <http://article.sapub.org/10.5923.j.jwnc.20120204.03.html>
- [4] G. Arfken, etc., "Mathematical Methods for Physicists," 7th ed., Academic Press, 2013.
- [5] 稲見麻央, 小林弘一, 山口芳雄, アンテナ特性を考慮した AF による近距離レーダ画像, 電子情報通信学会技術研究報告(宇宙・航行エレクトロニクス), SANE2012-52, pp.19-24, 2012年8月.
- [6] 布施行規, 荒木完, 埋設地雷離隔探知方式に関する基礎的検討, 電子情報通信学会技術研究報告(宇宙・航行エレクトロニクス), SANE2007-95, 2007年12月.
- [7] 小林弘一, 稲見麻央, 山口芳雄, アレイファクターによるレーダ画像について, 電子情報通信学会技術研究報告(宇宙・航行エレクトロニクス), SANE2011-138, pp.65-70, 2011年12月.
- [8] H. Kobayashi, M. Inami, S. Park and Y. Yamaguchi, G. Singh and Y. Cui, Radar Imaging by Using GTD Near-field Model and Antenna Array-factor, International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2012), Pos1-32, Japan, Oct. 2012.
- [9] 小林弘一, "空間波動の工学理論," サクラテック出版, ISBN 978-4-9905821-0-4, 2011年12月.
- [10] D. Daniels, "Surface-Penetrating Radar," IEE, Radar, Navi. and Avionics Series 6, UK, 1996.

#### 5. 主な発表論文等

[学術誌論文 計1件]

- [1] H. Kobayashi, and S. Takaoka, Short-Range Microwave Radar Imaging and Permittivity Estimation for Multilayered Dielectrics, IEEE, Trans. AP. (submitted in March 2019) (査読有)

[学会発表 計9件]

- [1] 小林弘一, レーダ断面積と高周波漸近理論, その応用, 電子情報通信学会技術研究報告(宇宙・航行エレクトロニクス), SANE2016-6, pp.29-38, 2016年4月. (査読無)
- [2] 小林弘一, アレイファクター理論を応用した近傍界の遠方変換とレーダイメージング, 電子情報通信学会技術研究報告, SANE2015-38, pp.25-30 (AP2015-76, pp.89-94), 2015年8月. (査読無)
- [3] H. Kobayashi, S. Takaoka, etc., Permittivity Estimation of Multilayered Dielectrics by Wall-Thru Radar Image, ISAP2014, WE3B-04, Dec. 2014. (査読有)
- [4] H. Kobayashi, S. Takaoka, etc., Novel Permittivity Estimation for Dielectric Plate by Radar Image, APMC 2014, FR3G-17, pp.1336-1338, Nov. 2014. (査読有)
- [5] H. Kobayashi, Measurement for Permittivity and Thickness of Multilayered Dielectric Plate by Wall-through Radar, ICSANE2013, SANE2013-71, pp.01-06, Nov. 2013. (査読有)

[その他]

大阪工業大学 HP, 研究室 Voice, 電磁波が未だ出来ること

<https://www.oit.ac.jp/japanese/voice/eng/detail.php?id=201604005>