

電磁波を用いた凍結検知技術に関する研究

新井 浩成, 宮崎 俊之

Research on a Pavement Freezing Detection Method with Microwave

Hironari ARAI, Toshiyuki MIYAZAKI

抄 録

ベクトルネットワークアナライザと一対のアンテナを組合わせた電磁波の反射率を測定する環境を電波暗室内に構築し、アスファルト、コンクリート、圧雪路面を模擬した測定対象に対し、Sバンド帯及びKバンド帯2つの周波数帯の電磁波の反射率を測定した。その結果、乾燥、湿潤、凍結の3つの状態について差が生じることが確認され、実環境での凍結検知の可能性が得られた。

キーワード：凍結検知，ベクトルネットワークアナライザ，電磁波，反射率

1. はじめに

本道は、1年の約1/3の期間が雪に覆われる積雪寒冷地である上、公共交通機関網の整備が不十分な地域も多く、自動車運送に大きく依存している。住民・運転者の安全と自動車輸送を確保するため、凍結路面上での自動車スリップ事故の防止が重要な課題となっている。特に目視では凍結が湿潤の状態判断ができないブラックアイスバーンなどの凍結路面(図1)では事故の発生率が高い。そのため、路面状況を検知し、瞬時に運転者や道路管理者が把握することができ、安全操作や凍結防止処置に活かすことができる凍結検知技術の開発が望まれている。



図1 凍結路面の例

当場ではこれまで凍結路面検知技術に関する研究を行っており、赤外光を利用した据置型路面凍結検知装置の商品化や

事業名：経常研究

課題名：電磁波を用いた凍結検知技術に関する研究
(平成26～27年度)

車載型路面凍結検知技術の開発(平成22～23年度)においてマイクロ波反射率計測により水、氷、雪の分離検知が可能であることを見出した¹⁾。本研究では電磁波を用い、実用化を目指した凍結路面検知に関する技術開発を行った。

2. 電磁波の特性

電磁波はアンテナ近傍から球面状に放射され、マクスウェルの方程式により電磁場のふるまいとして、距離の三乗で減衰する準静電界、距離の二乗で減衰する誘導界と呼ばれる近傍界(誘導界とも呼ばれる)及び球面波の半径が大きくなり、平面波となって十分遠方まで到達し、距離に反比例して減衰する遠方界で表現される。

電気回路における電圧と電流の比にあたる電磁波のインピーダンスは電場Eと磁場Hの比となる。誘電体の誘電率 ϵ と透磁率 μ とすれば(1)式で表される。

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (\Omega) \quad (1)$$

近傍界では電場及び磁場の変化に応じて電磁波のインピーダンスも変化するが、遠方界では電場と磁場の比は一定となる。電磁波の真空中(空気中)の特性インピーダンス Z_0 は、 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 、 $\epsilon = \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ を(1)式に代入すると $Z_0 = 120\pi \approx 377 \Omega$ となる。

本研究では、図2に示すように、送信アンテナから放射された電磁波が遠方界で平面波となった後、測定対象に入射する際、空気中における電磁波の特性インピーダンス 377Ω と測定対象の特性インピーダンス(比透磁率 μ_r 、比誘電率 ϵ_r)

の違いによる境界面での反射及び透過する特性を利用して凍結状態を検知するものである。

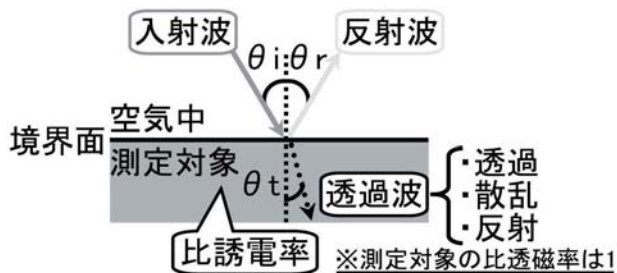


図2 電磁波の反射と透過

2.1 おもな測定対象の電気的特性

表1に示すように想定される測定対象の比誘電率は、水の77.54以外、水の3.18と比較的近い2～6程度である。電磁波の損失に關する誘電損失率(比誘電率に誘電体損失角tan δを乗じた値)も水の8.877以外、0.1以下と比較的小さな値である。また、本表に示していないが、雪は気温(含水状態)によって比誘電率は2～10程度まで変化するなど、水以外の測定対象の電気的特性はそれぞれ比較的近い値を有している。

表1 測定対象の電気的特性²⁾

物質名	比誘電率	誘電損失率	備考
水	77.54	8.877	周波数2.45GHz(観測温度20°C)
氷	3.18	0.001	周波数2.7GHz(観測温度20°C)
人工コンクリート	6	0.074	周波数3GHz(観測温度25°C)
アスファルトセメント	2.4	0.002	周波数3GHz(観測温度25°C)

2.2 水の関与

水は誘電緩和により周波数22GHz付近において複素誘電率の複素数部ε_r''(誘電損失率と等価)の極大点があることが知られており(図3)、この周波数付近で電磁波の損失は最大となる³⁾。

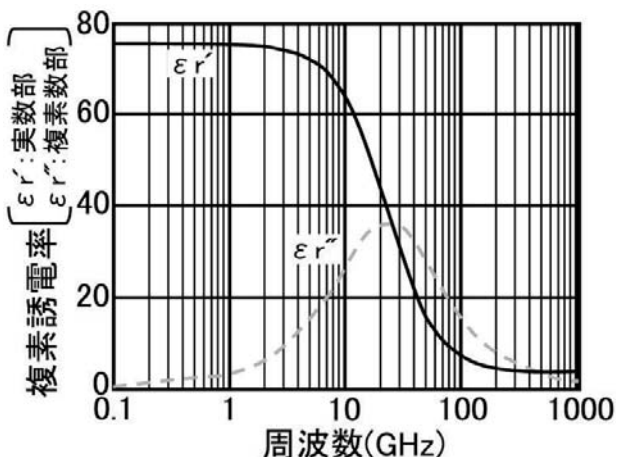


図3 水の複素誘電率特性

また、電磁波が透過波として誘電体中を伝搬する際の透過

性を表す電力半減深度Dは、

$$D = \frac{3.31 \times 10^7}{f \sqrt{\epsilon_r} \cdot \tan \delta} \text{ (m)} \quad (2)$$

となり、周波数f(Hz)、誘電体損失角tan δ、比誘電率ε_rの増加により減少する。一般的に、複素誘電率は分極により周波数の増加とともに実数部は低下し、複素数部は増加する傾向を示す。

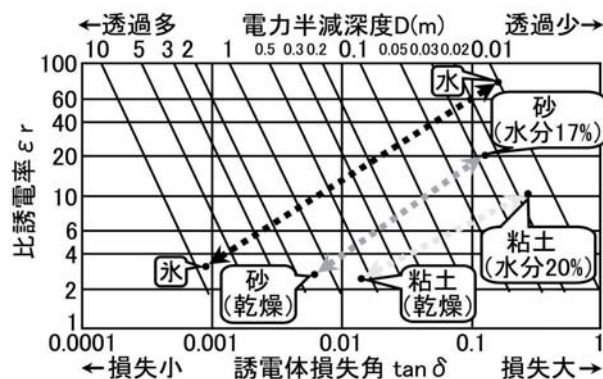


図4 含水による電気的特性の変化(周波数2.45GHz)

水の関与による電気的特性の変化として、周波数2.45GHzにおける各物質の比誘電率及び誘電体損失角と(2)式で表される電力半減深度の関係を図4に示す。これまで示した電気的特性より、水と水では比誘電率及び誘電体損失角が大きく異なるため、電力半減深度は氷の約10mに対し、水では約10mmとほとんど電磁波は透過することはなく、約1000倍の差となる。また、乾燥と含水について粘土及び砂が示されているが、含水によってそれぞれの比誘電率は乾燥の約3程度から10(粘土)、20(砂)程度へ増加する一方、誘電体損失角は乾燥の0.01前後から10倍程度増加することで、電力半減深度は約1m前後から約20～30mm程度へ減少している。すなわち、水分は比誘電率及び誘電損失角の増加、電力半減深度の減少に大きな影響を与える。これらの傾向はアスファルトやコンクリートなど路盤を構成する材料が含水した際にも同様と考えられる。

3. 測定系の構築

当場の小型電波暗室内に図5のような電磁波の反射特性を測定するための環境を設置した。反射特性の測定にはアジレントテクノロジー社製のベクトルネットワークアナライザE8362Cを用いた。

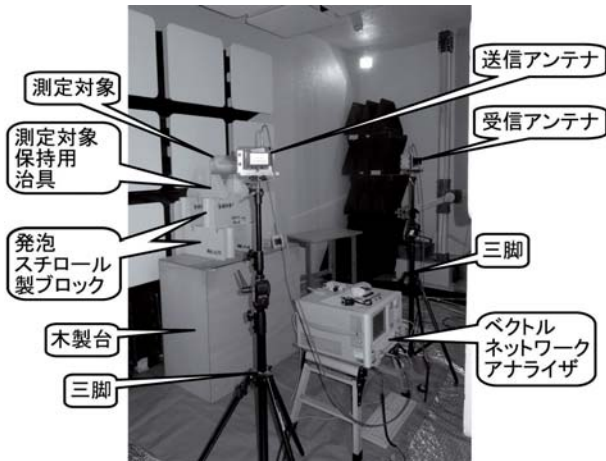


図5 構築した測定環境 (Sバンド帯の例)

3.1 2アンテナ法

送信、受信で一对のアンテナを用いる2アンテナ法にて反射率 (S21) を測定した。図6に示す配置図のように、入射角 θ_i 、反射角 θ_r 、偏波など個別に設定可能であり、送信・受信で兼用する1アンテナ法と比べアンテナ設定条件の自由度が大きくなる。

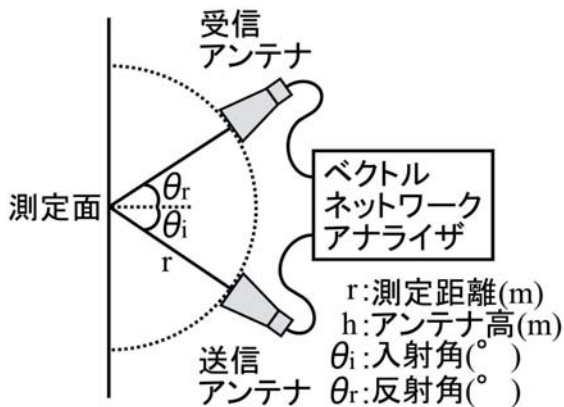


図6 配置図 (上面図)

3.2 測定条件の決定

2章で示したように、安定した反射率の測定を行うため、アンテナから放射された電磁波が平面波となり、距離に対する電磁波の減衰量の変動が少ないことが望ましい。すなわち、遠方界となる条件を満たす必要がある。

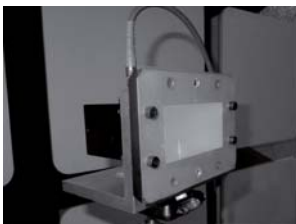


図7 導波管



図8 ホーンアンテナ

今回使用するアンテナは、図7のSバンド帯で用いる導波

管及び図8のKバンド帯で用いるホーンアンテナで、開口面アンテナという種類である。これらのアンテナが遠方界と見なす距離dは、

$$d = \frac{2D^2}{\lambda} \text{ (m)} \quad (3)$$

となり、Dは開口面の長辺(m)、 λ は電磁波の波長(m)である。測定距離rは(3)式で求められる距離dより遠方とする必要がある。

表2のアンテナ仕様よりそれぞれのアンテナ開口面寸法の長辺及びアンテナ使用周波数帯で、波長が最も短くなる使用周波数上限にて遠方界と見なす距離を(3)式から計算すると導波管で約0.17m、ホーンアンテナでは約0.59mとなる。

表2 アンテナのおもな仕様

アンテナ形式	導波管	ホーンアンテナ
メーカー	CERNEX,INC.	PASTERNAK
型名	CWK340020303SF	PE9852/2F-20
使用周波数帯(GHz)	2.3~3.3(Sバンド帯)	18~26.5(Kバンド帯)
利得(dBi)	不明	20
半値幅(°)	不明	17.5(H面)、17.8(E面)
開口面寸法 W X H(mm)	86.36 X 43.18	57.404 X 44.958

図5に示したように測定対象は、製作した保持用治具により直立するため、電磁波を送信及び受信するアンテナは水平方向設置した。以上の条件からアンテナ高hは測定対象中央となる1.33mとなった。

アンテナは三脚で固定し、入射角 θ_i や反射角 θ_r 、偏波の調整を行う。ベクトルネットワークアナライザとアンテナを接続する同軸ケーブル長などの制約のため、測定距離rはそれぞれのアンテナで遠方界を満たす距離dより遠方となる1.2mとした。

3.3 データ処理

ベクトルネットワークアナライザで測定された反射率をそのまま用いると測定対象以外からの反射波や直接波、反射特性などの誤差要因が含まれるため、以下のデータ処理によってそれらを排除した。

3.3.1 タイムゲーティング処理

反射率の測定では、図9のように①測定対象からの反射波のほか、②送信アンテナから直接受信アンテナに届く直接波、③測定対象以外の周囲設置物から散乱波や反射波が観測される。測定対象以外からの反射波を抑制するため、ベクトルネットワークアナライザに搭載された機能の一つであるタイムゲーティング処理を行った。

反射率は、図10の①'のように様々な反射(干渉)による周波数特性が得られる。そこで逆フーリエ変換を行うと②'

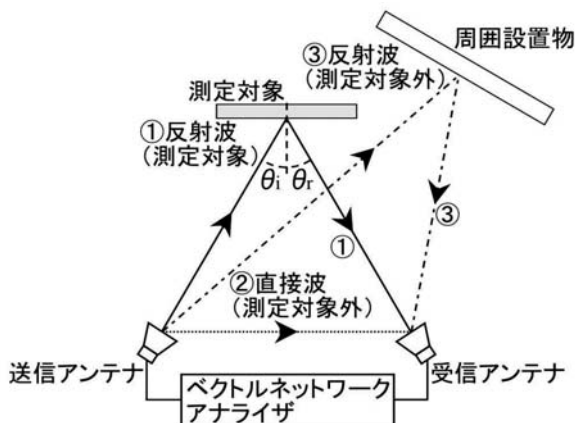


図9 測定時に観測される電磁波

のような時間軸へ変換される。③'のように測定対象の反射波の伝搬時間付近に関わる選択（ゲーティング）処理を行った後、フーリエ変換を行うと④'のように測定対象本来の反射特性が得られるものである。

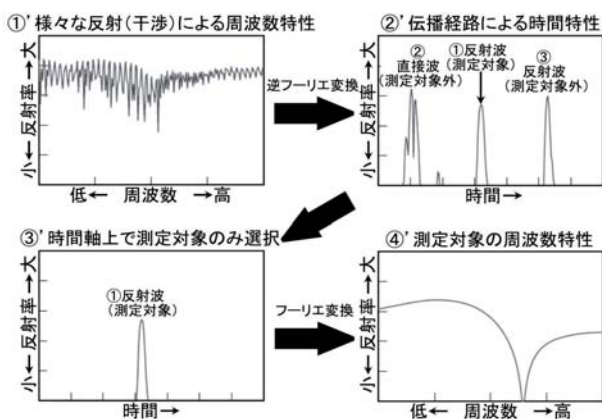


図10 タイムゲーティング処理

測定距離 r として設定した1.2mの往復2.4mが、反射率測定に関わる電磁波の伝搬距離 d となる。

$$T = \frac{d}{c} \text{ (s)} \quad (4)$$

(4)式より、伝搬時間 T は電磁波の伝搬速度 c (光速と同じ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$)にもとづき、8 ns付近でタイムゲーティング処理を行った。

3.3.2 正規化処理

本来、理想的な条件であれば基準となる金属板の反射特性はレーダー方程式にもとづきほぼ一定（平坦）になる。しかし、測定した結果、タイムゲーティング処理後においても変動が確認された。図11に最大約3.5dBの変動があったSバンド帯の金属板の反射特性を示す。なお、Kバンド帯でも約3 dB程度の変動があった。

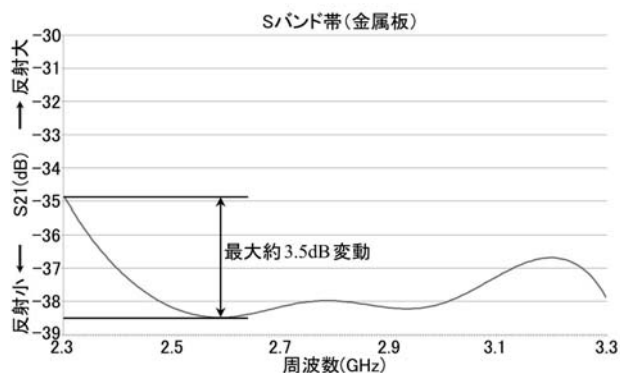


図11 金属板の反射特性（Sバンド帯）

各測定対象から得られた反射率も基本的に同様な変動があると考えられるため、Sバンド帯、Kバンド帯それぞれの金属板の反射率で除算する正規化処理を行った。

4. 反射率の測定

4.1 測定対象



図12 測定対象

図12に示す測定対象は、反射率の基準とするための金属板、圧雪路面の模擬サンプル、アスファルト、コンクリートである。アスファルト及びコンクリートについては乾燥のほか、湿潤と凍結した状態についても評価を行った。なお、アスファルトには前田道路(株)のマイルドパッチ、コンクリートにはトーヨーマテラン(株)のインスタントコンクリートを用いた。

4.2 入射角及び反射角

入射角 θ_i 及び反射角 θ_r は 15° 、 30° 、 45° 、 60° で評価を行った結果、 15° や 30° では導波管を用いるSバンド帯で、アンテナ半値幅が大きく(図18)広い範囲に電磁波が放射されるため、ベクトルネットワークアナライザで測定作業を行う人体からの干渉による反射率変動があったほか、 60° では反射率が低下した。そのため、入射角 θ_i をSバンド帯及びKバンド帯で測定対象外からの反射が少なく、反射率が安定してい

る45°に決定し、反射角 θ_r を15°, 30°, 45°, 60°で評価を行った結果、45°が最も反射率が大きく、入射角 θ_i と反射角 θ_r は等しいというスネルの法則に則っていることを確認した。また、受信アンテナの偏波を送信アンテナの偏波と異なる設定(直交)にしてみたが、反射率が低下するのみで、電磁波の電力半減深度(透過性)が大きい圧雪路面において透過波の散乱によって偏波が乱れるなど反射率に特徴が確認されることはなかった。以上のことから最終的な測定条件を表3のように決定した。

表3 測定条件

項目	設定	備考
測定距離 d(m)	1.2	
アンテナ高 h(m)	1.33	
入射角 θ_i (°)	45	
反射角 θ_r (°)	45	
偏波	水平	
測定対象外形 (mm)	金属板(基準)	250WX250HX0.8D
	アスファルト	250WX250HX40D
	コンクリート	250WX250HX40D
	圧雪路面	350WX350HX110D※採取時

4.3 測定結果

4.1節で示した測定対象の反射率測定結果を図13, 図14に示す。反射特性を補正するため、正規化処理として各周波数で測定された反射率を金属板の反射率で除算したため、0 dB=1であれば金属板と同一ということなる。各測定対象から得られた反射率は、基準とした金属板の反射率より小さくなった。

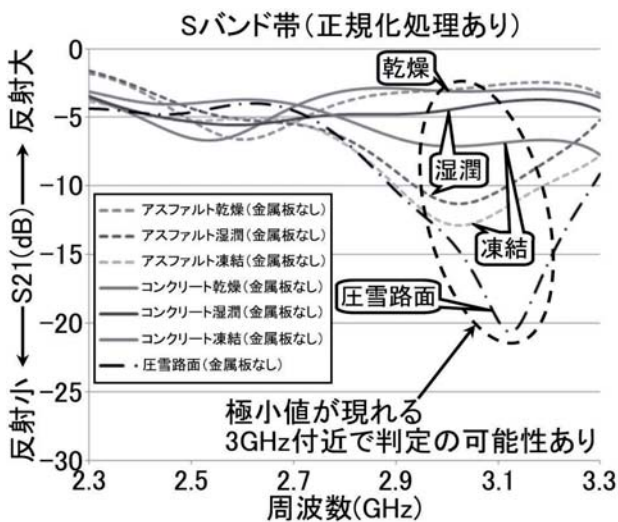


図13 反射特性 (Sバンド帯)

Sバンド帯では周波数3GHz付近で各測定対象の反射率の差が大きくなり、この周波数付近の反射率を用いるのがよいと考える。反射率は乾燥, 湿潤, 凍結の順番で大きく、コンクリートの方がアスファルトより数dB反射率は大きかった。

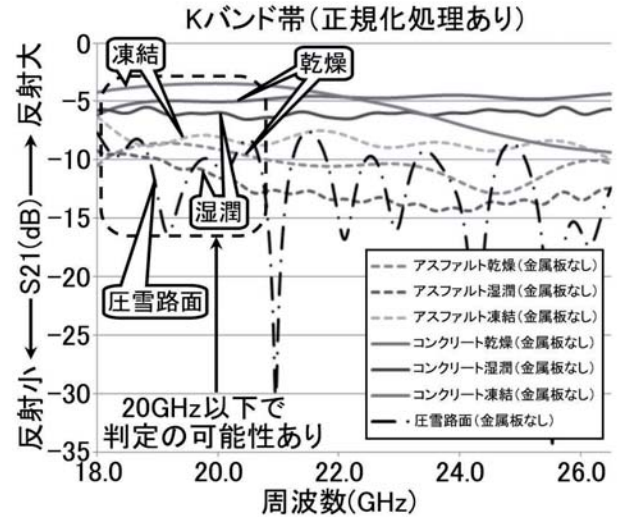


図14 反射特性 (Kバンド帯)

Kバンド帯では周波数20GHz以下の領域で各測定対象の反射率の差が大きくなり、この周波数付近の反射率を用いるのがよいと考える。反射率は凍結, 乾燥, 湿潤の順番で大きく、Sバンド帯とは順番が異なっている。コンクリートの方がアスファルトより数dB反射率は大きく、こちらはSバンド帯と同様であった。参考として、模擬サンプルの圧雪路面のデータも載せてあるが、Kバンド帯では約1.2GHzの周期で反射率の規則的変動が見られた。

4.4 スポンジを用いた評価

これまでの測定では反射率に差違は見られるが、周波数帯ごとに反射率の順番が入れ替わったため、スポンジを用いた評価を行った。スポンジの電磁界の特性は気泡により乾燥状態でほぼ空気と同様と見なすことができる上、含水も容易である。基本的な測定条件は表3と同じであるが、形状は165W×245H×50D(単位はmm)のものを用いた。図15に評価に用いたスポンジを示す。

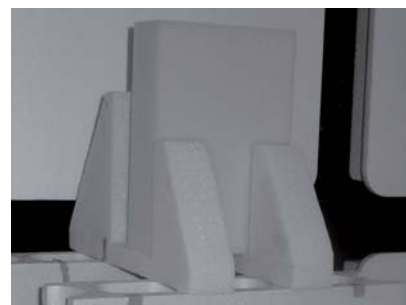


図15 評価に用いたスポンジ

図16及び図17にそれぞれの周波数帯における反射特性を示す。いずれも比誘電率に応じた反射率が得られ、湿潤、凍結、乾燥の順番で反射率は大きかった。また、乾燥はSバンド帯では何もない状態とほぼ等しく、Kバンド帯では若干の相違は見られるが-60dB以下の反射率で極めて小さく、問題にはならない。そのほか、Kバンド帯の凍結では約3GHzの周期で反射率の規則的変動が見られた。

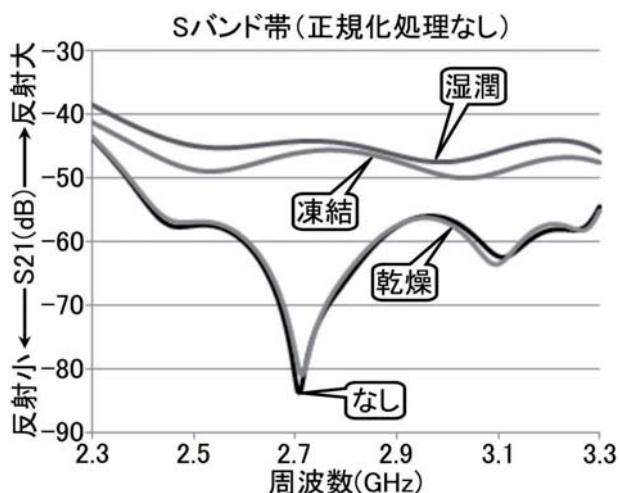


図16 反射特性 (Sバンド帯)

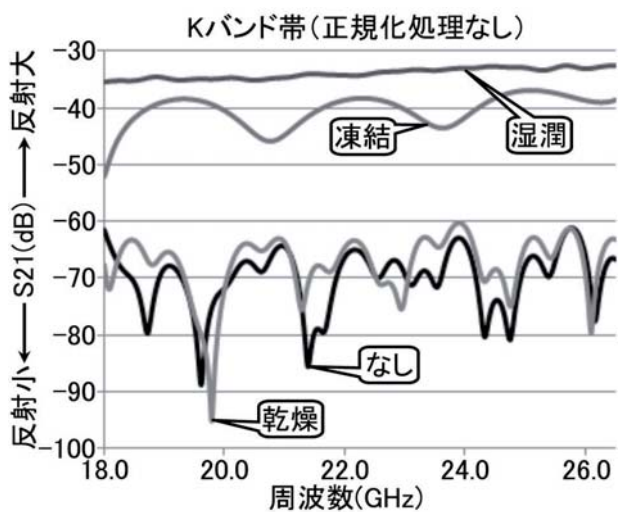


図17 反射特性 (Kバンド帯)

5. 考察

スポンジでは測定対象の比誘電率に応じた反射率は得られるが、アスファルトやコンクリートでは周波数帯によって反射率の順番が異なるなど実環境へ適用するためには解決すべき課題も多い。そこで反射率が比誘電率と一致しない要因について考察する。

5.1 照射幅と測定対象の大きさ

電磁波は光の1種ではあるが、レーザー光のごく狭い範囲に照射(放射)されるのではなく、図18に示すようにアンテナからの距離が遠くなるほど広い範囲に放射される。そのため、測定された反射率はある程度の範囲に放射された電磁波の反射波が合成されたものとなる。反射率に影響を与える目安としては、アンテナから放射される電磁波が正面(0°)での電力を100%とした場合、電力が50%になる角度(アンテナ半値幅)までの範囲とした。

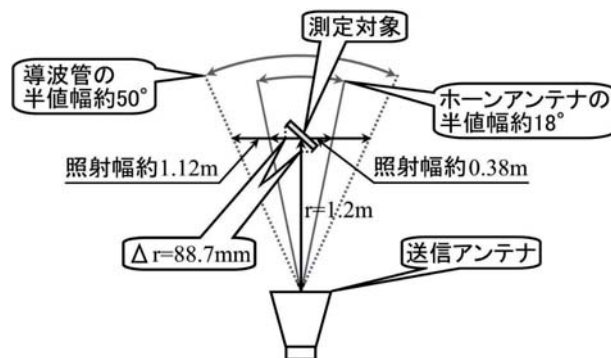


図18 距離1.2mにおける照射幅

それぞれのアンテナ半値幅(表2)から測定距離 r が1.2mにおける照射幅を求めると導波管で約1.12m、ホーンアンテナで約0.38mとなり、測定対象の大きさとは比べいづれも大きい。さらに入射角 θ_i を45°としているため、測定対象中央を基準とした場合、測定対象の両端と中央では88.7mmの電磁波の到達距離差が生じる。波長の一番長いSバンド周波数2.3GHz帯の1/4波長約32.5mmを上回っているため、測定周波数全域に渡って経路差による反射波の干渉や測定対象端面での反射や散乱による干渉が起きていると考えられる。

5.2 表面状態

使用したSバンド帯の下限周波数2.3GHzの波長 λ は約130mm、上限周波数3.3GHzの波長 λ は約91mmとなる。同様にKバンド帯の下限周波数18GHzの波長 λ は約16.7mm、上限周波数26.5GHzの波長 λ は約11.2mmとなる。5.1節で説明したとおり、電磁波は広範囲に放射され、反射波は合成波となるため、空気と測定対象の表面、すなわち境界面の凹凸差が1/4波長以上あり、それにより往復の経路差が1/2波長の奇数倍になると逆位相となるため、反射波は減衰する。今回の測定対象では、金属板以外は平滑ではない。そのため、波長の短いKバンド帯では境界面の表面状態が数ミリ程度の凸凹で反射率に影響を与えている可能性がある。

5.3 透過波

測定対象が氷など電力半減深度が大きく、電磁波の損失が少ない場合、測定対象を透過する透過波の影響が考えられる。

今回の評価では図12のように測定対象が直立しているため、図19のように測定対象は空気に囲まれていると見なされる。

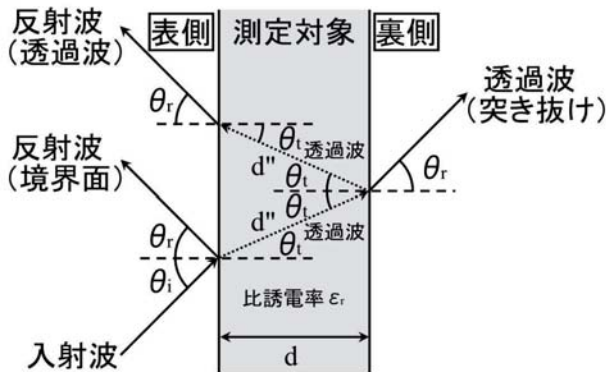


図19 測定対象の透過波の影響

そのため、本来反射率として注目している空気層と測定対象の境界面での反射（表側）のほか、測定対象を透過する透過波が、空気層との境界面（裏側）で反射及び空気層へ突き抜ける。

今回の測定対象は比透磁率は1となるため、比誘電率 ϵ_r の場合、空気に対する屈折率 n はスネルの法則より、

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (5)$$

となる。水の比誘電率 ϵ_r を3.18とすると屈折率 n は(5)式より1.78となる。また屈折率 n は、

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = n \quad (6)$$

のように表すこともできる。 θ_i は入射角 45° 、 θ_t は透過波の屈折角となる。

$$\theta_t = \sin^{-1} \frac{\sin \theta_i}{n} (^\circ) \quad (7)$$

(7)式から屈折角 θ_t を求めると 23.4° となる。

そこでKバンド帯で透過波の影響があると思われる模擬サンプル圧雪路面（水と同等と想定）の厚さ d が100mm（反射率測定時点）及びスポンジの厚さ d が50mmの凍結状態について検証を行った。測定対象を透過する透過波の経路 d'' が $1/4$ 波長の奇数倍になると透過波が裏側の空気層との境界面で反射し、表側の空気層との境界面に到達した時点で本来、表側の境界面で反射する反射波との位相差が逆位相となる。誘電体中を伝搬する電磁波は波長短縮が起こり実質的な経路長は比誘電率 ϵ_r の平方根倍となるため、経路 d'' は、

$$d'' = \frac{d\sqrt{\epsilon_r}}{\cos \theta_t} \text{ (m)} \quad (8)$$

となる。これまで説明した条件で反射経路の距離 d'' を求めると、圧雪路面では0.306m、スポンジでは0.153mとなる。これらを4倍した値が干渉すると考えられる電磁波の波長 λ (m)となるため、周波数 f は、

$$f = \frac{c}{\lambda} \text{ (Hz)} \quad (9)$$

となり、圧雪路面では周波数245MHzが透過波の干渉による減衰が現れる最低周波数となり、この周波数の奇数倍、すなわち約490MHzの周期で、同様にスポンジでは周波数490MHzが透過波の干渉による減衰が現れる最低周波数となり、この周波数の奇数倍、すなわち約980MHzの周期で変動（減衰）すると考えられる。

Kバンド帯で測定された圧雪路面やスポンジの凍結状態における反射率の変動周期と比べてみると測定された変動周期の方がそれぞれ2.5倍程度大きく、乖離がある。この原因は、これまで考察してきたように様々な反射や干渉によるものと考えられる。

6. まとめ

- 1) 電磁波を用い、1対のアンテナを用いた非接触な方法でアスファルト、コンクリート、圧雪路面を模擬した測定対象に対し、Sバンド帯及びKバンド帯2つの周波数帯における電磁波の反射率測定を行った結果、乾燥、湿潤、凍結の3つの状態において差が生じることを確認した。
- 2) アスファルトやコンクリートは、周波数帯によって反射率の順番が異なったため、スポンジを用いて評価を行った結果、比誘電率に応じた順番で反射率が異なることを確認した。
- 3) Kバンド帯で測定された圧雪路面やスポンジの凍結状態における透過波の影響に関する検証を行った結果、反射率の変動周期は測定結果の方が2.5倍程度大きく、乖離していた。考察したように電磁波照射幅と測定対象の大きさの関係や測定対象表面の凹凸による反射や散乱など複雑な干渉が影響していると考えられる。

以上のことから、電磁波の反射率にもとづく凍結検知の可能性が得られた。

今後は、測定距離 r と測定対象の大きさの見直しなどを行い、測定対象の電磁波反射率の測定精度向上を進め、引き続きデータを蓄積していくとともに、本分野以外にも一次産業への適用検討など電磁波利用技術の展開を進めていきたい。

謝辞

本研究では平成20年度地域イノベーション創出共同体形成事業研究開発環境支援事業で導入したミリ波ネットワークアナライザシステムを使用しました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 宮崎俊之, 大崎恵一: 車載型路面凍結検知技術の開発,
北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.312, pp.101-104, (2013)
- 2) ㈱科学技術研究所 誘電率・透磁率データベース
- 3) Agilent誘電体測定の基本, Application note