

路面積雪の圧雪過程におけるマイクロ波散乱機構の研究 —マイクロ波による雪氷の複素誘電率計測—

Studies on Microwave Scattering due to Snow in the Densification Process on Road.
- Microwave measurement of complex dielectric constant of snow and ice. -

○阿部修¹・小杉健二¹・長康平²・吉川真由子³・Josaphat Tetuko Sri Sumantyo²・西尾文彦²

1. (独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄支所, 2. 千葉大学環境リモートセンシング研究センター, 3. 千葉大学大学院



本研究では、電波吸収材などの材料定数計測に用いられる自由空間法を応用し、マイクロ波による複素反射係数計測を用いた雪氷検出手法を提案する。また昨今、小型で携帯可能な計測機器(VNA ベクトルネットワークアナライザ)も製品化され、比較的容易に屋外計測を

実施することも可能となった。そこで携帯型の計測機器(VNA)を用い、本手法にて実際にアスファルトや圧雪状態の積雪に対する複素反射係数計測を行い、積雪の検出・識別のための誘電率の推定を試みた。ここではその一例を紹介する。

1. はじめに

マイクロ波からみると雪や氷は誘電体である。氷の比誘電率は3、雪の比誘電率は2前後の値をとることが知られている[1]。誘電率は媒質境界面における電波の反射、透過、媒質内における電波の伝搬、減衰などを決定するパラメータであり、媒質からの反射波を計測・解析することで誘電率を逆推定することが可能である。また誘電率は媒質の物理状態に応じて変化するため、推定した誘電率から媒質の物理状態の推定も可能となる。本研究では、昨今入手が可能となった小型で耐候性能を有するベクトルネットワークアナライザ(VNA)で構成する複素反射計測装置にて雪や氷の複素比誘電率の計測を試みる。本稿では、複素誘電率計測手法、および、先だって実施した低温実験室内における雪や氷の誘電率の計測事例を紹介する。



2. 手法

2.1. 概要

マイクロ波による複素誘電率計測は、電波吸収材などの材料定数計測に使われる自由空間反射法[2]を応用し、次の手順で行う。1) 計測対象に対する複素反射係数計測を行う。2) 複素反射係数の計測値と理論値を用いた逆問題解析により複素比誘電率を推定する。

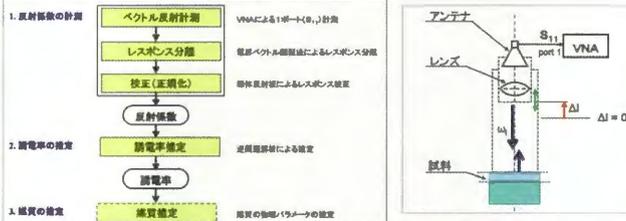


図1 誘電率計測フロー

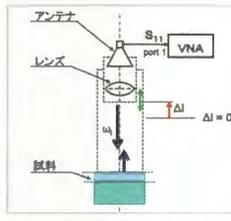


図2 計測装置概要図

2.2. 複素反射係数の計測

VNA、ホーンアンテナ、誘電体レンズで構成する複素反射計測装置(図2)にて、周波数ごとの複素反射係数を計測する。1) ここで、アンテナ系を計測対象から少しずつ遠ざけ、これによって位相変化する反射波成分を計測対象からのものとして抽出する。2) さらに計測対象の表面にアルミ反射板を置いて同様の計測を行い、その値を用いて計測対象の複素反射係数の値を比較補正する。これらより得られた計測対象の複素反射係数の補正值を Γ_{corr} とする。

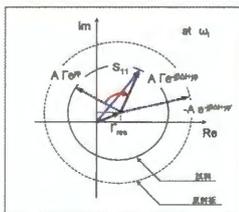


図3 反射係数ベクトル

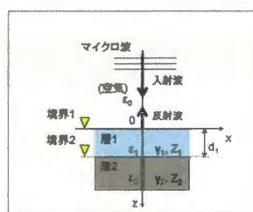


図4 積層誘電体モデル

2.3. 複素比誘電率の推定

複素反射係数の補正值と理論値を用いた逆問題解析により複素比誘電率を推定する。計測対象の誘電率として、ある値の複素誘電率の組を与えて複素反射係数の理論値を計算する。次いで、対応する計測値との二乗誤差を計算し、その値を最小とする複素誘電率の組を探索する。なお理論値の計算には、2層の積層誘電体に平面波を垂直照射する解析モデルを仮定する。層1、2の複素比誘電率を ϵ_1, ϵ_2 、層1の伝播定数を γ_1 、厚さを d_1 とする。このとき積層誘電体表面に角周波数 ω の平面波を自由空間から垂直入射させたときの複素反射係数 Γ を式(1)に示す。

$$\Gamma(\omega) = \frac{R_1 + R_2 e^{-2\gamma_1 d_1}}{1 + R_1 R_2 e^{-2\gamma_1 d_1}} \quad (1)$$

ここで R_1, R_2 は次式で表す反射係数である。また伝播定数 γ_1 は次式で表される。(c:光速)

$$R_1 = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_1}}{1 + \sqrt{\epsilon_1}}, \quad R_2 = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}, \quad \gamma_1 = j \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_1}$$

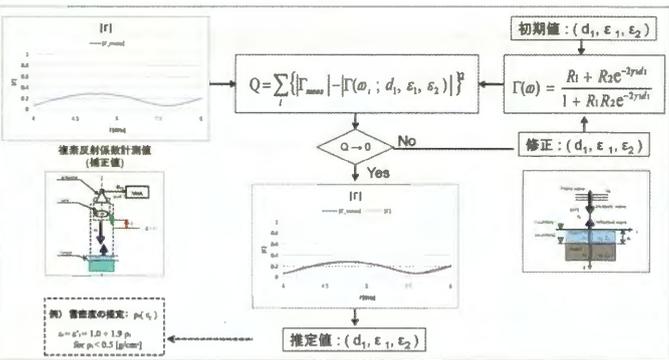


図5 誘電率推定フロー

3. 計測事例

(独)防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄支所の低温実験室において雪氷の複素誘電率計測を実施した。ここでは乾雪および純氷の計測事例を紹介する。なお、VNAにはAnritsu MS2036Aを使用し、周波数4-6GHzの範囲で計測を行った。計測および推定の結果を表2に示す。乾雪では複素比誘電率の実数部が1.59、氷では3.03となった。雪は2-3以下、氷の比誘電率の実数部は3前後であるので、概ね妥当な計測結果が得られた。

表1 試料の物理パラメータ

No.	試料	層1	層2	深さ [mm]	電密度 [g/cm ³]	温度 [°C]
1	乾雪	(EPS)		31.0	0.31	-1.3
2	純氷	(EPS)		32	-	<0
3	アクリル	(空気)		5	-	(参考)

EPS : 発泡スチロール (Expanded Polystyrene foam)

表2 誘電率推定結果

No.	試料	層1	層2	深さ [mm]	誘電率 (実部)	誘電率 (虚部)
1	乾雪	(EPS)		30.5	1.59	(I)
2	純氷	(EPS)		33.1	3.03	(I)
3	アクリル	(空気)		5.0	2.58	1 (参考)

EPS : 発泡スチロール (Expanded Polystyrene foam)



図6 誘電率推定結果(断面図)



図7 試料(左:雪, 右:氷)

4. おわりに

本報告では、自由空間法を用いた雪氷の誘電率計測手法を示した。本手法を用いた低温実験室における屋内計測では概ね妥当な計測結果が得られた。今後、標準材料などを用いた計測装置、計測手法の評価、屋外計測における問題点の把握と対策の検討を行う予定である。

なお、本研究は 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄支所と千葉大学環境リモートセンシング研究センターとの共同研究として実施したものである。

【参考文献】

- [1] MARTTI T. HALLIKAINEN et al: Dielectric Properties of Snow in the 3 to 37 GHz Range. Antennas and propagation, vol. AP-34. No. 11, pp1329-1340, 1986.
- [2] 橋本修: マイクロ波・ミリ波における測定技術, pp12-16, リアライズ社, 1998年