

## 路面上に残留する凍結抑制剤濃度の非接触検出手法に関する検討

山田 宗男\* 谷寄 徹也\* 上田 浩次\*  
宮田 康史\*\* 安川 博\*\*\*

### A Study of the Non-Contact Detection Method with Microwave for Salinity Measurement on the Road Surface

Muneo YAMADA\*, Tetsuya TANIZAKI\*, Koji UEDA\*,  
Yasushi MIYATA\*\*, Hiroshi YASUKAWA\*\*\*

This paper discusses the detection of saline solutions induced on road surface with microwave. The reflection characteristic for the water and saline solution on the road depend on the dielectric constants at microwave frequencies. Therefore, the salinity and thickness of the solution seems to be detectable based on reflection characteristics. We examined about the detectability based on the theoretical calculation and conducted verification experiments on the consistency between the theoretical value and the measured value with the measurement system considering the practicability. Furthermore, we conducted field tests to verify the detection ability of the salinity on the actual road surface and got favorable results.

**Keywords** : ITS, AHS, road management, salinity, reflectivity

#### 1. はじめに

日本の国土の約 6 割は積雪地域であるため、冬季における安全かつ円滑な交通の確保を目的とし、除雪や塩化ナトリウムなどの凍結抑制剤の散布といった積極的な雪氷対策が各地域で展開されている。また、近年の ITS 構想の下、冬季を含めた安全走行支援を実現するための走行支援道路システム (AHS) の一環として、路面状況把握センサの開発が進められるとともに、さまざまな地域において試験および導入が進められている。この路面状況把握センサは、車両走行路面の状況として、「乾燥」、「湿潤」、「水膜」、「積雪」、「凍結」などの状態を検出しており、その検出情報をドライバーへ提供することで安全走行支援を行なうとともに、雪氷対策作業の判断基準あるいは補助的な情報としても活用されている<sup>1)~4)</sup>。

しかし、雪氷対策を意識した場合、路面状況に加えて凍結抑制剤散布後の残留濃度も重要な管理項目である。平成 2

年度に制定された「スパイクタイヤ粉塵の発生の防止に関する法律」の施行を皮切りに、凍結抑制剤の散布量は年々増加する傾向にあり、土壌、植生、水質およびコンクリートや鋼構造物といった沿道環境への影響が懸念され、社会的な問題になりつつある。不要な凍結抑制剤の散布を無くし、散布量を必要最少限に抑えるためには、路面上に残留している凍結抑制剤の正確な把握が必要不可欠であり、その検出センサに対するニーズが高まっている<sup>5)~7)</sup>。このような背景のもと、本研究は路面上の凍結抑制剤の残留濃度を非接触で計測する方式の確立を目指すものである。

従来、路面状況を検出するセンサとしては、近赤外光の反射強度を計測する方式や TV カメラの映像を利用した画像処理方式などが実用化されている<sup>1)~4)</sup>。これらのセンサはいずれも、光学反射式であるため、凍結抑制剤の濃度 (以後、塩分濃度と略す) を計測することは非常に困難である。それは、対象となる塩分濃度に対する光の屈折率に大差がないことに起因しており、目視によってこれらの違いを見出すことが難しいことから予想できる。

このほか、道路に電極を埋設して電気導電率などの物理パラメータを直接計測する方式も実用化されているが<sup>8)</sup>、車両走行による衝撃、振動、汚れの問題および故障時の保守性などの問題点を抱えており、非接触計測が望まれる。

\* 名古屋電機工業 (株)  
愛知県海部郡美和町篠田面徳 29-1  
\*\* 名古屋市工業研究所  
名古屋市熱田区六番 3-4-41  
\*\*\* 愛知県立大学  
愛知県長久手町熊張  
(Received March 14, 2006)

本稿では、この非接触濃度計測手法の新しいアプローチとして、マイクロ波を計測キャリアとする方式について検討し、その検出可能性に関して考察するとともに、反射率特性に基づいて塩分濃度を同定可能な新たな手法について提案する。また、屋外環境下での計測を考慮した計測システムを実際に構築し、このシステムによる計測結果と理論計算結果との整合性についての検証を行なうことで、計測システムとしての妥当性について示す。さらに、実際の道路路面を計測対象とした場合の本提案手法による濃度検出精度に関して検証を行なった結果についてもあわせて示す<sup>9)~12)</sup>。

## 2. 理論計算に基づく検出可能性の検討

### 2.1 物理パラメータ

検出対象となる路面上の水あるいは塩水は、誘電体として扱うことができる。これらの誘電体に対して交流電界を印加した場合、誘電分極を生じ、その交流電界の周波数に対して複素比誘電率が変化することが知られており、この原理に基づいて誘電体の複素比誘電率を計測する手法についての研究が盛んに行なわれている<sup>13)~15)</sup>。この複素比誘電率の変化は、デバイの緩和理論に基づいて(1)式のような表現される<sup>16)</sup>。

$$\dot{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2}$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} + \frac{\sigma}{\epsilon_0\omega}$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ は複素比誘電率 ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ はそれぞれ実部, 虚部),  $\epsilon_s$ は直流の誘電率,  $\epsilon_\infty$ は高周波誘電率,  $\omega$ は与える電界の角周波数,  $\sigma$ は導電率,  $\epsilon_0$ は真空の誘電率,  $\tau$ は誘電体の緩和時間をそれぞれ示している。また一般に、誘電率の値は温度依存性を有するが、たとえば道路アスファルト材のような低誘電率体では、屋外環境での温度範囲においては、温度に対する誘電率の変化は無視できうる僅かなものであり、固定値で扱うことが可能である。しかし、水や

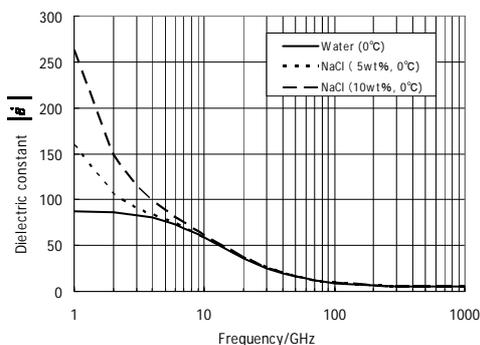


Fig.1 Changes of the dielectric constant for the electric field frequency

塩水のような誘電体の誘電率は、温度によって大きく変化するため温度特性に対する考慮が必要となる。水および塩水 (NaCl) の誘電率の温度特性および温度に対する補正式に関しては、これまでに数多くの研究報告例があるが<sup>17)~19)</sup>、本検討は屋外環境における道路面上の計測を想定しているため、低温から高温までのより広い温度レンジに対応可能である文献<sup>17)</sup>の結果を参照することとした。

Fig.1 は、(1)式に基づいてマイクロ波帯 (1~1000GHz) の電界周波数、温度 0°Cにおける水、重量パーセント濃度 5%の塩水 (以下、NaCl-5wt%と表記する)、および塩水 (NaCl-10wt%) の複素比誘電率の絶対値 $|\dot{\epsilon}|$ を算出した結果である。Fig.1の結果においては、水および塩水の両者において、印加する電界の周波数に対して複素比誘電率が変化することがわかる。また、濃度に対しても複素比誘電率は変化しており、1~5GHz付近でその違いが特に顕著であることが確認できる。つまりこの特性に基づく、数GHz帯のマイクロ波を計測キャリアとすることで、塩分濃度の検出が可能であると見込まれる。

### 2.2 電波伝搬モデル

電波が誘電体中を伝搬する場合、誘電率の違いにより、電波の伝搬特性 (反射, 透過, 減衰) が変化する。本検討においては、路面上の水および塩水が計測対象となることから、Fig.2に示すような道路層および水膜・塩水膜層による2層の誘電性電波吸収層における電波伝搬モデルを考慮する必要がある。また、路面上部からの非接触計測を念頭に置いた場合、電波の反射特性が基本となることから、道路層の下端に金属板 (電波反射体) を配置し、電波を積極

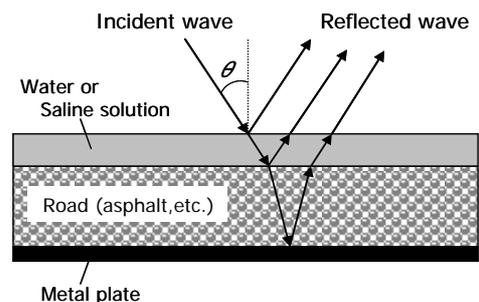


Fig.2 The radio wave propagation model on the road surface

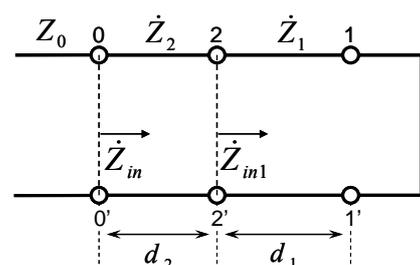


Fig.3 The transmission-line theory model

的に反射させる形で検討することとした。このような誘電層構成における電波の伝搬に関しては、伝送線路理論に基づいて分布定数回路で等価記述することが可能であり<sup>20),21)</sup>、Fig.3にFig.2で示した道路路面における伝搬モデルの等価回路を示す。

Fig.3において、 $Z_0$ は自由空間(空気)層の特性インピーダンス、 $Z_1$ は道路層の特性インピーダンス、 $Z_2$ は水膜・塩水膜層の特性インピーダンス、 $Z_{in1}$ は2-2'境界面から終端側を見込んだ合成インピーダンス、 $Z_{in}$ は0-0'境界面から終端側を見込んだ合成インピーダンスを示している。また、 $d_1$ 、 $d_2$ はそれぞれ、道路層および水膜・塩水膜層の厚みである。

この伝送線路理論モデルにおいて、各層の特性インピーダンスおよび電波が特定の角度 $\theta$ で入射した場合の反射率 $\dot{\Gamma}$ は(2)式ようになる<sup>21)</sup>。

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{Z}_{in} - Z_0 \cos \theta}{\dot{Z}_{in} + Z_0 \cos \theta} \quad (2)$$

$$\dot{Z}_{in} = \dot{Z}_2 \cdot \frac{\dot{Z}_{in1} + \dot{Z}_2 \tanh(\dot{\gamma}_2 d_2)}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_{in1} \tanh(\dot{\gamma}_2 d_2)}$$

$$\dot{Z}_{in1} = \dot{Z}_1 \tanh(\dot{\gamma}_1 d_1)$$

$$\dot{Z}_1 = \frac{Z_0 \sqrt{\dot{\epsilon}_{r1} - \sin^2 \theta}}{\dot{\epsilon}_{r1}}, \quad \dot{Z}_2 = \frac{Z_0 \sqrt{\dot{\epsilon}_{r2} - \sin^2 \theta}}{\dot{\epsilon}_{r2}}$$

$$\dot{\gamma}_1 = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{r1} - \sin^2 \theta}, \quad \dot{\gamma}_2 = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{r2} - \sin^2 \theta}$$

ここで、 $\lambda$ は波長、 $\dot{\epsilon}_{r1}$ 、 $\dot{\epsilon}_{r2}$ はそれぞれ道路層および水膜・塩水膜層の複素比誘電率、 $\dot{\gamma}_1$ 、 $\dot{\gamma}_2$ は伝搬定数である。なお、偏波モードについてはTMモードを用いた。

### 2.3 濃度および膜厚の変化に対する反射率特性の振舞

前節において検討したFig.2の伝播モデルにおいて、(1)式および(2)式に基づいて算出される反射率特性が、塩水膜の濃度および膜厚の変化に対していかなる振舞いをするのかについて検証することで、塩分濃度の検出可能性について考察する。

Fig.2において、道路層の厚みを $d_1=10\text{mm}$ 、アスファルトの複素比誘電率を $\dot{\epsilon}_{r1}=5.6-j0.1$ (サンプルを切出してAgilent Technologies製85071E<sup>21),22)</sup>にて実測)、電波の入射角を $\theta=2^\circ$ 、温度を $0^\circ\text{C}$ として、塩水の膜厚 $d_2$ が $0.1\text{mm}$ および $0.2\text{mm}$ 、濃度が $0\text{wt}\%$ 、 $5\text{wt}\%$ 、 $10\text{wt}\%$ における各種反射率の絶対値 $|\dot{\Gamma}|$ を算出した例をFig.4に示す。この結果においては、塩水の濃度および膜厚に対して、電波の反射率特性が特徴的に異なっており、特に反射率が極小となる点(以下、反射率極小点と略す)に注目しおのおのを比較する。まずFig.4(a)を見ると、反射率極小点の値は各濃度に対して異なる値を取り、この傾向は膜厚の異なるFig.4(b)においても共通してい

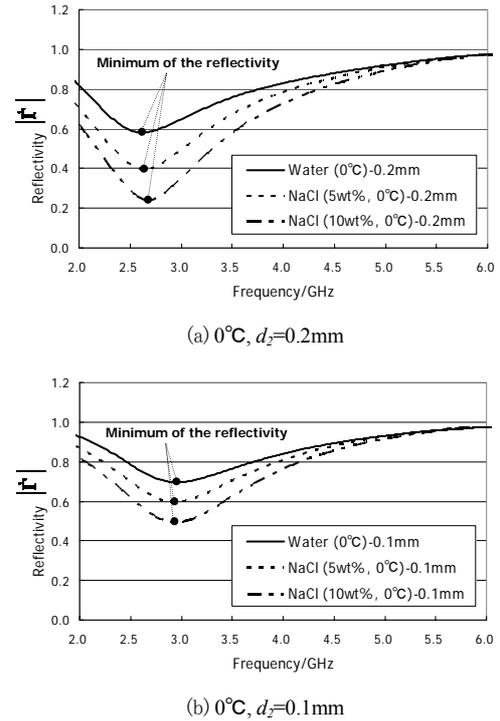


Fig.4 A theoretical calculation example of the reflectivity

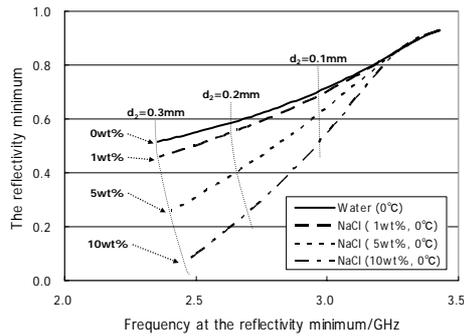
る。また、膜厚の違いに関しては、Fig.4(a)およびFig.4(b)を比較してわかるように、膜厚が薄くなるに伴い反射率極小点が高周波側へシフトする特徴をもつ。

以上の考察により、反射率の極小値およびその周波数は、塩水の膜厚に応じて変動し、さらにその度合いは、濃度に対して異なることがわかる。したがって、反射率の極小値およびその周波数に基づいて、計測対象の濃度および膜厚を検出することが可能となると考えられる。次節では本節での考察結果を踏まえて、反射率極小点に基づいて濃度および膜厚を同定可能な手法についての検討を行なう。

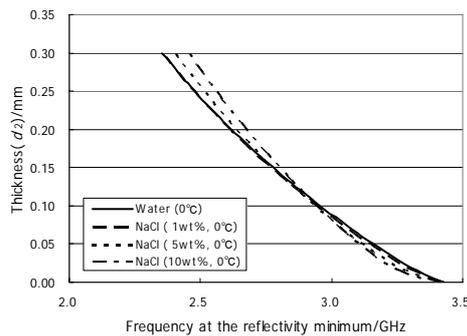
### 2.4 濃度および膜厚の同定手法

実際の計測を想定すると、計測対象となる路面上の水および塩水は、その濃度および膜厚の両者が未知で、さらにその値は計測ごとに異なる。したがって、計測される反射率特性に基づいて濃度および膜厚の両者を同定可能な手法の検討を行なう必要がある。前節での結果に基づけば、濃度および膜厚の変化に対する反射率極小点は、反射率一周波数の2次元空間において特徴的にマッピングされると予想できる。

Fig.2において、道路層の厚みを $d_1=10\text{mm}$ 、アスファルトの複素比誘電率を $\dot{\epsilon}_{r1}=5.6-j0.1$ (サンプルを切出してAgilent Technologies製85071E<sup>21),22)</sup>にて実測)、電波の入射角を $\theta=2^\circ$ 、温度を $0^\circ\text{C}$ として、 $d_2=0\text{mm}\sim 0.3\text{mm}$ の膜厚における反射率特性を $0.005\text{mm}$ ピッチで計算し、その反射率極小点の軌跡を各濃度( $0\text{wt}\%$ 、 $1\text{wt}\%$ 、 $5\text{wt}\%$ 、 $10\text{wt}\%$ )に対して求めた結果をFig.5(a)に示す。また、Fig.5(b)はこの場合における反



(a) The locus of the reflectivity minimum



(b) The relationship between the frequency at the reflectivity minimum and the thickness

Fig.5 The locus of the reflectivity minimum

射率極小点の周波数と膜厚の関係を求めた結果である。Fig.5(a)の結果においては、各濃度に対する反射率極小点の軌跡は独立で扱うことが可能であり、さらにFig.5(b)に基づけば、反射率極小点の周波数は膜厚に対応することがわかる。つまり、計測対象において想定されるすべての温度、濃度および膜厚に対して Fig.5 の極小点分布を理論計算によりあらかじめ作成しておき、計測された反射率極小点がFig.5(a)の極小点分布のどこに位置するかによって濃度が同定できる。さらに、Fig.5(b)に基づけば、極小点の周波数から膜厚を同定可能となる。すなわち、極小点における反射率と周波数に対する 2 次元テーブルの参照により濃度および膜厚の同定が可能となる。

以上、理論計算に基づく一連の検討・考察結果から、数 GHz 帯のマイクロ波を計測キャリアとして反射率特性を計測し、その極小点の反射率および周波数に基づいて、路面上の塩水濃度および膜厚の検出可能性を見出すことができた。次章では、実際の道路におけるセンシングを想定した計測システムを屋外に構築し、この計測システムで計測される反射率特性と理論計算結果との整合性について検証実験を行なうことで、上述した理論モデルの妥当性および計測システムとしての妥当性に関する検証を行なう。

### 3. 計測システムの構築

計測システムとしては、道路側に設置して定点計測を行なうインフラシステムと、車両に搭載して走行しながら線的に計測を行なう車載システムが考えられるが、前章で述べた本提案方式は、電波の反射率特性に基づくものであるため、反射率を計測する際の基準および道路舗装材の材料定数が計測ごとに異なってしまう車載システムへの適用はきわめて困難であると考えられる。そのため今回は、インフラシステムとしての検討を行なうこととした。

#### 3.1 計測システム

Fig.6 に実際の道路面の計測を想定して構築した計測システムを示す。本計測システムは、非接触計測が目的であることから、自由空間伝送法<sup>13)</sup>に基づくものである。計測装置は送受信アンテナ、ベクトル型ネットワークアナライザ (VNA) およびデータ解析 PC によって構成されており、Table 1 に計測装置の主要な諸元についてまとめる。送受信アンテナはダブルリッジ・ホーンアンテナであり、路面から 5.2m の高さに設置されている。また、道路面への入射角 ( $\theta_i$ ) および反射角 ( $\theta_r$ ) については、道路の上方におけるアンテナ設置およびアライメント調整を行なう上での都合に鑑みてつぎの理由から  $2^\circ$  とした。たとえば、入射角・反射角を大きく取ろうとすると、送信アンテナと受信アンテナの設置間隔を計測面を中心に両側へ離さねばならず、より長い張出しを有する支柱が必要となったり、道路側にも設置スペースを確保する必要性が出てくる。実用上はこのような設置に関する制約条件を極力排除する方が望ましく、長

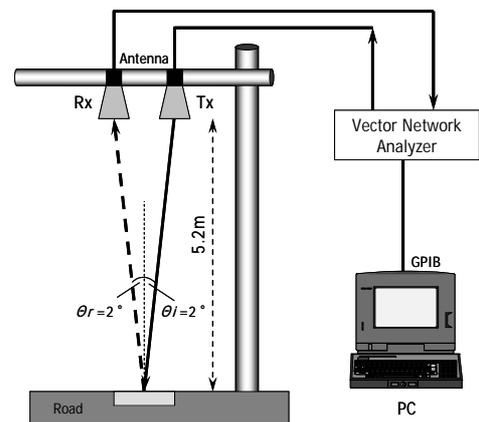


Fig.6 Measurement system

Table 1 Major parameters of measuring device

Frequency	0.3~8.0 GHz
Maximum output power	+10dBm
Dynamic range	90dB
Antenna	Double-ridge horn antenna (1~18 GHz)

い支柱の張出しや道路側のスペースを必要としない小さな角度を設定した。

計測手法としては Fig.2 で示したように、計測対象表面での反射波および各層を透過し金属板で反射され再度各層を透過した反射波を計測し、計測対象の代わりに金属板（全反射体）を配置して計測した反射波との比を反射率とする反射法<sup>13)</sup>により行なう。

### 3.2 道路面の加工

Fig.2 の電波伝搬モデルでの計測を行なうためには、道路面を掘削加工し、下端に金属板（電波反射体）を埋設する必要がある。また前章での検討に基づけば、計測周波数を 1GHz ~ 5GHz 程度 (Fig.1 において濃度に対する変化が大きな領域) とする場合、この周波数範囲内で反射率極小点が観測されるためには、道路層の厚みを 10mm 程度にする必要がある。そのため、Fig.7 に示すような広さ 850mm 四方、深さ 10mm の加工を道路面に行ない、この加工した領域を計測対象とする。すなわち、本計測システムの検出範囲は 850mm 四方となる。

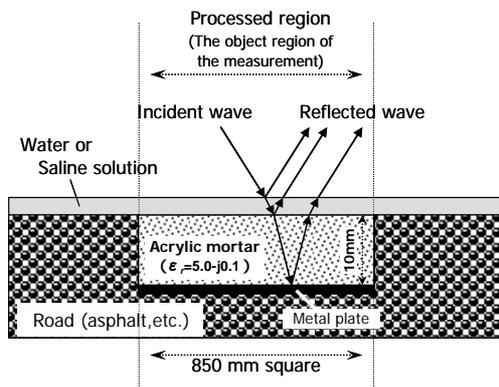


Fig.7 The aspect of the road surface processing

また、掘削部分を埋め戻す道路層の材料としてはアスファルト材を用いず、以下の観点から硬化性をもつ樹脂系接着剤を使用することとした。

- (1) 加工が容易で、かつ、加工後の表面を平らに仕上げることが可能であり、計測対象を均一膜として保ちやすい。
- (2) 複素比誘電率が既知 ( $\epsilon_r = 5.0 - j0.1$ ，サンプルを切出して Agilent Technologies 製 85071E<sup>21),22)</sup>にて実測) であり、アスファルト材のそれと大差がなく、アスファルト材よりも均質な層として形成しやすい。
- (3) アスファルト材よりはるかに堅牢で剥がれにくく、通過車両や風化に対して頑健である。

この路面加工については、システム設置場所ごとに行なう必要があるため、実際の道路面において高精度での加工が再現可能な最大の大きさからその範囲を決定した。

### 3.3 データ解析処理

また、計測データの解析処理としては、VNA により 2GHz ~ 6GHz の周波数における反射強度および位相を計測し、データ解析 PC において反射率を算出する。ここで、本計測シ

ステムの計測範囲としては路面加工を施した 850mm 四方であるが、アンテナから照射する電波はこの面内のみには収束しているわけではないため、計測面以外からの不要反射成分がノイズ成分として計測される。そのため、このノイズ成分を低減するためにタイムドメイン処理<sup>14)</sup>を前処理として施す。タイムドメイン処理とは、周波数領域での計測結果をフーリエ逆変換によって時間領域に変換し、計測対象と受信アンテナ間の距離に基づいて計測対象とする信号を同定し、その信号のみに窓処理を施した後にフーリエ変換を行なう。これら一連の処理によって、計測対象以外からの不要反射成分による影響を低減することが可能となる<sup>14)</sup>。

## 4. 検証

第 2 章において、反射率極小点に基づく塩分濃度の検出可能性を理論計算上から得ることができ、さらには、その具体的手法について検討したが、あくまで反射率極小点が理論計算通りに計測されることが前提となる。そのため本章では、Fig.6 の計測システムで計測される反射率と、(2)式に基づいて理論計算した結果との整合性に関する検証を行なうとともに、2.4 節において提案した濃度同定手法が実際に適用可能であるか否かについて検証する。

### 4.1 アクリル容器による検証

より厳密な検証を行なうために、検証に際しては、複素比誘電率が既知 ( $\epsilon_r = 2.7 - j0.0001$ ，サンプルを切出して Agilent Technologies 製 85071E<sup>21),22)</sup>にて実測) なアクリル板で構成された容器（以下、アクリル容器と呼ぶ）を Fig.6 の道路面上に配置して、容器内に各種濃度および各種膜厚の塩水膜を張り計測対象とする。Fig.8 に示すように、このアクリル容器は、厚さ 5mm のアクリル板で構成され、底面 500mm 角、側面高さ 100mm の正方容器となっている。容器内に張る塩水の膜厚に関しては容積に基づいて算出し、たとえば、1mm の膜厚の場合は 250ml の溶液を入れ、容器内底面の全体に馴染ませている。また、このようにアクリル容器内に塩水膜を形成することで、Fig.2 と同様に、[塩水膜] - [アクリル板] - [金属板（終端）] の 2 層誘電性電波吸収モデルで考えることができ、(1)式および(2)式に基づいて理論計算が可能となる。なお、計測に際しては、ア

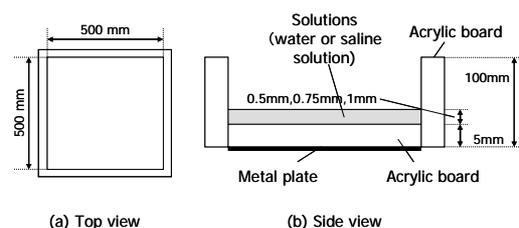


Fig.8 Acrylic container

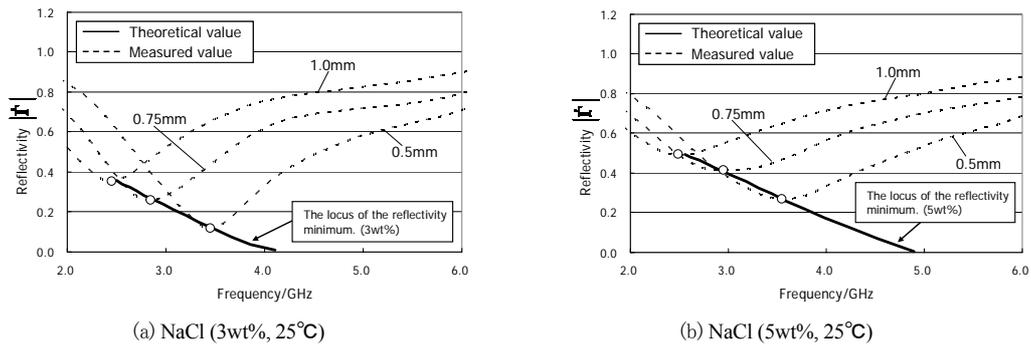


Fig.9 The consistency between the measured value and the theoretical value-1 (The locus of the reflectivity minimum)

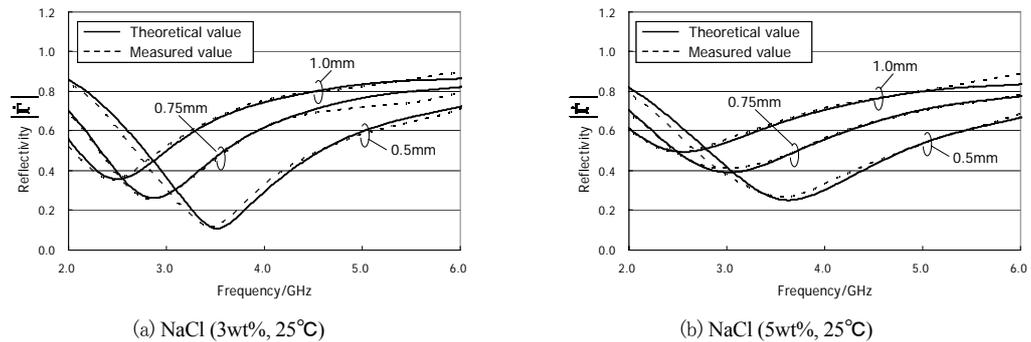


Fig.10 The consistency between the measured value and the theoretical value-2 (Reflectance characteristics)

クリル容器の周囲に電波吸収体を配置し、アクリル容器以外からの不要反射成分による影響を極力低減した状態で行なった。

上述の形態のもとで、温度 25°C、濃度 3wt% および 5wt% における各種膜厚 (0.5mm, 0.75mm, 1.0mm) に対する反射率計測結果と理論計算結果との比較を Fig.9 および Fig.10 に示す。まず、Fig.9 の結果は Fig.5(a) と同様に、0.3mm ~ 1.0mm の膜厚における反射率特性を 0.005mm ピッチで理論計算によって算出し、その反射率極小点の軌跡を各濃度に対して求めた結果 (実線) と、各種膜厚に対して計測された反射率極小点 (白点) との関係について検証した結果である。なお、Fig.9 における反射率極小点の軌跡と Fig.5(a) におけるそれとは、同じ塩水濃度に対して軌跡が異なっているが、これはアクリルの誘電率とアスファルトの誘電率との違いによるものである。

この結果では、いずれの膜厚においても、計測された反射率極小点は理論計算によって求めた各濃度における極小点の軌跡上に位置しており、2.4 節での検討通り、反射率極小点に基づいて濃度の同定が可能であることが検証できた。一方、Fig.10 は反射率極小点だけでなく、反射率特性全体の整合性を検証した結果である。この結果においても、特性全体の傾向として理論計算結果との高い整合性が確認でき、理論モデルおよび計測システムの妥当性が検証された。しかし厳密には、Fig.10 において、理論計算結果との僅かな誤差が確認できる。理論計算結果は、計測対象が完全な均質かつ均一な状態であることの仮定のもとに算出さ

れるのに対して、計測実験においては、計測対象の各層を完全には均質かつ均一な状態には保てないことに起因する誤差であると考えられる。その原因としては、アクリル容器の設置状態による塩水膜層の偏りや、アクリル板の表面加工精度など種々の要因が考えられる。なお、この考察に対する補足実験として、設置状態による塩水膜層の偏りがより軽減される工夫を施した試料を作成して検証実験を行なった結果を付録に記した。

#### 4.2 道路面における検証

前節までの検証によって、本計測システムの妥当性が検証された。本節ではさらに、Fig.7 のように加工した実際の道路面を計測対象として、2.4 節で提案した濃度同定手法による濃度検出精度に関して検証を行なう。検証に際しては、濃度が既知な溶液を道路面上に散布し反射率を計測する。そして、計測時の温度条件において Fig.5(a) と同様に理論計算によって算出した極小点軌跡において、計測された反射率の極小点がどこに位置するかによって濃度の判定を行なう。なお、2.4 節で述べたように、本提案手法では Fig.5(b) の関係に基づいて膜厚の検出も可能であるが、今回の実験に際しては道路面に塩水を散布した状態で膜厚を正確に測る術がなく、膜厚の真値を得ることができなかつたため、主目的である濃度検出精度の検証のみにとどめた。検証対象とする溶液としては、塩水 (NaCl-1wt%, 7°C)、塩水 (NaCl-5wt%, 7°C) および塩水 (NaCl-10wt%, 7°C) の 3 種について行なった。結果を Fig.11 および Table 2 に示す。

Fig.11 は、Fig.2 および Fig.7 に基づいて道路層 (樹脂加

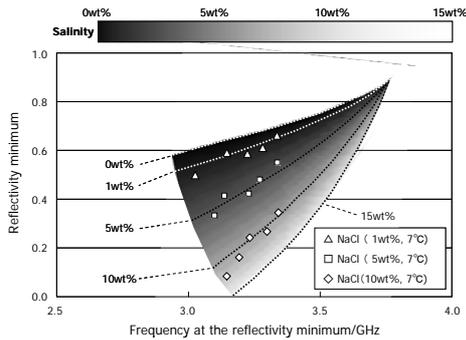


Fig.11 The measuring results for the actual road surface

Table 2 The salinity detection results

sample No.		1	2	3	4	5
1 wt%	measured value [wt%]	1.60	1.00	1.50	1.67	0.87
	absolute error [wt%]	0.60	0.00	0.50	0.67	0.13
	mean absolute error [wt%]	0.38				
5 wt%	measured value [wt%]	5.50	4.50	5.33	4.67	4.00
	absolute error [wt%]	0.50	0.50	0.33	0.33	1.00
	mean absolute error [wt%]	0.53				
10 wt%	measured value [wt%]	12.00	11.00	9.67	10.10	10.10
	absolute error [wt%]	2.00	1.00	0.33	0.10	0.10
	mean absolute error [wt%]	0.71				

工した部分)の厚みを  $d_1=10\text{mm}$ , 複素比誘電率を  $\hat{\epsilon}_{r1}=5.0-j0.1$ (サンプルを切出して Agilent Technologies 製 85071E<sup>21),22)</sup>にて実測), 電波の入射角を  $\theta=2^\circ$ , 計測時の温度を  $7^\circ\text{C}$ として, 膜厚  $d_2=0\text{mm}\sim 0.2\text{mm}$ ( $0.001\text{mm}$ ピッチ)および濃度  $0\text{wt}\%\sim 15\text{wt}\%$ ( $0.01\text{wt}\%$ ピッチ)における各反射率を算出し, 反射率極小点の分布を周波数—反射率平面内に示したものであり, 各点の濃度についてはグレイスケールで示した。また,  $\Delta$ ,  $\square$ ,  $\diamond$ の各点は,  $1\text{wt}\%$ ,  $5\text{wt}\%$ ,  $10\text{wt}\%$ の溶液を散布して計測された反射率の極小点であり, 各点における濃度判定結果および各濃度における 5 サンプルの平均絶対値誤差を Table 2 に示す。

第 1 章にて述べたように, 本計測装置は凍結抑制剤の過剰散布をなくすことを目的として, 凍結抑制剤を散布すべきか否かの判断基準を道路上に残留する塩分濃度で規定しようとするものである。つまり実用上, 散布すべきか否かの判断基準を与えるための濃度としては, たとえば  $1.00\text{wt}\%$ と  $1.01\text{wt}\%$ との厳密な弁別能が要求されているのではなく, もっと荒い分解能であっても目的を十分に達成できると考えられる。Table 2 の結果においては, いずれの濃度においても平均絶対値誤差で  $1\text{wt}\%$ 以下の結果が得られており, 少なくとも  $1\text{wt}\%$ 以下の分解能で濃度の検出が可能であることから, 上述した観点での実用上の要求精度は十分に満足するものと考えられる。また, 誤差要因に関しては以下のように考察される。

計測対象の周囲に電波吸収体を配置して, 不要反射成分

のない理想的な条件で計測を行なった場合, 理論計算値と整合性の高い結果が得られた前節での検証結果から鑑みると, タイムドメイン処理では除去しきれない不要反射成分による影響が先ずは考えられる。また前節でも考察したように, 実際の道路面上では, 細かな砂礫などの異物との混在状態となるため, 均質かつ均一な塩水層を想定して算出した理論値との整合性は低くなるのが考えられる。これらの問題点については, 実用化に向けての今後の重要な課題である。

## 5. まとめ

本稿では, 道路の雪氷対策および管理上において必要不可欠な情報である塩分濃度の非接触検出方法について, 新たにマイクロ波を計測キャリアとする方式について検討し, その検出可能性について理論的考察を行なうとともに, 塩水の濃度を同定するための具体的手法について提案した。また, 屋外環境下において実際に計測システムを構築し, 水および塩水(NaCl)を対象とした実験上の確認を行なった。その結果, 理論計算値と計測値が良好に一致する結果が得られ, 理論モデルおよび計測システムの妥当性が確認された。さらに, 実際の道路面において,  $1\text{wt}\%$ ,  $5\text{wt}\%$ ,  $10\text{wt}\%$ の塩水を対象として, 本提案手法による濃度検出精度についても検証を行なった。その結果, いずれの濃度においても平均絶対値誤差で  $1\text{wt}\%$ 以下の結果が得られ, 少なくとも  $1\text{wt}\%$ 以下の分解能で濃度の検出が可能であることから, 凍結抑制剤の散布基準を与える観点での実用上の要求精度を十分に満足するものと考えられる。

しかし, 本検討は緒についたばかりであり, 検証時の膜厚および濃度に関しては, 一様性をほぼ保った理想的な条件下での検証に留まっている。そのため実用化に向けては, 以下に示す課題についての詳細な検討が今後必要である。

- 屋外環境下での実際の道路を計測対象とする場合, 形成される塩水膜の均一性, あるいは濃度分布の一様性が異なるため, これらの影響についての検討が必要である。
- 水や塩水といった均質な状態だけではなく, ごみ・土石などの成分を含んでいる場合や, シャーベット状態のように雪氷成分と混在して存在する場合など, 各種状態における影響についての検討が必要である。
- 運用中の道路が対象となるため, 通過車両が計測におよぼす影響についての検討が必要である。
- 近年においては塩化カルシウムや酢酸系化合物なども凍結抑制剤として使用されるケースが増えてきているため, 凍結抑制剤の違いによる影響についての検討が必要である。
- 本計測システム 1 台の検出範囲は, 道路面の加工を必要とする関係上,  $850\text{mm}$  四方程度であるため, より広範囲な濃度分布状況を把握するためには, 検出領域の濃度分布状況に基づいて, 周辺領域における状況を推定する手法や, 複数台のセンサシステムによる濃度検出結果を

統合して、より広範囲の濃度分布状況を検出する手法などの検討が実用上必要になると考えられる。

今後も引き続き、これらの問題点および課題に関する考察および検証実験を進め、稿を改めて報告していく所存である。

**謝辞** 本研究を進めるにあたり、試験フィールドの提供およびデータ収集に関して多大なるご協力を頂きました国土交通省飯田国道事務所 伊知地 誠 様（現 岐阜国道事務所 電気通信係長）に深く感謝いたします。

## 文 献

- 1) 森昌文, 鈴木武彦, 佐々田敬久: AHS (走行支援道路システム) を構成する要素技術について, 月刊土木資料 7 月号, 28/33, July (2001)
- 2) 鈴木武彦, 加治屋安彦, 松沢勝, 川崎茂信, 福田敬大: 路面状況把握センサ実道フィールド実験, 寒地技術シンポジウム 2002, 421/426, (2002)
- 3) 坂田: 画像処理型路面情報収集装置について, 建設電気技術, 159/163, (2001)
- 4) M. Yamada, K. Ueda, I. Horiba and N. Sugie: Discrimination of the Road Condition Toward Understanding of Vehicle Driving Environments, IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2-1, 26/31, (2001)
- 5) 佐々木重和, 佐藤信之, 芳賀千賀子: 凍結抑制剤散布車のワンマン化に向けた取り組みについて, 第 17 回ふゆトピア研究発表会論文集, 154/157, Feb. (2002)
- 6) 藤崎哲也, 上西通, 中島博行: 凍結抑制剤の樹木への影響調査報告書について, 第 17 回ふゆトピア研究発表会論文集, 720/722, Feb. (2002)
- 7) 岡前憲秀: 青森県における新しい凍結抑制剤の開発とその使用について, 第 17 回ふゆトピア研究発表会論文集, 723/725, Feb. (2002)
- 8) ヴァイサラ株式会社ホームページ: 路面検知センサ DRS511, [http://www.vaisala.co.jp/rp\\_drs511.php](http://www.vaisala.co.jp/rp_drs511.php)
- 9) 宮田康史, 上田浩次, 山田宗男, 谷寄徹也, 安川博: 路面上における凍結防止剤濃度の非接触検出手法に関する検討, 電気学会 ITS 研究会資料, ITS-05-17, Jun (2005)
- 10) K. Ueda, T. Yagi, Y Miyata, and T. Takeo: Contactless Detection Method of Freeze and Saline Solution on Road Surface, Proceedings of 11th World Congress on ITS, Paper#3204(CD-ROM), Oct. (2004)
- 11) 国土交通省 飯田国道事務所: 04 年度報告 添付資料, <http://www.mlit.go.jp/chosahoukoku/h16giken/pdf/0216.pdf>
- 12) 伊知地 誠: 電波を使った凍結防止剤濃度測定実験, 国土交通省中部地方整備局管内事業研究会発表論文集 管理部会編, 47/52, July (2004)
- 13) D.K. Ghodgaonkar, V.V. Varadan and V.K. Varadan: A Free-Space Method for Measurement of Dielectric Constants and Loss Tangents at Microwave Frequencies, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 37-3, 789/793, (1989)
- 14) A.M. Nicolson, G..F. Ross: Measurement of Intrinsic Properties of Materials by Time Domain Techniques, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, IM-19, 377/382, (1979)
- 15) William B. Weir: Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies, IEEE, 62-1, Jan. (1974)
- 16) A.Stogryn: Equation for Calculating the Dielectric Constant of Saline Water, IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., 19, 733/736, Aug. (1971)
- 17) Richard Buchner, Glenn T. Hefter and Peter M. May: Dielectric Relaxation of Aqueous NaCl Solorions, J. Phys. Chem. A., 103-1, 1/9, Jan. (1999)
- 18) K. Nortemann, J. Hilland and U. Kaatzte: Dielectric Properties of Aqueous NaCl Solutions at Microwave Frequencies, J. Phys. Chem. A., 101-37, June (1997)
- 19) R. P. Singh, V. Kumar and S. K. Srivastav: Use of Microwave Remote Sensing in Salinity Estimation, Int. J. Remote Sensing, 11-2, 321/330, (1990)
- 20) 橋本修, 川崎繁男: 新しい電波工学, 培風館, (1998)
- 21) 橋本修: 電波吸収体のはなし, 日刊工業新聞社, (2001)
- 22) Agilent Technologies ホームページ: 材料試験システム 85071E, <http://www.home.agilent.com/JPjpn/nav/-536889951.0/pc.html>

## 付 録

### アクリル試料による検証

試料の設置状態による塩水膜層の偏りを極力低減するために、Fig.A-1 に示すような試料を新たに作成した。この試料は、10mm 厚のアクリル板 2 枚で 5mm の間隙を作成し、その間隙に計測対象となる溶液を封印することで、アクリル容器での実験において問題であった設置状態による偏りが起きにくいように工夫をした試料（以下、アクリル試料と呼ぶ）となっている。この試料を 4.1 節と同様に Fig.6 の路面上に配置して、反射率計測結果と理論計算結果との比較を行なう。検証の対象とする溶液としては、塩水 (NaCl-3wt%, 10°C) について行ない、また、計測に際しては、アクリル試料の周囲に電波吸収体を配置し、アクリル試料以外からの不要反射成分による影響を極力低減した状態で行なった。結果を Fig.A-2 に示す。

Fig.A-2 の結果では、反射率極小点の計測値と理論計算値は一致しており、さらに反射率特性全体の傾向としても高い整合性が確認できる。このことから、4.1 節での検証にお

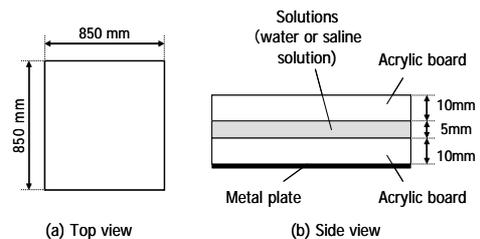


Fig.A-1 Acrylic sample

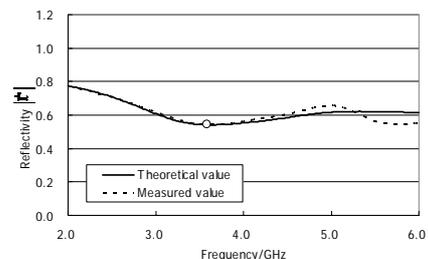


Fig.A-2 The consistency between the measured value and the theoretical value (Acrylic sample)

いて、アクリル容器の設置状態による塩水膜層の僅かな偏りが Fig.10 における誤差要因の一つであると考えられる。

山田 宗 男



(正会員) 1965年9月1日生まれ。89年名城大学理工学部電気工学科卒業。90年名古屋電機工業(株)入社。98年名城大学大学院修士課程修了。現在、名古屋電機工業(株)システム開発部。交通系における画像処理応用に関する研究に従事。電子情報通信学会、情報処理学会、電気学会、日本神経回路学会、応用物理学会、自動車技術会など各会員。

谷 寄 徹 也



1968年12月21日生まれ。92年名城大学理工学部電気電子工学科卒業。同年名古屋電機工業(株)入社。現在、名古屋電機工業(株)システム開発部。交通系における画像処理応用に関する研究に従事。電子情報通信学会、電気学会会員

上 田 浩 次



1959年2月20日生まれ。81年名城大学理工学部電気工学科卒業。同年名古屋電機工業(株)入社。88年名城大学大学院修士課程修了。現在、名古屋電機工業(株)システム開発部 技師長。主として交通系における画像処理応用に関する研究に従事。博士(工学)。電子情報通信学会、情報処理学会各会員。

宮 田 康 史



1965年10月04日生まれ。89年東北大学 理学部 化学学科卒業。民間企業を経て、現在、名古屋市工業研究所勤務。電磁波を用いたセンシングに関する研究および燃料電池に関する研究に従事。電気化学会、化学工学会各会員。

安 川 博



1947年07月16日生まれ。72年静岡大学大学院工学研究科修士課程了。同年日本電信電話公社(現NTT)入社。電気通信研究所にてデジタル伝送システムなどの研究実用化に従事。98年愛知県立大学情報科学部教授。情報通信・信号処理の研究に従事。工博。IEEE、情報処理学会、電子情報通信学会、日本音響学会など各会員。