

氏 名	宇 野 亨 <small>とある</small>
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 60 年 3 月 26 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	電磁波を用いた不均質媒質定数の推定に関する基礎的研究
指 導 教 官	東北大学教授 安達 三郎
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 安達 三郎 東北大学教授 西田 茂穂 東北大学教授 竹田 宏

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 言

計測は通信と並ぶ電磁波の主要な利用分野である。なかでも，地中探査，プラズマ診断あるいは医療関係分野への応用などのリモートセンシング技術に関連して，観測対象物に電磁波を照射し，散乱波を測定することによって対象物の媒質定数を推定するいわゆる逆散乱問題への関心が高まっている。

電磁波を用いた一次元不均質媒質の逆散乱問題の解法に関する従来の研究では，入射波，媒質定数分布，測定法等に制限が加えられており，測定値が有限個で誤差を含む場合であるとかが，入射波の偏波を考慮するというような見地からの報告は見当らない。実際の測定では，観測量には必ず誤差が含まれているから，測定誤差が推定値に与える影響を明らかにすると共に，誤差を含む有限個の測定値からより信頼度の高い誘電率分布及び導電率分布を推定する手法を確立しておかなければならない。本論文は，このようなより実際的な観点から，電磁波を用いた一次元不均質媒質定数の推定に関して，新しい有効な手法を確立することを目的として行なった研究をまとめたものである。なお，本論文を通して周波数領域における逆散乱問題を取扱っている。

第2章 周波数領域における一次元不均質媒質の逆散乱問題の定式化

本章では、一次元層状不均質媒質に平面波が斜めに入射する場合の逆散乱問題の解法に関する基本的な定式化を行なっている。図1に示すように、媒質にTEあるいはTM平面波が入射する場合に対して、反射係数と未知の媒質定数に関する非線形積分方程式を導出し、以後の取扱いを容易にするためにこれを線形近似した基本式を導いた。すなわち、未知の媒質定数 $q^*(k, x) = \varepsilon^*(x) - j(\eta_0/k)\sigma^*(x)$ が既知の媒質定数 $q(k, x)$ の摂動としたとき、 q^* による反射係数 r^* と q による反射係数 r との差は、

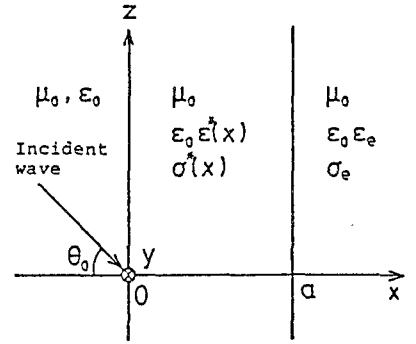


図1 座標系

$$r^* - r(q) \simeq L \delta q \quad , \quad \delta q = q^* - q \quad (1)$$

と求められた。ただし、

$$L \delta q = \int_0^a F(q, x) \delta q(k, x) dx \quad (2)$$

$$F(q, x) = \begin{cases} \frac{k}{2j \cos \theta_0} \phi^2(k, x) & ; \text{TE} \\ \frac{\eta_0^2}{2jk \cos \theta_0} \frac{1}{q^2(k, x)} \{ k^2 \sin^2 \theta_0 \Psi^2(q, x) + \Psi'^2(q, x) \} & ; \text{TM} \end{cases} \quad (3)$$

$\phi(q, x)$:電界, $\Psi(q, x)$:磁界

この結果、従来ほとんど検討されていなかった入射角、TE波、TM波あるいはそれらを組合せた推定が可能となった。

第3章 誘電率分布の推定

氷雪や大気のように導電率が無視できることが予めわかっている場合には、損失を含めた一般的な解法を考えるよりも始めから媒質には損失がないとした推定法について考えた方が有利である。本章では、第2章で導いた基本式(1)の一つの応用として、無損失媒質の誘電率分布の推定について検討した。まず、第1次Born近似に基づく推定法について検討した。その数値例を図2に示した。ここで推定に用いられる反射係数 r^* は

$$r^* = R + \bar{\sigma}(n_r, n_m) \quad (5)$$

であるとした。ただし、 R は正確な反射係数、 n_r, n_m はそれぞれ平均値0、分散1の正規分布に従うものとした。次に、均質多層分割法に基づく推定法について検討した。その数値例を図3に示した。又、これら2つの推定法が近似的に等価であること、誘電率分布の不連続点付近を除いて良

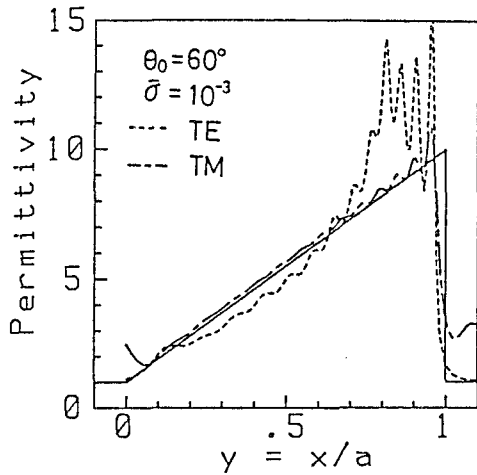


図2 第一次Born近似に基づく推定

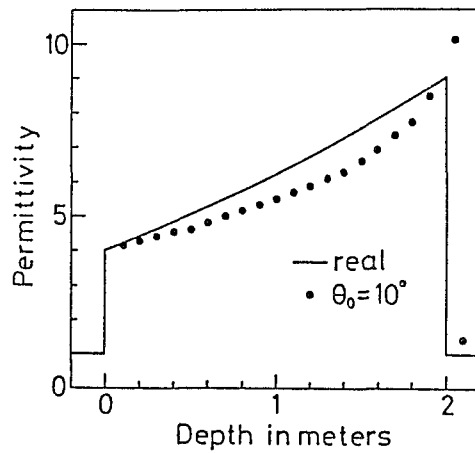


図3 均質多層分割法に基づく推定 (TE, $\bar{\sigma}=0$)

好な推定が可能であることを示した。このように、斜め入射の場合の推定法について検討した結果、入射角や偏波を変えて測定した反射係数を用いて誘電率分布の推定が可能となり、総合的判断ができるようになった。

第4章 最小二乗法に基づく誘電率及び導電率分布の推定

一般に、一次元不均質媒質の誘電率分布及び導電率分布を同時に、かつ一意的に決定するためには全ての周波数に亘って散乱行列の全ての要素が厳密にわかっているなければならない。従って、実際の測定の場合のように、誤差を含む有限個の反射係数だけから不均質媒質の誘電率分布及び導電率分布を推定するためには、最小二乗法的な意味で推定値を決定しなければならない。本章では、第2章で導出した線形積分方程式(1)を最小二乗反復探索法を用いて安定に解くために正則化法を導入し、均質多層媒質定数の推定に関しては数理計画法からのアプローチを行ない、連続媒質定数に関しては変分法からのアプローチを行なった。その結果、媒質定数は両者とも、簡単な行列演算で推定できることを示した。その数値計算例を図4及び図5に示した。また、最小二乗法に基づいた方法のような反復推定法に関する従来の研究報告において、常に未解決のまま残されていた初期値の与え方を解決する新しい方法を提案し、多くの数値例でその有効性を実証した。

次に、推定精度を格段に向上させる安定な推定法として、入射角、TE及びTM両偏波、さらにそれら全てを利用した媒質定数推定法を提案し、本手法がきわめて有効であることを示した。その一例を図6に示した。この推定法は従来全く報告されていない、新しい有効な方法であるといえる。又、観測量が反射係数の振幅のみの場合の推定法も示した。

さらに、得られた推定値の信頼度を知るという観点から測定誤差と推定誤差との関係を明らかにした。この結果、媒質定数の推定誤差分散が測定反射係数の誤差分散によって予め評価できるよう

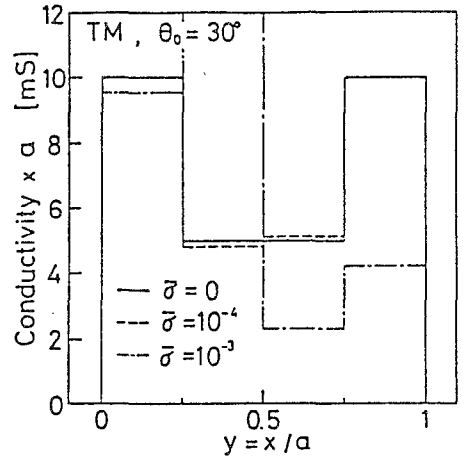
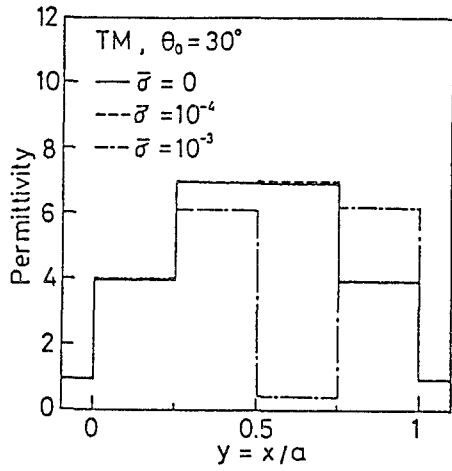


図4 均質多層媒質の再現プロフィール

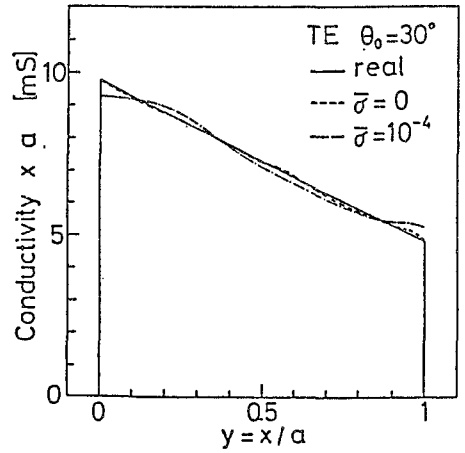
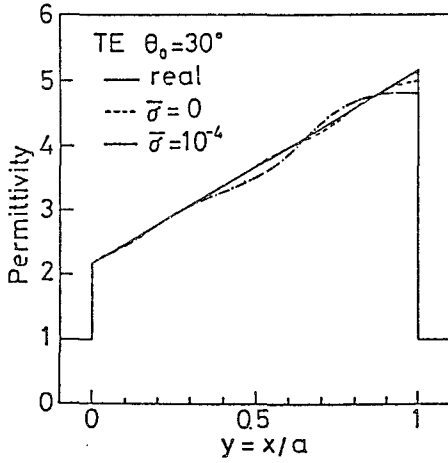


図5 連続媒質の再現プロフィール

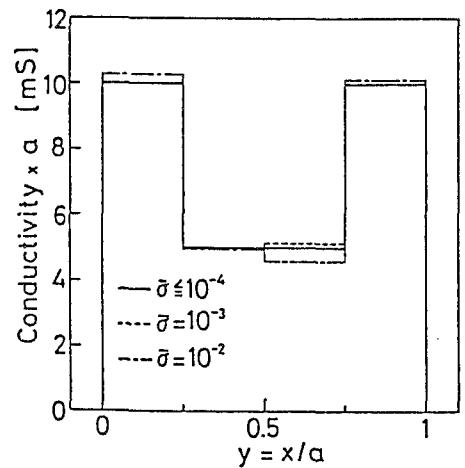
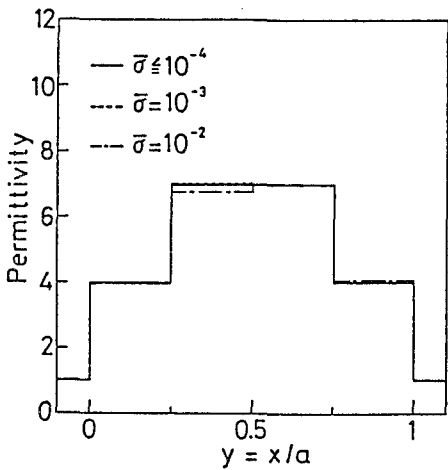
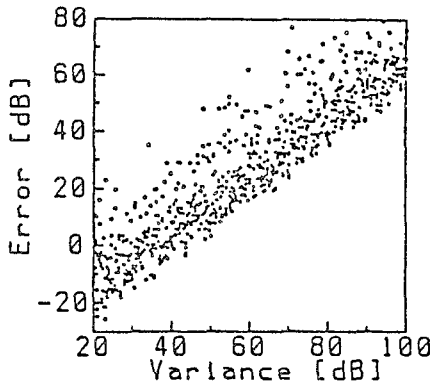
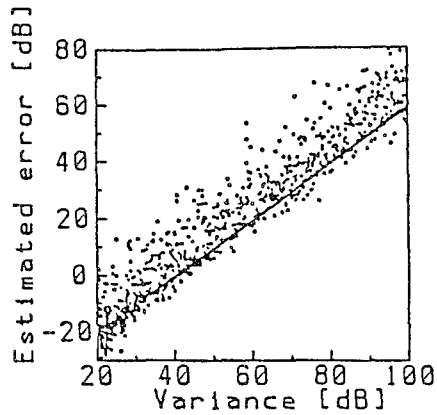


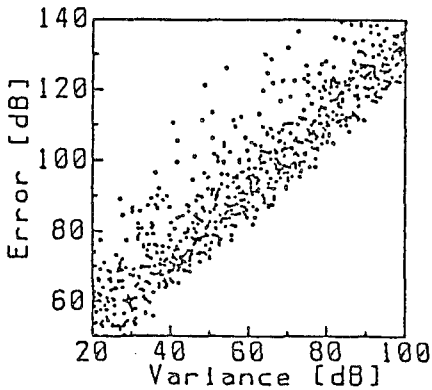
図6 TE, TM波及び入射角を利用した推定の再現プロフィール



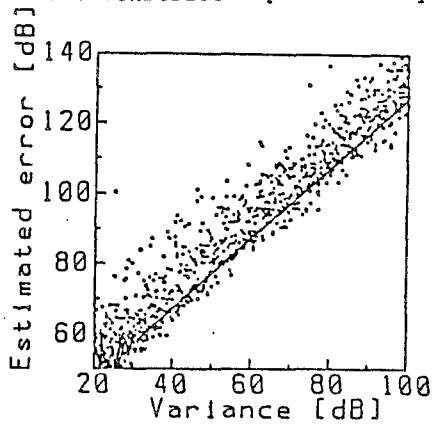
(a) Real error variance of the reconstructed permittivity.



(b) Estimated error variance of the reconstructed permittivity.



(a) Real error variance of the reconstructed conductivity.



(b) Estimated error variance of the reconstructed conductivity.

図7 測定誤差分散に対する誤差分散(a)と推定誤差分散(b) (実線は σ から評価されている) になった。数値計算例を図7に示した。

第5章 結 言

本論文は、電磁波を用いた一次元不均質媒質の誘電率分布及び導電率分布の推定に関して、より一般的な見地にたって理論的に検討したものである。従来の研究報告においてはそのほとんどが媒質に平面波が垂直に入射する場合の取扱いであり、電磁波の基本的な問題であるにも拘らず、TE波、TM波入射の場合を取扱った例はほとんど見当らなかった。又、それら両偏波を利用した推定法については全く報告されていない。さらに、測定値が有限個で誤差を含む場合の推定法、測定誤差が推定値に与える影響等は未解決のまま残されていた。本論文は、これら未解決であった問題を解決すると共に、より実際的な関点から新しい媒質定数推定法を提案し、その有効性を理論的に実証したものである。

近年、電磁波を用いたりモートセンシングが注目されており、本論文で得られた成果がこれら技術発展の基礎資料として役立つものと考えられる。

審査結果の要旨

氷雪、大地、大気、プラズマ、生体などの観測対象物に電磁波を照射し、表面反射波および内部からの散乱波を外部から測定することによって、対象物の電気媒質定数を推定するいわゆる逆散乱問題が、リモートセンシングに関連して最近とみに関心を集めている。

一次元層状不均質媒質の逆散乱問題の周波数領域における解法は、従来、特殊な入射波、媒質定数分布、測定法の場合に限られていたが、本論文は、より一般的な場合に適用できる有効な媒質定数の推定法を開発するために行った研究の成果をとりまとめたもので全編5章よりなる。

第1章は緒言である。

第2章では、一次元不均質媒質に平面波が斜めに入射する場合の逆散乱問題の解法に関する定式化を行っている。すなわち、TE、TM波入射のそれぞれに対して、反射係数と媒質定数に関する非線形積分方程式を導出し、次に以後の取扱いを容易にするためにこれを線形近似した基本式を提示している。

第3章では、無損失不均質媒質の誘電率分布の推定について検討している。まず、第1次Born近似に基づく推定法、次いで均質多層分割法に基づく推定法について検討し、両者がほぼ等価であること、誘電率分布の不連続点付近を除けば良好な推定が可能であることを示している。

第4章では、誤差を含む有限個の測定値から、より信頼度の高い誘電率および導電率分布を同時に得るという見地に立って、最小二乗法に基づく逆散乱問題の解法に関する検討を行っている。第2章で導出した線形積分方程式を最小二乗反復推定法によって安定に解くために正則化法を導入し、均質多層分割法においては数理計画法からの接近、連続媒質法においては変分法からの接近による推定法を与えている。これらいずれの方法においても、これまで未解決であった反復推定における初期値の決め方に対して有効な手段を与え、これを多くの計算機シミュレーションによって実証している。また、媒質定数の推定精度を格段に向上させる新しい方法として、平面波の入射角や、偏波(TE、TM)を変化させて得た測定値を組合わせて利用する推定法を提案し、これを数値例によって実証している。さらに、得られる媒質定数の推定誤差分散が測定誤差分散によって予め評価できることを示すなど多くの新しい知見を加えている。

第5章は結言である。

以上要するに本論文は、電磁波を用いた一次元不均質媒質定数の推定に関して、従来未解決であった問題点を解決し、より一般的な新しい推定法を提案し、その有効性を実証したもので、電波工学並びに電気計測学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。