

氏名	たむら やすひこ <b>田 村 安 彦</b>
学位(専攻分野)	博 士 ( 学 術 )
学位記番号	博乙第 137 号
学位授与の日付	平成 17 年 7 月 25 日
学位授与の要件	学位規程第 3 条第 4 項該当
学位論文題目	<b>不規則表面とゆらぎのある薄膜による波動の散乱回折理論</b> (主査)
審査委員	教授 中山純一 教授 遠藤久満 教授 中森伸行

## 論文内容の要旨

本学位論文は、不規則表面による散乱とゆらぎを持つ薄膜による平面波の散乱問題を電磁界理論と確率過程論の立場から研究したものであり、9 章と付録から構成されている。第一章では、研究背景と本論文で扱う不規則系の散乱回折現象、研究目的、確率汎関数法について説明し、各章の構成を述べている。

第二章・第三章では、不規則表面による平面波の散乱問題を解析している。平面波入射に対するランダムな散乱波を不規則表面の確率汎関数として Wiener 展開すれば、この問題は Wiener 核に対する可算無限個の階層方程式に変換される。本論文では、対角近似を適用して解析的に Wiener 核を求め、同時に多重散乱効果を表すマスオペレータが満たす非線形の積分方程式を導いている。この積分方程式の 1 次近似が従来の一次平滑近似(FSA: first order smoothing approximation)と一致すること、1 次平滑近似は物理的に不合理な散乱特性を与えうること、を指摘している。この難点を克服するため、新しい数値解法を提案して非線型積分方程式を初めて解き、その解を多重繰り込みマスオペレータと命名した。多重繰り込みマスオペレータを用いれば、スプリアスがなく物理的に妥当な散乱特性が得られることを明らかにしている。第三章では、反射係数を Hermite 多項式展開する新しい数学公式を導き、その公式を用いて不規則表面の相関距離が無限大となる場合の厳密解を得ている。次に、対角近似を用いないで Wiener 核を数値的に計算する手法を提案している。TE 平面波の散乱問題に適用し 2 次 Wiener 核まで数値的に求めれば、光学定理を満たす解となること、Wiener 核に特異性が現れる TM 波入射の場合にも精度よく数値解析できることを示している。

第四章と第五章では、一次元ゆらぎがある薄膜の TE 平面波の散乱を解析している。一次元ゆらぎの場合には FSA が発散し、散乱波が合理的に計算できない。一方、多重繰り込みマスオペレータを用いれば、発散することがない合理的な解が得られること、膜厚が十分厚いとき 1 次インコヒーレント散乱は後方散乱、鏡面反射方向、前方散乱及び対称前方散乱(前方散乱の膜厚方向に対称な方向への散乱)方向へのピークを持つこと、などを明らかにしている。また、2 次 Wiener 核を用いて 2 次インコヒーレント散乱特性を評価している。膜厚が厚い場合は、膜厚方向の構造がもたらす強調散乱として緩やかな強調散乱が後方散乱、鏡面反射、前方散乱及び対称前方散乱の方向に現れることを予見している。

第六章・第七章・第八章では、エッジのある不規則平面による散乱と回折、それらの相互作用を解析したものである。第六章では半平面による TE 平面波を取り扱い、ウィナーホップ法を用いて散乱波の摂動解を求めている。2 次摂動解には、'回折'のみ、'散乱'-'回折'、'散乱'-'回折'-'散乱'、'回折'-'散乱' の四つのプロセスが現れること、コヒーレント散乱は照射側に現れ、影側はほとんど現れないと、インコヒーレント散乱波は照射側で拡散散乱として現れ、影側の逆

鏡面反射方向では、散乱一回折、回折一散乱の2つのプロセスが打ち消すため、角度分布上のデイップとなることを示した。第七章では、不規則ストリップによるTE平面波散乱を解析している。この場合の解は、半平面問題の解を二つ重ね合わせ、二つのエッジ間の多重回折を表す補正項を付加する形となる。ストリップ幅が波長よりも十分大きい場合の遠方界を導き、2次摂動の寄与のためコヒーレント前方散乱振幅がわずかに強調されることを見出した。第八章では、不規則半平面によるTM平面波散乱を解析している。この問題の摂動解は発散するため不合理な解となる。そこでWiener展開を用いて多重散乱効果を含む発散のない近似解を構成している。不規則表面上のTM導波表面波とエッジ回折波が結合するため、影側の半平面側上でのインコヒーレント波の強度は強調されることを見いだしている。第九章はまとめであり、付録では、数値計算のための公式を述べている。

## 論文審査の結果の要旨

不規則表面やランダム媒質による波動散乱は、海面によるレーダーエコーの発生や海中での音波伝搬などに関連して1950年頃から研究が始まり、近年では後方強調散乱・随伴強調散乱・メモリ効果などの特異な現象が観測され、活発な議論の対象となっている。現象を解明するため、摂動法・多重散乱理論・確率汎関数法などが用いられているが、非線形の問題であるため完全な解決は困難で近似解法によらざるをえない。申請者は、2次元問題で揺らぎが小さい場合に限定して、以下の3つの問題を取りあげ、確率汎関数法を用いて近似解を構成し、統計的な回折散乱特性について議論している。

(1) 不規則表面による散乱(第2・3章)。従来の理論において、多重散乱効果を表すマスオペレータが非線形積分方程式を満たすことが知られていたが、その1次平滑近似解(FSA: first order smoothing approximation)だけが議論されていた。申請者は、FSAを用いると散乱特性に非物理的なスプリアスが現れることがあることを指摘した。新しい数値解法を考案して非線形積分方程式を初めて解き、その解を多重繰り込みマスオペレータと命名した。多重繰り込みマスオペレータを用いれば、スプリアスがない散乱特性が得られるることを示した。次に、解析上の示唆を得るために、凹凸のない平板の位置がランダムに変位する場合を取りあげている。反射係数をエルミット多項式展開する新しい公式を導き、展開の打ち切りによる近似について議論している。

(2) 1次元ゆらぎを持つ薄膜による平面波の散乱(第4・5章)。薄膜の誘電率のゆらぎが等方で2次元的であるときの解は知られているが、非等方で1次元的であるときにはFSAが発散するため未解決であった。しかし、多重繰り込みマスオペレータを用いれば、発散の問題が解決でき、精度の良い近似解が構成できることを初めて示した。

(3) エッジをもつ不規則表面による回折と散乱(第6・7・8章)。エッジ部分からの回折と表面の不規則性による散乱が共存する問題である。散乱波を摂動展開またはWiener展開して、展開の核関数をウィナー・ホップ法により決定し、エッジ回折と散乱およびそれらの相互作用について具体的に議論している。この問題の解析例は国内外において極めて少なく、申請者が初めて体系的な解析に成功したものである。

申請者が構成した近似解は多重積分で表現されているため、実際の評価には数値計算が必要となる。膨大な数値計算を行って、コヒーレント散乱や後方強調散乱、随伴強調散乱、散乱回

折特性、光学定理などの具体例を数多く図示している。これらの計算結果は、実用上の参考データとして意義のあるものである。

以上のように、申請者の研究は、新しいアイデアを導入して従来未解決であった問題に解答を与えるものであり、不規則系の散乱回折理論として高く評価できる。なお、本論文の主要部分は、申請者を筆頭著者とする以下6編の論文（その内、1編は印刷中）として査読制度のある学術誌に公表されている。

- (1) Y. Tamura and J. Nakayama, Mass operator for wave scattering from a slightly random surface, *Waves in Random Media*, Vol. 9, No. 3, pp. 341–368 (1999)
- (2) Y. Tamura and J. Nakayama, A formula on the Hermite expansion and its application to a random boundary value problem, *IEICE Trans. Electron.* Vol. E86-C, No. 8, pp. 1743–1748 (2003)
- (3) Y. Tamura and J. Nakayama, Wave reflection and transmission from a thin film with one-dimensional disorder, *Waves in Random Media*, Vol. 14, No. 3, pp. 435–465 (2004)
- (4) Y. Tamura and J. Nakayama, Enhanced scattering from a thin film with one-dimensional disorder, *Waves in Random Media* (accepted for publication)
- (5) Y. Tamura, J. Nakayama and K. Komori, Scattering and diffraction of a plane wave by a randomly rough half-plane: Evaluation of the second order perturbation, *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E80-C, No. 11, pp. 1381–1387 (1997)
- (6) Y. Tamura and J. Nakayama, Scattering and diffraction of a plane wave from a randomly rough strip, *Waves in Random Media*, Vol. 6, No. 2, pp. 387–418 (1996)