

博士(工学)学位論文 概要

散乱断面積の計算理論と 計算コードの開発に関する研究

小林 弘一

平成13年1月

第1章 序 論

本研究は波長に比べて大きな物体に平面電磁波が照射したときの散乱断面積 (*RCS*) の計算理論、および計算コードの開発について論じたものである。様々な物体による散乱断面積に関する研究は 20 世紀の初頭からはじまっており、現在では多くの理論解析あるいは数値解析的な方法が提案されている。散乱断面積に関する研究は特殊用途のレーダシステムを始め高層ビルによる電波障害、衝突防止用センサーなどの高度道路情報システム (*ITS*) 分野、建屋内の通信など身近な分野でもその需要が高まっている。高速で大容量の小型電子計算機の出現とともに *RCS* をシステマティックに計算するコードが欧米を中心に開発されているが、わが国ではまだ見当たらない。

散乱物体が波長に比べて大きい場合を想定しているため、計算理論としては代表的な高周波漸近解法である物理光学法 (*PO*) に基づき、計算の精度改善と時間短縮を中心に考察する。一般に散乱体の表面は角および曲面で構成されることが多い。角は端部と見なすことができ表面は曲面と考えられる。波長に比べて十分大きい物体による散乱界を求めるには、代表的な高周波解法である *PO* 法が最も有力な方法の一つに挙げられる。*PO* は入射した電磁波によって散乱物体の表面に誘起された等価な電磁流が源となって生じる放射界を求める方法であり、誘起された電磁流が実際のもと同じであれば、この方法は厳密な解を与える。しかし、実際の問題では電磁流を正しく求めるのは困難である。

標準的な *PO* では入射波の反射点近傍の表面を接平面で置き換え、その接平面上に誘起される電磁流を幾何光学的に求めて近似する。散乱物体が完全導体の場合には電流 \mathbf{J} だけが誘起され、これを単に $\mathbf{J} = 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}^i$ で与える。法線ベクトル \mathbf{n} と入射方向の成す角が垂直となる領域の近傍では、この電磁流は近似精度が劣化する恐れがある。また、散乱物体の表面が入射波に対して影となる陰影領域では $\mathbf{J} = 0$ と仮定しているが、実際は 0 ではない。これが *PO* 法における精度劣化の大きな要因であるが、物体の寸法が十分大きい場合にはこの誤差の割合は比較的少ない。*PO* では表面に流れる電磁流が分かれば後は面積分だけで散乱界が得られ、特に複雑な形状を有する大きな 3 次元物体に対し、他の計算手法より多くの利点を持っている。このため、*PO* を用いた回折領域での計算精度の改善および *RCS* 計算コードは、この分野で大きな関心を持たれている。

接平面上で幾何光学的に求めた電磁流は一様である。これに対し、非一様な電磁流を考慮して精度を改善する方法が提案されている。代表的なものは物理光学的回折理論 (*PTD*) である。この理論は当初、角を持つ物体に適用されているが、近年では表面インピーダンスを持つ滑らかな物体あるいは角を持つ物体にも拡張され、現在も研究が進められている。*PTD* は実際の電流と *PO* 電流の差である非一様電流の放射界に対する寄与を幾何光学的回折理論 (*GTD*) と *PO* の漸近解との差を使って求める方法である。但し、*PTD* は前述のように *GTD* および *PO* で計算した遠方放射界を使って *PO* による放射界を補正するものであり、非一様電流と言っても実際の電流から放射界を計算するものではない。

以上の背景に対し本研究では、従来 *PO* を改善するために非一様な遷移電磁流の表示式を推定し、その効果を考慮した計算法を考案している。即ち、1 次近似である *PO* の電磁流に対し高次の遷移電磁流により直接補正することによって、散乱物体表面に誘起される電磁流分布をより正確にしようとする考えである。このような遷移電磁流を考慮した計算手法の考えを従来 *PO* と区別するため、*PTD-TC* 法 (*Physical Theory of Diffraction with Transition Currents*) と名付けている。従来 *PO* は完全導体ばかりでなく物体の表面に誘電体皮膜が装荷されている場合にも適用することができる。従って、非一様な電磁流分布をどのように推定するかという問題はあるが、ここで提案する方法は不完全導体に対しても一般化することが期待できる。また、実際の電磁流を基にしているので遠方界ばかりでなく近傍界も比較的容易に計算することができ、従来 *GTD* あるいは *PTD* が持っている欠点を補う特長を持つ。非一様電磁流の推定には規範問題の解を利用する。この意味では *GTD* の考え方と類似しており、大部分は従来 *規範問題* をそのまま利用できるが、誘電体皮膜が装荷された不完全導体に対する規範問題の解が求められていない問題もあるので、新たに解析しておく必要がある。同時に特殊な関数に対しては独自に計算プログラムを作成しなければならない。前述のように多くの物体では角と滑らかな領域を有しており、楔および円筒と球状の物体が基本的な規範形状として挙げられる。本研究では第 5 章

から 8 章で、表面インピーダンスを持つ楔と円筒、および滑らかな球状物体に平面波が照射したときの散乱界を *Fresnel* 積分, *Maliuzhinets*, *Fock* 関数等の特殊関数を用いて誘導あるいは新たに導出する。これらの結果を自在に *PO* の放射積分に取り入れることで計算精度が大きく改善できることを数値的に検証している。

実用的な観点で見ると、*PO* は二つの大きな自由度を持っている。*PTD-TC* 法のように電磁流の与え方に自由度があること、そして面積分の範囲を散乱物体の表面形状に従い任意に設定できることである。後者に関し、従来の *PO* を用いて散乱界を求める場合には、物体の表面を三角形あるいは四角形の平板で分割するか直接数値積分するのが通常のプロセスであった。この方法に対し、本研究では第 4 章で分割面を表面インピーダンスを持つ 2 次曲面に拡張し積分を *Fresnel* 積分の漸化式を用いて閉じた形で与えている。この効果は物体表面の分割面を大きく減少でき計算時間の短縮に寄与している。一方、その周縁が滑らかな凸状の平板に対し *PO* および *PTD* 解を求め、得られた表示式の妥当性を数値的に検証している。この *PO* 解は表面インピーダンスを持つ場合にも拡張できることを示す。複雑で大きな物体を対象とする場合、複数の平板状の形状物体が直交に近い角度で交差している領域はコーナーリフレクター部を形成している。本研究では幾何光学的に多重の反射波を求め、最終的に観測点に向かう波動についてその開口領域の寄与を散乱界として評価している (第 3 章)。また、航空機などの空気取り入れ用インテーク、ビルディングの個々の空間などに対し空洞部を考慮する必要もある。空洞部に対しては *PO* をベースとした積分方程式の繰り返し法で電磁流を求める方法が既に提案されており、空洞内壁が表面インピーダンスを持つ場合に対し考察している (第 9 章)。

以上の *PTD-TC* および *PO* を計算手法の基礎理論として、複雑で大きな散乱物体に対する平面電磁波の散乱界を計算評価するコードの開発について第 10 章で検討している。計算コードは、全体として 3 次元物体で且つ表面インピーダンスを持つ物体に対応できるようにプログラム構築する必要がある。計算実行のためには物体形状のモデリングが必要であり、*PO* と *PTD-TC* が有効に働く動作環境を考察する。*RCS* が計算できると、このデータを使って合成開口レーダ、逆合成開口レーダ、ドップラスペクトラム等の処理が可能となることを実証する。

本研究の主要な成果は、3 次元の表面インピーダンスを持つ物体 (以後、インピーダンス物体などと略称する) に対し従来の *PO* を改善する手法を提案し、その妥当性および有効性を個々の問題を挙げて解析し数値的に検証したこと、そしてシステムティックに *RCS* を計算できるコードの基本部分を試作し、2 次的に電波画像等のシミュレーションを可能としたことである。

第 2 章 電磁流分布による散乱電磁界と物理光学

本研究で扱う散乱断面積あるいは回折現象を解析するうえで、電磁界理論の知識は必要不可欠である。本章では散乱現象の理論的根拠として、散乱体表面上の電磁流分布による散乱界あるいは放射界に関する積分表現について考察する。電磁波が外部領域から物体に照射した場合、等価原理により物体表面に分布する電磁流で電磁界を表現できる。これは積分で表示され、*Green* の定理あるいはベクトルポテンシャル理論から誘導される。この一つの帰結が次式で与えられる電磁流分布の積分表示である。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^s &= -jkG_0(R) \int_S \left\{ Z \left[\mathbf{J} - (\mathbf{i}_R \cdot \mathbf{J}) \mathbf{i}_R \right] - \left[\mathbf{i}_R \times \mathbf{M} \right] \right\} \exp[jk\mathbf{r}' \cdot \mathbf{i}_R] dS' + O(R^{-2}) \\ \mathbf{H}^s &= -jkG_0(R) \int_S \left\{ \left[\mathbf{M} - (\mathbf{i}_R \cdot \mathbf{M}) \mathbf{i}_R \right] + Y \left[\mathbf{i}_R \times \mathbf{J} \right] \right\} \exp[jk\mathbf{r}' \cdot \mathbf{i}_R] dS' + O(R^{-2}) \end{aligned}$$

ここで、 $G_0(R) = \frac{\exp(-jkR)}{4\pi R}$ は等方的な球面波を表しており、 $Y = Z^{-1} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}$ 、 \mathbf{i}_R と R は各々散乱体座標の原点から観測点に向かう単位ベクトルとそれらの間の距離、 k は波数である。この積分は *PO* に基づいた散乱および放射の問題での基本となる表示式であり、一般に放射積分と呼ばれている。実際の解析を考えると、積分は $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ 、 $\mathbf{M}(\mathbf{r}')$ の与え方に依存している。これに対する考え方は重要である。即ち、 $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ 、 $\mathbf{M}(\mathbf{r}')$ は電磁流の空間的あるいは散乱体形状にそった幾何的な広がりがある。従って、電磁流の与え方と散乱体形状の数学的な表

現ポイントとなる。第3章では周縁が滑らかな凸型の平板に対し解析的に積分を展開する。第4章では任意形状の曲面から出発し電磁界分布による散乱界の定式化を行い、2次曲面を仮定して積分を解析的に解く。第5章から第8章では電磁流の与え方に対し規範問題より類推して精度の高い表示式を求め、従来POの弱点とされている回折領域での精度改善に大きく寄与することを目指す。

第3章 周縁が凸状のインピーダンス平板による散乱

本章では、その周縁が凸型の滑らかな平板に平面波が入射した場合について考察する。平板による散乱は基本的な問題でもあり、ここではPOの放射積分を数学的に展開する。平板周縁を任意の滑らかな曲線に拡張した場合、散乱界はAiryパターンを呈することが明らかになる。得られた表示式より、矩形板、円板、楕円板等の個々の形状平板に対する解が容易に誘導できる。さらに、平板の縁における非一様電流を考慮したPTDによる解析を行い、数値計算でその有効性を確認している。表面インピーダンスを持つ不完全導体の場合は、まず滑らかな曲面に対する一般的な積分表示の定式化を行い、そこから任意の凸状周縁を持つインピーダンス平板に拡張する。問題は平板に限定しているため表示式は容易に導かれ、結果的に電磁流に対する積分の外側に入射角と観測角および反射係数の因子が付くだけとなる。以上の結果を用いれば、これらの間の多重反射に対しても定式化ができる。この章では3面の直交コーナーリフレクターを意識して3重の反射界を求め、実測値と比較する。図3-1は同図に示す凸状平板に対し、数値積分(実線A)とここで得た表示式(実線B)、および漸近解(破線)を比較した結果である。図3-2はミリ波帯での3面直交リフレクターによるモノスタティックRCSの計算値(赤:実線)を実測値(黒:破線)と比較したものであり、良く一致しているのが分かる。

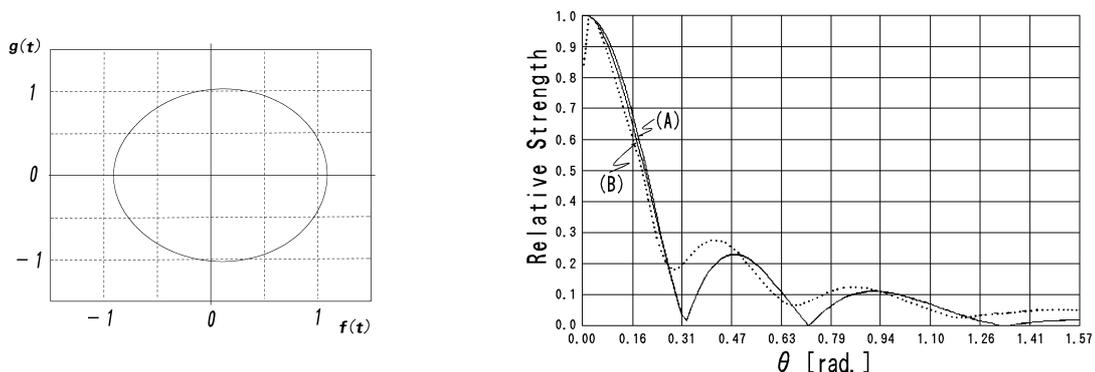


図 3-1 凸型導体平板による散乱 ($ka=10$, 偏波, $\theta_0=0$) A: 数値積分, B: Caustic 修正表示, 破線: 漸近解

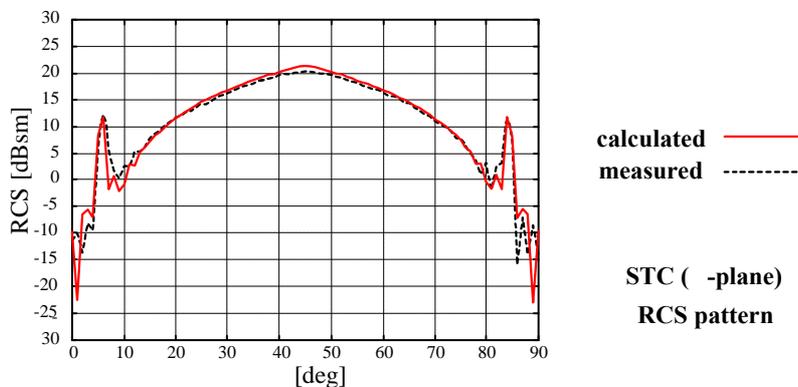


図 3-2 ミリ波帯 (60.5GHz) における3面直交リフレクターのRCS (偏波 VV, -面, $c=100\text{mm}$)

第4章 インピーダンス2次曲面による散乱

本章では、先ず滑らかな曲面で与えられている3次元のインピーダンス物体による散乱界について考察する。散乱物体が平板の場合、一般に PO の放射積分はサンプル関数に帰着する。位相を2次の項まで考慮すると積分は $Fresnel$ 積分で与えられる。滑らかな曲面をいくつかの区分に2次曲面で分割近似し曲面上の PO 電流を利用すると、これも $Fresnel$ 積分の拡張した関数(漸化式)で表されることが明らかとなった。 $Fresnel$ 積分の数値計算は多項式近似で行うことができるので、短い計算時間で実行できる利点がある。この計算法は3次元物体に容易に適用できる。また曲率半径が無限大の平板も自動的に対応でき、その応用範囲は広範囲にわたる。種々の物体をモデルにして数値計算を行い、 PO 近似の範囲内で精度が得られていることを確認する。一方、任意形状の滑らかなインピーダンス曲面に対する放射積分を利用すれば、2次曲面が表面インピーダンスを持つ場合にも拡張できることを示す。当然、完全導体の場合を含んでおり適用範囲が更に広範囲となることが期待できる。遷移領域での電磁流は $Fock$ の理論等を適用して考慮することができ、これについては主に第8章で扱う。図4-1は完全導体の $Ogive$ に対する2次曲面分割方式を PO の数値積分、 MoM の計算結果と比べたものである。

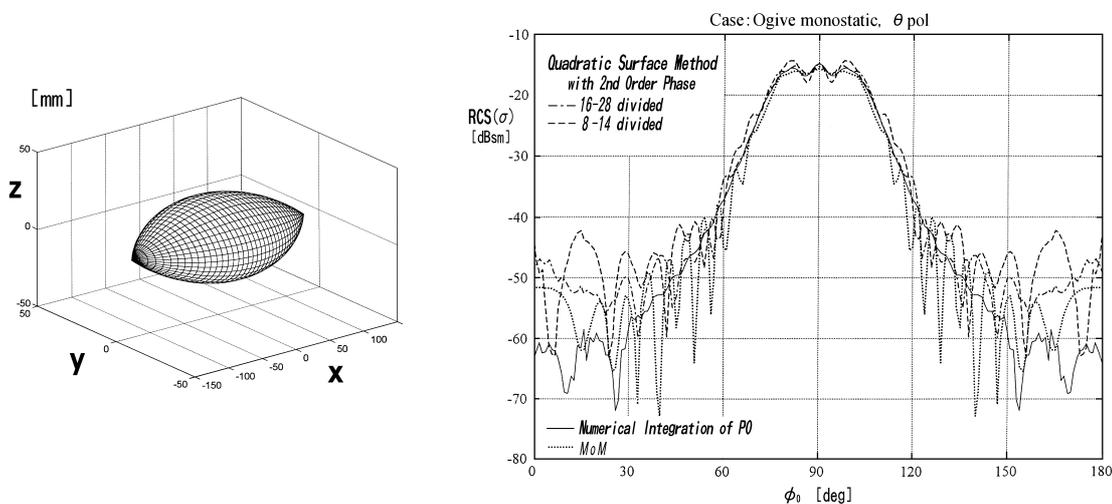


図 4-1 2次曲面分割法による導体 $Ogive$ の RCS (外形:軸長 7.65 波長, 半頂角 22.6 度, 偏波, 10GHz)

第5章 遷移電磁流を考慮した物理光学に対する規範問題(楔)

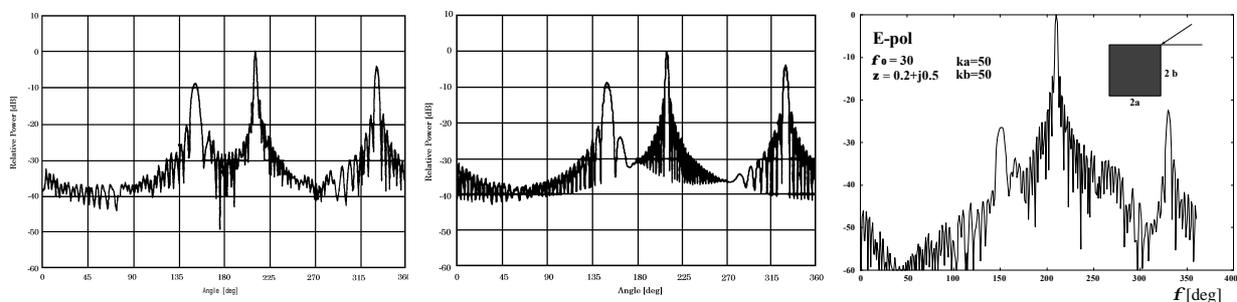
本章は遷移電流を用いた物理光学法 ($PTD-TC$) の基となる規範問題について記述する。角を持つ物体の規範問題は楔である。完全導体の楔に平面波または円筒波が入射したときの解は既に求められており、 $Bessel$ 関数を使った固有関数展開により厳密に表すことができる。しかし、観測点が端部から数波長離れると級数解の収束性は劣化するので、 $Fresnel$ 積分を使った近似式が利用される。この近似式的最も簡単な形は陰影領域の境界で発散する。一様な表示式は $Pauli$ により示されており、この表示式が現在 GTD の標準となっている。本章では、少し異なった観点からこれと同等の表示式を誘導し、数値上殆ど差がないことを確かめている。一方、損失を含む誘電体、あるいは誘電体皮膜を装荷した導体楔は表面インピーダンスで近似できる。インピーダンス楔に平面波が入射した場合の解は $Maliuzhinets$ により与えられており、近年この解の拡張を含めて広く研究が進められている。特に、楔表面近傍の電磁界の振る舞いは $PTD-TC$ 法における表面電流の規範問題として重要な項目であり、本章および第7章で一様な漸近解の誘導を行う。このような高次の漸近解は楔の壁面と入射方向が平行になる場合、あるいは角が二つ以上ある場合の深い回折領域で必要となる。ここで得た高次の表示式は新しく求めたものである。

第6章 遷移電磁流を考慮した物理光学に対する規範問題(円筒・球)

本章では、滑らかな物体に対する *PTD-TC* の規範問題となる導体円筒およびインピーダンス円筒に平面波が入射した場合の表面電流に関し考察する。その曲率半径が広範囲にわたって変化する物体を対象としているので、収束が半径に大きく依存する級数表示を *Watson* 変換によって積分の形に表すことを考える。3次元問題に適用するためには斜め入射に対する解も必要であるが、これは垂直入射の場合を少し変形して誘導できる。表面インピーダンスを持つ円筒表面上の電界と磁界の接線成分に対する表示式に対しても *Fock* 関数が用いられる。導体表面に誘電体を装荷したとき、これを表面インピーダンスで近似するのは電磁波が垂直に近い角度で入射するという前提条件がある。しかし、遷移電流は面に平行に近い角度で入射した場合に相当しており、表面インピーダンスによる近似式が妥当であるかどうか問題となるが、適当なモデルを使って数値計算した結果では厳密解と良く一致している。斜め入射の場合は垂直入射に比べて理論的には難しい部分はないが、解の表示式はかなり複雑になってくる。一方、表面インピーダンスを持つ球状の滑らかな3次元物体に平面波が照射したときの回折は既に *Fock* が行っているが、本章ではこの *Fock* の表面電流に着目してその理論を展開しておき、第8章で *PTD-TC* の考えに従い滑らかな球状物体に適用する。

第7章 2次元インピーダンス物体へのPTD-TCの応用

本章と第8章では種々の物体による *PTD-TC* の応用例を議論する。本章は2次元のインピーダンス楔と導体楔、および滑らかな曲面で構成される *Ogive* 状の導体に平面波が入射したときの散乱に対し、規範問題の解を利用して *PTD-TC* 法の散乱界を誘導し、数値的にその有効性を確認する。規範問題は第5章と6章の楔と円筒による電流表示を用いる。表面インピーダンスを持つ四角柱では、インピーダンス楔の回折界を基にして遷移電磁流を求め、インピーダンス四角柱による平面波の散乱界を計算している。さらに、インピーダンス多角柱による平面波の散乱を解析する際に必要となる等価的な表面電磁流を求める方法について発展させている。インピーダンス楔による表面の電磁界については今まであまり検討されておらず、その様な漸近界を与えたのは初めてではないかと思われる。多角柱の場合にはこれだけでは不十分であり、多重の回折波の漸近解が必要である。ここでは著者等が既に提案している等価波源の方法 (*ESM*) を適用して、インピーダンス面の多重回折波に対する表示式を与える。インピーダンス壁面上の電磁界は壁面に平行に入射している場合 $(k\rho)^{-\frac{1}{2}}$ 、平行でない場合は $(k\rho)^{-\frac{3}{2}}$ に比例して漸近的に減衰することを明らかにした。ここで、 ρ は角 (*edge*) からの距離である。以上の規範問題を数値計算する場合には、そこに現れる特殊関数の数値計算用プログラムが必要となる。そのうちの一部は既版の参考文献から得られるものもあるが残りは独自に作成している。図7-1に完全導体と表面インピーダンスを持つ、大きさ $2ka = 2kb = 100$ の四角柱による散乱界に対し *PTD-TC* 法を使った計算結果を示す。但し、入射角は $\phi_0 = 30^\circ$ である。



(a) 完全導体四角柱 (PTD-TC) (b) 完全導体四角柱 (MoM) (c) 表面インピーダンス (PTD-TC)

図7-1 PTD-TC法によるインピーダンス四角柱の散乱 ($ka=kb=50$, E波)

第 8 章 3次元インピーダンス物体への PTD-TC の応用

本章では、遷移電流を考慮した PTD-TC の考えを表面インピーダンスを持つ滑らかな凸状の 2 次元および 3 次元物体に適用し、従来の PO 法に比べ精度良く散乱界を計算できることを示す。滑らかで大きな物体に平面波が入射したときの表面電流は Fock の理論より求められる。ここで議論するように、入射角によって変化する陰影境界近傍に対して PTD-TC 法、その他の照射領域では PO 法、例えば 2 次曲面分割法による計算を行うことで効率良く計算精度の向上が期待できる。2 次元、3 次元モデルの具体的な数値計算ではモーメント法あるいは級数展開による厳密解と比較した結果、数波長の僅かな遷移領域を考慮するだけで十分改善できることが分かり、PTD-TC 法の有効性を明らかにすることができた。一般の滑らかな凸状のインピーダンス物体に対しても本章で示した遷移電流および計算アルゴリズムを用いて、その散乱界が評価できると考えている。図 8-1 は表面インピーダンス $Z_{ns} = 0.25$ の球 ($ka = 50$) に TM 偏波の平面波が入射 ($\theta_0 = \phi_0 = 0$) したときの RCS パターンを比較したものであり、PTD-TC による改善効果が確認できる。

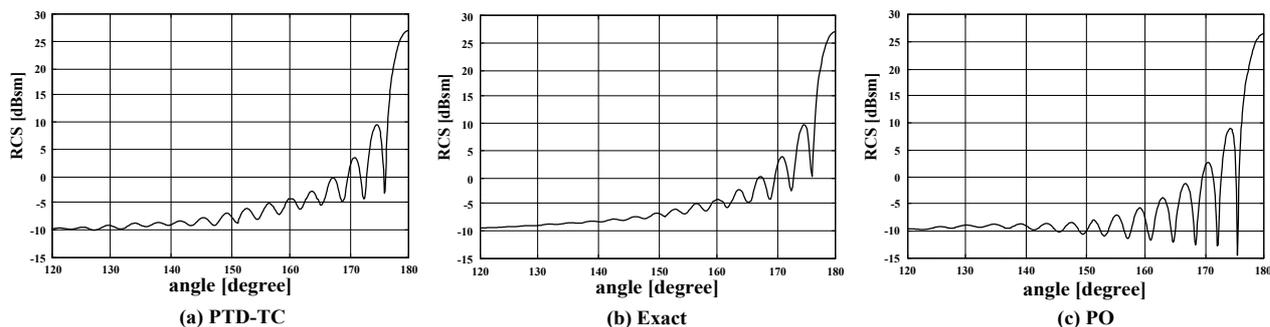


図 8-1 PTD-TC 法によるインピーダンス球の RCS ($ka=50$, $Z_{ns}=0.25$, TM 偏波, 10GHz)

第 9 章 インピーダンス空洞共振器による散乱

第 9 章は空洞共振器による散乱断面積について議論する。空洞共振器モデルは複雑で大きな物体の RCS の評価上、重要な項目となる場合がある。航空機、自動車等のダクト状の構成物がこれに相当する。計算方法としては幾何光学的なアプローチと PO をベースにした手法が既に提案されているが、本章ではこれらの理論と新たにインピーダンス物体への拡張を検討している。ここで扱う高周波解法は比較的任意形状の共振器を取り扱うことができる利点があり、PO を基本とした解法として IPO (Iterative PO) と PPO (Progressive PO) の二つの方法を取り上げている。これらは何れも共振器の内壁の誘起電流に対する磁界型積分方程式 (MFIE) を繰り返し法により解くことを基本としたものである。この両者は MFIE を基本としているので、完全導体ばかりでなく表面インピーダンスの境界条件を持つ物体に一般化することが可能である。ここでは IPO 法を使って数値的にそのアルゴリズムを確認し、次章の計算コードに反映する。図 9-1 は直径 4 波長、奥行 4 波長、内壁の表面インピーダンスが $\zeta_s = 0.40 + j0.115$ の円筒共振器に対するモノスタティック RCS を収束性を兼ねて図示したものである (m : 繰り返し数)。なお、底面は側壁と同じ表面インピーダンスを持つ平板で終端している。

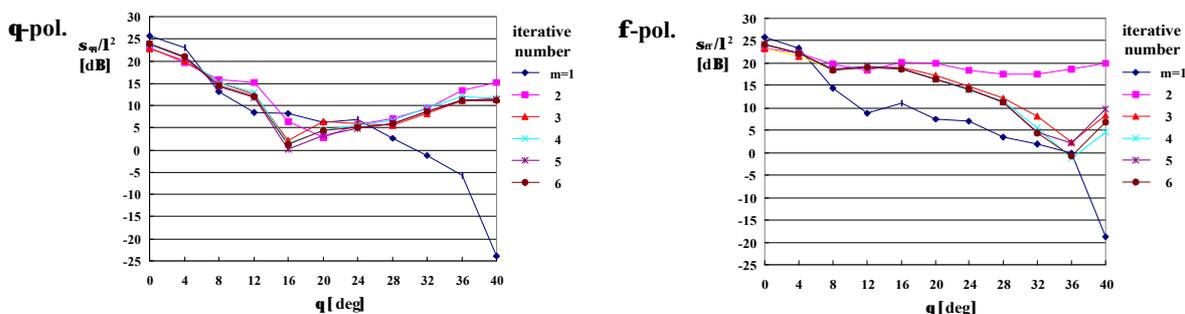


図 9-1 IPO 法によるインピーダンス円筒共振器の RCS (平板終端, 直径 4λ , 奥行 4λ , $\zeta_s = 0.40 + j0.115$)

第 10 章 散乱断面積計算評価コード

本章は 9 章までの理論的手法である *PTD-TC* あるいは *PO* を用いて、複雑で大きな 3 次元のインピーダンス物体に対する平面電磁波の散乱界を計算評価するソフトウェアコードの開発に関して考察する。*RCS* 計算のためには、第 1 に対象の散乱物体のコンピュータデータが必要となる。近年では各種シミュレーション向けなどに汎用性の高い物体に対する形状データが市販されているが、特殊なモデルの場合は実際的ではない。従って、実在する散乱対象物を直接あるいはそのスケールモデルから間接的にデータベース化しておく必要があり、デジタルカメラあるいはビデオを基に 3 次元データを再生するソフトウェアの利用、そして 3 次元のプロローピングによるデータ取得などの方法も考える。計算の基本コードには楔、筒状物体、球状物体、楕円錐物体などの基本形状とこれらを組み合わせた簡単な複合物体に対するデータ生成用モジュールも用意しておく。第 2 は *PO* 法と *PTD-TC* 法を適用するためのモデル加工技術である。即ち、前述の方法で得たコンピュータデータを基に入射波の照射領域と非照射領域の区別を行う陰影処理、境界の形状を認識し規範形状による遷移電磁流の領域を特定する処理、あるいは分割パッチ数を平板と 2 次曲面に最適化し、多重反射および回折の計算のためのコーナー部および空洞部を特定する処理などを行う必要がある。*RCS* 計算コードを半自動的に動作させる上で以上の処理は重要な役割を占めている。散乱体表面の最適なメッシュ化あるいは分割処理がこれらの計算の効率と精度を最大限に引き出すことになる。さらに、*RCS* の計算データを基に *Fourier* 変換を利用して、合成開口レーダ (*SAR*)、逆合成開口レーダ (*ISAR*)、ドップラスペクトラム等の処理をパーソナルコンピュータ上で演算可能となることをシミュレーションを通して検証する。*SAR/ISAR* の計算には微小に分割したパッチによる散乱界が必要であり、この意味からも *PO* 法との整合性を活かすことができる。

図 10-1 は実際の航空機による *RCS* の実測値 (黒) とそのモデルによる計算値 (赤) を比較したものである。多重反射および空洞共振部に対する効果が読み取れ、全体として改善されている。図 10-2 は旅客機をモデルにして、*ISAR* 処理を行ったシミュレーション結果である。周波数を *X*, *C*, *L* 帯に分けて計算しており、航空機表面による散乱強度、即ち電流分布の違いが把握できる。図 10-3 はヘリコプターモデルの *RCS* を基にその回転部分のドップラスペクトラムを計算した結果である。

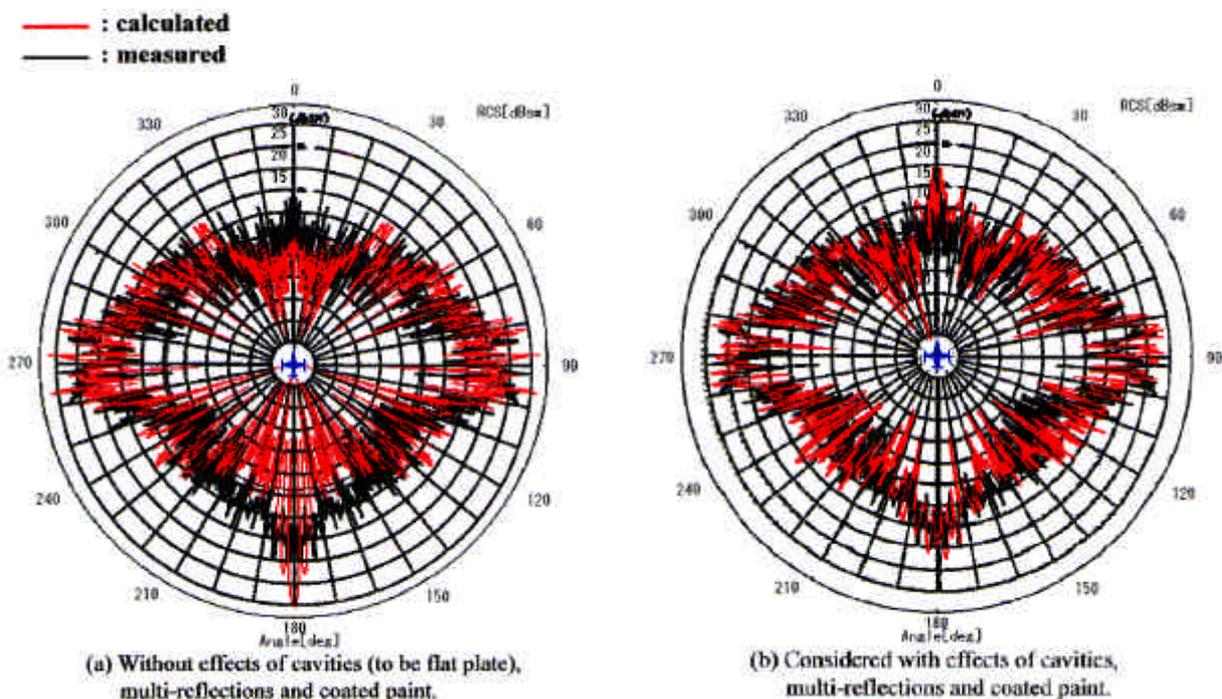
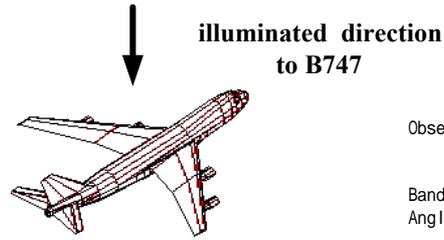
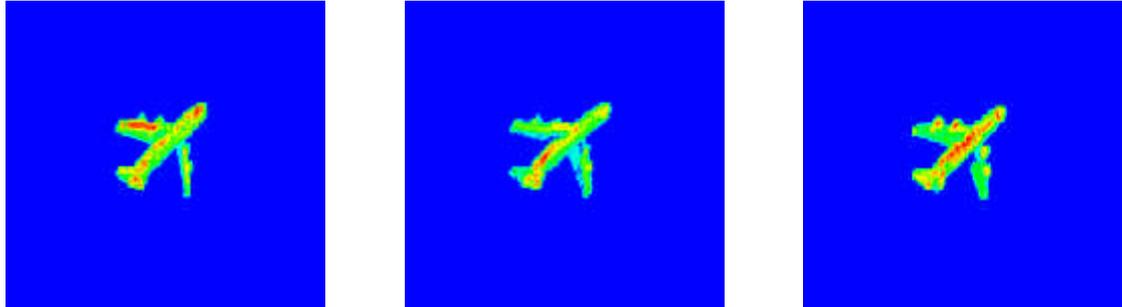


図 10-1 実際の航空機による *RCS* の実測値 (黒) と計算値 (赤) の比較



Observation time X-band (10 GHz) : T=0.3987 [s]
 C-band (6 GHz) : T=0.6645 [s]
 L-band (2 GHz) : T=1.9935 [s]
 Band-width : f=192 [MHz]
 Angle velocity of target : 0.04834 [rad/sec]

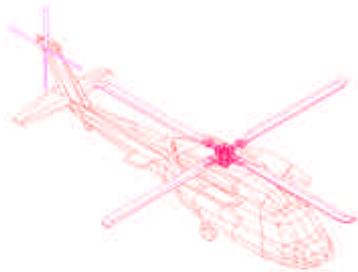


(a) X - band

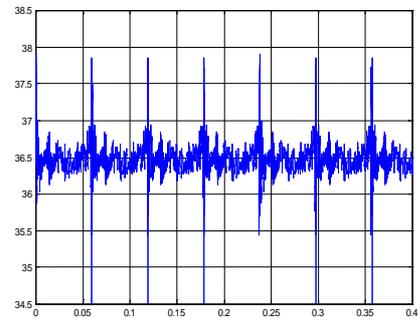
(b) C - band

(c) L - band

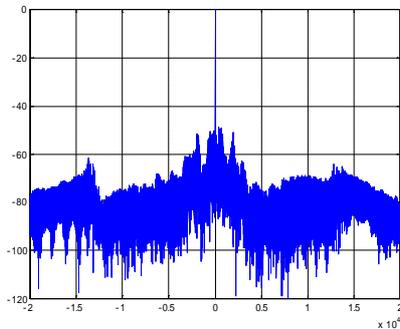
図 10-2 航空機モデルに対する ISAR の周波数特性



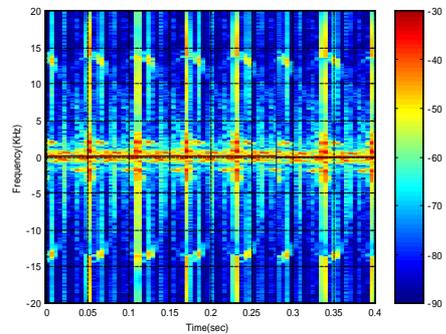
入射角 $Az=El=0^\circ$ (正面) 周波数 10GHz, 偏波 : 水平
 サンプリング : 50kHz (20 μ s)
 メインロータ : 直径 6m, 回転速度 216m/s(14.4kHz), 回転数 4.2rps
 テールロータ : 直径 3m, 回転速度 121m/s(8.1kHz), 回転数 8.4rps



(a) RCSの時間(s)変化



(b) ドップラスペクトラム(Hz)



(c) スペクトラムの時間変化

図 10-3 ヘリコプターモデルによるドップラシミュレーション

第11章 結言

本研究では *PTD-TC* および *PO* の計算理論の展開と、これらを基礎とする *RCS* の数値計算コードの開発を目的としている。この研究での主要な成果は、大きな3次元のインピーダンス物体を対象として従来の *PO* 法を改善する手法を提案し有効性を数値的実験的に検証したこと、およびシステムティックに *RCS* を計算するコードの基本部分を試作し開発の指針を与えたことである。個々には以下のようにまとめられる。

(1) *PO* 積分の一般化 (第3, 4章)

放射積分を解析的に解くことができれば、数値計算の利便性と信頼性は大きく前進する。本研究の前半では、その周縁が滑らかな凸状のインピーダンス平板と散乱体表面が2次式で表されるインピーダンス曲面に対し *PO* 解あるいは *PTD* 解を解析的に誘導する方法を提案した。一方、平板間の多重反射を考慮するための定式化を行い、計算コードに応用する。従来、平板で分割近似していた方法を2次曲面で置き換えることで、分割パッチ数は凡そ数十分の一に軽減され大きな物体に対する計算時間の短縮が可能となる。平板間の多重反射に関しては煩雑な手続きが単純化され、コーナーリフレクターを例に結果の妥当性を検証している。

(2) *PTD-TC* 法の提案とその検証 (第5-9章)

PO 法の適用範囲を広げるため、放射積分の電磁流を規範問題から与える計算手法を提案した。ここでは、2次元のインピーダンス楔と円筒、および3次元の滑らかな凸状物体による平面波の散乱界を調べている。具体的には

- ・ 2次元の完全導体と表面インピーダンスを持つ四角柱による散乱
- ・ 2次元の完全導体と表面インピーダンスを持つ *Ogive* による散乱
- ・ 2次元の表面インピーダンスを持つ多角柱による高次回折
- ・ 表面インピーダンスを持つ円筒の斜め入射による散乱
- ・ 3次元の滑らかな表面インピーダンスを持つ球状物体 (球, 楕円体等) による散乱

等を取り上げ、陰影境界近傍の僅かの領域の遷移電流を放射積分に取り込むことで計算精度は大きく改善できることを示した。このための規範問題としては、インピーダンス円筒に対する斜め入射およびインピーダンス楔の表面界と高次回折界など、今まで報告されていない回折界の表示式を新たに誘導した。空洞共振器に対しては、積分方程式を繰り返し法で計算する *IPO* 法を内壁が表面インピーダンスを持つ場合に拡張した方法を使って評価した。

(3) *PO*, *PTD-TC* 法を基にした *RCS* 計算コードに関する考察と開発指針 (第10章)

波長に比べて大きな散乱物体による *RCS* をシステムティックに計算評価することを目的に、計算コードの基本部を試作し開発指針について考察した。主要な対象物体は導体の他に表面インピーダンスを持つ3次元物体であり、上述の計算理論と整合したモデリング処理などの体系的なアプローチを行った。一方、計算結果となる *RCS* のデータベースは *SAR/ISAR* の電波画像、あるいは回転部を持つ移動物体によるドップラスペクトラムのシミュレーションに応用できることを示した。

本研究では未検討の項目もある。例えば、斜め入射のインピーダンス楔による回折界の検討、遷移領域における楔 *edge* 部と滑らかな部位のパッチ抽出のシステム化、多くのモデルによる *RCS* の計算と実測値との比較検証などが挙げられる。今後これらを通して、開発中途の段階にある計算コードを完成させていく意向である。*RCS* 計算コードはここで記述した応用以外にも、市街地モデルによる電波環境のデータベース発生源として *MUSIC* などの高分解能処理のシミュレーションにも用いることができる。実際的で精度の高い *RCS* 計算の応用が色々の分野で期待される。