

レーダ散乱量を用いた散乱体の形状認識について II

研究代表者 研究員 白井 宏 (中央大学理工学部電気電子情報通信工学科)
共同研究者 研究員 趙 晋輝 (中央大学理工学部電気電子情報通信工学科)
共同研究者 研究員 牧野 光則 (中央大学理工学部情報工学科)

1 はじめに

高周波電磁波散乱は、物体の局所的形状がその散乱パターンに大きく影響を及ぼす。したがって高周波電磁波を用いた物体の散乱現象を調べるには、その散乱体の局所的な形状をよく知る必要がある。逆に局所的な形状からの散乱現象をある程度把握しておけば、その散乱データを基に散乱体の形状の推定が可能となる。本研究は、こうした高周波電磁波散乱解析に基づいて散乱体の形状認識を試みている。

筆者らは既に、導体多角形状をモデルにした高周波電磁波散乱解析を行い、波長に比べ十分大きな散乱体の場合、幾何光学的回折理論 (Geometrical Theory of Diffraction: GTD[1]) に代表される高周波散乱解析手法は、解析に十分有効であること、また後方散乱については、主反射方向をもつ平板の両端のエッジで励振されるエッジ回折波が重要な役割を果たすことを示してきた [2], [3]。さらに凸型柱状散乱体に平面電磁波が入射した場合の散乱現象を GTD を用いて解析し、主反射方向となる反射境界における回折波の表現を基にして、後方散乱波の性質を調べた。そしてモノスタティックレーダ散乱断面積 (Radar Cross Section: RCS) の角度依存性から、その散乱体を構成している各平板の大きさを簡単に推定する方法を示した。また提案したアルゴリズムの有効性を調べるために、アルミ平板を用いて作られた導体散乱体モデルを使って RCS 値を実測し、それらのデータに対し本アルゴリズムの適用を試みた。その結果、本手法は凸型柱状の散乱体に対し、構成要素である各平板の寸法を精度よく推定できることが示された。さらに各平板を接続して元の散乱体の形状を再構成し、可視化する方法についても調べて報告した [4],[5]。

昨年の研究 [5] に引き続き、さらに高い精度で散乱体の形状を認識するためのアルゴリズムの開発を行った。推定アルゴリズムに基づいて得られた散乱体の形状を用いて、ESM (Equivalent Source Method: ESM) によってレーダ散乱断面積を計算し、最初に与えられたデータと比較することにより、形状推定の精度を上げる方法について検討している。

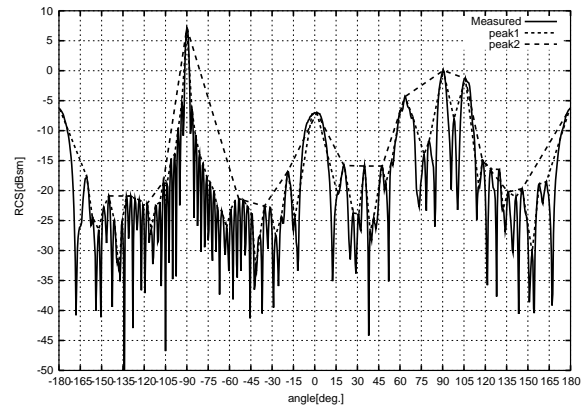


図 1 実測値からのピーク抽出アルゴリズム (モデル 1)

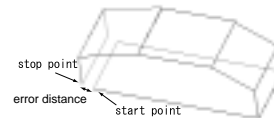


図 2 再構成図における誤差距離の検出 (モデル 1)

2 問題の定式化

本研究は、ターゲットの形状が不明な場合に周波数領域 RCS の角度変化の様子からその全体形状を推定することを目的としている。昨年、文献 [4],[5] で提案した形状認識方法に基づいて、図 1 に示すような周波数領域における RCS 値の角度変化から、散乱体の構成要素に対応するピークの抽出を行う。始めに RCS の主なピークを抽出し、peak1 とおく。しかし、RCS の角度変化において、面の主反射方向におけるピークの左右には、面の端部からのエッジ回折波の干渉により細かい振動が現れる。これらのピークも含む peak1 中から主反射面に対応するピークを選別して抽出するために peak1 同士を接続した波形を作成し、その中から再度ピークの抽出を行い peak2 とする。この peak2 を構成要素からの主反射と考え、RCS 値の降順に認識に使用する構成平板の個数を増やしながらターゲットの再構成を行う。

本方法を用いた形状認識方法では、ピークを持つ角度順に端面を接続していくため、推定した形状の始点と終点の間に誤差が集中し、図 2 のように誤差距離が現れる。そこ

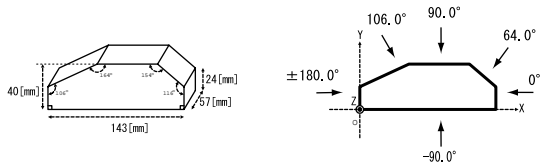


図 3 モデル 1

表 1 誤差距離 (モデル 1)

faces	error distance	faces	error distance
3	3.01 [cm]	4	0.89 [cm]
5	2.76 [cm]	6	0.95 [cm]
7	10.36 [cm]	8	11.53 [cm]

で、複数の再構成図の中から始点と終点の距離が極小となる面数を最適な再構成図の候補として採用する。しかしながら始点と終点の距離からだけでは最適な推定形状の決定まで行うことは不可能である。そこで推定形状の妥当性の評価を行うために再構成したモデルの RCS の角度変化を ESM を用いてシミュレーションし、認識したい元のターゲットの RCS 値と比較する。そして推定に用いた RCS とそのシミュレーション値の誤差を評価し、推定形状の妥当性の検討を行う。ESM を用いて RCS のシミュレーション値を求めるとき、誤差により空いた隙間を補うが必要になる。ここでは再構成図形が開いている場合は新たな面を、また推定形状の最初の面と最後の面が交差する場合は交線において両者を接続する方法を用いた。

本方法では散乱体を構成する各平板の大きさについて構成要素の平板毎に推定を行う。このため推定した形状は、構成要素の各平板の奥行き長さ L についてそれぞれ異なった値をとる。ESM を用いて 2 次元推定形状の RCS 値を計算するためには、 L は一致している必要があるが、本方法ではこの L に再構成図の全構成要素平板の中央値を用いることとした。

3 結果及び検討考察

本方法のアルゴリズムの妥当性を評価するためにアルミニウム平板を接続して作られた、柱状散乱体の 3 次元モノスタティック RCS 値を電波暗室内にて測定し、その RCS 値からターゲットの形状認識を行った。測定データは 0.5° ごとの 1024 回の平均データであり、ピーク値とそのビーム幅を決定するために測定値を 2 次の B スプライン関数 [6] で補間している。

図 1 は、凸型六角柱 (図 3) のモノスタティック RCS の実測値である。推定形状は表 1、図 4 から面数 4 と面数 6

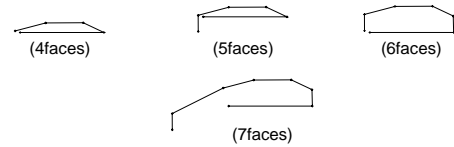


図 4 再構成断面図 (モデル 1), (4, 5, 6, 7 面)

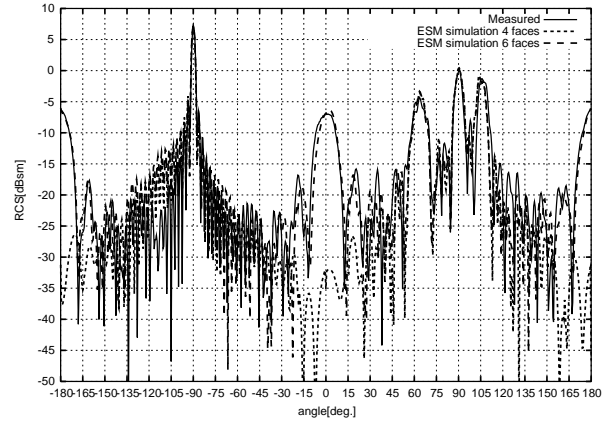


図 5 ESM シミュレーション値 (モデル 1)

の場合で誤差距離が 0.89, 0.95 [cm] と極小値をとる。この情報だけでは両者のどちらが妥当であるかは判定できない。そこでこの 2 つを推定形状の候補と考えて ESM シミュレーションを行う。図 5 はモデル 1 の実測値、ターゲットを 4 角柱、6 角柱と仮定した場合の ESM シミュレーション値である。図 5 より $0^\circ, \pm 180^\circ$ において 4 角柱推定形状の ESM シミュレーション値はピークが無く実測値と比較して大きな誤差が出ている。また、6 角柱推定形状の ESM シミュレーション値は実測値とよく一致している。このことからターゲットは 6 角柱であることが推定できる。6 角柱として推定を行った再構成図は図 2 となり、使用したモデル形状に近い推定を行うことができている。

次に一部凹型部を含む散乱体について検討する。ただし本方法では現在、面の入れ換えによる凹型部の認識については全ての場合に対して行うことが困難であり、まずは凸型形状として認識する。面の入れ換えを行い、凹型部の認識を行うには有効な方法として時間領域の情報を利用することが考えられている。ここでは、理論形状との比較のために面の入れ換えを行った再構成図を示すほか、ESM シミュレーション値と実測値の誤差からおおよそ凹型部の存在の有無について検討を行う。図 6 の凹型部を含む 8 角柱を、図 7 の RCS 実測値を基にターゲットの形状認識を行う。表 2、図 8 からモデル 2 は 8 角柱であると推定することができる。そこでターゲットを 8 角柱であると仮定し、ESM 法を用いてシミュレーションを行った RCS 値が図 9 の細い破線である。

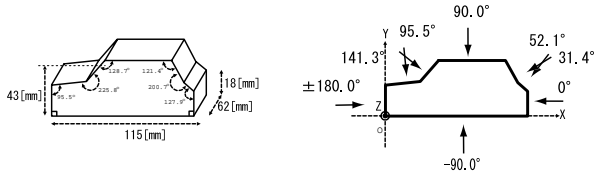


図 6 モデル 2

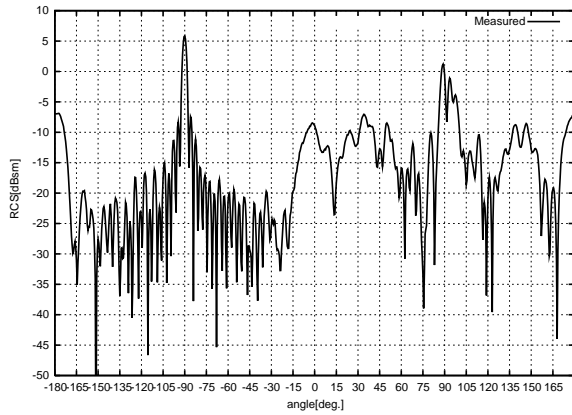


図 7 RCS 実測値 (モデル 2)

表 2 誤差距離 (モデル 2)

faces	error distance [cm]	faces	error distance [cm]
3	7.93 (7.93)	4	6.65 (6.65)
5	6.58 (6.58)	6	5.58 (5.58)
7	3.97 (2.15)	8	2.26 (0.47)
9	24.97 (23.22)	-	-

(カッコ内は 93.6° ピーク使用を表す.)

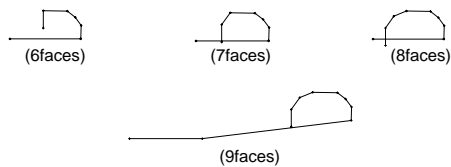


図 8 再構成断面図 (モデル 2), (6, 7, 8, 9 面)

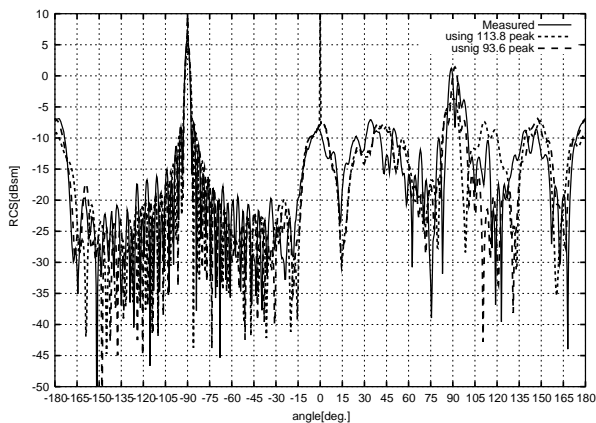


図 9 ESM シミュレーション値 (モデル 2)

表 3 RCS ピーク値の比較 (モデル 2)

Estimated angle [deg.]	Original RCS peak [dBsm]	Estimated RCS peak [dBsm]
-90.1	5.8921	3.8973 (5.5368)
-1.6	-8.4633	-7.7485 (-7.5174)
34.2	-7.0259	-7.7746 (-7.8600)
49.8	-8.4664	-8.0100 (-8.9620)
88.9	1.2108	-3.7202 (1.4345)
(93.6)	(-1.0695)	**
113.8	-10.3207	-7.3476
146.6	-8.5583	-7.2524 (-6.8630)
180.0	-6.8671	-9.1650 (-6.8371)

(カッコ内は 93.6° ピーク使用を表す)

次に表 3 に示すように推定形状の主反射方向にあたる RCS 値のピークを実測値とシミュレーション値で比較を行った。

大きな誤差が -90.1° に現れているが、推定形状は最初の面と最後の面を交差線で接続し、余分に長い分を切り離しているために $\pm 180^\circ$, -90° 方向の平板は面積が小さくなり RCS もシミュレーション値が実測値よりも小さくなったと考えられる。次に 88.9° , 113.8° についても誤差が現れている。これは 88.9° に隣接する 93.6° のピークは、 88.9° 平板の二次的な振動ピークと考えたために起きた誤差である。これらの情報を基に 113.8° に主反射面をもつ平板のかわりに 93.6° 方向に主反射する平板があるとして、ESM 法を用いてシミュレーションした結果が図 9 の太い破線である。平板の主反射方向が 113.8° であると想定した場合の結果 (図 9 の細い破線) と比較して 88.9° 付近において実測値とシミュレーション値の誤差が小さくなっているが、シミュレーション値では 93.6° の平板に対応するピークが失われている。これは、実際のモデルでは主反射角 90.0° , 95.5° の二平板は互いに散乱波が干渉して合成波が激しく振動するのに対し、図 10 の推定形状では 88.9° , 93.6° の二平板が凸型に接続されたことでエッジの位置が変化して主反射角の近い二平板の計 3 つのエッジ回折波が互いに干渉し、一つのピークとなったためであると考えられる。また、理論形状との比較のために面の入れ換えを行った再構成図は図 11 となる。

4 結論

本報告では周波数領域におけるモノスタティック RCS 値の角度変化を用いて柱状散乱体の形状認識を行い、ESM を用いて推定形状を評価する方法を考案した。その結果本方法は柱状散乱体の各平板の大きさを推定するのに有効であり、元データと推定形状の ESM シミュレーション値とを推定形状における主反射角の RCS 値ピークについて比

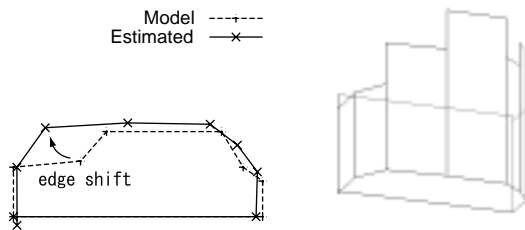


図 10 モデル 2 の再構成図

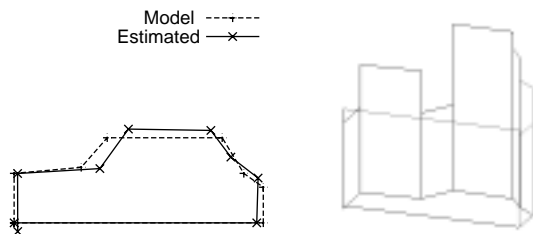


図 11 モデル 2 の再構成図 (面入れ換え後)

較することで推定形状の妥当性を確認する方法が有効であることがわかった。また、一部凹型部が含まれる場合や同一主反射角に複数の平板が存在する場合について、元データと推定形状のシミュレーション値との間に起きる誤差の問題を明らかにした。今後は凹型部の有無による RCS シミュレーション値と元データの誤差を評価し凹型部の認識を可能にすること、また時間領域の RCS 値の情報を組み合わせることによって凹型部、同一主反射角の複数の平板の認識について検討を進める方針である。

謝辞

本研究は、中央大学 理工学研究所 2000 年度、2001 年度共同研究の援助を受けて行われた。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- [1] J. B. Keller: "Geometrical theory of diffraction," *J. Opt. Soc. Am.*, **52**(2), pp.116-130, 1962.
- [2] 林, 白井, 関口: "多角柱による平面電磁波の散乱解析," 電学会電磁界理論研資, EMT-97-36, pp.61-66, 1997.
- [3] 白井, 林: "自動車モデルに対する電磁波の散乱," 電学会電磁界理論研資, EMT-99-78, pp.47-52, 1999.
- [4] 小野, 白井, 有竹, 牧野, 趙: "RCS 値を用いた凸型柱状散乱体の形状認識について," 電気学会電磁界理論研資, EMT-01-96, 2001.
- [5] 白井, 趙, 牧野: "レーダ散乱量を用いた散乱体の形状認識について," 中央大学 理工学研究所 年報, 8 号,

pp.12-15, 2001.

- [6] 桜井, 菅野, 吉村, 高山: "C によるスプライン関数," 東京電機大学出版, 1993.