

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010 ~ 2011

課題番号：22656086

研究課題名（和文）高周波散乱現象の局所性と相反性に基づいた計算負荷の低減

研究課題名（英文）Reduction of computational load based on Locality and reciprocity of high frequency diffraction

研究代表者 安藤 真 (ANDOU MAKOTO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：90159533

研究成果の概要（和文）：

高周波散乱現象の局所性を、定量的に普遍的に表現する指標として、フレネルゾーン数を用いた領域の定義を行い、数値積分の分割数の決定や重み関数の表現もこの指標を用いて統一的に扱うことにより、大規模問題の計算量低減の方針を示した。3次元平板に対して具体的に精度の評価と計算量の低減効果を評価したが、原理的には、計算負荷が波源観測点の位置、波長に依らぬものとなる可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：

Locality of the diffraction phenomena is explicitly and uniformly defined by introducing the Fresnel Zone number. This parameter provides us the universal criteria valid for arbitrary combination of source and observer positions and frequency. The computational load after localization is estimated for a square plate illuminated by a dipole and high accuracy as well as frequency-independency of the computational cost is demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	0	1,800,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	420,000	3,620,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：アンテナ、電磁界理論

1. 研究開始当初の背景

本来、散乱現象における誘起電磁流は「波源と散乱体の位置関係のみ」により決まる。この電磁流と対応する散乱界を求める問題は、高周波において計算負荷の大きい難題として知られている。申請者は、散乱界を求める問題に、局所性と相反性の基本概念を導入し、誘起電磁流を「観測点の位置にも」依存した形で求めることで、飛躍的に未知数を減

らす方法、原理的には周波数に依存しない算法を提案している。散乱現象の局所性の理解のために、ある点から観測される矩形板による幾何光学的振る舞いのイメージを図1に示す。求めるべき誘起電流は全面に亘り存在するものの、この観測点に対しては1つの反射点と4個の回折点の「局所的」にしか輝いて見えない。モーメント法に代表される従来の算法は、散乱体「全面」の電流を未知数と

する大規模問題を一度に解くものであり、高周波で拡大する計算規模の削減が現在でも中心課題である。「局所」でなく「全面」を解くことは、この観測点に対しては過剰な未知数を扱っていることになる。一方、電磁界が相反性（波源と観測点を入れ替えても伝達関数は普遍）を満足することは検証に使うことはあっても、算法として全く活用してはいなかった。申請者は以前より幾何光学的回折理論を研究しており、その概念である「局所性」と「相反性」を従来の計算法に定量的に組み込むことで、計算規模の大幅な削減が図れることを予想し、手法を模索してきた。散乱体全体ではなく、観測点毎に定義される、必要最小限の領域についてのみ誘起電磁流を求めるものである。具体的には、実際の散乱体の代わりにその一部分のみを抽出した等価散乱体モデル(スケルトンモデル)を解析してきた。申請時での最新の研究で領域の輪郭の定義に、波源と観測点の両方の関数であるフレネルゾーン数を用いることを発案するに至った。

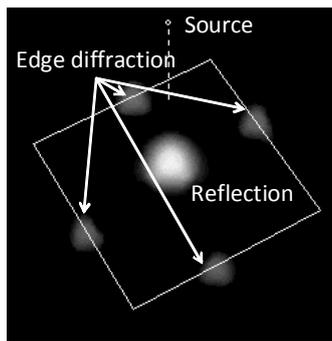


図1 矩形板の高周波散乱現象の局所性

2. 研究の目的

電磁界解析の分野で、波長に比して大きな散乱体を扱う高周波近似解法において、原理的には周波数に計算量が依存しない算法を提案し実証する。幾何光学に象徴される散乱現象の局所性を定量的そして陽に表現し、従来の低周波数解法にこれを反映した、概念の全く新しい近似計算法を構築する。散乱体上の全表面の誘起電流を一度に求める従来手法と対照的に、観測点毎に定義される、必要最小限の領域についてのみ誘起電磁流を求めるもので、この研究では領域の輪郭の定義にフレネルゾーン数を適用することの妥当性の検証と、曲面や多重反射を含む具体的な散乱問題への適用の基礎を構築する。

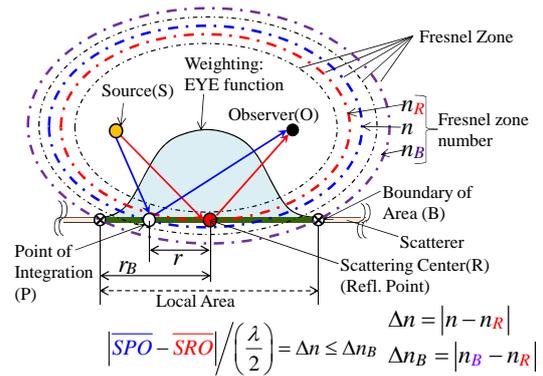


図2 フレネルゾーン数を用いた領域の定義

3. 研究の方法

(1) 今回は「放射面積分の局所化」までを検討した。通常は散乱体上の全表面の誘起電流を一度に求め、表面全体にわたって放射面積分する。一方、「放射面積分の局所化」とは、全表面の誘起電流が与えられたものとして、放射面積分する際の積分範囲を一部分のみに限定して同じ計算結果・電磁界を得ようとする近似法である。この一部分のみの領域については、反射点や回折点といった散乱中心点の周辺に定義するものとし、領域の形や大きさはフレネルゾーン数で定義することを提案している(図2)。

(2) 図3のような完全導体の無限平面と微小波源という規範問題を比較対象として、領域の輪郭の定義にフレネルゾーン数を適用することの妥当性の検証および基準の設定を試みた。また、散乱現象の局所性を表現するのに用いられてきた窓関数にも、フレネルゾーン数を組み込み検証した。

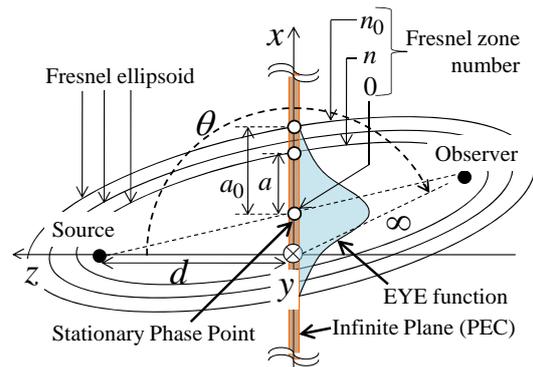


図3 無限平面と微小波源モデル

(3) 研究の中で図2に示す領域決定法は反射点に対してのみ有効であることが判明した。回折点に対しても統一的に領域を決定するために、図4に示す修正法線ベクトルで定義される仮想無限平面上で一旦局所化領域を決定した後、実際の散乱体にその領域を投影

するという手法を提案した。この提案により、反射点も回折点も区別することなく統一的に領域が決定できるようになり、また電磁界の基本則である相反性（波源と観測点を入れ替えても伝達関数是不変）が自然と取り入れられることとなった。

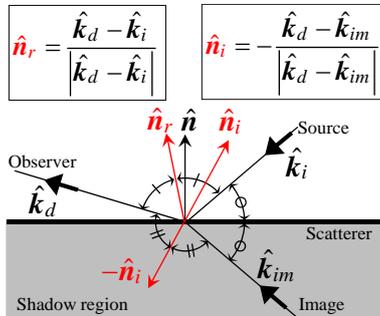


図4 修正法線ベクトル

この提案を適用し、図5のような完全導体の矩形板と微小波源というモデルに対して放射面積分の局所化を適用した。表面全体を積分した結果と比較し、近似精度を検証した。さらに、全体面積に対する積分範囲の面積を調べ、高周波における計算負荷低減効果を予測した。

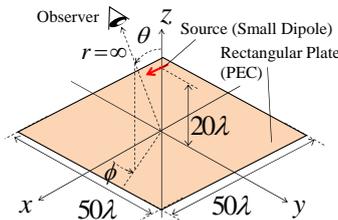


図5 矩形板と微小波源の計算モデル

(4) 後方散乱断面積の形で、実験結果との照合を行った。今後、多重散乱を生じるさまざまな形状に対する検証に備え、後方散乱断面積の実験結果（モデルは図6を参照）を取得し、市販シミュレータに加えもう一つの参照解となる「修正物理光学法と繰り返し幾何光学法を相補的に用いる解法」という混合解法の手順を整備した。この混合解法のうちの修正物理光学法は相反性を意識した解法である。また、相補的に用いるというのは、図6のようなダクト型散乱体において、ダクト内部の電磁界と外部の電磁界はお互いに影響しないという局所性を意識したものである。



(a) duct1 (b) duct3

図6 後方散乱断面積の測定におけるモデル（後の図11に対応: duct3は duct1を上下ひっくり返したもの）

4. 研究成果

(1) 領域の輪郭の定義にフレネルゾーン数を使うことの妥当性を検証した。具体的には、領域の輪郭をフレネルゾーン数で定義し、輪郭内部に窓関数を適用後その範囲のみ積分する近似計算法を試みた。図4のモデルに対する検証結果を図7に示す。領域の輪郭・大きさを示すフレネルゾーン数を横軸、振幅の再現具合を左縦軸、位相の再現具合を右縦軸に示す。どちらの縦軸でも0に近づくにつれて電磁界が正確に再現されることを示す。窓関数を従来のもの（引数に実距離を用いていたもの）と今回新たに提案したもの（引数にもフレネルゾーン数を採用したもの）の2パターンで検討している。

どちらの場合も収束の仕方は波源の位置や観測角に依存せず、積分領域に対応するフレネルゾーン数にのみ依存する。従来の窓関数（図7中のEYE(r/r_B ））では振幅は小さなフレネルゾーン数で収束するものの位相の収束は遅い。一方新たな窓関数（図7中のEYE($\Delta n / \Delta n_B$ ））は振幅と位相の収束のバランスが良く、フレネルゾーン数が3以上の奇数のとき、振幅・位相どちらも誤差なく電磁界が再現されることが示される。この結果から普遍的な基準として、フレネルゾーン数3という基準で領域の輪郭を決めれば良いという事がわかる。

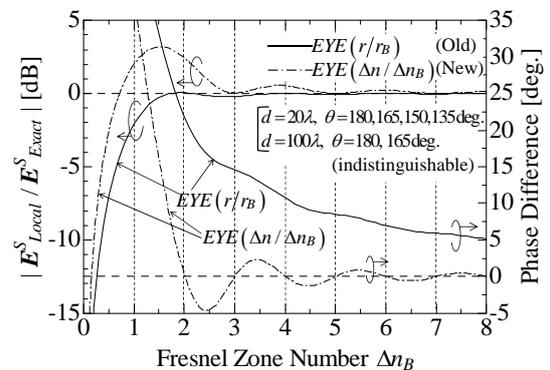


図7 フレネルゾーン数に対する放射積分の収束（窓関数による収束性の差異）

(2) 上記で判明した基準をもとに図5の矩形板のモデルに対して提案する近似計算法を

適用した。図 8 にその結果を示す。近似せず全体を積分した結果と近似計算結果はよく一致しており、フレネルゾーン数を用いて領域を決定する手法の有効性を示している。グラフ中の破線は右縦軸に対応し、全体に対する積分領域の割合を示している。この場合高々43%の領域のみを積分すれば良い。

この割合の周波数変化を調べたものが図 9 である。高周波になればなるほどその割合が周波数に反比例して小さくなるのが分かる。高周波になるほど計算負荷低減効果が大きいことが分かる。

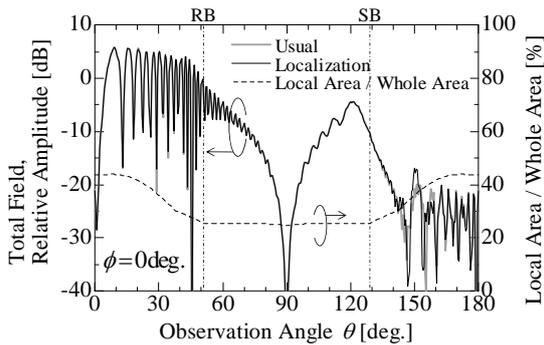


図 8 矩形板モデルにおける全体界近似計算結果

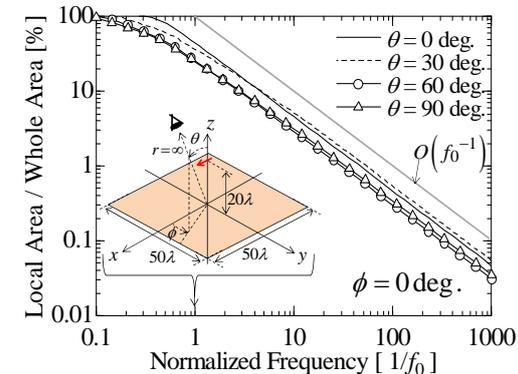
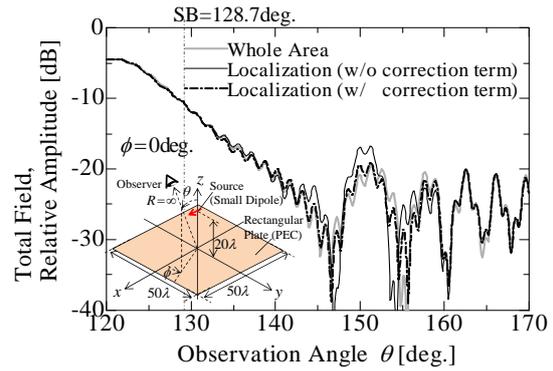


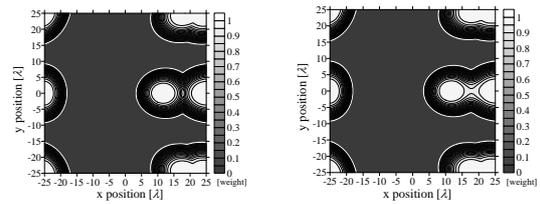
図 9 矩形板モデルにおける全体界近似計算結果

(3) 放射面積分の局所化過程において、複数の散乱中心が接近した際に生じる誤差を特定し、重み関数の急峻な変化をもたらす人為的な寄与が原因であることを見出した。これを解消する滑らかな新しい3次元重み関数を提案し、精度向上に成功した。

図 10 は図 8 のグラフの観測角 θ が 90 度から 180 度の範囲のみを描いたものである。黒の実線は図 8 の黒の実線そのものであるが、比較対象である灰色の実線との間には誤差が目立つ。そこで重み関数の急峻な変化を解消する補正項を導入することで、黒の一点鎖線のように誤差が小さくなり、計算精度向上に成功した。



(a) 全体界計算結果



(b1) 補正項なし (b2) 補正項あり
(b) 補正項による窓関数の差異の視覚化

図 10 窓関数の補正項の有無に対する近似精度の比較

(4) 図 6 のモデルでの後方散乱断面積の実験結果とモーメント法汎用シミュレータによる数値計算結果を図 11 に示す。実験結果は数値計算結果とよく一致しており実験結果の信頼性の高さを示している。また duct1 と duct3 の結果を比べると、散乱体の外部形状は変わらずに、内部形状のみが変化しているので、正面方向 (-90 度から 90 度まで) に違いがみられる。しかし、正面方向以外では、ほとんど内部形状により差はみられない。このことから波長に対して大きな開口付散乱体において、内部の電磁界が外部の電磁界にほとんど影響しないことがわかる。したがって、提案している混合解法 (内部の電磁界と外部の電磁界を切り分けてそれぞれに対して別の解法を適用する手法) が有効であることが示唆されている。今後、実験結果と混合解法との照合が課題となる。

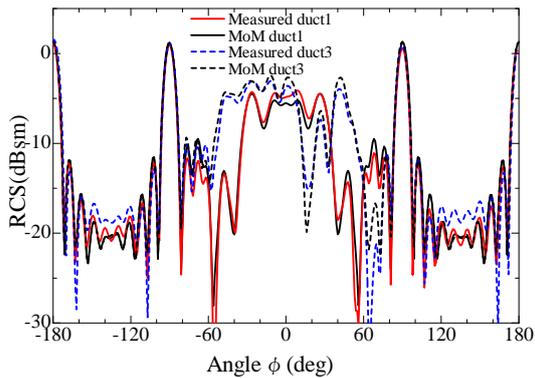


図 11 後方散乱断面積の実験結果とモーメント法によるシミュレーション結果の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Takayuki Kohama, Makoto Ando, "Localization of Radiation Integrals Using the Fresnel Zone Numbers," IEICE Trans. Electron., vol. E95-C, no. 5, pp. 928-935, May. 2012.
- ② Ryosuke Hasaba, Makoto Ando, "Hybrid Analysis of Radar Cross Section of Open-ended Cavity Scatterers by Using Modified Physical Optics and Iterative Physical Optics," Trans. Electronics, IEICE, accepted 2012.
- ③ Lu Pengfui, Makoto Ando, "Difference of Scattering Geometrical Optics Components and Line Integrals of Currents in Modified Edge Representation," Radio Sci., (accepted 22 April 2012)

[学会発表] (計 5 件)

- ① Takayuki Kohama, Keita Ito, Makoto Ando, "Localization of Physical Optics Radiation Integrals Area in Scattering from a Rectangular Plate" International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2011/10/26, Jeju
- ② Houhi Ro, Makoto Ando, "Differences between Scattering Geometrical Optics and Line Integral of Modified Edge Representation" IEEE AP-S International Symposium, 2011/7/6, Spokane, Washington
- ③ Houhi Ro, Makoto Ando, "Discussions of differences between scattering geometrical optics and line integral of modified edge representation" International Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics (ICMTCE), 2011/5/23, Beijing
- ④ Takayuki Kohama, Keita Itou, Makoto Ando,

"Abbreviated Analysis of Electromagnetic Fields Based upon Locality of Scattering Phenomena", Beijing

- ⑤ 榑場 亮祐*, 安藤真, 原正一, 吉村昭彦"反復法と修正法線ベクトル法を内外で使い分けた物理光学近似による開口付き多重反射散乱体の RCS 評価と実験的検証" EMT-11-153, 電子情報通信学会, 2011/11/19, 富山県

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 真 (ANDOU MAKOTO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：90159533

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：