

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：53801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25390159

研究課題名(和文) 導体のエッジ特性を考慮した超高精度三次元電磁波解析法の開発

研究課題名(英文) Development of a super high-precision 3-D analytical method of an electromagnetic wave considering the edge property of the conductor

研究代表者

芹澤 弘秀 (Serizawa, Hirohide)

沼津工業高等専門学校・制御情報工学科・教授

研究者番号：70226687

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：方形物体による電磁波散乱と放射の問題に対する従来よりも高精度な解析方法を開発し、問題に付随する二重無限積分と二重無限級数を希望の精度で計算するための数値計算法を確立した。様々な方形物体(遮蔽板内の方形開口、フランジ付導波管等)に対する厳密解を導出し、一部の問題に対しては解の収束性を定量的に評価した。また、得られた厳密解を用いて様々な物理量を計算し、電磁波回折現象に関する新しい知見を得た。さらに、複雑な方形物体を解析する際の基礎となる多数の開口の結合問題も厳密に定式化した。

研究成果の概要(英文)：We developed an analytical method for solving problems of the electromagnetic scattering and radiation from rectangular objects, which brought highly accurate results compared to the conventional method, and established a numerical technique for calculating the double infinite integrals and double infinite series associated with the problems with the desired accuracy. The exact solutions were obtained for various rectangular objects such as a rectangular aperture in the screen and a flanged waveguide, and we evaluated the convergence of the solution to some problems. We also calculated the various physical quantities by using the derived exact solution and new knowledge of the EM diffraction phenomena was obtained. In addition, we rigorously formulated a coupling problem for multiple apertures that served as the basis for analyzing complex rectangular objects.

研究分野：電磁波工学

キーワード：小林ポテンシャル 厳密解 方形開口 電磁波回折 透過係数 導波管モード 開口分布 近傍界

1. 研究開始当初の背景

近年、電磁現象の予測や各種電磁システムの設計において高精度な電磁界解析法およびその精度を正しく評価するための基準解が必要とされている。一般に電磁界解析を行う場合、物体形状や媒質に左右されない汎用的数値解法(有限要素法や時間領域差分法(FDTD法)等)が用いられるが、精度を高めるためにはメッシュやセルの細分化が必要となり、メモリサイズや計算時間の面で問題がある。特に金属のエッジを有する物体ではその近傍で特定の電磁界成分が非常に大きくなることが知られており(文献)、物理量に対する高精度な数値解を得るためにはこのエッジ特性(端点情報)を組み込んだ定式化が不可欠となる。また、従来は電界に関するエッジ特性のみが考慮される場合が多く、磁界に関するエッジ特性を組み込んだ定式化は報告されていない。磁界の端点情報が解の収束に大きな影響を与えることが最近の研究により明らかになりつつある(文献)。このように、解の収束に対するエッジ特性組み込みの効果についてはエッジ形状と周囲の媒質等に対する依存性も含め早急に解明する必要がある。また、希望の精度で物理量を計算するための体系的な数値計算法の確立も急務の課題となっている(文献と)の方法をさらに発展させる必要がある。

2. 研究の目的

様々な構造の方形物体による電磁波散乱と放射の問題に対する従来よりも高精度な解析方法を開発して遮蔽板内の方形開口やフランチ付導波管等に対する厳密解を導出し、それに付随する二重無限積分と二重無限級数を希望の精度で計算するための数値計算法を確立することを目的とする。得られた厳密解を用いて解の精度と収束性を定量的に評価するために様々な物理量を計算し、電磁波回折現象に関する新しい知見を得ることも研究の目的である。さらに、複雑な方形物体を解析する際の基礎を確立することも目的の一つとなっている。

3. 研究の方法

研究の骨格は端点情報(電界のみならず磁界も)を組み込んだ厳密解を得るための理論計算と物理量に対する数値結果を得るための計算コードの開発(数値計算法のアルゴリズム開発も含む)から成り、数理解析の方法に基づく定式化、計算コードの開発、およびコンピュータを利用した数値実験が中心となる。対象とする物体の形状は過去に取り扱ったものと類似または複雑化したものであるため、定式化と数値計算法の開発で過去の資産の有効活用が期待され、効率的かつ段階的に研究を遂行する。数値計算法の開発では補助ツールとして科学計算ソフトを導入し、数値実験では高性能コンピュータとバックアップ用の大規模記憶装置を導入する。

4. 研究成果

(1) 厚い遮蔽板内の方角開口による回折

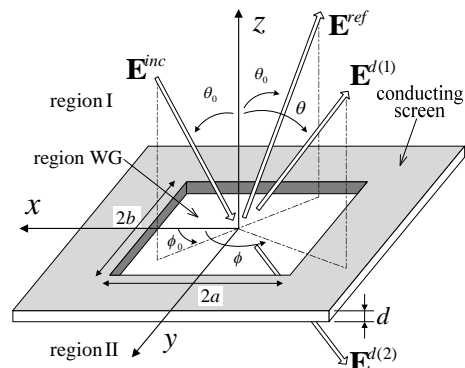


図1 問題の構成と座標系

図1は、厚さ d の完全導体遮蔽板に開けられた $2a \times 2b$ の方形開口に平面電磁波が入射したとき、反射波(平面電磁波)と回折波の関係を示している(反射波は開口を完全にふさいだときのものであり、領域IIの回折波は透過波を意味している)。小林ポテンシャルの方法(KP法)に基づき端点情報を組み込んで本問題を厳密に定式化すると、表示式には4種類の非整数次のベッセル関数を含んだ二重無限積分と二重無限級数が含まれる。それらを希望の精度で計算するための計算コードを開発し、解の収束性について調べた。

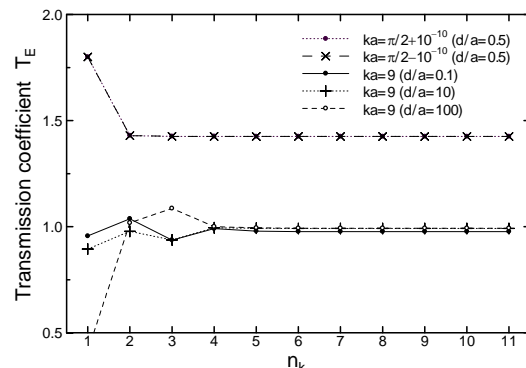


図2 透過係数の収束性

物理量の表示式は一般に無限級数の形となるが、実際に物理量を求める際にはそれを有限項(それを n_k とする)で打ち切る必要がある。図2は打ち切り項数を大きくしていった時の透過係数 T (領域IIの全透過電力 W_T を開口上 ($z=0$) の入射平面波の電力 W_i で規格化したもの: $T = W_T / W_i$) の収束性を調べたものであり、非常に少ない項数で収束していることが確認できる。

次に、透過係数 T が開口寸法 (a, b) と板厚 d にどのように依存しているかを詳しく調査した。図3は、 $2a$ が半波長以下の小さな開口 ($ka < \pi/2$) に対する透過係数を板厚 d の関数として表示したものである。図より開口が小さいほど板厚の増加に伴って透過電力が急激に(指数関数的に)減少していることが分かる。また、半波長付近の開口

の場合、細長い開口の方が、電力透過量が相対的に増加していることが確認できる。

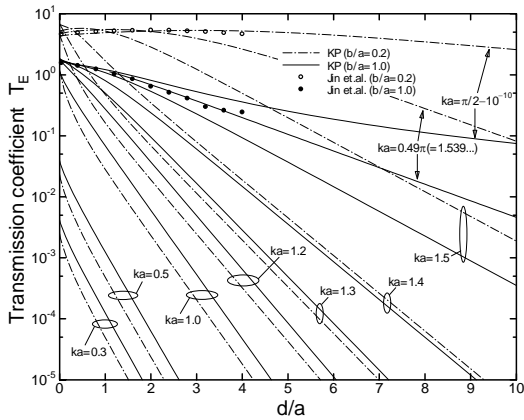


図3 透過係数の板厚依存性

図3の透過係数の曲線は板厚 d の増加に伴って対数グラフ上で直線に近づいていくことが分かったため、曲線にフィットする漸近線を調べたところ、正方形開口 ($a=b$) かつ垂直入射の場合は以下のような簡単な式で記述できることが分かった (次式で添え字の E は E 偏波入射を意味する)。

$$T_E = T_0 \exp\left(-\frac{2d}{a} \sqrt{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - (ka)^2}\right)$$

ここで、 $k (= 2\pi/\lambda)$ は波長定数、 T_0 は図4のグラフから読み取ることのできる係数である。この式を用いることにより、厚い遮蔽板内の小さな開口を透過する電磁波のエネルギーをある程度正確に予測することができる (ただし、 $0.3 < ka < 1.5$)。

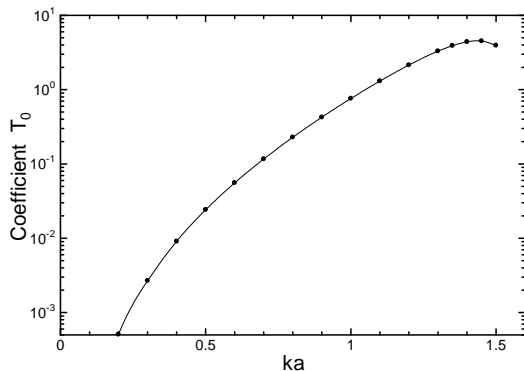


図4 漸近線の係数

図5は、開口寸法が半波長 ($ka = \pi/2$) 付近の透過係数を示している。図より、開口寸法が半波長以下 ($ka < \pi/2$) の場合は板厚の増加に伴って透過電力が急激に減少しているが、開口寸法が半波長より大きい場合 ($ka > \pi/2$) は板厚が増加するにつれて透過電力が振動しながら増減していることが確認できる。これは導波管領域の開口端部で

の多重反射に起因するものであると考えられる。また、開口形状が細長いほど電力透過量が相対的に増加することも分かった。

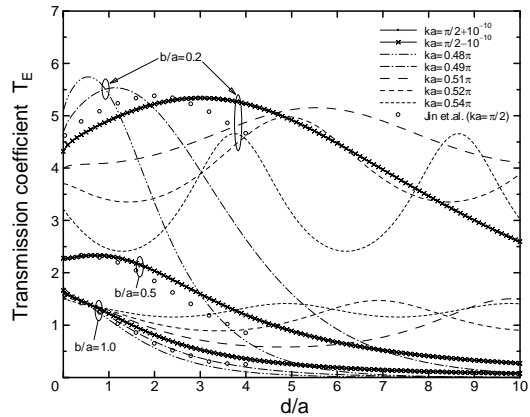


図5 透過係数の板厚依存性 ($ka \cong \pi/2$)

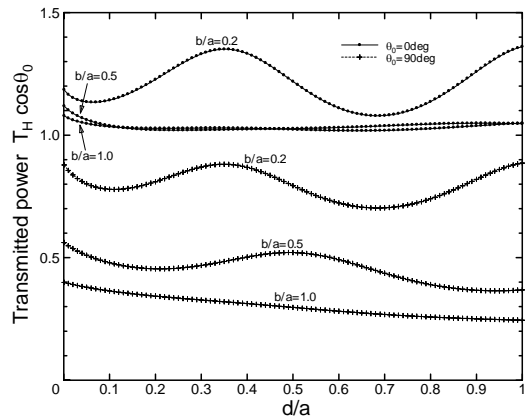


図6 透過係数の板厚依存性 ($ka = 5$)

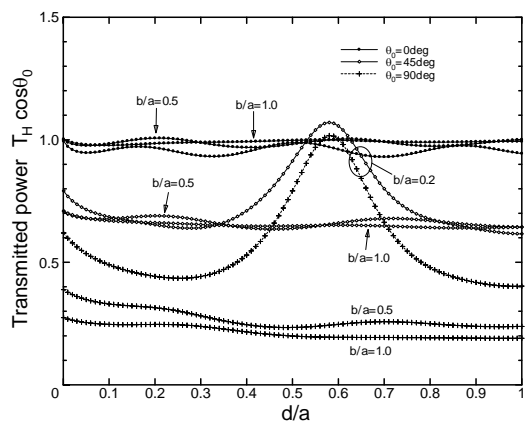
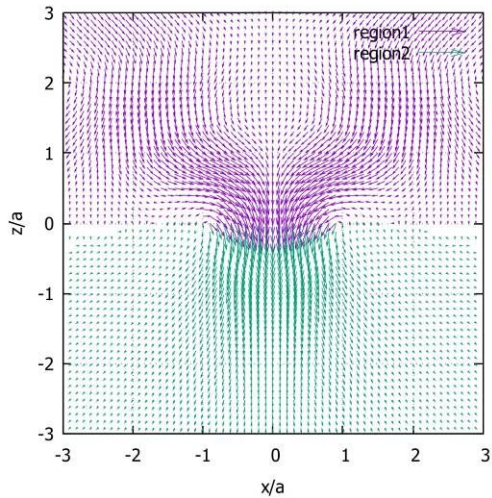


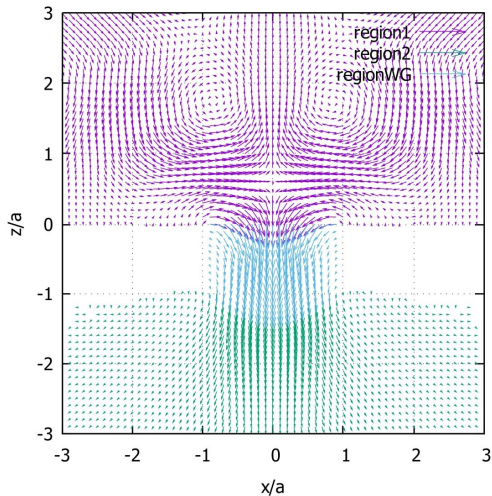
図7 透過係数の板厚依存性 ($ka = 9$)

図6と図7は、それぞれ $ka = 5$ 、 $ka = 9$ に対する透過係数の板厚依存性を示している。いずれも波長に比べて十分に大きな開口寸法となっている (開口の長い方の一辺が2~3波長程度)。 $ka = 5$ の場合、開口が細長いときは透過係数の曲線に周期性が見られるが、 $ka = 9$ の場合は周期性が見られず複雑な変化をしていることが確認できる。開口寸法が大きい場合、正方形開口の透過係数は板厚

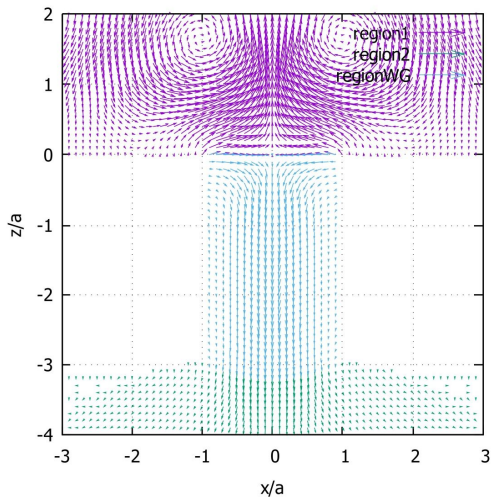
に対する依存性があまり見られず、ほぼ一定値を示すことがわかった。



(a) $d/a=0.02$



(b) $d/a=1.0$



(c) $d/a=3.0$

図8 電力流 ($ka = \pi/2 - 10^{-10}$)

開口近傍の電磁エネルギーの流れをベクトル図で表示することによって可視化を行い、電磁波の回折の様子を調べた。図8は、半波長の正方形開口に平面波が垂直に入射

したときの電力流をベクトル図で表現したものであり、板厚を増加させたときの変化を見ることができる。いずれの板厚でも電磁エネルギーは一旦開口に引き寄せられるが、透過係数が大きい場合はそのエネルギーがほとんど反射することなく開口をそのまま通過し（これが透過係数が1を超える理由）、透過係数が小さい場合は引き付けられたエネルギーが開口前部に反射されることが明らかとなった。

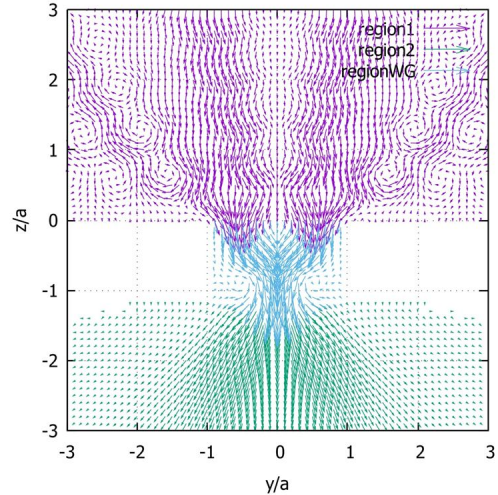


図9 電力流 ($ka = 5$)

図9は、大きな開口（ただし、正方形開口で垂直入射）の場合の電力流を示したものであり、小さな開口に比べてエネルギーの通り道が複雑であり、至る所に渦を観察することもできる。

得られた知見はアンテナ等の電磁波放射素子の効率化や電磁波漏洩等の対策を検討する際に役立つものと期待する。

(2) 薄い遮蔽板内の N 個の開口による回折

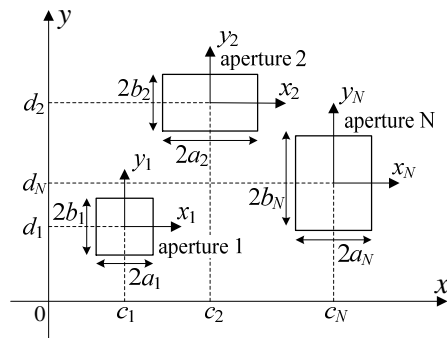


図10 N 個の開口の結合問題

図10のような複数の開口の結合問題は、アレーアンテナの設計や電磁結合を利用したセンシングデバイスの開発、さらには複数の窓からの電磁波漏洩の正確な予測という観点から非常に重要であるが、端点情報まで含んだ厳密解はこれまでに導かれていない。そこで、KP法を本問題に適用して定式化を行

い、厳密解を導出した。回折波の表示式に含まれる未定係数の決定方程式には、4種類の非整数次のベッセル関数と素子間距離に関する二つの三角関数を被積分関数に含む新しい二重無限積分が現れた。物理量を計算するためにはその無限積分を希望の精度で計算するためのアルゴリズムを開発する必要がある。研究期間内では計算コード開発までたどり着かなかったので、計算コードの開発と物理量の計算は今後の課題としたい。

<引用文献>

J. Meixner, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.AP-20, pp.442-446, 1972.

芹澤弘秀 他, 電子情報通信学会 2011 年総合大会講演論文集, C-1-7, p.7, 2011.

本郷廣平 他, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.47, pp.1029-1041, 1999.

芹澤弘秀 他, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.53, pp.3953-3962, 2005.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計11件)

芹澤弘秀, "On the EM transmission property of a rectangular hole in a thick conducting screen Calculation of the transmission coefficient and power flow distributions," 信学技報 [EMT], 査読無, vol. 117, no. 74, pp. 41-46, 2017.
<http://www.ieice.org/ken/paper/201706025bU6/>

芹澤弘秀, "Exact solution of the plane wave diffraction by multiple rectangular holes in a thin screen," Proc. of the ICCEM 2017, 査読有, pp. 38-40, 2017.
DOI: 10.1109/COMPEM.2017.7912837

芹澤弘秀, "Plane wave diffraction by a small rectangular aperture in a thick conducting screen," Proc. of the ICEAA '16, 査読有, pp. 890-893, 2016.
DOI: 10.1109/ICEAA.2016.7731545

芹澤弘秀, "Plane wave diffraction by two rectangular holes in a thin conducting screen Derivation of the exact solution," 信学技報 [EMCJ], 査読無, vol. 115, no. 259, pp. 129-133, 2015.
<http://www.ieice.org/ken/paper/201510234bDA/>

芹澤弘秀, "Diffraction of a plane wave by a rectangular hole in a thick conducting screen," Proc. of the EuCAP 2015, 査読有, MA12 EMTheory.3, pp. 1-5, 2015.
<http://ieeexplore.ieee.org/document/7228955/>

[学会発表](計11件)

芹澤弘秀, "On the EM transmission property of a rectangular hole in a thick conducting screen Calculation of the transmission coefficient and power flow distributions," IEICE 電磁界理論研究会, 2017.06.02, 東京.

芹澤弘秀, "Exact solution of the plane wave diffraction by multiple rectangular holes in a thin screen," 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 2017.03.08, 熊本.

芹澤弘秀, "Plane wave diffraction by a small rectangular aperture in a thick conducting screen," 2016 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, pp. 890-893, 2016.09.22, Cairns (Australia).

芹澤弘秀, "Plane wave diffraction by two rectangular holes in a thin conducting screen Derivation of the exact solution," IEICE 環境電磁工学研究会, 2015.10.23, 仙台.

芹澤弘秀, "Diffraction of a plane wave by a rectangular hole in a thick conducting screen," 9th European Conference on Antennas and Propagation, 2015.04.14, Lisbon (Portugal).

6. 研究組織

(1)研究代表者

芹澤 弘秀 (SERIZAWA, Hirohide)
沼津工業高等専門学校・制御情報工学科・教授
研究者番号: 70226687

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし