

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：53801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05150

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と応用

研究課題名（英文）Development and application 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） 2,700,000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高精度な解析方法（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含む）を開発して、様々な方形物体（遮蔽板内の方形開口、フランジ付導波管、複数の開口等）に対する厳密解を導出し、それを応用することで電磁現象を正確に把握するとともに、汎用数値解法（有限要素法）の計算精度を定量的に評価した。さらに、解の収束性に対するエッジ特性組込の効果についても調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発された三次元厳密解法は小林ポテンシャル法（KP法）を応用したものであり、特に従来手法が苦手とする共振構造や微小開口を含む問題で威力を発揮する。種々の規範問題に対して得られた厳密解は、エッジ特性が組み込まれているため少ない項数で高精度な数値結果を得ることができ、汎用的数値解法の精度を正しく評価するための基準解として使用できる。さらに、正確な電磁現象の把握が可能であるため、研究成果はメタマテリアル等の電気的人工媒質や高性能アンテナ・新センサプローブ等の開発に役立てることができる。

研究成果の概要（英文）：We developed a highly accurate analytical method for the problems of EM wave scattering and radiation from rectangular objects, which include the numerical technique for calculating the double infinite integral and the double infinite series associated with the problems with the desired accuracy, and we obtained the exact solutions for various rectangular objects such as a rectangular aperture in the screen, a flanged waveguide, and multiple apertures. By applying them, we made the exact understanding of the EM phenomenon, and quantitatively evaluated the calculation accuracy of the general-purpose numerical solution method (finite element method). In addition, we investigated the effect of incorporating edge properties on the convergence of the solutions.

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 エッジ特性 数値計算

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）。厳密解法に基づく回折波の表示式（ただし、任意の端点情報を組み込み可能）を用いて、これまで不十分であった近傍電磁界と解の収束性について詳しく調査した。図 1（右）は、高速収束解をもたらすエッジ特性（端点情報）に対する板厚依存性を示したものであり、板厚が薄い場合は、直角のエッジ特性よりも平板の特性を組み込んだ方が解の収束が速くなることを確認した。一方、特定の板厚では開口端部での界の特異性が直角楔のものより弱くなることを示唆する新たな知見が得られた。現在、この原因を明らかにするための検討を継続中であるが、3次元構造に起因する様々な問題を排除するために有限要素解析ソフトウェア（RF モジュール）を導入し、代表的な構造パラメータおよび垂直入射に対して開口上の電界分布を FEM で求め、その計算精度を部分的に評価した。特に、エッジ近傍でのメッシュの細分化方法に対する計算精度の依存性について詳しく調査し、開口上の電界分布が最も急激に変化する方向に関してメッシュを細分化すれば計算精度が向上すること、そして計算精度はメッシュの細分化だけでなく解析領域の大きさにも関係することを明らかにした（データ数が不十分のため一部の結果は未発表）。また、KP 法による厳密式を用いて、様々な開口アスペクト比と幾つかの入射角に対して透過係数を計算し、開口形状と板厚、および入射波の偏波が透過特性に与える影響についても調べた。さらに、構造パラメータの違いによって透過電力量が増減する仕組みを解明する目的で、導波管モードの平面波分解および穴内部での平面波の多重反射に基づく解析法を適用して、大きな電力透過を引き起こす板厚を予測する近似式を導出した。しかし、板厚が小さい場合には適用できないことが分かり、透過電力量が増加する仕組みの解明にはさらなる調査が必要であることが分かった。

(2) 異種媒質境界面に接する方形開口（板厚を無視した開口とフランジ付き方形導波管）

異種媒質に面した方形開口（板厚を無視）と図 2（左）のフランジ付き方形導波管の研究については計算コードの修正と拡張を行い、開口でのエネルギー透過量（フランジ付導波管は反射量も）を様々な媒質パラメータに対して計算した。

薄い開口の問題では、開口寸法が波長に比べて著しく小さい場合は外部の誘電体の存在がエネルギー透過を促進すること、および、開口が大きくなると誘電率が大きくなるにつれてエネルギー透過量が減少していくことを確認した。厚い開口の問題と同様に FEM の計算精度を開口電界分布に基づいて評価した。さらに開口でのエネルギー透過量等を様々な媒質パラメータ（誘電率および透磁率）に対して計算した。特に、様々な入射角に対して透過特性を調査した。様々な開口寸法や媒質パラメータの組み合わせに対して開口分布と透過係数の収束性を調査し、Meixner の理論から導かれる端点情報を組み込んだ場合が最も収束が速いことを確認した（結果は未発表）。

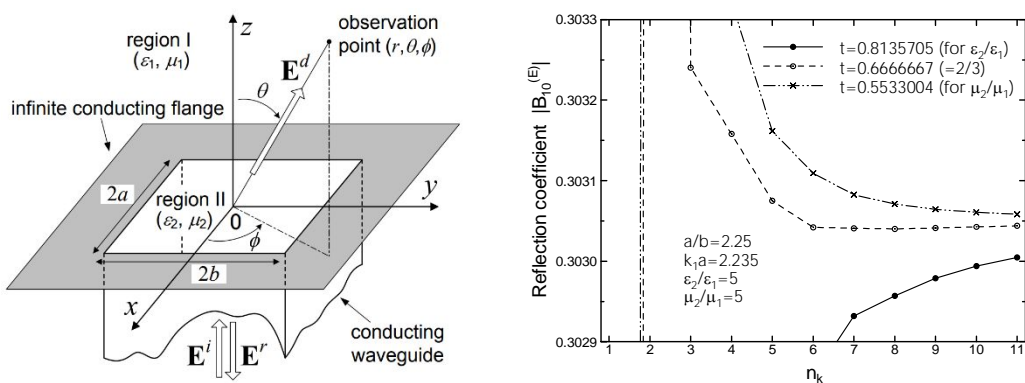


図 2 導波管と座標系（左）および反射係数の収束性（右）

フランジ付き導波管の問題については、特に媒質パラメータの違いによって解の収束性が異なるのかを調査し、Meixner の理論の妥当性について一部検証した。これまで不十分であった開口近傍界を様々な媒質パラメータに対して計算し、開口分布については解の収束性も詳しく調べた。その結果、Meixner の理論の解釈について再検討が必要であることが分かった。有限要素法（FEM）の計算精度を開口電界分布と透過電力に基づいて評価し、メッシュの細分化だけでなく解析空間の寸法の影響についても詳しく調査し、計算誤差がその寸法に関して周期的に変動することを明らかにした。しかし、メッシュ細分化を行っても精度が向上しない場合があり、さらなる調査が必要となった。異種媒質において電力流の不連続が生じている原因については特定でき、計算コードの修正によって境界面で電力が連続することを確認した。

(3) N 個の開口の結合問題

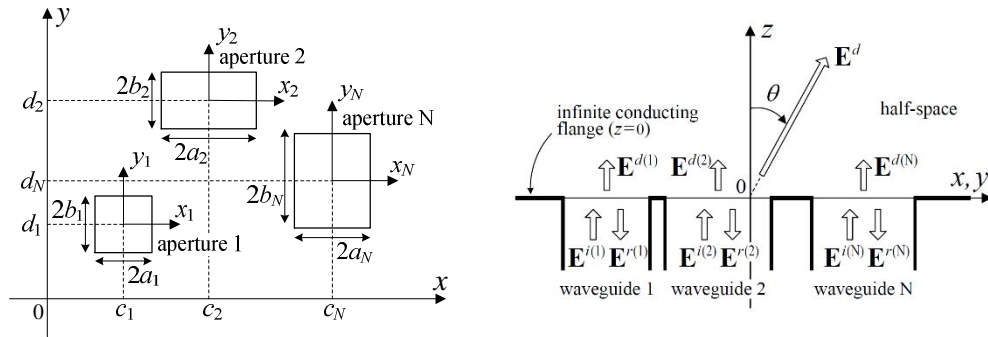


図3 N個の開口の結合問題（左：薄い平板内の開口、右：フランジ付き方形導波管アレー）

図3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に基づく数値結果はこれまでに得られていない。薄い平板内の複数の開口については、定式化は完了していたため、式に含まれる二重無限積分（4個のベッセル関数と2個の三角関数を被積分関数に含む）を希望の精度で計算するためのアルゴリズムと計算コードの開発を実施したが、一部の無限積分のアルゴリズム開発に予想以上の時間を要してしまい、研究期間内では計算コード開発が終了しなかった（進捗度は9割程度）。一方、方形導波管アレーについては定式化を行い、端点情報を組み込んだ厳密式の導出は完了した（等価磁流源を用いた別の方法でも厳密な定式化を行って両者が完全に一致することを確認済み）。しかし、求められた表示式には複数の開口と同じ二重無限積分が含まれていて、その計算コードが開発途上であることから、数値結果を得るまでには至らなかった。

(4) 二次元スリットによる平面電磁波回折

3次元問題を取り扱う中で様々な問題が発生し、三次元構造に起因する問題を排除して類似した二次元構造の研究を行う必要が生じたため、最も基本的な二次元のスリット回折問題（ただし、E偏波入射のみ）の定式化と計算コードの開発を行い、エッジ特性が解の収束性に与える影響を詳しく調べた。これは本来予定していなかった内容である。特に、高速収束解を得るためには正確なエッジ特性の組込が不可欠であることを理論式および数値結果から明らかにした。図4は研究成果の一例であり、正しいエッジ特性（ $t_e = 0.5$ ）以外では展開係数の減少傾向がある値を境に鈍化に転じ、係数の符号が交互に反転することが確認できた。

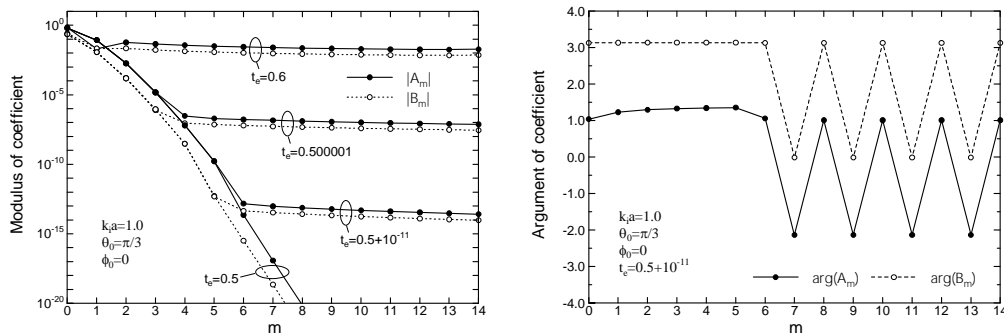


図4 展開係数 A_m, B_m の絶対値（左）と偏角（右： $t_e = 0.5 + 10^{-11}$ のみ）

< 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年総大会講演論文集, C-1-7, p.7, 2011.
- 芹澤弘秀 他, Proc. of the ISAP2011, FrP2-46, 2011.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 芹澤弘秀、高階未来翔	4. 巻 122
2. 論文標題 薄い導体平板内のスリットによるE偏波平面波の回折 ~ 任意のエッジ特性を組み込んだ解の導出 ~	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 13-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 岩垣侑, 芹澤弘秀	4. 巻 121(no. 33)
2. 論文標題 開口の結合問題に現れる二重無限積分に対する高精度数値計算法の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 19-24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Khanh Nam Nguyen, Hiroshi Shirai, and Hirohide Serizawa	4. 巻 E104-C
2. 論文標題 Electromagnetic scattering analysis from a rectangular hole in a thick conducting screen	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 134-143
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.2020REP0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hirohide Serizawa, Hananosuke Ono, and Akihiro Yamada	4. 巻 120(no. 33)
2. 論文標題 Diffraction of an EM plane wave by a rectangular hole in a thick screen Evaluation of the solution convergence and transmission property	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirohide Serizawa and Yu Iwagaki	4. 巻 120(no. 100)
2. 論文標題 High-precision calculation method of double infinite integrals appearing in the coupling problem of rectangular apertures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 71-76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirohide Serizawa and Satoshi Tsukii	4. 巻 119
2. 論文標題 Diffraction of an EM wave by a rectangular hole in a thick conducting screen Examination of the transmission property for various aspect ratios	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 17-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirohide Serizawa	4. 巻 118
2. 論文標題 Radiation from a flanged rectangular waveguide In the case of different media	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 11-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirohide Serizawa	4. 巻 117
2. 論文標題 On the EM transmission property of a rectangular hole in a thick conducting screen Calculation of the transmission coefficient and power flow distributions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 41-46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirohide Serizawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Plane wave diffraction by a large rectangular aperture in a thick conducting screen	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA '17)	6. 最初と最後の頁 1612-1615
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICEAA.2017.8065597	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 岩垣侑, 芹澤弘秀
2. 発表標題 開口の結合問題に現れる二重無限積分に対する高精度数値計算法の開発
3. 学会等名 電子情報通信学会電磁界理論研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hirohide Serizawa
2. 発表標題 Evaluation of the solution convergence for rectangular hole diffraction problems
3. 学会等名 2021 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yu Iwagaki and Hirohide Serizawa
2. 発表標題 Development of high-precision numerical calculation method for matrix elements of an aperture coupling problem
3. 学会等名 2021 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芹澤弘秀, 高階未来翔
2. 発表標題 薄い導体平板内のスリットによるE偏波平面波の回折～任意のエッジ特性を組み込んだ解の導出～
3. 学会等名 電子情報通信学会電磁界理論研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hirohide Serizawa, Hananosuke Ono, and Akihiro Yamada
2. 発表標題 Diffraction of an EM plane wave by a rectangular hole in a thick screen Evaluation of the solution convergence and transmission property
3. 学会等名 電子情報通信学会電磁界理論研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hirohide Serizawa and Yu Iwagaki
2. 発表標題 High-precision calculation method of double infinite integrals appearing in the coupling problem of rectangular apertures
3. 学会等名 電子情報通信学会電磁界理論研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hirohide Serizawa and Satoshi Tsukii
2. 発表標題 Diffraction of an EM wave by a rectangular hole in a thick conducting screen Examination of the transmission property for various aspect ratios
3. 学会等名 電子情報通信学会電磁界理論研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirohide Serizawa
2. 発表標題 Radiation from a flanged rectangular waveguide In the case of different media
3. 学会等名 電子情報通信学会電磁界理論研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirohide Serizawa and Kaisei Okawa
2. 発表標題 Diffraction by a rectangular hole in a thick conducting screen Calculation of aperture fields
3. 学会等名 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirohide Serizawa and Yukito Takahashi
2. 発表標題 Diffraction by multiple rectangular holes in a thin conducting screen Calculation of double infinite integrals for the Bessel functions
3. 学会等名 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirohide Serizawa
2. 発表標題 EM transmission through an aperture in a thin conducting screen separating two half spaces of different properties
3. 学会等名 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirohide Serizawa
2. 発表標題 On the EM transmission property of a rectangular hole in a thick conducting screen Calculation of the transmission coefficient and power flow distributions
3. 学会等名 電子情報通信学会電磁界理論研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hirohide Serizawa
2. 発表標題 Plane wave diffraction by a large rectangular aperture in a thick conducting screen
3. 学会等名 2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA '17) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Hirohide Serizawa	4. 発行年 2020年
2. 出版社 IntechOpen	5. 総ページ数 -
3. 書名 Novel Imaging and Spectroscopy (Diffraction by a rectangular hole in a thick conducting screen の章を執筆)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関