

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 20 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560492

研究課題名(和文) 散乱電磁界に対する高周波近似解析法とその物理的解釈法に関する研究

研究課題名(英文) Study on High-Frequency Analytical Method for Electromagnetic Scattered Field and Its Physical Interpretation

研究代表者

後藤 啓次(GOTO, Keiji)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・その他部局等・准教授)

研究者番号：20531982

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：研究課題『散乱電磁界に対する高周波近似解析法とその物理的解釈法に関する研究』を、2つの研究細目(1)コーティングされた導体円柱による散乱電磁界の新たな高周波近似解析法、および(2)誘電体境界面における透過・散乱界の新たな高周波近似解析法、に分けて研究を行った。その結果、本研究で導出を行った近似解は、(ア)厳密解または参照解と良く一致すること、および(イ)物理現象を理解する上で有効であること、が明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the research by dividing the subject "Study on high-frequency analytical method for electromagnetic scattered field and its physical interpretation" into two subtitles (1) Novel high-frequency asymptotic analysis for scattered field by a coated conducting cylinder and (2) Novel high-frequency asymptotic analysis for transmitted and scattered fields through a plane dielectric interface. We clarified that each novel asymptotic solution derived in the above mentioned two subtitles agrees very well with the exact or the reference solution and is effective understanding scattering phenomena.

研究分野：工学

キーワード：散乱電磁界 高周波近似解析法 周波数領域 時間領域 コーティングされた導体円柱 誘電体境界面

1. 研究開始当初の背景

(1) コーティングされた導体円柱による散乱電磁界の近似解析及び誘電体境界面における透過・散乱界の近似解析に関する研究は、レーダ断面積の解析、コンフォーマルアンテナの解析、非破壊検査、光ファイバー内の光伝搬などの分野において重要な研究課題となっている。

(2) しかしながら、コーティング部の厚さが波長に比較して小さい場合における高周波近似解析法については十分な研究がなされていない。また、観測点が入射波側と平面誘電体境界面を挟んで反対側に設置された場合の透過波に対する近似解については十分な研究がなされていない。

(3) このような研究状況及び研究の重要性・必要性から、本研究においては、コーティング部の厚さが波長に比較して小さいコーティング導体円柱の高周波散乱界及び平面誘電体境界面にビーム波が入射する場合の透過・散乱界、について検討を行う。

2. 研究の目的

(1) 上記 1. の研究開始当初の背景で述べた研究状況及び研究の重要性・必要性の中で、本研究においては、研究課題「散乱電磁界に対する高周波近似解析法とその物理的解釈法に関する研究」について検討を行い、新たに導出する散乱電磁界あるいは透過・散乱界を表す一様漸近解および近似解は、
(ア) 厳密解あるいは参照解と精度良く一致し有効であることを明らかにすること、
(イ) 散乱現象、透過・散乱現象を理解する上で有効であることを、
を目的として研究を行う。

3. 研究の方法

(1) 上記の 2 つの研究目的を達成するために、研究課題を、
(A) コーティングされた導体円柱による散乱電磁界の新たな高周波近似解析法
(B) 誘電体境界面における透過・散乱界の新たな高周波近似解析法
の 2 つの研究細目に分割し、それぞれの研究細目に対して研究代表者 1 人及び研究協力者 1 人の 2 名からなる研究グループを 2 グループ構成し、研究目的の達成を目指して研究を行う。それぞれのグループの研究の結果得られる成果については、他の学者・研究者からのコメントあるいは評価を得るために、学会発表及び学術論文誌への投稿を行う。

(2) 研究方法としては、研究細目(A)及び(B)のそれぞれにおいて厳密解あるいは参照解を求める方法について検討を行い、プログラムを作成し、数値データを取得する。また、数値データを用いて反射・散乱現象及び透過・散

乱現象について概略の検討を行う。
散乱界あるいは透過・散乱界の近似解及び遷移領域においても有効な一様漸近解の導出を行う。
厳密解または基準解と比較することにより、近似解及び一様漸近解の有効性及び適用範囲について明らかにする。
近似解及び一様漸近解の数値結果を考察することにより、散乱界あるいは透過・散乱界の解釈法を明らかにする。
周波数領域における結果を拡張することにより、時間領域における散乱過渡応答を表す近似解の導出を行い、その有効性及び過渡応答波形の解釈法について検討を行う。

以上の 5 段階に分けて研究を進める。

4. 研究成果

(1) 研究を効果的に進めるために、研究課題「散乱電磁界に対する高周波近似解析法とその物理的解釈法に関する研究」を 3. 研究方法、において述べた研究細目(A)及び(B)に分け、2 つの研究グループを組織して研究を実施した。その結果として、2. 研究目的の(ア)及び(イ)で述べた 2 つの研究目的を達成できたことから、本研究においては、十分な研究成果を修めることができたものと自己評価を行っている。

(2) 研究成果は、他の学者・研究者からの評価を得るために、あるいは広く関係分野の研究・開発に供するために学術論文誌等において 17 件、また学会において 16 件の発表を行った。

(3) 具体的な研究成果、得られた成果の内外における位置づけとインパクト、及び今後の展望は、以下ようになる。

(4) 研究細目(A)に関する研究成果
研究細目(A)では、図 1 に示す波長に比較して厚さ $t (= a - b)$ の薄い均質媒質 2 で覆われた半径 a のコーティングされた導体円柱に点から Q から円筒波あるいはパルス波が入射する場合の散乱界あるいは過渡散乱界について検討を行った。媒質 1 の周囲空間は、影境界 (shadow boundary : SB) および遷移領域 (transition region : TR) により、
および の 4 つの領域に分割して検討した。周波数領域 (frequency domain : FD) および時間領域 (time domain : TD) における一様近似解の導出を行った。具体的には、領域 ① では直接波 ① と反射波 ③、領域 ② では直接波 ② と疑似表面回折波 ④ の重畳による拡張 UTD (uniform geometrical theory of diffraction) 領域 ③ では表面回折波級数 ⑤ による修正 UTD、および領域 ④ では最低次の表面回折波 ⑥ が到達することを明らかにした。

上記の ① ~ ⑥ の散乱界成分に対する近

似解を新たに導出し、数値的に求めた厳密解または参照解と比較することにより導出した近似解の有効性を明らかにした。

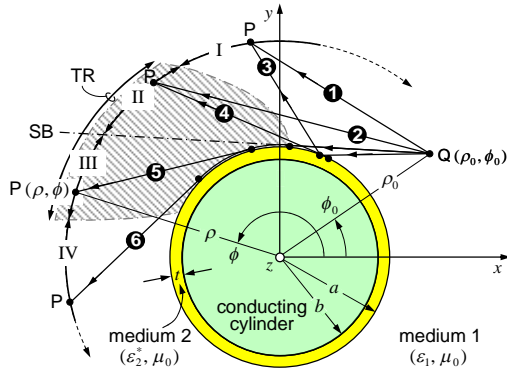


図1 コーティングされた導体円柱による散乱現象. SB: 影境界, TR: 遷移領域. ①および②: 直接波, ③: 反射波, ④: 疑似表面回折波, ⑤および⑥: 表面回折波.

図2には、周波数領域(FD)における散乱磁界の計算例を示した。新たに導出した近似解(—)は従来の近似解(—)と比較して厳密解(○)と精度良く一致することを示した。

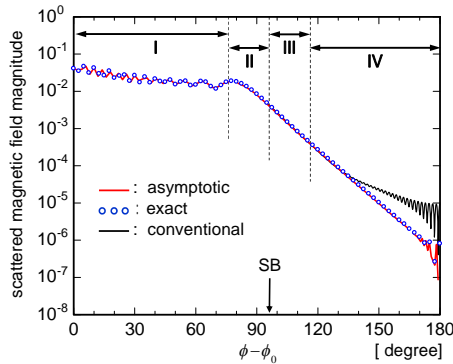


図2 散乱磁界振幅の計算例.

図3には、時間領域(TD)における過渡

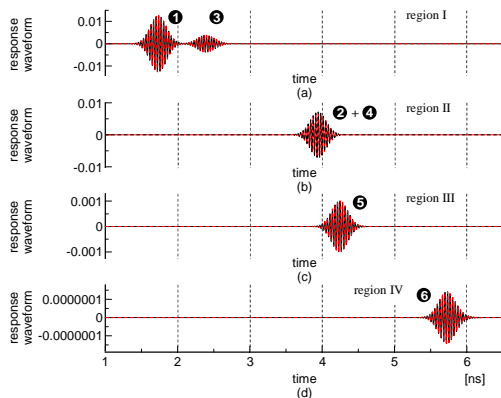


図3 領域 ~ で観測される過渡散乱磁界の応答波形. 散乱電界の計算例を示した。新たに導出した

近似解(—)は、領域 ~ の各領域において参照解(—)と良く一致することを示した。また、領域 IIには直接波②と疑似表面回折波④の2つのパルス波が到達する。参照解では到達時間差が小さすぎて2つのパルス波に分離することは困難である。

図4には領域 IIにおいて新たに導出した近似解を用いて計算した応答波形の計算結果を示した。新たな近似解は直接波②(図4(a))と疑似表面回折波④(図4(b))に分離して観測することが可能であることから、新たに導出した近似解は、コーティングされた導体円柱による散乱現象を理解する上で有効であることを明らかにした。

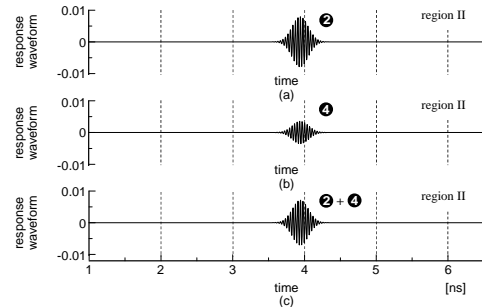


図4 領域 IIで観測されるパルス波成分(a)および(b)、ならびに応答波形(c).

(2) 研究細目(B)に関する研究成果

研究細目(B)では、図5に示す2つの異なる誘電率ε₁およびε₂からなる平面誘電体境界面(ε₁ > ε₂)にガウスビーム波が誘電率の大きな媒質側から入射する場合の透過・散乱界について近似的に解析を行い透過・散乱界は、境界面を透過する透過ビーム波と、エバネッセントビーム波、ラテラル波の振幅を有する透過ビーム波、および遷移ビーム波からなる散乱ビーム波を用いて近似可能であることを明らかにした。

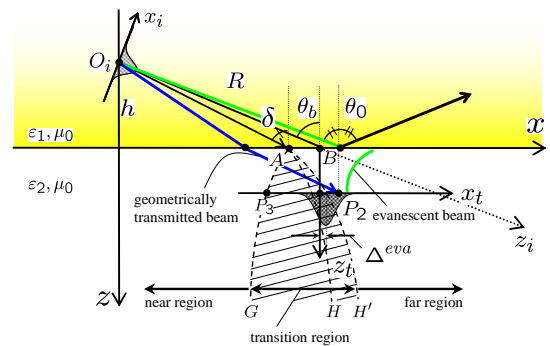


図5 平面誘電体境界面における透過・散乱ビーム波の概略図.

透過・散乱界を図5に示すx軸方向に沿って近傍領域(near region)、遷移領域(transition region)、および遠方領域(far

region) の3つの領域を分割して近似解の導出を行った。図6には、ビーム波の入射角が臨界角より十分に大きな場合の透過・散乱ビーム波の計算例を示した。導出した近似解(—)は参照解(○○○)と良く一致すること、散乱ビームは遷移領域において重要な働きをすること、および遷移領域において小さなビームシフト現象が観測されることを数値的に示した。

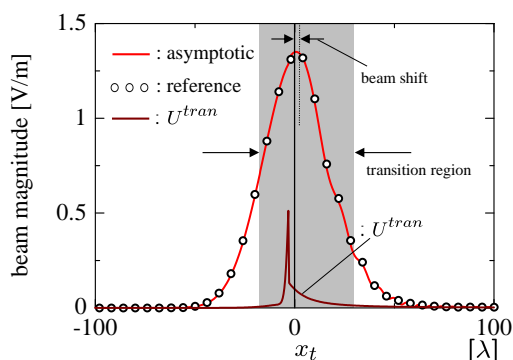


図6 近似解と参照解の比較。

(3) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

研究細目(1)のコーティングされた導体円柱による散乱電磁界の新たな高周波近似解析法、及び研究細目(2)の誘電体境界面における透過・散乱界の新たな高周波近似解析法については、これまで十分な発表がなされておらず、レーダ断面積の解析、コンフォーマルアンテナの解析、非破壊検査、光ファイバー内の光伝搬などの分野において重要な研究課題であることから、国内外の発表において注目され、大きなインパクトを与えた。

(4) 今後の展望

研究細目(1)の研究成果は、これまで発表がなされている他の形状の物体による散乱界に対する近似解と組み合わせることにより、航空機等の複雑な形状の物体による散乱界の近似解析、レーダ断面積の計算、高分解能レーダ、及び形状認識等の分野において適用されることが期待される。

研究細目(2)の研究成果は、誘電率の異なる物質からなる物体による非破壊検査、光ファイバー内の光伝搬の計算等の分野において応用されることが期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計17件)

- [1] K. Goto, L. H. Loc, T. Kawano, and T. Ishihara, Extended UTD solution for scattered fields by a coated conducting cylinder, Proc. of 2012 IEEE AP-S, 査読有, 358.6, Chicago, USA, 2012.
DOI:10.1109/APS.2012.6348045
- [2] T. Kawano, K. Goto, and T. Ishihara, Analysis of scattered fields by an

impedance discontinuity of a planar surface by using Helmholtz-Kirchhoff integral theorem, Proc. of 2012 IEEE AP-S), 査読有, 508.4, Chicago, USA, 2012.

DOI:10.1109/APS.2012.6348469

- [3] K. Goto and L. H. Loc, Asymptotic solutions of transient scattered fields excited by one of the edges of curved conducting surface, Proc. of 2012 ISAP, 査読有, pp. 375 ~ 378, Nagoya, Japan, 2012.
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&number=6393930&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6393930
- [4] L. H. Loc and K. Goto, Asymptotic analysis methods for scattering fields by a coated conducting cylinder, Proc. of 2012 ISAP, 査読有, pp. 379 ~ 382, Nagoya, Japan, 2012.
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&number=6393931&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F6381732%2F6393716%2F06393931.pdf%3Farnumber%3D6393931>
- [5] D. T. Quang, K. Goto, and T. Ishihara, Asymptotic solutions for transmitted Gaussian beam through a plane dielectric interface, Proc. of 2012 ISAP, 査読有, pp. 383 ~ 386, Nagoya, Japan, 2012.
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&number=6393932&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6393932
- [6] K. Goto and L. H. Loc, Asymptotic solutions for scattered field by a coated conducting cylinder with a thin lossy dielectric material, IEICE Electronics Express, 査読有, Vol. 10, No. 5, 20130100, pp. 1 ~ 9, 2013.
DOI:10.1587/elex.12.20141110
- [7] K. Goto and L. H. Loc, Asymptotic solutions for scattered field by a coated conducting cylinder, IEICE Electronics Express, 査読有, Vol. 10, No. 6, 20130139, pp. 1 ~ 10, 2013.
DOI:10.1587/elex.10.20130139
- [8] D. T. Quang, K. Goto, and T. Ishihara, Time-domain asymptotic solution for transmitted Gaussian pulse through a plane dielectric interface, Proc. of EMTS 2013, Electromagnetic Theory, 査読有, 21PM1D-03, pp. 184 ~ 187, Hiroshima, Japan, 2013.
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&number=6565709&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6565709
- [9] K. Goto and L. H. Loc, High-frequency asymptotic analysis for scattered field by a conducting cylinder, 査読有, Proc. EMTS 2013, Electromagnetic Theory, 23PM3F-03,

- pp. 782 ~ 785, Hiroshima, Japan, 2013.
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6565856&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6565856
- [10] L. H. Loc and K. Goto, Uniform asymptotic solutions for scattered field by a coated conducting cylinder, 査読有, Proc. EMTS 2013, Electromagnetic Theory, 24AM1A-01, pp. 796 ~ 799, Hiroshima, Japan, 2013.
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6565860&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6565860
- [11] K. Goto and L. H. Loc, Time-domain asymptotic solutions of transient scattered field excited by a thin cylindrically curved conducting surface with edges, Proc. 2013 IEEE AP-S, 査読有, 104.2, pp. 25 ~ 26, Lake Buena Vista, USA, 2013.
[DOI:10.1109/APS.2013.6710673](https://doi.org/10.1109/APS.2013.6710673)
- [12] K. Goto and L. H. Loc, Asymptotic solutions in the transition regions for scattered field by a conducting circular cylinder, Proc. 2013 IEEE AP-S, 5 査読有, 39.1, pp. 1840 ~ 1841, Lake Buena Vista, USA, 2013.
[DOI:10.1109/APS.2013.6711579](https://doi.org/10.1109/APS.2013.6711579)
- [13] K. Goto, M. Sawada, K. Mori, and Y. Horii, Asymptotic analysis for transient scattered field excited by the edges of a cylindrically curved conducting open sheet, IEICE Electronics Express, 査読有, Vol. 11, No. 5, 20130963, pp. 1 ~ 11, 2014.
[DOI:10.1587/elex.11.20130963](https://doi.org/10.1587/elex.11.20130963)
- [14] K. Goto, K. Mori, Y. Horii, and M. Sawada, Study on arrival times of transient creeping wave and transient whispering-gallery mode, Proc. of 2014 IEEE AP-S, 査読有, High Frequency and Asymptotic Methods I, IF441.9, pp.2214-2215, Memphis, USA, 2014.
[DOI:10.1109/APS.2014.6905434](https://doi.org/10.1109/APS.2014.6905434)
- [15] K. Goto, Y. Horii, K. Mori, and M. Sawada, Study on transient scattered electric field by a coated conducting cylinder, Proc. of 2014 IEEE AP-S, High Frequency and Asymptotic Methods I, IF441.10, pp.2216-2217, Memphis, USA, 2014.
[DOI:10.1109/APS.2014.6905435](https://doi.org/10.1109/APS.2014.6905435)
- [16] K. Goto, M. Sawada, K. Mori, and Y. Horii, Time-domain asymptotic analysis for magnetic-type transient surface diffracted ray, Proc. of 2014 IEEE AP-S, High Frequency and Asymptotic Methods I, IF441.11, pp.2218-2219, Memphis, USA, 2014.
[DOI:10.1109/APS.2014.6905435](https://doi.org/10.1109/APS.2014.6905435)
- [17] K. Goto, R. Asai, N. Sumikawa, and T. Santikul, Time-domain asymptotic-numerical solution for transient scattered electric field by a coated conducting cylinder covered with a thin lossy dielectric material, IEICE Electronics Express, vol. 12, no. 3, 20141110, pp. 1-10, 2015.
[DOI:10.1587/elex.12.20141110](https://doi.org/10.1587/elex.12.20141110)
- [学会発表](計 16 件)
- [1] 後藤啓次, レ・ホアン・ロク、フーリエ変換の方法を用いた導体曲面のエッジによる過渡散乱界の近似解析法, EMT-12-75, 電気学会電磁界理論研究会資料, pp. 61 ~ 66, 広島市, 広島市立大学, 2012.
- [2] ディン・チョング・クアン, 後藤啓次, 石原豊彦, 平面誘電体境界面における透過ガウスビーム波の近似解析, 電気学会電磁界理論研究会資料, EMT-12-79, pp. 17 ~ 22, 札幌市, 北海道大学, 2012.
- [3] ディン・チョング・クアン, 後藤啓次, 石原豊彦, 平面誘電体境界面における透過・散乱ガウスビーム波のビームシフト, 2012 年電子情報通信学ソサイエティ大会講演論文集(エレクトロニクス1), CS-1-4, pp. S-7 ~ S-8, 富山市, 富山大学, 2012.
- [4] レ・ホアン・ロク, 後藤啓次, コーティングされた導体円柱による高周波散乱界に対する拡張 UTD, 2012 年電子情報通信学ソサイエティ大会講演論文集(エレクトロニクス1), CS-1-5, pp. S-9 ~ S-10, 富山市, 富山大学, 2012.
- [5] 後藤啓次, レ・ホアン・ロク, 開放円筒導体曲面による過渡散乱界の近似解析, 2012 年電子情報通信学ソサイエティ大会講演論文集(エレクトロニクス1), C-1-24, pp. 25 ~ 26, 富山市, 富山大学, 2012.
- [6] 後藤啓次, レ・ホアン・ロク, 導体円柱による高周波散乱界に対する近似解析, 電気学会電磁界理論研究会資料, EMT-12-148, pp. 161 ~ 166, 阿蘇市, 阿蘇プラザホテル, 2012.
- [7] 後藤啓次, レ・ホアン・ロク, 導体円柱による散乱界の SB 上における連続性の検討, 2013 年電子情報通信学会総合大会講演論文集(エレクトロニクス1), C-1-2, p. 2, 岐阜市, 岐阜大学, 2012.
- [8] K. Goto, L. H. Loc, and H. Fujishiro, Study on scattered field by a coated conducting cylinder covered by a thin coating medium compared with a wavelength, AP-RASC 2013, 査読有, B3a-3, Taipei, Taiwan, 2013.
<http://aprasc13.ntu.edu.tw/Program2/AdvanceProgram.asp>
- [9] K. Goto, L. H. Loc, and K. Hagiwara, Study on scattered field by a coated conducting cylinder including the scattering phenomena inside of a coating medium, AP-RASC 2013,

査読有, B3a-4, Taipei, Taiwan, 2013 .
<http://aprasc13.ntu.edu.tw/Program2/AdvanceProgram.asp>

- [10] 後藤啓次, 過渡表面回折波に対する時間領域における近似解析, 電気学会電磁界理論研究会資料, EMT-13-137, pp. 11 ~ 16, 三沢市, 星野リゾート青森屋, 2013.
- [11] 後藤啓次, 森宏二郎, 堀井勇希, 澤田 瑞希, コーティングされた導体円柱による過渡散乱電界の散乱現象, 2014 年電子情報通信学会総合大会講演論文集(エレクトロニクス1), C-1-27, p. 27, 新潟市, 新潟大学, 2014.
- [12] 後藤啓次, 浅井亮, 澄川尚功, ｸｲｰﾃｯﾁ ﾏﾞｲｽ ﾏﾞｲｽ ﾏﾞｲｽ, 薄い誘電体媒質で覆われたコーティングされた導体円柱による散乱界に対する近似解析 - 磁界形問題 -, 電気学会電磁界理論研究会資料, EMT-14-95, pp. 59 ~ 64, 室蘭市, 室蘭工業大学, 2014.
- [13] 後藤啓次, 澄川尚功, ｸｲｰﾃｯﾁ ﾏﾞｲｽ ﾏﾞｲｽ ﾏﾞｲｽ, 浅井亮, クリーピング波とウィスパリング・ギャラリーモードの到達時間, 電子情報通信学 2014 年ソサイエティ大会講演論文集(エレクトロニクス1), C-1-7, p.7, 徳島県, 徳島大学, 2014.
- [14] 後藤啓次, ｸｲｰﾃｯﾁ ﾏﾞｲｽ ﾏﾞｲｽ ﾏﾞｲｽ, 浅井亮, 澄川尚功, 厚さの薄い誘電体媒質で覆われたコーティングされた導体円柱による散乱界に対する近似解析 - 電界形問題 -, 電気学会電磁界理論研究会資料, EMT-14-152, pp. 23-28, 吾妻群草津町, 草津温泉 中沢ビレッジ, 2014.
- [15] 後藤啓次, 澄川尚功, ｸｲｰﾃｯﾁ ﾏﾞｲｽ ﾏﾞｲｽ ﾏﾞｲｽ, 浅井亮, 厚さの薄い損失性のある誘電体媒質で覆われたコーティングされた導体円柱による過渡散乱磁界に関する研究, 電気学会電磁界理論研究会資料, EMT-15-57, pp. 293-298, 大阪市, 大阪大学 豊中キャンパス, 2015.
- [16] 後藤啓次, ｸｲｰﾃｯﾁ ﾏﾞｲｽ ﾏﾞｲｽ ﾏﾞｲｽ, 浅井亮, 澄川尚功, コーティングされた導体円柱による過渡散乱界の解析的および数値的検討, 2014 年電子情報通信学会総合大会講演論文集(エレクトロニクス1), CS-1-4, p. 27 ~ 28, 賀県草津市, 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス, 2015.

6. 研究組織

(1)研究代表者

後藤 啓次 (GOTO Keiji)
防衛大学校・電気情報学群・准教授
研究者番号: 20531982