

2023年度北海道大学情報基盤センター萌芽型共同研究成果報告書

1. 研究類型 A) 計算資源利用型
2. 研究課題名 大規模電磁界解析を用いた社会インフラ基盤を支える通信および電波応用技術の開発
3. 研究期間 2023年5月22日 ~ 2024年3月31日

4. 研究代表者

氏名	所属機関・部局名	職名	備考
伊藤 桂一	秋田工業高等専門学校・創造システム工学科	教授	

5. 研究分担者

氏名	所属機関・部局名	職名	備考
丸山 珠美	函館工業高等専門学校・生産システム工学科	教授	
中津川 征士	函館工業高等専門学校・生産システム工学科	教授	
大島 功三	旭川工業高等専門学校・電気情報工学科	教授	
村本 充	苫小牧工業高等専門学校・創造工学科	教授	
山本 綱之	津山工業高等専門学校・総合理工学科	准教授	
船木 聖仁	旭川工業高等専門学校・生産システム工学専攻	専攻科1年	
鎌田 緋莉	函館工業高等専門学校・生産システム工学専攻	専攻科1年	
海老田 のあ	函館工業高等専門学校・生産システム工学専攻	専攻科1年	
保坂 真志	秋田工業高等専門学校・グローバル地域創生工学専攻	専攻科2年	
柴田 勝成	秋田工業高等専門学校・グローバル地域創生工学専攻	専攻科1年	
金子 睦	秋田工業高等専門学校・グローバル地域創生工学専攻	専攻科1年	
深谷 猛	北海道大学情報基盤センター	准教授	

6. 共同研究の成果

本研究では、スパコンを駆使した大規模電磁界解析技術、伝搬シミュレーション、最適設計技術を確立することを目的として、プログラム開発とアンテナ設計・解析、電波伝搬解析への応用を相互に行う。大きなテーマとして電波応用技術の開発、5G対応通信技術に取り組み、以下の研究成果が得られた。

A)マイクロ波融雪装置の最適設計研究

融雪用のマイクロ波を、電波を漏らすことなく、ワイヤレス電力伝送によってエネルギーに変換するための新たな装置について検討を実施した。この実現のため、メタ材料を導入し、左手系導波管をサーキット型導波管に取り入れ、電磁波が管内を同じ方向に一周するサーキット型導波管の構造と電磁界分布を明らかにし、査読付き国際会議 IEEE AP-S[1]で報告した。

EBG 構造（バンドギャップ構造）を装置に組み込むことによる電波を外に漏らさない装置について、検討を実施した。初めに融雪用の周波数で電磁波の伝搬を遮断する EBG の基本構造について検討を行い、その結果を CIF2023 [2]で報告した。本結果は、proceeding への掲載論文[3]に推薦された。次に、EBG をホーンアンテナに組み込み、雪および水を通過させて融雪および排水を実現すると同時に、電磁波を通過させない構造を JetFDTD を用いた解析によって明らかにした。本装置を 3D プリンタで試作し、近傍電磁界の測定を実施した。これらの結果をまとめ、査読付き国際会議 IEEE AP-S 2024 に投稿し、採択された。本結果について、高専ワイヤレステックコンテスト Wicon 2023 で報告し、プラチナ協賛企業賞を受賞した。また、本結果は、電子情報通信学会総合大会[4]および WPT 研究会[5]でも報告した。

また、右手系スロット付きサーキット型導波管の試作を実施し、導波管から放射される近傍電磁界の測定を実施した。その結果、電源の両側に電磁波が進み両側のスロットから放射される様子を観測した。本結果をまとめ査読付き国際会議 APWC2023[6]、および電子情報通信学会ソサイエティ大会[7]および WPT 研究会[8]でそれぞれ報告した。また、マイクロ波融雪のためのレドーム最適化について書いた招待論文が発行された[9]。試作したサーキット型導波管に対して、受電用のダイポールの配置とワイヤレス電力伝送効率の関係を明らかにし、本成果は招待講演として報告した。

マイクロ波放射・加熱の均一性実現を目的として、右手系、および左手系導波管を組み合わせた右手/左手系複合(CRLH)導波管をサーキット状にループさせたサーキット型導波管での零次共振現象について検討した。2023 年度は、前年度までで実現が不十分であった、サーキット状 CRLH 導波管の円弧部での零次共振現象について検討を行った。円弧部では、内周と外周とで周長に差が生じている。我々の研究グループが検討を進めている CRLH 導波管では、導波管内に設置した 2 組の円柱ペア間のギャップにより、左手系導波管における直列のキャパシタンスを実現していることから、円弧部では内周と外周とでこのキャパシタンスに差が生じ、結果、右手系領域と左手系領域との G ポイント周波数とに差が生じるアンバランスな状態となっていた。

そこで我々の研究グループでは、まず円弧部の単位セルにおける内・外周の周長と同様の周長を持つ単位セルをそれぞれ用意し、それぞれの単位セルで最適化を行い、バランスしている CRLH 導波管の単位セルを実現した。この最適化の際、図 1 に示すように、導波管の高さ、および導波管の幅は両者で同一とし、導波管内に設置している円柱長、および円柱直径の調整のみで最適化することとした。

次に、バランスしている 2 つの CRLH 導波管の単位セルを中央で分割し、接合したものを、新たな円弧部の単位セルとした。こうして実現した新たな円弧部の単位セルの周波数分散特性を確認したところ、目標としている 2.45 GHz でバランスが取れ、零次共振現象が得られることが期待される CRLH 導波管の単位セルが実現できていることが確認された。そこで、この新たな円弧部と、昨年度までに実現した直線部とを組み合わせ、CRLH サーキット型導波管を実現した。実現した CRLH サーキット型導波管内の電界分布を解析したところ、図 2 に示すように 2.458 GHz において長波長の電界分布が確認され、零次共振現象が得られていることが確認された。

B)八木宇田アンテナ応用レクテナの最適設計

八木宇田アンテナを応用したエネルギーハーベスト用レクテナの最適設計を実施した。2023 年度は、素

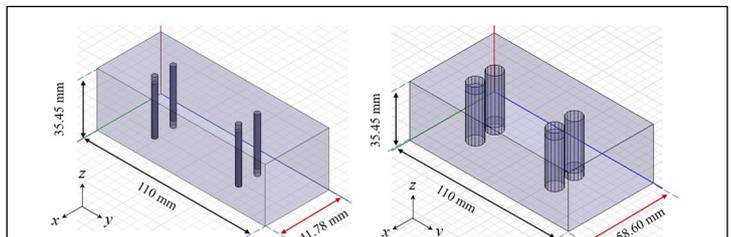


図 1: CRLH 導波管の円弧部の内周長、および外周長と同一の単位セル長を持つ、2.45 GHz でバランスされた単位セルの俯瞰図。

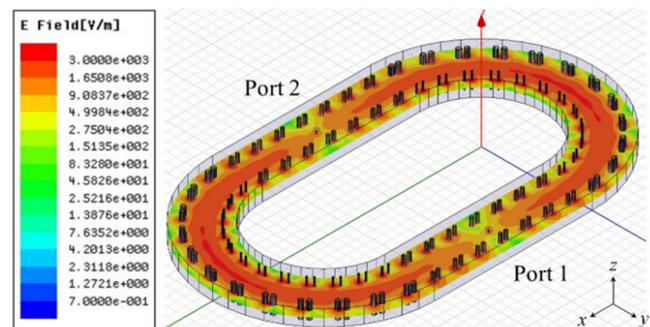


図 2: 新たに設計した円弧部を組み入れた CRLH サーキット型導波管における零次共振現象を示す電界分布 (2.458 GHz)。

子間相互結合の影響の有効利用を従来のマイクロ波だけでなく、MHz 帯における磁界結合ワイヤレス給電への検討にも拡張した[10]。また、送信アンテナと受信アンテナの向きを同相にした場合、逆相にした場合のkQ積を比較し、逆相にすることによって結合係数kおよびkQ積が大きくなることを明らかにした[11][12]。

次に、これを一つの送電コイルで二つの受電コイルに同時に電力を伝送する場合についてコイルの向きを変更した検討を行い、この場合も逆相の方が有効となることを明らかにした[13][14]。また、GHz帯における空間伝送型ワイヤレス給電に用いるループ型レクテナアレーについて、C型にすることで素子の短絡の問題を解決できることを明らかにした[15]。次に、C型にすることでループアンテナから特性が変化し、共振周波数が高くなる問題に対処するために、キャパシタンスの装荷を提案し、その効果を明らかにした[16]-[18]。

集中定数装荷によりアンテナを小型にできることが知られている。本研究では、この集中定数装荷アンテナを八木宇田アンテナと同様に導波素子として働かせることができること、さらにそれをレクテナアレーに適用できることを明らかにし報告した[19]-[22]。

これまで検討してきたレクテナアレーは、整流ダイオードをそのままダイポールアンテナとして用いることを基本としてきた。本研究では、さらに、このレクテナで点灯させるダイオードもまた、ダイポールアンテナとして用いるクロスダイポール型レクテナを提案し、その設計、解析を行い、テザリングモードで、従来の2倍のLEDの点灯に成功した。その結果をWPT研究会で報告した[23]。

C) 5G など通信技術の高周波化, 高度化

ミリ波帯アンテナ用薄型誘電体レンズの構造設計にトポロジー最適化を用いた。高誘電率材料を用いた場合[24]と3DプリンタのPLAフィラメントを想定した場合[25]の設計を行い、従来構造よりも誘電体レンズの厚みを薄くできることを示した。また、ミリ波帯誘電体線路の設計を行い、誘電体だけで構成した線路でも伝送および分波可能であることを示した[26]。

3Dプリンタを用いたミリ波部品の設計では導波管フィルタ[27]、およびプリント基板用フィルタ[28][29]の設計を行い、バンドパス特性が得られることを示した。

D) メタヒューリスティクスを活用した到来方向推定

5G 移動通信環境において、メタヒューリスティクスを用いた到来方向推定手法の確立のため、より自由度の高いGAとして提案されているパラメータフリーGA (PfGA) を用いて推定手法の改善を試みた[30]-[32]。研究成果[32]において優秀発表賞を受賞している。

研究成果

- [1] K. Unyu, T. Maruyama, M. Nakatsugawa, M. Omiya, Y. Tamayama, “Transient Response of Circuit Shape Right- and Left-handed Waveguide,” IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, AP-S 2023 1(1) 211-212 2023.
- [2] K. Hatazawa, T. Maruyama, M. Omiya, T. Yamamoto, T. Nakamura, M. Nakatsugawa, “Applied EBG Structure for Microwave Snow Melting,” Chitose International Forum on Science & Technology 2023 (CIF 2023) R2(01) 1-1 2023.
- [3] K. Hatazawa, T. Maruyama, M. Omiya, T. Yamamoto, T. Nakamura, M. Nakatsugawa, “Applied EBG Structure for Microwave Snow Melting,” Proceedings of Chitose International Forum on Science & Technology 2023 (CIF 23), p. 27-30, Number of Pages 4 CIF23(9) 27-30 2024.
- [4] 畑沢公陽, 海老田のあ, 鎌田緋莉, 丸山珠美, 大宮学, 山本綱之, 中村尚彦, 中津川征士, “電波が漏れないマイクロ波融雪のための EBG 適用導波管の特性解析,” 電子情報通信学会総合大会 2024 電子情報通信学会通信総合大会論文集 B(1B) 32-32 2024.
- [5] 畑沢公陽, 丸山珠美, 鎌田緋莉, 海老田のあ, 中村尚彦, 山本綱之, 小早川七海, 吉井風華, 日笠汐菜, “電磁波漏洩防止のための EBG 応用による新たなマイクロ波融雪装置の近傍電磁界測定,” 信学技報, vol. 123, no. 437, WPT2023-46, pp. 59-62, 2024.
- [6] T. Maruyama, M. Nakatsugawa, K. Unyu, T. Nakamura, Y. Sasaki, M. Omiya, Y. Tamayama, “Measurement of Near-Field Electromagnetic Distribution Radiated from Slotted Circuit-Shape Waveguides to Melt Snow with Microwave,” The 12th edition of the IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (IEEE-APWC 2023) 120-123 2023. (Invited)
- [7] 丸山珠美, 鶴入宏太, 佐々木悠雅, 中津川征士, 中村尚彦, 大宮学, 玉山泰宏, “マイクロ波融雪のための スロット付きサーキット型導波管の 近傍電磁界測定と FDTD 解析,” 2023 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会論文集 B-1(90) 90-90 2023.

- [8] 丸山珠美, 鶴入宏太, 佐々木悠雅, 中津川征士, 中村尚彦, 大宮 学, 玉山泰宏, “マイクロ波融雪のためのサーキット型導波管上の近傍電磁界測定,” 信学技報, vol. 123, no. 93, WPT2023-12, pp. 9-12, 2023.
- [9] 伊藤桂一, 丸山珠美, 中津川征士, 中村尚彦, 村本充, 奈須野裕, 大島功三, 山本綱之, 大宮学, 玉山泰宏, “NGnet を用いたマイクロ波融雪システム用モルタルブロックのトポロジー最適化,” 電子情報通信学会論文誌, Vol.J106-C, No.5, pp.133-134, 2023. (招待論文)
- [10] T. Maruyama, A. Kamada, T. Shimada, N. Ebita, M. Nakatsugawa, M. Tamura, “Efficiency Improvement by Loading Impedances for Dual Feeding Magnetic Field Coupling WPT,” 2023 IEEE International symposium on antennas and propagation ISAP2023 RS18.5 1-2 2023.
- [11] A. Kamada, T. Maruyama, N. Ebita, M. Nakatsugawa, M. Tamura, N. Suematsu, “Method of Moments Electromagnetic Field Analysis for Wireless Power Transfer Efficiency Improvement using Reverse-Coil Configuration for Magnetic Field Coupled WPT,” Joint Workshop of Thailand-Japan MicroWave Workshop and Asian Wireless Power Transfer Workshop 2023 (TJMW&AWPT 2023) 23(201) 1-3 2023.
- [12] 鎌田緋莉, 海老田のあ, 丸山珠美, 中津川征士, 田村昌也, 末松憲治, “磁界結合 WPT 用逆向きコイルによるワイヤレス電力伝送効率改善 に関するモーメント法電磁界解析,” 令和 5 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会 講演 1(16) 22-23 2023.
- [13] 鎌田緋莉, 海老田のあ, 丸山珠美, 中津川征士, 田村昌也, 末松憲治, “両側同時給電における磁界結合 WPT 用コイルの向きと kQ 積の関係,” 電子情報通信学会総合大会 B(20) 7-7 2024.
- [14] 鎌田緋莉, 丸山 珠美, 中津川征士, 海老田のあ, 田村昌也, 末松 憲治, “両側同時給電における磁界結合 WPT 用コイルの向き の 効率に対する影響,” 信学技報, vol. 123, no. 396, MW2023-178, pp. 21-24, 2024.
- [15] T. Maruyama, N. Ebita, M. Nakatsugawa, M. Tamura, “Novel C-shaped loop rectenna arrays for LED accessories,” IEEE URSI GASS 2023 pp.1-2, 2023.
- [16] N. Ebita, T. Maruyama, A. Kamada, M. Nakatsugawa, M. Tamura, N. Suematsu, “LED Illumination Experiment through Energy Harvesting using Novel Capacitance Loaded Loop Rectenna,” Joint Workshop of Thailand-Japan MicroWave Workshop and Asian Wireless Power Transfer Workshop 2023 (TJMW&AWPT 2023) 23(202) 1-3 2023.
- [17] 海老田のあ, 鎌田緋莉, 丸山珠美, 中津川征士, 田村昌也, 末松 憲治, “キャパシタンス装荷ループ型レクテナの提案と エネルギーハーベストによる LED 点灯実験,” 令和 5 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会 講演 1(15) 20-21 2023.
- [18] 海老田のあ, 鎌田緋莉, 丸山珠美, 中津川征士, 田村昌也, 末松 憲治, “キャパシタ装荷ループ型レクテナアレーの解析と LED 点灯実験,” 電子情報通信学会総合大会 B(20) 14-14 2024.
- [19] T. Maruyama, H. Ishiguro, N. Ebita, A. Kamada, M. Nakatsugawa, M. Tamura, "Miniaturization of Yagi-Uda rectenna by impedance loading ," IEEE AP-S 2023, IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, AP-S 2023 1(1) 673-674 2023.
- [20] 丸山珠美, 海老田のあ, 鎌田緋莉, 石黒大翔, 中津川征士, 田村昌也, 末松憲治, “インダクタ装荷による受電および導波素子一体型レクテナアレーの小型化,” 信学技報, vol. 123, no. 252, WPT2023-25, pp. 12-16, 2023.
- [21] 丸山珠美, 石黒大翔, 海老田のあ, 鎌田緋莉, 畑沢公陽, 中津川征士, 田村昌也, 末松 憲治, “インピーダンス装荷レクテナアレー,” 信学技報, vol. 123, no. 223, AP2023-121, pp. 123-126, 2023.
- [22] 丸山珠美, 海老田のあ, 鎌田緋莉, 中津川征士, 田村昌也, 石黒大翔, “八木宇田構造応用レクテナのインピーダンス装荷による小型化,” 信学技報, vol. 123, no. 115, MW2023-47, pp. 111-114, 2023.
- [23] 丸山珠美, ハイネン オラン, 海老田のあ, 鎌田緋莉, 中津川征士, 田村昌也, 末松憲治, “クロスダイポール型レクテナアレーの解析特性とテザリングによる LED 点灯実験,” 信学技報, vol. 123, no. 437, WPT2023-58, pp. 111-116, 2024.
- [24] K. Itoh, S. Togase, J. Satoh, H. Matsuda, E. Sugawara, M. Tanaka, H. Igarashi, "Topology Optimization of Thin Lens for Millimeter Wave Antenna Using High Dielectric Constant Material," 24th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag2023), Kyoto, PC-A2-6, 2023.
- [25] 伊藤桂一, 田村祐太, 田中将樹, 五十嵐一, “NGnet を用いたミリ波アンテナ用誘電体レンズのトポロジー最適化”, 第 32 回 MAGDA コンファレンス in 金沢 (MAGDA2023) ~電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス~, OS-4-7, pp.73-74, 2023.
- [26] 伊藤桂一, 伊藤大翔, 田中将樹, 松田英昭, 五十嵐 一, “ミリ波誘電体線路の FDTD 解析とトポロジー最適化,” 電気学会電子・情報・システム部門大会, MC1-7, pp.1094-1095, 2023.
- [27] K. Itoh, Y. Hori, H. Matsuda, H. Nozaka, T. Nishino, M. Tanaka, T. Furuichi, N. Suematsu, "Design of Millimeter Wave Waveguide Bandpass Filter for Prototyping with 3D Printer," 21st International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2023), Tokyo, OB-A3-4, 2023.
- [28] 柴田勝成, 武居周, 野村政宗, 伊藤桂一, “電磁界解析を用いたプリント基板フィルタの設計,” 令和 5 年東北・北海道地区高等専門学校専攻科産学連携シンポジウム, T23-5-06, 2023.

- [29] 柴田勝成, 武居周, 野村政宗, 菅原英子, 伊藤桂一, “ミリ波プリント基板用バンドパスフィルタのトポロジー最適化,” 令和6年東北地区若手研究者研究発表会, YS-22-P17, pp.237-238, 2024.
- [30] 船木聖仁, 大島功三, 村本充, “分散型 PfGA を用いた近傍波の到来方向推定の精度向上に関する一検討,” 令和5年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 13, 2023.
- [31] 船木聖仁, 大島功三, 村本充, “分散型 PfGA を用いた近傍波の到来方向推定の計算時間短縮に関する一検討,” 第29回高専シンポジウム in Nagaoka, G-14, 2024.
- [32] 船木聖仁, 大島功三, 村本充, “染色体数可変 GA を用いた到来方向推定における設定パラメータに関する考察,” 令和5年度 IEICE 北海道支部学生会インターネットシンポジウム, 3-01, 2024.