

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：11201

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14730

研究課題名（和文）金属筐体内における感知できない受電端末への電波を用いた超高効率無線給電技術の確立

研究課題名（英文）Establishment of ultra-high efficiency microwave wireless power transmission technology for undetectable power receivers in metal housing

研究代表者

村田 健太郎 (Murata, Kentaro)

岩手大学・理工学部・助教

研究者番号：20848030

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、輸送・産業機器を想定した金属筐体内のデバイスに対し、電波を用いてハーネスレスで給電可能とする技術を確立した。

提案法では、信号源を持たない寄生アンテナのインピーダンス制御により、筐体内の電磁界分布を電子的に制御することができる。そして、電磁遮蔽空間と寄生アンテナの特質を活用することで、間接的に給電効率を推定するアルゴリズムを発明し、位置探知困難な受電器に対しフィードバック不要で高効率給電を可能とした。提案法の実証に向け、極低損失（約 -0.5dB）かつ全域位相制御可能なインピーダンス自動制御装置を開発し、筐体内の位置に依らず平均給電効率約50%の無線給電が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本邦では、2022年5月に無線給電実用化に向け改正省令が施行され、同技術の市場規模は2031年に約1兆5500億円に達するものと予測されている。一方、電池切れで探知困難なデバイスに対する給電方法は国内外で未だに確立されておらず、同技術普及の律速となっていた。

これに対し提案法では、受電器からのフィードバック不要で約50%の無線給電効率を達成し、上記問題の有効な解決手段となる。提案技術実用化の暁には、ハーネスレス化による輸送・産業機器の軽量・低燃費・低コスト化、電源管理フリー化によるアクセス困難な極限環境における作業ロボットの自立運転支援など、多岐産業分野に渡り波及効果をもたらすことが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study established a harness-less power-supply technique using radio waves to devices in metal enclosures intended for transportation and industrial machinery.

In the proposed method, the electromagnetic field distribution in the enclosure can be electronically controlled by adjusting the impedance of parasitic antennas with no signal source. By utilizing the unique characteristics of the electromagnetically shielded space and parasitic antennas, an algorithm to indirectly estimate the transfer efficiency was developed, enabling a highly efficient power supply to difficult-to-detect receivers without any feedback.

To demonstrate the proposed method, an automatic impedance control system with extremely low loss (approximately -0.5 dB) and full-range phase controllability was developed, and wireless power transfer with an average transfer efficiency of approximately 50% was demonstrated regardless of the receiving position within the enclosure.

研究分野：通信工学

キーワード：無線電力伝送 マイクロ波 空洞共振 寄生アンテナ 電磁遮蔽 負荷変調 Sパラメータ 整合回路

1. 研究開始当初の背景

(1) 輸送用機器の軽量・低燃費化、産業機械の低コスト化や、核・宇宙施設等の極限環境へのアクセス困難性のため、上記閉空間内部の電子機器の配線・電源管理フリー化が求められている。そこで金属筐体の電波閉込効果と電波の反射・回折特性により、見通し外でも位置制約無く高効率な電力供給が見込める、筐体内無線給電技術の実現が多岐分野で期待されている。

(2) これまでに我々は、多数アンテナが発する電波の位相制御により、開空間の所望点に電波を集束可能な無線給電システムを開発し、受電器 6 台の充電時間を従来比 1/40 に短縮成功している (文献①)。しかし電磁遮蔽空間では、空間内の反射電波の大半を多数送電アンテナが再回収し信号源負荷で自己消費するため、「送電アンテナが多いほど給電効率が高い」という従来理論が成立しない。

(3) 一方、東大等の研究グループが、単一コイルと共振器だけを用い、金属筐体内の (準) 閉空間に様な磁界を生成し、受電位置に依らず 50%超の給電効率を達成可能であることを示した (文献②)。しかし、共振器の最適位置や固有共振周波数は筐体設計に応じ制限されるため、あらゆる閉空間シーンへの万能的な応用は困難である。

(4) これに対し南航大 (中国) が、信号源を持たない寄生アンテナの可変無損失負荷を制御し、伝搬環境自体を最適化することで筐体構造に依らず給電効率を向上する有力な手法を提案している (文献③)。しかしこの最適化過程には 2 つの致命的な欠点が存在する。

(5) 第 1 に、受電器から受電情報のフィードバックが必要な点である。現実には受電器が電池切れのケースは不可避免的に存在し、この場合フィードバック不能となり本手法は破綻する。第 2 に、総当り試行送電と無数の負荷条件切替を伴う点であり、これにより不要なエネルギー消費と電子システムの急激な摩耗を招く。

(6) このように無線給電技術の研究開発が激化する一方で、探知困難な電池切れの端末に対して高効率に無線給電を行う手法は世界的にも未だ報告されていない。したがって、この問題を解決することは、学术界のみならず産業界においても同技術実用化の上で極めて重要である。

2. 研究の目的

(1) 以上の課題に対し本研究では、受電情報フィードバック不要で、最小回数の試行送電しか必要としない、究極にシンプルな無線給電技術を提供することを目的とする。図 1 に提案法とシステム構成の概念図を示す。前述の通り、受電器からのフィードバックが得られない以上、送受電器間の伝搬特性の推定は不可能である。そこで提案法では以下に示す 2 つのキーアイデアに基づき、給電効率を最大化する負荷値を特定する。

(2) 第 1 に、「反射最小化=伝送効率最大化」の原理の応用である。電磁遮蔽された筐体内では、寄生アンテナ (parasitic antenna, Px) が無損失と仮定すると、電波が消失するのは送受電アンテナ (transmitting/receiving antenna, Tx/Rx) のどちらかである。つまり送電機での反射最小化は受電器への伝送効率最大化と等価であり、受電情報フィードバックが無くとも、送電機の反射電力を評価するだけで原理的に高効率給電可能な負荷を特定できる。

(3) 第 2 のアイデアは、最少回試行処理による反射電力の予測である。第 1 の原理だけでは、送電機において最小の反射電力を得るために、依然総当り試行処理を必要とする。そこで、寄生アンテナの負荷 (具体的には負荷位相) を切り替えた時の反射信号の変動を測定することで、送電アンテナの反射特性に影響を与えている特徴量 (具体的には、寄生アンテナに関する反射と相互結合を表す S パラメータ) を推定する。そしてこれらの S パラメータを用いることで、任意の負荷値に対する反射電力の応答曲線を完全に予測可能とする。これにより実際に反復的な試行処理を行わずとも、予測曲線から反射電力を最小化する負荷値を最小回数の試行により特定可能となる。

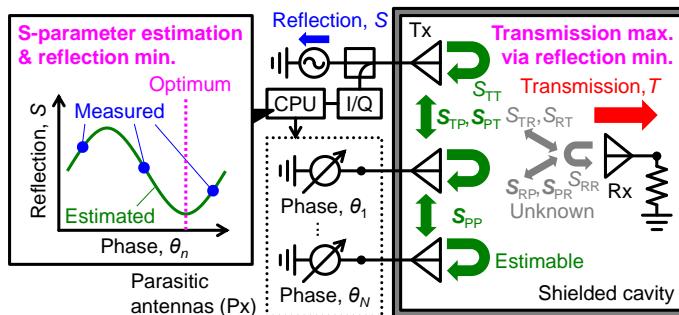


図 1 提案法とシステム構成の概念図

### 3. 研究の方法

(1) 図2に実証実験に用いた実験系の写真を示す。筐体は、300 mm角のアルミ製の底板と200 mm立方の銅製筐体を銅テープで貼り付けて構成され、底板と天板にアンテナの挿入孔を設けた。

(2) アンテナには、素子長30 mmの真鍮製モノポールを用いた。Txと2つの寄生アンテナPx1およびPx2は、底板中央部に93.3 mmおよび30.5 mmの間隔を空けて配置した。Rxは、天板に設けられた9つのアンテナ孔のいずれかに挿入され、受電器位置毎の伝送特性を評価した。

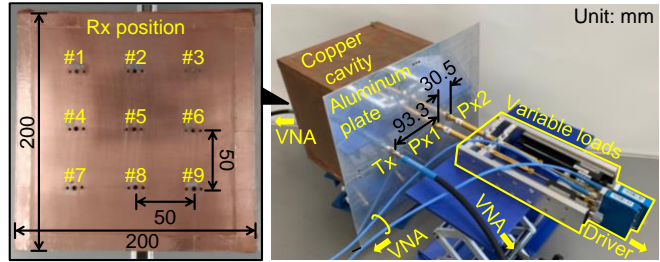


図2 実験系の写真

(3) TxおよびRxは、ベクトルネットワークアナライザ (VNA) に接続され、Txへの反射およびRxへの伝達成分を同時測定可能である。ただし、提案法適用時は、反射情報のみを使用するものとし、伝達情報は評価目的にのみ使用した。なお測定周波数は2.4 GHzとした。

(4) 図3に示すsingle-pole double-throw (SPDT) スイッチ付属ラインストレッチャー型自動負荷位相制御装置をPxに接続した。本実験では、常開型SPDTの2つの制御ピンに選択的にバイアスすることでPxの負荷を切替でき、無バイアス時は開放負荷、一方のピンをバイアス時はリアクタンス負荷、他方のピンをバイアス時は整合負荷に接続される。

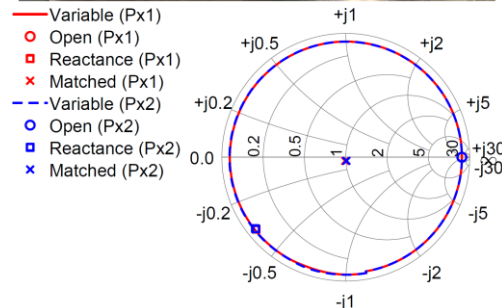
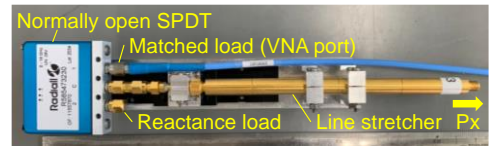


図3 自動負荷位相制御装置と負荷特性

(5) ここで整合負荷として校正済みのVNAポートを代用しており、整合状態を満たすと同時にSPDTを介した系のSパラメータを測定可能となっている。このようにして測定されたPxのSパラメータは、提案法の比較対象として、既知のSパラメータを規範とする従来法(文献④)の適用を想定した最大伝達点探索の際に用いられる。

(6) 本実験では、上記の自動負荷制御機能を利用しSパラメータ推定を行った後、最小反射点探索に基づき最適な負荷位相を特定する。そして、事前に作成したラインストレッチャー長に対する位相特性のルックアップテーブルを参照しながら、ラインストレッチャーを伸縮させ、負荷位相を前述の最適値へとチューニングしたときの伝送特性を評価する。

### 4. 研究成果

(1) 図4にRx位置#1における負荷位相に対する推定反射特性、実測反射特性、実測伝達特性のカラーマップを示す。図中、△、▽、○のマークはそれぞれ、従来法(文献④)による最大伝達点、Px1およびPx2両方、Px1又はPx2のいずれか片方を用いた時の提案法による最小反射点を示す。図から、提案法による推定反射特性が実測反射特性とよく一致していることが分かる。さらに、達成可能な最大伝送効率は、提案法により推定された最小反射点の近傍で観測されている。

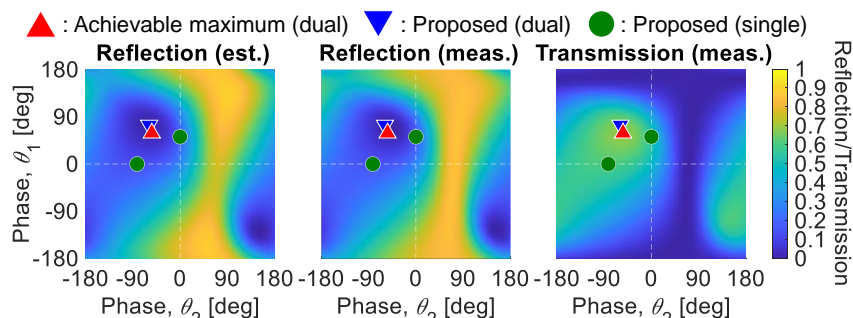


図4 負荷位相に対する推定反射特性(左)、実測反射特性(中)、実測伝送特性(右)



ることが分かる。これらの結果より、提案する S パラメータ推定法と反射最小化による伝送効率最大化の原理が良好に機能することが実証された。

(2) 図 5 は、各 Rx 位置における伝送効率を示している。図中、黒とマゼンタのバーはそれぞれ、既知の S パラメータを規範とする従来法（文献④）と推定 S パラメータを規範とする提案法の伝送効率を示す。図から、提案法により従来法に匹敵する伝送効率を得られ、平均で約 50%と高い伝送効率を達成することができた。

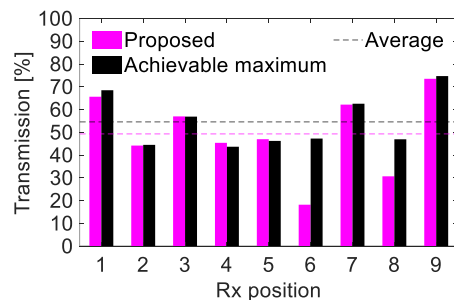


図 5 受電位置毎の伝送効率の比較

(3) 以上の結果は、従来必要不可欠とされていた S パラメータの事前測定や受電器からのフィードバックを必要とせずとも、提案法により従来法同等の給電性能を実現できることを証明したものである。これにより受電器が電池切れの場合、給電環境が変化・給電対象が移動する場合、給電対象のポートにアクセス困難な場合等、より現実的なシナリオへの適用が可能となった。よって、提案無線給電技術は、配線・電源管理フリー化が求められる産業用途の多岐アプリケーションに波及効果をもたらすことが期待され、産業 IoT 化の加速的発展に貢献することができる。

(4) なお本研究過程で、筐体内の損失性媒体又は筐体外への電波漏洩による損失や送電ポートにおいて残存する反射損失により伝送効率が頭打ちとなる新たな課題にも直面した。これに対し、提案法を多素子の寄生アンテナへと拡張する手法、伝送効率を直接的に推定・最大化する手法、整合回路との併用により伝送効率の更なる向上を可能とする手法を新たに考案した。これらにより不測の電力損失を最小限に抑制でき、給電効率を極限まで向上可能であることを電磁界シミュレーションにより明らかとし、国内の学会・研究会において研究報告を行った。今後、競争的研究費を獲得しながら、これらの新たな研究テーマについて実証実験を行う予定である。

(5) 代表的な研究成果として、本研究に関連し国際学術誌 IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters に論文 2 編が掲載され、マイクロ波分野 3 大国際会議の 1 つである Asia-Pacific Microwave Conference 2022 において招待講演を実施した。更に、電磁波分野主要国際会議である 2022 URSI Atlantic and Asia Pacific Radio Science Meeting における Young Scientist Award の受賞、電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会における 2 件の発表による学生奨励賞の受賞（指導学生の受賞）等に代表されるように、本研究成果は学術的にも高く評価されている。

#### <引用文献>

- ① K. Murata, T. Mitomo, M. Higaki and K. Onizuka, “A 5.8-GHz 64-Channel Phased Array Microwave Power Transmission System Based on Space-Time Beamforming Algorithm for Multiple IoT Sensors,” in Proc. 2018 48th European Microwave Conference (EuMC), Madrid, Spain, 2018, pp. 170-173.
- ② T. Sasatani, M. J. Chabalko, Y. Kawahara and A. P. Sample, “Multimode Quasistatic Cavity Resonators for Wireless Power Transfer,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 2746-2749, 2017.
- ③ X. Wang, C. Chen, H. Wong and M. Lu, “A Reconfigurable Scheme of Wireless Power Transmission in Fully Enclosed Environments,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 2959-2962, 2017.
- ④ S. Nimura, D. Furuusu and M. Tamura, “Improvement in Power Transmission Efficiency for Cavity Resonance-Enabled Wireless Power Transfer by Utilizing Probes With Variable Reactance,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 68, no. 7, pp. 2734-2744, July 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 Murata Kentaro, Takiya Keito, Kondo Shinnosuke, Honma Naoki	4. 巻 21
2. 論文標題 Performance Improvement in Implicit Cavity Resonant Wireless Power Transfer Using Dual Parasitic Antennas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters	6. 最初と最後の頁 1273 ~ 1277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LAWP.2022.3164565	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 Murata Kentaro, Kondo Shinnosuke, Takiya Keito, Honma Naoki, Chida Tsukasa	4. 巻 20
2. 論文標題 Receiver-Feedback-Free Cavity Resonant Wireless Power Transfer Based on In Situ S-Parameter Estimation Using a Parasitic Antenna	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters	6. 最初と最後の頁 1923 ~ 1927
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LAWP.2021.3100535	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15件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kentaro Murata, Naoki Honma
2. 発表標題 Concept of Reconfigurable Intelligent Surface for WPT: Calibration, Estimation and Synthesization
3. 学会等名 2022 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kentaro Murata
2. 発表標題 Dilemma of Microwave Wireless Power Transfer and Fully Passive Receiver Finding Utilizing Multi-Antenna Technologies
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀧谷慧斗, 村田健太郎, 本間尚樹
2. 発表標題 寄生アンテナを用いた空洞共振無線電力伝送における伝送効率推定法
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀧谷慧斗, 村田健太郎, 本間尚樹
2. 発表標題 寄生アンテナと整合回路を併用した空洞共振無線電力伝送法における伝送効率最大化
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤慎之介, 村田健太郎, 本間尚樹
2. 発表標題 マイクロ波電力伝送に向けた電力及び空間平均に基づく複数レクテナの受動DoA推定
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村田健太郎, 瀧谷慧斗, 本間尚樹
2. 発表標題 N素子の寄生アンテナを用いたインプリシット空洞共振無線電力伝送法に関する考察
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀧谷慧斗, 近藤慎之介, 村田健太郎, 本間尚樹
2. 発表標題 寄生アンテナと整合回路の併用によるインプリシット空洞共振無線電力伝送法における伝達効率最大化
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古内航紀, 村田健太郎, 本間尚樹
2. 発表標題 マイクロ波発泡成形における最適金型構造に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村田健太郎, 近藤慎之介, 本間尚樹
2. 発表標題 マイクロ波無線電力伝送に向けた複数レクテナの完全受動チャネル推定法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀧谷慧斗, 近藤慎之介, 村田健太郎, 本間尚樹
2. 発表標題 Sパラメータオンライン推定に基づく空洞共振無線電力伝送法
3. 学会等名 電子情報通信学会無線電力伝送研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村田健太郎, 近藤慎之介, 本間尚樹
2. 発表標題 マイクロ波無線電力伝送のジレンマと完全受動チャネル推定法
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kentaro Murata, Shinnosuke Kondo, Naoki Honma
2. 発表標題 Fully Passive Multi-rectenna Channel Estimation for Microwave Wireless Power Transfer
3. 学会等名 3rd URSI Atlantic / Asia-Pacific Radio Science Meeting - 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村田健太郎, 千田司, 近藤慎之介, 本間尚樹
2. 発表標題 寄生アンテナを用いた受電機フィードバック不要な筐体内無線電力伝送法の実験的評価
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsukasa Chida, Kentaro Murata, Naoki Honma
2. 発表標題 Feedback-Free Wireless Power Transfer Technique in Conductive Enclosure Using Parasitic Antennas
3. 学会等名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 瀧谷慧斗, 近藤慎之介, 村田健太郎, 本間尚樹
2. 発表標題 双寄生アンテナを用いたフィードバック不要な空洞共振型無線電力伝送法
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

URSI AT-RASC 2022 Young Scientist Award受賞 <a href="https://www.iwate-u.ac.jp/cat-research/2022/06/005521.html">https://www.iwate-u.ac.jp/cat-research/2022/06/005521.html</a> 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究専門委員会学生奨励賞受賞 <a href="http://www.eec.iwate-u.ac.jp/cgi-bin/news.cgi?f1=1673956482&amp;f2=staff">http://www.eec.iwate-u.ac.jp/cgi-bin/news.cgi?f1=1673956482&amp;f2=staff</a>
--

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			
スウェーデン	ルンド大学			