

ワイヤレス充電システムの高周波電源開発と 社会実装に向けた取り組み

Development of RF Generator for Wireless Charging Systems and Its Implementation in Society

唐川 祐一郎^{*1}
Yuichiro Karakawa

木下 岳^{*1}
Takashi Kinoshita

山崎 広行^{*1}
Hiroyuki Yamazaki

鶴谷 直樹^{*1}
Naoki Tsurutani

竹内 裕人^{*1}
Hiroto Takeuchi

東 純史^{*2}
Yoshifumi Azuma

小原 大輝^{*1}
Daiki Obara

〈概要〉

マイクロモビリティ向けに開発した電界結合型ワイヤレス充電システムに関して、高周波電源の技術開発と社会実装に向けた実証実験の成果を報告する。既存のMHz帯高周波電源をワイヤレス給電用途として用いる場合、大型なサイズ、変換効率の低さが課題となる。特に、数100 W程度の低消費電力のアプリケーションに適用する場合、小型で高効率な高周波電源が求められる。そこで、本報告では解決策としてGaNデバイスを用いたE級インバータ技術開発を行い、高い変換効率を実現した。また、社会実装に向け制度化の動きをまとめるとともに電動マイクロモビリティ及びワイヤレス充電の有用性を示すための実証実験を行ったので、これを報告する。

1. はじめに

ワイヤレス給電(Wireless Power Transfer, WPT)技術は、電力供給の利便性を飛躍的に向上させることが期待される次世代技術として注目されている。この技術は、電気自動車(EV)の非接触充電やスマートフォン、医療機器などの分野での応用が進んでいる。

特に、エネルギー問題を背景とし乗用車の電動化が加速しているため、EVへのワイヤレス給電の期待も大きくなっている。一方、日本においては2010年代に世界に先駆けて電気自動車へのワイヤレス給電の制度化が進められたが、当時は電気自動車自体の普及の遅れもあり製品化が進まなかった。2024年現在、EV普及及びEVワイヤレス給電の社会インフラ化を推進する団体として新たに「EVワイヤレス給電協議会」(EVワイヤレス給電を社会インフラとして整備していくため、民間企業及び研究機関が協力する場として、また、行政機関と業界をつなぐ窓口として設立された団体)が立ち上げられ、製品化・事業化に向けた活動が活発化している。

また、近年ではEVだけでなく様々な形態の電動化されたモビリティ・ロボットが増加している。2023年には改正道路交通法が施行され、歩道や公道の領域に新たな車両区分として、「移動用小型車」、「遠隔操作型小型車」、そして電動キックボードが代表的な「特定小型原動機付自転車」が誕生した。

これらを背景に本稿では、EVよりも低速で歩道・施設、公道領域で使われるマイクロモビリティに着目し開発を行った電界結合型ワイヤレス充電システムと社会実装に向けた実証実験の取り組み成果に関して報告する。

2. WPTの制度化状況に関して

2.1 国際的なWPT制度化の状況

WPTの制度化は、電磁波の周波数利用と安全性の観点で国際的な規制やガイドラインの整備によって進められている。国際電気通信連合(ITU)や国際電気標準会議(IEC)が規制の策定を主導しており、特に、周波数帯の利用に関してはワイヤレス給電が他の無線通信と干渉しないよう配慮が求められている。表1に地域別の規制、安全性基準、EMC規制に関してまとめた。

表1 地域別のワイヤレス給電に関する規制
Wireless power transfer regulations by region.

項目	米国	欧州	日本
規制機関	FCC	CEマーキング, RED, EMC指令	総務省, 経済産業省
安全性基準	IEEE C95.1, UL	ICNIRP, IEC 62368-1	電波防護指針, PSE
EMC規制	FCC Part 15/18	EN 55011, EN 301 489 シリーズ	電波法 (場合により, VCCI基準)

^{*1} 研究開発本部 エレクトロニクス研究所

^{*2} 古河AS株式会社 技術企画部

米国では、WPT装置に関する規制は主に連邦通信委員会(FCC)によって管理されている。FCCの規定は、無線機器の運用に関する基準を定めており、WPT技術はFCC Part 15(意図しない放射装置)やPart 18(産業・科学・医療機器)に基づく認証が求められる。これにより、装置が無線通信や他の電子機器への干渉を防止することが義務付けられている。安全性に関しては、IEEE C95.1規格が人体への電磁波曝露制限を定めており、これに従うことが求められる。また、UL(Underwriters Laboratories)は、WPT装置が発火や感電などのリスクを回避するための安全試験を行い、適切な安全基準を提供している。EMC規制に関してはFCCの規制を遵守する必要がある、周囲の無線通信機器に干渉しないように設計されている。これらは、低周波数帯域(数十kHz～数MHz)の使用が一般的で、装置からの放射を適切に制御することが求められる。

欧州では、WPT装置に関する規制は主にCEマーキングを通じて管理されている。CEマーキングは、製品が欧州経済地域(EEA)のすべての規格に適合していることを示すものであり、WPT装置にはRadio Equipment Directive(RED)やEMC指令に基づく適合が求められる。これにより、装置の無線通信性能や電磁適合性が確保されることとなる。また、安全性に関しては、低電圧指令(LVD)などが適用される。安全性の規制は、ICNIRP(国際非電離放射線防護委員会)のガイドラインを基に人体への電磁波曝露限度を定めており、これに基づき装置が設計される。また、IEC 62368-1規格が適用され、WPT装置の構造的な安全性や温度上昇によるリスクを管理するための基準が設定されている。EMC規制については、EN 55011(工業・医療機器のエミッション規格)やEN 301 489シリーズ(無線機器のEMC基準)が適用される。これらの基準は、周囲の無線機器や通信機器への干渉を最小限に抑えることを目的としており、WPT装置の設計において重要な役割を果たしている。

日本においては、WPT装置は主に総務省及び経済産業省によって規制されている。電波法ではWPT装置は「高周波利用設備」として位置付けられる。高周波利用設備が出す不要輻射は混信や雑音の原因となり、他の無線通信に妨害を与える可能性があることから「設置許可」を受ける必要がある。例外として、50 W以下の装置に関しては設置許可の申請が不要とされている。また、インバンドで伝送電力に変調を掛け情報通信を行う場合は「特定無線設備」として扱われ、技術基準適合証明(技適)の取得が求められる場合もあるため設置には注意が必要である。安全性に関しては、電波防護指針が策定されており、これに基づいてWPT装置の電磁波曝露が管理されている。更に、PSE(電気用品安全法)に基づく電気機器の安全試験も必要であり、火災や感電などのリスクを回避するための基準が適用される。EMC規制については、主に電波法やVCCI(情報通信審査協議会)の基準に従い、不要な電波の発生を抑制することが求められる。

2.2 日本国内のWPT制度化状況¹⁾

2.2.1 近接型WPT装置の法的位置づけ

日本では電波法第100条に基づき、10 kHz以上の高周波電流を利用する設備は高周波利用設備とみなされ、これらの設備は不要放射、伝導ノイズが生じ、放送や無線通信に妨害を与えるおそれがあるため設備の設置にあたり総務大臣の許可を受けるよう定められている。WPT装置も例外ではなく、50 W以上の電波を利用する装置は電波法施行規則45条に基づき「高周波利用設備」として扱われ装置毎個別の設置許可が必要となる。設置の許可が不要となるのは、型式指定された、若しくは伝送電力が50 W以下のWPT装置である。

日本では世界に先駆けてWPTの制度化が進められている。平成28年3月15日総務省令第15号が公布・施行され、電波法施行規則第45条、46条などが省令改正され、図1に示すように、

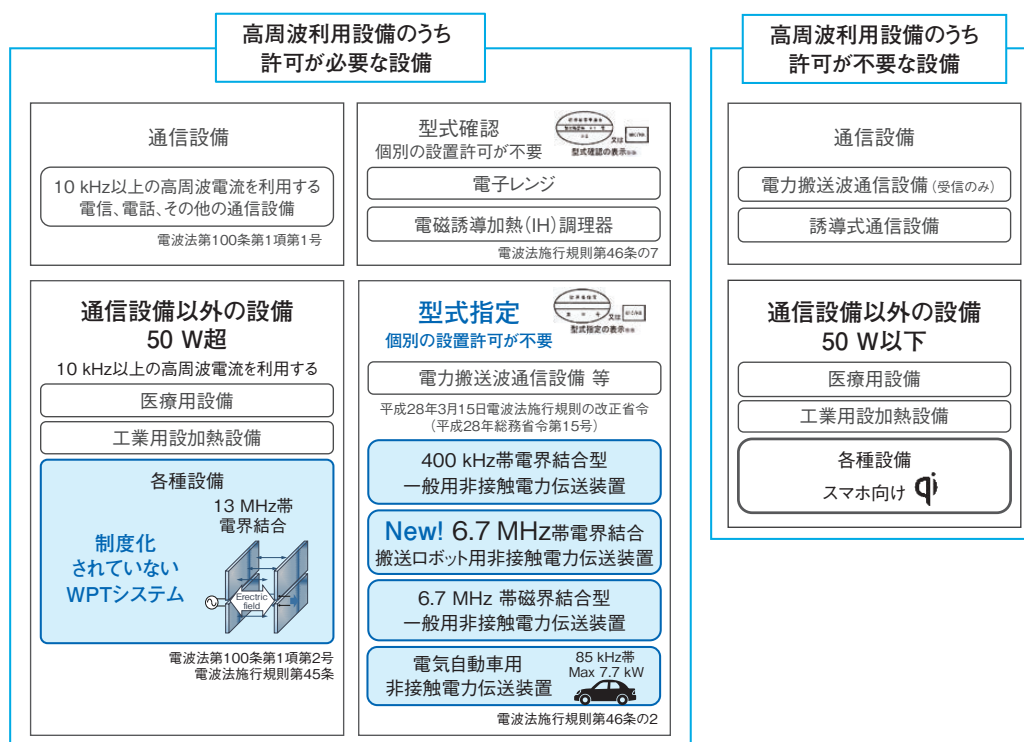


図1 近接型WPT装置の法的位置づけ
Regulatory position of near-field wireless power transfer.

型式指定されたWPT装置が追加されている。型式指定されたWPT装置は、個別の設置申請が不要となり手続きが簡易化されるため、広く販売・利用され普及することが期待される。ただし、これらの型式指定を受けるためには、平成28年総務省告示第69～71号に基づき、妨害波電圧・不要発射の測定法や電波強度に対する安全施設などの基準に適用する必要がある。

最近では6.7 MHz帯で電界結合方式を用いる「搬送ロボット用非接触電力伝送装置」が新たな方式として追加されている。これにより、工場や物流拠点で使用される自動搬送車(AGV)やロボットがケーブル不要で充電や電力供給を受けられるようになる。特に、稼働中でも電力供給を継続できる点で、労働人口の減少や物流業界の課題解決策として注目されている。今後は急速充電や産業機器向けの大電力化対応の制度化も進んでいくと考えられる。

2.2.2 空間伝送型無線電力伝送の法的位置づけ

IoT機器、センサ向けに1 W程度の電力伝送を行う空間伝送型無線電力伝送装置は「特定無線設備」として扱われる。令和4年5月26日の令和4年総務省令第38号「電波法施行規則等の一部を改正する省令」により省令改正が施行され、空間伝送型無線電力伝送には920 MHz帯、2.7 GHz帯、5.4 GHz帯の周波数が割り当てられ、無線電力伝送用の構内無線局として開設することが可能となった。特に、920 MHz帯については既に特定無線設備として法整備が行われており、電波法に基づく技術基準に適合していることを示す表示である技適マークが付されている場合、無線局免許手続の省略が可能で手続きが大幅に簡略化された。更に、2024年現在も更なる省令改正が検討されており、2.4 GHz帯と5.7 GHz帯の周波数の追加も検討されている。

3. 電界結合型ワイヤレス充電システムの開発

3.1 ワイヤレス充電システムに関して

ワイヤレス充電システムの基本的な構成を図2に示す。高い周波数の交流電力を発生させる高周波電源、無線で電力を送るカプラ、整流及び充電制御を行う受電回路で構成されている。当社では商用電源からバッテリーの充電まで行うトータルソリューション開発を行っている。本項では、当社技術の特長である、電界で電力伝送を行う電界結合型カプラ及び高周波電源内にある直流を高周波に変換するRFインバータを中心に報告を行う。

3.2 電界結合型カプラの特長

電界結合型WPTのカプラ構造は図3に示すようなメアンダライン形状 a) や平板電極板形状 b) などが検討されている。メアンダライン形状はパターン自身のインダクタンスとキャパシタンスによる共振を利用するため、インダクタンスの追加が必要となり平面構造をとることができる。しかし、伝送線路の長さ、パターン構造から高周波電流を流す際に表皮効果、近接効果の影響を受け高周波帯での損失が増大する。

一方、平板電極を用いる場合、共振用コイルなどインダクタンスの追加が必要となるが、メアンダラインのようなパターンが不要で高周波帯での損失を小さくできる。共振現象を積極的に利用することで、電極間に高電圧を発生させており、電極自体に流れ込む電流を小さくできている。これにより、電極材料は銅よりも電気伝導率が低いアルミニウム、鉄などの安価な金属材料で構成することが可能である。カプラは平板電極と共振コイルを接続したシンプルな構成で、金属箔などの電極により軽量かつフレキシブルな構造が可能である。

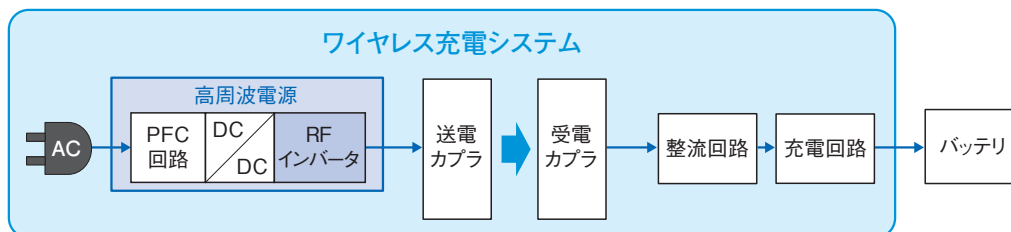


図2 ワイヤレス充電システムの構成
Wireless charging system configuration.

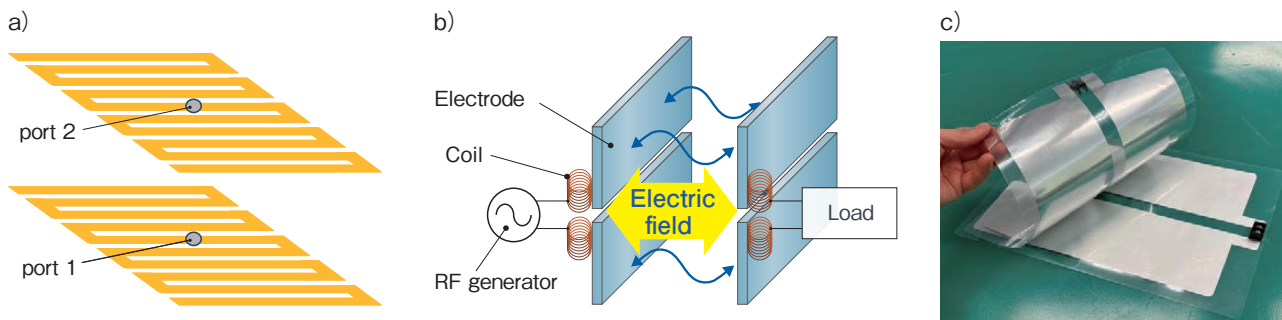


図3 電界結合型カプラの模式図
a) メアンダライン形状 b) 平行平板形状 c) アルミニウム箔材で構成
Schematic diagram of the electric field coupling coupler.
a) Meander line shape. b) Parallel plate shape. c) Composed of aluminum foil.

3.3 RFインバータの開発

3.3.1 インバータ技術の概要

インバータ (Inverter) 技術は、直流 (DC) 電源を交流 (AC) に変換するデバイスや回路のことを指す。基本的な動作原理は、直流電源から取り出した電圧を一定の周期で逆転させ、交流の波形を生成することである。これにより、直流から得られたエネルギーを異なる周波数や電圧の交流電源に変換することができる。MHz帯を用いる WPT 装置では、医療、産業、科学分野で汎用的に使用するために割り当てられたライセンス不要の ISM 帯 (Industrial Scientific and Medical Band) にある 6.78 MHz, 13.56 MHz, 27.12 MHz などを利用することが多い。これらの高周波電力を供給する装置は高周波電源や RF 電源 (Radio Frequency Power Supply) といい、これに組み込むインバータを「RF インバータ」と呼んでいる。

3.3.2 E級インバータに関して

パワー半導体と回路トポロジの進化により電源装置の高周波化が進み、変換効率向上や小型化に寄与している。高周波化によりコイルやトランスの巻き数が減り、損失低減や冷却設計の簡素化が可能となる。これにより、小型・軽量化が求められる携帯電話の充電器や車載機器などで重要な技術となっている。

スイッチングパワーアンプは信号や電力を効率的に増幅する

装置で、音響、通信、医療、自動車分野で活用されている。スイッチング損失を最小化するため、ZVS (Zero Voltage Switching) や ZCS (Zero Current Switching) を採用し、放熱板やファンを不要とする小型化・省スペース化を実現する。スイッチングパワーアンプの代表的回路として E 級アンプが挙げられる。E 級アンプは 1975 年に Sokal によって発表されたもので、スイッチング素子が 1 つのシンプルな回路構成で高周波・高効率なインバータを実現できるため応用が期待されている。コンベンショナルな E 級インバータの回路図とその動作原理を図 4 に示す。FET の電圧電流波形のオン・オフの切り替わり 4 か所のうち、3 か所がゼロとなる条件で理論的に数式を解くことで、回路定数を設計することが可能である。理想的に動作した場合、FET の電圧と電流のどちらかが常にゼロにできるのでスイッチング損失により電力を消費しないため、高周波でスイッチングしても効率を高くすることができる。

3.3.3 電動アプリケーションの充電電力に関して

ワイヤレス充電システムを開発するにあたり、電動化されたモビリティ、ドローンやロボットの一般的な充電電力を表 2 にまとめた。産業用途では大きな電力が必要となるが、家庭用途は 1000 W 弱ほど必要だということが判る。本報告では比較的小さな充電電力が求められる領域で高効率化を目指した。

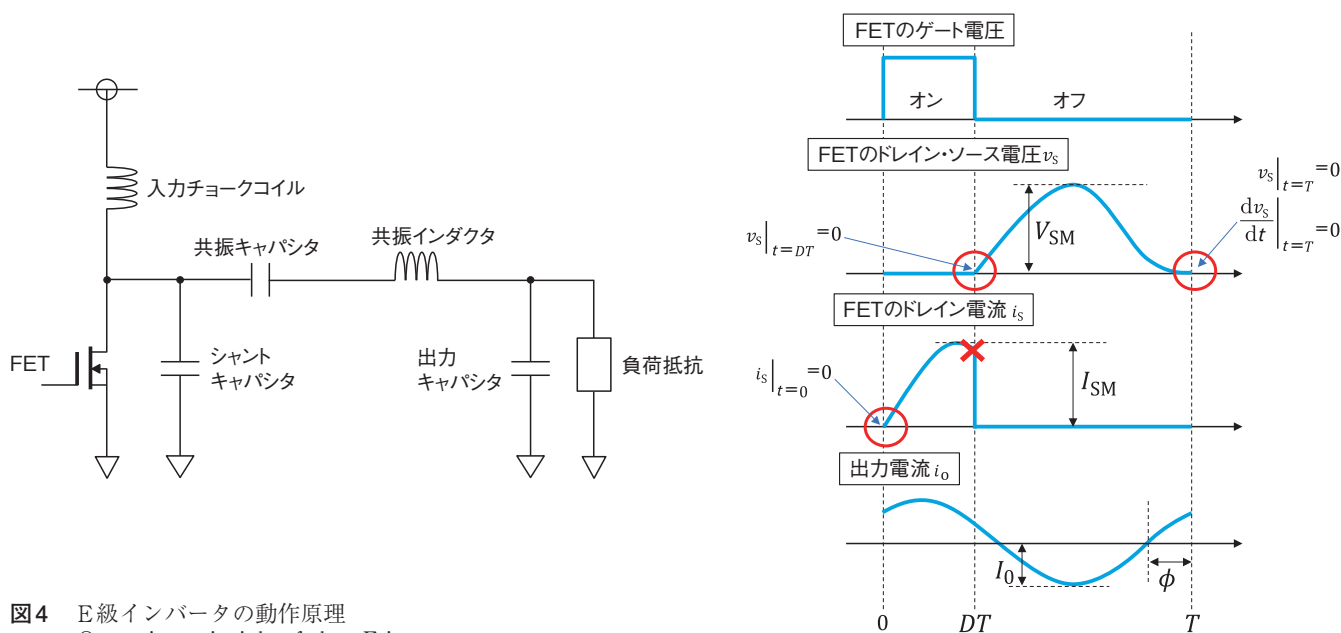


図4 E級インバータの動作原理
Operating principle of class-E inverter.

表2 電動アプリケーションの一般的な充電電力の一覧
General charging power list for electrified applications.

分類	機器例	一般的な充電電力	備考
家電ロボット	掃除ロボット (例: Roomba), 芝刈りロボット	20 ~ 150 W	家庭用で省エネルギー設計が多い
小型ドローン	ホビー用ドローン (例: DJI Mini シリーズ)	50 ~ 300 W	軽量型で小容量バッテリーを使用
モビリティ	電動スクーター, 電動車いす	200 ~ 1000 W	大型バッテリー搭載のもののほど高い充電電力が必要
産業用ドローン	農業用ドローン, 点検用ドローン (例: DJI Matrice)	500 ~ 2000 W	長距離運用や重荷物運搬のため、大容量バッテリーを搭載
産業用ロボット	溶接ロボット, 組み立てロボット	1000 ~ 5000 W	工場内で高負荷作業を行うため、非常に高い充電電力が必要

3.3.4 E級インバータの設計

50 W, 200 Wで最適化したE級インバータの開発事例を報告する。目標仕様を表3に示す。ZVS, ZCSが成立するように電圧電流波形を定義し、計算を解くことで素子値の設計を行った。開発したE級インバータの主回路の回路図と計算で求めた素子の設計値及び実装した部品の素子値を図5、表4に示す。本開発ではGaN-FETを採用しており、FETを交換することで50 W, 200 Wで高効率な動作を実現している。

表3 E級インバータの目標仕様
Target specifications for class-E inverters.

項目	50 W版	200 W版
インバータ出力	50 W	200 W
周波数	13.56 MHz	
出力インピーダンス	50 Ω	
ドレイン効率	>90%	

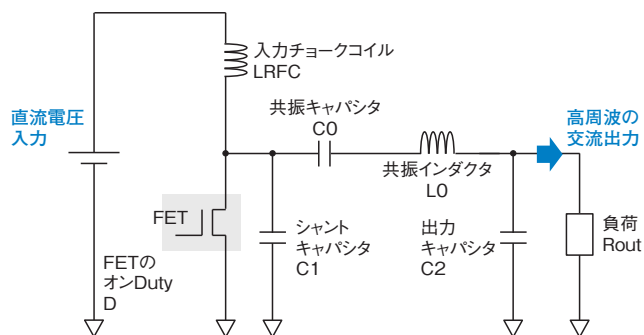


図5 設計したE級インバータの回路図
Circuit diagram of the class-E inverter.

表4 回路定数
Circuit parameters.

パラメータ	記号	設計値	実装品	単位
負荷	Rout	50	50	Ω
出力キャパシタ	C2	540	540	pF
シャントキャパシタ	C1	373	302	pF
共振キャパシタ	C0	810	810	pF
共振インダクタ	L0	561	564	nH
入力チョークコイルのインダクタ	L _{RFC}	10	10	μ H

3.3.5 E級インバータの実機評価

開発したE級インバータの波形・効率測定を行った。開発したE級インバータ及び計測系を図6、7に示す。

図8に波形測定結果を示す。GaNのドレイン・ソース電圧波形はスイッチのオンオフ時に電圧値及び傾きがゼロとなっており期待した通りの波形を観測できた。また、出力電圧波形も正弦波状となっておりE級動作を実現できていると考えられる。

出力電力波形をフーリエ変換し信号スペクトラムを解析した結果を図9に示す。この結果、2～4倍波の高調波スプリアスを含むことが分かった。実際の回路ではFETのターンオンとターンオフ時間の違いもあるため、信号源のDuty比を50%ではなく調整を加えていることから偶数次のスプリアス成分が観測され

ていると考えられる。また、元々の信号源が矩形波であることから奇数次の成分も見られる。過去の検討からこれらのスプリアスはローパスフィルタを出力部に取り付け対策可能であることが判っている。本インバータにおいてもローパスフィルタを設計・製作し高調波成分が出力されないようにする必要がある。

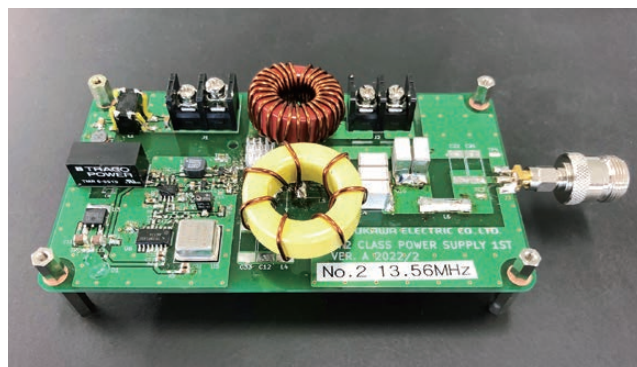


図6 開発したE級インバータ (サイズ: 145 × 80 × 25 mm)
The developed class-E inverter.



図7 計測系
Measurement system.



※GaNのゲート電圧はGNDのブローピングが長く波形にひずみが見られる
※デスキュー未実施のため測定波形には位相ずれ有り

図8 E級インバータの出力波形 (50 W版)
Output waveform of the class-E inverter at 50 W output.

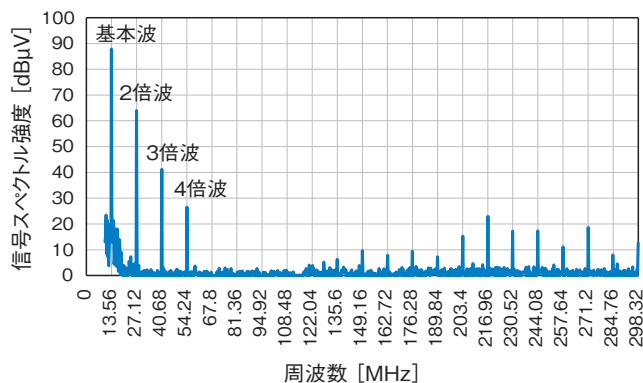


図9 E級インバータの50 W出力時の電力波形のスペクトル
Power spectral of the output waveform of the class-E inverter at 50 W output.

図10に出力電力とドレイン効率を示す。搭載するGaN-FETを選定し50 W版と200 W版を評価している。50 W版では自然空冷で熱設計が成立する最大出力は50 Wで、その時のドレイン効率91%を達成している。200 W版では最大出力は200 Wで、出力100 W前後でドレイン効率95%を達成している。表5、図11に本成果と先行事例を併記したものを示した。ここから、出力電力が小さい領域で高効率なインバータを設計できていることが分かる。今後はインバータ単体の出力電力向上と、電力合成技術などによる大出力化を進め、充電電力が大きなアプリケーションへの適用を図っていく。

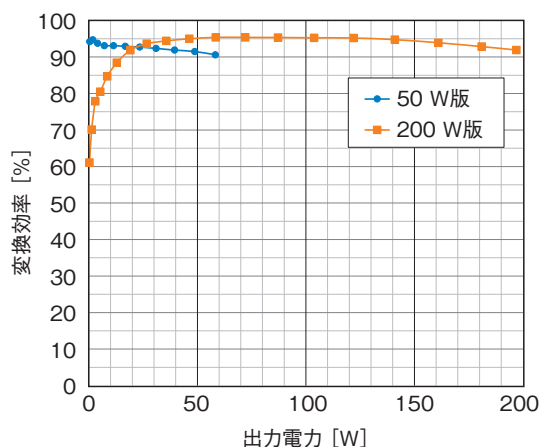


図10 E級インバータのドレイン効率(DCtoRF)
Drain efficiency of the class-E inverter.

表5 13.56 MHz インバータの先行事例との比較⁷⁾
Comparison of the 13.56 MHz inverter with previous examples.

測定装置	回路トポロジ	出力電力	主回路の変換効率
本研究①50 W版	単相 E級	50 W	91.0%
本研究②200 W版	単相 E級	200 W	95.0%
先行事例① ²⁾	プッシュプル C級	400 W	75.5%
先行事例② ³⁾	単相 E級	1.0 kW	85.0%
先行事例③ ^{4), 5)}	単相 Φ 2級	1.3 kW	94.6%
先行事例④ ⁶⁾	単相 D級ハーフブリッジ	1.7 kW	87.0%
先行事例⑤ ⁷⁾	単相 D級ハーフブリッジ	2.8 kW	96.2%

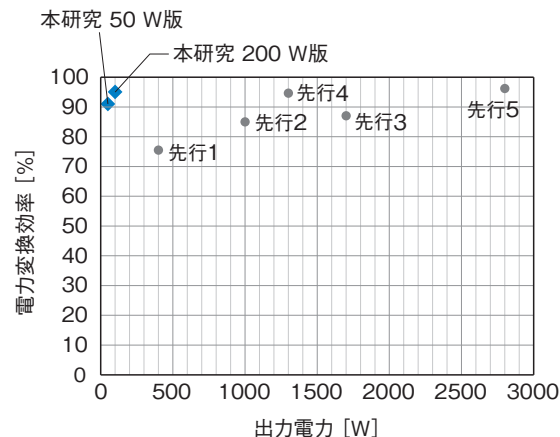


図11 13.56 MHz インバータ先行事例との比較
Comparison of the 13.56 MHz inverter with previous studies.

4. マイクロモビリティ向けワイヤレス充電システムの実証実験

4.1 実証実験の概要

社会実装に向けた実証実験の取り組み成果に関して報告する。ここまでは、小電力で最適化したRFインバータの開発事例を報告してきた。ワイヤレス充電システムを社会インフラとして普及させるためには、高周波利用設備申請が不要となるように制度化を進める必要があるが、普及の目途がないと制度化が進まないという面がある。現状において50 W以下の設備は申請が不要であるため社会実装が容易である。そこで、当社では図12、表6に示すような電動キックボード向けに50 W以下のワイヤレス充電システムを開発し、ワイヤレス充電の有用性を示すための実証実験を行った。開発したシステムは駐輪すると自動で充電を行うシステムであり、有線接続の手間を意識することなく充電を行うことができる。

バッテリー充電に対する要求はユースケースによると考えられる。連続的な移動手段として用いる場合には非稼働時間を短くし稼働時間を上げる必要があるため、バッテリー容量を大きくしバッテリー交換を行う方法が適している。一方で、スポット的な移動手段として用いる場合、例えば朝夕の移動手段に用い日中は駐輪しているだけという使い方も考えられる。本実証では、このように駐輪時間が長いユースケースに焦点を当てた実験を行い、移動手段としてのマイクロモビリティの有用性と充電作業の省人化の効果を実証したので、これを報告する。

4.2 ユースケース 工事現場の移動手段

実際の工事現場において実証実験を行った。事務所と工事現場間の移動手段に電動キックボードを用い、事務所で作業している時間は駐輪している状態となる。駐輪時は自動で充電が開始される。実験では機体にデータロガーを搭載し充電電圧と電流をモニタし、バッテリー残量を推定した。典型的な1日の使用条件とバッテリー残量の推移を図13、14に示す。

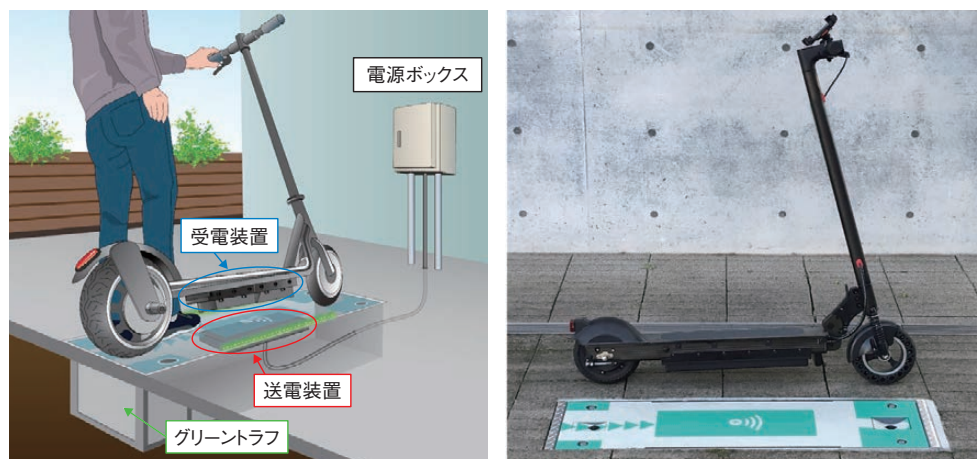


図12 開発したワイヤレス充電システムの構成
Configuration of the developed wireless charging system.

表6 ワイヤレス充電システムのスペック
Specifications of the wireless charging system.

項目	仕様
高周波電源出力	50 W
周波数	27.12 MHz
伝送距離	Max 70 mm
充電電力	30 W

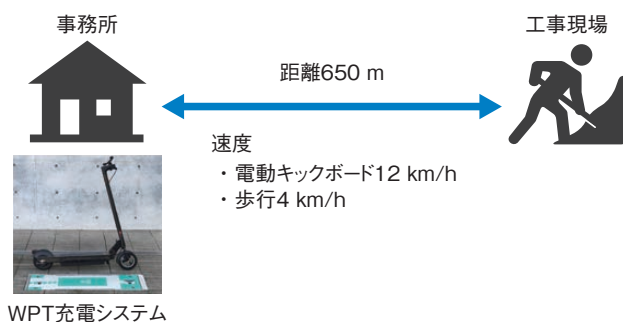


図13 工事現場でのユースケース例
Use case examples in construction sites.

事務所作業がメインで一日数回工事現場へ向かうという使い方であったため、1回の走行が5～6分程度で、その他の時間の多くが駐輪している状態であった。走行中は電流を出すため電圧降下し大きくバッテリー残量が低下しているように見えるが、走行終了し停車しているときを見ると20%弱の消費と分かる。小一時間駐車している間に充電するようなユースケースでは、有線接続する手間が無く充電を意識しなくてもバッテリー残量が80～100%に維持できると分かった。

移動手段としてマイクロモビリティを用いた際の時間節約効果を図15に示す。片道650 mの移動を3往復した場合を仮定すると、1日当たり約25分、1年で約150時間(約1か月分の作業時間に相当)の時間削減効果があると分かった。比較的短い数100 mの移動にマイクロモビリティを活用することの有用性も確認できた。

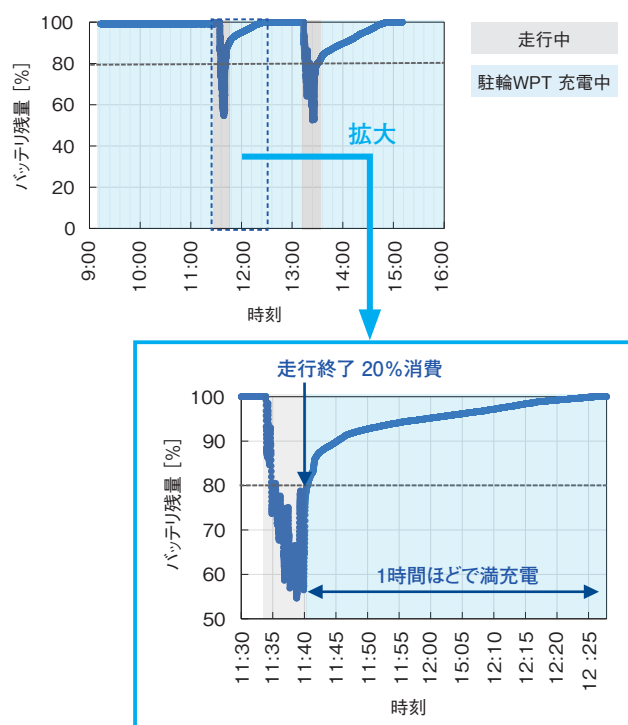


図14 1日のバッテリー残量の推移
Battery level variation over the course of a day.

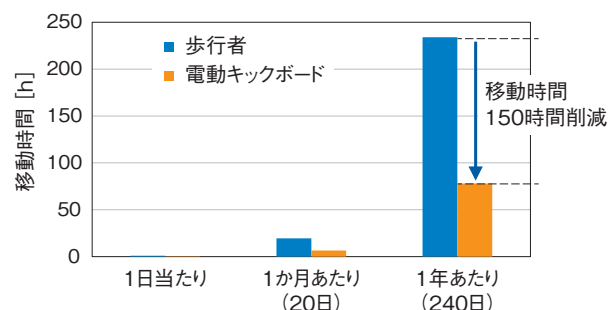


図15 マイクロモビリティによる時間節約効果
Time-saving benefits of micro-mobility.

計算条件		移動時間	
片道移動距離	650 m	1 往復	3 往復
歩行者速度	4 km/h	20 分	40 分
電動キックボード速度	12 km/h	7 分	15 分

5. まとめ

マイクロモビリティ向けに開発した電界結合型ワイヤレス充電システムに関して、小電力に焦点を当てた高周波電源の技術開発と社会実装に向け実際に工事現場で行った実証実験の成果を報告した。高周波電源内のRFインバータを開発し、最大出力は200 W、出力100 W前後でドレイン効率95%を達成した。また、実証実験を通し短距離移動にマイクロモビリティを活用する有用性と、駐輪時自動ワイヤレス充電技術を提供することで、有線接続する手間が無く充電を意識しなくてもバッテリー残量が80～100%に維持できる結果が得られた。

参考文献

- 1) 小原大輝：“電界共鳴型ワイヤレス電力伝送システムのEMI特性”，古河電工時報, 138 (2019), 18-24.
- 2) K. Dierberger, B. McDonald, and L.B. Max: “400 watt 13.56 MHz RF power amplifier”, Advanced Power Technology, Application note (1995), 1-13.
- 3) Matthew W. Vania: “PRF-1150 1kW 13.56 MHz class E RF generator evaluation module”, DIRECTED ENERGY, INC. TECHNICAL NOTE (2002), 1-20.
- 4) G. Choi: “13.56 MHz, class-D half bridge, RF generator with DRF1400”, Microsemi, Application note (2012), 1-17.
- 5) J. Choi, D. Tsukiyama, Y. Tsuruda, and J. Rivas: “13.56 MHz 1.3 kW resonant converter with GaN FET for wireless power transfer”, in Proc. 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conf. (WPTC) (2015), 1-4.
- 6) J. Choi, D. Tsukiyama, Y. Tsuruda, and J. Rivas: “Highfrequency, high-power resonant inverter with eGaN FET for wireless power transfer”, IEEE Transactions on Power Electronics, 33 (3) (2018), 1890-1896.
- 7) 大矢根蒼：“MHz周波数帯のワイヤレス電力伝送における高出力化・高効率化・伝送距離向上のための要素技術研究”，名古屋大学大学院工学研究科博士論文 (2023).