

電気自動車・電気バス用ワイヤレス充電の実用化を目指す85 kHz帯ワイヤレス電力伝送技術

85 kHz-Band Wireless Power Transfer Technologies toward Practical Realization of Contactless Charging of Electric Vehicles and Buses

尾林 秀一

松下 晃久

石田 正明

■ OBAYASHI Shuichi

■ MATSUSHITA Akihisa

■ ISHIDA Masaaki

電気自動車 (EV) や、プラグインハイブリッド車 (PHEV)、電気バスなどでは、二次電池への充電の際、充電ケーブルの着脱がドライバーの負担になるため、駐車するだけで充電できるワイヤレス充電の普及が望まれている。

東芝は、標準化での周波数候補である85 kHz帯を用いた7 kWワイヤレス充電システムを開発し、試作システムにより評価用EVに搭載された二次電池への充電試験を行った。更に、同じ85 kHz帯を使用し、有線急速充電器並みの44 kWワイヤレス充電が可能で、他機器との干渉を考慮して放射電磁界エミッションを低減した電気バス用ワイヤレス充電システムを開発し、電気バスを用いた公道走行実証試験を羽田空港周辺地域で行った。これらの試験を通して、利便性の向上と、目標の電力伝送効率での送受電が可能であることを確認した。

In order to simplify the process of charging secondary batteries mounted on electric vehicles (EVs), plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs), and electric buses without the need to attach and detach a cable, attention is being increasingly focused on contactless charging through power transfer between an onboard battery charger and a parking pad on the ground.

Toshiba is making efforts to develop wireless power transfer technologies using frequencies in the 85 kHz band, one of the candidate frequency bands for the international standardization of contactless charging specifications. Based on these technologies, we have developed a 7 kW wireless charging system for EVs and conducted secondary battery charging tests for verification of a prototype system mounted on an EV. We have also developed a 44 kW wireless charging system for electric buses, which achieves a reduction in radiated electromagnetic emissions taking interference with peripheral devices into consideration while providing a charging speed almost equal to that of conductive quick chargers, and have conducted verification operation tests using electric buses running on public roads around Haneda Airport. The tests have verified that these wireless charging systems offer enhanced convenience and achieve the targeted power transmission efficiency.

1 まえがき

二酸化炭素 (CO₂) 排出量を削減できる環境に優しい車両として、電気自動車 (EV) やプラグインハイブリッド車 (PHEV) の利用が広がるに従い、これらに向けたワイヤレス充電システムの研究開発が各国で進んでいる。これに伴い、SAE (Society of Automotive Engineers) InternationalやISO/IEC (国際標準化機構/国際電気標準会議) では標準化活動が進んでいる。先行するSAE InternationalのタスクフォースJ2954では、使用する周波数帯の調査を国際的にを行い、2014年に85 kHz帯を運用周波数帯とすることで合意した。また、2016年5月には、システム仕様の概要を記したTIR (Technical Information Report)⁽¹⁾を発行し、現在は細部の検討を継続している。わが国では2016年3月に改正された電波法施行規則により、型式指定により許可される設備として、79 ~ 90 kHzの範囲の“電気自動車用非接触電力伝送装置”が加えられた⁽²⁾。

このような背景から東芝は、既に開発した1 kW⁽³⁾に続く7 kWワイヤレス充電システムを、85 kHz帯を用いて開発した。これは、欧米で主流となっているEV・PHEV用の7 kW級有線充電システムと同等の充電速度を実現している。

一方、EVより大容量の二次電池を搭載する電気バス用の大電力ワイヤレス充電システムは、早くも2002年には欧州での実証が始まり、現在は公道での実運用を行っている例も見られる。しかし、従来の大電力ワイヤレス充電システムの多くは、伝送距離が数cmと短く受電装置も大きいため、小型電気バスへの搭載は困難である。また、運用周波数も20 ~ 25 kHzのものが多い。

そこで当社は、乗降を楽にするノンステップバスの、低車高時での一般的な地面からの距離10.5 cmで、ワイヤレスでも有線急速充電器並みの44 kW充電が可能でワイヤレス充電システムを、EVと同じ85 kHz帯を使用開発した。

ここでは、まずEV用に開発した7 kWワイヤレス充電システムと、評価用EVに搭載した二次電池への充電試験について述べる。次に、電気バス用に開発した44 kWワイヤレス充電システムと、2台の電気バスを用いて羽田空港周辺地域で行った公道走行実証試験について述べる。

2 EV向け 85 kHz帯7 kWワイヤレス充電システム

EV用ワイヤレス充電システムに使用する85 kHz帯は、電力回路としては比較的高い動作周波数である。そのため、送電側の交流(AC)から直流(DC)へのコンバーターや高周波インバーターとともに、受電側の整流器やチョッパ回路の高効率化や小型化が重要である⁽⁴⁾。

充電試験に用いた評価用EV、EVの底部に搭載した受電パッド、及び受電用電力回路を図1に示す。受電パッドは、伝送距離やシステム全体の電力伝送効率(システム伝送効率)を向上させるうえで重要なコンポーネントである。駐車する際に、送受電パッド間の位置ずれが多少生じて、システム伝送効率の低下が少ないことが望ましい。更に、受電パッドは車載するため、小型化も要求される。

今回の試作システムでは、広さ400×600 mmで厚さ5 mmの平面型の受電パッドを使用した⁽⁵⁾。送受電パッドの電力伝送用コイルを、フェライトコアにリッツ線を垂直方向に巻いた、ソレノイド型とすることで、水平方向に巻いたサーキュラー型と比較して同一サイズで同じ送受電パッド間距離における電力伝送効率を高めた。また、フェライトコアによる損失が電力伝送効率に及ぼす影響を低減するため、磁界シミュレーションによってフェライトコアの形状を決定し、共振用コンデンサーを内蔵して小型化を達成した⁽⁵⁾。

また、送受電電力回路間の相互制御を実施するには、信頼性の高い制御用の無線通信装置が重要となる。EVの電源周りのうち、有線の急速充電規格CHAdeMOは、CAN(Controller Area Network)を物理層とした独自の制御プロトコルを採用している。今回使用する無線通信方式としては、ハイスピードCANの伝送レートである1 Mビット/sと同等以上の伝送レートが得られる、2.4 GHzの無線LANを選定した⁽⁶⁾。制御に用いる処理のうち、メインの制御は、①無線通信の接続と認証、②送受電の可能状態の確認、③送電開始と充電制御、④送電正常終了時の処理又は異常発生時や異常から復旧

する場合の処理などを実行する。また、バックグラウンド割込み処理として、送受電装置や、車両動作、二次電池などの異常確認、車両操作状態の確認、無線通信接続状態の確認、及び送受電装置の過電圧・過電流確認などを備える。

システム伝送効率を測定した結果、充電時に送受電パッドの位置ずれがない場合では、伝送距離10～17 cmの範囲で、88～89% (目標85%以上)のシステム伝送効率を得られた。また、送受電パッドが前後に15 cm又は左右に25 cm位置がずれても、いずれの場合も伝送距離16 cmにおいて、85.2% (目標80%以上)のシステム伝送効率を得られており、大きな低下が生じないことが確認できた。また、EVのECU(Electronic Control Unit)との連携動作による自動充電制御の動作も確認した⁽⁷⁾。

3 電気バス用 85 kHz帯44 kWワイヤレス充電システム

乗用車タイプのEV(以下、乗用車EVと略記)と同様、電気バスも、排気ガスを出さず、CO₂排出量を削減できる環境に優しい交通手段として、欧州を皮切りに導入例が増えてきている。特に、公共交通インフラが未整備の新興国などでは、鉄道などに比べ導入しやすい環境対応の交通機関としても注目されている。

質量が大きい電気バスは、二次電池の消費量が乗用車EVに比べて大きく、大容量の二次電池を搭載しても、1日に何度も充電を行う必要がある。充電のつど、充電ケーブルを着脱することは、バスの運転手の負担になる。そのため、駐車するだけで充電できるワイヤレス充電が、乗用車EV以上に望まれている。しかし、従来の電気バス用大電力ワイヤレス充電システムの多くは、伝送距離が1.5～4 cmと短いため、バスから受電パッドを降ろす昇降機が必要で、保守などに難がある。また、送受電共振子の位置ずれを5 cm未満にするために、運転操作にも負担が生じる。比較的新しい装置では伝送距離は長くなっているが、送受電装置が大きく、小型バスへの受電装置の搭載が難しい。

当社は、2章で述べた、伝送距離が長く送受電共振子の位置ずれに強い、7 kWワイヤレス充電システムに用いた技術を生かすことで、有線急速充電器並みの44 kW受電が可能なワイヤレス充電システムを実現し、電気バスの充電時間を1回当たり10～25分に短縮することに成功した。

伝送周波数は85 kHz帯を用いた。従来は、電力回路が比較的容易に構成可能な20 kHz帯などを用いているが、設置場所ごとに他の無線システムに影響がないことを申告して許可を得る手続きが必要となり、将来の普及に難がある。これに対し85 kHz帯は、1章で述べたとおり、わが国での他の無線システムとの周波数共用検討を完了した後、EV用のワイヤレス

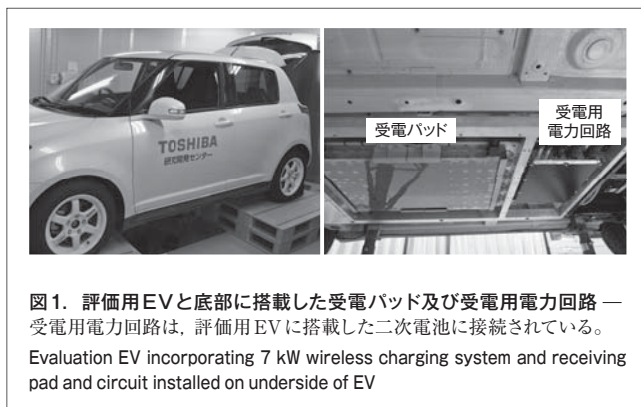
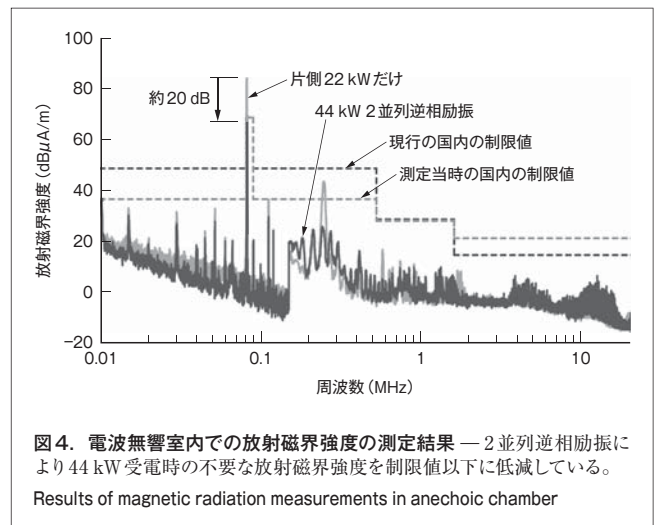
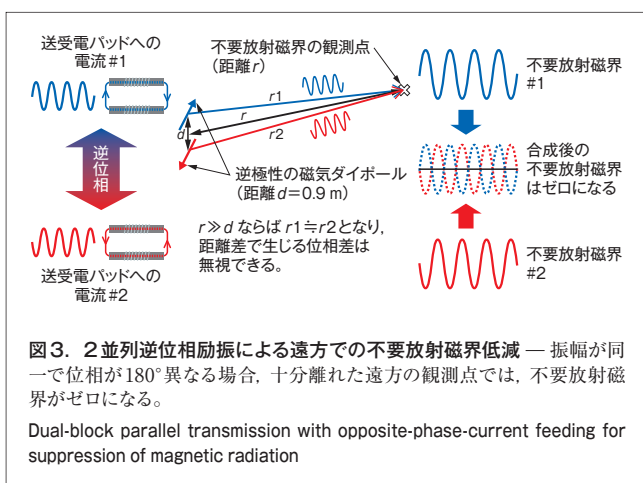
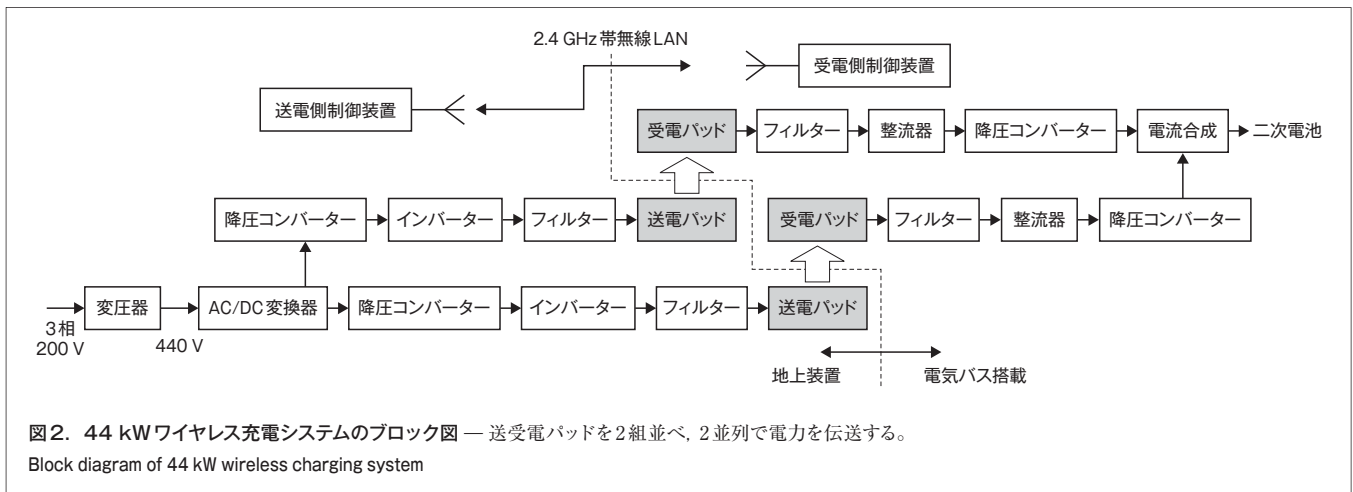


図1. 評価用EVと底部に搭載した受電パッド及び受電用電力回路 — 受電用電力回路は、評価用EVに搭載した二次電池に接続されている。
Evaluation EV incorporating 7 kW wireless charging system and receiving pad and circuit installed on underside of EV



充電向けに割り当てられており、国際標準化でも合意している運用周波数帯である。また、周波数が高い85 kHz帯のほうが共振などの小型・軽量化に向く利点もある。高周波動作に向くSiC（炭化ケイ素）などの半導体デバイスの開発も進んでおり、乗用車EV用ワイヤレス充電システムに向けた量産が進めば、低コスト化が期待できる。

85 kHz帯44 kW ワイヤレス充電システムの構成を図2に示す。伝送電力が22 kWの送受電系を2並列にした。1組当たりの伝送電力を小さく抑えたことで、乗用車EV用7 kW ワイヤレス充電システムと比較しても、電力回路の必要耐圧の上昇が少なく、送受電パッドに用いる共振子の面積も、あまり大きくならない。

並列化には別の狙いもある。二つの共振子に印加する85 kHz帯の電流を逆位相にすることで、遠方での不要放射磁界を低減できる。基本的な原理を図3に示す。逆相で励起された共振子は、近似的に逆極性の磁気ダイポール（双極子）とみなせる。逆極性で大きさが等しい二つの磁気ダイポールが発生する磁界は、十分遠方で観測すると、観測点から両者までの距離差で生じる位相差が無視できるため、磁界が打ち消

し合ってほぼゼロになる。

実際には、不要放射磁界の測定距離は10 mである。電波無響室内の10 m離れた観測点で放射磁界強度を測定した結果を、図4に示す。2並列の送受電回路のうち片側22 kWだけを動作させた場合の測定結果、測定当時の国内の制限値、及び現行の国内の制限値も、共に示してある。片側22 kW送受電時の伝送周波数の磁界強度に比べ、2並列送受電時では磁界強度が約20 dB低減されて限界値以下に収まっている。今回用いた並列2系統の電流制御方式で、位相及び振幅とも、多少の制御誤差は生じるが、44 kW送電時に必要なレベルまで磁界を低減できていることが確認できた。

小型電気バス用ワイヤレス充電システムについては、まず30 kWの送受電を確認し⁽⁸⁾、一部改良して44 kWでの受電を可能にした。その後、更に改良した中型電気バス用44 kW ワイヤレス充電システムを測定評価した結果、伝送距離10.5 cmにおいて、送受電パッド対の位置ずれがない場合、システム伝送効率は87.7%（目標80%以上）であった。また、充電時の位置ずれには、前後±10 cm、又は、左右±20 cmまで対応で

き、伝送距離は10～13 cmまで対応可能であった。

送受電装置間の制御には2.4 GHz帯の無線LANを用いた。ワイヤレス受電システムの制御装置は、バス側のECUと連携し、バスに搭載した二次電池の充電状況に応じて充電動作を制御する。また、送電側制御装置との通信によって過電流や無線通信の継続的な不良などの異常を検出した際には、必要に応じて安全に充電動作を停止する機能を持つ。

更に、電気バス用ワイヤレス充電システムには、乗用車EVに対して充電する機能も付与した。二つの送電パッドのうち片方だけを稼働することで、図1の評価用EVで約7 kWの受電ができることを実測で確認している。

4 2台の電気バスと44 kWワイヤレス充電システムを用いた公道走行実証

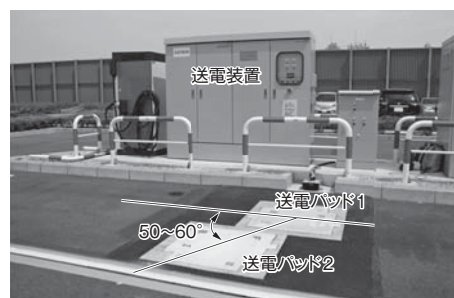
学校法人 早稲田大学の小型電気バス WEB-3 (Waseda Electric Bus-3) Advanced (図5(a)) と中型電気バス (図5(b)) に受電部を搭載し、公道走行実証試験を行った。

送電部は、全日本空輸 (株) (ANA) の協力の下、神奈川県川崎市内にあるANAの拠点内に設置した (図6(a))。また、図6(b)は、前述の中型電気バスに搭載した受電部である。並列する2組の送受電パッド対の異なる組の間でやり取りされる電力が大きいと、2系統の電流制御を行うことが難しいので、今回、2組のパッド対を50～60°程度斜めになるように並べることで相互干渉を低減し、安定した並列伝送を可能にした⁽⁹⁾。

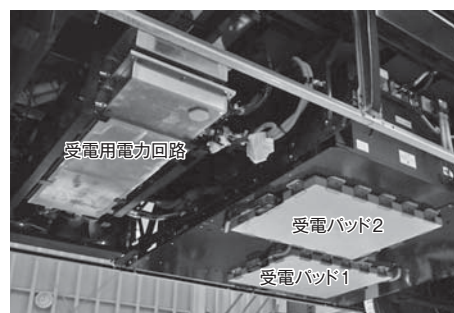
2016年2月から、WEB-3 Advancedを用いて、ANAの川崎市内拠点と東京都 大田区内拠点を往復する約11 kmの公道ルートを一往復し、ANAグループの従業員が利用する連絡バスを模擬して試験を開始した。同年6月からは、ANAの川崎市内拠点と羽田空港とを往復する約23 kmの首都高速道路を含む公道ルートで、中型電気バスで一往復する運行も追加し、2017年1月初旬まで、ワイヤレス充電システムの利

便性に加えて、CO₂削減効果を評価した。実証試験ルートを図7に示す。

公道走行において測定した走行距離と消費電力などのデータを基に、早稲田大学がCO₂削減効果を計算した結果、それぞれ同サイズのディーゼルバスと比較して、小型電気バスでは約40%、中型電気バスでは約60%の削減効果があった。また、エネルギーコストに関しても、小型電気バスで30%強、中型電気バスで50%強の削減が見込めることが実証できた。



(a) 地上装置



(b) 中型電気バス底部に搭載した受電装置

図6. 電気バス用44 kWワイヤレス充電システム — 2組のパッド対間の相互干渉を低減するため、パッド対を50～60°程度斜めになるように並べている。

44 kW wireless charging system for electric buses



(a) 小型電気バス WEB-3 Advanced

(b) 中型電気バス

図5. 公道走行実証試験に用いた2台の電気バス — WEB-3 Advancedは39.7 kWh、中型電気バスは53 kWhの当社製リチウムイオン二次電池SCiB™を搭載した。

Small and medium-sized electric buses for verification operation on public roads

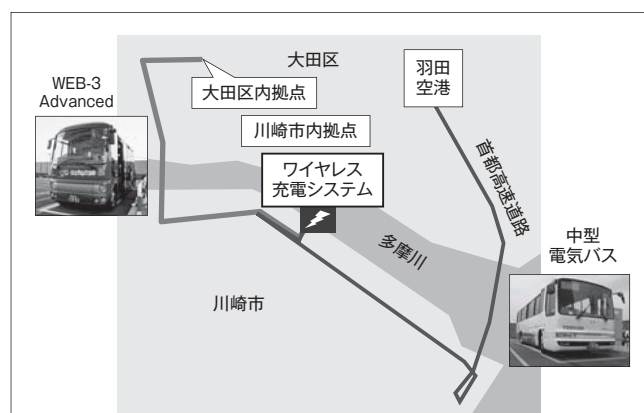


図7. 公道走行実証試験ルート — WEB-3 Advancedのルートは往復約11 km、中型電気バスのルートは首都高速道路を含み、往復約23 kmである。Route for verification operation using public roads around Haneda Airport

5 あとがき

EV・PHEV用のワイヤレス充電システムの世界共通周波数となる85 kHz帯で、評価用EVへの7 kW充電を行った。更に、電気バス用に有線急速充電器並みの44 kWで充電できるワイヤレス充電システムを開発し、公道走行実証試験により、CO₂削減効果を実証した。

今後、充電電力の更なる大電力化を含めたワイヤレス充電技術の研究開発を進めるとともに、環境負荷低減と都市交通における利便性向上の両立に貢献していく。また、今回の開発実績を活用し、自動搬送車など産業用電動車両用のワイヤレス充電システムの実用化も進めていく。

謝 辞

2016年度まで3年間の環境省委託事業「CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」の下で、44 kWワイヤレス充電システムの開発と公道走行実証試験を共同で行った、早稲田大学の紙屋雄史教授、そしてお支援助とご協力をいただいた、環境省、川崎市、及びANAの関係各位に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) SAE TIR J2954:2016. Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology.
- (2) 産業競争力懇談会. 産業競争力懇談会 2016年度 プロジェクト 最終報告 ワイヤレス電力伝送の普及インフラシステム. 2017, 40p. <<http://www.cocn.jp/thema90-L.pdf>>, (参照 2017-06-01).
- (3) 大高章二 他. kW級ワイヤレス電力伝送システム. 東芝レビュー. 68, 7, 2013, p.6-10.
- (4) 松下晃久 他. EV用7 kW級無線充電システムを可能にする送受電回路技術. 東芝レビュー. 69, 4, 2014, p.33-36.
- (5) 尾林秀一 他. PHEV/EV充電向け7 kW無線電力伝送システム. 電子情報通信学会技術研究報告. 114, 450, 2015, p.85-88.

- (6) 尾林秀一 他. ワイヤレス電力伝送システム用制御通信技術. 東芝レビュー. 68, 7, 2013, p.11-14.
- (7) Obayashi, S. et al. "Kilowatt-class wireless power transfer system for efficient PHEV/EV charging". International Electric Vehicle Technology Conference and Automotive Power Electronics Japan Conference. Yokohama, 2014-05, Society of Automotive Engineers of Japan. 2014, Paper No. 20144023, (CD-ROM).
- (8) Obayashi, S. et al. "85 kHz wireless power transfer system for rapid charging of electric bus". Proceedings of International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems. Chiba, 2015-11, The Japan Society of Mechanical Engineers. 2015, p.3D13-1-3D13-9. (USB memory stick).
- (9) Shijo, T. et al. "EMI reduction technology in 85 kHz band 44 kW wireless power transfer system for rapid contactless charging of electric bus". IEEE Energy Conversion Congress and Exposition 2016. Milwaukee, WI, 2016-09, IEEE. 2016, p.1-6.

• CHAdeMOは、CHAdeMO協議会の登録商標。



尾林 秀一 OBAYASHI Shuichi

技術統括部 研究開発センター ワイヤレスシステムラボラトリー研究主幹。ワイヤレス電力伝送システム、無線通信アンテナ、電波伝搬の研究・開発に従事。電子情報通信学会、IEEE、SAE International会員。
Wireless System Lab.



松下 晃久 MATSUSHITA Akihisa

エネルギーシステムソリューション社 電力・社会システム技術開発センター 電機応用・パワーエレクトロニクス開発部主務。パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。電気学会、IEEE会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



石田 正明 ISHIDA Masaaki

技術統括部 研究開発センター ワイヤレスシステムラボラトリー研究主幹。ワイヤレス電力伝送システム、高周波回路の研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。
Wireless System Lab.