

ワイヤレス給電技術の開発

Development of Wireless Power Transmission

平野 圭蔵 小林 茂 堀内 雅城
Keizo Hirano Shigeru Kobayashi Masaki Horiuchi

大西 喬之 須田 保
Takayuki Onishi Tamotsu Suda

要 旨

日本無線グループでは、長野日本無線株式会社が早期に磁界共振結合方式のワイヤレス給電の開発に取り組み、2009年には30Wの自動整合機能付きの原理実証機を他社に先駆けて発表した。自動整合回路により、カップラ間距離40cmで95%以上の電力伝送効率を得ている。その後1kW給電、3kW給電と電力を増大した給電技術の開発の他、小型で扱いやすいサンプルモデルも開発した。一方で、3次元電磁界シミュレーションによる解析評価により、電波防護指針への適合や、電力伝送方向以外への磁界強度の低減対策としてのシールド構造の効果を検証した。

Abstract

In the JRC group, NJRC has worked on development of Wireless Power Transmission (WPT) using a magnetic resonant coupling method at an early stage and released a principle proof machine with an automatic matching function of the 30W ahead of other companies in 2009. We get more than 95 % of electric power transmitting efficiency by distance 40cm between the coupler by the automatic matching circuit. The technology development of WPT advanced afterwards in the direction where electric power increased to 1kW and 3kW. On the other hand, we developed the sample model that it is easy to treat in small size. Furthermore, by an analysis evaluation by the three-dimensional electromagnetic field simulation, we inspected the conformity to an electromagnetic wave protective guideline and an effect of the shield structure as reduction measure of the magnetic field strength to any place other than the electricity transmission direction.

1. まえがき

近年、無線通信技術の進歩は著しく、Wi-Fi等によりPCやスマートフォン等だけでなく、デジタルカメラ等のパーソナル機器でもワイヤレス通信があたりまえになっているがその一方で、電源に関してはワイヤレス化が残され、また切望されている。この非接触給電技術については、従来は電磁誘導方式により一部の電動歯ブラシ、コードレス電話の子機等に利用されてきたが、近年ではQi規格によるものが普及し始め電子機器の総ワイヤレス化が現実のものとなってきていることから、この技術の早期普及が望まれている。

現在、実用化されているワイヤレス給電は電磁誘導方式が主流だが、送受電間の近接が必要、位置ずれに弱い等の欠点がある。一方、2006年にMIT (Massachusetts Institute of Technology) から発表された磁気共鳴 (磁界共振結合) 方式は、数mの電力伝送の可能性を示し、翌年にはその具体例が示され⁽¹⁾、注目を浴びた。以降、小型電子機器、工場内の自動搬送車、電気自動車 (EV) や大形電動車両向け等に盛んに開発が行われ、一部実用化され始めた。また、電波法施行規則の一部改正やARIB規格 (STD-T113) 制定等、使用環境も整いつつある。

当社グループでは磁界共振結合方式によるワイヤレス給電の実用化を目指し、他社に先駆けて2009年8月に、自動整合機能を伴い、位置ずれや角度によらず高効率を保つ30W

の原理実証機を公開⁽²⁾するとともに、その評価・検証を行ってきた。その後、伝送電力を1kW、3kWと高める開発の一方で、35Wの実用サンプルモデルの開発も行っている。なお、これらの開発は過去に長野日本無線株式会社で行われたものであり、現在、継続して当社で実施している。

本稿では、当社グループにおけるワイヤレス給電の技術とその開発事例、3次元電磁界解析の評価等を通しての現状の課題、そして将来への展望を述べる。

2. ワイヤレス給電の原理と構成

2.1 磁界共振結合方式ワイヤレス給電モデル

磁界共振結合方式の基本原理解は、送電側のコイルに交流電流を流すことで交流磁界を発生させ、受電側のコイルにも電流が流れることを利用するものである。このこと自体は従来の電磁誘導方式と同じであるが、磁界共振結合方式

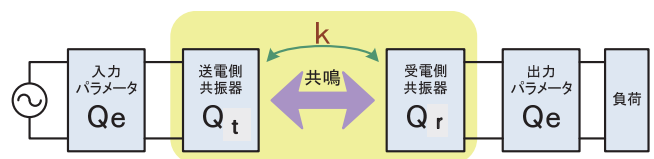


図1 磁界共振結合方式ワイヤレス給電基本モデル
Fig.1 Magnetic Resonance Method WPT Model

は、送電側で交流磁界を発生する回路と受電側の回路が共振する特性を利用している。当社グループでは図1に示すように、電源、負荷の入出力部を含めた実用化のための基本モデルを定義し、共振器コイル間の結合係数kの変化に対する電力伝送効率を解析している。送電、受電間の電力伝送効率は次式によって表される。効率の高さは性能指数fom, 即ち、送受電間のコイルの結合係数kと共振器のQを如何に高めるかがポイントになる。

$$\text{効率} = \frac{\text{仕事}}{\text{入力電力}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\sqrt{1 + fom^2}} + \frac{(1 + \sqrt{1 + fom^2})^2}{fom^2 \cdot \sqrt{1 + fom^2}}}$$

$$fom = k\sqrt{Q_t Q_r}$$

2.2 自動整合の原理

磁界共振結合方式では、距離に応じて送電コプラと受電コプラの相互インダクタンスは変化し、共振状態も変化する。共振状態は伝送効率に直接関係し、その様子を図2に示す。例えばk=0.100のときに共振するように共振回路定数を決めた後に距離、即ち、kがずれると共振点が変わり、その結果、伝送効率が落ちる。ずれた位置において伝送効率を上げるためには、共振回路定数の修正が必要になる。即ち、図には特定の距離 (k) において共振状態にした特性をいくつか示すが、各共振状態の最大値をトレースするように共振回路定数を自動的に調整すればよいことがわかる。

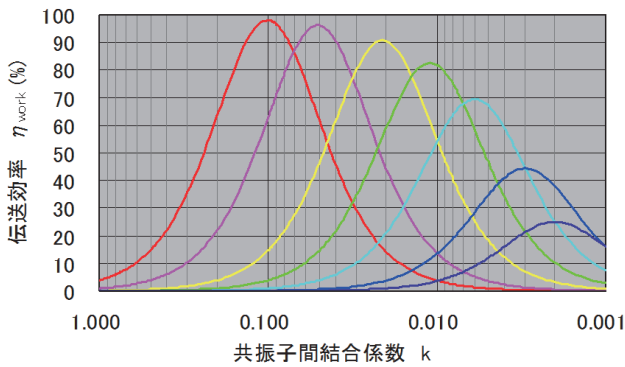


図2 共振特性と伝送効率

Fig.2 Resonance Special Quality and Transmitting Efficiency

原理実証機では、図3に示す矢印からみた送電電力の反射が最小、即ち、最適共振状態になるように送電側の容量値を調整し、自動的に整合をとる制御をしている。原理実証機における共振器の伝送効率特性の理論値と実測値を図4に示す。共振器間距離の変化に応じて入出力パラメータを適切に調整することで理論値に沿った伝送効率を得られている。

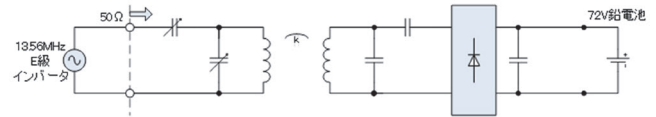


図3 自動整合回路

Fig.3 Automatic Matching Circuit

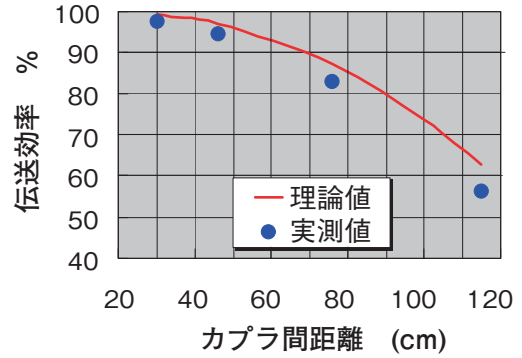


図4 共振器間伝送効率

Fig.4 Efficiency between the Resonators

2.3 システム基本構成

ワイヤレス給電システムの基本構成の一例を図5に示す。送電コプラと受電コプラ間の空間を、磁界共振結合方式により電力を伝える。システムへの入力は商用電源又は直流電源であり、インバータ部で数十kHz～十数MHzに変換し送電コプラへ入力する。一方受電コプラで受けた交流電圧は整流され蓄電素子に、又は安定化して電子機器に給電する。給電の状態や受電側の検知は送電側の内部回路だけで監視制御が可能である。また、送受電間に無線通信部を設けて受電側のIDや充電の状態をフィードバックし制御する。

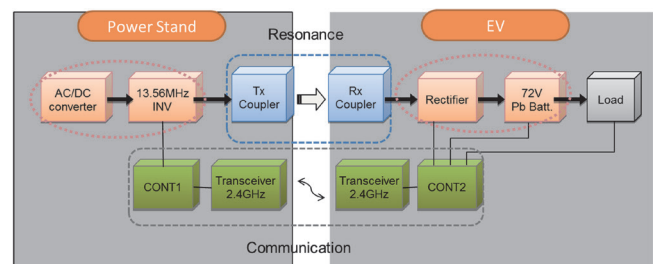


図5 ワイヤレス給電システムの基本構成例

Fig.5 Basic Composition of WPT System

3. ワイヤレス給電の開発事例

当社グループは、2009年に30Wの原理実証機を発表して以来、他社との協業も含め10機種以上の開発を行ってきた。以下に開発事例を示す。

①30W原理実証機

本原理実証機は、磁界共振結合方式の実証と自動整合方式の基本技術を確認する目的で開発し2009年に公開した。

作製した原理実証機の装置仕様を表1に、外観を図6に示す。伝送周波数はISMバンドの13.56MHzを用いており、送電電力は高周波利用設備の届出が不要な50W以下とした。コイル間距離が数cm~60cmの範囲で30Wの電力伝送が可能であり、コイル配置の横ずれや角度の変化があっても、最適な電力伝送効率に追従する自動整合機能を実現している。ここで、受電側はDC24V出力でパッシブ素子のみで構成され、自動整合の監視制御は送電側のみで行っている。コイル間の伝送効率は、コイル間距離が40cmのときに95%以上得られている。

表1 装置仕様 (30W)
Table 1 Specification of Equipment (30W)

項目	仕様
送電コブラ	直径40 cm, 太さ2 cm
受電コブラ	直径40 cm, 太さ2 cm, 他
コブラ間距離/角度	数cm~60 cm/任意
負荷	白熱電球 (DC 24V, 30 W)
伝送周波数	13.56 MHz



図6 原理実証機 (30W)
Fig.6 30W WPT Principle Proof Model

②1kWデモシステム

本デモシステムは、ワイヤレス給電の実用性を示すことを目的として開発し2011年に公開した。作製したデモシステムの装置仕様を表2に、外観を図7に示す。本システムは自動整合機能を備え、超小型EV搭載の72Vの鉛電池へ1kWの充電が行える。また、送受電コブラのコイル背面には、筐体や車体へ設置したときの共振状態への影響を軽減するため、かつ送電方向以外の電磁界の漏れを低減するためにシールド機構を採用している。送受電間は、2.45GHzの特定小電力の通信モジュールにより送電対象物の認証、電池充電状態等の情報を通信し、制御している。コブラ間10~30cmの範囲で、整流・平滑化回路を含めた13.56MHz電源の出力端から電池入力までの伝送効率は80%以上得られている。

表2 装置仕様 (1kW)

Table 2 Specification of Equipment (1kW)

項目	仕様
送電コブラ	700(W) × 600(H) × 160(D) mm
受電コブラ	600(W) × 600(H) × 100(D) mm
コブラ間距離	10~30 cm
充電対象	72 V, 鉛電池
伝送周波数	13.56 MHz



図7 1kWワイヤレス電力伝送デモシステム
Fig.7 1kW WPT Demonstration System

③3kW評価システム

本評価システムは、中日本高速道路株式会社 (NEXCO中日本) において、高速道路維持管理車両のEV化研究の一環^③として実フィールドでの実験を目的に東京大学、三菱ふそうトラック・バス株式会社と共同開発したものであり、ITS世界会議東京2013でNEXCO中日本より公開された。作製した評価システムの装置仕様を表3に、外観を図8に示す。2013年10月にトラック搭載試験を開始し、2014年6月~12月の期間に富士保全サービスセンタを拠点に実フィールド運用評価をした。本システムは数百ボルトの高電圧のLi-ion電池へ3kWの充電が行えるものであり、給電エリアに入ったことを運転手に知らせる機能や運転席からの給電開始操作が可能となっている。また、実フィールドでの使用に耐える構成を考慮している。

表3 装置仕様 (3kW)

Table 3 Specification of Equipment (3kW)

項目	仕様
送電コブラ	1,150(W) × 1,150(H) × 160(D) mm
受電コブラ	1,000(W) × 1,000(H) × 160(D) mm
コブラ間距離/ずれ	20~50cm/±30cm (コブラ間距離30cm)
充電対象	数百V, Li-ion電池
伝送周波数	13.56 MHz

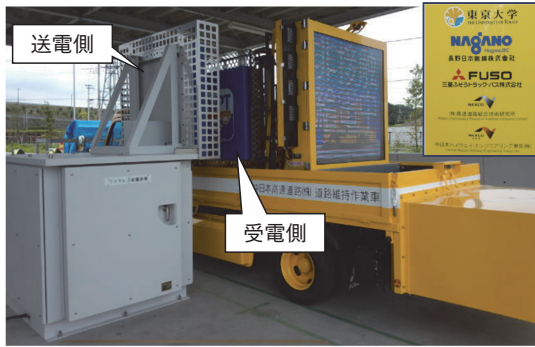


図8 EVトラックと送受電カプラ

Fig.8 EV Truck and a Transmission and Receipt Coupler

④35Wサンプルモデル

本装置は、マーケティングサンプルとして、また、85kHzの伝送周波数による技術確立を目的として2014年に開発した。作製したサンプルモデルの装置仕様を表4に、外観を図9に示す。用途によりカプラ形状の変更を可能とするために、電源部とカプラを分離してカプラ部のみを交換できるようにしている。

表4 装置仕様 (35W)

Table 4 Specification of Equipment (35W)

項目	仕様
送電, 受電カプラ	100(W) × 100(H) × 20(D)mm
電源寸法	90(W) × 45(H) × 140(D)mm
カプラ間距離/ずれ	~15 mm/ ± 10 mm (カプラ間距離10mm)
給電対象	DC 24V機器
伝送周波数	85 kHz

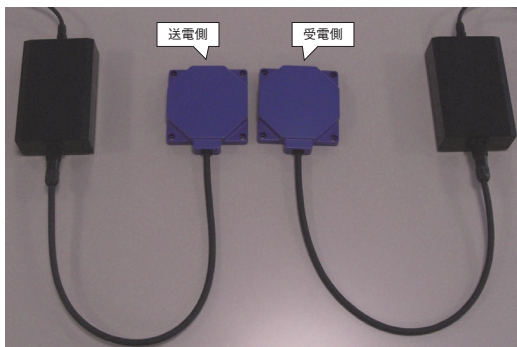


図9 サンプルモデル (35W)

Fig.9 35W WPT Sample model

4. 電波防護指針と電磁界シミュレーション

磁界共振結合方式の場合は、伝送可能距離が従来の電磁誘導方式に比べ格段に長く利便性が高い一方で、その電力伝送区間の内部及び周辺の空間においては、磁界暴露からの人体の安全性確保として、電波防護指針又は国際的には

ICNIRPのガイドラインへの適合性評価が欠かせない。そこで、電磁界分布を掌握するために3次元電磁界シミュレーションを用いた設計・解析手法を導入し、電力伝送方向以外への磁界強度の低減対策として用いたシールド構造の効果について計算値と実測値を対比し検証している。

解析評価の一例として、前出の超小型EV用デモシステムの1kWワイヤレス電力伝送について、解析の座標系を図10に、解析結果を図11にそれぞれ示す。ここで、解析モデルには電源スタンド、超小型EV車両は含めていない。

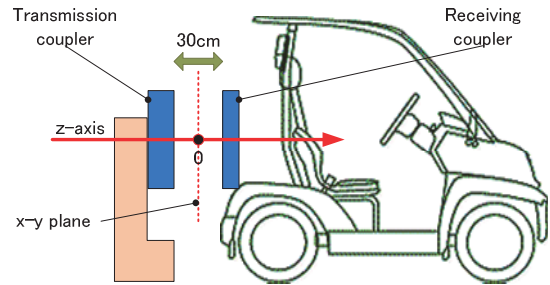
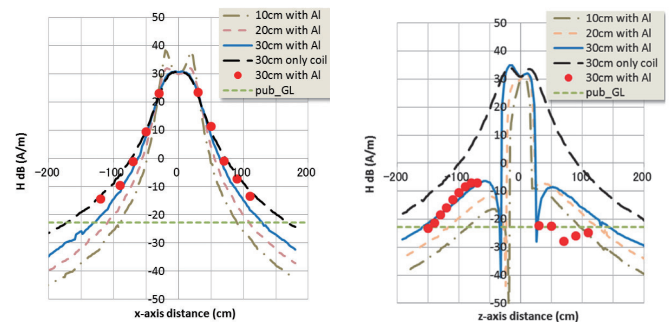


図10 解析の座標系

Fig.10 The Coordinate System of Analysis

図11では、シミュレーションの計算結果を線で表し、実測値を赤丸点で表す。特に、送受電間の距離30cmについて、シールド構造がある場合 (with AI) の計算値を実線で表し、同条件の実測値の赤丸点と対比している。x軸のグラフから計算値と実測値が概ね一致し、モデル化と解析手法が有効であることがわかる。一方、z軸ではマイナス側は概ね計算値と一致しているのに対し、プラス側は実測値が低くなっている。これは超小型EVの車体が影響していると思われる。また、z軸のグラフより、シールドなし (破線) に対してシールドあり (実線) の効果があることが分かる。

図中の水平の点線 (pub_GL) はICNIRPの磁界強度における公衆の暴露の参考レベル (0.073A/m ⇒ -22.7dB (A/m) at 13.56MHz) である。カプラ間が30cmの距離で1kW充電中では、カプラ端から約120cm以内はこのレベルを超えている。一方カプラ間距離が10cmの場合は、このラインを超える範囲がカプラ端から約70cm以内までに狭まるという結果が得られた。このことは逆に、カプラ間距離が離れた場合はシールド構造の考案が大きな課題であることを表す。



(a) x-axis

(b) z-axis

図11 磁界強度

Fig.11 Magnetic-Field Strength

5. あとがき

当社グループにおけるワイヤレス給電技術の開発状況について述べた。ワイヤレス給電は、利便性は高いが電波防護の観点から課題があり、また、安価で確実な有線による給電に代わることは容易ではない。しかし、有線接続による充電の煩わしさからの解放、非接触化による装置信頼性の向上、有線で諦めていた機能の実現等、社会に大きく寄与するものである。現在は、①ワイヤレス給電と通信機能を併せたシステム化、②伝送周波数85kHz時の電力の増大等の開発を進め、今後は実用に供する開発を行っていく。

参考文献

- (1) André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffat, J.D.Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljačić : “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances” Science Express, Vol.317, 2007/6, pp.83-86.
- (2) 長野日本無線, “無線給電システムの開発に成功”, 長野日本無線プレスリリース, 2009/8
- (3) 前田・東・高橋, “LED標識車のための非接触給電技術及び実運用に資するITS技術について”, 電気学会ITS 2013 (28-51), 2013/11, pp.63-67.

用語一覧

ARIB: Association of Radio Industries and Businesses
(一般社団法人電波産業会)

ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
(国際非電離放射線防護委員会)

ISMバンド: Industry Science Medical (産業・科学・医療分野で汎用的に使うために割り当てられた周波数帯)

Qi (チー) 規格: WPC (Wireless Power Consortium) が策定したワイヤレス給電の国際標準規格

WPT: Wireless Power Transmission (ワイヤレス給電)