

RFワールド

無線と高周波の技術解説マガジン

RADIO FREQUENCY

www.rf-world.jp

トランジスタ技術 増刊

特集 磁界結合、電界結合、電波放射など、基礎と普遍的法則を知る
はじめてのワイヤレス電力伝送

特設記事 920MHz帯LPWAエア・モニタの仕組みと観測例

折り込み付録 ITUの周波数割り当て地域と世界のISMバンドほか

No.43



CQ出版社

開発の歴史、磁界結合、容量結合、電波放射などの
方式と最近の動向など

ワイヤレス電力伝送の世界へようこそ！

高橋 俊輔
Shunsuke Takahashi

1 はじめに

モバイル機器や電気自動車(EV)などに使われている電池への充電は、一般的にはケーブルを介する接触式システムです。しかし、この充電システムにはケーブルを挿抜する必要があるという問題のほかに、接点のメンテナンスや漏電/感電という課題もあります。

現在、通信システムの発達によりユビキタスに近づいている機器を完全なユビキタス化するためのワイヤレス給電システムの開発が求められています。

本特集では、各種ワイヤレス電力伝送システムと、その応用例を各章で取り上げています。それらについて、簡単に開発の歴史と最近の動向をここにまとめました。

2 ワイヤレス給電実現への道のり

2.1 19世紀は電磁気学発展の時代

電磁気学の発展をざっとおさらいしましょう。18世紀までは1785年にフランスのクーロンが見出した荷電粒子間の相互作用を示す「クーロンの法則」程度でした。19世紀になると1820年にデンマークのエルステッドが電流の磁気作用を発見したのを皮切りに、その年はフランスのアンペールが電流とその周りにできる磁場との関係を示す「アンペールの法則」を、またフランスのビオとサバールが電流の周りにできる磁場を計算する「ビオ・サバールの法則」を見出しています。

1831年には英国のファラデーが、一つのコイルに生じる誘導起電力の大きさは、そのコイルを貫く磁界の変化の割合に比例するという電磁気学上重要な「ファラデーの電磁誘導の法則」を発見しました。写真1はファラデーの肖像とクリスマス休暇に行われた子供向けのやさしい科学講座のようすを示した英国紙幣です。

1836年にはアイルランドのカランが変圧器の元と

なる「誘導コイル」を発明し、後の電磁結合タイプのワイヤレス電力伝送システムの始まりとなりました。

1835年にドイツのガウスは電荷と電場の関係を表す方程式である「ガウスの法則」を発見しています。

このように、わずか15年の間に電磁気学の基本的な法則が見い出されています。

2.2 マックスウェルから始まるワイヤレス給電

1864年に英国のマックスウェルが、

- ①ファラデーの法則
- ②アンペールの法則
- ③電場に関するガウスの法則
- ④磁場に関するガウスの法則

を数学的形式として統合し、整理して四つの式からなる「マックスウェルの電磁方程式」を導き出して、古典電磁気学を確立し、電磁波の存在を理論的に予言しました。それから四半世紀を経た1888年になって、ようやくドイツのヘルツが電磁波の存在を実験的に証明しました。写真2はマックスウェルとヘルツが一緒に描かれたメキシコ切手です。

ワイヤレス電力伝送技術は、このマックスウェル方程式で記述でき、①と④の方程式からは結合型と呼ばれる方式が考えられ、高周波磁界や高周波電界を介してワイヤレス電力伝送を行うもので、送電側と受電側が電磁界的に結合していて、送電側の近傍において給電ができます。②と③の方程式からは電波放射方式が考えられ、アンテナから放射された電磁波を介してワイヤレス電力伝送を行うため、長距離の給電が可能となります。

2.3 最初の長距離電磁波伝送の意味

1895年以来、電磁波の伝搬現象を利用した無線通信の実験を続けていたイタリアのマルコーニは、1901年に出力25 kWの送信機と垂直接地型のアンテナ、そして舳から吊り下げた152.4 mの受信アンテナを使って、英国～カナダ間約3500 kmの長距離電磁波伝送に成功し、これにより無線通信の実用化が開け、大洋を航行する船舶の上でもニュースが読めるようにな



〈写真1〉ファラデーの肖像とクリスマス講演が描かれた英国紙幣



〈写真2〉ヘルツ(左)とマックスウェル(右)の肖像が描かれたメキシコ航空切手

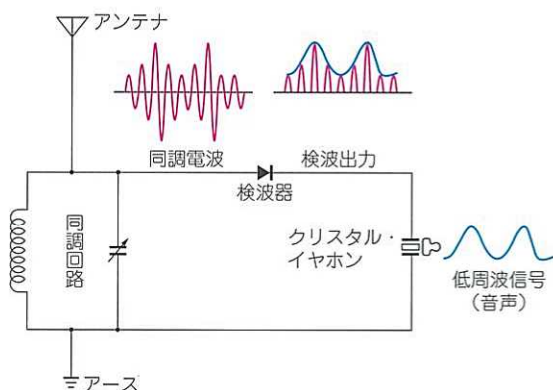


〈写真3〉マルコーニの肖像と彼のヨットが描かれたバハマ切手

りました。写真3は、マルコーニの肖像が描かれたバハマ切手です。

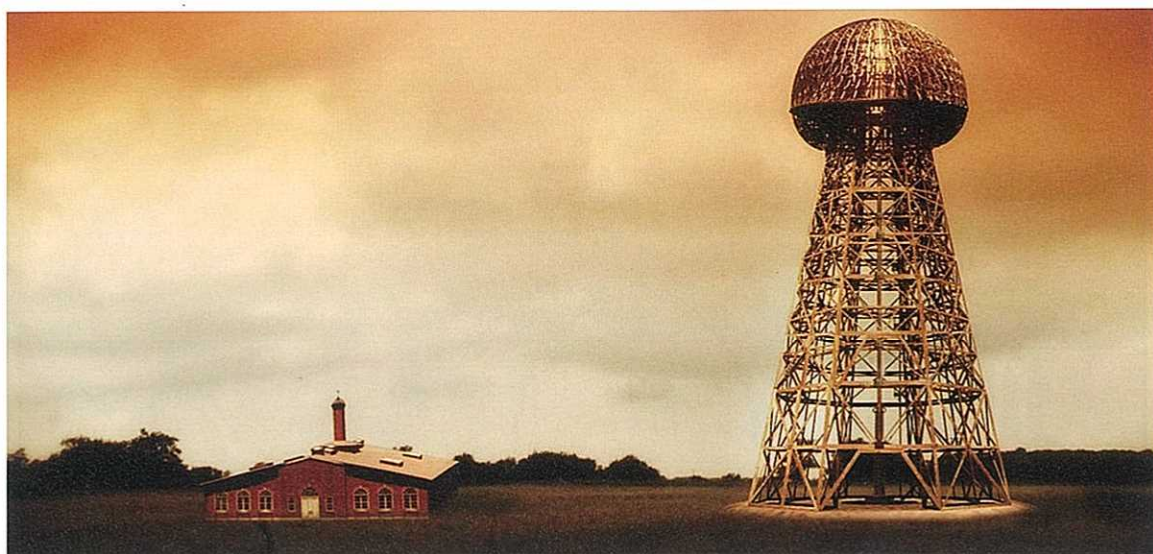
これは通信であって、電力伝送とは無関係と思う方がおられるかもしれませんが、電波を利用するワイヤレスのエネルギー伝送技術は、かつては非常に身近にあったものです。

私の子供のころ、昭和20～30年代に電気少年たちが熱中したものは鉱石ラジオの製作でした。一般の家庭にはTVはまだ普及してなく、真空管式のラジオもありましたが、通常は家に1台、それも親たちが聞くものであり、子供達にチャンネル権ならぬ番組選択権はありませんでした。しかし、アンテナ・コイルとバリコン、鉱石検波器とクリスタル・イヤホンがあれば、電気を使わなくても自分のラジオ放送が聴けることは、大いにその製作意欲を高めたものです。これは図1のような回路を使って、電波からクリスタル・イヤホンを駆動するエネルギーを調達するワイヤレス電力



〈図1〉鉱石ラジオの回路

伝送を体現したものともいえます。なお、当時すでにゲルマニウム・ダイオードもあったのですが、まだ非常に高価であり、子供の小遣いでおいそれと買えるものではありませんでした。



〈写真4〉 テスラの無線給電システムを実証するために建設されたウォーデンクリフ・タワー(高さ57m, 米国ニューヨーク州ロング・アイランド)



〈写真5〉 テスラの肖像を描いたセルビア紙幣

■ 2.4 ワイヤレス給電の始まり

最初に行われたワイヤレス電力伝送の実証実験は鉱石ラジオと同じような電波放射方式でした。1891年にワイヤレス電力伝送の特許⁽¹⁾を取得したセルビア出身のTesla^{Nikola Tesla}は1905年に米国ニューヨーク州ロング・アイランドのショアハムに高さ57mのウォーデンクリフ・タワー^{Wardenclyffe Tower}、一般にはテスラ・タワーと呼ばれる電波送信塔(写真4)を建設し、150 kHzの電磁波を使って出力300 kWでワイヤレス給電の実証実験を行いました。彼はこのワイヤレス電力伝送システムを「世界システム」と名付けましたが、それは送電電磁

波が地球との共振現象により地球の反対側にまで達すると思ったためです⁽²⁾。しかし、実際には地球との共振ではなく、電磁波の伝搬現象によるワイヤレス電力伝送だったため、実験は失敗に終わりました。

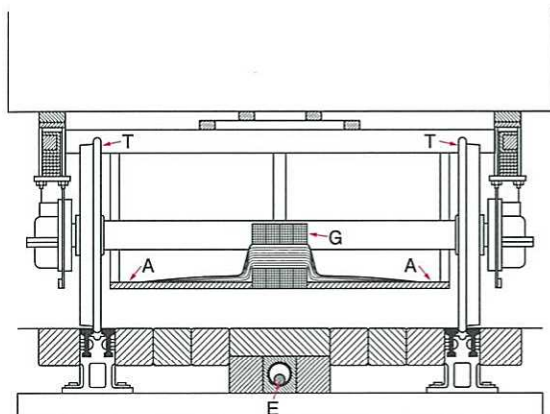
しかしながら故国セルビアでは今でも絶大な人気があり、紙幣(写真5)や切手(写真6)にその姿を見ることができます。

■ 2.5 EV出現でワイヤレス給電も興隆か

同時期、すでに世に出ていた電動機や電池等を使ってEVの開発も行われていまして、1894年には米国のEmil E. Keller^{Emil E. Keller}が実用的なEVを発明し、タクシーとしても使



〈写真6〉 テスラの肖像を描いたセルビア切手



A: 台座, E: 給電線, G: 2次コイル, T: 台車

〈図2〉 ユタンとルブランによる電車でワイヤレス給電に関する特許書類⁽³⁾に登場する図

われるようになっていました。1903年には米国のエジソンも、自ら発明したアルカリ蓄電池を搭載したEVを世に出しています。

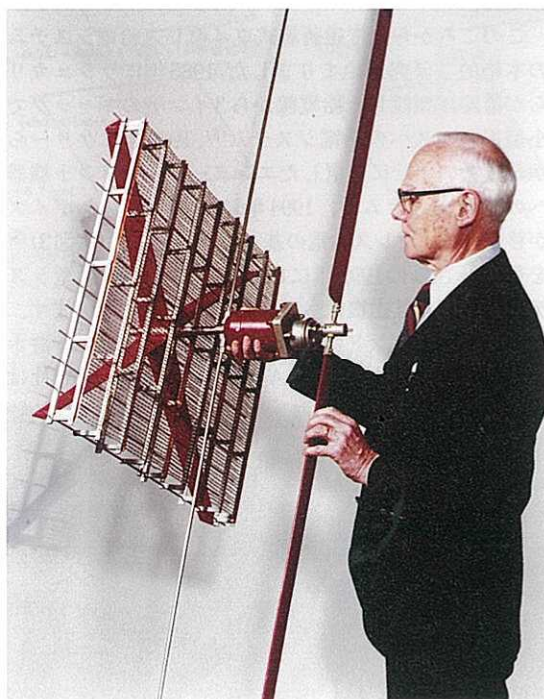
EV黎明期の1894年には米国のユタンとルブランが電車で、3 kHzの電磁波を使った電磁誘導型ワイヤレス電力伝送の特許⁽³⁾ (図2)を取得しています。

しかし1908年に発売されたフォードT型を始めとするガソリン・エンジン車の目覚ましい発展により、わずか十数年後の1920年代にはEV製造は打ち切れ、ワイヤレス電力伝送技術も忘れられていきました。

3 ワイヤレス給電の再登場

3.1 戦争は技術発達の母？

戦争は技術の発達を促す母のようだとはいわれますが、ワイヤレス電力伝送が実際に可能になったのは、テスラの時代から半世紀後、大電力のマイクロ波送電を必要とするレーダが開発された第2次世界大戦以降



〈写真7〉 ブラウンと飛行体に搭載したレクテナ

です。

1964年に米国のブラウンが2.45 GHzのマイクロ波電力を飛行体(写真7)に搭載し、自身の発明となる「レクテナ」(rectifying antennaの略)で受信して、電力変換効率80%で直流に変換して電力伝送できることを実証しています⁽⁴⁾。1975年、米国のディキンソンは、直径26 mのパラボラ・アンテナから2.388 GHzで450 kWのマイクロ波を送電し、1.54 km先のレクテナ(1.16 m × 1.2 m × 17基)で30.4 kWの受電を成功させました⁽⁵⁾。

これらの実験により、マイクロ波を使って指向性を高めれば、大電力を長距離に伝送できることが明らかになりました。しかし、高いビーム効率を実現するた

めには非常に大きなサイズのアンテナを必要とすることや、人体防護の観点からマイクロ波を使ったワイヤレス電力伝送の研究は下火になりました。

■ 3.2 半導体の発展がワイヤレス給電を実現

電磁誘導技術を使ったワイヤレス給電製品が具体的に身の回りで見られるようになるのは1980年代になってからです。これは、効率的な電磁誘導ワイヤレス給電を実現するには商用周波数の電源を高周波電力にするインバータ技術が必要ですが、大電力半導体デバイスの普及により、安価で小型/高性能なインバータを容易に入手できるようになったのが、1980年ころであることによります。

● 海外

このころから、電磁誘導式ワイヤレス給電システムの本格的な研究が始まりました。1986年にラシュカリKhoshrow Lashkariらが道路に埋設した給電線から3インチのギャップで小型電動バスへの給電システム⁽⁶⁾、1989年にケリーArthur W. Kelleyらが飛行機の座席に設置したエンターテインメント機器への給電システム⁽⁷⁾、1994年にはグリーンAndrew W. GreenとボイスJohn T. Boysが移動型ワイヤレス給電の基本となるシステム(図3)⁽⁸⁾を発表。さらに1995年にはクロンツKeith W. Klontzらが移動型システムを使った鉱山機械への応用⁽⁹⁾を提案しています。

ニュージーランドにあるオークランド大学の特許ホールディング会社であるAuckland UniServices社はグリーンらによる移動型ワイヤレス給電システムの特許を自動車/半導体分野の搬送機器用途のものを日本の㈱ダイフクに、そのほかの分野はドイツのWampfler(現Conductix-Wampfler)社に対して使用許諾し、ダイフクではHID(High Efficiency Inductive Power

Distribution Technology)システムをWampflerはIPT(Inductive Power Transfer)システムをそれぞれ商品化しました。

● 国内

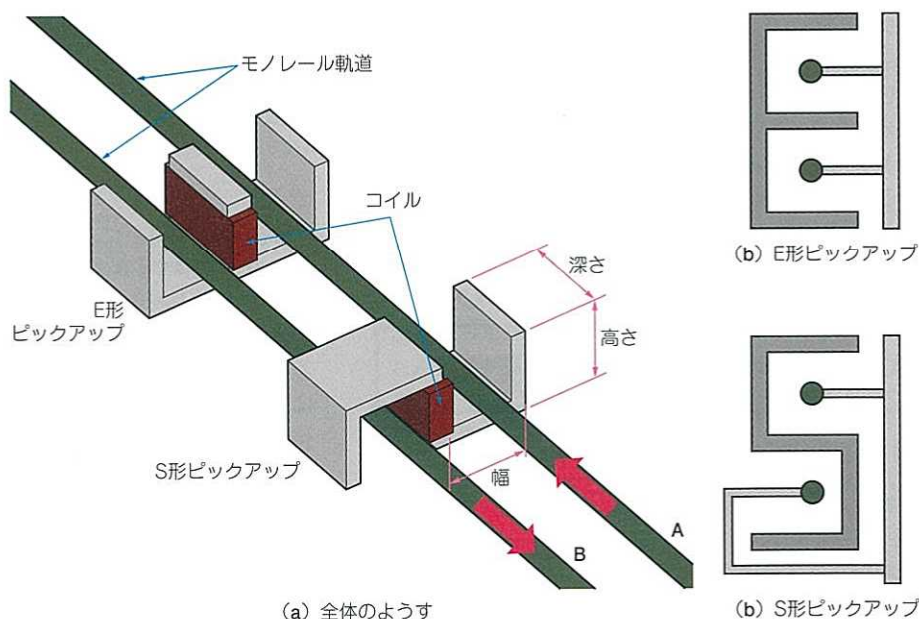
1991年に松木英敏らが人工心臓駆動用に皮膚を隔てて給電するシステム⁽¹⁰⁾を発表し、1996年に河村篤男らは多軸ロボットの関節を通して送電と通信を同時に行うシステム⁽¹¹⁾を提案しています。1999年に安倍秀明らが家電品への充電器⁽¹²⁾、2002年に湯村敬らはエレベータへの給電⁽¹³⁾を発表しています。

これらの研究の結果、電磁誘導式のワイヤレス給電システムは家庭での水回り機器や工場内自動搬送車(AGV: Automated Guided Vehicle)など、多くの分野で使われるようになりました。

■ 3.3 コイルを2m離れた実験の成功写真がワイヤレス給電の世界に激震を与えた

2007年にマサチューセッツ工科大学(MIT)のマリン・ソーリャッチMarin SoljačićのグループがLC共振させた直径60 cmのヘリカル型オープン・コイルどうしを電磁的に結合させることで、距離2 mでも伝送効率40 %以上で60 Wの電球を点灯させる実験に成功したことを論文発表し、図4の構成でデモンストレーション(写真8)を行いました⁽¹⁴⁾。この写真は衝撃的なもので、世界の大きな注目を集めました。

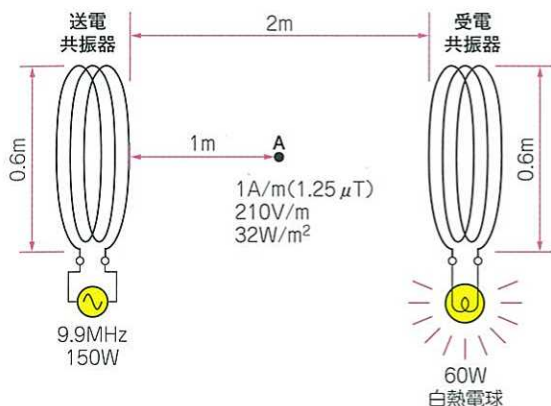
それまでの電磁誘導式では短距離しか届かなかったワイヤレス給電の世界に新たな可能性を与えるものとなり、大ギャップを必要とするEVへの充電など、時代のニーズに沿って、実用化に向けた研究開発が盛んに行われて、製品も多数出回ってきています。



〈図3〉Wampfler社の移動型IPTのコイル構成

3.4 磁界結合があれば電界結合も

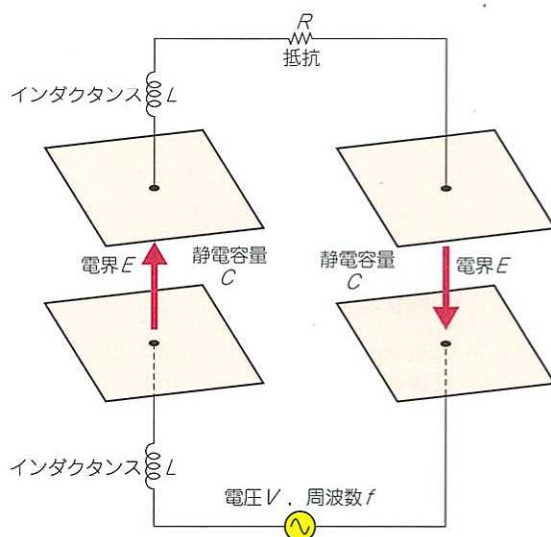
前述したように送電側と受電側のLC共振器間の「磁界」エネルギーを媒介してワイヤレス給電が可能であるならば、送電側と受電側にそれぞれ電極を設置し、電極が近接したときに発生する「電界」のエネルギーを媒介した方式もまた成り立ちます。これが電界結合方式です。これはまさにコンデンサであり、コンデンサは、いわば極板間に変位電流を流すことでワイヤ



〈図4〉MITのソーラッチャーによる磁界共振型ワイヤレス電力伝送の実験概要

スにエネルギー伝送を行うデバイスといえます。

すなわち、電界結合方式は電極を近接させるときに形成される静電容量(接合容量)に交流電圧を加え、静電誘導の作用により電力伝送する方式です。2008年にフーらがサッカー・ロボットへの給電⁽¹⁵⁾を、2011年にクラインは4.2 MHzを使って80%近い効率で



〈図5〉電界結合方式の原理的な構成



〈写真8〉MITのソーラッチャーによる磁界共振型ワイヤレス電力伝送のデモ写真(Photo: Courtesy Witricity, Corp.)

3.7 W の給電⁽¹⁶⁾を発表しています。

電界結合方式は図5に示すように、LC共振回路を使う点では磁界結合方式と同様ですが、電流を流して磁界を作る磁界結合方式に対して、電界を利用するので電極間に電圧を加えるだけでよく、磁界結合方式に比べて装置が小型化する利点があります。

しかし、空気中への放電を避けるために電界強度に上限が存在するため、小電力機器が対象になると思われます。また、電極間はコンデンサなので、磁界に比べて平等な電界を比較的实现しやすく、水平方向の位置ずれに対応しやすいのですが、送電側と受電側の電極を近づける必要があります。

4 最近の動き

4.1 電波放射方式

Wi-FiやBluetoothと似たような電波放射式では、2013年に米国Ossia社が2.4 GHz帯を使って最大約10 m離れて最大1 Wまでを複数デバイスに給電できる新しいワイヤレス充電技術“Cota”⁽¹⁷⁾を発表しました。これは図6のように送受電デバイス間に人が入っても安全な方式です。米国Energous社も2017年12月に最長3 ftの距離から最大10台の機器へのワイヤレ

ス電力伝送を可能にするWattUpシステムに関して米連邦通信委員会(FCC)の認可を取得したと発表しています。

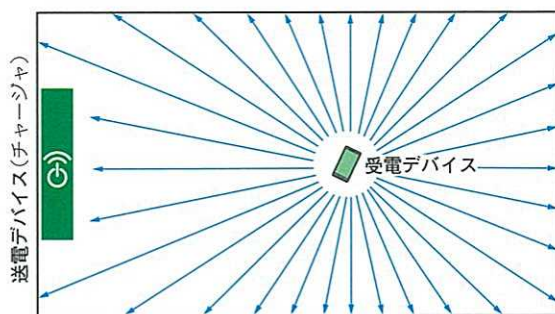
4.2 磁界結合方式

● EV向け

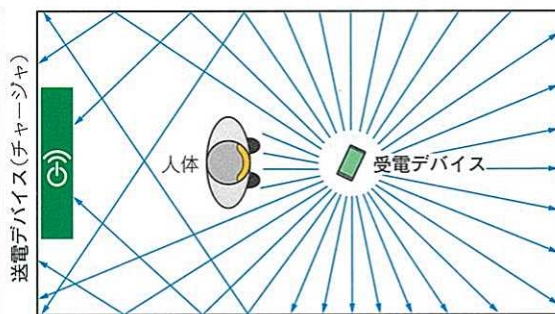
これは、ほとんどが磁界共振式で開発されています。EV用途としては、MITが発明したワイヤレス電力伝送技術を商業化することを目的に2007年に設立された米国WiTricity社が世界の多くの自動車会社などと技術提携を行い、いくつかの会社が搭載して実証を行



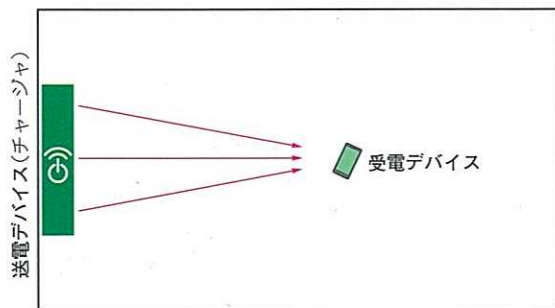
〈写真9〉ホンダ「フィットEV」に対応したワイヤレス給電システム〔㈱IHI, Witricity, 本田技研工業㈱〕



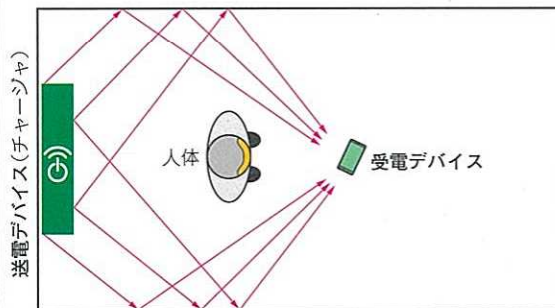
(a) 受電デバイスがビーコン・パルスを送信



(c) ビーコン・パルスの一部が人体などの障害物によってさえぎられる場合



(b) 送電デバイスが入射したビーコン信号とそっくり逆向きの特性を形成して、受電デバイスへ焦点を当てた充電パルスを送信する



(d) 送電デバイスは入射したビーコンとそっくり逆向きに充電パルスを送信する

〈図6〉Ossia社による“Cota”の動作

っています。写真9はその一例です⁽¹⁸⁾。

UniServices社が設立したHalo IPT社は、2010年にボイズが発明した位置ずれ特性が良好なDouble-D(D-D)コイル技術を持つEV用ワイヤレス給電システムを発表しました。そして2011年に米国Qualcomm社に買収され、Qualcomm Halo社として3.3/7/11/20 kWのシステムを発表しています⁽¹⁹⁾。写真10がそのD-Dコイルです。同じ2010年にはUniServices社からD-Dコイルの特許許諾を得て、(株)ダイフクが静止型のD-PADシステムを開発しています⁽²⁰⁾。

このほかにも多くの会社が磁界共振方式を開発しています。グローバルな商品である自動車に搭載する機器は相互互換性が重要で、現在IEC/ISOを中心にワイヤレス給電システムの規格化が進められています。

● 電動バス

自動車ほどグローバルではない電動バス用のワイヤレス給電システムは、欧州を中心に各地で100 k ~ 200 kWのものがすでに実運用されていて、米国自動車技術者協会のSAE J2954において現状使われている20 kHz帯の周波数になることが決まりました。写真11はその一例です。



〈写真10〉 Qualcomm HALOのD-Dコイル



〈写真11〉 Bombardier社の200 kWワイヤレス給電システムに対応した電動バス(ドイツのBraunschweig中央駅)

● 携帯電話など

自動車と同じようにグローバルな商品である携帯電話のワイヤレス給電システム(写真12)も異なるメーカー間の相互互換性が非常に重要です。約100 k ~ 200 kHzの電磁誘導式を採用するワイヤレス・パワー・コンソーシアム(WPC)のQi規格と6.78 MHzで動作する磁界共振式を採用するAirFuelアライアンスのRezence規格が競合していましたが、2017年にアップル社がiPhone 8やiPhone Xに採用したことでQi規格が優勢になっています。

■ 4.3 電界結合方式

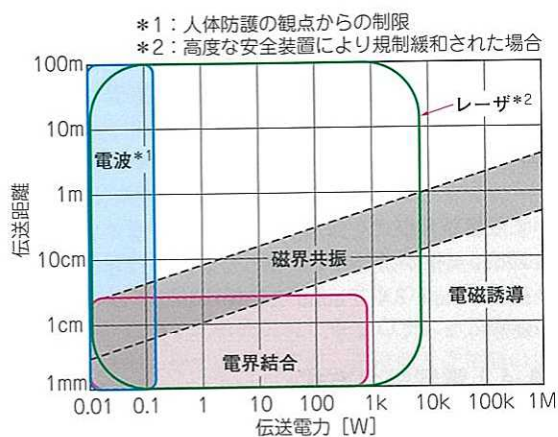
電界結合方式は電流を流さなくて済むので、透明電極や銀ナノ・ペーストを使ったコイルのように比較的抵抗が高いものも使えるため、特色ある製品が出てきています。写真13は透明電極を使い5 Wの給電が可能な試作機の例です。



〈写真12〉 Qi規格ならメーカーの異なるスマートフォンも充電可能



〈写真13〉 透明電極を採用し5Wまで給電可能な電界結合方式のワイヤレス充電器の試作機 [株式会社製作所]



〈図7〉各種ワイヤレス給電システムの伝送電力と伝送距離

5 おわりに

一般的なワイヤレス給電システムの送電電力とギャップ(伝送距離)の関係を図7に示します。レーザー方式は電波放射方式と同じように遠方へのワイヤレス電力伝送が可能です。電波放射方式と同じように高度な対人安全システムが装備されて規制緩和された場合に初めて可能となる伝送電力範囲を示しています。

本特集ではワイヤレス電力伝送方式の基礎および磁界結合方式の原理と実例、電界結合方式の原理と実例、電波放射方式の原理と実例などについて取り上げます。また、法規制および相互互換性確保のための標準化についても解説します。

参考・引用文献

- (1) N. Tesla; "System of Electric Lighting", U. S. Patent No. 454622, June 23, 1891.
- (2) N. Tesla; "Reprint of Tesla's Articles in Electrical Experimenter", Nicola Tesla Museum, pp. 20 ~ 25, pp. 54 ~ 57, 2006.
- (3) * M. Hutin and M. Leblanc; "Transformer system for electric railways", U. S. Patent 527857.
- (4) W. C. Brown; "The history of power transmission by radio waves", IEEE Transactions of Microwave Theory and Technology, vol. MTT-32, no. 9, pp. 1230 ~ 1242, 1984.
- (5) R. M. Dickinson; "Performance of a high-power, 2.388 GHz receiving array in wireless power transmission over 1.54 km", in 1976 IEEE A4TT-S International Microwave Symposium, pp. 139 ~ 141, 1976.
- (6) K. Lashkari, S. E. Schladober, and E. H. Lechner; "Inductive power transfer to an electric vehicle", Proceedings of 8th International Electric Vehicle Symposium, pp. 258 ~

267, 1986.

- (7) A. W. Kelley and W. R. Owens; "Contactless Power Supply for an Aircraft-Passenger Entertainment System", IEEE Transactions of Power Electronics, vol. 4, No. 3, pp. 348 ~ 354, 1986.
- (8) A. W. Green and J. T. Boys; "10 kHz inductively coupled power transfer-concept and control", IEE PEVD (Power Electronics and Variable-speed Drives conference), No. 399, pp. 694 ~ 699, 1994.
- (9) K. W. Klontz and D. W. Novotny; "Contactless power delivery system for mining applications", IEEE Transactions of Industrial Applications, vol. 31, pp. 27 ~ 35, 1995.
- (10) 松本英敏, 椎木元晴, 山本孝幸, 村上孝一; 「電磁型人工心臓駆動用経皮的薄型変圧器の特性」, 電気学会論文誌A, vol. 111, No. 9, pp. 807 ~ 810, 1991.
- (11) A. Kawamura, K. Ishioka and J. Hirai; "Wireless Transmission of Power and Information Through One High-Frequency Resonant AC Link Inverter for Robot Manipulator Applications", IEEE Transactions of Industrial Applications, vol. 32, No. 3, pp. 503 ~ 508, 1996.
- (12) 安倍秀明, 坂本浩, 原田耕介; 「非接触充電システムにおける負荷整合」, 電気学会論文誌D, vol. 119, No. 4, pp. 536 ~ 543, 1999.
- (13) 湯村敬, 岩田雅史, 桑田朗子, 荒木宏; 「ロープ式ダブルカーエレベータの基礎技術開発」, 日本機械学会, No. 01-58, 昇降機・遊戯施設等の最近の技術進歩講演会論文集, pp. 21 ~ 24, 2002.
- (14) A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić; "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonators", Science Magazine, No. 317, pp. 83 ~ 86, 2007.
- (15) A. P. Hu, C. Liu and H. L. Li; "A Novel Contactless Battery Charging System for Soccer Playing Robot", IEEE M2VIP 2008, pp. 646 ~ 650, 2008.
- (16) M. Kline, I. Izyumin, B. Boser and S. Sanders; "Capacitive Power Transfer for Contactless Charging", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 1398 ~ 1404, 2011.
- (17) Orson Nash; "Wireless power: could Cota make it long-distance and mainstream?", November 13, 2013.
<http://www.qiwireless.com/wireless-power-cota-make-long-distance-mainstream/>
- (18) 本田技研工業(株); 「2020年の未来の暮らしを具現化したスマートハウスをさいたま市に建設」, プレス発表, 2014年5月21日.
- (19) Qualcomm Technologies Inc.; "Qualcomm Acquires HaloIPT Team and its Wireless Electric Vehicle Charging Technology", Press Release on Nov. 8, 2011.
- (20) ㈱ダイフク; 「世界初、電動フォークリフト向けの非接触充電システムを実用化」, プレス発表, 2016年2月12日.

たかはし・しゅんすけ 早稲田大学 電動車両研究所

