

マイクロ波を用いた電気自動車無線充電システムの効率化

児島 淳一郎[†] 篠原 真毅[†] 三谷 友彦[†] 橋本 隆志[‡] 岸 則政[‡] 外村 博史^{‡‡} 岡崎 昭仁^{‡‡}

[†] 京都大学 生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

[‡] 日産自動車株式会社 総合研究所 〒237-8523 神奈川県横須賀市夏島町 1 番地

^{‡‡} 日産ディーゼル工業株式会社 〒362-8523 埼玉県上尾市大字壱丁目 1 番地

E-mail: [†] {j-kojima, shino, mitani}@rish.kyoto-u.ac.jp,

[‡] {t-hash, n-kishi}@mail.nissan.co.jp,

^{‡‡} {hiroshi_tonomura, akihito_okazaki}@nissandiesel.co.jp

あらまし マイクロ波無線電力伝送技術は、宇宙太陽発電所 SPS への応用が第一義的な目標であったが、近年は地上での応用例も多い。電気二重層キャパシタを蓄電素子とした電気自動車を、マイクロ波無線電力伝送技術をもって充電する本システムも地上での応用の一例である。本報告では充電効率向上の為の研究内容とその成果について論じる。

キーワード レクテナ、導波管スロットアンテナ、DC-DC コンバータ、無線電力伝送、マイクロ波

Development of highly-efficient microwave wireless charging system for electric vehicle

Junichiro KOJIMA[†] Naoki SHINOHARA[†] Tomohiko MITANI[†]

Takashi HASHIMOTO[‡] Norimasa KISHI[‡]

Hiroshi TOYOMURA^{‡‡} and Akihito OKAZAKI^{‡‡}

[†] Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011 Japan

[‡] Nissan Research Center, NISSAN Motor co., LTD. 1 Natsushima, Yokosuka, Kanagawa, 237-8523 Japan

^{‡‡} Nissan Diesel Motor co., LTD. 1-1 Oaza, Ageo, Saitama, 362-8523 Japan

E-mail: [†] {j-kojima, shino, mitani}@rish.kyoto-u.ac.jp,

[‡] {t-hash, n-kishi}@mail.nissan.co.jp,

^{‡‡} {hiroshi_tonomura, akihito_okazaki}@nissandiesel.co.jp

Abstract Wireless power transmitting technology via microwave is being studied for applications to ground-to-ground services as well as Solar Power Satellites. We studied on charging of electric double layer capacitors on an electric vehicle by this technology. Experimental trials and results for increasing charging efficiency are described.

Keyword rectenna, waveguide-slotted antenna, DC-DC converter, wireless power transmitting, microwave

1. 背景

近年、環境問題への懸念から自動車の排気ガスを規制する動きが出てきている。ハイブリッド車が隆盛を極めているのも燃費の問題だけではなく、「ロハス」志向の高まりに起因するところが大いと考えられる。電気自動車の導入で環境負荷の更なる軽減を目指す動きも活発であるが、今日の代表的な電気自動車である燃料電池電気自動車には、電池が重い、航続距離が短い、充電時には高電圧ケーブル接触による感電の危険性がある等の問題点も多い。電磁誘導を用いた非接触充電

システムに関する研究も行われているが、原理上ギャップ許容範囲が数ミリメートルに限定されるという問題点がある。

そこで当研究グループでは上述した問題点を解決すべく、マイクロ波を用いた電気自動車無線充電システムの研究、開発を進めている。本システムは移動中充電にも応用可能であるため、航続距離は伸び、必要となる充電地も軽量化できる。また無線充電なので、感電の危険性も皆無である。

2. 充電システム概略

本充電システムの概略図を図 1 に示す。

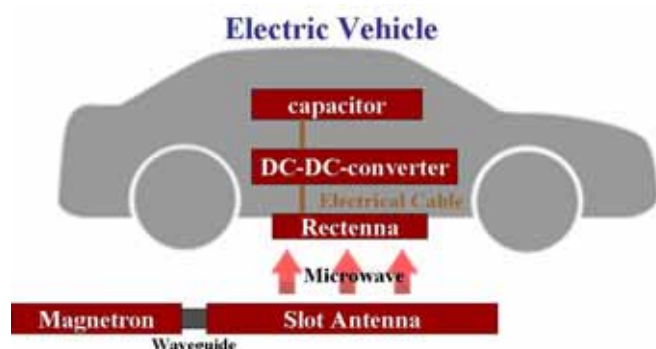


図 1 電気自動車無線充電システム概略

送電システムは、マイクロ波源であるマグネトロン、放射装置である導波管スロットアンテナから構成される。受電システムには、レクテナと呼ばれるアンテナと整流回路を一体化した素子を使用している。導波管スロットアンテナから鉛直上向きに放射したマイクロ波エネルギーを車の底に敷き詰めたレクテナで受電し、充電用の電気二重層キャパシタに蓄えるというのが本システムの概要である。

なお、周波数は ISM バンド帯であり、当研究グループで実績がある 2.45GHz とした。また、レクテナアンテナ部にはパッチアンテナを用いた。

3. これまでの電気自動車無線充電システムの問題点および導かれる解決策

マイクロ波を用いた電気自動車無線充電システムに関する研究は十年来に渡って行われている。2005 年度には上述した充電系と同様の系で充電実験を行った[1]。導波管スロットアンテナ 5 本を用いて約 1kW を放射した際には、総合マイクロ波送受電効率 10%、キャパシタの実用レベル(120V)までの充電時間は約 60 分であった。効率向上を目指し、一本の導波管スロットアンテナから 190W を放射した際には総合マイクロ波送受電効率 20%を達成した。

本研究は更なる充電効率向上を目指す。2005 年度の充電実験の結果を分析した結果、以下に示す 3 点の改善すべき問題点があると判断した。

1. 導波管スロットアンテナが、本充電系において最適化されていない[2]
2. レクテナの耐電力が不十分である
3. レクテナの出力インピーダンスが変動する

1 点目に関して、2005 年度の充電実験時に使用した導波管スロットアンテナは、自由空間で最適になるようにシミュレーションで設計したものである。しかし、

本充電系のように、送電アンテナの近傍領域にレクテナや金属などの構造物が存在する場合、導波管スロットアンテナの放射特性が悪化していると思われる。本研究では導波管スロットアンテナ上方にレクテナアレイ及び金属が存在することを考慮に入れて導波管スロットアンテナを設計し、この問題の解決を図った。

2 点目に関して、2005 年度の充電実験時には一部のレクテナが破損してしまった。これは、導波管スロットアンテナからのマイクロ波の放射が均一ではないため、部分的に強い電力が入射してしまったためであると考えられる。また、破損に至らないまでも性能が劣化してしまったレクテナも存在すると思われる。本研究ではレクテナ整流回路前段のウィルキンソン分配器の分配数を増やすことで、整流回路単体に入射する電力を分散させ、レクテナ全体としての耐電力向上を図った。

3 点目に関して、2005 年度の充電実験時にはレクテナアレイと電気二重層キャパシタを直結していた。電気二重層キャパシタは充電電圧によって入力インピーダンスが変動する。レクテナは出力インピーダンスが最適値から外れると RF-DC 変換効率が大幅に悪化する。よってこの 2 つの素子を直結した場合、レクテナアレイが RF-DC 変換を常時高効率に行うことは不可能である。本研究ではレクテナアレイと電気二重層キャパシタの間に DC-DC コンバータを介することで、レクテナ出力インピーダンスを常時最適値に保ち、RF-DC 変換効率を常時高く保つ工夫を施した。

4. 導波管スロットアンテナの改善

2005 年度の充電実験時に送電アンテナ、受電アンテナ間距離が 12.5cm の時に最も充電効率が高いという結果が得られた[1]。そこで、シミュレーション空間で導波管スロットアンテナ上方 12.5cm の位置にパッチアンテナアレイを配置し、この状況下で最適な導波管スロットアンテナの設計を試みた。本シミュレーションには Ansoft 社製の有限要素法をベースとした電磁界解析ツールである 3 次元電磁界シミュレータ HFSS(High Frequency Structure Simulator)を用いた。シミュレーション空間を図 2 に示す。ポート 1 を導波管スロットアンテナに、ポート 2 をアレイの中心に位置するパッチアンテナに設定した。なお、シミュレーション空間の上面は電気自動車を模して反射境界とし、地面も同様の反射境界とし、それ以外は開放境界とした。

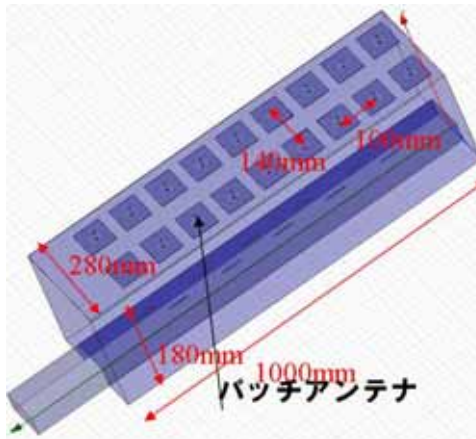


図2 導波管スロットアンテナ最適化のためのシミュレーション空間

解析を進めた結果、導波管スロットアンテナのオフセットを外側へずらすことで、つまり導波管スロットアンテナの放射インピーダンスを下げることで導波管スロットアンテナからパッチアンテナへの透過特性が良くなることが分かった。自由空間では 19.3mm で最適であったオフセットを 25.8mm にした時に、導波管スロットアンテナからアレイ中央部へのパッチアンテナへの透過特性 S_{21} が最大となった。従来の導波管スロットアンテナを用いた場合、 S_{21} は -14.7dB であった。これは導波管スロットアンテナの出力のうち 3.39% がアレイ中央のパッチアンテナへ入力されたことを意味する。最適化した導波管スロットアンテナを用いた際には -13.1dB、つまり、これは導波管スロットアンテナの出力のうち 4.90% がアレイ中央のパッチアンテナへ入力されるという結果を得た。導波管スロットアンテナの調整で、エネルギー伝達効率が約 1.4 倍になることが示された。

5. 導波管スロットアンテナの改善

2005 年度に作製した 8 分配レクテナ整流回路は耐電圧が不十分であったため、充電総合実験時に破損してしまった。そこで、小型化と同時に更なる大電力化を目指し、レクテナ整流回路の開発を行った。小型化は出力平滑用のスタブの長さを長くすることで、ダイオード-出力平滑用スタブの間隔を短くしても効率が保たれることに主眼をおき、大電力化はレクテナ整流回路の前段の分配器の分配数を増やすことで、それぞれのダイオードにかかる電圧を軽減させることに主眼をおいた。結果、図 3 示す 16 分配レクテナ整流回路が完成した。特性を図 4 に示す。

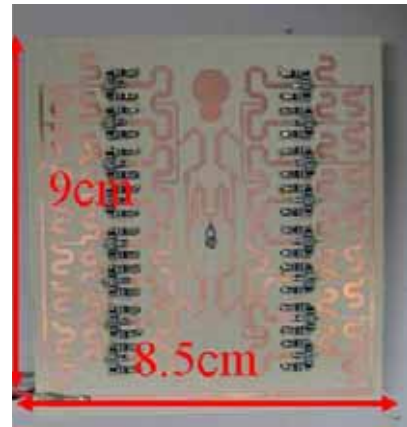


図3 作製した 16 分配レクテナ整流回路

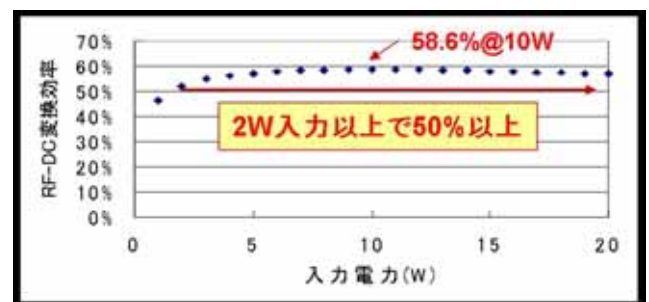


図4 16 分配レクテナ整流回路の電力特性

図 4 のように、最適負荷 30Ω を接続し、最適な電力である 10W のマイクロ波を入射させた場合、RF-DC 変換効率は 58.6% となった。また、入力が 20W のときも RF-DC 変換効率は 57.1% と高い値を保っている。前回実験時は 8 分配レクテナ整流回路を用いており、この RF-DC 変換効率は最適負荷 10Ω を接続し、最適電力 2.7W を入射させた状態で 60.3% であった。しかし、入力が 6W を超えると RF-DC 変換効率が 50% を下回っている。つまり、新しく開発した 16 分配レクテナ整流回路はピーク時の変換効率こそ若干劣るものの入力電力特性は大きく改善されたと言える。

6. 総合実験

上述した導波管スロットアンテナ、レクテナを用いて充電実験を行った。さらに最後に翔エンジニアリング製の DC-DC コンバータを用いて、充電効率の更なる改善にも取り組んだ。ただし、レクテナアレイは 10×4 個の計 40 素子から構成した。

まず、導波管スロットアンテナの改善によりどの程度充電効率が改善されるのかを調査した。調査にあたり、オフセットが 19.3mm、21.3mm、23.0mm、26.0mm の 4 つの導波管スロットアンテナを作製し、それぞれの導波管スロットアンテナを用いた場合について、送受電アンテナ間距離と充電効率の関係を調べた。結果

を図5に示す。なお、導波管スロットアンテナの比較充電実験ではDC-DCコンバータは用いていない。また、レクテナの後段に接続する負荷には200Ωの直流抵抗を用いた。放射電力は234Wとした。

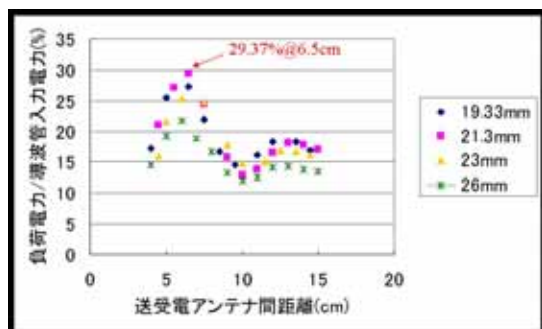


図5 送受電アンテナ間距離と充電効率

自由空間で最適なオフセットは19.3mm、シミュレーションから導き出した最適オフセットは26mm、本充電実験で最適であったオフセットは21.3mmであった。本充電実験ではアレイを構成するレクテナの間隔がシミュレーション時よりも密であるため、導波管スロットアンテナから見える金属の面積がシミュレーション時よりも少ない。最適オフセットが中間的な値になったのはこのためであると考えられる。

レクテナ整流回路の改善については、2005年度に用いた8分配レクテナ整流回路の在庫が不十分であったため、充電効率に関して比較実験を行うことが出来なかったが、導波管スロットアンテナからの放射電力が400Wまでは正常に動作していることを確認した。

最後に、レクテナアレイと電気二重層キャパシタの間にDC-DCコンバータを介して同様の充電実験を行った。このDC-DCコンバータは入力電圧を制御することが出来る。DC-DCコンバータ入力電圧を制御しない場合、80Vに制御した場合、96Vに制御した場合のそれぞれについてキャパシタ(日清紡績製 N'sCAP15V)を3Vから14Vまで充電し、充電時間を比較した。結果を図6に示す。ただし放射電力は114Wである。

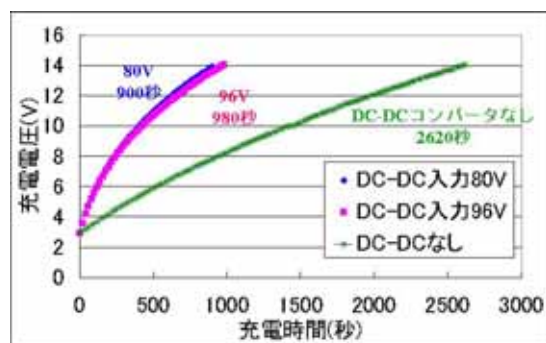


図6 DC-DCコンバータを用いた充電実験の結果

DC-DCコンバータを介した場合は、充電時間が約1/3に短縮された。つまり、充電効率が約3倍になった。また、DC-DCコンバータを介した場合でも制御電圧によって充電時間に若干の差が生じた。これは、レクテナ出力インピーダンスによってレクテナのRF-DC変換効率が変化するためである。

7. まとめ

本研究は、電気自動車無線充電システムの充電効率を向上させるという目的の下、以下の3点に着眼点を置いた。1点目の導波管スロットアンテナについては、充電系を模した環境下でパラメータを最適化することで、より充電系に適した導波管スロットアンテナの作製に成功した。その結果、充電総合実験にて自由空間で最適化したものを使用した場合と比較して、充電効率が約2%向上した。2点目のレクテナについては、大電力化のために、ウィルキンソン分配回路の分配数を8から16に増加させ、耐電力を向上させることに成功した。また、10W以上の大電力入力時にもRF-DC変換効率が50%を超えていることも確認した。3点目のDC-DCコンバータの導入により、レクテナ出力インピーダンスが常に最適値に保たれ、DC-DCコンバータ未使用時に比べて充電効率が約3倍と飛躍的に改善された。

さらに充電効率を向上させるためには、個々の素子、特にレクテナのRF-DC変換効率を向上させる必要がある。このためにはレクテナを構成する材料から見直す必要がある。中でもダイオードはレクテナのRF-DC変換効率及び耐電力向上のために非常に重要である。現在、SiCショットキーバリアダイオード等を用いた新たなレクテナの設計、開発を行っている。

謝辞

本実験は、京都大学生存圏研究所全国共同利用「マイクロ波エネルギー伝送実験装置」の電波暗室にて行われた。

文 献

- [1] 篠田健司, 篠原真毅, 三谷友彦, 松本紘, 橋本隆志, 岸則政, “マイクロ波を用いた電気自動車充電システムの評価研究”, 信学技報 SPS2005-11(2006-02), 2006, pp.1-4.
- [2] 篠原真毅, 兒島淳一郎, 三谷友彦, 橋本隆志, 岸則政, 藤田晋, 三田村健, 外村博史, 西村省吾, “マイクロ波を用いた電気自動車充電システムの評価研究”, 信学技報 SPS2006-18(2007-02), 2007, pp.21-24.