

[招待講演] 自動車タイヤを介するゼロギャップ走行中給電

大平 孝

豊橋技術科学大学 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1

E-mail: ohira@tut.jp

あらまし 走行中給電の電気自動車が主流交通手段となるグリーンでクリーンな社会を目指して電化道路電気自動車 EVER (Electric Vehicle on Electrified Roadway) の研究を進めた。EVERとは高速道路と主要幹線道路を電化工事を施し、幹線道路入り口までは小さなバッテリーで走行し、幹線道路では路面からのエネルギーで走行するというコンセプトである。これが可能となれば電気自動車の行動範囲を飛躍的に拡大できる。自動車のタイヤが常に路面に接地している「ゼロギャップ」ということに着目し、これに鉄道における架線とパンタグラフの役割をさせる。タイヤのトレッド表面はゴム製なので通常の50/60ヘルツの電流はまったく流れない。そこで、電流をメガヘルツ帯の高周波エネルギーに変換してタイヤに供給するというしくみを考えた。この原理に基づいて市販の乗用車用ラジアルタイヤを用いて給電実験を行った。高周波電源からのエネルギーがタイヤを介してホイールに伝送され、車軸間に挿入した白熱電球が輝いた。これにより実用的な伝送効率が達成可能であることがわかった。新しい電気自動車システムの可能性を示す画期的な第1歩である。

キーワード 電気自動車, 電化道路, 電力伝送, 変位電流, スチールベルト, ホイール

Via-Wheel Power Feed to Running Electric Vehicles

invited

Takashi OHIRA

Toyohashi University of Technology 1-1 Hibirigaoka, Tempaku, Toyohashi, 441-8580 Japan

E-mail: ohira@tut.jp

Abstract Electric vehicles (EVs) are strongly expected as a drastic green innovation to replace conventional gasoline engines. Unfortunately for the moment, EVs are not so widely used. This is because of their short cruising distance, long charging time, high cost, and heavy weight. These are all due to the bulky batteries onboard. Indeed chemical engineers are attempting to improve battery performance, we still need a breakthrough for this problem. As a possible Maxwellian approach to on-the-run wireless feeding, we focus on the steel belt usually built in a tire for vehicles. It can collect RF displacement current if another electrode is buried beneath the road by analogy to an overhead wire for railways. Since the tire always surely touches on the road surface with "zero-gap", it could be an ultimate wireless power transfer scheme. High dielectric constant of the tire permits high efficiency displacement current with much less electromagnetic field leakage to outside than trans-air-gap schemes. If EVs can employ such a feeding system, they have significant advantages of long cruising, no charging time, and lightweight. You may doubt such a scheme is really feasible. This paper brings the world first prototype demonstration that shows its high transmission efficiency using regular steel-belt tires and metal plates under the ground.

Keyword Electric Vehicle, Electrified Roadway, Wireless Power Transfer, Displacement Current, Steel Belt, Via Wheel

1. まえがき

鉄道の長い歴史をみてわかるように、動力源は石炭から石油へさらに電気へと変わってきた。その理由は石炭や石油より電気のほうが圧倒的に高効率すなわち省エネルギーだからである。たとえば新幹線がディーゼル式になることは決してない。自動車も同様に石炭から石油へ変わった。しかし、まだ電気自動車は本格普及に至っていない。それは、鉄道と違って、現在の電気自動車は大容量のバッテリーを搭載し、蓄積し

たエネルギーで走行するからである。もし自動車が、蓄積エネルギーではなく、トロリーバスのようになんらかの方法でインフラから直接電気を受けて走れるようになると、今よりも格段に省エネルギーな交通手段となるだろう。

2. 電気自動車の問題点

現在の電気自動車の普及を妨げている大きな要因は、よく知られているように1) 航続距離が短い、2) 充電時間が長い、3) 車両価格が高い、の3点である。航続距離を伸ば

すには大容量のバッテリーを搭載する必要があり、そうすると、充電時間が長くなる。しかも、車両が重くなるのでエネルギー効率が低下する。重い車重を駆動するためには大容量バッテリーが必要という悪循環である。現在、電気自動車の価格が300万円以上するのは大容量バッテリーが高価だからである。この悪循環から抜け出し、電気自動車が移動手段の主流となる省エネでクリーンな社会を構築するにはブレークスルーとなるなんらかの技術革新が不可欠である。

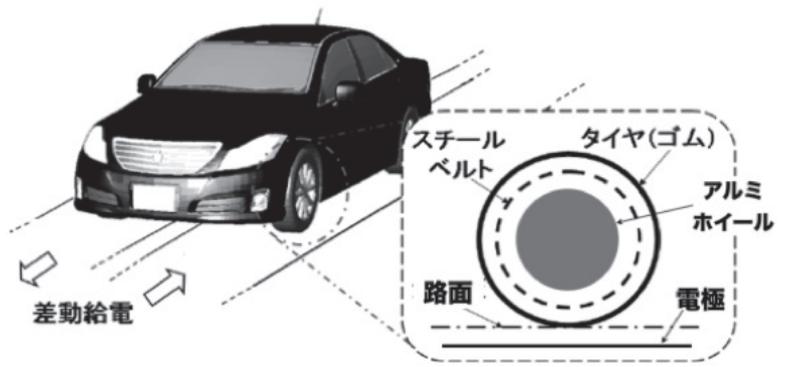


図2 路面下の電極対からタイヤを介して車両へエネルギーを伝える「ゼロギャップ」ワイヤレス給電

3. 電化道路電気自動車

電気自動車問題解決のブレークスルー技術として「電化道路電気自動車 EVER: Electric Vehicle on Electrified Roadway」の可能性研究を進めてきた[1]-[8]。EVERの基本概念を図1に示す。大容量バッテリーを車載せず、道路インフラからエネルギーを集電して路面電車のように走行する理想の電気自動車、つまり「停車中充電」から「走行中給電」へのパラダイム転換である。道路インフラの工事が必要だが、全国津々浦々まで全ての道路を電化するという意味ではない。少なくとも高速道路と主要幹線道路だけでも電化工事を施しておけば、たとえば自宅から幹線道路入り口までは小さなバッテリーで走行し、幹線道路では路面からのエネルギーで走行する。幹線道路からおりる頃には小さなバッテリーも満充電されていて、目的地まではそのバッテリーで走行する。これがEVERの基本コンセプトである。つまり、EVERが実現できれば大容量バッテリーを搭載することが不要となる。これにより、電気自動車は一般家庭で購入できる価格となり、しかも途中で充電することなく長距離に到達できる移動手段となる。

4. インフラからの走行中給電

走行中給電とは、走行中の電気自動車へ道路からエネルギーをたゆまなく連続的に届ける技術である。まず考えられる第1の方法が架線とパンタグラフである。これは接触集電とも呼ばれており、路面電車やトロリーバスがこの方法である。この方法は直接接触した導体から電流を採るのでエネ

ルギー効率は高いという特徴がある。しかし、電気自動車はワイヤレスつまり非接触で給電する必要があるため採用が困難である。

第2の方法は電磁誘導と呼ばれており、道路に埋めた巻線コイルと車両に搭載した巻線コイルの間の磁界結合を利用する方法である（磁気共鳴と呼ばれている方法も構造は類似）。この方法はワイヤレスつまり非接触であり、これを実用化した車両の報告もある。コイルは直径1m程度のサイズであり、ふたつのコイルの間で共通の磁力線を保つには、コイル同士がお互いに正しく向き合っている必要がある。この方法は停車中は高い効率を得ることができる。しかし、走行中はクルマが前後左右に移動するためコイル間の磁気結合効率が低下する。走行中に動作させるので、コイル間の距離を少なくとも車両の最低地上高以上離すことが必要である。これによって必然的に生じるエアギャップ（空隙）から磁界が外部へ漏洩する懸念がある。さらに、道路中にコイルを埋めるのは維持コストが高いという大きな問題もある。常にあちこちで道路を補修している日本において、道路工事の毎に新しいコイルを埋設し直すのは現実的とは言えない。

第3の方法が「ゼロギャップ」方式である。これはタイヤ誘電方式とも呼んでおり、図2に示すように、クルマのタイヤが常に路面に接地していることに着眼する。現在自動車に通常使われているタイヤはほぼすべてトレッド表面近くにスチールベルトが埋め込まれている。このスチールベルトが金属製つまり電氣的に導体であることに注目し、これにパンタグラフの働きをさせるワイヤレス給電方式である。一方、インフラ側には、架線のかわりとなる電極を路面下に敷設する。電極は導体平板あるいはそれと電氣的に等価な他の形状の導体でも可能である。道路の敷設や補修時のメンテナンスがコイルに比べて圧倒的に容易となることが期待できる。



図1 電化道路電気自動車 EVER の基本コンセプト

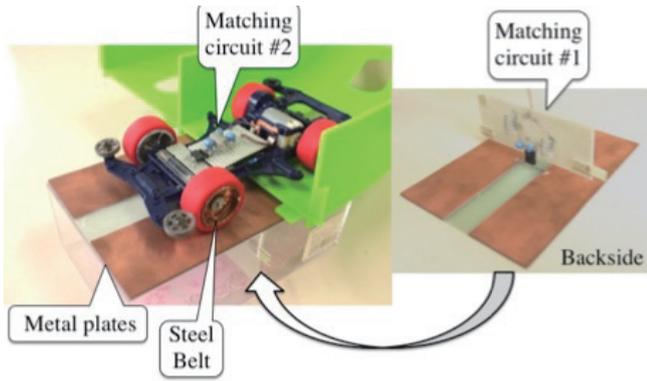


図3 電化道路と電気自動車の1/3 2スケールモデル

5. スケールモデル実験

タイヤは常に路面に接地しているというものの、トレッド表面はゴム製なので通常の50/60Hzの電流はまったく流れない。そこで、電流をMHz帯以上の高周波エネルギーに変換してタイヤに供給するというしくみを考えた。高周波エネルギーは電気的導電性がない材質にも変位電流として流れるという性質がある。言い換えると、ゴムやコンクリートなど電気的絶縁体は高周波の観点からみると絶縁体ではなく誘電体として働くという性質を利用することがポイントである。

スケールモデルの外観を図3に示す。このシステムを構築する際に問題点は、通常の高周波電源をそのまま接続してもほとんど車輪にエネルギーが伝わらないということである。なぜなら、高周波電源からの電力の大部分がタイヤ表面で反射してしまうからである。この反射は高周波電流に対するタイヤの電気的インピーダンスが電源インピーダンスと大きく異なるために起る。そこでここでは、電源とタイヤの間にコイルとコンデンサからなる回路（LC回路）を挿入した。この回路の働きは高周波電力を再度あえて反射させることである。これら2つの反射の位相を180度ずらせておくことにより、互いに反射がキャンセルしあって、結果的に電力を効率

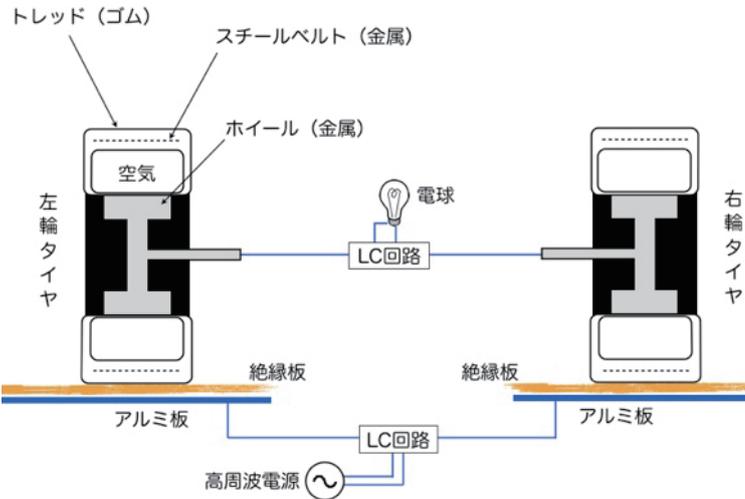


図5 路面下から車軸へエネルギーを伝える実験系構成

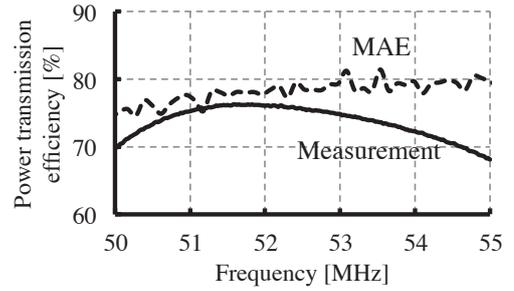


図4 スケールモデルの電力伝送効率測定結果

よくタイヤへ伝えることができるという工夫である。同様の回路を車軸と整流器の間にも挿入した。電力伝送効率の測定結果を図4に示す。電力効率 $|S_{21}|^2$ の実測値で76%を達成した。同図に破線で示してあるのは効率の上限指標である最大有能効率 MAE (Maximum Available Efficiency)

$$MAE = k - \sqrt{k^2 - 1}$$

$$k = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|}, \quad \Delta = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{vmatrix}$$

である。実測値としてMAEに近い効率を得たことからLC回路が有効に動作しているといえる。

6. 実際のタイヤによる給電実験

実際の乗用車用タイヤによる実験の構成を図2に示す。高周波電源→アルミ板→アクリル板→トレッド→スチールベルト→ラジアル→アルミホイール→右車軸→白熱電球の順にルートが構築され、帰路は左車軸から同様逆順に高周波電源まで一巡ルートを形成する。その電気的等価回路を図4に示す。スケールモデルと同様の考えに基づいて高周波電源とアルミ板の間にLC回路を挿入した。これはタイヤのインピーダンスが高周波電源と大きく異なっていることに起因する効率低下を解決するためである。同じく、LC回路を車軸と白熱電球の間にも挿入した。これはタイヤの

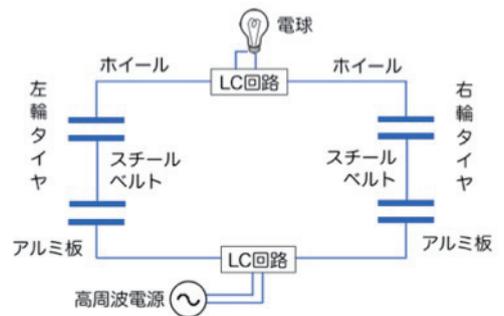


図6 実験系の電気的等価回路

インピーダンスが電球とも大きく異なっていることに起因する効率低下を解決するためである。これらの工夫を施して実験系を組み立てた。タイヤ素材に特別な工夫はなく、市販されている通常の乗用車用13インチラジアルタイヤをそのまま用いた。エネルギーが伝わったことを示すために左右車軸の間に60Wの白熱電球を接続した。高周波電源からのエネルギーがタイヤを介してホイールに伝送され、その証拠として、白熱電球が明るく点灯した。情報通信で培ってきた高周波技術を情報を伝えるためではなくエネルギーを伝える手段として活かしたことが実験成功の鍵である。

7. むすび

走行中給電の電気自動車主流交通手段となるグリーンでクリーンな社会[9]を目指す電化道路システムの可能性研究として、ここで報告した実験はその最初の第1歩である。路面からタイヤへ給電できるという原理を実証でき、EVER実現への突破口を開くブレークスルーという意味で大きな1歩だといえる。

文 献

- [1] 鈴木良輝, 鳥井俊宏, 水谷 豊, 杉浦貴光, 坂井尚貴, 上原秀幸, 大平 孝, “車両タイヤによるゼロギャップ無線電力伝送,” ワイヤレス・テクノロジー・パーク, アカデミアプログラム, 横浜, July 2012.
- [2] Yoshiki Suzuki, Takamitsu Sugiura, Naoki Sakai, Masahiro Hanazawa, and Takashi Ohira, "Dielectric Coupling from Electrified Roadway to Steel-Belt Tires Characterized for Miniature Model Car Running Demonstration", IEEE MTT-S International MicrowaveWorkshop Series on Innovative Wireless Power Transmission, IMWS-IWPT2012, pp.35-38, Kyoto, May 2012.
- [3] Takamitsu Sugiura, "High Efficiency Rectifier in Electric Power Feed System to Running Automobiles though Tires", IEEE AP/MTT-S Midland Student Express 2012 Spring, S3-4, Nagoya, April 2012.
- [4] Masahiro Hanazawa, Naoki Sakai, and Takashi Ohira, "SUPRA: Supply Underground Power to Running Automobiles", IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC2012, Greenville, March 2012.
- [5] 花澤理宏, 大平 孝, “タイヤ内スチールベルト道路埋設導体間の静電容量を用いた走行中給電” 電子情報通信学会技報, MPT2011-17, pp. 61-66, Oct. 2011.
- [6] 花澤理宏, 大平 孝, “走行する自動車への電力伝送技術実現に向けた取り組み” 電子情報通信学会技報, MW2011-36, pp. 23-28, June 2011.
- [7] Masahiro Hanazawa and Takashi Ohira, "Power Transfer for a Running Automobile", IEEE MTT-S International MicrowaveWorkshop Series on Innovative Wireless Power Transmission, IMWS-IWPT2011, pp.77-80, Kyoto, May 2011.
- [8] 花澤理宏, 大平 孝, “走行する自動車への電力伝送に関する基礎検討” 電子情報通信学会技報, MW 2010-168, pp. 93-98, March 2011.
- [9] 西川和廣, “電気自動車(EV)普及が広げる道路インフラの可能性への期待,” 土木学会誌, vol. 96, issue 4, p.43, April 2011.



図7 路面下のアルミ電極板から左右のタイヤを介して車軸間へエネルギーが伝わり60W白熱電球が輝いた