

9. 第4世代ビークルの研究

電気・電子情報工学系 教授 大平 孝, 准教授 田村 昌也, 助教 坂井 尚貴

9-1 はじめに

(1) 第4世代ビークルの黎明

第1世代＝石炭, 第2世代＝石油, 第3世代＝バッテリー, に続く第4世代ビークルとして, 本学は「電化道路電気自動車 EVER: Electric Vehicle on Electrified Roadway」を提唱した(図9-1-1)。第1～3世代が“エネルギーを運搬して走行”であるのに対し, 第4世代は“エネルギーを集電して走行”の概念に基づく。すなわちエネルギー資源のパラダイムシフトである。

近年注目されている, 第3世代のバッテリー式電気自動車はグリーンなビークル社会実現のコアテクノロジーである。第4世代ビークルの EVER はバッテリー式電気自動車の普及の障害となっている3つの課題: 1) 航続距離が短い, 2) 充電時間が長い, 3) 車両価格が高い, を一挙に解決することを狙う。EVER のコンセプトは, 自宅から幹線道路入り口までは小容量バッテリーで走行し, 幹線道路からは路面からエネルギーを集電して走行する。そして, 幹線道路から外れる際には小容量バッテリーは満充電されており, 目的地までは小容量バッテリーで走行する。つまり, EVER は高速道路と主要幹線道路に電化工事を施すことで実現できる。「走行中給電」は「停車中充電」と異なり大容量バッテリーの搭載を不要とする。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ることが期待でき, 更には途中充電することなく長距離移動が可能となる。

(2) ワイヤレス走行中給電 タイヤ集電方式

ワイヤレス走行中給電技術としてタイヤ集電 (V-WPT: Via-Wheel Power Transfer) 方式を本学は提案している(図9-1-1)。本方式は, 現在自動車に使われる一般的なタイヤのほぼすべてがトレッド表面近くにスチールベルト(導体)が埋め込まれていることに着目し, これにパンタグラフの働きをさせるという革新的なワイヤレス給電方式である。インフラ側は架線のかわりとなる電極を路面下に埋設する。電極は導体平板あるいは網目状シートでよいので, 道路敷設や補修が容易であると期待できる。一般にトレッド表面にはゴムがあり, 電極もアスファルトに覆われているため, スチールベルトと電極の間には絶縁体がある。つまり, 通常の 50/60Hz のエネルギーは流れない。そこで, 50/60Hz のエネルギーを数 MHz 以上の高周波 (RF) エネルギーに変換してタイヤに給電する仕組みを考える。RF エネルギーは絶縁体の材質にも流れるという性質がある。これは変位電流と呼ばれている。

本学ではV-WPT方式を搭載した EVER システムの実現を目指し, 図9-1-2のロードマップを作成, 平成24年度から3年間研究を進めてきた。本年度は100W級のV-WPT方式を搭載した電化フロア電動カートシステムの開発に成功, 1kW級のEVERシステムの基礎検討を実施したので報告する。

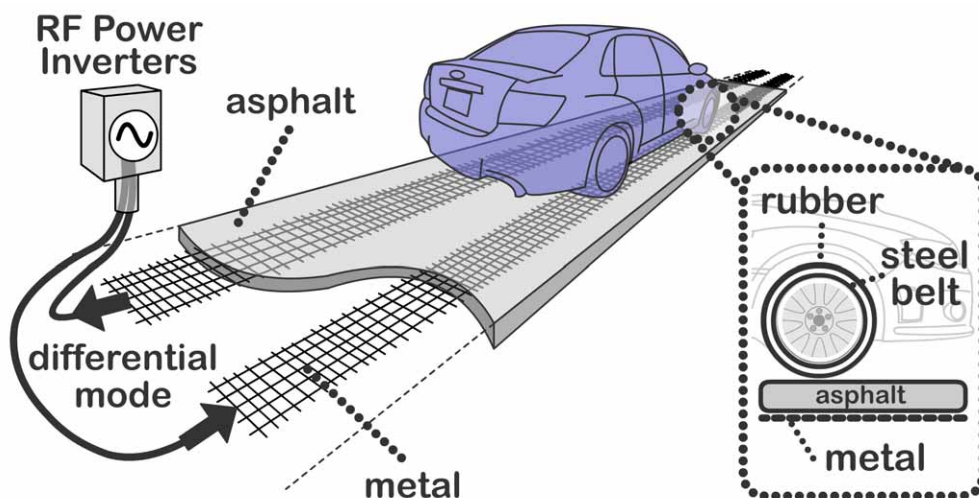


図9-1-1 電化道路電気自動車 EVER のしくみ

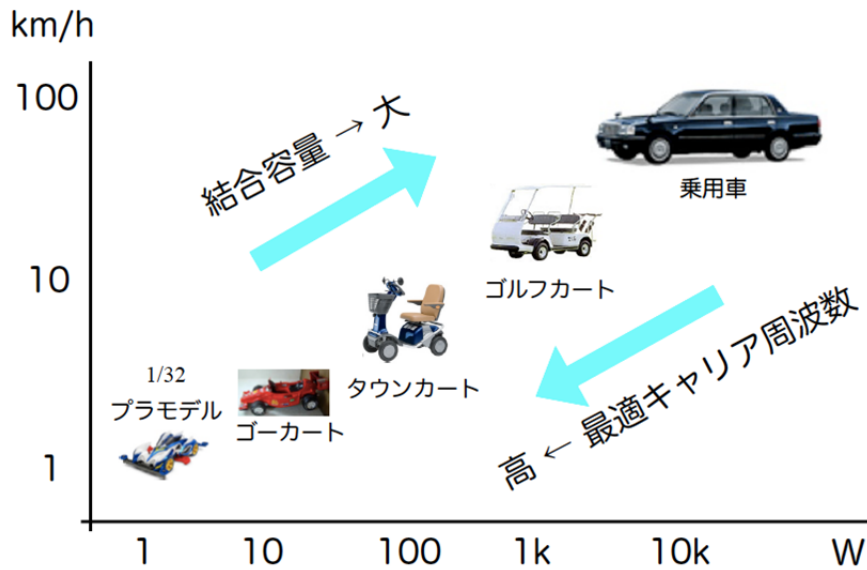


図 9-1-2 電化道路電気自動車 EVER 実現までのロードマップ

9-2 平成 24 年度：V-WPT 方式によるワイヤレス電力伝送の基礎検討

(1) 普通乗用車タイヤによるワイヤレス電力伝送の実証

普通乗用車のタイヤによる RF エネルギー電力伝送フィージビリティを明らかにするため、電球点灯実験システムを設計、試作した。試作した電球点灯システムの動態様子を図 9-2-1 に示す。試作したシステムは、RF 電源 - 整合回路 - 電極 - アスファルト - タイヤ - 整合回路 - 電球 で構成される。試作したシステムの電力伝送効率は 85% を達成した。図 9-2-1 に示す通り、白熱電球を点灯するほどのエネルギーを伝送することに成功した。15% の損失要因はゴムタイヤの誘電損失、整合回路のコンデンサ、コイル等に含まれる内部損失が考えられる。



図 9-2-1 60W 白熱電球点灯実験

(2) 1/10 スケールモデル電気自動車による EVER システム

前小節では V-WPT 方式の原理実証を行い、タイヤによる電力伝送が十分可能であることを示した。本小節では V-WPT 方式を搭載した 1/10 スケールモデル EVER システムを試作し、フィージビリティを示した。試作した 1/10 スケールモデル EVER システムの動態様子を図 9-2-2 に示す。試作したシステムは、RF 電源-整合回路-電化道路(プリント基板)-タイヤ-整合回路-整流回路-モーター で構成しており、全て学生の手作りである。試作した EVER システムの RF 電源の出力から整流回路の入力までの電力伝送効率 η は 61.5%を示した。最後に、RF 電源に直流電源を接続し、1/10 スケールモデル電気自動車へ約 10W の電力伝送を行った。結果、モーターが勢い良く回転することを確認した。

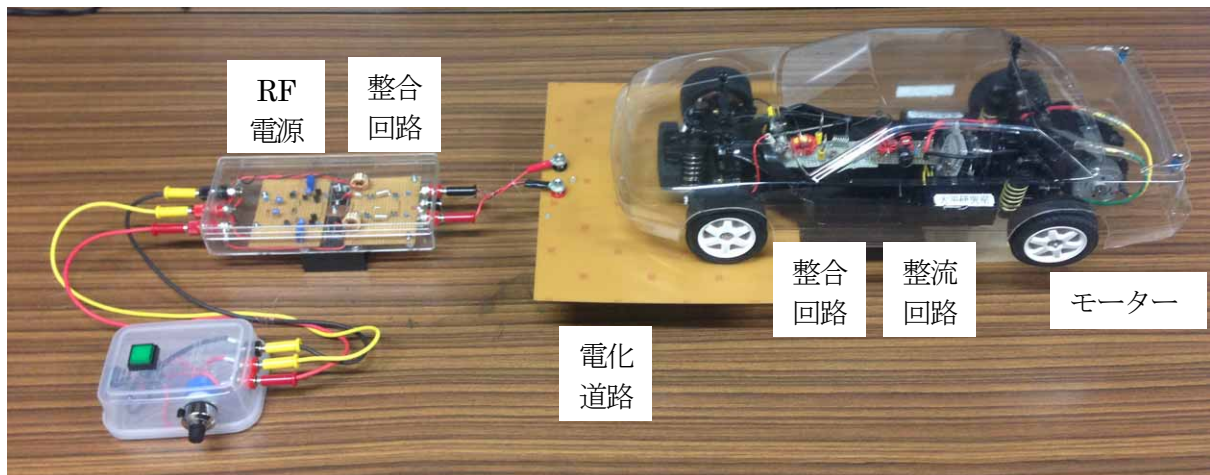


図 9-2-2 試作した 1/10 スケールモデル EVER システム (全て学生の手作り)

9-3 平成 25 年度：リアルタイム負荷追従インピーダンス整合回路

EVER システムを実現するにはインフラ側から車両側へ RF エネルギーを効率よく伝えることが重要である。RF 電源の内部インピーダンスと、電化道路の入力インピーダンスは互いに複素共役の関係にあるとき電力伝送効率 η が最大となる。一般に上記条件を満たすためにインピーダンス整合(インピーダンス変換)回路を RF 電源と電化道路の間に装荷する。ところが、電化道路の入力インピーダンスは時々刻々と変化するため、常に高い電力伝送効率を維持することが難しい。何故ならば、電化道路の給電先にある車両の位置が時々刻々と変わり、その走行距離が RF エネルギーの波長に比べて無視できないからである。

上記課題に対し、本学は電化道路の入力インピーダンスに応じて自律的にインピーダンスの整合を行う、リアルタイム負荷追従(R-TLT: Real Time Load Tracking) 整合回路を提案、試作した。R-TLT 整合回路は、可変インピーダンス整合回路、電力伝送状態の電化道路の入力インピーダンスを検知する回路、検知結果を可変インピーダンス整合回路に反映させる回路で構成する。それら全てアナログ回路であるため、インピーダンス整合動作がリアルタイムである。

試作した R-TLT 整合回路を図 9-3-1 に示す。試作した R-TLT 整合回路に可変負荷を装荷し、可変負荷のインピーダンスを順次変更した場合にインピーダンス整合が自律的に行われるか実証実験した。結果、可変負荷のインピーダンスが 15Ω から 90Ω まで変動した際に、R-TLT 整合回路が自律的にインピーダンス整合することに成功した。インピーダンス整合後、 $55\pm 5\Omega$ の範囲に収まることを確認した。

9-4 平成 26 年度：V-WPT 方式によるワイヤレス電力伝送の大電力化実証実験

(1) 電化フロア電動カート走行中給電システム

平成 24 年度において V-WPT 方式を搭載した 1/10 スケールモデル EVER システムを試作し、フィージビリティを示した。本年度は V-WPT 方式を搭載した 100W 級電化フロア電動カートシステム(ECEF: Electric Cart on Electrified Floor)を試作し、バッテリーレス電動カートの有人走行実験を

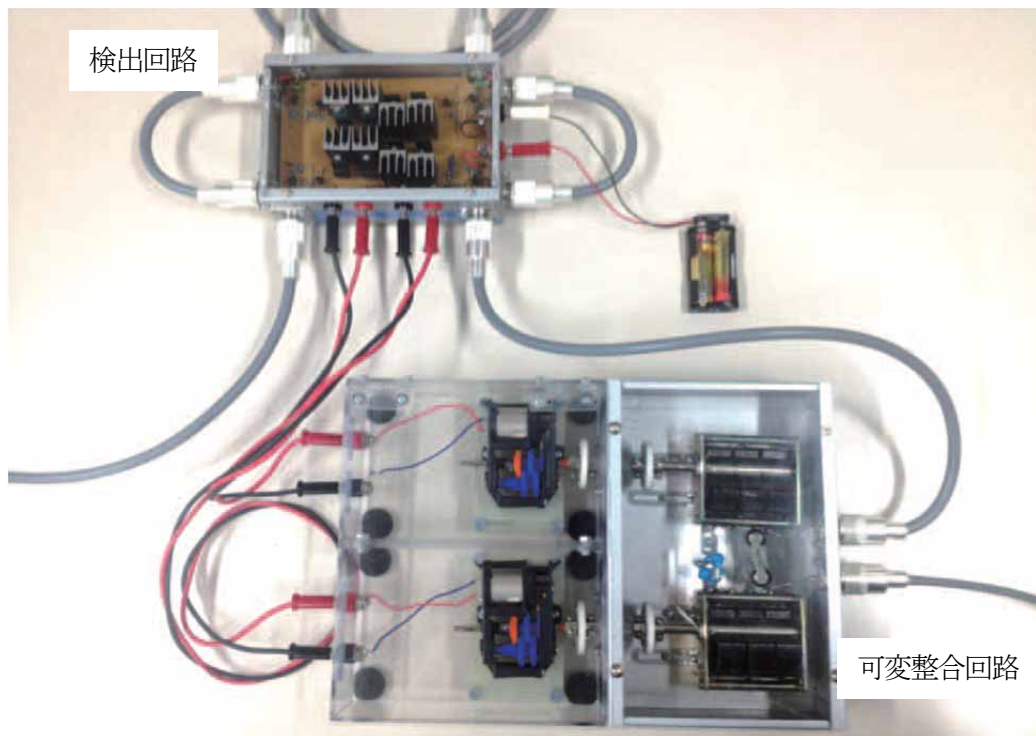
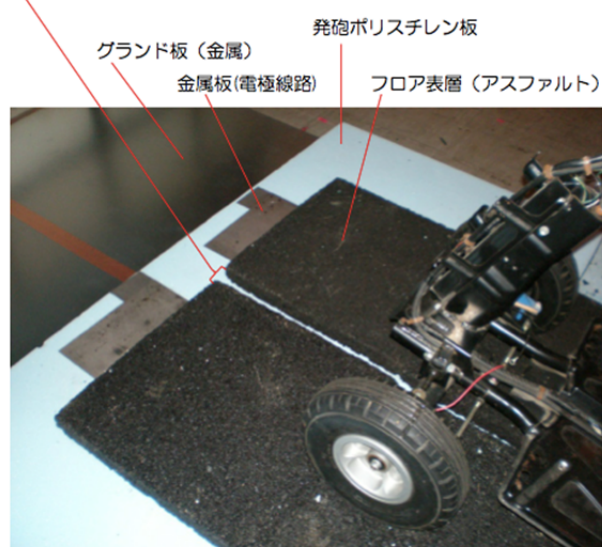


図 9-3-1 リアルタイム負荷追従 (R-TLT) 整合回路

行った。

電動カートを駆動させる電力を高効率で伝送するため、2つのアプローチを実施した。1) 最大有能電力効率理論および二ポート同時整合法の導入によるインピーダンス整合回路の設計手法を確立した[実績：論文 2]。2) 電力伝送効率を向上する電化フロア構造の提案した[実績：技術報告 1]。上記アプローチを駆使し、図 9-4-2 に示す ECEF システムを試作した。試作した ECEF システムは、500W 級 RF 電源、整合回路、電化フロア、200W 級 RF 整流回路、電圧・電流レギュレータ回路で構成した。これらは全て学生の手作りである。試作した電化フロアの構造を図 9-4-1 に示す。試作した ECEF

空気層(電極線路の絶縁)



電化フロア構造

図 9-4-1 試作した電化フロア



図 9-4-2 電化フロア電動カートシステムによるバッテリーレス電動カートの有人走行実演展示

システムの総合電力伝送効率（RF 電源 DC 入力—整流回路 DC 出力）は 21%を達成した。電化フロア上をバッテリーレス電動カートが時速 3km で力強く走行することを確認した。

（2）バスタイヤを用いた 1kW 電力伝送実験

前小節にて V-WPT 方式による 100W 級電動カートの走行中給電実証を達成した。次に図 9-1-2 のロードマップに従い、走行するのに 1kW 以上の電力を必要とする電気バスに着目する。V-WPT 方式の給電のみで電気バスが駆動するかの基礎検討として、本小節は市販バスタイヤを用いた 1kW 電力伝送実験結果を報告する。

試作したバスタイヤ V-WPT 方式無線電力伝送システムを図 9-4-3 に示す。システム構成は RF 電源・整合回路・電極・アスファルト・タイヤ・整合回路・1kW ダミーロードである。1kW 電力伝送を実現するため、損失要因分析および整合回路の耐電圧評価を行い、最適な整合回路のトポロジを見出した。試作した V-WPT 方式無線電力伝送システムの 1kW 電力伝送実験を行った。結果、1kW RF 電力の入力に対し、820W の RF 出力電力を確認した。つまり、電力伝送効率 82%を達成した。

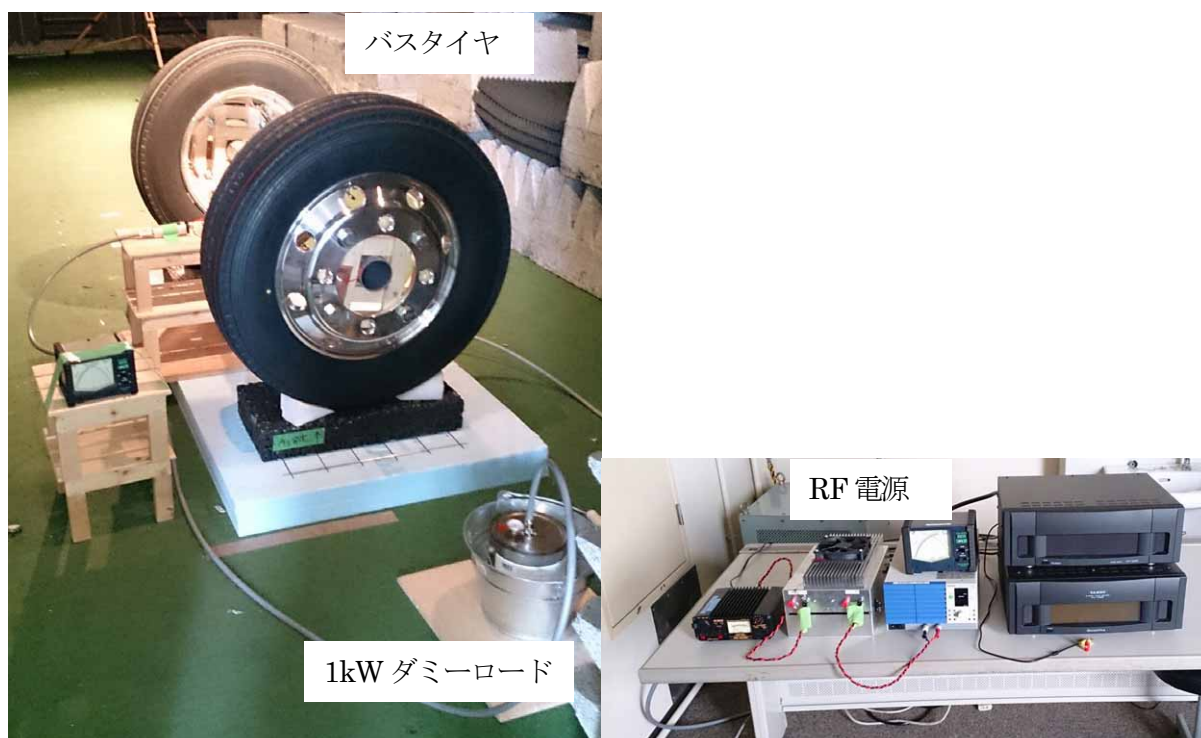


図 9-4-3 市販バスタイヤを用いた V-WPT 方式 1kW 無線電力伝送システム

（3）1kW RF 整流回路の開発

前小節にて V-WPT 方式による 1kW の無線電力伝送の実現可能性を示した。無線電力伝送した 1kW の RF 電力で DC モーターを駆動させるには 1kW RF 整流回路が必要である。また、入力が大電力であるため発熱を抑えるには高い RF-DC 変換効率が求められる。本年度は高効率 1kW RF 整流回路を試作したので報告する。

試作した 1kW RF 整流回路の外観を図 9-4-4 に示す。1kW RF 整流回路を実現するため、RF 電力分配回路で 1kW を 250W に分配し 4 台の RF 整流回路で RF-DC 変換を行った。RF 整流回路は RF-DC 変換効率が高くなるよう、半導体素子から発生する高調波を抑圧する回路トポロジを組み込んだ。1kW 電力入力時における試作した整流回路の RF-DC 変換効率を測定した。結果 RF 電力 1 kW を DC 電力 751.6 W に変換することに成功した。つまり、RF-DC 変換効率 75%達成した。

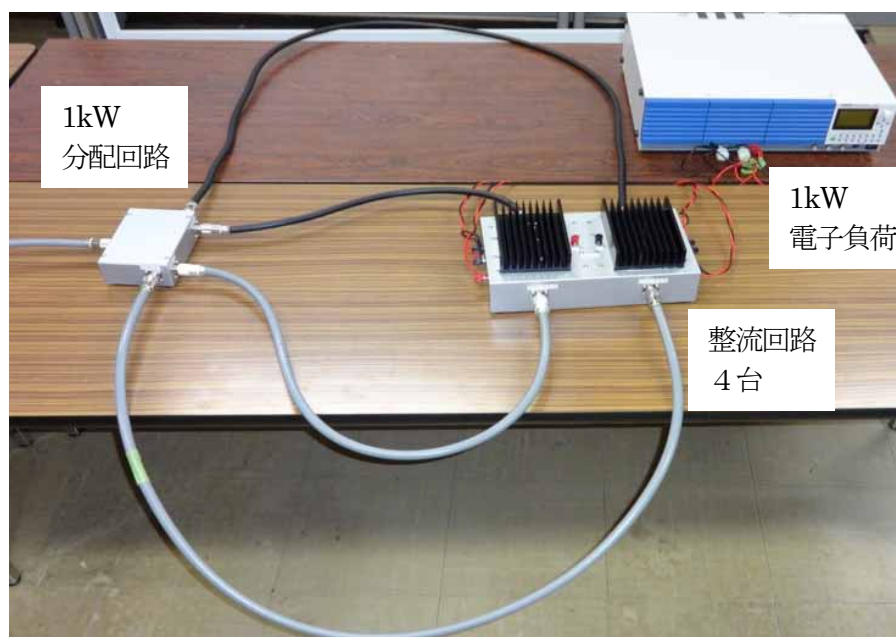


図 9-4-4 試作した 1kW RF 整流回路

(4) 液相の大電力誘電率測定システムの開発

V-WPT 方式を一般乗用車や電気自動車などに導入した場合，屋外環境を想定した EVER システムの環境耐性の評価が重要である。電化道路は雨水や雪の影響を受けることが想定される。つまり，大電力伝送における雨水や雪などの液体の電気特性を測定したい。そこで，本学は液相の大電力誘電率特性を測定するシステムを新たに提案，試作した。

試作した大電力誘電率測定システムを図 9-4-5 に示す。システムは液体に大電力を印加するための，1kW RF 電源，測定する液体に電力を加えるための水槽型液体評価デバイス，誘電率を測定するためのオシロスコープ，1kW の入力電力のうち液体で消費されない電力を消費するための 1kW 負荷で構成される。試作した大電力誘電率測定システムで塩水を評価した結果，塩水の誘電率が電力に対して非線形であることを突き止めた。



図 9-4-5 大電力誘電率測定システム

9-5 研究成果公表

電化フロア電動カート ECEF システムによるバッテリーレス電動カートの有人走行に成功した成果を、9月22日に本学にてプレスリリースを行った。結果、多くのメディアから取材があり、テレビ東京の「ワールドビジネスサテライト」やNHKの「ほっとイブニング」などで報道された【実績：報道掲載】（図9-5-1）。

本成果の一つである大電力液体誘電率測定システムを、電子情報通信学会主催「マイクロ波展示会 MWE2014 : Microwave Workshop and Exhibition 2014」に展示した。また、展示会で開催される大学展示コンテストにエントリーした。液相の誘電率の電力特性に非線形性があることを世界で初めて発表したところ、来場者や審査員の方々から多くの賞賛をいただいた。コンテストの審査の結果、本学ブースが優秀賞に選ばれた（図9-5-2）。

トヨタ自動車内山田会長が本学にご来校し、その際、本成果 ECEF システムのご試乗、ご視察していただいた（図9-5-3、図9-5-4）。非常に強い興味を持っていただいた。



図9-5-1 テレビ東京
「ワールドビジネスサテライト」放送



図9-5-2 MWE2014 大学研究室展示
優秀賞受賞



図9-5-3 トヨタ自動車内山田会長
電動カートご試乗風景



図9-5-4 トヨタ自動車内山田会長
超小型電気自動車ご視察風景

9-6 むすび

本学ではタイヤ集電（V-WPT）方式を搭載した電化道路電気自動車 EVER システムの実現を目指し研究開発を進めた。本年度は電化フロア電動カート ECEF システムを試作した。電化フロアの上を

バッテリーレス電動カートが時速 3km で有人走行することに成功した。その時の総合効率 は 21% を達成した。V-WPT 方式を搭載した電気バスのフィージビリティを明らかにするため、市販バスタイヤを用いた V-WPT 方式無線電力伝送システムを試作、1kW の無線電力伝送実験を行った。結果、電力伝送効率 82% で 1kW の RF 電力を送ることに成功した。最後に給電した 1kW の RF 電力で DC モーターを動かすため 1kW RF 整流回路を設計、試作した。試作した RF 整流回路は RF-DC 変換効率 75% を達成した。これら成果により EVER システムの実現可能性を世の中に強く示すことに成功するとともに、低炭素な未来ビークルシティ実現に向けて大きく前進した。