

9. ワイヤレス電力伝送用リアルタイム負荷追従インピーダンス整合回路の研究

電気・電子情報工学系 教授 大平 孝

9-1 電化道路電気自動車

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世代のビークルとして，本学は「電化道路電気自動車 EVER: Electric Vehicle on Electrified Roadway」を提唱した。第1～3世代が "Carry Energy" であるのに対し，第4世代は "Collect Energy" の概念に基づく。すなわち移動手段のパラダイムシフトである。バッテリー式の電気自動車の普及の障壁となっている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。電化道路電気自動車 EVER のしくみを下図に示す。高速道路と主要幹線道路に電化工事を施すことで，たとえば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，幹線道路では路面からのエネルギーで走行する。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。これが EVER の基本コンセプトである。「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り，さらには途中で充電することなく長距離移動が可能となる。

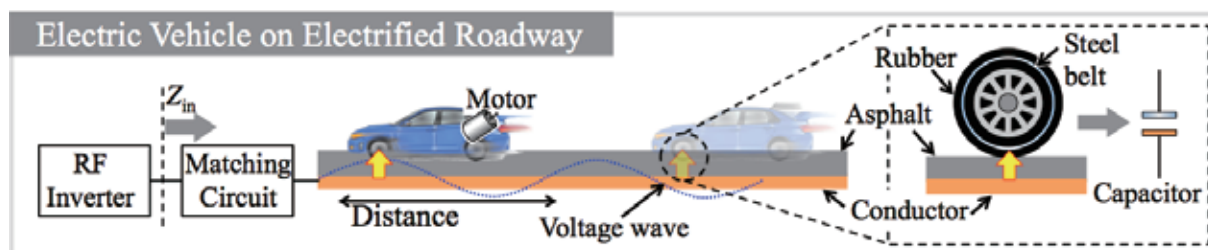


図 9-1-1 電化道路電気自動車 EVER のしくみ

走行中給電技術としてタイヤ集電（V-WPT: Via-Wheel Power Transfer）方式を同図の右部破線枠で示す。本方法は，現在自動車に通常使われるタイヤはほぼすべてがトレッド表面近くにスチールベルト（導体）が埋め込まれており，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のシートでよいので道路敷設や補修時のメンテナンスが容易であることが期待できる。タイヤは常に路面に設置（ゼロギャップ）しているため，空隙による電波漏洩も少ない。一般にトレッド表面はゴム製であり，電極もアスファルトに覆われているため，通常の 50/60Hz の電流は流れない。そこで，電流を数 MHz 以上の高周波エネルギーに変換してタイヤに給電するという仕組みを考える。高周波エネルギーは電氣的導電性が無い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 システムを試作し、高い電力伝送効率を示すと共にそのフィージビリティを明らかにした。

9-2 リアルタイム負荷追従インピーダンス整合回路の構成と動作原理

EVER を実現するにはインフラ側から車両側へ高周波エネルギーを効率よく伝えることが重要である。一般に、高周波電力伝送システムでは電源のインピーダンスと負荷のインピーダンスが互いに複素共役の関係にあるときに電力伝送効率が最大となる。ところが、EVER においては、負荷インピーダンスが時間的に変動する。なぜならば負荷すなわち車両は走行しており、道路上で時々刻々とその位置が変わって行き、その走行距離が高周波電圧の波長（数十メートル）に比べて無視できないからである。そこで、負荷インピーダンスに応じて電源と負荷の間にインピーダンス整合（インピーダンス変換：Matching Circuit）回路を挿入する。負荷インピーダンスを通電状態で検知し、それに応じてリアルタイムでインピーダンス変換を行う。この機能を達成するリアルタイム負荷追従（R-TLT: Real Time Load Tracking）インピーダンス整合回路の構成を下図に示す。アナログ回路のみで構成するため整合動作がシンプルでリアルタイムであることが特長である。

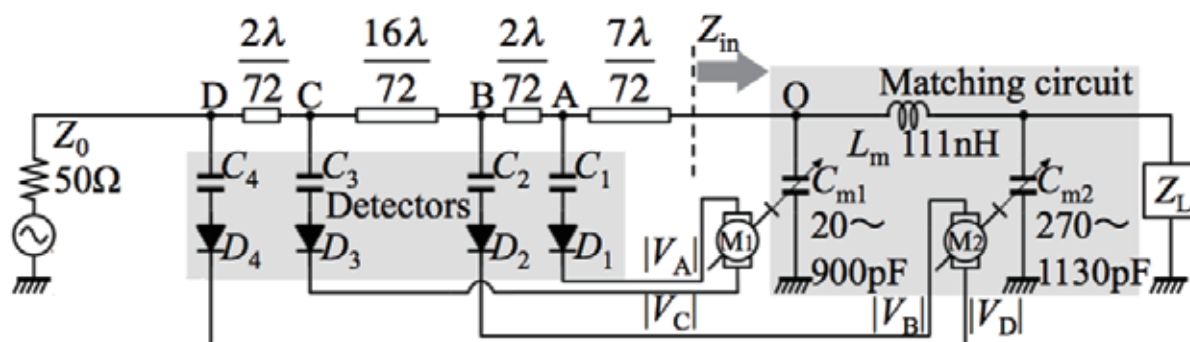


図 9-2-1 リアルタイム負荷追従インピーダンス整合回路の構成

R-TLT インピーダンス整合回路は可変インピーダンス整合回路部および定在波検出部からなる。同図の右端にある Z_L が電化道路のインピーダンスを表す（電気自動車を含む）。可変インピーダンス整合回路部は直列インダクタ L_m と 2 つの並列可変キャパシタ C_{m1} , C_{m2} で構成される π 型整合回路である。 π 型整合回路は 2 つの自由度を持つため、複素数である負荷インピーダンス Z_L を追い込んで整合できる。CLC 型の π 整合回路を通じて点 O から Z_L 側をみたインピーダンスを Z_{in} と書く（同図内の太矢印記号）。 Z_{in} は 2 個のキャパシタ容量の増減により次の図に示す矢印のような軌跡でスミスチャート上をある円弧に沿って一定の方向へ移動できる。2 つのキャパシタのうち C_{m1} を変えた場合の軌跡を同左図の赤線で、 C_{m2} を変えた場合の軌跡を同右図の青線で示す。

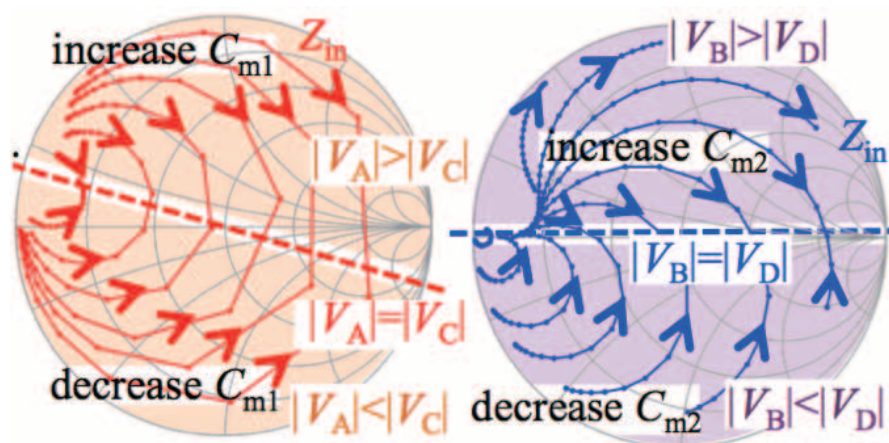


図 9-2-2 π 整合回路の可変コンデンサの容量変化に伴う入力インピーダンス軌跡

定在波検出部は伝送線路4本の縦続接続から構成される。電源の特性インピーダンス Z_0 と可変インピーダンス整合回路部の入力インピーダンス Z_{in} が異なることにより電圧定在波が生じる。電源と可変インピーダンス整合回路部間の4本の伝送線路（特性インピーダンス Z_0 ）の接続点を A,B,C,D とする。4個のキャパシタ $C_1 \sim C_4$ は伝送線路中の定在波に影響を及ぼさないよう線路の特性インピーダンスに比べて充分小さい容量値とする。4個のダイオード $D_1 \sim D_4$ は高周波電圧を整流する。これらキャパシタとダイオードで点 A,B,C,D 上の高周波電圧を検出して直流電圧として取り出す。ここで点 A,C および点 B,D はそれぞれ電気長が $\lambda/4$ 離れている。点 A,B および点 C,D は電気長が $\lambda/36$ 離れている。ここで λ は伝送線路上の伝播波長である。電源と可変インピーダンス整合回路の間でインピーダンスが整合している場合は定在波が生じないため点 A,C および点 B,D はそれぞれ等しい電圧となる。一方、整合がとれていない場合は伝送線路上に定在波が生じるため点 A,C および点 B,D はそれぞれ異なる電圧となる。これら4点の電圧の相対的大小関係によりスミスチャート上で Z_{in} の位置を推定できる。その推定結果に基づいてモータ M1, M2 を駆動する方向を決定する。このように、本 R-TLT はアナログ素子のみで動作するためリアルタイムの負荷追従が可能となる。

9-3 リアルタイム負荷追従インピーダンス整合の実証実験

リアルタイム負荷追従整合の原理を実証するため試作した第1号機の写真を下図に示す。図中左上のアルミケースが定在波電圧検出部、同軸ケーブルが伝送線路、中央下のアクリルケース2個が DC モータおよびギアボックス、右下のアルミケースがバリコンとソレノイダルコイルによる π 型整合回路である。左端の同軸ケーブルから高周波電力を入力し、右端の同軸ケーブルで出力する。高周波入力電力範囲は数ワットから数百ワットである。定在波電圧検出部と DC モータ2個は単三電池2本で

動作する。

定在波電圧検出部の特性測定結果を次図に示す。入力インピーダンスが赤領域にあるときは点 A と点 C で高周波電圧振幅がほぼ等しくなる。同じく、青領域にあるときは点 B と点 C で高周波電圧振幅がほぼ等しくなる。これら 2 つの条件が連立している状態すなわち入力インピーダンスがスミスチャートの原点 ($50+j0\ \Omega$) となっている場合に 4 点 A,B,C,D の高周波電圧が全て等しくなることがわかる。これが定在波がない状態つまりインピーダンスが完全に整合している状態である。

この検出電圧をモータ M1 と M2 に印加することで、2 つのモータがそれぞれ赤領域および青領域へインピーダンスを同時に収束させ、最終的に完全整合状態となる。実際に負荷のインピーダンスを順次変更して収束するかどうか実験を行った。負荷の電力反射係数 0.5 (定在波比 $VSWR = 6$) で反射位相が異なる 1 2 通りの場合の実験結果を次図に示す。どの場合も整合動作前は入力インピーダンスが $15\ \Omega$ から $90\ \Omega$ まで変動している。それが自動整合により $55\pm 5\ \Omega$ の範囲内に収束した。収束後の電力反射係数は 0.01 以下 (-20dB 以下) である。

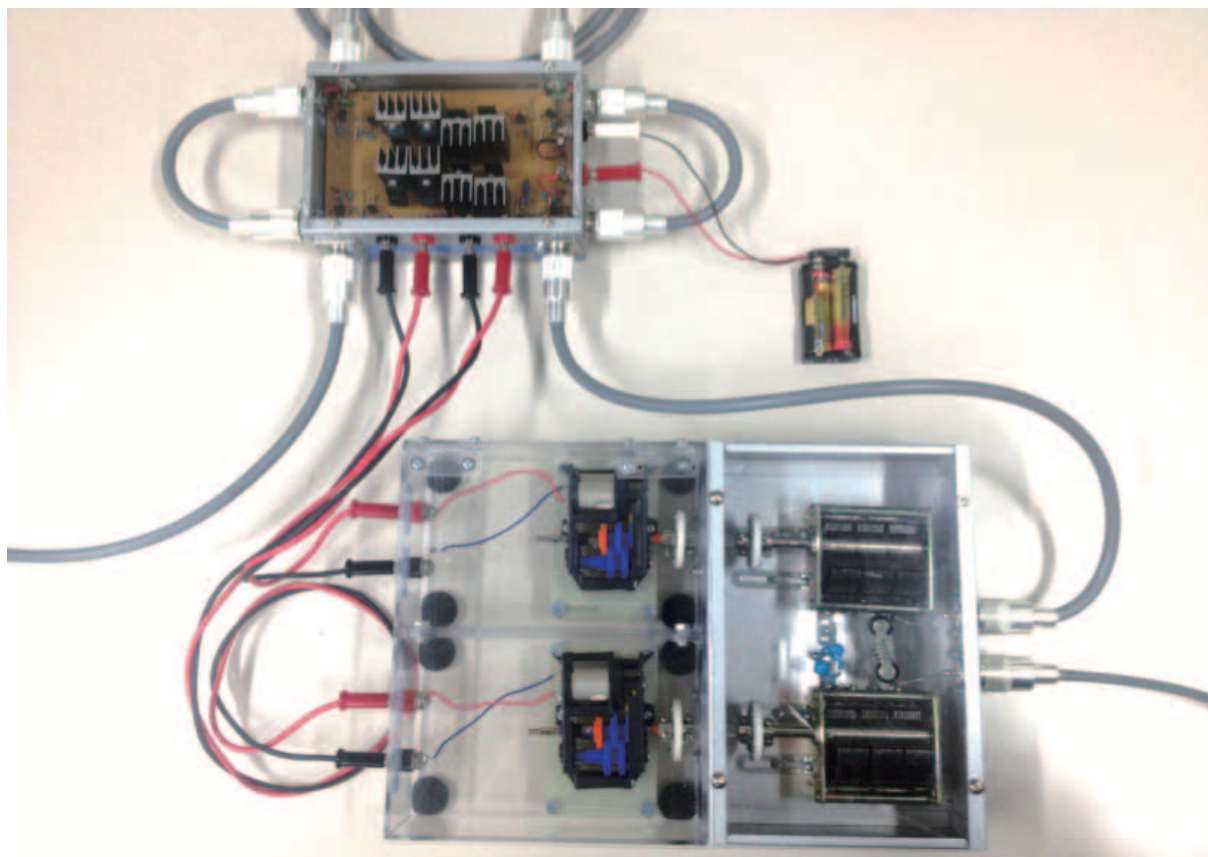


図 9-3-1 試作したリアルタイム負荷追従インピーダンス整合回路

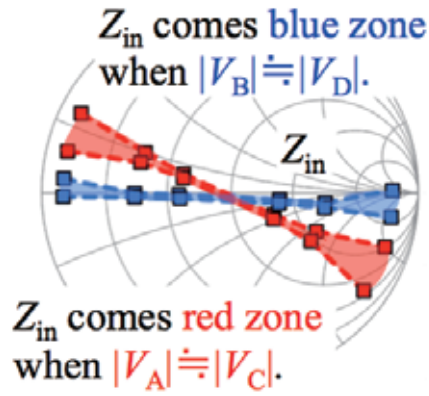
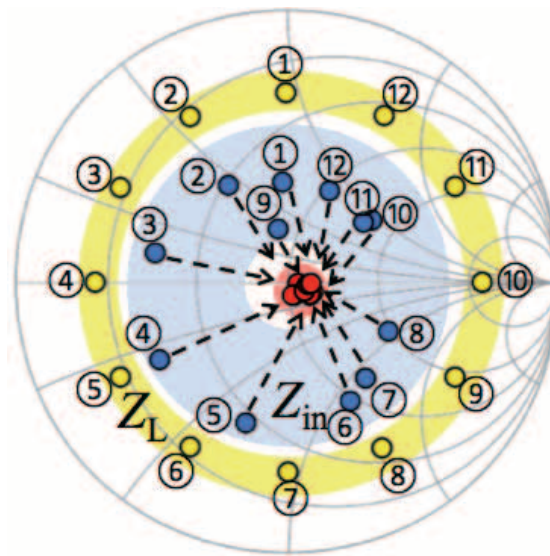


図 9-3-2 定在波検出部の特性測定結果



	$Z_L[\Omega]$	Z_{in} before matching $[\Omega]$	Z_{in} after matching $[\Omega]$	$ \Gamma_{in} @ O$ [dB]
①	$16.7 + j46.4$	$36.6 + j31.5$	$60 - j4.5$	-20
②	$11.1 + j27.6$	$25.3 + j22.2$	$53.5 - j0.5$	-29.3
③	$9.1 + j12.8$	$16.9 + j4.9$	$57.7 - j5$	-21.4
④	8.5	$15.4 - j12.9$	$52 - j5.1$	-25.4
⑤	$9 - j13$	$21.7 - j32.6$	$51.5 - j5.1$	-25.6
⑥	$11.1 - j27.5$	$47.4 - j55.9$	$57.7 - j4.7$	-21.5
⑦	$16.6 - j47$	$61.5 - j56$	$58.1 - j5.8$	-20.7
⑧	$30.6 - j76.1$	$95.7 - j42$	$58.5 - j5.6$	-20.6
⑨	$91 - j128$	$43 + j17.8$	$57 - j1.9$	-23.4
⑩	295	$80 + j42.7$	$56 - j4$	-23.4
⑪	$90 + j128$	$76.3 + j39$	$57.6 - j1$	-23
⑫	$30.8 + j77$	$51.6 + j40.5$	$59.3 - j0.5$	-21.4

図 9-3-3 インピーダンス自動整合の実験結果

9-4 研究成果公表

電子情報通信学会主催で「マイクロ波展示会：Microwave Workshop Exhibition 2013」が平成25年11月27日～29日にパシフィコ横浜にて開催された。大学展示コンテストに全国の大学等から30校が出展した。本学から今期開発した高周波インバータ回路，リアルタイム負荷追従整合回路，高周波整流回路，トランスレス変成器を3日間出展した。本学のブースの様子を下図に示す。来場者の方々や審査員の方々から，学生の説明および質問への対応が極めて分かり易い，夢のある技術なので実用化が楽しみ，実演デモで技術内容理解が容易，質問に対する応答も良く学生さんが深く理解しているのが伝わった，など好評を得た。コンテスト審査の結果，30校のうち本学ブースが優秀発表賞



(第1位) に選ばれた。授与された表彰状と表彰式当日（11月29日）の様子を次図に示す。

図 9-4-1 Microwave Workshops Exhibition 2013 大学展示コンテスト：本学ブース



図 9-4-2 MWE2013 大学展示コンテスト表彰状



図 9-4-3 MWE2013 大学展示コンテストで本学が優秀発表賞（第 1 位）に輝く

9-5 むすび

タイヤ集電 (V-WPT) 方式による走行中電気自動車への給電システム EVER のためのリアルタイム負荷追従整合回路を提案, 原理実証実験を行った。インピーダンスが約 8Ω から 300Ω まで大幅に変動する負荷に対して自動的に 50Ω 系へ変換し, その結果, 反射電力-20dB 以下 (反射係数 0.01 以下) を達成した。全回路を研究室学生 100% 手作りで第 1 号機を試作し, マイクロ波展 Microwave Workshop Exhibition 2013 へ出展した。MWE2013 学生展示コンテストにて実演展示を行った結果, 大学展示優秀発表賞 (全国大学 30 校中第 1 位) にみごと輝いた。リアルタイム自動整合は第 4 世代移動手段となる走行中給電システムの開発に大きく貢献できる技術であり, 本実験成功は低炭素社会における安全安心なビークルシティ実現への着実な 1 歩である。

業績リスト

【報道】

- [1] Establishing basic formulas for squeezing wireless energy from radio frequency systems, phys.org, 25 Sept. 2013 [<http://phys.org/news/2013-09-basic-formulas-wireless-energy-radio.html>].

【表彰】

- [2] 波動工学研究室「MWE2013 大学展示優秀発表賞」Microwave Workshop Exhibition 2013, 2013-11-29.
[3] 波動工学研究室「日経エレクトロニクス読者賞」NE ジャパン・ワイヤレス・テクノロジー・アワード 2013-05-21.

【論文誌】

- [4] 大平 孝, “疑似線形理論による発振回路注入同期現象の定式化: 紙と鉛筆でロックレンジと Q ファクタを探究する,” 信学論 C, vol. J96-C, No.12, pp. 454-462, 2013.
[5] 大平 孝, “電化道路電気自動車”, 自動車技術, 特集: 進化する道路関連技術, vol. 67, no. 10, pp. 47-50, Oct. 2013.
[6] Takashi Ohira, "Power efficiency and optimum load formulas on RF rectifiers featuring flow-angle equations," IEICE Electronics Express, ELEX, vol. 10, no. 11, pp.1-9, June 2013.

【国際会議】

- [7] Takashi Ohira, "Basic circuit theory for emerging RF power conversion in future smart grid systems", IEEE Distinguished Microwave Lecture, pp.1-6, Bangkok, Dec. 2013.
[8] N. Sakai, Y. Suzuki, T. Torii, Y. Kitagawa, and T. Ohira, "Electric Vehicle on Electrified Roadway Maquette Demonstrator," International Conference of Global Network for Innovative Technology 2013, page 1, Penang, Malaysia, Dec. 2013.

- [9] Kento Ichinose, "Active Q-factor Estimation and Phase Noise Measurement on Transmission Line Feedback BJT Oscillators", IEEE AP/MTT-S Midland Student Express 2013 Autumn, S6-3, Kanazawa, December 2013.
- [10] Takashi Ohira, "Circuit Q Factor as a Basic But Still Ambiguous Index for Resonators and Oscillators," EuMA European Microwave Doctoral School, Nuremberg, Germany, Oct 2013.
- [11] Minoru Mizutani, Mondo Aoyama, and Takashi Ohira, "Real-Time Load Tracking Circuit for Wireless Transfer System," Interdisciplinary Research and Global Outlook Conference 2013, p.83, Aichi, Japan, Oct 2013.
- [12] Kyohei Yamada, Takanari Minami, Sonshu Sakihara, Tuya Wuren and Takashi Ohira, "Injection-locking-range estimation based on Q factor and experimental verification for Hartley oscillator," Interdisciplinary Research and Global Outlook Conference 2013, p. 84, Aichi, Japan, Oct. 2013.
- [13] Takashi Ohira, "Challenge for 4G Mobility", IEEE Distinguished Microwave Lecture, Rome, May 2013.
- [14] Takashi Ohira, "No Oil, No Coil, Just V-WPT", IEEE Distinguished Microwave Lecture, Perugia, May 2013.
- [15] Takashi Ohira, "Via-Wheel Power Transfer to Vehicles in Motion (special talk and exhibition)", IEEE Wireless Power Transfer Conference, WPTC2013, pp.242-246, Perugia, May 2013.
- [16] Yuri Kitagawa, "Prototype RF Inverter for 1/10 Scale EVER", IEEE AP/MTT-S Midland Student Express 2013 Spring, S2-1, Nagoya, April 2013.
- [17] Takumi Honda, "Electromagnetic Analysis on a Basic Model for Via-Wheel Power Transfer", IEEE AP/MTT-S Midland Student Express 2013 Spring, S2-2, Nagoya, April 2013.

【技術報告】

- [18] 佐藤 翔一, 水谷 豊, 坂井 尚貴, 大平 孝, "リアルタイム負荷追従インピーダンス自動整合回路の提案", 信学技報, vol. 113, no. 204, MW2013-92, pp.23-28, Sep. 2013.
- [19] 南 昂孝, 大平 孝, "[特別講演] 平行平板シリーズスタブと伝送線路ループによる立体的なマイクロ波帯バンドパスフィルタ", 信学技報, vol. 113, no. 110, MW2013-29, pp.1-4, June 2013.
- [20] 大平 孝, "高周波整流回路の最適負荷と電力効率の理論式：半波および全波流通角方程式の導出と活用", 信学技報, vol. 113, issue 70, MW2013-10, pp.1-6, May 2013.

【学会全国大会】

- [21] 一瀬 健人, 南 昂孝, 大平 孝, "BJT コルピッツ発振器の発振条件及び Q ファクタ解析," 信学ソ大, C-2-7, Sept. 2013.
- [22] 南 昂孝, 一瀬 健人, 大平 孝, "伝送線路帰還発振回路における FET 電圧増幅率と Q ファクタ," 信学ソ大, C-2-8, pp.33, Sept. 2013.
- [23] 鈴木 良輝, 鳥井 俊宏, 坂井 尚貴, 大平 孝, "電化道路電気自動車 EVER 実証実験", ワイヤレス・テクノロジー・パーク, 横浜, 2013-05.

- [24] 坂井尚貴, “1G:石炭 2G:石油 3G:電池に続く第4世代自動車”, NE ジャパン ワイヤレス・テクノロジー・アワード2013 記念講演, 東京国際展示場, May 2013.

【技術展示会】

- [25] 波動工学研究室(大平研究室), あいち ITS ワールド 2013, ポートメッセなごや(名古屋市国際展示場), Dec. 12-15, 2013.
- [26] 波動工学研究室(大平研究室), Microwave Exhibition, Pacifico Yokohama, Nov. 27-29, 2013.
- [27] 波動工学研究室(大平研究室), 未来ビークルシティリサーチセンター講演会, 田原文化会館, Nov. 7, 2013.
- [28] 波動工学研究室(大平研究室), さかい IPC 環境ビジネス研究会セミナー, 堺市産業振興センター, Oct. 17, 2013.
- [29] 波動工学研究室(大平研究室), 電子情報通信学会東海支部 第二回一般講演会, 豊田工業高等専門学校, Jun. 21, 2013.