

展望・解説

未来のクルマとエネルギー ～モータ/キャパシタ/ワイヤレスへのパラダイムシフト～

Cars and Energy in the Future
～ Paradigm Shift to Motor/Capacitor/Wireless ～

堀 洋 一*
Yoichi Hori



小生は、本郷、柏、駒場などにまたがる東京大学の広義の電気系の長老教授で、あと2年で定年である。本務は柏の先端エネルギー工学専攻で、20年ほど前に、電気系、航空宇宙系、原子力系(システム創成)で作ったものである。

専門は、パワーエレクトロニクス、モータ制御、メカトロニクス、そして、電気自動車のモーション制御である。WEVA(世界電気自動車協会)の前会長として、昨年EVS31という国際会議を主導した。電気学会産業応用部門元部門長、自動車技術会元技術会議議長であり、日本能率協会モータ技術シンポジウム委員長、キャパシタフォーラム会長などをつとめている。

鉄道が専門の曽根 悟先生に学位をいただき、茅 陽一先生に採用され、茅先生が退官されるまで共同で研究室を運営した。当学会が研究会として活動を始めたころからよく知っている。現会長の浅野氏は、そのころ茅研究室の修士課程に入ってきた優秀な学生で、手塚副会長は同級生である。本稿の執筆を世話してくれた光田氏はキャパシタフォーラムの有力メンバー。他にも、山地先生、藤井先生、藤野先生、松橋先生…こちらのコミュニティに属する親しい先輩や後輩はたくさんいる。

先般、内閣府SIP(第1期)「次世代パワーエレクトロニクス」(PD(プログラムディレクタ)は大森@三菱電機)のサブPDをつとめた。これを部分的に受けた第2期SIP「IoT社会のエネルギーシステム」(PDは柏木教授@東工大、中身は、A:システムデザイン(浅野@電中研)、B:パワーエレ(高橋@東北大)、C:ワイヤレス(庄木@東芝))が活動している。この枠組Cの中に、電気自動車(EV)への走行中ワイヤレス給電(WPT)があり、諸外国の怪しげな試みに先んじて、日本の国プロがお手本を示す正念場である。

なお本稿は、文献19) 20) をもとに、最近の状況などを追加したものであることをお断りしておく。

1. まえがき

100年後のクルマはどのように走っているだろう?それは「電気モータ」で走行し、電車のように電力インフラから直接エネルギーをもらっているだろう。そこでは、大容量電池ではなくパワーの出し入れにすぐれた「スーパーキャパシタ」と、クルマを電力インフラにつなぐ「ワイヤレス給電」がキー技術となっている。さらに、電気モータの制御特性を生かした「モーション制御」や自動走行の技術によって、エネルギー効率や安全性は飛躍的に向上していることだろう。

2. ガソリンと電気

昨今のクルマの電動化への大きな流れを見れば、エンジンが徐々に電気モータに置き換わり、100年も経てば、ほとんどのクルマは電気モータで走っていると思う。

しかし、EVへのエネルギー供給手段は依然大問題である。日常的なガソリンの給油を電力換算すると約20,000kWであることはご存知だろうか。これは新幹線16両編成フルパワー加速に相当する。50kWの急速充電とは桁が違う。

電池EVの航続距離が不十分であることは皆知っているから、短い航続距離でがまんしようとか、急速充電や高性能電池がキー技術だと誰もが言ってきたが、基本的に無理がある。

ガソリンと電気はエネルギーの形がまったく違うのに、なぜEVに「止まって」「短時間で」「大きな」エネルギーを入れようとしてきたのか、不思議で仕方がない。ガソリンを町中に噴霧し、クルマがそれを吸い込んで走るのはまず無理だが、電気は実質同じことができる^{3, 20)}。

大きなエネルギーを持ち歩く電池EVは、当面は必要な技術であっても長期的には消えるクルマである。災害時の火種にもなりうる。また、リチウムイオン電池に必要なコバルトは容易に枯渇するから、長期的には成り立たない解であることは明らかであって、早く電池から脱却した他の方策に移行しないと大変なことになる。

*東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻
〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5
E-mail: hori@k.u-tokyo.ac.jp

3. モータ／キャパシタ／ワイヤレス

ではどうすればいいのだろう。実はまったく異なる道がある。電車のように、EVに電力インフラから直接エネルギーを供給すれば、一充電「航続距離」は意味を失う。停車中の「ちょこちょこ充電」と走行中の「だらだら給電」によって、クルマは大きなエネルギーを持ち運ばず、電池EVとはまったく違った未来のクルマ社会を描くことができる。そこでは、クルマを電力系統につなぐ最後の数メートルを担う「ワイヤレス給電」がキー技術となる^{4)~12)}。

考えてみれば、EVへのエネルギー供給手段と、EVをどう使うかとは何の関係もないはずである。しかし、電池を使うと両者は強くリンクされ、電池の性能が「航続距離」を決めてしまう。これは理不尽なことである。

未来のクルマが電気で動き電力インフラにつながるとすれば、航続距離とは1回の充電で走れる距離ではなく、「インフラから離れても安心できる距離」程度の意味しか持たなくなり、「ちょこちょこ充電で走る電車のようなクルマ」が普通になるだろう。そこでは「電池からキャパシタへ」の移行と「ワイヤレス給電」が実現され、人々は充電という作業から解放される。同時に、電気モータの優れた制御性を生かした「モーション制御」が当たり前になってクルマの燃費は大きく改善され、「ワイヤレス給電」をサポートするだろう。

この3点についてもうすこし述べてみる。

3.1 モータ (EVのモーション制御)

EVの特長は電気モータの特長そのものである。すなわち、(1)トルク応答がエンジンの2けた速い、(2)モータは車輪の中に分散配置できる、(3)発生トルクが正確に把握できる、という3点である^{1), 2)}。微小なタイヤの空転に対してmsオーダーでトルクを垂下させる粘着制御によってタイヤはすべりにくくなり、同じ運動性能でよければ、幅の狭い固いタイヤを使って燃費は一気に数倍になる。

モータの優れた制御性を生かした「EVのモーション制御」によってクルマの使うエネルギーは激減し、大量の電池を積む必要性はさらに小さくなる。横すべり防止はもとより、インホイールモータを使ったアクティブサス、ヨー、ピッチ、ロールなどの姿勢制御が当たり前の技術になり、クルマの安全性や乗り心地は大きく向上するだろう。

その詳細は文献1)2)に解説しているので興味のある読者はご覧いただきたい。これがEVの本当のメリットであり、小生がEVの研究を始めた真の動機でもある。

3.2 キャパシタ (ちょこちょこ充電)

500km走るための高性能電池は不要である。高価な電池をたくさん積むのは、従来のガソリン車と同じ「航続距離」を実現しようとするためである。しかし、電気は起こ

したらすぐ使うのがベストであって貯めて使うのは賢くない。そのため先人たちは、ものすごい努力をして、長距離高電圧送電網を築いてきたのである(小さい電池の利便性を否定するのではないから、誤解のないように)。

ただクルマは電車にはない自由度を持たなくてはならないから、数~数十kmを走るエネルギーは自前で持つ必要がある。電力を頻繁に出し入れするには、寿命の短い化学電池ではなく、数百万回の充放電に耐えられる物理電池「スーパーキャパシタ」を必要量だけ用いるのがよい。たとえば、当研究室のC-COMSは30秒ほどの充電で20分以上走る(図1)。

上海ではキャパシタだけで走る路線バスが安定に営業している。上海万博では約60台のリチウムイオン電池バスと約30台のキャパシタバスを運行した。電池バスは、巨大な電池交換場が必要で、日常的な実用性は疑問であることもわかった。一方、キャパシタバスは、バス停での30秒~1分ほどの充電で永久に走り続ける(図2)。

数年前には、日本ケミコン製キャパシタを使った量産ハイブリッド車として、アテンザ、アクセラ(マツダ)、フィッ



図1 キャパシタだけで走るC-COMS 1とC-COMS 2



図2 上海万博(2010)のキャパシタバス

ト（ホンダ）が登場し、回生エネルギーの吸収と加速アシストにきわめて効果的であることを証明している（残念ながら、MAZDA3は使っていないらしい）。

3.3 ワイヤレス（だらだら給電）

日本でも100V、10～15A程度のコンセントは至るところにあり「ちょこちょこ充電」はいつでも可能である。そして、いま盛んに研究開発が行われているワイヤレス給電技術が、ブレイクする気配をみせている（図3）。ワイヤレス給電の現在の技術レベルは、送電距離50cm～1m、送受信コイル間の伝送効率95%程度である。簡単な中継コイルを用いて距離を数mに伸ばすこともできる^{9～11)}。

キャパシタEVの概念は「オートチャージSuica」であり、ワイヤレス給電は「エネルギー版ETC」である（図4）。Suicaは昔は大きな駅でしかチャージできなかったが、だんだん使える範囲が広がるとともに、持ち運ぶ金額は少なくてよくなった。それと同じことが言える。すべてのインフラが整わなくても、できるところから導入していけばよい。

クルマの中はすっかり情報化されインフラにつながり、ナビがなければ運転できない人も多だろう。自動運転の進展とともにこの傾向はさらに加速される。エネルギーだけ自前で持ち運ぶ理由は何もない。まさにSIPで言う「IoT社会」のクルマにふさわしい概念である。

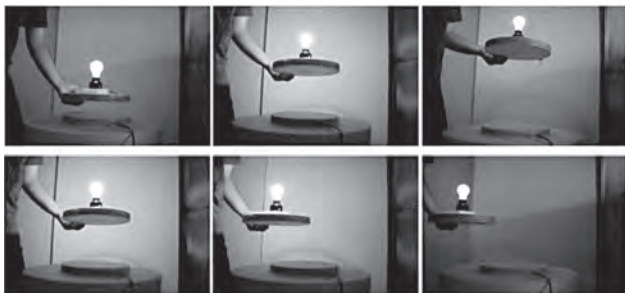


図3 磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送（長ギャップ、横ずれに対してロバスト）

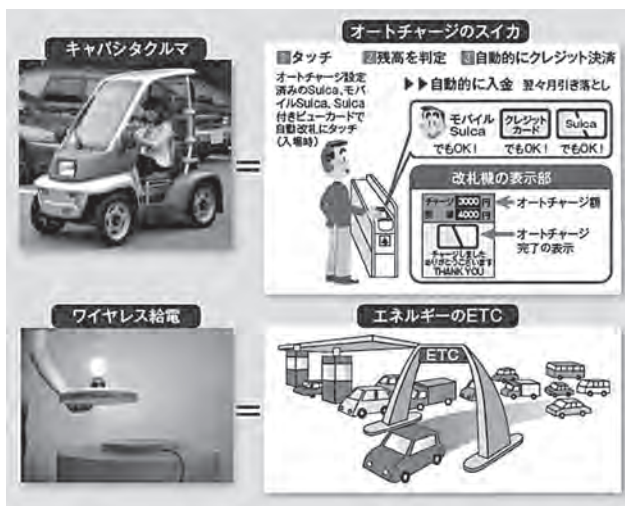


図4 モーター／キャパシタ／ワイヤレスの概念

そして100年もすれば、大昔に世間を騒がせた電池EVは、ガソリン車や燃料電池車とともに博物館でしか見られなくなっているだろう。

4. ワイヤレス給電の道路への敷設

図5のような、道路への敷設を視野に入れた走行中ワイヤレス給電の実用シーンでは、距離は数m、パワーは10kWが目標である。小生の研究室では、東亜道路と共同で、現実的な敷設方法の研究を行っている²⁰⁾。

走行中ワイヤレス給電のインフラを作るためには膨大な費用がかかるのではないかと心配する人は少なくない。そこで次のような話を披露してみよう。

2012年4月に162kmが部分開通した新東名高速道路は人件費などすべて含めて2.6兆円かかったという。割り算すると1kmあたり160億円である。でもこれではピンとこないので1mあたり1,600万円といえようだろう。3mも走れば家が建つ。東京湾アクアラインや最近の地下鉄の建設費用は1mあたり1億円である。その中に、ワイヤレス給電の設備を含めることはそれほど難しいことだろうか。

大規模なコスト試算はすでになされている。信号機前の準走行中WPTシステム（全国約21万基）の整備で6,300億円、東京IC～豊中ICまでの高速道路での走行中WPTシステムで約1,000億円である。一方、日本の新車約500万台/年がすべてEVになり1台が100kWhの電池（5,000円/kWh、これは現行の1/5の値段）として2.5兆円。意外にもワイヤレス給電のインフラ構築は廉価である。

むしろ問題は誰がやるかということである。世界中で知恵を出し合っているけれども明快な答えを見い出せない。日本のような民主主義国では、共通の未来像を描き、そこに向かって業界が一丸となって努力する、ということしかないのではないか。中国やベトナムのような、社会主義経済の名残がある国の方が容易かもしれない。指をくわえて眺めることにしないようにしたいものである。



図5 中央分離帯のガードレールからワイヤレス給電を受けてクルマが走る日が来る

表1 走行中ワイヤレス給電において注意すべきポイント

走行中ワイヤレス給電において注意すべきポイント	
(1) 停車中給電と走行中給電はまったく別の技術	・まずこの認識をもち、じっくり取り組むこと
(2) 地上設備はおそらく簡単にしなければならない	・何100キロにも施設する必要がある ・停車中給電を並べても実現しない ・送電側と受電側が制御信号を交換する方式は無理
(3) 車はインテリジェントでもOK	・いろいろな電化方式(誘導、共鳴、マイクロ波)の対応 ・周波数や電圧もさまざま ・100年ぐらいかけてインフラは作られる。大昔のインフラからも受電できること
(4) ビジネスモデルは成立するか	・高速道路だけ相手にすればいいだろう。幸い日本の高速道路料金が高いのでその一部に含めることができるかも ・給電レーンを設ける。自動走行技術の一部を利用する。つまり、道路中央に送電コイルを設けてその上は走らないようにできる
■キーワードは、100kW、100km、100km/h、95%、双方向	

表1は、走行中ワイヤレス給電の実用化において注意すべきポイントをまとめたものである。地上側設備は数kmに亘って、しかも長年かけて作られるから、きわめて簡単なものにしなければならないだろう。一方、車上側の設備はクルマの付加価値になり、ライフサイクルも短いことから多少高度でもいいだろう。ここが、地上と車上が1対1の設備をもち、高頻度で制御信号を交換する停車中ワイヤレス給電とはまったく事情が異なる。停車中給電の技術は、走行中給電にはあまり役に立たないのである。

なお、紙面の都合で省略するが、ワイヤレス給電によるEMCの問題や、人体防護についてもよく研究がなされており、遵守すべき基準もかなり整備されている。ただ、磁界共振結合方式は磁界を用いる電力伝送であり、電磁波ではないことを注意しておきたい。この両者は異なるものであるが、区別できない人も世の中には多い。

5. 100年ごとのパラダイムシフト

妹尾堅一郎氏^{13, 14)}によれば、世界は100年ごとにパラダイムシフトを経験してきたという。18世紀のコンセプトは「物質」である。モノを作るために産業革命が起こり、モノを運ぶ鉄道、船舶などのネットワークが構築された。19世紀のコンセプトは「エネルギー」で石油を中心とするエネルギー革命が起こり、エネルギーを運ぶネットワークが世界を席捲したことは記憶に新しい(表2)。

21世紀は、20世紀に生まれたコンセプト「情報」を具現化する時代である。GAFAなどいわゆる勝ち組のやり方を見れば、ユーザは単なるインターフェースである安価な端末を持つだけであって、肝腎の知能はネットで接続されたCloudにある。

われわれの世代はよく「親父、クルマ買ってくれ」と言ったものだが、親父に買ってもらったクルマとはいったい何だったのだろう。エンジン? 外装? 内装? タイヤ? 今はインバータか? しかし、「俺のクルマのSiCインバータは

表2 100年ごとのパラダイムシフト

	コンセプト	世界観	革命	ネットワーク
18世紀	物質	—	—	—
19世紀	エネルギー	→唯物史観	→産業革命	→モノを運ぶ
20世紀	情報	→宇宙観	→エネルギー革命	→エネルギーを運ぶ
21世紀		→情報世界観	→情報革命	→情報を運ぶ

(妹尾堅一郎の講演から筆者が作成)

すごいんだよ」などと、彼女に自慢したりするだろうか?

iTunesで買うのは音楽そのものであってCDは必然ではないのと同じように、クルマで買うのは快適な移動と運転の楽しみだとすれば、大きなエネルギーを持ち運ぶ、エンジン車、電池EV、燃料電池車は時代錯誤の商品である。クルマがナビによってネットにつながる時代に、持ち運ぶエネルギーを自前で所有する必然性はない。

筆者は100年後のクルマは、「エンジン」「電池」「急速充電」に代わって、「モータ」「キャパシタ」「ワイヤレス」で走るだろうと述べてきたが、これは、妹尾のいう産業構造論の流れに沿った、歴史の必然でもある。

クルマは大きなエネルギーを持ち運ばなくなり、クルマを電力系統につなぐ最後の数mを担う「ワイヤレス給電」が重要な役割を果たす。光ネットワークの大幹線はハードウェアですぐそこまで来ているが、最後の数mは高速WiFiが担う情報ネットとのアナロジーが成り立つ。

さらに言えば、クルマ会社が自社のクルマを売るために、給電インフラを整備しメンテすることになるだろう。鉄道では、饋電インフラもそこを走る車両のどちらも同じ会社のものである。これも歴史の必然に思える。

6. 100年後のエネルギー

1,000年後の世界においても、きめ細かい制御ができる「電気」が諸種エネルギーの媒体として重要な役割を担っていることは間違いないだろう。

太陽光や風力発電の大量導入は電力系統の安定性を著しくおびやかす。まとめれば平均化されるというのは幻想で、関東地方ぐらいの規模で一斉に日が陰ったり風がやんだりすることは一日に何度もある。

5MWの風車はジャンボB747の数倍の大きさになる。稼働率10%をかけて約500kW、しかも同容量の蓄電が必要である。これで100万kWの発電機を置き換えるには2,000台が必要だから、1年で作るには、1週間に40ずつ作ればよい。東京電力の20%を置き換えるにはその10倍、つまり1週間に500ずつ作り続けければよい⁶⁾。

太陽光も似た感じである。北海道電力の伊達ソーラー発

電所には同じ敷地内に火力発電所があり、両者はほぼ同じ面積である。火力は35万kWが2機あるので計70万kW。ただし、ピーク負荷用なので稼働率70%として、実質50万kW。太陽光は設備容量1MWすなわち0.1万kW。年間発電量は実績で1,000MWhだったというから1年365日と1日24時間で割り算して1時間率に直せば、 $1,000\text{MWh} \div 365 \div 24 = 0.1\text{MW} = 100\text{kW}$ となり、太陽光発電の稼働率10%というよく知られた数値が出てくる。

まとめると、①設備容量で1/700、②実力は1/5,000である。太陽光は火力の5,000倍の敷地面積が必要である。いやいや、それでもやらねばならぬ、というのが、当学会のスタンスであろう。幸運を祈るしかない。

では何が100年後のエネルギーを担うのだろうか。諸種多様なエネルギー源のベストミックスになっていることに異論はないが、その中に、高温岩体発電（マグマ発電）は入らないだろうか。地熱発電とは桁違いのエネルギーが眠っている。空ばかり見てないで、地下にある無限のエネルギー「地下の星」を見てはどうだろう。マグマのエネルギーを安定的に利用するには、適切なサイトの選定技術や高温高压に耐える材料の開発など、未解決の技術開発が必須である。しかし、20年30年後ではなく、100年後のエネルギーを考えると、いまからチャレンジする意義は十分にあると思うが、いかがであろう。

7. ワイヤレスインホイールモータ

最後に、研究室を共同運営している、藤本准教授の「ワイヤレスインホイールモータ」を紹介しておきたい¹⁵⁻¹⁸⁾。

インホイールモータには、EVの航続距離延長や走行安定性の向上等、様々なメリットがある。バネ下重量が増えるので駄目だという理屈はいまや過去のものである。しかし、モータに車体から電力を供給する電力線が断線する恐れがあるため、普及に至っていない。

藤本らはこの問題を解決し、さらに走行中給電にも対応するため、ワイヤレス電力伝送の技術を適用し、世界初の走行実験を成功させた(図6)。ホイール側にはスーパーキャパシタを搭載して回生ブレーキの効率向上を行い、路面に敷設された送電設備から走行中ワイヤレス電力伝送で直接モータを駆動する。SiCなどの最先端パワーデバイスと、様々な電力源からの電力を適切に制御する最先端の制御理論を駆使したパワー制御がキー技術である(図7)。現在、東大柏キャンパスに実験路を敷設し、精力的に実験を行っている(図8)。

藤本によれば、ワイヤレスインホイールモータは究極の駆動方式であり、また、モータ／キャパシタ／ワイヤレスの概念をわかりやすく具現した好例ともいえる。本稿が出版されるころには、第3世代が完成してお披露目されている

はずである。

この研究は冒頭に述べた第2期SIPの枠組みにも入っており、目標は、時速60km/h以上の高速走行中に85kHzで給電を行い、EV一台あたり30kWで定格効率90%以上、高速での給電には高度な過渡応答制御の実現が必要。コイル検知は車載と車輪側コイル方式を比較。主要企業メンバーは85kHzでの停車中給電システムの相互互換性がとれた製品化。13.5MHz給電は将来目標として基礎開発、といったところである。これはどれも諸外国には真似できない。

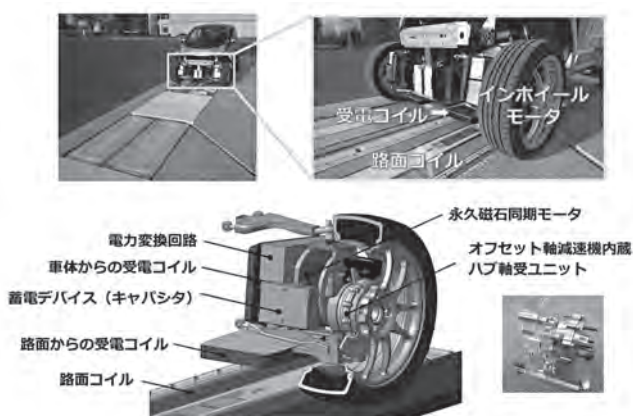


図6 ワイヤレスインホイールモータ（第2世代）

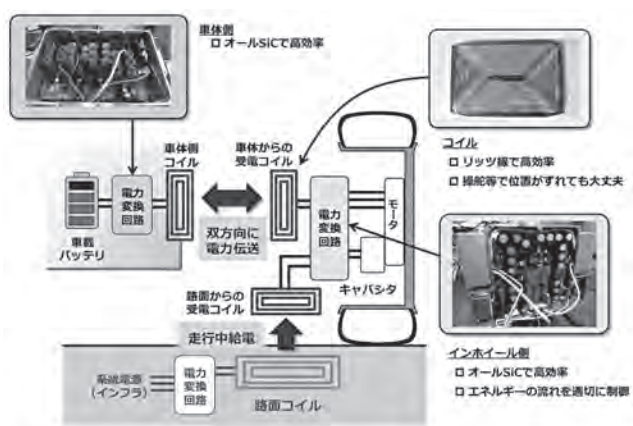


図7 電力変換回路構成



図8 走行中給電実験路（東大柏キャンパス）

8. あとがき

電池EVのように、人々が疑いの余地なしとして大合唱しているものは、全員間違っているかもしれない²¹⁾。

風力・太陽光の導入には強い電力系統網が不可欠であるという論理のもと、電力会社の系統網メンテ費用をキープすれば、もし、再生可能エネルギーが不調に終わっても強い系統は残る。これはよほど国益にかなうと思うが、皆さんはどう思われるだろうか。

いま、クルマの電動化への流れは疑うべくもないことになっている。30年ほど前は、電気モータで動くクルマが世界を席捲するようになるとはとても思えなかった。いよいよEVの時代になりましたね、などとやっかみ半分でおだてる輩もいるが、そう簡単にEV全盛の時代になるとは思えない。有頂天にならないようにしたい。

IoT, AI, VRなどもそうである。ブームに異を唱える気はないが、かつては長い長い冬の時代を経験していてこそその今がある。いつの時代もブームに流されることなく、冷静に未来を見極める必要がある。乏しい筆者の経験から言えば、ほとんどの技術は種が出てからモノになるまで20年かかっている。いまWPTがその状態にある。一方では、過ちに気づいたら潔く「改むるに憚ることなし」の精神も肝要である。

参考文献

- 1) Y. Hori; Future Vehicle driven by Electricity and Control -Research on 4 Wheel Motored 'UOT March II', IEEE Trans. on Industrial Electronics, 51-5 (2004), pp. 954-962.
- 2) 堀; 電気自動車の制御 一東大三月号のめざすもの一, 計測と制御 特集「自動車制御の昨日, 今日, 明日」, 45-3 (2006), pp. 243-253.
- 3) 堀; ガソリンと電気, 自動車技術 (巻頭言), 65 (2011), p. 7.
- 4) 横井, 居村, 高橋; 日本におけるワイヤレス給電システムの技術動向と今後の展望, 自動車技術, 66-9 (2012), pp. 94-98.
- 5) 堀; ワイヤレス給電技術が生み出す新たなクルマ社会, OHM, 2月号 (2013), pp. 18-20.
- 6) 堀; 00年後のクルマとエネルギー (巻頭言), 電気学会誌, 134-2 (2014), p. 1.
- 7) 堀; 「モータ」「キャパシタ」「ワイヤレス」というパラダイム, 技術総合誌OHM, 103-3 (2016), p. 4.
- 8) 居村; 磁界共鳴による無線給電方式の現在と未来, 電気学会誌, 135-4 (2015), pp. 620-622.
- 9) 居村, 堀; 電磁誘導方式と磁界共振結合方式の統一理論, 電気学会論文誌D, 135-6 (2015), pp. 697-710.
- 10) 居村; 磁界共鳴によるワイヤレス電力伝送, 全416ページ (2017), 森北出版.
- 11) 畑; 実験・EV走行中ワイヤレス給電, MOTORエレクトロニクス, 6 (2017), pp. 23-77.
- 12) 畑, 居村, 藤本, 佐藤, 郡司; インホイールモータとワイヤレス給電技術の融合, MOTORエレクトロニクス, 8 (2017), pp. 40-71.
- 13) 妹尾, 生越; 社会と知的財産, 放送大学教育振興会, ISBN4595308396 (2008), pp. 160-170.
- 14) 経済産業省・特許庁 事業戦略と知的財産マネジメント, 発明協会, ISBN4827109699 (2010), pp. 10-24.
- 15) 郡司, 居村, 藤本; 磁界共振結合によるワイヤレスインホイールモータの電力変換回路の制御に関する基礎研究, 電気学会論文誌D, 135-3 (2015), pp. 182-191.
- 16) 佐藤, G. Guidi, 居村, 藤本; ワイヤレスインホイールモータの高効率化および高応答回生の実現に関する研究, 電気学会論文誌D, 137-1 (2017), pp. 36-43.
- 17) M. Sato, G. Yamamoto, D. Gunji, T. Imura and H. Fujimoto; Development of Wireless In-Wheel Motor using Magnetic Resonance Coupling, IEEE Trans. on Power Electronics, 31-7 (2016), pp. 5270-5278.
- 18) 竹内, 居村, 郡司, 藤本, 堀; スーパーキャパシタを搭載したワイヤレスインホイールモータのパワーフロー制御法, 電気学会論文誌D, 138-3 (2018), pp. 219-226.
- 19) モータ/キャパシタ/ワイヤレスへのパラダイムシフト, 精密工学会誌, 84-9 (2018), pp.777-781.
- 20) 堀; これからの動力システムの変化と道路, 道路建設, 30-11 (2018), pp. 11-16.
- 21) 堀; 皆が大合唱していることは大間違い!?, R&D KANSAI (2019), p. 1, 関西電力.
- 22) 堀, 横井 (監修); 電気自動車のモーションコントロールと走行中ワイヤレス給電, 全492ページ (2019.5), エヌティーエス.