

キャパシタ電気自動車 C-COMS のめざすもの

東京大学 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 堀 洋一

はじめに

電気自動車は電気モータで走るため、(1) トルク応答がエンジンの2ケタ速い、(2) 発生トルクが正確にわかる、(3) モータは分散配置ができる、というガソリン車には到底まねのできない電気制御の良さに最大の特長がある。これを実証するために、堀研では、東大三月号IおよびII、カドウェル号などを製作して走行実験を行ってきた。

ただ大きな車での実験は手間も金もかかる。そこで、実験を近場で手軽に行うことを目的に、数年前に電気二重層キャパシタだけで動く C-COMS を製作したところ、キャパシタ電気自動車にはいろいろの特長があることがわかってきた。

電気二重層キャパシタには、(1) 寿命が半永久的、(2) 急速充放電が可能、(3) 材料の環境負荷が小さい、(4) 端子電圧から残存エネルギーがわかる、というきわめて興味深い特長がある。将来のクルマは電力系統につながっていくことは確実である。そして、500km も走る車がいかに非常識なものであるかを人々が考えるようになれば、高性能リチウムイオン電池の開発さえあまり意味を持たなくなり、キャパシタが主流となる日は遠くないのかも知れない。

電気自動車の運動制御

電気モータで動くEV(電気自動車)の特長は電気モータの特長そのものであり、ICV(内燃機関自動車)にはまねのできない次の3点が重要である。

トルク応答がエンジンの2ケタ速い

電気モータの特長は、トルク応答がエンジンの2ケタ速いことである。エンジンが500msならモータは5msである。

車は平行移動であるから原理的にエネルギーは要らない。ロスの大半はタイヤ路面間の摩擦で生じる。鉄道のエネルギー効率が格段によいのは、摩擦のきわめて少ない鉄車輪と鉄レールを使うためである。鉄車輪と鉄レールの組み合わせはよくすべるから、モータによる粘着制御が不可欠である。新幹線が時速300km/hを越えてなお駆動できるのは粘着制御のためである。車輪とレールの粘着特性がモータの種類や制御方式によって異なることは不思議なことである。

制御系には目標値応答特性と外乱応答特性があり、両者は異なる。人間を含んで論じるべき目標値応答と、その必要のないタイヤのスリップに対する外乱応答とは別物である。

定常的な速度・トルク特性や効率マップを見る限り、EVのエネルギー効率は決してよくないし、発電所の種類によってはCO2削減にもつながらない。トルク応答という時間軸を持ちこまないほとんどメリットはない。

モータは分散配置できる

エンジンを4つも8つも使う車は考えにくい。しかし、電気モータは複数に分けて車輪に入れてもそれほどコスト高にはならない。逆に、電気モータの高い制御性を活かせば、高度な運動制御が可能になる。前後方向の運動を対象としたABSの高性能化やトラクション制御TCSはもとより、横方向の運動も考えたヨーレートやすべり角 β の制御が考えられる。4輪独立駆動にすればヨーレートそのものを制御入力とする新しい制御系が組める。EVの4輪独立駆動は、ステアリングやデフによる駆動力配分によって横方向の力を発生せざるをえない、従来の4WDや4WSとは本質的に異なる。

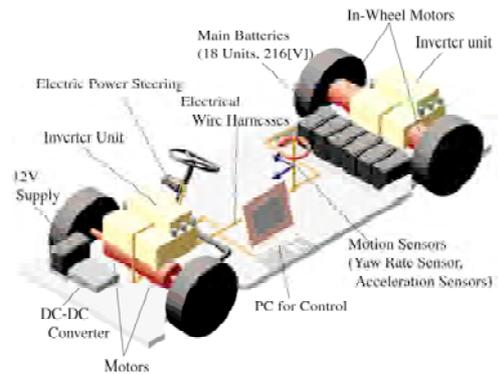
発生トルクが正確に把握できる

電気モータは発生トルクを正確に把握できる。エンジンはトルク発生機構に多くの非線形性を含み、モデルを正確に記述することは難しい。電気モータは電流を観測すれば、発生トルクを正確かつ容易に把握できる。駆動力オブザーバという仕組みを用いることによって、タイヤから路面に伝わる駆動力を容易に推定でき、路面状態を推定することが可能となる。ドライバに「今すべりやすい路面に入りました」などという警告を出すことが可能になる。

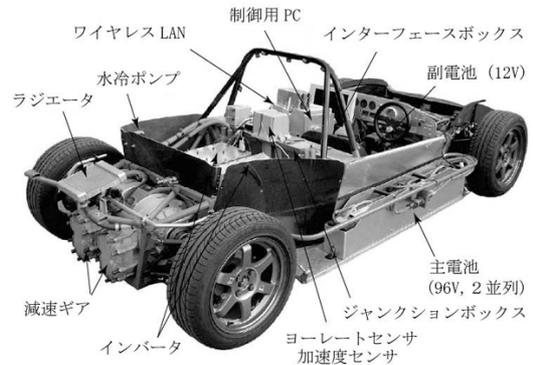
われわれは、このような電気自動車ならではの特長を生かした新しい制御に光をあて、その将来性を明らかにしてきたが、ここでは制御については文献をあげるにとどめ、キャパシタの話題を中心に述べることにする。



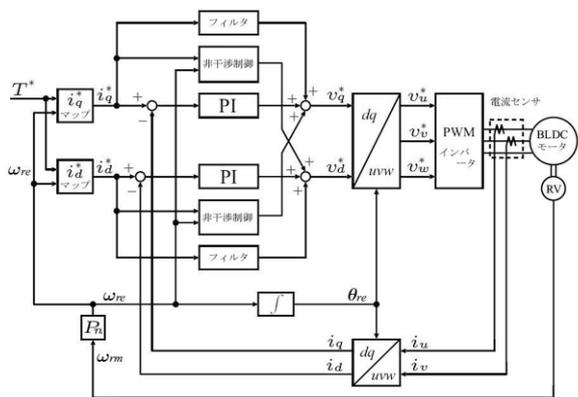
東大三月号IIの外観



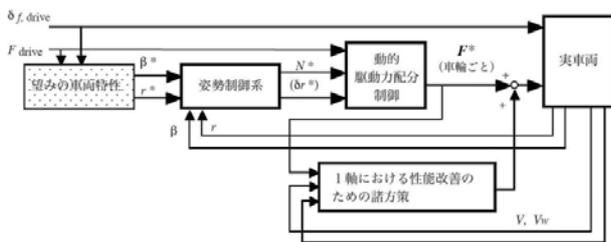
東大三月号IIの構成



カドウェル号の外観



カドウェル号のモータ制御系



堀研の電気自動車をめざすモーション制御系

電気自動車へのシナリオ

2006年10月に開催されたEVS22は「純電気自動車の復権」の会議であった。ちなみに昨年開催されたEVS23は「プラグイン・ハイブリッド大合唱」の会議であった。次回のEVS24はノルウェーであるが、エコブームを反映してかすでに多くの論文が集まっており大盛会になりそうである。

すなわち、「内燃機関車→ハイブリッド車→プラグイン・ハイブリッド車→純電気自動車」という流れを多くの人が言いはじめたのである。10数年前とは大変な様変わりである。

ハイブリッド車は充電がいらないことが売り物だが、これを家庭で充電できるようにする。エコドライブなどの流行によって、気づいてみたら、今日は、今週は、そして今月は、エンジンの出番はなかったということが容易に起こるだろう。さすれば、ハイブリッド車が築いてきた大きなマーケットはそのまま純電気自動車に転化する。

そういうことを吹聴していたら、ばかなことを言うんじゃないといろいろな人に怒られたが、今はこれがもっとも有力なシナリオになってしまった。本当のことを言っていたので怒られていた、ということらしい。もし世の中が筆者の予測どおりに進むのであれば、キャパシタの出番は無限にある。

キャパシタの特長

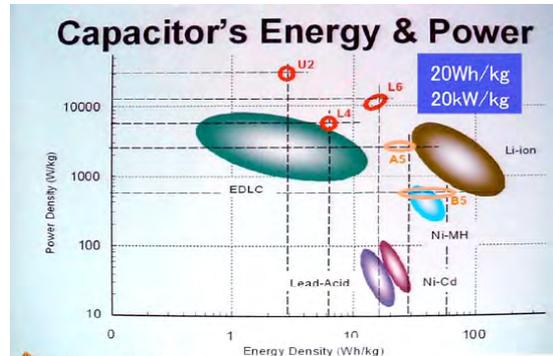
キャパシタには、次のような特長がある。

- (1) ほとんど劣化しない
(化学変化を伴わないので物理電池といわれる)
- (2) 大電流の動作が可能
(10kW/kg以上の充放電が可能で、とくに数分で充電できる)
- (3) 材料の環境負荷が小さい(重金属を使っていない)
- (4) 端子電圧から残存エネルギーがわかる
(あとどのぐらい走れるかが正確にわかる)

とくに、充電が非常に速くでき、端子電圧から残りのエネルギーが完全にわかるので、心配して余分な電池を積む必要がなくなる、という点が重要である。

このようにキャパシタは従来の化学電池にない特長を持つが、パワー密度は電池をはるかにしのぐものの、エネルギー密度はようやく鉛蓄電池に追いついた程度で、リチウムイオ

ン電池の約1/10である。下図に代表的な「移動体エネルギーストレージデバイス」の比較を示す。20Wh/kg, 20kW/kgという数字が代表的なキャパシタの実力であろう。しかしナノゲートキャパシタなどの新技術によって追いつく可能性もある。さらに、パワー密度は放電時も充電時も同じ数値であることは、電池とまったく異なっている。



移動体エネルギーストレージデバイスの比較

- 一方、キャパシタを利用する上で注意すべき点は、
- (1) 電気分解が始まる電圧(約3V)以上では使用できない
 - (2) 充放電にともなって端子電圧が大きく変動するという点である。

これらを克服し、高電圧を得るためにはセルを多数直列接続し、セルごとの最大電圧をそろえる並列モニターと呼ぶ均等化回路が必要である。また、モジュール全体の電圧低下に対しては、直並列切替、DC/DCコンバータ、それから、インバータに直結という、おそらくもっとも有力な方法がある。



キャパシタだけで駆動されるC-COMS1 およびC-COMS2

筆者の研究室で作ったC-COMSでは、直並列接続によって、外から見て100V, 100F程度のキャパシタをインバータに直結しており、30Vから100Vの範囲で動かしている。インバータの電源電圧が一定でなければならないというのは一種の先入観、あるいは固定観念である。たとえば、鉄道車両駆動用インバータ(従ってかなり大容量)は、架線電圧の倍近い変動を受け入れ、電力制御にも支障ないように設計されている。

30Vから100Vの間で動くということは、充電エネルギーの90%以上が使えることを意味する。これは電池には無理である。

充電装置はキャパシタ電圧に関わりなく150Aを流しこむありふれたスイッチング電源であり、30秒ほどの充電で20分以上走るエネルギーを注入することができる。これも電池にはできない大きな特長である。



C-COMS1 のキャパシタ (日清紡)



C-COMS2 のキャパシタ (パワーシステム)

これらの特長から導かれる新しいライフスタイルは何だろうか。それは、「電力システムにつながり」、「インフラからエネルギーをもらいながら」、「ちょこちょこ充電しながら走る電車のようなクルマ」を使うことである。

数日分のエネルギーを抱えて走ることが大前提だったクルマに、外からエネルギーを供給する仕組みを作るのである。考えてみれば、500km も走るエネルギーを貯め込んでいるということ自体が、安全性の問題も含めてすべての元凶である。いわば爆弾を抱えているようなものである。そんな危険で野蛮な乗り物は、早晚時代遅れになっていくであろう。

さらに、乗り物を動かすアクチュエータとして、電気モータの良さは無限にあり、将来は他を犠牲にしても電気を使うようになるだろう。これはオール電化住宅の良さを考えてみるとよくわかる。

いつかはキャパシタ

「いつかはクラウン」という自動車のコマーシャルがあった。クラウンやレクサスは高嶺の花であっても、いつかキャパシタの時代は確実にやってくるだろう。

そもそも自動車会社の論理は非常に面白いところがある。「いつでも、どこでも、だれでも」使えるクルマ、すなわち、1回ガソリンを入ると 400km も 500km も走り、速度も 160km/h ぐらいは出て加速もいいものでないと売れないという。本当にそうだろうか。

500km 車は明らかにオーバースペックである。1日 20km も走ればよく、速度だって 100km/h 以上出したことはない人も少なくないだろう。小さくてデパートの駐車場にとめるのが楽な車の方がよい。でも今は簡単には手に入らない。

キャパシタ電気自動車が普通になれば、ネット上で適当な部品の組み合わせが選択できて、自分の好きな仕様を入れると値段が計算され、2~3 日したら家まで配達される。すでにパソコンはそういう買い方をしている。これは車の産業構造を変える可能性がある。

キャパシタは「エネルギーと知恵の缶詰 (Can of Energy and Wisdom)」と呼んだように、周辺の電子回路の知識がないと使いものにならない。これは電気屋にはかなり痛快なことである。またキャパシタの開発は正義の研究である。後ろめたい要素はほとんどない。昨年筆者は中国やインドに行きいろいろ考えることが多かった。キャパシタによって彼らを、ひいては地球を救うこともできるかもしれない。キャパシタの開発に自信と誇りをもって、この技術を後世に残したい。

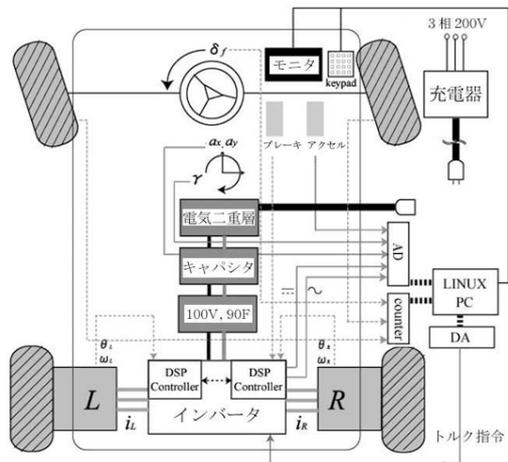
「いつかはキャパシタ」の時代はいつか、しっかり見極める必要がある。少なくともエネルギー密度が既存の電池に等しくなるまで待つ必要はないことは確かである。数年後か、十数年後か、数十年後か。100 年もすれば、ほとんどの車はモータとキャパシタで動いていることは間違いないのだが。

C-COMS の制御系構成

C-COMS1 (種車はトヨタ車体制コムス) は、EV の運動制御の原理原則をほり下げる目的で作ったものである。大きい車は充電に時間を要し、テストコースに持ち込むためには時間も費用もかかる、また、タイヤの非線形領域まで踏み込んだ粘着制御や、鋭いコーナリング性能などの危い実験はできないためである。

図に C-COMS1 の制御系構成を載せる。キャパシタは日清紡製である。インバータは直流電圧 30V から 100V までの範囲で動作するように工夫している (といっても電圧低下で出力カットなどという機能を殺すだけである)。

車輪ごとの粘着制御はインバータの制御用 PC に分担させ、上位の Linux PC で車両全体の運動制御を行う。これによって電気自動車ならではの制御に関するさまざまな実験を行うことができる。費用は 200 万円もあれば十分である。



C-COMS1 の制御系構成

- (1) TCS (traction control) based on MFC
- (2) Slip prevention using Back-EMF Observer
- (3) Hybrid ABS and TCS
- (4) Adhesion Control emulating Separately Excited DC Motor's Property
- (5) Estimation and Control of Body Slip Angle β
- (6) DYC based on Yaw Moment Observer
- (7) Estimation of μ Gradient and Peak μ Estimation using Brush Model and Driving Force Observer"
- (8) Realtime Speed Pattern Generator to Improve Ride-comfort using Driver's Will Estimation
- (9) Driving Force Distribution Control based on Estimation of Side Force



C-COMS でもくろんでいる運動制御実験

最近、C-COMS1 に加えて、C-COMS2 および COM3 を製作した。C-COMS2 はパワーシステム社のキャパシタを積み、充放電効率など車内のエネルギー分析を行うと同時に、ダイレクトドライブのインホイールモータの優位性を追究する予定である。また、トルクの垂下特性を利用した粘着性能の改善、とくに、d 軸 q 軸両軸の電流制御を用いる方法を提案し有効性を実証している。

COMS3 は鉛電池駆動のまま、従来のモータのトルク指令を 1ms 程度の高速で入力できるような改造を行った汎用機である。これは高性能な粘着制御を実現するフィードバック制御のためには譲れないポイントである。



COMS3 (電池駆動) (従来技術の汎用機)
 C-COMS1 (キャパシタ駆動) (特注インバータ)
 C-COMS2 (キャパシタ駆動) (DD モータ)
 C-COMS ファミリー

	Lead-acid batteries (6 series)	EDLCs (3 series, 3 parallel)	Ratio
voltage	72 V	97.2 V	0.74
energy stored	3744 Wh	144 Wh	26
weight	130 kg	40 kg	3.25
vehicle weight	350 kg	260 kg	1.35
vehicle volume	47.3 L	44.21 L	1.07
internal resistance	21 mΩ	22 mΩ	0.96
range	45 km	2.5 km	18
time of charging	13 h	60 s	780

C-COMS2 のオリジナル電池とキャパシタの比較

永久磁石モータ (PM) への警鐘

EV 駆動用モータは PM が主流である。どんな比較表を見ても、誘導モータ (IM) のエネルギー効率は必ず PM に劣る。これは全速度・トルク領域でベクトル制御を行うためである。

しかし、IM は負荷の軽いときに励磁電流を絞れば消費電力は下がる。自動車は全負荷で長時間運転することはないから、低負荷時の効率改善は重要である。IM の効率最大化制御を用いれば、例えば 40km/h 定速走行時には IM の方がよくなり、街乗り車は PM、郊外に出るなら IM が最適ということになる。

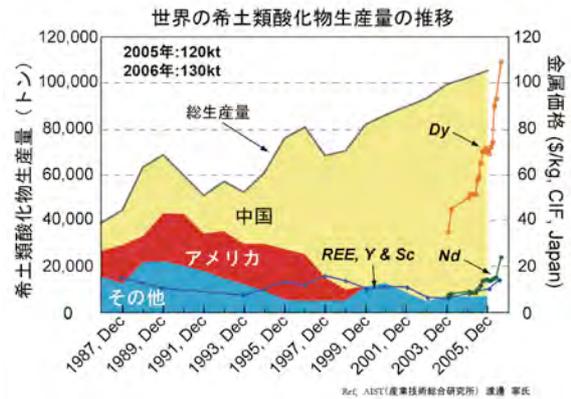
強力な永久磁石に使われるネオジムなどの希土類元素は中国一国に資源が集中するため、これを使い続けてよいかどうかはきわめて疑問である。高温で保持力を高めるためにはディスプレイウムを大量に用いる必要があるが、これがまた高価でレアメタルパニックを助長する。

磁石材料にしわ寄せを求める体質は改め、レアアースレスモータの開発を進めたり、高温で弱め界磁をしなくて済むなど制御面での工夫も含めて総合的に考える必要がある。アメリカの EV はほぼすべて、永久磁石のいらぬ IM を用いていることにも注意すべきであろう。

なぜ磁石にレアアースが必要とされたか？

- ① 大きな始動トルク、劇的な小型軽量化
- ② 自動車駆動用に適したモータを検討したところ、誘導モータはベクトル制御を前提としたため低効率、リタクタンズ系は性能不足のため早々に脱落
(電車は依然、ほぼ100%誘導モータを使用)
(誘導モータの高効率制御という方法も有望)
- ③ PMモータで高速域まで引っ張ろうとすると弱め界磁制御が必須になる (これはこれで大欠点)
- ④ 弱め界磁は磁石の力を弱らせる (減磁という) ので、**減磁に強い磁石材料**が必要とされた (ネオジム)
- ⑤ さらに自動車会社の要求によって、**高温で動作**させる必要が生じた (ディスプレイウム)

..... という本道を歩み、遠くまで来てしまった。
 磁石にレアアースが使われる理由



中国に偏在する希土類資源と価格上昇

上海キャパシタバスの勇気

2007年11月EVS23開催の直前に、「モチペート」の森五宏社長のお世話で上海のキャパシタバスを見学する機会を得た。

まず上海トrolleyバス会社 (申沃客車) 訪問。現在約10台、万博までに100~200台を計画中という。翌日バスに試乗。1.65V, 80000Fのキャパシタを18個で1モジュールとし、21モジュールを直列に使っている。全体で600V, 200Fほどになる。電圧の均等化回路はとくに使用していない。インバータに直付け。バス停でパンタをあげて200Aで充電。400~600Vぐらいの電圧範囲で使用するのでフル充電時間は200秒である。 $Q=CV=IT$ の公式そのまま。普段バス停での充電はもっと短い。電力は100kWといったところである。

続いて、奥威科技というキャパシタメーカを訪問。華社長は世界を変えたいという夢とビジョンを持っていた。政府が後押しをしながらあつという間に決断し、世界初の試みを思いきってやっている。悪口を言う人は少ない。慎重な日本ではなかなかできないだろう。勇気の問題かも知れない。



上海のキャパシタバス外観



バス停で充電する (時間は30秒ほど)

近未来のクルマが電力系統に接続されることは、いまや明白である。V2H, V2G, G2Vなどと言いつつ始めている。動くものへのエネルギー供給の問題さえ解決されれば、乗り物を動かすアクチュエータには電気モータが最適であるということは、鉄道がとうの昔に証明済みである。

キャパシタを積んだ路面電車やトrolleyバスは、クルマそのものを変える原動力になるだろう。プラグイン・ハイブリッド車は、将来必ずキャパシタを積むようになり、エンジン

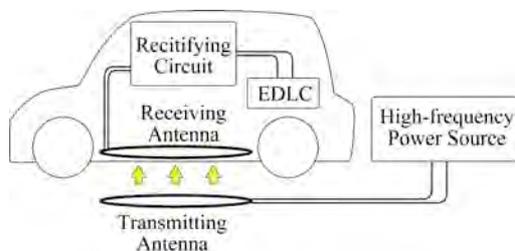
は早晚その役目を失うだろう。筆者には、ちょこちょこ充電しながら走るクルマに向かって行く、まったく新しい時代の潮流がありありと見える。

おわりに：資源セキュリティと将来の研究テーマ

キャパシタは環境にやさしい材料から作られると述べたが、このような観点はこれからますます重要になる。たとえば、燃料電池車が1台あたり白金を100g近く使いつづけるかぎりは、けっして環境にやさしいクルマではない。

これからやるべき研究テーマは、移動体へのエネルギー貯蔵（ストレージ）と供給（サプライ）である。前者は電気学会の産業応用部門に調査専門委員会が設置され、2年間の活動を終えて立派な報告書が出る予定である。

クルマが電力系統につながっていくとすれば、次に来るべきは、「移動体へのエネルギー供給技術」であろう。数十kHz、10～20MHz、2.45GHzなどの周波数を使った非接触のエネルギー伝搬装置の研究が、あまり表にはでないけれどもいろいろところで始まっている。近い将来、いきなりブレイクする可能性がある。そのとき、キャパシタはエネルギーを仲立ちし、系をバックアップする重要なデバイスとなり、大活躍することになると考えられる。



非接触充電システムの例

50周年を迎えた東京モーターショーやEVSなどを見ると、かつては実験車のブースにまとめられていたEVは、ハイブリッド車とともに普通の車として出品されている。50年後のモーターショーでは、エンジン車は記憶の歴史館にまとめられ、EVSなどという会議は存在意義を失っているだろう。

いずれにしても世界が「オートショー」と名乗る中で、日本では昔から「モーターショー」を名乗ってきた。将来のモーターショーが、本当に電気モータとその制御技術を競う場になることを、技術者は知っているのである。

電気自動車ではモータのトルク応答が速いというメリットを生かさないと意味がない、という15年以上前からの筆者の主張が、かなり認められるようになってきて、大変喜んでいる。将来のクルマは必ず電力系統からもらう「電気」エネルギーで走り、その次には「制御」の時代が来ることを確信をもって予言し、結びとしたい。

参考文献

- 1) Y.Hori, Y.Toyoda and Y.Tsuruoka: Traction control of electric vehicle: Basic experimental results using the test EV UOT Electric March, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.34, No.5, pp.1131-1138 (1998)
- 2) 鶴岡, 豊田, 堀: 電気自動車のトラクションコントロールに関する基礎研究, 電気学会論文誌D, Vol.118, No.1, pp.45-50 (1998)
- 3) S.Sakai, H.Sado and Y.Hori: Motion Control in an Electric Vehicle with Four Independently Driven In-Wheel Motors, IEEE Trans. on Mechatronics, Vol.4, No.1, pp.9-16 (1999)
- 4) 堀: 「家田編著, それは足からはじまった(モビリティの科学)」, 1.5 電気モータのしくみ, 5.3 電気自動車の将来性, 技報堂出版 (2000)
- 5) 坂井, 佐渡, 堀: 電気自動車における車体速度情報不要の新し

- いたイヤ空転検出法, 電気学会論文誌D, Vol.120, No.2, pp.281-287 (2000)
- 6) 坂井, 佐渡, 堀: 4輪独立駆動電気自動車における動的な制御動力配分法, 電気学会論文誌D, Vol.120, No.6, pp.761-768 (2000)
- 7) 片岡, 佐渡, 坂井, 堀: ファジィ推論を用いた電気自動車用トラクションコントロールシステムのための最適スリップ率推定器, 電気学会論文誌D, Vol.120, No.4, pp.581-586 (2000)
- 8) 堀, 坂井, 片岡: 電気自動車の新しいモーションコントロール(解説), システム/制御/情報, Vol.45, No.5, pp.231-239 (2001)
- 9) T.C.Minh and Y.Hori: Convergence Improvement of Efficiency-optimization Control of Induction Motor Drives, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.37, No.6, pp.1746-1753 (2001)
- 10) 堀, 寺谷, 正木: 自動車用モータ技術, 日刊工業新聞社 (2003)
- 11) C.Chakraborty and Y.Hori: Fast Efficiency Optimization Techniques for the Indirect Vector-Controlled Induction Motor Drives, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.39, No.4, pp.1070-1076 (2003)
- 12) Y.Hori: Future Vehicle driven by Electricity and Control -Research on 4 Wheel Motored 'UOT March II-', IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.51, No.5, pp.954-962 (2004)
- 13) 堀: 電気と制御で走る近未来車両の研究, 生産研究, Vol.56, No.2, pp.131-137 (2004)
- 14) 青木: 電気自動車における車体すべり角オブザーバのロバスト化と実車データによる検証, 電気学会論文誌D, Vol.125, No.5, pp.467-472 (2005)
- 15) 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」, Vol.45, No.3, pp.243-253 (2006)
- 16) 小玉, 堀: 他励直流モータのトルク垂下特性をまねることによる電気自動車のスリップ抑制制御-ブラシレス DC モータを搭載した「東大カドウェル号」による検証-, 電気学会論文誌D, Vol.126, No.3, pp.248-254 (2006)
- 17) 堀: モータ制御で進化する自動車, 豊田自動織機技報, No.54 (2007)
- 18) 小池, 堀, 電気二重層キャパシタと DD インホイールモータを搭載した電気自動車 C-COMS2 による運動制御実験, 電気学会自動車研究会 VT-07-21 (2007)
- 19) 佐竹, 河島, 内田, 堀, IPMSM の dq 軸電流をともに利用したトルク垂下特性による 電気自動車のスリップ抑制制御, 平成 20 年電気学会産業応用部門大会 (2008)
- 20) 森, 堀, 麻岡: 「上海キャパシタトロリーバス」, ECaSS フォーラム会報, Vol.3, pp.2-8 (2008)
- 21) 堀, いつかはキャパシタ, 平成 20 年電気学会産業応用部門大会 (オーガナイズドセッション: 電気二重層キャパシタの将来性) (2008)
- 22) 堀, ちょこちょこ充電する電車のようなクルマへ, ATI スペシャル・インタビュー (第3回), 日経エレクトロニクス (7月14日号) (2008)
- 23) Y.Hori: Motion Control of Electric Vehicles and Prospects of Supercapacitors, 電気学会共通英文誌, 特集"Special issue on Motion Control in Japan", to be published (2009)

★本稿は以上の文献の中から、キャパシタに関係のある部分をピックアップして構成したものである。とくに、文献 12) 15) 17) 21) 23) から多くを参照したことをお断りしておく。