

モータ制御で進化する自動車

Cars will Evolve by Motor Control.

東京大学生産技術研究所

教授 堀 洋一
Professor Yoichi Hori



要旨

電気モータの高速トルク発生を生かし、電気自動車ですべて可能になる新しい制御の実現をめざす研究を行っている。タイヤの増粘着制御によって低抵抗タイヤの使用が可能になれば、燃費はいっぺんに数倍になる。4輪独立駆動車を用いれば高性能な車体姿勢制御が実現できる。また、モータトルクは容易に知れるので路面状態の推定ができ、「いま雪道に入りました」という車ができる。これらを実証するために、インホイールモータ4個を用いた高性能車「東大三月号-II」および「カドウェルEV」を製作し実験を進めてきた。最近キャパシタだけで走る「C-COMS I & II」を製作した。キャパシタには、寿命が長い、大電流での充放電が可能、重金属を用いないため環境にやさしい、端子電圧から残存容量が正確にわかる、などの優れた特長があり、車の世界を変える可能性を秘めている。

Abstract

By utilizing electric motor's quick torque generation, we can realize novel motion control for EV. Effective adhesion control at tires enables usage of lower loss tires, which improves fuel consumption drastically. 4-wheel-driven car realizes high performance vehicle dynamics control. Easily known motor torque is used for road surface estimation, where the car tells us "We have entered snowy road!". The test vehicles "UOT March-II" with independent 4 in-wheel motors and "Cadwell EV" are used for experiments. New vehicles "C-COMS I & II" have been recently completed. Capacitor has advantages in Long life, Large current charge/discharge, Environment friendly without heavy metal usage, and Remaining energy can be known from the terminal voltage. It must change the car world.

1 まえがき

エネルギー・地球環境問題を契機として電気自動車への関心が大きく高まったのは、1996年に大阪で開かれた電気自動車専門の国際会議EVS-13からであろう。その後10年を経て、2006年10月には、筆者がプログラム委員長を務めたEVS-22が、日本自動車研究所(JARI)の主催によって、パシフィコ横浜で開催された。現在、電気自動車の最高速度や加速性能は満足できるレベルに達し、ハイブリッド車が登場して売れ行きも好調である。最後は燃料電池車になるといわれ、各社開発にしのぎを削っているが、インフラの整備や技術的な問題も少なくない。しかし、もはや電気駆動への流れは否定すべくもなく、車の世界はモータ制御とパワーエレクトロニクスを制する者が制するようになることは誰の目にも明らかである。

細かく見れば、電気モータは日本では誘導モータ(IM)から永久磁石型モータ(PM)へ進む傾向がはっ

きりしたが、アメリカではIMが依然主流であるとか、電池は、鉛→ニッケル水素→リチウムイオンという流れがはっきりして、これに電気二重層キャパシタ(EDLC)がどう食い込むかが注目される、などといった興味深い話題もたくさんある。

しかし、本稿ではこのような電気自動車の特徴、分類、あるいは歴史や将来動向などに関する普通の事項は述べないで、ほとんどの紙面を、筆者の研究室で行ってきた「東大三月号プロジェクト」に割き、電気自動車ならではの新しい制御の可能性を述べ、後半ではEDLCの将来性などについて私見を述べる。本稿は計測自動制御学会に執筆した解説^[15]をもとに、最近の情報を加えたものであることをお断りしておく。

2 電気自動車の特長

EV(電気自動車)は電気モータで動くため、ICV(内燃機関自動車)にはまねのできない3つの特長がある。

トルク応答がエンジンの2ケタ速い

電気モータの最大の特長は、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。この100倍の差を使って、ガソリンと電池のエネルギー密度差100倍を取り返さなければならぬ。逆に、電気モータの高速かつ正確なトルク応答を活用できればEVにはバラ色の未来が開ける。

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。ただし鉄車輪と鉄レールの組み合わせはよく滑るから、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おかげである。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もよく知られている。まったく同じモータを使っても、直流機関車よりも交流機関車の方がたくさんの貨車を引っ張ることができる。これは不思議なことである。

モータの応答は速すぎるので、無用であるばかりか危険であるという人がいる。しかしこの理屈は間違っている。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応答（外乱応答）とは別物である。これは2自由度制御の概念そのものである。

いままでEVといえば、定常的な速度・トルク特性や効率マップだけがエンジンと比較されてきた。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二酸化炭素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と勝ち目はないのである。

モータは分散配置してもコスト高にならない

エンジンを4つも8つも使う車は非常識である。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、ガソリン車にはできない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。前者の代表はABSであり、ガソリン車においても比較的応答

の速いブレーキ系統を利用して実現されている。しかしトラクション制御は付加ハードが必要でコスト高となる。EVであれば、モータ制御だけで高性能なトラクション制御が簡単に実現できる。

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のである。

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。すると、駆動力オブザーバという簡単な演算を用いることによって、タイヤから路面に伝わる駆動力や制動力を容易に推定でき、リアルタイムで路面状態を推定することが可能となる。例えば車が雪道に入れば、ドライバに「今滑りやすい路面に入りました」などという警告を出すことも可能になるから、安全性向上に大きく貢献する。

このような、電気と制御の世界にこそ、EVならではの魅力が存在する。遠からず人々はこの魅力に気がつき、EVといえば高性能制御車という時代がやってくる。

3 電気モータのトルク速度特性

図1は、よく見る「乗物に適した速度・トルク特性」である。モータには定トルク領域と定出力領域があることはよく知られているが、タイヤが滑ったときの挙動のような速い現象は、定トルク曲線や定出力曲線に沿って変化するわけではない。図には、微少な速度変化が生じたときトルクがどの方向に反応するかを、2種類模式的に描き込んでみた。

アクセルペダルの踏み込み角度に比例させてトルク制御を行う通常の制御では、車輪がスリップしてモータ速度が増加しても、トルクはほとんど変化しないのでスリップはさらに増大する。一方、電圧が短時間ではあまり変わらないようにしておくと、小さな速度増加に対してトルクは急激な垂下特性を示し、タイヤは非常に滑りにくくなる。

このような、タイヤの空転に対する過渡特性は、**図1**のような静的な速度・トルク特性曲線では表現できない。静的なトルクカーブや効率マップからは時間軸がごっそり抜けているから、落とし穴にはまってしまう。

4 「東大三月号 I」の研究

東大三月号 I

以上のようなEVの積極的な優位性に光を当て、実用化に向けた問題点の洗い出しと解決を行うために、東大三月号 I を製作した。**図2**にその制御系構成を示す。

車輪のスリップ防止制御

自動車の加速時にスリップを抑制する制御をTCS(トラクションコントロール)、ブレーキ時のものをABS(Anti-lock Braking System)という。トラクションコントロールはガソリン車では困難であるが、トルク応答の速いEVでは容易に実現可能である。

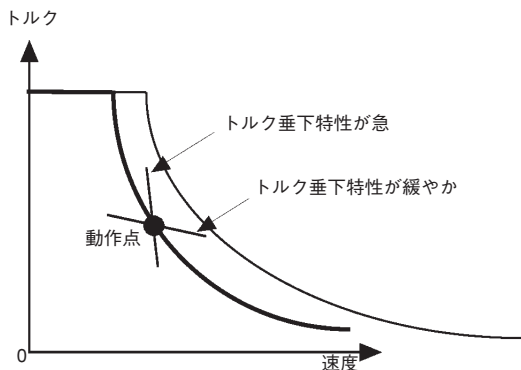


図1 電気モータの速度・トルク特性
Fig.1 Speed-Torque Characteristics of Electric Motor

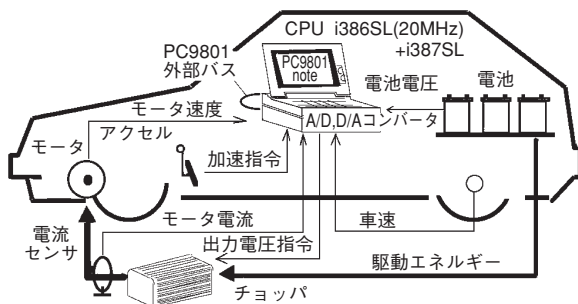


図2 東大三月号 I の制御系構成
Fig.2 Control System of UOT March I

(1) 車輪速度のみの制御による空転抑制

図3は車輪回りの運動方程式を示す。スリップ率 λ とは、車体速度 V と車輪速度 V_w の差の相対比であり、**図4**に示す μ - λ 曲線において、 $\lambda=0$ が完全粘着、 $\lambda=1$ が完全空転を意味する。ここで、車輪速のみを用いたもっとも簡単な制御として、**図5**に示す擬似的なモデル追従制御(疑MFCと呼ぶ)を提案し、空転を抑制することができることを示した。

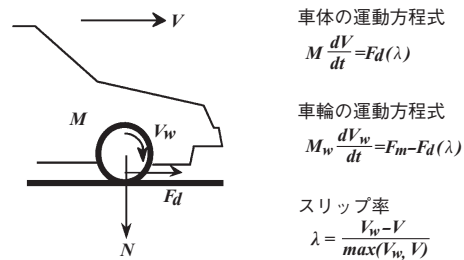


図3 車輪回りの運動方程式
Fig.3 Motion Equation on Wheel

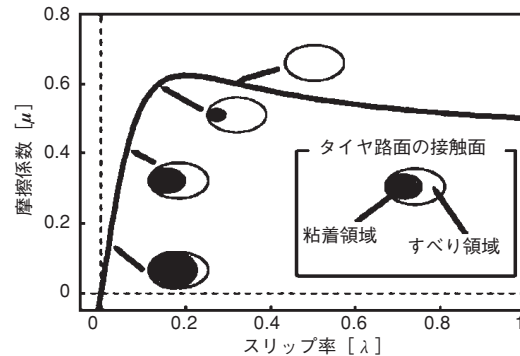


図4 μ - λ 曲線
Fig.4 μ - λ Curve

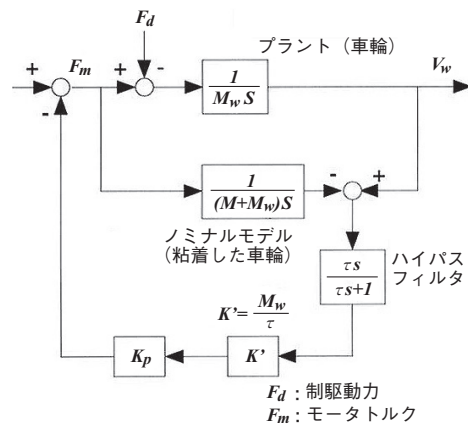


図5 疑MFC (モデル追従制御)
Fig.5 Semi MFC (Model Following Control)

滑りやすい路面に入って出る走行実験の結果を図6に示す。皆さんは、タイヤの滑りやすさは、路面の状態とタイヤの材質や空気圧だけで決まると思っていないだろうか。これが駆動するモータの制御によって異なるなんてことがありうるだろうか？しかし図6からは、制御の効果は明確であり、しかも調整できることがわかる。「電気制御によって機械特性が変わる」というかなり不思議な事実が存在するのである。

(2) スリップ率制御

スリップ率制御とは λ を直接制御する非常に強いフィードバック制御であり、図7のような可変ゲインのPI制御器を用いて実現される。図8に東大三月号Iを用いた実験結果を示す。 $\lambda=0.3$ のような $\mu-\lambda$ 曲線のピークの右側にいると思われる不安定領域でも、良好に制御できていることがわかる。

(3) 車体速度を用いない空転検出

モータの出力トルクの値は正確に把握できるが、油圧ブレーキやエンジンでは難しい。ここにもEVの新しい可能性がある。その好例が、モータのトルクと速度のみから空転の発生を検出する手法である。図9に示す駆動力オブザーバを用い、モータの出す力とタイヤから路面に伝わる力の関係を用いる。図10に実験結果を示す。空転の発生を良好に検出することができる。

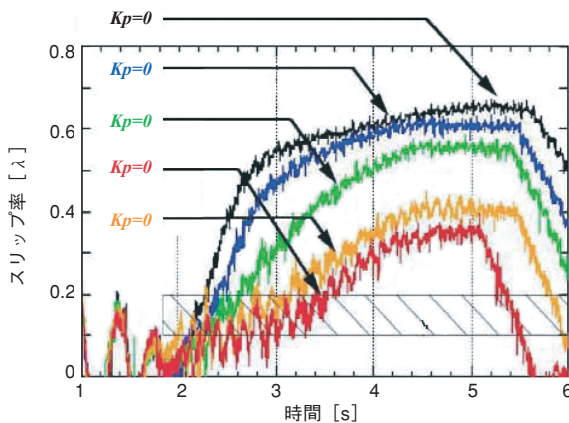


図6 疑MFCの実験結果
Fig.6 Experimental Results of Semi MFC

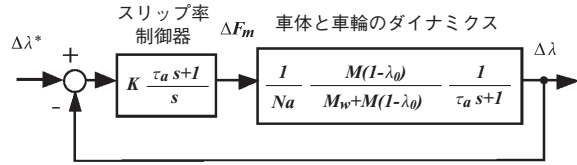


図7 スリップ率制御系
Fig.7 Slip Ration Control System

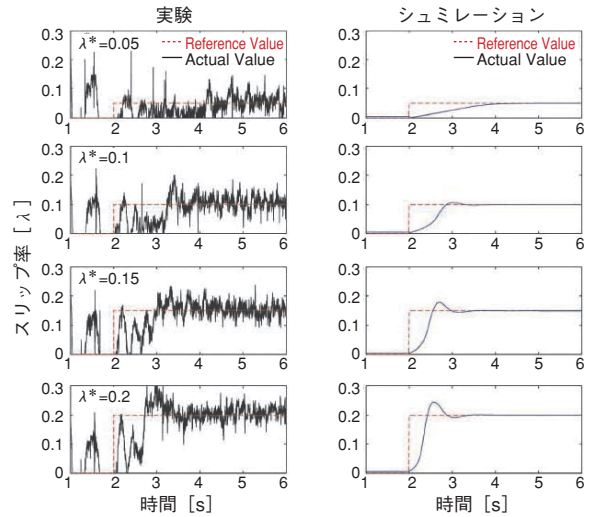


図8 スリップ率制御のシミュレーションおよび実験結果
Fig.8 Simulation and Experimental Results of SRC

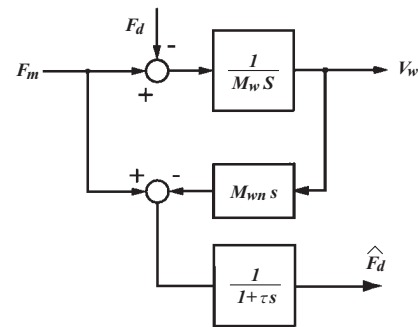


図9 駆動力オブザーバ
Fig.9 Driving Force Observer

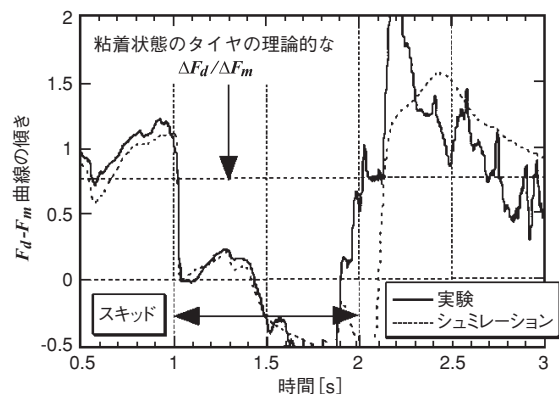


図10 μ 勾配の推定結果
Fig.10 Estimation Results of μ Slope

路面状態推定とその応用

ABSやDYC (Direct Yaw Control)などを効果的かつ安全に適用するためには、路面の滑りやすさを制御器が把握していることが重要である。また、ドライバーに対して路面状態を表示できれば、安全性向上の面でも大きな意義がある。

路面状態を推定し制御に利用するためには、いま車が μ - λ 曲線のどの部分にいるのかを実時間で推定できなければならないが、EVでは駆動力オブザーバ(図9)を用い、あとは、一般的な逐次最小二乗法、固定トレース法などの適応同定の手法を用いればよい。

さらに積極的な路面状態推定法として、 μ - λ 曲線のピーク μ 値の推定がある。詳細は省略するが、図11に実験結果を示す。乾燥アスファルト路面を定常走行中に、2.2s付近で急に濡れた鉄板に入る。路面の変化は2.6s付近で最大摩擦係数の減少として検出されている。このような急変はドライバーには検知しにくいから、安全性は大きく向上する。さらにITSの枠組みでは、車そのものが文字通り動く路面センサになり、中央に情報を集めればいくらかでも使い道があるだろう。

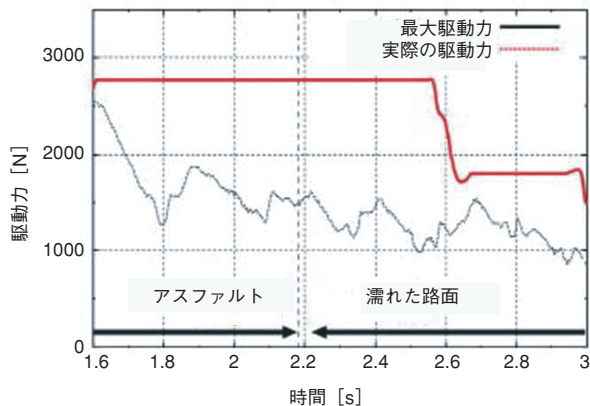


図11 路面が急変する場合の駆動力と最大駆動力の変化
Fig.11 Driving Force and its Possible Maximum Value with Rapid Change on Road Condition



図12 東大三月号IIの外観
Fig.12 Outlook of OUT March II

5 「東大三月号II」の研究

東大三月号II

図12は東大三月号IIで、4つの車輪に配したインホイールモータによって4輪の完全独立駆動を行う。図13はその構成である。図14に全体の制御系を示す。姿勢制御系は、車体すべり角 β とヨーレート γ をある値に保つため、制御入力としてヨーモーメント力 N^* と後輪舵角 δr^* を出力する。これらの指令を満たすように4輪の駆動力が決められるが、そこには冗長性があるため、駆動力の最適配分制御を行う。

各輪の駆動力が決まったあと、さらに1軸における性能改善を行うための諸方策を盛り込んだマイナー制御ループが加わって、最終的なトルクが決まる。電気モータの速く正確なトルク発生を最もよく利用できるのは、一番内側のマイナー制御ループに作り込まれる増粘着制御である。

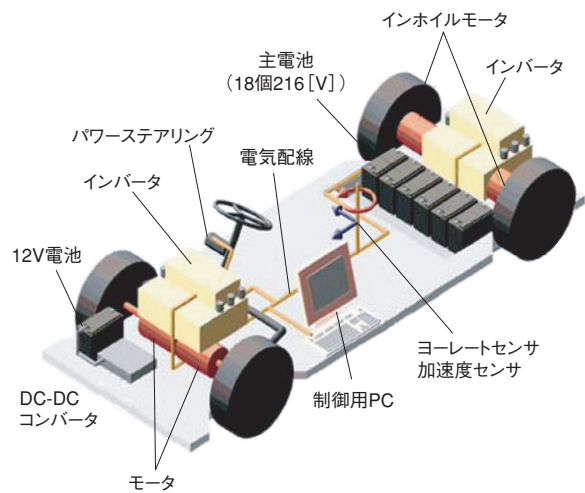


図13 東大三月号IIの構成
Fig.13 Configuration of OUT March II

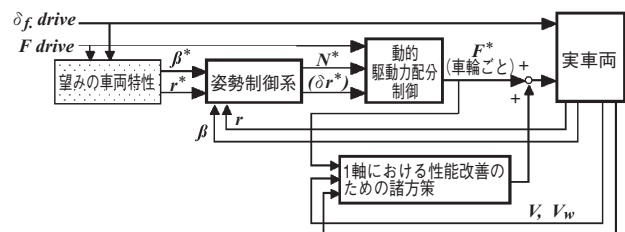


図14 東大三月号IIがめざすモーション制御系
Fig.14 Motion Control System which OUT March II Aims to

2 次元姿勢制御

電気モータは小型化が可能であるので分散配置することができ、左右輪に異なるトルクを与えて車両姿勢を制御するいわゆるDYCが、容易に実現可能である。

ここでは、4輪のモータに前述の擬MFCを適用しておくだけでも、旋回制動時の安定性を向上できることが確かめられている(図15)。これは、高速なマイナーループの付加によって、乗り物に適した車輪特性が作られ、無意識のうちに車両運動が安定化されるということであり、従来の手法とは考え方も手法も全く異なる。

車体すべり角 β の推定と制御

ヨーレート γ と車体すべり角 β のうち、 γ はセンサを用いて容易に測定可能であるが、 β はきわめて困難である。オブザーバを用いて推定するしかない。ここでは、 γ と β を状態変数とする2輪モデル(図16)を用い、教科書どおりの線形オブザーバを構成する。横方向の加速度を測定変数に加えている。東大三月号IIを用いた推定実験結果を図17に示す。

β の真値は画像処理を用いた効果な光学センサによる。かなり急激で大きなステアリングを切っているが、推定結果はきわめて優秀である。オブザーバゲインの冗長性を生かし、コーナリングスティフネスの変動に対するロバスト化、さらに制御(図18)にも成功している。

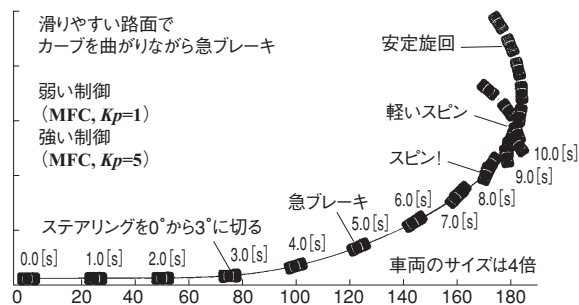


図15 コーナリングにおけるMFCの効果
Fig.15 Effect of MFC at Cornering

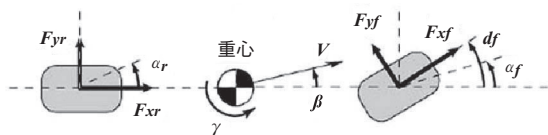


図16 車両の2輪モデル
Fig.16 Bicycle Model of Vehicle

6 「東大カドウェル号」の研究

他励直流モータのトルク垂下特性

東大カドウェル号では、電気モータのさらに本質的な特性を利用して粘着特性の改善を図っている。図19にその外観、図20に後輪2輪を駆動するモータ制御系を示す。

増粘着制御の原理は、車輪が小さなスリップをおこしたとき、マイクロな時間スケールでは大きなトルク垂下特性を示すが、マクロな時間スケールでは定められたトルクを出力するという特性である。これを図20のようなIPMでいかに実現するかがポイントである。

カドウェル号による実験結果

80Nmの一定トルク指令で加速中に、乾燥アスファルト路面から濡れたアルミ板へ進入する実験を行った実験結果を図21に示す。従来手法では、スリップの発生時にモータの回転速度が急上昇するが、提案手法では、速度上昇が抑制されている。

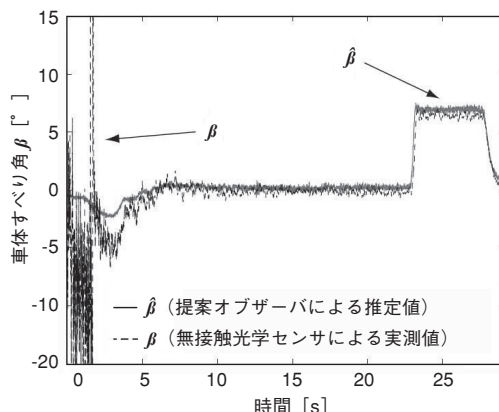


図17 β 推定の実験結果 (三月号II)
Fig.17 Experimental Results of β Estimation (UOT Match II)

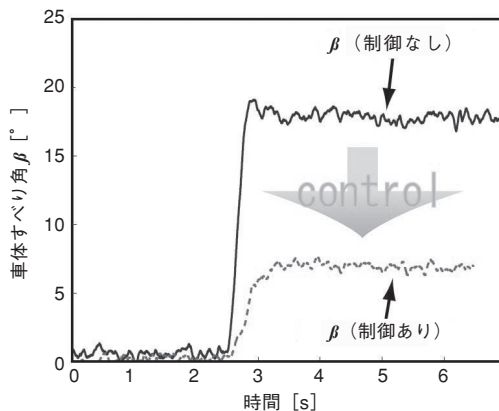


図18 β 制御の実験結果 (三月号II)
Fig.18 Experimental Results of β Control (UOT Match II)

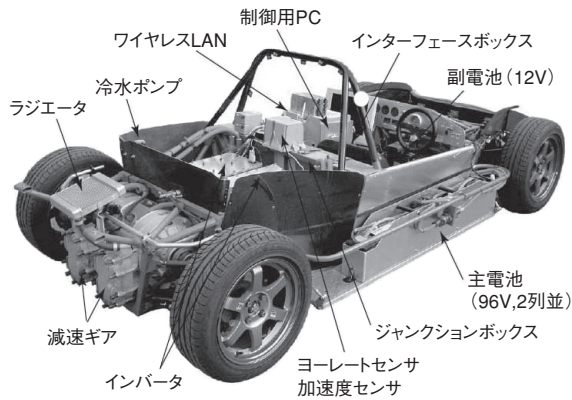


図19 カドウェル号の外観
Fig.19 Outlook of Cadwell EV

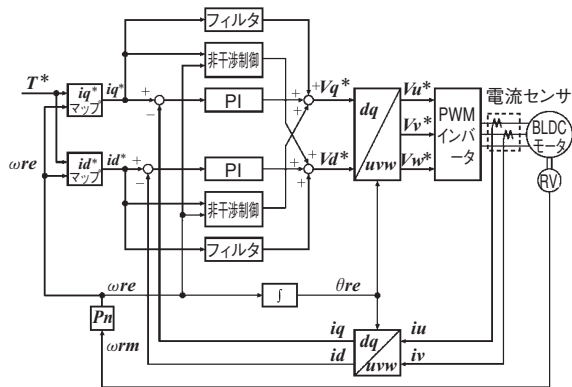


図20 カドウェル号のモータ制御系
Fig.20 Motor Control System of Cadwell EV

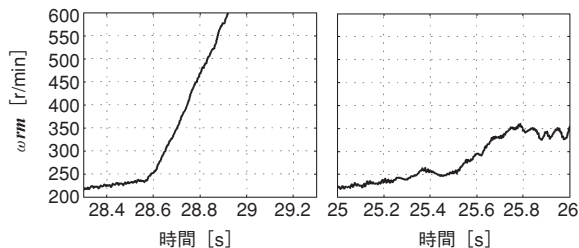


図21 カドウェル号による空転の抑圧
Fig.21 Skid Prevention using Cadwell EV

7 キャパシタビークル「C-COMS」の開発

電気二重層キャパシタ

近年注目を集めているキャパシタには、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以上の放電が可能で、通常数分で充電できる)

- (3) 材料の環境負荷が小さい(重金属を使わない)
- (4) 端子電圧から残存エネルギーがわかる(走行距離がわかるので少ない搭載量でも安心)

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。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がある。

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(有機系で約3V)以上では使用できない
- (2) キャパシタは充放電に伴って電圧が大きく変動するという点である。

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、チョッパを用いた電圧一定化、それから、インバータに直結という有力な方法がある。

C-COMS の製作

C-COMS (図22、車種はトヨタ車体制コムス)は、EVの運動制御の原理原則を掘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。



図22 キャパシタだけで駆動されるC-COMS 1 およびC-COMS 2
Fig.22 Capacitor Driven C-COMS 1 and C-COMS 2

図23はC-COMS1の制御系構成である。インバータは直流電圧30Vから100Vまでの範囲で動作するので満充電の約90%のエネルギーを利用できる計算になる。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予定である。

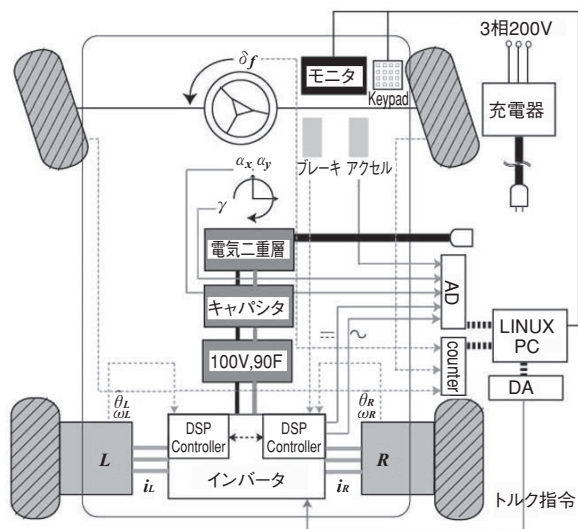


図23 C-COMS1の制御系構成
Fig.23 Control System Configuration of C-COMS 1

8 問題提起

最後に電気自動車に関していくつか問題提起と私見を述べておく。

(1) 永久磁石型モータ (PM) を使い続けてよいのか

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ずっと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げられる。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というようになる。

強力な永久磁石に使われる希土類元素は中国一國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ロジ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、制御面での工夫を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。

(2) インホイールモータは論外か

東京電力のIZA、環境庁のLuciole、慶応大学のKAZやEllica、それからわれわれのMarch II、カドウェルEV、C-COMSは、車輪にモータを埋め込んだインホイールモータを使用している。また、先の東京モーターショーで発表され話題となった三菱自動車のランエボMIEVも、本格的な4輪駆動のインホイールモータを使用している。

しかし、インホイールモータに対しては根強い反対も少なくない。その最大手はバネ下重量が増えるので論外であるというものである。最近のインホイールモータはずいぶん小型軽量になっているし、モータ本体がバネ下重量にならないような構造上の工夫も見られるようになってきた。

ガソリン車ではエンジンの振動はなるべく路面やドライバーに伝わらないようにしてきたが、電気モータの発想は逆で、インホイールモータではモータの持つ良い特性が路面に伝わりやすいので、制御面の利点を活かしやすい。

インホイールモータによる4輪駆動車は、車体側にモータをおいた場合と異なり、1個のトルクが抜けても車体を回すような力は生じないことも報告されている。これは、4個のうち1個でも生きていれば走ることができることを意味している。

(3) いつかはキャパシタ

自動車のコマーシャルに「いつかはクラウン」というのがあった。クラウンは無理でも「いつかはキャパシタ」の時代は確実にやってくるだろう。

昨年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。つまり「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。10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ぬことが売り物だが、これを家で充電できるようにしてしまう。気づいたら今週はエンジンが全然かからなかったということ

が起こり、ハイブリッド車が築いた大きなマーケットはそのまま電気自動車に転化する。これが正しければキャパシタの出番は無限にある。

私の研究室で作ったC-COMSではキャパシタをインバータに直結しているが、30Vから100Vまで動く。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。電池ではできない。

キャパシタによる新しいライフスタイルは何か。それは「ちょこちょこ充電しながら走る電車のような車」である。数日分のエネルギーをもつことが大前提だった車に、外からエネルギーを供給する仕組みを作る。エネルギー供給の問題がなければ、乗り物を動かすアクチュエータは電気モータが最適であることは、鉄道が証明済みである。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意義を考えてみるとよくわかる。

そもそも自動車会社の論理はあやしいところがある。「いつでも、どこでも、だれでも」使える車、すなわち、1回ガソリンを入れると400kmも500kmも走り、速度も160km/hぐらいいは出て加速もいい車でないと売れないという。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。

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、これこれの仕様でと入れると値段はいくらですと出てきて、2~3日したら家まで配達される。すでにパソコンはそうになっている。これは車の産業構造を変えるかもしれない。

キャパシタは「エネルギーと知恵の缶詰 (Can of Energy and Wisdom)」と呼ぶように、周辺の電子回路の知識がないと使いものにならない。これは電気屋にとってはかなり痛快なことである。また、キャパシタの開発は一種の正義である。後ろめたい要素はほとんどない。

「いつかはキャパシタ」になるのはいつか。しっかり見極める必要があると考えている。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ことはないだろう。それは数年後か、十数年後か、数十年後か。100年もすれば、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。

(この項は、ECaSSフォーラム会報2007.4での筆者の小文と同一内容です。)

9 あとがき

50周年を迎えた東京モーターショーやEVS-22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。

世界がオートショーと名乗る中で、日本では50年前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、本当に電気モータの製造と制御技術を競う場になることを、図らずも物語っているのである。

参考文献 (紙面の都合で代表的な自著のみ)

- [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タイヤ空転検出法, 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駆動力配分法, 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 -東大三月号のめざすもの-, 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)

■ 著者紹介 ■

堀 洋一

略歴

1978年 東京大学電気工学科卒業

1983年 同大学院博士課程修了

2000年 同大電気工学科教授

2002年 同大生産技術研究所教授

専門は制御工学とその産業応用、とくにモーションコントロール、電気自動車など。

1993年および2001年, IEEE Trans. on Industrial Electronics 最優秀論文賞、2000年電気学論文賞などを受賞。

電気学会(上級会員、03-04年産業応用部門副部門長), IEEE (Fellow), 日本シュミレーション学会(理事)などの会員。

2005年より ECaSS フォーラム会長。

EVS22 (2006年10月) プログラム委員長。