

電気と制御で走る近未来のクルマ

(キャパシタだけで動くC-COMSが完成！)

堀 洋一 (東京大学 生産技術研究所 教授)

内田利之 (東京大学 工学部電気工学科 技術専門職員)

河島清貴 (東京大学大学院 工学系研究科電気工学専攻 修士2年)

■概要

国立学校法人東京大学生産技術研究所 (所長：前田正史教授) 第3部 (電気系) に所属する電気自動車研究室 (堀洋一教授) では、電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor:以下、キャパシタ、または、EDLC) だけで走る小型電気自動車C-COMSを開発した。1分の充電で20倍以上の時間走る。

堀研究室では、電気モータの高速で正確なトルク発生能力を生かし、電気自動車ならではの新しい制御の実現をめざしている。電池に弱点があるといわれる電気自動車にとって、今回のクルマは救世主となるか、注目される。

■電気自動車の特長

堀研究室では、電気モータの高速で正確なトルク発生能力を生かした、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している。すなわち、

(1) タイヤの増粘着制御によって、すべらないクルマが実現され、低抵抗タイヤの使用が可能になる。

(2) 4輪独立駆動によって、高性能な車体姿勢制御が実現できる。

(3) モータトルクは容易に知れるから、路面状態の推定が容易である。

現在までに、ニッサンマーチのエンジンをDCモータに置き換えた「東大三月号I」、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、電気モータの制御性を極限まで利用した「カドウェルEV」を製作し、「電気と制御で走る未来のクルマ」を研究している。

■電気二重層キャパシタだけで走るC-COMSの開発

本研究の目的は以下の2点である。

大電流での充放電が可能、長寿命、電池電圧から残りのエネルギーがわかる、という利点を持つ電気二重層キャパシタを蓄電装置として小型電気自動車に搭載し、実験をスムーズに行うことができる車両システムを構築すること。そしてこの車両を用いて電気モータの利点を生かした車両の運動の安定化について検証することである。

現在の電気自動車の最大の問題点は充電に多大な時間がかかることである。当研究室の電気自動車においても充電時間が多大な時間を占め、また車両が大きくテストコースに持ち込む必要があるため、実験には時間もコストもかかっていた。本研究では近年の技術革新によってエネルギー密度が急激に増大しているEDLCを搭載した小型電気自動車を製作し、場所と時間を選ばずに車両運動性能実験を遂行できるよう改造を行い、電気モータの利点を生かした車両運動制御の実験を行う予定である。

■電気と制御で走る未来のクルマ

電気自動車を動かす電気モータには、エンジンが逆立ちしたってまねのできない、とんでもない特長がある。

まず、発生トルクがエンジンの2ケタ速いこと。エンジンが500msならモータは5msだ。これを生かさなければ電気自動車のメリットはまったくない。クルマが水平移動する限り原理的にはエネルギーは要らない。エネルギーはタイヤと路面の摩擦で失われる。鉄道はどうか。車輪とレールが鉄だから摩擦は極端に少なく、エネルギー効率も格段によい。しかしよくすべる。新幹線が時速300kmを超えてなお加速できるのは、電気モータの粘着制御のおかげなのだ。同じことがクルマでできないはずがない。

二つ目は、発生トルクが正確にわかること。エンジンのトルク発生機構は複雑で、どのくらいの力を出しているか実はよくわからない。一方、電気モータのトルクは電流を見ればすぐわかる。「駆動力オブザーバ」という簡単な計算で、タイヤから路面に伝わる力もわかり、路面の状態もわかる。

「今、雪道に入りました」などと教えてくれる賢いクルマができるわけだ。

三つ目は、モータを分散して配置できること。エンジンを4個使うクルマは非常識でも、モータをタイヤに入れて4輪駆動にしてもコストアップはわずか。ヨーレートを直接コントロールしたり、ウルトラABSはもちろん、今まで体験したことのないコーナリング性能だって可能になる。また、一つでもモータが生きていれば走行できるから、信頼性の高いクルマになる。

こういうことは全部、電気制御のなせるわざである。堀研究室では、電気自動車「東大三月号」IおよびIIを自作し、これらを実証してきた。3台目の「東大カドウェル号」では、電気モータのさらに本質的な特長を活かした制御を実現した。4台目の「C-COMS」はウルトラキャパシタだけで動く、未来の超小型電気自動車だ。

これからの四半世紀、クルマの世界は大きく変わる。エンジンはなくなり、すべてのクルマが電気モータ（と、ひょっとしたらキャパシタ）で走るようになる。そのことは自動車業界が一番よく知っている。だって、業界最大のイベントは、大昔から「東京エンジンショー」ではなくて「東京モーターショー」なのだから。



図1 多くの成果をあげて引退した東大三月号I



図2 いま活躍中の東大三月号II

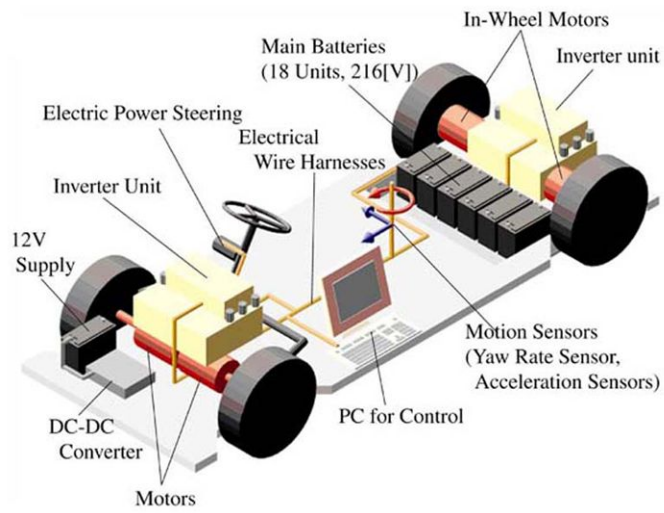


図3 東大三月号IIのしくみ



図4 東大カドウェル号

■研究の背景と意義（ロングバージョン）

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、来る2006年10月には、筆者がプログラム委員長をつとめる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る。1000～2000人規模の参加（展示やパレードへの参加者を含めばその数倍）を見込む大規模な国際会議である。

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い。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、シール形鉛→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、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日本自動車研究所（JARI）のホームページなどをご覧いただきたい。きわめて公正な解説を読むことができるだろう。

それに替えて、堀研究室で行っている「東大三月号プロジェクト」は、電気自動車ならではの新しい制御の可能性を追究している。そこでは、電気自動車の将来が、まさに電気と制御技術者の手腕にかかっていることを強調している。

2. 電気自動車の特長

EV（電気自動車）は電気モータで動くという理由によって、ICV（内燃機関自動車）には絶対にまねのできない3つの特長がある。これを活かさないとEVのメリットはほとんどない。

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ない。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人間特性との調和を妨げるといふ人がある。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（閉ループ特性）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とは別物である。まさに2自由度制御の概念そのものである。

いままでEVといえは、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二酸化炭素も結構出す。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。

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つ使う車は非常識である。しかし、電気モータは4つ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システム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。たとえば車が雪道に入れば、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も可能になるから、安全性向上には大きく貢献するであろう。

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といえは高性能制御車という時代がやってくるだろう。

3. キャパシタビークル「C-COMS」の開発

3. 1 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ともなって電圧が大きく変動する

という点である。



図5 C-COMS の外観

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。「エネルギーと知恵の缶詰」と呼ぶ理由がここにある。また、モジュール全体の電圧低下に対しては、直並列切替（バンク切替）、チョップを用いた電圧一定化、それから、インバータに直結というおそらく最も有力な方法がある。どの方法に軍配があがるかは現時点では不明である。逆にいえば研究の価値がある。

3. 2 C-COMSの製作

C-COMS（トヨタ車体製一人乗り小型EV）は、EVの運動制御の原理原則的な側面をほり下げる目的で製作した。図5に外観を示す。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。

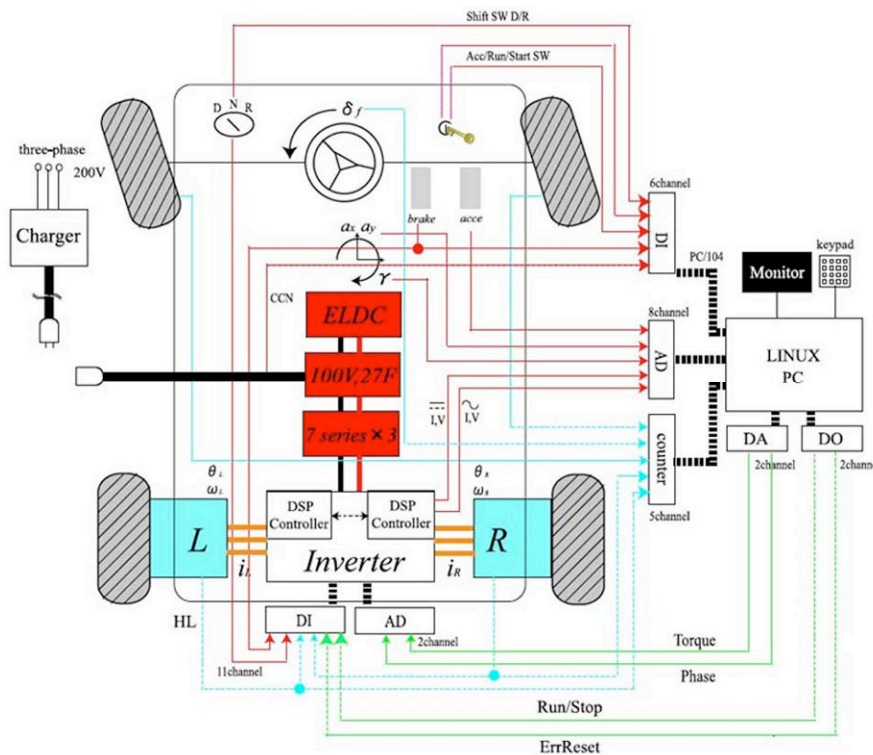
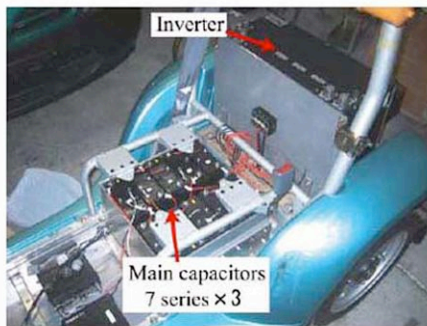
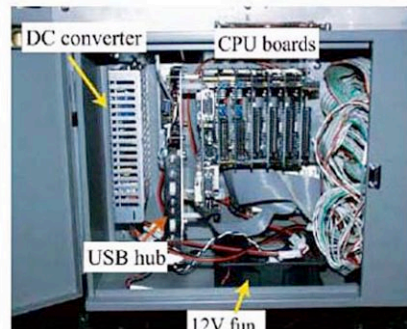


図6 C-COMS の構成



(a)Capacitor box and inverter



(b)Upper PC BOX

図7 キャパシタと車両制御コンピュータ

図6はC-COMSの制御系構成である。図7はキャパシタである。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設計した。これで満充電の約90%のエネルギーを利用できる計算になる。同じことを電池でやろうとすると、いっぺんに寿命を縮めてしまう。

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。予定している実験は下記のとおりである。

- (1) 車体すべり角 β の推定と制御（タイヤの非線形領域で）
- (2) ヨーモーメントオブザーバを用いた車両特性のノミナル化によるDYC制御（超小型車ならではの厳しい条件での実験）
- (3) 非線形領域での μ 勾配の推定（とくにタイヤのブラシモデルと駆動力オブザーバを用いたピーク μ の推定）
- (4) ドライバの意図を読みスムーズな加減速を実現する速度パターンのリアルタイム生成
- (5) 横力の推定を用いた制駆動力配分制御（余力のあるタイヤに大きな制駆動力を動的に配分する手法）

また、前後方向の増粘着制御として、

- (6) 疑モデル追従制御によるTCS（トラクション制御）
- (7) 逆起電力オブザーバによるスリップ抑制制御
- (8) 油圧と電気によるハイブリッドABSやTCS（応答は遅いが力が出る油圧と、速いが弱い電気の協調）
- (9) 他励直流モータトルク垂下特性をまねる粘着制御

などについても、きめ細かい実験を多数回繰り返し、統計的にも意味のある実験データを収集する予定である。これらの研究テーマは、電気自動車ならではの制御に関わるものである。

テーマ(4)は、エレベータのように加速し減速して止まる車をめざしている。ドライバの意思を推測しながら加速度の変化率（ジャーク）まで滑らかにする速度パターンを自動生成する。低速領域での電力回生はほとんど意味がない。エネルギーを積極的に使ってでも制御面での利点を追求した方がよいと考えている。

4. あとがき

先日閉幕した50周年を迎えた東京モーターショーでは、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。中でも、三菱自動車のランエボMIEVと富士重工のR1eが注目される。数年以内の実用化をめざした純EVである。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ているかもしれない。EVSなどという会議は存在意義を失っているだろう。

最近のハイブリッド車は電気モータのパワーがエンジンを凌ぐようになってきている。これにプラグインハイブリッドという夜間充電の仕組みが加わると、エンジンの出番はどんどんなくなる。エンジンは降ろしてもハイブリッ

ド車の作ったマーケットは残る。電力会社が背中を押し、50年もすればキャパシタ駆動の超小型EVがたくさん走っているかも知れない。ハイブリッド車はあまり小さい車ではペイしない。燃料電池車の実現は15年以上先であるから、環境にやさしい純EVがこのシナリオで普及する可能性がある。

筆者がこういうことを言うと、そんなことにはなりませんよ、と非常に評判が悪い。ところが、モーターショーの会場で、それは本当にそうなる可能性があるから評判が悪いのだ、と言われた。真偽のほどは不明である。日本ではプラグインハイブリッドの意味はない、という人もいる。しかしキャパシタの出現がその事情を変えるかもしれない。

しかし、近未来の車が「電気」で走ることは、もう間違いないことである。10年前EVS13で半信半疑であった人々も今は首を縦にふる。

真空管はトランジスタに、白熱灯は蛍光灯に、レコードはCDに（さらにmp3に）、8ミリはビデオに、タイガー計算機は電卓に、機械時計はクォーツに、固定電話は携帯に、電話線は光ファイバに、ブラウン管は液晶に、プロペラ機はジェット機に、蒸気機関車は電車に....これらの技術革新は、目的は同じだがまったく異なる原理の導入によって生じ、その特徴は、高効率、長寿命、小型軽量、量産によるコストダウンにある。（トヨタ自動車中村氏のご講演による。）その続きとして、筆者は、「エンジンはモータに、電池はキャパシタに」という2つの項目を付け加えたい。真偽は歴史が判断するだろう。

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、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先取りしているのである。（こういうことをズケズケ言うから叱られる。もちろん、モーターショーのモーターは自動車の意である。念のため。）

■参考文献

- 1) 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）
- 2) 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，システム／制御／情報，Vol. 45, No. 5, pp. 231-239（2001）
- 3) 堀，寺谷，正木：自動車用モータ技術，日刊工業新聞社（2003）
- 4) 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）
- 5) 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）

■マスコミ関係

- 日刊工業新聞（2002. 11. 28）：東大三月号II
日刊自動車新聞（2003. 6. 7）：東大三月号II
ニュースステーション（2003. 10. 2）：ナノゲートキャパシタ
朝日新聞（2004. 11. 13）：東大三月号II
12chモーニングベル（2005. 10. 27）：日清紡のキャパシタとC-COMS

■連絡先

堀 洋一
東京大学生産技術研究所 教授
(東京大学工学系研究科電気工学専攻 教授)



〒153-8505
東京都目黒区駒場4-6-1 東京大学生産技術研究所 Ce-501
Tel: 03-5452-6287, Fax: 03-5452-6288
Email: hori@iis.u-tokyo.ac.jp
Web: <http://mizugaki.iis.u-tokyo.ac.jp/staff/hori/index-j.html>

1955年7月14日愛媛県生まれ。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。助手，講師，助教授を経て，
2000年2月より電気工学科教授。2002年10月より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，福祉制御工学。

電気学会（上級会員，2003-2004年度産業応用部門副部門長），
IEEE（Fellow），日本シミュレーション学会（理事），計測自動制御学
会，自動車技術会などの会員。2005年よりECaSSフォーラム会長。
EVS22（2006年10月開催，主催は日本自動車研究所）プログラム委員長。

超小型キャパシタ電気自動車 C-COMS 完成！



生産技術研究所
第3部 堀 洋一

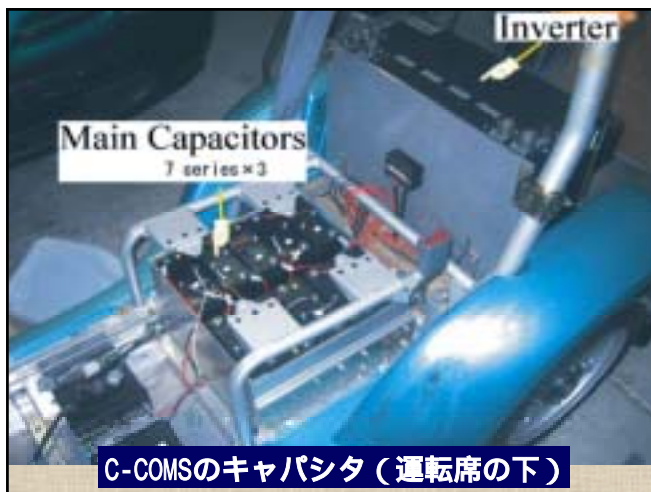
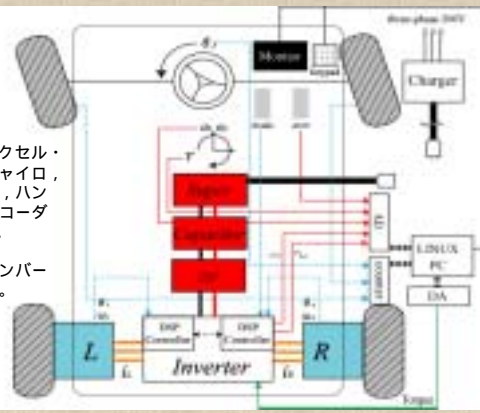
Ellicaのようなモンスターカーではなく...



C-COMS 車両制御系の構成

上位Linux-PCにアクセル・ブレーキ指令、ジャイロ、2軸加速度センサ、ハンドル角、前輪エンコーダをフィードバック。

速い制御演算はインバータの制御PCで行う。



C-COMSのキャパシタ（運転席の下）



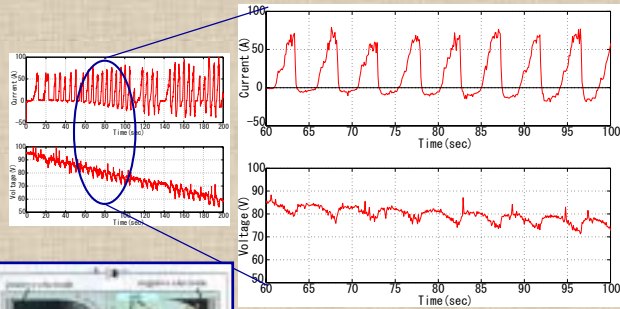
C-COMS製作の歴史

特注インバータ (30V ~ 100Vで動作)



まったくのオーダーメイドで中身がよく見える。

キャパシタ電圧/電流推移



こういう走行実験からいろいろなことがわかる。

キャパシタを搭載して手軽な実験が行えるようにした小型電気自動車で...

- (1) 車体すべり角の推定と制御(タイヤの非線形領域で)
- (2) ヨーモーメントオブザーバを用いた車両特性の直接ノミナル化による完璧なDYC制御
- (3) タイヤ非線形領域での μ 勾配の推定
- (4) プラシモデルと駆動力オブザーバを用いたピーク μ の推定
- (5) ドライバの意図を読みスムーズな加減速を実現する速度パターンのリアルタイム生成
- (6) 横力の推定を用いた動的制駆動力配分制御
また、前後方向の増粘着制御として開発してきた
- (7) 疑モデル追従制御によるトラクション制御
- (8) 逆起電力オブザーバによるスリップ抑制制御



最近の科学技術の動向

資料4

電気をためる技術:キャパシタによる蓄電



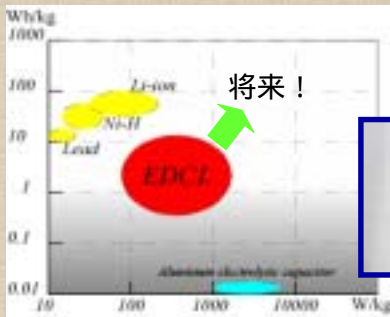
第50回総合科学技術会議
平成17年11月28日

キャパシタとバッテリーの特徴比較



	キャパシタ	バッテリー
長所	短時間で電気が出し入れできる 長期間使っても性能が落ちにくい	たくさん電気がためられる
短所	バッテリーに比べてためられる電気が少ない	電気の出し入れに時間がかかる 性能が長持ちしない

電池とキャパシタ



寿命がほぼ無限(10万回~) パワーも出る。
×エネルギー密度が電池の1/10 ×値段はまだ高い。

キャパシタの将来展望

コピー機

キャパシタの電圧を急速に充電・放電することで、従来の充電時間が約1/10で可能。従来の充電時間は従来の約1/10以下、従来の充電時間は従来の約1/10以下、従来の充電時間は従来の約1/10以下。

トラック

燃料消費量は従来のディーゼル車に比べて44%減少。

風力発電

風の強弱によって変動する電力をキャパシタに蓄えて、需要した電力を供給する。風力発電事業で稼働率。

電車

ブレーキ時に発生する電力をキャパシタに蓄えて、動力として利用する。乗降し入居る電車への応用に期待。

キャパシタはエネルギーと知恵の缶詰

キャパシタの特長

- (1)寿命が長い(化学変化を伴わない「物理電池」)
- (2)大電流での充放電が可能(とくに数分で充電完了)
- (3)重金属を用いないため環境にやさしい
- (4)端子電圧から残存容量が正確にわかる

留意点(腕の見せ所)

- (5)周辺回路が重要(「エネルギーと知恵の缶詰」)
- (6)欠点はエネルギー密度(密度10倍の新しいタイプが開発済み)

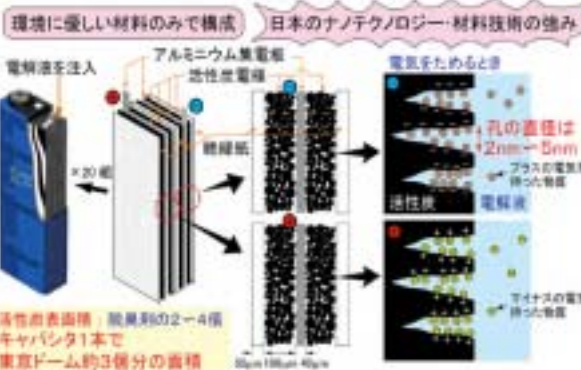
しかももう十分かもしれない

完全に放電するまで使える

たとえば30~100Vで90%のエネルギーが利用できる

ECaSSフォーラムを設立(応援団長)

キャパシタの構造と蓄電のしくみ



ナノゲートカーボンと活性炭の違い

	ナノゲートカーボン	従来の活性炭
細孔の つくり方	電解液イオンでカーボンに細孔を設ける 電圧印加 	高温で炭素を分解させ細孔を設ける 加熱
細孔の 状態	イオンサイズにマッチングした均一な細孔 	バラツキの大きい細孔 細孔寸法 < イオン径 容量がでない 細孔寸法 > イオン 無駄なスペースが多い
特徴	無駄のない細孔を作製できるので 最高の静電容量を確保できる 従来活性炭の約15倍の容量達成	均一な細孔ができないので、静電容量 UPに限界がある。しかし出力密度は高い

電気自動車の制御

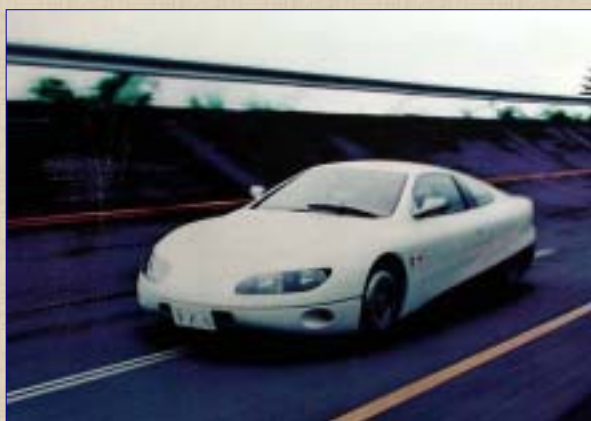
電気自動車の最大の特徴 モータの高い制御性

- 高速トルク応答
- 4輪独立駆動
- 正確なトルク値の把握
- 車輪の空転防止制御
- 2次元車体運動の制御
- 路面状態推定



キャパシタだけで動くコム
スCV(製作中)
トルク垂下特性による高粘
着制御をめざすカドウェル号
インホイールモータ4基
搭載の東大三月号II

- (1) 疑モデル追従制御によるTCS(トラクション制御)
- (2) 逆起電力オブザーバによるスリップ抑制制御
- (3) 油圧と電気によるハイブリッドABSやTCS
- (4) 他励直流モータトルク垂下特性をまねる粘着制御
- (5) 車体すべり角の推定と制御
- (6) ヨーモメントオブザーバを用いたDYC制御
- (7) 非線形領域でのμ勾配の推定(ブラシモデルと駆動力オブザーバによるピークμ推定)
- (8) ドライバの意図を読みスムーズな加減速を実現する速度パターンのリアルタイム生成
- (9) 横力の推定を用いた制駆動力配分制御



IZA(東京電力, 1991)

(Drive System)	
Motor	DC Brushless Motor*4 (Direct Drive System)
Maximum Power	25 kW/motor
Maximum Torque	42.5 kg-a/motor
(Battery)	
Type	Nickel Cadmium
Weight	531 kg
Voltage	288 V
Capacity	28.8 kWh
(Performance)	
Maximum Speed	175 km/h
Acceleration(0-400m)	18.05 sec.
Range(40km/h:constant)	548 km
(100km/h:constant)	270 km
Energy consumption	55 km/l
(50km/h:constant)	(Equivalent to Gasoline Consumption)



EVS13,14に見る
主な電気自動車

10年前は....

クルマは
電気で動かない
でほしい？

表3 EVS13に見る主な電気自動車¹⁾

メーカー	トヨタ	日産	ホンダ	GM	Ford	
車種	RAV4L-EV	プレーリー ジョイ EV	ホンダEV	GM EV-1	Ranger	
空車重量	1540 kg	1700 kg	1615 kg	1350 kg	2173 kg	
乗車定員	5名	4名	4名	2名	2名	
最高速度	125 km/h	120 km/h	130 km/h 以上	130 km/h	120 km/h	
一充電 走行距離	215 km	300 km	210 km (10-15mode)	110 km (city)	95 km	
モータ	PM	PM	PM	IM	IM	
電池	タイプ	Ni-MH	Li イオン	Ni-MH	ニッケル鉛	
	容量	95A×5h 30 V	106A×3h 28.8 V	95A×3h 12 V	53Ah 12 V	66A×3h 8 V
	総電圧	288 V	345 V	288 V	312 V	312 V



最近の超小型EV

メーカー	トヨタ	日産	ホンダ
車種	e-com	Hypermini	City Pal
電池	Ni-MH	Li イオン	Ni-MH
モータ	PM	PM	PM
最大出力	19kW	20kW	30kW
一充電 走行距離	100km	130km	130km
最高速度	100km/h	100km/h	110km/h



エコビークル Luciole (環境研究所, 1996)

エコビークル

- 前後2シートの小型車
- 車重910kg, 最高速度130km/h,
- 一充電130km走行,
- 燃費は原油1リットル換算50km
- 太陽電池によって年間1000km走行

多くの新御術

- (1) インホイールモータ
- (2) B B F
- (3) B M S



電気と制御で走る未来の車

電気モータの最大の特徴 高い制御性

高速トルク応答

車輪のスリップ防止制御

モータの分散配置, 各輪独立駆動

2次元車体運動の制御

正確なトルク値の把握

路面状態の推定

東大三月号

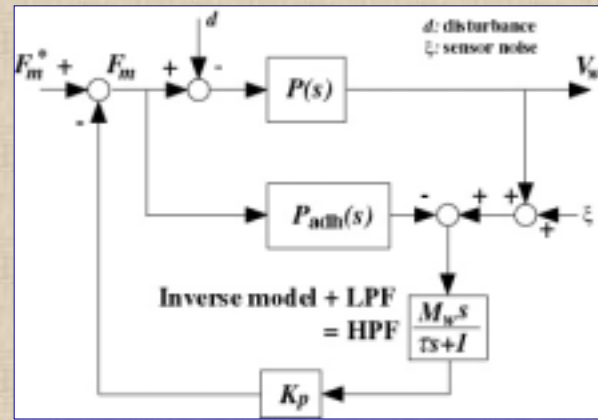
・1996年完成。
 ・直流モータ1基搭載。回生ブレーキは不可。
 ・前後輪の回転速度を計測。ノートPCによる制御。

東大三月号

・2001年完成。
 ・インホイールモータ4基搭載。
 ・各輪の完全独立駆動可能。回生ブレーキも可。
 ・4輪の速度、ヨーレート、前後加速度を計測。

車輪の空転防止制御 (高速トルク応答を活用)

MFC: モデル追従制御



空転防止制御の実験

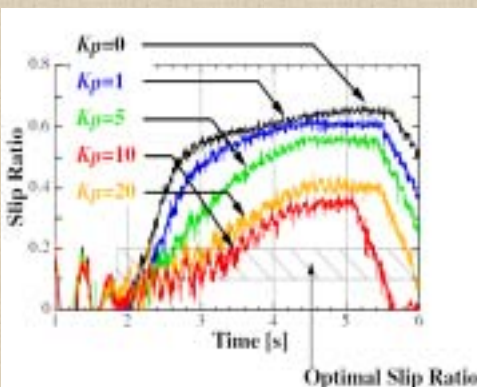
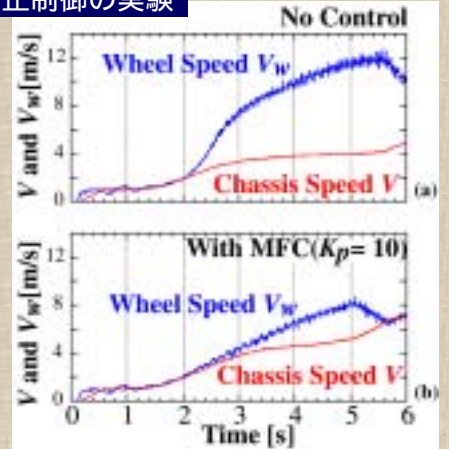
東大三月号 I

μ_{peak} は 0.5 ぐらい

14 [m]

アルミ板に水をまいてすべりやすくする。

空転防止制御の実験



電気制御によって機械特性が変わる!

ハイブリッドABS (制動試験)



MFC適用時: 油圧併用

東大カドウェル号



Base Chassis	Tokyo R&D CADWELL
Wheel Base	2350 [mm]
Front Track	1300 [mm]
Rear Track	1270 [mm]
Overall Length	3800 [mm]
Overall Width	1550 [mm]
Overall Height	1030 [mm]
Total Weight	1000 [kg]
Front Tire Size	185/60R13
Rear Tire Size	205/60R13

Drive Train	2 BLDC Motors
Max. Power	24 [kW]
Max. Torque	130 [Nm]
Gear Ratio	4.11 ± 0.7
Battery	Lead Acid
Total Voltage	Parallel 96 [V] (2*8 units)

Controller	
CPU	Pentium III 850 [MHz]
OS	Vine 2.6r1 with ART-Linux



逆起電力によるスリップ抑制の仕組み

路面が急に滑りやすくなった場合

急激にタイヤ-路面間の摩擦が減少

エンジンやモータが
それまでと同じトルク
を出す場合

直流分巻モータの
トルク(電流)垂下特性

⚠️タイヤは大空転を起こす

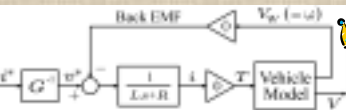
車輪の速度が一旦は急激に上昇

車輪の回転速度に比例する逆起電力がトルクを低減

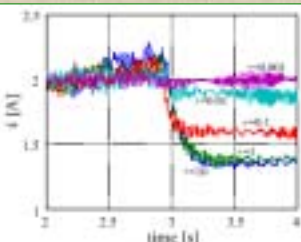
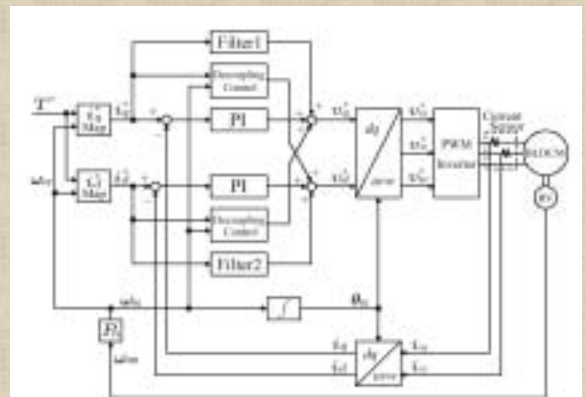
車輪の急激な加速を抑制

⚠️タイヤの大空転を抑制

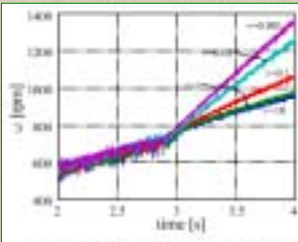
直流分巻モータを搭載した
電気自動車のブロック線図



モータの制御系 (IPM)

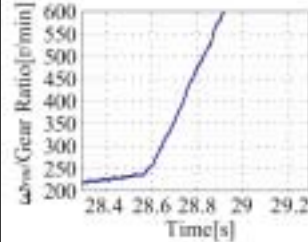


(c) The current of the motor reduces when the time constant τ is varied.

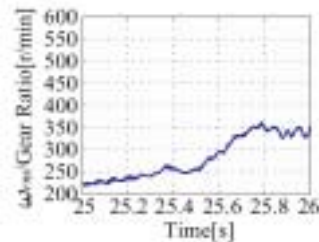


(d) The rotational speed of the motor is prevented from rapid increase when the time constant τ is varied.

トルク垂下特性とその調整



(a) FB current control. [Conventional method]



(b) Hybrid (FF+FB) current control.

カドウェル号を用いた実験結果

車両2次元運動制御 (各輪の独立駆動)

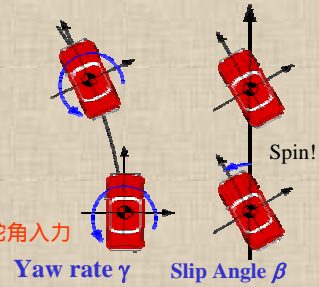
車両運動制御

[2輪モデル]

$$\dot{x} = Ax + B\delta, \quad x = \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -2\frac{C_f + C_r}{mV} & -1 - 2\frac{l_f C_f - l_r C_r}{mV^2} \\ -2\frac{l_f C_f - l_r C_r}{mV} & -2\frac{l_f C_f - l_r C_r}{IV} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{mV} & \frac{2C_r}{I} \end{bmatrix}^T \quad \delta_f: \text{ドライバの舵角入力}$$



β の安定性 スピンや横滑りの特性
 VSCなどで実用化(Vehicle Stability Control)
 δ_f から γ への伝達特性 操舵応答性
 理論的にはDYC(Direct Yaw Moment Control)など

コーナリング性能の改善

[二次元運動における制御性能の検討]

各輪に空転防止制御を適用
 円旋回試験路において
 旋回安定性の向上を確認



制御なし

(後輪がロックし、
 姿勢が不安定になったのを
 ドライバがたてなおしている)



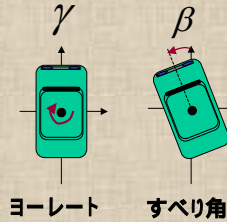
制御あり

(安定な旋回に成功)

の推定(と制御)

車体すべり角 は測れない
 とはいないが....

$$\beta = \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x} \quad (1-1)$$



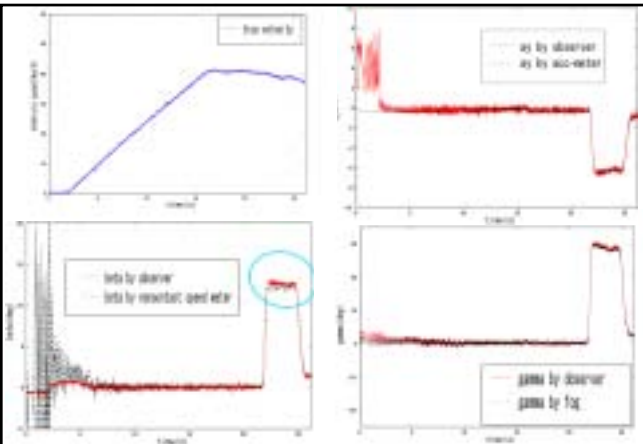
ヨーレート

すべり角

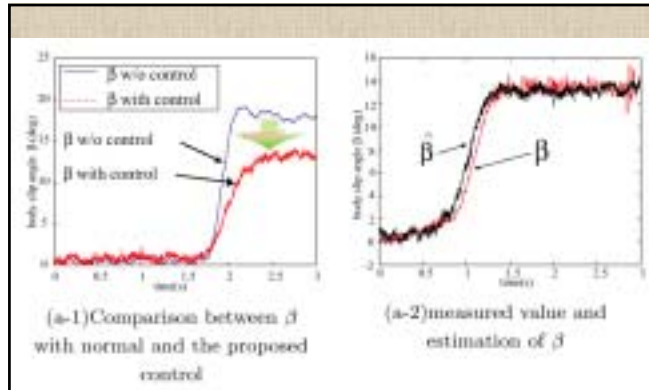
VDCの制御変数
 として重要



光学式センサは高価
オブザーバを設計



の推定(非線形領域)

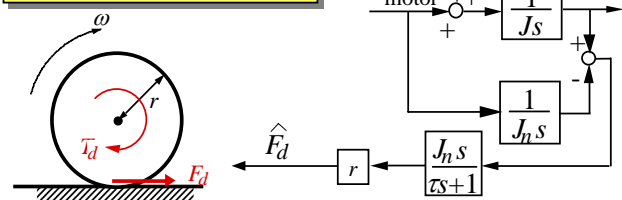


の制御(非線形領域)

路面状態推定 (出力トルク値の活用)

駆動力オブザーバ

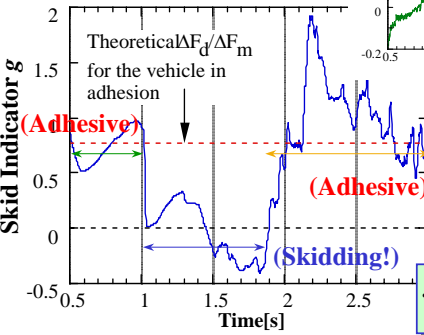
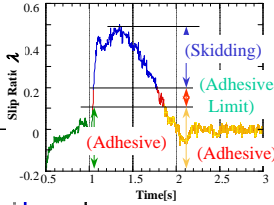
駆動力 F_d は、モータにとって
は負荷(外乱)となる



外乱オブザーバと呼ばれる手法で、
モータの負荷トルク F_d が推定できることが知られている。
駆動力を推定できる！(駆動力オブザーバ)
(モータの出力トルクが把握できるため)

空転検出法の実験

F_m-F_d 曲線の傾き g は、逐次型最
小二乗法(RLS法)を同定すると...

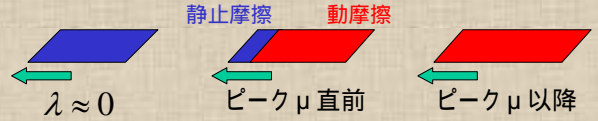
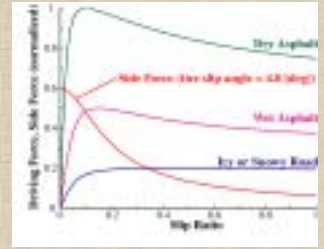


RLS法による、
 F_m-F_d 曲線の傾き
同定結果

g の急減で空転
を検出できる！

路面状態推定への適用

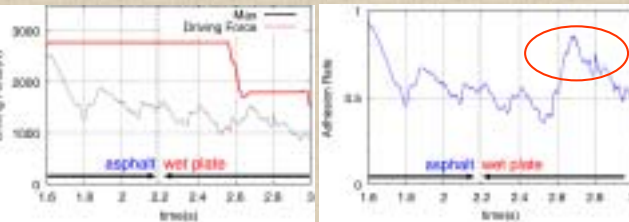
$=0$ 近辺の挙動か
ら推定する



この赤い部分には、ピーク μ の情報が含まれている！

実験

乾燥アスファルト路面から濡れたアルミ板へ



最大駆動力(ピーク μ)推定値 駆動力/最大駆動力

いますべりやすい路面に入りました！

技術革新の特徴

- 真空管 → トランジスタ
- 白熱灯 → 蛍光灯
- レコード → CD
- 8mm → ビデオ
- 機械式計算機 → 電卓
- 機械時計 → クォーツ時計
- 電話 → 携帯電話
- 電話線 → 光ファイバー
- ブラウン管 → 液晶ディスプレイ
- プロペラ機 → ジェット機
- 蒸気機関車 → 電車

特徴

- ①高効率
- ②長寿命
- ③小型軽量
- ④量産による低コスト

結論：革新は、目的は同じだが原理は全く異なる所に生ずる

内燃機関 → 電気モータ?

電池 → キャパシタ?