

電気二重層キャパシタを搭載した小型電動車両の製作と 運動制御に関する研究

河島 清貴[□], 内田 利之, 堀 洋一 (東京大学)

Development of Small Electric Vehicle powered only by
Electric Double Layer Capacitor and Vehicle Motion Control
Kiyotaka Kawashima[□], Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori (University of Tokyo)

Abstract

This paper presents the novel electric vehicle powered only by "Electrical Double Layer Capacitors (EDLC)" and the vehicle motion control using this vehicle. This vehicle provides easy experiment of electric vehicle motion control, since capacitor has the peculiar characteristic of large current charging. In this paper, the driving experimental data and capacitance monitoring system is proposed in the second section. The introduction of the electric vehicle motion control utilizing advantages of electric motor and the normal force stabilizing control will be given in the third section. In the last section, the development of "Capacitor COMS" (C-COMS) and the vehicle control system will be shown.

キーワード：電気二重層キャパシタ、DC ブラシレスモータ、車両運動制御
(Electric double layer capacitor, DC brushless motor, Vehicle motion control)

1. はじめに

本研究の目的は、以下の2点である。大電流での充放電可能という利点を持つ電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor: 以下 EDLC) 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。現在の電気自動車における最大の課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、静電容量を推定する故障診断機能を含めて一つのシステムとして確立した。また各センサ情報からトルク指令値の生成及びデータログのために上位 PC (AR T-LINUX) を用意し、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した。

オリジナル車両のバッテリーは 72V 鉛蓄電池、駆動は後輪インホイールブラシレス DC モータである⁽¹⁾。本研究ではこの車両のフレーム部、インホイールモータ以外の主要部分を全て改造し高密度 EDLC、新設計インバータを搭載し新しい車両システムを構築する。図 1 に小型電気自動車 "Capacitor - COMS" の外観を示す。

この自動車は省スペース性とシステムが比較的単純であることから大手自動車メーカーや大学でも運動制御の研究に用いられている^{(2) (3)}。

以下では EDLC の基本特性、実際に車両に搭載し走行テストを行った際のデータと、今後この車両を用いて行う予

定の車両運動制御を紹介し、最後に車両システムの全体像を説明する。



図 1 開発した「Capacitor-COMS」の概観

2. EDLC の基本原理と EV に活用することのメリット

〈2・1〉 EDLC の原理 電気二重層 (Electric Double Layer: EDL) の現象は 1879 年 Helmholtz によって発見された。EDL の意味は電解液が導体電極に接する領域に薄い分子の層ができ、その外側にできる拡散層のことを総称したものである⁽⁴⁾。図 2 にその構成を示す。本キャパシタは電解液にイオン性液体を用いており、内部抵抗が非常に小さくマイナス 30 °C の低温環境下でも劣化せずに使用可能であるとされている。

化学反応を伴わない EDLC は以下のような利点を持っている。

- 2 大電流充電が可能
- 2 環境の温度変化に依存せずに使用が可能
- 2 エネルギー残量が正確に分かる

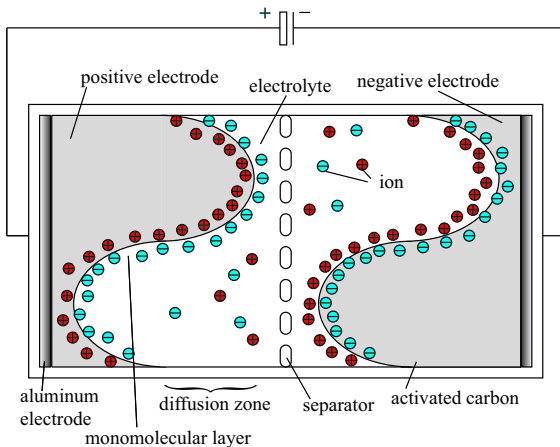


図2 EDLCセルの内部構造

- 繰り返し充電に強い(長寿命)
- 重金属を用いないため環境負荷が低い

蓄電装置として考えた場合、今まで最大の欠点とされていたエネルギー密度もLi-イオン電池に匹敵するものが開発されていて、残るはコストと信頼性・耐久性の保証をどのように獲得するかであるとされている。

本研究で用いているEDLCのスペックは100[V]、25[F]モジュール(現在は搭載性を考えて小型15V,200Fモジュールを使用)である。

2.2 EVにEDLCを用いることの利点 EDLCはコンデンサであるため使用していると電圧値が下がってくる。これは一見デメリットのように見えるが、見方を変えれば電圧の推移がエネルギー残量を表しているという優れたメリットになっている。化学反応を伴った二次電池では電圧はほぼ一定であり、まだ容量に余裕があると思っても突然電池切れとなってしまうというケースが多々ある。一方EDLCの場合は電圧によってユーザが充電時期を一目で判断できることは大きな利点となる。さらにインバータとの組み合わせではインバータが電流指令に従って電圧調整を行い(電流制御)、モータから見るとEDLC+インバータで一つの蓄電装置とみなすことができる。これによってEDLCとインバータの間にDC-DCコンバータ等の昇降圧器を入れる必要がないため効率の低下がない。

ここでエネルギー利用率について考える。EDLCの電圧が100[V]から30[V]まで使用したとするとコンデンサのエネルギーは2乗に比例するので利用率 η は

$$\eta = \frac{\frac{1}{2}C(100^2 - 30^2)}{\frac{1}{2}C(100^2)} = 0.91 \dots \dots \dots (1)$$

となり90%以上のエネルギーを使用可能となる。

充電時間が短いこと、そしてエネルギーレベルが一目でわかることで必要な時にすぐに必要なだけ充電して使用が可能であり、これをEVに生かすことには大きなメリットがあると考えられる。

2.3 走行実験結果 構内で簡単な走行実験を行った。コースは54[m]の直線を含むトラックで1周約80mである。トラックを周回した実験結果を図3に示す。電流波形において山がいくつもあるのはカーブ手前で減速し、直線移行時に加速することをトラック型コースで繰り返しているため、2つの山でコース1周となる。

この実験データからいくつかの知見が得られた。

- (1) 電圧の低下から正確なエネルギー残量を把握することができる。
- (2) インバータのモータ側の出力要求に応えるために電圧降下分を電流で補っているため、やや最高速度の低下が見られたものの、通常の電池走行とほぼ同じ走行性能を得られた。
- (3) はじめの方は回生電流が取れていないが時間が経つにつれて回生電流が大きくなっている。電圧が高いうちは蓄電装置保護のためにあまり回生を行わないようリミットをかけている。
- (4) 電圧値が電流値によって2~3[V]の変動が見られる。これは内部抵抗によるもので電流が流れている時はこの電圧降下で見かけ上EDLCの電圧は低く見えてしまう。しかし内部抵抗分を引くことによって電流値に依存しない電圧状態を知ることも可能である。

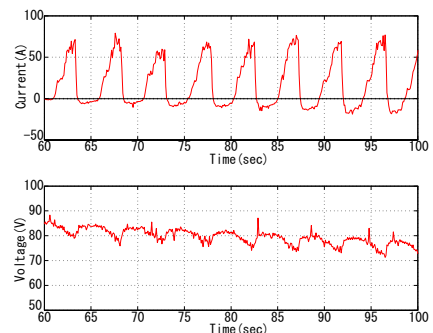


図3 走行実験における電圧・電流カーブ

この走行モードでは3モジュール(100[V],25[F])で約4分弱ほど走行可能であったがこれは大きな加速を行なっているため、通常走行では10数分ほど走行可能であることが分かっている。電気自動車の運動制御の実験は2、3分程度で済むため、実験を行い、パラメータ等を変える間に充電を行うようにすれば同じ条件で実験を容易に行うことができると考えている。

2.4 静電容量の監視システム ・静電容量監視の必要性

EDLCは近年になって自動車に導入され始めたためその信頼性、安全性の面から故障診断の機能があると非常に有用であると考えられる。例えば電力回生によりEDLCに耐電流以上に電流が流れ込んでしまった時や過電圧により内

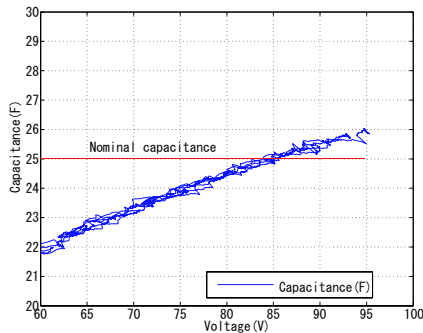


図 4 走行実験データを用いた静電容量の推定

部電解液が電気分解することで性能が著しく劣化する可能性がある。そこで EDLC の性能評価指標の一つとして静電容量を考え、電流・電圧を常時監視して静電容量をリアルタイムで監視すればセルの異常状態を早期に発見できると考えられる。

そこで EDLC の等価回路を CR 直列と仮定して静電容量の推定を行った。

時間変化する静電容量 $C(t)$ は以下のように表される。

$$C(t) = \frac{Q(t)}{V(t) - R * I(t)} \dots \dots \dots (2)$$

ただしここで $Q(t)$ は EDLC に蓄えられる総電荷、 $V(t)$ はキャパシタモジュール端子間の電圧、 R は EDLC モジュールの内部抵抗、 $I(t)$ は EDLC から流れ出す電流である。ここで $Q(t)$ は

$$Q(t) = Q_0(t) - \int_0^t I(t)dt \dots \dots \dots (3)$$

図 4 に以後に示す走行実験の際のデータを用いて推定を行った結果を示す。結果として電圧が減少するに伴い容量がやや減少する傾向が見られた。これは特有の EDLC の静電容量の電圧依存性として知られており、この性質により大きい時は約 2~3 割ほど静電容量が低下する。しかしこのような性質を持っていたとしても、前もって各電圧値における低下量を知っておけば上の電流、電圧のみを用いたアルゴリズムでも監視が行えんと考えている。

3. 電気モータの利点を生かした車両運動制御

電気自動車には燃費や環境問題の面だけではなく、駆動源であるモータの制御性のよさ(指令からのトルク出力応答速度が速い、出力トルクが把握できる、各輪に分散配置できる)から、EV の内燃自動車に比べて新たな優位性を持っていることが知られている。

具体的にはスリップ時に駆動力が低下する事をすばやく察知し指令トルクを下げることで内燃自動車では実現困難なスリップ制御を容易に実現できることや、分散配置しているモータで車体に意図的にヨーモーメントを発生させることにより、旋回時の危険な γ (車体上方から見た時の回転角速度) や β (車体滑り角) の発生を抑える挙動安定化などである。

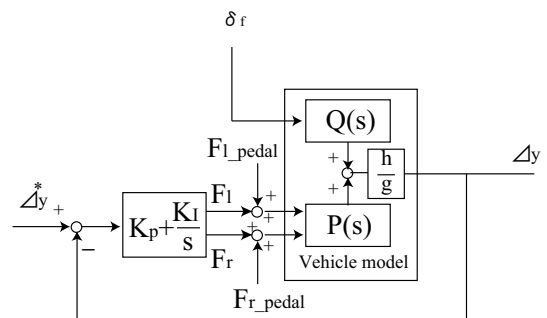


図 5 NFS のブロック線図

・垂直抗力安定化制御 (Normal Force Stabilization:NFS) の試み

今までの 2 次元運動の安定化にはヨーレートやベータの制御が多く議論されてきた。本章では加速度から各タイヤの接地荷重が記述できることを示し、車両の新たな安定化手法を示す。考え方としては加速度によって垂直抗力が記述できることを利用してその垂直抗力から仮想重心移動距離を推定する。この仮想重心移動度が垂直抗力の不均衡の一つの指標となっていると考えられ、そしてこの移動度に応じたトルクをフィードバックすることで垂直抗力変化を減らしてより安定な旋回を実現しようとするものである。図 5 に NFS 制御ブロックを示す。

線形二輪モデル⁽⁵⁾を用いると左右駆動力 F_{x-rr} 、 F_{x-rl} とハンドル切り角 δ から車体の加速度 a_x 、 a_y への式は以下のように表される。

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} & \frac{1}{M} \\ P(s) & -P(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x-rr} \\ F_{x-rl} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Q(s) \end{bmatrix} \delta(s) \quad (4)$$

ただし $P(s)$ 、 $Q(s)$ はそれぞれ 2 次遅れ系の伝達関数である。

ここで垂直抗力を計算するために図 6 のように軸を取り、タイヤに働く力を決める。ここでは導出を割愛するが、前後それぞれのシャフト中心点における左右輪の垂直抗力の合力 F_{z-f} と F_{z-r} は以下のように表される。

$$F_{z-f} = \frac{m}{l_f + l_r} (l_r g + h a_x) \dots \dots \dots (5)$$

$$F_{z-r} = \frac{m}{l_f + l_r} (l_f g - h a_x) \dots \dots \dots (6)$$

これらからモーメント、力の釣り合いを考えた場合の仮想重心点の移動距離 Δ は以下のように表される。

$$-F_{z-f}(l_f - \Delta x) + F_{z-r}(l_r + \Delta x) = 0 \dots \dots \dots (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{F_{z-f} l_f - F_{z-r} l_r}{F_{z-f} + F_{z-r}} \\ &= \frac{a_x}{g} h \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

$$\Delta y = \frac{a_y}{g} h \dots \dots \dots (9)$$

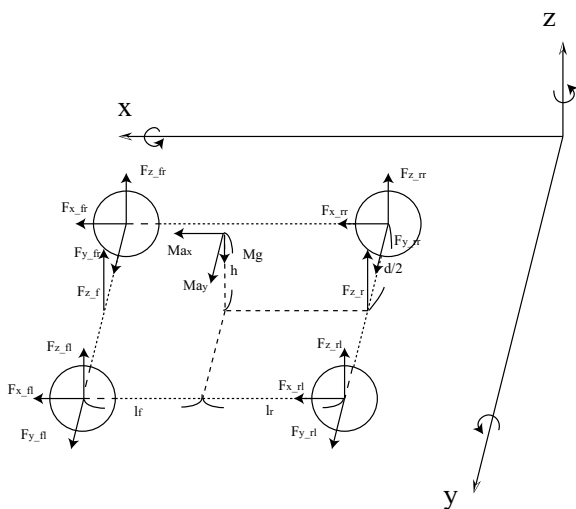


図 6 垂直抗力の計算

実際にはこの仮想重心移動度 Δ_y が指令値に追従するように左右駆動輪にフィードバック制御をかけることで最適な旋回を実現しようと考えている。

4. C-COMS 開発経緯と車両システム

まず既存の車両システムのインバータではトルクを左右独立には入れることができないこと、またペダル操作からトルク指令の間に $300[msec]$ ほどの時間遅れが存在すること、また電圧レベルが $60[V]$ になると制御を打ち切ってしまうなどのことからモータ制御を行うことは非常に難しかった。そこで左右独立にまた時間遅れもなくトルク指令を与えることができる仕様のインバータを新たに用意した。さらに EDLC の電圧が変動していくのにも耐えられる仕様とし、EDLC の電圧が $100[V]$ から $30[V]$ まで使用できるように電気素子等を選定した。制御システムを図 7 に示す。

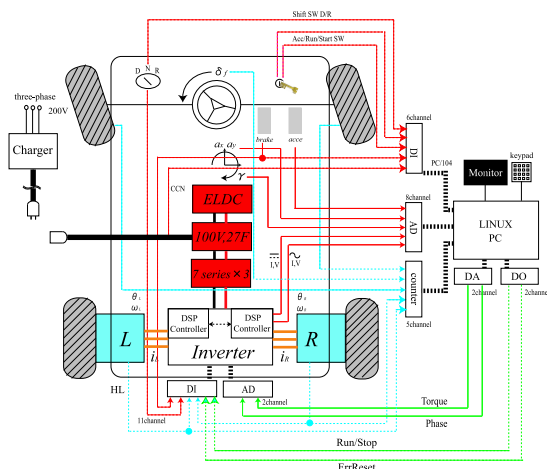


図 7 C-COMS の車両制御システム

インバータの上位に LINUXPC を用意し、各センサ情報

からトルク指令値を作成及びデータの保存を行っている。

各車輪の速度情報については、前輪は内歯歯車と磁気式速度センサを組み合わせ、後輪はインホイールモータ内臓のホールセンサを用いて計測する。また加速度センサ、ジャイロセンサを車体中心に搭載し、またハンドル切り角 δ をエンコーダから読み取り一連の二次元制御を行える仕様にした。ADA ボード、カウンタボードを搭載している上位 PC を図 8 に示す。

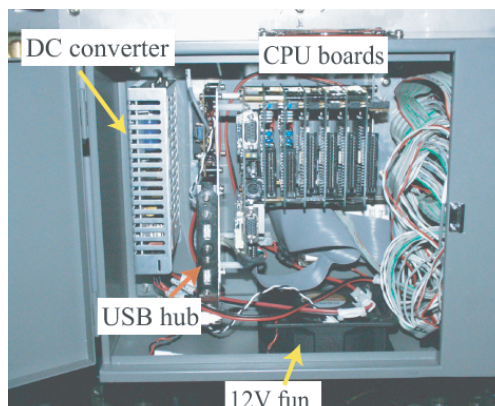


図 8 C-COMS の上位 PC

5. まとめと今後の構想

本発表では電気二重層キャパシタという新しい蓄電装置を搭載した電気自動車について EDLC の基本特性、走行実験等の結果を示した。この車両を用いて行ってゆきたいと考えている制御について述べ、そして最後に開発した車両制御システムについて紹介を行った。

まだ EDLC は信頼性とコストが高いという欠点があるが、技術開発により高エネルギー密度、高出力密度は他のどの二次電池にもひけをとらないまでとなっている。さらに応用データが蓄積されることで信頼性も増していくのではと考えている。今後大量生産がなされればハイブリッド車などの一般向けの自動車にも用いられると考えられる。

参考文献

- (1) 神谷克彦, 他, "超小型 EV COMS の開発", JEVA 電気自動車フォーラム 2001, pp.85
- (2) Hiroshi Fujimoto, Takeo Saito, Toshihiko Noguchi, Yaw-moment stabilizing control of small electric vehicle, AMC2004-Kawasaki, pp.35-40, 2004
- (3) Motoki Shino, Masao Nagai, Independent wheel torque control of small-scale electric vehicle for handling and stability improvement, JSAE Review, Vol.24, pp.449-456, 2003
- (4) 岡村 勉夫: "電気二重層キャパシタと蓄電システム 第二版", 日刊工業新聞 pp.25 2001 年
- (5) 安部 正人, "自動車の運動と制御", 山海堂, pp.56, 2003