

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

小池卓志* , 河島清貴 , 内田利之 , 堀洋一 (東京大学)

Motion Control Experiments of an Electric Vehicle C-COMS2
powered by Electric Double Layer Capacitors

Takashi Koike* , Kiyotaka Kawashima, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

Electrical double layer capacitor (EDLC) has great advantages for energy storage device for future EV/HEV, which are impossible to achieve by secondary batteries. We have developed a novel electric vehicle powered by EDLC which installs DD-motor. In this paper, we compare EDLC to Lead-acid batteries from the viewpoint of motion control.

キーワード：電気自動車, 電気二重層キャパシタ, DD モータ, インホイールモータ
(electric vehicle, electric double layer capacitors, direct-drive motor, inwheel motor)

1. はじめに

近年、地球環境問題・エネルギー問題の顕在化にともない世界は持続可能な社会に向け動き始めている。中でも温暖化は早急に取り組む必要があり、CO₂ 排出の少ない電気自動車 (EV) は注目されている。

EV はモータで走るので蓄電装置が重要となってくる⁽¹⁾。現在蓄電装置として広く利用されているのは二次電池である。これは二次電池はエネルギー密度が高く、また長い歴史があるのでノウハウがたまっており利用しやすいためである。しかし二次電池は化学電池なので状態がわかりにくく、現在でもモデリングや充電方法が議論されている⁽²⁾⁽³⁾。このような理由から過酷な環境化での使用が向かないため、二次電池ではモータの能力を活かすことができない。

それに対し新しい蓄電デバイスとして注目を浴びている電気二重層キャパシタ (EDLC) は二次電池に比べ様々な利点を持っている。キャパシタの特長は以下のようにまとめられる⁽⁴⁾。

- 内部抵抗が小さいので大電流での高速充放電可能
- 物理電池なので劣化がなく繰り返し利用でき長寿命
- 電圧値がエネルギー残存容量をあらわす
- 重金属を用いないので環境負荷が低く、持続可能な蓄電デバイスとなりうる

ここでは新しい蓄電デバイスである電気二重層キャパシタを用いた自動車をキャパシタ・鉛蓄電池でそれぞれ単独で走行できるよう改造、さらにDDモータに取り替えることで運動制御の観点から電気二重層キャパシタと鉛蓄電池を比較するための実験をおこなった。

2. 電気二重層キャパシタとは

電気二重層とは一般に固体電極と電解質溶液のような異

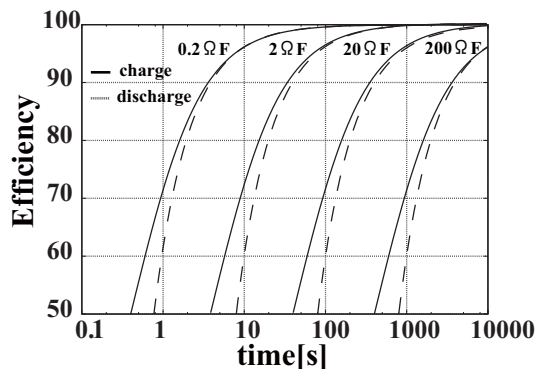


図 1 キャパシタ充放電時効率⁽⁴⁾

Fig. 1. Efficiency of capacitor while charging and discharging

なる二つの相が接触する界面において、極めて短い距離を隔てて正・負の電荷が対向して配列した状態をいう⁽⁴⁾。この電気二重層の現象を利用したものが電気二重層キャパシタ (EDLC) である。電極の表面に形成される二重層のイオンは電解質を介してセパレータをくぐり電極を行き来することで充電・放電を行う。化学反応を使わないためエネルギー密度は低くなってしまいが、出力密度が高くほとんど劣化することがないという特長をもつ。

キャパシタは定電流充電をしてやると効率よく充電でき、キャパシタに蓄えられる電力量 U と抵抗 R で失われる電力量 P_R は、

$$U = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} \dots \dots \dots (1)$$



図 2 COMS
Fig.2. COMS

$$P_R = I^2 R \cdot t = R \cdot \frac{Q^2}{t} \dots\dots\dots (2)$$

とあらわされるので、充電時の率 E_{charge} は、

$$E_{charge} = \frac{U}{U + P_R} = \frac{t}{t + 2RC} \dots\dots\dots (3)$$

となり、放電効率 $E_{discharge}$ は、

$$E_{discharge} = \frac{U - P_R}{U} = 1 - \frac{2RC}{t} \dots\dots\dots (4)$$

充電時間と RC のみに影響されることになる⁽⁴⁾。

この様子を表したものが図 1 である。またこの RC はエネルギー密度とトレードオフの関係になっているので利用法により RC を選ぶことで充放電効率を適切なもの選ぶことが大切である。

3. 実験装置特性

今まで電気二重層キャパシタを用いた車での実験を行うため C-COMS2 を改造した電気自動車を利用して来た⁽⁵⁾。

表 1 搭載した鉛蓄電池と電気二重層キャパシタの比較

Table 1. Comparison between Lead-acid battery and EDLC

	Lead-acid(6S)	EDLC(3S3P)	ratio
voltage	72V	97.2V	0.74
strage energy	3744Wh	144Wh	26
weight	130kg	40kg	3.25
weight of vehicle	350kg	260kg	1.35
volume	47.3l	44.2l	1.07
internal resistance	21mΩ	22mΩ	0.96
range	45km	2.5km	18
time of charging	13h	60s	780

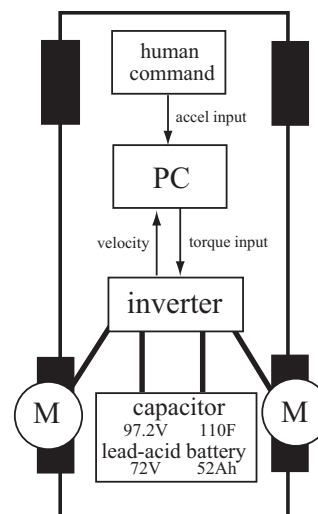


図 3 C-COM2 構成
Fig.3. composit of C-COM2

ベースとなるのはトヨタ車体(株)が市販している電気自動車 COMS (図 2) である。この車は走行用の蓄電装置として Panasonic 製 12V-52Ah の鉛蓄電池を 6 並列にして 72V で利用している。

この車の鉛蓄電池を 32.4V-110F のパワーシステム製電気二重層キャパシタを 3 並列 3 直列で利用することで、97.2[V],110[F] のもので駆動することを可能にした。

表 1 に元の車と C-COMS2 の性能比較を載せた。蓄電電力量は鉛蓄電池の方が 26 倍と大きな差があるが、その電力をためるのに必要な時間はキャパシタのほうが 780 倍も速い。これは同じ電力量だとキャパシタの方が 30 倍高速に充電できることをあらわしており、キャパシタには高速充電による様々な利用法が考えられる。

一充電走行距離はキャパシタと同じ電力量だとすると鉛蓄電池は 1.73[km] となりキャパシタの 70[%] しか走行できないことになる。これは鉛蓄電池は電圧から残存容量の予想が難しく高い放電深度での使用ができないのに対し、キャパシタは電圧から残存容量がそのまま分かるので高い放電深度での利用が可能であるためと考えられる。

また今回は C-COMS2 のモータを DD モータに交換し、インバータもトルク入力を自由にできるようにした。これにより PC でトルク入力が制御できるようになり、DD モータを利用することでさらなる運動制御の実験を行えるようにした。簡単な構成を図 3 に示す。

ここで PC は(株)インターフェースの CPU モジュールに AD ボード・DA ボード・DIO ボードを搭載し、ART-Linux を組み込むことでリアルタイム制御をおこない、1[ms] ごとに左右独立にトルク入力が可能となっている。

4. 運動制御実験

電気二重層キャパシタを鉛蓄電池と比較したときの利点は高い出力密度にあり、特に充電時は大きな差がある。このことが運動制御にどの程度影響を与えるか調べるために、C-COM2 で基礎実験を行った。

実験では 1[s] から 6[s] の間 100[Nm] を加え加速し、6[s] から 9[s] の間-85[Nm] で回生ブレーキをかけることで急激な出力の変化を与え、電気二重層キャパシタと鉛蓄電池での出力特性を比較することで出力密度の違いによる出力特性の違いを調べた。

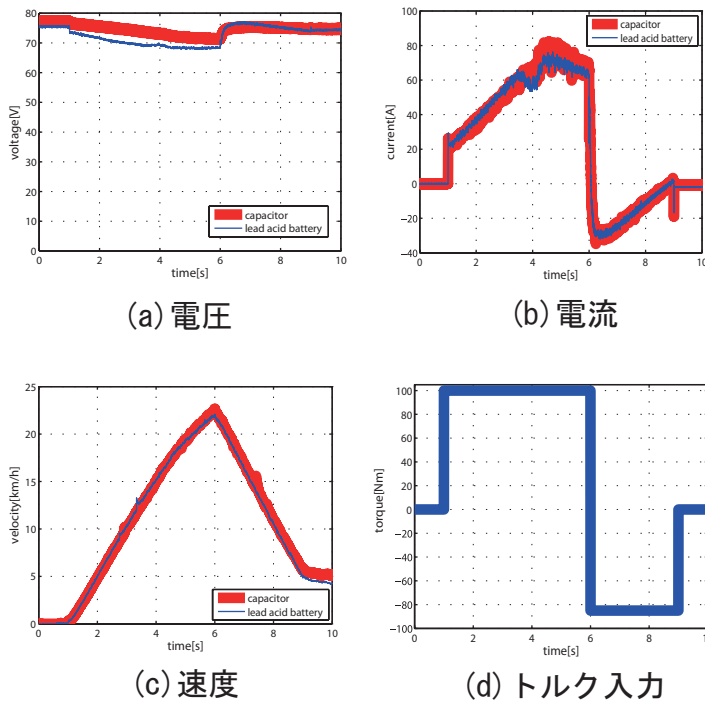


図 4 基礎実験データ

Fig. 4. Values of basic experiment

図 4 に実験時の電圧・電流・速度・入力トルクの値を載せた。

実験結果からキャパシタ・鉛蓄電池による違いはほとんど見る事ができなかった。もちろん電圧変化は異なるが、前回検討したとおり鉛蓄電池のほうが内部抵抗が大きいために電圧が上昇したと考えられる⁽⁵⁾。

電流値については図 5,6 に細かい結果を載せた。ほぼ同じ結果が得られていることから、これらの特性はインバータの性質が見えているのであり、キャパシタと鉛蓄電池での出力特性の差はインバータの応答速度よりも早く差が現れていないことが考えられる。

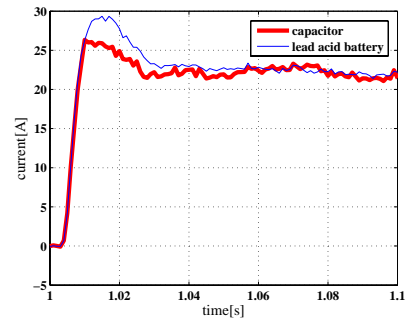


図 5 トルク入力直後の電流比較

Fig. 5. Comparison of current at the moment of torque input

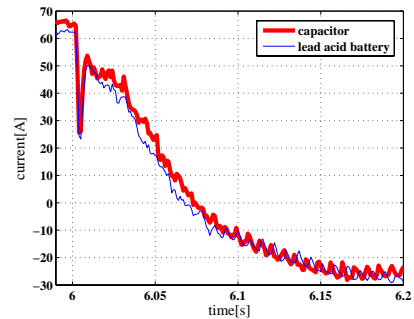


図 6 回生直後の電流比較

Fig. 6. Comparison of current at the moment of regenerative brake

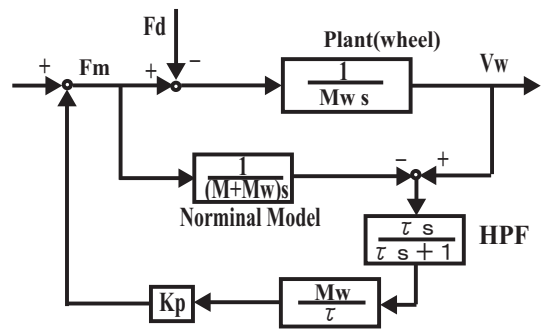


図 7 モデル追従制御

Fig. 7. Model following control

5. まとめ

今回 C-COM2 のモータを DD モータに取り替え、インバータ・P C 等を新たなものを搭載し運動制御の実験ができるよう改造を行った。また、キャパシタと鉛蓄電池を比較するため両方搭載されている。

鉛蓄電池と比較したときキャパシタの利点である出力特性のよさを調べるために簡単な実験を C-COM2 で行いその結果を示した。この実験では鉛蓄電池・キャパシタともにほぼ同じ結果が得られることによりキャパシタの有意性は認められなかった。これは出力特性の差がインバータの出力特性よりも早いところにあるためだと考えられる。

今後は図 7 のモデル追従制御のようにもっと細かい制御の場合の比較、また DD モータの特性を活かせるような実験をしたい。

参考文献

- (1) Joeri Van Mierlo et al, "Models of energy sources for EV and HEV : fuelcells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators", Journal of Power Source, vol.28, pp.76-89, 2003.
- (2) M.Thele et al, "Modeling of the charge acceptance of lead-acid batteries", Journal of Power Source, Nov 2006.
- (3) Dirk Uwe Sauer et al, "Charging performance of automotive batteries - An underestimated factor influencing lifetime and reliable battery operation", Journal of Power Source, Nov 2006.
- (4) 岡村迪夫,"電気二十層キャパシタと蓄電システム", 日刊工業新聞社, 2005.
- (5) 小池卓志 内田利之 堀洋一,"キャパシタで駆動される電気自動車のエネルギー分析", 電気学会産業応用部門大会,2007