

# キャパシタで駆動される電気自動車のエネルギー分析

小池 卓志, 内田 利之, 堀 洋一 (東京大学)

## Energy Analysis of an Electric Vehicle powered by Electric Double Layer Capacitors

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

With popularization of HEV and EV, energy sources for these are widely discussed.

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. In this paper, the possibility of EDLC is explored from a viewpoint of energy analysis. Its charge-discharge behavior and fuel consumption property will be shown to verify the effectiveness of EDLC comparing with batteries.

キーワード：電気自動車, 電気二重層キャパシタ, エネルギー分析

Keywords: electric vehicle, electric double layer capacitors, energy analysis

### 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、CO<sub>2</sub> 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<sup>(1)</sup>。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<sup>(2)(3)</sup>。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しきることができない。

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。キャパシタの特徴は以下のようにまとめられる。

- 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
- 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新たな自動車を製作し、充放電効率・燃費等のエネルギー分析をおこなうことで従来の蓄電デバイスである鉛蓄電池と比較しその可能性を探る。

### 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<sup>(4)</sup>。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。

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、

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

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

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<sup>(4)</sup>。

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

3-1 実験装置諸元 今回、電気二重層キャパシタを用いた車での実験を行うため新たな車 C-COMS2 (図2) を製作した。ベースとなるのは (株) トヨタ車体が市販している電気自動車 COMS 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に置き換え 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とした。

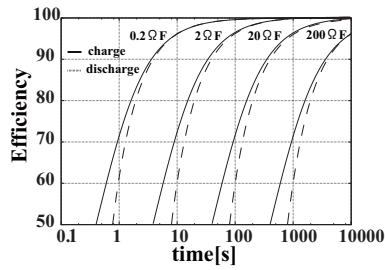


図1 キャパシタ充放電時効率<sup>(4)</sup>

Fig. 1. Efficiency of capacitor while charging and discharging



図2 C-COMS2

Fig. 2. C-COMS2

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

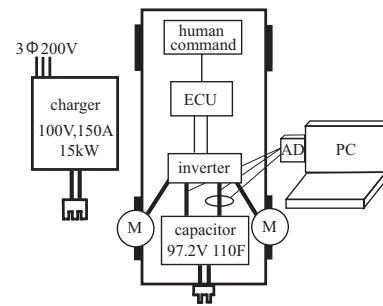


図3 C-COMS2の構成

Fig. 3. Configuration of Capacitor-COMS2

表1に元の車とC-COMS2の性能比較を載せた。蓄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。

C-COMS2の構成を図3に示す。キャパシタ定格電流は60[A]であり3並列にして利用しているので最大180[A]の電流で充電することができる。また、鉛蓄電池をキャパシタに置き換えたので大きな電圧変動に対応するためインバータの電圧制限をはずし、電流・電圧値はセンサを使ってRT-LinuxにADボードから取り込んでいる。

3.2 内部抵抗 効率はキャパシタの内部抵抗と静電容量に大きく依存されるので、まずは内部抵抗と静電容量を測定するため実験を行った。

内部抵抗は定電流で充電を開始したときの電圧の変化量から $R = \Delta V / I$ と計算することができる。図4に電流を変えたときの電圧変化の様子を載せた。

またその値を電流で割ったものを図5に示した。 $V/I$ が

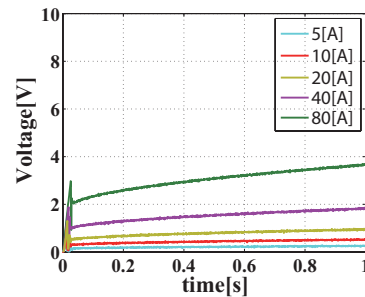


図4 定電流充電をおこなったときのキャパシタの電圧変化

Fig. 4. Voltage changes of capacitor while constant current charging

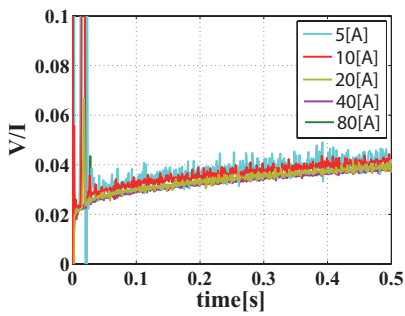


図5 キャパシタの内部抵抗  
Fig. 5. Internal resistance of capacitor

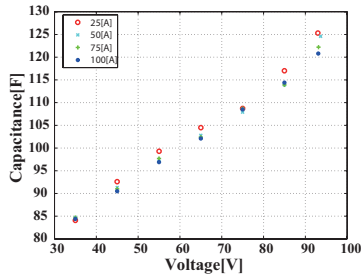


図6 静電容量  
Fig. 6. Capacitance

時間につれ上昇しているように見えるが、これはキャパシタに電荷が入ったことによるもので、初期段階での値が内部抵抗となる。これより内部抵抗は20~30mΩであり、電流によらずほとんど一定であることがわかる。

3.3 静電容量 キャパシタにおいて静電容量は電荷  $Q$  と電圧  $V$  とはリニアになっていないため静電容量を定義する方法がいくつか存在する。ここでは電圧微分法を使うことにした<sup>(5)</sup>。

電圧微分法において静電容量は  $C = I \cdot T / \Delta V$  [F] として計算する。C-COMS2 を使い、設定電圧まで定電流充電を行い設定電圧まで達したら定電圧充電に変わるという方法で充電実験を行った。ここで設定電圧は98[V], 設定電流は25,50,75,100[A] とした。

電圧によって静電容量が変化する様子を図6に示す。電流によつての静電容量の大きな違いはみられなかったが、電圧が大きくなるにつれ静電容量が増加していることがわかる。このように静電容量は動的に変化し、高電圧で利用すればするほどより多くのエネルギーをためられることを示している。

また平均の静電容量の値を算出するには、キャパシタに蓄えられているエネルギーが半分になっている電圧の時の静電容量から得られるとする。今回のキャパシタの電圧は  $V = 97.2$  [V] であるから、エネルギーが半分になる電圧は69[V] のときであるのでおよそ105[F] となる。これはまさにキャパシタの定格から与えられる静電容量110[F] とほぼ一致する。

## 4. エネルギー分析

4.1 総合効率 3節では製作したキャパシタピークールが実際にどのような特性を持っているかを調べた。今節ではそれを踏まえキャパシタピークールが総合的にみてどの程度の効率かを検討する。ここでは内燃機関で使われる燃費を総合効率として定義することにする。

また燃費は走行の仕方によりかわるので、今回は研究所内の直線を加速して25km/hで定速度走行を行い、回生ブレーキで止まるということを6往復する実験を行い比較的10モードの低速時に近い走行で代用することにした。実験は鉛蓄電池のみの場合、キャパシタのみの場合について行い走行距離は1.65[km] となった。図7,8にそのときの電流・電圧値を載せた。ただし実験車にはキャパシタ、鉛蓄電池が両方乗っているため車量重量は450[kg] となっている。

ここで内燃機関と比べるために原油換算を行うことにした。このとき内燃機関は精製・輸送により原油の90%が元のエネルギーとして使え、電気自動車は精製・発電・送電・充電器と通るため原油の33.2%が充電器から供給できるものとする。このときの効率はそれぞれ精製97%、発電40%、送電95%、充電器90%として計算している。さらに充電効率  $p$  [%] をキャパシタは95%(式(3))、鉛蓄電池を80%<sup>(6)</sup> とする。

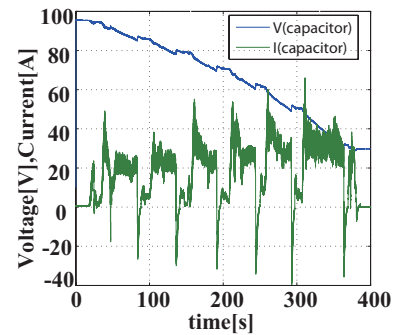


図7 キャパシタ走行時の電圧・電流値

Fig. 7. Voltage and current when powered by EDLC

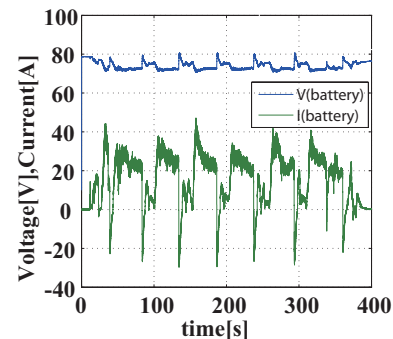


図8 鉛蓄電池走行時の電圧・電流値

Fig. 8. Voltage and current when powered by Lead-acid battery

表2 燃費 (車重 450kg 時)

Table 2. Fuel consumption (weight 450kg)

type of vehicle	fuel consumption (km/l)
C-COMS2(EDLC)	52.1
C-COMS2(Lead-acid battery)	43.9
compact car	about 30 <sup>(7)</sup>
hybrid car	about 45 <sup>(7)</sup>

原油は 1l で 38.2[MJ] の発熱をするので、式 (5) によって燃費が得られる。

$$\begin{aligned}
 A[\text{km/kWh}] &= A/3.6[\text{km/MJ}] \\
 &= A/3.6 \times 38.2 \times 0.332 \times p[\text{km/原油 1l}] \\
 &= Ap/3.6 \times 38.2 \times 0.332 \div 0.9[\text{km/l}] \\
 &= 3.91 \times Ap[\text{km/l}] \dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

ゆえにキャパシタの燃費は 14.1[km/kWh]=52.1[km/l] となる。それに対して鉛蓄電池の場合は充電効率がキャパシタに比べ低いので 43.9[km/l] となる。

車重がほとんど同じと換算したときの小型車・ハイブリッド車での燃費の比較をすると表2のようにあわせ、総合的に見るとキャパシタを利用することにより燃費の改善があることが分かる。

4.2 回生時効率 これまでは総合的エネルギー効率について見てきたのでキャパシタ・鉛蓄電池の差が分かりにくかった。そこでここではキャパシタ・鉛蓄電池の差がである回生時の様子について詳しく調べる。

実験では止まっているところからアクセル全開で 25[km/h] まで加速しすぐに回生ブレーキで止まるということをおこなった。図 9,10 にその回生時の様子を載せた。

鉛蓄電池の電圧は回生時最終電圧よりも約 2.5[V] 上昇しているのに対して、キャパシタは回生時の最終電圧より約 0.4[V] の上昇している。この原因は回生初期の段階において大電流が流れたことに起因すると思われる。鉛蓄電池、キャパシタともにいろいろなモデルが提唱されているが、基本は内部抵抗とキャパシタンスであるのでこの電圧上昇の原因は内部抵抗のエネルギー消費と考えることにする。

この電圧上昇は内部抵抗によるものだと仮定したとき、そのときに電流から内部抵抗で消費されてしまった電力量  $W_i$  を式 (6) と求めることができる。

$$W_i = \int (V(t) - V_{terminate}) I(t) dt \quad (6)$$

一回の制動に対して鉛蓄電池の場合は  $W_i = 175[\text{J}]$ 、キャパシタの場合は  $W_i = 25[\text{J}]$  となる。

一回の制動で約 6[kJ] のエネルギーを回生しているのに鉛蓄電池は 3[%] を、キャパシタは 0.4[%] を内部抵抗で失うことになる。このことより大きな差ではないがキャパシタの方が回生エネルギーを吸収できることがわかる。

## 5. 結 論

本論文では、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電気自動車を製作しその基本特性を測定し

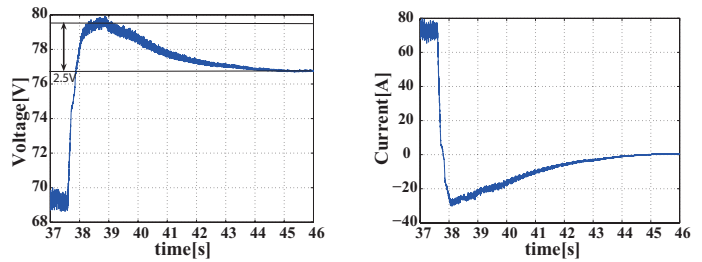


図9 鉛蓄電池の場合の電流・電圧値

Fig. 9. Voltage and current powered by battery

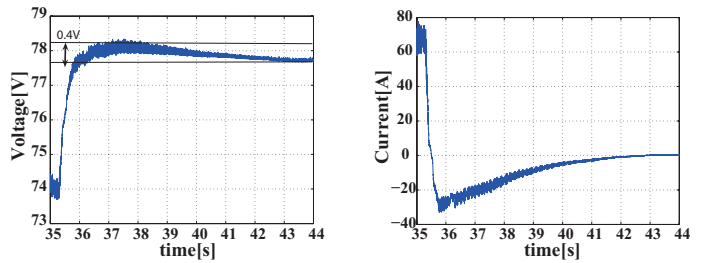


図10 キャパシタの場合の電流・電圧値

Fig. 10. Voltage and current powered by EDLC

結果を示した。

次に走行データを使うことでキャパシタ自動車の総合効率、回生効率について検討した。総合効率はガソリン 1l あたりの燃費に換算することで、内燃機関よりも効率がよいことがわかる。また、回生効率については鉛蓄電池に比較すると大電流でも電圧上昇が少なく、大きな差ではなかったが効率がよいことがわかる。

ここでキャパシタと鉛蓄電池で効率の差がそれほどおおきくなかったのは、インバータが電流を制限していたからでありその制限をとることでより効率をえられる可能性がある。

## 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, "電気二重層キャパシタと蓄電システム", 日刊工業新聞社, 2005.
- (5) 木下繁則, "電気二重層キャパシタの基礎と産業応用への可能性", PEA2006 技術セミナー.
- (6) Michail Rantik, "Life Cycle Assessment of Five Batteries for Electric Vehicles under Different Charging Regimes", KFPB, pp.3-6, 1999.
- (7) 国土交通省, "自動車燃費一覧 (H19.3)", 2007.