

キャパシタ駆動 EV の運動制御とエネルギー分析

Motion Control and Energy Analysis of Capacitor driven Electric Vehicle

小池卓志*・河島清貴*・内田利之*・堀洋一**

Takashi KOIKE, Kiyotaka KAWASHIMA, Toshiyuki UCHIDA and Yoichi HORI

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伴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) は注目を浴びている。また、原油価格の上昇により燃費のよいハイブリッド車 (HEV) の普及も急速に進んでおり、効率をあげるため出力比較においてエンジンと同等の力を出せるモータが使用されるようになり始めた。この流れは間違いなく将来にわたって続き、自動車がモータのみで走る日はそう遠くないかもしれない。

モータで自動車が走るとなると重要なのは蓄電装置である。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り、これはエネルギー密度が高く、また長い歴史があるためノウハウがたまっており利用しやすいからである。しかし二次電池は化学電池なので状態が分かりにくく、現在でもモデリングや充電方法が議論されている¹⁾²⁾。このような理由から二次電池は過酷な環境化での使用が向かず、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て利用でき長寿命
- ・端子電圧からエネルギー残量が分かる
- ・重金属を用いないので環境負荷が低く、持続可能なデバイスとなりうる

本論文はまず電気自動車の特徴、その特徴を活かした運動制御を紹介し、引き続き電気二重層キャパシタについて説明する。そして新たに製作したキャパシタビークルの特性を調べ、その実験車のエネルギー分析を行った。

2. 電気自動車の運動制御

本研究室では今まで電気自動車において電気モータの特徴を活かした運動制御をすることを目標に研究してきた。この電気モータの運動制御における特徴とは、以下の3点にまとめられる。

- ・トルク指令からトルク出力までの応答が高速で正確
- ・出力トルクの大きさが正確に分かる
- ・モータの小型化が可能なので分散配置できる

以下にこれらの電気自動車の制御性での利点を活かした運動制御をいくつか簡単に紹介する。

2.1 MFC によるトラクションコントロール³⁾

MFC (モデル追従制御) はタイヤモデルを粘着状態でノミナル化することで、タイヤがスリップした場合に生じる見かけ上の慣性の減少を外乱とみなす。実際の車輪速度と粘着状態のモデルによる速度との差をとり、モータ指令値にフィードバック (FB) することでトラクション制御をしたものである。

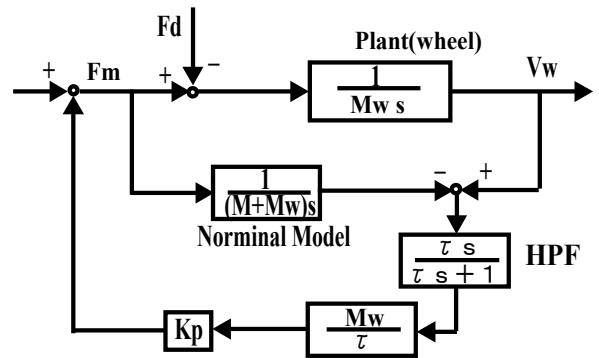


図 1. MFC ブロック図

図 1 にブロック図を示した。FB ゲイン K_p をかえてやることにより性能を調整することができる。ただし、 F_m : モータトルク, F_d : 駆動力, M : 車体重量, M_w : 車輪慣性重量換算値, V_w : 車輪速度, τ : HPF 時定数となっている。

実験では図 2 のような日産 March を改造して製作

* 東京大学大学院工学系研究科

** 東京大学生産技術研究所 3 部

した 4 輪インホイールモータの電気自動車”UOT-March II”を利用した。



図 2. UOT-March II

実験は水をまいたスリップしやすいアルミプレートの上での発進を K_p を変化させながら行ったものである。図3に結果を示す。制御がない場合は完全にスリップしているが、制御している場合はスリップが抑えられていることが分かる。

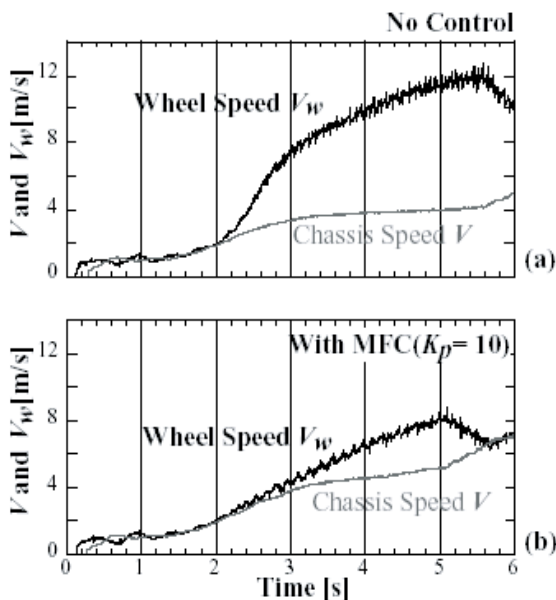


図 3. MFC 実験結果

2.2 逆起電力オブザーバによるスリップ抑制制御⁴⁾

直流モータは一般に強い電流制御FBをして動かしているため、指令電流が一定だとスリップしやすい路面に入った場合電流値が一定に保たれ回転数が急激に上昇する。しかし直流モータは回転数が上昇することで逆起電力を生じるため、FF 電流制御を行うとスリップした場合でも逆起電力により電流が垂下しスリップを抑制することができる。

MGset による垂下特性の実験結果を図 4 に示した。この実験では 3 秒付近で負荷を減らすことでスリップを模擬した。FB 電流制御だと電流を一定に保つため回転数が急激に上昇してしまうが、FF 電流制御の場合回転数が上昇すると電流が垂下し回転数が抑えられていることが分かる。

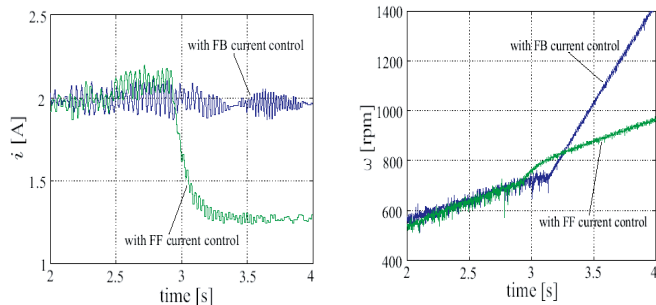


図 4. FB・FF 電流制御の比較

以下の図 5 には FF 電流制御を行っているものに外乱オブザーバをつけて逆起電力の調整を行えるようにしたものを示す。ただし L, R, ϕ : モータ定数, K : 逆起電力調整ゲイン, τ : フィルタ時定数, $G^{-1}: v^*$ から i の逆伝達関数とする。

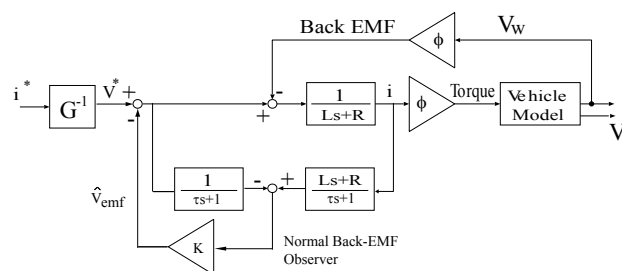


図 5. 逆起電力オブザーバブロック図

実験は図 6 の Cadwell という電気自動車を用いて行った。図 7 にトルク一定でスリップしやすい路面に入ったときの実験結果を示す。実験は FF 制御のみでは危険なので FB 制御のみと FB+FF 制御を比較しており提案手法の制御によりスリップが抑えられることが分かる。



図 6. Cadwell

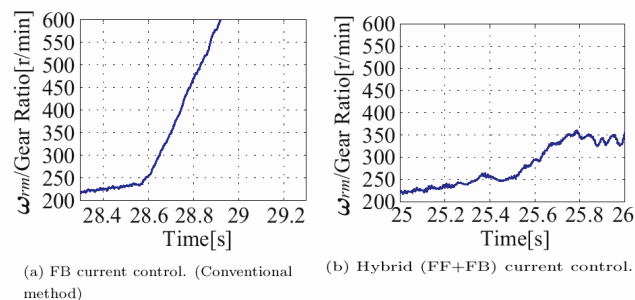


図 7. 逆起電力オブザーバによる実験結果

3. 電気二重層キャパシタとは

これまで本研究室では図 2,6 のような大きな電気自動車
で運動制御の実験を行ってきた。これらの電気自動車は鉛
蓄電池で駆動されており、充電時間がかかるものの走行時
間が短く、実験車両としては不十分であった。

そこで近年急速に蓄電容量をのびし注目を浴びている電
気二重層キャパシタを用いた実験車両を製作することで、
充電時間を大幅に短くし効率よく運動制御の実験をするこ
とにした。さらにエネルギー分析をすることでその可能性
についても調べた。ここでは実験車両に利用した電気二重
層キャパシタについてまとめる。

3.1 電気二重層キャパシタの原理

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。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)でありその様子を図 8 に示した。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。

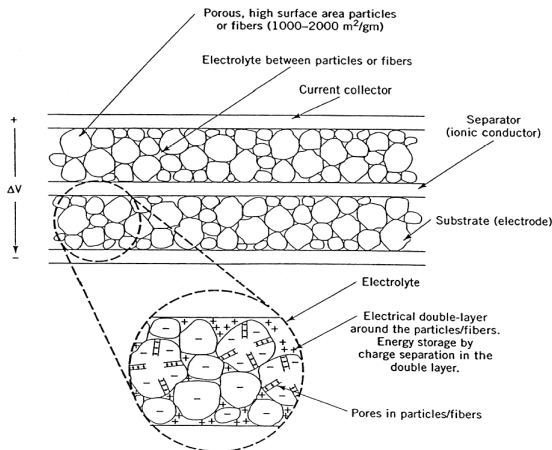


図 8.EDLC の構造⁵⁾

3.2 電気二重層キャパシタと二次電池の比較

電気自動車用の蓄電デバイスとして最も利用されている
ものは二次電池である。これは二次電池は EDLC に比べエ
ネルギー密度の観点から大きな利点を持っているからであ
る。図 9 にパワー密度とエネルギー密度の関係を示した。

特に、Li-ion 電池はエネルギー密度・パワー密度ともに
高く電気自動車用の蓄電デバイスとして大きな注目を浴び
ている。しかしながら Li-ion 電池は Li を使用しており使い
方によっては爆発してしまうという欠点も持ち合わせてお
り自動車に利用するには問題も多い。また Ni-MH 電池の安
全性は Li-ion 電池に比べ高いものの、コストの面では高価
な金属を使用しており普及するにいたっていない。

それに対し EDLC はエネルギー密度では及ばないが、パ
ワー密度では抜群の性能を持ち合わせている。また現在は
コストがかかるが、高価な金属を使っていないため普及す
ればコストは下がるものと考えられる。

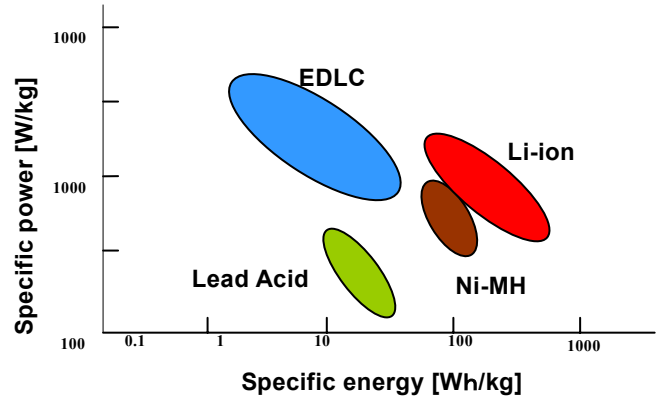


図 9 パワー密度・エネルギー密度の比較

3.3 充放電特性

キャパシタを充電するとき蓄えられているエネルギーは
 $1/2CV^2$ なので効率が 50%と勘違いされる場合がある。これ
は定電圧充電をした場合の効率でありキャパシタの充電法
として適切ではない。キャパシタを充電する場合は定電流
充電をすることで効率よく充電できる⁶⁾。キャパシタに蓄
えられる電力量 U 抵抗 R で失われる電力量 W_R は、

$$U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

$$W_R = I^2 R t = R \frac{Q^2}{t}$$

と表され、充電効率・放電効率は下記のように充電時間 t
と RC [ΩF] のみに影響される。

$$E_{\text{charge}} = \frac{U}{U + W_R} = \frac{t}{t + 2RC}$$

$$E_{\text{discharge}} = \frac{U - W_R}{U} = 1 - \frac{2RC}{t}$$

この様子を示したものが図 10 である。 RC [ΩF] は大きいほ
どエネルギーを蓄えられるが、短時間での充放電効率が低
くなる。このことは利用の仕方により RC を適切に選択す
ることで充放電効率を高められることを意味している。

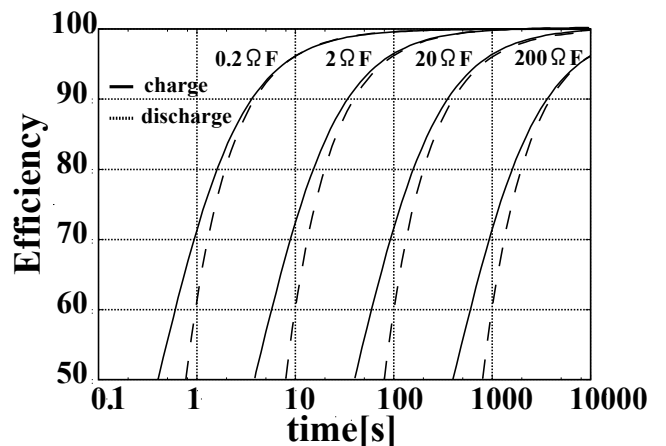


図 10.充放電特性

4.実験装置特性

4.1 実験装置諸元

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を製作した。ベースになるのは(株)トヨタ車体が市販している電気自動車C-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]で駆動することにした(図 11)。



図 11 C-COMS2

	Battery(6S)	EDLC(3S3P)	ratio
電圧	72V	97.2V	0.74
電気量	3744Wh	144Wh	26
蓄電装置重量	130kg	40kg	3.25
車体重量	359kg	260kg	1.35
蓄電装置容量	47.2ℓ	44.2ℓ	1.07
内部抵抗	21mΩ	22mΩ	0.96
1 充電走行距離	45km	2.5km	18
充電時間	13h	60s	1/780

表 1.鉛蓄電池と EDLC の比較

表 1 に元の車と C-COMS2 の性能比較を示した。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表しており、高速充電による様々な利用法が考えられる。

1 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深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ため高い放電深度での利用が可能であるからと考えられる。

実験に使用する車体の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ため 180[A]で充電することができるが、配線の負担を考え 100[A]で充電することにした。

充電装置は 15[kW]の能力を持つ松定プレジジョンの直流電源 PR100-150 を利用する。

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た。電流・電圧値はセンサを使って ART-Linux により AD ボードから取得する。

4.2 内部抵抗・静電容量

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 12 に 100[A]で充電時の実験の様子を示した。また、図 13 に充電電流による内部抵抗の違いをのせた。キャパシタの場合電流が増えても内部抵抗の変化は小さいため大電流においても内部抵抗によるエネルギー消費また熱の発生が少ない。

これに対し鉛蓄電池は大電流を流したときは、負極表面で水素ガスが発生するため負極電位が急激に低下し電池電圧が急上昇する。このため鉛蓄電池は大電流での充放電には向いていない。

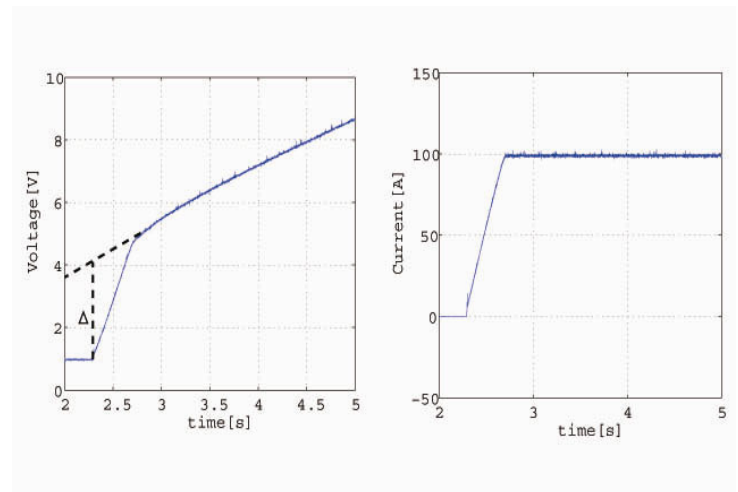


図 12.充電実験

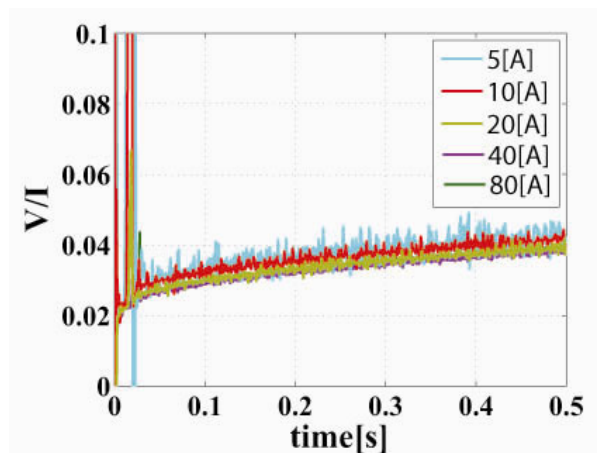


図 13.充電電流による内部抵抗変化

次は静電容量について測定した。キャパシタの静電容量 C は電荷 Q /電圧 V に対して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。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に達したら定電圧充電になるという設定で充電実験を行った。ここで設定電圧は 98[V], 設定電流は 25~100[A] で変化させて実験した。

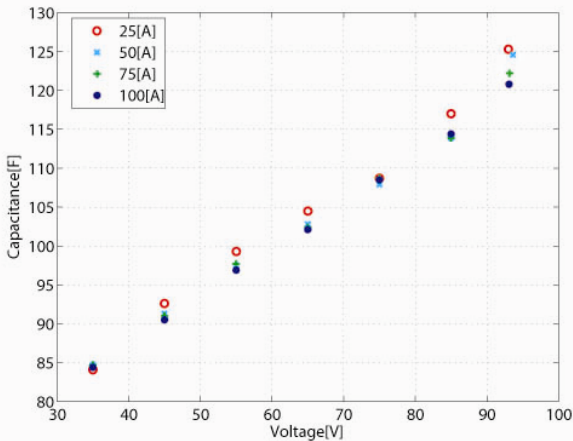


図 14. 静電容量

電圧によって静電容量が変化する様子を図 14 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分かる。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多くのエネルギーをためられることを示している。

5. エネルギー的分析

4 節ではキャパシタ単体でどのような特性を持っているか調べた。今節ではそれを踏まえキャパシタビークルがどの程度のエネルギー効率か検討する。

5.1 総合効率

蓄えられたエネルギーからどれだけ運動エネルギーに変換できたかを総合効率として検討したいが、摩擦等の問題で運動エネルギーでは厳密に効率を定義するのが難しい。そこで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。

燃費は走行の仕方により変わるので、現在日本で広く使用されている 10-15 モード走行で算出する。ただし、これは実走ではなくテスターの上でタイヤを回転させて実験を行ったものである。

今回は研究所内の直線を加速して 25[km/h] で定速度走行し、回生ブレーキで停止するというパターンを 6 回繰り返す比較的 10 モードの低速時に近い走行をすることで代用した。実験はキャパシタのみの場合、鉛蓄電池のみの場合

について行い走行距離は 1.65[km] であった。図 15 にそのときの電流・電圧値を示した。ただし実験車にはキャパシタ、鉛蓄電池の両方が搭載されているため車量重量は 450[kg] となっている。

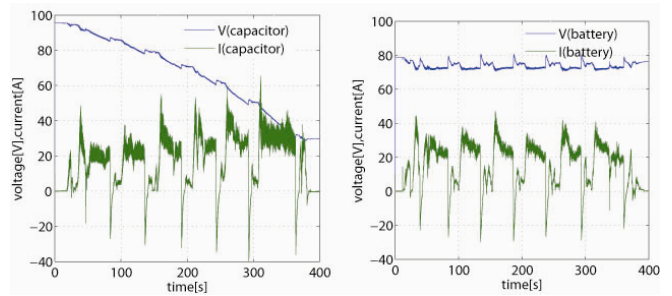


図 15. 走行時電圧電流データ

このときの電力量を算出すると、キャパシタ・鉛蓄電池でほぼ等しく 420[kWh] であった。ゆえに燃費は $E=1.65 \times 3600/420=14.1$ [km/kWh] となる。

ここで内燃機関と比べるためにはガソリン 1ℓ あたりと比較する必要があるため原油換算して計算を行う。

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用できるとする。電気自動車は、精製・発電・送電・充電器と通るため原油の 32[%] がキャパシタに充電されたものにする。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[%] として計算した⁷⁾。さらに充電効率をキャパシタは 95[%]、鉛蓄電池を 80[%] とする⁸⁾。

原油は 1ℓ で 38.2[MJ] の発熱をするので以下の式のように燃費に換算してやることができる。

$$\begin{aligned}
 A[\text{km/kWh}] &= A / 3.6[\text{km/MJ}] \\
 &= A / 3.6 \times 38.2 \times 0.32[\text{km/原油}1\ell] \\
 &= A / 3.6 \times 38.2 \times 0.32 / 0.9[\text{km}/\ell] \\
 &= 3.7 \times A[\text{km}/\ell]
 \end{aligned}$$

ゆえにキャパシタの燃費は 14.1[km/kWh]=52.1[km/ℓ] となる。それに対し鉛蓄電池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。

車体重量と燃費の関係が線形であるとする 450[kg] 時において内燃機関は表 2 のようにまとめられ、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⁹⁾。

車の種類	燃費(km/ℓ)
C-COMS2(EDLC)	52.1
C-COMS2(Lead-acid battery)	43.9
小型車	30 程度
ハイブリッド車	45 程度

表 2. 燃費比較(450kg 相当時)

5.2 回生時効率

ここまで総合効率についてみてきたが、キャパシタ・鉛蓄電池の差は実験から大きく分かるものではなかった。そこで鉛蓄電池が苦手とする回生時の効率について詳しく調べることにする。

停止し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停止する実験を行った。図15.16にその回生時の電圧値を示した。

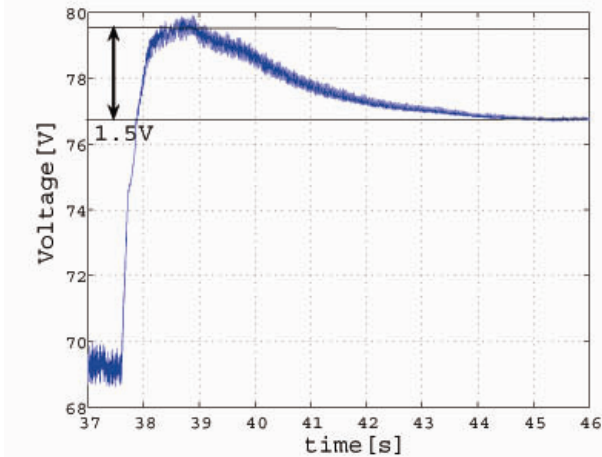


図 15.回生時鉛蓄電池電圧

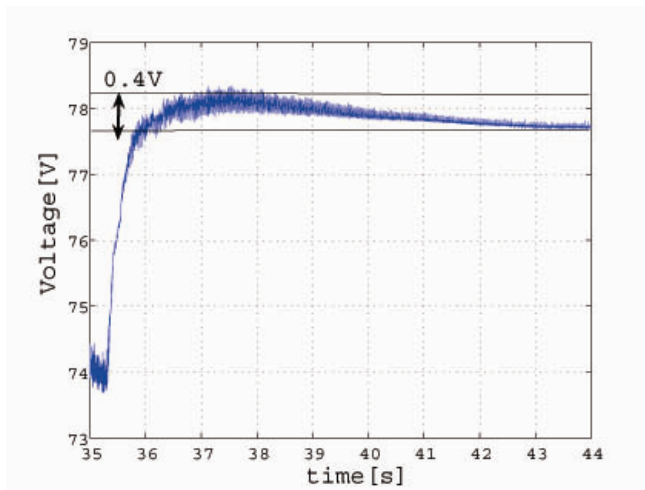


図 16.回生時キャパシタ電圧

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、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、キャパシタともに様々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によるものと考えられる。

この電圧上昇は内部抵抗によるものと仮定したとき、電流から内部抵抗で消費された電力量 W を下記のように定義してやる。

$$W = \int (V(t) - V_{\text{terminate}}) I(t) dt$$

この式により 1 回の制動に対し鉛蓄電池の場合は

$W=175[\text{J}]$ 、キャパシタの場合は $W=25[\text{J}]$ のエネルギー消費をしていると計算できる。1 回の制動で約 $6[\text{kJ}]$ のエネルギーを回生しているので鉛蓄電池は $3[\%]$ 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分かる。

6. おわりに

本論文では電気モータの制御性を利用した電気自動車の運動制御について紹介したあと、キャパシタの原理、キャパシタを利用した実験車についてまとめた。さらに実験車による特性を調べその効率について検討した。

キャパシタの効率は他の内燃機関の自動車やバッテリーを利用した電気自動車に比べ高いが、HEV 等燃費のよい自動車に比べると大幅な改善があるとは言えないためキャパシタ単独での利用は難しいと考えられる。

ただしキャパシタは高電流での効率が高いことを考えると、バッテリーとの併用等利用の仕方次第で大きな役割を果たす可能性を秘めている。また電流が取り出しやすいことを考えると運動制御に利用できる可能性もある。今後は実験車で具体的にどのような利用の仕方ができるか実験・検討をしたい。

参考文献

- 1) M.Thele et al, "Modeling of the charge acceptance of lead-acid batteries", Journal of Power Source, Nov 2006.
- 2) 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.
- 3) Shinichiro Sakai et al, "Advantage of Electric motor for anti akid control of electric vehicle", Eoupean Power Electronics Journal, vol.11, no.4, pp.26-32, 2001.
- 4) Xiaoxing Liu et al, "Optimal Traction Control for EV utilizing Fast Torque", 31th IECON, 2005.
- 5) Andrew Burke, "Ultracapacitors: why,how,and where is the technology", Journal of Power Sources, vol.91, pp.37-50, 2000.
- 6) 岡村 勉夫, "電気二重層キャパシタと蓄電システム", 日刊工業新聞社, 1999.
- 7) 清水 浩, "多目的高性能電気自動車の開発", FED レビュー, vol.2, No.8, 2002.
- 8) Michail Rantik, "Life Cycle Assessment of Five Batteries for Electric Vehciles under Different Charging Regimes", KFB, pp.3-6, 1999.
- 9) 国土交通省, "自動車燃費一覧(H19.3)", 2007.