

電気二重層キャパシタで駆動される電気自動車の可能性とその展望

小池 卓志 **, 河島 清貴 **, 内田 利之 **, 堀 洋一 ***

The possibility and the vision of electric vehicle powered by EDLC

Takashi Koike, Kiyotaka Kawashima, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori

With popularization of HEV and EV, energy sources for these are widely discussed. Among them, Electrical double layer capacitors(EDLC) has many advantages that secondary batteries can not realize. First, characteristics of EVs and our researches on EVs are introduced. Next, a novel electric vehicle powered by EDLC is manufactured, and the possibility of EDLC is explored from energy analysis. The charge-discharge behavior and fuel consumption are shown to verify the effectiveness of EDLC. Moreover, the possibility and the vision of EVs powered by EDLC are discussed.

Key words: electric vehicle, electric double layer capacitor, 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、CO2 排出の少ない電気自動車(EV)は注目されている。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いる。HEVにおいては、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ってきている。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も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、持続可能な蓄電デバイスとなりうる

ここではまず電気自動車の特徴、その特徴をいかした運動制御を紹介する。それに続き、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的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。

* 原稿受付 平成 19 年 8 月 25 日
** 東京大学大学院 工学系研究科 (東京都文京区本郷 7-3-1)
*** 東京大学 生産技術研究所 (東京都目黒区駒場 4-6-1)

2. 電気自動車の運動制御

本研究室では、今まで電気自動車の運動制御における電気モータの特徴を活かすことを目標に研究を行ってきた。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。

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

引き続き、これらの利点を活かした本研究室で行われてきた電気自動車の運動制御の研究をいくつか紹介する。

2.1 モデル追従制御によるトラクション制御⁴⁾

この制御で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することでトラクション制御を行うものである。

そのブロック図を Fig.1 に示した。フィードバックゲイン K_p を変える事で性能がかわってくる。Fig.2 に滑りやすい路面でのトラクション制御の実験結果を示す。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わかる。

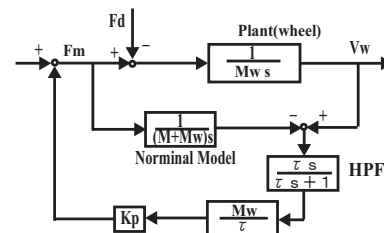


Fig. 1 モデル追従制御のブロック図

2.2 逆起電力オブザーバによるスリップ抑制制御⁵⁾

直流モータは電流制御フィードバックをして動かしているため、スリップしやすい路面に入ったとき指令電流が一定だと電

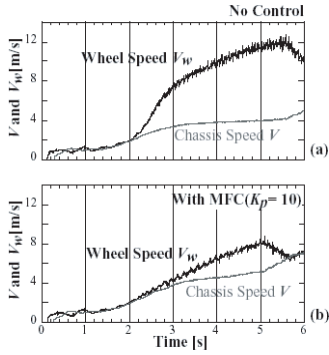


Fig. 2 モデル追従制御の実験結果

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ので、フィードフォワード電流制御を行うとスリップした場合でも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 Fig.3 に示した。FB 電流制御だと電流が一定なため回転数が急激に上昇しても電流は一定だが、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わかる。

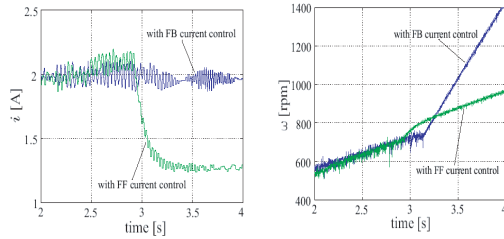


Fig. 3 FB 電流制御と FF 電流制御時の車体速度と電流

また垂下特性はそのままでは安全性や乗り心地といったものに影響を与える可能性があるため、Fig.4 のように逆起電力を外乱とみなすことで特性を調整することもできる。

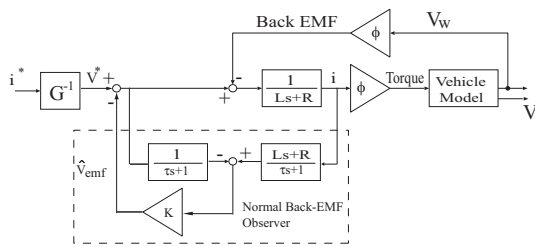


Fig. 4 逆起電力オブザーバのブロック図

2.3 車体すべり角 β 推定と制御⁶⁾

車体すべり角 β は横方向の運動安定化にとっても重要な要素となっているが、それを測定するセンサはとても高価で変数から推定するという手法が一般的である。しかしながらその多くは複雑すぎたり、ロバストでないという欠点をもっている。

この欠点を改善するため、Fig.5 のような線形オブザーバを構成し、横加速度・ヨーレイトを用いることでロバストなオブザーバを設計することが可能となった。さらに車体の運動方程式から推定した各タイヤの横力を使うことでコーナリ

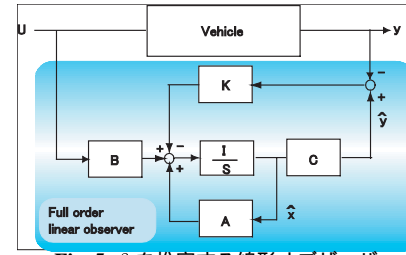


Fig. 5 β を推定する線形オブザーバ

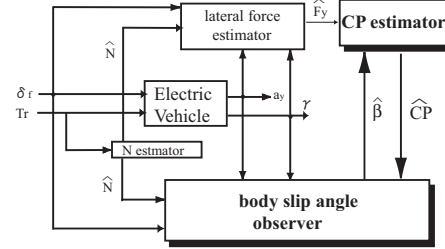
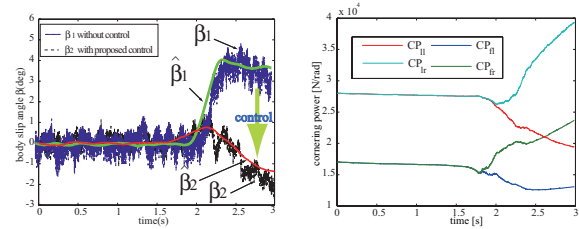


Fig. 6 CP 推定

グパワー CP を求め Fig.6 のように β と CP を相互補完してやることでさらにより推定が行える。



(a) β の実測値と推定値 (b) CP の推定値
Fig. 7 β の制御とその推定

さらに実験ではDYC(Direct Yaw Moment Control) を用いながら 40[km/h] で走行中に 150[deg] ハンドルをきった。そのときの β 、CP の推定を行った結果を Fig.7 に載せた。これにより、DYC を行いながらも β 、CP の推定ができることがわかる。

3. 電気二重層キャパシタとは

これまで掘研究室では 2 節のような運動制御の実験をバッテリーを用いた電気自動車でおこなってきた (Fig.8)。しかしながらバッテリーは充電時間がかかるものの走行時間がたいして長くなく実験車両としては使い勝手の悪いものである。そこで大電流での充放電を得意とする電気二重層キャパシタを用い実験のしやすい車両を製作することにし、ここでは電気二重層キャパシタとはどのようなものかをまとめた。



Fig. 8 バッテリーで駆動する電気自動車 (UOT-MarchII)

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 Fig.9 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。

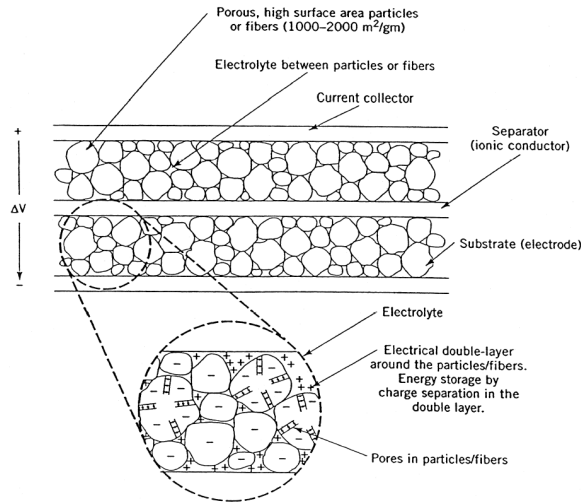


Fig. 9 EDLC の構造 7)

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現在よく使わ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。特に、Li-ion はエネルギー密度・パワー密度共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 は使い方を間違えると爆発してしまうというような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 は安全性は Li-ion に比べ高いものの、コストの面では高価な金属を使っ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ものの、パワー密度・信頼性では抜群の性能をもっている。また現在はコストがかかるものの、高価な金属を使っていないので普及すればコストは下がるものと考えられる (Table1)。

Table 1 電気二重層キャパシタとバッテリーの比較

	EDLC	Ni-MH	Li-ion
power density			
energy density			
cost			
safety			

:excellent :good :not good

3.3 充放電特性

キャパシタを充電するとき、入るエネルギーは $1/2CV^2$ 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⁸⁾。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。この様子を表したものが Fig.10 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に選ぶことが大切である。

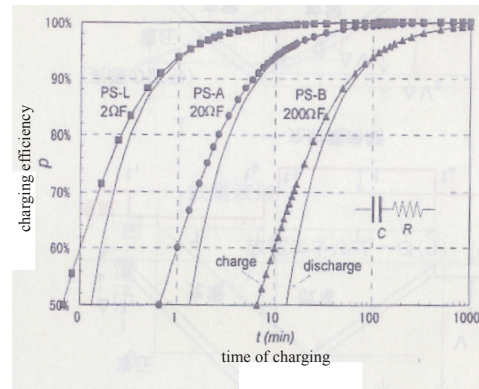


Fig. 10 充放電特性 8)

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。ベースとなるのは (株) トヨタ車体が市販している電気自動車 COMS (Fig.11) 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。



Fig. 11 Capacitor-COMS2

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] のもので駆動することとした。

Table 2 鉛蓄電池と電気二重層キャパシタの比較

	battery(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	1/780

Table2 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、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。

実験に使う車体の構成を Fig.12 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 180[A] の電流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。

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 RT-Linux に AD ボードから取り込んだ。

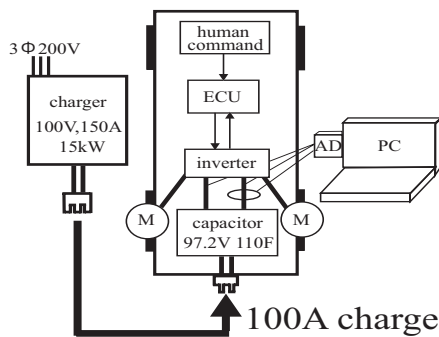


Fig. 12 C-Coms2 の構成

4.2 内部抵抗・静電容量

4.2.1 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。

Fig13 に 100[A] で実験の様子を載せた。

また、Fig.14 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

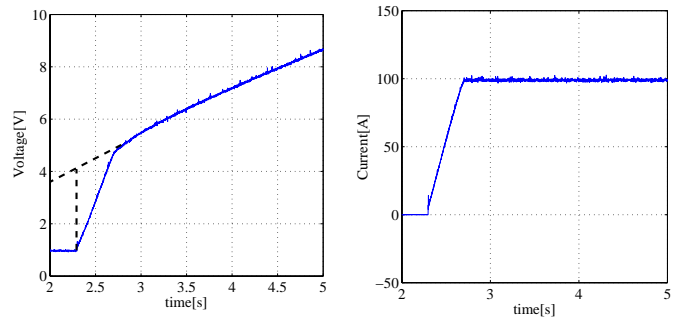


Fig. 13 内部抵抗

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 Fig.15 に示すように負極電位が急激に低下する。これは負極表面で水素ガスが発生するからである。このため電池の電圧が急激に上昇し大電流での充放電には向かない。

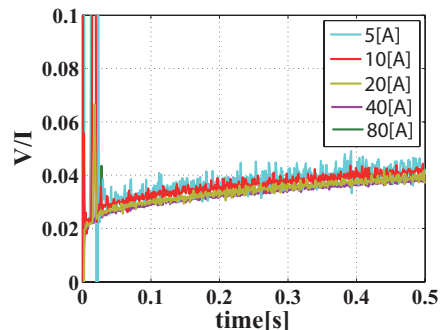


Fig. 14 充電電流による内部抵抗の変化

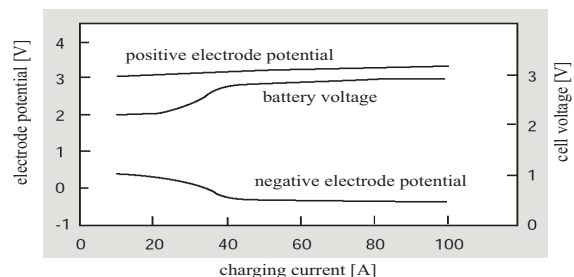


Fig. 15 充電電流による鉛蓄電池電極の変化⁹⁾

4.2.2 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¹⁰⁾。

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] としている。

電圧によって静電容量が変化する様子を Fig.16 に示す。電流によっ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。

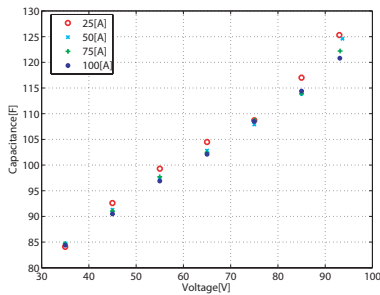


Fig. 16 静電容量

4.3 充電効率

内部抵抗・静電容量がもったのでそれを利用して充電効率を求める。充電器からキャパシタに入れられたエネルギー Q_c 、キャパシタに蓄えられたエネルギー U は、

$$Q_c = \int_0^t V(t) \cdot I(t) dt$$

$$U = \frac{1}{2} CV^2$$

であるので充電効率 E_{charge} は、

$$E_{charge} = \frac{U}{Q_c}$$

と定義できる。

効率を求めため実験では $I = 25, 50, 75, 100$ [A] で定電流充電を行った。Table 3 に電流が違う場合の充電効率を載せた。効率を求めるときに静電容量の値が必要となるのでここでは $C = 105$ [F] として計算した。充電電流が 100 [A] でも 94.8% であり、非常に高効率で高電流における充電においてもほぼ損失なく充電を行うことができる。

Table 3 電流による充電効率の違い

charging current[A]	25	50	75	100
efficiency[%]	98.4	96.4	97.5	94.8

4.4 放電効率

次は放電効率を求める。放電実験の電圧・電流を Fig.17 に示す。ここでは静電容量が充電時とは変化しているようなので、初期電圧と終端電圧から使われたエネルギーが半分の時電圧を出し、そのときの静電容量を電圧微分法で計算した。そのとき静電容量は $C=114$ [F] となった。

負荷によって消費されたエネルギー Q_d 、キャパシタから放電されたエネルギー U は、

$$Q_d = \int_0^t V(t) \cdot I(t) dt = 480 [\text{kJ}]$$

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = 517.7 [\text{kJ}]$$

であり、放電効率 $E_{discharge}$ は、

$$E_{discharge} = \frac{Q_d}{U} = 92.4\%$$

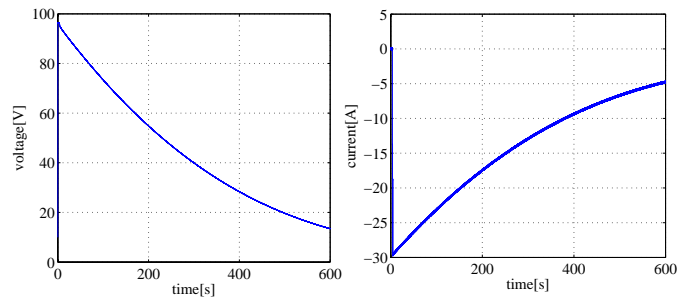


Fig. 17 放電時の効率

とできる。

このようにキャパシタは放電時に 90% 以上の効率が出ることが可能である。文献¹¹⁾によると鉛蓄電池の充放電効率は 80% 程度といわれていることを考えると、キャパシタは充放電共に 90% を超える効率であるので、高電流で頻繁にエネルギーの出し入れを行う自動車の使用に向いている。

5. エネルギー分析

4 節ではキャパシタ単体でどのような充放電効率になるかを調べた。今節ではそれを踏まえキャパシタピークルが総合的にみてどの程度の効率かを検討する。

総合効率として、入れられたエネルギーからどれだけの運動エネルギーに変化したか検討したいが、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かわるので、現在日本で広く使われているのは 10-15 モード走行にて算出する。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ているものである。

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。Fig.18 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重量は 450 [kg] となっている。この時の電力量を算出すると、キャパシタ・鉛蓄電池ともほぼ同じく 420 [kW] であった。よって燃費は、

$$E = \frac{1.65 \times 3600}{420} = 14.1 [\text{km/kWh}]$$

となる。

ここで内燃機関と比べるためにガソリン 1l あたりと比較する。そのためには土俵を同じくする必要があり原油換算して計算を行う。またこの時 Fig.19 のように内燃機関は精製・輸送により原油の 90% が元のエネルギーとして使える。電気自動車の場合、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。さらに充電効率をキャパシタは 95%、鉛蓄電池を 80% とする¹¹⁾¹²⁾。

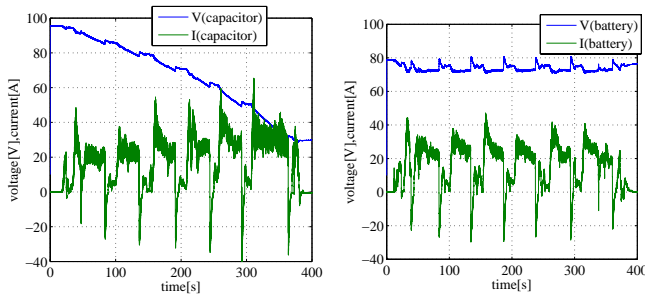


Fig. 18 電気二重層キャパシタ、鉛蓄電池での走行実験中の電圧・電流

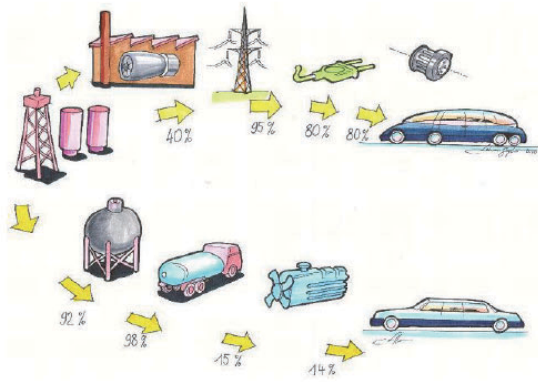


Fig. 19 エネルギーの流れ¹²⁾

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。

$$\begin{aligned}
 A[\text{km/kWh}] &= A/3.6[\text{km/MJ}] \\
 &= A/3.6 \times 38.2 \times 0.32[\text{km/原油 1l}] \\
 &= A/3.6 \times 38.2 \times 0.32 \div 0.9[\text{km/l}] \\
 &= 3.70 \times A[\text{km/l}] \dots \dots \dots (5)
 \end{aligned}$$

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。

Fig.20 に自動車の車重に対する燃費の様子を載せた。車重と燃費の関係が線形であるとする 450[kg] 時においては Table4 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。

Table 4 燃費比較 (450kg の場合)

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

6. まとめと今後の課題

本論文では電気自動車の制御性を利用した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。

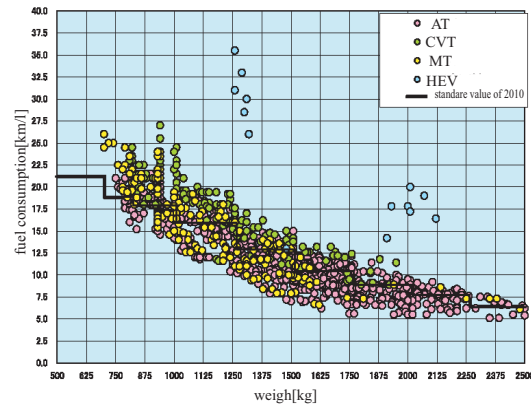


Fig. 20 燃費¹³⁾

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効率が非常に高いが、蓄電容量の低さを考えると現在の自動車がキャパシタのみで駆動する自動車に置き換えるとは考えにくい。これからは効率が高くかつ長く走れる HEV・PHEV の時代であろう。これは社会が普段は長距離を走ることはないのに使うかもしれないという理由でオーバースペックの車を要求しているからであり、キャパシタのみで駆動する自動車が必要とされるには社会意識の変化が必要である。

ただし、キャパシタは高電流でも効率が非常に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) 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) Shinichiro Sakai et al, "Advantage of Electric motor for anti akid control of electric vehicle", Eouropen Power Electronics Journal, vol.11, no.4, pp.26-32, 2001.
- 5) Xiaoxing Liu et al, "Optimal Traction Control for EV utilizing Fast Torque", 31th IECON, 2005.
- 6) Yoshifumi Aoki, Tomoko Inoue, Yoichi Hori, "Robust Design of Gain Matrix of Body Slip Angle Observer for Electric Vehicles and its Experimental Demonstration", Proc.of AMC - 2004, 2004.
- 7) Andrew Burke, "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology", Journal of Power Sources, vol.91, pp.37-50, 2000.
- 8) 岡村 達夫, "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.
- 9) Masayuki Terada, "The VRLA Battery for 42V High Voltage Automotive System", technical report of Shin-Kobe, vol.3, 2003.
- 10) 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", PEAF2006 技術セミナー.
- 11) Michail Rantik, "Life Cycle Assessment of Five Batteries for Electric Vehicles under Different Charging Regimes", KFB, pp.3-6, 1999.
- 12) 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.
- 13) 国土交通省, "自動車燃費一覧 (H19.3)", 2007.