

- 修士論文 -

電気二重層キャパシタとDDモータを
搭載した小型電気自動車の
エネルギー分析と車両運動制御
Energy Analysis and Motion
Stabilization using high performance
Electric Vehicle powered by Electric
Double Layer Capacitors

平成20年2月4日提出

指導教員: 堀 洋一 教授

東京大学大学院
工学系研究科電気工学専攻
66432 小池 卓志

内容梗概

近年電気自動車が普及への道をたどっているが、その鍵を握っているのは蓄電装置である。中でも電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor:以下 EDLC) は二次電池に比べて内部抵抗が低く、化学反応を伴わないため、大電流での充放電効率の改善や大幅な充電時間の短縮が可能である。本論文では、EDLC を駆動源とする小型電気自動車 C-COMS2 を製作し、実車による走行実験を通じて、EDLC 駆動電気自動車の効率のよさを明らかにした。また駆動モータを DD モータに取替え高性能制御を可能とし、走行実験によって EDLC と二次電池を比較することで、EDLC が車両運動制御に有効であることを検証した。

目次

| | | |
|-------|--|----|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 1.1 | 研究の背景 | 1 |
| 1.1.1 | 電気自動車の歴史 | 1 |
| 1.1.2 | 電池技術の進化 | 3 |
| 1.2 | 研究の目的 | 3 |
| 1.3 | 本論文の構成 | 5 |
| 第2章 | 電気二重層キャパシタとは | 6 |
| 2.1 | 電気二重層キャパシタの構造と特長 | 6 |
| 2.1.1 | 電気二重層キャパシタの原理 | 6 |
| 2.1.2 | 電気二重層キャパシタと二次電池との比較 | 7 |
| 2.2 | 電気二重層キャパシタの等価モデル | 8 |
| 2.3 | 電気二重層キャパシタの特性 | 8 |
| 2.3.1 | 充放電時間と効率 | 8 |
| 2.3.2 | 出力密度と効率 | 9 |
| 第3章 | 電気二重層キャパシタとDDモータを搭載した電気自動車C-COMS2を用いたエネルギー分析 | 13 |
| 3.1 | 実験車C-COMS2の製作とその構成 | 13 |
| 3.2 | 搭載キャパシタ基礎特性の測定 | 15 |
| 3.2.1 | 充電電流・電圧による内部抵抗の変化 | 15 |
| 3.2.2 | 充電電流・電圧による静電容量の変化 | 17 |
| 3.3 | 電流を変化することによる充放電効率の比較 | 19 |
| 3.4 | 実験車C-COMS2を用いたエネルギー分析 | 20 |
| 3.4.1 | 10-15モード適用時の総合効率 | 20 |
| 3.4.2 | 回生時効率 | 24 |
| 3.5 | まとめ | 24 |
| 第4章 | 電気二重層キャパシタとDDモータを搭載した電気自動車C-COMS2を用いた運動制御における実験的検討 | 26 |
| 4.1 | 電気自動車による運動制御 | 26 |
| 4.1.1 | 電気自動車の運動制御の利点 | 26 |
| 4.1.2 | 電気自動車の一次元運動モデル | 26 |
| 4.2 | 電気二重層キャパシタと鉛蓄電池による運動性能比較 | 28 |
| 4.2.1 | モデルフォロイング制御を用いたスリップ抑制制御による性能比較 | 28 |

| | |
|------------------------------|-----------|
| 4.2.2 急発進による性能比較 | 36 |
| 4.3 まとめ | 42 |
| 第 5 章 結論 | 43 |
| 5.1 まとめ | 43 |
| 5.2 今後の課題 | 43 |
| 謝辞 | 45 |
| 参考文献 | 46 |
| 発表文献 | 48 |
| 付 録 A C-COM2 改造について | 49 |
| A.1 全体構成 | 49 |
| A.2 電源系 | 49 |
| A.3 メインリレー用 PICBOX | 50 |
| A.4 コントロール用 PC | 52 |
| A.5 DD インホイールモータ | 52 |
| 付 録 B EVS22 試乗会報告書 | 55 |

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 電気自動車の歴史

電気自動車が初めて世の中に誕生したのは19世紀末のことである[1]。誕生したばかりの頃は、自動車生産のうち40%が電気自動車であった。しかしながら内燃機関の急速な発達とともに自動車の市場は完全に内燃機関のものとなり、それとともに電気自動車は表舞台から姿を消していった。

Table. 1.1: 電気自動車の歴史概要

| | | |
|------|------------------------------|-------|
| 1873 | R. ダビットソンにより実用電気自動車誕生 (イギリス) | 草創期 |
| 1900 | ポルシェ インホイール4輪駆動電気自動車のパリ万博展示 | |
| 1908 | フォード フォード・モデルTの発売開始 | |
| 1971 | Muskie 法の制定 (アメリカ) | 低公害化 |
| | 通産省大型プロジェクト開始 (76年終了) | |
| 1973 | 第1次オイルショック | |
| 1979 | 第2次オイルショック | |
| 1990 | ZEV 法の制定 (アメリカ カリフォルニア州) | 温暖化対策 |
| 1997 | COP3 開催 (日本 京都) | |
| | トヨタ自動車 プリウスの発売開始 | |
| 2006 | 原油価格過去最高を記録 | 実用化段階 |
| 2007 | EVS23 開催 | |

長い間姿を潜めていた電気自動車の研究が近年活発になってきているが、それまでに電気自動車は実用化に向け2度注目されたことがある。1回目はアメリカは大気汚染防止のため厳しい排気ガス規制 Muskie 法が制定し、さらにオイルショックにより石油価格が上昇した1970年代である。このとき日本において国主導の電気自動車開発プロジェクトが実施され、鉛蓄電池による電気自動車が作られた。しかしながら三元触媒の開発による排気ガスのクリーン化や電子制御化によりガソリン・エンジン車に対応可能となり1回目電気自動車の普及は失敗に終わった。

2回目はカリフォルニアにおいて ZEV 法 (Zero Emission Vehicle) が制定されたときである。ZEV 法とはカリフォルニア州で販売する自動車会社は販売する自動車の10%は有害な排気ガスをゼロにするという大変厳しいもので、当時そのような条件を満たす自動車は存在せず、各社一斉に電気自動車を開発にのりだした。これにより日本では Ni-H 電池を利用

した電気自動車が発売されることになった。また電気自動車用の電池開発のため国がリチウム電池電力貯蔵技術開発を進めこの成果を活かした車も販売されるに至った。しかしながらこの電気自動車は価格が500万円程度し、性能についても走行距離・最高速度等において内燃機関に大きく及ばず普及なかった。

また ZEV 法は自動車会社からの反発もあり規制が緩和されてきた。改正では ZEV だけではなく 10%のうち 6%を PZEV(Partial ZEV) で、2%を AT PZEV(Advanced Technology PZEV) で置き換えることができることになっている。Table1.2 に ZEV 法における自動車の分類を載せた [2][3]。

Table. 1.2: ZEV・PZEV・AT PZEV の分類分け

| 種別 | 該当車 |
|---------|---|
| ZEV | PureEV, 水素 FCEV |
| AT PZEV | HEV,CNG, 改質型 FCEV,PHEV |
| PZEV | SULEV(super ultra low emission vehicle) |

しかしながらこの流れは結果としてハイブリッド自動車の普及拡大を後押しすることとなる。1997年にトヨタ自動車がプリウスを発売することになったのはZEV法をクリアするための電池技術が大いに活かされている。発売当初アメリカではそれほど売れるとは思われていなかったプリウスだが、9・11等中東情勢の悪化に伴い石油資源の供給不足が懸念されるようになり特にセレブの間で人気が広まり、一つのライフスタイルとしてプリウスが認識をされることとなった。そして現在まだハイブリッド自動車の人気は衰えるところを知らない。

そして現在、電気自動車が市場に投入されたり PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle) の利用を本格化しようとする流れが起きているがこれは今までの電気自動車の流行とは少し異なる部分がある。今までの電気自動車は”Zero Emission”とあるように基本的に排出ガス規制に対するものであった。しかしながら今回は自動車のエネルギー源として石油資源に対する対策として位置づけられている。特に原油価格は 100 ドル/バレルを超える気配を見せており非常にリスクが高いものになりつつある。以前より多様化が図られている発電技術はこのリスク分散には必要不可欠なものである。このため日本・アメリカ共国家レベルでの電気自動車のプロジェクトが実施されている。

そして純電気自動車への道を歩んでいくのに超えなければならない問題も様々存在する。その中で一番大きなものはやはり高エネルギー密度の電池技術開発である。今までの HEV では電気モータはあくまでもガソリンエンジンの補助役であったが、PureEC においては駆動をすべて電池でおこなうため、電池がさらに自動車の燃費・コストに利いてしまう。そのため現段階の電池技術においては純電池自動車の普及は困難であり、HEV から PureEV への橋渡しとして PHEV が注目されている。特にアメリカではとても有望視されており、2007 年 12 月アメリカで開催された EVS23(Electric Vehicle Symposium) においては様々な改造された PHEV が展示された。

このように電気自動車は幾度かの興隆を経て、現在自動車業界では主たる研究部分として実用化に向けて開発が進むに至った。

1.1.2 電池技術の進化

1990 年までは二次電池で利用されているものは、ほとんど鉛蓄電池かニッケルカドミウム電池であった [4]。鉛蓄電池は 19 世紀の発明であるにもかかわらず、安定した品質・高い信頼性・経済性を持ち合わせておりエンジン始動用電池や UPS としていまだに広く使われている。ニッケルカドミウム電池も鉛蓄電池と同時期に発明されたものであり、鉛蓄電池より高価であったが軽量化しやすいこともあり小型のエレクトロニクス機器に利用されてきた。

さまざまな電化製品が小型化する中電池も小型で容量の大きな求められるようになり、1990 年にニッケル水素電池が、1991 年にはリチウムイオン電池が商品化され、ニッケルカドミウム電池に変わり小型の電化製品に利用されるようになってきた。現在ノートパソコン・携帯電話等の小型・大容量の電池が必要なものにはほとんどどちらかが使われている。

リチウムイオン電池の方が容量が大きく・メモリー効果が少ない等の利点を持っていたためニッケル水素電池は一時期出荷量を減らしていたが、リチウムイオン電池に比べ安全性が高いためトヨタ自動車や本田技研工業のハイブリッド自動車に利用されるようになり売り上げを伸ばしている。リチウムイオン電池は安全性は他の電池に比べて劣るものの、ニッケル水素電池に比べ約 2 倍のエネルギー密度を持っており様々なものに利用されその販売個数を驚異的に伸ばしている。

近年は原油高騰等を追い風にしてハイブリッド自動車の人気が高く、特に自動車業界からのニーズが高い。ハイブリッド自動車の延長線上には PHEV や PureEV があり、大容量の電池はこの先も求められ続けていくと考えられる。特に日本はハイブリッド自動車・高性能電池の技術で世界をリードしており、産官学連携して次世代電池の開発に明確なビジョンをもって取り組もうとしている (Fig.1.1)。

1.2 研究の目的

背景に述べたよう、近年環境問題や電池技術の進歩により今後自動車は電気自動車に置き換わっていくであろうことがますます現実味を帯びてきている。そして電気自動車の普及にあたり最も重要なことは蓄電システムをいかに構成するかである。

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るが、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つまっております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 [6][7]。このような理由から過酷な環境化下での使用が向かず、二次電池では電池の能力を活かしきれない可能性がある。

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。EDLC の特長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
- 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

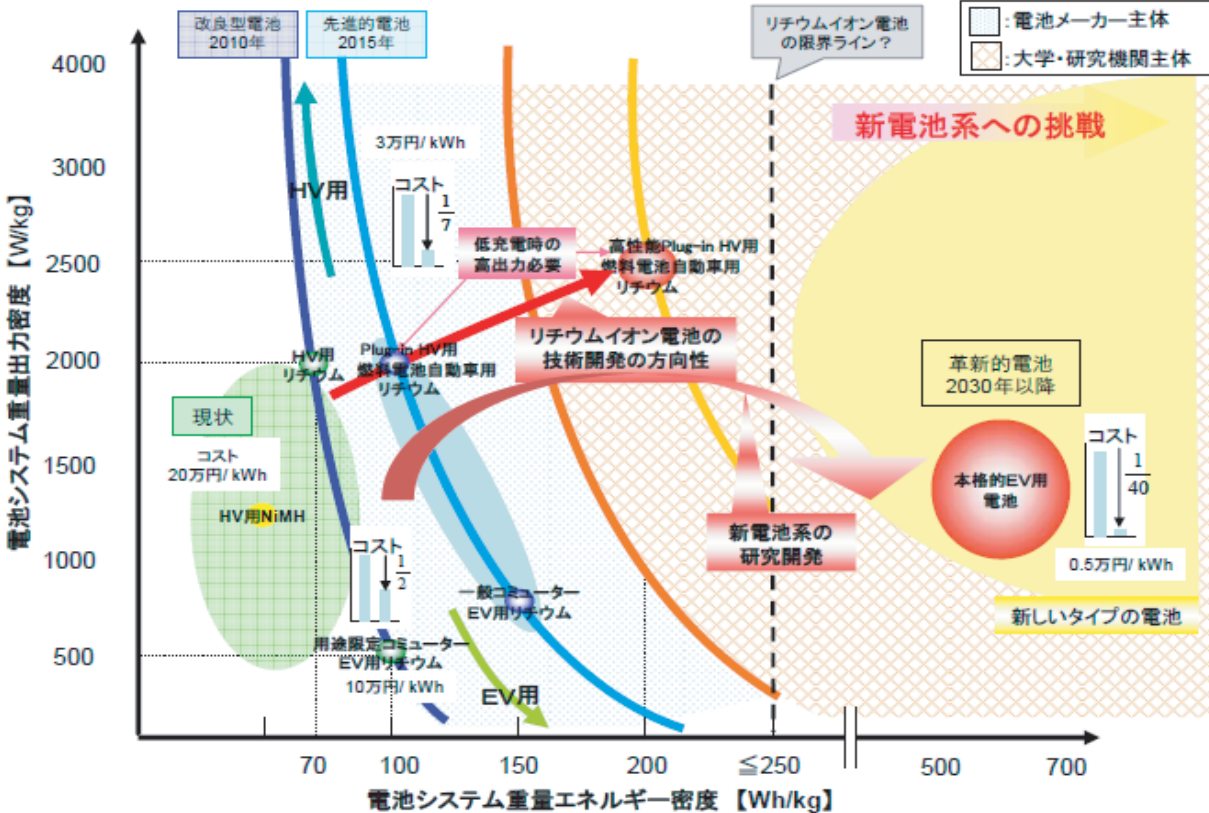


Fig. 1.1: 自動車用電池の開発の方向性 [5]

また電気自動車は内燃機関と比較したとき環境負荷が少ないだけでなく以下のような特長を持っており、電気モータならではの制御面での利点を活かすことができる。

- トルク応答が高速かつ正確である
- 出力トルクの大きさが正確に把握できる
- モータを各輪に分散配置できる

本論文ではこれら EDLC と電気自動車を組み合わせた電気自動車の可能性について検討する。まず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し、燃費に換算することでエネルギー分析を行った。また駆動モータを DD モータに取替え高性能制御を可能とし、走行実験によって EDLC と二次電池を比較することで、EDLC が車両運動制御上でも有用性を持つことを検証している。

1.3 本論文の構成

本章では、電気自動車の歴史・電池技術の進化について説明しこれからの電気自動車の方向性についてまとめた。第 2 章では、EDLC の特長を説明しその有用性についてまとめた。第 3 章では、EDLC・鉛蓄電池単独で駆動する小型電気自動車での 10-15 モードでの走行によりその燃費を、また制動時の回生エネルギーの比較によりエネルギー的分析を行った。第 4 章では、さらに駆動モータを DD モータに取り替え EDLC と鉛蓄電池による運動制御の比較検討を行った。最後に第 5 章では、本論文の結論と今後の課題を述べる。

第2章 電気二重層キャパシタとは

2.1 電気二重層キャパシタの構造と特長

2.1.1 電気二重層キャパシタの原理

電気二重層は 1897 年に Helmholtz が発見した現象であり、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。電気化学系に電流が通過するとき、左右の電極系では誘電分極または化学変化が起こるが、このうち誘電分極が起きているものの典型例が電気二重層キャパシタである [8]。この誘電分極による誘電性界面が両電極近傍に 2 つ存在しこのことを電気二重層といっており、全体が誘電分極しているわけではない。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であり、電極として多孔質の活性炭を用いることで表面積を稼ぐことで静電容量を飛躍的に向上させたキャパシタである。構造を Fig.2.1 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・放電を行っている。

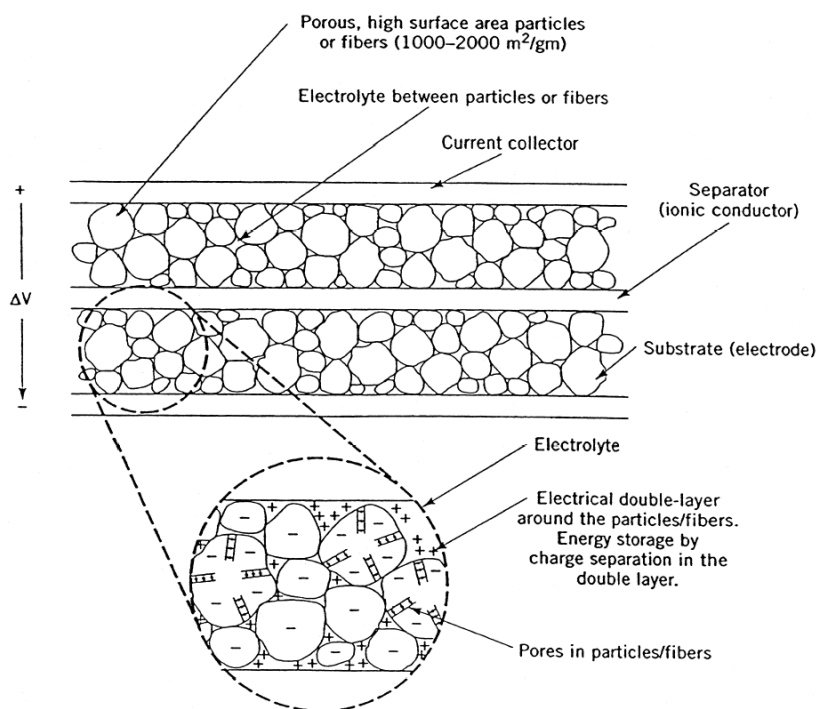


Fig. 2.1: 電気二重層キャパシタの構造 [9]

2.1.2 電気二重層キャパシタと二次電池との比較

電気二重層キャパシタは二次電池と比較すると、次のような特長を持っている。

- 高速充放電可能：内部抵抗が小さいため電流が大きくても損失が小さく、大電流で充放電を高効率で行える。充電時間を短くする等、充電方法が自由に選べる。
- 長寿命：電気エネルギーを化学エネルギーに変換することなく、物理的に蓄えるため劣化をすることもなく、メモリー効果などもない。その分、自然放電が多いと言われるが高速に充電できるため必要な時に充電すればよい。
- 残存容量が分かる：二次電池はそれ自体が電位をっており、電圧変動が小さく残存容量が分かりにくいいため、電圧深度を深くできない。それに対し、電気二重層キャパシタは電圧がそのまま残存容量を表しており電圧深度を深く利用することができる。
- 環境に優しい：活性炭と有機電解液から構成され原料はどこにでも存在し、二次電池のように重金属を使うこともないため環境負荷が小さい。

このように電気二重層キャパシタは様々な特長をっており、様々な利用法が存在する。

蓄電装置を評価するうえで大切な指標としてエネルギー密度とパワー密度が存在する。

Fig.2.2 に電気二重層キャパシタと二次電池を比較したグラフを載せた。電気二重層キャパシタはエネルギー密度では二次電池には及ばないものの、パワー密度が二次電池と比較して大きく大きな負荷に対応することができる。近年ではナノゲートキャパシタと呼ばれるものが開発され、研究段階では 50[Wh/kg] のものも存在しており二次電池と同じレベルで利用できる可能性がある [11]。

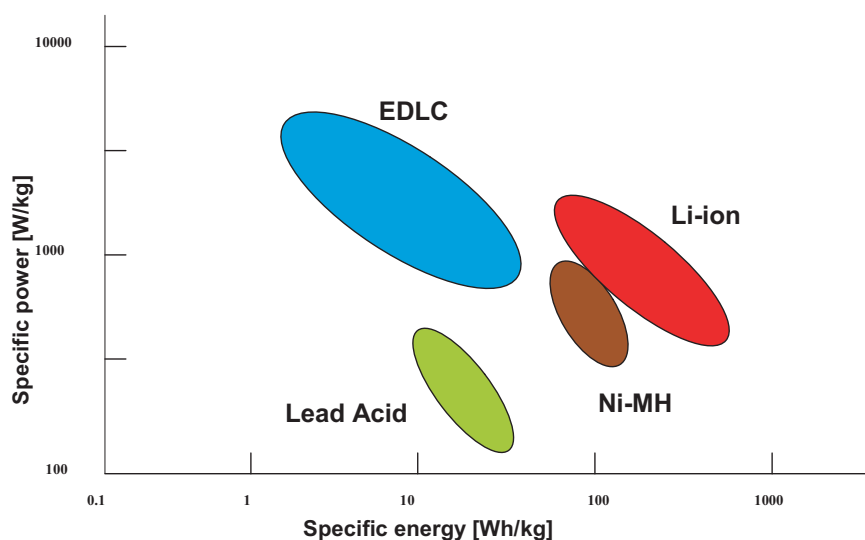


Fig. 2.2: エネルギー密度とパワー密度

まだ数がでていないのでコスト高であるが原材料は確保が容易なため広く普及すれば安くなると思われる。またショートしても壊れない、火に入れても爆発しない等、二次電池に比べると安全な蓄電装置である。

2.2 電気二重層キャパシタの等価モデル

電気二重層キャパシタの分極性電極は Fig.2.3 のように表すことができ、一種の分布定数回路で抵抗とキャパシタがいくつかつながったものとして近似することができる [12]。3,4 段程度の近似で実用上は問題ない程度の精度をえることができる。

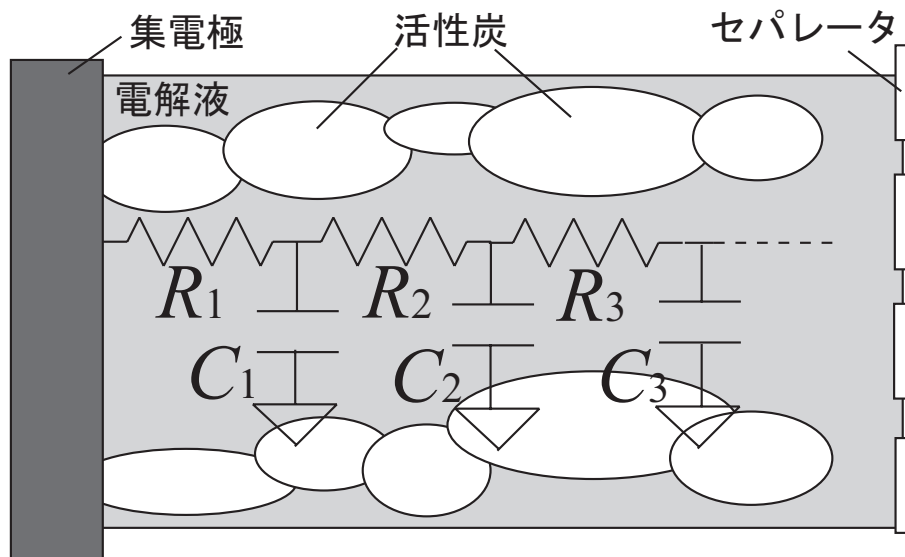


Fig. 2.3: 電気二重層キャパシタの等価回路

一般に電気二重層キャパシタの自己放電がこのことと大きく関係している。Fig2.4 に充電時間と自己放電の関係を載せたがこれは充電時間が短いと先ほど説明した回路の外側にしか充電されず、充電が終わったあとさらに内側のキャパシタに充電するという自己充電と表現される現象がおきている。このため、ゆっくり充電すればそれだけ最初から内側まで充電され自己放電がほとんどおきない。

2.3 電気二重層キャパシタの特性

2.3.1 充放電時間と効率

電気二重層キャパシタは電圧が変動するため充放電の効率が特徴的である。電気二重層キャパシタを充電するとき、入るエネルギーは $1/2 CV^2$ なので効率が 50% と勘違いされる場合があるが、これは定電圧充電をした場合であり電気二重層キャパシタの充電法として適切ではない。電気二重層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 [13]。電気二重層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

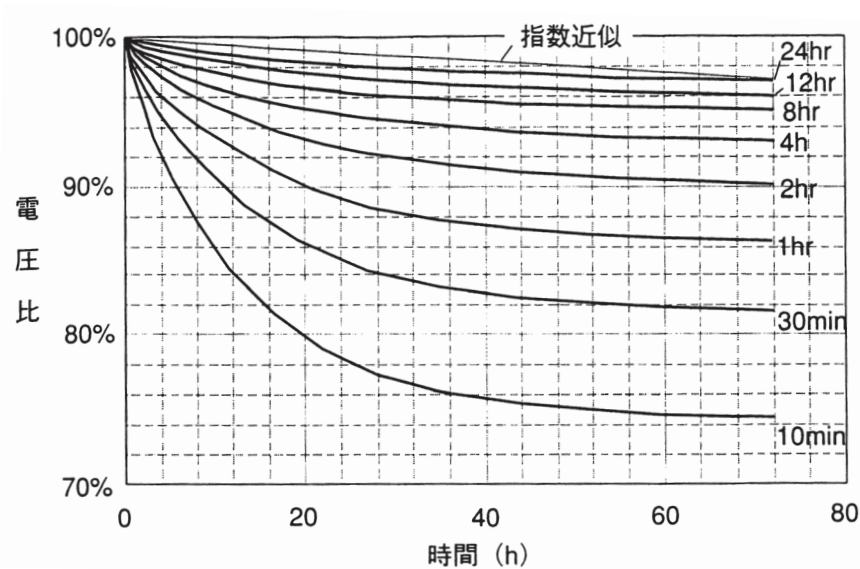


Fig. 2.4: 充電時間と自己放電の関係 [13]

P_R は、

$$U = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} \quad (2.1)$$

$$P_R = I^2 R \cdot t = R \cdot \frac{Q^2}{t} \quad (2.2)$$

とあらわされるので、充電時の率 E_{charge} は、

$$E_{charge} = \frac{U}{U + P_R} = \frac{t}{t + 2RC} \quad (2.3)$$

となり、放電効率 $E_{discharge}$ は、

$$E_{discharge} = \frac{U - P_R}{U} = 1 - \frac{2RC}{t} \quad (2.4)$$

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.2.5 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。

2.3.2 出力密度と効率

キャパシタの特性を表す重要なパラメータとして出力密度がありその定義方法はいくつが存在する。その中で主要なものは、

- マッチトインピーダンス法
- ラゴーニ・プロットによる方法

があげられる。この二つを比べることでキャパシタの出力密度と効率について考える。

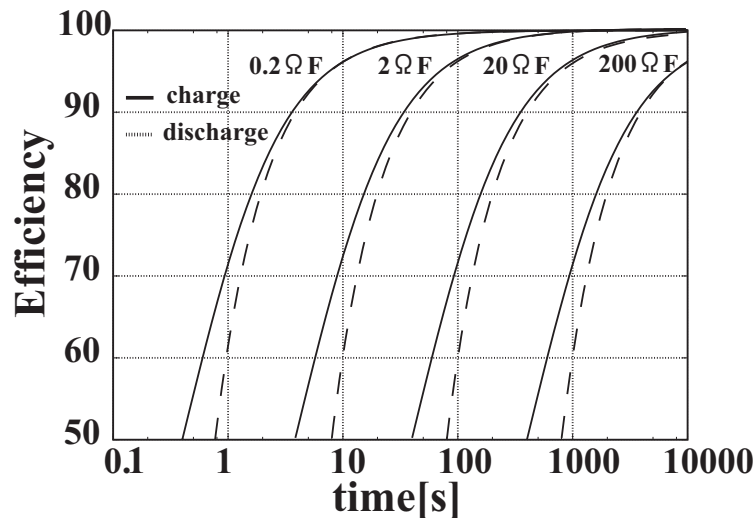


Fig. 2.5: 充放電時効率 [13]

マッチトインピーダンス法

マッチトインピーダンス法の出力密度の基準は「最大出力点”Matched Impedance Point”」である。Fig.2.6 のような回路では、 $R_i = R_l$ の時最大出力 P が式 (2.5) のように表せる。

$$P = V^2 / 4R_i \quad (2.5)$$

この条件下では起電力の半分は内部抵抗で消費されてしまうため負荷に取り出せる電力はキャパシタに蓄えられた電力の半分になってしまう。つまり効率は 50% ということになる。さらにこの状態では内部抵抗がエネルギー消費をするため温度が上昇し、電池では内部抵抗の上昇により、キャパシタは急放電による電圧低下によりこの状態を保つことはできない。そのためこの出力は単なる理論上の最大出力であり、実際にはこの出力では利用することはできない。

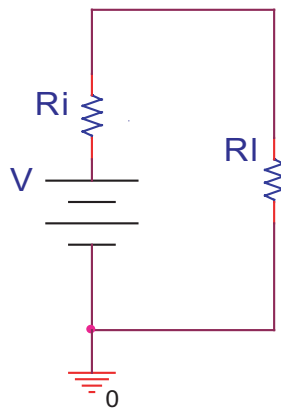


Fig. 2.6: マッチトインピーダンス法

ラゴーニ・プロットによる方法

エネルギー密度と出力密度の関係をプロットできるラゴーニ・プロットを用いると放電効率 50% 以外の点でのエネルギー密度と出力密度の関係得られる。

Fig.2.7 のような、静電容量 C ・内部抵抗 R ・定電力負荷 W の回路においてキャパシタの電圧 $e(t)$ が半分になるまでの時エネルギー密度と出力密度がどのようになるかを考える。ただしキャパシタの初期電圧 e_0 はキャパシタの最大定格値、またキャパシタの静電容量と内部抵抗はあらかじめ分かっているものとする。

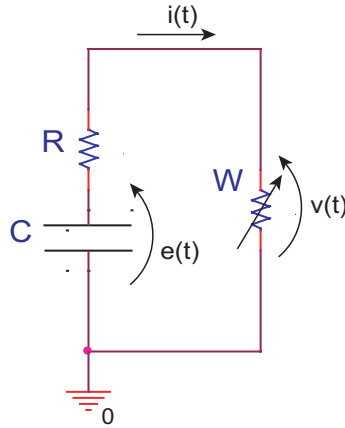


Fig. 2.7: ラゴーン・プロットによる方法

これらから下のような関係式が得られる。

$$W = i(t) \cdot v(t) \quad (2.6)$$

$$e(t) = R \cdot i(t) + v(t) \quad (2.7)$$

$$q(t) = C \cdot e(t) \quad (2.8)$$

$$i(t) = -\frac{dq(t)}{dt} \quad (2.9)$$

またこの関係式から放電終了時までの時間 t は、

$$t = \frac{C}{2W}(v_0^2 - v^2(t)) + CR \ln \frac{v(t)}{v_0} \quad (2.10)$$

$$v(t) = \frac{e(t) + \sqrt{e^2(t) - 4RW}}{2} \quad (2.11)$$

これよりキャパシタが放電したエネルギー W_C ・負荷がした仕事 W_L ・効率 E が下のよう
に計算できる。

$$W_C = \frac{1}{2}C e_0^2 - \frac{1}{2}C \left(\frac{e_0}{2}\right)^2 = \frac{3}{4}C e_0^2 \quad (2.12)$$

$$W_L = W \cdot t \quad (2.13)$$

$$E = \frac{W_L}{W_C} \times 100 \quad (2.14)$$

次に、実際に C-COMS2 が使っているもののエネルギー密度と出力密度がどのようなものになるか代入する。ここでは、 $C = 110[\text{F}]$, $R = 22[\text{m}\Omega]$, $e_0 = 97.2[\text{V}]$ とした。

Fig.2.8,2.9 に関係をグラフに表した。このとき効率 50% となっているのがマッチとインピーダンス法によって求められた値である。

定電力負荷抵抗つまり出力密度が大きくなるにつれ内部抵抗で消費される電力が多くなるため効率が低くなっておりこのように効率から適切な出力密度が計算できることが分かる。

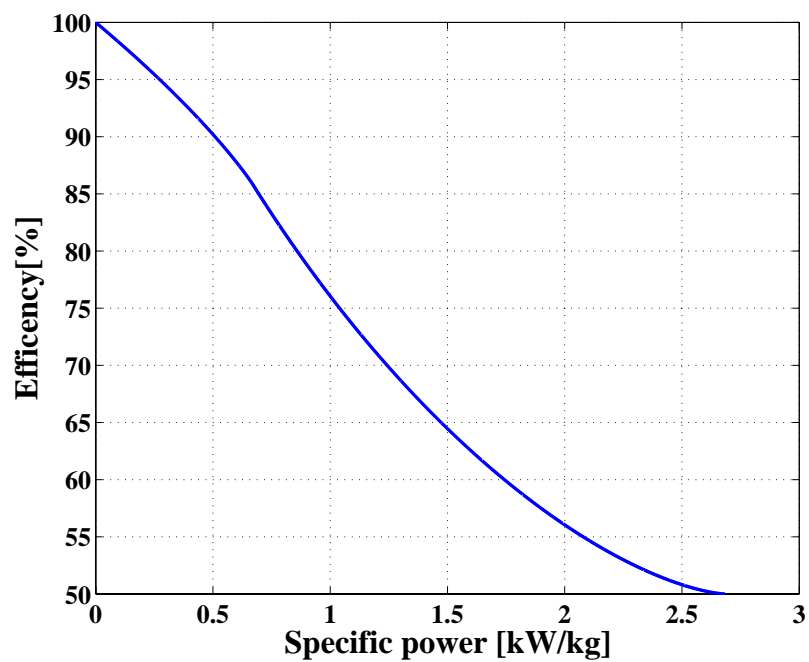


Fig. 2.8: 出力密度と効率

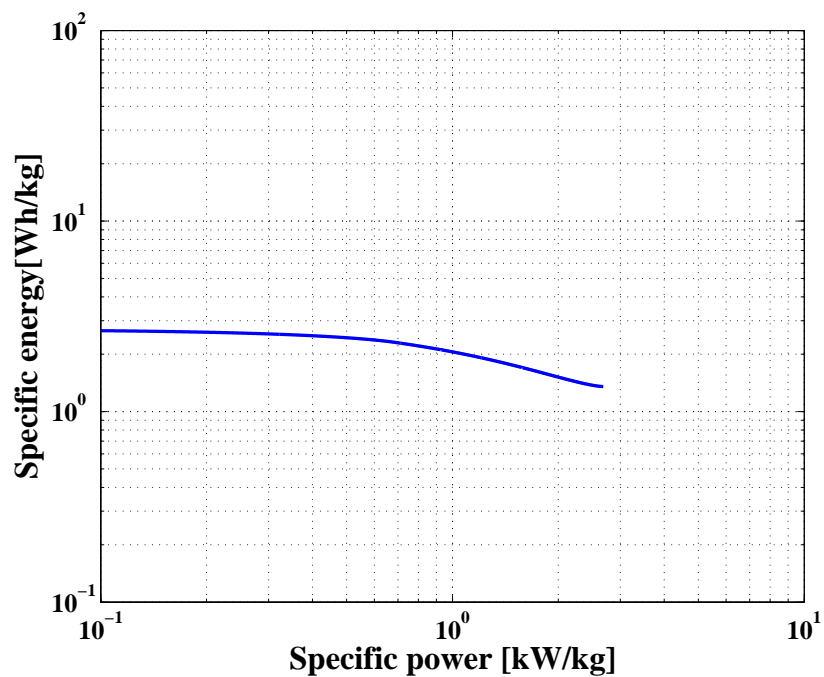


Fig. 2.9: ラゴーニ・プロット

第3章 電気二重層キャパシタとDDモータを搭載した電気自動車 C-COMS2を用いたエネルギー分析

3.1 実験車 C-COMS2 の製作とその構成

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を製作した。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 (Fig.3.1) 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 (Table3.1) を 6 並列にして 72V で利用している。



Fig. 3.1: Capacitor-COMS2

この車の鉛蓄電池をパワースystem製電気二重層キャパシタ (Table3.2) 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。

Table3.3 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電気二重層キャパシタのほうが

Table. 3.1: 電気自動車用鉛蓄電池諸元 (EC-FV1260)

| | |
|---------------|--------------------|
| 公称電圧 | 12V |
| 公称容量 | 60Ah |
| 容量 (25℃, 20A) | 52Ah |
| 重量 | 21kg |
| 容積 | 7.88l |
| 内部抵抗 | 3.5mΩ(full charge) |

Table. 3.2: 電気二重層キャパシタ諸元

| | |
|------|-------|
| 電圧 | 32.4V |
| 定格電流 | 60A |
| 容量 | 110F |
| 蓄電容量 | 16Wh |
| 重量 | 4.4kg |
| 容積 | 4.91l |
| 内部抵抗 | 22mΩ |

Table. 3.3: 搭載する電気二重層キャパシタと鉛蓄電池の比較

| | 鉛蓄電池 (6S) | 電気二重層キャパシタ (3S3P) | ratio |
|---------|-----------|-------------------|-------|
| 電圧 | 72V | 97.2V | 0.74 |
| 蓄電容量 | 3744Wh | 144Wh | 26 |
| 重量 | 130kg | 40kg | 3.25 |
| 車両重量 | 350kg | 260kg | 1.35 |
| 容積 | 47.3l | 44.2l | 1.07 |
| 内部抵抗 | 21mΩ | 22mΩ | 0.96 |
| 一充電走行距離 | 45km | 2.5km | 18 |
| 充電時間 | 13h | 60s | 1/780 |

780 倍も速い。これは同じ電力量だと電気二重層キャパシタの方が 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。

一充電走行距離は電気二重層キャパシタと同じ電力量だとすると鉛蓄電池は 1.73[km] となり電気二重層キャパシタの 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、電気二重層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。

実験に使う車体の構成を Fig.3.2 に示す。電気二重層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。また電気二重層キャパシタと鉛蓄電池での比較ができるよう車体には両方の蓄電装置を搭載させている。

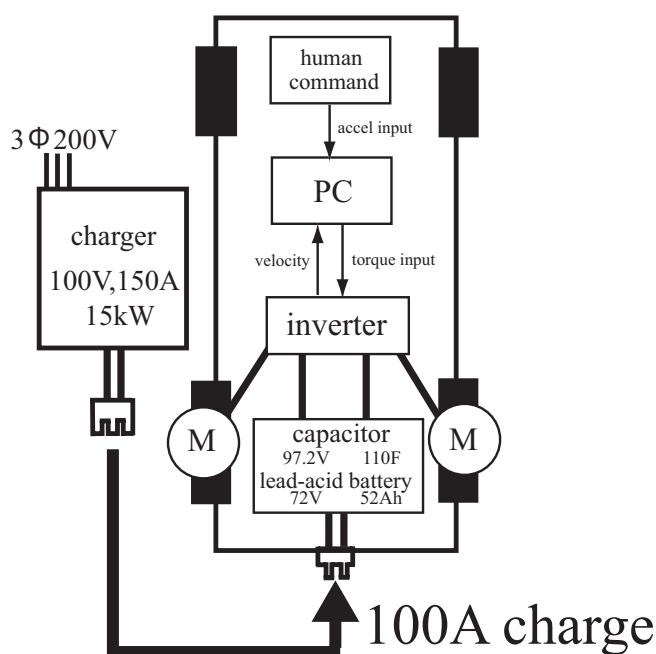


Fig. 3.2: Capacitor-COMS2 の構成

さらにモータを新たに DD モータにし、インバータも取替え、新たな制御 PC を搭載し 1[ms] の周期で左右独立でトルク入力ができるようにした。Fig.3.3 にシステムの図を載せた。詳細については付録に載せたが、制御用 PC は ART-Linux を利用することで確実に 1[ms] 以内にトルク入力値の計算を完了させトルク入力を実行できるようにしている。

3.2 搭載キャパシタ基礎特性の測定

3.2.1 充電電流・電圧による内部抵抗の変化

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。

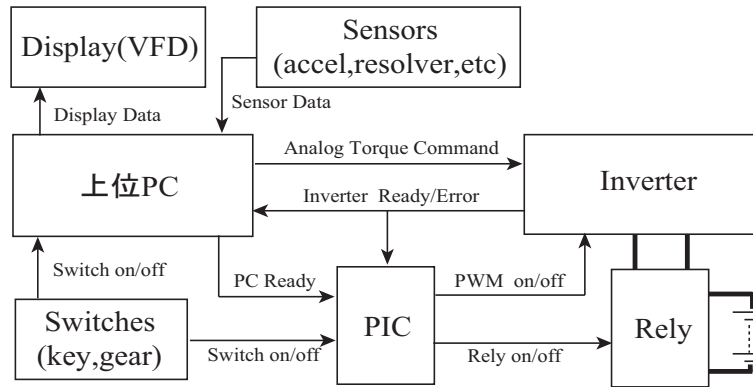


Fig. 3.3: C-COMS2 制御システム構成

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。特に Fig.3.4 のような回路においては、

$$\frac{V}{I} = R + \frac{t}{C} \quad (3.1)$$

とあらわせるため、内部抵抗は定電流充電開始時の V/I を計算することで求めることが可能である。

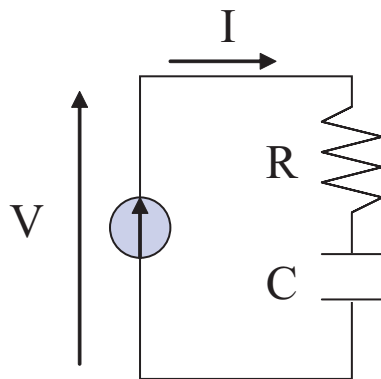


Fig. 3.4: キャパシタ内部抵抗モデル

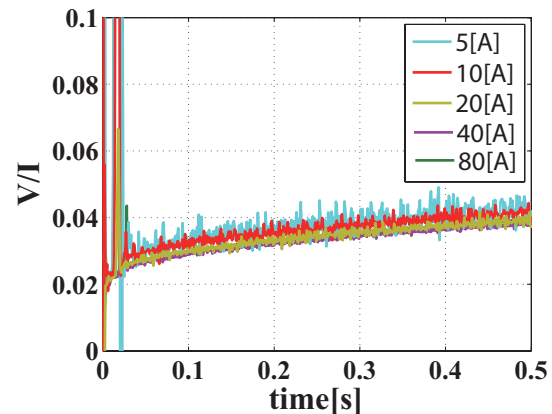

Fig. 3.5: 充電電流を変化させたときの V/I

Fig.3.5 に V/I の変化を充電電流を変化させることで比較したグラフを載せた。これより充電電流による内部抵抗の変化を Table3.4 に載せた。

Table. 3.4: 充電電流による内部抵抗の変化

| 充電電流 [A] | 25 | 50 | 75 | 100 |
|-----------|------|------|------|------|
| 内部抵抗 [mΩ] | 29.8 | 29.3 | 30.7 | 32.7 |

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 Fig.3.6 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。

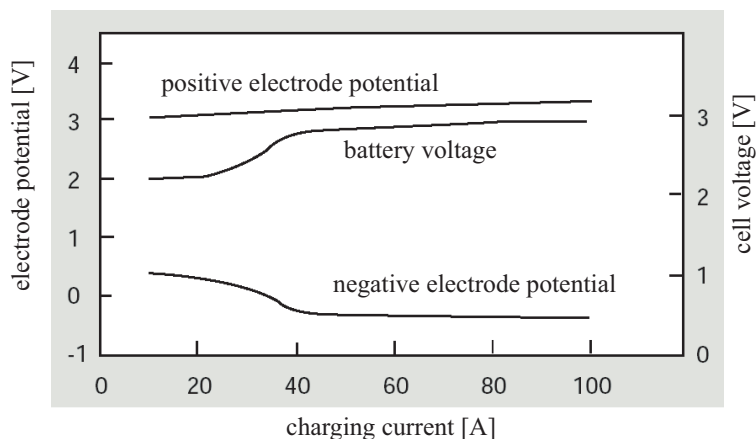


Fig. 3.6: 充電電流と電池電圧、および正・負極電位の関係 [15]

3.2.2 充電電流・電圧による静電容量の変化

微分法による静電容量の算出

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。ここではまず充放電カーブの勾配から測定できる電圧微分法を使った場合について調べる [14]。

電圧微分法において静電容量は $C = I \cdot \Delta t / \Delta V$ [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。100[A] 実験時の電圧・電流を Fig.3.7 に示す。

電圧によって静電容量が変化する様子を Fig.3.8 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より多くのエネルギーをためられることを示しているようにみえるが、これはキャパシタの等価回路が単純にコンデンサー一つに表せた場合になるので実際に利用するものとしては不適格である。

エネルギー換算法による静電容量の算出

キャパシタに蓄えられるエネルギー量を測定して、その値から等価な静電容量を算出することで任意の用途で利用可能な静電容量が算出できるエネルギー換算法を使った場合について調べる [14]。

この方法では、 W を全充電エネルギーとすると以下のようにして算出できる。

$$C = \frac{2W}{V^2} \quad (3.2)$$

このときの充電電流を変化させたときの静電容量を Table 3.5 に載せた。これにより充電電流により若干の減少がみられるがこれは内部抵抗によるものと考えられるので静電容量自体はほぼ一定であると考えてよい。またカタログ値は 110[F] であるので値が小さくなっているが、これは急速充電をしていたため電気二重層キャパシタの等価回路から分かるよ

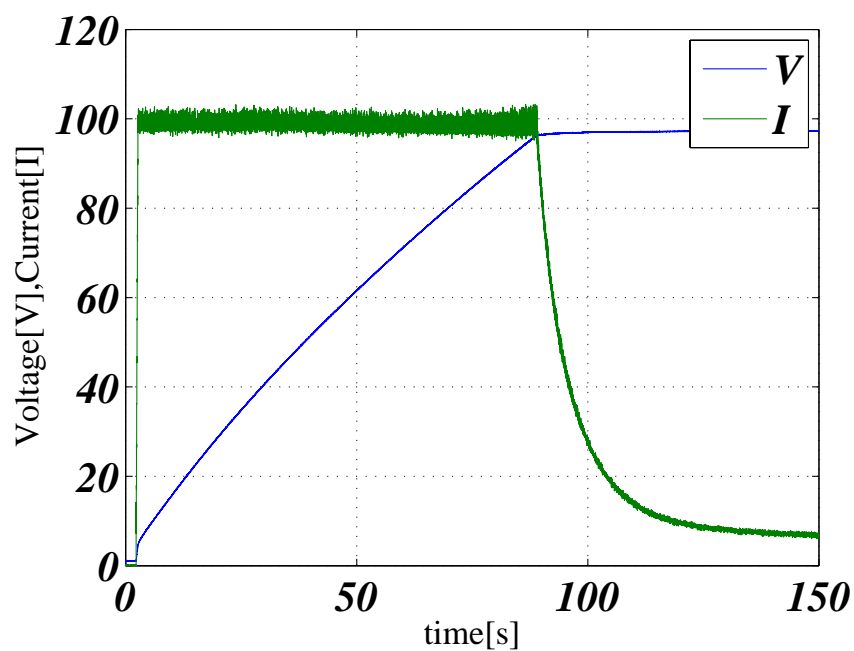


Fig. 3.7: EDLC 充電時の電池電圧及び充電電流

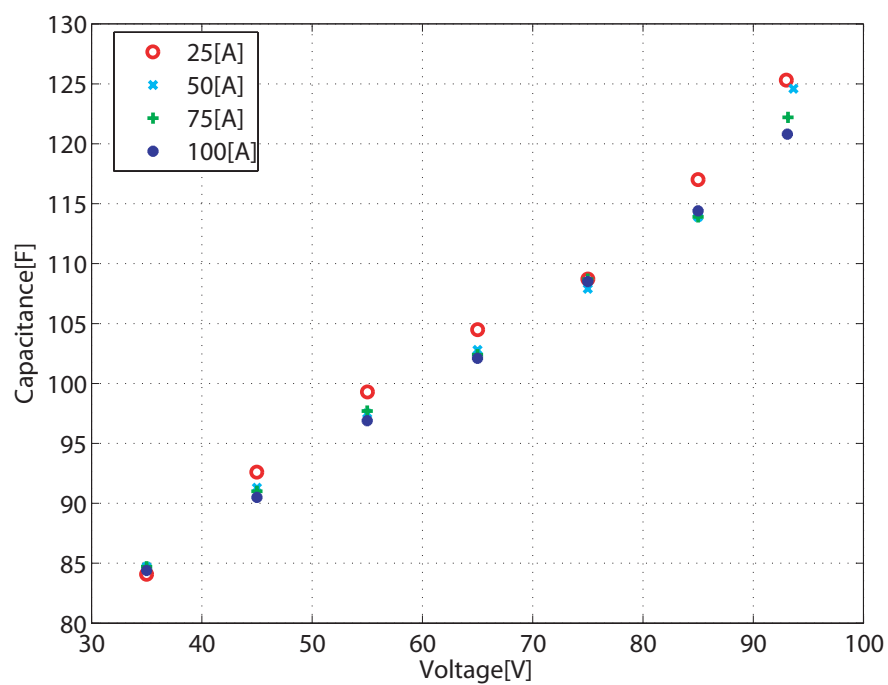


Fig. 3.8: 充電電流及び電池電圧による静電容量の変化

うに、奥のコンデンサまで充電しきれていなかったためである。以後の実験では高電流において急速充電をしたあと、ある程度の定電圧充電をおこない奥のコンデンサまで充電するようにしたので $C = 110[\text{F}]$ を使うことにする。

Table. 3.5: 充電電流による静電容量の変化

| | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 充電電流 [A] | 25 | 50 | 75 | 100 |
| 静電容量 [F] | 103.7 | 102.7 | 102.8 | 101.8 |

3.3 電流を変化することによる充放電効率の比較

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 W_c 、キャパシタに蓄えられたエネルギー U は、

$$W_c = \int_0^t V(t) \cdot I(t) dt \quad (3.3)$$

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.4)$$

であるので充電効率 E_{charge} は、

$$E_{charge} = \frac{U}{W_c} \quad (3.5)$$

と定義できる。

効率を求めるため実験では $I = 25, 50, 75, 100[\text{A}]$ で定電流充電を行った。Table3.6 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 $C = 105[\text{F}]$ として計算した。充電電流が $100[\text{A}]$ 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. 3.6: 充電電流と電池の効率の関係

| | | | | |
|----------|------|------|------|------|
| 充電電流 [A] | 25 | 50 | 75 | 100 |
| 効率 [%] | 98.4 | 96.4 | 97.5 | 94.8 |

次は放電効率を求める。放電実験の電圧・電流を Fig.3.9 に示す。

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

$$Q_d = \int_0^t V(t) \cdot I(t) dt = 480[\text{kJ}] \quad (3.6)$$

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = 517.7[\text{kJ}] \quad (3.7)$$

であり、放電効率 $E_{discharge}$ は、

$$E_{discharge} = \frac{W_d}{U} = 92.4\% \quad (3.8)$$

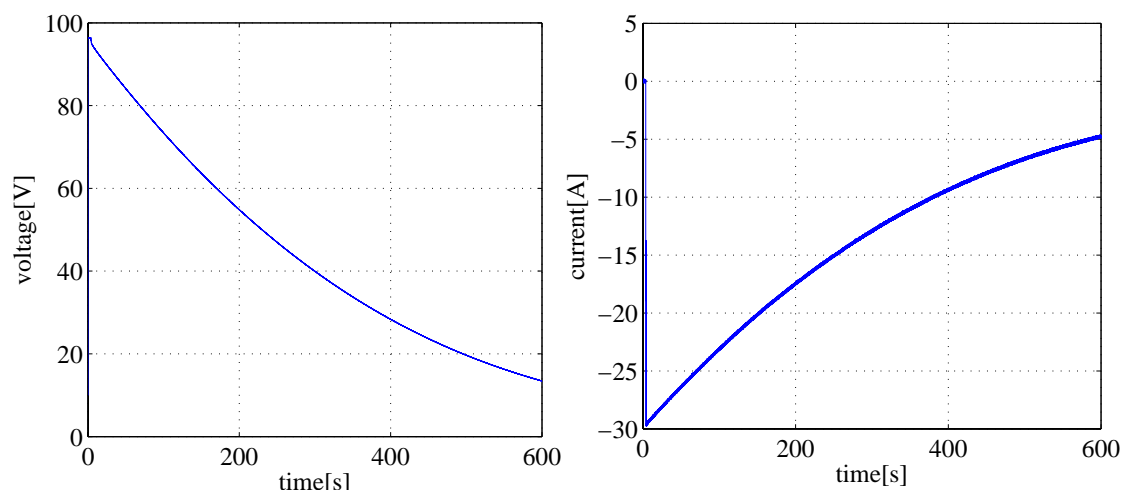


Fig. 3.9: 放電時の電池電圧と放電電流の関係

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[16]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。

3.4 実験車 C-COMS2 を用いたエネルギー分析

3.4.1 10-15 モード適用時の総合効率

前節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ビ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 (Fig.3.10) 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.3.11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ので車量重量は450[kg]となっている。

ここで燃費を求めようとすると電力量が必要となるので Fig.3.12 に時間ごとの電力量を

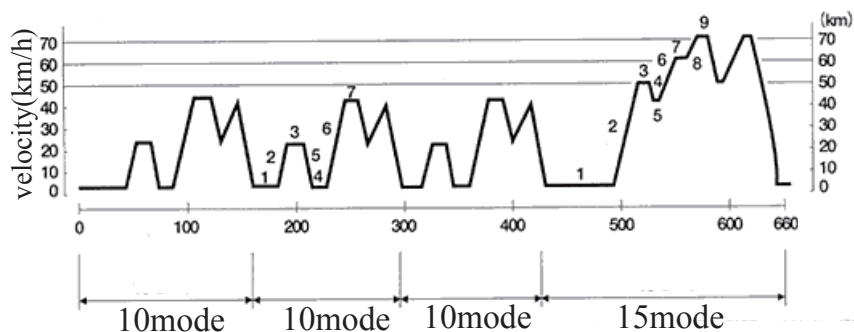


Fig. 3.10: 10-15 モード

算出した。ここから 1.65[km] 走るのに 420[kJ] 必要だったことが分かる。これは、キャパシタ・鉛蓄電池もほぼ同じであった。よって燃費は、

$$E = \frac{1.65 \times 3600}{420} = 14.1[\text{km/kWh}] \quad (3.9)$$

となる。

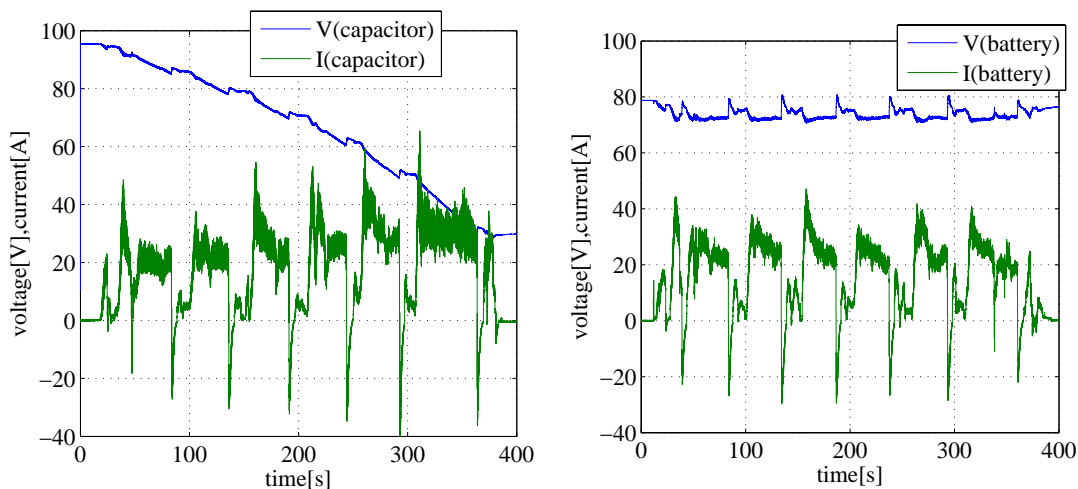


Fig. 3.11: 10 モード走行時の電気自動車の電池電圧と電流

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.3.13 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。

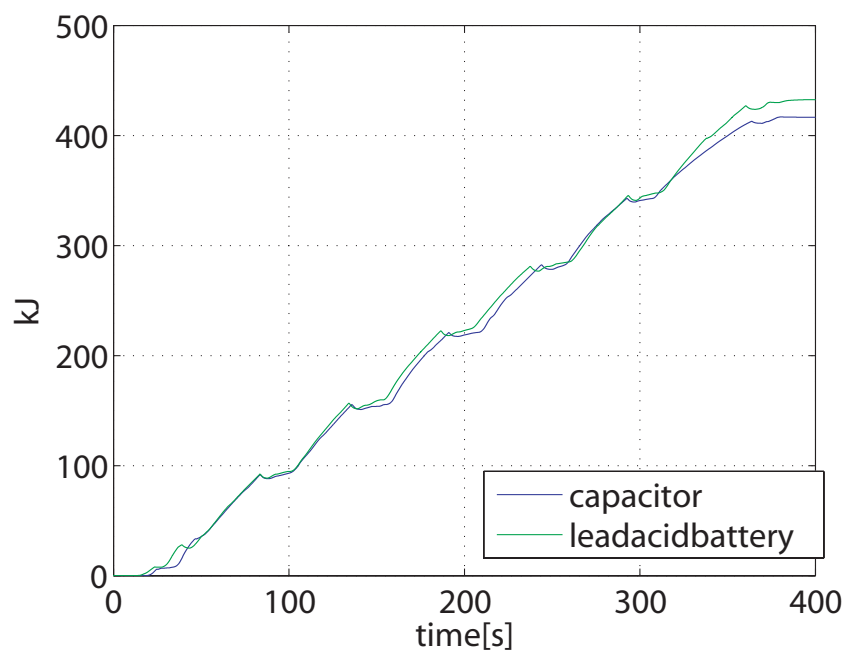


Fig. 3.12: 10 モード走行時の電気自動車の消費電力量

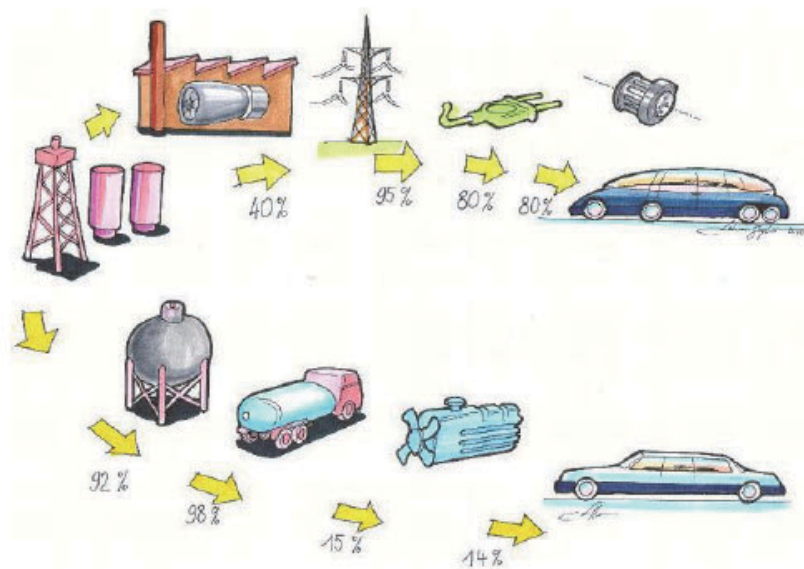


Fig. 3.13: エネルギーの流れ [17]

原油は 1l で 38.2[MJ] の発熱をするので、式 (3.10) によって燃費が得られる。

$$\begin{aligned}
 A[\text{km/kWh}] &= A/3.6[\text{km/MJ}] \\
 &= A/3.6 \times 38.2 \times 0.32[\text{km/原油 1l}] \\
 &= A/3.6 \times 38.2 \times 0.32 \div 0.9[\text{km/l}] \\
 &= 3.70 \times A[\text{km/l}]
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

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.3.14 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] 時には Table3.7 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。

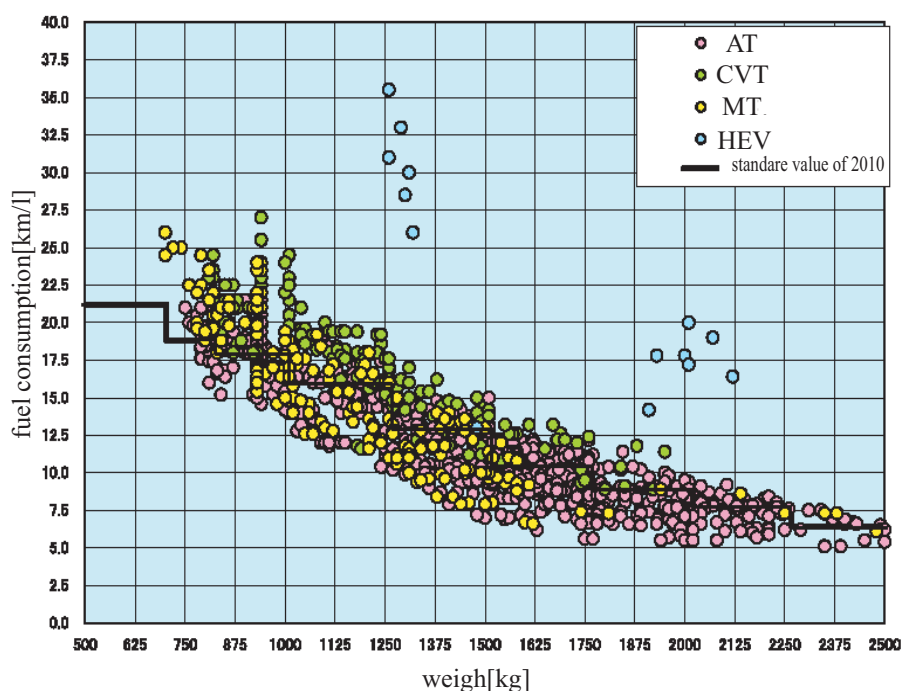


Fig. 3.14: 自動車の燃費 [18]

Table. 3.7: 燃費 (weight 450kg)

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

3.4.2 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・鉛蓄電池の差がでるであろう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。Fig.3.15,3.16 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 1.5[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なのでこの電圧上昇の原因は内部抵抗がエネルギーの消費していると考えられることにする。

この電圧上昇は内部抵抗によるものと仮定したとき、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_l を式 (3.11) と求めることができる。

$$W_l = \int (V(t) - V_{terminate}) I(t) dt \quad (3.11)$$

鉛蓄電池の場合は $W_l = 175[\text{J}]$ 、キャパシタの場合は $W_l = 25[\text{J}]$ となる。

一回の回生で約 6[kJ] のエネルギーを回生できるので鉛蓄電池は 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。

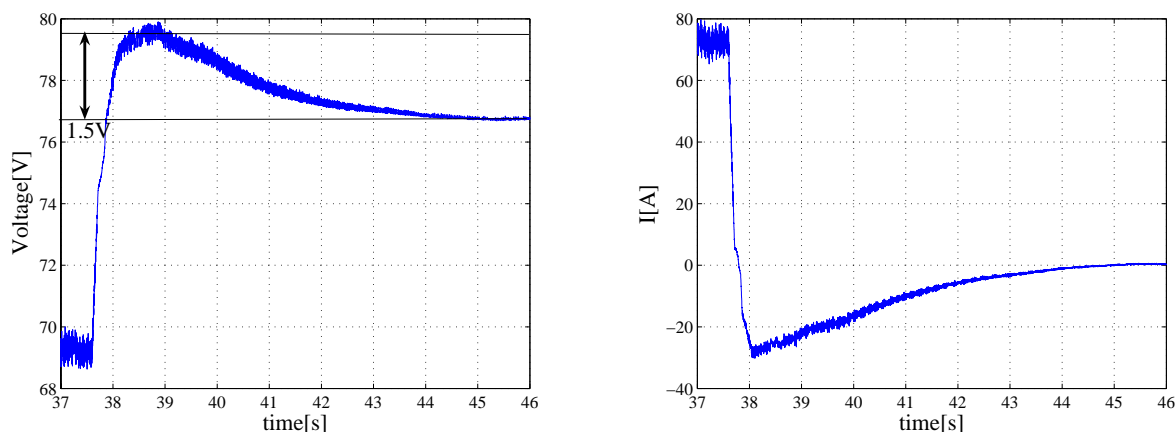


Fig. 3.15: 回生時鉛蓄電池の電池電圧と電流

3.5 まとめ

この章では、電気二重層キャパシタを搭載した新たな小型電気自動車を製作し、搭載された電気二重層キャパシタの充電・放電時における内部抵抗・静電容量・効率について調

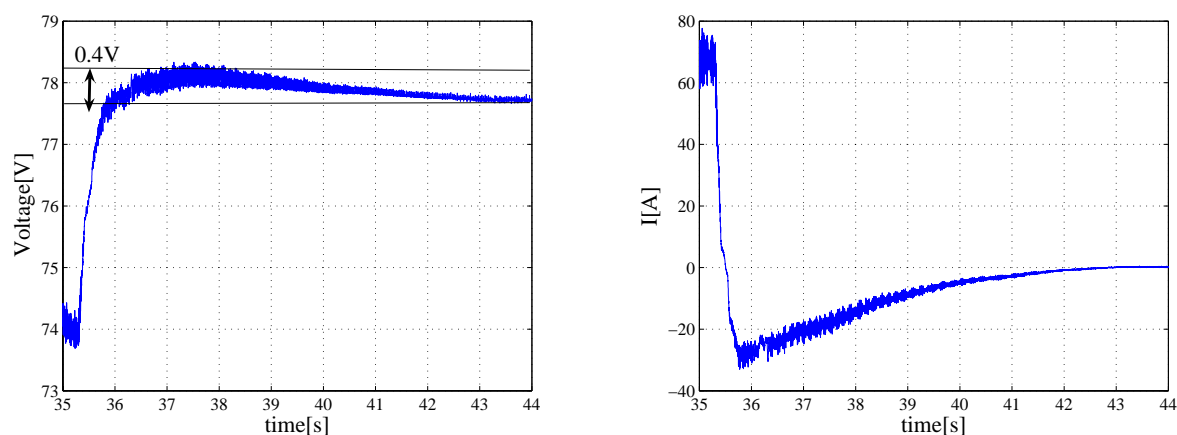


Fig. 3.16: 回生時電気二重層キャパシタの電池電圧と電流

べた。それにより電気二重層キャパシタは100[A] 程度の大電流においても90%以上の高効率であることが分かった。

さらに製作した電気自動車で、内燃機関の燃費の基準となる10-15モード走行を行い石油換算にすることでその計算上の燃費を算出し内燃機関と比較できるようにした。これより電気二重層キャパシタによる燃費は50[km/l]を超えているおり重量が同じような内燃機関の自動車よりも効率がよいことが分かった。

また鉛蓄電池による電気自動車と比較すると充放電効率がそのまま燃費として表れるためそれがそのまま差に表れている。特に鉛蓄電池は回生エネルギーを吸収する場合には電圧が急上昇してしまう可能性のあるため回生時には大電流は入れることができない。このように電気自動車の蓄電装置の充放電効率は非常に大切な要素であることが分かる。

第4章 電気二重層キャパシタとDDモータを搭載した電気自動車 C-COMS2を用いた運動制御における実験的検討

4.1 電気自動車による運動制御

4.1.1 電気自動車の運動制御の利点

電気自動車は内燃機関と比べると以下のような利点を持っている。

- トルク応答が高速かつ正確：電気モータのトルク応答速度は 1[ms] 程度であるのに対して、内燃機関は 100[ms] 程度である。このためより高速で高度な制御が可能である。
- 出力トルクの大きさが正確に分かる：トルクの大きさが正確に分かることにより、タイヤと路面の間に生じる駆動力、制動力の推定がリアルタイムで可能になり路面状態を考慮した、全く新しい制御が実現できる。
- モータを各輪に分散配置可能：モータの小型化、分散化により各タイヤのトルクを自由に制御できるので、車体すべりやヨーレートを制御する二次元制御が容易に実現できる。

前章までは電気自動車を電気二重層キャパシタで駆動することで、エネルギー的観点から検討を行ったがここからは電気自動車に特有の制御性を利用した運動制御について検討を行う。

4.1.2 電気自動車の一次元運動モデル

車両の運動を考えると、タイヤ一輪を取り出して考えたものが車体の一輪モデルである。そのモデルを Fig.4.1 に示した。 M は車両重量、 V は車体速度、 V_w は車輪速度、 F_d はタイヤから路面に伝わる力、 N は垂直抗力をあらわしている。

この一輪モデルにおける車両の運動方程式・タイヤの回転の運動方程式は、

$$M \frac{dV}{dt} = F_d(\lambda) - F_a \quad (4.1)$$

$$M_w \frac{dV_w}{dt} = F_m - F_d(\lambda) \quad (4.2)$$

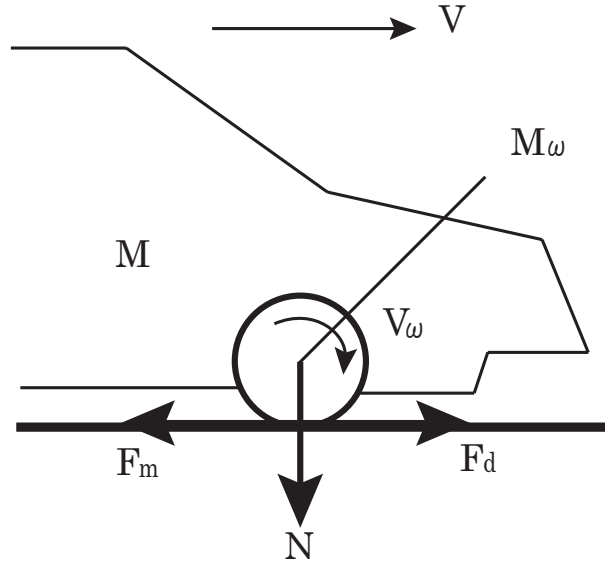


Fig. 4.1: 車両の一輪モデル

のようにあらわせる。ただし、 M_ω はタイヤと付随する回転部を合わせた部分の慣性の質量換算値、 F_a は車体に対する空気抵抗をあらわしているとする。

ここで F_d は λ の関数としているが、 λ とはスリップ率のことで式 (4.3)(4.4) と定義されている。

$$\lambda = \frac{V_\omega - V}{V_\omega} : (V_\omega > V) \quad (4.3)$$

$$\lambda = -\frac{V - V_\omega}{V} : (V > V_\omega) \quad (4.4)$$

スリップ率とは、ある車両の対地重心速度 V とその車両の車輪回転速度 V_ω の比をあらわして、タイヤの空転や粘着について考えるときによく用いられる。

次にスリップ率 λ と摩擦係数 μ の関係をあらわす $\mu - \lambda$ 曲線について考える。この関係の数式モデルとしては Magic Formula などいくつかのモデルが存在する [19]。ここでは式 (4.5)(4.6) とした。

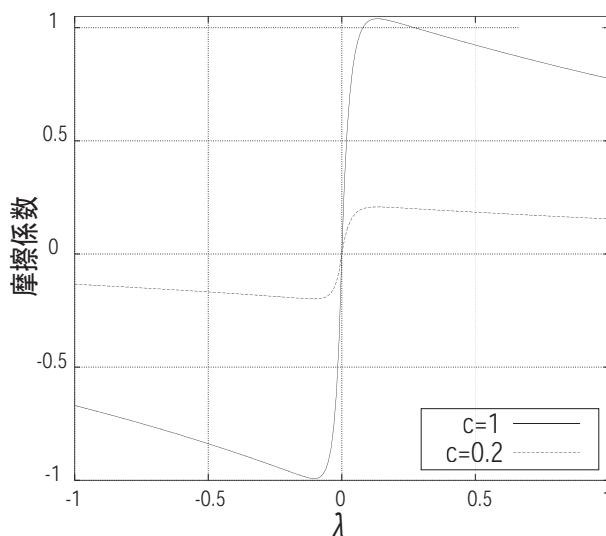
$$\mu = -c \times 1.1(e^{-35\lambda} - e^{-0.35\lambda}) : V_\omega > V \quad (4.5)$$

$$\mu = c \times 1.05(e^{45\lambda} - e^{0.45\lambda}) : V > V_\omega \quad (4.6)$$

c は路面の状況によって変化するもので、小さいほど滑りやすい路面となっている。その様子を Fig.4.2 に $\mu - \lambda$ 曲線を示した。

スリップ率と $\mu - \lambda$ 曲線から摩擦係数 μ が得られ、式 (4.7) により駆動力 F_d が求まる。

$$F_d = \mu(\lambda)N \quad (4.7)$$

Fig. 4.2: $\mu - \lambda$ 曲線

4.2 電気二重層キャパシタと鉛蓄電池による運動性能比較

電気二重層キャパシタを使った電気自動車を使って運動制御を行うとき、二次電池と比較して利点として考えられる以下の二点である。

- 物理電池である：二次電池は化学電池であり、エネルギーを出し入れするのに必ず化学反応を伴う。それに対し、電気二重層キャパシタは物理的にエネルギーを出し入れしているため二次電池と比較して応答性が早い可能性がある。
- 出力密度が高い：鉛蓄電池の出力密度は $100[\text{W/kg}]$ 程度であるのに対して最新のものでは電気二重層キャパシタは $9000[\text{W/kg}]$ 程度のものが存在する。このためトルクを急に発生するような運動性能に影響を与える可能性がある。

以下ではこの応答性と出力特性がどの程度運動制御に影響を与えるかを実験を通して検討を行う。

4.2.1 モデルフォロイング制御を用いたスリップ抑制制御による性能比較

応答性比較するためには、トルク入力が激しく変化するような制御がよいと考えスリップ抑制制御を適用することにした。

スリップ制御としてはタイヤをノミナル化できる点に着目し外乱オブザーバを用いたモデルフォロイングコントロール (MFC: Model Following Control)[20] が以前から用いられてきた。タイヤモデルをノミナル化し、スリップする際に、タイヤ回転速度の急激な増加により慣性が見かけ上小さくなることを外乱とみなし、タイヤ/車両モデルと実測の加速度との差をモータ指令値にフィードバックすることで、トルク制御を行うものである。

Fig.4.3 に MFC のブロック線図を示す。フィードバックゲイン K を変える事で制御性能が変わってくる。この制御をモータのある各輪の制御系として実装することでスリップ抑制実験を行うことが可能となる。

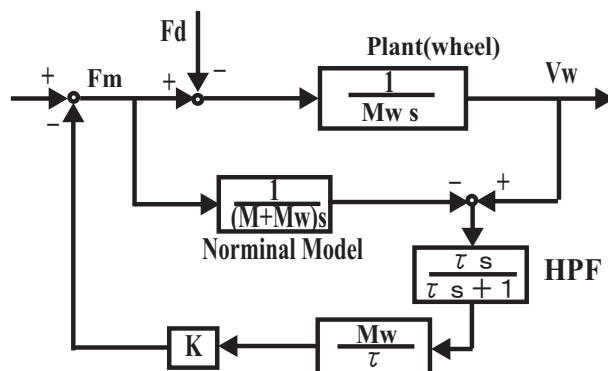


Fig. 4.3: モデル追従制御

今回はこのMFCを行うことでその違いを検証することにした。また、スリップ発生させるために Fig.4.4 のようにアクリル板の上に水を撒いて実験を行った。

実験時スリップしてしまうと車体速度が計測できないため左輪のみアクリル板の上におき、右輪はアスファルトに設置させた駆動は左後輪のみによっておこなった。滑りやすい路面に止まっている状態から左後輪に $60[\text{Nm}]$ のトルクを入れることでスリップさせた。尚、実験のパラメータとしては、車体重量 $M=450[\text{kg}]$ 、タイヤ慣性(質量換算値) $M_w = 3.7[\text{kg}]$ 、タイヤ半径 $r=0.233[\text{m}]$ 、擬似微分時定数 $\tau = 100[\text{ms}]$ としてフィードバックゲイン K を変化させることで実験を行った。



Fig. 4.4: スリップ実験風景

以下、Fig.4.6-4.9 にフィードバックゲイン K を変化させた時のスリップ率・実行トルク・車輪速度・車体速度・電池電流・電池電圧を鉛蓄電池の場合と電気二重層キャパシタの場合でそれぞれ結果を載せた。

止まった状態から大きなトルクを入れてやっているが、トルク入力時にすぐスリップが発生するのではなく最初のすこしは粘着状態に入って加速したあと、あるところでスリッ

ブ状態に入る。このため必ずしも同じ時間にスリップを開始するわけではないのでスリップが発生した時間を 0[s] として比較しやすいようにしている。

MFC の効果であるがどのデータも K を大きくするにつれて次第にスリップ率の上昇が抑制されている様子が現れており、MFC はスリップ抑制に効果があることが確かめられた。鉛蓄電池と電気二重層キャパシタを比較するとゲイン K が小さいところでは差がほとんど見られないが、ゲイン K が大きい場合において若干の差がみられた。Fig.4.10 には $K = 60$ におけるスリップ率・トルク指令値・電池電流・車輪速度を載せた。

特に Fig.4.5 には $K = 60$ におけるスリップ率の比較を載せた。MFC はスリップ率上昇を遅らせる効果があるので、それぞれスリップし始めた段階からのスリップ率を最小二乗法で一次近似することでその性能を比較し、Table.4.1 にその結果を載せた。

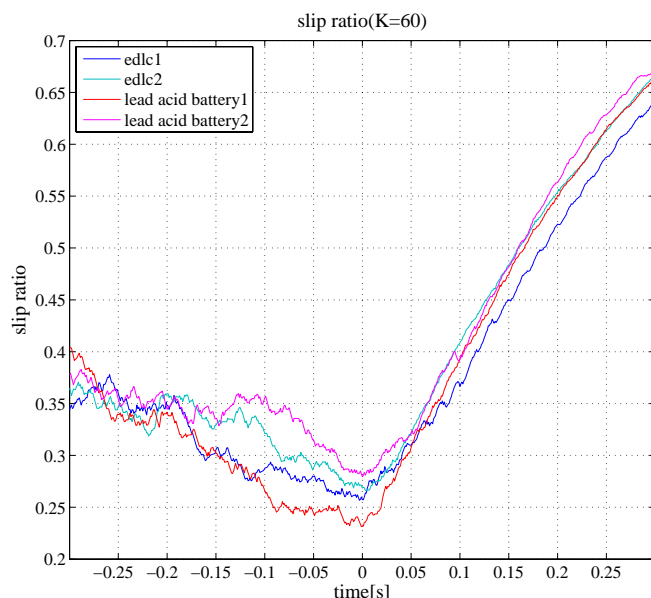


Fig. 4.5: 鉛蓄電池と電気二重層キャパシタの MFC 時スリップ率 ($K=60$)

Table. 4.1: スリップ率上昇の一次近似比較

| | |
|------------------------|------------------------|
| EDLC No.1 | $y = 1.3482x + 0.2478$ |
| EDLC No.2 | $y = 1.4103x + 0.2691$ |
| Lead acid battery No.1 | $y = 1.5071x + 0.2367$ |
| Lead acid battery No.2 | $y = 1.4537x + 0.2622$ |

これにより電気二重層キャパシタは鉛蓄電池に比べスリップ率の上昇が抑えられていることがわかり、トルクが細かく振動するようなスリップ抑制制御において電気二重層キャパシタが有る程度の効果があることが分かった。

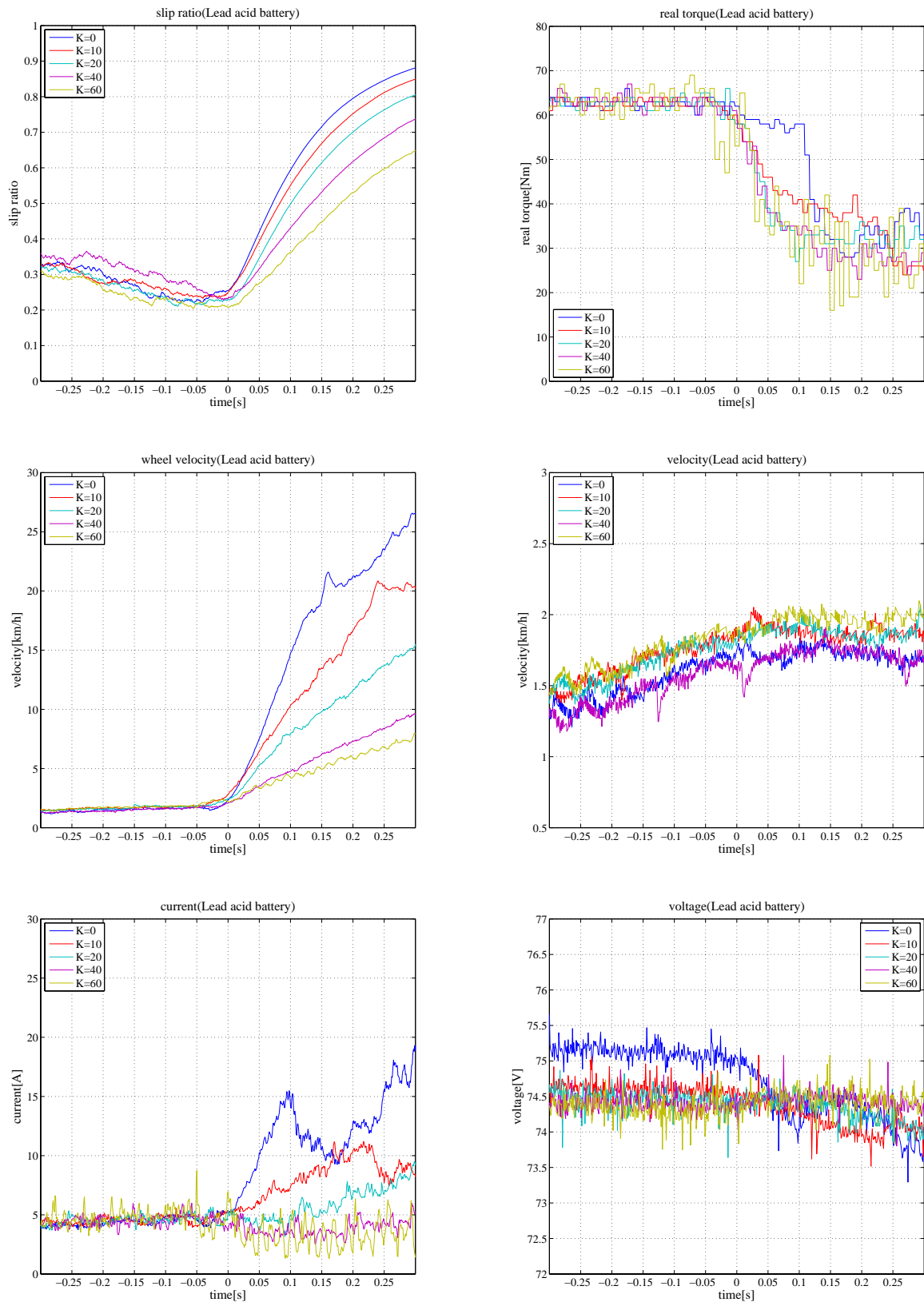


Fig. 4.6: 鉛蓄電池での MFC 制御 (その 1)

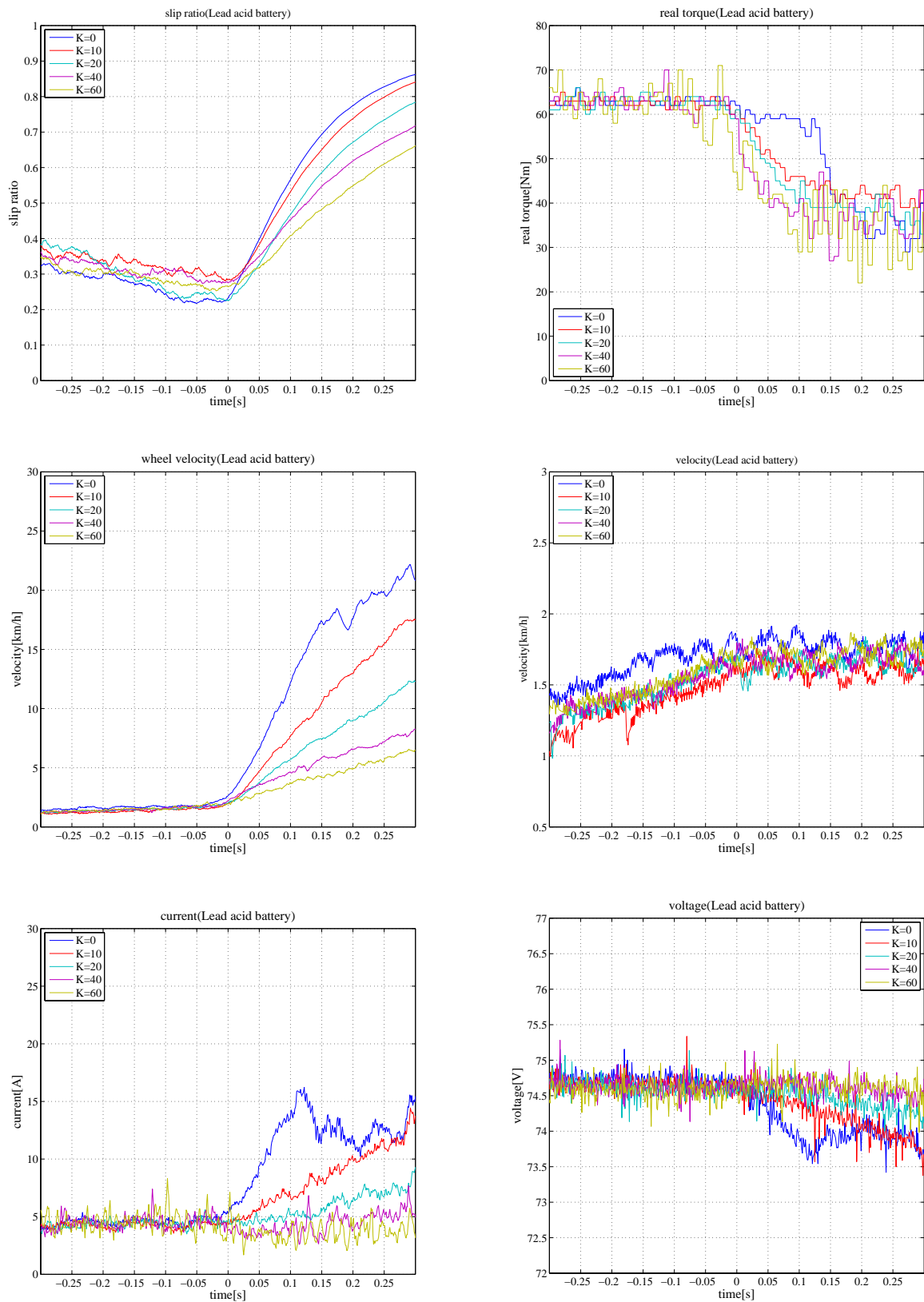


Fig. 4.7: 鉛蓄電池での MFC 制御 (その 2)

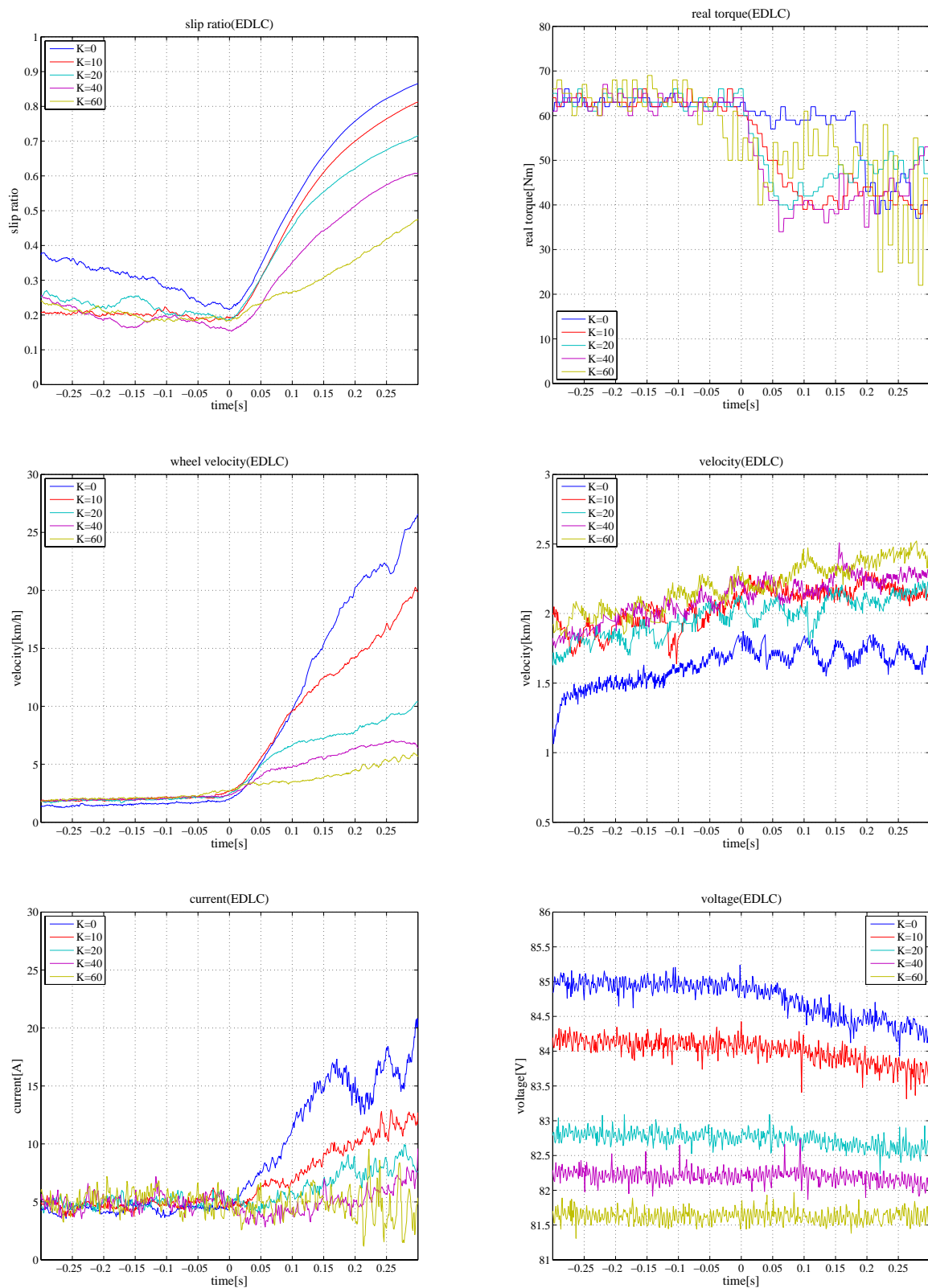


Fig. 4.8: 電気二重層キャパシタでの MFC 制御 (その 1)

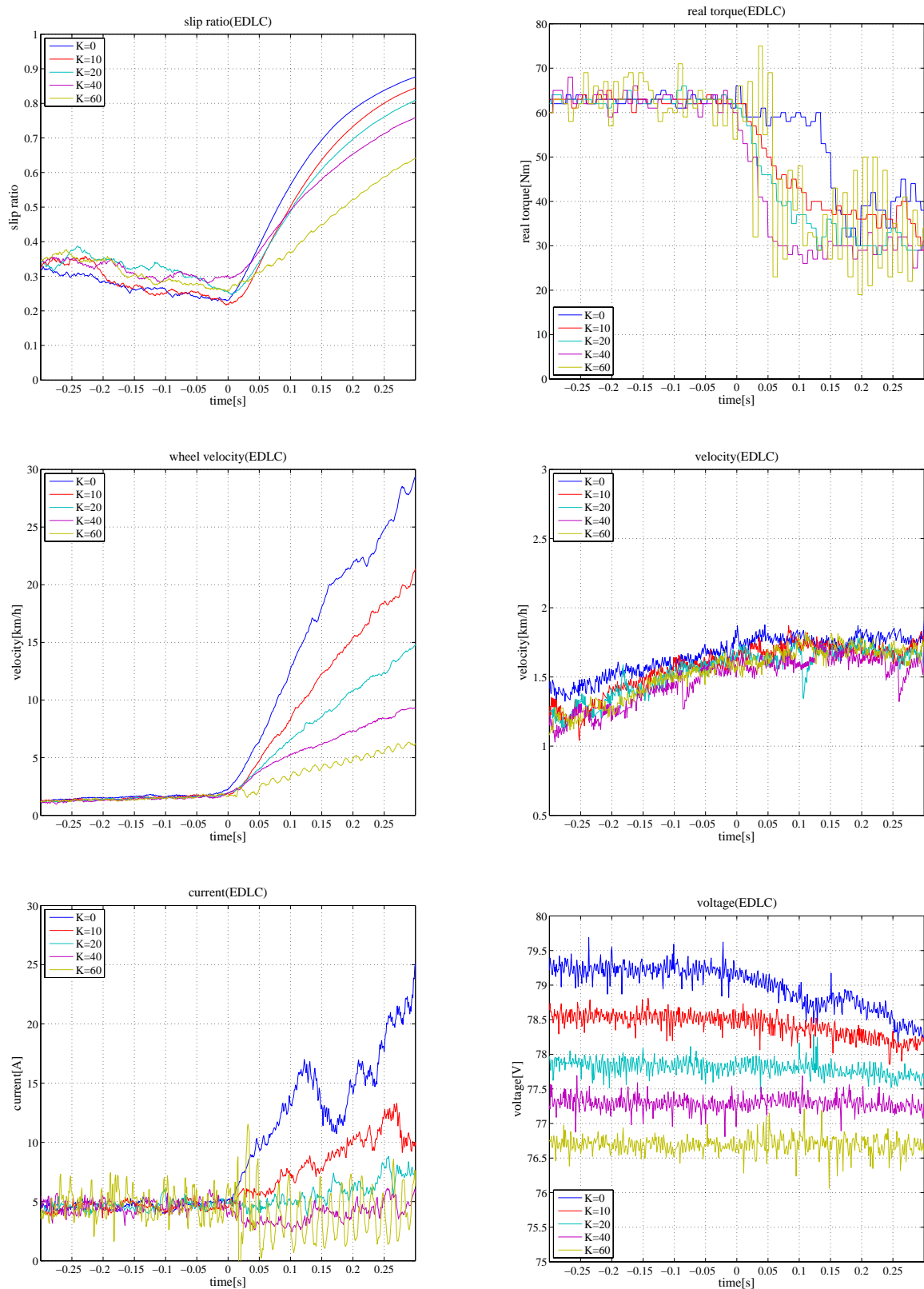


Fig. 4.9: 電気二重層キャパシタでのMFC制御（その2）

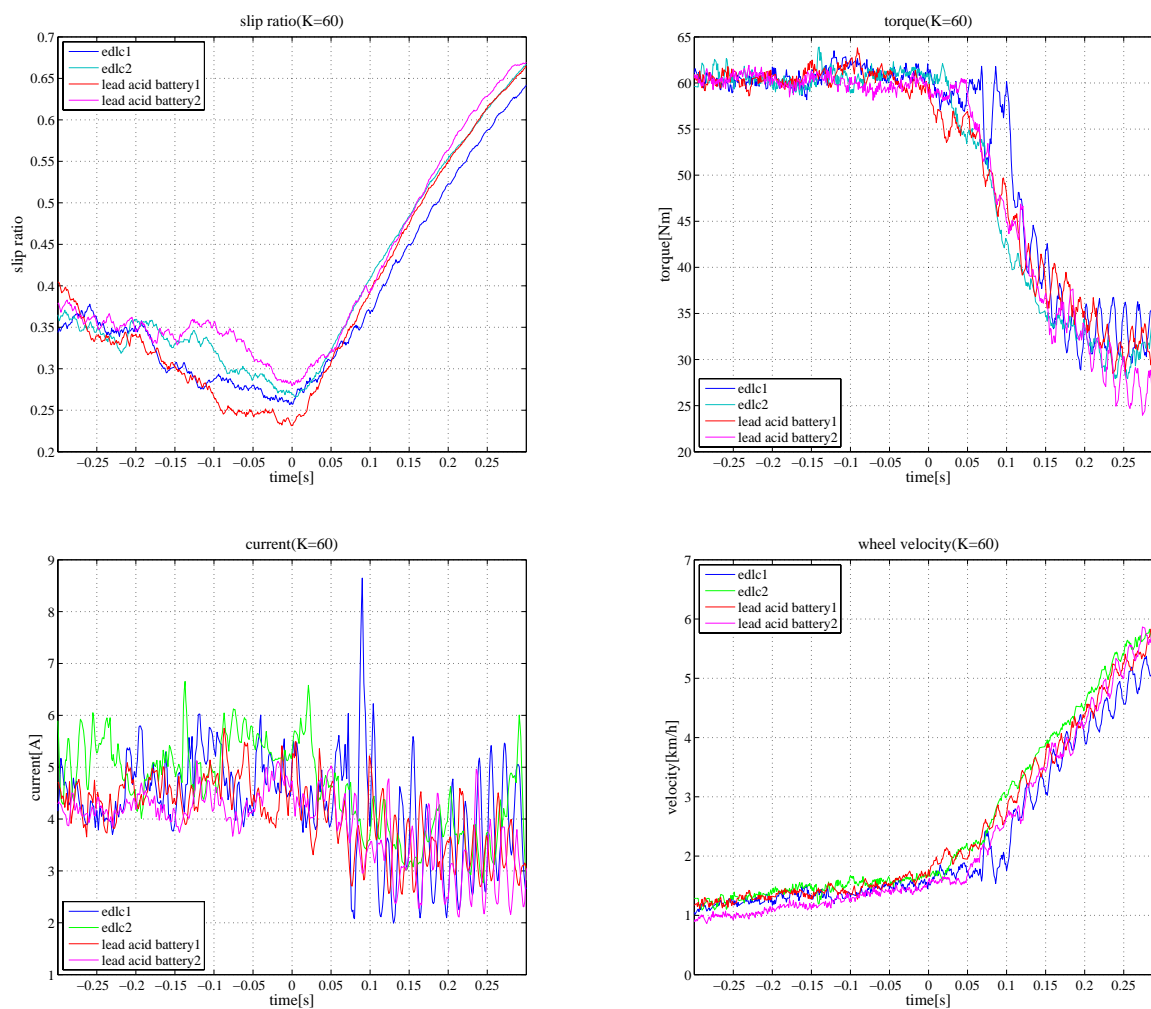


Fig. 4.10: 鉛蓄電池と電気二重層キャパシタのMFC比較 (K=60)

4.2.2 急発進による性能比較

鉛蓄電池・電気二重層キャパシタそれぞれ単独で使した場合

前節では細かいトルクが細かく振動する条件において鉛蓄電池と電気二重層キャパシタを比較したが、今節ではトルクを大きく変動させることでその特性を比較することにした。

トルクを大きく変動させるときの最も比較しやすい方法は急発進時であると考え、ここでは $1[s]$ に $110[Nm]$ を加え加速した場合、電気二重層キャパシタと鉛蓄電池での特性を比較することにした。

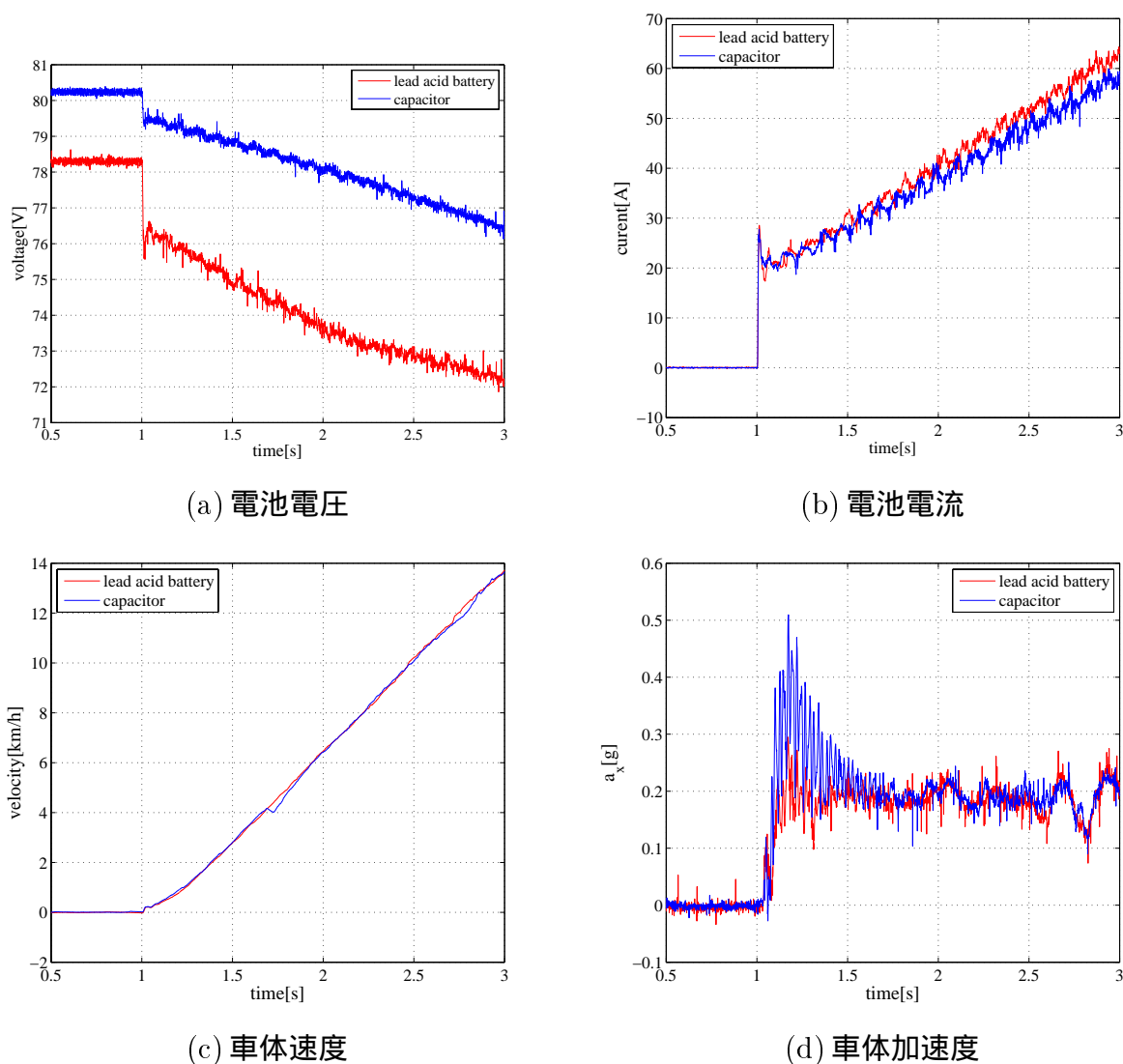
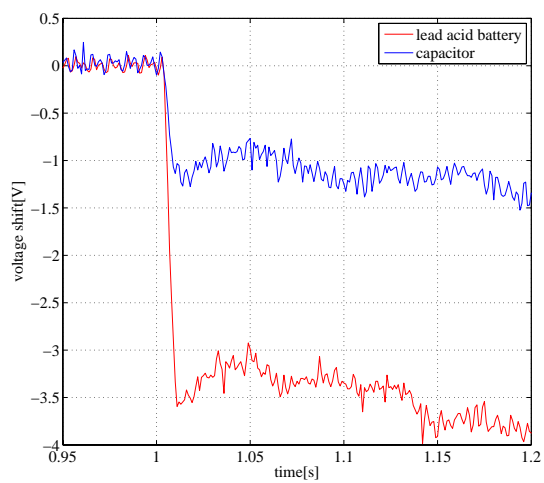
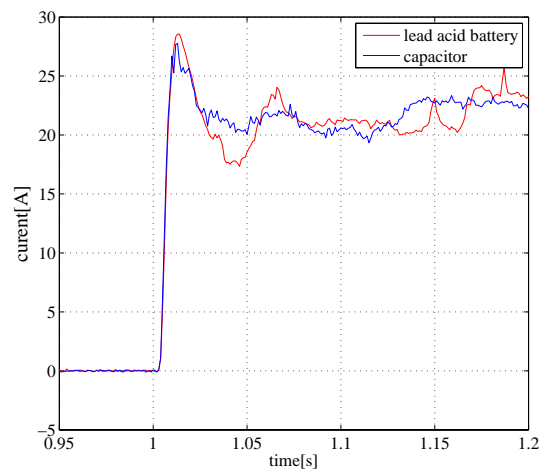


Fig. 4.11: 急発進時鉛蓄電池と電気二重層キャパシタのデータ比較

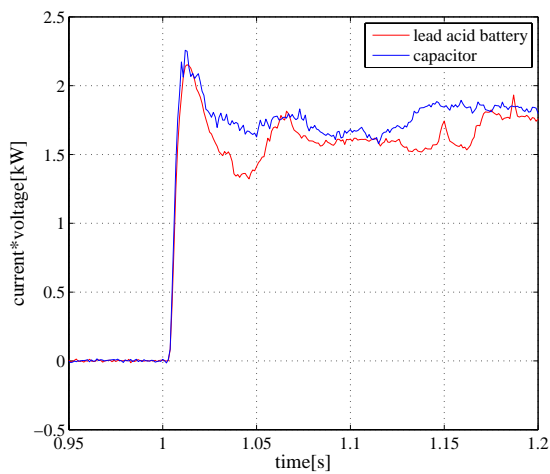
Fig.4.11 に実験時の電池電圧・電池電流・車体速度・車体加速度を載せた。車体速度はほぼ同じ結果となったが車体加速度は電気二重層キャパシタの方がでていることが分かる。さらに Fig.4.12 に細かい結果を載せた。



(a) 初期電圧からの変化



(b) 電池電流



(c) 電力

Fig. 4.12: 急発進時鉛蓄電池と電気二重層キャパシタのデータ比較（拡大）

電気二重層キャパシタの方が電流や電力の振れが小さく結果として急発進時トルクが電気二重層キャパシタの方がだせたために車体加速度もおおきくなったものと考えられる。

この原因として考えられるのは急激な電圧変化がインバータ内部の電流制御に影響を与えたということである。Fig.4.13 に C-COMS2 のモータ制御のブロック図を示したが、電流マップによって決められる I_d, I_q の指令値が電圧変動によって悪影響を及ぼし指令トルクが出せなかった考えられる。

Fig.4.12 において、電気二重層キャパシタに比べ鉛蓄電池のほうが電圧減少が大きくその結果として指令電流が小さくなりトルクが小さくなったものと考えられる。

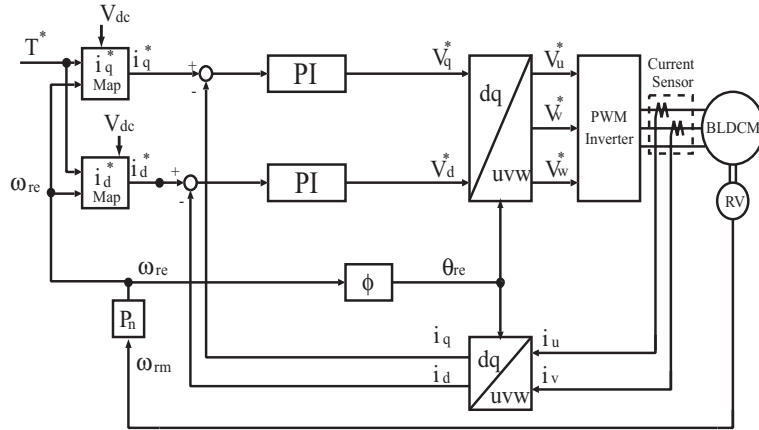


Fig. 4.13: C-COMS2 モータ制御ブロック図

このことにより、トルクが急激に増加したとき電気二重層キャパシタの方が鉛蓄電池に比べ電圧減少が小さいためにより指令値に近いトルクを出力することができることが分かった。

今回の実験は小型電気自動車によって行われたため、車体速度変化にまで影響することはなかったがもっと大きな出力のモータで大電流が流れるときもっと差が現れる可能性がある。

鉛蓄電池と電気二重層キャパシタを併用した場合

前節では急激な電圧変化がモータ制御に影響することが分かった。そこで今節では電気二重層キャパシタと鉛蓄電池を並列に使うことで電圧変化を抑えた場合どのような影響を与えるかを調べる。

電気二重層キャパシタと鉛蓄電池を並列にした場合、回路は Fig.4.14 のような形になる。この場合、電流 I で定電流放電をしたと考えると

$$I_c = \frac{R_b I}{R_b + R_c} e^{-\frac{1}{C(R_b + R_c)} t} \quad (4.8)$$

$$I_b = I - \frac{R_b I}{R_b + R_c} e^{-\frac{1}{C(R_b + R_c)} t} \quad (4.9)$$

となり、 $t = 0$ での電流は

$$I_c = \frac{R_b I}{R_b + R_c} \quad (4.10)$$

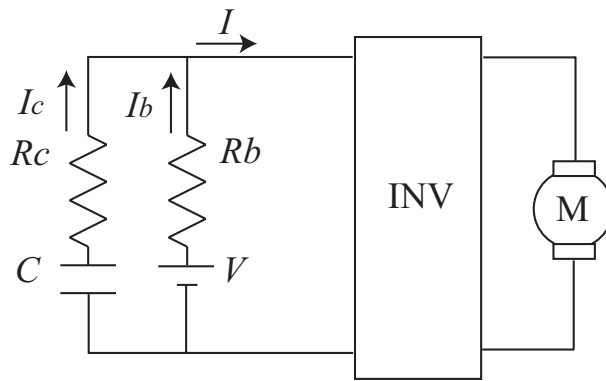


Fig. 4.14: 電気二重層キャパシタと鉛蓄電池を併用したモデル

$$I_b = \frac{R_c I}{R_b + R_c} \quad (4.11)$$

となり、 $R_c < R_b$ であるから $I_c > I_b$ となり過渡状態での電流の多くをキャパシタに分担してやることでパワー不足や効率の改善をみることができる。この方法はエンジン始動の方法としてためされておりその有用性が検証されている [22]。

この並列にした場合をさきほどの急発進におけるデータと比較することにした。実験結果を Fig.4.15,4.16 に結果を示した。電気二重層キャパシタと鉛蓄電池を並列にしたことで電圧減少が小さくなり、トルクがより指令値に近く出せたため鉛蓄電池の場合に比べ車体加速度が大きくなっている。また電気二重層キャパシタのと比べると電圧減少はほぼ同じとなり車体加速度も同じように大きくなっている。

このことにより、電気二重層キャパシタと鉛蓄電池を並列につなぐことによりよりよいモータ制御が実現可能となった。

さらに Fig.4.17 には並列時、急加速・急ブレーキをした場合の電流を鉛蓄電池・電気二重層キャパシタそれぞれ分けて載せた。これより発進時は電気二重層キャパシタにより多くの電流が流れており、式 (4.10), (4.11) に示すように内部抵抗逆比がそのまま電流比になって表れていることが分かる。

利用した電気二重層キャパシタの内部抵抗はおおよそ $R_c = 20[\text{m}\Omega]$ で、電気二重層キャパシタと鉛蓄電池の電流比がおおよそ 1 : 3 であることを考えると鉛蓄電池の内部抵抗はおおよそ $R_b = 60[\text{m}\Omega]$ であることが分かる。これより式 (4.8), (4.9) から定電流放電時の時定数は $C(R_b + R_c) = 110 \times (0.06 + 0.02) = 8.8[\text{s}]$ となり非常に遅い変化になるため電気二重層キャパシタの電力で走行することが分かる。

さらに鉛蓄電池は電力吸収時は内部抵抗が高くなりやすいため、回生時電流はほとんど電気二重層キャパシタが吸収しており、吸収したエネルギーはそのあと電気二重層キャパシタから鉛蓄電池に移されていることも分かる。このためほとんど電圧上昇がなく、電力吸収も効率よく可能であると考えられる。

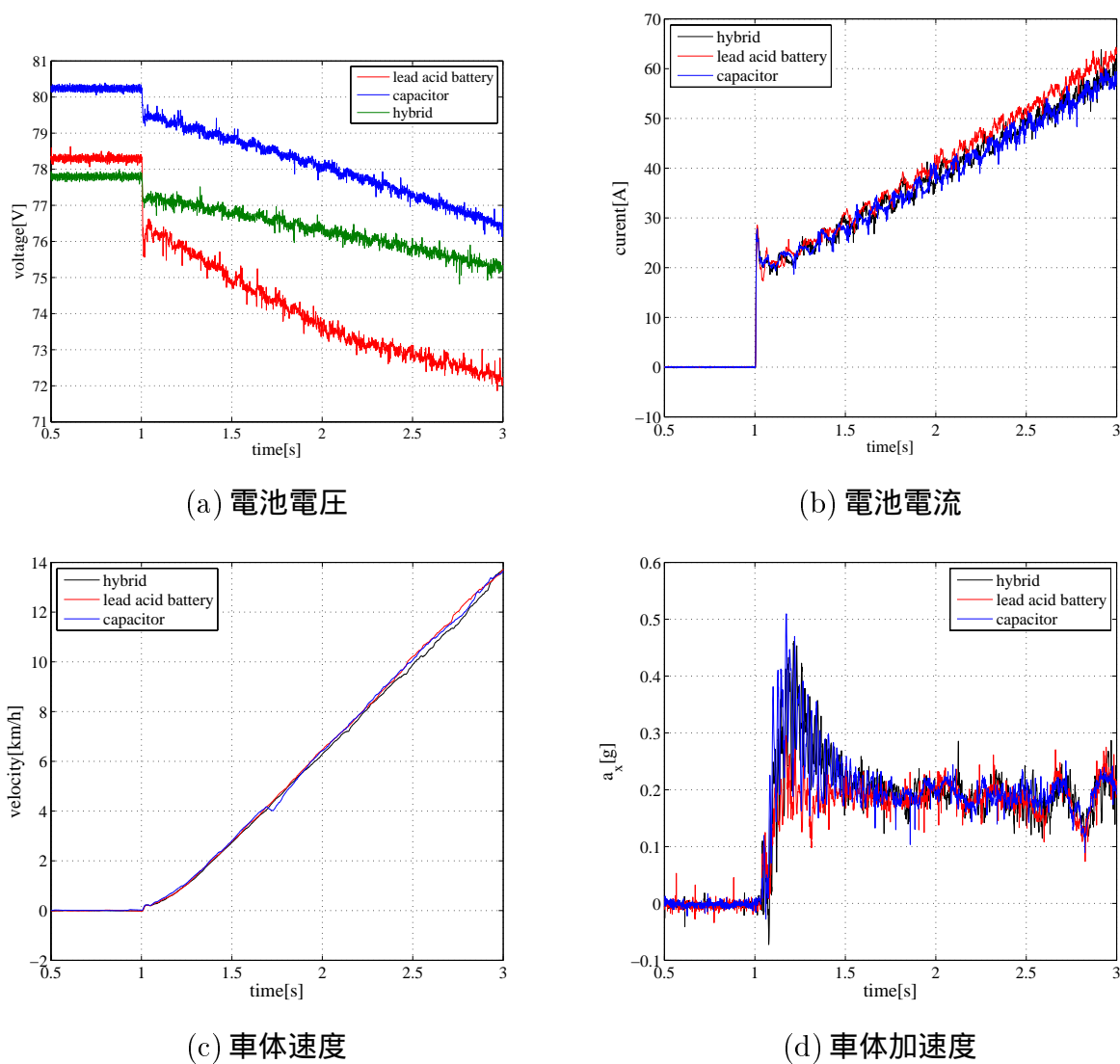
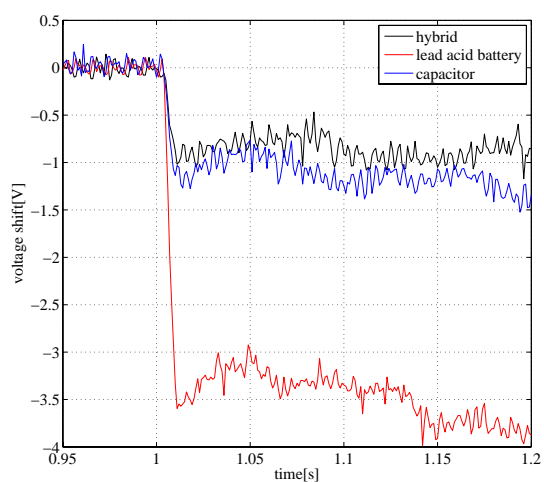
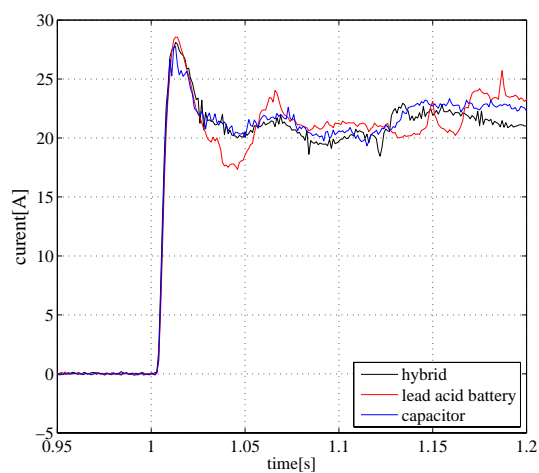


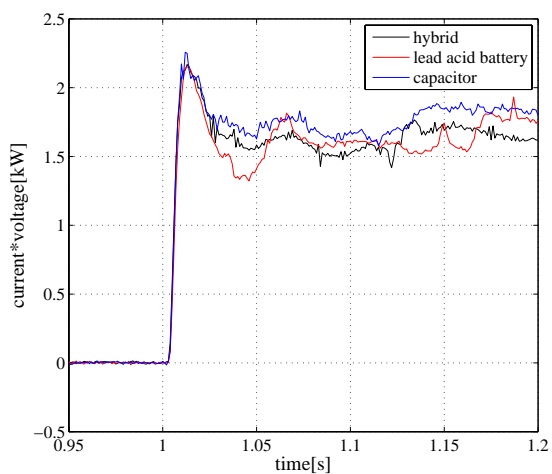
Fig. 4.15: 急発進時鉛蓄電池と電気二重層キャパシタを併用した時のデータ比較



(a) 初期電圧からの変化



(b) 電池電流



(c) 電力

Fig. 4.16: 急発進時鉛蓄電池と電気二重層キャパシタを併用した時のデータ比較 (拡大)

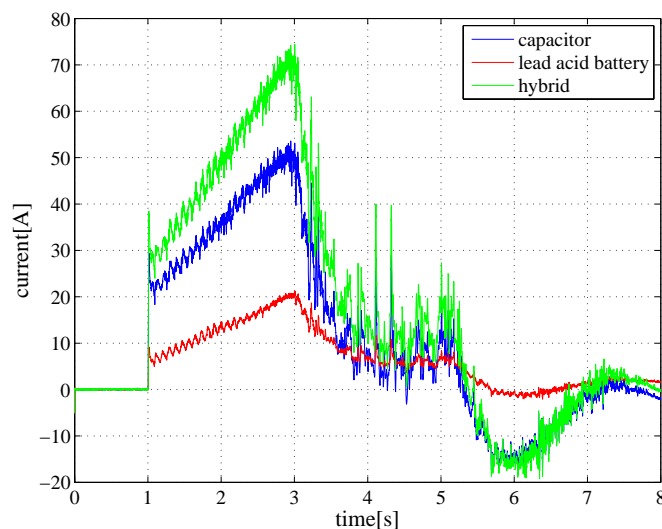


Fig. 4.17: 鉛蓄電池と電気二重層キャパシタを併用した時のそれぞれの電流値

4.3 まとめ

この章では電気二重層キャパシタが物理電池であり出力特性が高いことから、運動制御実験を行った場合鉛蓄電池と比較してどのような違いが現れるかを検討した。

MFC を利用したスリップ抑制制御において、特にフィードバックゲインが大きくトルク指令が細かく振動するような場合電気二重層キャパシタを利用することでスリップ率上昇を抑えることができその有用性が検証された。

急発進時においては、電気二重層キャパシタは電圧変動が小さく指令電流の変動も小さくなりより指令に近いトルク出力が可能であることが分かった。また電気二重層キャパシタと鉛蓄電池を並列に使うことで急激な電圧減少を抑え鉛蓄電池の運動制御特性や効率を改善することが可能であることも分かった。

第5章 結論

5.1 まとめ

本論分では、電気二重層キャパシタと高性能DD インホイールモータを搭載した小型電気自動車を製作し、その自動車をエネルギー的観点また運動制御の観点からその有用性を検討した。

エネルギー分析においては、大電流においても電気二重層キャパシタは90%以上の効率を保っており、実際に10モード走行時において石油換算で50[km/l]を超えるような燃費を持っていて小型の内燃機関と比較しても燃費がよいことが分かった。また燃費には電池の効率がそのまま効いてくるので鉛蓄電池などの二次電池と比較しても燃費がよく、特に鉛蓄電池の苦手とする回生時のデータを比較することで電気二重層キャパシタは電圧上昇が小さく効率よく充電できることが分かった。

運動制御面においては、鉛蓄電池と比較したときの電気二重層キャパシタの応答特性・出力特性に注目することで運動制御を行いその制御性を検討した。応答特性についてはモデル追従制御を行うことで特にゲインが大きくトルク指令が振動する場合において制御特性を改善することが分かった。また出力特性についても急発進時の比較を行うことで出力特性を改善し、さらに電気二重層キャパシタと鉛蓄電池を併用することで出力特性を確保しながら効率のよい運動ができることが分かった。

電気自動車は走るたび、止まるたびに蓄電装置から電気を出し入れするため蓄電装置の効率はとても重要であり、大電流においても充放電効率の高い電気二重層キャパシタは有用であると考えられる。近年、ハイブリッド自動車のモータは出力が小さくエンジンの補助として利用から、高出力のモータでメインの駆動装置として利用される傾向にあり、大電流での効率が求められている。電気二重層キャパシタはエネルギー密度で劣るため、駆動用メイン蓄電装置として利用されることは少ないが、二次電池と並列につなぐだけで出力特性を維持し効率よく充放電できるためバッファのような形で広く利用される可能性がある。

5.2 今後の課題

今後の課題を以下にあげる。

- 電気二重層キャパシタのパワー密度を活かすためには、もっと大きな出力での検討が必要である。
- 電気二重層キャパシタと二次電池を併用することで出力特性を維持するのにはどの程度の割合で入れてあげるのが、エネルギー的にもコスト的にも最適であるか。

- 運動制御実験において、トルク指令よりもマイナーループである電流制御系に触れることでさらなる運動制御改善の可能性がある。
- DD ドライブのモータを利用していることで、今までの電気自動車よりもより細かな制御を行うことができる可能性の検討。
- レゾルバデータを速度変換する際、特に細かい振動をする場合の速度データの扱い精度を上げる必要がある。

これからの電気自動車の流れとしては、小型・高効率で充電時間が短く通勤利用をするものか、PHEV の用に大量に電池を積み長距離走行するというものの分かれていくと考えられる。小型・高効率のものはまさに電気二重層キャパシタを使うのが最適であり問題としては充電方法をどのようにするか検討することである。また二次電池との電気二重層キャパシタを併用して利用する場合にどのようなものを使えるか検討することは特にこれから必要になってくると思われる。

謝辞

まず始めに、3年間に渡り熱心にご指導いただいた堀洋一教授に心より御礼申し上げます。実験機製作にあたっては細かくご指導いただいた内田利之技術専門職員、的確なアドバイスをしていただいた博士2年の河島清貴さんに御礼申し上げます。研究室生活においては、様々なサポートをしていただいた呉世訓助教をはじめ研究室の皆様に御礼申し上げます。

また、実験車両 C-COMS2 の製作にあたり、電気二重層キャパシタを提供していただいた(株) パワーシステムの皆様、車両・モータの改造にご協力いただいたトヨタ車体(株)の皆様、試乗会等ではかかさず駆けつけ手伝ってくださった日清紡(株)の皆様をはじめ、様々なアドバイスをしてくださった企業・諸団体の皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 電気自動車ハンドブック編集委員会, ”電気自動車ハンドブック”, 丸善株式会社, 2001.
- [2] 増永 邦彦 他, ”ハイブリッド車・燃料電池車・電気自動車”, 自動車技術, Vol.58, pp85-92, 2004.
- [3] ARB, ”ARB Modifies Zero-Emission Vehicle (ZEV) Regulation”, 2003
- [4] 松田 好晴 他, ”電池便覧 第3版”, 丸善株式会社, 2001.
- [5] 経済産業省, ”次世代電池の将来に向けた提言”,
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g60824b01j.pdf>, 2006.
- [6] M.Thele et al, ”Modeling of the charge acceptance of lead-acid batteries”, Journal of Power Source, Nov 2006.
- [7] 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.
- [8] 美浦 隆 他, ”電気化学の基礎と応用”, 朝倉書店, 2004.
- [9] Andrew Burke, ”Ultracapacitors: why,how,and where is the technology”, Journal of Power Sources, Vol.91, pp.37-50, 2000.
- [10] Michio Okamura et al, ”Capacitor Storage System ECaSS : Problems and Improvements in Pure EDLCs”, The 12th international seminar on double layer capacitors and similar energy storage devices, Dec 2002.
- [11] 江頭 港 他, ”電気化学キャパシタの最新動向”, IEEJ Journal, Vol.126, pp.80-83, 2006.
- [12] 山田 淳, ”移動体電気二重層キャパシタの応用技術”, 電気学会自動車研究会, VT-07-18, 2007.
- [13] 岡村 進夫, ”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.
- [14] 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, 2006.
- [15] Masayuki Terada, ”The VRLA Battery for 42V High Voltage Automotive System”, technical report of Shin-Kobe, Vol.3, 2003.

- [16] Michail Rantik, "Life Cycle Assessment of Five Batteries for Electric Vehciles under Different Charging Regimes", KFB, pp.3-6, 1999.
- [17] 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.
- [18] 国土交通省, "自動車燃費一覧 (H19.3)", 2007 .
- [19] H.B.Pecejka and E Bakker, The Magic Formula tyre model, In *Proc.1st International Colloquium on Tyre Model for Vehicle Dynamics Analysis*, Delft, Netherlands, 1991.
- [20] Y. Hori, Y. Toyoda, and Y. Tsuruoka, "Traction control of electric vehicle : Basic experimental results using the test EV UOT electric march", *IEEETrans.Ind.Applicat.*, Vol.34, No.5, pp.1131-1138, 1998.
- [21] 戴 建華 他, "速度パターン整形を導入した電気自動車の新しい運動制御法の提案", 平成 14 年電気学会産業応用部門大会, 2002.
- [22] 山下 繁則 他, "電気二重層キャパシタによるエンジン始動システムの提案", 平成 18 年電気学会産業応用部門大会, 2006.

発表文献

- [1] 小池卓志, 堀洋一: "電気モータの高速応答を利用したブレーキ性能の向上", 平成 18 年電気学会産業応用部門大会, 2006.8.
- [2] Takashi Koike, Yoshifumi Aoki, Xiaoxing Liu, Yoichi Hori, "Advanced Vehicle Motion Control of EV based on Electric Motor's Advantages", *Proc. of EVS22*, 2006.10
- [3] 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", 平成 19 年電気学会産業応用部門大会, 2007.8
- [4] 小池卓志, 河島清貴, 内田利之, 堀洋一: "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", 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会, 第 10 回例会, 2007.8
- [5] 小池卓志, 河島清貴, 内田利之, 堀洋一: "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", 電気学会自動車研究会, VT-07-21, 2007.12.

付 録 A C-COM2改造について

A.1 全体構成

C-COMS2の全体構成を Fig.A.1 に示した。大まかには、上位PC・Inverter・PIC・リレーで構成されている。PICを上位PCとインバータ・リレーの間にいれInverter 出力 on/off 信号やリレー on/off 信号をもたせることで上位PCの構成を簡単にしている。そのため上位PCはInverterにはトルク指令を与えるだけである。

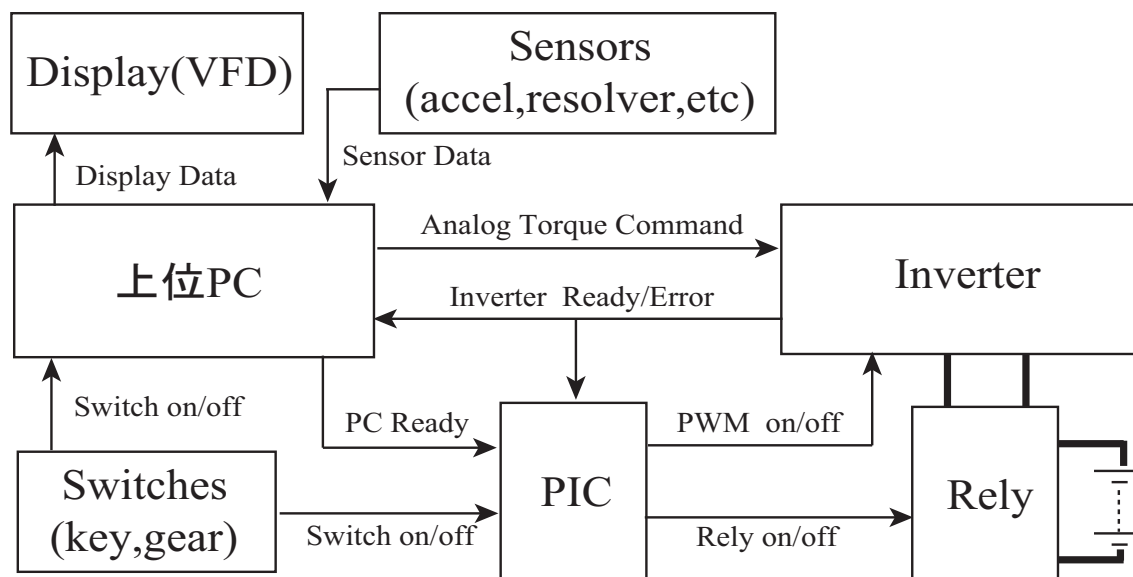


Fig. A.1: C-COMS2 構成

A.2 電源系

C-COMS 2の目的として、鉛蓄電池の場合とキャパシタの場合での比較また両方を使った場合の検討を行うことがある。そこで高電圧系の配線を変えることで簡単に実現できるようにする。

C-COMS1の上位PCが固定している場所に高電圧系のBOXを取り付けることでキャパシタのみ、鉛蓄電池のみ、キャパシタ＋鉛蓄電池の併用を簡単に実現できるようになっている。また電流センサもそれぞれにつける (Fig.A.2)。

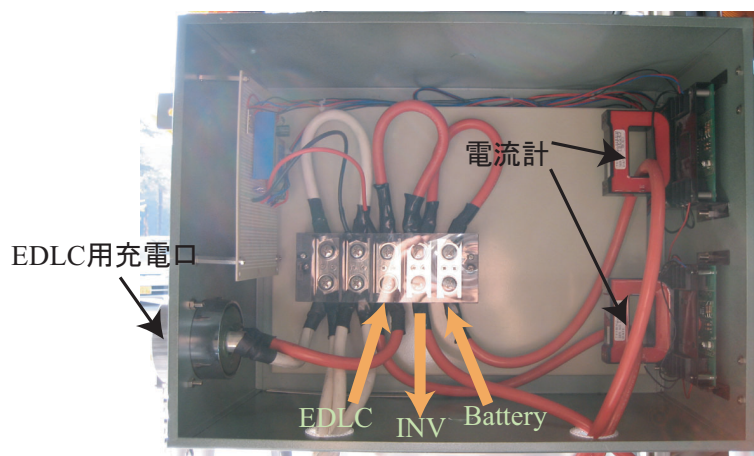


Fig. A.2: 電源系配線

A.3 メインリレー用PICBOX

今回改造によりモータ・インバータを取り替えたがリレー回路はそのままのもの (Fig.A.3) を使うことにしたためリレーを駆動させるための機構を自分で作ることにした。

上位 PC でリレー駆動をすることも考えられたが、上位 PC はできるだけトルク指令の計算のみに特化したかったのでリレー駆動は PIC を使って上位 PC とは独立に行うことにした。また PIC には電流制限があるので、サイリスタ駆動回路に回路 (Fig.A.4) を追加することで PIC の電流消費を抑えた。

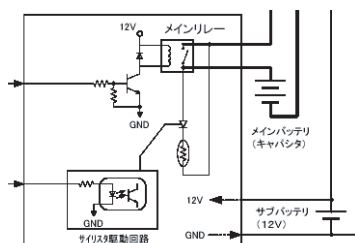


Fig. A.3: 充電 BOX(リレー回路)

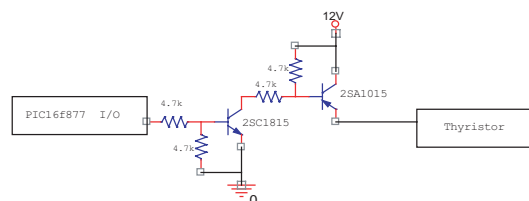


Fig. A.4: リレー追加回路

そして PIC を用いることで Gear, Key、インバータ状況、上位 PC 状況を判断することでリレー on, リレー off をする仕組みとなっており、そのシーケンスは Fig.A.5 に示した。

尚、PICBOX は PIC と端子台の役割を果たしており様々な配線が通っている (Fig.A.6)。

PIC

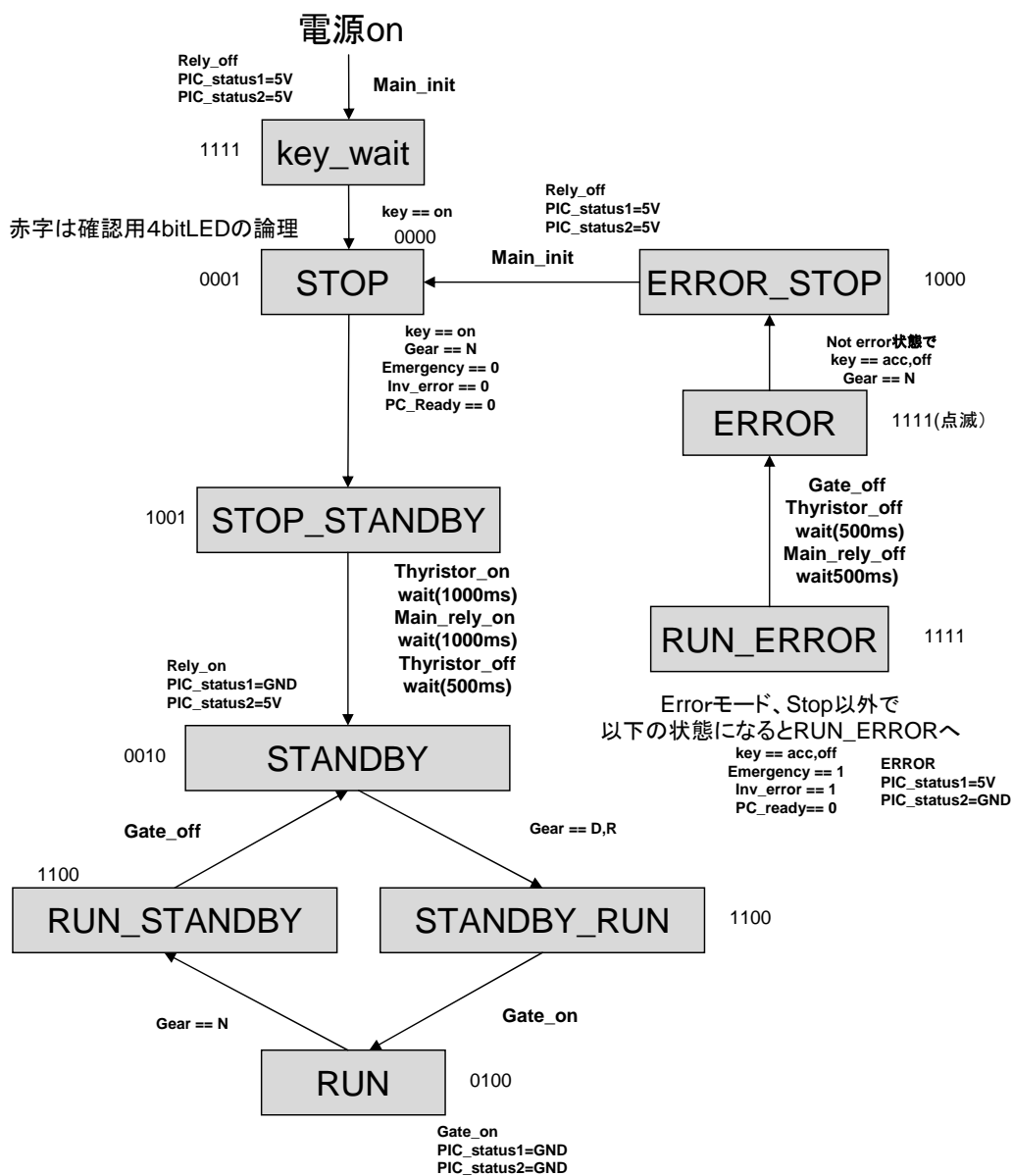


Fig. A.5: PIC のシーケンス図

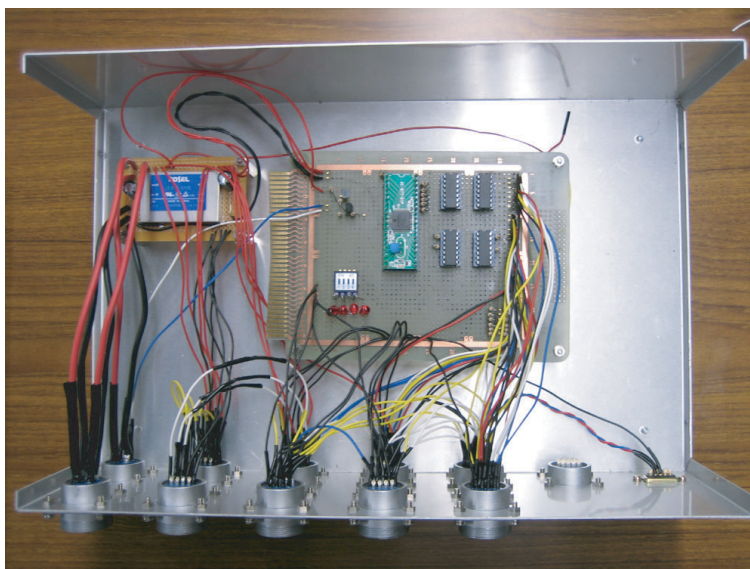


Fig. A.6: PICBOX

A.4 コントロール用 PC

C-COMS2 は上位 PC として interface 社の Compact-PCI シリーズのボードを利用している (Fig.A.7)。表 1 に使用しているボードをまとめた。

AD ボードはアクセル入力・各種センサ情報取り込み、DA ボードはトルク出力、DIO ボードは信号入出力・レゾルバ信号取得、CAN ボードはインバータ状態取り込みをそれぞれ行う。

| | ボード種類 | 性能 |
|---------|------------|--------------------------|
| CPU ボード | CTP-PM11 | Pentium M 1.1GHz |
| AD ボード | CTP-3120A | 12bit 差動 8ch $\pm 5[V]$ |
| AD ボード | CTP-3165 | 16bit 差動 8ch $\pm 10[V]$ |
| DA ボード | CTP-3338 | 12bit 8ch $\pm 5[V]$ |
| DIO ボード | CTP-2798 | I/O オープンコレクタ出力 64ch |
| CAN ボード | CTP-485211 | 高速 1ch, 低速 1ch |

Table. A.1: C-COMS2 ボード構成

A.5 DD インホイールモータ

C-COMS2 は元々ついていたモータをより高性能な制御の行える DD モータに交換した (Fig.A.8)。新しいモータの PCD は 100cm だったので、PCD チェンジャ (Fig.A.9,A.10) を使い PCD を 140cm に変換することでコムス用のタイヤを簡単に取り替えることができ様々な実験に対応できるようにした。

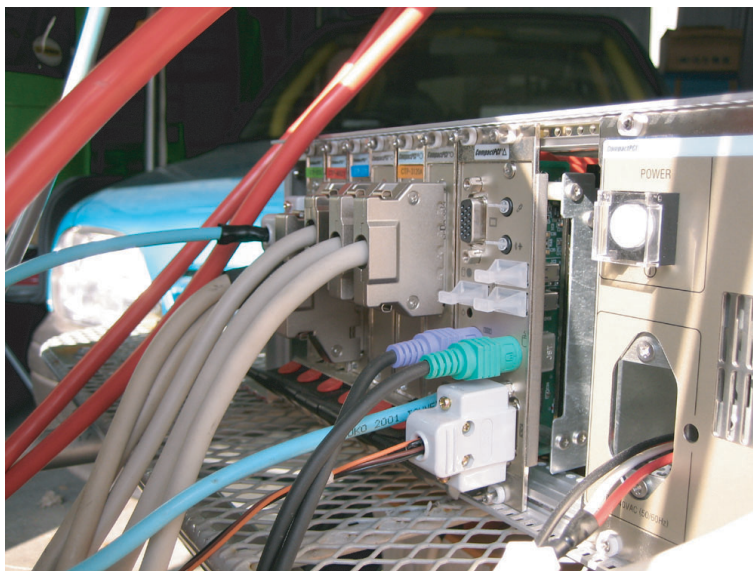


Fig. A.7: コントロール用 PC



Fig. A.8: DD モータ



Fig. A.9: PCD チェンジャー概観図



Fig. A.10: PCD チェンジャー装着時写真

付 録 B EVS22 試乗会報告書

先月末 10 月 23 日～10 月 28 日に横浜パシフィコにて行われた EVS22 において C-COM1, C-COM2 を試乗会に出展させていただきました。1 週間という長い試乗会だったので何かしらのトラブルが起きるかもしれないと思っていましたが、C-Tech での試乗会の経験もあり特に大きなトラブルもなく無事終えることができました。これもパワーシステム・ECaSS フォーラム・堀研究室の方々の協力があったので大変感謝しております。



Fig. B.1: EVS22

試乗会では 1 人につき 120m のコースを 2 周する形だったので、COMS の総走行距離約 70km (トリップメータで得られたデータ) から考えると総勢で 300 名程度の方に試乗してもらったことになります。今回の EVS には COM2 はセンサを載せるのが間に合わなかったということもあり、定量的なデータを得ることはできなかったのですが、乗ってくれた方の意見なども参考に気になったことが 2 点あります。

- バッテリーのものに比べ回生が多くとれている
- COM1 に比べて、COM2 のエネルギーの減少度合いが大きい

回生についてですが試乗会にいらした方でバッテリーとキャパシタの COMS を乗り比べたらキャパシタの時のほうが回生が強く効いているとおっしゃった方がいらっしゃいました。これはキャパシタのほうが電池よりも急速な充放電に対応できたからということの証明であり、非常に参考になる意見でした。しかしながら、実際問題キャパシタとモータの間にはインバータが挟まれているので、インバータの影響を強く受けるので実際に実験をして検証をする必要性があります。

また COM2 のエネルギーの減り方が大きいことについてですが、電圧の具合からの予想ですがおおよそ 1.5 倍程度の違いがあるように感じました。重量は 1.2 倍程度しか変わらない

し、キャパシタの性能もほぼ同じなので、インバータの効率なども関係しているのではないかと考えているのでこれも今後検証する必要があると感じました。

試乗会前半はまだセッションが始まっていなかったり、天候が悪かったこともあり人が少なかったのですが、セッションが始まるとともに人の出も増えたくさんの人に試乗していただくことができました。このような試乗会は技術者の方はもちろん一般の方にも車に乗っていただくことでキャパシタの存在を広めることができた大変貴重な機会だったと思います。今後は試乗会だけでなく実験によりキャパシタの利点を明確に示すことができたらと思っております。