

研究成果

1. 未来ビークルライフを支えるエネルギーの発生と利用技術に関する研究

電機・電子情報工学系 教授 滝川 浩史

1-1 EV車／ハイブリッド型コミュニティバスの環境・コストメリットの算定

(1) はじめに

近年、地球温暖化問題やエネルギー問題が深刻化している。日本は、2005年の京都議定書が発効され、2008年から2012年までに1990年比で6%のCO₂排出量削減が義務付けられた。しかし、逆に排出量は増加しているのが現状である。また、石油燃料の枯渇や発展途上国の台頭による、世界的石油需要の増加から、石油に依存しない社会作りといった課題も持ち上がっている。その解決策の一つとして、化石燃料を使わず、走行時に二酸化炭素を排出しない電気自動車の開発や導入・利用が活発になっている。現在、電気の発電には化石燃料への依存度が大きい。これからクリーンな発電方法に切り替わっていくことにより石油への依存度を下げることができる。しかし、電気自動車には、一充電での走行距離が短い、という欠点がある。従来のガソリン車では500 km程度走ることができたが、電気自動車では160 km程度しか走ることができない。このため、走行が必要なときに走ることができない状況が発生することがある。街中旅客向けの電気バスは、あらかじめ運用者が運行パターン（路線とタイムスケジュール）を決められるため、一充電の走行距離が短いという現在の電気自動車の欠点を回避しながら利用することができる。昨年、電気バスを実際の路線に導入した場合、運行コストとCO₂排出量に対しどのような効果があるかについて、バス運行シミュレータを作成し検討した。その結果、電気バス導入によって運行コストとCO₂の削減が可能であったが、導入コストが大きい。そのため、導入コスト回収が難しいことがわかった。今回、比較的安価なハイブリッドバスも含め、搭載バッテリー容量をパラメータとし導入効果の検討を行った。

(2) 導入対象

導入対象バス路線は、愛知県豊橋市の豊橋市民病院線（豊橋鉄道株式会社）とした。この路線は、豊橋駅から豊橋市民病院との間、または豊橋駅から同市民病院を経由して豊橋総合スポーツ公園までを往復運行する路線である。これらの運行のうち、豊橋駅から市民病院までの往復（片道4.5 km）を対象とした。なお、導入する電気バスまたはハイブリッドバスはどちらか

表 1-1-1 現行ディーゼルバス PDG-AR820GAN の仕様

全長×全幅×全高	8,990×2,340×2,950 (mm)
車両重量	8,260 kg
乗車定員	57 名
燃費	4.65 km/L
走行時 CO ₂ 排出量	0.564 kg- CO ₂ /km

表 1-1-2 モデル使用および条件

(1) 導入対象路線

豊橋市民病院線（豊橋駅-病院間：片道 4.5 km, 片道所要時間：12 分, 往復所要エネルギー：6.7 kWh）

(2) バス仕様（基準値）

ベース車両：PDG-AR820GAN

効率¹⁾

プラグ経由の系統充電効率：90%

回生充電効率：70%

電気エネルギーに基づく駆動効率：70%

プラグイン電気バス

搭載バッテリー容量：48 kWh

急速充電（容量の 80%以下）：24 Wh/s

通常充電（容量の 80～100%）：0.6 Wh/s

プラグインハイブリッドバス

発電機定格出力：140 kW

燃料消費量：32 L/h

搭載バッテリー容量：16 kWh

発電：搭載バッテリー容量の 40 %以下で開始, 80%で停止

発電機からの充電効率：70%

急速充電なし, 通常充電（上記値）のみ

バッテリー

許容入出力係数：6 W/Wh

許容放電深度：0～100%

(3) 運行条件

① 電気バス／ハイブリッドバス以外は現有ディーゼル車で運行

② 走行パターン：JE05 モードの都市内・渋滞路部

(8.4 km, 1,400 s)

③ 空調：なし

④ スケジュール：現時刻表を踏襲

⑤ 一日の初めは満充電状態

⑥ 豊橋駅での最低停車時間：3 min

⑦ 充電ステーション（豊橋駅）での 6 min を超える待機停車時には充電（6 min 未満の場合, 充電作業時間不十分と仮定）

(4) エネルギー単価（基準値）

軽油単価：113.83 円/L（2010 年 04 月～2011 年 03 月までの愛知県の店頭価格の平均値）

電気料金単価：10.75 円/kWh（中部電力(株)の高圧業務用電力の 2010 年の平均単価：標準電圧 6000 V, 契約電力 500 kW 未満 プラン C：昼夜一定料金）（発電時 CO₂ 排出係数：0.455 kg-CO₂/kWh）

1 台のみとし, そのバスが利用できない運行タイミングには, 現行のディーゼルバスを利用することとした。

(3) バスの仕様

豊橋市民病院線で現在運行しているディーゼルバス（三菱ふそうトラック・バス株式会社,

PDG-AR820GAN) の仕様を表 1-1-1 に示す。このバスを電気バスおよびハイブリッドバスの改造ベース車両とすることにした。

電気バスはエンジンを搭載せず、モータのみで走行するとした。電気バスはエンジンを搭載せず、モータのみで走行するとした。バッテリーの充電は容量 80%までは急速充電、それ以上は通常充電とした。また、制動時の運動エネルギーは電気エネルギーとして回収し、バッテリーに充電するとした。

ハイブリッドバスはエンジンを発電機として仕様し、モータのみで走行する、シリーズ方式とし、エンジンは常に定格運転するとした。エンジン発電による充電は、バッテリー残量が搭載バッテリー容量の 40%以下で開始し、80%以上で停止するとした。また、搭載バッテリーでは力行

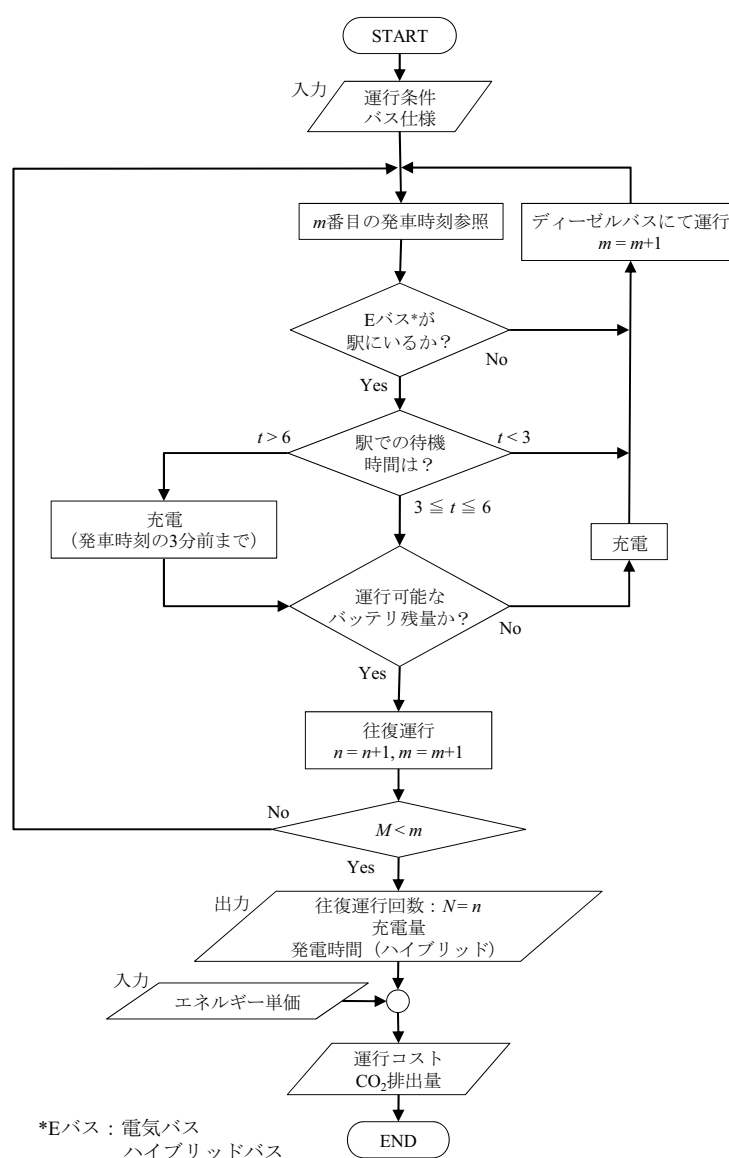


図 1-1-1 搭載バッテリー容量と運行コストの関係（平日）

の要求電力を賄えなかった場合にも発電するとした。なお、エンジン発電機を備えているため、急速充電は行わないとした。

(4) シミュレーションモデル

図 1-1-1 にシミュレーションの流れを示す。実路線への適用を検討するので、まず必要なのは、現在利用されている時刻表に従い、1 日の往復運行回数 M 回のうち、電気バスまたはハイブリッドバスで往復運行ができる回数 N を求めることである。可能運行回数 N は、バッテリーの残量、往復可能になるまでの充電時間 $t_{\min}$ 、および時刻表上の運行タイミングによって決まる。例えば、 m 回目の運行の発車時刻までに電気バスまたはハイブリッドバスの n 回目の運行が終了していたとき、もう 1 回以上往復可能なバッテリー残量があれば、 $m+1$ 回目の運行を電気バスまたはハイブリッドバスの $n+1$ 回目の運行として実施する。しかし、バッテリー残量が十分でない場合、充電を行った後、 $m+2$ 回目あるいはそれより遅い時刻の運行を電気バスまたはハイブリッドバスの運行の $n+1$ 回目として行う。なお、シミュレーションは秒単位で行った。以上の条件およびパラメータを表 1-1-2 に示す。

(5) シミュレーション結果

搭載バッテリー容量をパラメータとして、バス 1 台の一日の運行コスト（軽油代と電気代の和）および CO_2 排出量を求めた。図 1-1-2 および図 1-1-3 に平日の結果を示す。これらから以下のことがわかった。

- ① 電気バスの場合：往復に必要なエネルギー量は 6.7 kWh であるので、搭載バッテリー容量はそれ以上必要である。搭載バッテリー容量が 7 kWh 以上あれば、運行コストと CO_2 排出量はディーゼルバスのそれらより少なくなる。電気バスの一日の運行回数は、 7 kWh のとき 10 回、 8 kWh 以上のとき 12 回であった。運転コストおよび CO_2 排出量は運行回数に比例するため、 8 kWh 以上ではほぼ一定となり、 7 kWh の場合では 8 kWh 以上の場合より少なくなる。 7 kWh の場合の運行回数は 8 kWh 以上の場合より、2 回少ない。その 2 回はディーゼルバスが運行することになる。ディーゼルバスの運行コストは電気バスのそれよりも高いため、電気バスの運行回数が多い方が全体のコストメリットがあることになる。これらのことから、電気バスの搭載バッテリー容量は最少 8 kWh でよいと判断した。
- ② ハイブリッドバスの場合：搭載バッテリー容量に関わらず、平日の場合、一日の運行回数は 12 回であった。搭載バッテリー容量が 9 kWh 未満の場合、運行コストと CO_2 排出量はディーゼルバスのそれらより大きくなった。これは、搭載バッテリー容量が小さい場合、許容出力も小さいため、バッテリーからの出力が足りず、走行中頻繁にエンジンが稼動するためである。 10 kWh 以上の場合、運行コストと CO_2 排出量は、ディーゼルバスのそれらより少なく、かつ、ほぼ一定となった。これは、搭載バッテリー容量が概ね十分であり、エンジン発電への依存があまりないからである。

③ 3 者の比較：運行コストおよび CO₂ 排出量ともに電気バスが最も少なくなることがわかる。搭載バッテリー容量については、電気バスの場合、駅での待機時間に急速充電を行うことによって、ハイブリッドバスと同程度にまで小さくしてもよいことがわかる。

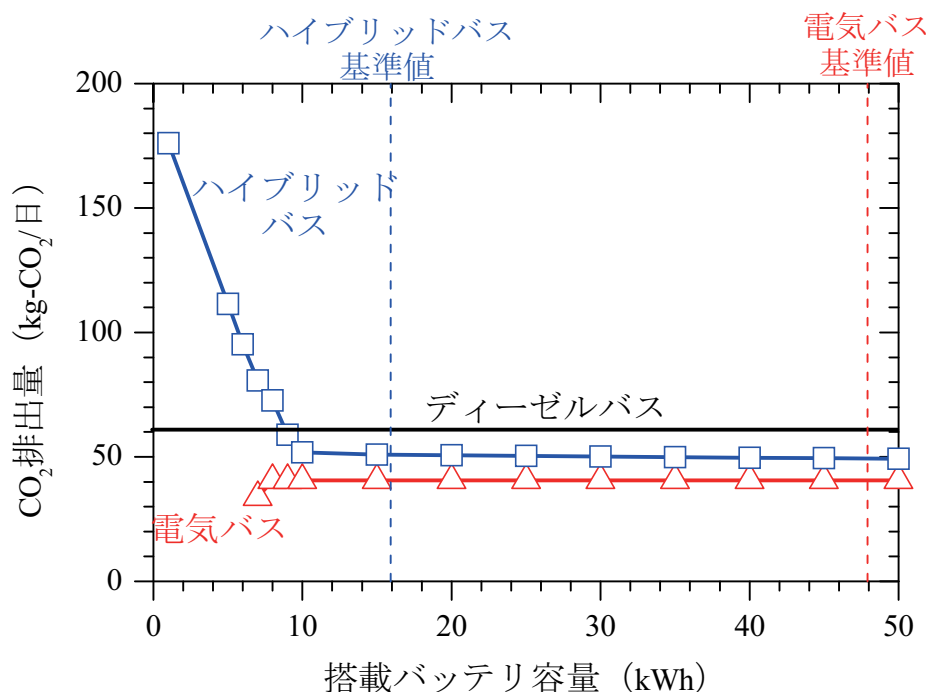


図 1-1-2 搭載バッテリー容量と運行コストの関係（平日）

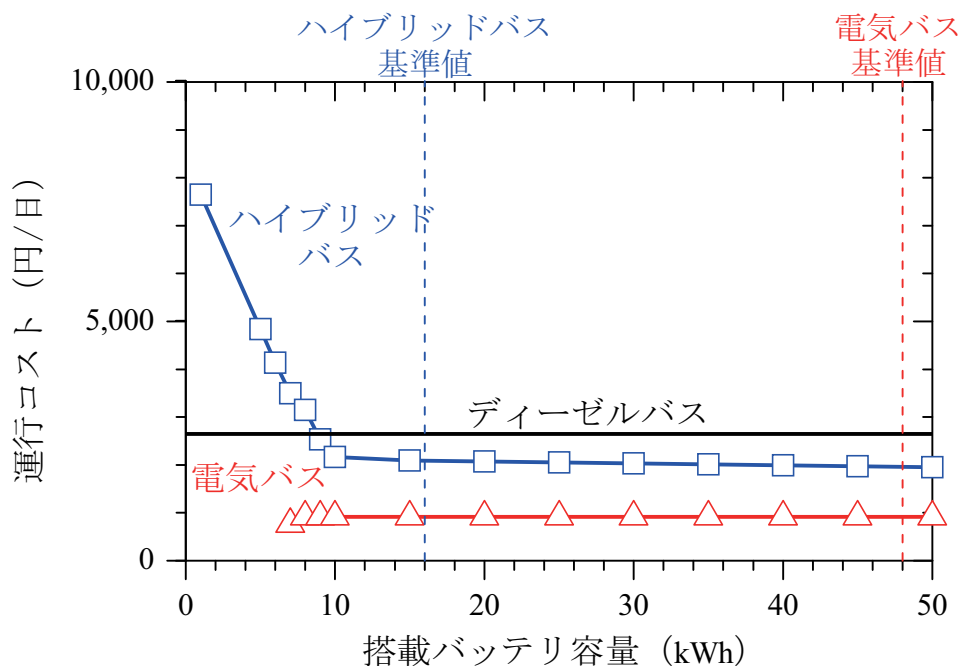


図 1-1-3 搭載バッテリー容量と CO₂ 排出量の関係（平日）

搭載バッテリー容量が同程度ならば、複雑な機構を持つハイブリッドバスより電気バスの方がコストやメンテナンスの点で有利である。なお、電気バスとハイブリッドバスとにおいて、コストの差が生じたのは、急速充電の有無に起因している。つまり、ハイブリッドバスの場合、急速充電なしとしたため、駅で十分な充電ができず、その結果、単価の高い軽油を用いたエンジン発電機で走行することになるからである。

(6) まとめ

電気バスとハイブリッドバスを実路線に導入した際に、ディーゼルバスと比べ、運行コストとCO₂排出量において、どのような効果があるかを検討した。その結果、電気バス、ハイブリッドバスともに運行コストおよびCO₂排出量はディーゼルバスの場合より減少することがわかった。電気バスの場合、待機時間中に急速充電することによって、搭載バッテリー容量を最小 8 kWh まで小さくできることがわかった。つまり、市内路線では、往復に必要なエネルギーよりやや大きな容量のバッテリーを搭載すればよいと言える。高価なバッテリーの量を少なくできることは導入コストへの効果が大きい。ハイブリッドバスの場合、一日の初めの満充電の分の電気エネルギーは運行コストおよびCO₂排出量の削減に寄与できるが、急速充電とできなかったため、運転間に十分な充電ができない。そのため、エンジンが稼働し、電気バスと比べ、運行コストおよびCO₂排出量の削減量が少ない。従って、これらの削減量の観点からは、急速充電ありの電気バスの導入が好適であると言える。

1-2 公共施設内における EV 車両導入効果の検討

(1) はじめに

東三河地域は、全国に誇る農業地帯であり、今後農工商連携の活発化なども期待されている。農業においては、利用エネルギーの変換（重油から、自然エネルギーあるいは電気エネルギーへ）や農業用ビークルの EV 化が検討されており、特に、EV 時代の到来は疑う余地がなく、産業の転換を促す「引き金」となると考えられる。今回、のんほいパークの客車牽引車の現状調査を行うとともに、同車両を EV 化した場合の、環境およびコストメリットを検討した。のんほいパークは、三遠南信地域において、最大規模の動植物公園であり、豊橋市民には非常になじみ深い場所といえる。また、同施設における太陽光発電量を調査し、EV 車両への電力供給の可能性を検討した。

(2) のんほいパーク内における客車牽引者の運行状況

のんほいパークの園内地図を図 1-2-1 に、運行している園内バスを図 1-2-2 に示す。図 1-2-1 の地図中に示されている運行ルートについて調査をした。地図上から運行ルートの距離を 2 km と推定した。停留所が 8 箇所あるので、平均の停留所間隔は 250 m である。このルートを日曜日・祝日は 3 台、土曜日は 2 台のバスが一周約 25 分間で運行している。また、実地での運行調査も行った。図 1-2-3 に調査風景を示す。4 箇所の停留所に待機し営業時間中に停留所を通過し

たバスの乗車人数や停留所への発着時刻を調査した。曜日や祝日、天候などを考慮し合計6回行った。図1-2-2に示した園内バスについても調査をした。この車両はToyota 2TG10 (Toyota L&F) という牽引用トラクタで、燃料はガソリンである。この車両が客車を2両牽引し、運行している。客車の乗車定員は合計20名で、運転手の他に常に車掌が1名乗車している。



図1-2-1 のんほいパーク園内地図



図1-2-2 のんほいパーク園内バス



図 1-2-3 園内バス運行調査風景

(3) コストメリットの算定

① シミュレーション条件

調査した情報を基に運行シミュレーションを行い、客車牽引者を EV 化した際のコストおよび環境メリットの算定をした。表 1-2-1 にシミュレーションで使った条件とパラメータを示す。シミュレーションは常に満員状態（総重量 3,500 kg）とし、1 日中運行できるバッテリー容量とした。バッテリーの充電は運行終了後の夜間のみに行うとした。また、速度は加減速以外を 7.2 km/h で一定とし停留所の停車時間を 1 分とした。また、勾配はそれほど急なものが無く、結果に大きな影響を与えない判断し、無視した。EV 化することにより、走行時に CO₂ の排出が無くなる。しかし、電気を使用するので、その発電時に排出される CO₂ を考慮する必要がある。この CO₂ 排出量と現状のガソリン車量から排出される CO₂ 排出量を比較することによって環境メリットを算出する。コストメリットは、現状消費しているガソリンの量と、EV 化後に消費される電力量からそれぞれの単価を用いてランニングコストの算定、比較を行った。ガソリン単価は 2011 年 6 月までの愛知県の年間店頭平均価格である 139 円/L を用いた。電気料金は単価は中部電力の高圧業務用電力（標準電圧 6,000 V、契約電力 500 kW 未満、プラン C）の年平均単価である 10.75 円/kWh を用いた。発電時の CO₂ 排出量は中部電力の 2009 年度の実排出係数の実績値である 0.474 kg-CO₂/kWh を用いた。

表 1-2-1 シミュレーション条件とパラメータ

運行	
施設	豊橋動植物公園
ルート	
1 周の長さ	2 km
1 周の所要時間	25 min
停留所数	8 箇所
停留所の停車時間	1 min
1 日に運行数	17 周/台
客車牽引者の仕様	
メーカー / 型番	Toyota / 2TG10
乗車定員	20 人
車両重量	1,470 kg
総重量	3,500 kg
燃費	2.5 km/L
(走行時 CO ₂ 排出量	0.944 kg-CO ₂ /km)
改造価格	1,200,000 円
バッテリー	
メーカー / 型番	Panasonic / EC-FV1260
直列数	12
合計容量	8,640 Wh
サイクル寿命	350 回
バッテリー価格	336,000 円
パラメータ	
ガソリン単価	139 円/L
電気料金単価	10.75 円/kWh
(発電時 CO ₂ 排出量	0.474 t-CO ₂ /kWh)

② シミュレーション結果とコスト・環境メリット

前述の条件下にて、平均停留所間隔である 250 m, 140 秒間のシミュレーション結果を図 1-2-4 に示す。1 区間の消費電力は 48 Wh となったので、1 周の消費電力は 384 Wh、1 日の消費電力は 6,500 Wh である。この結果から EV 化前後のランニングコストと CO₂ 排出量を算出した。結果を図 1-2-5 に示す。ランニングコストは年間 23 万円、CO₂ 排出量は年間 3.7 t-CO₂ の削減となった。EV 化によってランニングコスト、CO₂ 排出量ともに大幅な削減が期待できる。

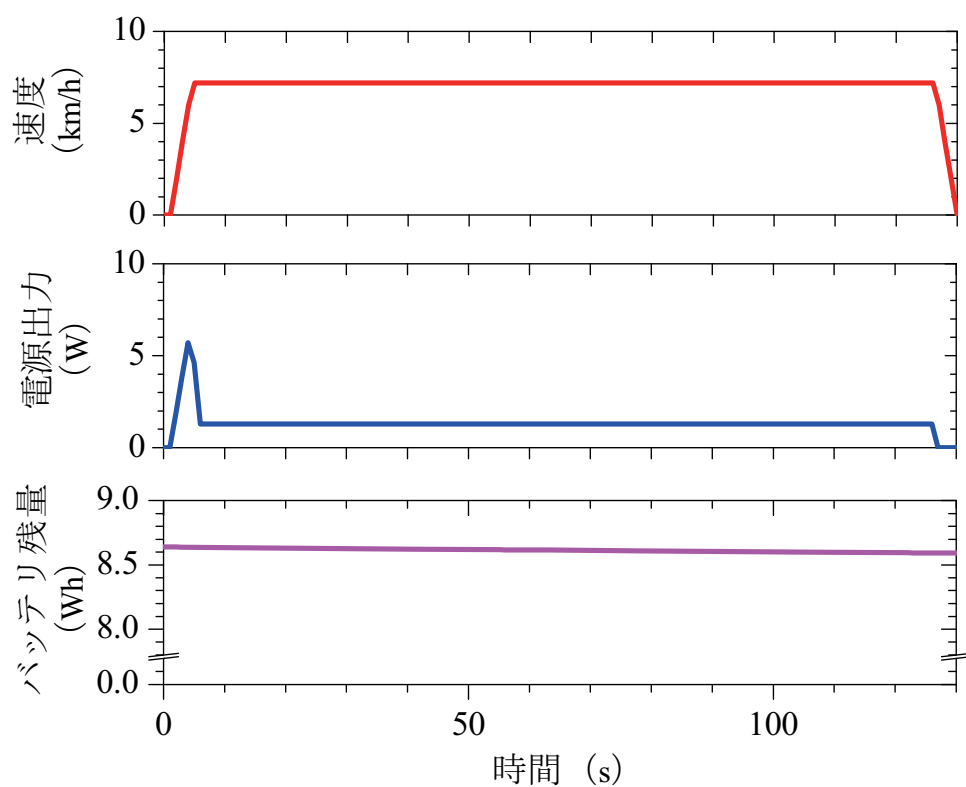


図 1-2-4 停留所間 1 区間のシミュレーション結果

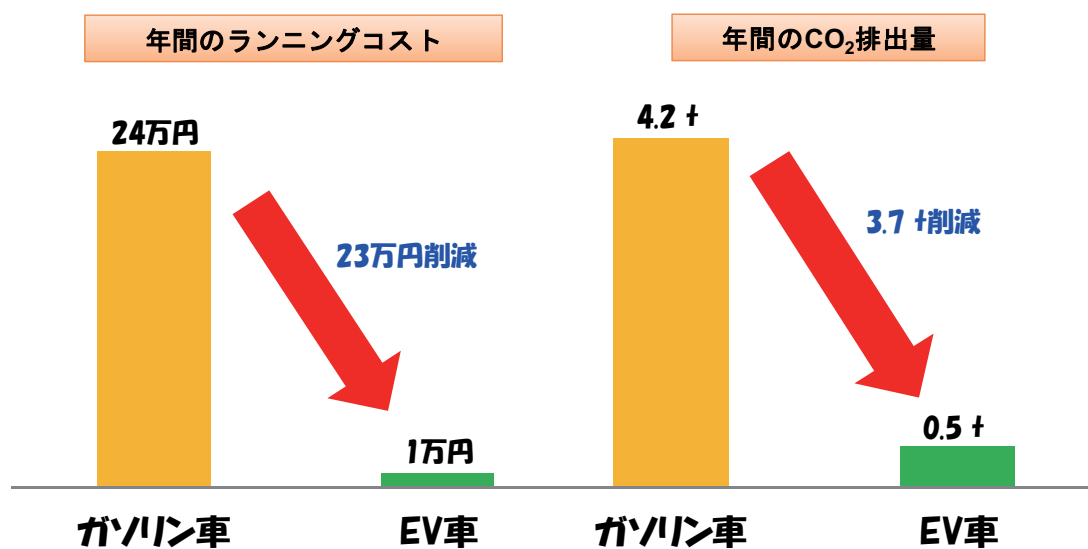


図 1-2-5 EV 化前後のコストと CO₂ 排出量

③ EV 化コストの償却年数

EV 化によって削減されるコストで EV 化にかかる費用（約 120 万円）を償却できる期間を検討した。年間 120 日運行したとすると、バッテリーのサイクル寿命が約 350 回なので、3 年に一度交換が必要になる。EV 化後のコスト収支を図 1-2-6 に示す。同図から約 10 年間で EV 化コストを回収できることがわかる。また、今後バッテリー価格の低下やガソリン価格の高騰などによっては、この期間が短くなる可能性もある。

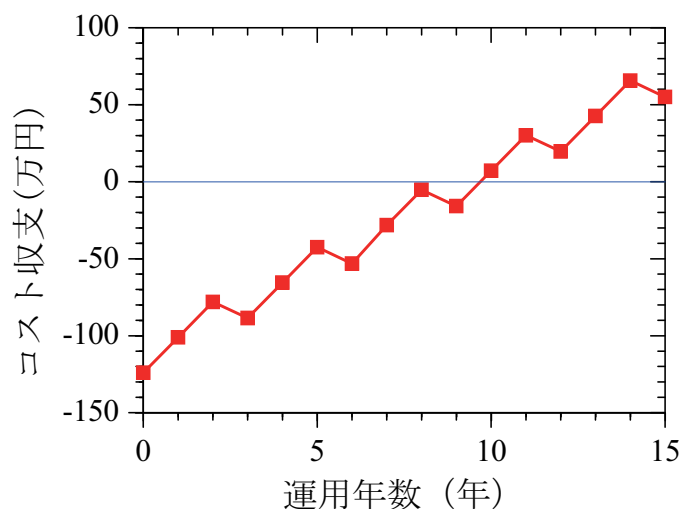


図 1-2-6 EV 化後のコスト収支

（４） EV 車両への太陽電池による電力供給

のんほいパークには自然史博物館の屋上に太陽電池パネル（20 kW）が設置されている。設置されている太陽電池パネルの写真を図 1-2-7 に示す。EV 化したとしても電気の供給源を現状と同じく電気事業者とすると、発電の際に CO₂ を排出してしまう。EV への電力供給に太陽電池を用いることへの可能性を検討した。シミュレーションによって算出した EV の消費電力量と 2010 年度の太陽電池の発電電力量を図 1-2-8 に示す。一日の発電量は EV の消費電力量に対し多く、十分に供給できるといえる。また、EV の年間消費電力量は太陽電池の年間発電量の 3.4%であった。



図 1-2-7 のんほいパークの太陽電池

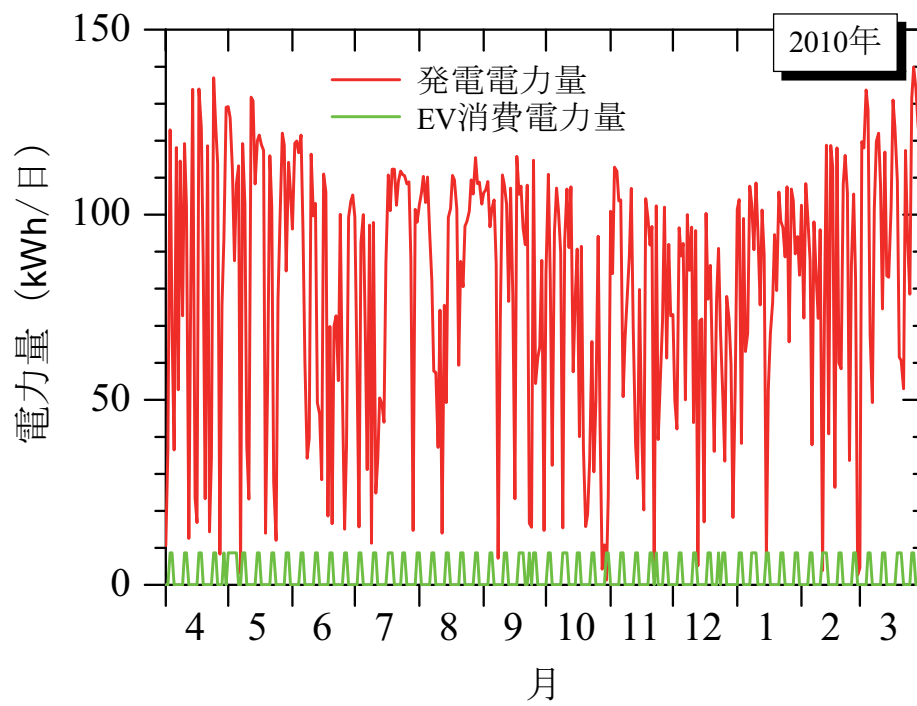


図 1-2-8 年間の発電量と EV 消費電力量

（５） 客車牽引者の EV 化

シミュレーションの結果を基にのんほいパークで運行しているものと同一車両（Toyota 2TG10）をエンジンや燃料タンクを取り外し、モータやバッテリーを搭載し EV 化した。モータは DC ブラシモータ（AMD Motor, FB1-4001, 144 V, 27 kW）を使用した。バッテリーは表 1-2-1 と同様に鉛蓄電池（Panasonic, EC-FV1260, 12V, 60 Ah）を 12 個直列にして使用した。改造作業は EV TOYOHASHI 株式会社に依頼した。EV 化した車両の写真を図 1-2-9 に、改造前後のモータ/エンジンの性能の比較を示す。



図 1-2-9 改造 EV トラクタ外観

表 1-2-2 改造前後のトラクタのモータ/エンジン性能比較

項目	改造 EV トラクタ*	エンジントラクタ
定格出力	28.5 / 5000 ps / rpm	32 / 3100 ps / rpm
最大トルク	12.4 / 0-3300 kg・m / rpm	8.6 / 2200 kg・m / rpm
登坂能力	約 50°	約 25°

*改造 EV トラクタは計算値

（６）フィールド試験

① 試験概要

実際に改造した車両がシミュレーション通りの性能であるかを調べるために、実際にのんほいパークでフィールド試験を行い、評価をした。フィールド試験の詳細を表 1-2-3 に示す。21 名が乗車した客車を改造 EV トラクタに接続し、園内バスが運行している同様のルート进行した。計測項目は、車両速度、バッテリー電圧、バッテリー出力電流の 3 種類とした。図 1-2-10 にフィールド試験風景を示す。

表 1-2-3 走行試験詳細

実施日	2011 年 12 月 26 日
走行ルート	園内バスと同様
周回数	3 周
客車乗員数	21 名
総重量	3,724 kg
計測項目	車両速度、バッテリー電圧、バッテリー出力電流



図 1-2-10 のんほいパークでのフィールド試験

② 試験結果

一例として図 1-2-11 に運行ルートを 1 周した際の計測結果と、計測した走行パターンや重量でのシミュレーション結果を示す。計測した消費電力量は 1,016 Wh、シミュレーションのそれは 709 Wh であった。計測結果のほうが約 300 Wh 多くなった。この消費電力量の差が発生した理由は、シミュレーションは勾配を無視しているからである。図 1-2-12 に計測した消費電力量と勾配を考慮したシミュレーションを示す。勾配を考慮することによって、シミュレーションでの消費電力量は 1,020 Wh となり、計測結果とほぼ同じとなった。しかし、当初のシミュレーションでの 1 周の消費電力量は 384 Wh であり、倍以上の値となってしまった。この理由は、当初推定した運行ルートが 2 km であったのに対し、実際に走行すると 2.5 km と長かったこと、そこから車両の走行速度が当初より速くなったこと、また、図 1-2-4 のように一定の速度パターンは現実には難しく、再現できないことなどが挙げられる。よって現状の搭載バッテリー容量 8,640 Wh では、8 周しかできず、1 日中（17 周）運行するには更に多くのバッテリーを搭載する必要がある。

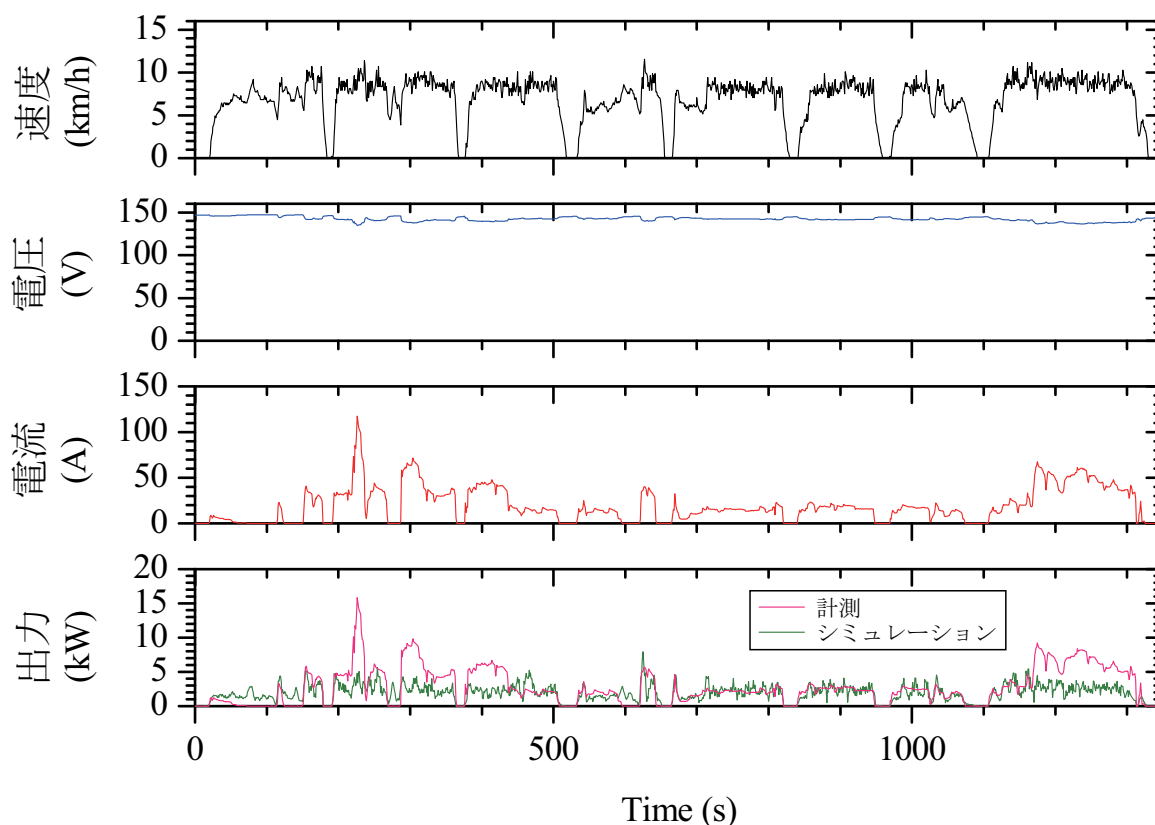


図 1-2-11 計測結果とシミュレーション結果

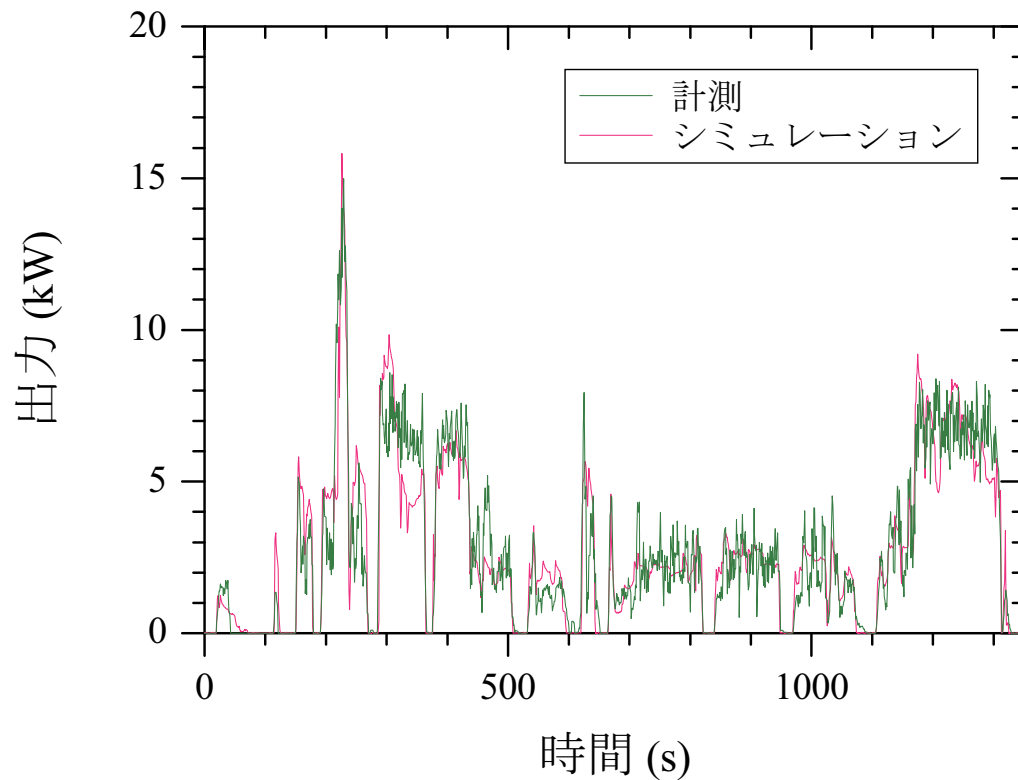


図 1-2-12 勾配を考慮したシミュレーション結果と計測結果

(7) まとめ

のんほいパークの客車牽引者の現状調査および、EV 化した際の環境・コストメリットの検討を行った。当初のシミュレーション結果ではコスト、CO₂ 排出量ともに大幅に削減ができ、EV 化コストも約 10 年で償却可能という結果となった。また、太陽電池からも十分に電力を供給可能であるという結果となった。しかし実際に車両を改造し、フィールド試験を行ったところ、シミュレーションの値より消費電力が多くなってしまい、乗客が定員まで乗車した場合、半日程度しか運行できないという結果となった。対策としては、現状より多くのバッテリーを搭載するなどが挙げられる。

1-3 バッテリー-キャパシタハイブリッド電源

(1) はじめに

電気自動車の電源には、走行中の加速に伴う大電流放電が要求され、回生ブレーキ等による充放電サイクルの繰り返しが行われる。これらはいずれも、バッテリーの劣化を加速させる要因である。バッテリーの劣化を抑制し、長寿命運用を行うには、バッテリーの出力を一定にし、充放電の繰り返し回数を減らせばよい。この相反する要求を満たすために、本研究室では、バッテリーに電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor : EDLC) を付加し、電源システムとして電気回路で結合する方法に注目した。大容量キャパシタには複数の種類があるが、本研究室では主に EDLC の研究を行っている。EDLC は、二次電池に比べて高い出力密度を持つ。また、科学反応を経ずに電荷を直接蓄電するため、特性の劣化も少なく非常に長寿命である。ただし、容量は二次電池に比べて小さく、現在の市販品レベルでは、鉛蓄電池の 1/5、ニッケル水素系蓄電池の 1/10~1/15、リチウムイオン系蓄電池の 1/15~1/20 程度しかない。このように、EDLC は優れた入出力特性を持つが、電気自動車の電源として単独搭載するためには、容量の大幅増加が必須である。しかし、一時的なエネルギー供給や、エネルギー回生の用途には適用可能であり、ハイブリッド車の電源として搭載された例も報告されている。電気自動車の場合も同様に、バッテリーの出力補助や、エネルギー回生のための蓄電装置として、EDLC を利用できる可能性がある。この考え方は、ハイブリッド車に似ている。エンジンとモータのハイブリット車では、エンジンをなるべく高効率で運用するために、モータとバッテリーでアシストを行う。この考え方を電気自動車に移し、バッテリーを最適な状態で運用するために、EDLC でエネルギーのアシストを行うという発想である。

(2) これまでの成果

これまでに、ハイブリッド電源を電気自動車に搭載した際の走行シミュレーションを行い、車両搭載時の制限と、走行性能に及ぼす影響について検討した。現在市販のキャパシタのエネルギー密度は二次電池と比べて小さい。このため、現行の電気自動車に、単にキャパシタを追加しようとすると、車両に収まらない可能性がある。そこで、バッテリーとキャパシタが車両中で占有できる体積を決め、その中でキャパシタが占める体積比率（キャパシタ体積比率）を変化させてシミュレーションを行った。その結果、最適なキャパシタ体積比率を決定するための指針を得ることができた。今年度は、実証実験を行うために小型の EV とハイブリッド電源の走行システムを製作し、走行実験を通してその評価を行った。特に、バッテリーの出力電流・電力の低減効果について評価した。

(3) 実験用小型 EV・ハイブリッド電源の製作

製作した小型 EV の外観を図 1-3-1 に示す。3 輪駆動のガソリン車である BUBU501（光岡自

動車)をベースに、後輪 2 輪駆動の電気自動車に改造した。走行用のモータには、図 1-3-2 に示すインホイールモータ (IWM : In-Wheel Motor) を用いた。IWM は、タイヤの内部にモータが内蔵された一体構造であり、通常の車両で必要とされるギア等の伝達系が不要である。このため、車両の軽量化や高効率化が期待できる。また、1 台の車両に対して個々のタイヤを独立に制御できるため、従来の車にはない、高い制御性を確保できる。この小型 EV は一人乗りで、最高速度は約 25 km/h、バッテリーやキャパシタ等の電源を除いた重量は 151 kg である。この小型 EV にハイブリッド電源を搭載し、実証実験を行った。

ハイブリッド電源を搭載した、小型 EV の駆動制御回路を図 1-3-3 に示す。バッテリーと EDLC とを自作の DC-DC コンバータで接続し、EDLC からインバータを通してモータへ電力を供給



図 1-3-1 本研究室で製作した実験用小型 EV



図 1-3-2 インホイールモータ (600 W, 48 V)

するシステムとした。DC-DC コンバータは、出力電流（EDLC への充電電流）を一定にするよう制御した。従来のハイブリッド電源では、DC-DC コンバータの出力電力を、キャパシタの出力電力の平均値になるよう制御する方式が一般的であった。しかし、電力計測のために多くのセンサを必要とし、また、電力の制御のために高度なコントローラを搭載する必要があった。また、バッテリーの出力電流をあまり一定にできず、キャパシタとハイブリッドすることによる効果が薄かった。そこで本研究室では、DC-DC コンバータの出力電流を一定にするよう制御することで、センサの数を削減し、コントローラの簡素化を図った。

製作したハイブリッド電源を、EV に搭載した様子を図 1-3-4 に示す。バッテリー・EDLC, DC-DC コンバータを、車両の後部に設置した。

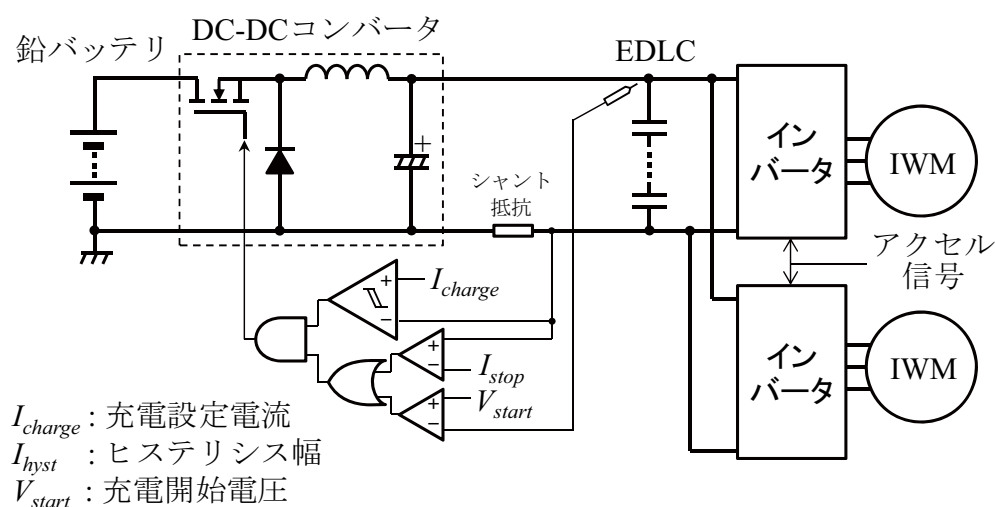


図 1-3-3 小型 EV の駆動制御回路

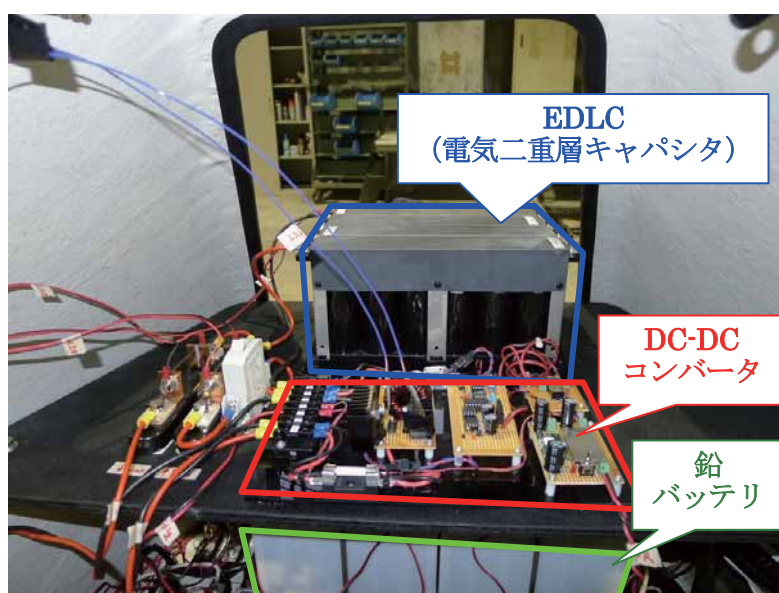


図 1-3-4 小型 EV の駆動制御回路の外観

(4) 走行実験と評価

ハイブリッド電源を搭載した EV (BC-EV) と、バッテリーのみを搭載した EV (B-EV) とを同じ速度パターンで走行させ、バッテリーと EDLC の出力を比較した。B-EV は、BC-EV から EDLC と DC-DC コンバータを取り外し、バッテリーを直接インバータに接続した EV である。走行は、本学学内の、舗装された 50 m の直線道路で行い、加速・定速・減速の一連の速度パターンで走行した。実験の結果を図 1-3-5 に示す。図は上から、車両の速度、バッテリーと EDLC の出力電流、電圧、出力電力である。B-EV では、車両の加速と同時にバッテリーから約 40 A の大電流を放電したのに対し、BC-EV では EDLC が代わりに放電することで、バッテリーの出力電流を小さくすることができた。また、DC-DC コンバータを制御して EDLC を一定電流で充電することで、バッテリーの出力電流もほぼ一定に制御することができた。このことから、従来のハイブリッド電源と比べて、バッテリーをより安定した状態で使用でき、さらなる長寿命化が期待できる。また、B-EV と BC-EV の出力電流の最大値を比べると、BC-EV は B-EV よりも約 70 % も小さくすることができた。さらに、B-EV では回生ブレーキ (Regenerative braking) 時のエネルギー回収をバッテリーに行ったのに対し、BC-EV では EDLC で回収したため、バッテリーの充放電回数を少なくすることができた。以上の結果から、バッテリーの長寿命化が期待できる。

今後の課題として、バッテリーの寿命がどの程度延長するのか、サイクル試験を通した検証が必要である。また、回生ブレーキシステムを改善し、回収電力をより多くする努力が必要であ

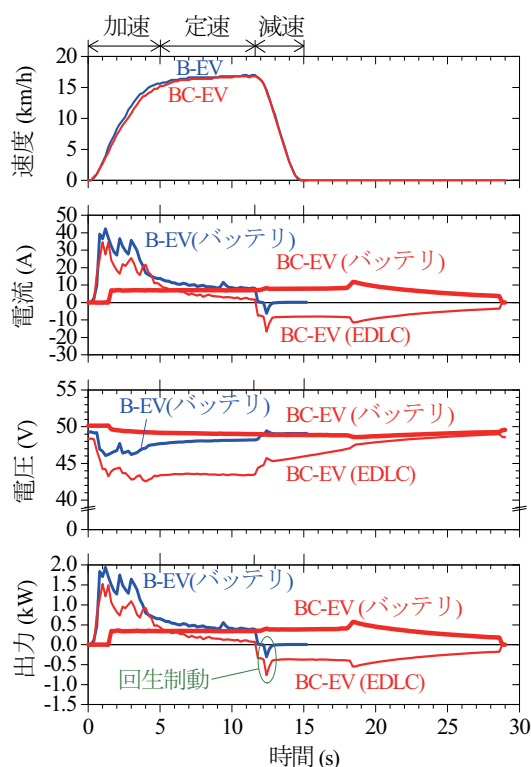


図 1-3-5 走行実験結果

る。

1-4 高効率回生システムの開発

(1) 小型回生試験装置による回生実験

① はじめに

近年、低環境負荷と考えられる電気自動車の開発が進んでいる。そこでの課題は、航続距離の延長とバッテリーの長寿命化である。このような背景から、本研究室ではバッテリー-キャパシタ併用(BCH)電源の開発を進めている。BCH 電源は、キャパシタで加速時に大電流を出力するとともに回生エネルギー（ブレーキ時にモータを発電機として動作させ、回収することができるエネルギー）を吸収し、バッテリー負荷を手源することで、バッテリーの長寿命化を図ろうというものである。また、キャパシタへの回生エネルギー回収効率を向上させることで航続距離も延長することができる。そこで、回生エネルギー回収効率の高いシステムの開発を目指し、小型回生試験装置による回生実験を行った。

② キャパシタへの定電流充電制御回路

キャパシタへの充電は、定電流で充電を行うほうが良いと言われている⁽¹⁾。そこで、定電流充電回路として、降圧コンバータを作製しキャパシタへの充電電流を一定値に制限するようにした。この回生システム図を図 1-4-1 に、実験結果を図 1-4-2 に示す。この結果から、キャパシタの初期電圧が回生効率に影響し、最適値が存在することが分かった。これは、キャパシタの初期電圧が高いほど、入出力の電位差が小さくなりコンバータの動作周波数が低くなる。その結果、コンバータの効率が高くなる。一方、回生時間は短くなることが原因と考えられる。モータの発電効率とコンバータの変換効率が低いことが分かった。コンバータの変換効率の改善手段としては、制御方法を変更が考えられ、モータの発電効率の改善手段としては、極数切替モータの開発を考えた。

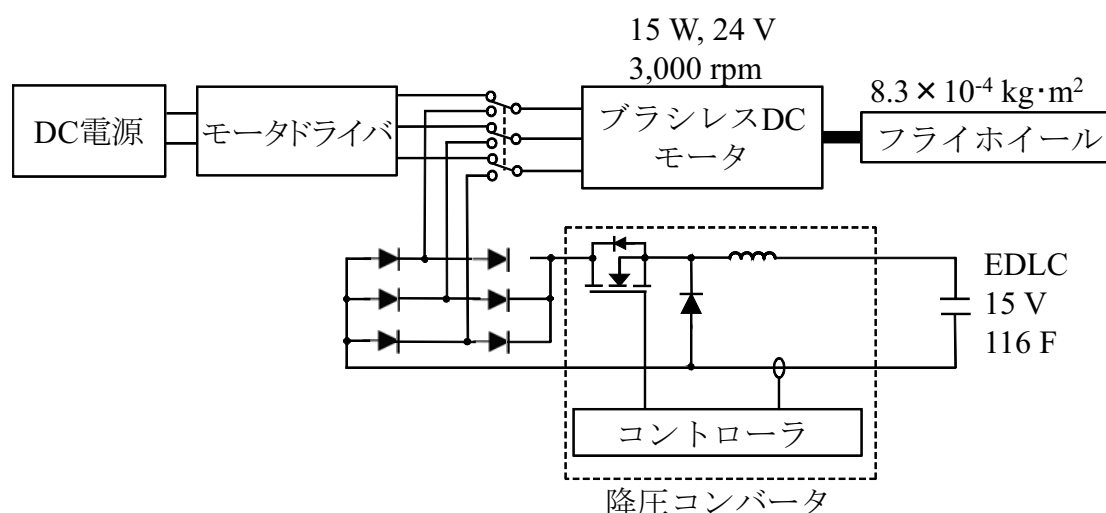


図 1-4-1 小型回生試験装置のシステム図

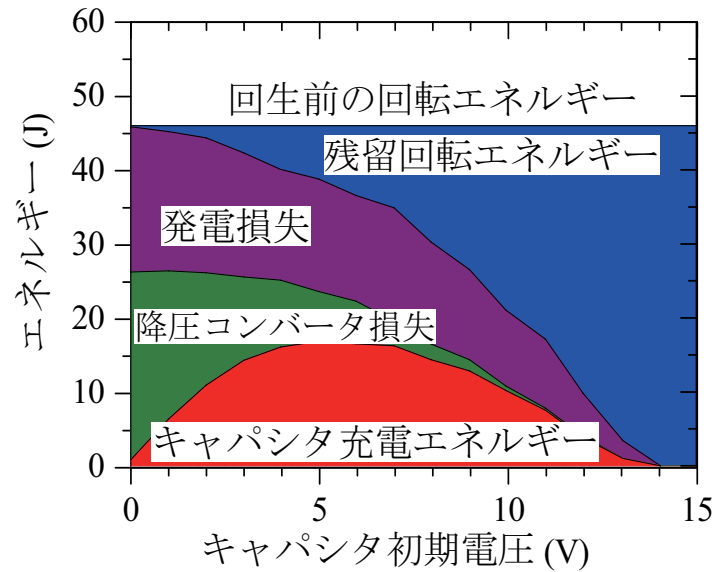


図 1-4-2 小型回生試験装置による実験結果

③ 極数切替モータの開発

モータは走行時に高効率で、発電機は発電時に高効率である。車両用モータは回生時に発電機として動作させるため、回生時の効率が悪い。そこで、回生時にモータの極数を変え、発電機として動作させても高効率なモータを考えた。まず、導入効果の検討のため、極数を切替るとモータの起電圧、電機子リアクタンス、電機子抵抗のみが変わるとしてモータを発電機として動作させた場合の特性を計算した。結果を図 1-4-3 に示す。結果、極数が多ければ銅損が大きいが低回転数でも発電可能であることが分かった。

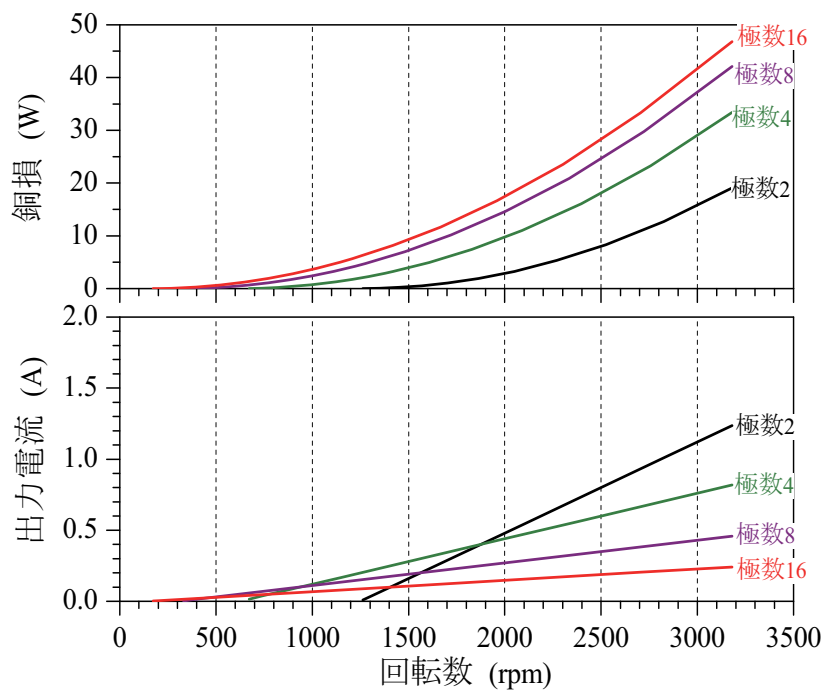


図 1-4-3 極数によるモータ特性の違い

(2) MATLAB/Simulink による車両の回生モデルの作製

① はじめに

回生現象の理解を促進するために、MATLAB/Simulink により車両モデルと回生制動のモデル化を行った。図 1-4-4 に回生制動のモデルを示す。小型 EV による走行試験により BCH 電源を用いた場合、回生エネルギー回収効率がキャパシタへの充電電流に依存していたため、今回作製したモデルでシミュレーションした場合も同様の結果となるか確認を行った。

② シミュレーション

小型 EV による走行試験とシミュレーション結果を比較した結果を図 1-4-5 に示す。結果はほぼ一致し、充電電流を大きくすると回生エネルギー回収効率は向上し、20 A で頭打ちとなった。これは、充電電流を大きくすると制動力が大きくなり、回生時間が短くなる。そのため、走行抵抗の影響が小さくなることが原因と考えられる。また、充電電流を 20 A 以上に設定しても、発電機の出力不足で設定値に制御できないことが、回生エネルギー回収効率が頭打ちになる原因と考えられる。

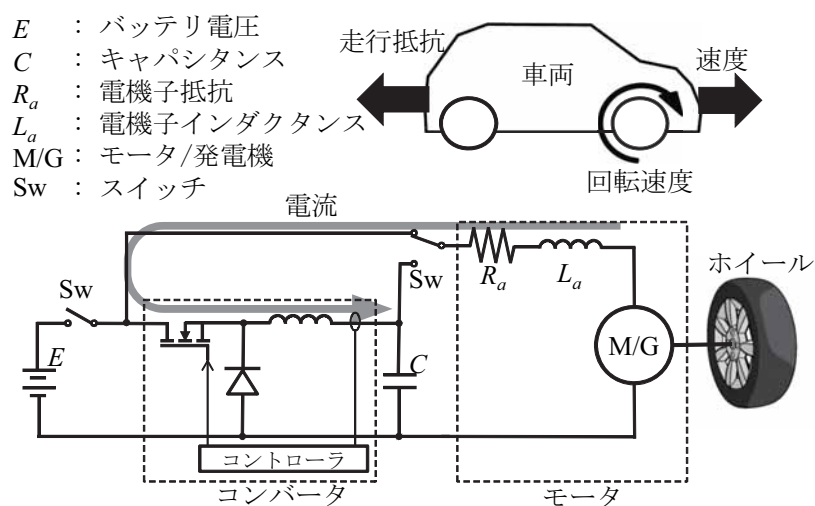


図 1-4-4 車両の回生制動モデル

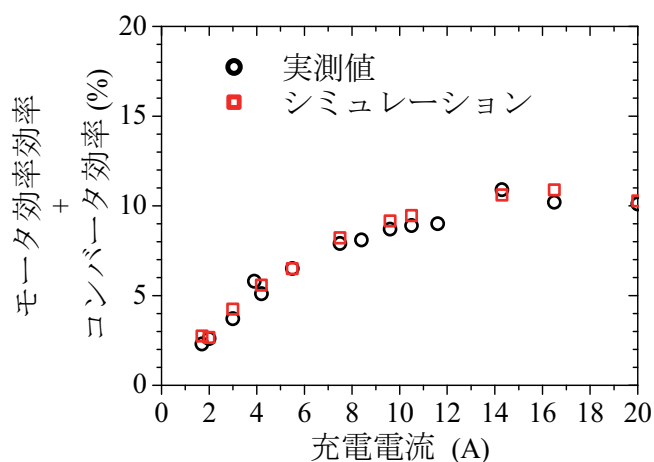


図 1-4-5 充電電流とモータ効率+コンバータ効率の関係

1-5 大学試作の小型電気自動車のデモンストレーション

(1) 市民へのデモンストレーション

次世代ビークルは、環境への負荷を軽減できるという利点を持つ。しかし、それは旧来からあるビークルとは利用形態が異なる場合が多い。例えば、電気自動車の場合、ガソリン車からの大きな変化は、走行エネルギーの供給形態である。電気はガソリンより単価が低いことから、これまでのガソリンスタンドのような形態のビジネスは成り立ちにくい。車両へのエネルギー供給（電気自動車では充電）は自宅で行うケースが増えるであろう。また、安価な夜間電力を利用するようになれば、エネルギー供給のタイミングも変化することとなる。これらのことから、次世代ビークルの導入によって、市民の生活も変化することが予想される。また、次世代ビークルの技術は発展段階にあり、特に航続距離は、従来車に比べてまだ 1/3 程度である。現状の技術がどの程度であり、次世代ビークルの特徴はどういったものなのか、市民へ情報を発信し、理解してもらうことが重要である。また、市民からの声をフィードバックすることで、次世代ビークルを含めた未来ビークルシティの構想を、より良いものにできると考えられる。本研究室では、技術や概要を市民に理解し、興味を持ってもらうためにエコ電気エネルギーに関するイベントの開催やデモンストレーションを行っている。

(2) 小型 EV の試乗体験（第 28 回 豊橋技術科学大学オープンキャンパス）

2011 年 8 月 27 日に豊橋技術科学大学にて、第 28 回オープンキャンパスが開催された。そこで、本研究室では製作した小型 EV の試乗会を行った。図 1-5-1 はその様子である。試乗会では車両の速度を制限し、普段はなかなか電気自動車に乗ることができない高校生から大人の方まで、約 80 名の幅広い年齢層の方々に試乗して頂けた。



図 1-5-1 小型 EV の試乗風景（2011 年 8 月 27 日 豊橋技術科学大学にて）