

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

電気・電子情報工学系 教授 滝川 浩史

1-1 公共施設内における EV 車両導入効果の検討

(1) はじめに

近年、地球温暖化や原油枯渇などの問題がますます深刻化している。今後、代替エネルギーとなり得る発電方法の見通しが立たなければ、地球温暖化や原油枯渇が加速する可能性がある。このような背景から石油に依存しない社会づくりという課題が指摘されている。

その解決策の 1 つとして、電気自動車 (EV) の普及がある。EV は内燃機関を持たずモータで走行するため、CO₂ などの温室効果ガスを排出しない。また、自然エネルギーなど、化石燃料以外の一次エネルギーを利用することができる。しかし、1 度の給油で 500 km 走行することができるガソリン車と比べて、EV は 1 回の満充電あたり 150 km 程度しか走行することができない。さらには、充電時間が長いなど利便性の低さの問題がある。これらに対し、街中走行の旅客用商業バスなど、路線やタイムスケジュールなど予め走行パターンが決められた車両は充電タイミングを決めやすく、それら問題を回避して利用できると考えられる。

(2) 対象施設および園内バスについて

今回研究対象とした車両は、愛知県豊橋市に位置する豊橋動植物公園 (のんほいパーク) 内で運行している園内バスとした。のんほいパークは植物園、自然史博物館、動物園、遊園地を併せ持つ複合商業施設である。客層は親子連れが多く、園内バスに乗車する約半数が子供である。園内バスは牽引車と客車から構成され、牽引車はガソリンエンジン駆動の TOYOTA L&F 製の 2TG10 である。のんほいパークでは土曜日に 2 台、日祝日に 3 台の園内バスが運行している。本研究では施設内を走行している車両を EV 化し、実際に客車を牽引し走行した。

(3) フィールド試験

これまで本研究室では走行時の簡易な消費エネルギーの計算からバッテリー容量を決定し、牽引車と同型の車両を EV 化してきた。そして、EV 化した車両を実際にのんほいパークへ運び入れフィールド試験を行った。客車は現在運用されているものを用い、実際の運行スケジュールに沿って行った。図 1-1-1 にフィールド試験の様子を示す。搭乗人数は車掌を含み本学の学生 21 人を乗せて行った。



図 1-1-1 のんほいパーク内フィールド試験の様子

(4) 厳密な消費エネルギーの計算について

フィールド試験の結果から、1 周を走行するのに消費する電力量は 1,016 Wh/周となった。園内バスは 1 日に 17 周運行しており、更に安全係数、バッテリーの劣化係数を考慮すると 1 日に必要なバッテリー容量は以下の式で求められる。

$$W_n = W_{round} \times 17 \div \eta_d \times \eta_{safe} = 25,908 \text{ (Wh)} \quad (1)$$

W_n : 搭載バッテリー容量(Wh/日), W_{round} : 1 周の消費電力量(Wh/周),

η_d : 劣化係数(0.8), η_{safe} : 安全係数(1.2)

これまでの簡易な消費エネルギーの計算から求めたバッテリー容量は 8,640 Wh であり、フィールド試験の結果と比較すると、1 日の走行に必要なバッテリー容量に達していないことがわかった。従って、厳密な消費エネルギーの計算が必要と考えた。

簡易な消費エネルギーの計算では、停車駅間速度パターンを加減速を除き一定とし、路面の勾配を考慮しないなど簡略化していた。つまり、簡略化したことでバッテリー容量の計算に大きな差異が生じることとなったと考えた。そこで、停車駅間速度パターンをフィールド試験で計測した値を用い、走行する路面の勾配を計測し計算に適用することとした。園内を 1 周する際に計測したバッテリー出力と厳密な消費エネルギーの計算の結果のバッテリー出力を比較したグラフを図 1-1-2 に示す。加速パターンおよび勾配を考慮することでバッテリー出力はほぼ一致し、1 周の消費エネルギーは実測値 1,016 Wh/周に対し、942 Wh/周と近い値となった。

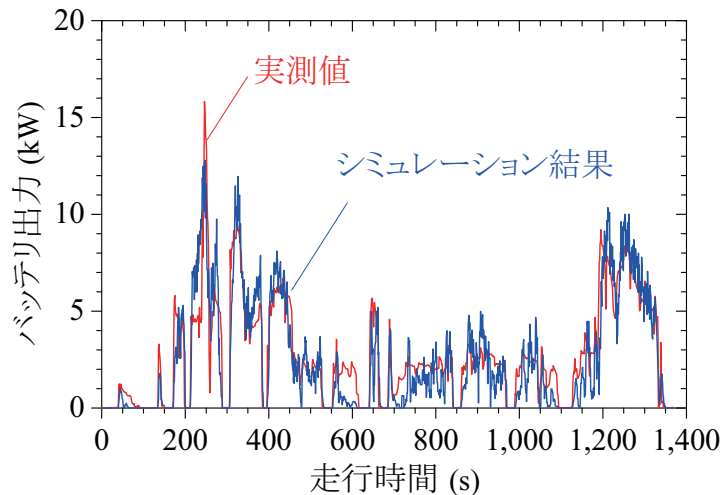


図 1-1-2 シミュレーション結果

(5) バッテリー容量とコスト

先述したように、現在のバッテリー容量では一日中の走行ができない。不足した周回数は現行のガソリン車が行う必要があるため、コスト削減量と CO₂ 排出削減量が少なくなる。逆にバッテリー容量が十分に搭載されている場合でも、過剰に搭載した場合は重量増加により走行消費エネルギーが増加し、コスト削減量と CO₂ 排出削減量が少なくなる。また、バッテリーには寿命があるため、バッテリー容量を多くすると、バッテリー交換費用が多くかかってしまう。

図 1-1-3 に鉛バッテリーを用いた場合の運用コストの削減量を示す。バッテリー容量は走行可能周回数が 5, 10, 15, 17, 20, 25 周となるバッテリー容量とした。鉛バッテリーは耐用年数の都合上、三年毎にバッテリーを交換する必要がある。この時、バッテリーの交換コストの影響が大きく、コスト償却することができないことがわかった。

次に、リチウムイオンバッテリーを用いることを考えた。リチウムイオンバッテリーは鉛バッテリーと比較して、高エネルギー密度で寿命が長いというメリットがある。しかしながら、単位容量当たりの値段は高い。図 1-1-4 にリチウムイオンバッテリーを用いた場合の運用コストの削減量を示す。初期コストがかかるものの、交換サイクルが 16 年と長い場合コスト償却が可能であることがわかる。また、17 周を走りきるだけのバッテリー容量が最もコスト削減量が良いことがわかった。これは前述の通り、運行周回数の 17 周を走りきるバッテリー容量より少ない場合は、現行のガソリン車が行う必要があるため、コスト削減量が少なくなるためである。また、それ以上に搭載した場合は重量増加により走行消費エネルギーが増加し、バッテリー交換コストも高くなり、コスト削減量が少なくなる。

(6) バッテリー容量と CO₂ 排出削減量

同様に、バッテリー容量と CO₂ 排出量の関係を図 1-1-5、図 1-1-6 に示す。鉛バッテリー、リチウムイオンバッテリーどちらを用いた場合でも、運行可能周回数が 17 周となるバッテリー容量が最も削

減量が多くなった。従って、EV 化する場合は最適なバッテリー容量を搭載することで削減量を最大とすることができる。

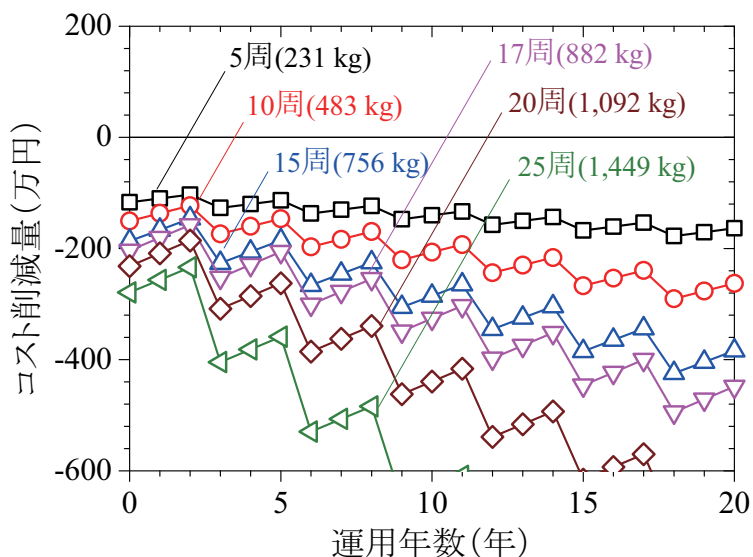


図 1-1-3 鉛バッテリーを用いて EV 化した時の
運行可能周回数とコスト削減量の関係

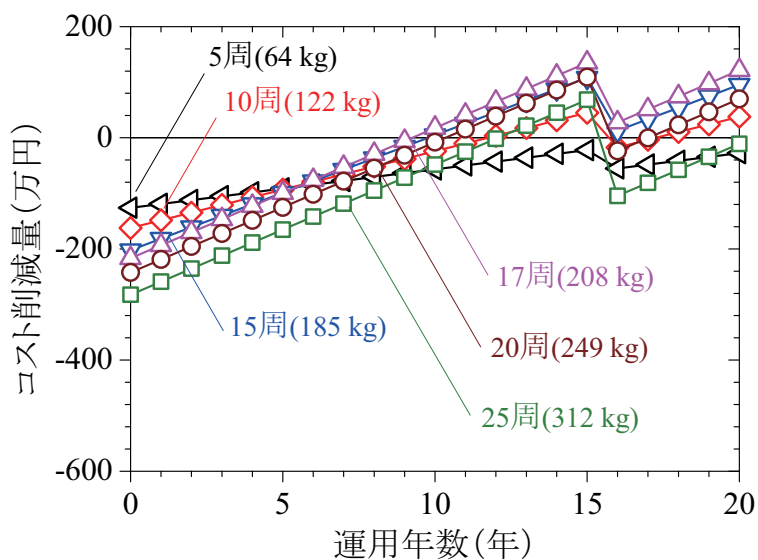


図 1-1-4 リチウムイオンバッテリーを用いて EV 化した時の
運行可能周回数とコスト削減量の関係

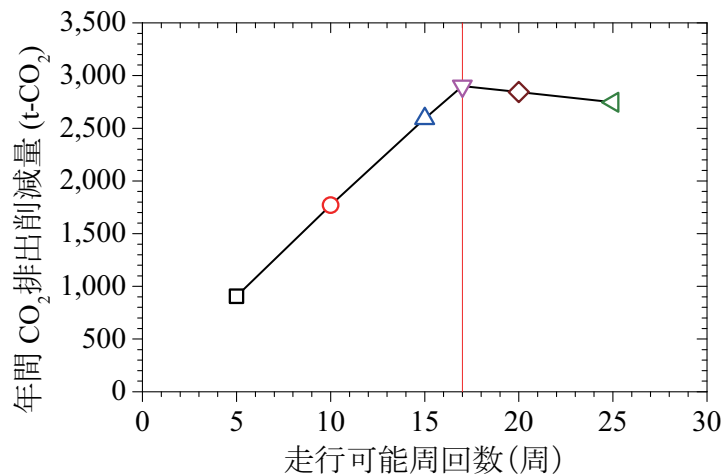


図 1-1-5 鉛バッテリーを用いて EV 化した時の
走行可能周回数と CO₂ 排出削減量の関係

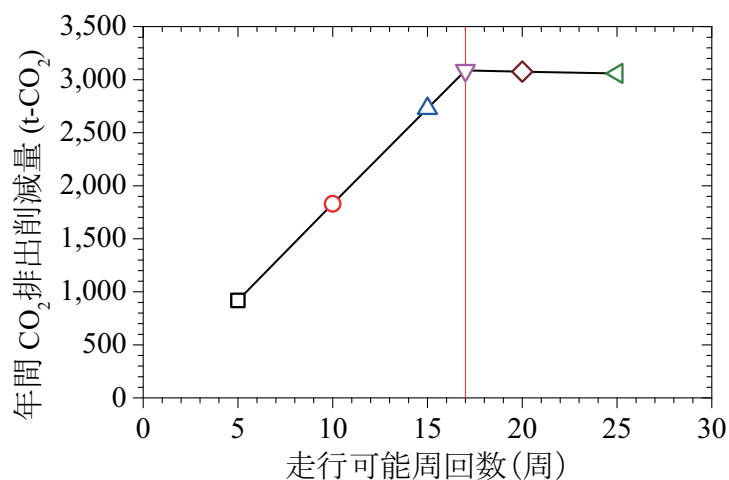


図 1-1-6 リチウムイオンバッテリーを用いて EV 化した時の
走行可能周回数と CO₂ 排出削減量の関係

(7) まとめ

削減量が最大となる条件は、リチウムイオンバッテリーを用いて、走行可能周回数が 17 周となる容量となった。また、その時の運用コスト、CO₂排出量それぞれ 91%、74%と、ともに大きく削減することができる。改造費の償却も約 10 年で可能であり、EV 化のメリットは十分に大きいと考えられる。今回、乗客は満員を想定して計算を行ったが、実際には常に満員ではないことや、利用客の約半分は子供であり重量が軽くなることから、運用コスト、CO₂排出量は更に少なくなる。バッテリー容量を少なくすることができるため、重量の軽量化やバッテリーコストの低減なども期待することができる。

1-2 のんほいパーク内への太陽電池の利用の検討

(1) EV 充電用太陽電池について

のんほいパークへ EV を導入した場合、EV への充電を太陽光発電から供給することができれば、電力コストおよび発電から消費までの CO₂ 排出量はゼロとすることができる。しかし、既存の施設内に太陽光パネルを設置する場合は土地の面積が限られてしまう。従ってソーラーパネルを設置する際には、発電量が最も大きくなる条件を知る必要がある。今回、ソーラーパネルを設置する際の最適条件を見つけることを目的とした。最適条件の考え方として、単位土地面積における発電量が最大かつ、2 列目以降のソーラーパネルは前列のソーラーパネルの影による発電ロスをできる限り抑えることが必要である。

(2) 太陽光パネルの影の長さ、受光面積率について

今回、ソーラーパネルの設置傾斜角と、パネル面長さとパネル間距離の比をパラメータとした。設置傾斜角が大きければ大きいほど、パネル面長さとパネル間距離の比が小さければ小さいほど、影の影響が大きく現れ、受光面積率は減少する。太陽軌道は春分、夏至、秋分、冬至の 4 軌道について検討を行った。太陽光発電での発電量は、日射量に比例する。今回、ソーラーパネルに降り注ぐ日射量は NEDO が提供する日射量データベースを用い、各軌道の日の前後 15 日を平均したデータを用いた。なお、ソーラーパネルは真南に向けることとした。

(3) 最大発電量と設置条件

図 1-2-1 にソーラーパネルの設置傾斜角と、パネル面長さとパネル間距離の比を変化させた場合の単位土地面積あたりの年間発電量とソーラーパネルの利用率の関係について示す。単位土地面積あたりの年間発電量は、各軌道における発電量に重みづけをして求めた。単位土地面積あたりの年間発電量は、設置傾斜角 40°、パネル面長さとパネル間距離の比が 0.6 で最大となった。しかしながら、パネル配置が密であり、影による発電ロスは約 40% となってしまった。そのため、発電ロスが 10% 未満となる制約条件を付けると、ソーラーパネルの設置傾斜角 20°、パネル面長さとパネル間距離の比が 1.2 で単位土地面積あたりの年間発電量は最大となった。しかし、傾斜角による発電量の差はほとんど見られなかった。

日本において、影の影響を考えない場合での最も効率のよい設置角は 35°程度とされている。しかしながら、今回 20°となった原因として影の影響があった。事実、大阪-東京間における太平洋側のメガソーラーは 10~20°でソーラーパネルが設置されている。しかし、メンテナンスや気候条件により、20°が最もよい設置角とは限らない。

(4) のんほいパーク内への太陽電池設置に向けた課題

本研究では、日射量の値として NEDO から提供されているデータを利用したが、NEDO から提供されるデータは、様々な計測点の日射量を平均化されているものであるため、今回のようにあ

る地域（地方）における日射量を正確に把握しているものではない。そのため、より計画的に太陽電池を導入するには、その地域（地方）の日射量を正確に知る必要がある。今後は、分光放射計を用いた日射量の計測を実施することで、豊橋の日射量をある程度正確に把握し、のんほいパークに適した太陽電池の種類や設置方法等条件を見出していく予定である。

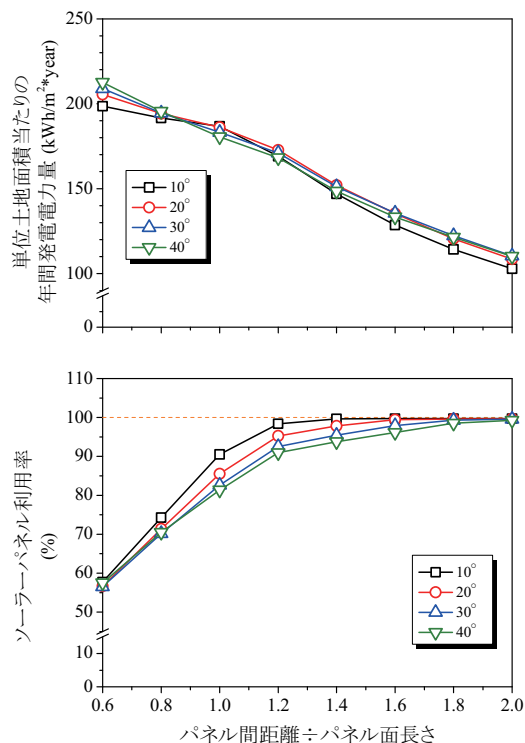


図 1-2-1 設置傾斜角とパネル面長さとパネル間距離の比に対する、
単位土地面積あたりの年間発電電力量とソーラーパネルの利用率の関係

1-3 湾岸重機の EV 化の効果および自然エネルギーの利用についての検討

(1) 研究対象

本研究では、三河港のコンテナターミナルで稼働しているストラドルキャリア（SC: Straddle Carrier, 図 1-3-1）を対象とし、EV 化による効果を検討した。SC とは、コンテナターミナル内のコンテナの移動、積み上げを行う大型の自動車である。現在は比較的小さな電気自動車が増えているが、単体でもエネルギー消費が大きいことや、継続的にエネルギーを消費しているため確実にエネルギー消費量の削減ができる大型のものにも普及していくと考えられるためである。SC は現在軽油を燃料としているが、エンジンをモータに、燃料タンクをバッテリーに載せ替え EV 化することで、運用コスト、CO₂ 排出量が削減できると考えた。さらに、電源として再生可能エネルギーを用いれば、運用コスト、CO₂ 排出量はゼロにできる。



図 1-3-1 SC 外観

(2) SC の詳細と EV 化について

コンテナターミナルには計 4 台の SC が稼働している。3 台は三菱重工製ディーゼル SC (DSC) の VSC4434, もう 1 台が TCM 製ディーゼルハイブリッド SC (HSC) の S4WE である。DSC は 11,149 cc のエンジンを 2 基積んでおり, 移動時は両方のエンジンを荷役時は片方のエンジンを使用する。HSC はシリーズ式のハイブリッドであり, 11,045 cc のディーゼルの発電機で発電し, 移動と荷役はモータで行っている。電動ストラドルキャリア (ESC: Electric Straddle Carrier) への EV 化の検討に際し, 搭載バッテリーは一日の稼働に必要な容量とし, モータは TCM 製 HSC-S4WE のカタログに記載されている 257 kW のモータとして計算を行った。

(3) 運用コスト削減量と CO₂ 排出削減量

現状は DSC, HSC どちらも軽油を使用しており, 燃料消費量から軽油単価と軽油の二酸化炭素排出係数を用いて計算を行った。また, EV 化後では電力を消費するため, 消費電力量から電力料金単価と電気の二酸化炭素排出係数を用いて計算を行った。燃料単価は三河港コンテナターミナル株式会社, 燃料購入実績 (2010 年度) を用い, 電力料金単価は三河港コンテナターミナル株式会社, 電力料金単価 (2008 年 8 月～2011 年 8 月) を用いて計算を行った。運用コストと CO₂ 排出量の削減率を表 1-3-1 に示す。

表 1-3-1 ESC 化による運用コスト削減率および CO₂ 排出削減率

	削減率 (%)	
	運用コスト	CO ₂ 排出量
HSC→ESC (1 台)	32.4	37.9
DSC→ESC (3 台)	34.7	44.1
Total (4 台)	34.2	42.8

（４）バッテリー価格とコスト削減量

EV 化に必要なコストとして、改造費とバッテリー価格とを考える。ここでの改造費は、バッテリー価格を含まずに、他のモータなどの必要な部品費用は含まれているとした。改造費はモータ出力と比例すると仮定し、以前本研究室で作成したのんほいパーク用の客車牽引車両の改造費を参考にして算出した。のんほいパーク用客車牽引車両のモータ出力は 25 kW、改造費 100 万円だった。ESC のモータ出力は 257 kW であり、約 10 倍の出力であるため、ESC の改造費を 10 倍の 1,000 万円とした。次にバッテリー価格を考える。現状のバッテリー価格は 100~200 円/Wh、2020 年頃には 20 円/Wh になると考えられる。ESC4 台分に必要なバッテリーの価格は、現状で 3~6 億円、2020 年頃には 6,000 万円となる。

この時のコスト償却年数を図 1-3-2 に示す。現在のバッテリー価格は高価であり、コスト償却年数が長い。2020 年からの EV 化であれば、コスト償却年数は 8 年になり、現実的である。ただし、この時バッテリー交換タイミングは考慮していない。また、1 日中稼働することのできるバッテリー量としたが、運用方法および充電タイミングによってバッテリー容量は異なる。そのため、ESC 化の厳密検討には、ESC の適切な運用方法の解析が必要となる。

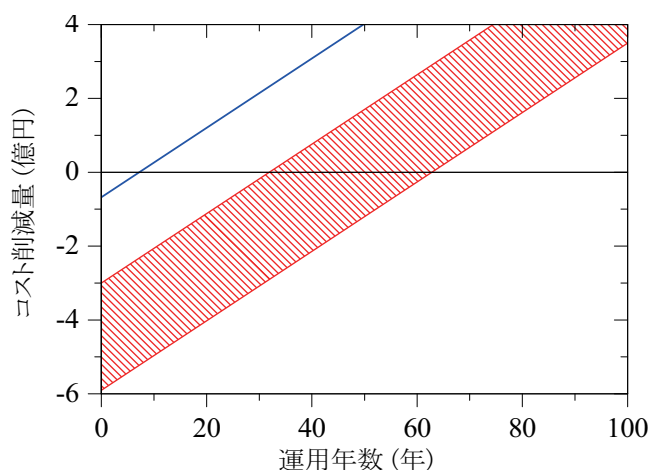


図 1-3-2 バッテリー価格の違いによるコスト償却年数の変化

1-4 ゴミ収集車の EV 化の効果の検討

（１）研究対象

今回は愛知県豊橋市のごみ収集車を対象とし、電動化のごみ収集車（EV ごみ収集車）のコスト削減量、CO₂ 排出削減量およびコスト償却年数の検討を行った。計算方法として、これまでののんほいパークでの研究を基に、厳密な消費エネルギーの計算を行った。

ごみ収集車は様々なごみを回収するが、今回は最も回収量が多いと考えられる燃えるごみの日を対象とした。燃えるごみを収集する日は週 2 回あり、それを EV に置き換えた場合のコスト削減量、CO₂ 排出削減量を求めるとした。なお、今回は改造費用は考慮しないこととした。

(2) GPS を用いたごみ収集ルート測定

厳密な走行消費エネルギーの計算では速度パターンが大きく影響する。そのため、速度は実測のものを用いるとし、GPS 機器をごみ収集車に乗せ測定を行った。図 1-4-1 に測定に用いた GPS 機器を示す。GPS で測定したルートはごみ収集車のうち最も消費電力量が多くなると考えた、ストップ&ゴーが繰り返されるルートを対象とした。



図 1-4-1 GPS 測定器

(3) 運用コスト削減量、CO₂ 排出量

EV ごみ収集車の運用方法として、昼休憩にのみ 1 時間の急速充電ができるとした場合（ケース#1）と、昼休憩の急速充電を無くし、ごみ収集を終えて戻ってくる度に 20 分の急速充電を行うとした場合（ケース#2）を検討することにした。後者は、こまめに充電することでバッテリーの搭載量を少なくできるが、バッテリー交換サイクルが短くなる。

図 1-4-2 に、年間運転コストと年間 CO₂ 排出量とを示す。EV 化により運用コストは抑えられるものの、CO₂ 排出量は増加してしまった。また、ケース#1 と#2 とではケース#2 の方が良い結果となった。図 1-4-3 にコスト削減量の経年変化を示す。ケース#1 ではバッテリー交換時に大きな費用が発生し、コスト償却ができない。ケース#2 では頻繁なバッテリー交換のため、コスト償却ができないことがわかる。

コンバージョン費用を考慮しない場合でも、コスト償却ができない理由をのんほいパークの客車牽引車の場合を比較して検討した。園内バス牽引車の場合、総重量 3,976 kg、平均走行速度 6.6 km/h であり、電費が約 410 Wh/km であった。これに対し、EV ごみ収集車は重量 5,700 kg に加え、ごみを最大で 4,000 kg 収集する。さらには、23 号バイパスを通り車速は速く、電費は約 1,740 Wh/km と 4 倍以上となった。そこで、ケース#2 の場合の EV ごみ収集車の電費を園内バス牽引車のそれを同じとしたところ（ケース#3）、図 1-4-3 の#3 に示すように、コスト償却が横ばいとなった。これは、電費がよくなることでバッテリー搭載量が減少したためである。

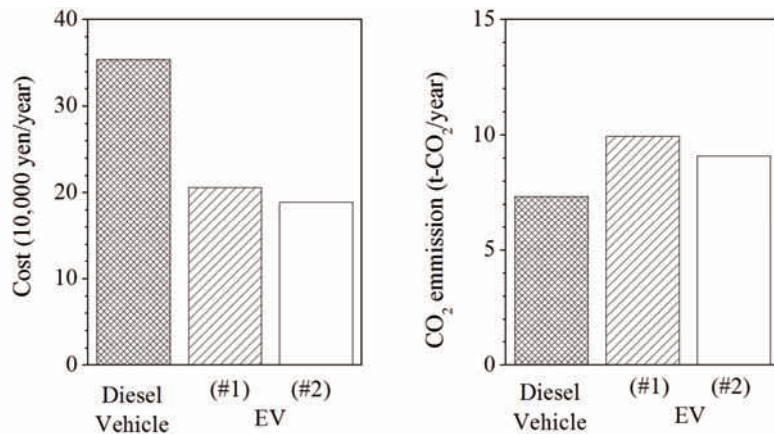


図 1-4-2 現行車と EV 化後の運用コストおよび CO₂ 排出量比較

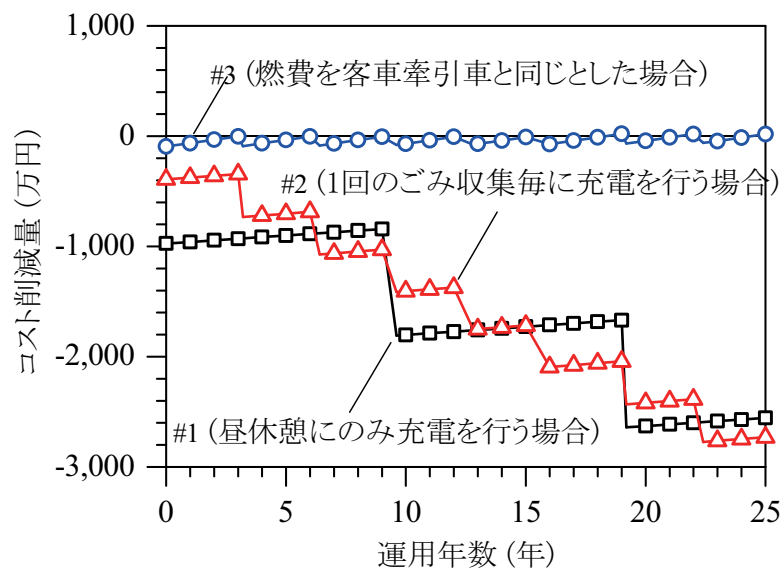


図 1-4-3 コスト削減量

1-5 EV 車で利用する電源システムの検討と試作

(1) はじめに

電気自動車では、定期的なバッテリーの交換が必要である。電気自動車のバッテリーは、大容量で交換には多額の費用がかかる。交換期間を長くする方法として、バッテリーの劣化を抑える方法が考えられる。劣化を加速させる原因には、走行中の加速に伴う大電流放電や回生ブレーキ等による充放電サイクルの繰り返しがある。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エネルギーフローを制御する方法に注目した。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, エンジンに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応用し, バッテリーを 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。EDLC のエネルギー密度は二次電池と比べて小さいため, 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, 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。この指針をもとに, 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, 走行試験を通してその評価を行った。走行試験より, ハイブリッド電源では, バッテリーを一定電流放電で制御できており, 従来のバッテリーのみの電気自動車と比べ, バッテリーの放電電流のピークを 80%低減することができた。

(3) 実験用小型 EV・ハイブリッド電源の改良

試作したハイブリッド電源は, 降圧コンバータを介して一定電流でバッテリーからキャパシタへ電力を輸送し, その後, キャパシタから駆動モータへ電力を輸送するタイプである。走行試験の結果から, 加速時にキャパシタの蓄積エネルギーが消費され, それに伴ってキャパシタの電圧が減少し, その結果十分な電流をモータの送り込めなくなるという問題が見つかった。そこで, この問題を解決するために, バッテリーから直接インバータへ電力供給する切替え回路を付加したシステムを構築し, 製作した。図 1-5-1 に, 今回の走行試験で使用したハイブリッド電源の回路図を示す。電源の運用として, 発進時等の瞬時高負荷時にハイブリッド電源として利用する BCH (Battery-Capacitor Hybrid) モードと, 電圧低下時にバッテリーのみを利用する BO (Battery Only) モードとを切替えることとした。また, 搭載する小型 EV のインバータの最低動作電圧が 42.5 V であるため, これよりキャパシタの電圧が低くならないようモードを切り替えた。坂走行による高負荷走行試験を行い, 改良したハイブリッド電源の評価を行った。走行試験の結果を図 1-5-2 に示す。加速時, キャパシタは大電流放電により, キャパシタの電圧は減少するが, 42.5 V より

低くならないように途中でモードを切り替えることで走行速度が低下することなく走行できた。

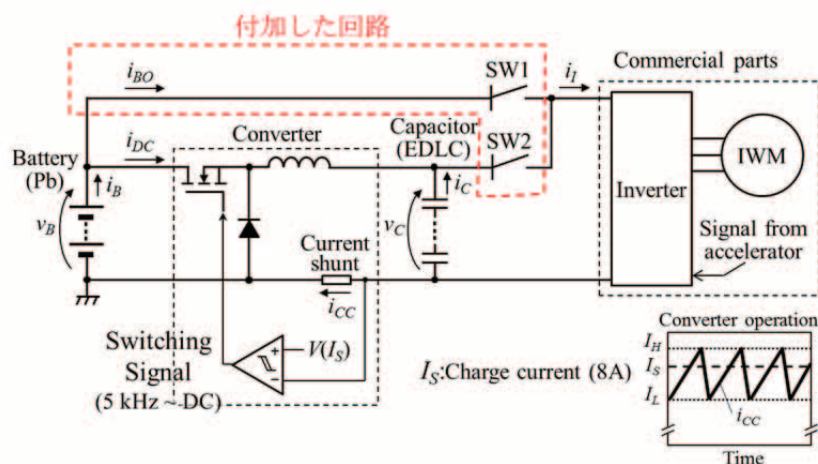


図 1-5-1 改良したハイブリッド電源の回路図

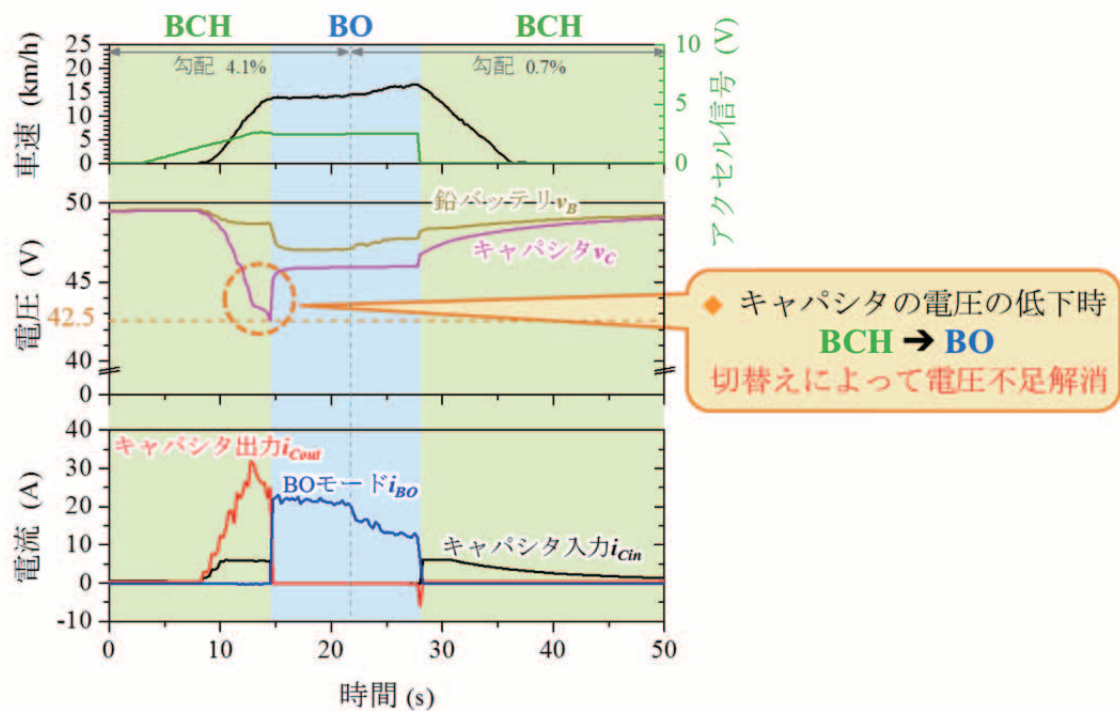


図 1-5-2 高負荷走行試験の結果

1-6 二次電池の長寿命化に関する研究

（1）はじめに

バッテリーの劣化を抑制するために、これまでハイブリッド電源の製作を行い、小型 EV に乗せ走行試験を行ってきた。その結果、バッテリーの放電電流ピークを抑えることはできた。しかしな

がら、ハイブリッド電源によるバッテリーの長寿命化に対して、直接評価することはできていなかった。そこで、図 1-6-1 に示す充放電装置を使用し、バッテリーとバッテリー-キャパシタハイブリッド電源とを充放電を繰り返す試験を行うことで、ハイブリッド電源の長寿命化の評価、特性の比較を行った。



図 1-6-1 二次電池充放電装置

(2) 充放電試験による測定結果

充放電を行う際、バッテリーやハイブリッド電源の周辺温度が特性に影響してくるため、エアコンにより温度を一定に保つことを可能としたビニールルームを製作した。(図 1-6-2)

また、充放電の負荷パターンには、米国新型電池開発協会 (USABC) が電気自動車用電池の評価試験に提案した DST (Dynamic Stress Test) を使用し、負荷のピークを 150 W/kg とした。

試験全体の手順を図 1-6-3 に示す。DST パターンでの放電を全部で 100 サイクル行い、10 サイクルするごとに、1 回の CC 放電を行った際の特性も測定した。この条件でバッテリーのみを測定した結果を図 1-6-4 (a) に、拡大図を図 1-6-4 (b) に示す。図 1-6-4 (b) より、少量ではあるが、100 サイクルの充放電により容量が減少していることがわかる。今後、同様の試験をハイブリッド電源でも行い、長寿命化に対する評価を行う。

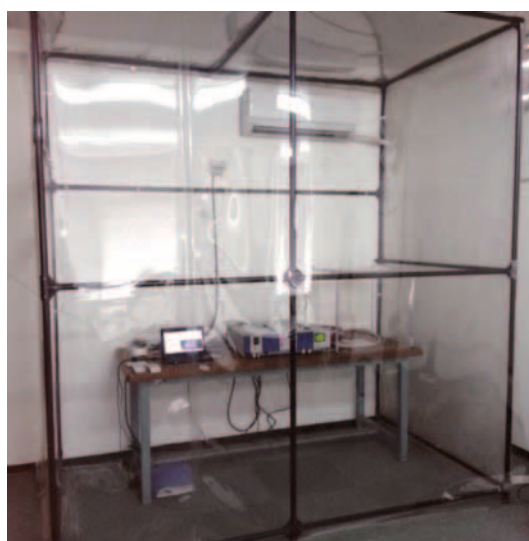


図 1-6-2 ビニールルームの外観

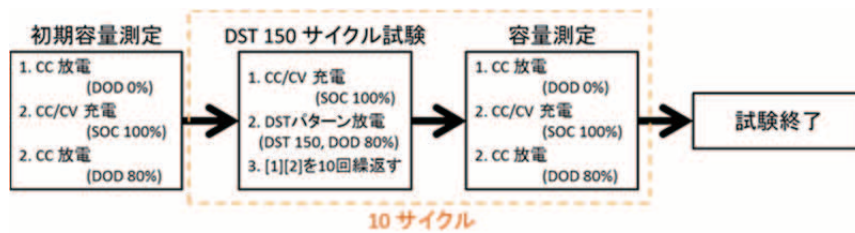
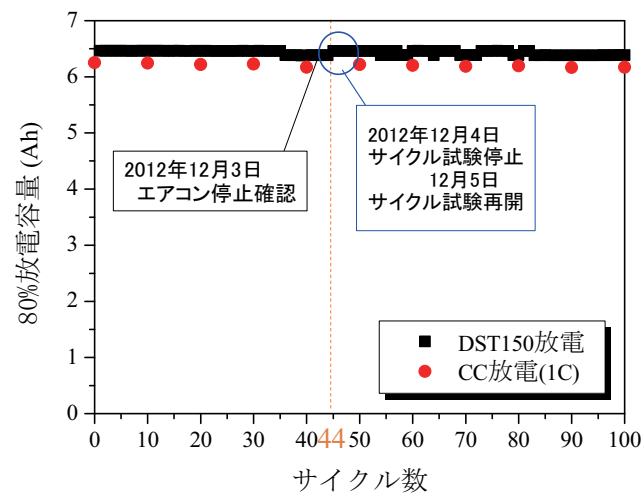
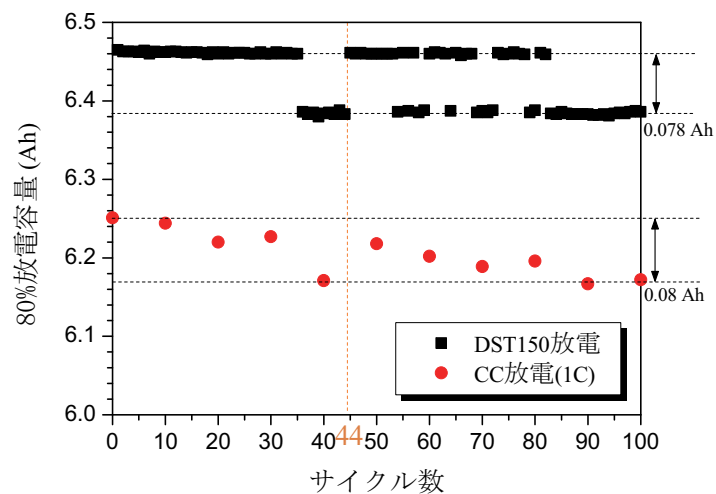


図 1-6-3 サイクル試験手順



(a) 全体図



(b) 拡大図

図 1-6-4 サイクル試験の結果 (DST150)