

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, 助教 田上 英人

1-1 EV への充電のための PV 利用の検討

(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。東日本大震災以降、原子力発電所の停止が相次ぎ、火力発電が多く使われるようになった。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、石油に依存しないサステナブルエナジーとして太陽光発電 (PV) が注目されている。

これまで、本研究室では愛知県豊橋市に位置する豊橋総合動植物公園 (のんほいパーク) 内で運行している園内バスの牽引車部分であるガソリン駆動の TOYOTA 2TG10 の EV 化の検討を行い、同型の車両を EV 化した。また、同園内で EV 化した車両を用いてフィールド試験などを行い、EV 化によるメリットの算定を行ってきた。ところで、EV を充電するには PV を利用することができる。今回、この EV 化した車両をのんほいパークで利用するとした場合の電源として、PV を導入する検討をおこなった。



図 1-1-1 EV 化した車両 (牽引車部分) を用いたフィールド試験の様子

(2) PV パネルの設置場所と斜面日射量

PV パネルは車庫の屋根の南側に設置するとした。図 1-1-2 に車庫の外観, 上からの様子を示す。このときの屋根の傾斜角約 20° , 方位東 74° 南, 設置可能面積が約 40 m^2 である。この屋根における斜面日射量は, NEDO が Web で公開している日射量データベース閲覧システムから調べることができる。図 1-1-3 に日射量データベース閲覧システムで得られる日射量のデータの例を示す。データ参照元の年間時別日射量データベース (METPV-11) は, 1990~2009 年の日射量データを用いることで各時間の方位角別, 傾斜格別の日射量の算出をしており, 日射量の推定に活用することができる。



図 1-1-2 車庫外観と上からの様子

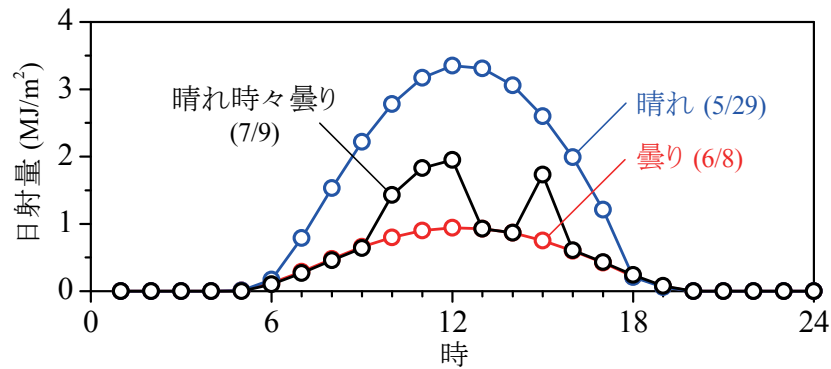


図 1-1-3 日射量データ抜粋（傾斜角約 20°，方位東 74° 南）

（３）充電の振り分けと買電，余剰電力の振り分け

EV の電源として PV を導入するに際し，EV 化後の園内バスは，土曜日用と日曜日用の 2 台運用とした。これは，常に運用しない車両をつくることで，PV 発電電力の貯蓄用バッテリーが不要とできると考えたためである。また，余剰電力はのんほいパーク内の他施設で利用するとした。これは，既に自然史博物館屋上に設置してある PV の発電電力がのんほいパーク内で利用されているためである。



図 1-1-4 EV 化に伴う運用方法の変更

PV の出力は日射量に比例し、天候によって大きく左右される。充電時の必要電力に対し、発電電力が過剰であれば余剰電力の使い道を考えなければならず、逆に発電量が足りなければ買電を行わなければならない。そのため、運用方法を含めた充電、買電、余剰電力の振り分け条件が必要となる。そのため、図 1-1-5 に示すような振り分けを考えた。

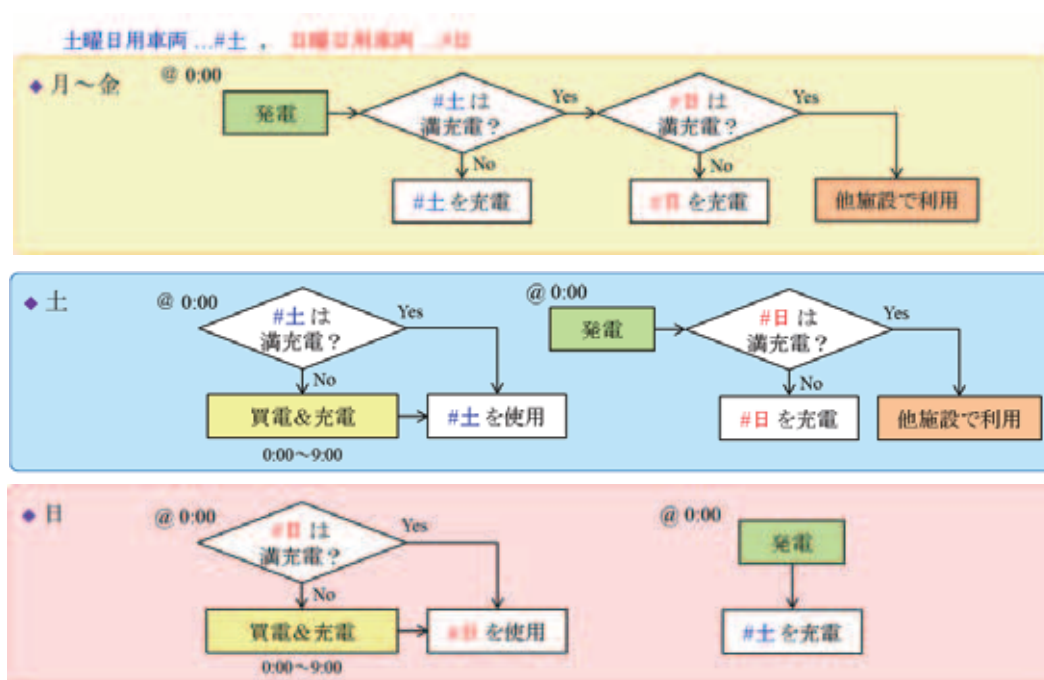


図 1-1-5 振り分け条件

(4) PV パネル面積と電力

充電電力が不足し買電を行った電力を買電電力、充電以外で使用した余剰電力を施設利用電力、充電に利用した電力を充電電力、PV パネルで発電した電力を総発電量と定義した。図 1-1-6 に PV 面積に対する各年間電力の関係について示す。総発電量は PV パネル面積に比例して大きくなるが、その内の充電電力は、バッテリーがフルとなることから飽和する。PV パネル面積が小さいと、充電時に十分な電力が発電できておらず、買電が必要となる。逆に PV パネル面積が大きいと、余剰である施設利用電力が多く発生する。買電電力と施設利用電力が一致する PV パネル面積が最もバランスが良いと考え、導入面積を約 11 m^2 とした。この時のシステム容量は約 2 kW である。車庫の屋根の設置可能面積が約 40 m^2 であるため、十分設置可能な面積だと考えられる。買電電力と施設利用電力が同時に発生しているのは、晴天が連続したことによる過剰発電により施設利用電力が発生している期間があることと、天候不順が連続したことによる充電電力量の不足による買電が発生している期間があることを示す。

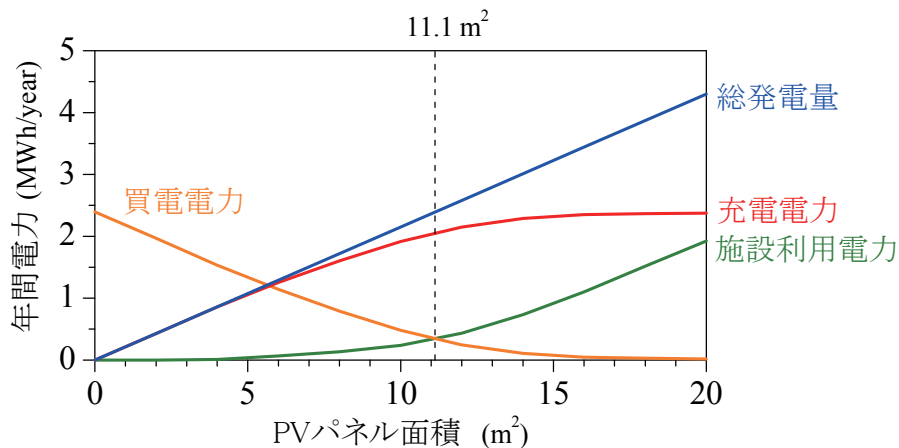


図 1-1-6 PV パネル面積に対する各電力の関係

(5) PV 導入によるメリット

図 1-1-7, 1-1-8 に, PV パネル面積に対する買電電力相当量と CO₂ 排出削減量を示す。買電電力相当量は系統から電力を購入した場合にどれほどの金額に相当するかを示し, CO₂ 排出削減量は発電時の CO₂ が PV によりどれだけ削減できたかを示し, どちらも数値が大きいほどメリットがあること示す。11 m² の PV を導入した際, 買電電力相当量は約 3 万円/年, CO₂ 排出削減量は約 1 t-CO₂/年となった。EV 充電分を考えた場合, それ以上の PV パネル面積では飽和する形となり, どちらの値もそれほど変わらない。

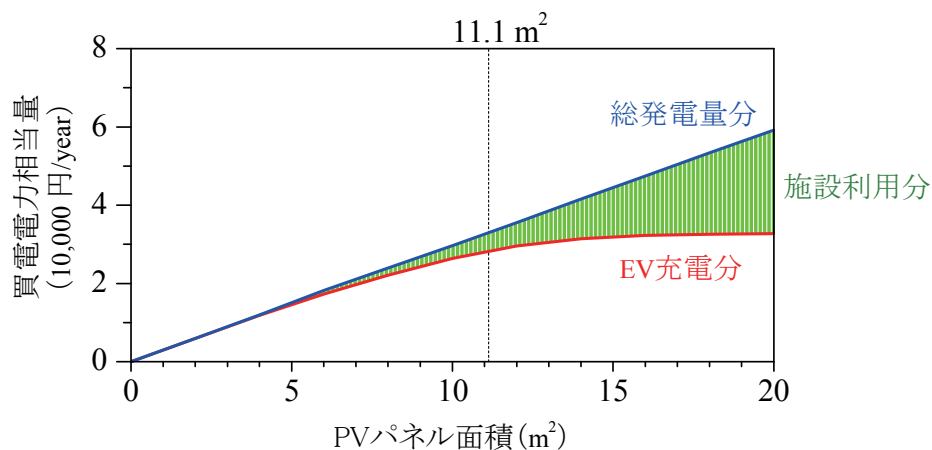


図 1-1-7 PV パネル面積に対する買電電力相当量の関係

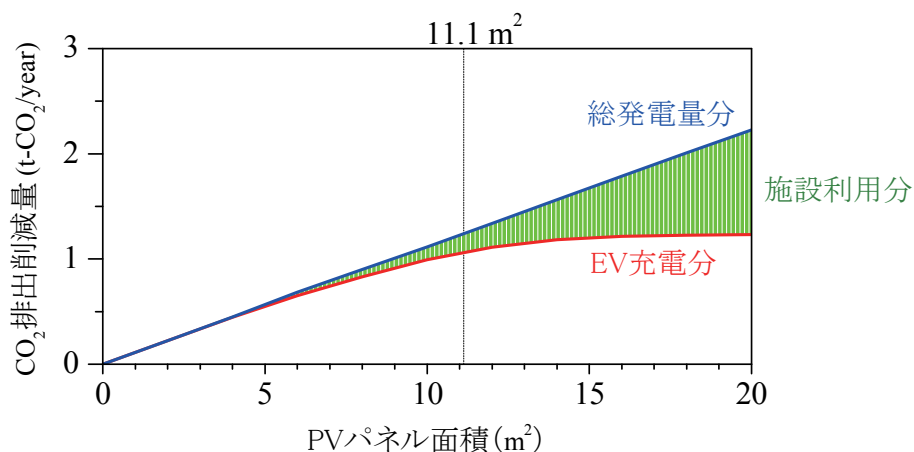


図 1-1-8 PV パネル面積に対する CO₂ 排出削減量の関係

(6) PV の導入時期

図 1-1-9 に PV のコスト推移を示す。PV の価格は現在降下傾向にある。欧州太陽光発電産業協会(EPIA) のシナリオを考慮した今後の見通しでは、2030 年頃には現在の半分程度まで価格が減少すると考えられている。今回、パネル面積が 11 m² の PV を導入するとした場合、導入年によってコスト償却年数がどれほど違うかの検討を行った。図 1-1-10 に PV を 2010 年、2020 年、2030 年とした場合のコスト削減量の推移の比較を示す。その結果、償却年はそれほど違いがないことがわかった。

豊橋市と未来ビークルシティリサーチセンターは低炭素社会の実現を目指している。早期導入により、目標へ前進として公共施設で自然エネルギーを使っていくが良いだろう。

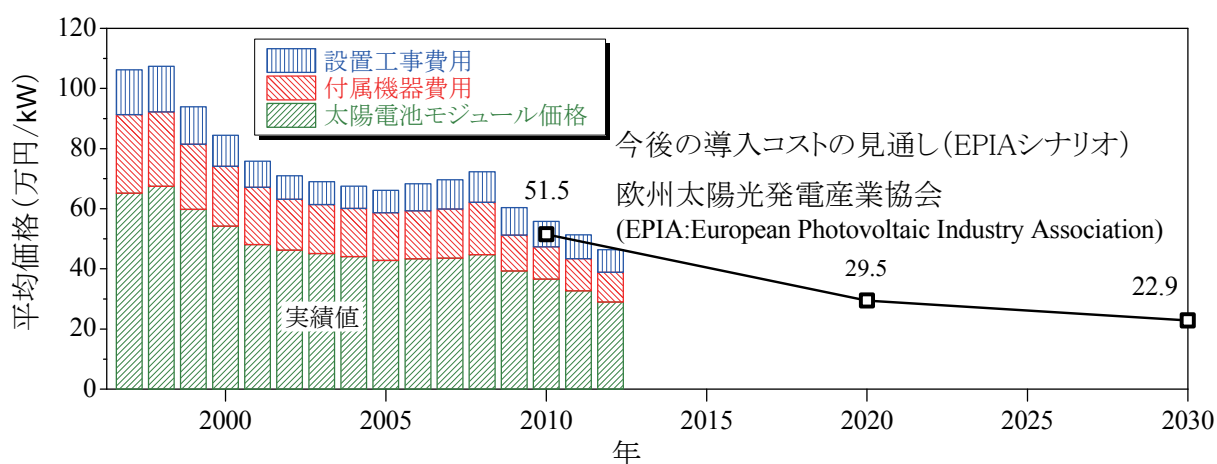


図 1-1-9 PV 導入コストの推移と今後の見通し

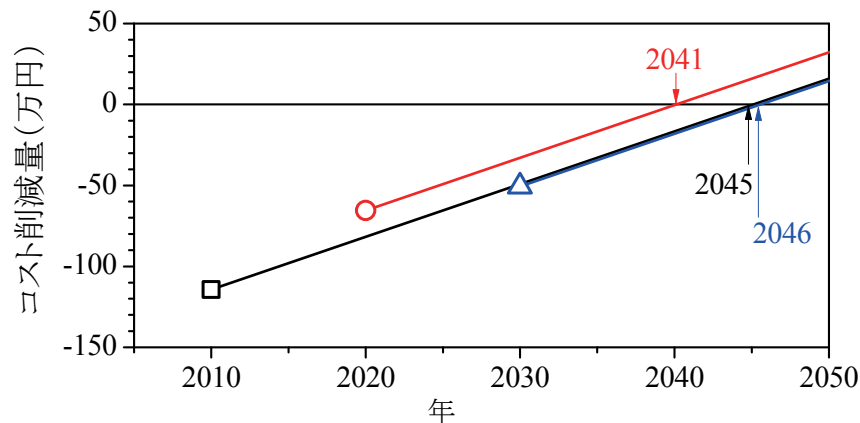


図 1-1-10 PV 導入年の違いによる償却年の違い

1-2 ゴミ収集車の EV 化の効果の検討

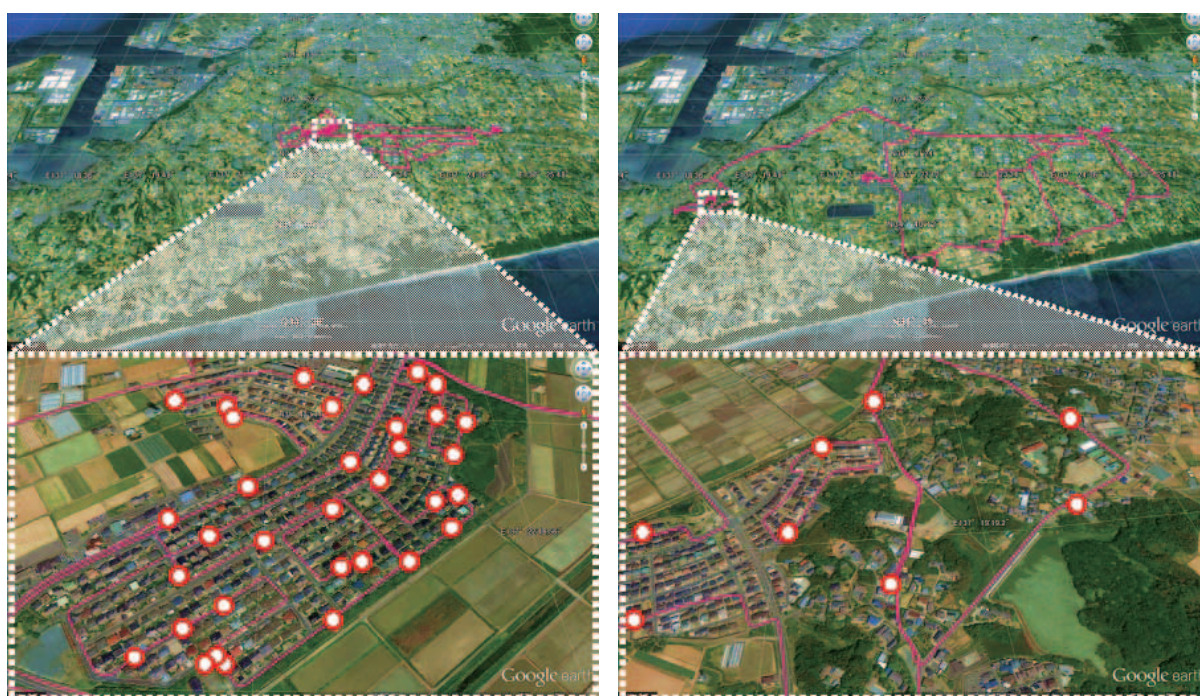
(1) これまでの研究

昨年度、愛知県豊橋市の燃えるごみの回収を担当するゴミ収集車の EV 化の検討を行った。なお、EV 化にはリチウムイオン電池を用いるとした。図 1-2-1 に燃えるごみ担当のゴミ収集車の外観を示す。燃えるごみ担当のゴミ収集車を対象とした理由は、ごみの回収量が多く、消費電力量が大きいと考えたためである。

燃えるごみ担当のゴミ収集車の内、市街担当車両と郊外担当車両の計 2 台について EV 化のメリットに違いがあるかについても検討を行った。図 1-2-2 に走行経路とゴミステーションを示す。両者を比較すると、市街担当車両の走行距離が短く、ゴミステーションの数は多く、密であった。また、EV 化後の運用方法として次の 2 つの運用方法を考えた。1 つ目は午前と午後それぞれごみ収集を通して行い、昼休みおよび終業後にまとめて充電を行う『昼・終業後充電』、2 つ目はごみ収集を行った後、センターに戻り、ごみを降ろす度に充電を行う『帰センター毎充電』である。帰センター毎充電は、充電のタイミングが多く、搭載するバッテリーの容量を少なくすることができる。バッテリーの重量も抑えられるため、昼・終業後充電の場合と比べて、走行に消費するエネルギーも少なくなる。バッテリー交換のコストも抑えられるが、充電のタイミングが多いためにバッテリーの交換サイクルが短くなる。



図 1-2-1 ゴミ収集車（燃えるごみ担当）



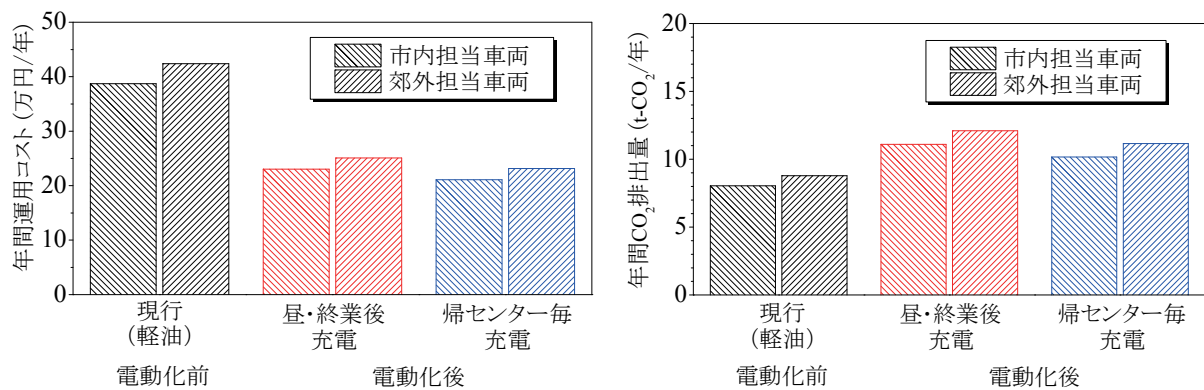
(a) 市街担当車両

(b) 郊外担当車両

図 1-2-2 ごみ収集車の走行経路とごみステーション

それぞれのごみ収集車に GPS 機器を載せた状態で実際にごみの回収を行い、ごみ収集車の速度や道路勾配を計測し、走行消費エネルギーの計算と必要バッテリー容量の算定を行った。図 1-2-3 に EV 化前と後で年間の運用コストおよび CO₂ 排出量の違いを示す。その結果、市街担当車両と郊外担当車両それぞれ、昼・終業後充電と帰センター毎充電のどちらの場合でも、EV 化により年間運用コストは削減できるが、年間 CO₂ 排出量は増加する結果となった。運用年数に対するコスト削減量を図 1-2-4 に示す。昼・終業時充電と帰センター毎充電それぞれ、9.6 年と 3.2 年でバッテリー寿命を迎え、それによるバッテリー交換費用が発生することによりコストの償却が不可能となった。

燃えるごみを担当するごみ収集車は 4t パッカー車である。車体が大きくパッカー部もあることから、車重が重く走行消費エネルギーが多い。そのため多量のバッテリーが必要となり、バッテリーが重くなることによる消費エネルギーの増加が生じ、更にバッテリー容量が必要となる負の循環が見られた。この結果から、今年度は車両重量の軽いと考えられる、危険ゴミを回収する 2t ダンプ車を対象とし、EV 化の検討を行った。



(a) 年間運用コスト比較

(b) 年間 CO₂ 排出量比較

図 1-2-3 ごみ収集車の EV 化前後の比較

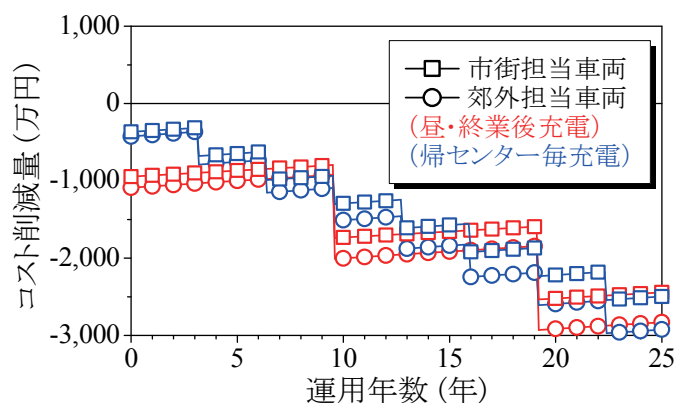


図 1-2-4 EV 導入時の運用年数に対するコスト削減量の推移

(2) 対象車両と比較

今回対象とした車両は、愛知県豊橋市の危険ごみの回収を担当するごみ収集車である。図 1-2-5 に危険ごみ担当のごみ収集車の外観を示す。車両は 2 t ダンプ車であり、荷台にはパッカーではなくコンテナが付いている。

表 1-2-1 に燃えるごみ担当のごみ収集車と危険ごみ担当のごみ収集車の比較を示す。2 t ダンプ車は 4 t パッカー車と比べて車重が半分程度であり、年間走行距離も半分以下である。2013 年 8 月 22 日から 2013 年 10 月 11 日までの木曜日と金曜日の危険ゴミを回収する日に、2 t ダンプ車に GPS 機器を載せ、ごみ収集車の速度や道路勾配の計測を行った。



図 1-2-5 ごみ収集車（危険ごみ担当）

表 1-2-1 車両比較

担当	燃えるごみ	危険ごみ
車両	4t パッカー車	2t ダンプ車
外観		
収集日	火, 金曜日	木, 金曜日
燃費 (km/L)	3.7	6.9
燃料	軽油	軽油
年間走行距離 (km)	19,000	7,200
総重量 (kg)	約 9,800	約 4,800
シャシ重量	2,900	2,630
パッカー部重量	2,800	0
最大ごみ積載量	4,000	2,000
作業員重量(2 人)	136	136

（３）運用方法と EV 化の効果

EV 化後の運用方法として次の 2 つの運用方法を考えた。1 つ目は午前と午後それぞれごみ収集を通して行い、昼休みおよび終業後にまとめて充電を行う『昼・終業後充電』, 2 つ目はごみステーション毎に急速充電所を設置し、回収の度に急速充電を行う『ステーション毎充電』である。昨年度は昼・終業後充電と帰センター毎充電の 2 つとしたが、ステーション毎充電は帰センター

毎充電よりも充電回数が多く、EV の搭載バッテリー容量を少なくできると考えた。

図 1-2-6 に、年間運転コストと年間 CO₂ 排出量とを示す。また、図 1-2-7 にコスト削減量の経年変化を示す。EV 化により年間運用コスト、CO₂ 排出量共に削減できる結果となった。ごみステーション毎充電はバッテリー重量が軽くなり、走行時の消費エネルギーを抑えることができるため、どちらも昼充電パターンに比べてメリットがある結果となった。しかしながら、運用年数に対するコスト削減量を考えると、どちらの運用方法もバッテリー交換費用が影響しコスト償却ができない結果となった。

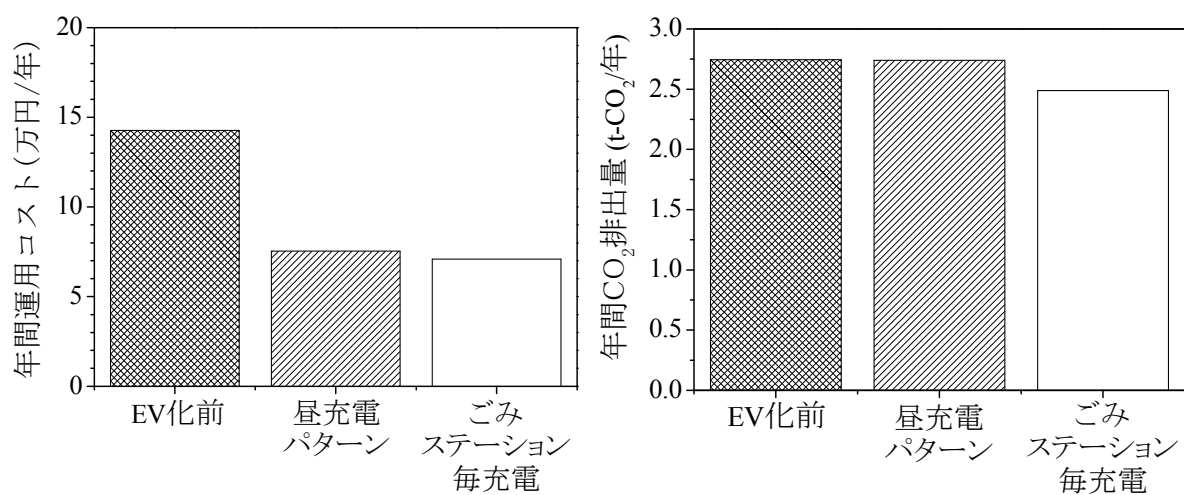


図 1-2-6 EV 化前と後の年間運用コスト，年間 CO₂ 排出量比較

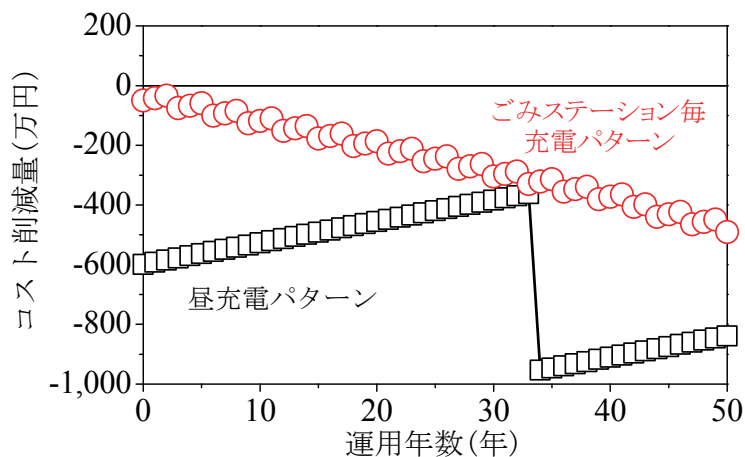


図 1-2-7 運用年数に対するコスト削減量の推移

1-3 三河港における太陽光発電導入による効果

(1) はじめに

三河港は愛知県の豊橋市，田原市，蒲郡市，豊川市にわたる港湾である。図 1-3-1 に三河港を示

す。昨年度は三河港の神野地区を対象とし、神野地区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について、EV 化の検討と、電源としての PV の導入の検討を行った。その際の PV を導入する場所として神野地区の空き分譲地を考えたが、空き分譲地は神野地区以外にも存在する。今回、神野地区以外での空き分譲地に PV を導入することを考えた。

（２）御津２区と豊川浄水センター

御津２区は三河港の中の豊川市と豊橋市の堺付近にある。図 1-3-2 に御津２区の詳細を示す。御津２区には約 22 万 m²の空き分譲地がある。すぐ近くには豊川浄水センターが存在し、豊川流域の下水道を常に浄化している。今回、空き分譲地を有効活用するために PV を導入するとし、発電電力は全て豊川浄水センターで利用できると考えた場合の、PV の有用性について検討を行った。



図 1-3-1 三河港

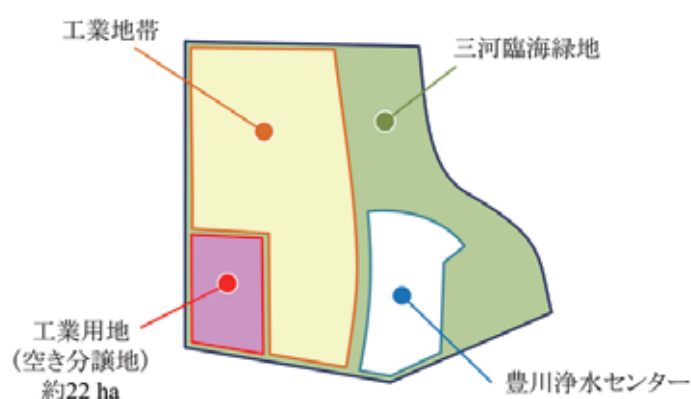


図 1-3-2 御津２区詳細

（３）PV の導入面積率と発電量

空き分譲地に対し、どれだけ PV パネルを敷き詰めることができるかの検討を行った。PV は真

南方向，設置角 15°とした。設置条件はメガソーラーたけとよを参考に，パネル面長さが縦 1.3 m×横 1.0 m，パネル列間距離を 1.0 m とした。土地面積に対するパネル設置範囲の面積を考えると，約 60%となった。これを考慮すると設置可能パネル面積 A は約 8 万 m^2 となる。また，式①を用いて，PV による発電電力を求めた。なお，日射量は年間時別日射量データベース（METPV-11）の値を用いた。

$$P = W_0 \times W_s \times D \times K \quad \dots \textcircled{1}$$

月間発電量： P (kwh)， 太陽光パネル設置面積： $A(m^2)$ ， 変換効率： α (=16%)

月平均斜面日射量： $W_s(kW/m^2 \cdot day)$ ， 月の日数： $D(day)$ ， 総合設計係数： K

図 1-3-3 に豊川浄化センターの消費電力と PV 発電電力の月別の変化についての比較を示す。豊川浄化センターの消費電力は一年を通して横ばいなのに対し，PV 発電電力は月によって大きく異なる。これは，季節による日射量の変化が影響しているためである。浄化センターが 1 年間に約 15 GWh 消費するのにに対し，PV は約 1.4 GWh と，約 90%を賄うことができる。今回，土地面積に対するパネル設置範囲の面積を約 60%としたが，浄化センターすべての電力を賄うためには，約 70%まで高める必要がある。

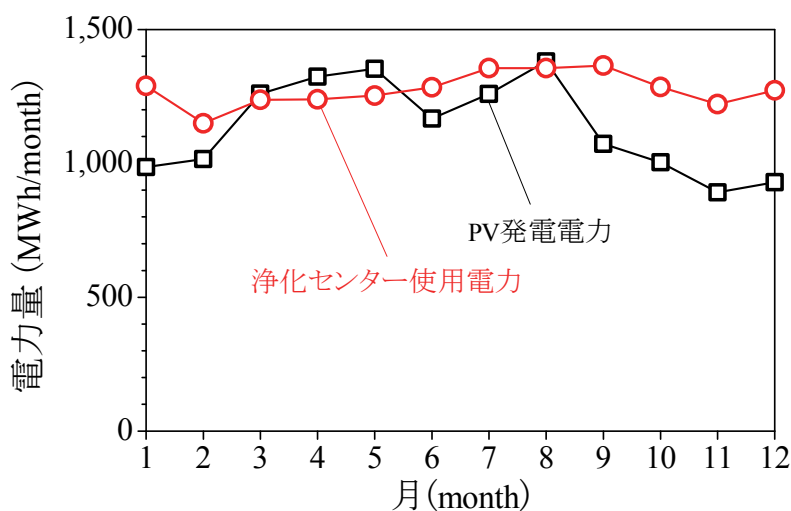


図 1-3-3 浄化センター使用電力と PV 発電量比較

1-4 ハイブリッド電源のエネルギーフロー制御の改良

(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あり交換には多額の費用がかかるが，バッテリーの劣化を抑えることで，交換時期を延ばすことができる。交換時期を早くさせる原因であるバッテリー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、回生ブレーキ時の発電電力のバッテリーへの充電などによる充放電の繰り返しがあある。そのため、バッテリーの劣化を抑制するためには、バッテリーのピーク出力を低減させ、充放電の回数を減らせばよいと考えた。これを実現する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、エネルギーフロー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ち、科学反応を経ずに電荷を直接蓄電できるため、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、現在市販されているものでは、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で搭載するためには、容量の大幅な増加が必須である。しかしながら、一時的なエネルギー供給や、回生時のエネルギー回収先としての用途には利用可能であり、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、回生のための蓄電デバイスとして、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、試作したハイブリッド電源を小型 EV に搭載し、走行試験を行い評価した。試作したハイブリッド電源は、モータの負荷電流に対して、バッテリーの供給電流を降圧コンバータで制限し、不足分をキャパシタからの電流供給を行う。そのため、加速時のような高負荷走行時には、キャパシタの蓄積電荷量が消費され、それに伴いキャパシタの電圧が大幅に減少する。その結果、十分な電流をモータに送り込めなくなる問題が見つかった。そこで、バッテリーから直接インバータへ電力供給ができる切替え回路をハイブリッド電源に付加した。電源の運用として、発進時の瞬間高負荷時にハイブリッド電源として動作する BCH（Battery-Capacitor Hybrid）モードと、電圧低下時にバッテリーから直接電力供給を行うバイパスモードとを切替えることとした。切替え回路を付加したハイブリッド電源を用いて実走行試験を行い、動作の確認を行った。登坂走行において、走行負荷は大きくなるためキャパシタの電圧が急激に減少したが、キャパシタの電圧が指定した電圧以下になった時にモードを切替えることで走行速度が低下することなく走行できた。

（３）エネルギーフロー制御の改良

これまで製作した BCH モードとバイパスモードとの切替え回路には、電圧差によってキャパシタへ電流が逆流する問題があった。そこで、ダイオードを加えて逆流の防止することにした。さらに加速中にキャパシタを最大限に生かすために、加速度に応じてバッテリーとキャパシタの供

給の割合を無段階変化させ、キャパシタの電圧の減少を制御することにした。試作した回路を図 1-4-1 に示す。供給の割合を決定するため、まず加速時の走行シミュレーションからキャパシタの電圧変動をシミュレートした。次に、加速中にキャパシタから供給がストップしないための供給割合を決定する関数を作成した。関数を用いてマイコンで制御回路を制御し、加速度に応じた供給割合の無段階変化を実現した。エネルギーフロー制御を改良したハイブリッド電源を用いて、実走行試験にて動作を確認した。本校の学内を 1 周した走行試験結果を図 1-4-2 に示す。意図しない车速の低下が見られていないことから、モータへの電流供給が途切れていないことが確認できた。また、すべての加速時において、キャパシタの出力で供給をカバーできていることから、エネルギーフローを改良できたと言える。

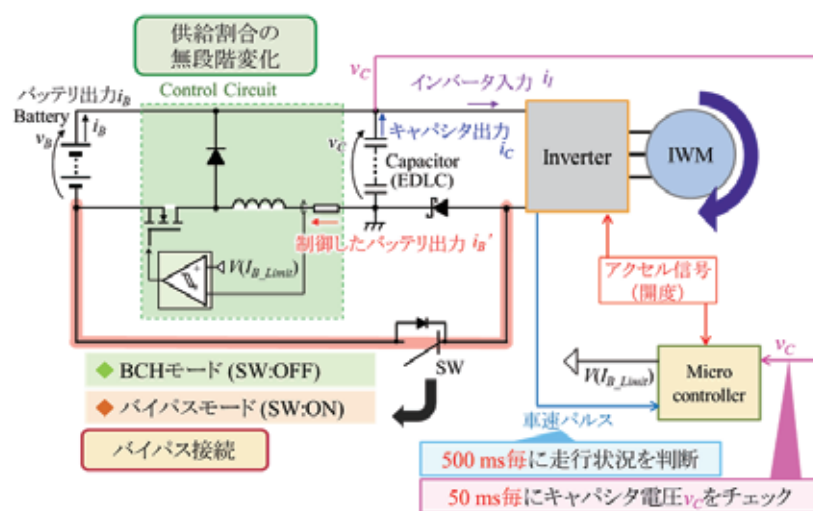


図 1-4-1 エネルギーフロー制御を改良したハイブリッド電源

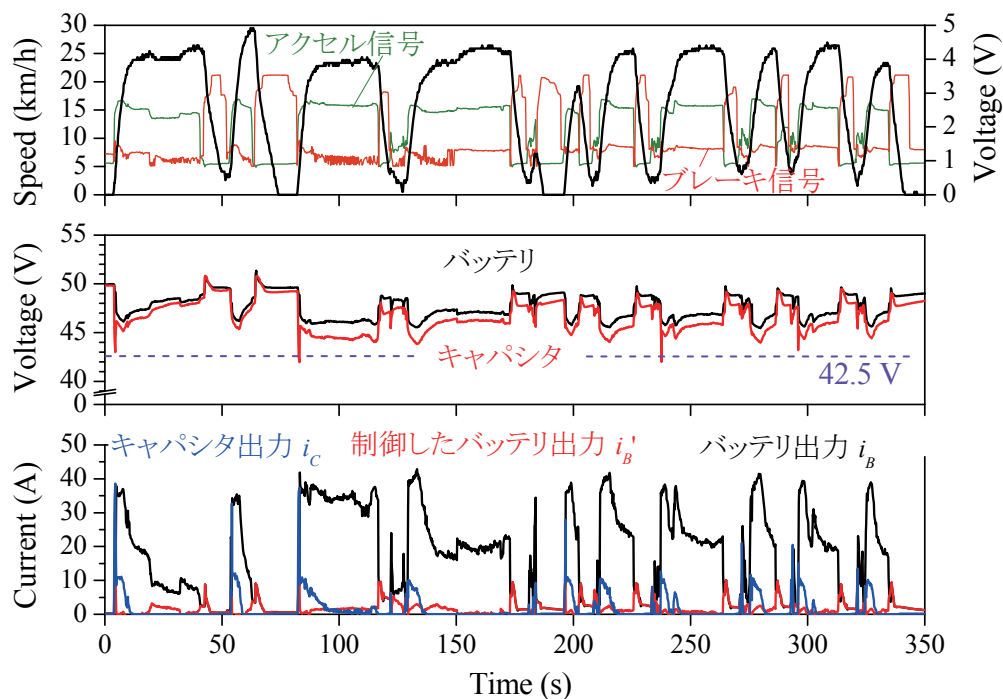


図 1-4-2 学内走行試験結果

1-5 ハイブリッド電源を用いることによる二次電池の寿命評価

(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を定量的に評価することができていなかった。そこで、バッテリーとバッテリー-キャパシタハイブリッド電源に対し、図 1-5-1 に示す充放電装置を用いて、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寿命延長の定量的な評価を行うこととした。



図 1-5-1 二次電池充放電装置

(2) これまでの成果

充放電試験を行う際、試験対象デバイスの周辺温度が特性に影響してくる。そこで、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。まず、指標となるバッテリー（リチウムイオン電池）のみでの充放電試験を行った。放電の負荷パターンを図 1-5-2 に示す。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、ピーク放電電力が 150 W/kg を 100% とした。100 サイクル行い、DST パターンの放電を 10 サイクルするごとに、1 回の CC 放電で容量を測定した。この条件で試験を行ったところ、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った。

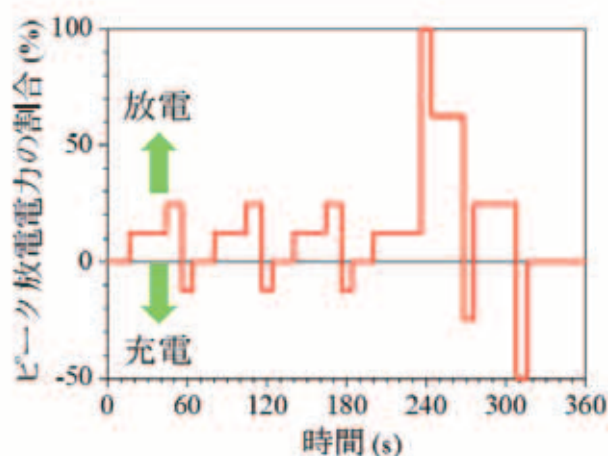


図 1-5-2 DST パターン

（３）サイクル試験結果の評価と今後の課題

これまで 100 サイクルの充放電試験を行ってきたが、容量の減少が小さいことがわかった。そこで、劣化の変化が大きく出ることを期待し、DST パターンのピーク放電電力に対し、300 W/kg が 100% になるように変更した。前回 100 サイクルの充放電を行ったバッテリーを対象に、ピーク放電電力を変更し充放電試験を続行した。結果を図 1-5-3 に示す。負荷の増加後において、目に見える劣化の加速は見られなかったが、着実に容量が減少していることが確認できた。この結果と比較を行うための試験として、本来はこのリチウムイオン電池とキャパシタを用いてハイブリッド電源の充放電試験を行う必要がある。しかしながら、試作した制御回路の動作電圧の制限からこの組み合わせでの試験が行えないことがわかった。そこで、現在は走行試験で用いている電気自動車と同様の鉛バッテリーとキャパシタを対象に充放電試験を行うための準備を行っている。

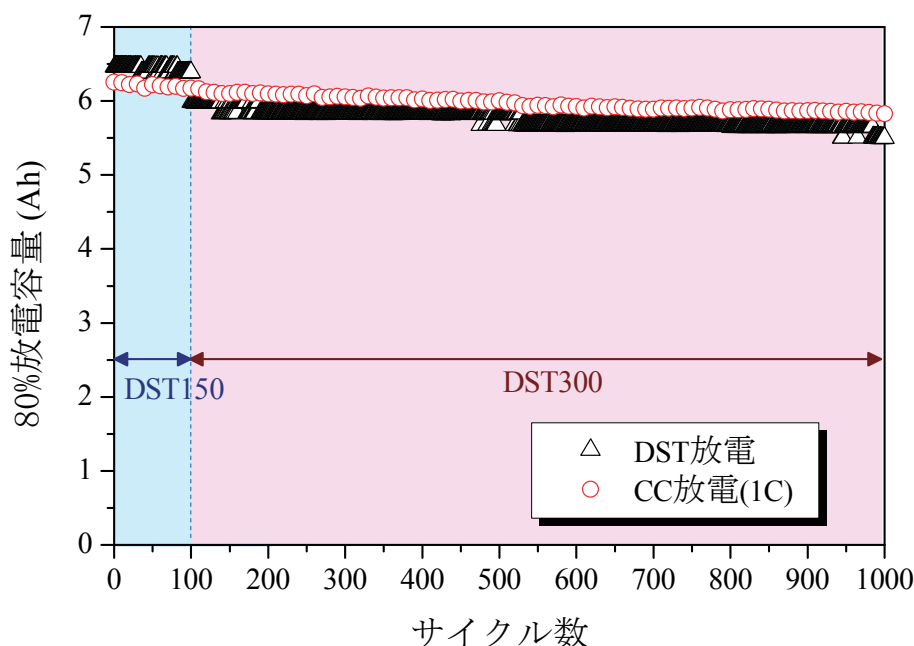


図 1-5-3 サイクル試験の結果（リチウムイオン）

1-6 WEB ページにおける全方位カメラの写真公開

（１）はじめに

本研究室では、全天カメラ（PREDE, Skyview PSV-100）を用いて、一分毎に本研究室屋上から上空の撮影を行っている。昨今、PV は一般家庭にも普及し始め、屋根の上に設置されている PV パネルがよく見られるようになった。PV の発電量は天気依存し、上空の雲の様子で発電の良し悪しを直感的に理解することができる。全天カメラで撮影した画像を Web で一般公開することで、市民への情報提供をすることができることや、天気と PV の関係性などへの関心が高まることを期待する。

（２）リアルタイムデータの公開

本研究室の Web ページに、1 時間ごとの空の写真のデータを公開した。データはリアルタイムで更新される。分光放射計で計測したデータも同時に載せることにより、上空の様子と光の関係を直感的に理解できるようにし、過去のデータも閲覧できるようにする予定である。

1-7 市民へのアピール、電気自動車を用いたイベント

（１）イベント目的

2013 年 11 月 16 日（土）にのんほいパークでのイベント「ぎかだいがやってくる～eco エネを感じよう！～」を開催した。今回のイベントは、豊橋技術科学大学の研究内容はあまり知られておらず、また地元豊橋市との交流が少ないのが現状に対して、本研究室の研究にご協力いただい

た同園内にて、もっと豊橋技術科学大学のことを知ってもらうと共に、本研究室の研究成果の発信を行うためのものである。

（２）イベント内容

イベントの内容は、EV 牽引車の試乗会と子供向けのサボニウス風車作りである。EV 牽引車の試乗会は、中央門前から噴水前までを定期的に運行した。またこの試乗会で用いた EV 牽引車は、同園で実証実験を行った際の車両である。サボニウス風車作りでは、本研究室のオープンキャンパスでも使用したサボニウス風車キットを用いて、ハサミとのかみで簡単に子供達と一緒に作った。

イベントには多数の方が足を運んでいただき、EV 牽引車の試乗会には 375 人（大人 213 人、子供 162 人）、サボニウス風車作りには 135 人（大人 50 人、子供 85 人）もの人に参加していた。



図 1-7-1 EV 牽引車試乗会の様子



図 1-7-2 サボニウス風車作りの様子



図 1-7-3 小型 EV の説明