

3. 工学的技術面から見た導入条件

3-1 はじめに

我々の日常におけるエネルギー消費からくる地球環境問題は、より深刻化し切迫した問題となっている。その対策として、省エネルギー、高効率エネルギー変換技術などの開発が進められている。現在、世界中の国々で、京都議定書やグリーン・ニューディール政策に沿った議論が活発化している。その議論の中で、ガソリン車から電気自動車への移行が大きく注目されている。また、電気自動車やプラグインハイブリッド車を、蓄電デバイスとして公共の電力網に組み込む方法も検討され始めている。これらのことから、次世代自動車や、そのエネルギー供給システム、次世代自動車をインフラネットワークに組み込む手法などに関する技術は日々進歩している。本項では主に、未来ビークルシティの工学的技術面に関して、現状と本学の取り組み内容について述べる。

現在、ガソリン車から電気自動車へ移行するための研究開発や実証試験が各地で多く行われており、日本国内においても徐々に動きが活発化してきている。電気自動車は、(1) 深夜電力の利用により安価で自宅で充電でき、エネルギー費用が抑えられる、(2) 電動のため走行時に CO₂ や NO_x を排出しない、といったメリットを有する。しかし、(1) 導入コストが高い、(2) 走行距離が短い (ガソリン車 : 500 km, 電気自動車 : 160 km)、(3) 二次電池の充電にかかる時間 (急速充電で 30 分)、(4) 二次電池のリサイクル、といった問題もあり、実用化へ向けて解決していかなければならない。他にも、自然エネルギーを利用して発電する太陽電池を自動車の部品として組み込み、走行中でもバッテリーが充電できるシステムなどの開発も進んでいる。

電気自動車や太陽光発電の導入効果を議論する際に、導入する土地の条件で効果は大きく変化するため代表的な値を用いることは困難である。また、市民の理解、協力も不可欠である。そのため、実データを用いた、技術的な面からの検討・シミュレーション等が必要である。本稿ではまず、次世代自動車のエネルギー源として有望視されている太陽電池の導入可能性について検討する。太陽電池は、発電時に CO₂ を排出しない、騒音を発生しない、系統への連携と売電が可能という利点がある。続いて、電気自動車の電力供給システムについての現状と、期待される新しい電源システムについて述べる。最後に、本研究室で実施または計画中的、市民へのデモンストラレーションの内容について述べる。

3-2 自然エネルギーの利用

(1) はじめに

電気バスなどの次世代自動車へ自然エネルギーを利用した発電システムを用いることにより、更に環境に優しい交通システムを構築できると考えられる。今回は太陽光発電を電気バスの電源として利用することができるか、を検証すると同時に、太陽光発電システムのコストペイバックタイム、CO₂ペイバックタイム計算を行った。検証対象は、豊橋技術科学大学のA棟屋上に設置された太陽電池とした。また、豊橋市の一般家庭で計測した電力需要データから、家庭に設置された太陽電池のペイバックタイムの検討も行った。

(2) 大学への導入効果

豊橋技術科学大学のA棟屋上に設置されている太陽電池は、定格出力20 kW、総面積142.56 m²で、設置も含めた導入コストは1840万円である。この太陽電池を対象に、豊橋技術科学大学の自然エネルギー棟屋上で計測した日射量をもとに発電量を予測した。表3-2-1に各月の発電電力量を示す。一日の発電量の年間の平均値は、約60 kWh/日である。これは現状の電気バスが一日に使用する電力量の半分以上である。また、電費の向上や、運行回数の制限などを行えば、一日に電気バスが使用する電力の全てを賄える可能性もある。次に、表3-2-1の発電電力量から次の3種類のペイバックタイムの検討を行った。各ペイバックタイムは、システムのライフサイクルで使用されるエネルギーを回収できるまでの期間である、エネルギーペイバックタイム(EPT)、システムのライフサイクルで排出される二酸化炭素を回収するまでの期間であるCO₂ペイバックタイム(CO₂PT)、導入費用を回収するまでの期間であるコストペイバックタイム(CPT)の3種類である。各ペイバックタイムの計算値を表3-2-2に示す。EPTとCO₂PTは太陽電池の寿命である20年より短くなった。しかし、CPTは太陽電池の寿命より長い期間となり、回収することができない。EPTとCO₂PTは3年以下であり、その期間が経過することにより、それ以降は完全にクリーンな発電なる。コスト面でのメリットは無いが環境対策として太陽電池は優れていると言える。

表3-2-1 各月の発電電力量

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
発電電力量 E_M (kWh)	1,391	1,185	1,938	2,683	2,418	2,214	1,986	2,418	2,065	1,613	1,222	1,220

表3-2-2 A棟屋上太陽光発電システムの各ペイバックタイム

エネルギーペイバックタイム (EPT)	1.86 (年)
CO ₂ ペイバックタイム (CO ₂ PT)	2.64 (年)
コストペイバックタイム (CPT)	74.4 (年)

(3) 一般家庭への導入効果

前項の結果より、太陽光発電の導入コスト回収は難しいことがわかった。しかし、住宅向けの太陽光発電システムの場合、国と市から補助金に加え、余剰電力を電気事業者に売電することができる。これらの条件を加え、住宅用太陽光発電システムのペイバックタイムを算出することによって、システムの妥当性を検討した。導入したと仮定した太陽電池の定格出力は 3.72 kW，導入コスト 229 万円とした。この値は、2008 年度の導入件数 55,100 件の平均値である 3.6 kW と近いことから、妥当であると言える。また保守費用は、パワーコンディショナーを一度交換するとして、33 万円とした。発電量は 2009 年 12 月～2010 年 11 月に計測された日射量からの予測値、電力需要は同期間に豊橋市内の一般家庭で計測したデータを使用した。補助金は国と市からそれぞれ 7 万円/kW が支給される。よって今回のシステムでは合計で約 52 万円である。また売電単価は 48 円/kWh とした。図 3-2-1 と図 3-2-2 に売電している日としていない日の電力データの例を示す。斜線部分が発電電力で、灰色部分が売電電力である。表 3-2-3 に住宅用太陽光発電システムの各ペイバックタイムを示す。全てのペイバックタイムが太陽電池の寿命である 20 年よりも短くなった。EPT と CO₂PT が短い期間であることは前項の結果と同様だが、CPT も寿命の半分強である。CPT が短くなったのは売電による効果大きい。

(4) まとめ

大学に設置された太陽電池の発電量から、電気バスへの自然エネルギーによる給電の可能性が示された。しかし、売電を行えなければ導入コストを回収することは難しい。

3-3 電力供給システム

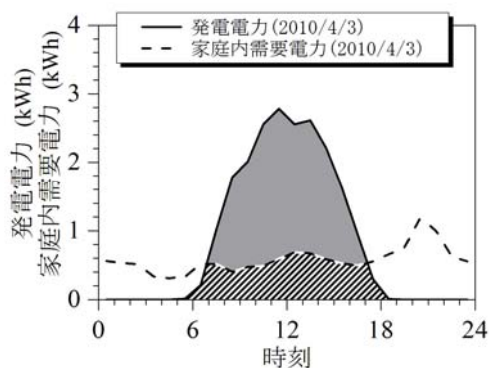


図 3-2-1 売電をしている日の電力データの例

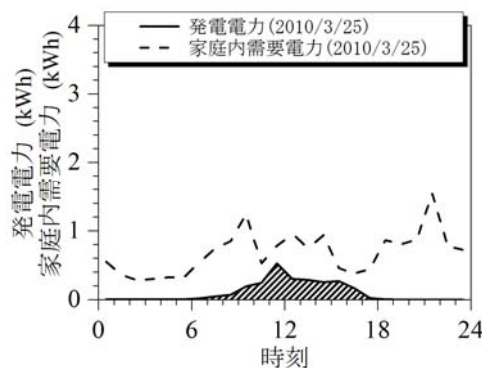


図 3-2-2 売電をしていない日の電力データの例

表 3-2-3 住宅用太陽光発電システムの各ペイバックタイム

エネルギーペイバックタイム (EPT)	1.95 (年)
CO ₂ ペイバックタイム (CO ₂ PT)	2.24 (年)
コストペイバックタイム (CPT)	13.1 (年)

(1) はじめに

電気自動車の歴史は古く、内燃機関を用いた自動車が実用化される以前から、研究・開発が進められてきた。近年では、動力源であるモータの効率向上や、半導体技術の進歩によるパワーエレクトロニクス素子の性能向上、電源であるバッテリーの性能向上により、次第に実用化が近づいてきた。しかし、現行のガソリン車に比べると、まだその性能は十分とはいえない。特に、走行のエネルギー源となる電源の性能向上が重要である。現在の電気自動車は、そのほとんどが、ニッケル水素やリチウムイオン電池といった、二次電池を電源として走行する。これら二次電池は、使用する度に劣化し、性能が低下する。最新のリチウムイオン電池を用いた、長期的なサイクル特性の測定例はあまり見られないが、現在の市販品の性能では、自動車の平均的な寿命である 10 年のうちに、最低でも 1 回は交換が必要との見方もある。二次電池は、車両の安全性に直接影響する部品であるために、交換は容易ではない。また交換のコストも高く、将来、電気自動車が普及し、大量の廃棄電池が生まれれば、リサイクルのための技術やしくみを確立する必要がある。以上のことから、電気自動車の普及のためには、走行用電源の性能向上が重要と思われる。このためには、現在、電源の主流である二次電池そのものを改良する方法と、二次電池の運用方法を改善する方法とが考えられる。本研究室では、大電流充放電特性が良く、長寿命な電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor : EDLC) に着目し、二次電池とキャパシタを電子回路でハイブリット化した、キャパシタ-バッテリー併用システムについて、実証を含めた研究を計画し、シミュレーションと並行して進めている。

(2) バッテリーの劣化要因と劣化緩和運転方法

バッテリーの劣化には、容量の低下と出力密度の低下の 2 種類がある。容量は、バッテリーが蓄えられるエネルギー量の上限を表し、出力密度は、バッテリーが単位時間あたりに出力できるエネルギーを表す。これらの劣化は、電解液や電極の劣化によって引き起こされると考えられているが、詳細なメカニズムは解明されていない。電気自動車において、この 2 種類の劣化は、それぞれ異なる性能の低下をもたらす。まず、バッテリーの容量が低下した場合、蓄えられるエネルギー量が減るため、1 回の充電で走行できる距離 (航続距離、一充電走行距離) が短くなる。容量の低下による寿命の定義は複数あるが、主に、初期容量の 80 % まで低下したときを、バッテリーの寿命とすることが多い。次に、出力密度が低下した場合、単位時間に出力できるエネルギーが小さくなるため、モータへのエネルギー供給が不十分になり、加速性能が低下する。電気自動車のバッテリーには、出力密度が約 150 W/kg 必要との試算があり、バッテリーの劣化が進み、この値より小さくなったときも、バッテリーが寿命に達したと言える。容量が低下しても、航続距離が短くなるだけで車としての走行は可能だが、出力密度が低下すると、車としての走行性能を満足できなくなる。また、リチウムイオン電池では、容量の低下よりも出力密度の低下が早く起こることが報告されている。このため、出力密度の低下がバッテリー寿命を決定しているといえる。

(3) キャパシタ-バッテリー併用システム

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ド車では、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。

(4) システム概要と導入効果のシミュレーション

システムのエネルギーフローを図 3-3-1 に、動作フローを表 3-3-1 に示す。走行時のエネルギーは、基本的に EDLC から出力する。EDLC の充電状態が低くなったら、バッテリーから EDLC を充電する。このため、加速時の大電流放電に対応しつつ、バッテリーをほぼ一定電力出力で運用できる。また、減速に伴うエネルギー回生は EDLC で行い、走行中はバッテリーへの充電を行わない。これにより、バッテリーの充放電サイクル数を少なくできる。システムを電気自動車に搭載した場合の効果について、車両の物理モデルを用いたシミュレータを作成し、検討を行った。車両の特性を表すパラメータは表 3-3-2 のように定めた。モデルに車速の時系列データを与えることで、走行に必要なエネルギーを算出できる。今回は、ガソリン車やハイブリッド車の燃費測定に使用される、JC08 モードの車速時系列を使用した。算出したエネルギーから、表 3-3-1 のルールに基づいてバッテリーと EDLC の出力電力を求めた。

(5) 車両搭載時の制約とシミュレーション結果

先も述べたように、現在市販の EDLC 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 EDLC 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 EDLC が車両中で占有できる体積を決め、その中で EDLC が占める体積比率（EDLC 体積比率）を変化させてシミュレーションを行った。EDLC 体積比率 10% のときの

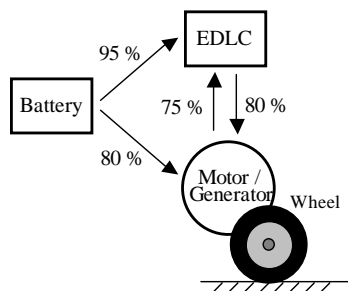


図 3-3-1 キャパシタ-バッテリー併用システムのエネルギーフローと効率

表 3-3-1 動作フロー

状態	動作
加速	EDLC から優先的に放電し、エネルギーが不足した場合はバッテリーから放電する。
減速	制動エネルギーを EDLC で回収する。 EDLC が満充電の場合は、油圧ブレーキによって減速する。
バッテリーからの EDLC 充電	バッテリーは 0.5 C で放電し、EDLC を充電する。 EDLC の SOC が 80% を超える場合、バッテリーからの充電は行わない。

表 3-3-2 シミュレーション条件

車両 (軽自動車)	電源体積	85 L
	車両重量 (電源重量除く)	920 kg
	搭乗者重量	55 × 2 kg
	全面投影面積	2 m ²
	空気抵抗係数 Cd 値	0.24
バッテリー (Li-ion)	質量エネルギー密度	100 Wh/kg
	体積エネルギー密度	190 Wh/L
	出力密度	500 W/kg
EDLC	質量エネルギー密度	5 Wh/kg
	体積エネルギー密度	6 Wh/L
	出力密度	4000 W/kg
初期条件	バッテリーと EDLC は満充電	
走行 パターン	JC08 モード	
	走行距離	8.172 km
	走行時間	1204 s

シミュレーション結果を図3-3-2に示す。バッテリーがほぼ一定電力出力で運用できたことがわかる。EDLC体積比率をさらに増やせば、バッテリーは完全に一定電力出力で運用できるようになる。EDLC体積比率が0%~30%のときの、バッテリーの負荷持続曲線を図3-3-3に示す。負荷持続曲線とは、負荷（出力電力）の時系列を降順に並べ変えたもので、負荷の大きさや持続時間を把握するために用いられる。EDLC体積比率が0%のときは、エネルギーの回生を行わない電気自動車と等価である。EDLC体積比率10%のとき、全放電時間のうち93%が一定電力出力であった。また、EDLC体積比率0%の場合に比べて、放電時間を26%短縮できた。以上のことから、バッテリーの長寿命化が期待できる。また、EDLC体積比率が30%のとき、バッテリー出力を全時間で一定とできた。

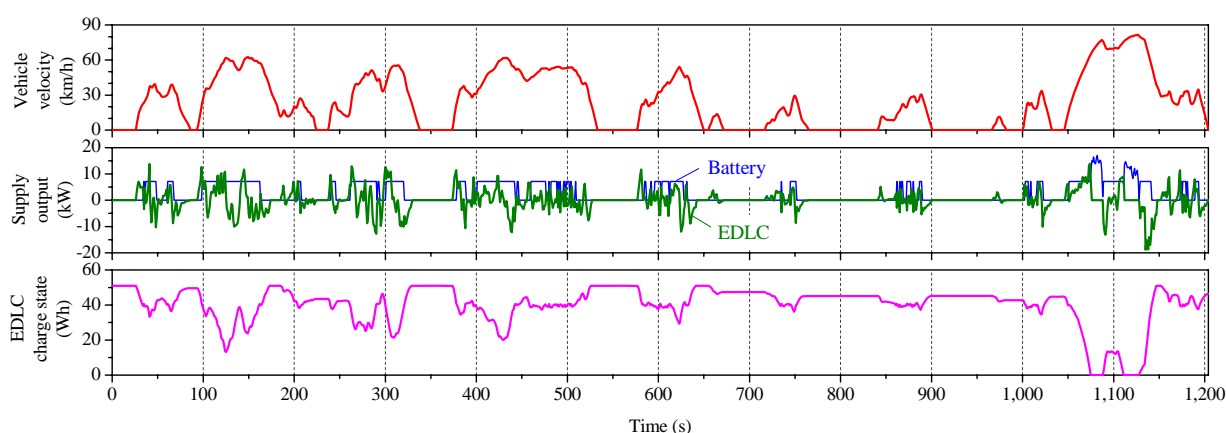


図3-3-2 JC08モード1回走行のシミュレーション結果（EDLC体積比率10%）

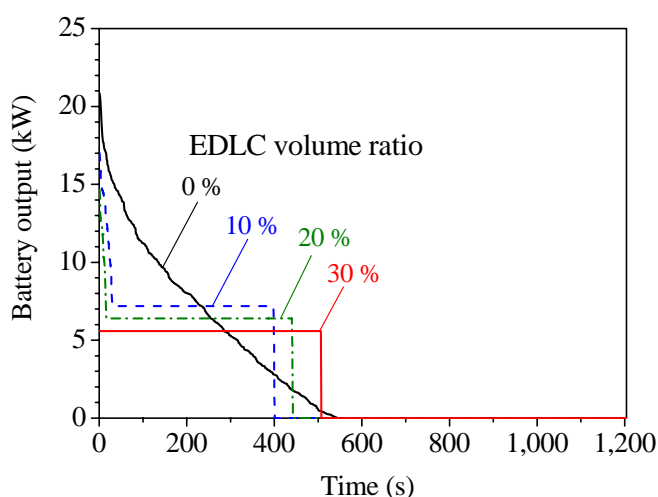


図3-3-3 バッテリー負荷持続曲線のEDLC体積比率依存性

3-4 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できるようになれば、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。

① 工作教室（夏休み特別教室@こども未来館）

2010年7月31日に、豊橋少年少女発明クラブ主催にて「夏休み特別教室」が、本研究室の助教、および学生が講師として、豊橋市こども未来館「ココニコ」にて開催された。このイベントは小学4年生以上の児童を対象に、豊橋少年少女発明クラブが毎年実施しているものである。今回、本研究室から「よく回るサボニウス風車をつくろう」「よく回るフランクリンモーターをつくろう」の二種類の体験講座を行った。図3-4-1は当日の参加者作業風景である。参加者は皆、熱心に作業を行っており、大変好評であった。



図3-4-1 参加者の作業風景（2010年7月31日 ココニコにて）

② 電気自動車の展示（第27回 豊橋技術科学大学オープンキャンパス）

2010年8月29日に豊橋技術科学大学にて、第27回オープンキャンパスが開催された。そこで、本研究室は中部電力、豊橋営業所の協力のもと、三菱自動車から販売されている電気自動車のi-MiEVの展示を行った。図3-4-2は展示されているi-MiEVである。このi-MiEVは実際に営業で使われている車両であり、来場者は普段この車を利用している説明員による生の声を聞くことができ、電気自動車を身近に感じることができた。

③ パーソナルモビリティ試乗体験（ものづくりフェア2010 in 東三河）

2010年の11月26日～27日にかけて、ものづくりフェア2010 in 東三河が豊橋市総合体育館にて開催された。これは、東三河のものづくり企業や大学が集まり展示を行うもので、地元のものづくりを体験できるというものである。本研究室では、次世代のパーソナルモビリティとして、セグウェイ（セグウェイ社）とTwin wheeler GT（KOKUFUMOBIL）の試乗体験を実施した。図3-4-3は当日の体験会場の様子である。本イベントでは、老若男女問わず、延べ800名以上の方が試乗体験し、大いに賑わった。



図3-4-2 電気自動車展示風景（2010年8月29日 豊橋技術科学大学にて）



図3-4-3 試乗体験会場の様子（2010年の11月26日～27日 豊橋市総合体育館にて）

④エコエネルギー体験（計画中）（豊橋総合動植物公園 のんほいパーク）

豊橋総合動植物公園（のんほいパーク）でのデモンストレーションを計画するため、昨年6月19日に現地調査を行った。その結果、「エコ電気エネルギーを覚えて体験してもらおう」という目的のもと、次のような二つの具体案を考えた。

具体案1：

のんほいパーク内には、多くの太陽電池が設置されている。図3-4-4は、自然史博物館屋上の太陽電池パネルと、自動販売機に設置された太陽電池である。これらを利用して、園内を回るツアー・説明を行い、何気なく設置されている太陽電池とエコエネルギーに興味を持ってもらう。

具体案2：

のんほいパークには多くの子供が訪れる。このため、子供が興味を持ちやすい、遊びながら学ことができる物が有効と思われる。この一例として、ミニ四駆に太陽電池を搭載したものが挙げられる。これは、岡山県等での実施例があり、好評だったとのことである。

具体案3：

現在ののんほいパークにはガソリンエンジン式のトーイングトラクターによる園内バス（図3-4-5）が巡回している。このバスを電気バスに改造をする。それにより、運行コストの削

減と CO2 排出量の減少ができる。また、排気ガスによる汚染や悪臭がなくなるので、動植物公園に適した移動手段になると思われる。

上記以外にも、広い敷地を有効活用した電気自動車のデモなども考えられる。

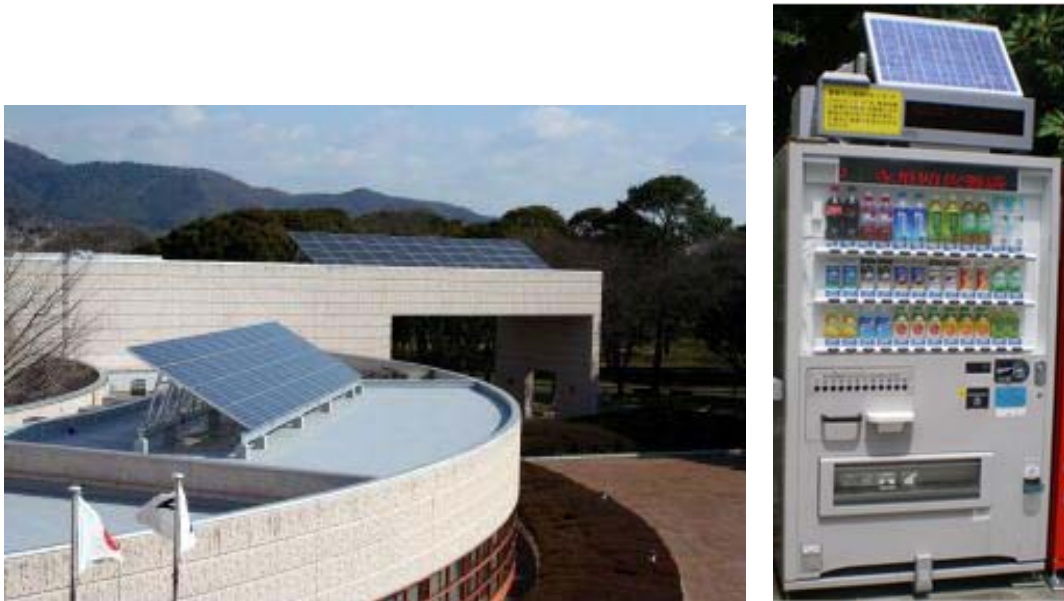


図 3-4-4 各所に設置された太陽電池パネル



図 3-4-5 のんほいパーク園内バス

(2) 小型電気自動車

キャパシタ-バッテリー併用システムの実証実験に向け、1人乗りの小型電気自動車の製作を進めている。50 cc のガソリン車をベースに、走行用動力を 600 W のインホイールモータに置き換え、電気自動車に改造中である。インホイールモータは、駆動輪のホイール中にモータを内蔵したもので、ギアなどの機械的な伝達機構を介さずに駆動輪を駆動するため、高効率である。また、ギアレス構造により、軽量化・省スペース化を実現している。図3-4-6は、改造中の電気自動車のフレームである。ベースとした車両は、光岡自動車製の3輪小型自動車 BUBU503 で、後輪の1輪駆動輪をインホイールモータに置き換えた。次年度以降の実験の計画として、まずは、バッテリーのみを搭載した電気自動車として組み上げ、各機器のエネルギー収支と温度の測定器を仕込む。また、車速なども併せて測定し、実車両の、実走行下における機器のエネルギー効率や温度上昇を測定する予定である。次に、電源をキャパシタ-バッテリー併用システムに置き換え、実車両への導入効果を検討する。また、現在は3輪車で後輪1輪駆動だが、将来的には4輪車の後輪2輪駆動に改造予定である。駆動輪にはインホイールモータを用いるため、駆動輪が2つに増えることで、内輪差や車速を考慮した制御が必要となるが、車両の特性をより一般的なものに近づけることができる。



図3-4-6 改造中の小型自動車（モータ換装後のフレーム）

(3) 卓上エネルギー回生試験機

小型電気自動車の製作と並行して、卓上型のエネルギー回生試験機を製作している。外観を図3-4-7に示す。図中の左から、モータ、フライホイール、電磁ブレーキの順に、同一軸上に配置してある。この装置では、まず、モータでフライホイールを回転させ、フライホイールに回転エネルギーを蓄える。続いて、モータを発電機として使用し、回転エネルギーを電気エネルギーとして取り出すことで、車両のエネルギー回生動作を模擬できる。次年度以降、同装置を用い、エネルギー回生に対応したモータドライバの開発や、エネルギー回生効率の実験を行う予定である。

3-5 今後の課題

本項では、未来ビークルシティの工学的技術面から見た導入条件について検討した。以下に、その結果と課題を示す。

- (1) 次世代ビークルのエネルギー供給源として有望視されている、太陽光発電の導入条件について、本学と豊橋市内の一般家庭の電力負荷データを用いて検討を行った。一般家庭の場合、余剰電力を電力会社へ売電することで導入コストを取り戻すことができるが、太陽電池の寿命(約20年)の間にペイバックするためには、国や地方自治体等による補助金が必要不可欠との結果になった。
- (2) 電気自動車の電力供給システムについて、キャパシタとバッテリーを用いた新しい電源システムの実用可能性について検討を行った。キャパシタとバッテリーの併用により、電気自動

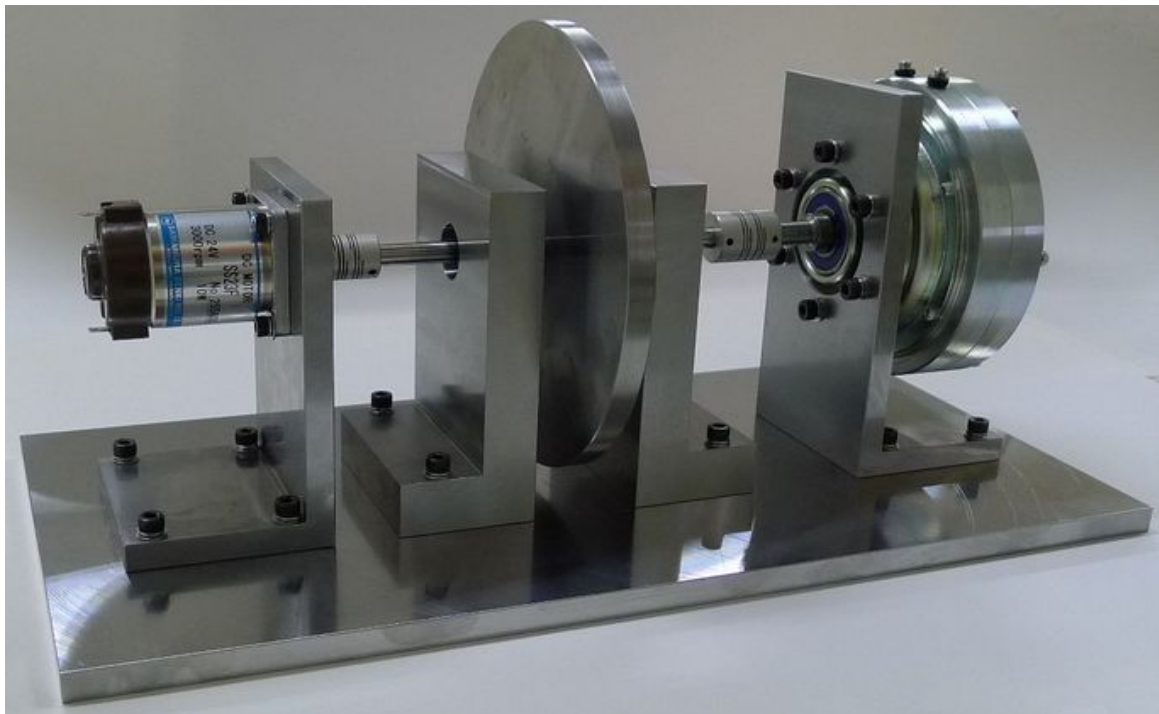


図3-4-7 卓上型エネルギー回生試験機

車用電源で重要な、大電流充放電の要求を満たしつつ、高サイクル特性を実現し、長寿命運用が可能となる。キャパシタを用いてバッテリーを一定電力出力運用し、長寿命化を狙うことで、これを実現する。車両の物理モデルに本システムを組み込んだシミュレータを作成し、JC08モードを走行した場合のバッテリー出力を求めた。その結果、キャパシタの付加によって、バッテリーを一定電力出力運用できることがわかった。航続距離のさらなる延長など、車両性能向上のためには、キャパシタのエネルギー密度の向上が望まれる。エネルギー密度が二次電池と同程度になれば、現在の電源を完全にキャパシタに置き換えることも不可能ではなくなる。

- (3) 市民へのデモンストレーションの実施結果と今後の実施計画について述べた。次世代ビークルの技術や、特性、現状を理解してもらう上で、デモンストレーションは重要である。また、市民の声をフィードバックすることで、未来ビークルシティの構想をより良いものにすることができると考えられる。本年度は、オープンキャンパスを初めとする3つのデモンストレーションを実施し、いずれも好評であった。また、来年度のデモンストレーションについても計画中である。