

電気二重層キャパシタによるソーラーヴィークルの エネルギー効率改善

木村 英樹*

Energy Efficiency Improvement of Solar Vehicle Using Electric Double Layer Capacitor

by

Hideki KIMURA*

(received on Sept. 28, 2001 & accepted on Dec. 6, 2001)

Abstract

The environment problems such as global warming and fossil fuel depletion become serious. As one means for reaching solution in these problems, the solar vehicle research of Tokai University began since 1991. Some solar cars were developed in this study. The new model based on the new international regulation was made in 2001. As a part of these researches, the solar vehicle was mounted for the first time on the electric double layer capacitor (EDLC) in the world in 1998. The internal resistance is low, because there is no chemical reaction on the EDLC, and it is possible to increase in the large output current. In addition, the charge-discharge cycle is almost infinitely. The energy efficiency of solar vehicle was improved by this EDLC.

Keywords: Solar vehicle, Electric double layer capacitor, Energy storage

1. まえがき

エネルギー・環境といった人類を取り巻く問題は、深刻化の度合いを深めつつある。化石燃料の使用は石油等資源の枯渇を引き起こし、地球温暖化の原因とされているCO₂ガスを排出し、同時に酸性雨となるNO_xやSO_xガスも生じさせている。そのため、各種機器においてエネルギー利用効率を高めるとともに、より一層の排気ガス清浄化を進める工夫が必要となってくる。

移動体である自動車は、発電所や工場とは異なり、燃料貯蔵、排ガス浄化、燃費改良などを行う機器を搭載すると重量が増加し、消費エネルギーの増加につながるため対応が難しい。たとえばクリーンであると言われている電気自動車(Electric Vehicle: EV、バッテリーのみをエネルギー源とするものを特にPure EVと呼ぶ)は航続距離を保つために大量のバッテリーを搭載する必要があることから、一般に同型ガソリン車の1.5倍程度の重量が増える。したがって、転がり抵抗、勾配抵抗、加速抵抗などが増えることによって、車としての消費エネルギーはむしろ悪化している。また、電気エネルギーをどこから持ってくるのかも重要で、発電所の効率が低い途上国で使用すると、むしろ全体のCO₂排出量が増加してしまうといった矛盾も指摘されている。このような背景から、従来のガソリンエンジンと電気モーターを組み合わせたハイブリッド車(Hybrid Electric Vehicle: HEV)が登場したが、「化石燃料消費 = CO₂ガス排出」を約半分に抑えるに過ぎない。そこで、水素やメタノールなどを

利用した燃料電池車(Fuel Cell Electric Vehicle: FCEV)の登場が待たれている。しかしながら、なんらかの燃料供給源を必要としていることに変わりはなく、その道筋はインフラを含めてまだこれといって定まっていない状況にある。そのような状況の中で、ソーラーヴィークル(Solar EV)は太陽光エネルギーというクリーンな自然エネルギー源を独自に確保している点に優位性がある。そして一度作ってしまえば、ガソリンを消費することなく、CO₂ガスなどの排出もなしに、半永久的に走行することができることから究極の環境車であるといえる。技術面、コスト面などクリアすべき困難な課題があるものの、ねばり強く研究していく必要があると考える。

2. 東海大学におけるソーラーヴィークル研究

ソーラーヴィークルとは、太陽電池で得られた電気エネルギーでモーターを動かす電気自動車である。東海大学では、環境問題への意識が高まりつつある1991年にソーラーヴィークルの研究開発が始まった。1992年には2人乗りのソーラーヴィークルが実際に作られた(Fig.1)。また、安定性を考慮して4輪とした。翌年の1993年には軽量化と空気抵抗の低減が行いやすいなどの理由から、1人乗りソーラーヴィークルが作られた(Fig.2)¹⁾。さらに1996年には、1993年型をベースに3輪とするなど、軽量化を進めた改良型が登場した(Fig.3)²⁾。そして2001年には国際レギュレーションの変更に対応した一回り小さいサイズの新型車を製作した(Fig.4)。これらの車体の主な仕様を

* 電子情報学部エレクトロニクス学科講師



Fig.1 Solar vehicle having two-seats and four-wheels (1992).



Fig.4 Solar vehicle having one seat and three wheels (2001).



Fig.2 Solar vehicle having two-seats and four-wheels (1993-1995).



Fig.3 Solar vehicle having one seat and three wheels (1996-2000).

Table 1 Specification of solar vehicles.

Year	1992	1993-1995	1996-2000	2001-
Seating capacity	2	1	1	1
Length (mm)	6000	5800	5800	5000
Width (mm)	2000	2000	2000	1800
Height (mm)	1100	1000	1000	1000
Frontal area (m ²)	1.34	1.12	1.12	0.87
Weight (kg)*	230	195	166	195
Number of wheels	4	4	3	3
Battery type	Pb-acid	Ag-Zn Ni-Zn Pb-acid	Ag-Zn Ni-MH Pb-acid	Li-ion
Cruising speed (km/h)	45	55	60	70
Maximum speed (km/h)	90	120	115	120

* without driver's weight.

となどから、秋田県大潟村で行われる World Solar-car Rallye (WSR)³⁾、三重県鈴鹿市で行われる Dream Cup ソーラーカーレース鈴鹿、オーストラリア大陸 3000km を縦断する World Solar Challenge (WSC)^{4,5)}などの大会に出場した。そして、レースを通じて得られたデータを研究開発にフィードバックしている。

ソーラーヴィークルに関する技術は多く分野にまたがる。これまでに著者らはグループとして、風洞実験等による低空気抵抗ボディの開発⁶⁾、軽くて強いチタン製フレームの製作^{1,3)}、ニッケル水素バッテリーの自主開発⁷⁻¹⁰⁾、世界初の電気二重層キャパシタ搭載^{9,10)}、ソーラーヴィークル用に開発された低転がり抵抗専用タイヤの採用⁹⁻¹¹⁾、集電体の抵抗を低減したシール式鉛バッテリーの搭載¹²⁾、太陽電池最大電力点追従装置 (Maximum Power Point Tracker: MPPT)の開発、高効率な太陽電池モジュールの設計などソーラーヴィークルを用いた研究だけでも多数を行ってきた。さらに、新機能太陽電池^{13,14)}やニッケル水素バッテリー用電極¹⁵⁾など、基礎的な研究も並行して行っている。これらの研究の結果、ソーラーヴィークルの消費電力は Fig.5 に示したように年々低下しつつある。ここで、1馬力は約 750W であり、このパワーで 53km/h 程度の速度を出すことができる。このことから、最先端技術で作られた省エネルギー車では、人を 1 人運ぶのに 1馬力もあれば十分であり、5馬力ほどもある 50cc スクーターのパワーでさえも必要でないことが

Table 1 に示す。1996 年までの車体は全長 6000mm × 全幅 2000mm 以内、2001 年は同じく 5000mm × 1800mm 以内という国際レギュレーションに基づいて製作されている。なお、ここに示した巡航速度は晴天時のものであり、実際には天候等によって低下する場合もある。また、最高速度は太陽電池アレイとバッテリーの出力を合わせた場合の速度を意味している。

これらのソーラーヴィークルは、学内での走行試験が不可能なことや、専用コースを借り切ったテストが費用的に困難なこと

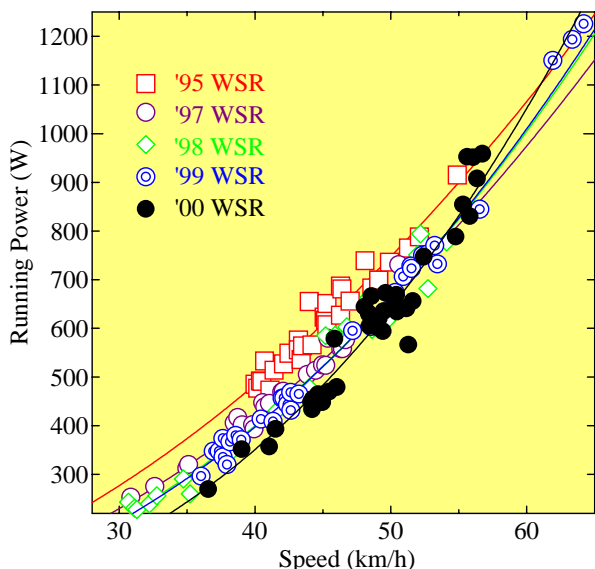


Fig.5 Dependence of running power on speed.

わかる．ともすれば太陽エネルギー収集効率ばかりに目が行ってしまうソーラーヴィークルである．しかし，実は空気抵抗，転がり抵抗，駆動損失などのあらゆるロスを低減したソーラーヴィークルこそが，優れたEVであることを理解されたい．限られた紙面で，これらの技術を解説することができないため，ここでは電気二重層キャパシタの応用技術を中心に触れることにする．

3．電気二重層キャパシタ

電解液と電極が接する界面には分子レベルの距離を置いて電荷が存在する電気二重層が生じる．一般に電気二重層は 1cm^2 あたり数十 F 程度の容量を有していると言われてている．一方，活性炭は 1g あたり数千 m^2 (テニスコート数面分) に相当する表面積を持っている．これらの2つの性質を組み合わせると巨大容量化したものが電気二重層キャパシタ(Electric Double Layer Capacitor: EDLC)である．EDLCの模式的な構造図を Fig.6 に示す．

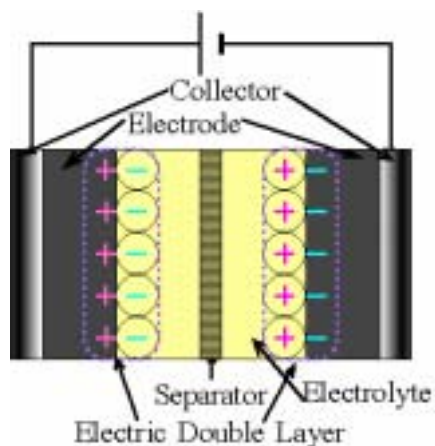


Fig.6 Schematic sketch of the EDLC.

図に示したように，孔径を制御して製作された活性炭を集電

体であるアルミニウム箔上に塗布して電極としている．この電極を対向させ，それらに間に電気は流さないがイオンは通過するセパレータを挿入した構造である．しかし，上述したようなメカニズムで動作するため，原理的に耐電圧を上げることは難しい．例えば希硫酸水溶液を用いた水系 EDLC の場合，耐電圧は水の電気分解電圧 1.23V 程度以下となり，実用的な使用範囲はさらに低いものになってしまう．そこで分解電圧が高く，比重が軽いプロピレンカーボネート(PC)溶媒などに，テトラエチルアンモニウム・テトラフルオボレート(Et_4NBF_4)溶質などを添加した有機系電解液を用いることで，耐電圧とともに重量エネルギー密度を増加させることが近年行われている¹⁶⁾．1998年に初めてソーラーヴィークルに搭載した水系 EDLC，および2001年に使用した有機系 EDLC を Fig.7~9 にそれぞれ示す．さらに，これらの仕様を比較したものを Table 2 に示す．なお，これらの EDLC は，日本ケミコンといすゞ自動車による合弁会社 CCR，あるいは日本ケミコンの研究開発品である．



Fig.7 EDLC bank using aqueous electrolytic solution (1998).



Fig.8 EDLC bank using organic electrolytic solution (1999-2000).

この EDLC は，代表的な大容量コンデンサであるアルミ電解コンデンサと比較しても非常に大きな静電容量となる．また，バッテリーと比較すると化学反応が無いため，酸化還元による電極活物質の体積変化も発生しない．そのためクラックの成長が引き起こす微粉化による劣化がないため，充放電回数は無限に近い．また，内部抵抗が小さいことから充放電の際のジ



Fig.9 EDLC bank using organic electrolytic solution (2001).

Table 2 Specification of EDLC bank.

Year	1998	1999-2000	2001
Electrolyte type	Aqueous	Organic	Organic
Nominal capacitance (F)	6.0	15.6	30.0
Rated voltage (V)	120.0	112.5	100.0
Stored energy (Wh)	12.0	27.4	41.7
Weight (kg)	9.2	9.8	9.7
Energy density (Wh/kg)	1.3	2.8	4.3

ジュール損が少なく、パワー密度が高いといった長所を有する。そのため、電流を短時間に繰り返し充放電することに適し、その際のエネルギー効率はバッテリーよりも高い。

バッテリーと同様に1セルあたりの電圧が低いため、多数のセルを直列に接続して使用することが多くなるが、その際にセル間の電圧にバラツキが生じる場合がある。水系EDLCであれば水が電気分解されるだけであるが、密閉構造の有機系EDLCの場合にはガス発生による電解液の劣化等が問題になる。したがって、同じ有機系電解液を用いたリチウムイオンバッテリーと同様に、セル間の電圧を均一化するバランス回路などを使用することが望ましい。そのため1999~2000年は、Fig.8に示したようなバランス回路を実際に製作し装着した。なお2001年については、静電容量等の特性が揃ったEDLCが製作できるようになり、電圧のバラツキを調整する必要がなくなったので、バランス回路は廃止した。

4. エネルギーの回生利用

自動車が減速する際に、それまでに持っていた運動エネルギーは、ディスクとパッドが摩擦して発生する熱エネルギーとして捨てられている。この運動エネルギーを駆動用モーターあるいは専用発電機で電気エネルギーに変換することで制動力を得る方法を回生制動と呼ぶ。この回生制動は、燃費を向上させる効果が多大であるので、すでにトヨタ自動車から市販された「プリウス」、「エスティマハイブリッド」やホンダの「インサイト」、「シビックハイブリッド」などのHEVなどでも応用されている。ところが、バッテリー搭載量が少ないHEVでは、長くても数十秒というブレーキ時間で回生制動を行うと充電電流がバッテリーに対して過剰なレートとなる。これは、バッテリー搭載量が少ないソーラーヴィークルにおいても同様に問題となる。

ここで、EDLCを用いて回生制動によって得られた電気エネルギーの充電を分担し、再加速時に放電させることによってバッテリー負担を低減することが可能となる。またEDLCを利用することで、充放電の際のエネルギー損失を低減することも期待できる。バッテリーとキャパシタを並列に接続してソーラーヴィークルに搭載し、2000年WSRにおいて試験を行った結果、Fig.10に示したように回生制動時に電流をEDLCが分担していることが分かる。また、加速時のデータをFig.11に示す¹²⁾。その結果、EVのような大きな電力貯蔵システムにおいても、EDLCによってバッテリー電流の平準化が行われていることが確認できた。その結果、バッテリーのみの場合よりも、急峻な充放電が可能となり、その分だけ急減速および急加速が可能となることから、競技用ソーラーヴィークルの平均速度を高める効果が生まれ、パフォーマンスが向上した。また、バッテリーと並列に接続して電力の平準化を行うよりも、EDLCのみに切り換えて回生電流を受けた方が、さらなるエネルギー効率の改善が可能であることを確認している。

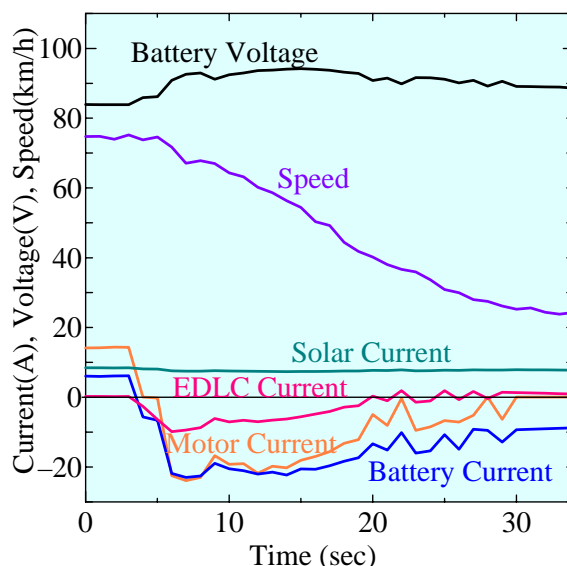


Fig.10 Characteristics in the deceleration of the solar vehicle¹²⁾.

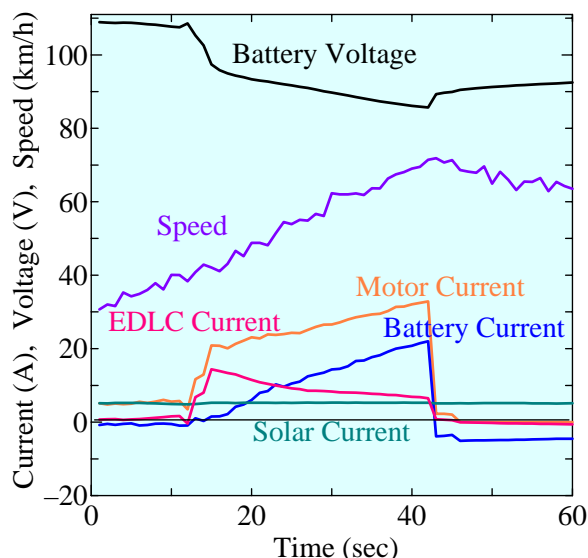


Fig.11 Characteristics in the acceleration of the solar vehicle¹²⁾.

この回生制動は運動エネルギーだけでなく、自動車の位置エネルギーも吸収することができる。70mの標高差を持つ宮城県の菅生サーキットにおいて競技用小型EVを用いてテストした結果、使用可能なエネルギーが40%以上増加したことを確認した¹⁷⁾。

4. まとめ

ここでは、東海大学で行われてきたソーラーヴィークル研究に関する研究について紹介し、その一部として行われたEDLCによる回生エネルギー利用技術を中心に述べた。これらの技術は、同じEVの仲間であるHEVなどにも応用可能な技術ばかりである。とくにEDLCは、充電ができない燃料電池と組み合わせてFCEVに搭載することで、重量増加を抑えつつ燃費向上に貢献でき、エネルギー貯蔵システムの信頼性も向上できると考えている。

ソーラーヴィークルの実用化はエネルギー・環境といった問題の進行状況によるところが大きいが、まだしばらくは先のことであろう。しかしながら、夢のある究極の乗り物であり、学生に対しては貴重なものづくりを体験できる場であることから、教育的な効果も高いように思える。

今後も研究活動を引き続き行ってきたいと考えているので、より一層のご理解とご支援をお願いしたい。

謝辞

ソーラーヴィークル等へのEDLC搭載について協力していただいたCCR、日本ケミコン、いすゞ自動車に感謝します。また、本研究遂行にあたりご協力いただいた古河電池、日本ミシュラン、ENAX、MC、ソルトン、日本インターなどの企業、また貴重な研究・教育の場を与えていただいたWSR、JISC、WSC、Dream Cupソーラーカーレース鈴鹿などの大会関係者、そして多方面にわたりご支援をいただいた東海大学関係者の方々に感謝します。

参考文献

- 1) 飯田昌盛, 松前義昭, 高本慶二, 星野博司, 平岡克己, 横塚英世: 1993年度 World Solar Challenge データにもとづく東海大学ソーラー自動車の走行エネルギーと電力収支, 東海大学紀要工学部 Vol. 36 (1996) No. 1, 17.
- 2) 飯田昌盛, 松前義昭, 高本慶二, 押野谷康夫, 星野博司, 平岡克己, 木村英樹, 内田裕久: 1996年ワールド・ソーラー・チャレンジのための東海大学ソーラー自動車の特性改善と結果, 東海大学紀要工学部 Vol. 37 (1997) No. 2, 9.
- 3) "1998 World Solar-Car Rallye in Akita Achievement Report", ワールド・ソーラーカー・ラリー・イン・アキタ大会本部 (1998).
- 4) D. M. Roche, A. E. T. Schinchel, J. W. V. Storey, C. P. Humphris and M. R. Guelden, "Speed of Light: The 1996 World Solar Challenge" Photovoltaics Special Research Centre, University of New South Wales (1997).
- 5) 木村英樹, 池上敦哉, 堺一佐武, 粕井基之, 木村聡海: 小型ソーラーカーの開発およびその性能, 太陽エネルギー Vol. 26 (2000) No. 6, 43.
- 6) 野田憲吾, 高本慶二, 関和市: ソーラーカーの空気力学的最適形状に関する実験的研究, 太陽/風力エネルギー講演論文集 (2000) 513.
- 7) 星野博司, 木村英樹, 高本慶二, 森井清史, 内田裕久: ニッケル・水素電池の試作とソーラー自動車への応用, 水素エネルギーシステム Vol. 23 (1998) No. 1, 22.
- 8) H. Hoshino, H. Uchida, H. Kimura, K. Takamoto, K. Hiraoka, Y. Matsumae: Preparation of a nickel-metal hydride (Ni-MH) rechargeable battery and its application to a solar vehicle, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 26 (2001) 873.
- 9) 木村英樹: ソーラーカー, 夢, 未来 -明日を拓く技術に挑む-, 技術と経済 (1999) No. 385, 44.
- 10) 木村英樹, 星野博司, 松前義昭, 高本慶二, 平岡克己, 内田裕久, 渡辺真一郎, 高橋昌宏: 電気二重層キャパシタ, ニッケル水素電池および低転がり抵抗タイヤによるソーラーカーのエネルギー効率改善, 太陽エネルギー Vol. 25 (1999) No. 2, 45.
- 11) 高本慶二, 木村英樹, 星野博司, 松前義昭, 平岡克己, 内田裕久, 蒲池光久, 田口英生: 低転がり抵抗タイヤおよびドライバによるソーラーカー走行エネルギーの低減, 東海大学紀要工学部 Vol. 39 (1999) No. 1, 177.
- 12) 大塚恵里, 木村英樹, 松前義昭, 星野博司, 高本慶二, 黒須楯生: 太陽/風力エネルギー講演論文集 (2000) 493.
- 13) 木村英樹: 太陽光発電の開発トレンド, 技術と経済 (2001) No. 411, 68.
- 14) 石川次郎, 星崎博之, 木村英樹, 黒須楯生, 沖村邦雄, 室谷裕志, 若木守明, 飯田昌盛: 太陽/風力エネルギー講演論文集 (2000) 295.
- 15) 星野博司, 内田裕久, 木村英樹: ソーラー自動車搭載用ニッケル・水素電池の放電容量に関する一考察, 太陽エネルギー Vol. 27 (2001) No. 4, 36.
- 16) 岡村迪夫: 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) 148.
- 17) 木村英樹, 池上敦哉, 高橋昌宏, 西村嘉孝: 電気二重層キャパシタによる競技用小型電気自動車の改良(2), 第48回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集 (2001) No.1, 507.