

高効率小型電気自動車の開発

木村英樹

Development of the Small Sized High Efficiency Electric Vehicle

by

Hideki KIMURA

(received on Sept. 12, 2003 & accepted on Jan. 14, 2004)

Abstract

A small sized electric vehicle has been designed and fabricated to decrease the running power consists of mainly the rolling resistance and the aerodynamic drag. The 18kg light body was realized by carbon fiber reign-forced plastic (CFRP). Further, 93% high efficiency DC brushless motor has been developed by using iron based amorphous core. To increase the energy efficiency, electric double layer capacitors (EDLC) having large capacity have been applied to the energy storage system of the electric vehicle. This paper reported on the trial developments of the super economical electric vehicle.

Keywords: Electric Vehicle, DC Brushless Motor, Iron Based Amorphous Core, Electric Double Layer Capacitor

1. はじめに

近年、地球温暖化やエネルギー資源の枯渇などの問題が懸念されている。このような背景から太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギーの開発が急務とされている。しかしながら、新エネルギー開発だけでは、エネルギー需要の増加に対応することができないと予測されるため、省エネルギー技術の向上が必要不可欠であるとされている¹⁾。仮に新エネルギー開発が順調に進んだとしても、現在、先進国一人あたりが使用しているエネルギーの1/4~1/3程度しか消費できないと予測されている²⁾。現在、このような背景から低消費電力化に関する技術はより一層重要になってきている。

一方、移動体である自動車は、重量的な制約から火力発電所並みの変換効率で動力を得ることが難しい状況にある。近年、燃料電池自動車が注目されているが、燃料電池セルの電気変換効率が40~50%程度とされており、化石燃料をベースに考えると、ハイブリッド車よりも若干優位性があるというレベルに留まる。したがって燃料電池車は廃熱が多く、都市部におけるヒートアイランド現象を食い止めるには不十分であると考えられる。一方、太陽光発電や風力発電からは、質が高い電気エネルギーが得られるため、水素ガスに変換せずにバッテリーに充電し、そのまま電気自動車で利用することが最も環境に優しいという意見も報告されている³⁾。

現在のところ、電気自動車については車体質量が重い、航続距離が短い、充電時間を要するなどの問題点が指摘されている。そこで、本研究では人間を移動させるために、最小限必要なパワーを追求することを目的として、0.1馬力(約

73W)で走行可能な小型電気自動車を設計製作することにした。そして、低消費電力化を進めるために、鉄系アモルファスコアをステータコアに採用したDCブラシレスモーターを開発した。さらに、回生制動用に電気二重層キャパシタを採用するなど高効率化を達成することに成功したので報告する。

2. ボディーの設計・製作

乗用車では、居住性、快適性、安全性、生産性、経済性などを総合して開発が行われるため、開発費が巨額となる。本研究では、究極的な省エネルギー性能を追求する電気自動車エコラン競技に着目し、一人の人間がぎりぎり乗車できる小型サイズを念頭において設計を行った。このコンセプトにより、電気自動車の研究開発にかかる費用を大幅に低減できると考えた。Fig.1に設計した車体の図面を示す。

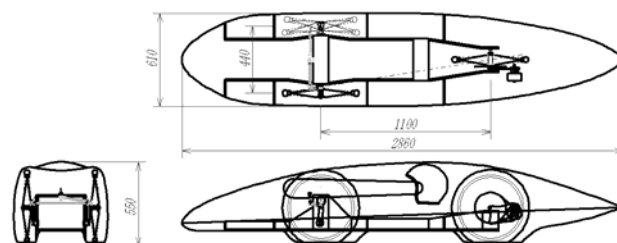


Fig.1 Drawing of the electric vehicle.

軽量化を進めるために、車体はバスタブ型セミモノコックを採用した炭素繊維強化プラスチック(CFRP)製とした。さらに、タイヤは低転がり抵抗を実現するために、ミシュラン社製44-406 Marathon Shell型タイヤ(20×1.75 inch)を3本使用し

* 電子情報学部エレクトロニクス学科助教授

た。カウル形状は、地上高を高めを設定することで前方投影面積が小さくし、流線形状を採用することで、空気抵抗係数が小さくなるようにした。さらに、地上高を 100mm と高めを設定することで前方投影面積も小さくした。また、タイヤ回りに生じる乱流によって発生する空気抵抗を低減するために、ポディー下面にタイヤスパツを設けた。一方、ハブやキングピンなどの金物には、アルミ合金 7075 を採用し、ドライバー、バッテリーを除いた車体質量は 18kg となった。これは一般的な自転車並みの質量であり、高いレベルで軽量化を達成することに成功した。主な車体仕様を Table 1 に示す。また、製作された車体の外観を Fig.2 に示す。

Table 1 Specifications of the electric vehicle.

Vehicle Dimensions	L×W×H	2860×610×550mm
	Wheel base	1100mm
	Track	440mm
	Weight	23kg
Equipment and Construction	Chassis	CFRP monocoque
	Body	CFRP
	Wheel	20inch aluminum alloy
	Tire	Michelin 20×1.75
Motor	Transmission	Single stage chain
	Type	DC brushless
	Manufacturer	Tokushudenso
Battery	Weight	1.5kg
	Type	Sealed lead acid FT-4L
	Manufacturer	Furukawa battery
Capacitor	Capacity	12V-3Ah×4
	Type	EDLC
	Manufacturer	Nippon Chemi-con
	Capacity	13.5V-65F×4 13.5V-100F×1



Fig.2 Exterior of the developed electric vehicle.

3. 高効率 DC ブラシレスモーターの開発

3.1 ステータコア材料の検討

DC ブラシレスモーターのステータコアには、電磁コイルによる磁束を稼ぐために、一般に無方向性ケイ素鋼板が使用されている。しかし、モーターのような交番磁界がケイ素鋼板に印加された場合、ヒステリシスロスなどに起因する鉄損が発生することが知られている。一方、コアの体積を小さくすることで鉄損は少なくなるが、相対的に巻線が細くなりジュール損に

起因する銅損が増加しやすい。このような技術的背景から、鉄損が少ない軟磁性材料の開発が進められている。ここで、主な軟磁性材料の飽和磁束密度と鉄損について Table 2 にまとめる。

Table 2 Comparison among the soft magnetic materials.⁴⁾

Soft magnetic material	Saturation magnetic flux density (T)	High frequency iron loss (W/kg)
Non-oriented silicon steel plate	1.90	325
Super micro crystalline iron	1.25	20
Iron based amorphous	1.55	40
Permalloy	0.70	97

本研究では、軟磁性材料として鉄損が少なく、飽和磁束密度が比較的高い鉄系アモルファス箔を積層したコアをステータ材料として採用することにした。このようなアモルファスコアは、近年 DC-DC コンバータのチョークコイルや変圧器等に用いられつつあるが、硬くて脆いことから加工性が悪く、モーターへ応用された例は少ない。今回は、打ち抜きやフライスによる加工が行えないため、ワイヤー放電カット法を採用することにした。将来的にはより低コストで加工できる方法を確立する必要があると考えられる。

鉄系アモルファスコアはケイ素鋼板コアに対して、飽和磁束密度が小さい。そこで、マグネット-ステータ間のエアギャップを広げて磁束密度を下げ、その分不足した磁束を補うために、コアの積み厚をケイ素鋼板のそれよりも約 1.5 倍の 27mm とした。製作したモーターの外観を Fig.3(a)に、内部のステータコアを Fig.3(b)に示す。また、コア材料に鉄系アモルファスと高性能型ケイ素鋼板を用いたときの、モーター特性を比較したものを Fig.4 に示す。

Fig.4 はモーター入力電流に対する回転数 N 、トルク T 、出力 P および変換効率 η を示したものである。これより、鉄系アモルファスコアを採用することで、無負荷に近い(低電流側)領域での変換効率が改善されていることから、期待通りに鉄損成分を改善することに成功したことがわかる。また、コアサイズの大形化および巻線径を太くしたことなどにより、銅損成分も低減することができ、高電流側での効率も大幅に改善することができたといえる。

ただし、アモルファスコアの最大飽和磁束密度が低いことから、マグネットとコア間のエアギャップを広げて界磁を弱めため、同じ電流値に対して回転数は高くなり、トルクは若干低下した。コントローラーにおける損失を含むモーターのピーク効率は約 93%に達し、広範囲な電流領域において高効率化を達成できたことがわかる。100W 程度以下の出力規模としては、たいへん高効率なモーターを実現できたといえる。

次に、得られたモーター特性より、主なパラメータについて求めた値を Table 3 に示す。



(a)



(b)

Fig.3 (a) Developed DC brushless motor having iron based amorphous core. (b) Inner view of the stator.

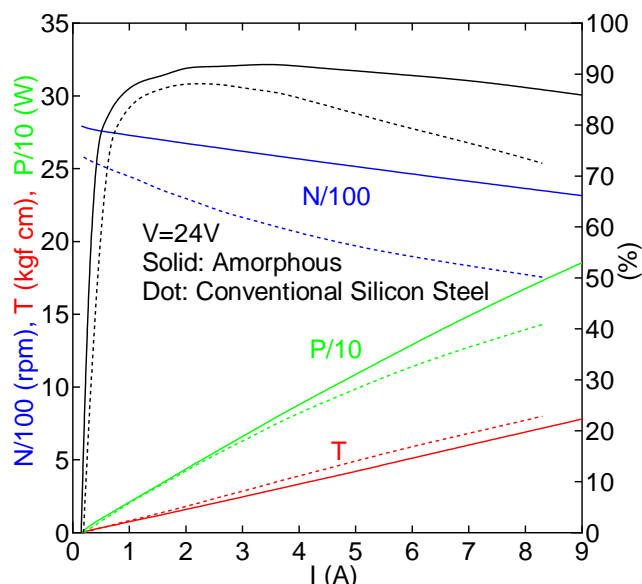


Fig.4 Comparison between amorphous and conventional core.

3.2 進角制御の採用

モーターの速度制御には一般にPWM制御が用いられる。このPWM制御では、トランジスタ自身のスイッチングロスや、トランジスタがオフとなった際に、フライホイールダイオードを環流する電流などによって損失が増大する。そこで、ローター

Table 3 Values of the DC brushless motor.

Assigned power rating	80W
Nominal voltage	24V
Torque constant	0.0864Nm/A
Counter electromotive force coefficient	0.00856V/rpm
No load speed	2793rpm
No load current	0.15A
Evaluated resistance	0.45
Max. efficiency	93%

マグネットの位置を検出するホールICを3セット用意し、それらを切り換えることで、巻線への通電タイミングを早めるといった進角制御を取り入れることにした。この進角制御により、効率をほとんど落とすことなく、PWM制御に頼らない速度制御領域を設けることに成功した。試作したモーターの特性をFig.5に示す。

Fig.5の中の矢印は進角制御を行った際の特性変化を表している。図より通電タイミングを早めることで回転数が高くなることがわかる。その際の効率低下はほとんど観測されず、損失を発生することなく、速度制御を行えることを確認した。

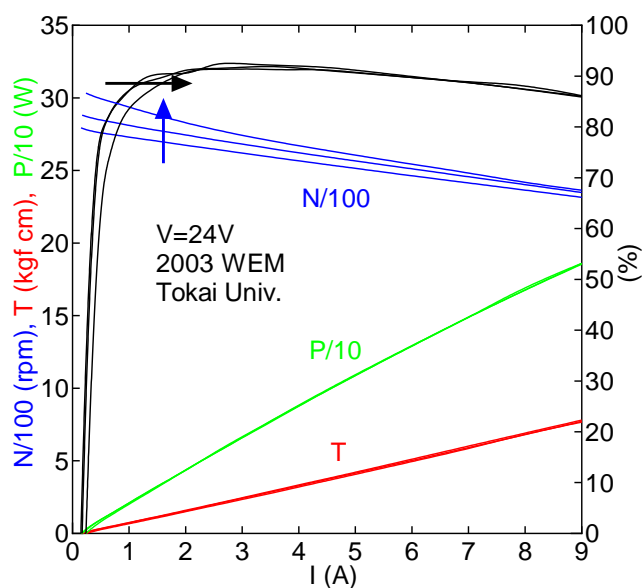


Fig.5 Characteristics of developed motor.

4. 電気二重層コンデンサによるエネルギー回生

多孔質な活性炭を電極材料に用いた巨大容量コンデンサである電気二重層コンデンサは、アルミ電解コンデンサとバッテリーの中間を埋めるエネルギー貯蔵デバイスとして注目されている。電気自動車では加速や減速の際に大きな電流を要求されるが、これは数秒から数十秒の範囲に収まることが多い。このような時間領域において、電気二重層コンデンサの有効性は高いと判断した。そこで、13.5V-65Fの電気二重層コンデンサを2直列にした27V-65Fバンクを用いることにした。この電気二重層コンデンサバンクは負荷変動を抑制するために12V-3Ahの鉛バッテリーを2並列2直列にした組電池(24V-6Ah)と並列に接続した。

また、回生制動効果を確認するために、回生専用の電気

二重層コンデンサ(13.5V-100F)も別に搭載した。このコンデンサの質量は 485g と軽量であり、54×54×127mm と小型であるため、重量エネルギー密度で 4.47Wh/kg、体積エネルギー密度で 5.86Wh/L となる高性能品である。なお内部抵抗は 10mΩ であり、巻線抵抗に比べて十分に小さいため、回生制動の際に損失を抑えてエネルギー回収を行うことができる。この電気二重層コンデンサの外観を Fig.6 に示す。このコンデンサは巡行、回生制動、加速の 3 つの状態ごとに接続関係を変化させている。バッテリーと電気二重層コンデンサの模式的な接続関係を Fig.7 に示す。



Fig.6 Electric double layer capacitor for the regeneration brake and acceleration.

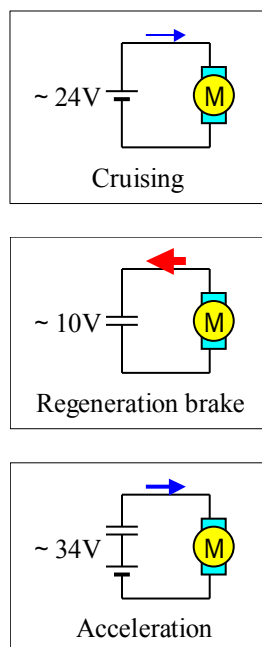


Fig.7 Three states of the energy storage system.

巡行状態(Cruising)では、バッテリー電圧である 24V で走行し、PWM を用いず(DUTY 比=100%)のときに適当な消費電流(例えば 3A)となるようにギヤ比を設定しておく。このときのモーターの内部起電力は約 22V 程度となる。この状態から

減速を行う場合、約 10V 程度に保たれている電気二重層コンデンサに接続を切り換える。この場合、モーターの起電力の方がコンデンサ電圧よりも約 12V 高いため、コンデンサへ回生電流が流れ、制動トルクが発生する。その結果、運動エネルギーを回収しながら車体を減速させることができる(Regeneration brake)。再加速を行う場合には、まず巡行時と同じバッテリーを接続しバッテリーから電力を供給する。そのままであると、加速後半に速度の上昇が伸び悩む。そこで、電気二重層コンデンサをバッテリーと直列に接続して 34V とし、モーター電流を増やし、速やかに巡行状態へ推移させるようにした(Acceleration)。

一方、回生制動によって 38.5km/h から 24km/h まで減速する際の制動距離を確認するために、モーター特性および車体特性からシミュレーション計算を行ったところ 130m と見積もられた。実車による回生制動のテストを行ったところ、シミュレーションと非常に良い一致を示した。しかし、この制動距離は長いので、今後は回生効率を落とさずに、さらに強力な制動を行えるような対策が必要であると考えられる。

5. 車体性能の評価

5.1 走行抵抗の測定

無風状態の平地を巡行する自動車の走行抵抗を測定することは、性能評価をする上で最もシンプルな方法である。しかしながら、テストコースの占有や、実車の風洞試験機を行うことは大変コストがかかる。秋田県八郎潟の干拓地にある大瀧村には、1 周が 25.1km で 0.1% 以下の勾配の直線路が主体の「大瀧村ソーラースポーツライン」という優れたコースがある。本研究ではこの南コースの直線部分を往復することで走行性能を評価することにした。減速比 6.4: 1 における平均的な巡航飽和速度は 41 ~ 42km/h となった。

これまでの研究で得られた値⁵⁻⁸⁾とともに本車体の性能を評価した結果を Table 4 にまとめる。

Table 4 Values of the electric vehicle.

Total mass (include in driver and batteries): m	95kg
Rolling resistance coefficient: μ	0.0036
Frontal area: A	0.27m ²
Aero dynamic drag coefficient: C_D	0.15
Tire diameter: $2r$	0.5m
Gear ratio: G_R	6.4: 1
Mechanical efficiency: M	0.97
Electrical efficiency: E	0.93

5.2 走行シミュレーション

平地無風状態を巡行する自動車の転がり抵抗は、

$$\mu mg \text{ (N)} \quad (1)$$

となる。ただし、 μ は転がり抵抗係数、 m (kg) は車体質量、 g (m/s²) は重力加速度である。一方、空気抵抗は

$$\frac{1}{2} C_D A \rho v^2 \text{ (N)} \quad (2)$$

となる。ここで、 C_D は空気抵抗係数、 A (m^2)は前方投影面積、 ρ (kg/m^3)は空気気密度、 v (m/s)は対風速度である。したがって速度 v (m/s)で走行する車体に必要な走行パワーは、

$$\left(\mu mg + \frac{1}{2} C_D A \rho v^2 \right) \frac{v}{\eta_M} \quad (W) \quad (3)$$

となる^{9,10}。ここで、 η_M はチェーン駆動による機械効率である。Eq.(3)について計算を行った結果を Fig.8 に示した。なお、第1項の転がり抵抗成分、第2項の空気抵抗成分についても図中に示してある。

一方、ある車速にある自動車におけるモーターの回転数は、タイヤ直径と減速比から求めることができる。したがって出力される電力は Table 3 あるいは Fig.4 から求めることができる。回転数 N (rpm)の当モーターが発生する逆起電力 E は

$$E = K_E N \quad (V) \quad (4)$$

である。ここで K_E は逆起電力係数であり、 $0.00856V/rpm$ である。電源電圧 V (V)のときの負荷電流 I (A)は、

$$I = \frac{V - E}{R} = \frac{V - K_E N}{R} \quad (A) \quad (5)$$

となる。ここで、 R (Ω)は巻線の等価抵抗である。このモーターが発生する出力 P (W)は、

$$P = \frac{K_T (I - I_0) N \pi}{30} = \frac{K_T \left(\frac{V - K_E N}{R} - I_0 \right) N \pi}{30} \quad (W) \quad (6)$$

である。回転数 N (rpm)のときの車速 v (m/s)は

$$v = \frac{N \pi r}{30 G_R} \quad (m/s) \quad (7)$$

であるので、Eq.(6)および(7)を計算することで、車速に対するモーターパワーを求めることができる。 $V=25V$ としたときのモーターパワーを計算した結果を Fig.8 の中に示す。

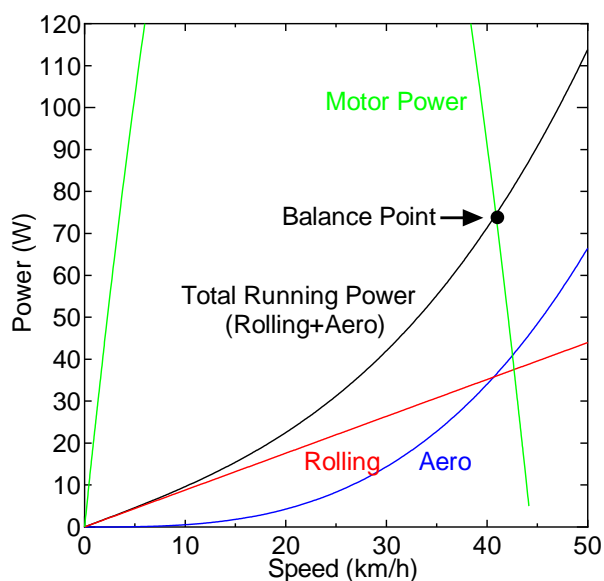


Fig.8 Dependence of running power on speed.

図に示したようにモーターパワーは上に凸の放物線状の関数になる。また、走行パワーとモーターパワーの交点が電気

自動車の飽和巡航速度となり、約 75W のパワーで 41km/h という値が得られた。この値は実地走行を行った際に得られた値とよく一致していた。以上の結果から、あらかじめシミュレーション計算を行うことによって、実際の走行状態を考察することが可能であることを示すことができた。今回は平地のみの考察しか行わなかったが、勾配抵抗や加速抵抗を考慮することで、より複雑なコースに対してもシミュレーションが行えるかどうかについても検証する必要があるだろう。

5.2 走行性能の評価

実測値およびシミュレーションの結果から、本研究で開発された小型電気自動車は、75W の消費電力で 41km/h で走行することが可能であった。さらに、長時間の走行による走行性能の評価を行うために、12V-3Ah の制御弁式鉛バッテリー(古河電池製 FT4L-BS)を 4 個搭載して大潟村ソーラースポーツラインを 2 時間連続走行したところ、76.95km を走行することができた。計算値よりも若干走行距離が減少したのは、折り返しの際に減速および再加速を行っているためである。いずれにしても、電池の定格エネルギーである 144Wh を利用したとすると電力料金にして約 3.3 円分で 約 77km の距離を走行できたことになる。一方、ガソリン 1 リットルの理論エネルギー(低位発熱量)を 8972Wh とすると、4794km/L という燃費に相当する。この比較は極端であるため、火力発電所での発電を想定し、化石エネルギーから電気エネルギーへの変換効率を 40%と想定した場合でも、約 1900km/L の超低燃費を実現できたといえる。

6. まとめ

人間一人を移動させるために最低限必要なパワーを実際に調べることを目的として、空気抵抗と転がり抵抗を低減した小型電気自動車を製作した。鉄系アモルファスコアを使用した高効率 DC ブラシレスモーターおよび電気二重層コンデンサを搭載することで、エネルギー変換に伴う損失の低減を実現した。その結果、0.1 馬力(約 75W)のパワーで 1 人の人間を 41km/h の速度で移動させることが可能であることを実証した。

今後の課題として、さらなる車体性能の向上とともに、現実的な走行条件に近づけるために、登坂コースなどでの評価を行うことが挙げられる。

謝辞

今回の電気自動車を製作するにあたり、中心的に携わった菊田剛広氏に感謝します。車体製作に協力していただいた、本学電子情報学部エレクトロニクス学科の黒須楯生教授、工学部機械工学科の鈴木曠二教授、東海大学付属翔洋高等学校の山田修司教諭、電気二重層キャパシタ、アルミ電解コンデンサ、アモルファスコアなどを提供していただいた日本ケミコンの森正行氏、志田洋一氏、光安大輔氏、岩手エレクトロニクスの松岡孝氏、アモルファスモーター試作をしていた

だいた特殊電装の西村嘉孝氏に感謝します。シール式鉛バッテリーをご提供いただいた古河電池の熊谷枝折氏，車体製作についてご指導いただいたヤマハ発動機の池上敦哉氏に感謝します。また，車体運行に協力していただいた辻岡毅氏，太田涼子氏，藤田将利氏，三島純人氏，佐川耕平氏に感謝します。最後に，貴重な研究の場を与えてくださった，WEM 組織委員会，大瀧村，および東海大学の関係者各位に感謝します。

参考文献

- 1) 茅陽一：エネルギー環境制約克服へのエンジニアへの期待，応用物理 Vol.72, No.7 (2003) 930.
- 2) 若井和憲：エネルギー危機と大気環境問題，応用物理 Vol.72, No.7 (2003) 846.
- 3) 齋藤武雄：次世代自動車の姿，FB テクニカルレビュー No.58 (2002) 1.
- 4) アモルファスチョークコイル CAT No.1008G 日本ケミコン社内測定データ.
- 5) 木村英樹，初井基之，立脇修：競技用ソーラーバイクの設計製作，太陽/風力エネルギー講演論文集 (1999) 269.
- 6) 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ソーラーバイクでの回生エネルギー利用，太陽/風力エネルギー講演論文集 (2000) 129.
- 7) 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 No.1 (2001) 507.
- 8) 木村英樹，池上敦哉，初井基之，内山英和，竹本憲，森正行，熊谷枝折：電気自動車用電気二重層コンデンサおよび DC ブラシレス DD モータの走行試験：平成 15 年電気学会全国大会講演論文集 No. 4 (2003) 397.
- 9) G. Tamai "The Leading Edge", Robert Bentley (1999).
- 10) 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).