

基調講演

世界最速ソーラーカーの開発

○会員 木村 英樹 (東海大学) 会員 池上 敦哉 (ヤマハ発動機)

Development of the World's Fastest Solar Car

Hideki KIMURA* and Atsuya IKEGAMI**

*Tokai University

4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa,
259-1292, Japan

Fax: +81-463-50-2031

E-mail: kimura@tokai.ac.jp

**Yamaha Motors

ABSTRACT

A solar car "Tokai Challenger" having 1.8kW high performance solar cells, 97% high efficiency motor, 5.7kWh high capacity battery and 160kg light weight body has been developed and made for "World Solar Challenge". 3D CAD and CFD were used for its improved design of aero dynamics. The developed solar car realized the performance of 100km/h cruising speed by using only solar energy.

キーワード: 持続可能エネルギー, 化合物太陽電池, 空気抵抗, ブラシレス DC ダイレクトドライブモータ, 鉄系アモルファスコア, リチウムイオン電池, エネルギーマネジメント

Keywords: sustainable energy, compound solar cell, aero dynamic drag, brushless dc direct drive motor, iron based amorphous core, lithium ion battery, energy management

1. はじめに

限りある石油資源は、このままではあと数十年程度で枯渇すると予想されている。とくに中国、インドをはじめとした新興国において自動車の保有台数は伸び続け、それに伴って原油の消費量も増加している。オイルサンドやオリノコタールなどの生産性の悪い資源は、原油価格の上昇により採算ラインに乗るとの見方もあるが、原油と比べ精製に要するエネルギーが増加するとされている。一方、化石燃料

を燃焼させる際に発生するCO₂ガスは、大気中で濃度を高めつつあり、地球温暖化を引き起こすのではないかと懸念されている。このような時代の要請を受け、自動車メーカーはハイブリッド車、ディーゼルエンジン車、アイドリングストップ車など、走行中のCO₂ガス排出量を削減した低燃費自動車を投入するようになった。そして、電気自動車や燃料電池自動車など、走行中のCO₂ガス排出がゼロとなる次世代自動車も登場しつつある。しかしながら、低燃費車であっても依然として石油資源を消費し続け、温室効果ガスであるCO₂ガスも排出することには変わらない。また後者の新世代車も、現時点では電力会社の発電所には火力発電が含まれ、水素ガス生産にも天然ガスなどが原料として使用されることも多いことから、エネルギー源の確保について課題を残している。ソーラーカーは、太陽電池をボディ上部に配置した電気自動車であり、一度作ってしまえば燃料供給なしに半永久的に走行できる究極のエコカーである。ところが、太陽電池から得られるパワーは限られており、自動車を動かすには十分な大きさに達していない。そのため、ソーラーカーの実用化は不可能であると考えられてきた。しかしながら、持続可能な社会の構築を目指す場合、ソーラーカーの持つ意義は高く、可能性を追求する必要がある。そこで、先端技術の粋を集めた競技用のソーラーカーを開発することにした。

2. 高性能な太陽電池による発電システム

ソーラーカーのエネルギーを生み出すのは、ボディ上面に配置された太陽電池アレイであり、この発電性能がソーラーカーの性能を決める大きなポイントのひとつとなる。今回は、1987年に第1回大会が始まった"World Solar Challenge (WSC)"のチャレンジクラスのレギュレーションに適合する車体を開発することとした。



Fig.1 Route map of WSC.

本大会は、2009 年からは”Global Green Challenge (GGC)”のソーラーカー部門として開催されている。従来のソーラーカーは上方投影面積で 8m^2 、あるいは全長×全幅が $5 \times 1.8\text{m}$ 以内の車体全体に搭載できるというものであったが、2007 年に制定されたチャレンジクラスでは、セル面積の合計が 6m^2 以内と定められている。以前に比べ $20 \sim 25\%$ 程度削減された太陽電池の制限面積内で最大の発電電力を得るために、シャープが宇宙用途向けに開発した化合物太陽電池を、ソーラーカー用にカプセルリングした太陽電池モジュールを搭載した。セルは三接合化合物太陽電池と呼ばれるもので、波長感度の異なる 3 種類の半導体を組み合わせたものである。トップ層は紫外線を含む短波長領域の光を吸収する InGaP、ミドル層は中波長領域に対応した GaAs、ボトム層は赤外線を含む長波長領域の光を吸収する Ge が用いられている。変換効率は 30% と高く、 1.8kW の定格出力を得た。モジュール 1 枚あたりの封止セル数は 48 枚であり、24 枚ごとに電極を外部に取り出している。また、影や発電トラブルなどに対応できるように、セル 1 枚ごとにバイパスダイオードが設置された。太陽電池モジュールは比較的曲率半径を大きめに設定したアッパーボディに設置され、モジュール間の角度差を抑えた。さらに、コックピット上部にあるキャンपी周辺には、キャンピーが作る影による発電低下を抑えるために、広めの空白域を設定した。

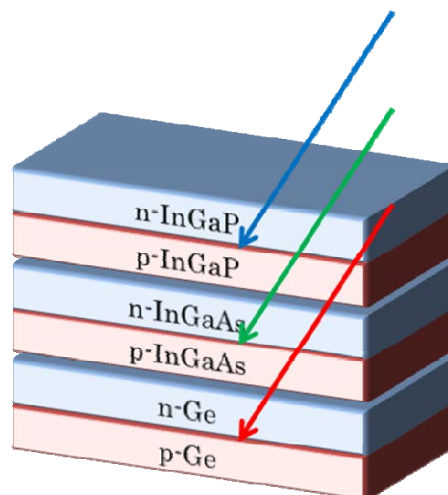
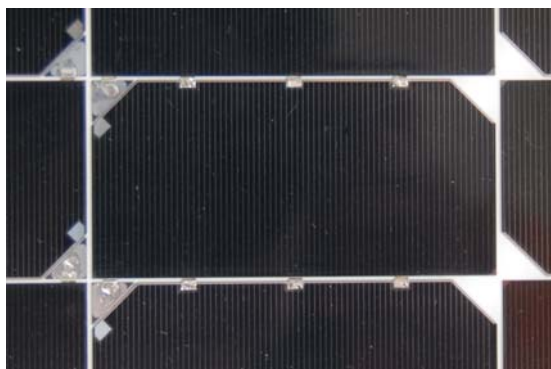


Fig. 2 Compound solar cell.

これらの太陽電池モジュールからの出力電力は、24 チャネルの昇圧型最大電力点追従回路 (Maximum Power Point Tracker: MPPT) に投入され、バッテリーやモータと接続された。この MPPT は、1 基板あたり 1 つの制御用電源と制御用マイコンを搭載し、2 チャネルの入力を持つ。このソーラーカーのために開発された MPPT は、12 枚用意され搭載された。三島木電子により製作された MPPT は、変換効率は 98% 以上と高効率化を達成した。

3. 高効率な鉄系アモルファスコア DD モーター

ソーラーカーの電気自動車としての低消費電力性能を追求する中で、モータの高効率化は重要な課題である。ギヤやチェーンにおける伝達損失を減らすために、ダイレクトドライブ (DD) 構造を採用し、タイヤホイールを直接駆動する方式とした。また、コギングを低減し、トルク定数を得るためにマグネットと電磁石の比を $8:9$ としたモータがミツバより供給された。この電磁石には、日本ケミコンが製作した鉄系アモルファスコアが導入され、鉄損の低減を図った。さらに、軸受けには転がり抵抗が少ない JTEKT 製セラミックボールベアリングを採用した。マイコン制御により、通電タイミングを早める進角制御に加え、可変キャリア周波数 PWM、相補 PWM などのスイッチング損失を低減する制御もモータコントローラに組み込まれた。これらの機構により 97% の変換効率を実現することができた。昇圧回生ブレーキ機能も以前より搭載されている。



Fig. 3 Brushless DC direct drive motor, carbon disk wheel and low rolling resistance tire.

4. 高容量バッテリー

太陽電池の出力は天候や時間帯などによって変動する。一方、ソーラーカーの消費電力も、登坂時、加速時など走行状態によって変化する。単にエネルギー予備的に蓄えているだけでなく、この発電と消費のミスマッチを緩和するためにもバッテリーは大きな役割を担う。ソーラーカーは 25kg と少ない量のバッテリーを搭載するため、エネルギー密度が高く、同時に内部抵抗も小さいことが要求される。今回は、220Wh/kg 以上の世界トップレベルの高容量性能をもつパナソニック製の NCR18650 型リチウムイオンセルを、17 並列 32 直列にした 5.7kWh のバッテリーを作成した。18650 型セルは、主にノート PC などに使用されているが、テスラモーター社ロードスターのような電気自動車にも採用例がある。



Fig. 4 lithium ion battery.

5. 空力性能と軽量化を追求したボディ

ボディの設計には 3D CAD を用いた。時間的余裕やコスト制約から風洞試験は行わず、CFD (ソフトウェアクレイドル SCRYU/Tetra) による空力解析を行った。ただし、もともと空気抵抗が小さいソーラーカーの場合、空気抵抗の値については誤差が生じやすい。そこで、ライバルチームの車体についても写真等から 3D モデルを起こし、同様に解析を行うことで、相対的に優位性を確保することとした。WSC チャレンジクラスの場合、ドライバーのシートアングルを 27° 以下にする必要があり、空気抵抗や重量が増加しやすいと

いう条件が加わるが、設計段階での C_D は 0.15、前方投影面積 0.776m^2 、ドラッグ面積 $C_D A$ は 0.12 という計算値を得た。ボディの主要素材には炭素繊維強化プラスチック (CFRP) が用いられた。空気抵抗を低減することを最優先させた結果、フロントタイヤスパツの前方投影面積を減らすためにハンドルの切れ角を抑えた。不足した回転半径を短くするために後輪をサーボモーターで逆相操舵する機構を搭載した。GH クラフト社の協力を得て、ボディは学生の手により製作された。製作された車体の質量は 160kg (バッテリー込み、ドライバーを含まず) と、WSC チャレンジクラスとして最軽量となった。



Fig. 5 Comparison of aero dynamic drag.

タイヤは、ミシュラン社の溝が 1.5mm 以上の新レギュレーションに対応した低転がり抵抗ラジアルタイヤ 95/80 R16 をフロント 2 輪、リヤ 1 輪の 3 輪を導入。GH クラフト社製のカーボンディスクホイールと組み合わせて使用した。



Fig. 6 Solar car "Tokai Challenger".

6. 実際の走行データ

Fig. 7 に GGC 大会期間中の各日の発電量を示す。さらに、それらの結果を Table 1 にまとめる。



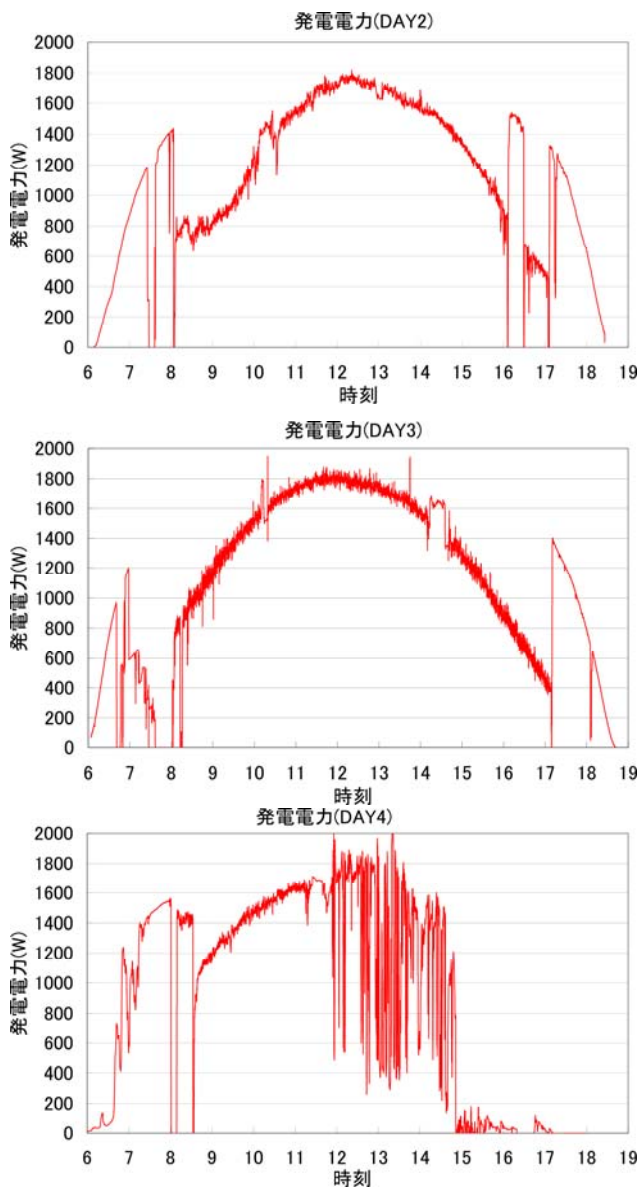


Fig. 7 Generated power (Day 1-4).

Table 1 Generated Energy (Day 1-4).

	発電			
	朝(kWh)	昼(kWh)	夕(kWh)	合計(kWh)
DAY1		11.61	0.28	11.89
DAY2	1.41	11.64	1.08	14.13
DAY3	0.76	12.39	1.20	14.35
DAY4	1.69	8.94		10.63

Fig. 7より、概ね1.8kWのピーク発電電力が得られ、期待通りのエネルギーを得ることができたことがわかる。Day 2の午前中に発電電力が低下しているのは、砂嵐の影響で太陽光が若干遮られたからである。また、朝夕や日中の一部で発電電力が増加しているのは、アッパーボディを太陽の方に向けているためである。次に、速度の変化をFig. 8に示す。砂嵐の影響を受けたDay 2以外、100km/hの速度で走行できたことがわかる。途中で速度がゼロになっている点は、大会側が定めたコントロールストップに停車し

ているためである。ただし、Day 4の13時付近はタイヤパンクにより8分間停車したことを示している。各日の発電、消費、走行距離をまとめたものをTable 2に示す。とくにDay 3において1日間で、東京～広島間に相当する900kmを移動したことが特筆される。

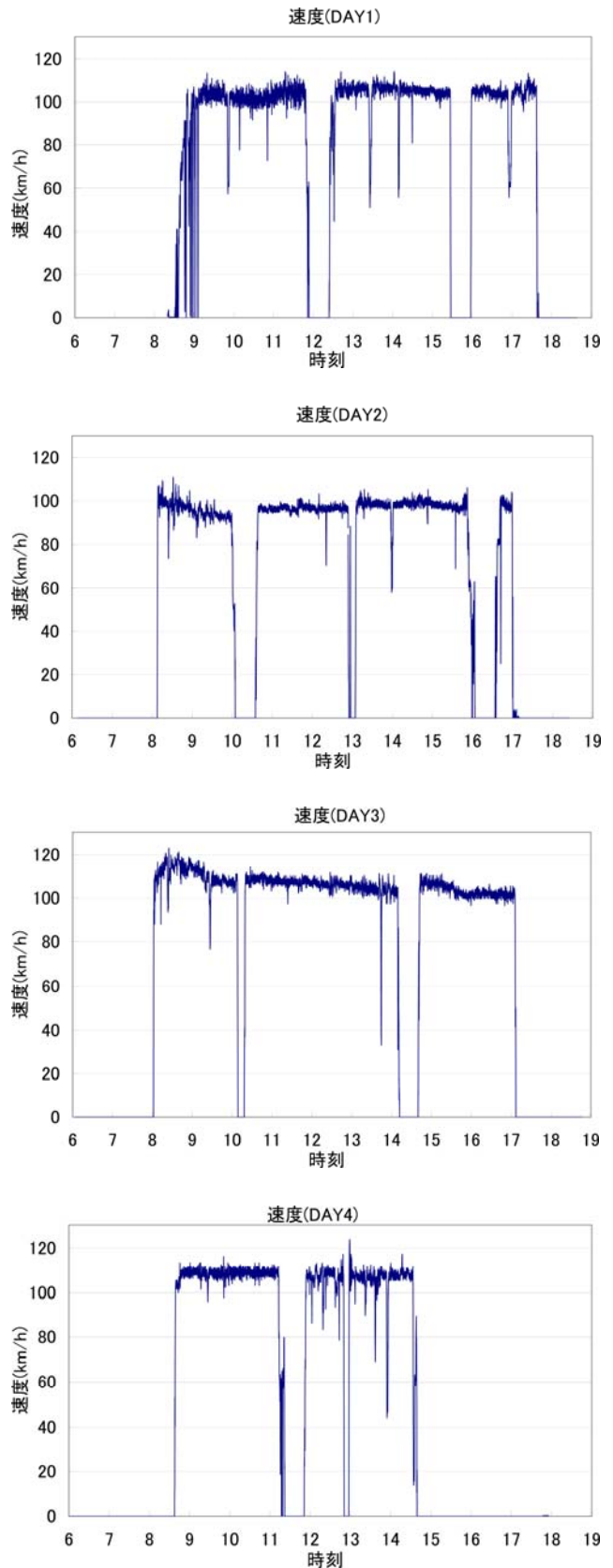


Fig. 8 Speed (Day 1-4).

Table 2 Generation and consumption energy and running distance (Day 1-4).

	発電(kWh)	消費(kWh)	走行距離(km)	総走行距離(km)
DAY1	11.89	14.21	804	804
DAY2	14.13	12.09	727	1531
DAY3	14.35	16.73	901	2432
DAY4	10.63	11.08	566	2998

WSC のレース結果としては 2998km を 29 時間 48 分で走行し、平均速度 100.54km/h の大会記録を樹立して優勝することができた。(コントロールストップでの停車時間は除く)これは 6m²に太陽電池面積が縮小された新レギュレーションのソーラーカーとしては世界最速のものとなった。

巡航中の速度と走行消費電力を平均化し、走行区間ごとにまとめたものを Fig. 9 の中に実測値としてプロットした。この実測データとの走行電力の式をフィッティングすることにより、 $C_dA=0.105m^2$ 程度という値が得られた。前方投影面積は $A=0.775m^2$ であるので、 C_d 値は 0.135程度となる。ただし、この値の決定プロセスには横風、向かい風の影響も含まれているので、厳密な風洞試験を行った場合には、これよりも空気抵抗係数は小さい値が得られると期待される。

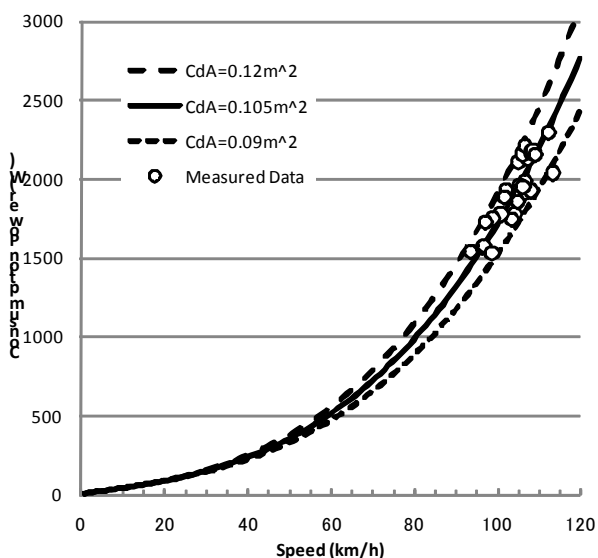


Fig. 9 Consumption power – speed characteristics.

7. 支援体制

競技用ソーラーカーの場合、ドライバーは運転に集中させるため、エネルギーマネジメントやナビゲーションなどはチーム全体でサポート体制を構築している。サポートカーはレギュレーションにより、ソーラーカーの前後を先導車と指令車の 2 台のエスコートカーが走行しなくてはならず、これ以外にメカニックを運ぶ伴走車、天候・キャンプ地・ライバルチームなどの情報を探る偵察車、ソーラーカーやその部

品・キャンプ用品などを運ぶ輸送トラック、記録・食料調達などを行う遊撃車で構成されている。できるだけ環境に配慮する観点からトヨタ自動車のプリウスなどを利用している。指令車では、ソーラーカーの車体の情報として、速度、バッテリー電圧、発電電流、モータ電流、バッテリー電流、スロットル開度、リチウムイオン電池セル電圧、セル温度などの情報をテレメトリシステムによって受信している。一方、日本国内において、気象衛星ひまわりの衛星画像を独自に受信し、東海大学情報技術センターで競技用に処理したものを作成した。これを、現地の指令車に搭載した通信衛星インマルサット BGAN の EXPLORER 727 で天気図などととも受信し、天候予測に役立てている。

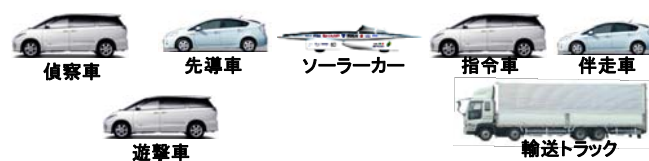


Fig. 10 Solar car and support vehicles.

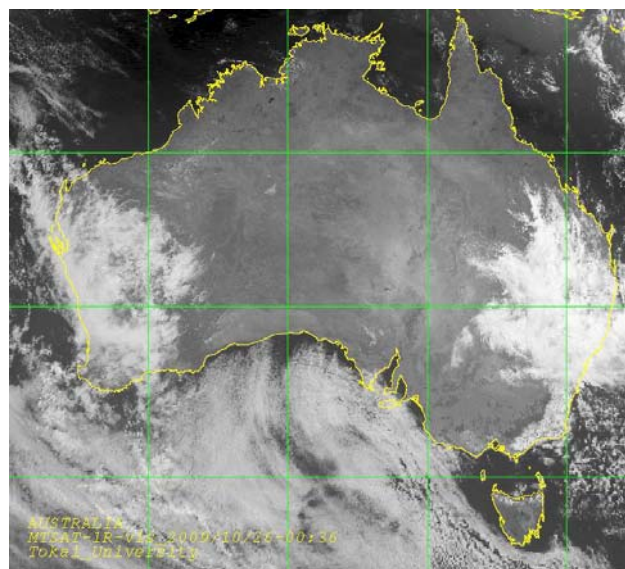


Fig. 11 Satellite image for solar car management.



Fig.12 Explorer 727.

8. 最後に

太陽光発電, 高効率モータ, 高容量バッテリー, 低空力&軽量ボディ, 低転がり抵抗タイヤなど, 数々の新技術を取り込み, 太陽エネルギーのみで 100km/h の高速走行が可能なソーラーカーを実現することができた. 2010 GGC の WSC 部門において, 新型ソーラーカー「Tokai Challenger」は, 念願の初優勝を成し遂げることができた. このような結果が得られたのは, 自動車や電気などの分野で高い技術力を持つ企業の特段の協力体制が得られたことが大きく関わっている. さらに, 秋田大会および鈴鹿大会など, 日本では数多くの大会が開催され, 切磋琢磨する機会が与えられてきた. ここで成長した日本チームの技術やノウハウを, Tokai Challenger プロジェクトに集結することができたことが成功につながったと考える. 2010年9月から10月にかけて, 南アフリカ共和国で開催された FIA 公認ソーラーカーレース”South African Solar Challenge (SASC) 2010”に出場した. この大会は, コース長 4000km 以上, 高低差約 2000m の過酷な条件が課せられており, 直線的でフラットなオーストラリア大会よりも難易度が高い. この SASC においても 4061.8km を 45 時間 5 分で走破し, 平均速度 90.1km/h の記録を樹立して優勝することができた.

以上の成果より, 競技用に開発されたソーラーカーであれば, 通常の乗用車並の走行性能を手に入れることができたといえる. しかし, 乗用車の代替手段として実用になるか?と問われた場合には, エアコンや衝突安全性などの点でまだまだ多くの課題を抱えていることは否めない. ここで視点を変えて二輪車と比較した場合には, 動力性能を除けば, まずまずの満足度を与えられる水準に達しつつあるように思える. 少なくとも馬よりはだいぶ改善されているだろう.

一方, このような大学におけるプロジェクト活動への取り組みは, 脱石油後の社会を支える未来のエンジニア育成と同時に, 厳しい環境をチーム力で突破することで社会的実践力を学生に身につけさせることができたのではないかと考える.

謝辞

本プロジェクトは, 東海大学チャレンジセンターのチャレンジプロジェクトとして実施され, シャープをはじめとし, ミツバ, パナソニック, GH クラフト, ミシュラン, 日本ケミコン, JTEKT, JM エナジー, 三島木電子, 石塚工業, 日本デジコム, ソーアップ, RS コンポーネンツ, サンスター技研, 昭和飛行機工業, 商船三井ロジスティクス, 郵船グローバルロジスティクス, トヨタ自動車などの企業の協力を得た. また, 篠塚建次郎氏, 長幸平氏, 靱井基之氏, 佐川耕平氏, 菊

田剛広氏, 三瀬剛氏, 山田修司氏らの助力を得た. 関係者各位に感謝する.

参考文献

- (1) 日本太陽エネルギー学会編, エコ電気自動車のしくみと製作, オーム社 (2006).
- (2) 東海大学チャレンジセンター編, 世界最速のソーラーカー, 東海教育研究所 (2010).
- (3) シャープソーラーカー情報 2009.
http://www.sharp.co.jp/corporate/solar_car2009/
- (4) シャープソーラーカー情報 2010.
http://www.sharp.co.jp/corporate/solar_car2010/
- (5) 川端由美, 優勝を奪取した「テクノロジー」の日本代表, Motor Fan Illustrated Vol. 42, 三栄書房 (2010) p. 30.
- (6) 高田仁志, 東海大ソーラーカー・チームはなぜ勝ったのか? WSC 2009にみるTokai Challengerと車両デザインの変遷, カースタイリング Vol. 195, 三栄書房 (2010) p. 84.