

サイエンス・プラザ

太陽電池の最新事情

—ソーラーカーレース世界—はなぜ可能になったか—

東海大学工学部電気電子工学科教授 木村 英樹

1. はじめに

現在、プラグインハイブリッド車、電気自動車、などのエコカー開発が進められ、自動車のエネルギー効率も格段に向上しつつある。これらのクルマのエネルギーは、主に発電所からの電力供給によって賄われている。しかしながら、3.11 東日本大震災後に発生した原子力発電所での爆発事故をきっかけとして安全性への不安が高まり、稼働の是非について大きな議論が繰り広げられている。今日、原子力発電所の稼働が制限された日本においては、火力発電が電力供給の中心を担っており、限りある化石エネルギーを大量に消費している状況にある。とくに石油資源はいずれ枯渇すると懸念され、その燃焼によって排出される二酸化炭素は、地球温暖化を引き起こすという説もある。このような背景から、持続可能なエネルギーへのシフトが急務であると考えられるようになった。

固定電力買取制度が2012年7月1日にスタートし、その中でも太陽光発電は42円/kWhという高価格で引き取られることとなった。電力会社による一般家庭への電力販売価格は26円/kWh程度であり、この買い取り価格が比較的高額であることから、太陽光発電のエネルギーシェアはこれから急増するものと期待される。しかしながら、原子力発電機の1～2基分のエネルギーを得るのに、山手線の内側程度の面積が必要になるとされており、狭い日本の国土では十分な設置スペースを確保できるかが課題となるであろう。

一方、ハイブリッド車や電気自動車の車重は、一般のガソリン車に比べて重くなる傾向があり、効率が高くなったとはいえ、依然として多量のエネルギーを必要としているのが実情である。薄く広がった自然エネルギーでクルマを動かそうとした場合、さらに画期的な省エネルギー技術を導入する必要がある。ここでは、世界最速ソーラーカ

◆ も く じ ◆

| | |
|---------------------|------------------------|
| サイエンス・プラザ | 授業実践 |
| 太陽電池の最新事情…………… 1 | 波の基本性質を理解するために…………… 17 |
| 人工光合成について…………… 7 | |
| トピックス | 高校生へ私が選んだ1冊の本 |
| 食中毒の被害実態の推定…………… 12 | 超常現象の科学 |
| サイエンス・カフェ | なぜ人は幽霊が見えるのか…………… 20 |
| つくば院生ネットワーク…………… 15 | |

ーに用いられた最新の太陽電池を紹介するとともに、数々の省エネルギー技術について触れる。

2. 三接合化合物太陽電池

オーストラリア大陸のダーウィン～アデレード間の3,000kmを走破する World Solar Challenge (WSC) は、1987年に第1回大会が始まり四半世紀の歴史を誇っている。東海大学チームは、2009年大会の出場に向けてソーラーカー「Tokai Challenger」を開発し、出場した。

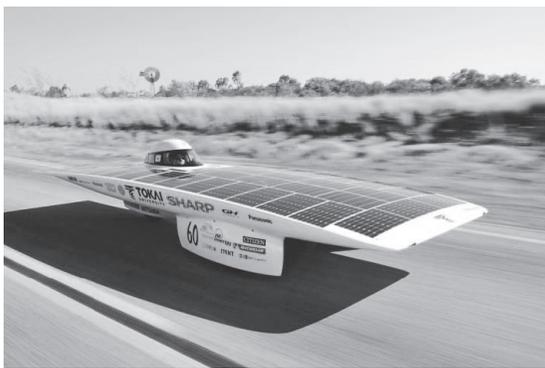


図1 ソーラーカー 2009年型 Tokai Challenger

このソーラーカーのエネルギーを生み出す太陽電池には、シャープが開発した三接合化合物太陽電池を採用した。この太陽電池は主に宇宙用や集光用に開発されたものであり、これを地上を走るソーラーカー用に加工したものを使用した。太陽光は紫外線から遠赤外線に至るまでの広いスペクトルを持つが、この太陽電池はこれらの光を効率よく電気エネルギーに変換するために、波長感度の異なる3種類のバンドギャップ（禁止帯幅）を持った半導体（インジウム・ガリウム・燐、インジウム・ガリウム・ヒ素、ゲルマニウム）を積み重ねたような構造を採る。図2に三接合太陽電池の構造を、図3にその外観を示す。

この三接合化合物太陽電池を使ったモジュールは、世界トップレベルとなる変換効率30%を達成した。これをソーラーカーに6m²搭載し、合計で1.8kWという出力を得た。2009年大会において、Tokai Challengerは平均速度100.54km/h

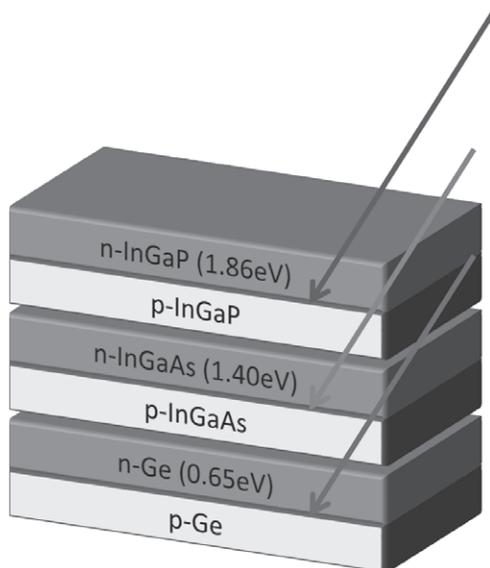


図2 三接合化合物太陽電池の構造

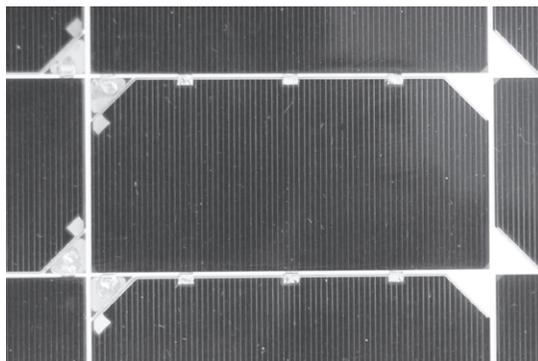


図3 三接合化合物太陽電池の外観

の記録を樹立して初優勝を飾ることができた。ところが、巡航速度が南オーストラリア州の制限速度である110km/hに達したことから、これ以降の大会では、化合物太陽電池の使用が制限されることとなった。

3. 高効率シリコン太陽電池

高性能な三接合化合物太陽電池によって、ソーラーカーの走行性能は飛躍的に高められた。そこで、実用化に少しでも近づけるために、住宅屋根に用いられるコスト的に優れたシリコン系の太陽電池を積極的に採用すべきであるという考え方が登場した。このような背景から、2011年大会で

はシリコン系太陽電池を使用した方が、チームにとって有利になるようにレギュレーションが改訂された。

シリコン系太陽電池の中でも変換効率が高いものとして、単結晶 n 型シリコン基板を使用したバックコンタクト型太陽電池と HIT 太陽電池がある。2011 年大会は事実上、この 2 種類の太陽電池による戦いが繰り広げられた。バックコンタクト型太陽電池は、アメリカの SunPower 社が開発したもので、発電層が裏面側のみに形成され、表側には集電電極が存在していない。そのため、通常 1 割程度の面積が存在する集電電極の影がなくなるため、多くの光を太陽電池に採り入れることができる（図 4）。そのため変換効率は、量産型シリコン太陽電池として世界トップレベルとなる 22% 程度を実現した。2011 年の WSC 大会では、アメリカのスタンフォード大学をはじめとして、ミシガン大学、マサチューセッツ工科大学、オランダのデルフト工科大学、芦屋大学などのほとんどのチームが、このバックコンタクト型太陽電池を採用した。



図4 バックコンタクト型太陽電池の構造

これに対して東海大学では、日本独自の技術であるパナソニックの HIT 太陽電池を採用した。この HIT 太陽電池は単結晶シリコンとアモルファス（非結晶）シリコンを組み合わせたハイブリッドタイプの太陽電池である。低温プロセスで太陽電池を作成できることから、結晶基板へのダメージを少なくすることができ、セル変換効率は 21.6% を達成している。（HIT は Hetero-junction with Intrinsic Thin-layer の略で、「真性薄層をもった異種接合」という意味）HIT 太陽電池の構造を図 5 に示す。

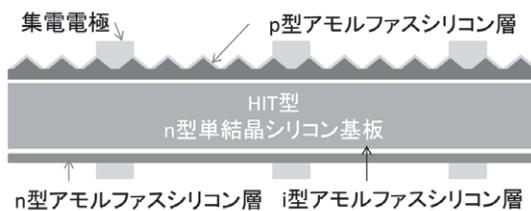


図5 HIT太陽電池の構造

HIT 太陽電池では表面にある集電電極の影が生じるが、この集電電極の表面で光を反射させ、太陽電池封止用のフィルムで再反射させることで、モジュール化した際の変換効率を稼ぐことにした。その結果、Tokai Challenger では 22% の変換効率を達成することに成功した。6m² あたりの定格出力は 1.32kW となる。



図6 太陽電池モジュール表面での光閉じ込め

この光閉じ込め効果は、光ファイバなどと同様な原理を用いたものである。できあがった HIT 太陽電池モジュール（図 7）とそれを装着した 2011 年型ソーラーカー Tokai Challenger（図 8）を示す。



図7 HIT太陽電池モジュール

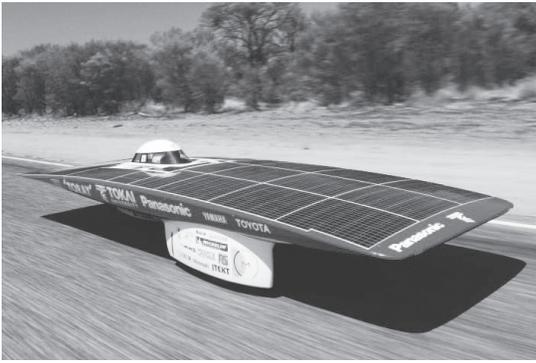


図8 2011 年型 Tokai Challenger

太陽電池は周囲温度 25℃ という測定条件で性能が評価されるが、実使用時の太陽電池温度は真夏の日中には 80℃ に達することもある。一般に結晶系シリコン太陽電池は、高温になると 10℃ あたり 5% 程度出力が低下するが、HIT 太陽電池は 3% 程度の低下に留まる。そのため、炎天下で使用した際の太陽電池出力を得やすいという特長がある。

なお、一般的なシリコン太陽電池の構造は図9に示したように p 型シリコン基板を使用した厚い構造となっており、バックコンタクト型や HIT 型は全く新しい発想の太陽電池であることを理解してほしい。

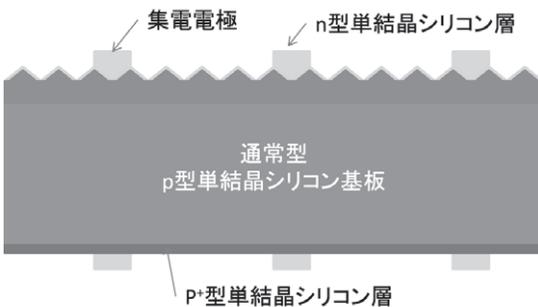


図9 通常の結晶系シリコン太陽電池の構造

4. ソーラーカーの省エネルギー技術

ソーラーカー用に開発された太陽電池モジュールは世界トップレベルの性能を得ることができたが、馬力に換算すると 1.8～2.4 馬力程度である。このパワーは原付スクータの半分程度以下であり、

クルマを高速で走行させることは難しい。そこで、様々な省エネルギー技術を惜しみなく投入することが求められる。

ボディは軽量である必要があるため、B787などに用いられている東レの炭素繊維「トレカ」を、童夢カーボンマジックの協力を得て成型した。さらに、サスペンションアームやロールバーなど、パーツのカーボン化率をアップするなどで、全長 4.98m のボディ質量は 134kg (5kWh 分のバッテリー込み) と、極めて軽量になっている。また、CFD (数値流体力学) 解析が可能なソフトウェアクレイドル社の SCRYU/Tetra を使い、コンピュータによる空力デザインを行うことで、極めて小さい空気抵抗で走行できるようになった。

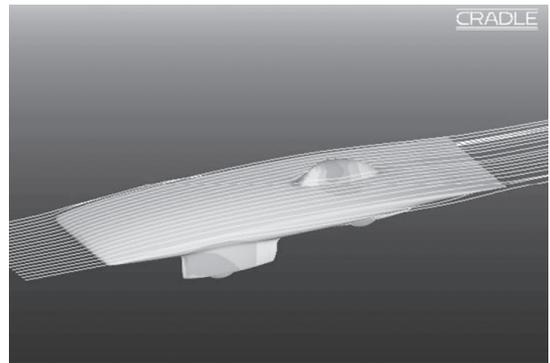


図10 CFD 解析を用いた空力開発

ギヤやチェーンを介せず直接タイヤホイールを駆動することで伝達ロスを減らした、ダイレクトドライブ方式のミツバ製ブラシレス DC モータを採用した。モータの電磁石に使われる鉄芯には、磁気変換効率が優れた、日本ケミコン製鉄系アモルファス箔積層コアを導入した。さらに、鋼鉄製の玉よりも転がりやすいセラミック (窒化ケイ素) を使用した JTEKT 製ボールベアリングが組み合わされた。回生ブレーキももちろん使用でき、コントローラ込みのモータの変換効率は約 97% と極めて高くすることができた。

また、通常のものよりも 3 倍程度転がる低転がり抵抗ラジアルタイヤ (ミシュラン 95/80R16) が 3 本装着された。平地巡航時であれば、車体重

量を1/3に減じたのと同様な効果が得られる画期的なものである。

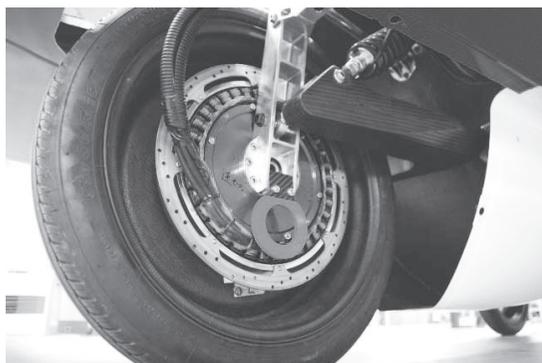


図11 ソーラーカー用DDモータとラジアルタイヤ

曇天や登坂などに対応できるように、大会レギュレーションによって補助バッテリーの使用が認められており、リチウムイオンバッテリーであれば21kgを搭載することができる。そこで、ノートPCなどに用いられる円筒型リチウムイオン電池（パナソニック製NCR18650A）を450本使用し、15並列30直列の組電池を構成した。このリチウムイオン電池は世界トップレベルの高容量性能を有しており、5kWhの電気エネルギーを蓄えることができる。これは、晴天時正午の太陽光発電で3.75時間分のエネルギーに相当する。仮に、太陽電池の発電を止めた純電気自動車として走行させた場合であっても、90km/hの速度で330kmの距離を移動することができる。Tokai Challengerは電気自動車としての性能も秀逸である。

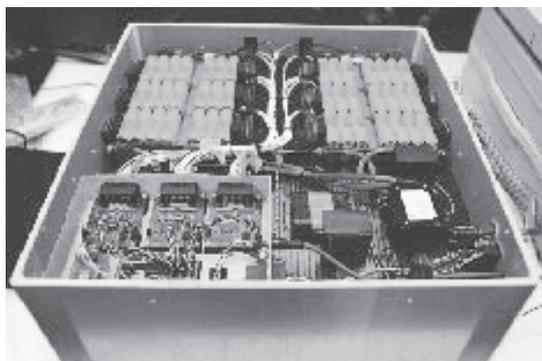


図12 リチウムイオンバッテリーの内部

ソーラーカーレースにおいては気象観測や天候予測も重要となる。ソーラーカーの後ろを走るエスコートカーには、複合気象センサや全天日射量計が搭載され、気温、風速、風向、気圧、湿度や日射量が計測された。これらの情報をもとに、対風速度などを検討し、ソーラーカーの巡航速度の目標値を設定した。さらに、東海大学宇宙情報センター（熊本）で、気象衛星ひまわりの画像データを受信し、東海大学情報技術センター（代々木）長幸平教授の協力を得て、ソーラーカーレースが行われるオーストラリアの高解像度画像（可視光）や赤外画像を30分間毎に作成した。

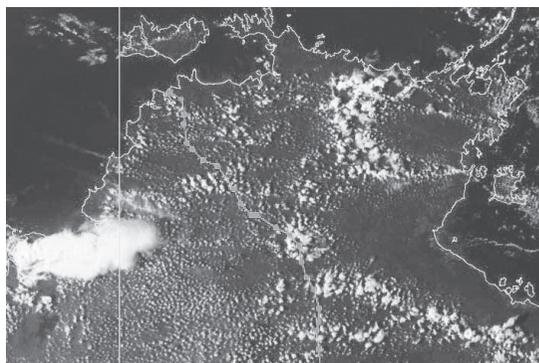


図13 気象衛星ひまわりの高解像度衛星画像

また、千葉大学環境リモートセンシング研究センター竹中栄晶特任助教、東海大学情報デザイン工学部情報システム学科の中島孝准教授の協力を得て、Tokai Solar Energy Estimation and Display System (T-SEEDS)が開発され、オーストラリア大陸の日射量が詳細に推定された。これらの衛星画像は、インマルサットBGANを用いて送受信が行われ、静止衛星追尾アンテナを装備した車載型通信端末Explorer 325を用いてコース上で受信し、レース運営に活用した。

5. おわりに

日本が誇る高い太陽電池技術を背景に、世界トップレベルの太陽電池モジュールがソーラーカー用に開発された。また、炭素繊維を用いた低空力&軽量ボディが設計・製作され、高効率モータや

低転がり抵抗タイヤが装着することで、高い省エネルギー性能を獲得することができた。これに高容量リチウムイオンバッテリーが組み合わせられ、曇天や登坂などのコンディションにも対応できるようになった。さらに、気象観測や衛星画像技術は、ソーラーカーのエネルギーマネジメントに活用された。

2013 WSC の新レギュレーションが 2012 年 6 月 17 日に発表され、4 輪や広いコックピット空間などが求められるようになった。最先端の技術を集約することで、十分な速度を得られるようになったソーラーカーは、実用化を目指す方向に今後大きく舵を切ることになるだろう。

付録 いろいろなソーラーカー

1) Nuon Solar Team の Nuna6

ヌオン社がメインスポンサーとなるオランダのデルフト工科大学のソーラーカーチームが 2011 年に開発した Nuna6。元宇宙飛行士のウッポ氏がアドバイザーを務める。SunPower 社の太陽電池を搭載し、Panasonic のリチウムイオン電池を搭載する。同チームは 2001、2003、2005、2007 の WSC 大会で 4 連覇を達成した強豪チーム。



図 14 Nuon Solar Team の Nuna6

2) Michigan Solar Car Team の Quantum

ミシガン大学は 1987 年の第 1 回 WSC から連続出場を続ける名門チーム。American Solar Challenge での優勝回数も多い北米最強のチーム。これまでにも何度も WSC の表彰台に上がるものの、まだ優勝経験はない。写真は 2011 年に開発

された Quantum。

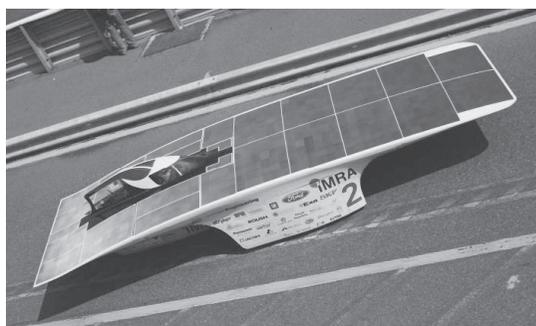


図 15 ミシガン大学の Quantum

3) 小学館のソラえもん

小学館が 1993 WSC に出場するために製作したソラえもん。子どもたちに大人気。2008 年にレストアされ、展示会に出展される。最高速度は 70km/h、平均速度は 35km/h 程度となっている。

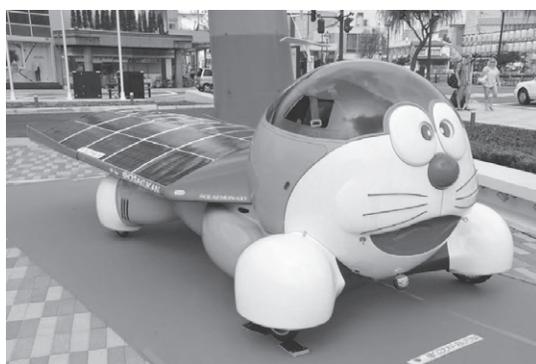


図 16 ソラえもん

参考文献

- 1) 木村英樹 (2012) 世界最速ソーラーカーの最新技術と構造, 新電気 2012 年 2 月号, オーム社
- 2) 木村英樹 (2011) ソーラーカーで未来を走る, くもん出版
- 3) 東海大学チャレンジセンター編 (2010) 世界最速のソーラーカー, 東海教育研究所
- 4) 日本太陽エネルギー学会編 (2006) エコ電気自動車のしくみと製作, オーム社