

ワールド・ソーラー・チャレンジの最新動向

Newest Trend of the World Solar Challenge

木村 英樹*・池上 敦哉**

1. はじめに

ソーラーカーは一度作ってしまえば、燃費無限大 & CO₂ 排出ゼロで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。夢の技術といわれて久しいが、それだけ技術的なハードルは高く、性能の向上には多くの努力を要する。しかし、長い年月をかけて着実に進化を遂げてきた。その技術向上の舞台となっているのが世界最高峰のソーラーカーレースであるワールド・ソーラー・チャレンジ (World Solar Challenge : WSC) である。オーストラリア大陸のダーウィン～アデレード間の 3,000km を走破する過酷なコースは、完走するだけでも困難を極める。年々進化するソーラーカー関連技術に合わせてレギュレーションも厳しくなり、依然として難易度が高く、毎回ハイレベルなレースがくり広げられている。

2. WSC の歴史

1982 年にデンマーク生まれの冒険家 Hans Tholstrup 氏がパース～シドニー間の 4,052km を、



図1 3,000km の長さをもつ WSC のルート

20 日間かけてソーラーカーで横断した。これを契機にハンスは WSC 大会を企画し、1987 年に第 1 回 WSC が開催された。第 1 回大会では、宇宙用ガリウムヒ素太陽電池を搭載した GM Sunraycer が、平均速度 66.9km/h の記録を樹立して優勝した。このインパクトは非常に大きいものであり、石油資源から脱却した自動車の未来を予感させるものであった。当時、大気汚染問題で苦しんでいたカリフォルニア州では、環境対策自動車の導入を一定割合でメーカーに義務づけた ZEV (Zero-Emission Vehicle = 無公害車) 法が 1990 年に制定されたこともあり、Sunraycer の優勝はその後 GM が電気自動車 EV1 を開発する契機にもなった。

1990 年からはホンダが参戦し、1993 年と 1996 年にはホンダ・ドリームが、それぞれ 85.0km/h, 89.8km/h の平均速度記録を樹立して優勝した。1999 年からは南オーストラリア州に運営権が移され、地元オーストラリアの Aurora が平均速度 73km/h の記録で初優勝した。その後は隔年開催となり、2001 年～2007 年にかけてオランダのデルフト工科大学が中心となった Nuon Solar Team が 4 連覇を達成した。そして、2009 年と 2011 年大会では、東海大学チャレンジセンターのソーラーカー Tokai Challenger が、二連覇を成し遂げた。開催年ごとの優勝車の平均速度を図 2 に示す。

太陽電池面積に関するレギュレーションは、1999 年まではモジュールは上方投影面積で 8m² 以内、2005 年までは全長×全幅が 5 × 1.8m 以内のボディサイズ内であり、車体側面を活用するなど、立体的なレイアウトも認められていた。南オーストラリア州の最高速度は 110km/h に定められており、優勝車

* 東海大学 工学部 電気電子工学科 教授

東海大学 チャレンジセンター 次長

** ヤマハ発動機

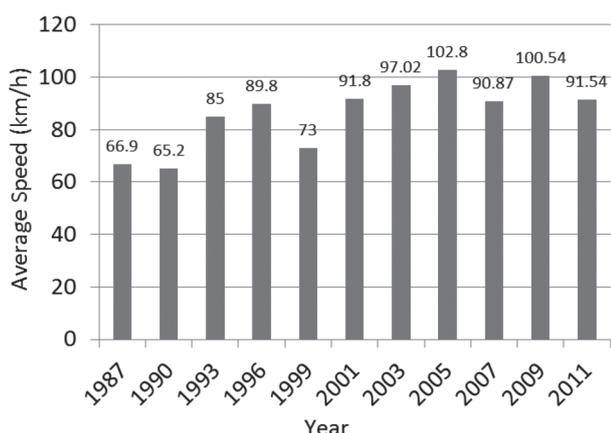


図2 WSCにおける優勝車平均速度記録の変遷

の平均速度が100km/hを超えるような状況が発生した場合、WSCのレギュレーションは速度を落とす方向で改訂が行われる。そのため、これ以上の平均速度の増加は制限されることとなった。2005年にNuna3が102.8km/hの記録で優勝したことから、翌2007年大会以降はセル面積で6m²以内となった。また、2009年にTokai Challengerが100.54km/hの記録を樹立したことから、翌2011年はシリコン太陽電池6m²・化合物太陽電池3m²以内というルールに変更され、年を経るごとに太陽電池の搭載面積は

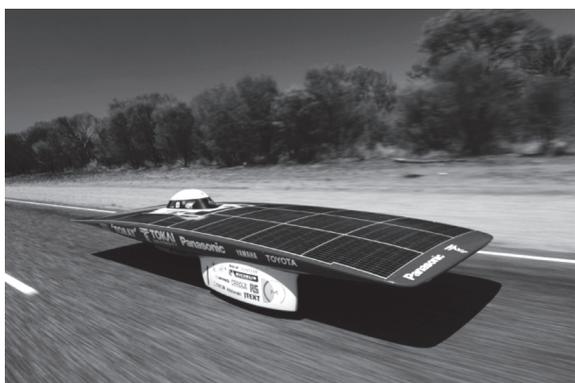


図3 2011 WSCで2連覇を達成したTokai Challenger



図4 2位となったNuon Solar TeamのNuna6



図5 3位となったミシガン大学のQuantum

減少している。しかしながら、WSC優勝車の平均速度は依然として高いレベルを維持している。2011 WSCにおいて、東海大学チームが6m²のシリコン太陽電池（HIT太陽電池）を搭載して、91.54km/hの記録を樹立して優勝したことは特筆に値する。

車体的には、当初は全長×全幅が6×2m以内のボディサイズであったが、2001年より一般道での運転のしやすさや、空輸などを行いやすいため、5×1.8m以内と縮小された。2007年以降はドライバーの背もたれの角度が垂直方向から27°以内となり、寝そべったような乗車姿勢が禁止された。バッテリーは概ね5kWhになるように、毎回のように改訂が行われている。タイヤについては、2009年以降は1.6mm以上の排水溝があるものに限定された。

3. WSCに投入されたテクノロジー

3.1 太陽電池

1987年のGMは当時としては非常に高い、変換効率20%のガリウムヒ素太陽電池を搭載した。1999年大会までは化合物太陽電池の使用が禁止となった。1993年、ホンダはSunPower社の裏面電極型シリコン太陽電池（変換効率21%）を用意し、1996年にはニューサウスウェールズ大学のMartin Greenらが開発したPERL型単結晶シリコン太陽電池（23%）を使用したモジュールが採用された。2001年以降は、Spectrolab社、Emcore社、Azurspace社などの多接合化合物太陽電池を搭載するチームが登場した。そして2009年にシャープ製の三接合化合物太陽電池（変換効率30%）を、東海大学チームが搭載し優勝するに至った。2011年WSC大会より、化合物太陽電池の搭載面積が3m²に削減されたため、多くのチームはSunPower社製の22%程度の変換効率を持った裏面電極型太陽電池6m²を搭載するようになった。これに対し、東

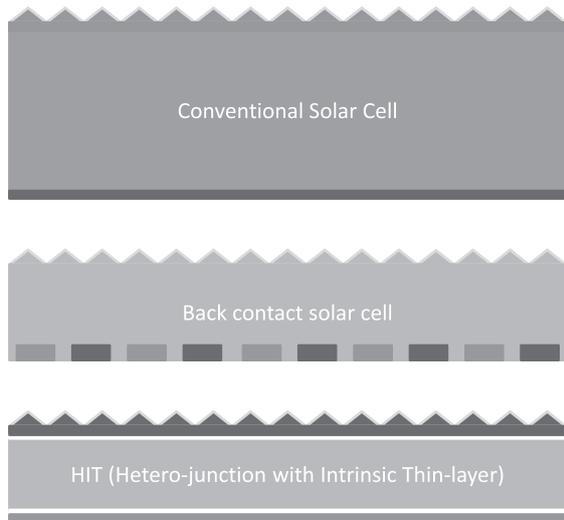


図6 シリコン系太陽電池の構造（上：通常型，中：バックコンタクト型，下：HIT 太陽電池）

海大学チームは大会出場チームの中で唯一の国産太陽電池セルを使用したパナソニック製 HIT 太陽電池モジュール（変換効率 22%）を搭載した。なお、ベルギーの Umicore は化合物太陽電池 3m² を搭載し、その内の 1m² 分は集光器と組み合わせられた。

これらの太陽電池は、一般に PET やテフロン系などの樹脂フィルムによって封止される。最表面での反射を抑えるために、モジュール表面にテクスチャー処理を施すことで反射防止対策を採るケース

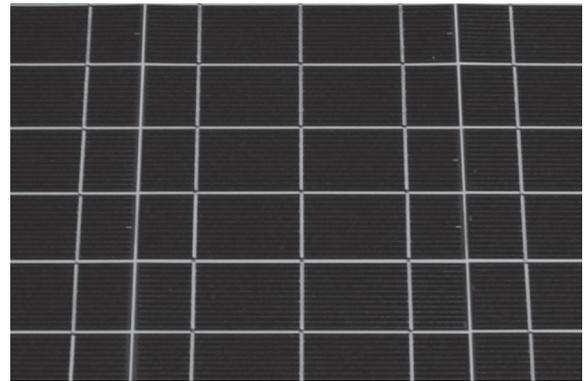


図7 ソーラーカー用 HIT 太陽電池モジュールの外観

が見受けられる。一方、スタンフォード大学は7層からなる反射防止（AR）膜を設けた薄膜ガラスによる封止を行ったモジュールを採用したといわれている。これらのモジュールは、降圧型や昇圧型の MPPT（最大電力点追従回路）と組み合わせられて搭載され、この MPPT の変換効率も 96 ~ 98% 程度と非常に高くなっている。

3.2 車体

ソーラーカーのボディは、太陽光発電量と空力特性の両方を兼ね備えた形状とする必要がある。また、可能な限り軽量化を図る必要もある。以上のような要求から、トップレベルのチームでは炭素繊維強化

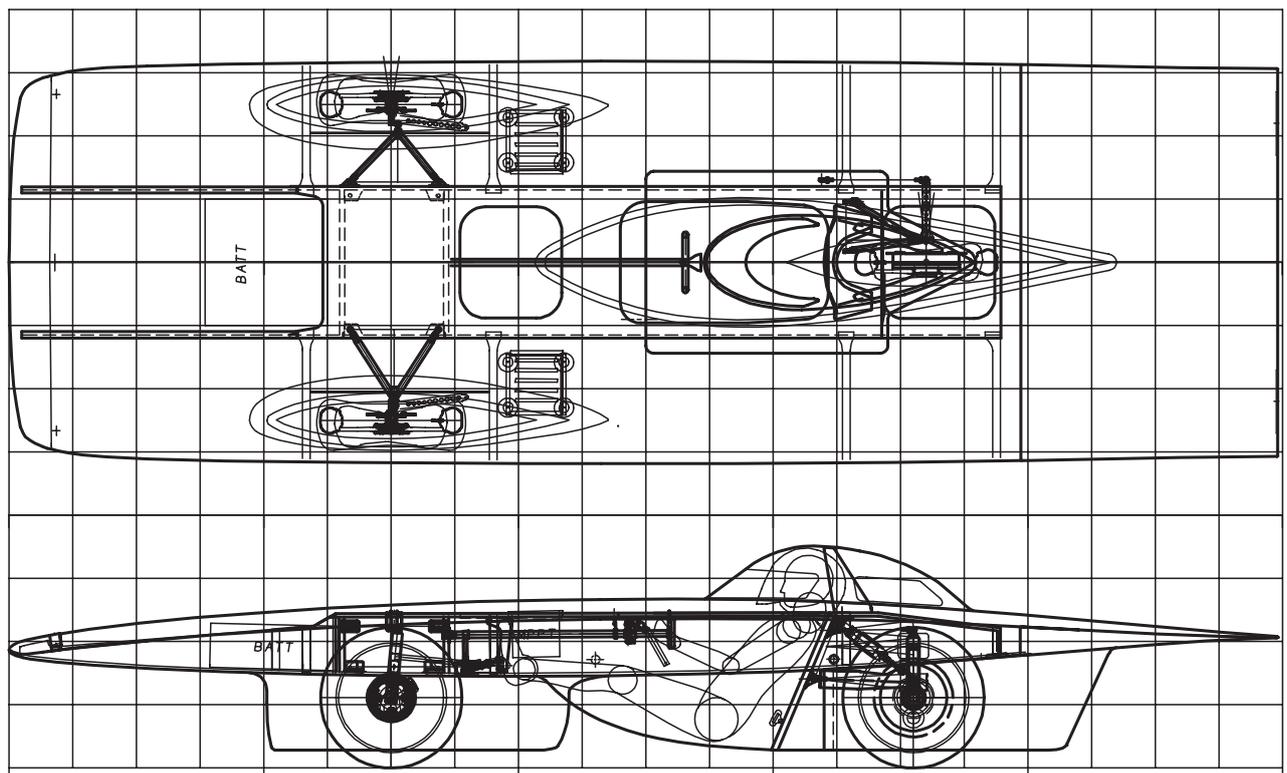


図8 2011 年型 Tokai Challenger の上面&側面図

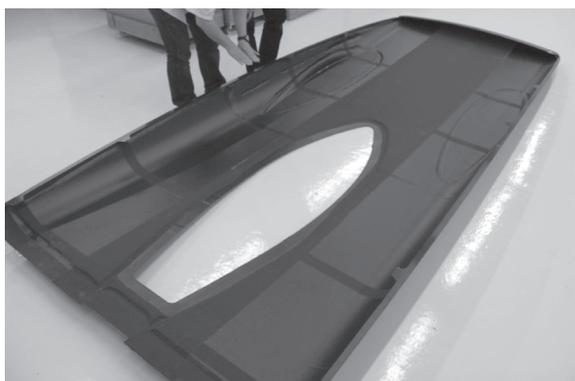


図9 1Kと3Kのトレカを組み合わせたボディ

プラスチック (CFRP) を用いたディヤホイールなどが用いられる。また、金属パーツは、局所的に大きな応力が加わるシャフトなど一部を除き、アルミ合金で作られることが多い。国際自動車連盟 (FIA) は実用性や安全性に配慮し4輪の Olympia クラスを提唱しているが、省エネルギー性能を追求する WSC では3輪のチャレンジクラスに属するものが主流となっている。ホイールレイアウトは、ほとんどがフロント2輪・リア1輪となっているが、オーストラリアの Aurora などフロント1輪・リア2輪のものもある。

WSC 用に製作された Challenge クラスの車体質量は、東海大学、Nuon Solar Team などは140kg 前後 (バッテリー込み・ドライバー含まず) となっており、非常に軽量化に仕上がっている。東海大学チームでは、東レ社の炭素繊維「トレカ」を童夢カーボンマジック社で成型加工したボディを採用した。この中にはF1で使用される1Kという種類のカーボンプリプレグも含まれている。ボーイング B747 やエアバス A380 などの新型旅客機に採用されているように、移動体における軽量化は運動性能の向上と省エネルギー化の両面に大きく作用する。さらにリアサスペンションアーム、ロールフープ、ステアリングなどの部品をカーボン化することで、軽量化が実現された。

3.3 モータ

ソーラーカー用モータは高効率であることが求められるため、永久磁石 (マグネット) による界磁を利用し、摺動するブラシを省いたブラシレス DC モータが主に用いられる。また、ギヤやチェーンなどの減速機構を省き、機械伝達効率を高めたダイレクトドライブ (DD) 化が進められている。マグネットをディスク上に配置したアキシヤル型や、アウ



図10 低転がり抵抗タイヤを装着した高効率 DD モータ

ターロータから電磁石コアを引き抜く可変界磁型、ハルバッハ配列によって強い磁界を得ることでコアレス化したものなど、様々な技術的アプローチが実施されている。東海大学チームでは、日本ケミコン製鉄系アモルファスコアを電磁石コアに用い、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組み合わせたミツバ製 DD モータを搭載している。この DD モータはコギングが少なく、トルクが得やすいようにマグネット極数:電磁石極数が8:9の比率となっている。これに、相補 PWM 制御、進角制御などの機能が組み込まれたコントローラを組み合わせることで、広い動作範囲で高効率な運転を可能にした。

コントローラのスイッチングデバイスには、主にパワー MOSFET が用いられ、IGBT は少数である。これは80~150V 程度のバッテリー電圧に対して、最も損失が少なくなると考えられているためである。

3.4 タイヤ

ソーラーカーの軽量化とともにタイヤの低転がり抵抗化は重要な課題であるが、初期の頃はソーラーカー用に適したものが存在せず、自転車用タイヤや二輪用のタイヤが流用された。耐久性に課題があることから、初期の WSC ではキャトルグリッド (放牧牛の逃亡を防ぐために設けられた深さ2m程度の溝の上に、隙間の大きい鉄製の格子を乗せたもの) を通過する際にタイヤがパンクすることを恐れて、サポートカーが先行して板を敷くということも一部のチームで行われた。その後、ブリヂストン、ダンロップ、ヨコハマなどがソーラーカー用にタイヤを製造し、ミシュランも専用ラジアルタイヤを開発した。ソーラーカーの高性能化により、巡航速度が向上したため、高速公道を走行できる旨の表記やメー

カー推奨があり、1.6mm以上の深さの排水溝を備えていることが必要となった。その結果、2011年はソーラーカー用タイヤとしてはミシュラン社が唯一に近い適合タイヤ供給メーカーとなった。

低転がり抵抗化に用いられる手法としては、ヒステリシスロスが少ないゴム&コンパウンド材料、耐久性を確保した薄肉化、ラジアル構造の採用などがある。空気圧は5~6kgf/cm² (500~600kPa)程度と高めである。フリクションロスによる影響が大きくなるため、これ以上に空気圧を高めケースはほとんど無い。

3.5 バッテリー

鉛バッテリーを搭載することでプロダクションクラス優勝を狙うチームもあるが、一般に軽量で高容量な高性能バッテリーを採用するチームが多い。初期のソーラーカーレースでは、トップレベルのチームは酸化銀亜鉛電池やニッケル亜鉛電池を採用するケースが多かった。この酸化銀亜鉛電池は大陸間弾道弾用に使用され、ニッケル亜鉛電池はホンダの二足歩行ロボットに用いられたものであり、いずれも特殊用途に向けて開発されたものであった。1999年頃からは、リチウムイオン電池やニッケル水素電池が登場し始め、近年ではリチウムイオン電池、リチウムイオンポリマー電池、リン酸鉄リチウムイオン電池が主流となっている。なお、リチウムイオン電池とリチウムイオンポリマー電池のエネルギー密度は、原理的にはほとんど変わらないため、日本の大会では区別されていない。WSCのレギュレーションでは直近のレースで使用された電池のスペックをもとに、搭載重量制限の値が変更されるため、年ごとに有利不利が発生するが、長距離レースであることから大きな問題に発展するとは考えられない。なお、鉛蓄電池の場合には、125kgまで搭載すること

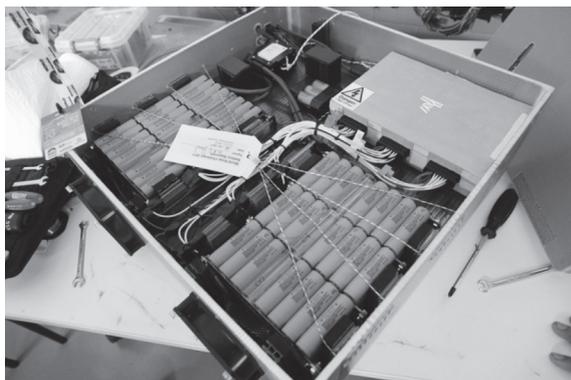


図11 リチウムイオンバッテリーの内部

ができるが、重量増の影響が大きくなるため、最大量を搭載しないケースも多い。

4. 気象観測体制

太陽エネルギーのみを使用して走行するソーラーカーレースにおいて、気象条件はヨットレースと同様に重要な意味を持つ。ミシガン大学はラジオゾンデを1日2回飛ばし、上空の風向、風速、気圧など独自の気象観測を実施していた。各チームとも気象情報をインターネットから入手するなど、情報収集を精力的に行っている。また、気象衛星ひまわりのデータを直接コース上で受信したり、衛星FAXで天気図を入手するなどの対応を行ったチームも存在した。

最新の対応事例として、東海大学チームでは熊本にある東海大学宇宙情報センターで独自に受信した気象衛星ひまわりのデータを、代々木にある東海大

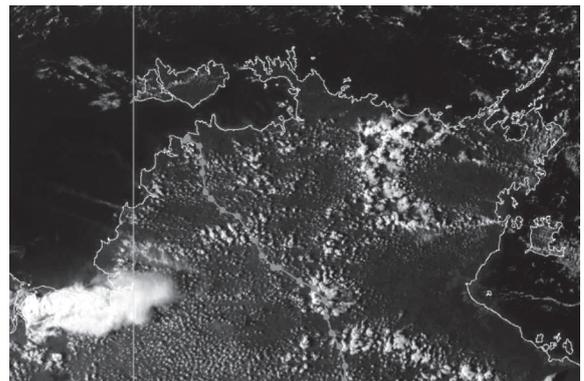


図12 気象衛星ひまわりの高精細衛星画像の一部（ダーウィン付近）

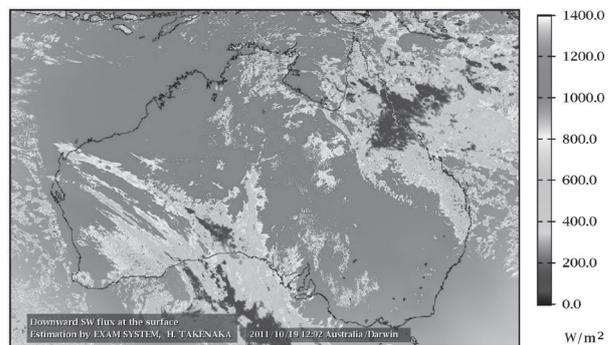


図13 日射量推定システム T-SEEDS のイメージ画像

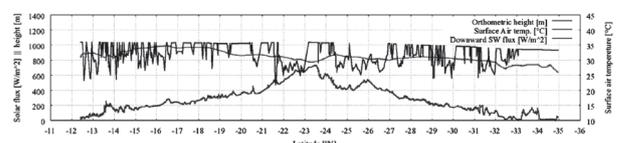


図14 T-SEEDSによる緯度に対する日射量、標高、温度の分布

学情報技術センターでソーラーカーレース用に加工したものを、通信衛星インマルサット BGAN 経由で現地に届けた。現地では静止衛星への自動追尾機能を有した車載型端末 Explorer 325 を使用し、30 分毎に 1km × 1km のメッシュサイズの高精細衛星画像を作成し、10 分毎にソーラーカーの現在位置をプロットした。

さらに、千葉大学環境リモートセンシング研究センターの竹中氏らの協力を得て、リアルタイムに近い形で日射強度をイメージ化し、さらにコースとなるスチュアート・ハイウェイ上の強度分布をプロットしたものをレースで使用した。

また、上位チームでは風向、風速、気温、気圧、湿度、降雨量などを計測できる気象センサを装着したサポートカーを用意し、エネルギーマネジメント等に活用している。

5. WSC の今後

四半世紀の歴史をもつようになった WSC 大会において、ソーラーカーの形状はゴキブリ型からセンターキャノピー型、そしてリアキャノピー型に変化した。また以前は宇宙用、軍用などに開発された、特殊な太陽電池やバッテリーがかつてはソーラーカーに使用されてきた。25 年が経過した最新のソーラーカーでは、住宅屋根用に開発され、6m² に面積が削減されたシリコン太陽電池を搭載し、ノート PC に用いられるようなバッテリーを組み合わせることで、90km/h を超える速度で走行できるソーラーカーが



図 15 ルーフ上に気象センサ、警光灯、衛星通信アンテナ、全天日射量計などを備えたサポートカー

実現できた。この背景には、炭素繊維技術が普及段階にあることも大きく関与している。

2011 年 3 月 11 日に起きた東日本大震災による津波で、原子力発電所の水素爆発が引き起こされ、多くの放射性汚染物質が拡散した。リスクが高い原子力発電に代わり、太陽光発電に期待が寄せられているが、絶対的なエネルギー供給能力が不足していると指摘されることが多い。しかしながら、最新のソーラーカーが示したような省エネルギー技術と組み合わせることで、一見不可能とも思えるようなエネルギー事情も克服できると確信する。私たちにとって、とくに今回は負けられないレースであり、日本のもつ太陽光発電、蓄電、省エネなどの高い技術を、このタイミングで世界に発進できたことに、大きな達成感を感じている。

参考サイト

World Solar Challenge オフィシャルサイト

<http://www.worldsolarchallenge.org>

東海大学ソーラーカー特設サイト

<http://www.u-tokai.ac.jp/WSC2011/>

Zero to Darwin Project WEB サイト

<http://www.zdp.co.jp/2011/2011wsc.html>

<http://www.zdp.co.jp/2011/2011wsc2.html>

筆者紹介

木村 英樹 (きむら ひでき)

東海大学工学部電気電子工学科教授、東海大学チャレンジセンター次長、博士(工学)、日本太陽エネルギー学会理事、Dream Cup ソーラーカーレース鈴鹿技術アドバイザー、全日本学生ソーラーカーチャンピオンシップ組織委員会監事。



池上 敦哉 (いけがみ あつや)

ヤマハ発動機、Zero to Darwin Project 主宰、東海大学ソーラーカーチーム・テクニカルディレクター、日本太陽エネルギー学会会員。

