

ソーラーカーとソーラー無人飛行機の 開発最前線

Frontline in the Development of Solar Cars and Solar UAVs

木村英樹*

1. はじめに

SDGsの観点から、地球温暖化抑止を目的として、2050年を目処にカーボンニュートラルを達成しようという取り組みが、世界各地ではじまっている。このようなトレンドを受け、再生可能エネルギーへのシフトを進め、グリーン電力などの生産が増加している。一方、化石燃料から電気や水素（アンモニアを含む）を製造し、その際に排出されるCO₂ガスを地中に埋めるといったCCS技術を組み合わせることで、ブルー電力やブルー水素なども登場しつつある。

自動車や飛行機などの乗り物を太陽光発電で動かすには、面積的な制約から変換効率をいくら向上させても、十分なエネルギーを確保することはできないといわれている。一方で、排気ガスからCO₂ガスを回収し、タンクに貯蔵して駐車時に地中に埋めるといふ、CCS技術は自由に動き回るモビリティでは現実的でない。

初期の太陽電池の応用分野は、人工衛星、燈台、

マイクロ波中継基地など、人の手が届きにくい場所で、電気エネルギーを確保することから始まった。そして、ソーラーカーやソーラーUAVは、極めて省エネルギー性能に優れた車体（機体）に、高効率な太陽電池モジュールを組み合わせることで、航続距離を飛躍的に伸ばしてきた。本稿では、筆者が関わってきたソーラーカーやソーラーUAVを題材に、その開発の最前線について述べることにする。

2. ソーラーカー開発の歴史

ソーラーカー開発の起源は諸説ある。人が乗って動くものとしては、1982年にオーストラリアで行われた、BP Solar Trekのために製作されたThe Quiet Achiever¹⁾ではないかと思われる。デンマーク生まれの冒険家ハンス・ソルストラップ氏が計画を立案し、パーキンス兄弟が製作を行った。8.5m²の太陽電池を搭載したソーラーカーは、シドニー〜パース間の4,052kmを20日間かけて走破した。このときの平均速度は23km/hであり、今から考えるとたいへん遅いものであった。しかし、ハンス氏は太陽エネルギーの可能性をこのときに確信し、オーストラリア大陸を縦断するWorld Solar Challenge : WSCの開催を決意した。

WSCは、オーストラリア大陸のダーウィン〜アデレード間の3,000kmを縦断するステュアート・ハイウェイで行われる。1987年に開催された第1回大会は、米国GMのSun LaycerがGaAs太陽電池を搭載し、66.9km/hの平均速度を記録して優勝した。その後、93年と96年にホンダが2連覇するなど、自動車関連メーカーによる開発が中心であった。93



Fig. 1 The Quiet Achiever.¹⁾
図1 クワイエット・アチーバー.¹⁾

* 東海大学工学部 教授

年のホンダ Dream は、SunPower 社製の裏面電極型太陽電池を使用して優勝した。これを契機に SunPower セルの量産が軌道に乗り、後述する NASA の高高度ソーラー無人機 Helios の開発につながった。

2001～07年と2013～17年は、オランダのデルフト工科大学を主体としたチームが連覇を重ねている。筆者が所属する東海大学チームは、2009～2011年にかけて二連覇した。図3に、WSC優勝車の平均速度記録の変遷を示す。

2001～2005年は、全長×全幅が5m×1.8m以内であれば、太陽電池8m²程度を搭載することができた。ところが2007年以降は、セル面積が6m²以内と制限が厳しくなった。2009年型と2011年型の Tokai Challenger の外観を、図4、5に示す。2009年型は、シャープ製の三接合化合物太陽電池（変換効率30%）を6m²搭載した。この新レギュレーション下で、100.54km/hの記録を樹立して優勝²⁾することができた。

2011年以降は、化合物太陽電池の使用が、シリコンの半分の3m²に制限され、実質的に禁止となった。そこで、パナソニック（三洋電機）の HIT 太

陽電池モジュールを搭載することとなった。変換効率は22%と高く、91.54km/hの平均速度を記録し、チームとしては、2連覇を達成した。2011年は東日本大震災の影響で開発や製作に影響が出ていたが、明るい話題作りに貢献できたと考えている。

WSCでは、4年（2回）に一度大きなレギュレーション変更が行われるが、全般的には、走行速度が速くなりすぎないようにする改定が行われる。2013年以降は、4輪化が義務づけられ、全長が4.5m以内となり、大きなコックピットサイズが要求された。さらに2017年以降は、シリコン太陽電池の面積が4m²以下に、化合物系は2.64m²になった。その結果、ボディサイズが小型化できることと相まって、化合物太陽電池がシリコンよりも再び有利になった。2021年以降は、化合物太陽電池が禁止されるものの、3輪が容認されるレギュレーションとなった。安定性を確保するという名目で4輪化を進めてきたにもかかわらず、このような変更が行われることは理解しがたい。太陽電池種類や4輪化といった制限には一貫性がなく、半ば強制的に新車開発を行わせることで、イベントの新規性を保つことを狙っている。



Fig. 2 1993 Honda Dream.
図2 1993年型ホンダ Dream.



Fig. 4 2009 Tokai Challenger.
図4 2009年型 Tokai Challenger.

WSC優勝車の平均車速の変遷

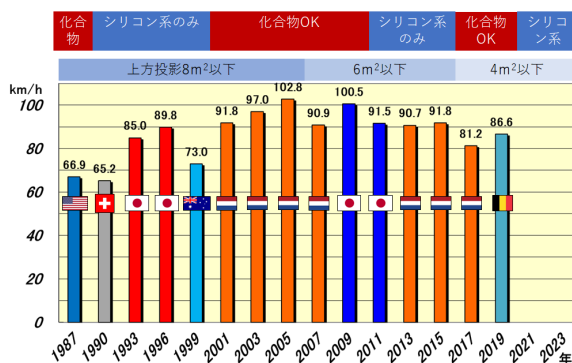


Fig. 3 Average speed records of WSC winning cars.
図3 WSC 優勝車の平均速度記録.



Fig. 5 2011 Tokai Challenger.
図5 2011年型 Tokai Challenger.

るようだ。

3. ソーラーカー開発の最前線

ソーラーカー開発の歴史は太陽電池と連動している。最新のソーラーカーに用いられる太陽電池の変換効率率は、シリコン系で24%、化合物系で34%に達した。(ただし、このような値については、国内メーカーの発電出力は実力ベースであるのに対し、海外メーカーはトップ値を示すことが一般的である。単純な比較はできないことに留意が必要である。)

長年にわたる技術開発の結果、ソーラーカー初期の頃と比較して、1.5～1.8倍程度の変換効率向上を達成することができた。たとえば、東海大学ソーラーカーでは、1993～2001年は約16%の変換効率を有する単結晶シリコン太陽電池セルを使用していた。2011～2017年のモデルにはパナソニック製の太陽電池モジュール HIT を搭載できたが、モジュール後のセル変換効率は、この間に22.0%から24.1%へ向上した。太陽電池モジュールとしてトップレベルの性能に到達したとあってよいだろう。とくに、2017年もモデルでは、開発段階にあった裏面電極構造の HIT を搭載するまでに至った。

ソーラーカーは空力性能のためには流線型の丸まったボディ形状が望ましいが、発電性能のためにはフラットなルーフ面の方が適しているといった、相反する条件が求められる。そのため、平面～2次元曲げ～3次元曲げ形状の間でボディがデザイン³⁾される。図6のように、空力性能に配慮して曲げが厳しいソーラーカーは、ドライバーのヘルメットや頭部を保護するロールバーの影などもあるため、モジュールの細分化とともに、PV バランサーを搭載し、発電量確保に努めている。MPPT についても専用に開発が行われ⁴⁾、2並列6直列のモジュールレイアウトを採っている。

モジュール表面の反射防止についても研究が進められ、ゴッヘルマン・ソーラー・テクノロジー社では、テクスチャー構造を採ることもあった。一方、

スタンフォード大学は、反射防止コーティングを施した薄膜ガラスを封止材料に使用するなど、挑戦的な取り組みが行われた。

高性能化するソーラーカーに対して、南オーストラリア州のシュアート・ハイウェイは、最高速度が110km/hに制限されている。大会の運営車両が先行するためには、概ねトップチームの平均速度を90km/h以下に抑える必要がある。そのため、太陽電池搭載面積が削減されたり、GaAs系化合物の使用が制限されたりしてきた。大会が始まった当初は8m²以上あったシリコン太陽電池セルの総面積は、近年では、ついに当初の半分以下となる4m²以下となった。1台のソーラーカーが獲得できる太陽電池のアレイ出力は、変換効率が向上したにもかかわらず、時代とともに減少してきた。

このような太陽電池の制限下において、走行速度を維持できているのは、空力解析技術の向上によるところが大きい。CFD解析技術の飛躍的な進歩によって、形状抵抗や干渉抵抗を低減する試みが続けられてきた。細かいところでは、実際のソーラーカー表面における、段差や隙間を減らす製作技術も進んでいる。効果は不明であるが、2021年には鮫肌のようなボディ表面形状を採用する海外チームの事例など、摩擦抵抗を低減するチャレンジは絶え間なく行われている。太陽電池モジュールの表面も反射防止を狙いつつ、摩擦抵抗を低減するリブレット構造を採用した例もあった。トヨタが特許発表し、製品化を行った空力改善用アルミテープを、当チームのボディ表面の一部に貼ったこともある。

先進的なソーラーカーのCd A値は、0.1m²を切るような時代になった。太陽電池面積が削減される中で、ゴキブリ型→薄板型→カタマラン(双胴)型→モノハル(単胴あるいは砲弾)型と、形状が変化



Fig. 6 2017 Tokai Challenger.
図6 2017年型 Tokai Challenger.

Table 1 Cell Efficiency of solar module HIT.
表1 太陽電池モジュール HIT のセル効率.

Model Year	Cell Efficiency (%)
2011	22.0
2013	22.5
2015	23.2
2017	24.1

してきた。

バッテリー性能の向上は、リチウムイオン電池の登場が大きい。しかも、1999年大会に登場してから、今日までに2倍以上の重量エネルギー密度(120→250Wh/kg)に増加した。ソーラーカー大会では、エネルギー量が5kWhとなるように制限するため、搭載量は40kgから20kgへと半減した。エネルギー増は無いが、その分は軽量化に振り向けられている。近年は、ラミネート封止されたリチウムイオンポリマー電池が、金属缶ケースよりも軽量化できる場合があることから、採用される場合が多い。また、算定に使われた文献値が、電池開発に追いつかない場合があり、2021年のレギュレーションでは、リン酸鉄リチウムイオン電池が有利になるといふハプニングがあった。

ボディは、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の製造ノウハウがチーム間に広まったことで、軽量化が進んだ。レギュレーションの強化により、ドライバー・バッテリーを除いた車重が、120kg程度と軽量のソーラーカーが登場している。また、標準品よりも高強度・高弾性化された高性能炭素繊維が開

発され、当チームでは2019年に、東レの強度5.7GPaの弾性率377GPaを誇るM40Xを使用した。(標準的な同社のT300は、強度3.5GPa、弾性率230GPa)

タイヤは、低転がり抵抗性能を実現する、ソーラーカー専用のラジアルタイヤが登場し、現在はブリヂストンとミシュランの2社が対抗している。この技術は、電気自動車用向けのタイヤ開発につながっている。転がり抵抗係数RCCは、日本のグレーディングシステムでAAA、すなわち $RCC \leq 6.5N/kN$ のものが登場しているが、ソーラーカー用はさらにその先の性能に達している。

モーターは、チェーンやギヤを省き、機械的なロスが無い(機械伝達効率が高い)ダイレクト・ドライブ: DDモーターが主流である。さらに鉄損を低減するために、鉄系アモルファス薄膜積層コアをステーターの鉄芯として採用した。また、トルクを得にくいというデメリットがあるものの、鉄損が発生しないコアレスDDモーターを採用するチームもある。インバーターについても、制御の高度化やデバイスの低消費電力化によって、高効率化が進んでいる。長年にわたる高効率化の末に、モーターとイン

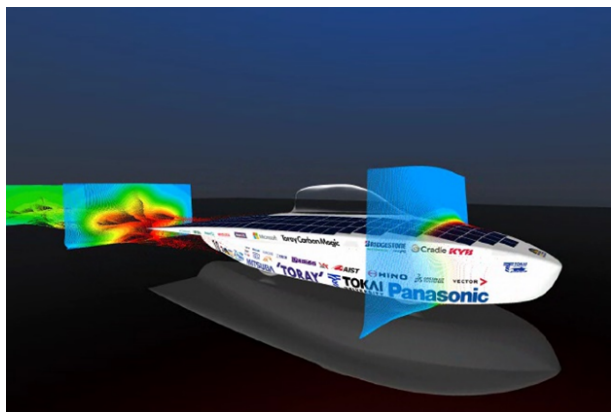


Fig. 7 CFD analysis of solar car.
図7 ソーラーカーのCFD解析。



Fig. 9 Ultra-light CFRP body.
図9 超軽量CFRPボディ。

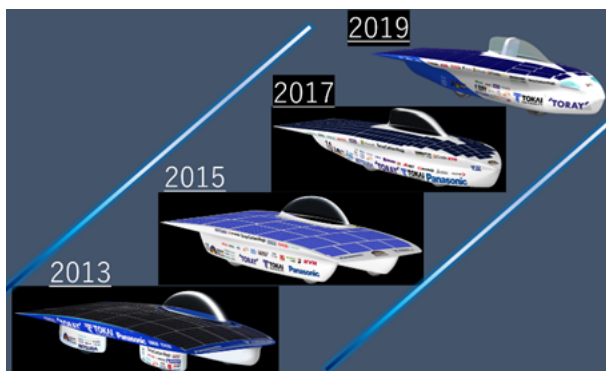


Fig. 8 Change in body design.
図8 ボディデザインの変化。



Fig. 10 Low rolling-resistance radial tire.
図10 低転がり抵抗ラジアルタイヤ。

バーターに冷却用ファンが不要になったことが大きな進化であるといえる。

このモーターや車軸には、鋼鉄よりも軽く、転がり抵抗が小さいといわれる、セラミックボールベアリングが使用されている。ソーラーカーは、技術の粋を集めたショーケースとも呼ばれるようになった。

4. ソーラー UAV の開発最前線

インターネットは、地面から海底など、主に平面型として拡大してきた。これは、有線であるメタルケーブルや光ファイバーを敷設する物理的な制約によるところが大きい。しかし、依然として山間部や砂漠など、インターネットがカバーできていないエリアが存在している。また、大規模な災害や戦闘によって、通信網が遮断されるケースもあり、衛星通信をインターネットに組み込む、垂直型のインターネットの必要性が高まっている。

衛星通信としては、これまでに 36,000km 離れた静止軌道衛星と、1,200km 程度の低軌道衛星があった。スペース X 社の Starlink は、まず 550km の軌

道に 1,600 基、1,150km の軌道に 2,800 基、340km の軌道に 7,500 基、合計で 12,000 機程度の衛星を打ち上げる計画を開始した。

衛星は距離が離れると、アンテナのカバー範囲が広がる反面、双方通信を行う場合には、電波が往復するだけで、0.25 秒を要するため遅延が発生する。そのため、衛星放送など一方向の大容量通信に向いている。低軌道衛星になると、カバー範囲が狭まることと、より高速な通信を行うため、多くの基数を投入する必要がある、1 兆円を遙かに越える膨大な打ち上げコストがかかると見られている。

2001 年に行われた NASA の Helios がプロペラ機として 29,511m の高度記録を樹立したことを足がかりに、高高度プラットフォーム（あるいは高高度疑似衛星と訳される）、HAPS の開発機運が高まっている。

ソフトバンクは、HAPS モバイル社を立ち上げ、Helios の開発に関わった AeroViroment 社とともに機体開発に取り組んでいる。NTT グループやスカイパーフェクト JSAT 社は、AirBus 社と Zephyr という機体を開発している。これ以外にも、気球や飛行船などが候補に挙がっているが、いずれも太陽電池モジュールを搭載して電力を確保し、長時間滞空を可能にすることを目標としている。

スカパー JSAT 社とともに、JAXA、東海大学、NICT は、NEDO 事業として 2017 年度「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト」を実施した。図 14 に開発した機体の外観を示す。

実用化を視野に入れ、単結晶シリコン裏面電極型太陽電池を採用し、CFRP で導体や翼桁の主要武運を構成した。JAXA が開発したの飛行制御システムを、東海大学が開発・組み立てを行った機体に搭載し、北海道大樹町の航空宇宙実験場において、オートパイロット飛行に成功した。ドローン規制の制約



Fig. 11 In-wheel DD motor.
図 11 インホイール DD モーター。



Fig. 12 Ceramic Ball Bearing.
図 12 セラミックボールベアリング

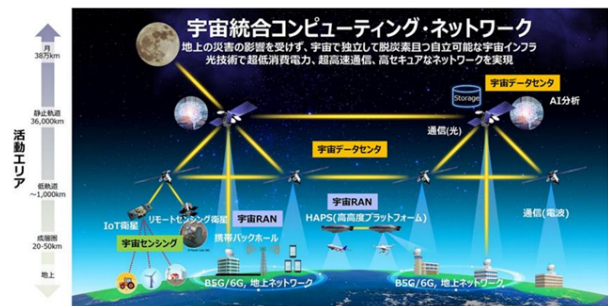


Fig. 13 Space Integrated Computing Network.⁵⁾
図 13 宇宙統合コンピューティング・ネットワーク.⁵⁾



Fig. 14 Solar UAV and Solar Car.
図 14 ソーラー UAV とソーラーカー。

Table 2 Specifications of Solar UAV.
表 2 ソーラー UAV の諸元。

全長	6.55m
全幅	15.9m
全高	1.9m
翼面積	10.61m ²
機体全備重量	90kg

から、150m までの飛行高度に留まっているが、引き続き来たい開発を継続し、高高度飛行試験に取り組んでいきたいと考えている。

5. まとめ

太陽光発電の応用分野として、ソーラーカーとソーラー UAV の開発最前線について紹介した。太陽電池の高効率化によって、応用範囲は広がりつつあるが、薄い太陽光パワーで、クルマや飛行機といった乗り物を動かすには限界があり、様々な省エネルギー技術を駆使した、ベース車体（機体）と組み合わせることで、はじめて成立するようになった。特殊な環境下でエネルギーを獲得して、ミッションを遂行するような用途において、太陽光発電技術は威力を発揮する。引き続き、このような先端応用の分野で研究開発を行っていききたいと思う。日本太陽エネルギー学会を通じた関係者からの協力をお願いしたいと考えている。

謝辞

東海大学ソーラーカーチームの運営にあたり、東レ、大和リビング、ミツバ、ブリヂストン、裕源、産業技術総合研究所、日本ケミコン、ソフトウェアクレイドル、をはじめとする学内外の関係者の方々から多くの協力を得た。この場にて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) The Quiet Achiever, Wikipedia (accessed Jun. 4 2022), https://en.wikipedia.org/wiki/The_Quiet_Achiever
- 2) 前田朋也, 木村英樹, 佐川耕平, 福田紘大, ソーラーカーのルーフ面形状による空力及び発電性能の検討, 太陽/風力エネルギー講演論文集, 191-194, (2017).
- 3) 木村英樹, 池上敦哉, ワールド・ソーラー・チャレンジの最新動向 (特集 エコビークルの最新動向), 太陽エネルギー, **37** (6), 35-40, (2011).
- 4) F. Kano, Y. Kasai, H. Kimura, K. Sagawa, J. Haruna and H. Funato, Buck-Boost-Type MPPT Circuit Suitable for Vehicle-Mounted Photovoltaic Power Generation, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, **16** (9), 1229-1235 (2021).
- 5) NTT とスカパー JSAT, 株式会社 Space Compass の設立で合意～持続可能な社会の実現に向けた新たな宇宙統合コンピューティング・ネットワーク事業をめざして～, スカパー JSAT プレスリリース (released Apr. 26 2022), https://www.skyperfectjsat.space/news/detail/ntt_space_compass.html

著者略歴



木村英樹 (きむら ひでき)

東海大学工学部機械システム工学科教授。東海大学ユニバーシティビューローゼネラルマネージャー。日本太陽エネルギー学会理事・フェロー。

応用物理学会, 電気学会, Society of Advanced Science 正会員。博士 (工学)。専門はエネルギー変換・貯蔵。