





Fig.2 自然界模倣により設計された車両（前方）

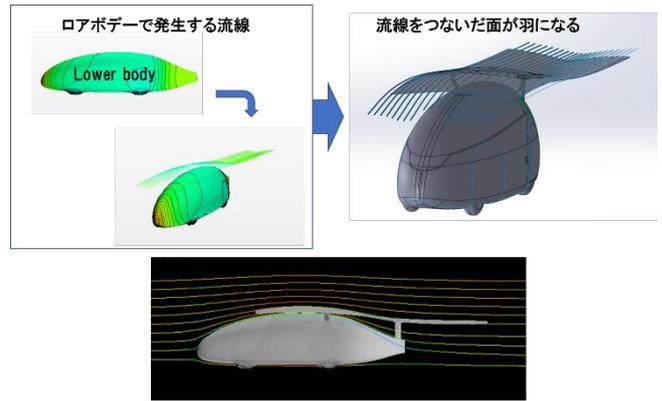


Fig.4 自然界模倣によるデザイン

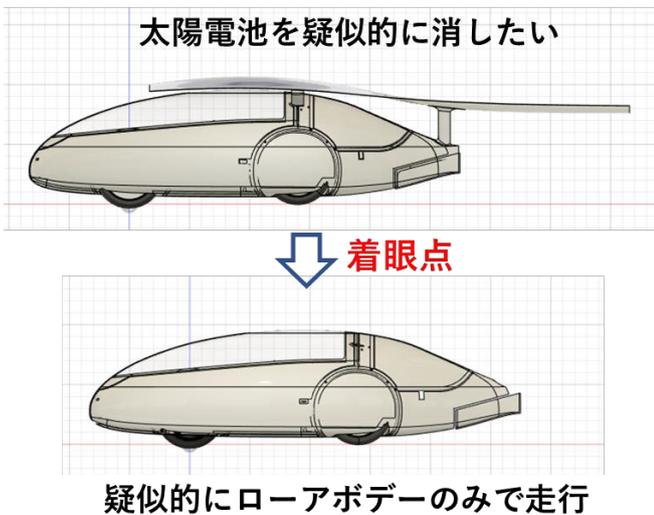


Fig.3 太陽電池を消すというアイデア



Fig.5 自然界の形状に太陽電池を設置

すなわち、ローアボデーから浮かせた空気の流れに沿った極薄の 3D 曲面により、一定の巡航スピード時に、空力性能で図 5 の太陽電池面を消滅させようというアイデアである。実際は表面積に起因する粘性抵抗をゼロにすることはできないが、太陽電池面の空気抵抗を極力減らすことができる。

空気は見えない存在であり、意匠に空気を見えるデザインとした。見えない自然界の美しい 3D 形状をボデーの一部としてみるができる。図 6 の 2D 平面とした場合の風洞試験では、2D 平面の末端を流線が乗り越えるときに渦が発生する。提案の 3D 曲面では渦は発生せずに空気抵抗の削減ができ、走行消費を下げることができる。あわせて、自然界の形状に、人工物である太陽電池を設置するという、自然界との融合を取り入れることができた。

### 3. 自然界模倣デザインの具現化

自然界模倣を実現するためには、工学的な設計（剛性/強度、振動）が必要である。これらの具現化について述べる。

#### 3.1. 極薄の羽根

第 2 章のコンセプトは挙げられたものの、最高速度 130 km/h にて複合材料や空気力学の専門家から、実現は難しい

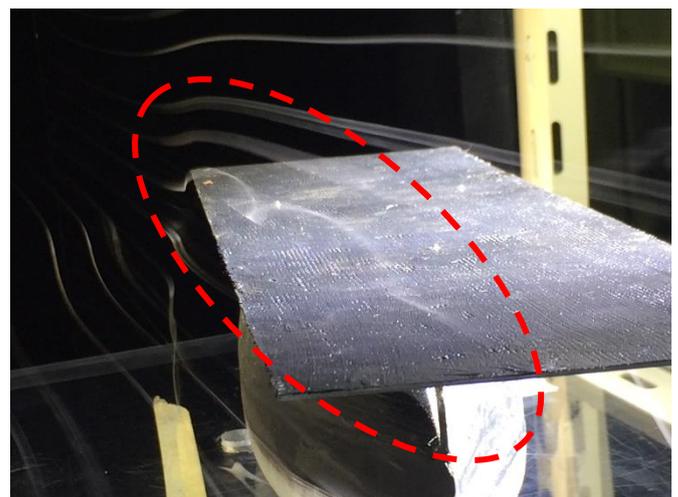
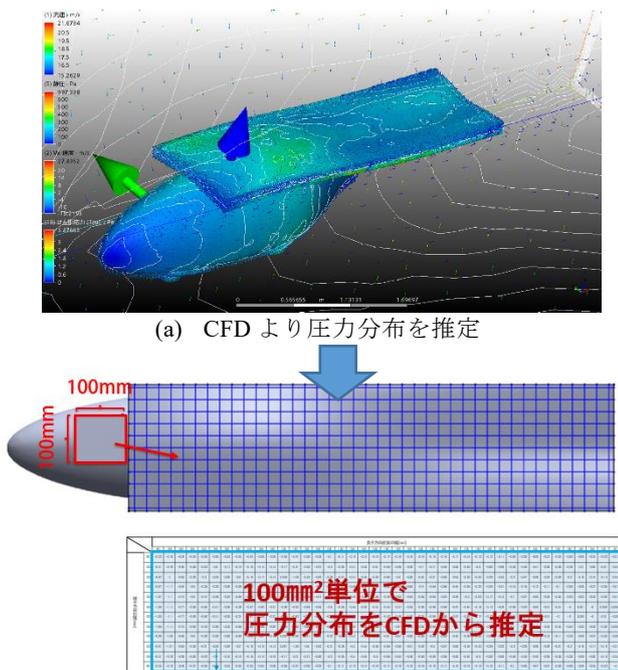


Fig.6 風洞試験（2D 平面の場合は渦が発生）

という意見を頂いた。

- 1) 末端 3mm という極薄では剛性が確保できない
- 2) フラッター現象（曲げと振れによる弾性振動と空気が連成して生じる自励振動の不安定現象）が生じて、すぐに極薄面は破壊する
- 3) 3D 曲面に太陽電池を張れない



(b) 100 mm<sup>2</sup> 単位に変換して剛性解析・積層計画に利用  
Fig.7 CFDより走行中の圧力分布を推定

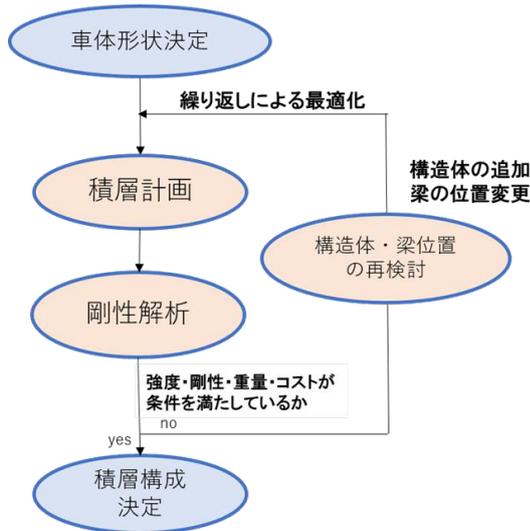


Fig.8 強度/剛性・重量・コストを条件に UD材の梁位置を決定

4) 極薄面に太陽電池の配線を仕込めない  
そこで下記に示す設計によりこれらの問題を解決した。

3.1.1. 構造設計 自然界模倣は空気の流れを採用したことから、極薄面の構造設計に Computational Fluid Dynamics (CFD) を利用する新しい試みを行った。一方向のみ繊維を揃えた炭素繊維 Uni-Direction (UD)<sup>7)</sup> を梁として埋め込み、極薄面に対して強度/弾性の方向性を設計したい。そこで、図 7 の CFD で得られた最高速度 130km/h での圧力分布を 100mm<sup>2</sup> 単位に分解して、図 8 の工程で、UD 材の梁位置を強度/剛性・重量・コストを制約条件にして最適化した。極薄面の 3D 曲面は、上下分割して、NC フライスで内部のアルミハニカム自身を直接切削する方法を採用した。切削後に 2 つを接着した。剛性解析は梁に高弾性 UD を

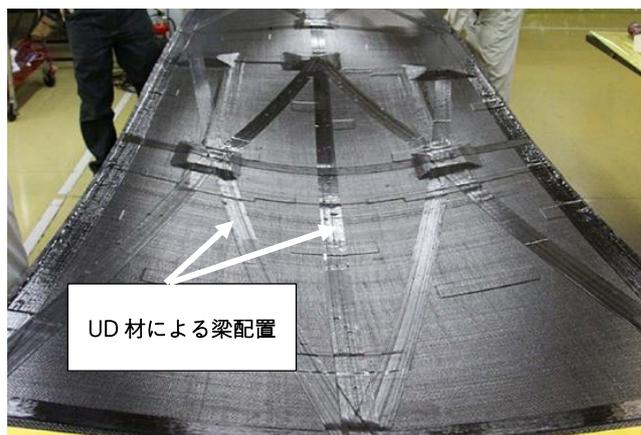


Fig.9 UD材を梁として積層

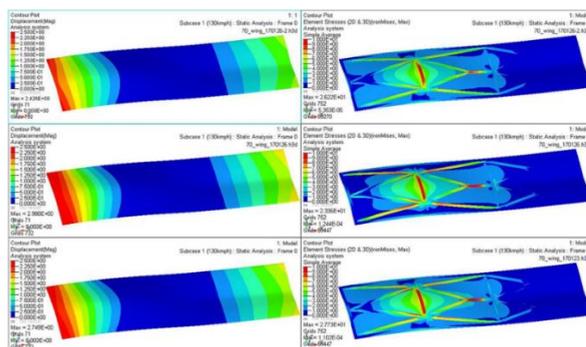


Fig.10 当初の UD 梁位置

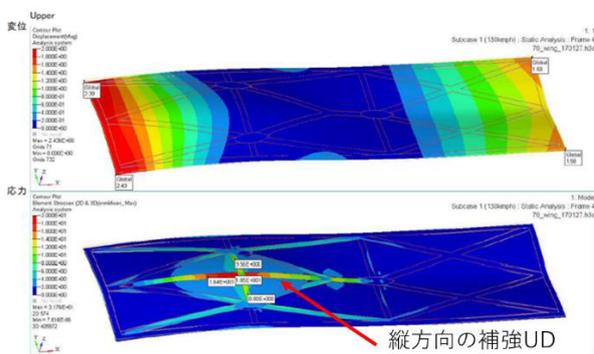


Fig.11 縦方向 UD 梁を設けた場合

1ply と 2ply したものの、梁位置の違いで数パターンのモデルを作成した。極薄面の変形量と応力集中の箇所を確認した。最大変形量は 3mm 以内、最大応力は 20~30MPa の範囲内という良好な結果が得られた。速度 130km/h で走行したときに、加わる力は羽を破壊するほどのものではない。しかし、高速域で極薄面の振動を抑えるための変形をどれだけ抑えられるかを再検討した。図 10 の解析結果では極薄面を支える左右ステーの間に応力が集中している。風を受けた羽が下方向に垂れようとする、ステーを支点に変形する。補強は斜めと短手方向にしか配置しておらず、長手方向を支える補強がない。これらより、積層数を増やすよりも応力集中の箇所に補強の梁を入れて、エネルギー分散を狙った方が効果的に変形を抑えることができると考えた。車両中央の長手方向に補強を入れて再び解析した結果を図 11 に示す。中央に追加した高弾性 UD 材の補強が効果を発

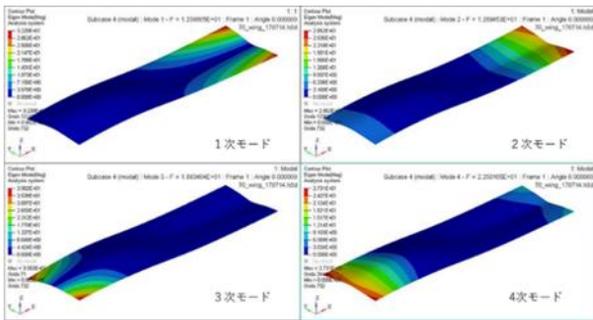


Fig.12 周波数応答

表 1:積層計画(最適化後)

種類	配置	ply	厚さ[mm]
CFRP_1K		1	0.07
UD_中弾性		5	1.25
UD_高弾性		1	0.29
CFRP_1K		1	0.07
UD_中弾性		5	0.25
CFRP_3K		1	0.22
UD_中弾性		5	0.25

揮して変形を支えていることが分かる。極薄面の重量は14.6kgで補強のUD材を2plyしたパターンよりも約1kgを軽量化できた。軽量でありながら最も引張応力がかかっている部分で応力が約1.9MPa、変位は最大で2.43mmを達成した。

**3.1.1. 構造設計** 自然界のフラッター現象は、曲げと捩れによる弾性振動と空気力が連成して生じる自励振動の不安定現象である。走行中の弾性振動は低速時には空気力で減衰されるが、高速域に空気力が羽の振動を助長して振幅が増大発散し、最終的に発散して破壊される懸念がある。周波数応答(固有値解析)を行い、フラッター現象の発生有無を調べた。1次モード:羽後端のねじり:12.38Hz, 2次モード:羽後端の縦曲げ:12.89Hz, 3次モード:羽前端的ねじり:18.83Hz, 4次モード:羽前端的縦曲げ:22.50Hzとなった。1次モードと2次モードは近いが車両のバウンドする周波数<sup>⑧</sup>よりも高く、問題ないと判断した。また、3次モードと4次モードは同時には起こらないことがわかり逆位相による不安定な発散は生じないと考えた。実際に走行して、解析結果とほぼ同様な結果が得られた。

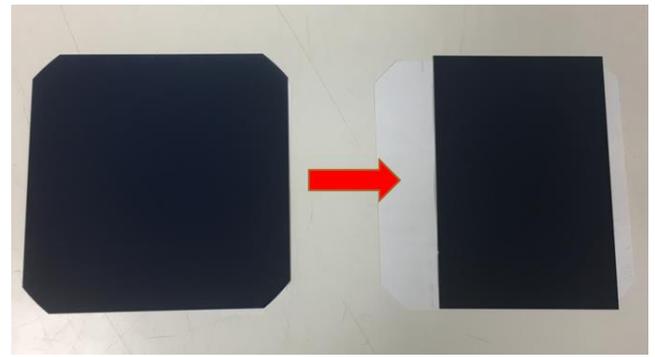


Fig.13 太陽電池のレーザーカット

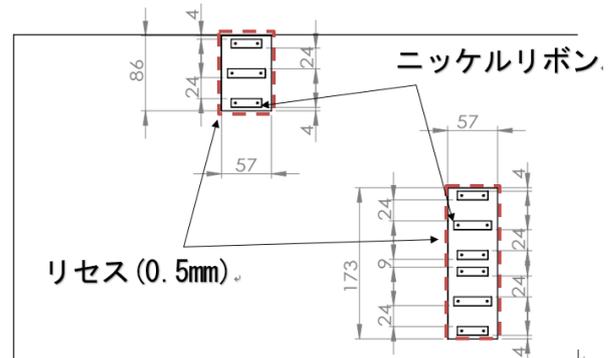


Fig.14 ニッケルリボンを半田してモジュール接続

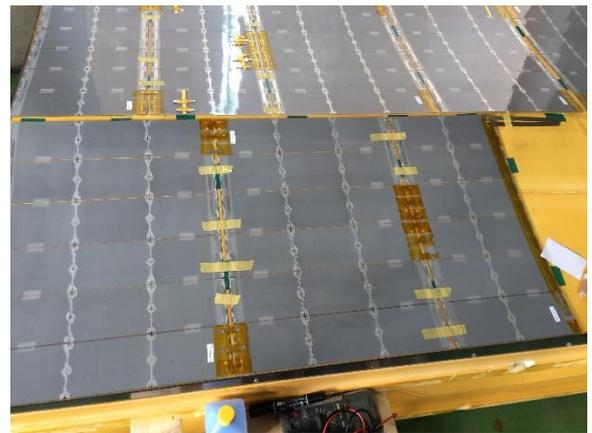


Fig.15 3D形状のため型を使いニッケルリボン長さを調整

## 3.2. 太陽電池の実装

極薄面に太陽電池を施工することは、いくつかの困難があり工夫が必要となった。これらを述べる。

**3.2.1. レーザーカット** 太陽電池セルはシリコン製で3D曲面に湾曲できず割れてしまう。セルはEVAフィルム(接着材)で外側をPET材で包まれるようモジュールを製作する。3Dに湾曲できるように図13のセルを86mm×125mmにレーザーカットした。いくつかのカット幅を検討して発電に影響がなく、3D曲面に湾曲できる寸法にした。

**3.2.2. ニッケルリボン配線** 極薄面は宙に浮いている状態であり、極薄のため太陽電池の配線にケーブルを使用できない。ケーブル径を仕込むスペースがないためである。そこで、図14のようにモジュールどうしを0.5mm厚のニッケルリボンで半田付けした。しかし、それぞれのニッケルリボンの長さを異なるようにしなくては、3D曲面に合

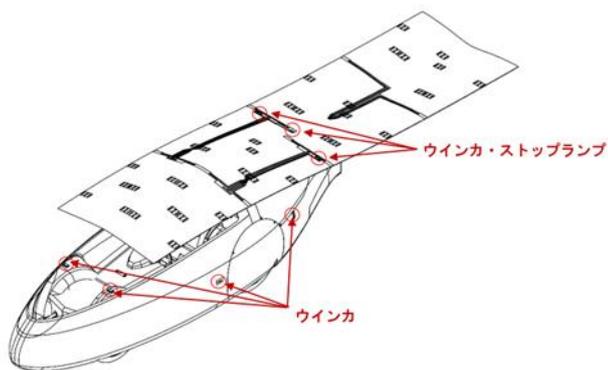


Fig.16 配線用リセス (極薄面に配線用くぼみ)



Fig.17 配線用リセス (絶縁用カプトンテープの箇所)

わせることができない。図 15 のようにボデー成形時に使用した型を使い、型上に太陽電池モジュールを 3D 配置したうえで、適切なニッケルリボンの長さを調整しつつ、半田づけを行った。

**3.2.3. 配線用リセス** 極薄面は末端が約 3mm である。0.5 mm 厚のニッケルリボンは太陽パネルに凹凸を生じさせる。図 16 のようにニッケルリボンで配線する箇所にリセスを設けて、埋め込むようにした。リセス箇所には絶縁のため、カプトンテープを施工した。

**3.2.4. ロアーボデーへの配線** 極薄面の太陽電池モジュールからロアーボデーへ配線を落とす必要がある。極薄面は 3 つのステーにより支えられている。ステー内部を空洞化させて、太陽電池ハーネスをステー内部に通過させた。

**3.2.5. 輻射反射シート** シリコン太陽電池は温度により発電力が劣化する。極薄面は宙に浮いているため、走行中は極薄面の裏から空冷される。さらなる冷却効率を高めるため、図 18 の極薄面の上に道路からの輻射熱を遮るためのシートを施工した。

#### 4. 結 言

自然模倣を利用したソーラービークルの設計について述べた。太陽電池を施工する面を自然界の空気流れを模倣した 3D 曲面にして、車両の性能向上と自然界との融合を図った。実際に車両を製作して、工学的に困難な点を解決した。近年、3D-CAD、CAM などの設計ツール、5 軸複合機など

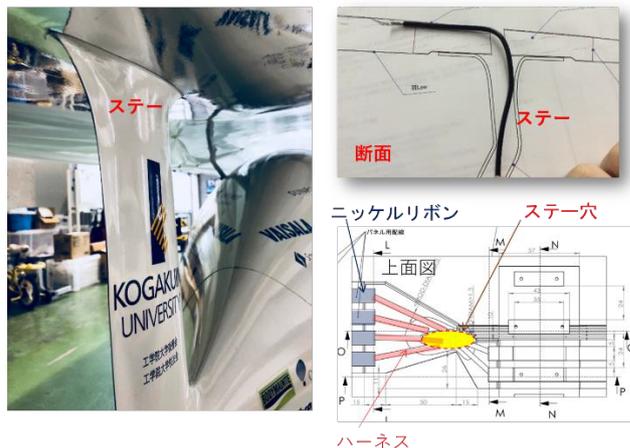


Fig.18 ステー内部を通過させた配線

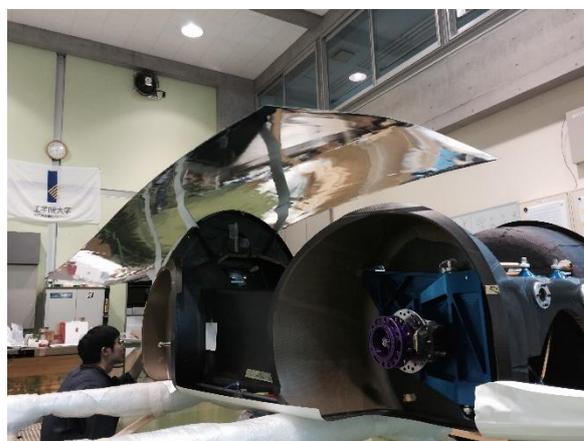


Fig.18 道路からの輻射熱反射シート

の工作機の発展に伴い、従来よりも複雑な 3D 形状を表現できる。一方、今回の設計・製作は、極薄の面という非常に特殊な制約があり、機械系と電気系ともに多数の工夫が必要となった。生物模倣や自然模倣を実現するには多大な工夫が必要となるが、従来に考え付かない製造手法の開発につながると考えられる。本車両はオーストラリアで開催された世界大会で 7 位、国内大会で総合優勝を収めることができた。引き続き、生物模倣や自然模倣を取り入れた開発をしていきたい。

## 文 献

- (1) Bridgestone World Solar Challenge オフィシャルサイト, <https://www.worldsolarchallenge.org/> 10, June. 2021
- (2) R.Kyle, Racing with the Sun: The 1990 World Solar Challenge. Society of Automotive Engineers. 1991.
- (3) D. Roche, E. Antony, T. Schinckel, J. Storey, C. Humphris, M. Guelden, Speed of Light: The 1996 World Solar Challenge. Intl Specialized Book Services. 1998.
- (4) J.Storey, A.Schinckel, C.Kyle, Solar Racing Cars World Solar Challenge. Australian Government Pub. Ser. 1994.
- (5) E.Betancur, et.al, Heuristic Optimization for the Energy Management and Race Strategy of a Solar Car, Sustainability, 9(10), 1576, (2017).
- (6) E.Yesil, et.al, Strategy Optimization of a Solar Car for a Long distance Race using Big Bang Big Crunch Optimization, 14th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics, pp.521, (2010)
- (7) S.Tamura.: Teijin's advanced carbon fiber technology used to build a car for the World Solar Challenge, Reinforced Plastics, 60, 3 (2016), 160.
- (8) Y. Hayakawa, S. Aihara, T.Abe, H.Hamane, A. Nakamura., Design of Pneumatic Controlled Hybrid Suspension by Using Nonlinear Series Springs for Solar Powered Vehicle, The 5th International Conference on Design Engineering and Science (ICDES2020), 7pages, B44, 2020.

## 付 録

付録 表 1:車両諸元

車名	Wing
搭乗者数	1名
サイズ	L4990×W1050×H1067mm
フレーム	ハニカムサンドイッチ構造
ホイール	CFRP 16inch ホイール
タイヤ	Bridgestone Ecopia with ologic 95/80R16
ブレーキ	4輪:油圧ディスク サイド:油圧ディスク
サスペンション	Fr:マルチリンク,プルロッド,ナックハラウフ Rr:マルチリンク,リジット式
操舵	4WS システム(油圧駆動)
太陽電池	Sunpower E60 をレーザーカット 効率 Up to 24.3%, 4 平米
バッテリー	Li-Po, 20kg
モータ	DC ブラシレス DD モータ, 可変界磁、アモルファスコア, 平角線, オートクルージング機能付き
MPPT	昇降圧型 MPPT