

## World Solar Challenge に挑む 羽を持つソーラーカー "Wing" の開発



### 概要

#### 業界

自動車、教育、学生活動

#### 課題

- ・CFRP ボデー構造の最適化
- ・羽の積層構造、フラッター現象、剛性
- ・金属部品の軽量化

#### 解決策

- ・HyperMesh、OptiStructを用いた構造解析
- ・Inspire のトポロジー最適化

#### メリット

- ・材料の特性を生かした設計
- ・技術の情報共有

### 工学院大学ソーラーチーム

工学院大学ソーラーチームは、全学部、全学科から300名以上の学生が所属する学生団体です。横断的専攻の学生が主体となり、理工学の創造活動を通して、自らの成長と自立、チームワーク力を育成するプロジェクトに取り組んでいます。2年ごとにオーストラリアで開催される約25ヶ国から約45チームが集結する世界最大級のソーラーカーレース、Bridgestone World Solar Challenge (BWSC) に参戦しています。チームは2009年に設立され、これまでに国内大会で大会新記録の達成と3度の総合優勝、世界大会で準優勝などの成績を取っています。2017BWSCは、稀にみる気候条件の悪い大会となり、半数以上のチームがリタイアするなか、世界7位の成績を納めました。また、レースのみではなく社会貢献活動にも参加し、持続的な社会、エネルギーの有効利用、理工学の先端技術を、様々なイベントを通して広く伝える活動もしています。

### チームの理念、ビジョン、ミッション

チーム設立時に理念、ビジョン、ミッションを掲げました。理念は『50年後の未来を考えた地球の持続

的利用』、ビジョンは『人と自然の高度なサイエンスにチャレンジ精神をもち挑戦する』、ミッションは『独創的かつオンリーワンの車両を製造する』です。【右倣への発想をやめて、オリジナルに徹底する】というフィロソフィは、先輩後輩の年代が変わっても引き継いでおり、通常のソーラーカーの意匠や特徴とは違う独創的なソーラーカーを製作しています。

### HyperWorks を車両設計にフル活用

チームの特長は、写真からも分かる通り、独創的な車両を製作していることです。車体の曲線や意匠は、空気力学的に大きな意味があります。この車両は太陽電池を施工する極薄の羽が、ボデーから浮いている変わった構造をしています。

図1は、ロアボデーが発生する空気の流れ(流線)をつないだ面で形成した羽のアイデアです。羽の末端厚みはわずか3mmの極薄の羽で、見えない空気の流れを3D形状にしたことで羽自身の空気抵抗を可能な限り最小化しようとした斬新なアイデアです。チームは自然界模倣(Nature morphing)を、自然界がデザインした意匠を人間がデザインする人工物に組み合わせる新しい取り組みと考えています。車

# 工学院大学事例



「最も良かったのは、『材料の特性を生かした設計ができたこと』です。炭素繊維の種類、配向、ply数、ハニカム厚みなどを考慮して、強度は余る特性に対しての剛性の最適化により最軽量化を達成できました。」

工学院大学ソーラーチーム

体の性能を最大限引き出すためにはCFRPボデーを最適化し、羽の形状・厚みを完全に再現して、軽量かつ高剛性であることが求められ、これらの点を達成するために、HyperWorksが大いに活躍しました。

また、協力企業様のご指導のもとで複合材料研究を進め、学生チームが産学連携の技術交流を行う上のコミュニケーションツールとして非常に有効でした。

## CFRP ボデー構造と積層計画

ボデーは炭素繊維(CFRP)を成形して製作しています。そのボデー構造と積層計画にHyperWorksを利用しました。

構造体のレイアウト、梁補強からCFRPの種類(1K、3K、UD: Uni-Directionなど)、配向(90度、45度)、ply数、CFおよびハニカム厚などを決定します。構造と積層計画は、図2の最適化の繰り返しプロセスによって決定しています。

図4は、積層計画における剛性解析の例です。前二輪に荷重が加わるとき、リアホイールハウスが開く方向に変形したため、左右のホイールハウスを接続する構造体を追加する方針変更にも寄与しました。必要な剛性を保ちながらも軽量となるよう、モノコックの各箇所ではハニカム厚さが異なります。製作後のCFRPパーツのみの最終的な重量は約45kgとなり、超軽量かつ高剛性を実現できました。

## 極薄の羽の積層計画

車体設計にあたり、一番の課題となったのは車体上部に設置する太陽電池の羽の積層です。極薄、軽量、高剛性な羽の構成を検討するためにHyperMesh、OptiStructを用いた構造解析を行い、解析から求めた応力や変形のデータをもとに、最適な積層構成を計画しました。羽の積層構成を検討するにあたって、ソーラーカーが130km/hで走行した際に羽がどのような空気力を受けるのかが明らかになり、構造解析を行いました。空気力を求めて入力荷重

とし構造解析を行ったことは、本設計のユニークな点だと考えています。

剛性解析は補強梁に高弾性UD(Uni-Direction、単方向性繊維)を1plyしたものと2plyしたものと、梁位置の違いで数パターンのモデルを用意して羽の変形量と応力集中の箇所を確認しました。図5の補強梁を2plyしたモデルは最も変位が少ない結果となりましたが、重量は1kgほど重くなります。この積層構成でも100km/h以上の速度で走行した場合に加わる力は羽を破壊するほどのものではないと判断しました。しかし、高速域での羽振動を抑えるために変形をどれだけ抑えられるかが課題になり積層構成を再検討しました。

図5の解析結果では左右のステーの間に応力が集中していることがわかります。風を受けた羽が下方向に垂れようとした際にステーを支点に変形するためと考えられます。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を入れていません

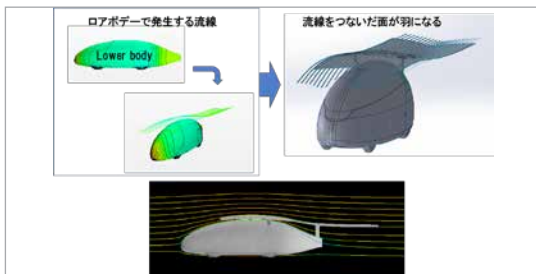


図1 自然界模倣のアイデア

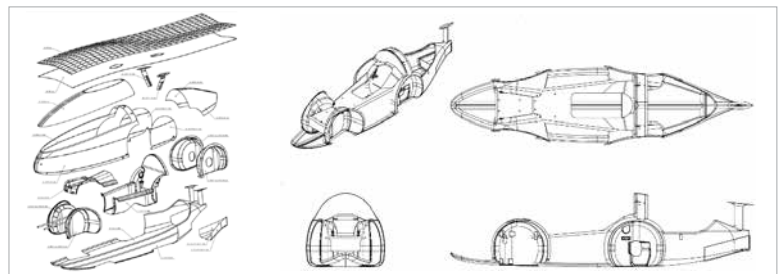


図3 CFRP パーツ分解図とモノコックフレーム ISO 図

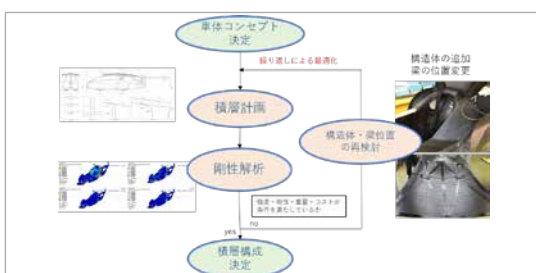


図2 フレーム構造と積層計画

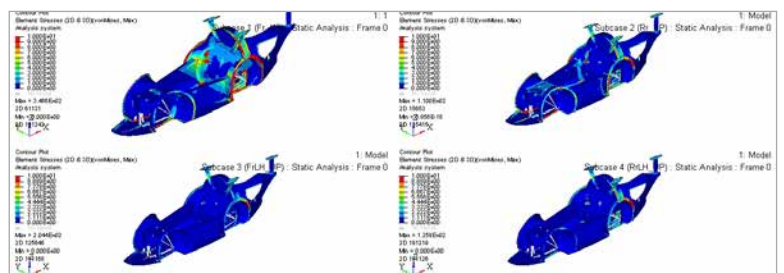


図4 積層計画における剛性解析の例

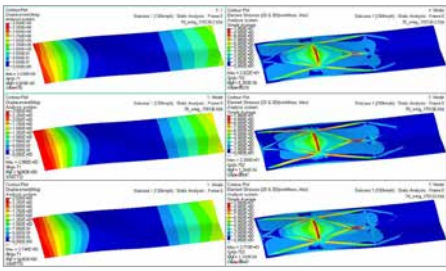


図5 羽の解析結果（縦方向の補強 UD 材なし）

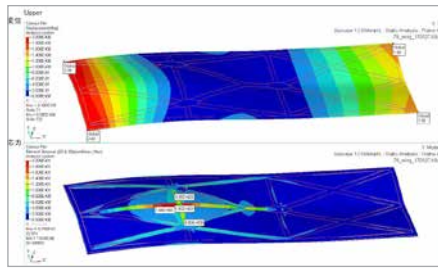


図6 羽の解析結果  
（縦方向の補強 UD 材ありで 1kg の軽量化となった）

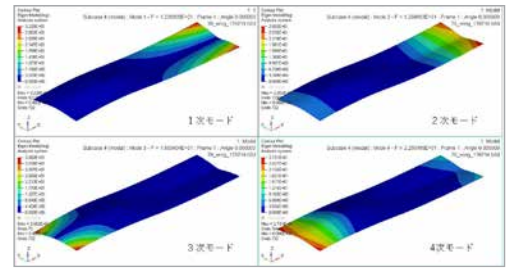


図7 羽の固有値解析結果（周波数応答）

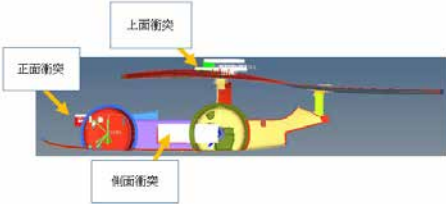


図8 衝突時の安全証明

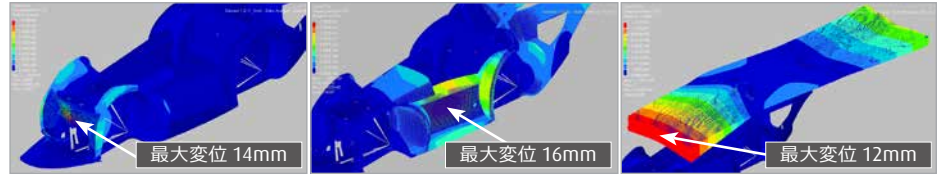


図9 解析結果（左から正面衝突、側面衝突、上面衝突）

でした。この考察から ply 数を増やすよりも応力集中の箇所に補強を入れ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ました。追加補強で変形に対して効果があると判断できれば、ply 数を減らして軽量化することができます。

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6に示します。中央に追加した高弾性 UD 材の補強が効果を発揮して、羽が変形しようとするのを支えていることがわかります。左右のステーの間と斜めの UD に集中していた応力を分散することができました。

今回の積層構成では、補強の UD 材を 2ply したパターンよりも 1kg ほど軽量化できました。これまでのパターンの中で最も重量と剛性の取り合いがうまくいった構成だといえます。この最適化には、HyperMesh、OptiStruct を用いています。

## フラッター現象の解析

フラッター現象とは、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動振動の不安定現象で、一度発生すると振動が増幅発散して飛行機の羽など構造物の破壊を招く現象です。走行中に羽に起こる弾性振動は低速時には空気力で減衰されますが、高速域では空気力が羽の振動を助長して振幅が増大発散し、最終的に羽が破壊される懸念がありました。

図7の周波数応答(固有値解析)を行い、フラッター現象の発生有無を調べました。1次モード：羽後端のねじり、2次モード：羽後端の縦曲げ、3次モード：羽前端的ねじり、4次モード：羽前端的縦曲げを解析しました。

1次モードと2次モードの固有値は、近い値になりましたが、重心よりも後方位置で発生する共振現象であり、羽の故障には至らないと考えました。また、3次モードと4次モードは20%以上離れており、同時には起こらないことがわかりました。以上から、後方での共振現象は多少発生しますが、不安定な発散は生じないと考えられました。この解析を行うことで、重心よりも前縁の変形が発散ないように設計する方針を見つけることができました。実際に走行して、解析結果とほぼ同様な結果が得られました。

## 安全性の証明

羽の積層では UD 材を用いた補強を行いました。シャシはドライバーシート、ホイールハウスなどを構造体の一部とすることで、高い剛性を保ちつつ最小限のスペースに収める構成にしました。ドライバーの安全は、最優先に確保する必要があります。モノコックフレームの構造体に対してドライバーを守る空間を搭乗者セルと定義して、衝突時の変形がドライバー空間内に侵入しない設計を行いました。(図9)

側面衝突では左右のホイールハウスがモノコックの板材を変形するのを支える形状になっています。計画した積層構成であれば衝突に対しては十分な強度、剛性を確保できたと考えます。

設計をするにあたって最も剛性が心配された羽でしたが、解析によって最適な箇所を UD 材で補強したことで、結果的には最も変位の少ない結果となりました。この積層構成であればあらゆる方向からの衝突に対して十分な強度、剛性を確保できており、ドライバーに危険を及ぼすことのない安全な車両であることが証明できました。

最終的に完成したモノコックフレームが図10です。

## CFRP ボデー製作

CFRP ボデーの一連の製作作業（積層→オートクレイブ→トリム→組み上げ→接着→サンディング仕上げ）は、2年生以下の下級生が担当して、春休み3か月の間、協力企業様に赴き作業しました。設計、工程、人材管理は上級生が担当し、チームワーク育成に大きな成果が得られました。とくに、上級生から下級生の指示書は、HyperWorks の解析結果を情報共有し、下級生の作業に大きく活かすことができました。

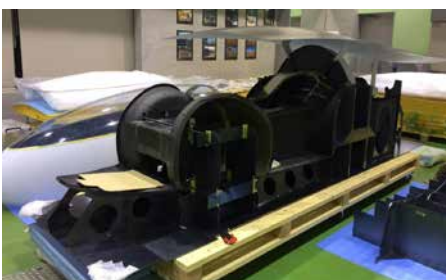


図10 モノコックフレーム（ホワイトボデー）



図11 足回りの構成

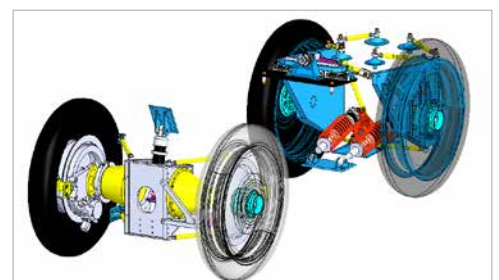


図12 足回り ISO 図

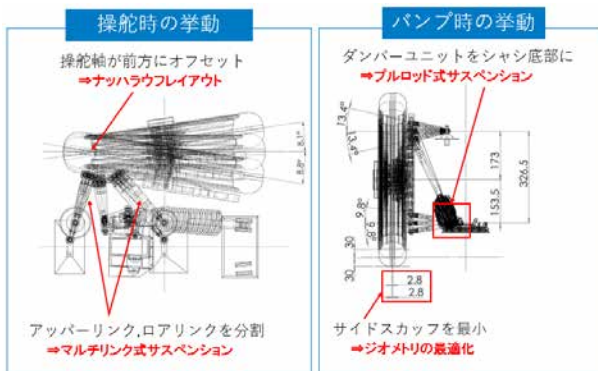


図 13 フロント足回りの挙動 (ナットハウフ配置、マルチリンク、ブルッド式サスペンション)

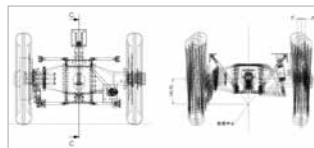


図 14 リア足回り挙動 左：背面図、右：上面図 (リジット式、マルチリンク、4WS)

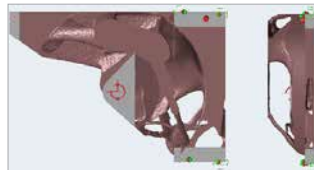


図 15 アップライト最適化結果

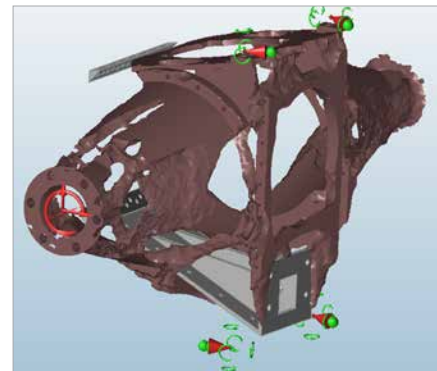


図 16 アップライト最適化結果

## トポロジー最適化による肉抜きと軽量化

足回りは、図 11～14 のように、フロントがナットハウフ配置、マルチリンク、ブルッド式サスペンション。リアがリジット式、マルチリンク、4 輪操舵搭載の構成となっています。とてもユニークな足回り構成となっており、車体形状、車両運動性能を考慮した足回りの統合設計によりこの構成が決定されました。

構成部品の中の大い金物部品は、図 15、16 の Inspire によるトポロジー最適化を用いて必要な剛性を確保し、かつ軽量化を図りました。「突き上げ力」「制動力」「横力」の 3 つの外力に加えて、タイヤ荷重部と車軸取り付け部とのオフセットによるモーメントを荷重条件に考慮しました。

トポロジー最適化は、既存の考えにとらわれずに最適な形状を模索するために使用しています。リブ配置や肉抜き箇所は結果を参考にして設計者が考え、応力 (図 17) と変位を再確認して最適化を繰り返し作業しています。複数部品が ASSY されてユニットを形成するため、ユニットの設計意匠を優先します。

たとえば、アップライトは車軸が組み付くため、双方の変位を合算して足回りジオメトリに影響しない変位を優先します。このようにトポロジー最適化を参考として、ユニットの意匠と設計者の意匠を優先するようにしています。

最終的には、加工性を考慮したモデルを作成します。例として、図 19 のリアビーム構造は中央の box 型パーツをコストと加工時間がかかる一体削りではなく、6 枚の板状の部品を多数の M4 ねじ締結により圧力一定で組み上げ、コスト低減と加工時間の短縮を図りました。

## HyperWorks を利用したメリット

工学院大学ソーラーチームは、HyperWorks を以下のような車両設計で幅広く利用しました。

- ・CFRP ボデー構造と積層計画
- ・極薄の羽の周波数解析 (フラッター現象の解明)
- ・安全性の証明
- ・トポロジー最適化による金属部品の軽量化
- ・CFRP と金属の接着面積の最適化

最も良かったことは、「材料の特性を生かした設計ができたこと」です。炭素繊維の種類、配向、ply 数、ハニカム厚みなどを考慮して、強度の余裕を確認した上での剛性の最適化により最軽量化を達成できました。3DCAD からインポートしたモデルに対して、HyperWorks を使った剛性解析を行うことで、積層計画を効率よく行うことができました。また、企業との産学連携を進める際に、技術の情報共有にも役立ちました。最適化するプロセスを定量的に情報共有することで、工学的な見地をもとに設計意匠にも反映することができました。

## 今後の目標

すでに 2019 年の BWSC に向け、設計をはじめていきます。今後は MotionSolve や MotionView などを使った動解析も取り入れていきたいと考えています。

工学院大学ソーラーチームは、これからも世界が驚く車両製作を続けていきます！

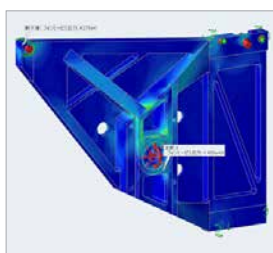


図 17 フォンミーゼス応力図 (アップライト)

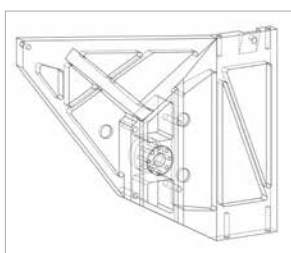


図 18 アップライトの最終形状 ISO 図

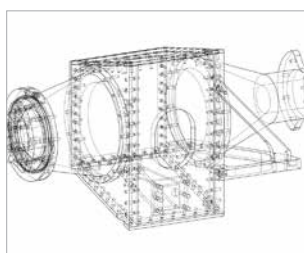


図 19 リアビーム構造体の最終形状 ISO 図

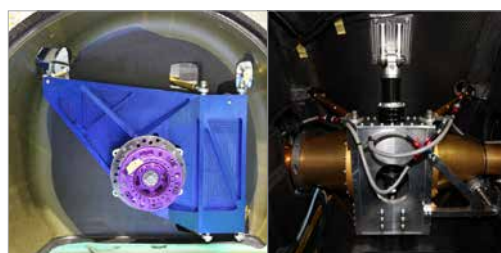


図 20 アップライトの最終形状



アルテアエンジニアリング株式会社

www.altairjp.co.jp



Altair Japan

で検索