

創造的卒業研究：ソーラーカーの設計と製作

弓削康平*1, 堀口淳司*2, 渡辺大*3, 石井貞行*3

Graduation research for developing the faculty of creation
- Design and manufacturing of a solar car -

Kohei YUGE*1, Junji HORIGUCHI*2, Dai WATANABE*3, Sadayuki ISHII*3

ABSTRACT: In this paper a graduation research project based on the concept that students can experience a practical industrial design and manufacturing is introduced. This project is different from conventional ones in that it aims at bringing up students' faculty of creation rather than theoretical knowledge. Students are asked to make a solar car and take part in several races to check its performance. Usage of computer tools such as 3D CADs, FEM analysis softwares and NC machines is emphasized in the design and manufacturing processes from an educational point of view since these CAE systems are widely spread nowadays and students are expected to have the knowledge about them when they graduate. Through the project students reconfirm the importance of "engineering experience" as well as the theoretical knowledge.

KEYWORDS: Design, CAE, Education

(Received July 31, 2003)

1 はじめに

国際的な競争に晒される製造業ではコンピュータ支援による設計、いわゆるCAEシステムを積極的に導入し製品開発期間と開発コストの低減に努めている。最新のCAEでは、設計者は3次元CADによって3次元イメージで機械部品を設計し、これらを仮想的に組み立て動作確認をすることができる。またこの3次元CADデータは計算機シミュレーションの解析モデル作成や金型など製造プロセス設計にも使用されるためコンカレントエンジニアリングに不可欠である。ここ十数年のコンピュータとネットワークの目覚ましい発達に伴いCAEも大きく進展した。CAEソフトの統合化、ブラックボックス化が進みこれまで独立したソフトと専門オペレータが必要であったシミュレーションによる性能評価、製造工程の設計などの作業を、ひとりの設計者が設計と同時に進めることが可能になってきた。また、生産・設計の国際分業化によってCAEソフトのデファクトスタンダー

ド化が進んだ。このようなCAEの変化は機械設計の概念を根本から変えつつある。著者らの研究室はCAEの一角を占める計算機シミュレーションを専門としているが、シミュレーションの理論的な教育だけではなく、CAEを利用した設計法も併せて教育することの重要性を年を追って強く感じるようになってきた。そこで著者らは1998年より4年次生の卒業研究の一環としてソーラーカーをCAEを利用して設計製作するという物づくり主体の研究に取り組み始めた。

ソーラーカーの設計製作には機械設計に必要なエッセンスが凝縮されている。また、レースに参加することによって競い合う喜びを得られるとともに設計の良し悪しが結果として客観的に理解できるという利点がある。ソーラーカーレースには学校や企業、一般の愛好家など様々なグループがそれぞれに目的を持ち参加しているがCAE教育の一環として位置づけている例はユニークであろう。本稿ではこの研究の5年にわたる経過と進歩を実用面と教育面の両面から示す。

*1 機械工学科教授 (yuge@me.seikei.ac.jp)

Professor, Dept. of Mechanical Engineering.,

*2 同助手

*3 同大学院生

2 三次元設計の重要性

本研究ではAutodesk社のMechanical desktopという広く普及しているミドルレンジ3次元CADを設計に使用して

いる。従来の2次元CADは設計ツールと言うよりはむしろ紙と鉛筆による設計手順を踏襲した製図のツールである。設計者は出来上がる形を想像しながら正面図、側面図、平面図と展開し、図面を作成する。これをミスなく仕上げられる人が「設計能力が高い」という評価になる。これに比べ3次元CADでは立体を平面に変換する作業はコンピュータが実行する。設計した部品をいろいろな視点からみて全体のイメージをつかむことが容易で結果的に製図も早く正確になる(図1)。従って学生のように設計経験の浅い者でも意図する部品の設計が比較的容易にできる。加えて3次元データによって部品の体積、質量が計算できるため総重量の算出といった情報が容易に得られる。さらに、3次元データより設計と同時に強度解析、振動解析といった有限要素解析ができる。さらに、部品の仮想的な組み立てと機構動作確認(図2)や自動化されたNC加工機用加工データの作成も3次元データがそのまま活かされる。これらの特徴は、卒業研究という限られた時間を有効に使う必要がある学生には大変便利な機能である。ヒューマンインターフェースも改善が進み年を追って直感的な操作が可能になってきている。知識として理解していても、実際に経験すると学生はその便利さに驚きを隠せない者が多い。社会で広く普及しているCAEを実際に習得するという側面の他に、短期間の設計を余儀なくされている学生には現実的問題として3次元CADは必須の知識と言えよう。

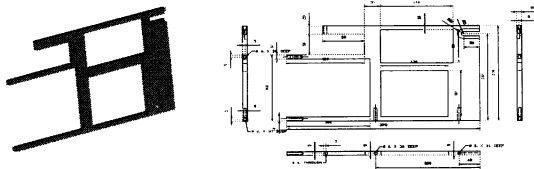
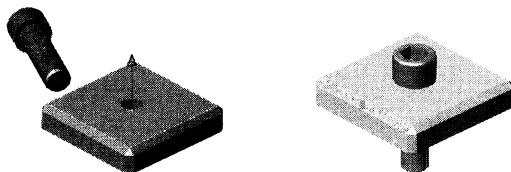


図1 三次元モデルと二次元図



(a) アセンブル前

(b) アセンブル後

図2 部品のアセンブル

3 車体の設計と製作

著者らが参加しているのは毎年7月末に秋田県大潟村で開催される「ワールド・ソーラー・バイシクル・レース^[1](以下WSBR)」である。このレースでは、ソーラーパネルとバッテリーのみをエネルギー源として、1周約30kmのカーブの少ないほぼ平坦なコースを3周する競技である(2002年からは5時間内の周回数を競う)。コースはほとんどが直線で平坦である。主なレース条件は(1)バッテリーは小型制御弁式鉛蓄電池 14kg以下、(2)ソーラーパネルは1.2m²以下、(3)車両は全長3.0m×全幅1.2m×全高1.6m以内、(4)ドライバーの体重はウェイトと合わせて70kg以上に調整することなどである。

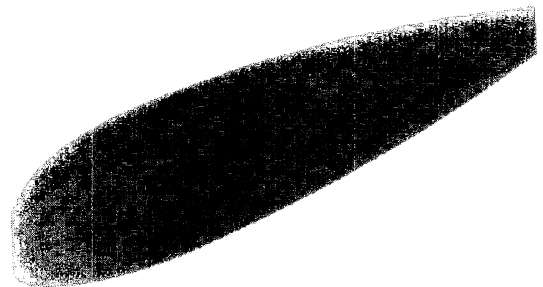
学生は3月下旬から具体的な作業に着手し、次のような手順で設計製作を進めて行く。

- 1) 3次元CADによる設計
- 2) CAEによる解析
- 3) 製作
- 4) エネルギーマネジメント

以下に各工程の概要を示す。

3. 1 3次元CADによる車体設計

3DCADを用いて車体外観デザインの検討を行う場合、主に2通りの段階がある。はじめに2次元平面をスケッチして押し出し操作と回転操作等により、大まかな車体外観(オブジェクト)を作成する。続いてオブジェクトの結合および切断、面取り、フィレット等を施して設計者のイメージするデザインに近づけていく。図3はこのようにして簡単に設計されたWSBR車の外観図である。このオブジェクトは10個ほどのデザインパラメータで管理されているためパラメータスタディにより自由にデザイン変更が可能となっている。この他に車両の前後方向の断面をスケッチし各断面を自由曲面で滑らかに結合して外形を作成する方法もあるが、設計者の自由な3次元曲面のデザインイメージが盛り込める一方で高度な3次元形状想像能力が必要である。



(a) 大まかなWSBR車デザイン



(b) タイヤの干渉を考慮したWSBR車デザイン

図3 3DCADによりデザインされたWSBR車の外観

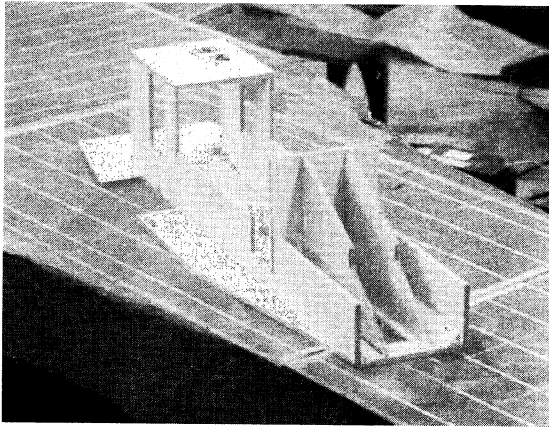
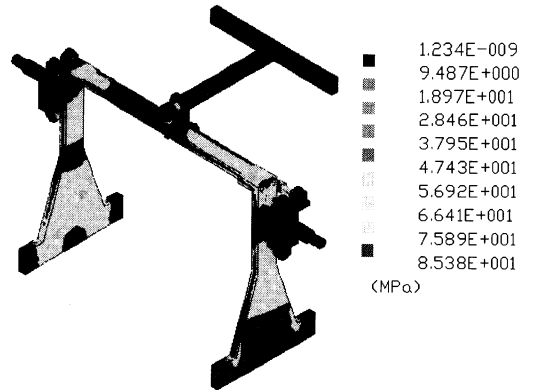


図4 CAD図面より製作した1/5シャーシ模型

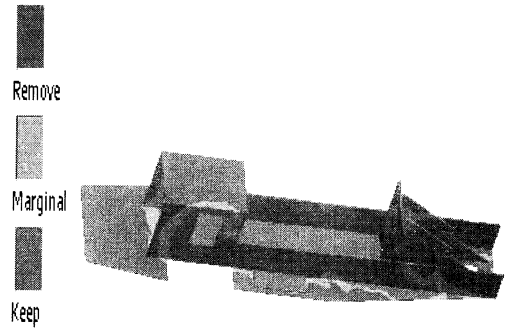
外形の設計と同様に2次元平面をスケッチして押し出し等により、シャーシ部分を作成する。設計されたシャーシのCAD図面を基にシャーシの模型を製作し検討する。製作した1/5シャーシ模型を図4に示す。

3. 2 CAE解析

研究で使用している3次元CADには構造解析ソフト(Ansys社のDesign Space)が内蔵されておりCADの操作画面上で簡単に部品の強度等を調べることができる。CADには質量計算や機構解析機能も付加されているため重量のチェックやステアリング周り等のリンク機構の動作や干渉も簡単に調べることが可能である。これらの機能によって性能評価と設計変更の繰り返し作業を容易に行うことができる。



(a) ステアリング機構周りの応力解析



(b) 必要構造部材の評価結果

図5 CAE解析

図5(a)は車体総重量時に掛かる荷重の境界条件を基に求めたステアリング機構の応力解析結果である。図5(b)は車体総重量を軽減するための最適設計解析である。材料の必要性を3パターンに分類し必要、不必要を判断することができる。図6は車両の最小回転半径を調べるためCADの機構解析機能を利用してハンドルの回転角とタイヤの実舵角比とシャーシとの干渉を検討している。ハンドルを動かすとステアリング機構が動作し、タイヤがシャーシの一部に当たる最大舵角を調べることができる。また、シートに着座したドライバーの姿勢やドライバーの視点から見たバックミラーの有効範囲も検討することが可能である。

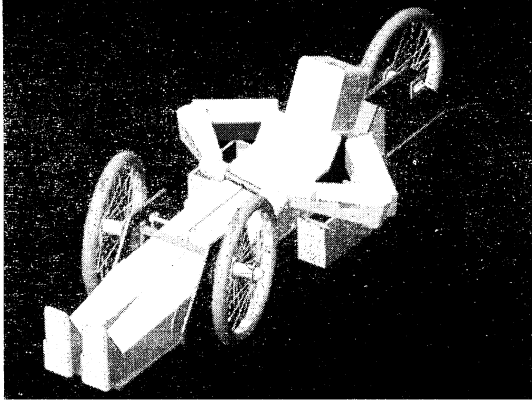
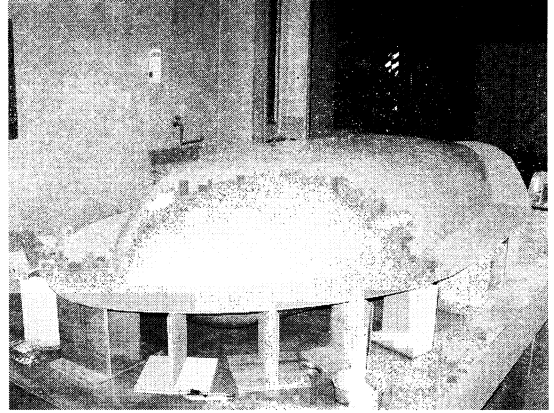


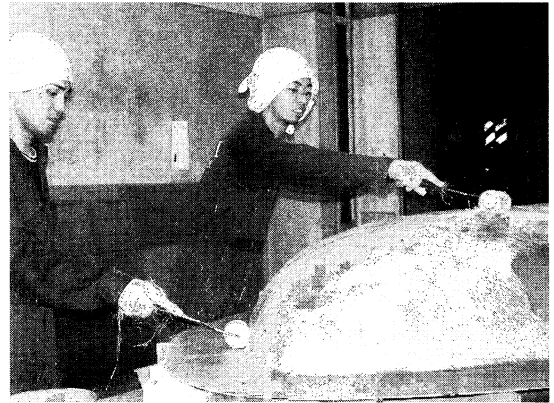
図6 前輪の機構解析と干渉チェック



(b) 表面処理され上下に分割されたオス型

3.3 製作

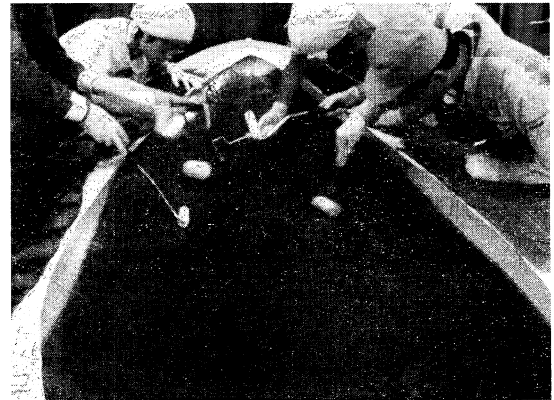
車両の製作では大半の作業時間はカウル製作に費やされる。カウル制作はCADにて車両の前後方向を約100mm間隔に輪切りにした断面形状の型紙をプリンタに出力することから始まる。この型紙をウレタンフォームに貼り付けフォーム材を型切していく。同様の製作方法で作成された合板材のフレームの間に型切されたフォーム材を張り合わせていく(図7(a))。次にオス型の表面をパテ等により滑らかに仕上げ離型剤を塗布し車体上下の分割位置にフランジを設けその上部にメス型となるガラスマットとエポキシ樹脂で数層積層していく(図7(b)、(c))。離型したメス型の製品面となる面の凹部をパテ修正してから表面を研磨しカーボクロスとエポキシ樹脂にて2から3層積層して製品を完成させる(図7(d))。同様の工程でアンダー側のカウルも製作することにより上下で分割されたカウルが完成する。



(c) メス型の製作風景



(a) オス型の製作風景



(d) メス型にてカウルの積層風景

図7 カウルの製作風景

3. 4 エネルギーマネージメントによる最適走行

レースでの走行は、効率よくエネルギーを使用し平均速度を上げることが求められる。そのためには、レース中に使用できる全エネルギーを予測し、そのエネルギーを効率よく使用できるように車両諸元やモータ性能、減速機のギヤ比等の各パラメータを設定しエネルギーマネージメントのシミュレーションプログラムをVisual Basicにより作成し最適走行を検討した(図8)。プログラムは走行時の車両に作用する抵抗力(1)~(4)式で表される。

車種 005		全走行時間		計算実行	
フロントプロペラ	16	全走行時間	10時間49分46秒	要求電流	
リアプロペラ	18	定常走行時間	04時間57分22秒	仕事率	
設定速度	14.5950m/s 52.5440km/h	定常走行距離	50.244km	消費エネルギー	
平均速度	13.1575m/s 47.9671km/h	加速時間	17分48秒	パネルエネルギー	
空気抵抗	5.6799N	加速距離	13.404km	パネルエネルギー (シャーフ)	
転がり抵抗	3.2052N	制動時間	43分36秒	使用可能エネルギー	
全抵抗	9.178N	走行距離	30.120km	残りのエネルギー 電池残量	

図. 8 Visual Basicによるエネルギーマネージメント

$$F_{all} = F_{air} + F_f + F_a \quad (1)$$

$$F_{air} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (2)$$

$$F_f = \mu mg \quad (3)$$

$$F_a = ma \quad (4)$$

ここに F_{all} , F_{air} , F_f , F_a はそれぞれ全走行抵抗(N), 空気抵抗(N), 転がり抵抗(N), 加速抵抗(N)を, また ρ は空気密度 (kg/m^3), C_d は空気抵抗係数, A は前面投影面積(m^2), v は車速 (m/s), μ はタイヤの転がり抵抗係数, m は車両重量 (kg), g は重力加速度 (m/s^2), a は車両の加速度 (m/s^2) である。

一方, エネルギーの収支(5)~(7)式で表される。

$$P_s = i P_{S_{max}} t \quad (5)$$

$$P_B = j V_B E_B \quad (6)$$

$$P_{total} = P_s + P_B \quad (7)$$

ここに P_{total} は全エネルギー (Wh), P_s は発電エネルギー (Wh), P_B は電池エネルギー (Wh), V_B は電池電圧 (V), E_B は電池容量 (Ah), t は走行時間 (h),

i はソーラーパネルの発電効率, j は電池の充放電効率を表す。

4 これまでの設計とレース記録

本研究室ではこれまでに5台のソーラーカーを製作した。シミュレーション主体の研究を重視していた著者らにとって実際の製作では手探りの状態が続いた。年度ごとに他チームの設計から多くのことを学び設計コンセプト・製作方法を新たに検討し直して車両製作を行った。

4. 1 1998年度の車両設計 (seikei 001)

初年度はソーラーパネルやモータの使用法・減速機のセッティング等すべてが初めてであることと4月からレースまでの3ヵ月という短い設計製作期間を考慮して制限時間内に完走することだけを目標として設計製作の計画を立てた。車体はドライバーが剥き出しとなり空力的には不利ではあるがソーラーパネルの最大発電量が稼げる水平なルーフを設置する形状とした。

シャーシは1からすべて設計製作するのではなく十分なフレーム剛性が確保されているゴーカートのシャーシを流用した。前輪のステアリング機構および後輪の駆動機構はオリジナルに設計製作した。ソーラーパネルはシャーシからアルミパイプの骨組み構造でルーフを組み上げその上面に貼り詰めた。図9に1998年度車 (seikei 001) の3D CADモデルを示す。完成した車両の走行テスト時の走行抵抗結果と晴天時の発電量および初期バッテリー容量から駆動系のセッティングを行い巡航車速は約25km/h, 4時間で完走とした。

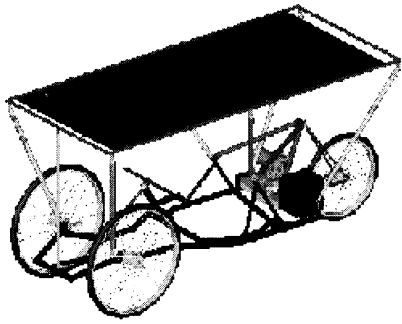


図9 seikei 001の3D CAD モデル

レース結果は、レース前の準備段階においてバッテリーの充電ミスから充電容量差を生じさせてしまい、直列に配置したバッテリーのうち1個がレース終盤に過放電状態となり車速が乗らず制限時間の5時間内に完走することが出来なかった。

秋には幕張で開催された朝日ソーラーカーラリーにseikei 001のシャーシを流用し空気抵抗低減のためルーフを取り外してスチロールカウルにソーラーパネルを装着したseikei 002を完成させ参加した。レース結果はブレーキトラブルによりリタイヤであった。まさに物作りは経験が必要であることを教員、学生ともに大いに学んだ年となった。

4. 2 1999年度の車両設計 (seikei 003)

前年の反省点より、軽量化、空気抵抗と転がり抵抗の低減を狙った車両設計を実施した。

車両の軽量化のためにシャーシに軽量・高剛性のCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) のハニカムサンドイッチ材 (図10) を使用し、カウルにはGFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) を使用した。さらに、鋼材構造からアルミ部材を高断面2次に配置したことにより、剛性を保ちつつ 12 kgの軽量化することができた。

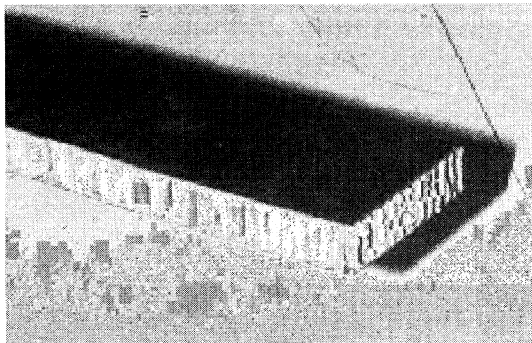


図10 ハニカムサンドイッチ材

また、ソーラーパネルからの最大発電量は確保しつつ空気抵抗は減るようにフルカウル型デザインを採用した。カウルは製作が比較的容易で進行方向の空気抵抗を低減できる2次元曲面の翼断面形状を採用した。図11にこのコンセプトで設計製作されたレース中の1999年度車 (seikei 003) を示す。

一方、転がり抵抗低減策として一般の自転車用タイヤではなく、ミシュラン社製エコラン専用タイヤを採用した。実験によって、転がり抵抗係数が0.008 から0.0035 へと大幅に低減されることを確認した。レースでは、完走タイム2時間25分26秒、平均速度38.6 (km/h)、11位の成績を収めた。

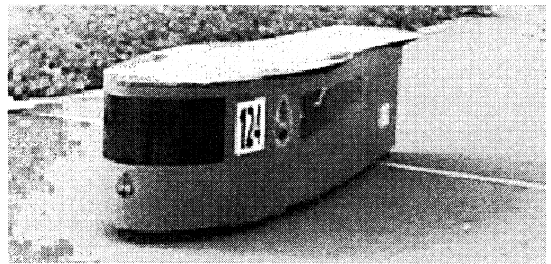


図11 seikei 003 モデル

4. 3 2000年度の車両設計 (seikei 004)

2000年度モデルは更なる高剛性軽量化と低空力化の改良が加えられた。空気抵抗の低減のため、新型車は前モデルと比較し一層、空気抵抗が少なくなるように3次元曲面の形状を採用した。また、新型車の形状を検証するため、数個の模型と模型風洞を製作して風洞実験を行った (図12、図13)。

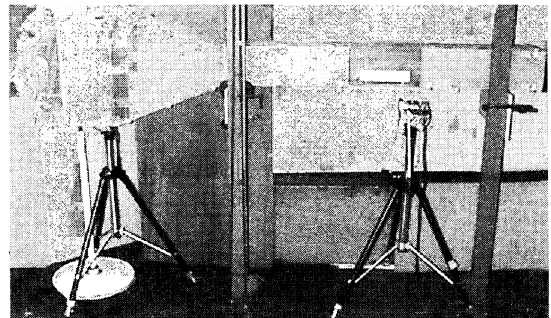


図12 自作風洞による模型車両の空気抵抗実験



図13 風洞実験用自作模型

後輪回りはこれまでアルミ材骨組み構造であったものをCFRPサンドイッチ材によるパネル構造に変更し高剛性軽量化を図った。さらにカウルはガラス・ポリエステル樹脂からカーボン・エポキシ樹脂のCFRPに変更し高剛性軽量化を図った。カウルはオス型からメス型、メス型から製品という3段階の工程を経て作成された。この結果、車体剛性が格段に高くなり車重は34kgから32kgへと低減した(図14)。また、この年はエネルギーマネジメントプログラムも完成させレースに役立たせた。2000年モデルは空力性能を向上させるため前年比25%のソーラーパネル搭載面積(発電量)の車体形状であるが、事前シミュレーションでは十分に完走可能と判断された。

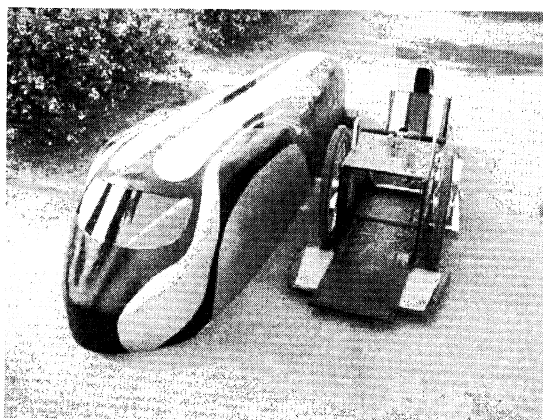
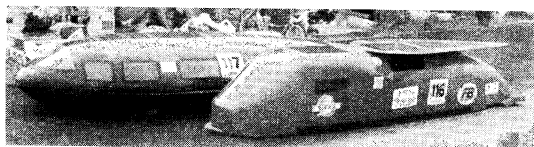


図14 2000年モデル (seikei 004) のカウルとシャーシ

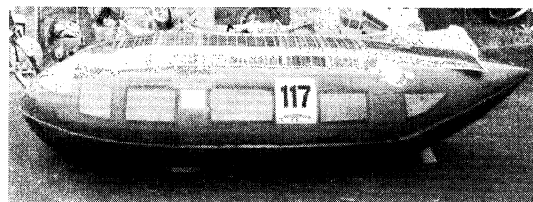
レース当日は想定外の強い横風に悩ませられ、前面投影面積だけではなく側面積も減らす必要性を学ぶこととなったが、完走タイム2時間25分28秒、平均速度38.8(km/h)、10位の成績を収めることができた。

4. 4 2001年度の車両設計 (seikei 005)

2001年度はレギュレーションを変更するとの話がレース関係者から持ち上がったことから、新規レギュレーションを先取りした車両開発を行った。新規レギュレーションではこれまで以上に長時間走行になることが予想されたため、この年はソーラーパネルを最大限搭載し、横風にも対応できるよう全方位流線形状を採用した(図15)。また、3年間のレース経験を通して安全視界の確保が必須であること痛感し新型車では最大限にスクリーンを配置した。



(a) 改良された2000年モデル (右側車)



(b) 2001年モデルのスクリーンとソーラーパネルの配置状況

図15 2000年モデル (seikei 004) と2001年モデル (seikei 005) モデル

レースは、改造された2000年モデルと共に2台体制で参戦し2001年モデルは完走タイム2時間2分59秒、平均速度45.7(km/h)、6位入賞、2000年モデルは完走タイム2時間5分54秒、平均速度44.7(km/h)、7位の成績を収めた。

4. 5 2002年度の車両およびレース

2002年度は5時間耐久(1周約30kmのコースの周回数を競う)にレースのレギュレーションが変更されたことにより新規レギュレーションを先取り開発した2001年モデルに改良を施してレースに参戦した。改良車はソーラーパネルのセル配置を最適化することにより発電効率とパネル面積を増し発電量を約1割増した。また、シャーシ周りにリブ補強を施して剛性をアップさせ、前輪のアライメントの調整を行うことによりタイヤの転がり抵抗の低減を図った。

レースでは、コース5周目(距離約150km)の周回タイム4時間20分31秒をマークして、5位入賞の成績を収めた。

以上のように経験不足で現場組み合わせ同然の状態からスタートしたソーラーカーの設計・製作プロジェクトは年ごとに進歩し、現在では名実ともにCAEを有効利用した設計・製作プロジェクトとなった。図16はWSBRを終えて入賞を喜ぶ学生たちである。



図16 入賞を喜ぶ学生たち

5 まとめ

著者らの研究室でここ5年間実施してきた創造的卒業研究「ソーラーカーの設計と製作」の概要とその教育的側面について示した。学生は設計から製作まで物作りの工程を一通り経験するために工学教育効果が高い。また、通常の限られた授業時間の中では習得の難しい3DCADや解析、試作などCAEの利用法を一通り学習し、これらのツールによってどのくらいの時間でどの程度の作業が可能なのかを理解することができる。

さらにチームワーク、リーダーシップの重要性も理解することができる。教員側はこの卒業研究から得た経験を活かし、3DCADによる設計とモデリングマシンによる試作などを学部学生の必修実験テーマのひとつとして盛り込むことができた。近年注目を集めているJABEE（日本技術者教育認定機構）では教育の一環として創造的な科目を求めている。今後は、この研究指導で得られた経験をもとにより多くの学生が創造的な体験ができる授業を工夫していきたいと考えている。

参考文献

[1]WSBR ホームページ

<http://www2.ogata.or.jp/wsbr/index.htm>

[2]永田勝也, 隠塚大介, 筑後隼人, 岩見武博, 金本佳紀 : 省電力競技 “ワールド・エコノ・ムーブ” 用車両の改良法の検討について, ソーラー&電気自動車に関する研究集会 報告論文集 p45-49, 2002

[3]小森裕介, 池上敦也, 木村英樹, 堺一佐武, 鈴木康慎 : ワールド・ソーラーカー・ラリーにおけるエネルギー・マネジメント手法および試作 DD モータの検証, ソーラー&電気自動車に関する研究集会 報告論文集 p21-28, 2002

[4]ソーラービークルとソーラーバイシクルに関するワークショップ 2000, 2000

[5] Zero to Darwin Project ホームページ

<http://www.zdp.co.jp/>

（[2]～[5]は本文全般に渡って参考）