

## 会報49号

	頁
1. ご挨拶	堀内浩太郎 1
2. GPS ソーラーボートの製作およびその制御技術	鶴沢 潔 2
3. 新 HP 用トラック軌道型ペダリング SDV 駆動機構の性能評価	岩月 徹 11 織田紀之
4. 市販ペダルボート「エスカペード」	堀内浩太郎 20

## ご挨拶

いよいよレースの時期が近づいて参りました。今回の清水港での開催が初めての土地である上に海での開催とあって、協会、マリンスポーツ財団、東海大学の関係者の皆さんにはそれぞれ大変なご苦勞を掛けたようです。皆さんの間に飛び交うメールを見ていると、ご苦勞のほどが察しられて、お役に立たないことが申し訳なく感じられます。でも、着々と問題が片付いて開催のめどが立っていく様子は頼もしい限りです。

さて今回の会報の中身ですが、再び鶴沢さんから新しい GPS ソーラーボートの記事を頂きました。この船は前回に引き続き2連覇を達成したもので、前回に比べて性能的にも技術的な完成度の点でも飛躍的に向上したということです。この記事は今年1月、2月に行われた太陽エネルギー学会のソーラーカー、電気自動車製作講習会用の資料を使わせて頂いたもので、終わりに講習会の申込書を添付しました。350人ほどの参加があり、大変な盛況だったとのこと。次回参加したいと言う方は、日本太陽エネルギー学会事務局にお問い合わせ下さい。(申込書の上に電話、E-mail, URL など載っております)

次の原稿は織田さんから頂きました。自転車のペダルを丸くまわすのではなく足を踏ん張る方向に動かして効率を上げるメカを織田さんが作っておられまして、市販もされています。一昨年まで人力ボートを出していた広島大学は現在、人力飛行機にその装置を取り付けて飛んでいるということです。今回 Human Powered Vehicle Association (HPVA) の HPV ニュース又は論文集にこの論文を掲載してもらうお手伝いをしました関係で、織田さんに掲載をお許し頂きました。多少慣れが要るようですが、熱烈なファンも居るようで、内容をぜひご検討下さい。リカンベントには慣れも要らないようです。

三番目は市販ペダルボートの紹介です。その昔、有名なヨットデザイナーのガリーホイット氏が設計したウオターバッグと言うペダルボートがあって、まるまるとした形なのに意外に性能が良く、波にも強いので興味を持ったものでした。最近その船を原型として回転成形とベルト駆動を取り入れて生産性を上げ、売り出したようです。これは相当に数が出ているようで、レンタルボートなどによく使われるようです。

# GPS ソーラーボートの製作およびその制御技術

Designs, Fabrications and Automatic Control of Crew-less Solar Boats

鵜 沢 潔 \*

## 1. はじめに

著者が所属する東京大学大学院環境海洋工学専攻では、大学院生に対するものづくり教育の一環として「クルーレス・ソーラーボート大会」に出場する活動を行っている。

2004 年の第 8 回びわ湖クルーレス・ソーラーボート大会では初出場ながら優勝をはたしたが、東大チームの最大の勝因は圧倒的な艇体重量の軽さによる走行抵抗の軽減・巡航速度の速さであった。この軽量艇はスチロールフォームの表面に CF クロスを積層した構造で、3 度のテスト走行を含めて約 2 ヶ月間で完成させたものである。続く昨年 2005 年は更なる記録更新を狙って新型艇を製作し、波浪条件や艇体の細かなトラブルにより記録更新はならなかったものの、大会 2 連覇を達成することができた。本艇は 2004 年艇よりさらに軽量化が図られ、全体構造の取りまとめ・完成度も高く、たった 2 年間における学生の製作技術・開発能力の飛躍的な向上をもって達成できた艇である。

本稿では、2004 年度と 2005 年度のレースに出場し優勝した東大チームのボートの概要を船体製作と制御機構を中心に紹介する。

## 2. クルーレス・ソーラーボート大会とは

クルーレス・ソーラーボートとは、ソーラーパネルによりエネルギーを自給し、GPS 受信機と電子コンパスおよび制御用コンピュータを搭載し、目的の場所へ自律航行することが可能であるボートであり、長期の広域環境モニタリングなどへの応用も考えられ、研究対象や学生の物作り教育の素材としても面白いものである。びわ湖クルーレス・ソーラーボート大会はクルーレス・ソーラーボート協会により毎年夏に開催され、例年のレースは琵琶湖畔のマキノサニービーチを出発し、GPS による自動操縦で竹生島沖までの 3 箇所のマークを周回し、再び出発点に戻るまでの約 20Km のコースによるスピードレースである。

レース艇の規定はソーラーパネルの大きさが  $2\text{m}^2$  以下というだけで、他には動力用バッテリーは 20Wh まで、危険回避のためにラジコン操作で停船出来ることが要求されているのみで、船体の大きさや重量に関する規定は自由である。<sup>[1][2]</sup>

## 3. 船体の基本設計

大きさや水中翼の有無など船体に関する規定は無く、設計の自由度は非常に高い。仕様の決定において、まず決まるのはレギュレーションにより大きさが規定されているソーラーパネルになる。これには軽量で効率が高いソーラーカーレース用の製品を選択した。次にソーラーパネルの出力からモーターを選択して全重量を見積もり、船体を設計することになる。モーターには効率が 90%以上と高いソーラーバイシクル用のブラシレスモーターを選択した。また、補助動力用には容量 1100mAh のニッケル水素電池を 15 本直列に接続したものを積載した。

船体形状は、見積もられる全重量が 15kg 程であるのに対して、出力は 200W 以上と実船で言うと超高速船の範囲に入るため、通常の船舶とは大きく異なったものになる。超高速船では造波抵抗が大きくなるため、漕艇競技のボートのように船体を非常に細長くするか、水中の翼で船体を水上に持ち上げる水中翼船などの形態が取られる。東大チームは初めて出場した 2004 年のレースにおいては 3 つの細長い胴体を持つ排水量型(浮力で重量を支持する型)トリマラン船を、2 回目の挑戦となった 2005 年のレースにおいては全重量の 90%以上を薄い板状のサイドハルと前後に設けたスカートでつくる空気室内の圧力で支持する SES(Surface Effect Ship)を採用した。<sup>[3][4][5]</sup>

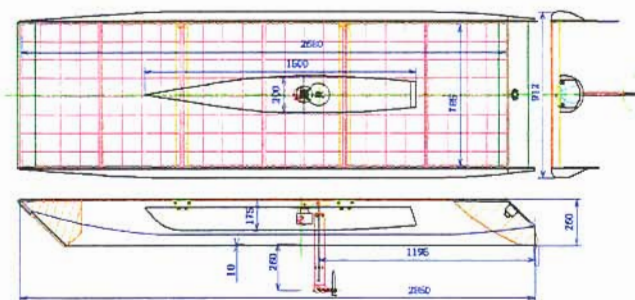
図 1, 2 に 2 艇の一般配置図と写真を、表 1 に主な仕様を示す。SES のボートには後部スカートの上に直径 5cm のファンが設置されていて、内部のゲージ圧を 70Pa 程に保つ。圧力は SES 型の実船に比べると 1

\* 東京大学 工学系研究科 環境海洋工学専攻 助手

桁以上小さいが、小型であることから重量の割に空気室の投影面積が大きく、船体のほぼ全重量をこの圧力で支持することが可能である。



(a) 04 トリマラン船 “Eve” (winner of the 2004 race)



(b) 05SES “SPASES” (winner of the 2005 race)

図1 東大艇全体配置図



(a) 04トリマラン船 “Eve”



(b) 05SES “SPASES”

図2 東大艇外観写真

表1ソーラーボートスペック一覧

	2004年	2005年艇
全長(m)	3.2	2.8
全幅(m)	1.0	0.9
排水量(kg)	13.0	15.0
モーター	特殊電装S13560-260R (定格107W)	
ソーラーパネル	特殊電装S13560-260R (定格107W)	
プロペラ直径(m)	0.2	0.2
プロペラピッチ(m)	0.3	0.3

#### 4. 船体製作

ソーラーカーやソーラーボート、人力船などは曲面形状やサンドイッチ構造、2次接着などの組み合わせであり、適材適所の部材配置やインテグレートされた全体構造設計およびアセンブリや艤装技術までが必要とされる。さらに自作の場合は、これらの構造が全て成形可能な技術の中に在る事も要求される。04 トリマラン船“EVE”と 05SES“SPASES”の構造は全複合材料構造で、軽量でスマートな全体構造を実現する為に、レース艇の基本計画時には構造検討にも多くの時間を掛けた。さらに主な構造・材料は以下の様にハンドレイアップ成形が可能な構造とした(図3, 4)。

##### “EVE”主要構造

- Main & Side Hull: ウェットレイアップ成形  
スチロールフォーム+CF  
フォーム比重  $\gamma = 0.03$   
CFRP スキン: 1K CF 平織りクロス  
CF:  $120\text{g/m}^2$ , RC40~50%
- Solar Panel: 真空オープン成形  
KV プリプレグ+ノーメックスハニカム  
KV:  $75\text{g/m}^2$ , BF:  $50\text{g/m}^2$ ,  
ノーメックスハニカム:  $174\text{g/m}^2$  ( $\gamma = 0.029$ , t6mm)
- Strut: 真空オープン成形  
CFRP ソリッドプレート + CF パイプ  
CF 平織りクロス:  $335\text{g/m}^2$   
CF:  $200\text{g/m}^2$ , RC40%
- Rudder/Propeller: コールドプレス成形  
CFRP スキン + バルーンパテ  
パテ比重  $\gamma = 0.4 \sim 0.5$

##### “SPASES”主要構造

- Center Hull: ウェットレイアップ成形  
スチロールフォーム+CF
- Side Hull: ウェットレイアップ成形  
Divinycel+スチロールフォーム+KV  
KV スキン: KV 平織りクロス  
KV:  $75\text{g/m}^2$ , RC50%
- Solar Panel: 真空オープン成形(RFI 成形)  
KV 平織りクロス+BF+ノーメックスハニカム  
KV:  $75\text{g/m}^2$ , BF:  $100\text{g/m}^2$ ,
- Strut: 真空オープン成形  
CFRP ソリッドプレート + CF パイプ
- Beam:  
Inner Beam: CFRP スキン + バルーンパテ  
Fr/Rr Beam: KV/ノーメックスハニカム CFRP スキン

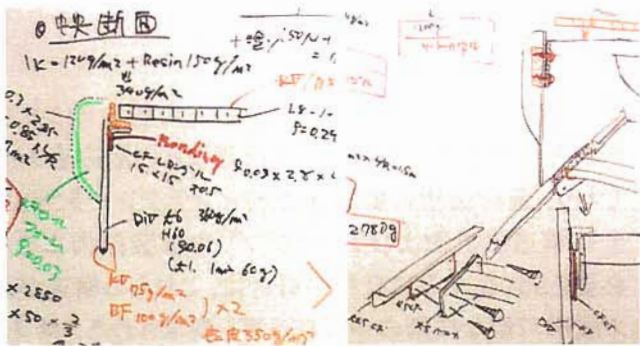


図3 構造検討スケッチ



(a) “EVE”主要構造



(b) “SPASES”主要構造

図4 船体主要構造

主な製作方法を以下簡単に説明する。

#### 4-1. 船体(ハル)成形

船体の主構造は建材用の断熱材で連続発泡タイプ。船内空間を確保するように板材を組み合わせた後(図5), 外形形状に削り出し, その表面にCF1K平織りクロスをウェットレイアップし, 塗装仕上げをおこなった。このときの積層では, 造形したフォーム材の上にCFクロスをタッキファイヤ材(3M-55等)を用いて貼り付けておく。CFクロスを手く3次元形状のフォームに沿わせることが難しいこの作業でも, プリプレグのように貼り直ししながら納得いくまで繊維を綺麗に配置することができる。次にこのCFクロスに対してエポキシ樹脂を塗布・含浸させるが, 多少足りないかと思う程度で良く, 樹脂が多いとCFクロスがフォームから浮いてしまうので注意する。ドライヤー等を利用して樹脂温度を上げて粘度を下げてCFの下に樹脂が回りやすくするのがコツである。含浸させた樹脂が硬化を初め, Bステージのタイミングになったら, その上に追加して樹脂を塗布してやることで必要かつ最小限の樹脂含浸を得ることが出来る(図6)。

05“SPASES”のサイドハルは軽量化のためにKVを採用した。下端にリップと呼ばれるプレートが飛び出すがこれはデイビニセルという塩ビ系フォーム材をコアにしたサンドイッチパネルで形成した。ウェット積層によるサンドイッチパネルの成形にはヴァキュームバッグを利用すると比較的簡単にできる。まず, 表皮材を通常の積層を行った後, フォームコアを載せて真空圧着する, 積層した樹脂のみで十分コア接着ができる(図7, 8)。

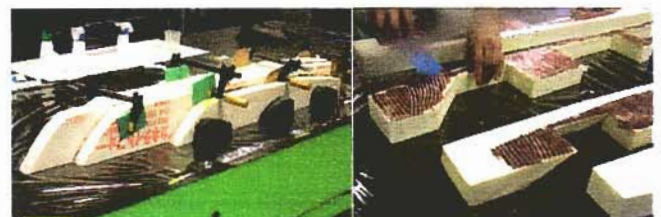


図5 ハルフォーム接着



図6 ハルCF積層



図7 サンドイッチパネル積層



図8 ハルフォーム接着

## 4.2. プロペラ・ラダー成形

プロペラは細長い 2 枚のブレードを持つもので、簡易性能推定プログラム<sup>6)</sup>を用いて直径とピッチを決定した。ラジコン飛行機用の市販品では大きいピッチ比のものが存在しないため自作した。モーターからストラットの中のシャフトを介し、下のポッドに収めているベベルギアで軸の向きを 90 度変えプロペラを駆動する。

プロペラ、ラダーは小型卓上 NC 加工機を用いて作成したメス型を用いてコールドプレスにて成形した。外皮積層後、中実材としてマイクロバールンパテを充填して型締めして成形する。このとき充填するパテの量を調整する事で表皮成形圧を得るが、プロペラはラダーに比べて強度要求が厳しく、部品肉厚も薄いため、表皮材に加えて内部材として CF-UD 材を追加・充填している。これらの小さな成形品に対しては織り目の細かい 1K 織物を使用するが、それでも寸法精度良く材料を裁断するのは難しい。そこで、粘着力の弱いタッキファイヤ材を塗布した薄いフィルムを CF クロスに張りつけて繊維の裏打ちをしてやると、形状のマーキングや切り出しが楽に出来、織り目が解けることなく綺麗に材料を切り出すことができる。このフィルムは CF 繊維を下にして積層すれば樹脂が含浸してくると自然に剥がれてくれる。また、05“SPASES”では更なる強度 UP を得るためにパテを使わず、型内全てに CF 繊維をセットし RTM 法による成形を行った(図 9, 10)。



図 9 ラダー積層



図 10 プロペラ成形

## 4.3. ソーラーパネル成形

ソーラーパネルは軽量ハニカムサンドイッチ構造とするため KV プリプレグによるオープン成形とした。オートクレーブを用いない真空圧のみのサンドイッチ成形では、コア内の脱気が確実に行われる様に十分対策する必要がある。それは、プリプレグやノーメックスコアの吸湿水分が硬化加熱時に蒸発し、これがコア内部に溜まると表皮とコアの接着不良を引き起こしてしまうためである。また、05“SPASES”ではさらに軽量化を図って KV ドライ繊維と BF100g/m<sup>2</sup> の組み合わせによる RFI 成形とした。この方法は BF の樹脂の粘度特性から成形表面に細かいポイド・ピットが出来やすいが、むしろ出来上がり重量に対するハニカムと表皮との接着力が強くコストもプリプレグを使用しない分安く出来る。

## 5. 制御・自動走行

### 5.1. 制御・電力系の設計

まず、制御・電力系統の全体を図 11 に示す。ソーラーパネルとモーター間には降圧型 DC/DC コンバータを挟み MPPT (Maximum Power Point Tracking) 制御を行なっている。この DC/DC コンバータは適当な製品がないために文献[7]などを参考に自作した。バッテリーは電圧がモーター動作電圧よりも低いために昇圧型の DC/DC コンバータを介し接続する。降圧、昇圧コンバータは制御マイコンで発生する PWM (Pulse Width Modulation) 信号により制御する。また、パルス幅はマイコンによる自動制御により決定される。各点における実際の電圧は以下の様になる。ソーラーパネル出力電圧は主にパネル温度の変化によって変動し、モーター動作点電圧はパネル出力電力(日射量)によって変化する。

- ・ソーラーパネル最大出力点電圧 30~32V
- ・バッテリー電圧 13~18V
- ・モーター動作点電圧 20~29V
- ・浮上ファン動作電圧 8V(固定)

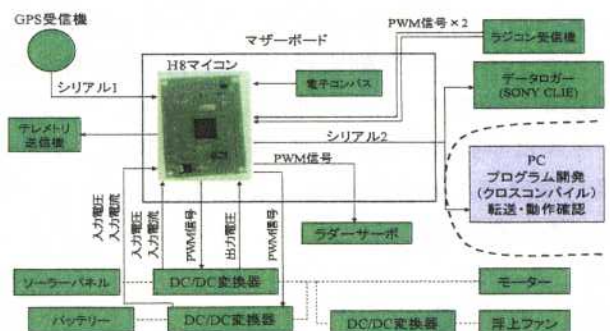


図 11 制御・電力系統

RFI

自動操縦のための制御機構は GPS 受信機で取得した位置と電子コンパスまたは GPS 受信機で得た方位を制御用のマイコンに入力してアルゴリズムに基づき舵角を決定し、サーボを動かして実際に舵を切るというものである。GPS 受信機は一般に市販されているアンテナと受信機が一体となっている、Garmin 社製の Saturn 16 という製品を使用した。舵のサーボはフタバ社製 S3003 を使用し、電子コンパスには PNICORP 社製の VECTOR2X という機器組込用のものを使用した。この電子コンパスは 2 つの軸が直交するコイルで地磁気を検出して方位を計算し、0~359 度の整数値でデジタル出力するものである。

制御用マイコンとしてはロボットコンテストなどでも広く使われている H8 マイコンを選択した。使用した製品は株式会社秋月電子通商より発売されている AKI-H8/3052F マイコンボードである。航行中の各種のデータは搭載した PDA(Sony CLIE)の内蔵メモリに記憶させるとともに、特定小電力無線によるテレメトリーを行った。レース中は伴走艇が 30~100m くらい離れてボートを追跡するが、この伴走艇中でデータを受信した。

## 5.2. 制御アルゴリズム

本ソーラーボートのシステムにおいて、自動制御を要するのは、ラダー角及びソーラーパネル用 DC/DC コンバータのパルス幅、バッテリー用 DC/DC コンバータのパルス幅の 3 つになる。それぞれの制御アルゴリズムは確実かつ安定に動作することを目指して、単純なものを採用した。制御間隔が各種のセンサーの出力間隔に依存するため、制御全体の流れは図 12 に示しめすような多重のループになっている。まず、各部の電圧及び電流をマイコンに搭載された AD 変換器によって計測し、ソーラーパネル及びバッテリーの DC/DC コンバータに送るパルス幅(デューティ比)を決定する。AD 変換に要する時間は 1 チャンネルあたり 0.1 ミリ秒のオーダーであり、このループの周期は 1 ミリ秒のオーダーであった。なお、パルスの周波数は 20kHz である。次に短い周期で行われるのは、ラジコン受信機からの信号の読み出しである。ラジコンは 2 チャンネルを使用し、1 つのチャンネルは自動走行・手動走行の切り替え及び手動走行時のスロットルの制御に用い、もう一つのチャンネルは手動走行時のラダー制御に用いる。ラジコン受信機はパルス幅変調された信号を出力するが、マイコンのタイマーによりこのパルスの幅を計測する。なお、このパルスの周波数は約 100Hz である。次に周期が短いのが、電子コンパスの方位出力であり、約 0.2 秒間隔である。方位が得られると、後述のアルゴリズム

によりラダー角を計算し設定する。GPS 受信機の出力間隔は約 1 秒であり一番長い。GPS 受信機からは現在位置(緯度、経度) 速度及び進行方向が得られる。

自動航行時のラダー角の制御は図 13 に示すように、まず GPS 受信機で得たボートの座標と、現在の目標点(WP)の座標から目標の方位  $\phi$  を求める。次に、目標の方位  $\phi$  と電子コンパスで得た現在の方位  $\theta$  の差  $\beta$  に応じたラダー角  $\delta$  を取って目標点に向かって方位を修正する。電子コンパスの精度の問題などから角速度を求めるのが困難であったため、ラダー角  $\delta$  は  $\beta$  に比例するという最も簡単な比例制御を行うこととし、ゲインを実験により調整した。なお、最大ラダー角は 30 度程度なので、方位偏差  $\beta$  がある値以上のときは取り得る最大角を取るようになる。

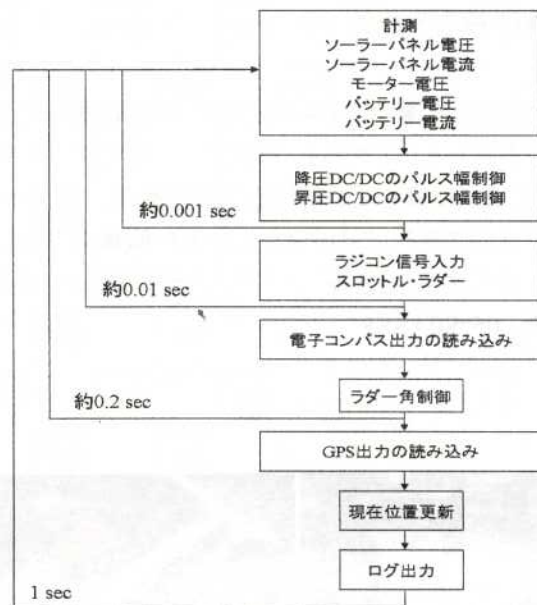


図 12 制御プログラムの構造

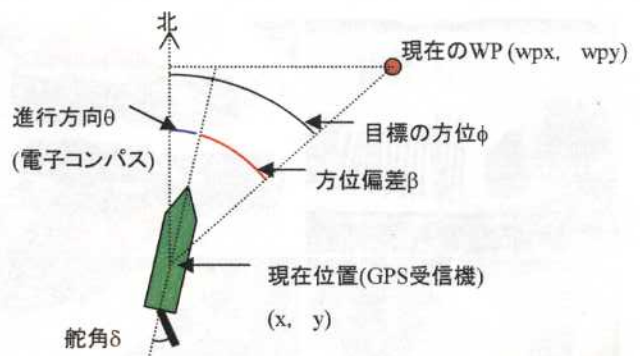


図 13 WP に向かって方位を取る方法

### 5.3, 自動走行

図 14 は実際のレースコースである。このコースを土曜日、日曜日と2回走り、2レースの順位点を合計して総合順位が決定される。図 15 は 2004 年及び 2005 年のレースにおける東大チームのボートの軌跡である。簡単なラダー制御法ではあるが、針路は安定し B 点においても、オーバーシュートすることなく速やかに進行方向を変えていることが分かる。2004 年度のレースにおいては、針路が目標 WP 方位から 5 度から 10 度くらいずれており、WP に近づくとつれて修正していく傾向が見られた。この原因は、電子コンパスのキャリブレーションが不十分であったこと及び風と波、流れによる外乱があること、ラダーの中立位置がずれていたことなどであるが、その中でも電子コンパスの誤差の影響が最も大きかったと考えられる。対策として、2005 年度のレースにおいては、電子コンパスの出力を使用しないで、GPS 受信機が出力する速度ベクトルの向きを使用してラダー制御を行った。

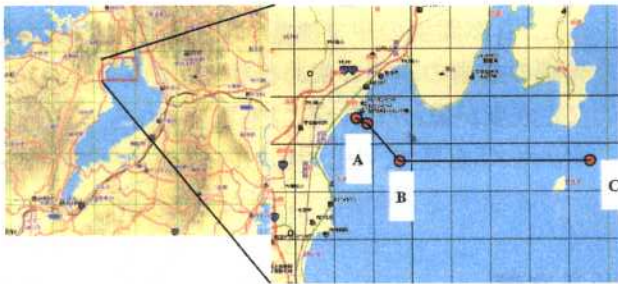


図 14 レースコース

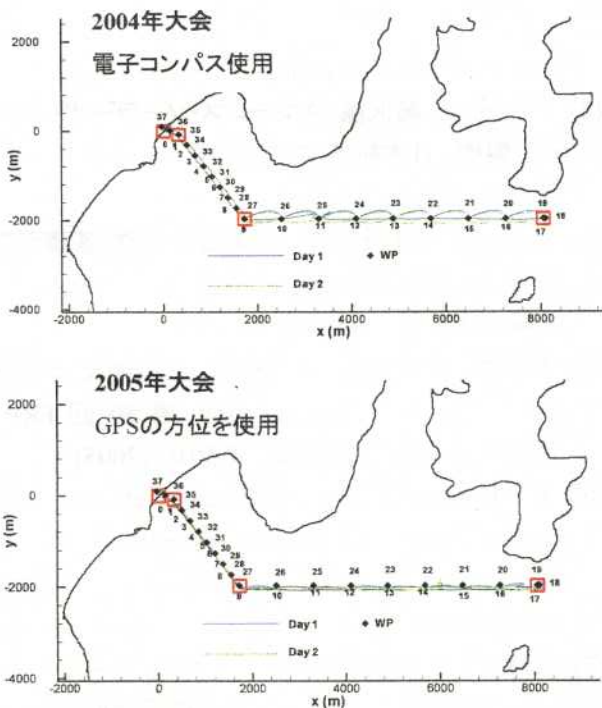


図 15 実際の航行軌跡

GPSによる方位計測は、計測間隔が1秒と大きいこと及び遅れがあること、前進速度が無いときには計測できないことなどの短所があるが、一方でキャリブレーションが不要という大きな長所がある。実際のレースの結果を見ると、1秒の計測間隔と遅れは船体の操縦運動の時間スケールに対して十分小さく、実質的にほとんど問題にならないことが分かった。

また、3~5m/s というボートの速度において、十分な精度の方位計測が出来ることも確認された。衛星からの電波が受信できないときには方位計測ができないことも GPS による方位計測の短所であるが、湖上は GPS の受信条件が非常に良く、常に十分な数の衛星が捕捉出来るため、レースにおいては問題とはならなかった。

### 5.4, DC/DC コンバータ

次に DC/DC コンバータの制御について述べる。ソーラーパネルとモーターの間には降圧型の DC/DC コンバータにおいて、MPPT(Max Power Point Tracking)制御をおこなった。最大出力点を追尾する方法は何通りかあるが、今回は目標電圧を定める方法を採用した。<sup>[5]</sup>これは、太陽電池の出力特性が変化した場合でも、最大出力点電圧と開放電圧の比がほぼ一定であるという性質を利用したものである。実測によると最大出力点電圧は開放電圧の約 81%であったので、レース中、1000 秒に一度開放電圧を計測し、ソーラーパネルの出力電圧がその 81%になるように制御を行った。一方、バッテリーは電圧がモーターの動作電圧よりも低いため、昇圧型の DC/DC コンバータを介してモーターに接続する。昇圧型のコンバータは、バッテリーの出力電流が一定値となるような制御を行う。

製作した DC/DC コンバータはチョップパ型と呼ばれるもので、入力電圧及び電流を  $V_{in}$ ,  $I_{in}$  とし、出力電圧及び電流を  $V_{out}$ ,  $I_{out}$ 、入力パルスのデューティー比を  $d$ 、効率を  $\eta$  とすると、降圧型のコンバータでは、

$$V_{out} \approx dV_{in}, \quad V_{out} I_{out} = \eta d V_{in} I_{in} \quad (1)$$

となり、昇圧型のコンバータでは、

$$V_{out} \approx V_{in}/(1-d), \quad V_{out} I_{out} = \eta d V_{in} I_{in} \quad (2)$$

となる。この関係とソーラーパネルの特性を合わせると、出力特性は図 16 のようになる。さらに、モーターの特性を合わせて考えると、デューティー比  $d$  とソーラーパネル出力電圧は図 17 に示したような関係になる。

実際のデューティー比の制御は、以下のような単純な比例制御を行ったが、問題なく動作した。

$$\Delta d = G(V_m - V_t) \quad (3)$$

$\Delta d$  はデューティー比の変化幅、 $V_t$  は目標電圧、 $G$  はゲインで正の定数である。ゲインは実験に基いて定めた。バッテリー用のコンバータについては、電流センサーの出力に基づき、バッテリー電流値を一定にする制御を行うが、同様に実験により定めたゲインにより比例制御を行った。

これらの電力制御は、日照の変化やバッテリー状態の変化に対応して行うものであるが、その変化の時間スケールは動力系の応答時間と比べると十分長いいため、安全のためゲインを小さくしても追従性が問題となることはないことがレースの結果から確認された。

## 6. レース結果

2004年度のびわ湖クルーレス・ソーラーボート大会は2日間とも天候は晴れで風、波ともにほとんどなく最高のコンディションであった。初日のレースでは有力各チームにそれぞれトラブルがあってタイム的には非常に際どい勝負となったが、主催者の計時により東大チームが1位と確定した。各チームとも初日にトラブルを出し尽くしたのか、同様のコンディションで行われた2日目のレースでは上位チームに大きなトラブルは無く、艇速の差がそのまま結果に表れた。順位は初日と同じで、東大チームのレース時間は約90分であり、2位のチームとのタイム差は約10分であったため、10%程の速度差があったものと思われる。初参加のレースを終わってみると、速度については満足できるものであったが、駆動系の信頼性や波浪中での安定性に不安が感じられた。

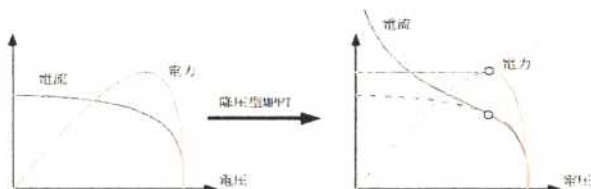


図 16 DC/DC コンバータの出力特性

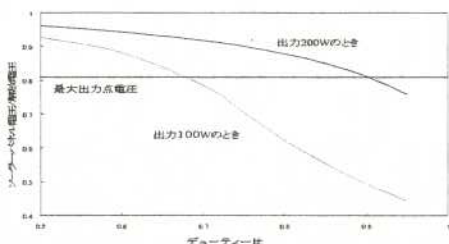


図 17 コンバータのデューティー比と出力電圧

また制御システムについても前述の通り目標に向かってやや斜めに進む傾向があるため、最短経路から1割程長い距離を走っていたことが改善点と挙げられた。

2度目の出場となった2005年のレースには前年度優勝艇である“EVE”とSES型“SPASES”の2艇をエントリーしたが、駆動系のトラブルにより“EVE”の方は残念ながらリタイヤに終わった。一方の“SPASES”は前後のスカートに不具合が発生したものの幸い応急処置によって走り続けることが出来、無事に2日間のレースを1位のタイムで完走して優勝を飾った。

## 7. おわりに

出場した2回のレースでは東大チームが運良く優勝したが、日照や波などの条件が異なれば別のチームが勝っていた可能性もある。今後は、参加チームのレベル向上に合わせ、より難易度が高いコースで制御の要素を大きくするなど、レースを盛り上げるための工夫をする余地もあり、様々な方向への発展が考えられる。

また、自然環境の中で機能する艇を作るためには、最先端の技術のみ追い求めるのではなく、むしろ総合的な完成度が備わっていることも重要である。

本テキストを見て、少しでもクルーレス・ソーラーボートレースの面白さを理解していただけたら幸いである。

## 参考文献

- (1) <http://www.biwa.ne.jp/~solar/index.html>.
- (2) 川村隆文, 黒田洋司, 鶴沢潔: 第8回びわ湖クルーレス・ソーラーボート大会参加記, Technomarine Vol. 884, 240/244 (2005)
- (3) 川村隆文, 鶴沢潔: クルーレス・ソーラーボートの設計と製作, 日本航空宇宙学会第36期年會講演會講演集, 65/68 (2005)
- (4) 鶴沢, 複合材料を用いた構造の製作(基礎から応用まで), 電気自動車製作講習會プログラム, 日本太陽エネルギー学会, (2005)
- (5) 鶴沢潔, 村山英晶, 影山和郎, 川村隆文: クルーレス・ソーラーボートの設計と製作, 第50回FRP総合講演會・展示會講演集, 102/103 (2005)
- (6) K. Koyama: "On Application of the Lifting Surface Theory to Marine Propellers," 13rd Symposium on Naval Hydrodynamics, Tokyo, 13/40 (1980)
- (7) 安藤友二: 太陽電池の動作原理とソーラー・カーへの応用例, トランジスタ技術 2002年11月号, 207/216 (2002)



## 関連書籍・購入サイト

(1)だれでも使えるFRP-FRP入門:強化プラスチック協会  
幅広くFRPとは何かから材料・製造技術の解説までを  
全く複合材料を知らない人でも理解できるようにまとめ  
たもの。

(2)FRPポケットブック:強化プラスチック協会  
製造・成形よりの技術を要約した手帳タイプの小冊  
子。国内の成形加工機や材料メーカー、複合材料の  
商品まで殆ど網羅されている。材料調達や専門用語  
の理解にまで役立つ。

(3)複合材料活用事典:日本複合材料学会編  
複合材料のアプリケーションの説明から理論的な設計  
手法までを網羅している。複合材料がどういう分野、ど  
ういうところに利用されているかを眺めるだけでも楽し  
める内容。

(4)High-Performance COMPOSITES/ COMPOSITES  
Technology: [www.compositesworld.com](http://www.compositesworld.com)  
複合材料に関する情報専門誌。一般的成形技術/材  
料から航空宇宙までの幅広いピックスを掲載。毎月  
交互に発行。無料。

(5)Professional BOATBUILDER: [www.proboat.com](http://www.proboat.com)  
US発行のおもに造船業向け、特に小型艇建造者む  
けの専門誌であるが、FRP成形・設計に関する記事も  
多い。Wetレイアップの記事が多いが大型成形物の参  
考になる。隔月で発行、当然無料。

(6)European Boatbuilder :  
[www.europeanboatbuilder.net](http://www.europeanboatbuilder.net)

上記の雑誌の欧州版。欧州は複合材料の適用が積  
極的だが、それは長いボートビルディングの歴史の賜  
物だという事が理解できる。年4回発行これも無料。

(7)GHクラフト社: [www.ghcraft.com](http://www.ghcraft.com)  
ソーラーカー製作に必要な材料・消耗品は殆ど購入  
する事が可能で、さらにはハニカムパネル、アングル  
材などの1次成型品を購入する事も可能。

(8)Air Craft Spruce & Specialty Company :  
[www.aircraft-spruce.com](http://www.aircraft-spruce.com)

エアクラフトスプルース社は、アメリカの自作飛行機の  
材料通信販売店。ここのカタログがあると何かと便利、  
クレジットカードで簡単に購入可能。小型航空機の部  
品から複合材料一般まで殆どのが揃っている。  
CFからエポキシ接着剤まで少量の購入には便利。

(9)West Marine Master Catalog:  
[www.westmarine.com](http://www.westmarine.com)  
艇体補修用としてWESTsystem等のエポキシ樹脂等  
を扱っている。小物から遠征に便利なキャンプ用品ま  
で購入可能。カタログはFREE。

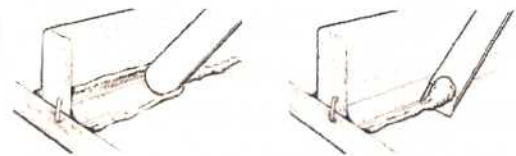
## その他

最後に、ウェット作業に必要な工具・道具類について  
気づき事項を以下に挙げる。

(1)刷毛: FRP積層用として毛の腰の強いものがひ  
必要。塗装用の刷毛は柔らかすぎる。むしろ、100円ショ  
ップで手に入る多少質の悪い塗装用刷毛に具合が良  
い物がある。

(2)はさみ: CF繊維やKV繊維を切るためには砥石は  
を使わずグラインダーを利用して刃先にグラインダー目  
が残るようにすると繊維が刃先で滑って逃げないので  
良く切れる。

(3)へら: パテを塗布する以外に樹脂の含浸・かき落と  
し時にも使用する。広い面にパテを塗布する時は波形  
のへらを使用してパテを筋状に上げ、へらの角度を倒  
したり起こしたりして筋の高さを変えて塗布量を調節す  
る。下敷きや、ゴム板などを使用するのも良い。パテの  
フィレット処理のためには図のようにフィレットの大き  
さにあわせてR5~R20ていどのへらを用意しておくよ  
い。また、フィレットからはみ出したパテは平らなへらで  
掬い取ってやるとマスキングテープを用いなくとも綺麗  
にフィレット処理が出来る。



(4)洗い桶: 刷毛が全て納まる高さの密閉容器だと刷  
毛の漬け置きも出来て都合が良い。これも100円均一  
店などで手に入る。図の様にフタつきの容器の中にさ  
らにカップを置いて2槽として使用すると洗い用と保管  
用に使い分けられて便利。



## 筆者紹介

鶴沢 潔(うざわ きよし)

東京大学工学系研究科環境  
海洋工学専攻、助手。

本田技術研究所、GHクラフト  
を経て現在に至る。量産車開  
発では空力性能を、GHクラフト  
においては数多くのCFRP

ソーラーカー・ボートの設計・  
製作に関する。現在量産車や大型舟艇へのCFRPの適  
用について研究中。







I HPV A用論文

新HPV用トラック軌道型ペダリング

SDV 駆動機構の性能評価

岩月 徹

(産業技術総合研究所 主任研究官)

織田紀之

(オーテック 株式会社 代表取締役)

## 1. はじめに

ペダルが円形軌道を描く従来の駆動機構においては、運転者の消費エネルギーは必ずしも有効に機械に伝達されていない。体重がうまくペダルに作用し、しかもペダルが力の方向に沿って直線的に動き、運動エネルギー保持と遅滞のない踏み込みのため上下端部で周回する機構が実現できれば、運転者から機械へのエネルギー変換効率が大幅に増大する可能性がある。

オーテック有限会社では、このような駆動機構を有する高出力自転車(SDVと呼称)の開発を1998年から着手し、2年間、3次に渉る試作の結果、第4次モデルを完成した(2000年)。産業技術総合研究所ではこの第4次モデルを用いて、SDV駆動機構と従来型円形ペダリング機構とのエルゴメータによる比較評価試験を行い、二人の被験者について低心拍数域においてSDV駆動機構の出力が従来型円形ペダリング機構駆動機構に比して1.5-1.8倍、高心拍数域においても1.1-1.15倍に達するというデータを得た(2000年)。

以下にSDVの概要と性能評価試験結果について紹介する。なお、本技術については早稲田大学人間科学部でも研究がなされており、同大学のご好意により、本論文のため一部のデータの提供を受けたので合わせて紹介する。

## 2. 従来の駆動機構におけるクランクへの力の伝わり方

図1、2は米国ナショナルチームのレーサーを被験者としたデータで<sup>(1)</sup>、図1は400W、118rpmで、図2は350W、118rpmでペダリングしている状態で得られたものである。図1において、ペダル踏力の大きさは矢印の長さで、力の方向は矢印の方向で示されている。ペダル踏力はペダルの踏み込み期間中は概ね鉛直下向きとなっている。図2はペダル踏力の回転方向成分(有効分力)の変化を示すもので、面積Sは出力に比例する。

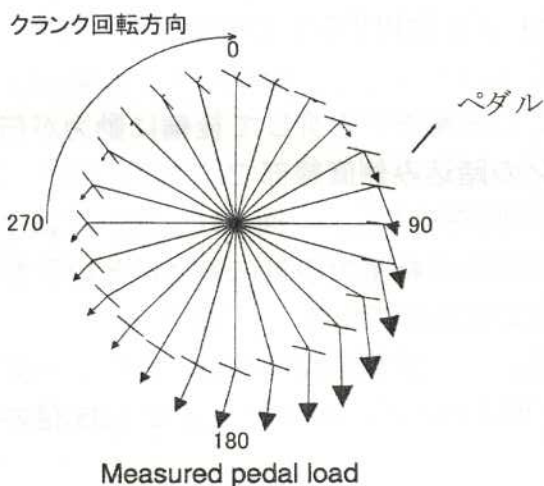


図1 従来車のペダル踏力

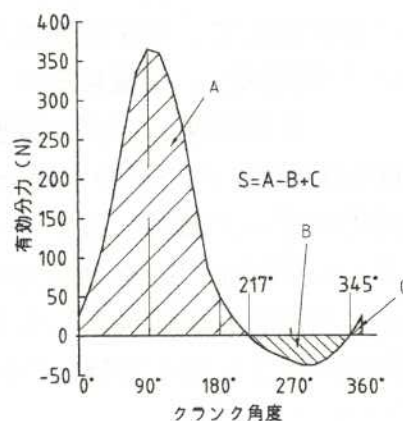


図2 従来車の有効分力

図1において60°-240°の範囲で大きなペダル踏力が見られるが、図2に

示されるように効果的に有効分力となっているのは90°を中心とする狭い範囲である。

### 3. SDV 駆動機構と特徴

図2における有効分力のカーブが三角形ではなく、台形になれば有効仕事の面積Sは増大するわけで、このためペダルの軌跡をトラック軌道状とすることを考えた。図3は自転車に適用したSDV駆動機構を示したものである。

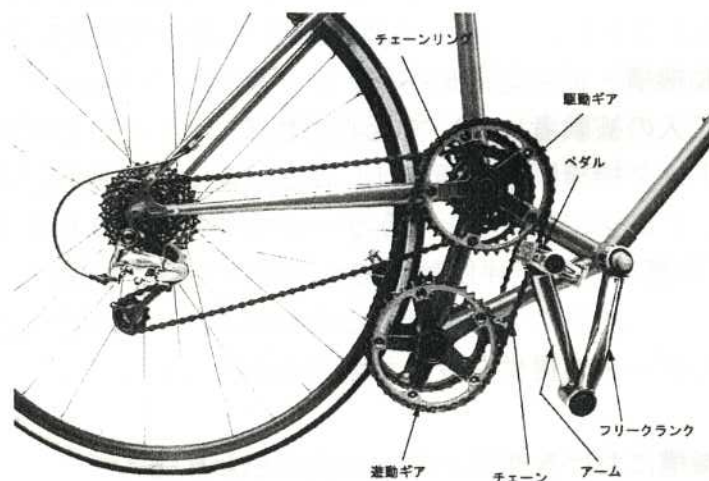


図3 SDVの駆動機構

図3において、ペダルの軸は直接チェーン（ペダル駆動チェーン）に連結され、このチェーンは上下に配置された駆動ギアと遊動ギアに掛け渡されている。このようなユニットが左右に設けられ、左右の駆動ギアは後輪を駆動するチェーンリングと連結軸を共有している。左右のペダルは1/2位相ずらして配置してある。

ペダルに力を加えて、ペダル駆動チェーンを周回させると、駆動ギアと同軸のチェーンリングが回転し、後輪駆動チェーンおよび後輪ギアを介して後輪に動力が伝達される。この結果、ペダル駆動チェーンの踏込み側直線部ではペダル踏力は出力に100%有効で、ピークの有効分力が一定期間持続する。図4は、図3におけるペダル踏力のピーク値が、図2で示される従来の自転車での値に等しいという前提で、ペダル1周回中での有効分力の変化を求めたものである。横軸のペダル位置はペダル1周回を100%として示している。計算過程は省略するが、ペダルの平均周速が図2と図4で等しいとすると、図4の方が、図2に比して1.35倍の出力（パワー）となる。

このようにSDVでは、ピーク負荷が一定期間続くので、従来の自転車のようにサドルに深く腰掛けるのではなく、いわば浅く腰掛けることによって、体重が足を介して容易にペダルに作用できるようサドルポジションを決めている。

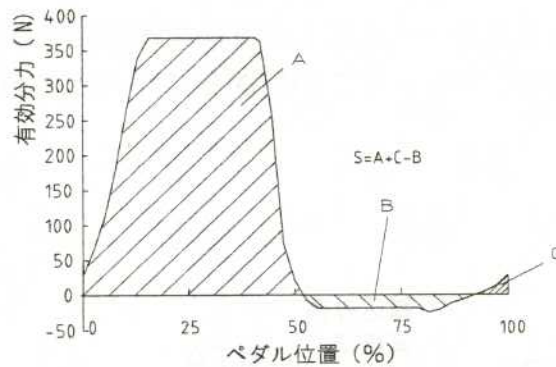


図4 SDVの有効分力(想定)

#### 4. ペダル踏力測定データ

図5 および図6 は、早稲田大学人間科学部スポーツ科学科にて得られた夫々従来型円形ペダリング機構とSDV駆動機構のペダル踏力および有効分力を示すグラフである。いずれも200W、60rpmでペダリングをしている時のデータである。出力はエルゴメータ、踏力は圧電素子によって計測されている。

図5 および図6 において、横軸のペダル位置はペダル1周回を100%として示している。従来型円形ペダリング機構でのペダル周長は1068mm(クランク長170mm)で、SDVのペダル周長は889mmである。図5において、従来型円形ペダリング機構ではペダル踏力と有効分力のカーブがペダル位置23%(図2のクランク角度83°)でしか接していないが、図6に示されるSDVの場合、ペダル踏力と有効分力のカーブが、ペダル位置14%~42%の間、接している。これは、図4のピーク値の範囲、すなわちペダル駆動チェーンの直線域と合致している。

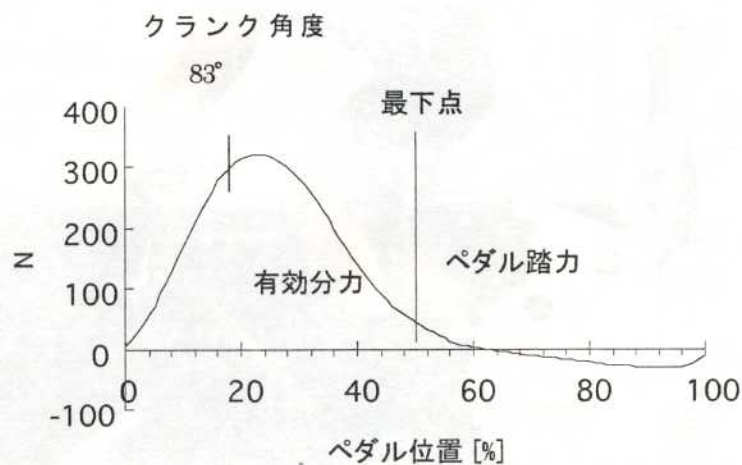


図5 従来型円形ペダリング機構のペダル踏力と有効分力

図6 を詳細に見てみると、ペダル踏力は直線域の始点ではまだピークには至らず、少し遅れてピークレベルとなり、そこからさらに増大して直線域の終点近傍でピークとなっている。

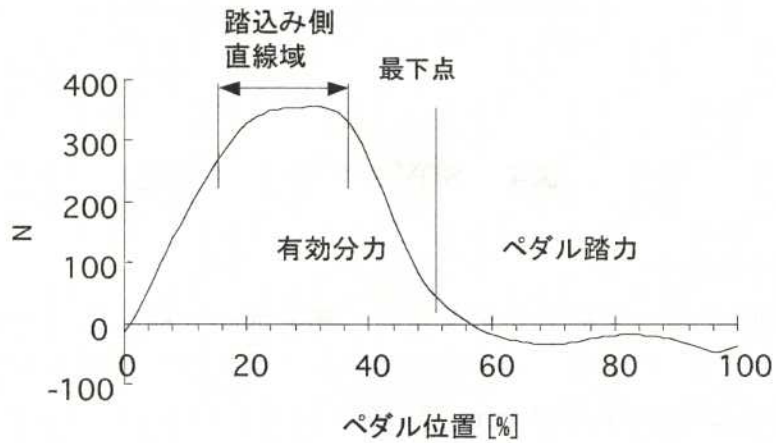


図6 SDV のペダル踏力と有効分力

従来型円形ペダリング機構では、膝角度が小さく力が十分出ないクランク角度  $83^{\circ}$  近傍で有効分力がピークとなっているが、SDV では力を出しやすい膝角度の大きい領域でペダル踏力がほぼ100%有効分力となっている。

これらのペダル踏力測定からも、踏込み時の直線区間の有効性が示されたものと判断される。図7 は早稲田大学における試験状況を示す写真である。後輪はエルゴメータのフライホイールに置き換えられている。

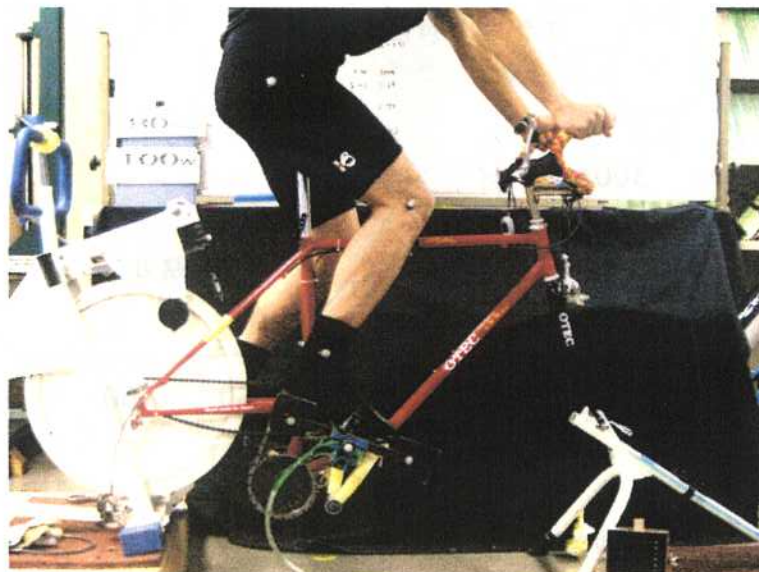




図 7 ペダル踏力ベンチテスト (提供: 早稲田大学人間科学部)

#### 5. 産業技術総合研究所におけるエルゴメータによる性能評価

産業技術総合研究所では、SDV 駆動機構と従来型円形ペダリング機構の性能比較に当たり、心拍数を評価指標とした。人間が力学的パワーを発生している時に、人間側の負担度を評価するには通例、心拍数か酸素消費量が用いられる。この2つの量は、ほぼ比例する関係にあるのでどちらを用いてもよい。今回は計測の容易さと呼気計測マスクの装着が不要で呼吸が楽という点から心拍数を評価指標とした次第である。

図8、図9は産業技術総合研究所でのエルゴメータによるウォーミングアップ後の心拍数の安定した2分間の試験データをプロットしたもので<sup>(2)</sup>、SDV 駆動機構と従来型円形ペダリング機構との性能比較試験結果である。横軸は被験者の心拍数、縦軸は出力を示す。試験では、目標心拍数に対して、出力が最大となることが予測されるエルゴメータ負荷荷重を選んで実施する。被験者は、その目標心拍数からできるだけずれないようにケイデンスでペダリングを行なう。さらに同じ目標心拍数に対して若干異なるエルゴメータ負荷荷重で試験を行い、出力が最大となるエルゴメータ負荷荷重を特定する。その時の試験での平均ケイデンスが、その出力および心拍数に対する最適値となる。図8の被験者は普段あまり自転車に乗っていない男子大学生(ノンサイクリスト)、図9の被験者は長年毎日1時間程度ロードバイクに乗っているサイクリストである。いずれもデータが安定するまで約2週間を要した。SDV 駆動機構の場合には、習熟するにつれて同一心拍数に対して最適なエルゴメータ負荷荷重が増加する傾向が見られた。

図8において、SDV 駆動機構の出力は、エルゴメータ負荷荷重が大きい場合(ケイデンス21.5-35.1rpm)には、心拍数100拍/分で比較すると従来型に比して約1.8倍、心拍数170拍/分においても従来型に比して約1.15倍となっている。エルゴメータ負荷荷重が小さい場合(ケイデンス20.3-35.7rpm)には、若干出力が低下する傾向が見られる。従来型のケイデンスは22.6-65.6rpmとなっている。

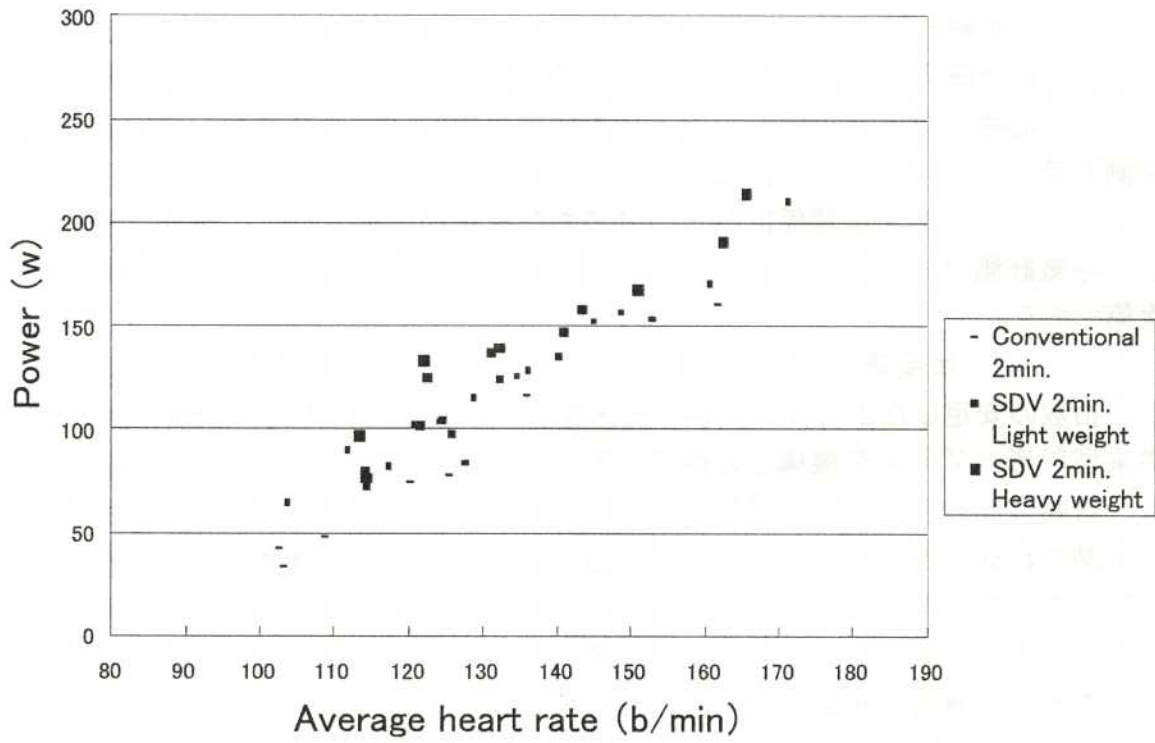


図8 SDVと従来型との性能比較(ノンサイクリスト)

図9において、この被験者(サイクリスト)の場合、SDV駆動機構の出力はエルゴメータ負荷荷重の大小にかかわらず同一心拍数に対してほぼ同じ値を示し、従来型に比して約1.2-1.5倍となっている。

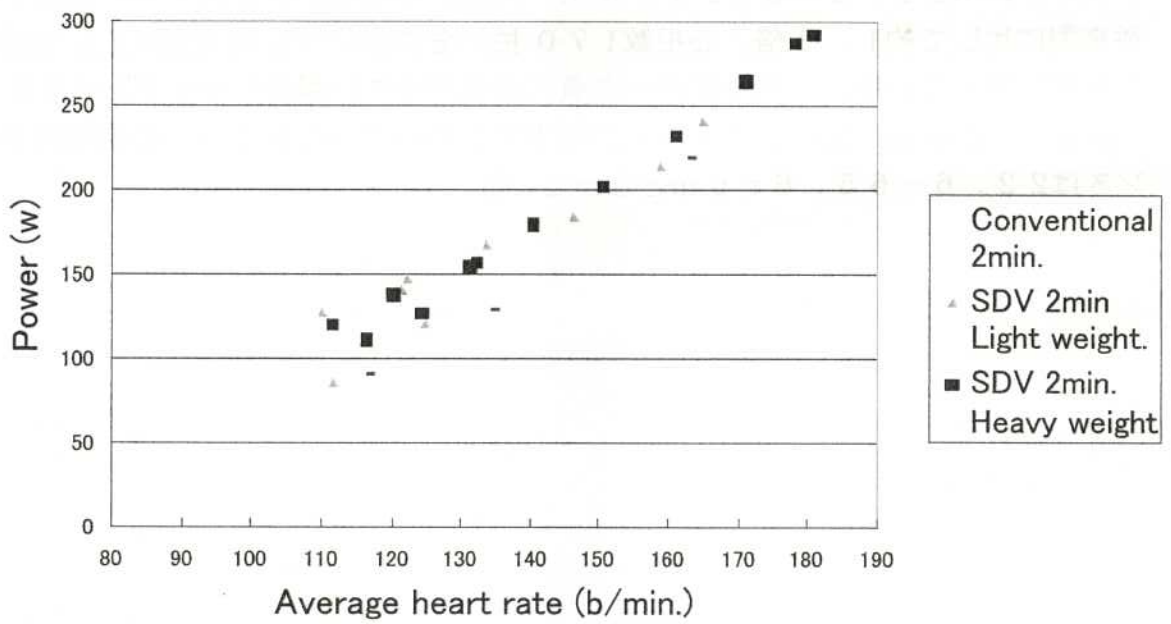


図9 SDVと従来型との性能比較(サイクリスト)

ケイデンスについては、従来型で35.3-88.9rpm、SDVでエルゴメータ負荷荷重が大きい場合20.8-38.0rpm、エルゴメータ負荷荷重が小さい場合20.7-42.9rpmである。

## 6. あとがき

従来型の円形ペダリング機構では、ペダル踏力は少なくともペダルの踏込み期間中は概ね鉛直下向きとなっており、回転には関係のない半径方向にかなりの角度範囲で力が作用している。この力成分は力学的には何らの仕事をしないので、ペダルに力を加えている人にとってはエネルギーの浪費となっている。この問題を解決するため、産業技術総合研究所とオーテック有限会社は共同研究によってSDV駆動機構の評価と改良および応用開発を進めてきた(2000年以降)。本論文で、心拍数を評価指標とするかぎり、当初想定以上にSDV駆動機構が人から機械への動力伝達装置としてエネルギー伝達効率が高いことが示された。

なお、心拍数や酸素消費量による評価には次の問題点がある。すなわち、従来型円形ペダリング機構を評価する場合、心拍数もしくは酸素消費量を用いると、それらが最小となるケイデンスは50-60rpmとなるが、実際のレース等では、80-100rpmのケイデンスが好んで使われている。このことからケイデンスが80-100rpmの時に、最適となる人間の体の指標があることが予想されるが、それが何であるかは未だ把握されていない。そのため現状では心拍数か酸素消費量による評価が一般に行なわれている。

SDV駆動機構はフェアリング付きリカンベントに適用すると、円形ペダリング機構を搭載したものに比してフェアリングをより流線型に近づけることが可能になると考えており、駆動機構そのものの効率向上と流体抵抗減少の二つが同時に期待できる。誰もが楽に時速30km程度の速度を出すことができ、これに安全性と快適性を加えることが可能となれば新たな交通手段、交通システムの出現につながる。このような交通手段が実現され、多くの人々がこれを利用するようになると、環境と省エネルギーと人々の健康促進・福祉コストの低減に大きな貢献が期待される。最高性能のHPVを検証するため、HPVの世界最速レースに参戦することも視野に入れて、引続き開発を進めたいと考えている。

## 文献

- (1) Edmund R. Burke, PhD, HIGH-TECH CYCLING (P149-P154), (1996), Human Kinetics
- (2) 岩月 徹、織田紀之、自転車駆動機構の高効率化、No.01-22 ジョイント・シンポジウム 2001(日本機械学会他)、平成13年11月
- (3) 織田紀之、岩月 徹、高出力自転車の実現に向けて、日本機械学会誌、平成14年6月号

# 市販ペダルボート「エスカベード」

堀内浩太郎

ナウティクラフト社はエスカベードを含む6種類のペダルボートを製造、販売しています(21ページ)。一人乗りのスプライト、前後二人乗りエスカベード、横二人乗りのエンコア、そしてエンコアにはペダル電動両用、電動モデルなどもあります。いずれも大きなプロペラをベルト駆動するとともに、回転成形で作られ、キールには砂を入れてバラストにしています。回転成形とは、アルミの閉じた雌型にポリエチレンの粉末を入れ、外から加熱しながら型を回転させると、溶けたポリエチレンが壁に着くので型を冷やすと船が形になるという作り方です。従ってエスカベードの場合で重量が325ポンド(148kg)と軽くはありません。どうしてもトレーラーが必要なボートです。そのかわり不思議なほどスルスルと走る「ウォーターバッグ」の性質を受け継いでいることと思います。日本に向くかどうか判りませんが、不思議な走りのボートでどのぐらいアメリカで売れているのか知りたいところです。

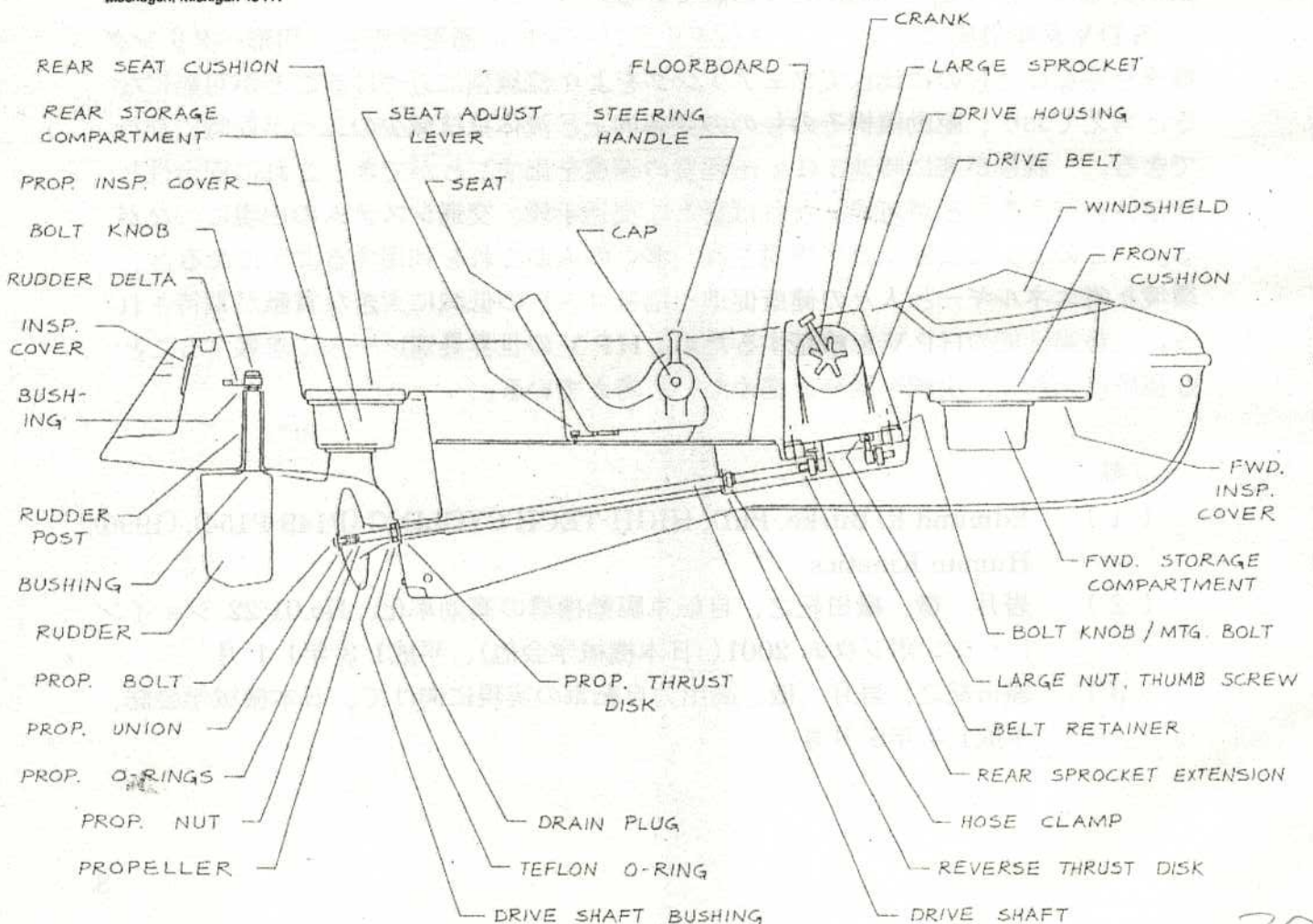
下に内部構造、続くページにモデルの説明とスペックを載せました。また21ページ以降の下にはナウティクラフト社のURLがありますのでホームページもご覧下さい。

## エンコアの構造

Nauticraft Corporation  
5980 Grand Haven Road  
Muskegon, Michigan 49441

ENCORE PEDAL CRAFT

REV. 6-01





- What's New
- Propulsion
- Maneuverability
- Safety
- Specifications
- Options
- Prices

- Our Company
- Links
- Contact Us
- Home

**"Have had waves up over the windscreen but not a drop in the cockpit!"**

- Bruce, Fairfax, VA

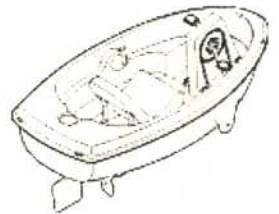
## Models

All three pedal boats feature form-fitting recumbent style seats that are fully padded. They adjust to 11 positions fore and aft to accommodate all leg lengths, and are so comfortable that extended excursions are thoroughly enjoyable. One important feature about Nauticraft boats is that they are "dry" pedal boats. There's no need to worry about getting wet - you can wear street clothes. But, if you want to swim off the Escapade and Encore, it's easy to climb back in due to molded-in swim platforms and reboarding handholds.

### **SPRITE** | [see boat](#)

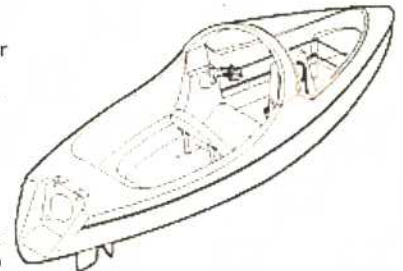
The Sprite is a versatile one-person runabout. There's space around the cockpit to store safety gear, personal items, and your flip-flops will slide under the seat. Like the Encore, the Sprite also has a self-draining cockpit and a weed clean-out hole. Pedaling the Sprite is a perfect way to exercise while enjoying the ever-changing view of the water and sky and yet avoiding the dangers of cycling on the roadways. Its single seat gives you the perfect excuse to "go it alone".

Kids absolutely love the Sprite, which is economically priced so that they each can have one of their own. The kids wind up inventing their own version of games using beach balls, water soaker guns, walkie-talkies, etc. These boats are tough enough to take the rough and tumble contact that is bound to happen when the kids are having a good time.



### **ESCAPADE** | [see boat](#)

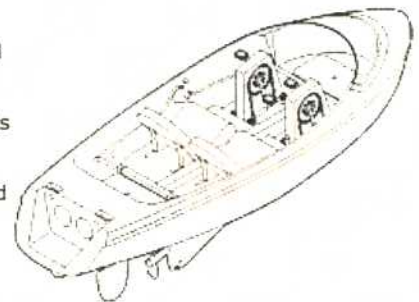
The Escapade's cockpit has space for the pedaler as well as one or two passengers and/or traveling gear and supplies. Extra storage areas have been thoughtfully included in the bow, under the rear bench seat, and under the operator's seat. There's plenty of space for mooring gear, safety equipment, personal items, as well as food and beverages. A "dry shelf" in the front is protected from inadvertent spray by the large windshield and is intended to hold towels, blankets, camera, or radio.



### **2005 ENCORE MODELS**

Encore's model line has been expanded to add electric power. The generous size and configuration of the Encore hull retains the convenience of a four-person boat, yet permits the adaptation of battery-electric power for a variety of model combinations. The electric motor drives are time proven trolling rigs used by the recreational fishing industry. The versions chosen are a submersible type with an in-line mounted propeller. They have a mounting bracket that allows direct bolt fastening up against the bottom of the Encore.

This is important because the location is between the Encore's two molded-in keels where it is protected from inadvertent contact. The operation of the motors requires 12-volt deep cycle marine batteries, which are readily available from local marine supply stores. All versions come with their own on-board chargers for simple 120-volt plug-in battery regeneration. All Encore models, recently converted to a single rudder, now have a single steering location.



### **ENCORE I - Pedal** | [see boat](#)

The original pedal driven Encore is now known as Encore I.

### **ENCORE II - Pedal/Electric**

Retaining the pedal drive system of the Encore I, this model features a 35 pound thrust electric drive for supplemental power. As mentioned above, the motor with its direct mounted propeller is located down between the Encore's keels. The necessary electrical support components, including the single 12-volt battery, are hidden away in the Encore's front storage compartment. A compact box controller with forward-reverse

switch and twist-knob speed control is conveniently positioned between the Encore's front seats.

### **ENCORE III - Electric**

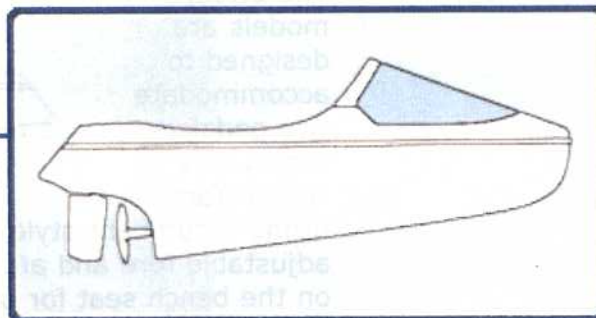
This model converts the Encore to a true all electric boat. The elimination of the pedal drive system gives a spacious interior for comfortable luxurious cruising. The powerful 55-pound thrust underwater motor is mounted in the same position as the motor on the Encore II. Power is provided by two 12- volt, deep cycle marine batteries giving a 24- volt power package. These batteries are nestled one each under the Encore's front seats. For added ingress-egress ease these seats have been raised 4 inches. The converter and battery charger are located in the Encore's rear storage compartment. Like the Encore II, the controller is located between the front seats. There is also a battery charge meter, which is the equivalent of a fuel gauge in a car. Convenience items such as a bimini top, beverage holders, covers, etc. are standard with this model.

 [prev](#)

[next](#) 

---

[home](#) | [about nauticraft](#) | [what's new](#) | [models](#) | [propulsion](#) | [maneuverability](#) | [safety](#) | [specifications](#)  
| [our company](#) | [links](#) | [regional sales representatives](#) | [contact us](#)

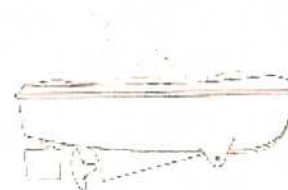


**Specifications**

- What's New
- Models
- Propulsion
- Maneuverability
- Safety
- Options
- Prices

- Our Company
- Links
- Contact Us
- Home

The **Sprite** is a single person craft that offers tight, quick maneuverability. A smaller version of the Escapade concept, but we've added two molded-in fins near the bow for easy "beachability".

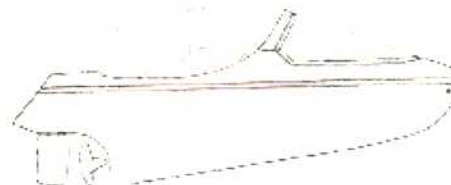


<b>Hull Construction</b>	Rotomolded polyethylene
<b>Drive Unit</b>	1:4 ratio, twist belt design
<b>Propulsion</b>	15" two-blade propeller
<b>Length</b>	7' 9"
<b>Beam</b>	3' 10"
<b>Draft</b>	1' 6"
<b>Weight</b>	170 lbs.
<b>Speed Potential</b>	4.1 mph

**"One of the best things about going out is hearing everyone tell me how 'Cool' the boat is and wondering where I got it."**

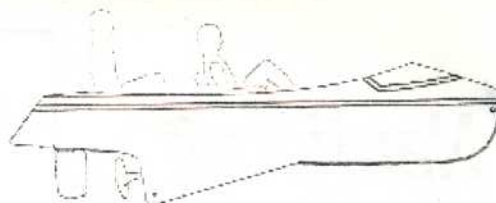
- Rick, Glendale, AZ

The **Escapade** model offers maximum protection from wind, waves and spray. The windshield arch also acts as a mounting header for optional bimini top - which gives added protection from sun and rain.



<b>Hull Construction</b>	Rotomolded polyethylene
<b>Drive Unit</b>	1:4 ratio, twist belt design
<b>Propulsion</b>	15" two-blade propeller
<b>Length</b>	12' 2"
<b>Beam</b>	4' 0"
<b>Draft</b>	1' 8 "
<b>Weight</b>	325 lbs.
<b>Speed Potential</b>	5.3 mph

The **Encore** models are designed to accommodate two pedalers sitting side by side in form-



fitting recumbent style seats that are fully padded and adjustable fore and aft. There is plenty of room in back on the bench seat for one or two passengers. The Encore features an auxiliary shelf in the bow of the boat that is suitable for holding a wide variety of items.

<b>Hull Construction</b>	Rotomolded polyethylene
<b>Drive Unit (2)</b>	1:4 ratio, twist belt design
<b>Propulsion</b>	(2) 15" two-blade propellers
<b>Length</b>	14' 2"
<b>Beam</b>	4' 11"
<b>Draft</b>	1' 9"
<b>Weight</b>	375-475 lbs.
<b>Speed Potential</b>	5.7 mph

[prev](#)

[next](#)

[^ top](#)

---

[home](#) | [about nauticraft](#) | [what's new](#) | [models](#) | [propulsion](#) | [maneuverability](#) | [safety](#) | [specifications](#)  
| [our company](#) | [links](#) | [regional sales representatives](#) | [contact us](#)