

第 2 章 ソーラーボート

本章では、ソーラーボートとはどのようなものであるかを説明し、大会規則を考慮した基本設計および使用した部品、機構等について述べる。

2.1 ソーラーボート

2.1.1 ソーラーボートとは

ソーラーボートとは、太陽光エネルギーを太陽電池により変換した電気エネルギーと補助バッテリーから得られるエネルギーを動力源として航行するボートである。

ソーラーボートに搭載できる太陽電池の面積は限られるうえ、その変換効率が低いため、使用できるエネルギーが限られている。一般に、真夏に太陽が一番輝いている時の太陽光エネルギーは $1[\text{kW}/\text{m}^2]$ と言われ、現在、市販の太陽電池の変換効率は $15[\%]$ であるから $1[\text{m}^2]$ あたり $150[\text{W}]$ ということになる。また、大会規則により太陽電池の最大出力はカタログ値で $480[\text{W}]$ までとされているが、これはあくまでも非常に条件の良い時の値であり、実際の出力は $300[\text{W}]$ 程度でしかない。

補助バッテリーも大会規則により制限されており、定格 $12[\text{V}]$ 、 $6.5[\text{Ah}]$ （20 時間率）の小型シール鉛蓄電池 4 個を使用できる。この補助バッテリーの容量は 1 時間率で $222[\text{W}\cdot\text{h}]$ （実験値）である。詳しくは第 4 章のバッテリーの性能試験で述べる。

なお、浜名湖大会では、1 時間の周回数を競う耐久レースと $200[\text{m}]$ の直線コースでの速度を競うスピードレース（以下それぞれ耐久レース、スピードレースとする）の 2 種目があり、両種目の順位により総合成績が決まる。

2.1.2 基本設計

ソーラーボートは、太陽電池と補助バッテリーから得られる限られたエネルギーで航行しなければならない。したがって、ゴールドenイーグルを設計するうえで大会規則を考慮し、以下の条件を基本設計として開発を行なった。

1. 海上運航時の安全性を考慮し、システム電圧は $24[\text{V}]$ とする。
2. 太陽電池を効率よく発電させるために MPPT を開発する。
MPPT: Maximum Power Point Tracker (最大電力点追尾装置)
3. 定格 $24[\text{V}]$ 、 $25[\text{A}]$ の DC モータを耐久レース用に 1 個、スピードレース用には耐久レース用と同型のものを 2 個並列使用する。
4. 船体抵抗の低減を図るため、全没逆 T 字型水中翼を採用する。
5. 船体の横傾斜を抑えるため、2 重反転プロペラ機構を採用する。
6. 水中翼船の航行時の安定性を高めるため定電力制御を行なう。
7. マイコンによる電力制御システムを開発し、自動航行を実現させる。

以下にゴールデンイーグルの電気系統および艇体概要、動力伝達装置について説明する。また、図 2.1 に駆動エネルギー構成図を示す。

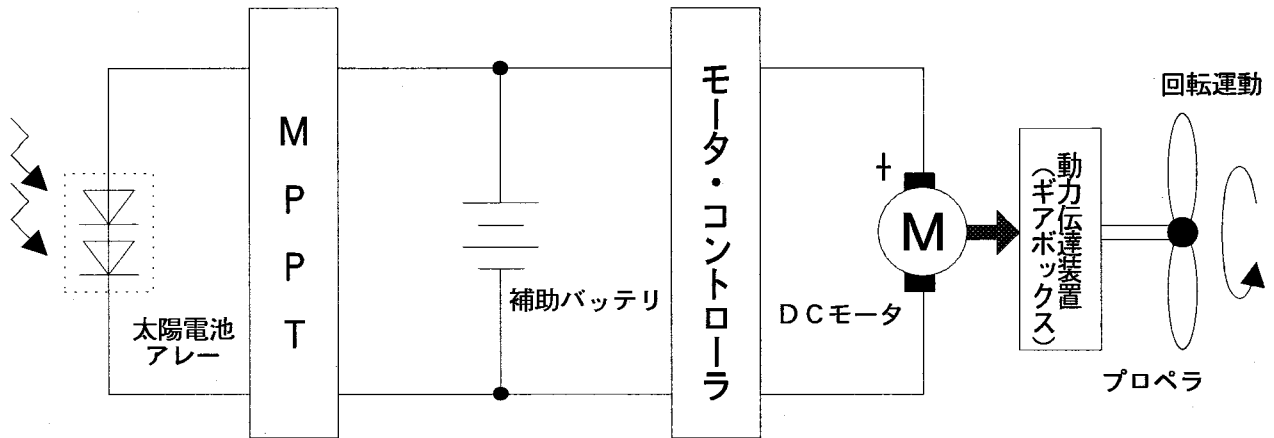


図 2.1 ソーラーボートの駆動エネルギー構成図

2.2 太陽電池

2.2.1 太陽電池の原理

太陽電池の材料は半導体である。一般に半導体に光が入射すると吸収され光と半導体を構成している物質との相互作用が起こりマイナス（-）とプラス（+）の電荷をもった電子と正孔が発生し、電流が流れやすくなったり、電気そのものが生じたりする。太陽電池は電子を引き付けるN型半導体と正孔を引き付けるP型半導体を接合したものである。図 2.2 に太陽電池の原理を示す。半導体中で発生したマイナスの電荷はN型半導体側へ、プラスの電荷はP型半導体側へ引き寄せられそれぞれ両電極部に集められ両電極間で電位差が生じる。そこで、両方の電極に負荷を接続すれば電流が流れ、電力が得られる。これが半導体の光電効果であり太陽電池の原理である。⁽¹⁾

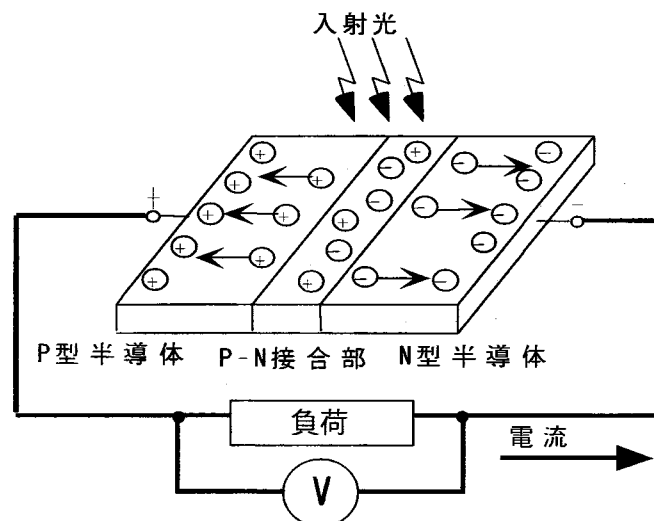


図 2.2 太陽電池の原理

2.2.2 太陽電池の特徴

太陽電池は光エネルギーから直接電気エネルギーに変換でき、通常の発電システムと比べると多くの特徴がある。その一方注意を要する点もあり、以下に述べる。⁽²⁾

1. 太陽光のエネルギーは無尽蔵

石油、石炭などの化石燃料には限界があるが、太陽光は半永久的であり、燃料代の必要がない。

2. クリーンなエネルギー源

石炭や石油などの化石燃料を燃やしたり、発電機を回したりすることがないので、環境を汚す排気ガスや有害物質は出さず、騒音もない。

3. その場で発電

一般の発電送電は、発電所と電気を使う場所が離れており、送電を必要とするが、太陽電池はその場で供給することができる。

4. 入射エネルギーが希薄

エネルギー密度が小さいため、大きい電力を取り出すためには比較的大きい面積を必要とする。

5. 気象条件

気象条件（天候の状態、気温、季節、昼夜）によって、出力が変動する。

6. 蓄電機能がない

光があたっている時しか発電せず、電気を貯えることはできない。夜や雨の日に電気を使用するならば、蓄電池と組み合わせる必要がある。

2.2.3 太陽電池の種類

太陽電池の種類はシリコン太陽電池、化合物半導体太陽電池、有機半導体太陽電池に大別でき、それぞれの特徴を表 2.1 に示す。

表 2.1 太陽電池の種類

種類	構造	特徴	変換効率[%]	価格
シリコン太陽電池	単結晶	高効率	15~19	高価
	多結晶	低効率	12~15	安価
	アモルファス	薄型・低効率	7~9	安価
化合物半導体太陽電池		高効率・高価	22	高価
有機半導体太陽電池		低効率	1以下	安価

* 変換効率は一般市販品の効率である。

一般に、太陽電池 1 枚はセル、そのセルを何枚か連結して 1 つのパッケージにしたものはモジュール、さらにそのモジュールを数枚組み合わせたものはアレーと呼ばれている。

2.2.4 太陽電池の出力特性

ゴールデンイーグルに搭載した太陽電池の出力特性について説明する。太陽電池は昭和シェル石油株式会社製のソーラーカー・ソーラーボートレース用薄型軽量太陽電池モジュール（単結晶シリコン）FL-136-SP-93を10枚、FL-336-SP-93を2枚使用した。表2.2は放射照度1000[W/m²]、モジュール温度25[°C]の時での太陽電池の出力特性であり、図2.3にその特性曲線を示す。⁽³⁾

表 2.2 太陽電池の出力特性

形式	最大出力 P _{max} [W]	最大動作電流 I _{pm} [A]	最大動作電圧 V _{pm} [V]	短絡電流 I _{sc} [A]	開放電圧 V _{oc} [V]
FL136-SP-93	44.9	2.52	17.8	2.7	21.8
FL336-SP-93	14.8	0.83	17.8	0.95	21.8

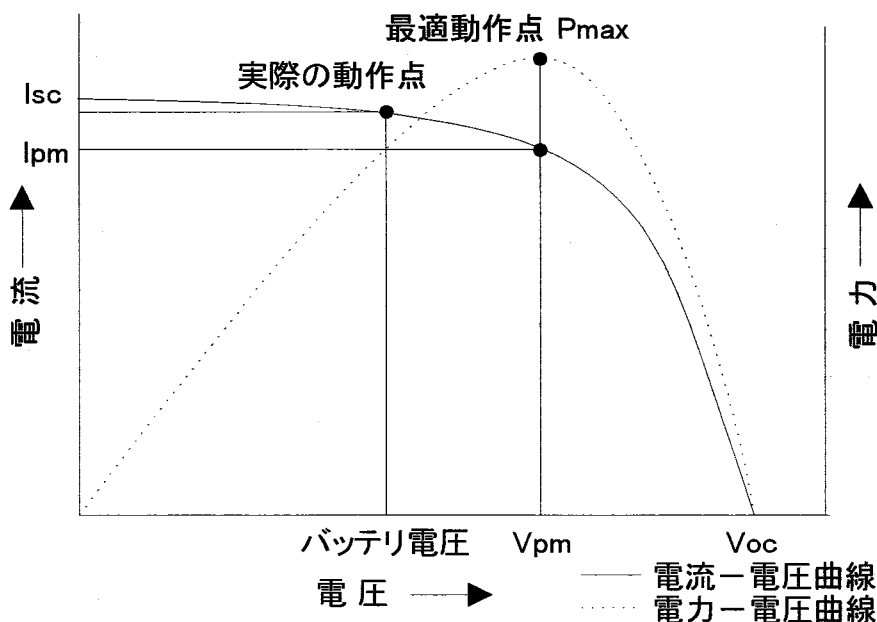


図 2.3 太陽電池の特性曲線

この太陽電池モジュールをソーラーボートに搭載した時の最大総出力は

$$44.9[\text{W}] \times 10[\text{枚}] + 14.8[\text{W}] \times 2[\text{枚}] = 478.6[\text{W}]$$

となっており、大会規則で制限されている太陽電池出力 480[W]（25[°C]、カタログ値）以下としている。

また、太陽電池の出力特性は太陽光の入射量（放射照度）・太陽電池の温度等によっても大きく変化する。放射照度が低くなると短絡電流は大きく減少し、開放電圧も若干低下する。最大出力動作電圧についても開放電圧値と同様に低下し、出力電力は減少する。温度上昇に対しては、短絡電流はわずかに増加するが、開放電圧・最大出力は大幅に減少するため、それに伴って最大出力動作電圧も大きく低下する。

2.3 最大電力点追尾装置 (MPPT: Maximum Power Point Tracker)

2.3.1 MPPTの必要性

太陽電池の動作電圧は負荷状態に影響され、太陽電池にバッテリーを直接接続した場合、バッテリーの電圧に太陽電池の動作電圧が依存してしまい、太陽電池をバッテリーの電圧で動作させることになる。また、バッテリー定格電圧は残存容量・放電電流・充電電流・温度等によって約±20[%]の変動幅があると言われている。一般に、バッテリーの電圧と太陽電池から最も多くの発電電力を得られる最大出力動作電圧(最適動作点)は一致しないため、太陽電池の発電電力は本来発電できる電力よりも少なくなる。

その最適動作点を追尾する装置がMPPTであり、MPPTを使用した場合、太陽電池の動作電圧はバッテリーの電圧に依存せず、常に太陽電池を最適動作点で動作できるため、太陽電池から効率よく発電電力を得ることができる。⁽⁴⁾

2.3.2 MPPTの種類

太陽電池の最大電力点追尾方式には、大別して以下に示す3種類の方法がある。

1. 太陽電池の温度特性によって最適動作点を補正する温度補償付電圧一定制御方式。
2. 太陽電池の開放電圧をある一定の頻度で計測し、開放電圧に対して一定の比率で最適動作点を決定する開放電圧測定型電圧一定方式。
3. 太陽電池の発電電力を演算しながら太陽電池の動作点を変動させ、最適動作点を追尾する最適動作点追尾方式。

上記に示す1.において太陽電池の出力特性の変化要因となるのは太陽電池の温度、2.では太陽電池の開放電圧というそれぞれの1つの情報に対しての最大出力動作電圧があらかじめ決められており、その情報に対応した動作電圧に制御する方法であるため、比較的簡単に制御することができる。しかし、他の条件による最大出力動作電圧の変化までは追尾できないという短所もある。

3.は電力という情報に対して最適動作点を追尾するため、最大出力動作電圧の変化に関わる個々の条件に無関係に最適動作点を制御することができ、他の方式よりも効率よく最適動作点を追尾できる方法である。しかし、その反面制御方法が複雑になるという短所もある。

ゴールドンイーグルは限られたエネルギーの有効利用を目的として開発しているため3.の制御方式を採用した。

2.4 モータ

2.4.1 モータの種類

1. ブラシ付き DC モータ

回転電機子に流れる電流をブラシと整流子を用いて整流する形のモータ

2. ブラシレス DC モータ

永久磁石を回転子、電機子を固定子とし、半導体で電機子磁化電流を制御するモータ

3. ステッピングモータ

固定子巻線にパルス電流を与えて、回転子をステップ的に回転するモータ

表 2.3 にそれぞれの特性を示す。

表 2.3 モータの種類と特性

	長 所	短 所
ブラシ付きDCモータ	トルク制御が容易 トルクむらが小さい 制御回路が簡単 低慣性	騒音が大きい ブラシが摩耗する
ブラシレスDCモータ	トルク、回転数制御が容易 音が静か 高効率 メンテナンスフリー 長寿命	制御回路が複雑 駆動に半導体素子が必要
ステッピングモータ	入力パルスとモータ回転角が比例 高効率	駆動装置が必要 低回転時に脈動がある トルク制御が難しい

2.4.2 モータの選定と制御

ゴールドイーグルで使用したブラシ付き DC モータは特殊電装株式会社より提供を受けた界磁が永久磁石でできている他励電動機（HAC-5B-18）である。このモータは界磁が永久磁石のため、負荷電流が変わっても界磁の強さは変化しない。したがって、負荷電流に対する回転数の変動が少なく、安定した速度を得ることができる。さらに、直巻モータのように無負荷になった場合でも過回転によるモータ破壊の危険性がないという特長を持っていることから選定した。⁽⁵⁾

また、モータの回転数制御は PWM 制御を用いた。PWM（Pulse Width Modulation：パルス幅変調）制御とは、周期は一定で、入力信号の大きさに応じて、パルス幅のデューティ・サイクルを変化させる制御方式である。デューティ・サイクルが変化すると、モータ駆動用のパワー・デバイスの ON/OFF の間隔が変化し、モータへ供給する平均電圧も変化する。つまり、モータの回転数を制御することができる。⁽⁶⁾

ゴールデンイーグルで使用したモータの仕様を表 2.4、出力特性を図 2.4、外観を写真 2.1 にそれぞれ示す。

表 2.4 モータの仕様

型名	HAC-B-18
定格電圧 [V]	24
定格電流 [A]	25
定格回転数 [rpm]	4700
定格トルク [kg·cm]	10
重量 [g]	4500

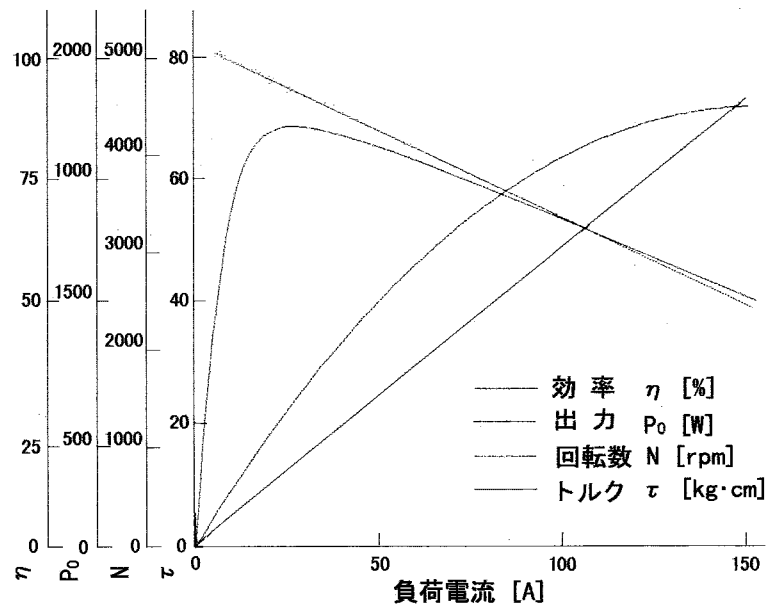


図 2.4 モータの出力特性

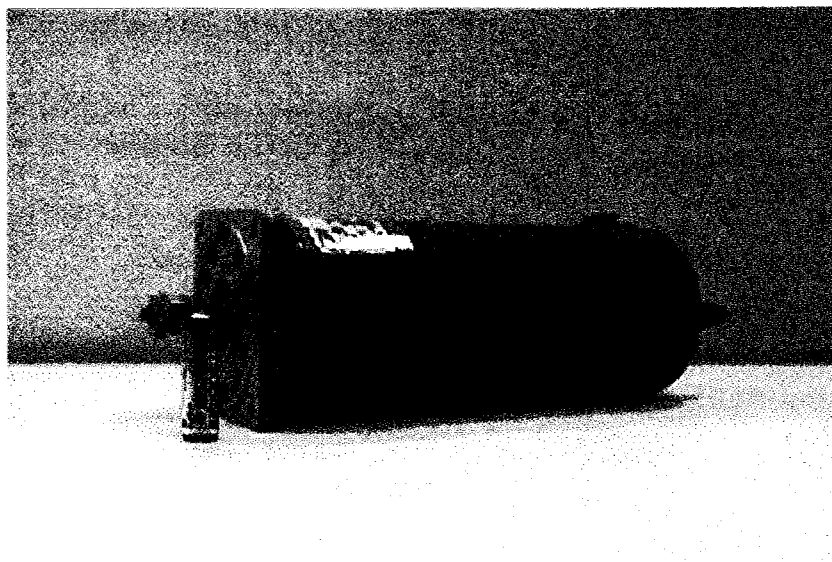


写真 2.1 モータの外観

2.5 バッテリー

ソーラーボートは、その動力源として太陽電池の他に大会規則により補助バッテリー（松下電池工業株式会社製のシール鉛蓄電池（LCR12V6.5BP）4個を搭載しているが、このバッテリーは太陽電池の発電量だけではソーラーボートの航行には不十分であり、それを補うためのものである。

耐久レースでは、どのボートもほぼ同一の太陽電池の出力を得ているため、補助バッテリーの使い方が勝敗を大きく左右させる。理想的な補助バッテリーの使い方は、これまでの海上試験により、レース時間ちょうどで使い切れれば良いという結論を得ている。しかし、太陽電池の出力は天候などにより変動するため、補助バッテリーと太陽電池の出力をいかにうまく組み合わせて使うかが問題となる。

一方、スピードレースでは、150[A]、30[sec]の放電を必要とするため、ほぼバッテリーのみの電力で航行することになる。この時の太陽電池は予選レースと決勝レースの間の待ち時間でのバッテリーの充電に使われる。

この補助バッテリーの性能試験については第4章で詳しく述べる。使用したバッテリーの仕様を表2.5、外観を写真2.2にそれぞれ示す。

表 2.5 バッテリーの仕様

公 称 電 圧 [V]		12
定 格 容 量 (20時間率) [Ah]		6.5
寸 法 [mm]	総 高	100
	高 さ	94
	長 さ	151
	幅	64.5
質 量 [g]		2270

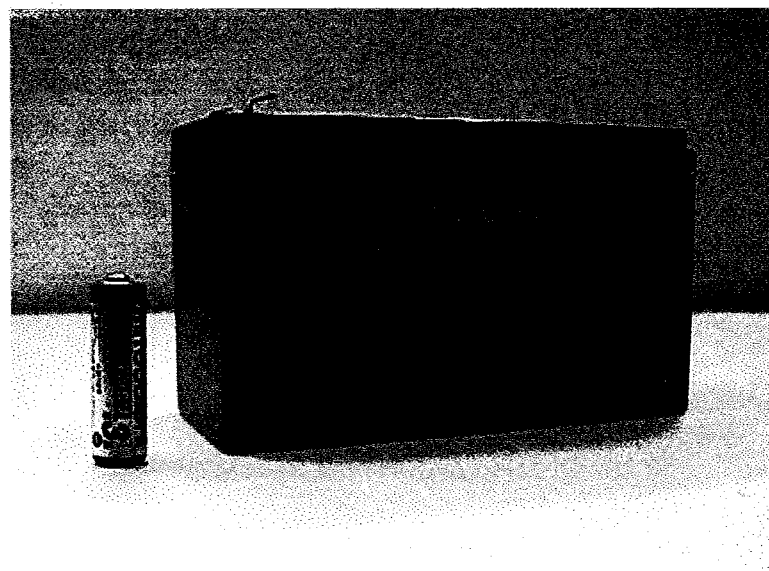


写真 2.2 バッテリーの外観

2.5 艇体概要

2.5.1 艇体

艇体は大会規則に合わせて設計し、やや幅広の単胴艇とした。材質は剛性と軽量化を考慮し、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) のサンドイッチ構造で製作した。大会では耐久レースとスピードレースの2種目があり、両レースを水中翼で航行することを目的として、水中翼、ギア系、電気系などのシステムを組み替えられるようにした。艇体の諸元を表 2.6、耐久レース仕様の全体図を図 2.5 にそれぞれ示す。⁽⁷⁾

表 2.6 艇体諸元

	耐久レース	スピードレース
全長 [mm]	5210	
全幅 [mm]	2250	1000
全高 [mm]	970	1470
総重量 [kg]	109.5	125.5

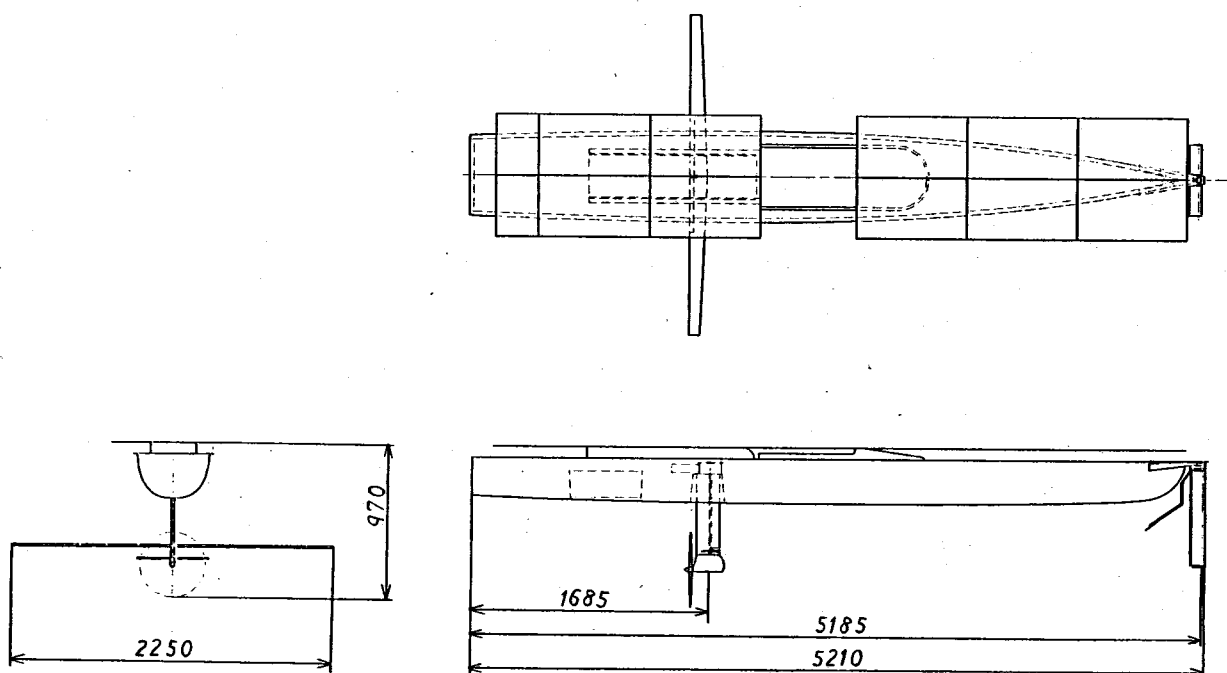


図 2.5 艇体全体図

2.5.2 水中翼

船舶が航行する際の抵抗には、形状抵抗、摩擦抵抗、造波抵抗、空気抵抗などがあるが、特に高速域では造波抵抗が急増し、抵抗の大部分を占める。そこで、高速時の造波抵抗の減少を図る手段として、水中翼を用いて船体を揚力により浮上させる方法がある。本研究ではソーラーボートの高速化、高効率化を目指すために水中翼を用いることとした。⁽⁸⁾

水中翼は全没型逆T字型のカナードタイプとし、重量配分は前翼 10[%]、主翼は 90[%]を受け持つものとした。前翼はピッチ運動を機械的に自動制御するために高さ調整機構を設けた。主翼にはロール運動を手動で制御できるようにエルロン機構を設けた。高さ調整機構を図 2.6、エルロン機構を図 2.7 にそれぞれ示す。

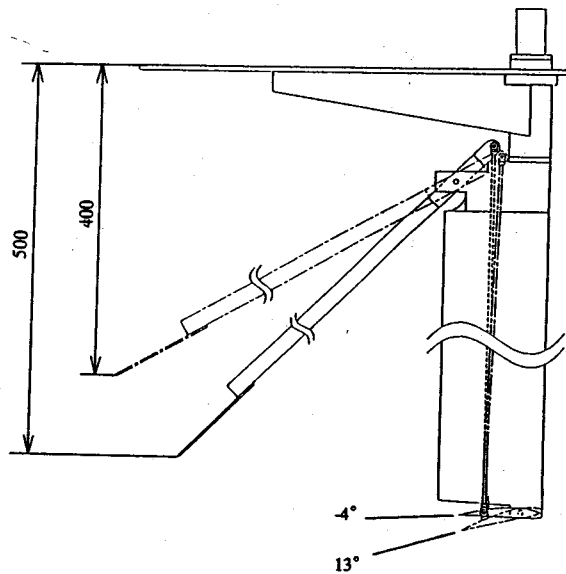


図 2.6 高さ調整機構

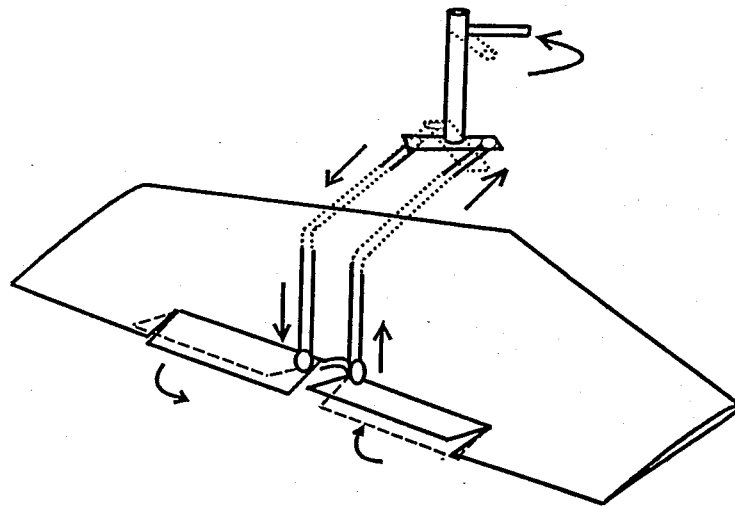


図 2.7 エルロン機構

2.7 動力伝達装置

2.7.1 ギアボックス

減速比は使用するモータの出力特性とプロペラの効率を考慮し、耐久レースで 12:1 (360[rpm])、スピードレースで 6:1 (600[rpm]) とした。プロペラギアボックスの投影面積を減らすには、プロペラシャフトの径を細くして径の小さな軸受けを使用することと、用いるスパイラルかさば歯車の径を小さくすることである。しかし、運転時間の短いソーラーボートに適用するには、通常の許容応力値で設計すると過大なものとなる。耐久レース用のプロペラシャフトの径はこれまでの実績を踏まえ、できる限り小さいものとした。スピードレース用では翼走時にプロペラの回転トルクによって生じるボートの傾きを抑えるため二重反転プロペラ機構を採用した。この機構を用いると動力を 2 つの歯車に分配できるので使用する歯車の歯面強度を半分にすることができ、結果的にプロペラギアボックスの投影面積の減少につながる。図 2.6 に二重反転機構を用いたプロペラギアボックスを示す。⁽⁹⁾

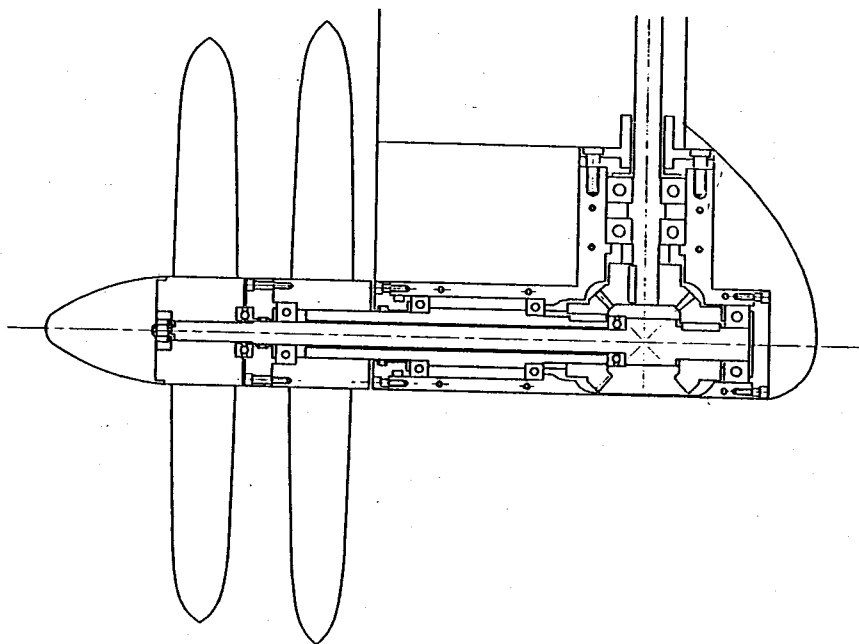


図 2.6 プロペラギアボックス

2.7.2 プロペラ

プロペラは後流渦面が変形しないとした理論⁽¹⁰⁾に基づき、推力の小さい領域での効率を重視して設計を行った。翼断面形状は、レイノルズ数が低いことを考慮してFX63-137を採用した。スピードレース用二重反転プロペラの設計では、まず前プロペラを設計し、それにより加速された流体の速度を後プロペラの流入速度として計算を行った。プロペラの翼断面形状を図2.7、外観を写真2.4に示す。

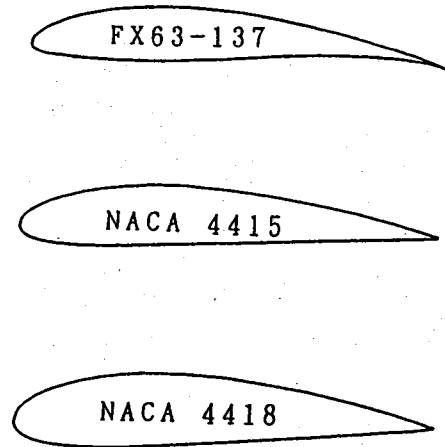


図 2.7 プロペラの翼断面形状

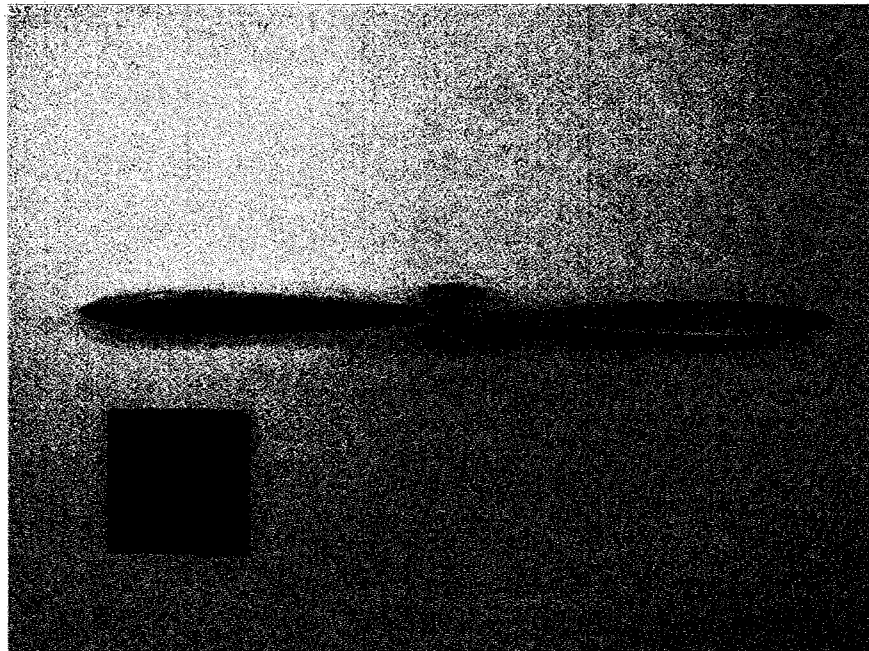


写真 2.4 プロペラの外観