

人力飛行機的设计・製造

田中宏幸¹・中村俊一郎²

¹第一工業大学 学部学生 航空宇宙工学科

²第一工業大学 客員教授 航空宇宙工学科

(〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央1-10-2)

E-mail:s-nakamura@daiichi-koudai.ac.jp

Design and Manufacture of Man-powered Airplanes

Hiroyuki Tanaka¹, Shunichiro Nakamura²

¹ Undergraduate, ² Guest Professor,

Dept. of Aeronautics Eng., Daiichi Univ. of Technology

(Kokubu-Chuo 1-10-2, Kirishima-shi, Kagoshima-ken 899-4395, Japan)

E-mail:s-nakamura@daiichi-koudai.ac.jp

Man-powered airplane is powered by direct human energy which rotate propeller to provide thrust and lift force. In 2007 member of Airplane Design and Investigation Club, re-started their activities, design, manufacture and flight, for the man-powered airplanes. Flight of the first airplane was succeed, but the airplane was still heavy. Second airplane was designed as a lighter one and was failed to fly. Now, third airplane is designed by solving the former airplane's problems as reported in this paper, and is manufacturing. The club member are joining in their activities everyday as getting over with many difficulties and are intended to challenge the next year's Bird-man Contest which will be held at Lake Biwa.

Key words : Man-powered airplane, Airplane Design and Investigation Club, Bird-man Contest

1. はじめに

人は、古来より空を飛ぶことに憧れ、様々な挑戦をしてきた。そして、翼を使って飛ぶことを発見し、今日ではジェットエンジンの登場によって「より速く」「より遠く」「より多く」に人を運ぶことを可能にした。第一工業大学工学部の航空機設計研究部(以下、機設計)では、この「空を飛ぶ」という行為を学生のサークル活動で実現出来ないだろうかと考えた。そこで、人力飛行機を設計・製作し、飛行試験を行い、毎年琵琶湖で行われる「鳥人間コンテスト選手権大会」に参加しようではないか!と言う結論に達した。新一年生が入学する4月には大々的に部員募集を行い、毎夕活発に活動している。

2. 人力飛行機とは

人力飛行機は航空機に搭乗している一人またはそれ以上の人間の筋肉エネルギーによって離陸し、空中に支持される航空機で、ヘリウムガスや暖めた空気などの静的浮力を使ってはならないし、エネルギーを貯えたり、受け入れたりできるどんな種類の動力を使って飛行してはならない¹⁾。簡単に言うと自転車に羽根を付けて飛び立つイメージとなる。(図1)

過去に機設計は琵琶湖で行われる鳥人間コンテストに出場していた。しかし部員数が減少し、人力飛行機的设计・製作を続けることが困難となり、9年前に人力飛行機から遠去かってしまった。しかし鳥

人間コンテストの出場に対する熱い気持ちと復活にかける強い思いがあり、2007年から活動を再開し人力飛行機的设计・製作をすることにした。知識や経験が皆無の状態からの再スタート。それでも幾つもの苦難を乗り越えてきた。現在、3機目の機体を製作中であり、来年の大会出場をねらい、先輩方が作り上げてきた記録を更新していくことを目標に、楽しく激しく議論し合いながら日々の活動をしている。



図1 人力飛行機のイメージ

3. 完成までの流れ

ここでは設計開始から機体が完成するまでの流れを述べる。

- ① 目標・コンセプトの決定
- ② 各種パラメーターの決定
- ③ 設計計算
- ④ 各部位(翼・駆動 等)の詳細設計
- ⑤ 設計確認試験および不具合の修正、改善
- ⑥ 図面の完成
- ⑦ 材料発注
- ⑧ 機体製作
- ⑨ 飛行試験
- ⑩ 飛行試験および不具合の修正、改善
- ⑪ 機体の完成

この流れの中で②～⑤を繰り返し行い最適な設計になる。さらに⑨⑩を繰り返すことで目標とする機体になる。

4. 設計

(1) 目標とコンセプト

まず、目標とコンセプトを決定する。目標は先輩方が作り上げた記録(飛行距離522m)を更新することであり、これを達成するには長距離を飛べる機体によることである。この為に注目するのは、飛行における「安定性」である。即ち、風にあおられても容易に機体が制御でき、自由に空を飛べることである。機体の制御が容易ということはパイロットがいかなる状況にも対応できることであり、これが飛行安全につながることになる。そこでこれを実現するために、飛行において起こりうるあらゆる状況を考えて設計に盛り込むことにする。これらを踏まえコンセプトは「機敏に長距離」とする。

次に、機体名を決定する。機体名から、かっこ良さや飛びそうなイメージにする必要がある。部員は鹿児島で生活していること、および「機敏に長距離」と言うコンセプトから「つばめ」と命名した。つばめは渡り鳥であり、どんな状況下でも長距離を飛べる。また、九州新幹線「つばめ」にもあやかっている。

(2) 材料

人力飛行機を製作するに当たり使用する材料について述べる。人力飛行機は軽くそして丈夫に作らなくてはならない。どの部分にどの材料を使うかを慎重に選ばなくてはならない。しかし軽く・強い材料や精度の高い部品は高額なため、必要最低限に抑えなければならず選定に苦勞する。

最近の人力飛行機はCFRP(炭素繊維強化プラスチック)を多用している。図2は炭素繊維クロス材、図3はCFRPパイプ、図4は炭素繊維に含浸させるエポキシ樹脂を示す。CFRPは最近の航空機、F-1カー、釣り竿、テニスラケットなどにも使用されており、強度も高くとても軽いものである。しかしかなり高価なので重量軽減効果のある部分に使用する。

このほかにスタイロフォームや発泡スチロールなどを翼リブ/翼外皮/コックピットなどに使用する。部品どうしの接着は構造用エポキシ樹脂(図5)で行う。バルサ材(図6)はとても軽く加工しやすい木材であり、重量に対しての強度が高く、翼リブなどの補強や翼後縁材などに使用する。いずれにしても、どの部品も軽く強く作るため試行錯誤の連続であり、そのための材料選定が重要となる。

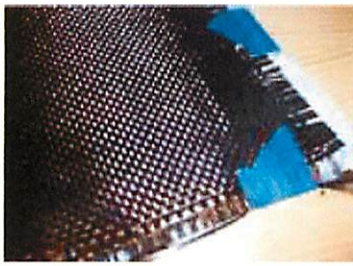


図2 クロス材

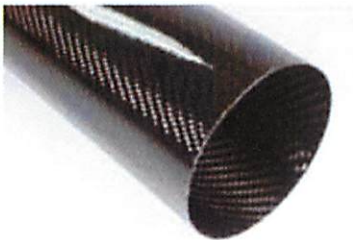


図3 CFRPパイプ



図4 炭素繊維に含浸させるエポキシ樹脂



図5 構造接着用エポキシ樹脂



図6 バルサ材

(3) 翼

主翼は飛行時に揚力や抗力を発生させ、人力飛行機には重要な部分であり、また機体の中では一番大きく、全幅はおよそ28mもある。

a. 設計

設計に関してはチーム独自で開発した翼型を使用している。翼型の基本はDAE21を使用しているが、それをすべての翼幅に適用した場合、翼の三次元効果で翼端付近にねじれが発生し、ねじり

に弱い部分で壊れてしまう。そこで翼端付近は空力中心が主翼桁にねじれの生じさせない位置になるような独自の翼型を設計しDAE21改と名づけた。図7に主翼の平面形と翼断面を示す。DAE21改は図7に示したように翼幅の81%から翼端まで使用している。このことにより桁位置を翼根から翼端まで同じ%コードに配置しても翼端のねじりは抑えられると考えており、飛行試験で確認することになっている。

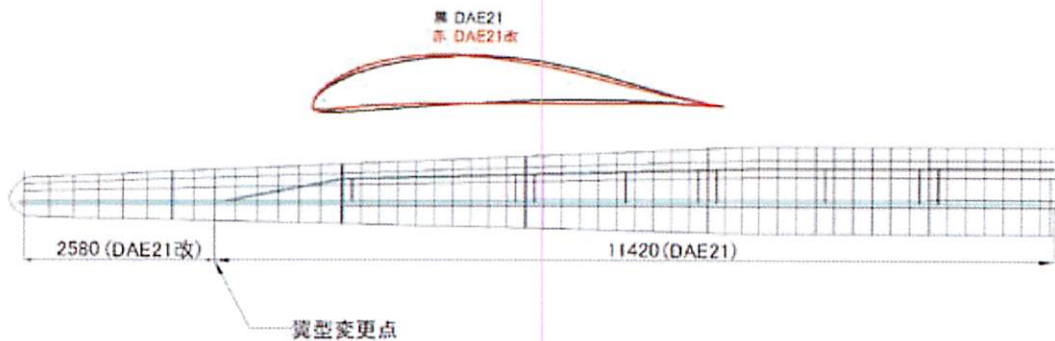


図7 主翼平面形及び翼断面 (DAE21およびDAE21改)

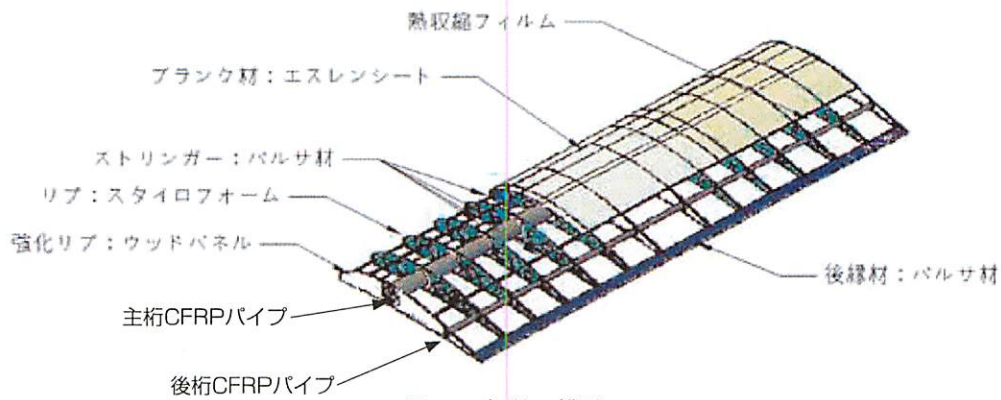


図8 主翼の構造

b. 構造

主翼は機体の中でも1番大きいパーツとなり、軽量化しやすい部分でもある。しかし高剛性にして重くなりすぎたはいけないし、あまり軽く作りすぎてすぐ壊れてはいけない。材料を選び、可能な部分はしっかりと軽量化し、強度・剛性の必要な所は必要な大きさと厚さにしなければいけない。主桁および後桁は軽く、強度のあるCFRPパイプを用いる。リブおよび前縁材は飛行中の翼型を保つため、形状を保ちつつ軽量化できるスタイロフォームを用いる。またリブ外周は曲げ荷重により大きな力をうけるためバルサ材で補強する。さらに、リブの位置を決めかつリブの横倒れを防ぐため、翼の上面に3本、下面に2本のバルサ材で作ったストリンガを入れる。(図8) 前縁および上面の2/3は翼型を保つためブランク材を用いる。ブランク材は作業効率などからエスレンシートを用いる。

主翼は翼幅が28mにもなるため、飛行ができる場所まで運搬ができる長さになるよう11分割する。

(4) コクピット

パイロットの居住空間を形作る胴体フレームやコクピットフェアリングは、パイロットが飛行時に風に曝されるのを防ぎ、また機体が湖面に着水する時の衝撃を緩和し、かつ即座に脱出出来る構造でなければならない。構造は何回も繰り返される飛行試験での離着陸でも壊れることが無いようにしなければならないし、外形は飛行時の空気抵抗が極力少ないものがとめられる。

a. フレーム

コクピットを構成するフレームパイプの配置は、パイロットの姿勢によって、パイロットが通常の自転車と同じ様に漕ぐアップライト型、およびパイロットが寝そべった姿勢で漕ぐリカンベン

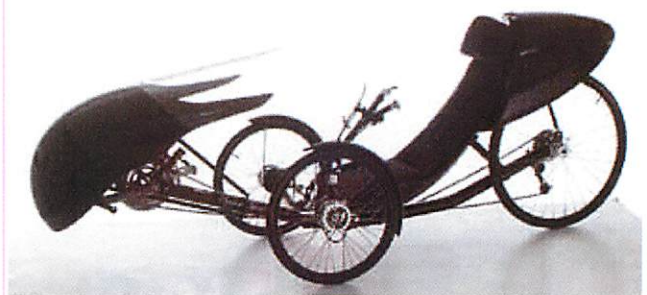


図9 リカベント型自転車



図10 コクピットフレーム

ト型の2種類に類別できる。どちらを選ぶかはパイロットの好む姿勢やチームの特色などから決定される。今回設計した機体はリカンベント型を採用し、座席やペダルの配置をリカンベント型の自転車(図9)を参考に決める。これは駆動系が簡単な構造に出来る事や、先輩方が採用した型を引き継いでいる。漕ぐ姿勢を決めると、次はフレームパイプの配置である。着水時などで万一パイロットが前方に飛ばされても安全を確保するようにパイプの前方にチェーンを持ってくる(図10、図20)。パイプにとん付けする別のパイプの端部形状はプログラムソフトを用いて計算して隙間のないように削る。パイプ同士の結合はエポキシ樹脂を含浸させた炭素繊維クロス材を巻いて綺麗に成形して行く。

b. フェアリング

フェアリングはパイロットを風圧や日射から保護し、操作に必要な空間と視界を確保し、かつ内部が新鮮な空気で保たれているものでなければならない。形状は空気抵抗が少なく、全機のイメージをたかめるための美しい外見でなければならない。また軽くすることも必要である。

ア. 居住性

鳥人間コンテストは真夏に行われる。そのため、

パイロットが長時間ペダルを漕ぎ続けても、内部の気温上昇を抑え、空気を新鮮に保てるよう、外気を取入れて内部の空気を排出しなければならない。またパイロットのペダルを漕ぐ動作や操縦桿操作に邪魔しない空間がなければならない。内部の空気の入れ替えはインテークおよびアウトレット(図11)を設けて行く。インテーク/アウトレットはフェアリングの抗力の増加を抑え、かつ冷却効果が得られる位置と大きさにする。そのためにはフェアリング周りの空気の流れをしっかりと把握しておかなければならない。

イ. 大きさおよび形状

主にペダル周りや操縦桿周りなど、パイロットの動作を妨げない大きさ(図12)に決定する。また、プロペラと干渉しない先端位置と空気抵抗の少ない流線型にする(図13)。ここで決めた形状の空気抵抗およびフェアリング周りの空気の流れを確認するため、同じ形状の模型を使い風洞試験をおこなった。フェアリングの模型は鹿児島県工業技術センターの支援を頂き加工した。

また、フェアリングを覆う膜に使用する材料は飛行中室内に太陽熱が入りにくい遮断性のあるもので、かつ着水時にパイロットが容易に破って脱出できるものとする。

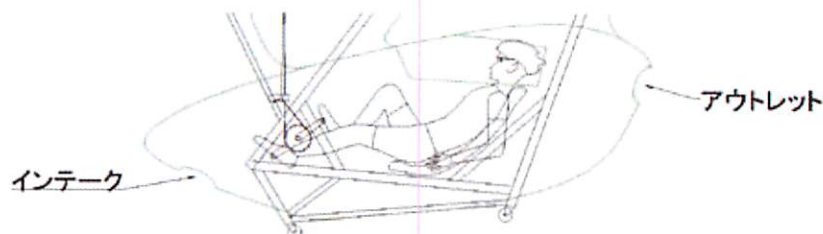


図11 インテークおよびアウトレット

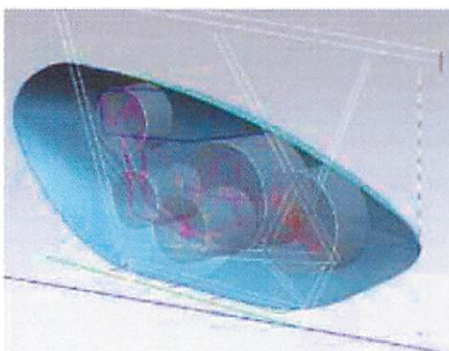


図12 フェアリングの大きさ

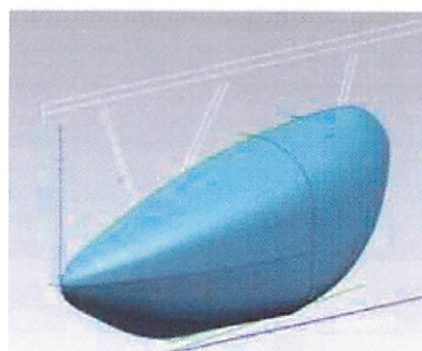


図13 フェアリングの形状

(5) 操縦系統

操縦系統はパイロットが機体を思い通りにコントロールでき、かつ無駄な動きの無い操縦ができるものでなければならない。また安全に飛行するには、操舵系統や尾翼の動きが確実なものでなければならない。

a. 操舵系統

パイロットの操縦が確実に尾翼に伝わるようリンクージュワイヤ方式を採用する。また、ニュートラル位置を把握できるようにし(図14)、機体を安定に保持するための余分な操縦が減少できるようにした。索にはステンレスワイヤを使用し、操舵量に対し尾翼の動きが1対1になり操縦が容易になるようにした。さらにパイロット座席の後方に操縦桿を持っていくことにより着水時にパイロットが前方に投げだされても傷つくことを防ぐことができるようにした。(図15)

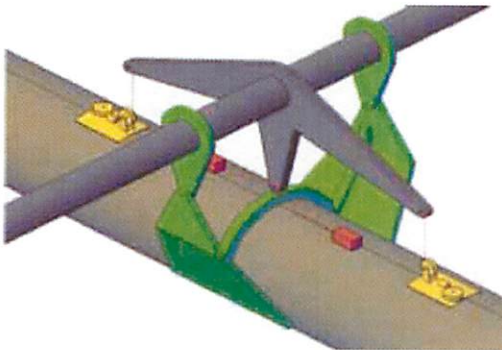


図14 尾翼操舵

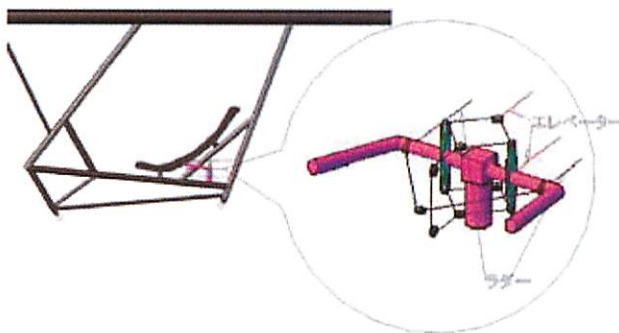


図15 操舵系統

b. 尾翼

翼型はNACA0009とし、桁はカーボンパイプを使用し、リブにはスタイロフォームを使用した。ストリングを4か所入れることにより翼の形状を保ち(図16)、操舵時の応答性を高めている。尾翼取り付け部は(図17)、ベニヤ板をエポキシ樹脂含浸状態のカーボン繊維クロスで挟んで硬

化させた強化板(図18)から製作する。これにより軽量化をはかり高強度が得られる。

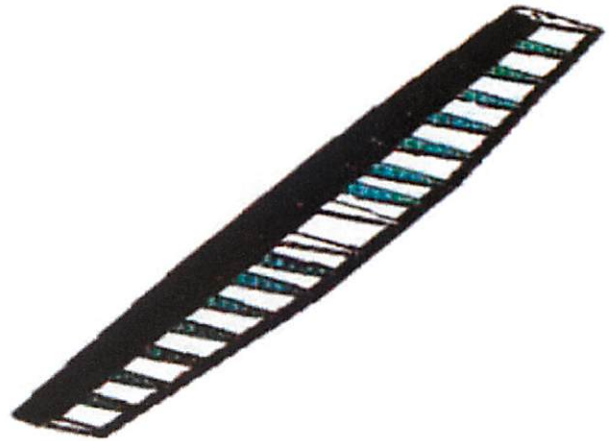


図16 水平尾翼



図17 尾翼取り付け



図18 強化ベニヤ板

(6) プロペラ駆動系統

これまでペダルの回転方向をギアで垂直方向軸に変換し、CFRP シャフトを介して胴体パイプ内のギアに伝え、更に胴体パイプ内のギアで前後方向軸の回転に変換し、別のCFRP シャフトを介してプロペラを回転させるギア駆動方式(図19)を採用していた。しかし回転方向の調整や胴体パイプ内のCFRP シャフトの変形を逃がす工夫がうまくいかず苦難の連続で成功していない。そこで自転車に使われるチェーン駆動方式に挑戦することにした。(図20)



図19 ギア駆動



図20 チェーン駆動

a. 構造

駆動系は長時間漕いでいても確実に回転する事や、パイロットのペダルを漕ぐ力を無駄なくプロペラに伝えなくてはならない。今回挑戦するチェーン駆動方式は自転車になじみが深く取り組みやすい方式である。機構のチェック、構成する機械要素の強度計算を繰り返し設計してきた。ペダルを漕ぐとチェーン駆動により胴体パイプ内のシャフトが回転し、プロペラを駆動する機構(図21)となっている。チェーンの動きが確実に両端のスプロケットに伝わるにはテンシヨナと呼ばれる部品を用いてチェーンがスプロケットに入り込む方向とチェーンの張りを調整する。そのためにはペダル側にあるクランクスプロケットの位置、およびテンシヨナの位置と取り付け角度が鍵となる。テンシヨナは自転車の変速に使われるディレーラと同様の機能を持ち、これを参考に設計する。またパイロットの漕ぐ力が過大にならないためにもチェーンの張りは重要である。機構の作動はモックアップを作り確認した。(図22)



図21 チェーン駆動方式



図22 チェーン駆動機構のモックアップ

(7) プロペラ

人間の力でいかに効率よく推力出せるかがプロペラの重要な役目である。

a. 設計

プロペラの設計は計算ソフトが公開されており、このソフトに設計条件となるデータを入力してプロペラ形状を示す座標線図(図23)が得られる。計算ソフトは下記のウェブサイトからダウンロードする。

<http://www2.jimu.nagoya-u.ac.jp/aircraft/airplane/canopus/pera.html>

b. 構造

プロペラは高剛性のうえ軽量にしなければならない。翼型はDAE51を使用する。構造としては(図24)、桁にCFRPパイプ、リブに航空ベニヤ、リブ間の充填に発砲スチロールを使用し、外皮はガラスクロスとカーボンクロスにエポキシ樹脂を含浸させて積層し硬化させたものを使用している。成型は参考文献²⁾に示す要領で、真空引きして加熱硬化することにより行なう。プロペラ先端はバルサで製作し、付け根のハブはアルミニウム合金のブロック材から削り出す。パイロットの安全のため、着水時に万一プロペラが折れて成型した部分の細かな破片が飛び散らないよう、成型したプロペラの表面にパテを薄く塗りコンパウンドで仕上げる。

5. まとめ

図25に枕崎空港での飛行試験の写真を示す。末尾に「つばめ」の三面図を示す。

2007年より三度、鳥人間コンテストにエントリーしたが、未だ出場を果たしていない。しかし、ここに纏めたように、活動再開当初に比べると設計・製造のレベルは格段に成長している。部員のやる気も旺盛であり、来年こそはとの気概に燃えている。このまま活動を続けていけば、必ずや出場を果たし、初期の目標である先輩方が作り上げた記録の更新もできると確信している。人力飛行機の飛行は最終的にパイロット一人の体力にかかっているが、そこに至るまでには部員全員の熱意と努力、関係する方々の労を惜しまない助言と支援がなければ達成できないと考えている。

ここに部員、先輩、諸先生方、および鹿児島県工業技術センターの南見様に深く感謝感謝申し上げます。

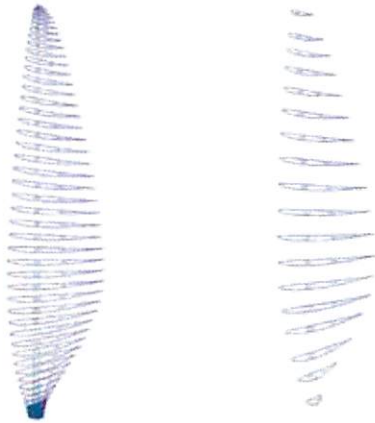


図 2 3 プロペラ線図 (右図：必要なリブのみ)

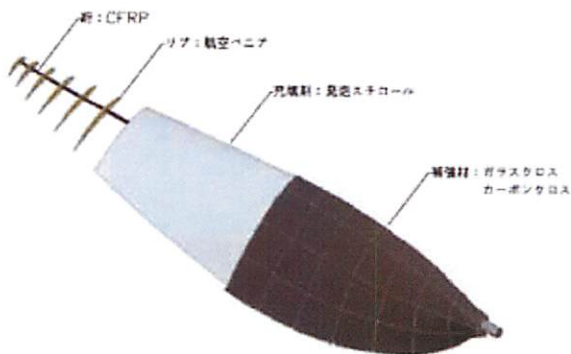


図 2 4 プロペラの構造

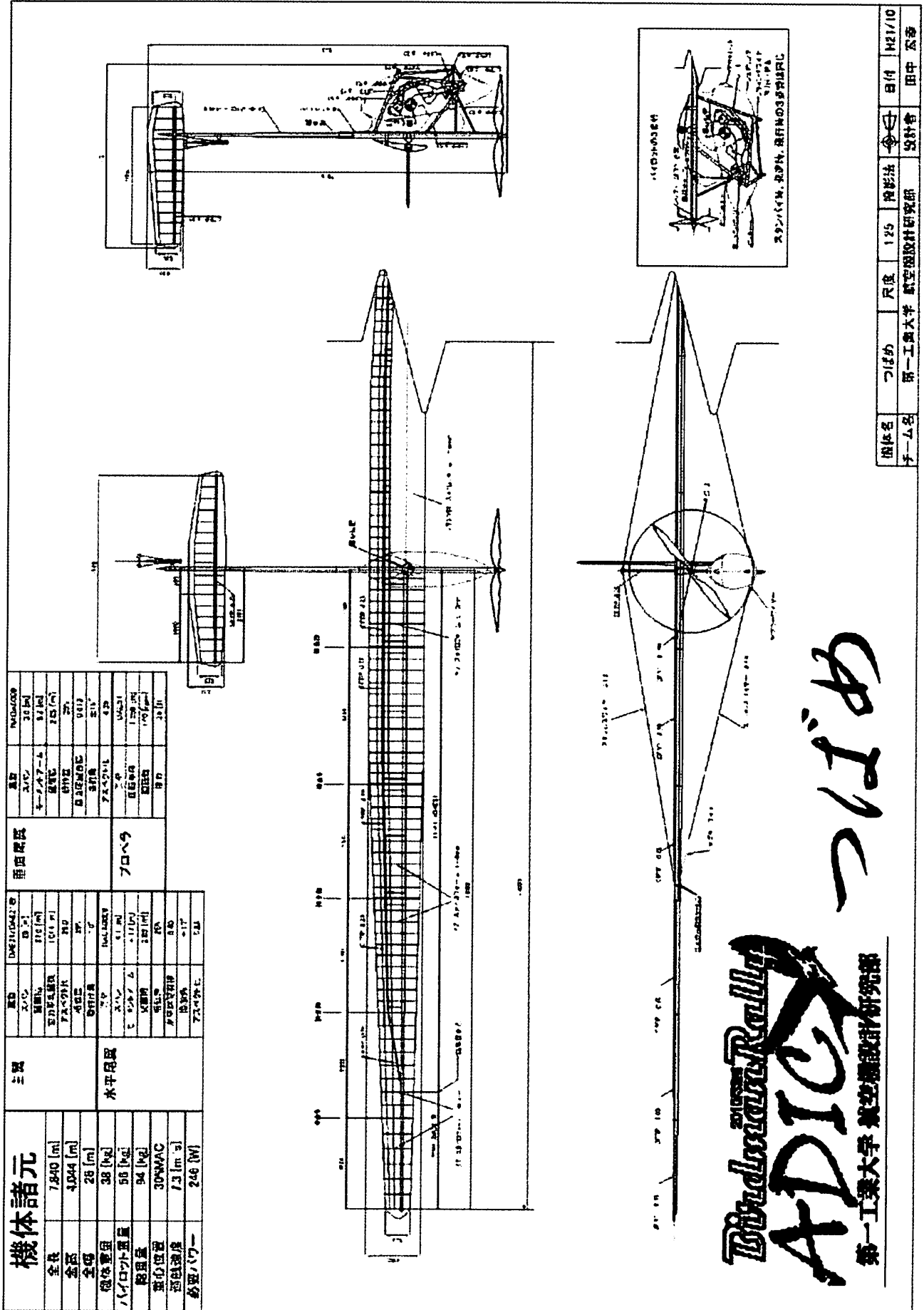


図 2 5 枕崎空港での試験飛行
(2008年12月 「かげろう改」)

参考文献

- 1) 福本和也、木村秀政監修:人力飛行機;光文社
- 2) 中村俊一郎、岩崎洋平:人力飛行機用強化繊維プラスチック製プロペラの成型;第22号 (2010) pp.41-46

「つばめ」三面図



機体諸元

全長	7.840 [m]	翼根	1.042 [m]	翼幅	14.000
全高	4.044 [m]	重心	1.100	エンジン	30 [馬力]
全幅	2.8 [m]	翼面積	112 [m ²]	燃料容積	20 [リットル]
機体重量	38 [kg]	最大速度	100 [km/h]	巡航速度	80 [km/h]
パイロット重量	50 [kg]	上昇率	1.0 [m/s]	エンジン	30 [馬力]
総重量	94 [kg]	巡航高度	1.0 [km]	燃料消費率	0.17 [kg/hp-h]
重心位置	30%MAC	必要パワー	246 [W]		
巡航速度	7.3 [m/s]				

BirdmanRoller
ADIC
 第一工業大学 航空機設計研究部

つばめ

図体名	つばめ	尺度	1/25	投影法	第三角法	日付	H21/10
チーム名	第一工業大学	航空機設計研究部	設計者	田中 高彦			