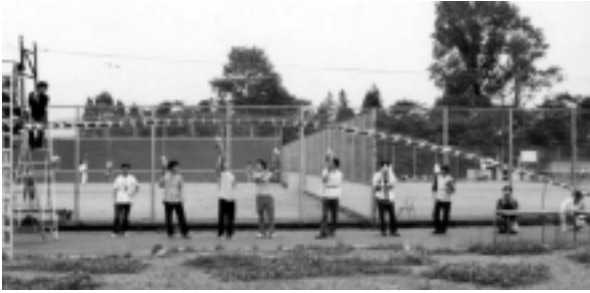


# 東北大学 Windnauts における CFRP の製作方法および利用方法



安倍 祥 (東北大学)  
沢田 雅洋 (東北大学)  
後藤 卓也 (東北大学)  
達 永里子 (東北大学)  
石川 智己 (東北大学)  
青木 太助 (東北大学 大学院)  
中村 寿 (東北大学 大学院)

Methods of Making and Using CFRP in Windnauts Tohoku University

*Key Words* : CFRP, Human Powered Aircraft, Molding Method, Primary Structure

## Abstract

High specific strength and stiffness CFRP are used in Human Powered Aircraft (H.P.A.) for the limit of human power. We have made CFRP pipes and plates ourselves for 4 years and its performance have improved from year to year. In this report, we introduce our production method of CFRP.

## 1. 緒言

人力飛行機においては、人力の限界から極度の軽量化が求められるため、高比強度・高比剛性という特徴をもつ CFRP パイプが 1 次構造部材に多く用いられている。近年、CFRP の利用がさまざまな分野で進み、その価格はかなり安価になったが、依然としてアルミなどの金属部材と比較するとまだまだ高価である。これを解決する方法として、CFRP をプリプレグシートから自作する方法がある。プリプレグシートはパイプやプレートに成形された CFRP に比べるとはるかに安価であるため、さまざまなチームで実践が進められている。

また、CFRP の持つもうひとつの特徴として、異方性がある。設計者が負荷のかかる方向に強度や剛性などの力学的特性の方向を適切に設計すれば、無駄な材料を減らすことができ、軽量化につながる。しかし、実際には成形に使用する治具の制限や価格の問題がある。CFRP の自作はこのような問題を緩和させることができることにも利点がある。

このような理由から、東北大学 Windnauts では山形大学クラフト・パル<sup>1)</sup>のご協力により、4 年前に CFRP パイプおよびプレートの自作を行った。その後さまざまな改良を重ねた結果、機械的性能・コストパフォーマンスの両方を兼ね備えた CFRP を安定供給できるようになった。このため、本サークルで製作される人力飛行機の CFRP の自作率は年々増加し、内外から高い評価を得ることができるようにもなった。そこで、本報では始めに FRP 製作法の一般的な解説を行った後、本サークルにおける製作方法を説明し、その変遷およびそれに伴う成功談・失敗談を紹介する。

## 2. 成形方法

FRP の成形方法はさまざま存在し<sup>2)</sup>、それぞれ長所・短所を持っている。人力飛行機に利用する部材の代表的な成形方法にはハンドレイアップ成形法、スプレーアップ法、オートクレーブ成形法およびプレス成形法などがある。いずれの方法も、治具の上に樹脂を染み込ませた炭素繊維を積層し、樹脂を硬化させた後に治具を取り外すという作業工程は同じである。

プレス成形法は雌雄一対の治具を製作し、その間に材料を供給して加圧・加熱することで成形す

る方法の総称である。常に同一形状のものを製作できるため生産性が高く、仕上がりもよい。しかし、複雑な形状や大型の部材の成形が難しいという欠点を持つ。

スプレーアップ法は型の上に繊維を積層すると同時に、スプレーガンを用いて樹脂を吹き付けて成形する方法である。あまり強度を必要としない大型の成形や曲面の成形に適している。近年、繊維はカーボンでなくガラスであるが、主翼桁構造に応力外皮構造を用いた際の外皮の成形に用いられ、報告された<sup>3)</sup>。

ハンドレイアップ成形法は人の手でへらやローラーなどを用いて樹脂を繊維に含浸させながら積層する成形法である。一般には、加圧・加熱とも行わない場合をいう。複雑な形状を形成できるという利点の反面、人の手による作業のため、生産者の技術による依存が強いという欠点を持つ。また、強度・剛性は他の成形法に比べて低い。

オートクレーブ成形法はプリプレグシートを治具の上に積層し、フィルムを巻いて治具ごとオートクレーブ(加圧できる窯)の中に入れ、加圧しながら樹脂を熱硬化させる成形法である。または真空パックで治具ごと包み込み、減圧しながら加熱する方法もオートクレーブ成形法と呼ぶ。仕上がりがきれいで性能もよく、ある程度は複雑な形状を成形できる。しかし、オートクレーブがないと生産できない(または大出力の真空ポンプが必要)、生産性が低いなどの欠点を持つ。

### 3. Windnauts での CFRP パイプ製作方法

CFRP パイプが最も重要、かつ大量に用いられる、主翼桁に適用する場合を中心に紹介を進める。Windnauts では主翼桁構造に応力主桁構造を採用している。主翼桁の1次構造にこの方式を採用しているチームは多い。このとき、主桁には剛性・強度ともに非常に高い性能が求められる。この条件を最も満足するのはオートクレーブ成形法である。しかし、人力飛行機のスパンは非常に長いため、最短でも 2,3[m]というかなり長い主桁を製作する必要がある。このような主桁を成形できるような大型のオートクレーブや大出力の真空ポンプを所有することは事実上不可能である。そこで Windnauts では、治具として使用するアルミパイプの中に電熱線を通し、これをスライダックで制御することで加熱を行い、また、積層後に熱収縮するテープを巻いておくことで加圧する方法をとっている。これにより、オートクレーブや真空ポンプがなくても、高性能な CFRP パイプを自作できる。

第1図に、CFRPの自作を始めた初期のころの、積層物の順序を示す。また、第2図には現在の場合を示す。いずれの場合でも、大まかな製作手順は同じで、以下のとおりである。

治具となるアルミパイプの表面を耐水ペーパーで水研ぎし、表面の凹凸を無くす。

アルミパイプを洗浄し、十分に乾燥させる。

離型剤でアルミパイプの表面をコーティングする。

プリプレグを積層する。

その他の積層物を積層する。

電熱線をアルミパイプの中に通し、保温のためにアルミホイルを巻く。

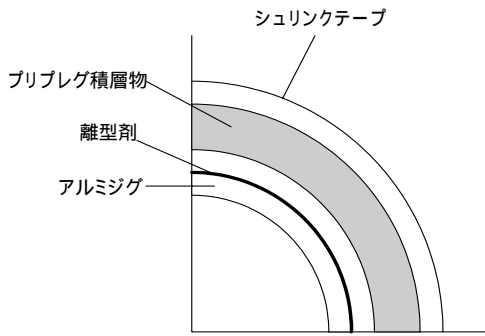
キュアサイクルを守って加熱する。

その他の積層物を取り外し、アルミパイプを引き抜く。

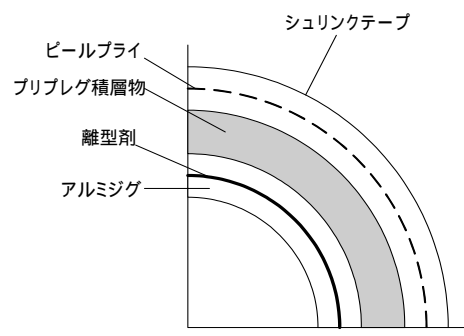
仕上がり具合を確認する。

初期の積層物は治具のアルミパイプ、でアルミパイプを引き抜きやすくするための離型剤、プリプレグシートおよび熱収縮テープとしてのシュリンクテープ(ラッピングテープ)から構成され

ていた。離型剤としてはフッ素系カーワックスを使用していた。これは安価ではあるが、加熱時の熱で組成が変化してしまい、離型性能が低下する場合がある。したがって、しばしばアルミパイプと成形後の CFRP パイプを分離することができないときがある。最後の最後で失敗すると大きな痛手となるため、現在は(株)GH クラフトから専用の離型剤ケムリースを購入している。カーワックスに比べてかなり高価になるが、失敗するよりははるかによい。なお、Windnauts ではケムリースの使用を始めてから、CFRP パイプがアルミパイプから抜けないという失敗は起きていない。



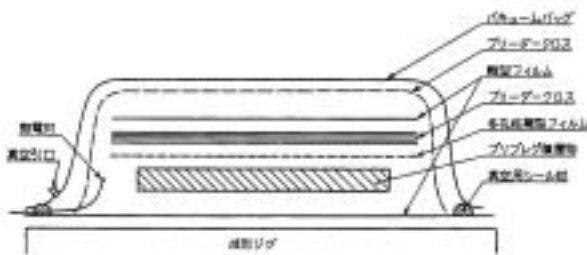
第 1 図 過去の積層物の構成



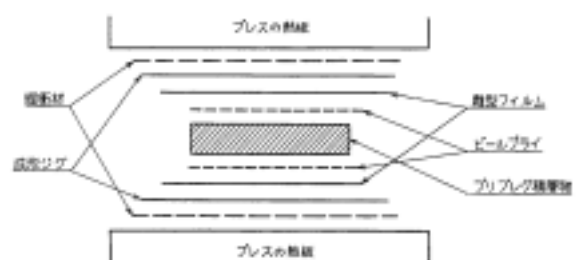
第 2 図 現在の積層物の構成

初期にはその他の積層物としてシュリンクテープのみを巻きつけていた。この方法でも出来上がる CFRP パイプの機械的特性には問題ない。しかし、プリプレグシートから熱硬化時に出てくる余分なエポキシ樹脂が CFRP パイプの表面ににじみ出て、表面に凹凸が形成される。これはリブ取り付け時に翼の製作精度の低下を招く。コクピットフレームに用いる場合には、組上げる際の接合面に凹凸があることになるから、製作が難しくなる。そこで、現在はシュリンクテープと積層し終わったプリプレグシートの中にピールクロス巻きつけている。にじみ出てくる余分なエポキシ樹脂をピールクロスに吸収させることで取り除くのである。

本来は、第 3 図<sup>4)</sup>に示すように、ピールクロスは離型フィルムではさむ構成が正しい。しかし、主に 2 つの理由から Windnauts では使用していない。ひとつは、離型フィルム、特に有孔性離型フィルムが非常に高価なことである。ふたつ目に、シュリンクテープを巻きつけるときに離型フィルムが内部ですべりを起こし、シュリンクテープをしっかりと巻きつけることができないことである。経験則ではあるが、現在の積層方法は有孔性離型フィルムを用いる場合に比べてより多くのエポキシ樹脂を吸い出しているように思える。すなわち、CFRP 中に含まれるエポキシ樹脂の含有率が低くなっている。この場合、強度の低下、剥離が起こりやすくなること、寿命の低下などの問題が考えられる。しかし、表面の仕上がりは非常に美しく、リブ取り付けおよび接合の際に寄与する製作精度の向上は大きい。荷重試験は問題なくクリアしているのでそのまま使用しているが、より詳細を明らかにするための破壊試験を行うことが今後の課題といえる。



第 3 図 JIS によるオートクレーブ成形法の積層構成



第 4 図 JIS によるプレス成形法の積層構成

#### 4. その他、自作 CFRP に関する話題

##### 4.1 CFRP プレート

Windnauts では CFRP パイプ製作のノウハウを生かして、CFRP プレートの製作にも取り組んできた。接合部を中心に需要は大きいですが、必要となる大きさが小さいので、成形法の選択の幅はパイプに比べると広い。Windnauts ではプレス成形法を採用している。その概略図を第 4 図に示す。実際にはプレス機がないので、コンクリートブロックで圧縮を行っている。それだけでは圧縮が足りないため、真空ポンプでの減圧も同時に行っている。パイプでは難しかったシールや真空ポンプの出力の問題も小さいプレートには問題なかった。

##### 4.2 多段積層

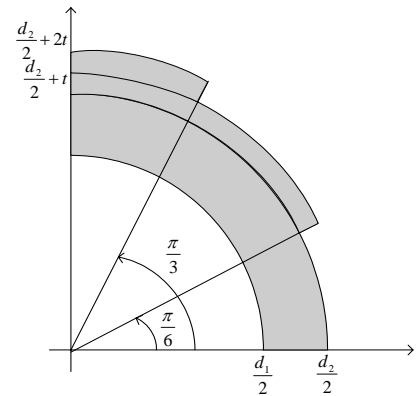
自作 CFRP の最大の利点はコストパフォーマンスに優れる点である。もう一点、成形する形に自由度が高い点が挙げられる。主翼桁のように一方向の曲げモーメントだけが非常に大きくかかる場合、パイプの上下面に集中積層すると効果が大きい。そこで、円周方向の多段積層に挑戦した。その断面形状を第 5 図に示す。一番外側に積層するプリプレグシート 1 枚分を短冊状に分割し、それを第 5 図のように積層する。本来ならばもっと集中積層した方が剛性増加の効果が大きいのだが、大きく真円形状を外れた場合のリブ取り付け精度の低下を懸念し、プリプレグシート 1 枚分を利用した。なお、Windnauts ではスパン方向の多段積層による CFRP パイプの製作も行っている。

##### 4.3 キュアサイクル

加圧・減圧のタイミングをキュアサイクルという。高性能な自作 CFRP を製作する場合、キュアサイクルを守ることは最も重要なことのひとつである。キュアサイクルはプリプレグシートに使用されている樹脂によって微妙に異なるので、プリプレグシートの購入先に問い合わせることが望ましい。特に、エポキシのような高分子化合物は温度感受性が高く、ある特定の温度を超えると脆化してしまうので、温度に関するキュアサイクルを守ることは非常に重要である。圧力に関しても同様に注意が必要である。加圧が足りないとエポキシ層とカーボン層の接合が不十分となり、強度の低下を起こす。逆に加圧しすぎるとエポキシ層がつぶれてしまい、やはり強度の低下を起こす。

#### 5. まとめ

東北大学 Windnauts における CFRP パイプとプレートの自作方法について解説した。われわれの自作 CFRP は荷重試験を除いて、試験飛行、本番の飛行において破壊を起こしたことがない。今後この記録を更新しつつ、より高性能な CFRP の製作に取り組んでゆきたい。



第 5 図 円周方向の多段積層

$d_1$ : ジグ径  $t$ : プリプレグシート厚

$d_2$ : 通常積層の径

#### 参考文献

- 1) 鳥羽慶、徳山浩二、高橋直人、須田元昭、柳川章全、丸山徹、矢野剛、秋葉岳博、岩田宗久：CFRP パイプの製作と曲げ試験、第 3 回スカイスポーツシンポジウム講演集、(1997) pp. 151-154
- 2) 三木光範、福田武人、元木信弥、北條正樹：複合材料(1997)
- 3) 吉川俊明、坂本慎介、堀琴乃、服部高資、佐多宏太：人力飛行機 CHicK-2000 における応力外皮構造翼の開発、第 6 回スカイスポーツシンポジウム講演集、(2000)、pp. 59-62
- 4) JIS K 7072-1991 炭素繊維強化プラスチックの試料の作製方法