

FW円筒殻成形装置の製作と評価

樋上 磨* 成澤 哲也** 星 悠介***

Setup and Evaluation for FW Forming Unit for Circular Cylindrical Shells

Osamu HIGAMI Tetsuya NARISAWA Yusuke HOSHI

Abstract - Fiber reinforced plastics (FRP) made of resin and stiffened fiber have been used for light weight structures. In this lab., circular cylindrical shells are formed by using the simply FW forming unit designed by authors. In Kushiro National College of Technology (KNCT) practical curriculum on student course has been provided using mechanical machine to raise the creativeness. This paper shows the design process and evaluation method for the winding machine set up in graduated research.

Key word : FRP, Filament Winding Forming, Circular Cylindrical Shells

1. はじめに

釧路高専機械工学科では、低学年から工作機械を用いた実習がカリキュラムに組み込まれている。学生はこの実習で工作機械の基本的な扱い方を習得することで、本科5年における卒業研究で大いに活用できる。そこで、本報ではこの実習で習得したものづくり技術力を活かしたFW成形装置の製作を卒業研究および特別研究で実施したので、その過程と評価について報告する。

2. FW 成形装置の仕様設定

糸巻きの原理を用いたフィラメントワインディング(Filament Winding:FW)法は、繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastics:FRP)の成形方法の1つである⁽¹⁾。FW専用の装置は高価であり、パスライン生成のためのプログラム作成にも時間と労力がかかる。そこで機械力学研究室にて簡単なFW成形装置を製作し、その成形品の弾性特性を求めることとした。FW成形はマンドレルと呼ばれる回転型に、FRPロービングを測地線に沿って巻き、所望する円筒殻を形づくる加工法である。ロービングは一方向強化材であるためその巻き方を工夫することで成形品の剛性をコントロールできる。このようなテーラリング機能を持たせ、なおかつ操作が容易な装置を作ることが設計指針と

なる。ここで設計にあたり、次の条件を設定した。

- ①操作はマニュアルであり、右手で回転、左手でロービングの操作を行う機構とする。
- ②マンドレルは脱着を容易にするため、チャック部を可動式にする。
- ③マンドレルの偏心は成形品質に影響するためチャック部軸心のずれを少なくする。
- ④将来の自動化を見据えた設計とする。

3. FW 成形装置の製作⁽²⁾

3. 1 成形装置の構成

図1に装置全体を示す。寸法は幅700mm、高さ600mm、奥行700mmである。装置フレームは不要となった事務用穿孔機をベースに追加工した。

装置の主要構成は、マンドレルを取り付けるチャック部、マンドレルを回転させる回転機構

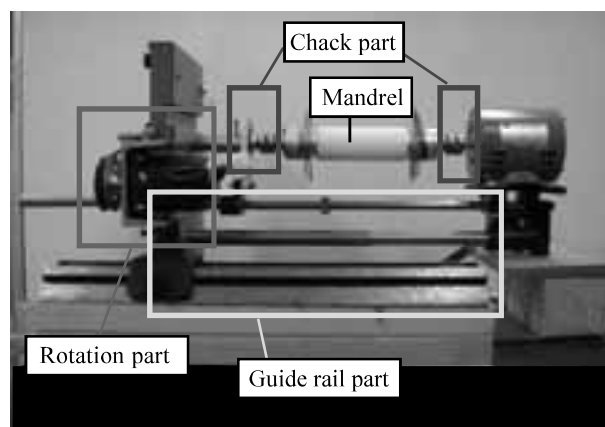


Fig.1 Filament winding unit

* 釧路高専教育・研究支援センター機械・建築グループ

** 釧路高専機械工学科

*** 釧路高専建設・生産システム工学専攻

部, 回転機構部の水平移動を行うガイドレール部である。

チャック部には, 最大開口径6.5mmのチャックを左右に取り付け, マンドレルの着脱を容易にした(図1)。右側のチャック端はACモータに固定されており, 後の自動化に対応させている。

回転機構部は, 左側のチャック軸にプーリを取り付け, 左手でハンドルを回すことでマンドレルを回転させることができる。したがって右手はFRPロービングを巻きつける作業に専念でき, 修正などの復元作業にも対応できる。

ガイドレール部には, 左側チャックと回転部のモータ部分を水平, かつ平行に移動できるようガイドレールを取り付けた。このことによりFRPロービングをくり出すキャリッジを取り付けるなど将来的な自動化に対応できる。

以下製作工程について詳細記述する。

3. 2 チャック部について

チャック部はマンドレルの両端を挟み, 回転機構と連結させる機能をもつ。製作にあたって, マンドレルが回転しても軸ぶれのないことが要求される。それは, 繊維配向角度の一定化に必須である。そのために, ジャコブステーパを採用した。製作したシャフトを図2に示す。シャフトの左端はプーリ取付用, 右端にジョコブステーパとなるよう設計した。チャックはユキワ精工(株)製のテーパ型ドリルチャック(6.5EL)を用いた。さらに, チャック本体とベルト駆動用のプーリを取り付けるシャフトと, マンドレルの長さに応じてチャックの位置を調整するためのアジャストシャフトを製作した。仕様を表1に示す。図中, ELは

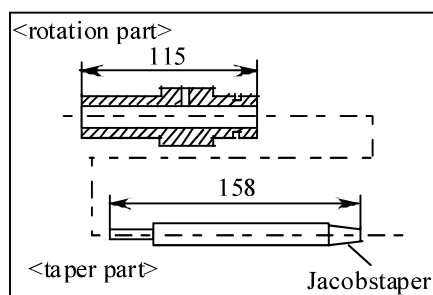


Fig.2 Shaft parts

Table 1 Spec. of chack

呼び寸法	ジャコブステーパ	ツカミ能力	長さ [mm]	重さ [g]
6.5EL	JT.NO.1	0.5~6.5	49.5	190

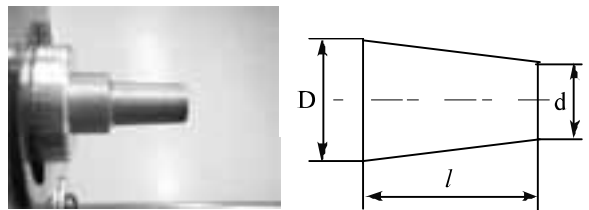


Fig.3 Jacobstaper

Table 2 Spec. of taper

D	d	l	Jacobstaper
9.754	8.469	16.669	0.07709

軽量形ドリル用チャックを表し, 6.5 は呼び寸法を表す。

図3 は加工後の写真である。ここで苦労したジャコブステーパの加工工程について説明する。まず, $\phi 10\text{mm}$ の鋼材を用い旋盤でテーパ加工を行った。テーパは表2のJIS規格に合わせるため, 刃物台を計算式により 2.207° 傾けた。この後切削を行い, 所望の寸法に近くなった時点で光明丹をつけ, すり合わせを行った。光明丹がチャック内面にまんべんなくつくことでめ合いの良好性を確認した。なお, これらのチャックとジャコブステーパについてはJIS B 4634 携帯電気ドリル用チャックに記載されている。

次に, 回転用シャフトの段付き加工を旋盤を用いて行った。材料はアルミの丸棒である。特に, このシャフトの両端はブシュをはめるため高い精度が要求される。そのために切削時には, 適宜切削油をさしながら行うよう注意した。これにより, 構成刃先による丸棒表面の粗さが少なくなり精度が上がった。さらに, 長手方向にチャック用シャフトを通すための貫通穴をあけた。これらをネジで一体化させるために側面にM3のネジ切りを行った。

次に, シャフト部に抜け落ち防止機構を作るため呼び径24mmのスナップリング(TRUSCOB34-0024)溝加工を行った。JIS規格に合わせ, 溝径24mm, 溝幅2mmとなるよう突っ切りバイトを用いて加工した。スナップリング取り付け状態を図4に示す。

これらのシャフトは, 穿孔機の土台となる部分の穴にブシュをはめ, シャフトを通すことができたが, チャック側にもシャフトを支持, 回転ができる機構が必要となった。さらに, 軟鋼プレート



Fig.4 Snapping

(110mm × 70mm × 10mm) にブシュをはめる $\phi 28\text{mm}$ の穴と、ガイドに取り付けるための $\phi 6\text{mm}$ の貫通穴をあけた。穴径も規格に合わせてブシュの径より 1mm 小さくした。取り付けに当たってはブシュをはめ合わせながらヤスリを用いて穴径の微調整を行った。チャック部を取り付けた状態を図 5 に示す。

3. 3 回転機構部について

ワインディング作業に当たっては手動にてハンドルを回し、マンドレルを回転することとした。図 6 に回転機構部を示す。

マンドレルを回す伝達方法として、ベルト伝達機構を考案した。チャック部に取り付けたプーリにハンドルを取り付けた。ハンドル部を回すことで、ゴムベルトを介しチャック部が回転する機構となっている。ハンドルの製作については、ハンドルとなる棒材($\phi 8\text{mm}$)を取り付けたが、径が小さく回しにくいいため外形 $\phi 15\text{mm}$ 、厚さ 0.5mm の銅製パイプをハンドルにかぶせるようにして取り付けた。また、ベルト部分には簡易的なテンショ



Fig.5 Chuck parts unit

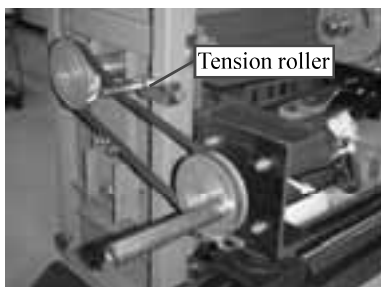


Fig.6 Rotation mechanism

ンローラを取り付け、ベルトが緩まないようになっている。この回転機構部はプーリ間の同一軸上への配置、ゴムベルトの張り方、プーリホルダ機構などの精度が要求され高度な設計と、ボール盤加工が求められた。

3. 4 ガイドレール部について

ガイドレール部には、移動可能なチャック部と、それに連結する回転機構部が水平方向に移動できるようにレールを配した。これにより、チャック部は、最大で 45mm 可動でき、マンドレルの取り付けが容易となる。ガイドレール部の概観を図 7 に示す。

チャック部におけるガイドレールは穿孔機の主軸を利用しており、チャック部をレールと平行に取り付けた。このガイドレールによってチャック

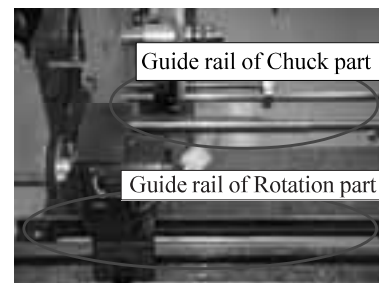


Fig.7 Guide rail part

部に可動領域を持たせることができた。また、回転機構部におけるガイドレールにおいても、軸と平行にガイドを配した。このガイドレールは将来的にはファイバーキャリッジの自動送りを実現するために必要となるので、平行度の精度を上げ、配向角の正確な成形をもたらす重要な箇所である。

4. マンドレルの製作

4. 1 マンドレルの機能

ワインディングを行う際、FRP を巻き付ける成形型がマンドレルである。本研究で製作したマンドレルは、成形品の形状を決定する型と円筒殻の配向角を決めるピン部に分けられる。今後、本報では成形品の形状を決定する型をマンドレル部、ピンが配された部分をピン部、チャックに取り付けられるフランジをフランジ部と呼ぶ。本研究で製作したマンドレルを図 8 に示す。

一般的に、FW 法で用いられるマンドレルの材質は金属であるが、離型を行う際、離型シートなどを用いて行わなければならない、手間がかかる。そこでマンドレル材にデルリン(商標)を用いることで、表面の滑りをよくし、離型を容易に行えるようにした。デルリンの一般的なスペックを表 3

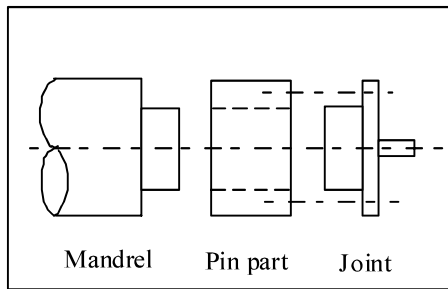


Fig.8 Mandrel parts

Table 3 Spec. of mandrel

商標	材質	融点	引張強度
デルリン	ポリアセータル	179℃	70Mpa

に示す。

ピン部は、マンドレルの段付き部分とチャックに取り付けるためのフランジ部を考慮して長さは37mmである。ここに、フランジ部を取り付けるためのM3のねじ穴を配した。また、反対側には離型時のカッターが入るように、溝を配した。ピン部におけるもっとも重要な配向角を決定するピンであるが、配向角ごとに異なり、ピンの間隔も違う。これは、ロービングをそれぞれの配向角で配した時のロービングの幅を考慮したためである。図9にピン間隔の決定法について示す。まず、ロービング幅を b としたとき、配向角 α° のときの垂直高さ h は $b/\cos\alpha$ で表される。今回使用したロービング幅は2.5mmである。たとえば 30° に配向する場合のロービングの垂直高さは2.88mmとなる。このロービングの垂直高さがピン間隔と等しくなる。 30° のときのピン部のピン本数はピン部の円周長さ/ピン間隔によって求められるので54本と決定された。

ピンを立てるためにピン部にボール盤で穴あけ加工を施さなければならないが、2.88mmという間隔は加工が困難であるため、ピンの配列を2列に

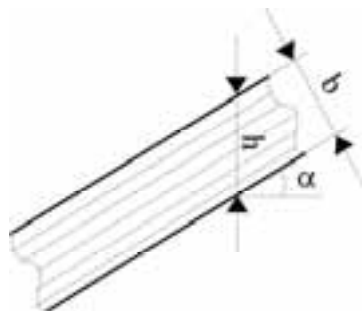


Fig.9 Robing angle

した。 45° においても3.5mmとなり同様に加工が困難であるため、ピンの配列を2列とした。 60° はピンの間隔が5mmとなり、ピン配列は1列で収まった。また、2列にした際にロービングを巻きやすくするため、外側のピンを長くする工夫を施した。 30° のときのピン部を図10に示す。

次に、マンドレルをチャック部に取り付けるためのフランジを製作した。このフランジは、リング状のピン部にはめてねじ止めすることでピン部との結合ができる。加工は旋盤で行い、 $\phi 50\text{mm}$ のアルミ棒材に $\phi 25\text{mm}$ と $\phi 6\text{mm}$ の段付き加工を施した。なお、チャックに取り付ける部分の径は用いるチャックのツカミ能力を考慮しなければならない。今回はツカミ能力 $\phi 6.5\text{mm}$ 以下なのでこれに従った径にしなければならない。また、ピン部と一体化させるために $\phi 6\text{mm}$ の通し穴を配した。組み上げたマンドレルを図11に、成形装置に取り付けたマンドレルの状態を図12に示す。

実際に成形する際はピンに番号を振り、一定の順番に従ってワインディングを行うためのピン番号の書かれたカラーを取り付けた。



Fig.10 Pin part (30°)



Fig.11 Mandrel



Fig.12 Setting for FW unit

このピン機能アイデアはピンを用いない成形に比べてマンドレルの両端まで同じ配向角の成形品を製作することのできる大きな特長を持っている。

4. 2 パスラインについて

パスラインとはワインディングを行うときのロービングを配すべきルート（測地線軌跡）を示すものである。本研究では、配向角 α の円筒殻を成形するためにパスラインシートを用意した。これは、あるピンを通過する順番をピン番号で示した表で、その順番をたどるようにワインディングを行うことができるものである。

図13にパスラインの決定方法について示す。以下いろいろ試行錯誤の結果を説明する。まず、マンドレルの円周を展開した短辺、マンドレルの長

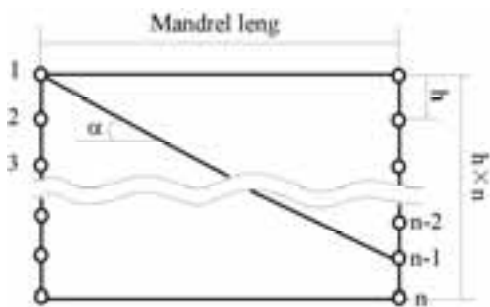


Fig.13 Pass line

手方向を長辺とする長方形を作り、短辺にピン番号を振る。ロービングがある配向角で配向した場合のロービングの円周方向高さ h を計算し、マンドレルの円周を割ることでピン数と配列を決定した（前述）。このピン配列をもとにロービングを配すべきパスラインが決定される。出発点となるピンを決めた後、そこからマンドレルの長手方向に対して配向角 α の角度を保つように反対側のピン配列を決定した。ワインディングを繰り返すと、出発点に戻るのので、ピンを1つ隣に移動する。ピンの順番を記載した表を用意し、ワインディング時に随時チェックすることでワインディングもれや掛けミスがないよう配慮した。これを繰り返すことでマンドレル表面均一にロービングが覆われる。また、最初の1往復のワインディング時は、基本となるパスがわかるようにするために、マンドレルの表面上を通過する座標点を数値計算で算出し、その点を通るようにワインディングを行った。2層目以降は1層目のロービングを見本としてワインディングを行った。パスラインシート方式にすることで専用機ではプログラムにより制御してパスラインを形成するのに比較して安価で効率的である。このように工夫することで、1本の成形を1時間未満で行えるようになった。

Table4 Property of prepreg

Number of strings	12000
Fiber density	1.29[Kg/m ³]
Fiber volume fraction	58[%]
Curing temperature	120[°C]
Resin content	38[wt%]

5. FW円筒殻の製作

5. 1 ロービングについて

用いたFRPロービング（長繊維）は、炭素繊維とエポキシ樹脂で構成される長繊維状の炭素繊維プリプレグT70012K（東レ社製）である。このプリプレグとはあらかじめ強化繊維と母材樹脂が混ざった半硬化状態の製品のことであり、表4にその仕様を示す。

5. 2 成形工程の工夫

本成形工程は、ワインディング、加熱硬化、離型作業である。ワインディングを行う前に、マンドレルを成形装置に取付けた後、マンドレルに離型剤を吹きつけ、ピン部には硬化後のFRPを取りやすくするためにアルミホイルを巻きつけた。その後パスライン順にワインディングを行った（図14）。

ワインディングに当たっては、4名の学生が共同で行った。まず一人が、右手にロービングを持ちマンドレルのパスラインをトレースし、左指で押しつけながらその位置を確定する。同時にもう一人の学生がマンドレルをパスの状態に合わせて回転させる。1パス終了と同時に次のパスライン番号を3人目の学生が声で指示しながらチェックシートで確認する。このように正しい配向角になることを確認しながら1層を巻く。最後に、4人目の学生は逐次、ロービングをトレースしている学生にくくり出す。この作業を繰り返すことで複数層成形を行う。円筒殻の製作に慣れないころはパス成形の際、ピン番号の読み間違い、チェックもれなどのミスがあったが、数回の成形でミスが減少した。パス時間であるが、配向角が大きくなるとパス時間が増加する。 $\alpha=45^\circ$ で45分程度か



Fig.14 Winding

かった。

次に、恒温槽の中にワインディングしたものを
入れ加熱する。本研究では恒温槽に送風定温恒温
器(ヤマト：DK912)を用いて加熱硬化を行った
(図15)。加熱硬化を行う際のヒートサイクルを図
16に示す。このヒートサイクルは、エポキシの歪
みを取るために 100℃で 60 分間定温加熱、150℃
で 120 分間加熱を加え硬化させる。

加熱硬化後、専用グラインダーを用いて離型を



Fig.15 Heat oven

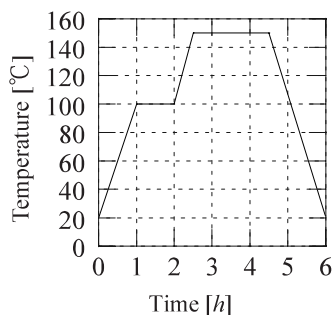


Fig.16 Heatcycle



Fig.17 Cutting for FW cylindrical shells

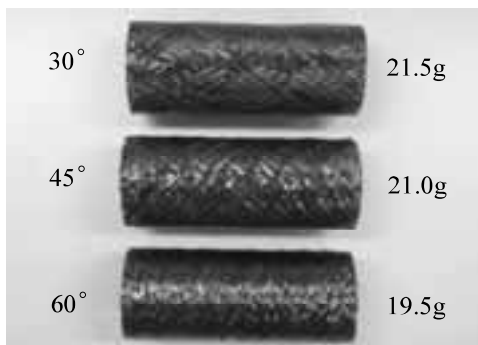


Fig.18 Forming piece

行った(図17)。このとき、刃がピン部の溝に入る
ように切断を行った。離型は簡易的な装置を製作
して行ったが、正確な切断ができる装置の設計製
作を検討している。切断後のマンドレル左右のピ
ン部に硬化したロービングが巻きついてその取り
外しに苦勞した。取り外しには、ピン部1つにつ
き1時間ほどかかり、パス成形時間より長い時間
を要した。成形より離型に多くの時間がさかれる
ためワンタッチ式離型法のアイデア創出が急がれ
る。図18にFW成形装置で製作した円筒殻を示す。
成形品の評価は今後の課題である。

6. さいごに

本校での工作実習のカリキュラムで習得できる
基本的な工作機械の使用技術で、簡易的なFW 成
形装置を製作した。高専の高い技術力を生かし、ア
イデアを出すことで所望の機能を持たせた成形装
置を製作できた。また、製作に当たっては、再利
用品を使用することで予算をかけずに製作した。
さらに、本校1～3学年での製図の授業が、加工
図面にて実際の製作のための設計を行う技能とし
て生かされた。具体的には三面図としてより加工
図面として、寸法の入力方、仕上げの精度、加工
手順の記入などを学んだ。これにより、現場製作
をスムーズに行う図面を作成する方法を学生は実
地をとおして大いに学ぶことができ、教育効果が
あった。参考までに、本装置を用いた研究成果が
文献(2)～(5)である。FW成形工程には不確定要
素が多く存在する。そのための学術研究がこれか
ら精力的に進むと思われる。

最後にFW成形装置の製作にあたってご協力い
ただいた本校実習工場職員の的野様、並びに石塚
様にここで感謝の意を表す。

参考文献

- (1)牧・島村・田部井ほか、フィラメントワインディング、日刊工業新聞社、(1970)。
- (2)星・成澤・樋上、FW 円筒殻の製作と実験モード解析を用いた固有振動数の測定、日本機械学会 D&D 講演会、(2009)、102。
- (3)樋上・成澤・星、斜交配向されたFW 円筒殻の振動特性、日本機械学会 D&D 講演会、(2009)、100。
- (4)星・成澤・樋上、FW 円筒殻の製作と実験モード解析を用いた固有振動数の測定、日本機械学会北海道支部講演会、(2009)、5-6。
- (5)樋上・成澤・星、FW 材の等価剛性を考慮したFRPの弾性定数測定、日本機械学会北海道支部講演会、(2009)、7-8。