

## 機体班長引継ぎ資料 オートクレープ（焼く）による成形

2020/09 9→10 期

9 期機体班長 中村悠斗

## 目次

1	オートクレープ法とは .....	1
2	成形手順 .....	1
2.1	プリプレグの準備 .....	1
2.2	マンドレル（型）の準備 .....	1
2.3	積層 .....	2
2.4	焼き作業 .....	2
2.5	引き抜き .....	2
3	電熱線の電力計算について .....	2

## 1 オートクレープ法とは

プリプレグと呼ばれる繊維に樹脂をしみこませてあるものをマンドレル（アルミパイプ）にまき、高温にすることで固め、成形する方法である。ハンドレイアップでの成形に比べ、樹脂量を少なく成形することができると同時に圧縮できるため繊維の割合が大きいため強度が大きくなる。（詳しくは材料科学等のテキスト参照）人力飛行部などでは桁焼きとして広く使われている方法である。FTE でも桁焼きとほぼ同じ方法で製作している。

## 2 成形手順

### 2.1 プリプレグの準備

繊維に樹脂をしみこませたものである。常温保管ではすぐにダメになってしまうので買ってすぐに使用するか冷凍庫で保管する。巻く際は一周ずつ別々に巻くので 1 周分の長さを計算し、カッターなどで切り取る。機軸方向の長さは端面出し加工を考慮し 50mm ほど余裕をもって切る。

### 2.2 マンドレル（型）の準備

巻きたい径のパイプを準備する。熱伝導率の関係でアルミパイプを使うことが多い。アルミパイプの規格は別資料のパイプ規格表を参照してほしい。基本的に規格以外の径を巻くことはできない。

使用するパイプの表面を確認し、明らかな突起等があればやすりがけを行う。熱硬化性樹脂専用の離型剤があるのでそれをパイプ表面に吹きかける。



## 2.3 積層

2.1 で準備したプリプレグの表面についているシートを外し、2.2 のマンドレルに一周ずつ巻いていく。この際気泡が入らないように注意しながらゆっくりまく。多少入ってしまった場合はカッター等で気泡が入っている場所に切り込みをいれると気泡を除くことができる。2 周目以降は巻き始めを最初の位置からずらすと、強度のバランスを保つことができる。すべて巻き終わったら、上からクッキングシートを巻き、耐熱テープ（テフロンテープ）でとめる。次に上から新聞紙を 3~4 周まき、最後にサランラップを巻いて圧縮する。ここで使うサランラップは最低でも 140℃まで耐えられるものを使用する。

参考文献

<https://www.asahi-kasei.co.jp/saran/products/saranwrap/comparing.html>

サランラップは高温になると縮むため、成形中に圧縮する効果がある。またクッキングシートはプリプレグにラップや新聞紙が張り付くのを防止するために巻いているが、成形中に染み出す樹脂を吸ってくれる素材にしたほうが強度があがる。

## 2.4 焼き作業

マンドレルの内径より細いアルミパイプを用意し、そこに電熱線をできる限り等間隔な螺旋状となるようにまき、耐熱テープで固定する。それをマンドレルの内側に挿入する。木片などをつかって床に固定したら、マンドレルに温度計をセットする。このとき温度計はマンドレル自体の表面でできる限りプリプレグに近い場所にセットする。焼き作業中に温度計が動くと温度が変わってしまうのでできるだけ動かさなくてすむようにしっかりと固定する。

電熱線を電圧調整器につなぎ、あたため始める。プリプレグの購入源から図 2.4-1 のような時間-温度図が公表されているはずなのでそれにそって電圧を調整しながら温度を上げていく。10℃程度の振れがあっても硬化するのでそこまでシビアに測る必要はない。

## 2.5 引き抜き

焼き作業が終わったら、しっかりと冷ましてから、マンドレルから引き抜く。だいたい引き抜けるがまれに抜けないことがあるらしい。

## 3 電熱線の電力計算について

電熱線から発生した熱は、内側のアルミパイプ及びマンドレル、プリプレグと伝わっていく。この複雑な系を直接見積もることは難しいので以下のように単純化して考える。

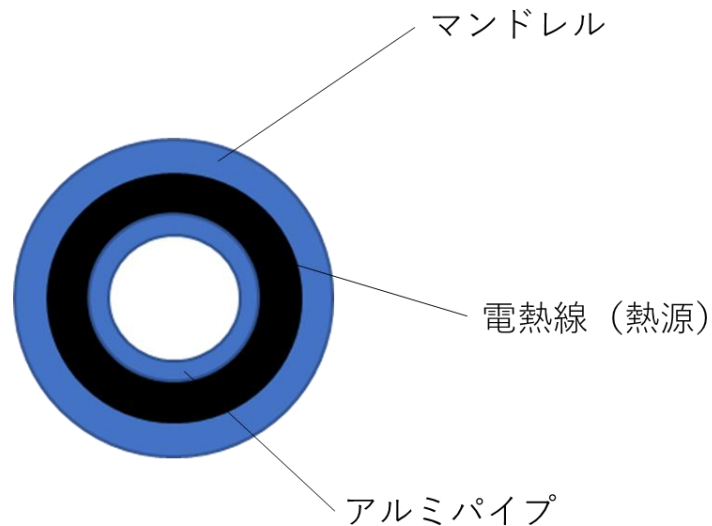


図 3-1 熱モデル

またさらに電熱線から発生した熱の半分がマンドレルに伝わると仮定すると、マンドレル表面から対流により発散する熱量の 2 倍を供給できる電熱線であればよいとわかる。

したがって熱流束  $J[(J \cdot s)/m^3]$  を計算すればよい。熱流束は単位面積当たりの熱通過量を表す値である。

熱伝達についてはニュートンの冷却法則より、以下の式で計算できる。

$$-\frac{dQ}{dt} = hS(T_w - T_a) \quad (3-1)$$

ここで  $h[W/(m^2 \cdot K)]$  は熱伝達率、 $S[m^2]$  は 2 物体の接触断面積である。  $T_w[K]$  は物体表面の温度、 $T_a[K]$  は流体の温度である。

これを解いて以下の式を得る。

$$h = \frac{J}{(T_w - T_a)} \quad (3-2)$$

水平な円柱が加熱され、自然対流している（周りの流体に大きな流れが存在しない）熱伝達率は以下の実験式で与えられる。

$$Nu = [0.60 + \frac{0.387(GrPr)^{\frac{1}{6}}}{\frac{9}{8} \{1 + (0.492/Pr)^{16}\}^{\frac{1}{4}}}]^2 \quad (3-3)$$

ここで $Nu$ はヌッセルト数,  $Pr$ はプラントル数,  $Gr$ はグラスホフ数である.

まず, ヌッセルト数は熱伝達率 $h[W/(m^2 \cdot K)]$ に対する無次元数で, 以下の式であらわされる.

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3-4)$$

ここで $L[m]$ は代表長さで円柱の場合にはその直径である.  $k[W/(m \cdot K)]$ は流体の熱伝導率である.

次にプラントル数 $Pr$ は熱伝導に関する無次元数で以下の式で表される.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (3-5)$$

ここで $\mu[Pa \cdot s]$ は流体の粘度,  $c_p[J/(kg \cdot K)]$ は流体の比熱,  $k[J/(s \cdot m \cdot K)]$ は流体の熱伝導率である.

グラスホフ数 $Gr$ は自然対流に関する無次元数で以下の式で表される.

$$Gr = \frac{g\rho^2\beta(T - T_m)L^3}{\mu^2} \quad (3-6)$$

ここで $g[m/s^2]$ は重力加速度,  $\rho[kg/m^3]$ は流体の密度,  $\beta[1/K]$ は体膨張係数である. ここからヌッセルト数を求め, 熱伝達率を求めればよい.

したがってまとめると対流熱流束を求める手順は以下のようになる.

- i. グラスホフ数, プラントル数を式 (3-5), 式 (3-6) から求める.
- ii. 上記を用いて式 (3-3) よりヌッセルト数を求める.
- iii. 求めたヌッセルト数から式 (3-4) を用いて熱伝達率を求める.
- iv. 熱伝達率から式 (3-2) で熱流束を求める.
- v. 熱流束に空気と接する面積を乗じることで消費電力を求める.
- vi. 伝熱線で発生した電力のうち半分が対流により消費される電力になるので 2 を乗じて必要電力を求める.

これはあくまでも温度を一定に保つために必要な電力であり，温度を上昇させるためにはさらに多くの電力を必要とする．よって次にマンドレル全体が時間 $S[s]$ で一様温度 $T[K]$ に達するために必要な電力 $W$ を計算する．

$$W = \frac{C(T - T_0)}{S} \quad (3-5)$$

ここで  $C$  はマンドレルの熱容量である．電熱線の電力はここで計算した対流によって消費される電力とマンドレルの温度上昇に使われる電力の和より大きいことが必要である．これを事前に計算して電力が十分か確認するとよい．この計算式を反映した Excel シートを別途作成したので活用してほしい．ちんちろりんではこれで計算した値とほぼ同じ電力で製作することができた．ちんちろりんでは 500[W]の電熱線で径 70[mm]のチューブを作成した．これより大きなチューブを作る場合，さらに強力な電熱線が必要だがこれ以上は市販されていないため，自作する必要がある．