

# ‘15年度機体フレーム接着詳細報告書

文責：早稲田大学宇宙航空研究会鳥人間プロジェクト駆動・フレーム班長  
杉山 拓弥

## 目次

1. はじめに
2. スケジュール
3. 製作工程
4. おわりに

※以下「パイプ」と言う表現と「桁」と言う表現がありますが、どちらも CFRP 製パイプのことで、差異はありません。混同してしまい大変申し訳ありません※

### 1. はじめに

本報告書は’15年度機体用のフレームのパイプの状態からフレームの状態に至るまでの製作に関する報告書である。宇宙航空研究会(以下 WASA)内だけでなく、外部にも公開し、広くフレーム接着のノウハウを知ってもらうために記した。  
目次の通り、スケジュールを述べ、その後に製作に関する詳細を記した。

### 2. スケジュール

- a. フレーム設計
- b. 定盤選定・購入・下準備
- c. 治具準備
- d. 治具製作
- e. 治具固定
- f. フレーム桁罫書き
- g. ウレタン充填
- h. パイプやすり
- i. 表面処理・接着
- j. 盛り
- k. 積層

### 3. 製作工程

2.で示したスケジュールについて詳しく見ていく。

a. フレーム設計

‘15 機体のフレーム設計は設計主任が行ったので、筆者は関与してないが、前年度機体よりも、小さくなっており、(恐らく)軽量化がなされている。詳細は別途資料参照のこと。

b. 定盤選定・購入・下準備

フレーム接着に用いる定盤の選定と購入を行った。定盤の購入は東京都中野区にある島忠ホームズ中野店で購入した。購入したのは 910×1820 の(種類)を 2 枚購入した。実際に店まで出向き、できるだけ水平なものを選定するよう心がける。中野なので、トラックで理工キャンパスまで運送してもらった。できるなら自分達の手で運んだほうがよい。可能ならばの話。

購入後は、定盤の水平出しを行う。デジタル水準器を用いて、定盤を水平に保つ。必ずしも地平と水平である必要はなく、地平とある特定の角度で一定、すなわち同一平面を保っていればよい。デジタル水準器を用いる際は、0.05 度以下のズレは誤差とみなした。ここで許容誤差を設定しないといつまでたっても同一平面を作れない。

水平出しをした後は、定盤にフレームのスケッチを行う。フレームパイプの中心線を H~B 程度の濃さの鉛筆ないしは、0.3mm のシャープペンシルで行う。線が太くなると、以下で示す治具の罫書き線と合わせる際の微妙なズレが、フレーム全体のねじれに繋がるからである。0.5mm のシャープペンシルだとどれほどのねじれが生じるか定量的に評価はできないが、可能ならば細い線を用いて、ねじれないようにするのがよい。

c. 治具準備

フレームを固定するにあたって、治具を製作する。治具は図 3.1 のようなものを用いた。中央の穴にフレーム桁を通し、穴から下に降りている溝は罫書き線で、フレームについている罫書き線と溝を合わせ、接着の際のねじれを防ぐ。フレーム桁の罫書きについては f. で示す。

治具は全て、3D-CAD(SolidWorks)を用いて製作した。

SolidWorks 上での設計における注意点は以下の 3 点。

1. 罫書き線を入れる
2. 桁中心位置を揃える
3. 内径を実測径より増やす

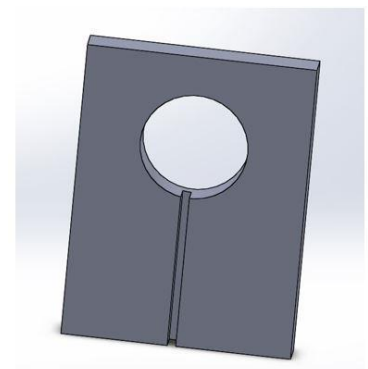


図3.1 治具(SolidWorks)

詳細を示す.

### 1. 罫書き線を入れる

図 3.1 の溝は罫書き線である. 溝の幅は切削に使うエンドミル径+1mm に設定する. エンドミル径と同じだと CAM 化した時に読み込まれない. また, 治具を定盤に固定する際に, b. で書いたフレームの下書き線と治具の罫書き線を合わせることで, 治具の時点でのねじれを防ぐことができる (はず). CAD 上だと円の中心から鉛直に線をおろせるため, これを罫書き線と合わせるようにする.

前回以前のフレーム接着の治具は治具に入れる罫書き線 (今回だと溝) も手書きだったらしく, 次年度以降も NC が使用できるなら NC を用いて治具製作を行った方が精度がでてよいと思われる.

### 2. 桁中心を揃える

治具の桁中心 (円の中心) の位置 (Z 座標) を必ず揃えなければならない. 本年度のフレーム桁は  $\Phi 60$  (2 種類),  $\Phi 50$ ,  $\Phi 110$  (全て設計値) と異なる値が多く, パイプ中心間のオフセットを 0 にするには, 治具で定盤からパイプ中心の距離を統一する必要がある. 本年度は 100mm とした. 値に意味はなく, キリがいいのと, あまりに治具の高さが高いと後述のパイプやすりの際のモーメントが不安, 治具用の材料にも限度があるなど大きすぎる欠点もある.

ただし, 個人的な所感として, 100mm だとパイプやすりの際に, 立ち膝で回すことになり, 身体的な負荷がかかってしまうので, 足腰に自信がないなら, 治具を高くしてみてもいいかもしれない...

### 3. 内径を実測径よりも増やす

CAD で治具データを作成する際の注意点である. 以下の表 2 にフレーム桁の設計値, 実測値, 治具の円の内径値をまとめた.

表 1 桁設計値, 実測値, 治具内径値

名称	設計値	実測値	内径値
メインビーム	111.444	112.8	113.3
前パイプ	61.888	61.90	62.10
後, 股下パイプ	61.666	61.55	61.70
背中パイプ	51.444	51.44	51.55

表 2 からわかるように、設計値と実測値は 1%程度の誤差しかないが、必ず実測を行うこと。WASA 所有の CNC は  $10^{-1}\text{mm}$  の精度出しが限界なので、実測値に基いて切り出しの内径値を決めること。

実測を行った後は、切り出しを行うわけだが、実測値と切り出しの内径値を等しくするとはめあいができないので、必ず内径値は実測値よりも大きくすること。大きくする度合いについては、試作を繰り返して適切な値を見つけるのがよい。本年度は 0.1~0.5mm の値で落ち着いた。+0.3mm 程度が適切な値と言えよう。

#### d. 治具製作

前回(13 年度機体)の時は、自在錘を用いて製作した。自在錘とは、ボール盤のドリル部にサークルカッターを取付け、円状の穴を空ける謎極まる工作機械である。ただ、危険極まりないのと、内径の精度が怪しいので、本年度からは CNC を用いて治具製作を行った。CNC を用いることで  $10^{-1}\text{mm}$  のオーダーまで確実に精度が出せる(とされている)のと、一度 CAD データさえ作ってしまえば同じものが量産可能なのが利点として挙げられる。

また、欠点としては、固定用の両面テープ費用がかさむ、切り出しに時間がかかる、CNC 使用者が限定されるなどが挙げられる。以下表 2 に CNC を用いた際の利点・欠点をまとめた。

表 2 CNC を用いる利点・欠点

利点	欠点
精度が出る( $10^{-1}\text{mm}$ 程度)	時間がかかる(1 治具 45 分程度)
1 人で製作できる	利用者が限定される
	諸費用がかさむ

CNC で治具製作した後に、紙やすりを用いて治具のバリ取りと内径調整を行う。

用いた紙やすりは#60→#120の順に行う。#60にて切り出しの際に生じたバリを取り、#120にて治具の内径調整を行う。やする際のポイントとして、対になる治具同士で同時にやすりを行うことである。1桁ごとに2つの治具を用いてパイプやすりを行うが、対で同時にやすりによる調整を行わないと同心度が出ないため、対になる治具を両面テープで接着してからやすりを行う。図3.2のように実際に桁とのはめあいを行い、紙が1枚入るほどの隙間が空くまでやする。紙1枚程度の隙間を空ける理由としては、罫書きをする際にカットラインを桁に貼ることで、紙1枚程度の隙間が空いてないと、そもそもパイプが回せないことが挙げられる。



図3.2 はめあいの様子

#### e. 治具固定

治具を製作したら定盤に治具を固定する。治具は1桁ごとに2つ、本年度はメインビーム、前パイプ、後ろパイプ、背中パイプ、足下パイプ、股下パイプの12個を設置する。治具を置く位置については、治具と他のパイプが干渉しない位置ならどこでもよいが、出切るだけパイプの端に近い箇所に設置するのがよい。

治具を直接設置するのではなく、まず定盤に治具の支えを接着する。図3.3に治具全体の様子を示したが、黒円で囲まれた箇所が治具の支えである。この支えがないと、パイプ回しの最中に治具がずれたり外れたりするので必ずつける。また、支えにも罫書き線を入れておく。支えに書いた罫書きと治具の罫書きを、支えの罫書きと定盤の下書きを合わせる。（可能ならば治具と定盤の罫書きを直接合わせる）



図3.3 治具全体の様子

また支えの材料には、フレームのモックアップ製作で使用した3×4断面の木材を用いた。大学付近のホームセンターで買ってきた木材で、材料は不明だが、材料は特に何でもよく、断面が長方形ならなんでもよい。

支えと定盤の接着にはセメダイン社のスーパーXを用いた。用いた理由として、硬化時間が早い、硬化後でも剥がせない程強固な接着力でもない、という2点が挙げられる。エポキシ樹脂などの、硬化時間が長く接着力が強いものは失敗できない上

に時間がかかってしまうため推奨はしない。

f. フレーム桁罫書き

前述の通りフレーム桁には罫書きを行う。罫書きを行う理由は、取付部を今後取り付ける際に桁に対して垂直,水平に取り付けるためである。フェアリング班の取り付けの都合や、車輪取付部の関係もあり、全桁に罫書きを施した。

罫書きの方法は

1. CAD で断面と垂直線と水平線を描く
2. 1.を等倍で印刷
3. 桁の水平出しをレーザー墨出し器で行う
4. 罫書きマスターの作成, 印刷
5. 罫書きマスターの添付
6. 水糸を張る
7. スプレー塗布
8. 罫書き延長

の手順で行う。

1について、4.で罫書きマスターを貼る準備である。桁の断面に貼り、罫書きマスターを貼る準備を行う。実際の写真を図 3.4 に示す。

2で添付を行う。

3については、翼土台に置いただけだと桁の水平がでていないため、チラシ等の厚い紙を用いて、レーザー墨出し器を用いて水平出しを行う。墨出し器は重力と水平方向をレーザーとして出力してくれるため水平出しを行う際には極めて重宝する。

4の罫書きマスターとは、4本の罫書きを行うために、等間隔に線が引かれた紙のことで、CADで製作した後、クリスタルテープを表面に貼ることで破れたりするのを防ぐ。

5で添桁の端の2箇所貼り、6でそれらに合わせて水糸を張る。7でその張った水糸の上からスプレーを塗布し罫書きを行う。

8の罫書き延長は、罫書きマスターを張った箇所はスプレー塗布されていないため、罫書きマスターを剥がし、罫書き線に合わせ養生テープを貼り、その上からスプレー塗布を行う。



図3.4 桁断面の図

g. ウレタン充填

罫書き終了後は、桁断面にウレタンを充填する。ウレタンを充填する目的としては、接着面積を増やすのが最大の目的である。その他にも、パイプやすりの際の目安になるなど他にも利点はある。

パイプを接着する箇所の断面全てにウレタンを充填する。設計主任が要求した特に強度が必要な箇所（メインビームー前パイプ、メインビームー後ろパイプ、後ろパイプー背中パイプ）は4倍ウレタンを、それ以外の箇所は20倍ウレタンを充填した。4倍ウレタンの方が引っ張り強度が強いため、強度が必要な箇所には4倍ウレタンを用いた。

ウレタンを充填する際の注意点がウレタンの充填方法である。ウレタンは意外に粘性が少ないため、完全に膨らむ前に垂れてきてしまうことが多々ある。そのため、コピー用紙などでウレタンの受け皿を作り、それにウレタンを流し込み、流し込み終わったら紙の上から手で押さえ、断面が下になる様に桁を立てると垂れる量を少なくすることができる。

h. パイプやすり

ウレタンを充填し終わった後は、フレーム接着の真骨頂であるパイプやすりを行う。

パイプをやする前に、パイプをある程度接着する際の断面に近づくために切断する。その際に用いるのが、カットラインソフトである。図3.5の様な.exeである。

主パイプと従パイプ（やする断面を作りたい方のパイプ）と取付け角とオフセットを入力するだけで、その切断面を出力してくれ、それを印刷しパイプに添付し、それに合わせて切断すれば断面形状が出来上がるというものであり、



図3.5 カットラインソフト

WASAに10年以上引き継がれる謎技術の1つである。カットラインを印刷する上での注意点は、

- ・パイプの外径は実測値を用いること
- ・値を入力する際は、+0.5mm程度大きめで入力する

の2点である。1点目については言わずもがなとして、2点目は、実測値のまま出力すると紙の厚さ分外径が増しているため、微妙に合わないため+0.5mm程度外径を大きくして出力する。大きくする度合いについては実際に印刷してみて現物合わせを行うのが一番良い。

また、カットラインを貼ってパイプを切断する際には、カットラインギリギリをきり過ぎないこともポイントである。カットラインの外側が残っている分ならやすれば問題ないが、内側まで削ってしまうとそこだけ接着が浮いてしまい強度合が落ちるため注意すること。

カットラインに沿ってパイプを切断し終わった後は、パイプやすりに移る。やすりの順番としては、

- 1.様子見(練習)として、前パイプと足下パイプをやする
- 2.取付角が  $90^\circ$  に近い、股下パイプー後ろパイプ、背中パイプー股下パイプをやする
- 3.取付角が  $90^\circ$  から遠いその他の箇所をやする

の順に行う。

やする順番は特に指定は無いが、強度が最も必要ない箇所で一度練習してから強度が必要な箇所のやすりを行うとよい。

やすりを行う際の注意点としては、人数が真っ先に挙げられる。パイプをやする人(2人)、治具を抑える人(2人)、治具のずれを見る人(2人)の計6人は最低限必要である。パイプを回しながら治具のずれを見るのは個人にかかる負担が大きいため、回避した方がよい。治具の野書き(溝)と支えの野書きが少しでもずれたら、治具を抑える人はそれを指摘しパイプやすりを中断すること。

やする際、まずウレタンがやすれるため、粉塵は灰色に近い色になるが、パイプのCFRPがやすれだすと次第に黒色に近づく。粉塵の色が黒色になったらやする速度を少し抑え、やすり過ぎない様気をつけること。

必ずしもカットライン通りにやすれない場合もある。やすりを終える基準としては、薄い紙(コピー用紙など、チラシだと厚い)が、パイプを押して入らない程度までやすること。紙が入るということは、それだけ接着が浮いているということであり、そこで接着不良を起こす。

パイプやすりが終盤になるにつれての注意点もある。やすることに夢中になりすぎて、実際にフレームを組んだ際に各々では接合できているが、全体で噛み合っていないことが一番の惨事なので、半分くらいやすり終わったら適宜やすり終わったパイプで仮組みを行うことも必ず行うこと。

#### i. 表面処理・接着

パイプやすりを行ったら、接着を行うわけだが、その前に忘れてはならないのが表面処理である。表面処理を行わないで接着を行わないと、接着剤とパイプ表面との界面で接着不良を起こす。

表面処理は、紙やすりで接着される側をやする。#60→#120→#240の紙やすりを用いた。まず#60で表面のOPP痕が見えなくなるまでやすり、その後#120、#240



の順にやする。表面の積層が 1ply 剥がれるくらいやすれば表面処理終了の目安である。

表面処理終了後、アセトンなどの有機溶媒を用いて脱脂を行う。脱脂はキムワイプに粉塵が付かないまで拭くこと。

やすり、脱脂終了後は接着を行う。接着の前には h. のパイプやすりの段階で仮組みを行っているはずなので、接着は一度に行う必要はない（というかできない）。接着する順番はやすった順番と同様に行うとよい。

また、接着をする際の注意点は治具にある。治具をそのままにしておくと接着が終わった際に治具が閉じ込められてしまうので、治めを中央の空いている円の箇所を切断し、再度金具で固定する。その様子を図 3.6 に示した。

治具を切断する前に金具 2 つを置き、ネジ穴を空け、切断後ネジ穴に合わせて再度接合する。この治具の調整は、あとは接着のみの時に行うこと。

接着には、HUNTSMAN 社の Araldite2011 のエポキシ樹脂を用いた。やすった方のパイプ、やする方のパイプ双方共にエポキシを塗る。エポキシを塗った後、パイプを押してビニールテープで圧着する。圧着は図 3.7 の様に行う。図の黒丸がビニールテープである。接着がずれない様に行うのがポイントである。



図3.6 治具再固定の様子



図3.7 圧着の様子

#### j. 盛り

接着が完了した後は、盛りを行う。盛りを行う理由としては、R をつけての補強が第一である。

盛りは 2 種類にわけて行う。エポキシ樹脂に CFRP の充填材を含めたもの、その次にパイプ片を用いてロール方向の強化を行った。

始めに行う充填材の強化はアラルダイトの A（主剤）と B（硬化剤）と充填材を A:B:充填材=10:8:3.5 の混合比で混ぜたものを使用する。この混合比は、歴代の混合比試験と実際に使用した際の加減により決定した。

この盛りは接着箇所全てに施す。

次に行うロール方向補強の盛りは今年度より取り入れた方法である。図 3.8 にその様子を示した（図内黄円が



図3.8 盛りの様子

盛りのパーツ)

前パイプ (Φ60) を切断し, 100mm 程度に切断した後三角形に切断, カットラインに合わせて切断する. 切断後は現物合わせでやる. 前パイプメインビームは取付角が 90° なので接着→圧着は容易だが, 背中パイプメインビームは取付角が 90° でないため, 圧着が非常に難関である. 多少の浮きは覚悟の上で, 浮いた箇所にはアラルダイトと流し込むなどして対処すること.

#### k. 積層

盛りまでが終了したら積層を行う. 低粘度エポキシを 3K カーボクロス材に含浸させ, 全接着箇所積層する. 前パイプメインビーム, 背中パイプメインビームは 2 層積層を行った.

積層後はビニールテープで圧着を行い, フレーム接着完了である. 完成したフレームを図 3.9 に示す.



図3.9 完成したフレーム

#### 4. 終わりに

以上をもってフレーム接着の全報告となる. 図が少なく, 文ばかりになってしまったが, 図では説明しきれない箇所もあるので, 不明瞭な箇所があれば直接呼んで聞いて欲しい. また, 最後になったが, フレーム接着に協力してくれた班員や他班, OBOG の方にこの場を借りて感謝したい.

以上

## 連絡先

早稲田大学宇宙航空研究会

鳥人間プロジェクト駆動フレーム班 31 代班長 杉山 拓弥

taks.jx5018 あっとまーく gmail.com

(あっとまーくを@に変換)

## 参考

フレームパイプの名称

