

1. はじめに

炭素繊維強化複合材料(CFRP)は軽くて強い材料として、次世代の軽量化素材として期待されている。とくに母材樹脂にナイロン等の熱可塑性樹脂を用いた熱可塑性 CFRP は、加熱すれば軟化して変形加工が可能になり、冷却すれば固まる性質から、成形時間を短縮できて生産性が向上することに加え、再加工、補修、リサイクルが容易といった特徴が注目されている。このため、中間素材と呼ばれる、熱可塑性樹脂を炭素繊維の布やテープに含浸させた素材がさまざまな企業で開発がされるなど素材開発は進んでいる。一方で目的の形状や繊維配向を実現するための成形加工技術の開発が熱可塑性 CFRP 普及への大きな課題であり、我々の研究グループでは熱可塑性 CFRP に適応したプレスや鍛造などの成形加工技術の研究開発に取り組んできた。

とくに近年では、熱可塑性 CFRP パイプの成形方法として筆者らの開発した組紐プレス成形⁽¹⁾に取り組んでいる。これは以下の工程からなる。(1)組紐工程:組紐装置を用いて一方向繊維熱可塑性 CFRP テープをシリコンマンドレル上に右螺旋、左螺旋、および軸方向に配向させて組紐を製作する。(2)プレス工程:上記シリコンマンドレル内にシリコンロッドを挿入し、これらを金型内に設置して外部から熱を与え、シリコンロッドを軸方向に圧縮して内圧を与えながら冷却してパイプを得る(図 1)。この特徴は、シリコンロッドを介した内圧により、低い荷重で高い圧力(数 MPa)を均等に付与できること、層間を強固に密着させることができ強度の高いパイプを成形できることである。

シリコンゴムを用いる利点は、(1)加熱温度 250℃に耐えられること、(2)組紐工程では CFRTT テープの組紐層を数十層重ねるため層間に隙間ができ、これを内圧でつぶす過程で組紐の内径が拡

大するが、その変形に追従できること、(3)均一に加圧できること、である。一方で、柔軟なシリコンゴムと接触する内面は、図 2 に示すように、繊維の凹凸が残り、寸法安定性に欠けることが問題であり、その解決が課題であった。



図 2 成形したパイプ内部の凹凸

2. 目的

本申請の研究期間内には、他の部品とのはめ合いを想定して、内径の寸法安定性と平滑性を改善した熱可塑性 CFRP パイプ成形用の金型の設計法を確立し、その効果を確かめることを目的とする。

3. 実用的な価値、実用化の見込など

本研究で対象とするのは大型ドローンであり、可搬重量が 50kg を超え、8 個のローターを有し、それぞれを支えるフレームの長さが 800mm ほどあり、ローターを含めた全長は 2400mm ほどである(図 3)。これを山間部まで軽トラック等で運搬して運用することを想定していることから、フレームは簡単に着脱が可能で、フレーム自体を軽くして作業者の負荷低減を図る必要がある。このためボルト等をつかわずはめ込みによる組立が求められ、ここに内面寸法を安定させる実用的な価値がある。



図 3 大型ドローンの例

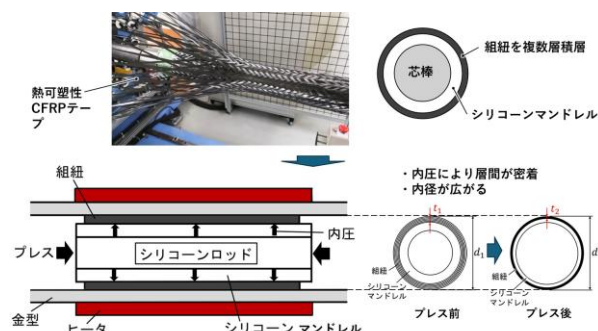


図 1 組紐プレス成形法

このフレームを仮にジュラルミンから熱可塑性 CFRP に置き換えて同じ剛性のフレームを得ようとする場合、表 1 に示すように、熱可塑性 CFRP のヤング率はジュラルミンに劣るものの、比重が半分程度であり、ジュラルミンに対して質量を 60%に抑えることが可能であると試算した。ドローン全体の重量削減につながり、より長時間の飛行、より重い荷物の運搬が可能となる。

表 1 物性の比較

	曲げ強度 [MPa]	曲げ弾性率 [GPa]	比重	等価剛性を得る ための板厚比※	質量比
熱可塑性CFRP	563	54.2	1.5	1.1	0.6
ジュラルミン (A2017)	425 (引張強さ)	72.6	2.8	1	1

※片持ちはりの断面二次モーメントより算出

4. 研究内容の詳細

4.1 成形品形状

成形対象は、図 4 に示すようにテーパ状の全長 800mm のパイプである。断面はオーバル状で剛性を高める形状とし、小径側の長軸が 53mm、短軸が 40mm、板厚は 3mm、大径側の長軸が 76mm、短軸が 60mm、板厚は 2mm である。炭素繊維は伸び縮みすることができず、断面積を両端で一致させる必要があるため、テーパ領域では板厚が傾斜的に変化している。フレーム両端 120mm 区間をクランプするため、この内面を平滑に仕上げる必要がある。

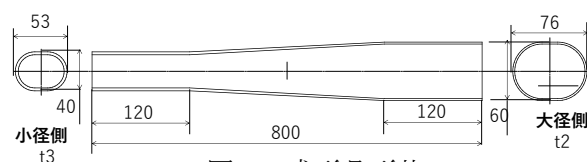


図 4 成形品形状

4.2 マンドレルの構成

図 5 はマンドレルの構成を示したものである。テーパ部はシリコンマンドレルを用い、フレーム両端 120mm 区間の平坦部がクランプ領域であるため、この内面を平滑に仕上げる必要があり、後述する金属製の分割マンドレルを用いる。これらの上に熱可塑性 CFRP テープを巻き付けて組紐を製作する。

プレス工程では、マンドレル中心にシリコン角ロッドを挿入し、これを軸方向に圧縮して組紐に内

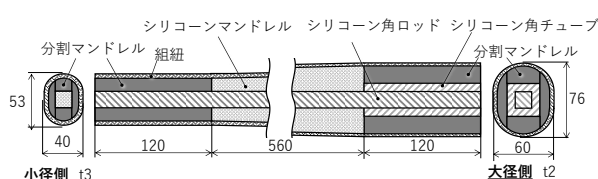


図 5 マンドレルの構成

圧を与える。ただし座屈を防ぐため長さ 50mm 程度の角ロッドを並べている。

4.3 分割マンドレルの設計

図 6 は、設計製作した金属製の分割マンドレル²の基本構造である。中心のシリコン角ロッドの周囲に 4 つに分割した金属製マンドレルが配置され、その周囲は組紐工程で製作した組紐が巻かれており、これらを金型に収める。この状態でシリコン角ロッドを軸方向に圧縮すると分割マンドレルが四方に移動して組紐に圧力を与える。分割マンドレルマンドレル表面は平滑であるため、組紐内面も平滑に仕上がる。分割にすることで組紐の内径拡大にも追従することができる。ただし分割マンドレルの分割面に隙間ができるため、ここを t0.1mm の SUS テープで埋めて繊維や樹脂が入り込まないようにする。なお、プレス前後での組紐の板厚は、小径側で t4.5mm から t3mm に、大径側で t3mm から t2mm に変化する。

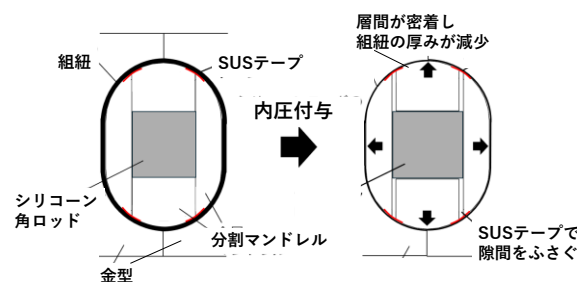


図 6 分割マンドレルの基本構造

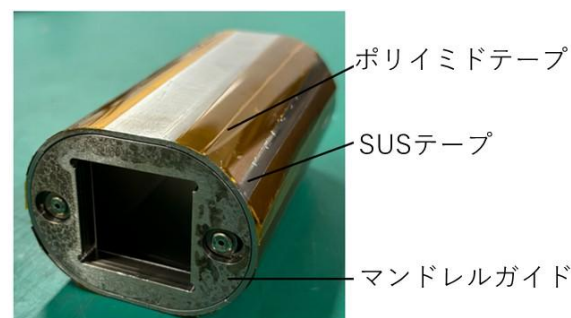


図 7 分割マンドレルの外観

4.4 プレス荷重と算出

シリコン角ロッドによる内圧が液圧として組紐に伝達すると仮定して必要なプレス荷重を求める。プレス工程で荷重を与えるのは中心のシリコン角ロッド(□17mm)である。小径側の平坦部を含む分割マンドレルの幅は、図 8 に示すように 39.3mm なので、面積比は

$$39.3\text{mm} \div 17\text{mm} = 2.3$$

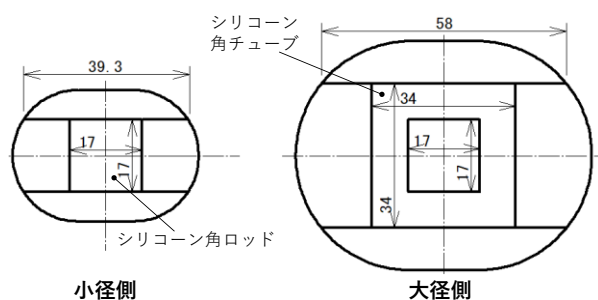


図 8 分割マンドレルの寸法

となり、シリコーン角ロッドの圧力の約半分の圧力となる。仮に平坦部に 5MPa を与えるとする、シリコーン角ロッドに必要な圧力は 10MPa であり、必要なプレス荷重は

$$10\text{MPa} \times 17\text{mm} \times 17\text{mm} = 2890\text{ N}$$

であり、小さな荷重で高い圧力を与えることができる。

大径側は、 $\square 17\text{mm}$ ロッドで平坦部を含む分割マンドレルを直接加圧すると面積比が小径側と大きく異なる。このため $\square 34\text{mm}$ の角チューブを角ロッドにかぶせて面積比を

$$58\text{mm} \div 34\text{mm} = 1.7$$

として小径側のそれに近づけている。よってシリコーン角ロッドに 10MPa を与えて同じ圧力がシリコーン角チューブにも伝達するとした場合、分割マンドレルに作用する圧力は

$$10\text{MPa} \div 1.7 = 5.9\text{MPa}$$

となる。使用している CFRTP テープは 3MPa 以上の加圧で層間にボイド(空洞)のないパイプができること、シリコーンゴムによる圧力分布はほぼ均等であることを確認している。

4. 5 成形実験条件および結果

組紐工程で用いた熱可塑性 CFRP テープは、母材樹脂が PA6 で融点は 225℃、炭素繊維体割合は 53%、厚み 42 μm のものである(Shindo 製)。組紐の 1 層はマンドレルの軸に対して +45 度、-45 度にした組糸(幅 3mm)と、軸に沿った軸糸(幅 5mm)からなり(図 9)、これを 29 層積層した。

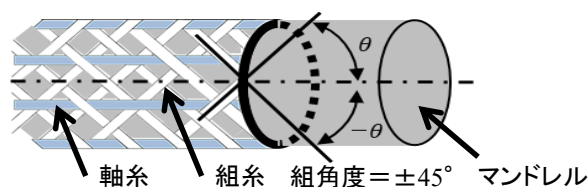


図 9 組紐構造

プレス工程では、図 10 に示すように、マンドレル中心にシリコーン角ロッドを挿入して金型に設置し加熱加圧する。加熱温度は 250℃、内圧は

4MPa とし、内圧を 10 分間保持した。その後ヒータを切り、内圧を保持したまま金型が 120℃になるまで冷却し、金型を分解してマンドレルを抜き取り、パイプを成形した。

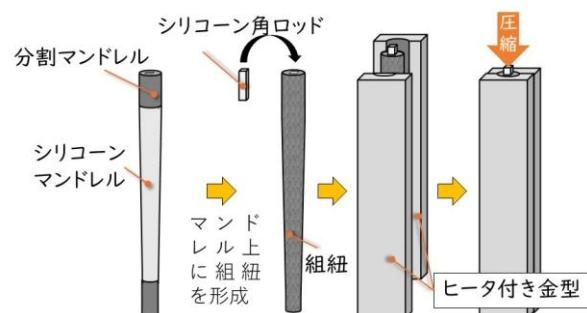


図 10 組紐プレス手順

4. 6 成形品外観

成形したパイプの外観を図 11 に示す。パイプ外面は金型と接触しているため全面的に平滑で、バリのない成形ができる。内面は、小径側も大径側も、繊維の凹凸やバリもなく、期待した通りに平滑な面を得られている。なお分割マンドレルの隙間を埋める SUS シートの効果と、流動しにくい連続繊維の性質により、目立ったバリがなく良好な成形ができています。

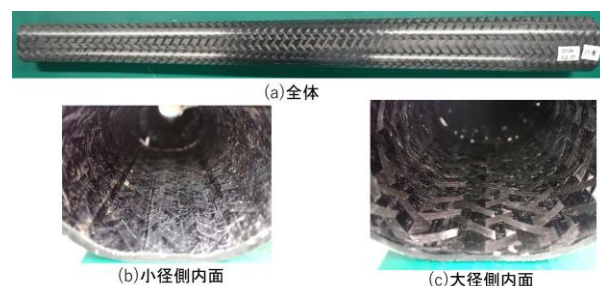


図 11 成形したパイプの外観

4. 7 断面組織

図 12 は大径側の平坦部の軸方向に沿った断面組織であるが、層間の剥離やボイドがなく、表面が平滑にできており、分割マンドレルで適切な加圧ができていることを示している。なお画面の白い筋状のものは画面に平行な炭素繊維の断面で、粒状のものは画面に交差する繊維断面であり、繊維の隙間は母材樹脂が充填されている。

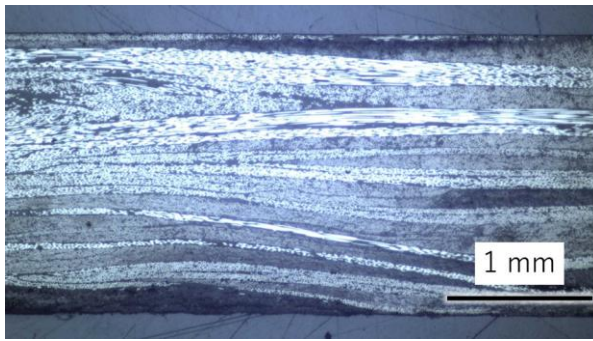


図 12 大径側平坦部の軸方向に沿った断面組織



図 14 実機に装着した飛行試験の様子

4. 8 寸法測定結果

パイプの各部を切断し、非接触の形状測定機を用いて撮影した断面画像を図 13 に示す。また、オーバルの平坦部とR部の板厚を実測し、平均板厚とその標準偏差を求めた。シリコンマンドレルで加圧されるテーパ部は内面に凹凸があり、板厚の標準偏差が 0.17~0.34 なのに対し、分割マンドレルが接触する小径部および大径部では内面の凹凸がなく、板厚の標準偏差がおおむね 5 分の 1 となっており、分割マンドレルにより平滑度が向上する効果が得られている。



	(a)小径部		(b)テーパ部		(c)大径部	
	(A)平坦部	(B)R部	(A)平坦部	(B)R部	(A)平坦部	(B)R部
平均板厚 [mm]	2.45	3.03	1.97	2.41	1.84	2.05
標準偏差 [mm]	0.03	0.10	0.17	0.34	0.04	0.08

図 13 寸法測定結果

4. 9 ドローン飛行試験

実際のドローンに成形したパイプを取り付けた様子を図 14 に示す。パイプ大径側を本体に、小径側にモータをそれぞれクランプして取付けた。この状態で飛行を行うことができ、パイプのクランプ部および剛性が適切であることが確かめられた。ドローンの総重量は 50kg、可搬重量は 30kg であった。なお先行研究では単純円筒状のパイプを用いたが、剛性不足によりアルミ製補助フレームを追加して飛行した。これに比べると合計で約 10kg の軽量化を達成した。

5. まとめ(結言)

本研究では、組紐プレス成形での課題であったパイプ内面の平滑化に取り組んだ。平滑さが求められる部分に加圧する手段として、金属製の分割マンドレルを考案し、圧力によって分割マンドレルが外側に広がって組紐に内圧を与える構造とした。プレス成形実験では、その機構が適切に作動すること、成形品内部組織にボイドなどがなく加圧が良好であることが確かめられた。さらに内面形状測定および板厚計測結果から、シリコンゴムでの加圧に比べてパイプ内面の形状精度を 70%程度向上することができた。

ドローンへ取り付けた飛行実験を実施し、平滑化を図った領域をクランプできたこと、剛性強度とも適切であったことが確かめられ、総重量 50kg のドローンを飛行させることができた。

以上より、組紐プレスにおける内面形状を改善する手法が開発され、その効果が確かめられた。金属製分割マンドレルの設計についての知見が得られ、本技術のさらなる発展につながることが期待できる。

6. 参考文献等

- 1) D. Tatsuno, et al.; Braid-press forming for manufacturing thermoplastic CFRP tube, International Journal of Material Forming, 14(4), 753-762, 2021.
- 2) 東 晃史郎ほか; 内径を拡大する組紐プレス成形法, 2024 年度塑性加工春季講演会講演論文集, 606, 2024.