

研究論文

多給糸 FW 法を用いた CFRTP パイプの成形条件の検討

深谷憲男*1、田中俊嗣*1、原田真*1

Determination of Optimum Condition for Molding of CFRTP Pipes Were Made by Multi-Supply Filament Winding Method

Norio FUKAYA*1, Toshitsugu TANAKA*1 and Makoto HARADA*1

Mikawa Textile Research Center*1

数十束もの繊維束を同時に巻き付ける Filament Winding 法(多給糸 FW 法)を用いて異なる加熱条件及び繊維束の太さで CFRTP パイプを作製し、圧縮強度と破壊形態の違いから、最適な CFRTP パイプの成形条件の探索を行った。その結果、成形温度を高く、1 束あたりの炭素繊維本数を少なくすることにより、安定的な成形及び圧縮強度の向上が確認できた。

1. はじめに

従来、CFRP(炭素繊維強化樹脂)は、比強度などが優れていることから航空宇宙分野、スポーツ分野などで利用が進められてきた。特に近年、燃費向上の要求から軽量化を目的として自動車分野での利用が検討されている。

CFRP のマトリックスには力学的物性が高いことから熱硬化性樹脂が使用されてきたが、量産性、2 次加工性、リサイクル性、成形時に化学反応を伴わないなどの点から、CFRTP(炭素繊維強化熱可塑性樹脂)が注目されている。

前報¹⁾では、一束の炭素繊維束を巻き付けていく従来の Filament Winding 法(FW 法)とノンクリンプ状態に配向させた数十束もの繊維束を同時に巻き付ける FW 法(多給糸 FW 法)²⁾の異なる 2 種の供給法による FW 法を用いて CFRTP パイプを作製し圧縮強度測定を行った。

その結果、従来の FW 法パイプと比較して、多給糸 FW 法パイプは、弾性座屈が起きにくく、エネルギー吸収特性が優れている傾向が見られた。また、炭素繊維が剥がれながら圧壊するという特徴的な破壊形態が確認されたため、繊維配向、繊維破損、積層剥離、樹脂と繊維の界面強度、含浸性などの要因が複雑に絡みながら起きている現象と考えられた。

そこで、本研究では、樹脂と炭素繊維の界面強度の把握を目的として、マイクロドロップレット試験による界面せん断強度の測定を行った。また、加熱処理によるせん断強度変化の検証を行った。

さらに、多給糸 FW 法を用いて使用する炭素繊維総本数は同一として、異なる加熱条件及び 1 束あたり異なる炭素繊維本数で CFRTP パイプを作製し、圧縮強度試験

から、最適な CFRTP パイプの成形条件の探索を行った。

2. 実験方法

2.1 樹脂と炭素繊維の界面せん断強度

マイクロドロップレット試験により、樹脂と炭素繊維の界面せん断強度の測定を行った。界面せん断強度(τ)の導出には $\tau = F/\pi dL$ を用いた。マイクロドロップレット試験の概略図を図 1 に示す。樹脂は、ナイロン(LEXTER8500、三菱ガス化学(株)製)、繊維は、炭素繊維束(TR50S-12k、三菱ケミカル(株)製)を使用した。

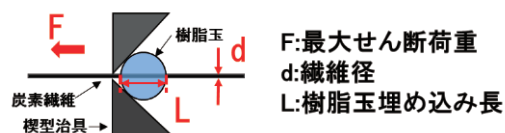


図 1 マイクロドロップレット試験の概略図

試料の作製は、炭素繊維束から 1 本を引き抜き、複合材界面特性評価装置(HM410、東栄産業(株)製)の電気炉を使用し、窒素雰囲気中 200℃で樹脂玉(ドロップレット)を炭素繊維に付着させた。樹脂付けの様子、作製した樹脂玉を図 2 に示す。

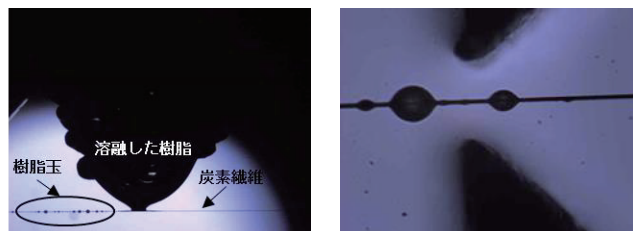


図 2 作製した樹脂玉

さらに、加熱処理の影響を検証するために、未処理の試料と送風定温乾燥器(DRM420DA、アドバンテック東

*1 三河繊維技術センター 産業資材開発室

洋(株)製)を用いて、230℃、260℃で各々30分間加熱処理を行った試料と合わせて合計3種の試料を作製した。

測定には、上記の複合材界面特性評価装置を使用し、試験速度は0.3mm/minとして最大せん断荷重を測定した。1種あたり炭素繊維を5本選定し、1本あたり樹脂玉を10個ずつ選定し試験数を合計50とした。

なお、埋め込み長は、画像処理ソフト(ART-MEASURE Ver.1.3.8.2、(株)アートレイ製)により計測を行った。また、繊維径は7 μ mとして界面せん断強度を求めた。

2.2 多給糸FW法パイプ成形

多給糸フィラメントワインダーを使用して、短波長赤外線ヒーターの入力電圧の3条件、原料構成の2条件の組み合わせ(表1)で多給糸FW法によるパイプ成形を行った。

表1 多給糸FW法パイプ成形条件

装置	多給糸フィラメントワインダー MFW48-1200CKS 村田機械(株)製
積層構成	4層
配向	+45、-45、+45、-45deg
成形速度	60mm/min
加熱装置	短波長赤外線ヒーター ヘレウス(株)製
マンドレル径	12mm
入力電圧	120、150、180V
原料構成 条件1	半含浸コニングルヤーン カジレーネ(株)製 TR50S-12k/LEXTER8500 1334dtex Vf:48.7% 構成繊維束本数8本
原料構成 条件2	半含浸コニングルヤーン カジレーネ(株)製 TR50S-6k/LEXTER8500 667dtex Vf:48.7% 構成繊維束本数16本

2.3 成形表面温度測定

多給糸FW法によるパイプ成形時の繊維束がマンドレルに到達する位置(巻き点)(図3)にヒーターを設定し、その巻き点の表面温度を測定箇所とした。

測定には赤外線サーモグラフィカメラ(G120W2-NUU、NECAvio 赤外線テクノロジー(株)製)を使用した。

2.4 寸法・密度測定

適切な成形条件の探索を目的として、試作したパイプの寸法及び密度測定を行った。1本の試作したパイプから5ヶ所を選び、長さ5cmで切り出した。そして、試

料の測定した質量と寸法から密度を求めた。

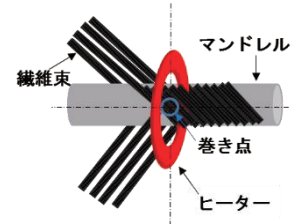


図3 巻き点とヒーターの位置

2.5 圧縮強度試験

軸方向の圧縮強度測定を行った。試験条件は表2のとおりとした。

表2 圧縮強度試験条件

装置	精密万能試験機 AG-50kNXPlus (株)島津製作所製
試料長	50mm
試料数	5個
温湿度	23℃ 50%RH
圧子	水平
試験速度	5.0mm/min

3. 実験結果及び考察

3.1 樹脂と炭素繊維の界面せん断強度

表3~5にマイクロドロップレット試験により、樹脂と炭素繊維の界面せん断強度の測定を行った結果を示す。測定した樹脂玉の大きさ(埋め込み長)は、約60 μ m程度の樹脂玉を選択した。これは、樹脂玉が小さすぎると、楔型治具に引っかけることができず、一方、大きすぎると炭素繊維自体が破断したためである。

表3 200℃ 樹脂付けのみ

	埋め込み長 (μ m)	最大せん断 荷重(mN)	界面せん断 強度(MPa)
平均値	60.5	43.5	32.4
標準偏差	9.53	14.8	8.67
変動係数	0.158	0.341	0.267

表4 200℃ 樹脂付け→230℃×30min

	埋め込み長 (μ m)	最大せん断 荷重(mN)	界面せん断 強度(MPa)
平均値	61.0	25.6	19.0
標準偏差	9.42	6.51	3.55
変動係数	0.154	0.254	0.186

表5 200℃ 樹脂付け→260℃×30min

	埋め込み長 (μ m)	最大せん断 荷重(mN)	界面せん断 強度(MPa)
平均値	63.8	61.1	43.0
標準偏差	9.12	17.1	7.76
変動係数	0.143	0.279	0.180

測定結果としては、200℃ 樹脂付けして 260℃で 30 分加熱処理した試料の界面せん断強度が 43.0MPa と最も高く、続いて、200℃ 樹脂付けのみの試料が 32.4MPa、200℃ 樹脂付けして 230℃で 30 分加熱処理した試料は、19.0MPa と低い値であった。

これらの結果は、目視により、230℃で 30 分加熱処理した試料は黄色、260℃で 30 分加熱処理した試料は、黄褐色が確認されたため、加熱処理により、樹脂の熱劣化を伴い、延性から脆性への遷移が起きて、界面せん断強度が低くなったり、高くなったりしていたのではないと思われる。また、樹脂付けした後に加熱処理した試料は、変動係数が小さくなり、値が安定する傾向となった。加熱処理により、樹脂付けする際に生じた、残留応力や残留ひずみが、結果的に除去されたためではないかと思われる。

3.2 多給糸 FW 法パイプ成形条件探索

図 4 に成形時の赤外線サーモグラフィカメラによる表面温度分布の画像結果と巻き点における表面温度結果を示す。原料構成条件 1 による表面温度測定結果から、短波長赤外線ヒーターの入力電圧を 120V、150V、180V にすると、巻き点の位置で各々約 197℃、約 230℃、約 261℃となり、約 30℃ずつ上昇していた。一方、原料構成条件 2 では、約 203℃、約 251℃、約 323℃となり、入力電圧 120V では、大きな変化はなかったが、150V、180V は大きく表面温度が上昇していた。原料構成条件 1 に使用している炭素繊維本数は 1 束あたり 12K であり、それに対して原料構成条件 2 では 1 束あたり 6K と半分の繊維本数のため、細くなることにより熱の伝達効率が上がったためと思われる。

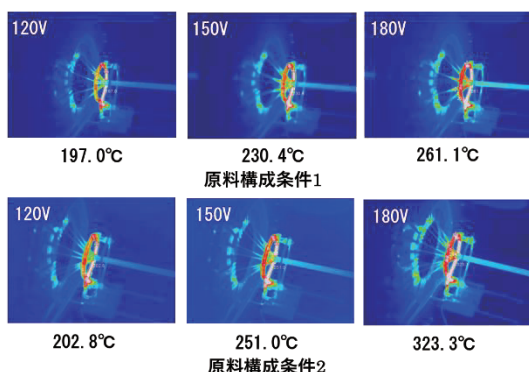


図 4 表面温度測定結果

試作したパイプの密度と厚さの測定結果を表 6~11 に示す。表面温度測定では差が見られなかった入力電圧 120V では、原料構成条件 1 に比べ原料構成条件 2 は、密度が大きく、厚さが薄くなっていた。加えて、ばらつきを評価する変動係数も小さくなっていた。これは内部まで熱が伝わって樹脂と炭素繊維の含浸性が向上したためと思われる。また、1 束あたりの炭素繊維本数が少な

い方が、マンドレルに巻き付け時の接着面積が小さくなるので接着圧力が向上していいのではないかと推察される。他の入力電圧条件でも同じように密度が大きく、厚さが薄くなる傾向となった。特に入力電圧 180V の原料構成条件 2 は、密度と厚さの変動係数が、0.0116、0.00614 と最小値となっていた。この結果から成形温度を高く、1 束あたりの炭素繊維本数を少なくすることにより、安定的に成形できることが示唆された。

表 6 入力電圧 120V 原料構成条件 1 試作結果

	密度(g/cm ³)	厚さ(mm)
平均	0.981	1.66
標準偏差	0.0504	0.139
変動係数	0.0541	0.0835

表 7 入力電圧 150V 原料構成条件 1 試作結果

	密度(g/cm ³)	厚さ(mm)
平均	1.03	1.47
標準偏差	0.0271	0.0457
変動係数	0.0262	0.0310

表 8 入力電圧 180V 原料構成条件 1 試作結果

	密度(g/cm ³)	厚さ(mm)
平均	1.17	1.28
標準偏差	0.0582	0.105
変動係数	0.0498	0.0824

表 9 入力電圧 120V 原料構成条件 2 試作結果

	密度(g/cm ³)	厚さ(mm)
平均	1.01	1.51
標準偏差	0.0312	0.0480
変動係数	0.0309	0.0318

表 10 入力電圧 150V 原料構成条件 2 試作結果

	密度(g/cm ³)	厚さ(mm)
平均	1.13	1.35
標準偏差	0.0357	0.0502
変動係数	0.0316	0.0372

表 11 入力電圧 180V 原料構成条件 2 試作結果

	密度(g/cm ³)	厚さ(mm)
平均	1.23	1.22
標準偏差	0.0142	0.00748
変動係数	0.0116	0.00614

3.3 圧縮強度

図 5 に試作したパイプの圧縮強度測定により得られた圧縮応力-ひずみ曲線を示す。ばらつきは、あるものの各加熱条件とも最大圧縮応力に達した後、圧縮応力が低下し、増減を繰り返しながらひずみが進んでいく傾向となった。これは、連続的にパイプが圧壊を繰り返したためと思われる。また、前報と同様に、弾性座屈は起きな

かった。入力電圧 120V で試作したパイプの圧縮試験後の試料を **図 6** に示す。原料構成条件 1 の試料は、上部の破損が大きい様子が分かる。上部の破損を起点として初期の最大圧縮応力達した後に局所的な破損をしながら、圧壊が進んでいったためだと思われる。一方、原料構成条件 2 の試料は、巻いた炭素繊維が剥がれている様子が分かる。初期の外側の積層剥離が主な要因として圧壊が進行していくように思われた。

また、入力電圧を 180V に上げると原料構成条件 1 の試料は、上部破損が確認できるものの、原料構成条件 2 の試料は、上部ではなく中央あたりに大きな繊維に沿った破損が確認できる (**図 7**)。

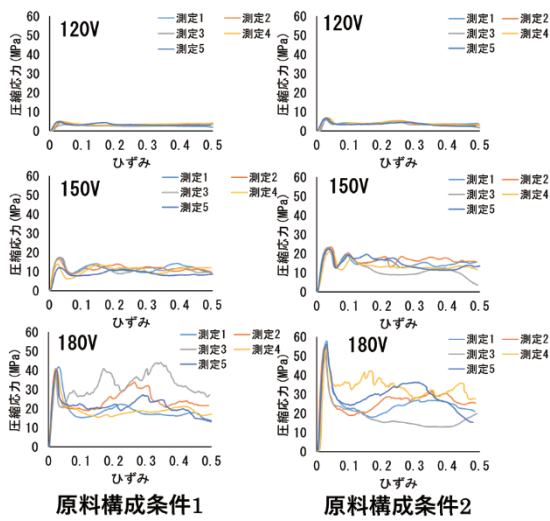


図 5 圧縮応力-ひずみ曲線



原料構成条件1 原料構成条件2

図 6 入力電圧 120V 試作パイプ圧縮試験



原料構成条件1 原料構成条件2

図 7 入力電圧 180V 試作パイプ圧縮試験

表 6~11 の密度結果と各試料の最大圧縮応力から求めた比強度と試料が全長の半分になるまでに必要としたエネルギーと質量から求めたエネルギー吸収量を **表 12** と **表 13** に示す。なお、数値は 5 測定の実測値である。

入力電圧を上げていくほど、比強度とエネルギー吸収量ともに大きくなっていく傾向となった。これは樹脂と炭素繊維の含浸性の向上に伴う、界面せん断強度及び炭素繊維自体の座屈強度の改善などが主な要因だと思われる。また、原料構成条件 1 に比べ、原料構成条件 2 で試作した試料の方が、比強度が約 3 割程度向上していたが、エネルギー吸収量に関しては、あまり差が見られなかった。図 5 の圧縮応力-ひずみ曲線が示すように最大圧縮応力が向上しても、原料構成条件 1 と同程度まで圧縮応力が低下してからひずみが進行していったためだと思われる。

表 12 原料構成条件 1 圧縮強度結果

入力電圧	比強度 (kN・m/kg)	エネルギー 吸収量(J/g)
120V	4.92	1.71
150V	15.0	5.21
180V	35.5	9.91

表 13 原料構成条件 2 圧縮強度結果

入力電圧	比強度 (kN・m/kg)	エネルギー 吸収量(J/g)
120V	6.63	1.88
150V	20.0	6.30
180V	45.3	10.4

4. 結び

本研究の結果は、以下のとおりである。

- (1) 樹脂と炭素繊維の界面せん断強度測定は、加熱処理温度により、界面せん断強度が増減した。
- (2) 多給糸 FW 法によるパイプ成形条件の探索は、成形温度を高く、1 束あたりの炭素繊維本数を少なくすることにより、安定的に成形できる。
- (3) 圧縮強度は、成形温度を高く、炭素繊維束を細くすることにより、比強度が約 3 割程度向上した。

文献

- 1) 深谷憲男, 原田真, 茶谷悦司, 松田喜樹: あいち産業科学技術総合センター研究報告, **9**, 102(2020)
- 2) Tadashi Uozumi, Akio Ohtani, Asami Nakai, Motohiro Tanigawa, Tatsuhiko Nishida and Takahiro Miura: *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, **5**, 435-439(2015)