

# 熱可塑性 FRP の疲労評価・推定・診断に関する研究（第1報）

鈴木 貴行、千原 健司、山田 孝弘

## Study on long-term durability in fatigue of fiber reinforced thermoplastics (I)

Takayuki Suzuki, Kenji Chihara and Takahiro Yamada

熱可塑性 FRP は短時間成形が可能なため、軽量化及び生産性が重視される分野で研究開発が盛んに行われている。しかし、熱可塑性 FRP はマトリックス樹脂の物性が環境要因に応じて変化するため、特に材料で重要となる疲労特性のデータベース化が困難である。本年度は、熱可塑性 FRP の基本的な疲労特性の評価方法を確認するために、PA6 と炭素繊維からなる熱可塑性 FRP の引張疲労試験および両振り平面曲げ疲労試験を行った。その結果、引張疲労試験における課題および両振り平面曲げ疲労試験におけるバラツキの改善方法が判明した。

### 1. はじめに

樹脂に繊維を複合化させた繊維強化プラスチック（FRP : Fiber Reinforced Plastics）は軽量かつ高強度なため、航空宇宙関連や自動車産業、スポーツ用途など様々な製品で活用されている。特に熱可塑性 FRP は加熱・冷却による短時間成形が可能なため、自動車部品などの生産性が重視される分野で、研究開発が盛んに行われている。岐阜県工業技術研究所においても、「熱可塑性 CFRP（CFRTP）の立体成形技術の確立」<sup>1)</sup>において、成形・加工条件を確立し、自動車のオイルパン（図1）等を製作した。また、「CFRTP を活用した超軽量下肢装具の開発」<sup>2)</sup>において CFRTP 製下肢装具（図2）を実用化するなど熱可塑性 FRP を用いた研究を行ってきた。

また、これらの研究を通して、熱可塑性 FRP の疲労評価が困難であることが分かってきた。これは、熱可塑性 FRP 内の繊維と樹脂の接着性や樹脂物性が環境要因（温度、湿度、成形条件、試験条件など）に応じて変化するためである。この他、効率的な評価方法も確立されておらず、熱可塑性 FRP の効率的な疲労評価方法を確立することを目的に本研究を開始した。本年度は、熱可塑性 FRP の基本的な評価方法を確認するために、PA6 と炭素繊維からなる熱可塑性 FRP の引張疲労試験および両振り平面曲げ疲労試験を行った。

### 2. 実験

#### 2.1 試験材料

試験材料は、炭素繊維の 3K 綾織クロス材とマトリックス樹脂 PA6 を複合化した厚み 2mm の熱可塑性 CFRP（TEPEX202、Bond-Laminate 製）を用いた。試験寸法への切断は、ウォータージェット加工機（Flow International Corporation 製 FlowMach3 1313b-XD）を使用し、全長方向が 0° 方向となるように切断した。また、両振り平面曲げ疲労試験においては、ウォータージェット加工機で切り出したままの試験片の他にダイヤモンド成形機（Ring Maschinenbau GmbH 製 MEMBRA6、図3）



図1 670gの金属製オイルパン（上）と240gのCFRTP製オイルパン（下）（県内企業との共同開発品）



図2 CFRTP製下肢装具（県内企業との共同開発品）



図3 ダイヤモンド成形機

で加圧した試験片でも評価を行った。ダイヤフラム成形機での成形条件は、試験片を 245℃で 8 分間加熱後、0.5MPa-50 秒間加圧することとした。

## 2. 2 引張疲労試験

JIS K 7083<sup>3)</sup>を基に引張疲労試験を行った。疲労試験機は油圧チャック式の 8802 型疲労試験機 (Instron Corporation、図 4) を使用し、室温条件で試験を行った。試験片の寸法は II-A 形試験片とし、タブを貼り付けない試験片においても引張疲労試験を評価した。引張疲労試験の試験荷重は 20kN、25kN、応力比は 0.1 とし、正弦波を用いた。また、周波数は試験荷重が 20kN の時は 10Hz とし、試験荷重が 25kN の時は 8.3Hz とした。

## 2. 3 平面曲げ疲労試験

JIS K 7082<sup>4)</sup>を基に曲げ疲労試験を行った。疲労試験は引張試験と同様の試験機 (図 4) を使用した。また、両振り平面曲げ疲労試験用治具は JIS K 7082<sup>4)</sup>に記載の図を参考に設計、作製した(図 5)。試験片の形状は図 6 に示す寸法とした。制御は試験機のロードセル容量が大きく、繊細な荷重制御が困難であったため、位置制御の正弦波で行った。周波数は、振幅に合わせて試験時間が短くなるように調整し、0.75Hz~1.3Hz とした(表 2)。また、ロードセルで測定された荷重を下記の式に代入することで応力を計算した。

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot l}{b \cdot h^2}$$

- σ : 応力振幅(MPa)
- P : 荷重 (N)
- b : 試験片の破断幅(mm)
- h : 試験片の厚み(mm)
- l : つかみ部の支持点間長さ(mm)

位置制御により試験を行っており、試験荷重 (P) が変動するため、応力振幅の計算で用いる荷重は、破断までの繰り返し数が 10 サイクル以上の場合には 1 サイクルから 10 サイクルまでの最大荷重の平均から求め、破断までの繰り返し数が 10 サイクル未満の場合には、1 サイクル目の最大荷重を用いた。計算により得られた応力振幅と破断までの繰り返し数をプロットし、グラフ(S-N 図)を作成した。S-N 図の X 軸は繰り返し数を対数で表記し、Y 軸は応力振幅とした。また、得られたグラフの近似式および R<sup>2</sup>の値を求めた。

## 2. 4 X線 CT を用いた破断観察

2.3 平面曲げ疲労試験における試験片をマイクロフォーカス X 線 CT (東芝 IT コントロールシステム社 TOSCANER-32300μFD) を用いて撮影した。撮影条件は、管電圧が 55kV、管電流 100μA で刻み角を 0.2° とし、一枚当たりの露光時間は 5s で撮影を行った。得られた CT 画像を VGStudio MAX 2.2 (Volume Graphics GmbH 製) を用いて解析し、破断面の状態を観察した。



図 4 8802 型疲労試験機

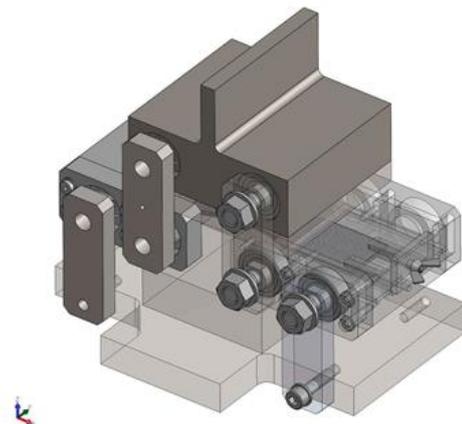


図 5 両振り平面曲げ疲労試験治具の CAD 図

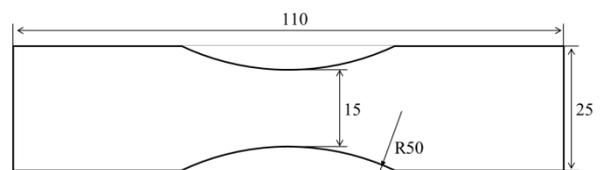


図 6 両振り平面曲げ疲労試験の試験寸法

## 3. 結果及び考察

### 3. 1 引張疲労試験

試験結果を表 1 に示す。応力は、試験荷重 (N) を断面積 (mm<sup>2</sup>) で除して計算した。タブなしの試験片の場合、荷重が 20kN では 1.2×10<sup>6</sup> 回までの試験では破断しなかったが、荷重が 25kN では 8.3×10<sup>2</sup> 回で破断した。また、タブを貼り付けた試験片の場合、荷重が 20kN では 2.5×10<sup>5</sup> 回で、荷重が 25kN では 1.8×10<sup>4</sup> 回で破断した。破断面を確認すると、タブを張り付けていない試験片ではチャック部の内部で破断が起り、タブを貼り付

けた試験片では、タブのテーパ部と平面部の境目で破断が起こった(図7)。どちらの場合においても、チャックによる影響が破断を促進していると考えられる。そのため、正確な引張疲労試験と比較すると少ない試験回数で破断が起こっていると推察される。

### 3.2 両振り平面曲げ疲労試験

加圧成形した試験片としていない試験片の室温条件でのS-N図を図8に示す。2つのグラフを比較すると、加圧後はグラフが全体的に右側にシフトしている。また、対数近似式のR<sup>2</sup>に注目すると、0.382から0.617に増加している。つまり、加圧成形を行う事で繰り返し数が向上し、近似からのばらつきが改善していることが分かる。

また、加圧成形した試験片の室温条件と80℃条件での疲労評価を図9に示す。80℃条件では破断強度が低下した。また、対数近似のR<sup>2</sup>の値が小さくなっていることから、近似からのばらつきが大きくなっていることが分かる。これは、80℃条件がマトリックス樹脂(PA6)のガラス転移温度(T<sub>g</sub>=約50℃)以上の温度のため、樹脂強度が低下したことによると考えられる。なお、参考として、各試験の測定結果を表2に示す。

### 3.3 X線CTを用いた破断観察

ダイヤフラム成形前後の試験片のX線CT写真を図10に示す。加圧成形前のX線CT写真では、切断面(図6のR50部に相当)に細かな傷が確認できる。一方、加圧成形後のX線CT写真では、切断面の細かな傷が減少している。また、加圧成形後では、切断面に樹脂のダマが確認できる。

加圧成形後試験片の両振り平面曲げ試験後のX線CT写真を図11に示す。図11(a)より、破断がクロス材の織りに沿って進行していることが分かる。また、図11(b)の断面写真より表層面の層間剥離を確認できる。断面写真からは、加圧成形後にボイドが形成されていることも観察された。

## 4. まとめ

熱可塑性CFRPの引張疲労試験では、チャック部の影響を受け、破断までの回数が少なくなっている可能性が高い。そのため、チャック圧の調整や応力集中を防ぐタブ形状<sup>9)</sup>などの正確な試験が行える条件を検討する必要がある。

熱可塑性CFRPの両振り平面曲げ疲労試験に関しては、以下のことが分かった。

1. 加圧成形を行うことで破断強度およびばらつきが改善した。
2. 破断は繊維の織りに沿って進行する。
3. 温度上昇により疲労強度が低下し、ばらつきが上昇する。

今後は、切断面の細かな傷が破断強度やばらつきにどのような影響を与えているかの検討、様々な温度による破断強度の比較等を行っていく予定である。

表1 引張疲労試験の結果

試験荷重(kN)	タブなし		タブあり	
	20	25	20	25
断面積(mm <sup>2</sup> )	49.3	49.3	50.1	50.1
応力(MPa)	406	507	399	499
破断回数	1.2 × 10 <sup>6</sup>	8.3 × 10 <sup>2</sup>	2.5 × 10 <sup>5</sup>	1.8 × 10 <sup>4</sup>
破壊状況	破断せず	チャック内部で破断	タブ内で破断	タブ内で破断

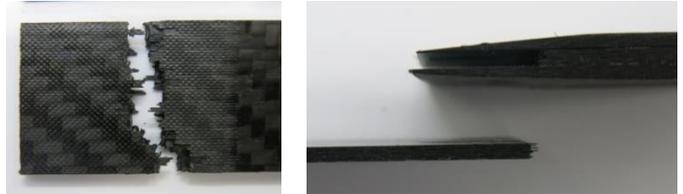


図7 タブなしでの破断状態(左)とタブありでの破断(右)

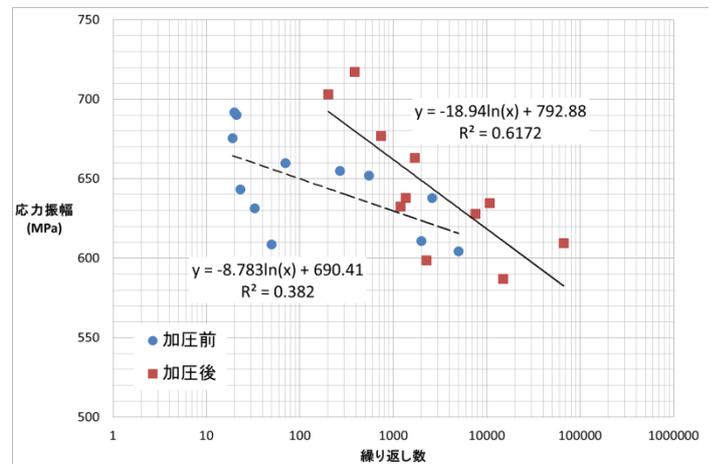


図8 ダイヤフラム加圧前後でのS-N図(室温条件)

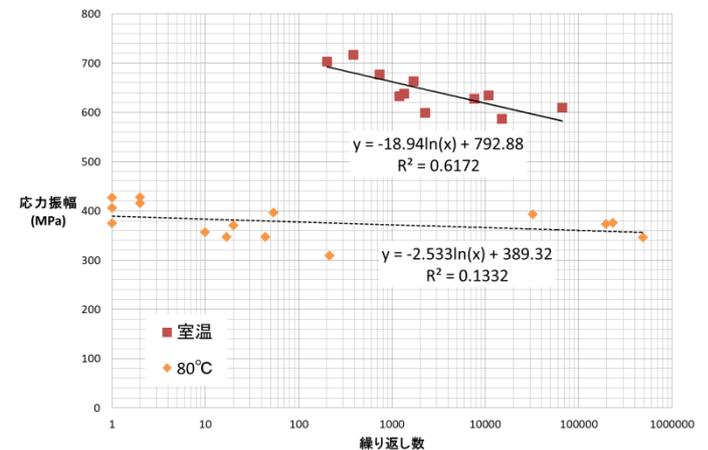


図9 室温と80℃条件でのS-N図(ダイヤフラム加圧後)

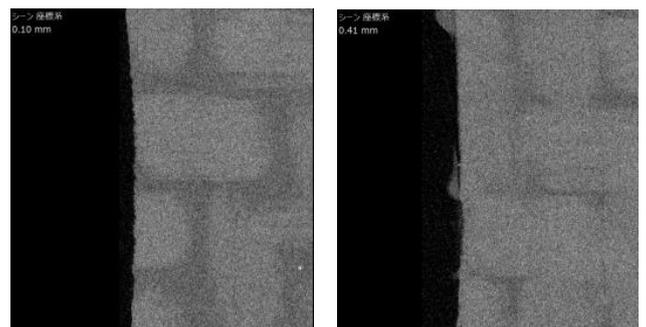


図10 加圧成形前の試験片(左)と加圧成形後の試験片(右)

【謝 辞】

本研究の一部は、一般財団法人越山科学技術振興財団の研究助成金により実施しました。ここに深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 道家ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.2, pp35-38,2015
- 2) 千原ら,岐阜県工業技術研究所研究報告 No.6, pp43-44,2018
- 3) JIS K 7083 「炭素繊維強化プラスチックの定荷重引張一引張疲れ試験」
- 4) JIS K 7082 「炭素繊維強化プラスチックの両振り平面曲げ疲れ試験方法」
- 5) 竹花立美, 「FRP 複合容器の設計クライテリア」,高圧ガス保安協会,2010

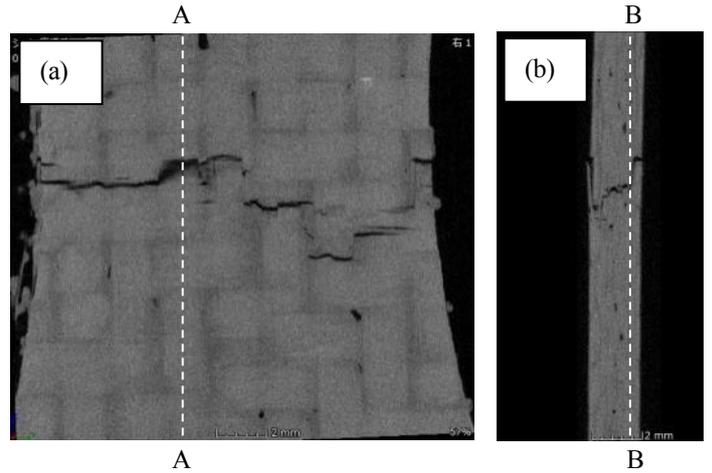


図 1.1 破断試験片の X 線 CT 写真  
(a) B-B 線での断面画像  
(b) A-A 線での断面画像

加圧成形前(室温条件)

厚み(mm)	破断幅(mm)	振幅(mm)	周波数(Hz)	繰返し数	荷重(kN)	応力振幅(MPa)
2.01	15.67	8	0.8	19	0.375	676
2.03	15.73	8	0.8	21	0.391	690
1.97	15.90	8	0.8	70	0.357	660
2.00	16.38	8	0.8	269	0.377	655
2.02	15.73	7.5	0.9	549	0.366	652
2.02	15.73	7.5	0.9	20	0.388	692
2.01	15.63	7.5	0.9	2610	0.355	638
2.02	15.68	7.5	0.9	23	0.359	643
1.96	15.63	7.5	0.9	33	0.333	631
1.97	15.62	7	1	5000	0.322	604
2.01	15.65	7	1	50	0.337	609
2.01	15.66	7	1	2000	0.338	611

加圧成形後(室温条件)

厚み(mm)	破断幅(mm)	振幅(mm)	周波数(Hz)	繰返し数	荷重(kN)	応力振幅(MPa)
1.96	16.29	9.0	0.75	385	0.395	717
2.02	17.12	9.0	0.75	738	0.413	677
2.01	16.58	9.0	0.75	202	0.413	703
2.01	16.46	8.5	0.80	1706	0.387	663
1.95	16.48	8.5	0.80	1354	0.351	638
2.03	16.37	8.5	0.80	1202	0.372	632
1.99	16.64	8.0	0.90	15061	0.340	587
1.95	16.77	8.0	0.90	66432	0.340	609
1.99	17.38	8.0	0.90	10786	0.381	635
2.03	16.68	8.0	0.90	7606	0.379	628
2.02	16.88	8.0	0.90	2269	0.362	599

加圧成形後(80°C条件)

厚み(mm)	破断幅(mm)	振幅(mm)	周波数(Hz)	繰返し数	荷重(kN)	応力振幅(MPa)
1.99	16.51	6	1.1	2	0.238	415
2.03	17.18	6	1.1	1	0.233	374
1.99	16.51	6	1.1	1	0.233	405
2.00	16.47	6	1.1	2	0.247	427
2.04	16.42	6	1.1	1	0.257	427
2.05	16.02	5.5	1.1	54	0.233	396
2.04	16.34	5.5	1.1	10	0.211	356
2.07	16.11	5.5	1.1	17	0.210	347
1.96	15.62	5.5	1.1	32294	0.207	393
2.00	15.77	5.5	1.1	20	0.206	370
2.07	16.59	5	1.3	234530	0.233	375
2.05	16.02	5	1.3	44	0.206	347
2.02	16.67	5	1.3	214	0.184	308
2.01	16.29	5	1.3	493660	0.200	346
2.03	16.05	5	1.3	197267	0.217	373

表 2:  
両振り曲げ平面  
疲労試験の条件  
および結果