

2024（令和 6）年度 修士学位論文

CNF を付着させたガラス繊維で強化した
GFRP のモード I 疲労き裂伝ば挙動

Interlaminar fatigue crack growth behavior of GFRP
with grafting CNF onto the glass fiber under mode I loading

2025 年 2 月 6 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械工学コース

1275020 田中 秀平

指導教員 楠川 量啓

目次

1 章 緒言	1
1-1 背景	1
1-2 破壊力学パラメータ	2
1-2-1 エネルギー解放率の導出 [7]	2
1-2-2 疲労き裂進展速度の評価 [8]	4
1-3 目的	4
2 章 マイクロドロップレット	5
2-1 目的	5
2-2 実験方法検討	5
2-3 試験片検討	6
2-3-1 試験片作製手順	6
2-3-2 検討内容	6
2-3-3 検討結果	6
2-4 実験治具（ブレード）検討	8
2-4-1 検討内容	8
2-4-2 検討結果	8
2-5 引抜試験	10
2-5-1 試験片	10
2-5-2 実験方法	10
2-5-3 実験結果	10
2-6 まとめ	13
3 章 材料および試験片	14
3-1 使用した主な材料	14
3-2 GFRP 積層板の作製方法	15
3-2-1 ガラスクロスの切断方法	15
3-2-2 CNF の付着方法	19
3-2-3 VaRTM（Vacuum assisted Resin Transfer Molding）法	22
3-3 試験片作製方法	29
4 章 実験方法	31

4-1	二重片持ち梁疲労試験 (DCB 試験)	31
4-2	GFRP の曲げ剛性の測定	33
4-3	コンプライアンス法 [11]	34
4-4	モード I の疲労き裂進展試験 (DCB 試験)	35
4-5	破面観察	36
5 章	結果および考察	38
5-1	曲げ剛性の測定	38
5-2	コンプライアンス	39
5-3	き裂進展速度	41
5-3-1	手法 A	41
5-3-2	手法 B	46
5-3-3	手法 A と B の比較	47
5-4	破面観察	48
6 章	結言	52
	引用文献	53
	謝辞	54

1 章 緒言

1-1 背景

複合材料は、軽量かつ高強度であるだけでなく、単一材料では実現できない特性を引き出し、さまざまな機能を付与できる材料として注目されている。特に、地球温暖化防止が産業界で重要な課題となる中、軽量・高強度・高剛性の複合材料は二酸化炭素排出の抑制に寄与する可能性があり、幅広い分野で関心を集めている。しかしながら、複合材料の力学的挙動が非常に複雑であることから、その性能を十分に活かした合理的な機器や構造体の設計が進んでいない [1]。

母材に樹脂、強化材にガラス繊維を用いたガラス繊維強化プラスチック（GFRP）は、複合材料の中でも比較的安価で、比強度および比剛性が高い。そのため、航空機や自動車などさまざまな分野で広く利用されている。近年、GFRP の機械的特性をさらに向上させることを目的に、カーボンナノチューブ、ナノクレイ、セルロースナノファイバー（CNF）などのナノ材料を添加する研究が盛んに行われている。例えば、ガラス繊維上にカーボンナノチューブを添加することで破壊靱性が向上することが報告されている [2]。

CNF は、鉄の約 25 倍の比強度を有し、植物由来で資源量が豊富であることから、その利用が注目されている [3]。従来の研究では、母材である樹脂に CNF を分散させて GFRP を強化する方法が数多く報告されている。例えば、エポキシ樹脂に最適な濃度の CNF 水溶液を混合することで引張強度、引張弾性率、曲げ強度、曲げ弾性率、層間せん断強度が向上した報告がある [4]。本研究では、ガラス繊維上に直接 CNF を付着させる方法を採用した。この方法は、繊維と樹脂の界面を直接的に強化できる特徴があり [5]、マイクロドロップレット試験や破壊靱性試験において、適切な濃度の CNF を添加することで繊維と樹脂の界面強度を向上させることが報告されている [6]。さらに、先行研究 [7] では、引張疲労強度の向上に最適な CNF 添加量が存在することが明らかにされている。

一方で、GFRP の主な破壊形態は層間剥離であるため、この材料を用いた構造体の信頼性を確保するには、層間破壊挙動を十分に把握する必要がある。特に、繰り返し荷重下での疲労き裂伝ば挙動は、長期信頼性の観点から極めて重要である。

1-2 破壊力学パラメータ

1-2-1 エネルギー解放率の導出 [8]

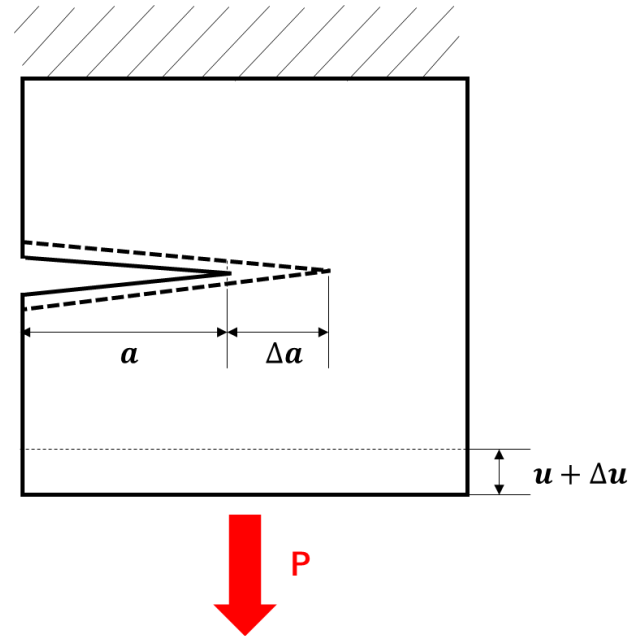


図 1.1 き裂進展

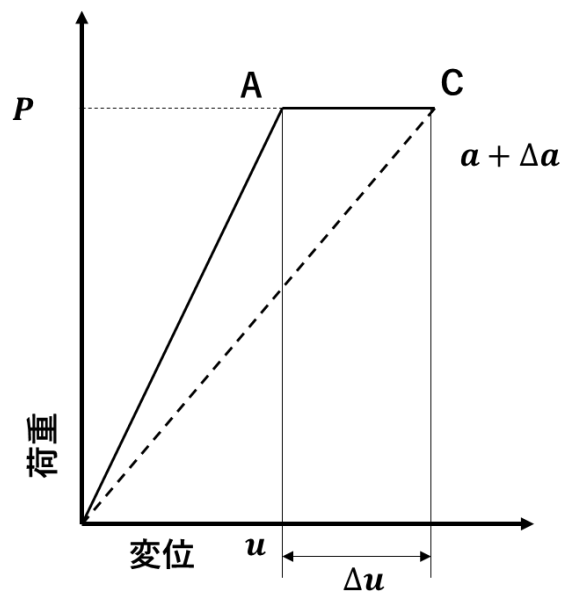


図 1.2 き裂進展時のエネルギーの変化

き裂を含む構造体の強度評価を行うとき，一般的に破壊力学が用いられる．破壊力学において，き裂の力学的状態を評価するパラメータとして，き裂の進展に伴うひずみエネルギーの解放量に基づいた値であるエネルギー解放率 G が広く使用されている．

ここで図 1.1 に示すように、長さ a のき裂を有する平板に、荷重 P が一定の状態でき裂長さ Δa だけ進展する場合を想定する。き裂面積の増大を

$$B\Delta a = \Delta A \quad (1)$$

とする。

図 1.2 にの直線 OA はき裂が進展する前の平板の荷重と変位の関係を示す。き裂が進展すると P 一定で変位 Δu だけ変形する。この時の外力は

$$\Delta W = P\Delta u \quad (2)$$

だけ仕事をし、ひずみエネルギーは増大することになる。また、その変化量は

$$\Delta U = \frac{P\Delta u}{2} \quad (3)$$

よって、このときの外力と平板を合わせたエネルギーの変化量を $\Delta \Pi$ とおくと

$$\Delta \Pi = \Delta W + \Delta U \quad (4)$$

とおける。式(1), (2), (3)より、き裂進展 Δa に伴い減少する全体のエネルギーは

$$\frac{P\Delta u}{2} = -\Delta \Pi \quad (5)$$

単位面積のき裂が新たに作られるときに開放される力学エネルギーの変化として、エネルギー解放率 G が定義されるので、エネルギーの減少量 $\Delta \Pi$ をき裂面積の増分 ΔA で割って、 $\Delta A \rightarrow 0$ とする。

$$G = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta \Pi}{\Delta A} \right) \quad (6)$$

物体を二次元平板と考え、式(1)を式(6)に代入すると

$$G = -\frac{1}{B} \frac{\Delta \Pi}{\Delta a} \quad (7)$$

となる。コンプライアンスは荷重と変位の傾きの逆数で定義される。

$$C = \frac{u}{P} \quad (8)$$

よって式(5), (7), (8)より

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{\Delta C}{\Delta a} \quad (9)$$

が得られる。この式(9)よりエネルギー解放率はき裂長さに対するコンプライアンスの変化量から実験的に求めることができる。これはどのような負荷状態でも dC/da からエネルギー解放率を求めることができる。

1-2-2 疲労き裂進展速度の評価 [9]

き裂の進展長さ da と負荷の繰り返し回数 dN で疲労き裂進展速度 da/dN が表せる。疲労き裂進展速度とエネルギー解放率範囲 $\Delta G(\Delta G=G_{\max}-G_{\min})$ 、ここで $G_{\max}$ 、 $G_{\min}$ はエネルギー解放率の最大値および最小値を表す)の間には強い相関関係がある。き裂進展速度 da/dN とエネルギー解放率範囲 ΔG の関係は次式で表すことができる。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta G)^m \quad (10)$$

この式(10)は一般的に Paris 則と呼ばれており、エネルギー解放率範囲から疲労寿命の予測ができる。また、き裂進展速度 da/dN - ΔG の関係は対数を用いて、模式的には図 2.10 のように示せ、3 段階(Phase1-3)に分けることができる。Phase1 では ΔG の減少に伴って、 da/dN は急激に減少する。また、下限界エネルギー解放率範囲 ΔG_c が存在し、 ΔG_c 以下のエネルギー解放率範囲では、ほとんどき裂が進展しない。Phase2 ではき裂が安定して進展する領域である。またこの領域では線形であるため、 da/dN - ΔG の間には指数則が成り立つ。よって上記で示した Paris 則が成り立つ領域でもある。Phase3 では ΔG の増加に伴って、 da/dN は急激に増加し上限界では不安定破壊が起こる。

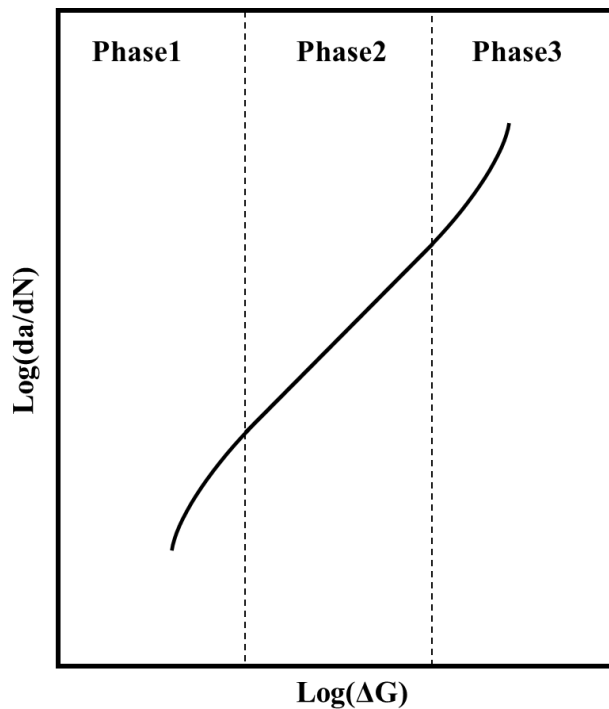


図 1.3 エネルギー解放率範囲とき裂進展速度の関係

1-3 目的

本研究では、ガラス繊維表面に CNF を付着させた GFRP 試験片についてモード I 疲労き裂伝ぱ試験を行い、その疲労特性について調査を行った。

2章 マイクロドロップレット

2-1 目的

本実験では、マクロドロップ試験を応用し、繰り返し荷重を加えることで繊維樹脂界面に着目した疲労特性を評価するための検討を行った。実験の概略図を図 2.1 に示す。

予備試験として、1 本のガラス繊維に付着した樹脂球をブレードを用いて引き抜く試験を実施するために、試験治具および試験片の作製方法について検討を行った。詳細については次項より示す。

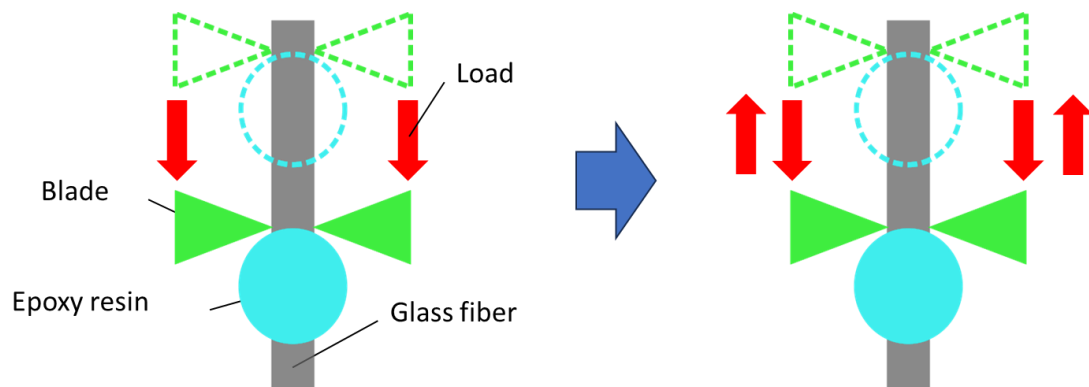


図 2.1 試験概略図

2-2 実験方法検討

マイクロドロップレット試験は繊維 1 本に樹脂を付着させて樹脂から繊維を引き抜くため低荷重での制御が必要となる。既存のサーボ試験機（SHIMAZU, MMT-101N）では低荷重での疲労試験が不可能であったため、試験機に図 2.2 に示す枠を取り付けた。枠はアルミフレームなどを用いて作製した。また試験片に掛かる荷重を測定するために微小荷重用ロードセル（定格容量 1 N）を取り付けた。

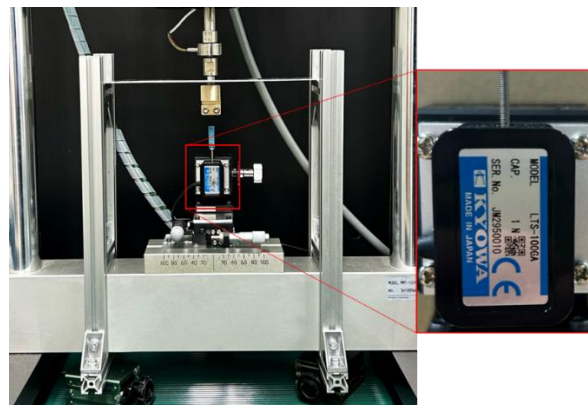


図 2.2 試験治具 枠

2-3 試験片検討

引き抜き試験に使用した試験片の作製手順および樹脂の付着方法の検討事項を以下に示す。

2-3-1 試験片作製手順

- ① 図 2.3 に示す寸法で，レーザーカッターを用いて紙を切断した。
- ② 平織のガラスクロスから指でねじるようにして，一本の繊維を取り出した。
- ③ ②で取り出した繊維を図 2.4 のように張り付けた。このときガラス繊維が弛まないように注意した。
- ④ ③に樹脂を付着させて試験片とした。

2-3-2 検討内容

樹脂を付着させる方法として 3 種類の方法を検討した。以下 3 種類の方法を示す。樹脂は主剤と硬化剤を重量比 100:42.5 で混合し，攪拌機を用いて 150 rpm で 15~30 min 攪拌し，デシケータ内で真空ポンプを用いて 15~30 min 脱泡を行った。

- (a) テフロンシートの上にあらかじめ樹脂を垂らし，そこに③のものを半分に切断し，ガラス繊維を樹脂に差し込む方法。（図 2.5 (a)）
- (b) ③で作製したものをテフロンシート上にガラス繊維が接するように置き，樹脂を垂らす方法。（図 2.5 (b)）
- (c) ガラス繊維部分を浮かし，裁縫針を用いて樹脂を付着させる方法。（図 2.5 (c)）

2-3-3 検討結果

(a) の方法では，樹脂に差し込む繊維の長さを正確に調整することが困難であった。(b) の方法では，繊維に付着させる樹脂の量が多くなり，さらに引き抜く際に樹脂の形状によりブレードと接する部分が不安定となるため試験の実施が困難であった。一方，(c) の方法では樹脂を付着させる際に一定の技術が求められるものの，樹脂サイズを 0.1 mm オーダーで作製することが可能であったため，本研究ではこの方法を採用した。

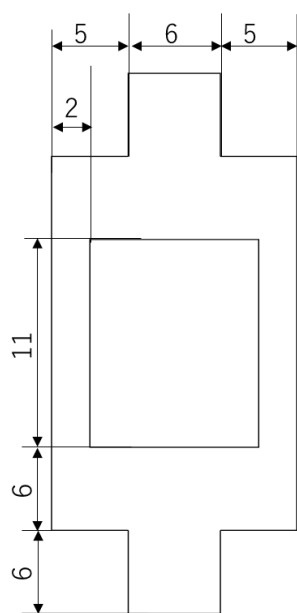


図 2.3 紙切断寸法



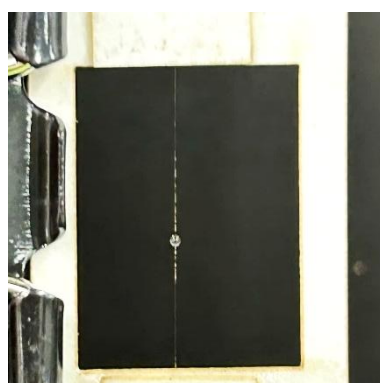
図 2.4 ガラス繊維貼り付け



(a)



(b)



(c)

図 2.5 試験片検討

2-4 実験治具（ブレード）検討

引き抜き試験で樹脂に引っ掛ける実験治具の形状と作製方法の検討事項を以下に示す。

2-4-1 検討内容

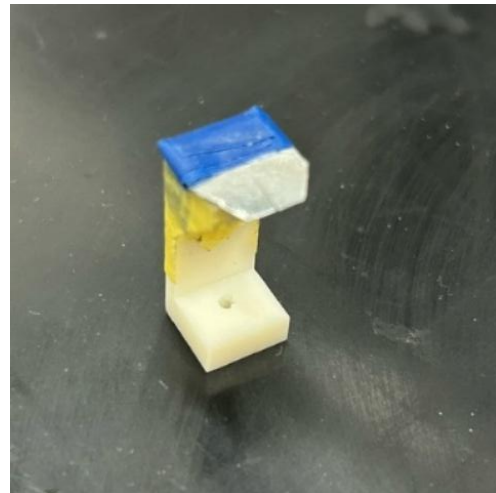
- (a) ベリリウム銅を用いてブレードの作製を行った。ペンチと糸鋸（0.24 mm）を用い、ブレードの形に作製し、高性能高温小型（FT-105FM-ST）を用い 2 h で 315 °C まで上昇させ 2 h 保持し、熱処理を行った。（図 2.6（a））
- (b) 3D プリンター（光造形）を用いて、土台部分を作製しアルミニウムの薄板で樹脂をひっかける部分を作製した。（図 2.6（b））
- (c) 3D プリンター（光造形）でブレードの隙間を埋めて作製し、0.24 mm の糸鋸を用いてブレードの隙間を作製した。
- (d) 全て 3D プリンター（光造形）で作製した。最終的に使用した CAD データを図 2.7 に示す。

2-4-2 検討結果

(a)，(c) の方法ではブレードの隙間が糸鋸の寸法で決定され、幅を調整するのが困難であった。(b) の方法では、ブレードの隙間の精度に限界があった。(d) の方法では、3D プリンターにおける紫外線の照射時間などのパラメータを調整することでブレードの隙間を 0.1 mm 程度で作製することができた。



(a)



(b)

図 2.6 試験治具（ブレード）

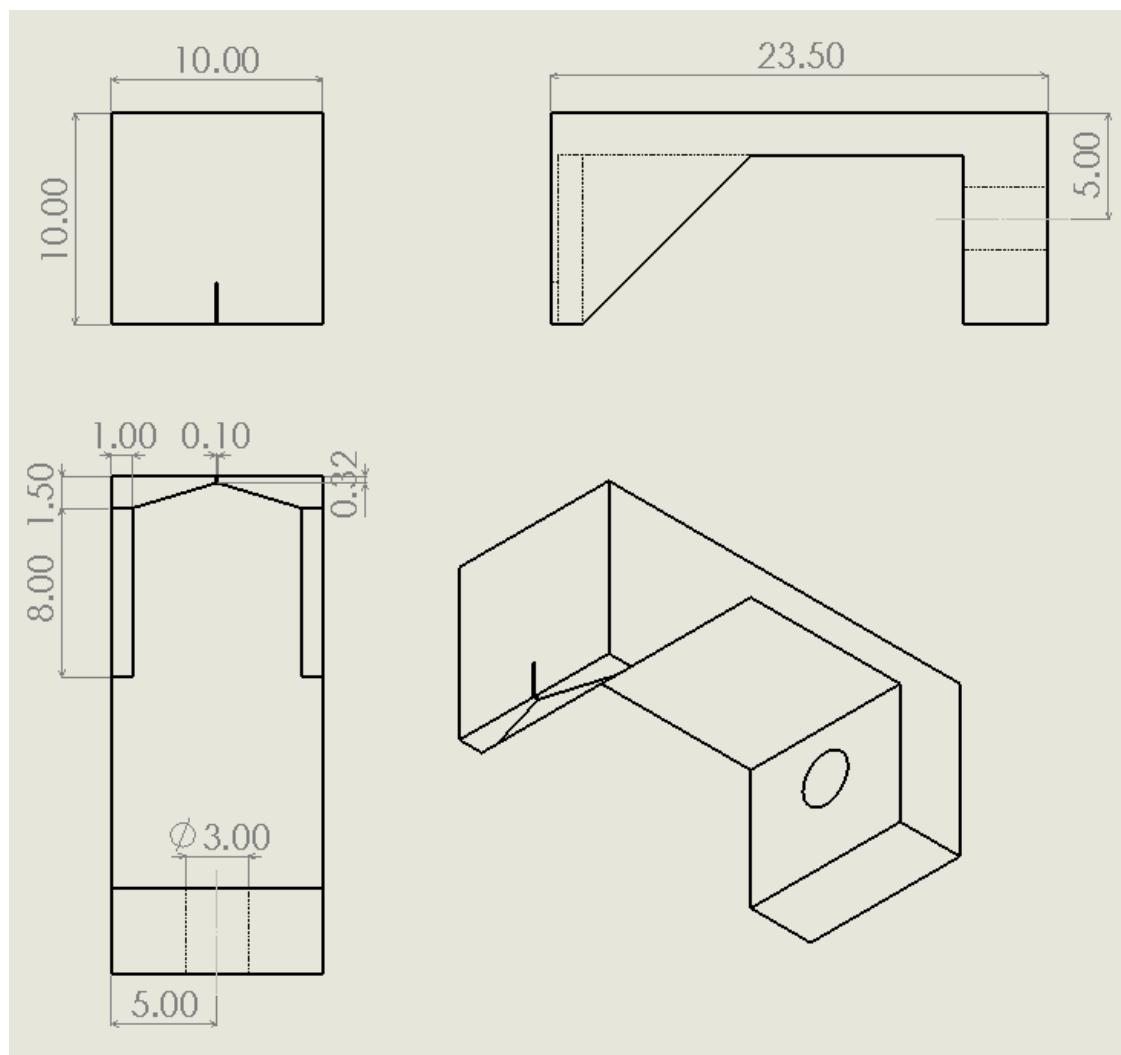


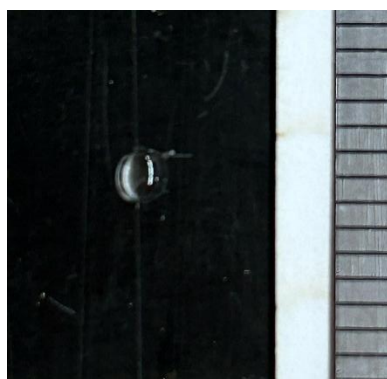
図 2.7 ブレード図面

2-5 引抜試験

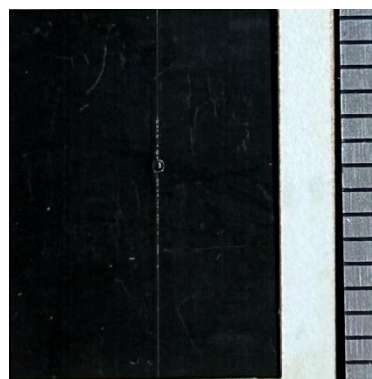
引抜試験では実際に引抜が成功した条件での結果のみを示す。

2-5-1 試験片

試験片検討事項で示した (c) の方法で樹脂を付着させて試験片を作製した。樹脂サイズは 0.135~1.8 mm で作製した。(図 2.8)



(a) 樹脂サイズ 1.8 mm



(b) 樹脂サイズ 0.2mm

図 2.8 樹脂付着サイズ

2-5-2 実験方法

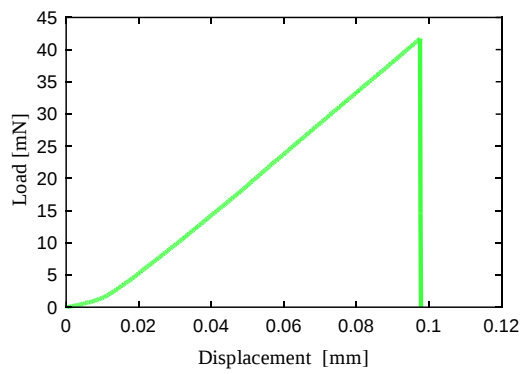
試験治具検討事項で示した (d) のブレードを用いて、試験を行った。疲労試験機を用いて、0.05 mm/sec の条件で引き抜きを行った。

2-5-3 実験結果

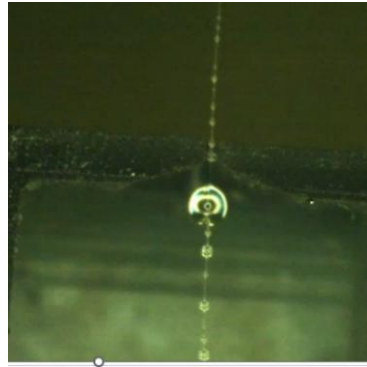
樹脂サイズが 0.517 mm、0.292 mm、0.277 mm、および 0.159 mm の場合に得られた荷重-変位線図と試験中の写真を図 2.9~2.12 に示す。樹脂サイズが 0.517 mm の場合、荷重は 42 mN まで上昇し、繊維と紙の接着部分から破断する結果となった。同様に、樹脂サイズが 0.292 mm および 0.277 mm の場合では、それぞれ荷重が 73 mN および 132 mN まで上昇し、いずれも繊維と紙の接着部分が破断した。この結果は、樹脂とガラス繊維の界面強度が繊維の強度を上回ったためであると考えられる。

原因として、樹脂球のサイズが大きすぎる点に加え、樹脂球同士の間隔が狭く、引き抜きの前に樹脂球が連結してしまうことで、さらなる界面強度が生じた可能性が考えられる。

これらの点を踏まえ、樹脂サイズ 0.159 mm では樹脂球の間隔を可能な限り広くなるように作製した。その結果、図 2.12 (a) に示すように 129 mN で 1 つの樹脂球から繊維が引き抜かれた。その後、連結した樹脂球がブレードに引っ掛かり、荷重は 102 mN まで上昇した。ガラス繊維の直径 (9.3 μm) および樹脂球のサイズから計算したガラス繊維-樹脂界面におけるせん断強度は 28 MPa となった。この値は、図 2.13 に示す Moustapha らによる研究結果と比較して妥当であると考えられる。

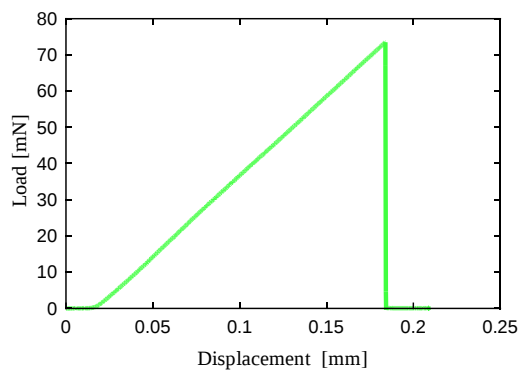


(a) 荷重変位線図

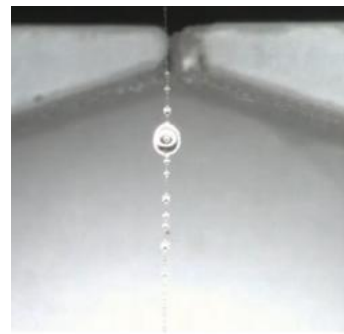


(b) 試験写真

図 2.9 実験結果（樹脂サイズ 0.517 mm）

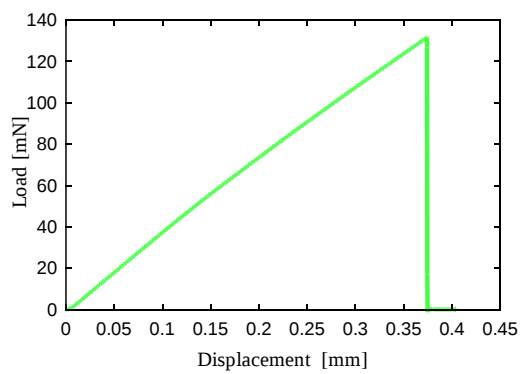


(a) 荷重変位線図



(b) 試験写真

図 2.10 実験結果（樹脂サイズ 0.292 mm）

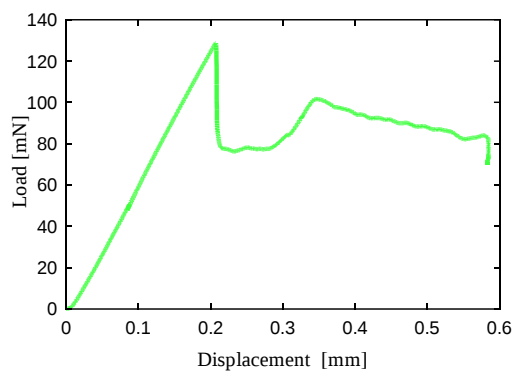


(a) 荷重変位線図



(b) 試験写真

図 2.11 実験結果（樹脂サイズ 0.277 mm）



(a) 荷重変位線図

(b) 試験写真

図 2.12 実験結果 (樹脂サイズ 0.159 mm)

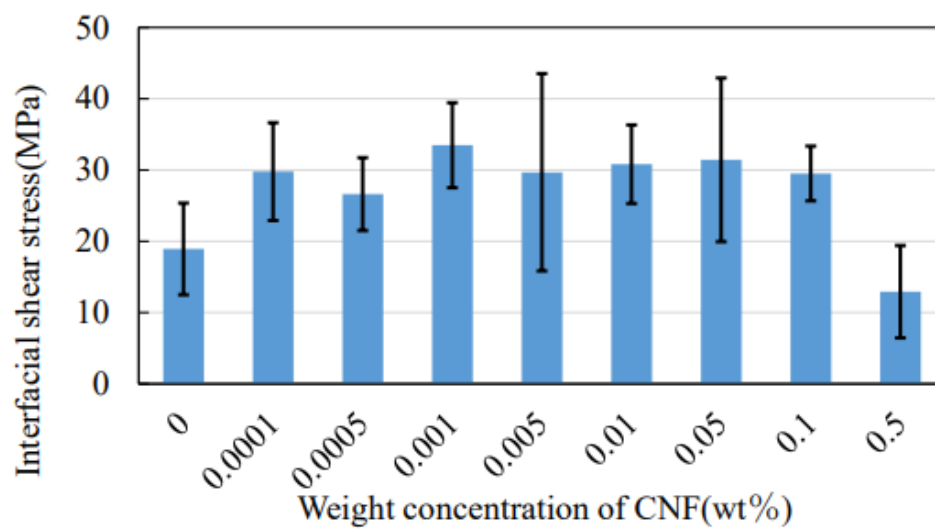


図 2.13 マイクロドロップレット結果 [6]

2-6 まとめ

3D プリンターを用いてブレードを作製し、樹脂球のサイズが 0.159 mm の条件で引抜試験に成功した。しかし、この成功は 1 回のみであり、図 2.14 に示すように、樹脂球のサイズを 0.15 mm 付近に制御することが困難であった。さらに、樹脂球のサイズが 0.2 mm 以上になると、繊維樹脂界面強度が繊維の強度を上回り、繊維が破断する結果が得られた。また、0.15 mm 付近の試験片でも繊維が破断するケースが観察され、これは荷重が垂直に負荷されていないことが原因と考えられる。

本試験を安定的に実施するためには、繊維樹脂界面強度が低い 0.1 mm 以下の樹脂球を引き抜けるブレードが必要であると考えられる。しかし、本研究ではブレードの隙間を 0.1 mm 程度に制御した治具しか作製できなかったため、樹脂球が 0.1 mm 以下の試験の実施が困難であった。また、繰り返し荷重による試験という本来の目的を達成するには、荷重を垂直に負荷し続ける必要があり、さらに試験の実施が困難であることが示唆された。

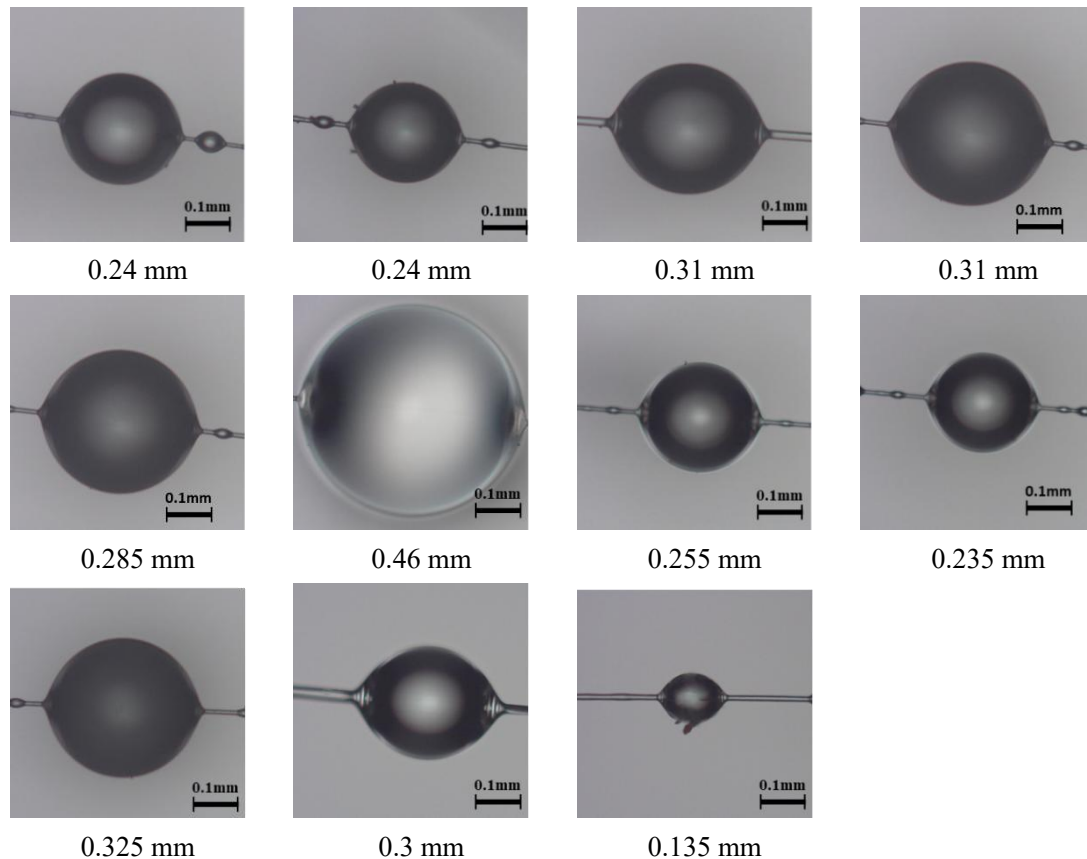


図 2.14 試験片樹脂サイズ

3 章 材料および試験片

本章ではモードI疲労き裂進展試験で使用した GFRP 試験片の作製方法，曲げ剛性の測定方法，疲労き裂進展試験である DCB 試験，破面観察の実験方法を述べる．

3-1 使用した主な材料

本研究では以下に示す材料と方法を用いて GFRP 積層板を作製した．強化材として平織のガラスクロス（KS2750，日東紡，繊維直径 $9.3\ \mu\text{m}$ ，目付 $104\ \text{g/m}^2$ ，ガラス密度 $2.6\ \text{g/m}^3$ ）（図 3.1（a））を用いた．織物はしなやかで屈曲性があり，組織が乱れにくく複合材料の成形作業で取り扱いが容易である利点がある．また，直行織物に比べて力学的異方性が小さくなる [10]．マトリックスとしてエポキシ樹脂 jER 801N，（三菱ケミカル株式会社）を用い，硬化剤には ダイトクラール 3080（大都産業株式会社）を用いた．エポキシ樹脂は接着性，耐熱性，機械特性，電気特性および耐食性などに優れ，成形が容易である． [11]厚さ $12.5\ \mu\text{m}$ のカプトンシート(JMT 株式会社)を用いて，GFRP 試験片を作製した．主剤と硬化剤の混合割合は重量比で $100 : 42.5$ とした．添加剤として用いた CNF は高知県紙産業技術センターから提供いただいた $2.0\ \text{wt}\%$ スラリー（図 3.1（b））を希釈して使用した．GFRP 積層板の成型方法として VaRTM 法（Vacuum assisted Resin Transfer Molding）を用いた．



(a) 平織ガラスクロス



(b) CNF スラリー， $2.0\ \text{wt}\%$

図 3.1 使用した主な材料

3-2 GFRP 積層板の作製方法

3-2-1 ガラスクロスの切断方法

ガラスクロス切断手順

平織のガラスクロス を 150×150 mm に切断し、平織ガラスクロスにスプレーを用いて直接 CNF を付着させた。手順を以下に示す。

平織ガラスクロスの切断に使用した器具類（図 3.2）と方法（図 3.3）を以下に示す。

- ・カッターマット（大）
- ・カッターマット（中）
- ・鋼尺（大）
- ・鋼尺（小）
- ・マスキングテープ（12 mm 幅）
- ・カッター
- ・ハサミ
- ・セロハンテープ

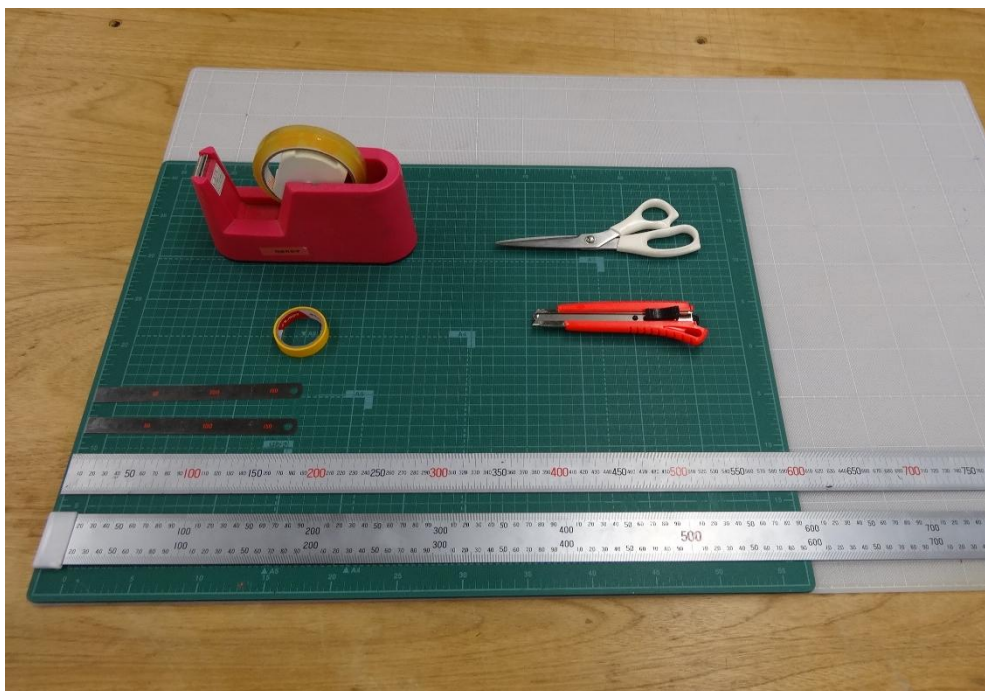
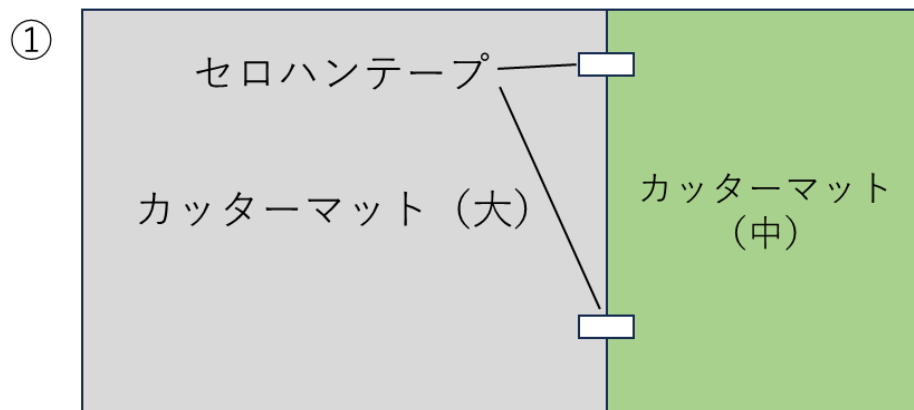
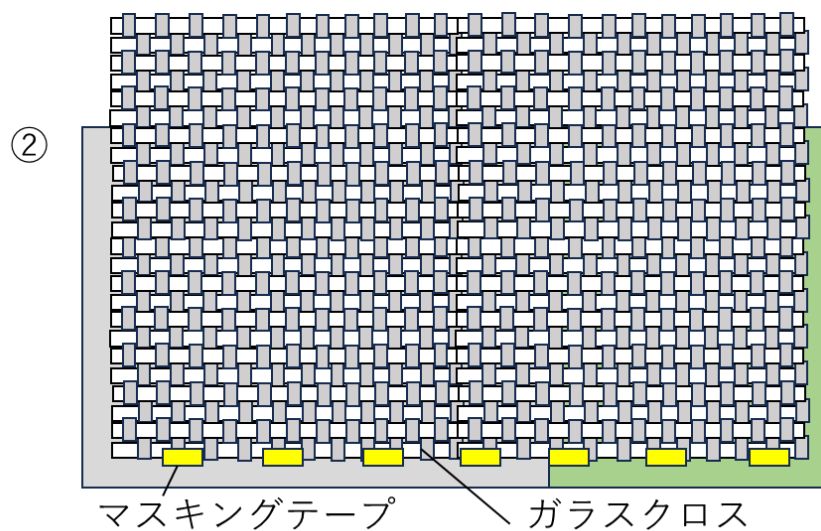


図 3.2 ガラスクロス切断に使用した器具

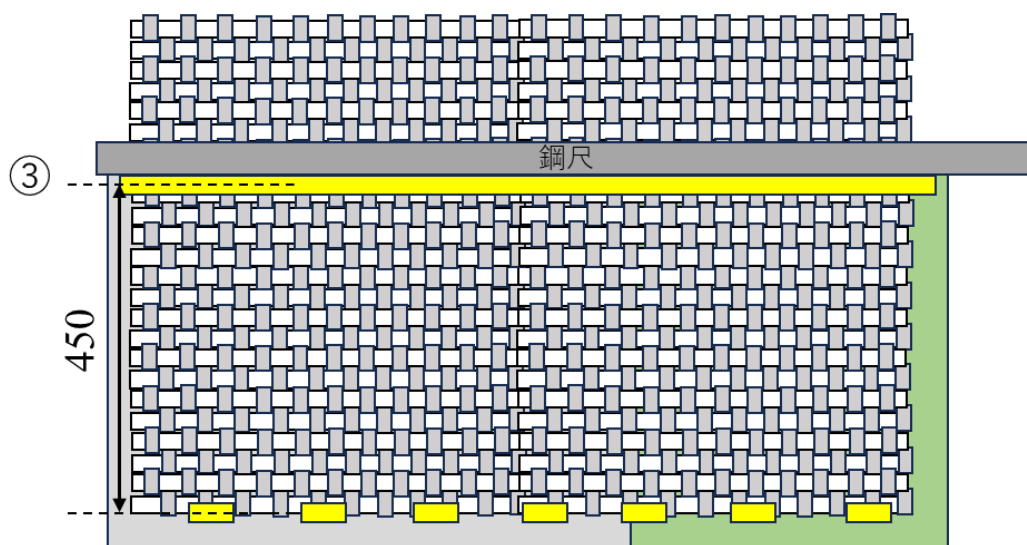
- ① カッターマット（大）（中）を並べセロハンテープで止める.
- ② ガラスクロスのカッターマット上に配置し、端部をマスキングテープで固定する.
このときガラスクロスのしわ，ゆがみ，弛み等を馴らす.
- ③ ガラスクロスを固定した端から 450 mm の幅に切断できるように鋼尺を配置し，それに沿ってマスキングテープを貼る.
- ④ マスキングテープの中心を切断する.
- ⑤ 150 mm の幅になるように横方向に 2 本，③と同様にマスキングテープ貼る.
- ⑥ 縦方向にも同様に 7 本マスキングテープを貼る.
- ⑦ ⑤⑥で貼ったマスキングテープの中心を切断する.
- ⑧ 切断後のガラスクロスを図 3.4 に示す.



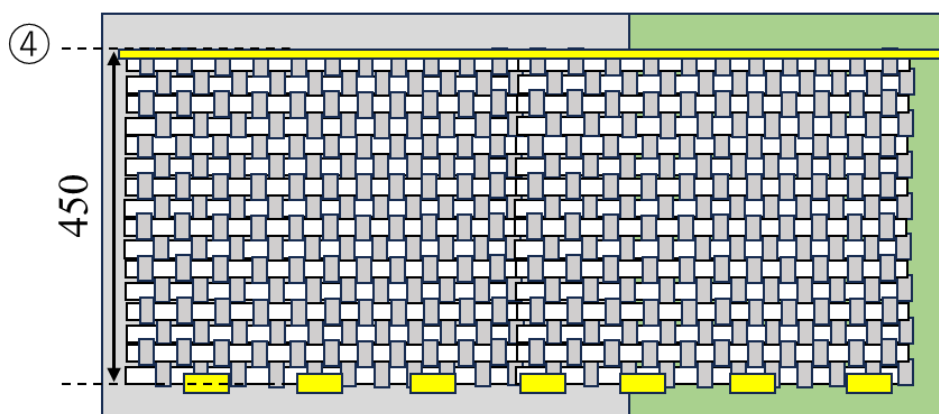
(a) カッターマット準備, ①



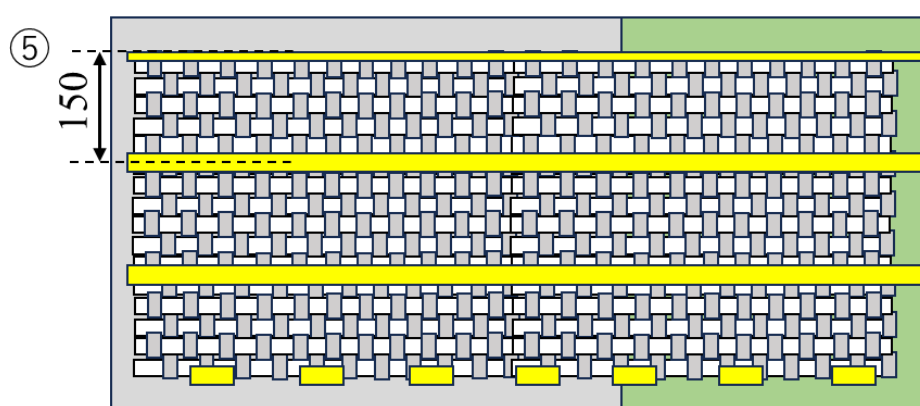
(b) ガラスクロス端固定, ②



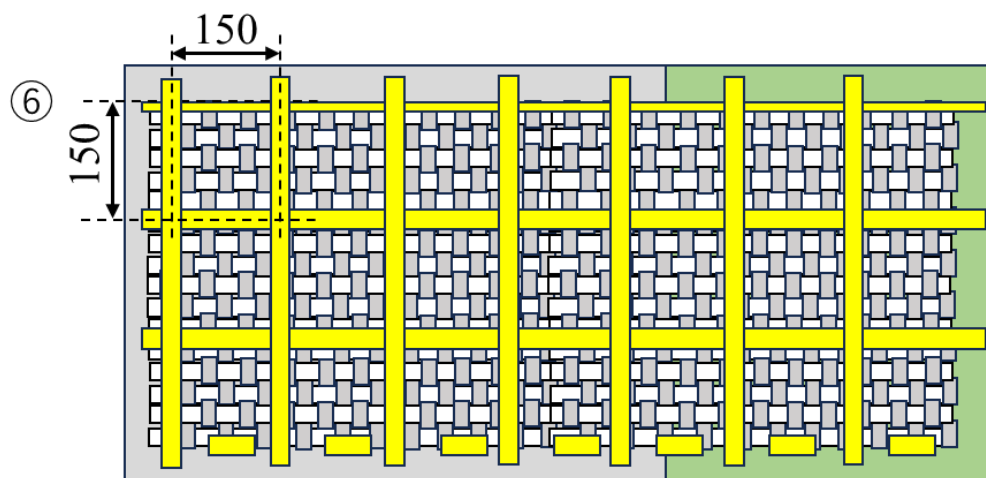
(c) 450mm の幅にマスキングテープを貼る, ③



(d) 端を切断, ④



(e) 横方向にマスキングテープを貼る, ⑤



(f) 縦方向にマスキングテープを貼る, ⑥

図 3.3 ガラスクロス切断の手順

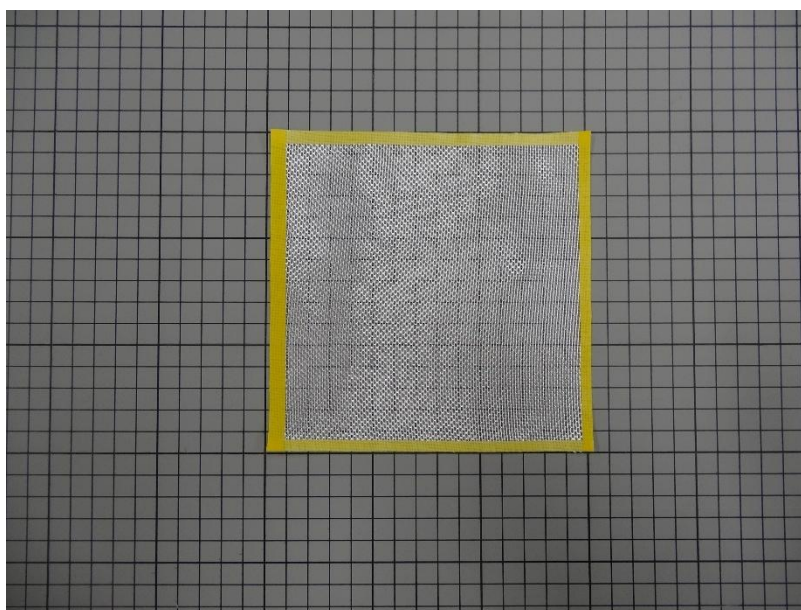


図 3.4 切断後のガラスクロス

3-2-2 CNF の付着方法

切断した平織ガラスクロス表面へ CNF を付着させる際、使用した器具類（図 3.5）と方法を以下に示す。30 枚のガラスクロスそれぞれに CNF を付着させる方法を手法 A、中間層の 2 枚のガラスクロスのみ CNF を付着させる方法を手法 B とする。

- ・ピンチハンガー
- ・ハンガー
- ・クリップ
- ・板（おもりとして使用）
- ・霧吹き
- ・攪拌機
- ・乾燥炉

作製手順（手法 A）

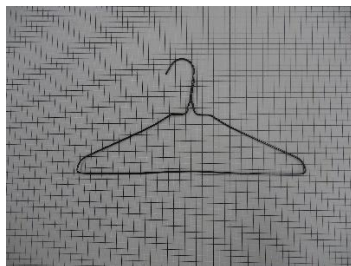
- ① CNF スラリーに純粋を加え、重量割合を 0.05 wt%，0.1 wt%，0.2wt%とした。
- ② ①の水溶液を、攪拌機を用いて 200 rpm で 40 min 攪拌した。
- ③ 切断したガラスクロスの上辺をクリップでハンガーに固定もしくはピンチハンガーで固定した（図 3.6）。
- ④ ガラスクロスの下辺に板をおもりとしてクリップで固定した。
- ⑤ ②の水溶液を霧吹きに入れ、④のガラスクロス両面に 5 回ずつ噴霧した。
- ⑥ 実験室環境下で 12 hour 以上乾燥させた。
- ⑦ このガラスクロスを 30 枚積層し、プリフォームとした。このとき、予き裂導入源としてカプトンシートを 15 枚目のガラスクロス上に配置した

作製手順（手法 B）

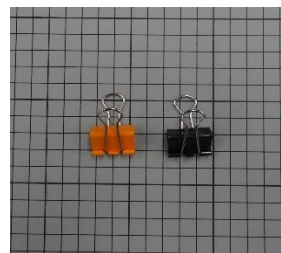
- ① CNF スラリーに純粋を加え、重量割合を 0.1 wt%，0.2 wt%とした。
- ② ①の水溶液を、攪拌機を用いて 200 rpm で 40 min 攪拌した。
- ③ ガラスクロスを 14 枚積層し、15 枚目と 16 枚目にスプレーを用いて両面 5 回ずつ噴霧し積層した。15 枚目と 16 枚目の間にはカプトンシートを挿入した。その後ガラスクロスを 14 枚積層した。
- ④ おもりを乗せ、乾燥炉で 60℃、3 時間で乾燥させた。これをプリフォームとした。



(a) ピンチハンガー



(b) ハンガー



(c) クリップ

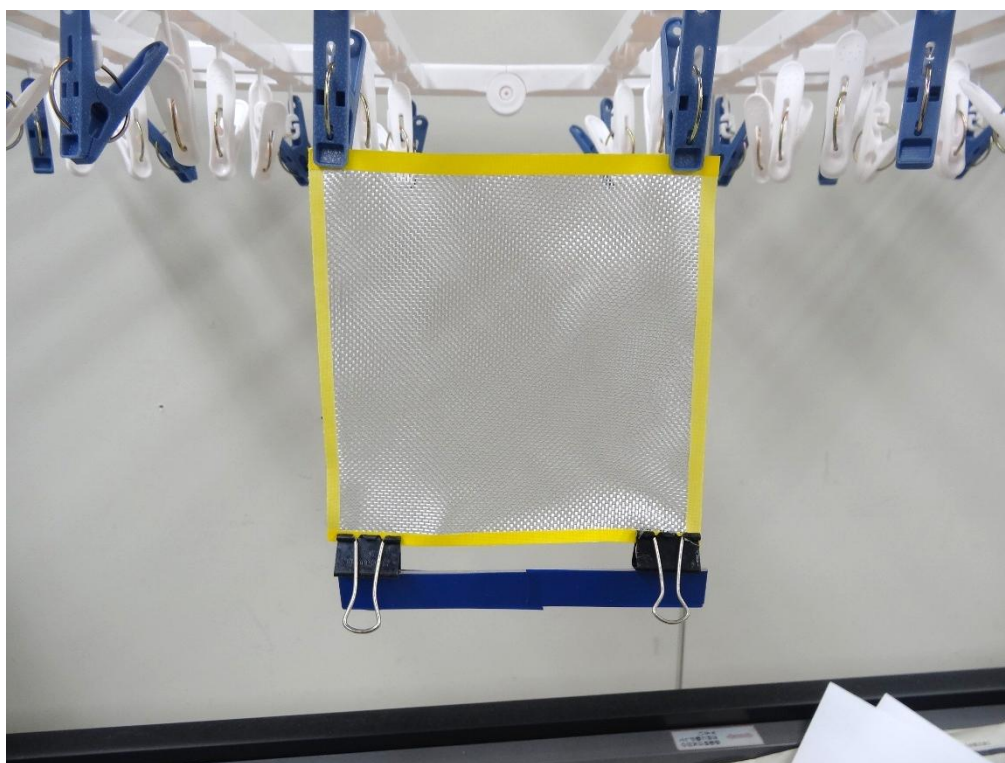


(d) 板



(e) 霧吹き

図 3.5 CNF 付着に使用した器具



(a) ピンチハンガー



(b) ハンガー

図 3.6 ガラスクロス固定方法（手法 A）

3-2-3 VaRTM (Vacuum assisted Resin Transfer Molding) 法

VaRTM 法に使用した器具類 (図 3.7) と方法を以下に示す.

- ・ 鉄板
- ・ 台
- ・ 三脚
- ・ 離型剤 (TR Industries)
- ・ シーラントテープ
- ・ マスキングテープ
- ・ ピンチ×4
- ・ バネ (約 100 mm) ×2*
- ・ 耐油ホース (750 mm) ×2
- ・ スプリングホース (100, 1000 mm)
- ・ ピールプライ (175×175 mm)
- ・ フローメディア (150×200, 150×50 mm)
- ・ シート綿 (150×50, 150×25 mm) ×3
- ・ 真空パック (350×500 mm)
- ・ ガラス繊維 (150×150 mm) ×30
- ・ カプトンシート (150×40 mm×12.5 μm)
- ・ デシケータ
- ・ 真空ポンプ
- ・ 攪拌機
- ・ 恒温機 (いすゞ製作所, SSR-11S)

*針金を直径 6 mm のビットに巻き付け, バネ状になるよう加工した.

準備としてバネ-スプリングホース-耐油ホースの順で径口の大きい方に差し込んで組み合わせた. スプリングホースが 100 mm のものを入り口側, 1000 mm のものを出口側に使用した.

配置手順

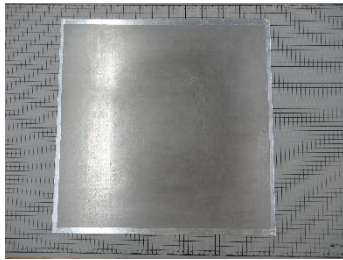
- ① 台の上に鉄板を置き、鉄板上をアルコールで洗浄し、シーラントテープで A4 サイズの枠を作った。四隅は空気が漏れないように切断せず曲げ、2 重に重ねて補強を行った (図 3.8 (a))。
- ② 離型剤を枠内に多めに粗く塗った後に、キムワイプで余剰分を拭き取り薄く塗り伸ばした。試験片表面に影響するため均一に塗り伸ばした (図 3.8 (b) (c))。
- ③ 手法 A と B の方法で作製したプリフォームを、枠中央に配置した。 (図 3.8 (d))。
- ④ ガラスクロスの上にピールブライを重ね、四隅をマスキングテープで固定した (図 3.8 (e))。
- ⑤ ピールブライ上にフローメディアを図 3.8 (e)のように重ね、四隅をマスキングテープで固定した。
- ⑥ 出口側のフローメディアの上に図 3.8 (f)のようにサイズの大きいものを下にして配置し、マスキングテープで固定した。
- ⑦ 入口と出口にホースを配置し、シーラントテープで枠に固定した。その後、バネを枠内に収まる長さに伸ばした (図 3.8 (h))

パッキング手順

- ① 各辺に 2 個または 1 個ずつ真空パック側にシーラントテープを張り付けることによって折り目を作り、弛ませた (図 3.9)
- ② 出口側のホースを、真空ポンプと接続したデシケータと繋いだ。
- ③ 入り口側のホースの先をピンチで塞ぎ、真空ポンプを作動させ気密を確認した。

含浸手順

- ① 主剤と硬化剤を重量比 100:42.5 で混合し、攪拌機を用いて 150 rpm で 15~30 min 攪拌し、デシケータ内で真空ポンプを用いて 15~30 min 脱泡を行った。本研究では、450 g のエポキシ樹脂を使用した。
- ② 入り口側のホースをピンチで止めたまま真空ポンプを作動させ、真空状態にしてから入り口側のホースの先をエポキシ樹脂に挿入し含浸を開始した。このときエポキシ樹脂の入った容器は含浸を行っている鉄板よりも下に来るように配置した。
- ③ エポキシ樹脂が出口側のスプリングホースを満たした段階で、出口側と入り口側の耐油ホース部分をピンチで塞いだ。
- ④ 実験室環境下で 48 hour 以上硬化させた。
- ⑤ スクレイパーなどを用いて、ピールブライなどの資材を GFRP から取り外した。
- ⑥ 乾燥炉を用いて 80 °C、3 hour ポストキュアを行い完全に硬化させた。



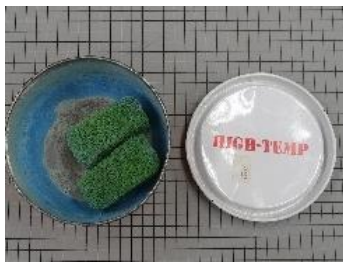
(a) 鉄板



(b) 台



(c) 三脚



(d) 離型剤



(e) シーラントテープ



(f) マスキングテープ



(g) ピンチ



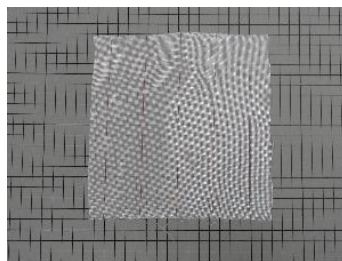
(h) バネ



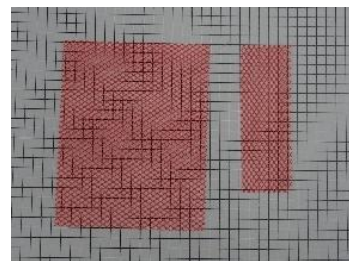
(i) 耐油ホース



(j) スプリングホース



(k) ピールプライ



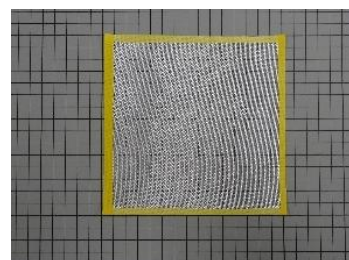
(l) フローメディア



(m) シート綿



(n) 真空パック



ガラス繊維



(o) カプトンシート



(p) デシケータ



(q) 恒温機

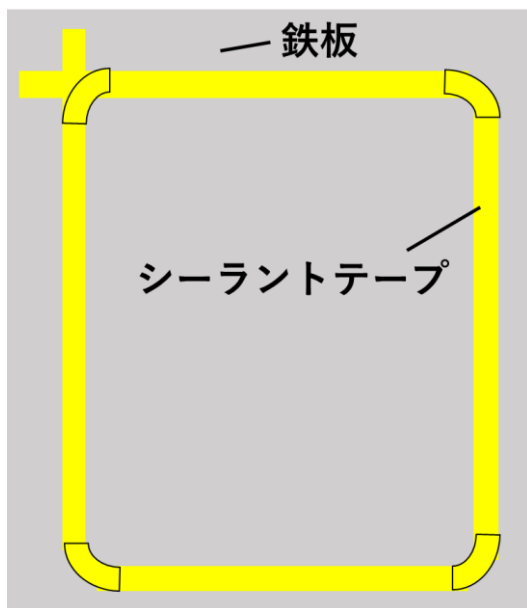


(r) 攪拌機

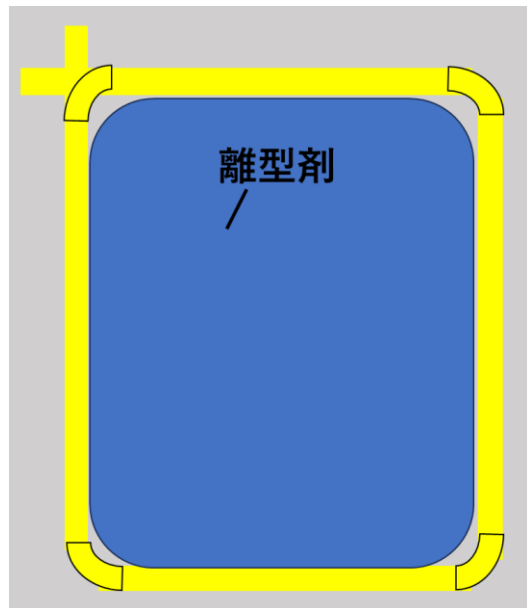


(s) 真空ポンプ

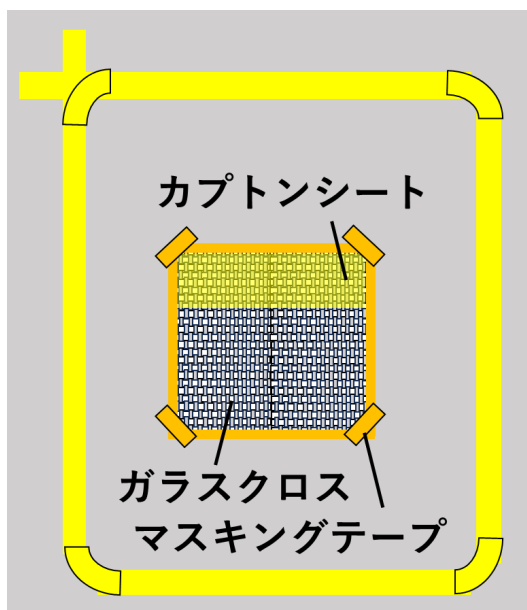
図 3.7 VaRTM で主に使用した材料，器具



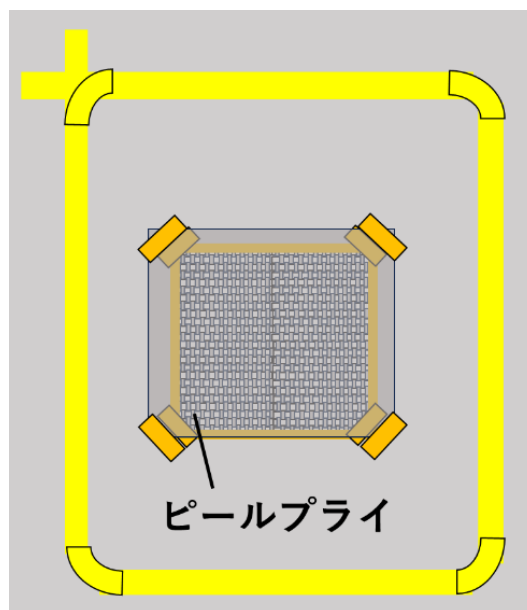
(a) ①



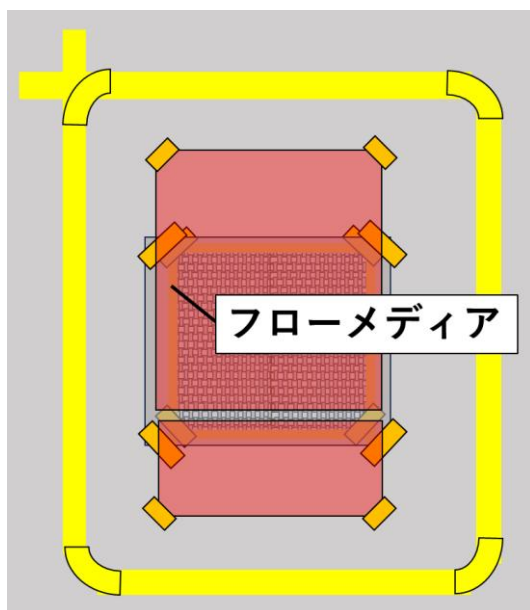
(b) ②



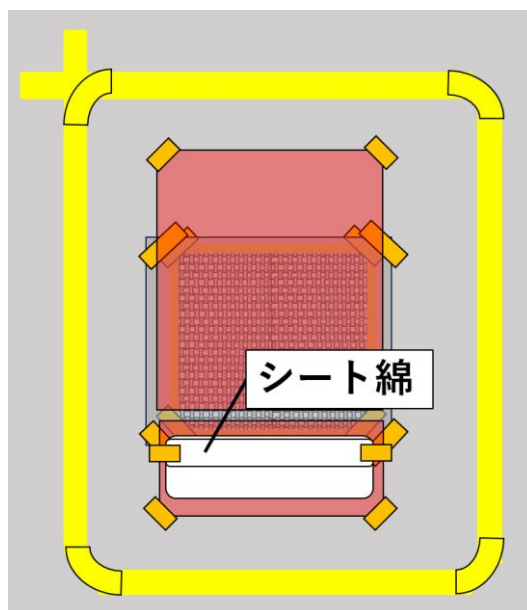
(c) ③



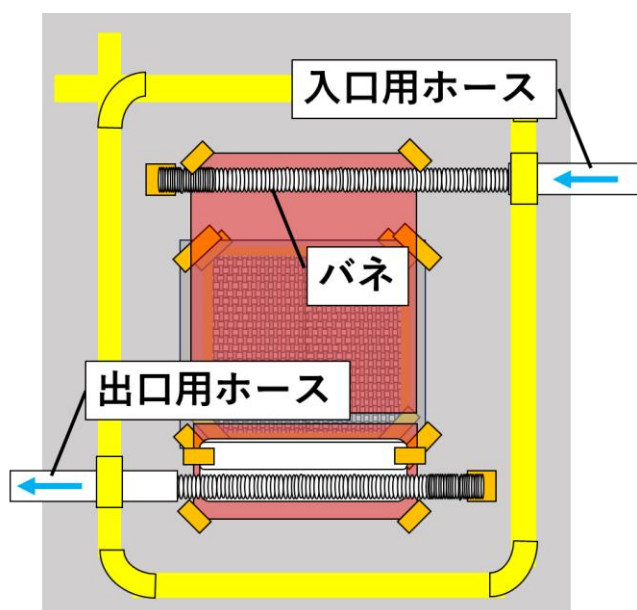
(d) ④



(e) ⑤



(f) ⑥



(g) ⑦

図 3.8 VaRTM 配置手順

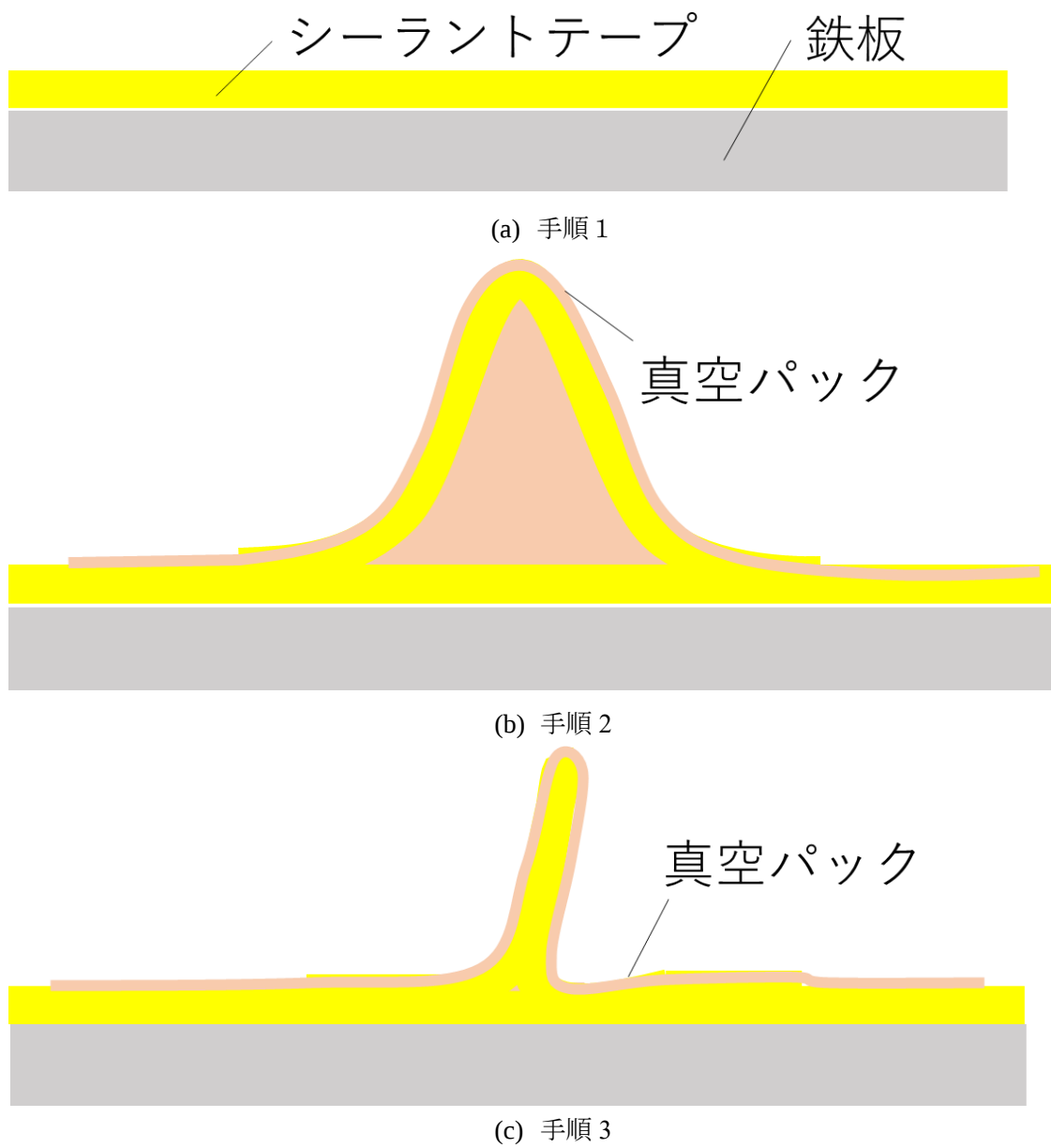


図 3.9 パッキング，弛みの作り方

3-3 試験片作製方法

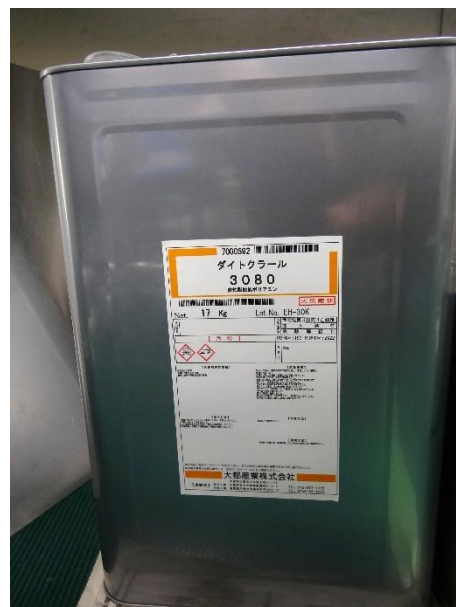
図 3.11 に疲労試験に用いた試験片の寸法を示す。VaRTM 法によって作製した GFRP 積層板をダイヤモンドカッター（図 3.10(a)）を用いて切断した。続いて、予き裂側の試験片端部から 10 mm 程度をエメリー紙 240 番で研磨を行った（往復 5 回）。同様に、蝶番（図 3.10(b)）の接着面を研磨した。接着は Araldite2011（図 3.10(c)）を用い、接着後クリップで固定し 120 °C で 40 min 乾燥炉を用いて硬化させた。カッターナイフを用いてカプトンシートを挿入した層間に予き裂を 20~25 mm 導入した。なお、試験片の板厚は $t=3.5\text{ mm}\sim 3.7\text{ mm}$ の範囲であった。



(a) ダイヤモンドカッター

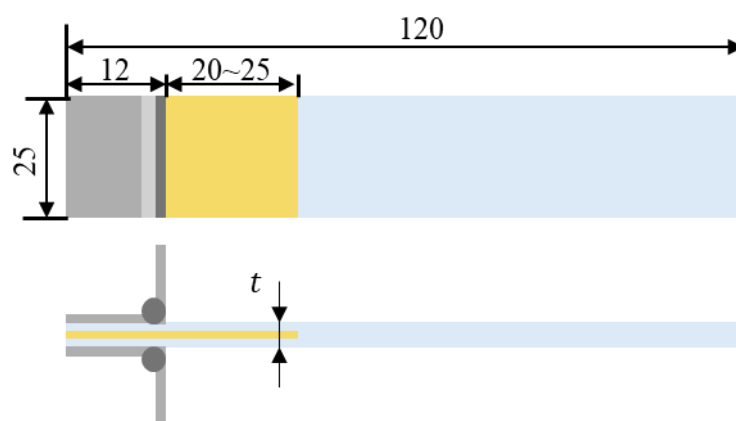


(b) 蝶番

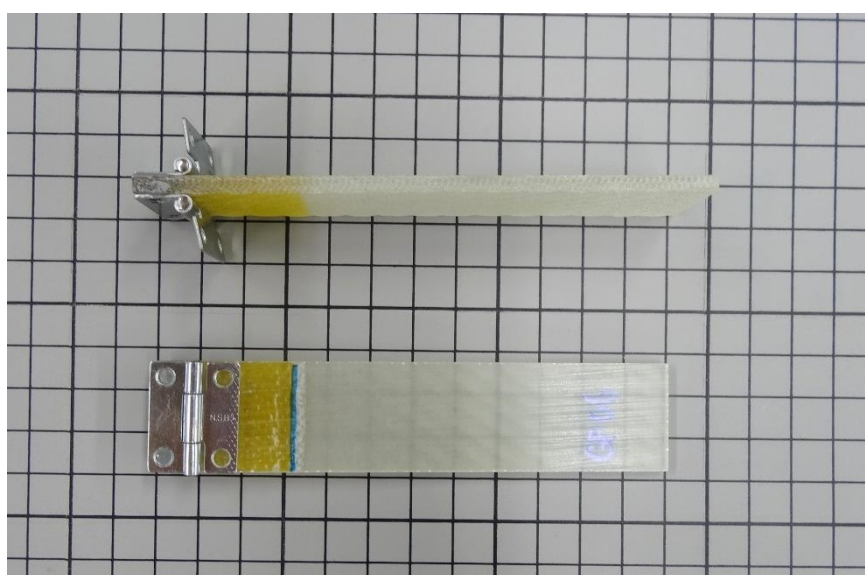


(c) 樹脂

図 3.10 試験片作製に使用した材料，器具



(a) 試験片寸法



(b) 試験用試験片

図 3.11 DCB 試験片

4 章 実験方法

4-1 二重片持ち梁疲労試験 (DCB 試験)

本実験ではモードI疲労き裂進展試験として、DCB(Double Cantilever Beam, 二重片持ち)試験を行った。積層板の層間にフィルムを入れて予き裂を導入した試験片を、引き裂くように引っ張る試験方法で、実際に行った試験の概略図を図 4.1 に示す。

以下、荷重 P 、き裂長さ a 、荷重線上での開口変位 2δ 、試験片幅 B 、被着体ヤング率 E 、断面二次モーメント I とする (図 4.2, 4.3)。

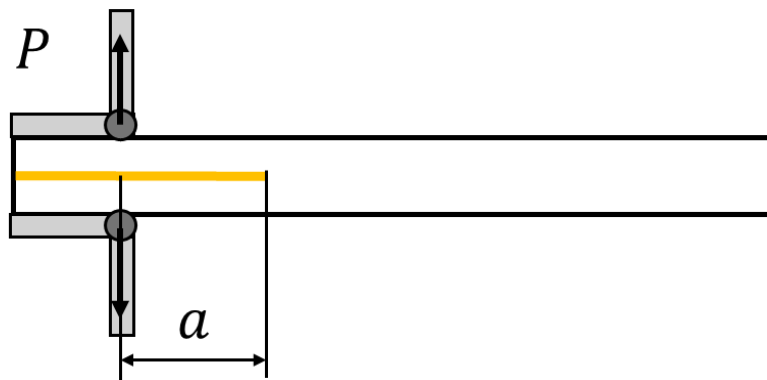


図 4.1 DCB 試験の概略図

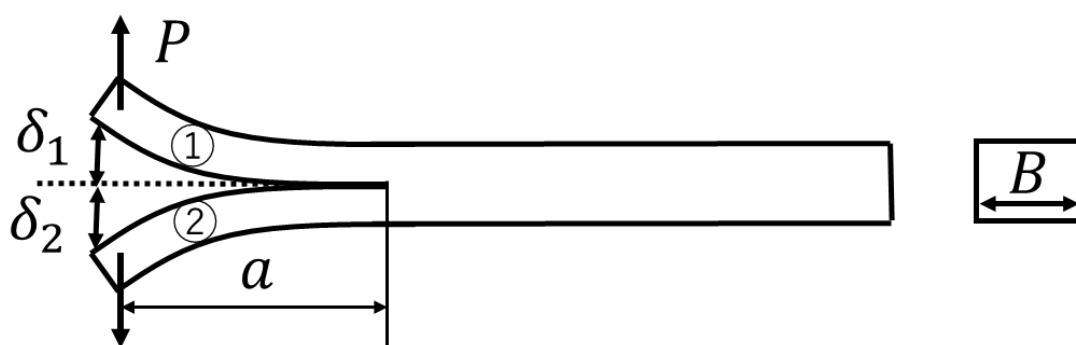


図 4.2 DCB 試験片の概略図

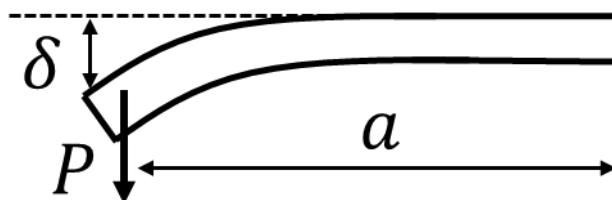


図 4.3 片持ち梁

本試験でのモードIのエネルギー解放率範囲 ΔG_{II} を導く．

片持ち梁より試験片のたわみ δ_1 , δ_2 は

$$\delta_1 = \frac{Pa^3}{3(EI)_1} \quad (11)$$

$$\delta_2 = \frac{Pa^3}{3(EI)_2} \quad (12)$$

よって，DCB 試験片の開口変位 δ は

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_1 + \delta_2 \\ &= \frac{Pa^3}{3\{(EI)_1(EI)_2\}} [(EI)_1 + (EI)_2] \end{aligned} \quad (13)$$

したがって，試験片のコンプライアンス C は式(13)より

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{a^3}{3\{(EI)_1(EI)_2\}} [(EI)_1 + (EI)_2] \quad (14)$$

式(9)より，モードIのエネルギー解放率は

$$G_{II} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} = \frac{P^2 a^2}{2B} \left\{ \frac{(EI)_1 + (EI)_2}{(EI)_1(EI)_2} \right\} \quad (15)$$

以上より，エネルギー解放率範囲 ΔG_{II} は

$$\Delta G_{II} = \frac{(P_{max}^2 - P_{min}^2) a^2}{2B} \left\{ \frac{(EI)_1 + (EI)_2}{(EI)_1(EI)_2} \right\} \quad (16)$$

4-2 GFRP の曲げ剛性の測定

曲げ剛性は材料力学より次式を用いて導出することができる．

$$P = \frac{48EI}{l^3} \delta \quad (17)$$

ここで、P、EI、 δ 、l はそれぞれ荷重、曲げ剛性、変位、支点間距離である．

曲げ剛性の測定は油圧サーボ式疲労試験機（容量 10 kN）を用いて 3 点曲げ負荷により行った．試験片は疲労き裂伝ば試験後のき裂が進展した面で完全に分離したものを使用した．き裂が進展した面の上部を上、下部を下とする．図 4.4 および 4.5 に試験の概略図，試験写真を示す．

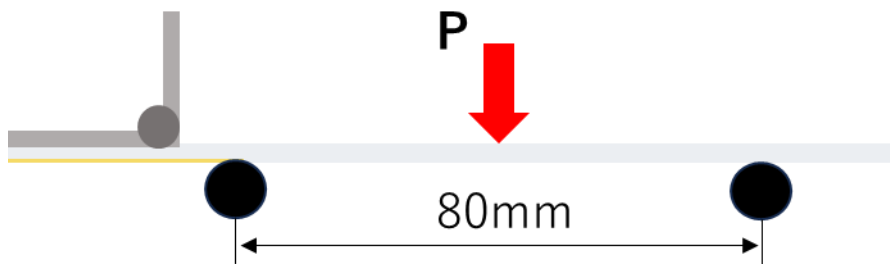


図 4.4 3 点曲げ概略図

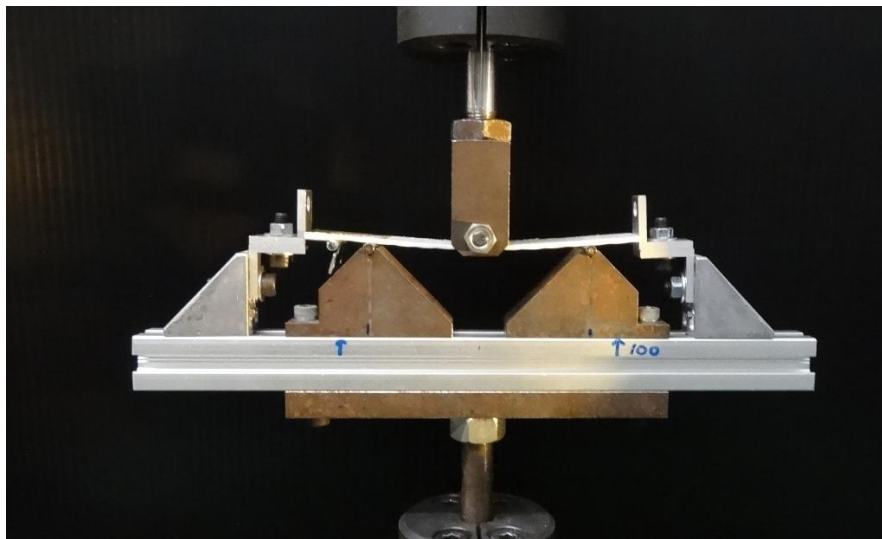


図 4.5 3 点曲げ

4-3 コンプライアンス法 [12]

式(14)を用いて、コンプライアンスからき裂長さを求めることができる。本研究では、目視で実測したき裂長さと試験中に測定した荷重と変位から求めたき裂長さが一致するか確認を行った。試験を行う前にき裂進展を観測しやすくするために、試験片側面をやすりがけ(#150～#500)した後に、白の修正液を塗った。き裂の観測は読み取り顕微鏡(図 4.6)を用いて行った。

式(14)よりき裂長さの三乗に対する変位と荷重で定義されるコンプライアンスの関係は線形であることが分かる。このき裂長さ三乗に対するコンプライアンスの関係の傾きを求めると

$$dc/da = 3a^2 \times (\text{傾き})$$

の式がなり立つ。式(14)を用いるとコンプライアンスからエネルギー解放率が導出できる。よって実験で測定した荷重と変位からエネルギー解放率を導出することが可能である。

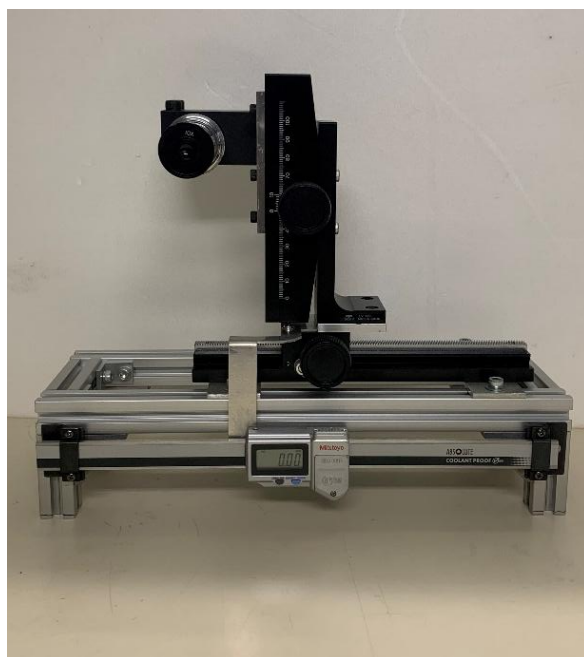


図 4.6 読み取り顕微鏡

4-4 モード I の疲労き裂進展試験 (DCB 試験)

図 4.7 および 4.8 にモード I の疲労き裂進展試験の概略図，試験写真を示す．モード I 疲労き裂進展試験は油圧サーボ式疲労試験機（容量 10 kN）を用いて行った．次に，カッターナイフを用いてカプトンシートを挿入した層間に予き裂を 20 mm～25 mm 導入した．応力比 0.1，繰返し速度 2 Hz，正弦波状負荷の条件下のもと荷重制御で試験を行った．その後開口変位が約 5 mm となってから，応力比が約 0.1 になるようにアクチュエータ変位を制御した変位制御での試験に切り替えた．この時の繰返し速度を 2 Hz とした．試験は CNF を付着させていないもの，プリフォームが手法 A, B の試験片について行った．以下試験片については 0 %材, 0.1 %材_A, 0.2 %材_B などと記述する．き裂長さおよびエネルギー解放率 G_I は，コンプライアンスから算出した．疲労き裂進展において応力比が影響を与える報告 [13] がある．そこで荷重制御および変位制御で応力比を統一して行った．

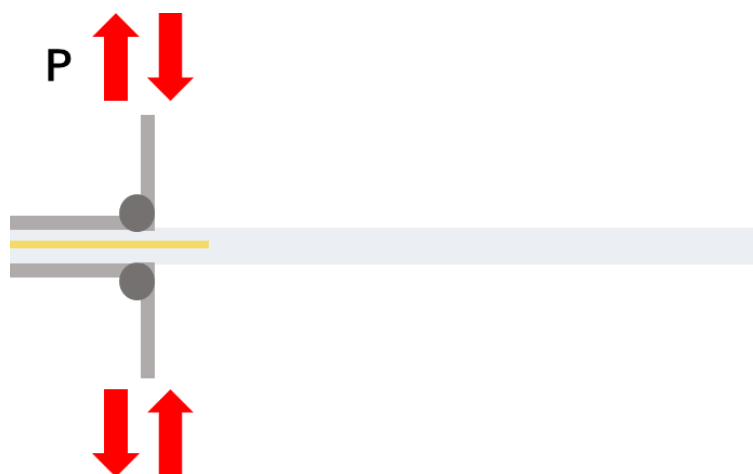


図 4.7 DCB 試験概略図

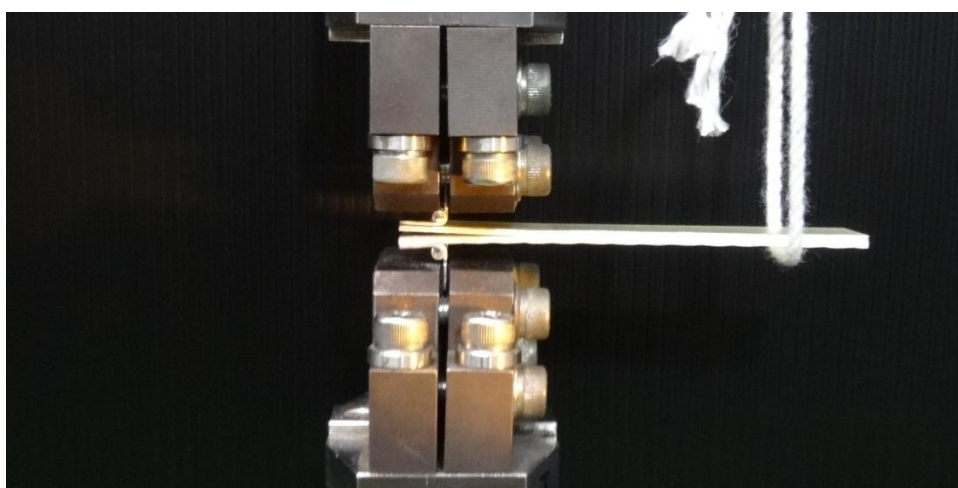


図 4.8 DCB 試験

4-5 破面観察

図 4.9 に示す機器を用いて、疲労試験終了後の 0 %材, 0.05 %材_A, 0.1 %材_A, 0.2 %材_A の試験片をそれぞれき裂の上面と下面を観察した。0.05 %材_A においてはデータのばらつきが大きかったため 2 種類の試験片を観察した。表 4.1 に示す $\Delta G=300$ 付近のき裂長さを中心に 20 mm 破面観察のため糸鋸を用いて切り出した。次に、切り出した試験片を試料台に導電テープで張り付けた。その試験片にエアーコンプレッサーを用いて付着しているほこりなどを取り除いた (図 4.10)。

次に、スパッタ装置 (CRESSINGTON, Sputter Coater 108auto)を用いて真空中に金パラジウムで成膜を行うスパッタリングを 10 mA, 90 s の条件で行った。これは、観察時に帯電現象によるノイズを低減させるためである。その後、走査型電子顕微鏡(SEM)(JEOL, JCM-5000)を用いて破面の観察を行った。



(a) 糸鋸



(b) エアーコンプレッサー



(c) スパッタ装置



(d) 走査型顕微鏡

図 4.9 破面観察に使用した主な機器

表 4.1 切り出した試験片の範囲

	き裂長さ [mm]	ΔG [J/m^2]
0 %材	33.5	302
0.1 %材	26.6	306
0.2 %材	25.8	300
0.05 %材	30.5	299
	39.6	296

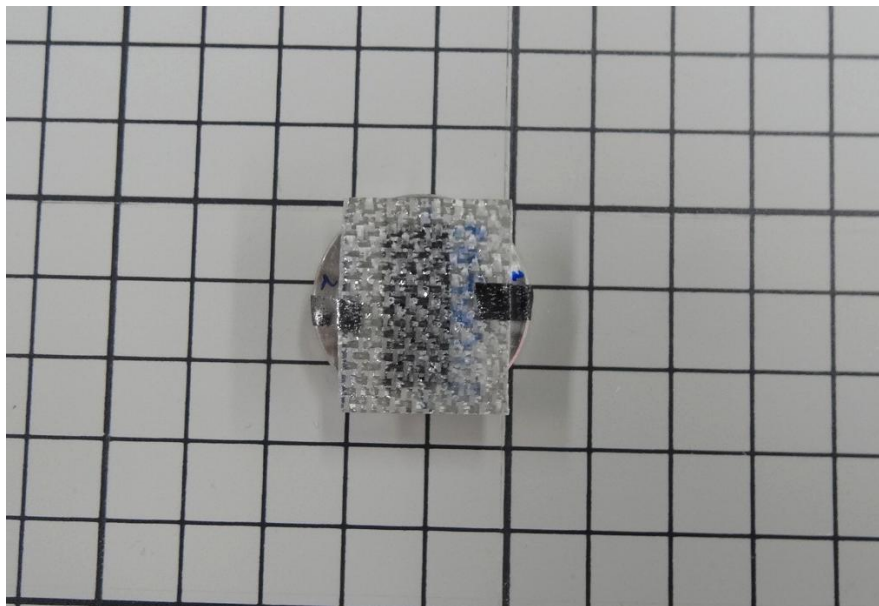


図 4.10 観察試験片

5 章 結果および考察

5-1 曲げ剛性の測定

疲労試験終了後の 0 %材, 0.05 %材_A, 0.1 %材_A, 0.2 %材_A の試験片をそれぞれき裂の上面と下面の曲げ剛性の測定を行った. 試験片ごとに 3 回測定を行いその平均値を表 5.1 に示す.

表 5.1 曲げ剛性まとめ

		上, EI [N・mm ²]	下, EI [N・mm ²]			上, EI [N・mm ²]	下, EI [N・mm ²]
0 %材	01	155000	173000	0.1 %材_A	01	195000	150000
	02	159000	157000		02	199000	174000
	03	143000	177000		03	193000	151000
	04	152000	165000		04	196000	157000
	05	157000	169000		Av.	195750	158000
	Av.	153200	168200	0.2 %材_A	01	222000	233000
0.05 %材_A	01	176000	143000		03	233000	228000
	03	173000	154000		04	213000	228000
	04	175000	165000		05	229000	194000
	05	174000	163000		06	233000	201000
	06	171000	147000		07	240000	193000
	07	172000	147000		08	238000	178000
	08	177000	145000		09	188000	181000
	09	175000	151000		10	197000	170000
	Av.	173625	151875		11	184000	180000
					Av.	217700	198600

上記の測定値を破壊力学パラメータの算出に使用した. 曲げ剛性の平均値は CNF の添加量が増加するほど高くなった. これは, 添加量増加によって試験片の厚みがわずかに増加したためだと考える.

5-2 コンプライアンス

測定したき裂とコンプライアンスから算出したき裂長さの比較を行った. 図 5.1, 5.2 にそれぞれ 0 %材_A および 0.2 %材_A のき裂長さ三乗に対するコンプライアンスの関係を示す. このときの傾きは 0 %材で 4×10^{-6} , 0.1 %材で 3×10^{-6} となり, 実測値と理論値の傾きは一致した.

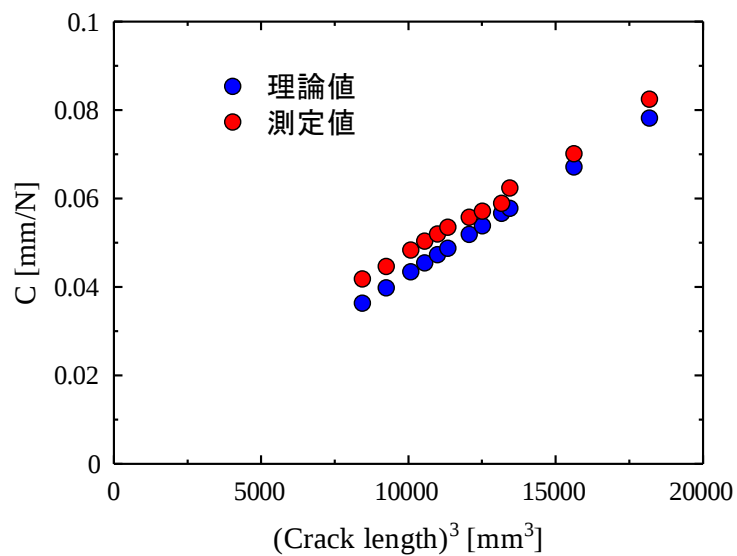


図 5.1 き裂長さとコンプライアンスの関係, 0 %材

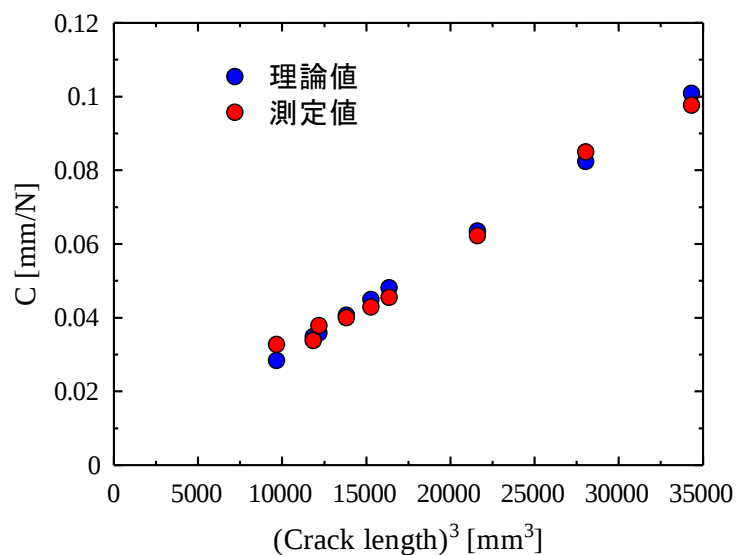


図 5.2 き裂長さとコンプライアンスの関係, 0.1 %材_A

次に，実測値とコンプライアンスから求めたき裂長さを表 5.2，5.3 に示す．両材料で実測値とコンプライアンスから求めたき裂長さは誤差が 1 mm 以下になった．よって，本研究のモードⅠき裂伝ば試験ではコンプライアンスからき裂長さを算出した．

表 5.2 き裂長さ比較，0 %材

0 %材	実測値[mm]	コンプライアンス[mm]	誤差[mm]
01	19.99	20.93	-0.94
	20.36	21.35	-0.99
	20.99	21.82	-0.83
	21.61	22.4	-0.79
	21.94	22.71	-0.77
	22.24	22.95	-0.71
	22.47	23.18	-0.71
	22.94	23.49	-0.55
	23.22	23.69	-0.47
	23.62	23.93	-0.31
	23.78	24.39	-0.61
	25	25.36	-0.36
	26.3	26.77	-0.47

表 5.3 き裂長さ比較，0.1 %材_A

0.1 %材_A	実測値[mm]	コンプライアンス[mm]	誤差[mm]
01	26.6	26.26	0.34
	27.85	27.66	0.19
	30.38	30.69	-0.31
	32.5	32.15	0.35
02	22.8	22.57	0.23
	23.02	23.44	-0.42
	24	23.88	0.12
	24.82	24.43	0.39
	25.39	24.91	0.48

5-3 き裂進展速度

き裂長さ増分 Δa —繰返し数増分 ΔN の関係を整理する際、一般にはき裂進展速度 da/dN を決定するために、セカント法と増分多項式が推奨されている。両者に本質的な差異はないが、後者のほうがなめらかなデータを与える [14]。本研究では5つの測定値で平均化を行った。

5-3-1 手法 A

図 5.3 に疲労き裂進展試験において得られたき裂進展速度 da/dN とエネルギー解放率範囲 ΔG_I の関係を両対数プロットで示す。0 %材は3本、0.05 %材_A は7本、0.1 %材_A は4本、0.2 %材_A は6本の試験片の結果をまとめている。

図 5.3 から、すべての条件において da/dN - ΔG_I 関係にかなりのばらつきが見られた。すべてのデータをパリス則に当てはめたとき m 値（傾き）は0 %材：2.16, 0.05 %材：2.01, 0.1 %材：, 0.2 %材：1.83 であった。さらに、同一 ΔG で比較すると CNF を付着させた試験片のき裂進展速度が高くなる傾向が確認された。この結果は先行研究で報告されている、CNF 付着による疲労強度の向上とは異なるものである。しかし、非常にばらつきが大きいため、この関係を一つの式で表すのは適切ではないと考えられる。よって、異なる方法で比較し検討を行った。

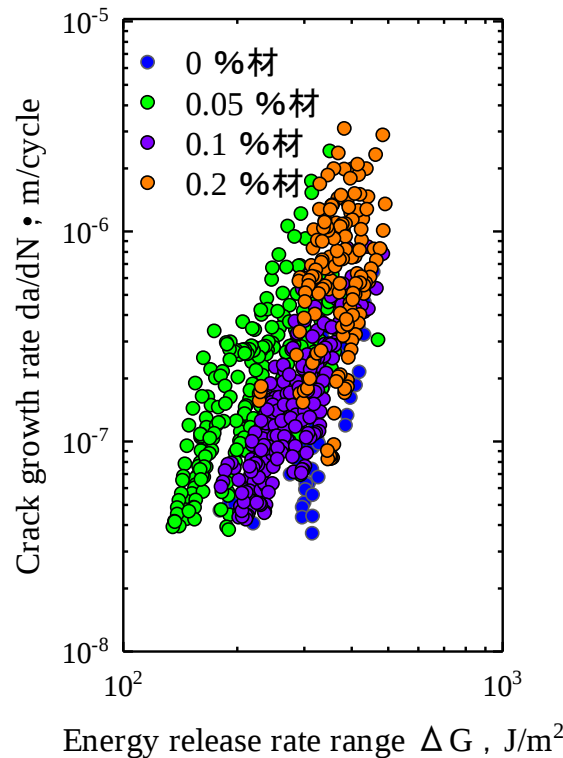


図 5.3 ΔG_I と da/dN の関係_A

次に図 5.3 に示した結果を試験条件ごとに近似直線でまとめたものを図 5.4 に示す。また式(10)で近似したときの係数 C および m を表 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 に示す。0 %材, 0.05 %材, 0.1 %材, 0.2 %材の傾きの平均値はそれぞれ 6.69, 6.91, 5.48, 5.86 であり添加量の違いによる差異は見られなかった。

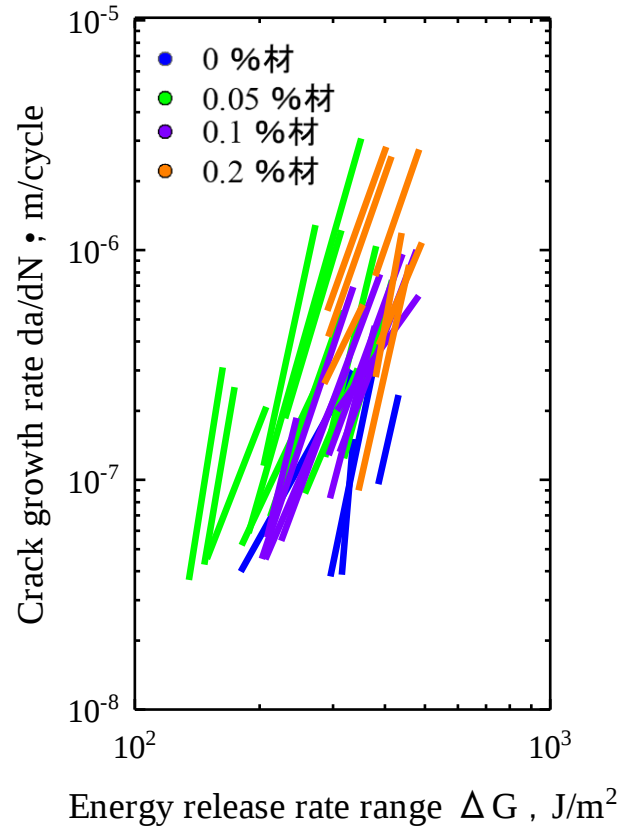


図 5.4 ΔG_I と da/dN の関係, 近似直線

表 5.4 指数則係数, 0 %材

		C	m		J/m ²	m/cycle
0 %材	01	1.65×10^{-15}	3.24	Max	335	2.98E-07
				min	180	3.99E-08
	02	1.31×10^{-29}	8.73	Max	375	2.99E-07
				min	296	3.79E-08
	05	7.47×10^{-61}	21.1	Max	336	1.51E-07
				min	315	3.86E-08
		1.26×10^{-28}	8.11	Max	431	2.34E-07
				min	386	9.57E-08

表 5.5 指数則係数, 0.05 %材_A

		C	m		J/m ²	m/cycle
0.05 %材_A	04	5.05×10^{-27}	8.38	Max	272	1.29E-06
				min	204	1.15E-07
	05	8.65×10^{-22}	6.06	Max	314	1.22E-06
				min	230	1.85E-07
	06	4.68×10^{-31}	10.6	Max	174	2.54E-07
				min	147	4.28E-08
		5.95×10^{-20}	5.19	Max	316	5.48E-07
				min	212	6.92E-08
		6.10×10^{-23}	6.59	Max	351	3.06E-06
				min	188	5.88E-08
	07	2.76×10^{-32}	11.3	Max	163	3.09E-07
				min	135	3.67E-08
		3.90×10^{-20}	5.55	Max	207	2.08E-07
				min	149	4.52E-08
	08	1.06×10^{-16}	3.86	Max	274	2.57E-07
				min	181	5.19E-08
		4.37×10^{-18}	4.29	Max	344	3.05E-07
				min	257	8.73E-08
		2.05×10^{-24}	6.71	Max	416	7.38E-07
				min	319	1.24E-07
	09	5.73×10^{-26}	7.45	Max	381	1.04E-06
				min	287	1.26E-07

表 5.6 指数則係数, 0.1 %材_A

		C	m		J/m ²	m/cycle
0.1 %材_A	01	2.11×10^{-20}	5.36	Max	336	6.91E-07
				min	202	4.52E-08
		9.47×10^{-20}	4.93	Max	441	9.61E-07
				min	293	1.28E-07
	02	6.14×10^{-25}	7.32	Max	245	1.86E-07
				min	208	5.62E-08
		1.62×10^{-19}	4.86	Max	390	7.87E-07
				min	225	5.43E-08
	03	8.26×10^{-18}	4.21	Max	325	3.08E-07
				min	206	4.51E-08
		1.61×10^{-19}	4.74	Max	477	1.00E-06
				min	311	1.32E-07
	04	4.63×10^{-25}	6.97	Max	378	4.68E-07
				min	295	8.31E-08
		1.03×10^{-13}	2.53	Max	483	6.34E-07
				min	307	2.01E-07

表 5.7 指数則係数, 0.2 %材_A

		C	m		J/m ²	m/cycle
0.2 %材_A	4	2.79×10^{-28}	8.06	Max	458	8.64E-07
				min	346	9.00E-08
	7	2.25×10^{-16}	3.71	Max	354	5.79E-07
				min	286	2.62E-07
	8	2.03×10^{-29}	5.05	Max	403	2.82E-06
				min	291	5.45E-07
	9	5.30×10^{-32}	9.59	Max	439	1.19E-06
				min	380	2.80E-07
		3.47×10^{-20}	5.20	Max	484	2.75E-06
				min	379	7.71E-07
	10	8.57×10^{-20}	5.14	Max	415	2.56E-06
				min	292	4.21E-07
		2.90×10^{-18}	4.29	Max	491	1.08E-06
				min	387	3.87E-07

次に、表 5.4～5.7 の近似直線を用いて、き裂伝ば速度 2×10^{-7} m/cycle に対応するエネルギー解放率範囲を算出し CNF の添加量ごとにまとめたものを図 5.5 に示す。図 5.5 から 0 %材に比べ CNF を添加することでばらつきがさらに大きくなり、0.05, 0.2, 0.1 %材の順で大きい結果となった。また、同様に CNF を添加することでエネルギー解放率範囲の平均値も小さくなっており、き裂伝ば抵抗は低下する結果となった。

引張疲労試験において、本材料の疲労強度は CNF を適切な量手法 A により付着させることで向上することが確認されている。しかし、本研究における層間でのき裂伝ばに関しては、CNF の添加が強化に寄与せず、むしろ欠陥として作用する可能性が示唆された。

GFRP において応力比、繊維ブリッジングなど様々な要因が影響を与える報告 [13]があり、ばらつきの原因を特定するのは困難であった。

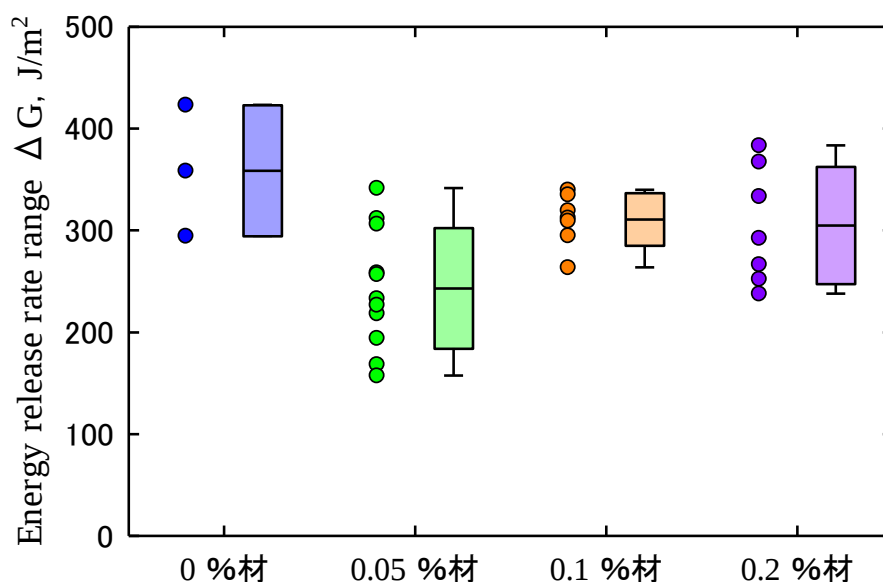


図 5.5 $da/dN=2 \times 10^{-7}$ のときのエネルギー解放率範囲

5-3-2 手法 B

図 5.6 に手法 B で作製した 0.1 wt% および 0.2 wt% CNF 水溶液を付着させた実験結果を比較したものを示す。手法 B においても da/dN - ΔG_I 関係にかなりのばらつきが見られた。手法 A と同様に、手法 B においても 0.1 %材に比べて 0.2 %材の疲労き裂伝ば抵抗が低下する結果となった。したがって、手法 A と同様に層間でのき裂伝ばに関しては、CNF の添加が強化に寄与せず、むしろ欠陥として作用する可能性が示唆された。

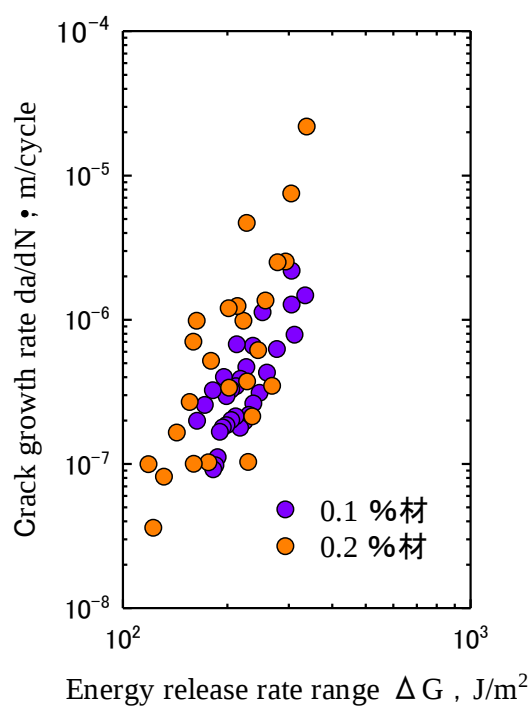


図 5.6 手法 A と B の比較

5-3-3 手法 A と B の比較

図 5.7 に手法 A と B で 0.1 wt% および 0.2 wt% CNF 水溶液を付着させた実験結果を比較したものを示す。同一 ΔG で手法 A と比較を行うと伝ば速度は 10 倍高くなり、き裂伝ば抵抗はさらに低下した。0.1 %材においては手法によるばらつきの変化は見られなかったが、0.2 %材においては手法 A に比べ手法 B はばらつきが非常に大きくなった。疲労き裂伝ば抵抗が低下した原因として CNF を付着させて加圧したことが考えられるが詳細なメカニズムは不明である。

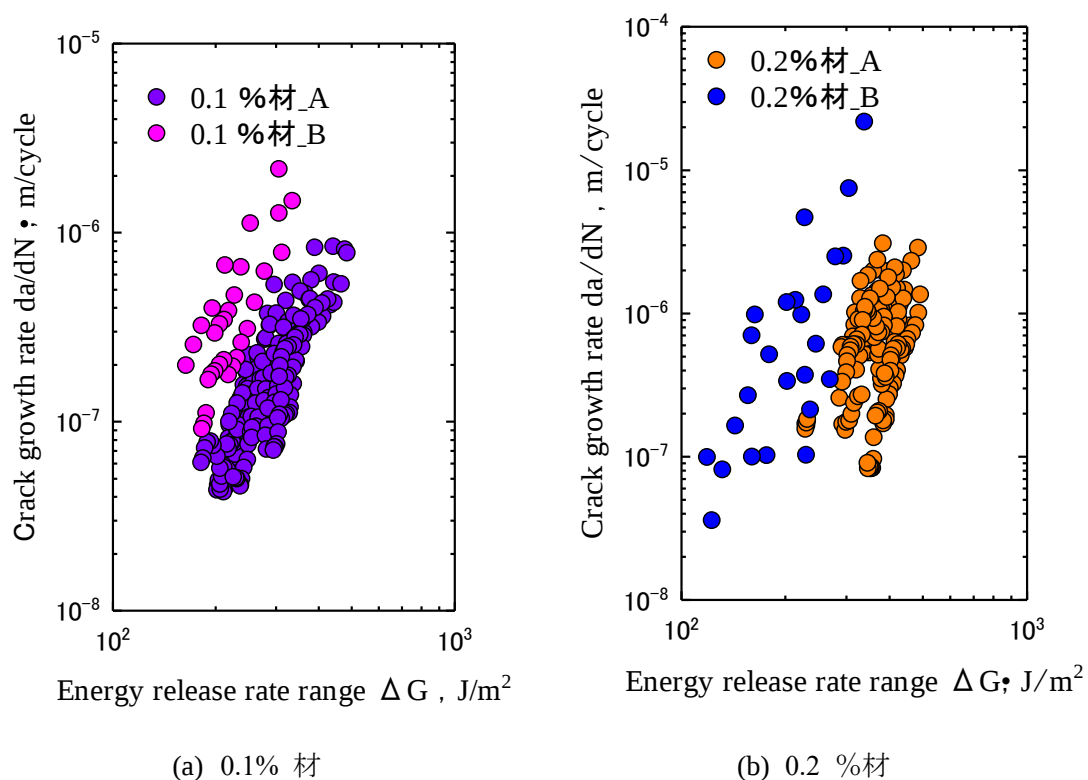


図 5.7 手法 A と B の比較

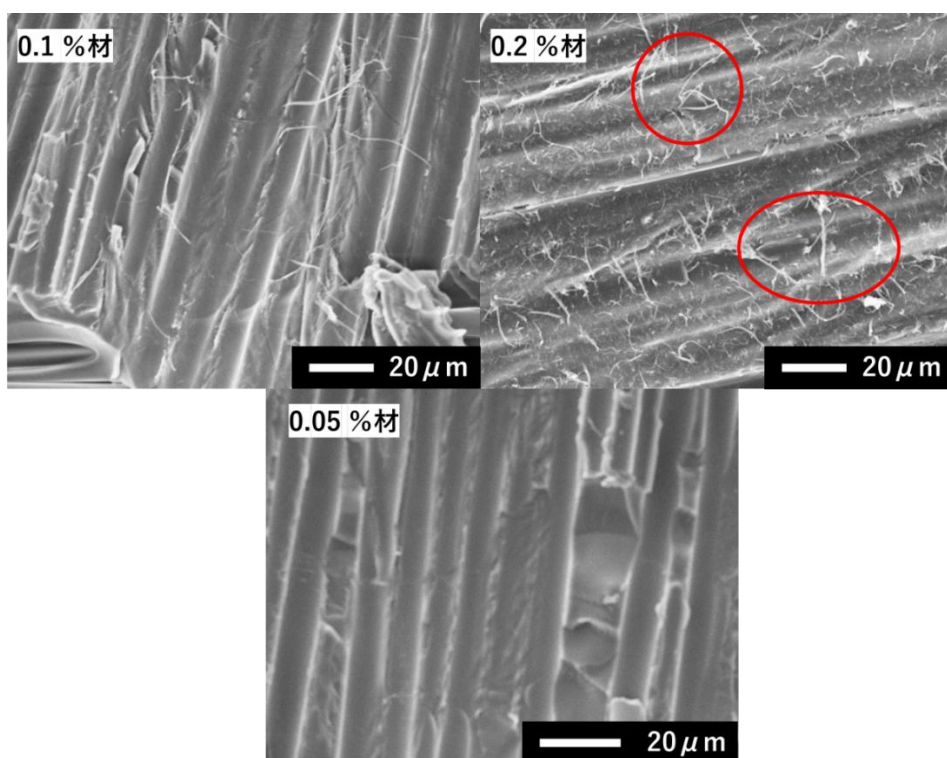
5-4 破面観察

図 5.8 に、0 %材、0.05 %材_A、0.1 %材_A、0.2 %材_A の破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果を示す。

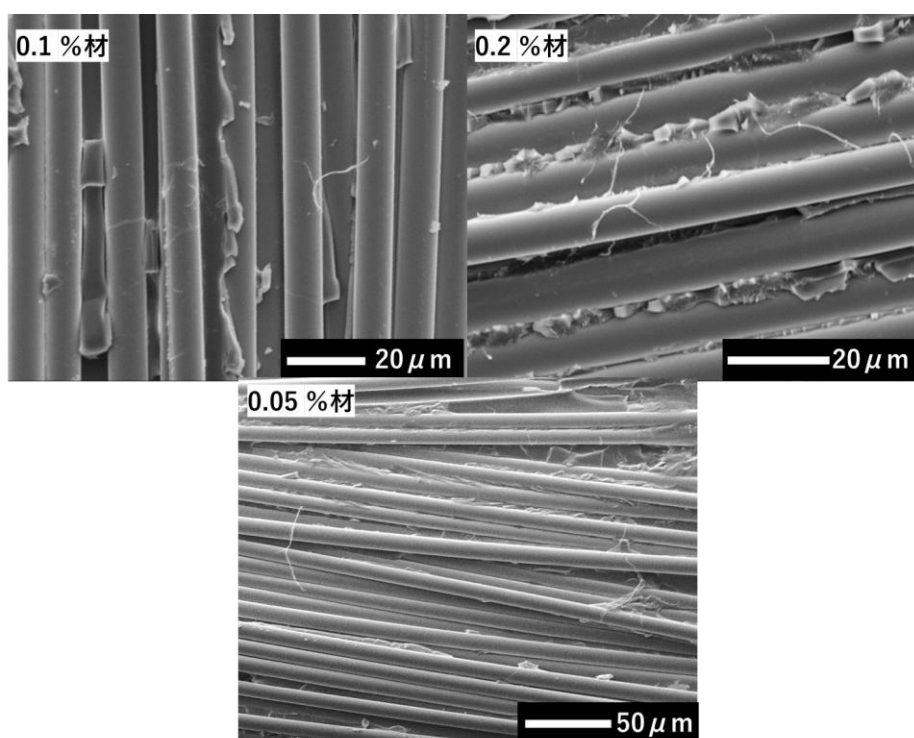
手法 A で CNF を付着させたものはすべての濃度の破面において図 5.8(a)(b)に示すようなガラス繊維と樹脂の界面をき裂が進展した様相が確認された。また、0.1 %材_A および 0.2 %材_A では、樹脂表面およびガラス繊維表面に CNF の付着が確認された。一方、0.05 %材_A ではガラス繊維のみ付着が確認できた。0.2 %材_A では図 5.8(a)の赤丸で示すような CNF の解繊が十分でない部分が観察された。この繊維の集合が結果としてき裂進展抵抗を低下させたと考えられる。さらに、0 %材では観察されなかった図 5.8(c)のような気泡が、0.05 %材_A、0.1 %材_A、0.2 %材_A で確認された。特に 0.05 %材_A では全面的に気泡が確認できた。この気泡が欠陥となり、き裂進展抵抗の低下の要因の一つになったと考えられる。0.05 %材_A は 9 月の室温が高い時期に作製したため気温の上昇により樹脂の流入速度が速くなり、その結果、気泡を十分に押し流すことができなかったと考えられる。よって、VaRTM 法において適切な作製条件の検討が必要である。

一方で、0 %材および 0.1 %材_A では図 5.8(d)のような繊維の破断が確認され、これが 0.2 %材_A よりも両者のき裂進展抵抗が高くなった理由と考えられる。繊維ブリッジングはき裂進展に対する抵抗力を大幅に向上させることが知られている [15]。したがって、0 %材および 0.1 %材_A では、き裂先端において繊維ブリッジングが発生した可能性が示唆される。

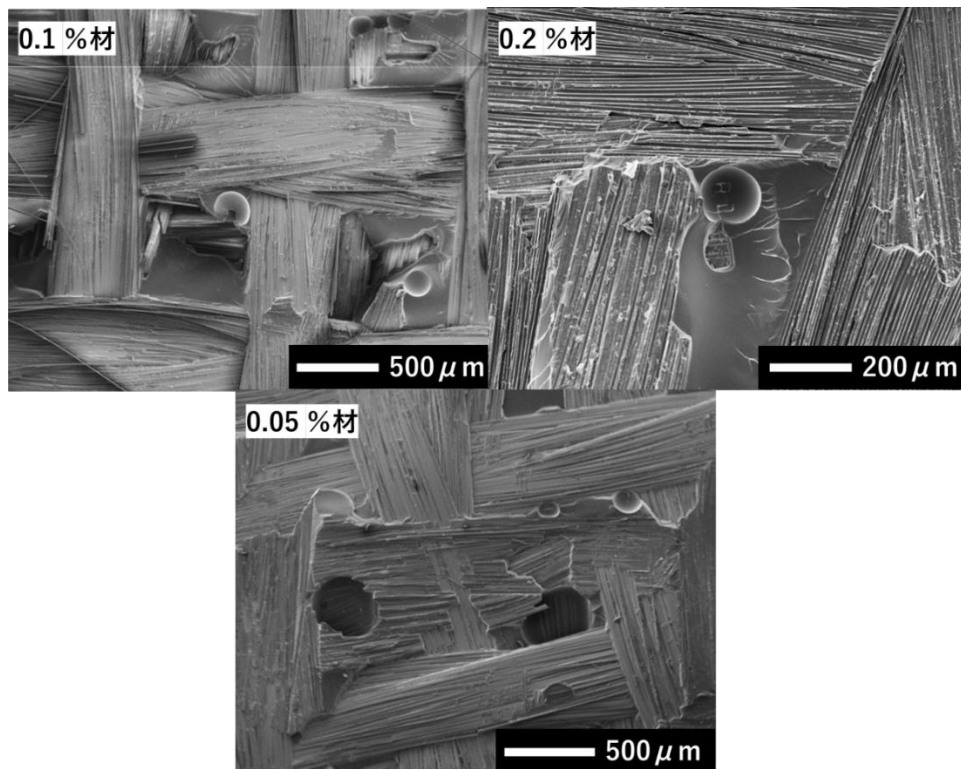
また、図 5.8(e)に示すように、0 %材および 0.1 %材では樹脂の破面がのこぎり刃状であるのに対し、0.05 %材および 0.2 %材では比較的なめらかであった。特に、疲労き裂伝ば抵抗が最も低い 0.05 %材では、最もなめらかな樹脂破面が観察された。一方、最もき裂伝ば抵抗が高かった 0 %材では、最も鋭利な樹脂破面が確認された。



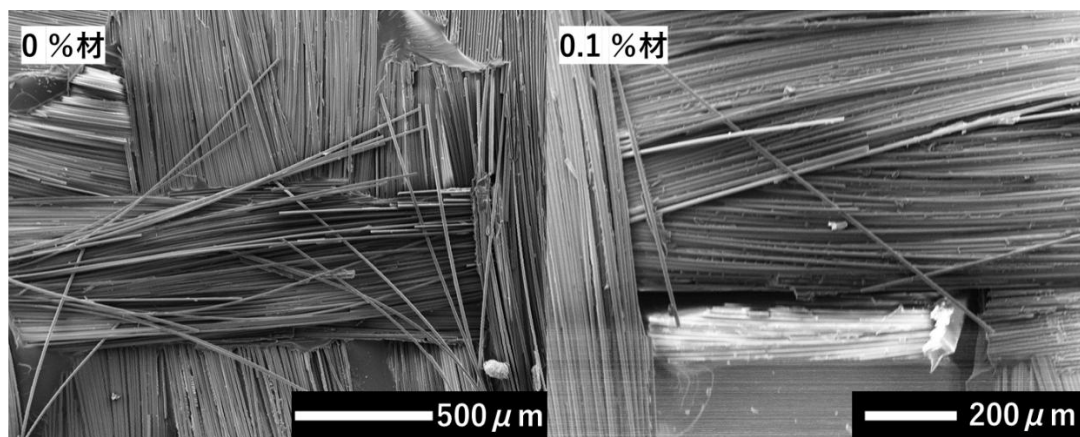
(a) 樹脂上 CNF



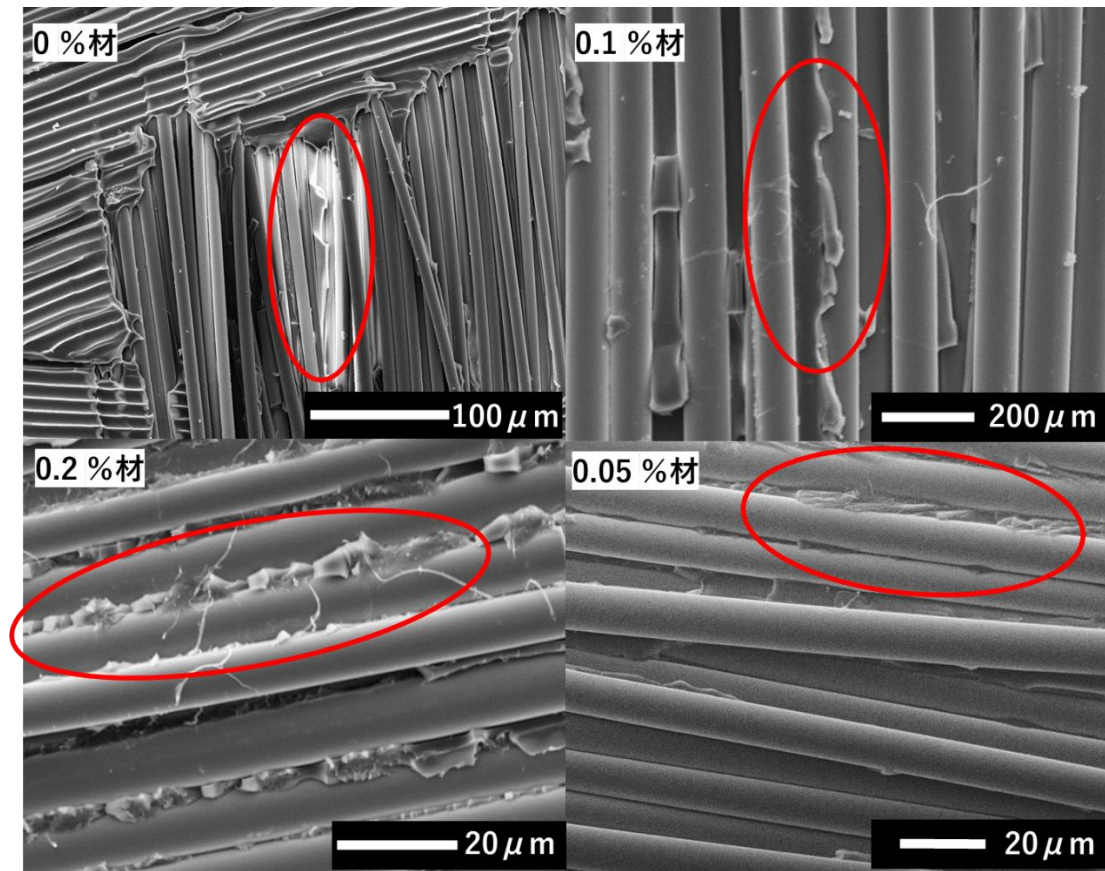
(b) 繊維上 CNF



(c) 気泡



(d) 繊維破断



(e) 樹脂破面の違い

図 5.8 破面観察

6 章 結言

ガラス繊維に 2 種類の方法で CNF を付着させた GFRP 積層板のモード I 疲労き裂伝ば試験について調査した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 作製したすべての試験片において da/dN - ΔG_I 関係にかなりのばらつきがあり、一つに式でパリス則に当てはめることが困難であった。
- (2) き裂伝ば速度 $2 \times 10^{-7} \text{ m/cycle}$ に対応するエネルギー解放率範囲で比較を行うと、CNF を添加することでばらつきは大きくなりき裂伝ば抵抗は小さくなることが分かった。
- (3) 手法 A に比べ手法 B の GFRP 積層板はき裂伝ば抵抗が著しく低下し、0.1%材に比べて 0.2%材はばらつきがさらに大きくなりき裂伝ば抵抗は低下した。
- (4) SEM での破面観察結果より、CNF 付着材では樹脂とガラス繊維の界面でのき裂進展が確認された。0.2 %材_A では CNF の解繊が十分でないものが見られた。また、0.05 %材_A では気泡が多く見られた。以上のことで両材料ではき裂進展抵抗が低下したと考えられる。一方、0 %材と 0.1 %材_A では繊維破断が見られ、繊維ブリッジングによりき裂伝ば抵抗が向上した可能性がある。

引用文献

- [1] 未益博志, 入門複合材料の力学, 培風館, 2009, PP.1, 67-68.
- [2] Kaan Yildiz, Idris Gürkan, Fırat Turgut, Fevzi Ç. Cebeci, Hülya Cebeci, “Fracture toughness enhancement of fuzzy CNT-glass fiber reinforced composites with a combined reinforcing strategy,” *Composites Communications*, 21(2020)100423.
- [3] 環境省, “セルロースナノファイバー活用ガイドライン,” 2021.
- [4] Taufik Azhary, Kusmono, Muhammad Waziz Widan, Herianto, “Mechanical, morphological, and thermal characteristics of epoxy/glass,” *Polymer Testing*, 110(2022)107560.
- [5] 井上光, “CNF を添加した FRP 積層板の曲げ機械特性,” 高知工科大学 大学院 工学研究科基盤工学専攻 知能機械工学コース, 2021.
- [6] Mouhamadou Moustapha Sarr, Hikaru Inoue, Tatsuro Kosaka, ““Study on the improvement of interfacial strength between glass fiber and matrix resin by grafting cellulose nanofibers”” .
- [7] 野地俊成, 楠川量啓, 高坂達郎, ““CNF により繊維-樹脂界面強度を向上させた GFRP の疲労特性,”” 日本機械学会 2023 年次大会, 講演論文集, J133p-05.
- [8] 成田文生, 大宮正毅, 荒木稚子, “楽しく学ぶ破壊力学,” 朝倉書店, 2020, PP.32-38.
- [9] 影山和郎, “『複合材料の破壊力学(I)』,” 日本複合材料学会誌, 1992, PP.83-89.
- [10] 高久明, 多田尚, “複合材料をつくる,” 共立出版, 1995, PP.4-5.
- [11] 鞠谷雄士, 竹村憲二, “プラスチック成形材料,” 森北出版株式会社, 2013, PP.206.
- [12] 萩原芳彦, 鈴木秀人, “よくわかる破壊力学,” 株式会社オーム社, 2000, PP.58-59.
- [13] Liaojun Yao, Yi Sun, Meiyang Zhao, R.C. Alderliesten, R. Benedictus, “Stress ratio dependence of fibre bridging significance in mode I fatigue,” *Composites: Part A*, 95(2017)65-74.
- [14] 國尾武, 中沢一, 林郁彦, 岡村弘之, “破壊力学実験法,” 朝倉書店, 1993, PP.164-165.
- [15] Liaojun Yao, René Alderliesten, Meiyang Zhao, Rinze Benedictus, “Bridging effect on mode I fatigue delamination behavior in composite,” *Composites: Part A*, 63(2014)103-109.
- [16] C. Blondeau, G.A. Pappas, J. Botsis, “Crack propagation in CFRP laminates under mode I monotonic and fatigue loads: A methodological study,” *Composite Structures*, 256(2021)113002.

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた担当指導教員の楠川量啓教授に深く感謝致します。また、日頃の議論を通して多くの知識や示唆を頂いた材料強度学研究室の皆様にも感謝致します。