

2024（令和6）年度 修士学位論文

アルミニウム合金/CFRP 重ね合わせ接着継手の
破壊挙動に及ぼす被着体剛性および接着条件の影響

Effects of adherend stiffness and overlapping geometry
on fracture characteristics of aluminum alloy/CFRP adhesive joints

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

1275019 竹又 裕也

指導教員 楠川 量啓

目次

1. 緒 言	1
2. 材料および実験方法	2
2・1 材料および試験片	2
2・2 アルミニウム合金（A5052）	2
2・3 CFRP	6
2・4 接着剤（Araldite2011）	10
2・5 単純重ね合わせ接着継手（SLJ）	11
2・6 実験方法	14
3. 有限要素解析	14
3・1 応力解析	14
3・2 結合力モデル	16
4. 結 果	17
4・1 引張りせん断強度	17
4・2 破断部の巨視的様相	18
5. 考 察	19
5・1 破壊強度に及ぼす接着条件の影響	19
5・2 被着体ひずみ変化と破壊開始	21
5・3 CFRP 層間剥離シミュレーション	21
6. 結 言	22
文 献	22

1. 結 言

世界的な CO₂ 排出量規制の影響を受け、自動車や航空機等の分野では、ますます輸送機器の軽量化に対するニーズが高まっている。軽量化を実現するために鉄鋼材料からアルミニウムやマグネシウムなどの軽金属、そして炭素繊維強化プラスチック (CFRP) などの複合材料への材料置換も進められている (廣瀬, 2021)。特に軽量かつ高強度という特徴を持つ CFRP は、すでに航空機やスポーツ用品に広く使用されており、今後さらに自動車等の他の輸送機器や産業機器等への使用が予想される。一方、CFRP の普及を妨げる要因の一つに材料および加工のコストが高いことが挙げられる。鋼やアルミニウムなどの金属材料に対し、CFRP がコスト面で優位になることは現時点で難しい (中田, 2020)。そこで、適材適所で複数の材料を組み合わせるマルチマテリアル技術への期待が高まっている。一方、そこでの課題の一つとして接合方法が挙げられる。異種材料を接合するにあたり、金属材料同士の接合に用いられる溶接やボルト、リベットを用いた冶金的、機械的接合方法の使用は困難である。また、穴などにおける応力集中による強度低下も懸念される。これらの課題を回避する接合方法として接着接合がある。接着接合は、面接合であるため、応力集中の低減、部品数の削減という利点を有することに加え異種材料接合に有利であることから、多くの分野で使用されつつある。一方、接着接合では、継手の強度が接着剤の特性、接着面の処理方法などに依存しやすく、接合部形状の設計や施行手順の確立など多くの課題も残されている。また、被着体の機械的特性や幾何学的条件なども強度に影響を及ぼすと考えられ、信頼性を確保するためにはこれらの影響を十分把握しておく必要がある (佐藤, 2020)。

接着継手の強度特性を実験的に明らかにする場合、単純重ね合わせ接着継手 (SLJ) が広く用いられている。接着による SLJ のせん断強さに及ぼす接着剤、接着部の幾何学的条件、被着体表面処理およびエッジングの影響などを広範囲にわたって da Silva らが系統的に調査を行っている (Silva et al., 2020)。Min Park らは、CFRP を被着体とする SLJ の表面処理方法を検討し、SLJ の静的強度と疲労強度の調査を行った (Min Park et al., 2020)。Reis らは CFRP およびアルミニウム合金などの異種材料を用いた SLJ の引張りせん断強度について調査を行った。そして異なる材料を被着体とする接合では、剛性の低い方の被着体が接合部の強度を決定すると結論づけた (Reis et al., 2011)。Anyfantis らは、CFRP を用いた異種材料 SLJ について調査を行い、被着体の厚さ、接着長さ、接着厚さが、接合部の強度に及ぼす影響について報告している (Anyfantis and Tsouvalis, 2012)。Bamberg らは、エポキシ樹脂接着剤で接合された異種材料 SLJ の機械的挙動を調査し、接着長さ、接着厚さ、被着体の降伏強さが破壊荷重に及ぼす影響について報告した。接着長さを増やすことが破壊荷重の増加に最も効果があったが、その効果は長さの増加とともに減少することを明らかにしている (Bamberg et al., 2018)。Ozel らは積層構成の異なる CFRP と AA2024 アルミニウム合金を被着体として、その組み合わせを種々変更した SLJ について、引張り試験と有限要素解析の両面から強度特性を調査している (Ozel et al., 2014)。Nuhoglu らは損傷進行および破壊荷重を正確に予測するために、接着接合された CFRP のマルチスケール有限要素解析 (FEA) を行った。SLJ の数値解析により、隣接する界面間の結合力モデル (CZM) を用いて、CFRP の接着挙動をシミュレートした (Nuhoglu et al., 2024)。Wang らは単一モードおよび混合モード荷重下における CFRP - 鋼材接合界面の剥離破壊を FEA により検討した。FEA から得られた荷重 - 変位関係、せん断応力分布、ひずみ分布は、文献に見られる実験結果と概ね良い一致を示し、延性接着剤を用いた CFRP と鋼材の接合界面の進行性破壊損傷を解析するのに CZM が有効であることを明らかにしている (Wang and Xian, 2022)。以上のように CFRP を被着体とする接着継手の強度特性に着目した研究は数多く、接着接合部のき裂進展や強度特性の把握には、CZM が有効である。

CFRP は炭素繊維に樹脂を含浸させたプリプレグによる成形が主流であり、積層構成によって成形材料の剛性が大きく異なる。CFRP 被着体の剛性の違いが接着継手の強度に及ぼす影響について調査した研究は多くない。著者の一人は最近、A2017 - CFRP の SLJ 接着継手の引張りせん断強度に及ぼす CFRP の剛性の影響を明らかにした。そこでは接着条件により CFRP に層間剥離が生じることを指摘した。CFRP の代表的な破壊形態である層間剥離は継手の強度に影響を及ぼすことが予想される。このため CFRP を用いた異種材料継手では、CFRP 積層板に生じる層間剥離による破壊を考慮することが信頼性の高い接合構造の

設計につながる。Liu らは、平織り CFRP の層間剥離挙動について調査を行った。CZM を含む有限要素モデルを構築し、モードIおよびモードIIの破壊試験における剥離挙動をシミュレートすることができた (Liu et al.,2019)。

本研究では、積層構成により剛性を変化させた3種類のCFRPと、アルミニウム合金 A5052 を被着体とした単純重ね合わせ異材接着継手 (SLJ) の静的引張試験を行い、継手の破壊特性に及ぼす被着体剛性ならびに接着長さ、接着厚さの影響について調査した。また、エネルギー解放率を基準とした CZM を利用することで、CFRP の層間剥離破壊が起きる条件についても検討を行った。

2. 材料および実験方法

2・1 材料および試験片

本研究ではアルミニウム合金 A5052 と CFRP 直交積層板を被着体として接着接合した単純重ね合わせ継手 (SLJ) を試験片とした。前者は板厚 1.5 mm の圧延板から 100 (106.25) × 25 mm に機械加工した。被着体の長さは接着長さを変えた SLJ を作製するため、2 種類準備した。接着剤には、二液エポキシ系接着剤 (Araldite2011) を用いた。

2・2 アルミニウム合金 (A5052)

2.2.1 A5052 単純引張試験

A5052 のヤング率、ポアソン比、0.2%耐力を得るために試験片を作製した。

- ① A5052 板 (400×300×1.5 mm) 図 1 から帯鋸盤 (LE-300) 図 2 を用いて、100×20 mm の短冊形となるように、圧延方向とそれに直角な方向にそれぞれ切り出した。
- ② 卓上フライス盤 FK-800 (コスモキカイ) (図 3) を用いて 90×15 mm となるように切削加工を行った。その後、図 4 に示す形状となるように加工した。
- ③ 試験片の中央部をエメリー紙 #500 で研磨を行い、アセトンを用いて研磨部の脱脂を行った。
- ④ 瞬間接着剤 (東亜合成) を用いてゲージ長さ 2 mm のひずみゲージ (共和電業) (図 5) を図 4 のように試験片片面の中心位置に貼付した。

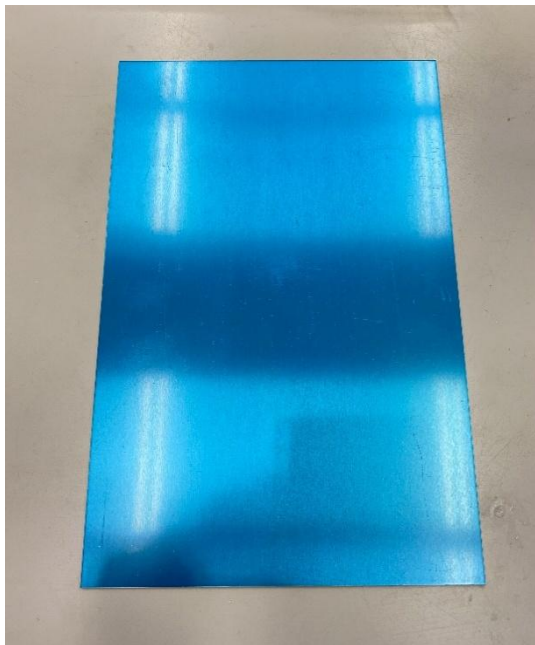


Fig. 1 Aluminum alloy (A5052)



Fig. 2 Band sawing machine (LE-300)



Fig. 3 Desktop milling machine FK-800

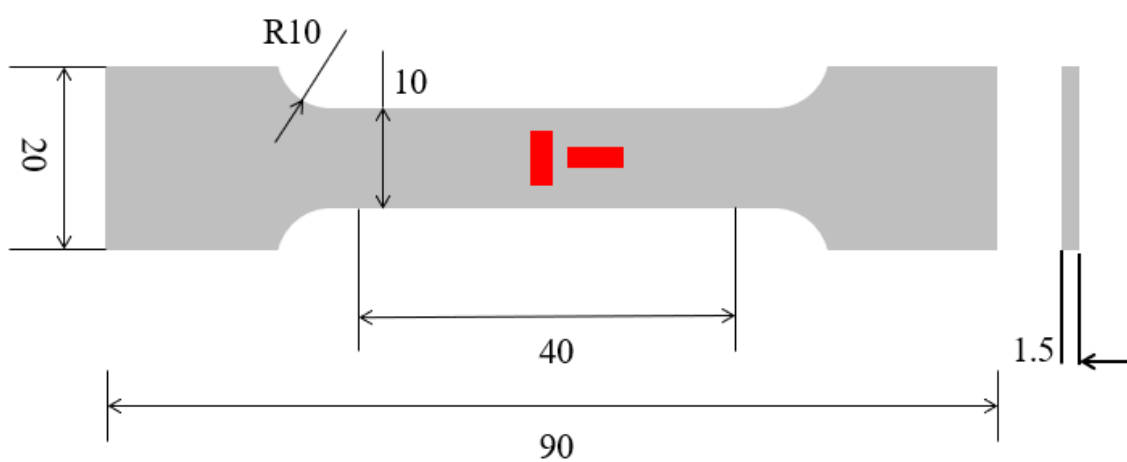


Fig. 4 test piece (A5052)

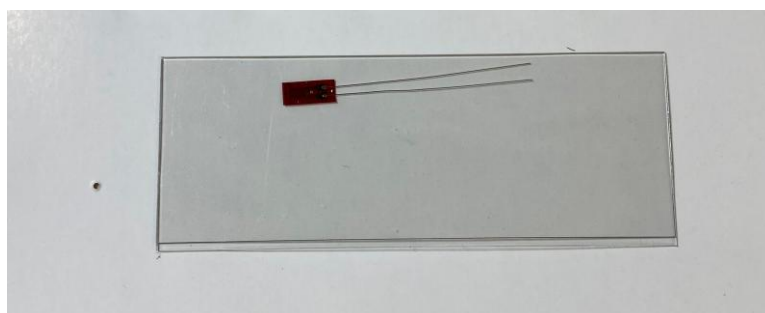


Fig. 5 Strain gage (gage length: 2 mm)

図 4 を，精密万能試験機 AG100kNG (島津製作所) (図 6) を用いて引張試験を行った．クロスヘッド変位速度を 0.3 mm/min，環境温度は室温とし，材料が塑性変形を起こさない弾性領域内で試験片軸方向に引張負荷を与え，除荷を何度か繰り返し，荷重とクロスヘッド変位，および被着材に貼付したひずみゲージから得られるひずみを記録し，応力とひずみの関係，縦ひずみと横ひずみからポアソン比を算出した．

次に同じ試験片をクロスヘッド変位速度 0.5 mm/min で試験片が破断するまで軸方向に引張負荷を与え，破断まで荷重とクロスヘッド変位，および被着材に貼付したひずみゲージから得られるひずみを記録し，応力とひずみの関係から 0.2 %耐力を算出した．



Fig. 6 Precision Universal Testing Machine AG100kNG

A5052 静的引張試験より得られた 0.2% 耐力を得ることができた．その時の応力ひずみ線図を図 7 に示す．実験結果から圧延方向とそれに直角方向の 0.2% 耐力平均はそれぞれ 179 [MPa]，169 [MPa]となり，両者には若干強度差があることがわかった．この結果より，SLJ 製作には圧延方向を荷重軸にとることに決めた．

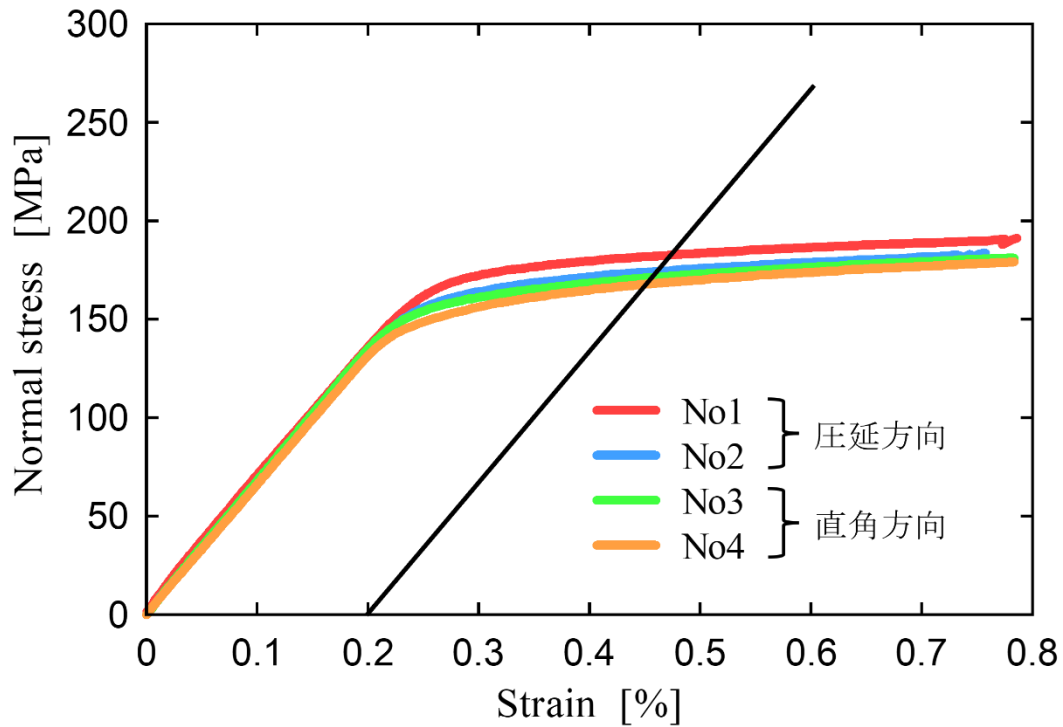


Fig. 7 Stress strain diagram (A5052)

2.2.2 A5052 曲げ剛性

A5052 の曲げ剛性を得るために試験片を作製した。2.2.1 節と同様の方法で A5052 板から、115×26 mm の短冊形となるように帯鋸盤を用いて切り出した。次に、卓上フライス盤 FK-800 を用いて 110×25 mm となるように切削加工を行った。図 8 に作製した A5052 の曲げ試験片を示す。

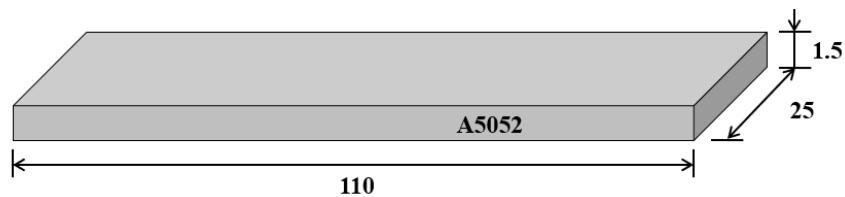


Fig. 8 A5052 test piece

作製した曲げ試験片を微小材料試験機(島津製作所)(図 9)に設置し三点曲げ試験を行った。材料が塑性変形を起こさない弾性領域内で、各荷重における変位を繰り返し計測した。

材料の中央に集中荷重を付加した場合、変位 δ は支点間距離 l (100 mm)、負荷荷重 P 、曲げ剛性 EI を用いて式(1)のように表す。

$$\delta = \frac{Pl^3}{48EI} \quad (1)$$

式(1)において、 $l^3/48EI = c$ として置き換えると、

$$\delta = Pc \quad (2)$$

となる。式(2)を用いて、計測した変位と負荷荷重より、 c を算出し曲げ剛性 EI を算出した。

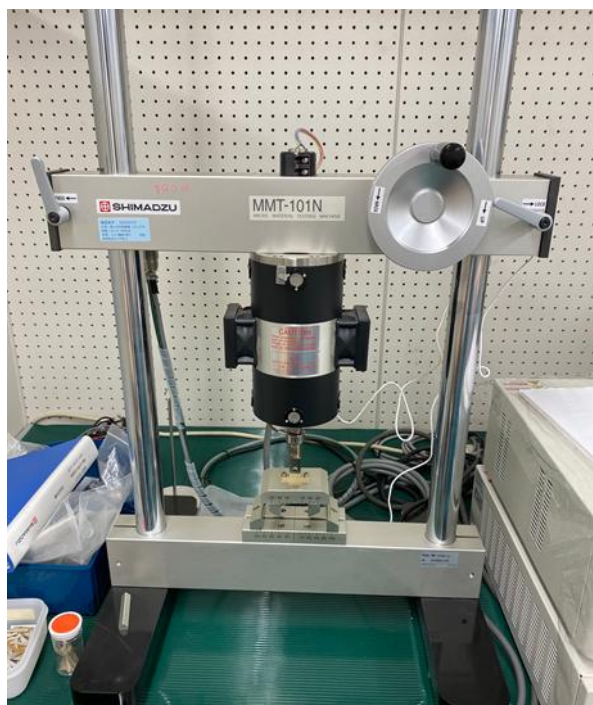


Fig. 9 Servo testing machine (SHIMADZU, MMT-101N)

曲げ試験を行った際の、荷重と変位の関係を図 10 に示す。この結果から式 (2) を用いて傾き c を代入することで曲げ剛性を得た。

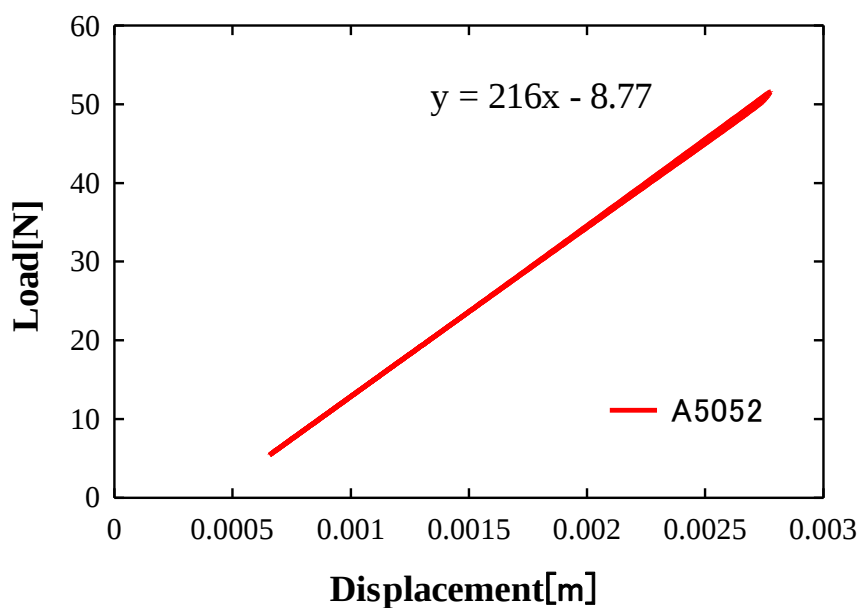


Fig. 10 Load and displacement diagram (A5052)

2・3 CFRP

本研究では、炭素繊維にマトリクス樹脂を含浸させた熱硬化性炭素繊維プリプレグ TR350C100S（三菱ケミカル）（図 11）を使用し、 $150 \times 150 \times 0.08$ mm に加工したプリプレグシートを 20 枚積層し、油圧プレスを用いて CFRP を加圧成形した。積層を行う際に、CFRP は空隙の存在により強度低下が生じるため、プリプ

レグ間に空気が混入しないようにヘラで空気を除去しながら積層を行った。CFRP の剛性を変化させるために積層方法を変化させる必要がある。積層方法には、図 12 のように繊維の向きを一方向にして積層する一方向積層と炭素繊維プリプレグの繊維の向きが直交するように積層する直交積層の二種類がある。本研究では繊維の方向 0° とし、計 20 枚一方向積層したもの、 0° を 4 枚、 90° を 12 枚、 0° を 4 枚の計 20 枚直交積層したもの、 0° を 2 枚、 90° を 16 枚、 0° を 2 枚の計 20 枚直交積層したもの、の 3 種類を作製した。積層構成は、一方向積層板で $[0_{20}]$ 、直交積層板で $[0_4/90_{12}/0_4]$ および $[0_2/90_{16}/0_2]$ のように表す。積層構成は中心から対称になっているとして以後、 $[0_{20}]$:UD, $[0_4/90_6]_s$:CF4/6, $[0_2/90_8]_s$:CF2/8 とする。



Fig. 11 Carbon Fiber Prepreg TR350C100S

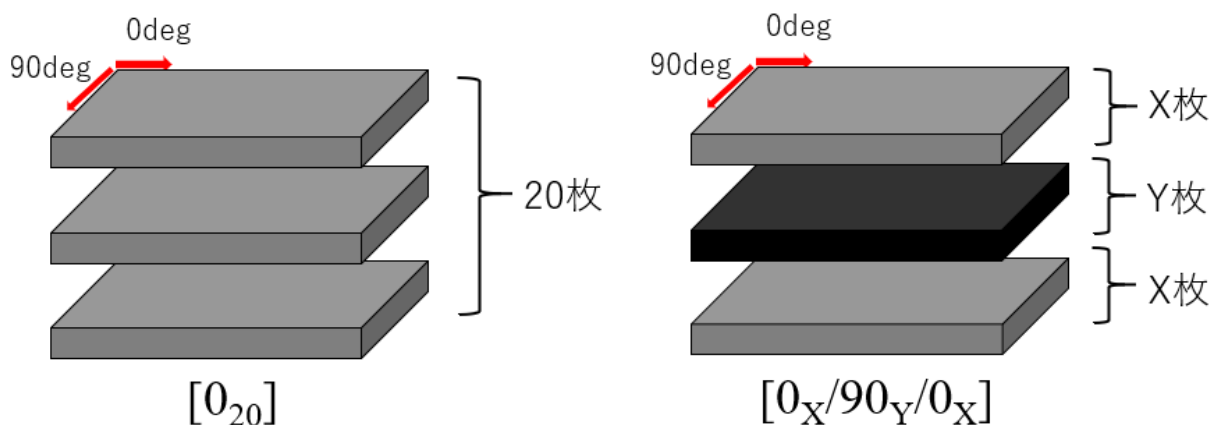


Fig. 12 Carbon Fiber Prepreg Lamination Method

以下に CFRP の加圧成形手順 (図 13) を示す。

- ① 高温ペーストワックス (TR industries) (図 15) を天板(上) (160×160×2 mm) と天板(下) に塗布した。
- ② 天板(下) にスペーサー (75×20×1.5 mm) をピンで固定することで、CFRP の厚みを 1.5 mm になるように制御した。

- ③ 厚さ 0.02 mm のテフロンシートをスペーサーで囲まれた領域内に敷き、その上に CFRP を配置した.
- ④ 成形を行う際に、CFRP が動かないように、CFRP とスペーサーの間をシーリングテープで埋めた.
- ⑤ 加圧成形時に CFRP から排出される樹脂を吸収するためにスペーサーの隙間にブリーザーを配置し、空気の通り道を確保するために、スペーサーの中央に紙を置いた.
- ⑥ CFRP の上にテフロンシートを敷き、その上に天板(上)を配置した.
- ⑦ 天板(上)を覆うようにブリーザーを配置した.
- ⑧ 天板(下) (320×250×5 mm) の上部にあるくぼみの右側に吸引口を合わせ瞬間接着剤で固定した.
- ⑨ 天板(下)の周囲にシーリングテープを貼り、真空フィルムを取り付けた.
- ⑩ 卓上型テストプレス(テスター産業)(図 14)の下部加圧盤に吸引口と吸引ホースを接続し真空状態を維持した.
- ⑪ 油圧ジャッキで圧力計の 10 MPa の目盛りまで下部加圧盤を持ち上げ、上下加圧盤で天板を挟みこんだ状態で、加圧盤を 1 時間かけて 130°C まで上昇させ、130°C で 2 時間加熱した. 温度が 90°C になった時に、油圧ジャッキで 40 MPa まで下部加圧盤を持ち上げ、加圧しながら CFRP の成形を行った.

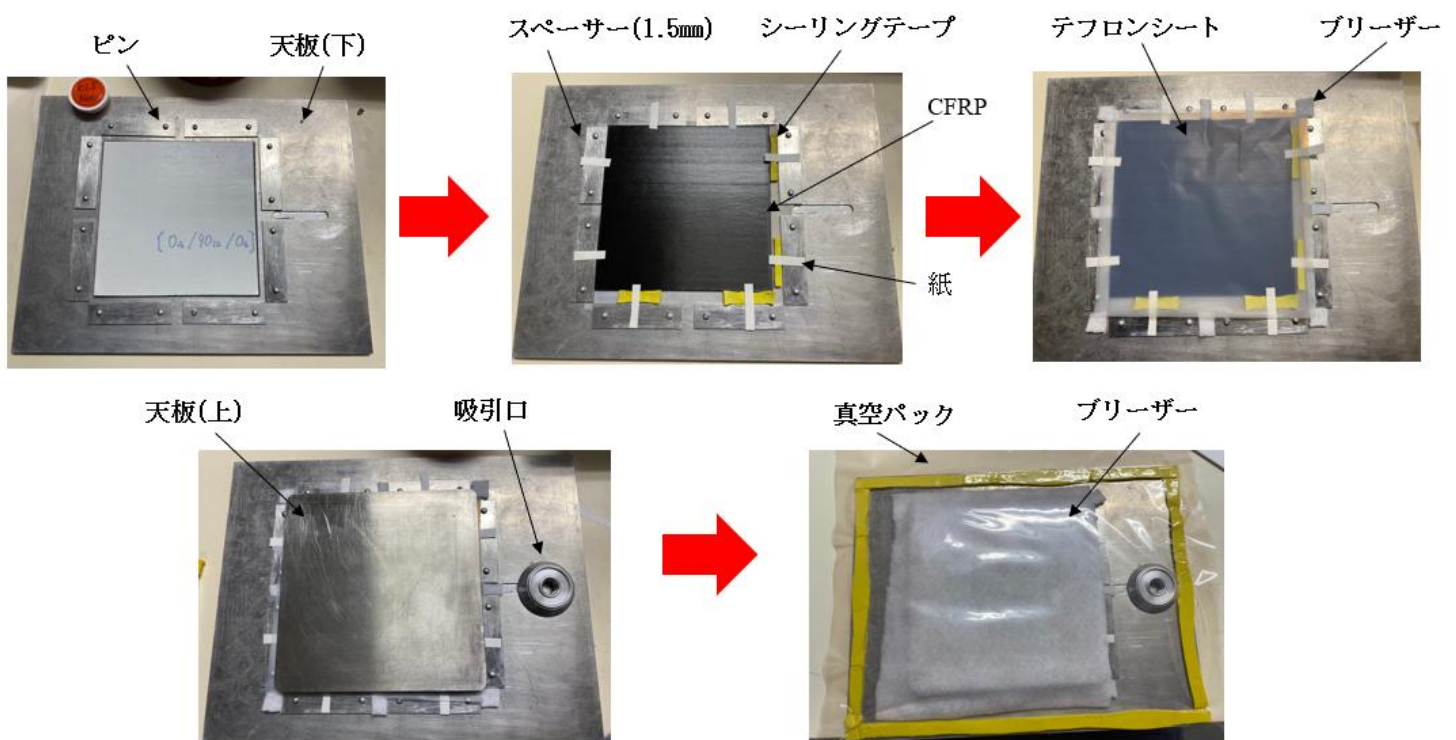


Fig. 13 CFRP Molding Procedure



Fig. 14 Tabletop test press



Fig. 15 High temperature paste wax

加圧成形を行った後、CFRP 積層板からダイヤモンドカッター (MARUTO) (図 16) を用いて繊維の 0° 方向が長辺となるように $10 \times 6 \text{ mm}$ ($108 \times 26 \text{ mm}$) の短冊形に加工した。加工後、エメリー紙 #150 と #500 を用いて研磨を行い、 $100 \times 25 \text{ mm}$ ($106.25 \times 25 \text{ mm}$) 図 17 となるように試験片形状を整えた。研磨をする際には、試験片の角が丸みを帯びないように注意した。本研究ではそれぞれの CFRP 積層板ヤング率、曲げ剛性の値を先行研究より採用した (Yokoyama, 2021)。各被着体の軸方向ヤング率および曲げ剛性を表 1 に示す。



Fig. 16 Diamond Cutter (MARUTO)

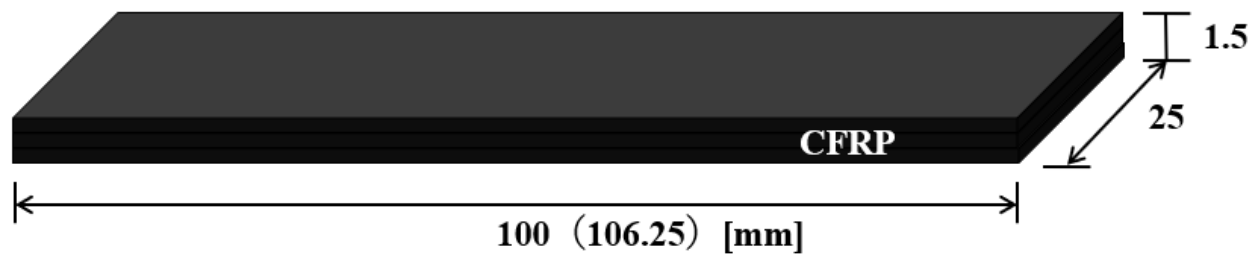


Fig. 17 CFRP Specimen Shape

Table 1 Elastic properties of adherends

	Young's modulus in axial direction (GPa)	Flexural rigidity (N·m ²)
[UD]	153	1.30
[CF4/6]	62.1	0.919
[CF2/8]	38.7	0.599
A5052	69.7	0.45

2・4 接着剤 (Araldite2011)

強度と耐久性が必要な箇所に用いられる接着剤のことを、構造用接着剤という。代表的な構造用接着剤には、脆性接着剤である、エポキシ系接着剤、アクリル系接着剤、延性接着剤であるウレタン系接着剤などがある。本研究で用いた接着剤 Araldite2011 はエポキシ系の熱硬化性接着剤である。継手強度を調べるうえで、接着剤の機械的特性は重要であり、先行研究によるヤング率を採用した。接着剤 Araldite2011 のヤング率は 1.36 [GPa]となった (Sunada, 2020)。



Fig. 18 Epoxy adhesives



Fig. 19 agitator

実験に用いる際には、エポキシ系接着剤(HUNTSMAN) (図 18)の主剤と硬化剤を 1:0.8 の質量割合で混合した後、攪拌機 (TORNADO SM-103 AS ONE CORPORATION) (図 19)を使い回転数 350 rpm で 5 分間攪拌

させ、真空器(図 20)を用いて 40 分間脱泡したものを使用した。



Fig. 20 vacuum equipment

2・5 単純重ね合わせ接着継手 (SLJ)

接着継手の強度は、使用する材料の組み合わせや、表面性状、接着部の厚み、負荷速度により大きく変化する。そのため実験によって強度を測るためには、時間や費用をなるべく抑える取り組みが必要である。本研究では静的引張試験に最も単純な継手様式である SLJ 試験片を用いた。SLJ の形状は接着部において、引張によるせん断応力や、曲げによる剥離応力が生じるなど、応力分布は複雑なものになる。さらに被着体の変形が大きく、被着体での破断も生じる。このことから被着体の機械的特性の違いによって SLJ 試験片の強度評価をする必要がある。

被着体は、2.2 項の手順で A5052 板から帯鋸盤と卓上フライス盤により 100×25 mm (106.25×25 mm) に加工した試験片と、3 種類の積層構成で炭素繊維プリプレグを加圧成形し 100×25 mm (106.25×25 mm) に加工した A 材、B 材、C 材を使用した。被着体同士を接着する際、接着部の厚みは 0.2 mm、0.4 mm の 2 種類とし SLJ 試験片を作製した。以下に本研究で使用した SLJ 試験片の作製手順を示す。

- ① A5052, CFRP それぞれの接着面をエメリー紙#500 で研磨を行った。CFRP の繊維が逆立ち破壊形態に影響を及ぼさないように一方向に研磨を行った。
- ② アセトンを用いて、接着面を十分脱脂した。
- ③ 天板(下)と天板(上)の表面にシリコン系金型離型剤(図 21)を振りかけた。
- ④ 天板(下)のピンの間に接着厚さを確保するための厚み 0.2 mm のテフロンシートと、被着体の厚さを確保するためのスペーサー(A5052 厚さ 1.5 mm)を重ねて設置した。本研究では接着厚さを 0.2 mm とした SLJ 試験片と 0.4 mm とした SLJ 試験片を作製するため、0.2 mm の場合はテフロンシートを一枚、0.4 mm の場合はテフロンシートを二枚とすることで接着部の厚みを調整した。
- ⑤ 天板(下)のピンの間に被着材(A5052)の研磨した面を上にして設置した。被着材の端と天板(下)の淵を揃えることで、SLJ 試験片の全長(187.5 mm)となるように調整を行った。
- ⑥ Araldite2011 を、A5052 の研磨部に金属製のヘラを用いて塗布した。
- ⑦ ④と同様に被着体(CFRP)をピンの間に置いたスペーサーとテフロンシートの上に研磨した面を下にして置き、テフロンシートとスペーサーを被着体(A5052)に重ねて設置した。

- ⑧ 接着面を覆うように天板（上）を重ねて圧力をかけた。
- ⑨ すべての処理を行った後、熱風循環式低温乾燥炉そよかぜ（図 22）を用いて 70℃、1 時間の条件で熱硬化させた。
- 図 23 に SLJ 試験片の作製手順を示す。



Fig. 21 Silicone mold release agent



Fig. 22 Low temperature drying furnace

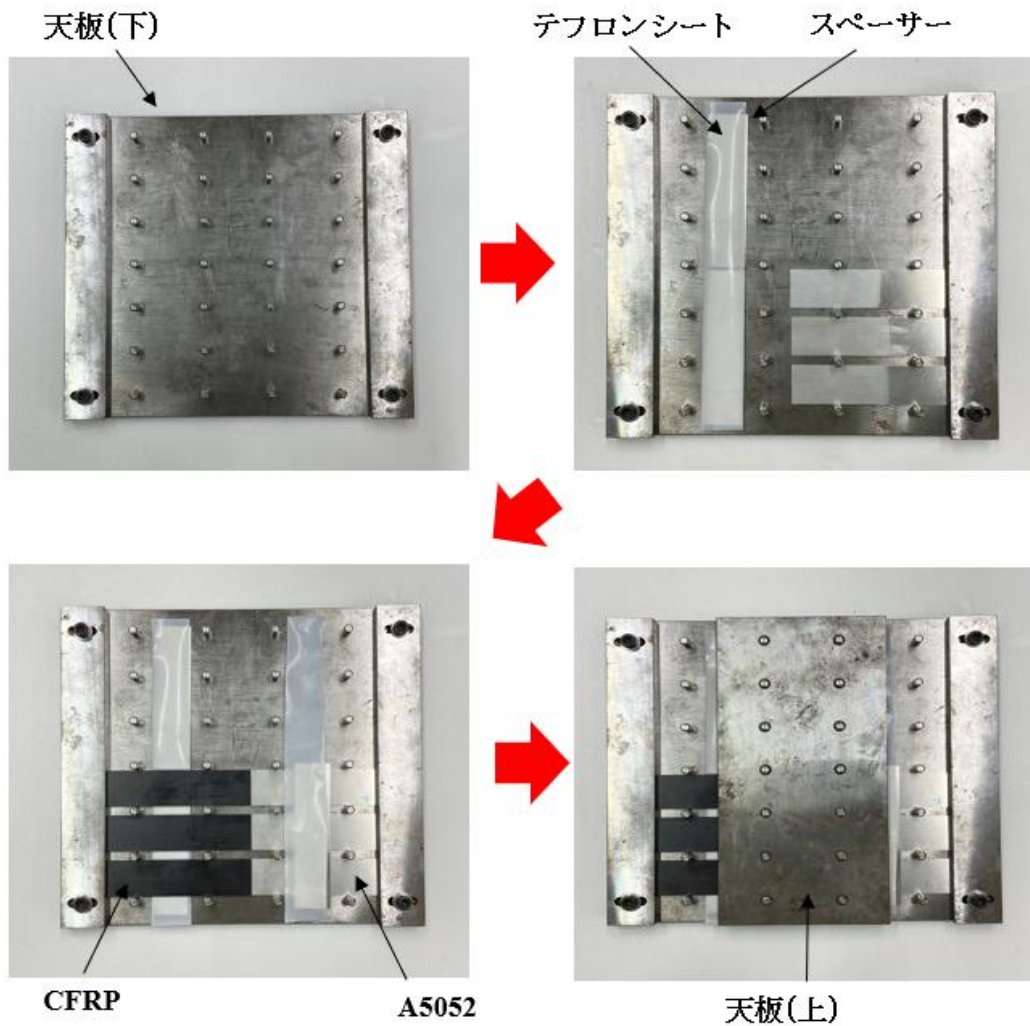


Fig. 23 SLJ specimen preparation procedure

硬化後、電動工具とスクレイパーを用いて余分な接着剤を取り除いた。その際に、正確な接着強度を計測するため、接着剤の取り残しや除去しすぎに注意した。研磨部に 2.2.1 節と同様のひずみゲージ（ゲージ長 2 mm）を貼付した。事前処理として、ひずみゲージ接着部をエメリー紙#500 で研磨した。ひずみゲージを貼付した位置は、SLJ 試験片が最も変形する部分と推測でき、強度特性の計測に最適だと考えた。また静的引張試験を行う際に、継手の両端部に A5052 製タブ(25×25×1.5 mm)と金属板(18×18×0.2 mm)を瞬間接着剤で貼付し、SLJ 試験片を作製した。これは SLJ 試験片に対して真っすぐに引張荷重を加えるためである。ただし、接着部の厚みが 0.4 mm の場合は金属板を二枚用いた。図 24 に作製した SLJ 試験片を示す。

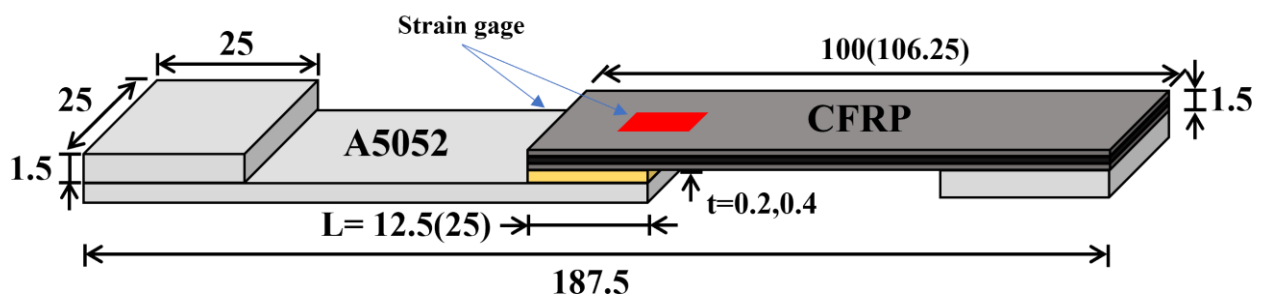


Fig. 24 Configurations of the SLJ test specimen (in mm)

2・6 実験方法

作製した SLJ 試験片を精密万能試験機（図 6）に設置し、静的引張試験を行った。試験片を設置するには、荷重方向と試験片が真つすぐになるように、スコヤを用いて調整を行なった。また試験中にすべりが起きないように、上下掴み部固定した。クロスヘッド変位の他に、SLJ 試験片の接着部の伸びを計測するために伸び計（図 25）を使用した。またその際の試験片設置例を（図 26）に示す。クロスヘッド変位スピードを 0.5 mm/min、環境温度は室温とし、引張荷重を加え、試験片が破断するまで計測を行った。その際に、荷重、クロスヘッド変位、伸び計変位、被着体に貼付した A5052 と CFRP それぞれのひずみゲージから得られるひずみの記録を行った。



Fig.25 clip cage

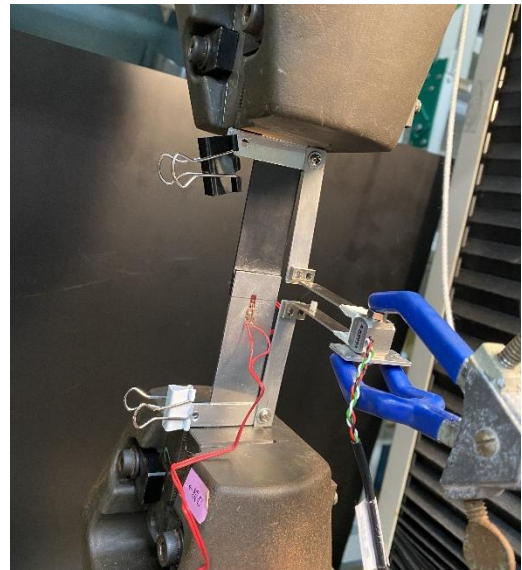


Fig.26 Clip gauge attached to test specimen

3. 有限要素解析

3・1 応力解析

SLJ の接着層における 2 次元応力分布を有限要素法（FEM）により解析した。解析に用いたのは汎用 FEM ソフトの ANSYS2021 R1 で、図 27 よるモデルを二次元 8 節点要素を用いて、材料特性および変形の非線形性も考慮した。メッシュ分割サイズは、接着層端部で応力集中が起きることを想定し、両端部に行くにしたがってメッシュが細分化されるように設定を行った。接着層のメッシュ分割図を図 28, 29 に示す。応力集中部における最小要素寸法を 0.01 mm とした。解析に用いた各材料の材料特性を表 2 に示す。



Fig. 27 Configurations of the SLJ test piece (mm)

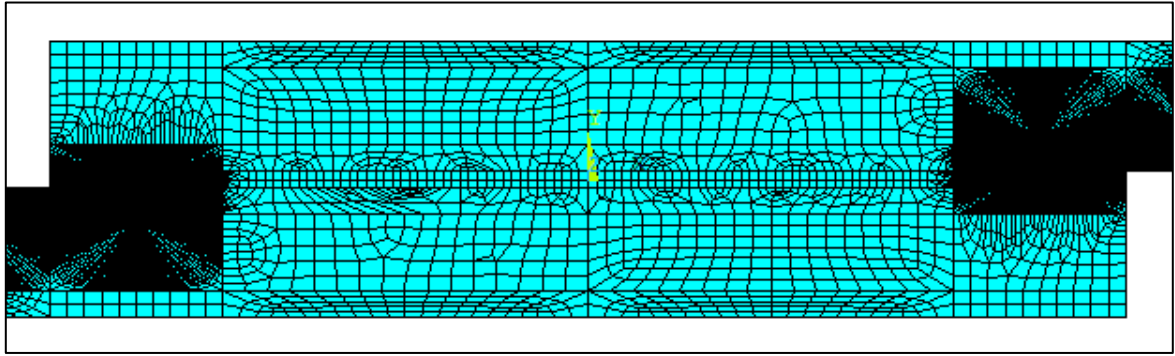


Fig. 28 Mesh division diagram (adhesive layer)

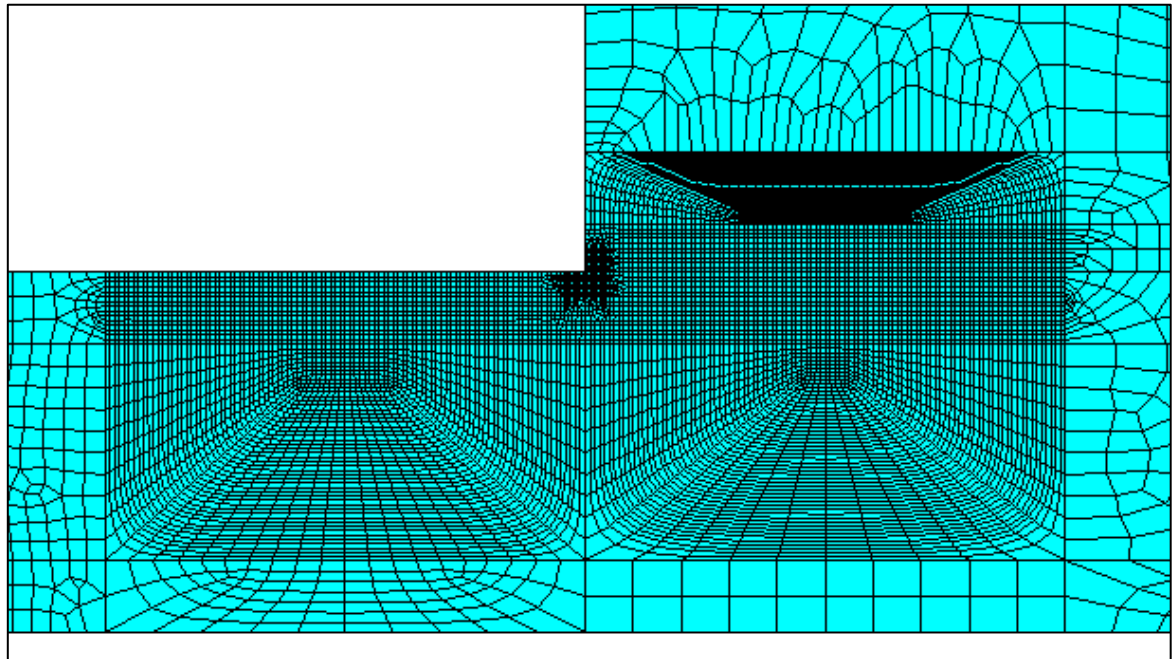


Fig. 29 Mesh division diagram (adhesive layer edge)

Table 2 Mechanical properties of adherend and adhesive used in the FEM

CFRP	Longitudinal Young's modulus (GPa)	153
	Transverse Young's modulus (GPa)	10.6
	Major Poisson's ratio	0.3
	Minor Poisson's ratio	0.06
A5052	Young's modulus (GPa)	68.7
	Poisson's ratio	0.33
	Yield stress(MPa)	175
Araldite2011	Young's modulus (GPa)	1.3
	Poisson's ratio	0.33
	Yield stress(MPa)	10

3・2 結合力モデル

SLJ の破壊に至る挙動および破壊強度をシミュレートするため、結合力モデル (CZM) による FEA を行った。CZM では結合力 - 相対変位則を用いてエネルギー基準に基づくき裂進展を表現できる。SLJ ではモードIおよびモードIIの混合モード下でき裂が進展するため、本研究では CZM 要素に対し各モードごとに図 30 に示す 2 直線型の結合力 - 相対変位則を適用した。 $T_{\max}$, $\delta_{\max}$ は最大結合力と完全に破断する相対変位であり、添え字 n,s はそれぞれ引張方向とせん断方向を表す。 G_C は破壊エネルギーを示し、 G_I , G_{II} はモードI, II成分である。混合モードでの破壊過程のエネルギー基準 (Sekiguchi, 2020) は式(3)を用いた。

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right) + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right) = 1 \quad (3)$$

厚さが 0 である CZM 要素を接着剤と被着体の界面破壊および CFRP 内での層間剥離破壊を検討する目的で図 31 に示すように界面部 2 か所、CFRP 内部 (0.039 mm) 1 か所に配置した。また、後者の CZM 要素の長さは接着層長さと同じとした。界面および層間に配置した CZM 要素のパラメータをそれぞれ表 3 に示す。界面破壊における特性値は別途実験により求めた実測値で、層間剥離における値は文献 (清水他, 1999) における値を用いた。

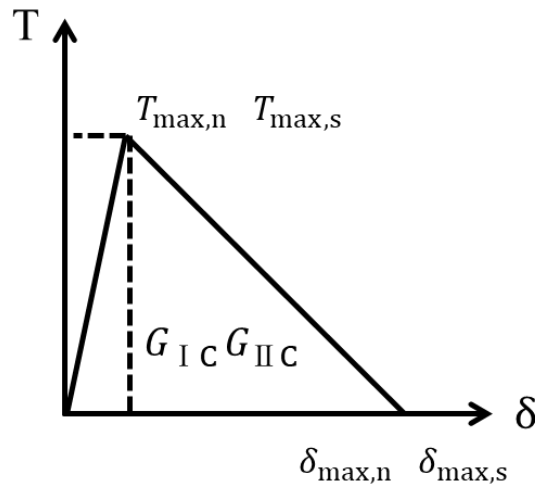


Fig. 30 Traction Separation law used in the CZM



Fig. 31 Cohesive element in the adhesive joint

Table 3 CZM parameters of interface and interlayer

Parameter	Interlayer(CFRP)	Interface
Maximum normal cohesive Traction (MPa), $T_{\max,n}$	38	19.1
Maximum tangential cohesive Traction (MPa), $T_{\max,s}$	52	28.8
Mode I critical strain energy release rate (J/m^2)	200	135
Mode II critical strain energy release rate (J/m^2)	650	800
Stiffness in Mode I (N/mm^3)	1.0×10^5	1.0×10^5
Stiffness in Mode II (N/mm^3)	1.0×10^5	1.0×10^5

4. 結 果

4・1 引張りせん断強度

引張り試験における負荷荷重を接着面積で除した応力を平均せん断応力 τ_{ave} と定義し、伸び δ との関係 を接着長さ L ごとに図 32 に示す。 $L = 12.5$ の場合、破壊に至るまで $\tau_{ave} - \delta$ 関係は直線的であったが、接着厚さ $t = 0.4$ では荷重が一度低下する挙動が現れた。これは後述するように接着厚さが厚い場合、A5052 と接着剤との界面で破壊が進行する途中に CFRP と接着剤の界面においてもき裂が発生したためである。 $\tau_{ave} - \delta$ 関係の傾きにおいて被着体剛性の影響が見られ、CFRP の剛性の小さい SLJ で傾きが小さくなった。一方、 $L = 25$ では、 $\tau_{ave} - \delta$ 関係が直線関係より逸脱し τ_{ave} の増加割合が低下する挙動が見られた。これは接着部長さが長いため、破壊に要する荷重が大きくなり A5052 および接着剤の塑性変形が著しくなり影響したものと考えられる。

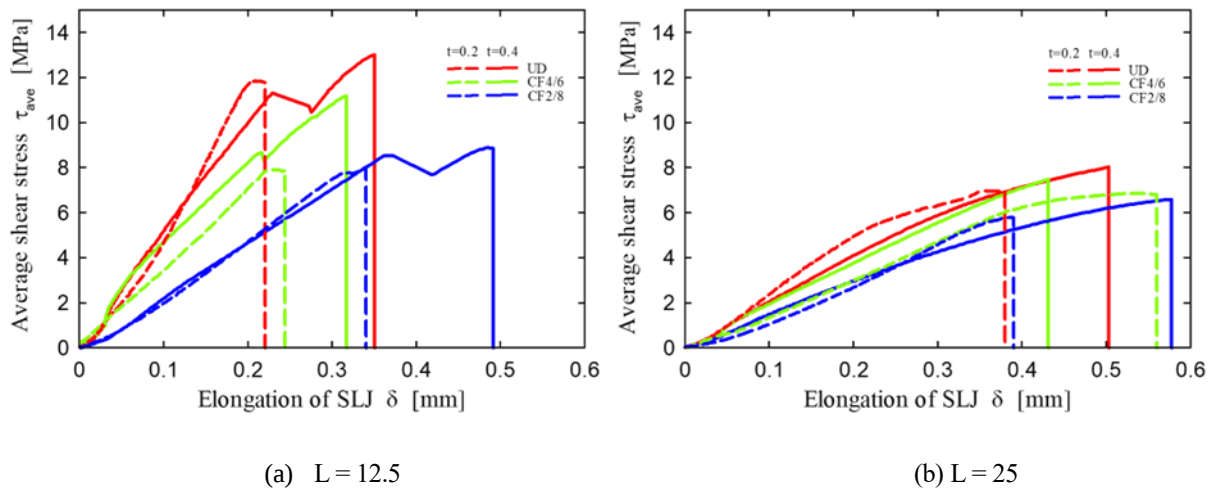
Fig. 32 Typical relationships between average shear stress τ_{ave} and elongation δ in the tensile tests

図 33 に、各条件 3 本ずつの試験片の最大の τ_{ave} を平均した値を引張りせん断強度 τ_f としてまとめて示した。 $L = 12.5$ の場合、 τ_f に及ぼす CFRP の積層構成の影響が顕著であることがわかる。すなわち UD, CF4/6, CF2/8 の順に τ_f が低下し、剛性が高い場合の強度が高い。この結果は金属被着体として A2017 を用いた報告 (Kusukawa, 2024) と一致している。 $t = 0.2$ では、CF2/8 は UD に比べて 29%, $t = 0.4$ では、27% 減少した。 $L = 25$ においてはこのような影響はあまり見られないことから、接着長さが長くなると、強度に及ぼす被着体の剛性の影響が小さくなることがわかった。CF2/8 の $L = 25$ においては、後に述べるように CFRP 内で層間剥離が生じ、その場合 τ_f が特に大きくなることがわかった。

一方、接着厚さの影響についてみると、いずれの条件でも、接着厚さが厚い場合の τ_f が大きくなった。接着長さの観点から比較すると、 $L = 25$ の τ_f は $L = 12.5$ に比べて低くなるが、これは接着面積が 2 倍となっているため破壊荷重は、いずれの条件でも $L = 25$ の場合が高い。

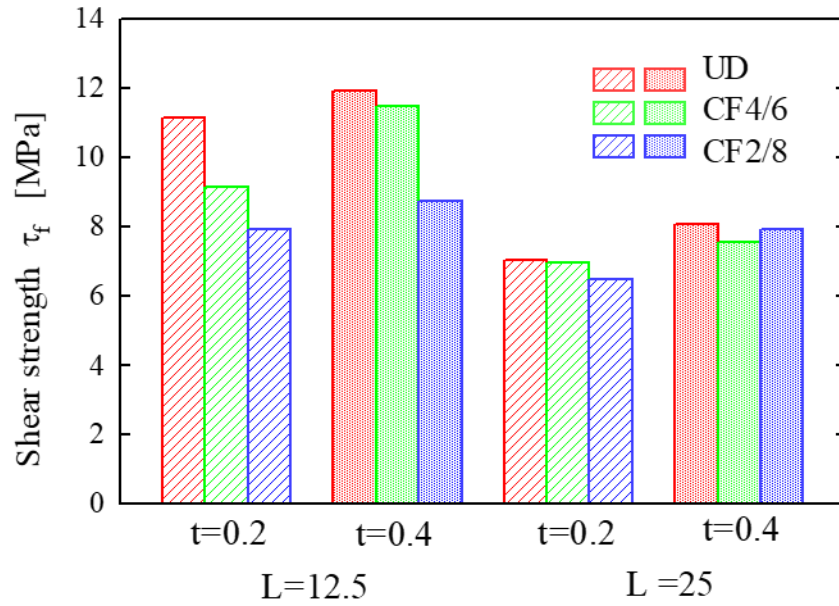


Fig. 33 Summary of tensile shear strength for SLJ with various conditions

4・2 破断部の巨視的様相

破面は基本的に A5052 と接着剤との界面であった。CF2/8 の破面の様相を例として、図 34 に示す。図 34 (a) および (b) は $L = 12.5$ でそれぞれ t が 0.2 および 0.4 での破面である。 $t = 0.4$ の場合、CFRP 側で一部の接着剤が剥離した領域が見られる。このタイプの剥離は CFRP 被着体の種類にかかわらず観察された。この剥離は図 32(b)に示した $\tau_{ave} - \delta$ 関係に現れた破断前に一度 τ_{ave} が低下する挙動に対応したものと思われる。

図 34 (c) および (d) は $L = 25$ のもので CF2/8 では t に関係なく、CFRP の層間剥離破壊が生じた跡、すなわち A5052 側に炭素繊維の付着が見られるものが 6 本中 2 本あった。このような CFRP の層間剥離が発生した破壊とそうでない場合の $\tau_{ave} - \delta$ 関係の比較を図 35 に示す。層間剥離が生じた場合、破壊までの伸びが著しく増加し、これに従い破壊荷重が高くなることがわかった。

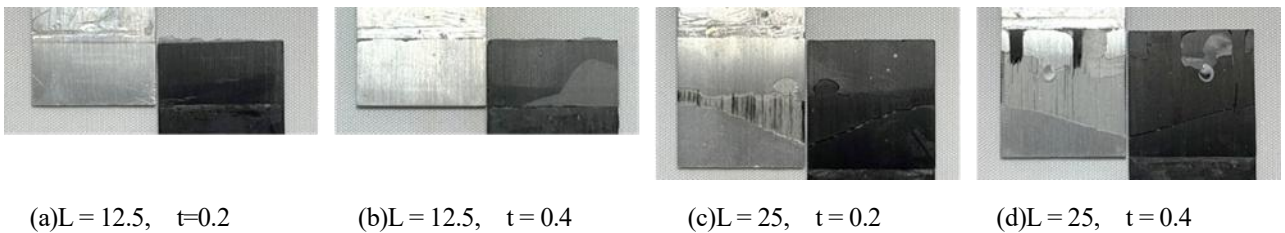


Fig. 34 Typical macroscopic fracture surface of CF2/8 type

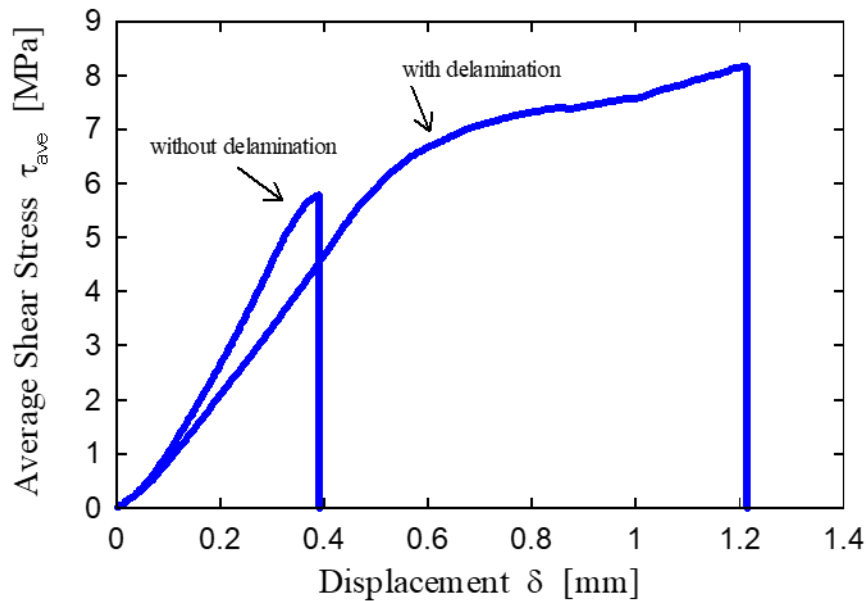


Fig. 35 Effect of different of fracture modes on the τ_{ave} - δ curves

5. 考 察

5・1 破壊強度に及ぼす接着条件の影響

1 kN の引張り荷重を SLJ に負荷した時の、接着層の厚み中心面上の垂直応力 σ_y について FEM 解析結果を、 $t=0.2$ の UD, CF2/8 について図 36 に示す。横軸は接着長さの 1/2 ($S=L/2$) で接着中心からの距離 x を正規化している。 $x/S = -1$ が CFRP の端部、 $x/S = 1$ が A5052 の端部に対応している。接着層での垂直応力は、接着端部において $L=12.5$ の場合が $L=25$ に比べて大きい。CFRP 端部側での最大値を比較すると $L=12.5$ では $L=25$ に比べ 15% 大きくなっている。図 33 に示した τ_f は、 $t=0.2$ の UD で比較すると $L=12.5$ よりも $L=25$ の方が低くなっているが破断荷重は、 $L=12.5$ で 3.6 kN であるのに対し $L=25$ で 4.4 kN と 1.2 倍ほど大きいため、実際破壊時の最大垂直応力は L の違いに依らず同等のレベルであったと考えられる。せん断応力についても FEM での解析では CFRP 端部での値は $L=12.5$ の方が若干大きくなった。

一方、剛性の影響については L に関係なく σ_y の分布に大きな違いは見られないが、最大応力は CFRP の剛性が小さい方が若干大きくなる傾向にあった。ただし、 τ_{xy} の最大値においては破壊開始点と考えられる $x/S = -1$ 付近で CFRP の剛性の影響はほぼなかったものの、反対側の $x/S = 1$ においては剛性の影響が顕著となり、CF2/8 の τ_{xy} は UD のその 1.4 倍ほど大きくなった。

$L=25$ の CF2/8 の垂直応力分布に及ぼす接着層厚さの影響を図 37 に示す。接着部全体的には大きな差異はみられないが端部の応力集中において、 $t=0.2$ の方が $t=0.4$ に比べ、30% 程度高くなる。実験結果では接着層が薄い場合の強度が若干低いものの、最大垂直応力に見られるほどの違いはなかった。

以上の結果より接着層の応力分布から、継手強度の特性に及ぼす各種影響を定性的に予測することは可能であるが、定量的に把握することは困難と思われる。

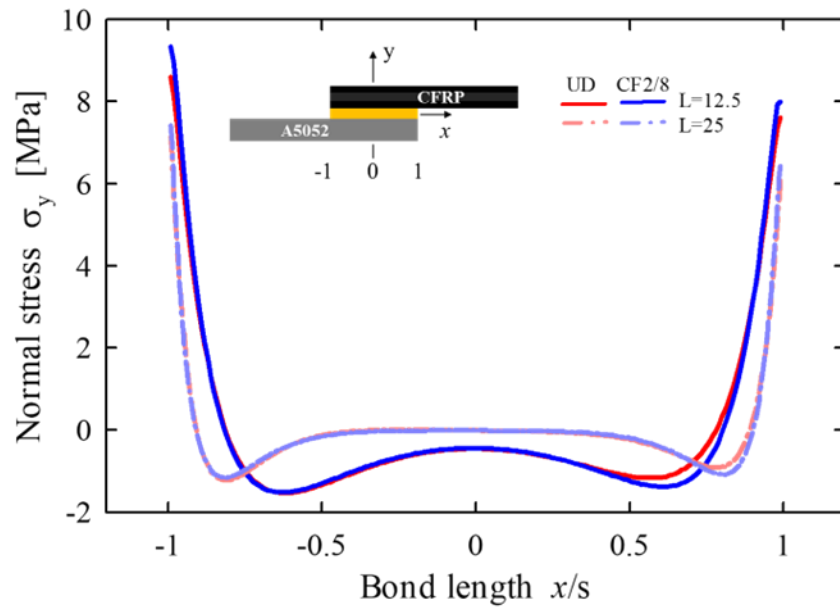


Fig. 36 Distributions of normal stress at the center of the bond line in the UD and CF2/8 types with $t = 0.2$

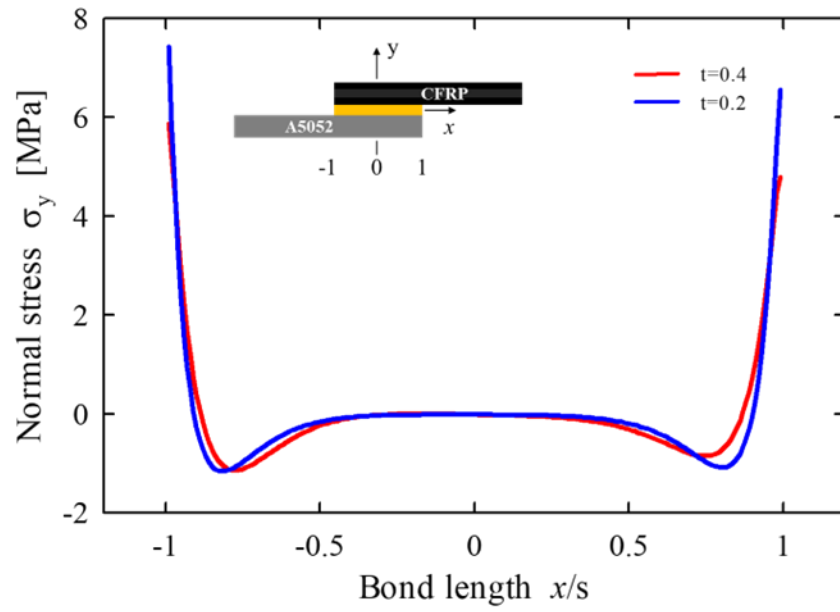


Fig. 37 Effect of adhesive thickness on normal stress distributions in CF2/8 type

5・2 被着体ひずみ変化と破壊開始

図 38 に $L = 12.5$, $t = 0.4$ の SLJ を引張り試験した時の平均せん断応力と被着体ひずみの関係を示す。被着体端部裏面のひずみは、SLJ に引張り荷重が負荷されると、引張りに加えて接着部で生じる曲げによるひずみが重畳したものとなる。このため引張り荷重とともに曲げによる圧縮ひずみが増加する。すべての SLJ において、CFRP の剛性が大きくなるほど、A5052 の圧縮ひずみは減少し、逆に CFRP のそれが増加するため、両被着体でひずみの差は小さくなった。これは、CFRP の剛性が増加することで、SLJ の曲げ変形が抑制されるためである。接着端部でき裂が発生し、破壊が開始されるとそこでの曲げひずみが解放され、ひずみが引張り側に転じ、逆の端部ではさらに曲げが加わり、圧縮ひずみが増加する。いずれの SLJ においても A5052 のひずみがある応力で急激に引張り側に反転することから、接着の CFRP 端部側より破壊が開始されたことがわかった。

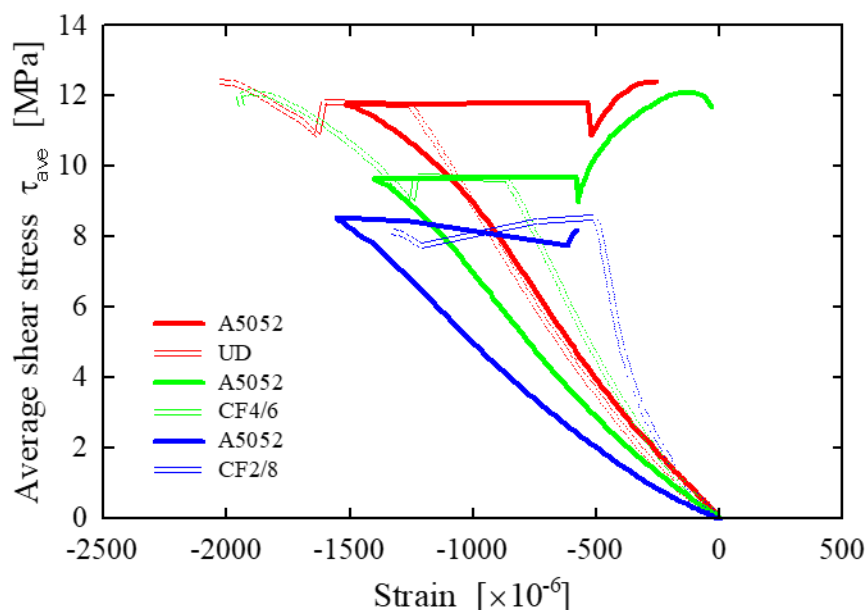
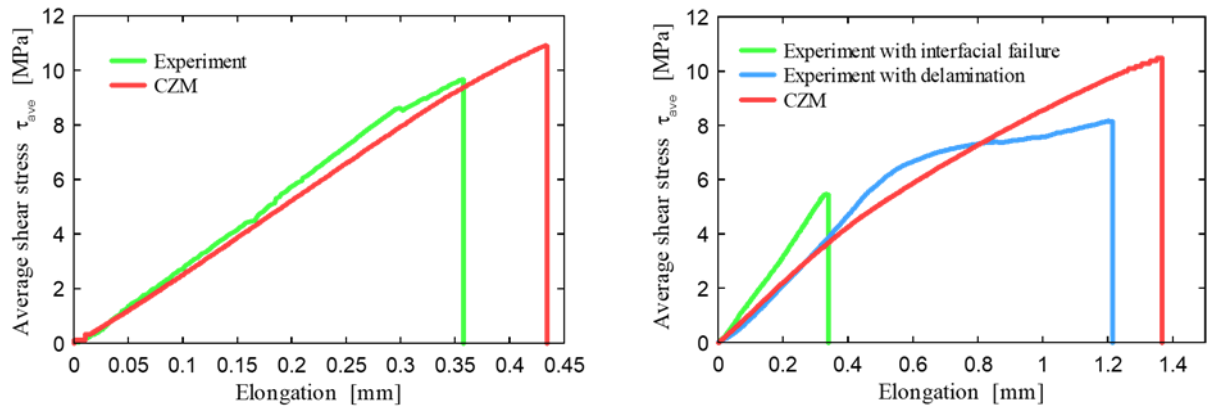


Fig. 38 Strain change on the back surface of the adherends at the adhesive edge during tensile tests

5・3 CFRP 層間剥離シミュレーション

CF2/8 について CZM 解析で得られた $\tau_{ave} - \delta$ 関係と実験結果との比較を図 39 (a) および (b) に示す。実験において、層間剥離が見られたのは $L = 25$ の CF2/8 材のみであった。まず層間剥離が生じない $L = 12.5$ においては図 39 (a) に示すとおり実験と CZM 解析結果は良い一致が見られた。図 39 (b) に示す $\tau_{ave} - \delta$ 関係の比較では層間剥離となったときの実験結果と CZM により得られた $\tau_{ave} - \delta$ 関係は同じ傾向となり、破断までの δ が増加するとともに破断時の τ_{ave} も層間剥離が生じない場合のそれに比べて高くなった。

CZM 解析では、CFRP の内部で要素を配置する位置を種々変更したが、今回の条件で層間剥離となる条件は CFRP と接着剤界面からの $38.5 \mu\text{m}$ の位置であった。これより界面側、および内部側では、層間に配置した要素ではなく界面の要素より破壊が生じた。本実験で使用したプリプレグの厚さは約 $80 \mu\text{m}$ であり、それよりも薄い箇所で剥離が生じることが予想される結果となった。実際に層間剥離した CFRP 被着体破面における段差を測定すると約 $40 \mu\text{m}$ であり、解析結果と良い一致が見られた。ただし、実験では CF2/8 のみで層間剥離が生じたが、CZM ではいずれの CFRP のタイプでも層間剥離型の破壊となったため、剛性の影響を説明するのは困難であった。



(a) $L = 12.5$, CF2/8

(b) $L = 25$, CF2/8

Fig. 39 Simulation results on the $\tau_{ave} - \delta$ curves of CF2/8 type by CZM

6. 結 言

本研究では、積層構成を3種類に変えた CFRP 積層板とアルミニウム合金 A5052 を接着接合した異種材 SLJ について、接着長さおよび接着厚さの条件を変えて引張り試験を行い、その強度特性に及ぼすこれらの影響を調査した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 接着長さが $L = 12.5$ mm の場合、接着厚さに関係なくせん断強度に CFRP 被着体剛性の影響が見られ、剛性の大きい CFRP を被着体とした場合の強度が高かった。しかし $L = 25$ mm と長い場合、この剛性の影響は見られなかった。
- (2) 接着厚さが $t = 0.4$ mm と厚い場合のせん断強度は、 $t = 0.2$ mm の薄い場合に比べて増加した。この影響の大きさは被着体の種類や、接着長さとは無関係であった。
- (3) 破壊は基本的に A5052 被着体と接着剤との界面で生じたが、接着長さが長く、CFRP の剛性が小さい場合、CFRP において層間剥離が生じる傾向にあった。またこの層間剥離が生じる場合、破断荷重の増加と破断までの伸びが著しく増加することがわかった。
- (4) CFRP 直交積層材をモデル化し、接着層中心面上での応力分布を有限要素により解析した結果、接着端部に生じる垂直応力の最大値に CFRP 剛性の影響が見られ、剛性の低い場合の最大応力が剛性の高い場合と比べて大きくなることが確認できた。このことが実験での低い剛性が強度低下をもたらす結果を示唆するものであった。また最大応力は接着層が薄い場合、厚い場合に比べ大きくなることがわかった。
- (5) 接着界面と CFRP 層間に結合力要素を配置した CZM 解析により CFRP の剛性が小さい場合に界面に近い CFRP の層間で剥離が生じることを予測することができた。またこのような層間剥離が生じた場合、破壊時の応力ならびに伸びが増加する挙動についても解析によりシミュレートできた。

文 献

- Anyfantis, K. and Tsouvalis, T. G., Experimental parametric study of single-lap adhesive joints between dissimilar materials, Abstract from ECCM15 (2012)
- Bamberg, P, A, M, G, P., Reisinger, U., Schiebahn, A., Barbosa, J. D. V., Marx, B. and Coelho, R. S., Digital image correlation analysis of the effects of the overlap length, adhesive thickness and adherends yield strength over similar and dissimilar joints of high strength steel and aluminum alloys, International Journal of Adhesion and Adhesive, Vol.83 (2018), pp.69-705
- Da Silva, Lucas, F. M., Carbas, R. J. C., Critchlow, G. W., Figueiredo, M. A. V., and Brown, K., Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints, International Journal of Adhesion and Adhesive, Vol.29 (2009), pp.621-632

- 廣瀬明夫, マルチマテリアルと異種接合, 軽金属, Vol.71, No.4 (2021), pp.188-196
- Kusukawa, K., Effects of laminate stacking sequence on the strength properties of aluminum alloy-carbon fiber-reinforced plastic dissimilar single-lap adhesive joints, *Journal of Advanced Joining Processes*, Vol.10 (2024), 100239
- Liu, Z., Xia, Y. and Guo, S., Characterization methods of delamination in a plain woven CFRP composite, *J Mater Sci, Composites and nanocomposites*, Vol.54 (2019), pp.13157-13174
- 中田一博, CFRP/CFRTP とマルチマテリアルの接合 1.CFRP/金属異種材の摩擦重ね接合, 材料, Vol.69, No.6 (2020), pp.479-484
- Nuhoglu, K., Aktas, E., Tanoglu, M., Barisik, M., Esenoglu, G., Martin, S., Iplikci, H., Yeke, M., Türkdöğan, C., Dehneliler, S. and Iris, M. E., Multi-scale analysis of the adhesive bonding behavior of laser surface-treated carbon fiber reinforced polymer composite structures, *International Journal of Adhesion and Adhesive*, Vol.130 (2024), 103643
- Ozel, A., Yazici, B., Akpınar, S., Aydın, M. D. and Temiz, S., A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends, *Composites Part B*, Vol.62 (2014), pp.167-174
- Park, S. M., Roy, R., Kweon, G. H. and Nam, Y., Strength and failure modes of surface treated CFRP secondary bonded single-lap joints in static and fatigue tensile loading regimes, *Composites Part A*, Vol.134 (2020), 105897
- Reis, P. N. B., Ferreira, J. A. M. and Antunes, S., Effect of adherend's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints, *International Journal of Adhesion and Adhesive*, Vol.31 (2011), pp.191-201
- 佐藤千明, CFRP/CFRTP とマルチマテリアルの接合 3.CFRP/金属との接着接合, 材料, Vol. 69, No. 8 (2020), pp. 626-629
- Sekiguchi, Y., Cohesive zone model (CZM) for numerical analysis, *Journal of the Adhesion society of Japan*, Vol.56 (2020), pp.447-455
- 清水理能, 足立忠晴, 荒井政大, 中原拓也, 松本浩之, 一方向 CFRP 積層板の ModelI および ModelII 層間破値に及ぼす環境温度の影響, 日本機械学会論文集, Vol.65, No.630 (1999), pp.282-286
- 砂田敬太, CFRP 直交積層板とアルミニウム合金の単純重ね合せ接着継手の破壊挙動, 高知工科大学, (2020)
- Wang, Z. and Xian, G., Cohesive zone model prediction of debonding failure in CFRP-to-steel bonded interface with a ductile adhesive, *Composites Science and Technology*, Vol.230 (2022), 109315
- 横山遥大, 異種材料単純重ね合わせ接着継手の強度特性に及ぼす被着材特性の影響, 高知工科大学, (2021)

謝辞

本研究の遂行にあたり適切なご指導を賜った楠川量啓教授に深く感謝致します。研究をともに模索した朝倉氏, 田中氏, 牧野氏をはじめとする材料強度学研究室の皆様には適切なご助言, ご協力をいただきました。ここに誠意の意を表します。最後に, このような学生生活を送らせていただいた家族に心より感謝を申し上げます。

付録

```

! SLJ の CZM 解析 CFRP:UD 材      O-2/90-8 材
!
!
lt=106.25      ! adherend length
lo=25          ! bond length
ta=0.2         ! adhesive thickness
t00=0.15       ! 0 deg layer thickness
t90=1.2        ! 90 deg layer thickness
tm=t00*2+t90   ! metal adherend thickness
wt=25          ! width

/prep7

!      要素タイプ
ET,1,183,,,5
ET,2,targe169
ET,3,conta172

KEYOPT,3,2,0    ! 拡大ラグランジュ
KEYOPT,3,3,1    ! 力/長さ
KEYOPT,3,12,6   ! 固着 (初期接触)
KEYOPT,3,9,1    ! 初期食い込みギャップ, オフセ
                ット除外

NLGEOM,on

!      A2017 properties
!MP,ex,1,68.7e3
!MP,nuxy,1,0.35
!TB,plastic,1,,,miso      ! 塑性, 多直線等方硬化
!TBPT,defi,0,210
!TBPT,defi,0.7e-3,250
!TBPT,defi,1.2e-3,270
!TBPT,defi,1.7e-3,280
!TBPT,defi,2.5e-3,290
!TBPT,defi,3.6e-3,300
!TBPT,defi,4.8e-3,310

!      A5052 properties
MP,ex,1,68.7e3
MP,nuxy,1,0.33
TB,plastic,1,,,miso      ! 塑性, 多直線等方硬化
TBPT,defi,0,75
TBPT,defi,0.23e-3,90
TBPT,defi,0.39e-3,100

TBPT,defi,1.0e-3,140
TBPT,defi,1.4e-3,160
TBPT,defi,1.7e-3,170
TBPT,defi,3.2e-3,180
TBPT,defi,6.5e-3,190
TBPT,defi,7.3e-3,192

!      Araldite2011 properties
MP,ex,2,1300
MP,nuxy,2,0.33
TB,plastic,2,,,miso      ! 塑性 2 直線等方硬化
TBPT,defi,0,10
TBPT,defi,5.3e-3,15
TBPT,defi,13.5e-3,20      ! yield 15 MPa

!      CF(0 deg. ) propeties
MP,ex,3,153e3
MP,ey,3,10.6e3
MP,ez,3,10.6e3
MP,prxy,3,0.3
MP,prxz,3,0.3
MP,pryz,3,0.06

MP,gxy,3,5.52e3
MP,gxz,3,5.52e3
MP,gyz,3,3.21e3

!      CF(90 deg. ) properties
MP,ey,4,10.6e3
MP,ex,4,10.6e3
MP,ez,4,153e3

MP,nuxy,4,0.3
MP,nuxz,4,0.06
MP,nuyz,4,0.06

MP,gxy,4,3.21e3
MP,gxz,4,5.52e3
MP,gyz,4,5.52e3

K,1,-lt+lo/2,-ta/2-tm,0
K,2,lo/2,-ta/2-tm,0

```

KGEN,2,1,2,1,,tm,,2	!TBDATA,1,19.1,166.1,15.7,381.5,1e-5,0
K,5,-lo/2,-ta/2,0	!R,1
	!RMODIF,1,3,-1.09e5
KGEN,2,4,5,1,,0,,2	!RMODIF,1,12,-3.21e5
KGEN,2,6,7,1,,ta,,2	
KGEN,2,8,9,1,,0,,2	
K,12,lt-lo/2,ta/2,0	
	R,1
KGEN,2,11,12,1,,0,,2	RMODIF, 1, 3,-1.0e5
KGEN,2,13,14,1,,t00/3.89,,2	RMODIF, 1,12,-1.0e5
KGEN,2,15,16,1,,0,,2	
	REAL,1
KGEN,2,17,18,1,,t00*(1-(1/3.89)),,2	TYPE, 2
KGEN,2,19,20,1,,t90,,2	MAT,5
KGEN,2,21,22,1,,t00,,2	KSEL,s,kp,,4,5,1
	KSEL,a,kp,,10,11,1
K,25,lo/2,ta/2+t00/3.89,0	LSLK,s,1
K,26,lo/2,ta/2+t00/3.89,0	NSLL,s,1
	ESURF
A,1,2,4,5,3	
A,7,6,8,9	REAL,1
A,11,10,12,16,25,15	TYPE, 3
A,17,26,18,20,19	MAT,5
A,19,20,22,21	KSEL,s,kp,,6,7,1
A,21,22,24,23	LSLK,s,1
	NSLL,s,1
ESIZE,3*ta	ESURF
AESIZE,2,ta	
	REAL,1
MAT,1	TYPE, 3
AMESH,1	MAT,5
MAT,2	KSEL,s,kp,,8,9,1
AMESH,2	LSLK,s,1
MAT,3	NSLL,s,1
AMESH,3	ESURF
AMESH,4	
AMESH,6	!CF 内への CZM 要素
MAT,4	
AMESH,5	TB,czm,6,1,1,cbde
	TBDATA, 1,20, 0.2e-3,30,0.65e-3, 1e-4, 0
TB,czm,5,1,1,cbde	!新しく試す
TBDATA, 1, 19.1, 0.135, 28.8, 0.8, 1e-4, 0	!TB,czm,6,1,1,cbde
	!TBDATA, 1,2, 20,3,10, 1e-4, 0
!砂田さんの CZM パラメータ	!R,2

RMODIF, 1, 3, -1.0e3
 RMODIF, 1, 12, -1.0e3

!新しく試す
 !R, 2
 !RMODIF, 1, 3, -1.0e3
 !RMODIF, 1, 12, -1.0e3

REAL, 1

 TYPE, 2
 MAT, 6
 KSEL, s, kp, 17, 26, 1
 LSLK, s, 1
 NSLL, s, 1
 ESURF

REAL, 1
 TYPE, 3
 MAT, 6
 KSEL, s, kp, 15, 25, 1
 LSLK, s, 1
 NSLL, s, 1
 ESURF

NSEL, all
 KSEL, all
 LSEL, all

!ここまで

EPLOT
 FINI

/SOLU

KBC, 0
 NLGEOM, on
 LNSRCH, on

TIME, 1
 DELTIM, 0.0001
 !NSUBST, 2000, 2000, 50

SELTOL, 1e-6
 NSEL, s, loc, x, -lt+lo/2

D, all, ux, 0
 NSEL, all

NSEL, s, loc, y, -ta/2
 NSEL, r, loc, x, -lt+lo/2, -lt+lo/2+25
 D, all, uy, 0
 NSEL, all

NSEL, s, loc, y, ta/2
 NSEL, r, loc, x, lt-lo/2-25, lt-lo/2
 D, all, uy, 0
 NSEL, all

!LSEL, s, loc, x, lt-lo/2
 !SFL, all, pres, -26.7 !応力どれだけかけるか
 !LSEL, all

SELTOL, 1e-6
 NSEL, s, loc, x, lt-lo/2
 D, all, velx, 12 !どこまで引っ張るか(変位制御)
 NSEL, all

OUTRES, all, all
 OUTPR, all, all

KSEL, all
 LSEL, all

SOLVE
 FINI
 SAVE

/POST1
 /DSCALE, 1, auto

set, last
 ETABLE, dpn, cont, gap
 ETABLE, dps, cont, slide

PLDISP, 0

/POST26