

2019（令和元）年度 修士学位論文

CFRP 直交積層板とアルミニウム合金の  
単純重ね合わせ接着継手の強度特性

Strength properties of adhesively bonded single lap joints  
of CFRP cross-ply laminates and aluminum alloy

2020 年 3 月 9 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻  
知能機械システム工学コース

1225007 大久保優也

指導教員 楠川量啓

# 目次

第1章 緒言 .....	1
1.1 炭素繊維強化プラスチック(CFRP) .....	1
1.2 接着接合 .....	3
1.3 有限要素法 .....	6
1.4 研究目的 .....	7
第2章 材料と試験片 .....	8
2.1 材料 .....	8
2.1.1 A2017 .....	8
2.1.2 CFRP .....	9
2.1.3 Araldite2011 .....	13
2.2 試験片 .....	14
2.2.1 弾性特性を得るための試験片 .....	14
2.2.2 SLJ 試験片 .....	15
第3章 実験方法, 実験条件 .....	17
3.1 引張り試験 .....	17
3.2 三点曲げ試験 .....	18
3.3 引張りせん断試験 .....	18
第4章 実験結果, 考察 .....	19
4.1 引張り試験 .....	19
4.2 三点曲げ試験 .....	20
4.3 引張りせん断試験 .....	22
4.4 破面観察 .....	25
第5章 有限要素解析 .....	26
5.1 解析条件 .....	26
5.2 解析結果 .....	29
第6章 結言 .....	35
第7章 謝辞 .....	36
・参考文献 .....	37
・付録(ANSYS コマンド) .....	39

## 第1章 緒言

### 1.1 炭素繊維強化プラスチック(CFRP)

CFRP は炭素繊維を強化材，プラスチックを母材とした複合材料である．複合材料はこのように二つの異なる素材を組み合わせることで単独材料では得られない性質を持たせた材料である．現在，CFRP は軽量，高強度，高剛性といった特徴から航空分野をはじめ，自動車，スポーツ用品などの幅広い分野で使用されている．

CFRP の大きな特徴として異方性材料であることがよく知られている．異方性材料とは外力の負荷する方向によって，材料の力学的特性が異なる材料のことである．CFRP は繊維方向の外力に対して炭素繊維の高強度，高剛性の特徴が効果的に発揮される．しかし，繊維方向と直交する方向に外力が加わると，炭素繊維の特徴が消え，その特性はほぼ樹脂単体のものとなり，強度，剛性は大きく低下する．この異方性のため，CFRP を用いる場合は繊維の配向方向を多方向にすることが一般的となっている<sup>(1)</sup>．

CFRP の成形法の一つに図1に示すような繊維に樹脂をあらかじめ含浸させたプリプレグを積層し，加圧，加熱硬化の手段として油圧プレスを用いて成形する加圧成形法がある．この手法は成形品の強度，弾性率に優れており，成形品の寸法精度や面精度が良いという特徴がある<sup>(2)</sup>．実際に使用される CFRP の部材や製品の多くは，成形品に更なる機械加工や接合技術が利用されている．

一般に直交積層板をつくる際，中央の面を挟んで上下対象になるように積層を構成する．これは，繊維と母材の熱膨張率の違いによって層間に曲げ応力が発生し，図2(a)のような湾曲した板ができるためである．同じ理由から $\pm\theta^\circ$ の交叉積層板をつくると，ねじり応力が層間に発生し，図2(b)ような変形が生じる．この変形を阻止しようとするれば，内部に発生する応力を釣り合わせるために，中央面を挟んで上下対称に積層すればいいことになる<sup>(1)</sup>．

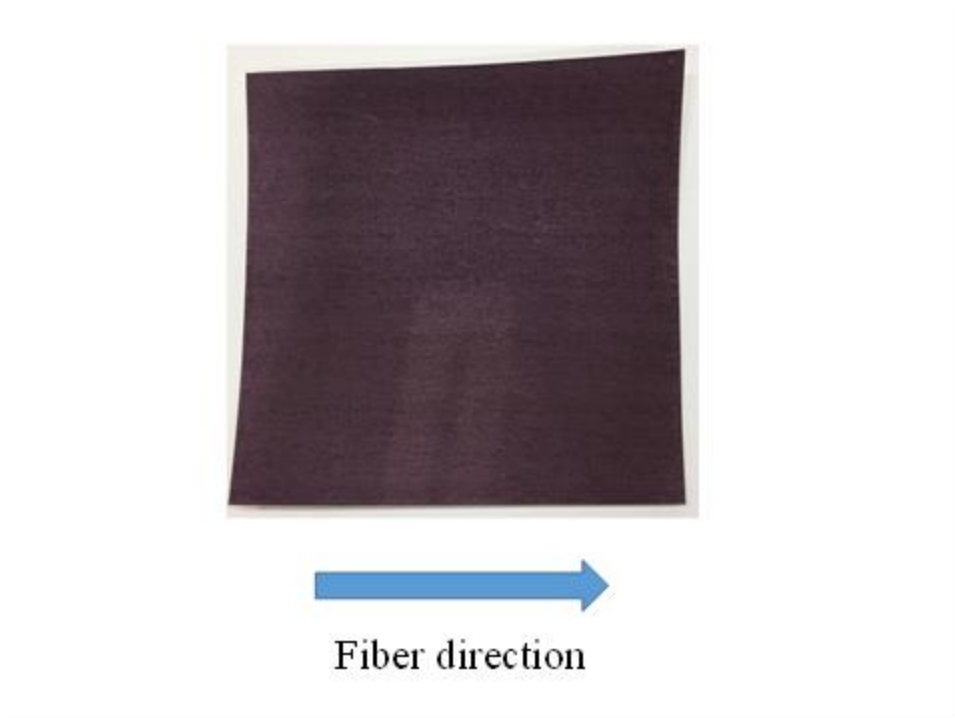


図1 プリプレグシート

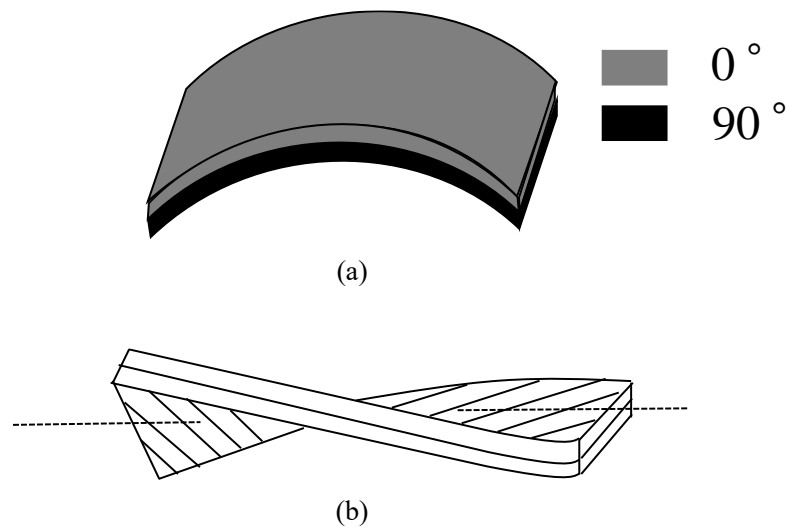


図2 積層板の変形<sup>(1)</sup>

## 1.2 接着接合

近年、様々な分野で低コスト化や軽量化が進められており、それに伴って材料の多様化が進んでいる。特に自動車や航空機の分野では燃費向上の観点からボディーや機体の軽量化が積極的に行われている。これにあいまって異種材料の接合が多く使用されるようになっている。そこで注目されている接合方法の一つが接着接合である。

接着接合は異種材料間の接合が可能であり、機械的接合に比べ面接合であるため応力集中を低減することを可能にする。また、単純構造となるので重量の増加を防ぐことも可能である。本研究でも使用する単純重ね合わせ接着継手(SLJ)は、最も単純な継手方式で施工も容易なことから多く使用される。

SLJの場合、左右に引張りの力が作用すると、接着部に大きなせん断応力が発生する。そしてその応力は接着端部に集中する。図3にSLJの引張り荷重負荷における変形図を示す。引張り応力が同一線上にないため、曲げ応力も加わる。これによって端部からはく離が始まる<sup>(1)</sup>。SLJにおいて接着剤と被着材との界面で破壊が生じる場合、接着継手の強度は接着面での平均的な最大せん断応力として次式で表される。

$$\tau_0 = \frac{P_{\max}}{A} \quad (1)$$

$P_{\max}$ は試験中の最大荷重、 $A$ は接着面積である。式(1)がSLJの継手強度の公称値として用いられる。

SLJにおいては前述したとおり曲げ変形が生じる(図3)。そのため、曲げ変形を無視した場合の接着部でのせん断応力を以下のように求めることができる<sup>(2)</sup>。図4にSLJの接着部を示す。上板と下板のヤング率を $E$ 、板厚を $t$ 、接着剤のせん断係数を $G$ 、接着層厚さを $h$ 、接着部長さを $L$ 、接着幅を $w$ とする。接着部端部から $x$ 座標をとり、位置 $x$ における上板および下板の $x$ 方向の内力を $P_1$ 、 $P_2$ 、 $x$ 方向変位を $u_1$ 、 $u_2$ とする。接着部でのせん断応力 $\tau$ は

$$\tau = G\gamma = G \frac{u_2 - u_1}{h} \quad (2)$$

である。式(2)を $x$ で微分すると

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{G}{h} \left( \frac{du_2}{dx} - \frac{du_1}{dx} \right) = \frac{G}{h} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (3)$$

となる。ここで、 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ は上板と下板の $x$ 方向ひずみであり、次式で書ける。

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} = \frac{P_1/wt}{E} \quad (4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} = \frac{P_2/wt}{E} = \frac{(P - P_1)/wt}{E} \quad (5)$$

また、上板における長さ  $dx$  の微小部分の力のつり合いより

$$\frac{dP_1}{dx} = -\tau w \quad (6)$$

である。この式を  $x$  で微分した式に式(3), (4), (5)を代入すれば

$$\frac{d^2 P_1}{dx^2} = -\frac{2G}{hEt} P_1 = -\frac{GP}{hEt} \quad (7)$$

となり、上板の内力  $P_1$  に関する微分方程式を得る。この微分方程式の一般解を求めて、 $x = 0$  で  $P_2 = 0$ 、 $x = L$  で  $P_1 = 0$  の境界条件を用いることで  $P_1$  が得られる。この結果より、接着部でのせん断応力  $\tau$  は次のようになる。

$$\tau = \frac{P}{w} C \frac{\cosh(cx) + \cosh c(L-x)}{2 \sinh(cL)} \quad (8)$$

ここで

$$C = \sqrt{\frac{2G}{hEt}} \quad (9)$$

とおく。せん断応力の分布は接着部の両端で最大となる。よって  $x = 0$  または  $x = L$  のとき、

$$\tau_{\max} = \frac{c}{w} \frac{1 + \cosh(cL)}{2 \sinh(cL)} P \quad (10)$$

となる。

つまり、継手強度が  $\tau_{\max}$  によって決定されたとすると、接着部の長さ  $L$  を長くしても必ずしも有効ではないことが分かる。そして実際の応力分布はより複雑であり、詳細な応力状態を知るには有限要素法を用いた数値計算が必要となる。

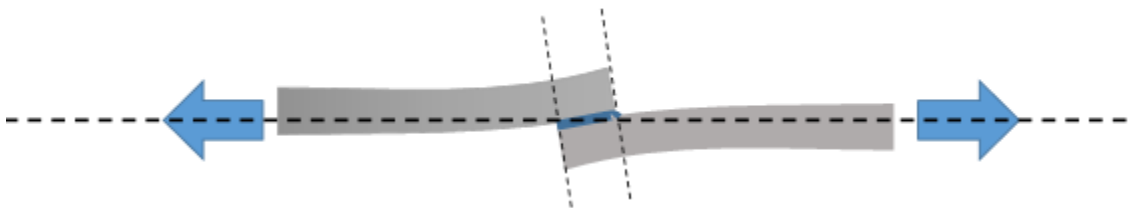


図3 SLJの引張り荷重負荷における変形図

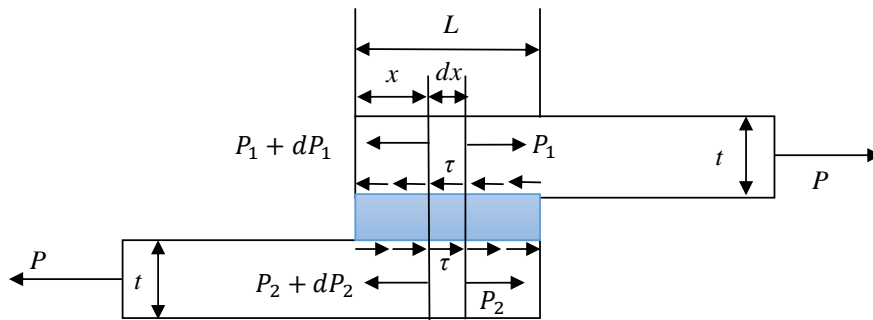


図4 SLJの接着部<sup>(3)</sup>

接着部では、せん断応力や垂直応力によって接着剤と被着材での界面破壊や接着剤内での凝集破壊が生じる。一般にき裂の変形様式には、図5に示すようなモードI(開口型)、モードII(面内せん断型)、モードIII(面外せん断型)の三種類の基本変形がある。SLJに発生したき裂は主にモードIとモードIIの混合モード状態となっている。CFRPを被着材とした場合、その厚み方向の強度が低いため、層間はく離が発生・進展することで、接着層よりもCFRPの破壊が先に生じることもある。

以上のように接着継手では様々な要素から破壊に至る。そのため、様々な条件下での試験を行う必要がある。本研究では、被着材の剛性に着目し、接着継手の強度特性を評価する。

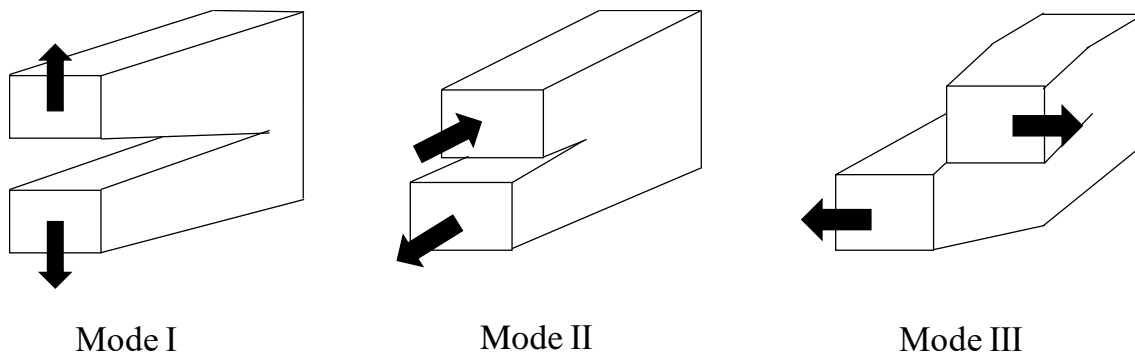


図5 き裂の変形モード

### 1.3 有限要素法

前節でも述べたように接着継手の接合部の応力状態は非常に複雑である．そのため，詳細な応力状態を知るために多く用いられるのが有限要素法(FEM)を用いた数値解析である．

FEM は，連続する物体を微小部分の集まりとみなし，個々の要素の特性を組み合わせて全体の方程式を作り，これを数学的に解く手法である．したがって，複雑な形状を持つ構造物においても，個々の小部分は極めて簡単なものになり，簡単にモデル化することができる．

現在，FEM は非常に幅広く応用され，微分方程式で表される様々な物理現象的な問題で用いられる．これは FEM の持つ利点に起因している．FEM の利点の一つ目は隣り合った要素の材料特性は同じである必要がないことである．これは，様々な材料からできている物体への応用を可能にしている．二つ目は要素の大きさを変更することができることである．この特性は，要素分割の網目を必要に応じて拡大したり，縮小したりすることを可能にしている．しかし，この要素分割は理論的な裏付けはなく，技術者の判断に依存してしまう．このことが FEM の大きな欠点である．要素分割のサイズ(メッシュサイズ)が不十分または不適切な場合，その他が正確でも不正確な結果が求まってしまう．有用な結果を得るためにはメッシュサイズを小さくすることが最も効果的である．しかし，要素の分割数が増えると計算時間が増えてしまう．そのため，技術者は両者のバランスに注意しなければならない．さらに必ず実験結果と比較して解析の結果が正しいかを確認する必要がある<sup>(4)</sup>．

SLJ での接着層端部における接着剤には，高いせん断応力と垂直応力が生じることは既に良く知られている．本研究では，被着材の剛性の変化によって接着層の応力分布がどのように変化するかを調べた．また，接着剤のはく離の評価法の一つであるエネルギー解放率を VCCT 法(仮想き裂閉口法)を用いて求めた．

VCCT は，表面をはく離させるのに必要なエネルギーと，表面を閉じるのに必要なエネルギーは同じであるという仮定に基づいている．き裂が成長した場合( $\Delta a$ )でも，き裂先端まわりの応力状態は大幅には変化しないと仮定している．低次要素メッシュでの二次元き裂形状(図 6)では，エネルギー解放率は式(11)，式(12)のように定義される<sup>(5)</sup>．

$$G_I = -\frac{1}{2\Delta a} R_Y \Delta v \quad (11)$$

$$G_{II} = -\frac{1}{2\Delta a} R_x \Delta u \quad (12)$$



ここで、 $G_I$ および $G_{II}$ はモード I および II それぞれのエネルギー解放率、 $\Delta u$ および $\Delta v$ は局所座標  $x$  および  $y$  でのき裂面の最上部と最下部との間の相対変位、 $R_x$ および $R_y$ はき裂先端接点での反力、 $\Delta a$ は図 6 に示すようなき裂進展である。

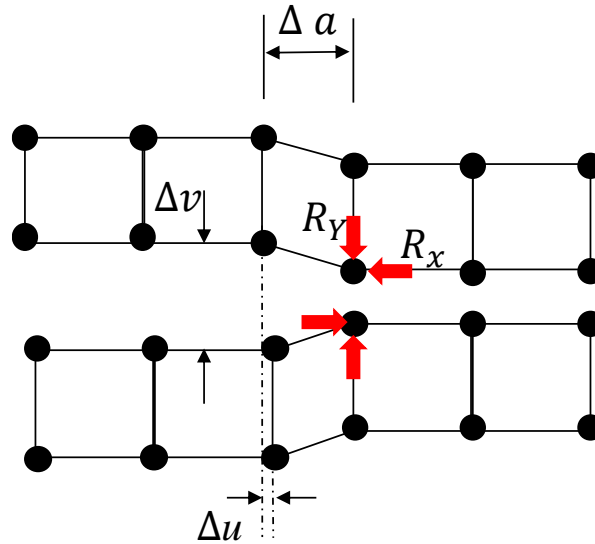


図 6 二次元き裂形状概念図<sup>(5)</sup>

#### 1.4 研究目的

以上で述べたとおり、接着継手の強度を検討する場合、多くのファクタを考慮する必要がある。本研究では、金属と CFRP の異種材料接着における継手について接着部の応力は被着材の剛性に影響を受けることが予想されるため、積層構成を変化させることで剛性を変化させた CFRP とアルミニウム合金(A2017)による単純重ね合わせ接着継手(SLJ)に注目した。その SLJ の静的引張り試験を行い、破断強度、被着材の変形(ひずみ)、破面観察からの実験的評価と有限要素解析より得られる接着層の応力分布と接着剤のはく離の評価法の一つであるエネルギー解放率からの解析的評価を行う。

異種材料接着において被着材の剛性の違いが継手強度にどのような影響を与えるのかを実験と解析から評価することを目的とする。

## 第2章 材料と試験片

### 2.1 材料

本研究では被着材にアルミニウム合金(A2017) と CFRP プリプレグ(TR350C100S,三菱ケミカル)を積層して作製した CFRP 積層板を用いた。接着剤には Araldite2011(HUNTSMAN)を使用した。

#### 2.1.1 A2017

- ・ A2017(300×400×1.5 mm)からバンドソー(図7)を用いて 26×101 mm の寸法に切り出した。この時、バンドソーの刃の厚み(1 mm)を考慮してけがいた。また、試験片の長手方向と A2017 の圧延方向が一致するようにした。
- ・ 切り出した 26×101 mm の A2017 をフライス盤(図8)で 25×100 mm の寸法に加工した。



図7 バンドソー



図8 フライス盤

## 2.1.2 CFRP

CFRP プリプレグの物性値を表 1 に示す.

表 1 CFRP プリプレグの物性値

Fiber weight [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]	100
Resin content [wt%]	25
Prepreg weight [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]	133
Thickness [mm]	0.083

- ・CFRP プリプレグ約 140×140 mm(図 2)を積層枚数分用意し一日真空機に入れた後, 積層を行った. 積層を行う際は各プリプレグの間に空気が入らないようヘラで空気を除いて積層を行った.
- ・一方向積層板(図 9 左)の際は繊維方向が全て同じになるようにして積層し, 直交積層板の際には図 9 の右側のように繊維方向が直交するような層を間に挿入した.

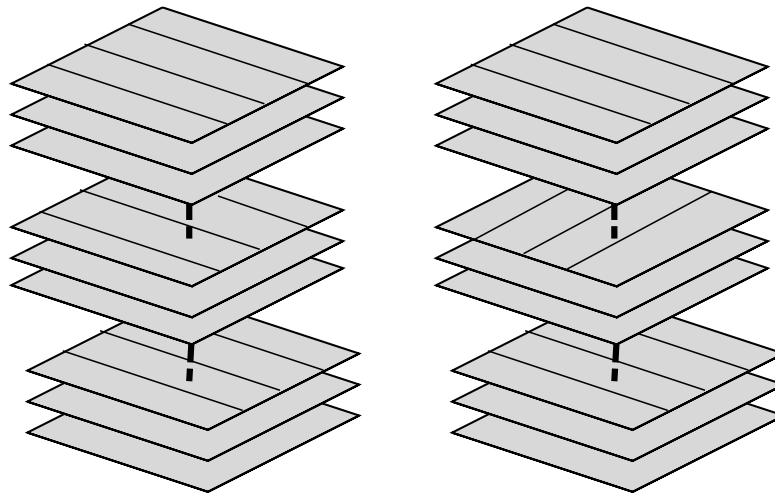


図 9 積層構成(左:一方向積層板 右:直交積層板)

- ・図 10 の底板と図 14 の吸引口を瞬間接着剤で固定し, 底板と図 11 の天板に離型剤(図 13)を塗布した.
- ・底板の上に積層したプリプレグを配置し, プリプレグの周りを囲うように厚みを制御するための厚さ 1.5 mm のスペーサ(図 15)とプリプレグを固定するためのシーリングテープ(図 12)を配置した. スペーサーと底板には穴があいており, そこにピンを刺すことでス

ペーサーを固定した。

- ・樹脂の通り道にブリーザー(図 16)を配置し、空気の通り道を作るためシーリングテープの上に紙を置いた。
- ・天板を上からかぶせ、その上から天板を覆うようにブリーザーをかぶせた。
- ・底板の四辺にシーリングテープを貼付し、全体を覆うように真空フィルム(図 17)をかぶせた。吸引口と吸引ホースをつなげられるようにするため、吸引口の位置で真空フィルムに穴をあけた。

ここまでの手順が完了した際の模式図を図 18 に示す。



図 10 底板



図 11 天板



図 12 シーリングテープ



図 13 離型剤



図 14 吸引口



図 15 スペーサー



図 16 ブリーザー



図 17 真空フィルム

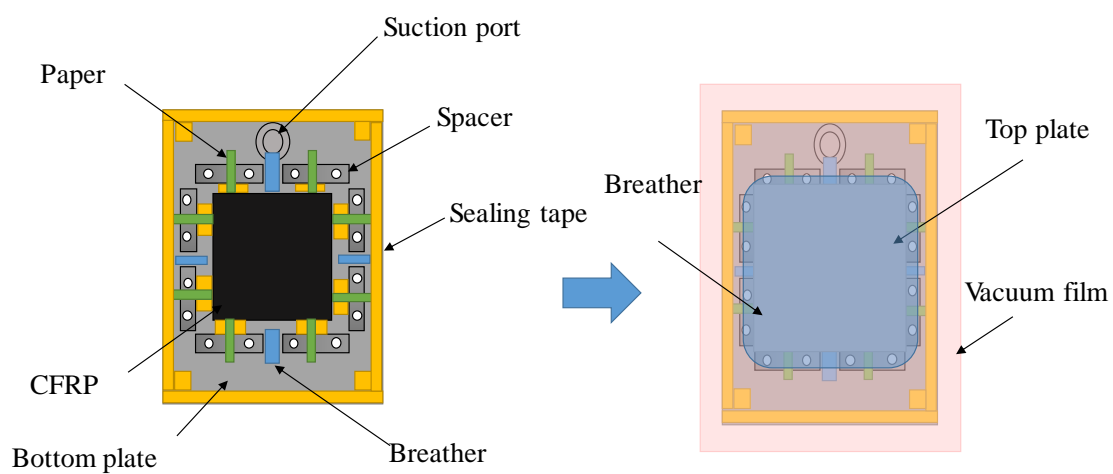


図 18 CFRP 試験片制作模式図

- ・吸引口と吸引ホースをつなぎ、ホットプレス機(図 19)にセットした。シーリングテープを用いて空気が漏れないようにした。
- ・ホットプレス機の温度設定は図 20 のように設定し、樹脂が溶け出す 110 °C 付近で圧力 40 MPa を加えた。
- ・ホットプレス機の温度が室温まで低下した後、CFRP を取り出した(図 21)。
- ・取り出した CFRP をファインカッター(図 22)で 25.5×100.5 mm の寸法に切り出した。
- ・エメリー紙を用いて 25×100 mm になるように研磨を施した。



図 19 ホットプレス機

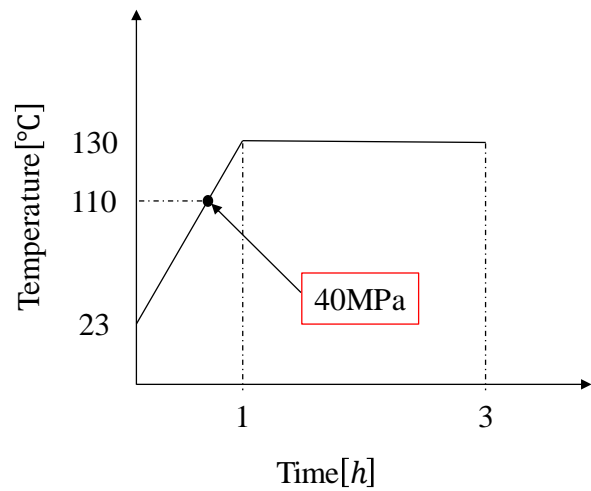


図 20 ホットプレスの温度設定

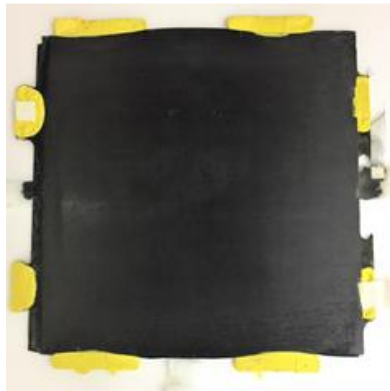


図 21 ホットプレス成形直後の CFRP



図 22 ファインカッター

### 2.1.3 Araldite2011

・図 23 の Araldite2011 の主剤と硬化剤を質量比 1:0.8 で混ぜ、真空機にて 40 分間の脱泡を行った。



図 23 Araldite2011 の主剤と硬化剤

## 2.2 試験片

### 2.2.1 弾性特性を得るための試験片

引張り弾性率測定のため，2.1.2 節で作製した試験片(25×100×1.5 mm)に図 24 の赤色で示した場所にひずみゲージを貼付した．ひずみゲージの詳細を表 2 に示す．試験片の両端部にはタブ(25×25×1.5 mm)を取り付けた．

表 2 ひずみゲージ詳細

Model	KFGS-5-120-C1-23L1M2R
Gage Factor	$2.11 \pm 1.0 \%$
Gage Length	5 mm
Gage Resistance(23°C、50%RH)	$119.6 \Omega \pm 0.4 \%$
Transverse Sensitivity Ratio (23°C、50%RH)	$0.7 \pm 0.2 \%$

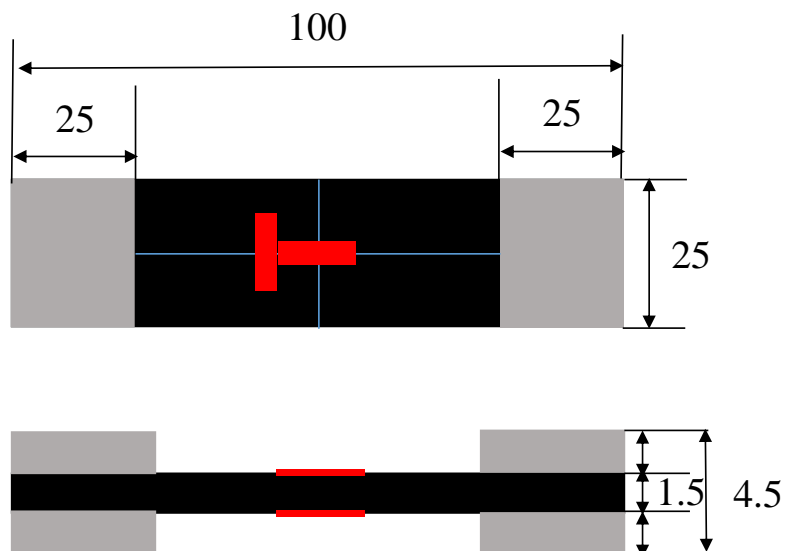


図 24 引張り弾性率測定用試験片 [mm]



曲げ弾性率測定のため，図 25 のように 2.1.2 節で作製した試験片に線を引き，三点曲げ試験の際の支点間距離の目印を付けた．

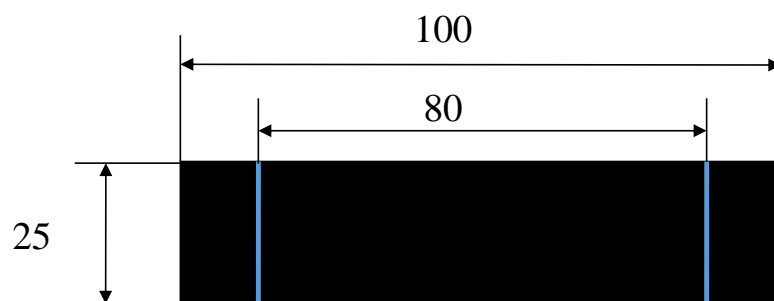


図 25 曲げ弾性率測定用試験片 [mm]

### 2.2.2 SLJ 試験片

本研究では，被着材に A2017 と CFRP 積層板を使用した．接着剤には Araldite2011 を使用した．被着材の接着面は#500 のエメリー紙で研磨処理を施した後，超音波洗浄を行いアセトンでの洗浄を行った．

試験片の表面処理後，接着剤を塗布し SLJ を作製した．図 26 に SLJ の寸法を示す．継手作製の際には図 27 に示す治具を用いて試験片寸法を制御した．また，接着厚さはテフロンシートを挟み込むことで 0.2 mm に制御した．その後，恒温器(ISUZU Hot Air Rapid Drying Oven Soyokaze)で 70 °C1 時間の条件で接着剤を硬化させた．硬化後，余分な接着剤はスクレイパーを用いて切除した．この時，試験片に損傷を与えないように注意した．被着体それぞれの接着層端部裏面にひずみゲージを貼付した．

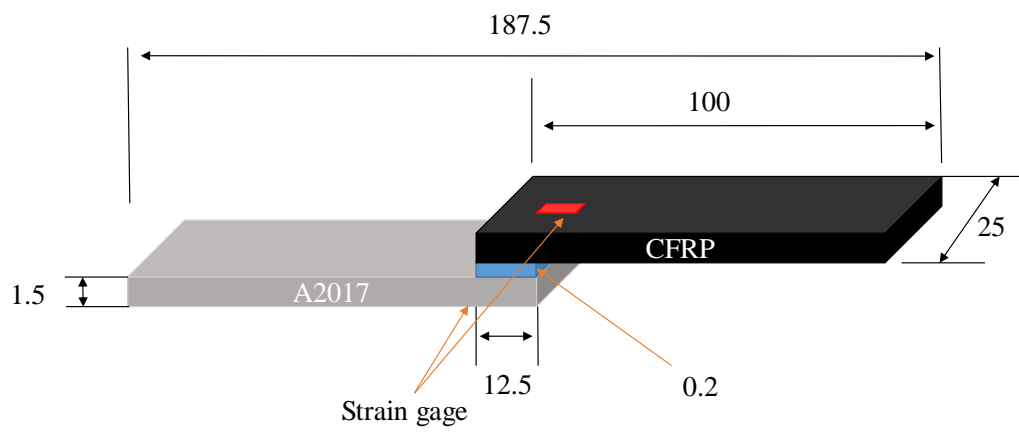


図 26 SLJ の寸法図 [mm]



図 27 加熱硬化治具

### 第3章 実験方法, 実験条件

#### 3.1 引張り試験

引張り弾性係数測定のため 2.2.1 節の試験片を図 28 の万能材料試験機オートグラフ (SHIMADZU AUTOGRAPH AG-100kNG 島津製作所) にセットした。図 29 に試験条件の例を示す。縦軸は荷重  $P$ , 横軸はクロスヘッド変位  $\delta$  である。材料の弾性域内で任意の四種類の荷重を決め, その荷重を負荷した。①-②を三往復, ①-③を三往復, ①-④を三往復し, その際のクロスヘッド変位と縦ひずみと横ひずみを記録した。



図 28 引張り試験機

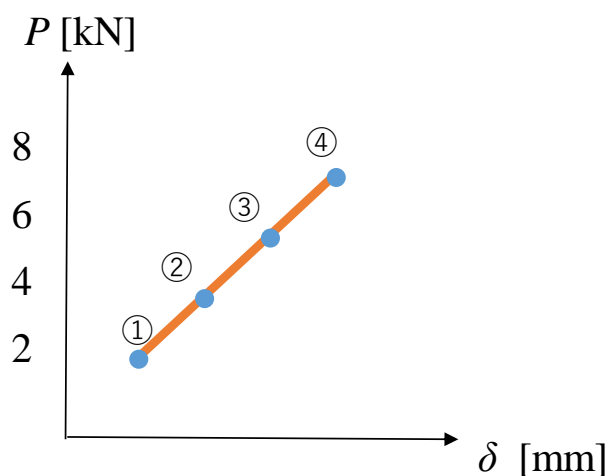


図 29 試験条件の例

### 3.2 三点曲げ試験

2.2.1 節の試験片を図 30 に示す油圧サーボ疲労試験機(SHIMADZU EHF-F1)を用いて三点曲げ試験を行った。支点間距離を 80 mm に設定し、3.1 節と同じ方法で荷重 20N, 40N, 60N および 80N を負荷した。その際の荷重と変位を記録した。

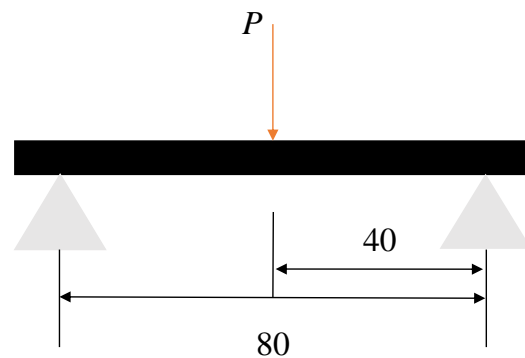


図 30 油圧サーボ疲労試験機と三点曲げ試験概略図 [mm]

### 3.3 引張りせん断試験

2.2.2 節の SLJ 試験片を図 28 の引張り試験機を用いて引張りせん断試験を行った。SLJ は引張りせん断負荷の際に接着部に曲げモーメントが作用するため、取り除くために試験片両端部にタブを設けた。変位速度 2 mm/min で SLJ が破壊されるまでの荷重とクロスヘッド変位とひずみを記録した。

## 第4章 実験結果, 考察

### 4.1 引張り試験

表3に積層構成の種類と引張り弾性率測定のための試験本数を示した。軸方向引張り荷重を負荷した時の応力とひずみの関係を図31に示す。

応力とひずみと引張り弾性率  $E$  の関係は式(11)で表される。この関係から引張り弾性率は応力ひずみ線図の傾きから求めることができる。縦ひずみ  $\varepsilon$  と横ひずみ  $\varepsilon'$  から式(12)を利用してポアソン比  $\nu$  を算出した。各被着材の引張り弾性率とポアソン比の平均値を表4に示す。引張り弾性率は  $90^\circ$  層の枚数が増えると低下することが分かる。これは1.1節でも述べたように  $90^\circ$  層は繊維方向に対して直交するため、軸方向の引張りの力に弱くなるからである。

A2017の引張り弾性率とポアソン比についても同様の方法で求めた。 $[0_4/90_{12}/0_4]$  はA2017と引張り弾性率が最も近い値を示した。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (11)$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \quad (12)$$

表3 CFRP 積層構成と試験本数

	Number of specimen
$[0_{21}]$	3
$[0_7/90_7/0_7]$	3
$[0_4/90_{12}/0_4]$	4
$[0_2/90_{16}/0_2]$	5

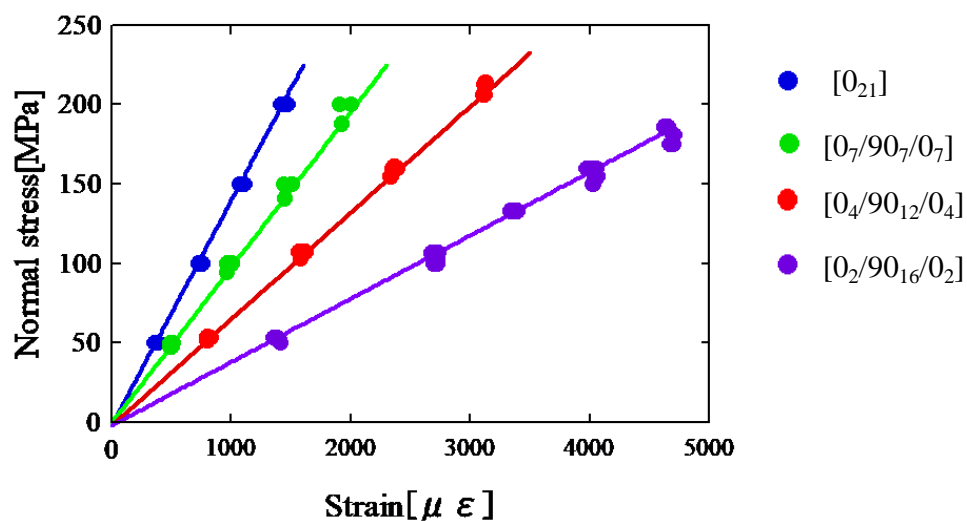


図 31 応力ひずみ線図

表 4 各被着材の引張り弾性率とポアソン比

	Young's modulus (Tensile)[GPa]	Poisson's ratio
[0 <sub>21</sub> ]	141	0.382
[0 <sub>7</sub> /90 <sub>7</sub> /0 <sub>7</sub> ]	101	0.0637
[0 <sub>4</sub> /90 <sub>12</sub> /0 <sub>4</sub> ]	68.6	0.0329
[0 <sub>2</sub> /90 <sub>16</sub> /0 <sub>2</sub> ]	39.7	0.0247
A2017	68.7	0.35

## 4.2 三点曲げ試験

3.2 節で得られた荷重  $P$  と変位  $D$  から曲げ応力  $\sigma_b$  と曲げひずみ  $\varepsilon_b$  を式(13)と式(14)から算出した。支点間距離  $L = 80 \text{ mm}$ ,  $w$  は試験片の幅,  $t$  は試験片の板厚を表している。

各被着材の算出した曲げ応力と曲げひずみの関係を図 32 に示す。表 5 は各積層構成の曲げ弾性率測定のための試験本数と曲げ弾性率の平均値を表している。最も曲げ弾性率が大きくなったのは [0<sub>21</sub>] であった。曲げ弾性率についても引張り弾性率同様 90°層が多くなると低下する傾向にあった。曲げ弾性率は引張り弾性率に比べ、試験片ごとのばらつきが大きかった。これは、試験片ごとの繊維、樹脂の体積含有率の違いによって各層の厚みが変わり、それが影響を与えていると考えられる。A2017 についても同様にして曲げ弾性率を算出した。[0<sub>2</sub>/90<sub>16</sub>/0<sub>2</sub>] は最も A2017 に近い曲げ弾性率の値を示した。

$$\sigma_b = \frac{3PL}{2wt^2} \quad (13)$$

$$\varepsilon_b = \frac{6Dt}{L^2} \quad (14)$$

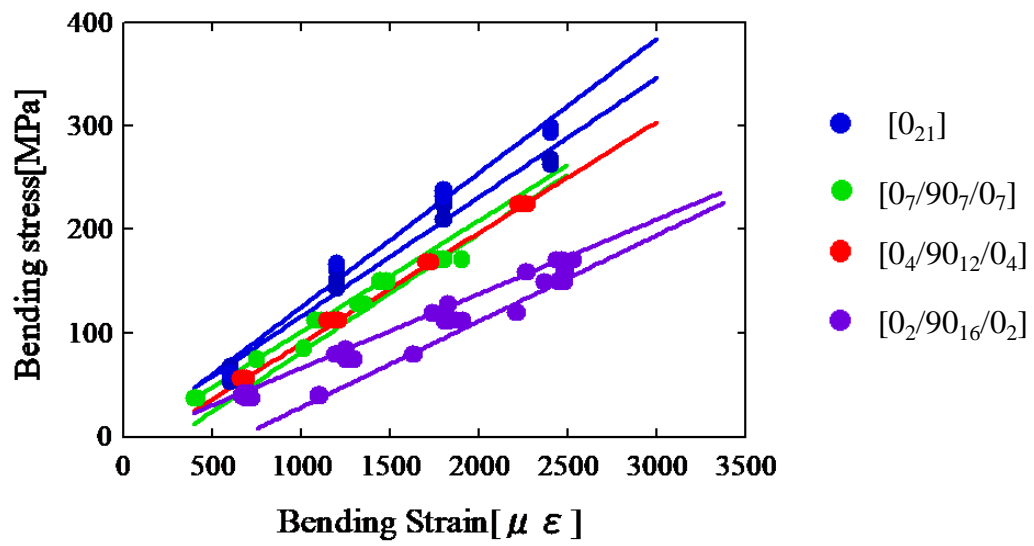


図 32 応力ひずみ線図(曲げ)

表 5 各積層構成の試験本数と曲げ弾性率

	Number of specimen	Young's modulus (Bending) [GPa]
[0 <sub>21</sub> ]	2	122
[0 <sub>7</sub> /90 <sub>7</sub> /0 <sub>7</sub> ]	2	111
[0 <sub>4</sub> /90 <sub>12</sub> /0 <sub>4</sub> ]	3	108
[0 <sub>2</sub> /90 <sub>16</sub> /0 <sub>2</sub> ]	5	72.1
A2017	3	73.2

### 4.3 引張りせん断試験

#### 4.3.1 破断強度

図 33 には SLJ の荷重変位曲線の一例を示している。各 SLJ 試験片は三本ずつ試験を行った。表 6 に破断荷重と破断変位の平均値を示す。破断荷重は CFRP の剛性の大きいものから順に高かった。破断変位は、CFRP の剛性の小さいもので最も大きい結果となった。

表 4、表 5 より、 $[0_7/90_7/0_7]$ と $[0_4/90_{12}/0_4]$ は、引張り弾性率に比べ曲げ弾性率の差異はほとんどない。しかし、破断荷重は $[0_7/90_7/0_7]$ -A2017 のほうが高かった。これより、破断荷重は引張り弾性率の影響を大きく受けると考えられる。

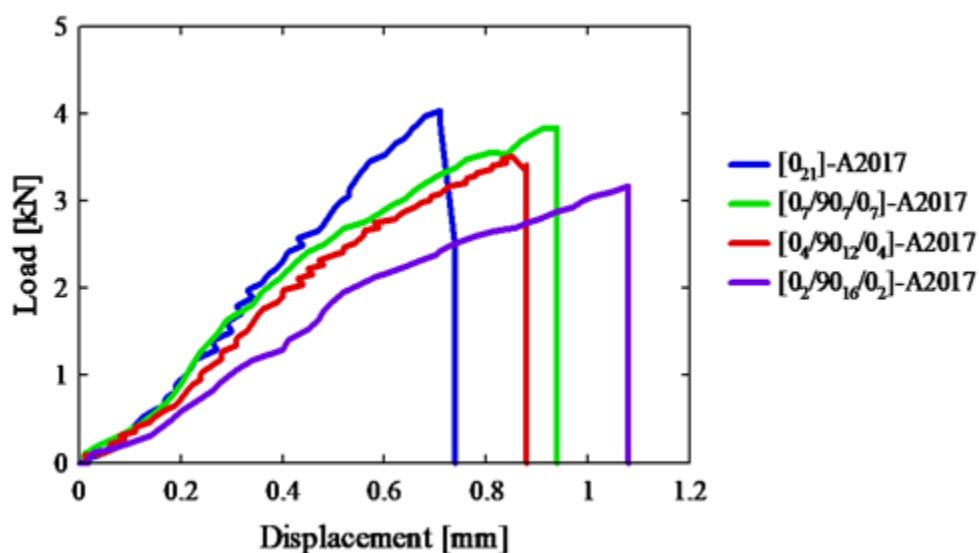


図 33 荷重変位曲線

表 6 各 SLJ 試験片の破断荷重と破断変位の平均値

	Average fracture load [kN]	Average fracture displacement [mm]
$[0_{21}]$ -A2017	4.28	0.71
$[0_7/90_7/0_7]$ -A2017	3.87	0.92
$[0_4/90_{12}/0_4]$ -A2017	3.41	0.88
$[0_2/90_{16}/0_2]$ -A2017	3.14	1.08



図 34 は $[0_2/90_{16}/0_2]$ -A2017 の荷重変位曲線である。二種類の曲線が得られた。#2 で試験開始直後に曲線の傾きが変化した。これは、図 35 に示すように画像上部の  $90^\circ$  層にき裂が入ったためであると考えられる。 $[0_2/90_{16}/0_2]$  は  $90^\circ$  層の枚数が多いため、引張り弾性率が低くなっている。このため、接着剤がはく離する前にき裂が入り、傾きが変わり、破断変位が増加したと考えられる。

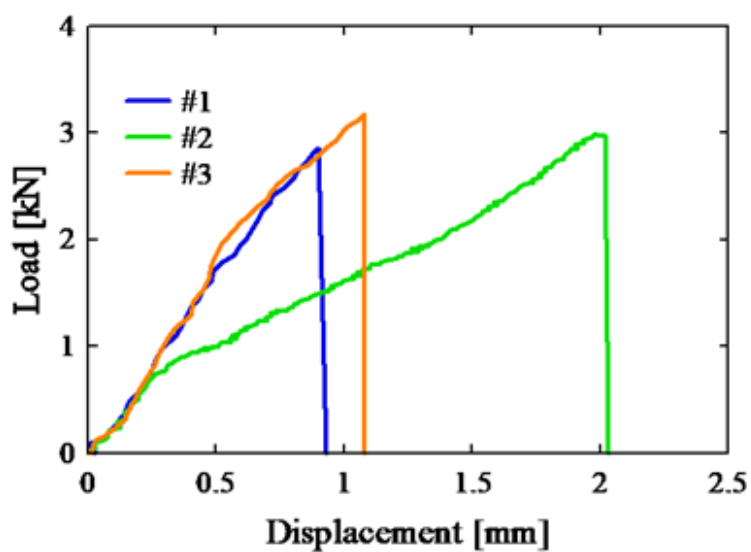


図 34  $[0_2/90_{16}/0_2]$  の荷重変位曲線

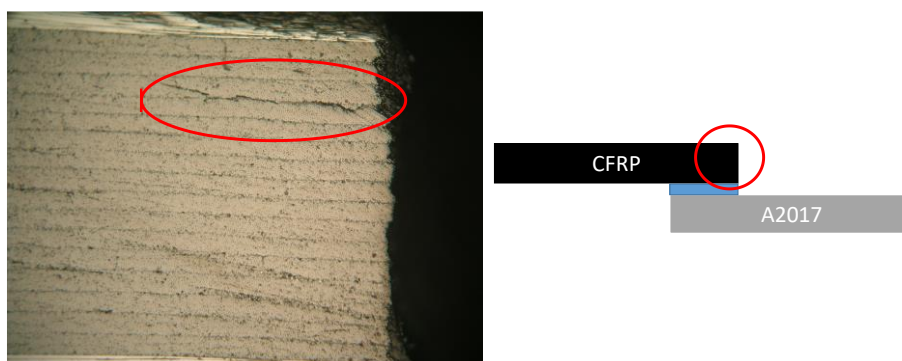


図 35  $[0_2/90_{16}/0_2]$  の#2 の側面

#### 4.3.2 被着材の変形

図 36 に図 33 で示した SLJ の引張り試験時に測定した被着材のひずみを示す．縦軸は引張荷重であり．横軸は SLJ に貼り付けたひずみゲージから得られた値である．本研究ではひずみゲージを SLJ の接着層端部に貼り付けたため，ここでのひずみは引張りによる正のひずみと曲げ変形による圧縮の曲げひずみが足し合わされたひずみとなる．

CFRP の剛性が高い SLJ ほど同一荷重下での A2017 の圧縮ひずみが小さくなった．これにより，CFRP の剛性の違いは A2017 のひずみに大きく影響を与えることが分かった．

CFRP の剛性が低下すると CFRP は引張りによるひずみの割合が大きくなった．

式(15)を用いて曲げひずみ $\varepsilon_b$ を算出し，図 37 に示した． $\varepsilon$ がひずみゲージから得られた全体のひずみ， $\sigma$ が荷重を断面積 37.5 mm<sup>2</sup>で除した垂直応力， $E$  は材料の引張り弾性率である．

全ての試験片において荷重の増加とともに曲げひずみは増加した．CFRP の曲げ弾性率の差異が少ない SLJ は，両被着材が同じ挙動を示した．CFRP の曲げ弾性率の値が A2017 に近いほど，両被着材の曲げひずみの差は小さくなった．また，[0<sub>2</sub>/90<sub>16</sub>/0<sub>2</sub>]-A2017 ではある荷重以上で，ひずみの増加割合が増す傾向を示した．これは，被着材の塑性変形や割れが生じたためであると考えられる．

$$\varepsilon_b = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (15)$$

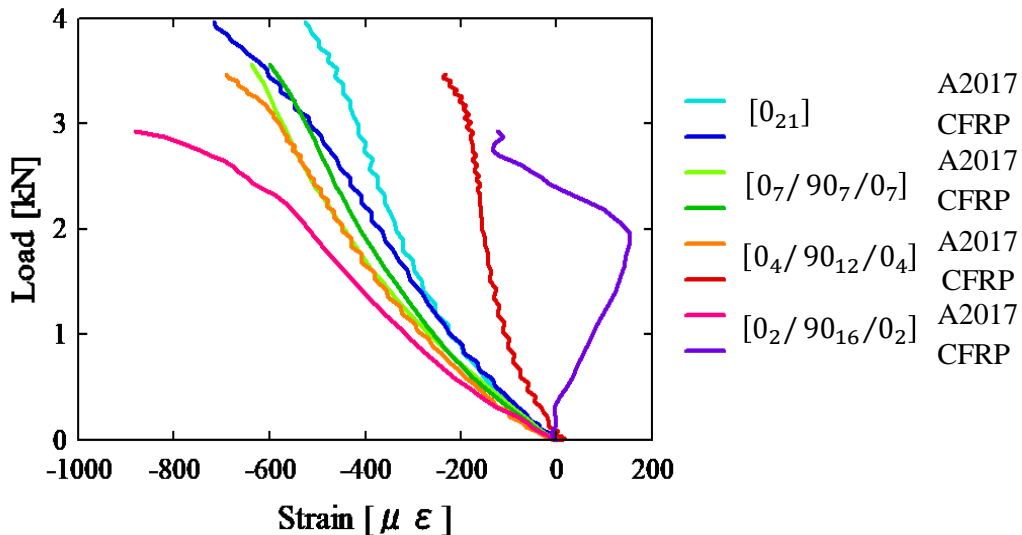


図 36 荷重とひずみの関係

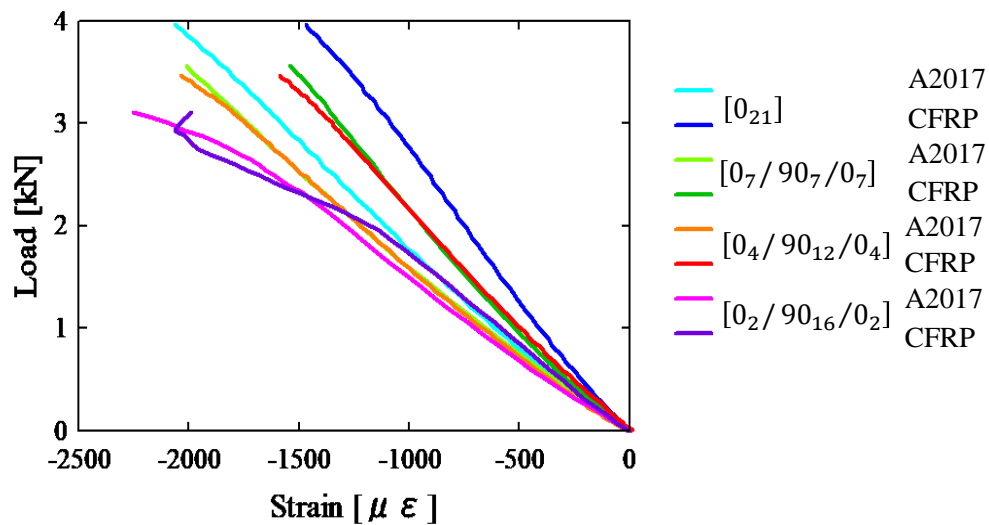


図 37 荷重と曲げひずみの関係

#### 4.4 破面観察

試験片の破面を図 38 に示す。全ての試験片で A2017 と接着剤との界面破壊が支配的であった。しかし、CFRP の剛性が低下するほど、A2017 に付着する接着剤の面積が増加した。よって、被着体の剛性の変化によって破壊形態が変化すると考えられる。

さらに、 $[0_2/90_{16}/0_2]$ -A2017 の A2017 に付着した接着剤に CFRP の繊維を確認できたことから、 $[0_2/90_{16}/0_2]$ -A2017 では、CFRP 自体での破壊が生じたと考えられる。

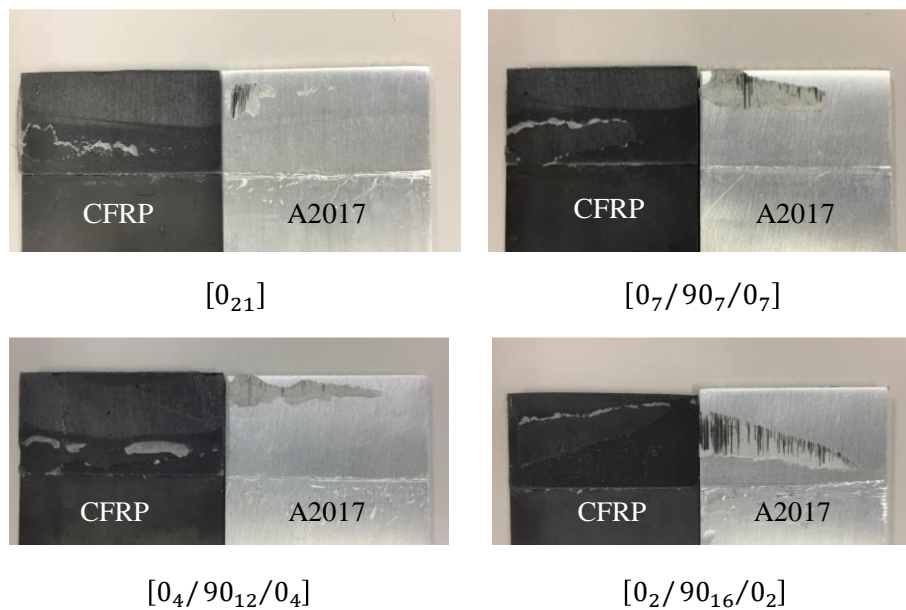


図 38 破面観察

## 第 5 章 有限要素解析

### 5.1 解析条件

本研究では、汎用有限要素解析ソフト ANSYS を用いて継手の二次元応力解析を行った。要素は二次元四接点要素を使用した。SLJ の接着層の応力分布を調査し、エネルギー解放率を算出した。

解析の際に入力した各被着材の材料定数を表 7 と表 8 に示す。表 7 の Araldite2011 の  $\sigma_y$ ,  $\sigma_f$ ,  $\varepsilon_f$  と表 8 における  $G_{xy}$  の値は参考文献の値<sup>(6)(7)</sup>であり、その他は実測値に基づいている。図 39 に解析時のモデルを示す。試験片の寸法は図 26 で示した寸法である。また、被着材の CFRP 部分は図 40 に示すように  $0^\circ$  層,  $90^\circ$  層それぞれを積層したモデルとした。各厚さについては、全体の積層枚数から  $90^\circ$  層の枚数が占める割合を求め、試験片の厚さ 1.5 mm に占める  $90^\circ$  層の厚さを算出した。

表 7 A2017 と Araldite2011 の材料定数

	A2017	Araldite2011
Tensile modulus $E$ [GPa]	68.7	1.37
Poisson's ratio $\nu$	0.35	0.37
Yield stress $\sigma_y$ [MPa]	298	24.5
Failure stress $\sigma_f$ [MPa]	396	31.7
Failure strain $\varepsilon_f$ [%]	19.5	20

表 8 一方向積層板の材料定数

$E_x$ [GPa]	141
$E_y$ [GPa]	9.92
$E_z$ [GPa]	9.92
$\nu_{xy}$	0.382
$\nu_{yz}$	0.382
$\nu_{xz}$	0.382
$G_{xy}$ [GPa]	4.36
$G_{yz}$ [GPa]	2.52
$G_{xz}$ [GPa]	4.36

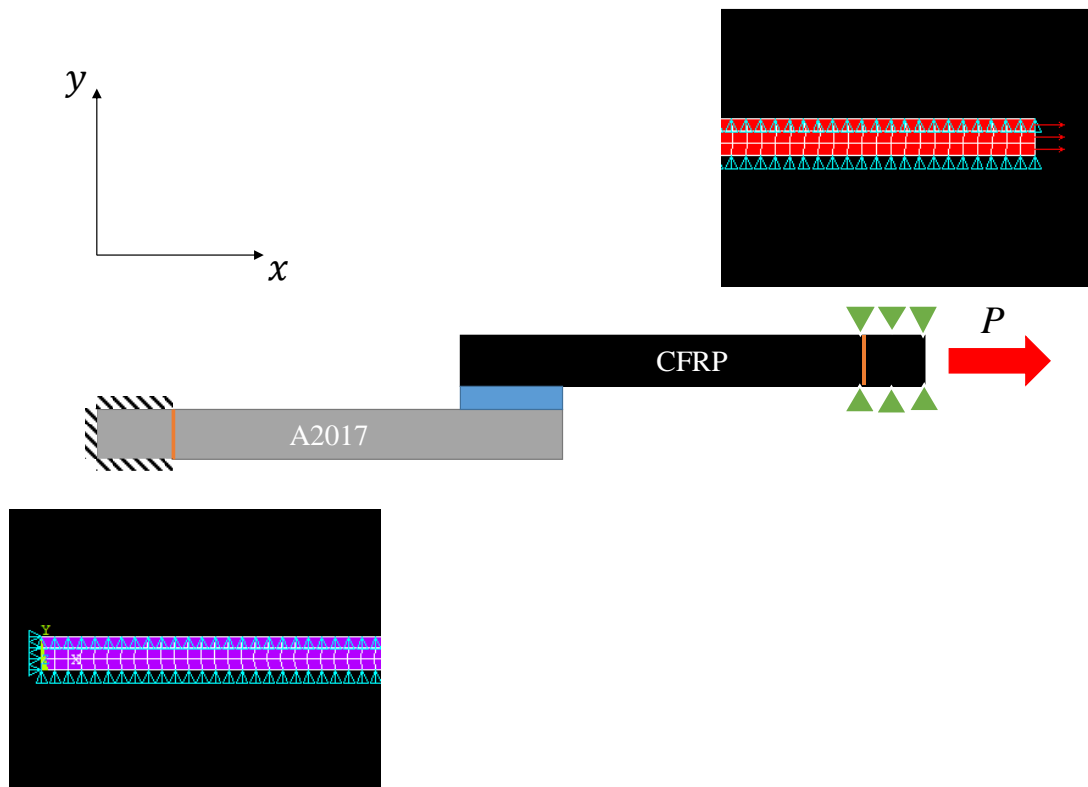


図 39 解析モデルの概略図

応力分布における要素の分割を図 40 に示す．分割サイズは被着材を 0.6 mm で分割し，接着層を 0.0667 mm で分割した．また，Araldite2011 と A2017 は非線形挙動と仮定し，SLJ の幾何学的非線形も考慮した．荷重  $P$  を 2000 N 負荷した際の接着層の応力分布について調査した．

エネルギー解放率算出のために VCCT 法を用いた．各材料は線形弾性体であると仮定し，解析を行った．また，破面観察より全ての試験片で A2017 と接着剤との界面破壊が支配的であったため，A2017 界面の接着層の左端から 0.1 mm の位置にき裂先端を定義し，荷重  $P$  を 1000 N 負荷，その際のエネルギー解放率  $G_I$ ， $G_{II}$  を求めた．要素の分割サイズは接着層を 0.0667 mm，被着材を 0.6 mm で分割し，き裂先端は 0.025 mm で分割した(図 41)．

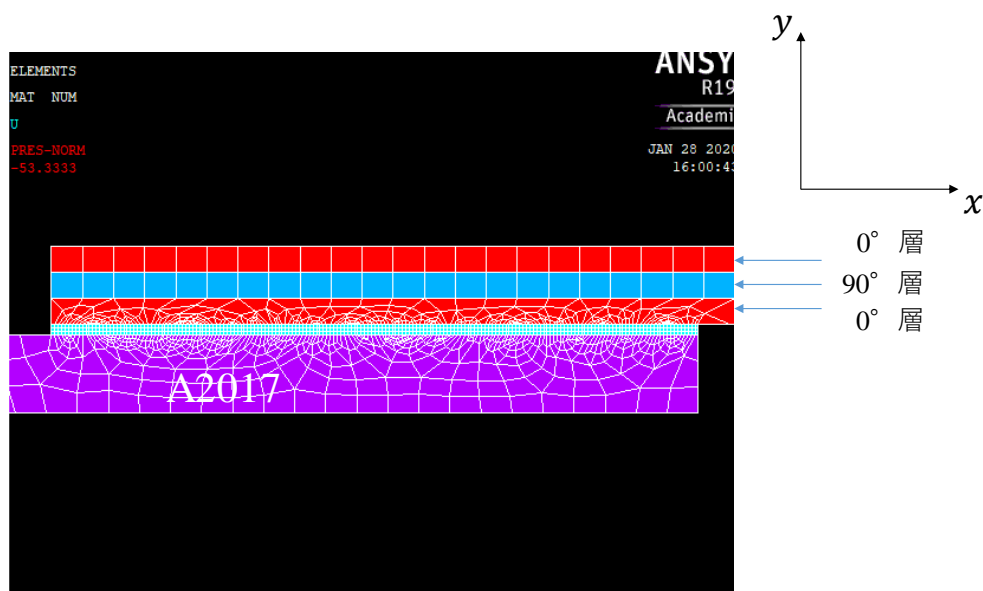


図 40 応力分布の際の $[0_7/90_7/0_7]$ -A2017 の接着層

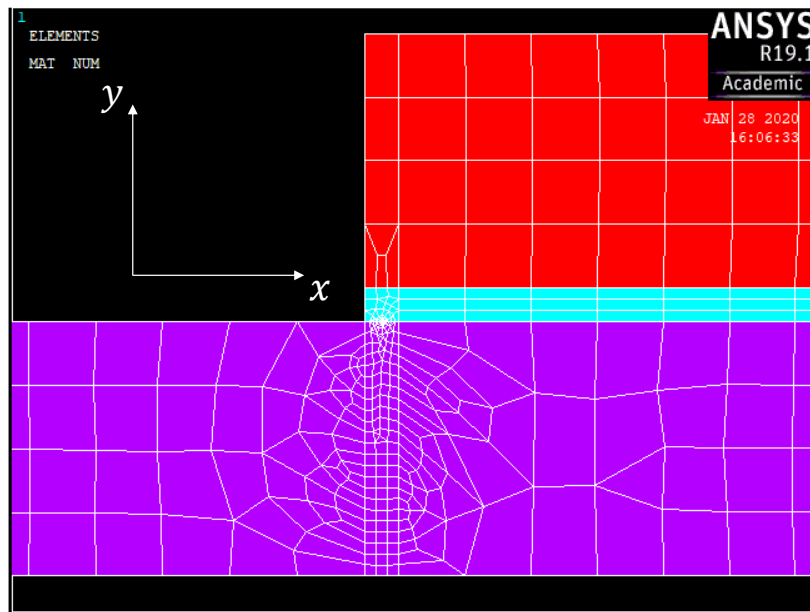


図 41 エネルギー解放率算出の際のき裂先端部

## 5.2 解析結果

図 42 に  $P = 2000 \text{ N}$  負荷した際の  $[0_{21}]$ -A2017 と  $[0_2/90_{16}/0_2]$ -A2017 の変形のコンター図を示す．変形量の大きい箇所が赤色で示されている． $[0_{21}]$  は剛性が高いため，A2017 より変形量が小さいのに対し， $[0_2/90_{16}/0_2]$  は剛性が低いため，A2017 よりも大きく変形しているのが分かる．

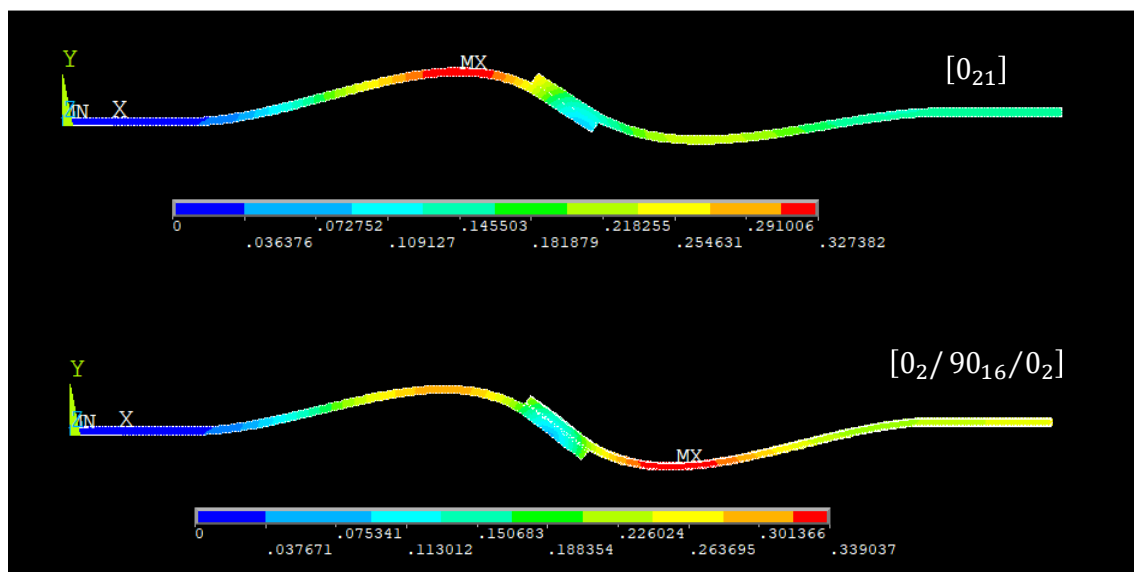


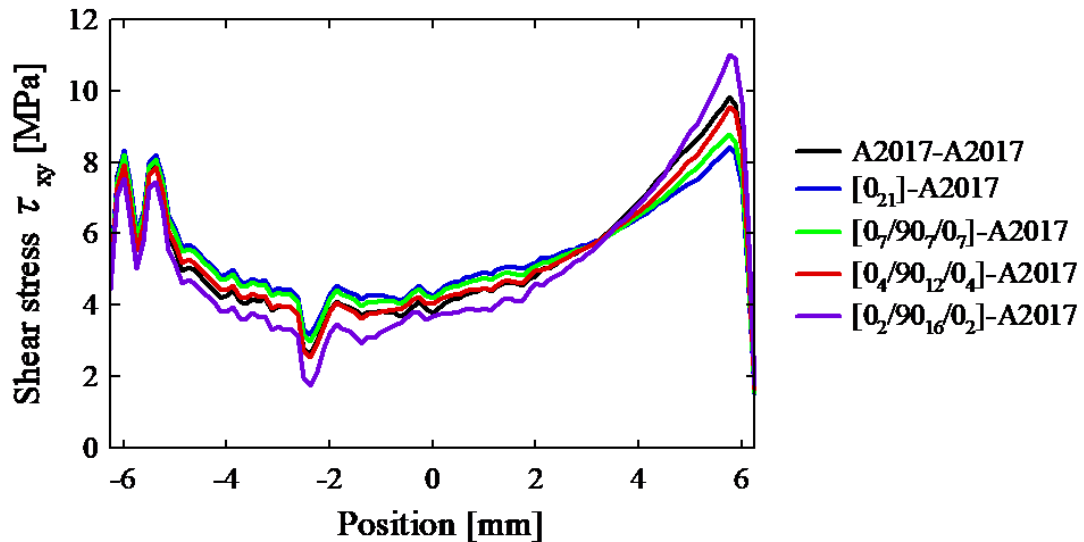
図 42 変形のコンター図

図 43 は  $P = 2000 \text{ N}$  負荷した際の各 SLJ のせん断応力分布を示している。縦軸はせん断応力  $\tau_{xy}$ ，横軸は接着層の位置を表しており，接着長さ中心を 0 としている。(a)と(b)は各被着材の接着界面における分布を表しており，(c)は接着厚さ 0.2 mm の中心位置の 0.1 mm の位置での分布となっている。比較対象として両被着体を A2017 とした SLJ の結果を黒色で示している。

図 43(a)，(b)は，異種材料界面のため応力特異点となり有意義なデータとはならないが，(a)で  $[0_4/90_{12}/0_4]$ -A2017 は A2017-A2017 と挙動がほぼ一致した。これは， $[0_4/90_{12}/0_4]$ と A2017 の引張り弾性率が近い値であるためと考えられる。両被着材の曲げ弾性率が近い  $[0_2/90_{16}/0_2]$ -A2017 は右端でのせん断応力の値は他の SLJ に比べ大きくなり， $[0_{21}]$ -A2017 では小さくなった。

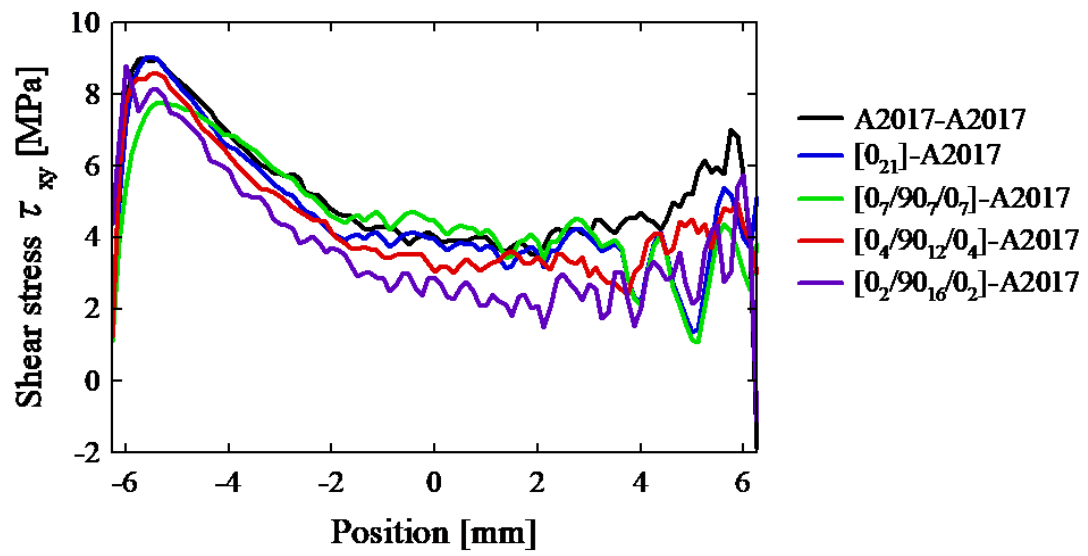
図 43(c)においても，(a)と同様に  $[0_4/90_{12}/0_4]$ -A2017 と A2017-A2017 の挙動はほぼ一致した。表 9 に(c)における各 SLJ の左端，右端でのせん断応力の最大値を示した。CFRP の剛性が低くなるにつれ，左端のせん断応力の最大値は減少し，右端での最大値が増加した。これにより応力集中が起き，継手強度が低下したと考えられる。CFRP と A2017 の引張り弾性率が近いと左端と右端のせん断応力の最大値の差が少なかった。

以上のことより，接着層のせん断応力は被着材の引張り弾性率に強く依存し，引張り弾性率の高い被着材を使用することは，応力集中の低減を可能とし，効果的であると考えられる。

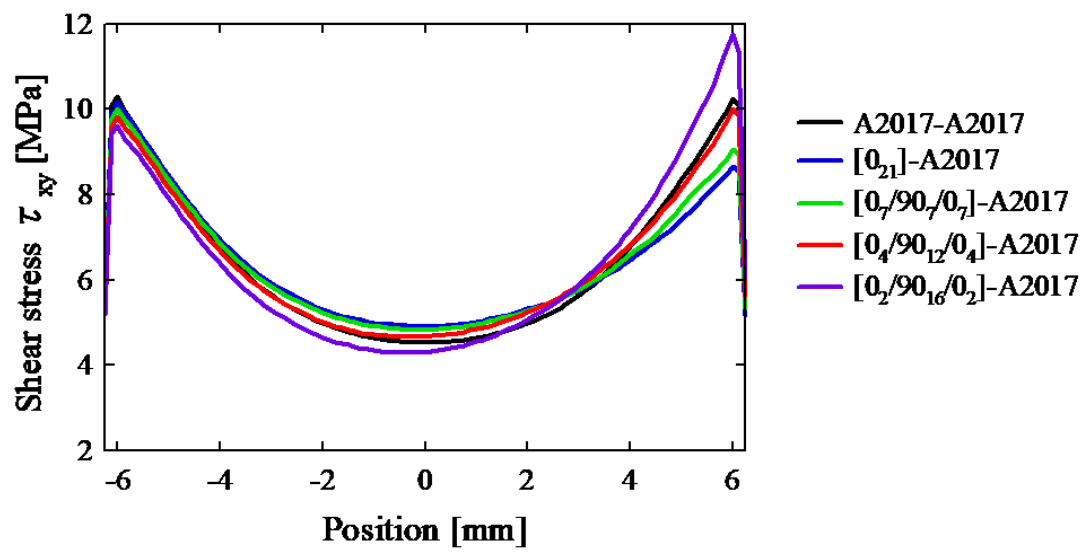


(a) A2017 界面





(b) CFRP 界面



(c) 接着厚さ中心

図 43 セン断応力分布

表 9 (c)における各 SLJ のせん断応力の最大値[MPa]

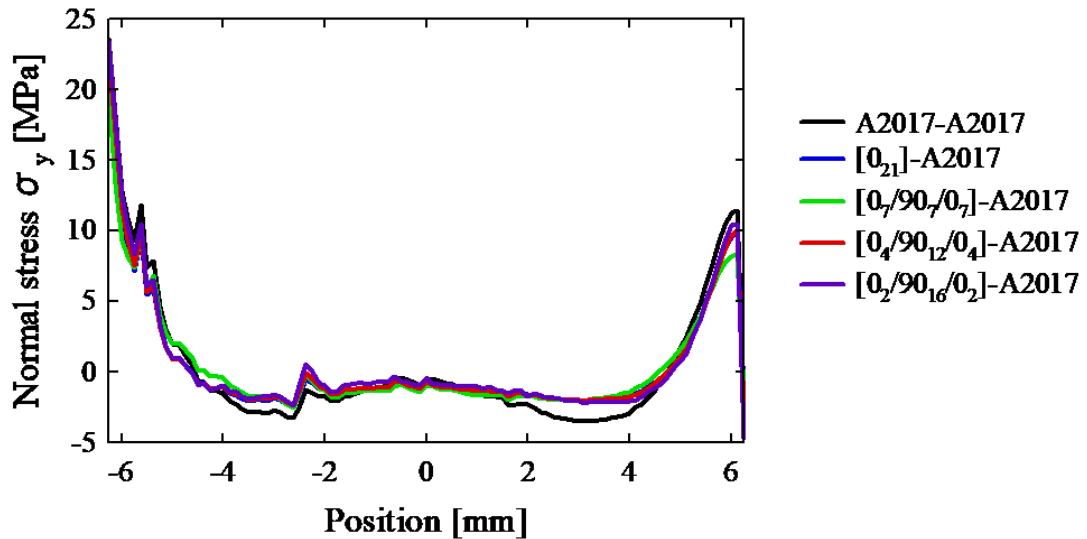
	A2017 side	CFRP side
A2017-A2017	10.3	
[0 <sub>21</sub> ]-A2017	10.2	8.65
[0 <sub>7</sub> /90 <sub>7</sub> /0 <sub>7</sub> ]-A2017	10.0	9.05
[0 <sub>4</sub> /90 <sub>12</sub> /0 <sub>4</sub> ]-A2017	9.81	10
[0 <sub>2</sub> /90 <sub>16</sub> /0 <sub>2</sub> ]-A2017	9.61	11.8

図 44 は垂直応力 $\sigma_y$ の分布を表しており、縦軸は垂直応力 $\sigma_y$ 、横軸は図 43 と同様である。

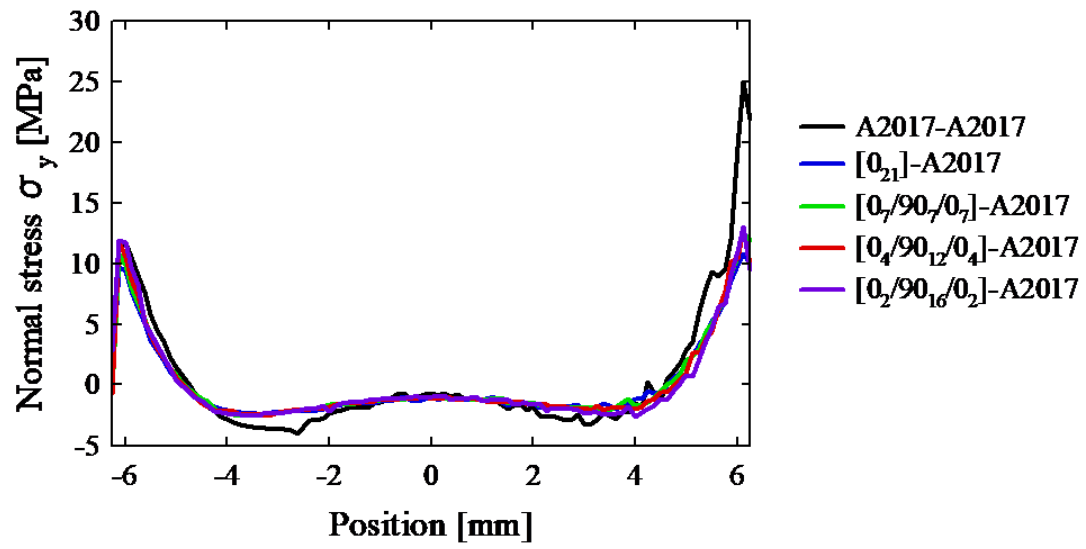
図 44(a), (b)は図 43 同様応力特異点となるため解が収束せず、有意義なデータとはならなかった。

図 44(c)での各 SLJ の左端、右端の垂直応力の最大値を表 10 に示す。CFRP の剛性が低下すると両端で垂直応力の最大値は高くなった。垂直応力ははく離応力として作用するため、被着材の曲げ弾性率に影響を受けることが予想される。[0<sub>2</sub>/90<sub>16</sub>/0<sub>2</sub>]は A2017 と曲げ剛性が近い値を示すため、[0<sub>2</sub>/90<sub>16</sub>/0<sub>2</sub>]-A2017 で両端での垂直応力の最大値が A2017-A2017 と近い値となったと考えられる。

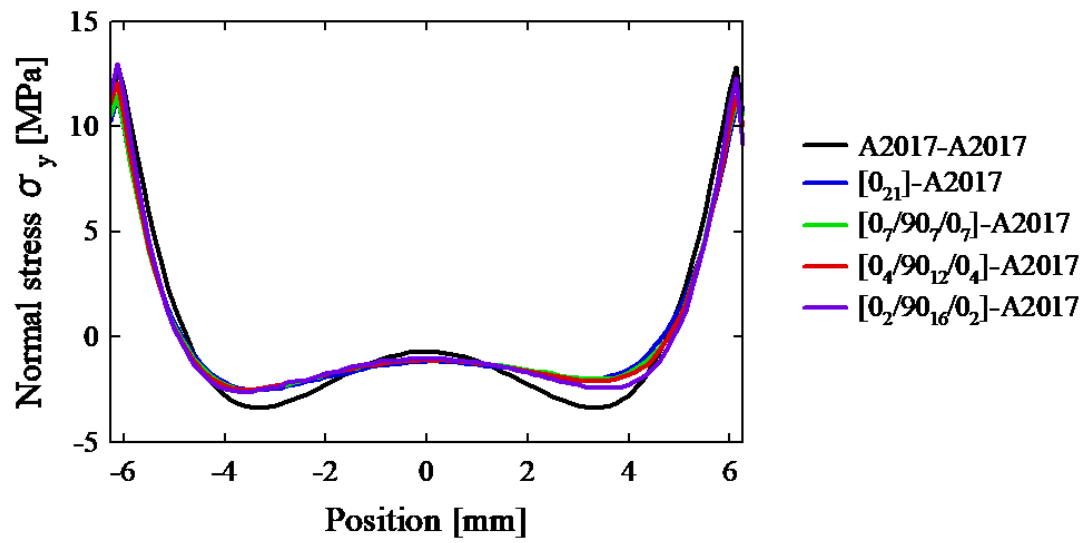
以上のことより、接着層の垂直応力は被着材の曲げ剛性に影響を受け、曲げ剛性を高くすることは両端での垂直応力の最大値を低下することに繋がると考えられる。



(a) A2017 界面



(b) CFRP 界面



(c) 接着厚さ中心

図 44 垂直応力分布

表 10 (c)における各 SLJ の垂直応力の最大値[MPa]

	A2017 side	CFRP side
A2017-A2017	12.9	
[0 <sub>21</sub> ]-A2017	11.5	10.9
[0 <sub>7</sub> /90 <sub>7</sub> /0 <sub>7</sub> ]-A2017	11.5	11.1
[0 <sub>4</sub> /90 <sub>12</sub> /0 <sub>4</sub> ]-A2017	12.1	11.4
[0 <sub>2</sub> /90 <sub>16</sub> /0 <sub>2</sub> ]-A2017	13.0	12.3

図 45 に VCCT 法により求めた各 SLJ のエネルギー解放率 $G_I$ ,  $G_{II}$ を示した.

全ての SLJ において $G_I$ の割合が大きくなったことから, SLJ の継手破壊において支配的となるのは開口型のモード I であると考えられる.

$G_I$ において, CFRP を被着材に用いることでエネルギー解放率は増加した. また, CFRP の中でも CFRP の剛性が低い SLJ で大きい値を示した.  $G_{II}$ では CFRP を被着材に用いることでエネルギー解放率は低くなった. CFRP の中では剛性の違いによる変化はごく僅かなものであった.

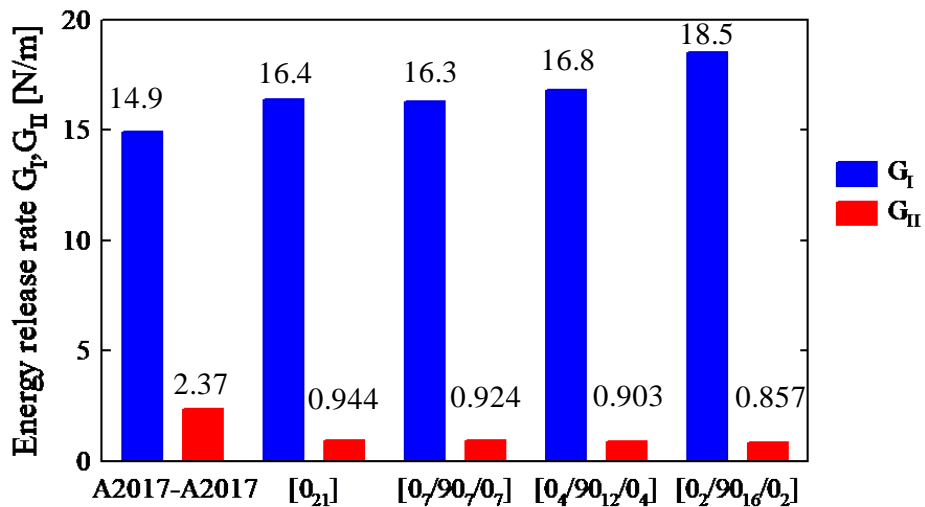


図 45 エネルギー解放率

解析結果より, SLJ において一方の被着材の剛性を高くすることは, 接着層のせん断応力の応力集中を緩和し, 両端での垂直応力の最大値を減少させることを可能にすることが分かった. そして, エネルギー解放率においても CFRP の剛性を高くすることは効果的であると分かった. これは, CFRP の剛性の高い SLJ で破断強度が高くなるという実験結果を示唆するものである.

## 第 6 章 結言

本研究では、被着材にアルミニウム合金 A2017 と CFRP を用いた異種材料接着 SLJ の強度特性に及ぼす CFRP の剛性の影響について調査を行った。静的引張り試験による破断強度、被着材の変形(ひずみ)、破面観察という実験的評価と有限要素解析より得た各 SLJ の応力分布とエネルギー解放率という解析的評価から剛性の違いが継手強度にどのような影響を及ぼすのかを考察した。得られた結果を以下に示す..

- (1)A2017 と CFRP の SLJ において、CFRP の引張り弾性率が大きいほど破断強度は大きくなった。
- (2)SLJ の引張りにおいて CFRP の剛性が高いほど、A2017 のひずみが小さくなった。また、 $[0_2/90_{16}/0_2]$ の曲げひずみはある平均せん断応力を超えるとひずみの増加割合が増した。これは、被着材の塑性変形や割れが生じたためであると考えられる。
- (3)破断した SLJ の破面観察より、A2017 と接着剤との界面破壊が支配的であった。CFRP の剛性が低下するにつれ、A2017 に付着する接着剤の割合が増加した。これは CFRP の層間割れによるものであった。
- (4)応力分布より、接着層のせん断応力は被着材の引張り弾性率が大きくなると端部での応力集中は緩和された。CFRP の曲げ弾性率が高くなると両端での垂直応力の最大値が減少した。
- (5)各 SLJ のエネルギー解放率は、 $G_I$ が支配的であり、 $G_I$ は CFRP の剛性が小さくなると大きくなった。 $G_{II}$ では、CFRP の剛性の違いによる変化はごく僅かであった。

## 第 7 章 謝辞

本研究を進めるにあたり，助言や丁寧な指導をして下さった楠川量啓教授，高坂達郎准教授に心より深く感謝いたします。

また，実験などご協力いただきました横山遥大氏，ならびに材料強度学研究室の皆様  
にこの場を借りて感謝の意をお伝え申し上げます。

・参考文献

- (1)つくる立場から見た複合材料入門 大谷杉郎  
株式会社裳華房, 1995
- (2)炭素繊維複合化時代への挑戦 -炭素繊維複合材料の入門～先端産業部材への応用-  
井塚淑夫  
株式会社繊維社企画出版 2012
- (3)基礎からわかる FRP - 繊維強化プラスチックの基礎から実用まで-  
強化プラスチック協会編  
コロナ社, 2016
- (4)応用有限要素解析  
川井忠彦監訳, 菊池恒夫, 風間悦夫, 川端康洋共訳  
丸善株式会社 1992
- (5)ANSYS Help 第2章破壊パラメータの計算タイプ 2.6 VCCT エネルギー解放率の計算
- (6)Influence of the Adhesive, the Adherend and the Overlap on the Single Lap Shear Strength  
Lucas F M da Silva, J E Ramos, M V Figueiredo, and T R Strohaecker  
Journal of Adhesion and Interface Vol7, No4, 2006
- (7)Golf club shaft  
Satoshi SHIMONO, Takashi KANEKO  
US Patent App 2015
- (8)シングルラップ接着接合の理論解析とはく離によるエネルギー解放率  
坂本貴大, 石川敏之  
土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.72, No.2(応用力学論文集 Vol.19), 2016, I\_653-I\_662
- (9)3点曲げ試験による積層 CFRP の面外方向引張弾性率  
原栄一, 横関智弘, 八田博志, 岩堀豊, 石川隆司  
日本複合材料学会誌, 39, 5(2013), 184-192

(10) THE MECHANICS OF ADHESIVES IN COMPOSITE AND METAL JOINTS

Finite Element Analysis with ANSYS

Magd Abdel Wahab, Ph.D.

DEStech Publications, Inc.

(11) 破壊力学について～(1)破壊力学の基本事項～ 岡田裕

Mechanical CAE NEWS Vol.26

(12) 破壊力学について～(2)有限要素法による破壊力学解析～ 岡田裕

Mechanical CAE NEWS Vol.26

(13) 構造解析技術者のための複合材料入門(1)～複合材料の概要と力学的特性(直交異方性材料の力学)～ 平山紀夫

Mechanical CAE NEWS Vol.26

(14) 構造解析技術者のための複合材料入門(2)～積層板の力学的挙動と FEM 解析における留意点～ 平山紀夫

Mechanical CAE NEWS Vol.26

(15) 入門 複合材料の力学

日本複合材料学会監修 末益博志編著

株式会社培風館 2009

(16) 一方向炭素繊維強化樹脂積層板および金属材料の被着体を有する単純重ね合わせ接着継手の引張せん断強度特性

志村穰, 伊藤惇, 林丈晴, 黒崎茂

東京工業高等専門学校研究報告書 第 47 号, 2015, p25-30

(17) 引張荷重下における CFRP/Aluminum alloy 単純重ね合わせ接着継手の有限要素応力解析  
小坂典嵩, 志村穰, 黒崎茂

東京工業高等専門学校研究報告書 第 42(2)号, 2011, p99-104

(18) A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends

Adnan Ozel, Betul Yazici, Salih Akpınar, Murat Demir Aydın, Semsettin Temiz

Composites: Part B 62 (2014) 167–174



・ 付録(ANSYS コマンド)

応力分布

A2017-A2017

tadv=0.2	TBPT,DEFI,3.57e-3,236
tadh=1.5	TBPT,DEFI,4.3e-3,265
l0=12.5	TBPT,DEFI,5.6e-3,290
lt=100	TBPT,DEFI,7.3e-3,300
delta=tadv/8	TBPT,DEFI,9.81e-3,311
wt=25	
	K,1,0,0,0
e1=1370	K,2,25,0,0
nu1=0.37	K,3,lt,0,0
sy=24.5	KGEN,2,1,3,1,,tadh,,3
sf=31.7	K,7,lt-l0,tadh
stf=0.2	KGEN,2,6,7,1,,tadv,,2
	K,10,162.5,tadh+tadv
e2=68.7e3	K,11,187.5,tadh+tadv
nu2=0.35	KGEN,2,9,11,1,,tadh,,3
/PREP7	A,1,2,3,6,7,5,4
ET,1,182	A,7,6,8,9
	A,9,8,10,11,14,13,12
MP,ex,1,e1	
MP,nuxy,1,nu1	ESIZE,3*tadv
TB,PLASTIC,1,,,MISO	AESIZE,2,tadv/3
TBPT,defi,0,7.5	
TBPT,defi,sy/e1,sy	MAT,1
TBPT,defi,sy/e1+stf,sf	AMESH,2
	MAT,2
MP,ex,2,e2	AMESH,1,3,2
MP,nuxy,2,nu2	EPLOT
TB,PLASTIC,2,,,MISO	FINISH
TBPT,DEFI,0,200	

	FINI
/SOLU	/POST1
KSEL,s,loc,x,0	/DSCALE,1,AUTO
KSEL,r,loc,y,0	PLDISP,0
DK,all,all	
KSEL,s,loc,x,25	PATH,alad,,100
KSEL,r,loc,y,0	PPATH,1,,87.5,1.5,,
DK,all,uy	PPATH,2,,100,1.5,,X
DL,1,,UY,0	PATH,cfad,,100
DL,7,,UX,0	PPATH,1,,87.5,1.7,,
DL,6,,UY,0	PPATH,2,,100,1.7,,X
DL,12,,UY,0	
DL,14,,UY,0	
SFL,13,pres,-2000/(tadh*wt)	
NLGEOM,on	
LNSRCH,on	
KSEL,all	
LSEL,all	
NSEL,all	
TIME,1	
KBC,0	
KSEL,all	
LSEL,all	
AUTOS,on	
DELTIM,0.1,0.01,0.1	
OUTRES,all,all	
OUTPR,all,all	
SOLVE	

[0 <sub>21</sub> ]-A2017	MP,ex,2,e2
	MP,nuxy,2,nu2
tadv=0.2	TB,PLASTIC,2,,,,MISO
tadh=1.5	TBPT,DEFI,0,200
l0=12.5	TBPT,DEFI,3.57e-3,236
lt=100	TBPT,DEFI,4.3e-3,265
delta=tadv/8	TBPT,DEFI,5.6e-3,290
wt=25	TBPT,DEFI,7.3e-3,300
	TBPT,DEFI,9.81e-3,311
e1=1370	
nu1=0.37	
sy=24.5	MP,ex,3,ec1
sf=31.7	MP,ey,3,ec3
stf=0.2	MP,ez,3,ec2
	MP,prxy,3,nu12
e2=68.7e3	MP,prxz,3,nu12
nu2=0.35	MP,pryz,3,nu23
	MP,gxy,3,g12
ec1=141e3	MP,gxz,3,g12
ec2=9.92e3	MP,gyz,3,g23
ec3=9.92e3	
nu12=0.382	K,1,0,0,0
nu23=0.382	K,2,25,0,0
g12=4.36e3	K,3,lt,0,0
g23=2.516e3	KGEN,2,1,3,1,,tadh,,3
	K,7,lt-l0,tadh
/PREP7	KGEN,2,6,7,1,,tadv,,2
ET,1,182	K,10,162.5,tadh+tadv
	K,11,187.5,tadh+tadv
MP,ex,1,e1	KGEN,2,9,11,1,,tadh,,3
MP,nuxy,1,nu1	
TB,PLASTIC,1,,,,MISO	A,1,2,3,6,7,5,4
TBPT,defi,0,7.5	A,7,6,8,9
TBPT,defi,sy/e1,sy	A,9,8,10,11,14,13,12
TBPT,defi,sy/e1+stf,sf	

ESIZE,3*tadv	TIME,1
AESIZE,2,tadv/3	KBC,0
MAT,1	KSEL,all
AMESH,2	LSEL,all
MAT,2	
AMESH,1	AUTOS,on
MAT,3	DELTIM,0.1,0.01,0.1
AMESH,3	OUTRES,all,all
	OUTPR,all,all
EPLOT	
FINISH	SOLVE
	FINI
/SOLU	
KSEL,s,loc,x,0	/POST1
KSEL,r,loc,y,0	/DSCALE,1,AUTO
DK,all,all	PLDISP,0
KSEL,s,loc,x,25	PATH,alad,,100
KSEL,r,loc,y,0	PPATH,1,,87.5,1.5,,
DK,all,uy	PPATH,2,,100,1.5,,X
DL,1,,UY,0	PATH,cfad,,100
DL,7,,UX,0	PPATH,1,,87.5,1.7,,
DL,6,,UY,0	PPATH,2,,100,1.7,,X
DL,12,,UY,0	
DL,14,,UY,0	
SFL,13,pres,-2000/(tadh*wt)	
KSEL,all	
LSEL,all	
NSEL,all	
NLGEOM,on	
LNSRCH,on	

[0<sub>7</sub>/90<sub>7</sub>/0<sub>7</sub>]-A2017

/PREP7

ET,1,182

tadv=0.2

tadh=1.5

l0=12.5

lt=100

delta=tadv/8

wt=25

MP,ex,1,e1

MP,nuxy,1,nu1

TB,PLASTIC,1,,,MISO

TBPT,defi,0,7.5

TBPT,defi,sy/e1,sy

TBPT,defi,sy/e1+stf,sf

e1=1370

nu1=0.37

sy=24.5

sf=31.7

stf=0.2

MP,ex,2,e2

MP,nuxy,2,nu2

TB,PLASTIC,2,,,MISO

TBPT,DEFI,0,200

TBPT,DEFI,3.57e-3,236

TBPT,DEFI,4.3e-3,265

TBPT,DEFI,5.6e-3,290

TBPT,DEFI,7.3e-3,300

TBPT,DEFI,9.81e-3,311

e2=68.7e3

nu2=0.35

ec1=141e3

ec2=9.92e3

ec3=9.92e3

nu12=0.382

nu23=0.382

g12=4.36e3

g23=2.516e3

MP,ex,3,ec1

MP,ey,3,ec3

MP,ez,3,ec2

MP,prxy,3,nu12

MP,prxz,3,nu12

MP,pryz,3,nu23

MP,gxy,3,g12

MP,gxz,3,g12

MP,gyz,3,g23

ec4=9.92e3

ec5=141e3

ec6=141e3

nu212=0.382

nu223=0.382

g212=2.516e3

g223=4.36e3

MP,ex,4,ec4

MP,ey,4,ec5

MP,ez,4,ec6

MP,nuxy,4,nu212

MP,nuxz,4,nu212

MP,nuyz,4,nu223

MP,gxy,4,g212

MP,gxz,4,g212

MP,gyz,4,g223

K,1,0,0,0

K,2,25,0,0

K,3,lt,0,0

KGEN,2,1,3,1,,tadh,,3

K,7,lt-10,tadh

KGEN,2,6,7,1,,tadv,,2

K,10,162.5,tadh+tadv

K,11,187.5,tadh+tadv

KGEN,2,9,11,1,,0.5,,3

KGEN,2,12,14,1,,0.5,,3

KGEN,2,15,17,1,,0.5,,3

A,1,2,3,6,7,5,4

A,7,6,8,9

A,9,8,10,11,14,13,12

A,12,13,14,17,16,15

A,15,16,17,20,19,18

ESIZE,3\*tadv

AESIZE,2,tadv/3

MAT,1

AMESH,2

MAT,2

AMESH,1

MAT,3

AMESH,3

AMESH,5

MAT,4

AMESH,4

EPLOT

FINISH

/SOLU

KSEL,s,loc,x,0

KSEL,r,loc,y,0

DK,all,all

KSEL,s,loc,x,25

KSEL,r,loc,y,0

DK,all,uy

DL,1,,UY,0

DL,7,,UX,0

DL,6,,UY,0

DL,12,,UY,0

DL,22,,UY,0

SFL,13,pres,-2000/(tadh\*wt)

SFL,17,pres,-2000/(tadh\*wt)

SFL,21,pres,-2000/(tadh\*wt)

KSEL,all

LSEL,all

NSEL,all

NLGEOM,on

LNSRCH,on

TIME,1

KBC,0

KSEL,all

LSEL,all

AUTOS,on	PLDISP,0
DELTIM,0.1,0.01,0.1	
OUTRES,all,all	PATH,alad,,,100
OUTPR,all,all	PPATH,1,,87.5,1.5,,
	PPATH,2,,100,1.5,,X
SOLVE	
FINI	PATH,cfad,,,100
	PPATH,1,,87.5,1.7,,
/POST1	PPATH,2,,100,1.7,,X
/DSCALE,1,AUTO	

$[0_4/90_{12}/0_4]$ -A2017 と  $[0_2/90_{16}/0_2]$ -A2017 は  $0^\circ$  と  $90^\circ$  の厚みを変更するのみのため省略

## VCCT 法によるエネルギー解放率

A2017-A2017

tadv=0.2	K,14,11,tadh
tadh=1.5	KGEN,2,9,12,1,,tadv,,6
l0=12.5	K,19,11+l0-a,tadh+tadv
lt=100	K,20,11+l0,tadh+tadv
wt=25	K,21,162.5,tadh+tadv
l1=lt-l0	K,22,187.5,tadh+tadv
a=0.1	
delta=tadv/8	KGEN,2,15,18,1,,tadh,,8
	K,27,162.5,2*tadh+tadv
e1=1370	K,28,187.5,2*tadh+tadv
nu1=0.37	
	A,1,2,3,9,8,7
e2=68.7e3	A,3,4,10,13,9
nu2=0.35	A,4,5,11,10
	A,5,6,12,11
/PREP7	A,14,13,10,16,15
ET,1,182,,,2	A,10,11,17,16
	A,11,12,18,19,17
MP,ex,1,e1	A,15,16,24,23
MP,nuxy,1,nu1	A,16,17,25,24
	A,17,19,20,26,25
MP,ex,2,e2	A,20,21,22,28,27,26
MP,nuxy,2,nu2	
	KSCON,13,delta,1
K,1,0,0,0	KSCON,19,delta,1
k,2,25,0,0	
K,3,11,0	AESIZE,5,tadv/3
K,4,11+2*a,0	AESIZE,7,tadv/3
K,5,11+l0-2*a,0	AESIZE,2,tadv/3
K,6,11+l0,0	AESIZE,10,tadv/3
KGEN,2,1,6,1,,tadh,,6	ESIZE,2*tadv
K,13,11+a,tadh	MAT,1



AMESH,5,7,1  
MAT,2  
AMESH,1,4,1  
AMESH,8,11,1  
EPLOT  
FINISH

/SOLU

KSEL,s,loc,x,0  
KSEL,r,loc,y,0  
DK,all,all

KSEL,s,loc,x,25  
KSEL,r,loc,y,0  
DK,all,uy

DL,1,,UY,0  
DL,6,,UX,0  
DL,5,,UY,0  
DL,35,,UY,0  
DL,37,,UY,0

SFL,36,PRES,-1000/(tadh\*wt)

NSEL,all  
KSEL,all  
LSEL,all

NLGEOM,on  
LNSRCH,on

TIME,1  
KBC,0

KSEL,all  
LSEL,all

AUTOS,on  
DELTIM,0.1,0.01,0.1

OUTRES,all,all  
OUTPR,all,all

NSEL,s,node,,2

CM,cracktip,NODE  
CMSEL,A,cracktip,NODE  
NSEL,all

CINT,NEW,1  
CINT,TYPE,VCCT  
CINT,CTNC,cracktip  
CINT,SYMM,OFF  
CINT,NORM,,

/SOL  
/STATUS,SOLU

SOLVE  
FINI  
\*GET,G1\_ANSYS,CINT,1,CTIP,2,,,DTYPE,G  
1  
\*GET,G2\_ANSYS,CINT,1,CTIP,2,,,DTYPE,G  
2

/POST1  
/DSCALE,1,AUTO  
PLDISP,1

[0<sub>21</sub>]-A2017

tadv=0.2

tadh=1.5

l0=12.5

lt=100

l1=lt-l0

a=0.1

delta=tadv/8

wt=25

e1=1370

nu1=0.37

e2=68.7e3

nu2=0.35

ec1=141e3

ec2=9.92e3

ec3=9.92e3

nu12=0.382

nu23=0.382

g12=4.36e3

g23=2.516e3

/PREP7

ET,1,182

MP,ex,1,e1

MP,nuxy,1,nu1

MP,ex,2,e2

MP,nuxy,2,nu2

MP,ex,3,ec1

MP,ey,3,ec3

MP,ez,3,ec2

MP,prxy,3,nu12

MP,prxz,3,nu12

MP,pryz,3,nu23

MP,gxy,3,g12

MP,gxz,3,g12

MP,gyz,3,g23

K,1,0,0,0

k,2,25,0,0

K,3,11,0

K,4,11+2\*a,0

K,5,11+l0-2\*a,0

K,6,11+l0,0

KGEN,2,1,6,1,,tadh,,6

K,13,11+a,tadh

K,14,11,tadh

KGEN,2,9,12,1,,tadv,,6

K,19,11+l0-a,tadh+tadv

K,20,11+l0,tadh+tadv

K,21,162.5,tadh+tadv

K,22,187.5,tadh+tadv

KGEN,2,15,18,1,,tadh,,8

K,27,162.5,2\*tadh+tadv

K,28,187.5,2\*tadh+tadv

A,1,2,3,9,8,7

A,3,4,10,13,9

A,4,5,11,10

A,5,6,12,11

A,14,13,10,16,15

A,10,11,17,16	DL,5,,UY,0
A,11,12,18,19,17	DL,35,,UY,0
A,15,16,24,23	DL,37,,UY,0
A,16,17,25,24	
A,17,19,20,26,25	SFL,36,pres,-1000/(tadh*wt)
A,20,21,22,28,27,26	
	KSEL,all
KSCON,13,delta,1	LSEL,all
KSCON,19,delta,1	NSEL,all
AESIZE,5,tadv/3	NLGEOM,on
AESIZE,7,tadv/3	LNSRCH,on
AESIZE,2,tadv/3	
AESIZE,10,tadv/3	TIME,1
ESIZE,2*tadv	KBC,0
MAT,1	
AMESH,5,7,1	KSEL,all
MAT,2	LSEL,all
AMESH,1,4,1	
MAT,3	AUTOS,on
AMESH,8,11,1	DELTIM,0.1,0.01,0.1
EPLOT	OUTRES,all,all
FINISH	OUTPR,all,all
/SOLU	NSEL,s,node,,2
KSEL,s,loc,x,0	CM,cracktip,NODE
KSEL,r,loc,y,0	CMSEL,A,cracktip,NODE
DK,all,all	NSEL,all
KSEL,s,loc,x,25	CINT,NEW,1
KSEL,r,loc,y,0	CINT,TYPE,VCCT
DK,all,uy	CINT,CTNC,CRACKTIP
	CINT,SYMM,OFF
DL,1,,UY,0	CINT,NORM,,
DL,6,,UX,0	

/SOL	[07/ 907/07]-A2017
/STATUS,SOLU	tadv=0.2
	tadh=1.5
SOLVE	l0=12.5
FINI	lt=100
*GET,G1_ANSYS,CINT,1,CTIP,2,,,DTYPE,G	l1=lt-l0
1	a=0.1
*GET,G2_ANSYS,CINT,1,CTIP,2,,,DTYPE,G	delta=tadv/8
2	wt=25
/POST1	e1=1370
/DSCALE,1,AUTO	nu1=0.37
PLDISP,1	
	e2=68.7e3
	nu2=0.35
	ec1=141e3
	ec2=9.92e3
	ec3=9.92e3
	nu12=0.382
	nu23=0.382
	g12=4.36e3
	g23=2.516e3
	ec4=9.92e3
	ec5=141e3
	ec6=141e3
	nu212=0.382
	nu223=0.382
	g212=2.516e3
	g223=4.36e3
	/PREP7
	ET,1,182

MP,ex,1,e1	K,19,11+10-a,tadh+tadv
MP,nuxy,1,nu1	K,20,11+10,tadh+tadv
	K,21,162.5,tadh+tadv
MP,ex,2,e2	K,22,187.5,tadh+tadv
MP,nuxy,2,nu2	KGEN,2,15,18,1,,0.5,,8
	K,27,162.5,tadh+tadv+0.5
MP,ex,3,ec1	K,28,187.5,tadh+tadv+0.5
MP,ey,3,ec3	KGEN,2,23,26,1,,0.5,,6
MP,ez,3,ec2	K,33,162.5,tadh+tadv+1
MP,prxy,3,nu12	K,34,187.5,tadh+tadv+1
MP,prxz,3,nu12	KGEN,2,29,32,1,,0.5,,6
MP,pryz,3,nu23	K,39,162.5,2*tadh+tadv
MP,gxy,3,g12	K,40,187.5,2*tadh+tadv
MP,gxz,3,g12	
MP,gyz,3,g23	A,1,2,3,9,8,7
	A,3,4,10,13,9
MP,ex,4,ec4	A,4,5,11,10
MP,ey,4,ec5	A,5,6,12,11
MP,ez,4,ec6	A,14,13,10,16,15
MP,nuxy,4,nu212	A,10,11,17,16
MP,nuxz,4,nu212	A,11,12,18,19,17
MP,nuyz,4,nu223	A,15,16,24,23,
MP,gxy,4,g212	A,16,17,25,24
MP,gxz,4,g212	A,17,19,20,26,25
MP,gyz,4,g223	A,20,21,22,28,27,26
	A,23,24,30,29
K,1,0,0,0	A,24,25,31,30
k,2,25,0,0	A,25,26,32,31
K,3,11,0	A,26,27,28,34,33,32
K,4,11+2*a,0	A,29,30,36,35
K,5,11+10-2*a,0	A,30,31,37,36
K,6,11+10,0	A,31,32,38,37
KGEN,2,1,6,1,,tadh,,6	A,32,33,34,40,39,38
K,13,11+a,tadh	
K,14,11,tadh	KSCON,13,delta,1
KGEN,2,9,12,1,,tadv,,6	KSCON,19,delta,1

AESIZE,5,tadv/3  
 AESIZE,7,tadv/3  
 AESIZE,2,tadv/3  
 AESIZE,10,tadv/3  
 ESIZE,2\*tadv  
 MAT,1  
 AMESH,5,7,1  
 MAT,2  
 AMESH,1,4,1  
 MAT,3  
 AMESH,8,11,1  
 AMESH,16,19,1  
 MAT,4  
 AMESH,12,15,1

/SOLU

KSEL,s,loc,x,0  
 KSEL,r,loc,y,0  
 DK,all,all

KSEL,s,loc,x,25  
 KSEL,r,loc,y,0  
 DK,all,uy

DL,1,,UY,0  
 DL,6,,UX,0  
 DL,5,,UY,0  
 DL,35,,UY,0  
 DL,57,,UY,0

SFL,36,pres,-1000/(tadh\*wt)  
 SFL,46,pres,-1000/(tadh\*wt)  
 SFL,56,pres,-1000/(tadh\*wt)

KSEL,all

LSEL,all

NSEL,all

NLGEOM,on

LNSRCH,on

TIME,1

KBC,0

KSEL,all

LSEL,all

AUTOS,on

DELTIM,0.1,0.01,0.1

OUTRES,all,all

OUTPR,all,all

NSEL,s,node,,2

CM,cracktip,NODE

NSEL,all

CINT,NEW,1

CINT,TYPE,VCCT

CINT,CTNC,CRACKTIP

CINT,SYMM,OFF

CINT,NORM,,

/SOL

/STATUS,SOLU

SOLVE

FINI

\*GET,G1\_ANSYS,CINT,1,CTIP,2,,,DTYPE,G  
 1

\*GET,G2\_ANSYS,CINT,1,CTIP,2,,,DTYPE,G  
 2

```
/POST1  
/DSCALE,1,AUTO  
PLDISP,1
```

```
EPLOT  
FINISH
```

$[0_4/90_{12}/0_4]$ -A2017 と  $[0_2/90_{16}/0_2]$ -A2017 は  $0^\circ$  と  $90^\circ$  の厚みを変更するのみのため省略