

2023(令和 5)年度 修士学位論文

エポキシ接着剤を用いた塗分け接着継手
の強度特性に関する研究

Strength properties of epoxy bi-adhesives joints

2024年2月28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

1265012 澤地 真魁

指導教員 楠川 量啓

目次

第1章 諸言	4
1.1 研究背景	4
1.1.1 はじめに	4
1.1.2 接着接合	4
1.1.3 塗分け接着継手 (bi-Ad)	6
1.1.4 微粒子を添加したエポキシ樹脂接着剤	7
1.2 研究目的	8
第2章 材料および試験片	9
2.1 材料	9
2.2 バルク試験片	10
2.3 単純重ね合わせ継手 (SLJ)	12
2.4 スペックルパターン塗布	14
第3章 実験方法及び結果	15
3.1 バルク材特性	15
3.1.1 試験方法	15
3.1.2 試験結果	15
3.2 SLJ 引張試験	16
3.2.1 試験方法	16
3.2.2 試験結果	16
3.2.2.1 弾性率比 E の影響	17
3.2.2.2 塗分け比 d の影響	18
3.2.2.3 接着厚さ t の影響	18
3.2.3 破面観察	19
3.3 デジタル画像相関法 (DIC)	19
3.3.1 DIC ひずみ測定	19

3.3.2	実験方法	20
3.3.3	実験結果	21
第4章	FEM解析	23
4.1	有限要素法(FEM)	23
4.2	解析モデル	23
4.3	解析結果	24
4.4	DIC と FEM の比較	28
第5章	結言	30
	謝辞	30
	参考文献	31
付録	33	

表 1	接着接合の持つ利点 (参考文献[4]より作成)	6
表 2	被着体 (A2017) の機械的特性	9
表 3	MHL-HD60CA の公称データ	9
表 4	MB 添加量の重量比と体積比	9
表 5	MB 添加率ごとの弾性率比 E	14
表 6	バルク材の機械的特性	16
表 7	各継手の破壊強度	17
図 1	マルチマテリアル化による航空機の構成材料比率の変遷 ^[1]	4
図 2	SLJ に生じる応力集中	5
図 3	端部における応力集中を避けるための様々な方法	5
図 4	bi-Ad にした継手に生じる応力	7
図 5	MB を添加した bi-Ad の概念図	7
図 6	Araldite2015 の主剤(2015/A)と硬化剤(2015/B)	10
図 7	バルク試験片表面(×100)	10
図 8	電子天秤	11
図 9	分析用電子天秤	11
図 10	攪拌機	11
図 11	脱泡用デシケータ	12
図 12	真空ポンプ	12
図 13	乾燥炉	12
図 14	単純重ね合わせ継手 (bi-Ad)	13
図 15	ハイトゲージ	13
図 16	硬化用治具	14
図 17	スプレーガン	14
図 18	万能試験機	15
図 19	荷重変位線図 (t=0.2, mono-Ad)	16
図 20	E の異なる各継手の強度	17
図 21	接着厚さの異なる各継手の破壊強度	18
図 22	SLJ の破面	19
図 23	変形前後のデジタル画像	20
図 24	ひずみ分布画像	21
図 25	接着層中央部のひずみ分布 (t=0.2mm)	22
図 26	解析モデルの概略	24
図 27	多直線等方硬化模式図	24
図 28	応力解析結果 (接着層中央)	26
図 29	応力解析結果 (上側被着体界面)	27
図 30	DIC と解析結果の応力分布の比較	29

第1章 諸言

1.1 研究背景

1.1.1 はじめに

近年、接着接合に注目が集められており、それぞれの接着剤が持つ特長や特性を活かし各産業分野で用いられている。特に、地球温暖化対策として製品の軽量化や燃費の向上が求められる輸送機器業界では、マルチマテリアル化を達成するため、従来以上に接着接合への期待が高まっている。マルチマテリアル化とは車体の材料を適材適所で用い、従来使用されてきた金属材料だけでなく繊維強化プラスチック（以下 FRP）なども使用し全体の軽量化を目指すという方法である。例えば輸送機器の中でも航空機においては図 1 に示すような構成材料比率の変遷がみられる^[1]。このように燃費向上の観点からマルチマテリアル化が進められている。

しかし、マルチマテリアル化において問題となるのが金属とプラスチックなどの異種材料間の接合である。異種材料を接合する場合、溶接は難しく、被着体に加工が必要な機械的接合も FRP などを用いる場合には適さない。ここで適切な接合方法として接着接合が選ばれることが多い。

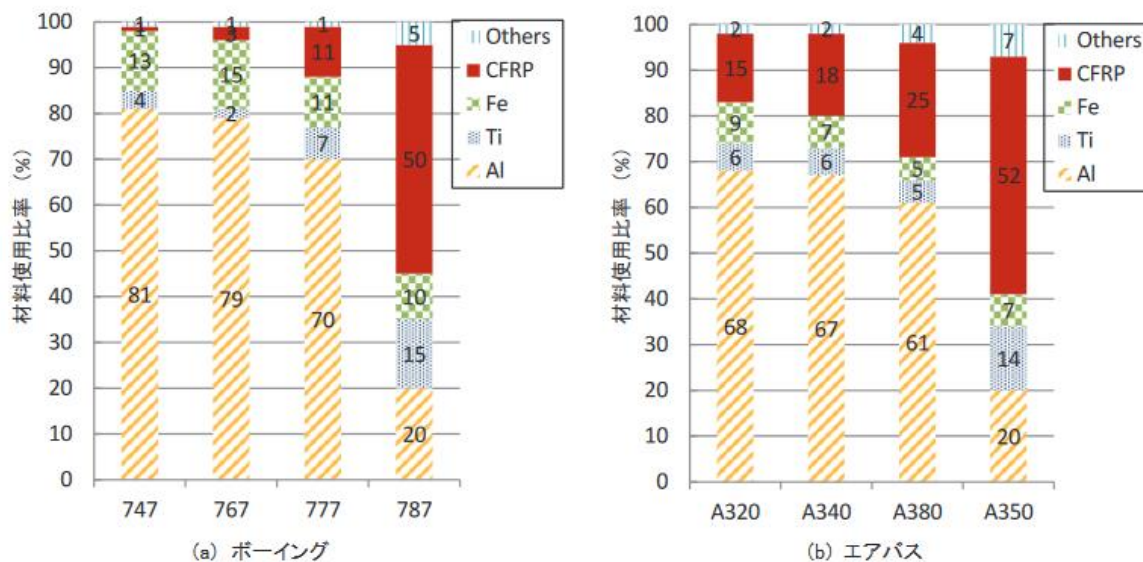


図 1 マルチマテリアル化による航空機の構成材料比率の変遷^[1]

1.1.2 接着接合

接着接合は一般的に接着剤を用いて被着体を接合する手法であり様々な種類がある。古くは、天然高分子系接着剤である糊が主に使用されており、樹脂、タンパク質、デンプン、ゴムなどが主成分であった。時代が進むにつれて様々な国、地域で使用され 20 世紀に入り、輸送機器等に利用される構造用接着剤が開発されるようになった^[2]。その後現在に至るまで様々な特性を持った接着剤が開発されてきた。現在、輸送機器などで構造用接着剤として用いられるのは、エポキシ系、アクリル系、ウレタン系など各樹脂接着剤であることが多い。中でもエポキシ樹脂接着剤は、開発されてから長く信頼性も高いためよく使用されている^[3]。

接着接合には、表 1 に示すようなメリットがある^[4]。しかし、図 2 のような単純接着継手(Single Lap Joint:SLJ)における界面上の応力分布をみると、接着層の継手方向の端部で応力の集中が発生している。

これが接着継手の破壊原因の一つであると考えられる。SLJ の応力分布について微分方程式による解析で初期のものとされる **Volkersen** の理論⁵⁾を用いれば、この応力集中を低減させるためには剛性の低い接着剤を使用することが必要となる。しかしながら、剛性の低い接着剤は一般的に強度も低いため構造用の接着には適さない。この問題を回避しつつ応力集中を回避するため図3のような被着体や、硬化した接着剤に加工を施す方法、機械的特性の異なる接着剤を数種類用いて硬化させる方法が研究されてきた。

この中でも機械的性質の異なる接着剤を用いて、端部と中央部のそれぞれで塗分ける手法が塗分け接着継手 (bi-Adhesive joints : bi-Ad) である。

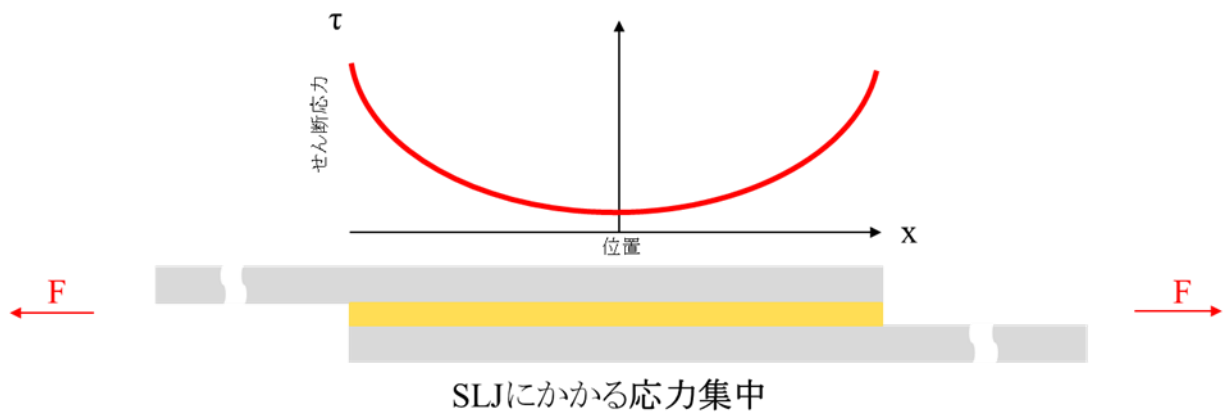


図2 SLJに生じる応力集中

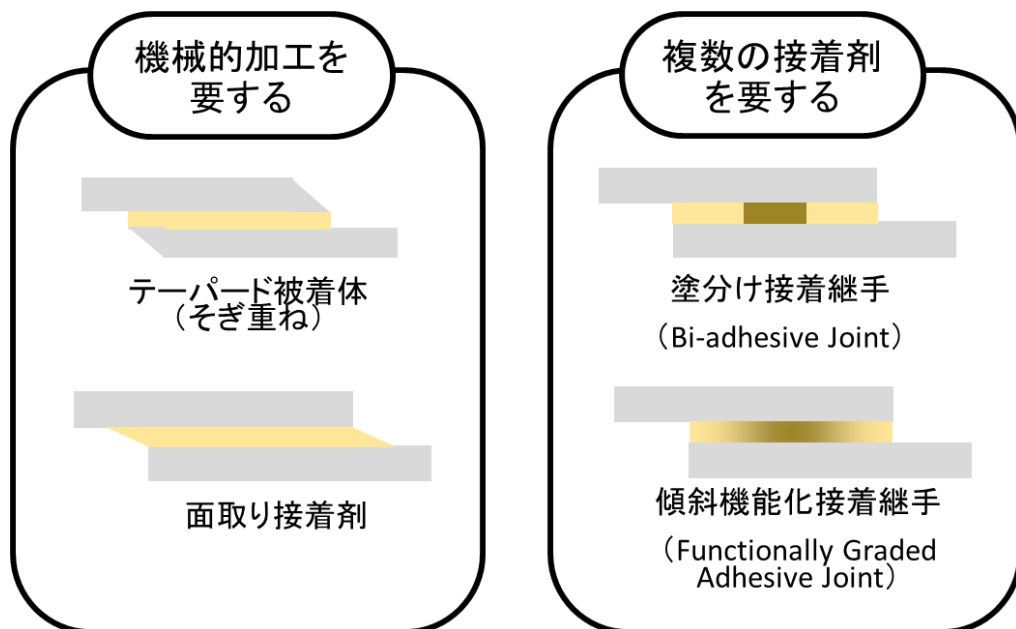


図3 端部における応力集中を避けるための様々な方法

表1 接着接合の持つ利点 (参考文献[4]より作成)

利点	詳細
異種材の接合	接着剤の選定が必要なものの、被着体の材料に依らず比較的容易な接合が可能である。またマルチマテリアル化による全体の軽量化、高機能化、剛性の向上等も期待できる。
部品の小型化	部品の作製において、機械的接合のように固定するためのスペースを省略できる。
低ひずみの接合	溶接やろう付けに比べ低温環境で接合できるので部品の熱変形を小さくできる。このため熱変形によって生じた歪みを取り除く工程が短縮され工程の簡素化も行える。
平坦度の確保	スポット溶接や機械的接合の点接合では、薄い板金などにおいて締結部間に膨らみが生じることがあるが、接着の面接合ではそれがないため簡単に平坦を得ることができる。
隙間充填性	液体の接着剤は接合面の隙間を埋めることができる。このため被着体界面の加工精度を落とせること、熱伝導性の向上、電食の防止、シール機能、振動吸収性などの効果を接合によって得られる。
低温接合	溶接やろう付け、はんだ付けでは被着体は耐熱部品でなくてはならないのに対し、接着ではその制限がない。このため金属部品に高温に弱い部品を直接取り付けることもできる。
面接合	機械的接合やスポット溶接は点接合、リード溶接は線接合であるため力が加わった際、接合点や線に応力が集中するため破壊しやすい。接着接合は面接合であり面全体で応力を受けるため応力集中が少なくなる。
火気レス工法	製造工程の中で溶接アークや火花など火気が発生する接合方法に比べ、接着接合では火気は必要でないため製造工程における安全性の向上が見込める。
素人工化	従来、アーク溶接やひずみの修正作業に熟練技能が必要だったが、接着においては特殊な熟練技能は必要ない。
低エネルギー接合	上に挙げてきた利点により使用される電力や燃料等が削減されることで作業全体の省エネルギー化を達成できる。また電力などが届かない地域でも手作業で接合することが可能な接着剤もある。
大がかりな設備が不要	接着作業には高額な設備はほとんど必要ない。手作業接着の場合は作業場所が限定されない。

1.1.3 塗分け接着継手 (bi-Ad)

bi-Ad は複数の機械的特性の異なる接着剤を用いて弾性率が低く変形しやすい接着剤を端部に、弾性率が高く高強度な接着剤を中央部に塗布することで作製できる。図4のように bi-Ad にすることで端部の応力集中が低減されることが知られている。

bi-Ad を用いて応力集中を低減させた Pires^[6]や Özkan ら^[7]の研究を見るとエポキシ樹脂接着剤など

を数種類組み合わせている。これらのように複数種類の接着剤を用いて作製する bi-Ad は比較的研究が進んでいる。しかし、複数種類の接着剤を用いる場合継手の作製時にそれぞれの硬化時間や硬化温度などの違いを考慮しなければならないなどの施工上の問題がある。この問題を解決する方法として接着剤内に微粒子などを添加し、接着剤の機械的性質を変化させた一種類の接着剤で bi-Ad を作製する方法も考えられている。

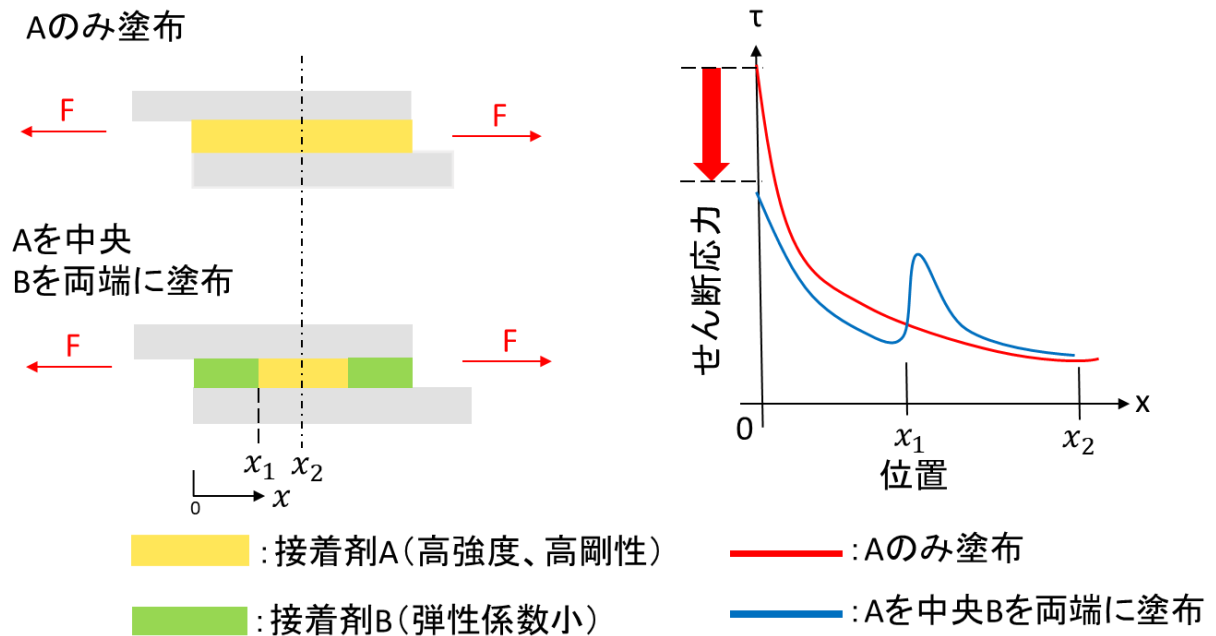


図4 bi-Ad にした継手に生じる応力

1.1.4 微粒子を添加したエポキシ樹脂接着剤

エポキシ樹脂に中空微粒子を添加させることで機械的性質が変化することが知られており^[8],これをエポキシ樹脂接着剤に応用した研究もある^{[9][10]}.すなわち, 図5に示すように MB 添加量の異なる接着剤を使用して bi-Ad を作製することが可能となると考えられる。

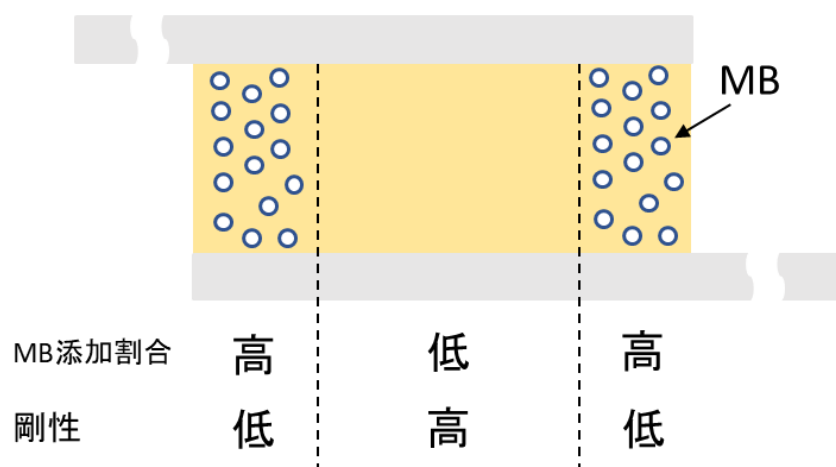


図5 MB を添加した bi-Ad の概念図

1.2 研究目的

上記の背景から一種類の接着剤に添加剤を加えた **bi-Ad** の作製は考案されているものの、実際に作製し実験的に機械的性質などを明らかにした研究は少ない。本研究では中空微粒子（以下 **MB**）を一般的に構造用接着剤として用いられるエポキシ樹脂接着剤に添加し、弾性率を変化させたバルク材を用いて **MB** を添加した接着剤の機械的性質を調査した。また **MB** を添加し弾性率を低下させた接着剤と無添加の高弾性率の接着剤を用い、二つの機械的性質の異なる接着剤を用いて **bi-Ad** を作製し、その強度特性を調査した。

またデジタル画像相関法（**Digital Image Correlation : DIC**）を用いて接着層のひずみ分布測定を行った。ひずみ分布から応力分布を推定し応力集中の低減効果を確認した。さらに有限要素法（**Finite Element Method FEM**）を用いた解析を行い、応力分布を求めた。これらの結果を比較検討し、**MB** を添加したエポキシ樹脂接着剤で作製した **bi-Ad** の応力集中の低減効果を調査した。

第2章 材料および試験片

2.1 材料

被着体に用いた材料はアルミニウム合金 A2017-T3 で、引張試験により得られた機械的特性を表 2 に示す。ここでの物性値は先行研究である砂田らの研究を参照した^[11]。被着体に A2017 を用いたそれぞれの試験片は、表面処理として、エメリー紙#500 で手動研磨した。被着体表面をアセトンで脱脂し、接着剤を塗布した。

接着剤に用いたのは熱硬化性を持つ 2 液型エポキシ接着剤の Araldite2015 である。使用した Araldite2015 を図 6 に示す。

MB として用いたのは松本油脂製薬株式会社の MHL-HD60CA である。公称データ^[12]を表 3 に示す。本研究では平均粒子径は公称データの平均値である 60 μm として採用した。本研究ではエポキシ樹脂接着剤に MB を 0.5, 1.0, 5.0 wt% 添加しバルク試験片を作製した。MB 添加量の重量比と体積比の比較を表 4 に示す。バルク試験片の内 MB 無添加材と 1.0wt%添加材の表面を SEM で撮影したものを図 7 として示す。

表 2 被着体 (A2017) の機械的特性

Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio [-]	Tensile strength [MPa]	0.2% proof stress [MPa]
68.9	0.35	396	298

表 3 MHL-HD60CA の公称データ

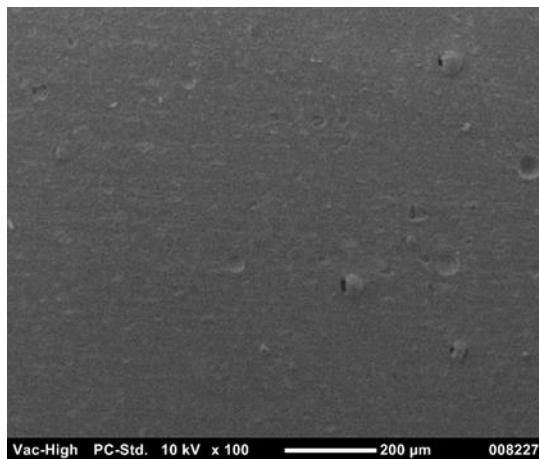
	平均粒子径 (μm)	シエル組成/無機粉体	真比重	耐熱性 $^{\circ}\text{C}$	特徴
MHL-HD60CA	50~70	AN 系コポリマー/ 炭酸カルシウム	0.23 \pm 0.03	140~150	耐熱性・耐圧性・耐シエア性

表 4 MB 添加量の重量比と体積比

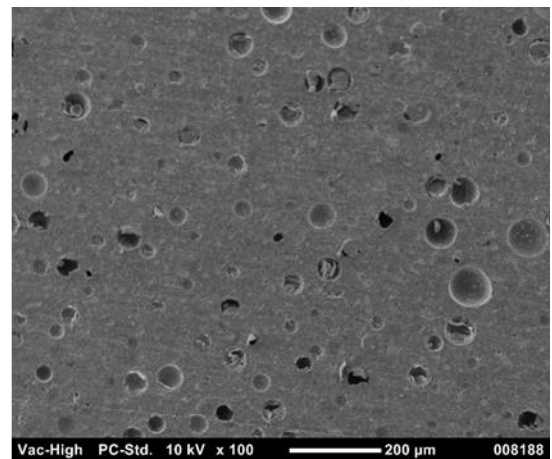
重量比 [wt%]	体積比 [vol%]
0.5	5.54
1.0	10.5
5.0	38.0



図 6 Araldite2015 の主剤(2015/A)と硬化剤(2015/B)



(a) MB 0wt%



(b) MB 1.0wt%

図 7 バルク試験片表面(×100)

2.2 バルク試験片

MB を添加した Araldite2015 の特性を調査するためバルク試験片を作製した。バルク試験片は MB 無添加のもの、MB を 0.5, 1.0, 5.0wt% 添加した。寸法 100×12×3 [mm] の矩形板である。

以下に作製手順を示す。

- ① 接着剤は図 8 の電子天秤 EK-300i (エーアンドディー株式会社) で主剤と硬化剤が 1:1 になるよう計量した。
- ② MB を図 9 の分析用電子天秤 GH-252(エーアンドディー株式会社)で計量し添加した。(非添加材はスキップ)
- ③ 図 10 の攪拌機 TORNADO, SM-103(アズワン株式会社)を用い, 300 rpm, 5 分間の条件で混合した
- ④ 図 11 の脱泡用デシケーター RVD-250(アズワン株式会社), 図 12 の真空ポンプ G-50SA(アルバック機工株式会社)で真空脱泡を 15 分間行った。
- ⑤ 空気が混ざらないよう速やかにテフロン製の型に流し込んだ。
- ⑥ 接着剤を入れた型の上にテフロンシートを重ね, さらに空気を抜くためローラーを用いて面全体を押しつぶした。
- ⑦ 図 13 の乾燥炉 SSR-111S(株式会社いすゞ製作所)で 70℃, 1 時間保持の条件で硬化した。

- ⑧ 硬化したバルク試験片を型から取り出し，型からあふれた余分をスクレイパーなどで取り除いた。
- ⑨ 作製したバルク試験片の平行部3点の厚さと幅を測定し，平均値から断面積を求めた。
- ⑩ バルク材の中央部にひずみゲージを貼り付け試験片の完成とした。



図 8 電子天秤



図 9 分析用電子天秤



図 10 攪拌機



図 11 脱泡用デシケータ



図 12 真空ポンプ



図 13 乾燥炉

2.3 単純重ね合わせ継手 (SLJ)

SLJは図 14 に示す形状および寸法のものを使用した。接着長さ L を 12.5 mm 一定とし、一種類のみを塗布して単一接着継手 (mono-Ad) と、中央部と端部で異なる接着剤を塗布した塗分け接着継手 (bi-Ad) を作製した。塗分け比 $d=L_1/L_2$ を 1 および 1/8 のものを用意した。また接着剤間の弾性率比 E を脆性接着剤に対する延性接着剤の比として定義する。MB の添加率ごとの弾性率比 E を表 5 に示す。

以下に作製手順を示す。

- ① 被着体表面を長手方向にエメリー紙#500 で手動研磨した。
- ② 塗分け部分の領域を示すため被着体表面を、図 15 のハイトゲージ HDS-20C (株式会社ミットヨ) を用いて測定箇所をけがいた。
- ③ 接着剤は電子天秤で主剤と硬化剤が 1:1 になるよう計量した。bi-Ad を作製する場合、無添加接着剤と MB 添加接着剤を作製するため二つの容器を用意した。
- ④ bi-Ad を作製する場合 MB を分析用電子天秤で計量し片方の接着剤に添加した。(mono-Ad 作製時はスキップ)

- ⑤ 攪拌機を用い、それぞれ 300 rpm, 5 分間の条件で混合した
- ⑥ 接着剤の真空脱泡を 15 分間行った.
- ⑦ 図 16 の治具に被着体をセットし、アセトンで接着面を脱脂した.
- ⑧ mono-Ad では無添加接着剤を接着面全体に、bi-Ad では中央部に無添加接着剤, 端部に MB 5.0 wt%添加した接着剤を塗布した.
- ⑨ 接着厚さを制御した状態で乾燥炉に 70°C, 1 時間保持の条件で硬化した.
- ⑩ 硬化した SLJ を治具から取り出し、はみ出した接着剤をスクレイパーなどで丁寧に取り除いた.

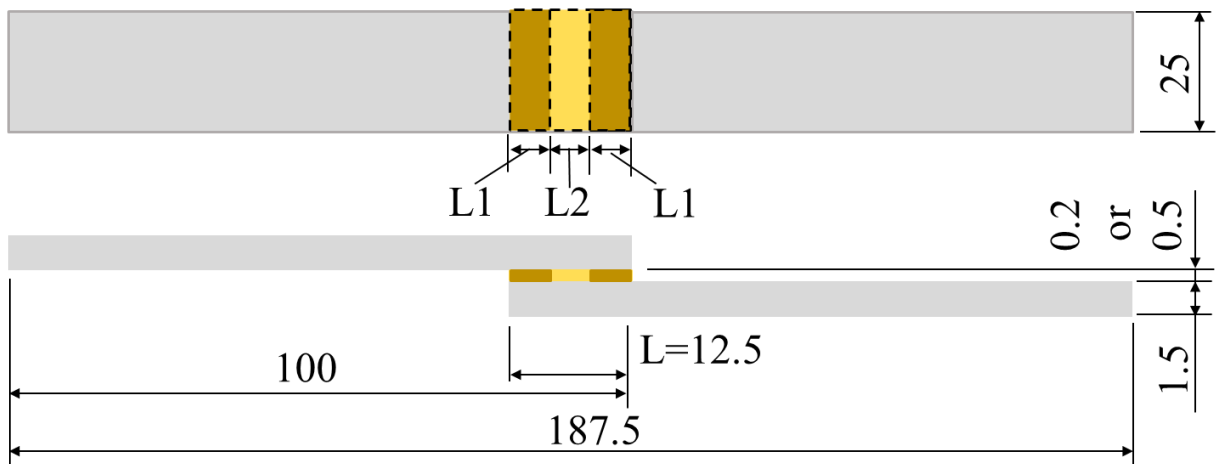


図 14 単純重ね合わせ継手 (bi-Ad)



図 15 ハイトゲージ

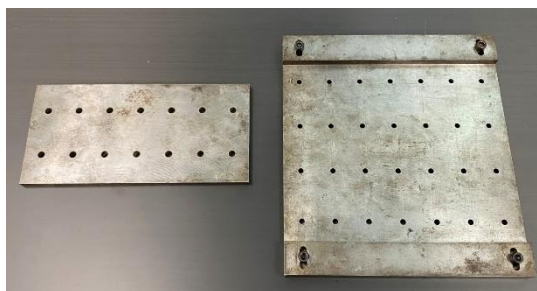


図 16 硬化用治具

表 5 MB 添加率ごとの弾性率比 E

MB ratio [wt%]	E [-]
0.5	0.64
1.0	0.55
5.0	0.23

2.4 スペックルパターン塗布

SLJ のひずみ分布測定には DIC を用いた。DIC は測定箇所ランダムなパターンが必要であるため、SLJ の接着面側部に塗布した。

以下に手順を示す。

- ① 被着体側面を長手方向にエメリー紙#1000 で手動研磨した。
- ② 1.0 micro のアルミナを用いて、ベンダーを使用して鏡面磨きを行った。
- ③ SLJ の測定箇所に黒色のインク、ペイント 300 (つや消し黒：株式会社アンチラスト) を吹きかけて表面を黒く塗りつぶした。
- ④ 十分に黒いインクを乾燥させた後、図 17 のスプレーガン (W-71) で白色のインク水性スーパーコート(1.6L) (つや消し白：株式会社アサヒペン) を吹きかけ斑点を付着させた。



図 17 スプレーガン

第3章 実験方法及び結果

3.1 バルク材特性

3.1.1 試験方法

図 18 の万能試験機 AG-100kNG(株島津製作所)(容量 100 kN)を用いて、クロスヘッド変位速度 0.1 mm/min の条件で静的引張試験を行った。環境温度は室温とした。縦弾性係数およびポアソン比を求めるためバルク材の弾性域において試験力を 0.2 kN まで負荷し、その後 0.05 kN まで除荷した。この往復を 3 回繰り返した。また引張強度を求めるため同様の条件で引張荷重を加え、破壊したところで停止させた。



図 18 万能試験機

3.1.2 試験結果

MB を各割合で添加したバルク材について得られた縦弾性係数、ポアソン比、そして引張強度を表 6 に示す。MB を添加することで縦弾性係数は大きく低下、MB を 5.0 wt% 添加したものは、非添加材に比べ、76.6 % 低下した。

またポアソン比は無添加のものが 0.343、MB を 5.0 wt% 添加したものが 0.337 となりほとんど変化がなかった。一方、引張強度に関しても MB の添加によって低下し、無添加のものが 15.4 MPa、MB を 5.0 wt% 添加したものが 5.69 MPa となり 63.1 % 低下した。MB の添加によって無添加材よりもポアソン比及び引張強度の向上がみられた。ポアソン比においては同種の MB を及びエポキシ樹脂接着剤を用いた安達らの研究[10]でも同様の結果が得られており MB を 0.5wt% 添加した場合においてポアソン比が向上している。

表 6 バルク材の機械的特性

MB ratio [wt%]	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio [-]	Tensile strength [MPa]
0	2.82	0.343	15.4
0.5	1.81	0.404	17.6
1.0	1.56	0.361	15.6
5.0	0.66	0.337	5.69

3.2 SLJ 引張試験

3.2.1 試験方法

2.2. 万能試験機を用いて、バルク試験と同じくクロスヘッド変位速度 0.1 mm/min の条件で静的引張試験を行った。環境温度は室温とし引張荷重を破壊するまで負荷した。測定時には荷重及びクロスヘッド変位を測定した。荷重変位線図（接着厚さ 0.2 mm, mono-Ad のもの）の一例を図 19 に示す。

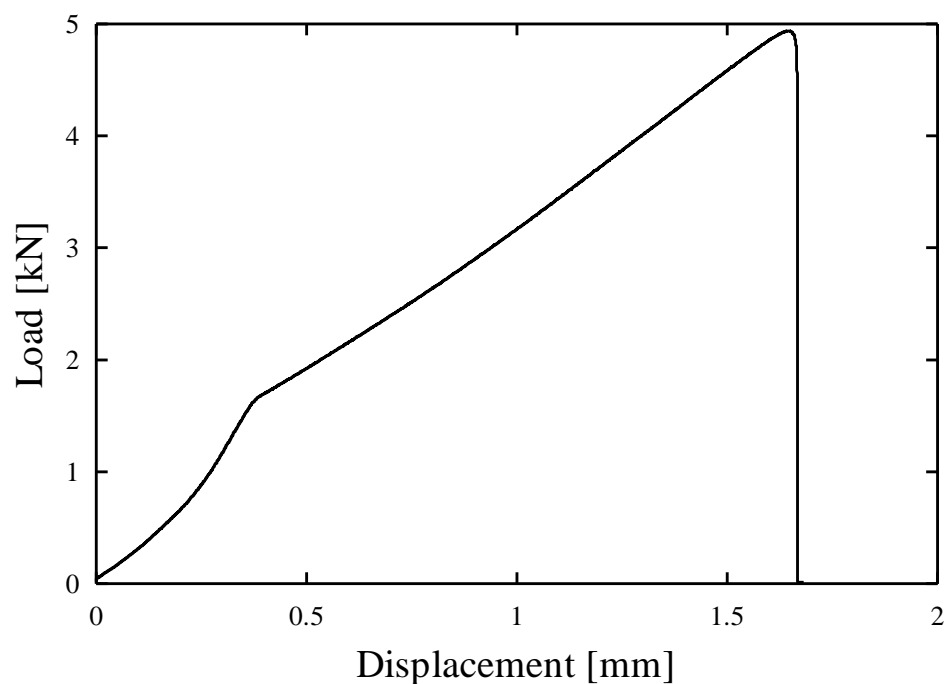


図 19 荷重変位線図 (t=0.2, mono-Ad)

3.2.2 試験結果

SLJ 強度試験で得られた mono-Ad と bi-Ad, それぞれについて、破断荷重を接着面積で除した破壊平均せん断応力を破壊強度と定義し、表 7 に示す。各継手は塗分け比, 弾性率比, 接着厚さが異なるためそれぞれについて比較検討を行った。

表 7 各継手の破壊強度

	t [mm]	E [-]	d [-]	Average fracture strength [MPa]	
mono-Ad	0.2	0	0	17.3	
	0.5			8.80	
bi-Ad	0.2	0.55	1	15.6	
		0.64		15.8	
		0.23		10.4	
	0.5	0.23	1/8	12.0	
					12.3

3.2.2.1 弾性率比 E の影響

一般的に塗分け接着継手における脆性接着剤に対する延性接着剤の弾性率の比として定義される^[13]。前述したように SLJ では端部に応力集中が起きるため、接着層端部の弾性率を下げ応力集中を回避することが必要である。このため bi-Ad では脆性接着剤と延性接着剤の弾性率の比が継手強度に影響を与える要素の一つである。本実験で得られた弾性率比の異なる継手の強度を図 20 に示す。各継手の塗分け比は $d=1$ である。弾性率比が小さくなるほど強度は低下した。特に $E=0.23$ の時、他の継手に比べ 3 割程度強度が低下した。Özer と Öz の研究^[14]では、一般的な 2 種類の接着剤を用いて bi-Ad を作製しているものの $t=0.5$ mm において、 $E=0.4$ の方が $E=0.14$ の継手よりも破壊荷重が高かった。これは接着厚さの違いはあるものの本研究で得られた結果に近いものであった。また、彼らは $t=0.5$ での E の最適値は 0.4 としている。しかし、同じ材料と幾何学的パラメータを用いて最適な E 値について検討した da Silva と Adams の研究^[15]では、最適な E 値は 0.61 であるとしている。これらを見ると少なくとも E 値は 0.4~0.6 に近い値のもので bi-Ad を作製するのが望ましいと考えられる。

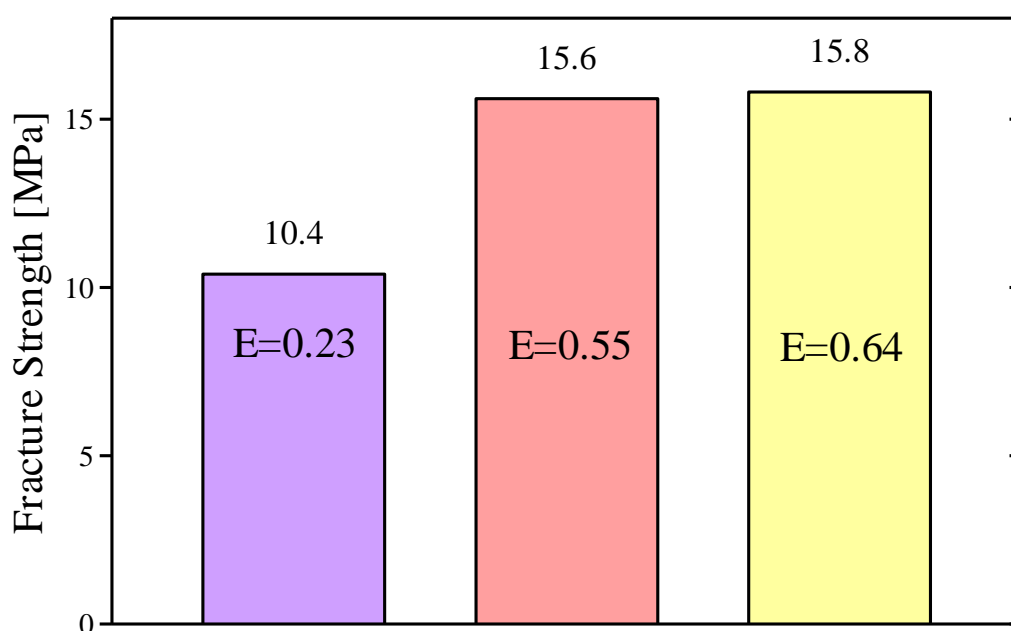


図 20 E の異なる各継手の強度

3.2.2.2 塗分け比 d の影響

次に塗分け比 d の影響について調査した。塗分け比 d は 2.3 に記したように接着層における弾性率の異なる接着剤の領域を表しており d=1 において接着領域は 1:1:1 で塗分けられる。本実験では強度が最も小さくなった E=0.23 において塗分け比 d の与える影響について調査した。各破壊強度は d=1 において 10.4 MPa, d=1/8 において 12.0 MPa となり約 13%強度が向上した。ここで Ramezani らの研究^[16]を見ると d=0.35 の継手よりも d 値を 0.1 または 0.2 にしたとき強度は増加したと報告している。

本研究でも d 値を低下させた結果、破壊強度の向上がみられたため弾性率の高い接着剤の領域を増やすことが接着強度の低下を防いでいると考えられる。

3.2.2.3 接着厚さ t の影響

接着厚さ t は接着層の厚みであり接着接合の破壊強度において重要な要素の一つである。接着剤の厚さが増すほどせん断接着強度は低下することが知られている^[17]。本研究では mono-Ad と bi-Ad の両方で接着厚さの異なる継手を比較した。接着厚さの異なる各継手の破壊強度を図 21 に示す。

これを見ると t=0.2 mm の場合、bi-Ad とした場合強度が低下する結果となったが、t=0.5 mm の接着厚さが厚い場合は bi-Ad とすることで強度が 1.4 倍ほど向上した。ただし接着厚さが薄い mono-Ad の強度には達しないことが分かった。接着厚さの増加により mono-Ad では強度低下したのに対し、bi-Ad では強度は変わらなかった。これは破壊形態の変化が要因であると考えられ、それについては 3.2.3 破面観察においてより詳しく掘り下げる。先述の Ramezani らの研究^[16]でも mono-Ad では接着層の厚さを増加させることで破壊荷重が低下しており、bi-Ad ではむしろ増加するなどの結果が得られている。本研究では bi-Ad は接着層の厚さに因らずほとんど強度が変わらなかったが、mono-Ad のように強度が低下しなかった点においておおむね一致した。

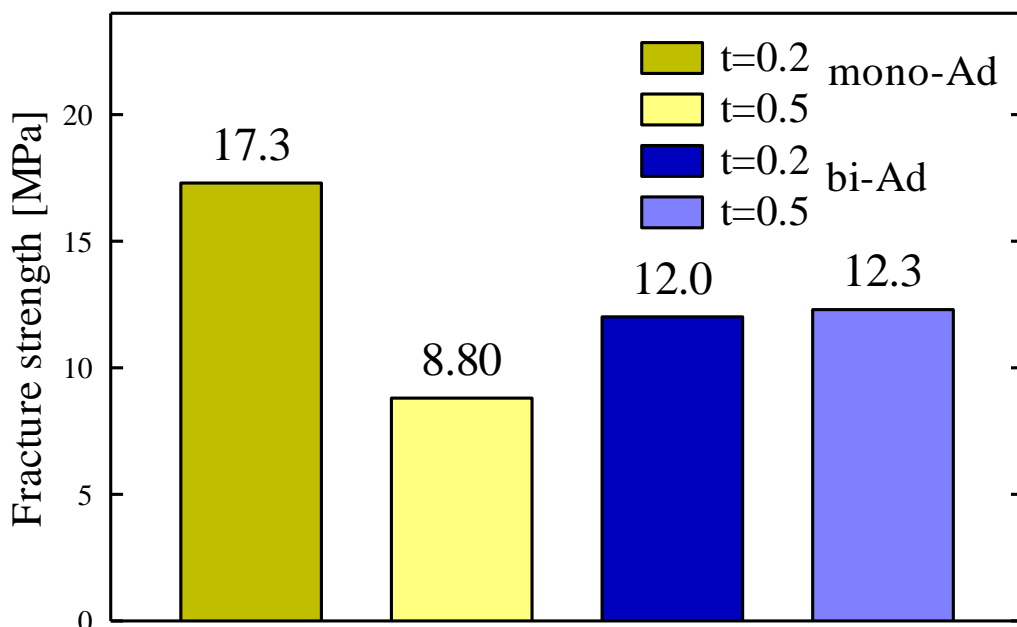


図 21 接着厚さの異なる各継手の破壊強度

3.2.3 破面観察

3.2.2.3 で使用した SLJ の破面の様相を図 22 に示す。図 3 の(a)および(c)に示すように接着厚さが薄い場合、破壊形態は凝集破壊であったが、厚くなると界面破壊となっている。このため、 $t=0.5$ では接着強度が大きく低下したと考えられる。しかし、 $t=0.5$ でも bi-Ad とした場合、破面は凝集破壊を維持しており、mono-Ad と比して強度が向上した。さらに(b)では継手の持ち手側両方の界面が露出しており中央で合流している。このため破壊は接着部の被着体端部から進行したと考えられる。

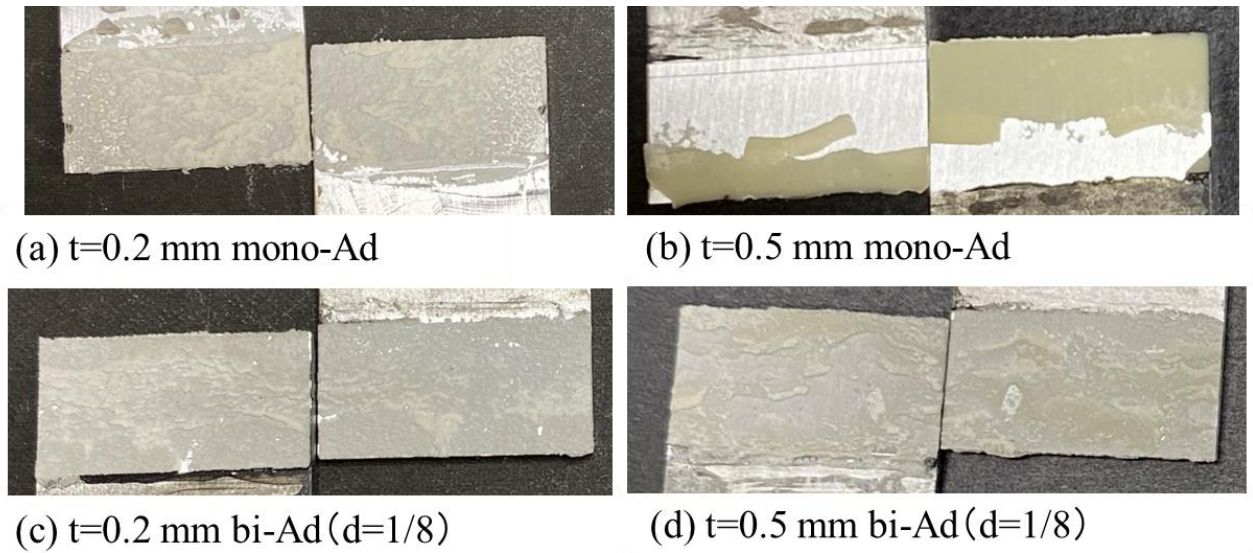


図 22 SLJ の破面

3.3 デジタル画像相関法 (DIC)

3.3.1 DIC ひずみ測定

DIC とは^[18]、物体のひずみを非接触で測定するための技術であり、変形した材料の関心領域 (ROI) の変位及びひずみ場を取得する手法である。この手法では、デジタルカメラやセンサーを使用して、測定対象の表面に塗布したスペックルパターンの画像を変形の前後で取得する。そして、物体が変形するときに生じる画像の変化を数値解析し、点間の一対一の対応からひずみを計測する。

具体的には図 23 のように変形前の画像において任意の $N \times N$ 画素の領域 (サブセット) を指定し、測定対象に変位を与えると、変形前後でサブセットの位置が変化する。その後、変形後のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索し、そのサブセット中心の点の移動から変位場を算出する。この処理を全ての小領域で繰り返すことによって、全視野の変位データを得ることができる。

DIC の画像層化を求める手法はいくつもあるが、そのうちのひとつである相関基準法 (Correlation criteria) をここでは紹介する^[19]。

$$C_{cc} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} (f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - f_m)(g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - g_m)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - f_m]^2 \sum_{(i,j) \in S} [g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - g_m]^2}} \quad (1)$$

$$C_{LS} = \sum_{(i,j) \in S} \left[\frac{f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - f_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - f_m]^2}} - \frac{g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - g_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - g_m]^2}} \right]^2 \quad (2)$$

ここで、 f と g はそれぞれ参照画像関数と現在画像関数であり、指定された (x,y) 点に対応するグレースケール値を返す。 f_m と g_m はそれぞれ、最終的な参照部分集合と現在の部分集合の平均グレースケール値であり、次式で定義される。

$$f_m = \frac{\sum_{(i,j) \in S} (f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}))}{n(S)} \quad (3)$$

$$g_m = \frac{\sum_{(i,j) \in S} (g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}))}{n(S)} \quad (4)$$

ここで、 $n(S)$ は S の要素数である。

式(1) は正規化相互相関基準であり、 C_{CC} が 1 に近いときに良好な一致を示す。式(1),(2)における平均成分 (f_m と g_m) の差は、グレースケール値のシフトに対して不変であることを可能にし、分母の量による除算は、スケールされたグレースケール値に対して不変であることを可能にしている。このようにして参照画像と現在画像の 1 画素ごとの輝度値から変位量を測定する。

以上のことから DIC は物体が力や圧力などによって変形する際に、その変形量や変形の分布を非接触で計測することが可能である。この技術は、材料の機械的性質や構造物の挙動を評価するために広く利用されており、例えば、材料の引張り試験や圧縮試験、構造物の応力解析などにおいて、物体の変形やひずみを詳細な解析に用いられている。本研究では SLJ の接着層においてひずみゲージなどの直接ひずみを測定する装置の利用が困難であったこと、接着層の連続的なひずみ分布の取得が必要だったことから DIC を使用した。

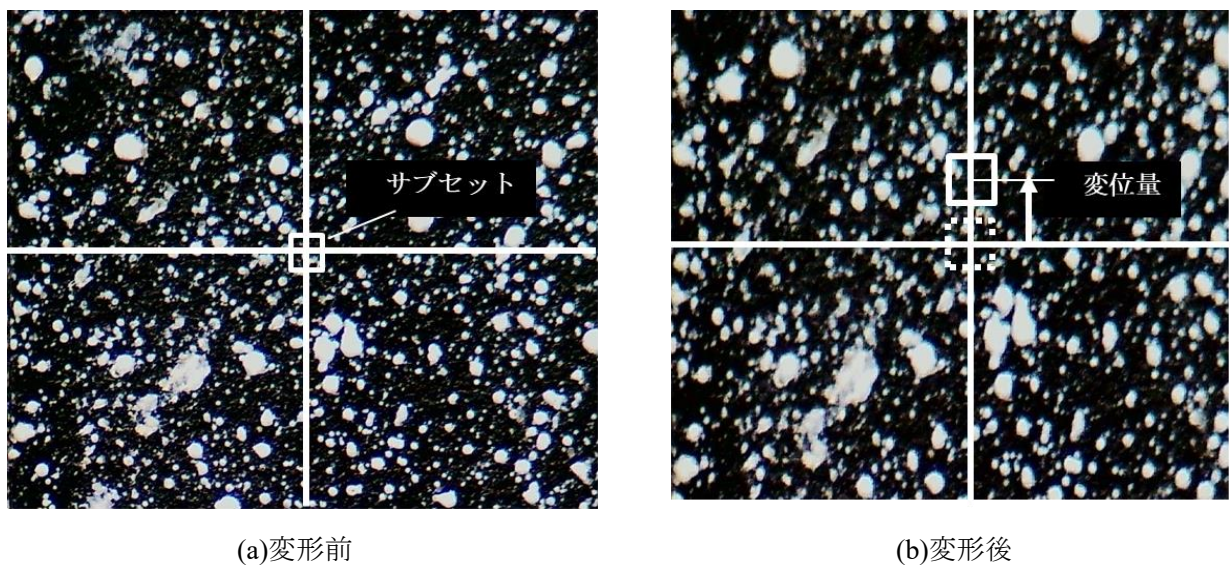


図 23 変形前後のデジタル画像

3.3.2 実験方法

実験に際しては牧野^[20]の研究を参考に行った。万能試験機に 2.4 でスペックルパターンを塗布した

SLJ を設置し、予荷重として 0.15 kN 負荷させた。その状態で画像を取得し参照画像とした。次に荷重を 1.5 kN 負荷しその状態で画像を取得し現在画像とした。各画像をフリーの画像解析ソフト ncorr で解析しひずみ分布画像および接着層中央部のひずみ分布のデータを取得した。

3.3.3 実験結果

取得したひずみ分布画像(ϵ_{xx} , ϵ_{xy})を図 24 に示す (bi-Ad は $d=1/8$ のもの)。ピール方向ひずみである(a)と(b)をみるとどちらも接着層の中央や端部その中間といった点で、ひずみが集中している領域がみられる。また絶対値化した最大値で比較すると(a)では約 1.9×10^{-3} , (b)では約 1.1×10^{-3} である。次に(c),(d)を見ると、どちらも端部に行くほどせん断ひずみは大きくなっており、最大値を比較すると(c)では約 1.1×10^{-3} , (d)では約 12×10^{-3} となった。次に接着層中央部のひずみ分布を図 25 に示す。どちらの継手においてもせん断ひずみは端部に近づくにつれて増加していく、ただし mono-Ad よりも bi-Ad の方がどの位置であってもせん断ひずみが大きい。ピールひずみは中央部(端部から 6.25mm)の位置で、ほとんど変わらないものの bi-Ad は mono-Ad よりも変化量が大きかった。これら DIC のひずみ分布の結果から bi-Ad にすることで機械的特性が変化しどちらの方向も伸びやすくなったのだと考えられる。

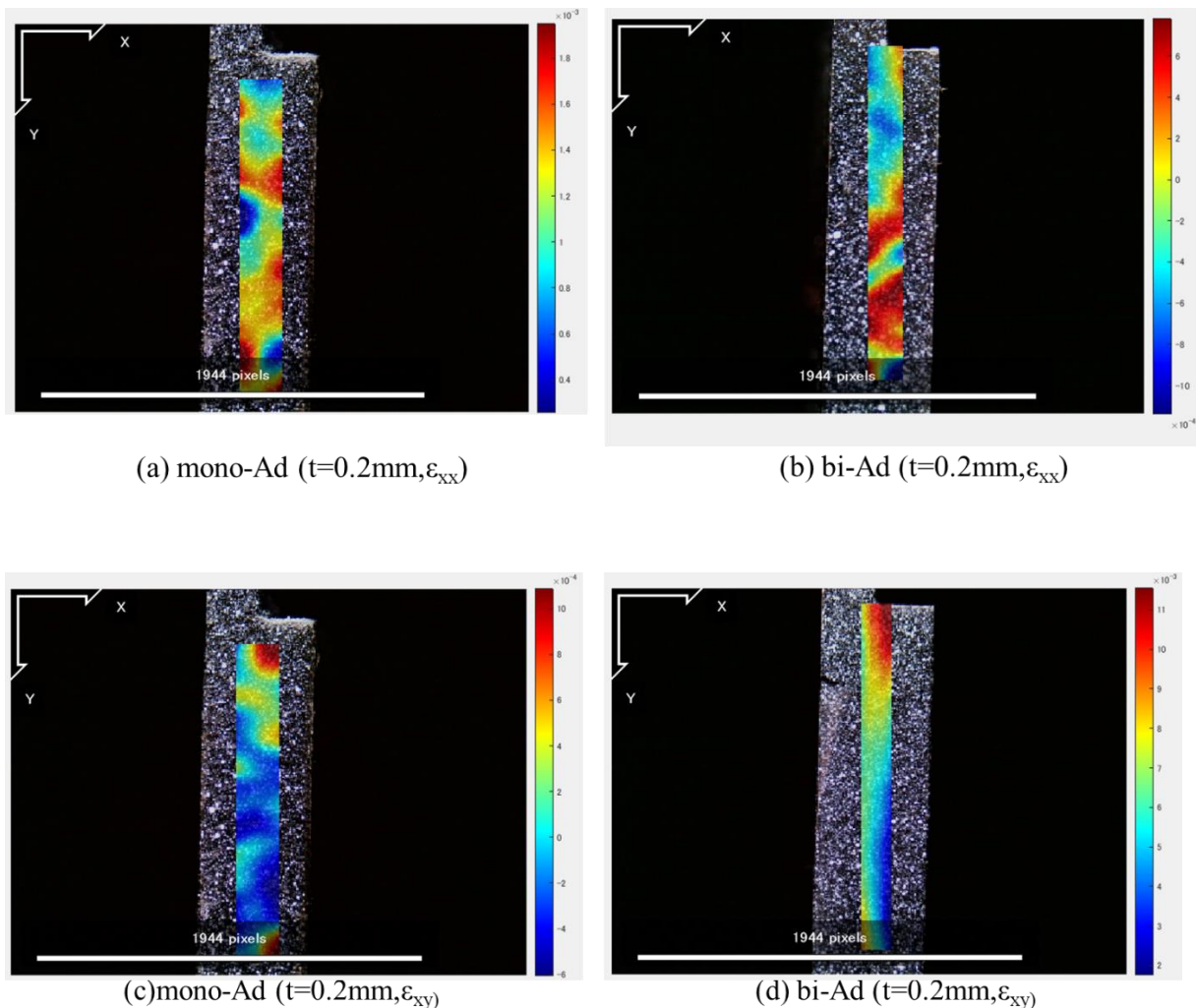


図 24 ひずみ分布画像

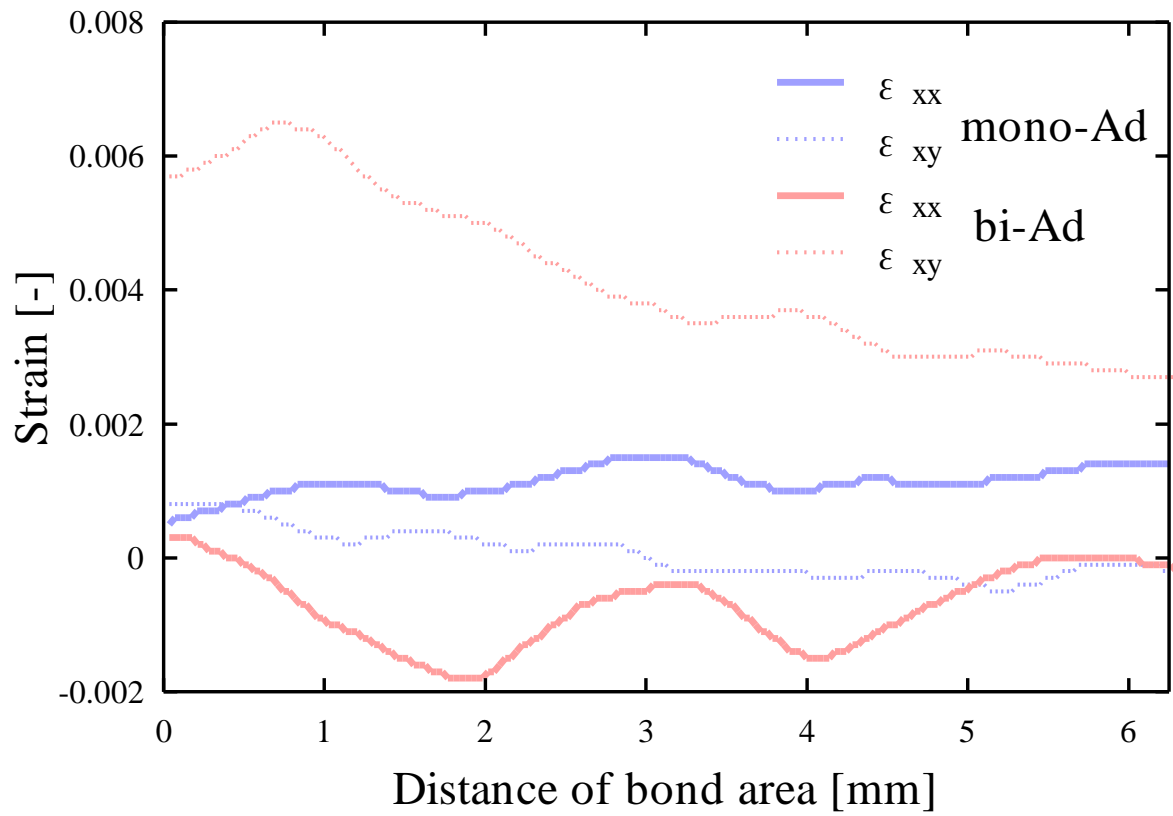


図 25 接着層中央部のひずみ分布 (t=0.2mm)

第4章 FEM 解析

4.1 有限要素法(FEM)

有限要素法 (FEM)とは、工学や物理学の分野で使用される数値解析手法の一つである。物体や構造物を有限個の要素に分割し、要素ごとに方程式を立てて解析することで、大規模な問題を扱うという手法である。Zienkiewicz によれば^[21]、「有限要素」という用語を生み出したのは、カリフォルニア大学の Clough という准教授で、彼と M.J. Turner らの 1956 年に発表した論文が FEM のルーツであるとしている。

時代が下るとコンピュータの発展により有限要素法は急速に発展した。横山正明らの著作^[22]では“現代の有限要素法は、構造解析と呼ばれる固体の変形や応力、振動問題、などの解析のみならず、熱や流れの解析、電磁気の解析、化学反応を伴った現象の解析など理工学の関係する広範囲の諸問題の一般的な解析法として不動の地位を気付いている。“としている。このように有限要素法は応力解析でも一般的な手法となっており本研究では、有限要素解析ソフトを用いて解析を行った。

解析ソフトの一般的な有限要素法の基本的な解析手順を以下に示す。

- ① 問題の設定：
解析する領域や構造の幾何形状や物性を定義し、境界条件や荷重について条件を指定する。
- ② 要素分割：
解析領域を有限個の要素に分割する。
- ③ 要素のモデル化：
各要素における物体の挙動を表す数学モデル（例：弾性体、熱伝導体など）を定義する。一般的に要素ごとに連立方程式を立てるための数学的な近似手法が適用される。
- ④ 境界条件の設定：
解析領域全体での物体の挙動を制御するため、問題の境界条件（例：外力、変位など）を設定する。
- ⑤ 連立方程式の解法：
各要素で立てられた連立方程式を組み合わせ、全体の問題を解くための方程式系を構築する。構築した方程式系に対して数値的手法（例：ガウスの消去法、共役勾配法など）を用いて解く。
- ⑥ 結果の評価：
解析結果を解釈し、物体の応力、変位、熱分布などの挙動を評価。

4.2 解析モデル

本解析では実験を行った SLJ の FEM モデルを作成し、接着層の応力分布について応力解析を行った。本解析に用いた解析ソフトは ANSYS2021 R1 である。モデルの作成には二次元 8 節点の PLANE183 を用いた。mono-Ad と bi-Ad(d=1/8)でそれぞれ接着厚さ $t=0.2, 0.5$ のものを解析した。また接着層中央部(図 26 の赤線の位置)及び上側被着体界面(図 26 の緑線の位置)にパスを挿入しそれぞれの位置の応力分布について調査した。

図 26 に解析モデルの概略図を示す。横山らの研究^[23]を参考に A2017 と Araldite2015 の、軸方向ヤング率とポアソン比の他に実験で得られた応力-ひずみ線図を多直線等方硬化で近似するこ

とで塑性変形を表現した。図 27 に多直線等方硬化の模式図を示す。多直線等方硬化は任意個数の点で応力と塑性ひずみを入力できるが、一点目は降伏応力 (σ_1) とそのひずみ (ε_1) にする必要がある [24]。

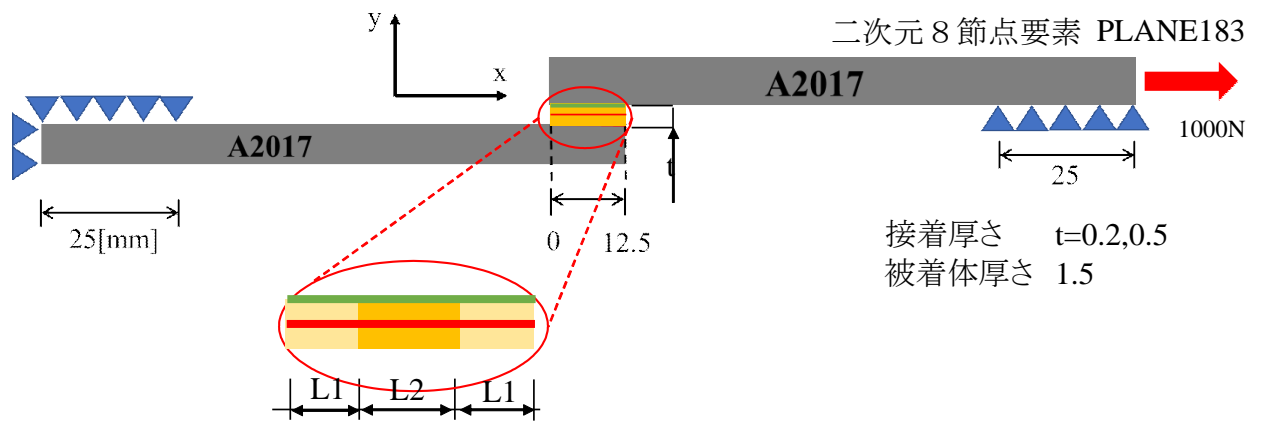


図 26 解析モデルの概略

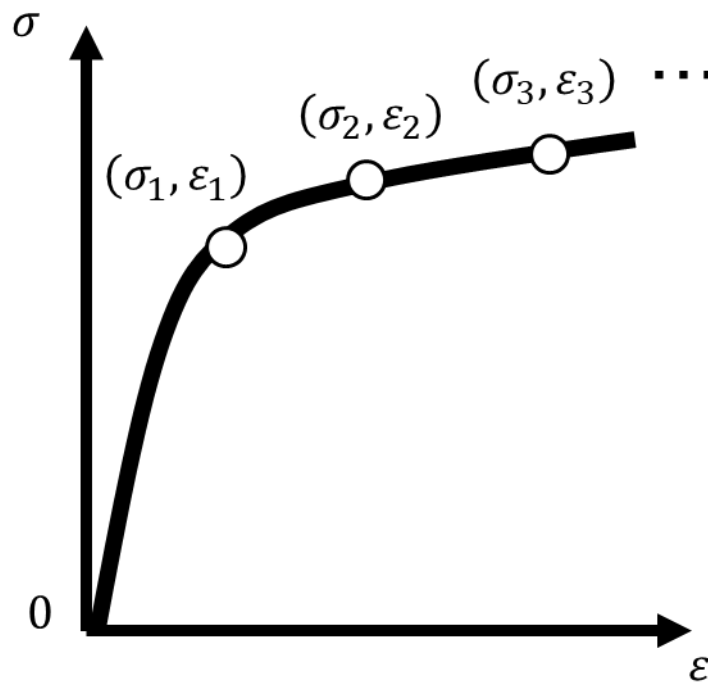


図 27 多直線等方硬化模式図

4.3 解析結果

ANSYS の応力解析の結果の内、接着層中央のものを図 28 に示し、上側被着体界面のものを図 29 に示す。

図 28 の(a)を見ると接着厚さに関わらず bi-Ad の方が端部におけるピール応力が低下した。t=0.2 では約 40%、t=0.5 では約 50%低下した。mono-Ad, bi-Ad とともに接着厚さを増加させると接着端部のピ

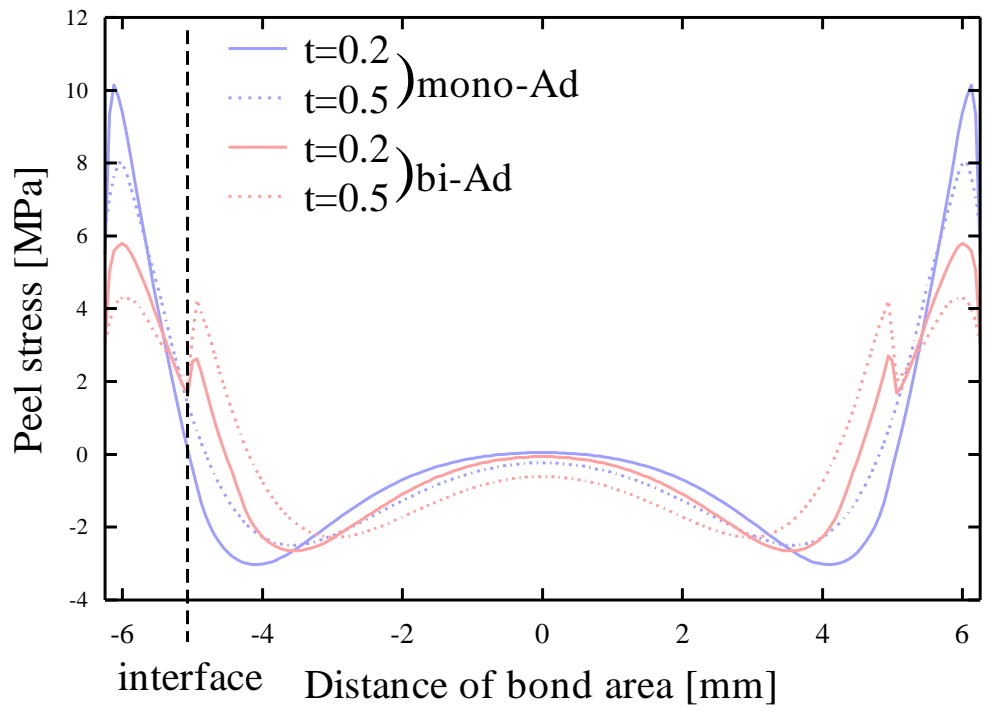
ークが減少した。また bi-Ad では塗分けの境界でもう一つの応力ピークが発生した。

次に図 28(b)を見ると mono-Ad と bi-Ad でせん断応力のピークにおける最大値はほとんど変化がなかった。しかし、ピークの出現する位置が変わっており mono-Ad では接着層端部であったのに対し、bi-Ad では塗分け境界だった。mono-Ad, bi-Ad とともに接着厚さを増加させるとピークのせん断応力が低下し、中央部のせん断応力が増加した。

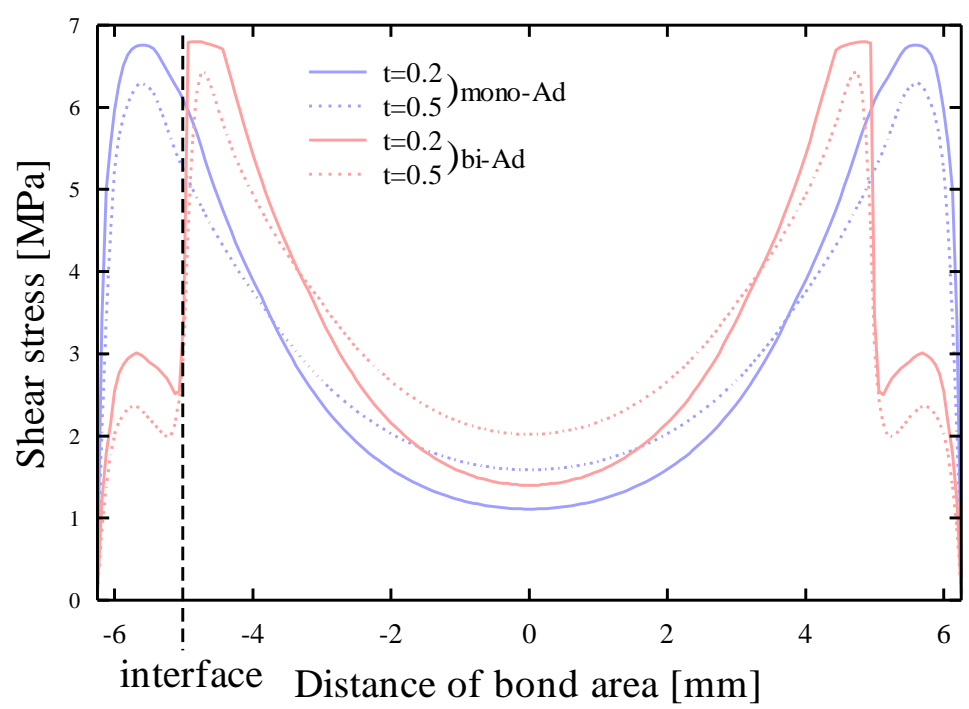
図 29(a)では mono-Ad, bi-Ad とともにピール応力の最大値が接着層中央よりも増加している。特に mono-Ad では接着厚さにかかわらず右端において最大となり接着層中央の右端のピール応力の 2 倍程度の値になった。また接着厚さを増すと mono-Ad, bi-Ad とともに右端での応力値が増加した。

図 29(b)では、ピール応力とは異なり右端のせん断応力のピークは左端より低くなる結果となった。中央部より右側の応力値は低下したものの左側の応力値にはあまり影響がみられなかった。

解析結果と 3.2.2 の破壊試験の結果を比較すると端部における応力集中低減の効果は確かにあったがそれでも、弾性率比 E が小さすぎたもしくは、破壊強度の最も低かった MB5.0wt%添加剤を使用したことで全体の接着強度が大幅に低下したため、 $t=0.2$ の mono-Ad の強度よりも低い結果になったのだと考えられる。 $t=0.5$ において mono-Ad よりも bi-Ad の強度が高かった理由は、図 29(a)で示された上側被着体界面の右端ピール応力に原因があると考えられる。解析モデルの形状から上側被着体界面の右端は引張方向側にあり、これは 3.2.3 破面観察で見られた界面が露出している領域と一致する。このため先に述べた、「破壊は接着部の被着体端部から進行したと考えられる。」という結果を支持していると考えられる。すなわち mono-Ad では接着厚さを増した結果、上下被着体界面の接着部の被着体端部においてピール応力の最大値が増加し、そこから破壊が進行したことで界面破壊が発生し、結果として強度の低下が引き起こされたものと考えられる。

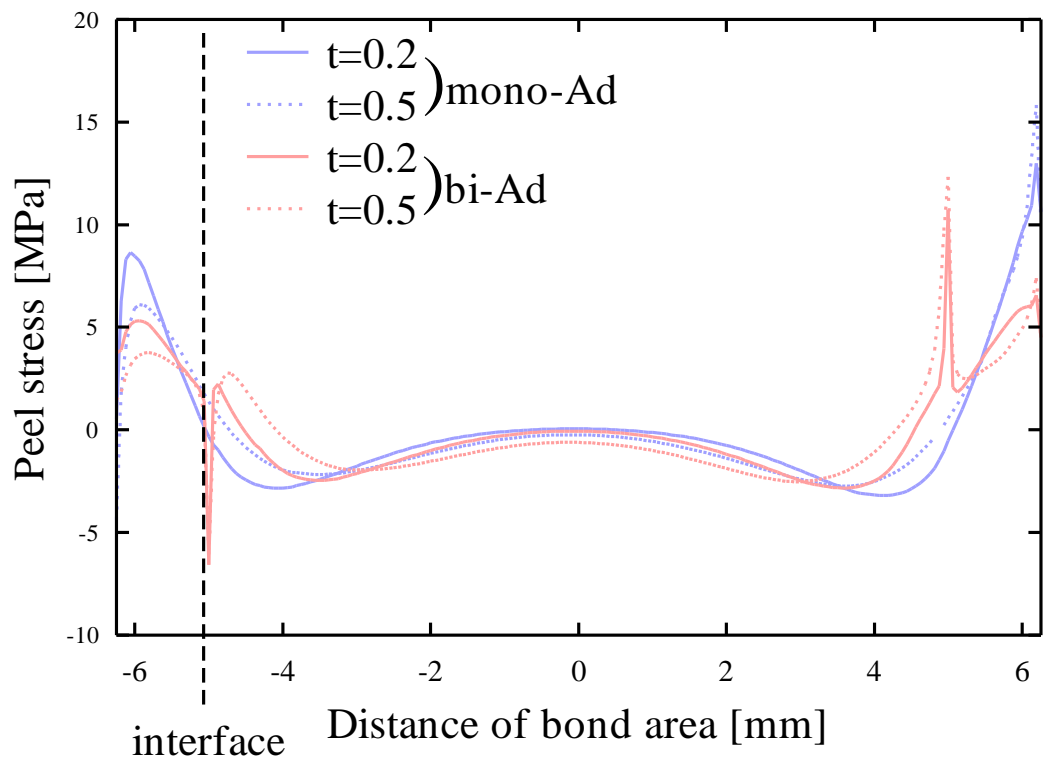


(a)ピール応力分布

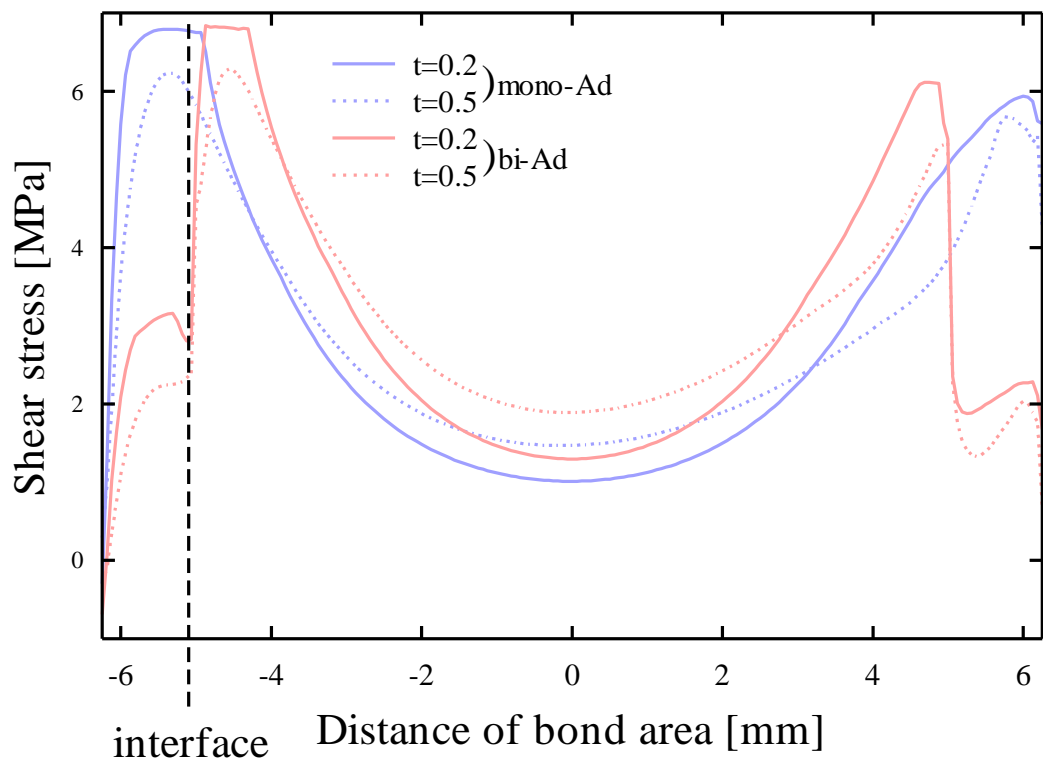


(b)せん断応力分布

図 28 応力解析結果 (接着層中央)



(a)ピール応力分布



(b)せん断応力分布

図 29 応力解析結果 (上側被着体界面)

4.4 DIC と FEM の比較

DIC により得られたひずみ分布を用いてせん断応力分布を求めた。横弾性係数 G と E_{Ad} 、各ポアソン比 ν_{Ad} の関係、及びせん断応力 τ とせん断ひずみ γ にある比例関係

$$G = \frac{E_{Ad}}{2(1 + \nu_{Ad})} \quad (5)$$

$$\tau = G\gamma \quad (6)$$

を用いて

$$\tau = \frac{E_{Ad}}{2(1 + \nu_{Ad})}\gamma \quad (7)$$

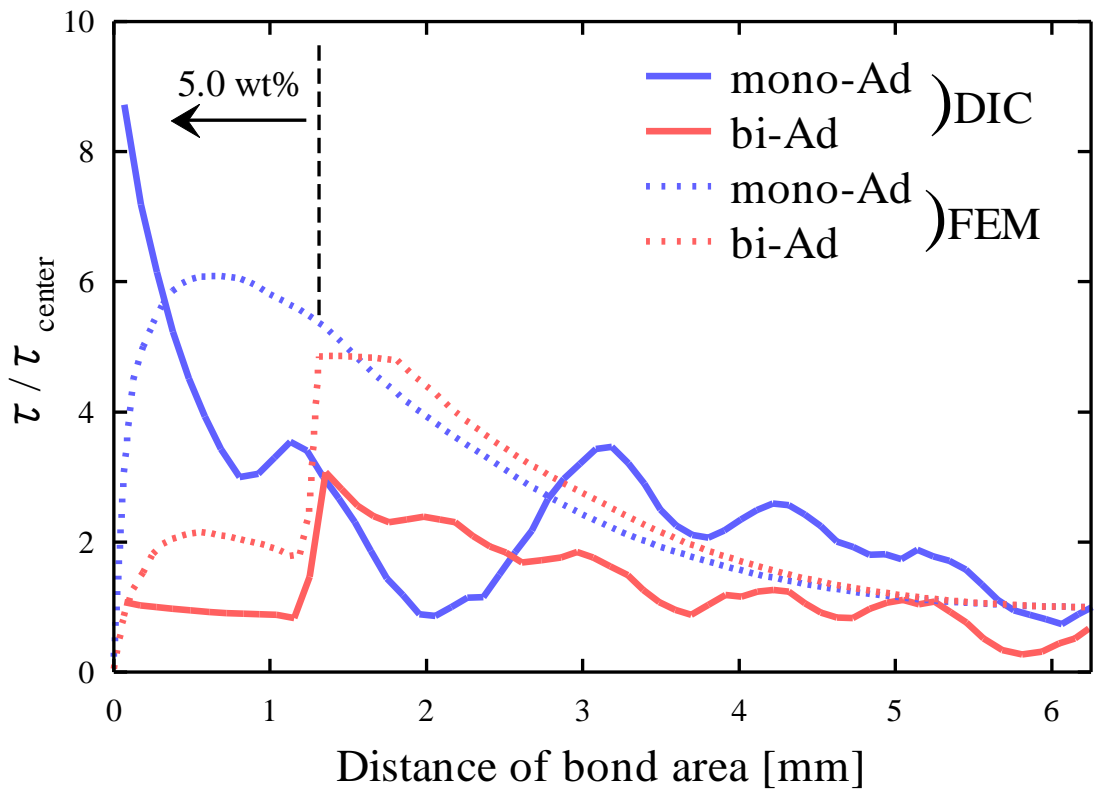
を導き、各点の位置のせん断ひずみを代入し求めた^[25]。

更に DIC と FEM の結果から荷重負荷時の応力の集中度合いを比較するため応力値には標準化せん断応力 τ/τ_{center} を用いた。ここで τ_{center} は中央部のせん断応力である。比較の結果を図 30 に示す。DIC の結果と比較するため端部から中央部の距離(6.25mm)まで表示している。また比較に用いた FEM の結果は、接着層中央のものである。

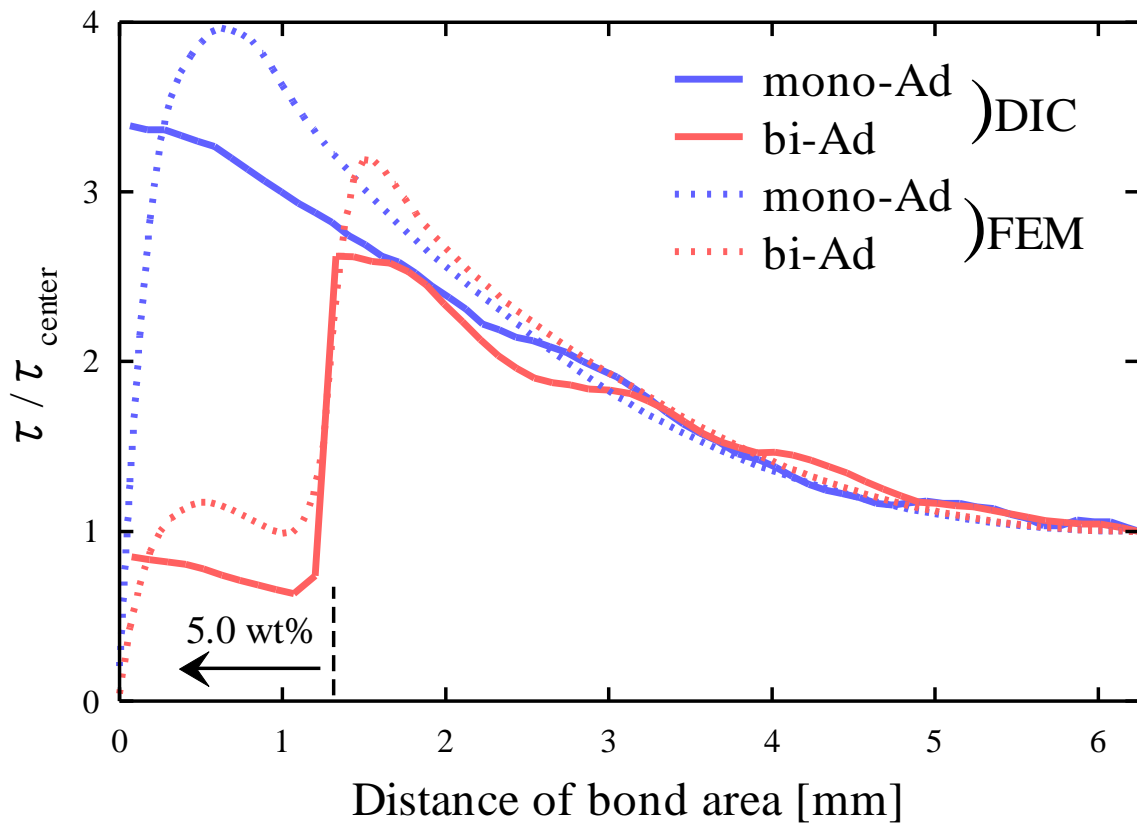
(a)を見ると、mono-Ad では DIC、FEM の結果ともに接着層の中央から端部にかけて τ/τ_{center} は増加していく、しかし、DIC の結果の方が極端な分布となっており、特に端部で急激に増加している。bi-Ad に関しては、塗分けの境界まで τ/τ_{center} は増加していくものの DIC の結果の方が FEM の結果よりも、端部を除くどの位置でも低い結果となった。mono-Ad に対する bi-Ad の端部における τ/τ_{center} は DIC の結果では 87.7%、FEM の結果では 64.8%低下した。

(b)を見ると mono-Ad は応力が端部に近づくほど増加する応力集中が得られたのに対して bi-Ad では塗分けの境界までは mono-Ad と同様に応力が増加している。しかし、塗分け境界(端部より 1.25 mm)で応力が急激に低下している。mono-Ad に対する bi-Ad の端部における τ/τ_{center} は DIC の結果では 75.0%低下し、FEM の結果では 70.1%低下した。FEM の解析結果では端部で 0 となるが、端部近傍を除く領域では DIC 測定結果と定性的によく一致している。

これらの結果から接着厚さにかかわらず、応力集中低減の効果がみられており、エポキシ樹脂接着剤に MB を添加することで bi-Ad とすることができた。このように接着厚さが厚い場合には、bi-Ad とすることでせん断応力の最大値を有効に低下させることが可能で、かつ破壊形態も界面型に遷移することを抑制して接着強度を向上させることが可能である



(a) $t=0.2$ mm



(b) $t=0.5$ mm

図 30 DIC と解析結果の応力分布の比較

第5章 結言

MB の添加量を変化させたバルク材を用いて機械的特性の調査を行った。A2017 を被着体、MB を添加した Araldite2015 を接着剤として SLJ を作製し強度試験及び DIC ひずみ分布測定を行った。また FEM 解析を通じて DIC の結果に基づいた応力分布との比較を行った。本研究で得られた結果をいかに示す。

- (1) 接着剤のバルク材は MB の添加割合が増加するほど弾性率は低下した。また、ポアソン比及び破壊荷重は、MB を 0.5wt% 添加した時が最も高く、非添加剤に比べポアソン比が約 17%、破壊荷重が約 14% 高かった。弾性率が最も低下した MB5.0wt% 添加材は非添加材に比べ弾性率が約 76%、破壊荷重は 63% 低下した。
- (2) bi-Ad の弾性率比 $E=0.26$ の時、破壊強度は最も低下した。mono-Ad に比べると $E=0.55, 0.64$ の破壊強度は 10% 程度低かった。長さ比 d を 1 から $1/8$ へ小さくすると強度は約 13% 向上した。接着厚さを 2.5 倍厚く変更した継手では、mono-Ad では強度が約 50% 低下し、bi-Ad ではほとんど変化しなかった。mono-Ad ($t=0.5$) の破面のみ界面破壊がみられた。
- (3) DIC で得られたひずみ分布では、mono-Ad, bi-Ad ともに先端に近づくほどせん断ひずみが増加した。ただし、どの位置においても bi-Ad は mono-Ad よりも変化量が大きかった。
- (4) 接着層中央における解析結果の比較では接着厚さにかかわらず、bi-Ad の方が端部におけるピール応力が低下した。せん断応力分布ではピークの出現する位置が変わっており mono-Ad では接着層端部であったのに対し、bi-Ad では塗分けの境界だった。
- (5) 上側被着体界面における解析結果の比較では mono-Ad, bi-Ad ともにピール応力の最大値が接着層中央よりも増加している結果が得られた。特に mono-Ad では右端において最大となり、接着層中央における最大ピール応力の 2 倍になった。
- (6) DIC と FEM の結果を比較し、どちらも接着厚さに依らず 60% 以上の応力集中低減の効果が得られた。このことから MB によってエポキシ樹脂接着剤の機械的特性を変化させることにより bi-Ad を作製することが可能であると示された。

謝辞

本研究を進めるにあたり、様々な助言やご指導いただいた担当教員の楠川量啓教授には深く感謝をいたします。また研究を共に進め、ときに相談に乗り様々な議論を重ね支えてくださった牧野優人様ならびに日々多くの知識や知見を教えてくださった材料強度学研究室の皆様には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] 高橋 孝幸, 航空機に適用されるマルチマテリアル化技術, 軽金属 第 72 卷 第 4 号 (2022), 151-158 DOI: 10.2464/jilm.72.151
- [2] 木村 馨, 砂川 誠, 諸石 裕, 佐野 建志, 安藤 雅彦, 高分子新素材 One Point[®] 高機能接着剤・粘着剤.
- [3] 佐藤千明, 接着工学, NTS (2008) .
- [4] 原賀 康介, 高信頼性を引き出す接着設計技術-基礎から耐久性, 寿命, 安全率評価まで- (2013), 7-17.
- [5] Volkersen O, Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit Konstanten Laschenquerschnitten, Luftfahrtforschung 15 (1938), 41.
- [6] Pires I, Quintino L, Durodola JF, Beevers A. Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints. Int J Adhesion Adhes 2003;23(3):215-23.
- [7] Özkan Öz, Halil Özer, On the von Mises elastic stress evaluations in the bi-adhesive single-lap joint: a numerical and analytical study, Journal of Adhesion Science and Technology 2014;28(21):2133-53.
- [8] 三輪 実, 大沢 直志, 小原 庸博, 中山 晃, 粒子充てん高分子複合材料の弾性率に及ぼす粒子サイズの影響, 1978 年 35 卷 2 号 p. 125-129.
- [9] 澤田 健太, 単純重ね合わせ接着継手における応力集中低減化効果を目的とした接着剤特性の検討, (2020)
- [10] 安達 秀飛, 中空微粒子充填エポキシ接着剤を用いた接着継手の機械的特性, (2022)
- [11] 砂田敬太, CFRP/アルミニウム合金単純重ね合わせ継手の強度に及ぼす CFRP 積層構成の影響 (2021)
- [12] 松本油脂製薬株式会社. “マツモトマイクロスフェア-MFLシリーズ | 一般工業関連 | 製品情報 TOP | 製品情報 | 松本油脂製薬株式会社”. 2008.
<https://www.mtmtys.co.jp/product/general/data02.html> (参照2024/02/05)
- [13] A. Akhavan-Safar, F. Ramezani, F. Delzendehrooy, M.R. Ayatollahi, L.F.M. da Silva, A review on bi-adhesive joints: Benefits and challenges, International Journal of Adhesion and Adhesives Volume 114, April 2022, 103098

- [14] Özkan Öz, Halil Özer, An experimental investigation on the failure loads of the mono and bi-adhesive joints, Journal of Adhesion Science and Technology Volume 31, 2017 - Issue 19-20: 2251-2270
- [15] L.F.M. da Silva, R.D. Adams, Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range, Int J Adhesion Adhes, 27 (5) (2007), pp. 362-379
- [16] F. Ramezani, M.R. Ayatollahi, A. Akhavan-Safar, L.F.M. da Silva, A comprehensive experimental study on bi-adhesive single lap joints using DIC technique, Int J Adhesion Adhes, 102 (2020), Article 102674
- [17] 技術情報協会, 樹脂と金属の接着・接合技術, 日本印刷, 2012 年, p8
- [18] 出水亨, 松田浩, 戸次翔, 森崎雅俊, 内野正和, 伊藤幸広, 森田千尋, “デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究”, 土木学会論文集 A2 (応用化学), Vol.68, No.2 (応用力学論文集 Vol.15) ,I_683-I_690,2012
- [19] Ncorr v1.2 DIC Algorithms, <https://ncorr.com/index.php/dic-algorithms>, (参照2024/02/27)
- [20] 牧野 優人, デジタル画像相関法によるSLJ継手接着層のひずみ分布測定, 2023
- [21] OC Zienkiewicz, RL Taylor, JZ Zhu , The finite element method: its basis and fundamentals, 2005, p2
- [22] 横山 正明, 岡本 紀明, 長谷川 浩志, 川面 恵司, 渡辺 隆之, 宇都宮 登雄, 有限要素法のモデル化技術と応用解析, 養賢堂, 2007, p1
- [23] 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, 2022
- [24] ANSYS Help 第4章 非線形材料特性 4.4.2.2.2. 多直線等方硬化
- [25] 一般社団法人日本機械学会, JSMEテキストシリーズ 材料力学, 中村栄一 (昭和情報プロセス株式会社), 2007, P26

付録

応力解析に用いたコマンド (bi-Ad ,d=1/8 ,t=0.2)

! SLJの応力分布解析 Bi-adhesive2023-07-21

/PREP7

!総合プリプロセッサ

! 材料寸法

lt=100 ! adherent length

bl1=1.25 ! bond1 length

bl2=10 ! bond2 length

bl3=1.25 ! bond3 length

bl=bl1+bl2+bl3 ! bond length

ta=0.2 ! adhesive thickness

tm=1.5 ! Metal thickness

! 圧力

press=26.7

!機械的特性

ex1=68700 !68.7e3 アルミニウム合金

NU1=0.35

ex2=660 !0.66e3 MB5wt%接着剤

NU2=0.34

ex3=2820 !2.82e3 MB0wt%接着剤

NU3=0.34 !要素タイプ

et,1,183,,5 ! ET,Itipe,Ename,KOP,INOPR

R,1,25 !R,NEST,R1板厚,R2断面二次モーメント

NLGEOM,on !大変形キー,オフ無視,オン含む

! 材料挙動

!アルミニウム合金

MP,ex,1,ex1 !MP線形材料特性を定数または温度の関数に定義,exヤング率

MP,nuxy,1,NU1 !NU,小ポアソン比

TB,PLASTIC,1,,MISO !TBデータテーブルアクティブ,PLASTIC非線形塑性,,MISO多直線等方向の塑性

TBPT,DEFI,0,300 !非線形データ曲線のデータ点を定義

TBPT,DEFI,8.01E-3,307

TBPT,DEFI,9.95E-3,314

TBPT,DEFI,19.45E-2,378

MP,ex,2,ex2

MP,nuxy,2,NU2

TB,PLASTIC,2,,MISO

TBPT,DEFI,0,3.50

TBPT,DEFI,2.31E-4,4.49

TBPT,DEFI,3.97E-4,5.00

TBPT,DEFI,5.16E-4,5.19

TBPT,DEFI,5.43E-4,5.49

MP,ex,3,ex3

MP,nuxy,3,NU3

TB,PLASTIC,3,,MISO

TBPT,DEFI,0,6.7

TBPT,DEFI,0.71E-4,7.57

TBPT,DEFI,1.71E-4,8.67

TBPT,DEFI,2.71E-4,9.74

TBPT,DEFI,3.71E-4,11.8

K,1,-lt+bl/2,-(ta/2+tm),0

! 金属部 (原点からの位置)x左端,y下端,z0(以下略)

K,2,-bl/2-ta*10,-(ta/2+tm),0

! 金属部 (メッシュのため接着厚の10倍の点を置く(可変)) x,y下端

K,3,-bl/2,-(ta/2+tm),0

! 金属部 (接着層端部) x,y下端

K,4,-bl/2+bl1/2,-(ta/2+tm),0

! 金属部 bl1層中央x,y下端

K,5,-bl/2+bl1,-(ta/2+tm),0

! 金属部 bl1-2界面x左端,y下端

K,6,0,-(ta/2+tm),0

! 金属部 層中央x左端,y下端

K,7,bl/2-bl3,-(ta/2+tm),0

! 金属部 bl2-3界面x左端,y下端

K,8,bl/2-bl3/2,-(ta/2+tm),0

! 金属部 層中央x左端,y下端

K,9,bl/2,-(ta/2+tm),0

! 金属部 層中央x左端,y下端

KGEN,2,1,9,1,,tm,,9,

KGEN,2,12,18,1,,ta/2,,7, !K19-25

KGEN,2,19,25,1,,ta/2,,7, !26-32

K,33,bl/2+ta*10,ta/2,0

K,34,lt-bl/2,ta/2,0

KGEN,2,26,34,1,,tm,,9 !K35-43

! 金属部エリア定義

A,1,2,11,10 !A1

A,2,3,12,11 !A2

A,3,4,13,12 !A3

A,4,5,14,13 !A4

A,5,6,15,14 !A5

A,6,7,16,15 !A6

A,7,8,17,16 !A7

A,8,9,18,17 !A8

A,26,27,36,35 !A9

A,27,28,37,36 !A10

A,28,29,38,37 !A11

A,29,30,39,38 !A12

A,30,31,40,39 !A13

A,31,32,41,40 !A14

A,32,33,42,41 !A15

A,33,34,43,42 !A16

! 延性接着剤エリア定義

A,12,13,20,19 !A17

A,13,14,21,20 !A18

A,16,17,24,23 !A19

A,17,18,25,24 !A20

A,19,20,27,26 !A21

A,20,21,28,27 !A22

A,23,24,31,30 !A23

A,24,25,32,31 !A24

! 脆性接着剤エリア定義

A,14,15,22,21 !A25

A,15,16,23,22 !A26

A,21,22,29,28 !A27

A,22,23,30,29 !A28

!デフォルトのライン分割数

ESIZE,0.5

!エリア内の要素サイズ

AESIZE,2,ta/2

AESIZE,3,ta/2

AESIZE,4,ta/2

AESIZE,5,ta/2

AESIZE,6,ta/2

AESIZE,7,ta/2

AESIZE,8,ta/2

AESIZE,9,ta/2

AESIZE,10,ta/2

AESIZE,11,ta/2

AESIZE,12,ta/2

AESIZE,13,ta/2

AESIZE,14,ta/2

AESIZE,15,ta/2

AESIZE,17,ta/10	
AESIZE,18,ta/10	!延性-脆性接着剤界面
AESIZE,19,ta/10	LESIZE,63,,,4
AESIZE,20,ta/10	LESIZE,54,,,4
AESIZE,21,ta/10	LESIZE,65,,,4
AESIZE,22,ta/10	LESIZE,58,,,4
AESIZE,23,ta/10	
AESIZE,24,ta/10	!端部
AESIZE,25,ta/5	LESIZE,53,,,4
AESIZE,26,ta/5	LESIZE,62,,,4
AESIZE,27,ta/5	LESIZE,59,,,4
AESIZE,28,ta/5	LESIZE,66,,,4
AESIZE,1,0.5	!AL-延性接着剤界面
AESIZE,16,0.5	LESIZE,10,,,20
	LESIZE,13,,,20
!ラインのメッシュ切り	LESIZE,22,,,20
LESIZE,2,,,5	LESIZE,25,,,20
LESIZE,46,,,5	
LESIZE,7,,,20	LESIZE,26,,,20
LESIZE,45,,,20	LESIZE,30,,,20
	LESIZE,39,,,20
!下側軸直行ライン	LESIZE,42,,,20
LESIZE,6,,,40	
LESIZE,9,,,40	!接着層中央部
LESIZE,12,,,40	LESIZE,52,,,20
LESIZE,15,,,40	LESIZE,55,,,20
LESIZE,18,,,40	LESIZE,57,,,20
LESIZE,21,,,40	LESIZE,60,,,20
LESIZE,24,,,40	
	!接着層直交部
!上側軸直行ライン	LESIZE,51,,,4
LESIZE,29,,,40	LESIZE,61,,,4
LESIZE,27,,,40	LESIZE,56,,,4
LESIZE,31,,,40	LESIZE,64,,,4
LESIZE,34,,,40	
LESIZE,37,,,40	!AL-脆性接着剤界面
LESIZE,40,,,40	LESIZE,16,,,120
LESIZE,43,,,40	LESIZE,19,,,120

```

LESIZE,33,,,120
LESIZE,36,,,120

!接着層中央部
LESIZE,68,,,120
LESIZE,69,,,120
!接着層直交部
LESIZE,67,,,4
LESIZE,70,,,4

!上端
LESIZE,28,,,20
LESIZE,32,,,20
LESIZE,35,,,120
LESIZE,38,,,120
LESIZE,41,,,20
LESIZE,44,,,20

!下端
LESIZE,8,,,20
LESIZE,11,,,20
LESIZE,14,,,120
LESIZE,17,,,120
LESIZE,20,,,20
LESIZE,23,,,20

!メッシング
MAT,1!金属
AMESH,1,8,1
AMESH,9,16,1

MAT,2!延性接着剤
AMESH,17,18,1
AMESH,19,20,1
AMESH,21,22,1
AMESH,23,24,1

MAT,3!脆性接着剤
AMESH,25,28,1

```

```

!ソリューションプロセッサの開始点
/SOLU

NSEL,s,loc,x,-lt+bl/2
D,all,all,0
NSEL,all

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

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

LSEL,s,loc,x,lt-bl/2
SFL,all,pres,-press
LSEL,all

!非線形的な変形を行えるようにする
NLGEOM,on
LNSRCH,on
!荷重のステップを決める
TIME,1
KBC,0

OUTRES,ALL,ALL

SOLVE
FINI

/POST1
!最後のサブステップを読み込み
SET,last

!接着層 - 界面, 応力, ひずみ
PATH,intcf,2,30,200
PPATH,1,,-bl/2,ta/2,0

```

PPATH,2,,bl/2,ta/2,0
PDEF,st_cfy,s,y
PDEF,st_cfy,s,xy
PLPATH,st_cfy
PLPATH,st_cfy

!接着層中央のパス定義, 応力, ひずみ

!PATH,adhes,2,30,200
!PPATH,1,,-bl/2,0,0
!PPATH,2,,bl/2,0,0
!PDEF,st_adhy,s,y
!PDEF,st_adhxy,s,xy
!PLPATH,st_adhy
!PLPATH,st_adhxy