

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

複合材／金属の異種材接着接合における
シングルラップ継手様式の改良とその強度特性
Modified single-lapped joint design and strength properties
for adhesive bonding of dissimilar materials in composites and metal

豊澤 崇文, 桑原 竜摩, 安岡 哲夫, 熊澤 寿, 杉本 直
TOYOSAWA Takafumi, KUWAHARA Ryoma, YASUOKA Tetsuo
KUMAZAWA Hisashi and SUGIMOTO Sunao

2021年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

1. はじめに	2
2. チタン合金基材接着面への溝加工による効果	2
2.1. 試験片概要	2
2.2. 有限要素解析での検証	4
2.3. 試験方法	5
2.4. 試験結果	5
2.4.1. 破断荷重・せん断応力	5
2.4.2. 破壊モード	6
2.5. 考察	7
3. チタン合金基材への溝加工及びCFRP基材へのパッドアップ加工, 溝とパッドアップ併用による効果	8
3.1. 試験片概要	8
3.1.1. 溝 (Groove) タイプ試験片	8
3.1.2. パッドアップ (PU) タイプ試験片	9
3.1.3. パッドアップ/溝 (PU-Groove) タイプ試験片	9
3.2. 有限要素解析での検証	9
3.3. 試験方法	11
3.4. 試験結果	11
3.4.1. 破断荷重・せん断応力	11
3.4.2. き裂進展	13
3.4.3. 破壊モード	14
3.4.4. ひずみ分布	17
3.5. 考察	19
4. おわりに	20
参考文献	20
Appendix.1	21
Appendix.2	22

複合材／金属の異種材接着接合における シングルラップ継手様式の改良とその強度特性

豊澤 崇文^{*1}, 桑原 竜摩^{*2}, 安岡 哲夫^{*1}, 熊澤 寿^{*1}, 杉本 直^{*1}

Modified single-lapped joint design and strength properties for adhesive bonding of dissimilar materials in composites and metal

TOYOSAWA Takafumi^{*1}, KUWAHARA Ryoma^{*2}, YASUOKA Tetsuo^{*1},
KUMAZAWA Hisashi^{*1}, SUGIMOTO Sunao^{*1}

ABSTRACT

This study investigated the strength improvement of bi-material single lap adhesive joints when the shape of the joints was simply modified. The joints in this study were composed of carbon/epoxy composites and titanium alloys with ITRO treatment. Two approaches, namely, forming grooves on titanium alloy substrates and thickening composite substrates, were applied. As a result of lap shear strength tests, the joint strength did not increase when grooves were introduced on the bonding surfaces of the titanium alloy substrates. When grooves were introduced the outside of the bonded surfaces of the titanium alloy substrates and the bonding surfaces of the composite substrates were thickened, the joints failed in the composite substrates and the strength also did not increase.

Keywords: Adhesive bonding, Metallic Materials, Composite Materials, Structural Design

概要

本研究では、簡易な加工による異種材接着シングルラップジョイントの継手強度向上について検討した。本研究で使用した継手は、カーボン/エポキシ複合材とチタン合金の接着面にイトロ処理を施したものである。チタン合金基材に溝を形成する方法と、複合材基材を厚くする方法の2つのアプローチを適用した。試験の結果、チタン合金基材の接着面に溝を形成した場合、継手強度が低下した。また、チタン合金基材の接合面の外側に溝を形成し、複合材基材を厚くした場合には、複合材が破損し、継手強度を向上させることができなかった。

* 2020年12月2日受付 (Received December 2, 2020)

^{*1} 航空技術部門 構造・複合材技術研究ユニット (Structures and Advanced Composite Research Unit, Aeronautical Technology Directorate)

^{*2} 新明和工業株式会社 (ShinMaywa Industries, Ltd.)

1. はじめに

近年の航空機分野において比強度・比剛性に優れている炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastic, 以下 CFRP）は、軽量化を目的に構造部材への適用が増えている。また、チタン合金は、金属材料の中でも CFRP に対する腐食や熱膨張係数の点で適合性に優れており、CFRP 同様に航空機構造への適用が増えている。これら CFRP-チタン合金の接合について、航空機構造に適用されている一般的な方法はボルトやリベットによるファスナ締結継手である。これを接着接合に置き換えることで、荷重伝達の効率化や重量軽減といったメリットが見込まれているものの、民間機の一次構造等へ適用するには、継手強度の向上、接合プロセスの低コスト化、信頼性の高い非破壊検査方法の確立、といった様々な課題を克服する必要がある。これら課題に対し、安岡、竹田らは、接着前の表面処理にイトロ処理法を適用することによる高強度化、低コスト化の検討を進めている^{1,2,3,4)}。

継手強度に関しては、接着接合継手の場合、その形状や剛性差等から接着端部に高い応力が発生し、多くの場合で破壊の起点となる。一方で、接着面中央部に発生する応力は端部と比較すると極端に低く、荷重伝達に寄与していない状態であることが知られている。継手強度はこの端部と中央部の応力差を軽減し、接着面全体で耐荷することで向上する。その手段としては、被着材にテーパやステップをつける方法が一般的である。これらの方法は、接着接合部における形状の偏心や物性値・剛性の差が滑らかとなり、力が特定の部位に集中することなくスムーズに伝達され、かつ接着面の広域に渡って耐荷できるようになることで、継手強度が向上する。しかしながら、これらテーパやステップ等の複雑な加工は接着面積が大きくなるほど、加工工数等が増大することなどにも注意が必要である。

複雑な加工を要するテーパやステップではなく、加工が容易でコストが比較的安い単純な溝形状でも、継手内部の荷重の流れに変化をつけることで、接着端部に発生する高い応力を接着面中央部あるいは接着面外へ分散できる可能性がある。本研究では、イトロ処理法を適用した CFRP-チタン合金シングルラップ接着接合継手試験片の接着面に対し種々の溝加工を施した場合、次にチタン合金基材への単一溝の追加や、CFRP 基材へパッドアップ（厚肉化）を追加した場合について試験を実施し、継手強度に対する効果の確認を行った。本稿ではその結果について報告する。

2. チタン合金基材接着面への溝加工による効果⁵⁾

チタン合金基材の接着面部分に種々の溝加工を施すことで、接着端部に集中する応力を接着面中央部へ分散し、継手強度が向上する可能性がある。これを評価するため、種々の溝加工を施した試験片を製作し、試験を実施した。

2.1. 試験片概要

接着接合継手試験片の継手形態はシングルラップとし、チタン合金基材（Ti-6Al-4V, 101.6 mm×25.4 mm, t=2.29 mm）、疑似等方積層（[+45/0/-45/90]_{2s}）された CFRP 基材（T800S/#3900-2B, 101.6 mm×25.4 mm, t=3.04 mm）並びにフィルム接着剤（Metlbond-1515）で構成されており、標定部の接着面積は 25.4 mm×25.4 mm とした。なお、掴み部には各基材と同じ材質、板厚のものとした。形状及び寸法を図 1 に示す。

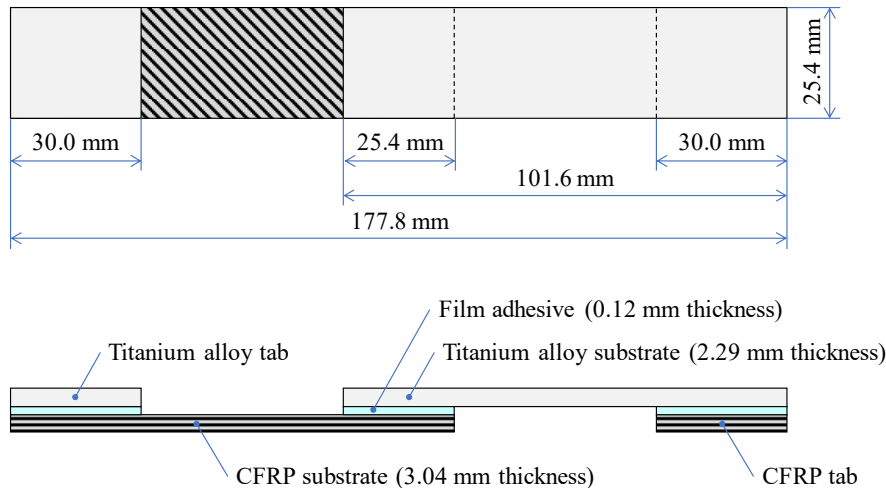


図1 試験片概要.

チタン合金基材は Ti-6Al-4V の板材から基材サイズ (101.6 mm×25.4 mm, t= 2.29 mm) へ加工した後, 接合面に対し図2に示す溝加工を施した. 溝は 0°, 90°, +45°及び-45°方向を設定した. 基本的な溝形状 (深さ×幅) は 1.0×1.5 mm とし, 90°のみ 0.5×0.5 mm, 0.5×1.5 mm 及び 1.0×0.5 mm の3種類を追加した. また, 強度比較用として “溝なし” (none) を設定した.

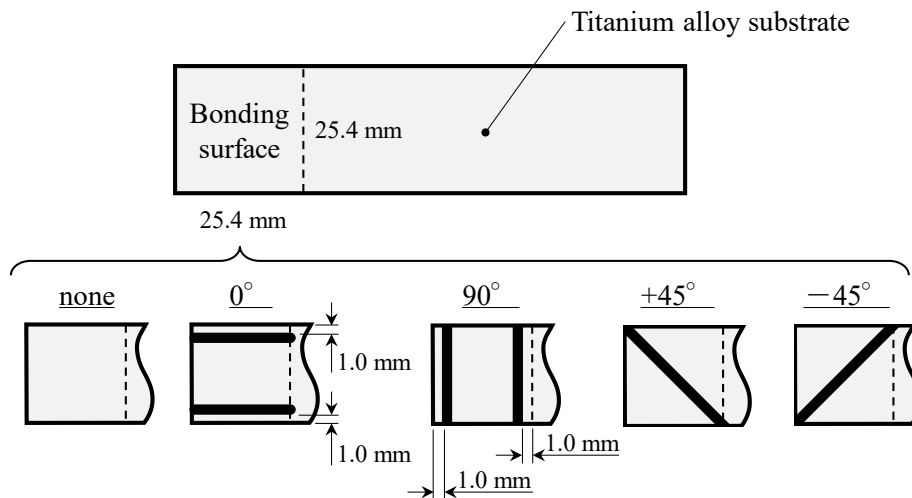


図2 チタン合金基材接着面の溝形状.

CFRP 基材は, 温度 177°C 圧力 586kPa 2 時間でオートクレーブにて成形した積層板から切り出した. 加工が完了したチタン合金基材及び CFRP 基材の接着接合面にイトロ処理法による表面処理を施した. イトロ処理は予備加熱した上で, チタン合金基材に対してはパス数を 18, 処理速度は 500m/s, CFRP 基材に対してはパス数を 12, 処理速度を 750mm/s にて処理した. 処理後速やか (24 時間以内) に接着作業を実施した. 接着作業では表面処理が完了したチタン合金基材及び CFRP 基材の間にフィルム接着剤 (Metlbond-1515) を挟み, オートクレーブで硬化させた. なお, チタン合金基材の溝部に対してもフィルム接着剤を積層し充填させた.

2.2. 有限要素解析での検証

溝加工による継手強度に対する挙動を確認するために、Abaqus (Abaqus/Standard 2017) を用いた有限要素解析を実施した。解析モデルは、各要素をソリッド (6 面体 1 次要素 C3D8I) で構成し、チタン合金基材並びに CFRP 基材を線形弾性材料、接着剤を弾塑性材料とした。代表的な解析モデルを図 3 に示す。計算に用いた各材料特性及び解析条件は Appendix. 1 に示す。

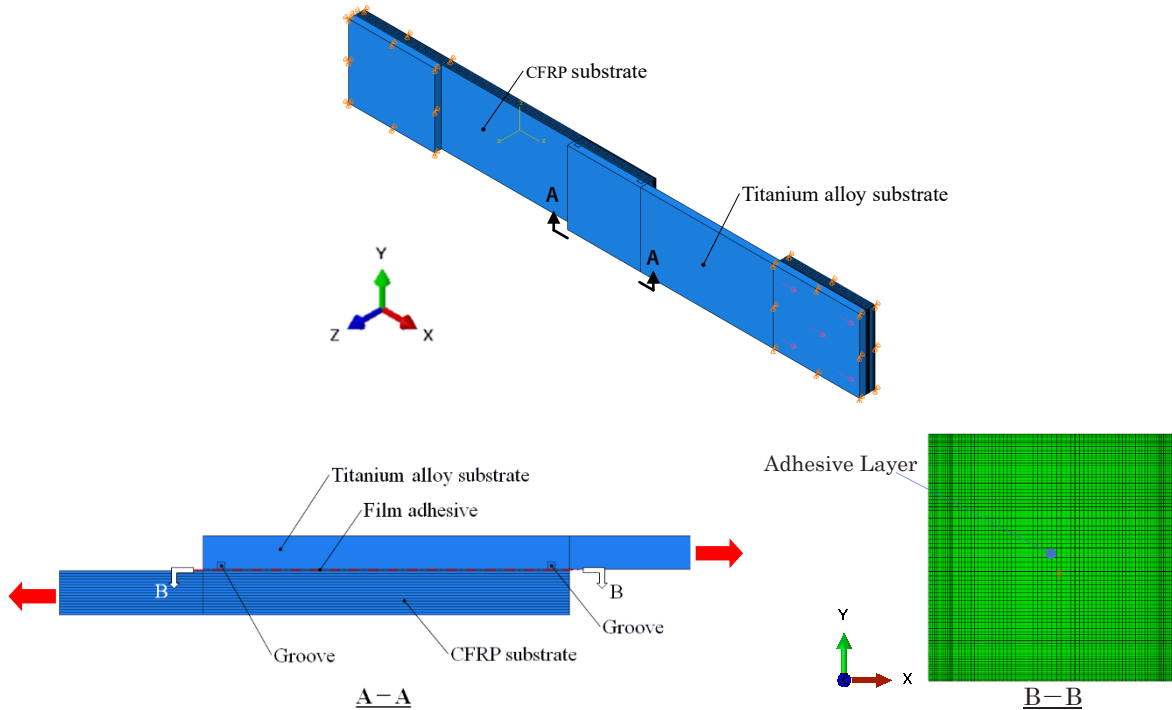


図 3 代表的な解析モデル (90°_0505 モデル)。

図 4 に”溝なし”の場合と”溝あり” (90°, 溝深さ 0.5 mm, 溝幅 1.5 mm) の場合の接着剤のミーゼス応力コンター図を示す。“溝あり”では、接着面内部に付与した溝により溝部直下の応力が低下し、接着面左側のコンターの付く範囲は”溝なし”と比べて中央に寄っており、一部の応力が接着面中央部に分散するような変化が見られる。しかしながら、接着端部に発生する最大ミーゼス応力は“溝なし”の none が 58.7MPa なのに対して、“溝あり”の 90°_0515 は 75.7MPa となり、溝を設置することで継手強度が低下することが示唆される。

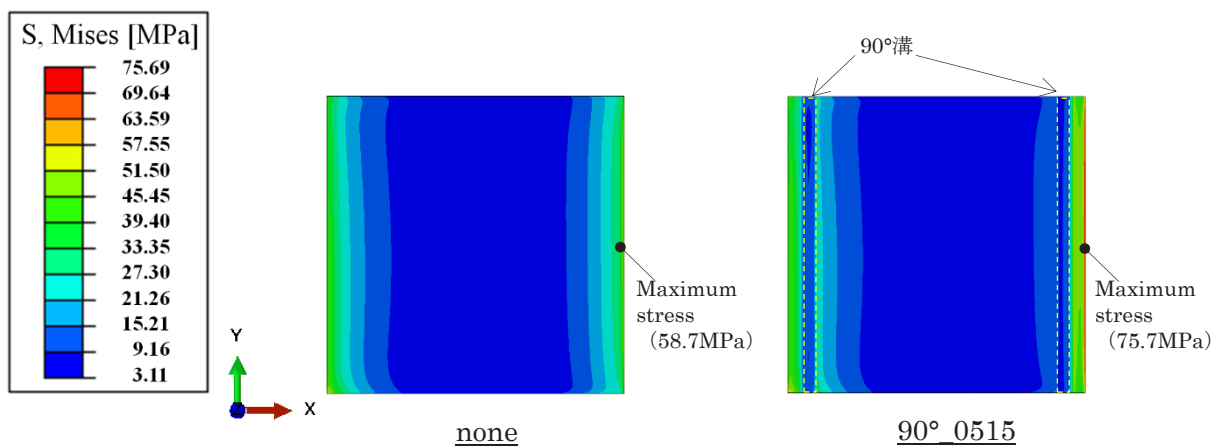


図 4 接着剤のミーゼス応力コンター図 (引張荷重 4.0kN 負荷時)。

2.3. 試験方法

製作した試験片について、油圧式機械試験機（INSTRON8802 シリーズ）を用いた引張試験を実施した。負荷速度は 1.0 mm/min とした。図 5 に試験の様子を示す。



図 5 試験の様子。

2.4. 試験結果

2.4.1. 破断荷重・せん断応力

試験結果を表 1 に示す。図 6 には破断荷重，図 7 には各試験片仕様において破断荷重が最大となった試験片の荷重－変位線図を示す。溝を付与した場合の破断荷重は、いずれも“溝なし”の none よりも低い値となった。

表 1 チタン合金基材加工仕様と破断荷重・せん断応力。

	チタン合金基材加工仕様			破断荷重 [kN] (せん断応力 [MPa])		試験数
	接着面概略図	溝深さ(mm)	溝幅(mm)	平均	標準偏差	
none		-	-	8.2 (12.7)	0.7 (1.0)	8
90°_0505		0.5	0.5	7.0 (10.8)	0.5 (0.8)	4
90°_0515		0.5	1.5	7.4 (11.5)	1.0 (1.6)	4
90°_1005		1.0	0.5	6.7 (10.4)	0.4 (0.6)	4
90°_1015		1.0	1.5	6.3 (9.7)	1.1 (1.7)	4
-45°		1.0	1.5	6.2 (9.5)	0.7 (1.1)	4
+45°		1.0	1.5	6.0 (9.3)	0.4 (0.6)	4
0°		1.0	1.5	6.5 (10.1)	0.6 (1.0)	4

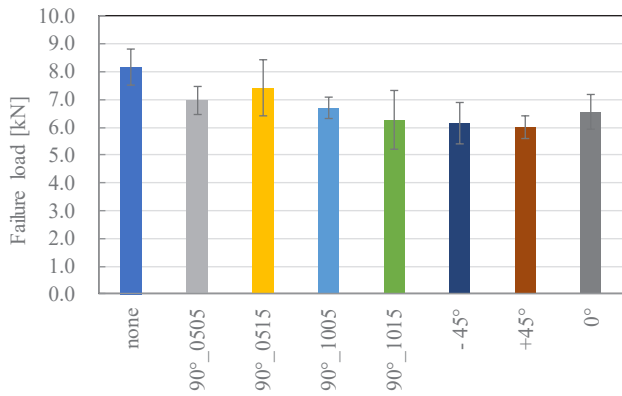


図6 破断荷重. エラーバーは標準偏差を示す.

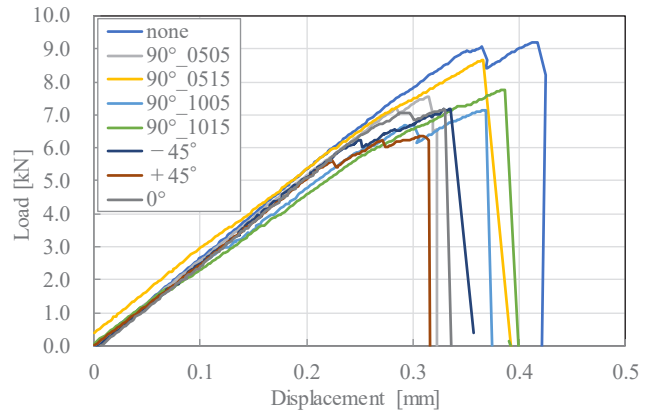


図7 試験時の荷重-変位線図.

2.4.2. 破壊モード

試験完了後の接着部近傍の破断面について、左側の CFRP 基材と、右側のチタン合金基材を突き合わせる形で示している。図8に代表例として none の破断面を示す。CFRP 基材側では 0°層、水色の接着剤、45°層が確認でき、チタン合金基材の相手側は、0°層、チタン合金、接着剤となっている。順に被着材破壊 (0°層)、接着剤とチタン合金間の界面破壊、接着剤と CFRP 間の界面破壊となっている。図9に示す破断面は、ほとんどが界面破壊となっており、一部で被着材破壊が確認できる。

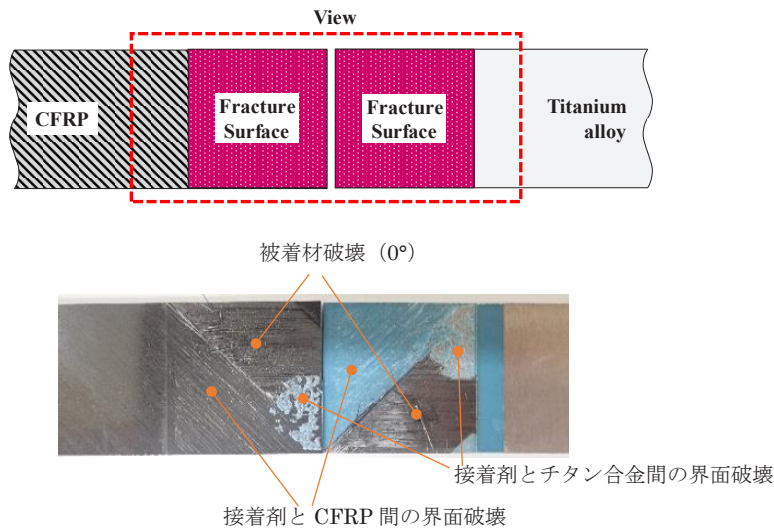


図8 破断面代表例 (none).

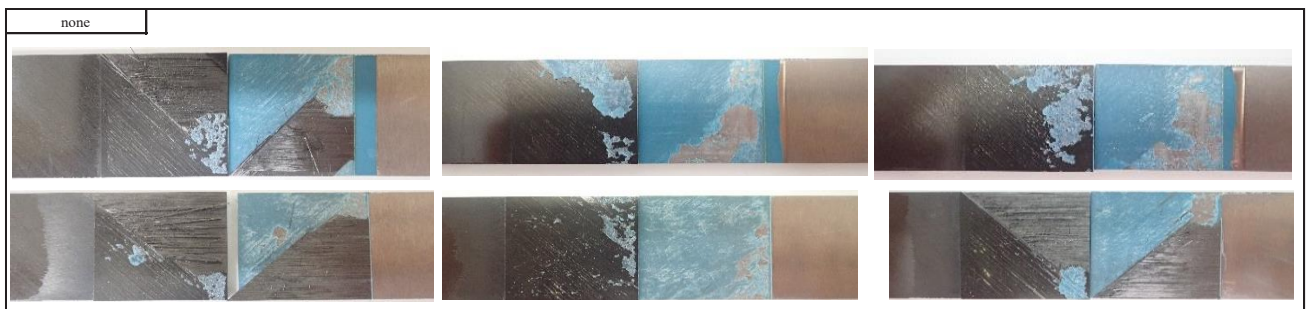


図9 破断面 (1/2).

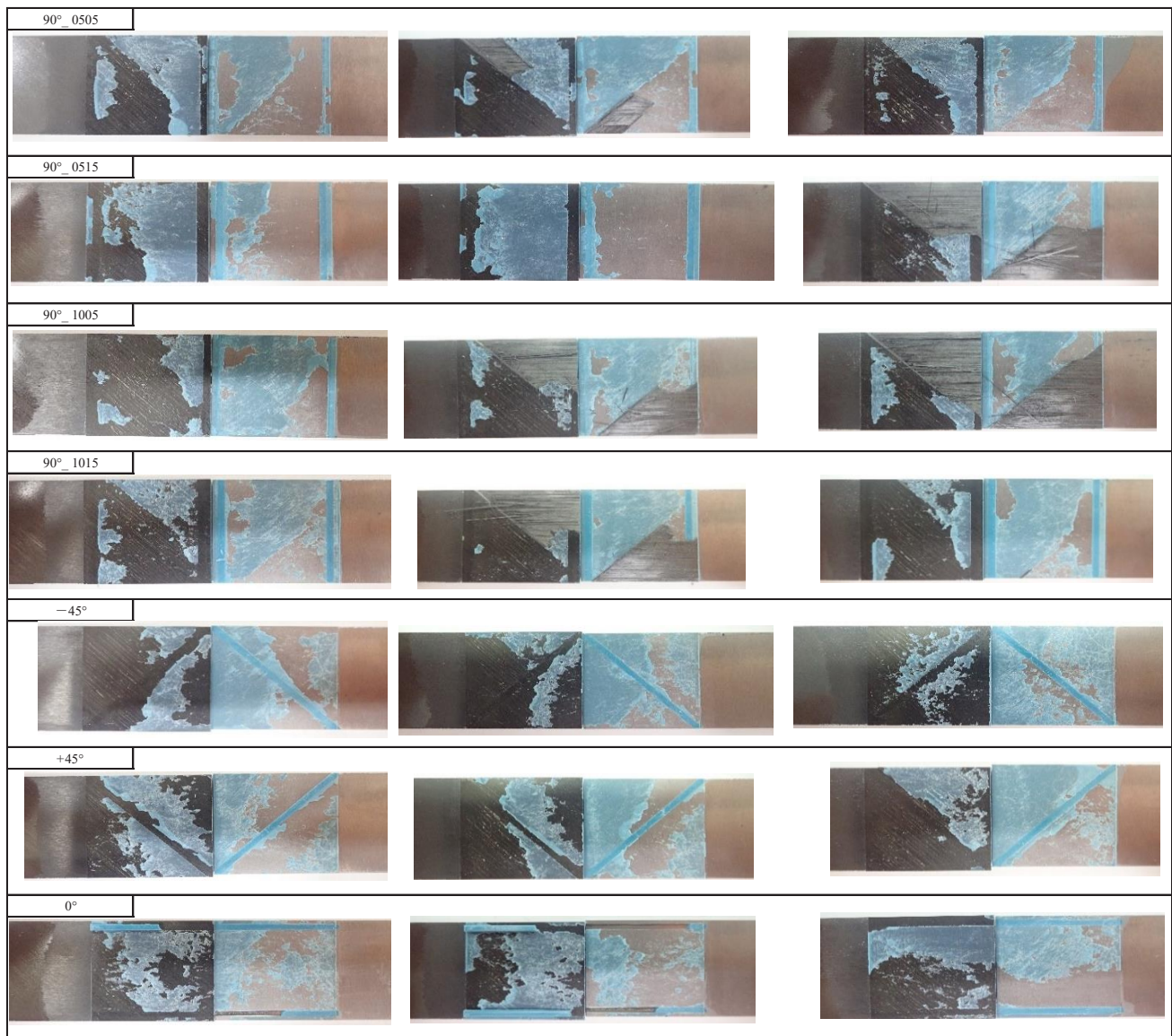


図9 破断面 (2/2).

2.5. 考察

有限要素解析での検証により、溝加工による継手強度低下が示唆されたが、試験結果はこれを裏付けるものとなった。チタン合金基材接着面への溝加工は、接着端部の応力集中の低減に寄与しなかったと考えられる。

3. チタン合金基材への溝加工及び CFRP 基材へのパッドアップ加工, 溝とパッドアップ併用による効果^{6,7)}

チタン合金基材への接着端面外側の溝加工及び CFRP 基材へのパッドアップにより、接着端部に集中する応力が接着面中央部へ分散し、継手強度が向上する可能性がある。これを評価するため、種々の溝加工及びパッドアップした試験片を製作し、試験を実施した。

3.1. 試験片概要

試験片は、チタン合金基材 (Ti-6Al-4V, 101.6 mm×25.4 mm, t=2.20 mm, 2.40 mm, 2.54 mm)、疑似等方積層 ([+45/0/-45/90]_{2s}) された CFRP 基材 (T800S/#3900-2B, 101.6 mm×25.4 mm, t=3.04 mm) 並びにフィルム接着剤 (AF163-2M) で構成されており、接着面積は 25.4 mm×25.4 mm とした。なお、掴み部には各基材と同じ材質、板厚のものを準備し、全ての構成品を同時に接着硬化させた。試験片の形状及び寸法を図 10 に示す。

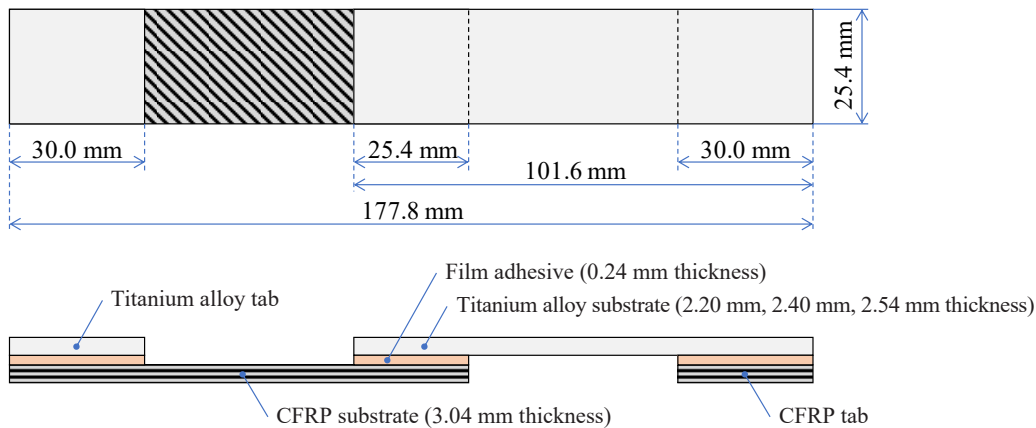


図 10 試験片概要.

CFRP 基材は、温度 177°C 圧力 586kPa 2 時間でオートクレーブにて成形した積層板から切り出した。加工が完了したチタン合金基材及び CFRP 基材の接着接合面にイトロ処理法による表面処理を施した。イトロ処理は予備加熱した上で、チタン合金基材に対してはパス数を 18、処理速度は 500m/s、CFRP 基材に対してはパス数を 12、処理速度を 750mm/s にて処理した。処理後速やか (24 時間以内) に接着作業を実施した。接着作業では表面処理が完了したチタン合金基材及び CFRP 基材の間にフィルム接着剤 (AF163-2M) を挟み、オートクレーブで硬化させた。溝加工やパッドアップを施した試験片については 3.1.1 節 ~3.1.3 節に示す。また、強度比較用として“溝なし” (None) を製作した。

3.1.1. 溝 (Groove) タイプ試験片

チタン合金基材に対し溝を追加した試験片。溝の深さは 0.5 mm、幅は 0.5 mm, 2.0 mm, 46.2 mm とし、挿入位置は接着端部の外側で接着端部に沿うように配置した。概要を図 11 に示す。



図 11 Groove タイプ試験片.

3.1.2. パッドアップ (PU) タイプ試験片

CFRP 基材に対しパッドアップを追加した試験片. パッドアップの積層方向は 0°とし, 接着部 (25.4 mm×25.4 mm) を覆うように最外層に配置したものを P1, 0°のパッドアップを+45°層の下に配置したものを P2 とする. 概要を図 1 2 に示す.

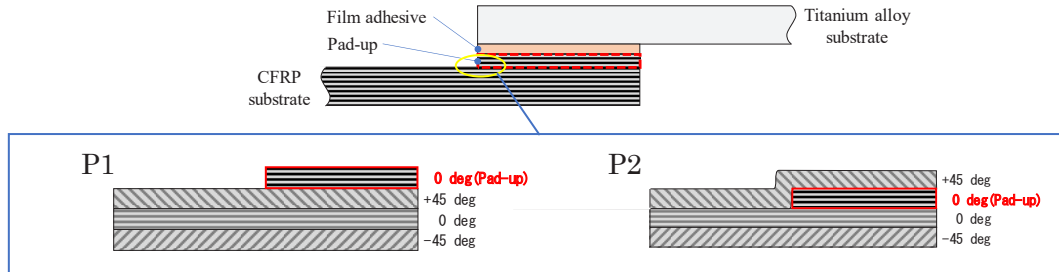


図 1 2 PU タイプ試験片.

3.1.3. パッドアップ／溝 (PU-Groove) タイプ試験片

パッドアップと溝を併用した試験片. パッドアップの形状は PU タイプ試験片と同様に P1 及び P2, 溝形状は Groove タイプ試験片と同様に溝深さは 0.5 mm, 幅は 0.5 mm, 2.0 mm, 46.2 mm とした. 概要を図 1 3 に示す.

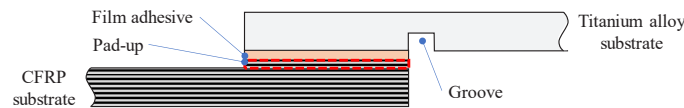


図 1 3 PU-Groove タイプ試験片.

3.2. 有限要素解析での検証

溝加工及びパッドアップ加工による継手強度に対する挙動を確認するために, Abaqus (Abaqus / Standard 2017) を用いた有限要素解析を実施した. 解析モデルは, 各要素をソリッド (6 面体 1 次要素 C3D8I) で構成し, チタン合金基材並びに CFRP 基材を線形弾性材料, 接着剤を弾塑性材料とした. なお, 解析モデルには, None (基本となる無加工モデル), Groove (溝加工モデル), PU (パッドアップ加工モデル), PU-Groove (パッドアップ加工, 溝加工併用モデル) の各解析モデルを作成した. 代表的な解析モデルを図 1 4 に示す. 計算に用いた各材料特性及び解析条件は Appendix. 1 に示す.

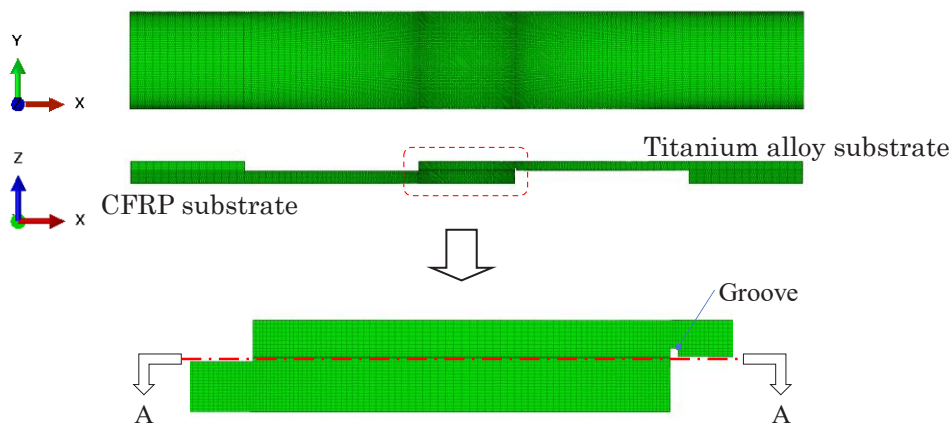


図 1 4 代表的な解析モデル (Groove モデル) (1/2).

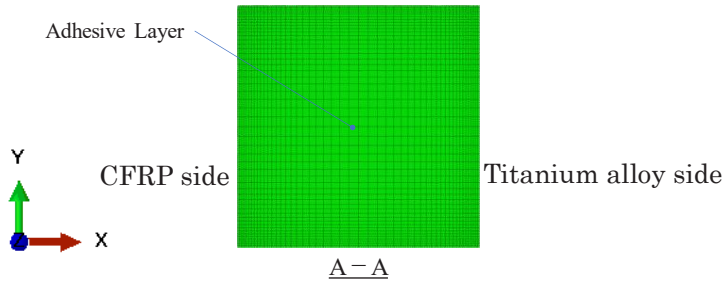


図 1 4 代表的な解析モデル (Groove モデル) (2/2).

引張荷重 5.6kN を負荷したときの、接着剤のミーゼス応力コンター図を図 1 5 に示す。ここで、Groove モデルは溝幅を 0.5 mm とした場合、PU モデルはパッドアップを P1 とした場合、PU-Groove はパッドアップが P1、溝幅を 0.5 mm とした場合について解析した結果である。None と比較して、Groove は右側 (Titanium alloy side) の接着端部応力が低減し、中央部へ応力が分散している。PU は左側 (CFRP side) の端部応力が低減し、中央部へ分散している。PU-Groove は両端部の応力が低減し、中央部へ分散している。

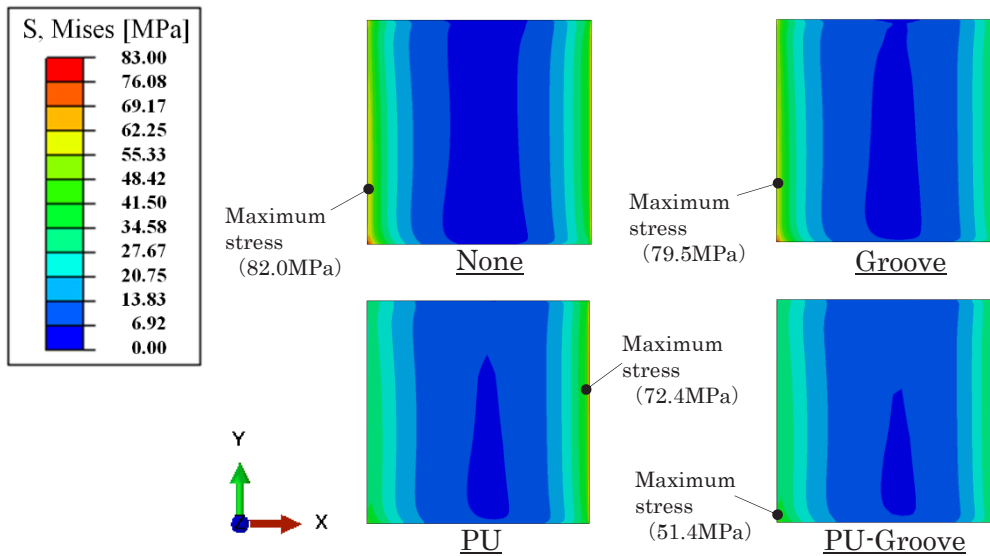


図 1 5 接着層のミーゼス応力コンター図 (引張荷重 5.6kN 負荷時).

また、各モデルの接着剤の幅中央部におけるミーゼス応力分布を図 1 6 に示す。コンター図と同様に、各モデルの端部応力の低減と中央部への応力分散が確認できる。PU-Groove は他のモデルと比べて、最大ミーゼス応力が最も低く、継手強度向上が見込まれる。

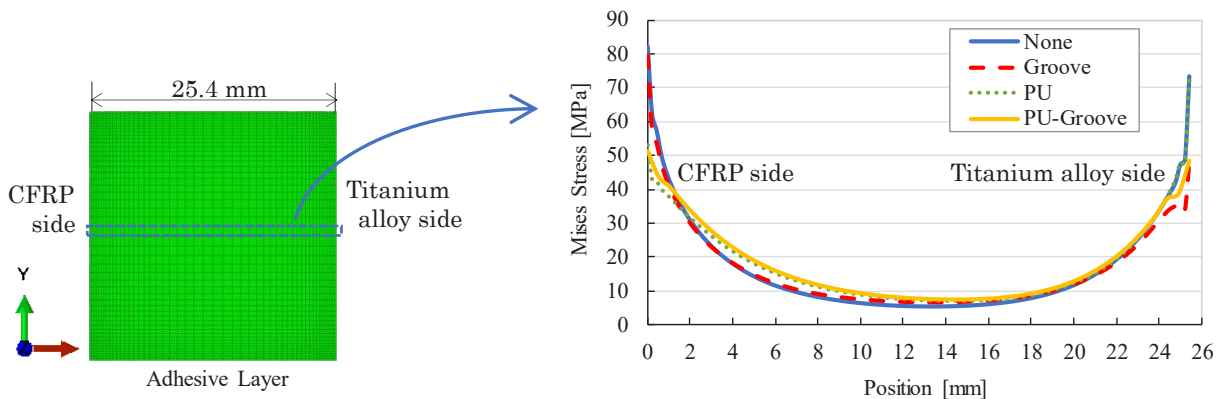


図 1 6 接着層幅中央部のミーゼス応力分布 (引張荷重 5.6kN 負荷時).

3.3. 試験方法

製作した接着接合継手試験片について、油圧式機械試験機（INSTRON 8802 シリーズ）を用いた引張試験を実施した。負荷速度は 1.0 mm/min とした。試験時には ARAMIS（GOM GmbH）を用いた Digital Image Correlation（以下 DIC）によるひずみ計測を実施した。DIC は試験片側面の接着部周辺に適用し、適用部には白と黒の塗料によるランダムパターン塗装を施した。ひずみ計測箇所を図 1 7 に、試験の様子を図 1 8 に示す。

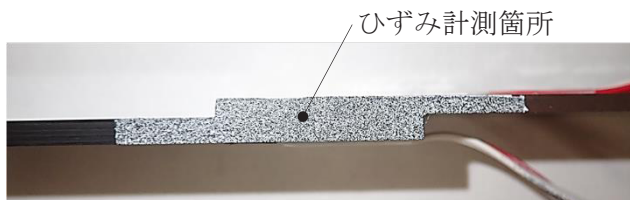


図 1 7 DIC によるひずみ計測箇所.

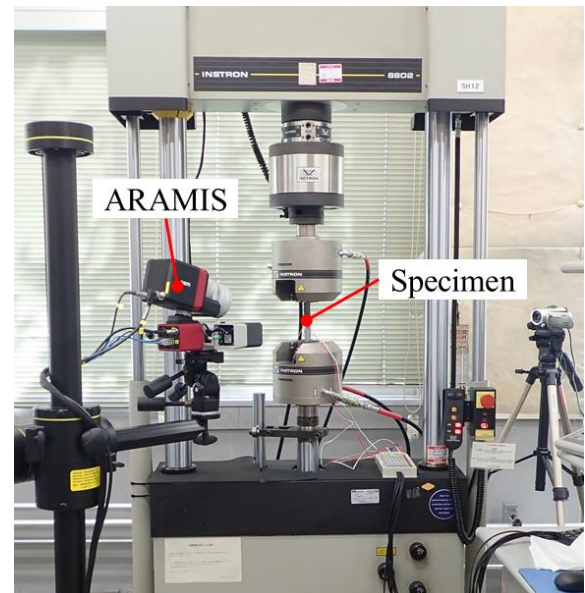


図 1 8 試験の様子.

3.4. 試験結果

3.4.1. 破断荷重・せん断応力

試験結果を表 2 に示す。図 1 9 に破断荷重、図 2 0 に各試験片仕様において破断荷重が最大となった試験片の荷重－変位線図を示す。破断荷重について、無加工の None タイプと比較して、Groove タイプは溝幅を 0.5 mm とした場合には高くなったが、溝幅 2.0 mm, 46.2 mm とした場合は低くなった。PU タイプ及び PU-Groove タイプは、パッドアップを P1 とした場合はいずれも低かったが、P2 とした場合は None タイプと同等となった。

表 2 試験片仕様及び破断荷重・せん断応力.

	試験片仕様					破断荷重 [kN] (せん断応力 [MPa])		試験数
	CFRP板厚 (mm)	チタン板厚 (mm)	チタン溝深さ (mm)	チタン溝幅 (mm)	CFRP パッドアップ	平均	標準偏差	
None-A	3.04	2.2	-	-	-	18.4 (28.6)	2.2 (3.5)	3
None-B	3.04	2.4	-	-	-	17.5 (27.2)	2.0 (3.1)	3
Groove_05-A	3.04	2.2	0.5	0.5	-	21.0 (32.6)	1.1 (1.7)	5
Groove_462-C	3.04	2.54	0.5	46.2	-	10.1 (15.7)	1.3 (2.0)	3
Groove_20-B	3.04	2.4	0.5	2.0	-	13.9 (21.6)	1.4 (2.2)	3
PU_P1-A	3.04	2.2	-	-	P1	9.6 (14.8)	0.4 (0.6)	5
PU_P1-B	3.04	2.4	-	-	P1	10.2 (15.8)	0.4 (0.6)	3
PU_P2-B	3.04	2.4	-	-	P2	18.4 (28.5)	1.7 (2.7)	3
PU_P1-Groove_05-A	3.04	2.2	0.5	0.5	P1	9.6 (14.8)	0.8 (1.3)	5
PU_P1-Groove_462-C	3.04	2.54	0.5	46.2	P1	9.1 (14.2)	0.2 (0.3)	3
PU_P1-Groove_20-B	3.04	2.4	0.5	2.0	P1	9.6 (14.8)	0.7 (1.0)	3
PU_P2-Groove_462-C	3.04	2.54	0.5	46.2	P2	18.3 (28.4)	0.5 (0.8)	3
PU_P2-Groove_20-B	3.04	2.4	0.5	2.0	P2	19.7 (30.5)	0.2 (0.3)	3

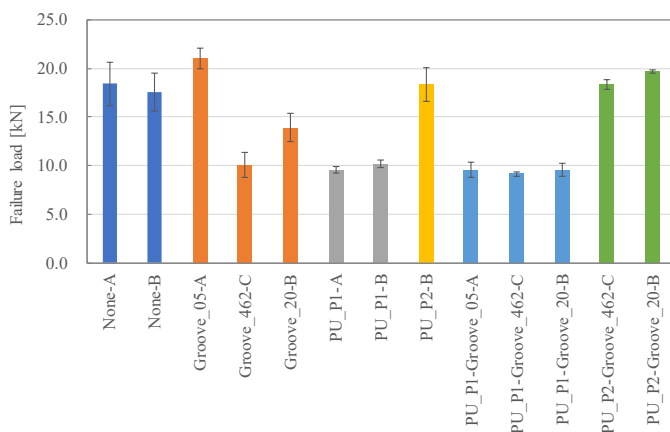


図 19 破断荷重. エラーバーは標準偏差を示す.

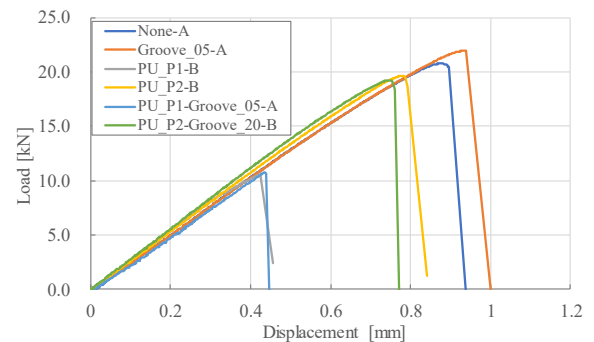


図 20 試験時の荷重-変位線図.

3.4.2. き裂進展

試験時に撮った動画をキャプチャーした画を図 2 1, 図 2 2 に示す. 左から時系列に並んでおり, き裂の進展が確認できる. 図 2 1 では上側 (CFRP 側) 接着端部近傍よりき裂が発生し, それが下側 (チタン合金側) まで進展し, 破断に至る. 図 2 2 では下側 (チタン合金側) 接着端部よりき裂が発生するが, 接着面の中ほどまで進展したところで, 上側 (CFRP 側) の CFRP 層内から発生したき裂が一気に下側まで進展し, 破断に至る. 実施した試験片のほとんどが, この 2 つのき裂進展のいずれかを経て破断した. 例外として, None-B の試験片で下側接着端部よりき裂が発生し, そのまま上側まで進展し, 破断するものがあった.

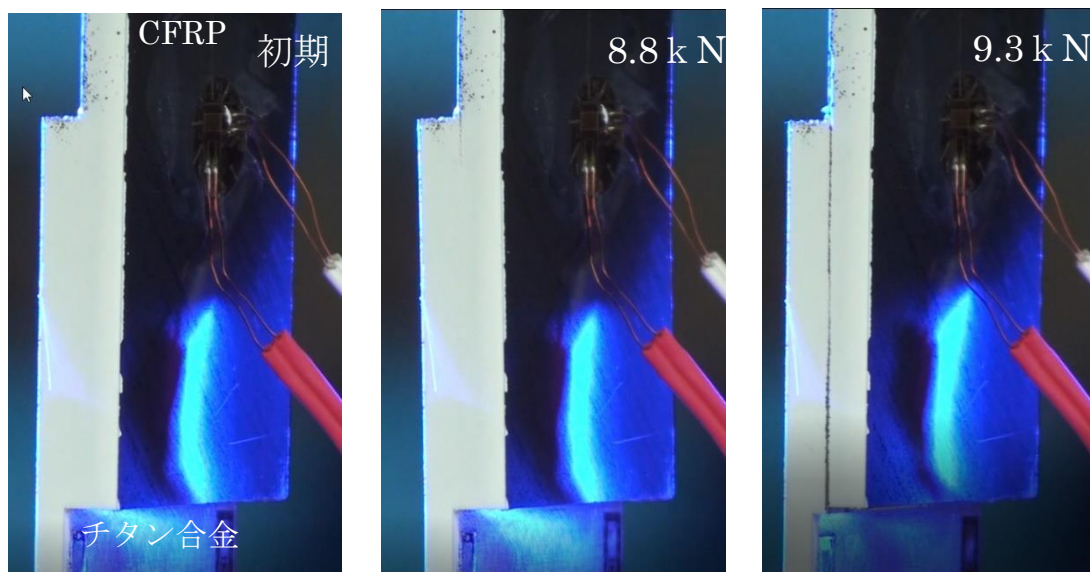


図 2 1 PU_P1-Groove_462-C き裂進展.

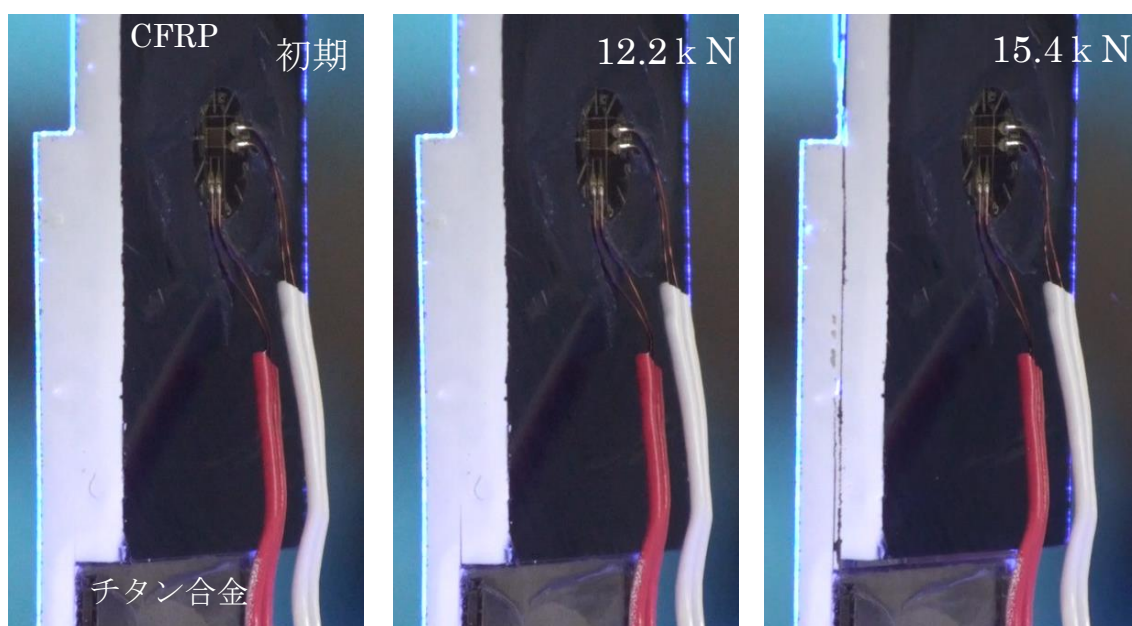


図 2 2 None-B き裂進展.

3.4.3. 破壊モード

試験完了後の接着部近傍の破断面について、前項で示したように、き裂進展は2つに大別され、破断面も同様に2つに大別される。図23に示すようにCFRP層内からき裂が発生し、そのまま進展し破断に至る場合は破断面全体が被着材破壊となる。図24に示すように、チタン合金側接着面からき裂が生じるが、CFRP層内のき裂が一気に進展し破断に至る場合は、界面破壊、凝集破壊と被着材破壊が混在したものとなる。例外として、図25では破断面全面が凝集破壊となった。これは前項で言及したチタン合金側でき裂が生じ、そのまま進展して破断に至った試験片である。破断面一覧を図26に示す。

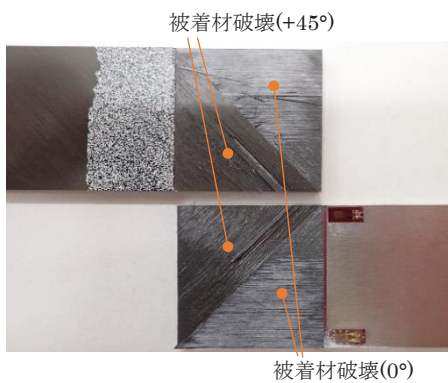
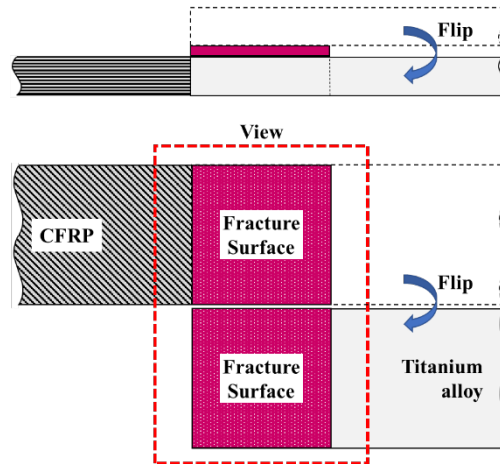


図23 破断面代表例 (PU_P1-B).

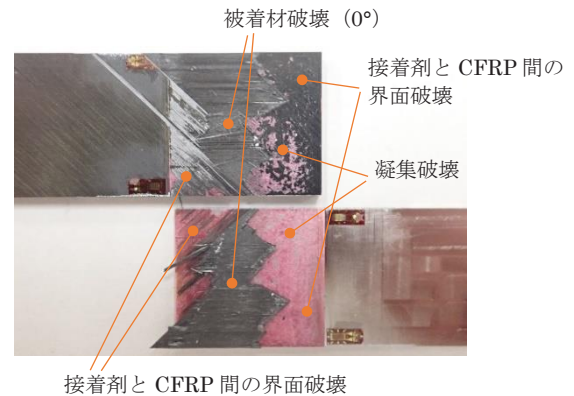


図24 破断面代表例 (Groove_462-C).

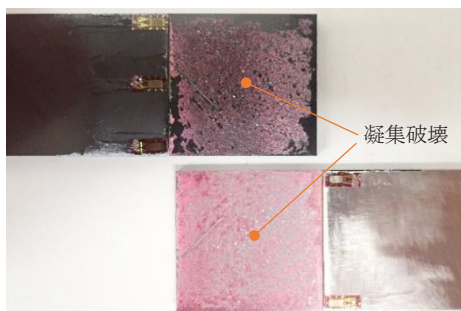


図25 破断面代表例 (None-B).

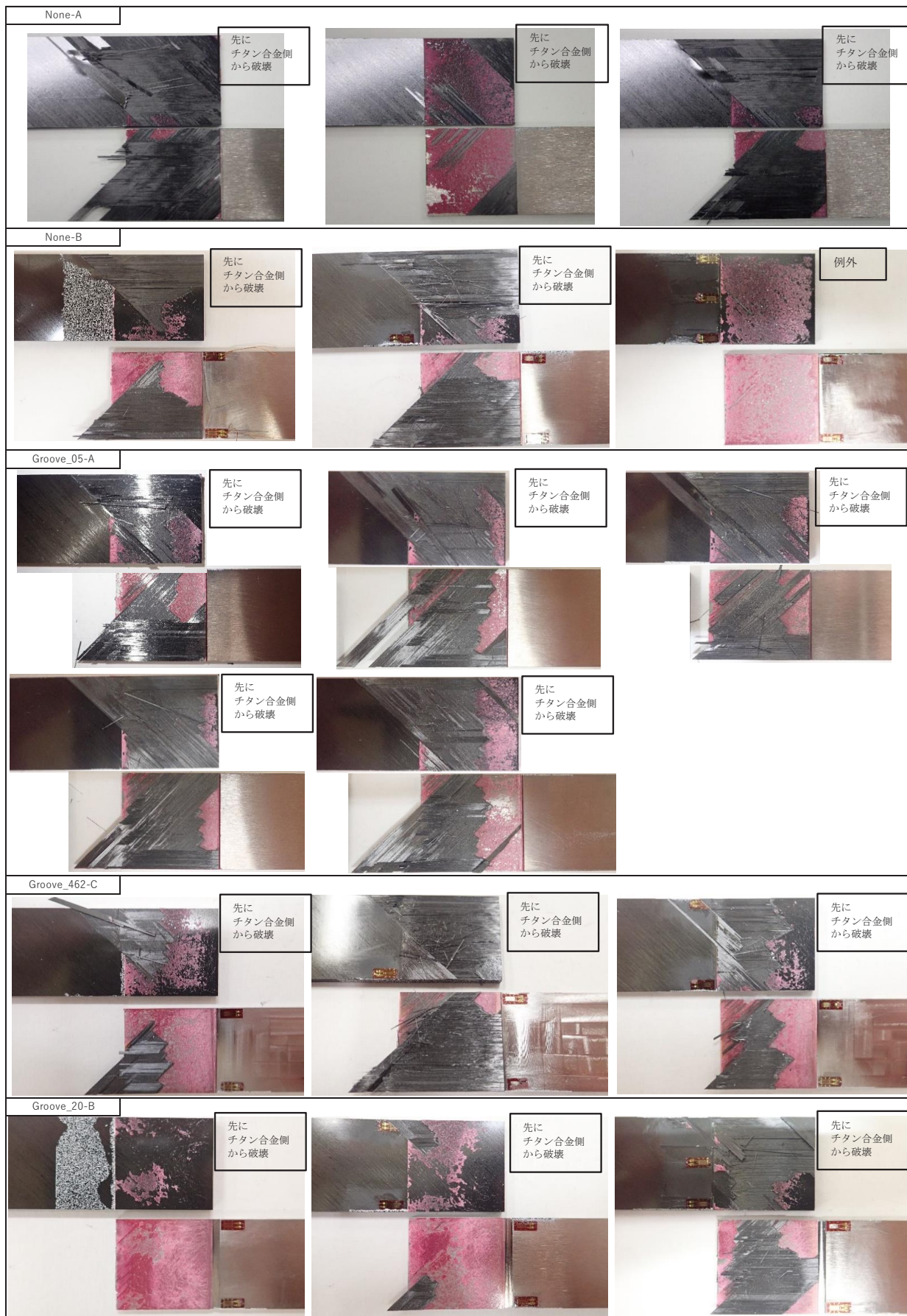


図 2 6 破断面 (1/3).



図 2 6 破断面 (2/3).

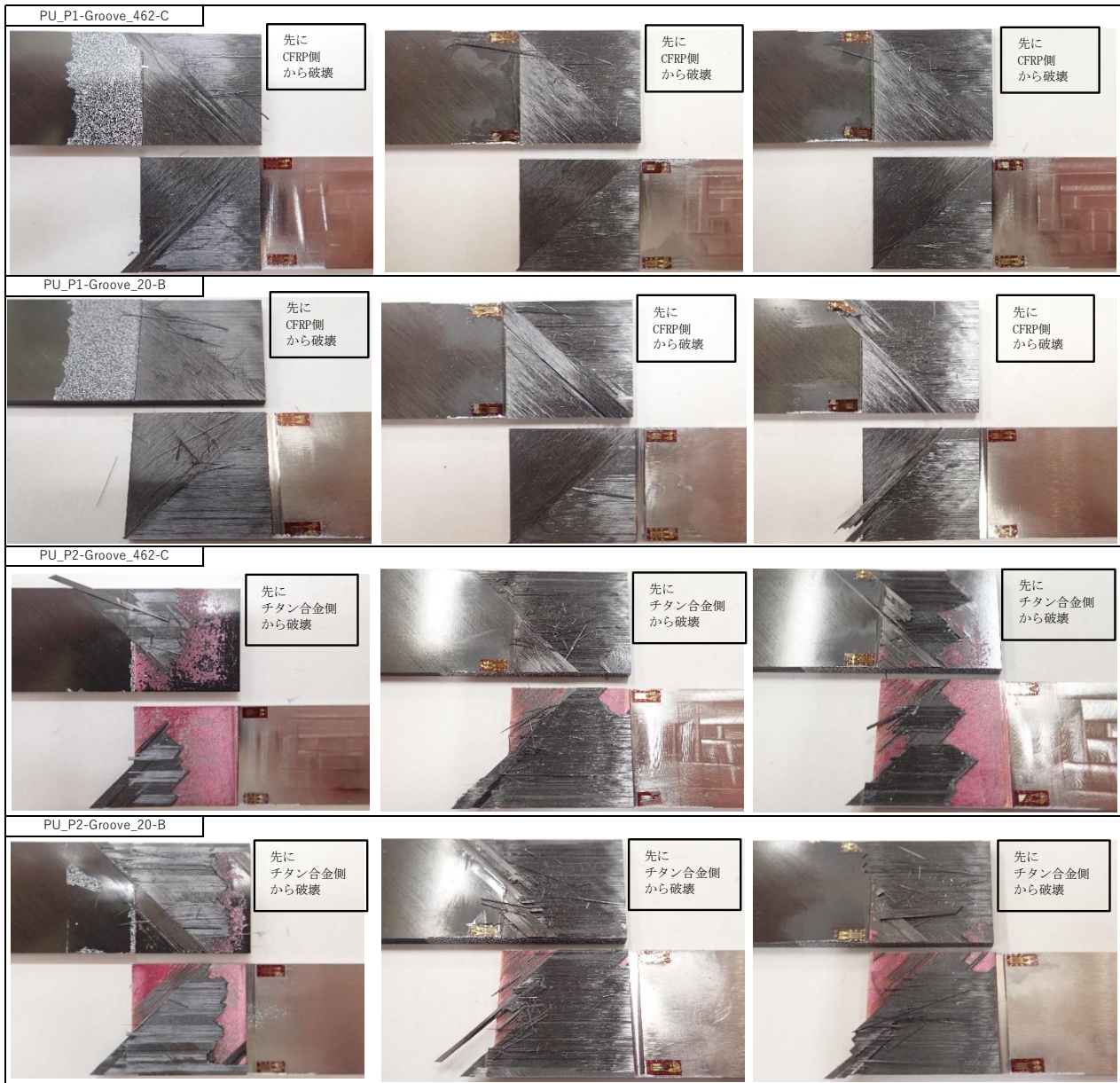


図 2 6 破断面 (3/3).

3.4.4. ひずみ分布

図 2 7 に無加工 (None-B), 図 2 8 に PU-Groove タイプ (PU_P2-Groove_20-C) の DIC によるひずみ計測結果を示す. 図中の y 方向が引張軸方向, x 方向が板厚方向を示す. y 方向ひずみより, 荷重された引張荷重が伝達される荷重パスが確認できる. また CFRP 基材及びチタン合金基材には, 引張荷重と併せて, CFRP 基材とチタン合金基材の板厚図心間のオフセット曲げによる引張が生じる. これら荷重によるひずみについては, チタン合金の弾性率 110.3GPa に対して, CFRP の弾性率は 53GPa なので, CFRP 基材にはチタン合金基材よりも大きな y 方向ひずみが生じている. 図 2 7 より, 15.0kN が荷重された時点で既に下側 (チタン合金側) 接着端部にき裂が生じており, ピール方向ひずみ (x 方向ひずみ) が大きい領域が上へ拡大する一方で, 上側 (CFRP 側) 接着端部と近傍の CFRP 内部でも大きなピール方向ひずみが生じており, CFRP 内部の大きなひずみ領域は拡大していった. 図 2 8 より, 15.7kN が荷重された時点でき裂は生じていないが, 19.6kN の時点では下側接着端部でき裂が生じている. また, 上側接着端部近傍の CFRP 内部で大きなピール方向ひずみが生じている.

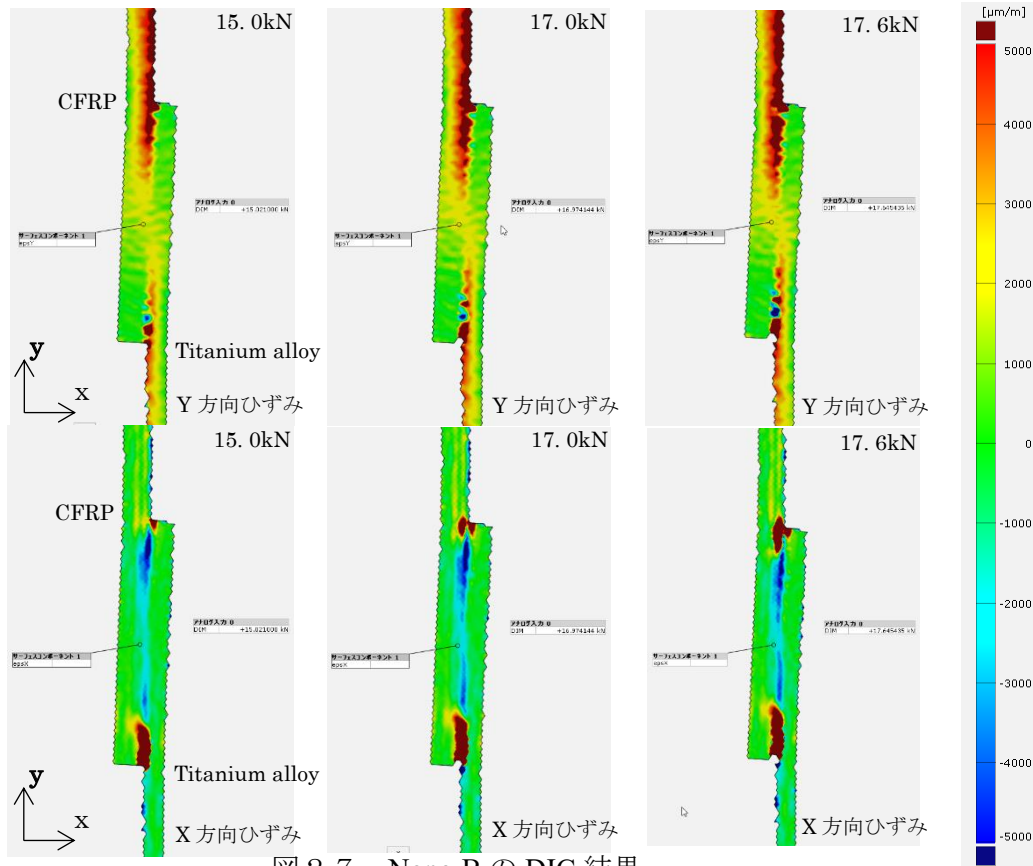


図 2 7 None-B の DIC 結果.

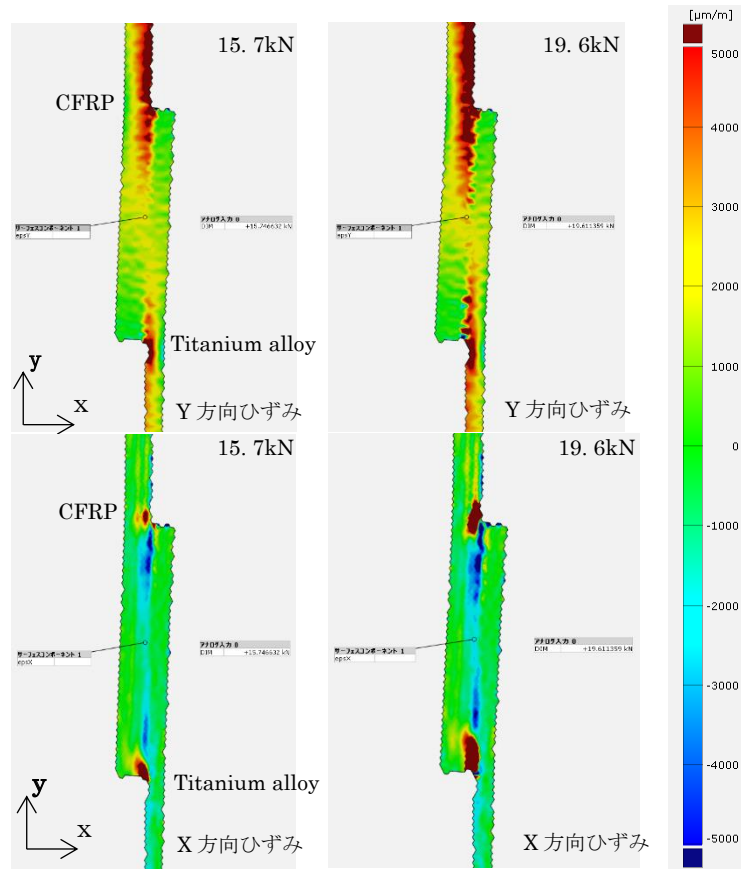


図 2 8 PU_P2-Groove_20-C の DIC 結果.

3.5. 考察

有限要素解析での検証にて、継手強度向上に有効であることを確認していた PU-Groove タイプは、試験においては None タイプと同等か、それ以下の破断荷重に留まった。これは破断が想定していた接着層ではなく、基材である CFRP で発生したためである。事実として、3.4.3 節に示す破断面からは最外層 (+45°) と 0°層間で破壊していることが明らかになっている。一般的にシングルラップ試験片ではオフセット曲げにより、接着端部近傍に大きな曲げ応力が生じる。有限要素解析でも図 2.9 のように接着端部近傍に高い応力が発生することを確認している。CFRP 基材においては、このオフセット曲げと引張負荷により、最外層 (+45°) に大きな引張応力が生じるが、隣接する 0°層も応力を負担する。一方で、+45°層と 0°層間については、3.4.4 節で示した通りピール応力も生じており、これが層間破壊の原因となりうる。

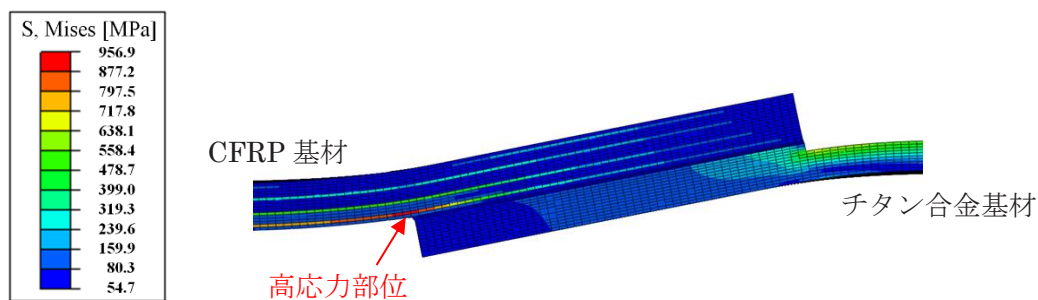


図 2.9 ミーゼス応力コンター図 (PU_P1-Groove_462-C 12.0kN 負荷時).

また、PU タイプ及び PU-Groove タイプはパッドアップを設けている分、板厚が増加し、オフセット曲げが大きくなるため、破断荷重は低下すると想定される。パッドアップを P1 とした場合の破断荷重はいずれも低いが、パッドアップを P2 とした場合については、破断荷重の低下は見られない。解析からは P1 と P2 の違いが見いだせなかったが、接着面から連続して+45°層が展開していることにより層間破壊を抑えることに寄与している可能性がある。P2 の場合でも、破断面は+45°と 0°の層間破壊であり、層間破壊の抑制・遅延の効果が仮にあったとしても、層間での破壊となることには変わりはない。Groove タイプはパッドアップがないので、PU タイプや PU-Groove タイプよりオフセット曲げの観点では優位である。しかしながら、3.2 節の有限要素解析による検証からも明らかなように、チタン側接着端部ミーゼス応力は低減するが、CFRP 側接着端部応力の低減効果はない。CFRP 側接着端部からき裂が発生し、破断に至ると考えれば、破断荷重は None タイプと同等程度となるはずであり、継手強度の顕著な向上は期待できないと想定される。試験結果より、破断面はほとんどが CFRP 層間破壊となっていることから、接着端部応力が低減しても、実際には接着層で破壊しないため、破断荷重への寄与は小さいと考えられる。

破断面が凝集破壊となった None-B について考察するため、超音波探傷を実施した。結果を図 3.0 に示す。CFRP 内部に剥離が確認された。他の試験片では接着端部でき裂が発生したとしても、最終的には CFRP 内部からのき裂が一気に進展し、破断に至ったのに対して、この試験片では CFRP 内部のき裂は進展せず、接着端部でき裂が進展して破断に至った可能性がある。このような現象が発生する原因については、さらなる検討を必要とする。

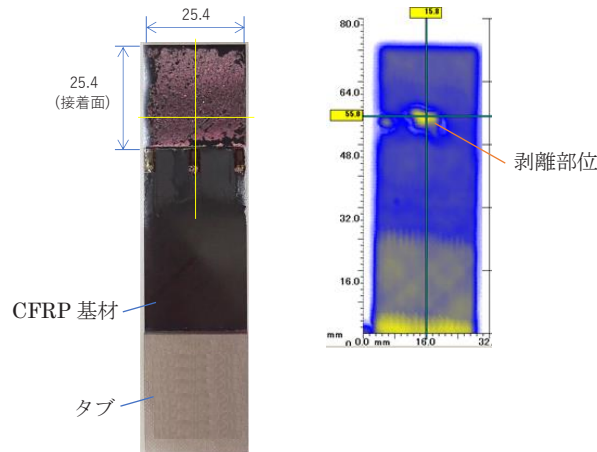


図 3 0 超音波探傷結果 (None-B).

4. おわりに

イトロ処理法を適用した CFRP-チタン合金シングルラップ接着接合継手について、チタン合金基材の接着面に対し種々の溝加工を施した場合、チタン合金基材への単一溝の追加や、CFRP 基材へパッドアップを追加した場合について試験を実施し、継手強度に対する効果の確認を行った。チタン合金基材接着面上への溝加工は、継手強度が低下することが明らかになった。チタン合金基材接着面外側への溝加工及び CFRP 基材のパッドアップは、解析上は接着剤部分の継手強度向上に寄与すると示されたが、試験では接着剤部分ではなく、CFRP 層間で破壊するため、継手強度は CFRP 層間強度に依存し、継手強度の向上が見込めないことが明らかになった。

参考文献

- 1) 安岡哲夫, 竹田智, 星光, 杉本直, 岩堀豊, “チタン合金及び CFRP に種々の表面処理を施した場合の濡れ性と表面形状評価及び接着接合継手強度”, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-16-014 (2017).
- 2) 竹田智, 安岡哲夫, 星光, 杉本直, 岩堀豊, “火炎応用表面処理を適用した接着継手の強度評価”, 第 60 回構造強度に関する講演会講演集, 徳島, JSASS-2018-3024 (2018), pp. 61–63.
- 3) Tomo Takeda, Tetsuo Yasuoka, Hikaru Hoshi, Sunao Sugimoto & Yutaka Iwahori, “Strength and bonding characteristics of adhesive joints with surface-treated titanium-alloy substrates”, Journal of Adhesion Science and Technology Volume 32, 2018 - Issue 5, pp. 553–571.
- 4) Tomo Takeda, Tetsuo Yasuoka, Hikaru Hoshi, Sunao Sugimoto, Yutaka Iwahori, “Effectiveness of flame-based surface treatment for adhesive bonding of carbon fiber reinforced epoxy matrix composites”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 119 (2019), pp. 30–37.
- 5) 桑原竜摩, 安岡哲夫, 竹田智, 杉本直, 中村俊哉, “チタン合金及び CFRP 異種材接着継手の強度向上に関する検討”, 第 61 回構造強度に関する講演会講演集, 長野, JSASS-2019-3057 (2019), pp. 163–165.
- 6) 桑原竜摩, 安岡哲夫, 竹田智, 杉本直, 中村俊哉, “チタン合金/CFRP 異種材接着継手の単純形状変更による強度向上に関する検討”. 第 57 回飛行機シンポジウム, 下関, JSASS-2019-5165 (2019), 3B11.
- 7) 桑原竜摩, 安岡哲夫, 竹田智, 杉本直, 中村俊哉, “チタン合金-CFRP 異種材接着継手の継手強度向上に関する検討”, 第 11 回日本複合材料会議, 2019, 3C07.

Appendix.1

有限要素解析に用いた材料定数及び解析条件

接着剤 (Meltbond-1515) [1], チタン合金[2], CFRP[3]の材料定数を表 A 1 に, 接着剤の真応力-塑性ひずみ曲線を図 A 1 に示す. なお, 3.2 節の有限要素解析での検証は, 2.2 節と同様に接着剤を Meltbond-1515 として解析を実施した.

表 A 1 材料定数

		Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio
Adhesive	Meltbond-1515	1.204	0.35
Adherend	Ti-6Al-4V	110.3	0.31
	CFRP(T800S/#3900-2B)	L: 152/ T: 8	0.34

L: longitudinal fiber direction
T: transverse direction

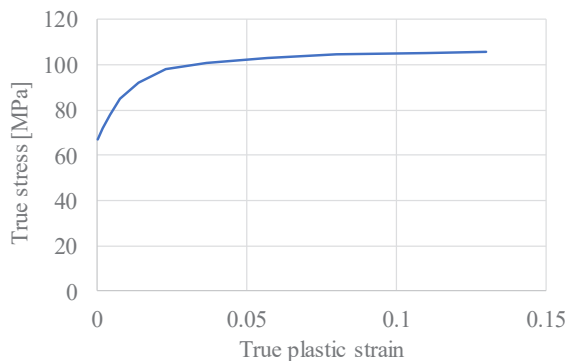


図 A 1 接着剤 (Meltbond-1515) の真応力-塑性ひずみ曲線

図 A 2 に解析条件を示す. 実際の試験を模擬して, チャックの掴み部では y 及び z 方向を拘束し, CFRP 基材端部の x 方向を拘束した上で, チタン合金基材端部に引張荷重を負荷した.

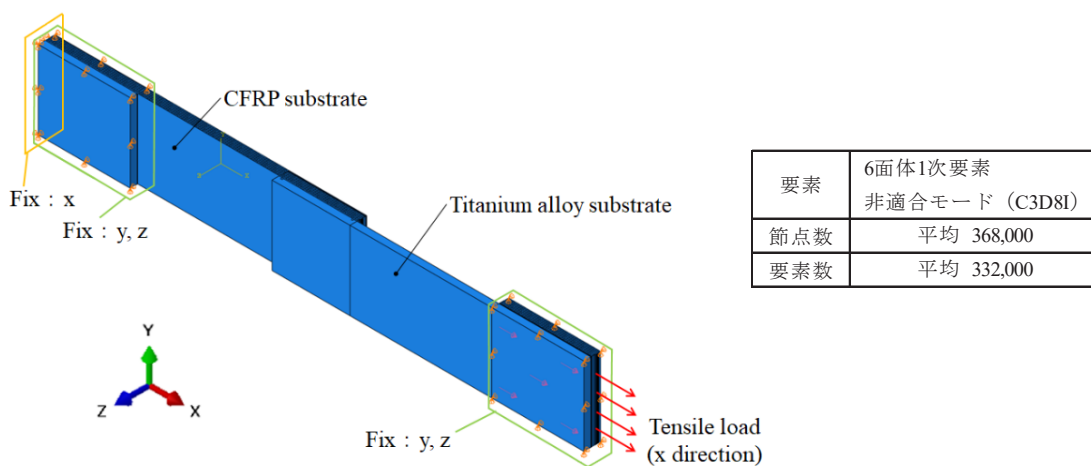


図 A 2 解析条件

Data reference

- [1] Chou SP, "Finite element application for strength analysis of scarf-patch-repaired composite laminates [master's thesis]", Wichita (KS): Wichita State University, 2006.
- [2] "Metallic Materials Properties Development and Standardization: MMPDS-11", Battelle Memorial Institute, USA (2016), pp. C5-59 and C5-77.
- [3] 森本哲也, 杉本直, 加藤久弥, 原栄一, 安岡哲夫, 岩堀豊, 小笠原俊夫, 伊藤誠一, "JAXA 先進複合材料力学特性データベース", 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-14-004 (2015), pp. 168-203.

Appendix.2

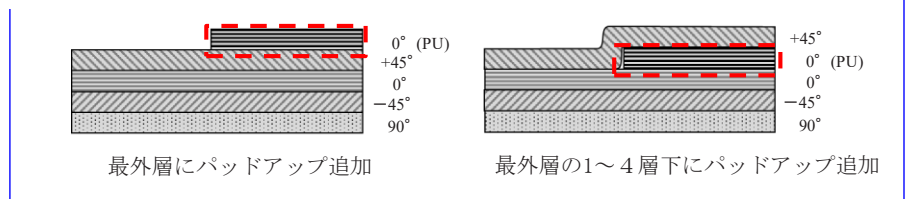
有限要素解析で検討した形状及びパラメータ

継手強度検討に当たって、接着層応力低減が継手強度向上につながるものとし、有限要素解析にて種々の形状とパラメータを検討した。効果が確認されたのは本文で扱った CFRP 基材へのパッドアップ、チタン合金基材接着面外側への溝加工、パッドアップと溝加工の併用のみで、他に有望なものは確認できなかった。表 A 2 に検討結果を示す。

表 A 2 形状及びパラメータ検討結果

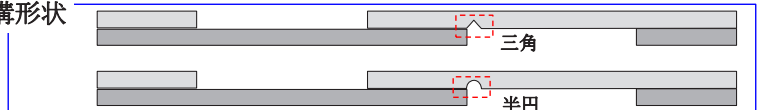
加工方法	パラメータ	接着層応力低減効果	
CFRPへのパッドアップ・削除	A:位置 B:長さ	×	接着面と逆側でのパッドアップ
		×	接着面側のパッドアップ
		×	CFRP層削除
	PU挿入層	○	接着面のパッドアップ

PU挿入層



加工方法	パラメータ	接着層応力低減効果	
チタン合金への加工	A:位置 C:溝幅 D:溝深さ 溝形状	○	接着面側に溝加工
		×	接着面と逆側、チタン端部から溝加工
		×	接着面と逆側、接着端部から溝加工
	E:幅 F:板厚	×	チタン板厚減少
CFRPへのパッドアップとチタン合金への溝加工	A:溝位置 C:溝幅 D:溝深さ 溝形状 PU挿入層	○	CFRP接着面でのパッドアップとチタン合金接着面側の溝加工

溝形状



宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-20-004
JAXA Research and Development Memorandum

複合材／金属の異種材接着接合における
シングルラップ継手様式の改良とその強度特性
Modified single-lapped joint design and strength properties
for adhesive bonding of dissimilar materials in composites and metal

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <http://www.jaxa.jp/>
発行日 2021年2月5日
電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

