

信州大学審査学位論文

炭素繊維強化熱可塑性樹脂の
熱特性を利用した異種材料接合に関する研究

2021年3月

小平 裕也

目次

第1章 緒論	6
1.1 地球温暖化対策の現状.....	6
1.2 CFRP の需要の増加.....	7
1.3 炭素繊維と CFRP の種類.....	9
1.3.1 炭素繊維の概要 ¹⁸⁾	10
1.3.2 熱硬化性 CFRP.....	10
1.3.3 熱可塑性 CFRP.....	12
1.4 異種接合技術の種類.....	14
1.4.1 機械的接合.....	15
1.4.2 接着接合.....	16
1.4.3 固相接合.....	17
1.4.4 溶融接合.....	18
1.5 目的	19
1.6 本論文の構成と要旨.....	19
第2章 板状 CFRTP の厚さ方向の熱特性を利用したアルミニウム合金との異種接合	22
2.1 緒言	22
2.2 実験方法	22
2.2.1 供試材.....	22
2.2.2 アルミニウム合金片加熱による CFRTP との接合方法および接着剤による接合方法	25
2.3 実験結果	28
2.3.1 ストレート溝を有するアルミニウム合金片加熱による CFRTP との接合および接着剤による接合方法	28
2.3.2 テーパー溝を有するアルミニウム合金片加熱による CFRTP との接合および接着剤による接合方法	35
2.4 考察	38
2.4.1 CFRTP の膨張による板厚増加率と膨張圧力の測定.....	38
2.4.2 試験片の曲げ破壊強度測定.....	44
2.5 結言	51
第3章 板状 CFRTP の熱特性による接合の強度に及ぼすシート成形圧力の影響.....	54
3.1 緒言	54
3.2 実験方法	54
3.2.1 供試材.....	54
3.2.2 CFRTP のオートクレーブ成形.....	55
3.2.3 CFRTP 板の加熱による膨張.....	57

3. 2. 4	アルミニウム合金片加熱による CFRTP との接合	58
3. 3	実験結果	59
3. 3. 1	CFRTP のオートクレーブ成形.....	59
3. 3. 2	CFRTP 板の加熱による膨張.....	60
3. 3. 3	アルミニウム合金片加熱による CFRTP との接合	61
3. 4	考察	63
3. 5	結言	71
第 4 章	円柱状 CFRTP ピンを用いた金属板材同士の接合	74
4. 1	緒言	74
4. 2	実験方法	74
4. 2. 1	供試材.....	74
4. 2. 2	CFRTP ピンによる板材の接合方法.....	76
4. 2. 3	引張りせん断試験方法.....	78
4. 2. 4	十字引張試験方法.....	80
4. 3	実験結果	81
4. 3. 1	引張りせん断試験.....	81
4. 3. 2	十字引張試験.....	84
4. 4	考察	86
4. 5	結言	91
第 5 章	結論	94
5. 1	まとめ	94
5. 2	本論文の課題と今後の展望.....	95
参 考 文 献	98
研究業績	104
謝辞	107

本論文における主要な記号の一覧

記号	単位	: 記号の説明
A	[mm ²]	: CFRTP の断面積
d	[mm]	: アルミニウム合金片の溝深さ
d_p	[mm]	: 積層に平行方向の外径
d_{pa}	[mm]	: 加熱後の積層に平行方向の外径
d_{pb}	[mm]	: 加熱前の積層に平行方向の外径
d_{pn}	[mm]	: CFRTP ピンの直径
d_v	[mm]	: 積層に垂直方向の外径
d_{va}	[mm]	: 加熱後の積層に垂直方向の外径
d_{vb}	[mm]	: 加熱前の積層に垂直方向の外径
E	[MPa]	: 接合品の縦弾性係数
$F(\theta)$	[N]	: 引張試験時に生じる引張荷重
F_a	[N]	: 試験片の引張荷重
F_b	[N]	: 曲げ破壊試験における破壊荷重
F_{bt}	[N]	: 曲げ破壊試験における加圧方向の荷重
F_c	[N]	: 引張り軸方向の荷重
F_{pcmax}	[N]	: 十字引張試験における引張軸方向の荷重
F_{pcmax}	[N]	: 十字引張試験における引張り軸方向の最大荷重
F_{pt}	[N]	: 引張せん断試験における引張り軸方向の荷重
F_{ptmax}	[N]	: 引張せん断試験における引張り軸方向の最大荷重
F_r	[N]	: 垂直抗力に依存した摩擦力
F_s	[N]	: 接合品引張試験における引張軸方向の荷重
F_{smax}	[N]	: 接合品引張試験における引張軸方向の最大荷重
F_t	[N]	: 膨張により発生する垂直抗力
G	[N]	: 試験片に負荷した荷重
L	[mm]	: CFRTP の元の長さ
L_t	[mm]	: アルミニウム合金片のテーパ量
L_x	[mm]	: 炭素繊維束の層方向の長さ
L_y	[mm]	: 炭素繊維束の平面方向の長さ
P_m	[MPa]	: オートクレーブの成形圧力
P_e	[MPa]	: 試験片に負荷した圧力
R	[N]	: 形状に依存した垂直抗力
S_{bt}	[mm]	: 曲げ破壊試験における加圧方向のストローク
S_{pc}	[mm]	: 十字引張試験における引張軸方向のストローク

S_{pt}	[mm]	: 引張せん断試験における引張軸方向のストローク
S_s	[mm]	: 接合品引張試験における引張軸方向のストローク
t_a	[mm]	: 加熱後の CFRTP 板の板厚
t_{aa}	[mm]	: オートクレーブ成形後の CFRTP 板の板厚
T_{al}	[K]	: アルミニウム合金片の加熱温度
T_{alp}	[K]	: アルミニウム合金板の加熱温度
t_b	[mm]	: 加熱前の CFRTP 板の板厚
t_{ba}	[mm]	: オートクレーブ成形前の CFRTP 板の板厚
T_{ca}	[K]	: オートクレーブ成形した CFRTP 板の加熱温度
T_{cp}	[K]	: CFRTP 板の加熱温度
V_f	[%]	: 炭素繊維含有率
W	[N]	: CFRTP とアルミニウム合金片の接着力
w	[mm]	: オートクレーブ成形した CFRTP 板の板幅
α	[%]	: 板厚増加率
α_a	[%]	: オートクレーブ成形した CFRTP 板の板厚増加率
α_d	[%]	: 外径増加率
α_{dp}	[%]	: 積層に平行方向の外径増加率
α_{dv}	[%]	: 積層に垂直方向の外径増加率
ΔL	[mm]	: 接合品の引張試験における試験機ストローク
Γ	[-]	: 炭素繊維束のアスペクト比
μ	[-]	: テーパー面の摩擦係数
θ	[deg.]	: アルミニウム合金片のテーパー溝角度
σ_b	[MPa]	: 曲げ破壊強さ
σ_{mean}	[MPa]	: 平均引張り強度
σ_{pn}	[MPa]	: 十字引張試験における引張り強度
σ_θ	[MPa]	: テーパー面に生じる応力
τ_a	[MPa]	: オートクレーブ成形した試験片のせん断応力
τ_{amax}	[MPa]	: オートクレーブ成形した試験片の最大せん断応力
τ_{cs}	[MPa]	: 平均せん断応力
τ_{csmax}	[MPa]	: 最大せん断応力
τ_{max}	[MPa]	: ストレート溝のアルミニウム合金接合品の最大せん断 応力
τ_{pn}	[MPa]	: 引張りせん断試験におけるせん断強度

第 1 章

緒 論

第1章 緒論

1.1 地球温暖化対策の現状

近年、二酸化炭素を始めとする温室効果ガスの排出による地球温暖化が世界的な問題となっている¹⁾³⁾。特に、航空機や自動車といった運輸部門のCO₂排出量は、**Fig. 1-1**に示す2017年度の統計で我が国全体の排出量の17.9%を占める⁴⁾。これに対し、欧州のCAFE規制や、米カリフォルニア州や中国のZEV規制、または各国でそれらに近い排出量の規制を進めている⁵⁾⁹⁾。しかし、規制をクリアするのは容易ではなく、各国の対策のみならず、企業に対策が求められている⁸⁾。

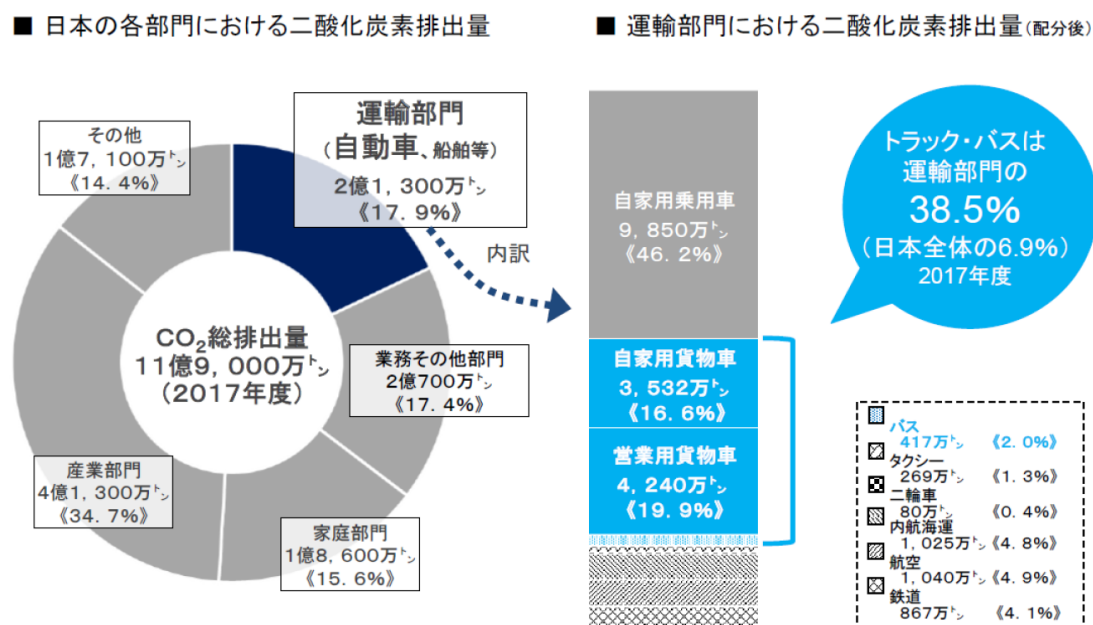


Fig. 1-1 Breakdown of carbon dioxide emissions in each sector of Japan and carbon dioxide emissions in the transportation sector⁴⁾.

運輸部門のCO₂の排出量の削減には、輸送機器を軽量化し燃費を向上させることが最適な手段といわれている。そこで、従来の鉄鋼材料から、より軽くて強度の高い材料が求められており、特にアルミニウム合金、マグネシウム合金、チタン合金等といった

比強度の高い金属材料の採用が進められてきた¹⁰⁾。車両重量とCO₂の排出量は比例関係にあるため、これらの金属材料よりさらに優れた比強度・比弾性率を持つ炭素繊維強化プラスチック（CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastics）は軽量化に最も寄与する材料として注目されている¹¹⁾。

1. 2 CFRP の需要の増加

CFRP は、軽量で且つ高い強度を持つため、自動車、航空機、スポーツ、レジャーなど幅広い産業分野で採用が増加している。Fig. 1-2 に PAN 系炭素繊維複合材料（CFRP/CFRTP）の世界市場と今後の予測¹²⁾を示す。ここでは、CFRP は熱硬化性樹脂を炭素繊維に含浸させた材料であり 2030 年に 4 兆 4864 億円が見込まれる。それに対し、熱を加えると軟化する性質を持つ熱可塑性樹脂を炭素繊維に含浸させた材料の CFRTP（Carbon Fiber Reinforced Thermo plastics）は、2030 年に 4193 億円と急激な増加が予想される。



Fig. 1-2 PAN-based carbon fiber composite material (CFRP/CFRTP) global market and future forecast¹²⁾.

ここ数年、自動車業界の開発トレンドは自動運転開発技術に向いており、CFRPの自動車用途としての採用計画は先延ばしとなっている。しかし、CFRPの特性を踏まえた設計技術や使いこなし技術が蓄積され利用技術が向上する2025年頃にこの採用の増加が予測される。各自動車メーカーでは、車体プラットフォームを共通化させ開発コストを削減する動きがあり、共通化の採用が進めば需要の急増が予測される。

風力発電におけるブレード用途は、洋上風力発電の増加やブレードの大型化に伴い、採用が増加している¹³⁾。風力発電ブレードが大型化する中で、ブレードの変形を抑えるためにCFの利用が不可避であり、引き抜き成形されたCFRPバーを採用している¹⁴⁾。CFRTPは100kW未満の超小型ブレードの一部が射出成形品などで開発されているが、市場規模は僅少となっている。今後、洋上風力発電の容量増加に向け、さらなる大型ブレードの開発および商用化が計画されており、CFRP使用量の増加が期待される。

スポーツやレジャーでの用途は、ゴルフクラブ、テニスやバドミントンのラケット、野球バット、釣竿が現状での中心である¹⁵⁾。Fig. 1-3にCFRPを用いたゴルフクラブとテニスラケットを示す。CFRPを採用したゴルフクラブ、野球バット、テニスやバドミントンのラケット、釣竿は、それぞれ材質の変遷はあったものの歴史は長く、素材としては定着している。競技人口が多いゴルフやテニスの道具であるゴルフクラブやテニスラケットが、今後も市場をけん引するとみられる。その他の用途として、マリンスポーツ（レジャーボートやカヌー、サーフボード、レーシング艇）、ランニング用シューズ、パラスポーツ用品（競技用義足や車いすの部品）などでCFRTPを採用する製品が増加しており、今後使用量の伸びが期待される。



Fig. 1-3 Golf clubs and tennis rackets with CFRP partially applied to reduce weight and improve operability¹⁶⁾.

建築・土木用途は、コンクリートや鉄筋などの骨格構造の強度を増強する補修・補強材として採用されることが多い。価格が高いため骨格構造本体に採用される場合は少なく、従来の金属材料では成立困難な建造物の補強用途に利用され、今後は長大・大型構造物の構造材料としての適用が期待されている¹⁷⁾。

1. 3 炭素繊維と CFRP の種類

CFRP は炭素繊維と樹脂との複合材料であり、その種類は、母材の樹脂により大きく 2 種類に分けられる。一つは、主にエポキシ樹脂などの、熱を加えると硬化する樹脂を炭素繊維に含浸させた炭素繊維強化熱硬化性樹脂 (CFRTS) である。もう一つは、熱を加えると軟化する樹脂を炭素繊維に含浸させた炭素繊維強化熱可塑性樹脂 (CFRTP) である。それぞれの特徴を以下に述べる。

1. 3. 1 炭素繊維の概要¹⁸⁾

炭素繊維は原料と製造方法から、ほとんどが PAN 系とピッチ系の 2 種類に分別される。中でも PAN 系が 90%以上の使用量を占める。

PAN 系炭素繊維は、PAN（ポリアクリロニトリル）を原料としており、単繊維の本数に 1K（1,000 本）～24K（24,000 本）で構成されるレギュラートウと、40,000 本以上の短繊維から構成されるラージトウに分類される。

ピッチ系炭素繊維は、原料ピッチの特性に応じて、黒鉛結晶構造が発達した異方的な微細構造をする異方性（メソフェーズ）タイプと、黒鉛結晶構造が未発達で等方的な微細構造をする等方性タイプに分類される。

1. 3. 2 熱硬化性 CFRP

エポキシ樹脂に代表される熱硬化性樹脂は、ガラス転移温度以上において機械的性質が時間や温度により著しく変化する¹⁹⁾。この熱硬化性樹脂をマトリックスとした炭素繊維との複合材を熱硬化性 CFRP（Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Plastics, 以下 CFRTS と記す）と呼ぶ。優れた機械的特性、耐熱性および炭素繊維との接着性から航空機、自動車、スポーツ用品、風車など幅広く利用されている²⁰⁾。CFRTS の成形法に関しては、多くの研究がされている^{21)~24)}。主な成形法は、オートクレーブ成形（**Fig. 1-4**）、RTM（Resin Transfer Molding）成形（**Fig. 1-5**）、プレス成形（**Fig. 1-6**）の 3 種類である。

オートクレーブ成形は、積層したプリプレグを副資材で包んで耐熱袋に入れたのち、真空引きして、オートクレーブと呼ばれる圧力釜の加温・加圧条件下で成形する方法である。真空引きと加圧により、材料内部のボイド（欠陥）がなくなることが特徴で、高品位な成形品を安定して得ることができる。ただし、成形に時間がかかるため生産性は乏しく、副資材を多く用いるため自動化に適さないなど課題がある。

RTM 成形は、あらかじめ予備賦形されたプリフォームを成形型に配置し樹脂を送り

込んで含浸と硬化する方法である。プリフォーム、樹脂の注入、硬化という多段階プロセスがあるため成形時間は最短でも数分から 10 分程度必要とする。

プレス成形は、積層したプリプレグを予備加熱し、プレス装置に取り付けた金型で加圧成形する方法である。加圧のみの成形のため、成形品中にボイドが残りやすい。オートクレーブと比べると力学特性や外観品質は劣る傾向にある。

いずれも CFRTS の成形タクトタイムは短くても数分、長いと 1 時間を超過するものもあるため、大量生産には不向きである。

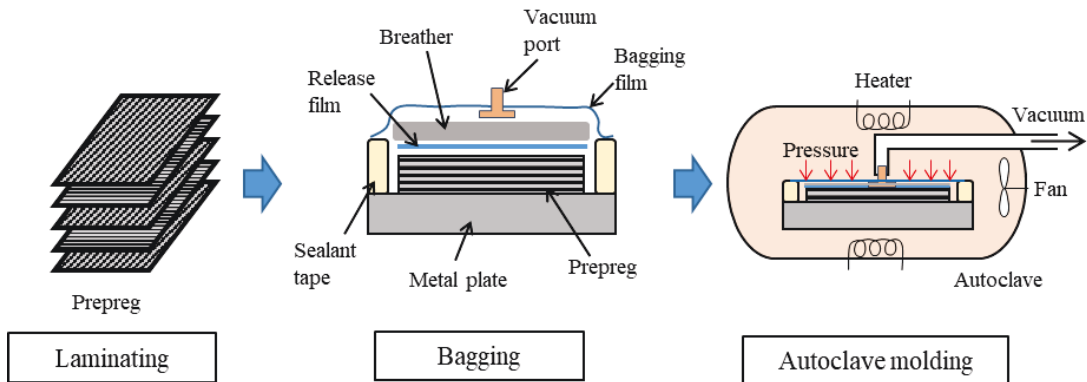


Fig. 1-4 Laminated manufacturing process of CFRTS/CFRTP by autoclave molding method.

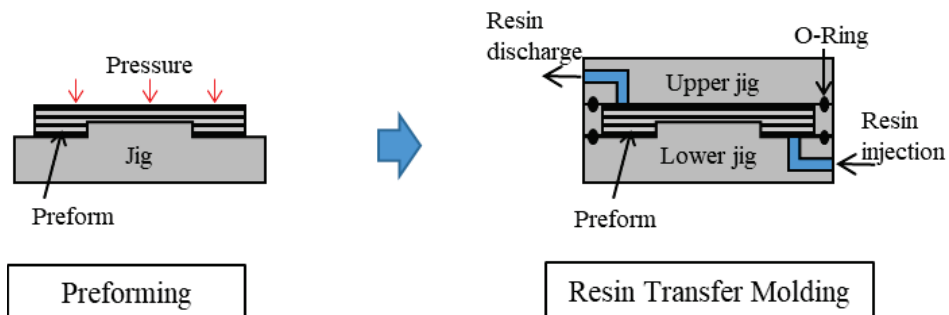


Fig. 1-5 Laminated manufacturing process of CFRTS/CFRTP by RTM molding method.

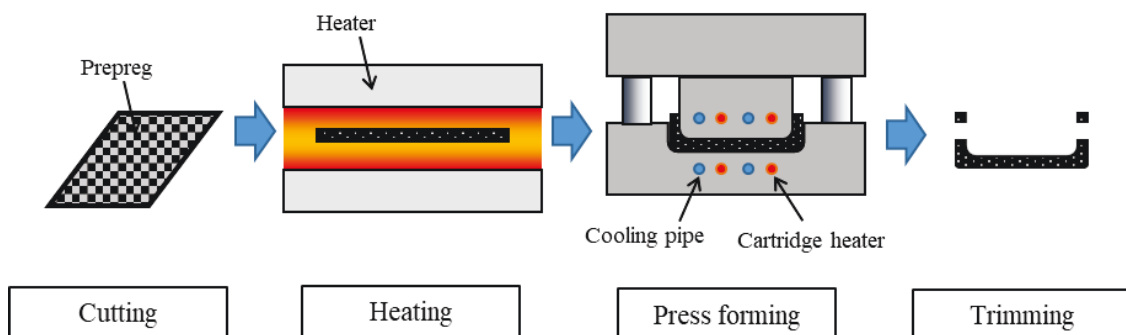


Fig. 1-6 Press forming procedure for laminated CFRTPS/CFRTP.

1. 3. 3 熱可塑性 CFRP

熱硬化性 CFRP と対称的に、加熱すると軟化し、冷却すると固化する性質の熱可塑性 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics, 以下 CFRTP と記す) が近年では注目されている²⁵⁾。この CFRTP の性質を利用することで、プレス加工や射出成型などを用いて所望の形状を得ることができ²⁵⁾、成形時間が短く、比較的高い生産性が実現できる²⁶⁾。CFRTP の成形法に関しても、多くの研究がされている²⁷⁾⁻³²⁾。主な成形法は CFRTPS と同様に、オートクレーブ成形 (Fig. 1-4)、RTM (Resin Transfer Molding) 成形 (Fig. 1-5)、プレス成形 (Fig. 1-6) の 3 種類の他に、射出成型 (Fig. 1-7) があげられる。

射出成型は熱可塑性樹脂と炭素繊維を高温で混練し、熔融状態となったものを金型に充填して成形する方法である。これまで短繊維を樹脂で固めた射出成型が主流であったが、近年、シリンダーに直接連続繊維を入れ込むことで、連続繊維の加工も可能になった。短時間の成形を可能にしたが、利用できる繊維の長さに限界があり、強度の高い成形品を製造することは難しい³³⁾

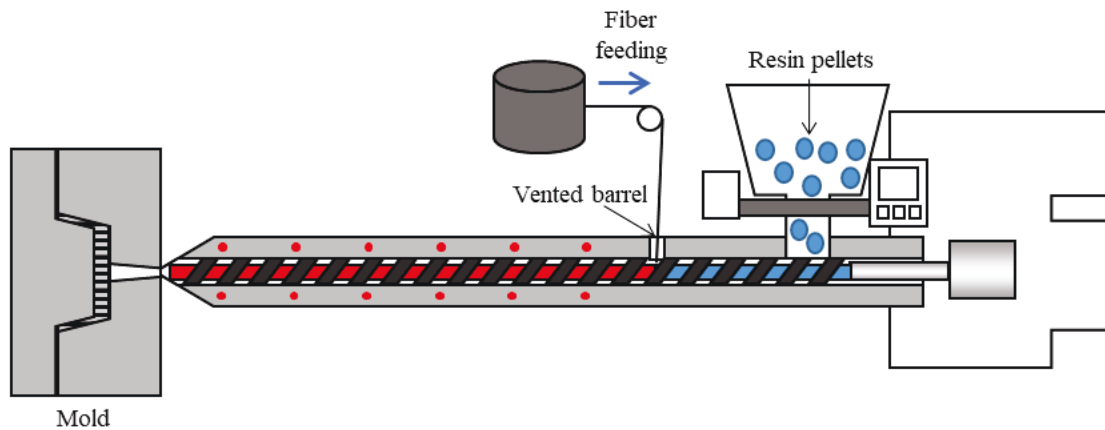


Fig. 1-7 Schematic drawing of direct fiber feeding injection molding process.

また、CFRTS ではリサイクルが困難であったが、CFRTP では破碎して熱可塑性樹脂と混練させ(**Fig. 1-8**)、射出成形で新しい部品を成形するなど、新しい技術開発が盛んに行われている³⁴⁾。この CFRTP を採用する上で、金属部品の一部置き換えや、特性が異なる材料を併用するマルチマテリアル化の技術開発³⁵⁾⁻³⁹⁾や、他の金属部品と連結させる異種接合技術の採用が増加傾向にある⁴⁰⁾。

主な熱可塑性樹脂に、ポリプロピレン (PP)、アクリル樹脂 (PMMA)、ポリアミド 6 (PA6)、ポリアミド 66 (PA66)、ポリカーボネート (PC)、ポリフェニレンスルファイド (PPS)、ポリエーテルエーテルケトン (PEEK)、ポリエーテルイミド (PEI) があげられる。これらと熱硬化性樹脂のエポキシについて、おもな物性値を Table.1-1 に示す。



Fig. 1-8 Pretreatment of CFRP recycling, crush, heat treatment and chemical treatment³⁴⁾.

Table 1-1 Representative examples of resin materials and main physical properties being considered as CFRP matrices⁴¹⁾.

項目および単位		熱可塑性樹脂								熱硬化性樹脂
		PP	PMMA	PA6	PA66	PC	PPS	PEEK	PEI	エポキシ
密度	g/cm ³	0.90~0.91	1.17~1.20	1.12~1.14	1.13~1.15	1.20	1.35	1.30	1.27	1.11~1.40
吸水率 (24 h)	%	<0.01	0.3~0.4	1.6	1.5	0.15	0.003	0.14	0.25	0.08~1.13
荷重たわみ温度 (18.5 kgf/cm ²)	℃	52~60	70~100	67~70	66~104	130~140	260	155	200	50~250
線膨張係数	×10 ⁻⁵ /℃	6~8.5	5~9	8.3	8	6.6	2.9	5	4.7~5.6	4~7
濡れ性	—	×	○	△	△	△	×	△	△	○

○：良い，△：普通，×：悪い

1. 4 異種接合技術の種類

現在、自動車や航空機のマルチマテリアル化が進む中で、金属と樹脂や複合材料などの異種接合に広く採用されている技術は、「機械的接合」、「接着」、「ろう接」、「固相接合」、および「熔融接合」の5つの要素技術に分類できる⁴⁰⁾。ここでは、特にCFRTPと金属の異種接合に用いられる「ろう接」を除いた4種類についてそれぞれの特徴を述べる。

1. 4. 1 機械的接合

機械的接合は、カシメやボルト・リベットなどを用いた機械的に接合する方法⁴²⁾⁴⁵⁾で、接合方法の中では最も古くからあり、母材の強度を上回る程の高い接合強度を発生させることが可能である。Fig. 1-9 にリベットおよびメカニカルクリンチングと接着剤を複合した接合断面の概略図を示す。機械的接合は、母材の溶解や拡散を必要としないため、他の方法では接合困難な材料や異種接合に用いられてきた。しかし、ボルトやリベットを使用することによって部品点数が増え、それによる重量の増加や、それらを挿入する部分に応力集中が生じ、強度が低下する課題があげられる。接合部材同士を変形させてカシメ接合を行うメカニカルクリンチング⁴⁶⁾は、重量の増加は無いが、リベットによる接合と比較すると接合強度は低い。

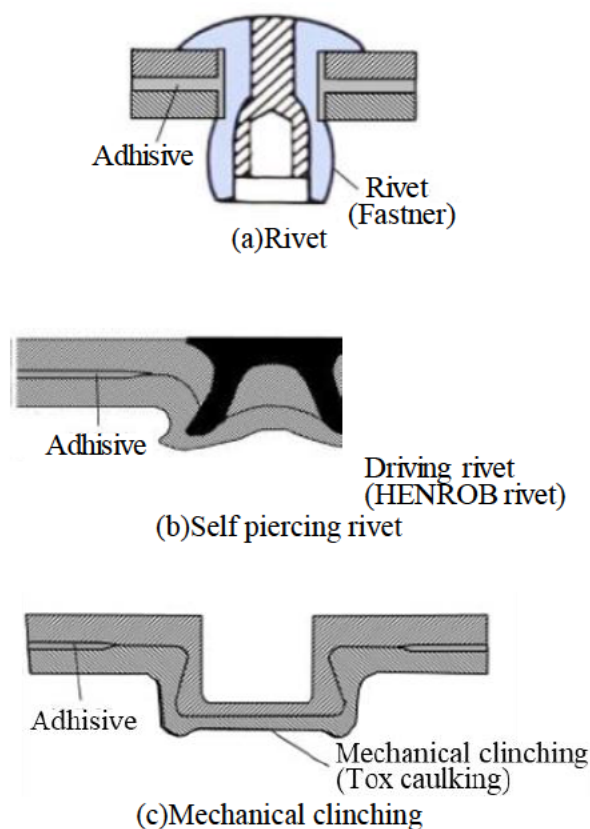


Fig. 1-9 Schematic cross section of various mechanical joining between metal plates⁴⁷⁾.

1. 4. 2 接着接合

接着接合は、接着剤を介して物体同士を接合する技術⁴⁸⁾⁻⁵³⁾である。Fig. 1-10 に航空機の接着修理に用いられるスカーフ継手の方法を示す。接着接合は、機械的接合や熔融接合と異なり、接着剤を塗布した面全体で接合するため、接合体の剛性など強度が増大する利点がある。しかし、主に熱硬化性樹脂の接着剤を使用するため、硬化時間や接着面の表面処理が必要などの課題があげられる。また、一度接着すると、溶剤を用いたり、機械的衝撃を加えたりしない限り外れないため、解体は非常に困難であり、公害や低いリサイクル性など環境影響も懸念される。接着性能はできるだけ広い面積で均等に接着されること、接着面はあらかじめ洗浄処理されたクリーンな面であることが必要である。接着は表面処理により性能が決まるといえるほど重要な工程であり、物理的な方法で活性化させる方法と、化学的に表面を活性化させる方法⁵²⁾がある。さらに、接着表面に凹凸を形成することでアンカー(投錨)効果を生み出して、接着力を高める効果がある⁵³⁾。

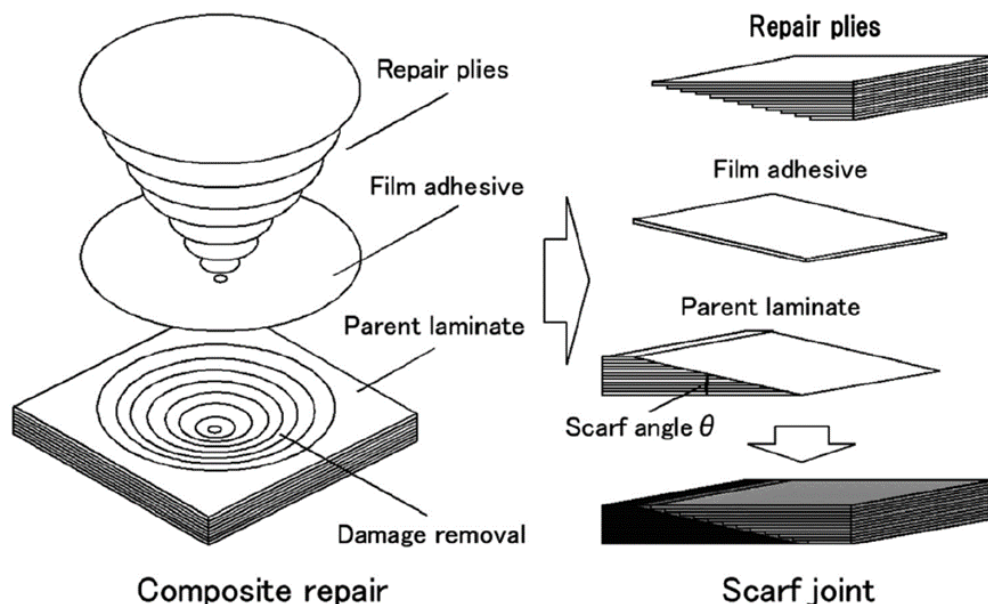


Fig. 1-10 Scarf repair of laminated CFRP and scarf joint⁵⁰⁾.

1. 4. 3 固相接合

固相接合は、溶融を伴わない接合手法である。接合部に加えられる変形量によって拡散接合と塑性変形接合に大別できる。拡散接合は、高温、長時間、低加熱といった接合条件において少ない変形量で接合させることが可能であるが、表面に酸化皮膜などがある場合には金属母材同士がなじまず、接合が不安定である。塑性変形接合は、摩擦圧接、摩擦攪拌接合⁵⁴⁾⁻⁵⁶⁾や超音波接合といった方法があり、接続部にある酸化物などを強制的に破壊しながら接合母材の清浄面同士をなじませて接合させる。これにより、接合できる金属の組合せ範囲が拡大するとともに、拡散接合に比べて接合条件を低温、短時間にでき、金属反応物の形成、接合強度の低下などを抑制することができる。固相接合の一つである摩擦攪拌接合（FSW：Friction Stir Welding）はプローブと呼ばれる突起を有する金属丸棒（ツール）を高速回転させながら材料に挿入し、さらに、接合母材の突き合わせ面に沿って回転ツールを移動させ、発生する摩擦熱と攪拌によって生ずる材料の塑性流動を利用して接合する方法である。Fig. 1-11にFSWの実施例を示す。接合中の最高到達温度は接合母材の融点より低く、金属を溶解せずに接合することができる。

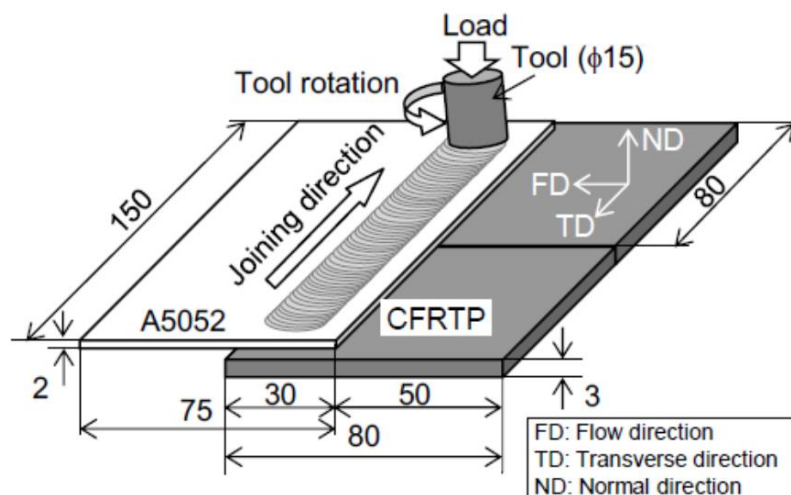


Fig. 1-11 Schematic illustration of the friction lap joining process⁵⁴⁾.

1. 4. 4 溶融接合

溶融接合は母材の接合部分を加熱し、溶融・混合して接合する方法である。加熱の方法によって抵抗溶接⁵⁷⁾⁻⁵⁹⁾、レーザー溶接⁶⁰⁾⁻⁶²⁾に分類できる。抵抗溶接は接合部の電気抵抗を利用してジュール熱を発生させ溶接する方法であり、短時間での接合が可能であるため、自動車などの薄板を使用した構造物の製造に応用されている。Fig. 1-12 に抵抗スポット溶接の概略図を示す。CFRTP プレートとアルミニウム合金プレート（Al）を銅電極で上下から荷重を負荷して挟み込み、電流を流して局部的に加熱して接合する。レーザー溶接は、接合界面の樹脂を分解温度以上に加熱することで接合を行い、高いエネルギー密度を利用して大型構造物の短時間接合も検討されている。また、溶接体の精度確保、溶接不良のない高品質接合を行うためには熟練を要し、技能保持者の養成、施工管理、非破壊検査による継手部の検査が欠かせない。また、これら熟練者のノウハウを実現した、自動車車体の製造におけるスポット溶接ロボットが実用化されている。

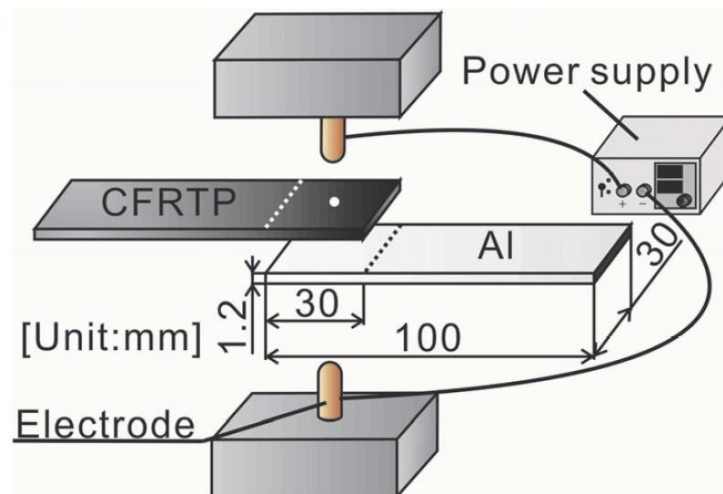


Fig. 1-12 Schematic drawing of the resistance spot welding method⁵⁹⁾.

1. 5 目的

1.4 節では CFRTP と金属の異種接合について、主な接合方法を説明した。それぞれの接合方法で優位性と課題があり、これらを十分に把握した上での利用が望ましい。

金属と熱可塑性樹脂の接合は、一般的に加熱と加圧によって高い接合強度を得ることができる⁶³⁾。従来はこの加圧を圧延やプレス加工で積極的に行っていた。これらに対して、本研究では、CFRTP 板をマトリックス樹脂の溶融温度付近に加熱し、板厚方向に膨張する性質を利用した異種接合の技術確立を目的とし、従来には無い CFRTP と金属の異種接合技術を提案する。

具体的な各章の目的を以下に記す。

第 2 章では、溝形状を設けたアルミニウム合金片を任意の温度に加熱し、CFRTP を挿入して膨張させることで、溝形状の壁面（接合面）を加圧する力が発生し接合強度を得る新しい接合技術を開発することを目的とする。

第 3 章では、CFRTP をオートクレーブ成形で製作し、オートクレーブの成形圧力と接合強度との関係性を明確にすることを目的とする。

第 4 章では、CFRTP を加熱したときの膨張特性を利用して、CFRTP を円柱状のピンに成形し、穴を開けた金属板の同種・異種接合を行い、その有用性を検討することを目的とする。

1. 6 本論文の構成と要旨

第 1 章では、研究背景と現状の CFRTP と金属の異種接合技術について説明し、本研究の目的を示した。

第 2 章では、CFRTP の熱特性を利用したアルミニウム合金との接合方法を提案する。溝を形成したアルミニウム片を加熱し、加熱後に CFRTP 板を挿入することで CFRTP に熱が伝わり膨張して、その加熱と加圧によって接合する方法である。また、アルミニウ

ム合金の溝をテーパ形状にすることで、膨張した際の CFRTP が溝に充填され、エポキシ系接着剤相当の高い接合強度を発生させることが可能である。

第 3 章では、CFRTP 板の熱特性と CFRTP 板の成形条件に関連性があると仮定し、オートクレーブを用いて、任意の温度と圧力条件で CFRTP 板を成形し、アルミニウム合金との接合品を製作して強度の評価を行った。さらに、加熱したアルミニウム合金片にオートクレーブ成形した CFRTP を挿入して接合し、オートクレーブの成形圧と、接合品の接合強度の関連性について検証を行った。

第 4 章では、CFRTP の熱特性を利用し、CFRTP を積層シートから円柱状に研削加工したピンを用いて、同種または異種の板材を接合する方法を提案する。すなわち、第 2 章で確立した CFRTP の板材による接合同様に、CFRTP を円柱状に加工したものを用意し、丸穴を開けた対の同種の金属板の接合を行った。

第 5 章では本論文で確立した CFRTP の熱特性を利用した接合技術についてまとめ、今後の展開について述べる。

第 2 章

板状 CFRTP の厚さ方向の熱特性を利用した アルミニウム合金との異種接合

第 2 章 板状 CFRTP の厚さ方向の熱特性を利用したアルミニウム合金との異種接合

2. 1 緒言

本章では、溝形状を設けたアルミニウム合金片を任意の温度に加熱し、CFRTP を挿入して膨張させることで、溝形状の壁面（接合面）を加圧する力が発生し接合強度を得る新しい接合技術を開発することを目的とした。ストレートおよびテーパの溝形状を有したアルミニウム合金片を製作し、新しく開発した接合方法の実証実験および接合強度の評価を行った。また、CFRTP の加熱膨張と接合強度の関係性を確認するため、CFRTP 板をあらかじめ加熱したアルミニウム合金板 2 枚で挟んで放置した際の板厚の増加量および応力を調べた。さらに、接合強度の比較のため、同一の試験片を用いてエポキシ系接着剤で接着し、接合強度の比較評価を行った。

2. 2 実験方法

2. 2. 1 供試材

供試材の特性を、Table2-1 に示すスタンパブルシート（一村産業（株）製、PA6-3KP10A-460S）を用いた。ここで 3K とは炭素繊維 1 束あたりの本数を示す。このシートを Fig. 2-1 に示すサイズに高速切断機で切断して試験片を製作した。

Table 2-1 Material properties of CFRTP stampable sheet used for joining.

Fiber	Carbon
Resin	PA6
Thickness mm	$2.3^{+0.002}_{-0.072}$
Number of layers	10
Fiber content ⁶⁴⁾ %	53
Bending strength ⁶⁴⁾ MPa	750

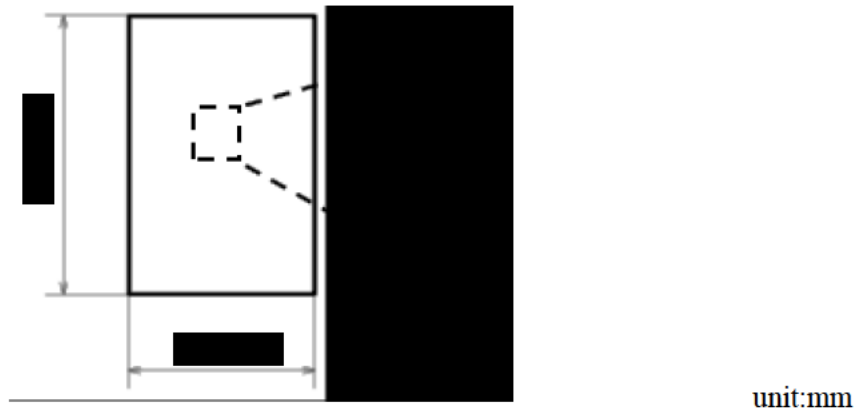


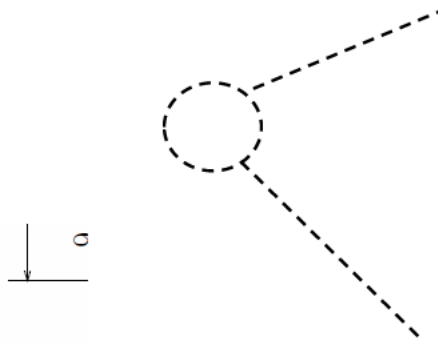
Fig. 2-1 Dimensions of stampable sheet of cut CFRTP sheet.

接合する金属材料として、アルミニウム合金（A5052）を供試材とし、**Fig. 2-2** に示す形状の試験片を用いた。CFRTP を挿入する溝形状と万能試験機のつかみ歯用に反対側を細くした部分を持つ形状である。アルミニウム合金（A5052）片の厚さは 20mm である。溝形状として、口元側を狭く内側を広く形成したテーパ形状を用いており、CFRTP 板を挿入して膨張した際に、垂直方向の最大せん断応力を高めることを狙いとした。

口元側の溝形状の幅を CFRTP の板厚 2.3mm よりわずかに広い 2.35mm、内側の幅を 3.0mm 一定とし、内側頂点からテーパ角度 θ を $\theta = 0^\circ, 82.8^\circ, 84.7^\circ, 86.4^\circ$ と変化させた。特に、テーパ部なしのストレート溝を $\theta = 0^\circ$ と表記する。テーパ以外の部分は、ストレート形状である。テーパ形状の鉛直方向長さ L_t はテーパ角度 θ を用いて式(2-

1)で表され、 $\theta=0^\circ, 82.8^\circ, 84.7^\circ, 86.4^\circ$ の時にそれぞれ $L_t=0$ (テーパーなし), 2.6 (1/2テーパー), 3.5 (2/3テーパー), 5.2 (フルテーパー) mmとなる。このテーパー形状の鉛直方向長さ L_t とテーパー角度 θ の関係を **Table2-2** に示す。

$$L_t = 0.325 \tan \theta \quad (2-1)$$



unit:mm

Fig. 2-2 Dimensions of Aluminum piece cut by wire electric discharge machining.

Table 2-2 Relationship between taper angle, length and ratio.

Taper angle [°]	Taper length [mm]	Taper rate [-]
0	0	-
82.8	2.6	1/2
84.7	3.5	2/3
86.4	5.2	Full

2. 2. 2 アルミニウム合金片加熱による CFRTP との接合方法および接着剤による接合方法

アルミニウム合金片加熱による CFRTP との接合方法として、以下の手順で試験片の製作を行った (Fig. 2-3).

- (1) CFRTP 板を切断機で、アルミニウム合金片をワイヤー放電加工機 (表面処理無し, $Ra0.4\mu\text{m}$) でそれぞれ切断して製作する.
- (2) あらかじめ所定の温度 T_{al} に加熱した電気炉で 5 分間、アルミニウム合金片の加熱を行う.
- (3) アルミニウム合金片を電気炉から取出し、CFRTP 板をアルミニウム合金片の溝形状に挿入させる.
- (4) 室温で放置冷却する.

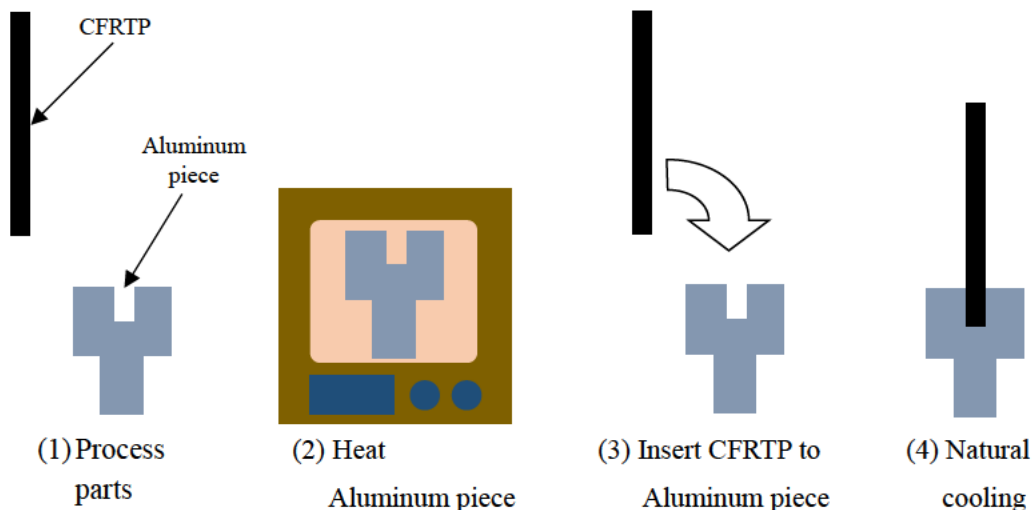


Fig. 2-3 Procedure for joining CFRTP plate and aluminum piece by heating aluminum piece.

アルミニウム合金片の加熱温度を、CFRTP のマトリックス樹脂である PA6 の熔融温度付近の $T_{al} = 523\text{K}$ から A5052 の熔融温度付近の $T_{al} = 823\text{K}$ まで 50K ごとに変化させた。さらに、本研究の比較として、前記供試材の CFRTP 板とアルミニウム合金片を用

いて、接合部分に接着剤を塗布し接着を行った。接着剤は常温硬化型二液性エポキシ樹脂軟質塩ビ接着タイプ（(株) Threebond 製, 2081D）を使用し、硬化時間を 24 時間とした。それぞれのサンプル数 $n = 5$ で行った。Table2-3 に本接着剤 2081D の各種材料に対する接着強さを示す。

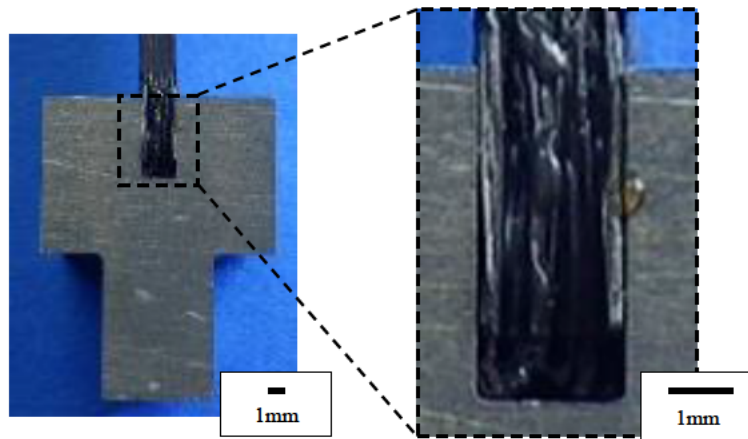
Table2-3 Adhesive strength of Threebond 2081D to various materials⁶⁵⁾.

Adhesive material	Tensile shear strength [MPa]	Remarks
Hard PVC (2mm)	8.4	Material damage
PC (2mm)	3.3	
Phenol (2mm)	9.3	Material damage
PA6 (1mm)	4.1	
Glass epoxy (2mm)	10.8	
ABS (2mm)	7.4	Material damage
PS (2mm)	3.2	
Aluminum (1.6mm)	10.3	

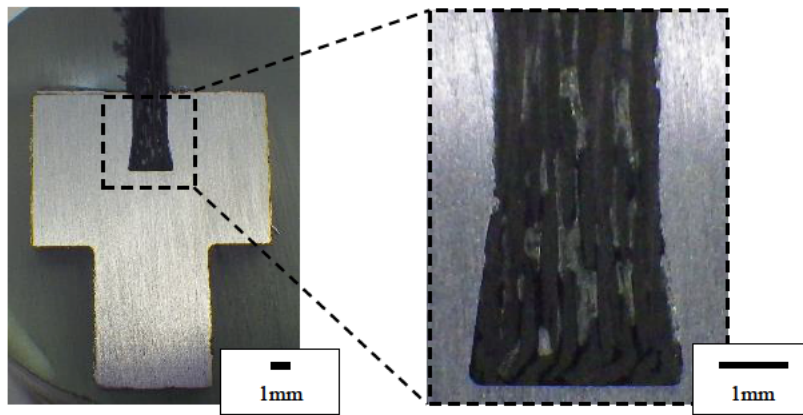
A5052 と CFRTP を接合した代表的な外観写真を Fig. 2-4 に示す。(a)は、 $\theta = 0^\circ$ （ストレート溝）のアルミニウム合金片で $T = 723\text{K}$ の条件で加熱して製作した試験片、(b)は $\theta = 82.8^\circ$ 、 $T = 723\text{K}$ 、(c)はエポキシ系接着剤で接着した試験片を示す。

また、断面観察は、走査電子顕微鏡（日本電子(株)製, JSM-6010LA）を用いて行った。観測用試料表面はイオンスパッタ装置（日本電子(株)製, JEC-3000FC）により、Pt スパッタコーティングを行った。

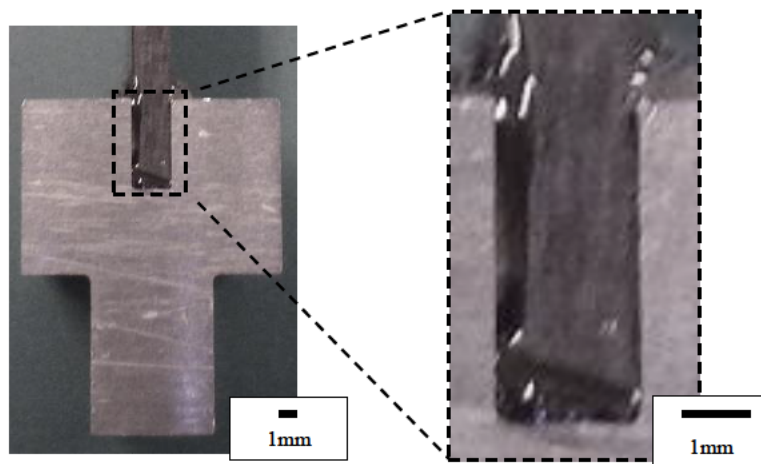
製作したそれぞれの接合試験片を万能試験機（(株)島津製作所製, AG-50KNXD）で垂直方向に 1mm/min で引張り、荷重の測定を行った。測定された最大荷重を、CFRTP 板側面の接触面積（CFRTP 板幅×溝深さ 5.2mm×2 面）で除して最大せん断応力を求めた。



(a) $\theta = 0^\circ$, $T = 723\text{K}$



(b) $\theta = 82.8^\circ$, $T = 723\text{K}$



(c) Bonded with adhesive

Fig. 2-4 Image of the joint between the test piece that was joined by heating the aluminum piece and the test piece that was adhesively bonded.

2. 3 実験結果

2. 3. 1 ストレート溝を有するアルミニウム合金片加熱による CFRTP との接合および接着剤による接合方法

Fig. 2-5 に $\theta=0^\circ$ のアルミニウム合金片で $T=723\text{K}$ の条件で加熱して製作した試験片の断面 SEM 写真を示す. 界面の CFRTP 側が樹脂で形成されており, 収縮による隙間が形成されていないことが確認できる.

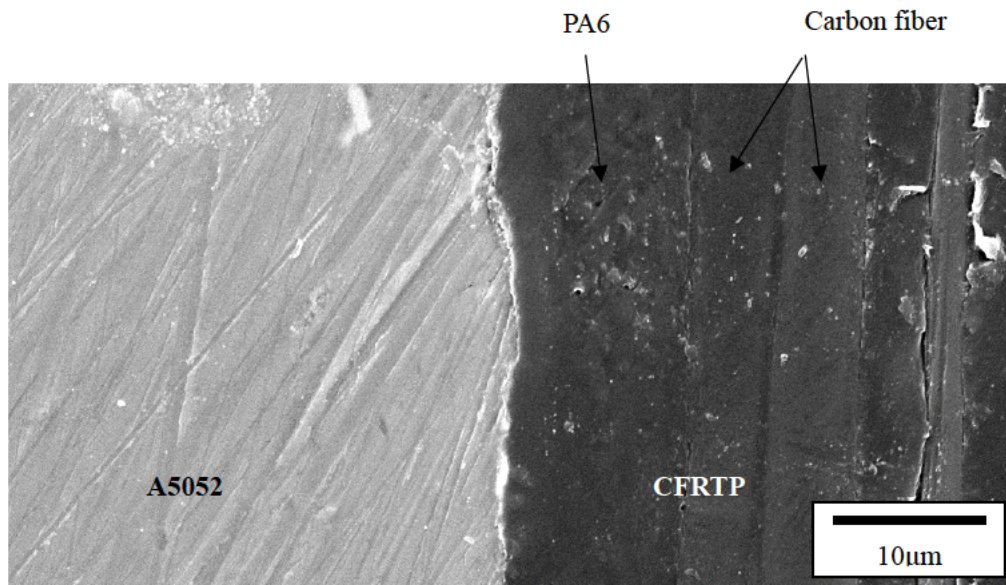


Fig. 2-5 SEM image of joining interface of a test piece that is joined to CFRTP by heating aluminum.

$\theta=0^\circ$ 一定としたストレート溝アルミニウム合金片を加熱して CFRTP と接合した試験片の引張試験結果のうち $T=623\text{K}$ を Fig. 2-6 に, $T=673\text{K}$ を Fig. 2-7 に, $T=723\text{K}$ を Fig. 2-8 に, $T=773\text{K}$ を Fig. 2-9 に, $T=823\text{K}$ を Fig. 2-10 にそれぞれ示す. また, エポキシ系接着剤による接合品の引張試験結果を Fig. 2-11 に示す. これらの結果は, 剥離試験の結果をせん断応力の値を用いてまとめたものである. それらのうち, 各温度と接着剤の結果の代表例を Fig. 2-12 にまとめて示す. 同図から全ての試験片において, 引張り

始めのストローク 0.4mm 付近までチャックと CFRTP のすべりが生じ、その後引張荷重 F_s が急激に増加し、アルミニウム合金片の溝から CFRTP の接合が剥がれる所で荷重が急激に減少している。エポキシ系接着剤で接着した試験片は、引張荷重の増加後ピークを迎え、急激に減少したが、0N まで減少せず、その後、再度 400N 程増加している。これは Fig. 2-13 に示すように、CFRTP 板の炭素繊維の一部がアルミニウム合金片と接着接合して残っており、引張り試験時に抗力として現れたためである。引張試験後の接合界面の観察より、接着剤がアルミニウム合金溝に残るものと界面で剥離するものがあり、最大荷重や最大荷重発生時のストロークにばらつきがあるのは、そのためと考えられる。

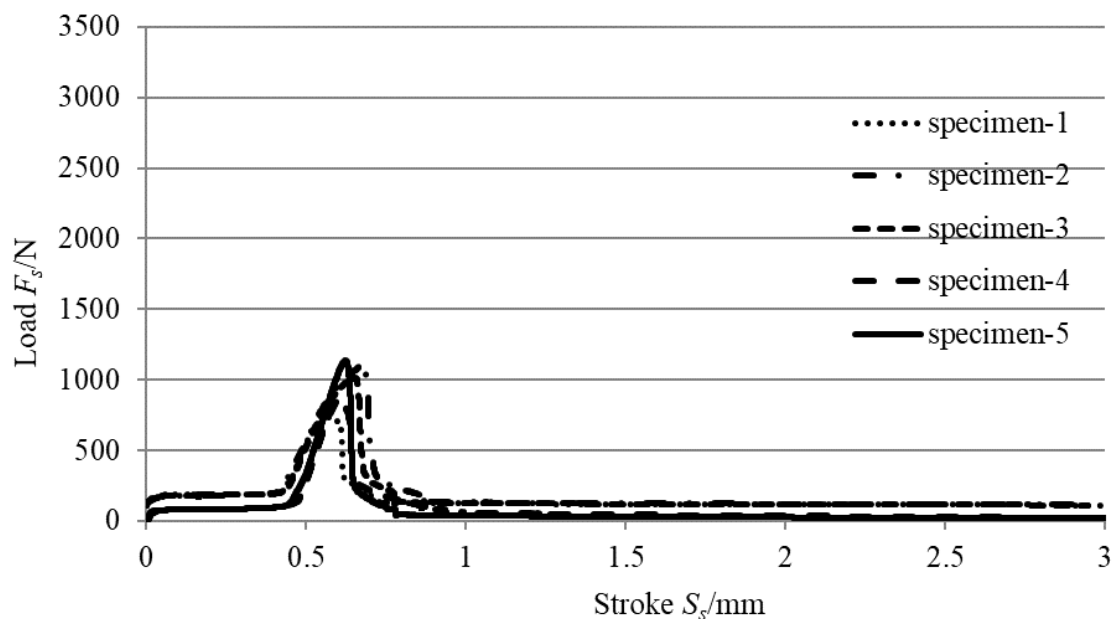


Fig. 2-6 Stroke-load result of tensile test of test piece with CFRTP and aluminum piece joined ($\theta = 0^\circ$, $T = 623\text{K}$).

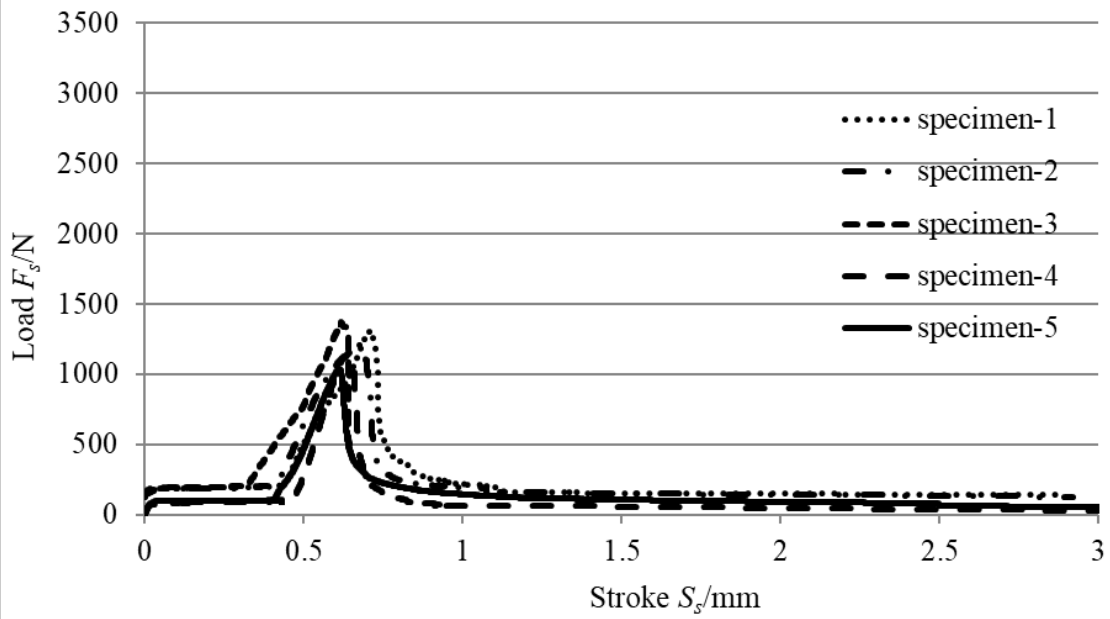


Fig. 2-7 Stroke-load result of tensile test of test piece with CFRTP and aluminum piece joined ($\theta = 0^\circ$, $T=673\text{K}$) .

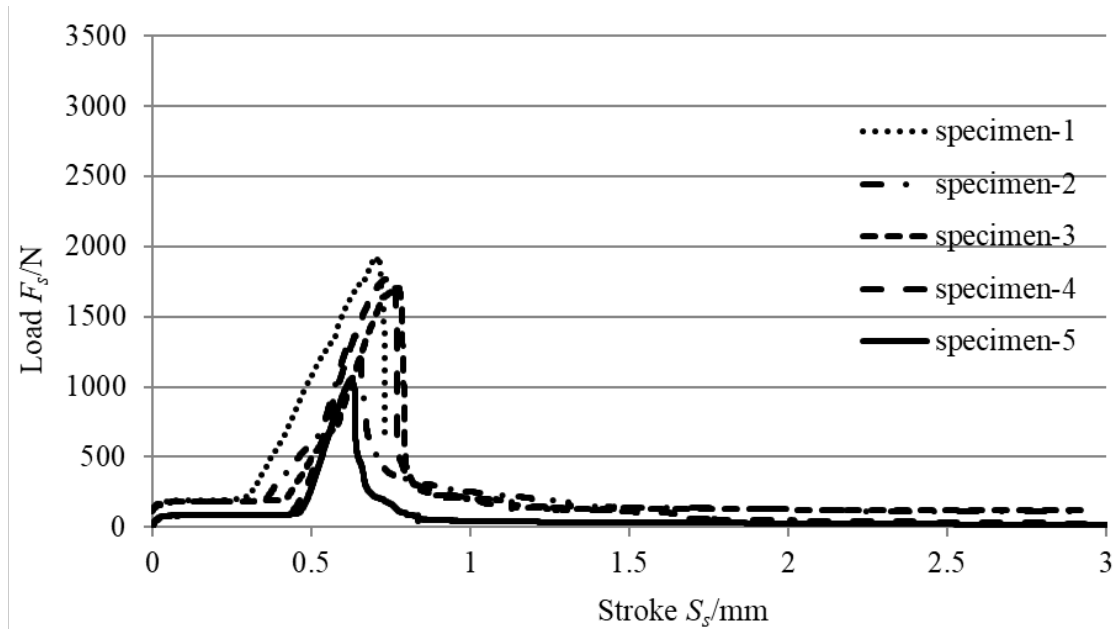


Fig. 2-8 Stroke-load result of tensile test of test piece with CFRTP and aluminum piece joined ($\theta = 0^\circ$, $T=723\text{K}$).

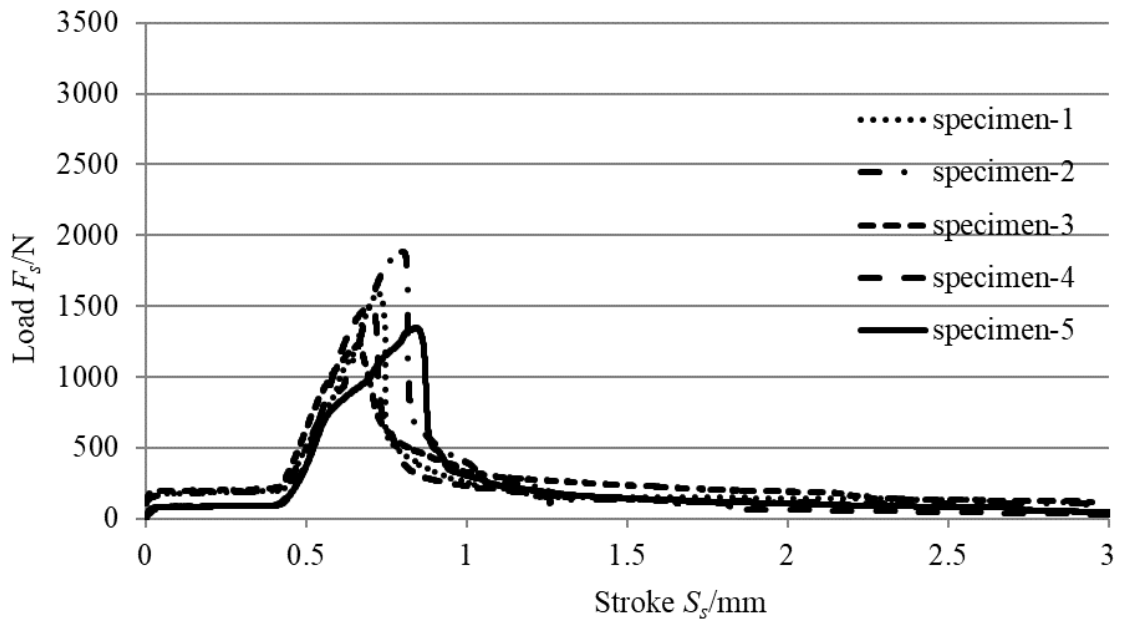


Fig. 2-9 Stroke-load result of tensile test of test piece with CFRTP and aluminum piece joined ($\theta = 0^\circ$, $T=773\text{K}$).

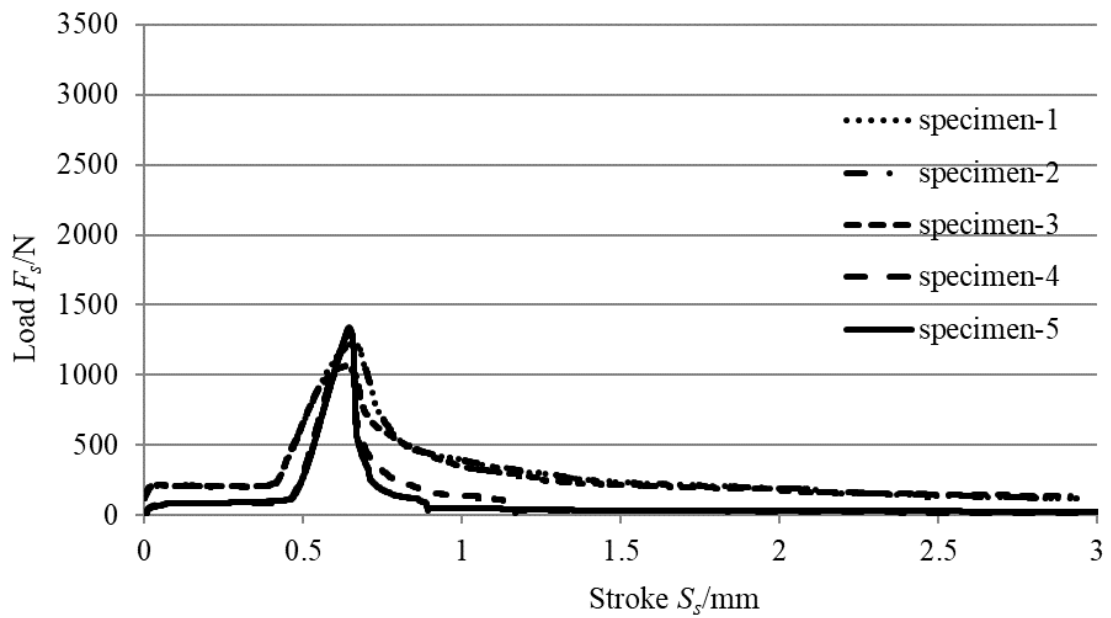


Fig. 2-10 Stroke-load result of tensile test of test piece with CFRTP and aluminum piece joined ($\theta = 0^\circ$, $T=823\text{K}$).

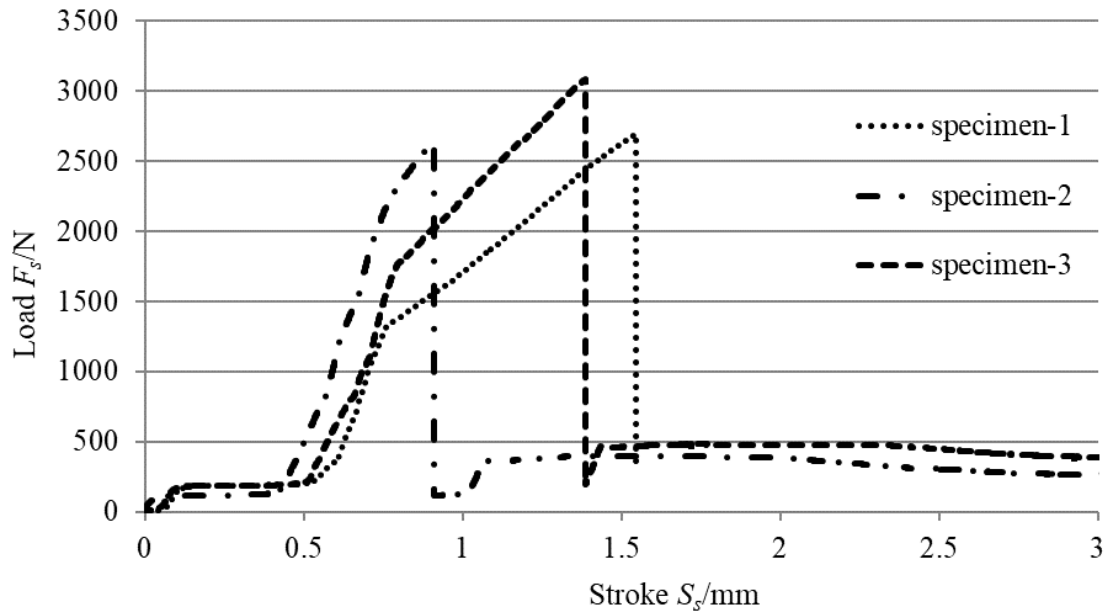


Fig. 2-11 Stroke-load result of tensile test of test piece with CFRTP and aluminum piece joined (Epoxy adhesive).

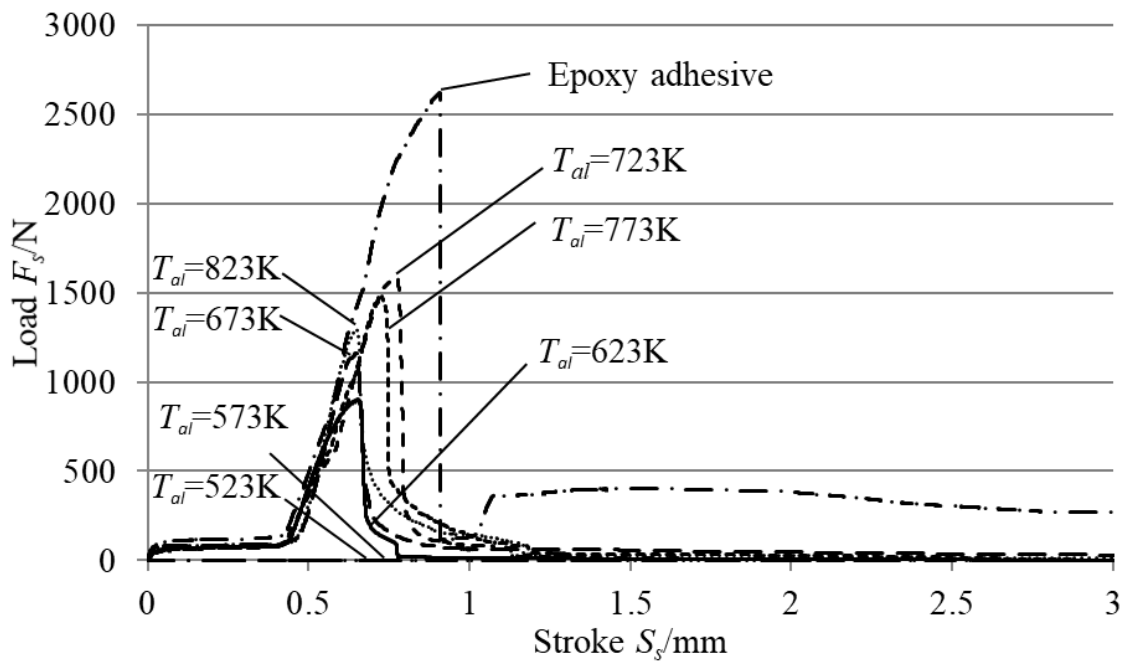


Fig. 2-12 Typical example of stroke-load results in tensile test of a test piece in which CFRTP and an aluminum piece are joined under each heating temperature.

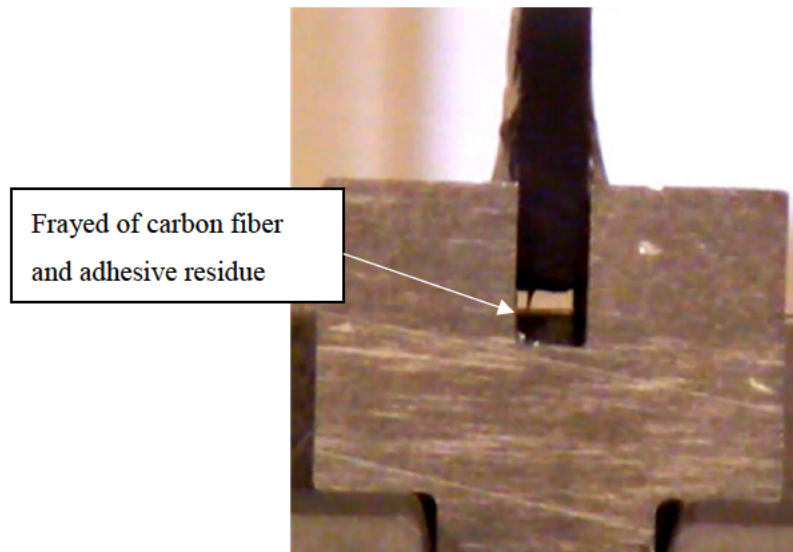


Fig. 2-13 Image of carbon fibers frayed and left on aluminum pieces during a tensile test of a bonded product with adhesive.

次に、Fig. 2-6 から Fig. 2-11 より求めた平均せん断応力 τ_{cs} の最大値を最大せん断応力 τ_{csmax} と定義して、これと加熱温度 T_{al} の関係を **Fig. 2-14** に示す。同図中には、サンプル数 $n = 5$ の最大せん断応力 τ_{csmax} の平均値と最小値および最大値を示す。さらに、同図中にはエポキシ系接着剤で接着した試験片の最大せん断応力 τ_{csmax} を併記する。 $T_{al} = 523\text{K}$ と 573K では、せん断応力がほとんど発生せず、接合が確認できなかった。その後、 $T_{al}=623\text{K}$ からせん断応力が得られ $T_{al}=723\text{K}$ で最大せん断応力 τ_{csmax} がピークとなり、それ以上の加熱温度 T_{al} では、最大せん断応力 τ_{csmax} の低下が見られた。これに対しエポキシ系接着剤で接着した試験片の結果は、ストレート溝アルミニウム合金片の最大せん断応力より高く、 $\tau_{cs} = 12.6\sim 14.8\text{MPa}$ の最大せん断応力 τ_{csmax} が得られた。

加熱温度 $T_{al} = 723\text{K}$ の引張せん断試験で剥がれた CFRTP の画像を **Fig. 2-15** に示す。材料に破断は起こらず、接合面の滑りによって分離しているのが確認できる。

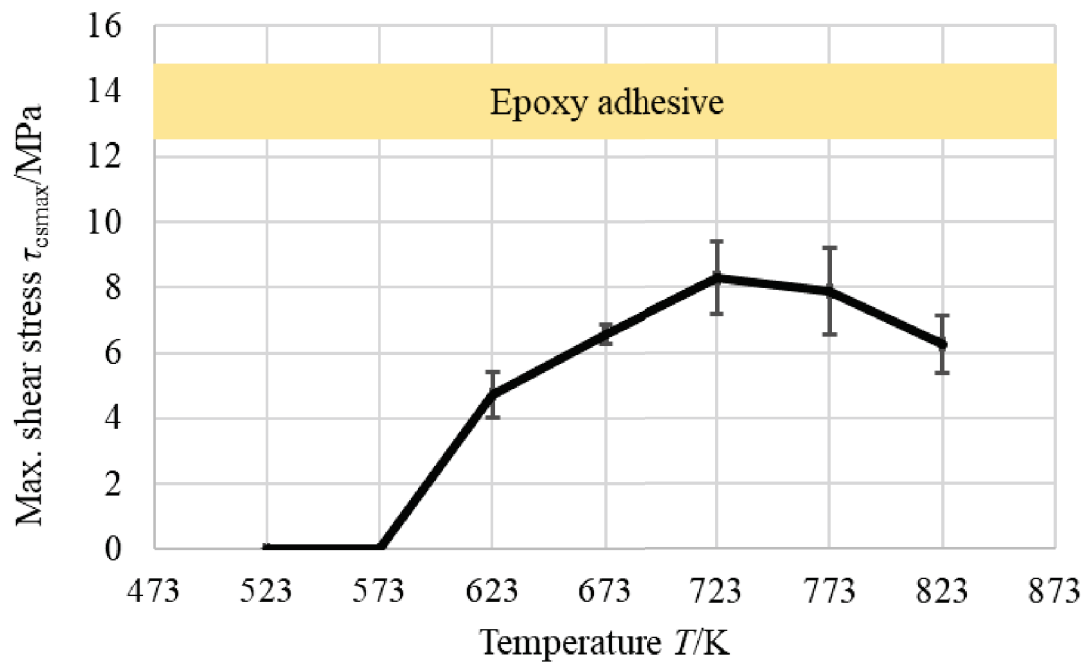


Fig. 2-14 Relationship between maximum shear stress of joint test piece and heating temperature of aluminum piece obtained from tensile test results ($\theta = 0^\circ$).

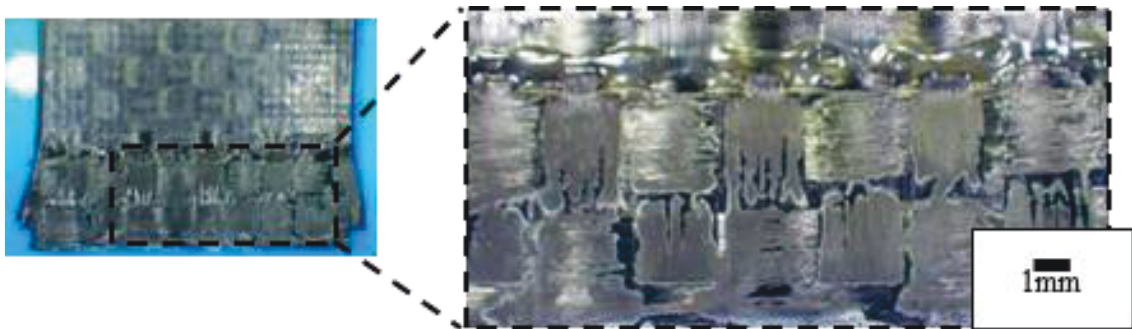


Fig. 2-15 Image of CFRTP peeled off in tensile shear test at heating temperature $T_{al} = 723K$, $\theta = 0^\circ$.

2. 3. 2 テーパー溝を有するアルミニウム合金片加熱による CFRTP との接合および接着剤による接合方法

ストレート溝タイプ ($\theta=0^\circ$) で最大せん断応力が最大となった $T_{al}=723\text{K}$ で一定として、 $\theta=0\sim 86.4^\circ$ と変化させて試験片を作製した。作製した試験片で引張試験を行った結果のうち $\theta=86.4^\circ$ を Fig. 2-16 に、 $\theta=84.7^\circ$ を Fig. 2-17 に、 $\theta=82.8^\circ$ を Fig. 2-18 に示す。また、それらのうち、各テーパー角度の結果の代表例を Fig. 2-19 にまとめて示す。ストレート溝と同様に、引張り直後に CFRTP の伸びが発生し、その後、急激に引張荷重が増加した。その後、一度は荷重が低下するが、再び徐々に増加し、緩やかに低下した。この傾向は、 θ が増加するに従い大きく現れることがわかった。一度目の引張荷重の増加は、アルミニウム合金片のテーパー溝と CFRTP 表面の接合が剥がれるまで続き、CFRTP の表面の接合が剥がれることで急激に荷重が低下する。

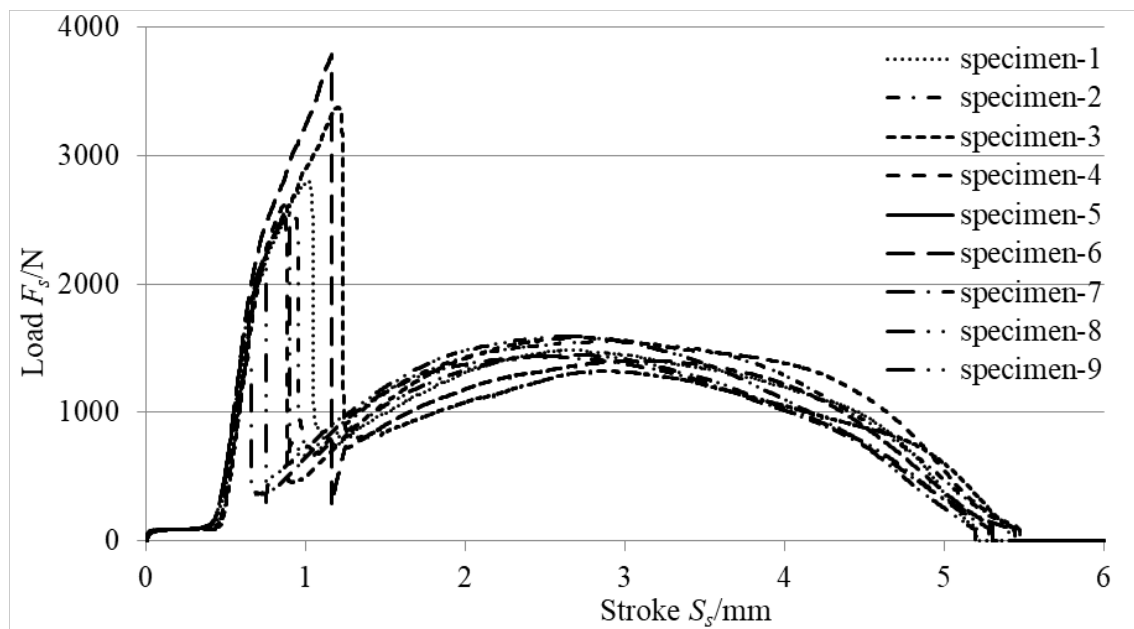


Fig. 2-16 Stroke-load result of tensile test of test piece with CFRTP and aluminum piece joined ($\theta=86.4^\circ$).

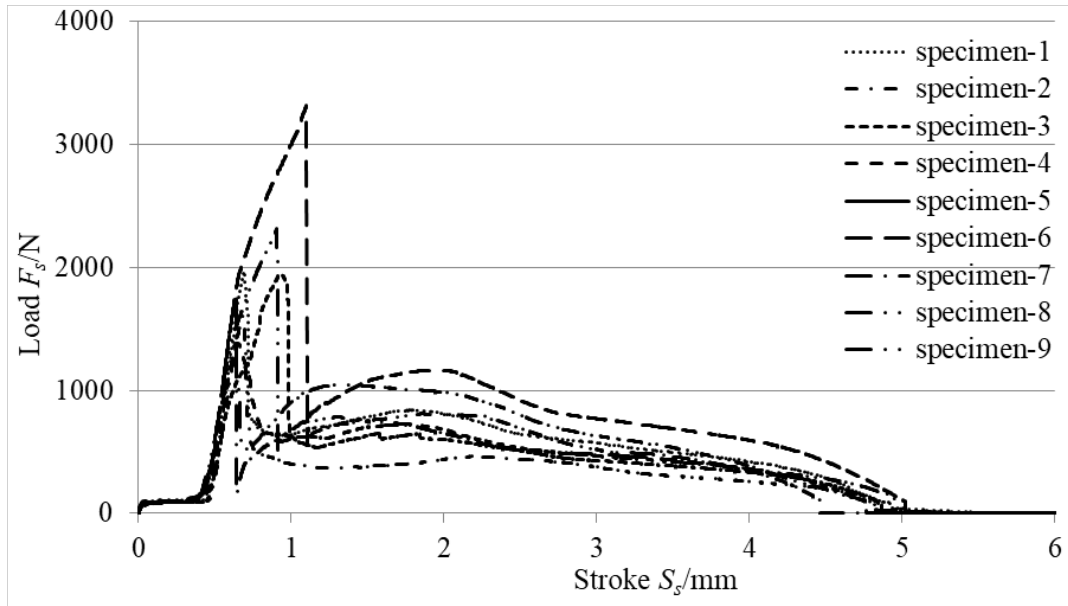


Fig. 2-17 Stroke-load result of tensile test of test piece with CFRTP and aluminum piece joined ($\theta = 84.7^\circ$).

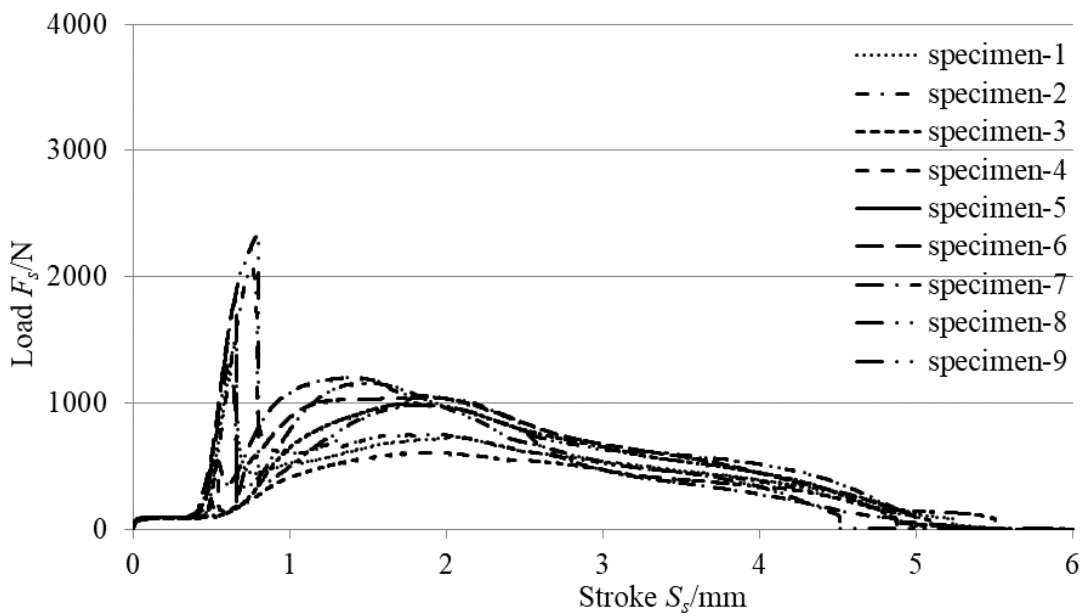


Fig. 2-18 Stroke-load result of tensile test of test piece with CFRTP and aluminum piece joined ($\theta = 82.8^\circ$).

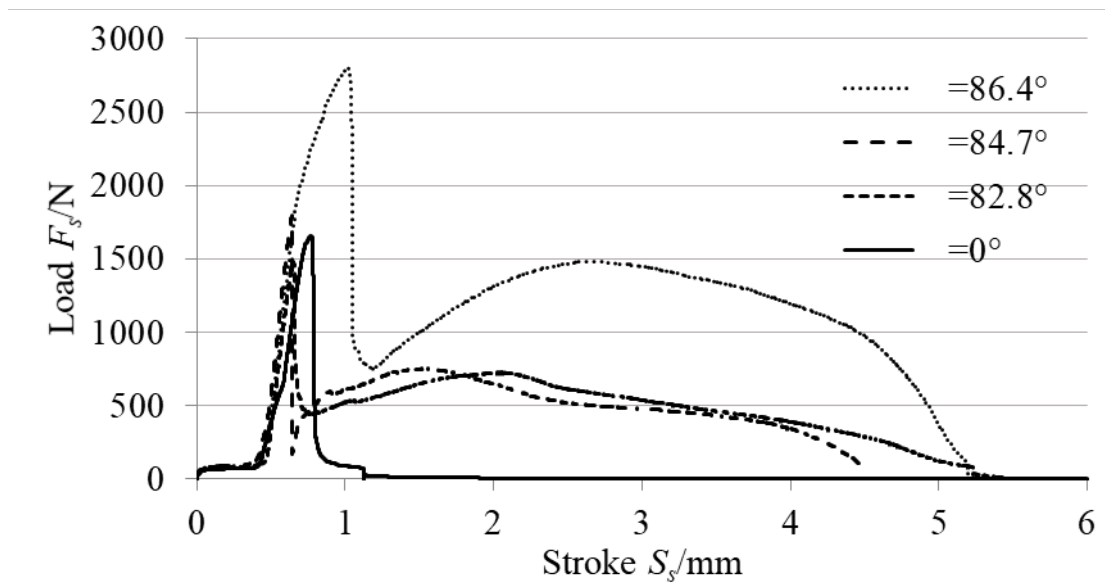


Fig. 2-19 Typical example of stroke-load result in tensile test of test piece in which CFRTP and aluminum piece are joined at each taper angle of aluminum piece.

Fig. 2-19 から一度目にピークとなった引張荷重から求めたせん断応力を最大せん断応力 τ_{csmax} として求め、テーパ角度 θ との関係を求めた結果およびテーパ角度 θ における CFRTP との接触面積を **Fig. 2-20** に示す。サンプル数 $n = 5$ の最大せん断応力 τ_{csmax} の平均値と最小値と最大値を示す。また、同図中にエポキシ系接着剤で接着した試験片の最大せん断応力 τ_{csmax} を併記する。 $\theta = 0^\circ$ のストレート溝のアルミニウム合金片では、最大せん断応力 $\tau_{csmax} = 8\text{MPa}$ である。 $\theta = 0^\circ$ に対し $\theta = 82.8^\circ$ や $\theta = 84.7^\circ$ に変化させても、最大せん断応力 τ_{csmax} はほとんど変化がなかった。しかし、フルテーパとなる $\theta = 86.4^\circ$ ではエポキシ系接着剤の最大せん断応力とほぼ同等の 13.6MPa であった。

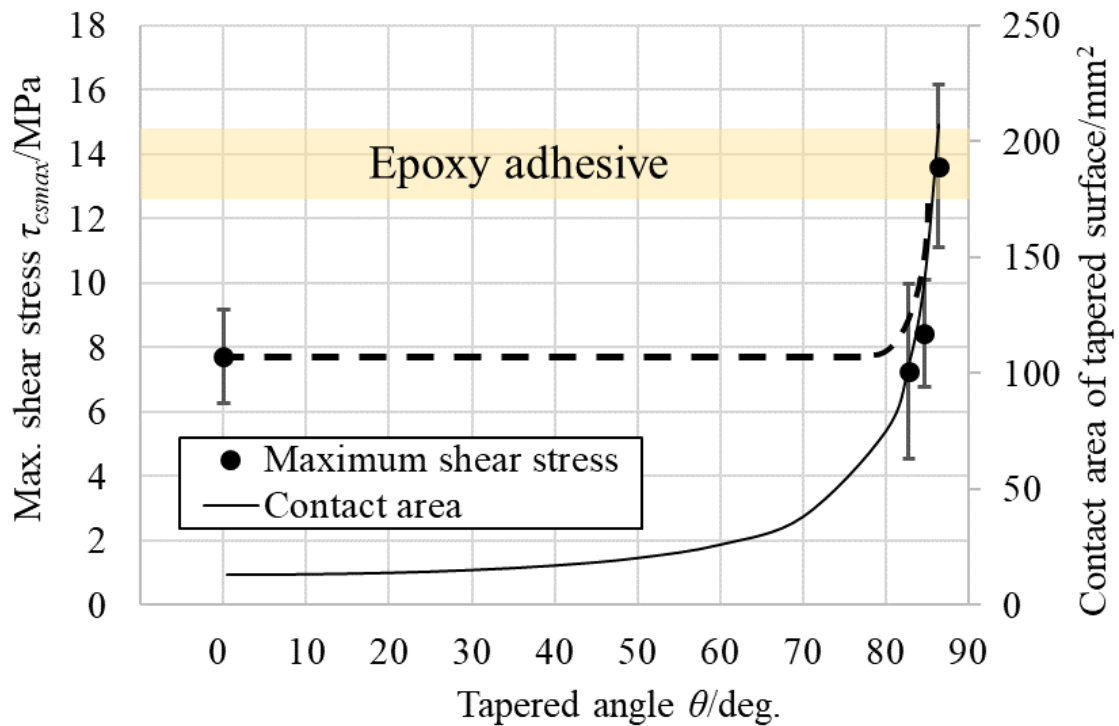


Fig. 2-20 Relationship between maximum shear stress of joint test piece and heating temperature of aluminum piece obtained from tensile test results ($T=723K$)

2. 4 考察

2. 4. 1 CFRTP の膨張による板厚増加率と膨張圧力の測定

Fig. 2-9 のように加熱温度 T が増加するに従い、最大せん断応力が増加したことは、加熱したことによる CFRTP の膨張が関係していると考えられる。従って、加熱による CFRTP の板厚増加率 α および板厚膨張から発生する際の圧力 P_e を求めた。Fig. 2-21 に示すように CFRTP の板材をあらかじめ 2. 2 と同様の所定の温度で加熱した 2 枚のアルミニウム合金板で挟み、その後、室温で保持した。図の紙面上下方向を CFRTP およびアルミニウム合金板の板厚方向とする。この時、アルミニウム合金板から熱が伝わる前後の CFRTP の板厚を測定して、式(2-2)から板厚増加率 α を求めた。

$$\alpha = \frac{t_a - t_b}{t_b} \times 100(\%) \quad (2-2)$$

ここで t_b は加熱前の板厚, t_a は加熱後の板厚を表す.

アルミニウム合金板は A5052 の厚さ 6.3mm で□40mm の試験片を, CFRTTP 板は前記供試材から□20mm に切断した試験片を使用した.

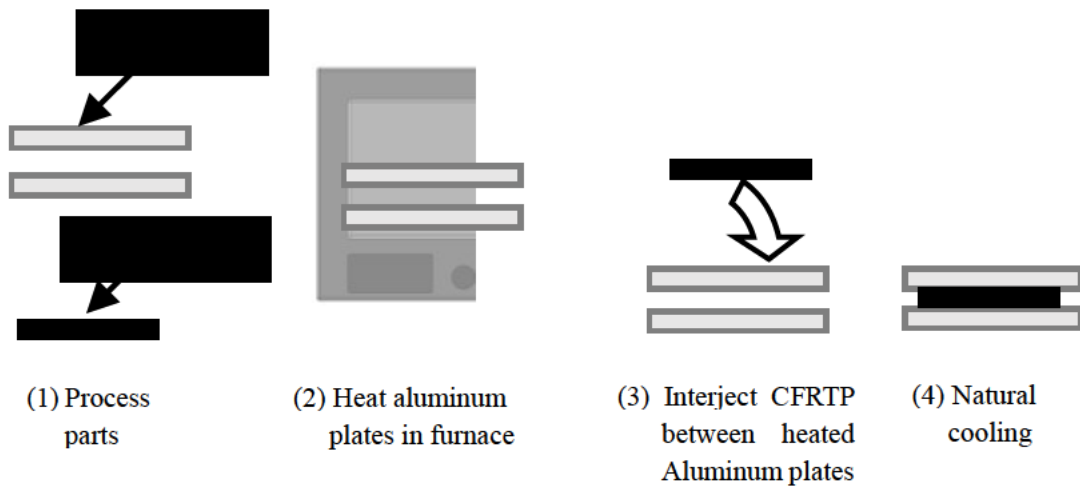


Fig. 2-21 Procedure to heat aluminum plates and transfer heat to the CFRTTP plate to increase plate thickness.

膨張の際に発生する荷重の測定は, 2 枚のアルミニウム合金板で挟んだ直後に **Fig.2-22** に示す荷重負荷治具によって任意の荷重を与え, 板厚増加率を算出した. アルミニウム合金片の加熱から板厚増加率算出までの手順を **Fig. 2-23** に示す. そのうち, 板厚増加率と, 荷重した圧力 P_e から近似直線を描き, 板厚増加率 0%の時の荷重圧力を $T_{sp} = 773\text{K}$ における膨張圧力 0.13MPa と定めた. 荷重圧力 P_e は式 (2-3) より求めた.

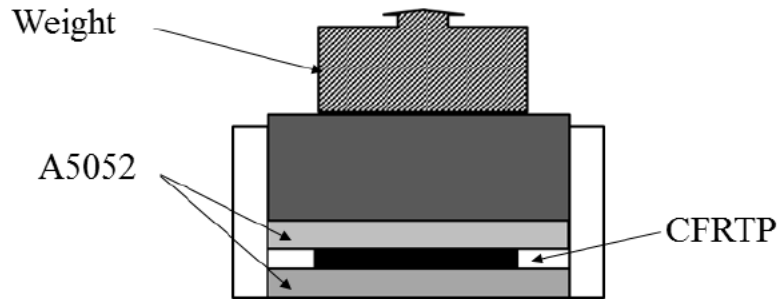


Fig. 2-22 Schematic diagram of a jig for measuring generated load due to the increase in CFRTP plate thickness

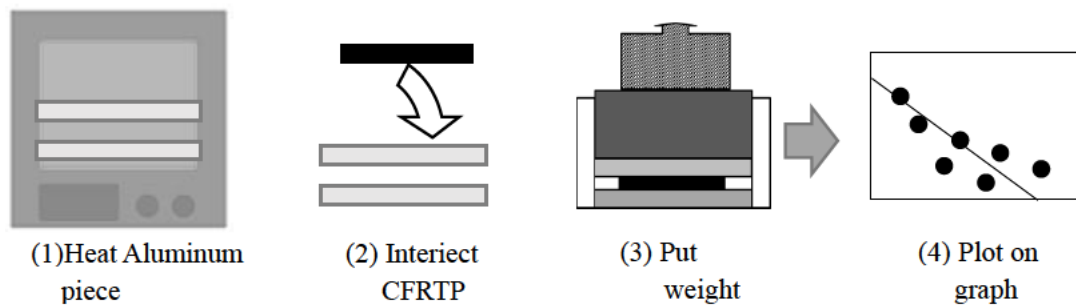


Fig. 2-23 Procedure for measuring the generated load due to the increase in CFRTP plate thickness

$$P_e = \frac{G}{20 \times 20} \quad (2-3)$$

ここで G は試験片に負荷した荷重を表す。

アルミニウム合金の加熱温度 T_{alp} と板厚増加率 α の関係を **Fig. 2-24** に示す。さらに、同図中に **Fig. 2-14** で示したストレート溝の最大せん断応力 τ_{max} を併記している。加熱温度 T_{alp} が $T_{alp} = 573\text{K}$ までは板厚増加率 α はほぼ 0 であるが、それ以上の加熱温度 T_{alp} になると板厚増加率 α が増加し、 $T_{alp} = 723\text{K}$ 以上になると板厚増加率 α が 25% 前後で安定

する。これらの板厚増加率 α と最大せん断応力 τ_{max} を比較すると、増加が始まる温度や最大せん断応力 τ_{max} がピークの時の温度に近い傾向が現れた。

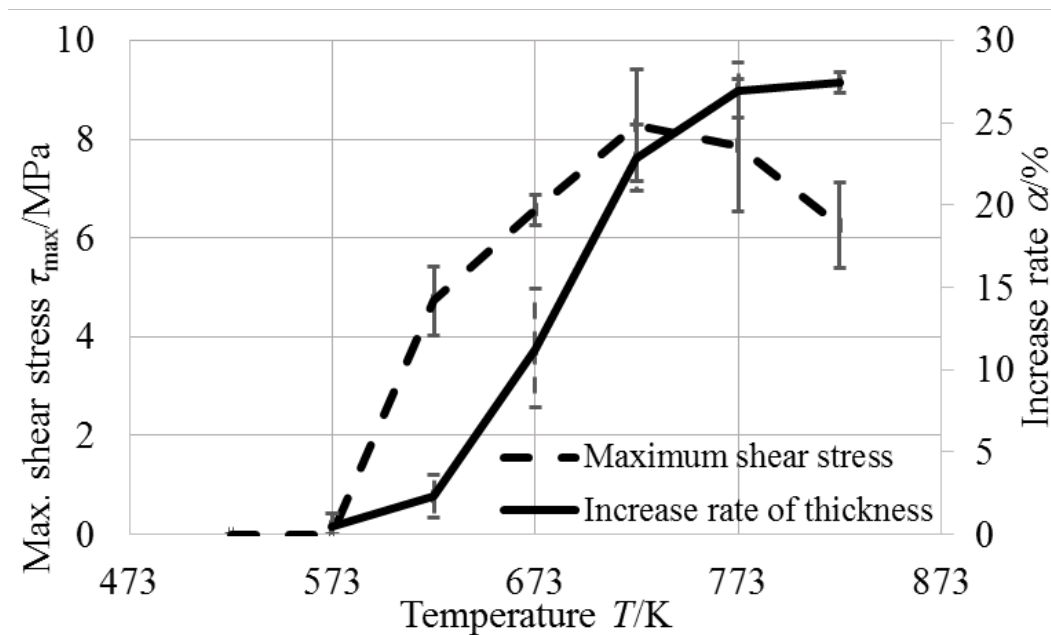


Fig. 2-24 Relationship between maximum shear stress of joint test piece and heating temperature of aluminum piece obtained from tensile test results. And Relationship between increase rate and heating temperature of aluminum piece.

Fig. 2-5 の界面の SEM 観察および Fig. 2-12, Fig. 2-19 の引張試験における荷重のピーク以降に急激に減少する結果より、アルミニウム合金と CFRTP の接合は、樹脂の溶融と膨張によって内側から押される荷重による溶着であると判断できる。

Fig. 2-25 にアルミニウム合金板を(a) $T_{alp} = 723\text{K}$ に加熱して挟んだ CFRTP と(b) $T_{alp} = 823\text{K}$ に加熱して挟んだ CFRTP の平面と断面の画像を示す。試験前は CFRTP 表面全体が PA6 で覆われていたが、 $T_{alp} = 723\text{K}$ では PA6 が溶融して空孔が形成され炭素繊維も露出している。これは、アルミニウム合金板から熱が伝わり、PA6 が溶融して軟化した

際に炭素繊維が応力開放されて膨張し、その膨張した繊維の隙間から内部へ樹脂が流出したためと考えられる。加えて、PA6の冷却過程での収縮も炭素繊維の露出の要因の一部と考えられる。 $T_{alp}=823\text{K}$ ではさらに溶融が進展して、樹脂が流れて炭素繊維の露出が増加しているのが確認できる。引張せん断試験の結果から、ストレート溝アルミニウム合金片では最大せん断応力 τ_{max} が $T_{al}=723\text{K}$ で最大値となり、それ以上の加熱温度 T_{al} では最大せん断応力が低下している。これは、加熱温度 T_{al} が $T_{al}=823\text{K}$ のように高温でA5052を加熱して接合させる場合、CFRTP中の樹脂が溶融し流出するため炭素繊維が露出し、接触面の樹脂面積が減少する。これにより、最大せん断応力が低下すると考えられる。これは、Fig. 2-16の最大せん断応力の結果と加熱による板厚の増加率 α の結果に近い傾向が現れたことからいえる。

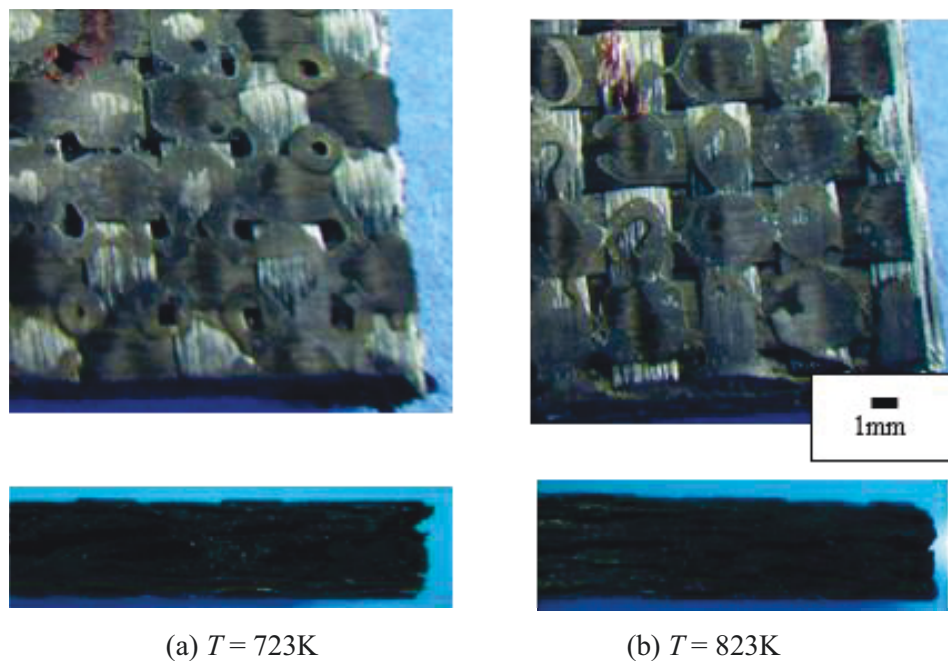


Fig. 2-25 Image of top surface and cross section of CFRTP sandwiched between heated aluminum alloy plates

膨張圧力の算出をすべく、膨張圧力 P_e と板厚増加率 α の関係を **Fig. 2-26** に示す。この結果より近似直線の板厚増加率 0% の時の負荷圧力である 0.13MPa が、膨張圧力として定まる。よって、ストレート溝のアルミニウム合金と CFRTP の接合品の引張せん断強さのうち、0.13MPa に接合部の面積をかけたものが、垂直抗力となる。これに摩擦係数をかけた値が、摩擦による引張せん断荷重の増加分であるといえる。接合部の面積を $5.2 \times 20 \times 2 = 208\text{mm}^2$ 、摩擦係数を 0.1 とすると、2.7N の引張力となるので、その他は、PA6 の溶着力であり、接合の中でも支配的であるといえる。

また、この時の負荷した各圧力 P_e における材料の表面の写真を **Fig. 2-27** に示す。負荷した圧力が高くなるにつれて、スタンパブルシートに含有されていた表面の樹脂の隙間が埋まって少なくなっているのが確認できる。これは、加熱したアルミニウム合金板から CFRTP 板に熱が伝わり、溶融して樹脂が軟化し、負荷した圧力によって炭素繊維が板厚方向に収縮され、樹脂が繊維間から表面に流出し広げられたためと考えられる。この時の繊維間とは、平織の直行する炭素繊維の重ならない部分にできる隙間が大半を占めると考えられる。

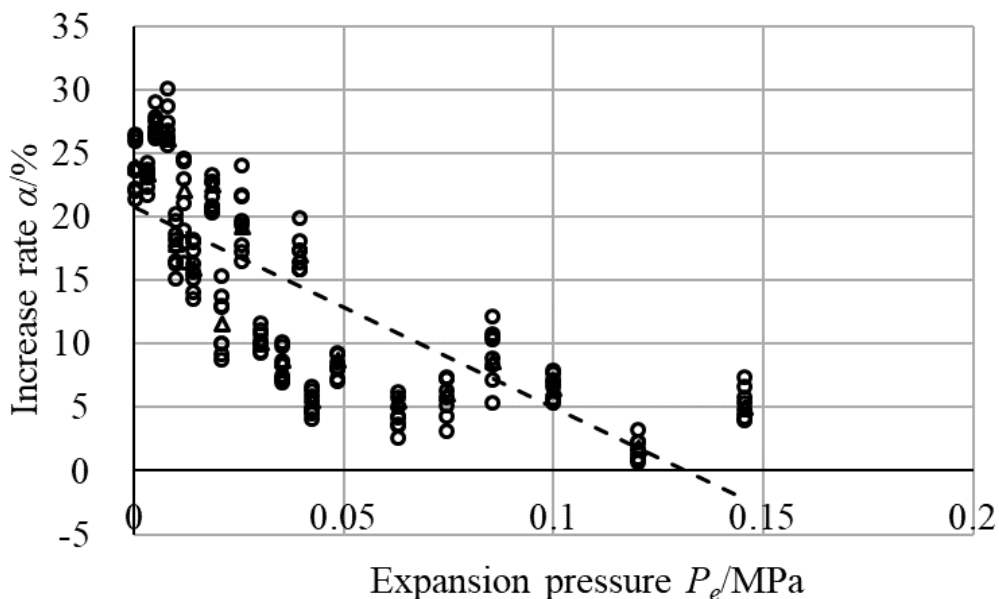


Fig. 2-26 Relationship between pressure by increase in plate thickness and increase rate.

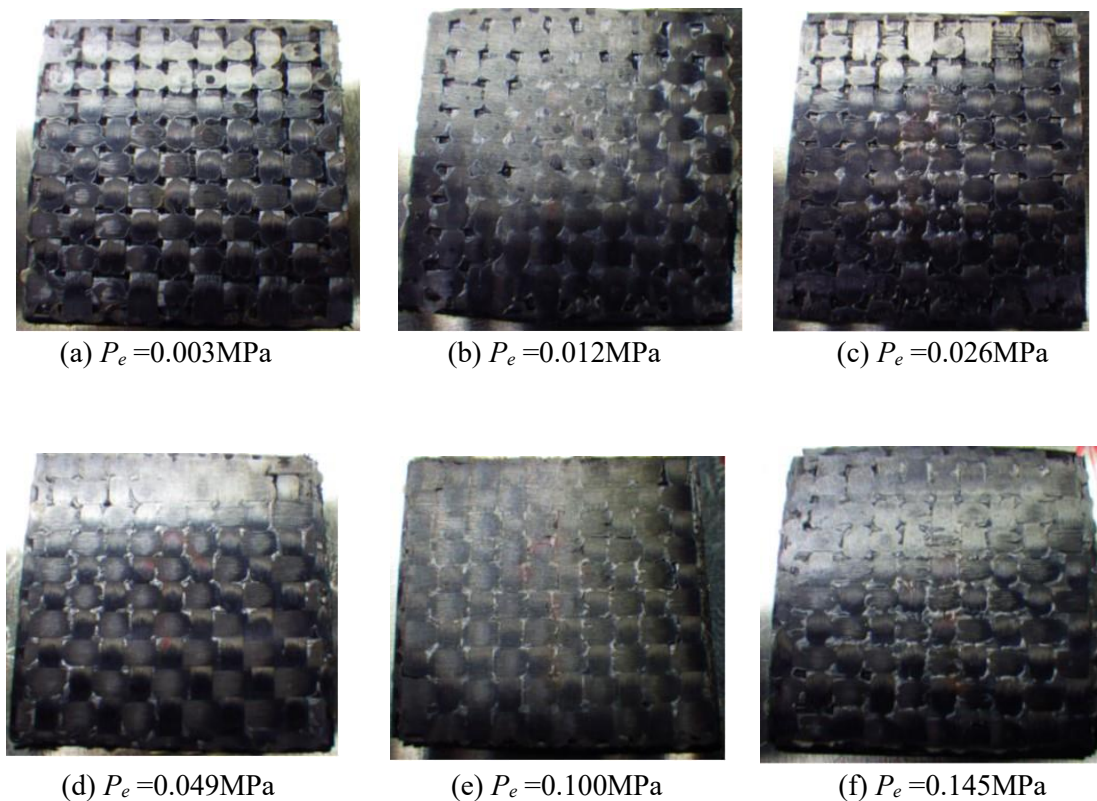


Fig. 2-27 Surface of the CF RTP plate held by adding a weight after heating.

2. 4. 2 試験片の曲げ破壊強度測定

CF RTP を加熱することにより板厚が増加し、積層内部の観察で樹脂の流動やボイドの発生が確認された。加熱して溶融した CF RTP を冷却した際、ボイドの発生量が多いと曲げ強度は低くなる⁶⁾。本接合による影響事項として確認する必要がある。

そこで、各温度でアルミニウム片により加熱して膨張した CF RTP (膨張前の板厚 2mm × 幅 100mm × 高さ 15mm) の曲げ強度を測定するため、JIS K7074「炭素繊維強化プラスチックの曲げ試験方法」により 3 点曲げ試験を行った。CF RTP 板の各加熱温度 T_{cp} における試験機の加圧方向のストローク S_{bt} と荷重 F_{bt} の結果のうち、加熱無しを **Fig. 2-28**, $T_{cp} = 623\text{K}$ を **Fig. 2-29**, $T_{cp} = 673\text{K}$ を **Fig. 2-30**, $T_{cp} = 723\text{K}$ を **Fig. 2-31**, $T_{cp} = 773\text{K}$

を Fig. 2-32 にそれぞれ示す。各加熱温度における最大曲げ荷重の差異は見られなかった。CFRTP の加熱温度が高くなるにつれて、最大曲げ荷重発生時の試験機ストロークが長い傾向にある。これは、加熱温度が低く膨張が少ない CFRTP 板を任意の角度に曲げるストロークと、加熱温度が高く膨張が多い CFRTP 板を任意の角度に曲げるストロークでは、板厚が厚い方が長いストロークが必要になるためである。よって、加熱温度が高く板厚増加率の高い板は最大荷重の発生するストロークも長くなる。

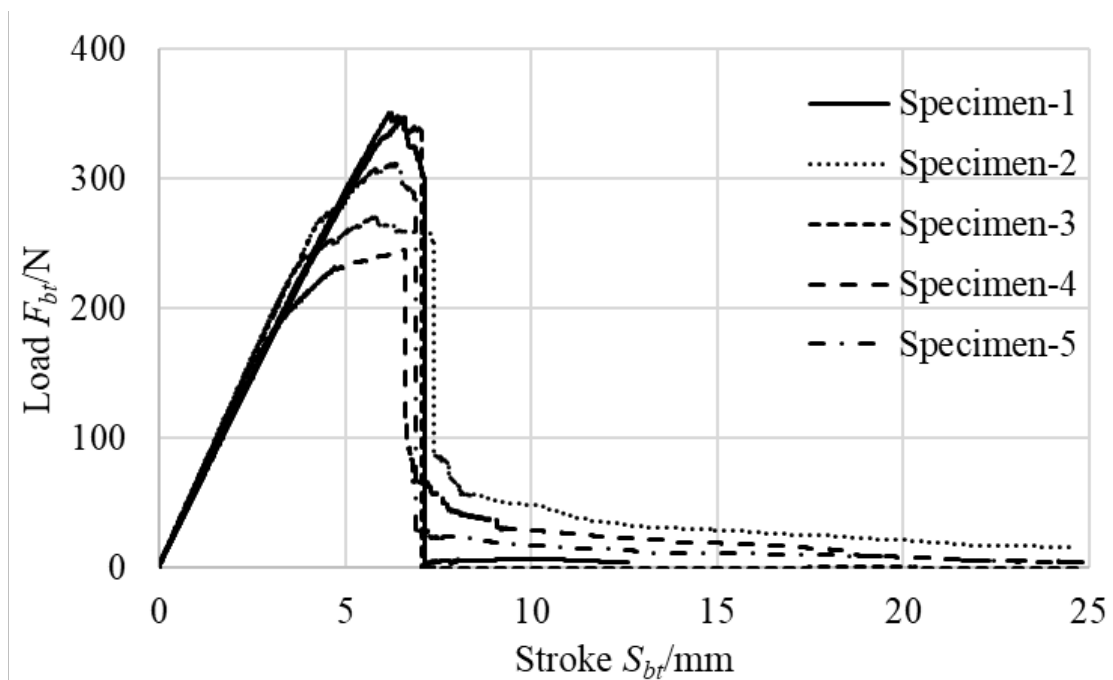


Fig. 2-28 Stroke-load result of bending test of CFRTP with increased plate thickness

(No heating)

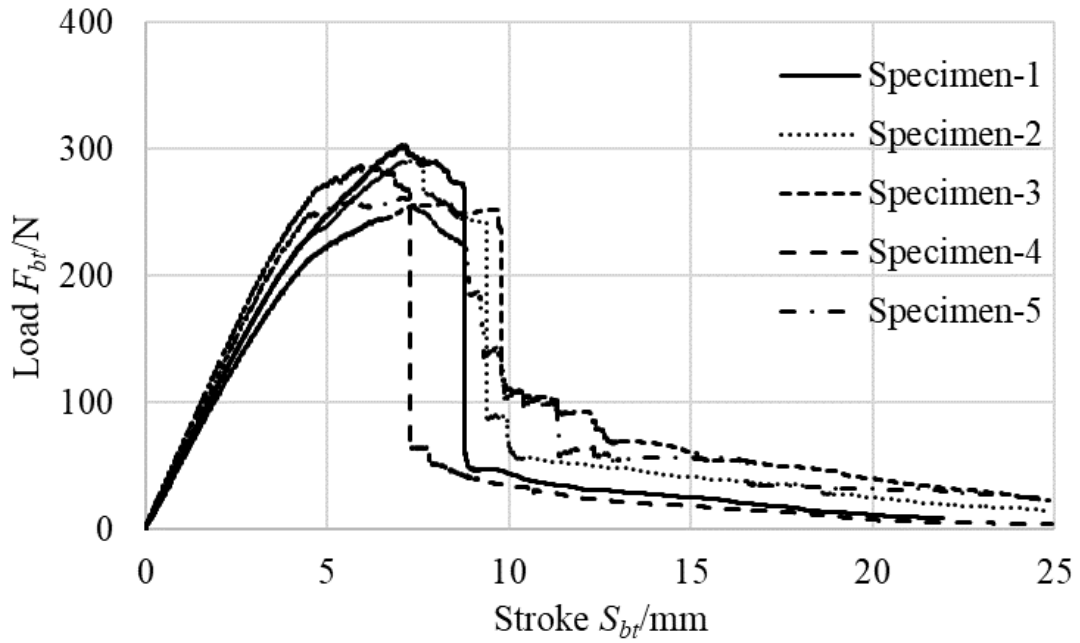


Fig. 2-29 Stroke-load result of bending test of CFRTP with increased plate thickness
 ($T_{cp} = 623\text{K}$)

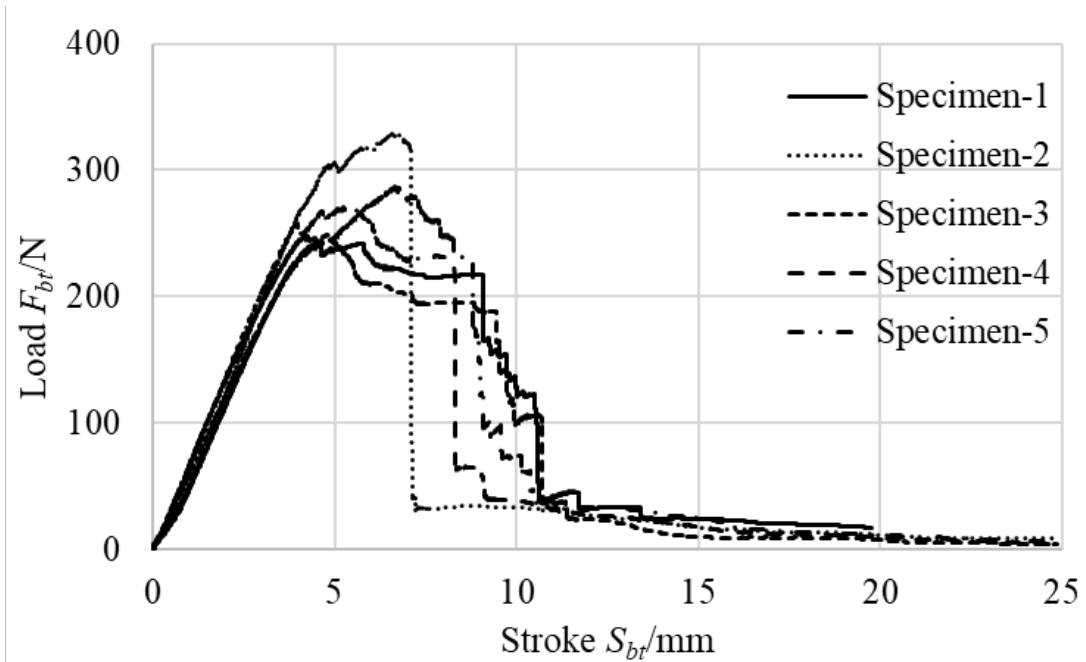


Fig. 2-30 Stroke-load result of bending test of CFRTP with increased plate thickness
 ($T_{cp} = 673\text{K}$)

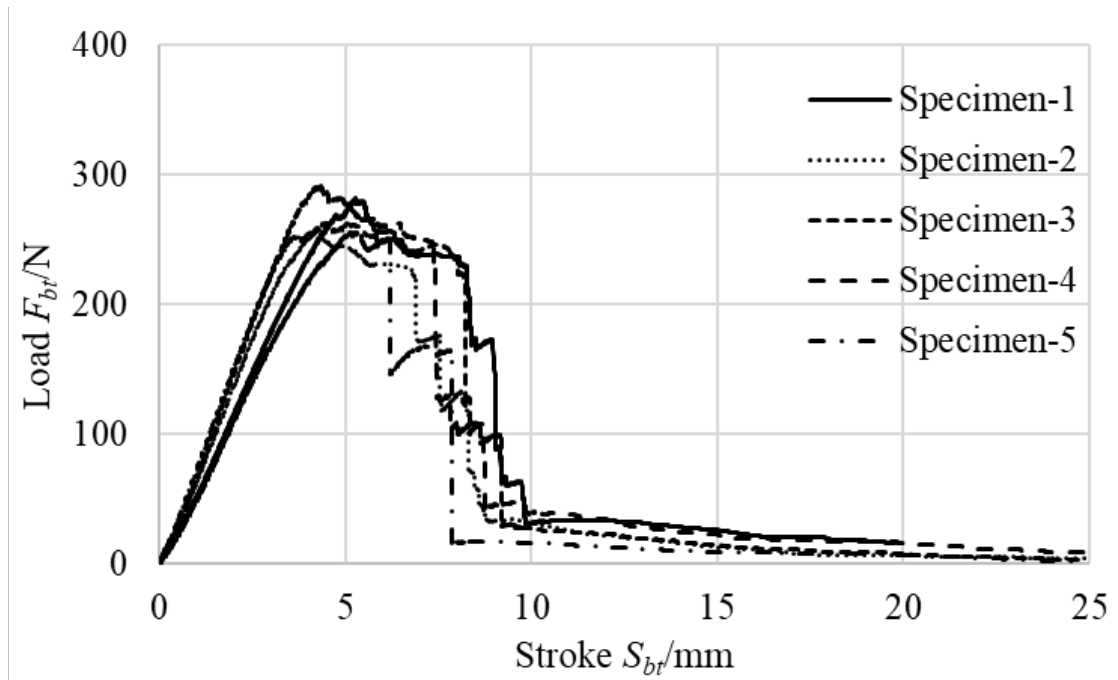


Fig. 2-31 Stroke-load result of bending test of CFRTP with increased plate thickness

($T_{cp} = 723\text{K}$)

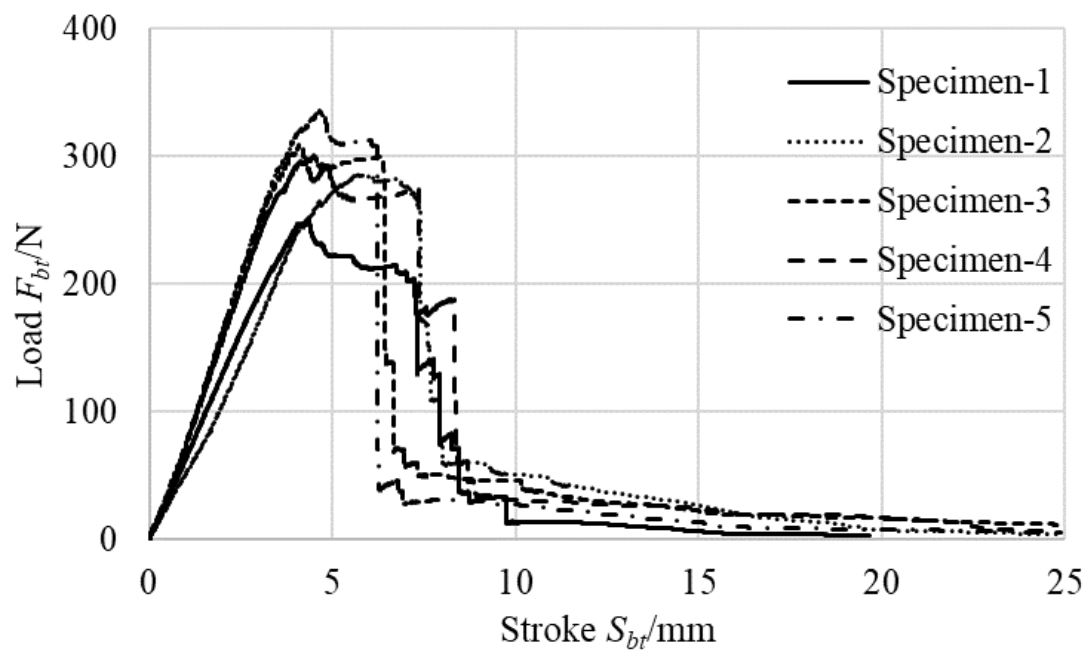


Fig. 2-32 Stroke-load result of bending test of CFRTP with increased plate thickness

($T_{cp} = 773\text{K}$)

各試験結果の温度と破壊強さ σ_b および破壊荷重 F_b を Fig. 2-33 に示す。曲げ破壊荷重 F_b は膨張しても変わらないが、温度が上がるにつれて曲げ破壊強さ σ_b は下降している。これは膨張によって板厚方向に厚くなるため、曲げ破壊強さ σ_b の分母が大きくなり、破壊強さが小さくなるためと考えられる。よって、本研究で用いた CFRTP では、膨張有無によらず、破壊に至る荷重は一定であるといえる。

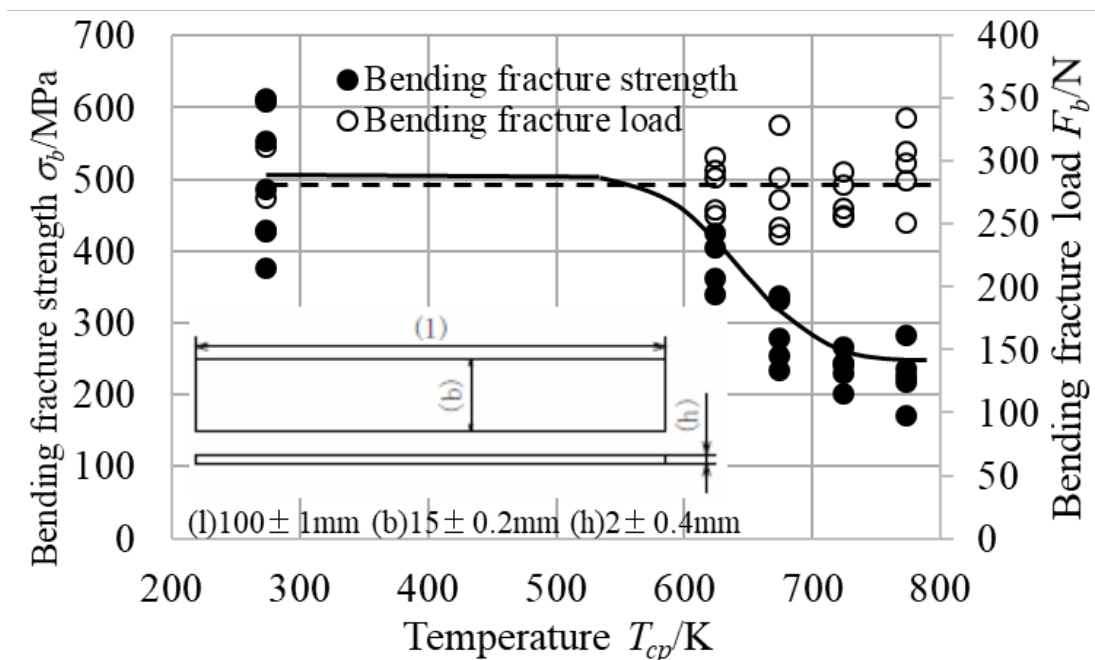


Fig. 2-33 Bending fracture strength and Bending fracture load at each temperature

以上の結果より、加熱による熱膨張は、マトリックス樹脂である PA6 が溶融して、重なり合った炭素繊維の応力が開放されることによる板厚の増加と考えられる⁶⁷⁾。また、この溶融と接合の仕組みを以下の Fig. 2-34 に示す。

- (1) 加熱した A5052 に CFRTP 板を挿入することで、A5052 から CFRTP 板に熱伝達が起こる。
- (2) 熱により CFRTP 板の PA6 が溶融し、成形時に収縮していた炭素繊維の応力が解放される。

(3) 解放された炭素繊維によって CFRTP の板厚方向の膨張が発生し、その膨張する力と溶融した樹脂によって接合が起きる。

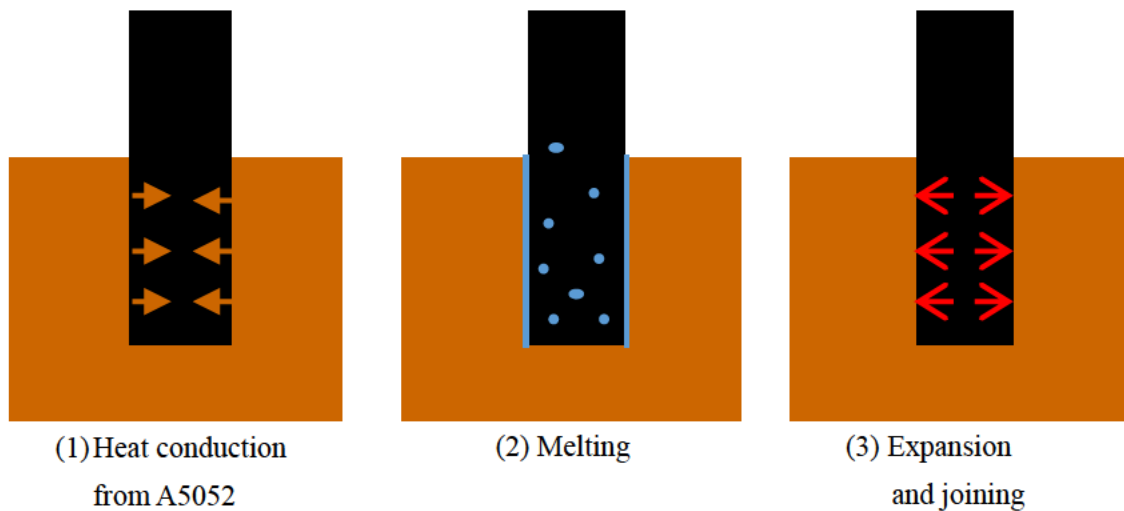


Fig. 2-34 It is considered that the plate thickness increases due to the melting of PA6, which is a matrix resin, and the release of stress from the overlapping carbon fibers. The mechanism of this melting and joining.

次にテーパの溝形状によって、高いせん断応力が発生したメカニズムについて考える。Fig. 2-35 にテーパ溝のアルミニウム合金片の接合部分の模式図を示す。ここで $F_{(\theta)}$ は引張試験時に生じる引張荷重を示す。

引張試験時には、形状に依存した垂直抗力 R 、膨張により発生する垂直抗力 F_r 、その垂直抗力に依存した摩擦力 F_f と接着力 W のそれぞれの引張り方向の荷重の和が引張荷重となる。

$$F_{(\theta)} = R \cos \theta + F_r \cos \theta + \mu \cos \theta (R \cot \theta + F_r \cot \theta + W \cos \theta) \quad (2-3)$$

ここで、テーパ面の摩擦係数を μ とする。Fig. 2-4(b)や Fig. 2-5 の観察より、いずれも CFRTP が加熱により膨張して、テーパ部分に接触した状況であることから、計算条件もこれを想定する。

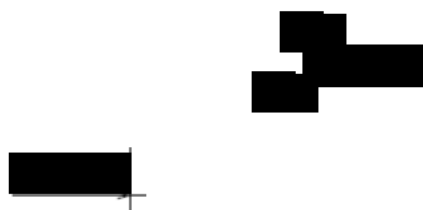


Fig. 2-35 Schematic diagram of the tapered groove provided on the aluminum piece.

まず、テーパ面から受ける垂直抗力 R と摩擦力の関係を求める。例えば、垂直抗力 R と摩擦力によって生じる引張り方向の荷重を F とすると、 R と摩擦力の関係は式(2-4)で表すことができる。

$$R = \frac{F}{2(\mu \sin \theta + \cos \theta)} \quad (2-4)$$

よって、引張試験時にテーパ面に生じる応力 σ_{θ} は、 R を接合面の面積で除して求めることができる。CFRTPの板幅を20mmとすると、Fig. 2-2と式(2-1)から底辺0.325mm,

高さ $0.325 \tan \theta$ から面積を求めることで、応力 σ_θ は、式(2-5)のように求めることができる。

$$\sigma_\theta = \frac{R}{20 \sqrt{0.325^2 + (0.325 \tan \theta)^2}} \quad (2-5)$$

式(2-4)を式(2-5)に代入して F を求める式(2-6)が得られる。

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{F}{40(\mu \sin \theta + \cos \theta) \sqrt{0.325^2 (1 + \tan^2 \theta)}} \\ &= \frac{F}{13(\mu \tan \theta + 1)} \end{aligned}$$

$$\therefore F = 13 \sigma_\theta (\mu \tan \theta + 1) \quad (2-6)$$

ここで、テーパ面の摩擦係数 μ とテーパ面に生じる応力 σ_θ を一定と考えると、 θ の値を大きくすると、 $\tan \theta$ の値も大きくなるため、引張方向 F の荷重も大きくなる。よって、 θ の値が大きくテーパが開くほど、引張方向の荷重 F は高くなる。これは、接合品を鉛直方向に引張る際に、溝のテーパ形状が抵抗となり、引張強度を高めているので、アンカー効果ともいえる。

Fig. 2-16 から Fig. 2-19 の試験結果における 2 度目のピークに関しては、テーパ状に膨張した CFRTP が縮められる方向へ荷重が負荷されるため、再び引張荷重が増加し、ピークを迎えたあと、最終的に外れるまで徐々に減少すると考えられる。

2. 5 結言

本章では、CFRTP 板を加熱した際に板厚方向に膨張する性質に着目し、異種接合の有用性の検討を目的とし、加熱したアルミニウム合金片に CFRTP 板を挿入して接合さ

せた試験片で評価を行った。また、CFRTP の加熱による膨張と発生する荷重について評価を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) ストレート溝アルミニウム合金片では、加熱温度を 723K で CFRTP を挿入した場合に最大せん断応力が最も高い値を得た。
- (2) CFRTP の加熱による炭素繊維の応力解放に起因する膨張と最大せん断応力の結果の傾向が近似しており、板厚増加率の上昇と共に最大せん断応力も上昇する関連性が確認できた。
- (3) 加熱したテーパ溝を有するアルミニウム合金片に CFRTP 板を挿入することで、CFRTP 表面の熔融と、膨張による加圧が発生し、アンカー効果が一段と効果を発揮し、高いせん断応力が得られた。
- (4) 溝形状をフルテーパに形成したアルミニウム合金片で CFRTP と接合品を製作することで、エポキシ系接着剤相当かそれ以上の最大せん断応力を得ることがわかった。

以上のことから、加熱したアルミニウム合金片に CFRTP 板を挿入する本方法を用いることで、接合強度が得られることがわかった。また、テーパ溝を有する加熱したアルミニウム合金片に CFRTP 板を挿入する本方法を用いることで、膨張による加圧と、テーパ形状によるアンカー効果が発生し、エポキシ樹脂を使用した場合の最大値と比較して、最大で 27% 高い接合強度が得られた。よってこれらは、異種接合技術として有用であることが確認できた。

第 3 章

板状 CFRTP の熱特性による接合の 強度に及ぼすシート成形圧力の影響

第3章 板状 CFRTP の熱特性による接合の強度に及ぼすシート成形圧力の影響

3.1 緒言

第2章では、溝形状を設けたアルミニウム合金片を 523K からアルミニウムの融点までの温度に加熱し、この溝に CFRTP を挿入して熱が伝わり、膨張させることで接合強度を得る接合技術を開発した。また、CFRTP の加熱によるマトリックス樹脂の熔融と炭素繊維の応力開放が、板厚方向の膨張を発生させると考察した。炭素繊維の応力開放は、CFRTP 板を成形する際の成形圧力が影響すると予測される。そこで、本章では CFRTP をオートクレーブ成形で製作し、オートクレーブの成形圧力と接合強度との関係を明確にすることを目的として、成形した CFRTP を加熱したアルミニウム合金片に挿入して接合し、接合強度を明らかにする。さらに、CFRTP の膨張と内部組織を明らかにする。

3.2 実験方法

3.2.1 供試材

供試材は、Table 3-1 に示す 3K 平織りの CFRTP スタンプ用シート（一村産業（株）製、PA6-3KP1-950S）を用いた。2章では、10層に重ねた成形板を用いたが、本章では、1層を用いて、3.2.2 で後述する方法で成形した。

Table 3-1 Material properties of CFRTP stampable sheet used for autoclave molding.

Fiber	Carbon
Resin	PA6
Thickness /mm	0.31
Number of layers	1
Fiber content /%	53
Bending strength /MPa	750

接合する金属材料としてアルミニウム合金 (A5052) を供試材とし, **Fig. 3-1** に示す形状の試料を用いた. CFRTP を挿入する溝形状と万能試験機のつかみ歯用に反対側を細くした部分を持つ形状である. このアルミニウム合金片の厚さは 20 mm であり, 溝形状はストレートで, 溝幅は各条件でオートクレーブ成形した CFRTP の板厚 t_b から 0.2 mm 広げた幅とした.

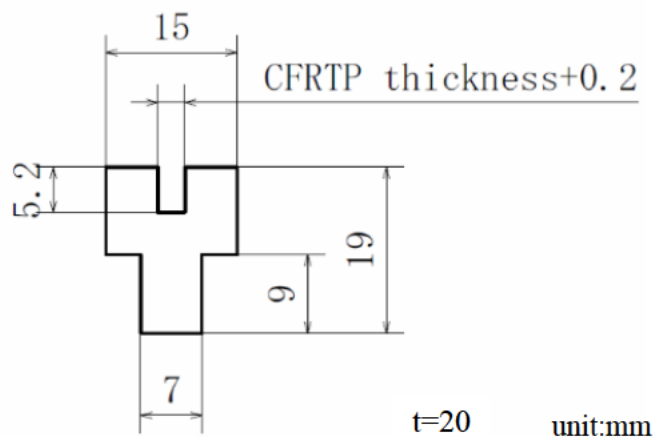


Fig. 3-1 Dimensions of Aluminum piece cut by wire electric discharge machining.

3. 2. 2 CFRTP のオートクレーブ成形

供試材の CFRTP を 10 枚同一方向に積層し, **Fig. 3-2** に示す構成で副資材によって包み込み, 専用の耐熱袋に入れ隙間をシールテープで埋めた (バギング). 実際にバギングした CFRTP の写真を **Fig. 3-3** に示す. これを真空引きし, **Fig. 3-4** に写真を示すオートクレーブ ((株) 羽生田鉄工所製, HAS-01) を用いて **Table 3-2** の条件で成形を行った. 試料は JIS K7072 「炭素繊維強化プラスチック試料の作製方法」に準じて製作した. 成形条件は, 加熱温度をマトリクス樹脂 PA6 の融点である 498 K 一定とし, 成形圧力 P_m は大気圧を 0 として 0~0.8 MPa とした. 成形した試料を **Fig. 3-5** に示すサイズに切断し, 試料を製作した.

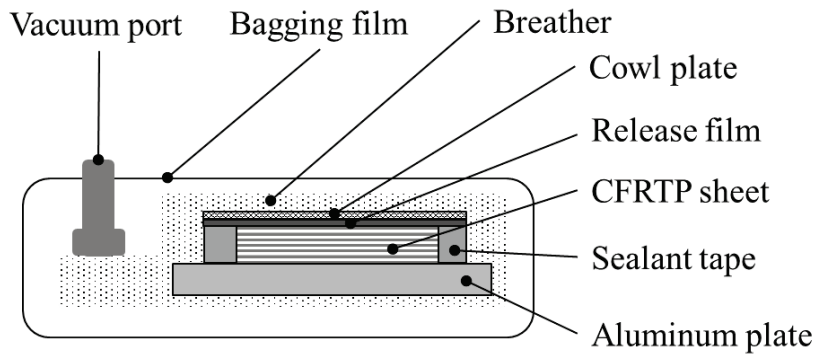


Fig. 3-2 Schematic of composition of bagging of CFRTP sample

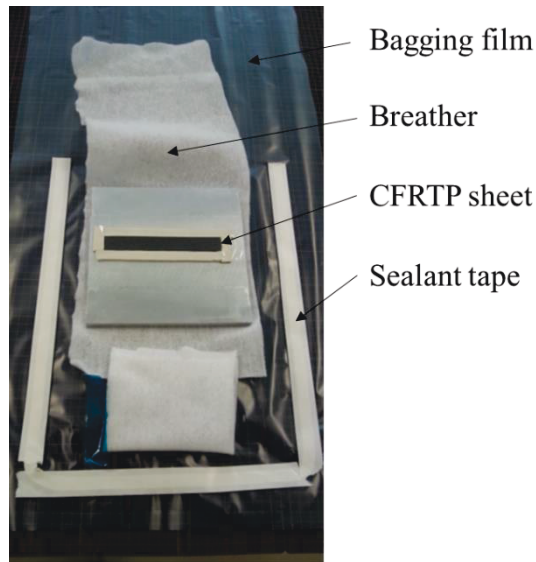


Fig. 3-3 Image of composition of bagging



Fig. 3-4 Image of Autoclave

Table 3-2 Conditions of autoclave molding of CFRTP

Heating temperature /K	498
Pressure force P_m /MPa	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8
Heating rate /K·min ⁻¹	10
Holding time /min	10
Vacuum pressure /MPa	0.096

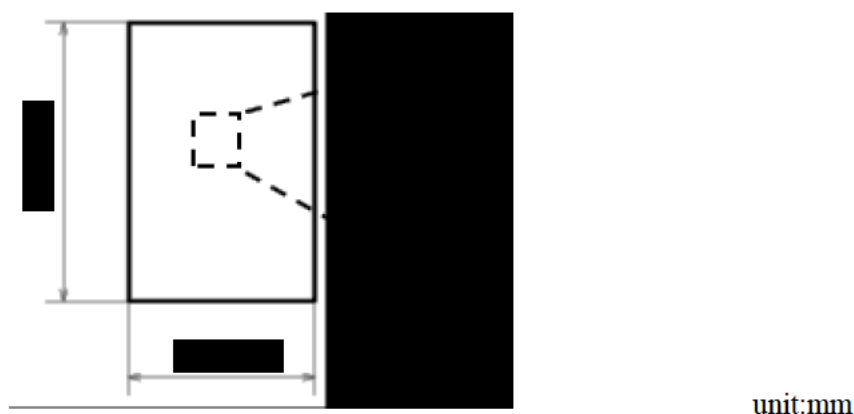


Fig. 3-5 Dimensions of stampable sheet of cut CFRTP sheet.

3. 2. 3 CFRTP 板の加熱による膨張

オートクレーブ成形した CFRTP 板の加熱による膨張の板厚増加率 α を求めた。板のサイズは□20 mm で、小型電気炉（城田電気炉材（株）製，SUPER100T）により加熱温度 $T_{ca}=523$ K で9分間加熱し，取出して常温放置した。加熱温度と時間は，第2章の実験結果を踏まえて，予備実験により CFRTP 板単体の加熱で，板厚増加率が最も高い条件で設定した。この加熱前後の CFRTP の板厚を測定し，式(3-1)より板厚増加率 α_a を求めた。

$$\alpha_a = \frac{t_a - t_b}{t_b} \quad (3-1)$$

ここで t_a は加熱後の板厚， t_b は加熱前の板厚を表す。

3. 2. 4 アルミニウム合金片加熱による CFRTP との接合

アルミニウム合金片加熱による CFRTP との接合方法として、以下の手順で試験片の製作を行った (Fig. 3-6).

- (1) CFRTP 板を切断機で、アルミニウム合金片をワイヤー放電加工機でそれぞれ切断して製作する。放電加工後は、アルミニウム合金片表面に表面処理を施さず、表面粗さは Ra0.4 μ m である。
- (2) あらかじめ $T=723$ K に加熱した小型の電気炉で 5 分間、アルミニウム合金片のみの加熱を行う。電気炉の加熱温度の設定は、第 2 章の接合と CFRTP の膨張の実験結果より定めた。
- (3) アルミニウム合金片を電気炉から取出し、CFRTP 板をアルミニウム合金片の溝形状に挿入する。
- (4) 室温で放置冷却する。

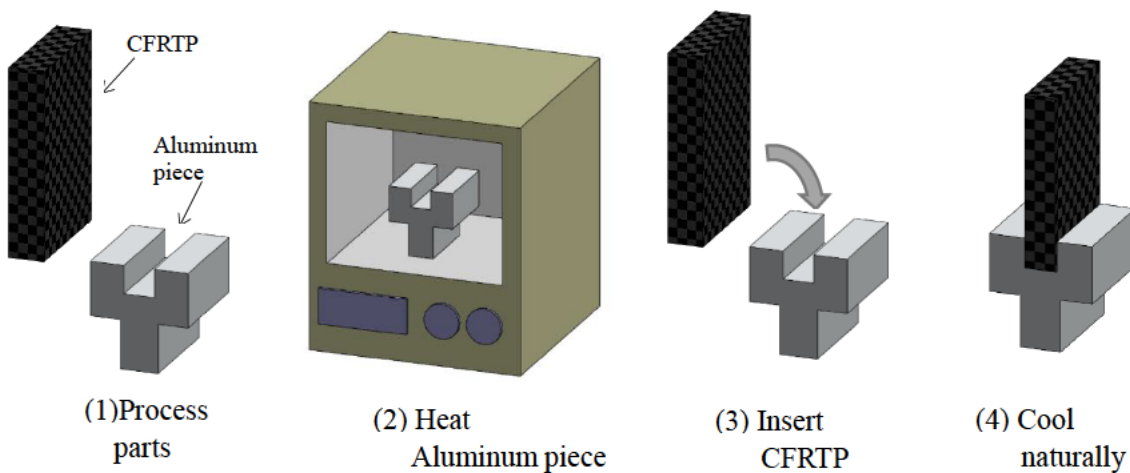


Fig. 3-6 Procedure for joining CFRTP plate and aluminum piece by heating aluminum piece.

製作したそれぞれの接合試験片を万能試験機 ((株)島津製作所製, AG-50KNXD) のつかみ歯で CFRTP 側とアルミニウム合金片側をつかみ、垂直方向に 1 mm/min で引張り、荷重の測定を行った。測定された荷重 F_a から、式(3-2)を用いて、引張せん断応力 τ_a を求めた。

$$\tau_a = \frac{F_a}{2wd} \quad (3-2)$$

ここで、 w はCFRTP板幅、 d は溝深さである。 τ_a のうち最も大きい値をその試験片の最大せん断応力 τ_{max} とした。

3. 3 実験結果

3. 3. 1 CFRTP のオートクレーブ成形

オートクレーブ成形後の CFRTP の外観の一例と板厚の測定箇所を Fig. 3-7 に示す。板厚の測定は、中央、両端、中央と両端の間、それぞれの上下の計 10 点の位置をスプレインマイクロメータ（測定面 $\phi 3.0$ ）で測定した。

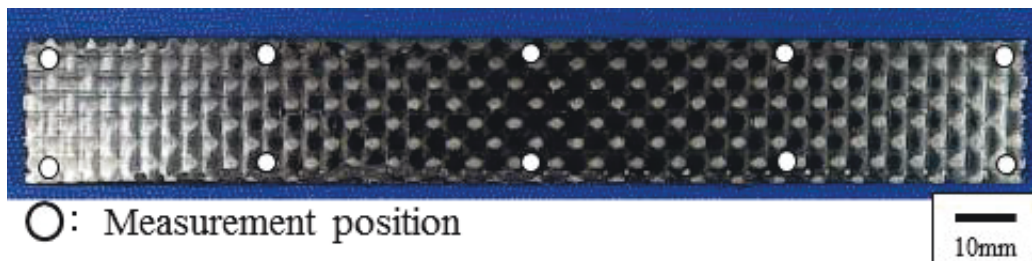


Fig. 3-7 Image of CFRTP plate and measurement positions

各成形圧力 P_m における CFRTP の板厚の測定結果を Fig. 3-8 に示す。同図中には 10 点の測定結果の平均値、最小値および最大値を示す。同図中の破線で示すオートクレーブ成形前の板厚 t_{ba} は、CFRTP の層数を 10 層に設定したため、1 層あたりの厚さが $0.3040 \sim 0.3180 \text{mm}$ で、平均厚さ 0.3096mm を 10 倍した値である。成形圧力 P_m が高いほど、オートクレーブ成形後の板厚 t_{aa} (=加熱前の板厚 t_b) が減少することがわかる。特に成形圧力 $P_m = 0.4 \text{MPa}$ から 0.6MPa の時の減少率が大きく、 $P_m = 0.4 \text{MPa}$ の板厚 t_{aa} と

比べ 14%の減少が確認できる。この試料を加熱膨張用に□20mm に、CFRTP との接合用に 30×20mm にそれぞれ切り出した

3. 3. 2 CFRTP 板の加熱による膨張

CFRTP の試験片を加熱して膨張させた際の、各オートクレーブ成形圧力 P_m における板厚の増加率 α_a および加熱前後の板厚の関係を Fig. 3-8 に示す。成形圧力が高くなるにつれて、オートクレーブ成形後の板厚 t_{aa} (=加熱前の板厚 t_b) が減少するが、加熱膨張による板厚の増加率 α_a は成形圧力 $P_m=0.4\text{MPa}$ から 0.6MPa の時の増加が最大となることが確認できる。

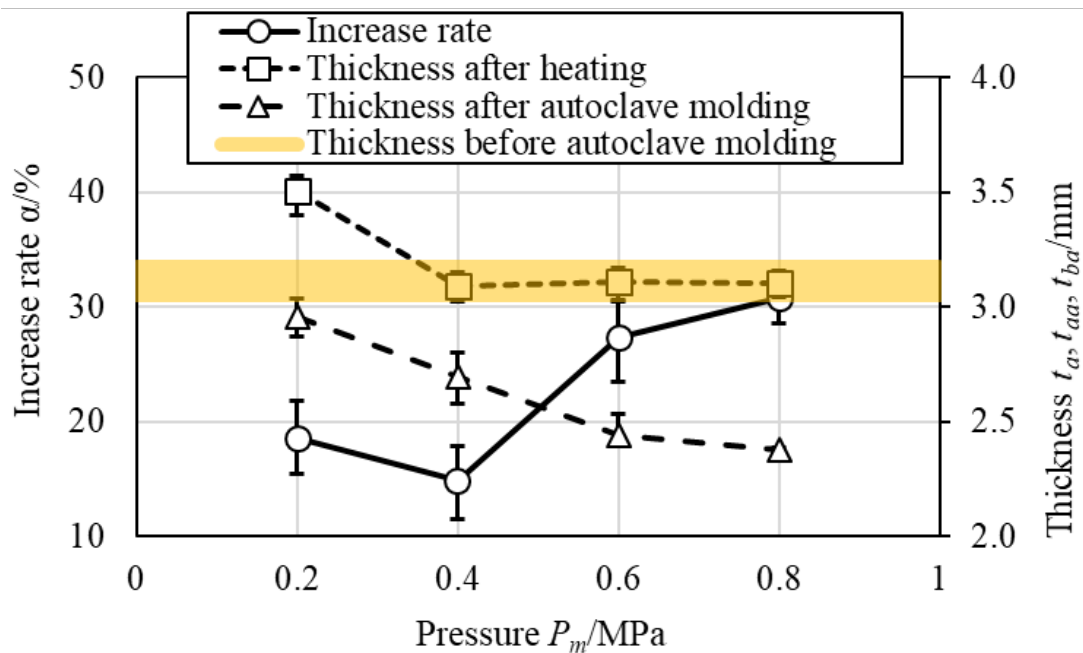


Fig. 3-8 Relationship between pressure force and thickness

3. 3. 3 アルミニウム合金片加熱による CFRTP との接合

0~0.8MPaのオートクレーブ成形圧力 P_m で成形したCFRTPと加熱したアルミニウム合金片を接合させた試験片の引張試験の結果のうち、各成形圧力 P_m の代表例をFig. 3-9に示す。これらの結果は、接合品の剥離試験の結果をせん断応力の値を用いてまとめたものである。これより、引張り始めのストローク $S_s = 0.1$ mm程度までは、荷重がほぼ同じ傾きで増加していることが確認できる。この箇所を弾性域と仮定すると、縦弾性係数 E はHookeの法則より以下の式(3-3)で表すことができる。

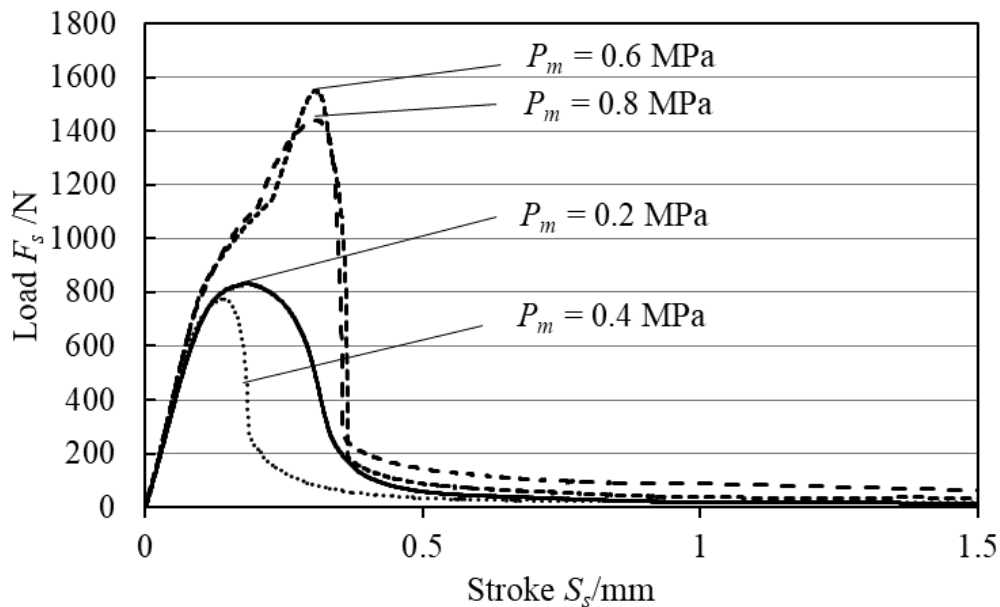


Fig. 3-9 Tensile test results. Load-stroke curve

$$E = \frac{FL}{A\Delta L} \quad (3-3)$$

ここで、 L はCFRTPの元の長さ、 A はCFRTPの断面積、 ΔL はストロークとすると、縦弾性係数 E は400 MPaほどになる。炭素繊維の縦弾性係数が200~500 GPaであり、これに炭素繊維含有量 $V_f = 53\%$ を掛け合わせると、106~265 GPaとなり、上記縦弾性係数 E の400 MPaを比較すると非常に小さい値である。よって、万能試験機のチャッ

クと CFRTP のすべりが支配的であると考えられる。その後、荷重 F_s の増加が 600 N 程度まで続き、成形圧力 $P_m = 0.2, 0.4$ MPa では緩やかに増加して荷重 F_s が 800 N 前後でピークを迎え減少するのに対し、成形圧力 $P_m = 0.6, 0.8$ MPa はさらに増加して荷重 F_s が 1500 N 前後でピークを迎え減少している。

接合した試験片から引き抜いた CFRTP の表面を確認したところ、CFRTP とアルミニウム片の分離は、CFRTP 板表面とアルミニウム片の溝表面が滑りにより分離している。また、アルミニウム片の溝表面から炭素繊維が A5052 と接合して引っ張られる破断は確認できなかった。

引張試験結果から、式(3-2)を用いてせん断応力 τ を算出し、最大せん断荷重 F_{smax} から最大せん断応力 τ_{amax} を求めた。オートクレーブ成形圧力 P_m と最大せん断応力 τ_{amax} の関係を求めた結果を Fig. 3-10 に示す。同図中には、条件ごとの実験数 5 の最大せん断応力 τ_{amax} の平均値と最小値および最大値を示す。Fig.3-9 と同様に成形圧力 $P_m = 0.2, 0.4$ MPa は最大せん断応力 $\tau_{amax} = 4$ MPa 前後であるのに対し、成形圧力 $P_m = 0.6, 0.8$ MPa では最大せん断応力 $\tau_{amax} = 7$ MPa 前後と増加している。

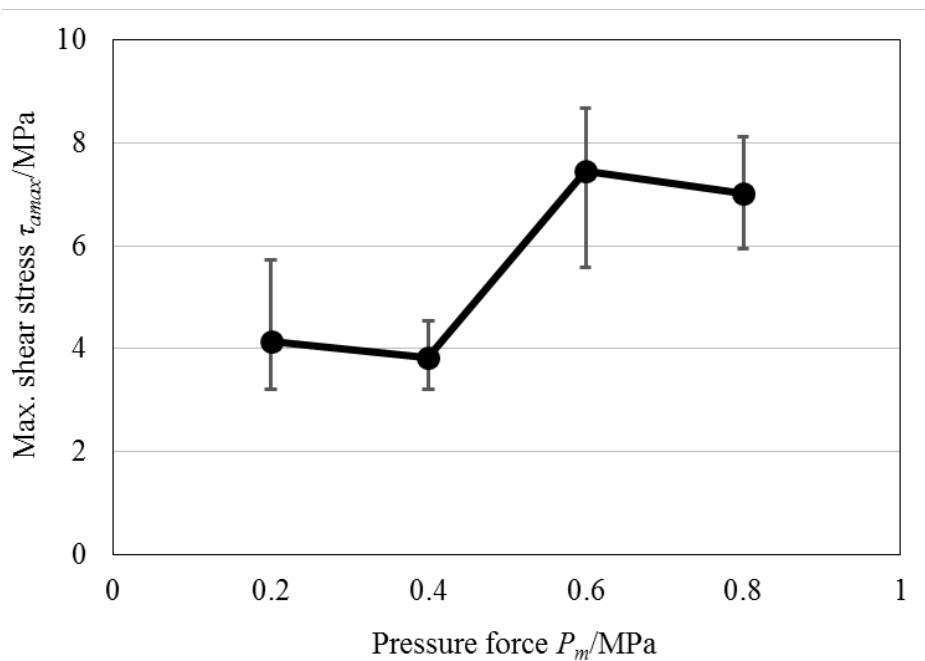


Fig. 3-10 Maximum shear stress at each pressure force

3. 4 考察

オートクレーブ成形後の CFRTP シートを繊維方向と平行もしくは垂直に切断して、マイクロSCOPE ((株)キーエンス製, VHX-6000) で試験片内部の組織観察を行った。オートクレーブの成形圧力(a) $P_m = 0.2$ MPa, (b) $P_m = 0.4$ MPa, (c) $P_m = 0.6$ MPa, (d) $P_m = 0.8$ MPa の断面画像を Fig. 3-11 に示す。同図(a), (b)より, $P_m = 0.2, 0.4$ MPa で成形した CFRTP 板に炭素繊維と樹脂の間に未接着の部分が確認できる。熱可塑性樹脂の接着は、加熱と加圧によって高い接着強度が得られる⁶³⁾。オートクレーブの成形圧力が比較的低い $P_m = 0.2, 0.4$ MPa の条件では、十分な接着強度が得られず、未接着として残存したと考えられる。 $P_m = 0.6, 0.8$ MPa の条件で成形した CFRTP の断面画像(Fig. 3-11(c), (d))では、未接着は見られなかった。また、Fig. 3-8 では、 $P_m = 0.4$ MPa と $P_m = 0.6$ MPa の間で板厚が大きく変化しているが、これは炭素繊維と樹脂の未接着が大きく影響すると考えられる。未接着部分が確認できた $P_m = 0.2, 0.4$ MPa では未接着の隙間分、成形後の板厚は厚く、未接着が確認できなかった $P_m = 0.6, 0.8$ MPa では隙間が無い分、成形後の板厚は薄いと考えられる。

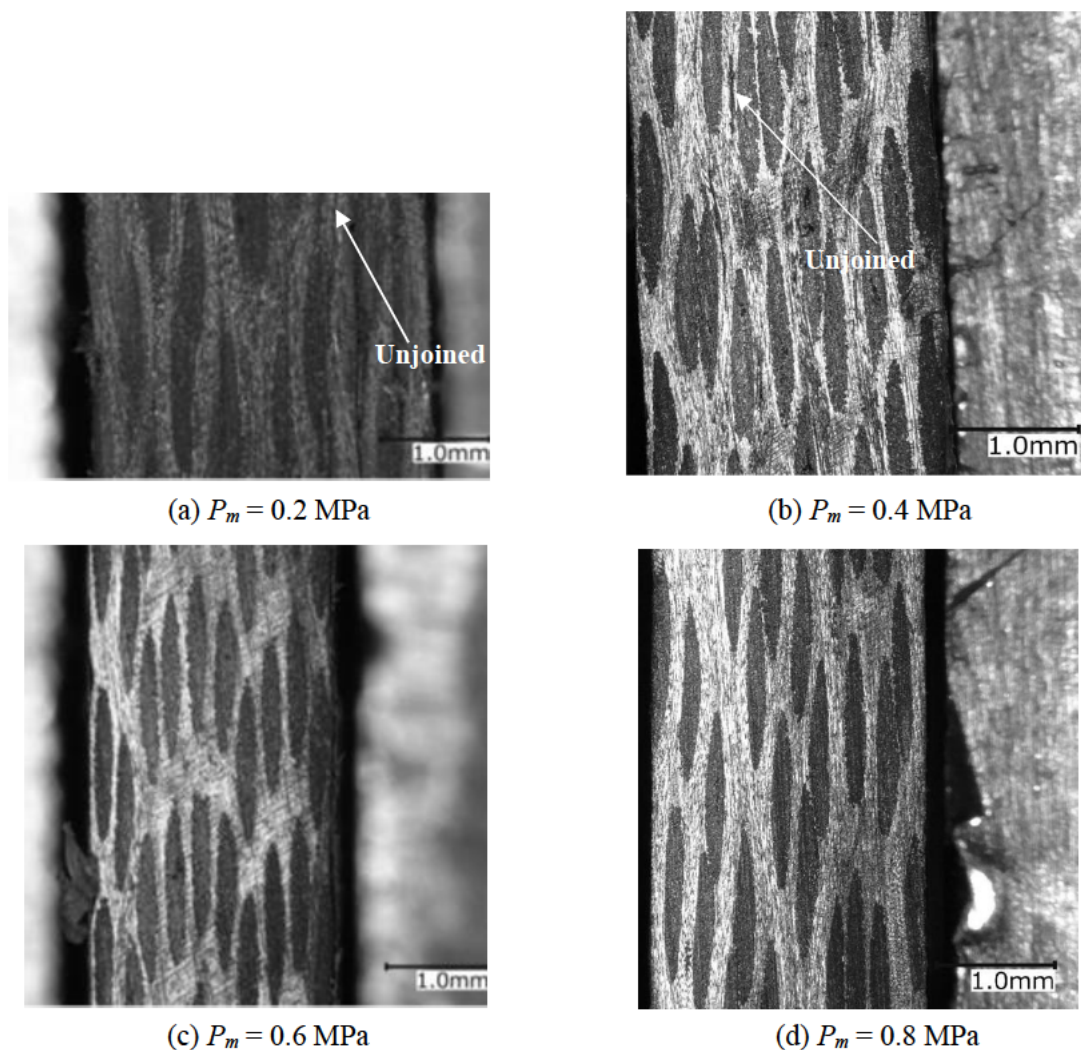


Fig. 3-11 Microscopy images of test piece cross section (After autoclave molding)

次に成形圧力 $P_m = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ MPa でオートクレーブ成形したこれらのCFRTPを、接合時と同じ小型の電気炉に入れて加熱膨張させた。加熱温度はPA6の融点498K以上且つ分解温度573K以下である523Kで9分間、CFRTP板のみを加熱した。

オートクレーブの成形圧力(a) $P_m = 0.2$ MPa, (b) $P_m = 0.4$ MPa, (c) $P_m = 0.6$ MPa, (d) $P_m = 0.8$ MPaの電気炉加熱後の断面画像を**Fig. 3-12**に示す。Fig. 3-11と同様に成形圧力 $P_m = 0.2, 0.4$ MPaで縦に走る長い隙間である未接着部分が確認できる。これは、オートクレーブ成形後に未接着であった部分が、さらに加熱膨張後に平面方向に広がったため、

大きな隙間として発生したと考えられる。また、 $P_m = 0.6, 0.8$ MPa の断面には、Fig.3-11 と同様に未接着の部分は確認できなかった。これは、オートクレーブ成形後の炭素繊維と樹脂が接着している部分が、加熱膨張しても分離することなく残存したためと考えられる。

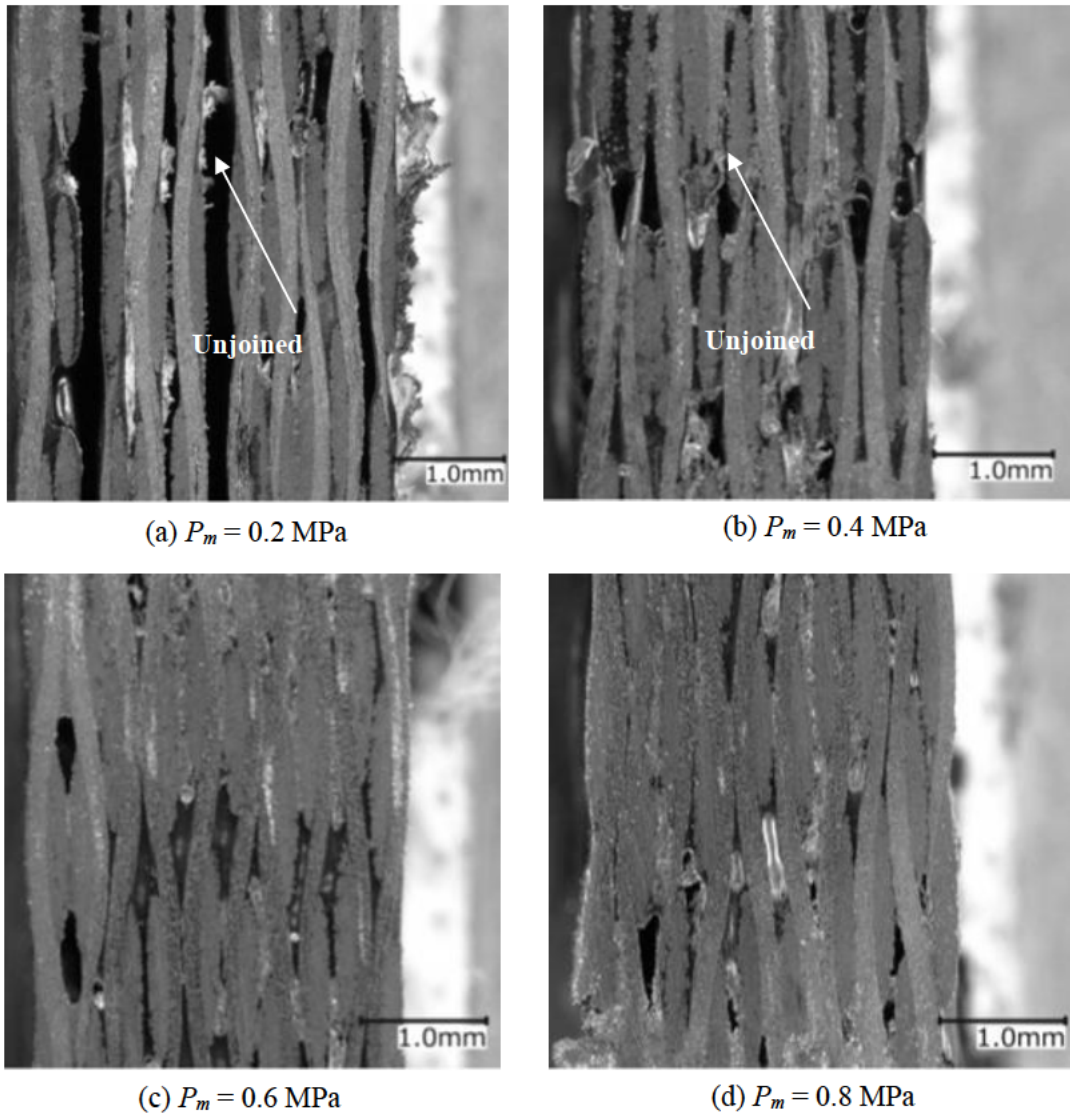


Fig. 3-12 Microscopy images of test piece cross section (After heating)

オートクレーブ成形時の未接合の他に、板厚の増減に影響する要因として、炭素繊維の変形や移動が考えられる。単体の CF RTP シートからプレスやオートクレーブ成形し

て板を製作し、さらに加熱して膨張させる工程の概略を Fig. 3-13 に示す。工程は、(a) シート単体の状態を重ね合わせて、プレスやオートクレーブで加圧と加熱を行い、(b) 積層板を成形する。さらにその板を加熱して(c)膨張させる。

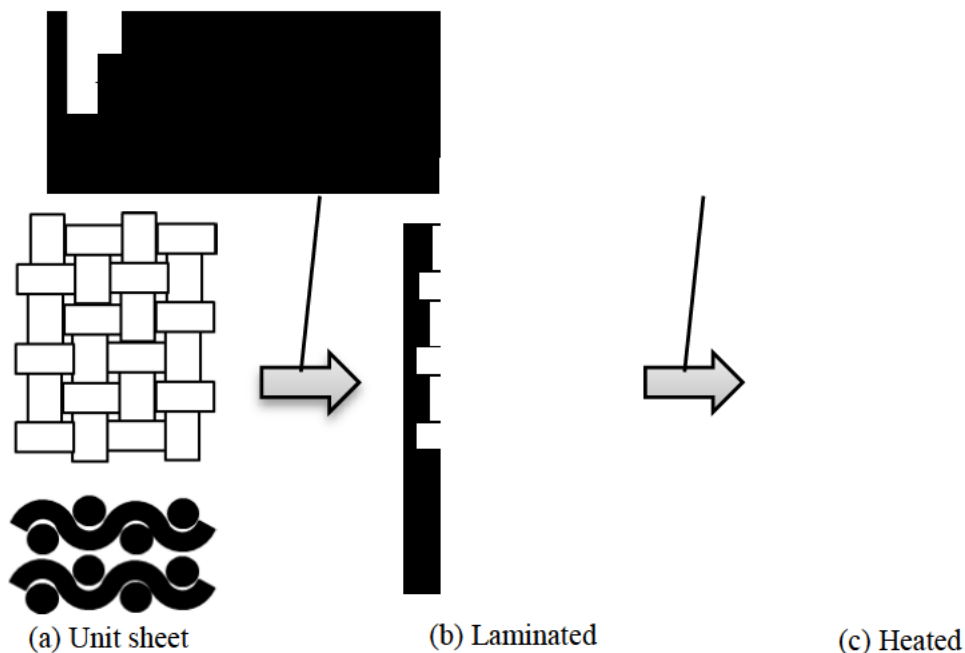


Fig. 3-13 Forming step and heating step of laminated sheet of CFRTP

シート成形時に、織り込んだ炭素繊維に樹脂を含有させて、加熱をしながらプレスにより板厚方向に加圧し、冷却して凝固する。このため、(a)の単体シートの中で炭素繊維の束も潰されて真円ではなく、ひし形や楕円形状になっている。さらにこれを加熱して加圧することによって(b)では炭素繊維の束が潰れや変形によって平面方向に伸びて凝固するため、板厚が減少した積層シートが形成される。さらに加熱すると樹脂が軟化して、潰れや変形が生じていた炭素繊維の束の応力が解放され⁶⁷⁾、(c)の回復した状態に膨張すると考えられる。

炭素繊維の移動と変形を確認するため、オートクレーブ成形前後の CFRTP 断面と加熱後の断面から、炭素繊維束の形状を観察した。炭素繊維束の楕円形状の長径方向の長

さと短径方向の長さをそれぞれ測定した。Fig. 3-14 に、実際に測定した楕円を白い線でトレースした図を示す。白い線で囲んだ部分の炭素繊維束の長径方向と短径方向の寸法を 10 点測定した。



Fig. 3-14 Measurement of carbon fiber bundle

測定した寸法値を用いて、式(3-4)によりアスペクト比 Γ を求めた。

$$\Gamma = \frac{L_y}{L_x} \quad (3-4)$$

ここで、 L_x を層方向の長さ、 L_y を平面方向の長さとした。オートクレーブ成形後と加熱後の成形圧力 P_m ごとのアスペクト比 Γ の関係を Fig. 3-15 に示す。同図中には、条件ごとの実験数 10 のアスペクト比 Γ の平均値と最小値および最大値を示す。オートクレーブ成形前のアスペクト比は平均 8.910 であり、平面方向に広がる楕円形状であることを確認した。また、同図より、オートクレーブ成形後のアスペクト比は成形圧力 $P_m=0.2$

MPa から 0.6 MPa でほぼ変化は無いが、 $P_m = 0.8$ MPa で増加しているのが確認できる。よって、オートクレーブ成形後は $P_m = 0.8$ MPa で長径方向への広がり、すなわち、炭素繊維束の圧縮による広がりが大きく現れている。また、加熱後のアスペクト比 Γ は、加熱前に比べ減少しており、さらに成形圧力 P_m に拠らずほぼ一定であることが確認できる。よって、加熱後は加熱前に比べ炭素繊維束が円形になる方向に変形していると考えられる。ただ、CFRTP とアルミニウム合金片との接合においては、 $P_m = 0.6$ MPa から最大せん断応力が上昇しているため、この炭素繊維束の移動と変形による影響は小さい。それに比べ、Fig.3-11 と Fig.3-12 に示した未接着の部分の関連性の方が高いと考えられる。

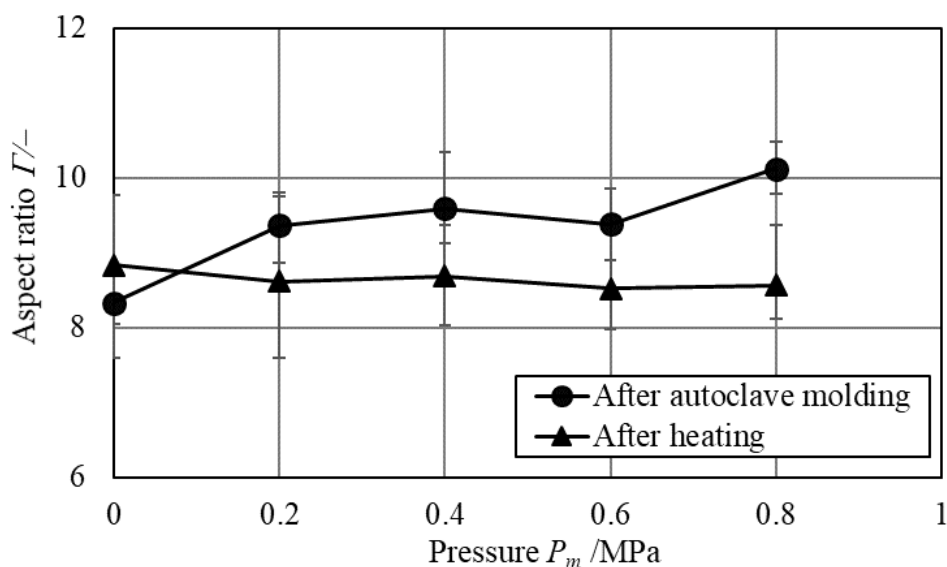
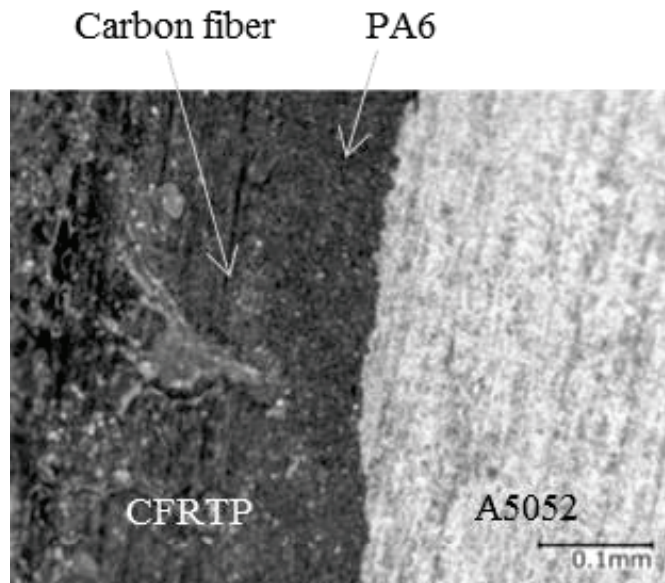


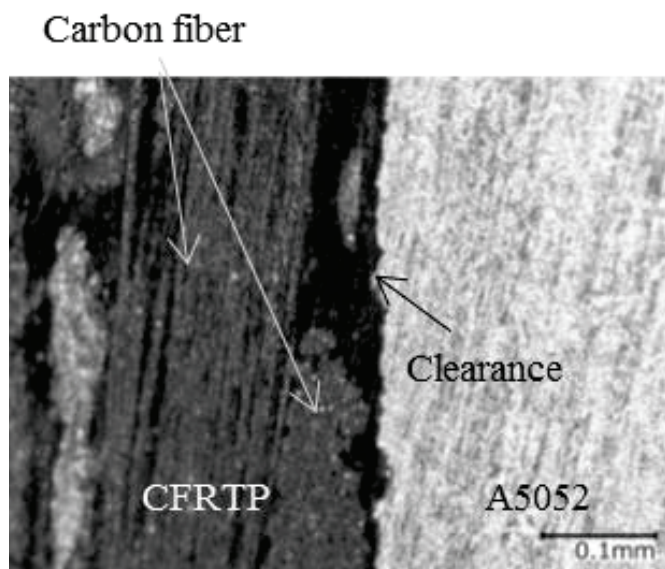
Fig. 3-15 Aspect ratio of carbon fiber bundle at each pressure force

次に、接合している CFRTP と A5052 の接合面の観察を行った。一例として、成形圧力 $P_m = 0.6$ MPa でオートクレーブ成形した CFRTP と A5052 材を接合した試験片の断面写真を Fig. 3-16 に示す。同図(a)は CFRTP と A5052 が隙間無く接合されている箇所、(b)は CFRTP と A5052 の表面側に隙間が発生した箇所を示す。(a)では A5052 と CFRTP

の接合面に PA6 が密接しており，特に A5052 をワイヤー放電加工した際の変質層に樹脂が入り込んでいるのが確認できる．また，(b)では上下方向の炭素繊維と前後方向の炭素繊維の間にできた隙間が確認できる．この隙間は奥まで続く長い穴ではなく，深さ 1 mm 未満の空孔である．



(a) Joining surface (no clearance)



(b) Joining surface (with clearance)

Fig. 3-16 Cross-sectional microscopy images of test piece in which CFRTP and A5052 material autoclaved at a molding pressure $P_m = 0.6$ MPa are joined.

Fig. 3-16(b)における空孔を確認するため、接合した試験片から引抜いた CFRTP の表面観察を行った。この表面写真を Fig. 3-17 に示す。炭素繊維が表面にむき出しになる山の部分を中心に、その周りに溶融した樹脂が広がっているのが確認できる。また、同図中に白い線でトレースした部分は、炭素繊維の繊維方向が縦方向と横方向に囲まれた箇所である。Fig. 3-17 のこの部分には表面第一層の炭素繊維がなく、樹脂の流れ込みも十分でないため、空孔として残存する。従って、Fig. 3-16(b)で確認した空孔は、この空孔である可能性が高い。さらに、この表面から炭素繊維が A5052 と接合して引張られる破断は確認できず、A5052 との接合が滑りによって分離されたと推測される。

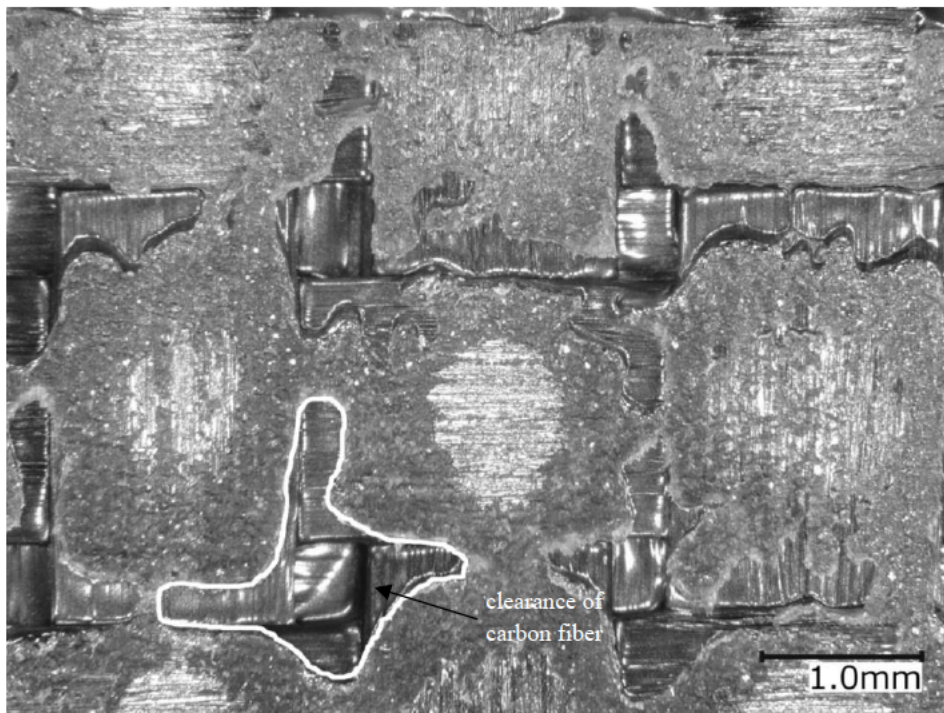


Fig. 3-17 Microscopy image of CFRTP surface

使用したアルミニウム合金片 (A5052) の線膨張係数は $23.8 \times 10^{-6}/K$ であり、723 K の加熱で溝幅は 0.030 mm 膨張していると予想される。そこで実際に測定し平均化したところ、室温の場合溝幅は 2.820 mm であり、炉から取出した直後は 2.856 mm で、0.036

mm の増加であった。結果、アルミニウム合金片も理論どおり熱膨張していることがわかった。ただ溝幅に対して 1%ほどの膨張であり、CFRTP の板厚増加率 15~30%に比べるとはるかに小さいため、本実験では考慮しないものとした。

3. 5 結言

本章では、オートクレーブの成形圧力と接合強度との関係性を明確にすることを目的とし、オートクレーブを用いて任意の成形圧力で CFRTP の成形を行った。さらに CFRTP と溝を形成したアルミニウム合金片を接合し、最大せん断応力を求め、評価を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) CFRTP 板のオートクレーブ成形では、成形圧力 0.4 MPa と 0.6 MPa で成形した板厚の落差が最も大きく現れることがわかった。
- (2) 加熱したアルミニウム合金片と CFRTP を接合した試験片の製作をし、引張試験を行ったところ、オートクレーブの成形圧力 0.2, 0.4 MPa は最大せん断応力が 4 MPa 前後であるのに対し、成形圧力 0.6, 0.8 MPa では最大せん断応力が 7 MPa 前後に上昇した。
- (3) オートクレーブ成形後と加熱後の CFRTP の断面観察を行った所、両過程で成形圧力 0.2 MPa, 0.4 MPa の断面に層間の未接着の部分が発見された。
- (4) オートクレーブ成形前後の CFRTP の断面より炭素繊維束のアスペクト比を算出したところ、オートクレーブ成形後は、炭素繊維束が圧縮されて成形前に比べ長径方向に広がることを確認できた。また、オートクレーブ成形後と加熱後のアスペクト比は成形圧力 0.2, 0.4, 0.6 MPa までは一定で、0.8 MPa で上昇した。成形圧力が高くなると、炭素繊維束が圧縮されて長径方向に広がることを確認できた。
- (5) CFRTP と A5052 の接合面に材料の破断が見つからないことから、分離は材料同士の滑りによるものであることがわかった。

以上のことから、オートクレーブの成形圧力が低い状態では、成形した CF RTP の断面に未接着の部分が生じ、接合強度が低下することがわかった。よって、未接着が生じない成形圧力でオートクレーブ成形することにより、アルミニウム合金片との接合は高い接合力が得られる。CF RTP 板を成形する際のオートクレーブの成形条件と接合強度の関係が確認できた。

第 4 章

円柱状 CFRTP ピンを用いた金属板材同士の接合

第4章 円柱状 CFRTP ピンを用いた金属板材同士の接合

4.1 緒言

第2章では CFRTP の熱特性を利用したアルミニウム合金との接合方法を提案し、その熱特性と CFRTP の成形圧力に関係があると考察し、第3章ではオートクレーブを用いて成形圧力を変化させて、CFRTP の成形を行い、CFRTP と溝を形成したアルミニウム合金片を接合し、最大せん断応力を求め、オートクレーブの成形圧力と接合強度との関係性を示した。これらは接合部品である CFRTP 板を使った接合方法であり、CFRTP は板状で、CFRTP と接合する金属には溝を形成する必要がある。よって、接合の対象および条件が制限されることが予測される。

そこで本章では、同じく CFRTP を加熱したときの膨張特性を利用して、CFRTP を円柱状のピンに成形し、ボルトやリベットの接合と同じように、穴を開けた金属板の同種・異種接合を提案する。この接合方法であれば、接合の対象および条件は少なく、接合部分に CFRTP ピンを挿入する穴を形成して加熱するだけで接合が成立する。ここでは、ピンの断面に働くせん断力および軸方向へ引き抜く引張り力に対向する接合強度を測定して、この有用性を検討することを目的とし、接合品の強度評価を行う。

4.2 実験方法

4.2.1 供試材

供試材は、3K 平織炭素繊維にマトリックス樹脂としてポリアミド PA6 を含浸させた厚さ 5.5mm の 25 層スタンパブルシート（一村産業（株）製、PA6-3KP25A-460S）を用いた。このシートを Fig. 4-1 に示す外径 5.3mm で長さ 6mm の円柱形状に研削加工で製作した。第2章、第3章の結果より、CFRTP が板厚方向に膨張することを考慮し、より接合強度が高くなる方向として CFRTP ピンの軸方向と積層方向を同一にした。

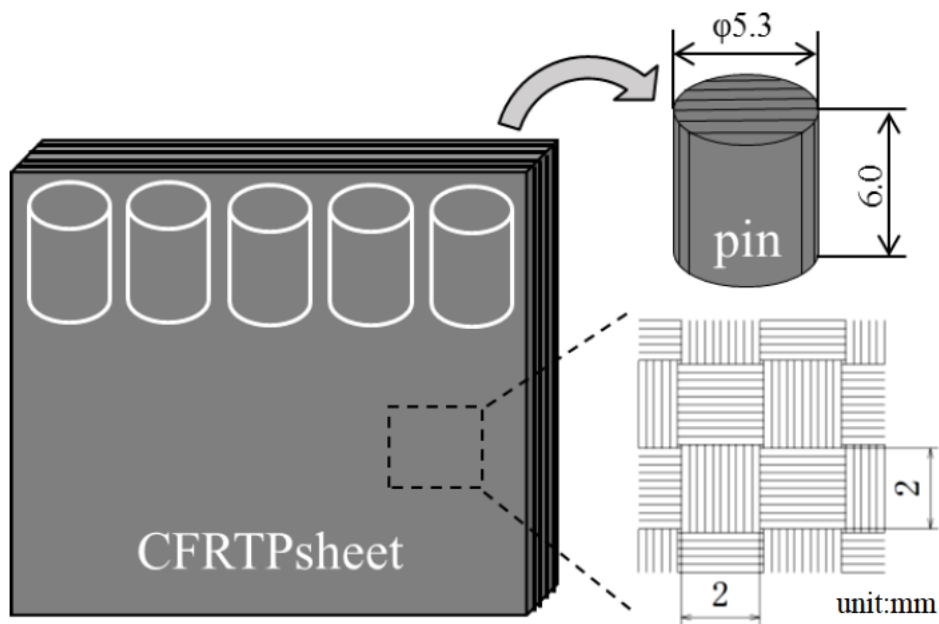
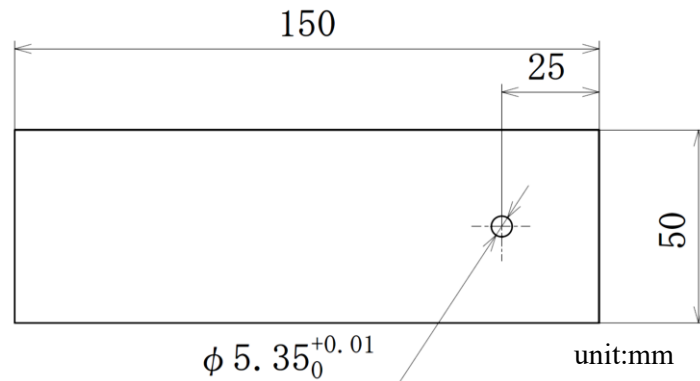
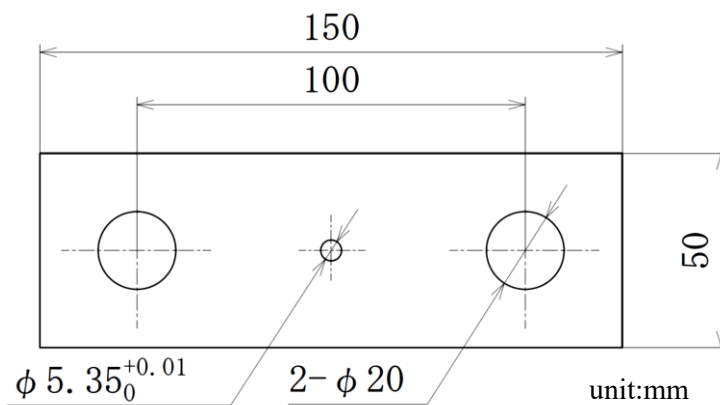


Fig. 4-1 Direction when the cylindrical pin is taken out from stacked CFRTP stampable sheet.

接合する金属材料として一般構造用圧延鋼材 (JIS3101,SS400) を用い、まず接合の可否を確認した。これを供試材とし、**Fig. 4-2** に示す(a)引張りせん断試験用、(b)十字引張試験用の試験片を製作した。すべての供試材において板厚はそれぞれ 3mm で、 $\phi 5.35$ 穴はストレート形状と、 $\phi 5.35$ から広がるテーパ形状を用いている。テーパ形状は、CFRTP ピンを挿入して膨張した際に、引張り応力を高めることを狙いとした。テーパ角度は 3° に設定し、接合する時には板材同士が接触する側に狭い穴の面を、外側に広い穴の面を構成した。(b)十字引張試験用の試験片には治具に取り付けるための $\phi 20$ の穴を 2カ所設定した。両方の試験において、サンプル数 $n = 5$ である。



(a) Steel plate for single lap joint



(b) Steel plate for cross lap joint

Fig. 4-2 Dimensions of steel plate

4. 2. 2 CFRTP ピンによる板材の接合方法

以下の手順で接合した試験片の製作を行った (**Fig. 4-3**)

- (1) CFRTP を切断機で切断した後，円筒研削盤で研削加工を行う．SS400 板材はフライス加工で形状を加工し，ワイヤー放電加工で $\phi 5.35$ 穴を形成する．放電加工後は，アルミニウム合金片表面に表面処理を施さず，表面粗さは $Ra0.4\mu m$ である．
- (2) 723K に加熱した電気炉 (Thermal Ltd., TL-4) で 5 分間，2 枚の板材の赤外線加熱を行う．第 2 章の接合と CFRTP の膨張の実験結果より，電気炉の加熱温度を定めた．

- (3) 2枚の板材を電気炉から取出し、 $\phi 5.35$ 穴の位置を位置決め用の治具を用いて合わせて重ね、CFRTP ピンを穴に挿入する。ピンの積層方向と上面に来る板材の長手方向を同じ向きにあわせた。
- (4) 室温で放置冷却する。

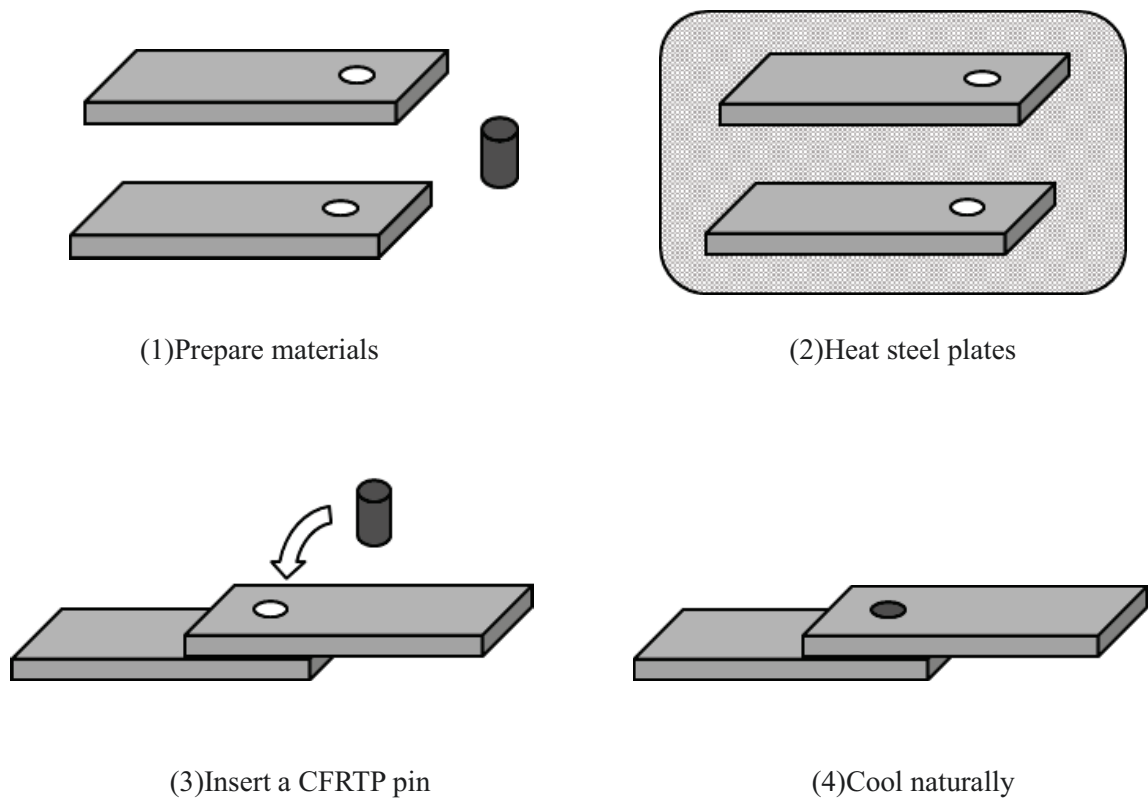
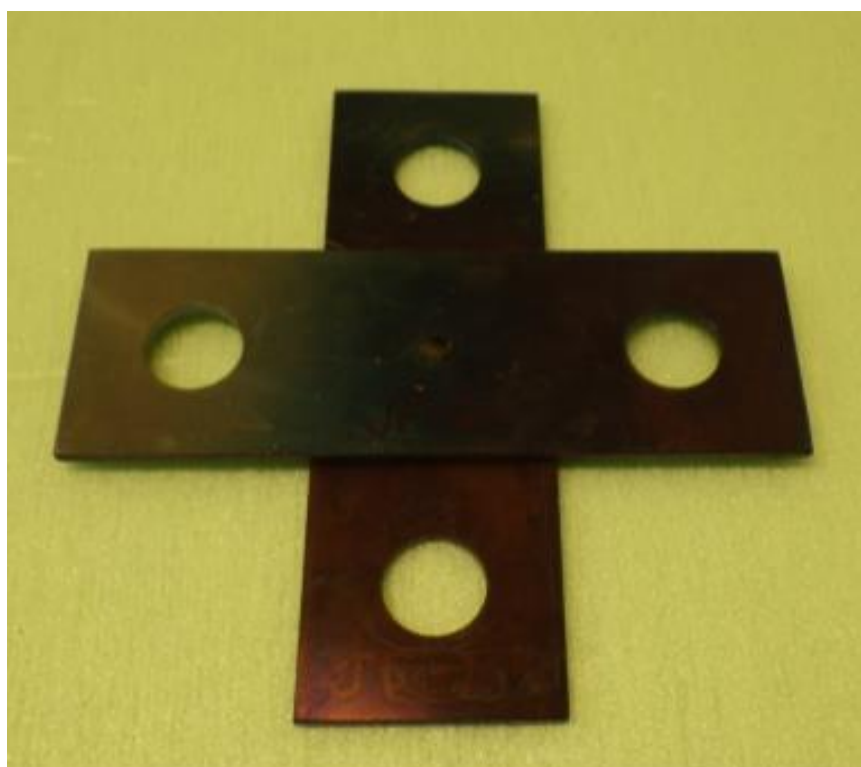


Fig. 4-3 Joining process of steel plates using a CFRTP pin

引張りせん断試験片は板材を平行に、十字引張試験は板材を十字に重ね合わせて接合した。板厚方向に膨張して飛び出たピンの部分は、グラインダーで板材の表面まで削った。接合した試験片の代表的な例として、**Fig. 4-4** にストレート穴の(a)引張りせん断試験片と(b)十字引張り試験片を示す。



(a) Single lap joint specimen



(b) Cross lap joint specimen

Fig. 4-4 Image of specimen of straight hole

4. 2. 3 引張りせん断試験方法

試験は JIS Z3136 に準拠して行った. 精密万能試験機 ((株) 島津製作所製, AG-50KNDX) を用い, クロスヘッド速度 1mm/min で試験を行った. **Fig. 4-5** に(a)引張り

せん断試験の模式図および(b)ストレート穴, (c)テーパ穴の接合部の詳細を示す. 試験片両端のつかみ部分は, 試験片と同じ板厚 3.0mm で 70×50mm の添え板をエポキシ接着剤 (コニシボンド (株), ボンドクイック 5 #16131) で接着した.

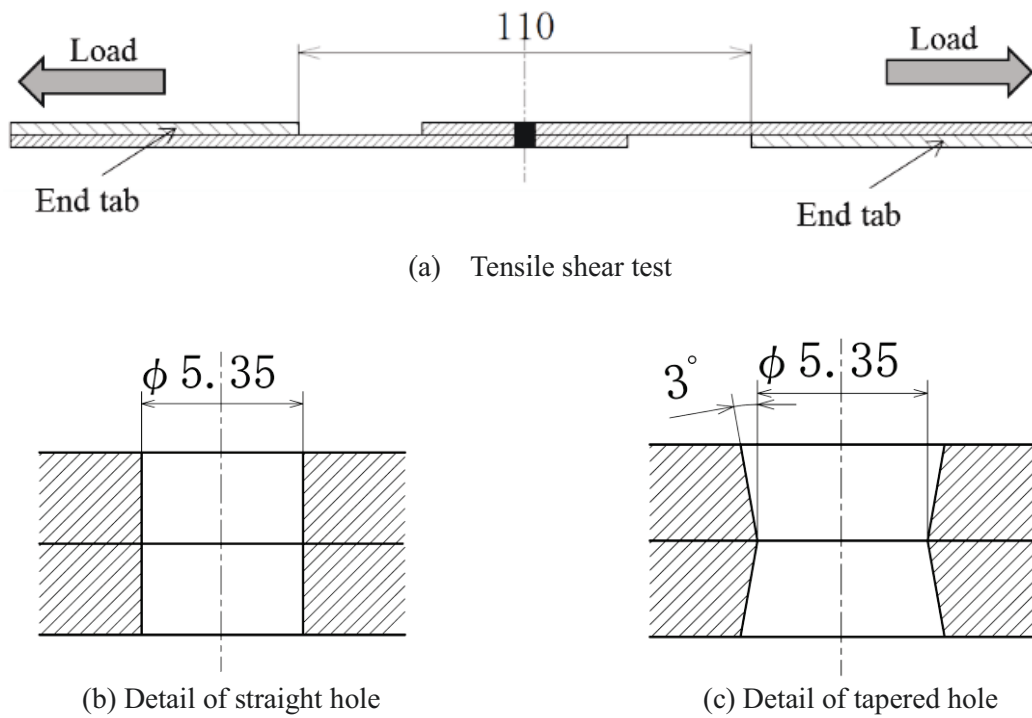


Fig. 4-5 Detail of holes on steel plate and schematic diagram of tensile shear test

引張りせん断方向の荷重 F_{pt} をロードセルで計測し, 得られた最大荷重 F_{ptmax} から式 (4-1) を用いてせん断強度 τ_{pn} として定義する平均せん断応力を算出する.

$$\tau_{pn} = \frac{4F_{ptmax}}{\pi d_{pn}^2} \quad (4-1)$$

ここで, d は CFRTP ピンの直径を表す.

4. 2. 4 十字引張試験方法

試験は JIS Z3137 に準拠して行った。試験は 4.2.3 と同じ装置を用い、同じクロスヘッド速度で行った。Fig. 4-6 に十字引張試験の模式図を示す。

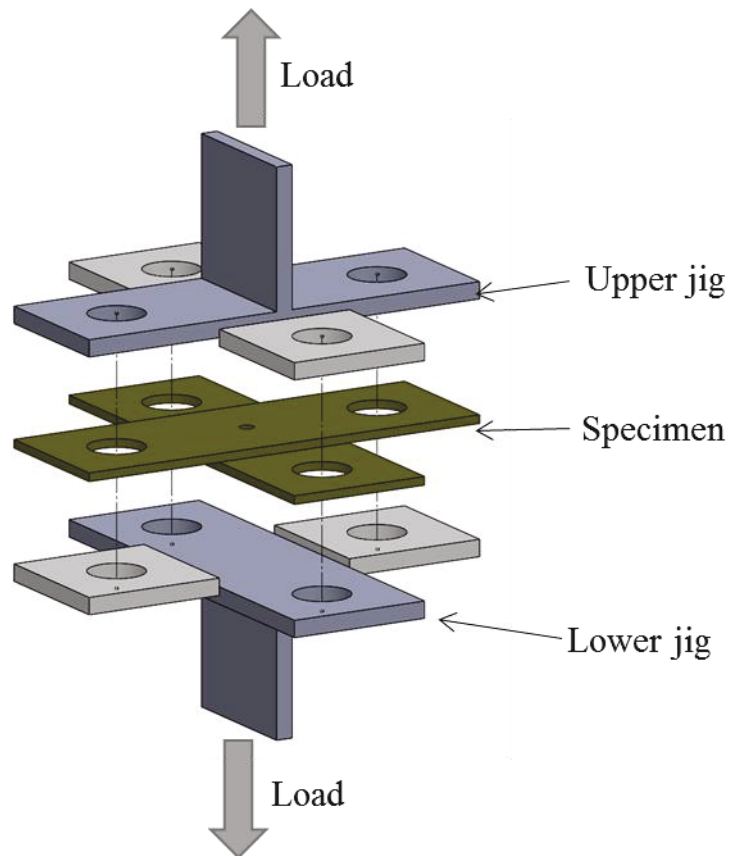


Fig. 4-6 Schematic diagram of cross tension test

板材 2 枚を十字に重ね合わせた試験片を上下の拘束治具にボルトで固定し、上下方向に 2 枚の板を引き剥がすように静的引張り荷重を与えた。引張り軸方向の荷重 F_{pc} をロードセルで計測し、得られた最大荷重 F_{pcmax} から式(4-2)を用いて引張強度 σ_{pn} として定義する平均引張り応力を算出する。

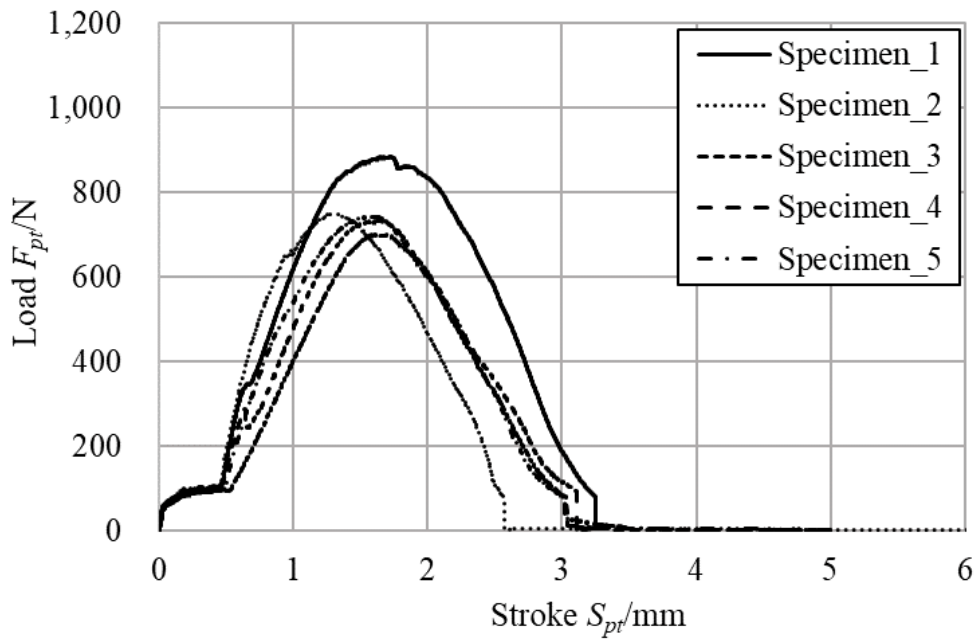
$$\sigma_{pn} = \frac{4F_{pcmax}}{\pi d_{pn}^2} \quad (4-2)$$

4. 3 実験結果

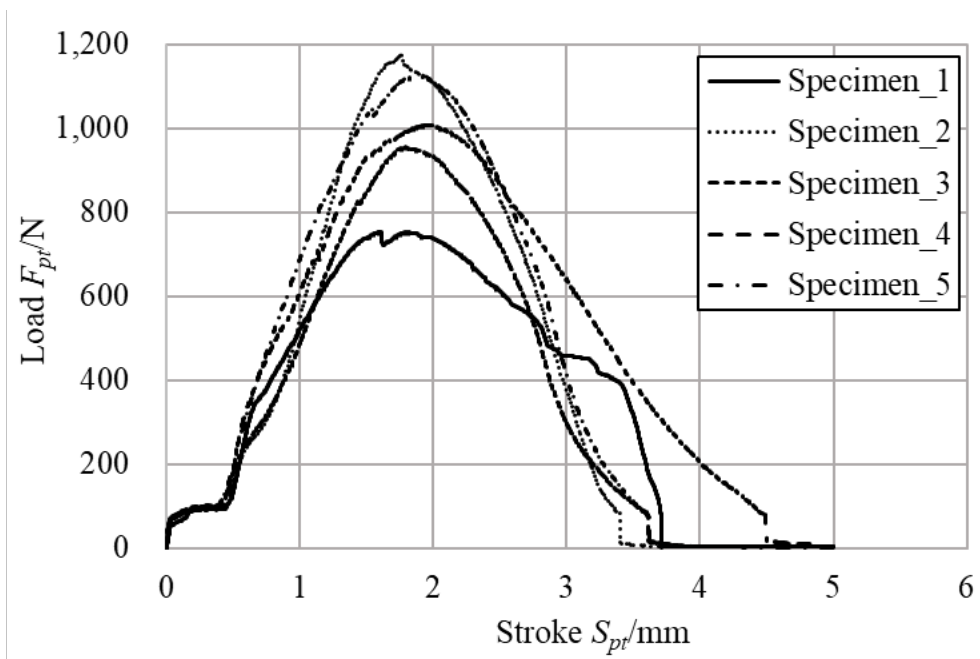
引張せん断試験，十字引張試験の結果は，剥離試験の結果をせん断応力，および引張応力の値として用いて，まとめたものである。

4. 3. 1 引張りせん断試験

接合した試験片で引張りせん断試験を行った内，ピンを挿入する穴が(a)ストレート穴，(b)テーパ穴の結果を **Fig. 4-7** に示す。横軸は試験機のクロスヘッドのストローク S_{pt} で，縦軸は試験機のロードセルから得られた荷重 F_{pt} である。接合した試験片を引張ると，ピンが変形しながら徐々に片方の板材の穴から抜けることが確認できた。Fig.4-7 はクロスヘッドのストローク S_{pt} に対する引っ張り応力の曲線であるが，(a)(b)の曲線でも，始まりと終わりを除き，急激な増加，減少は見られず，徐々に増加，減少しているのがわかる。ストローク $S_{pt}=0\sim 0.5\text{mm}$ の始まりの時に荷重が一定なのは，ピンと穴のわずかな隙間や，ピン内のボイドが変形するためと考えられる。さらに，荷重が減少してきて，100N 程度から終わりの時に荷重が急激に減少しているが，これは穴から CFRTP ピンが外れたためと考えられる。



(a) Straight hole



(b) Tapered hole

Fig. 4-7 Relationship between tensile load and crosshead stroke

ここで得られた最大荷重 F_{pmax} から式(4-1)により算出したせん断強度 τ_{pn} とエポキシ系接着剤 A,B による SS400 の重ね合わせ継手⁶⁸⁾のせん断強度 τ_{pn} の結果を Fig. 4-8 に示す。エラーバーは測定したせん断強度のデータ範囲を示す。ピンを挿入する板材の穴をテーパ穴にした場合、ストレート穴に対して、平均の比較で 11MPa である 30%ほどせん断強度が上昇することが確認できる。

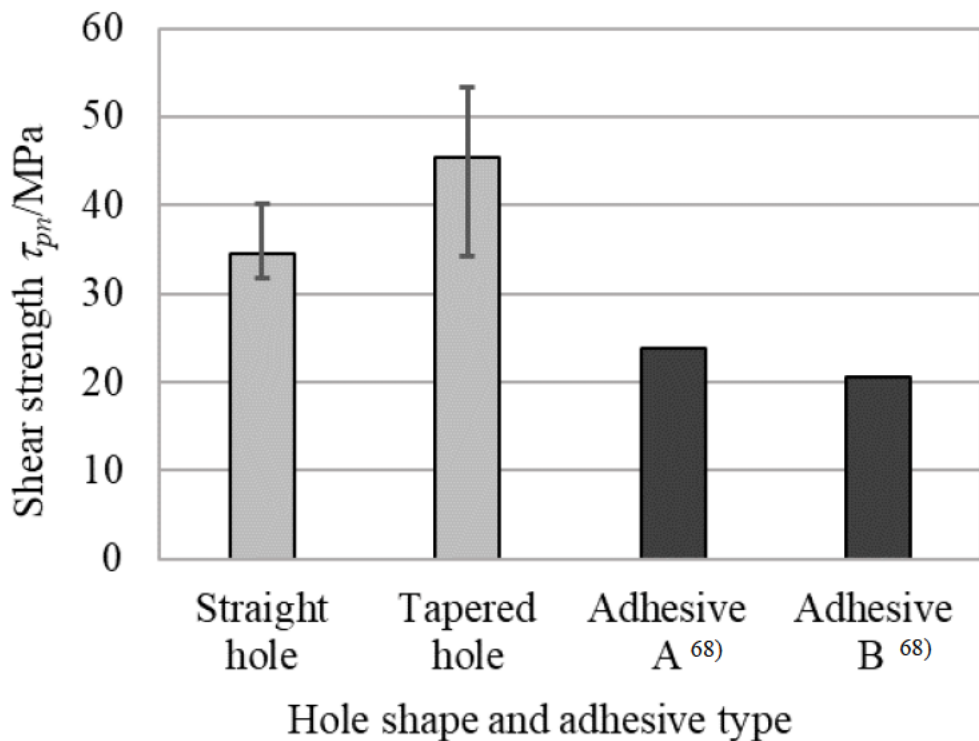
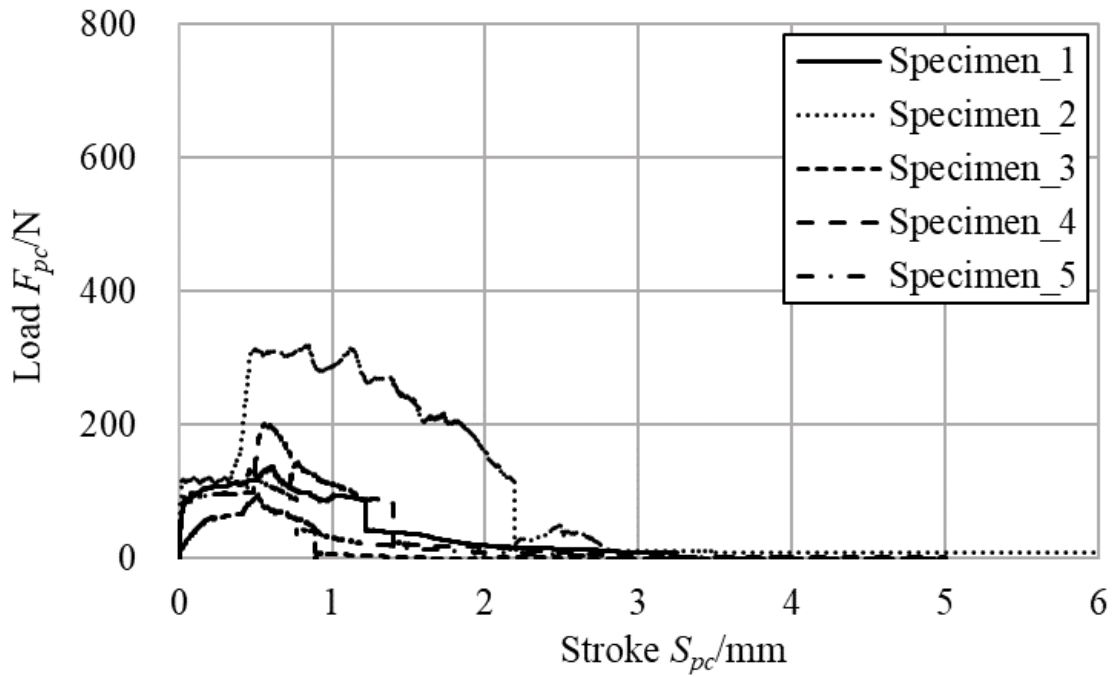


Fig. 4-8 Comparison of shear strength values in tensile shear tests of joined products using cylindrical CFRTP and shear strength values of adhesives in the paper.

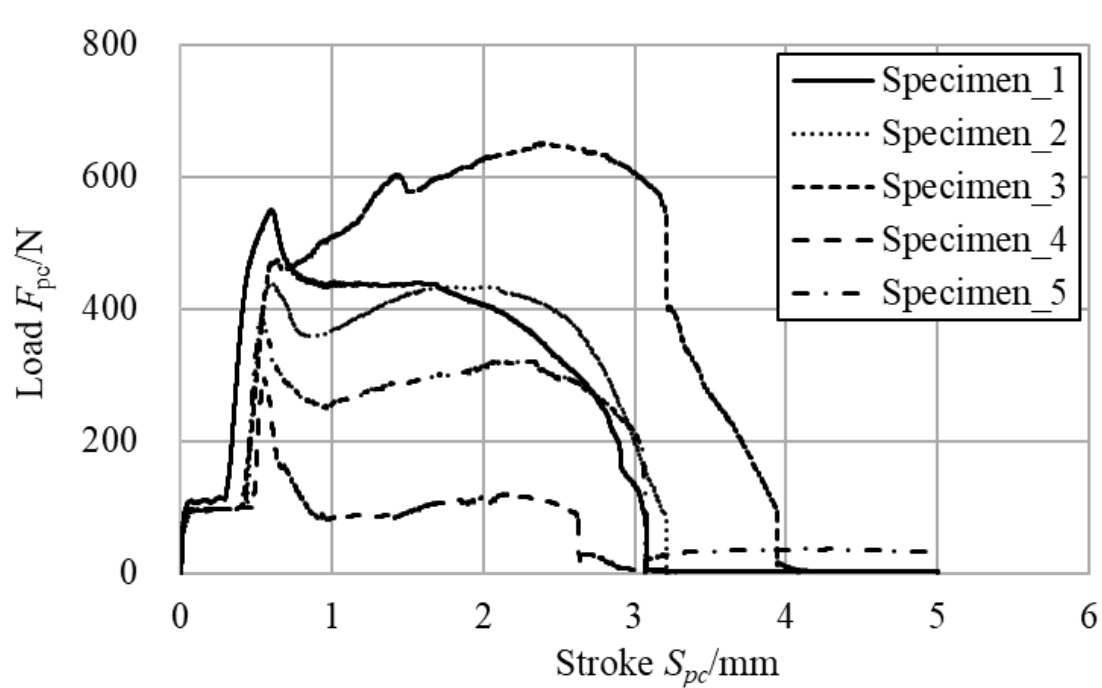
4. 3. 2 十字引張試験

接合した試験片で十字引張試験を行った内、ピンを挿入する穴が(a)ストレート穴、(b)テーパ穴のストロークごとにおけるせん断荷重の結果を **Fig. 4-9** に示す。横軸は試験機のクロスヘッドのストロークを示し、縦軸は引張試験機のロードセルから得られた荷重 F_c である。ストレート穴の試験片では、100 から 300N の引張りせん断荷重が得られる。これらは膨張したピンが穴の側面に溶着することによる影響と考えられる。ストローク 0~0.5mm の始まりの時に荷重が一定なのは、引張せん断試験と同様にピンと穴のわずかな隙間や、ピン内のボイドが変形するためと考えられる。

各曲線では、荷重が徐々に減少していくのが確認できる。これらは、ピンと穴の溶着が外れた後、ストロークが高くなるに従って、接触面からピンが受ける摩擦力によるものと考えられる。テーパ穴の試験片では、300 から 550N の高い値の荷重が得られる。それらはピンの溶着とアンカー効果によるものである。ピンの溶着が外れた後 2 枚の鋼板を分離するため、膨張して凝固したテーパ形状のピンが、穴の最小径を通過するため徐々に変形する。変形する力が引張り方向の抵抗となり、5 本のサンプルのうち 4 本の結果で再び荷重が上昇している。



(a) Straight hole



(b) Tapered hole

Fig. 4-9 Relationship between tensile load and crosshead stroke

ここで得られた最大荷重 F_{pcmax} から式(4-2)により算出した平均引張り応力 σ_{pn} を Fig. 4-10 に示す. エラーバーは測定した引張強度のデータ範囲を示す. テーパー穴にした場合, ストレート穴に対して, 平均の比較で 2.6 倍ほど平均引張り応力が上昇することが確認できる.

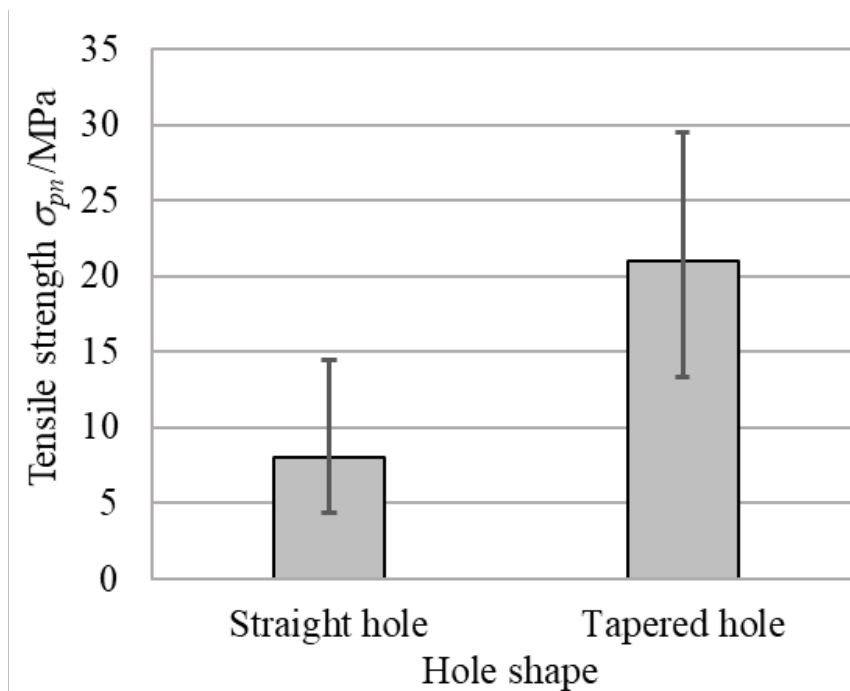


Fig. 4-10 Comparison of tensile strength values in cross tensile test of bonded products using cylindrical CFRTP.

4. 4 考察

引張りせん断試験を観察したところ, 試験片に荷重がかかると板材が離れる方向に徐々に移動していく. その後, CFRTP ピンが変形していき, ピンが穴から外れている.

Fig. 4-11 に試験後の CFRTP ピンのうち(a)ストレート穴, (b)テーパー穴を示す. ピンの形状が, 試験前の円柱形状と比べ変形しているのが確認できる. 特にテーパー穴の試験後のピンは, 著しく変形しているのが確認できる. まず, せん断方向に加わった力によ

って CF RTP ピンの変形が進んでいき、ピン外径と穴の内径の接合面積が減少した。これにより、接合力が下がって、ピンが外れたと考えられる。テーパ穴については、テーパ形状に膨張した CF RTP ピンが、最小径の穴を通過する時まで変形が続く。そのため、ストレート穴に比べ変形が大きいと考えられる。

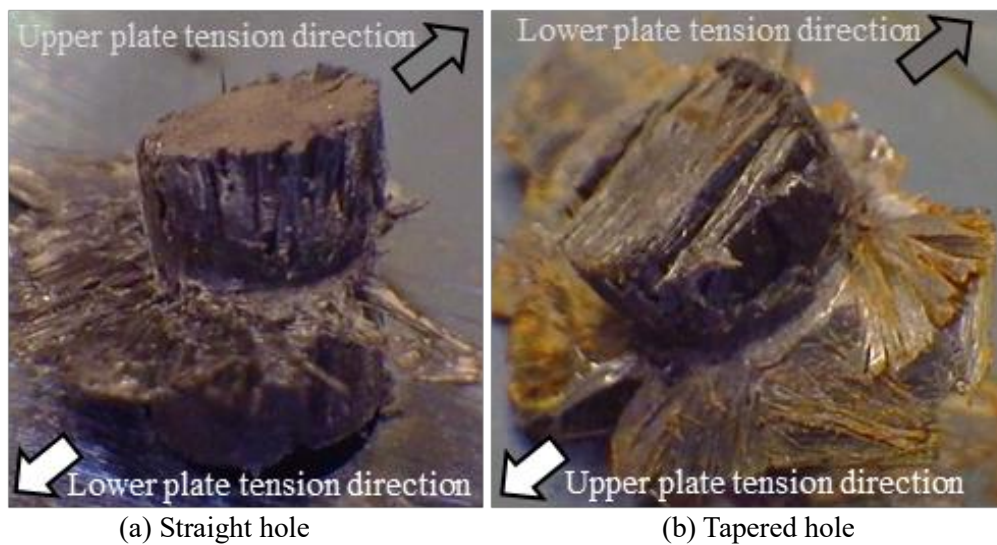
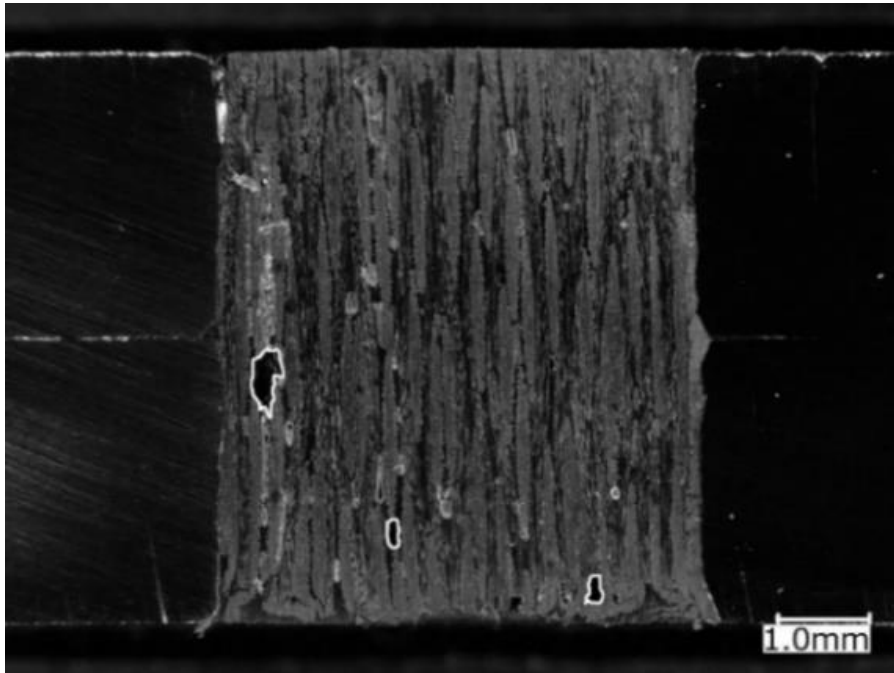
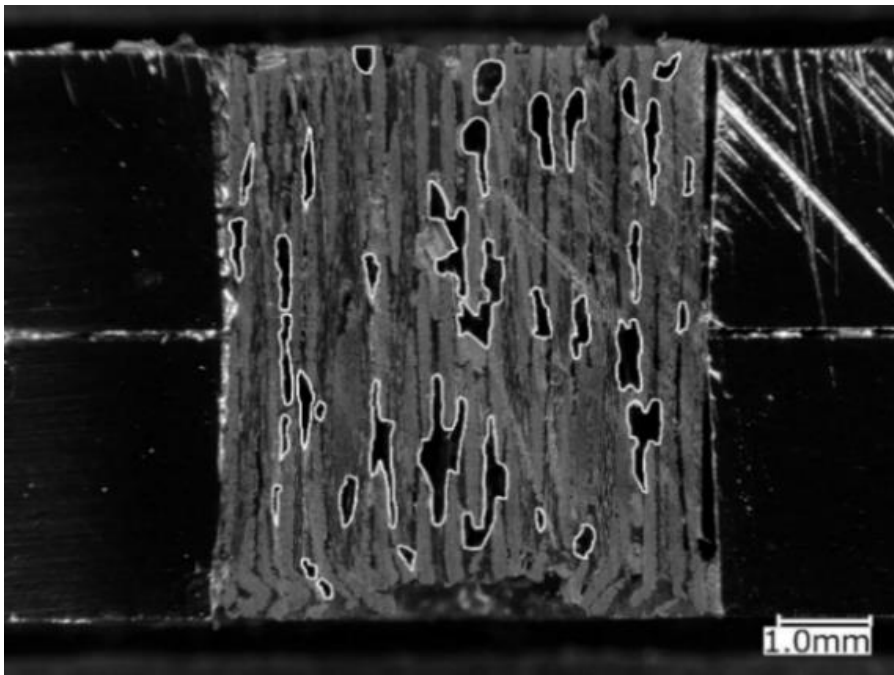


Fig. 4-11 Image of CF RTP pin after tensile shear test

Fig. 4-8 および Fig. 4-10 より、引張りせん断試験、十字引張試験ともに、テーパ穴にピンを挿入して接合させた試験片の方がストレート穴と比べてせん断荷重が高いことがわかった。加熱した板材から挿入したピンに熱が伝わって膨張し、テーパ部分の隙間まで炭素繊維とマトリクス樹脂が広がって凝固したため、テーパ穴のほうが離脱の抵抗が大きかったと考えられる。従って、接合した試験片のピン中央を切断して、マイクロ스코プ ((株)キーエンス製, VHX-6000) で試験片内部の断面観察を行った。Fig. 4-12 に(a)ストレート穴(b)テーパ穴の試験片断面写真を示す。これによると、炭素繊維の間に、ボイドや層間剥離が確認できる。白枠で囲んだ部分が膨張の際に発生したと考えられるボイドである。



(a) Straight hole



(b) Tapered hole

Fig. 4-12 Cross section micrographs of joined specimen

(a)のストレート穴ではいくつかボイドの発生が見られるが、(b)のテーパ穴では、(a)のストレート穴に比べボイドの数、面積共にはるかに多い。(b)のテーパ穴においてボイドが分散している。これは、テーパの隙間で生じたボイドが、ピンが軸方向に伸びた際に移動したためである。また、テーパ部分の隙間に炭素繊維およびマトリクス樹脂が入り込んで、テーパ形状を形成している。これにより、冷却して凝固したテーパ形状のCFRTPが、せん断方向や引張方向の力を受けた時の抵抗となる、いわゆるアンカー効果が発生すると考えられる。次に、CFRTPピン単体での熱膨張を確認した。方法は、CFRTPピンを電気炉で加熱し、加熱前後の外径2方向（Fig. 4-13, ϕdp : 積層に平行方向, ϕdv : 積層に垂直方向）の測定を行い、その差から外径増加率 α_d を以下の式(4-3)より求める。

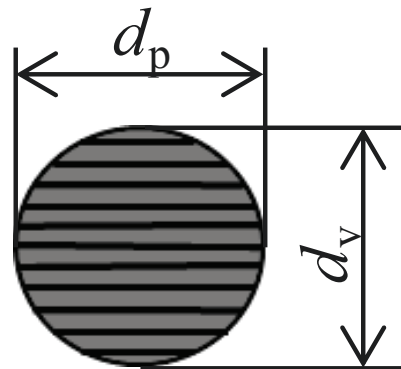


Fig. 4-13 Diameter measurement direction

$$\alpha_{d_p} = \frac{d_{pa} - d_{pb}}{d_{pb}}, \quad \alpha_{d_v} = \frac{d_{va} - d_{vb}}{d_{vb}} \quad (4-3)$$

外径増加率のうち、積層に平行方向の外径を α_{dp} 、積層に垂直方向の外径を α_{dv} とした。ここで、 d_{pb} は加熱前、 d_{pa} は加熱後の積層に平行方向の外径、 d_{vb} は加熱前、 d_{va} は加熱後

の積層に垂直方向の外径を示す。加熱温度は、CFRTP のマトリクス樹脂である PA6 の融点 498K と熱分解温度 573K の間の 523K に設定した。また、加熱時間は先行して行った実験により、炭素繊維のほつれが生じる前の 2min と定めた。標本数は 5 である。この結果を Fig. 4-14 に示す。

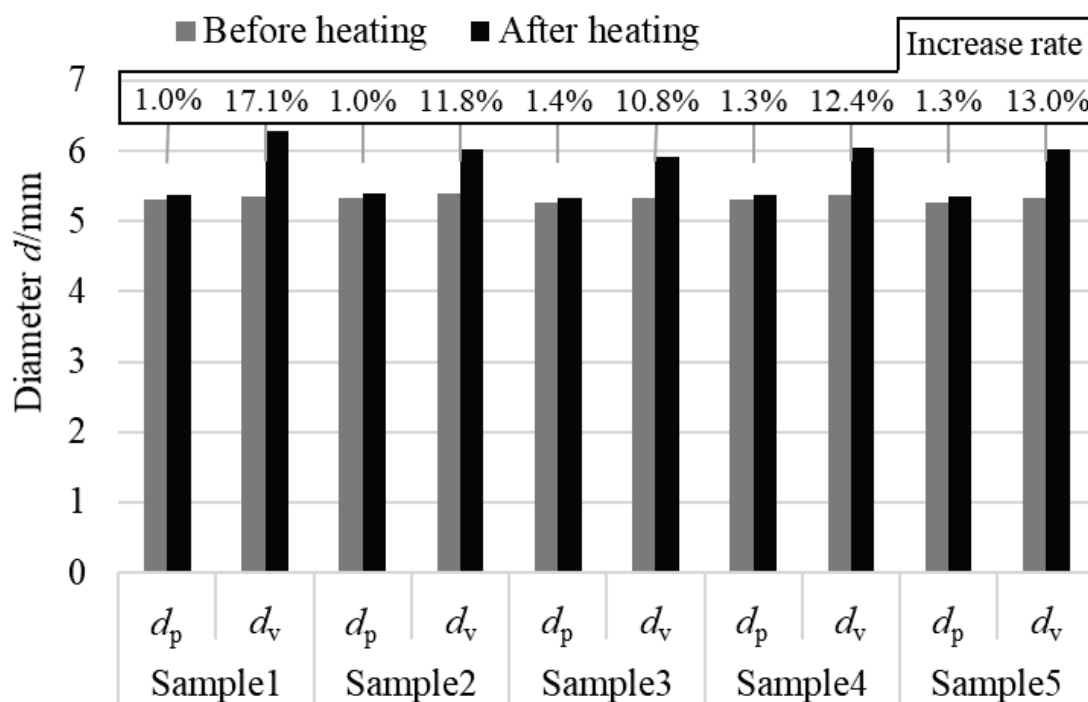


Fig. 4-14 Outer diameters of CFRTP pin before and after heating

全てのピンにおいて、積層に垂直方向の膨張が大きく、外径増加率(α_{dv})は 10.8~17.1%となった。積層と平行方向のピンの膨張(α_{dp})は 1%強の小さい結果となった。CFRTP が熱を加えた時に、層間にボイドが発生したり、高加圧条件化で生成した炭素繊維が、樹脂が溶けることで板厚方向(積層に垂直方向)に膨張する。このため、板厚方向の増加率である α_{dv} が大きな値になったと考えられる。これらの結果を平均すると 7.11%となり、ピンとテーパ穴のクリアランスおよびテーパ部分の体積増加分の 3.9%を十分満たすことができる (Fig. 4-15)。

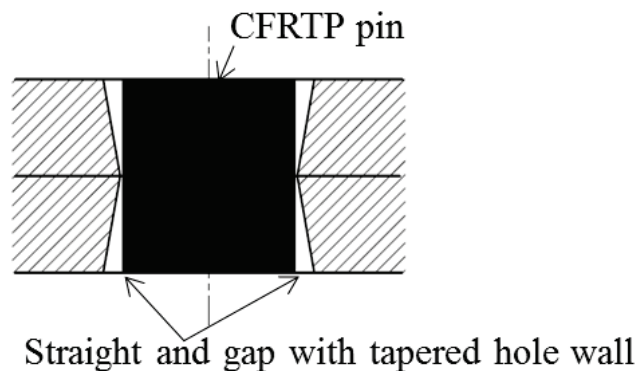


Fig. 4-15 CFRTP pin and tapered holes on steel plates

CFRTP のスタンパブルシートは、炭素繊維と樹脂を加熱して圧縮し、冷却して固化することで成形する。これを再度加熱することによって樹脂が熔融し、炭素繊維の応力が開放されるため、積層方向の膨張が生じる⁶⁷⁾。積層方向に加熱膨張したピンは、冷却しても若干の圧縮力は残るが、表面の熔融接合の強度に比べはるかに小さい。これは、Fig. 4-9 の十字引張試験結果において、最大値を得た後、急激に低下していることからいえる。

4. 5 結言

本研究では、CFRTP 板をマトリックス樹脂の熔融温度付近で加熱したときの厚さ方向の膨張特性に着目し、この膨張特性を利用したピンによる同種・異種接合の有用性を検討することを目的とした。また、CFRTP ピンの加熱による膨張の評価を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) ピン挿入の穴をテーパ形状にした接合品が、ストレート形状の接合品に比べ、引張りせん断試験、十字引張試験の両方で高い値を得た。
- (2) テーパー形状の穴に挿入したピンが膨張して、テーパ形状の隙間を埋めて凝固しており、これによって、ストレート穴より高い引張りせん断応力および引張り応力が得られている。

(3)引張りせん断試験では，引張られた CFRTP ピンが，全ての穴形状でせん断より先に板材の穴から外れることがわかった．

(4)CFRTP ピンを単体で加熱すると，積層方向に外径の 10~17%増加する．

以上のことから，加熱した板材に CFRTP ピンを挿入する本方法を用いることで，接合強度が得られることがわかった．また，板材の穴形状をテーパ形状にすることで，膨張による加圧とテーパ形状によるアンカー効果が発生し，ストレート穴形状に比べて高い接合強度が得られる．引張せん断応力は，エポキシ系接着剤に比べ倍近い強度が得られる．よって CFRTP ピンによる加熱接合は同種・異種接合技術として有用であることが確認できた．

第 5 章

結論

第5章 結論

5.1 まとめ

本研究では、CFRTPの熱特性を利用した接合方法について、接合の仕組みを明らかにし、それらの結果によりCFRTPピンによる新しい接合手段を提案した。

第1章では、研究の背景およびCFRPの種類、異種接合技術の種類について説明し、本研究の目的を示した。

第2章では、CFRTPの熱特性を利用したアルミニウム合金との接合方法を提案した。溝を形成したアルミニウム合金片を加熱し、加熱後にCFRTP板を挿入することでCFRTPに熱が伝わり膨張して、その加熱と加圧によってアルミニウム合金片と接合する方法である。また、アルミニウム合金の溝をテーパ形状にすることで、膨張した際のCFRTPがテーパ溝に充填され、エポキシ系接着剤相当の高い接合強度が発生することを確認した。CFRTPシート単体で加熱による膨張を行い、板厚増加率と負荷荷重から、CFRTP膨張時に発生する荷重を算出した。未加熱のCFRTPと熱による膨張後のCFRTPの曲げ試験を行い、曲げ強度の算出を行ったところ、曲げ破壊荷重に大差は無いものの、熱による膨張後のCFRTPの方が未加熱のCFRTPより曲げ破壊強さが高いことを確認した。さらに、CFRTPの熱による膨張は、マトリクス樹脂が熔融した際に炭素繊維が応力開放されることに起因すると仮定した。引張り試験時にテーパ面に生じる応力分布や引張り荷重の計算式を示した。

第3章では、CFRTP板の熱特性とCFRTP板の成形に関連性があると仮定し、オートクレーブを用いて、任意の温度と圧力条件でCFRTP板を成形し、接合品を製作して強度の評価を行った。CFRTPの積層板をオートクレーブ成形で製作し、電気炉による加熱で、膨張による板厚増加率を算出した。さらに、加熱したアルミニウム合金片にオートクレーブ成形したCFRTPを挿入して接合し、オートクレーブの成形圧と、接合品の接合強度の関連性について示した。オートクレーブ成形前後の炭素繊維束の層方向の長

さと平面方向の長さからアスペクト比を算出し、成形圧力が高くなると炭素繊維束が圧縮されて層方向に広がることが確認された。

第4章では、CFRTPの熱特性を利用し、CFRTPを円柱状に加工したピンを用いて、同種または異種の板材を接合する方法を提案した。第2章で確立したCFRTPの板材による接合同様に、CFRTPを円柱状に加工したものを用意し、丸穴を開けた対の同種の金属板の接合を行い、強度評価を行った。強度評価は、CFRTPピンのせん断方向に引張りせん断試験、軸方向に十字引張り試験を行った。これにより、テーパ穴を加工した方がストレート穴より試験片の接合強度が高く、優位性を示した。

5. 2 本論文の課題と今後の展望

本論文では、CFRTPの熱特性を利用した金属材料の異種・同種接合について、新しい方法を提案した。最後に本論文の課題と展望について述べる。

本論文は新しい接合方法の基礎的な研究として進めてきた。課題としては、エポキシ系接着剤相当まで接合強度を高めることが可能になったが、機械的締結や溶接に比べるとまだ低い値である。さらに高い接合強度が必要な状況を考慮して、接合強度を高める方策を探求していく。特に、接合物の表面性状や、金属材料の剛性、および最適な加熱温度、加熱方法、溝や穴の形状について検討の余地はあると考える。

次に今後の展望を述べる。

第2章でCFRTPの熱特性によるアルミニウム合金片との異種接合について述べた。また、第4章ではCFRTPピンの熱特性による異種・同種接合について述べた。これらの技術を用いて、軽量かつ強度の高い接合として自動車・航空機のマルチマテリアル化や建造物の補強などに活用できると考えられる。

CFRTPと接合する金属の溝や穴の形状がテーパの場合、第2章のFig.2-12や第4章のFig.4-9に示すように、接合品の引張り試験を行うと荷重のピークが2度発生する。

1 度目は CF RTP が溶融結合した金属から剥がれる時で、2 度目は膨張した CF RTP がテーパー部のボトルネックを通過する時である。この荷重変化を利用して、例えば自動車のバンパーの接合に用いて、衝突により接合が外れても、2 度目のピークがあるので抜け落ちないといった安全面に寄与できる構造ができる。

CF RTP の加熱方法として、本論文における金属側に蓄積された熱エネルギーを CF RTP に伝える方法の他に、誘導加熱や通電加熱、レーザ加熱などがあげられる。これらの加熱方法は CF RTP を直接加熱することも可能である。

CF RTP 板、およびピンの成形には、プレス成形や射出成形が考えられる。いずれも炭素繊維の織り方向と圧縮する方向を検証する必要がある。

本論文では CF RTP と金属の新しい接合方法を提案したが、これにより、金属の板材の同種または異種接合の可能性を示した。

参 考 文 献

参考文献

- 1) Yuta Kamobayashi, Ryuta Takashima: An Effect of Output Quantities on Costs for CO₂ Emission Reduction, *Journal of Real Options and Strategy*, 10(2018), p.p.1-19.
- 2) 紀伊 雅敦: 乗用車 CO₂ 排出量の将来推計と要因分析, *エネルギー・資源学会論文誌*, 40-4(2018), p.p.93-100.
- 3) 中谷 郁夫, 竹田 一彦, 佐久川 弘: 地球温暖化対策に関する国の補助事業の貢献度と CO₂ 削減予測, 47-5(2018), p.p.33-40.
- 4) 国土交通省: 大型車の長期的な低炭素化に向けた勉強会におけるとりまとめ, 大型車の長期的な低炭素化に向けた勉強会資料, (2020).
- 5) 経済産業省 環境省 地球温暖化対策推進本部: 2018 年度における地球温暖化対策計画の進捗状況, (2020).
- 6) 国土交通省, 経済産業省: 乗用車燃費規制の現状と論点について, (2018), 第 5 回自動車燃費基準小委員会配布資料, p.p.28-30.
- 7) Oliver Geden, Glen P. Peters & Vivian Scott: Targeting carbon dioxide removal in the European Union, *Climate Policy*, 19-4(2019), p.p.487-494.
- 8) 黒川 文子: EU における 2021 年の CO₂ 排出量規制に向けた電気自動車の開発・販売戦略, *環境共生研究*, 13(2020), p.p.75-85.
- 9) 坂元 洋一郎: 排出権取引制度の温暖化対策における有効性の考察, *日本経大論集*, 49-2(2020), p.p.1-10.
- 10) Hitoki Hasegawa, Shigehito Inui, Kazuma Shiraishi, Sho Ishii, Atsushi Kasai, Yoshihito Matsumura and Yoshitake Nishi: Preparation of Ti/CFRTP joint strengthened by carbon fiber cloth, *Journal of Advanced Science*, 28-11001(2016), p.p.1-4.
- 11) 和田原 英輔, 北野 彰彦: 炭素繊維強化プラスチックによる自動車の軽量化, *SEN'I GAKKAISHI*, 64-9(2008), p.p.21-27.
- 12) 日本経済新聞 2017 年 3 月 1 日: 富士経済, 炭素繊維複合材料の世界市場調査結果を発表.
- 13) 今村 博: この 10 年の国の主な風力研究開発プロジェクトと推移, *日本風力エネルギー学会誌*, 41-3(2017), p.p.389-397.
- 14) 鶴澤 潔: 適用拡大期における成形特性と製造プロセスの適合化への取り組み, *材料*, 67-7(2018), p.p.754-789.
- 15) 田中 克昌: 材料がもたらすスポーツ用具の進化, *材料*, 68-5(2019), p.p.407-413.
- 16) ヨネックス(株)企画宣伝部宣伝広報課: ゴルフクラブ・テニス, バドミントンラケット, セラミックアーカイブズ, 44-7(2009), p.p.554-556.
- 17) 鶴澤 潔, 斉藤 義弘, 保倉 篤: 土木・建築分野への複合材料利用-先進材料と革新製造技術による新たな取り組み-, *土木学会論文集 A1*, 73-5(2017), II-1-II-9.
- 18) 平松 徹: よくわかる炭素繊維コンポジット入門, (2015), p.p.10-12.

- 19) 笠森 正人, 大塚 猛, 新保 實, 宮野 靖: 耐熱性エポキシ樹脂およびその CFRP 積層板の機械的性質の時間—温度依存性, 材料, 41-463(1992), p.p.465-469.
- 20) 平野 啓之: 熱硬化性 CFRP の成形方法と材料への要求, ネットワークポリマー, 36-1 (2015) , p.p.28-46.
- 21) Jung-Ho Kim, Ji-Hoon Kim: Analysis of Bending characteristics of Autoclave Forming CFRP Structural Members, Journal of the Korean Foundrymen's Society, 28-4(2008), p.p.175-178.
- 22) 山崎 真明, 関戸 俊英, 山口 晃司: ハイサイクル RTM 成形方法の開発, 成形加工, 19-10(2007), p.p.645-648.
- 23) Alessio Vita, Vincenzo Castorani, Michele Germani, Marco Marconi: Comparative life cycle assessment of low pressure RTM, compression RTM and high-pressure RTM manufacturing processes to produce CFRP car hoods, Procedia CIRP, 80(2019), p.p.352-357.
- 24) Changchun Dong, Jianxin Zhou, Xiaoyuan Ji, Yajun yin, Xu Shen: Study of the curing process of carbon fiber reinforced resin matrix composites in autoclave processing, Procedia Manufacturing, 37(2019), p.p.450-458.
- 25) 大野 秋夫, 安江 昭, 井上 茂樹, 西田 正三, 羽生 芳史: セミプレグを用いた革新的 CFRTP 成形加工技術の開発, 日本製鋼所技報, 66(2015), p.p.129-134.
- 26) 米山 猛, 立野 大地, 河本 基一郎, 岡本 雅之, 越後 雄斗: 熱可塑性 CFRP 異形断面ビームのプレス成形と強度評価, 塑性と加工, 58-678(2017), p.p.605-610.
- 27) Toshikazu Uchida, Koichi Bun, Akio Ohtani, Asami Nakai: Autoclave forming technology for CFRTP braided T-shaped pipe, The 19th International Conference on Composite Materials, Montreal, Canada, 28 July-2 August(2013).
- 28) 中村 幸一, 平山 紀夫, 西田 裕文: 現場重合型ポリアミド6をマトリックスとする FRTP の機械的特性: 日本複合材料学会誌, 35-5(2009), p.p.195-202.
- 29) 田中 和人, 平田 晃浩, 片山 傳生: 熔融熱可塑性樹脂を用いた RTM による連続繊維強化熱可塑性樹脂複合材料の成形, 材料, 68-8(2019), p.p.628-635.
- 30) Sachihiro Isogawa, Hidenori Aoki, Masahiro Tejima: Isothermal forming of CFRTP sheet by penetration of hemispherical punch, Procedia Engineering, 81(2014), p.p.1620-1626.
- 31) Shoji Hineno, Takeshi Yoneyama, Daichi Tatsuno, Masaki Kimura, Keisuke Shiozaki, Takashi Moriyasu, Masayuki Okamoto, Shigenori Nagashima: Fiber deformation behavior during press forming of rectangle cup by using plane weave carbon fiber reinforced thermoplastic sheet, Procedia Engineering, 81(2014), p.p.1614-1619.
- 32) Daichi Tatsuno, Takeshi Yoneyama, Kiichirou Kawamoto, Masayuki Okamoto: Hot press forming of thermoplastic CFRP sheets, Procedia Manufacturing, 15(2018), p.p.1730-1737.
- 33) 石川 隆司: 自動車構造部品への炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の応用の展望 (CFRTP を中心に) , 精密工学会誌, 81-6(2015), p.p.489-493.
- 34) Jun Takahashi, Nobukuni Matsutsuka, Tetsuya Okazumi, Kiyoshi Uzawa, Isamu Ohsawa,

- Koji Yamaguchi & Akihiko Kitano: Mechanical Properties of Recycled CFRP by Injection Molding Method, 16th International Conference on Composite Materials, Kyoto, Japan, 8-13 July(2007).
- 35) 中田 一博: CFRP/CFRTP とマルチマテリアル接合 1.CFRP/金属異種材の摩擦重ね接合, 材料, 69-6(2020), p.p.479-484.
 - 36) 細井 厚志: CFRP/CFRTP とマルチマテリアル接合 2.CFRTP と Al の異種接合, 材料, 69-7(2020), p.p.563-567.
 - 37) 橋村 徹, 勝間 秀人, 岩谷 二郎: 抵抗スポット溶接とダボ形状を用いた鋼板とアルミニウム合金の新しい異種金属接合法, 自動車技術会論文集, 48-5(2017), p.p.1149-1154
 - 38) 田邊 大貴, 西藪 和明, 倉敷 哲生: 炭素繊維を発熱体として用いた CF/PPS 積層板の電気式融着接合に及ぼす影響因子, 日本機学会論文誌, 81-826(2015), p.p.1-13.
 - 39) Behrens Berend-Arno, Hübner Sven, Grbic Nenad, Micke-Camuz Moritz, Wehrhane Tim, Neumann André: Forming and Joining of Carbon-Fiber-Reinforced Thermoplastics and Sheet Metal in One Step, Procedia Engineering, 183(2017), p.p.227-232.
 - 40) 特許庁:平成 25 年度特許出願技術動向調査報告書 (概要) 構造材料接合技術, (2018).
 - 41) 寺田 幸平: 炭素繊維強化熱可塑性プラスチック-現状, 応用分野および課題-, 精密工学会誌, 81-6(2015), p.p.486-488.
 - 42) Masahito Ueda, Sotaro Miyake, Hiroyuki Hasegawa, Yoshiyasu Hirano: Instantaneous mechanical fastening of quasi-isotropic CFRP laminates by a self-piercing rivet, COMposite Structures, 94-11(2012), p.p.3388-3393.
 - 43) 灘部 岳晃, 西川 雅章, 水口, 中村 達也, 竹田 展雄: CFRP ボルト接合部の面圧破壊に影響する繊維キンク損傷のモデリング, 日本複合材料学会誌, 37-5(2011), p.p.172-181.
 - 44) Tomioka, T., Uzawa, K., Nomura, Y., Matsuo, T., Yamane, M., Ohsawa, I., Kanai, M. and Takahashi, J.: Basic study on mechanically fastened joints of carbon fiber reinforced thermoplastics, ECCM15-15TH European Conference on Composite Materials, (2012), p.p.1-7.
 - 45) 灘部 岳晃, 西川 雅章, 水口 周, 中村 達也, 竹井達也, Juho T. Siivola: ひずみ計測による CFRP ボルト接合部の損傷検出のための数値解析, 日本複合材料学会誌, 38-1(2012), p.p.22-29.
 - 46) 安部 洋平, 田呂丸 和哉, 加藤 亨, 森 謙一郎: アルミニウム合金板におけるメカニカルクリンチングされた接合部の強度特性と向上法, 塑性と加工, 52-610(2011), p.p.1193-1197.
 - 47) 原賀 康介, 佐藤 千明, 自動化軽量化のための接着接合入門, 日刊工業新聞社, (2015), p.p.88-89.

- 48) 中西 洋一郎, 澤田 吉裕: 一方向強化 CFRP の 90° 引張り強度と炭素繊維の表面特性との関係, 日本複合材料学会誌, 15-2(1989), p.p.64-70.
- 49) 野阪 克義, 金子 大昨, 古川 喬朗, 鈴川 研二, 西出 靖: CFRP 板接着補強において被着体厚さが補強効果に与える影響に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 10-38(2003), p.p.61-68.
- 50) 星光, 中野 啓介, 岩堀 豊, 石川 隆司, 矢島 浩, 福田 博: CFRP スカーフ継手の引張り強度における衝撃損傷の影響, 日本複合材料学会誌, 36-6(2010), p.p.237-245.
- 51) Shiqiang Deng, Luke Djukic, Rowan PatonLin Ye: Thermoplastic-epoxy interactions and their potential applications in joining composite structures, Composites: Part A, 68(2015), p.p.121-132.
- 52) 深川 仁: CFRP/CFRTP 接合技術, CFRP/CFRTP 成形・加工・接合技術, S&T 出版, (2016), p.p.120-121.
- 53) 板橋 雅巳: 金属と樹脂の直接接合を可能にしたナノモールドイングテクノロジー (NMT), 表面技術, 66-8(2018), p.p.359-362.
- 54) 永塚 公彬, 吉田 昇一郎, 土谷 敦岐, 中田 一博: 摩擦重ね接合による炭素繊維強化熱可塑性樹脂とアルミニウム合金の直接異材接合, 溶接学会全国大会講演概要, (2014).
- 55) 永塚 公彬, 田中 宏宜, 肖 伯律, 土谷 敦岐, 中田 一博: 摩擦重ね接合によるアルミニウム合金と炭素繊維強化樹脂の異材接合特性に及ぼすシランカップリング処理の影響, 溶接学会論文集, 33-4(2015), p.p.317-325.
- 56) 三輪 剛士, 北川 大喜, 永塚 公彬, 山岡 弘人, 伊藤 和博, 中田 一博: 摩擦重ね接合によるステンレス鋼と炭素繊維強化熱可塑性樹脂との異材接合, 溶接学会論文集, 35-1, (2017), p.p.29-35.
- 57) 河越 正羽, 水谷 義弘, 轟 章, 松崎 亮介, 安岡 哲夫: 熱可塑性 CFRP の導電性を利用した自己抵抗融着に関する研究, 日本機械学会論文集, 79-801(2013), p.p.555-562.
- 58) 守屋 一政: 炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材の抵抗スポット溶接による接合, 日本航空宇宙学会誌, 42-483(1994), p.p.259-266.
- 59) 田中 和人, 山城 太紀, 片山 傳生: 抵抗スポット溶接を用いた CFRTP とアルミニウム合金の異種材接合, 材料, 67-11(2018), p.p.1013-1020.
- 60) 片山 聖二, 川人 洋介, ジェン クワンウン: 金属と CFRP とのレーザ直接接合, 溶接学会全国大会講演概要, 90(2012), p.p.220-221.
- 61) 水俣 裕貴, 三好 栄二, 片岡 英樹, 奥野 陽介, 片山 聖二, 鄭 光云: CFRP とステンレス鋼ボルトとのレーザ直接接合, 溶接学会全国大会講演概要 90(2012), p.p.218-219
- 62) 鄭 光云, 川人 洋介, 片山 聖二: CFRP と各種金属のレーザ直接加工, 溶接学会全国大会講演概要, 90(2012), p.p.220-221.
- 63) Klaas Allaer, Ives De Baere, Wim Van Paeppegem, Joris Degrieck: Infrared welding of carbon

- fabric reinforced thermoplastics, JEC Composite Magazine, 77(2012), p.p.44-47.
- 64) 一村産業説明資料, 一村産業の熱可塑性 CFRP について(2015).
- 65) Threebond 技術資料, スリーボンド 2081D 常温硬化型二液性エポキシ樹脂軟質塩ビ接着タイプ, AD2005057(2005).
- 66) 渡邊 健斗, 越智 昭夫, 松岡 敬, 平山 朋子, 安藤 俊夫: カバーリング複合糸を用いた織物状 CFRTP の開発, 成形加工, 30-3(2018), p.p.131-135.
- 67) 芳我 攻, 小山 秀夫, 川田 勝巳, 小川 和洋: AI/CFRP ハイブリッド材料の残留応力制御, 材料, 41-464(1992), p.p.728-733.
- 68) 池上 皓三, 京極 秀樹, 川越 治郎, 杉林 俊雄, 能野 謙介, 藤井 透, 元家 勝彦, 吉田 総仁: 接着継手強度の総合的評価のためのベンチマークテスト, 日本機械学会論文集, 96-0731(1997), p.p.830-837.

本論文に関する研究業績

研究業績

1 査読付き投稿論文

- (1) 小平裕也, 小林信彦, 小平直史, 西條甲一, 武井敦子, 中山昇: CFRTP の熱膨張を利用したアルミニウム合金との異種接合, 塑性と加工, Vol.59, No.690, (2018), pp.135-140.
- (2) 小平裕也, 小林信彦, 小平直史, 武井敦子, 中山昇: CFRTP の熱膨張を利用した接合に及ぼすオートクレーブ成形条件の影響, 塑性と加工, Vol.60, No.705, (2019), pp.289-294.
- (3) Y. Kodaira, N. Kobayashi, N. Kodaira, A. Takei, N. Nakayama: Development of Joining Method by Cylindrical Pin Using Thermal Expansion of CFRTP, Advanced Experimental Mechanics, Vol.5, (2020), pp.110-115.

2 国際会議

- (1) Y. Kodaira, N. Kobayashi, N. Kodaira, A. Takei, N. Nakayama: Development of Joining Method by Cylindrical Pin Using Thermal Expansion of CFRTP, 14th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, Tsukuba, 2019/11/1-4

3 国内発表

- (1) 小平裕也, 中山昇, 小林信彦, 小平直史, 西條甲一: 加熱によるアルミニウム溝部と熱可塑性 CFRP のカシメ接合, 第 67 回塑性加工学会連合講演会, 日本工業大学, 2016 年 11 月 9 日～11 月 12 日.
- (2) 小平裕也, 中山昇, 小林信彦, 小平直史, 西條甲一, 武井敦子: アルミニウム製のテーパ溝部に挿入した熱可塑性 CFRP の熱膨張を利用した接合, 平成 29 年度塑性加

工春季講演会, じゅうろくプラザ他, 2017年6月8日～6月10日.

- (3) 小平裕也: CFRTP の熱膨張を利用したアルミニウムとの接合技術, プラスチック成形加工学会第28回年次大会, タワーホール船堀, 2017年6月14日～6月15日.
- (4) 小平裕也, 小林信彦, 小平直史, 西條甲一, 武井敦子, 中山昇: アルミニウム溝部に挿入した熱可塑性 CFRP 厚板の熱膨張を利用した接合, 第68回塑性加工連合講演会, フェニックスプラザ, 2017年11月9日～11月12日.
- (5) 小平裕也, 小林信彦, 小平直史, 西條甲一, 武井敦子, 中山昇: 熱膨張した熱可塑性 CFRP の曲げ特性の評価, 平成30年塑性加工春季講演会, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2018年5月31日～6月2日.
- (6) 小平裕也: CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics) の熱膨張を利用したアルミニウム合金との異種接合技術, 第329回塑性加工シンポジウム, 刈谷市産業振興センター, 2018年9月26日.
- (7) 小平裕也, 小林信彦, 小平直史, 西條甲一, 武井敦子, 中山昇: オートクレーブ成形した熱可塑性 CFRP の熱膨張と強度評価, 第69回塑性加工連合講演会, 熊本大学, 2018年10月27日～10月28日.
- (8) 小平裕也: 熱可塑性 CFRP の熱膨張を利用した金属との接合技術, 技術情報協会セミナー, 技術情報協会, 2019年1月18日.
- (9) 小平裕也, 小林信彦, 小平直史, 武井敦子, 中山昇: オートクレーブ成形した熱可塑性 CFRP とアルミニウム合金の接合, 2019年度塑性加工春季講演会, 同志社大学, 2019年6月7日～6月9日.
- (10) 小平裕也, 小林信彦, 小平直史, 濱 勉, 中山昇: CFRTP の熱膨張を利用した円柱ピンによるアルミニウム板材の接合, 第71回塑性加工連合講演会, web開催, 2020年11月14日～11月15日.

4 解説記事

- (1) 小平裕也: ボルト, 接着剤を使用しない熱可塑性 CFRP の異種接合技術の開発, プラスチック技術, Vol.56, No.9, (2018), pp.65-69.
- (2) 中山昇, 小平裕也: CFRTP とアルミニウムの接合技術, プラスチックエージ, 3月号, (2019), pp34-39.
- (3) 中山昇, 小平裕也: CFRTP の熱膨張を利用したアルミニウム合金との異種接合, 軽金属溶接, Vol. 58, No.4, (2020), pp.121-124.

5 著書 (分担執筆)

- (1) 小平裕也, 中山昇: 熱可塑性 CFRP の熱膨張を利用した金属との接合技術, CFRP/CFRTP の界面制御,成形加工技術と部材応用, (2020), pp.428-435

6 特許

(登録済み)

- (1) 登録番号 特許第 6788782 号 (特願 2016-173131) , 提出日 2016年8月18日

発明の名称 「異種材料の接合方法」

発明者 小平裕也

(公開前)

- (2) 出願番号 特願 2019-170892, 提出日 2019年9月2日

発明の名称 「板状部材同士の接合方法」

発明者 小平裕也

謝辞

本研究の遂行および本論文をまとめるにあたり、信州大学工学部 中山 昇准教授には終始、懇切丁寧なご指導ならびにご助言を賜りました。研究者として未熟な著者に、博士としての考え方や研究に取り組む姿勢をご指導、ご鞭撻を賜りましたこと、ここに深甚なる感謝の意を表します。

本論文の査読をお引き受けいただき、副査として貴重なご指導とご助言を賜りました信州大学 中村正行教授、榊 和彦教授、倪 慶清教授、秋田県立大学 邱 建輝教授に厚く御礼申し上げます。

オートクレーブによる CFRP の成形を、基礎からご教授いただきました株式会社羽生田鉄工所 羽生田豪太氏、羽生田大陸氏、多田 晃氏、松峯拓郎氏に厚く御礼申し上げます。長期にわたり成形技術をご指導いただき、本研究の遂行に不可欠な技術を習得することができました。

本研究の実験に際しまして、材料試験の方法や計測・評価技術のご指導とご協力をいただきました長野県工業技術総合センター 山岸 光氏、長洲慶典氏に厚く御礼申し上げます。本研究内容について有益なご助言をいただいたほか、試験設備等もご協力いただき心より感謝申し上げます。

同じ生産技術研究室の社会人大学院在籍者として、多くのご協力とご助言を賜りました長野工業高等学校 土屋善裕先生、高島産業株式会社 小口拓也氏に厚く御礼申し上げます。生産技術研究室の常前 洋氏、並びに研究室在籍の学生の皆様には、実験のご協力をいただくとともに、月例ミーティングで研究について議論させていただきました。大変感謝いたします。

社会人という立場でありながら、本研究および学位取得の機会を与えていただき、研究と仕事の両立に多大なご支援をいただきました太陽工業株式会社 小平直史氏、三井太郎氏、植松安彦氏、濱 勉氏、武井敦子氏、太陽メカトロニクス株式会社 西條甲一氏

に深く感謝申し上げます。大学院博士課程への進学を全面的に後押ししていただき、研究全般にわたり貴重なご助言、ご指導をいただきました太陽工業株式会社 小林信彦氏に深く感謝申し上げます。

最後に温かく見守り、そして辛抱強く支援してくれた妻と子供たち、家族に感謝の意を表して謝辞といたします。

令和3年 3月

小平 裕也