

# CFRTP の超音波溶着に関する研究

## Research on ultrasonic welding of CFRTP

システム創成学専攻  
096342 鈴木 一弥  
指導教員 高橋 淳教授

Key Words: CFRTP, welding joint, ultrasonic welding, joint efficiency

### 1. 緒言

軽量化ポテンシャルの高い CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) は、現在、航空機や F1、宇宙用途などさまざまな産業分野に適用されているが、そのほとんどがマトリックス樹脂として熱硬化性樹脂を使用している。熱硬化性樹脂は耐熱性や比強度など優れた性能を示す一方で、極めて高価であることや成形に膨大な時間や設備が必要であるといった難点があり、限られた分野でしか適用できなかった。そこで注目されているのがマトリックスとして熱可塑性樹脂を利用する CFRP である。この材料は、CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics) と呼ばれ、低コストや迅速成形の実現ならびに加工性・補修性・リサイクル性の向上が見込まれており、量産車などに適用されることで輸送機器などの燃費向上や性能向上に寄与することが期待されている。

中でも、CFRTP が熱硬化性樹脂による CFRP と最も異なる点は、その加工方法にあると言える。熱硬化性の CFRP は脆性材料であるがために、できるだけ接合部を作らない一体成形がなされており、そのため製造設備が高価で大規模となっていたが、金属よりも遙かに低温で溶着が可能な CFRTP では規格化された棒状・板状の材料から僅かな設備投資で誰でも簡単に構造物が作れる可能性がある。

すなわち、CFRTP が幅広い分野で適用されるようになるためには、強度を保ちながら CFRTP を簡易に接合する技術を確認させることが必要である。接合方法としては、ボルト・ナットやリベットに代表される機械的接合、糊などの接着剤を用いた接合、加熱・溶融による溶接が挙げられる[1]が、本研究では CFRTP の熱可塑性を活用した溶着技術の 1 つである超音波溶着に着目し、その接合効率について検討する。

具体的には、量産車用 CFRTP のマトリックス樹脂として開発が進められている PP(Polypropylene) と CF の一方向材(UD 材)とランダム材についてそれぞれシングルラップ継手、十字継手試験片の接合効率を比較検討することにより、CFRTP における接合の基本特性を明らかにする。さらに、スポット溶着についても同様の検討を行うことで、接合面全体を溶着するよりも容易な方法で接合できる可能性について検討する。

### 2. 超音波溶着の原理[2]

超音波溶着とは、熱可塑性樹脂を超音波振動と加圧力によって瞬時に溶融し、接合する加工技術である。原理を Fig. 1 に示す。発振器によって 20 kHz に増幅された電氣的信号は、振動子で機械的振動エネルギーに変換される。

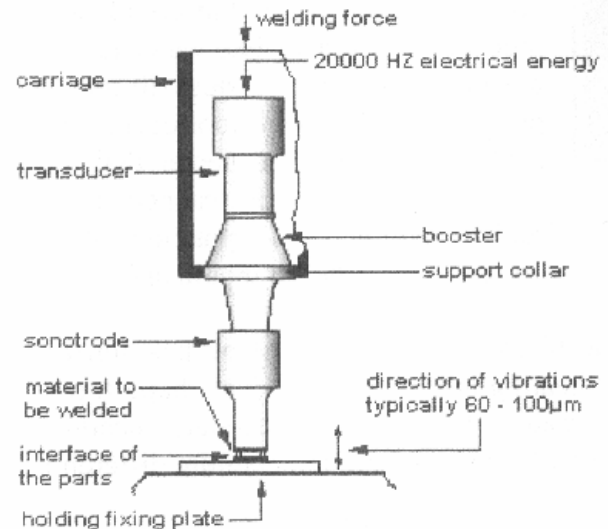


Fig. 1 Principle of ultrasonic welding [3].

機械的振動を被接合体に伝える部分をホーンと呼び、被接合体に接触する面積によって溶着の仕組みが異なる。接合面と同程度以上の大きさであれば被接合体間で摩擦熱が発生する面溶着、接合面より十分小さい面積であればホーンの先端と被接合体の間で摩擦熱が発生するスポット溶着となる。

### 3. 本研究で使用した材料

本研究では、FRP の強化繊維として炭素繊維(CF)を、樹脂として熱可塑性樹脂の中でも汎用性の高いポリプロピレン(PP)を使用した。繊維の方向による違いを検討するために、UD 材とランダム材を使用した。なお、繊維は三菱レイヨン製、樹脂は東洋紡製である。

### 4. 面溶着による接合強度の評価

本研究では、シングルラップ継手の引張試験によりせん断強度を、十字継手の引張試験により剥離強度を測定する。

#### 4.1 シングルラップ継手

UD材は15×100×2 mm, ランダム材は25×100×2 mmの試験片を作成し, それぞれラップ長25 mm, 超音波の発振時間は1.0 secでの溶着を行った. また, 引張試験を行う際にモーメントが発生しないように, 接合後の試験片両端にランダム材を溶着した.

シングルラップ継手は接合部の両端に応力集中が発生するが, (4.1)式より平均せん断強度を求める.

$$\bar{\tau} = \frac{F}{LB} \quad (4.1)$$

ここで, 平均せん断強度 $\bar{\tau}$ , 最大荷重 $F$ , ラップ長 $L$ , 試験片幅 $B$ である.

Fig. 2, Fig. 3に引張試験の結果を示す. 平均を求めると, UD材では21 MPa, ランダム材では17 MPaとなった. また, 接合面の凹凸を顕微鏡で観察した結果をFig. 4, Fig. 5に示すが, UD材のほうが大きく, 一体化したことが強度の差になったと考えられる.

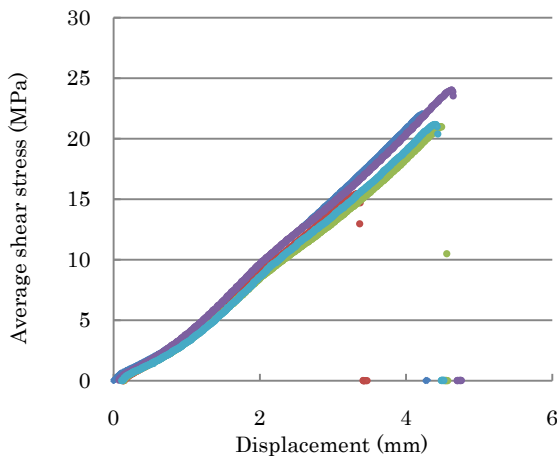


Fig. 2 Relationship between displacement and average shear stress of single lap joint (UD)

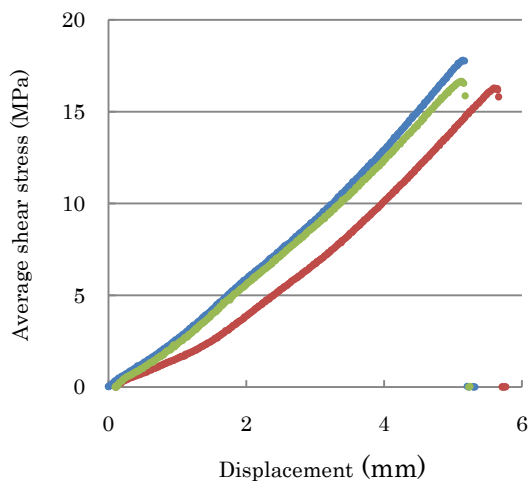


Fig. 3 Relationship between displacement and average shear stress of single lap joint (Random)

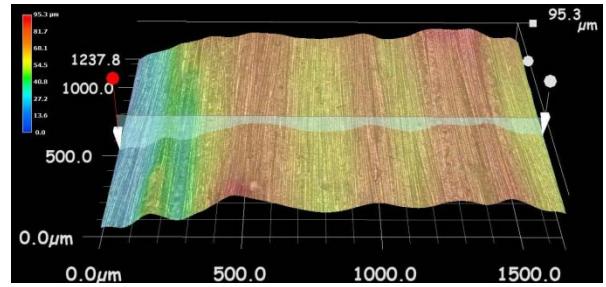


Fig. 4 Joint surface (UD)

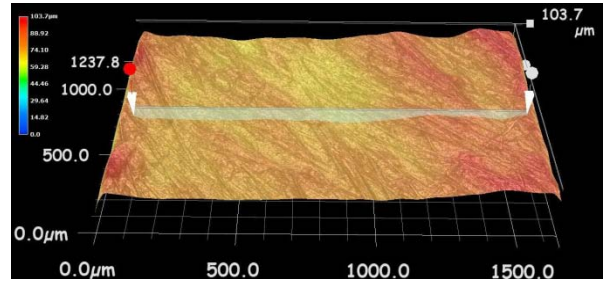


Fig. 5 Joint surface (Random)

#### 4.2 十字継手

シングルラップ継手で用いたものと同じ寸法の試験片を中央で直交させ, 発振時間1.0 secで溶着した.

シングルラップ継手とは異なり, 接合面全体の溶着ができなかったため, 変位と荷重の関係をFig. 6とFig. 7に示す. 実際に溶着された面積にもバラツキがあるため, 最大荷重のバラツキも大きい.

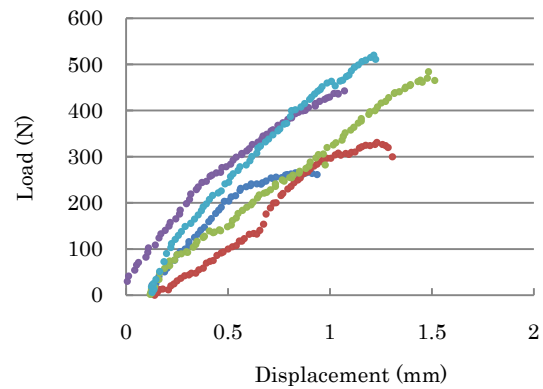


Fig. 6 Relationship between displacement and load of cross joint (UD)

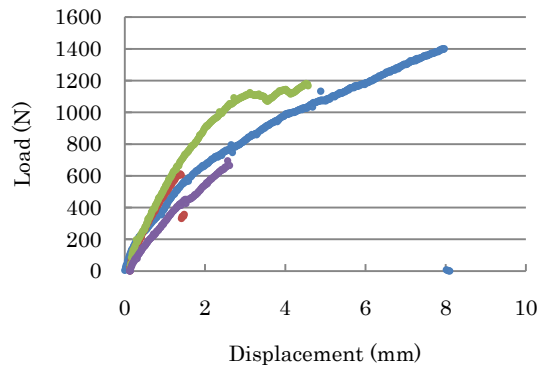


Fig. 7 Relationship between displacement and load of cross joint (Random)

### 4.3 考察

#### 4.3.1 シングルラップ継手

UD 材とランダム材の双方で接合部のほぼ全面が溶着していたため、試験結果に大きなバラツキは見られなかった。また、一体で加熱して溶着させる方法と比較すると樹脂が溶融している時間は短い、平均せん断強度はほぼ同じ値となっていた。このことから、シングルラップ継手において超音波溶着は有効な溶着方法であるといえる。

#### 4.3.2 十字継手

接合面全体を溶着することができなかった。1.0 sec の発振時間であっても溶着部から樹脂の蒸発が原因である煙が発生した試験片があったため、樹脂の蒸発や劣化を懸念して溶着時間を長くする試みは行わなかった。また、接合面を確実に密着させるために試験片を完全に固定することを試みたものの、ホーンに負荷がかかりすぎて安全装置が作動し、発振が 1.0 sec 以下で停止した。そのため、面溶着で十字継手の溶着を行うことは非常に困難であり、十字継手については他の溶着方法について検討する必要があると考えられる。

### 5. スポット溶着による接合強度の評価

スポット溶着は面溶着に比べて設備がポータブルで、かつ量産車の鋼板スポット溶接のように非平面形状部材への適用性が高い。そこで次に、スポット溶着についても、面溶着と同様にシングルラップ継手と十字継手について検討した。ホーンは、先端部の直径が 2 mm と 3 mm のものを用いた。

面溶着では試験片を完全に固定すると安全装置のため発振が停止するのに対し、スポット溶着では溶着面を固定しない状態ではホーンと試験片の間での発熱が起らなかったため、ホーン先端が接触する部分の周辺以外は試験片を完全に固定して溶着を行った。

#### 5.1 シングルラップ継手

面溶着と同じ寸法の試験片を用いて、25 mm のラップ長を確保し、接合面の中央にホーン先端部が接触するようにした。発振時間については、ランダム材は直径 2 mm のホーンで 1.5 sec と 2.5 sec、直径 3 mm のホーンで 2.5 sec と 3.0 sec とし、UD 材については双方のホーンで 2.5 sec とした。

試験結果を Fig. 8 と Fig. 9 に、接合面を Fig. 10 と Fig. 11 に示す。なお、ホーンが貫通している部分は樹脂が存在しないため、その部分を除いた面積を有効溶着面積としている。

#### 5.2 十字継手

面溶着と同じ寸法の試験片を中央で直交させ、接合面の中央にホーン先端部が接触するようにした。発振時間は、UD 材とランダム材のホーン直径 3 mm では 2.5 sec、ランダム材のホーン直径 2 mm では 1.5 sec とした。

試験結果を Fig. 12 と Fig. 13 に示す。有効溶着面積については、シングルラップ継手と同様である。

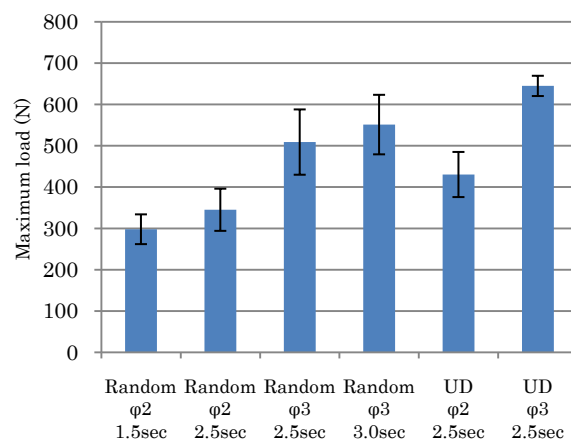


Fig. 8 Maximum load of specimens of single lap joint by spot welding .

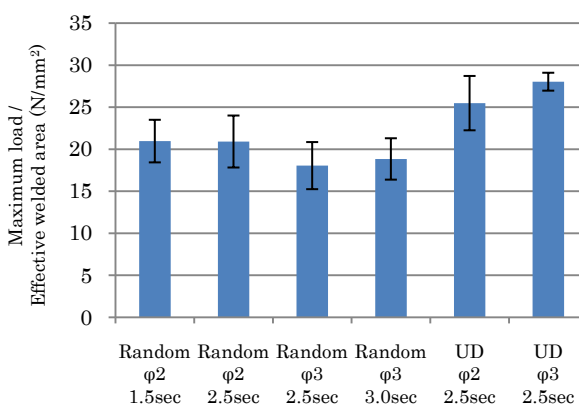
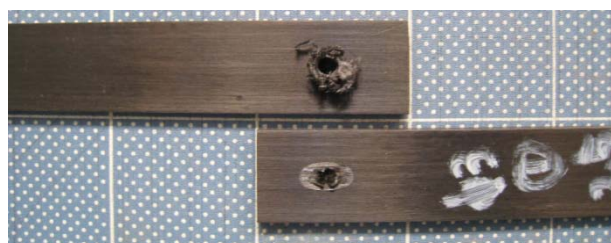


Fig. 9 Comparison of shear strength among the conditions of spot welding.



(a) Oscillation time of 2.5 sec with horn diameter of 2 mm.



(b) Oscillation time of 2.5 sec with horn diameter of 3 mm.

Fig. 10 Joint part of single lap specimens by spot welding (UD).



Fig. 11 Joint part of single lap specimens by spot welding (Random)

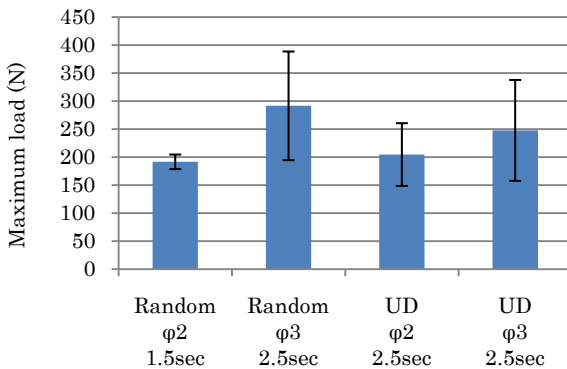


Fig. 10 Maximum load of specimens of cross joint by spot welding.

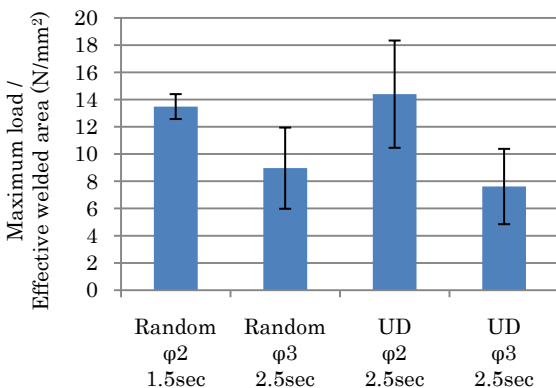


Fig. 11 Comparison of peel strength among the conditions of spot welding.

### 5.3 考察

#### 5.3.1 シングルラップ継手

ホーンの直径が大きいかほど溶着面積が大きくなり、最大荷重は大きくなる。UD 材、ランダム材のそれぞれにおいて、最大荷重に発振時間が与える影響よりもホーンの直径が与える影響のほうが大きいことが分かった。

一方で、ランダム材については、ホーンの直径が大きくなることにより有効溶着面積に対する平均せん断強度が小さくなった。誤差の範囲ととら

える事もできるが、樹脂が溶融していてもホーンからの距離で溶融の程度が異なっている可能性が考えられる。

また、UD 材の接合部は、繊維方向が長辺となった楕円形になっていた。これは、炭素繊維のほう樹脂よりも熱伝導率が高いことに起因していると考えられる。

#### 5.3.2 十字継手

シングルラップ継手と同様に、ホーンの直径が大きくなるほど溶着面積、最大荷重ともに大きくなる。しかし、十字継手の場合は、UD材、ランダム材ともにホーン直径が大きくなることで有効溶着面積に対する剥離強度が小さくなった。

面溶着では接合面の樹脂を完全に溶融することができなかったが、スポット溶着ではシングルラップ継手と同様にホーン周辺部の樹脂を溶融できたという点が大きな違いである。

#### 5.3.3 スポット溶着全般

面溶着における結果と試験片の固定条件が異なるために直接結果を比較することはできないが、スポット溶着であっても樹脂が溶融している部分の強度は面溶着と同等と考えられる。しかし、ホーンが貫通している部分が有効溶着面積を減少させているうえに、今回の試験よりも大きな荷重に対しては応力集中の影響が顕著になる可能性があるため、先端部の大きさや形状等が異なるホーンについても検討していく必要がある。

## 6. 結論

溶着接合はボルト接合で問題となる穴空け加工工程・繊維切断・応力集中等の問題が無く、接着剤接合で問題となる熱膨張係数のミスマッチによる疲労破壊の心配も無い、低コストで優れた手法であり、CFRTP の大きなメリットとなり得る。

本研究では、溶着技術の中でも製造現場での高速な溶着の可能性のある超音波溶着に着目し、せん断強度と剥離強度の観点から接合性能に及ぼす影響因子の検討を行った。その結果、面溶着、スポット溶着ともに熱プレスによる試験片全体の完全な溶着と同等の接合性能を示し、接手法としての有効性が明らかになった。

### 謝辞

本研究は経済産業省－NEDO プロジェクト「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」（平成 20～24 年）の一環として行われたものであり、関係各位に謝意を表します。

### 参考文献

- [1] 佐藤邦彦, 溶接・接合工学概論, 理工学社, 1990
- [2] 日本アレックス株式会社 HP  
<http://www.nalex.co.jp/welder/principle.html>
- [3] H. E. N. Bersee, M. Van Dongen and A. Beukers, "Thermoplastic Composite Technology Demonstrator", CETEX Thermoplastic Composites "From Scratch to Flight", Proceedings of the first CETEX conference, 2006