

次世代自動車・航空機部品の製造に必要な異種材料接合技術の開発（第3報）

- FRP-FRP 接合技術の開発2 -

西垣 康広、仙石 倫章、鈴木 貴行、山田 孝弘

Development of joining dissimilar materials for production of next generation vehicle parts and aircraft parts (III)
- Development of joining technology of FRP and FRP (II) -

Yasuhiro Nishigaki, Tomoaki Sengoku, Takayuki Suzuki and Takahiro Yamada

本研究ではFRPを効率良く、強固に接合する技術を開発することを目的とし、超音波溶着による接合技術、及び他の接合技術との複合化による接合技術を確立する。

超音波溶着技術により炭素繊維強化プラスチック（CFRTP）を接合する基礎研究として、昨年度はマトリックス樹脂が結晶性樹脂であるナイロン66（PA66）のCFRTP（CF/PA66）の同種材を溶着する条件を検討したが、本年度は非結晶性樹脂であるポリカーボネート（PC）のCFRTP（CF/PC）の同種材を溶着する条件を検討し、引張せん断試験により溶着強度を評価した。その結果、CF/PCの同種材の超音波溶着による溶着強度は、ホーンの設定圧力が0.5MPa、溶着時間が2秒と2.5秒において良好な溶着が可能であることがわかった。

1. はじめに

近年、CFRPやGFRP等のFRPは軽量化部材として、金属材料が使用されている部品からの代替利用が検討されている。特にCFRPは、軽量、かつ、高強度であるという優れた特性を有し、次世代自動車・航空機産業を中心に利用拡大に向けた製品開発が進められている。

これまで本研究所では、CFRTPの製品化に向けた支援を目的とし、「ぎふ成長産業強化プロジェクト」においてCFRTPの成形加工技術を確立してきたり、CFRTPの製品化においては、次の段階として、成形部品を他の部品（部材）と接合する技術が必要となっている。現在、FRP部品を他の部品（例えば金属部品）と接合するには、穴をあけてボルトで固定する「機械的締結」が中心となっている。しかし、穴あけ加工時にFRP部品やFRP中の炭素繊維を破損する危険性があるとともに工程数が多くなることが課題である。そこで、FRPの製品化に向けて、FRPに適した接合技術の確立が必要不可欠となっている^{2,3)}。

本研究では、FRPを効率良く強固に接合する技術を開発することを目的とし、超音波溶着による接合技術、及び他の接合技術との複合化による接合技術を確立する。

超音波溶着による接合技術の基礎研究として、昨年度はマトリックス樹脂が結晶性樹脂であるナイロン66のCFRTP（CF/PA66）を使用して、同種のCFRTP板材の溶着条件を検討し、引張せん断試験により溶着強度を評価した⁴⁾。

本年度も昨年度と同様の目的において、マトリックス樹脂が非結晶性樹脂であるポリカーボネートのCFRTP（CF/PC）の同種材を溶着する条件を検討し、引張せん断試験により溶着強度を評価したので、その結果について報告する。

2. 実験

2.1 試験片

試験材料は、炭素繊維クロス材とマトリックス樹脂がポリカーボネートの複合材料である厚さ1.8mmのCF/PC（Tencate製）の板材をダイヤモンドソーにより100mm×25mmに切り出した。なお、試験片の切り出し角度は繊維の織目方向に対し90°とした。

2.2 超音波溶着接合

超音波溶着によるCF/PCの接合は、超音波溶着機（精舎電子工業（株）製DΣG2210）を用いて、所定の溶着条件において溶着した。溶着条件は、振幅は30μm、ホーンの設定圧力を0.1MPa、0.5MPaとし、溶着時間は1秒、1.5秒、2秒、2.5秒、3秒、溶着後のホールド時間は10秒とした。なお、溶着時間は超音波を加振した時間とし、溶着エネルギーは溶着時間中に試験片に与えたエネルギーとした。

2.3 温度履歴測定

超音波溶着における基礎的な実験条件を検討するために、温度履歴測定を行った。温度履歴測定用試験片は、図1に示すように100mm×25mmのCF/PCの端部から25mm重ね、下側のCF/PCの重なり部分の中心付近にφ0.1mmの熱電対を埋め込み、データロガーを用いて各溶着条件における試験片の温度変化を測定した。

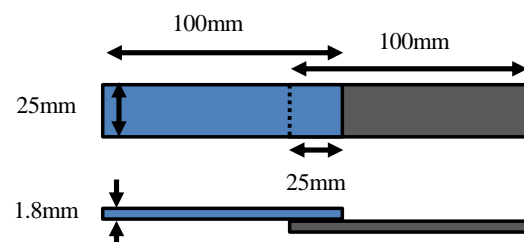


図1 超音波溶着により溶着した試験片

2. 4 引張せん断強度測定

超音波溶着による CF/PC の同種材の溶着強度を把握するために、シングルラップ継手試験を行った。CF/PC の溶着強度測定用試験片は、温度履歴測定用試験片と同様の溶着条件で作製した。その後、万能材料試験機（株）島津製作所製 AG-IS 100kN）により引張せん断試験を行い、溶着部が破壊する最大荷重を溶着強度とした。なお、試験片のチャック部分の厚みが一定となるように補助板として厚さ 1.8mm の 25mm×25mm の CF/PC の板材を張り付けて引張試験を行った。また、引張試験後の CF/PC の破壊した溶着面を観察することにより、マトリックス樹脂の熔融状態を評価した。

3. 結果及び考察

3. 1 温度履歴測定

ホーンの設定圧力を 0.1MPa と 0.5MPa とし、溶着時間が 3 秒の CF/PC の同種材を超音波溶着した温度履歴を図 2 に示す。図 2 より、ホーンの設定圧力が 0.1 MPa では、超音波加振開始後約 2 秒で 500°C 付近まで急激に界面温度が上昇し、その後徐々に低下し、加振終了後は急激に低下することがわかった。ホーンの設定圧力が 0.5MPa においても、界面温度は約 1 秒でピーク温度まで上昇し、その後はホーンの設定圧力が 0.1MPa と同様の温度履歴であり、溶着時間が 1 秒から 2.5 秒までの温度履歴はいずれの設定圧力においても、溶着時間が 3 秒の温度履歴と同様の傾向であった。

また、いずれの溶着時間においても超音波の加振開始直後からピーク温度までの界面温度は、ホーンの設定圧力が 0.5 MPa の方が速かった。これはホーンの設定圧力が高い方が超音波振動が伝わりやすいため、溶着エネルギーが大きくなったと考えられる。このため、加振開始直後の界面温度の上昇が速く、ピーク温度も高くなったと考えられる。

3. 2 溶着強度評価

各溶着条件で超音波溶着した同種材の CF/PC の溶着時間と溶着強度の関係を図 3 に示す。図 3 より、ホーンの設定圧力が 0.1MPa では、溶着強度は溶着時間に比例して高くなった。一方、0.5MPa では溶着時間が 2.5 秒までは溶着強度は溶着時間に比例して高くなったが、3 秒では低下した。また、溶着時間が 2.5 秒まではホーンの設定圧力が 0.5MPa の方が溶着強度は高くなり、溶着強度のバラつきについても小さいことがわかった。これは、ホーンの設定圧力が 0.5MPa の方が界面温度は融点以上である時間が長く、界面の樹脂が熔融している量も多いため、溶着強度が高くなったと考えられる。

次に各溶着条件で超音波溶着した同種材の CF/PC の溶着時間と溶着エネルギーの関係を図 4 に示す。図 4 より、いずれの設定圧力においても溶着時間が長くなると溶着エネルギーは高くなり、比例関係があることがわかった。また、いずれの溶着時間においてもホーンの設定

圧力が 0.5MPa の方が、溶着エネルギーが高くなった。これも溶着時間が長くなる程融点以上である時間が長くなるため、超音波振動による熱量も多くなることから溶着エネルギーが高くなったと考えられる。

次に各溶着条件で超音波溶着した同種材の CF/PC の溶着エネルギーと溶着強度の関係を図 5 に示す。いずれの設定圧力においても、溶着エネルギーが高くなると溶着強度も高くなる傾向が見られた。溶着エネルギーが 2000J 以下では、溶着強度のバラつきが大きく、溶着エネルギーが 2000J 以上では、そのバラつきは小さくなった。

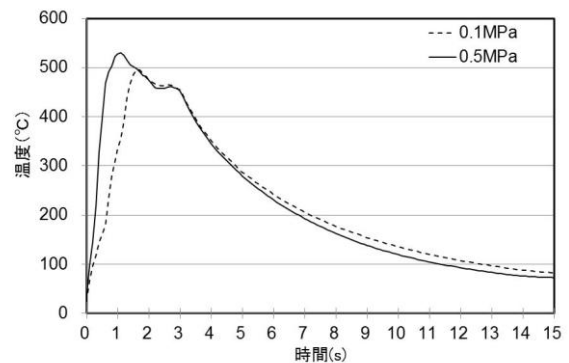


図 2 温度履歴

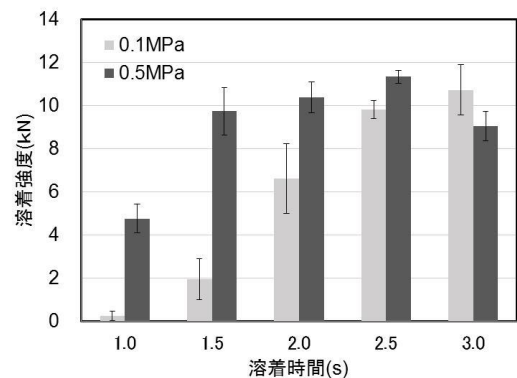


図 3 溶着時間と溶着強度の関係

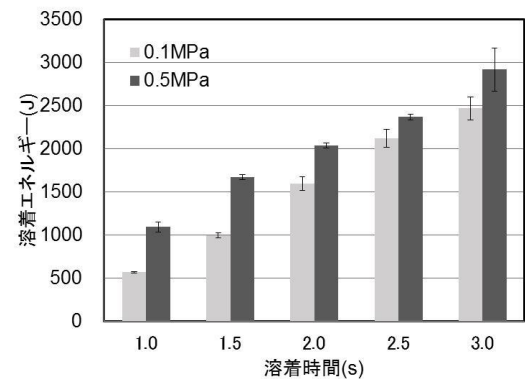


図 4 溶着時間と溶着エネルギーの関係

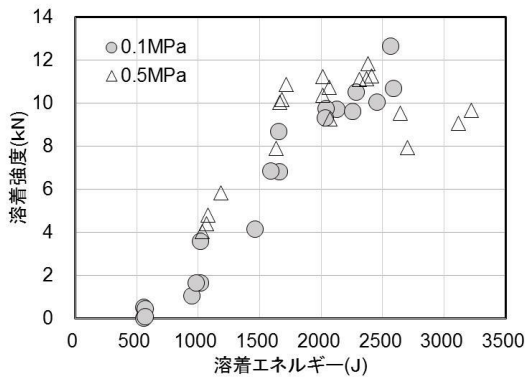


図5 溶着エネルギーと溶着強度の関係

た。更に溶着エネルギーが 2500J 以上では溶着強度は低下し、そのバラつきは大きくなった。溶着強度のバラつきは、設定圧力が 0.1MPa において顕著であった。これはホーンの設定圧力が低い方が、溶着エネルギーが小さく、界面でのマトリックス樹脂の熔融量が少ないためであると考えられる。

溶着エネルギーが 2000J 以下では、マトリックス樹脂の PC を熔融するエネルギーとして十分なエネルギーではないため、PC が 100%熔融しておらず、これが原因で溶着強度が低く、溶着強度のバラつきが大きくなったと考えられる。溶着エネルギーが 2000J 以上では、PC が熔融するエネルギーが十分であるため、溶着強度は高く、溶着強度のバラつきも小さくなったと考えられる。

3.3 破断面観察

ホーンの設定圧力が 0.1MPa と 0.5MPa で作製した試験片の引張試験後の試験片の破断面をそれぞれ図 6-a)、-c)、-e)、-g)と図 6-b)、-d)、-f)、-h)に示す。図 6-a)より、溶着時間が 1.5 秒では、試験片の端の一部のみが熔融しており、図 6-c)と図 6-e)より、溶着時間が 2 秒、2.5 秒と長くなるに従い、試験片の端部から熔融した溶着面積は増加するが、試験片の中心部付近に存在する未溶着部分は減少し、図 6-g)より、溶着時間が 3.0 秒では、界面全面が熔融していることがわかった。

次に図 6-b)より、溶着時間が 1 秒では試験片が重なる端部の周囲が熔融しており、図 6-d)から、溶着時間が 1.5 秒では図 6-e)と同様に中心部付近に未溶着部分が存在するが、それ以外は熔融していた。図 6-f)と図 6-h)より、溶着時間が 2 秒と 2.5 秒では、界面全面が熔融していることがわかった。このことからいずれの設定圧力においても、溶着時間が長くなると CF/PC の界面の熔融面積は増加することから溶着時間と溶着面積は密接な関係があると考えられる。また、図 5 より設定圧力が高い方が、高いエネルギーが供給できるため、短い溶着時間で溶着ができると考えられる。

最後に図 6-g)と図 6-h)より、界面が完全に熔融するための溶着時間はそれぞれ 0.1MPa では 3 秒、0.5MPa で

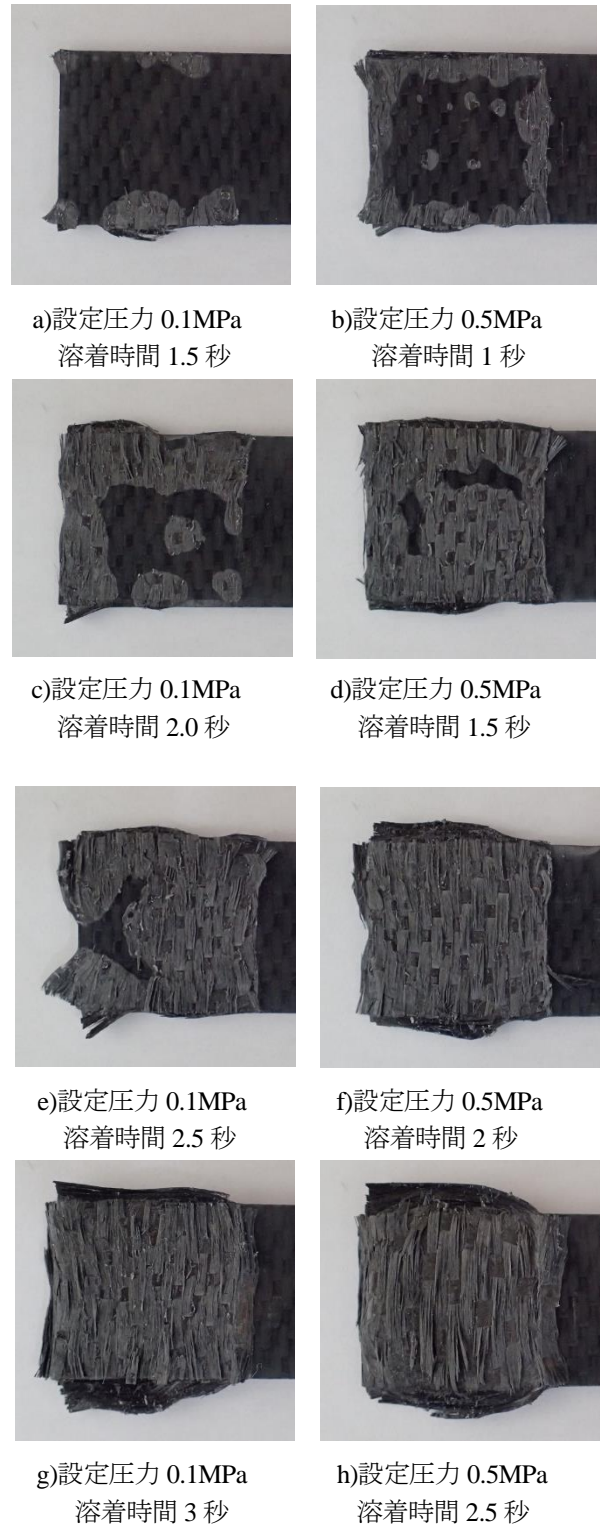


図6 引張せん断試験後の破断面

は 2.5 秒であり、図 4 からこの時の溶着エネルギーは約 2500J であった。また、図 5 から 2500J 以上の溶着エネルギーを CF/PC に与えると溶着強度が低下することから 2500J 以上のエネルギーは余剰なエネルギーであると考えられる。これは図 6-h)より、はみ出した CF/PC 量が多くなっていることから推察できる。

以上のことから同種材の CF/PC を超音波溶着した時

の溶着エネルギーが約 2500J の時に溶着強度が最大になる。このため、安定した溶着強度を求めるためには、溶着エネルギーは 2000J 以上が望ましく、2500J で十分な溶着強度が発現すると考えられる。

4. まとめ

同種材の CF/PC を超音波溶着する溶着条件を検討し、次の結果を得た。

- 1) 温度履歴から、CF/PC を超音波溶着すると設定圧力に関係なく、界面温度は急激に上昇し、その後、温度が徐々に低下し、加振が終了すると急激に温度が下降することがわかった。ホーンの設定圧力は 0.5MPa の方が 0.1MPa よりも初期の温度上昇は速かった。
- 2) ホーンの設定圧力が 0.1MPa では、溶着強度は溶着時間に比例し、0.5MPa では溶着時間が 2.5 秒までの溶着強度は溶着時間に比例したが、3 秒では低下した。また、溶着強度のバラつきは、設定圧力が 0.1MPa ではどの溶着時間においても 0.5MPa のそれよりも大きかった。
- 3) いずれの設定圧力においても、溶着時間が長くなると溶着エネルギーは高くなり、比例関係があることがわかった。同じ溶着時間で比べるとホーンの設定圧力が 0.5MPa の方が、0.1MPa よりも高い溶着エネルギーを付与できることがわかった。

- 4) いずれの設定圧力においても、溶着エネルギーが高くなると溶着強度も高くなる傾向があり、溶着エネルギーが 2500J で十分な溶着強度が得られると考えられる。
- 5) 引張試験後の破断面の溶融面積と溶着強度には密接な関係があり、2000J 以上の溶着エネルギーにおいて CF/PC 界面は十分に溶融し、溶着強度が高くなることがわかった。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、共同研究先の岐阜大学工学部 仲井教授に、ご指導・ご助言をいただきましたことに深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 道家ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.4, pp45-48, 2016
- 2) 原賀康介・佐藤千明, 自動車軽量化のための接着接合入門, 日刊工業新聞社, 2015
- 3) 中田一博, 異種材料接合, pp95-120, 日経 BP 社, 2014
- 4) 道家ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.5, pp44-47, 2017