

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5報）

－ FRP-FRP 接合技術の開発3 －

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 (V) - Development of joining technology of FRP and FRP (III) -

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熱可塑性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、これまでに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）と非結晶性樹脂であるポリカーボネート（PC）のCFRTP（CF/PC）を用いて同種材接合の溶着条件を検討してきた。

本年度はマトリックス樹脂が結晶性樹脂であるナイロン6（PA6）のCFRTP（CF/PA6）と非結晶性樹脂であるポリカーボネートのCFRTP（CF/PC）を用いて、異種材接合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。その結果、ホーンの設定圧力が0.1MPa、溶着時間が2秒、振幅が30 μ mの条件において、溶着強度は約7MPaであった。

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¹⁾。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内部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、これまでに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）と非結晶性樹脂であるポリカーボネートのCFRTP（CF/PC）を用いて、同種材接合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てきた^{4,5)}。

本年度は、マトリックス樹脂が結晶性樹脂であるナイロン6のCFRTP（CF/PA6）と非結晶性樹脂であるポ

リカーボネートのCFRTP（CF/PC）を用いて異種材接合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て知見を得たので報告する。

2. 実験

2.1 試験片

試験片は、炭素繊維とマトリックス樹脂がナイロン6とポリカーボネートの複合材料であるCF/PA6(Bond-Laminates 製 TEPEX 202)とCF/PC(TENCATE 製 TC925FST)を用いた。試験片は厚さがそれぞれ2mm、1.8mmのCFRTP板材を100mm \times 25mmに切り出した。

2.2 超音波溶着接合

超音波溶着による同種材接合（以後接合の材料組合せをCF/PC-CF/PC、CF/PA6-CF/PA6と表記）と異種材接合（以後接合の材料組合せをCF/PC-CF/PA6と表記）は、超音波溶着機（精電舎電子工業（株）製 D Σ G2210）を用いて所定の溶着条件において行った。溶着条件は、振幅は30 μ m、ホーンの設定圧力は0.1MPa、0.3MPaとし、溶着時間は1秒、2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、前報⁵⁾と同様に100mm \times 25mmの試験片の端部から25mm重ね、下側の試験片の重なり部分の中心付近に ϕ 0.1mm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。

2. 4 引張せん断強度測定

超音波溶着による CF/PC-CF/PC、CF/PA6-CF/PA6 と CF/PC-CF/PA6 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。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(25mm×25mm)の板材を張り付けて引張試験を行った。また、引張試験後の試験片の破断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

ホーンの設定圧力を 0.1MPa と 0.3MPa、溶着時間を 5 秒とし、CF/PC-CF/PC、CF/PA6-CF/PA6 と CF/PC-CF/PA6 を超音波溶着した時の温度履歴をそれぞれ図 1、図 2 に示す。

図 1 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 1 秒で全ての接合品の界面温度が 400°C から 450°C 付近まで急激に上昇し、加振中はそれぞれのマトリックス樹脂の融点やガラス点移転以上の温度を保持し、加振終了後は急激に降下することが分かった。

図 2 より、ホーンの設定圧力が 0.3MPa では、ホーンの設定圧力が 0.1MPa の温度履歴と同様に全ての接合品の界面温度は超音波加振開始後約 1 秒で 430°C から 500°C まで上昇し、加振中は温度が一定もしくは徐々に低下し、加振終了後は急激に温度が低下することが分かった。ホーンの設定圧力が高い方が振動エネルギーが大きくなり、界面温度が高くなったと考えられる。

3. 2 溶着強度評価

ホーンの設定圧力を 0.1MPa と 0.3MPa として超音波溶着した CF/PC-CF/PC、CF/PA6-CF/PA6 と CF/PC-CF/PA6 の溶着時間と溶着強度の関係をそれぞれ図 3、図 4 に示す。

図 3 より、ホーンの設定圧力が 0.1MPa では、CF/PC-CF/PC の溶着強度は溶着時間に比例して高くなったが、CF/PA6-CF/PA6 と CF/PC-CF/PA6 の溶着強度は溶着時間と比例せず、溶着時間が 2 秒、3 秒では同じ又は多少低下することが分かった。

次に図 4 より、ホーンの設定圧力が 0.3MPa では CF/PC-CF/PC、CF/PA6-CF/PA6 と CF/PC-CF/PA6 の溶着強度は、ホーンの設定圧力が 0.1MPa における溶着強度と異なっており、CF/PA6-CF/PA6 の溶着強度は、溶着時間が 1 秒で最大となり、溶着時間が長くなると溶着強度は低下し、CF/PC-CF/PC と CF/PC-CF/PA6 の溶着強度は溶着時間が 2 秒において最大となり、3 秒では低下することが分かった。それぞれの試験片の溶着強度はいずれの溶着

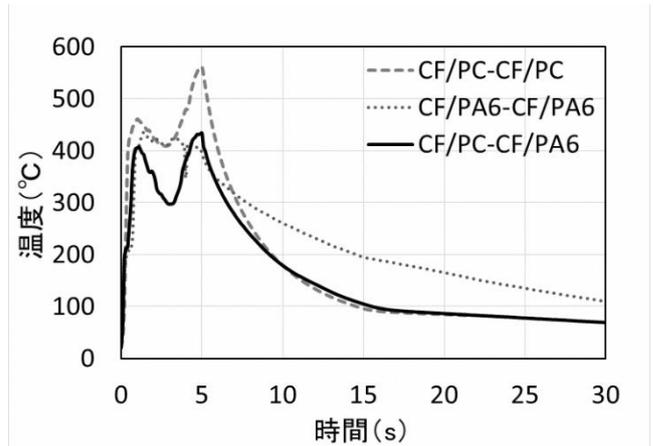


図 1 CF/PC-CF/PC、CF/PA6-CF/PA6 と CF/PC-CF/PA6 の温度履歴（ホーンの設定圧力：0.1MPa）

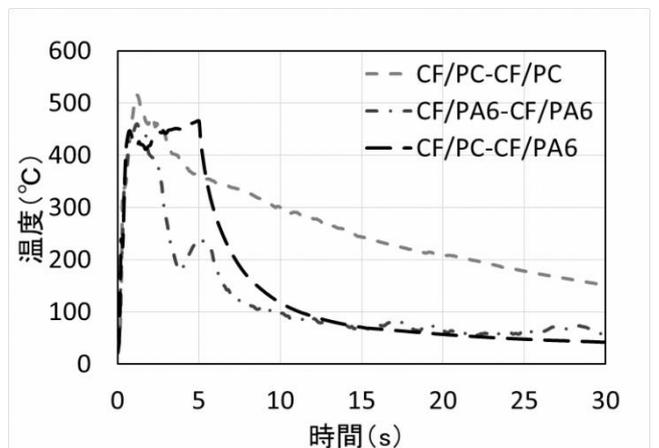


図 2 CF/PC-CF/PC、CF/PA6-CF/PA6 と CF/PC-CF/PA6 の温度履歴（ホーンの設定圧力：0.3MPa）

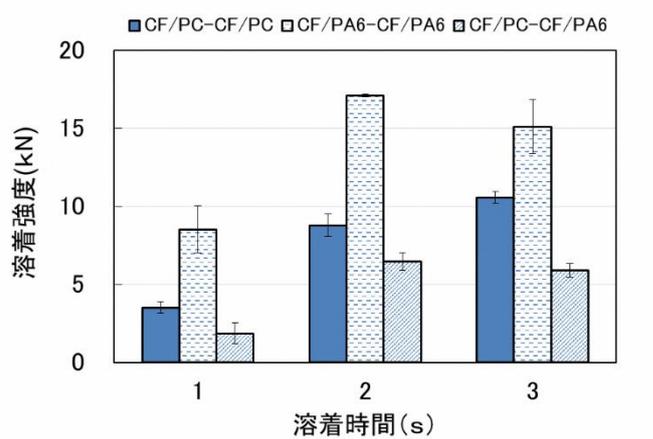


図 3 CF/PC-CF/PC、CF/PA6-CF/PA6 と CF/PC-CF/PA6 の溶着時間と溶着強度（ホーンの設定圧力：0.1MPa）

時間においても CF/PA6-CF/PA6 > CF/PC-CF/PC > CF/PC-CF/PA6 であった。これはマトリックス樹脂の強度 (PA6 > PC) とマトリックス樹脂の相溶性 (同種材 > 異種材) が影響していると考えられる。

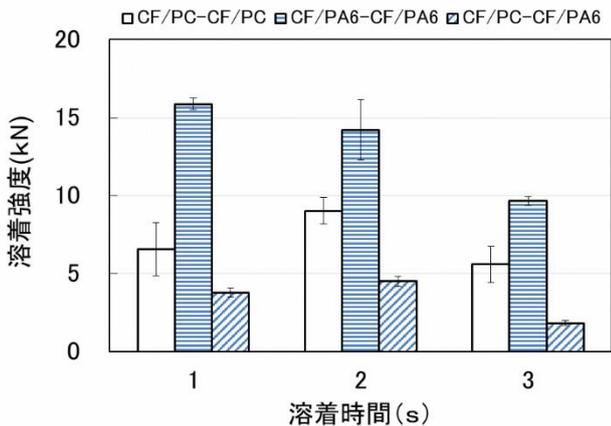


図4 CF/PC-CF/PC、CF/PA6-CF/PA6 と CF/PC-CF/PA6 の溶着時間と溶着強度 (ホーンの設定圧力 : 0.3MPa)

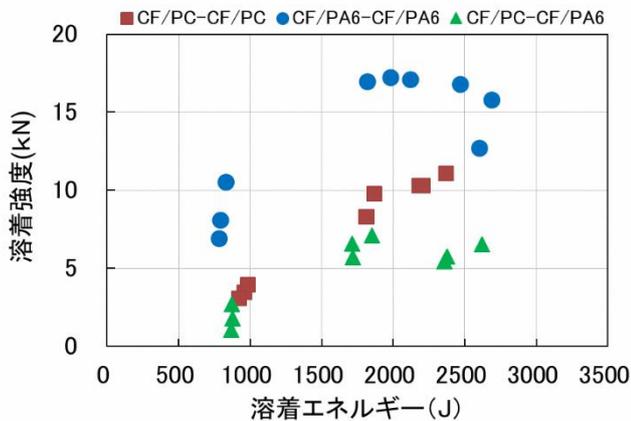


図5 CF/PC-CF/PC、CF/PA6-CF/PA6 と CF/PC-CF/PA6 の溶着エネルギーと溶着強度 (ホーンの設定圧力 : 0.1MPa)

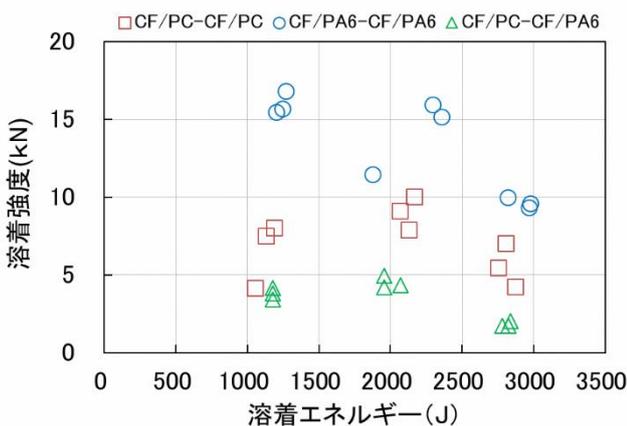


図6 CF/PC-CF/PC、CF/PA6-CF/PA6 と CF/PC-CF/PA6 の溶着エネルギーと溶着強度 (ホーンの設定圧力 : 0.3MPa)

次にホーンの設定圧力が0.1MPaと0.3MPaにおいて超音波溶着したCF/PC-CF/PC、CF/PA6-CF/PA6とCF/PC-CF/PA6の溶着エネルギーと溶着強度の関係をそれぞれ

図5、図6に示す。

図5より、CF/PA6-CF/PA6の溶着強度は、溶着エネルギーが約2500Jまでは比例関係があり高くなったが、2500J以上では若干低下した。一方、CF/PC-CF/PCの溶着強度は溶着エネルギーに比例して高くなり、CF/PC-CF/PA6の溶着強度は溶着エネルギーが1700J以上では、ほぼ同じ溶着強度となることが分かった。

図6より、全ての接合品において溶着エネルギーが約2300Jまでは溶着強度の低下は見られなかったが、2300J以上では溶着強度が低下することが分かった。

図5、図6よりホーンの設定圧力に応じて溶着強度が最大となる溶着エネルギーの最適値が存在し、それ以上の溶着エネルギーでは溶着強度が低下するため、最適値以上の溶着エネルギーは余剰なエネルギーであると考えられる。

3.3 破断面観察

ホーンの設定圧力が0.1MPaと0.3MPaにおいて溶着時間が1秒、2秒、3秒で作製したCF/PC-CF/PA6の引張試験後の破断面をそれぞれ図7-a)、-c)、-e)と図7-b)、-d)、-f)に示す。

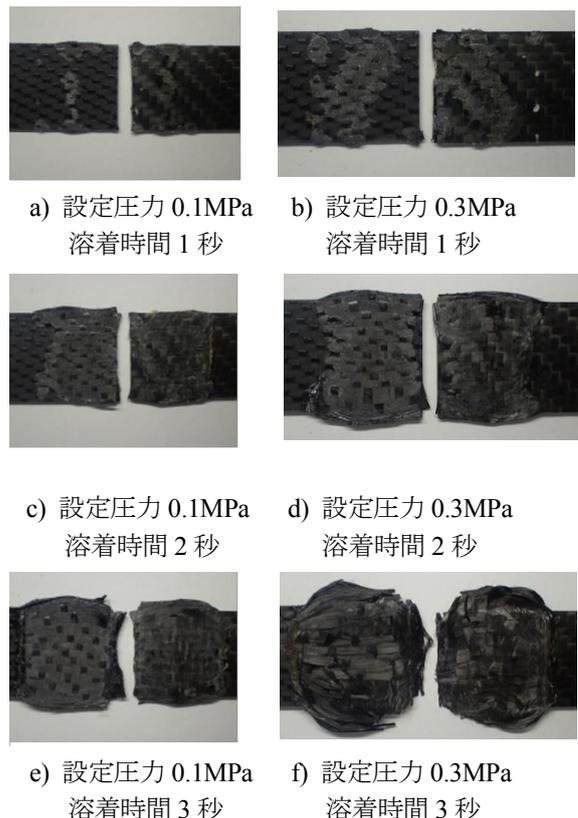


図7 CF/PC-CF/PA6の引張試験後の破断面

図7-a)より、CF/PCとCF/PA6のどちらの破断面においても界面は一部だけが溶融しており、図7-c)より、溶着時間が2秒では重ね合わせた部分はほぼ全面が溶融しており、図7-e)より、溶着時間が3秒では重ね合わせた全面が溶融し、炭素繊維が多少はみ出していることが分

かった。これは図1の温度履歴から超音波の加振直後から界面温度は融点、ガラス転移点以上の温度であるため、溶着時間が長くなると界面の熔融面積が増加すると考えられる。また、図5の溶着エネルギーと溶着強度の関係から溶着時間が3秒では溶着エネルギーが余剰であると考えられるため、炭素繊維もはみ出したと考えられる。

次にホーンの設定圧力が0.3MPaにおいて、図7-b)より、溶着時間が1秒では重ね合わせた部分の約半分が熔融し、図7-d)より、溶着時間が2秒では重ね合わせた部分のほぼ全面が熔融しており、図7-f)より溶着時間が3秒では重ね合わせた部分が全面熔融したことに加え、炭素繊維が乱れたことが分かった。これも図2の温度履歴と図6の溶着エネルギーと溶着強度の関係からホーンの設定圧力が0.1MPaと同様の傾向が見られた。ホーンの設定圧力が0.3MPaでは、ホーンの設定圧力が0.1MPaにおける加振直後の界面温度より高く、同じ溶着時間でも溶着エネルギーが高いことが原因であると考えられる。

また、CF/PC-CF/PCとCF/PA6-CF/PA6の破断面は、CF/PC-CF/PA6の破断面と同様な傾向が見られた。

4. まとめ

超音波溶着によりCF/PCとCF/PA6の同種材接合と異種材接合の溶着条件を検討し、次の結果を得た。

- 1) 温度履歴から、いずれのホーンの設定圧力においても、超音波加振開始後から接合品の界面温度は400℃から500℃付近まで急激に上昇し、加振中はそれぞれのマトリックス樹脂の融点やガラス転移点以上の温度を保持し、加振終了後は急激に降下した。
- 2) 試験片の溶着強度は、ホーンの設定圧力と溶着時間により決まるが、いずれのホーンの設定圧力及び溶

着時間においてもCF/PA6-CF/PA6>CF/PC-CF/PC>CF/PC-CF/PA6であった。これはマトリックス樹脂の強度(PA6>PC)とマトリックス樹脂の相溶性(同種材>異種材)が影響していると考えられる。

- 3) 溶着エネルギーと溶着強度の関係から、ホーンの設定圧力に応じて溶着強度が最大となる溶着エネルギーの最適値が存在し、それ以上の溶着エネルギーでは溶着強度が低下するため、最適値以上の溶着エネルギーは余剰なエネルギーであると考えられる。
- 4) いずれの試験片においても引張試験後の破断面の熔融面積と溶着強度には密接な関係があり、溶着時間が長くなると熔融面積は増加するだけでなく、炭素繊維ははみ出し、炭素繊維が乱れてくることが分かった。

【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
- 5) 西垣ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.6, pp45-48, 2018