

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1報）

－ FRP-FRP 接合技術の開発 －
道家 康雄、仙石 倫章、萱岡 誠

Development of joining dissimilar materials for production of next generation vehicle parts and aircraft parts. (I) Development of joining technology of FRP and FRP Yasuo Doke, Tomoaki Sengoku and Makoto Kayaoka

自動車・航空機等の輸送機器の軽量化部材として、金属材料の代わりにFRP（繊維強化プラスチック）の利用が進められている。これまで「ぎふ成長産業強化プロジェクト」においてCFRTP（熱可塑性炭素繊維強化プラスチック）の成形技術を確立したが、製品化に向けた次のステップとして、同一素材や異種材料との接合技術が重要な開発課題となっている。そこで、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技術を確立する。

本年度は超音波溶着技術の基礎として、同種のCFRTP（マトリックス樹脂：PA66）を溶着する条件を検討し、引張せん断試験により接合強度を評価した。超音波溶着の設定条件が設定圧力：0.1MPa、振動時間：3、4、5（秒）において、良好な溶着が可能であった。

1. はじめに

近年、CFRPやGFRP等のFRPは軽量化部材として、金属部品からの代替利用が検討されている。特に、CFRPは軽量で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。CFRTPの製品化のためには、更に次の段階として、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。しかしながら、穴あけ加工時にFRP部品や中の炭素繊維を破損する危険性があるとともに、工程数が多いという課題がある。そこで、FRP製品の実用化に向けて、FRPに適した接合技術の確立が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技術を確立する。

本年度は、超音波溶着技術の基礎研究として、同種のCFRTP板材を溶着する条件を検討し、引張せん断試験により接合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PA66の複合材料であるCFRTP（Bond-Laminates製TEPEX dynalite201、以下「CF/PA66」と表記）の板材を使用した。試験片は、ダイヤモンドソーにより板材（厚さ2mm）から25mm

×25mmと100mm×25mmに切り出し、それぞれ、温度履歴測定用試験片と接合強度評価用試験片とした。なお、試験片の切り出し角度は繊維の織目方向に対し0°とした。

2.2 超音波溶着機

本報告における実験では、超音波溶着機として精電舎電子工業（株）製DΣG2210（図1）を用いた。また、本装置のメーカーと相談の上、実験に適したホーン及び試験片固定治具を設計・作製した。



図1 超音波溶着機（全体像）

2.3 温度履歴測定

超音波溶着における基礎的な条件を検討するために、超音波溶着時における材料温度の変化を測定した。作製したホーンと治具を用いた温度履歴測定の実験風景を図2に示す。

25mm角CF/PA66を2枚重ね、その間に熱電対を挟んで試験片とした（図3）。熱電対をデータロガーに接続することにより温度履歴を測定した。なお、溶着条件は設定圧力を0.1、0.3、0.5（MPa）、振動時間を1、2、

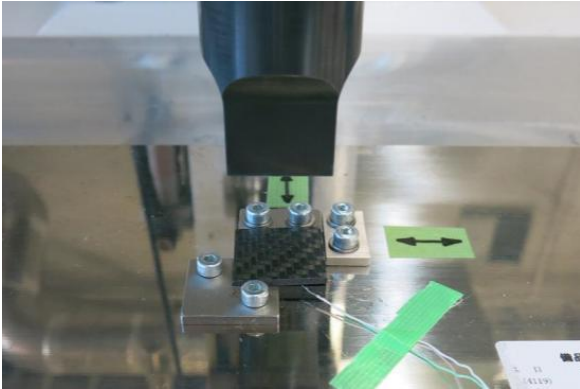


図2 温度履歴測定実験風景（溶着部）

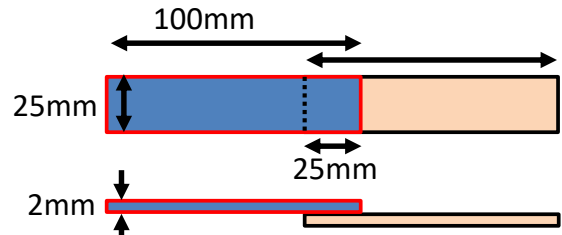


図5 接合強度測定用試験片

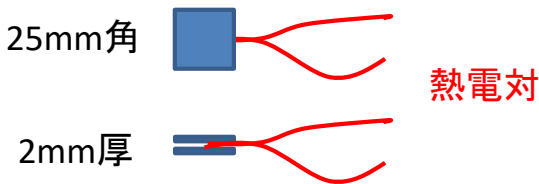


図3 温度履歴測定用試験片

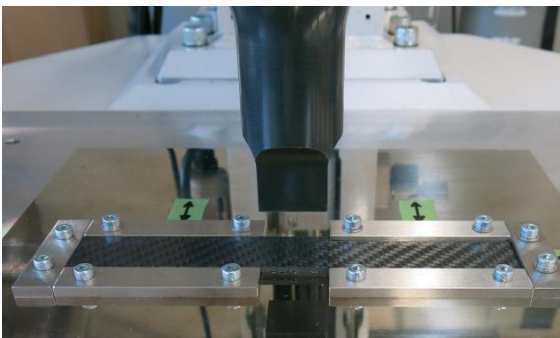


図4 超音波溶着実験風景（溶着部）

3、4、5（秒）とした。

2.4 超音波溶着接合

超音波溶着接合強度測定用の試験片を作製するために、作製したホーンと治具を用いて超音波溶着実験を行った（図4）。超音波溶着条件は、温度履歴測定と同様に、設定圧力を 0.1、0.3、0.5（MPa）、振動時間を 1、2、3、4、5（秒）とした。

2.5 引張せん断強度測定

超音波溶着で作製した試験片（図5）を万能材料試験機（株）島津製作所製 AG-IS 100kN）により引張せん断試験を行い、接合部が破壊する最大荷重を比較することで接合強度を評価した。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 2mm 厚のアルミ板を張り付けて実験を行った。また、引張試験後に

破壊した接合面を観察することにより、マトリックス樹脂の熔融状況を評価した。

2.6 分子量測定

超音波溶着によるマトリックス樹脂の分子量変化を検討するため、ゲルパーミエーションクロマトグラフ（GPC）測定を行った。未処理の CF/PA66 表面樹脂と超音波溶着（設定圧力 0.1MPa、振動時間 5 秒）後の溶着面樹脂を削り取り、測定試料とした。測定装置は、昭光サイエンティフィック（株）製 GPC-104 型を用いた。測定カラムは昭和電工（株）製 Shodex GPC LF-404 を使用し、溶離液にはヘキサフルオロイソプロパノール（添加剤 5mmol/L トリフルオロ酢酸ナトリウム）を用いた。標準物質として、ポリメチルメタクリレートを使用した。

3. 結果及び考察

3.1 温度履歴測定

超音波溶着の各条件における温度履歴測定結果を図6に示す。設定圧力が 0.1、0.3、0.5（MPa）の各結果から、振動時間が長いほど温度が上昇する傾向があることがわかった。また、振動時間中は、温度が上昇、または、高温を維持したが、振動が止まると温度が降下した。特に、振動時間が短い場合（1 秒）では、急激な降温が観察された。この急激な降温は、温度上昇している部分が少なく、材料全体の熱容量が小さいことに起因していると考えられる。一方、設定圧力の違いに注目して結果を比較してみると、振動時間が 1 秒では設定圧力が 0.1MPa で温度が 300°Cを超えたが、0.3MPa、0.5MPa では、250°C程度に留まっていた。逆に、振動時間が長くなる（3 秒以上）と、高い設定圧力（0.5MPa）で 400°C以上となったが、0.1MPa では 350°C程度に留まっていた。設定圧力が 0.1MPa では、振動時間ごとに到達する最高温度の差が少なく、振動時間が長くなっても過熱することが無かったことから、熱劣化の可能性が少ない溶着条件であったと考えられる。一方、設定圧力が高い（0.3MPa、0.5MPa）場合は、最初は加圧により材料が自由に振動できないが、温度が上昇して樹脂が軟化すると振動が伝わり易くなり、急激な温度上昇につながったと考えられ

表1 超音波溶着接合強度試験結果

設定圧力 (MPa)	超音波溶着の振動時間 (秒)				
	1	2	3	4	5
0.1	1.08	4.47	14.56	16.05	17.01
0.3	0.09	0.19	8.14	13.25	9.64
0.5	0.16	0.41	4.54	10.55	—

単位:kN

— : 装置エラー (過電流) により試験片を得られず。

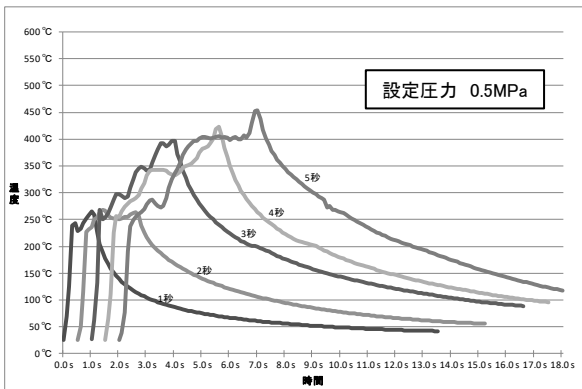
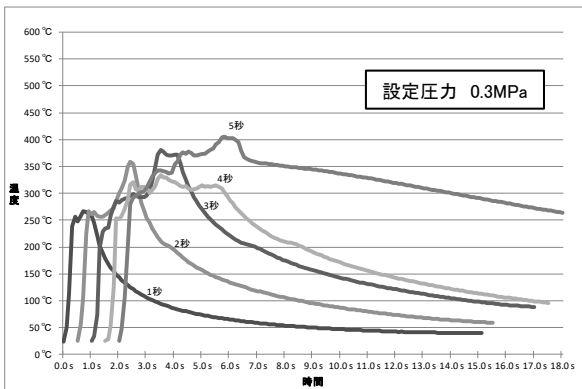
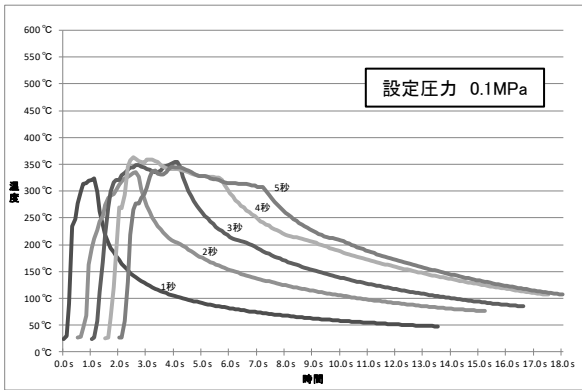


図6 各設定圧力・振動時間における温度履歴測定結果 (振動時間: グラフ上に表記)

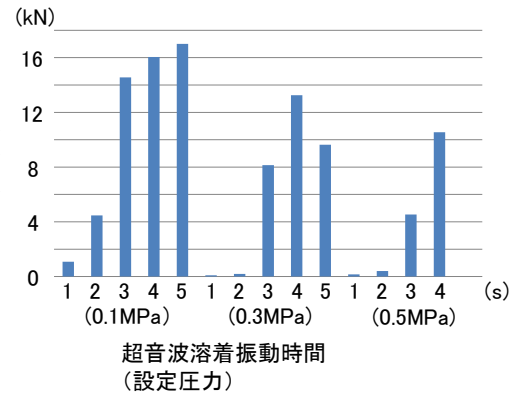


図7 超音波溶着接合強度試験結果

る。よって、高い設定圧力において、急激に温度が上昇し、マトリックス樹脂の融点よりかなり高温に過熱した場合には、樹脂が熱劣化する可能性がある。超音波溶着では、マトリックス樹脂の融点以上で、かつ、熱劣化しない温度で均一に温度上昇することが望ましい。この点を考慮すると、設定圧力は小さい方が適していると考えられる。一方、接合時間は短時間である方が優位であることを考えると、設定圧力を高くし、材料温度を高温・短時間で加熱する方が有利となる。このように、超音波溶着の条件設定では適切な材料加熱が可能となるように、設定圧力と振動時間の両方を連動して調整する必要がある。

3. 2 超音波溶着の接合強度評価



a



b



c

図8 強度試験後の接合面画像
a: わずかに溶着 (設定圧力 0.1MPa、振動時間 1 秒)、b: 部分的溶着 (設定圧力 0.3MPa、振動時間 3 秒)、c: 全面溶着 (設定圧力 0.1MPa、振動時間 5 秒)

超音波溶着した試験片の接合強度結果を表1、図7に示す。通常、引張強度を比較する場合には応力を用いるが、ここでは、引張試験により接合が破壊した時の最大荷重によって接合強度を評価した。測定した条件の中では、超音波溶着の設定圧力が0.1MPa、ホーンの振動時間が3秒以上において高強度な結果が得られた。設定圧力が0.3MPaでは、振動時間が3秒以上で接合強度が強くなっているが、0.1MPaにおける強度には至らなかった。また、設定圧力が0.5MPaでは、接合強度が全体的に低い値となった。なお、設定圧力が0.5MPa、振動時間5秒では、装置エラー（過電流）が発生し、試験片を得られなかった。温度履歴測定から、設定圧力を0.5MPaで3秒以上振動すると、試験片はマトリックス樹脂の融点より、かなり高温まで昇温することがわかっている。また、高圧力で加圧した方が、強く溶着することが予想される。これらから、設定圧力が0.5MPa、振動時間3秒以上における超音波溶着で、高強度に接合する可能性があると考えられた。しかしながら、実際には設定圧力0.1MPaで振動時間が3秒以上の条件の方が、接合強度が強かったことを考慮すると、超音波溶着条件では設定値は高い方が良いとは限らず、適度な設定圧力や振動時間があることがわかった。

一方、強度試験後に破壊した接合面の代表的な画像を図8に示す。試験片a（設定圧力0.1MPa、振動時間1秒）では、わずかな部分だけ溶融していた。従って、ほとんど溶着しておらず、接合強度が低かったと考えられる。試験片c（設定圧力0.1MPa、振動時間5秒）は、全面が溶融していた。これにより、接合面全体で溶着していたことがわかり、接合強度が高かったと考えられる。試験片b（設定圧力0.3MPa、振動時間3秒）については、部分的に溶融している様子が観察された。これは、試験片aと試験片cの中間の状態であり、接合強度も、試験片aと試験片cの中間に位置する値となったと考えられる。超音波溶着では、接合面における樹脂の溶融状態が、接合強度に影響する。超音波溶着により高強度な接合を実現するためには、接合面をいかに均一に加熱溶融し、接合面全体での溶着を可能とする条件を確立することが必要である。本報告における条件下では、設定圧力0.1MPaで、振動時間3秒以上において、良好で高強度な接合が可能であった。

3.3 マトリックス樹脂の分子量

超音波溶着前（未処理）と超音波溶着後（設定圧力0.1MPa、振動時間5秒）におけるマトリックス樹脂の分子量測定の結果を表2に示す。3.1の温度履歴測定の結果より、超音波溶着時には樹脂温度が融点よりもかなり高温まで上昇していることがわかっている。このことから、マトリックス樹脂が劣化、或いは重合することにより、分子量が変化している可能性があった。しかし、超音波溶着の前後において、数平均分子量、重量平均分

表2 マトリックス樹脂の分子量

試料名 (設定圧力、振動時間)	数平均分子量 Mn($\times 10^4$)	重量平均分子量 Mw($\times 10^4$)	多分散度 Mw/Mn
未処理	1.4	5.7	3.9
超音波溶着後 (0.1MPa、5秒)	1.4	5.6	4.0

子量及び多分散度には、ほとんど違いは無く、超音波溶着時の熱による樹脂への影響は少ないことがわかった。温度履歴測定時における到達温度だけを考慮すると、樹脂の熱劣化の可能性が考えられたのであるが、溶着時間が数秒と短時間であるため、劣化に至らなかったと考えられる。このように樹脂への影響が少ないという面も、超音波溶着の優位点であると言える。

4. まとめ

同種のCFRTPのCF/PA66（厚さ2mm板材）を使用した超音波溶着技術を検討し、次の結果を得た。

- 1) 温度履歴測定の結果、ホーンを振動させている間は温度が上昇し、振動を止めると速やかに温度が下がることがわかった。また、マトリックス樹脂を溶融できる温度に達するための条件設定では、設定圧力と振動時間の調和が必要であることがわかった。
- 2) 実験した条件の中で最適な結果が得られたのは、設定圧力が0.1MPaで、ホーンの振動時間が3秒以上であり、その接合面は、マトリックス樹脂が接合面全体で溶融していた。
- 3) 超音波溶着により、マトリックス樹脂の分子量はほとんど変化が無く、樹脂劣化の影響は少ないことがわかった。

以上の結果より、超音波溶着における基礎的なデータの収集方法を確立することができた。今後は更に、マトリックス樹脂が違うCFRTP材料についてもデータを収集し、超音波溶着技術を利用する上での基本条件の設定方法を確立していく。

【謝 辞】

本研究遂行にあたり、共同研究機関として、ご指導・ご助言をいただきました岐阜大学 工学部 仲井教授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