

(報告書様式)

2019年 3月 16日

金沢大学先端科学・イノベーション推進機構協力会 御中

### 第3回 若手研究者奨励賞 研究実施報告書

所 属 理工研究域フロンティア工学系  
職 名 助教

ふりがな たつの だいち  
氏 名 立野 大地

## 研究実施報告書

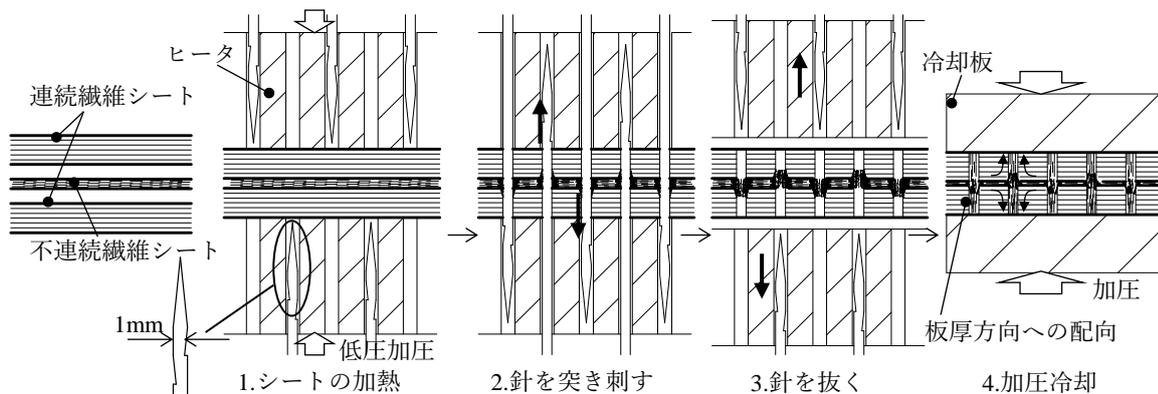
### (1) 研究テーマ名

不連続繊維を活用した熱可塑性 CFRP シートの接合法

### (2) 研究の目的および要旨

本研究の目的は、炭素繊維強化熱可塑性樹脂シート(CFRTP シート)中の繊維を板厚方向に配向させることで CFRTP シート接合界面の強度を向上する、新しい接合技術を開発することである。CFRTP シートは連続繊維織物を重ねて熱可塑性樹脂で一体化した積層板であるため、繊維方向には強いが板厚方向には層間が剥離する等の問題がある。CFRTP シートどうしの接合はこの問題が顕著であり界面の接合強度を向上することが非常に重要である。

本研究で提案する接合方法は、連続繊維シートの中に不連続繊維シートを挟み、これらを加熱溶融したのち、側面に繊維を引っかけるへこみを設けた針を上下から突き刺し、シートを加圧して針の貫通跡に不連続繊維を流入させるとともにシートを溶着する(図 1)。接合界面の樹脂の溶着のみによる接合と比べて不連続繊維を板厚方向に配向することで接合界面の剥離強度を向上させることが期待できる。本接合方法の基礎的研究として短冊状の CFRTP シートを接合する装置を製作し、針の形状、不連続繊維の繊維長などと接合強度の関係を解明し、高い接合強度を得るための知見を見いだす。その知見を展開しプレス成形と同時に不連続繊維を板厚方向に配向する方法を開発する。



### (3)採択されてからの研究の進捗状況

本研究ではまず目的の接合を実現するための装置(図 1)を設計製作した。幅 20, 長さ 60, 厚さ 3mm のシート(PA6 を平織で強化したもの、Vf50%)を長さ 20mm で重ね合せ、この間に不連続繊維シートを挟み、加熱、穴開け、加圧、冷却して接合を行う。治具に固定した試験片をまず加熱・穴開けステージに設置し、樹脂を溶かして針を刺す。その後加圧・冷却ステージに移動し圧着と樹脂の固化を行う。接合装置は万能試験機に装着し、各ステージの温度条件は内蔵のカートリッジヒータで設定する。針は、20×20mm の接合領域内に 6mm ピッチで縦横 3 列の 9 箇所配置した。接合した試験片の両端にタブを取付け、これを引張って接合面のせん断強度を評価した。また接合の内部組織を観察し、接合条件と繊維配向の関係を調査した。

これまでのところ、本手法は従来の接合に比べて高い接合強度を得られることを確認した。内部組織の観察から、板厚方向に繊維が配向していることを確かめた。また、より高い接合強度を得るための知見を得た。

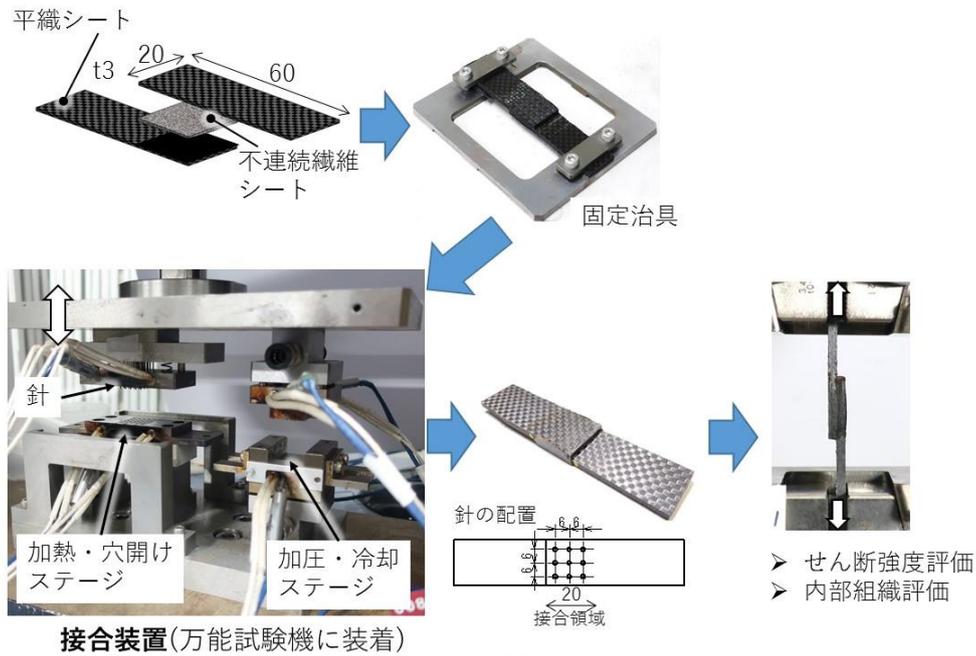


図1 接合装置と評価方法

#### (4) 研究の成果

##### (4-1) 不連続繊維の効果

接合界面に用いる不連続繊維を表1に示す3種類とし、接合強度との関係を調べたのが図2である。

従来の接合法(穴を開けず、不連続繊維も挟まないもの)の強度が20MPaだったのに対し、一方向繊維を挟んで穴を開けて接合したものでは25MPa程度になっている。破断は接合界面で生じており、破断面には針が貫通したことによる凹凸が見られる。本手法により接合強度が向上することを確認した。

一方向繊維の長さによる接合強度の違いは小さかった。不織布を用いたのは繊維がより流動しやすいと考えたためだが、Vf(繊維体積率)が低いため接合界面に樹脂層を形成し、逆に強度を低下させた。したがって界

表1 使用した不連続繊維の種類

強化繊維	樹脂	厚さ	繊維長
一方向炭素繊維	PA6 Vf50%	0.16mm (1層)	2mm
			5mm
炭素繊維と樹脂繊維の不織布	PA6 Vf20%	1mm (圧縮後0.1mm)	数mm~

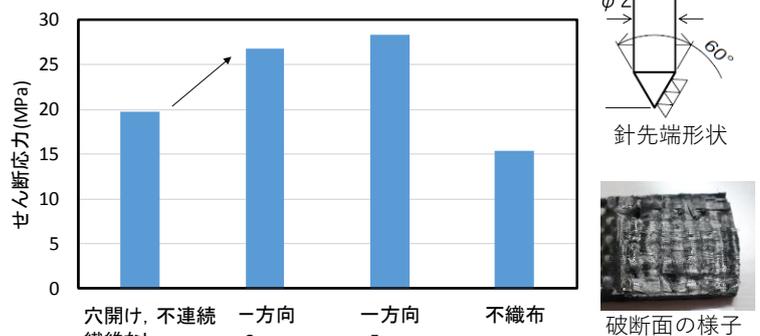


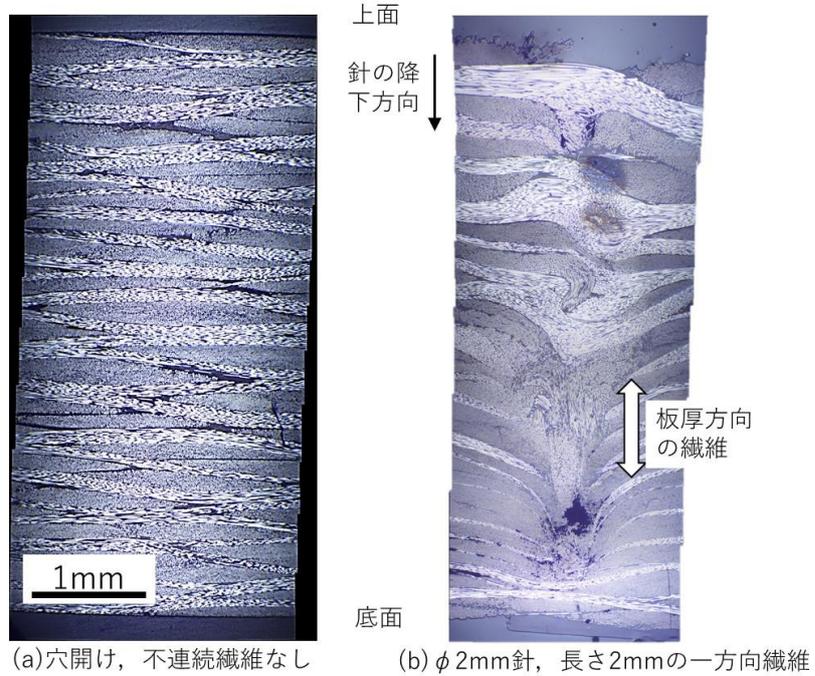
図2 不連続繊維の種類による接合強度

面にはさむ不連続繊維の Vf が強度に寄与することが明らかとなった。

なお、本実験は下記の条件で接合したものである。加熱温度 285℃，加圧板温度 220℃(あらかじめ 220℃に加熱し，圧着中はヒータを切り一定荷重を保持し冷却する。接合界面が 150℃になったら (90 秒後)加圧を止める)，圧着時の圧力 5MPa。

#### (4-2)内部組織の評価

接合部の針が通過した断面を切り取り，光学顕微鏡で観察したのが図 3 である。穴開けせず不連続繊維も挟まない場合(図 3(a))は積層構造が維持されており，板厚方向の繊維は存在しない。一方で本手法による接合部(図 3(b))には針が通過した位置に板厚方向に配向した繊維を確認することができた。(4-1)で示した接合強度の向上は，板厚方向の繊維が存在することでせん断荷重に対する抵抗力が増した効果によると考えられる。



(a)穴開け，不連続繊維なし (b)φ2mm針，長さ2mmの一方方向繊維  
図 3 接合部の内部組織

板厚方向の繊維を観察すると，針の降下方向に沿っていることがわかる。これは板厚方向の配向が主として針の押し込みによるものであることを示していると考えられる。したがって針の押し込みによる繊維の配向をさらに強化することでより高い強度を得られる可能性がある。

#### (4-3)針直径，加圧力の効果

針の直径と圧着時の圧力と接合強度を調べたのが図 4 である。針の径を拡大し，圧着時の圧力を増すことで不連続繊維の流動が促進し接合強度が向上すると考えたが，これらの条件間での優位な差異はないことがわかった。

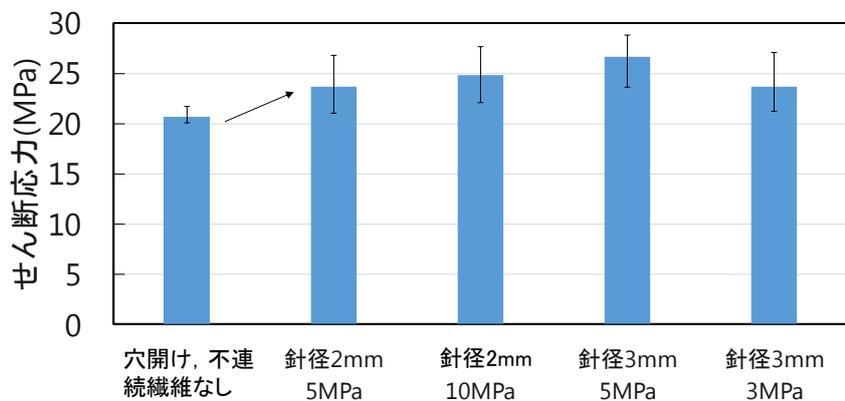


図 4 針直径，圧力と接合強度

#### (4-4) 針形状の効果

(4-3)で述べたように、針による繊維の押し込み効果を促進する目的で、側面に切り欠きを設けた針A(図5(a))と先端にくぼみを設けた針B(図5(b))を試みた。従来の針の先端角度  $60^\circ$  に対し、これらの針は  $30^\circ$  とした。図6に示すように、針Aでは針が貫通した跡はあるものの板厚方向の配向は見られない。これは先端角度が鋭くなったことで針が繊維を押しつけたためと考えられる。針Bでは板厚方向の配向が最も強く見られた。これは先端のくぼみに連続繊維が引っかかり押し込まれる量が増えたためと考えられる。したがって繊維の配向に対しては針の先端形状が強く関係していることが明らかとなった。

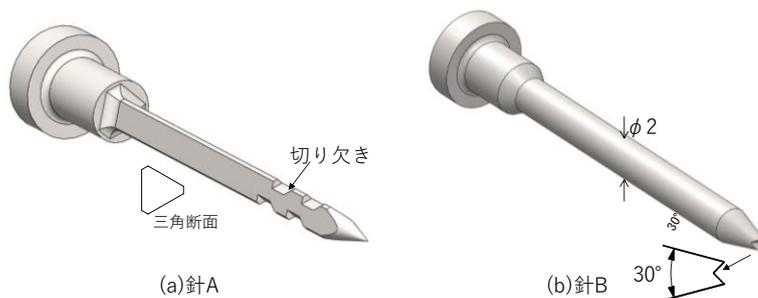


図5 繊維の押し込みを促進する針形状

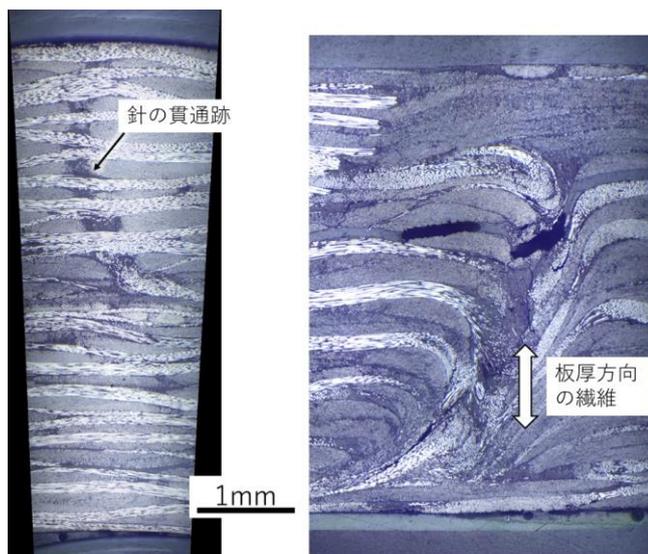


図6 針形状による繊維配向の違い

#### (4-5) フィラメント挿入の効果

まったく連続した繊維が板厚方向に配向した理想的な状態を想定し、図7に示すように、あらかじめ開けた穴に一方向繊維で作ったフィラメントを挿入して接合装置を用いて接合し、そのせん断試験における破断特性を調べたのが図8である。従来の接合が最大荷重を迎えるとともに分離して荷重を負担しなくなっているのに対し、フィラメントを挿入したものは徐々に破壊する挙動を示した。接合界面が分離したあとでも挿入したフィラメントが荷重を受け持ち、フィラメントが穴から引抜かれる抵抗が生じたと考えられる。徐々に破壊することは構造物の突然の崩壊を防ぐものであり、このような接合を効率よく実現することが求められる。荷重の傾きが従来の接合より小さいが、これはドリルで繊維が切断されたためと推察され、熔融したシートにフィラメントを挿入することで改善できると考える。



図7 フィラメントを導入した接合

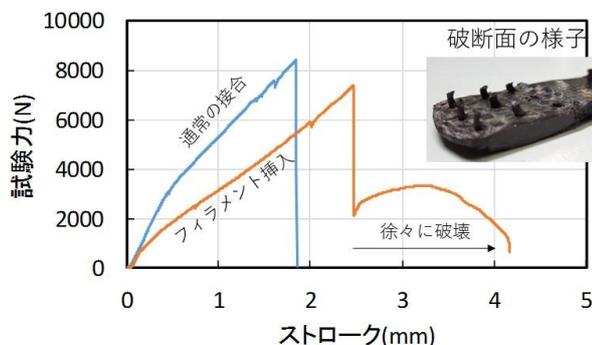


図8 試験荷重波形

## (5) 今後の研究の推進方策

### (5-1)より長い繊維を挿入する方法の試み

本研究で明らかになったのは、板厚方向の繊維が接合強度を向上すること、針の先端形状が繊維の配向に関与すること、連続したフィラメントを挿入することで接合部の急激な破断を防止できることである。これらの知見を活用し、より長い繊維を板厚方向に導入する機構を設計製作し、その効果を確かめる。

### (5-2)十字引張強度の評価

炭素繊維は繊維方向の引張に最も強度を発揮するものであるため、接合面に対して垂直に引きはがす十字引張試験等における接合強度を評価し、その効果を確かめる。

### (5-3)斜め配向によるせん断強度の効果

せん断荷重に対してより抵抗を増すには、シートに対して 45° 方向に繊維を配向することが考えられる。このような機構を設計製作し、その効果を確かめる。

## (6) 研究発表（平成 29 年度、30 年度）

<学会発表>

- 立野 大地，米山 猛，田中 涼介，炭素繊維を活用した熱可塑性 CFRP の接合法，日本塑性加工学会第 69 回塑性加工連合講演会，講演論文集 p49-50，2018 年 10 月
- 田中 涼介，立野 大地，米山 猛，炭素繊維を活用した熱可塑性 CFRP の接合法，日本塑性加工学会第 28 回北陸支部講演会，講演論文集 p11-12，2019 年 3 月

## (7) その他顕著な成果

- 金沢大学先端科学・イノベーション推進機構にて職務発明認定，整理番号 特 2018-0030