

CFRTP の局部加熱によるインクリメンタルフォーミングに関する基礎研究

上智大学理工学部 ○伊東 尊, 猪狩 龍樹, ◎田中 秀岳

要旨

本研究の目的は、CFRTP に対する金型を使わない薄板シェル形状の逐次成形法を確立するとともに、積層造形と比べて高強度の 3D プリンティング技術として提案することである。高強度の成形品を得るために、材料には連続繊維の熱可塑性 CFRTP を用いた。本研究では、予備実験として加熱下での曲げ試験を行い、成形に適した温度域と加熱範囲についての知見を得た。また、連続繊維の CFRTP の逐次成形に適した加熱方法と成形方法を提案した。

1. 緒言

近年、個人での製品生産や企業でのラビットプロトタイプング (RP)、その発展であるラビッドマニュファクチャリング (RM) の造形方法として、3D プリンティング技術が注目されている。この造形方法は、造形物の形状の自由度が高い、1 工程で材料から直接造形物を製作可能等の利点がある。しかし、もともと形状の評価を目的として開発された技術であり、RM の造形方法としては、積層された層間の強度が弱く、そのまま製品の部材として使用することは難しい。特にシェル形状を造形する場合、層間の接着強度が弱く、樹脂薄板に対しては未だ造形法は提案されていない。

本研究では、熱可塑性 CFRTP に対する薄板シェル形状を造形可能な逐次成形法を確立するとともに、積層造形と比べて高強度の 3D プリンティング技術として提案することを目的とする。逐次成形のための加熱方法を提案し、基礎的な成形実験を行った。

2. 炭素繊維強化樹脂

逐次成形を適用する樹脂は、加熱により軟化し、外力による変形が可能である必要がある。また、軟化した状態でも自重を支えることのできる温度域が広いことが望ましい。このような条件を満たす材料として、本研究では連続繊維の CFRTP (Carbon Fiber Reinforced thermo plastics) を使用する。母材に熱可塑性樹脂を用いているため、加熱により樹脂を軟化させることで、二次加工が可能になる。また、加熱により軟化した状態でも繊維による補強により、無強化の樹脂板と比較して形状の保持性が高い¹⁾。このような特長により、逐次的な成形が可能であるといえる。

3. 加熱時の変形特性

CFRTP を成形するためには、材料を加工に適した状態まで軟化させる必要がある。CFRTP は市場に登場して間もない材料であり、成形や加工のための十分な知見が蓄積されていない。また、使用される樹脂や繊維の構造、繊維の含有率の違いによっても材料特性が変化する。そのため、本研究では温度と材料強度の関係をj知るために、予備実験として加熱下での曲げ試験を行った。試験片の加熱にはリボンヒータを使用し、試験開始から終了まで加熱を行った。使用した材料の仕様を表 1 に示す。

Table1 Material specification of workpiece

Fabric	Twill 2/2
Yarn	3k tex
Polymer	PA66
Fibre content	45 % vol
Thickness per layer	0.25 mm
The number of layers	8
Glass transition temperature	70 °C
Melting temperature	260 °C

加熱下での曲げ試験の結果として、温度と曲げ強さの関係を図 1 に示す。温度が上昇するにつれて曲げ強さが低下していく様子が確認された。これは、樹脂が徐々に軟化しているためである。

次に、破壊モードの観察を行った。図 2(a) に 110°C、(b) に 240°C、(c) に 260°C で試験を行った際の破壊モードをそれぞれ示す。温度により様子が異なっており、(a) のような比較的低温度帯の試験片

では、引っ張り側に破断が発生している。温度が上昇するにつれて (b) のように引っ張り側の破断と圧縮側の座屈が混在するようになる。さらに温度を上昇させると (c) のように座屈、はく離による破壊のみが起こる。

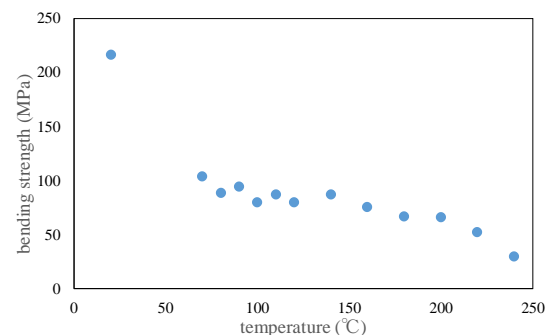
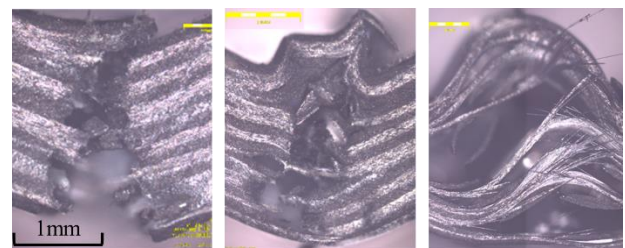


Fig.1 Bending strength



(a)110°C

(b)240°C

(c)260°C

Fig.2 Fracture mode

樹脂の軟化に伴い座屈が支配的になる理由は、引張強度と異なり圧縮強度は樹脂の強度に依存するためである。そのため、温度を上昇させ樹脂が軟化するにつれて強度が下がり、座屈が発生しやすくなる。

いずれの温度でも欠陥が発生した原因は、本試験で使用した材料が積層構造であるためと考えられる。なぜなら、加熱部に層間のずれを伴う変形を発生させるためには、面全体に層間の流動性が必要であるためである。本試験ではこの層間の流動性を考慮しておらず、変形部のみに加熱を行ったため、座屈、はく離が発生したと考えられる。

積層板に対して層間のずれを伴う変形が可能であることを確認するために、試験片全体を加熱した状態で実験を行った。曲げ試験時と同様の試験片を使用し、全体を 280°C まで加熱した。変形させた際の画像を図 3 に示す。図に示すように曲面形状へと変形が可能であり、積層がずれて変形している様子が確認された。



Fig.3 Formed test piece by whole heating

4. 加熱方法

曲げ試験の結果により、層間の滑りを伴う曲面形状へと変形させるためには、面全体の加熱が必要であることが確認できた。しかし、逐次成型を行う際の材料全体の加熱は、樹脂の劣化や材料全体の温度維持等の観点から現実的ではない。

本研究では、逐次成型を行うための加熱方法として通電加熱を提案した。通電による加熱では、猪狩らによる先行研究²⁾で使用されていた赤外線ヒータのように広範囲を加熱することはできないが、任意の繊維に対して加熱することが可能である。特定の繊維を加熱し、変形を与えることで、局所的な変形を発生させ、加工に関わらない樹脂の劣化を抑えることができると考えられる。また、ヒータによる加熱と比べて立ち上がりが早く、発生したジュール熱のほとんどが昇温に使われるため、エネルギー効率が良いといった利点も期待できる。

5. 通電実験

① 炭素繊維束への通電実験

通電による逐次成型の最初の課題として、炭素繊維束への通電実験を行った。電極として目玉クリップを使用し、摺動型変圧器により変圧した交流電流を通電させた。炭素繊維束は、電極を取り付ける部分のみアセトンにより樹脂を取り除いている。通電させた結果を図4に示す。図に示すように、自己のジュール熱による加熱により一様な温度分布を得ることができた。この実験により、炭素繊維束へ通電することで、融点付近の温度まで均一に加熱が可能であることが確認できた。

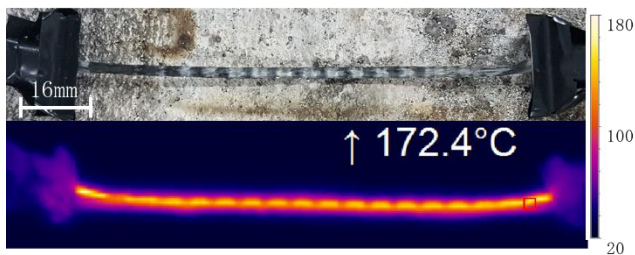


Fig.4 Bundle by electric heating

② 織物材料への通電実験

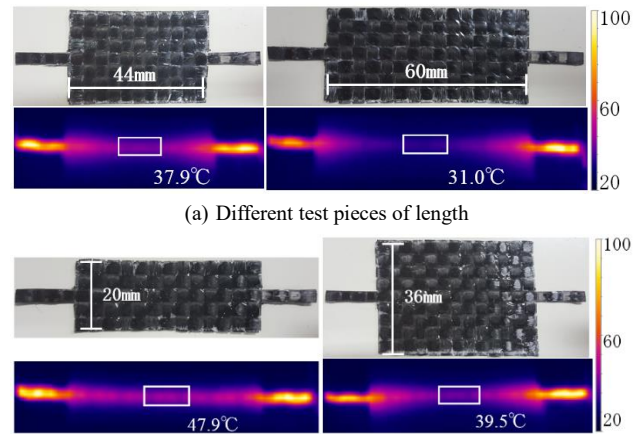
次に、織物材料に対して通電実験を行った。実験の目的は、織物構造の連続繊維 CFRP に対して、通電により通電方向に均一な加熱が可能かどうかを確認することである。長さの異なる試験片、幅の異なる試験片に対して通電し、それぞれの加熱の様子を比較した。使用した材料の仕様を表2に、試験片、加熱中の様子を図5(a)(b)に示す。

Table2 Material specification of workpiece

Fabric	Plain weave
Yarn	12k tex
Polymer	Epoxy
Thickness per layer	0.43 mm
The number of layers	1

図5の温度は、それぞれ囲まれた範囲内の最高温度を表している。(a)の実験において、試験片の端部が各試験片ともに100℃以上の高温になっている際に、試験片中央部は30~40℃程度であり、低い温度となった。さらに、試験片が長くなるほど中央部の温度が下がるという結果が確認された。(b)の試験片においても、端部が100℃以上の高温になった際に中央部分は40℃前後であり、大幅に低い温度となった。また、幅の狭い試験片のほうが中央部の温度が高いという結果になった。このような結果になったのは、織物材料のたて糸とよこ糸が絶縁されていないためである。たて糸とよこ糸の接点で通電してしまい、試験片全体で並列回路が形成されてしまっていると考えられる。そのため、試験片の長さ、幅が広がるほど均一な加熱が難しい。通電により織物材料を一様に加熱

したい場合、通電方向、もしくは通電方向と直行する方向の長さは十分に短い必要がある。



(a) Different test pieces of length

(b) Different test pieces of width

Fig.5 Fabric by electric heating

6. 成形実験

通電実験により得られた知見をもとに、曲げ変形による逐次成型実験を行った。材料として、単層のCFRTPを使用した。使用は表1のとおりである。単層板を用いており、積層をずらす必要がないため、本実験では変形部のみに加熱を行った。通電方向に均一な加熱が可能で、幅10mmの試験片を作成した。成形前、成形後の試験片の画像を図6に示す。図に示すように、半径90mmの円柱に沿った形状への成形に成功した。これは、曲げ変形により成形できる形であれば、任意形状に材料を変形させることができることを示している。また、通電により加熱することで材料の劣化を最小限に抑えて成形することが可能である。



Fig.6 Incremental bending by electric heating

7. 結言

連続繊維のCFRTPの逐次成型に関する研究を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 変形部のみでなく、加工に関わる繊維の全体を加熱する必要がある
- (2) 通電により一様に加熱するためには、通電方向、もしくは通電方向と直行する方向の距離が短い必要がある。

参考文献

- 1) 福田博, 邊吾一, 末益博志: 新版 複合材料・技術総覧
- 2) 猪狩 龍樹: 熱可塑性 CFRP の任意形状の薄板成型を可能とする3次元逐次成型技術の開発 (2016)