

平成28年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「3Dプリンターによる連続繊維複合材立体部材の製造技術開発研究」

研究開発成果等報告書

平成29年5月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 学校法人東京理科大学・スーパーレジン工業株式会社

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

3次元(3D)プリンターはコストのかかる金型や治具などを必要とせずに、既存技術では成形が難しい複雑な3次元形状を容易に造形できる。特に、熱可塑性樹脂を用いた熱溶解積層方式による3Dプリンターは安価であり、現在では、試作部品やモックアップの製作などに広く利用されている。しかしながら、現状の3Dプリンターは、熱可塑性樹脂(または強化粒子添加樹脂)を用いて熱溶解積層造形を行うため、出来上がった製品は強度や剛性が低く、航空宇宙・自動車用構造部材として利用するには向いていない。

一方で今日、金属材料よりも比剛性や比強度に優れる炭素繊維強化熱可塑性プラスチック(CFRTP)が、燃費削減のために軽量化が求められている自動車の構造部材などへ適用され始めている。CFRTPは母材である熱可塑性樹脂を炭素繊維で強化した複合材料であることから、熱溶解積層方式の3Dプリンターを用いてCFRTPの成形が可能であると考えられる。しかしながら、3Dプリンターによる強化材料を混合した複合材料の製作実績は、現在のところほとんど存在していない。

もし、3Dプリンターを用いてCFRTP部品を製造することが可能となれば、金型や治具などを使用せずに複雑な3次元形状を短時間で造形できるだけでなく、部品内部の繊維配向を任意に制御することによってさらなる軽量化も実現できる。また、供給する樹脂中の繊維の配合、有無を制御する事が出来れば、部品の各所で繊維を補強する部分としない部分とを形成する事ができるため、軽量化やコストの観点から複数部品(CFRTP部品と樹脂部品)で構成されていたものを一体成形することも可能となる。

3Dプリンターによる複合材料の成形に関しては、これまでナノ粒子や短繊維を強化材に用いた例が報告されているが、CFRTPを構造部材として利用するためには、連続繊維を強化材に用い、その補強効果を十分に発揮させる必要がある。そこで本事業では、連続繊維で強化したCFRTPを3Dプリンターによって成形する方法(すなわち、連続炭素繊維複合材料3Dプリンター)技術の確立を目指して研究開発を行った(概念図を図1に示す)。さらに3Dプリンターによって製造された部材の力学的、品質特性の評価を実施した。特に、

- (1) 連続炭素繊維のその場含浸技術
- (2) 炭素繊維切断機構の導入と繊維配向制御
- (3) 革新的高機能・高特性CFRP構造成形

を核となる要素技術として捉え研究開発を行い、連続炭素繊維をその場で含浸するCFRP 3Dプリンター技術を開発した。開発した3Dプリンターによる成形品は、従来品と同等以上(表面粗さが17%以上の改善)の表面性状を有しており、力学的特性については大きく向上していることを実証した。さらに、実際に全CFRP製のハニカムコアサンドイッチ構造の一括部プリントや、自動車・宇宙航空産業に应用可能な寸法1m×1mスケールのアイソグリッド構造の試作により実用性を示した。

強化繊維を樹脂含浸と同時に積層する3Dプリンタは
世界的にも報告がなく、**世界初**

- ・ 特願2014-109509「成形装置」
- ・ PCT出願 PCT/JP2015/65300

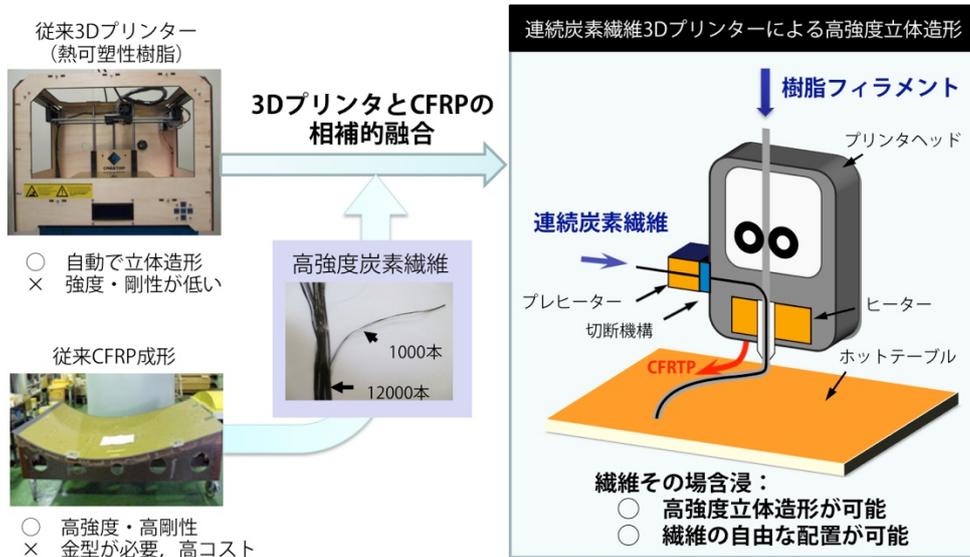


図 1 連続炭素繊維複合材料の3D プリント概要

1-2 研究体制

事業管理機関

- ・ 東京理科大学 (代表) 松崎亮介 (SL)
- ・ スーパーレジン工業株式会社 (連名・法認定企業) 尾崎 毅志 (PL)

研究機関

- ・ 宇宙航空研究開発機構 平野義鎮
- ・ 日本大学 上田政人
- ・ 東京工業大学 轟章

アドバイザー：

KYC-Japan 山口 泰弘

千葉県産業支援技術研究所 大谷 大輔

1-3 成果概要

(1) 連続炭素繊維のその場合含浸技術

3D プリンタノズル内で、連続炭素繊維束に熱可塑性樹脂を融解・含浸させ、吐出する方法を開発し、引張試験片や円筒形など各種形状について試作を行った。図 2 に連続炭素繊維複合材料 3D プリントの

様子を、図 3 に成形物の例を示す。

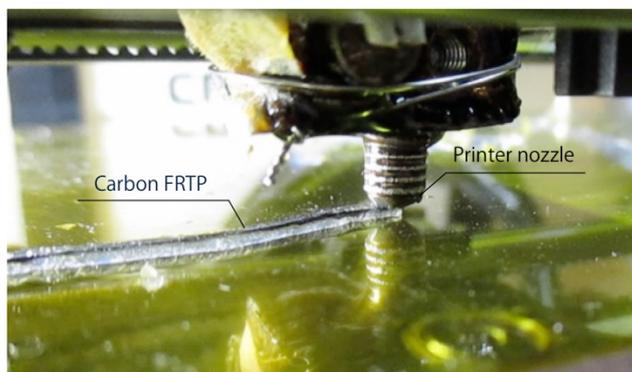


図 2 連続炭素繊維複合材料 3D プリントの様子

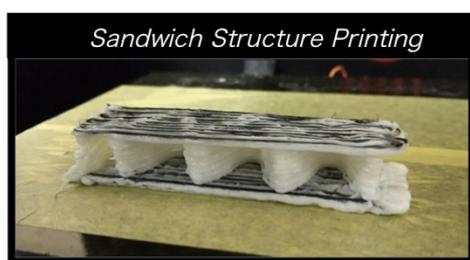
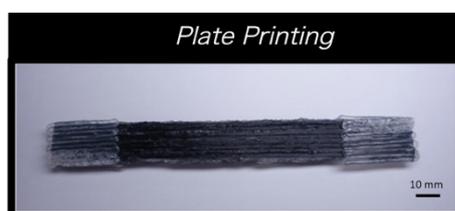


図 3 複合材 3D プリント成形物の例

(2) 炭素繊維切断機構の導入と繊維配向制御

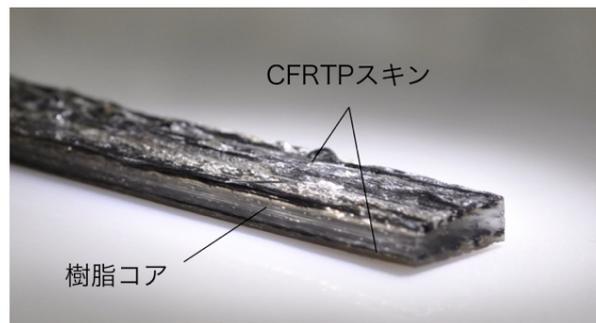
炭素繊維切断機能の導入については、ロータリーカッターによる繊維切断機構を導入した (図 4)。さらに、3D プリンター制御基板 Arduino と G-code を用いて、自動的に繊維配向や CFRTP の切断を制御しながらプリントすることに成功した。



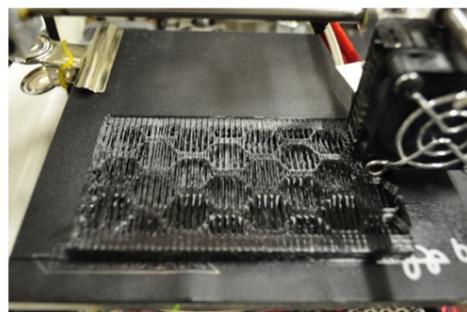
図4 ロータリーカッターによる繊維切断

(3) 革新的高機能・高特性CFRP 構造成形

炭素繊維複合材料を表皮材、ABS をコア材とした軽量高剛性サンドイッチ構造のプリント試作を実施した。より軽量化を目指すためコア材としてハニカム形状とするサンドイッチ構造のプリントを実施した(図5)。なお、実現した3D プリントされた複合材料の表面は、従来の樹脂3D プリンターの表面性状よりも優れている(図6)。

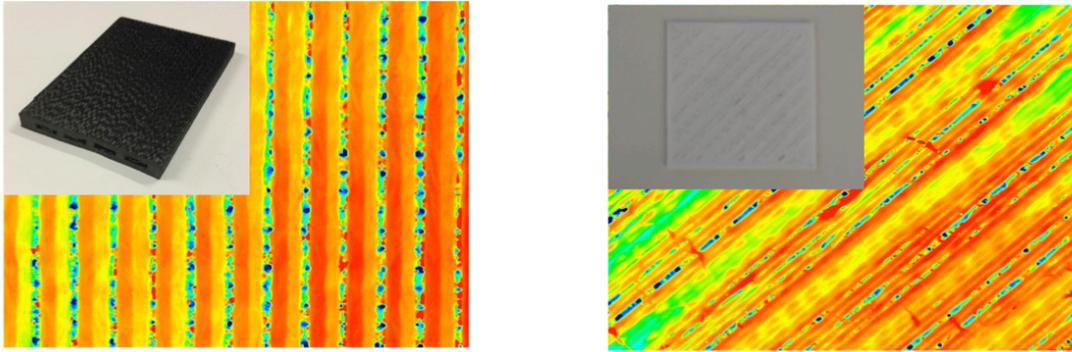


コア形状一筆書きプリント



表皮材プリント

図5 ハニカムコアサンドイッチ構造プリント



複合材プリント（本技術）
表面粗さRa=0.038 mm

従来樹脂FDM
表面粗さRa=0.046 mm

図6 サンドイッチ構造の表面性状

■開発された製品・技術のスペック

開発された製品および技術のスペックを図7に示す。

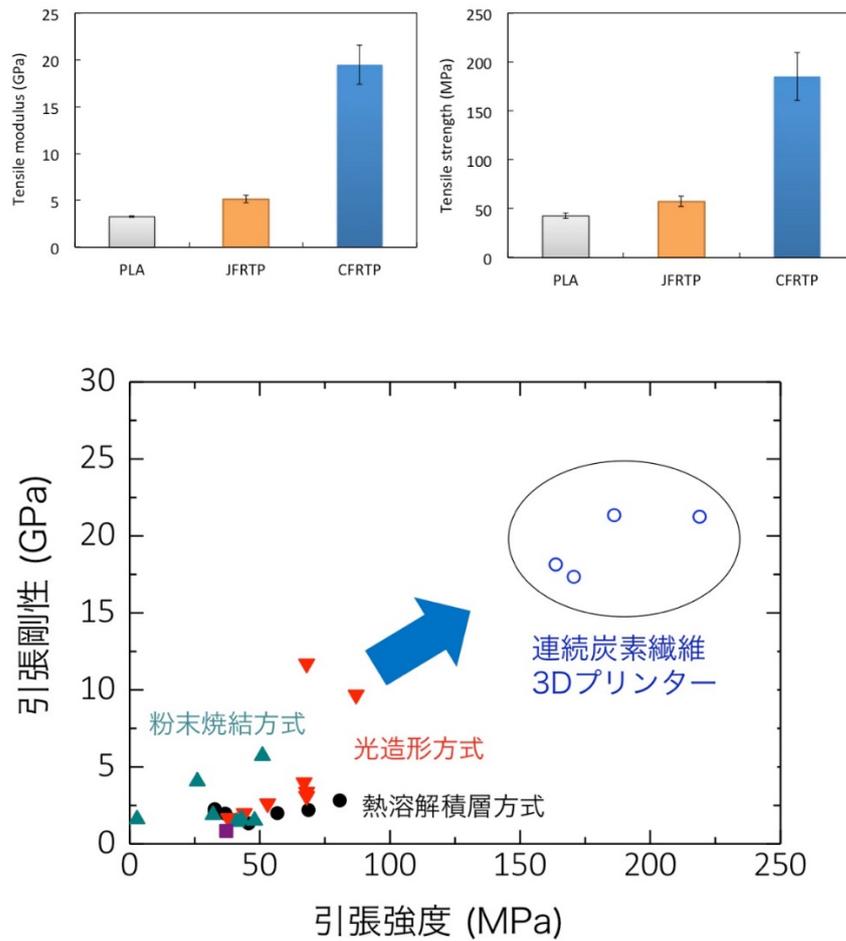


図7 連続炭素繊維 3D プリンター成形物の力学的特性

本研究開発の成果により、連続炭素繊維複合材料の3Dプリンターが可能となれば、多品種の構造強度部材をCADデータのみから容易に成形が可能となる。またニアネットシェイプでの成形が可能であり、トリム等の2次加工が最小限で済むため、原材料費や環境負荷の低減にも効果的である。今後も、3Dプリンターならではの新しい形や機能をもったCFRTPの自動立体造形技術の確立を目指して、開発を続けていく。

■ 知財整備状況

• 基本特許

PCT/JP2015/065300 (優先日 2014/5/27)

「三次元プリンティングシステム、三次元プリンティング方法、成形装置、繊維入りオブジェクト及びその製造方法」

出願人：日本大学、東京理科大学、JAXA

日本特許：登録 特許第 6061261 号

他、US (15/313644)、EP (15799462.5)、中国 (201580027790.5) に出願中。

• コンパクションローラー機構

PCT/JP2017/005440 (優先日 2016/2/29)

「3次元プリンティング装置及び3次元プリンティング方法」

出願人：日本大学、東京理科大学、JAXA

• 可燃機構

特願 2017-025745 (出願日 2017/2/15)

「3次元プリンティング装置」

出願人：日本大学、東京理科大学、JAXA

1-4 当該研究開発の連絡窓口

学校法人東京理科大学 研究戦略・産学連携センター

森谷 麗子

〒162-8601 東京都新宿区神楽坂一丁目3番地

TEL: 03-5228-7431 FAX: 03-5228-7442

Email: moriya_reiko@admin.tus.ac.jp

第2章 本論一（1）

（1）連続炭素繊維のその場含浸に関する課題への対応

【1-1】連続炭素繊維の導入機構の開発

連続炭素繊維の導入機構の開発では、『含浸プロセスの最適化』及び『コンパクションローラーの開発』について具体的な検討を行った。

連続炭素繊維の導入機構（ノズル機構）において、強化材である繊維と母材である樹脂とを別々に供給するノズル内含浸方式を採用している点が特徴である。この方式のメリットは、繊維及び樹脂を任意に選択可能であることである。しかしながら、ノズル内で繊維を樹脂に含浸させる必要があるため、含浸プロセスの最適化が必要である。そこで、図8に示す装置を製作して、成形品質に及ぼす含浸距離、ノズル温度及びプリント速度の影響について検討を行った。

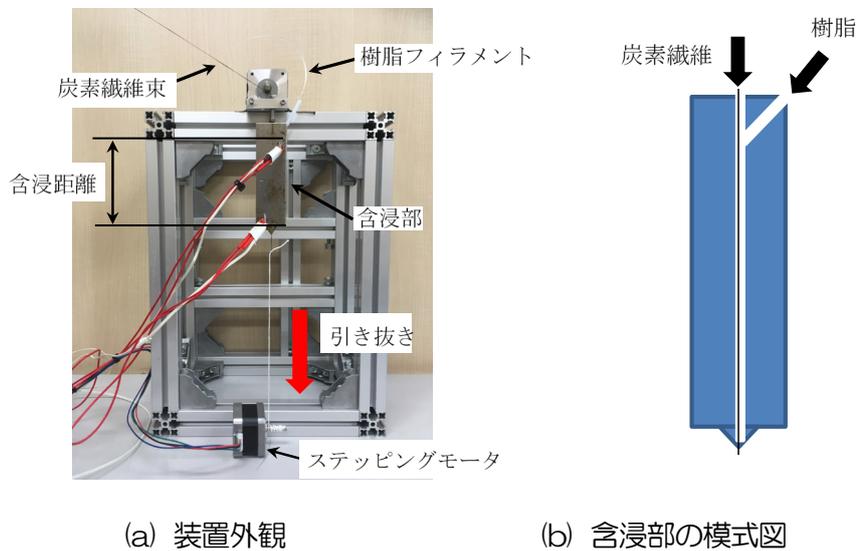


図8 含浸プロセスにおける諸条件の検討

試験方法としては、ノズルを模擬した含浸部に繊維と樹脂とを供給して、ステッピングモータを用いて含浸後のフィラメントを一定速度で引き抜く試験である。ノズル温度を190, 210, 230, 250°Cの4水準に、プリント速度（引き抜き速度）を100, 200, 300mm/minの3水準に変えて、含浸状況を検討した。また、含浸距離については、加工及び装置上の制限から55mmを採用した。炭素繊維束は1K（T300, 東レ）であり、樹脂はPLAフィラメントである。得られた結果を表1に示す。これよりノズル温度が高いほど、また、プリント速度が遅いほどよい含浸状況となる傾向を示している。この方法により適切な含浸条件を選定することによって、本機構において十分に含浸が可能であることが明らかとなった（図9）。

次に、熱溶解積層方式の欠点であるフィラメント間のボイドの生成を抑制するため、ノズル先端に搭載するコンパクションローラーの開発を行った。プリント直後にコンパクションローラーによってフィラメントを逐次押し付けることにより、フィラメント間のボイドを抑制する方法について検討した。ここでは図10に示す、全方位ローラーノズルとキャスターローラーノズルの2種類を検討した。

まず、全方位ローラーノズルについては、プリント中にローラー間にフィラメントが入り込む現象が生じて、フィラメントを効率的に押し付けるには至らなかった。今後更なる検討が必要である。一方で、キ

キャストローラーノズルについては、ノズル先端から吐出されたフィラメントを効率的にホットテーブルに押し付けることが可能であった。この結果、図 11 のように、フィラメント間の空隙の抑制に成功した。また、副次的な効果として、成形品の表面性状の向上、プリント時のヒートテーブルからの剥がれの抑制も確認され（図 12）、本機構の有効性を実証した。

このノズル機構については特許出願を完了している。また、実際に本ノズルを産業用ロボットに設置して（図 13～図 15）、試作実証も行った。

表 1 含浸プロセスの評価結果

		プリント速度 [mm/min]		
		100	200	300
ノズル温度 [°C]	190	×	×	×
	210	△	×	×
	230	○	△	×
	250	○	○	×

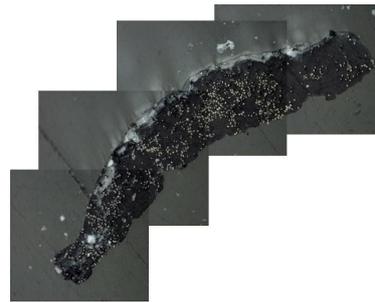
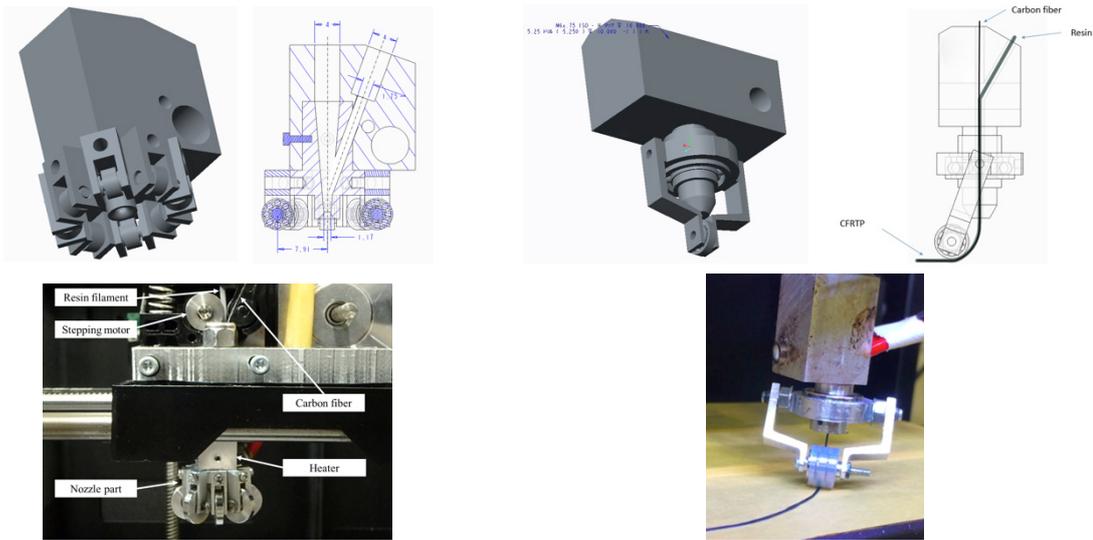


図 9 ボイドのない樹脂含浸後のフィラメント



(a) 全方位ローラーノズル

(b) キャスターローラーノズル

図 10 コンパクションローラーを搭載した新規ノズル方式（特許申請済）



- ・フィラメント間のボイドが多い。
- ・表面凹凸が大きい。

(a) コンパクションローラー無し



- ・フィラメント間のボイドが大幅に減少
- ・表面凹凸が小さく平滑。

(b) コンパクションローラー有り

図 11 成形品の断面観察

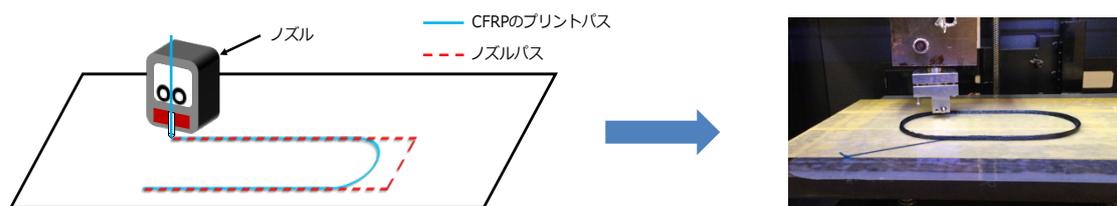


図 12 コンパクションローラーによるフィラメントのホットテーブルからはがれの抑制



図 13 産業用ロボットに設置した成形装置全体図

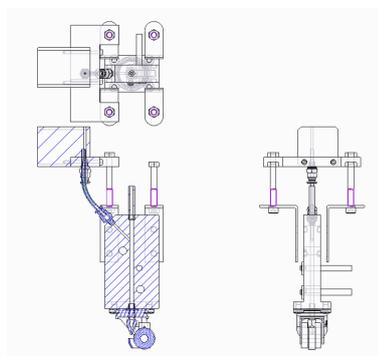


図 14 産業用ロボット設置プリンタのノズル部拡大写真

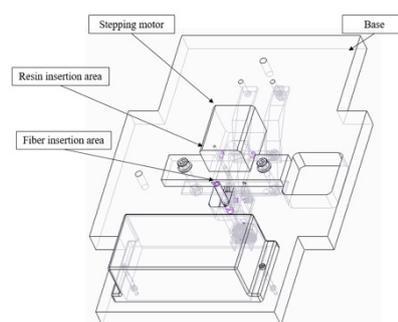
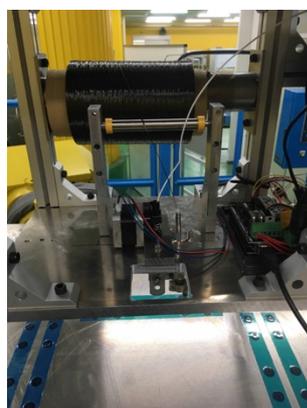
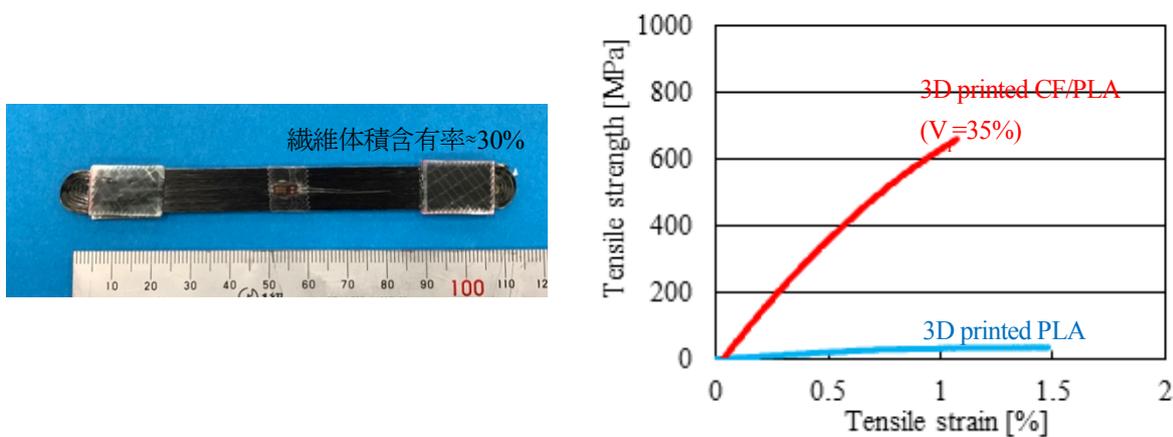


図 15 産業用ロボット設置プリンタの繊維及び樹脂供給部ベース

【1-2】連続炭素繊維 3D プリンター成形品の評価

1-1で開発したキャスターローラー方式のノズルを用いて、一方向CFRP試験片を3Dプリントした(図16a)。この一方向CFRP試験片の引張試験を実施した結果、引張弾性率60GPa以上、引張強度600MPa以上を達成した(図16b)。

さらに、任意の繊維配向が実現可能な連続炭素繊維3Dプリンタ製品の性能を引き出すためには、最適設計の適用が不可欠である。しかしながら、設計自由度の高さから大型複雑構造の最適設計には計算コストが増大してしまうという問題がある。そこで、部分構造での繊維配向最適化を行った後に、構造寸法を最適化する2段階最適化法を提案し、その有効性を示した。



(a) 3D プリントによる試験片

(b) 引張試験結果

図 16 3D プリントした一方向CFRP試験片の引張試験

(2) 炭素繊維切断機構の導入と繊維配向制御への対応

【2-1】炭素繊維切断機構の導入

連続炭素繊維複合材料 3D プリンターを用いて自由な 3 次元立体造形を行うためには、適宜炭素繊維を切断しながらプリントする必要がある。炭素繊維の切断にはせん断、超音波カッター、アーク、レーザーによる切断などさまざまな方法が考えられるが、本年度は、切断面が美しく連続的に切れ、装置が小型かつ安価である回転円形刃を用いたせん断による切断機構の導入について取り組んだ。アクチュエーターには毎分 20000 回転可能なブラシレスモーターAK2007 を用い、モーターに円形刃を取り付けることで、繊維切断機(図 17)を作製した。

切断機取り付けのため 3D プリンターの Y 軸シャフトにさらにもう一つシャフトを固定し、新しく設置したシャフトに切断機を取り付けた。このように設置することで切断機は 3D プリンターのヘッドが Z 軸方向に動く際に、切断機も同時に Z 軸方向に動くため Z 方向への制御が不要になる。Y 軸方向への移動は、ステッピングモーターの動力をタイミングベルトにより切断機に伝えることで行った。3D プリンターにはフィラメントを送るためのステッピングモーターが 2 個取り付けられているが、そのうちの 1 つを切断機構の Y 軸方向動力として使用した。図 18 に切断機構を取り付けた概念図を、図 19 に切断機構を取り付けた 3D プリンターの写真を示す。3D プリンター用の制御マイコンファームウェアには

オープンソースである Marlin を使用し、Marlin を一部書き換えることで G-code による切断制御を実現した。

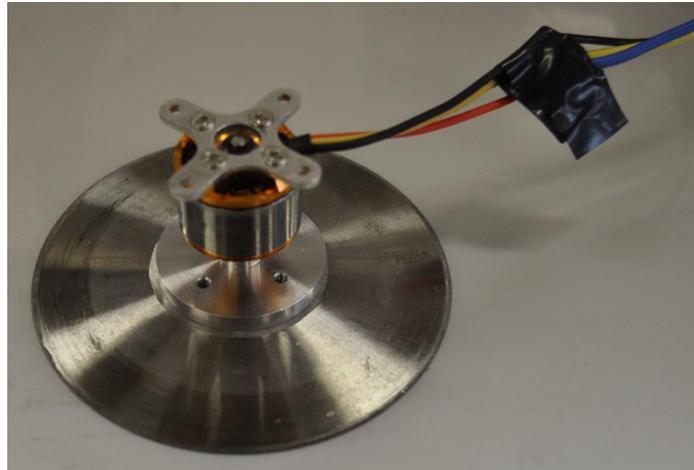


図 17 ロータリーカッターを利用した炭素繊維切断機能の導入

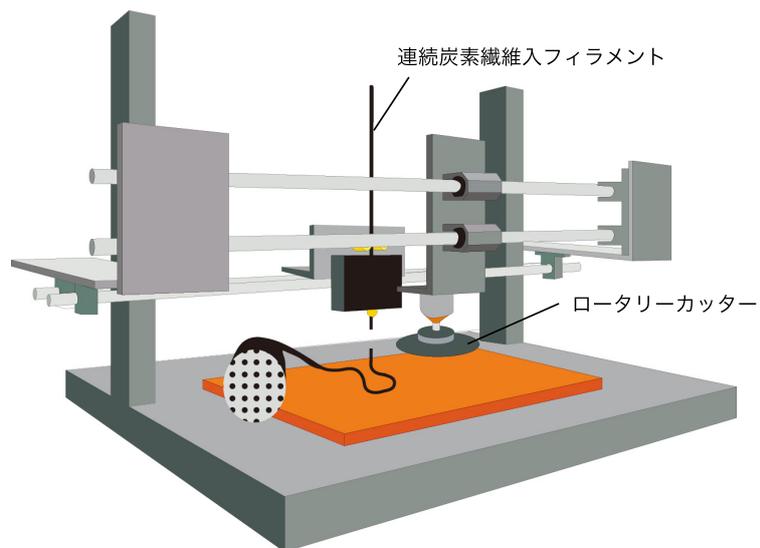


図 18 FDM 3D プリンターへの繊維切断機構の導入概念図



図 19 FDM 3D プリンターへの繊維切断機構の導入した装置写真

【2-2】繊維配向最適化

繊維含有率制御については、基礎検証した繊維配置箇所を最適制御するソフトウェアの最適性能高度化を実施した。具体的には現在の印刷ヘッド位置からの動き、方向とスピード、繊維の有無を設計変数として、目的関数を成形時間とする場合、引張強度最大化とする場合、剛性最大化とする場合、破壊直前に塑性変形を生じる場合などの各例について、最適化を実施した。

CFRP では引張と圧縮の強度が異なるため、単に弾性係数の異方性が存在する以上の強い異方性がある。従来の 2 次多項式の応答曲面を用いた積層構成最適化は座屈など剛性に起因する問題が扱われてきているが、破壊を拘束条件にするような問題では十分な効果が期待できない場合が多かった。これは、FRP の剛性と破壊強度はそれぞれ独立した物理定数であり、従来手法で利用されてきた積層パラメータが剛性の変数である事から破壊を取り扱う問題には適さないことが大きな原因である。従来研究でも破壊問題を扱った例はあるが、これらは構造的に剛性が支配的な問題であったり、たまたま、最適積層構成が一致したりした例に過ぎない。破壊を取り扱う積層構成最適化問題において剛性積層のみを変数とすることでは不十分であり、有効な手法が求められている。以上の背景から、本研究では、複合材料の破壊を取り扱う最適化問題を対象とした。また本研究ではその中でも、簡単化のために破壊荷重最大化の最適化問題を取り扱った。

強度予測のための複数の応答曲面を作成するに当たっては、それぞれの層毎に実験計画を行うと点が膨大となるため、全ての応答曲面で実験点（解析すべき繊維方位）を共通化することが望ましい。実験点の選択では全ての層において、繊維方位をあらかじめ決めた 0、45、-45、90 層が同様に含まれることが好ましい。ただし、バランスルールを適用する場合には 45 度と-45 度は必ず交互に現れるため共に 45 と表記する。全ての配向角をほぼ同数表れるようにする実験計画法としてラテン超方格を用いる。

ラテン超方格による実験計画は以下の手順で行った。サンプル数を $3N$ とし N 個の 0 と N 個の 45 と N 個の 90 を用意した。実験点が 9 点の 4 層の場合の例を示す。

N.1 0,0,0,0

N.2 0,0,0,0

N.3 0,0,0,0
 N.4 45,45,45,45
 N.5 45,45,45,45
 N.6 45,45,45,45
 N.7 90,90,90,90
 N.8 90,90,90,90
 N.9 90,90,90,90

この各列をランダムに並べ換え得られた繊維配向角の組合せの例を次に示す。得られた表を積層構成に変換する。この際、奇数番目に表れる45を45として、偶数番目に表れる45を-45と置き換える。

N.1 0, 45,0, 90
 N.2 45,0, 90,0
 N.3 90,0, 90,0
 N.4 45, 0,45,45
 N.5 0,45,45,45
 N.6 0, 90,45, 90
 N.7 90, 45, 0, 45
 N.8 0,90,90, 0,90
 N.9 45, 90,90, 0

得られた実験点から応答曲面を作成する際は次の手順に従った。k層目の配向角が0の実験点のみを選択し応答曲面を作成する。同様にk層目の配向角が45または-45の実験点のみを選択し応答曲面を作成する。同様にk層目の配向角が90の実験点のみを選択し応答曲面を作成する。これらにより注目する層における目的の実験点を選択することが可能となり、N層分の実験点は全て共通のものを使用することが可能となる。

結果として得られた応答曲面の精度を図20、図21に示す。横軸が真の破壊指標であり、縦軸が予想される破壊指標である。対角線上にプロットされることが正しい予測を意味している。図21の応答曲面が優れた精度を有していることがわかる。

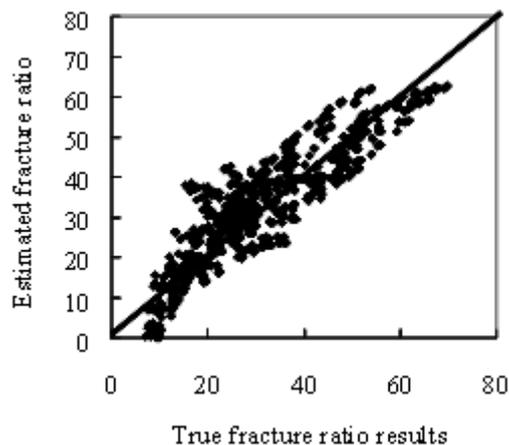


図20 多項式応答曲面

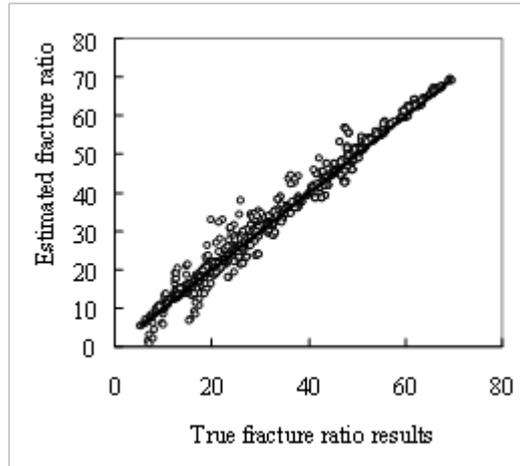


図 21 Kriging 応答曲面

CFRP の力学的特性はスライス方位と繊維配向に大きく依存していて、面内繊維配向の研究は行われているがスライス方位（図 22）の研究は行われていない。そこで、スライス方位の最適化手法の確立を目標としていて、図 23 に示す主応力方位に基づいたスライス方位の決定方法を確立するために、スパンを変化させた三点曲げで妥当性を評価した。破壊基準値から求めた真のスライス角度と主応力方位に基づいて求めたスライス角度を求めた結果、誤差は 10° 以内であり、スライス方位の推定がおおよそ可能だと分かった（図 24）。

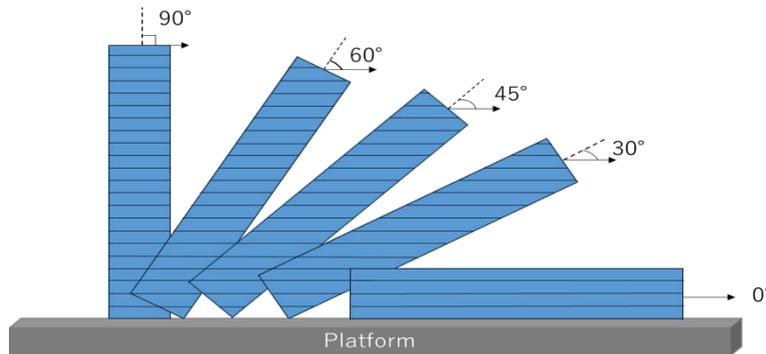


図 22 スライス方位の定義

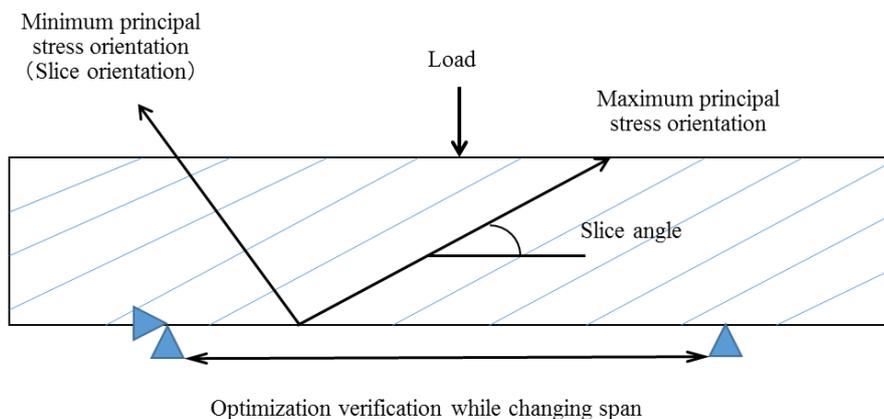


図 23 スライス方位と主応力方位の関係

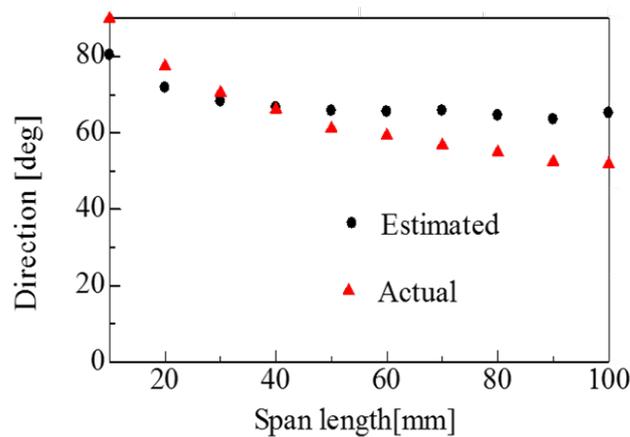


図 24 スライス方位推定値と真の最適スライス方位

(3) 革新的高機能・高特性 CFRP 構造成形への対応

【3-1/2】 3Dプリンターによる革新的 CFRP 構造成形の基礎的検討

高精度な造形を可能とする連続炭素繊維3D プリンターを作製し、コア形状の自由な設計、サンドイッチ構造の一体造形、3点曲げ試験を行った。手法として、一般的なFDM 式3D プリンターより本実験で使用するフィラメントの径が細いため、ノズル内でフィラメントの座屈が発生する。そこで、ノズル内に PTFE チューブを通して細径フィラメントへの対応を行った。また、連続炭素繊維3D プリンターでは一筆書き条件での造形のため、コア材の造形は、ユニットセルが周期境界条件を満足させる事によって、一筆書きでの造形を可能とし、さらには連続炭素繊維の張力により、サポート材なしで広いブリッジ空間の造形が可能になると考えた。

実験結果として、提案手法におけるコア形状、サンドイッチ構造の造形が可能であることを示した(図 25)。3点曲げでは、曲げ弾性率はひし形コア形状が高く、ハニカムコア形状が低い結果となった(図 26)。これはコア材の繊維配向分布とスキン材とコア材の接着面積が関係すると考えられる。また表面粗さの測定では、CFRTP 製サンドイッチ構造は、ABS 製サンドイッチ構造と同等以上の表面粗さを得た。以上より、提案手法において従来のFDM 式3D プリンターと同等以上の表面粗さでコア形状の自由な設計、サンドイッチ構造の一体造形が可能であることを示した。



図 25 ハニカムコアサンドイッチ構造の一括プリント

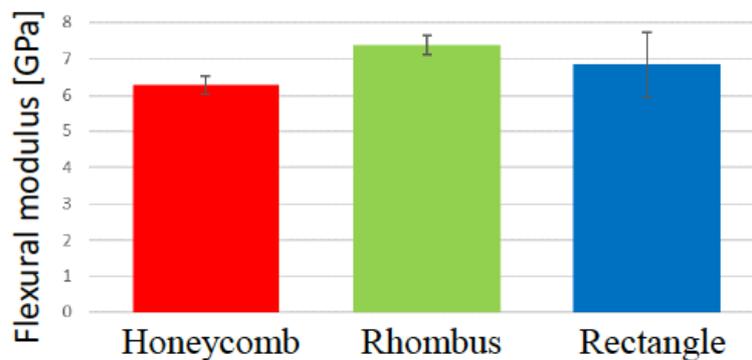
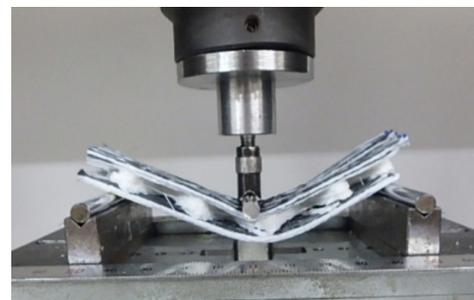


図 26 各種コア形状サンドイッチ構造の曲げ剛性

さらに炭素繊維複合材料を表皮材とし、ABS樹脂をコア材としたマルチマテリアルサンドイッチ構造のワンプロセス成形を実現した。図 27 に成形したサンドイッチ構造及びその強度試験の様子を示す。一般的にサンドイッチ構造では表皮材とコア材とを別々に製造した後、それらを接着接合するため、軽量化が実現できるが高コスト構造であり、成形にも時間を要する。本手法により、マルチマテリアルサンドイッチ構造をワンプロセスで成形可能であり、コスト及び成形時が大幅に短縮できることを実証した。



(a) 試験前



(b) 試験後

図 27 マルチマテリアルサンドイッチ構造の強度評価試験

【3-3-1】航空宇宙用構造への3Dプリンターの適用

連続炭素繊維3Dプリンタの利点と欠点とを整理し、航空宇宙機構造に適用可能な構造部位と構造様式の検討を行った。高い設計自由度と軽量構造の実現可能性に引き換え、生産速度が劣ることが連続炭素繊維3Dプリンタの欠点である。そのため、航空機の配線ブラケット等の2次構造や、宇宙機構造など、多品種少量生産生産品への適用が最適である。また、その形態としては、航空宇宙機 CFRP 構造で多用される、補強平板構造を基本とした構造が適すると結論付けた（図 28）。



図 28 ハット型ストリンガ形状の製造性確認

【3-3-2】自動車・医療・一般産業機器への3Dプリンターの適用

アイソグリッド構造の成形性の検証を行うことを可能にする3Dプリンターの機構の検討及びその装置化を研究開発目標として検討を進めた。具体的にはまず、連続繊維3Dプリントを実現するためのプリンタヘッドとテーブルとの制御関係の再検討、さらに繊維の繰り出し方法、繊維切断機構についてそれぞれ検討を行った。その結果、プリンタヘッドを駆動させるのではなく、産業用ロボットにテーブル（定盤）を把持させ、定盤側で成形位置制御を行う基本コンセプトを構築し、その技術を検証する要素試作機を開発する事ができた。

開発した要素試作機を図 29 に示す。なお、本試作機は以下に示す3つの要素から構成されるものである。

- 1) プリプレグ巻出部（プリンタヘッド）
- 2) ロボット部（定盤把持及び成形位置制御）
- 3) 制御部（プリプレグ巻出とロボットとの同期制御）



図 29 全体構成

1) プリンタヘッド部

基本的な機能としては、UD プリプレグの巻き出し、及び超音波カッターによる繊維切断機構を有する。UD プリプレグ巻き出しにあたっては、図 30 の通り二つのローラーとその間にあるクランプ及び超音波カッターを利用することで、任意の長さでプリプレグを巻きだす事ができるようにした。

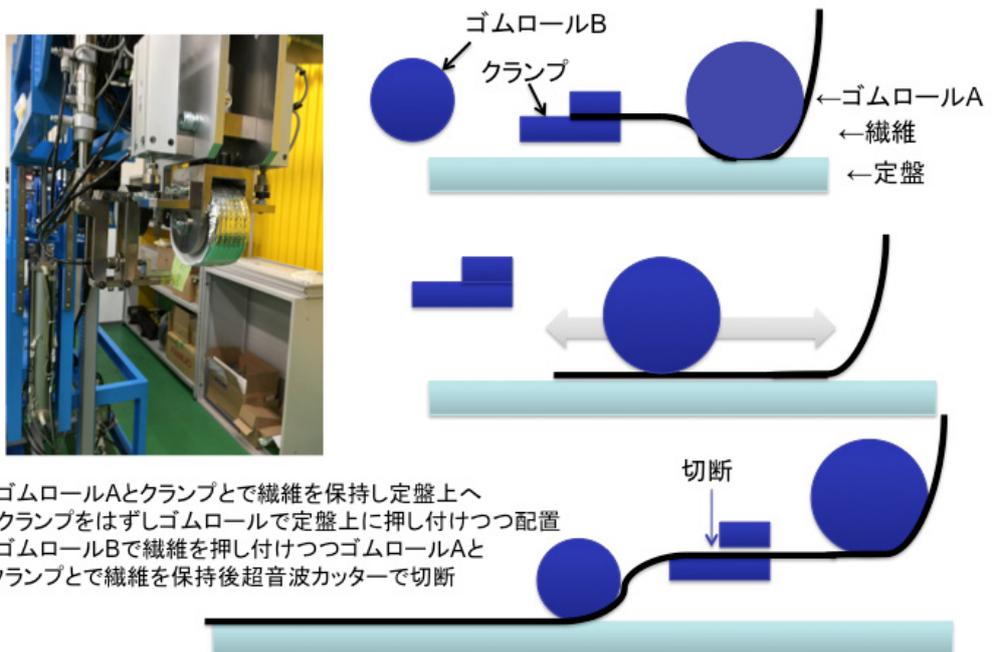


図 30 プリプレグ巻き出し機構

2) 定盤及び成形位置制御部

一般の3Dプリンターを考えた場合、プリンタヘッドを定盤の上で任意に駆動させつつ樹脂を吐出して積層する方法が一般にとられているが、本プロジェクトにおいて必要とされるプリンタヘッドの機能は、例えば炭素繊維に樹脂フィラメントをその場で含浸させるための繊維へのプレヒート機能や、超音波やレーザーで繊維を切断する機能など、多々要素を盛り込む必要がある。つまりプリンタヘッドはより大きく複雑な形となり、このようなヘッドを駆動させるためには、さらに大きなロボットを導入していかなければならないことになる。一方で、このようなヘッド部分は、むしろ駆動系から独立させ、定盤側を駆動させて位置制御をする方法も考えられる。その場合は、プリンタヘッド部から巻き出されたUDプリプレグを定盤上の適切な位置に配置されるよう、ロボットに把持させた定盤の位置を任意に変えることで調整する。この方法であればプリンタヘッドは自由に拡張ができる上、ロボットとしても定盤を把持するだけの比較的小さなサイズで対応する事ができる(表2)。以上の事から、本プロジェクトにおいては、ロボットにより定盤の位置制御を行う形で成形位置制御部を構築した(図31)。

表2 ヘッド駆動方式と固定方式とのトレードオフ

	ヘッド拡張への対応	駆動ロボットのサイズ
ヘッド駆動方式	×	×
		(ヘッドサイズに応じて大きくなる)
ヘッド固定方式 (テーブル駆動)	○	○
		(テーブルを駆動させるのみ)



図31 定盤制御ロボット

3) 装置仕様の最適化

検証結果のフィードバックによる装置仕様の最適化を行い、自動車構造等を対象とした連続炭素繊維複合材料 3D プリンターで成形可能なアイソグリッド構造を作製を目的として開発を進めた。

装置仕様最適化とは、以下の3つである。

- 3-1) ガイド機構の改良（繊維蛇行の改善）
- 3-2) 張力制御装置の導入（繊維弛みの改善）
- 3-3) カット機構の改良（カット時の目よれ改善）

3-1) ガイド機構の改良

繊維蛇行の改善を目的とし、ガイド機構の改良を行った。改良前は、ニップローラーより先のプリプレグは、ほぼフリーの状態でゴムローラーと定盤の間に抑えられた状態で、これが蛇行する要因となっていた。そこで、ニップローラー後にプリプレグをまっすぐゴムローラーまで通すガイドローラーを取り付け、横方向へのずれを最小限に抑える機構とした（図 32）。これにより、改良前は 5~8mm あった蛇行を、2mm 未満まで抑えることが可能になった。

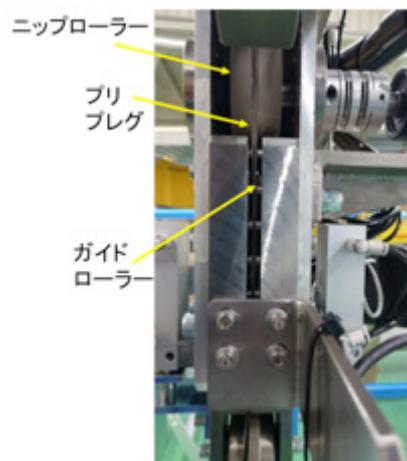


図 32 ガイド部

3-2) 張力制御装置の導入

プリプレグの弛み・蛇行の抑制として、張力制御装置の導入を行った。導入した装置は、三菱電機(株)製 LD-30FTA 形半自動テンションコントローラーである（図 33）。



図 33 テンションコントローラー

張力制御装置の導入により、各ローラーにかかるプリプレグの張力を数値的に制御出来るようになり、従来までの課題であったプリプレグの弛みや蛇行を抑制出来るようになった（図 34）。



図 34 張力制御機構

（左）張力をかけていない状態（右）テンションコントローラーで張力をかけた状態

3-3) カット機構の改良

UD プリプレグカット時の目よれ対策として、カット機構の見直しを行った。昨年度までハサミによる横からのカット機構を取り入れていたが、カット時にプリプレグが横方向に動いてずれたり繊維が広がったりしてしまい、本来の積層進行方向から外れた状態で積層が再開され、これが縦方向への積層のずれの原因となっていた。

その対策として図 35 のように超音波カッターによるプリプレグカット機構を取り入れた。また、カット前のプリプレグの走行ラインをより安定させるために、カット機構の前にガイドローラーを取り付けた。

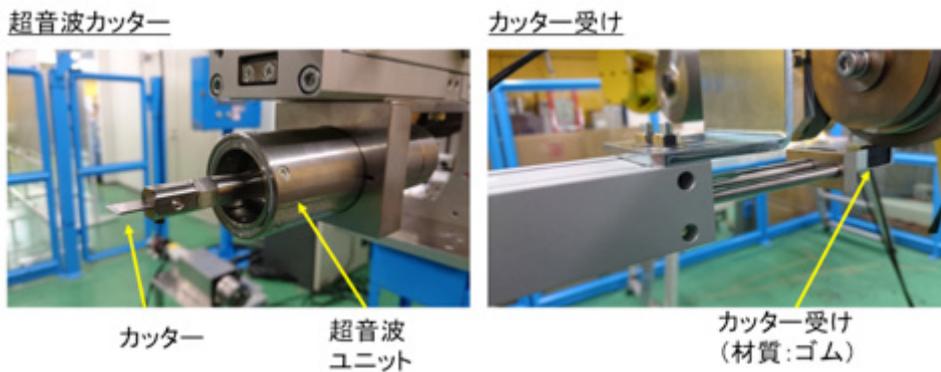


図 35 今回導入したカット機構

カット時の動作は、1 ラインの積層後にカッター受けがプリプレグの背面に位置するように横から飛び出し、正面からカッターの刃を入れてカットする。正面から刃を入れることにより、ハサミのように横からのカットによる横方向へのズレや繊維の拡がりを抑制することが出来た (図 36)。



図 36 カット時の動作とカット後のプリプレグ状態

4) 1m×1m のCFRP 製アイソグリッド構造体の成形

上記の装置仕様最適化を実施した後、1m×1m のCFRP 製アイソグリッド構造体の成形を行った。最適化により、積層する際の繊維の蛇行、弛み、目ヨレに大幅な改善が見られ、図 37 のような厚み約 10mm 成形体を作製することが出来た。



図 37 1m×1m のCFRP 製アイソグリッド構造体 (左) 積層直後 (右) 硬化後

5) 熱可塑プリプレグ成形用ノズルを導入しての試作実証

日本大学が開発した熱可塑プリプレグ成形用ヘッド機構を、連続炭素繊維複合材料 3D プリンターヘッドに取り付け、試作を試みた (図 38)。

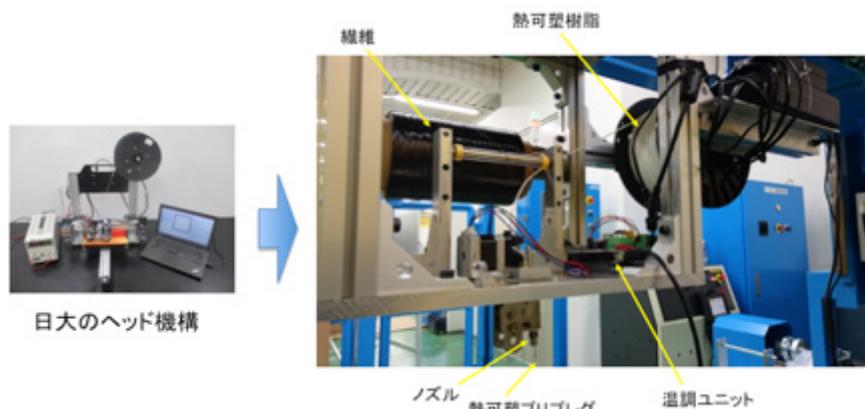


図 38 日大の熱可塑ヘッド機構と取り付け後の連続炭素繊維複合材料 3D プリンター

今回の試作により、熱可塑樹脂と 1K 炭素繊維からなるプリプレグを 74 層積み重ねた図 39 のようなトラック形状の積層物を成形することが出来た。今後、更なるヘッド機構の最適化やロボット動作の最適化により、より精密で複雑な形状の成形にも対応出来る見通しを得た。

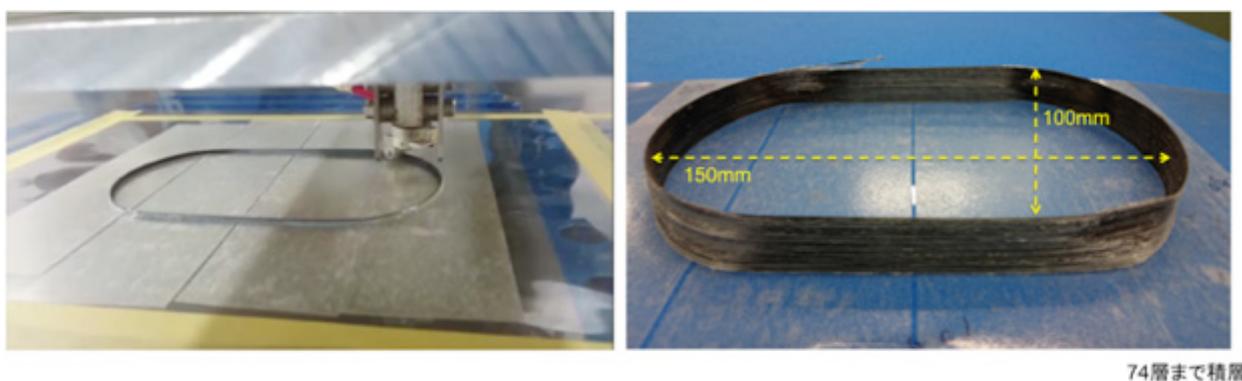


図 39 積層中の様子と 74 層積層後

最終章 全体総括

本年度の補助事業の成果をまとめると下記のとおりである。

(1) 連続炭素繊維のその場合含浸に関する課題への対応

【1-1】連続炭素繊維の導入機構の開発

ノズル先端プレス機構を開発し、特許も出願した。実際に産業用ロボットに設置し、試作実証も行った。

【1-2】連続炭素繊維 3D プリンター成形品の評価

3D プリントした成形品の表面性状を観察し、従来品と同等以上(表面粗さが 17%以上の改善)であることを確認した。力学的特性については大きく向上していることを実証した。

(2) 炭素繊維切断機構の導入と繊維配向制御への対応

【2-1】繊維切断機構の導入

炭素繊維切断機能の導入については、まずロータリーカッターによる繊維切断機構を導入した。さらに、3D プリンター制御基板 Arduino と G-code を用いて、繊維や CFRTP の切断を実現し、自動的に切断をしながらプリントすることに成功した。

【2-2】繊維配向最適化

成形対象の3次元 FEM 解析による主応力方位の決定し、最小主応力方位を z 軸として積層構成最適化を実施し最適角と 1° 以内の精度があることを実証した。面内配向最適化により座屈荷重比 60%向上することを示した。

(3) 革新的高機能・高特性 CFRP 構造成形への対応

【3-1/2】3Dプリンターによる革新的 CFRP 構造成形の基礎的検討

より軽量化を目指すためコア材とハニカム形状とするサンドイッチ構造の一括プリントを実施した。さらに炭素繊維複合材料を表皮材、ABS をコア材としたサンドイッチ構造をプリントを実現した。

【3-3-1】航空宇宙用構造への 3D プリンターの適用

提案した2段階最適設計手法の適用により、一般的な CFRP の補強板構造の座屈荷重を約 58%向上できる事を示した。また、連続炭素繊維 3D プリンタによって、検討する補強板構造（オメガストリンガ補強平板）が製造可能である事を示した。

【3-3-2】自動車・医療・一般産業機器への 3D プリンターの適用

寸法 1m × 1m の炭素繊維複合材料製アイソグリッド構造を改良した試作機により試作した。

航空機構造および宇宙機構造では、強度ではなく剛性標定となる部材も多く存在する。その様な箇所に連続繊維 3D プリント複合材を適用することで、大幅な構造重量削減が実現する可能性がある。適用先は航空機・宇宙機構造に限らず、一般産業や医療産業など、幅広い分野への応用が期待される。

想定する市場のうち、まず、航空宇宙・自動車分野においては、これまでにない新たな CFRP の高強度・高剛性立体造形の実用化を行う。例えば孔周りの応力集中を回避した構造や曲げ加工可能な構造、さらには 3 次元的に層間強化した構造など、従来のプリプレグ成形方法ではなしえない力学特性や機能をもつ CFRP 構造部材を、自動立体造形による強い価格競争力を持って提案することができる。

また、本技術は少量多品種生産を特に求められる医療・介護分野において大きな展開可能性をもつ。例えば義足やアシストスーツなど、CFRP 化することで薄肉かつ軽量にしたい引き合いは多々あるが、製品毎に複雑かつ専用の成形型が必要となる一方、量産となったとしても年間 100~200 台程度と数は少なく、費用対効果の面からこれまでほとんど実用化に至っていない。本研究開発で実現する自動立体造形技術により CAD データから型レスで様々な部材を安価に提供することが可能となれば、これまで CFRP 化による商品開発を実現できなかった医療介護分野において大きなブレイクスルーとなる。

さらに、一般産業機器においても、これまで金型費をまかなうことのできない小ロットの機械部品は数多く存在している。3D プリンター技術による小ロット品の経済性向上によって、機械部品の事業規模の一層の拡大が見込まれる。

販売促進戦略として、スーパーレジン工業は、航空・宇宙分野を得意とする三菱重工等の大手重工メーカー、三菱電機、日本電気の国内 2 大衛星メーカーとの取引を通じて、航空宇宙分野において長年の実績と信頼関係を築いている。加えて、JAXA プロジェクトに対する部品供給や共同開発を実施してきた。航空・宇宙分野については、これら既存の取引先との共同開発をベースに、新たな軽量立体造形部品の販売につなげていく。

自動車分野においては、これまで複数の国内大手自動車メーカーに対して部品供給のみならず、開発段階での試作協力を行ってきた。少量多品種生産を可能にする本技術の適用により、更に迅速かつ多様な開発試作が可能になることから、開発自体を 1 つの事業分野として確立することが可能である。量産段階においては、本研究および個々の開発試作で獲得した技術を大手自動車メーカーにライセンス供与する。

医療介護をはじめとする一般産業分野においては国内の多様なメーカーと様々な部材の取引や開発協力をっており、本開発成果の実用化及び普及は、既存の商流において十分に効率的に展開可能である。