

編織技術を活用した炭素繊維強化樹脂の加工性向上に関する試験研究

早乙女 秀丸* 仁平 敬治* 飯村 修志*

本庄 恵美** 中野 睦子** 篠塚 雅子**

1. はじめに

炭素繊維強化樹脂（以後 CFRP）は、軽量高強度な炭素繊維とプラスチックを複合化した優れた素材である。現在、軽量化を目的に航空宇宙・次世代自動車等、種々のものづくり産業において活用が進められており、今後の需要拡大が期待されている。¹⁾

CFRP には、作製に使用する樹脂の種類により大きく 2 種類あり、1 つは熱硬化性樹脂を使用した CFRP、もう 1 つは熱可塑性樹脂を使用した CFRP である。熱硬化性樹脂を用いた CFRP は、現在主流であり、航空機等に使用されている。この CFRP は形状の自由度が高いが、仕上がりまでの工程が長いことから、高コストの製品にしか使用できない。一方、熱可塑性樹脂を用いた CFRP は形状の自由度は低い、加工しやすいことから自動車などの量産部品への適用が検討されており、今後の需要増が見込まれている。

2. 目的

本研究では、生産性が高く、今後の需要増が期待される熱可塑性樹脂を用いた CFRP を対象とし、成形加工に必要な基礎的データの蓄積、量産化に資する既存加工技術の転用等を進めるとともに、編織技術を活用した新たな炭素繊維クロス部材を作製し、成形性、加工性を向上させることを試みる。

今年度は、熱可塑性樹脂と炭素繊維編み物を用いた CFRP のプレス成形、炭素繊維入り樹脂の射出成形、炭素繊維クロスを用いたインサート成形の 3 加工について実施し、条件の違いによる特性評価を実施した。

3. 研究内容

3.1 炭素繊維編み物を用いた CFRP の成形実験

3.1.1 カバーリングした炭素繊維のニット糸作製

繊維の屈曲による炭素繊維の損傷を防ぐため、炭素繊維に他の繊維でカバーリングしたニット糸を作製した。芯となる炭素繊維には 1 K（東レ株式会社製）を、カバーリング糸には下撚りにウーリーナイロン糸（56T/2）、上撚りにナイロン引撚糸を用いた。撚糸にはイタリー式撚糸機（TXS-40 久保田兄弟鉄工所製）のカバーリング用錘を用い、撚り数各約 1640T/m の条件で、ダブルカバーリングとした。

作製したニット糸については、編成し易くするため、サイジング機 YS-6（株式会社ヤマダ製）を用い、ポリビニールアルコール系糊剤によりサイジング加工を行った。

3.1.2 カバーリングした炭素繊維ニット糸の編成

カバーリングした炭素繊維のニット糸は図 1 に示す無縫製横編機 SWG091N215G（株式会社島精機製作所製）

を用い、針抜きにより筒状に編成した。編成した生地を図 2 に示す。



図 1 無縫製横編機



図 2 編成した生地

3.1.3 CFRP シートの作製

評価、実験に用いた CFRP シートは図 3 に示したように炭素繊維編み物と樹脂フィルムを交互に積層したものを、加熱、プレスして作製した。なお、樹脂フィルムはナイロン 6（ユニチカ株式会社製 A1020BRL）のペレットを加熱プレスし、厚さ 100 μm に成形したものを使用した。

昨年まで実施していた炭素繊維クロスを使用した CFRP シート作製の場合、型枠を使用せず作製していた。しかし、炭素繊維編み物の場合、型枠を使用せずにプレスを行うと図 4 左のように、繊維が圧縮荷重で破壊されてしまう。そのため、今回実験に使用した CFRP シートは 0.5mm の型枠を使用し作製を行った。

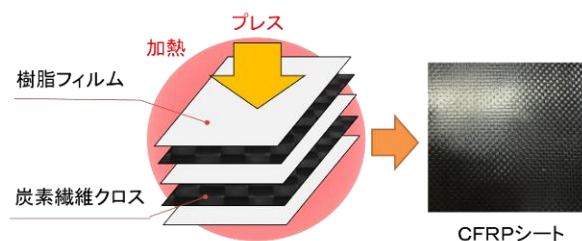


図 3 CFRP シートの作製

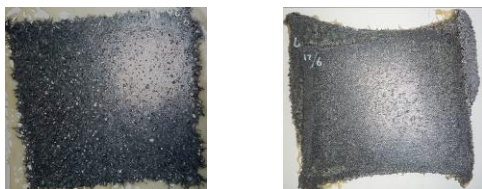


図4 炭素繊維編みを用いたCFRPシート
(左：型枠なし 右：型枠あり)

3.1.4 炭素繊維含有量測定

炭素繊維編み物を使用したCFRPシートについて、示差熱重量同時分析装置(TG-DTA) Q600 (TAインストルメント・ジャパン株式会社製)を用いて炭素繊維含有量の測定を実施した。

表1が測定結果である。昨年度まで成形評価に使用していた平織を用いたCFRPシートと比較し、編み物を用いたCFRPシートは炭素繊維含有量が重量比で3分の1程度に低下した。

これは、カバーリングが大きく影響していると考えられる。図5は炭素繊維編み物を使用したCFRPシートの断面観察結果である。炭素繊維の周りにはカバーリングに使用したウーリーナイロン糸がある分、織物を使用したものに比べ繊維を密集させることができず、樹脂量が増加したと考えられる。

表1 炭素繊維含有量

サンプル	重量比 (%)	体積比 (%)
編み物を用いたCFRPシート	17.1	11.7
平織を用いたCFRPシート	60~65	49~54

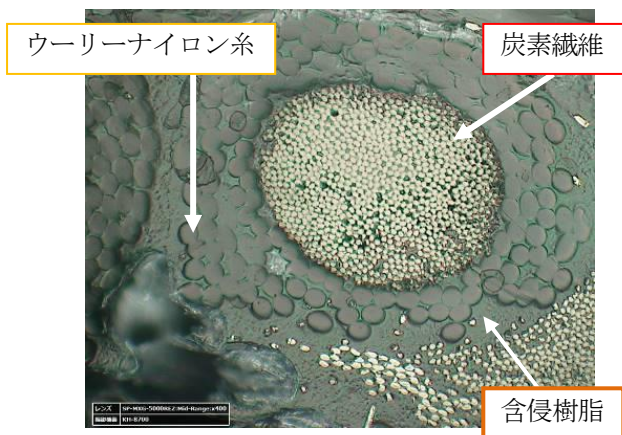


図5 編み物の断面

3.1.5 強度評価

炭素繊維編み物を使用したCFRPシートについて、引張強度試験を実施した。試験には、株式会社島津製作所製万能試験機(500N)を用いて行い、幅20mm、厚さ0.8mmの試験片で評価した。なお、チャック間距離は50mm、引張速度は毎分1mmとした。

図6、表2に測定結果を示す。今回の実験では含侵樹脂よりも、強度が低下する結果となった。これは、炭素繊維編み物は変形量が多く、今回の場合、編み物

が伸び引張強度が出る前に、含侵樹脂の伸びが足らず破断してしまったためと考えられる。

表2 引張強度試験の結果

サンプル	最大応力 (MPa)	弾性率 (GPa)
炭素繊維編み物を使用したCFRPシート	22.8	1.46
(参考) ナイロン6	72.5	2.74

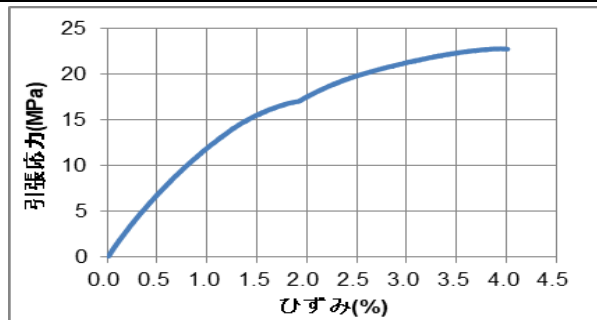


図6 炭素繊維編み物を使用したCFRPの応力ひずみ線図

3.1.6 プレス成形評価

炭素繊維編み物を用いたCFRPシートの成形実験を実施した。評価には、角絞り型(1辺50mm正方形)とサーボプレス機(株式会社アマダ製 SDH110)を使用した。成形は、CFRPシートを電気炉で250℃にプレ加熱し、80℃の金型で加工速度20mm/sで行った。

炭素繊維編み物を用いたCFRPの場合、予備加熱時に図7のようにシートがカールしてしまう。これは、予備加熱で拘束している樹脂が溶けて、編みの安定形状であるカールした状態に戻ろうとするためである。そのため、今回はテフロンコーティングを施した、ステンレス編みを使用し、図8のようにCFRPシートを挟み予備加熱を実施した。



図7 カールしたシート 図8 予備加熱状態

今回の試験では、図8に示す、250℃でプレ過熱し、厚さ1mmのCFRPシートに、厚さ0.05mmのテフロンシートを下側において成形したものが、しわがなく、表面状態も良い結果となった。

今回実験に使用した金型は、クリアランスが1mmに設計されているが、最良であった条件はCFRPシートとテフロンシートの厚みを足すと1.05mmとなる。一般的

な深絞り加工（軽いしごき絞り）は、クリアランスを被加工材厚さの 1.1~1.3 倍に設定し加工する。しかし、今回は、被加工材厚さに対して 0.95 程度になり、よりしごきを積極的にした条件になっている。このようなことから、炭素繊維編み物を使用した CFRP シートは、クリアランスを狭くし、しごぐ必要があることが確認できた。これは、短繊維編み物は加熱すると膨らむためであり、これを抑えるためにはクリアランスを厳しくし、シートをしごきながらつづす必要があるためと考えられる。

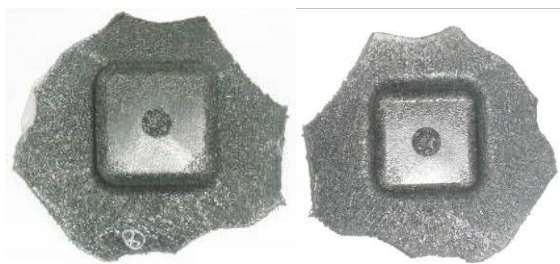


図9 炭素繊維編みのプレス成形
(左：外側 右：内側)

3.2 炭素繊維入り樹脂の射出成形について

3.2.1 成形条件

炭素繊維入り樹脂は、成形条件によって強度が変化する。本実験では成形時のスクリュ回転数と強度の影響を調査するために、長繊維 CF 強化 6 ナイロン（東レ株式会社製 TLP1040 炭素繊維含有量 20%）を用いて試験を実施した。

成形には、ファナック株式会社製射出成形機 ROBOSHOT α-S100ia を使用し、スクリュ回転数以外の条件については表 3 に示す条件で行った。なお、今回はスクリュ回転数に合わせて計量開始時間を調整し、滞留時間が約 10 秒になるように設定した。これは、炭素繊維の固化や樹脂の劣化を防ぐためである。

表 3 共通成形条件

項目	設定	項目	設定
射出速度	毎秒 12mm	背圧	6MPa
成形温度	275℃	冷却時間	40 秒
金型温度	75℃	滞留時間	約 10 秒
保圧	65MPa, 40 秒		

3.2.2 強度評価

成形時のスクリュ回転数と強度の影響を調査するために、引張試験と三点曲げ試験を実施した。

引張試験については、インストロンジャパン製万能試験機 (150kN) を用い、幅 10mm、厚さ 4mm、標点間距離 50mm のダンベル試験片で実施した。なお、引張速度については、弾性率は毎分 1mm、最大応力は毎分 50mm に設定した。

三点曲げ試験については、株式会社島津製作所製万能試験機 (500N) を用い、幅 10mm、厚さ 4mm の試験片で実施した。なお、圧縮速度については、毎分 5mm に

支点間距離は 64mm に設定した。

表 4 と図 10 に測定結果を示す。今回の実験では、スクリュ回転数の違いによる強度差は 6% 程度と、少なかった。炭素繊維入り樹脂の射出成形では、スクリュ径が小さいほど、炭素繊維の切断が顕著になる傾向がある。今回の実験では 32mm の小型スクリュを用いて成形したため、スクリュ回転数よりもスクリュ径の影響が大きくなり、差が少なかったと考えられる。

表 4 回転数と強度

	引張 最大応力 (MPa)	引張 弾性率 (GPa)	曲げ 最大応力 (MPa)	曲げ 弾性率 (GPa)
40rpm	248.5	15.9	282.4	10.9
60rpm	250.4	16.5	285.8	10.9
80rpm	241.6	15.9	278.7	10.8
100rpm	256.0	15.7	274.1	10.8
PA6	84.2	3.4	61.7	1.5

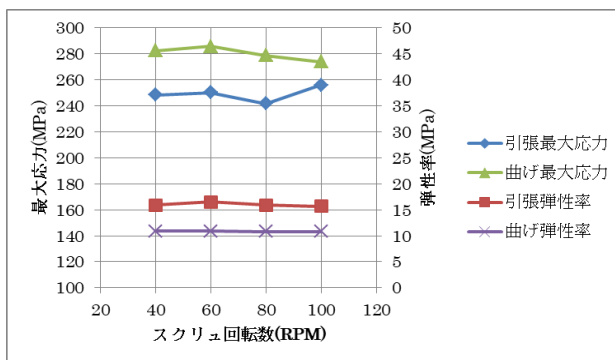


図 10 強度評価結果

3.3 インサート成形について

3.3.1 インサート成形のモデルと作製方法

炭素繊維クロスを用いたインサート成形による、製品の部分強化が可能か検討するために、成形実験を行った。本実験では製品の補強、特にたわみ量低減を想定し、図 11 のような三点曲げのモデルで評価を行った。

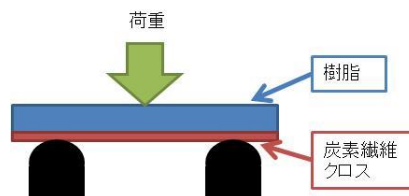


図 11 三点曲げのモデル

インサート部品は、「3.1.3 CFRP シートの作製」に記載した内容と同じ手法で、炭素繊維クロスを加工した CFRP シートを使用した。また、シート表面の樹脂が与える影響を評価するために、図 12 のように炭素繊維クロスに樹脂フィルムを置き含浸させたもの

と、片面のみ含侵させたものを作製した。また、炭素繊維クロスについては、平織で、密度は経糸緯糸ともに1cmあたり5本、繊維は東レ株式会社製T300B-3000-40Bを使用した。

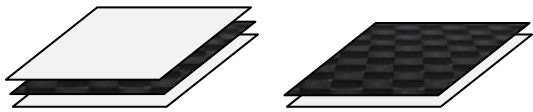


図12 CFRPシートの違い
(左：両面含侵 右：片面含侵)

金型は三点曲げ用試験片を作製する汎用金型を使用し、図13のように切断したCFRPシート(幅10mm長さ75mm)を1枚ずつ稼働側の金型に張り付け、その後成形した。なお、片面の場合は樹脂を含侵させた面を、金型側に張り付けた。

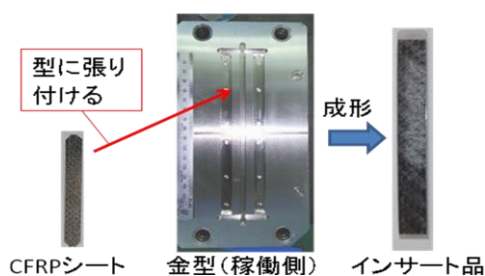


図13 インサート成形

3.3.2 成形条件

インサート成形には、ファナック株式会社製射出成形機ROBOSHOT α-S100iaを使用した。樹脂については、ナイロン6(東レ株式会社製CM1017)を用い、表5の成形条件で、成形を行った。

表5 共通成形条件

項目	設定	項目	設定
射出速度	毎秒12mm	背圧	5MPa
成形温度	270℃	冷却時間	90秒
金型温度	70℃	滞留時間	約10秒
保圧	35MPa, 30秒	スクリュ	60rpm

3.3.4 強度評価

インサート成形品の強度を評価するために三点曲げ試験を実施した。試験には、株式会社島津製作所製万能試験機(500N)を用い、幅10mm、厚さ4mmの試験片で実施した。なお、引張速度については、毎分5mmに、支点間距離は64mmに設定した。

今回の実験では、両面ともに樹脂を含侵させたCFRPシートを用いたインサート成形は、射出成形後試料を型から外す際にシートが剥離してしまい、成形できなかった。逆に、片面のみ場合は、シートの剥離はなく、強度についても表6と図14に示すように、補強しないものに比べ、最大強度が27%、弾性率が40%向上した。これは片面のみの場合、CFRPシートの表面に含侵樹脂が少なく、射出成形で注入した樹脂が炭素繊維クロスに直接入り込み密着性が向上したためと考えられる。

表6 インサート成形品の三点曲げ試験結果

	最大応力 (MPa)	弾性率 (GPa)	備考
両面樹脂含侵のCFRPシート	-	-	試験前にシートが剥離
片面樹脂含侵のCFRPシート	78.2	2.1	最大点でシートが剥離
PA6	61.7	1.5	

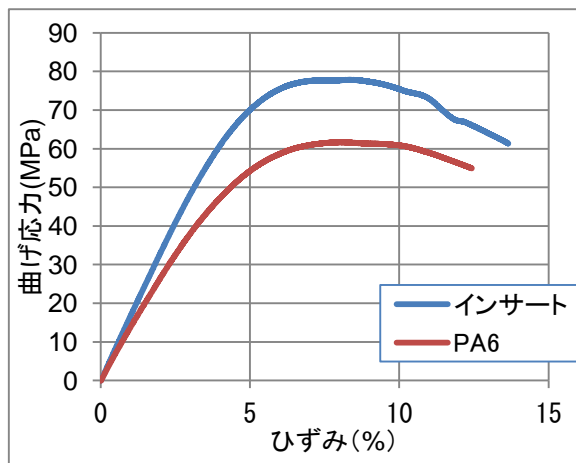


図14 三点曲げ試験結果(グラフ)

3.3.3 インサート成形品の炭素繊維含有量測定

インサート成形品の炭素繊維含有量を評価するために、示差熱重量同時分析装置(TG-DTA)Q600(TAインスツルメント・ジャパン株式会社製)を用いて、測定を実施した。表7に測定結果を示すが、今回作製したインサート成形品は炭素繊維含有量が体積比で3.9%であることが、確認できた。

表7 炭素繊維含有量

サンプル	重量比 (%)	体積比 (%)
インサート	6.0	3.9

4. まとめ

- 炭素繊維編み物を使用したCFRPシートをプレス成形する場合、プレ加熱の段階でシートが膨らむため、金型クリアランスをシート厚みの0.95倍程度にし、シートをしごきながら潰す必要がある。
- 炭素繊維入り樹脂の射出成形については、今回の実験では、スクリュ回転数の違いによる強度差は6%程度と、少なかった。
- 炭素繊維クロスを使用したインサート成形は、炭素繊維含有量が3.9%と少量であっても、補強しないものに比べ、最大強度が27%、弾性率が40%向上することが確認できた。

5. 参考文献

「長繊維強化樹脂の射出成形用スクリュの開発」三菱重工技報 第34巻第2号 戸田直樹・米谷秀雄・黒田英夫・荻谷俊彦 著