

熱可塑性CFRPの立体成形技術の確立(第4報)

—熱可塑性CFRP積層板作製技術の開発—

丹羽厚至、長屋喜八

Development of CFRTP Three Dimensional Molding Technology (IV)

— Examination the method of preparing the CFRTP laminated prepreg —

Atsunori NIWA and Kihachi NAGAYA

炭素繊維強化熱可塑性樹脂(CFRTP)基材を編物で作製し、プリプレグを成形したときの曲げ特性を評価した。まず曲げ特性評価のための予備検討として、試験片の幅と曲げ強さの関係を検討したところ、15 mm幅以上で曲げ特性を評価することが妥当であることを確認した。この試験片の幅を用いて1層のプリプレグにおける曲げ特性を評価し、ウェールとコースで曲げ強さが約2倍異なることが分かった。また0° または90° 積層した2層のプリプレグの曲げ特性を評価し、0° 積層では1層の場合と同様の傾向を示したが、90° では概ね異方性が解消されることが明らかとなった。

1. はじめに

航空機や宇宙分野において、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の利用が広まっている。航空宇宙分野で利用されているCFRPは、熱硬化性のエポキシ樹脂をマトリックスとし、炭素繊維を骨格とする熱硬化性CFRPである。このCFRPは鉄と比べると比重は1/4で、比強度は10倍であるため、例えば航空機のボーイング787では構造部材を含めた重量の半分にCFRPが使用されている¹⁾。また最近では電気自動車であるBMWのi3に使用され²⁾話題となった。

熱硬化性CFRPの成形は、炭素繊維の一方方向材や織物に液状のエポキシ樹脂を含浸させたプリプレグを積層し、オートクレーブで加熱硬化させることにより得られる。つまり熱硬化性樹脂の硬化に時間を要することから生産性が悪い。CFRPをより広く利用するためには、現在より高い生産性が求められており、マトリックス樹脂として熱可塑性樹脂を利用した熱可塑性CFRP(CFRTP)の研究が進められている^{3),4)}。

CFRPは金属代替材料として様々な場面において注目されており、リブ構造のような深絞りなど複雑形状への対応が求められている。しかし一方方向材や織物で深絞りを行うと、繊維が乱れてしまい部分的な強度低下を生じてしまうといった問題がある。

CFRTPでは熱可塑性樹脂の低流動性に起因する含浸不良を改善するため、コミングルヤーン⁵⁾などの取り組みが行われている。編物を基材としたCFRTPは、炭素繊維の走行が直線的ではないため、織物を基材としたCFRPと比べて強度および弾性率は劣るが、繊維に伸縮性があるため賦形性が高く、また樹脂繊維が炭素繊維をおおうカバリングを併用することで、樹脂含浸性の向上も期待できる。

第1報⁶⁾において、編物CFRTPを用いて平板状プリプレグを成形する条件について検討し、ヒーター温度、プレス圧力、プレス時間が曲げ強さに寄与することがわかった。本研究では、炭素繊維の方向性をランダムに漉き込んだ炭素繊維紙を編物と編物の間に挟んだときの補強効果を検討した。また

編物の強度の異方性についてを検討を行った。

2. 実験

2.1 試料

炭素繊維紙による曲げ強さへの影響の検討には、産業技術センター 繊維部にて作製した平編ニット(Pニット)を用いた。炭素繊維は東レ(株)製 T300 1000-50A 594d 1Kを用い、カバリングに使用したポリプロピレン(PP)は、マルチフィラメントで340d/60fのものを使用した。これらの繊維を意匠撚糸機(オゼキテクノ(株) トライスピニング)を使用し、炭素繊維を芯糸としてPP繊維でダブルカバリングを行った。また編物と編物の間の積層材として、産業技術センター 紙業部にて作製した炭素繊維紙を使用した。

ダブルフェイスニット(DFニット)の試験片幅の検討には、産業技術センター 繊維部にて作製したゴム編DFニットを使用した。炭素繊維は東レ(株)製 T300B 3000-50Bを用い、カバリングに使用したPPは440d/220fのものを使用した。

2.2 プリプレグ作製

各ニットの熱プレスには、熱プレス装置(アズワン(株)製 AH-2003C)を用いた。

炭素繊維紙による曲げ強さへの影響の検討では次のように行った。炭素繊維紙の条件及びプレス圧力については表1の4因子3水準について、L9直交表に基づき表2のように割り付けを行った。まず鉄板を170℃で5分間加熱し、そこに筒状のPニットを挟んでさらに5分間加熱し表面の樹脂を固めた。次にこのニット及び炭素繊維紙を110×70 mmに切断し、ニット4層とその間に炭素繊維紙を3層挟んで、110×70×1 mmのスペーサーを用いて表2Dの圧力で220℃、5分間加圧し、所定の時間経過後は水冷により冷却し、樹脂が冷却固化してから離型した。

DFニットの試験片幅の検討及びDFニットの曲げ強さの異方性の検討では次のように行った。まずDFニットを170℃で5分間軽く熱プレスを行い、続いて1.5 mm厚(ニット2層のと

き)または0.5 mm厚(ニット1層のとき)のスペーサーを用いて190℃で15分間、15 MPaの圧力で熱プレスを行った。所定の時間経過後は水冷により冷却し、樹脂が冷却固化してから離型した。

2. 3 三点曲げ試験

三点曲げ試験はオートグラフ((株)島津製作所製AG-10TB)を用い、JIS K 7074を参考に行った。炭素繊維紙による曲げ強さへの影響の検討では、プリプレグから100×10×1 mmに切り出し、支点間距離 40 mm、荷重速度 3 mm/min、上部圧子半径 5 mm、下部支点半径 2 mmにて行った。なお試験は一枚のプリプレグから切り出した3本について行い、厚さの1.5倍たわませた(規定たわみ)際の荷重から(1)式により曲げ応力を計算し規定たわみ時曲げ強さとした。

DFニットの試験片幅の検討では、プリプレグから110×幅×1.5 mmに切り出し、支点間距離 60 mm、荷重速度 4 mm/min、上部圧子半径 5 mm、下部支点半径 2 mmにて行った。得られた規定たわみ時荷重から(1)式により曲げ応力を計算し規定たわみ時曲げ強さとした。

DFニットの曲げ強さの異方性の検討では、プリプレグから70×15×厚さ mmに切り出し、支点間距離 40 mm、荷重速度 3 mm/min、上部圧子半径 5 mm、下部支点半径 2 mmにて行った。得られた最大曲げ荷重及び規定たわみ時荷重より、それぞれ(1)または(2)式により曲げ応力を計算し、最大曲げ強さまたは規定たわみ時曲げ強さとした。

$$\sigma_b = \frac{3P_b L}{2bh^2} \quad (1)$$

ここに、 σ_b :規定たわみ時曲げ強さ(MPa)、 P_b :規定たわみ時荷重(N)、 L :支点間距離(mm)、 b :試験片の幅(mm)、 h :試験片の厚さ(mm)

$$\sigma_b = \frac{3P_b L}{2bh^2} \left[1 + 4 \left(\frac{\delta}{L} \right)^2 \right] \quad (2)$$

ここに、 σ_b :最大曲げ強さ(MPa)、 P_b :最大荷重(N)、 L :支点間距離(mm)、 b :試験片の幅(mm)、 h :試験片の厚さ(mm)、 δ :荷重 P_b のときのたわみ(mm)

3. 結果及び考察

3. 1 炭素繊維紙による曲げ強さへの影響

表1に要因と水準を、表2にそれらをL9直交表に基づき割り付けを行ったものを示した。表3の9種類の条件に基づき熱プレスを行った。作製したプリプレグの最大曲げ強さを特性値として分散分析した結果を表3に示し、要因効果図を図1に示した。図1を見てわかるように、あまり大きな効果はみられないものの、Aの炭素繊維長は短いほうが、Cの坪量が多いほうが曲げ強さが高い傾向を示した。Dのプレス圧については、30、50MPaでは同程度の曲げ強さを示し、また10MPaのときよりも低い値を示した。このことから熱プレスのときのプ

レス圧力が試料に十分に伝わっていないのではないかと考える。繊維長は長いほど強度が向上することが知られているが⁷⁾、本結果ではそれと逆となっている。これは繊維長が長いことがかえって繊維の凝集を生じたため、強度が低下したと考える。

表1 水準表

	1	2	3
A CF繊維長 (mm)	3	6	12
B CF配合率 (%)	10	30	50
C 坪量 (g/m ²)	20	50	100
D プレス圧力 (MPa)	10	30	50

表2 L9直交表に基づく因子の割り付けと曲げ強さ

	A	B	C	D	曲げ強さ(MPa)
1	3	10	20	10	28.3
2	3	30	50	30	25.7
3	3	50	100	50	28.4
4	6	10	50	50	25.4
5	6	30	100	10	32.7
6	6	50	20	30	23.2
7	12	10	100	30	24.0
8	12	30	20	50	23.8
9	12	50	50	10	27.5

表3 分散分析表

要因	平方和S	自由度φ	平均平方V
A	28.8	2	14.4
B	10.5	2	5.3
C	50.5	2	25.2
D	129.2	2	64.6
e	83.3	18	4.6
T	302.4	26	

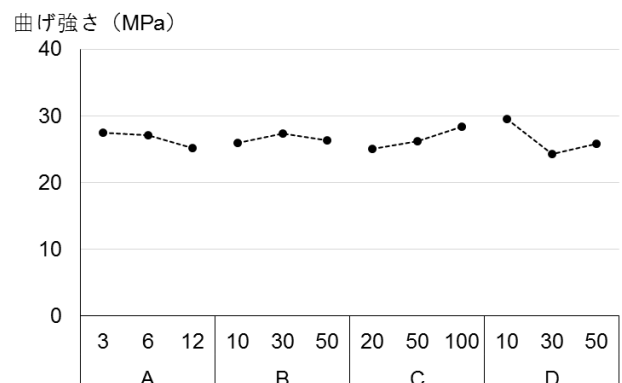


図1 要因効果図

3. 2 DFニットの試験片幅の検討

基材をPニットからDFニットへの変更に伴ってニットの目の間隔が変わることから、三点曲げ試験に使用する試験片の幅について検討した。ニットの目を同方向にしたDFニットを2

枚熱プレスし、作製したプリプレグから各幅の試験片を切り出して規定たわみ荷重を測定した。図2に各幅の試験片における目の数と曲げ荷重の相関を示した。視認できるニットの目以外の部分にも炭素繊維及び樹脂があるものの、目視にて数えたニットの目と曲げ荷重にはよい相関がみられた。これはニットの目が概ね等間隔に並んでいるため、試験片の幅とニットの目の数に比例関係があるためであると考えられる。

また試験片幅と曲げ強さの関係について検討した(図3)。その結果、10 mmを除いたほかの幅では概ね同じ曲げ強さを示したが、10 mmのときだけは若干低い値を示した。これはニットの目の間隔に対して試験片幅が十分でないため、ある程度のニットの目を含むと考えられる幅15 mm以上の試験片との間に差が出たと考える。この結果より、DFニットの曲げ強さの異方性の検討においては、試験片幅を15 mmとした。

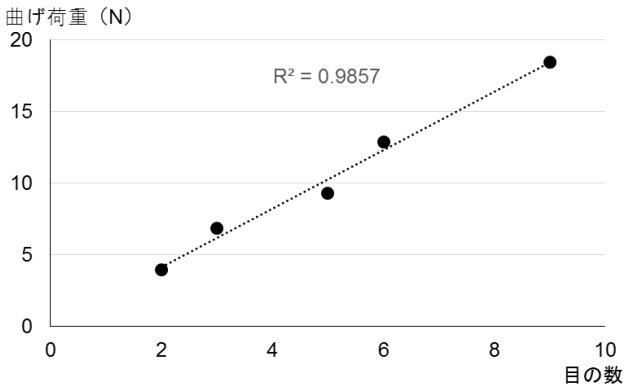


図2 ニット目の数による曲げ荷重への影響

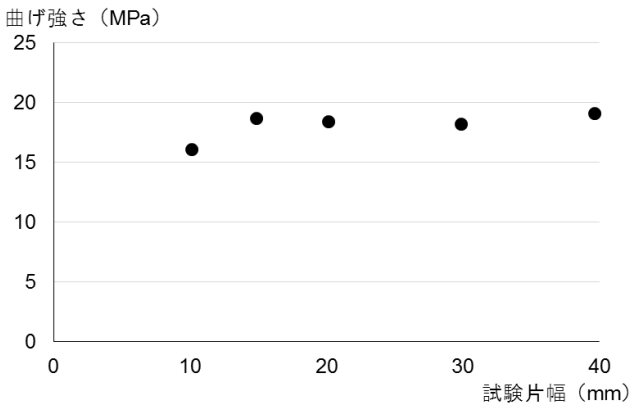


図3 試験片幅の違いによる曲げ強さへの影響

3. 3 DFニットの曲げ強さの異方性の検討

DFニットから熱プレスにより平板状プリプレグを作製したものを図4に示す。ニットの目は図4中 I 方向に向いていることから、ニット1層の場合について、試験片の長さ方向を I にとったものをウェール、II 方向にとったものをコースと呼ぶ。またニット2層の場合については、2層のうちプレスした際の上面に当たる層のニットの目を基準としてウェール、コースとし

た。

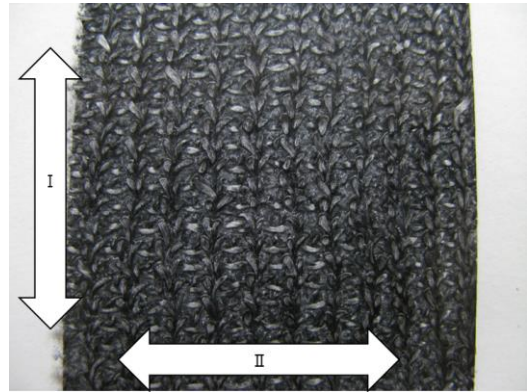


図4 DFニットから作製したプリプレグ

まずDFニット1層における三点曲げ強さの異方性を検討した結果を図5に示した。ウェール方向に対してコース方向は、最大曲げ強さで0.44倍、規定たわみ時曲げ強さで0.47倍となった。このことから1層では曲げ強さに異方性があり、方向によっては曲げ強さは半分以下になることがわかった。また最大曲げ強さと規定たわみ曲げ強さで、特に傾向に違いは見られなかった。

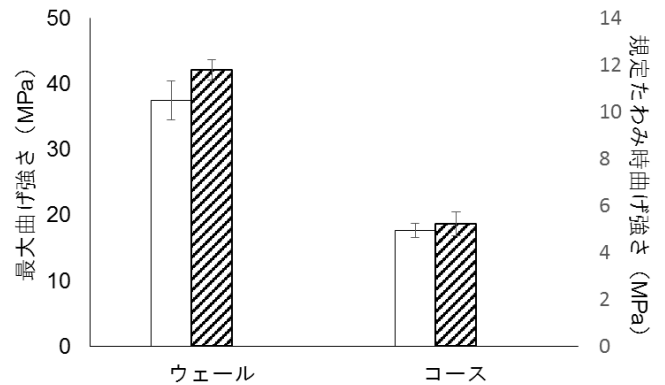


図5 DFニット1層における曲げ強さの異方性。

白:最大曲げ強さ、斜線:規定たわみ曲げ強さ。図中のエラーバーはn=4の標準偏差を示す。

次にDFニットを2層積層したプリプレグにおける三点曲げ強さの異方性を検討した。図6は2層ともニットの目を同方向に揃えたもの(0° 積層)の結果を、図7は2層のニットの目を直交するように積層したもの(90° 積層)の結果を示した。

0° 積層の場合では、ウェール方向に対してコース方向は、最大曲げ強さで0.70倍、規定たわみ曲げ強さで0.60倍であった。1層のものとは厚さが異なり曲げ試験の条件も異なることから曲げ強さの比較はできないが、ウェール:コース比の傾向は1層のものと同様である。加えて2層積層することで単層よりも異方性を抑えられる可能性が示唆された。

90° 積層の場合では、0° 積層と異なりコース方向のほうが最大曲げ強さ及び規定たわみ時曲げ強さが大きくなり、

最大曲げ強さが1.30倍、規定たわみ曲げ強さが1.15倍となった。織物では異方性を解消するために、30° や45° 積層を行うので、本研究でもニットの目が直交するように90° 積層を行った。しかし最大曲げ強さが3割ほどウェール方向が強くなったことは次のように考える。90° 積層プリプレグは、上層が図4の方向で下層はそれに直交するように積層した。試験片の切り出しについては、ウェール方向は図4のⅠ方向、コース方向は図4のⅡ方向に切り出した。このときの三点曲げ試験における下層のニットの目の方向について考えると、ウェール方向では圧子に対して平行、コース方向では圧子に対して垂直に並んでいる。これを踏まえて図7の結果を見ると、圧子に対して外側の層のニットの目の方向が曲げ強さに大きく寄与していることが推察される。ただしこの傾向は最大曲げ強さについて言えることであり、規定たわみ時曲げ強さでの影響は軽微で、試験片全体に荷重が負荷されていると考える。そこで規定たわみ時曲げ強さに着目すると、0° 積層では1.68倍、90° 積層では1.15倍であることから、90° 積層では異方性が概ね解消されたと考えることができる。

今回は積層枚数が2層までしか実験を行っていないため、今後層を増やしたときの異方性について検討することが、実際の製品設計では必要と考える。

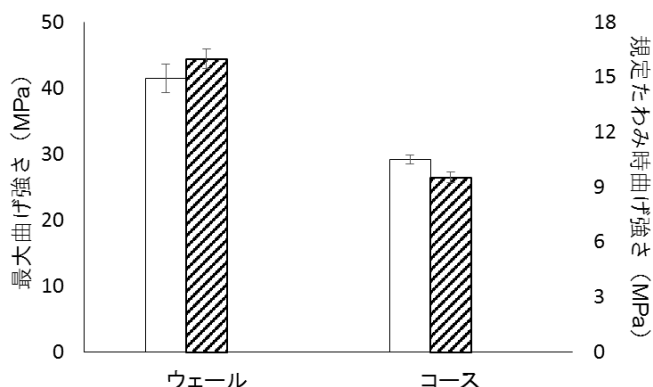


図6 DFニット2層(0° 積層)における曲げ強さの異方性。白:最大曲げ強さ、斜線:規定たわみ曲げ強さ。図中のエラーバーはn=4の標準偏差を示す。

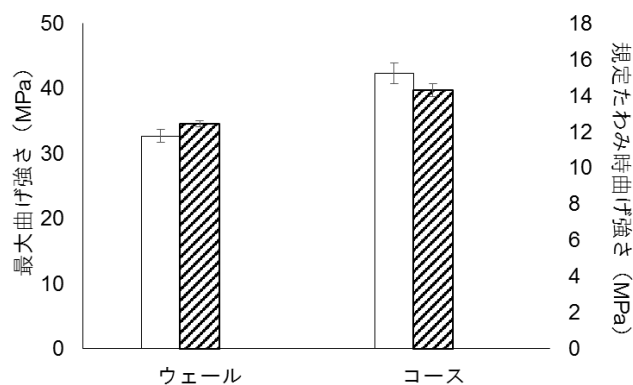


図7 DFニット2層(90° 積層)における曲げ強さの異方性。白:最大曲げ強さ、斜線:規定たわみ曲げ強さ。図中のエラーバーはn=4の標準偏差を示す。

4. 結び

本研究では立体成形性の向上を目指して、編物を用いたCFRTPプリプレグの作製に関する基礎物性の検討を行った。まず試験片の幅と曲げ強さの関係を評価したところ、15 mm幅以上で曲げ特性を評価することが適当であることが確認された。前述を踏まえて1層のプリプレグにおける曲げ特性を評価したところ、ウェール方向ではコース方向に比べて曲げ強さが約2倍であることが示された。次に0° または90° 積層した2層のプリプレグの曲げ特性を評価したところ、0° 積層では1層の場合と同様の傾向を示したが、90° では概ね異方性が解消されることが明らかとなった。この特性を十分把握して製品設計を行う必要があると考える。

【参考文献】

- 1) ボーイング・ジャパンホームページ, <http://www.boeing.jp/>.
- 2) BMW i3スペシャルサイト, <http://bmw-i.jp/BMW-i3/>.
- 3) 藤田ら, 兵庫県立工業技術センター 研究報告, 第22号, pp.48-49, 2013.
- 4) 茶谷ら, あいち産業科学技術総合センター 研究報告, pp.90-93, 2012.
- 5) 奥村ら, 石川県工業試験場 研究報告, vol.60, 2011.
- 6) 丹羽ら, 岐阜県産業技術センター研究報告, No.8, 2014.
- 7) CFRP/CFRTPの加工技術と性能評価, サイエンス&テクノロジー(株), 2012.