

熱可塑性炭素繊維強化プラスチックの機械的特性に影響を及ぼす各種因子の評価

瀬野 修一郎, 吉田 昌充, 山岸 暢, 可児 浩
太田 佳樹*, 早川 康之*

Characterization of Various Factors Affecting Mechanical Property in Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics

Shuichiro SENO, Masamitsu YOSHIDA, Tohru YAMAGISHI, Hiroshi KANI
Yoshiki OHTA*, Yasuyuki HAYAKAWA*

抄 録

自動車や航空機等の車体及び部品等の軽量・高強度化を図る材料として炭素繊維強化プラスチックが注目されている。これまでは熱硬化性プラスチックを用いた炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が一般的だったが、近年、熱可塑性プラスチックを用いた炭素繊維強化プラスチック（CFRTP）が新たに開発され、高生産性などの長所を活かし、今後の利用増加が期待されている。しかし、CFRTPは最新の材料であるため、CFRPに比べその機械的特性が未知である部分が少なくない。そこで本研究ではCFRTPの本格的な活用に向けてその特性を把握するため、どのような因子が機械的特性に影響を及ぼすのか評価を行った。各種試験を行った結果、(1)温度に関してはCFRPと比べて影響を受けやすいが、低温下での大きな物性低下の懸念がないこと、(2)マトリックス樹脂に関しては種類によって機械的特性が異なること、(3)繊維方向に関してはCFRPよりも大きく影響を受けることがわかった。

キーワード：熱可塑性炭素繊維強化プラスチック，機械的特性，温度，マトリックス樹脂，繊維方向

Abstract

Carbon fiber reinforced plastics attract attention as composite materials which make bodies and parts of automobile, airplanes and so on lighter. Although carbon fiber reinforced plastics consisted of thermoset plastics (CFRP) are general, recently carbon fiber reinforced plastics consisted of thermoplastics (CFRTP) have been developed. CFRTP has advantage of high productivity, so increased use in the future is expected. But mechanical property of CFRTP is not known very well, because CFRTP is the latest material.

In this research, we study that what factor affects mechanical property of CFRTP to learn the characteristics needed for wide applications. As the results of various evaluations, we have known that CFRTP is easier to be affected by temperature and direction of carbon fiber than CFRP, but there is no large decrease of mechanical property under low temperature, and mechanical property of CFRTP is deferent from kinds of matrix resin.

KEY-WORDS : Carbon fiber reinforced thermoplastics, mechanical property, temperature, matrix resin, direction of carbon fiber

* 北海道科学大学, * Hokkaido University of Science

事業名：公募型研究

課題名：炭素繊維強化熱可塑性材料の義肢装具への応用に関わる機械的特性に関する研究

1. はじめに

炭素繊維強化プラスチックは比強度、比剛性、耐腐食性に優れるため、自動車や航空機等の車体及び部品等の軽量・高強度化を図る材料として期待されている^{1,2)}。炭素繊維強化プラスチックはその名のとおり炭素繊維とプラスチックからなる複合材料の総称で、これまでプラスチックとしては熱硬化性プラスチックを用いたもの(Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP)が一般的であった。熱硬化性プラスチックからなるCFRPは機械的特性といった品質面では大変優れているが、一方で化学反応によって硬化する熱硬化性プラスチックを使用しているため、硬化するまでに時間がかかり、生産効率が悪く、製品コストが高くなってしまいう課題があった。

そこで、その課題を解決するべく、近年、熱可塑性プラスチックを用いた炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced ThermoPlastics: CFRTP)が新たに開発されている³⁾。熱可塑性プラスチックは熱硬化性プラスチックと異なり、非晶状態から結晶又はガラス状態への状態変化によって硬化し、融点又はガラス転移温度といった物質固有の特性温度を下回することで素早く硬化する。その上この状態変化は可逆的で、融点またはガラス転移温度を上回ると軟化し、再加工も可能となる。熱可塑性プラスチックのそのような硬化特性から高い生産性が予想されるため、CFRTPは今後の利用増加が大変期待されている新材料である。しかしながら、CFRTPは最新の材料であるため、CFRPに比べその各種特性や最適な物性評価方法が明らかではない。

そこで、本研究ではCFRTPの本格的な活用に向けてその特性を把握するため、どのような因子が機械的特性に影響を及ぼすのか評価した。具体的には温度、マトリックスとなる熱可塑性プラスチックの種類、炭素繊維の繊維方向の影響について評価した。機械的特性試験については引張、曲げ変形時の特性を評価するために引張試験、3点曲げ試験、衝撃特性を評価するためにシャルピー衝撃試験を実施した。

2. 実験方法

2.1 試料

CFRTPは3K平織のカーボンクロスを10枚積層した2mm厚の板材をメーカーから購入し、試験に供した。マトリックスの種類はポリアミド6 (PA6)、ポリメチルメタクリレート(アクリル)、ポリプロピレン (PP) の3種類を評価した。従来のCFRPと比較するために炭素繊維(3K平織カーボンクロス、10枚積層)は同じでエポキシ樹脂製のCFRPも購入し、評価を行った。PA6は吸湿によって物性が大きく変わり、実使用時には吸湿後の物性が重要であるため、マトリックスがPA6のCFRTPシートに関しては恒温恒湿槽にて調湿

後(70°C, 62%RH, JIS K7143)、試験を実施した。

2.2 試験片の作製

試験片は積層板から各試験に応じた寸法に複合材料切断機(コンボジッターMC-453, ㈱マルトー)を用いて切断し、作製した。寸法は以下のとおり、炭素繊維強化プラスチックに関するJIS規格に準拠した。

引張試験片： 250×25×2 mm (JIS K7164)
 3点曲げ試験片： 100×15×2 mm (JIS K7074)
 シャルピー衝撃試験片： 80×10×2 mm (JIS K7077)

また、炭素繊維の繊維方向の影響を評価するために、平織カーボンクロスの繊維方向と平行(0°)に切断した試験片と45°方向に切断した試験片を2種類作製した(図1)。

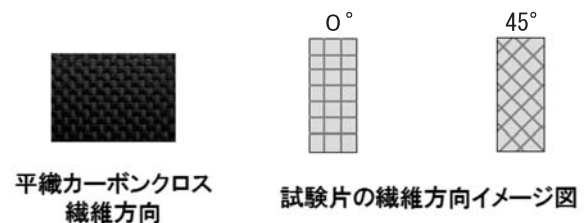


図1 試験片の繊維方向について

2.3 引張試験

引張試験においてはJIS K7164に準拠して行った。試験条件、使用した装置などの詳細については以下のとおりである。

試験片寸法：250×25×2 mm

タブ：なし

試験速度：2 mm/min.

試験温度：23°C, -30°C

試験装置：オートグラフAG-100kNXplus (㈱島津製作所)
 伸び計：ビデオ式非接触伸び幅計TRViewX (㈱島津製作所)

弾性率、ポアソン比の伸び測定には歪みゲージを使用

歪みゲージ：KFG-2-120-D16-11R 3 M2 (㈱共和電業)

接着剤：CC-33A (㈱共和電業)

2.4 3点曲げ試験

3点曲げ試験においてはJIS K7074に準拠して行った。試験条件、使用した装置などの詳細については以下のとおりである。

試験片寸法：100×15×2 mm

試験速度：5 mm/min.

支点間距離：80mm

試験温度：23°C, -30°C

試験装置：オートグラフAG-100kNXplus (㈱島津製作所)

2.5 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験においてはJIS K7077に準拠して行った。試験条件、使用した装置などの詳細については以下のとおりである。

試験片寸法：80×10×2 mm

試験方向：フラットワイズ

支持台間の距離：60mm

ハンマ容量：7.5J

試験温度：23℃，-30℃

試験装置：万能衝撃試験機No. 258（株安田精機製作所）

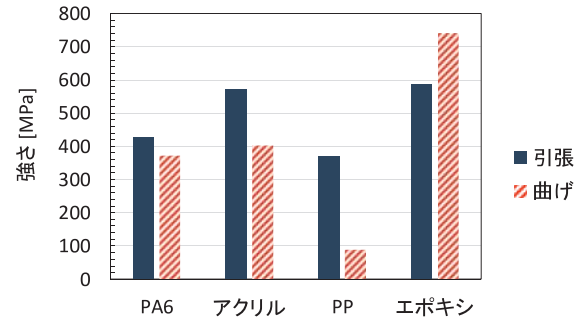


図2 各種CFRTP, CFRPの最大強さ (引張, 曲げ)

3. 結果と考察

3.1 マトリックスの影響について

CFRP及びCFRTPの各種物性の試験結果を表1に示す。表1の結果を用いて各マトリックスでの23℃, 0°方向における各種物性を棒グラフにまとめた結果を図2～4に示した。

マトリックスの種類によって強さ, 弾性率は異なり, 強さは, 引張, 曲げともに従来のCFRPであるエポキシの場合が最も大きかった。また, CFRTPではマトリックスにより物性値は異なり, PPは引張, 曲げともに低く, 特に曲げ強さは小さな値であった。弾性率は, CFRTPの方がエポキシ

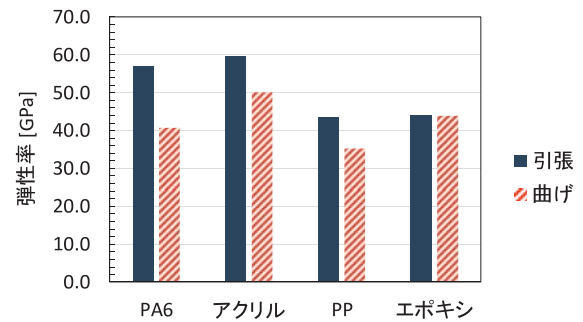


図3 各種CFRTP, CFRPの弾性率 (引張, 曲げ)

表1 CFRP及びCFRTPにおける各種物性の値

試験項目	単位	試験温度(℃)	角度(°)	マトリックスの種類			
				PA6	アクリル	PP	エポキシ
引張強さ	MPa	23	0	426	572	370	586
		-30	0	535	587	480	563
		23	45	188	172	111	489
		-30	45	245	208	139	498
引張弾性率	GPa	23	0	56.9	59.6	43.6	43.9
		-30	0	57.2	61.9	49.9	46.1
		23	45	5.7	12.4	3.3	37.3
		-30	45	15.1	17.1	10.8	38.8
ポアソン比	-	23	0	0.13	0.08	0.26	0.23
		-30	0	0.06	0.08	0.06	0.28
		23	45	0.91	0.79	0.96	0.42
		-30	45	0.76	0.72	0.96	0.44
曲げ強さ	MPa	23	0	372	402	88	741
		-30	0	529	604	199	678
		23	45	100	181	27	667
		-30	45	244	277	85	664
曲げ弾性率	GPa	23	0	40.7	50.2	35.3	43.9
		-30	0	41.7	48.3	38.0	41.7
		23	45	6.8	14.9	1.2	33.7
		-30	45	13.3	14.5	7.8	31.2
シャルピー 衝撃強さ	kJ/m ²	23	0	58	69	64	85
		-30	0	64	83	70	83
		23	45	92	144	30	129
		-30	45	157	152	50	129

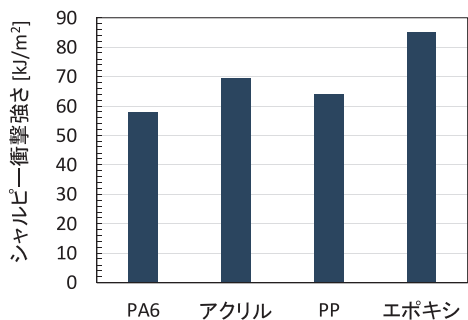


図4 各種CFRTP, CFRPのシャルピー衝撃強さ

のCFRPに比べ大きく、CFRTPの中では強さと同様にPPの場合が最も小さかった。引張破断後の試験片を観察してみると、PPをマトリックスとするCFRTPは試験片表面に肉眼でも確認できる顕著な層間剥離が見られた(図5)。特に物性値の低下が顕著な曲げ特性についても曲げ試験後の破断面を観察すると、剥離が起きやすい圧縮変形がかかる圧子面の方には明確な層間剥離が見られた(図6)。これらのことから、PPのマトリックスと炭素繊維表面の接着強度がその他のマトリックスと比較して弱いことが推測され、その接着強度の違いがマトリックスの違いによる物性差を引き起こす大きな要因の一つと考えられる。



図5 引張破断後のCFRTP(PP)試験片

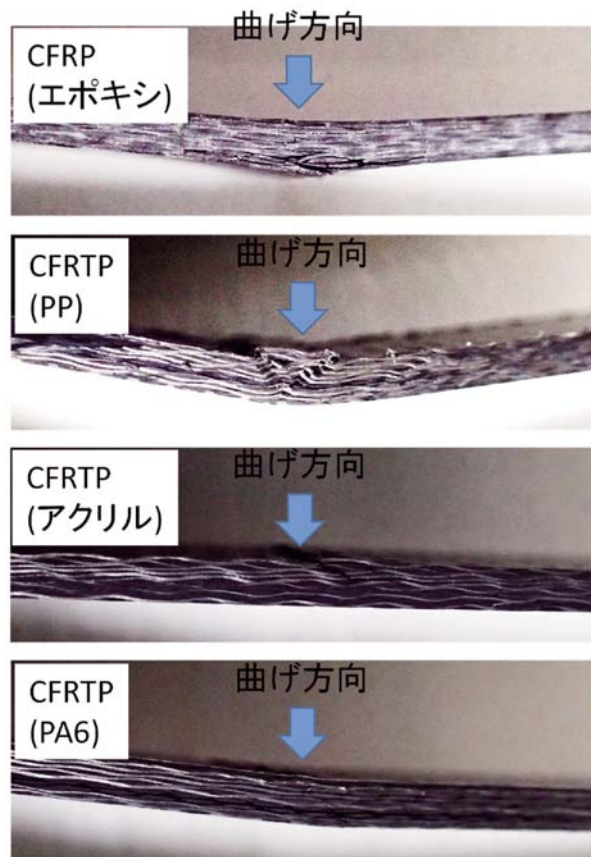


図6 各種CFRTP, CFRPの曲げ試験後の試験片破断面

シャルピー衝撃強さについてはCFRPがCFRTPに比べ、大きかった(図4)。CFRPが最も大きな値を示し、CFRTPに関してはマトリックスの種類でそれほど大きな差異は見られなかった。

3.2 繊維方向の影響について

表1の結果を用いて23°Cで試験した0°, 45°方向における各種物性を棒グラフにまとめた結果を図7~10に示した。

引張、曲げ特性については45°方向の物性値は強さ、弾性率ともにCFRPでは80~90%程度を保持するが、CFRTPについてはマトリックスの種類にもよるが、40%以下まで低下するものもあり、繊維方向の影響を大きく受けやすいことがわかった。-30°Cの物性においても同様の傾向であった。

図11にマトリックスがアクリルとエポキシの場合の0°と45°方向の応力-変位曲線を示した。繊維方向による物性の変化が小さいエポキシのCFRPは0°, 45°方向ともによく似た応力-変位曲線を描いている。一方でアクリルのCFRTPについては0°方向でCFRPと同様の応力-変位曲線を描くが、45°方向においては非常に伸びが大きくなり、応力もそれほど上昇しない。これはおそらく、CFRTPの場合は炭素繊維の応力を伝達する役目となるマトリックスの熱可塑性プラスチックが、炭素繊維に大きな荷重がかからないうちにずれて

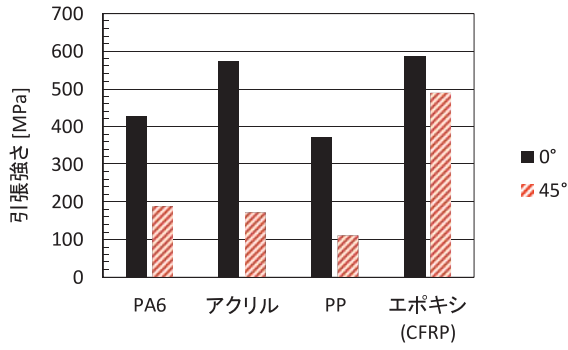


図7 引張強さの繊維方向依存性 (試験温度23°C)

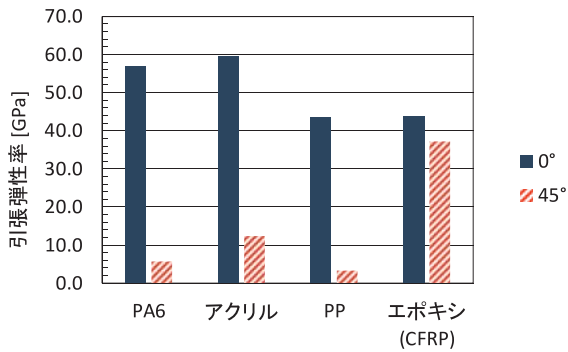


図8 引張弾性率の繊維方向依存性 (試験温度23°C)

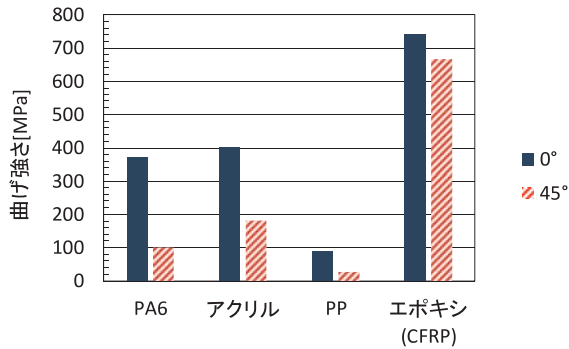


図9 曲げ強さの繊維方向依存性 (試験温度23°C)

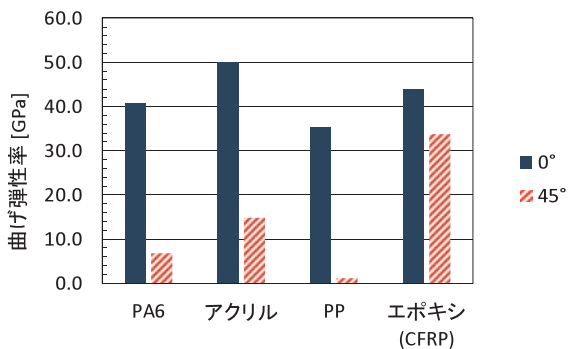


図10 曲げ弾性率の繊維方向依存性 (試験温度23°C)

しまったことが要因と推測される。実際に引張試験後の試験片の様子を観察したところCFRTPの場合は直交していた炭素繊維が変形して菱形となっていた(図12)。また、引張試験後の試験片形状は荷重のかかる長手方向が大きく伸び、幅方向は試験前に比べて大幅に細くなる変形が見られた(図13)。これはCFRTPでの45°方向のポアソン比が非常に大きくなっている(表1)こととも整合する。

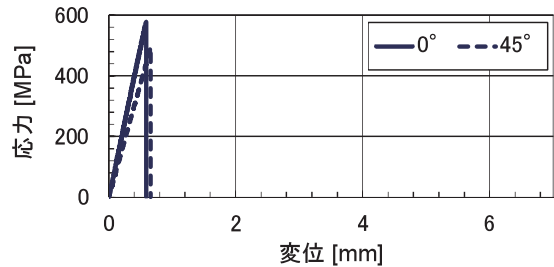
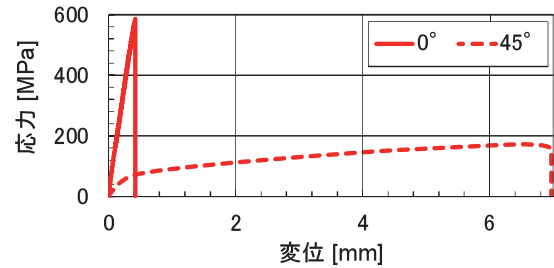


図11 引張試験時の応力-変位曲線 (上: CFRTP(アクリル), 下: CFRTP(エポキシ))

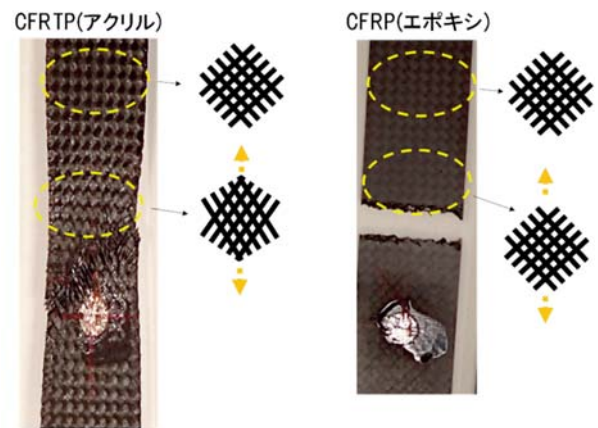


図12 引張試験後試験片の破断点付近の様子

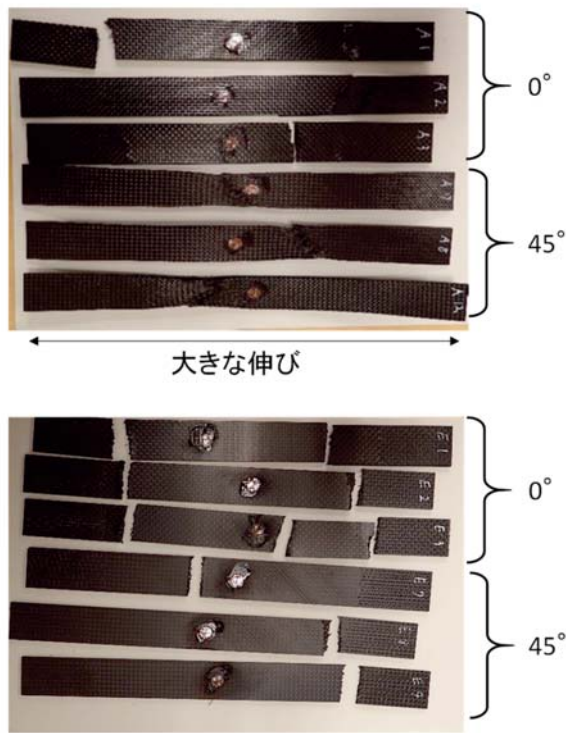


図13 引張試験後の試験片
(上：CF RTP(アクリル)，下：CFRP(エポキシ))

シャルピー衝撃強さについてはPPマトリックスのCF RTP以外はCF RTP, CFRPともに45°方向の物性は向上していた(図14)。衝撃強さはハンマーが試験片と衝突した際に試験片にかかる力と変位からなる仕事量のため、荷重、変位の両方の因子が影響する。シャルピー衝撃試験の変形は試験片の面方向からハンマーを衝突させるため、3点曲げと同様の変

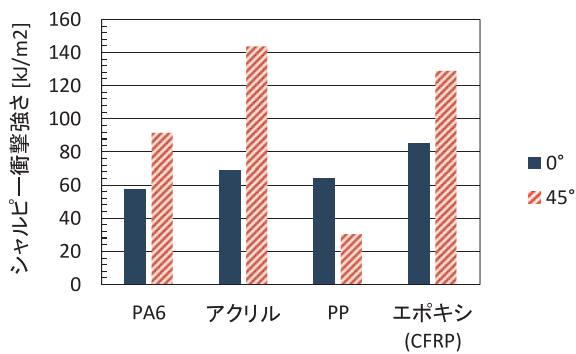


図14 シャルピー衝撃強さの繊維方向依存性
(試験温度23°C)

形となる。図15のように45°方向の曲げ試験において、CF RTPはいずれのマトリックスにおいても変形するが、柔軟なプラスチックのようにしなるだけで全く破断しない。これはシャルピー衝撃試験においても同様で、ハンマーで衝撃をあたえた後でも試験片は破壊されず、シート形状を維持し

ていた。このように45°方向の試験片の場合は0°方向の試験片に比べて大きく変形するため、変形時にかかる荷重は0°方向の試験片に比べて小さくなるものの、吸収するエネルギーは大きくなり、衝撃強さは大きな値を示したものと推測される。PPマトリックスのCF RTPでは変位は大きいですが、図2に示したように他マトリックスの試験片に比べて曲げ強さも非常に小さいため、45°方向でシャルピー衝撃強さが低くなったと考えられる。

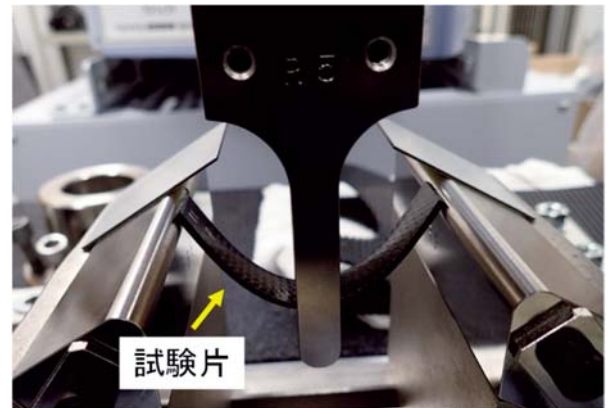


図15 曲げ試験の様子(繊維方向45°)

引張特性について繊維方向の影響をより詳細に評価するためにPA6マトリックスのCF RTPに関して繊維角度をさらに細かく刻んだ試験片を作製し、23°C, -30°Cにおける引張特性を評価した。その結果を図16, 17に示した。強さに比べて弾性率は繊維方向の影響が大きく、およそ16°付近では0°における値と比べてその値は半減している。そして、表1のとおりCFRPの場合は45°方向の場合においても、両温度とも弾性率は0°方向の値のおよそ85%程度を保持しているが、CF RTPの場合は5°付近ですでに85%程度の値に低下している。このようにCF RTPはCFRPと比べても非常に繊維方向の影響を受けやすく、製品設計を行う上で、繊維方向に対してどのような変形が加わるかを十分に考慮する必要がある。

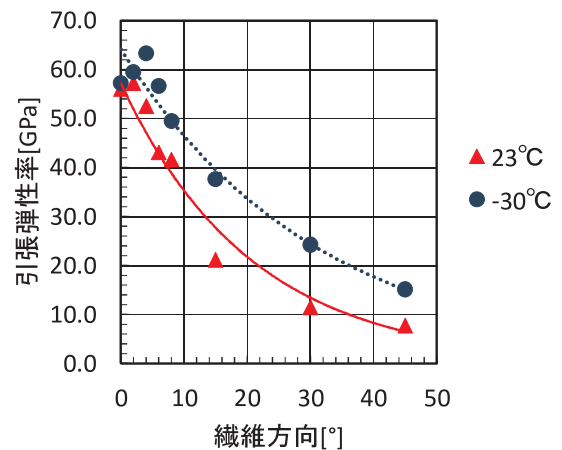


図16 引張弾性率の繊維方向依存性 (CF RTP(PA6))

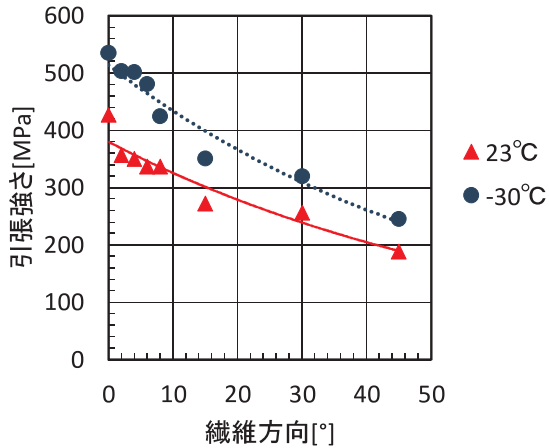


図17 引張強さの繊維方向依存性 (CFRTP (PA6))

3.3 温度の影響について

表1の結果を用いて0°方向における23°C, -30°Cで試験した各種物性を棒グラフにまとめた結果を図18~22に示した。引張弾性率を除いて引張, 曲げ, シャルピー衝撃特性のいずれの場合もエポキシ樹脂をマトリックスとした従来のCFRPは23°Cの場合に比べて-30°Cの低温下で物性値は低下していたが, いずれもその物性値は5%程度のわずかな低下であった。一方で, 各種の熱可塑性樹脂をマトリックスとするCFRTPにおいては多くの場合, 物性値が大きくなった。特にPPをマトリックスとするCFRTPは変化率が大きく, 曲げ強さで220%ほどに上昇した。45°方向における物性についても同様の傾向であった。

CFRPの機械的性質に関しては以前より温度依存性があることが知られているが⁴⁾⁶⁾, 熱可塑性プラスチックの方が熱硬化性プラスチックに比べて温度の影響を受けやすいため, CFRTPの温度を変えた際に機械的性質が大きく変化したものと考えられる。一般的に熱可塑性プラスチックは低温になるほど高分子鎖の分子運動が抑制され, 弾性率が上がり, 硬くなる傾向のため, CFRTPについても物性値の上昇に繋がったものと推測される。

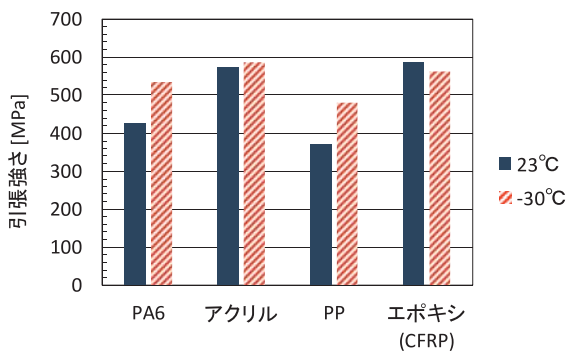


図18 引張強さの温度依存性 (繊維方向0°)

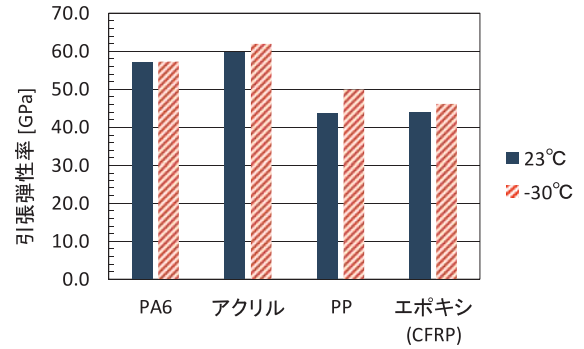


図19 引張弾性率の温度依存性(繊維方向0°)

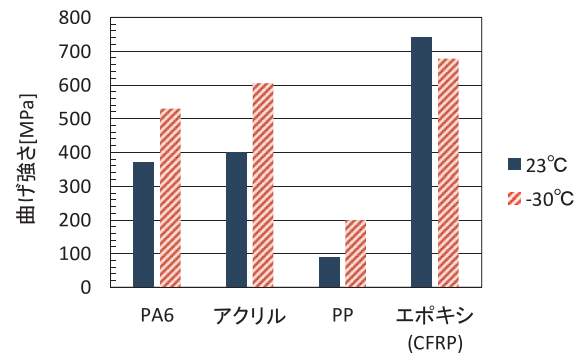


図20 曲げ強さの温度依存性(繊維方向0°)

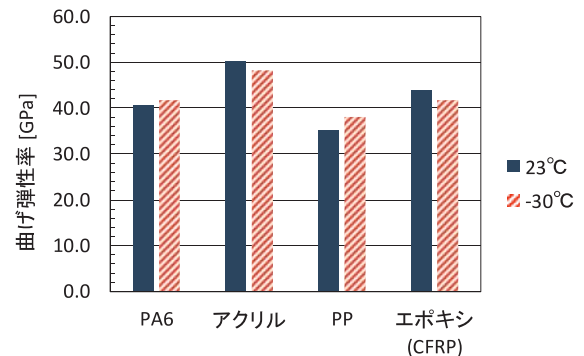


図21 曲げ弾性率の温度依存性(繊維方向0°)

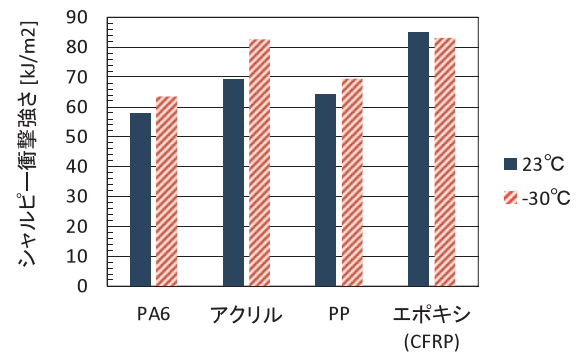


図22 シャルピー衝撃強さの温度依存性(繊維方向0°)

4. おわりに

本研究では熱可塑性プラスチックからなる炭素繊維強化プラスチックの機械的特性に影響を与える温度、マトリックス、繊維方向といった各種因子について評価を行った結果、各因子が与える影響について以下に示す知見が得られた。

(1) マトリックスの影響について

PA6, アクリル, PPの3種類について評価した結果、マトリックスによって機械的特性が異なることがわかった。特にPPについてはその他マトリックスと比較して値が低く、層間剥離も顕著なことから炭素繊維との界面強度が他マトリックスに比べて低いことが推測される。

(2) 繊維方向の影響について

CFRTPはCFRPより大きく影響を受けることがわかった。強度を考慮する製品設計の際は製品にかかる力の方向と繊維方向の関係に十分注意が必要であることが示唆された。

(3) 温度の影響について

CFRTPはCFRPに比べて影響を受けやすいが、低温下での大きな物性低下の懸念は小さいことがわかった。

謝辞

本研究は独立行政法人科学技術振興機構(JST)のマッティングプランナープログラムにより実施しました。また、本研究で使用したオートグラフ AG-100kNXplus は公益財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 石川隆司：自動車構造部品への炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の応用の展望, 精密工学会誌, Vol.81, No.6, pp.489-493, (2015)
- 2) 岩堀裕：軽量・高効率に貢献する輸送関連CFRP 航空・宇宙分野におけるCFRP技術の現状と展望, 成形加工, Vol.28, No.12, pp. 484-489, (2016)
- 3) 寺田幸平：炭素繊維強化熱可塑性プラスチック-現状, 応用分野および課題-, 精密工学会誌, Vol.81, No.6, pp.485-488, (2015)
- 4) J.H.Greenwood: Creep and fracture of CFRP at 180-200°C, Composites, Vol.6, No.5, pp.203-206, (1975)
- 5) M.N.Irion・D.F.Adams: Compression creep testing of unidirectional composite materials., Composites, Vol.12, No.2, pp.117-123, (1981)
- 6) 金光学：CFRP繊維方向の曲げ強度の時間-温度依存性, 材料, Vol.33, No.370, pp.869-875, (1984)