

研究論文

デジタル画像相関法を用いた CFRP の引張特性評価

門川 泰子*1、岡田 光了*1、高橋 勤子*1、福田 徳生*1

Tensile Properties Evaluation of CFRP
Using Digital Image Correlation MethodYasuko KADOKAWA*1, Mitsunori OKADA*1, Isoko TAKAHASHI*1
and Norio FUKUDA*1

Industrial Research Center *1

射出成形により作製した熱可塑性炭素繊維強化樹脂(CFRTP)の引張試験におけるひずみ分布をデジタル画像相関(DIC)法により可視化した。その結果、CFRTP のひずみ分布は不均一であり、計測点によって応力-ひずみ曲線は異なることが明らかとなった。X 線 CT 観察、破断面観察の結果から、試験片内部にボイドが存在し、試験片の表面と内部では繊維分布、配向が異なることが観察され、引張試験時のひずみ分布に寄与していると考えられる。

1. はじめに

地球温暖化防止のため、自動車による二酸化炭素排出量の削減は世界的な課題となっており、輸送機器産業では燃費の向上を目的として自動車部材の軽量化が進められている。炭素繊維強化樹脂(CFRP)は、軽さと優れた強度を有し、高い軽量化効果が期待される材料として注目されている。しかし、従来の均質な金属材料と比較して不均一であるため、強度のばらつきが生じやすく、安全性や信頼性に乏しいのが現状である。

デジタル画像相関(Digital Image Correlation: 以下 DIC)法は、試験片表面のランダムパターンを撮影し、撮影したデジタル画像を変形過程で比較することにより物体表面の移動量(変位)を計測する方法である。一般的な伸び計によるひずみ計測では標線間のひずみしか確認できないのに対し、DIC 解析では、ひずみ分布の可視化や任意の点のひずみ計測が可能である^{1,2)}。

本研究では、加工性・成形性に優れ、量産車の軽量化に有力な材料とされる熱可塑性 CFRP(以下 CFRTP)の引張試験において DIC 法を用いてひずみ分布を可視化し、引張特性を評価した。また、耐候性試験を実施し、引張特性に及ぼす影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片の作製

原料として炭素繊維を 30wt%含んだ長繊維強化 6 ナイロン(TLP1060、東レ(株)製)を使用し、射出成形機(J85AD-110-H、(株)日本製鋼所製)を用いて JIS K 7139

ダンベル形試験片(タイプ A1)を作製した。DIC 法では、試験片の表面にランダムパターンを作製する必要があるため、図 1 のようにスプレー塗料を塗布した。



図 1 ランダムパターン

2.2 耐候性試験

耐候性評価のため、促進耐候性試験機(サンシャインウェザーメーター、スガ試験機(株)製)による促進劣化試験をブラックパネル温度 63℃、120 分中 18 分間水噴霧の条件下で 500 時間、1000 時間実施した。

2.3 引張試験

引張試験は万能試験機(オートグラフ AG-100kNIS、(株)島津製作所製)を用いて行った(試験速度:2mm/min)。ひずみ計測には、3D 計測システム(ARAMIS、GOM 社製)を使用した。比較のため、炭素繊維を含まない 6 ナイロンについても引張試験とひずみ計測を実施した(試験速度:4mm/min)。

2.4 試験片の観察

成形品内部のボイドや解繊状態、繊維の配向状態は、X 線 CT 装置(SMX-225CT、(株)島津製作所製)、X 線顕微鏡(nano-3DX、(株)リガク製)を用いて観察した。引張試験後の破断面は、走査型電子顕微鏡(JSM-6510A、日本電子(株)製)を用いて観察した。耐候性試験後の試験片表面の外観変化は、デジタルマイクロスコープ(VHX-

*1 産業技術センター 化学材料室

6000、(株)キーエンス製)を用いて観察した。

3. 実験結果及び考察

3.1 引張試験結果・DIC 解析結果

図 2 に DIC 解析によって得られた 6 ナイロンおよび CFRTP の最大主ひずみの分布を示す。ひずみ量は色で表され、ひずみ量が大きい部分は赤く表されている。6 ナイロンでは、破断直前までひずみが集中している部分は見られず、試験片全体で均一なひずみ分布となっていた。一方、CFRTP ではひずみ量が大きい部分が局所的に現れ、ひずみが不均一に分布し破断した。DIC 解析では、解析ソフト上で設定した任意の点や標線間のひずみ変化を求めることや、動画とオートグラフの荷重出力

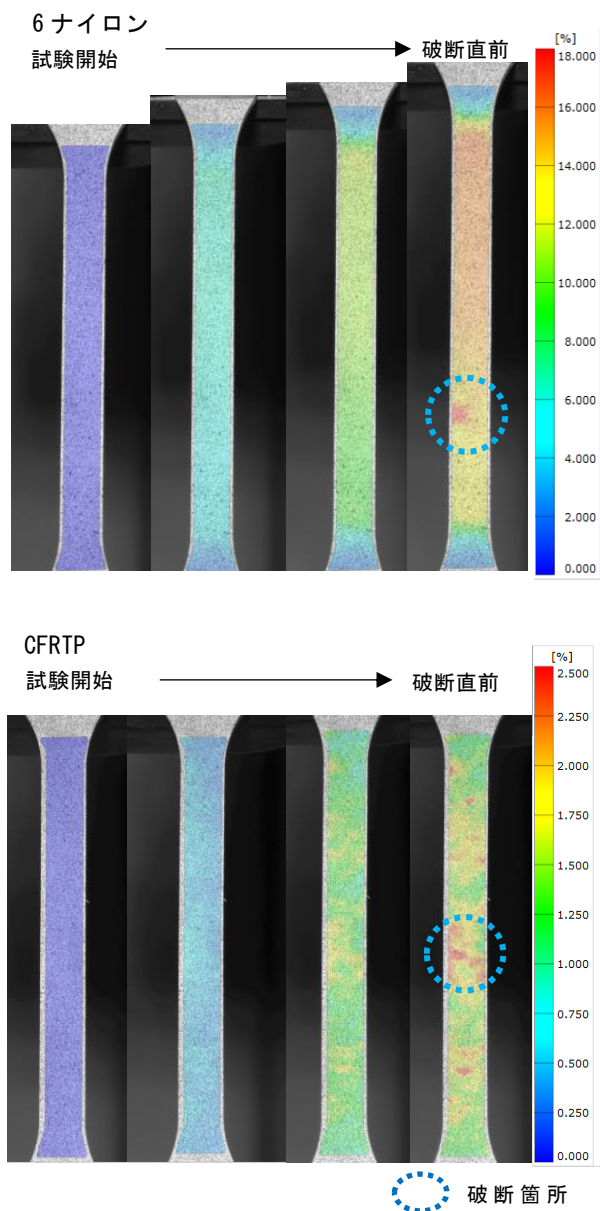


図 2 試験片のひずみ分布

値を同期することで応力-ひずみ曲線を得ることができる。図 3 に解析ソフト上で設定した任意の点①、②、③および④標線間 (標線間距離:75mm)のひずみ変化から求めた応力-ひずみ曲線を示す。6 ナイロンでは、破断時のひずみは計測点によって差があるものの、曲線はほぼ一致した。一方、CFRTP では曲線の傾きが計測部位によって異なり、標線間(④)から求めた応力-ひずみ曲線と一致しておらず、破断部付近(③)のひずみは他と比べて大きくなっていった。これらのことは CFRTP の不均一性の影響が現れたものと考えられ、材料局所のひずみ情報を得る手段として DIC 解析が有効であると考えられる。

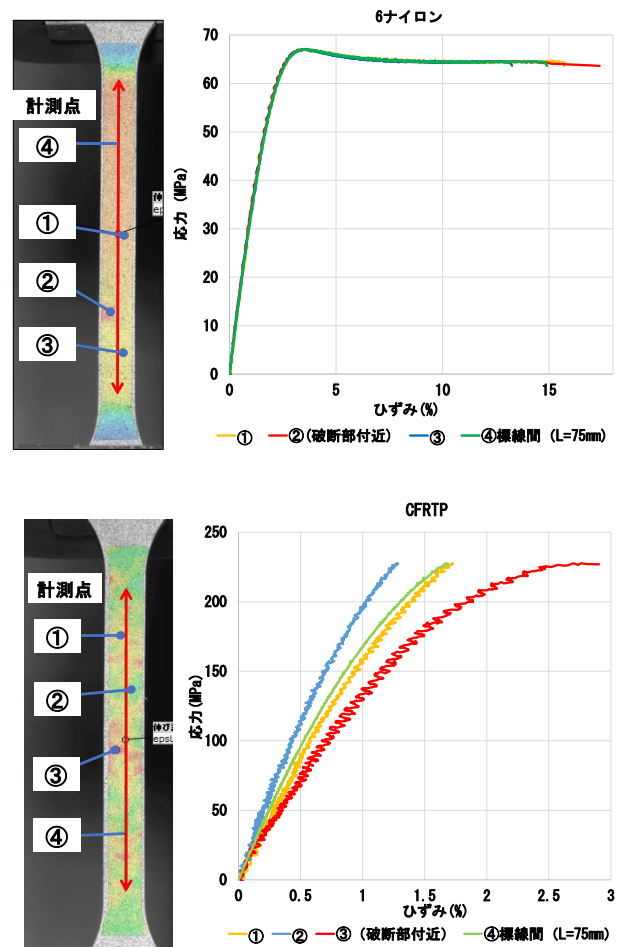


図 3 応力-ひずみ曲線

3.2 CFRTP の内部構造観察結果

図 4 に試験片全体の X 線 CT 観察結果(厚さ方向にスライスした断面像)を示す。試験片中央部に多く観察された黒い部分は密度が低く、他の部分に比べ繊維の割合が少なくなっていることやボイドが存在していることが考えられる。矢印で示した白い部分は密度が高く、繊維が十分にほぐれず凝集している箇所であり、場所により繊維の分布が異なっている様子が観察された。

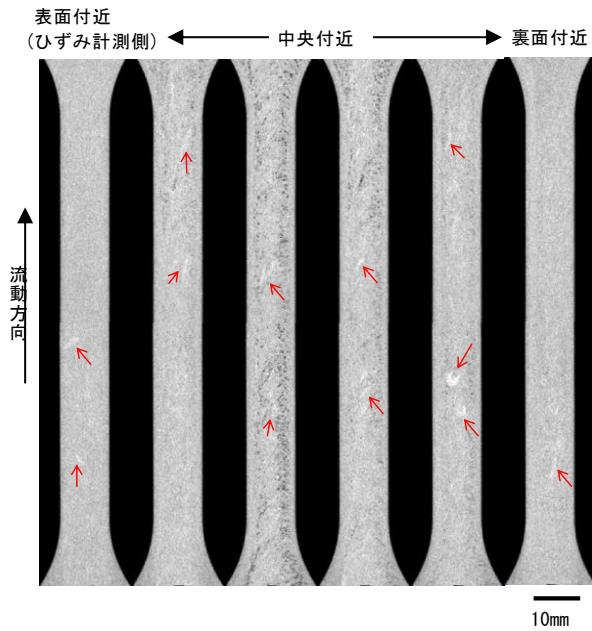


図4 試験片の X 線 CT 観察画像

図5に試験片表面付近と中央部付近の X 線顕微鏡観察結果を示す。樹脂の流動方向に配向した繊維が、試験片の表面付近と比べて中央部付近では少なくなっており、表面と内部では繊維の配向が異なることが推測される。このように試験片内で繊維の分布や配向が不均一となっていることが 3.1 における引張試験時のひずみ分布に影響を及ぼしたと考えられる。

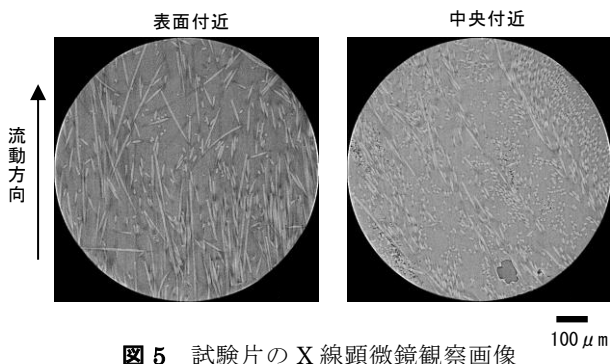


図5 試験片の X 線顕微鏡観察画像

図6に引張試験後の破断面の電子顕微鏡観察の結果を示す。表面付近は破断面に対して垂直に近い方向に配向した繊維が多く観察された。一方、中央部付近は破断面に対して平行に配向した繊維が多く、樹脂が伸びた様子も観察された。このことから、破断面付近のひずみが引張試験の初期段階から大きくなった一因として引張方向に沿わない繊維が多く存在し、繊維による補強効果が十分に得られなかったことが考えられる。また、射出成形により作製した試験片では、射出時に樹脂が受けるせん断力による繊維の折損が発生するため³⁾、繊維長が不均一となることもひずみ分布が不均一となった一因に挙げられる。

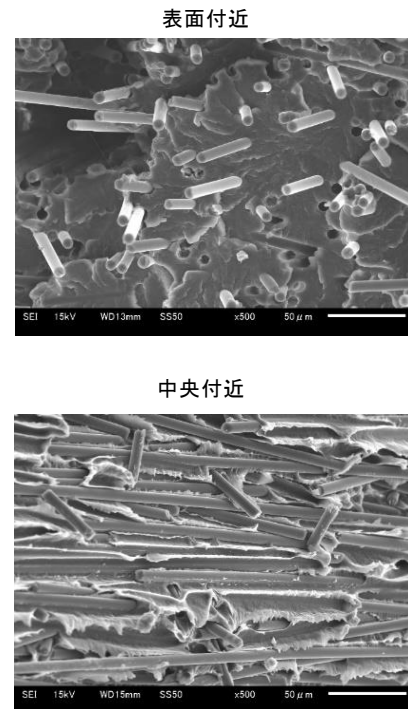


図6 破断面の電子顕微鏡観察画像

3.3 耐候性試験の結果

表1に耐候性試験前後の引張試験結果、図7に耐候性試験前後の DIC 解析結果と応力-ひずみ曲線(標線間距離:75mm)を示す。耐候性試験による引張強さ、弾性率、伸びに大きな変化は見られなかった。また、応力-ひずみ曲線についても、多少の差はあるが個々の試験片のバラツキの範囲内であった。

表1 耐候性試験前後の引張試験結果

	引張強さ (MPa)	引張弾性率 (GPa)	伸び (%)
耐候性試験前	229	20.6	1.6
500 時間後	222	20.9	1.4
1000 時間後	224	20.7	1.5

図8に耐候性試験前後の試験片表面の写真を示す。耐候性試験によるクラックの発生、試験時間の増加によるクラックの増加が確認された。また、目視観察により表面の白化、炭素繊維の露出が確認された。これらのことから、耐候性試験により樹脂表面は劣化したと考えられるが、引張特性やひずみ分布には大きく影響しなかった。炭素繊維は紫外線を透過しないため内部まで紫外線が侵入せず、樹脂の劣化が表面近くに抑えられ、引張特性やひずみ分布への影響が少なかったことが考えられる。今後さらに耐候性試験を継続し、引張特性の変化を評価していく予定である。

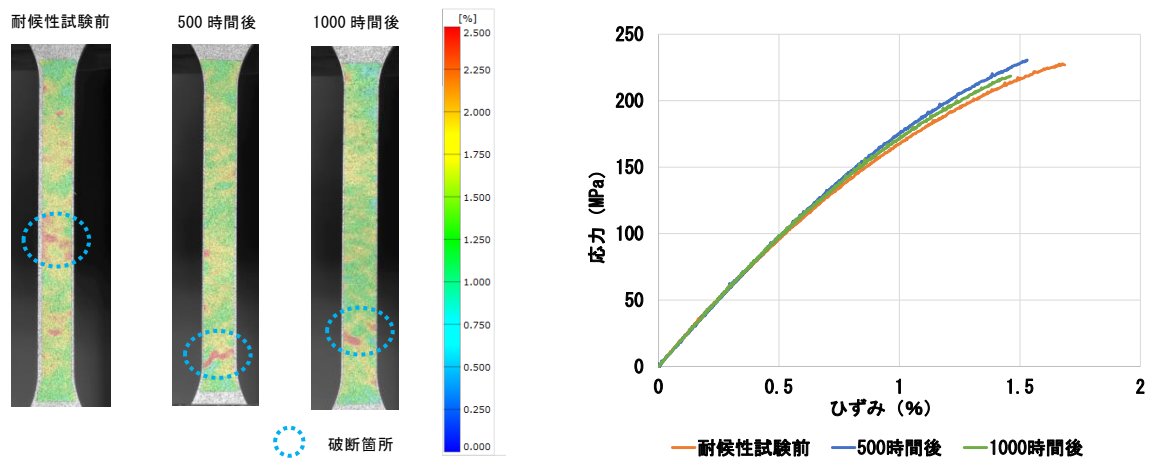


図 7 耐候性試験前後の DIC 解析結果

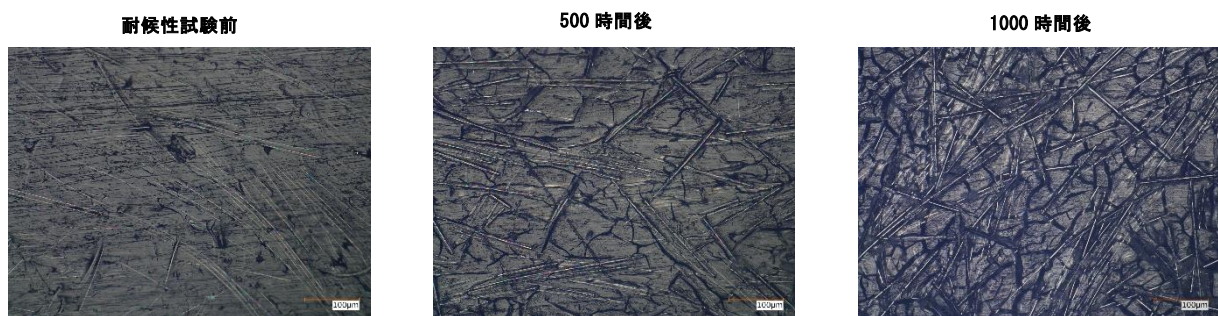


図 8 耐候性試験前後の試験片表面観察画像

4. 結び

本研究では、射出成形により作製した長繊維強化 6 ナイロンの引張試験において DIC 法を用いてひずみ分布を可視化し、引張特性を評価した。結果は以下のとおりである。

- (1) CFRTP のひずみ分布は 6 ナイロンに比べ不均一となった。また、応力-ひずみ曲線は計測点によって異なり、破断部付近のひずみは他と比べて大きくなっていた。
- (2) 材料局所のひずみ情報を得る手段として DIC 解析が有効であり、品質改善に役立つと考えられる。
- (3) 試験片の X 線 CT 観察、破断面の SEM 観察の結果から、試験片内で繊維分布や配向が不均一となっていることが示唆され、引張試験時のひずみ分布に寄与していると考えられる。

- (4) サンシャインウェザーメーターによる耐候性試験後の試験片は、その表面に樹脂の劣化が観察されたが、引張特性やひずみ分布には大きく影響しなかった。今後さらに耐候性試験を継続し、評価する予定である。

文献

- 1) 垣尾尚史, 矢野文彬, 亀井由樹: 強化プラスチック, **64**(4), 158(2018)
- 2) 村上岳, 松尾剛: 62nd FRP CON-EX 2017 講演要旨集, 150
- 3) 岡田光了, 福田徳生, 松原秀樹: あいち産業科学技術総合センター研究報告, **7**, 10(2018)