

## 研究論文

# 射出成形条件が長繊維強化樹脂の機械特性と繊維長分布に及ぼす影響

岡田光了\*1、福田徳生\*1、松原秀樹\*2

## Influence of Molding Conditions on Mechanical Properties and Fiber Length Distribution in Long Fiber Reinforced Plastics

Mitsunori OKADA\*1, Norio FUKUDA\*1 and Hideki MATSUBARA\*2

Industrial Research Center\*1\*2

長繊維強化樹脂の射出成形において、成形条件に起因する繊維折損の変化を繊維長分布と機械特性から検討した。射出速度が大きいほど、重量平均繊維長は長くなるが、繊維折損により短繊維の割合が増加するため、繊維長分布が広がることが明らかとなった。射出速度が小さいほど引張特性や曲げ特性は高くなったことから、機械特性は重量平均繊維長だけでなく、繊維長分布に影響を受けることが示唆された。

### 1. はじめに

熱可塑性の繊維強化樹脂を用いた射出成形は、熱硬化性樹脂と連続繊維を用いたプレス成形と比べて、複雑な形状を安価にハイサイクルで生産できることから、幅広い分野で利用されている。輸送機器産業では CO<sub>2</sub> 排出規制への対応や燃費向上を目的として車体の軽量化を進めており、樹脂部品の薄肉化のために炭素繊維を含有した繊維強化樹脂の射出成形の検討が盛んである。近年では、従来の短繊維強化樹脂に比べて優れた機械特性や寸法安定性が期待できるとされる、ペレットと同程度の長さの繊維を含有した長繊維強化樹脂(LFT)が注目されている。しかし、シリンダ内での可塑化工程における解繊不良や、金型内への射出工程において繊維折損が発生しやすい。そのため、成形品の内部で繊維の密度や繊維長のばらつきが生じ、成形品の表面性状や機械特性に悪影響を与える可能性がある。これらのことから、成形不良や繊維折損を低減した LFT の射出成形技術の開発が期待されている。

本研究では、炭素繊維 LFT の射出成形における繊維折損について、成形条件を変化させた時の繊維長分布と機械特性から検討した。合わせて、射出成形 CAE を用いて各成形条件における流動特性を検証した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 射出成形

成形材料として炭素繊維を 30wt% 含んだポリアミド 6 の LFT (TLP1060-30、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、表 1 に示す成形条件で射出成形を行った。シリンダ内で樹脂を熔融し混練する可塑化工程では計量条件(背圧および回転数)を、また射出工程では射出速度をそれぞれ変えて、JIS K 7139 に規定する多目的試験片(A1)を T ランナー、2 個取りの金型にて成形した。

表 1 LFT の成形条件

成形条件	A	B	C	D	E
樹脂温度[°C]	280				
背圧[MPa]	10		20		
回転数[rpm]	20	100			
射出速度[mm/s]	40	100	40	100	
射出圧力[MPa]	150				
保圧[MPa], [s]	40, 20				
冷却時間[s]	20				
金型温度[°C]	80				

#### 2.2 成形品の評価

##### 2.2.1 非破壊内部観察および機械物性

成形品内部のポイドと炭素繊維の解繊状態は、X 線 CT 装置(SMX-225CT、(株)島津製作所製)を用いて、管電圧 150kV、管電流 40 $\mu$ A の条件で観察した。引張特性および曲げ特性はオートグラフ(AG-Xplus、(株)島津製作所製)を用いて、試験速度 2mm/min で試験した。引張試験における伸びは標線間距離を 50mm としビデオ式非

接触伸び計(TRViewX、(株)島津製作所製)を用いて測定し、また、曲げ試験におけるたわみはクロスヘッドの移動量から測定した。シャルピー衝撃強さは衝撃試験機(Impact Tester IT、(株)東洋精機製作所製)を用いて、公称振り子エネルギー2.0J、ノッチの形状Aで試験した。

### 2.2.2 繊維長の測定

射出前後の繊維長を測定した。射出前の試料は計量した樹脂を射出せずにゆっくりと吐出することにより、また射出後の試料は成形品の中央部分から採取した。これらを1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanolで溶解し、溶解液をスライドガラス上に滴下し成膜した後、実体顕微鏡(SMZ1500、(株)ニコン製)を用いて炭素繊維を観察した。観察した画像から画像処理ソフト(Quick Grain、(株)イノテック製)を用いて炭素繊維300本の繊維長を測定した<sup>1)</sup>。

### 2.3 流動解析

流動解析は射出成形CAEソフト(3D TIMON、東レエンジニアリング(株)製)を用いて行った。スプルー、ランナー、ゲート、成形品をボクセルメッシュにて分割し、生成要素数45224、充填率10%の体積誤差率が2.3%のモデルで解析した。また、冷却管、金型は未設定の簡易モデルとした。

## 3. 実験結果及び考察

射出成形における射出前の試料と成形品の一例を図1に示す。どの条件においても射出前の試料は硬い繊維の塊状で、汎用の繊維強化樹脂で見られる水飴状とは異なっていた。その成形品は表面全体が凹凸であり、型温や保圧の調整では改善されなかった。LFTは均一な解繊が難しく、成形品中の炭素繊維の体積含有率が所々異なることで収縮差が生じ、表面に凹凸が発生したものと考えられる。



図1 射出前の試料と成形品(条件B)

成形品中央部の非破壊内部観察の結果を図2に示す。A~E どの条件においても解繊不良や微小なボイドが顕著に観察された。異なる計量条件で射出速度が同じA、B、Dを比較した場合、回転数や背圧が増加するにつれ

て解繊不良や両側に現れているボイドが減少する様子が観察された。特にAの場合は、解繊不良が樹脂の流動方向に沿わない箇所が観察された。他方、同じ計量条件で射出速度が異なるBとCあるいはDとEでは、これらはほとんど差がなかった。このことから、計量条件が解繊とボイドに影響することが明らかとなった。

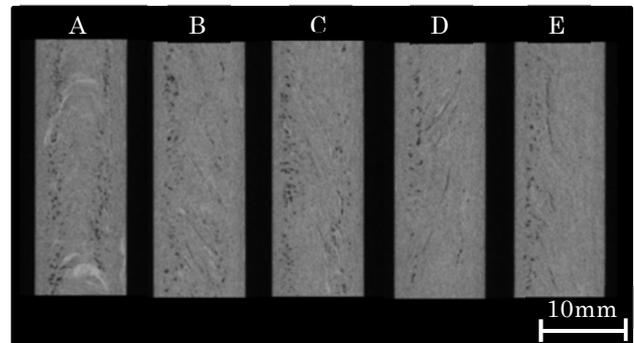


図2 成形品中央部の内部観察

条件B~Eで射出成形した成形品の機械物性試験の結果を表2に示す。引張特性と曲げ特性は、異なる計量条件で射出速度が同じBとDあるいはCとEを比較した場合、ほぼ同じであった。一方、同じ計量条件で射出速度が異なるBとCあるいはDとEを比較した場合、射出速度が小さいBやDの方が高い傾向があり、射出速度に依存する結果となった。他方、衝撃強さは計量条件により違いがあり、熔融混練の力が小さいB、CがD、Eより約15%高く、計量条件に依存する結果となった。

表2 成形品の機械特性

成形条件	B	C	D	E
引張強さ[MPa]	251	243	251	242
引張弾性率[GPa]	22.7	22.3	23.4	21.2
曲げ強さ[MPa]	389	373	380	378
曲げ弾性率[GPa]	18.9	18.5	19.2	18.8
シャルピー衝撃強さ[kJ/m <sup>2</sup> ]	15	15	13	13

次いで、各成形条件の射出前後で測定した繊維長の繊維長分布と累積比率分布を図3に示す。また、式(1)、(2)より求めた数平均繊維長 $L_n$ と重量平均繊維長 $L_w$ 、および繊維長分布の広がり尺度として $L_w/L_n$ を表3に示す。ここで、 $N_i$ は平均長さ $L_i$ の各ヒストグラムの繊維の本数である。

$$L_n = \frac{\sum N_i L_i}{\sum N_i} \quad (1)$$

$$L_w = \frac{\sum N_i L_i^2}{\sum N_i L_i} \quad (2)$$

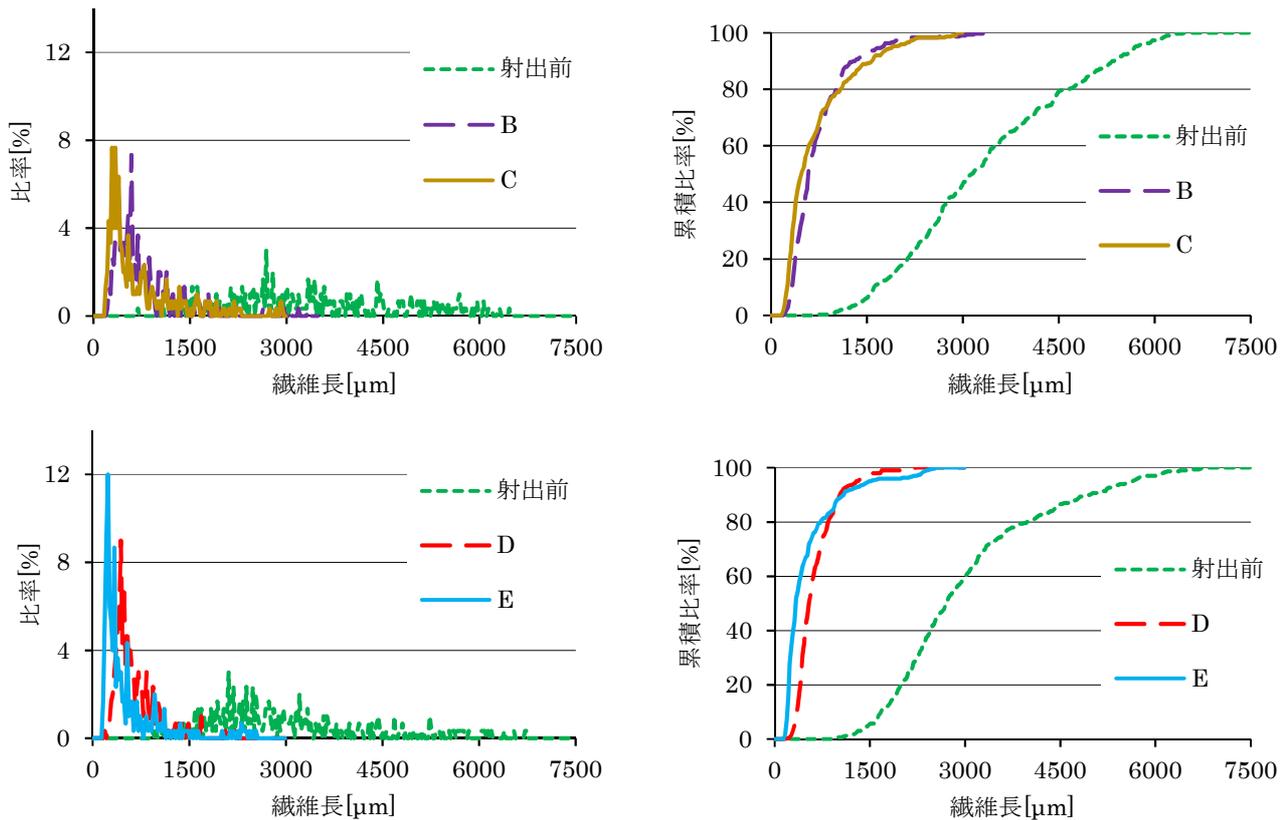


図3 射出前後における繊維長分布(左)と累積比率分布(右)  
(上:成形条件 B、C 下:成形条件 D、E)

可塑化工程を経た射出前の試料中には 1000~6500 $\mu\text{m}$  の繊維長の炭素繊維が幅広く分布していた。どちらの計量条件においても  $L_n$  は 3000 $\mu\text{m}$  前半で、LFT のペレットに含有される炭素繊維の繊維長が 7000 $\mu\text{m}$  程度であることから可塑化により繊維長は半分以下になることが明らかとなった。先述の非破壊内部観察で成形品中に観察された解繊不良やボイドの低減を試みる場合、計量条件の背圧や回転数をさらに上げる必要があると考えられるが、その場合はさらに繊維長は短くなると予想される。

射出後の繊維長分布は、可塑化の力(背圧)が大きいほど、あるいは射出速度が大きいほど短繊維長側にシフトした。射出成形では射出時に樹脂がせん断応力を受けるため、その際に繊維折損が発生しやすい。射出速度 100mm/s の場合、累積比率分布において、分布曲線が短繊維側にあることから、より強いせん断応力を受け繊維が折損し短繊維の割合が増加したと考えられる。一方で、分布曲線は 80%付近で交差し、射出速度 100mm/s の C、E では、射出速度 40mm/s の B、D に比べ  $L_w$  が約 10%大きいことから、C、E では B、D に比べ長繊維が残存する可能性が高いと考えられる。これらのことから、射出速度が大きいほど繊維長分布が広がり、小さい

ほど繊維長分布は狭くなる可能性が示唆された。 $L_w/L_n$  が B(1.42) < C(1.61)、D(1.24) < E(1.78)であることもこれを支持している。

表 2 の機械特性を考慮すると、引張特性および曲げ特性は  $L_w$  の大きい C、E が B、D よりも低い物性値を示した。このことから、これらの物性は  $L_w$  だけでなく、繊維長分布にも影響されることが示唆された。これは、繊維が折損し短くなると、ランダムに配向しやすくなることから、樹脂の流動と繊維の配向が必ずしも一致しないことに起因すると考えられる。一方で、衝撃強さは繊維長分布に依らず  $L_w$  を反映する結果となった。衝撃強さは繊維の配向や折れ曲がりの影響を受けにくいためと

表 3 射出前後における各平均繊維長

		$L_n$ [ $\mu\text{m}$ ]	$L_w$ [ $\mu\text{m}$ ]	$L_w/L_n$
射出前 (B、C)		3348	3883	1.16
射出後	B	748	1067	1.42
	C	717	1158	1.61
射出前 (D、E)		3014	3518	1.17
射出後	D	653	808	1.24
	E	537	960	1.78

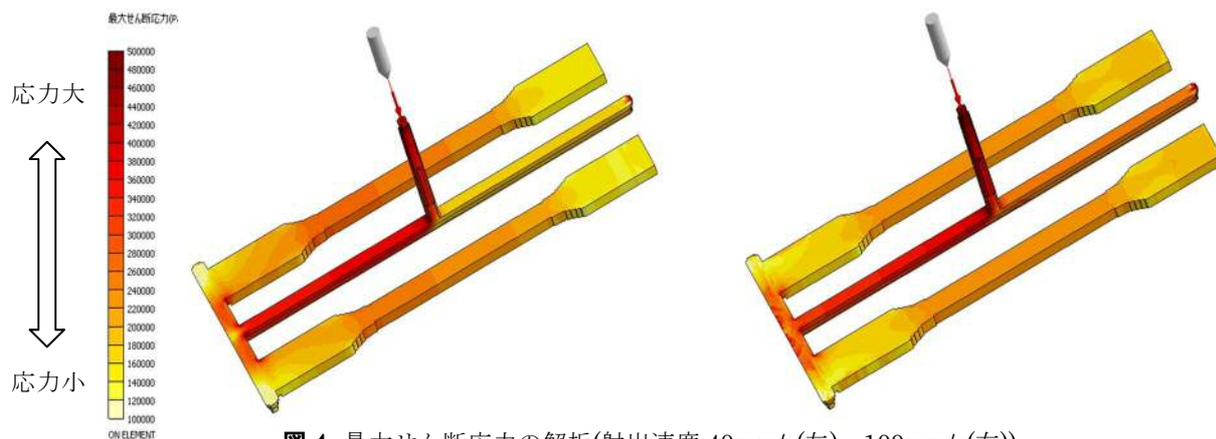


図4 最大せん断応力の解析(射出速度 40mm/s(左)、100mm/s(右))

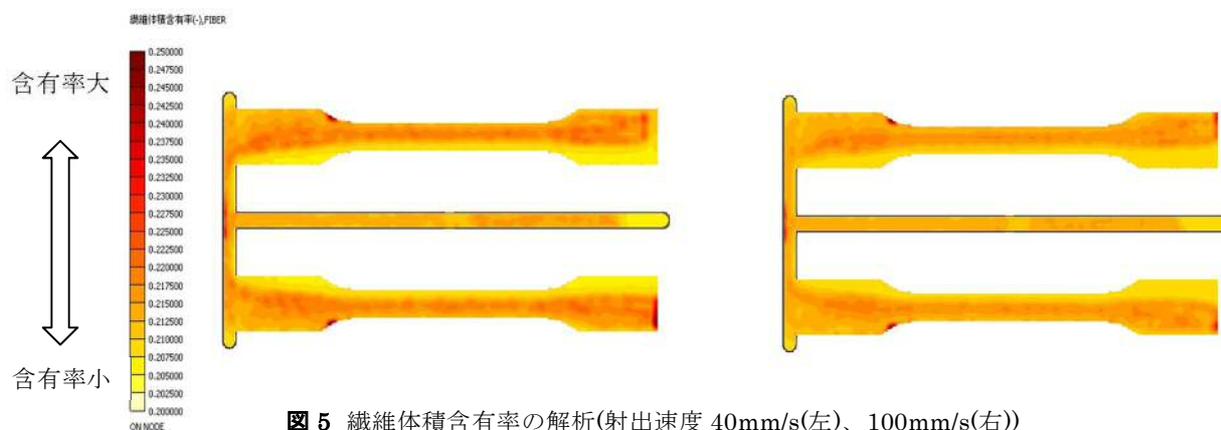


図5 繊維体積含有率の解析(射出速度 40mm/s(左)、100mm/s(右))

考えられる。

上記の条件による射出成形を CAE によりシミュレーションし、射出速度が寄与する成形特性の解析を試みた。射出速度 40mm/s の B と 100mm/s の C での射出成形における最大せん断応力と炭素繊維の体積含有率を解析した。図 4 に射出の際に生じる最大せん断応力を示す。射出速度 100mm/s の場合、樹脂が金型に流れ込むスプルー先端や分岐点の流路の狭い箇所において大きなせん断が生じることが示された。これらの箇所ではせん断により繊維折損が発生し、射出速度が大きいほど短い繊維の割合が増加したと推定される。一方で、射出時間は 0.39 秒と短いため、長繊維が残存し  $L_w$  が大きくなったと考えられる。次いで、成形品内部における繊維体積含有率を解析した結果を図 5 に示す。射出速度 100mm/s の場合と比較して射出速度 40mm/s で成形した場合、樹脂の流れに沿って繊維が密に存在しやすいことが示された。このことから、射出速度 40mm/s では繊維長分布が狭い繊維が密に配向することで引張特性、曲げ特性が向上したと考えられる。

一方で射出速度 100mm/s の場合、繊維は均一に分散しやすいと考えられるが、金型内で生じるせん断により短繊維化し繊維長分布が広がることで繊維がランダムに分散する可能性が高くなるため、引張特性や曲げ特性が低下したと考えられる。

#### 4. 結び

本研究では、炭素繊維 LFT の射出成形における成形条件と繊維長分布ならびに機械物性との相関を検討した。射出速度 40mm/s の場合、繊維長分布が狭く、引張特性、曲げ特性が高いことが分かった。一方、射出速度 100mm/s の場合、 $L_w$  は大きい、繊維長分布が広がり、引張特性や曲げ特性は低かった。これらの結果から、繊維長分布が広がると、繊維がランダムに分散し、その結果、引張特性や曲げ特性が低下すると考えられる。

#### 文献

- 1) 小川俊夫, 美馬正道, 田矢直紀: 成形加工, 7(5), 315(1995)