

Carbon-LFTD自動化プロセスの開発 (繊維強化熱可塑性樹脂の直接成形)

Development of Carbon-LFTD Automation Process ~Direct Molding of Fiber Reinforced Thermoplastics~

伊藤友樹* 嶋田翔太* 成田建次** 宮城光治* 木村隆一**
Yuki Ito Shota Shimada Kenji Narita Mitsuharu Miyagi Ryuichi Kimura

リサイクル性や生産効率の観点から熱可塑性樹脂を用いた繊維強化複合材料のハイタクトな製造システムに注目が集まっている。当社では長年使ってきた混練技術やプレス技術と成形・評価技術を組合わせた Carbon-LFTD の開発に取り組んできた。2019 年度には、お客様やパートナー企業との「共創の場」として、新コンポジットセンターを建設した。複雑な部品形状の成形に対応できるロボットハンドを開発し、自動化技術にて試作が可能なテストプラントの設置が完了した。炭素繊維複合材料は、その熱伝導性から混練物の表面温度の低下が急速に発生するため、複雑な部品を成形するためには、金型上の決められた位置に、精度よくそして迅速に材料を搬送して加圧する技術が必要になる。同プラントを用いて、残存繊維長が力学特性に及ぼす効果、材料の再利用に関する可能性、成形が可能な形状などについての検証を行った。

“Short takt production systems” for fiber-reinforced composite materials using thermoplastic resins have been gaining attention from the perspective of recyclability and production efficiency. Our company has been working on the development of Carbon-LFTD through a combination of kneading technology, press and molding technology, and evaluation technology, which have been used for many years. In FY2019, we constructed a new composite center for the development of light-weight parts with our customers and partners (a joint site for innovation). We also developed robotic tools for handling complicated parts and completed the set up of a test plant for automation technology trials and prototypes.

Due to the thermal conductivity of carbon fiber composite materials, a rapid decrease in the surface temperature of the compound materials occurs, and so the compound material must be quickly transported and accurately positioned on mold tools and presses. We are studying the mechanical properties of compound materials that depend on carbon fiber length in composite materials, their recyclability, and the making of complicated shapes by using Carbon-LFTD technology.

1 はじめに

材料やエネルギーの効率的な利用はあらゆる産業において重要な課題である。移動体分野では、低炭素化社会や温室効果ガス排出量規制に対応するため、燃費向上への取組みが活発化しており、車輛の軽量化は、ガソリン車や電気自動車のいずれにおいても不可欠な要素となっている。軽量化部材として、ガラス繊維・炭素繊維などの強化繊維を複合化した樹脂の適用・検討が進んでいる。炭素繊維は、これまで一部の高級自動車にしか採用されていなかったが、量産車への採用事例も見られるようになってきている。マトリックスとなる樹脂もこれまでは、熱硬化性が主体であったが、リサイクル性や生産性に有利な熱可塑性樹脂を用いた製造システムへの注目も高まっている。

当社では 2016 年に炭素繊維強化複合材料（以下 CFRP）に関する開発拠点として、湖東工場内にコンポジットセンターを設立した。「共創の場」として、お客様やパートナー企業と各種の量産工法を用いた軽量化部品、プロセスの試作や開発を実施してきた。2019 年

度には、新建屋を建設しており、最終的な生産体制を想定したプロセス検討や大型部品の試作が可能なデモプラントを設置した。試作が可能な量産工法としては、エポキシ樹脂系を中心とした引抜成形、ハイサイクル RTM、Wet Compression Molding、熱可塑性樹脂を用いた Carbon-LFTD (Long Fiber Thermoplastics Direct) である。本稿では Carbon-LFTD の自動化プロセスとその特長、成形事例について紹介する。

2 Carbon-LFTDプロセス

Carbon-LFTD は、LFP (Long Fiber Pellet: 長繊維ペレット) や GMT (Glass Mat Thermoplastics: 長繊維マット) などの中間基材を経由せずに、成形工場のラインの中で直接熔融混練を行いながら、圧縮成形を行うプロセスである。「高生産性」、「高強度」かつ「低コスト」な成形品の製造を、物性のばらつきを大幅に低減して実施できるシステムの開発を進めている。

Carbon-LFTD の基本構成図を図 1、ベンチプラント

* コンポジットプロジェクト室 プロセス開発部 ** 同 設備開発部

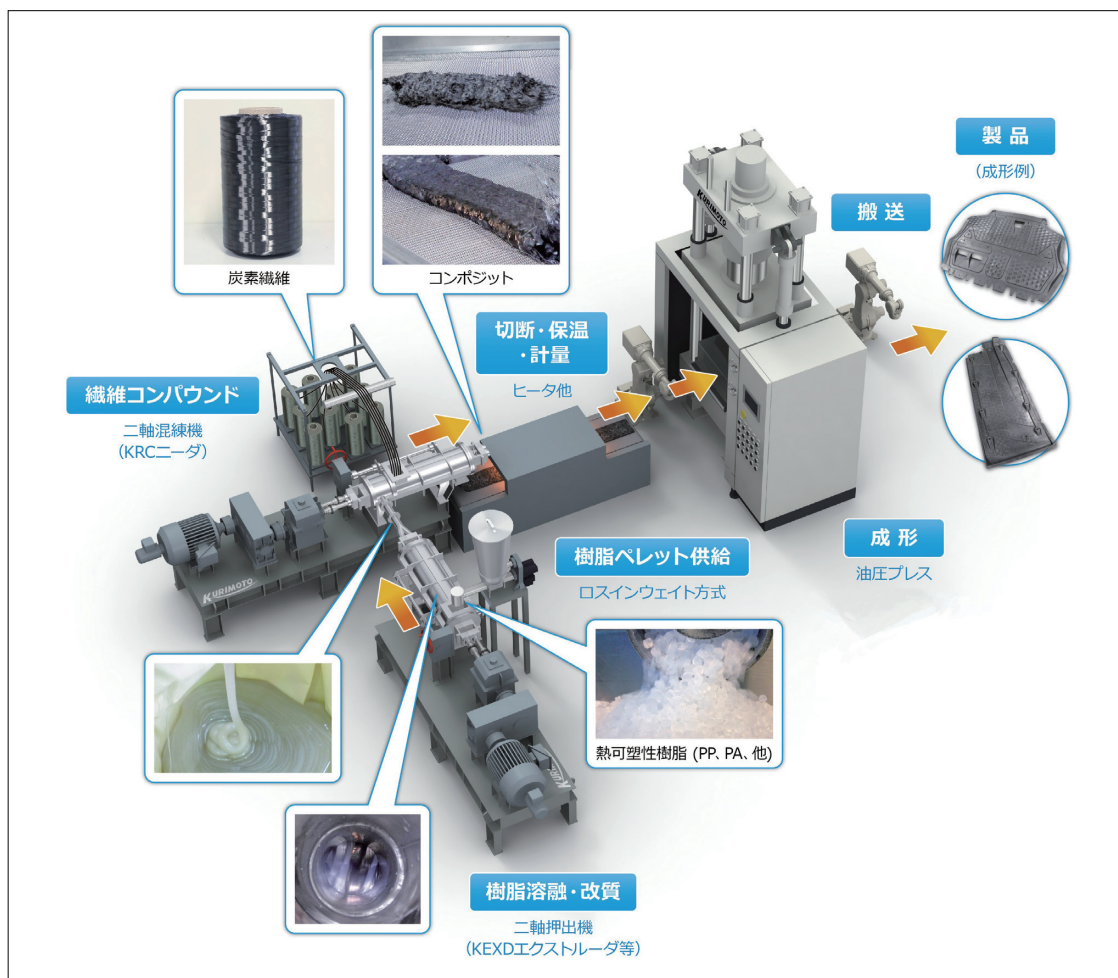


図1 Carbon-LFTD構成図



図2 Carbon-LFTDベンチプラント

の写真を図2に示す。本プロセスでは、材料の原単位であるペレット状の熱可塑性樹脂とロービングの形態で供給される各種強化繊維（炭素繊維、ガラス繊維など）を使用する。

1) 溶融・混練工程

樹脂ペレットと各種添加材（酸化防止材など）が、ロスインウェイト式フィーダを経由して当社の混練押出機（KEXDエクストルーダ）に供給される。高速・高せん断場により効率的な溶融混練操作を行いながら、後段に

溶融樹脂を送液する。繊維と可塑化した樹脂の混練工程ではKRCニーダを用いている。二軸噛合型の連続混練装置であるKRCニーダには、フリーボリュームが大きな超深溝型のパドルを搭載しており、トレードオフ関係にある開繊・混練性能と繊維の折損抑制の両立を図っている。KRCニーダに搭載しているスクリューに巻きつけながら装置内に引込むことにより、繊維フィラメントの集合体であるロービングの供給を行っている。KRCニーダ内の任意のゾーンにてロービングを切断した後、各繊維フィラメントを樹脂中に分散させている。

混練ダイスを経由して連続的に混練物を製造するが、ダイスから吐出される混練物の厚みや幅は、金型内での混練物の流動特性に大きく関与し、成形物の力学特性（引張や曲げ特性）、力学特性の等方性に大きく影響する。部品の形状などに応じて、適切に調整することが重要である。コンポジットセンターでは可動リップ・アウトディッケル付のLFTD用T型ダイスなど各種混練ダイスを保有しており、最大幅500mm、厚み10～30mmの混練物を押出・製造することが可能である。

2) 裁断・保温工程

KRCニーダより排出された混練物は、計量・裁断ユニットにより、部品に必要な重量・長さのカットされる。高い熱伝導率を有する炭素繊維を含有した混練物の表面は、

図3に示すとおり、急激な温度低下が発生する（計測点 A: 混練物中央、B: 後方）。箇所・条件にもよるが、約 15 s で温度管理レンジ以下まで降温するのが確認できる。混練物の温度低下は、欠陥の発生（物性低下）、外観不良や流動性低下による充填不良につながる。そのため、コンベアの上・下面に配置された中波長赤外線ヒータにより混練物の表面の温度を管理温度内に維持しながら搬送され、ロボットでの材料取出しの位置決めを行う。

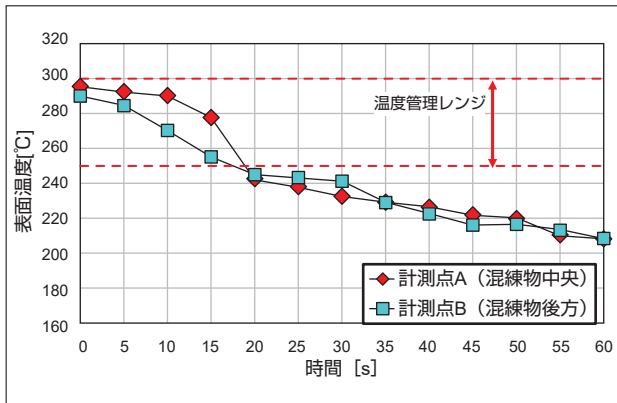


図3 混練物表面の温度降下測定事例

3) 金型への材料投入・成形工程

Carbon-LFTD は成形形状の自由度が高く、剛性設計を行う部品に適している。デモプラントでは、材料のハンドリングにはロボットを使用している。このロボットは金型の任意の位置に混練物を投入、複数の混練物を同時、かつ、混練物を各々自由な金型位置に投入することができるハンドを搭載している。図4に混練物のハンドリング状況の写真を示す。金型への材料投入パターンと位置決め精度を高めることにより、異厚形状やリブを組合わせた複雑な形状の部品を成形することが可能である。

油圧プレスは、複雑な形状を成形する時に発生する偏芯荷重に対応するため、スライドの傾きをアクティブな状況下で μm 単位で制御する機能を備えている。Carbon-LFTD は平衡を保持しながら高速で加圧しなければ温度低下による流動阻害が発生し、充填不良を起こす。その例を図5に示す。そのため高速で平衡度を保持しながら、混練物の温度が管理レンジ内にて混練物を加圧・冷却することが重要である。

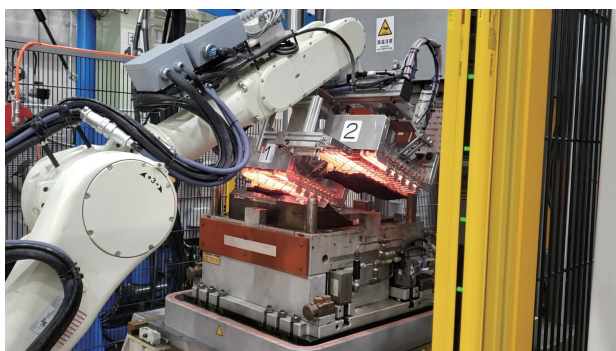


図4 混練物のハンドリング状況

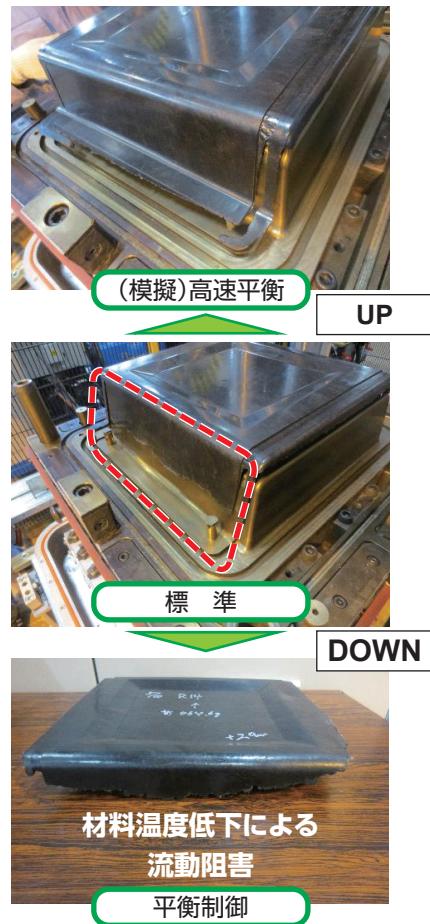


図5 平衡度と流動長の例

3 Carbon-LFTDシステムの特長

1) 成形品の高強度化

強化繊維複合材料の弾性率・強度は、繊維が長いほど向上する。高強度な成形品を得るためには、成形プロセス内での繊維の折損を抑制することも重要な要素のひとつである。通常の射出成形プロセスでは、繊維と樹脂が複合化されたペレットを熔融する際に、大きなせん断力が繊維に加わり、繊維の折損が急激に進行する。Carbon-LFTD では、強化繊維を投入する箇所において樹脂は既に熔融している。また装置に引込む強化繊維の長さも、混練パドルの構成により調整できるため、混練物中の残存繊維長を長く維持することができる。

測定事例として平均繊維長と弾性率の関数を図6に示す。繊維含有量 30 mass%、40 mass%とも、残存平均繊維長が約 10 mm までの領域では、繊維長の増加に伴い、引張弾性率、曲げ弾性率ともに増加する結果であった。一方、平均繊維長が 10 ~ 20 mm の領域では、弾性率の低下、もしくは増加が止まる傾向が確認された。繊維長の増加に伴い、混練物は分散した強化繊維のスプリングバック現象により空隙が大きくなる膨化現象が発生する。弾性率が低下したのはこの膨化現象が影響していると考えている。残存する繊維長により、スプリングバック現象や混練物の流動性は大きく変化する。成形物の力学特性と製造システムの管理レベルが相反する事象も発

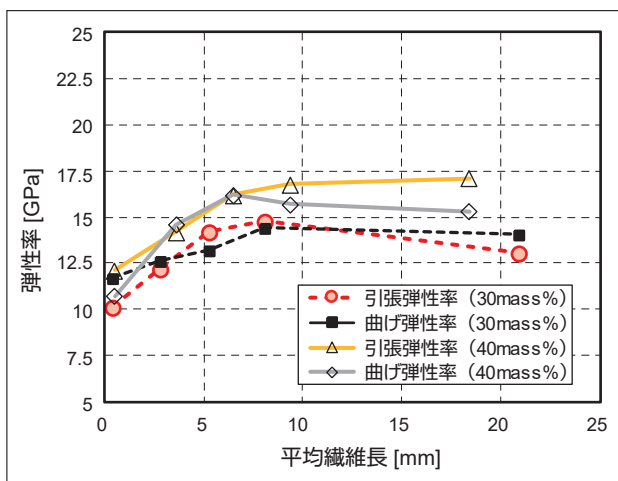


図6 混練物中の繊維長効果測定結果

生するため、部品に要求される特性や形状を加味して残存させる繊維長などのシステムのチューニングを実施していくことが重要である。現在、更なる高剛性化を目指して、強化繊維含有量 50 mass% 系の部品開発に取り組んでいる。

2) 材料コストの低減

強化繊維と樹脂の混練・分散工程で用いる KRC ニューダは、高い混練能力を有する二軸嚙合型の混練機である。40 千本以上の炭素繊維フィラメントから構成されるラージトウを使用しても良好な分散状態を得ることができる。表 1 に 12 千本のフィラメントから構成されるレギュラートウ（フィラメント数が 12 千本以下）と 48 千本の炭素繊維フィラメントから構成されるラージトウを強化繊維として使用したときの物性値測定事例を示す。樹脂にはポリアミド 6（以下 PA6）をそれぞれに用いた。レギュラートウと比較して安価で流通しているラージトウを用いた場合でも、引張・曲げ特性に差はなく、良好な含浸・分散状態が確保できており、Carbon-LFTD プロセスに適用することが可能である。

表1 レギュラートウとラージトウの比較試験事例 (Carbon-LFTD成形物)

CF40 mass%	ラージトウ 48K	レギュラートウ 12K
引張弾性率 (GPa)	16.8	16.4
引張強度 (MPa)	204	186
曲げ弾性率 (GPa)	15.7	13.7
曲げ強度 (MPa)	301	308

3) 成形材料の循環利用

成形した部品を粉碎して、プロセスに再度利用する試験事例を紹介する。実験原料には、PA6 と炭素繊維 (50K ラージトウ) を用いており、強化繊維の投入量は 30 mass% に設定した。リサイクル材料 (循環材料) は Carbon-LFTD 工程内残渣を想定しており、成形した部品を二軸シュレッダー+高速カッターミルを用いて 5 mm 以下に粉碎処理を行うことによって作製した。ここでは、樹脂と繊維の分離操作は行っていない。各 Run

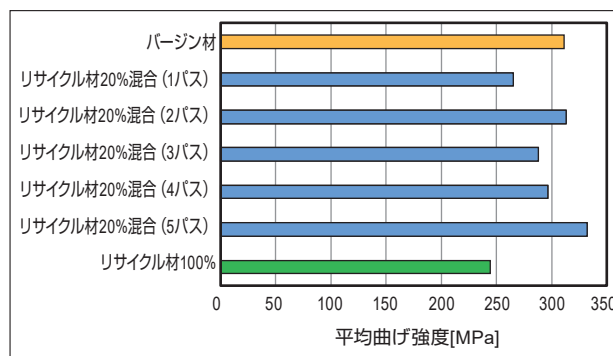


図7 Carbon-LFTD (CF量30 mass%) 再利用試験結果

のバージン材を 80 mass%、リサイクル材を 20 mass% となるように樹脂および強化繊維の供給を行い、混練・成形操作を実施した。最大 5 回の熱履歴を受けた材料を使用したときの曲げ試験の測定結果を図 7 に記載する。

全量熱履歴を受けた材料を使用した成形板の曲げ強度は、約 250 MPa (平均値) であった。ロービング状の強化繊維を使用した Carbon-LFTD と比較すると、大幅な曲げ強度の低下が確認されており、残存する繊維長が短くなることが影響していると推測される。バージン材と熱履歴を受けた材料を 20 mass% 混合した場合、5 回の熱履歴を受けた材料を使用しても、顕著な物性の低下は確認されなかった。熱履歴回数の増加に伴う PA6 樹脂の分子量の低下も観察されなかった。炭素繊維は高価な材料である。合格品位に達しなかった成形物や工程内で発生する残渣も粉碎処理により再利用できる可能性が示唆された。

4 成形事例

図 8 に Carbon-LFTD 成形体試作事例の写真を示す。自動化プラントにて、材料の温度低下が急激に発生する Carbon-LFTD においても、ハイタクトかつ精度よく成形を行うことで、写真に示すようなアスペクト比の大きなリブ形状やボス形状、異なる板厚を同一部品で形成する異厚形状など、さまざまな製品デザインにも対応することが可能となった。

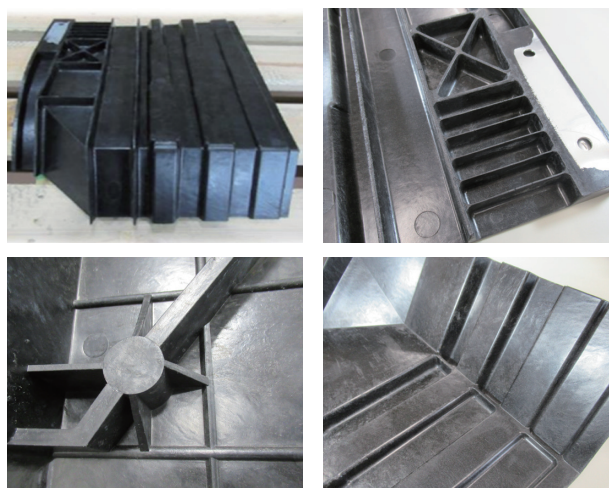


図8 Carbon-LFTD成形体試作事例

5 おわりに

当社コンポジットセンターでは、さらに大型の部品開発および試作に対応できるように4ポイント独立サーボ制御を駆使した大型成形機 HR4-10SP の開発を進めている。表2に主な仕様を示す。

表2 HR4-10SP主な仕様

加圧能力 (MN)	最大 10
ストローク (mm)	最大 1,500
デイトライト (mm)	2,000
ボルスサイズ (mm)	(左右×前後) 2,000 × 2,000
加圧速度 (mm/s)	最大 10

今後益々需要が高まる軽量化部材を廉価に成形できるシステムとして、「高剛性材料」「低コスト」「複雑形状の成形」を特長として、当社のコンポジットセンターが市場の期待に応えられるよう、鋭意開発を進めていく所存である。

執筆者：

伊藤友樹

2017年入社

複合材料のプロセス開発に従事



嶋田翔太

2018年入社

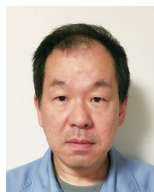
複合材料のプロセス開発に従事



成田建次

2018年入社

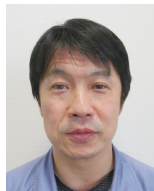
複合材料の量産設備開発・設計に従事



宮城光治

1990年入社

複合材料のプロセス開発に従事



木村隆一

1997年入社

複合材料の量産設備開発・設計に従事

