

生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発(第4報)

—構造解析シミュレーション技術に関する研究—

坂東 直行 山田 俊郎 平湯 秀和 久富 茂樹

窪田 直樹* 赤塚 久修* 丹羽 厚至*

A study on a Smart Injection Mold

- A Study on Simulation Technology of Strength Test -

Naoyuki BANDO Toshio YAMADA Hidekazu HIRAYU Shigeki KUDOMI
Naoki KUBOTA* Hisanobu AKATSUKA* Atsunori NIWA*

あらまし CFRP射出成形品の強度特性をシミュレーションで評価する方法について、実験や解析モデル間で比較しながら有効性を検討した。その結果、炭素繊維含有率の変化による剛性の変化や、ウェルドライン近傍での応力集中の様子をシミュレーションで確認できた。よって、シミュレーションによるCFRP射出成形品の強度評価は、製品設計において有効な手段といえる。

キーワード 構造解析, 均質化法, 引張試験, 熱可塑性炭素繊維強化プラスチック

1. 緒言

省エネルギー志向の高まりをうけて、軽量で高強度を特徴とする炭素繊維強化樹脂(CFRP)が輸送機械における次世代の材料として期待されている。

CFRPには、熱を加えると硬化する熱硬化性樹脂を使うものと、熱を加えると柔らかくなる熱可塑性樹脂を使うものに大別される。前者はすでに航空機の分野で活用されているが、加熱による硬化工程が必要であるため生産性が悪く、大量生産には不適である。そのため、生産性を重視する自動車分野では、熱可塑性CFRPが次世代材料として検討されている。

一般的な熱可塑性樹脂の成形加工では射出成形が用いられており、設備も普及している。そこで、熱可塑性CFRPの成形加工でも射出成形技術が使えるよう、炭素繊維入り樹脂の加工特性を考慮した成形技術が研究されている。

CFRPの持つ高い強度特性は、内部の炭素繊維によってもたらされたものであり、これは炭素繊維の配向方向に対して顕著に現れる。このため繊維配向が乱れている場合は揃っている場合と比較して強度は低下する。また、CFRP射出成形では繊維配向は、成形中の樹脂の流動方向に揃い、流動先端が合流するウェルドラインでは乱れる。これは成形品の部材強度が加工工程で決定することを意

味する。このため、射出成形で高品質な強度の部材を得るには、事前に部材内部の繊維配向が加工工程でどのように分布するか、またその結果部材の強度はどのようになるかを検討する必要がある。

部材の強度特性の評価には、構造解析シミュレーションを用いる方法がある。しかし、一般的な構造解析シミュレーションでは、部材を形成する材料は、部材中の箇所によらず、また力の方向によらず均質なものであると仮定するため、CFRP射出成形品の強度評価には不十分である。この課題の解決策の一つとして、事前に樹脂流動解析シミュレーションを行って得た繊維配向データを構造解析シミュレーションに反映させて解析する方法が提案されている。

そこで、本研究では、樹脂流動解析の結果を継承した構造解析シミュレーションの実施を試み、その特徴を検討したので報告する。

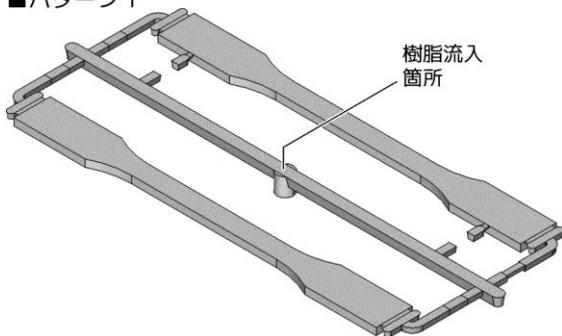
2. 目的

繊維配向により、部材中の箇所によって、また力の方向によって強度特性が異なるCFRP射出成形品は、程度や方向が不均質な強度異方性を持つ部材と見なせる。

このような部材の強度をシミュレーションで評価するための手法に均質化法がある。均質化法とは、材料の微視的な非均質性と巨視的材料特性とを関係づける理論であり、構造解析シミュレーションでは、要素にそれぞれ

* 岐阜県産業技術センター

■パターン1



■パターン2

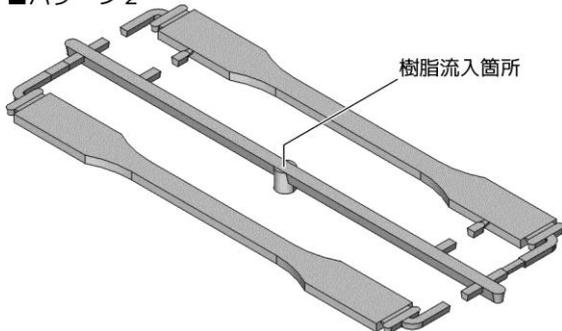


図1. 実験で用いた射出成形品



図2. CFRP射出成形品の引張試験

異なる異方性強度特性を割り当てることで、巨視的にみて実際の成形品の強度特性と同等の結果を導くことができる。この手法を取り入れることで、CFRPの射出成形品の強度特性も評価できる。しかし、均質化法がどれだけ有効なのかは、実際の部材強度との比較を行いながら探っていく必要がある。

また、シミュレーションは解析精度と必要時間がトレードオフの関係にある。そのため、ひとくちにシミュレーションによる強度特性評価といっても、目的と制約に応じたモデルで様々な解析されるのが実際である。

そこで、本研究では均質化法を用いたCFRPの射出成形品の強度評価において、実際の射出成形品の強度と比較して能力をはかるとともに、解析モデル間の比較を行い、それぞれの特徴を明らかにすることを目的とした。

表1. 実験で用いた材料

樹脂種	材料名
PC	lupilon S2000R*
PC+CF10%	lupilon CFH2010*
PC+CF20%	lupilon CFH2020*
PC+CF30%	lupilon CFH2030*

* 三菱エンジニアリングプラスチックス株式会社製

表2. シミュレーション環境

種別	ソフトウェア名
樹脂流動解析ソフトウェア	Autodesk Moldflow Insight Premium 2014
材料特性予測ツール	MSC Digimat 5.0.1
構造解析ソフトウェア	Altair HyperWorks Radioss v11

3. 方法

3. 1 強度特性評価実験

実際のCFRP射出成形品の強度を評価するため、図1に示す射出成形品から切り出した試験片を用いて引張試験を行った(図2)。この成形品は、昨年度の射出成形実験で取得した形状であり、JIS引張試験片を2つ得るものである。なお、CFRPの射出成形ではウェルドラインでの顕著な強度低下が知られている。そこで試験片中央のくびれ部にウェルドラインの有るものと無いものの2種類を用意した。

材料には、ポリカーボネート(PC)を母材とし、炭素繊維(CF)をそれぞれ10, 20, 30%含むCFRP、および比較のためにCFを含まないPCピュア材を用いた。用いた材料を表1に示す。

3. 2 シミュレーション

CFRP部材の強度特性を構造解析シミュレーションで評価するには、母材である熱可塑性樹脂と介在物である炭素繊維を区分できるレベルの微視的な要素の材料特性から、シミュレーションで用いるメッシュレベルの巨視的な要素の材料特性を導く機能と、それを構造解析用の要素に割り当てる機能が必要である。これらの機能は強度評価シミュレーションを行う構造解析システムにも射出成形加工をシミュレーションする樹脂流動解析システムにもなく、別途に用意する必要がある。

本研究で用いたシミュレーション環境を表2に示す。なおここで、均質化法の適用は材料特性予測ツールによってなされる。

表3. 解析で用いた炭素繊維の材料物性

特性	値
ヤング率	185 GPa
繊維直径	11 μm
アスペクト比*	30

* 繊維長/繊維直径

解析は以下の手順で行った。

まず、Moldflow上で、流動解析シミュレーションを実施する。ここから、射出成形品中の繊維配向が得られるので、繊維配向データを出力する。また、流動解析で用いたメッシュデータを出力する。次に、HyperWorks上で構造解析用モデルを作成し、メッシュデータを出力する。この3つのデータファイルをDigimatで読み込み、流動解析用メッシュ上の繊維配向データを構造解析用メッシュ上に割り当てる。また、母材であるPCおよび介在物であるCFそれぞれ単独の材料特性から炭素繊維複合材料の材料特性を予測するモデルを作成する。そして、Digimatから構造解析シミュレーション用に出力された解析コードを使いRadioss上で構造解析を実施する。解析中、DigimatはRadiossが要素の材料物性モデルを参照するたびに、その要素に応じた材料物性を提供する。

解析モデル間で比較するため、繊維配向を考慮する解析モデルと、考慮しない解析モデルを設定した。ここで、繊維配向を考慮しないとは、流動解析シミュレーションを行わずに、均質化法によって導出した材料物性モデルをそのまま構造解析で使うことを意味し、すなわち全体が均質な物性でシミュレーションすることを表す。なおこのとき、解析中のDigimatによる材料物性の提供は必要なく、解析の実行はRadiossのみで可能である。

均質化法を適用するには、実験で用いたCFRPの母材であるPC、およびCFの強度特性パラメータが必要になる。そこでシミュレーションでは、PCのパラメータはPCピュ

ア材の引張試験結果から導出し、CFのパラメータは表3の値を用いた。

4. 結果

引張試験結果を図3に示す。ここで、試験片のくびれ部にウェルドラインが無いものを(a)、有るものを(b)としている。図にはCFRPが破断するまでを示す。なお、ピュア材はひずみが3%を越えても変形を続ける。図3から、CFRPの場合、おおよそひずみが0~0.5%までの間は、応力・ひずみの関係が線形であるが、それ以降は非線形の傾向を示している。また、応力・ひずみの関係が線形区間の直線の傾きは、CF含有率の変化にともない増加している。なお、CFRPではウェルドラインの影響が強度の顕著な低下として現れている。

繊維配向を考慮した場合のシミュレーション結果を図4に示す。図4から、線形区間の直線の傾きは、実験とシミュレーションではほぼ一致した。

また、ウェルドラインがある場合のシミュレーション結果を応力の大きさによってコンター表示したものを図5に示す。このときの樹脂流動解析で得た繊維配向結果を配向の程度によってコンター表示したものを図6に示す。ここから、ウェルドラインにおいて、応力が集中している様子が見て取れる。

次に、CF20%の場合を取り上げ、解析モデル間で比較した結果を図7に示す。図7から、繊維配向を考慮しないモデルと比較して、繊維配向を考慮したモデルのほうが実際の強度特性に近い結果が得られた。

5. 考察

実験では、CF含有率の変化により剛性が変化することや、ウェルドラインがあると強度特性が著しく低下することが特徴として挙げられた。この様子をシミュレーシ

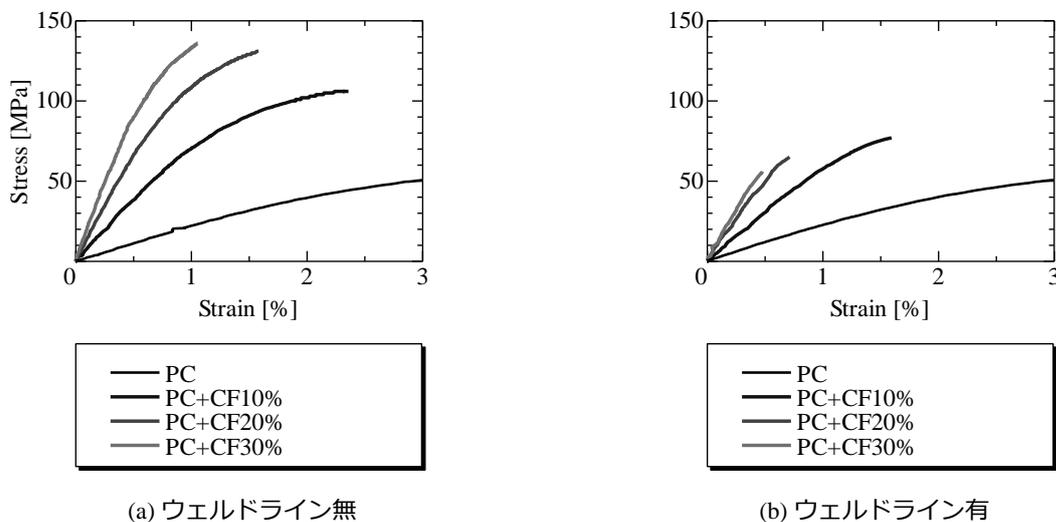


図3. 引張試験結果

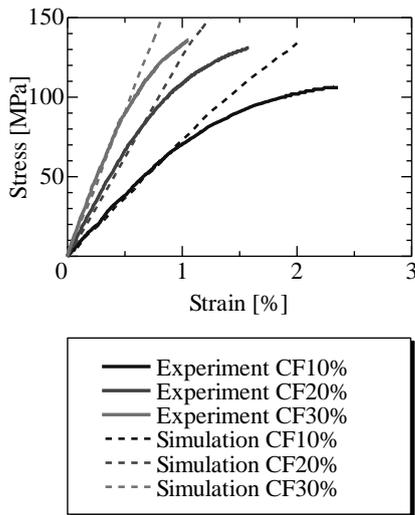


図4. 実験結果とシミュレーション結果の比較

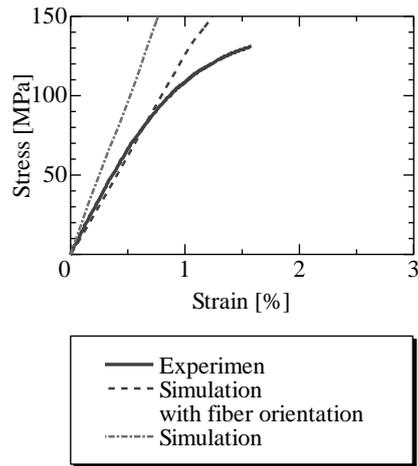


図7. 解析モデル間比較 (CF20%の場合)

ンでも表現できている. このことから, 均質化法を導入したシミュレーションによるCFRP射出成形品の強度特性評価は有効である.

特に, 強度を求めてCFRPを材料として用いた射出成形品では, ウェルドラインによる強度低下をあらかじめ把握しておくことは重要である. 部材の破壊起点となる応力集中の様子をシミュレーションで確認できることは有意義である.

繊維配向を考慮しない解析モデルは, 現実にはありえないが, 繊維方向があらゆる方向に完全にそろっている状態を仮定した場合の部材強度を評価することにあたる. これは, CFRP部材が取得する可能性のある最大強度を評価することであり, それ以上には成り得ないことを意味する. よって, この解析モデルは, 部材の材料設計や形状設計で有意義な方法である. この解析モデルでは, 構

造解析ソルバー単体で実施できるため, 解析時間が短縮できることもメリットとしてあげられる.

なお, 部材の変形がすすむとともに, 応力・ひずみ間の関係が非線形になっていく様子は, シミュレーションで再現できなかった. これはCFの破断およびCFと母材の接触界面の特性の考慮が不十分だったからである.

6. まとめ

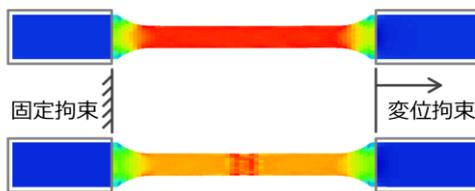
CFRP射出成形品の強度特性をシミュレーションで評価する方法について, 実験や解析モデル間で比較しながら有効性を検討した.

その結果, CF含有率の変化による剛性の変化や, ウェルドライン近傍での応力集中の様子をシミュレーションで確認できた.

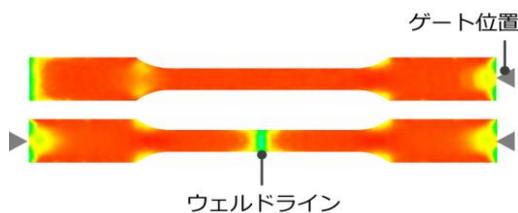
よって, シミュレーションによるCFRP射出成形品の強度評価は, 製品設計において有効な手段といえる.

文献

- [1] 山田俊郎, 坂東直行, 平湯秀和, 棚橋英樹, 丹羽厚至, 窪田直樹, 多田憲生, ”生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発 ―センシングシステムの設計と試験金型の試作―”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.15, pp.21-24, 2014
- [2] 坂東直行, 平湯秀和, 山田俊郎, 久富茂樹, 丹羽厚至, 浅倉秀一, 窪田直樹, ”生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発 ―樹脂流動解析シミュレーション技術に関する研究―”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.15, pp.25-29, 2014



上: ウェルドライン無 下: ウェルドライン有
図5. 応力分布結果



上: ウェルドライン無 下: ウェルドライン有
図6. 繊維配向結果