

# 生産性向上に資する射出成形スマート金型の開発(第6報)

—金型設計から成形品の構造解析まで一貫通貫したシミュレーション技術の研究—

坂東 直行 山田 俊郎 久富 茂樹

## A study on a Smart Injection Mold

- A Study on Simulation Technology of Coupled Analysis -

Naoyuki BANDO Toshio YAMADA Shigeki KUDOMI

**あらまし** これまでに筆者らは、炭素繊維強化プラスチックに対する現在の数値解析技術のポテンシャルを見極める一助とするため、流動解析技術と構造解析技術について実験とシミュレーション結果を比較しながら評価してきた。昨年度までは比較的単純な形状を検討対象として取り上げてきたため、本年度は実際の製品レベルの形状の複雑さを持つ場合における数値解析技術の能力を評価した。その結果、流動解析・構造解析ともに、複雑な形状であっても、定性的にはシミュレーション結果と実験結果は一致することがわかった。

**キーワード** 流動解析, 構造解析, 熱可塑性炭素繊維強化プラスチック

### 1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、強度と軽さを両立する材料として航空機に採用され、従来航空機と比較した機体の軽量化に寄与し、燃費を向上させた。現在、同様の意図をもって自動車をはじめとする他の輸送機械でも適用が模索されている。航空機と異なり量産が求められる自動車では、製造にかかる時間が重視される傾向にある。このため航空機で採用されている熱硬化性炭素繊維強化プラスチックは、成形に時間がかかるため適用が難しく、熱可塑性炭素繊維強化プラスチック (CFRTP) に期待が集まっている。

熱可塑性プラスチックは熱によって溶かした樹脂を金型のキャビティに注入し、冷え固まらせて形状を転写する射出成形技術のプロセスに採用する場合は一般的である。CFRTPにおいても炭素繊維による機械的強度の向上を狙いつつ、射出成形によって短時間で大量に部材を生産できるよう検討が進められている。現在の主たる検討課題は、炭素繊維のような強化材(フィラー)を樹脂(マトリクス)に混ぜた材料で射出成形する際の流動性の低下による成形不良や、流動方向にフィラーが配向することによる強度特性の異方性などである。

この課題への有効なアプローチとして、数値解析技術に注目が集まっている。流動解析技術によって金型内部の樹脂流動を可視化することで成形不良の原因を特定でき、構造解析技術によって射出成形後の繊維配向が部材強度に及ぼす影響を評価することでランナーやゲートなど樹脂の流動性に影響を及ぼす金型の要因と部材形状の

組み合わせを排除できると考えられるからである。ここで得た知見をもとに、部材形状から金型設計、射出成形プロセスのパラメータ設計にわたる広範な設計諸元を適切に設定することができると期待されている。

しかし、数値解析技術はマクロな視点で成立する支配方程式を基礎としモデル化した現象を扱うものであるため、シミュレーションの結果が実際の現象をどの程度表現できているかは、比較してみなければわからないところがある。そこで筆者らは、現在の数値解析技術のポテンシャルを見極める一助とするため、炭素繊維強化プラスチックの流動解析技術と構造解析技術について、実験とシミュレーション結果を比較しながら評価してきた<sup>[1][2]</sup>。その結果、実験結果とシミュレーション結果の間には定性的な一致が見られた。しかし、ここで取り上げた部材形状は、検討を容易にするために比較的単純なものであった。一般に、シミュレーションは形状が複雑になると精度が低下する傾向にある。そのため、実際の製品レベルの複雑さをもつ形状の場合についてはどうであるのか、という疑問が残されていた。

そこで、実際の製品レベルの形状の複雑さを持つ場合における数値解析技術の能力を評価するため、成形実験とシミュレーションの比較を行ったので結果を報告する。

### 2. 方法

本報告では、図1に示す形状をとりあげて、流動解析および構造解析を行った。

図1(a)は4つのC字型クリップが平板の四隅にある

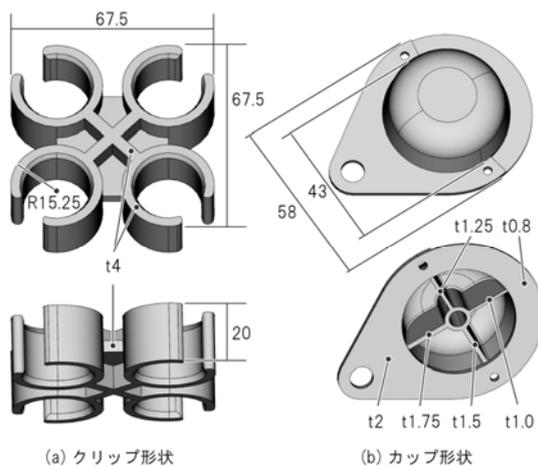


図1. 成形品形状

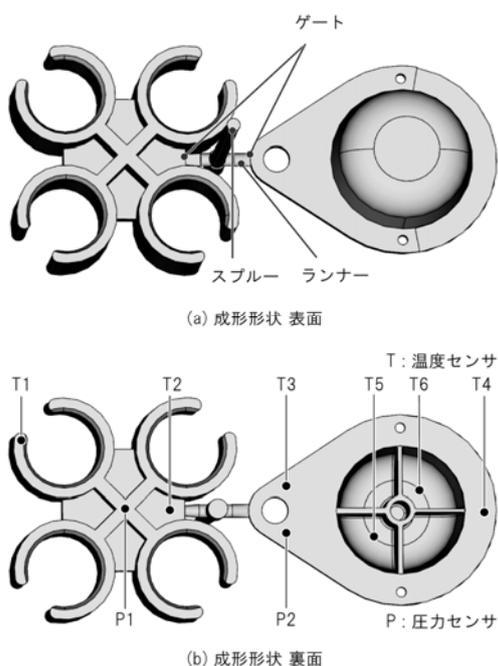


図2. 流動性評価におけるランナーパターン

形状で、対角のクリップはリブにより結合されており、前後と左右で対称な形状となっている。等方性材料を用いてクリップを成形した場合、各クリップの強度は同一とみなせるが、繊維強化樹脂によってクリップを成形した場合、繊維配向によって部材強度に差異が生じ、クリップ間の強度が異なると期待される。図1(b)は先端が平坦につぶれた半球カップの内側にボスを配置し、ボスからは半球の内面まで厚さの異なるリブが対向するように4つ配置された形状で、カップの縁には卵型のフランジが設けられ、卵の尻の部分の肉厚は先端部分よりも薄くなっている。流動性の悪い繊維強化樹脂と成形性の悪い薄肉のリブやフランジの組み合わせであるため成形環境が厳しく、実験とシミュレーションが比較しやすくなると期待される。

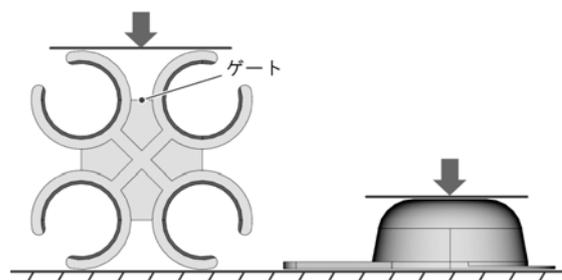


図3. 強度評価における荷重パターン

表1. 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 2016
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

流動解析では、この2つの異なる形状を一度の射出成形でそれぞれひとつずつ得る場合を想定し、図2(a)のようにランナーを配置した場合を取り上げてシミュレーションを行った。これは、同一形状の多数個取りと比較して異なる形状を一度に成形する場合、キャビティを満たす樹脂の流動が互いに及ぼす影響の程度が大きく、充填過程が複雑になり流動性の経時変化が表れやすく、実験とシミュレーションが比較しやすくなると期待されるためである。この結果と比較するため実際に射出成形を行い、スマート金型<sup>[3][4]</sup>によって図2(b)の位置における金型内部のデータを取得した。

構造解析では、図3のように圧縮した場合を取り上げてシミュレーションを行った。この際、流動解析で得た繊維配向データから構造解析の各要素における強度特性を均質化法によって推定し、解析モデルに反映させている。なお、モデルの複雑化を防ぐため、材料は弾性変形を仮定し、塑性変形や内部破壊はモデル化の対象から外した。この結果と比較するため、万能試験機によって圧縮試験を行った。

材料には入手のしやすさから三菱エンジニアリングプラスチック株式会社製のIupilon CFH2010を用いた。これはPCをマトリクスとし、フィラーとして短炭素繊維を10%含有するCFRTPである。また、シミュレーションには、表1の商用ソフトウェアを利用した。

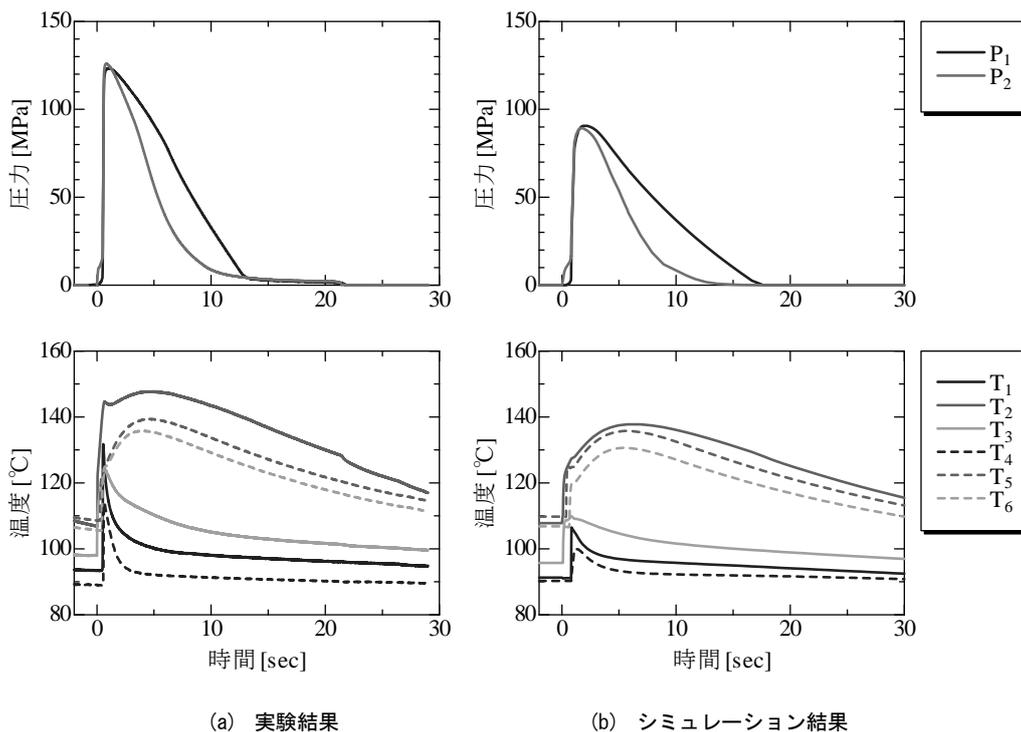


図4. 樹脂流動解析結果

### 3. 結果

流動解析結果と射出成形実験の結果を図4に示す。左のグラフは実験結果であり、右のグラフはシミュレーション結果である。横軸はすべて時間を表し、上段グラフの縦軸は圧力を、下段グラフの縦軸は温度を表す。ほぼグラフの形状が一致することから、本報告で取り上げた程度の複雑な形状であっても、炭素繊維を含有する樹脂の流動特性のシミュレーションの結果には妥当性があるといえる。しかし前報と同様に、定量的には実験結果とシミュレーション結果に差異が見られた。

図5は流動解析の結果得られたキャビティを満たす樹脂内部の繊維配向結果である。数値が高いほど繊維配向が揃っていることを意味し、その部分の材料の強度異方性が高くなることになる。

図6にクリップ形状の圧縮試験シミュレーション結果をミーゼス相当応力表示で示す。ここでは、全体が均質な材料であり、等方性の強度特性を持つと仮定した場合の構造解析の結果も示している。これは、繊維配向を考慮しない従来の解析手法の結果である。図中のA点とB点を比較すると、同一の応力分布となっているが、C点とD点を比較すると応力分布が異なっている。これは繊維配向に違いによって部材強度に差異が生じたためと考えられる。

次にカップ形状の圧縮試験の実験結果とシミュレーション結果を図7に示す。横軸は図3におけるカップ上面

の変位量であり、縦軸はそのときの圧縮荷重である。等方性材料を仮定した場合、シミュレーション結果と実験結果は顕著に傾向が異なるが、繊維配向を考慮した場合、定性的な傾向が一致した。ここから、樹脂の流動方向に揃いがちな繊維配向に起因する強度特性の不均質を考慮しなければ、CFRTP部材の強度特性シミュレーションの結果に妥当性がみられないことがわかる。しかし定量的には、差異が認められる結果となった。

### 4. 考察

一般に、実験結果とシミュレーション結果を比較すると、定性的な傾向は一致している。また、材料を均質材とした場合と比較して、繊維配向を考慮した場合の強度特性の傾向は実験とより一致している。このことから、繊維配向を考慮した数値解析技術が、CFRTPの部材設計に有効であるといえる。

一方、定量的には、流動解析、構造解析ともに差異が見られた。

流動解析における圧力値が実験との間で異なる理由としては成形実験における樹脂の過充填が考えられる。VP切り替えよりもわずかに早くキャビティ内が樹脂で満たされると、射出成形機のスクリーは押し込み動作を速度制御したままになり圧力値は高くなる。

構造解析における荷重・変位特性が実験との間で異なる理由としては、材料の内部破壊を考慮していないこと

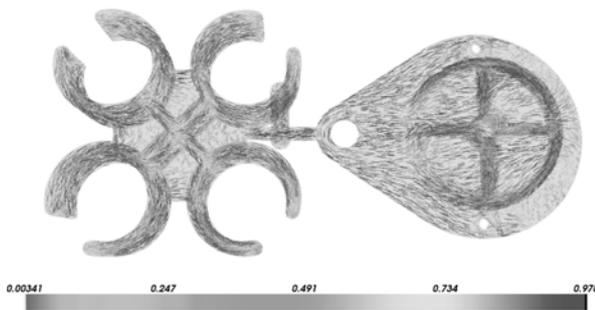


図5. 流動解析によって得られた繊維配向結果

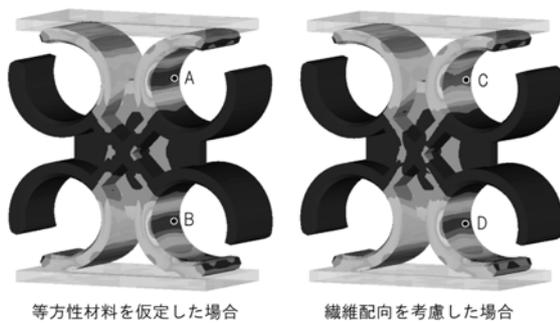


図6. クリップの強度解析結果

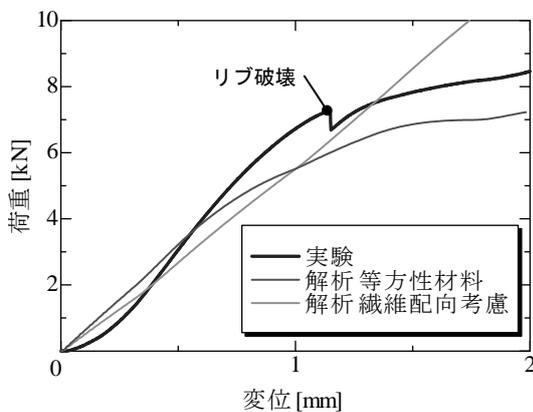


図7. カップ強度の比較

が挙げられる。CFRPは外力が加えられた際の部材の内部応力を炭素繊維が支持することで材料としての強度を得ているが、内部応力が大きくなると、炭素繊維と母材の界面が剥離したり、炭素繊維が折れたりして強度が低下する。このような現象を今回の解析モデルでは考慮していないため、変形が大きくなるほど強度特性に違いが目立つようになったと考えられる。材料の内部破壊も解析の対象に含めることは不可能ではないが、必要なパラメ

ータが多くなる、解析に時間がかかる、現象モデルの相互の影響が複雑になるなどの影響が表れ、シミュレーションによる現象理解を妨げることに伴い、結果として数値解析技術を実務としての設計に活用することが困難になる。

こうしたことを考慮すると、シミュレーションは実際の現象に対して定量的には差異が存在する、という前提で活用することが望ましい。よってシミュレーションの結果は、あらかじめ定めた物理的な評価指標の基準値を超えた・超えないで議論するのではなく、シミュレーション結果間で相対的に比較して優劣を見極める形式での活用が適しているといえる。

## 5. まとめ

実際の製品レベルの形状の複雑さを持つ場合における流動解析技術と構造解析技術の能力を、実験結果と比較して評価した。その結果、流動解析・構造解析ともに、複雑な形状であっても、定性的にはシミュレーション結果と実験結果は一致することがわかった。ここから、CFRTPの射出成形部材で意図する形状と特性を得るために数値解析技術は有効であるといえる。しかし、定量的には実験とシミュレーションの間に差異が見られた。ここから、シミュレーションの結果は相対的に比較して優劣を見極める形式での活用が適しているといえる。

## 文 献

- [1] 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
- [2] 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, "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—", 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.16, pp.5-8, 2015
- [3] 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
- [4] 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 (第3報) —金型搭載小型ロギングシステムの設計と試作—", 岐阜県情報技術研究所研究報告, No.16, pp.1-4, 2015