

繊維強化樹脂射出成形品の強度予測技術の研究

Research on strength prediction technology for fiber-reinforced plastic injection-molded products

小 倉 翔 吾
OGURA Shogo

要 旨

世界的なCO₂排出規制の導入により、輸送機器等の軽量化ニーズが高まっている。軽量素材として、繊維強化樹脂（FRP）が注目されている。FRPの中でも形状自由度や生産性が高い射出成形品は、物性とコストのバランスが良く、軽量化と低コスト化を両立できるポテンシャルを持つ。しかし、加工方法によって繊維の配向が変化し、それが物性に大きな影響を与えるため、強度の予測及びコントロールが困難である。そのため、トライ&エラーで開発を行っていることに加え、部品形状や加工方法の最適化が検討できていない。本研究ではシミュレーションを活用し、繊維配向による物性異方性を考慮した強度予測技術を開発する。それにより手戻りの無い開発の実現と設計最適化が可能な技術を構築する。

本研究では、従来困難であった樹脂部品中の繊維配向を定量化し、樹脂流動解析による繊維配向予測精度を向上させた。予測した繊維配向情報をもとに、繊維強化樹脂部品の物性異方性を予測した。その結果から構造解析用材料モデルを作成し、繊維配向を考慮した構造解析を行うことで、樹脂部品の強度予測精度を向上させることができた。

また本技術を用いて実部品形状の破壊挙動を予測可能なことも分かり、繊維強化樹脂の部品を設計する際は加工方法の影響も含めた材料強度検討が重要かつ有効なことが確認できた。

Abstract

In anticipation of the introduction of global CO₂ emission regulations, there is a growing need to reduce the weight of transportation equipment. Fiber-reinforced plastic (FRP) is attracting attention as a lightweight material. FRP injection-molded products have the potential for both weight reduction and cost reduction. However, it is difficult to predict and control strength because the fiber orientation changes depending on how the products are made, and this has a significant impact on physical properties. Therefore, development has been conducted on a trial-and-error basis, and optimization of part geometry and processing methods has not been studied. In this study, we use simulation to develop a strength prediction technique that considers the anisotropy of physical properties due to fiber orientation. This enables us to realize development without rework and to construct a technology that can optimize the design.

We quantified the fiber orientation in plastic parts, which has been difficult in the past, and improved the prediction accuracy of fiber orientation by resin flow analysis. Based on the predicted fiber orientation information, the physical property anisotropy of fiber-reinforced plastic parts was predicted. A material model for structural analysis was created, and structural analysis considering fiber orientation was performed to improve the accuracy of strength prediction for plastic parts.

It was also found that this technique can be used to predict the fracture behavior of actual

plastic part geometry, confirming the importance and effectiveness of studying material strength, including the manufacturing process, when designing fiber-reinforced plastic parts.

1 緒言

1.1 研究の背景

世界的なCO₂排出規制や、電気自動車等の投入により、輸送機器の軽量化ニーズが高まっている。軽量化ニーズに適応するため、金属に比べ軽量で加工が容易な樹脂に置き換えることが検討されている。樹脂は金属に比べ機械的特性が劣るため、ガラス繊維や炭素繊維等の強化繊維で補強した繊維強化樹脂が低比重かつ高強度な素材のため注目されている。樹脂材質自体の性能向上もあり、繊維強化樹脂は幅広い分野で構造部材として用いられている。

1.2 繊維強化樹脂の加工方法とその特徴

図1に繊維強化樹脂の加工方法毎の機械的特性と生産性の特徴を示す¹⁾。繊維強化樹脂は繊維の長さによって、その力学的特性と生産性が異なり、連続繊維では力学的特性は優れるが生産性が劣る。そのため、航空、スポーツ用途、高級車向け等、適用範囲が限定される。一方、射出成形が可能な不連続繊維は力学的特性と生産性のバランスが良く、軽量化とコスト低減の両立が可能なポテンシャルを持ち、本研究もターゲットを繊維強化樹脂の射出成形品としている。

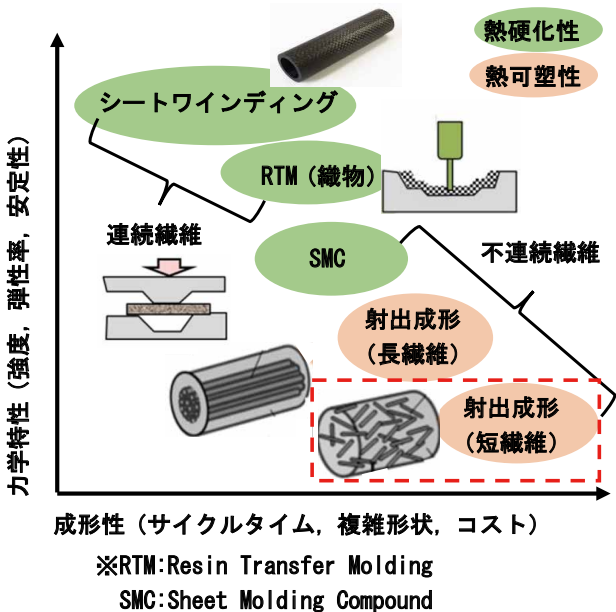


図1 繊維強化樹脂の加工方法毎の特徴

1.3 繊維強化樹脂射出成形品の物性異方性

繊維強化樹脂の射出成形品は射出成形中の金型内樹脂流動に伴うせん断応力や伸長流動によって、繊維の配向状態や繊維長に分布が生じる。繊維強化樹脂は繊維が配向している方向の補強効果が大きいため、射出成形時の繊維配向分布により、弾性率、強度、線膨張係数等に異方性が生じる。それにより、成形品の強度、剛性、そり変形等の予測が困難となり問題となっている。例えば、弾性率や強度の異方性を考慮しない場合、要求される荷重に到達する前に破壊が生じることがある。他には線膨張係数の異方性を考慮しない場合、そり変形により寸法公差を外れるといった不具合が考えられる。

これらの理由から繊維強化樹脂射出成形品の品質特性を予測することは困難であり、トライ&エラーによって金型修正を繰り返し、開発期間や開発コストの増大につながっている。また、繊維配向による物性異方性を正確に予測できないため、部品形状が適正化されておらず、品質確保のため必要以上に樹脂材料を多く使用している部品も見られる。

図2に現状の繊維強化樹脂部品の開発フローと目指すべき開発フローを示す。繊維配向に伴う物性異方性を予測し、成形品の機械的特性を予測することで、机上で部品形状や金型方案を適正化できるので開発効率を向上することができる。

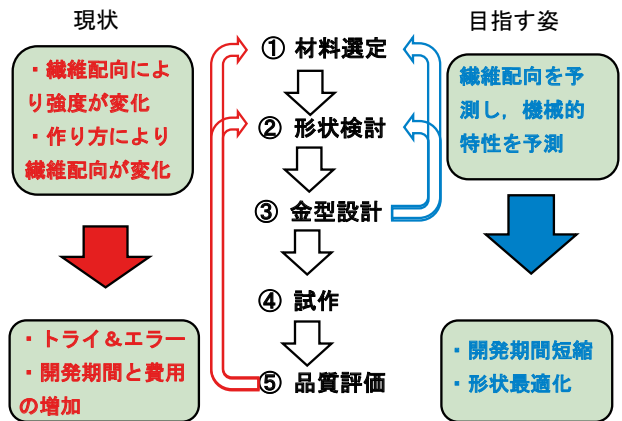


図2 開発フローの現状と目指す姿

2 方策の概要

本開発では、射出成形過程で生じる繊維の配向状態から物性の異方性を予測し、それを考慮した構造解析を行うことで、繊維強化樹脂部品の強度予測精度の向上を図る。方策の概念図を図3に示す。

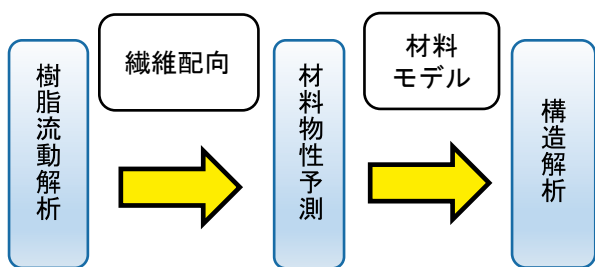


図3 強度予測方案の概念図

まず最初に樹脂流動解析を行い射出成形品の繊維配向を予測する。次に予測した繊維配向から異方性材料モデルを作成する。最後に異方性材料モデルを用いて構造解析を行うことで、繊維配向を考慮した機械的特性の予測が可能となる。この手法を実現する際の課題を列挙する。

- ① 繊維配向の定量評価技術
- ② 流動解析による繊維配向予測精度向上
- ③ 繊維配向を考慮した構造解析精度向上
- ④ ウェルド部の強度低下率の予測精度向上

これらを解決するため取り組んだ内容について紹介する。

3 要素試験片での精度検証

3.1 繊維配向の定量評価技術

写真1に射出成形品のX線CT画像を示す。

白い部分がガラス繊維を示し、グレーの部分が樹脂を示している。射出成形品中の繊維は10 μ m程度の太さで樹脂中に30~50%程度含有されており、3次元的に分布しているため、通常は繊維配向を定量化することが困難である。そこで、金沢工業大学と共同研究を行い、X線CT画像から円柱フィッティング法¹⁾を用いて繊維配向の定量化を実施した。

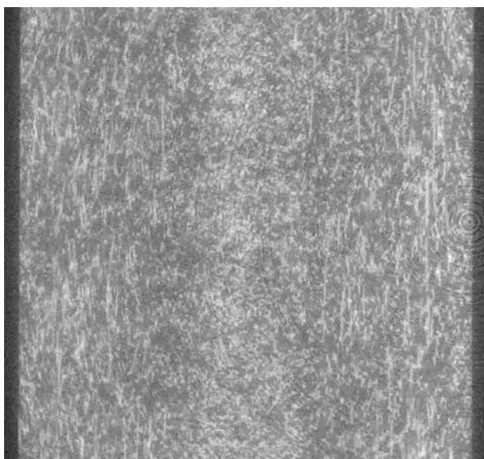
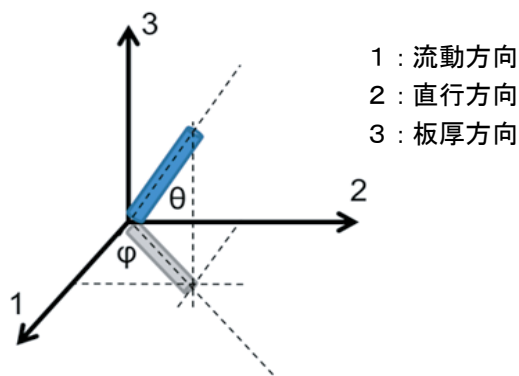


写真1 繊維強化樹脂のX線CT画像

円柱フィッティング法によるガラス繊維抽出方法を説明する。まず撮影したX線CT画像により得られた繊維1本1本に対し円柱モデルを置き、その角度、長さ等を調整しながら実際の繊維によく適合するパラメータを決定する。その円柱モデル1本毎の角度を算出することで繊維の配向を定量的に評価する手法である。次に各観察箇所とも板厚方向を21層に分割し、1層毎の繊維配向度を算出した。繊維配向度の定義を図4に示す。繊維の角度を面内配向角 ϕ と面外配向角の θ で表し、各方向の配向テンソルを式1)~3)で算出した。Nは繊維の本数を意味する。配向テンソルはどの観察位置においても流動方向(MD)をa11、流動直交方向(TD)をa22、板厚方向(ND)をa33とした。



ϕ : 面内配向角 (流動方向 90°)
 θ : 面外配向角 (板厚方向 0°)

図4 繊維配向度の定義

$$a_{11} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sin \theta_i \cos \phi_i)^2 \quad (1)$$

$$a_{22} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sin \theta_i \sin \phi_i)^2 \quad (2)$$

$$a_{33} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\cos \theta_i)^2 \quad (3)$$

このように従来では困難であった射出成形品の繊維配向を3次元的に定量化することが可能となった(図5)。

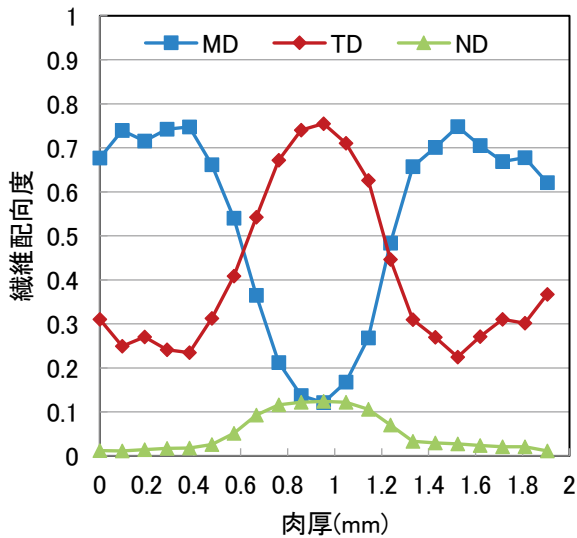


図5 繊維配向の定量評価結果

3.2 流動解析による繊維配向予測精度向上

繊維配向による物性異方性を考慮した構造解析を行うためには、射出成形過程で生じる繊維の配向を予測することが必要である。そのため、射出成形流動解析により繊維の配向を予測し、先程説明した実物の繊維配向の定量化結果と比較することで、その精度を検証する。

実験に用いた平板試験片を図6に示す。材料はPA66にガラス繊維30wt%含有したものを用いた。

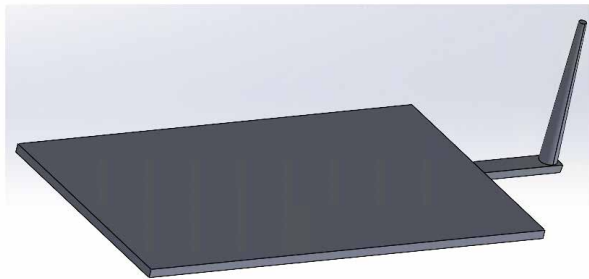


図6 試験片形状の概要

流動解析は射出成形ソフトウェア (Coretech System社製 MOLDEX3D[®]) を用いた。繊維配向の予測モデルには高濃度溶液中の楕円体配向挙動予測モデルであるFolger-Tuckerモデル²⁾に繊維同士の干渉等も考慮可能なように拡張したiARD (Improved Anisotropic Rotary Diffusion) モデル³⁾を用いた。

図7に繊維配向メカニズムの模式図を示す。射出成形中の樹脂は金型と接触した箇所が瞬時に冷却され固化し、その内側を熔融樹脂が流動することが一般的である。そして、固化層と熔融層では速度勾配が発生し、その速度差により生じるせん断応力によって繊維は樹脂流動方向に配向すると考えられて

いる。本報では固化層の厚みに影響の大きい射出速度を低速と高速の2水準で試験片を作成し、実物と解析で得られた繊維配向状態を比較した。

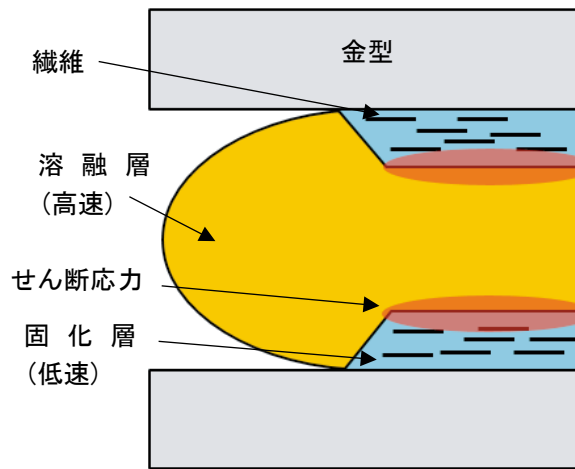


図7 繊維配向メカニズム模式図

実物と解析の繊維配向分布を比較した結果を示す(図8, 9)。繊維配向の予測精度向上のために流動解析パラメータを調整することで、実物の繊維配向分布と概ね合致する結果が得られている。また、射出速度の違いによって繊維配向分布の傾向も異なっている。具体的には射出速度が遅いほど壁面近傍の流動方向 (MD) の配向層厚みが増えている。これは射出速度が遅いほど金型壁面近傍の固化層が成長しやすく、固化層と熔融層の狭間で発生するせん断応力が、肉厚中央まで加わった結果だと考えられる。このような射出速度を変更した際の繊維配向分布を解析でも再現することが可能である。

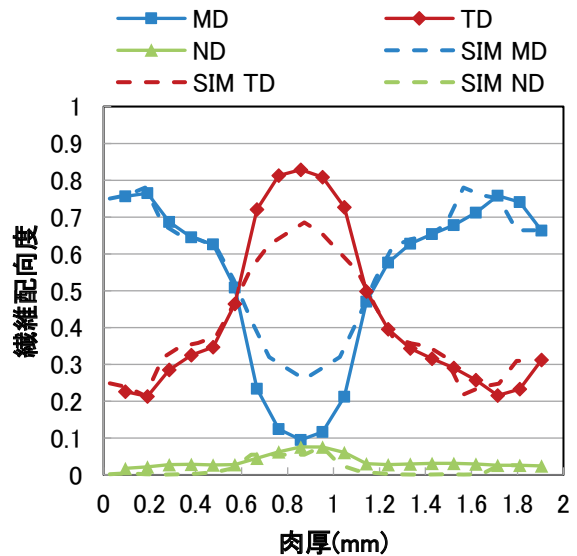


図8 実物と解析の繊維配向分布比較 (射出速度高速)

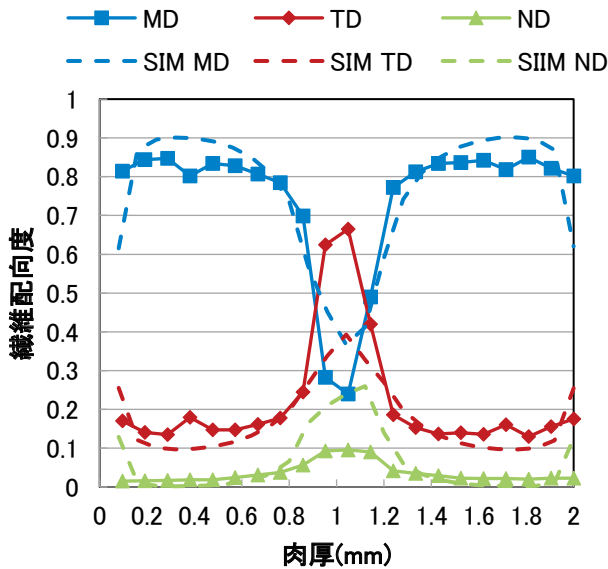


図9 実物と解析の繊維配向分布比較 (射出速度低速)

3.3 繊維配向を考慮した構造解析精度向上

流動解析により予測した繊維配向分布を考慮した構造解析を行い、その精度を検証する。異方性材料物性の予測には非線形マルチスケール材料モデリングソフトウェアDigimat[®] (e-Xtream社製)を用い、Mori-Tanakaモデル⁴⁾により均質化を実施した。Digimatでは平均場均質化法という手法を用いる。平均場均質化法とはガラス繊維の形状、配向を近似的に楕円として扱い、母材とガラス繊維にかかるひずみと応力を計算し、合計としてのガラス繊維入りの複合材料物性を計算する。平均場均質化法はミクロな応力ひずみ特性から材料の微細な構造を考慮した、マクロな物性を計算できる手法である。また、計算が速く、有限要素法の計算と連成させながら解くことができる。

構造解析精度は3.2節で成形した平板試験片から樹脂流動方向に対し0度、45度、90度と角度を変えて切り出したダンベル試験片にて検証した(図10)。作製した試験片の引張試験結果により得られたS-Sカーブを解析結果と比較した。射出成形品の繊維は樹脂流動方向の配向が支配的になりやすいため、繊維配向による物性異方性によって、切りだし角度0度では高強度に、切りだし角度90度では低強度になると考えられる。そういった挙動を解析で模擬できるか検証した。

また、3.2節では射出速度を変更すると繊維配向分布に差が発生し、それを解析で再現可能になったことが分かった。射出速度によって変化した繊維配向が物性に与える影響を確認するため、強度評価および解析との比較も射出速度低速な場合と高速な場合の2通り実施した。

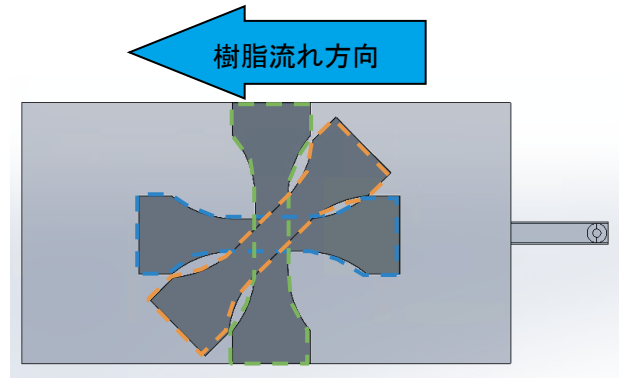


図10 強度試験片の切り出し箇所

実験結果を図11, 12に示す。実物結果を見ると実物の挙動を解析で再現可能になったことが確認できる。また、S-Sカーブの終点が試験片の破壊したタイミングを示す。破壊判定にはTsai-hill 3D transverselyを用い、繊維配向毎の破壊ひずみを考慮することで、破壊タイミングも精度よく再現ができています。

また、射出速度が遅いほど0度方向では強度が高く、90度方向では強度が低い異方性が大きい結果となった。これは3.2節で示した繊維配向分布において低速の場合はMD方向の配向が高くなったためだと考えられる。つまり、射出成形方案によって繊維配向が変化し、それにより物性が変化していることが分かり、繊維配向を考慮した解析によってそれらを精度よく再現可能であることが分かった。

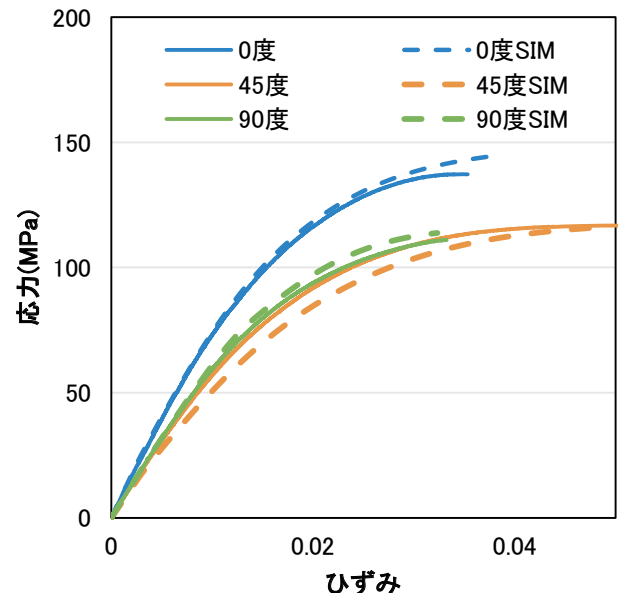


図11 切り出し角度毎の構造解析精度 (射出速度高速)

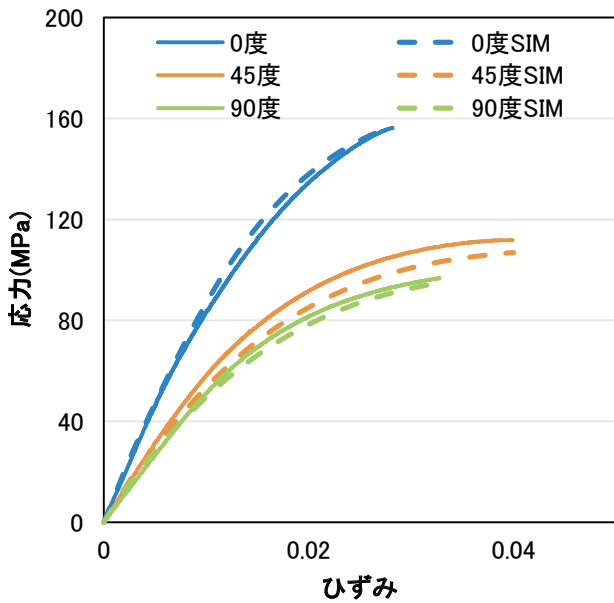


図12 切り出し角度毎の構造解析精度 (射出速度低速)

3.4 ウェルド部の強度低下率の予測精度向上

射出成形中の溶融樹脂が合流して発生するウェルドラインは繊維配向の局所的な変化や溶融界面の存在により強度を大きく低下させる (図13)。実製品の射出成形でウェルドラインを完全になくすことは困難であり、強度解析精度を向上するためには、ウェルドラインを考慮した解析が必須である。

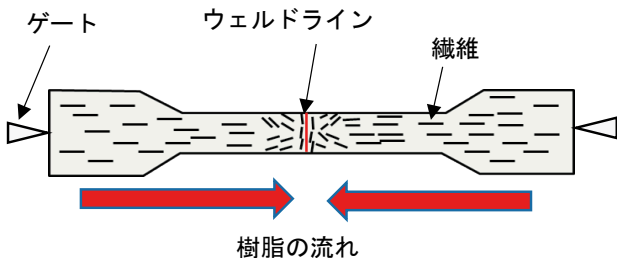


図13 ウェルドラインの模式図

ウェルド部の強度低下要因として局所的な繊維配向の変化と、溶融界面の存在が考えられる。ウェルド部の繊維配向分布を示すX線CT画像を示す (写真2)。樹脂が合流した部位では樹脂流動方向に直角に繊維が配向している様子が確認される。このようにウェルド部は局所的に繊維配向が変化するため、溶融界面の存在もあり、破壊起点となりやすい。流動解析で、樹脂合流部の繊維配向を予測した上で溶融界面による強度低下を解析変数として合わせこむことによって、ウェルド部の強度予測精度を向上させた (図14)。

これらの試みによって、繊維強化樹脂射出成形品の物性を大きく変化させる繊維配向やウェルドライ

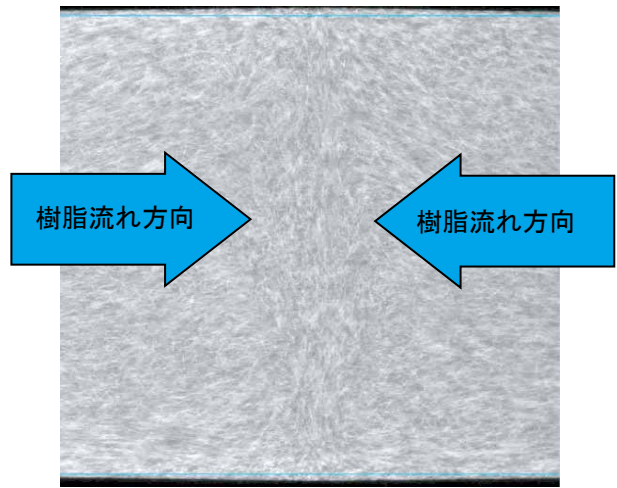


写真2 ウェルド部の繊維配向

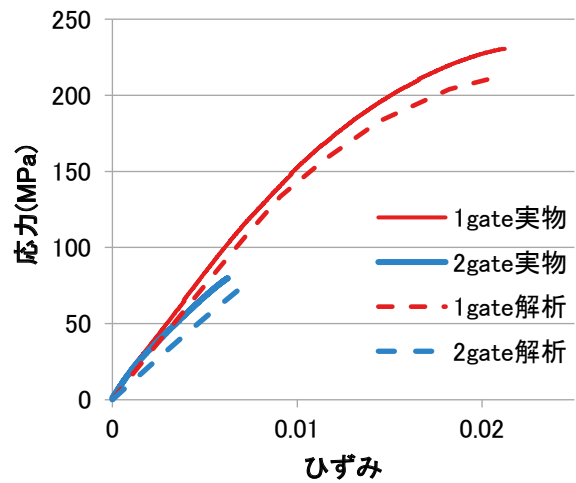


図14 ウェルド部の強度予測精度

ンを考慮した解析技術を構築した。

4 実部品形状での精度検証

4.1 実部品形状での効果確認

繊維配向やウェルドラインを考慮した解析が可能となったため、実部品を使用してその効果を検証した。一例としてショックアブソーバ用樹脂パンプストップパを挙げる。樹脂パンプストップパはアウトに圧入することで固定しているが、アウト圧入時に形状①で割れが発生し、トライ&エラーを繰り返し形状②に変更したことで割れが解消された (図15)。この現象を解析で再現可能か検証した。

まず樹脂流動解析により樹脂の流動挙動を検証した。その結果、形状の違いにより樹脂の流動挙動が変化し、ウェルドラインの発生範囲に差が生じていた。繊維配向やウェルドラインの強度低下を考慮した構造解析を行った結果、形状①で破壊し、形状②では破壊しないという実物の挙動を解析で再現する

ことができた (図16)。繊維強化樹脂の部品を設計する際は作り方も含めた材料強度検討が重要かつ有効なことが確認できた。

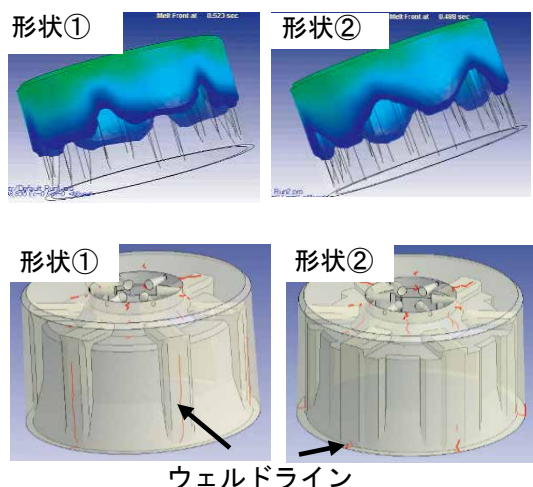


図15 ウェルドライン発生箇所の違い

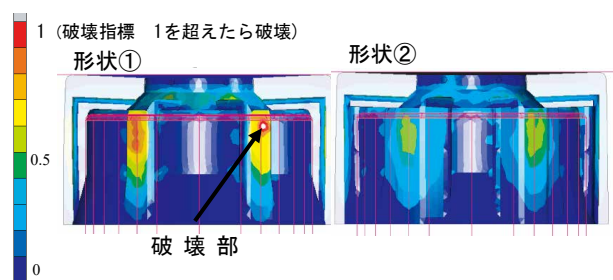


図16 アウタ圧入時の破壊指標解析結果

5 結言

繊維強化樹脂の射出成形品は成形過程で繊維の配向やウェルドラインにより機械的特性に異方性や分布が生じる。そのため、成形過程の繊維配向やウェルドを考慮した構造解析技術を開発し、樹脂部品の物性予測精度を向上した。それにより実部品形状の破壊挙動の予測も可能なことが分かり、繊維強化樹脂の部品を設計する際は作り方も含めた材料強度検討が重要かつ有効なことが確認できた。

6 今後の展望

本技術により、樹脂部品の強度予測精度を向上させることができた。今後は様々な実部品アイテムに適応し、開発効率向上や、部品形状最適化によるコスト、重量の低減等により競争力向上に貢献したい。

参考文献

- 1) ナノテックジャパンホームページ
<https://www.nanonet.go.jp/magazine/feature/10-9-innovation/58.html>
- 1) 鈴木亨, 杉田寿夫, 瀬戸雅宏, 柿島浩徳, 田中宏明, 山部昌: 成形加工, 28(6), 239 (2016)
- 2) Folgar, F. and Tucker, C.L.: Journal of Reinforced Plastic and Composites, 3, 98 (1984)
- 3) Peter H. Foss, Huan-Chang Tseng, John Snawerdt, Yuan-Jung Chang, Wen-Hsien Yang, Chia-Hsiang Hsu: Polymer Composites: 35(4), 671 (2014)
- 4) Mori, T., Marzari, N.: Journal of Energy Resources Technology, 114, 101 (1992)

著者



小倉 翔吾

2012年入社。技術本部生産技術研究所第一研究室。樹脂成形技術の開発に従事。