

## 繊維配向(3D)ソルバの検証

### 概要

- 射出位置の繊維配向が修正され、配向プロファイルとして定義されたことで、旧リリースのランダム配向よりもさらにリアルな結果が得られるようになりました。
- 繊維配向計算が 1 次元ビーム要素まで拡張されたことを受けて、ビーム要素の計算を MATLAB の結果と比較・検証しました。
- シンプルなジオメトリを使用して、四面体要素の繊維配向計算を MATLAB の結果と比較・検証しました。
- 実際のパーツのモデルの繊維配向計算を、実測データと比較・検証しました。

### はじめに

Autodesk Moldflow Insight 2011 以前のバージョンの 3D 繊維配向ソルバでは、射出位置と、1 次元ビーム要素でモデリングされたランナー システム内の繊維配向は完全にランダムなものとして処理されていました。しかし、実際の繊維配向はランナー システムとパレルを通過するメルト フローに左右されます。たとえ射出成形機に入った時点でメルト内の繊維配向がランダムだったとしても、ポリマーがゲートに到達した後の繊維配向はランダムにはなりません。

Autodesk Moldflow Insight 2011 ではよりリアルな配向予測を行うために、射出位置の注入口の配向が修正されたほか、配向計算がビーム要素にまで拡張されています。

この変更は、**[繊維配向解析]**オプションをオンにした場合の**熱可塑性樹脂の射出成形とオーバーモールド、ガスアシスト射出成形**プロセスにおける繊維充填材料の 3D 解析に影響します。

### 射出位置の注入口配向

Autodesk Moldflow Insight 2011 では、中立面解析と Dual Domain 解析に適用される既定値の注入口配向と同様に、3D 解析についても注入口の繊維配向がスキンの横方向に位置合わせされるように、新たに繊維配向プロファイルが定義されました。ランナー システムがビーム要素でモデリングされており、なおかつ射出位置がスプルーの最上部にある場合は、注入口の配向プロファイルは射出位置の最初のビーム ノードの層に適用され、繊維配向はランナー システムのビーム要素とパーツの四面体要素において計算されます。射出位置がパーツ上にある場合は、注入口の配向プロファイルはゲートの直径内のすべてのノードに適用されます。なお、どちらの場合も、注入口の配向プロファイルは射出位置の中心からの距離関数として定義されます。

注入口配向の変更による効果は、射出位置付近のわずかな領域にのみ見られます。ゲートの周辺は流動速度が非常に速く一般に速度勾配が大きいため、繊維配向は流動によって瞬時に変化します。したがって、今回の変更は小さなパーツの結果にはいくらか影響しますが、大きなパーツではその効果はほとんど分かりません。

ここでは 3 つの例をもとに、Autodesk Moldflow Insight 2011 で行われた繊維配向ソルバの改良の効果を Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 と比較・検証します。

- Pipette の例: パーツに直接射出(図 1 ~ 4)
- Hager ケーブル ホルダーの例: パーツに直接射出(図 5 ~ 8)
- Rhodia ボックスの例: ビーム要素でモデリングされたランナー システムに射出 (図 9 ~ 12)

図 2、6、そして図 10 は、Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 では完全にランダムであるとされていたゲート周辺の繊維配向と、Autodesk Moldflow Insight 2011 での若干位置の揃った繊維配向を比較したものです。パーツの他の部分の繊維配向については、Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 でも Autodesk Moldflow Insight 2011 とほぼ同様に解析されています。また、図 10 では、Autodesk Moldflow Insight 2011 では、ビーム要素の繊維配向の計算もランダムではないことが示されています。

Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 と Autodesk Moldflow Insight 2011 での反り予測の比較を図 3、

7、そして図 11 に示します。Pipette の例では、最も大きなたわみがゲートのすぐそばに起きており、2 つのリリース間での予測された反りの差異は 20% を超えています。Hager ケーブルホルダの例と Rhodia ボックスの例については、反りの予測結果に大きな差は見られません。主な理由は、それぞれの例の充填時間の結果が示しているように、両リリース間の流動結果の違いです(図 4、8、12)。Autodesk Moldflow Insight 2011 での流動解析の精度の向上に関する詳細は、「Autodesk Moldflow Insight 2011: 3D 流体ソルバによるフローフロント流動予測」検証レポートを参照してください。

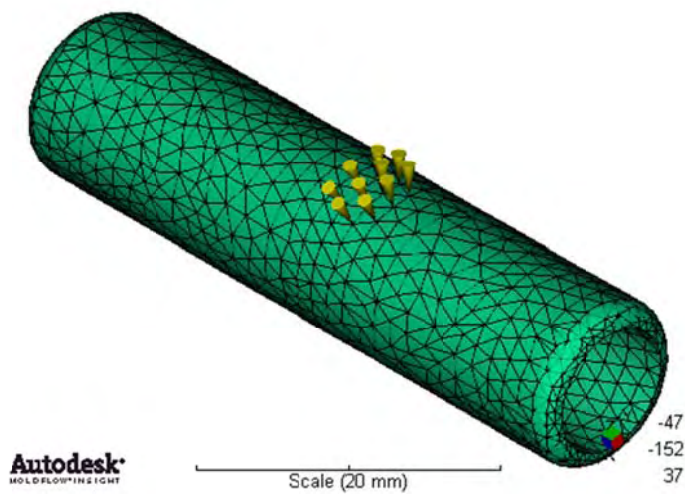


図 1. Pipette の例: ジオメトリと 3D メッシュ

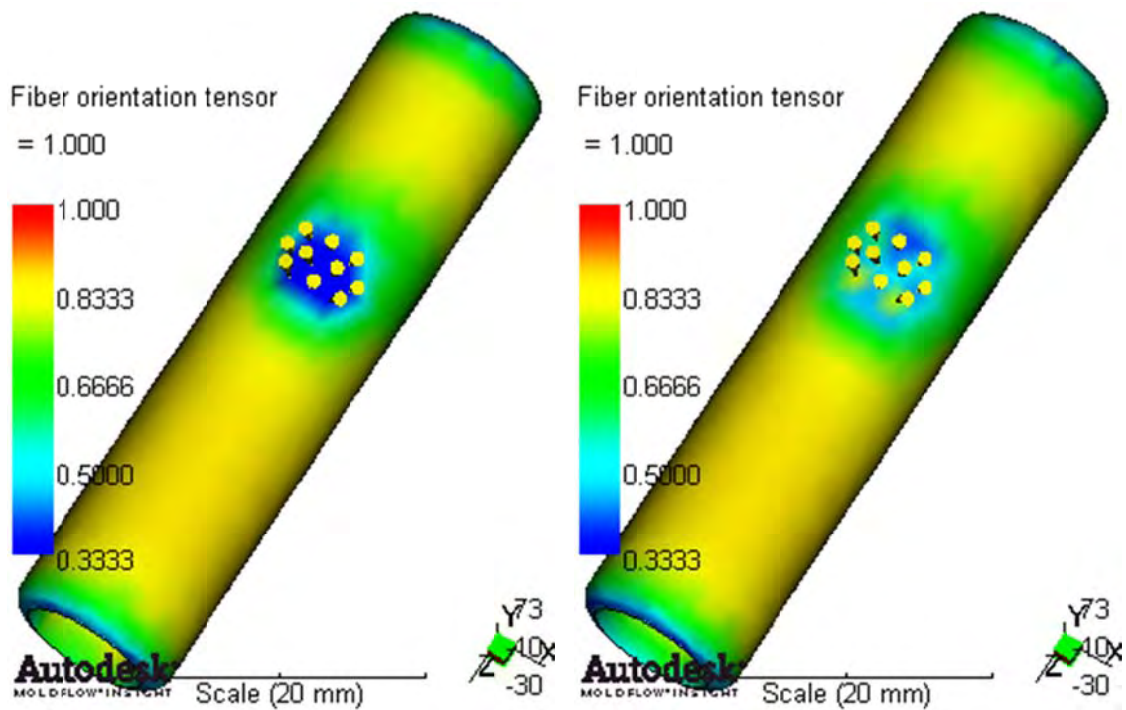


図 2. Pipette の例: Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 (左)と Autodesk Moldflow Insight 2011 (右)の繊維配向予測の比較

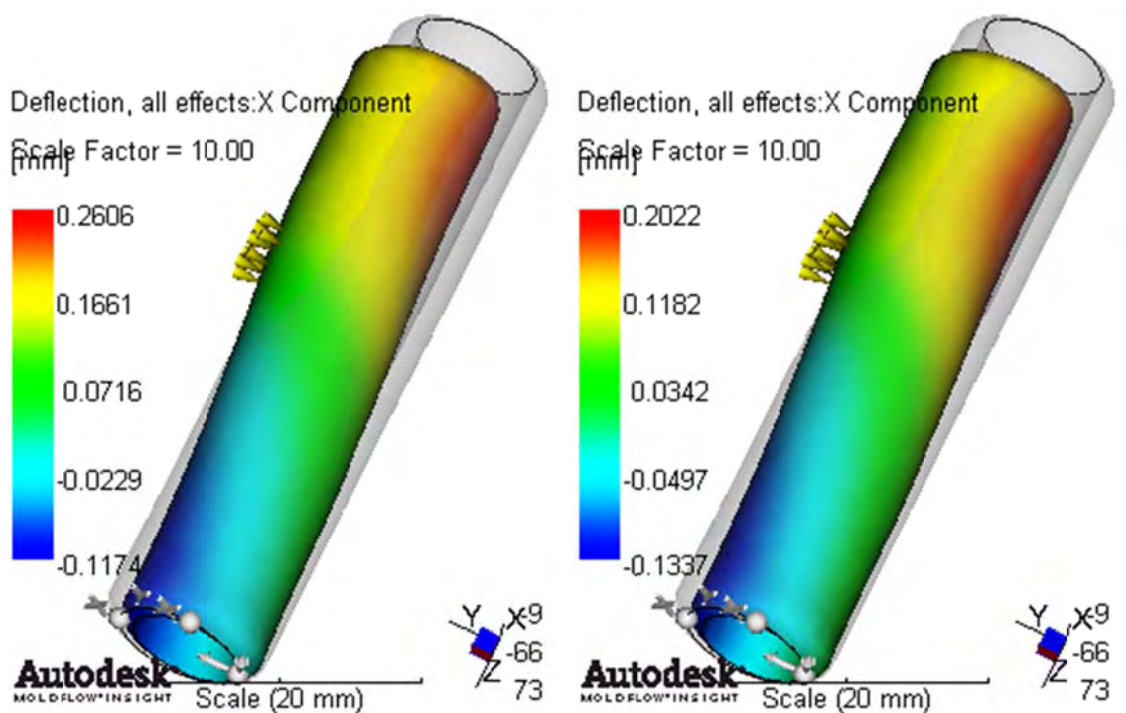


図 3. Pipette の例: Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 (左)と Autodesk Moldflow Insight 2011 (右)の反り予測の比較

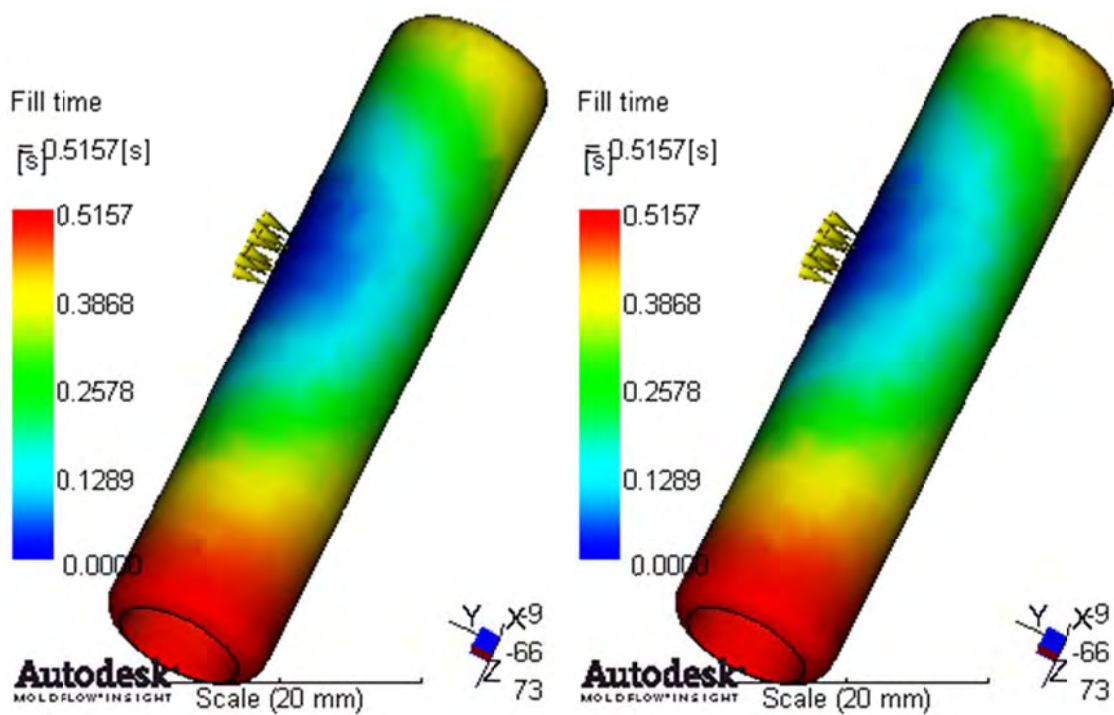


図 4. Pipette の例: Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 (左)と Autodesk Moldflow Insight 2011 (右)の充填時間の結果の比較

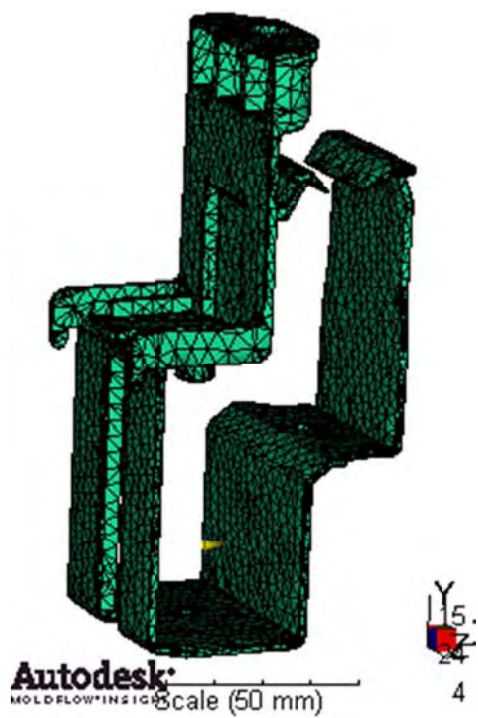


図 5. Hager ケーブルホルダの例: ジオメトリと 3D メッシュ

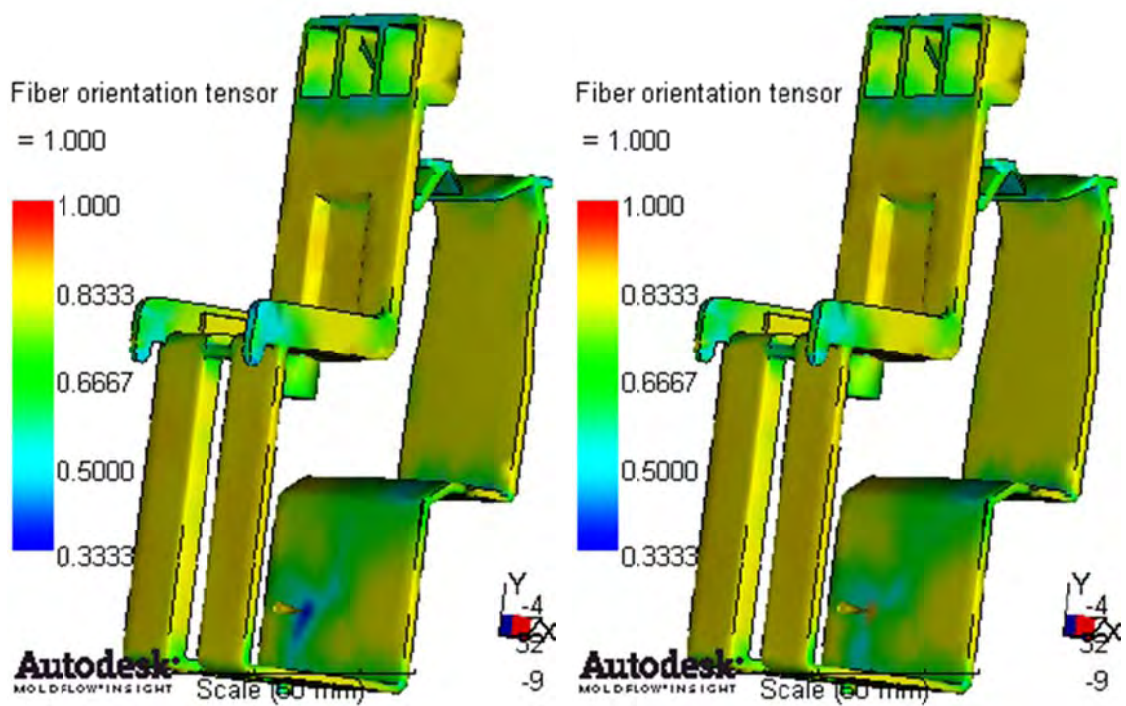


図 6. Hager ケーブル ホルダの例: Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 (左)と Autodesk Moldflow Insight 2011 (右)の繊維配向予測の比較

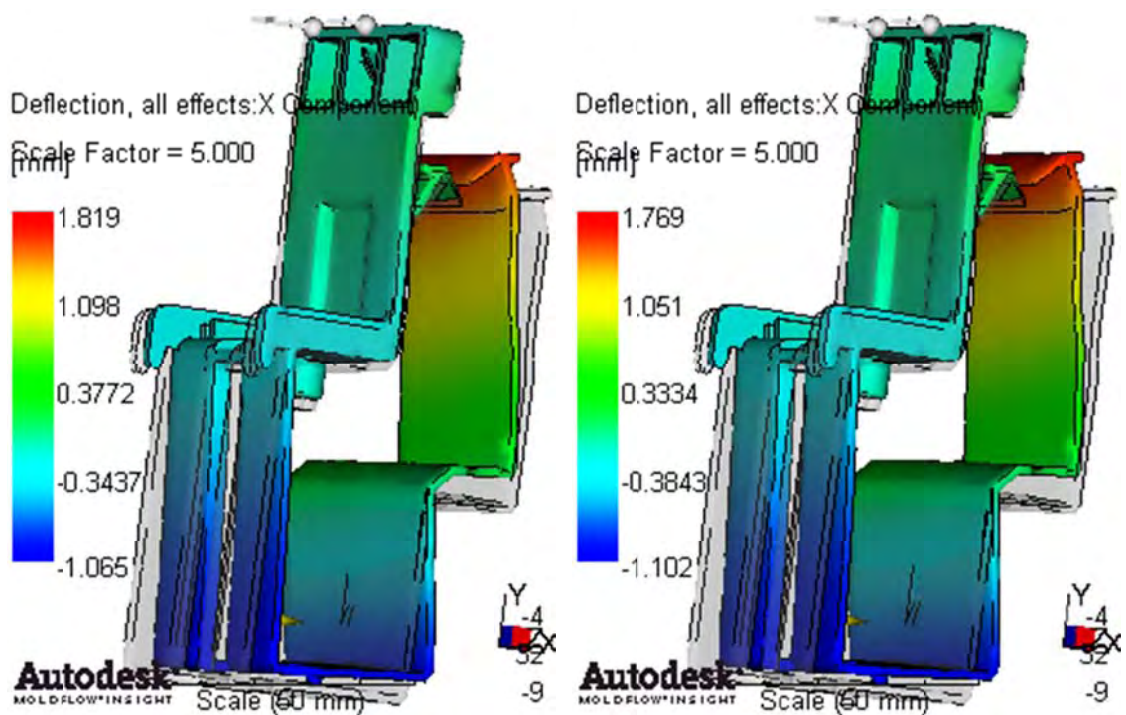


図 7. Hager ケーブル ホルダの例: Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 (左)と Autodesk Moldflow Insight 2011 (右)の反り予測の比較

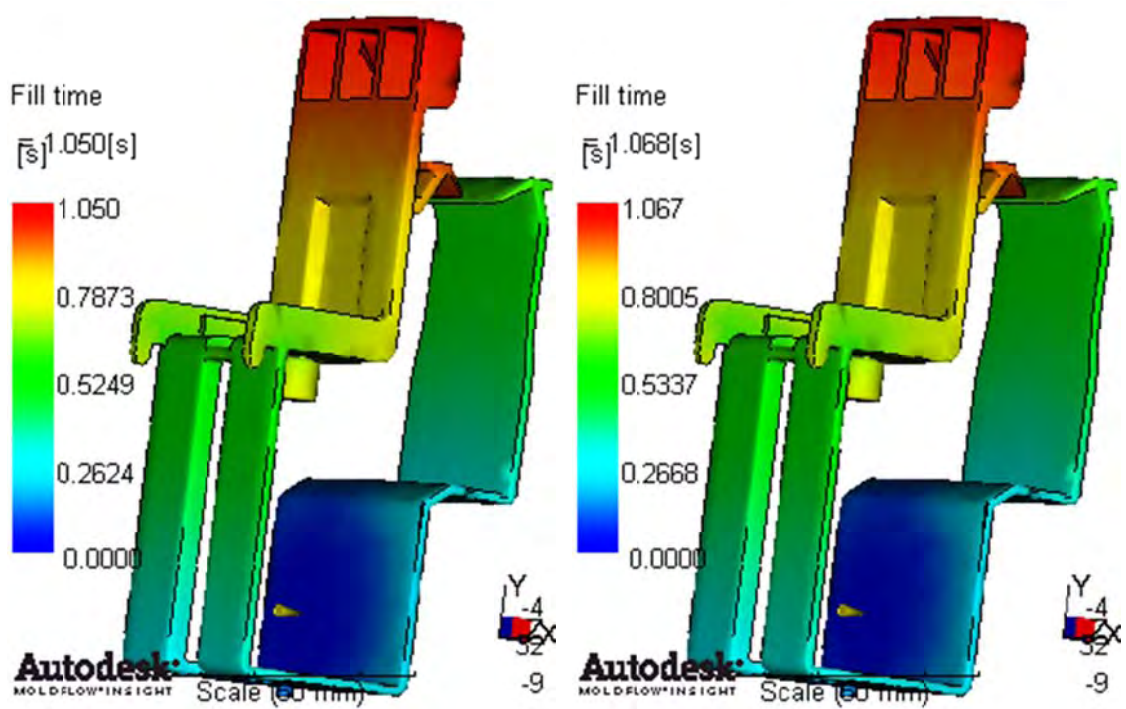


図 8. Hager ケーブル ホルダの例: Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 (左)と Autodesk Moldflow Insight 2011 (右)の充填時間の結果の比較

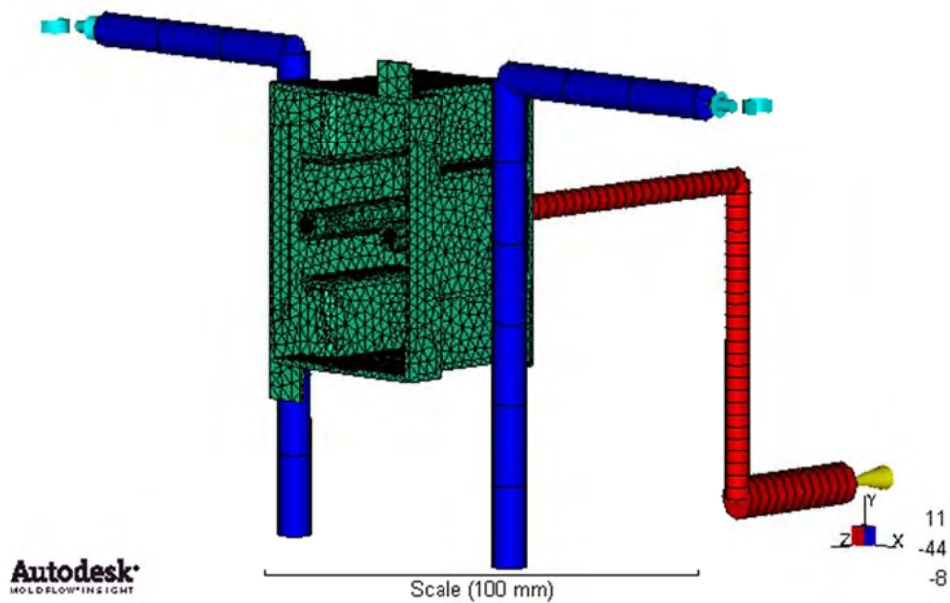


図 9. Rhodia ボックスの例: ジオメトリと 3D メッシュ

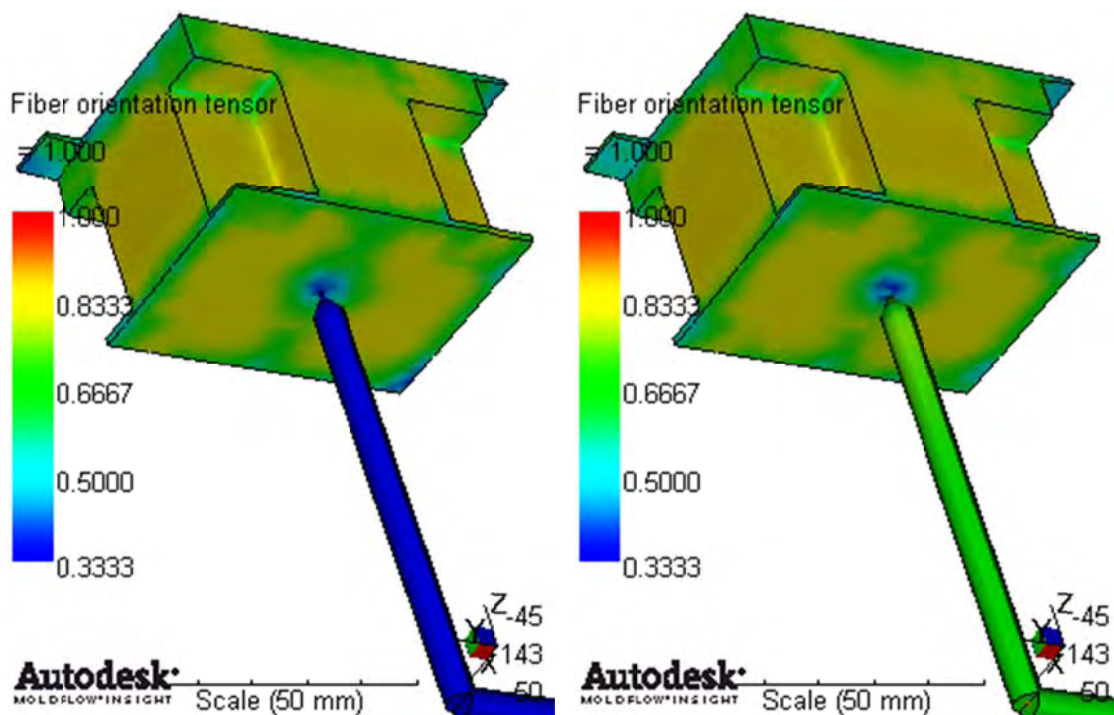


図 10. Rhodia ボックスの例: Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 (左)と Autodesk Moldflow Insight 2011 (右)の繊維配向予測の比較

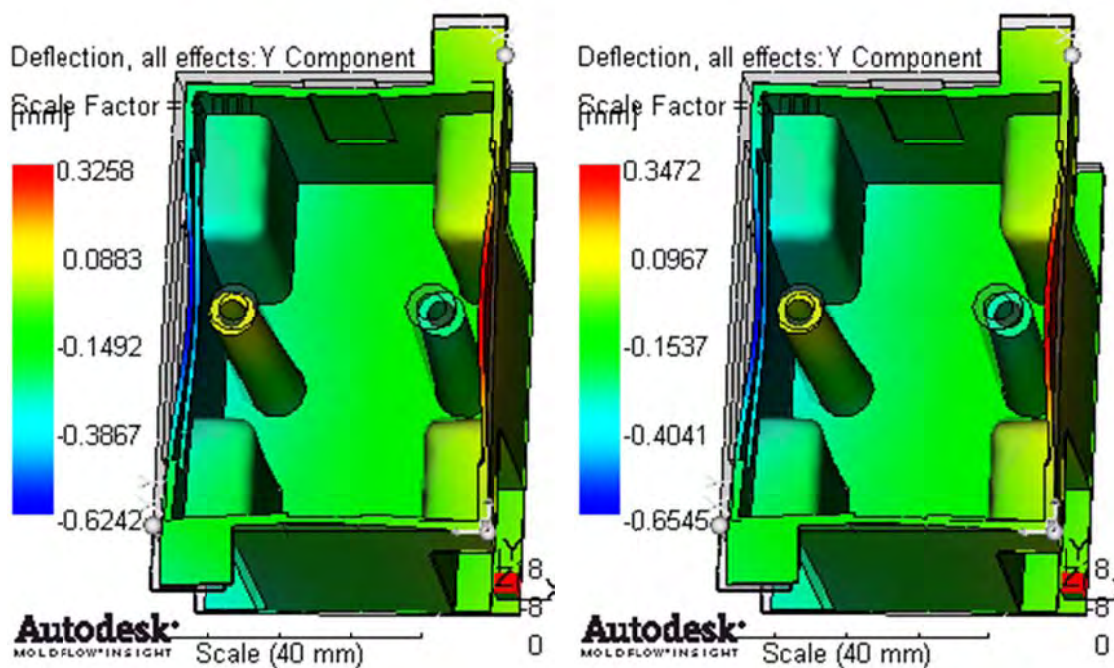


図 11. Rhodia のボックスの例: Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 (左)と Autodesk Moldflow Insight 2011 (右)の反り予測の比較

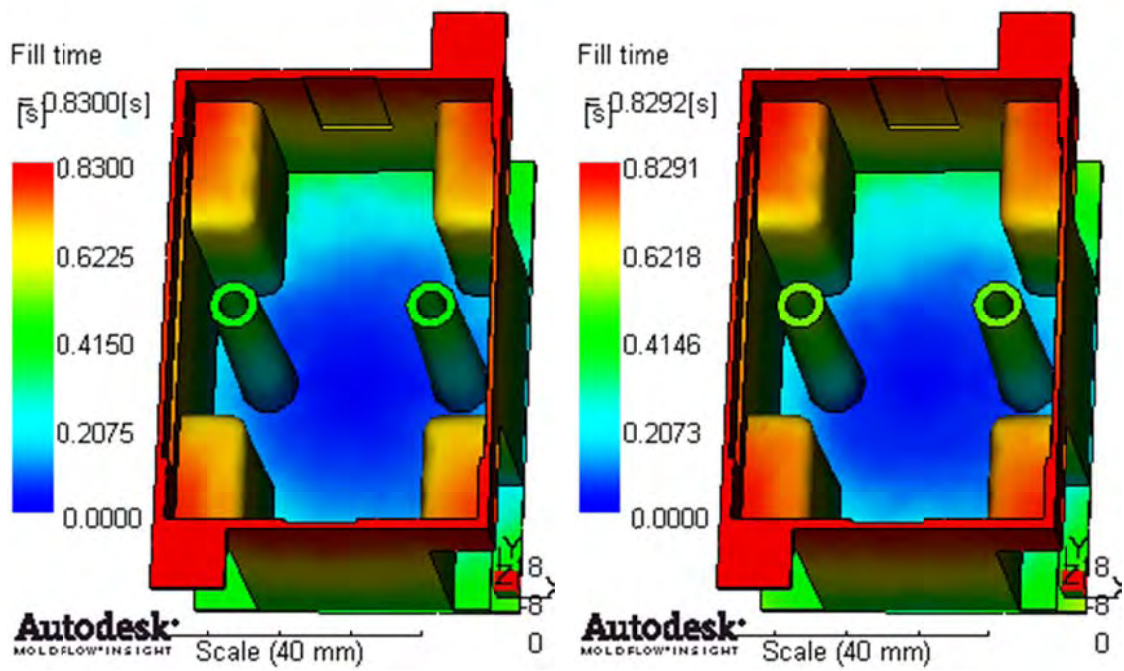


図 12. Rhodia ボックスの例: Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 (左)と Autodesk Moldflow Insight 2011 (右)の充填時間結果の比較

## ビーム要素の配向計算検証

1 次元ビーム要素の繊維配向は、ビームの形状や種類、寸法に関係なく、常に軸方向に流動するものとして計算されます。そのため、流動内には単純なせん断しか生じず、繊維は一般的に軸方向に位置合わせされます。

検証テスト用に、長い様なシリンダー ランナーの小さい 3D モデルを作成しました(図 13)。このモデルはテスト用に作成したもので、実際の使用を目的とはしていません。また、シリンダー内のニュートン流体とベキ乗則流体の等温流の繊維配向を予測する MATLAB スクリプトも作成しました。このスクリプトを使用すれば、等温流の速度と速度変化を簡単に解析できます。解析結果に基づいて、MATLAB スクリプトでシリンダーの一方の端から放出されるパーティクルをトレースします。そして、4 次ルンゲ・クッタ法が実装されている MATLAB 関数 `ode45` を使って配向の方程式を解きます。その後、Autodesk Moldflow Insight の 3D 解析と MATLAB 計算による、シリンダーの半径上の選択した位置での繊維配向予測を比較しました。Autodesk Moldflow Insight のソルバと MATLAB スクリプトに組み込んだ繊維配向方程式はともに、標準的な Folgar-Tucker モデルです。

図 14 と 図 15 の比較結果はそれぞれ、ニュートン流体とベキ乗則流体の比較結果です。両者の結果がほぼ完全に一致していることから、Autodesk Moldflow でビーム要素の配向方程式を正しく解析できていることが分かります。

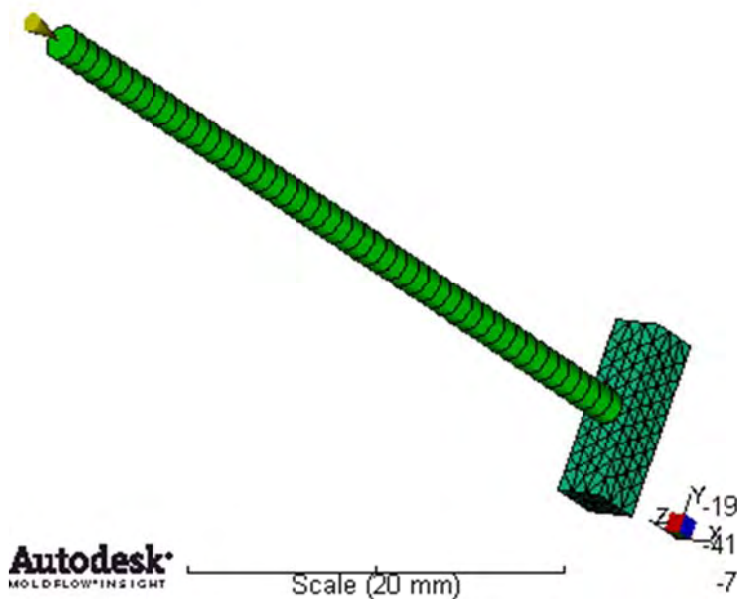


図 13. 検証用に作成したビーム要素を含む 3D モデル: ジオメトリとメッシュ

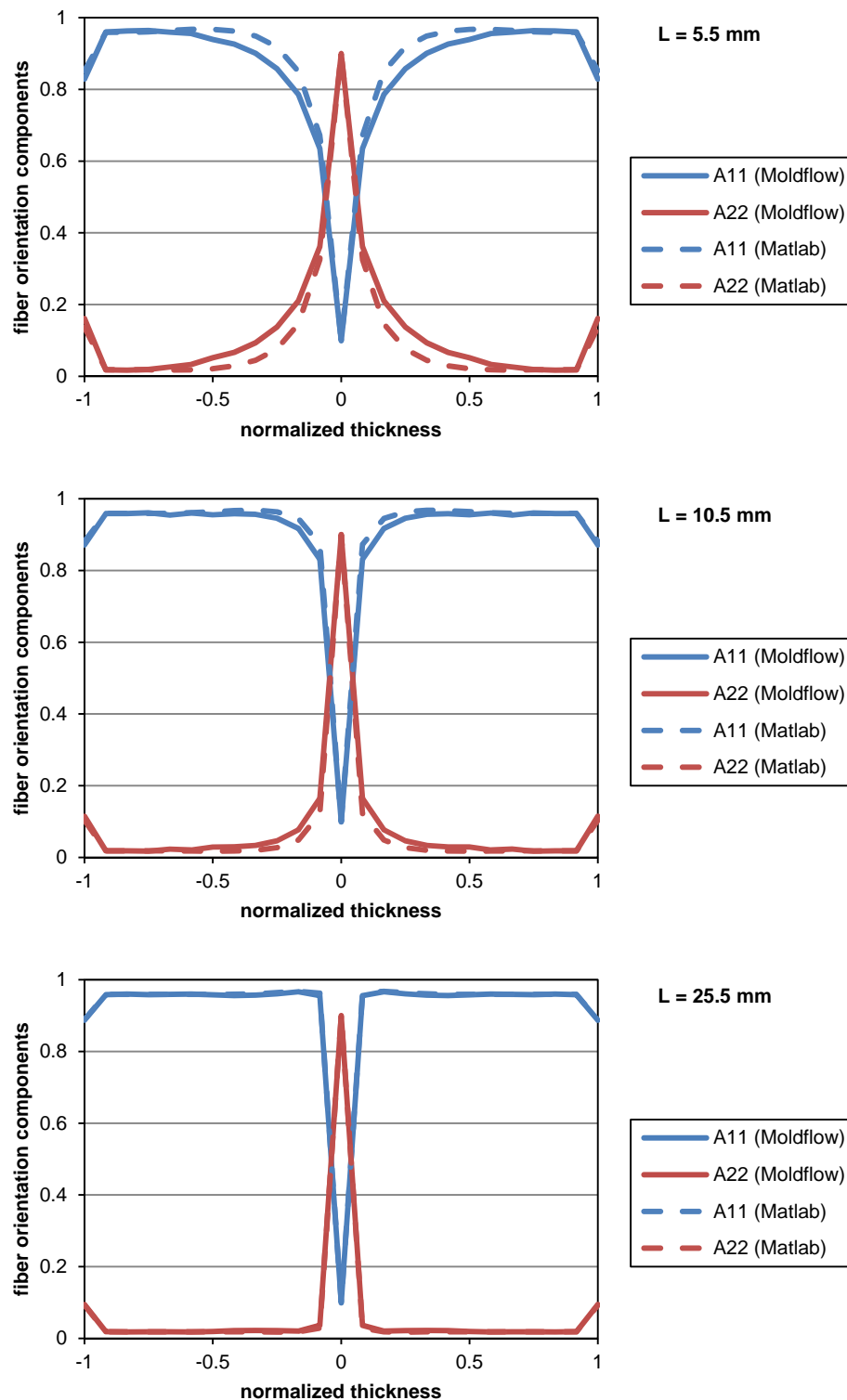


図 14. ビーム要素: Autodesk Moldflow Insight 2011 と MATLAB スクリプトによるニュートン流体の等温流の繊維配向予測の比較 ( $L$  はランナーノズルまでの距離、1 は軸方向、2 はシリンダーのビームの半径方向、繊維の相互作用係数  $C_I = 0.002$ )

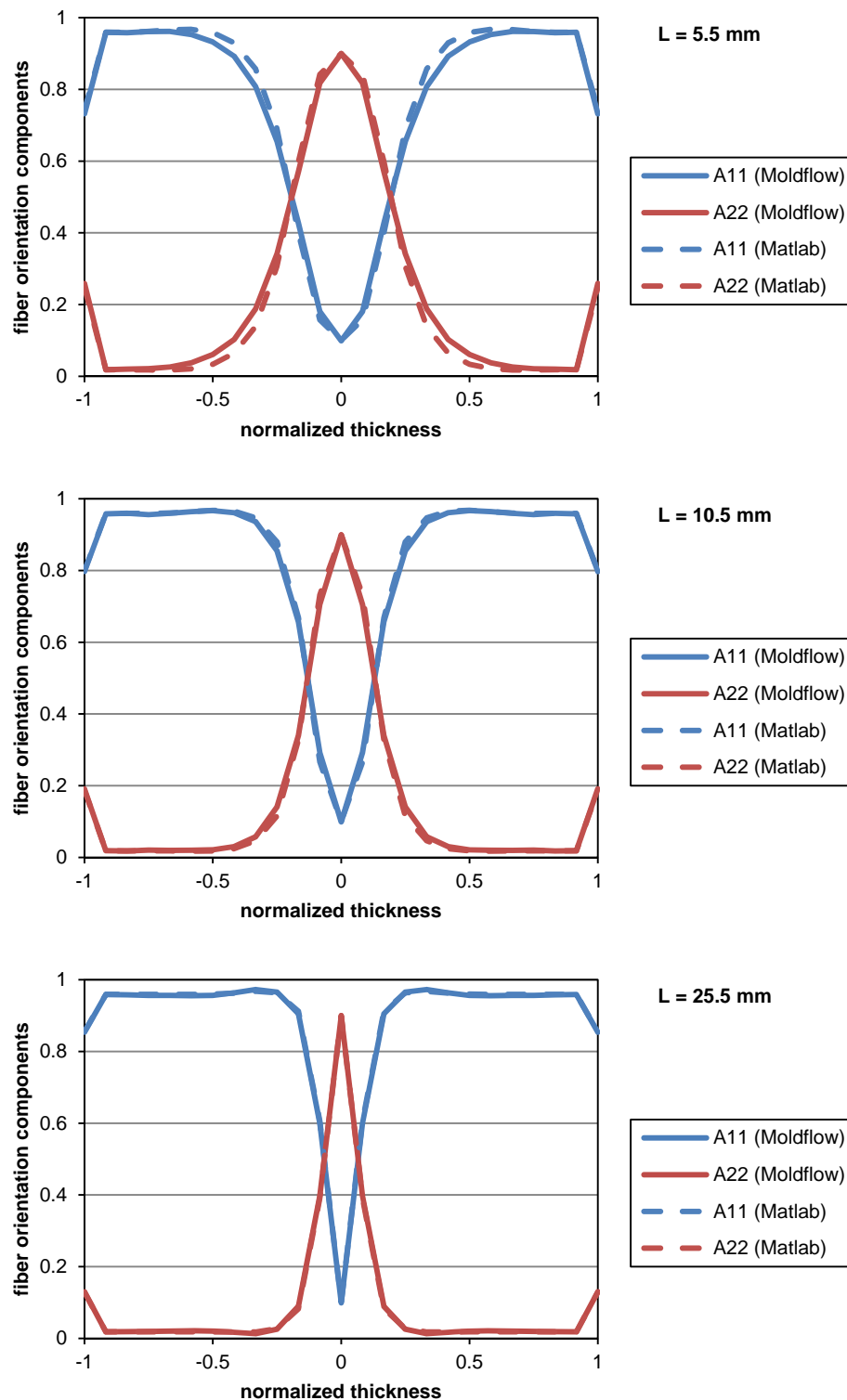


図 15. ビーム要素: Autodesk Moldflow Insight 2011 と MATLAB スクリプトによるベキ乗則流体の等温流の繊維配向予測の比較 ( $L$  はランナーのノズルまでの距離、1 は軸方向、2 はシリンダーのビームの半径方向、繊維の相互作用係数  $C_I = 0.002$ )

## 四面体要素の配向計算検証

さらに 2 つのシンプルなジオメトリ(プラークとディスク)を使用して、3D 繊維ソルバによる四面体メッシュの繊維配向解析を検証しました。図 16 と図 17 は、それぞれのモデル形状と 3D メッシュを示しています。プラークは長さ 90 mm、幅 60 mm、厚さ 1.5 mm です。ディスクは内側の半径が 10 mm、外側の半径が 90 mm、厚さ 1.5 mm です。この検証テストでも、ニュートン流体とベキ乗則流体と等温流を使用しています。平行なプラークと平行なディスクの間の圧流の解析を MATLAB スクリプトに組み込んで、繊維配向方程式を解析します。

Autodesk Moldflow Insight 2011 と MATLAB スクリプトによる、プラークとディスクにおける選択した位置の繊維配向の予測結果を比較したものが図 18 ~ 21 です。両者の結果は見事に一致しています。若干の差があるのは、MATLAB では注入口における流動が計算に入っていないためです。

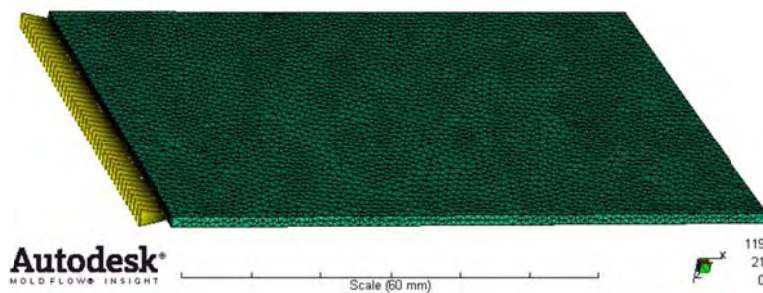


図 16. プラーク: ジオメトリと 3D メッシュ

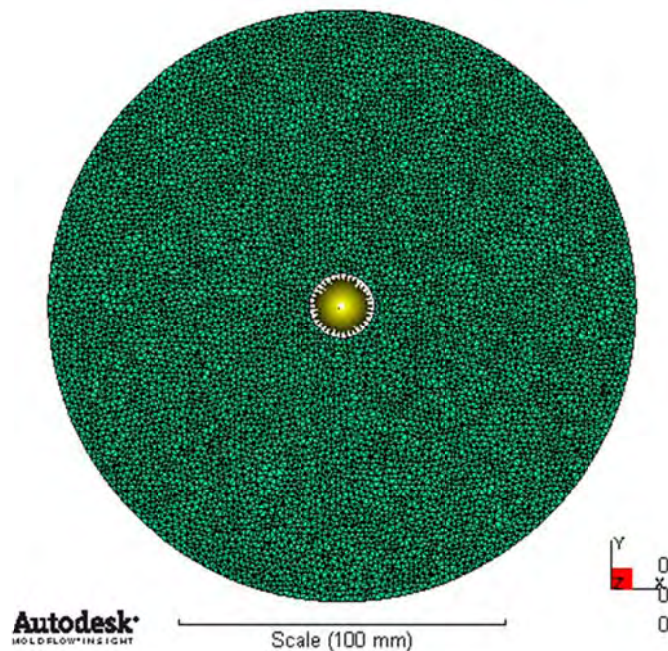


図 17. ディスク: ジオメトリと 3D メッシュ

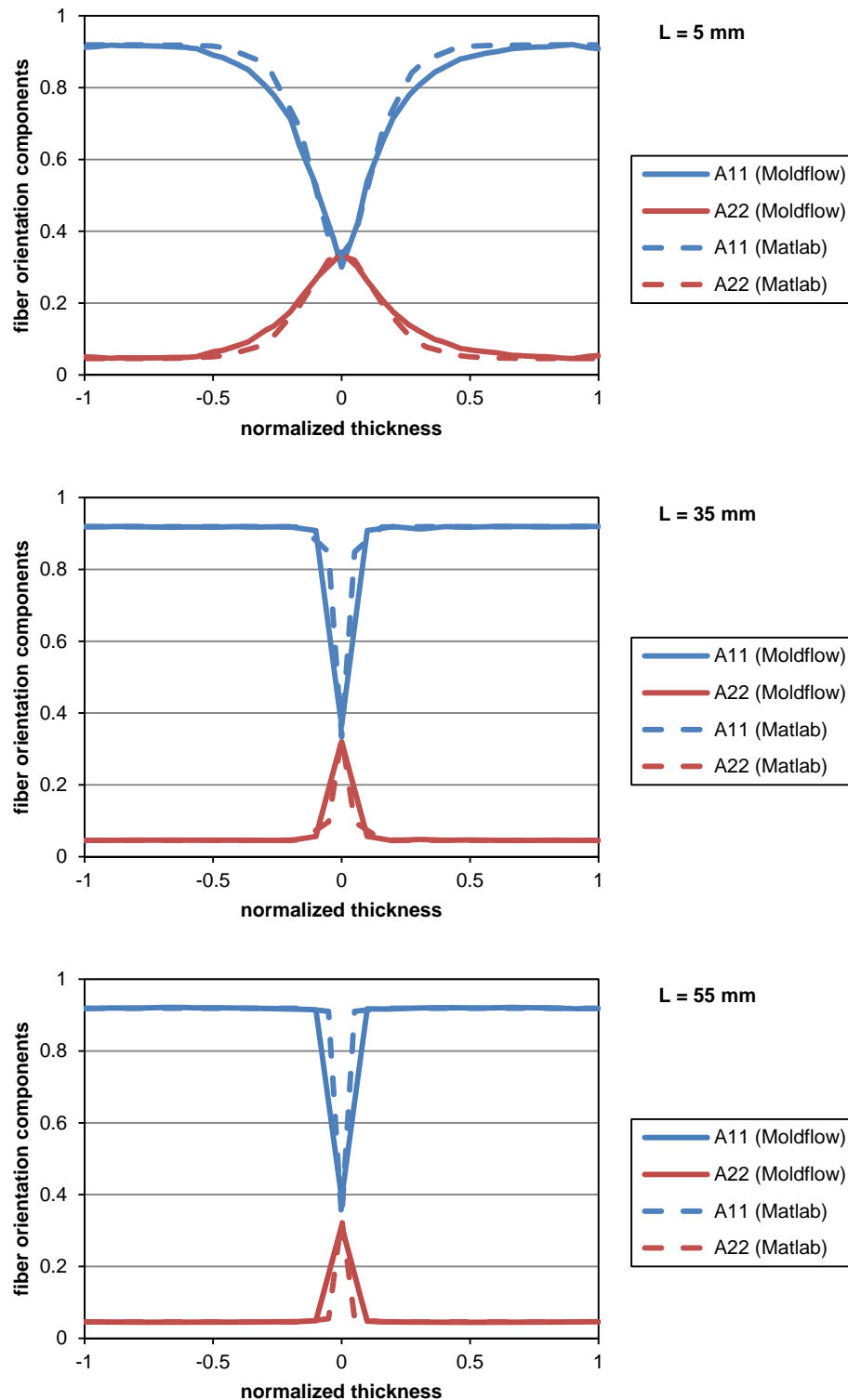


図 18. プラーク: Autodesk Moldflow Insight 2011 と MATLAB スクリプトによるニュートン流体の等温流の繊維配向予測の比較 ( $L$  はゲートまでの距離、1 は流動方向、2 はクロスフロー方向、繊維の相互作用係数  $C_I = 0.006$ )

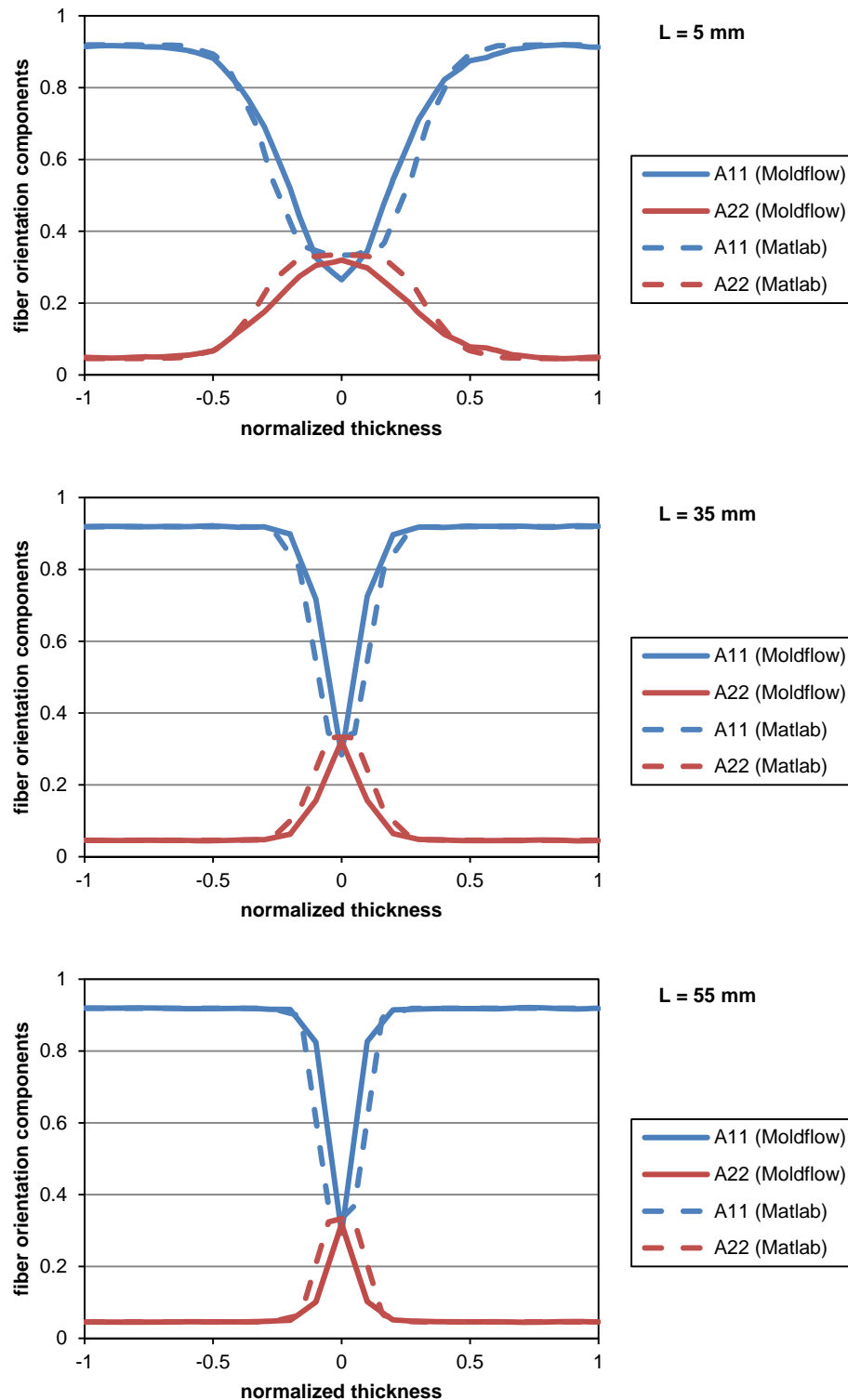


図 19. プラーク: Autodesk Moldflow Insight 2011 と MATLAB スクリプトによるベキ乗則流体の等温流の繊維配向予測の比較 ( $L$  はゲートまでの距離、1 は流動方向、2 はクロスフロー方向、繊維の相互作用係数  $C_f = 0.006$ )

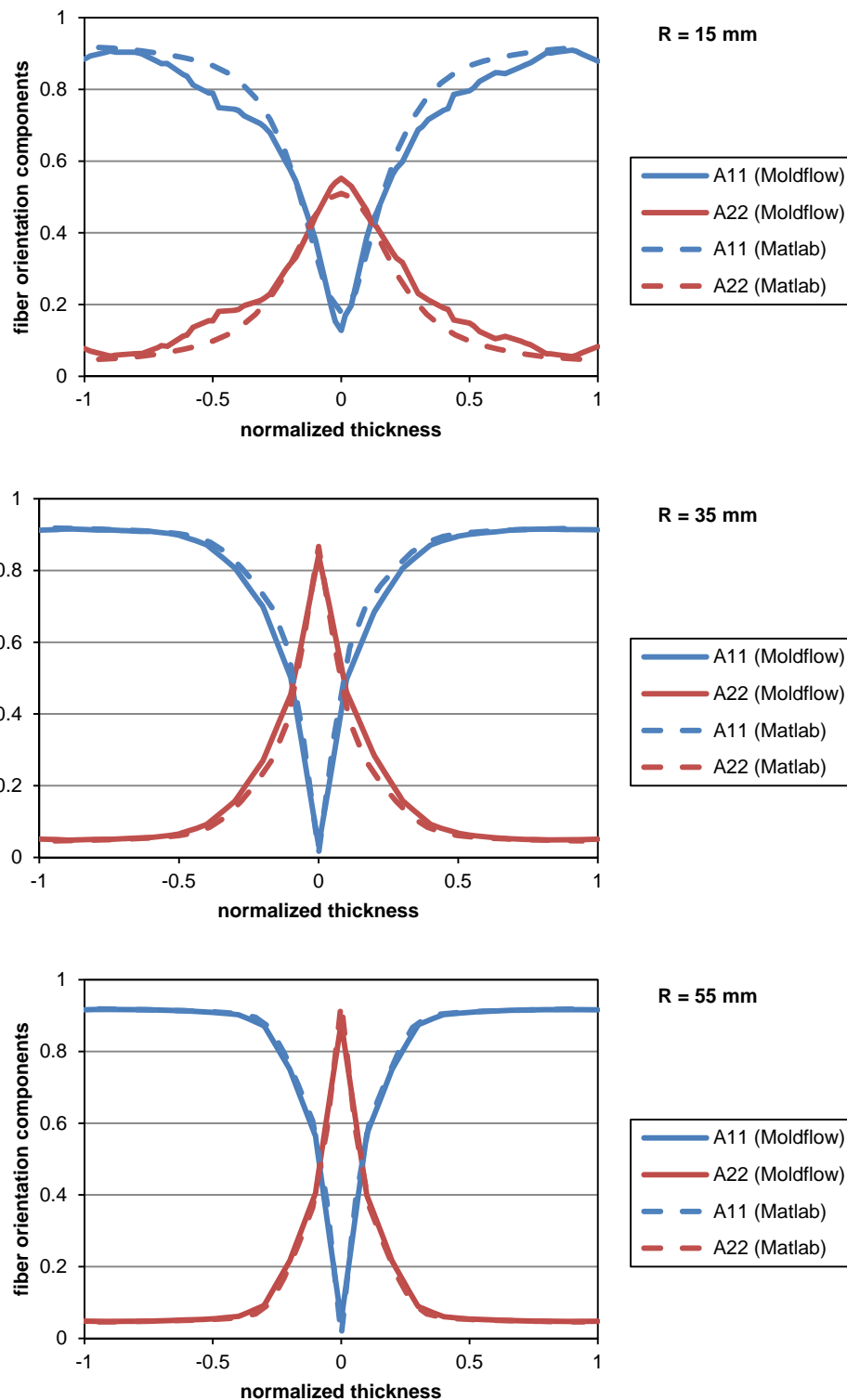


図 20. ディスク: Autodesk Moldflow Insight 2011 と MATLAB スクリプトによるニュートン流体の等温流の繊維配向予測の比較 ( $R$  は半径、1 は半径方向、2 は接線方向、繊維の相互作用係数  $C_I = 0.006$ )

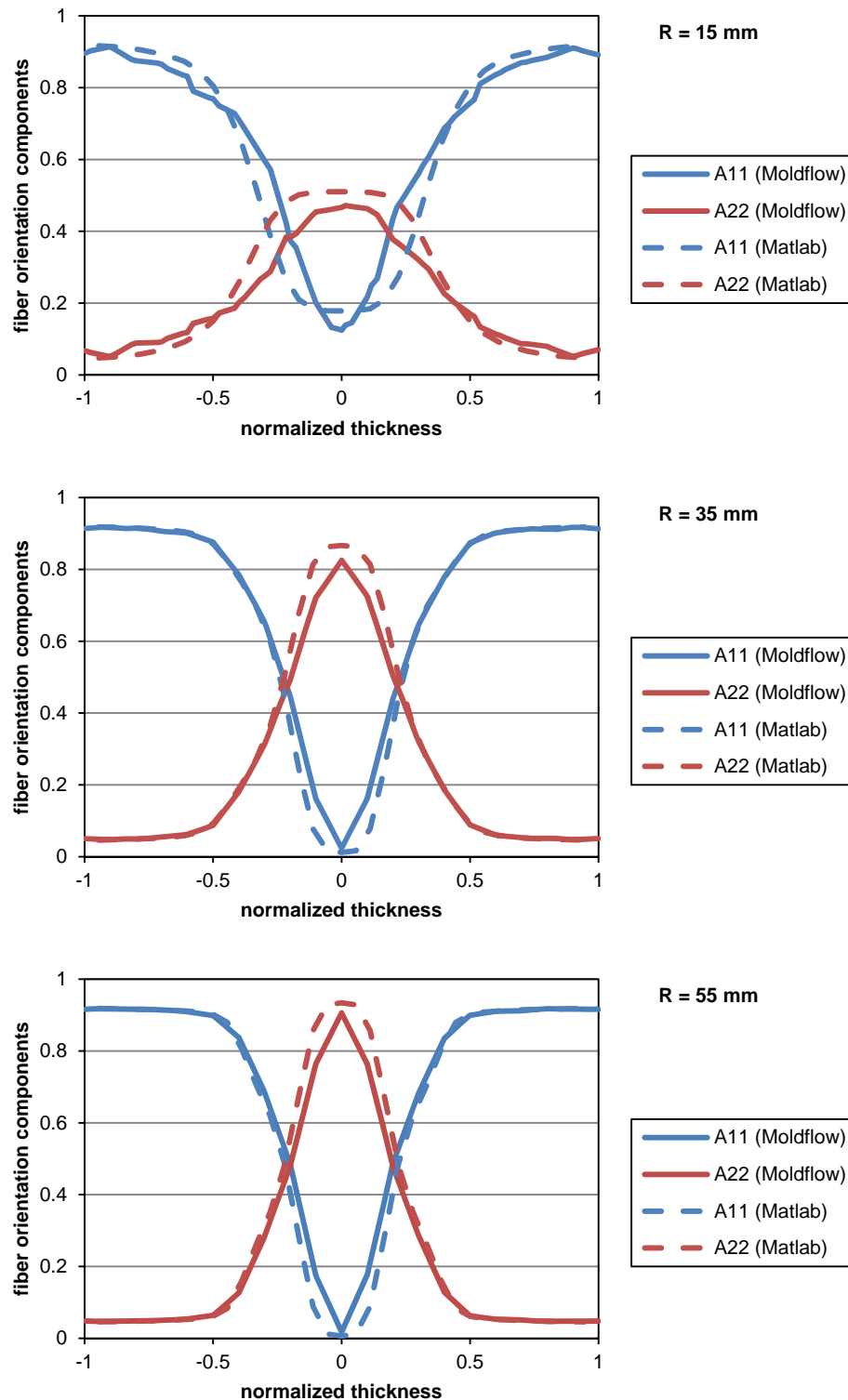


図 21. ディスク: Autodesk Moldflow Insight 2011 と MATLAB スクリプトによるベキ乗則流体の等温流の繊維配向予測の比較 ( $R$  は半径、1 は半径方向、2 は接線方向、繊維の相互作用係数  $C_I = 0.006$ )

## 実際のパーツにおける繊維配向ソルバの検証

Delphi Corporation は数々のブラークやディスクを製造しています。ブラークのゲートは末端に、ディスクのゲートは中央に配置されています。ISO 規格のブラークは幅 80 mm、長さ 90 mm、ディスクの半径は 90 mm です。それぞれのキャビティの厚みは 1.5 mm ~ 6 mm で、厚みによって 3 通りの射出速度(低速、中速、高速)を使い分けています。繊維配向の測定は、ブラークは中心線に沿って、ディスクは半径に沿ってゲートから 0 mm、30 mm、60 mm の 3 箇所幅 10 mm にわたって行いました。それぞれのセクションを領域 A、B、C とします。

ブラーク モデルとディスク モデルでのジオメトリとメッシュの分布はそれぞれ、図 23、図 24 に示すとおりです。シミュレーションと比較検証に使用した全てのモデルは、厚み方向に 6 層設けています。

図 24 は、厚さ 1.5 mm のブラークを低速で充填した場合の、中心線沿いの領域 B で測定した実測データと、Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2、Autodesk Moldflow Insight 2011 の予測結果を比較したものです。両リリースとも結果はほぼ同じです。Autodesk Moldflow Insight 2011 のビーム要素の繊維配向計算による影響はほとんど見られません。

さらに別のケースの配向の実測データと Autodesk Moldflow Insight 2011 の予測結果を比較したものが図 25 と図 26 です。総体的に見ると、繊維配向の予測結果はブラークでもディスクでも測定データとほぼ一致しています。ソルバはシェル-コア-シェルの繊維配向構造を予測しており、シェル層の結果とコア層の結果共に、実測データと一致しています。

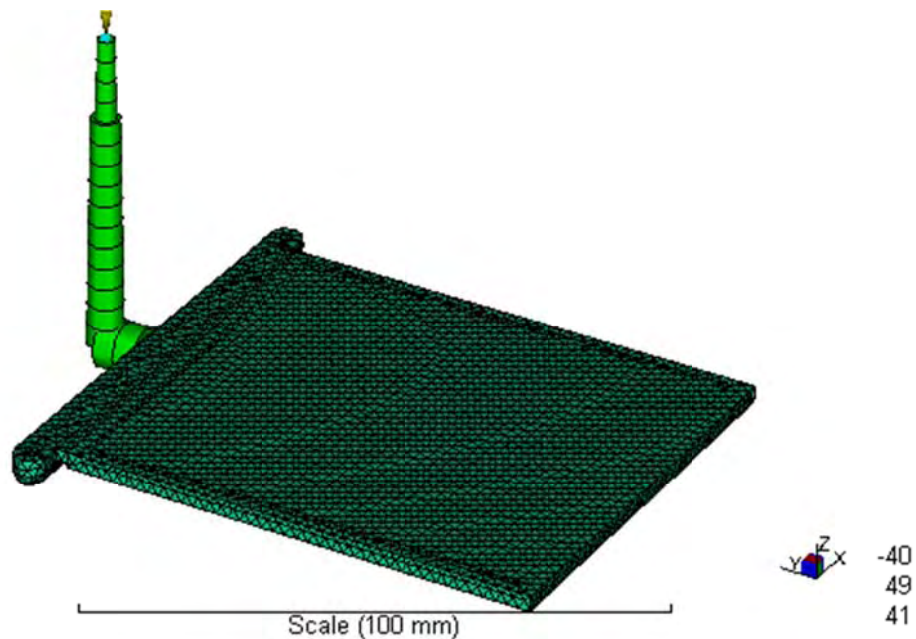


図 22. ISO 規格ブラーク: ジオメトリと 3D メッシュ

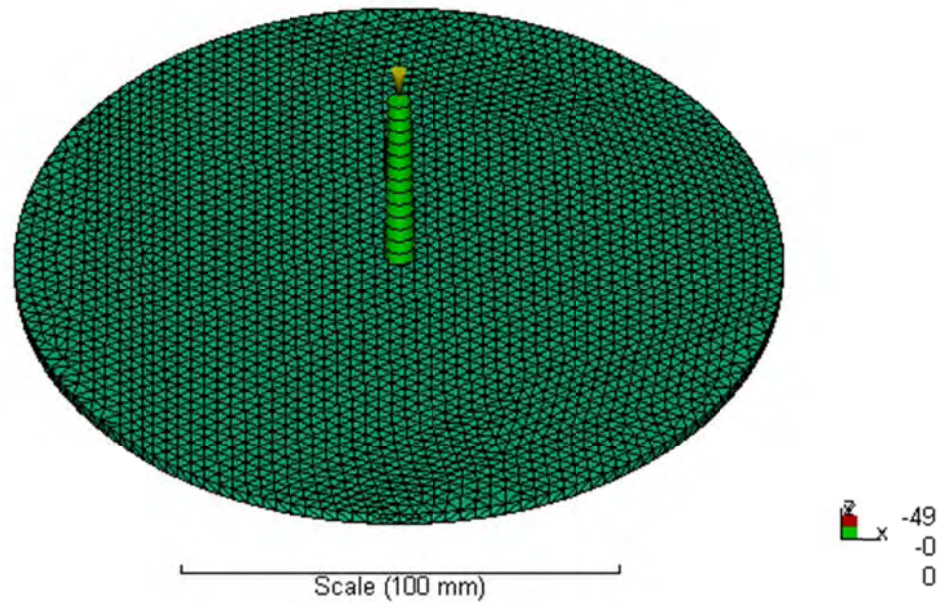


図 23. 中央にゲートを配置したディスク: ジオメトリと 3D メッシュ

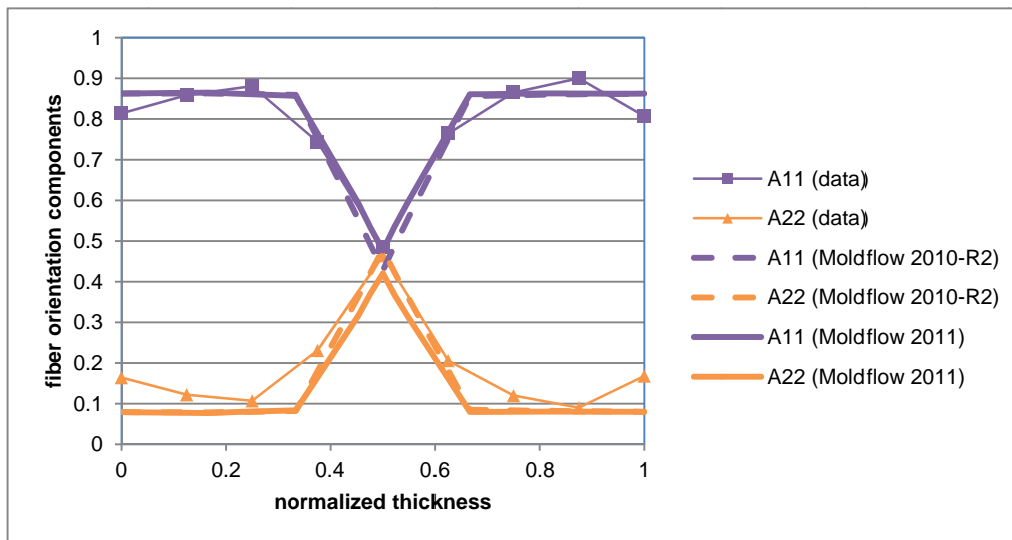


図 24. ISO 規格プラーク、厚さ 1.5 mm、低速充填: 領域 B の繊維配向の測定データと Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2、Autodesk Moldflow Insight 2011 の解析結果の比較 (1 は流動方向、2 はクロスフロー方向)

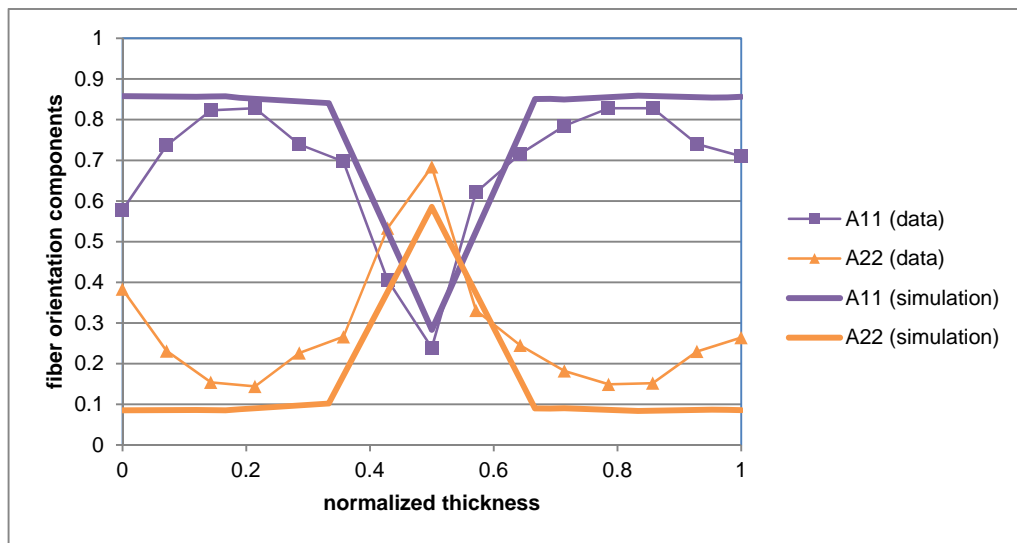


図 25. ISO 規格プラーク、厚さ 3 mm、中速充填: 領域 B の繊維配向の測定データと Autodesk Moldflow Insight 2011 の解析結果の比較 (1 は流動方向、2 はクロスフロー方向)

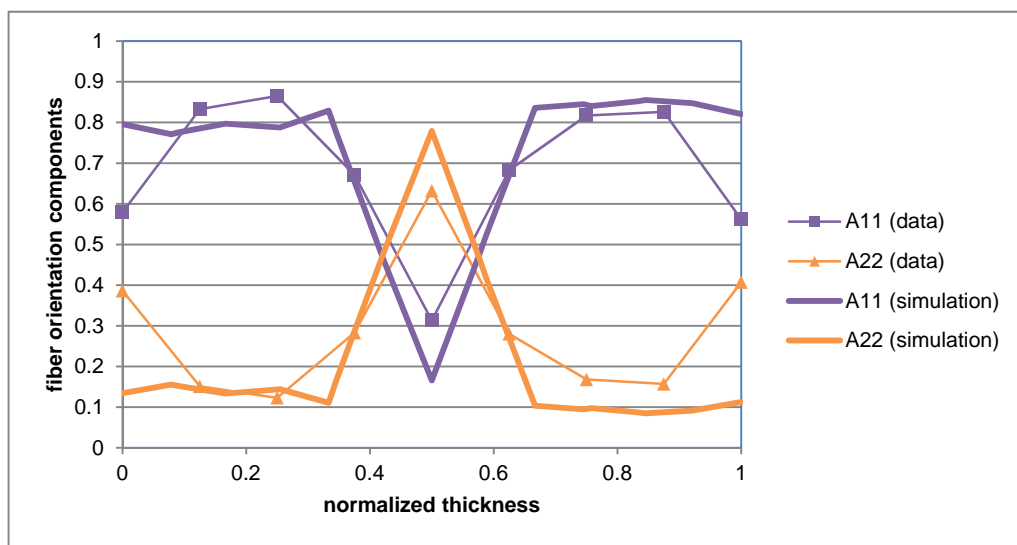


図 26. 中央にゲートを配置したディスク、厚さ 1.5 mm、低速充填: 領域 B の繊維配向の測定データと Autodesk Moldflow Insight 2011 の解析結果の比較 (1 は半径方向、2 は接線方向)

## 謝辞

オートデスクより、以下の方々に感謝の意を表します。

- Charles L. Tucker III 教授(繊維配向方程式を解析する MATLAB スクリプトの提供)
- ドイツ Hager GmbH 社、フランス Rhodia Engineering Plastics 社(射出成形部品の提供)
- Delphi Corporation (本レポートで使用したモデルと繊維配向測定データの提供)

改訂日: 2011 年 8 月

© 2011 Autodesk, Inc. All rights reserved.

このドキュメントのすべて、または本ドキュメントの一部は、オートデスクの許可がある場合を除き、いかなる形式、方法、目的でも複製することはできないものとします。

### 商標

Autodesk, Moldflow は、米国および/またはその他の国々における、Autodesk, Inc. の登録商標または商標です。その他のすべてのブランド名、製品名、または商標は、それぞれの所有者に帰属します。その他のすべてのブランド名、製品名、または商標は、それぞれの所有者に帰属します。オートデスクは、通知を行うことなくいつでも該当製品およびサービスの提供、機能および価格を変更する権利を留保し、本書中の誤植または図表の誤りについて責任を負いません。

### 免責事項

オートデスクはこのドキュメントおよびドキュメントに含まれる情報を「現状有姿」で提供し、これらのマテリアルについて、商品性および特定目的適合性に関する黙示的保証を含む(ただしこれに限定されない)、一切の明示的または黙示的保証を行わないものとします。

Autodesk®