

検証レポート

3D 流体ソルバによるフロー フロント 流動予測

概要

Autodesk Moldflow 2011 リリースでは、Autodesk Moldflow Insight および Autodesk Moldflow Adviser 製品に使用されている 3D 流体連成ソルバのフロー フロント流動予測に、レベル セット フロー フロント追跡アルゴリズムが採用されています。旧リリースでは、フロー フロント追跡アルゴリズムにレベル セット法ではなく流体体積(VOF: Volume of Fluid)法が使用されていました。今回、レベル セット法が採用されたことで、対称ジオメトリでのフロー フロント予測の対称性と、フロー フロントの滑らかさ、ジェッティングの予測におけるフロー フロントの正確さが向上しています。また、慣性効果を解析しない場合は以前の VOF 法よりもレベル セット法の方が短時間で解析できるという利点もあります。[Simulate inertia effect]オプションをオンにすると、解析時間は長くなりますがフロー フロント予測の精度が上がります。特にジェッティングが発生している場合は有効です。

はじめに

Autodesk Moldflow 2011 製品では、3D 流体連成ソルバのフロー フロント予測が強化されています。レベル セット フロー フロント追跡アルゴリズムの採用により、対称ジオメトリのフロー フロントの流動が非対称になるという問題が解決されたほか、フロー フロントの滑らかさとジェッティングの予測の精度も向上しました。旧バージョンの 3D 流体連成ソルバでは、VOF フロー フロント追跡アルゴリズムが使用されていました。

数学モデル

レベル セット法のフロー フロント追跡アルゴリズムは、次のような方程式で表わされます。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad [1]$$

F はレベル セットの距離関数、 u 、 v 、 w は x 、 y 、 z 方向の速度成分です。レベル セット関数 F は、解析ドメインの各地点からフロー フロントまでの距離を定義します。 $F < 0$ は充填領域、 $F > 0$ は充填領域の外側、 $F = 0$ はフロー フロント界面の位置になります([1]、[2]を参照)。

VOF 法も方程式[1]で表わすことができますが、その場合は F は解析ドメイン内のあらかじめ定義された体積の充填体積分率を定義します。したがって、 $F = 0$ は空のサブ体積、 $F = 1$ は充填体積、 $F = 0.5$ は自由表面のサブ体積になります。

実装

レベル セット フロー フロント追跡アルゴリズムでは、方程式[1]を使用して解析ドメインの各地点からフロー フロントまでの距離 F が求められます。これにより、自由表面をより滑らかにより正確に表現できます。また、[Simulate inertia effect]オプションをオンにした場合も、レベル セット法の方がジェッティングを正確に予測できます。

検証

フロー フロントの滑らかさと正確さ

図 1 の円筒型のパーツを例に、Autodesk Moldflow Insight 2011 のレベル セット アルゴリズムがフロー フロントの滑らかさと正確さという点で Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 の VOF 法よりも優れていることを実証しましょう。このモデルを見れば、[Simulate inertia effect]オプションをオンにした場合のジェッティング予測の向上は明らかです。

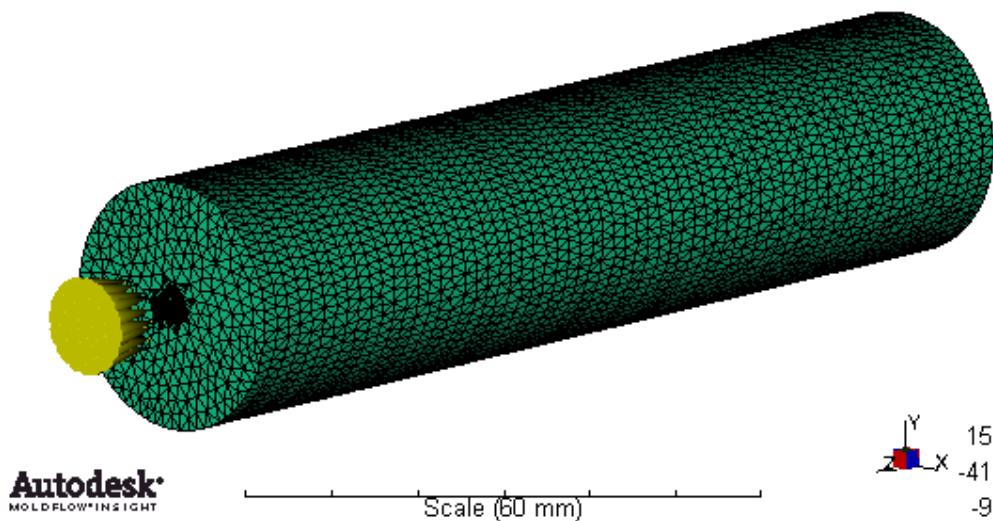


図 1. 円筒型パーツを用いたフロー フロントの解析結果の滑らかさと正確さの実証

図 2 は、Autodesk Moldflow Insight 2011 と Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 でのおよそ 0.04、0.1、0.3 秒後のポリマー充填領域のプロットのスナップショットです。両者の結果を比較すると、Autodesk Moldflow Insight 2011 はジェッティング現象を予測できていることが分かります。一方の Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 では、フロー フロントがばらばらに分裂してしまっています。このことから、Autodesk Moldflow Insight 2011 リリースは旧リリースと比べてジェッティングの予測精度がはるかに高いことが分かります。

一番下の 0.3 秒後のフロー フロントを示す 2 つの画像をご覧ください。Autodesk Moldflow Insight 2010 R2 の VOF 法と比べると、明らかにレベル セット アルゴリズムのポリマー充填領域のプロットの方が滑らかです。これは、レベル セット アルゴリズムが解析ドメイン内の各地点からフロー フロントまでの距離と距離 0 の補間センターを計算し、フロー フロント界面の位置を描画するためです。旧バージョンの VOF 法ではフロー フロント界面は単純に充填/無充填の補間として描画されるため、滑らかさはかなり劣ります。

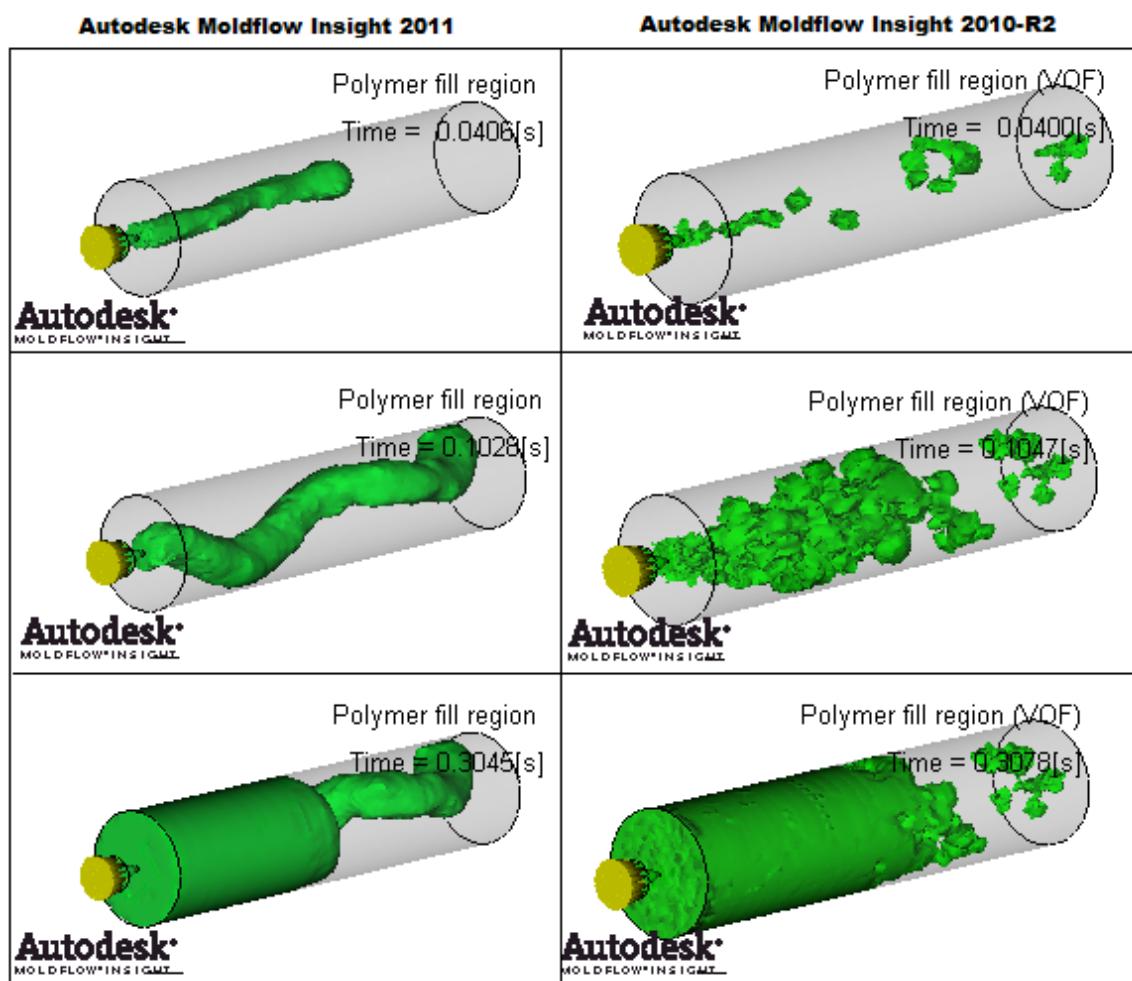


図 2. ポリマー充填領域のプロットの比較

通常は、[Simulate inertia effect]オプションをオンにすると、Autodesk Moldflow Insight 2011 は Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 よりも処理が遅くなります。ただし、この例の場合は 2011 リリースの方が旧リリースよりも高速です(表 1 を参照)。Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 の VOF ベースの解析では初期段階でジェッティングの予測が行われますが、フロー フロントがばらばらに分裂し、ソルバのタイム ステップが非常に細かくなり、結果として処理に時間がかかるってしまいました。一般的には、[Simulate inertia effect]オプションをオンにした状態でジェッティングが発生すると、処理速度は Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 よりも Autodesk Moldflow Insight 2011 の方が速いはずです。ただし、ジェッティングが発生しなければ、Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 の方が速くなります。

フロー フロントの対称性

Autodesk Moldflow Insight 2011 は、対称パーツの流動パターンの対称性にも優れています。図 3 をご覧ください。このモデルは長さ 700mm、肉厚 3mm の 2 つの左右対称の半円パイプのセット取り金型です。これら 2 つのパイプに同時に充填します。パーツのジオメトリからして、ジェッティングが発生する可能性はほとんどありません。したがって、この解析では[Simulate inertia effect]オプションはオフにしています。

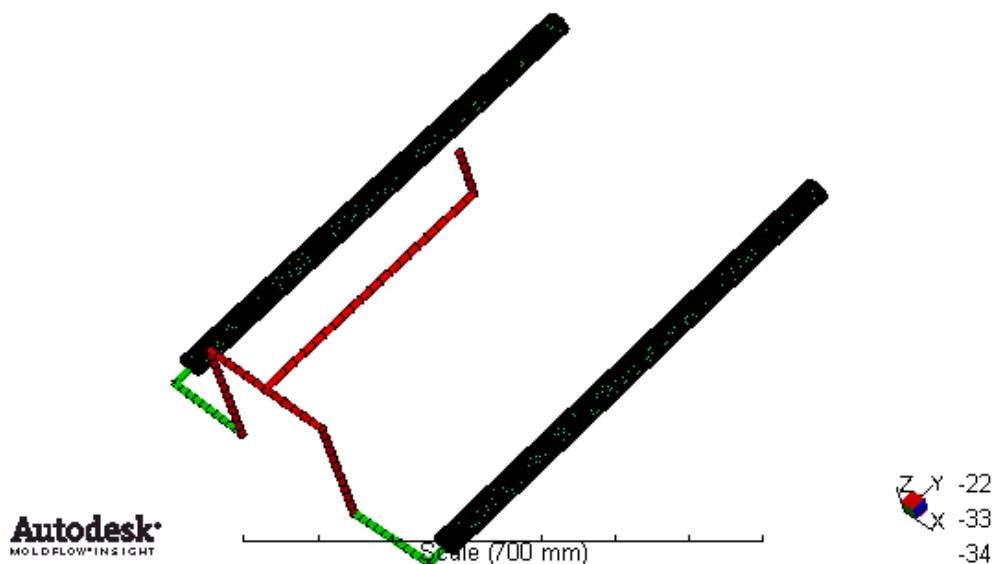


図 3. 半円パイプの対称モデル

図 4 と図 5 は、Autodesk Moldflow Insight 2011 と Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 の、1.38 秒後のポリマー充填領域の解析結果を比較したものです。左上のプロットは左側のパイプの一部を拡大した図、右上は右側のパイプの一部を拡大した図、さらに下の 2 つのプロットは両方のパイプとランナー システムの関係を示した図です。

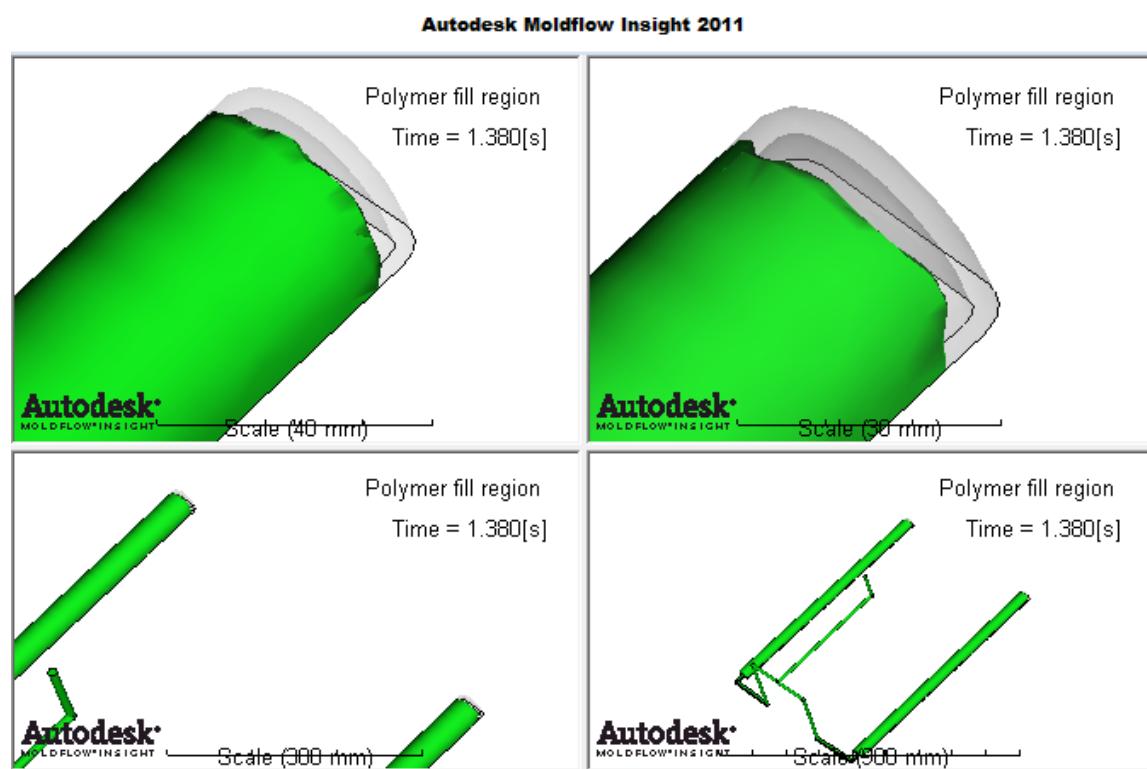


図 4. Autodesk Moldflow Insight 2011 の対称的なポリマー充填領域のプロット

Autodesk Moldflow Insight 2011: 3D 流体ソルバによるフロー フロント流動予測

Autodesk Moldflow Insight 2011 のポリマー充填領域(図 4)を見ると、レベル セット法による予測では、それぞれのパイプの流動パターンの位置がほぼ同じであることが分かります。一方の Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 のプロット(図 5)では、左側のパイプよりも右側のパイプの方が先に充填されています。これは正しくありません。

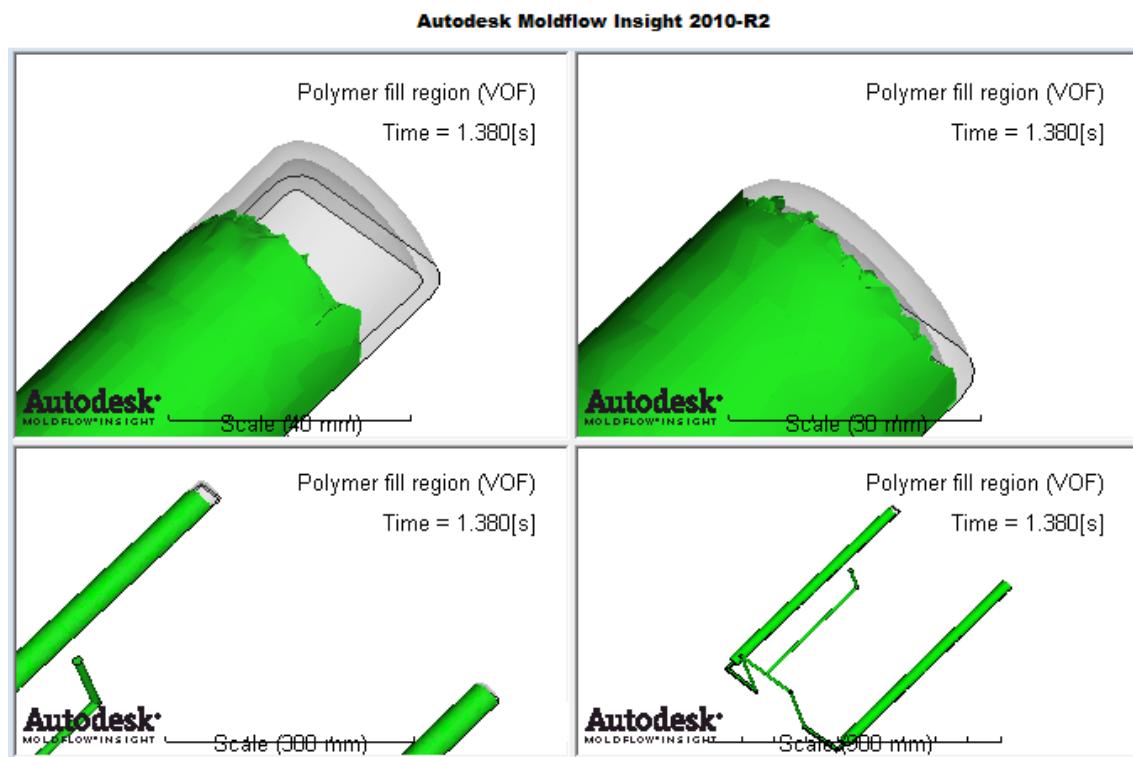


図 5. Autodesk Moldflow Insight 2010 Release 2 の非対称のポリマー充填領域のプロット

3D 流動解析の速度

前のセクションの半円パイプモデルにおける対称性テスト(図 3, 4, 5)では、慣性シミュレーションはオフになっていました。表 1 を見ると、[Simulate inertia effect]オプションをオフにした場合は、Autodesk Moldflow Insight 2011 のレベル セット法の方が VOF 法よりも、解析速度が 10% 以上速いことが分かります。Autodesk Moldflow Insight 2011 は CPU 負荷の高い機能(新機能のヒケやウェルド ラインの計算など)が追加されたにも関わらず、全体的な処理速度が向上しています。しかし、図 3 の対称モデルの例では、[Simulate inertia effect]オプションをオンにした場合の Autodesk Moldflow Insight 2011 の処理速度はオフのときと比べ、3 倍も遅くなっています。このことから、Autodesk Moldflow Insight 2011 は慣性シミュレーションをオンにすると、旧バージョンと比べて解析速度が大きく低下することが分かります。ただし、特にジェッティングの予測に関しては、2011 の方がはるかに正確な結果が得られます(図 2)。

表 1. 円筒型モデルと対称モデルの処理時間(慣性シミュレーションをオンにした場合とオフにした場合)

	Autodesk Moldflow Insight 2010, Release 2 Autodesk Moldflow Insight 2010, Release 2	Autodesk Moldflow Insight 2011 Autodesk Moldflow Insight 2011
円筒型パーツ(慣性オン)	6281.96 秒 *	1296.94 秒
円筒型パーツ(慣性オフ)	228.1 秒	339.3 秒
対称パーツ(慣性オン)	634.38 秒	1667.63 秒
対称パーツ(慣性オフ)	595.84 秒	526.25 秒

*フロー フロントの正しい解析結果が得られていません。異例な結果例です。

まとめ

Autodesk Moldflow Insight 2011 では、Autodesk Moldflow Insight および Autodesk Moldflow Adviser 製品に使用されている 3D 流体連成ソルバのジェッティング予測精度が向上したほか、解析結果のフロー フロントの対称性と滑らかさも向上しています。これは、レベル セット フロー フロント追跡アルゴリズムの採用によるものです。旧リリースでは、レベル セット フロー フロント追跡アルゴリズムではなく、VOF フロー フロント追跡アルゴリズムが使用されていました。また、[Simulate inertia effect]オプションをオンにした場合も、レベル セット法の方がはるかに解析精度が高くなります(ただし、解析時間は長くなります)。

参考資料

1. Adalsteinsson, D., and Sethian, J. A., A fast level set method for propagating interfaces, *Jour. Comp. Phys.*, Vol. 118, pp. 269-277, 1995.
2. Osher, S., and Sethian, J. A., Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulation, *Jour. Comp. Phys.*, Vol 79, pp. 12-49, 1988.

改訂日: 2011 年 7 月 1 日

この出版物のすべて、または本書の一部は、Autodesk, Inc. 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

Autodesk Inc. はこの出版物および出版物に含まれる情報を「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の適合性に関する默示的保証を含む(ただしこれに限定されない)、一切の明示的または默示的保証を行わないものとします。

© 2011 Autodesk, Inc. All rights reserved.