

3D 反りにおける大変形解析: 検証 レポート

Autodesk Moldflow Insight 2011 では、ポリマー射出成形コンポーネントの 3D 反り解析で使用出来たのは、微小変形解析機能だけでした。単純な線形解析は、ほとんどの反り解析には充分ですが、特殊な解析の場合は、誤った反り予測につながる可能性があります。

Autodesk Moldflow Insight 2012 では、3D 反りソリューションを拡張して大変形効果も考慮できるようになりました。大変形解析オプションを使用すると、以下のような特殊な解析において、より正確な反り予測が行われます。

1. 金型内残留応力下で成形品が座屈し、座屈後の形状予測が必要な場合
2. 微小変形解析による反り予測が大きく、無視できない場合

目次

はじめに	3
3D 反りにおける幾何学的非線形性	3
大変形解析用のグラフィカル ユーザ インタフェースのデザイン	5
解析例	5
まとめ	6

はじめに

ポリマー射出成形解析は、プラスチック成形品とそれに付随する射出成形金型の詳細な検証と最適化を提供するためのツールとして、業界で幅広く使用されています。正確な反り予測は、反りが発生する位置を識別して、成形品および金型の設計、材料の選択、およびプロセスのパラメータを最適化して、部品の変形をコントロールできます。

3D 充填保圧、冷却および反り解析の組合せには、従来のシェル ソリューションに勝るいくつかの利点があります。ソリッドモデルで直接シミュレーションでできるだけでなく、充填・保圧解析における Hele-Shaw 近似、反り解析における Kirchhoff 近似や Mindlin 近似を使用せずに済みます。さらに、複雑な射出オーバーモールドイングでは、3D 解析が唯一の実行可能なソリューションである場合があります。しかしその一方、肉厚方向における速度と温度の高い勾配変化の考慮と要素の最大アスペクト比の制限によって、多くの要素が必要となります。その結果、多くの計算時間と計算リソースが必要となる場合があります。

Autodesk Moldflow Insight 2011 では、3D 反り予測には単純な線形解析(変形が金型内残留応力または初期ひずみに正比例)のみが使用されていました。これは、射出成形コンポーネントのほとんどの反り解析には適していますが、線形解析が適さない場合が 2 つあります。1 つは、金型内残留応力でパーツが座屈し、座屈後の応答が必要な場合です。もう 1 つは、コンポーネントの変位と回転が、通常の解析における構成則での応力とひずみの計算において無視できなくなるくらい大きい場合です。どちらの場合も、反り解析には幾何学的非線形性を考慮する必要があります。Autodesk Moldflow Insight 2012 では、大変形反り解析の増分初期応力/ひずみ法を組み込みました。このレポートでは 2 つの典型的な大変形反り解析の結果を示しています。

3D 反りにおける幾何学的非線形性

射出成形部品は、固化進展中にキャビティ内部に型内残留応力が蓄積されていきます。型内拘束の影響により、残留応力の分布は、圧力と温度の変化とこれらの変化による固化層進展によって決定づけられます。いったん成形品が突き出されて金型から外れると、これらの残留応力は、静的平衡状態に達するまで、収縮変形の形で再分布されます。反りは、成形品の各部における収縮の違いによって発生します。いくつかの収縮モデルが、反り解析において明らかになっています。Autodesk Moldflow Insight の 3D 解析では現在、初期ひずみを構造解析に入力する、一般的な収縮モデルが使用されています。

幾何学的非線形性効果に対応するために、Total Lagrangian formulationが採用されています。ここでは Green-Lagrange ひずみテンソル ${}^t\epsilon_{ij}$ と第 2 Piola-Kirchhoff 応力テンソル ${}^tS_{ij}$ が使用されます。解析スキームの 0 時点での初期構成ではすべての変数が参照されるため、増分初期ひずみまたは応力が自動的に実装されます。

次の平衡方程式は、イテレーション $k=1,2,3,\dots$ において、 $t + \Delta t$ の時点で反復的に解決されます。::

$$\int_V C_{ijrs} \Delta e_{rs}^{(k)} \delta \Delta e_{ij}^{(k-1)} dV + \int_V {}^{t+\Delta t} S_{ij}^{(k-1)} \delta \Delta \eta_{ij}^{(k)} dV =$$

$$- \int_V {}^{t+\Delta t} S_{ij}^{(k-1)} \delta \Delta e_{ij}^{(k-1)} dV + \int_V C_{ijrs} \Delta e_{rs}^{ini(k)} \delta \Delta e_{ij}^{(k-1)} dV$$

C_{ijrs} は、応力-ひずみテンソルです。繊維充填ポリマーについては、その値は繊維配向シミュレーションからの流動影響繊維配向の結果と、ポリマーマトリクスと繊維の機械特性を使用して決定することができます。 $\Delta e_{ij}^{(k)}$ と $\Delta \eta_{ij}^{(k)}$ は、イテレーション k の線形/非線形増分ひずみテンソルです。 $\delta \Delta e_{ij}^{(k)}$ と $\delta \Delta \eta_{ij}^{(k)}$ は、仮想増分変位に対応する線形/非線形増分ひずみテンソルです。 $\Delta e_{rs}^{ini(k)}$ は、イテレーション k の増分初期ひずみテンソルです。 ${}^{t+\Delta t} S_{ij}^{(k-1)}$ は、 $t + \Delta t$ 時のイテレーション $(k-1)$ 後の第 2 Piola-Kirchhoff 応力テンソルです。

従来の一定ステップ長の荷重増分アルゴリズムでは、スナップスルーやスナップバックなどの複雑な非線形構造応答の追跡が困難でした。そのため、いくつかの効果的な可変ステップ長の増分反復アルゴリズムとこれ

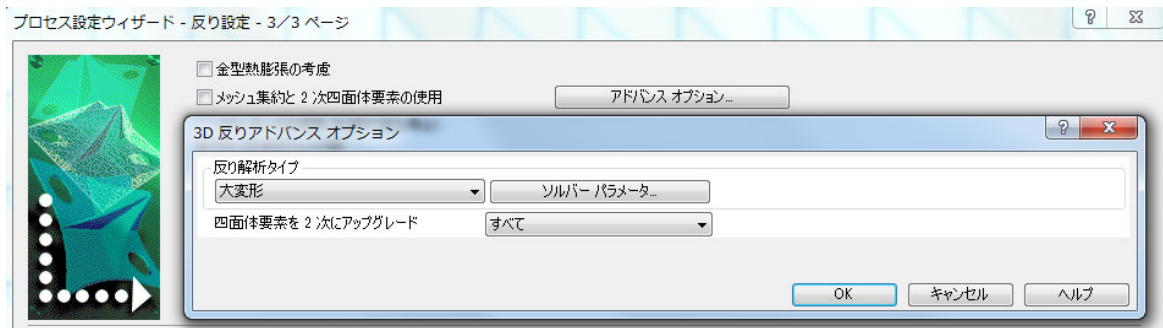
らのアルゴリズムの自動切り替えを実装しました。これには、単一変位制御法と弧長制御法が含まれます。各増分内の初期荷重ステップ長の自動計算のための、効率的なアプローチも採用されています。

3D 充填解析に 4 ノード 1 次四面体要素が使用されていますが、薄肉射出成形品に対して信頼性の高い反り解析の結果を得るためには、要素を 2 次要素にする必要があります。要素あたりのノード数は 4 から 10 に増えるだけで、3D メッシュ内のノードの合計数は約 6 倍に増えます。たとえば、100 万の 10 ノード四面体要素を持つモデルには、140 万超のノードが含まれます。つまり、数式の中には約 420 万の解決すべき未知の要素があることになります。これには(特に反り解析に幾何学的非線形性が含まれる場合には)過剰なメモリ要件と計算時間が必要となります。これに対処するため、非常に高速で堅牢な並列化された代数的マルチグリッド前処理付き CG(AMG-CG)ソルバが使用されています。この収束率はメッシュ密度にはあまり関係ありません。このソルバはエラーベクトルの低周波コンポーネントを効率的に除去するために設計されており、システムマトリクスが非常に悪い状態でマトリクスのサイズが巨大な場合でも、比較的小さなメモリ要件で一次方程式の解をすばやく取得することができます。利用可能な計算能力の急増と、高速な AMG-CG 方程式ソルバにより、非線形 3D 反り解析が現実的なオプションになりました。

また、構造ソルバの再構成も行われ、Autodesk Moldflow Insight 2012 での 3D 反りモデルサイズの制限が大幅に増加しています。Autodesk Moldflow Insight 2011 では、既定値のメッシュ集約化オプションを使用した、3D 反りモデルのサイズ制限は約 500 万四面体要素でした。プログラムが改善された Autodesk Moldflow Insight 2012 では、モデルのサイズ制限は約 1,600 万四面体要素に増えています。

大変形解析用のグラフィカル ユーザ インタフェースのデザイン

Autodesk Moldflow Insight 2012では、メッシュ集約化オプションを使用しない 3D 反り解析に、大変形解析が利用できます。最新のグラフィカル ユーザ インタフェース(GUI)フレームワークの制限により、プロセス設定ウィザードの [反り設定] ページで [メッシュ集約化と 2 次四面体要素の使用] オプションが選択されていない場合に、[3D 反りアドバンス オプション] ダイアログ内に [大変形] オプションが表示されます。



[ソルバ パラメータ] ダイアログには、多くの選択肢があります。非線形反り応答を追跡するのであれば、通常は既定値の設定で十分です。ただし、一部の特殊な解析では、収束の問題を克服するために特殊な荷重増分制御オプションを使用する必要があります。

解析例

当社では、開発の初期段階で、さまざまな荷重下におけるビーム、平板、シエルの大変形解析を含めた、複数の大変形応力解析のベンチマーク テストを行いました。しかし、これらの解析に使用されたのは、研究用の特別なソフトウェアです。製品版の Autodesk Moldflow Insight 2012には、これらの 3D 応力解析を行う機能はないため、その結果はこのレポートには含まれていません。ここでは 2 つの 3D 反り解析検証結果を提示します。最初の検証は、当社の社内ラボで成形された実験結果がありますが、2 つ目の検証にはありません。

最初のモデルを図 1 に、成形条件を表 1 に示します。これは 0.80 mm の平均的な肉厚の薄肉部品です。均一な肉厚のジオメトリであるため、中立面メッシュモデルが最適であると考えられますが、当社のソリューションを実証するために 3D メッシュモデルを使用して解析しています。充填保圧解析では、169,017 の 4 ノード四面体要素が使用され、すべての要素が反り解析のために 10 ノード四面体要素にアップグレードされています。充填保圧解析および反り解析で使用されたノードの数は、それぞれ 31,047 と 236,421 です。このモデルに対し、Core i7 3.30 GHz を搭載した PC で充填・保圧解析を行うと、6 分で解析が終了しました。微小変形反り解析には 4 分かかり、大変形反り解析には約 100 分かかりました。

これは、正確な反り予測を得るために大変形解析の使用が欠かせない、典型的な座屈現象の例です。図 2 は、実験結果を示しています。図 3 は、微小変形解析を使用して、予測される反り形状を示していますが、成形品の変形が誤って低く予測されています。図 4 は、大変形解析の結果です。型内残留応力により薄いトレイに座屈が発生すると、大きな座屈変形が発生します。反り解析結果の値は、図 2 の実成形品の変形量よりもごくわずかに小さいですが、変形形状は、ほぼ一致しています。大変形反り解析に 1 次四面体要素を使用した場合、せん断ロッキングが反りソリューションを完全に破壊し、変形予測が極端に小さくなり、座屈の予測ができません。

2 つ目の例は、正確な 3D 反り予測のために大変形解析が必要な別の状況を説明するものです。これは金型に金属がインサートされた 2 ショット オーバーモールドイングです。このモデルを図 5 に示します。成形品の高さは 20 mm で、ベース直径は 100 mm です。2 つ目のコンポーネントの厚みは 3 mm です。処理条件を表 2 に一覧表示します。

この複雑なインサートおよび 2 ショット オーバーモールドイング解析では、3D メッシュモデルが唯一の実行可能なソリューションです。このモデルには 107,980 の四面体要素が使用されています。微小変形解析と 10 ノード四面体要素を使用した予測される反り結果を図 6 に示します。この解析では、第 2 コンポーネントの厚

みよりも大きい、大きな変形(3.689 mm)が予測されるため、大変形解析を実行して、幾何学的非線形性効果に対処する必要があります。

大変形解析と 10 ノード四面体要素を使用した予測される反り結果を図 7 に示します。図 6 と比較すると、微小解析を使用した場合の半分以下になっています。図 8 は微小解析で 4 ノード四面体要素を使用した反り結果を示しています。変形の最大値は、10 ノード四面体要素を使用した微小解析よりも 16 % 小さくなります。

まとめ

Moldflow Insight 2012 では、射出成形コンポーネントの 3D 反り解析が拡張され、幾何学的非線形性に対処できるようになりました。ほとんどの反り解析には線形弾性解析で十分ですが、次の 2 つの特殊な解析で正確な反り予測を行うには、大変形解析が必要です。(1)金型内残留応力下で成形品が座屈し、座屈後の変形予測が必要な場合、そして(2)微小解析による反り予測が大きく、顕著な場合です。

表 1. Moldflow トレイ モデルの成形条件

材料タイプ	Moplen EP301K(KMT6100)、Basell Australia
金型温度	40.0 °C
溶解温度	220.0 °C
流量	32.3 cm ³ /s
保圧プロファイル	30 Mpa、5 秒間
合計冷却時間	24 .5 秒

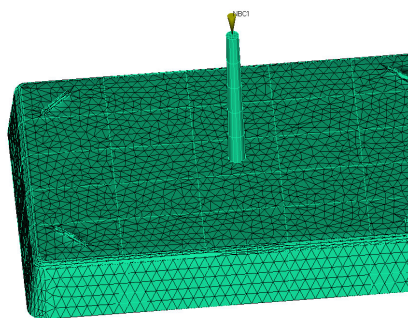


図 1. トレイ モデル

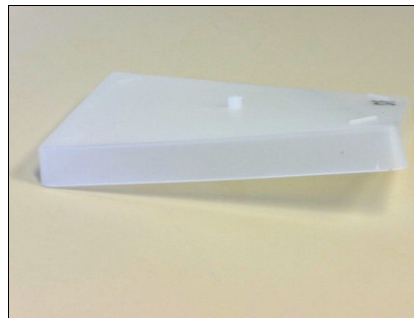


図 2. トレイ モデルの実験結果

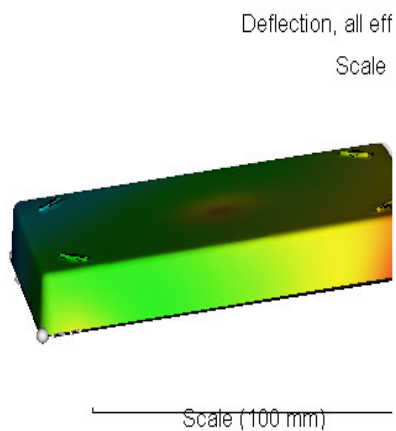


図 3. 微小変形解析の結果

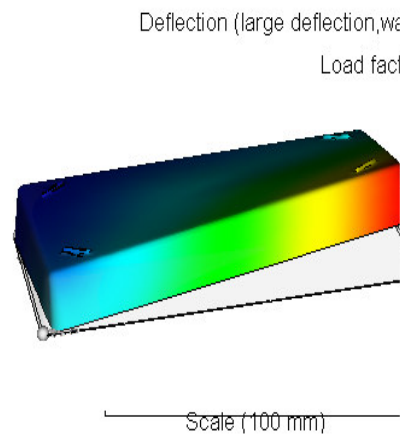


図 4. 大変形解析の結果

表 2.2 ショット オーバーモールディング モデルの成形条件

材料タイプ (1 ショット)	PIX05、BIP-PF
材料タイプ (2 ショット)	Hyflon P450、Solvay Solexis
射出時間 (1 ショット)	1.0 秒
射出時間 (2 ショット)	0.89 秒
保圧時間 (1 ショット)	80% 充填圧力、10 秒間
保圧プロファイル (2 ショット)	80% 充填圧力、10 秒間
冷却時間 (1 ショット)	20.0 秒
冷却時間 (2 ショット)	20.0 秒

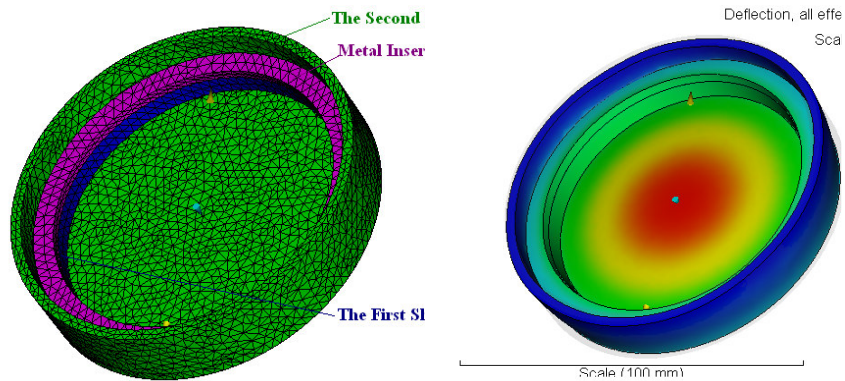


図 5.2 ショット オーバーモールディング モデル 図 6.微小変形解析の結果

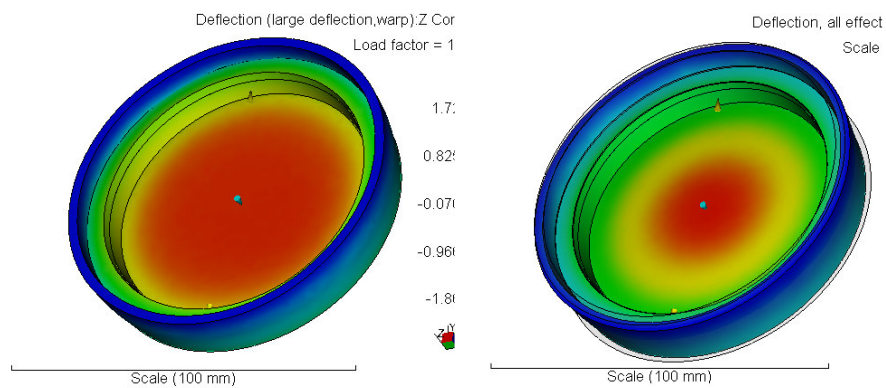


図 7. 大変形解析の結果

図 8.4 ノード要素を使用した反り結果

Autodesk、Moldflow は、米国および / またはその他の国々における、Autodesk, Inc.、その子会社、関連会社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。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。

© 2011 Autodesk, Inc. All rights reserved.

Autodesk®