

---

# HyperBlow(Ver.7.0.0)改良成果報告書

2021/10/30

株式会社HASL

# 改良成果

- 1) パリソン形成過程解析機能の新規実装  
(押出ブロー成形におけるパリソン形成・膨張工程の一貫解析機能  
& パリソンコントローラの最適制御条件の近似的予測機能)
- 2) 輻射加熱解析機能の新規実装  
(コールドパリソン法, 熱成形輻射加熱工程への対応)
- 3) すべり解析機能の改良
- 4) アニメーション動画ファイルの作成機能

## 1) パリソン形成過程解析機能の新規実装 (押出ブロー成形におけるパリソン形成・膨張工程の一貫解析機能)

押出ブロー成形は、熔融樹脂をダイから非定常的に押出してパリソンを形成する工程とパリソンを金型内で拘束膨張させる工程より構成されます。簡易的な計算モデルを採用することで、パリソンの形成状態を容易な運用の下、短時間で予測する解析機能をHyperBlowに実装し、押出ブロー成形工程の一貫解析への適用性を向上させます。

## パリソン形成工程の定量化モデル

溶融樹脂の非定常的な押出工程を定量化する際に計算時間の短縮と運用の容易さを追求し、従来より提案されている簡易的な解析法<sup>1),2),3)</sup>を採用します。当簡易解析法では、図1に示す様にパリソンを複数のモデルセグメントに細分化して取り扱います。

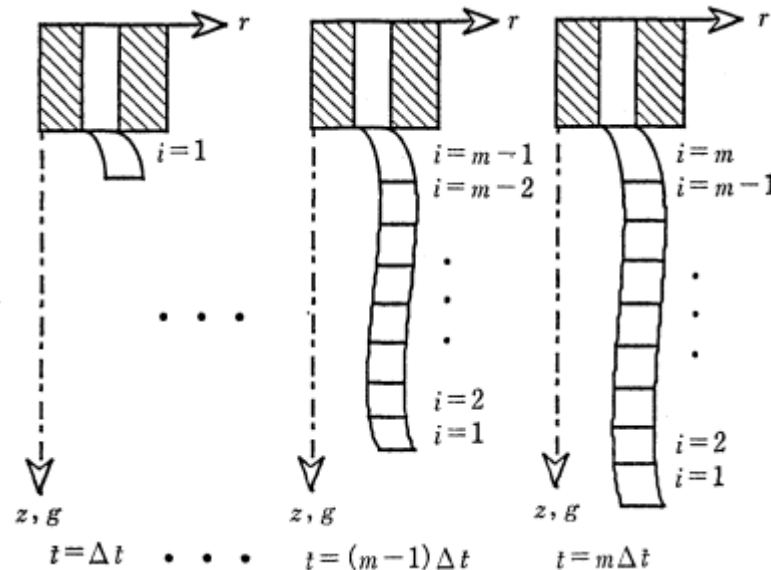


図1 パリソン非定常押出工程を表現するモデルセグメント

参考文献 1) Ajroldi, G.: Polym. Eng. Sci., 18, 742 (1978)

2) Tanoue, S., Kuwano, Y., Kajiwara, T., Funatsu, K., Terada, K., and Yamabe., M.: Polym. Eng. Sci., 35, 1546 (1995)

3) 谷藤眞一郎, 滝本淳一, 小山清人, 成形加工, 8(9),590(1996)

非定常押出工程において、モデルセグメントは、重力による垂れ(ドローダウン)と弾性回復(スウェル)の影響を受けて変形します。ドローダウンはセグメント長を長くする向きに作用するのに対し、スウェルは、逆に短くする向きに作用するため、これらの現象は、セグメントの変形に競合して影響します。これらの競合効果を簡易的に表現するために以下に示す仮定を採用します。

仮定 1 : ドローダウンとスウェルによる個別の伸長ひずみを線形的に重ね合わせることにより、モデルセグメント形状を評価可能。

仮定 2 : モデルセグメントのドローダウンによる変形は一軸伸長変形としてモデル化可能。

セグメント  $i$  のドローダウンによる長さを  $l_{ig}$ 、スウェルによる長さを  $l_{is}$  とすると、仮定1に従い、実際のセグメント長  $l_i$  は、以下に示す様に評価されます。

仮定1: 
$$\varepsilon_i(t_i) = \varepsilon_{is}(t_i) + \varepsilon_{ig}(t_i) \quad (1)$$

伸長ひずみ定義式 
$$\varepsilon_i(t_i) = \ln \frac{l_i(t_i)}{l_i(0)}, \varepsilon_{is}(t_i) = \ln \frac{l_{is}(t_i)}{l_i(0)}, \varepsilon_{ig}(t_i) = \ln \frac{l_{ig}(t_i)}{l_i(0)} \quad (2)$$

(1),(2)式より, 
$$l_i(t_i) = \frac{l_{is}(t_i)l_{ig}(t_i)}{l_i(0)} \quad (3)$$

ここで,  $l_i(0)$ は, モデルセグメント長の初期値,  $t_i$ は押出後の経過時間を表し, 計算時間刻みを $\Delta t$ , 押出開始からの経過時間を $m\Delta t$ とすると,

$$t_i = (m - i + 1)\Delta t \quad \text{for } i = 1 \sim m \quad (4)$$

と表されます.

仮定2に従って, ドルーダウンによる変形勾配テンソルは, 次式で表されます.

$$D_{ig} = \begin{pmatrix} \frac{1}{l_{ig}} \frac{dl_{ig}}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{h_{ig}} \frac{dh_{ig}}{dt} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{r_{ig}} \frac{dr_{ig}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_{ig} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\dot{\epsilon}_{ig}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\dot{\epsilon}_{ig}}{2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

ニュートンの粘性法則:

$$\sigma_i = 2\eta_i D_{ig} - p_i \delta \quad (6)$$

に従って、半径方向及び周方向に応力が作用していないことを考慮すると

$$2\eta_i \frac{1}{h_{ig}} \frac{dh_{ig}}{dt} - p_i = 0, 2\eta_i \frac{1}{r_{ig}} \frac{dr_{ig}}{dt} - p_i = 0 \quad (7)$$

の関係が得られます。また、軸方向(重力方向)の応力の釣り合い式は、

$$S_{ig} \left( 2\eta_i \frac{1}{l_{ig}} \frac{dl_{ig}}{dt} - p_i \right) = \sum_{l=1}^{i-1} \rho V_l g \quad (8)$$

と表されます。ここで、 $\eta_i, S_{ig}, h_{ig}, r_{ig}$  はセグメントの粘度、断面積、肉厚及び半径です。また、セグメント $l$ の体積 $V_l$ は、押出流量 $Q$ が一定の場合、

$$V_l = Q\Delta t = S_{lg} l_{lg} \quad (9)$$

と表され、セグメント番号 $l$ に依存せず、一定となります。

(5),(7),(8),(9)からドルーダウンによる伸長ひずみ速度に対して以下に示す応力釣り合い式が求められます。

$$3\eta_i \frac{1}{l_{ig}} \frac{dl_{ig}}{dt} = (i-1)\rho gl_{ig} \quad (10)$$

一方、径及び肉厚スウェルは、次式で表されます。

$$\begin{cases} \chi_r(t) = \frac{r(t)}{R_d} = 1 + (\chi_{r\infty} - 1) \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\zeta_r}\right) \right) \\ \chi_h(t) = \frac{h(t)}{H_d} = 1 + (\chi_{h\infty} - 1) \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\zeta_h}\right) \right) \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 $R_d$ はダイ流出半径(外半径)、 $H_d$ はダイ流出肉厚です。

(11)式とセグメント*i*の体積保存則より、

$$l_i(0)\pi(R_d^2 - (R_d - H_d)^2) = l_{is}(t_i)\pi(r_{is}(t_i)^2 - (r_{is}(t_i) - h_{is}(t_i))^2) \quad (12)$$

が成立します。ここで、 $r_{is}$ 、 $h_{is}$ はセグメント*i*のスウェルによって変化する半径と肉厚を表します。



(3),(11),(12)式より, セグメント*i*の長さ*l<sub>i</sub>*は, ドルダウン長とスウェルパラメータ及びダイ形状パラメータを利用して次式で表されます.

$$l_i(t_i) = \frac{(2R_d - H_d)}{(2R_d\chi_r(t_i) - H_d\chi_h(t_i))\chi_h(t_i)} l_{ig}(t_i) \quad (13)$$

再び, 仮定1により, セグメント*i*の半径*r<sub>i</sub>*と肉厚*h<sub>i</sub>*は, 次式で表されます.

$$r_i(t_i) = \frac{r_{is}(t_i)r_{ig}(t_i)}{r_i(0)}, h_i(t_i) = \frac{h_{is}(t_i)h_{ig}(t_i)}{h_i(0)} \quad (14)$$

また, 仮定2により,

$$\frac{r_{ig}(t_i)}{r_i(0)} = \sqrt{\frac{l_{ig}(0)}{l_{ig}(t_i)}}, \frac{h_{ig}(t_i)}{h_i(0)} = \sqrt{\frac{l_{ig}(0)}{l_{ig}(t_i)}} \quad (15)$$

が成立します.

(11),(14),(15)式より, セグメント*i*の半径*r<sub>i</sub>*と肉厚*h<sub>i</sub>*が, 以下に示す様に求められます.

$$r_i(t_i) = \chi_r(t_i)R_d \sqrt{\frac{l_i(0)}{l_{ig}(t_i)}}, h_i(t_i) = \chi_h(t_i)h_d \sqrt{\frac{l_i(0)}{l_{ig}(t_i)}} \quad (16)$$

材料物性としては、パリソン膨張工程の解析でも利用しているG'Sell Jonas 粘塑性モデルを採用します。当材料モデルでは、伸長応力 $\sigma$ が、伸長ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と伸長ひずみ $\epsilon$ 、及び温度 $T$ に依存し、

$$\sigma = A \exp(-b(T - T_{ref})) [1 - \exp(-w\epsilon)] \exp(h\epsilon^2) \dot{\epsilon}^m \quad (17)$$

と表されます。

以下に示すテスト解析では、基準温度 $T_{ref}: 200^\circ\text{C}$ のHDPEの一軸伸長変形に対して決定した下記モデルパラメータを採用します。

表1 G'Sell Jonasモデルパラメータ(HDPE:200°C)

A [kPa·s <sup>m</sup> ]	130.0
B [1/K]	0.04
w [-]	1.5
h [-]	0.15
m [-]	0.4

図2に表1に示したモデルパラメータとG'Sell Jonas モデルを利用して評価される様々な伸長速度状態における一軸伸長応力の伸長率依存性を示します。

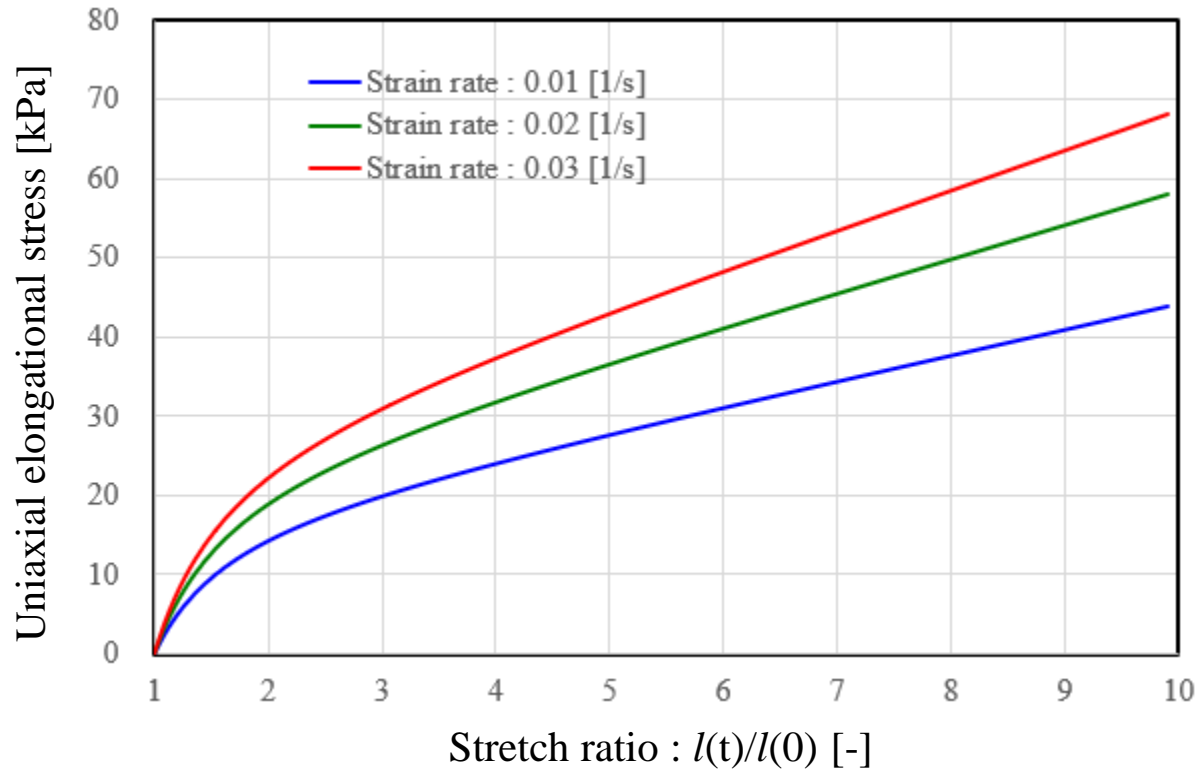


図2 一軸伸長応力の伸長率依存性(HDPE,190°C)

解析条件として必要になるスウェルパラメータは、粘弾性解析結果を利用して算出する方法が提案されていますが、非定常粘弾性流体解析の難度は高く、定常粘弾性流動解析結果を利用した解析法が提案されています<sup>2),3)</sup>。しかし、定常粘弾性流体解析に簡略化しても粘弾性に関わる材料物性を収集するためのコストが高いことや適切な粘弾性構成方程式を選定して材料物性をモデリングする作業に専門性が要求されることは否めません。また、選定する粘弾性構成方程式によっては特異性があり、実成形条件を考慮して解が得られないことが度々あります。新規実装した一貫解析機能を簡便に運用するには、手間と時間を要する粘弾性流動解析を避け、パリソン押出の試作段階で収集する情報を有効活用することを提案します。押出ブロー成形におけるパリソン形成過程は、ブラックボックス内の成形現象では無く、ビデオ撮影などで容易に視覚化可能です。パリソン先端形状は、ドロウダウンの影響を受けないため、径スウェルや肉厚スウェルの平衡値は、パリソンの先端形状の実測情報から推定可能です。また、各スウェル比の時定数は、パリソン長さの時間依存性を良好にフィットすることで推定可能です。パリソン形成の解析に要する計算時間は短く数十秒程度です。実測値のモデルフィットの際のケーススタディは容易に遂行可能です。テスト解析では、以下に示すスウェルパラメータを採用しました。

表2 スウェルパラメータ一覧

$\chi_{r0}$ [-]	1.0
$\chi_{r\infty}$ [-]	1.5
$\zeta_r$ [s]	3.0
$\chi_{h0}$ [-]	1.0
$\chi_{h\infty}$ [-]	1.5
$\zeta_h$ [s]	3.0

HyperblowのCalculation Control Formの解析種別1パネル内に従来の標準的なブロー熱成形解析とパリソン形成解析を切り替えるラジオボタンを設けました。パリソン形成過程を解析する場合には、後者のラジオボタンをONとします。その際に表示されるパリソン形成過程解析条件設定ボタンを押して表示されるフォーム内で、パリソン形成解析に関する入力情報を設定します。最大計算サイクル数の非定常解析を一定時間刻みで実行します。この設定例では、 $200 \times 0.05 = 10$  sの非定常シミュレーションを遂行します。パリソンはZ方向に押出される設定になっています。ドロウダウンを考慮するには、重力パラメータパネル内のGzに単位[m/s<sup>2</sup>]で重力加速度を設定します。

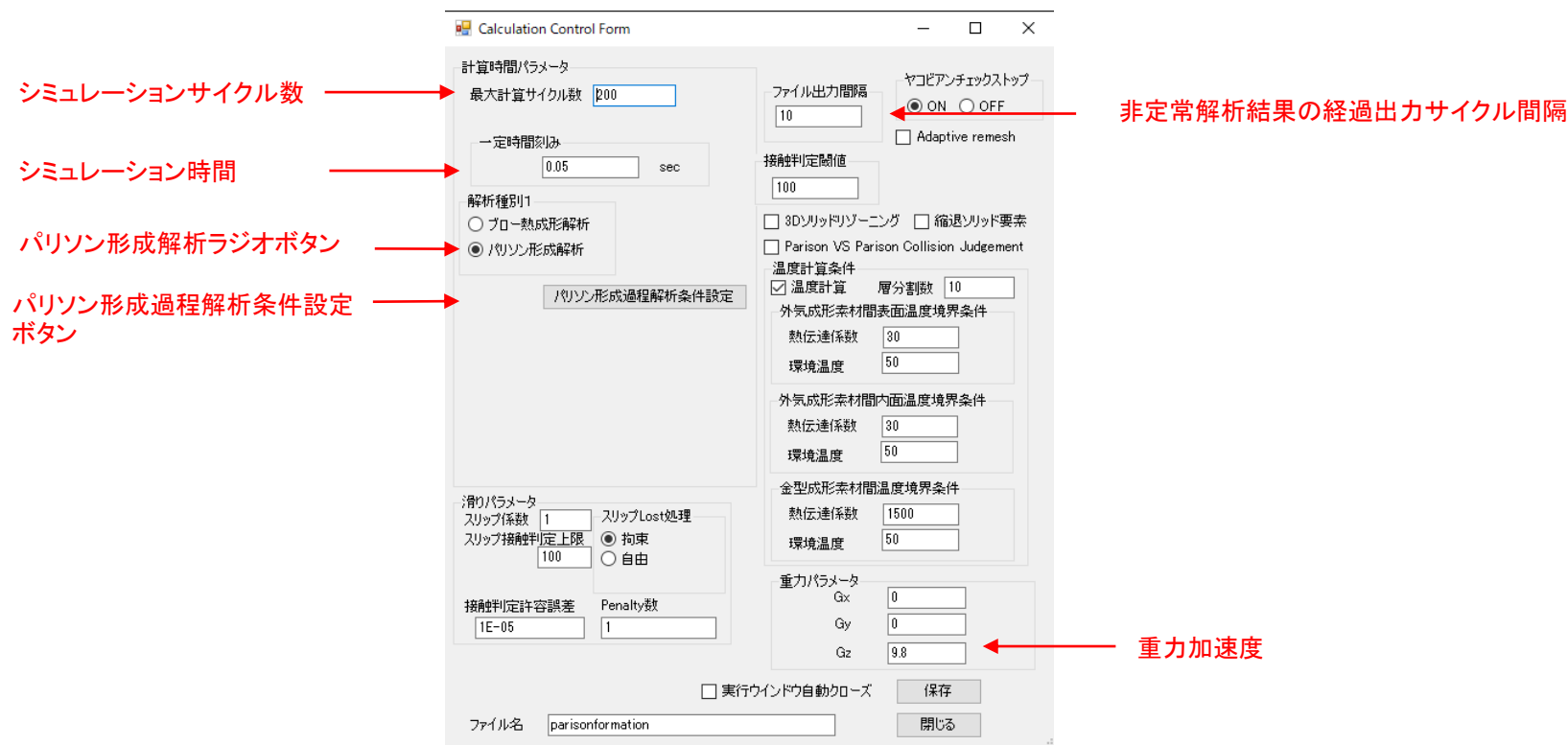


図3 新規実装されたパリソン形成解析用ラジオボタン

パリソン形成過程解析条件設定ボタンを押して表示されるフォームを下図に示します。当フォーム内で1) ダイ流出半径Rd, 2) ダイ流出流路肉厚(クリアランス)Hd, 3) 押出量, 4) ダイ流出温度, 5) セグメント追加サイクル数, 6) 周方向分割数, 7) 各種スウェルパラメータを指定します。ダイ流出流路肉厚は、パリソンコントローラを考慮する場合は、可変扱いになります。一方、他のパラメータは一定の設定になります。セグメント追加サイクル数は、非定常計算サイクル内で軸(z)方向に追加されるモデルセグメントの数に相当します。この設定例では、200計算サイクル(10 s)のシミュレーション時間内において、1~100サイクルの非定常計算サイクル毎に1個のセグメントが順次追加されます。すなわち、0~5 sの押出時間内にパリソンが形成され、押出終了後の5~10 sでは、パリソンがドロウダウンとスウェルの影響を受けて変形します。解析結果として、要素数: 軸方向分割数(セグメント追加サイクル数)×周方向分割数の軸対称パリソン解析モデルが作成されます。この情報を次工程のブロー成形解析に利用することで一貫解析に対応しています。

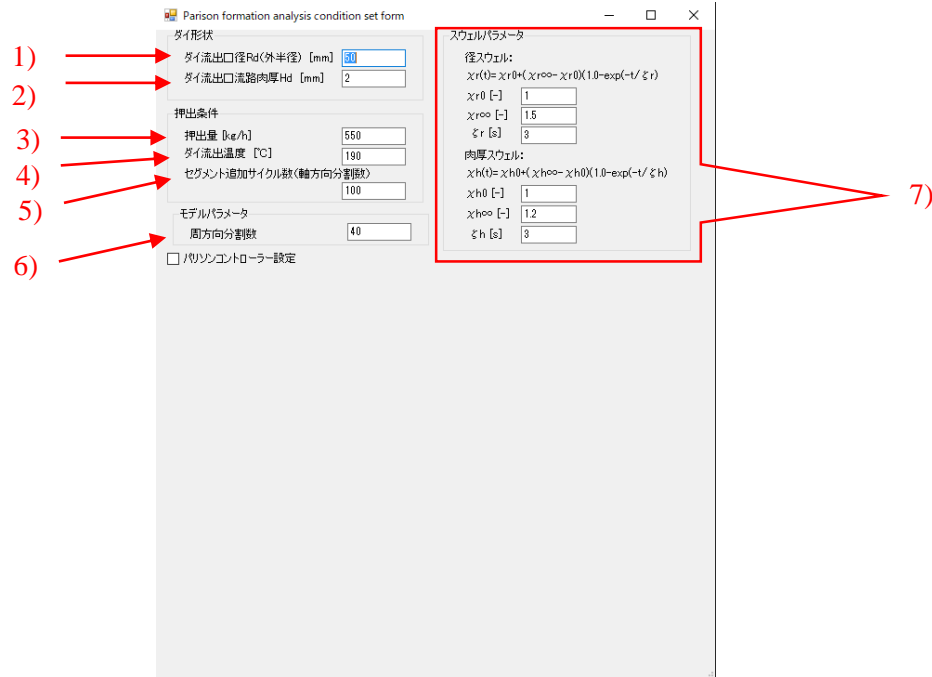


図4 新規実装されたParison formation analysis set form

パリソン形成解析では、ブロー成形解析で必要になる成形素材、金型メッシュ及び成形条件ファイルの設定は不要です。物性ファイルには、表1に示したG'Sell Jonasモデルパラメータが設定されています。以下にパリソン形成のテスト解析で利用したプロジェクトファイルの内容を示します。

The screenshot shows the 'Solver Control Form' window with the 'Job管理' (Job Management) tab selected. The interface includes the following fields and buttons:

- パス名 (Path):** C:\2020プロジェクト\HyperBlow2019\Ver8test
- プロジェクト名 (Project Name):** parisonformation
- Job管理ファイル読み込み (Load Job Management File):** A button highlighted with a blue border.
- 入出力ファイル名 (Input/Output File Name):** parisonformation
- 計算コントロールファイル名 (Calculation Control File Name):** parisonformation
- 選択 (Select) / 読み込み (Load):** Buttons for the calculation control file.
- 新規作成 (New):** A button for creating a new calculation control file.
- パリソン形成・膨張一貫解析 (Parison Forming/Expansion Consistent Analysis):** An unchecked checkbox.
- 成形素材メッシュファイル名 (Forming Material Mesh File Name):** An empty text field.
- 選択 (Select) / 読み込み (Load):** Buttons for the mesh file.
- 金型メッシュファイル名 (Die Mesh File Name):** An empty text field.
- 選択 (Select) / 読み込み (Load):** Buttons for the die mesh file.
- 成形条件ファイル (Forming Condition File):** An empty text field.
- 選択 (Select) / 読み込み (Load):** Buttons for the forming condition file.
- 新規作成 (New):** A button for creating a new forming condition file.
- 物性ファイル名 (Material File Name):** Gsell200
- 選択 (Select) / 読み込み (Load):** Buttons for the material file.
- 新規作成 (New):** A button for creating a new material file.
- 解析結果ファイル名 (Analysis Result File Name):** parisonformation
- Job管理ファイル保存 (Save Job Management File):** A button.
- Jobリスト登録 (Register Job List):** A button at the bottom.

図5 パリソン形成のテスト解析で利用したプロジェクトファイル一覧

以下にこれらの条件を利用したパリソン形成過程の解析結果を示します。図6は、予測されたパリソン長さの時間依存性を表します。当情報は、解析結果ファイル名+拡張子(prstlengthvstime)という名称のファイルに出力されます。ドローダウンによる伸長を評価するために、ドローダウンを無視し、スウェル変形のみを考慮した予測結果を比較として示しています。両予測結果の差がドローダウンによる伸長を表します。また、押出終了(5 s)後のパリソン長さの縮小は、スウェルの緩和(径と肉厚の時間的な膨張)による計算セグメント長の縮小の影響を反映しています。スウェルの緩和時定数に比較して押出時間が短い高速押出の場合には、押出後、スウェルの緩和によってパリソン長さが経過時間とともに短くなる現象(Shrink back)が観測されます。



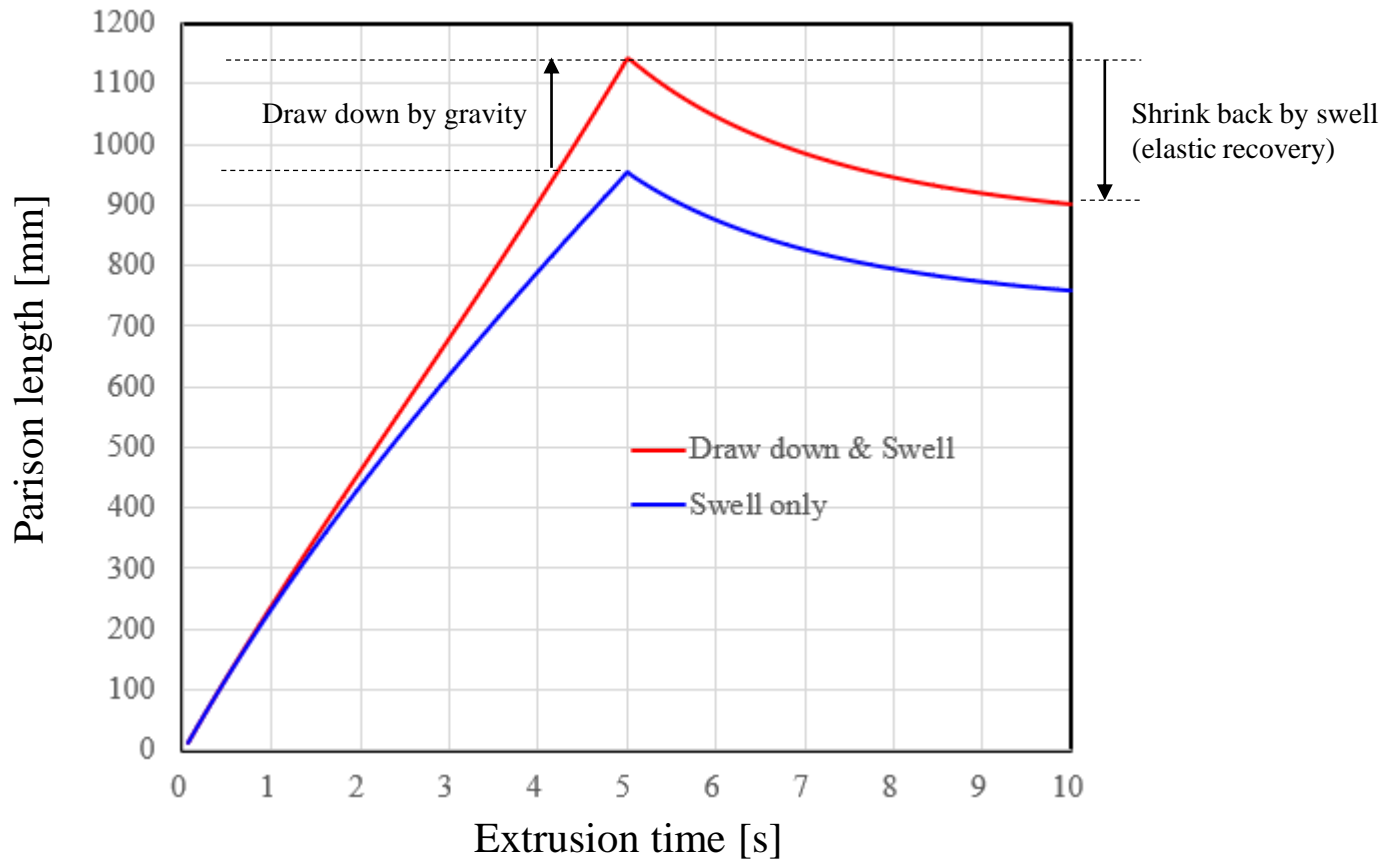


図6 パリソン長さの押出時間依存性

図7は、予測されたパリソン形状(半径)の時間依存性を表します。0~5 s の押出過程において、パリソン先端の先端半径は、ドローダウンの影響を受けないため、(11)式に示した径スウェルの時間依存性を表現する曲線に沿って移動します。上流側のパリソン半径が、このスウェル時間依存性を表現する曲線よりも縮小するのは、ドローダウンによる伸長の影響に依ります。5 s以降は、スウェルの緩和に伴って、パリソン長さが縮小するとともに半径が全体的に膨張する傾向が示されています。

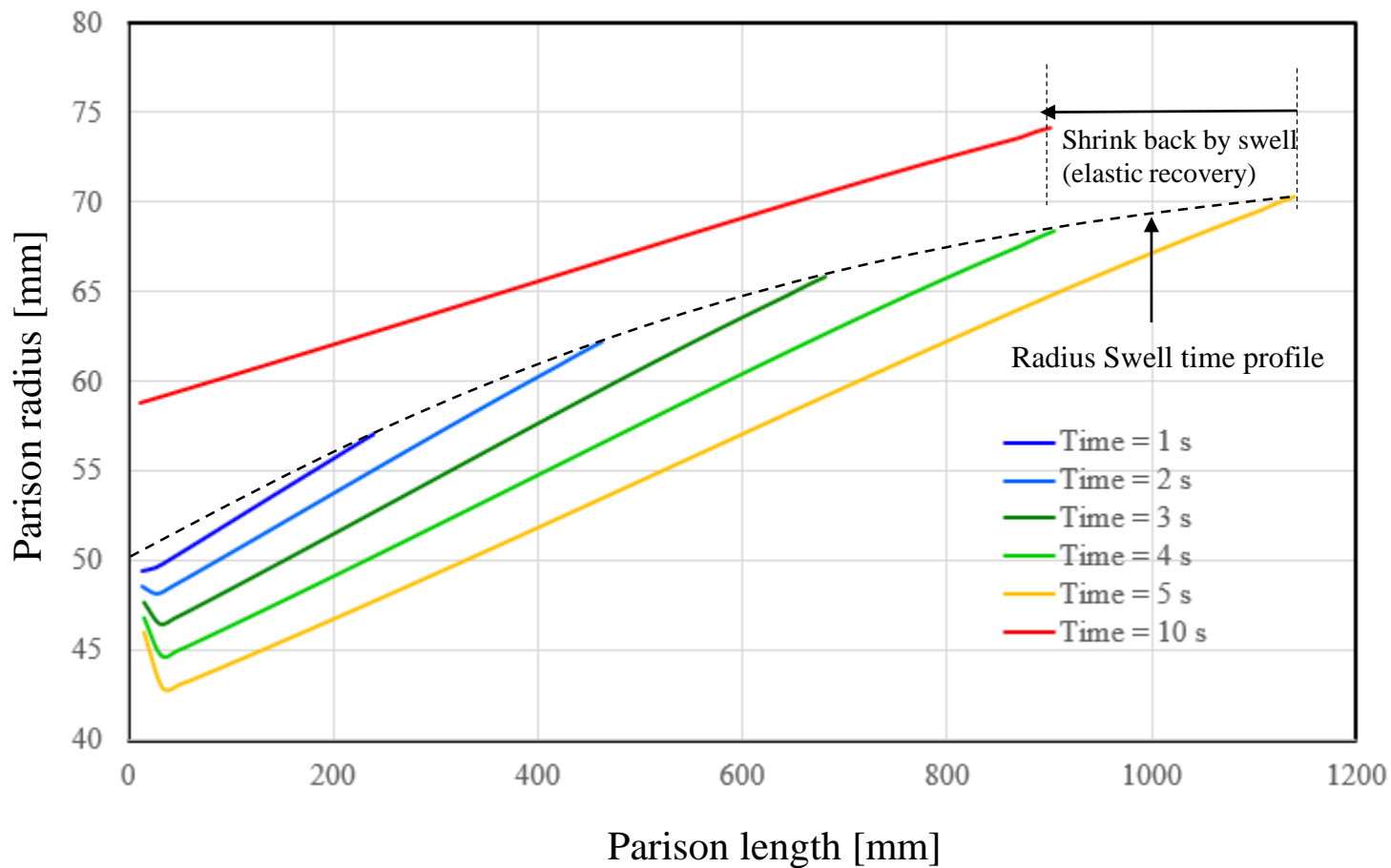


図7 パリソン半径の押出時間/パリソン長さ依存性

図8にパリソン形成解析の結果として出力される軸対称のパリソン押出形状と肉厚及び温度分布を示します。この出力ファイル名は、解析結果ファイル名+拡張子(prst)です。当解析結果をインポートする際には、標準的なブロー成形解析結果ファイル(拡張子brst)をファイルフィルターをプルダウン選択してprstに切り替えて下さい。

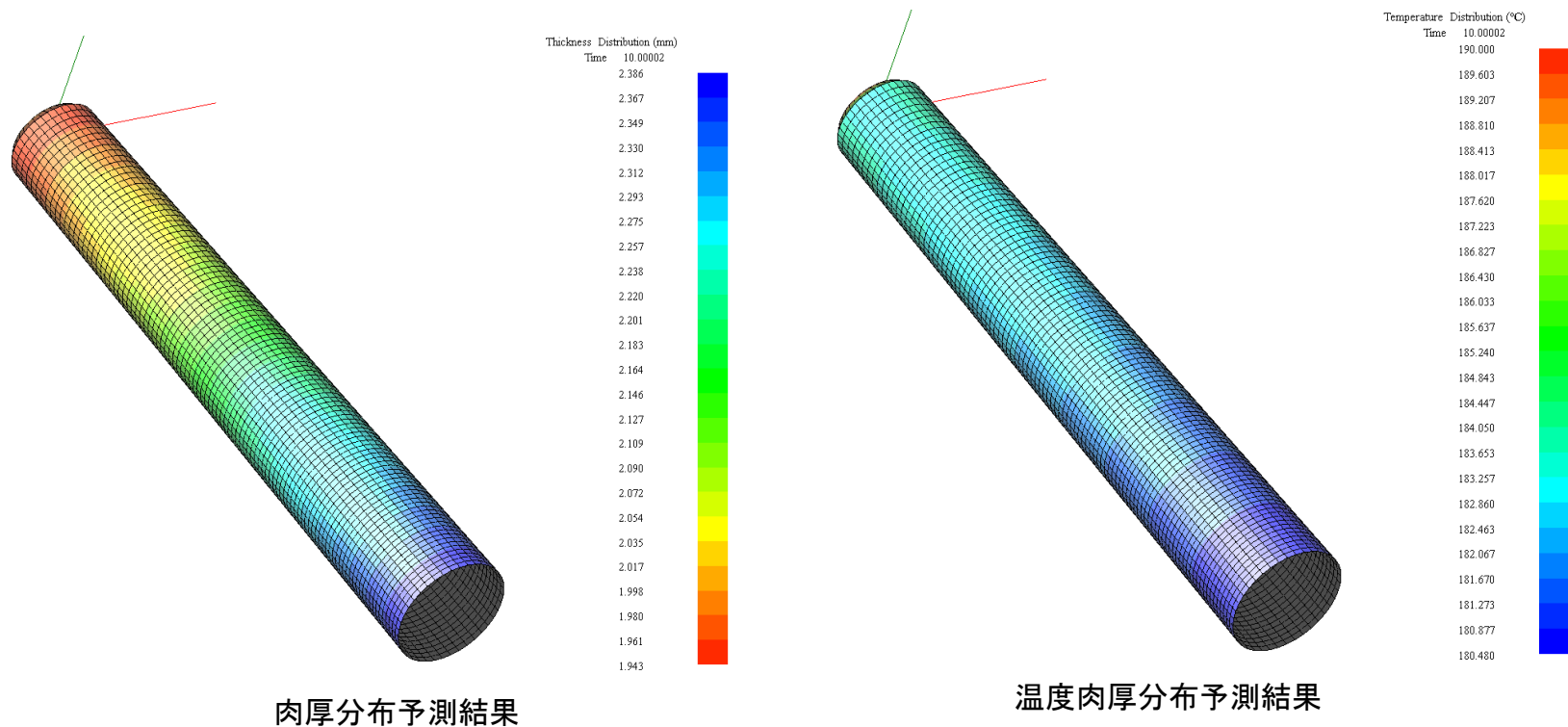


図8 パリソン形成解析出力ファイル(拡張子prst)のポスト処理例

パリソン形成解析結果を利用したパリソン膨張解析を一貫して解析するには、Calculation Control form 内のブロー熱成形解析ラジオボタンをONとします。また新たに追加された一貫解析チェックボックスをチェック状態とします。その際、Jobリスト登録タブメニュー内のパリソン形成・膨張一貫解析チェックボックスも連動してチェック状態になります。この状態で、選択ボタンを押し、予め実行したパリソン形成解析の出力ファイル(拡張子prst)を選択設定します。当操作によって、パリソン形成解析で予測されたパリソン形状、肉厚及び温度分布などの情報が、その後のパリソン膨張工程における初期情報として利用されます。その他の解析条件設定は、従来のブロー成形解析と同様です。

1) ブロー熱成形解析ラジオボタンをチェック

1) に連動して、パリソン形成・膨張一貫解析チェックボックスがチェック状態に変更

2) 選択ボタンを押し、パリソン形成解析の出力ファイル(prstファイル)を選択

図9 パリソン形成・膨張一貫解析の設定方法

パリソン形成解析結果を利用したパリソン膨張解析を一貫して解析するには、Calculation Control form内のブロー熱成形解析ラジオボタンをONとします。また新たに追加された一貫解析チェックボックスをチェック状態とします。その際、Jobリスト登録タブメニュー内のパリソン形成・膨張一貫解析チェックボックスも連動してチェック状態になります。この状態で、選択ボタンを押し、予め実行したパリソン形成解析の出力ファイル(拡張子prst)を選択設定します。当操作によって、パリソン形成解析で予測されたパリソン形状、肉厚及び温度分布などの情報が、その後のパリソン膨張工程における初期情報として利用されます。その他の解析条件設定は、従来のブロー成形解析と同様です。

パリソン形成・膨張一貫解析では、予め実施したパリソン形成解析の結果に膨張解析結果が追加される形式で解析結果ファイルが出力されます。この解析結果を利用して、図10に示すようにパリソン形状や肉厚及び温度分布を時間変化を経時的に表示可能です。また、図11に示すアニメーションの動画ファイルの作成にも対応しています(作成方法については後述)。

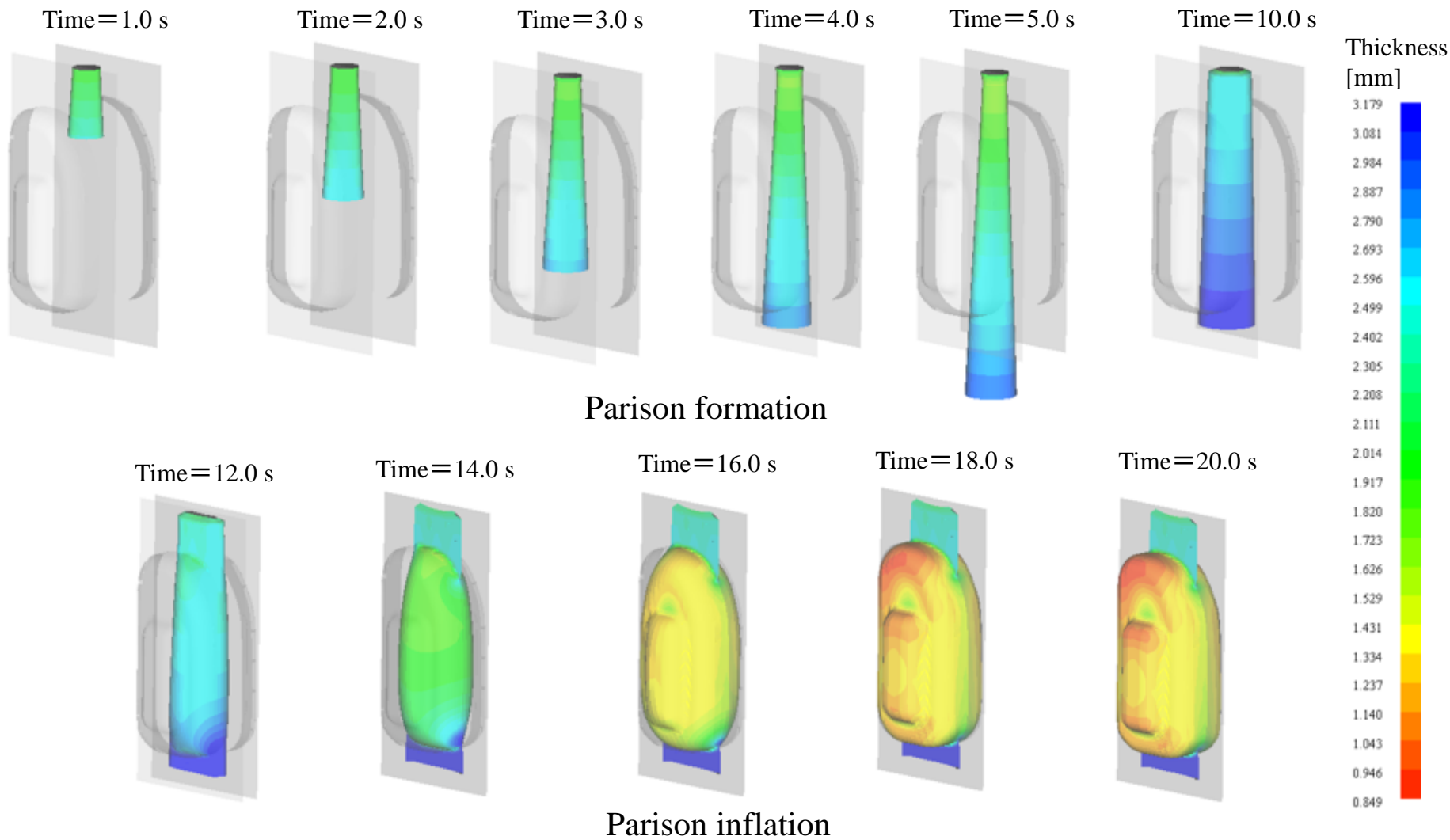


図10 押出ブロー成形工程におけるパリソン形状と肉厚の時間変化

# Integrated simulation of direct blow molding process

図11 パリソン形成膨張一貫解析結果ファイルを利用したアニメーション動画作成例



パリソン形成膨張一貫解析においても、従来のオプション機能の利用は可能です。以下にブロー成形品の肉厚最適化機能を利用したパリソンコントローラの最適制御条件の推定例について報告します。

肉厚最適化解析では、従来と同様、解析種別2パネルで肉厚最適化解析ラジオボタンをONとします。また最適化計算条件設定パネルで成形品の目標肉厚を単位[mm]で設定し、最適化反復計算回数を指定します。一貫解析において、1回目の反復計算では、パリソン形成解析で予測される肉厚分布が利用されますが、2回目以降の反復計算では、ブロー成形品の肉厚を目標肉厚に近づけるよう膨張解析の初期肉厚分布が自動的に更新されます。結果として、ブロー成形品の肉厚を目標肉厚に最適化するパリソンの初期肉厚分布が逆推定されます。この最適化初期分布肉厚を利用してパリソンコントローラの最適制御条件を推定します。

1) 肉厚最適化解析ラジオボタンをON

2) 目標肉厚と反復計算回数を設定(通常10回程度で十分な収束解が得られます)。

The screenshot shows the 'Calculation Control Form' dialog box with the following settings:

- 計算時間パラメータ: 最大計算サイクル数 1000, 一定時間刻み 0.1 sec
- 解析種別1: ブロー熱成形解析 (selected)
- 解析種別2: 肉厚最適化解析 (selected)
- 一貫解析:  一貫解析
- 最適化計算条件設定パネル: 均一設定 (selected), 目標肉厚(mm) 0.8, 最適化反復計算回数 10, 最適化緩和係数 1
- 温度計算条件:  温度計算, 層分割数 10
- 外気成形素材間表面温度境界条件: 熱伝達係数 0.03, 環境温度 50
- 外気成形素材間内面温度境界条件: 熱伝達係数 0.03, 環境温度 50
- 金型成形素材間温度境界条件: 熱伝達係数 0.3, 環境温度 50
- 重力パラメータ: Gx 0, Gy 0, Gz 0
- ファイル名: integratedopt

図12 ブロー成形品肉厚分布の最適化解析条件設定例

図13にパリソン形成膨張一貫解析の標準解析結果と肉厚最適化解析結果の比較を示します。

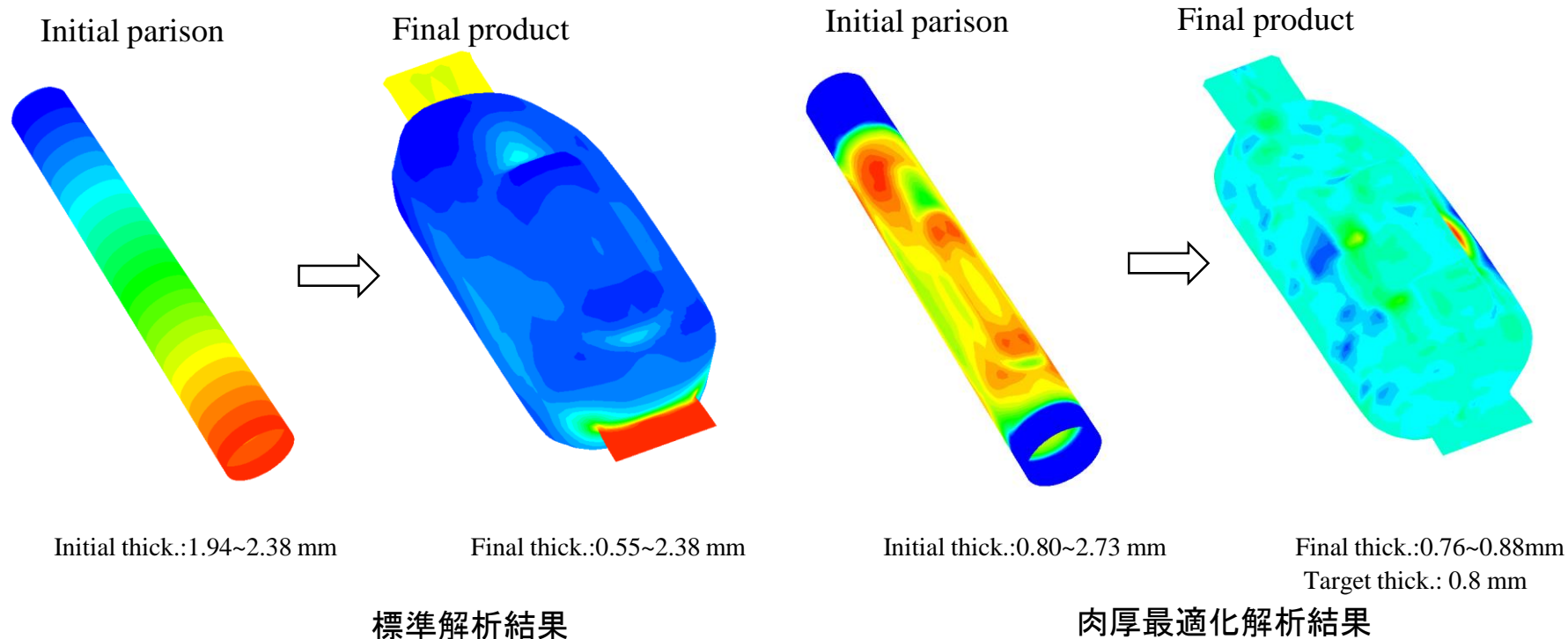


図13 標準解析結果と肉厚最適化解析結果の肉厚分布予測結果の比較

図13に示した最適解では、初期パリソン肉厚が周及び軸方向の双方に最適化されていますが、そのようなパリソンを実際形成するには、周及び軸方向の肉厚を自由に制御可能な機構を有するパリソンコントローラが必要になります。実際、このような機構は既に実用化されていますが、数値解析を通じて、その最適化制御条件を精度良く推定することは大変難しいと言えます。現在、最も普及している油圧制御で内径側コアを上下移動させることでダイクリアランスを変化させるパリソンコントローラの利用を想定し、パリソン膨張の肉厚最適化機能に軸垂直断面内の平均肉厚を軸方向に対して均一化するオプションを追加しました。このオプションは、図14に示す様に最適化計算条件設定パネル内に新規実装された平均肉厚均一化チェックボックスをチェック状態とすることで有効になります（非チェックとすると従来通り、全計算要素の肉厚を均一化する最適化解析機能が有効になります）。

新規実装された平均肉厚  
均一化チェックボックス

Calculation Control Form

計算時間パラメータ

最大計算サイクル数 100

一定時間刻み 0.1 sec

解析種別1  
 ブロー熱成形解析  
 パリソン形成解析

解析種別2  
 標準解析  
 肉厚最適化解析

一貫解析

最適化計算条件設定パネル

均一設定  平均肉厚均一化  
目標肉厚(mm) 0.8

金型設定肉厚  
最適化反復計算回数 10  
最適化緩和係数 1

滑りパラメータ

スリップ係数 1 スリップLost処理  
スリップ接触判定上限  拘束  自由  
100

接触判定許容誤差 1E-05 Penalty数 1

ファイル出力間隔 5 ヤコビアンチェックストップ  ON  OFF  
 Adaptive remesh

接触判定閾値 100

3Dソリッドリゾーニング  縮退ソリッド要素  
 Parison VS Parison Collision Judgement

温度計算条件

温度計算 層分割数 10

外気成形素材間表面温度境界条件

熱伝達係数 0.03  
環境温度 50

外気成形素材間内面温度境界条件

熱伝達係数 0.03  
環境温度 50

金型成形素材間温度境界条件

熱伝達係数 0.3  
環境温度 50

重力パラメータ

Gx 0  
Gy 0  
Gz 0

実行ウインドウ自動クローズ 保存 閉じる

ファイル名 integratedoptmod

図14 最終成形品の軸垂直断面内の平均肉厚を軸方向に対して均一化する  
肉厚最適化解析オプション

押出ブロー成形の一貫解析において最終成形品の肉厚分布の均一化を計るには、1<sup>st</sup> stepとしてパリソン膨張解析結果について軸垂直断面内の平均肉厚を軸方向に均一化する初期パリソンの最適化条件を推定します。2<sup>nd</sup> stepでは、1<sup>st</sup> stepで予測された最適化条件をパリソン形成過程のパリソンコントローラの制御条件に反映した一貫解析を行います。以下にこれらの2段階の最適化処理法について解説します。

押出ブロー成形の一貫解析で採用されるパリソンの計算モデルは、軸方向分割数 $m$ 、周方向分割数 $n$ の離散化要素で構成されます。パリソン形成の解析結果として予測され、パリソン膨張の解析で利用される初期パリソンの計算モデルに対して以下に示す関係が成立します。

$$V_{ex} = q_{ex} t_{ex} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij}(0) H_{ij}(0) \quad (18)$$

$V_{ex}$  : パリソン形成解析で設定された押出体積

$q_{ex}$  : パリソン形成解析で設定された押出流量

$t_{ex}$  : パリソン形成解析で設定された押出時間

$S_{ij}(0)$  : パリソン計算モデルの軸方向 $i$ 、周方向 $j$ の要素面積

$H_{ij}(0)$  : パリソン計算モデルの軸方向 $i$ 、周方向 $j$ の要素肉厚

パリソン膨張過程において、各離散化要素の肉厚と面積は、時間的に変化しますが要素体積は不変です。従って、膨張終了時の時刻を $t_b$ とし、次式で定義される計算モデルの軸方向 $i$ の周方向 $j$ の要素体積の総和 $V_i$ は、時間によらず一定で初期状態と等しくなります。

$$V_i = \sum_{j=1}^n S_{ij}(t_b) H_{ij}(t_b) \quad (19)$$

軸方向 $i$ の周方向平均肉厚を次式で定義します。

$$\tilde{H}_i(t_b) = \frac{\sum_{j=1}^n H_{ij}(t_b) S_{ij}(t_b)}{\sum_{j=1}^n S_{ij}(t_b)} = \frac{V_i}{\sum_{j=1}^n S_{ij}(t_b)} \quad (20)$$

ダイクリアランスを一定としたパリソン形成解析で予測されるセグメント $i$ の体積 $V_i$ は、 $i$ に依らず一定( $q_{ex} \Delta t$ )となります。従って、(20)式で定義される周方向平均肉厚は、軸方向 $i$ に配置された計算要素の膨張面積の総和に反比例した分布を示します。

前述したパリソソコントローラの制御条件において、最適化目標は、(20)式で定義された軸方向*i*の周方向平均肉厚 $V_i$ を一定とすることです。その目標値は、体積保存則を利用して、次式で表されます。

$$V_{ex} = q_{ex} t_{ex} = \sum_{i=1}^m V_i = \sum_{i=1}^m \tilde{H}_i(t_b) \sum_{j=1}^n S_{ij}(t_b) = \hat{H}^{opt} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij}(t_b)$$

$$\therefore \hat{H}^{opt} = \frac{V_{ex}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij}(t_b)} \quad (21)$$

(21)式は、最適化の目標肉厚が、押出体積を計算要素の膨張面積の総和で除した値に相当することを表しています。この目標肉厚が達成されると、以下に示す様に軸方向*i*の要素体積 $V_i^{opt}$ は、軸方向*i*に配置された計算要素の膨張面積の総和に比例した分布を示します。

$$V_i^{opt} = \hat{H}^{opt} \sum_{j=1}^n S_{ij}(t_b) \quad (22)$$

(21)式は、最適化の目標肉厚が、押出体積を計算要素の膨張面積の総和で除した値に相当することを表しています。この目標肉厚が達成されると、以下に示す様に軸方向*i*の要素体積 $V_i^{opt}$ は、軸方向*i*に配置された計算要素の膨張面積の総和に比例した分布を示します。

パリソン膨張解析において、初期パリソンの軸方向*i*の肉厚 $h_i$ は、軸対称性を前提しているため軸方向*j*には依存しません。と膨張後のセグメント*i*の体積に対する以下に示す比例関係を利用して、初期パリソン*i*の肉厚最適値 $h_i^{opt}$ を推定します。

$$\begin{aligned} h_i : \tilde{H}_i(t_b) &= h_i^{opt} : \hat{H}^{opt} \\ \therefore h_i^{opt} &= \frac{\hat{H}^{opt}}{\tilde{H}_i(t_b)} h_i \end{aligned} \quad (23)$$

初期パリソンの肉厚を変更することで膨張挙動が変化するため、(23)式に示した初期肉厚の更新は、反復計算で処理します。



このパリソン膨張解析の最適化アルゴリズムに従って、図15に示す様に最終成形品の軸垂直断面内の平均肉厚を均一にする初期パリソン肉厚分布が求められます。この初期パリソン肉厚分布を形成するためのパリソンコントロールの制御条件を模索することが、パリソン形成解析の最適化の目的となります。以下にパリソン形成解析の最適化アルゴリズムについて解説します。

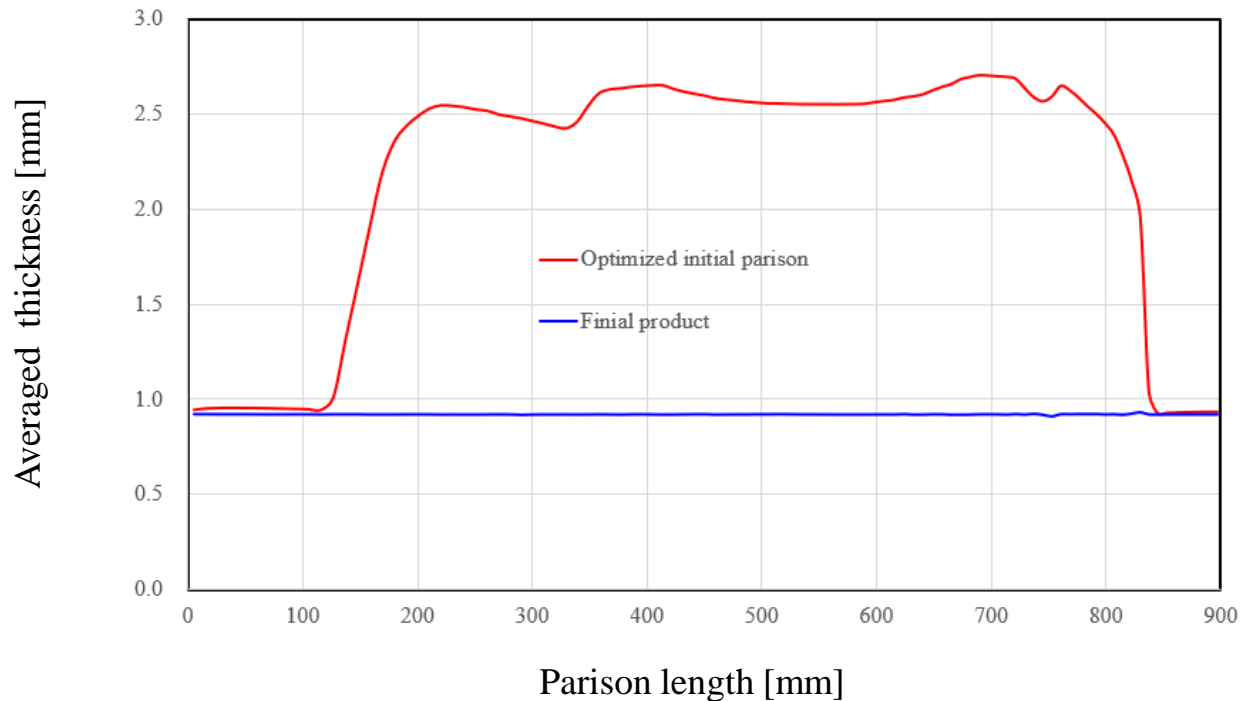


図15 最適化された初期パリソン肉厚分布と最終成形品の軸垂直断面内における平均肉厚

ここでは、最適化問題を単純化するために、内径側のコアを油圧制御で上下移動させることによって、ダイ流路クリアランスを変化させる一般的に普及したパリソンコントローラを想定します。この場合、制御可能なパリソン肉厚は、軸方向(MD)方向のみの分布になります。このような単純な機構のパリソンコントローラを対象とした最適制御条件を推定するために図15に示したように、軸方向にのみ肉厚が制御された制限条件の下に初期パリソン(パリソン形成後)の最適肉厚分布情報を利用します。

パリソンコントローラの最適制御条件の推定に際して以下に示す条件を採用します。

- ① 内径側コアの上下移動で軸対称形状のパリソン肉厚を制御する最も単純な機構のパリソンコントローラを想定します。
- ② ダイクリアランスを一定とした標準解析と押出量及び押出時間を共通とします。
- ③ ダイクリアランスを変化させることによってスウェル現象は変化しますが、最適化問題を単純化するためにその変化を無視します(但し、近似的にその影響を考慮した解析も可能です)。

(22)式に示したように最適化されたパリソン形成後のセグメント体積は、軸方向に対して分布を示し、互いに異なります。パリソンコントローラの最適制御条件②より押出量 $q_{ex}$ は共通としていますので、セグメント $i$ を押出す際の時間刻み $\Delta t_i$ は、次式で与えられます。

$$\Delta t_i = \frac{V_i^{opt}}{q_{ex}} \quad (24)$$

押出された $m$ 個のセグメントに対して(24)式に示す計算時間刻みの総和を採ると、

$$\sum_{i=1}^m \Delta t_i \underset{(24)}{=} \frac{\sum_{l=1}^m V_l^{opt}}{q_{ex}} \underset{(22)}{=} \frac{\hat{H}^{opt} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij}(t_b)}{q_{ex}} \underset{(21)}{=} \frac{V_{ex}}{q_{ex}} \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij}(t_b)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij}(t_b)} \underset{(18)}{=} t_{ex} \quad (25)$$

が成立します。すなわち、ダイクリアランスを一定とした標準解析とパリソンコントローラを作用させた最適化解析では、押出時間も共通となります。

パリソン膨張最適解析では、初期パリソンモデルの要素半径や面積の変化は考量せず、要素肉厚のみが最適化されています。パリソン形成過程においても、(23)式と同様、ダイクリアランス $H_d$ が一定の場合に予測される初期パリソンを構成するセグメント $i$ の肉厚 $h_i$ とセグメント $i$ が押出された際のダイクリアランスを $H_{di}$ に変化させた場合の最適値 $h_i^{opt}$ の間に以下に示す比例関係が成立することを仮定します。

$$H_d : h_i = H_{di} : h_i^{opt}$$

$$\therefore H_{di} = \frac{h_i^{opt}}{h_i} H_d \quad (26)$$

$V_i$ を標準解析結果で算出されるセグメント体積とします。この体積は、 $i$ に依らず一定です。

$$V_i = q_{ex} \Delta t = h_i \sum_{j=1}^n S_{ij}(0) \quad (27)$$

一方、 $V_i^{opt}$ は、(22)式に示したように、膨張面積の総和に比例した分布を示すセグメント $i$ の最適体積です。膨張後もセグメント $i$ の体積は変化しないので、

$$V_i^{opt} = \hat{H}^{opt} \sum_{j=1}^n S_{ij}(t_b) = h_i^{opt} \sum_{j=1}^n S_{ij}(0) \quad (28)$$

が成立します。

(26)~(28)式より,

$$H_{di} = \frac{V_i^{opt}}{V_i} H_d \quad (29)$$

の関係が導かれます.

ダイの流出断面積は,  $R_d \gg H_d$  の場合, 以下に示す様に近似的に計算されます.

$$S_d = \pi \left( R_d^2 - (R_d - H_d)^2 \right) = \pi (2R_d - H_d) H_d(t) \cong 2\pi R_d H_d \quad (30)$$

ダイクリアランス  $H_d$ , 押出流量  $q_{ex}$  及び時間刻み  $\Delta t$  が一定条件で押し出されるセグメントの初期長さ  $l(0)$  は,  $i$  に依らず一定で,

$$\begin{aligned} V_i &= q_{ex} \Delta t = 2\pi R_d H_d l(0) \\ \therefore l(0) &= \frac{q_{ex} \Delta t}{2\pi R_d H_d} = \frac{V_i}{2\pi R_d H_d} \end{aligned} \quad (31)$$

と表されます. 一方, 押出流量  $q_{ex}$  を一定として, ダイクリアランスを  $H_{di}$ , 時間刻みを  $\Delta t_i$  に変化した場合のセグメント  $i$  の初期押出長さ  $l_i(0)$  は,

$$l_i(0) = \frac{q_{ex} \Delta t_i}{2\pi R_d H_{di}} = \frac{V_i^{opt}}{2\pi R_d H_{di}} \quad (32)$$

と表されます.

(29), (31), (32)式より

$$l_i(0) = l(0) \quad (33)$$

の関係が得られます。すなわち、(29)式をパリソンコントローラの最適制御条件として採用すると、計算セグメントの初期押出長さは、ダイクリアランスを一定とした場合と変化しないことが分かります。

パリソンコントローラによるダイクリアランス $H_d(t)$ の時間的な変化を考慮する場合、解析条件として次式で定義される一定ダイクリアランス $H_d$ を基準とした開口率 $\kappa$ の時間依存性を指定します。

$$\kappa(t) = \frac{H_d(t)}{H_d} \quad (34)$$

パリソン膨張最適化解析結果をパリソン形成解析に反映される場合には、一定ダイクリアランスで評価されるセグメント体積と最適化解析で更新される最適化セグメント体積の情報を読み込み、(29)式に対応して次式で開口率が自動的に指定されます。

$$\kappa(t) = \frac{V_i^{opt}}{V_i} \quad \text{for } t_{i-1} < t \leq t_i \quad (35)$$

ここで、セグメント $i$ の押出が終了する時刻 $t_i$ は、

$$t_i = \sum_{l=1}^i \Delta t_l \quad (36)$$

と表されます。

パリソンコントローラを利用してダイクリアランスを変化させた際、スウェル現象が変化することが予想されます。しかしながら、スウェル現象は、ダイリップ近傍のみならず上流側流路内での粘弾性流体の変形履歴に依存する成形現象のため、その変化を厳密に定量化することは難しく、ここでは、近似的な評価方法について提案します。

パリソン形成解析においては、径スウェルと肉厚スウェルの2種のスウェル比を考慮していますが、押出ダイの外径がクリアランスよりも十分大きいとして、流路の曲率を無視し、二重管流路を平面状のスリット流路に近似し、径スウェルの変化を無視し、肉厚スウェルの変化のみを考慮します。

スリット流路に対する肉厚スウェル比に対してTanner が提案している近似的評価式<sup>4)</sup>を採用します。

$$\chi = \left[ 1 + \frac{1}{12} \left( \frac{N_1}{\tau} \right)_w^2 \right]^{1/4} \quad (37)$$

ここで、第1法線応力差 $N_1$ とせん断応力 $\tau$ はスリット流路の壁面上で評価される値を採用します。

4) Tanner R. I., *J. Polym. Sci. Mech.*, (A.2),**8**,2067(1970)

パリソコントローラを利用した場合も流量が変化しないことを前提としているため、肉厚スウェル比の変化は、クリアランスが変化した際の壁面上の第1法線応力差とせん断応力に依存して変化します。最も基本的な粘弾性流体としてマックスウェル流体を採用すると、第1法線応力差とせん断応力、及び壁面上せん断応力は、それぞれ次式で表されます。

$$\tau = \eta \dot{\gamma}_w \quad (38)$$

$$N_1 = 2\eta\lambda\dot{\gamma}_w^2 \quad (39)$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{3\eta q_{ex}}{\pi R_d H_d^2} \quad (40)$$

ここで $\lambda$ は緩和時間です。粘度 $\eta$ と押出流量 $q_{ex}$ 、及びダイ外径 $R_d$ が一定とすると、壁面上のせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_w$ は、ダイクリアランス $H_d$ の2乗に反比例します。

(37)~(40)式より、ダイクリアランスを基準値 $H_d$ から $h_d$ に変化させた際の肉厚スウェルの近似的評価式が得られます。

$$\chi_{h_d\infty} = \left[ 1 + \left( \frac{H_d}{h_d} \right)^4 \left( \chi_{H_d\infty}^4 - 1 \right) \right]^{1/4} \quad (41)$$

$\chi_{H_d\infty}$  : クリアランスが基準値 $H_d$ で定義される肉厚スウェル比 (標準解析の設定値)

$\chi_{h_d\infty}$  : クリアランスが $h_d$ に変化した際に予測される肉厚スウェル比



図16に本テスト解析で採用する肉厚スウェル比( $\chi_{Hd\infty}$ :1.2, Hd mm)に対して予測されるクリアランス $h_d$ 依存性を示します。予測結果が示す様に、クリアランスを基準値より縮小させるとせん断ひずみ速度が高くなりスウェル比は増加, 減少させることによってせん断ひずみ速度が低くなりスウェル比は減少する傾向を示します。この変化は、必要に応じて解析結果に反映させることが可能です。

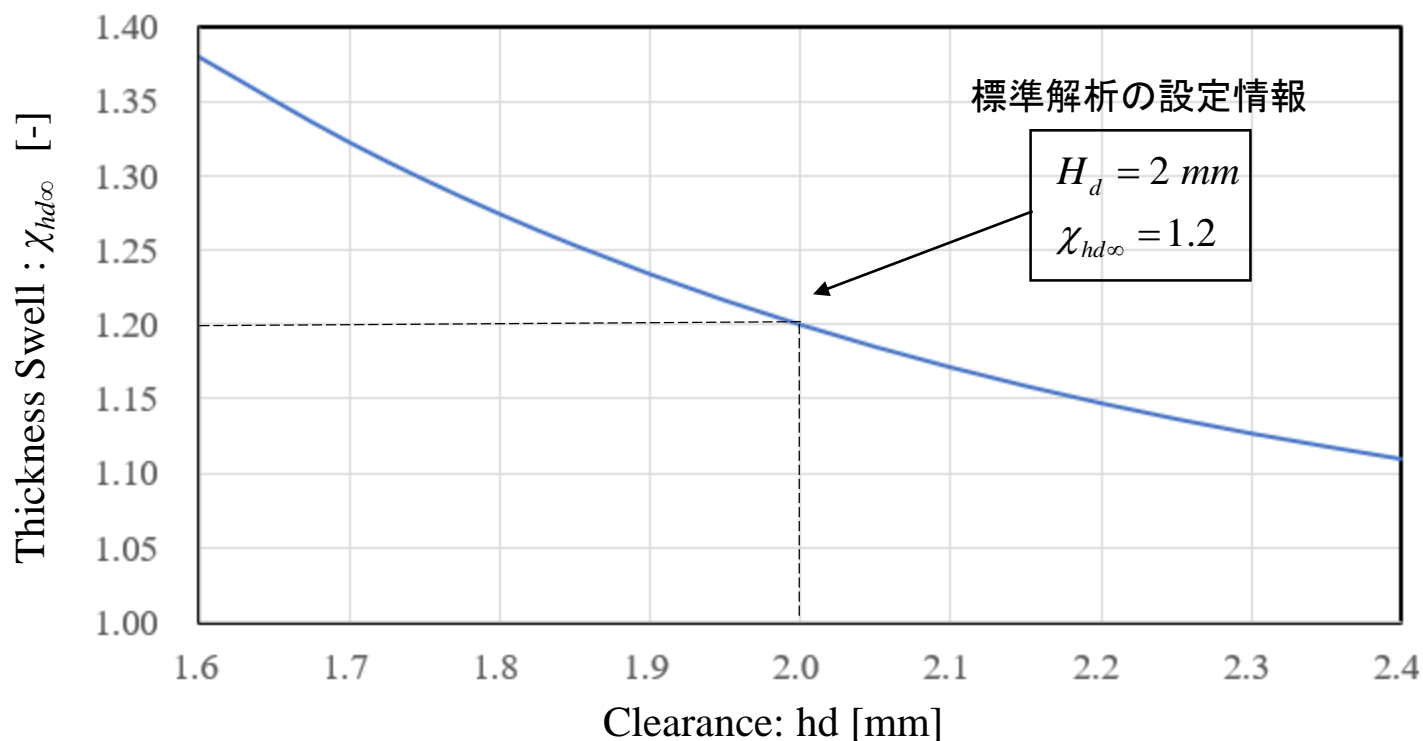


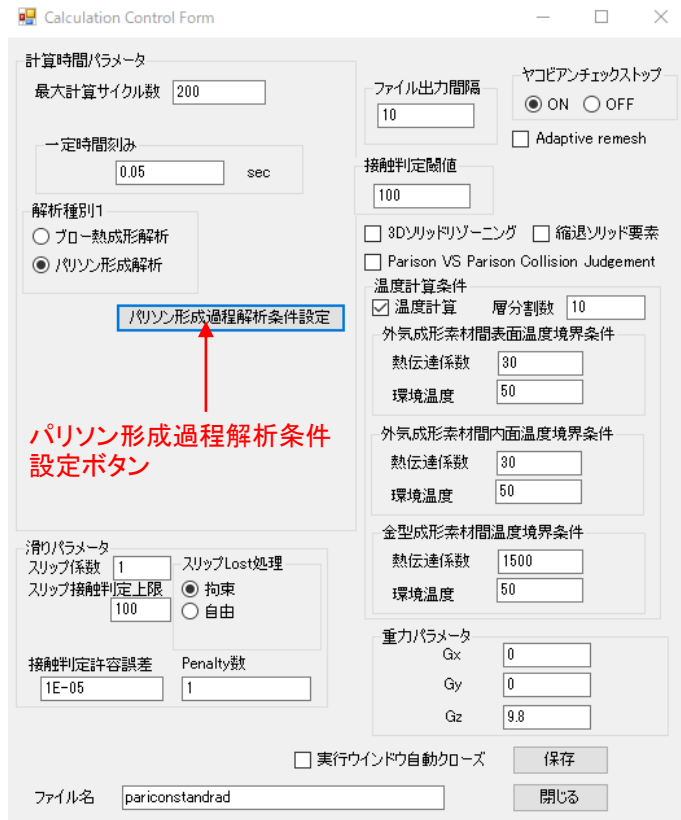
図16 肉厚スウェル比のダイクリアランス依存性

パリソンコントローラによる制御を考慮したパリソン形成解析を行う場合には、次ページ図17,18に示す様にパリソン形成解析ラジオボタンをオンとし、パリソン形成過程解析条件設定ボタンを押した際に表示されるフォーム内のパリソンコントローラ設定チェックボックスをチェック状態とします。表示されるパネル内の標準解析ラジオボタンをONとすると(34)式に示した開口率の時間依存性を設定した解析になります。この場合は、時間と開口率のテキストボックスに条件を設定し、追加ボタンを押してリストボックスに登録された情報がパリソンコントローラの制御条件として考慮されます。一方、最適肉厚設定ラジオボタンをONとすると、図15に示したような初期パリソン最適化肉厚分布がパリソンコントローラの制御条件に反映されます。パリソン膨張解析の最適解析で予測される初期パリソンの軸垂直断面内の平均肉厚とセグメント体積の軸方向分布は、解析結果名+拡張子(brstthickopt)という名称のテキストファイルに出力されます。Importボタンを押してこの出力ファイル情報を読み込むことでパリソンコントローラの最適制御条件が設定されます。

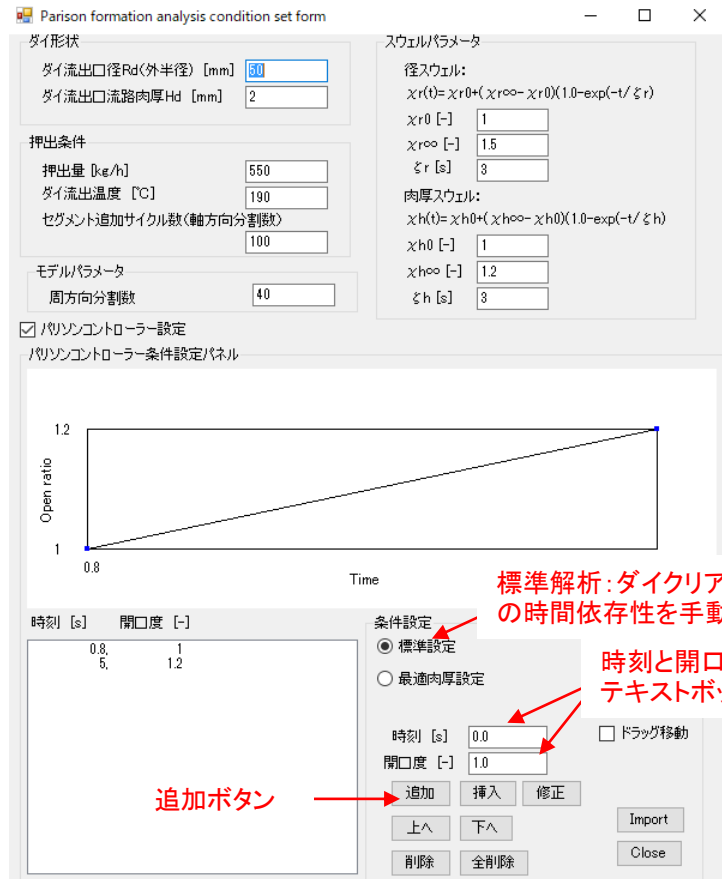
標準解析では、ダイクリアランスの変化に伴う肉厚スウェル比の変化は無視されます。最適肉厚設定の場合には、肉厚スウェル比補正チェックボックスをチェック状態とすることで、(41)式に示したように肉厚スウェルが補正されます。スウェルのモデルパラメータA,B,Cは、調整可能とし、(41)式に対応した以下の表式で補正が考慮されます。デフォルト値は、A=B=4,C=1/4です。

条件設定後、closeボタンを押してフォームを閉じ、従来と同様の計算制御フォームで保存ボタンを押して設定情報を保存します。

$$\chi_{h_d\infty} = \left[ 1 + \left( \frac{H_d}{h_d} \right)^A \left( \chi_{H_d\infty}^B - 1 \right) \right]^C \quad (42)$$



パリソン形成過程解析条件  
設定ボタン

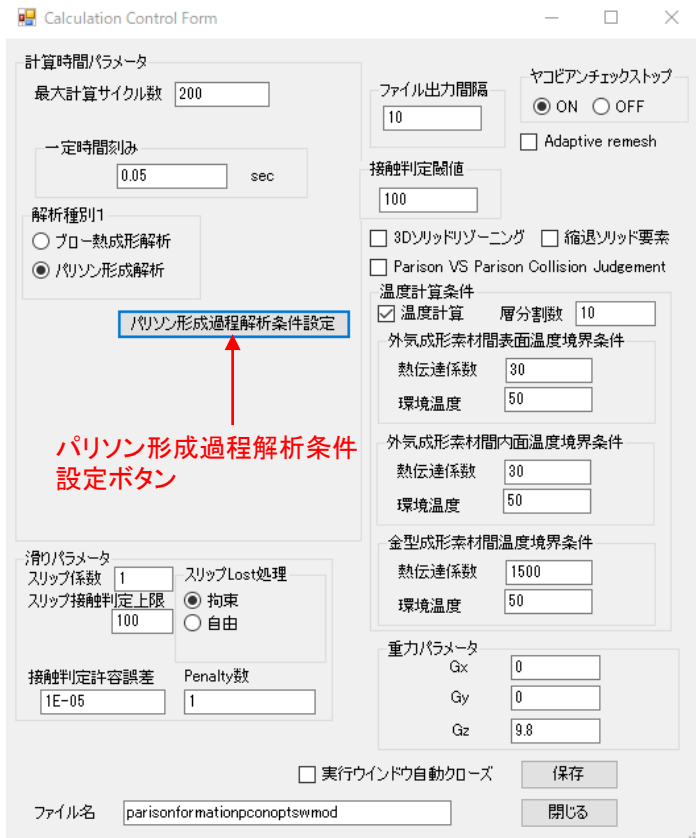


標準解析:ダイクリアランス開口率の  
時間依存性を手動で設定

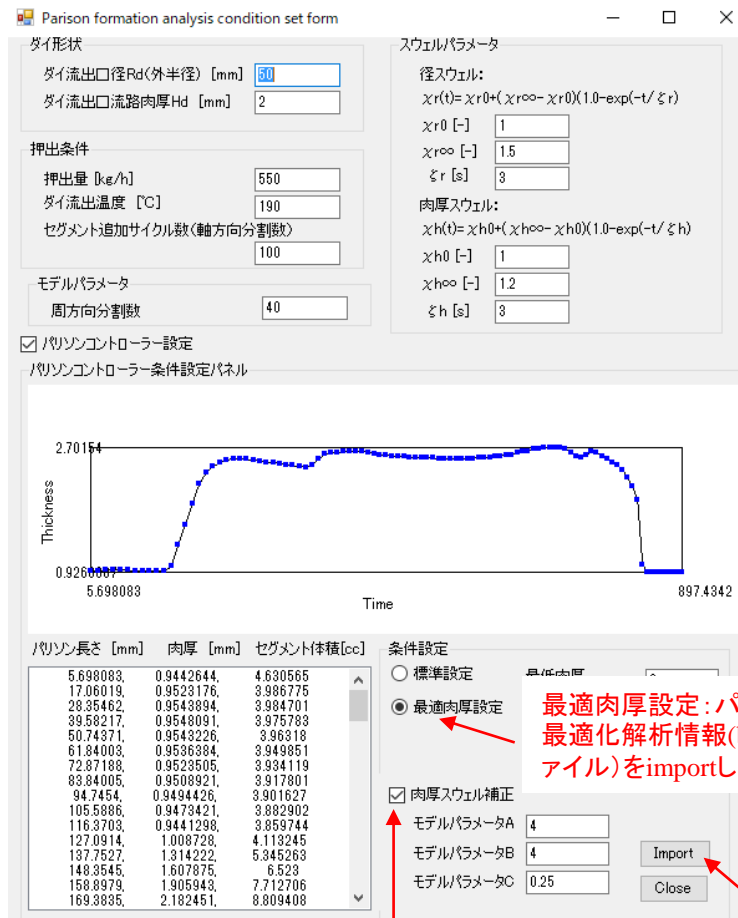
時刻と開口度の設定  
テキストボックス

追加ボタン

図17 パリソン形成解析におけるパリソンコントローラ制御条件の設定例(標準設定)



パリソン形成過程解析条件  
設定ボタン



最適肉厚設定: パリソン膨張の  
最適化解析情報(brstthicknessopt  
ファイル)をimportして設定

肉厚スウェル補正チェックボックス

Importボタン

図18 パリソン形成解析におけるパリソンコントローラ制御条件の設定例(最適肉厚設定)

図19にケーススタディで予測された肉厚分布予測結果の比較を示します。各実線は、パリソン形成解析結果として予測された初期パリソン肉厚分布、各破線は、初期パリソン肉厚分布をパリソン膨張解析の初期条件として予測された最終成形品の肉厚分布をそれぞれ表します。ダイクリアランスを一定とした条件下で予測された最終成形品の肉厚分布(Case1:青色破線)は、製品部肉厚の薄肉化が最も顕著です。図15に示した最適肉厚情報をパリソンコントローラの制御条件に反映した解析結果(Case2:赤色破線)では、薄肉化が抑制され、製品部の肉厚分布の均一性も向上しています。パリソン膨張解析の最適化肉厚情報を考慮したにも関わらず、図15に示したように最終成形品の肉厚が均一にならないのは、パリソンコントローラでダイクリアランスを変化させるとスウェルの変化を無視してもパリソン長さや半径分布が変化するためです。すなわち、パリソン膨張解析で予測される初期パリソンの長さや外径分布が、肉厚を最適化した際の形状と変化するため、最適化された均一肉厚とは乖離した予測結果が得られます。この乖離は、更にダイクリアランスの変化に伴うスウェル補正を施した解析結果(Case3:緑色破線)で多くなりますが、ダイクリアランスを一定とした条件化で予測された解析結果と比較して製品部の薄肉化は抑制され、肉厚の均一性は向上しています。

図20と図21にCase1と2で予測された初期パリソンと最終成形品の肉厚分布の比較を示します。パリソンコントローラ制御条件を採用したCase2では、一定ダイクリアランスのCase1と比較して、軸垂直断面内の平均肉厚が均一化するとともに金型コーナ部の最薄肉部の肉厚が厚くなることが予測されます。

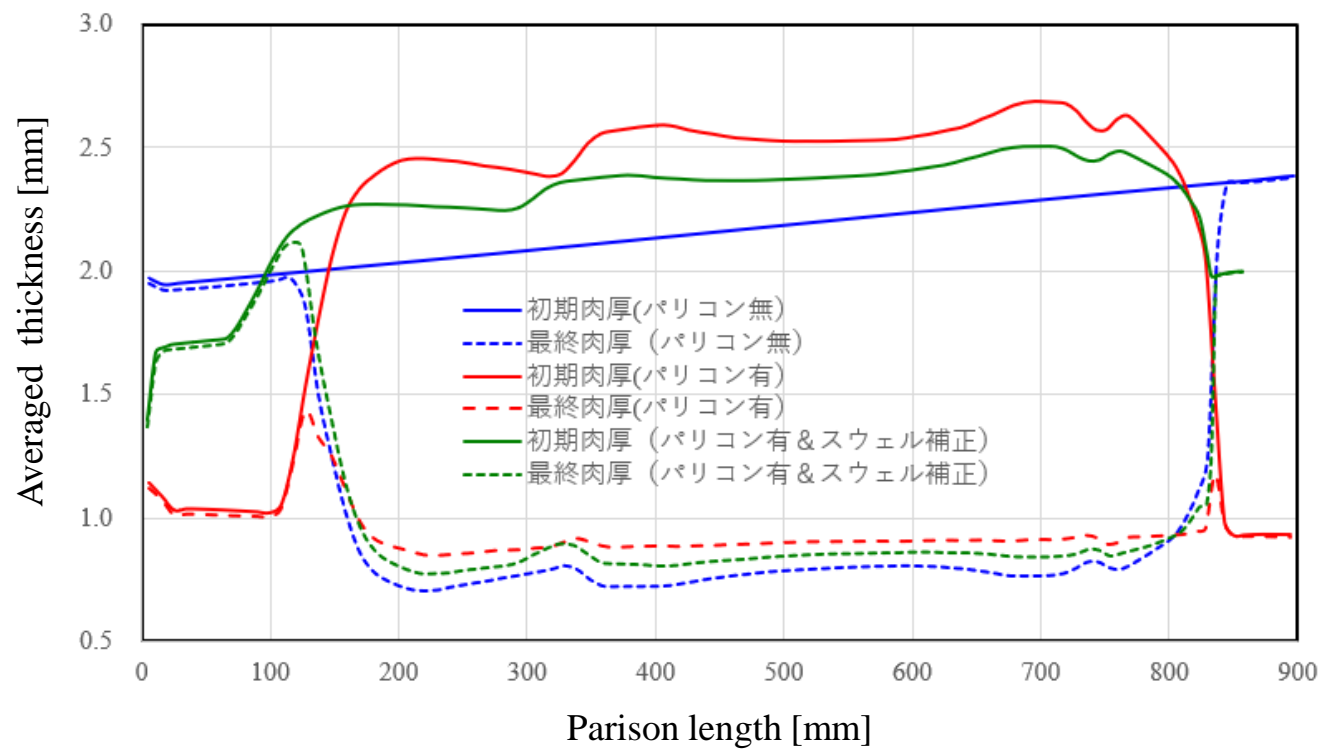


図19 初期パリソンと最終成形品肉厚分布予測結果の比較

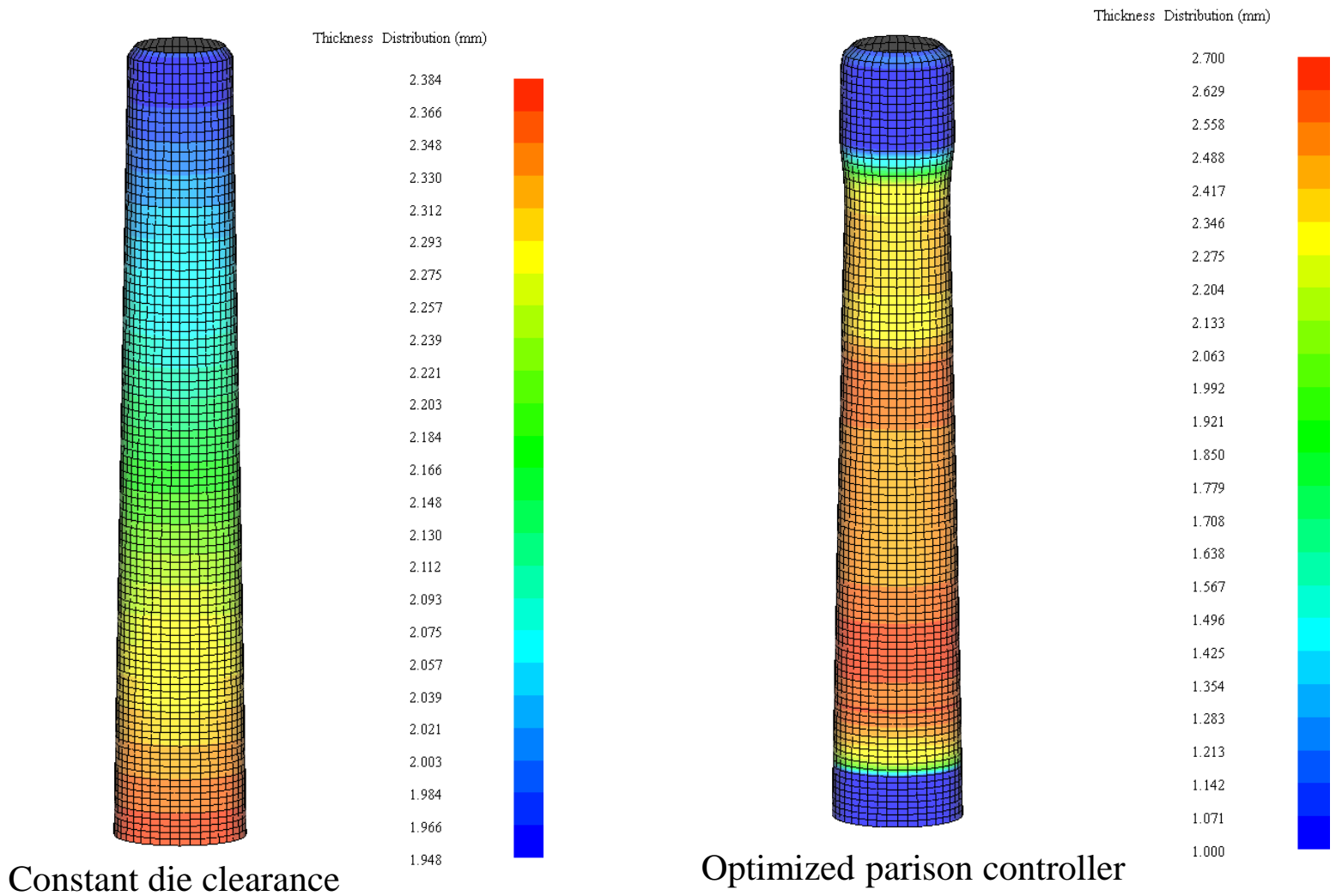


図20 パリソン形成肉厚分布の比較

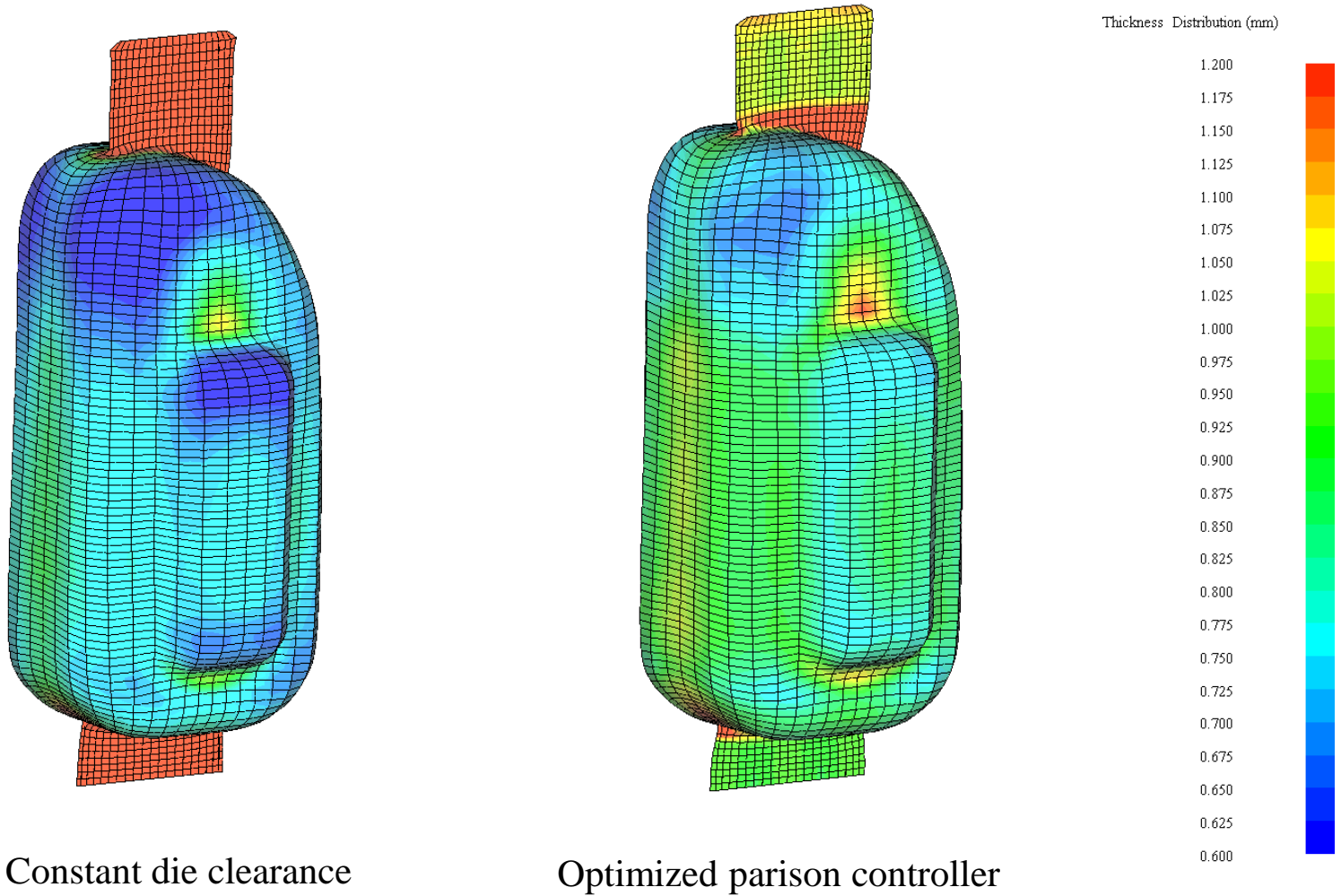


図21 最終成形品肉厚分布の比較



押出ブロー成形解析にパリソン形成解析機能が実装され、表2に示す出力ファイルが追加されました。

表2 新規追加出力ファイル

解析対象プロセス	出力ファイル名	内容
パリソン形成過程	xxx.prst	パリソン形成解析結果
	xxx.prstbmsh	パリソン膨張解析用初期パリソンメッシュ
パリソン膨張過程	xxx.prstlengthvstime	パリソン押出長の押出時間依存性
	xxx.prstresultinf	セグメント延伸比, パリソン半径, 肉厚, 温度, 粘度の押出時間依存性
	xxx.brstavthick	初期パリソンと最終成形品の軸垂直断面内平均肉厚分布
	xxx.brstthickopt	軸垂直断面内平均肉厚の最適化解析で評価される初期パリソンの径及びセグメントの体積分布(パリソン形成解析のパリソンコントロール制御条件に反映される情報)

(XXX:解析者が設定する解析結果ファイル名)

## 2) 輻射加熱解析機能の新規実装 (コールドパリソン法, 熱成形輻射加熱工程への対応)

従来, 成形素材と外界(外気及び金型)との熱交換は, 熱伝達境界としてモデル化していました. 真空熱成形や射出ブロー成形(コールドパリソン法)などの成形プロセスにおいては, 熱輻射加熱プロセスで成形素材を予熱する工程があります. 熱輻射による予熱は, 赤外線(電磁波)に依るものであり, 従来の熱伝達境界とは, 異なった温度解析機能が必要になります. 最新バージョンには, 熱輻射による予熱工程を解析するための新機能が実装されました. 以下に熱輻射モデルとその運用方法について解説します.

熱輻射によって、プリフォームを構成する要素*i*に金型を構成する要素*j*が与える熱量は、次式に従って計算します。

$$Q_{ij} = \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\frac{(1-\varepsilon_i)}{\varepsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{ij}} + \frac{(1-\varepsilon_j)}{\varepsilon_j A_j}} = \left( \frac{1}{F_{ij} \left( \frac{(1-\varepsilon_i)}{\varepsilon_i} \right) + 1 + F_{ij} \left( \frac{(1-\varepsilon_j)}{\varepsilon_j} \right) \frac{A_i}{A_j}} \right) F_{ij} A_i \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (43)$$

$Q_{ij}$  : 面*i*から面*j*に与えられる輻射による熱量

$F_{ij}$  : 面*i*の面*j*に対する形態係数

$\sigma$  : Stefan-Boltzmann定数( $5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$ )

$\varepsilon_i$  : 面*i*の放射率(0~1)

ここで、 $F_{ij}$ は、形態係数と呼ばれ、要素*i*と要素*j*の幾何学的な位置関係に応じて、次式で評価されます。

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i \pi} \iint \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{r^2} dA_i dA_j \quad (44)$$

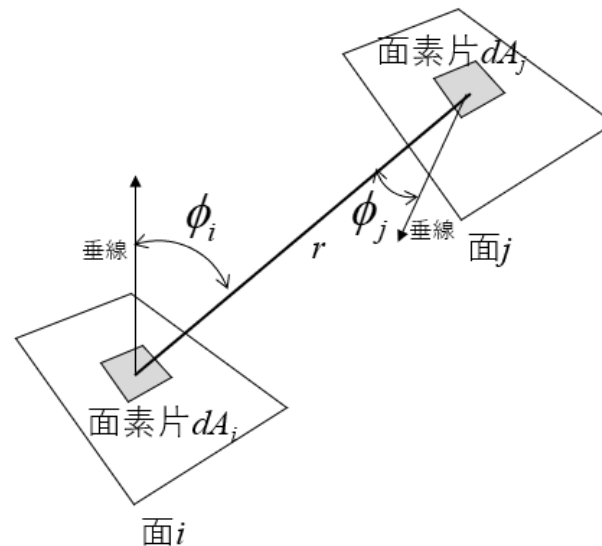


図22 形態係数を算出する際の要素面の位置関係

標準的な解析では、金型モデルのメッシュの品質は問題とせず、STLファイルの利用が可能です。しかし、熱輻射によるプリフォームの加熱状態や金型壁面上の滑りを定量化することを目的する場合には、金型モデルメッシュの品質についても注意を要します。見かけ上、金型の形状が妥当に表現されていてもメッシュのアスペクト比が歪であったり、非対称な分割状態になっていると、熱輻射によって加熱される成形素材の温度状態に、金型モデルメッシュの品質が反映されます。金型モデルメッシュの品質を追求すると、メッシュ数が増加するケースが多いため、計算コストと計算精度を適切にバランスさせ、適切な金型モデルメッシュを採用することが重要です。

熱輻射モデルの動作確認を目的として、下図に示す熱輻射による加熱工程を含む延伸ブロー成形(コールドパリソン法)解析モデルを採用したテストシミュレーションを実施しました。

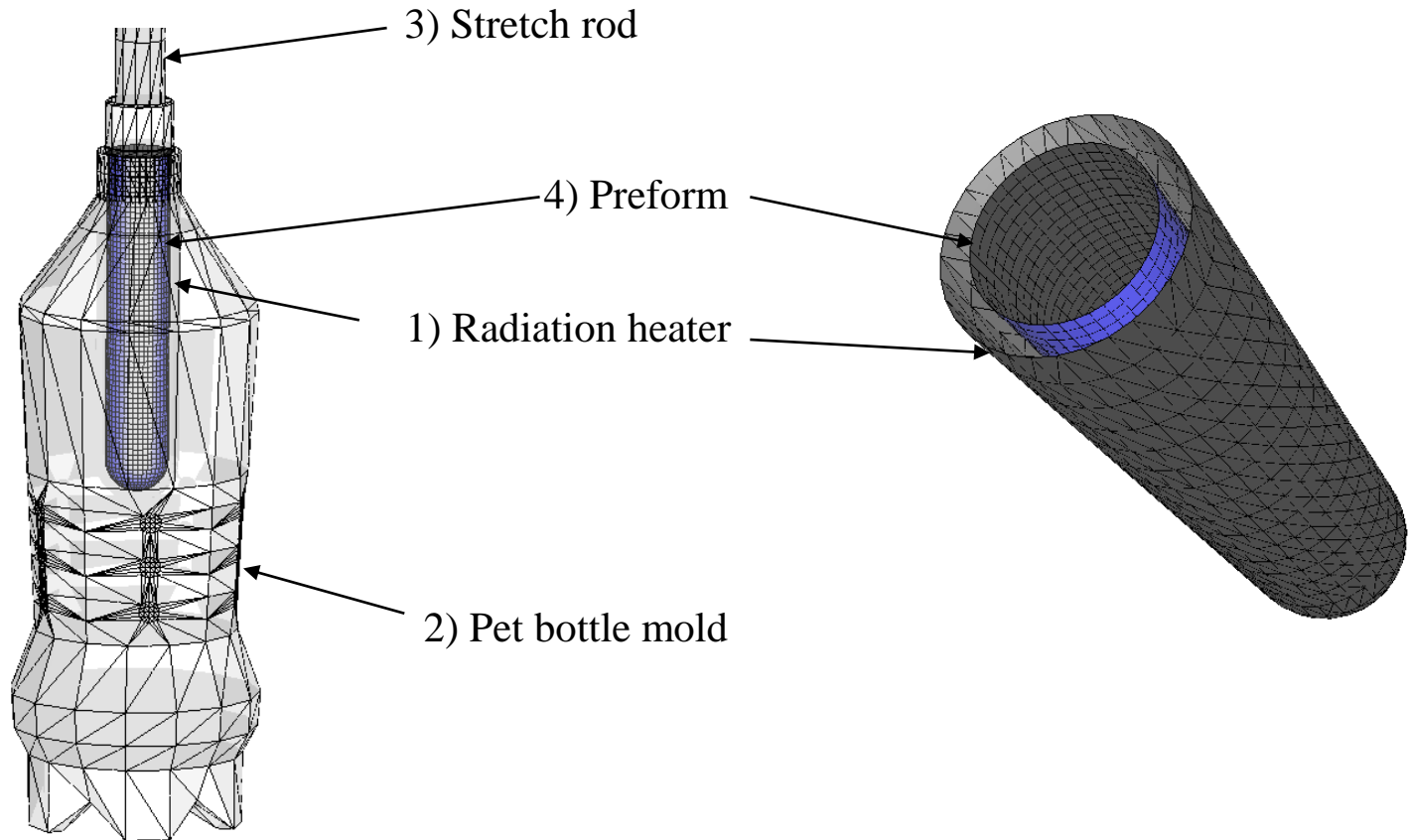


図23 熱輻射加熱工程を含む延伸ブロー成形解析モデル

熱輻射解析機能を有効にするには、計算コントロールフォームに追加された輻射計算チェックボックスをチェック状態とします。輻射源を表現する金型は、プロパティ番号で識別されます。Prop.ID欄には、そのプロパティ番号を指定します。輻射源の環境温度は、従来の金型環境温度で設定します。後述する新機能を利用すると金型温度の時間変化を考慮することも可能です。成形素材が金型と接触した領域は、従来と同様、熱伝達境界として取り扱われます。成形素材や輻射金型の形状や位置が時間的に変化するような条件では、形態係数の更新が必要になります。形態係数サイクル毎更新チェックボックスをチェック状態とすると、非定常計算サイクル毎に形態係数が更新されます。形態係数の計算には多くの計算時間を要するため、輻射による予熱工程で成形素材の変形が無い、あるいは小さい場合には、当チェックボックスは、非チェックとすることを推奨します。

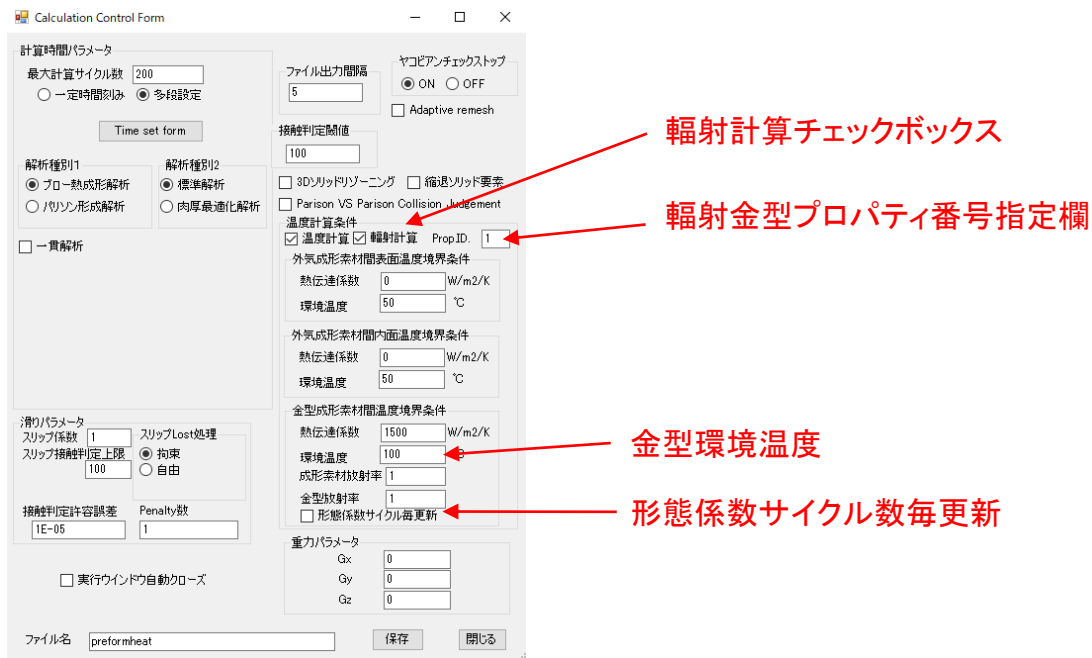


図24 熱輻射解析条件の設定(新規実装機能)

成形工程の時間制御として,

- 1) 輻射加熱工程 : 0~60 sec , 金型温度 (120°C)
- 2) Stretch rod による preform の延伸 : 60~62 sec , rod 移動距離 (プリフォーム軸方向に150mm)
- 3) ブロー圧力の作用時間: 62 sec~

などの条件を採用しました.

熱輻射による加熱時間とブロー成形の工程時間が大幅に異なる場合があります. 従来のように一定の計算時間刻みを採用すると計算サイクル数と計算時間が必要以上に増加することを避けるため, 計算時間刻みの多段設定機能を新規実装しました.



計算コントロールフォーム内のTime set formボタンを押すと下図に示す様に計算時間刻みの計算サイクル数依存性を設定するフォームが表示されます。計算サイクル数と時間刻みを設定し、追加ボタンを押すことで、リストボックスに情報が登録されます。この登録情報は、マウスクリック選択後、各種編集ボタンを押すことで、修正/削除/上下置換などの編集が可能です。本設定では、計算サイクル数1~100の時間刻みが0.6 sec, 101~の計算時間刻みが0.05 secとなります。この条件で、200サイクルの計算を行うとシミュレーション時間は65 secに相当します。

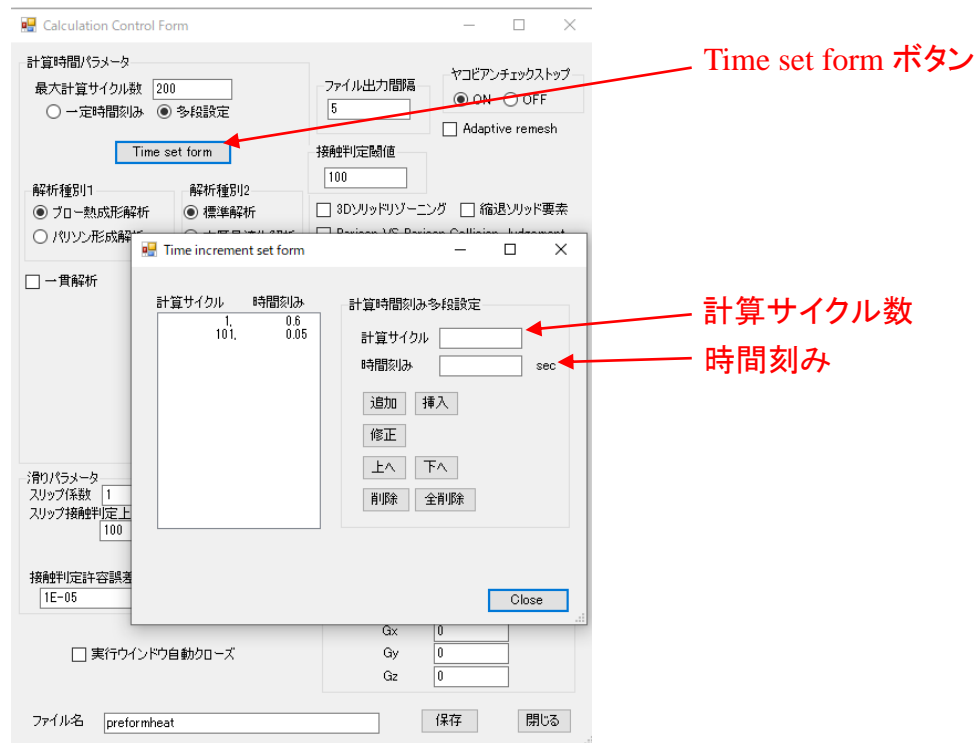


図25 計算時間刻みの多段設定(新規実装機能)

図23に示した3種の金型は、以下に示す様に、プロパティ番号で識別します(プロパティ番号は、従来通り、金型の編集機能を利用して設定可能です)。

- 1) Radiation heater : Prop. ID. 1 ; 熱輻射加熱終了60 sec以降消失
- 2) Pet bottle mold : Prop. ID. 2 ; 併進移動制御無し
- 3) Strech rod : Prop. ID. 3 ; 60~62 sec +z 方向に150 mm移動,62 sec 以降消失

輻射金型やStrech rod を加熱終了時60 secや延伸終了時62 sec において消失される条件は、それ以降のブロー成形工程において成形素材がこれらの金型と未接触でブロー成形されることを意図しています。

これらの条件は、従来の操作に従い、金型移動制御条件タブメニューにおいて、次ページに示す様に個別に設定します。

### 1) Radiation heater

プロ-圧力制御条件 金型移動制御条件 時間依存節点境界条件 時間依存金型温度

金型プロパティ番号  
1

移動方向/回転軸ベクトル情報	移動距離/回転角	開始時刻	終了時刻	消失時刻	変形モード	壁面条件
0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 999, 999, 60, P, F						

移動制御パラメータ

平行移動 Axis-X 0 Axis-Y 1 Axis-Z 0  
 回転 CenterX 0 CenterY 0 CenterZ 0

移動距離 0 mm 制御開始時刻 999 sec  
 制御終了時刻 999 sec

金型消失時刻 60 sec 消失後金型壁面条件  自由  拘束

金型温度情報設定

上へ 挿入 削除 追加  
 下へ 修正 全削除 確定

金型消失時間: 60 sec

### 2) Pet bottle mold

プロ-圧力制御条件 金型移動制御条件 時間依存節点境界条件 時間依存金型温度

金型プロパティ番号  
2

移動方向/回転軸ベクトル情報	移動距離/回転角	開始時刻	終了時刻	消失時刻	変形モード	壁面条件
0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 999, 999, 999, P, F						

移動制御パラメータ

平行移動 Axis-X 0 Axis-Y 1 Axis-Z 0  
 回転 CenterX 0 CenterY 0 CenterZ 0

移動距離 0 mm 制御開始時刻 999 sec  
 制御終了時刻 999 sec

金型消失時刻 999 sec 消失後金型壁面条件  自由  拘束

金型温度情報設定

上へ 挿入 削除 追加  
 下へ 修正 全削除 確定

並進移動距離: 0

### 3) Strech rod

Molding Condition Control Form

プロ-圧力制御条件 金型移動制御条件 時間依存節点境界条件 時間依存金型温度

金型プロパティ番号  
3

移動方向/回転軸ベクトル情報	移動距離	開始時刻	終了時刻	消失時刻	変形モード	壁面条件
0, 0, 1, 0, 0, 0, 150, 60, 62, 62, P, F						

移動制御パラメータ

平行移動 Axis-X 0 Axis-Y 0 Axis-Z 1  
 回転 CenterX 0 CenterY 0 CenterZ 0

移動距離 150 mm 制御開始時刻 60 sec  
 制御終了時刻 62 sec

金型消失時刻 62 sec 消失後金型壁面条件  自由  拘束

金型温度情報設定

上へ 挿入 削除 追加  
 下へ 修正 全削除 確定

時刻: 60~62 sec の並進移動距離: 150 mm

金型消失時間: 62 sec

図26 金型の移動制御・消滅条件の設定(既往機能)

ブロー圧力は、輻射加熱終了後60 secより、下図に示すように時間経過とともに増加させる制御条件を採用しました。

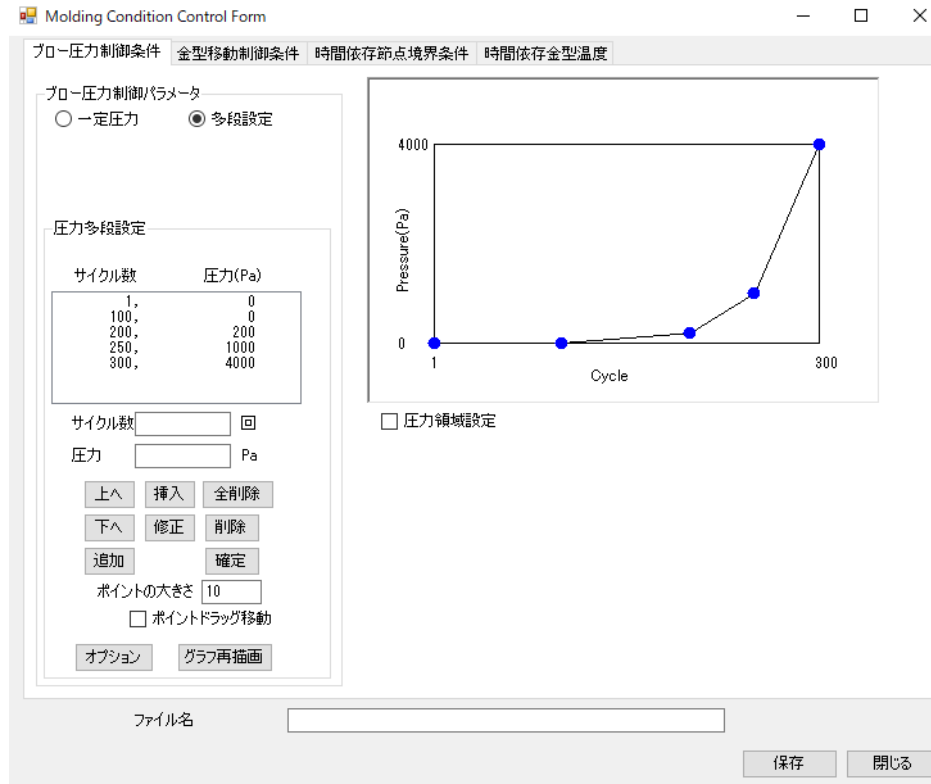


図27 ブロー圧力の制御条件

新規実装された時間依存金型温度タブメニューにおいて、金型設定温度の時間依存性の設定が可能になりました。時刻と温度を設定し、追加ボタンを押すことで、設定情報がリストボックスに登録されます。登録情報をマウスクリックし、各種編集ボタンを押すことで、修正/削除/上下置換などの編集が可能です。また、輻射計算の設定欄に1を入力すると輻射解析が有効、0とすると無効になります。以下に示す設定では、0~60 secの時間区間内において金型温度を120℃として輻射計算を有効、60.1 sec以降は、金型温度を50℃として輻射計算を無効にしています。輻射金型の設定温度が120℃、接触対象となるPet ボトル金型の設定温度が50℃と想定しました。

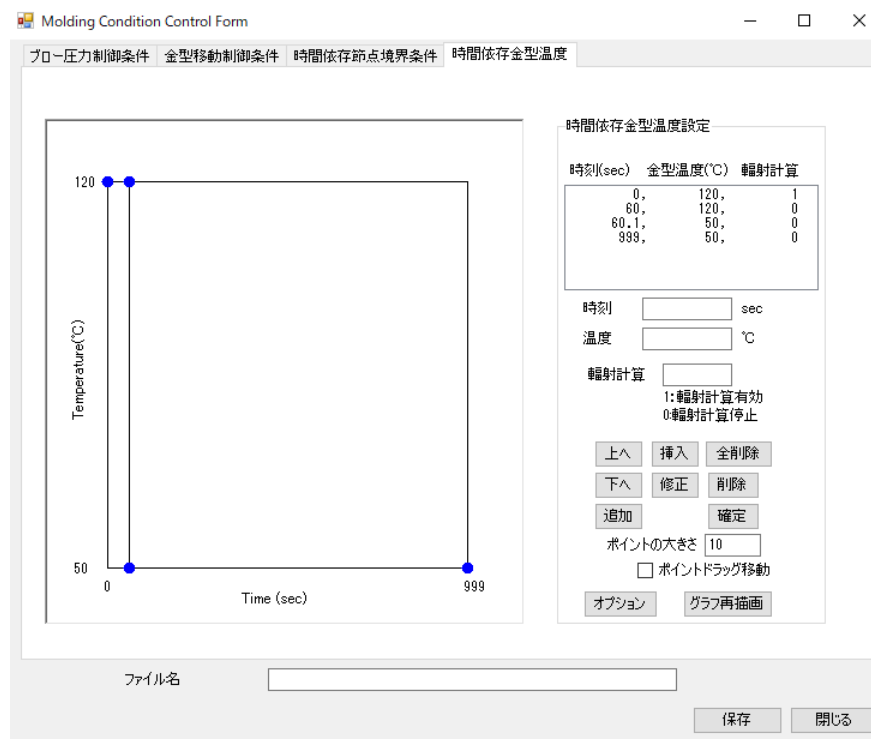


図28 金型温度時間依存性の設定(新規実装機能)

材料物性は、下図に示すG'Sell Jonas 粘塑性モデルを利用して表現しました。

Material Property Set Form

粘度設定 熱物性設定 G'Sell-Jonas model parameter Graph plot Generalized noi

$$\sigma = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}, \eta = \frac{1}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}},$$

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon} : \dot{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} \text{tr}(\dot{\varepsilon} \dot{\varepsilon})},$$

$$\bar{\sigma} = K(T)(1 - \exp(-A\bar{\varepsilon})) \exp(B\bar{\varepsilon}^C) \dot{\bar{\varepsilon}}^m,$$

$$K(T) = k_0 \exp\left(\frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}}\right).$$

Material Parameter

k0	1000	Pa·s	C1	8.86
A	20		C2	101.6
B	0.02		Tref	80
C	1.2		粘度評価最小ひずみ	
m	0.087			0.1

G'Sell Jonas材料モデルファイル名

読込

図29 G'Sell Jonas 粘塑性モデルパラメータ

下図にプリフォーム形状と温度の時間変化の予測結果を示します。

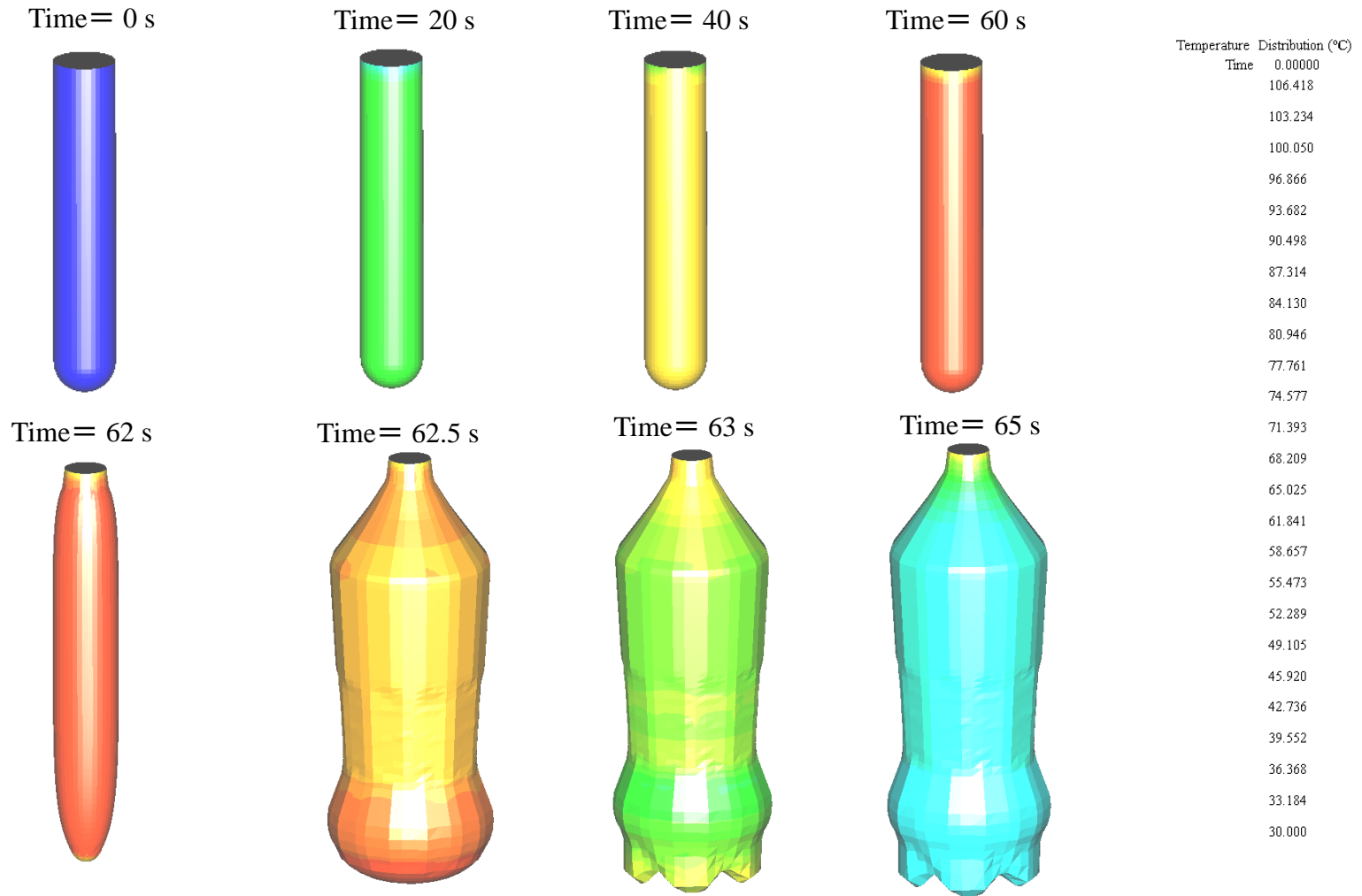


図30 プリフォーム形状と温度の時間変化

下図にプリフォーム中央部で予測される温度の時間変化を示します。0~60 sec の輻射加熱工程(金型温度:120℃)において,プリフォームは,初期温度30℃から110℃程度まで緩やかに加熱されます。その後,プリフォームは, 2sec の延伸工程を経て,ブロー圧力の作用を受けて急速に膨張し, PETボトル金型と接触します。金型接触後は, 50℃に温調された金型との熱伝達(熱伝達係数1500W/m<sup>2</sup>/K)の熱交換の影響を受けて急速に金型温度に漸近します。

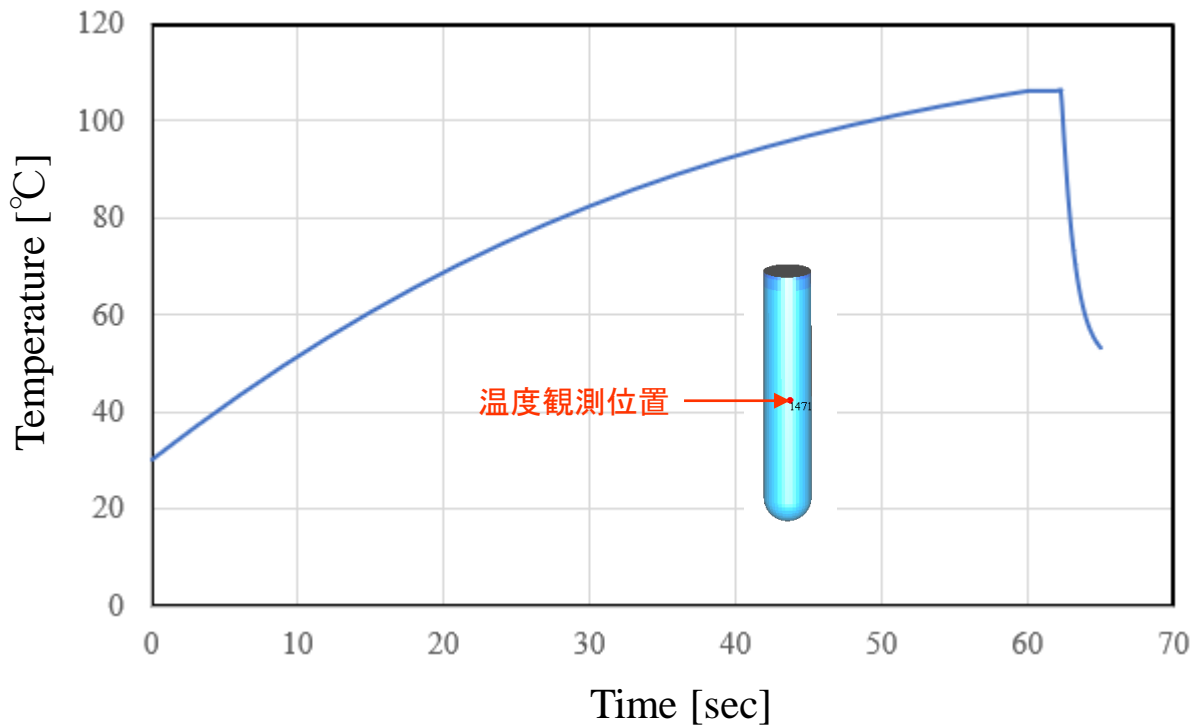


図31 プリフォーム中央部で予測される温度時間変化のグラフプロット



下図にプリフォーム形状と肉厚の時間変化の予測結果を示します。

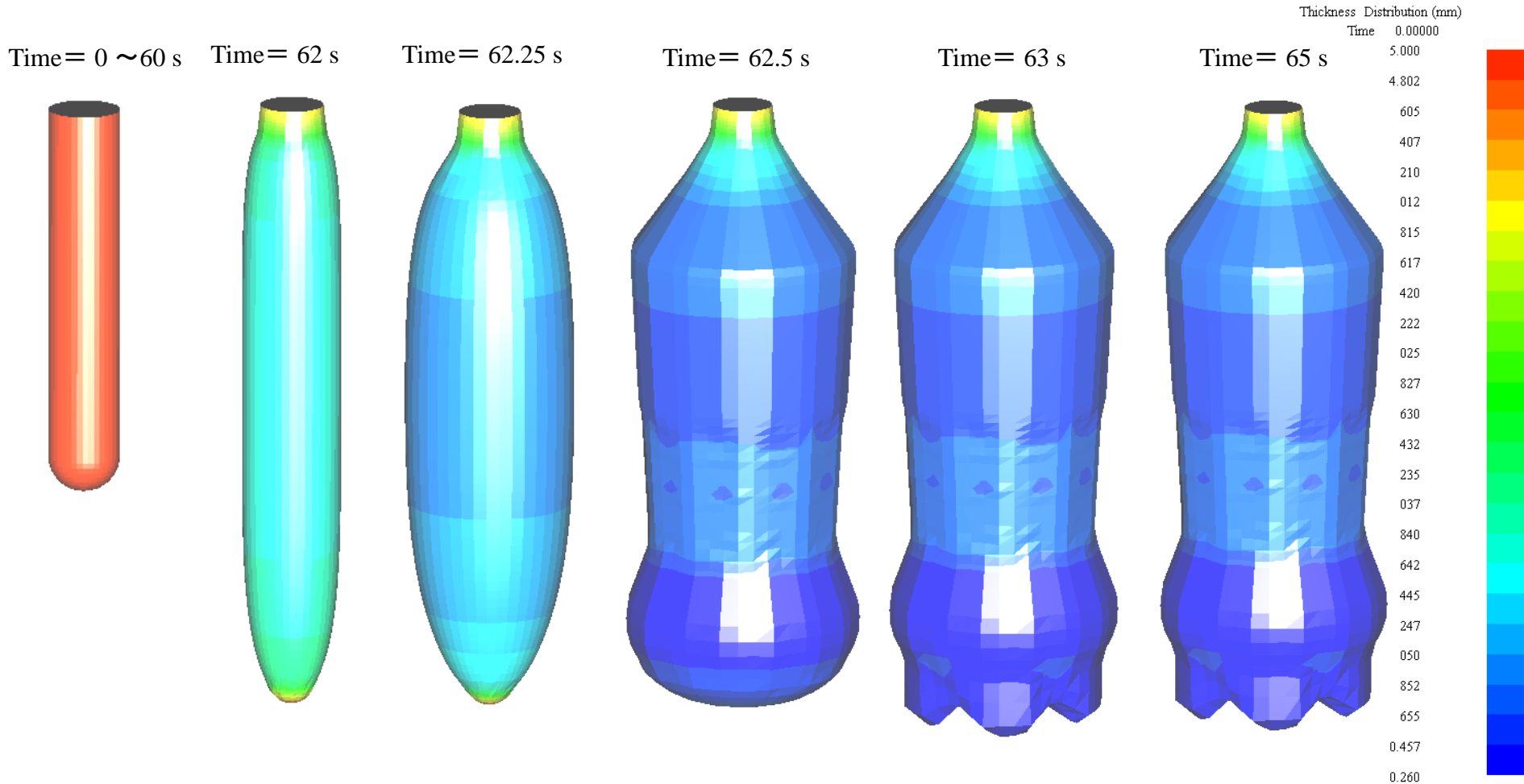


図32 プリフォーム形状と肉厚の時間変化

Simulation of stretch blow  
molding with radiation  
heating  
(Temperature distribution)

図33 熱輻射加熱を伴う延伸ブロー成形プロセス解析結果ファイルを利用したアニメーション動画作成例

### 3) すべり解析機能の改良

Navier スリップモデルを利用した滑り解析機能を利用する際に、金型要素の品質と計算時間について留意する必要があります。

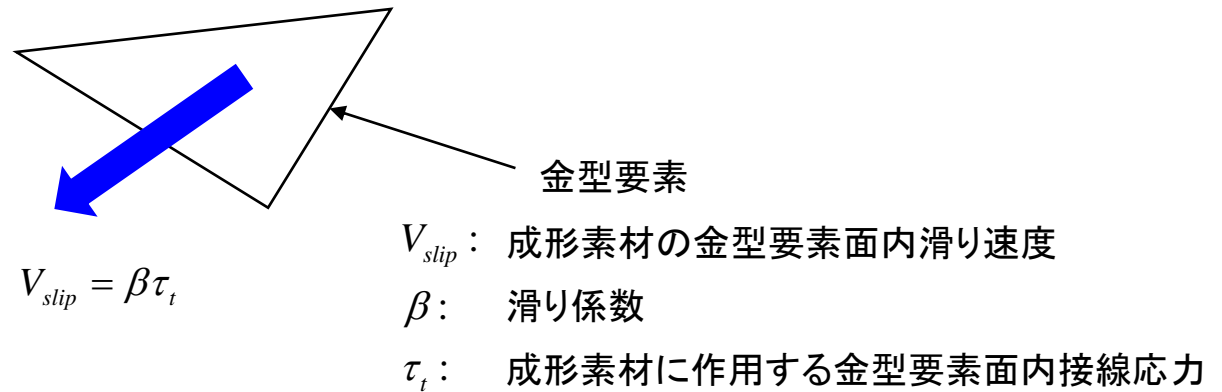


図34 Navier スリップモデル

滑り速度や計算時間刻みが大きい場合、下図に示す様に滑り運動の軌跡は、滑り速度を計算した元の金型要素面から逸脱する状況となります。このような場合には、金型要素の隣接関係の情報を利用し、滑り運動の軌跡を軌跡長を変えない条件下において隣接金型要素面に沿って折り曲げるモデル化を採用しています。新規バージョンでは、隣接関係の検索範囲を従来の2倍に拡張したことに加えて、要素面の転写計算アルゴリズムの精度を高め、滑り解析機能を強化しています(既往バージョンVer.6と同様、滑り解析機能を利用する場合、隣接関係の情報を求めるために金型要素の節点のマージ処理を行う必要があります)。

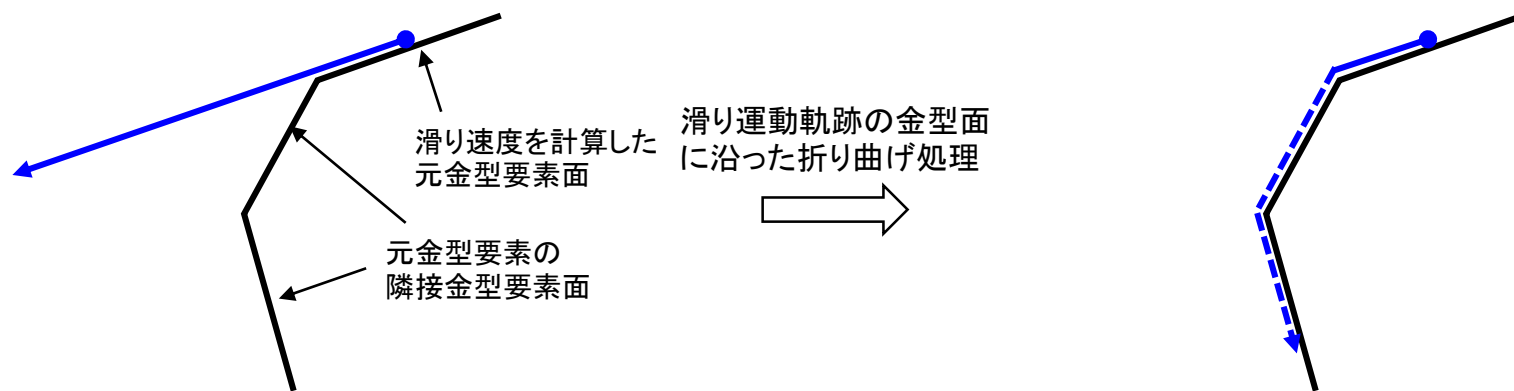


図35 滑り運動軌跡のモデル化

新規滑り解析機能の動作確認を目的として、下図に示す2モデルを採用したテストシミュレーションを実施しました。モデル①では、正方形状のシート素材を下方側から金型プラグで突き上げて変形させます。モデル②では、円筒状素材を左右に延伸させつつ周囲の円筒状金型内でブロー圧力を作用させて周方向に変形させます。接触面のせん断応力が大きい場合(素材の粘度が高い場合)、小さな滑り係数を設定しても、滑り速度は大きくなります。また、滑り係数を大きくすると滑り速度は増加しますが、完全滑りに相当する滑り速度がその上限値となり、更に滑り係数を大きくしても状態は変化しません。両モデルとも金型と素材間の滑りが顕著な条件(滑り係数:10)を採用しています。

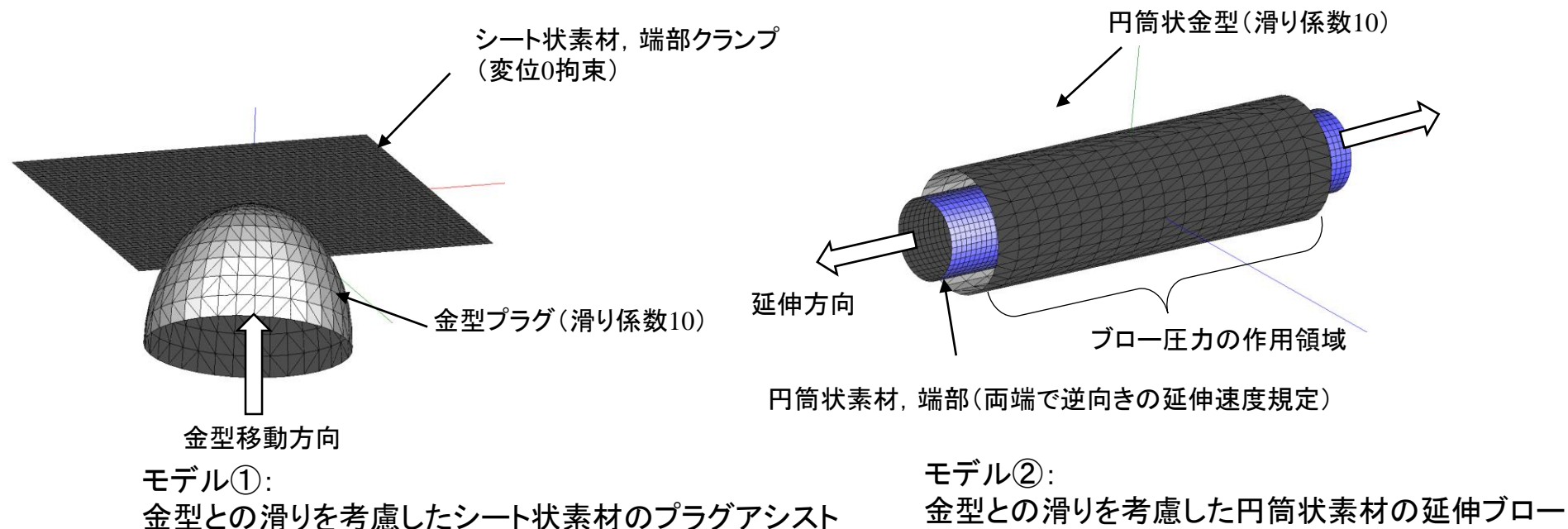


図36 滑り解析用テストモデル

モデル①において滑り無し条件を採用すると、金型プラグと最初に接触する部位の肉厚が最も厚くなり、接触の遅延に伴って周囲の肉厚が徐々に減少します。滑りを考慮した場合には、滑り係数の増加に伴って肉厚分布が変化します。滑り係数を大きく設定すると、接触後の節点が周囲から延伸される効果が増し、金型接触部の肉厚は、周囲よりも薄くなります。滑りが顕著な場合、成形素材を構成する要素の変形が大きくなり、安定計算を保証することが難しくなります。既往バージョンVer.6と比較すると新規バージョンVer.7では、下図に示す様に要素の歪が低減し、金型への転写精度や計算安定性が向上しています。

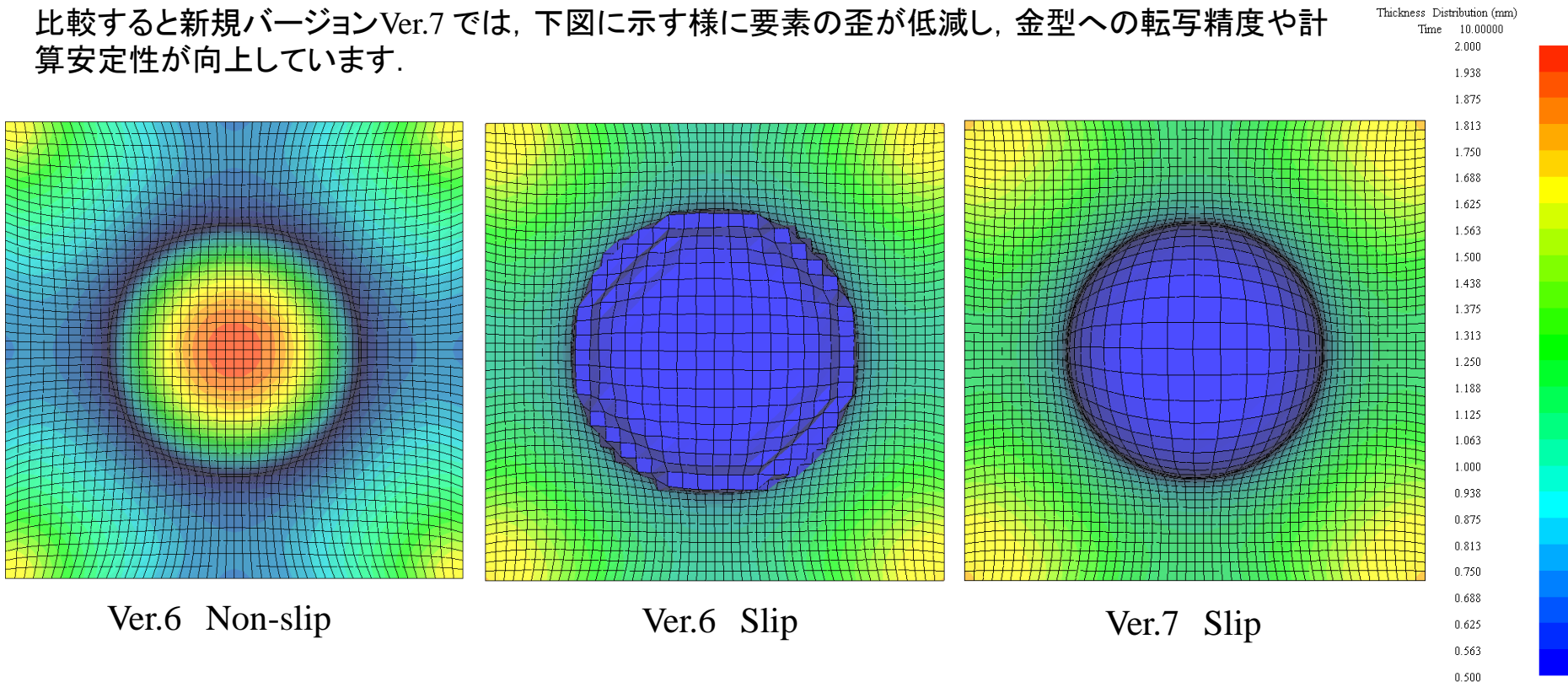


図37 最終肉厚分布予測結果の比較(モデル①)

モデル②を採用した既往バージョンVer.6の解析では、円筒状素材の延伸に伴い、計算要素の歪が過度に大きくなり、途中で解析がストップします。一方、同一の解析条件を採用した新規バージョンVer.7の解析では、滑り解析の計算安定性が向上し、既往の2倍以上の延伸条件を採用しても正常に解析を遂行することが可能です。滑り解析は、標準的な滑り無し解析と比較して、計算時間が長くなり、解析の難度も高くなりますが、Ver.7の滑り解析機能は、Ver.6と比較して明らかに向上しています。

Thickness Distribution (mm)

Time 10.00000

0.720

0.715

0.710

0.705

0.700

0.695

0.690

0.685

0.680

0.675

0.670

0.665

0.660

0.655

0.650

0.645

0.640

0.635

0.630

0.625

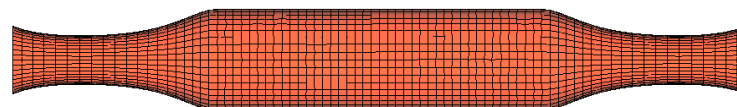
0.620

0.615

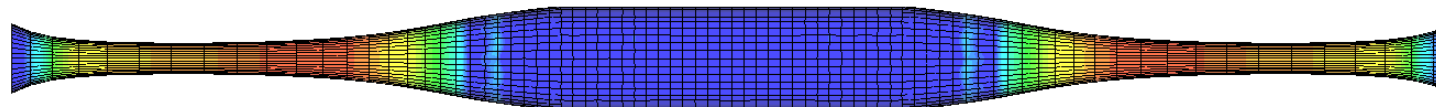
0.610

0.605

0.600



Ver.6 Slip



Ver.7 Slip

図38 最終肉厚分布予測結果の比較(モデル②)



成形条件コントロールフォームに素材と金型間の滑り係数を金型モデルのプロパティ番号毎に個別設定する機能が追加されました。金型滑り係数タブメニューを選択し、金型モデルのプロパティ番号と素材間の滑り係数を設定し、追加ボタンを押します。リストボックスに登録された情報に従って、金型モデルのプロパティ番号毎に異なる滑り係数が考慮されます。当リストボックスに情報が登録されていない場合には、従来通り、計算コントロールファイル内で設定する単一の滑り係数が考慮されます。

Molding Condition Control Form

プロ-圧力制御条件 | 金型移動制御条件 | 時間依存節点境界条件 | 時間依存金型温度 | 金型滑り係数

プロパティ番号	滑り係数
1.	10
2.	0.001

プロパティ番号

滑り係数

ファイル名

図39 金型モデルのプロパティ番号を利用した滑り係数の設定機能



プロパティ番号	滑り係数
1,	10
2,	0.001

プロパティ番号1:  
滑り係数10

プロパティ番号2:  
滑り係数0.001

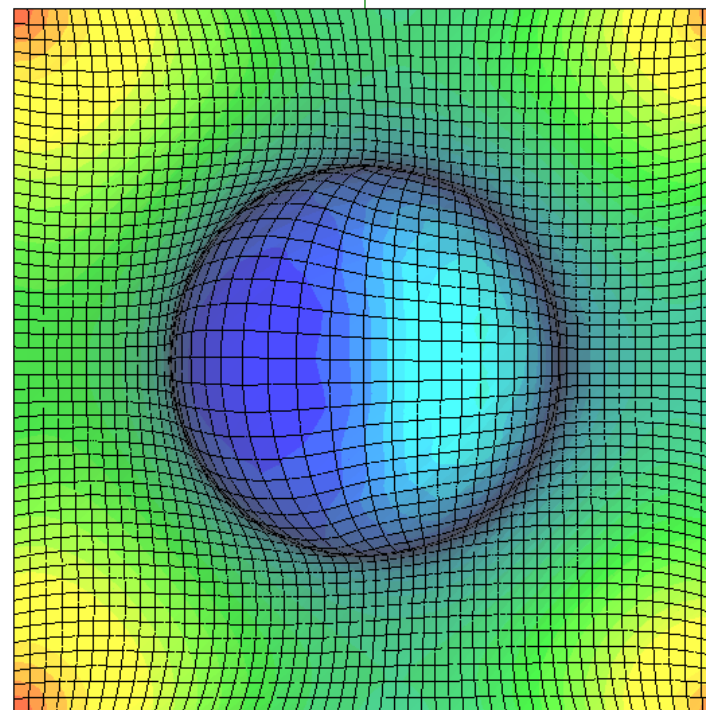
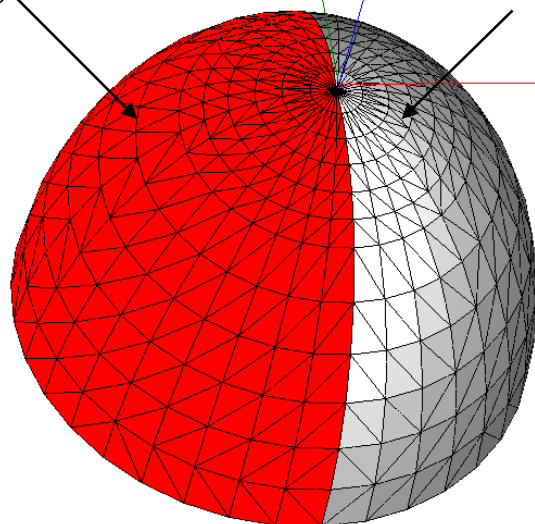


図40 金型モデルの滑り係数を領域(プロパティ番号)毎に変化させた滑り解析結果

# Simulation of plug assist considering slip between mold and sheet

図41 金型との滑りを考量したプラグアシスト解析結果のアニメーション

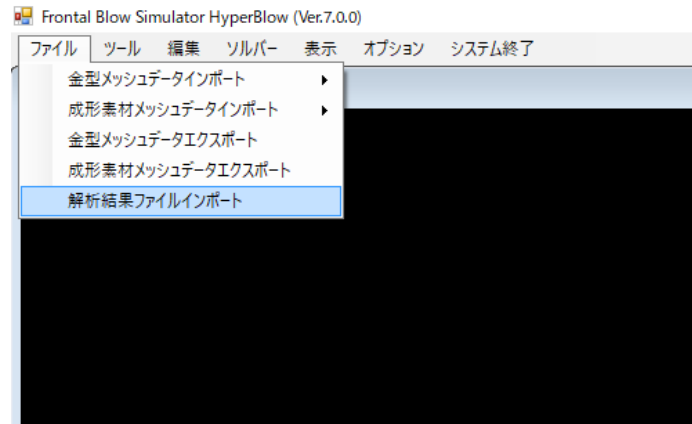
# Simulation of stretch blow considering slip between mold and parison

図42 金型との滑りを考量した延伸ブロー解析結果のアニメーション

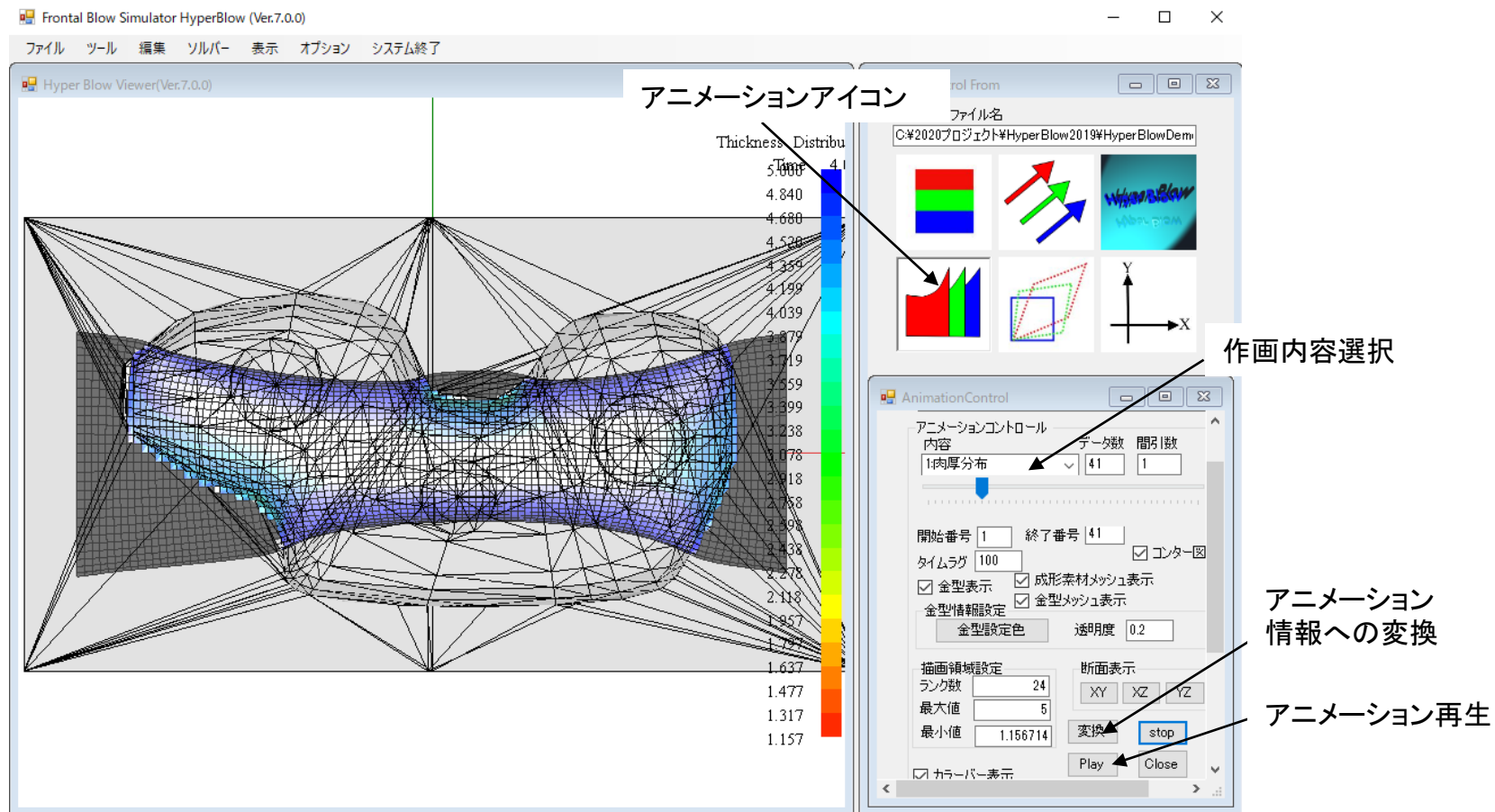
## 4) アニメーション動画ファイルの作成機能

Hyper Blow Ver.7.0.0では、アニメーション画像のビットマップファイルへの保存機能が新規実装されました。当ビットマップファイル情報のアニメーション再生機能もサポートされます。以下にこれら新機能の運用方法について解説します。

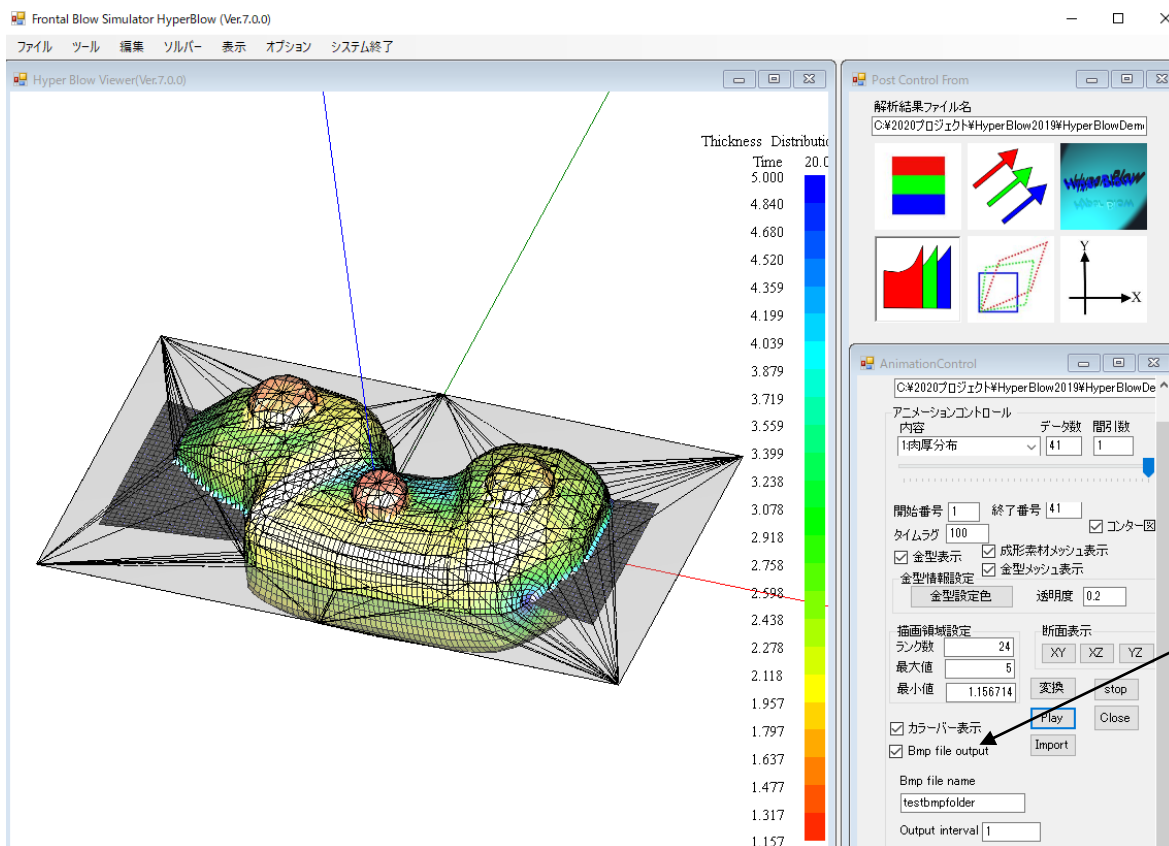
- 1) メインメニューのファイル/解析結果インポートをプルダウン選択し、表示されるファイルオープンダイアログボックスで作画対象とする解析結果ファイルを選択します(従来操作)。



2) アニメーションアイコンをマウスクリックし、表示されるパネルで作画内容を選択して変換ボタンを押します。その後、Playボタンを押すことでアニメーションが再生されます(従来操作)。

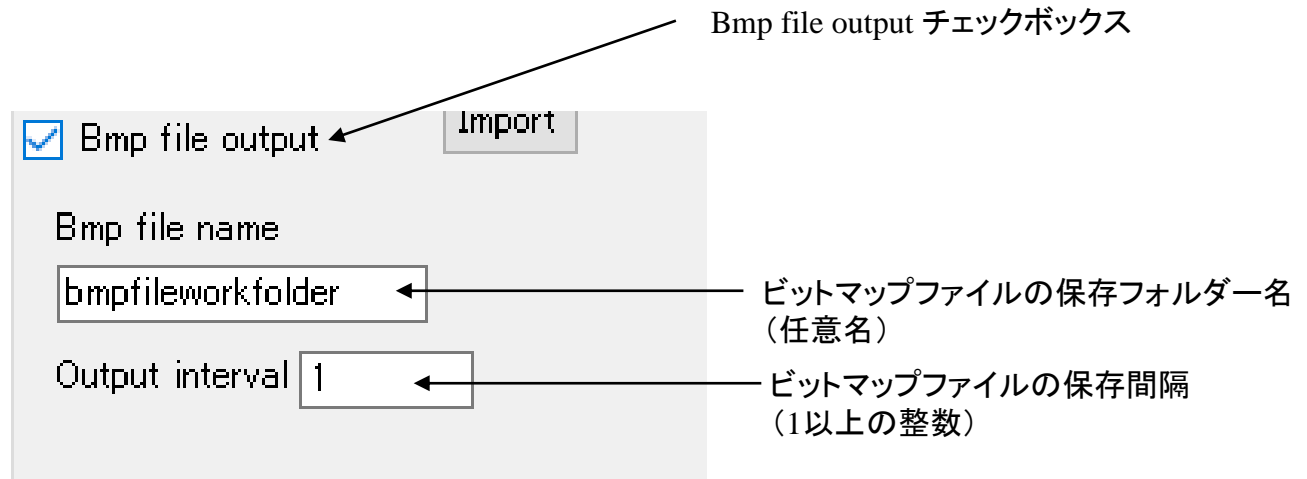


Playボタンを押してアニメーションを再生し、Stopボタンを押してアニメーションをポーズ状態とします。保存したい状態に画像情報を拡大/縮小した後、パネルに新規実装されたbmp file out チェックボックスをチェック状態としてPlayボタンを押して再度アニメーションを再生すると各ステップのアニメーション画像が、指定フォルダ内のビットマップファイルに自動的に保存されます(新規操作)。



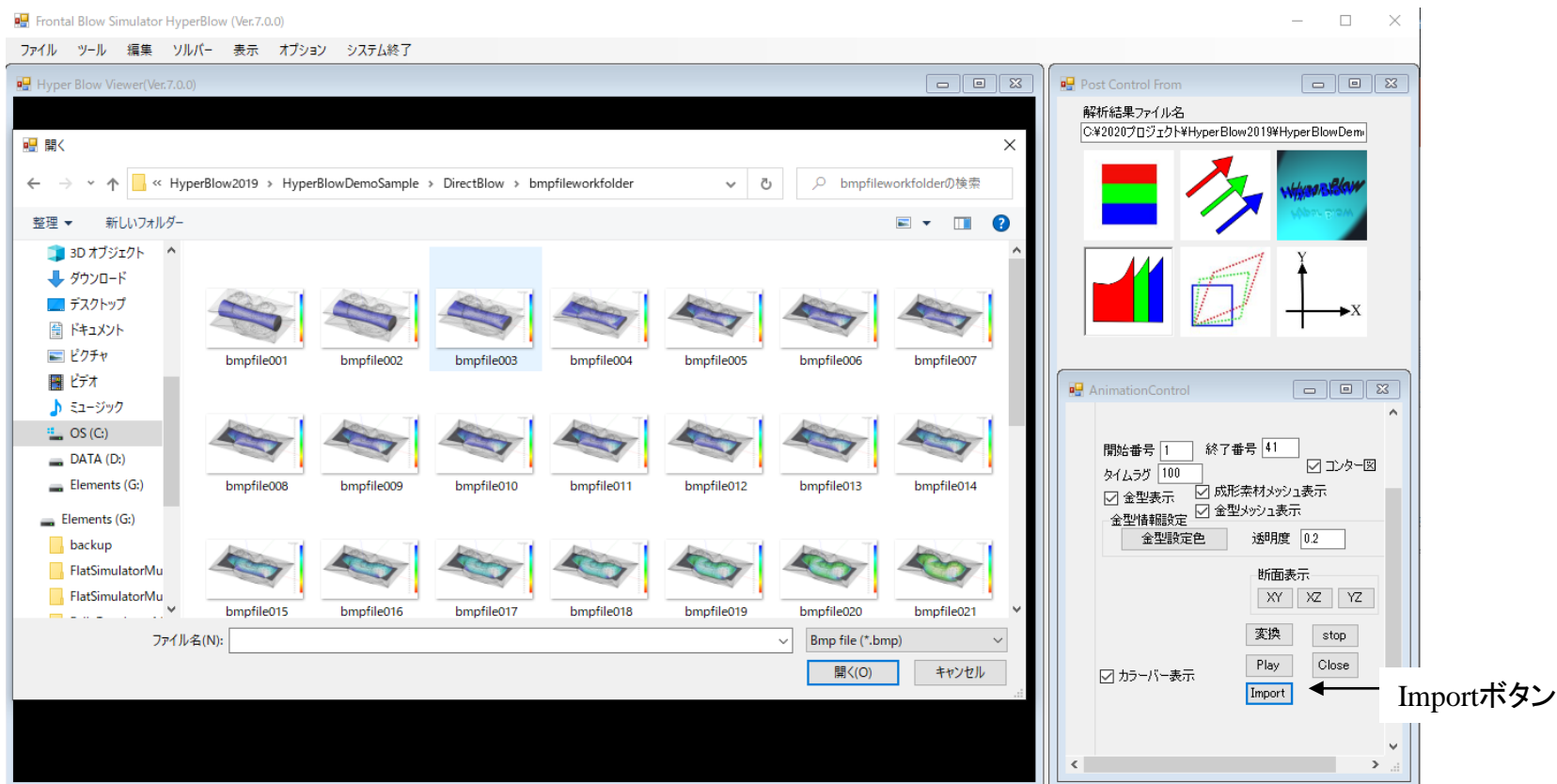
Bmp file output  
チェックボックス

Bmp file output チェックボックスをチェック状態とすると、ビットマップファイルの保存フォルダー名と出力間隔の指定欄が表示されます。保存フォルダー名は任意名の指定が可能です。指定された保存フォルダーは、解析結果をインポートした元フォルダー内に生成されます。ビットマップファイルは、指定保存フォルダー内にbmpfile###.bmpの名称で保存されます。###には、000から開始される連番が自動的に設定されます。Output interval を1とすると全アニメーション情報が保存されます。1より大きい整数を指定すると、指定整数間隔で間引きされてアニメーション情報が保存されます。



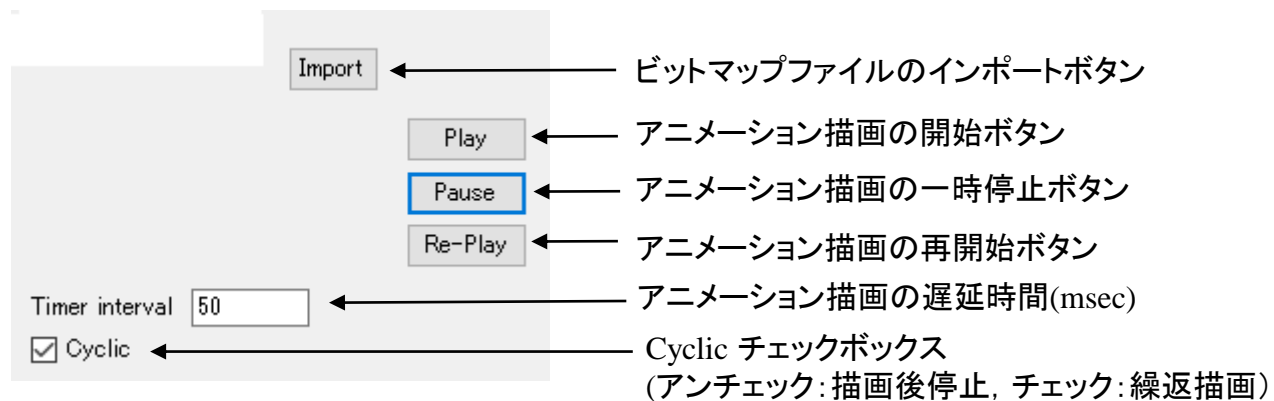
3) メインメニューのファイル/解析結果インポートをプルダウン選択し、表示されるファイルオープンダイアログボックスで解析結果ファイルを選択します(新規操作).

4) アニメーションアイコンをマウスクリックし、表示されるパネルでimportボタンを押し、作画対象となるビットマップファイルフォルダを選択します. 表示されるファイルオープンダイアログボックス内の何れかの保存ファイルをマウスクリック選択します(新規操作).





5) importボタンを押した後に表示されるPlayを押すとアニメーションの描画が開始されます。Pauseボタンを押すとアニメーション描画が一時停止し、Re-Playボタンを押すとアニメーション描画が再開されます。Timer intervalの指定単位はmsecです。この設定値の増加に伴ってアニメーションの描画速度は遅くなります。Cyclicチェックボックスをチェック状態とするとアニメーション描画が繰り返されます。

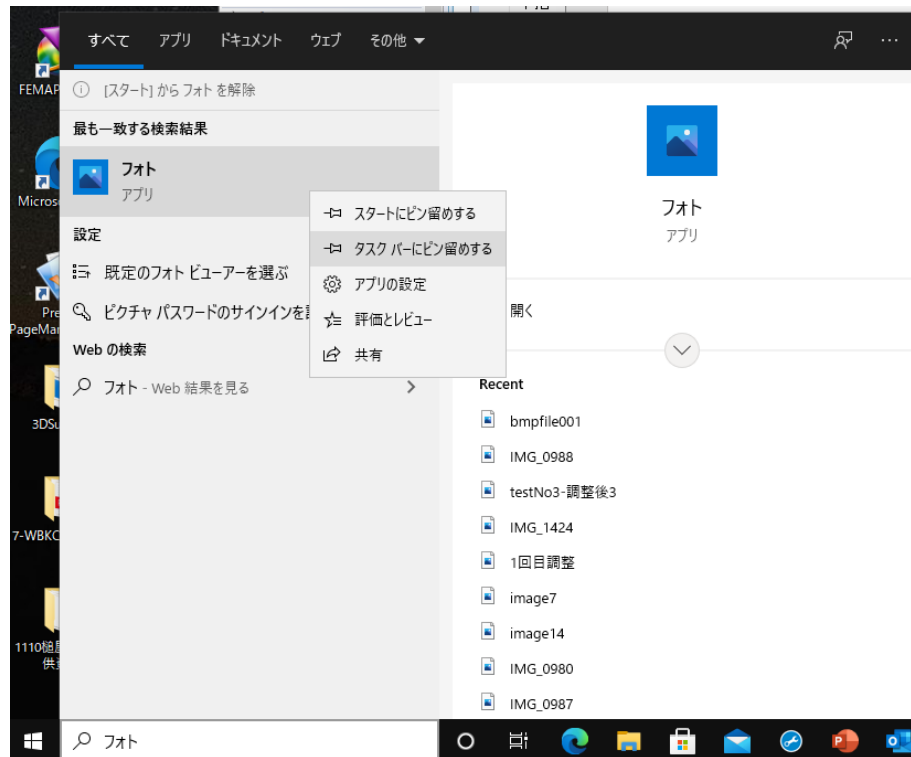


## ビデオファイルの作成

Windows 10の標準アプリケーションとして提供されたフォトを利用し、複数のビットマップファイルを利用した画像ファイルの作成が可能です。以下にフォトを利用した画像ファイルの作成方法について解説します。

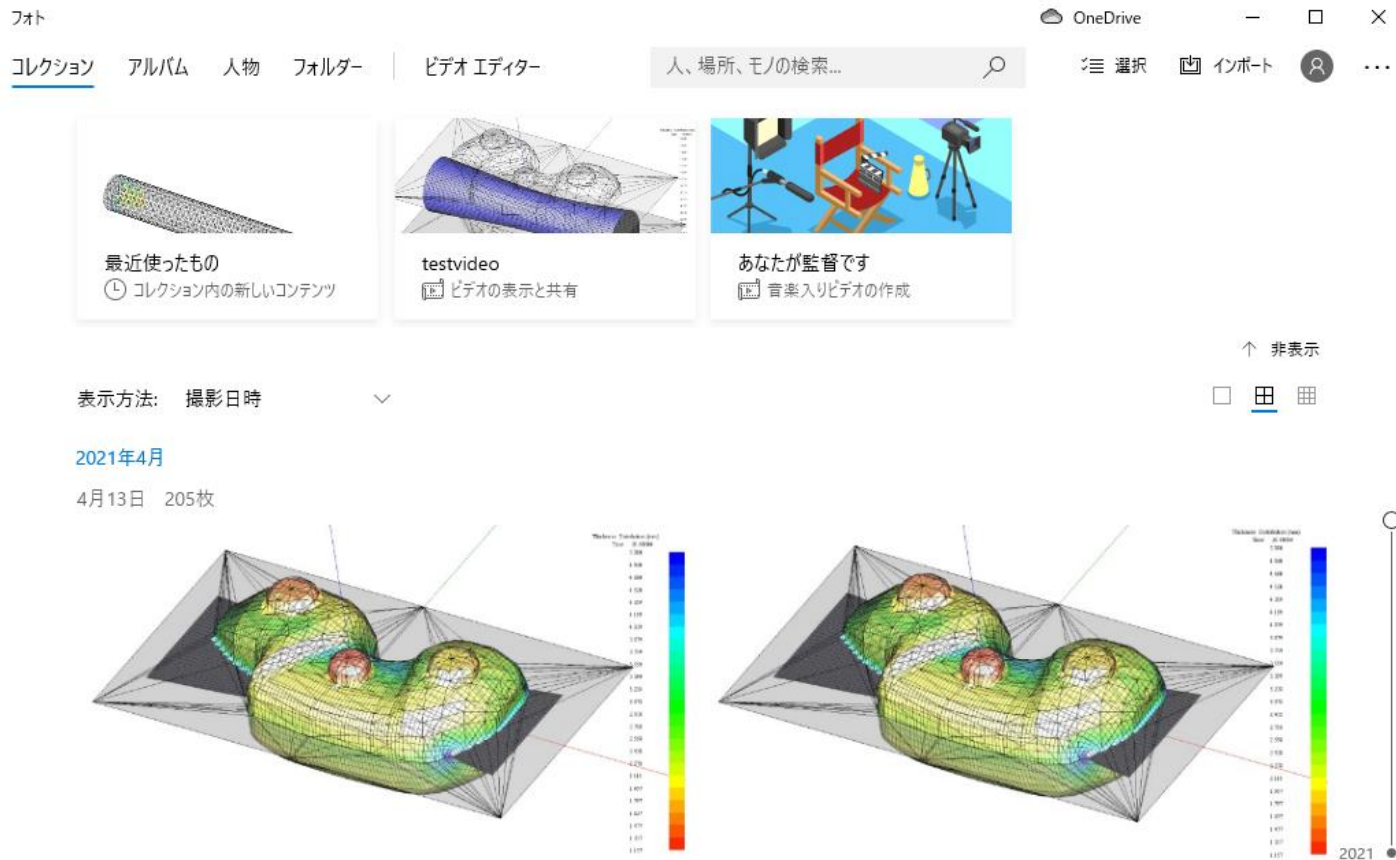
## フォトのタスクバーへの登録

Windowsスタートアイコンの右に表示されている『ここに入力して検索』の欄にフォトと入力します。フォトが標準アプリケーションとして提供されている場合には、下図に示すようにフォトのアイコンが表示されますので、マウスポインターをアイコン上にフォーカスし、マウス右クリックボタンを押してタスクバーにピン留めするをプルダウン選択します。



# フォトの起動

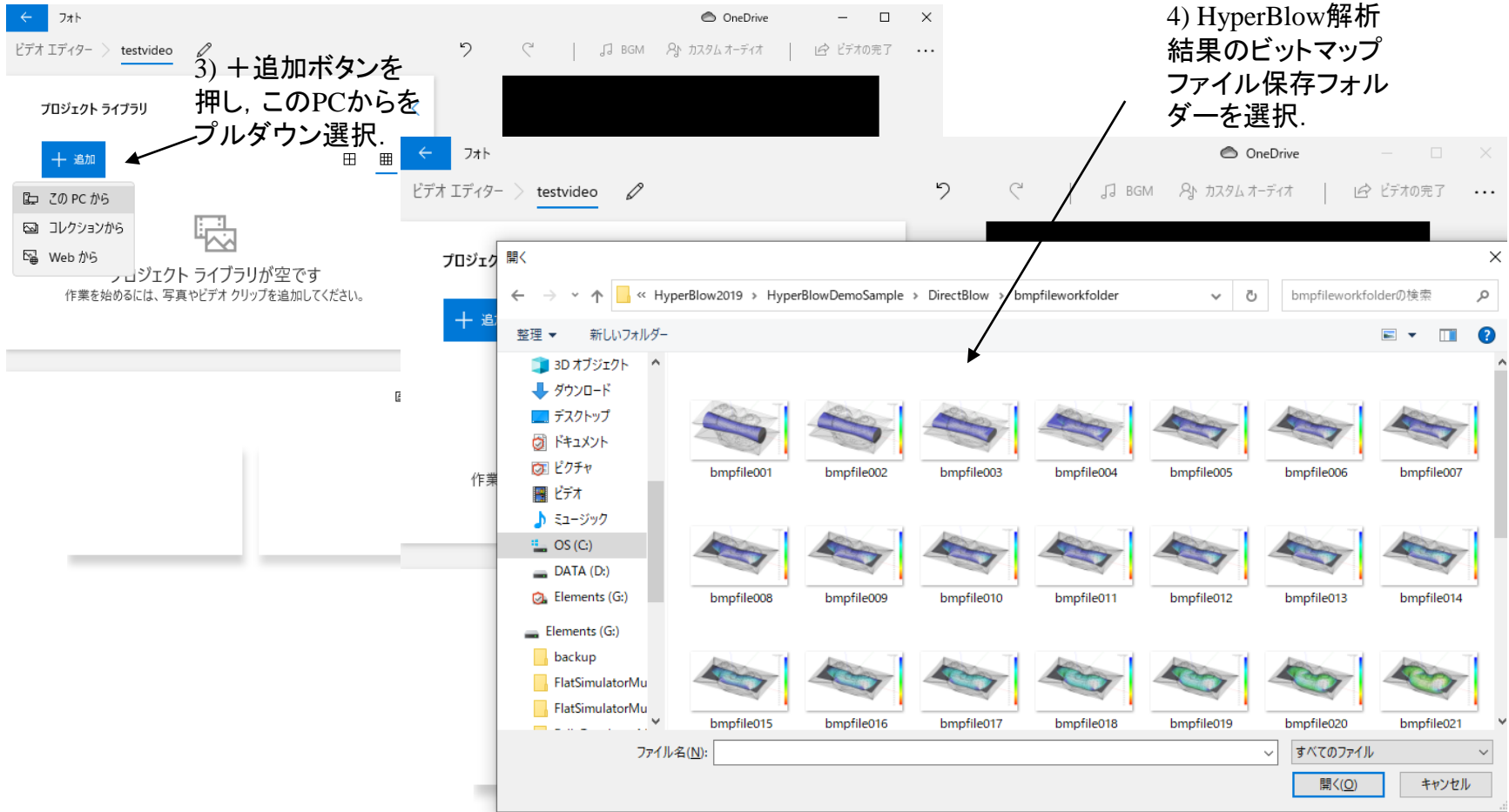
タスクバーのフォトアイコンをマウスクリックすることでフォトが起動します。



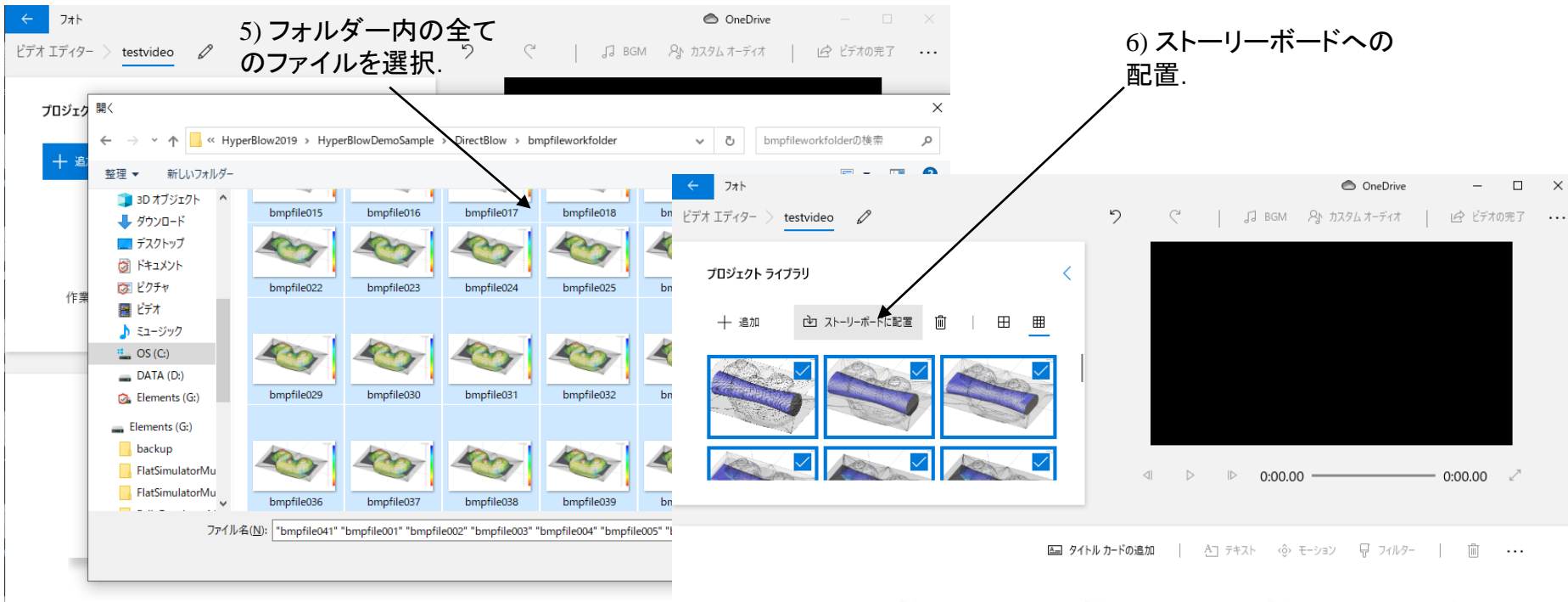
メインメニューでビデオエディターをマウスクリック選択し、新しいビデオプロジェクトボタンを押して表示されるメッセージフォームにビデオファイル名を指定してOKボタンを押します。



+追加ボタンを押し、このPCからをプルダウン選択します。表示されるファイルダイアログボックスで、ビデオファイル作成の対象となるビットマップファイルの格納フォルダーを選択します。

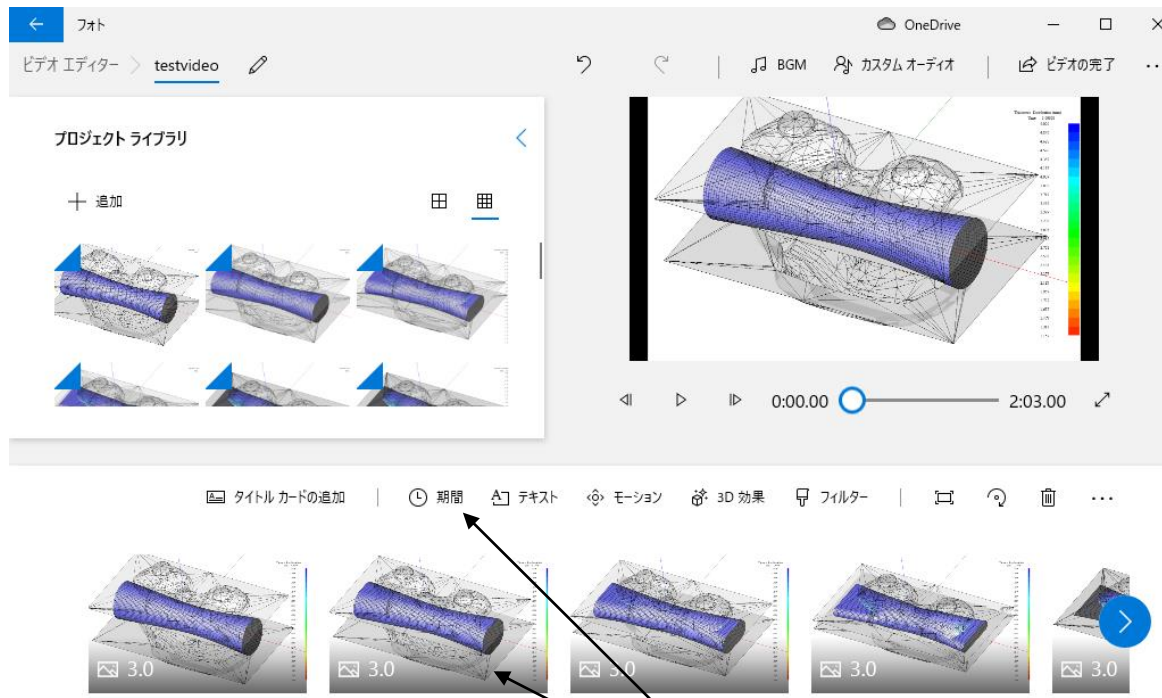


格納フォルダーの左上に表示される先頭のビットマップファイルをマウスクリック選択し、右端のスクロールバーを移動して末尾のビットマップファイルを表示させ、shift keyを押しながら、末尾ビットマップをクリック選択すると下図に示すように格納フォルダー内の全てのビットマップファイルが選択されます。この状態で開くボタンを押します。次に表示されるフォームにおいてストーリーボードに配置ボタンを押します。



ここにプロジェクト ライブラリから項目をドラッグしてください

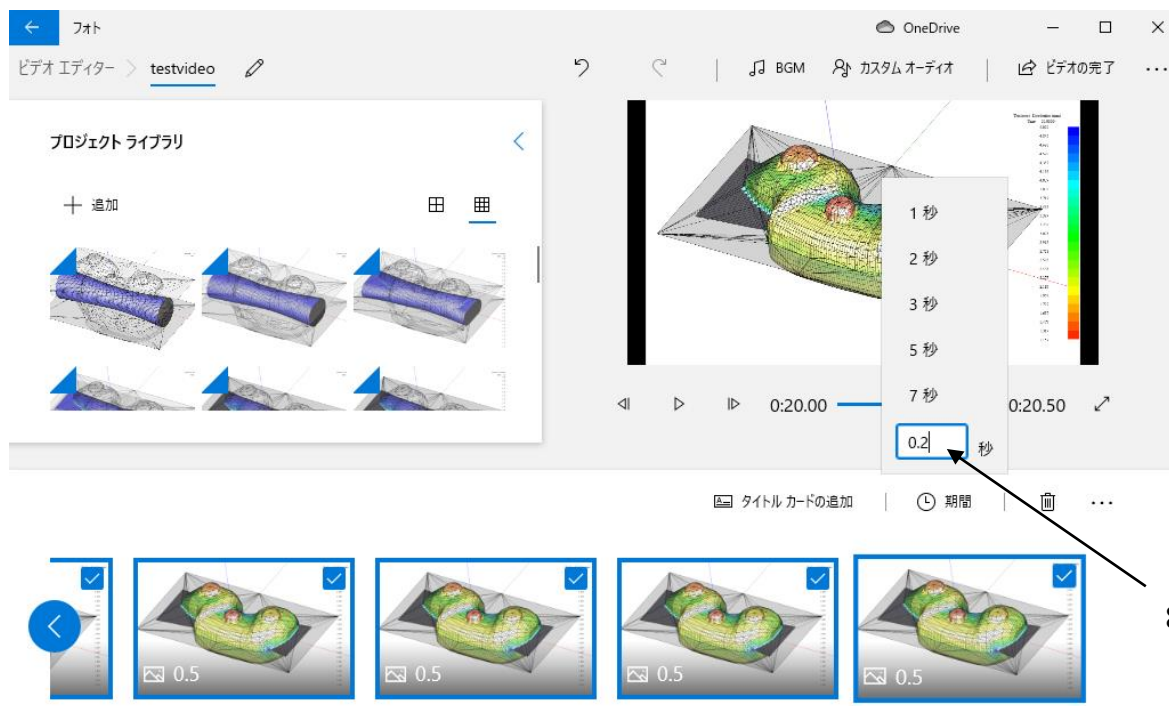
下部に表示されるストーリーボードに登録されたビットマップファイルがビデオファイルの情報として変換されます。デフォルト状態では、一コマ当たりの再生時間は3 secになっています。HyperBlowの結果をアニメーション表示するには、再生時間を短縮することが適します。例えば、一コマ当たりの再生時間を0.2 secにするには、ストーリーボードの左端のビットマップファイルをマウスクリック選択し、>ボタンを押して右端末尾のビットマップファイルをShift keyを押しながらマウスクリック選択して全ファイルを一括選択します。



7) ストーリーボードの登録情報を全て選択し、期間ボタンを押す。

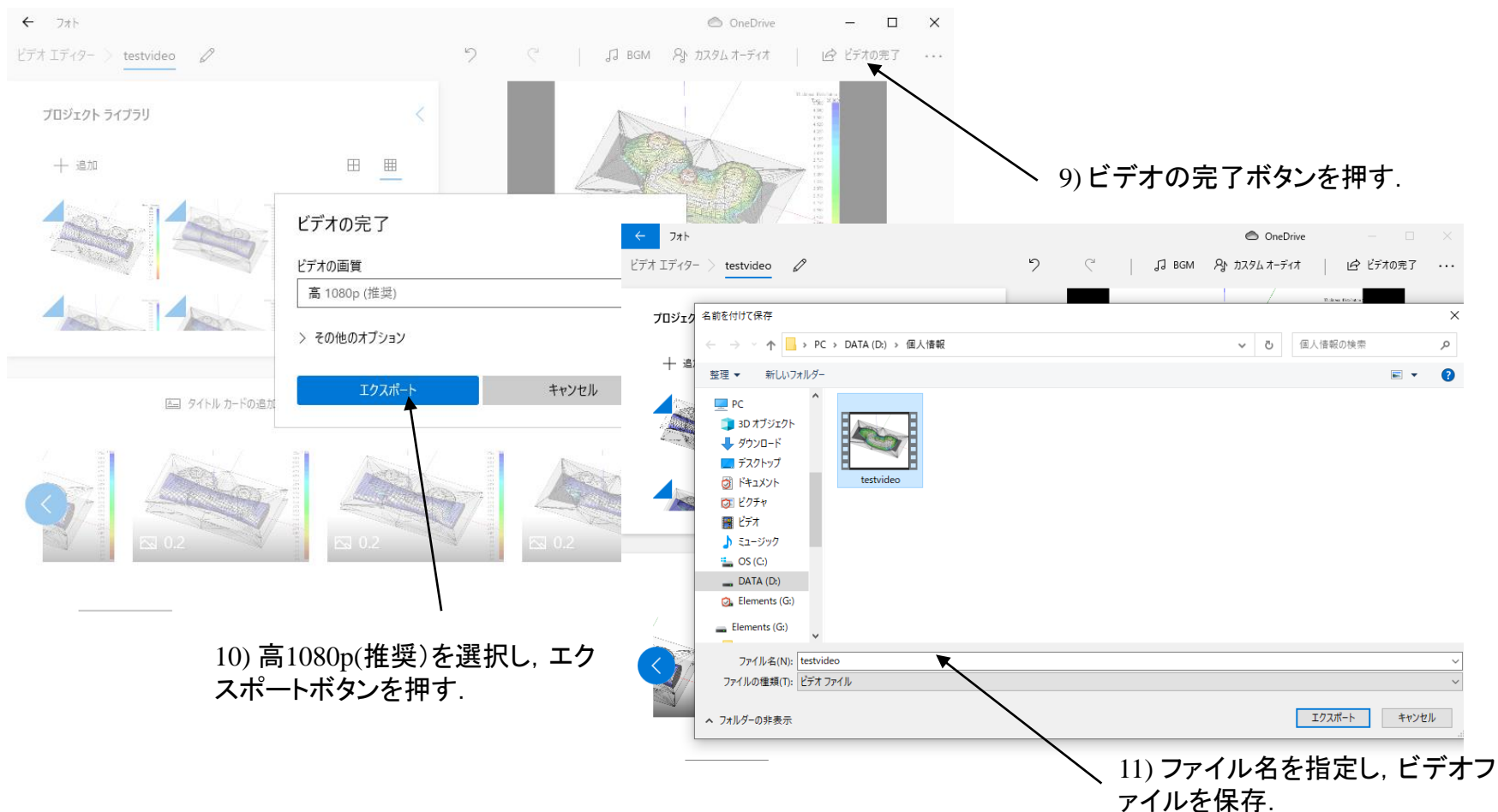


期間ボタンを押し、下端のテキストボックスに一コマ当たりの再生時間を指定し、Enter keyを押します。右上に表示されているビデオ再生パネルで再生ボタンを押し、ビデオの再生状況を確認できます。

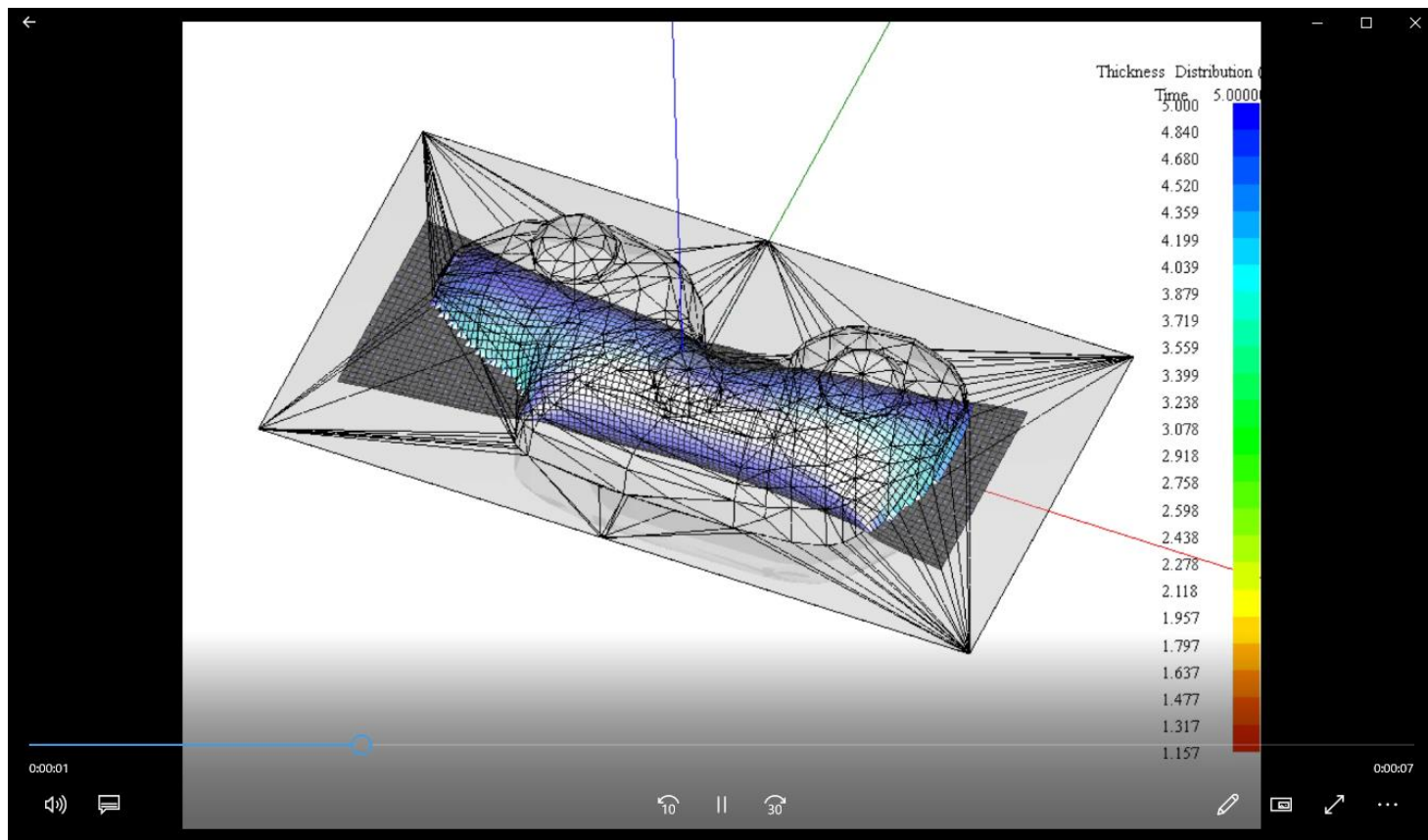


8) 再生時間の変更.

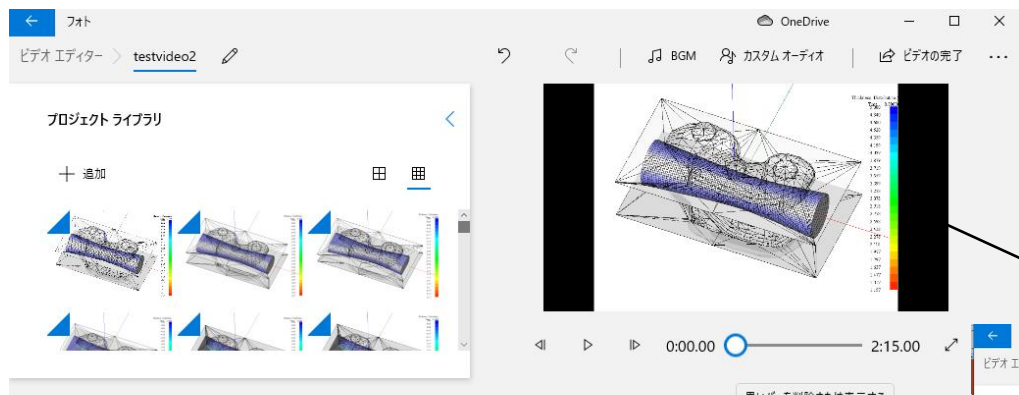
ビデオの再生状況を確認後、ビデオの完了ボタンを押し、ビデオの画質を高1080p(推奨)とし、エクスポートボタンを押します。ファイルセーブダイアログボックスでビデオファイル名を設定し、エクスポートボタンを押すとビデオファイルが選択フォルダー内に保存されます。



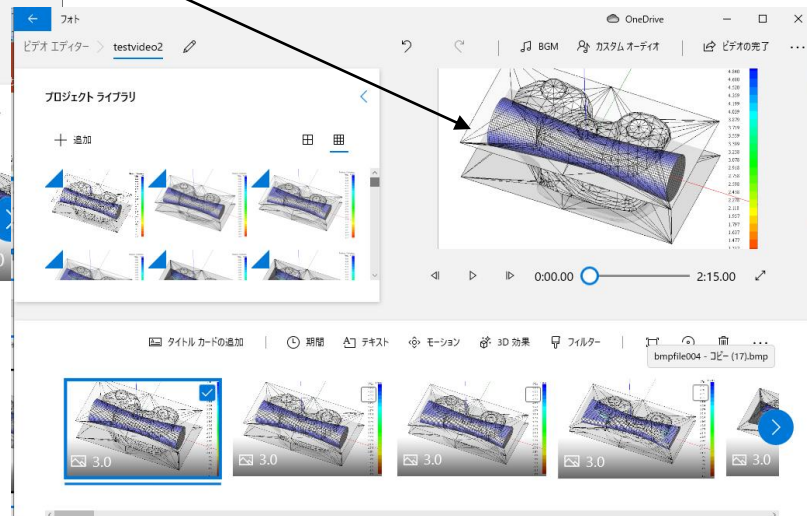
以上の操作で生成されるビデオファイルの拡張子はMP4です. このファイルは, Windows Media Playerで再生可能なビデオファイルです.



ビデオファイル作成時に左右上下に表示される黒いバーを削除するには、手間を要しますが、ストリートボードに登録されているファイルを個別に選択し、黒いバーを削除または表示するボタンを押し、黒いバーを削除するをプルダウン選択します。その他、フォトの詳しい操作方法についてはWeb上に多くの情報がアップされていますので参照して下さい。



ビデオファイルに表示される背景の黒色領域が削除される。



黒いバーを削除するをプルダウン選択

登録情報をマウスクリック選択