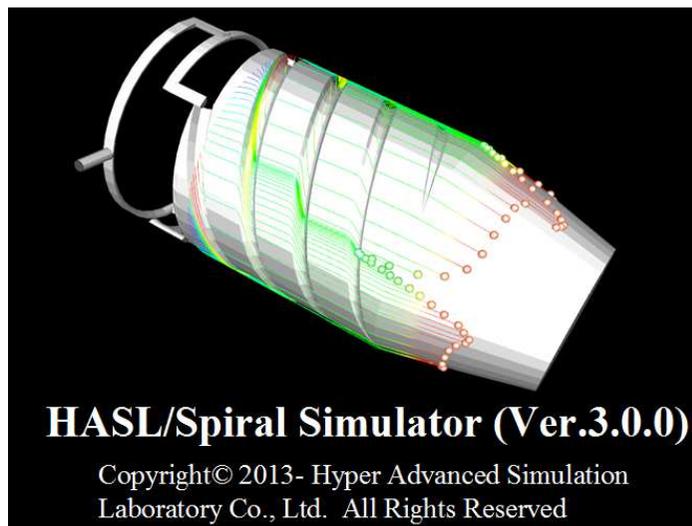


---

# Spiral Simulator(Ver.3.0.0)

## 改良成果資料



2013/11/15

株式会社HASL

---

本資料では、Spiral Simulator (Ver.3.0.0)の下記改良成果についてご報告します。

- ①スパイラルチャネル部形状表現の改良
- ②スパイラルチャネル近似モデルの改良
- ③VTKファイル出力機能(ParaView,KiwiViewerへの対応)の実装
- ④フィルムインフォレーション新規解析機能の実装  
(Zatloukal-Vleck model)

## ①スパイラルチャンネル部形状表現の改良

Spiral Simulator templateで簡便に定義されるスパイラルチャンネル形状について、入力情報を2点(最上流側と最下流側)に簡略化すると、スパイラルチャンネル幅が実際よりも狭く表現される問題がありました\*)。

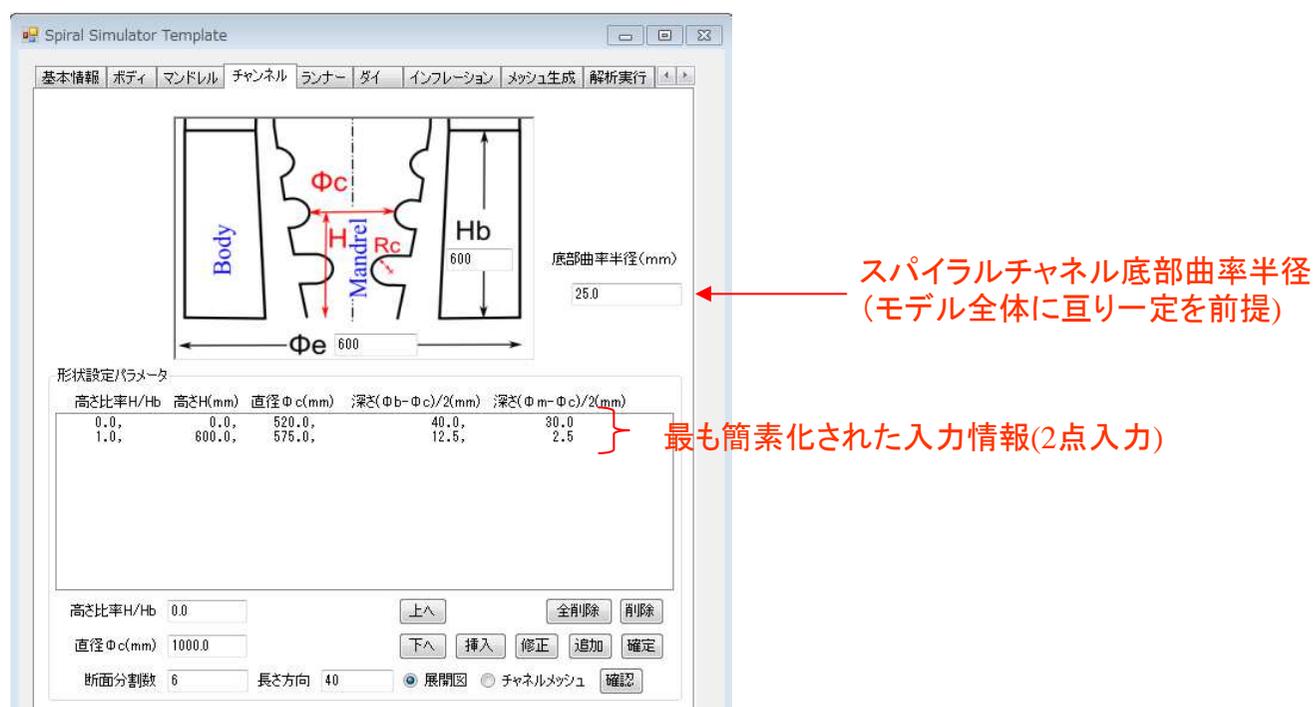


図1. Spiral Simulator templateを利用したスパイラルチャンネルの定義

\*)この問題は、当ソフトのユーザ様よりご指摘いただきました。

モデル作成に際して、スパイラルチャネルの底部の曲率半径は一定とする前提を採用しています。一般的に、スパイラルチャネルの深さは下流側に向けて浅くなるように定義されますが、チャネル幅は、下図に示すように、底部Rとマンドレル壁面が干渉する深さに至るまで一定と見なす必要があります。従来のバージョン (Ver.2.0.0) では、チャネル深さに加えて、チャネル幅を、テンプレートの定義点で計算し、その間を線形補間して表現していたため、上述の問題が生じました。

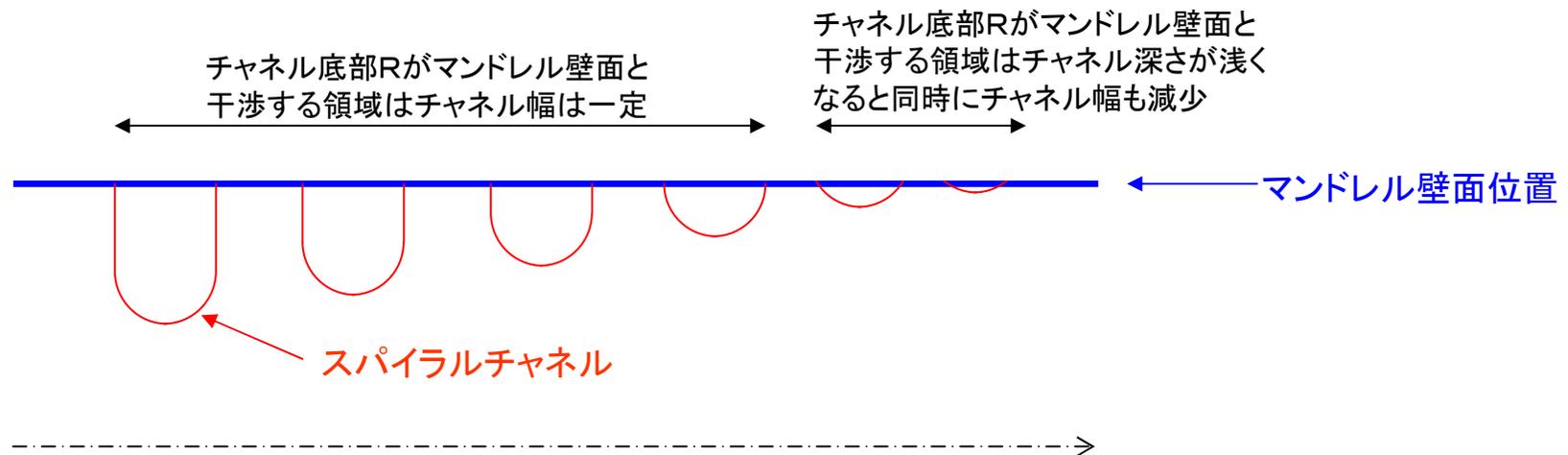


図2. スパイラルチャネル深さと幅の関係

Ver.3.0.0システムでは、この問題を解消し、スパイラルチャネル深さは従来通り、線形補間で定義しますが、チャネル幅は、2点の簡易入力になされた際も正確に計算されるように改良を加えました。下図に、新旧バージョンで作成されたモデルの比較を示します。また、この改良に伴う解析結果の変化について検討しました。以下に検討結果を示します。

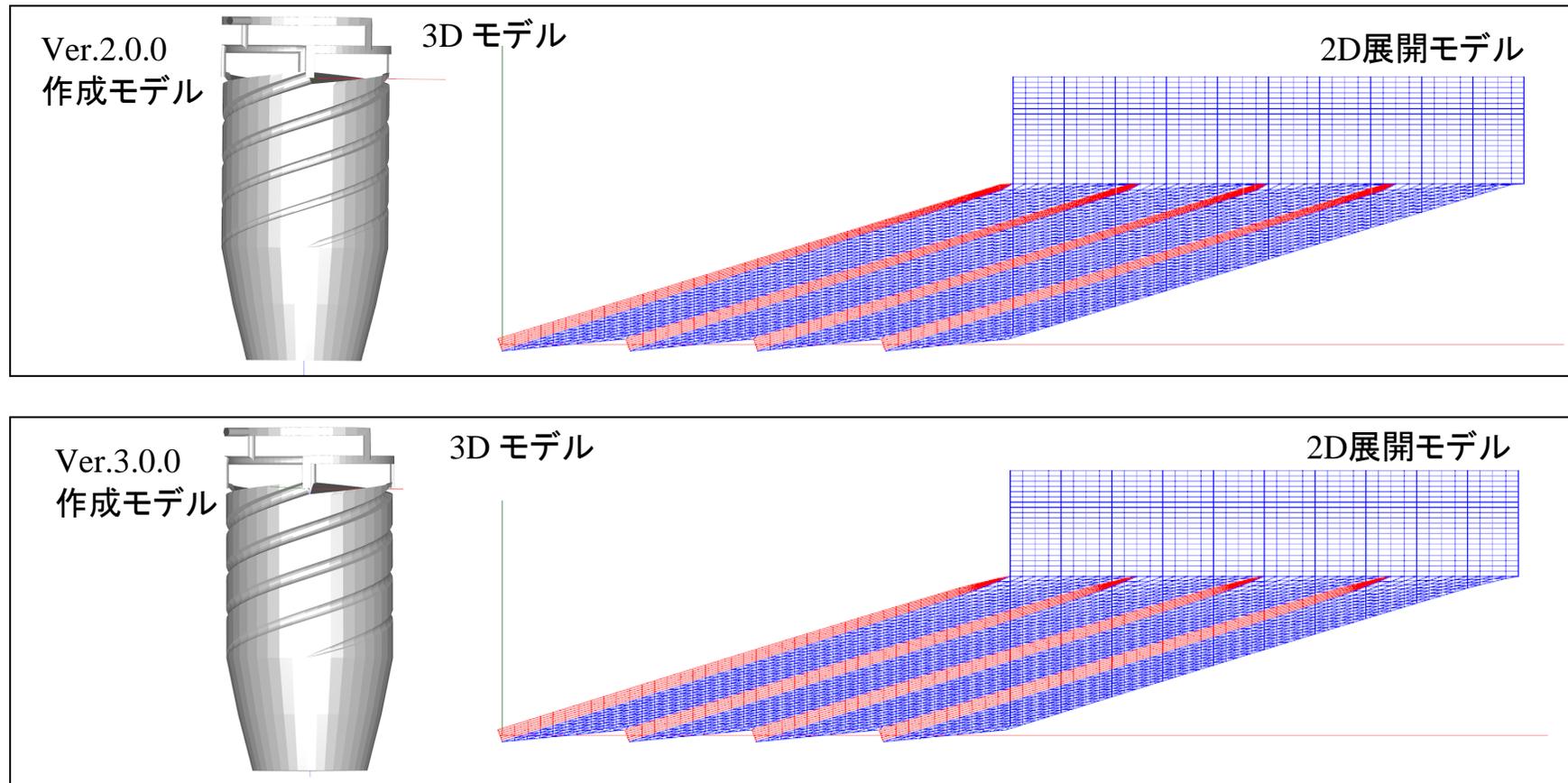


図3. 新旧バージョンで作成されたモデルの比較

両ケースについて形状の差を除き、解析条件を共通に設定していますが、Ver.3.0.0で作成した解析モデルの容積が大きいことを反映して、最大圧力は若干(0.009MPa程度)低下しています。圧力分布の差が小さいのは、溝深さが深いスパイラルチャネルの圧力に及ぼす影響が少ないためと考えられます。

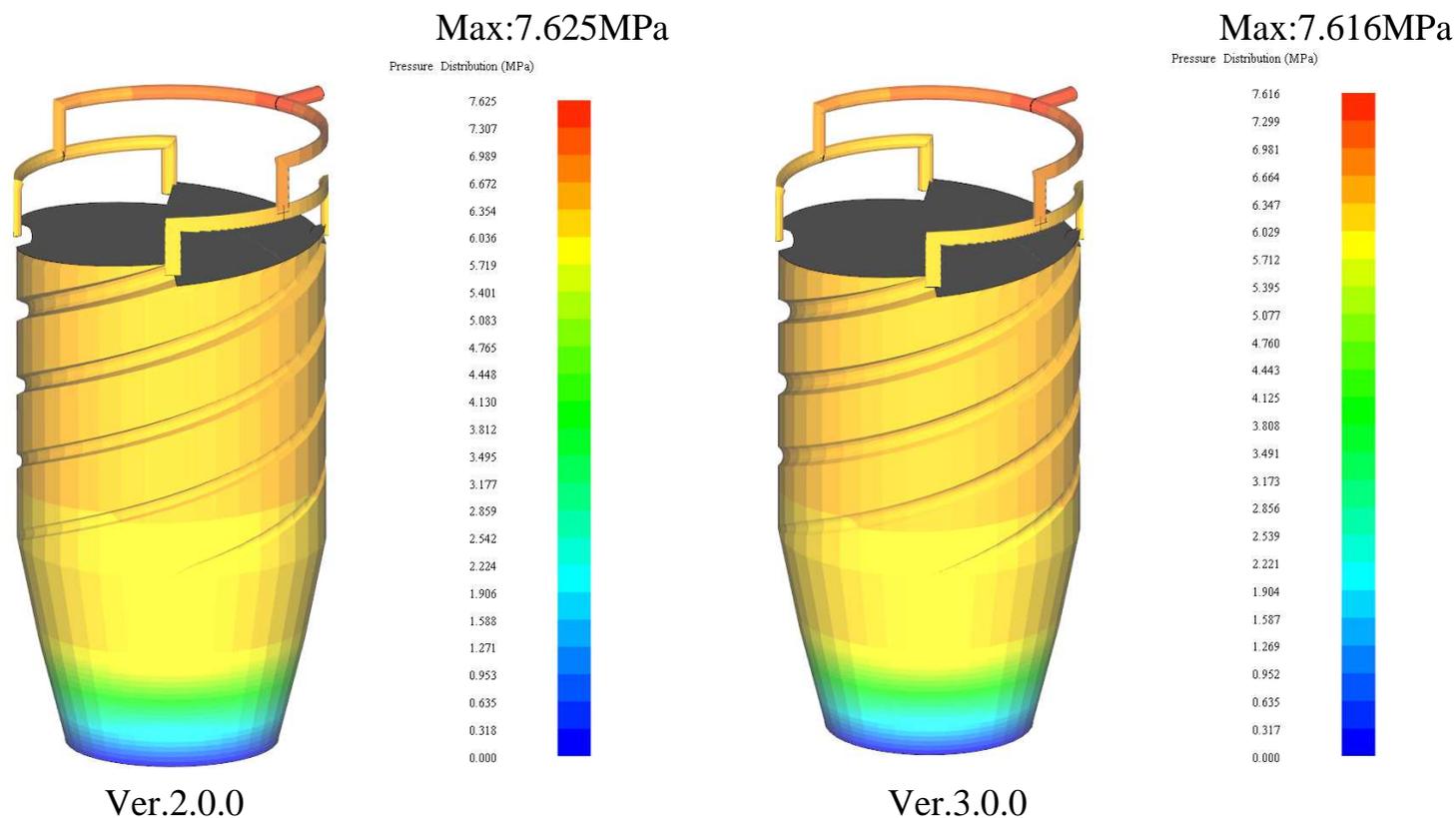


図4. 圧力分布解析結果の比較(Ver.2.0.0 vs. Ver.3.0.0)

Ver.3.0.0で作成した解析モデルの容積が大きいことを反映して、滞留時間は、より長くなるが示されています。

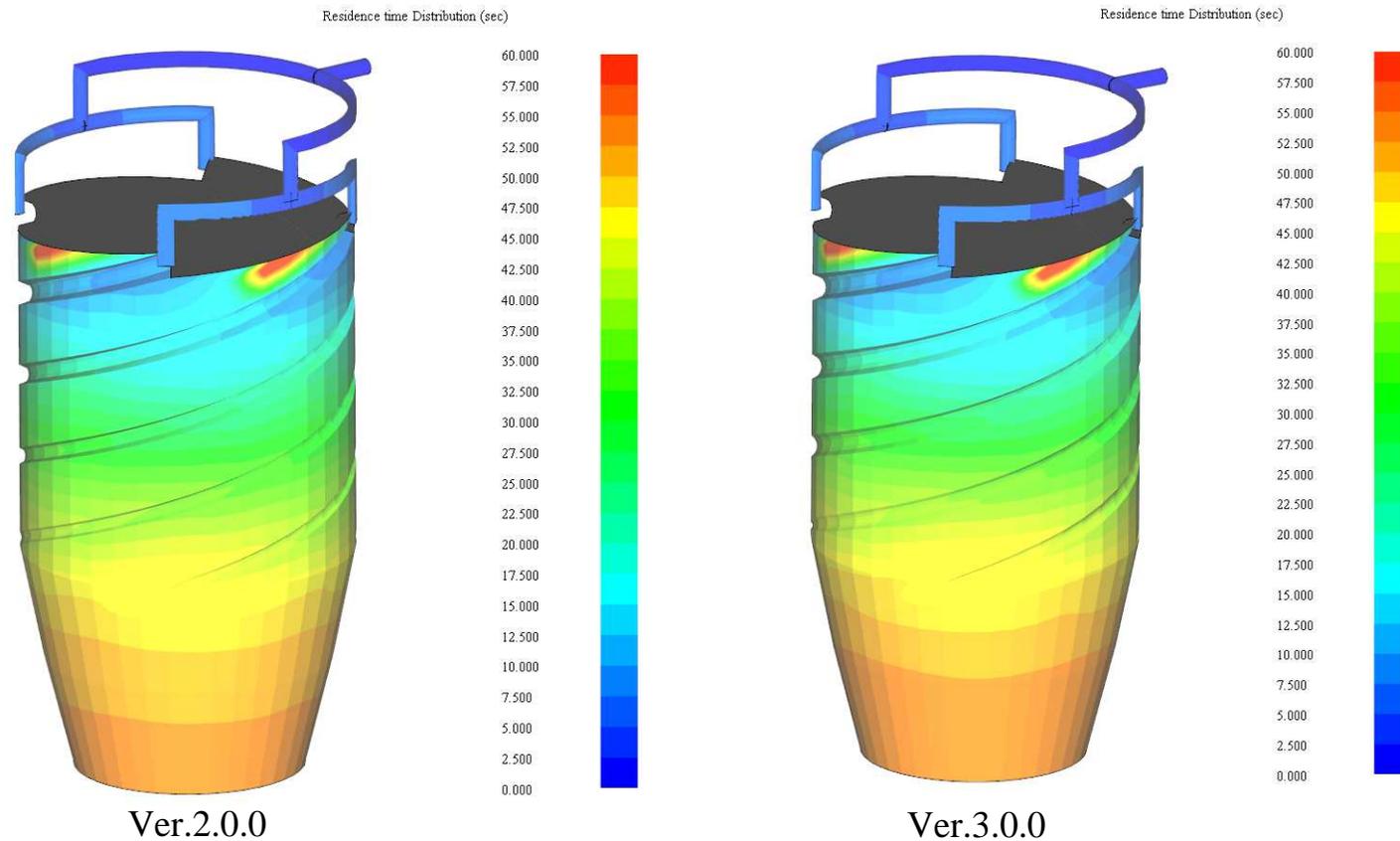


図5. 滞留時間解析結果の比較(Ver.2.0.0 vs. Ver.3.0.0)

この傾向は、スパイラルチャネル末端断面での滞留時間分布を示す下図より明らかなです。

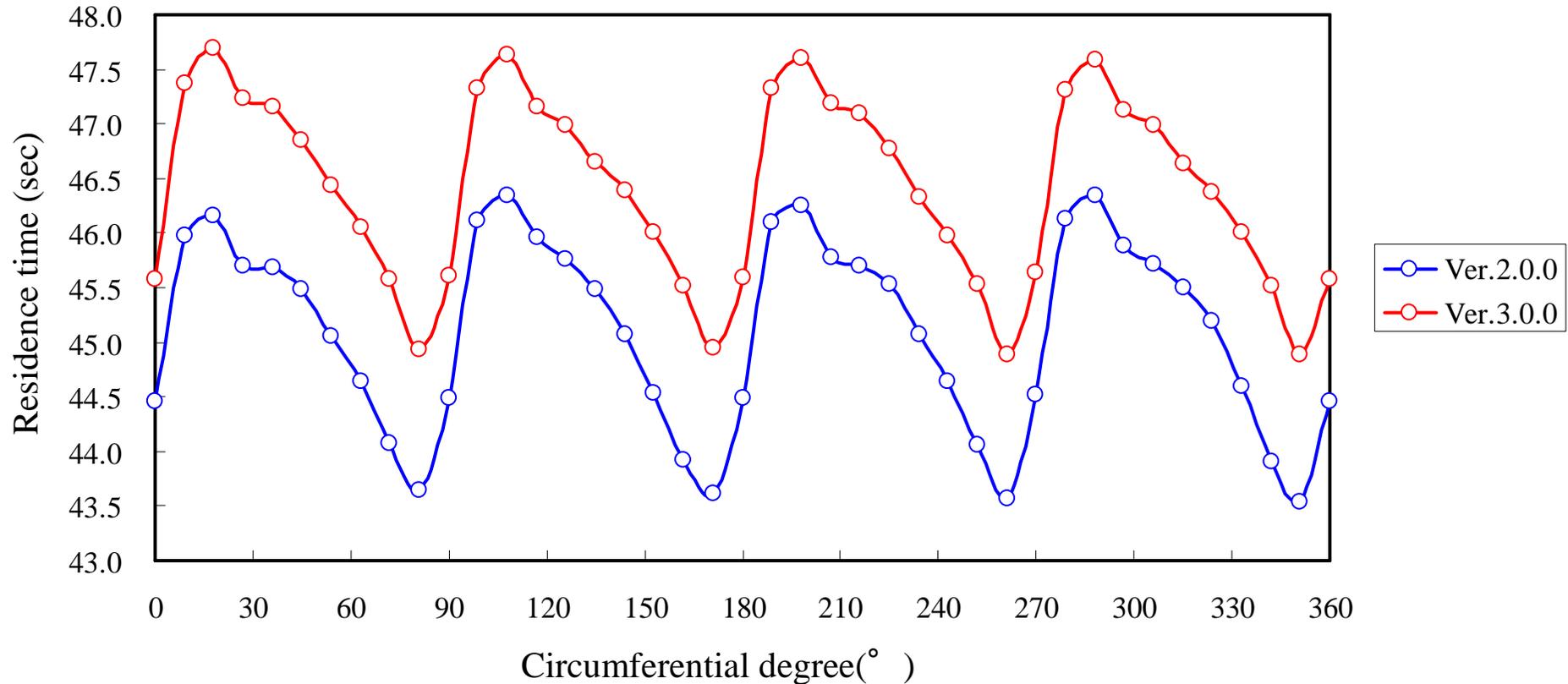


図6. スパイラルチャネル末端断面での滞留時間分布の比較 (Ver.2.0.0 vs. Ver.3.0.0)

Ver.2.0.0で作成した解析モデルの方がチャンネル幅が狭く、同じスケールで流速コンターを表示すると、Ver.2.0.0の方がチャンネル内でより下流側に向けて、流速が速い領域が拡大します。

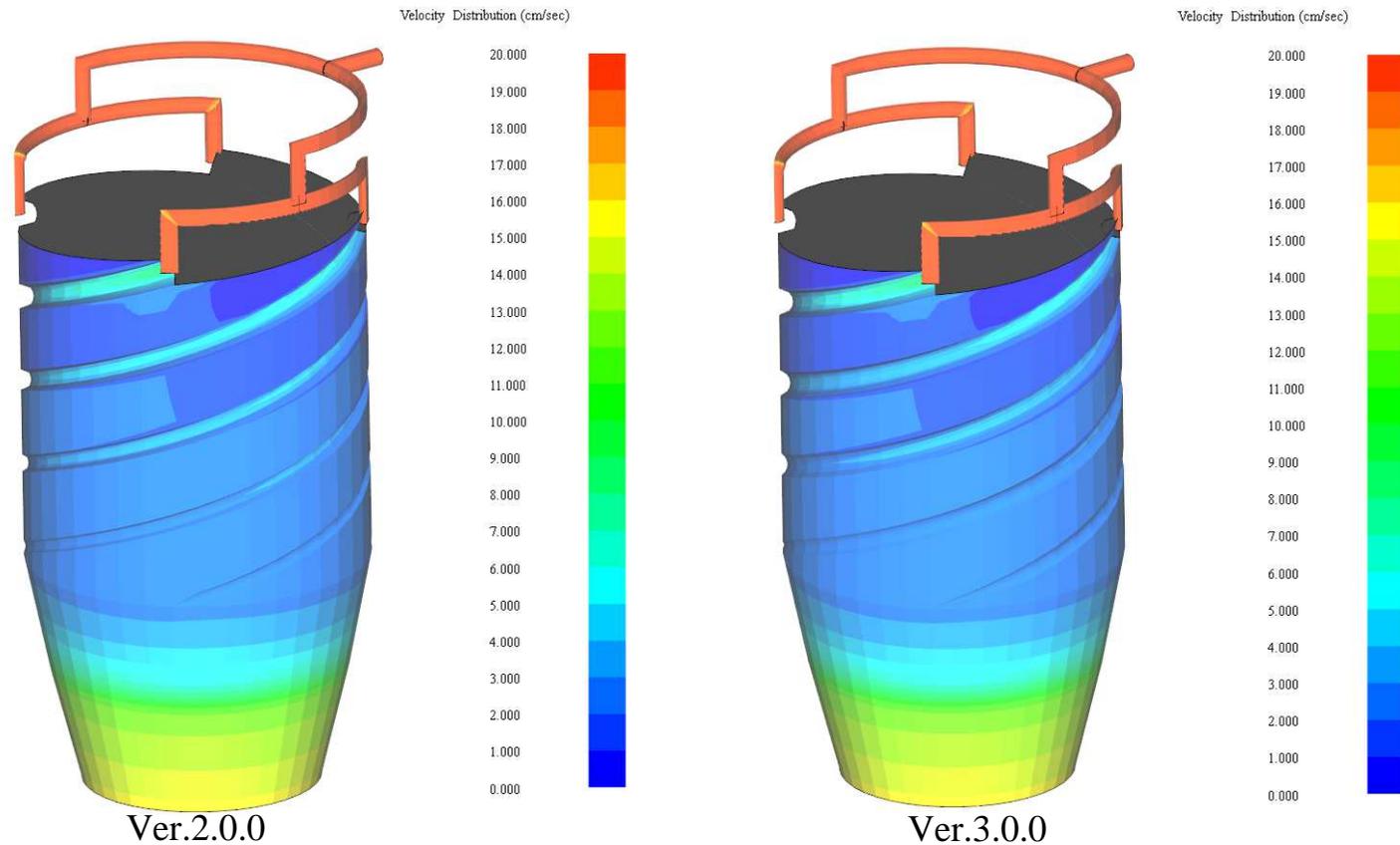


図7. 流速分布解析結果の比較(Ver.2.0.0 vs. Ver.3.0.0)

しかしながら、チャンネル流路に沿った主流の流束を比較すると、下図に示すように両者間で有意な差は観られません。このことは、当比較解析モデルでは、チャンネル幅の差が、流量配分に大きく影響していないことを示唆しています。すなわち、両者間でチャンネルに沿って流れる流量は殆ど共通であり、チャンネル幅の狭い(断面の小さな)Ver.2.0.0の方が、流速が速くなる傾向を示していると解釈することができます。

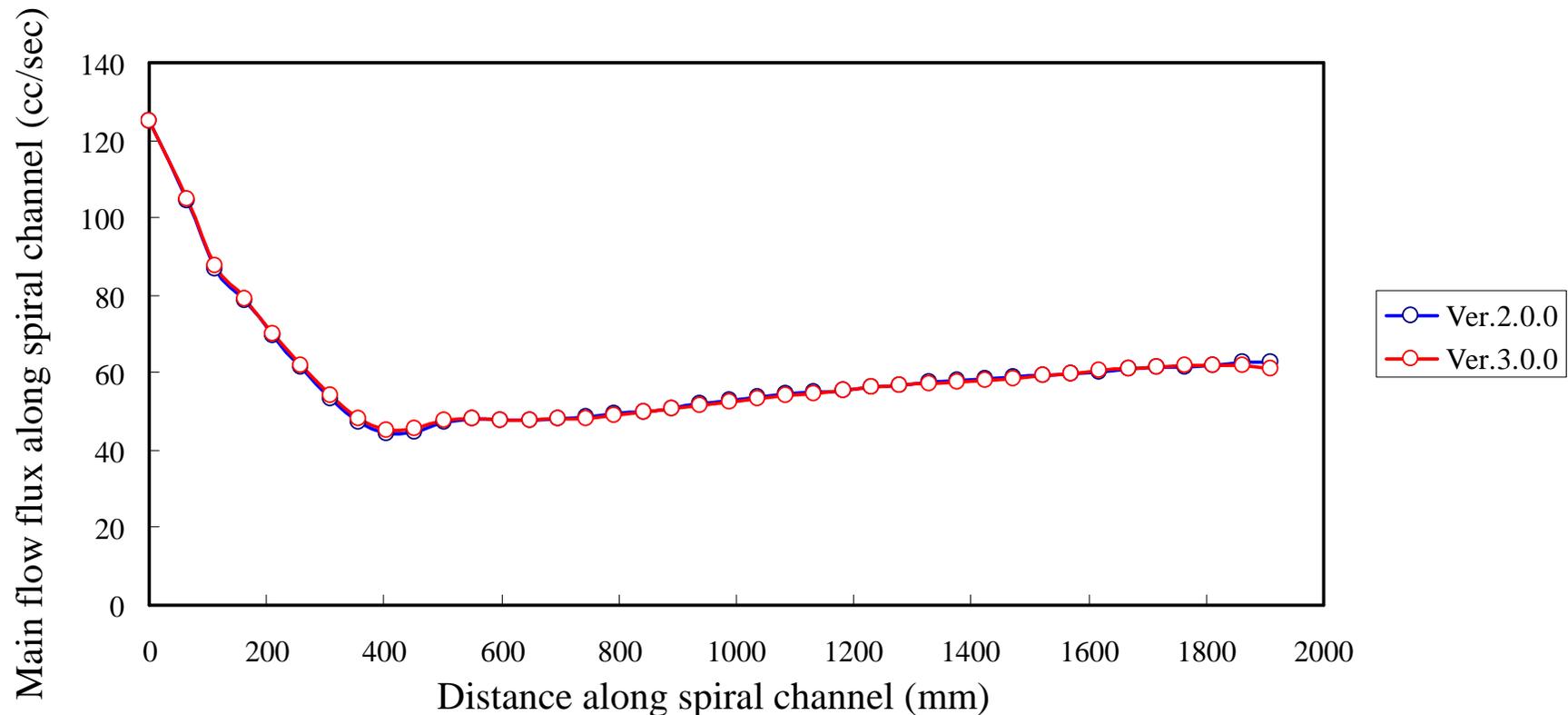


図8. スパイラルチャンネルに沿った主流束分布(Ver.2.0.0 vs. Ver.3.0.0)

スパイラルマンドレルの性能評価で工学的に重視されるスパイラルチャンネル末端断面内の流速分布の比較を下図に示します。Ver.3.0.0では、前述の理由により、溝部の平均流速が低下し、両端に配置されている漏洩部との流速差が小さくなります。結果として、流速変動量は、Ver.3.0.0モデルの方が若干減少する傾向を示します。解析結果の差は顕著に現れませんが、状況はケースバイケースと思われます。チャンネル肉厚が急激に変化するようなケースでは、今回の変更が及ぼす影響が大きくなると推察されます。Ver.3.0.0以降では、今回改良を加えたスパイラルチャンネルのモデル化法を採用します。

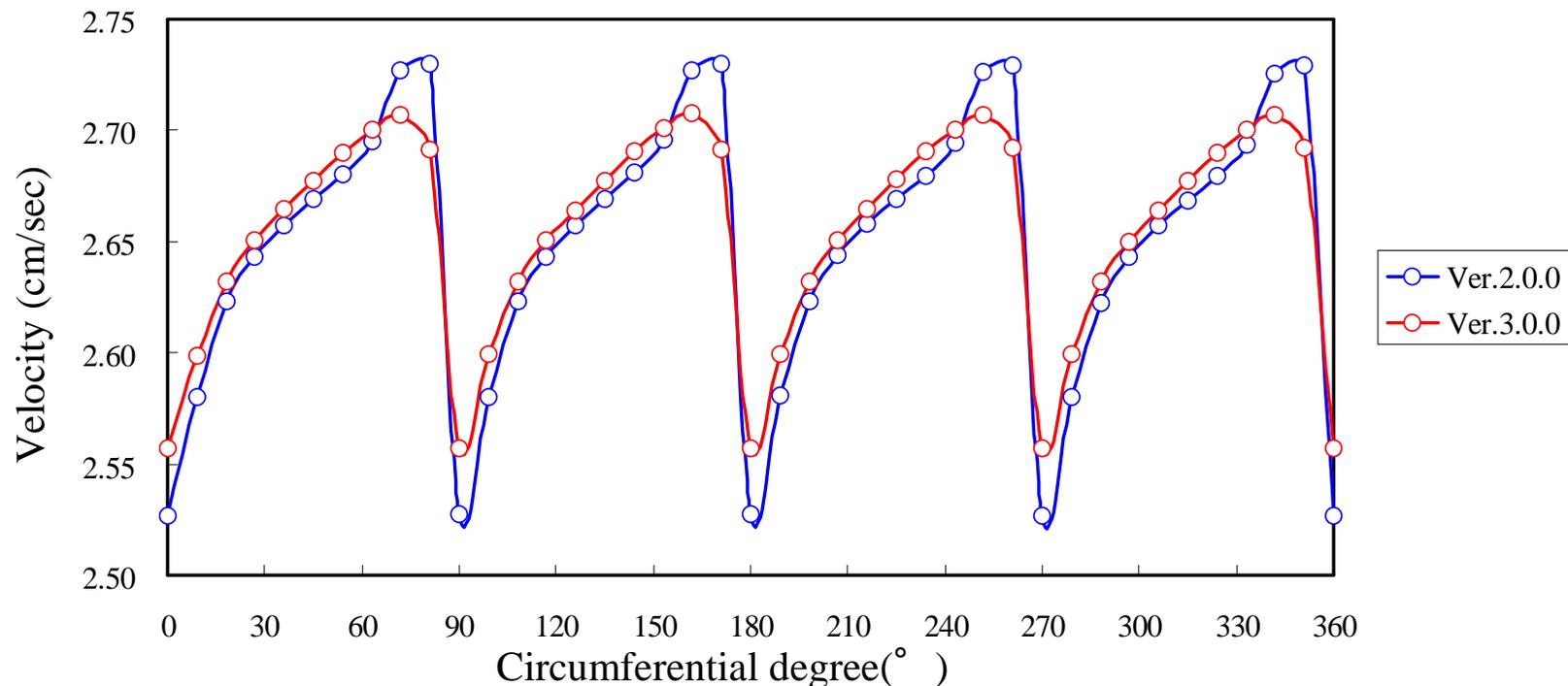


図9. スパイラルチャンネル末端断面での滞留時間分布の比較(Ver.2.0.0 vs. Ver.3.0.0)

## ②スパイラルチャネル近似モデルの改良

Spiral Simulatorによるスパイラルチャネルの取り扱いは、スリット近似を採用しています。Flat Simulatorのマンドレル部と同様、スパイラルチャネルを等価水力直径モデルで表現した場合に、流動特性が両者間で異なり、結果に差異が生じることになります。単純な円管をスリット近似モデルと等価水力直径モデルで表現すると、前者は、正確に流動抵抗を評価する後者に比べて、その値を過小評価し、流量配分のバランスが崩れる問題が指摘されてきました\*)。この問題について検討するために、Flat Simulatorと同様、スパイラルチャネルに対する従来のスリット近似に加えて、等価水力直径モデルが有効になるオプションを追加しました。従来より、ビーム要素で表現される上流側ランナー部は、等価水力直径モデルで評価しています。スパイラルチャネルは、Flat Simulatorによるマンドレル部の表現と同様、短冊形にメッシュ分割されています。当該部分に対して、従来の利点を損なうことなく、等価水力直径モデルを適用するには、特別な計算手順を要します。その具体的な計算手順については、Flat Simulator(Ver.3.0.0)成果資料(当社HPのWeb公開資料)をご参照下さい。

**\*)この問題は、Flat Simulatorに対して当該ソフトのユーザ様とポリダイナミクスインク殿よりご指摘いただきました。**

スパイラルチャネルに対するこれらの近似表現が解析結果に及ぼす影響について検討しました。以下に検討結果を示します。

両ケースについてスパイラルチャネルの近似モデルの差を除き、解析条件を共通に設定していますが、等価水力直径近似を採用したケース(Hydraulic)では、スパイラルチャネルの流動抵抗が大きいことを反映して、最大圧力は若干(0.015MPa程度)上昇しています。圧力分布の差が小さいのは、溝深さが深いスパイラルチャネルの圧力に及ぼす影響が少ないためと考えられます。

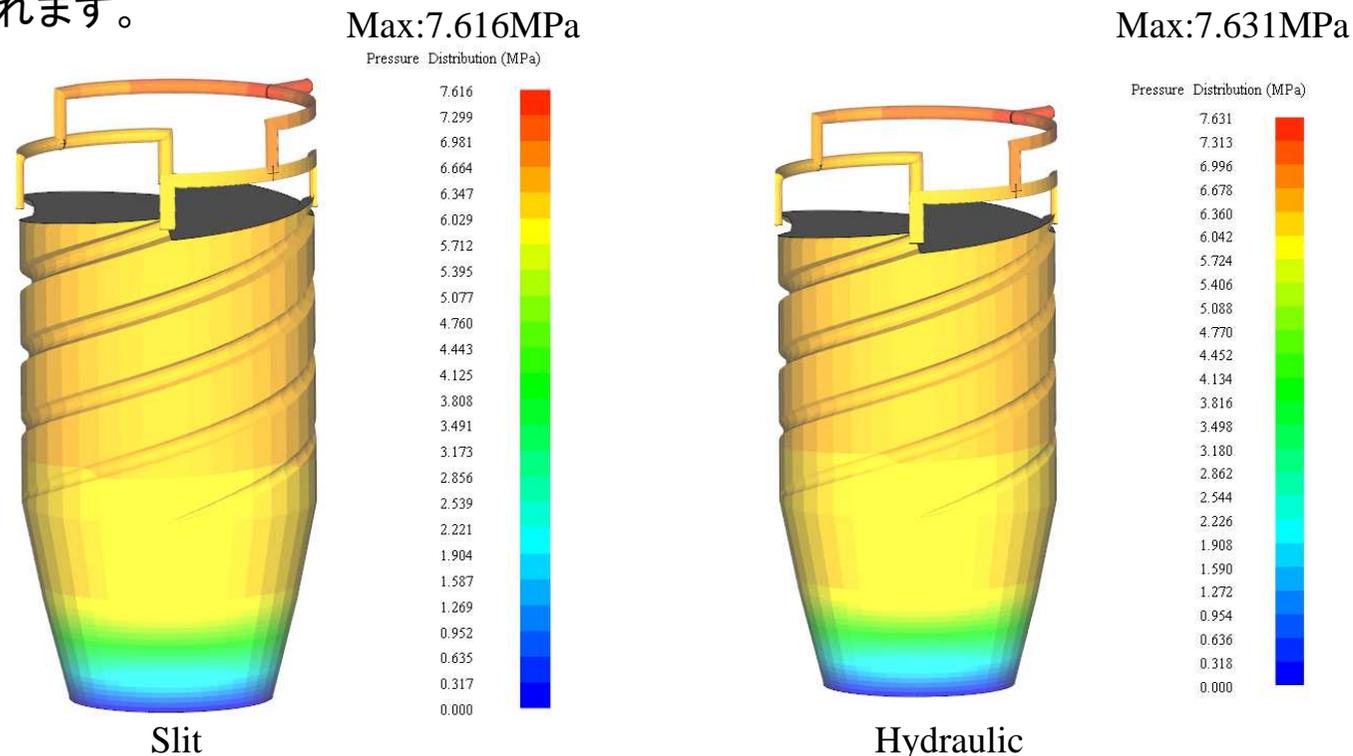


図10. 圧力分布解析結果の比較(Slit vs. Hydraulic)

スパイラルチャネルのモデル近似の差は、上流側の滞留時間分布に有意な差をもたらします。下図に示すように、Slitモデルでは、ランナーとスパイラルチャネルの結合部近傍の漏洩流れ領域に部分的に流れが滞留するデッドスペースが発生しますが、等価水力直径モデルを採用すると、その傾向が弱まります。Slitモデルでは、等価水力直径モデルと比較して、流体がチャネルに沿って流れ易くなるため、チャネル両端に配置される漏洩流れ領域への流量配分が少なくなり、結果としてデッドスペースが発生したと考えることができます。

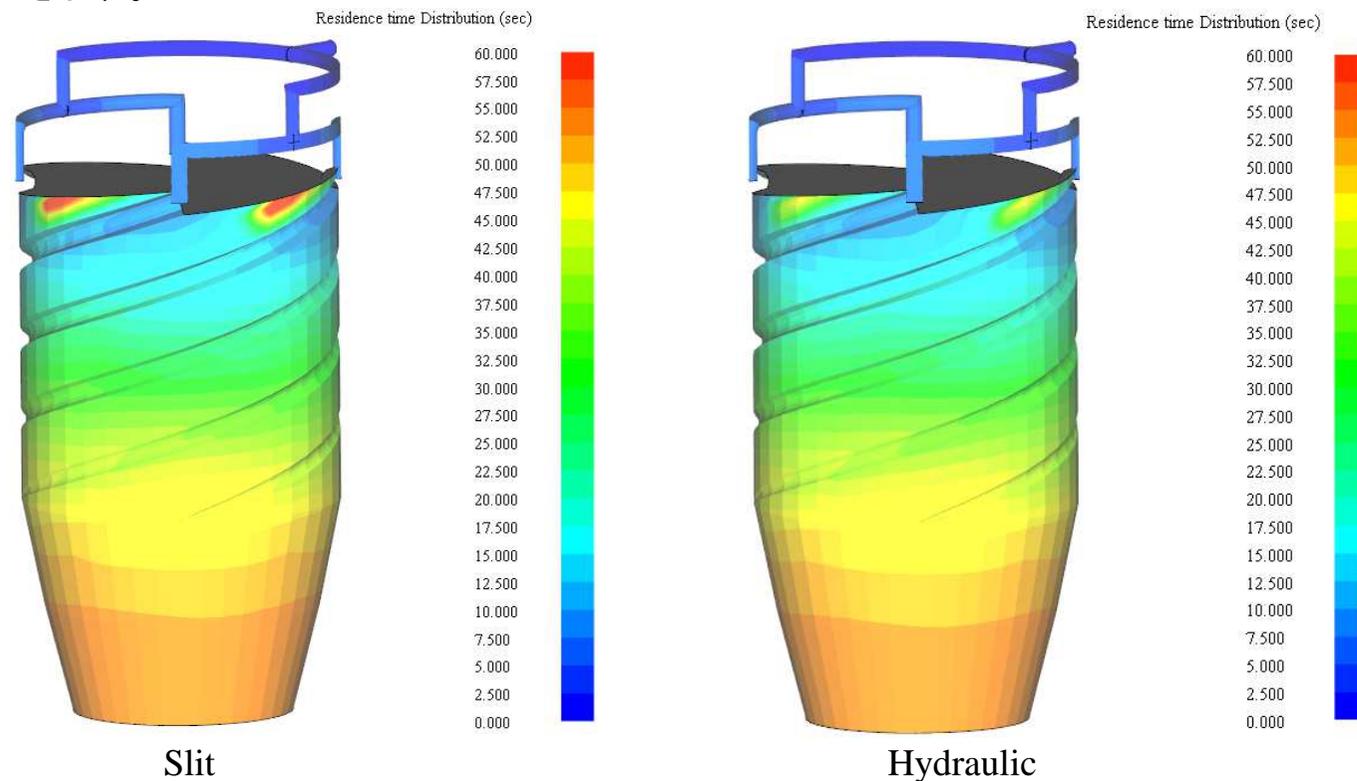


図11. 滞留時間解析結果の比較(Slit vs. Hydraulic)

下図に示すように、スパイラルチャネル末端断面での滞留時間分布を比較すると、等価水力直径モデルを採用したケースの方が短時間になる傾向を示します。Slitモデルと比較して、等価水力直径モデルでは、漏洩部に配分される流量が相対的に増加し、結果として、滞留時間が減少したと考えます。

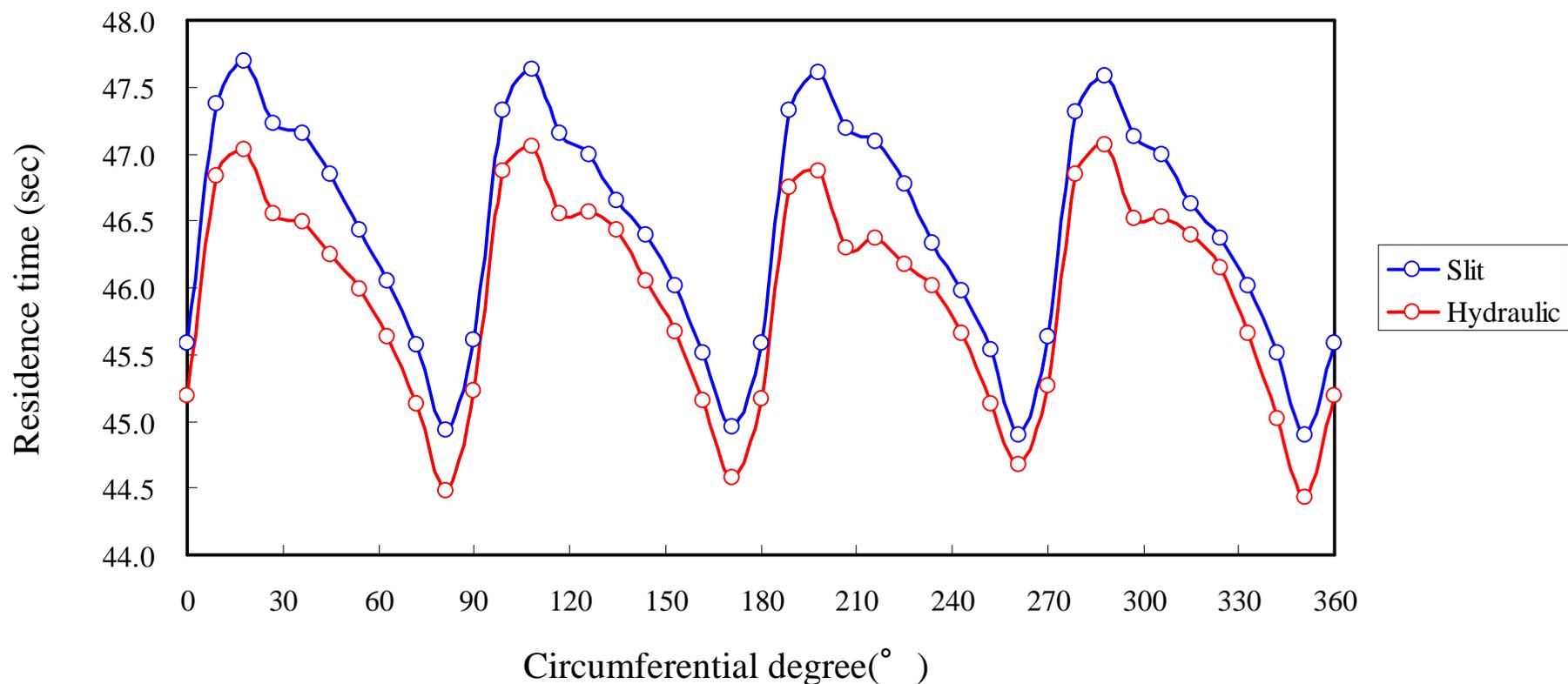


図12. スパイラルチャネル末端断面での滞留時間分布の比較(Slit vs. Hydraulic)

スパイラルチャンネルに沿う主流束を比較すると、上流側では、流動抵抗の大きな等価水力直径モデルの方が定性的に予測される通り、流束が低下しています。すなわち、上流側では、漏洩領域への流量配分が多くなる結果となっています。その影響が上述したデットスペースが発生する傾向を弱めていると考えられます。また、両者間の差が下流側に向けて減少するのは、チャンネル深さが下流側に向けて浅くなっているため、モデル化の差の影響が弱まったと考えられます。

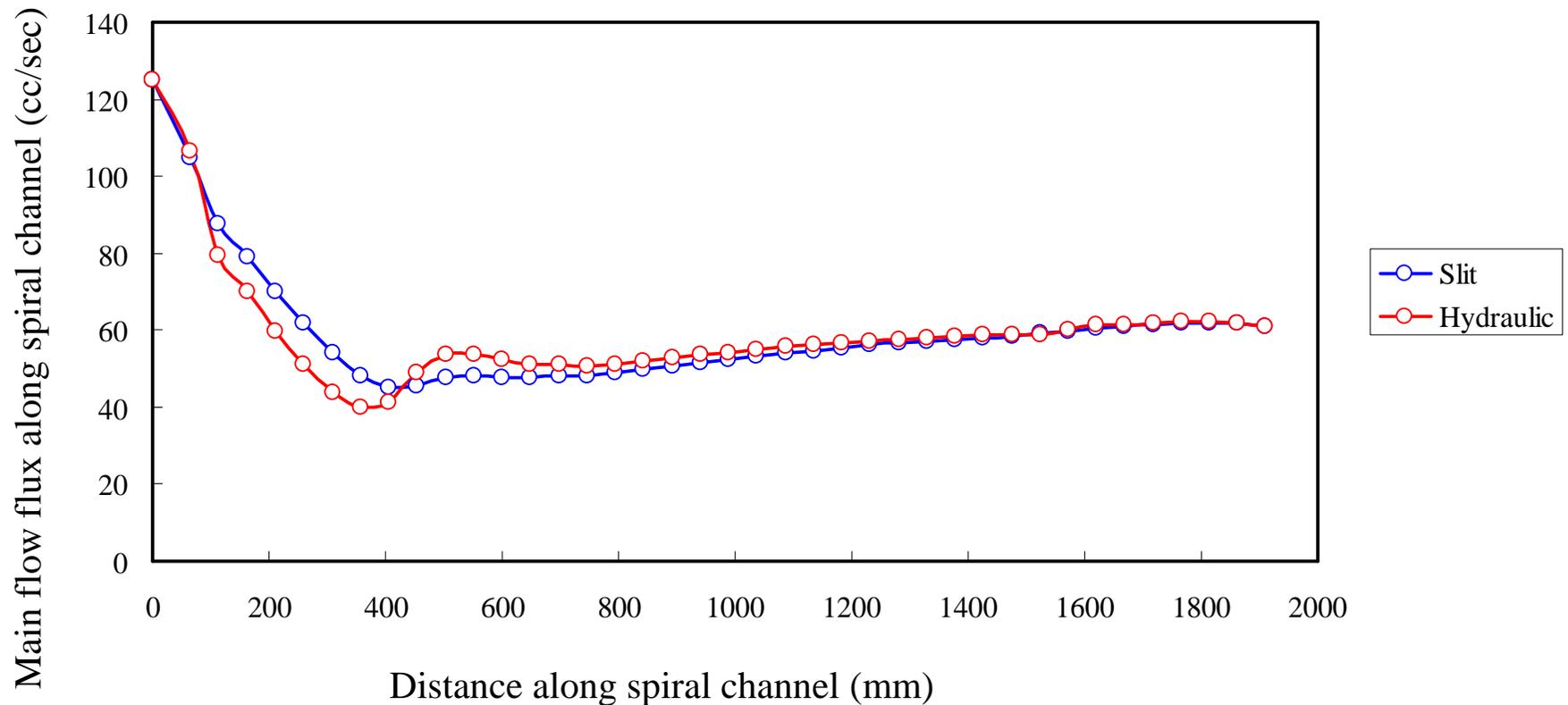


図13. スパイラルチャンネルに沿った主流束分布(Slit vs. Hydraulic)

スパイラルチャネルは、その両側に漏洩領域が配置されているため、上流側で漏洩領域に多く配分された流量が、再度、スパイラルチャネルに再配分され易くなる可能性があります。チャネルが深い上流側では、解釈しやすい結果となりますが、溝深さが浅く両者間の差が減少する領域では、流動抵抗の大きな等価水力直径モデルの方が、チャネル内の流速が必ず遅くなると断言することはできません。実際、前頁に示した主流束分布に着目すると、下流側では、等価水力直径モデルの方が主流束が多く評価されている領域が示されています。その結果を反映し、流速分布を比較すると、等価水力直径モデルの方が、モデル中央部でスパイラルチャネル内の高速領域が拡大しています。

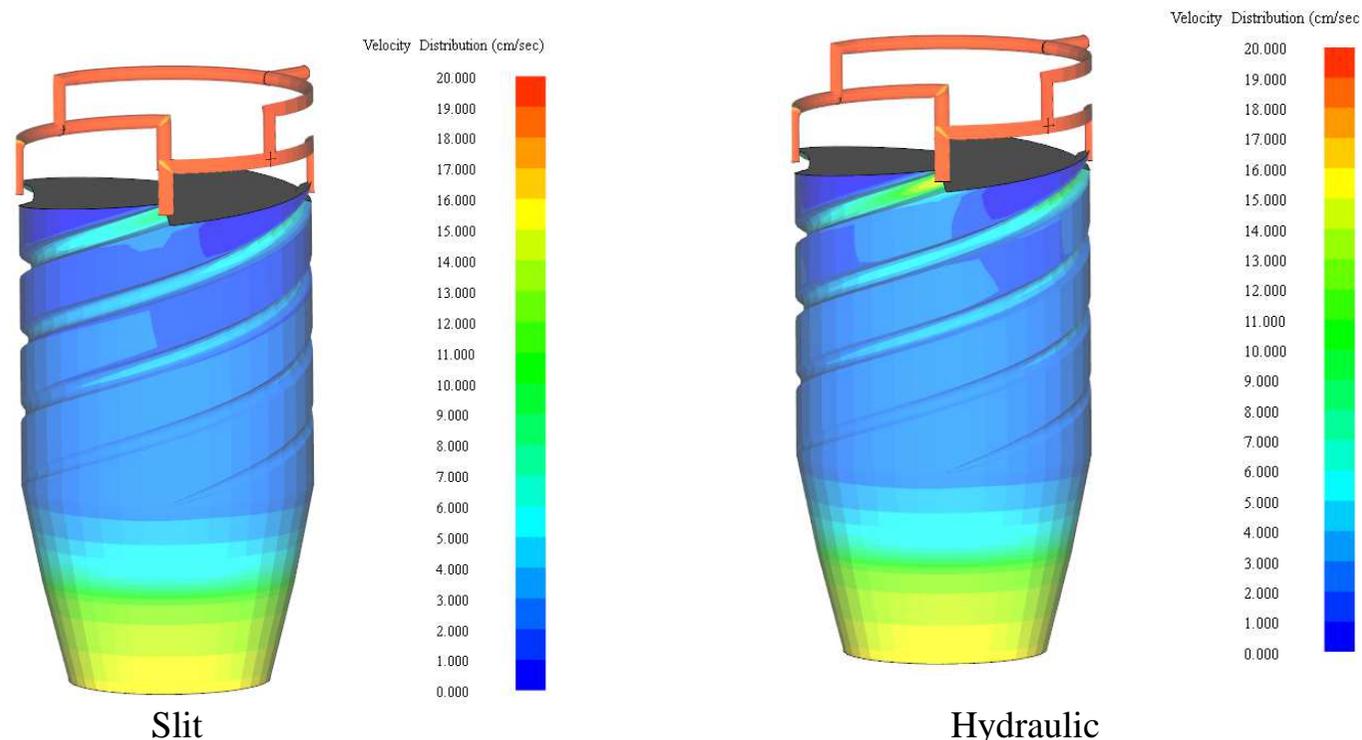


図14. 流速分布解析結果の比較(Slit vs. Hydraulic)

スパイラルマンドレルの性能評価で工学的に重視されるスパイラルチャンネル末端断面内の流速分布の比較を下図に示します。当比較解析モデルでは、チャンネル近似モデルの差がチャンネル末端での流動変動に及ぼす影響は少ない結果となっています。

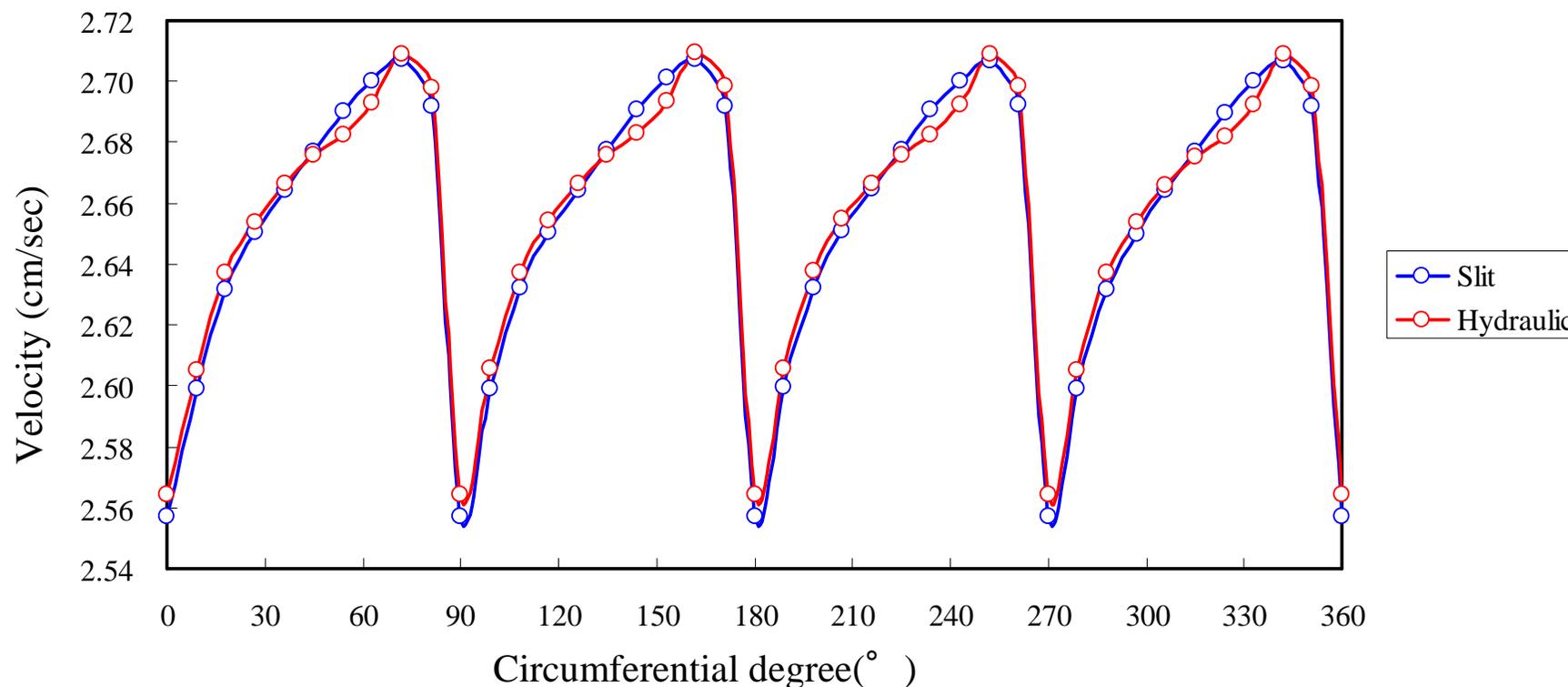


図15. スパイラルチャンネル末端断面での滞留時間分布の比較(Ver.2.0.0 vs. Ver.3.0.0)

---

Spiral Simulator templateのデフォルト設定を採用した当比較解析モデルでは、チャンネル近似モデルの差は、全体的な圧力分布や温度分布、チャンネル末端より下流側の流動変動評価結果に大きく影響しませんが、特にチャンネルが深い上流側の流量配分や履歴情報として評価される滞留時間分布に有意な差をもたらします。

以上の検討結果を踏まえ、今後の運用では、Flat Simulatorと同様、スパイラルチャンネル部の取り扱いに対して、等価水力直径近似の採用を推奨させていただきます。今回ご提供するVer3.0.0システムでは、従来の解析結果との対比を目的として、暫定的にスリット近似のオプションもサポートしています。解析実行タブメニュー内に新しく配置したスパイラルチャンネル近似解法パネルで等価水力直径のラジオボタンを選択して計算を開始すると今回の改良が解析結果に反映されます。デフォルトは、等価水力直径としていますが、従来の計算コントロールデータを読み込むとスリットが選択されます。従来の解析結果を再現する場合には、スリットのラジオボタンを選択し、等価水力直径を採用する場合は、ラジオボタンを切り替えて下さい。

基本情報 | ボディ | マンドレル | チャンネル | ランナー | ダイ | インフレーション | メッシュ生成 | 解析実行

計算コントロールデータファイル名  読込

パス名

メッシュデータファイル  選択

物性データファイル  選択

新規作成 読込

熱流動解析コントロールパラメータ

熱流動計算パラメータ

非ニュートン反復計算回数

温度反復計算回数

層分割数

温度計算選択

対称  非対称

Film blow計算

実行  非実行

滞留時間分布計算

実行  非実行

対流時間分布計算パラメータ

計算時間刻み

自動計算  固定

計算サイクル数

最大計算サイクル数

VOF判定基準値

ファイル出力

分割数指定

スパイラルチャネル近似解法

等価水力直径  スリット

解析結果ファイル名

TemplateResult

解析結果自動読込

保存 計算開始

等価水力直径を採用すると今回の解析機能が有効になり、スリットを選択すると従来通り。

図16. スパイラルチャネル近似解法選択パネル

---

## ④VTKファイル出力機能(ParaView,KiwiViewerへの対応)の実装

PC用無料可視化ソフトParaView及びタブレット端末、スマートフォン用可視化ソフトKiwiViewerによる作画情報の作成が可能なVTKファイル出力機能を新たに実装しました。当ファイルと前述の無料可視化ソフトを利用することで、誰もが無制限にSpiral Simulator解析結果を閲覧可能となりました。

コンター図コントロールパネル内の『VTKファイル出力』ボタンを押すと、ファイルセーブボックスが表示されます。適当な名称を付けて情報を保存すると、VTKファイル(任意名称+拡張子:VTK)が作成されます。このファイルは、前述の無料可視化ソフトにインポートすることで作画処理可能です。

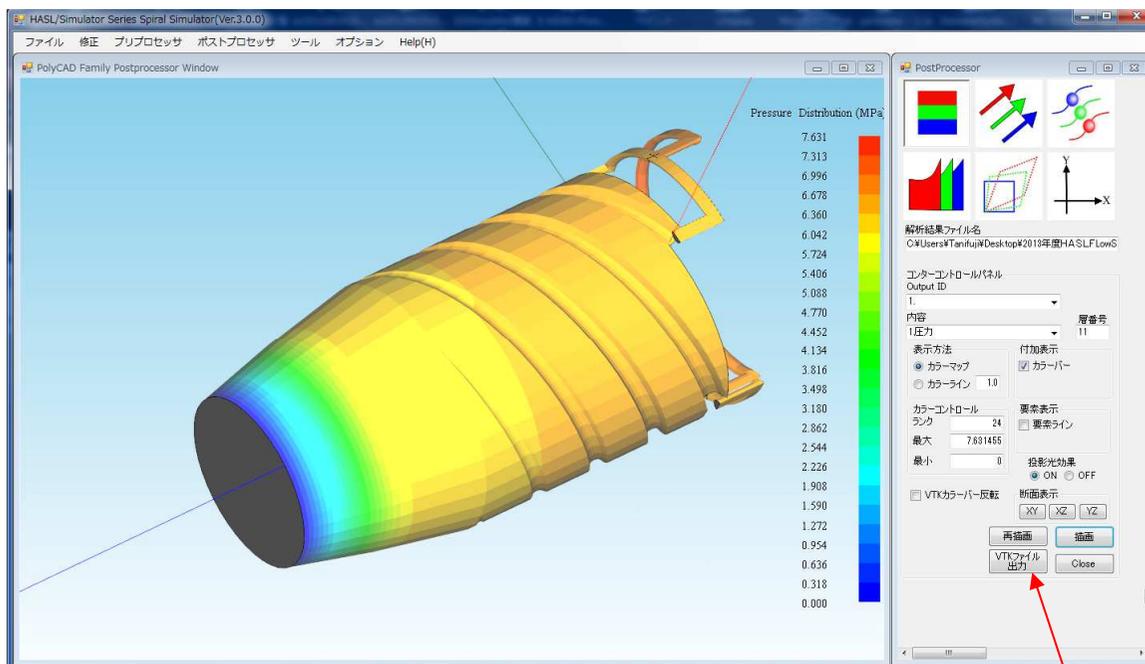


図17. VTKファイル出力ボタン

『VTKファイル出力』ボタン

ParaViewを利用したSpiral Simulatorの解析結果の可視化例を下図に示します。



<http://www.paraview.org/paraview/resources/software.php>  
より無料ダウンロード可能

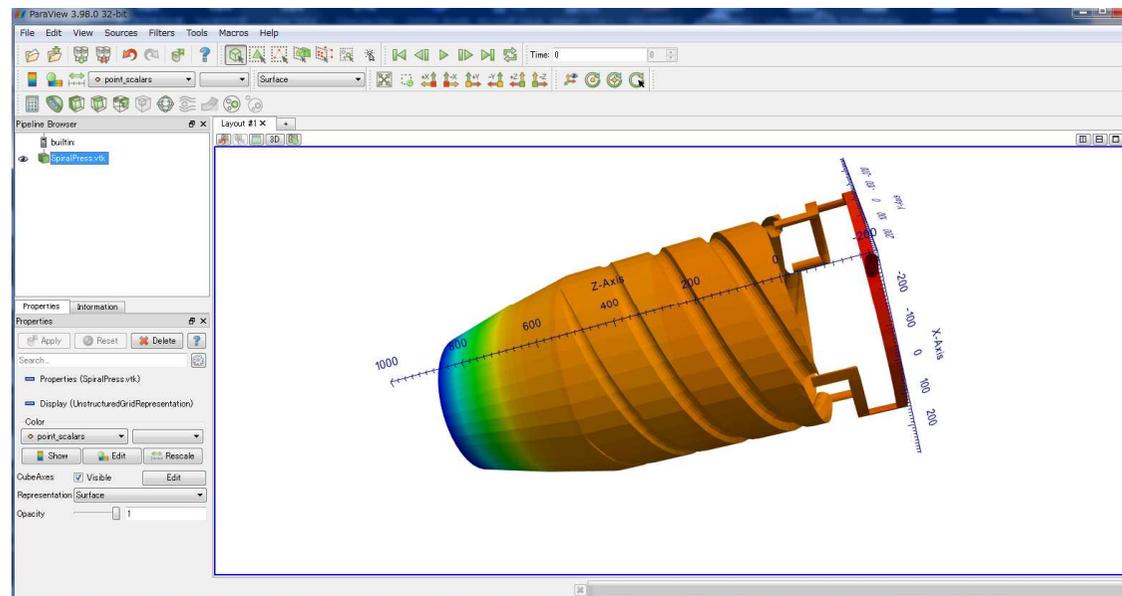
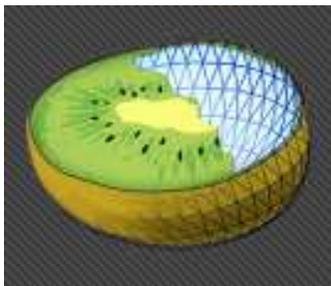


図18. ParaViewを利用したSpiral Simulator解析結果の可視化例

このVTKファイルとKiwi Viewerを利用することでスマートフォンやタブレット端末で可視化が可能です。



<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.kitware.KiwiViewer>  
より無料ダウンロード可能(タブレット端末Nexus7にてダウンロード、i-phone、スマートフォンでも可能)



*3D rotation* : 1-finger pan gesture  
*Pan camera* : 2-finger pan gesture  
*Dolly (zoom)*: 2-finger pinch gesture  
*Roll camera* : 2-finger rotate gesture

図19. タブレット端末でのSpiral Simulator解析結果の可視化例

---

## ④フィルムインフレーション新規解析機能の実装 (Zatloukal-Vleck model)

Kolarik等は、最近、フィルムインフレーション成形プロセスの定量化技法として、変分原理に基づくエレガントな解析法を提案しています<sup>1),2)</sup>。当解析法で取り扱われる数学モデルは、数値解析的な取り扱いが容易なことに加えて、成形プロセスの安定性を評価可能な利点を有します。Ver.3.0.0システムには、下記文献で報告されている数学モデルを参考として、フィルムインフレーション新規解析機能を実装しました。

### 参考文献：

- 1) Roman Kolarik and Martin Zatloukal : ‘Modeling of Nonisothermal film blowing Process for Non-Newtonian Fluids by Using Variational Principles’, Journal of Applied Polymer Science, Vol.122,2807-2820(2011)
- 2) Roman Kolarik, Martin Zatloukal and Costas Tzognakis : ‘Stability analysis of non-isothermal film blowing process for non-Newtonian fluids using variational principles’, Chemical Engineering Science, Vol.73,439-453(2012)

---

Kolarik等らは、成形プロセスの安定性解析に立脚し、以下に示す数学モデルを演繹しています(詳しくは元論文をご参照下さい)。

Dimensionless key parameter:

$$A = \frac{pJ - R_0}{pJ - B_{up}R_0}$$

ここで、

$p$  : フィルム内部荷重(Pa・m)

$J$  : 膜コンプライアンス(Pa<sup>-1</sup>)

$R_0$  : スパイラルダイ流出断面半径(m)

$B_{up}$  : ブロー比

です。

---

フィルムブロー成形プロセスが安定な条件(数学モデルの解が見つかる条件)は、無次元パラメータAが、

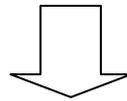
$$-1 \leq A \leq 1$$

を満たす場合に限定されています。

無次元パラメータAに応じて、ブローフィルムの形態が変化します。具体的には、ブローフィルムのMD(z)方向に対する半径分布R (m)は、フリーズライン高さをL (m)として以下に示すように与えられます。

表1. 無次元パラメータAとモデル関数  $\varphi$  の関係

Dimension less parameter A	Zatloukal-Vleck model function $\varphi$
1	0
$0 < A < 1$	$\text{Arc tan}\left(\frac{\sqrt{1-A^2}}{A}\right)$
0	$\frac{\pi}{2}$
$-1 < A < 0$	$\pi + \text{Arc tan}\left(\frac{\sqrt{1-A^2}}{A}\right)$
-1	$\pi$



ブローフィルム半径:

$$R(z) = (R_0 - pJ) \cos\left(\frac{z\varphi}{L}\right) - \alpha'(pJ - B_{up}R_0) \sin\left(\frac{z\varphi}{L}\right) + pJ,$$

$$\alpha' = \sqrt{\frac{2pJ - R_0 - B_{up}}{pJ - B_{up}R_0} \left| \frac{R_0(B_{up} - 1)}{pJ - B_{up}R_0} \right|}$$

---

膜コンプライアンス $J$ は、流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ やMD方向の伸長速度 $\dot{\epsilon}_1(\text{s}^{-1})$ 、粘度分布 $\eta$  ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )の平均値、モデルパラメータ $\phi$ 、フリーズライン位置での引き取り速度 $v_f(\text{m/s})$ 及びフリーズライン高さ $L$  (m)を利用して次式で評価されます。

$$J = \frac{L^2 v_f}{2\phi^2 \eta \dot{\epsilon}_1 Q}$$

また、フィルムブロー成形プロセスでは、伸長変形が支配的に成形現象を決定するため、Carreau-Yasudaモデルを伸長粘度の表現に適するように一般化した以下に示すGeneralized non-Newtonian modelを採用します。

## Generalized non-Newtonian model:

$$\bar{\eta} = \left\{ \frac{\eta_0 \bar{a}_T}{\left[ 1 + \left( \lambda \bar{a}_T \sqrt{\overline{II}_D} \right)^a \right]^{\frac{1-n}{a}}} \right\} \left\{ \tanh \left[ \alpha \bar{a}_T \left( 1 + \frac{1}{4(\sqrt{3})^3} \right)^{-\psi} \left( \left| 1 + \frac{\overline{III}_D}{\overline{II}_D^{3/2}} \right| \frac{\sqrt[3]{4|\overline{III}_D| + \overline{I}_D}}{3} + \beta \right) \frac{1}{\tanh(\beta)} \right] \right\}^{\xi}$$

ここで、各種変形不変量とシフトファクターは、

$$\overline{I}_D = \sqrt{\dot{\varepsilon}_1^2} + \sqrt{\dot{\varepsilon}_2^2} + \sqrt{\dot{\varepsilon}_3^2}$$

$$\overline{II}_D = 2(\dot{\varepsilon}_1^2 + \dot{\varepsilon}_2^2 + \dot{\varepsilon}_3^2)$$

$$\overline{III}_D = \dot{\varepsilon}_1 \dot{\varepsilon}_2 \dot{\varepsilon}_3$$

$$\bar{a}_T = \exp \left[ \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{273.15 + T_s} - \frac{1}{273.15 + T_r} \right) \right]$$

$$T_s = \frac{T_{die} + T_{solid}}{2}$$

で与えられます。上付きバーはMD方向の平均値を意味します。

当粘度モデルは、せん断粘度と伸長粘度の非線形特性の表現が可能です。

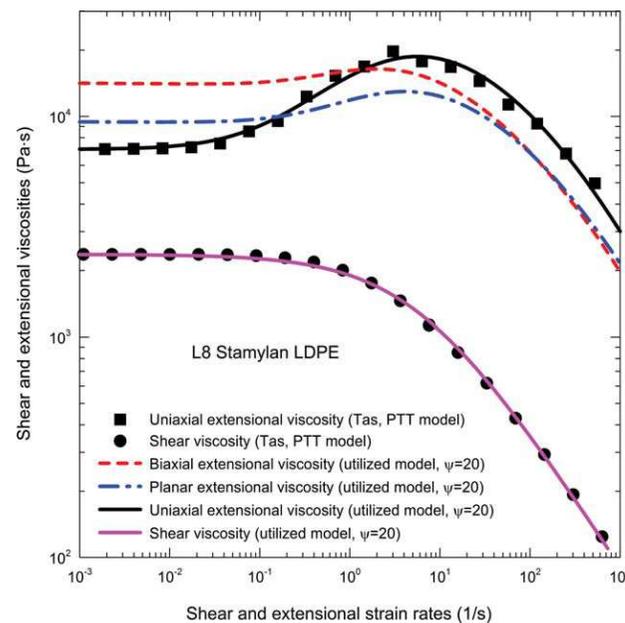


図20. Generalized non-Newtonian modelを利用した各種粘度の表現

参考資料1)より抜粋

Generalized non-Newtonian modelでは、図20に示すように、モデルパラメータ $\psi$ が定常二軸伸長粘度のStrain-hardening性を制御します。また、図21には、Zatloukal-Vleck modelを利用し、モデルパラメータ $\psi$ の変化がフィルムブローの形態に及ぼす影響をSpiral Simulatorを利用して検討した結果を示します。

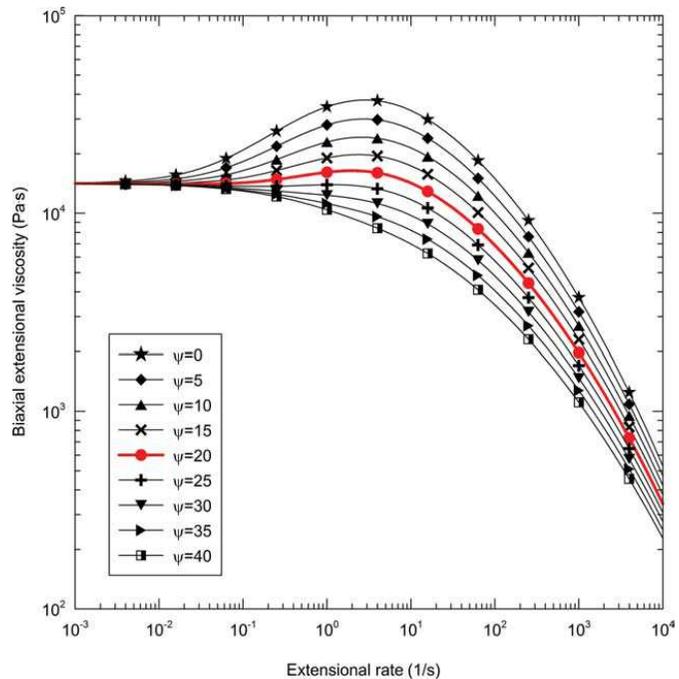


図21. Generalized non-Newtonian model を利用した二軸伸長粘度の表現

参考資料1)より抜粋

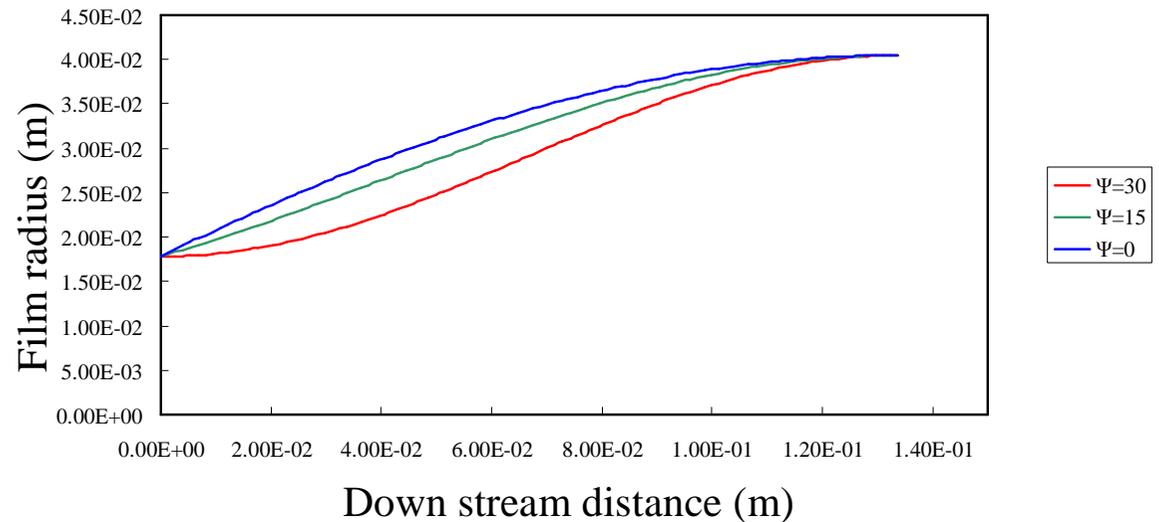


図22. 定常二軸伸長粘度がフィルムブロー形態に及ぼす影響の検討結果

このように、Zatloukal-Vleck modelを導入することにより、フィルムインフレーションプロセスで重視される材料の伸長流動特性と成形性について、比較的容易に分析可能となりました。また、当モデルの利点は、成形プロセスの安定性(数学モデルの解の存在)を判定できることです。フィルムインフレーションのシミュレーションでは、任意の条件に対して、妥当な答えを得られる保障はありません。前述した、Zatloukal-Vleck modelの安定性条件を外した入力となされた場合、解析プログラムは、以下に示すメッセージを出力し、自動停止します。このメッセージが出力された場合は、入力された各種成形条件と材料物性では、安定なフィルムインフレーションが実現できないと判定します。

```
C:\Users\tanifuj\ Desktop\2013年度HASL Flow Simulatorバージョンアップ\SpiralCADVer3.0.0\FilmBlow>fblow
Volume flow rate = 1.0869566E-06 m3/s
A coefficient = 1.002275
The film blow molding process is in an unstable state.
Fortran Pause - Enter command<CR> or <CR> to continue.
```

図23. 不安定(成形不可)判定時のエラーメッセージ