

## ◆HASL/Flowsimulator2D:粘弾性解析

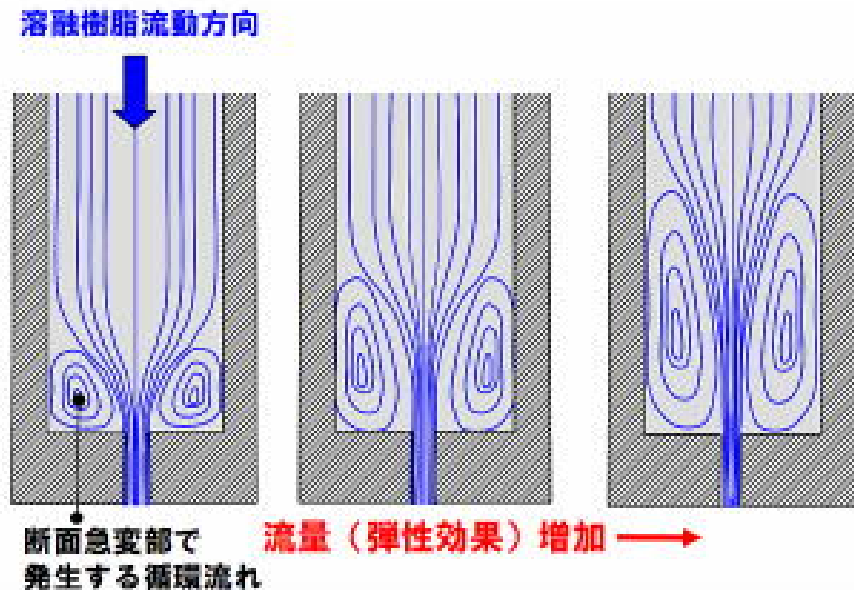
### 粘弾性現象を手軽に定量化する流体解析プログラム

HASL/Flowsimulator2Dは、押出成形分野の現場で活躍する設計技術者／生産技術者の方々が容易に運用し、実用的な分析結果を得ることを重視した設計思想に従ってHASLが自社開発を開始したLow end CAEシステムです。本ソフトウェアは、2D-CAD的な運用のもとに押出成形で問題視される様々な2次元あるいは軸対称、擬似3次元熱流動場を容易に解析可能です。長年に亘り培った押出成形現象の定量化技術と先進的なグラフィック技術を併用することで、プリ／ポストプロセッサ、アナリシスプログラム、GUIから構成される操作性の良い一体化解析システムを低価格で実現しています。以下に当該分野において定量化が難しいとされ、粘弾性成形現象として良く知られている断面急変流れとダイスウェル現象、多層流体の界面包込現象のシミュレーションを題材として本ソフトウェアについてご紹介させていただきます。

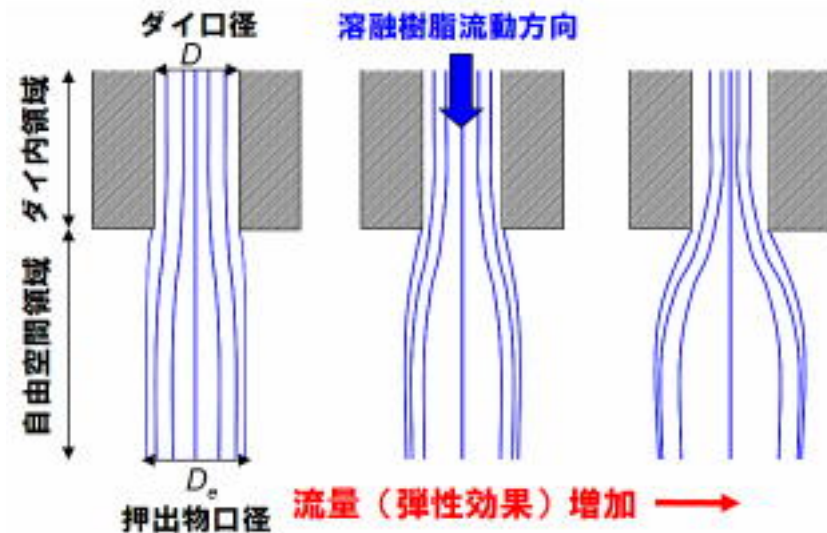
### 1. 解析対象モデル

#### 1.1 断面急変流れとダイスウェル現象

断面急変部の流れ現象とダイスウェル現象はそれぞれ、押出ダイ内とダイ流出後に発現する粘弾性現象として良く知られています。右図に示すように熔融樹脂の断面急変流路内の定常流れでは、流路縮小部の上流側のコーナー部で渦が発生します。渦領域内の樹脂流動はダイ内に滞留して流量に寄与しなくなるため、見かけ上流路形状が上流側で徐々に縮小するように捉えられ、結果として圧力損失が渦の発生を伴わないケースと比較して上昇します。この渦構造と圧力損失を精度良く予測することが熔融樹脂の流れ現象を把握する上で重要視されています。



一方、ダイスウェル現象は、右図に示すように溶融樹脂の押出断面形状がダイの流出断面形状から変化する粘弾性成形現象です。図内の押出物口径とダイ口径の比 $De/D$ で定義される無次元量はスウェル比と呼ばれ、その値は弾性効果の増加に伴って大きくなります。このダイスウェル現象の定量化は、パイプやフィルム、シートの押出形状を予測する上で重要になります。



## 1.2. 2多層流体の界面包込現象

通常、単純形状の角柱流路や円管流路内で発達状態にある高粘性流体は流れに垂直な断面内の流速成分を持たず安定な層流状態を形成します。一方、弾性を有する溶融樹脂は、単層の流体であっても断面内に2次流れが発生することが右図に示すように実験観測事実として報告されています<sup>1)</sup>。押出物の付加価値を向上させる目的で多用されている共押出(多層押出)では、材料特性の異なる溶融樹脂を隣接させて押し出すため、断面内の2次流れが顕著に現れて界面の揺らぎや包み込みが成形上問題視されることがあります。多層押出物の品質や生産性の向上を計る上で多層流体の界面の挙動を正確に予測することが強く望まれています。

実験観測結果の出典：

Viscoelastic Flow Effects in Multilayer Polymer Coextrusion / by Joseph Dooley, Technische Universiteit Eindhoven, 2002  
<http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/2051.pdf>



角柱流路内溶融樹脂二次流れに伴う界面の変形挙動の実験観測結果

## 2. 現象の定量化モデルと数値解析法

### 2.1 現象の定量化モデル

熱流動現象は、流体の質量、運動量、エネルギー保存則を表現する保存方程式と適切な構成方程式(材料モデル)から成る支配方程式を解析することで定量化可能です。熱流体解析では、ニュートン粘性則に立脚した構成方程式の利用が一般的ですが、弾性効果を考慮できない粘性流体解析の範疇では前述した粘弾性現象をシミュレートすることは不可能です。

近年、粘弾性流体の数値解析技術の進歩に伴って、積分型粘弾性構成方程式K-BKZや微分型粘弾性構成方程式PTT、Giesekusなどの高性能粘弾性モデルを利用した流体解析が実用レベルに到達しています。しかしながら、これらの高性能粘弾性モデルは、成形現象の本質を精度良く捉え得る可能性を内在している反面、複雑なモデルパラメータの同定や解析に利用する計算メッシュの設定に工夫を要することに加え、計算収束性を保障するために特殊な計算アルゴリズムの採用が必要になり、誰もが手軽に解析を実施可能という状況ではありません。このような高性能粘弾性モデルを利用した流体解析を成功させるには、モデルに対する専門的な知見と数値解析技術の理論的背景に対する基本的な理解が要求されることを否めません。

ユーザフレンドリーでロバストな運用に耐え、且つ、断面急変流れやダイスウェル現象を容易に定量化することを目的として、HASL/Flowsimulator2Dでは、指数則モデルやCarreauモデルなどの一般的な粘性モデルが表現できない溶融樹脂の第一及び第二法線法力差を考慮可能な以下に示すCEF (Criminale-Ericksen-Filbey)モデル<sup>2), 3)</sup>を採用しています。CEFモデルは、時間依存の記憶効果が表現できないために粘弾性構成方程式として分類されないものの、純粘性構成式と同様、取り扱いの容易さと計算の収束性が良好な利点を有します。

$$\tau = 2\eta(\dot{\gamma})\overset{\cdot}{D} - \psi_1(\dot{\gamma})\overset{\nabla}{D} + 4\psi_2(\dot{\gamma})\overset{\cdot}{D} \bullet \overset{\cdot}{D},$$
$$\overset{\nabla}{D} = \frac{\partial \overset{\cdot}{D}}{\partial t} + u \bullet \nabla \overset{\cdot}{D} - L \overset{\cdot}{D} - \overset{\cdot}{D} L^T$$

$\tau$ : 余剰応力テンソル	$L$ : 速度勾配テンソル
$\eta$ : 流体粘度	$\dot{\gamma}$ : ひずみ速度
$D$ : 変形速度テンソル	
$\psi_1 / \psi_2$ : 第一/第二法線応力差係数	

## 2.2 数値解析法

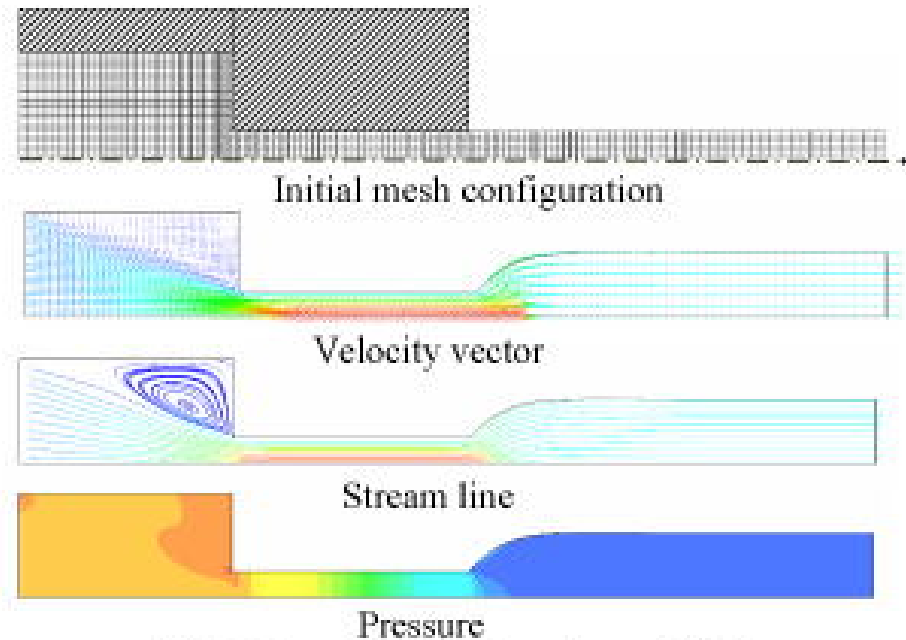
流体支配方程式の離散化法として有限要素法、ダイスウェルシミュレーションの自由表面と界面包込シミュレーションにおける界面の捕捉法として、それぞれ高さ関数法とVOF法を採用しています。

界面包込は、3次元成形現象ですが、下流側に向けて物理量の変化が小さいという実際に即した条件を勘案し、流れ方向と流れに垂直な方向に支配方程式を分離して解析します。すなわち、3次元現象を擬似3次元的な現象に簡略化しています。精密な3次元・刻<sup>h</sup>では、多層流体の界面に沿って計算要素の切り直しを行うことが一般的ですが、界面の大きな変形に伴って、計算不能に陥ることが多々あります。界面包込現象は、定常流動問題として定式化していますが、流路入口からの下流側に向けて測られる流動距離の変化を樹脂の平均到達時間の変化と解釈することによって、基本的に非定常の界面捕捉法であるVOF法を採用しています。VOF法は自由表面や界面の大変形挙動を許容できるメリットがあります。

## 3. シミュレーション結果

### 3.1 ダイスウェルシミュレーション

最初にご紹介するのは、押出成形に関わる粘弾性現象として最もよく知られたダイスウェル現象のシミュレーション結果です。弾性効果が高く、右図に示すようにスウェル比が、2を上回るような場合には、メッシュ分割や収束計算法の選定に工夫を要することが、一般的ですが、CEFモデルを採用した解析はロバストであり比較的容易に、且つ、短時間で収束解を得ることができます。右図に示す解析結果では解析領域の対称性を考慮して、上半分の領域のみを解析対象とし、断面急変流れとダイスウェル現象を同時にシミュレートしています。



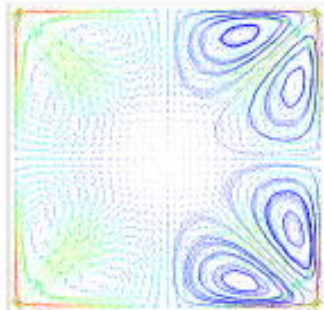
ダイスウェルシミュレーション結果

これらの成形現象には、第一法線応力差が支配的に影響します。第一/第二法線応力差を一般的な粘性構成方程式の粘度モデルと同様、適切なモデルで独立にフィット可能なことはCEFモデルの利点の一つです。流量や第一法線応力差を大きく設定して、第一法線応力差の影響を増加させると渦構造の規模やスウェル比が増加し、定性的に現実に即した結果を得ることができます。

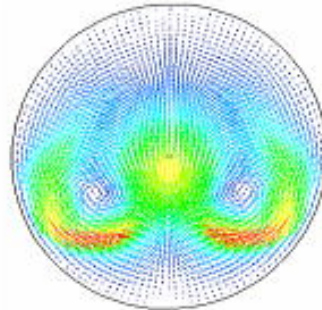
### 3.2 界面包込シミュレーション

次に、多層シートやフィルムの押出プロセスで問題視される多層流体界面の包込現象のシミュレーション結果についてご紹介します。この問題を現実通りに3次元で解析することは、極めて難しく、その実施例は僅かです。ここでは、実用性を重視し、CEFモデルを利用した擬似粘弾性、主流方向と主流に垂直な断面内の流れ現象を分離して評価する擬似3次元の簡略化した条件を採用しています。

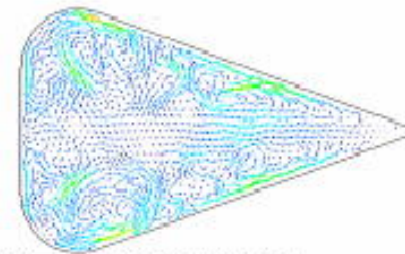
下図に様々な流路断面形状内で発生する2次流れのCEFモデルを利用した解析結果を示します。これらの2次流れには、第二法線応力差が支配的に寄与しています。角柱流路断面の解析ケースでは、単層流体を想定していますが、正方形断面のコーナーに対称的に8つの循環2次流れが形成されます。また、円形断面とコートハンガーダイのマニフォールドを想定したTear drop 断面形状を採用した解析ケースでは、初期的に下半分領域を高粘性流体に設定しています。図に示す通り、多層流体では、レオロジー特性の差を反映して2次流れの分布が非対称になります。これらの2次流れが、界面包込現象のドライビングフォースになっています。



角柱流路断面内2次流れ  
流速ベクトル/流線（単層流体）



円柱流路断面内2次流れ流速ベクトル  
（多層流体；下部領域が高粘性流体）



Tear drop断面形状流路内2次流れ  
流速ベクトル（多層流体；下部領域が高粘性流体）

CEFモデルを利用した断面内2次流れ解析結果

下図に、VOF法を利用した界面変形挙動のシミュレーション結果を示します。角柱流路内の単層流体を想定したケースでは、実測データ<sup>1)</sup>との比較を示しています。大胆な簡略化を採用したにも拘わらず、シミュレーション結果が実測値に観察される界面形状の変化を良く捉えていることは、特筆すべきことです。円形断面内の多層流体を想定した解析では、下流側に向かって、低粘性流体が高粘性流体を包込むような挙動を示し、実測と傾向が一致した解析結果が得られます。

Simulation: HASL/Flowsimulator2D



Down stream (Time evolution)

Experimental data: Viscoelastic Flow Effects in Multilayer Polymer Coextrusion  
/ by Joseph Dooley, Ph-D thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2002



角柱流路を流れる溶融樹脂断面内の界面変形挙動に対する  
シミュレーション結果と実測値の比較（単層流体）

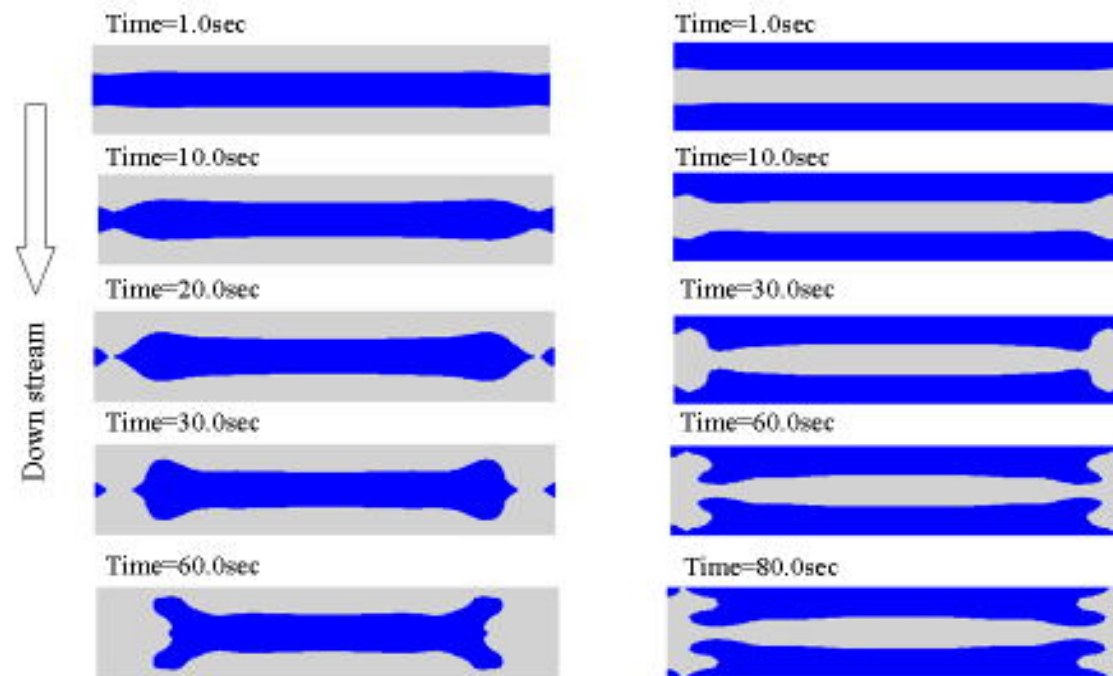
Simulation: HASL/Flowsimulator2D



Down stream (Time evolution)

円管流路を流れる多層溶融樹脂断面内の界面変形挙動に対する  
シミュレーション結果（青色領域：高粘性流体）

多層シートやフィルムの押出プロセスでは、下流側で幅が広く、肉厚の薄いスリットダイが利用されます。成形上、よく問題視されるエッジ近傍の包込現象を分析するために、下図に示すような矩形断面内の2種3層多層流体の界面変形挙動をシミュレートしました。青色領域を相対的・ノ高粘性流体と想定して層配置の変化が界面の変形挙動に及ぼす影響を検討しました。図に示す通り、層配置の変化に伴って、断面コーナー部の界面変形挙動が大きく異なります。単層流体の前提では、断面幅と肉厚のアスペクト比の変化は、循環流れの規模の大きさを変化させることがあっても、その方向を変えることが無いことを確認しています。一方、多層流体のレオロジー特性の差は、層配置によっては、循環流れの方向を反転させることを解析結果は示唆しています。結果として、スリットダイのケースでも低粘性流体が高粘性流体を包込む傾向が示されています。



スリットダイ内2種3層流体の多層界面変形挙動のシミュレーション結果（青色領域：高粘性流体）

## 4. まとめ

HASL/Flowsimulatorの開発コンセプトは、現在、多くの市販流体解析プログラムが追及している大規模モデルの高精度/高速演算 (High Performance Computation)とは、敢て逆行し、解析をモデルを可能な限り妥当に簡略化することで、誰もが手軽に運用でき、しかも短時間で解析結果を出力する解析ツールを構築することにあります。また、汎用性は少々損なっても、問題によっては、高級なソフトウェアの追従を許さないシミュレーションを実現することを目指しています。本解説資料では、その一例として、擬似粘弾性、擬似3次元というような大胆な簡略化を採用したシミュレーション結果をご紹介します。簡略化を採用しても、従来の粘性解析では捉えられない諸現象の定量化が可能であることを例証できたと思います。HASL/Flowsimulatorは、今後、ユーザの皆様のご要望に精力的にお応えしながら改良開発を継続する所存です。是非宜しくお願い致します。

## 参考文献

- 1) Joseph Dooley, “;Viscoelastic Flow Effects in Multilayer Polymer Coextrusion” ,Ph-D thesis, Technische Universiteit Eindhoven,2002
- 2) R. G. Bird, et al., Dynamics of Polymeric Liquids, Vol. 1 Fluid Dynamics (1977), John Wiley & Sons.
- 3) E. Mitsoulis, J. Vlachopoulos, F.A. Mirza, *Polym. Eng. Sci.*,24(9), 707(1984)