

樹脂流動解析技術

— 樹脂流動解析セミナーの企画と実施について —

北陸ポリテクカレッジ 生産技術科 増川 一郎
(北陸職業能力開発大学校)

1. はじめに

設計分野では、納期短縮、設計品質の向上などの要求がますます厳しくなるなか、設計業務を効率的に進めるためにCAEの導入が盛んになってきている。最近の傾向は、設計技術者自身がCAEを使用することを前提として「使いやすさ」をセールスポイントとしたものが多くなってきている。樹脂流動解析の分野においても上記のようにソフトウェア開発が行われ、簡易的なCAEと専門的なCAEとに住み分けが進んでいる。

簡易的なCAEは、設計業務への支援を強く意識したソフトウェアとなっており、3次元CADから出力されたSTLデータ*1を読み込んだ後、ゲート位置とランナーの設定および使用樹脂の情報を設定するだけで簡単に解析を行ってくれる。設計者は、わずかな時間と労力で解析結果を得ることができるようになったため、より創造的な作業に専念できることになる。

本報では、プラスチック射出成形に従事している方、プラスチック部品設計や金型設計に従事している方を対象として平成17年度の能力開発セミナーとして実施した「樹脂流動解析導入技術」の内容を紹介するとともに樹脂流動解析のポイントについて報告する。

STLデータ*1：STL (Standard Triangulated Language) は3D Systems Inc. が開発したフォーマットでStereolithographyとも呼ばれる。主に光造形等によるラビッドプロトタイプングシステムで使用され、サーフェイスやソリッドモデルを表現するのに通称三角パッチと呼ばれる小さな三角の面で構成される。

2. 使用機器

表1と表2は、当校で導入しているハードウェアとソフトウェアの仕様を示したものである。樹脂流動解析ソフトウェアは、モールドフロージャパン(株)のMoldflow Plastics Insight (MPI)と東レエンジニアリング(株)のTimon Mold Designer (TMD)がある。

表1 ハードウェア

クライアントPC 本体：HP XW4000 Intel Pentium4 2.8GHz メモリ：1GB ハードディスク：40GB グラフィック：Quadro4 980XGL OS：Windows XP SP1
CPUサーバ 本体：HP ZX6000 Itanium2 900MHz メモリ：4GB ハードディスク：438GB グラフィック：ATI RADEON 7000 OS：HP-UX11
ファイルサーバ 本体：ProLiantML350 T03 Intel Xeon 2.2GHz メモリ：1GB ハードディスク：880GB OS：Windows 2000 Server

表2 ソフトウェア

ソフトウェア名	機能・用途
Unigraphics NX1	モデラ
Timon Mold Designer Ver 2.1	プリ・ポストプロセッサ ソルバ
Mold Flow Plastics Insight 4.1/Synergy	プリ・ポストプロセッサ
Mold Flow Plastics Insight 4.1/Flow	ソルバ

動作環境は、若干違っておりTimonは、すべての作業がクライアントPC上で完了する。一方Moldflowは、プリ・ポスト作業はクライアントPC上で行いソルバによる計算はCPUサーバ上で実施する。これは、専門的で詳細な流動解析の実施にはマシンパワーが必要となるためである。

Moldflowは、上位版樹脂流動解析ソフトウェアのMPIと機能を限定した簡易版の樹脂流動解析ソフトウェアのMoldflow Plastics Advisers (MPA) をラインナップしている。またTimonは、上位版の3DTimonと簡易版のTMDを持つ。

当校では、上位版の樹脂流動解析ソフトウェアとしてMPI4.1を採用している。多数のグレードの樹脂データベースを備え精度の高いプラスチックの流動シミュレーションを実現できる。MPIは複数のモジュールから構成されており基本モジュールはMPI/FLOW (充填・保圧解析) + MPI/Synergy (プリ・ポストプロセッサ) となっている。その他に解析の用途に応じて、定常状態の金型と製品の冷却解析をするMPI/Cool, 金型離型後の成形品の収縮とそりを解析するMPI/Warp, 繊維強化樹脂の配向に伴うそりや収縮を解析するMPI/Fiber, 離型変形後の成形品に対する応力解析を行うMPI/STRESS等が用意されており用途に応じてモジュールを追加する形態となる。費用は、モジュールの追加ごとに発生するため必要な機能を厳選する必要がある。また、MPIは、扱える形状データによりシェルメッシュベースのmidplaneとデュアルドメインメッシュベースのFusionおよび完全3次元形状に対応した3Dがある。

一方、簡易版樹脂流動解析ソフトウェアとしてTimon Mold Designer Ver.2.1を採用している。「より早く、実用的に」がTimon Mold Designerの開発目標で、プラスチック製品設計や金型設計などの主に設計現場で利用されることを前提としている。コンピュータ上で仮想的に試作実験を繰り返し成形品の良否を予測しその対策をとることで開発時間の短縮や試作回数の削減を目的としている。

TMDは、解析モデルのメッシュを意識することなく、ボクセルベースでの完全3次元樹脂流動解析を

可能としている。CADからSTLファイルによりモデル形状を得た後、パーティング面の設定、ゲート位置、ランナーシステムの作成、樹脂データの選択を解析コンシェルジュの指示に従い対話形式で作業を進めることにより樹脂流動解析が可能となる。主な解析項目は、充填パターン、ウェルド位置、温度分布、圧力分布、ガスベント、ショートショット判定、フローマークがある。また温度・圧力は任意点における時系列グラフの表示ができる。

3. セミナーの概要

3.1 日程表

表3は、セミナーの日程表を示したものである。

1日目は、午前中の前半をかけて樹脂流動解析の概要と射出成形の概要を講義する。その後、午前中の後半から午後の終日にかけて流動解析ソフトウェア (Timon Mold Designer) の操作方法を習得する。

2日目は、樹脂流動解析理論と樹脂データに関する説明とフローコンセプトおよび解析結果の評価に関する説明で講義が主体となっている。

3日目は、前2日間の講習内容を踏まえ演習問題の取り組みと受講者が取り組んだ課題について分析結果を発表し質疑する内容となっている。

表3 樹脂流動解析導入技術日程表

1 日 目	午前	<ul style="list-style-type: none"> 樹脂流動解析の概要 射出成形の概要 樹脂流動解析ソフトウェアの起動と終了基本操作 (Timon Mold Designer) 解析の頭から尻尾までの操作練習
	午後	<ul style="list-style-type: none"> 樹脂流動解析操作練習 CADデータの取り込み 多数個取り設定
2 日 目	午前	<ul style="list-style-type: none"> 樹脂流動解析の理論 支配方程式 離散化 数値解法
	午後	<ul style="list-style-type: none"> 樹脂データについて 解析結果の評価について フローコンセプト
3 日 目	午前	<ul style="list-style-type: none"> 解析課題演習 演習課題の要求仕様について ギヤ, 携帯電話, パネル, マウスなど
	午後	<ul style="list-style-type: none"> 発表用データ・資料・レポートの作成 解析課題の分析結果の発表 まとめ

3.2 セミナーのポイント

1日目のポイントは、短時間の内にCAEの使用方をマスターしてもらうことが課題となる。そのためソフトウェアに対する要求として簡単な操作方法で解析が可能となるものが望ましい。

2日目のポイントは、樹脂流動解析理論の習得が中心となる。CAEユーザは、ブラックボックス的に計算された解析結果に対して少なからずの不安を抱く。そのため、どのような理論と仕組みにより計算が行われ、どのような近似が使われていることを理解し適切な設計を進めたいとの要望がある。そこで、樹脂流動解析で使用されている連続の式、運動方程式、エネルギー方程式の流れの現象を表す支配方程式と樹脂の物性値を表す構成方程式の説明を実施する。

3日目のポイントは、①演習課題について製品の要求仕様から、要求される機能を満足しつつ流動解析により成形加工時に発生すると想定される不具合を予測しその対処法を考え優れた成形条件や設計値を模索してもらうこと、②考えた自分の案を他の受講者にも説得できるようにデータをまとめ上げること、③プレゼンテーションにより自分の考えを発表する能力を養うことである。

発表に際してセミナー担当者には、下記の内容に対応できる能力が必要となろう。④受講者の考えた設計案が正しく導かれているのか誤った考え方をしているのか判断し適切なコメントを返すことができる能力で、射出成形加工、樹脂流動解析、樹脂データ等に関して幅広くかつ専門的な知識を有すること、⑤発表を有意義にするために受講者間で活発な意見が出るように授業を導くこと、⑥適切な課題を選定とすること。

4. 樹脂流動解析理論

4.1 支配方程式

射出成形における樹脂流動解析理論は、一般的な流体力学の基礎式である連続の式（質量保存則）、運動方程式（運動量保存則）、エネルギー方程式（エネルギー保存則）により流れの現象を支配する基礎方

程式（支配方程式）が導かれる。それらの式から圧縮項、慣性項、重力項を省き、定常状態を仮定することにより以下の方程式で表される。

連続の式は、図1に示すように各辺の長さ、 dx_1 、 dx_2 、 dx_3 の微小直方体において単位時間に流入する質量を考えると式(1)で与えられる。

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1 \sim 3 \quad (1)$$

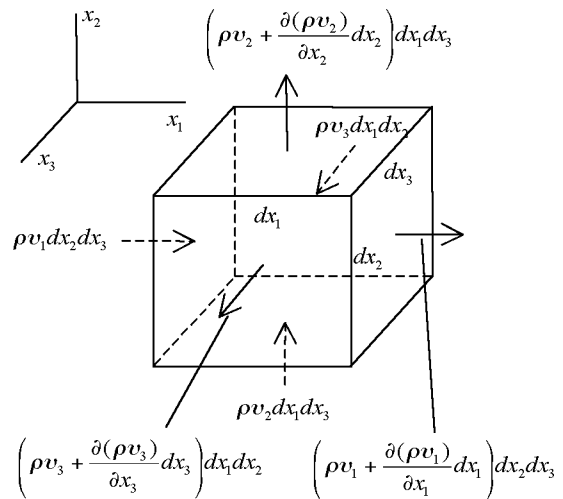


図1 微小直方体に単位時間に流入する質量

運動方程式は、図2に示すように流れ場の中に微小直方体を考え単位質量当たりの運動量の変化（力の釣り合い）より式(2)を得る。これより樹脂のように遅い流れ場（粘性が高い）では運動方程式は、圧力と粘性力により支配されることがわかる。

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0, \quad i, j = 1 \sim 3 \quad (2)$$

ここで、 σ_{ij} は粘性応力テンソルを表し式(3)で与えられる。

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - p \delta_{ij}, \quad i, j = 1 \sim 3 \quad (3)$$

ここで、 p は圧力を表す。また、 μ は粘性係数であり、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ記号を表す。

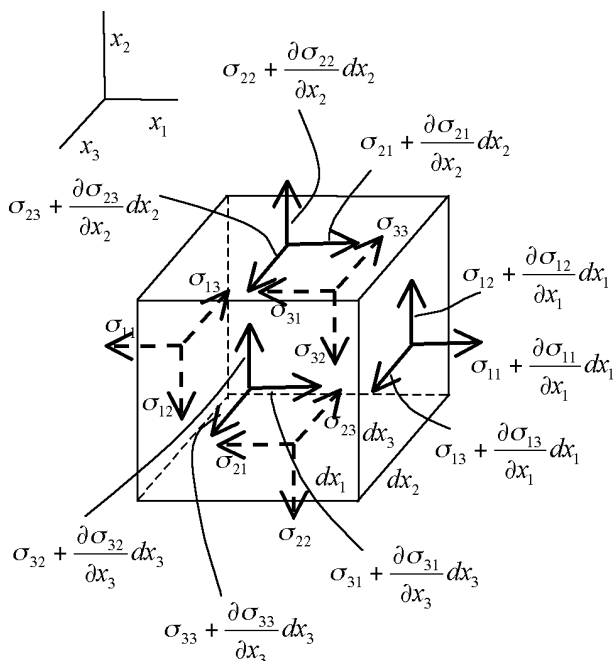


図2 表面力を受ける微小直方体

エネルギー方程式は、上記の連続の式、運動方程式と同様に流れ場に微小直方体を考えエネルギー保存を考えると式(4)で与えられる。

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_i} \right) + \sigma_{ji} \left[\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \delta_{ji} \right], \quad i, j = 1 \sim 3 \quad (4)$$

ここで、 C_p は比熱を表す。また、 T は温度で、 k は熱伝導率である。

4.2 樹脂データ

(1) 熱物性

樹脂データは、熱的特性、粘度特性、PVT特性、収縮データ、機械的特性などを持つ。流動解析では、流動停止や流体/固体2相混在系での密度変化や粘度変化を定義するために樹脂が流体なのか固体なのかその状態の判定が重要となる。この相変化に対しては、樹脂温度を判定基準とし流動停止温度を定義することで相変化を判定する。以下に流動解析で扱う熱的特性を示す。また、表4には樹脂情報の一例を示し、表5には代表的な樹脂の個体時における比

熱、熱伝導率、密度を示す。

- ・比熱 [J/kg/°C] : 1kgの樹脂を1°C上昇させるのに必要な熱量、値が小さいほど熱は伝わりやすい。
- ・伝導率 [W/m/°C] : 樹脂内の熱の移動を表す物性で、値が大きいほど熱は伝わりやすい。
- ・密度 [kg/m³] : 単位体積当たりに含まれる樹脂重量。
- ・流動停止温度 [°C] : 樹脂の流動が停止する温度。

表4 樹脂情報

基本情報	ベースレジン	ABS
	会社名	TORAY
	グレード	100-322
	繊維含有率	0
流動停止温度 (°C)		105
熔融時	参照温度 (°C)	230
	密度 (kg/m³)	881
	比熱 (J/kg°C)	2080
	熱伝導率 (W/m°C)	0.146
個体時	参照温度 (°C)	23
	密度 (kg/m³)	1040
	比熱 (J/kg°C)	1560
	熱伝導率 (W/m°C)	0.185
粘土 (3定数)	定数A	2.60E+06
	定数B	-0.683
	定数C	-0.018

表5 固体時の比熱、熱伝導率、密度の例

樹脂	比熱 (J/kg°C) ×10³	熱伝導率 (W/m°C)	密度 (kg/m³) ×10³
PS	1.20	0.12	1.06
PVC	1.10	0.21	1.40
PMMA	1.45	0.20	1.18
SAN	1.40	0.12	1.08
ABS	1.40	0.25	1.02
PC	1.40	0.19	1.20
LDPE	2.30	0.24	0.92
HDPE	2.25	0.25	0.95
PP	2.10	0.15	0.91
PA-6	2.15	0.25	1.13
PA-6.6	2.15	0.24	1.14
PET	1.55	0.29	1.35
PBT	1.25	0.21	1.35

* 熔融時の比熱 ≒ 1.6 × 固体の比熱

* 熔融時の密度 ≒ 0.88 × 固体の密度

(2) 粘度式

ニュートン流体では、せん断応力 τ は比例定数で

ある粘度 μ とひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の積に比例すると定義される。この定義に従わないような挙動をする流体を非ニュートン流体と呼び溶融樹脂は非ニュートン流体である。溶融樹脂は、樹脂温度やせん断速度によって粘度が大きく変わることが知られている。樹脂の粘度は、流れやすさを示す指標であり大きくなるほど流れにくくなる。

粘度式は、さまざまなモデル化がなされているが、あくまでも実験式のため完全なものが存在しない。以下に粘度式の例を示す。式(5)は、一次直線近似モデルで3定数モデルとも呼ばれる。式(6)は、二次曲線近似モデルで6定数モデルとも呼ばれる。式(7)は、Cross-WLFモデルである。

・一次直線近似モデル (パワーローモデル)

$$\ln \eta = \ln A + B \ln \dot{\gamma} + CT \quad (5)$$

η : 粘度(Pa·s) A : 粘度係数
 $\dot{\gamma}$: せん断速度(1/sec) B : せん断係数
 T : 温度(degC) C : 温度係数

・二次曲線近似モデル

$$\ln \eta = A_1 + A_2 \ln \dot{\gamma} + A_3 T + A_4 (\ln \dot{\gamma})^2 + A_5 T (\ln \dot{\gamma}) + A_6 T^2 \quad (6)$$

η : 粘度(Pa·s) $A_1 \sim A_6$: 粘度係数
 $\dot{\gamma}$: せん断速度(1/sec)
 T : 温度(degC)

・Cross-WLFモデル

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{(1-N)}} \quad (7)$$

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[\frac{-A_1 (T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right]$$

$$T^* = D_2 + D_3 P$$

η : 粘度(Pa·s) T : 温度(degC)
 $\dot{\gamma}$: せん断速度(1/sec) P : 圧力(Pa)
 $D_1, D_2, D_3, A_1, A_2, \tau^*, N$: 係数

5. 解析結果の評価法

5.1 フローコンセプト

樹脂流動解析では、何のために、何を評価するか解析の目的と評価基準を明確にしておく必要がある。さもなければ、ただ単に流動解析を実施したところで解析結果の中から判断に必要な情報を得ることができず現象を考察できないまま無駄な労力と時間を費やしただけになってしまう。そこで、適切な設計値、成形条件を得るためにフローコンセプトが必要となる。

フローコンセプトは、樹脂流動解析における1つの設計哲学であり解析した結果がフローコンセプトに沿うように設計値や成形条件を設定する。以下にフローコンセプトの一例を示す。

- ① ゲート数は、なるべく少なくする。金型構造がシンプルになるほか、スプール・ランナーなどスクラップ部が少なくなる。
- ② ゲート位置は、充填バランスが良い位置に設定する。応力分布を均一に保ちそりなどを防ぐ。
- ③ 充填パターンは、キャビティの充填末端部が同時になるようにし、樹脂焼けやアンダーフローを防ぐ。
- ④ 樹脂の流れは、なるべく一方向に流れるように設定し回り込みがないようにする。樹脂の配向により収縮が不均一とならないようにし応力を抑制しそりの原因を防ぐ。
- ⑤ 充填バランスは、同時充填が望ましい。充填のバランスが崩れると収縮バランスが崩れそりの原因となる。
- ⑥ 充填圧力は、なるべく低くなるように充填時間を調整する。
- ⑦ 最大せん断応力は、樹脂の持つ限界値を超えないようにする。高すぎるとひび割れが発生する。
- ⑧ 冷却は、成形品が均一に冷えるようにする。不均一な温度分布では収縮バランスが崩れそりの原因となる。
- ⑨ 樹脂温度分布は、最大値と最小値の差が20℃

～30℃になるようにし樹脂焼けを起こす温度以下にする。

- ⑩ ためらい現象のないようにゲート位置を設定する。極端な薄肉部はゲートから極力離れた位置に設定する。
- ⑪ ランナーバランスは、等距離ランナーとなるように設定する。
- ⑫ ランナーシステムは、材料損失を少なくするため材料を最小化するように設定する。

5.2 解析結果の評価について

樹脂流動解析では、近似計算により結果を導いている。したがって得られる計算結果は厳密解ではないといえる。そこで解析結果の評価は、定性的な評価を行うべきであり1つの厳密解にこだわるよりも、複数の解析結果を比較し相対的な傾向を把握するように勤めるべきである。

図3は、セミナーで使用した演習問題の成形品の形状（パネル）を示したものである。ここでは、充填パターンに着目し流動末端部において同時に樹脂が充填することを目的として流動解析を行った。製品に配置するゲート位置とサイズを決定するために3つの流動パターンの解析結果を比較検討する。

使用樹脂は、表4に示したABS樹脂を使用する。成形条件は、充填時間を1.6秒、射出温度220℃、金型温度50℃とし同一とした。また、ゲートサイズ、ランナーサイズを同一としてゲートの位置と数の違いによる結果の相違を評価することにした。

図4は、成形品の側面に1個のサイドゲートを設けたときの解析結果で結果1とする。最高圧力は163.945 MPa、ランナー最大圧損は82.662 MPa、最高温度は231.460℃、最低温度は211.869℃、型締め力は204.116 ton、最大ゲートせん断速度は8.466e+4 1/s、最大流動比は172.306であった。また、形状不良としてジェットイングの発生の可能性が高くなっている。充填パターンに関しては、流動末端部においてほぼ同時に樹脂が充填している。

図5は、成形品の中央の縁部に1個のサイドゲートを設けたときの解析結果で結果2とする。最高圧力は220.209 MPa、ランナー圧損は161.552MPa、最高

温度は227.734℃、最低温度は217.480℃、型締め力は112.508 ton、最大ゲートせん断速度は1.389e+5 1/s、最大流動比は155.971であった。充填パターンに関しては、流動末端部において同時に充填されない部分が存在した。

図6は、成形品の側面に3個のサイドゲートを設けたときの解析結果で結果3とする。最高圧力は235.387 MPa、ランナー最大圧損は193.589MPaランナー最小圧損は181.023 MPa、ゲート間最大圧力差は12.566 MPa、最高温度は227.443℃、最低温度は216.001℃、型締め力は103.146 ton 最大ゲートせん断

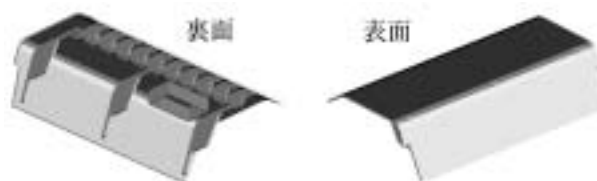


図3 成形品の形状（パネル）

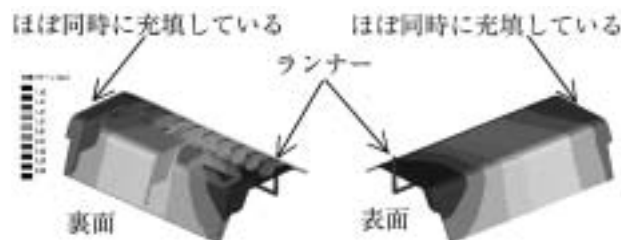


図4 成形品の側面に1個のサイドゲート

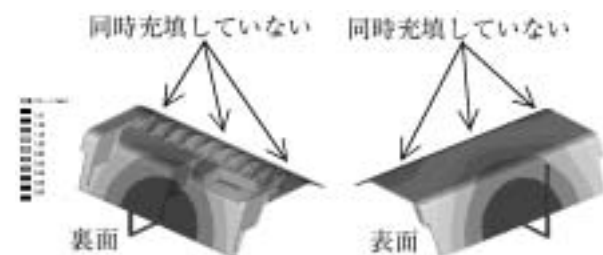


図5 成形品の中央の縁部に1個のサイドゲート

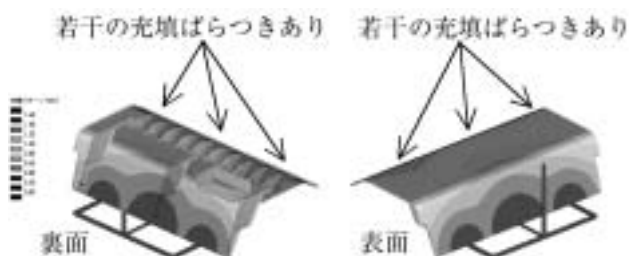


図6 成形品の中央の縁部に3個のサイドゲート

速度は $1.114e+5$ 1/s, 最大流動比は161.468であった。充填パターンに関しては、流動末端部において若干のばらつきがみられた。

表6は、3つの解析結果をまとめたものである。ここに記載した値は、樹脂流動解析が近似計算であるため定量的に評価することは危険である。そこで、3つの結果をフローコンセプトに沿って定性的に評価するために表7を作成した。記載した◎, ○, △, ×は3つの解析結果を相対的に比較したもので絶対的な評価ではない。

表6 解析結果の一覧

	結果1	結果2	結果3
最高圧力 Mpa	163.945	220.209	235.387
ランナー最大圧損 Mpa	82.662	161.552	193.589
ランナー最小圧損 Mpa	82.662	161.552	181.023
ゲート間最大圧力差 Mpa	-	-	12.566
最高温度 °C	231.460	227.734	227.443
最低温度 °C	211.869	217.480	216.001
型締め力 ton	204.116	112.508	103.146
最大ゲートせん断速度 1/s	8.47E+04	1.39E+05	1.11E+05
最大流動比	172.306	155.971	161.468

表7 フローコンセプトに対する解析結果の比較

	結果1	結果2	結果3
ゲート数	◎	◎	△
充填パターン・バランス	○	×	○
流動方向・流動配向	◎	○	△
充填圧力	◎	○	△
最大せん断力	◎	△	○
冷却バランス	△	○	○
樹脂温度分布	△	◎	◎
型締め力	△	○	◎
最大流動比	△	○	○
成形不良の可能性	×	○	○

◎…優 ○…良 △…可 ×…不可

本例題の解析の目的は、同時充填になるゲートの位置と数を求めるものであった。解析結果1~3を比較して結果1は、充填パターンは優れているもののジェティングの可能性が大きいので採用しないことにする。結果2は、同時充填となっていないため目的からはずれている。結果3は、わずかに充填のばらつきがあるものの他の項目に不可となるものがない。そのため、結果3を採用することにする。今回使用した簡易的なCAEでは、そりや金型冷却など

詳細な解析ができていない。専門的なCAEの使用と実成形実習が実施できれば解析項目と解析内容をさらに詳しく分析でき充実したセミナーとなるものと考ええる。

6. まとめ

本報では、樹脂流動解析セミナーに関しての内容とセミナーのポイントについて報告した。射出成形加工業界では、現在3次元CAD/CAMシステムの導入が活発化しておりCAEへの関心も高まっている。CAEによるシミュレーション技術は、今までになかった新しい生産技術であり職場において先輩が少ないことが多い。そのため、先輩から学ぶOJT体制もできておらず人材育成が思うように進まないことが多い。また、CAEを活用する技術者には、専門的かつ広範囲な知識、技能、技術が求められる。このような現状からCAE教育の要望が高まってきており、樹脂流動解析セミナーには、CAEを使用して得られた解析結果から有効な情報を多く読みとり業務に適用できる能力を付与できる内容とすることが求められている。

【謝辞】

樹脂流動解析セミナーの計画・実施するに当たり東レエンジニアリング株式会社（結城高志氏、大谷正人氏、白数正視氏）、株式会社電陽社（萩原英樹氏、上田貴志氏）、東京エレクトロン株式会社（岩月厚氏）に協力をいただいた。厚く御礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) スハン. V. パタンカー原著, 水谷幸夫・香月正司共訳: 『コンピュータによる熱移動と流れの数値解析』, 森北出版
- 2) 矢川元基・吉村忍共著: 『有限要素法』, 培風館
- 3) 『Timon Mold Designer Help Document』, 東レエンジニアリング株式会社