

## 射出成形の CAE—技術の現状と研究動向

K. K. Wang\*<sup>1</sup>金井俊孝訳\*<sup>2</sup>

射出成形の CAE (Computer-Aided Engineering) の出現は、射出成形産業に急激なインパクトを与えつつある。この技術を適切に使えば、生産性と品質の向上の両方に役立つことが示されてきた。

しかしながら、CAE はエンジニアにとって合理的で工学的な決定を行う有力な道具として使用されているが、決してすべての射出成形の問題を解決するための万能薬ではない。CAE パッケージの有効性はソフトウェアを開発するために使用された科学的な原理や数値解析手法に大きく左右されるだけでなく、材料物性や成形条件などのインプットデータの信頼性にも大きく依存する。

本稿は CAE ソフトウェアの開発上の基本的な事柄や制約、技術の現状、現在の研究活動、そして工業的応用の状況について述べる。

## 1. はじめに

二世紀以上前の第一次産業革命以来、製品の設計や製造はエンジニアリング活動の中心となってきた。スチームエンジンから宇宙船へ、煉瓦やモルタルの建物から鉄筋とガラスでできた高層ビルへ、電球からスーパーコンピュータへと、エンジニアは一生懸命に研究し製品設計の新しいアイデアや、より効率的で経済的に製造するための新しいプロセスを考えてきた。伝統的に、新しい工夫や直観が工学の実際の場面では主な役割を演じてきた。また、物理や工学における基本的な法則もエンジニアが意志決定する際に役立った。

人間の脳は問題解決するために膨大な量の情報を並

列的に処理しなければならないような仕事をこなすことができるかもしれないが、複雑な製品設計や製造のシステムを扱う場合には、コンピュータおよびそれを操作するための関連ソフトのような人工のツールの助けなくしては、十分な力を発揮できない。それゆえ、今日においてさえ、伝統的な環境の中では設計と製造技術者はそれぞれの仕事を別々に、そしてしばしば直列的に仕事を行っている。

高速コンピュータやそれに関連した技術の出現（しばしば、第二次産業革命の始まりであるとみられる）で、エンジニアや科学者たちは思考方法の新しい挑戦だけでなく、ビジネスを行ううえにおいてもかつて前例のない好機に直面している。今日のますます激化する競争社会においてエンジニアはこの新しい環境の進歩に対するあらゆる可能性を探りながら一生懸命に研究を行っている。現在、より高度な自動化へ導いてくれるような、急激に増大しているコンピュータに基づいた技術をわれわれが即座に利用できることが望まれている。しかしながら、現実はいわゆる CAD/CAM 技術の 20 年以上にわたる継続した発展<sup>1)</sup>はあったが、実社会へのインパクトは期待されたほどのものにはなっていない。ある領域、例えば幾何学形状のモデル化などの場合には、期待されながら研究を開始したものの、大きな進歩もなくいく分停滞した状態にあると思われる。専門用語の多用、約束ごとや錯覚に戸惑いながら、経営の上層部だけでなく、実際にたずさわっているエンジニアたちもこれらの技術がなぜ要求したように効果を上げないのか、そしていつ“第二次産業革命”が本当に起こるのか、についてしばしば疑問を感じている。

当然、これらの疑問に対する見方や評価は“見る人の目の中”にある。事実、有限要素法、有限差分法、境界要素法のような数値解析手法を使うことにより、構造物や機構部品の設計や解析においては大きな進歩がみられる。他のシステムの物理過程を数値計算によ

\*<sup>1</sup> Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering  
Cornell University  
Ithaca, New York, U. S. A.

\*<sup>2</sup> Toshitaka Kanai  
出光石油化学(株)樹脂研究所  
市原市姉崎海岸 1-1 (〒 299-01)  
1991. 1. 14 受理

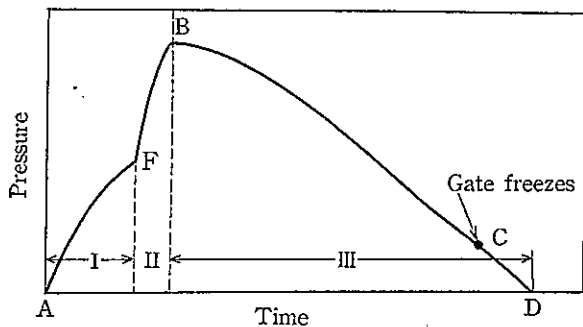


図1 3ステージよりなるキャビティ内の圧力パターン

リシミュレートする方法は合理的な決定を行う際に必要な洞察力を提供する有力な道具としてエンジニア、科学者や他の人々により広く使用されてきた。そのような解析は CAE あるいは Computer-Aided Engineering として、しばしば呼ばれてきた。

射出成形は薄い製品を寸法精度良く製造する最も一般的な手段の一つである。この成形は熱可塑性樹脂や熱硬化性樹脂に加え、ゴムや、高分子のバインダーを含んだセラミックス、金属粉材料にまで使用されている。

この報告では射出成形プロセスにおける CAE 技術の現状を紹介する。

## 2. 金型充填過程のシミュレーション

射出成形プロセスのシミュレーションは実質的には、過去 15 年間に渡って進歩してきた<sup>2)</sup>。このことは成形プロセスの基本的な取り扱いと同様に CAE の射出成形への応用に関して最近の本の中で記述されている内容<sup>3),4)</sup>からも明らかである。

多くの市販 CAE ソフトウェアパッケージも利用されるようになってきた。コンピュータプログラムはエンジニアに非常に有益なツールを供給するが、予測精度についての成功の程度はケースによって大きく変わる。その根本的な理由は多くあり、プロセス中の物質の挙動の基本的な理解の欠如から動的なプロセスを数学的に表わすことの難しさ、までいろいろである。

射出成形の過程で、熔融粘弾性体であるポリマー-溶融物は非常に短い時間、場合によっては 2, 3 秒の間、熱的および機械的な履歴を受ける。話を簡単にするために、キャビティ内の任意の位置における圧力履歴によって、このプロセスが明瞭な 3つのステージからなっていることを図1に定性的に示した。点AからFまでのステージIはキャビティの充填が完了する過程を表わしている。点FからBの短いパッキングステージIIでは瞬間的に高いキャビティ圧力へ到達させることにより細部に渡って良好な製品(例えばシャープコーナーや外観)を生み出し、冷却により生じる収縮を補

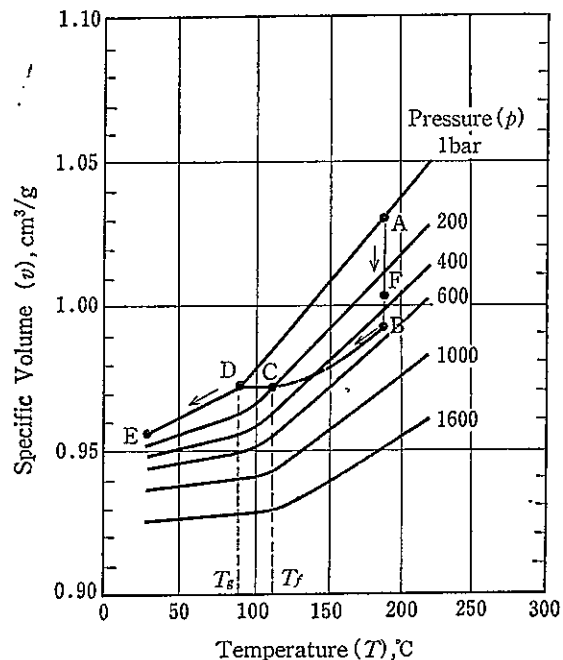


図2 PVT 曲線上で表示した射出成形プロセス中の材料の熱力学状態変化

う。部分的に固化した材料は保圧過程、すなわち、BからDのステージIIIの間で連続した冷却が行われる。そして、点Cではゲートが凍結し、材料はもはや金型内に流入しない。

このような成形サイクルは成形プロセス中の材料の熱物性を特徴づけた図2の PVT 曲線に対応させて示すことができる。理論的にいうと、使用する材料の状態方程式とその材料に適した PVT の経路がわかれば、成形プロセスの性能を予測しコントロールすることができる。

射出成形品が指向している特徴の一つは、薄くなることである。加えて熔融ポリマーの粘度は大きいため実際のレイノルズ数は小さい。したがって、薄い射出成形品の充填はゆっくりとしたせん断支配流れに相当し、非ニュートン、非等温、非定常状態に適応できるように一般化した古典的な Hele-Shaw 流れ<sup>5),6)</sup>で取り扱うことができる。記憶効果(つまり粘弾性)は重要ではないという仮定がそのようなアプローチの中で暗黙のうちに含まれている。この仮定は高分子材料として驚くべきことのように思われるが、この仮定の妥当性は詳細な実験との比較により検証されてきた。すなわち、このような弾性を無視したモデルでも圧力分布だけでなく、キャビティ内を進んでいくメルトフロントの形状を十分に確に予測している。事実、このようなモデルは、後述するように充填後のキャビティ内圧力の発達状況さえもよく記述している。

とくに任意な平面上  $(X, Y)$  の薄いキャビティを考えた場合、圧力場の支配方程式は次のように書ける<sup>7)</sup>。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

$$S \equiv \int_0^h -\frac{z^2}{\eta} dz \quad (2)$$

ここで  $S$  は流動性の尺度を示し、 $h$  は  $Z$  方向 (厚み方向) のキャビティの半分の厚さを表わし、 $\eta(\dot{\gamma}, T, P)$  は熔融ポリマーのせん断粘度を示す。例えば、指数法則モデルでは、

$$\eta = m(T, p) \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

$$m(T, p) = A \exp\left(\frac{T_a}{T}\right) \exp(bp) \quad (4)$$

$$S = \frac{1}{A} \left( \frac{A}{m_0 e^{bp}} \right)^{1/n} S \quad (5)$$

$$A \equiv |\nabla p| = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2} \quad (6)$$

$$S \equiv \int_0^h z \left( \frac{z}{g(T)} \right)^{1/n} dz \quad (7)$$

$$m(T, p) = m_0 g(T) e^{bp} \quad (8)$$

$$g(T) \equiv \exp\left(\frac{T_a}{T} - \frac{T_a}{T_0}\right) \quad (9)$$

ここで、 $T$  は射出時の熔融樹脂温度を表わす。したがって指数法則の代表的な値として  $n \approx 1/4$  の場合は (5) 式より、 $S$  は  $|\nabla p|^3$  に比例し、(1) 式は圧力に対し非常に非線型な支配方程式であることを示している。

さらに、(8) 式中の  $g(T)$  によって示されるように粘度が温度に依存するため、次のエネルギー方程式に基づいたモデルによる温度場の決定が必要である。

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (10)$$

すなわち、熱伝導は薄い厚み方向で起こり、また粘性発熱も考慮するが、幅方向の熱対流は無視される。

文献 7) で報告されているように、上記問題を解くために有限要素法と有限差分法を組み合わせた解析法が開発された。この方法では、圧力に対して二次関数の三角形要素を使用し、温度に対して一次関数の三角形要素を使用している。すなわち、時間依存の節点圧力は三角形要素の頂点と辺の midpoint の節点上で定義するが、時間依存性の温度は三角形要素の頂点で定義し、厚み方向の分布は肉厚の半分の要素分割した有限差分メッシュによって記述する。(1) 式にガレルキン法を適用して圧力に関する方程式を導き、得られた非線型方程式は逐次不足緩和により解いた。一方、(10) 式は基本的には有限差分法で解かれるが、 $\partial T / \partial t$  と  $\partial T / \partial y$  の項は一次の形式関数により評価されている。

文献 7) で開発された数値解析法では各時間ステップごとに新しい要素を追加してメルトフロントを前進させており、メルトフロントの前進に対して予測修正手法が必要であるが、より最近開発された方法 (詳細

CIMP-FLOW3D 1.1 :  
MELT FRONT ADVANCEMENT

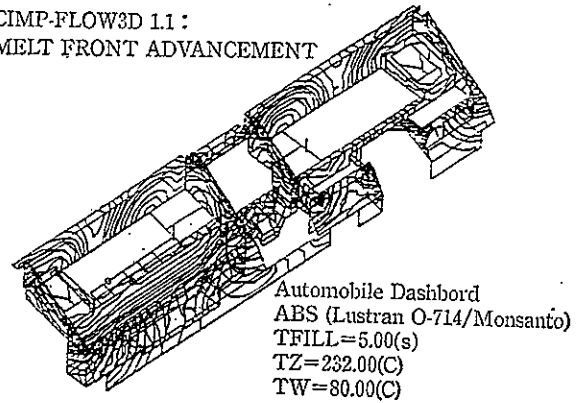


図 3 予測されたメルトフロントの前進

は文献 4) の 9 章に記述) では固定した有限要素格子とコントロールボリューム法を用い、メルトフロントの前進を自動的に処理している。また、後者は薄肉の三次元形状品を薄肉の二次元形状の集合体として取り扱えるように拡張されており、発展力のある市販プログラム C-FLOW のベースになった。その CAE パッケージによる図形出力例として図 3 に自動車のインストルメントパネル (計器盤) 用金型の 17 点ゲートからのメルトフロントの予測結果を示す。

このタイプのシミュレーションプログラムは疑いなく金型設計エンジニアに有力なツールとなる。このようなツールは近年、産業のいたるところで受け入れられるようになってきた。しかしながら、結果は予測結果と実験結果で非常によい一致を示す場合から、非常に大きな許容できない不一致まで千差万別である。この変化はソフトウェアによって、また使用する例や使用する材料によって異なってくる。

公開されているすべての解析の中で、おそらく最も厳密である上記解析について再度考えてみよう。解析するための仮定が不一致にどの程度影響しているのだろうか? 解析の中で弾性項や圧縮性の無視は本当に妥当であろうか? 粘度モデルは成形条件の広い範囲に渡って材料の挙動を表わすのに本当に良いのだろうか? キャビティ表面を通じて金型温度を一定温度で取り扱うことは誤差を生じさせるであろうか、どの程度であろうか? 材料の熱的特性の成形条件依存性は重要であるのか、もしそうであればそのデータは入手できるのか、またはそのようなデータを得るための技術が存在するのか、このような多くの疑問があるため、このような領域における研究が存在しうるのである。

### 3. 統合した充填/保圧/冷却 シミュレーション

一度キャビティに充填された後、充填後の冷却により生じるポリマー密度の増加を補うために材料が更にキャビティ中に追加される。すなわち、もしポリマーの密度が増加するときにも全キャビティ容積をポリマーで充填した状態にするためには、追加量（一般には全量の10%以下）は post-filling 段階で必要とされる。したがって、post-filling 段階で流れの解析に対する本質的な部分はポリマーの圧縮性にある。

特に前節の非弾性モデルに全プロセス、充填/保圧/冷却過程でポリマーの圧縮性を導入し、かつ密度の変化が密度の値自体よりも相対的に小さいという妥当な仮定をすることにより、(1)式は次のように書き替えられる。

$$h \frac{\partial \ln \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( S \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (11)$$

ここで、 $\rho$ は厚み平均密度を示す。それゆえ、 $\rho(T, p)$ の状態方程式を導入することが必要であり、非晶性ポリマーでは Spencer-Gilmore<sup>7)</sup>の式で表わせる。

$$(p + \hat{p}) \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\hat{\rho}} \right) = \hat{R}T \quad (12)$$

ここで、 $(p, \rho, R)$ は材料定数である。この場合(1)式は次のように表現される。

$$G(x, y, t) \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = -F(x, y, t) \quad (13)$$

ここで、

$$G(x, y, t) \equiv \left( \frac{1}{p + \hat{p}} \right) \int_0^h \left( 1 - \frac{\rho}{\hat{\rho}} \right) dz \quad (14)$$

そして

$$F(x, y, t) \equiv \int_0^h \left( 1 - \frac{\rho}{\hat{\rho}} \right) \left( -\frac{\partial \ln T}{\partial t} \right) dz \quad (15)$$

$S$ は、(2)式で定義されており、 $T$ は(10)式に従う。それゆえ、楕円 P.D.E. は冷却による力の項( $F$ )により放物線 P.D.E. になる。

予測されたように、 $G$ と $F$ を含む項は、充填中は小さな値であり、このような場合(13)式は(1)式に近似できる。しかしながら、充填完了時において入口圧力は急激に変化し(あらかじめ設定した保圧レベルまで)、そしてメルトフロントでの  $p=0$  (ゲージ圧)の境界条件を通過しえない条件(すなわち  $\partial p / \partial n = 0$ 、メルトフロントはキャビティの外部境界に達するの)に変更するとき、 $G$ に関連した項が重要となる。

事実、post-filling のこの第一段階の一般的な時間は0.1秒以下のオーダーであり、そして圧力は保圧に対応した一定値に急速に近づく。この短時間では温度

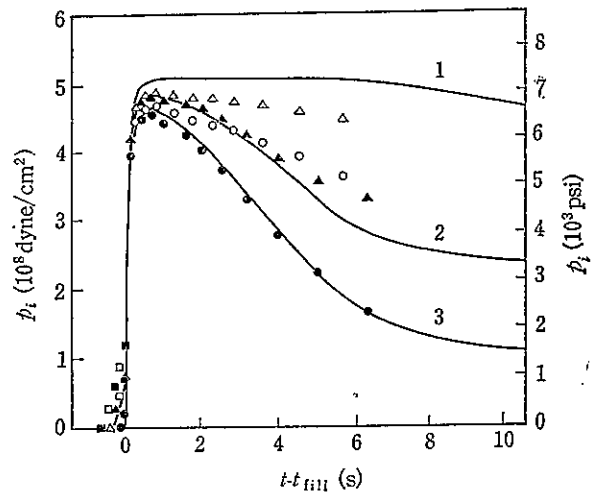


図4 実験より得られた圧力計1-3の位置の圧力データ(曲線)と5定数(白丸)および7定数(黒丸)粘度モデルに基づいた圧力予測データ(各点)との比較

条件: PS (Styron 678U/Dow),  $h=0.108\text{cm}$  ( $2h=0.085\text{in}$ );  $T_0=200^\circ\text{C}$ ,  $T_w=32^\circ\text{C}$ ,  $Q=10\text{cm}^3/\text{sec}$ ,  $t < t_{fill}$ , 曲線1は  $t > t_{fill}$  において設定保圧を使用

の変化はほとんどない。その後、(13)式の $F$ の項は、実質的な冷却が徐々に起こるに従って重要になってくる(ギャップの半分の厚さは代表的なものとして約0.1cm、ポリマーの熱拡散値を  $10^{-3}\text{cm}^2/\text{s}$  とすれば冷却時間  $h^2/a$  が10秒程度と特徴づけられる)。この後者の段階で、 $F$ は支配的な項となる。とくに温度 $T$ の低下による密度の増加よりキャビティ内へ材料を追加することになるが、この追加の流れによって粘性抵抗とバランスをとるための圧力勾配が生じる。したがって、この冷却段階においてキャビティ内の圧力は下がり始める。それゆえ、キャビティ圧力は等温下では保圧へ単調に近づく挙動を示すが、実際の非等温状態では圧力は冷却支配段階中、ピーク値をもち、その後低下するという特徴を示すのである。

上の定式化の妥当性は、キャビティの一端がリザーバーにつながっており、そのリザーバーから矩形平板キャビティ ( $38 \times 70 \times 1.16\text{mm}$ )へ充填することによって確かめられた。3つの圧力計のうち、1つはリザーバーに設置し、他の1つは末端から45.5mm、もう1つは8.7mmの位置のキャビティ壁面に取り付けられた。結果は図4に示されている。図4中の曲線は3つの圧力計から実測された圧力に相当する。白丸は、 $\eta(\dot{\gamma}, T, \rho)$ については次式の5定数モデルを用い上式から予測された値に相当する。

$$\eta(\dot{\gamma}, T, \rho) = \frac{\eta_0(T, \rho)}{1 + (\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \quad (16)$$

ここで  $\eta_0$  はゼロせん断ニュートン粘度であり、次式で定義される。

$$\eta_0(T, p) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \exp(\beta p) \quad (17)$$

黒丸は (16) 式の中で  $\eta_0(T, p)$  を次式のような WLF 式<sup>9)</sup>に従うモデルで予測した時の値である。

$$\eta_0(T, p) = D_1 \exp\left\{-\frac{A_1(T-T^*)}{A_2+(T-T^*)}\right\} \quad (18)$$

ここで、

$$T^* = D_2 + D_3 p, \quad A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 p \quad (19)$$

すなわち、この後者の表現は、7 定数 ( $n, \tau^*, D_1, D_2, D_3, A_1, \tilde{A}_2$ ) モデルで成り立っており、 $T^*$  は非晶性ポリマーの圧力依存を考慮したガラス転移温度  $T_g(p)$  に相当する。

図 4 の結果をよく見ると、充填過程、すなわちポリマー全体が射出温度に近い状態にある時は、5 定数および 7 定数粘度モデルは本質的に同じ結果となっている。言い換えれば 2 つの予測結果は実験値とよく一致している (注: レイノルズ数は小さいにもかかわらず、プラントル数が約  $10^6$  のためペクレ数が大きいので、充填時における温度場は金型壁面に存在する薄い冷えた境界層が、温度がほぼ  $T_0$  である高温のコア領域を取り囲んでいるという状態によって特徴づけられる)。

充填終了時  $t_{fill}$  において、3 つのすべての圧力計が急激に上昇し、その後キャビティの圧力は減少する。この後者の冷却支配段階では 5 定数モデルは、圧力降下 (すなわち、圧力計 1 と 2 あるいは 1 と 3 の間における圧力降下) を 2 倍以上実際よりも小さく見積っている。一方、7 定数モデルは実験値をよく予測している。すなわち、一度実質的な冷却が起こると、(18)、(19) 式のような、より正確な温度および圧力依存性を考慮した式を使用することが必須である。一方、充填段階は (4) 式の単純なモデル化で十分である。

単純形状金型の成形プロセスをモデル化した上の例は問題の複雑さ、特に材料のモデルに大きく依存することを表わしている。粘度に基づいたシミュレーション<sup>9)</sup>は単純な場合には、十分満足のいく結果が得られる。しかし、ずっと複雑な形状において収縮、そりや力学物性などのような実際の問題を取り扱う場合には全く十分ではなく、今後の研究課題がたくさん残されている。

#### 4. 材料特性とモデル化

前の章で述べたように、熔融粘度は充填過程においては、またある意味では post-filling 過程のシミュレーション結果にも影響するもっとも支配的な材料物性である。しかしながら、粘度計の種類や測定法が異なっているため、粘度のキャラクタリゼーションの結果

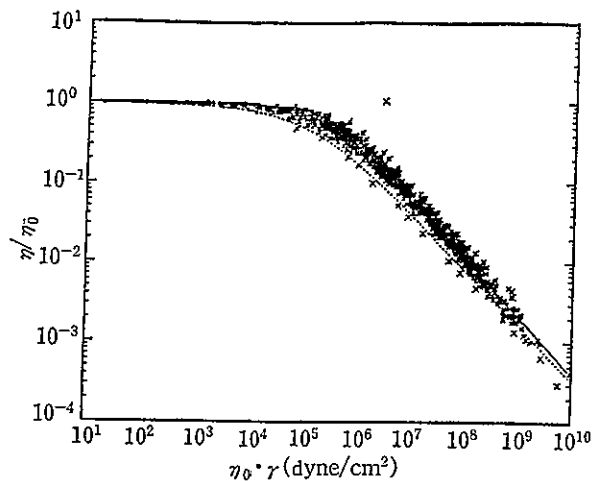


図 5 PS-BMWD の重ね合せデータのマスタープロット:  $n=0.25$ ,  $\tau^*=2.7 \times 10^5$  dyne/cm<sup>2</sup> で (16) 式に基づいた曲線

に矛盾がないわけではないことが知られている。これに関する広範囲な取り扱いが文献 4) の第 1 章に記述されている。(16)~(19) 式で表わされる修正 Cross モデルはせん断速度増加に伴ってせん断粘度の低下する挙動に加え、射出成形中の粘度の温度と圧力依存性も特徴づけている。このモデルで (16) 式中の関数型は正規化し、次式の形でプロットすることにより、単純化できることは非常に興味深い。

$$\eta/\eta_0 = \text{function}(\eta_0 \dot{\gamma}) \quad (20)$$

図 5 は広い分子量分布 (BMWD) をもつ一般的なポリスチレン (PS) に関する文献からの 50 点以上のデータについてのマスタープロットである。このようなプロットは生データの有効性をチェックするのに使用することもできる。

収縮、そりそして成形品の力学物性は成形品内の残留応力と密接に関係していることが知られている。これに関して、射出成形品中の残留応力は流動により誘起されたものと、熱により誘起されたものの両方の応力によることが文献 4) の 3 章に記載されている。流動起因の応力は流体状態からゴム状態の領域で生じ、これは文献 11) の中に記載されているように、Leonov モデルの構成方程式<sup>10)</sup>でモデル化することができる。一方、熱に誘起された応力はガラス領域で生じ、文献 12) で述べられているような線形粘弾性により取り扱われる。しかしながら、文献 13) 中に記載されているように、長期にわたる目標は高弾性低ひずみのガラス領域と同様に低弾性/大変形の流動/ゴム状態領域の両方について取り扱える構成方程式にある。これが達成できれば流動に誘起された応力と熱に誘起された応力の両方を取り扱えるし、また 2 つの効果の間のいかなる非線型な相互関係も説明することができる。

もう一つの加工履歴に依存する記憶効果の存在とし

て、ポリマーの体積緩和に関するものがあげられる。この領域では古くは Kovacs による古典的な研究から最近では Struik によるポリマーのフィジカルエージングに関する研究に多くの注目が寄せられている。特に、そのような密度の緩和効果は平衡状態における状態方程式の一般的な仮定を行う時よりも、むしろ残留応力の計算をする時に必要となると思われる。

上記の議論は材料特性の複雑さやシミュレーションに対する物性値の重要性を表わしている。数多くのほかの物性、例えば温度、圧力の関数として表わした材料の熱伝導、比熱、比容などの物性値はどれも最終結果に大きな影響を与える。この分野での多大な研究努力が必須である。

## 5. 最近の研究活動

射出成形の CAE 技術はこの 10 年間大きな進歩を遂げたが、多くの困難な問題も残っている。例えば寸法安定性（収縮やそり）の定量的な予測や力学的あるいはその他の物性（例えば超精密成形品の光学物性）などである。ここではそのような二つの研究について簡単に紹介する。一つはそり<sup>10)</sup>に関してであり、もう一つはウェルドラインとエアートラップ位置の自動評価についてである<sup>17)</sup>。

### 5.1 収縮・そり

そりは充填・保圧過程で発生する応力と、冷却過程の不均一な温度分布から発生する応力により生じる射出成形品の大きな問題の一つである。射出成形における充填・保圧、冷却過程のシミュレーションに関する数値解析手法の発展に伴い成形条件とそりとの関係を把握することは非常に興味のもたれるところである。

しかしながら、成形品全体にわたる中で主として不均一な残留応力分布から生じるそりに影響する多くの因子がある。したがってそりは流れや冷却条件によってだけに支配されるのではなく、成形品形状にも大きく左右される。市販のソフトによってそりが予測できるような多くの報告があるが、その結果は現実のものとはかけ離れており、とても受け入れられるものではない。より厳密で基本的な研究の中には Michael St. Jacques<sup>20)</sup> のように、平板形状の非晶性ポリマーの射出成形品のそりに対する不均一な冷却効果の研究を行ったものがある。この中で彼は製品の厚み方向の温度分布を得るために次元差分法を用い、また単純な弾性変形のモデルを用いている。Tamma ら<sup>21)</sup>は射出成形中の熱応力問題の解を得るために有限要素法および超有限要素法による解法を示し、冷却管の温度不均一によるビームタイプの片持ち梁の応力分布とそりを予測

している。

丸山ら<sup>22)</sup>はエチレン-プロピレン共重合体からできている二重管内の不均一な収縮によるそりを、容積ひずみがゲートの凍結時と大気圧・大気温度での平衡比容の差に直接関係していると考えて予測した。

残留応力問題は射出成形品のそりの研究と密接に関係しており、実験および理論の両面から広く研究されてきた。Bartenev<sup>23)</sup>は材料物性を単一  $T_g$  を境に完全流体と完全弾性体であるとして分け、熱弾性理論を用いてガラスの冷却中の残留応力を導いた。

Aggarwala と Sabel<sup>24)</sup>は完全流体-完全弾性体挙動を示すガラスの固化中の熱膨張係数の変化を研究した。Lee ら<sup>25)</sup>は熱レオロジー的に単純な挙動を示すという仮定を用いて、温度依存性を考慮した粘弾性物質モデルを利用した。彼らは初期にガラス転移温度以上で Newton surface-cooling に従う平板状のガラスシート of 残留応力を調べ、流体-弾性体モデルによる予測値と彼らを使用した一般熱粘弾性モデルの予測値の差を検討した。キャビティ内のポリマー流動に起因する残留応力は溶融挙動に関する各種のモデルを用いて多くの研究がなされている。これらに関する比較的最近の研究では一次元、非等温流れで発達する応力を予測するために Leonov モデルを使用した結果が Isayev や Heiber<sup>26)</sup>により報告されている。

最近の研究<sup>10)</sup>では単純なディスクタイプキャビティ形状のそりに対する金型温度の非対称性の影響、保圧の影響を調べる目的で研究が行われている。その理論解析は熱移動問題に対して有限差分法を使用し、①熱弾性モデルと② $T_g$  以上でゼロせん断粘度を持ち、 $T_g$  以下で無限大の粘度を示す（すなわち完全な流体-弾性体モデル）Maxwell モデルを基本にした力学的な構成方程式を使用することにより、開発された。実験は成形材料としてポリスチレン (Dow Styron 678 D) を用いて 50 トン Boy 射出成形機で行われた。ディスクは厚さ 1.22 mm、径 120.7 mm でリングゲートを用いた。2つの金型プレートの冷媒温度は 11.1 から 44.4°C まで温度を非対称に変えながら、それぞれ独立に制御した。保圧はキャビティピーク圧の 0, 33, 66% に保持した。そりの測定は 6  $\mu$ m の精度がある Brown & Sharpe 製測定装置を用いて行われ、各所定の成形条件に対して、ディスクの変形量を測定した。

この研究では与えられた形状に対して温度の不均一がそりを決定する第一の因子であり、ある値以下の保圧の影響は第二番目の因子であることを結論としている。不均一を生じさせるスプルーやその他の考えられる因子の存在はそりに大きな影響を与えないことがわ

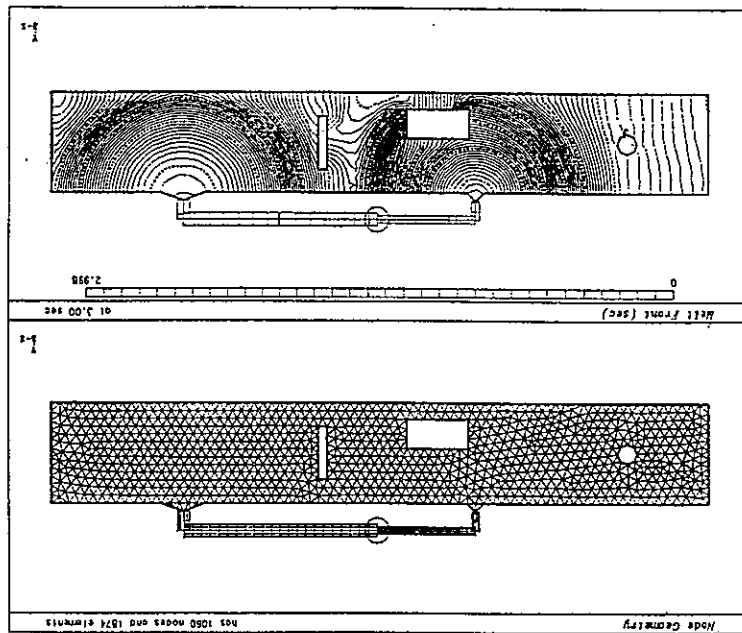


図 6 有限要素メッシュと予測されたメルトフロント

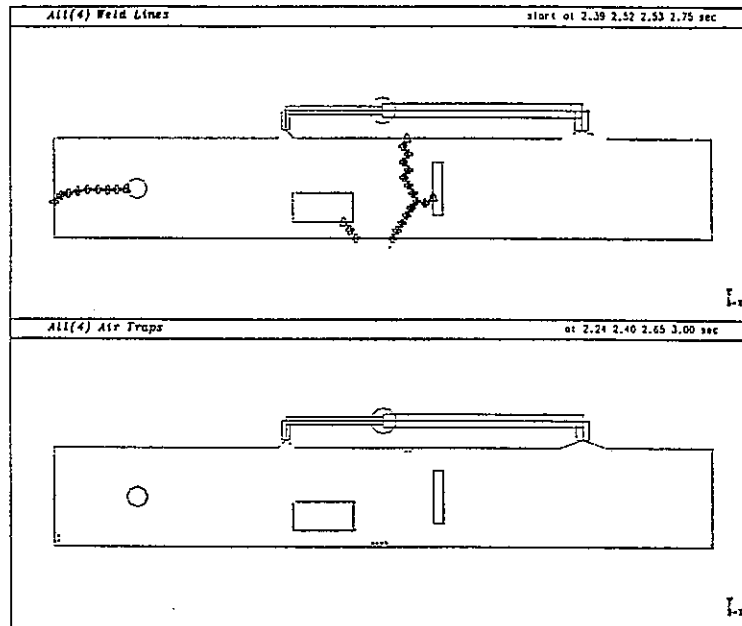


図 7 ウェルドラインおよびエアートラップの自動予測

かった。理論的解析はそりサンプルの変形量をよい精度で予測しており、設定した非対称の金型温度の変化の傾向を把握している。完全な流体-弾性体モデルは概念的にも、そして計算上も単純であり、より複雑な問題へ拡張するために魅力的な手法となる。

## 5.2 ウェルドラインおよびエアートラップ

ウェルドラインは成形品の表面外観の低下を引き起こすだけでなく、構造欠陥をもたらすことはよく知られている。同様にキャビティ内にトラップされた少量のエアースエムも、完全な充填を妨げ成形品の外観に欠陥を残す。これらの欠陥は金型設計段階で適切な考慮をすることにより避けられる。上に述べた充填解析プ

ログラムを使用し、フローフロントの前進を視覚的にみることにより、ウェルドラインおよびエアートラップの位置を説明することができる。

しかしながら、成形品形状が実際の場合のように、複雑な時は、解析結果の可視化による手作業的な方法は非常に難しく、時には不可能である。流れ解析と解析結果を解釈する帰納的な知見を組み合わせた最近の研究<sup>17)</sup>により、ウェルドラインの位置とエアートラップを自動的に得ることが可能になった。図6は内部に3つのインサートをもつ矩形平板金型のキャビティ内のフローフロントの前進を示している。キャビティは2つのバランスしたランナーと2つのゲートを持つ。

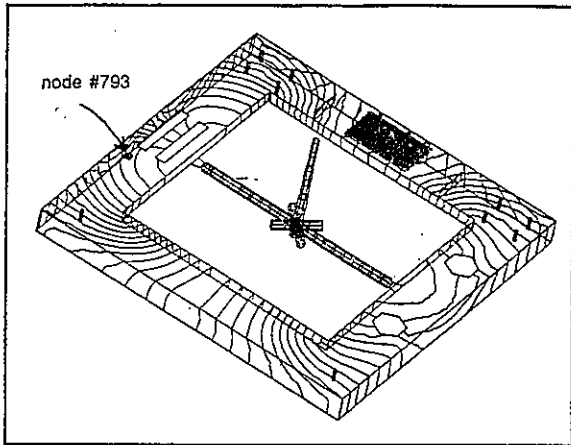


図 8 RIM プロセスのメルトフロント予測、全充填時間 5 秒

2つ以上の流れが合流するウェルドラインは、連続的かつ注意深くグラフィック表示されたのを観察すれば、見ることできるが、文献 17) に報告された自動評価システムは図 7 に示されるようにずっと的確で、明確なウェルドラインおよびエアトラップの位置を示す。このようなアルゴリズムはどんな複雑な成形品形状にも適用される。

### 5.3 熱硬化性樹脂の CAE ソフトウェア

低粘度の反応性物質は射出成形により、多くの特別な応用分野で使用されている。これらの材料は非常に低い充填圧力で充填できるため、軽量で低コストの金型が使用できる。しかし、これらの物質は充填中に硬化反応するので金型設計や成形条件の設定はずっと複雑である。高速充填は乱流となり、一方、低速充填はショートショットを引き起こす。金型温度を高温にした場合は熱分解を生じ、一方、低温にした場合にはサイクルタイムが長くなる。それゆえ、常に高品質な製品を製造するための金型を設計するには多くの成形試作や金型設計変更を要する場合が多い。

硬化反応についての基本的な理解やモデル化やそのレオロジーに及ぼす影響から射出成形過程のシミュレーションまでさまざまな研究が行われ、また文献として報告がなされている。

最近では市販の CAE ソフトである C-SET が利用可能となった。米国の AC Technology 社開発による C-SET は C-FLOW, C-PACK, C-COOL よりなる C-MOLD ソフトウェアの一員としての最も新しいものであり、充填、post-filling 段階での流れと温度とともに硬化反応の動力学を計算する。C-SET により得られる情報は次のものを含んでいる。

- ① メルトフロント位置
- ② ショートショット
- ③ 熱分解

④ 充填および post-filling 段階での温度と硬化過程

⑤ 滞留時間分布

⑥ 圧力と型締力

他の CAE ソフトウェアツールと同様に、C-SET は過大な労力とコストのかかる成形試作なしに、反応性物質を成形する際の潜在的な問題を予測し避ける手助けをする。ソフトウェアは熱硬化、ゴムそして反応射出成形 (RIM) に対して適用可能である。図 8 は充填時間 5 秒での RIM 成形中の予測されるメルトフロント位置を示している。

### 5.4 多層およびガス封入射出成形予測

多層射出成形やガス封入射出成形のような新規プロセスはプラスチック成形品のデザインの柔軟性を高めることが産業界でよく認識されている。例えば、多層射出成形法を用いれば製品設計者はできるだけ安価 (例えばリサイクル材料の利用) に機能の要求を満足させるようにスキンとコアに異なった材料を選択することができる。このプロセスはそれぞれの材料が持つ最適な特性を有効利用することにより、外観、熱特性や力学物性を高める場合や成形品の電磁波シールド性などを高める場合に柔軟性を与える。

ガス封入射出成形は 1970 年代後半に数社からわずかに異なる形で発明がなされた。この新しいプロセスは低い圧力で、かつ小さな型締力で大きくかつ厚い成形品が製造できるといった優位性のため、最近非常に注目されている。このプロセスはコアに相対的に低い圧力のガスを導入することにより、一般の射出成形よりも複雑な形状の成形品でも、低い圧力でより強く、表面外観を良好にし、スプルーマークも生じにくいという特徴を持っている。充填系、未充填系の熱可塑性プラスチックを取り扱うことができるので、ガス封入射出成形はコンピュータやコピー機のドアやパネル、大きな自動車外板パネルやコンポーネントその他大きなパネルを補強するための角張った中空ビームなどの成形品を製造するのに最適である。

残念ながら、二つの大きな因子がこのプロセスが市場で幅広く利用されることをはばんでいる。一つは、特許権に関する発明者らの法的な争いであり、もう一つは技術的な難しさである。ガス封入射出成形と多層射出成形の両方ともに界面を有する一つ以上の材料を取り扱う。これに伴う設計パラメーターが多いため、金型設計や成形条件の設定がかなり複雑になる。これらのプロセスを数値的にシミュレートするためには少なくとも膨大な計算量が必要な全射出成形中の個々の質点をトレースしなければならない。しかしながら、AC Tech. の研究エンジニアはこの問題を解決する新



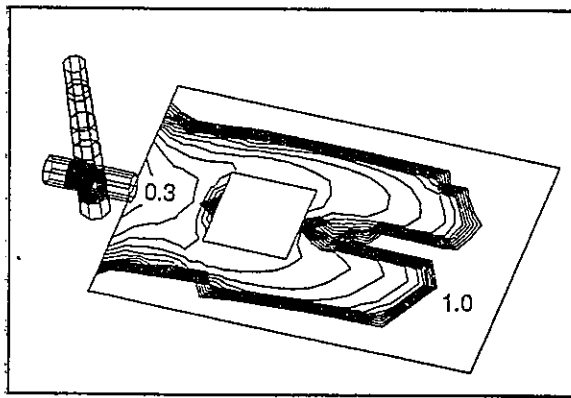


図9 多層射出成形プロセスの単純平板形状に関する正規化したスキン厚み比分布

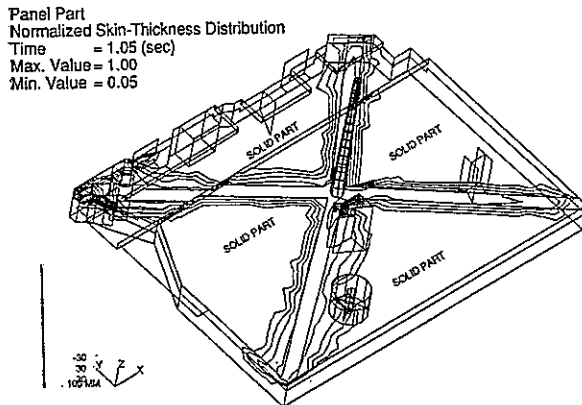


図10 ガス封入射出成形によるパネルの正規化したスキン厚み分布

しい考え方を生み出した。この新しいシミュレーションプログラムはそれぞれの質点を非常に効率よくトレースすることができる。これにより、任意な時間におけるスキン-コア材料の分率を計算できる。材料特性（あるいはガス封入射出の場合のガスの動的特性）の違いは、スキン-コア材料の分布やスキン層厚み分布だけでなく、圧力、温度、せん断速度、せん断応力分布についての情報を与えるシミュレーション中で反映される。ソフトウェアは初歩的なテストと実験結果による検証中ではあるが、図9および図10に両プロセスから得られたいくつかの基本的な結果を示している。

## 6. 結 論

射出成形プロセスのモデル化やシミュレーションは非常に強力な CAE ツールとなり、エンジニアが設計や製造を行ううえで、合理的な決定を行うことを支援することができるようになった。シミュレーションされた結果や予測値の精度は、シミュレーションモデルがベースとしているプロセスの理論や物理に大きく依存する。射出成形の場合、シミュレーション結果は材料物性が良くキャラクタライズされている時には実験

結果とよく一致する。そのソフトウェアは、有効な CAE ツールとして産業界でかなり受け入れられてきている。最近の研究は、より複雑な問題、例えばひげやその予測、機械的や光学的性質、新規プロセスのシミュレーションなどを解析する方向に向かっている。

この報告の中に引用した研究は、NSF (Grant No. DMC 8507371) と世界の 30 社以上が参加している CIMP 産業協会からの基金にもとづいたコーネル大学のコーネル射出プログラム (CIMP) によりサポートされている。

## 参 考 文 献

- 1) Wang, K. K.: The Basic Research Issues in Computer-Aided Design and Manufacturing Processes, Proc. of the Second Toyota Conference (Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1988).
- 2) Wang, K. K. et al.: Computer-Aided Injection Molding System, Progress Reports Nos. 1-15, Cornell Injection Molding Program, Cornell University, Ithaca, NY (1975-90)
- 3) Manzione, L. T., (ed.), Applications of Computer Aided Engineering in Injection Molding (Hanser Publishers, Munich-Vienna-New York, 1987).
- 4) Isayev, A. I. (ed.): Injection and Compression Molding Fundamentals, (Marcel Dekker, Inc., New York, 1987)
- 5) Hele-Shaw, H. S.: Investigation of the Nature of Surface Resistance of Water and of Stream Motion under Certain Experimental Conditions, *Transactions*, Institute of Naval Architecture, 11, 25 (1989)
- 6) Schlichting, H.: Boundary Layer Theory, Sixth Ed., (McGraw-Hill, New York, 1968)
- 7) Spencer, R. S. and Gilmore, G. D.: Equation of State for Polystyrene, *J. of Appl. Phy.* 20, 502-506 (1949)
- 8) Williams, M. L., Landell, R. D. and Ferry, J. D.: The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and other Glass-Forming Liquids, *J. of Am. Chem. Soc.*, 77, 3701-3707 (1955)
- 9) Wang, K. K. and Hieber, C. A.: A Viscosity-Based Simulation of the Injection Molding Process, Proc. of ASME Interdisciplinary Issues in Materials Processing and Manufacturing 2, 645-660 (1987)
- 10) Leonov, A. I.: Nonequilibrium Thermodynamics and Rheology of Viscoelastic Polymer Media, *Rheol. Acta* 15, 85-98 (1976)
- 11) Isayev, A. I. and Hieber, C. A.: Toward a Viscoelastic Modelling of the Injection Molding of Polymers, *Rheologica* 19, pp.168-182

- (1980)
- 12) Lee, E. H., Rogers, T. G. and Woo, T. C.: Residual Stresses in a Glass Plate Cooled Symmetrically from Both Surfaces, *J. of The Am. Ceramic Soc.*, 48, 480-487 (1965)
  - 13) Snow, B. D. and Bogue, D. C.: A Unified Model for the Rubbery and Glassy States, *J. of Rheol.* 18, 533-544 (1984)
  - 14) Kovacs, A. J.: La Contraction Isotherme du Volume des Polymers, *J. of Polym. Sci.*, 30, 131-147 (1958)
  - 15) Struik, L. C. E.: Physical Aging in Amorphous Polymers and Other Materials, (Elsevier, Amsterdam, 1978)
  - 16) Santhanam, N. and Wang, K. K.: A Theoretical and Experimental Investigation of Warpage in Injection Molding, to be presented at the SPE/ANTEC, May (1990)
  - 17) Jong, W. R. and Wang, K. K.: Automatic Interpretation of Weld Lines and Air Traps in Injection Molding by Synthesizing Deterministic and Heuristic Knowledge, to be presented at the SPE/ANTEC, May (1990)
  - 18) Austin, C.: Predicting Mechanical Properties of Injection Molded Parts from Computer Analysis, SPE/ANTEC 1560-62 (1988)
  - 19) Bernhardt, E. C.: Cavity Dimensioning Using Computerized Shrinkage Evaluation Software, SPE/ANTEC, 1262-1264 (1989)
  - 20) Jaques, M. St.: An Analysis of Thermal Warpage in Injection Molded Flat Parts Due to Unbalanced Colling, *Polym. Eng. Sci.*, 22 (4), 241 (1982)
  - 21) Tamma, K. K., Dowler, B. L. and Railkar, S. B.: Computer Aided Applications to Injection Molding: Transfinite/Finite Element Thermal/Stress Response formulations, *Polym. Eng. Sci.*, 28(7), 421 (1988)
  - 22) Maruyama, T., Hisashi, K., Horikawa, H.: An Analysis of Mold Shrinkage and Warpage in Injection Molded Parts of Thermoplastic Materials, *Kobunshi Ronbunshu*, 45(3), 253 (1988)
  - 23) Bartenev, G. N.: *J. Tech. Phys.*, 19, 1423 (1949)
  - 24) Aggarwala, B. D., Saibel, E.: Tempering Stresses in an Infinite Plate Glass, *Phys. Chim. of Glasses*, 2(5), 137 (1961)
  - 25) Lee, E. H., Rogers, T. G., Woo, T. C.: Residual Stresses in a Glass Plate Cooled Symmetrically from Both Surfaces, *J. of Am. Ceramic Soc.*, 48(9), 480 (1965)
  - 26) Isayev, A. I., Hieber, C. A.: *Rheologica Acta*, 19, 168 (1980)