成形加工における コンピューターの利用

大柳 康

Yasushi Oyanagi, 工学院大学機械工学科

1. 緒 言

近年のコンピューター応用技術は、限らないハード面の進歩—スーパーコンピューターやジェファソン素子応用などに支えられながら、あらゆる分野において利用され、高度利用時代到来のきざしをみせ、今後ますます新たな展開へと大きな期待が寄せられている。プラスチック・ゴムの成形加工分野においても例外でなく、ここ数年の間に著しい発展ぶりをみせ、現在ではまだ完成されたとはいえないまでも、研究・設計・生産・管理・評価といった各分野^{1),2)}でその偉力を発揮しつつあるといえよう。これはとりもなおさず、最近における高分子新規材料開発、改質・高機能付与と高能率化といった諸要求が活性化に対応したためと考えられる。

本稿はこのような視点から、プラスチック成形加工分野でコンピューター応用技術を現時点で展望し、主に実用面での利用状況を、筆者の周辺情報をもとにして参考までに紹介してみることにした。

2. 射出成形への応用

2-1. 流動解析^{2),3)}

射出成形の初期工程である熔融流動性は、最も重要な要因であるため、その適用例は多くあり、いくつかのシステムができています。既応の線形粘弾性的な処理としたいいくつかの粘度式や流動式が提示され、実用的に精度良く適用できるまでになっている。一般には流体基礎式とした連続・運動・エネルギーの式をもとにして流動方程式を作り、それに樹脂データを入力して解析が進められる。流動体自身にはまだ不明な点が多いため、単純化したいいくつかのモデリングについてのシステム化が進展している。

最近では二次元流動から三次元流動解析へと向かっている。これらは流路全体の解析が可能であり、最も

一般的解析対象は金型内流動過程・ウエルドライン（合流接着線）発生位置の予測・多数個取りのゲートバランス、さらには分子配向・充てん材配位・変形の予測⁴⁾といったことが進展しつつある。その一例を図1に示す。この図は溶融体流動先端（メルトフロント）に発現する噴水効果によって生じる分子配向性を解析⁵⁾したものである。最近では射出成形プロセス全般にわたり、精度良い適用例が提示され、有用度がすこぶる高い。このほか二相流や RIM ミキシングヘッド内解析といった適用範囲が拡大されつつある。解析手法にはいくつかがあるが、いずれもメッシュ分割されたキャピティの流量・熱のバランスを有限要素法を用いて行うのが共通点であり、最近ではより効果的である境界要素法も対象となっている。対象材料には最近ではゴム熱硬化性材料および粉末冶金に代わる粉末射出法も加わり、適用範囲を広めている。

2-2. 保圧・冷却解析

第二の工程として保圧・冷却があり、最終成形器の形状・寸法のみならず、成形品物性に大きな効果がこの段階で生じる。成形品の成形収縮率・残留ひずみ・変形と反りの解析⁶⁾が予測できるところまでできている。しかし保圧以後の冷却固化過程での熱移動・結晶固化・固体物性といった面でまだデータも少なく、完成にはほど遠く、今後にまっところが多い。成形収縮は溶融容積圧縮特性（pvT 特性）が最近著しく研究の対象となり、これらから予測することができるよう

大柳 康 工学院大学機械工学科（160 東京都新宿区西新宿 1-24-2）教授、工博

1951 年日大工学部機械工学科卒。1953 年より工学院大教授。専門は高分子材料特性（とくに流動特性）。現在は自転車のプラスチック化、射出成形など。＜趣味＞油絵など

Application of Computer Techniques to Polymer Processings

図1 分子配向シミュレーション

図3 CAE 総合システムの構成 (プラメディア)

なった。その一例を図2に示す。これは結晶性材料(HDPE)の pvT 特性と pmT 特性曲線⁴⁾を対比したものであり、溶融圧縮時の定比容状態から室温に至る状態をプロセスごとに示したものであり、状態変化による比容変化(Δv)によって成形収縮率が平均的に求める⁷⁾ことができる。

しかし実際には流れ方向の分子配向・充てんひずみが局部的に生じるため、異方性を考慮する必要もあり、変形を対象とするような場合には、冷却過程で生じる刻々の温度分布などの検討⁸⁾が必要となるほか、応力-ひずみ-時間の相関理論(構成方程式)の適用も重要となっている。現段階での最新システムではこれ

らがある程度可能であり、今後より精確なシステムの出現もあると考えられる。図3は最近の射出成形システム構成について示すものである。

2-3. エキスパートシステム

このような粘弾性体特有な複雑挙動をある程度モデリングした解析に続いて、より現場的な面でこれらに対応した知能(AI)化が進みつつある。その一例として各種のエキスパートシステムが提示されている。これはいわば射出成形機運転支援システム⁹⁾として開発され、より現場的適用に対応したものである。これらエキスパートシステムと前記各種のCAEとを併せ

図2 結晶性材料の pvT と pmT 特性曲線

てトータルシステムとして今後の進展が期待できよう。

2-4. 金型設計製作システム

従来長期製作期間を要し、数度の手直しによった金型製作は、最近では CAE 的に処理され短期設計製作ができるようになってきている。

さらに精密射出成形における金型変形に対する金型構造解析や冷却能力の判定に必要な金型冷却設計および標準化された金型構造材による自動設計 (CAD) から自動加工 (CAM) といった高能率化に進みつつある。

2-5. 成形品構造解析

固体構造部品に一般に用いられている構造解析も最近ではプラスチック構造部品に適用され、応力解析が可能となっている。これらには特性として構成方程式が加味され、その応用技術が進展していくものと想定できるほか、材料データベースとして応力緩和・クリープおよび疲れ特性といったものも重要となるであろう。最近の構成方程式としてレオノフの理論¹⁰⁾が、弾性を重視しており注目されている。これらは固体のみではなく、熔融時のプロセス解析に有用であり、熔融・固体の両面を考慮する必要がある。

2-6. トータルシステム

これら各種の解析法は個々にあるものでなく、理想的には成形時以前の問題、すなわち、材料の最適選択・最適金型設計・加工能力・成形品評価といったトータルのシステムへと今後発展していくものと期待できる。そして、いつの日か成形全般にわたって、要求特性・コストなどを入力すれば、すべてのプロセスが AI 的に処理され、最終製品が自動的に生産されるような夢の実現もそう遠くないように思われる。

3. その他の成形加工への応用

3-1. 押出成形

応用加工が広い押出成形は、適用が進展している射出成形に比較して、これから追従していくものと想定される。加工条件も低せん断速度領域の加工が適用できるほか、等温処理が可能のため、解析は容易であるが、同様に単純化したモデリングによって遂行されることになろう。最近では混練ゾーン (圧縮ゾーン) に発現するソリ

図 4 軸対称円筒ブロー成形品の円周長さ S と肉厚 (t/t_0) 相関シミュレーション

ッドベッドの解析や溶融ゾーン (メタリングゾーン) およびダイ内の流動解析、ダイスウェル (ダイ出口膨潤現象) および溶融流動破壊メカニズム、バレル (シリンダー) 内圧力損失分布と成形機性能といった検討¹¹⁾もなされ、今後の進展が期待されている。

応用加工例としては多層フィルムの多層流動問題、多層シート界面現象と改質、電線被覆性などの研究も着目され、複雑形状の多層・多材成形用ダイ高機能設計と製作にも CAE 的手法が適用されることになら

(上図はストリームライン, 下図は温度分布)
図 5 硬質 PVC カレンダーシミュレーション

図 6 エポキシ IC 封止材 (トランスファー成形) の流動固化特性

う。

押出成形 CAE も今後トータル化や AI 化がより注目されることになるものと考えられる。

3-2. ブロー成形

最近のブロー成形では、単にボトル形状の製造だけでなく、より複雑なパイプや中空板状構造体の製造にも進展し、多目的化が盛んである。

射出・押出ブローの区別なく、現在実用されている CAE は、パリソンの金型内でのブローイングと肉厚変動解析である。まだ射出成形に比べてその緒についてばかりとはいえ、研究報告が増してきている¹²⁾。図 4 はその一例¹³⁾であり、モデリング材料の軸対称円筒ブロー成形品における円筒長さや肉厚比に関する解析例である。今後対象領域は他と同様にトータル化と AI 化が進展していくものと考えられる。

3-3. カレンダーリング

硬質 PVC の混練工程を例とした解析例を図 5 に示す。この図の上図は二つのロール間で混練時に生じるバンク内のストリームライン、同下図は同バンク内の樹脂温度分布を解析した例である。これらは従来現場的に操業者の勘に頼ったものであったものが、定量化されこの種の加工性改善に役に立つ。

3-4. その他

熱硬化性材料の圧縮成形・トランスファー成形についての CAE も、現在まだ数少ないが検討されている。図 6 はその一例¹⁴⁾であり、エポキシ IC 封止材の流動固化性を独自に開発した装置によって、解析した

結果について示したものである。

4. ま と め

以上のように、プラスチック成形加工における CAE は種々な分野に利用され、一部はすでに汎用化のきざしさえする進展ぶりをみせている。これら CAE システムも日進月歩のいきおいを示し、将来予測もむずかしい。

今後高性能・高精度・知能化・汎用化システムの実現も夢ではない。ハード面では処理能力の一段と増したスーパー化が、10 台～100 台以上の CPU を組み合わせて行うことができる可能性¹⁵⁾を秘めている。一つにはハードの改良と充実した材料特性データバンクおよびあまり複雑でない高性能ソフトの開発と併せて、より有用なシステムの実現もそう遠い将来のものではないものと期待されるとともに、その早期実現を願っているしだいである。

文 献

- 1) E.C. Bernhand: Computer Aided Engineering for Polymer Processing, Hanser Pub., München (1987)
- 2) A.I. Isayev: Injection and Compression Molding Fundamentals, Marcel Dekker Inc., N.Y. (1987)
- 3) K.K. Wan, *et al.*: CIMP Tech. Report No. 11, Cornell Univ. (1986)
- 4) G. Menges, *et al.*: IKV 資料, Aachen Univ. (1988)
- 5) Vlachopoulos, *et al.*: PPS-4 Ann. Report, Stuttgart (1988)
- 6) 菱化システム, プラメディア資料 (1989)
- 7) 大柳 康: 超精密射出成形技術, トリケップス, 17 (1982)
- 8) 三菱瓦斯化学, Iu-CAT 資料 (1988)
- 9) 斉藤日出夫, ほか: 第 1 回プラスチック成形加工学会年次大会前刷集, 83 (1989)
- 10) A.I. Leonov: *Phel. Acta.*, 15, 85 (1976)
- 11) N.S. Rao: Designing Machines and Die for Polymer Processing with Computer Programs 2nd. ed., Hanser, München (1981)
- 12) M.R. Kamal, Ky T. Nguyen: PPS-6 Ann. Report, Kyoto (1989)
- 13) H.F. Nied, *et al.*: PPS-6 Ann. Report, Kyoto (1989)
- 14) 佐伯準一, 金田愛三: 高分子論文集, 45, 9, 691 (1988)
- 15) 矢川元基: 第 39 回応用力学連合講演会講演予稿集, 1 (1989)