高分子レオロジーと成形加工 CAE の基礎

—その中身と周辺問題—

(22) 近未来のマクロ CAE：未解決の問題，ユーザーとしての立場

亀 田 隆 夫*¹・山 部 昌*²

1. はじめに

射出成形 CAE，押出成形 CAE，ならびにブロー成形 CAE などの成形加工 CAE は，1980 年代の紹介期，90 年代の導入期・拡大期を経て，今や成形加工の第一線ではなくてはならないものとして成長してきた。しかしながら，成形加工の複雑化に伴い^{1), 2)}，また解析ソフトの 3 次元化への移行などにより，解析者にとっては投資に見合った成果を得るためにこれまで以上に多くの知識や経験が必要となってきたのが現状ではないだろうか？このような背景のもと，1998 年に本学会の下部組織として，射出成形 CAE 専門委員会（現在約 40 名）がスタートし，ユーザー同士で可能な限り情報の交換を行ってきた。この委員会では，ソフトの良し悪しを評価するのではなく，対象とする部品は異なるものの，解析上のノウハウ，結果の解釈，メカニズムの考察，さらには実験検証方法などを失敗例も含めて情報交換してきた。

本講座ではこれまで 21 回にわたり高分子レオロジーと成形加工 CAE の基礎についての解説が行われてきたが，最終回を迎えるにあたって，特に射出成形 CAE にターゲットを絞り，この射出成形 CAE 専門委員会での活動成果をも織り込んで現状と将来課題を展望しつつ，いかに上手く CAE を活用していくか？の観点から，ユーザーとして常に心がけてほしいポイントについて述べさせていただく。さらに解析で入力した条件どおりに成形機が追従しているか，それが解析精度に与える影響について例を交えて述べる。

図 1 には射出成形 CAE に従事している解析者が新製品の開発を行う際の一般的な業務の流れを示している。解析者は未知の形状・材料データから，流動や変形を大まかに考えながらモデル・メッシュ作成を行う。次に使用する成形機の能力範囲から成形条件を仮に設定する。その後解析を実施して結果を判断し，必要であればこのプロセスを繰

図 1 解析者の業務の流れ

り返し行う。次に得られた結果を取りまとめ，金型仕様（ゲート，冷却管レイアウト）と成形条件の範囲を仮決定し，金型の製作と製品の試作へと進んでいく。このようなプロセスの中で，解析者が注意しなければならないポイントは，図中の①，②，③，④であると考えている。すなわち，①種々の制約条件を考慮に入れながらゲートやランナーの決定や，温度分布を予測しながら冷却管のレイアウトの決定，成形機の能力を考慮しながらの条件範囲の決定，②有限要素法の原理に沿って物理量（温度，圧力，変形）が大きく変動すると予想される部分のモデル・メッシュ作成技

*¹ Kameda, Takao
三光合成(株) 技術部門
南砺市土生新 1200 (〒939-1698)

*² Yamabe, Masashi
金沢工業大学 工学部 機械工学科
白山市八東穂 3-1 石川ソフトリサーチパーク内 (〒924-0838)
2006.9.11 受理

術, ③解析結果より過去の経験やデータベースをもとに, 試行錯誤を行うプロセス, ④試作品をもとに目標品質に達したかどうかを判断するプロセス, である. ここでは, それぞれのポイントについて射出成形 CAE 専門委員会での取り組み例などを紹介・引用しながら課題を述べる.

2. 解析者のデータ作成におけるポイント

まずは図 1 における解析者の①②のポイントについて述べてみる. 詳細は既報^{3),4)}などに譲るが, 射出成形 CAE 専門委員会にて, 解析形状(図面), 材料(解析用データベース), 成形条件を委員全員(当時約 20 名)に配布し, 流動解析ならびにそり解析を実施していただいた(実験結果はこの時点では配布していない). その結果は, 解析ソフト間の違いによる結果の差異に比べ, 同一ソフトでの解析精度の差異の方がむしろ大きいことが明かとなった. このようなことがなぜ生じたかを, 以下金型内充填解析と部品のそり解析との場合についてそれぞれまとめてみる.

2.1 金型内充填解析

たとえば金型内の樹脂流動解析の結果の一例を図 2 に示す. ここでは充填時樹脂圧力値に対する 5 人の解析者の結果を比較した. なお使用したソフトは同一のものとは限らない. ここで図 2 に示す解析精度 A は, (1)式によって算出している.

$$A = (V_a / V_e) \times 100 \quad (1)$$

ここで, V_a 及び V_e は, それぞれソフトウエアによる計算値及び成形実験における実測値⁹⁾であり, 精度 A の値が 100 の時, 解析結果と実測値が一致していることを示す. また A の値が大きいとき解析結果は, 実測値よりも大きくなっていることを示す.

さて実験 1-1, 1-2 は充填時金型内樹脂圧力の精度を示している. ここでは実験(試作)結果は与えられておらず, 製品設計を行った後, 成形可否を判断するような場面を想定している. この場合, 解析に必要な情報はすべて同一であるにもかかわらず, 大きな差異が見られる. 解析ソフトの違いよりは同一ソフトであっても, 解析者間の差異がむしろ大きい. このようなことが発生すれば, 解析結果に対する対策が異なってくるのは当然のことと想像できる.

図 2 の実験 2 は, 実際の金型を用いて, スクリューの動き, 樹脂温度の測定や充填時の樹脂圧力を測定するなど, 樹脂流動に関する条件などを明確にして, 再度解析し比較した結果である. これは金型が完成し, 試作に立ち会って解析結果と実験結果をより詳細に詰めることで, 解析結果の予測精度を向上させようとする解析者の行動を想定したものである. その結果は解析者の違いによる解析結果の差異は小さくなり, ある値に収束していく傾向が見られる. このことから, 金型内に樹脂を充填するために必要な樹脂圧力値などがある程度イメージすることができれば, 人によらずほぼ同じような解析結果が得られている. これは換言すると, 製品開発途上における成形可否(充填可否)判断は, 解析者が実際の成形プロセスを事前にいかにイメージできるかに左右されると言っても過言ではない.

2.2 そり解析

そり解析は, 充填・保圧・伝熱のプロセスを含んでおり,

図 2 成形実験の情報量の違いによる解析の充填時樹脂圧力値に対する影響

図 3 成形実験の情報量の違いによる解析の反り変形量に対する影響

その解析精度は近年格段に改善されているが, ユーザーにとってはさらに高い精度を求めるのが当然であろう. これは前述の樹脂充填に起因する不良現象の解決よりも, そり量低減の解決が時間・コストの短縮につながり成果としては大きい. 図 3 に同様に 5 人の解析者(同じ解析ソフトではない)にそり変形量を予測いただいたときの, 実際のそり量と比較した結果である. この場合, 同一形状にて, 成形時の成形機の動きや樹脂温度などの情報を与えて 2 つの材料(PBT PP)にてそり解析を実施し比較を行った. この結果, 充填完了時の樹脂圧力の結果(図 2)に比べ, 解析者による結果の差異がさらに数倍もあることがわかる. このことは, そり解析の入力条件(図 1 の①, ②のプロセス)が充填解析のそれに比べて多岐にわたるため, 実際の現象を表す要因に対して適切な入力条件を設定できるかという, ユーザー側のノウハウがより多く含まれていると考えられる.

以上のことより, そり解析では充填解析の場合よりも, さらに多くの過去のデータベースなどの情報(図 1③, ④のプロセス)が必要であることがわかる.

図4 解析を中心とした業務の流れ

3. 解析者の結果判断におけるポイント

前項で述べたように、充填解析においても、また特にその解析においても、解析者は射出成形というプロセス情報(図1③、④のプロセス)をできる限り解析に反映させることが精度向上には不可欠であることを述べた。しかしながら、新規開発部品においては、これらの情報はきわめて乏しいことも少なくない。これを解決するには多くの事例を経験する以外には近道はないが、その過程で著者は「解析結果の解釈と標準化」をお勧めしたい⁶⁾。図4は解析を中心とした業務の流れである。解析で得られるシミュレーション結果は、あくまで温度、変形量、圧力、歪、流速、板厚等々の物理量にしか過ぎない。したがってこれらの結果をもとに、金型内で生じている成形現象をいかに予測するかがポイントである。

たとえばある不良現象と物理量との間にどんな関係があるのか？その物理量が増減することにより、不具合の程度はどのように変化するのか？これらのことを過去のデータベースをもとに総合的に考察し、金型内における不良現象のメカニズム解析を行う必要がある(図4の網掛け部分)。このメカニズムが明らかになれば、例えば物理量としてある値範囲内であれば、不良は発生しないが、ある範囲以上となれば不良発生の可能性を予測することができる。ここでこのように発生を予測できれば、その物理量にかかわる成形条件の変更を方策として検討すれば良いことになる。このことを繰り返し業務の中で実施すると、いつしか解析結果から事前に不良現象を精度良く予測できると同時に、その対策(方策の検討)も標準化(ex. こんな解析結果が得られたら、必ずこんな対策をすることというような取り決めごと)できる。これらのことを業務の中で毎回実施してデータを蓄積することと、さらには製品の立ち上げ後にもう一度「後追い解析」を実施することが肝要と考える(図1の破線)。このプロセスを繰り返すことにより、不良現象と物理量との因果関係が明らかになるものと考ええる。

これは筆者の知る「失敗事例」であるが、複数の解析者

が同じソフトを用いて解析し、同じ結果を得たにもかかわらず、その結果の解釈と対策の標準化がなされていなかったために、対策がまちまちとなり、その結果品質に差が生じ解析ソフトに対する信頼が大いに失墜したことがあった。このような失敗は前述した結果解釈を行い、対策の標準化を推進すれば必ず解決できると考える。ここで蓄積された標準化技術こそが、社内での普遍的な基盤技術となるものである。したがって、この標準化技術はソフトに付随するものではなく、ソフトを使っていく中で、解析者が独自に創り上げていかなければならないものである。

4. さらなる精度向上に向けて

そもそも射出成形プロセスは非常に複雑でかつ過渡的な現象であり、これらをすべて解析ソフトに織り込むことは困難である。すなわち金型内を流動する樹脂は冷却されながら充填されるが、この時に樹脂特性(熱的、機械的)は大きく変化する。解析では伝熱解析と流動解析を連成させて繰り返し計算を行っているが、ここでの樹脂特性変化をすべて解析的に理論立てることはできない。たとえば、溶融した樹脂が金型内を冷却されながら流動・固化することによって分子鎖が配向するが、一方固化するまでにそれが緩和するといった現象も起こる。その結果、種々の物性値が成形品内(場所・厚み方向)で分布することが考えられる^{7),8)}。これらの現象は大きな温度変化を伴うことは容易に想像されることである。しかしながら、解析ソフトにおいては、たとえば射出中の樹脂温度は初期温度と同じで一定であるというような仮定が存在する。このために、これらの解析ソフトにおける仮定と実際の成形との差を明確にし、その差による解析結果への影響度を十分に見積もっておくことは重要なことと考える。そこでこの過渡的な挙動が解析結果にどれほどの影響を与えるかを調べるために、樹脂温度、圧力、射出率を実際の挙動に擬似的に再現させて測定し、成形機の設定条件(解析者が解析ソフトに入力する条件)との差異を測定した。

図5 検証実験用の製品形状

図6 検証実験の手法
金型による成形とプロファイルの計測

図7 射出プロファイルを擬似した測定装置の詳細

4.1 測定原理

図5に示すような部品形状を成形できる金型を用いて、まずは図6に示すような通常の射出成形を行う。この時、成形機のスクリュ位置、ノズル部分の樹脂温度や圧力変化を詳細にモニタリングしておく。次に成形機はそのままとして、図7に示すようなプランジャーユニットと金型とを置き換える⁹⁾。ここでこのプランジャーユニットは背面に油圧ユニットを有しており、この油圧ユニットにより金型で成形した時と同じような圧力プロファイルが得られるように背圧制御を行うことができる。この時、プランジャーユニットに射出される樹脂の挙動（プランジャー位置、ノズル部樹脂圧力、樹脂温度）を測定することにより、擬似的に金型に射出された樹脂挙動を計測することが可能である。

4.2 擬似的成形における射出率・樹脂温度測定

図8に成形機スクリュ位置およびプランジャーユニットの位置変化より求めた射出率を示す。この図より、射出開始直後のプランジャーへの射出はスクリュ射出に追従していない。これはプランジャーユニットの背圧の増加に伴っ

図8 成形機スクリュおよびプランジャーユニットにおける射出率プロファイル

図9 成形機ノズルおよびマニホールド部における樹脂温度プロファイル

て溶融樹脂が圧縮されながら流動するためと考えられる。その後、溶融樹脂が所定量充填され保圧過程に切り替わると、成形機のスクリュは後退するが、プランジャーユニットでは樹脂の逆流は起こらず、かえって射出率が増加する傾向が見られる。これは保圧過程に入り、ノズル部分の樹脂圧力が低下することから、それまで圧縮されていた樹脂の体積が増加するような挙動を示したためと考えられる。

このように圧力変化を伴いながら圧縮、あるいは膨張を繰り返すような挙動をとることから、溶融樹脂温度もまた射出成形過程に変化するものと考えられる。図9に射出中のノズル内およびマニホールド部に設置した温度センサーによる、溶融樹脂温度の変化を示す。射出成形機の樹

図 10 射出プロファイルを考慮した充填時樹脂圧力値の解析結果比較

脂温度は、射出開始の時間の経過とともに増加する傾向を示した。また、この挙動は、保圧過程に切り替わるまで続いた。これは、射出中の剪断発熱によると考えられ、ノズル部の樹脂温度は、射出中に大きく変化し最終的に 250℃ 以上に達する挙動を示した。また、マニホールド内に射出された樹脂も、射出中に 10℃ 増加する挙動を示した。このことから、射出時間中の樹脂温度が一定であるという解析ソフトにおいて一般的に用いられている仮定は、実際のそれと異なると考えられる。

4.3 擬似的成形で得られた情報の解析への取り込み

このようにして、射出成形中の樹脂流動挙動や温度変化を擬似的成形により確認したあと、その情報を解析者に与え、解析者自身の工夫によって、どのように解析結果が変化するかを検討してみた。図 10 に充填完了時の金型内樹脂圧力に関する、成形機設定条件のみの情報で解析した場合と、前述の射出プロファイル及び樹脂温度変化の情報を加えて解析した場合の解析者による解析結果の変化を示す。解析担当者は、図中の白抜きシンボルで示す解析において通常の射出成形機のスクリュ移動速度データを射出速度プロファイルとして入力し解析を行っている。これに対して、図中の網掛けシンボルで示す解析において、解析上ノズルからの樹脂の射出プロファイルが図 8 に示すようになるように、解析ソフトウェア上の入力条件を変化させたり、樹脂温度を図 9 に示す温度プロファイルから適当と思われる条件を入力したりするなど、解析者はそれぞれ工夫をして解析を行っている。いずれの場合も、充填時の金型内圧力に関しては、入力条件を解析者が何らかの形で工夫しているにも関わらず、この場合は大きな変化がないことがわかる。これはこの形状での特定の材料の結果であり、必ずしも同様の結果となるものではないと考えるが、今後のデータ蓄積が不可欠であろう。すなわち材料の違いや形状の違いによる実験と解析のデータの蓄積により、そり現象そのものの発生メカニズムを明らかにする手がかりとなる。

5. ま と め

本講座では本学会の射出成形 CAE 専門委員会での活動を例にとり、解析者が心掛けてほしいポイントを中心に述

べてきた。本論でも紹介したように、同一の対象物、同一の成形条件、同一の樹脂データで解析を行っても、解析結果は人によって異なるものである。これは同じ解析ソフトを使った場合でも生じていることであり、解析ソフトの入力条件が異なっていることを示すものである。これを解決するためには、解析者が製品試作までのプロセスをいかにうまくイメージできるかということと、解析によって得られた物理量と不良現象との因果関係を数多く事例として蓄積し、解析結果の標準化を進めていく以外には近道はないものと考えられる。

さらに解析ソフトに含まれる数多くの近似や仮定に対して、実験的にそれを確認し、その近似や仮定が現実的でなければ、プログラムの改良へと繋げなくてはならない。以上述べたように、これらの問題点を着実に解決することにより、解析ソフトは製品開発におけるさらなる大きな戦力となりえるのではないかと考える。

謝 辞

本講座において使用した資料は、プラスチック成形加工学会射出成形 CAE 専門委員会の活動において得られた成果です。ここに、専門委員会委員各位の活動に敬意を表し、感謝いたします。特にプランジャーユニットを用いた 4 章の実験では、日精樹脂(株)さんの実験装置をお借りいたしました。末筆となりましたが、そのご好意に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Jansen, K. M. B., Dijk van D. J. and Keizer, K. P.: *Int. Polym. Proc.*, **13**, 417 (1998)
- 2) 瀬戸雅宏, 山部 昌: 成形加工, **13**(12), 812 (2001)
- 3) 山部 昌, 大塚弘己, 亀田隆夫, 瀬戸雅宏, 道井貴幸: 成形加工, **14**(11), 690 (2002)
- 4) プラスチック成形加工学会専門委員会公開セミナー 前刷資料 (2005)
- 5) 道井貴幸, 瀬戸雅宏, 山部 昌, 大塚弘己: 成形加工, **16**(7), 467 (2004)
- 6) 山部 昌: 日産技報, **39**, 80 (1996)
- 7) 瀬戸雅宏, 佐藤和人, 山部 昌: 成形加工, **16**(8), 548 (2003)
- 8) 瀬戸雅宏, 寺倉祐二, 佐々木幹夫, 山部 昌: 成形加工, **15**(2), 148 (2003)
- 9) 塩入隆仁, 山極佳年, 清水久登: '03 成形加工学会年次大会予稿集, 279 (2003)

謝辞 本講座を終えるにあたり

本講座は、2005 年 1 月号からスタートしました。プラスチック成形加工の CAE および高分子レオロジーの専門家の方々に、基礎から応用、さらに将来展望をご執筆頂きました。あらためてお礼申し上げます。プラスチック材料を主材料とした研究開発に携わっている方々に、本講座が参考になれば幸いです。

取りまとめ担当: 村田泰彦, 伊藤浩志, 木原伸一