射出成形における可視化実験解析法

東京大学国際・産学共同研究センター

横井 秀俊

1. はじめに

射出成形はプラスチック成形加工の代表的な成形技術で、自動車のバンパー等の大物成形部品から各種ハウジング類、ギヤ、レンズ、CDやDVD等の精密成形品まで、およそ形を持ったプラスチック部品はこの射出成形によりつくられる。その工程は、米粒状に調整された成形材料(ペレット)を(1)加熱シリンダ内で溶かす、(2)金型に注入する、(3)金型内で冷却して形状を転写・凍結する、と極めて単純である。一般に、1サイクルわずか数秒から数10秒の工程間に、圧縮性と断熱特性に富む成形材料は、常温・常圧から200～300℃・数100気圧以上の高温・高圧環境を経て常温・常圧に復帰する。やや専門的だが、非ニュートン流体、結晶化過程と体積収縮、分子／繊維配向と異方性発現などの諸因子が重畳し、その工程には見かけによらず実に複雑な成形現象が展開されている。しかしながら、こうした成形工程は厚い鋼鉄製の加熱シリンダ・金型内に閉ざされ、センサー設置箇所での数点の圧力・温度計測情報を除いて、外から容易には窺い知ることができないブラックボックスとなっていた。

射出成形工程には、大別して加熱シリンダと金型の2つのブラックボックスがある。圧力および温度のインプロセス計測情報を重畳させながら材料挙動・状態変化を直接観察できれば、これらブラックボックス内深くに光を導き入れ、成形現象の解明に飛躍的な進歩をもたらすことが可能となる。ここに可視化技術への大きな期待が込められている。

本解説では、上記2つのブラックボックスのそれぞれについて取り上げ、2回に分けて可視化実験解析法の解説を連載する。第1回となる本稿では、射出成形金型内の可視化技術を取り上げ、その発展の歴史と、著者らの最新の研究成果事例について、以下に順を追って紹介する。

2. 金型内可視化技術の分類と発展の歴史

金型内可視化技術は、高速ビデオ等を用い動的画像を記録する動的可視化法と、材料にマーキングなどの事前処理を加え成形後のサンプルを観察する静的可視化法との2つに大別される。

2. 1 動的可視化法

各種動的可視化法の分類を図1に示す¹⁾。キャビティ充填パターンのようなフローフロント形状の時間変化観察では、光反射方式が適用される。一方、繊維配向挙動など流動樹脂内部の情報が必要な場合には、樹脂内の透過光を観察する必要があり、バックライト法による光透過方式、レーザーライトシート法による光切断方式の2方式が用いられる。

(1)光透過方式

動的可視化の研究は、1950年のR.S.SpencerとG.D.GilmoreによるPhoto Moldの開発に始まる。この金型は、対向平行ガラス厚板の裏側に鏡を45°配置・固定した一眼レフカメラのような構造で、実成形機上で64frames/sの高速にて型内現象の撮影に成功した^{2),3)}。この研究は余りにも先駆的で、スキン層・コア層、補償流れなど成形現象の基本となる概念は当時すでに彼らによって提示されている。その後1970年代に入り、平行ガラス板の金型をキャピラリーレオメータ等と組合わせ行なったジェッティング現象の解析をはじめ、サンドイッチ成形過程の観察^{4)~6)}、発泡成形における気泡の成長過程の動的可視化^{7),8)}が行われた。

光透過方式の金型に偏向板、1/4波長板を対向して二組設置し、光弾性実験系を構成する。これにより、樹脂流動過程および圧縮・保圧冷却過程における固化層の成長と応力(複屈折)分布を動的に可視化することができる。これまで同方式によって、1978年にキャビティ面方向からの観察⁹⁾が、また1989年からは板厚方向からの観察(図2)^{10),11)}が継続的に

行われている。特に後者では、黒崎、佐藤らが固化層成長過程、ひけ・そり生成過程の観察に基づき生成機構の検討、伝熱学的手法による制御方法を提案している。

(2) 光反射方式

光反射方式は、光透過方式にやや遅れて登場した。型内流動の数値解析モデルを構成する上で、

樹脂流動パターンに加えてキャビティ内の圧力・温度計測データが同時に求められる。そのため、(1)の方式において片側のガラスブロックに替えて、センサーを装填した金属ブロックを組み入れたことに始まる^{12),13)}。例えば、M.R.Kamalらは、半円形状キャビティの充填・保圧冷却過程の理論検証を目的に、200 frames/sの高速度カメラによりフロント速度と圧力パ

図1 射出成形金型内の各種動的可視化法

図2 複屈折分布の可視化金型と光学系（黒崎、佐藤ら）

図3 レーザ可視化金型による光切断画像の例（キャビティ厚さ：2mmから4mmへ）

ロファイルを同時計測した¹²⁾。

光反射方式による二方向同時可視化は、1970年にドイツのアーヘン工科大学IKV(プラスチック加工研究所)によりはじめて本格的な研究がなされた。矩形キャビティでの拡大流から平板流への遷移過程、ウェルドライン生成現象の解析、キャビティ厚さ6mmでの3次元立体的速度分布の計測・表示等が行なわれた¹⁴⁾。

なお、近年では光反射方式(主に一方方向反射方式)の可視化金型により、ガスアシスト射出成形過程の可視化解析が多方面で盛んに行われている^{15),16)}。

(3)光切断方式

流動樹脂内の一部をスリット状の強力な光で切断し、この光切断面内のマーカ挙動を、切断面からかなり離れたキャビティ側面に設置したガラス窓から観察する。この際、光切断面と観察窓との間には多くのマーカが介在する。それにも関わらず、光切断面内のマーカ輝度が高いため、任意の光切断面の画像のみを離れた端面から観察できる。同方式は、流れ

の可視化に広く用いられているレーザライトシート法を、著者らが初めて金型に適用したものである。これにより板厚方向の樹脂挙動(図3)と速度分布¹⁷⁾、生成ガスの挙動、繊維配向過程、ファウンテンフロー現象の解析が進められた。

この他、等温系を仮定したモデル実験に適用が限定されるが、疑似流体を用いた板厚方向流動現象の可視化実験も一部試みられた。例えば垂直平行ガラス板の間に層状インクを浮かべたシリコンオイル等を充填し、ガラス板を落下させた際の液面部ファウンテンフローを観察する実験が行われている¹⁸⁾。

2. 2 静的可視化法

静的可視化法は、原則として金型側にはほとんど手を加えない。材料側にマーキング処理等を事前に施し、取り出し後に成形品の中に凍結された情報を読み出す方法である。材料へのマーキング法によって、図4の各種方法に分類される¹⁾。すなわち、着色顔料を埋込んだ材料や着色板の積層材料をプランジャ方式で押し込む方法、2本の射出シリンダにより

図4 射出成形金型内の各種静的可視化法

材料を交互射出する方法,着磁によりマーキングする方法に分類される。

(1)着色材埋込み方式

半径方向に一定間隔で小径穴明をし,同種樹脂の着色材を埋め込んだロッド材を作製する。同材料をキャピラリーレオメータにより金型内に射出することにより,内層部の多様な流動パターンを観察できる¹⁹⁾。その後, L.R.Schmidtにより,顔料埋込み箇所をロッド中心部のみに限定する技術的改良がはかられ,中心部の顔料部分をほとんどせん断変形させずキャビティ内へと射出させることが可能となった。これがSchmidtの実験で,特にスキン層近傍でのZ字状着色パターンの生成を初めて明らかにした²⁰⁾。

(2)着色材積層方式

これに対し,着色板の積層ロッド材をプランジャにて金型内に押込む方法も昔から広く用いられてきた。ただし,この方法によれば,射出時に着色材料ごとに順番にゲートを通過する保証がない。このため,定性的な理解には充分役立つものの,定量的な解析には不向きと考えられる。金型の可視化とは相違するが,H.Meijerらは,1991年に着色材を多数積層充填したシリンダ内で対向ピストンを往復動させ,生成したファウンテンフローの流動パターン(図5)を,シミュレーションモデルの検証用基礎データとした²¹⁾。多層射出成形,IC封止材の充填,ガスアシスト射出成形などの樹脂挙動解析用基礎データの収集にも同手法は活用されている。

図5 着色材積層ロッド法によるファウンテンフローパターンの可視化
(H. E. H. Meijerら)

(3)2シリンダ方式

2本の射出シリンダによる2色の射出樹脂を,バルブ等の切換え機構により順次あるいは交互に金型内に射出する方式である。シャープな樹脂の切換え実現に課題を残すものの,簡易な可視化手法として実際に試みられている。ただし,著者らのランナー切替え法(次章(4)参照)以外,報告例はほとんど見出されていない。

(4)着磁方式

こうした着色による材料マーキング法とは切口の相違した手法として,著者らの開発によるゲート着磁法がある²²⁾。テープレコーダの原理を金型に適用した本手法では,記録媒体として樹脂内に練り込まれた磁粉が利用される。樹脂がゲートを通過する際に,ゲート直前に設置された鉄心と磁気回路とにより樹脂内の磁粉にパルス状に着磁がなされる。着磁パターンの読み出しは,サンプル切断後に,切断面の着磁域を磁気検出液にて可視化することにより達成される。

本手法は,その高い再現性とパルス着磁パターンの任意性により,静的可視化でありながら,動的可視化法に準じた時間因子の導入を初めて可能とした。着磁パターンの現像に熟練を要する難点があるものの,数10 μm の高い記録解像度と併せて優れた可視化実験解析手法として活用されている。同手法により,リブ,段差部等の3次元流れ,補償流れ²³⁾、低速・高速充填パターン(図6)²⁴⁾、繊維配向と流れとの

図6 ゲート着磁法による長尺平板キャビティでの充填挙動可視化例(板厚中心での切断)

相関、端面部の先行流動挙動、フェノール樹脂の充填挙動²⁵⁾、半導体封止過程²⁶⁾等の可視化解析を実施した。1995年にはツインゲート着磁装置を開発し、ウェルドライン形成領域の流動パターンを観察も行った²⁷⁾。

3. 可視化観察の事例紹介

著者らは、1986年にまず片面反射方式の可視化金型(プリズムインサート金型)を開発した²⁸⁾。これをもとに、今日まで光透過方式(バックライト金型)、同時2面反射方式(3次元可視化金型)を、さらにこれらの流れとは独立に、すでに上述した光切断方式(レーザ可視化金型)¹⁷⁾をそれぞれ開発している。結果として、図1の全動的可視化法を目的に応じて使い分けながら、これまで成形現象の解明を行ってきた。また、静的可視化手法として、新規のゲート着磁法を開発するとともに、動的可視化法のプリズムインサート金型を静的可視化法の2シリンダ方式と組み合わせた究極の可視化技術—ランナー切替え方式—を開発した。以下に、こうした各種可視化技術の解説と可視化事例を紹介する。なお、レーザ可視化金型とゲート着磁法については上述したので、そちらを参照されたい。

(1) プリズムインサート金型

プリズムインサート金型(図7)は、①通常の成形条件のもとで、②通常の金型と同様にして、③通常の成形機上で使用できることを目的として、高耐圧(500気圧まで)の実用的可視化金型として開発された^{28),29)}。プリズムの素材は石英ガラスである。図8に高速ビデオ

図7 プリズムインサート金型の基本構造

カメラによる可視化実験の様子を例示する。同金型は、すでに高度に多様化し、複雑となった現実の成形現象解明に広く適用し得る可視化手法の確立を指向したものである。すでに国内外10セット以上の稼働実績を有しており、近年の画像計測技術の発達により500~4,000frames/s(特殊な用途には20,000frames/sまで)が、さらに拡大倍率として金型外から70倍以上の撮影が可能となっている。これにより、ウェルドライン³⁰⁾、フローマーク、シルバーストリーク³¹⁾、ランナーバランス³²⁾などの不良現象解析が実施され、さらにガスアシスト射出成形過程³³⁾、ショートショット過程³⁴⁾の可視化にも適用が拡げられている。

(2) バックライト金型

著者らは、上記プリズムインサート金型の発展研究として、もう一つプリズムを対向させて組み付け、機能的にPhoto Moldと同様の可視化金型を構成した³⁵⁾。この対向プリズムによるバックライト方式可視化金型に基づき、 $\phi 60 \mu\text{m}$ 、 $\phi 24 \mu\text{m}$ のNiめっきガラス繊維をマーカ繊維として用いることによって、繊維配向挙動を直接観察することが可能になった(図9)。特にカメラ追跡装置との組み合わせにより、7層構造を形成する繊維配向過程の解析に実績を上げた³⁶⁾。半導体封止過程では、リードフレームを挟む2つのキャビティ充填パターンの可視化にも適用されている³⁷⁾。

(3) 3次元可視化金型

成形現象は本質的に3次元流動現象に立脚しており、CAEの今日的課題も3Dシミュレーションとなりつつある。プリズムインサート金型のキャビティ端部にもう一つのプリズムを挿入し、リブ部、段差部、L字部

図8 プリズムインサート金型と高速ビデオシステム

での充填挙動の2方向同時観察を可能とした³⁸⁾。2台の高速ビデオシステムによる正面、側面画像を一画面上に合成表示することで、詳細な画像解析が可能になっている。さらに同手法を拡張し、厚肉物・ガスアシスト射出成形の可視化にも適用できる大型の3次元可視化金型を開発した³⁹⁾。同金型では、リブ・ボス内部流れを同時に観察するため、リブ・ボス形状の一部(半分)をガラスブロックとし、さらに外側に側面観察用ガラスブロックを組付けた構造に特徴がある(図10)。縦リブ、斜めリブ³⁹⁾、ボス⁴⁰⁾、段差キャビティ⁴¹⁾での充填現象、高充填フィラー・高濃度ガラス繊維系の樹脂流れ、さらにはガスアシスト射出成形のガス注入パターン⁴²⁾の観察などに用いられている(図11)。

(4)ランナー切替え装置

ゲート着磁法のようにゲート通過樹脂をマーキングするために、2色成形機と組合わせて、ゲート直前で回転し、2つのランナーを瞬時に何回も切替える装置を開発した(図12)⁴³⁾。これにより、分割面、側面観察用のそれぞれの可視化金型と組合わせて、リブ、段差、ボス部充填、ウェルドライン生成過程(図13)について、特にコア層流れを動的に可視化することに成功している⁴⁴⁾。同手法は、単に動的な可視化解析にとどまらず、動的観察をした成形サンプルを取り出し任意切断面を観察することで、内部流れの層状着色パターンを容易に観察できる。両者を対比して解析す

ることで高度な実験解析が可能となることから、“究極の可視化実験解析技術”として期待されるものである。

(5)拡大・追跡観察装置

成形成品外観不良現象は、主に樹脂フロント部におけるファウンテンフロー現象の乱れに起因している。それらの生成機構を解明するためには、フロントを拡大観察することが最も直接的なアプローチ法と言え、拡大・追跡観察手法の開発が求められていた。カメラを単軸移動ロボットに載せて追跡撮影する技術は上記(2)で繊維配向の研究にて試行されたが、フロントに注目した研究が横方向(板厚方向からのバック

図9 ゲート近傍での繊維配向過程(ガラス繊維径: $\phi 60 \mu\text{m}$, 樹脂: PS)

図10 大型3次元可視化金型(2方向同時可視化金型)の基本構造

(a)リブ部充填挙動

(b)ガスインジェクションにおける段差部ガス進入挙動

図11 2方向同時可視化金型による観察画像の例

図12 ランナー切替え装置

図13 ランナー切替え装置によるウェルドライン形成過程の観察

ライト撮影)⁴⁵⁾、手前方向(フロント部前方からの合焦点撮影)の拡大観察実験として行われた。さらに、ラインセンサーのインプロセス計測により、対象物(例えばフローフロント先端部)を横方向観察画像の視野内に常時捉える自動追跡システムの開発を行い、最大200mm/sまでの拡大追跡速度を実現している⁴⁶⁾。観察対象は、繊維配向過程、フローフロントの対称・非対称ファウンテンフロー過程、シルバーストリック生成過程等、多岐にわたる。

4. おわりに

可視化技術はここ10年で大きな進歩を遂げ、プラスチック成形加工の多くの分野で一般的な実験解析手法として広く市民権を得るに至っている⁴⁷⁾。プラスチック成形加工関連の大きな国際学会年次大会(PPS Annual Meeting, SPE ANTEC)では'96,'97,'98と近年毎年のように可視化セッションが設けられるようになり、可視化研究は今や国際的な潮流となっている。

可視化技術はその利用形態から、シミュレーション検証用の基礎データ収集を目的にするものと、未知の成形現象を発見的手法により解明することを目的にするものと、大きく2つに分けられる。前者は、基本的なモデル実験を課題とするため、可視化技術に対する課題は物理状態を読み出す計測手法(例えば、速度分布、応力・複屈折分布、圧力分布、温度分布などの計測法)にある。すなわち、これらをいかにして

正確に計測できるかが可視化技術に対する要求課題となる。一方、後者では、現実の不良現象を可視化金型内でいかにして再現し、ありのままの現象を定性的・定量的に捉えるかが課題になる。一般には、材料特性のばらつきや、金型の表面性状、微妙な滞留現象や不安定現象など、すぐにはシミュレーションでできないような現象が対象となっている。この場合には、いかにして実際の加工プロセスを実機上で可視化するかが課題となり、可視化技術にも妥協の許されない難度が要求される。

可視化技術は温度・圧力計測技術とともに実験解析分野の発展を支え、一方の予測技術としてのCAE分野と両輪をなしつつ、プラスチック成形加工をリードする役割を担おうとしている。前者の利用形態として、CAE高精度化への要望とともに、今後CAEに導入されるべき実成形現象のモデル化を実現することが求められる。そのため、後者の可視化技術に対する要望、すなわち未知の成形現象の解明が、今後ますます大きくなるものと予想される。

本稿が、金型内成形現象の可視化実験解析法の普及に対して一助となれば幸いである。

参考文献

- 1)横井秀俊:成形加工, Vol.6, No.2, pp.157 (1994).
- 2)Spencer,R.S., and Gilmore,G.D.: J.Colloid,Sci., No6, pp.118 (1951).
- 3)Gilmore,G.D., and Spencer,R.S.: Mod.Plastics, No.

- 28, pp.117 (1951).
- 4)White,J.L., and Dee,H.B.: Polym.Eng.Sci., Vol.14, No.3, pp.212 (1974).
- 5)White,J.L., and Lee,B.L.: Polym.Eng.Sci., Vol.15, No.7, pp.481 (1975).
- 6)Oda,K., White,J.L., and Clark,E.: Polym.Eng.Sci, Vol.16, No.8, pp.585 (1976).
- 7)Han,C.D., and Villamizar,C.A.: Polym.Eng.Sci., Vol. 18, No.9, pp.687 (1978).
- 8)Han,C.D., and Yoo,H.J.: Polym.Eng.Sci., Vol.21, No.9, pp.518 (1981).
- 9)Han,C.D., and Villamizar,C.A.: Polym.Eng.Sci., Vol. 18, No.3, pp.173 (1978).
- 10)黒崎晏夫,佐藤 勲,石井浩一郎:日本機械学会論文 集(C編), 56-522C, pp.504 (1990).
- 11)黒崎晏夫,龍腰健太郎,佐藤 勲:成形加工, Vol.2, No.6, pp.505 (1990).
- 12)Kamal,M.R., and Kenig,S.: Polym.Eng.Sci., Vol.12, No.4, pp.302 (1972).
- 13)高橋秀郎,松岡孝明:高分子学会レオロジー研究会講 演要旨集, pp.14 (1978).
- 14)Menges,G., and Leibfried,D.: Plastverarbeiten, No. 21, pp.951 (1970).
- 15)Lanvers,A.P.: Doctoral dissertation, IKV (1993).
- 16)Yang,S.Y., Huang, F.Z., and Liao,W.N.: Polym.Eng. Sci., Vol.36, No.23, pp.2824 (1996).
- 17)横井秀俊,稲垣幸秀,中西博之:成形加工'90, pp.143 (1990).
- 18)Coyle,D.J., Blake,J.W., and Macosko,C.W.: AIChE Journal, Vol.33, No.7, pp.1168 (1987).
- 19)Bagley,E.B., and Birks,A.M.: J.Appl.Phys., Vol.31, No.3, pp.556 (1960).
- 20)Schmidt,L.R.: Polym.Eng.Sci., Vol.14, No.11, pp. 797 (1974).
- 21)Vos,E., Meijer,H.E.H., and Peters,G.W.M.: Int'l Polymer Processing, No.6, pp.42 (1991).
- 22)横井秀俊,鎌田重人:生産研究, Vol.40, No.10, pp. 532 (1988).
- 23)横井秀俊,伊藤義一:成形加工'94, pp.45 (1994).
- 24)今出政明,宮内秀和,岡田三郎,横井秀俊: 成形加工 シンポジア'96, pp.257 (1996).
- 25)太田 隆,横井秀俊:成形加工シンポジア'98, pp.71 (1998).
- 26)佐藤正博,中村俊康,横井秀俊:成形加工シンポジア '99, pp.191 (1999).
- 27)宮内秀和,今出政明,岡田三郎,横井秀俊,増田範通: 成形加工シンポジア'95, pp.49 (1995).
- 28)横井秀俊,林 高樹,平岡弘之:生産研究, Vol.39, No. 7, pp.306 (1987).
- 29)横井秀俊,村田泰彦,坂本一郎:成形加工, Vol.6, No. 5, pp.349 (1994).
- 30)横井秀俊,村田泰彦,岡 克典,渡辺広三:成形加工, Vol.9, No.4, pp.290 (1997).
- 31)村田泰彦,横井秀俊,長谷元弘,永見 哲,渡辺広三: 生産研究, Vol.45, No.6, pp.421 (1993).
- 32)横井秀俊,村田泰彦,長谷元弘:成形加工, Vol.9, No. 7, pp.557 (1997).
- 33)横井秀俊,大竹智文:成形加工シンポジア'98, pp.59 (1998).
- 34)村田泰彦,横井秀俊,宇高 靖:成形加工, Vol.6, No. 10, pp.703 (1994).
- 35)横井秀俊,村田泰彦,西 芳夫,関 武邦:成形加工, Vol.7, No.9, pp.600 (1995).
- 36)村田泰彦,横井秀俊,長谷元弘,原田浩次:成形加工, Vol.7, No.10, pp.663 (1995).
- 37)横井秀俊,村田泰彦,山口龍善:生産研究, Vol.48, No.4, pp.266 (1996).
- 38)横井秀俊,梅山 浩,宇高 靖,村田泰彦:成形加工, Vol.9, No.3, pp.232 (1997).
- 39)横井秀俊,櫛田茂美,松坂 茂,松田 元:生産研究, Vol.49, No.9, pp.434 (1997).
- 40)松田 元,横井秀俊:生産研究, Vol.51, No.3, pp. 125 (1999).
- 41)松田 元,横井秀俊:生産研究, Vol.51, No.9, pp. 682 (1999).
- 42)Yokoi,H., and Otake,T.: Abstracts for the PPS-14, pp.77 (1998).
- 43)横井秀俊,金藤芳典:成形加工シンポジア'96, pp.131 (1996).
- 44)Yokoi,H., Kanetoh,Y., and Murata,Y.: Polymer Process Engineering 99, pp.109 (1999), IOM Communications.
- 45)横井秀俊,増田範通:成形加工'95, pp.145 (1995).
- 46)光畑晴彦,横井秀俊:成形加工シンポジア'98, pp.351 (1998).
- 47)横井秀俊:成形加工, Vol.11, No.4, pp.332 (1999).

(1999年9月30日受付)