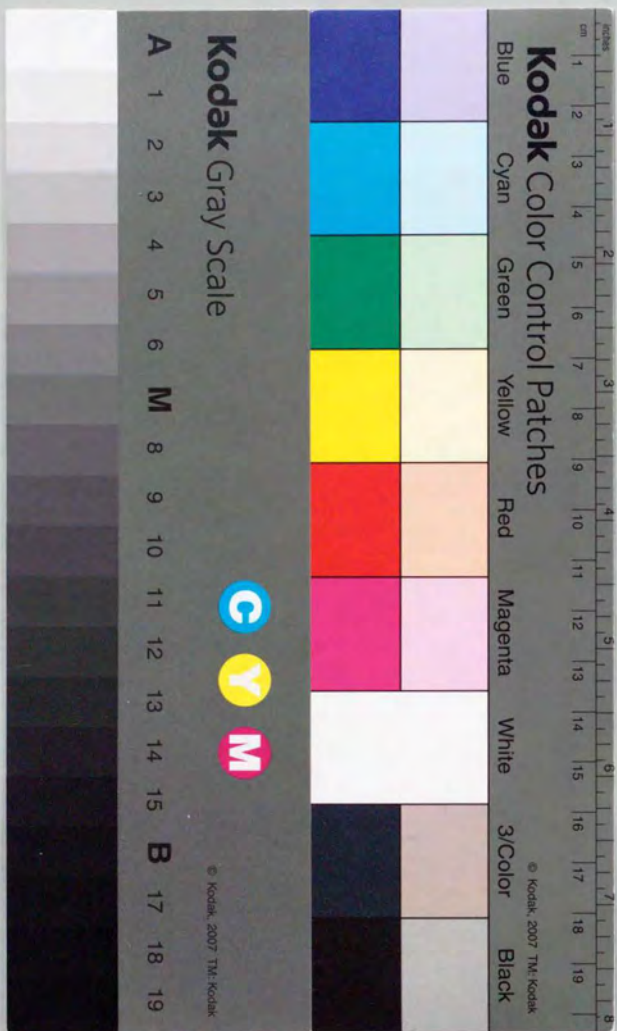


射出成形における
金型内成形現象の実験解析

村田 泰彦



①

射出成形における
金型内成形現象の実験解析

1996年7月

村田泰彦

【論文要旨】

射出成形法は、生産性の良さからプラスチック産業分野において急速な発展を遂げてきた。しかし、断熱材に近い粘弾性体である樹脂が主役となる成形現象は、複雑なプロセスをなしているため、金型内成形現象の定量的、系統的な解明、および成形理論の体系化が著しく遅れているのが実状である。

型内成形現象の解明および成形理論の体系化を行うためには、まず実験解析によって物理現象を明らかにし、その結果を数値モデル化すること、そして逆に、確立された数値モデルに基づき未知の現象を解析・予測することが重要と考えられる。そのためこの分野では、従来から可視化金型等を用いた型内成形現象の実験解析、およびコンピュータ数値シミュレーションによる成形プロセス、不良現象の解析あるいは予測技術の開発が行われてきた。しかし、従来の実験解析手法は、複雑な型内成形現象の解析に対して十分に寄与できる技術レベルにまで達しておらず、そのため、数値シミュレーションにおいても数値モデルの記述ができずに発展が困難な状況となっているのが実状である。すなわち、高いレベルの新しい実験解析手法の確立が最も必要と考えられる。

型内成形現象を具体的に解明するためには、物質の移動（樹脂流動、繊維配向）、樹脂圧力、樹脂温度の3つを点ではなく面情報として詳細に観測することが必要不可欠と考えられる。そこで、本論文では、実際の成形運転下で起こる各種成形現象の解明を可能とする、型内樹脂流動挙動および型内ガラス繊維配向挙動の可視化手法、キャビティ面圧分布、キャビティ厚さ方向樹脂温度分布の計測手法確立を第一の目的としている。そして上記手法を用いて、従来法では困難であった成形プロセスおよび成形不良現象の定量解析を行い、本手法の有効性を実証した。

本論文は、序論と総括を除いて3部、合計9章より構成されている。第Ⅰ部は、汎用ガラスインサート金型の試作・評価と、本金型の実用性を示す各種型内成形現象に関する実験結果について、第Ⅱ部は、型内ガラス繊維配向挙動の可視化手法確立と実験結果について、第Ⅲ部は、キャビティ面圧分布および樹脂温度分布計測法の確立と、それらの有効性を示す計測結果について取り扱っている。

序論では、型内成形現象を解明するために従来から行われてきた樹脂流動挙動およびガラス繊維配向挙動の実験解析法、樹脂圧力・温度計測手法の概要とそれらの問題点を整理し、今後新たに確立が求められる実験解析法について分析を行った。そして分析結果に基づき、本研究の目的を明らかにした。

第Ⅰ部は、型内樹脂流動挙動の実験解析と題し、第1章において、従来の光反射方式のガラスインサート金型を改良し、実成形条件下で発生する各種成形現象の可視化に適用できる広域のガラスキャビティ面と、各種キャビティ形状における観察に対応できる入れ子構造を有する実用的な汎用ガラスインサート金型を提案・試作した。そして、従来の動的可視化手法で検討が行われてこなかった、ガラスキャビティ面が樹脂流動挙動に及ぼす影響を評価した。その結果、通常の金型温度設定範囲においては、キャビティの片面にガラスブロックを挿入しても、樹脂流動パターンにほとんど影響を与えないことを実証した。

第2章では、汎用ガラスインサート金型を用いた動的可視化手法の有効性を確認することを目的として、従来の静的可視化手法の代表格であるショートショット法の適用限界について検討した。その結果、ショートショットのフローフロントが、射出完了後の型内冷却過程において変位し、その変位は、スプルー、ランナー内で圧縮された樹脂の圧力開放による前進、樹脂の冷却収縮による後退、一部の結晶性樹脂に見られるフローフロント部の局所変形による前進が、連続あるいは重畳された形態をとることを明らかにした。

第3章では、汎用ガラスインサート金型を用いて、多数個取り成形における成形品重量バラツキと密接に関係していると予測されるランナー分岐部での樹脂流動挙動解析を行った。その結果、各キャビティへの樹脂流入タイミングが、ランナー分岐部における樹脂飛び出し形状によって支配されることを明らかにした。また、ランナー分岐部での飛び出し形状は、樹脂のダイスウェル特性に依存せず、フィラー充填の有無、さらには分岐部でのフィラー配向状態とフィラー間の凝集力に依存するというモデルを提示した。

第4章では、汎用ガラスインサート金型を用いて、成形不良現象の中でこれまで最も解明が求められていたウェルドライン生成メカニズムの解析を行った。その結果、成形条件およびキャビティ条件の変化にかかわらず、フローフロント会合角が $120^{\circ}\sim 150^{\circ}$ でウェルドラインが消失すること、ウェルドライン消失会合角が、フローフロント会合部近傍における樹脂圧力状態に依存し、同部における圧力が高いほど消失会合角が小さくなることを実証的に明らかにした。

さらに、2つのファウンテンフロー会合部凹曲面、主にキャビティ壁面近傍曲面の、2次元展開によって生じる余剰表面積がウェルドラインを形成するという生成機構モデルを提示した。

第Ⅱ部は、型内ガラス繊維配向挙動の実験解析と題し、まず、第5章において、バックライト方式金型とNiめっきガラス繊維を用いた新しい繊維配向挙動観察手法を提案した。そして、従来法では達成できなかった実成形条件下での繊維配向挙動のリアルタイム観察を行い、本成形条件範囲内では、キャビティ厚さ方向に互いに交差した配向分布を示す7層の配向層が形成されることを明らかにした。また流動領域では、キャビティ厚さ方向の速度勾配変化が繊維配向状態を規定し、低速度勾配の中心領域は流動に直交配向のコア層を、その両側の高速度勾配領域は流動方向へ配向する中間層を形成することを明らかにした。しかし、繊維配向層形成メカニズムをさらに詳細に解析するためには、ゲートからキャビティ末端に至る繊維の全流動挙動を連続観察すること、フローフロント付近での繊維回転挙動をさらに拡大して観察することの必要性が示唆された。

第6章では、第5章で明らかとなった課題を解決するために、ゲートからキャビティ末端までを可視化できる改良型バックライト方式金型と繊維追跡撮影装置から構成される観察手法を提案し、繊維配向層形成メカニズムの検討を行った。コア層の繊維は、ゲートから流出直後、拡大流の影響を受け、流動方向に対して平行から垂直に配向角を変え、平行流領域で、その配向角を維持したまま流動する。中間層の繊維は、全流動過程を通してせん断流の支配を受け、流動方向に対して平行な配向を維持する。スキン層の配向状態は、フローフロント内部で繊維がファウンテンフローする経路に依存し、フローフロント表層部をファウンテンフローする繊維は成形品最外層のスキン層Ⅰを、また内層部を移動する繊維がその内側のスキン層Ⅱを形成することを定量的に実証した。

第Ⅲ部は、樹脂圧力・温度分布の実験解析と題し、まず第7章において、樹脂圧力をキャビティ全域における面分布として詳細に同時計測することを目的として、圧力伝達ピンアレイと触覚センサから構成される新しいキャビティ面圧分布計測手法を提案した。そして、まず触覚センサ出力特性の評価実験と、水晶圧電式圧力センサを用いた実成形中における触覚センサ出力の較正方法の提案を行った。つぎに、低密度ポリエチレンにおいて保圧時間を変化させてキャビティ面圧分布計測実験を行い、保圧時間の変化に対応したキャビティ面圧分布変化を詳細に捉えることにより、本計測手法の有効性を実証した。

第8章では、高集積度、高位置決め精度でキャビティ厚さ方向の急峻な樹脂温度分布を計測することを目的として、めっきにより多数の熱電対パターンをポリイミドフィルム上に集積形成した集積熱電対センサを新たに提案・試作した。そして、まず本センサの基本特性と、熱伝導誤差の発生をできるだけ抑えるための条件を明らかにした。つぎに、本センサを用いて、汎用ポリスチレンのキャビティ厚さ方向樹脂温度分布の計測を行い、射出率の増加に伴い、速度分布に対応するように放物線形状から台形形状へと温度分布が変化する現象、そして圧縮過程において、圧縮された溶融樹脂がキャビティ壁面方向に移動するためと考えられるコア層・スキン層境界領域での一時的な温度上昇現象を捉えた。

第9章では、第8章で開発した集積熱電対センサの汎用性確認の目的を兼ねて本センサをノズル流路内の流動樹脂温度分布計測に適用した。その結果、スクリュ形状、可塑化条件にかかわらず、ショット中の温度偏差は、ノズル流路中央と流路内壁面とのちょうど中間に当たる位置でピーク値を示すことを明らかにした。さらに、上記温度偏差のピーク値と流動過程での温度変動を、計量過程におけるリザーバ内での樹脂配置状況、およびその後の射出時におけるノズル流路内樹脂流動挙動と密接に関係づけるモデルを提示した。

最後に総括では、本論文で得られた主な結論を要約し、つぎに、本論文で新たに確立した各種実験解析法と従来法との比較検討を行い、本手法の特長と課題について整理した。さらに、本実験解析法を用いて得られた解析結果の活用方法について述べた後、最後に各種実験解析法の今後の展望を示した。

【目次】

序 論

1. はじめに	1
2. 型内樹脂流動挙動の実験解析法	8
2.1 静的可視化法	8
2.2 動的可視化法	14
3. 型内繊維配向挙動の実験解析法	21
3.1 静的可視化法	23
3.2 動的可視化法	27
4. 樹脂圧力・温度の計測法	31
4.1 樹脂圧力計測法	31
4.2 樹脂温度計測法	33
5. 確立が求められる実験解析法	39
5.1 型内樹脂流動挙動	39
5.2 型内繊維配向挙動	41
5.3 樹脂圧力・温度計測	42
6. 本研究の目的と論文構成	44

第1部 型内樹脂流動挙動の実験解析

第1章 汎用ガラスインサート金型の試作およびガラスキャビティ面の流動特性評価

1.1 緒言	47
1.2 汎用ガラスインサート金型および画像計測システム	47
1.2.1 汎用ガラスインサート金型の観察原理	47
1.2.2 汎用ガラスインサート金型の基本構造	48
1.2.3 画像計測システム	55
1.3 ガラスキャビティ面の流動特性評価	62
1.3.1 ガラスキャビティ面の影響評価方法の検討	62
1.3.2 実験方法	63
1.3.3 実験結果および考察	67
1.4 結言	76

第2章 ショートショット時におけるフローフロント挙動解析

2.1 緒言	77
2.2 実験方法	78
2.3 ショートショット時のフローフロント型内変動	80

2.4 Stage I の検討	84
2.4.1 前進量・圧力特性に及ぼすスクリュ制御の影響	84
2.4.2 前進量とランナー内圧力の関係	84
2.4.3 Stage I の前進機構	89
2.5 Stage II (IV) の検討	90
2.6 Stage III の検討	90
2.6.1 前進量とキャビティ内流動時間の関係	90
2.6.2 フローフロント部の断面観察	90
2.6.3 フローフロント部における圧力特性	93
2.6.4 Stage III の前進機構	93
2.7 各Stageの重畳効果	96
2.8 結言	96
第3章 ランナー分岐部における樹脂流動挙動の実験解析	
3.1 緒言	98
3.2 実験方法	99
3.2.1 ランナー内樹脂流動挙動の観察方法	99
3.2.2 ダイスウェル挙動の観察方法	101
3.3 ランナー内樹脂流動挙動観察	101
3.3.1 各ランナー内での流動挙動差	101
3.3.2 ランナー分岐部での飛び出し形状	104
3.4 ランナー分岐部での飛び出し形状差の検討	113
3.4.1 飛び出し形状の支配因子	113
3.4.2 ダイスウェル特性との相関関係	113
3.4.3 フィラー配向状況との相関関係	116
3.5 結言	118
第4章 ウェルドライン生成過程の実験解析	
4.1 緒言	119
4.2 実験方法	120
4.3 実験結果	123
4.3.1 ウェルドライン形状の計測	123
4.3.2 フローフロント会合角の画像計測	128
4.3.3 ウェルドライン深さとフローフロント会合角の関係	128
4.3.4 ウェルドライン生成部近傍における圧力特性	140
4.4 考察	140
4.4.1 ウェルドライン生成機構	140
4.4.2 各種樹脂間でのウェルドライン消失会合角差の検討	143
4.4.3 キャビティ間でのウェルドライン消失会合角差の検討	143
4.5 結言	144

第II部 型内ガラス繊維配向挙動の実験解析

第5章 バックライト金型方式によるガラス繊維配向過程の可視化解析

5.1 緒言	146
5.2 バックライト金型方式	147
5.2.1 観察原理	147
5.2.2 バックライト金型方式の基本構造	148
5.3 実験方法	151
5.3.1 トレーサ繊維	151
5.3.2 実験条件	151
5.3.3 繊維配向・速度分布抽出方法	153
5.3.4 可視化深度の評価方法	153
5.4 バックライト金型方式の評価結果	155
5.4.1 ガラスキャビティ面の影響	155
5.4.2 高繊維含有率における可視化深度	155
5.5 繊維配向観察結果および考察	157
5.5.1 キャビティ厚さ方向の繊維配向・速度分布	157
5.5.2 固化領域の配向	157
5.5.3 流動領域の配向	161
5.5.4 配向構造に及ぼす各種条件の影響	162
5.6 結言	167

第6章 繊維追跡撮影装置によるガラス繊維配向過程の可視化解析

6.1 緒言	169
6.2 実験方法	170
6.2.1 改良型バックライト方式金型と繊維追跡撮影装置	170
6.2.2 成形条件	174
6.2.3 観察方法	174
6.3 実験結果	175
6.3.1 コア・中間層の繊維配向挙動	175
6.3.2 フローフロント部における繊維挙動	183
6.4 繊維配向機構の考察	186
6.4.1 コア・中間層の繊維配向機構	186
6.4.2 スキン層の繊維配向機構	189
6.5 結言	189

第Ⅲ部 樹脂圧力・温度分布の実験解析

第7章 触覚センサによるキャビティ面圧分布計測

7.1 緒言	191
7.2 スリガラス法によるキャビティ面圧分布計測法	192
7.3 面圧分布計測方法および金型基本構造	192
7.3.1 計測方法	192
7.3.2 触覚センサ	195
7.3.3 金型基本構造	195
7.4 実験方法	200
7.4.1 センサ出力特性評価実験	200
7.4.2 キャビティ面圧分布計測実験	204
7.5 実験結果および考察	204
7.5.1 センサ出力特性評価	204
7.5.2 水晶圧電式圧力センサによる出力校正	206
7.5.3 キャビティ面圧分布計測	209
7.6 結言	215

第8章 集積熱電対センサによる型内樹脂温度分布計測

8.1 緒言	217
8.2 集積熱電対センサの計測原理と基本特性	218
8.2.1 計測原理	218
8.2.2 集積熱電対センサの形状および製作方法	218
8.2.3 センサの出力特性	221
8.3 実験方法	223
8.4 素線部を介した熱伝導誤差の評価	228
8.4.1 流動方向に沿う熱伝導誤差	228
8.4.2 キャビティ厚さ方向の熱伝導誤差	230
8.5 型内樹脂温度分布の計測	232
8.5.1 キャビティ厚さ方向樹脂温度の時間変化	232
8.5.2 キャビティ厚さ方向の樹脂温度分布	235
8.6 結言	242

第9章 ノズル流路内樹脂温度分布の計測

9.1 緒言	244
9.2 実験方法	245
9.2.1 ノズル流路内温度分布計測装置の基本構造	245
9.2.2 計測方法	245
9.2.3 実験条件	250
9.3 実験結果および考察	250
9.3.1 ノズル流路内樹脂温度のショット間変動	250

9.3.2 計量回転速度の影響	253
9.3.3 計量ストロークの影響	253
9.3.4 スクリュ計量部溝深さの影響	257
9.3.5 滞留時間の影響	260
9.4 温度偏差ピークの発生機構	260
9.5 結言	263

総 括

1. 各部のまとめ	265
1.1 第Ⅰ部で得られた結論	265
1.2 第Ⅱ部で得られた結論	267
1.3 第Ⅲ部で得られた結論	269
2. 本研究で確立した各種実験解析法の総合評価	270
2.1 型内樹脂流動挙動の実験解析法	270
2.2 型内繊維配向挙動の実験解析法	273
2.3 樹脂圧力・温度の計測法	275
2.3.1 樹脂圧力の計測法	275
2.3.2 樹脂温度の計測法	277
3. 各種実験解析法を用いて得られた解析結果の活用法	279
4. 各種実験解析法の今後の展望	281

参考文献	286
------	-----

本論文に関する公表文献	297
-------------	-----

付 録	301
-----	-----

謝 辞	312
-----	-----

— 序 論 —

1. はじめに

プラスチックの歴史は、1872年のセルロイドの工業化に始まる。これは、金属材料や無機材料の歴史に比較するとはるかに新しい。しかし、プラスチックは、約1世紀の間に急速な発展を遂げ、現在ではその生産量は金属に匹敵するほどになり、生産される製品の種類も家庭用雑貨品から、家電製品、OA機器、自動車部品に至るまで多岐に渡っている。賦形性がよく大量生産に適していることが一番の発展要因と言える。また、製品の多様化に対応して、その生産方法も数多く開発され、射出、押出、ブロー、カレンダー、圧縮、トランスファ等の各種成形法が生み出されてきた。

本研究の主題である射出成形の加工工程を図1に示す。射出成形は、以下に示す(1)可塑化、(2)射出、(3)圧縮・保圧、(4)冷却、(5)型開・離型工程から構成される。

(1)可塑化工程：成形材料（粒状の樹脂ペレット）がホッパから加熱シリンダ内に投入され、シリンダによる加熱とスクリュ回転によって溶融・混練されながらスクリュ先端に送られ、シリンダ先端部のリザーバ内に計量される工程。

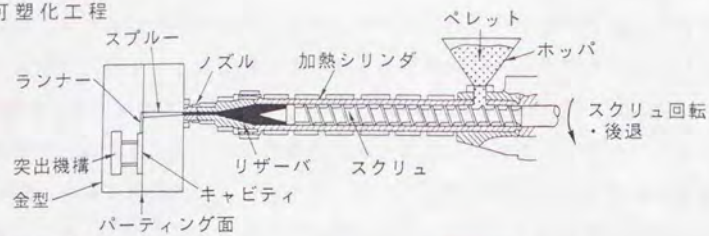
(2)射出工程：計量された溶融樹脂がスクリュ前進動作によりノズル、金型スプルー・ランナーを通して、キャビティ内に充填される工程。

(3)圧縮・保圧工程：射出工程でキャビティ内に樹脂が完全充填された後に、スクリュ前進動作により、一定圧力で樹脂をさらに充填する工程。本工程は、キャビティ内に充填された溶融樹脂の逆流を防止し、その冷却による体積収縮を補償するために行われる。

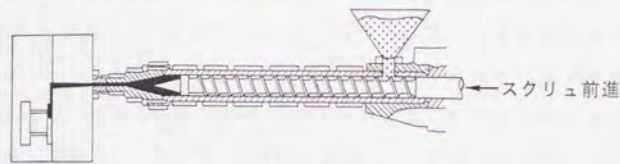
(4)冷却工程：温度制御された金型により、溶融樹脂を冷却固化または硬化させる工程。

(5)型開・離型工程：金型を開いて、突出機構により、成形品を金型から取り出す工程。

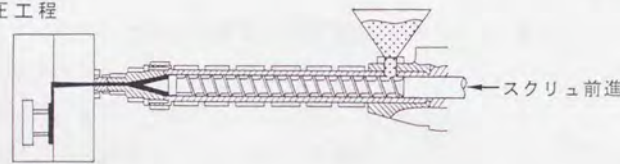
(1) 可塑化工程



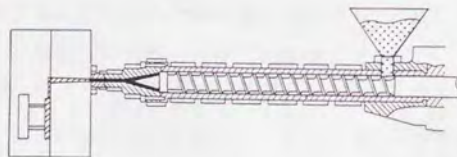
(2) 射出工程



(3) 圧縮・保圧工程



(4) 冷却工程



(5) 型開・離型工程

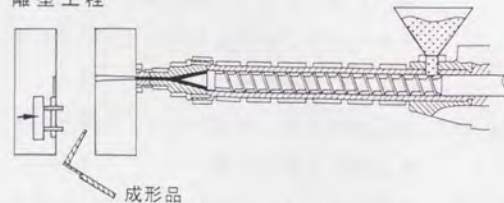


図1 射出成形の加工工程

射出成形法は、熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂の両方に適用することができ、プラスチック成形加工の最も重要な加工法の一つとなっている。射出成形の利点としては、(1)複雑形状の製品が容易に生産できること、(2)成形サイクルタイムが短いために大量生産に適すること、(3)生産工程の自動化が行いやすいことが挙げられる。そしてこれらの利点を活かして、具体的には、家電製品のキャビネット、バンパー等の自動車構成部品、歯車等の機構部品、家庭用雑貨品、最近では、光学レンズ、光ディスク等の精密製品の生産に広く利用されている。そして、これら用途の拡大に伴い、成形機、金型面においては、多色・異材射出成形法、発泡射出成形法、低圧射出成形法、射出圧縮成形法、ガスアシスト射出成形法等の新成形法が開発されている。一方、成形材料面においては、耐熱性、強度の向上を目的としたエンジニアリングプラスチック、スーパーエンジニアリングプラスチック、および母材にガラス繊維、カーボン繊維、金属繊維・粉末等を混入した複合材料、さらに樹脂特性の改質を目指したポリマーアロイの開発が盛んに行われている。

このように射出成形法は、プラスチック産業分野において急速な発展を遂げてきた。しかし、その発展の陰で、ウェルドラインおよびフローマーク、ひけ、複屈折、残留応力、さらにガラス繊維の充填等により起こるそり、変形等の成形不良現象が頻繁に発生し、成形品品質および機能、生産効率の低下をもたらすために、成形技術者を悩ませ続けているのが実状である。そこで、このような状況を脱し、高品質の成形品を得るために、射出成形分野では、従来から以下の2通りの試みがなされてきた。一つは、実験解析およびコンピュータ数値シミュレーションを用いて、型内成形現象の解明および成形理論の体系化を図ることにより、成形不良現象の発生を予測・抑止する方法である。もう一つは、タグチメソッド(品質工学)^{1)・2)}を用いて、成形不良現象の生成メカニズムは解明せずにブラックボックスのままとして、不良現象発生を抑止するための条件を探索する方法である。後者は、特別なツールを必要としないために、コストを上げずに高品質の成形品を得ることができる。しかし、本手法は未知の成形現象の予測技術として利用することが困難である。また、本手法の遂行過程からは、新成形技術・新成形材料開発に対する具体的な発想を導き出すことも

困難である。プラスチック製品の設計工程（金型設計工程等）の合理化、および射出成形技術のさらなる向上を考えた場合には、型内成形現象の解明および成形理論の体系化を行うことが最も重要と考えられる。

ここで、型内成形現象の解明および成形理論体系化のための具体的なプロセスを図2に示す。型内成形現象の定量的、系統的な解明、および成形理論の体系化を行うためには、まず実験解析によって物理現象を明らかにし、その結果を数値モデル化すること、そして逆に、確立された数値解析モデルに基づき未知の成形現象を解析・予測することが重要と考えられる。そのため、射出成形分野では、従来から型内成形現象の実験解析、および数値シミュレーションによる成形プロセス、成形不良現象の解析あるいは予測が行われてきた。特に、この分野では、実験解析よりもむしろ数値シミュレーションの開発研究が盛んに行われてきた。その結果、これまで様々な数値解析モデルが提案され、型内樹脂流動シミュレータをはじめとして、最近では、保圧・冷却過程および繊維配向過程、ひけ・そり現象等のシミュレータが開発されている。

このように多くの数値シミュレータが開発されているが、しかしこれらはすべて、ある仮定条件が導入された、簡略された数値解析モデルと境界条件に基づいている。一例として、樹脂流動・保圧・冷却過程シミュレータに導入されている基本的な仮定条件を表1に示す³⁾。シミュレーションの対象となる型内成形現象が仮定条件をほぼ満たす場合、例えば、樹脂流動解析において板厚方向を含む3次元流動が問題とならない薄肉キャビティの場合には、樹脂流動パターンおよび樹脂圧力分布がある程度予測できる（図3）。また、繊維配向解析では、板厚中央部のコア層内での配向のみがある程度予測できる（図4）。このように、現行の数値シミュレータは、ある範囲の現象までは予測できるように作られている。しかし、ひけ、そり現象のように予測精度が低いもの、あるいはウェルドライン消失位置およびフローマーク生成位置、スキン層生成過程、スキン層内での繊維配向状態等のように、現行の数値シミュレータでは解析・予測することができないものが数多く残されている。これには、コンピュータの計算能力の都合により、簡略化された数値解析モデルによる計算にとどめているという事情も含まれる。しかし、それよりもはるかに重要な問題は、ウェ

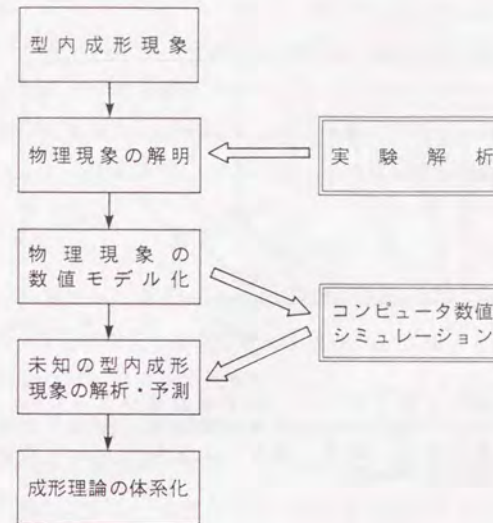


図2 型内成形現象の解明および成形現象体系化のプロセス

表1 樹脂流動・保圧・冷却過程シミュレータにおける基本的な仮定条件³⁾

支配方程式に関して

- ・流れ場は、キャビティでは薄肉流れと仮定して板厚方向の流速を無視した二次元単純せん断流とし、流路では同様にして一次元流とする。
- ・運動方程式では、慣性力、法線応力、物体力などを無視する。
- ・エネルギー方程式においては、流れ方向の対流、板厚方向の熱伝導、せん断発熱のみを考慮する。

構成方程式に関して

- ・非Newton純粘性流体を仮定し、粘度のせん断速度および温度依存性を考慮する。

境界条件に関して

- ・メルトフロントでの圧力を大気圧とする。
- ・金型表面での流速を零とする（滑りなし）。

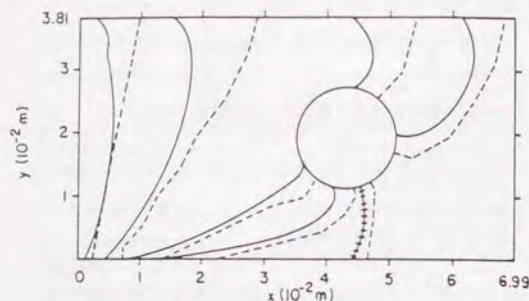
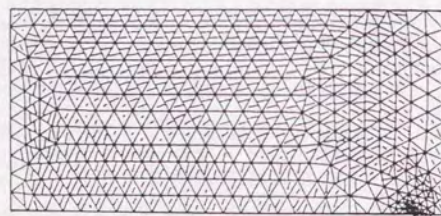
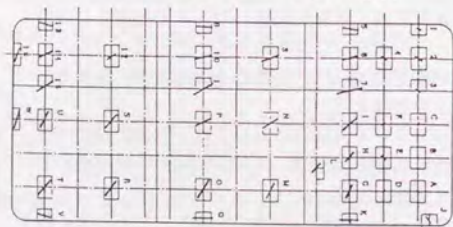


図3 樹脂流動パターンに関する数値シミュレーション結果と実験結果の比較例（実線：実験解析結果，破線：数値シミュレーション結果，ポリスチレン）⁴⁾



(a)数値シミュレーション結果



(b)測定結果

図4 コア層での繊維配向測定結果と数値シミュレーション結果の比較例（ガラス繊維16wt%充填AS）⁵⁾

ルドライン、およびフローマーク、ひけ、そり等の生成メカニズム自体、あるいはスキン層厚み等の定量データが実証的に明らかにされていないために、実際の現象に合った厳密な数値解析モデルの記述ができないという点にある。すなわち、実験解析による型内成形現象（物理現象）の解明が遅れているために、現在の数値シミュレータの発展、さらには、成形理論の体系化が行き詰まっているのが実状と言える。

断熱材に近い粘弾性体である樹脂が主役となる型内成形現象は、液相から固相への相変化、3次元の急峻な速度分布および圧力・温度分布の発生、繊維配向および分子配向の発現、結晶化に代表されるように、物質移動および圧力・温度分布変化を伴う複雑なプロセスをなしている。そのため、実験解析により型内成形現象を解明する際に最も重要となることは、この物質移動（樹脂流動挙動、繊維配向挙動）、圧力・温度分布を、詳細にかつリアルタイムで観測することと考えられる。前述したように型内成形現象の解明が遅れている理由は、これら現象が金型という厚い金属壁で囲まれたブラックボックスの中で、しかも数10MPaから数100MPa、300℃以上にも及ぶ過酷な圧力・温度環境のもとで、短時間の内に起こることが、既存の実験解析法の適用を困難なものとし、また新しい手法開発のための障壁となっているためと分析できる。すなわち、型内樹脂流動挙動および繊維配向挙動、圧力・温度分布は、簡単な計測ツールでは計測することができず、これまでになく高いレベルの新しい実験解析法を確立することが、型内成形現象の解明および成形理論の体系化に対して最も重要な第一ステップとなるものと考えられる。

こうした新しい実験解析法の確立が行われれば、成形不良現象の抑止対策を得ることができるだけにとどまらず、数値シミュレーション技術が進歩し未知の現象の予測が可能となるために、これまで試行錯誤に頼っていた製品および金型設計の合理化を図ることができる。さらに、これら実験解析法は、新成形法および新成形材料開発のための支援ツールとしての機能も果たし、プラスチック成形全体の進歩が促進される。このように、新しい実験解析法が確立されることによる波及効果は、極めて大きいものと期待できる。

以下では、まず第2節から第4節において従来から行われてきた型内樹脂流動挙動、および型内繊維配向挙動、樹脂圧力・温度の各種実験解析法の概要と解析事例、そしてそれらの問題点について述べる。そしてつぎに第5節では、従来の実験解析法の問題点を分析することにより、型内成形現象解明のために今後確立が求められる実験解析法を明確にする。最後に、第6節において本研究の目的と論文構成を明らかにする。

2. 型内樹脂流動挙動の実験解析法

図5、図6は、従来の型内樹脂流動挙動の可視化手法を静的と動的にそれぞれ分類して示したものである。成形後に取り出された成形品を分析して、流動挙動を推察する静的可視化法と、ガラス、アクリル等の透明材料を用いて樹脂流動挙動をリアルタイムで直接観察する動的可視化法の以上2通りに大別することができる。静的可視化法は、フローフロント等の外層部を観察するものと、流動樹脂内層部までを観察するものの2通りに細分化できる。前者には、ショートショット法が該当し、そして後者には、着色材埋込方式、および着色材積層方式、ゲート着磁法が含まれる。着色材埋込方式、および着色材積層方式、ゲート着磁法では、流動途中の樹脂の状態を観測したい場合に、ショートショット法とそれぞれ組み合わせて使用されることが多い。

一方、動的可視化法は、撮影方法の違いにより光透過方式および光反射方式、光切断方式の3つのパターンに細分化される。また静・動可視化方法の両者の中には、実際の金型と射出成形機上で観察を行うものと、そうではないシミュレーション実験が存在する。

以下では、図5、図6の分類に従って各手法の概要およびその問題点について述べることにする。

2.1 静的可視化法

2.1.1 ショートショット法

ショートショット法は、静的可視化法の最も代表的なもので、樹脂流動パターンを抽出するために生産現場において従来から盛んに用いられてきた。本手法

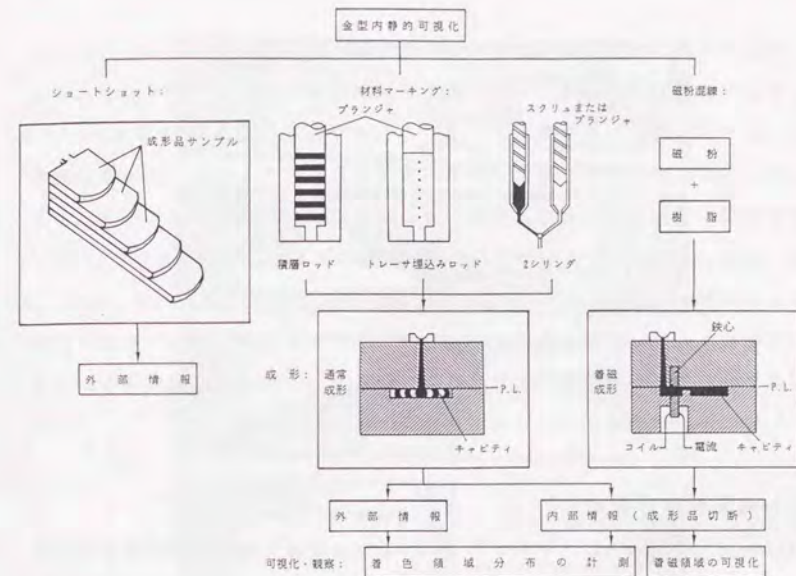


図5 型内樹脂流動挙動の各種静的可視化法⁸⁾

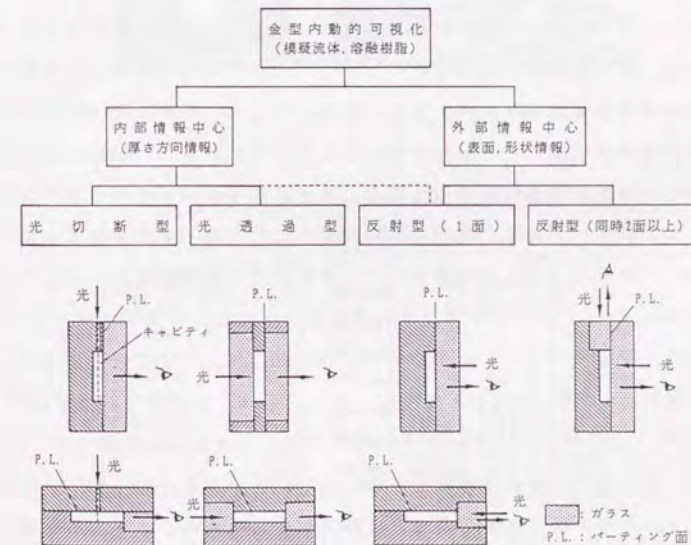


図6 型内樹脂流動挙動の各種動的可視化法⁹⁾

は、型内への射出樹脂量を段階的に変化させながら成形を行い、取り出されたそれぞれの成形品のフローフロント形状を流動時間経過に沿って重ね合わせることで、流動過程を推察しようとするものである（図7）。本手法は、フローフロント形状等の外部観察にのみその用途が限られるものの、特別な計測用金型や装置を必要とせず簡単に実施できるために、主に成形条件の吟味、あるいは、数値シミュレーション結果の検証手段等に広く用いられてきた^{4), 7)-10)}。しかし、第2章で述べるようにショートショットのフローフロントは、冷却・固化過程を経たものであり、そのフローフロント形状がフルショット時での流動過程のフローフロント形状を実際に表しているかどうかを実証的に明らかにされていないという問題点が残されている。

2.1.2 着色材埋込方式

BallengerとWhiteらは、キャビティ内における樹脂内部流動を観察するために、着色材埋込方式を開発した¹¹⁾。キャピラリパレル内と同じ形状の樹脂ロッドの中心軸に沿って垂直に小孔が一定間隔に開けられ、そこに着色された糸状の樹脂（トレーサ）が埋め込まれる。このロッドがキャピラリ内に挿入され、プランジャーによりキャピラリの出口に設置されたキャビティ内に押し出される。そして、取り出された成形品内におけるトレーサの分布状況から樹脂内部流動状況を解析する。本手法は、本来、Bagleyらによってキャピラリ内出口付近での樹脂挙動解析を目的として開発されたものである¹²⁾。そのため、本手法をキャビティ内流動観察に適用した場合、キャピラリパレル内壁近傍でのせん断流れ、およびゲート部での縮小流れの影響により、キャビティ流入前にトレーサが大きく変形し、それらの因子をどう取り除くかが課題となっていた。

Schmidtは、ロッド中心軸付近に分布するトレーサが、プラグフローによりキャピラリ内で変形せずに、そのままキャビティ内に流入することに着目し、トレーサを樹脂ロッド直径の1/3と短くし、それらをロッド半径方向の中心部に埋め込んだ¹³⁾。これにより、ゲート通過時のトレーサの変形を回避でき、純粋にキャビティ内における樹脂内部流動を解析することが可能となった。かれは本手法により、スキン層とコア層の境界の樹脂がせん断流れによって引き伸ばさ

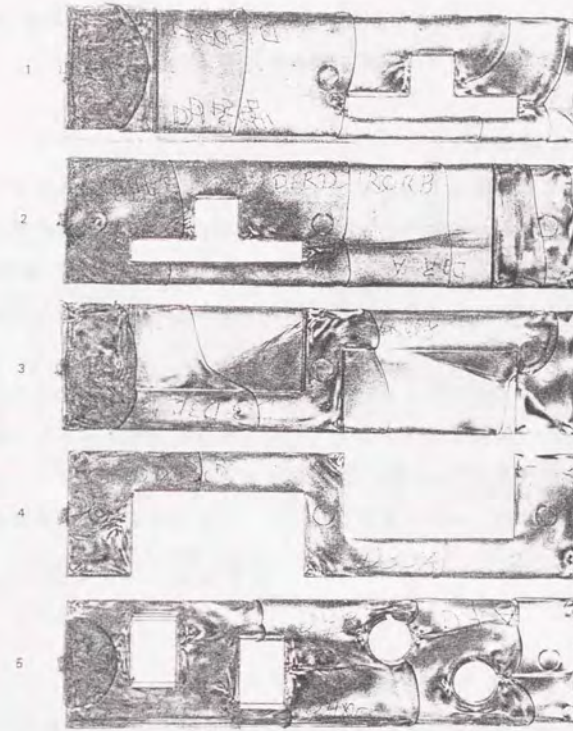


図7 ショートショット法による樹脂流動パターンの抽出例⁷⁾

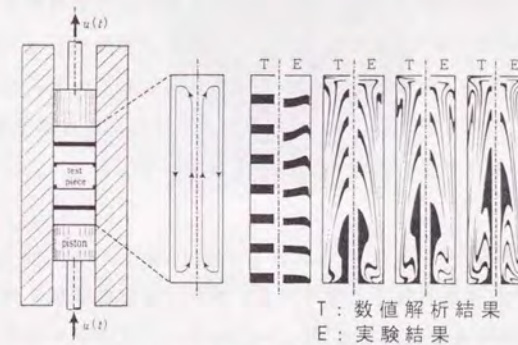


図8 Meijerらの着色材積層方式と解析例¹⁷⁾

れ“V字”マークが生成することを観測した。本手法は、現在、加藤らによって、セラミックス射出成形における流動挙動解析に応用されている¹⁴⁾。

2.1.3 着色材積層方式

着色材積層方式は、異なる色が着けられたコイン形状の樹脂を、キャピラリ軸方向に沿って積層した状態でキャビティ内に押し出し、成形品内部の着色材分布状況から樹脂の内部流動パターンを解析するものである¹⁵⁾。本手法では、キャビティへの樹脂流入状況が定性的に解析できるものの、前節のBallengerらの方法と同じ問題点を有していた。

Meijerらは、多層射出成形の基礎研究として、積層樹脂をピストン間に挟み、バレルを静置させた状態でピストンを下から上へ押し上げファウンテンフローを生じさせる装置(図8)を試作した¹⁶⁾。かれらはこの装置により、ファウンテンフロー現象の解析、および数値シミュレーション結果の検証実験を行っている¹⁶⁾。このようにゲートを介しての射出流動を行わない場合には、本手法は、定量的でかつ高精度の解析方法となる。

2.1.4 2シリンダ方式

着色材を用いるその他の方法として、2本の射出シリンダが搭載された2色射出成形機を用いる方法がある。泊らは、2本のシリンダにそれぞれ色の異なる着色材料あるいは異種材料を投入し、2点ゲートのキャビティにおいて、同時あるいは交互に射出を行い、ウェルドライン生成部における内部流動挙動の観察を試みた¹⁷⁾。前節までの3つの方法がシミュレーション実験であったのに対して、本手法は、実成形条件下で観察が行えることを特長としている。しかし、成形機が特殊で高価である、2つの材料を短い時間間隔で交互に射出できないため、流動パターンの分解能が低い等の問題点を有している。

2.1.5 ゲート着磁法

横井らは、実際の成形運転下で利用できる樹脂内部流動挙動の観察法として、図9に示すゲート着磁法を提案した¹⁹⁾。本手法は、以下のように説明される。

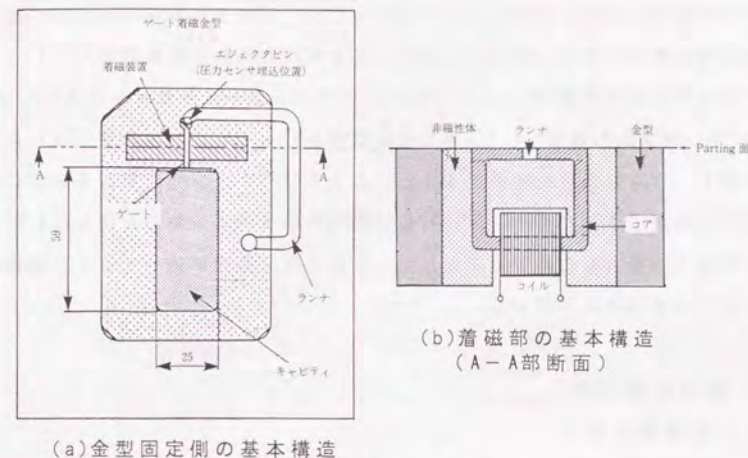


図9 横井らのゲート着磁金型¹⁹⁾



図10 ゲート着磁法によるボス形状キャビティ流動状況の観察例(汎用ポリスチレン)²³⁾

コイルの巻かれた着磁装置がゲート部に埋め込まれた金型内に、磁粉が20wt%混入された成形材料を射出する。つぎにパルス電流により着磁装置のギャップ間に磁界を発生させ、そこを通過する材料を磁化する。最後に成形品内の磁化材料分布状況を磁気検出液により抽出し、その状況から流動挙動を推察する。かれらは本手法により、型内微小段差による非対称流動の発生過程^{2.0), 2.1)}、スキン層近傍の流動挙動^{2.2)}、ボス(図10)・段差・コーナー部における樹脂流動挙動^{2.3)}、補償流動過程^{2.4), 2.5)}等の定量解析を行っている。本手法では、再現性が高く、パルス波形を制御することにより着磁パターン発生箇所を任意に制御することができるために、静的可視化法でありながら、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。この点は、高い着磁パターンの解像度と併せて大きな特長と言える。

2.2 動的可視化法

2.2.1 光透過方式

SpencerとGilmoreは、それまでにダイカストの成形過程観察に対して成功を治めていたガラス可視化金型手法^{2.6)}を応用し、1950年に射出成形分野では初めて可視化金型を開発した^{2.7), 2.8)}。本金型は、“フォトモールド”と呼ばれ、金型固定側と可動側にそれぞれ組み込まれたガラス板とミラーを通して、一方から光を照射し、他方から撮影スピード毎秒64コマのカメラにて観察する光透過方式を採用している。かれらは本金型を用いて、ディスクキャビティにおける流動パターン(図11)、およびスキン・コア層生成過程、ウェルドライン・ジェット生成過程の観察を行った。かれらの研究は、これまでブラックボックスであった型内樹脂流動挙動を初めて実証的に示し、また射出成形における問題点を明らかにしたものと先駆的と言える。しかし、成形プロセス、および成形不良現象の定量的な解明には至らず、定性的な観察のみにとどまっていた。

Hanらは、フォトモールドと同じ基本構造の光透過方式の可視化金型をプランジャー式射出成形機に取り付け、発泡射出成形における気泡成長挙動の動的観察を行った^{2.9)}。かれらは、また光弾性法と組み合わせて(図12)、流動・冷却

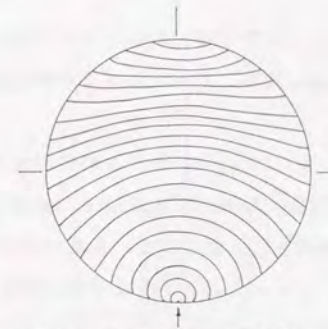


図11 フォトモールドによるディスクキャビティ流動パターンの実験解析例^{2.7)}

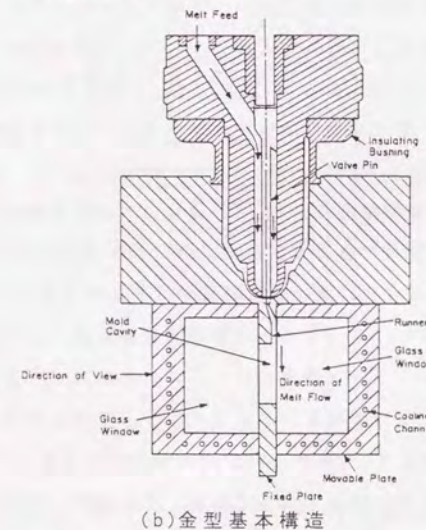
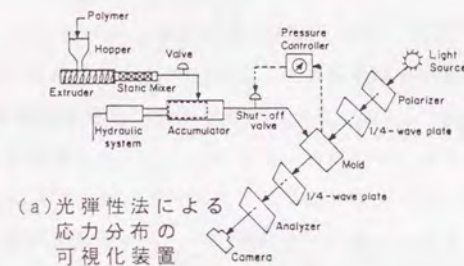


図12 Hanらの光透過方式可視化金型^{3.0)}

過程における複屈折パターン（応力分布）の発生および進展過程を初めて観察した³⁰⁾。Hanと同様の方法は、現在、黒崎らによるひけ生成過程の解析実験等に応用されている^{31), 32)}。

Whiteらは、図13に示すように2枚の平行ガラス板で構成された光透過方式の可視化装置をインストロン万能試験機に取り付けて、観察実験を行った³³⁾。かれらは、2.1.2節の着色材埋込方式を併用して、等温・非等温金型温度状態における樹脂流動挙動観察³⁴⁾、ジェッティング生成過程の観察³⁵⁾、サンドイッチ射出成形過程の樹脂挙動解析を試みた^{36), 38)}。

2.2.2 光反射方式

Kamalらは、数値シミュレーション結果の精度検証を目的として、図14に示すような光反射方式の可視化金型を試作し、流動・保圧・冷却過程でのポリエチレンの挙動観察を試みた³⁷⁾。成形現象を解析する際に、樹脂流動挙動と同時に樹脂圧力・温度を計測することが重要な課題となっている。前節の光透過方式の可視化金型では、キャビティ両壁面がガラスであるために、圧力・温度センサの挿入が不可能であった。しかし、本金型では、片面が通常の金属壁面であるために、上記センサの挿入が可能となり、流動パターンと圧力・温度変動を比較しながら解析を行えることが特長となっている。光反射方式の可視化金型は、高橋らによっても試作されている。かれらは、VTRあるいは16mmシネカメラを用いてジェッティング現象の観察を試み、ジェッティングの発生基準について検討を行った³⁸⁾。

横井らは、(1)通常の金型構造を有し、(2)通常の射出成形機に取り付けて、(3)通常の成形条件下で利用できる光反射方式の“ガラスインサート金型”を提案した³⁹⁾。図15に示すように、本金型は石英プリズムガラスがモールドベースに組み込まれた構造を有し、キャビティ内樹脂流動挙動をプリズムカットの全反射面を介して、モールドベース側面に開けられた観察窓から高速ビデオシステムにより画像計測するものである。本金型では、ガラスの引張強度よりも圧縮強度が高い性質を利用して、2組のくさびによりガラスを周りから締め付けガラスを圧縮応力状態へと導く構造となっており、その結果、50MPa以上の耐圧性

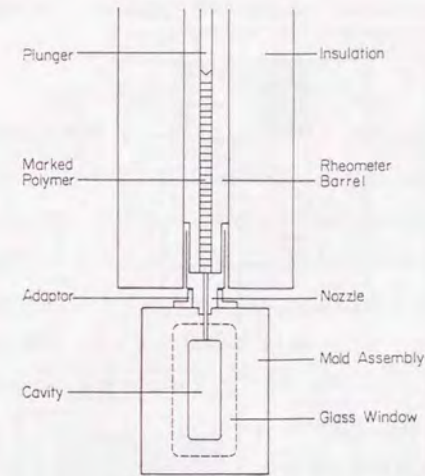


図13 Whiteらの光透過方式可視化装置³³⁾

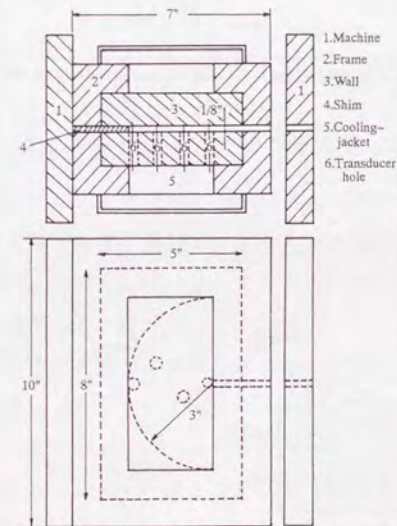
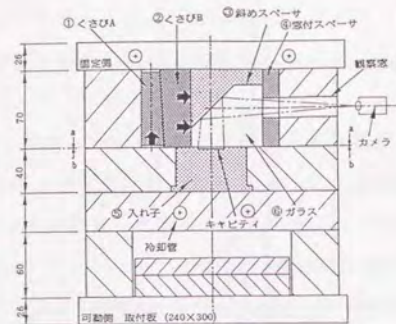
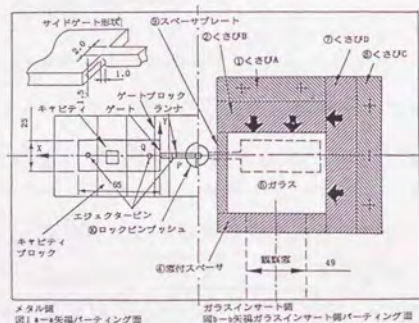


図14 Kamalらの光透過方式可視化金型³⁷⁾



(a) 金型側面



(b) パーティング面

図15 横井らのガラスインサート金型³⁹⁾

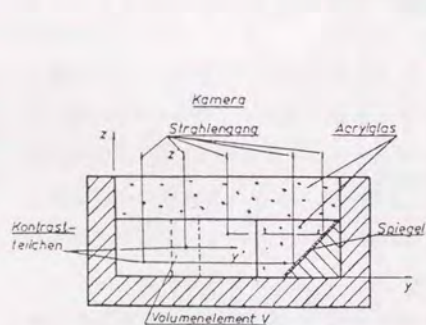


図16 Mengesらの2方向同時可視化金型⁴⁰⁾

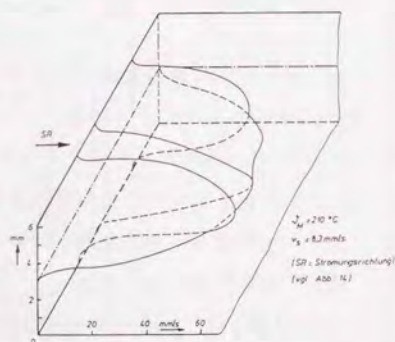


図17 2方向同時可視化金型によって得られた3次元樹脂流動速度分布の計測例⁴⁰⁾

を実現させた。横井らは、本金型を用いてジェッティング現象の観察に成功した。

2.2.3 2方向同時可視化方式

成形品は3次元的な複雑形状であることがほとんどありで、しかも樹脂流動挙動は、ファウンテンフローに代表されるように3次的である。したがって、キャビティ正面方向からだけではなく、キャビティ厚さ方向からの観察も重要となっている。Mengesらは、光反射方式を用いた2方向同時可視化金型を試作した(図16)⁴⁰⁾。本金型は、キャビティ側面にミラーが貼り付けられた透明アクリルを挿入し、側面からの画像を反射させてキャビティ正面からの画像と同じ方向から同時観察する方式である。かれらは、本金型により、矩形キャビティにおける拡大流れから平行流れに移行する流動現象、およびウェルドライン生成過程の観察、そして、図17に示すような矩形キャビティにおけるキャビティ正面方向と厚さ方向の3次元流動速度分布の計測に成功した。

2.2.4 光切断方式

横井らは、流動樹脂内層部における挙動を詳細に観察するために、水槽内の流れの可視化等に用いられた光切断法に基づく、レーザライトシート可視化金型を提案した(図18)⁴¹⁾。本金型は、スリットガラス(板厚1mm)を介して、金型内にシート状のレーザ光を照射し、光路内にある樹脂のみをキャビティ側面方向から観察するものである。図19は、本金型により得られたキャビティ厚さ方向の樹脂流動観察画像を示している。またかれらは、樹脂の中にトレーサ粒子を混入して樹脂速度ベクトルを計測した⁴¹⁾。Mengesらの観察法では、フローフロント形状は可視化できるが、内層部の観察は困難であった。本金型では、スリットガラスの位置を移動させることにより、任意断面における樹脂内層部観察を可能としたことが大きな特長と言える。ただし、側面ガラス近傍で不均一に成長する固化層がもたらすレンズ効果により、キャビティ壁面付近において画像の歪が発生し、これを補正する必要があることに注意を要する。

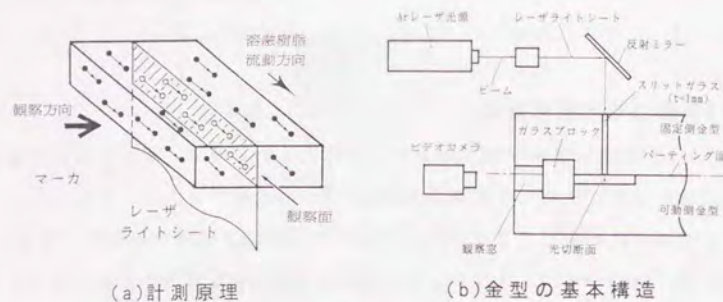


図18 横井らのレーザーライトシート可視化金型⁴¹⁾

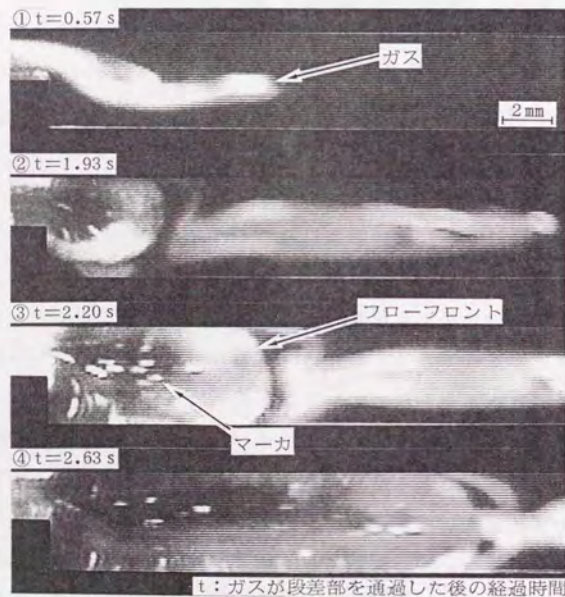


図19 レーザライトシート可視化金型によって得られた段差部におけるキャビティ厚さ方向樹脂挙動の観察例 (汎用ポリスチレン)⁴¹⁾

2.2.5 疑似流体法

Coyleらは、図20に示す可視化シミュレーション装置を提案し、有限要素解析を併用しながら、ファウンテンフロー現象の解析を行った⁴²⁾。透明アクリルとアルミニウムによって構成されたキャビティに疑似流体（水溶性ポリスルホン酸）が注入されている。アクリルの一端に連結されたモータの回転によりアクリルが降下し、壁面の移動により疑似流体にファウンテンフローと同様のフローパターンを生じさせる。アクリル側面に設置された針から層状のインクが注入され、ファウンテンフロー過程におけるトレーサ挙動を側方に固定されたビデオカメラにより撮影する。本手法は、簡易的にファウンテンフロー現象を再現し、観察できる点に特長がある。しかし、疑似流体を用いた等温状態での観察であるために、樹脂特有のスキン層の生成、粘度分布の存在等が考慮されておらず、実際の型内成形現象との等価性に関しては、疑問を残している。

3. 型内繊維配向挙動の実験解析法

短繊維強化熱可塑性樹脂 (FRTP) の射出成形にこれまで取り組んできた研究者の関心は、以下の3点に集約される。すなわち、(1)繊維充填樹脂が流動過程においていかなるメカニズムで繊維配向層を形成するか、そして、(2)形成された繊維配向層構造が強度、剛性等の成形品物性およびそり、変形等にいかに関与を与えるか、さらに(1)、(2)の検討結果に基づき、(3)成形過程で繊維配向、最終的には強度・剛性等をいかに制御すればよいにある。図21は、これまでに試みられてきたFRTPの型内繊維配向メカニズム解析方法を分類して示したものである。

静的解析法は、取り出された成形品内の各断面位置における繊維配向層構造を精密に計測し、その結果と既存の粘性流体理論を関係づけながら繊維配向メカニズムを推察するもので、(2)の検討を主眼とする研究者らによって用いられてきた。同手法の前提となる繊維配向層構造の計測手法は、各種顕微鏡の撮影画像から抽出する直接法、X線回折強度あるいは光散乱強度等と配向角との間に存在する較正関係から算出する間接法の、以上2通りに分けることができる。一方、動的解析法は、1960年代後半から行われるようになり、主に(1)の検討に重

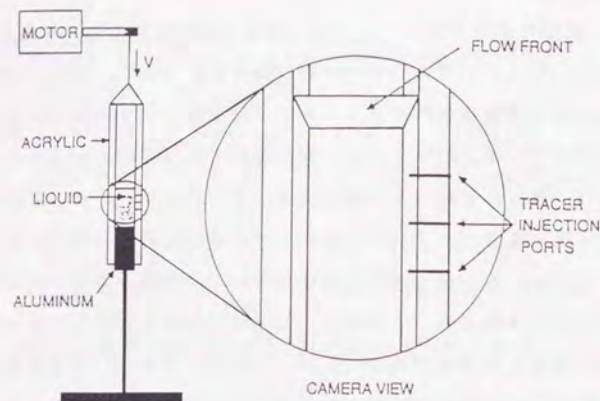


図20 Coyleらのファウンテンフロー可視化装置⁴²⁾

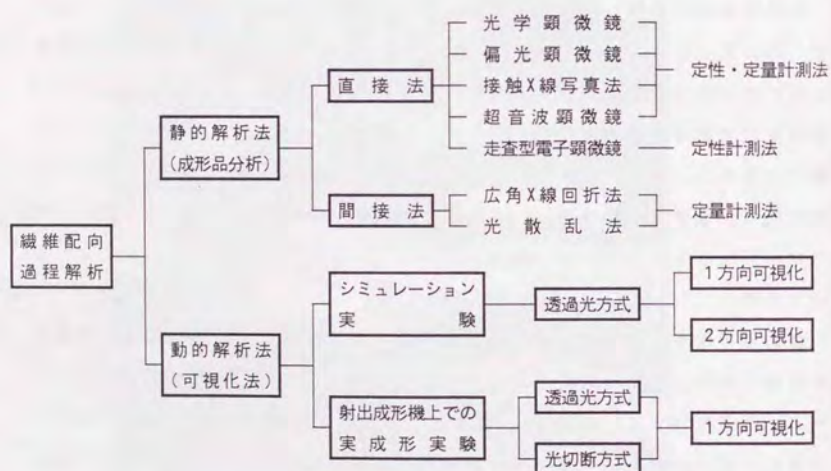


図21 短繊維強化熱可塑性プラスチックの各種繊維配向過程解析法

点を置いた研究者らによって用いられてきた。同手法は、透明ガラスで構成された可視化流路の中に繊維充填樹脂または疑似流体を流し、繊維挙動を直接観察することにより、配向メカニズムを把握するものである。

以下では、図21の分類に従って各種解析法の概要および解析結果について述べることとする。

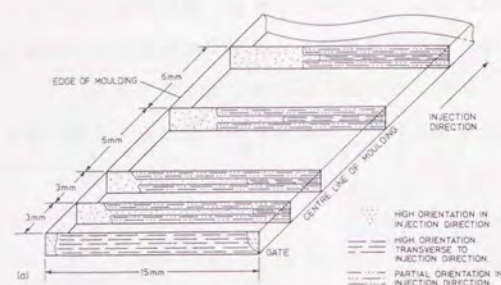
3.1 静的解析法

Brightらは、射出率を変化させて図22に示す成形品各断面でのガラス繊維配向層構造を計測した⁴³⁾。低速射出では、スキン層繊維がランダム配向を示し、コア層繊維が流動方向に配向すること、一方、高速射出では、スキン層繊維が流動方向に配向し、コア層繊維が垂直な配向を呈すること等を明らかにした。かれらはさらに、繊維配向と伸長流、せん断流、プラグ流等の各種流動挙動とを関係づけながら上記繊維配向メカニズムの推察を行った。またかれらは、ガラス繊維が充填されたポリプロピレンとナイロンのそれぞれの成形品内における繊維配向層構造を計測し、両材料における配向層構造の差異を抽出した。そして差異の原因を、熱伝導計算、およびキャピラリレオメータデータからそれぞれ求められたスキン層厚みとメルトコア速度分布を用いて解釈した⁴⁴⁾。Goettlerは、ガラス繊維充填エポキシ樹脂のトランスファ成形品に対して配向層構造の検討を行った⁴⁵⁾。さらに、竹田らは、各種キャビティ形状に対して配向層構造を計測し、チタン酸カリウム繊維/ポリスチレン複合材料における7層構造の配向層形成メカニズムの推察を行った⁴⁶⁾。

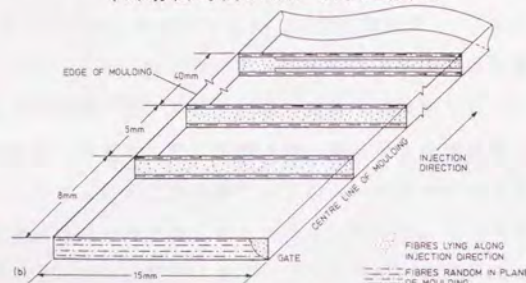
静的解析法では、繊維配向メカニズムの推察方法がほとんど画一化されている。それに対して、推察の前提となる繊維配向構造の計測手法については、研究者により様々であり、計測手法の開発自体に力が注がれている場合も多い。ここで、従来から用いられてきた配向構造計測手法について説明する。

3.1.1 直接法

光学顕微鏡は、簡便法であるために広く用いられている。本手法では、撮影自体よりもむしろ画像の定量解析法の工夫に力が注がれている。Fakirovら⁴⁷⁾、



(a) 射出時間0.2秒 (高速射出)



(b) 射出時間11秒 (低速射出)

図22 矩形成形品の各位置における繊維配向層構造 (ガラス繊維20wt%充填ポリプロピレン)⁴³⁾

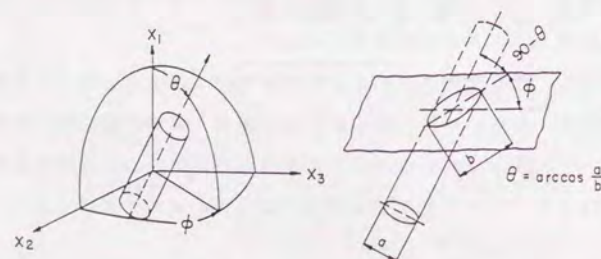


図23 成形品内における3次元繊維配向角の計測原理⁴³⁾

あるいはVaxmanら⁴⁸⁾は、成形品断面内のガラス繊維断面形状から3次元の繊維配向を抽出する方法を提案した(図23)。これは、成形品を3方向に切断・研磨してそれぞれを観察する方法⁴⁹⁾に比べて精度は低いものの、面倒な切断・研磨作業を省力化できる点で優れた方法と言える。Nicolaisらは、成形品内部のガラス繊維に顕微鏡の焦点を合わせ、焦点位置から厚さ方向の繊維位置を抽出し、厚さ方向の繊維配向角・長さ分布を非破壊で抽出した(光学計測の分野では、合焦点法と呼ばれる)⁵⁰⁾。その他、偏光顕微鏡も配向分布計測に用いられている^{51)~53)}。

接触X線写真法は、50~150μmにスライスされた試料を感光フィルムの上に設置し、試料上方からX線を照射しフィルム上にX線透過画像(図24)を得る方法である。Darlingtonらは、同一試料においてX線透過画像と光学顕微鏡画像とを比較して、前者の方が解像度が優れていることを示した⁵⁴⁾。本手法は、(1)試料研磨の必要がないこと、(2)繊維材質の制限がないこと、(3)画像分解能が最大0.2μmと高いこと、(4)数百倍の拡大倍率が得られることを特長としている。一方、装置が特殊で簡便法ではないという問題も有している。

走査型電子顕微鏡は、定量解析にはあまり適用されず、大きな撮影倍率を活かして、成形品破断面の繊維配向状況観察等に用いられている^{55)・56)}。また、最近では、技術的課題を残すものの、超音波顕微鏡によって成形品内部のガラス繊維配向を非破壊で画像検出する試みが行われている^{53)・57)}。

3.1.2 間接法

広角X線回折法は、回折X線の相対強度と回折角が繊維配向に依存することを利用したものである^{46)・58)}。竹田らは、得られた極点図をコンピュータ解析することにより図25の矩形成形品中央部断面での配向分布を得た⁴⁶⁾。成形品表面1から中央部4にかけて配向角ピークの異なる4つの配向層が形成されている。本手法では、(1)画像から繊維配向角、長さ等を測定する煩雑な作業を行わずに定量的データが得られること、(2)微細繊維および高充填率の場合の計測に適用できることを特長としている。ただし、(1)カーボン、ケブラー等の結晶性繊維に適用が限定されること、(2)装置が特殊で簡便法ではないことが欠点と言える。

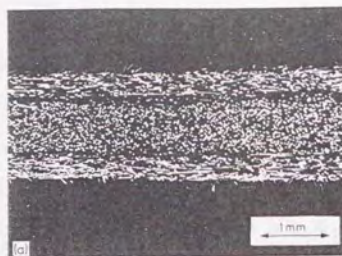


図24 接触X線写真法によって撮影された成形品の流動方向に垂直な断面(ガラス繊維20wt%充填ポリプロピレン、射出時間：11秒)^{4,3)}

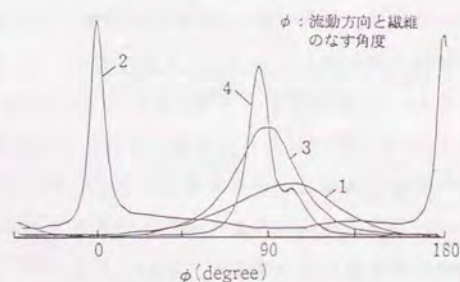


図25 広角X線回折法によって得られた矩形キャビティ中央部における繊維配向分布(チタン酸カリウム繊維20wt%充填ポリプロピレン、射出率：25cm³/s)^{4,6)}

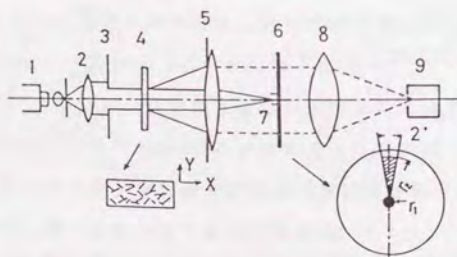


図26 竹田らの光散乱法による繊維配向角測定方法^{5,9)}

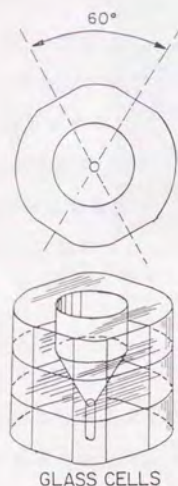
竹田らは、繊維に光が照射された際の散乱パターンと繊維配向との間に密接な関係があることを利用して、図26に示すような測定装置を提案した^{5,9)}。レーザ光源1から成形品4に向けてビームを照射し、試料からの散乱光をフォトセンサ9で測定する。フォトセンサの出力信号から計算により配向角が求められる。本手法は、(1)迅速に定量データが得られること、(2)ガラス等の非晶性繊維にも利用できることを特長としている。一方、5wt%以上の高繊維充填率の場合に、繊維間で多重散乱が起こるために測定精度が低下することが問題点と言える。

3.2 動的解析法

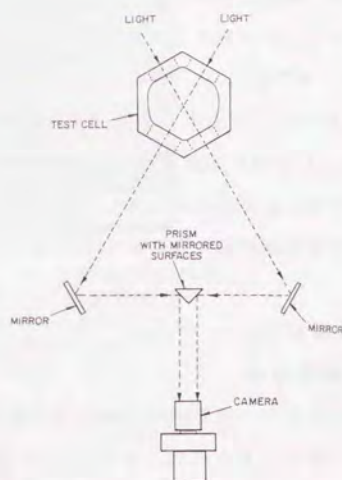
3.2.1 光透過方式

動的解析法では、透明ガラス製の可視化流路を用いた光透過方式が従来から用いられてきた。本手法は、ステンレス、あるいはカーボン製の不透明繊維をトレーサとして樹脂に少量混入して、トレーサ繊維の陰影を拡大観察するものである。通常の高繊維充填率の場合の観察では、トレーサ繊維を透明ガラス繊維の中に少量混入して、トレーサ繊維挙動より全体のガラス繊維挙動を把握する方法が用いられている。

Bell^{6,9)}、あるいはLeeら^{6,11)}は、透明ガラスで構成された縮小部を有する円管流路内の繊維配向挙動解析を行った。Leeらは、図27(a)に示す六角形構造のガラス流路を用いた^{6,1)}。繊維配向メカニズムの把握には、繊維配向を惹起する樹脂の3次元流動速度分布を知ることが重要と考えられる。そのためには、まず円管内における繊維流動位置の抽出が必要となる。Leeらは、図27(b)に示すように2方向からの画像をミラーとプリズムを介して1台のビデオカメラで記録し、両画像からステンレス製トレーサ繊維(直径 ϕ 180 μ m、長さ900 μ m)の流動位置を計測し、それに基づいて図28、図29に示す円管半径方向の繊維速度・配向角分布を得ることに成功した。縮小部の前後で速度分布がプラグフロー状から放物線状に変化する様子、そして縮小部における伸長流の影響で、半径方向のほとんどすべての位置でトレーサ繊維が流動方向($\alpha=50^\circ$ から $\alpha=0^\circ$)に回転する様子を捉えている。本手法は、繊維配向過程をリアルタイムで直接観察できる点に大きな特長があり、また、トレーサ技術、撮影方法の手本を示したも



(a)可視化ガラスの外観



(b)2方向同時可視化の原理

図27 Leeらによる円管縮小部内繊維配向挙動の可視化装置⁶¹⁾

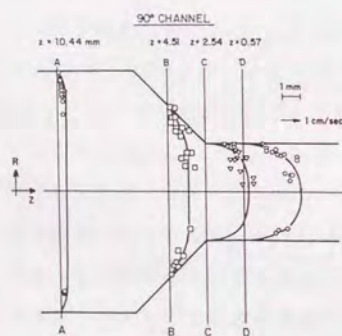


図28 Leeらの可視化シミュレーション装置によって得られた円管縮小部内の繊維速度分布⁶¹⁾

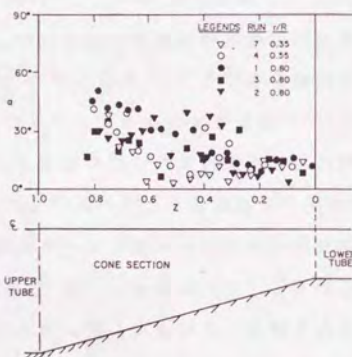


図29 Leeらの可視化シミュレーション装置によって得られた円管縮小部内の繊維配向角分布⁶¹⁾

のと言える。

矩形キャビティ内での繊維挙動解析を対象とした研究にも光透過方式が用いられている。Crowsonらは、Whiteらの光透過方式可視化装置(図13参照)を改良し、図30に示すようなキャピラリ内も同時に可視化できる装置を製作した⁶²⁾。そして、スチール製トレーサ繊維(直径 $\phi 100\mu\text{m}$ 、長さ1mm)が1wt%以下充填されたポリプロピレンを用いて、流路拡大・縮小部における繊維挙動観察を行った。かれらは、上部キャピラリ内で流動方向に配向した繊維がキャビティへ流入直後に 90° 回転し、その後下部キャピラリ内に入って再び流動方向に平行に配向する様子を捉えた。

堀川らは、カーボン製トレーサ繊維が0.1vol%充填された疑似流体(水溶性ポリエチレンオキサライド)を図31に示す可視化装置内で循環させて、繊維配向挙動を解析した⁶³⁾。図32は、実線で示す各円周内部の撮影写真から求められた繊維配向挙動を示している。流路幅が5mmから30mmに増加する部分において、それまで主配向方向(繊維配向頻度の最も高い方向)に強く配向していた繊維がややランダムな配向へと変化する様子を示している。本手法は、シミュレーション実験であるが、通常ガラス繊維とほぼ同じ $10\mu\text{m}$ 直径の微細カーボン繊維を、スポットで拡大観察し、その結果を定量化し、流動方向に沿った繊維配向変化として整理した点に特長がある。しかし、光透過方式を矩形キャビティに適用した場合、1方向からの観察であるために繊維流動位置等のキャビティ厚さ方向の情報を得ることができないという新たな問題点が生じている。円筒・円錐形状流路を対象としたLeeらの観察では、2方向からの撮影が可能であったのに対して、これらの場合は、装置の構造上、薄いキャビティ厚さ方向を含めた2方向からの同時観察が困難であることが原因となっている。

3.2.2 光切断法

横井らは、2.2.4節で述べたレーザーライトシート可視化金型により、繊維配向挙動をキャビティ厚さ方向から直接観察した⁶⁴⁾。本手法は、薄いキャビティ厚さ方向から繊維挙動を観察できることを大きな特長としている。一方、画像歪の問題に加えて、高繊維充填率の場合に、光切断面よりカメラ側に存在する繊

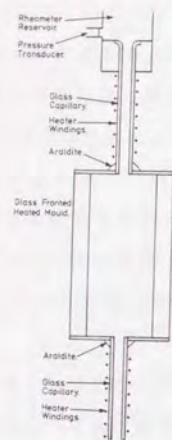


図30 Crowsonらによるキャピラリおよび矩形キャビティ内繊維配向挙動の可視化装置^{9,2)}

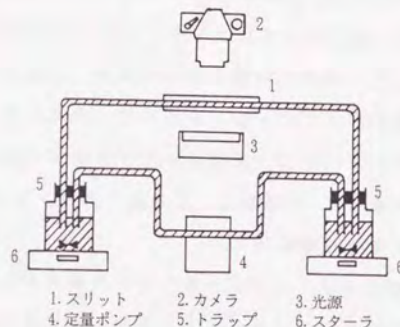


図31 堀川らによるスリット内繊維配向挙動の可視化装置^{9,3)}

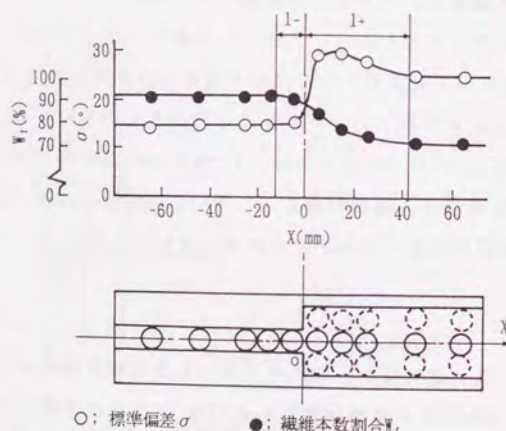


図32 堀川らの可視化シミュレーション装置によって得られたスリット内繊維配向挙動 (スリット幅: $D=5 \rightarrow 30\text{mm}$, スリット厚み: 0.5mm , 射出率: $0.5\text{cm}^3/\text{s}$)^{9,3)}

維の干渉により光切断面が観察できないことが問題となっている。

4. 樹脂圧力・温度の計測法

4.1 樹脂圧力計測法

射出成形において樹脂圧力を計測することは、成形過程での樹脂の状態変化を知るために重要と考えられてきた。樹脂圧力計測は、樹脂挙動・温度計測技術に比べて汎用技術としての確立が早い。そのため、ひずみゲージ式圧力センサから、水晶圧電式圧力センサのように200MPaまでの高圧条件下で計測可能なセンサが、研究開発用および生産現場での成形過程モニタ用として既に実用化されている。本節では、従来から用いられてきた樹脂圧力計測の概要とその問題点について述べる。

4.1.1 水晶圧電式・ひずみゲージ式圧力センサ

加熱シリンダ内および型内樹脂圧力の計測に最も広く利用されているのが、ピエゾ効果を利用した水晶圧電式圧力センサである^{9,5)}。本センサには、図33に示すようにエジェクタピン等の下に挿入する間接測定タイプと、キャビティ内に設置する直接測定タイプの2種類がある。間接測定タイプは、金型への装着が容易で、1つのセンサで多数の金型に適用できる等の特長を有している。しかし、エジェクタピンへの付着物により発生する摩擦摺動抵抗、ピンの座屈等による変形に起因する測定誤差等の問題を抱えている。一方、直接測定タイプは挿入箇所には制約を受け、またキャビティ面との合わせ加工が必要となるが、間接測定タイプのような誤差因子がなく、これにより、高精度、高応答性の計測を行うことが可能である。

水晶圧電式の代わりにひずみゲージを用いたセンサも市販されている^{9,6)}。ひずみゲージ式は、水晶圧電式圧力センサよりも安価であることを特長としている。しかし、水晶圧電式に比べて測定感度が数10倍から100倍低く、かつ耐熱性、センサ寿命の面で劣っている。

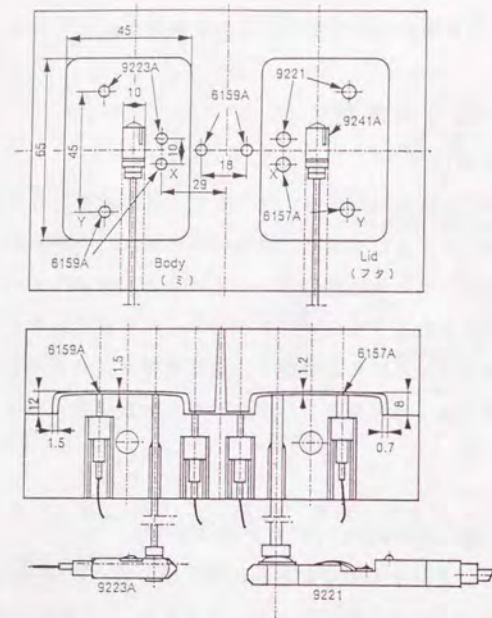


図33 金型内への水晶圧電式圧力センサの装着方法^{8,9)}

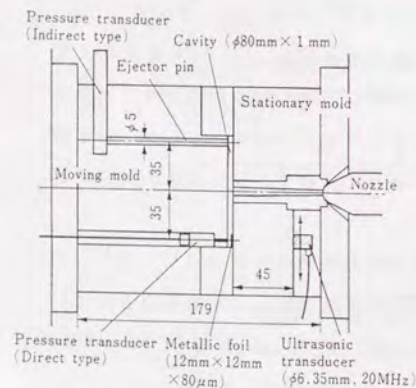


図34 西脇らによる超音波圧力計測法^{8,7)}

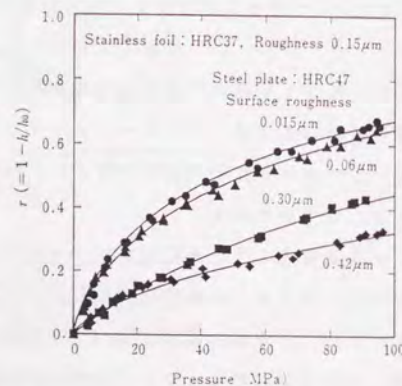


図35 反射波高比と圧力の関係^{8,7)}

4.1.2 超音波圧力計測法

西脇らは、超音波送受信子を利用して樹脂圧力を計測する方法を開発した^{8,7)}。図34に示すようにステンレス箔が貼り付けられたキャビティ壁面に金型の外部より超音波を投射する。樹脂がステンレス箔上を通過すると、キャビティ壁面と箔との密着度が変化し、単位面積当たりの超音波の反射波高比が変化する。この反射波高比と圧力との間には、図35に示すような校正関係が存在し、これらから圧力を導出する。本手法は、キャビティ壁面に加工を施す必要がなく、超音波送受信子を金型外部から計測したい部分に自由に設置できることを特長としている。しかし、(1)キャビティ表面にステンレス箔を貼付するために、キャビティ壁面状況を阻害する(熱伝導率、表面性状等が変わる)こと、(2)高価であること等の問題を有している。

4.2 樹脂温度計測法

樹脂は、温度によって固相から液相あるいは液相から固相へとその状態を変え、また液相においてもその粘度を著しく変化させる。フローマーク、ひけ、そり、複屈折等の成形不良現象は、樹脂温度と密接に関係しているものと推察され、そのため、樹脂温度を、樹脂流動挙動および圧力と併せて、正確に計測することが成形現象の解明に対して必要不可欠であると考えられてきた。本節では、樹脂温度計測技術に焦点を絞り、成形過程のモニタ用から研究用に至るまでのこれまでに開発されてきた樹脂温度計測手法の概要とその問題点について述べる。

4.2.1 赤外線放射温度計測法

赤外線放射温度計測法^{8,6)}は、物体から発生する赤外線放射エネルギーが、その物体温度に依存するというステファンボルツマンの法則に基づいて、熔融樹脂の発する赤外線放射エネルギーをキャビティ壁面に設置されたサファイヤプローブを介して検出し、温度に変換するものである。本計測手法は、現在、金型内およびスクリュ溝内、ノズル流路内樹脂温度のスポット計測に用いられている(図36)。図37は、ポリカーボネートのノズル流路内での温度計測例である^{8,6)}。

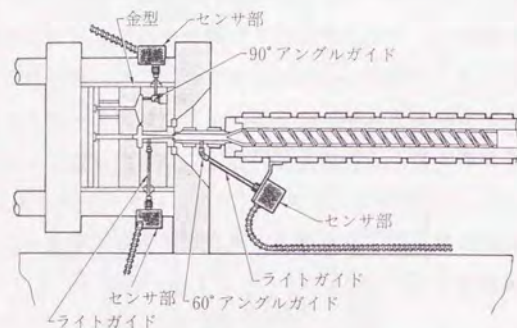


図36 赤外線放射温度計の装着例^{6,8)}

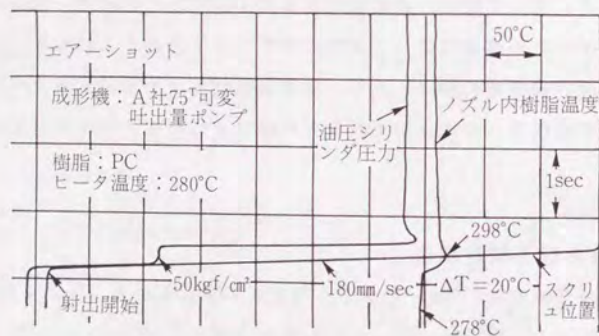


図37 赤外線放射温度計測によるノズル内樹脂温度変化計測例(ポリカーボネート)^{6,8)}

射出圧力による断熱圧縮および樹脂の流動による分子間摩擦に起因して、設定温度280℃の樹脂温度がさらに20℃上昇する現象を捉えている。本手法の優れた特長として、(1)応答性が良いこと、(2)伝熱でなく、ふく射による計測であるため、加熱シリンダ壁面等の周辺部から熱の影響を受けないこと、(3)樹脂の流路に測温部を突出させる必要がないので流れを阻害せずに計測できること、(4)耐摩耗性に優れ繰り返し計測が可能であることが挙げられる。しかし、課題として(1)樹脂の種類・充填材の混合によって放射率が変化するため、正確な計測を行うには補正が必要であること、また、(2)平均温度を計測するため、深さ方向の温度分布が計測できないこと、(3)Galskoyらの報告^{6,9)}にあるように、測定深度が樹脂の種類・色・充填材により変化し、流路のどの深さまでの平均温度を検出しているかが不明であること、(4)高価であることが挙げられる。

4.2.2 超音波温度計測法

西脇らは、樹脂温度と樹脂内を通過する超音波の音速との間に相関関係が存在することに着目し、図38に示される原理に基づく、超音波温度計測法を開発した^{7,10)}。媒質1の外側から超音波を投射すると、媒質1、2の境界面Iで一部の超音波が反射して超音波送受信子の方へ戻る。残りの超音波は境界面Iを透過して境界面IIで一部反射し、同送受信子の方へ戻る。戻ってくる超音波の強度は、各境界面における音響インピーダンスの値により変化し、両境界面からの反射波が戻る時間間隔 T_2 は、媒質2の厚さとその音速により変化する。この超音波の反射波形を模式的に示すと図38(b)のようになる。この原理を金型に応用した場合、媒質1、3が金型に、媒質2がキャビティ内の樹脂に相当する。金型内に樹脂が充填されていない場合には、超音波は境界面Iでほとんど反射する。一方、充填された後では樹脂へ透過するため境界面IIからの反射波が現れ、逆に境界面Iからの反射波の幅は減少する。さらに充填された樹脂が固化するとヤング率が変化し、音速が変わるため、 T_2 が変化する。このように T_2 および振幅を測定することによって、金型内樹脂温度や充填・固化状態を検出することができる^{7,11)}。上下方向から樹脂を挟み温度調節のできる簡易型を用いた実験結果、および樹脂の固化状態におけるヤング率、ポアソン比、密度の計測結果より、

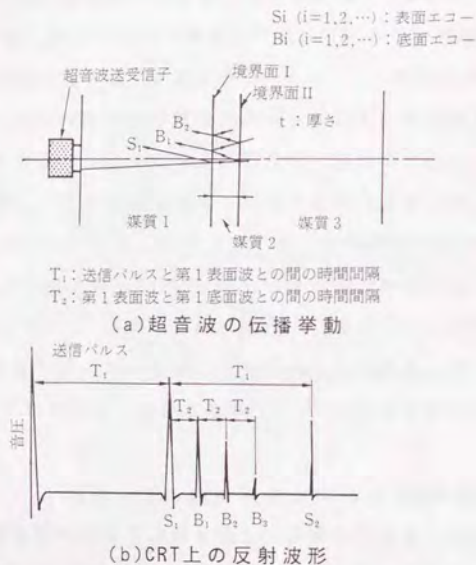


図38 西脇らによる超音波温度計測法の原理⁷¹⁾

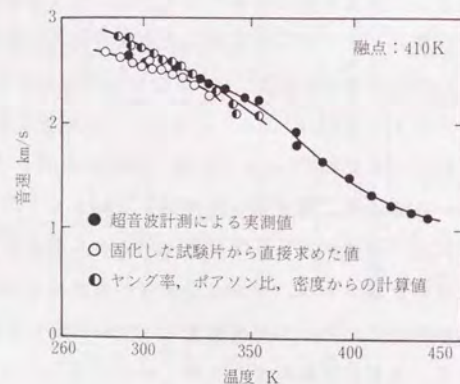


図39 音速と温度の関係 (高密度ポリエチレン)⁷²⁾

図39に示す音速と温度の校正関係が得られている⁷²⁾。図40は、高密度ポリエチレンを矩形キャビティに射出して得られた温度変化である⁷¹⁾。熱電対の出力を併記しているが、熱電対とほぼ同等の出力および応答性が得られている。最近では、本手法は、ノズル、スクリュ溝内における樹脂温度計測にも適用されている⁷³⁾。同手法の特長として、(1)金型の外から計測できるため、キャビティ内や壁面にセンサを露出させる必要がなく、そのため流動を阻害しないこと、(2)センサ埋め込み等の複雑な加工を必要としないことが挙げられる。しかし課題として、(1)樹脂が変わると音響インピーダンスが変化するため、その都度音速と温度の校正関係を調査する必要があること、(2)キャビティ厚さ方向温度分布の計測が困難であること、(3)高価であることが挙げられる。

4.2.3 蛍光法

蛍光物質の蛍光時間および蛍光強度は、温度に依存することが一般的に知られている⁷⁴⁾。黒崎らは、この現象に着目し、蛍光物質(ZnCd)S:AGが添加された樹脂を、2.2.1節で述べた光透過方式の可視化金型内に射出し、ストロボ光を照射して蛍光時間を計測することにより、温度分布を求めた⁷⁵⁾。本手法は、型内樹脂温度分布を非接触で、かつ面情報として捉えることができる点で今後が期待されるが、カメラ・発光装置に精度が要求され、またキャビティ厚さ方向温度分布計測には技術課題を残している。

4.2.4 素線熱電対による温度計測法

最も一般的な温度計測法でかつ、キャビティ厚さ方向の温度分布計測を可能とする方法として、素線熱電対を用いた計測が、古くから行われている。Thienelらは、数値シミュレーション結果の検証のために、矩形キャビティ内に1対の素線熱電対を樹脂流動方向に沿って流し、図41に示す結果を得ている⁷⁶⁾。黒丸印が計測された温度で、キャビティ壁面近傍でのせん断発熱による温度ピークを捉えている。また最近では、黒崎らが、数値シミュレーション結果の検証および樹脂固化過程の解析を目的として、 $\phi 0.1\text{mm}$ の銅-コンスタンタン熱電対を3本貼り付けたアクリル板をキャビティ内に垂直に設置し、キャビティ厚さ

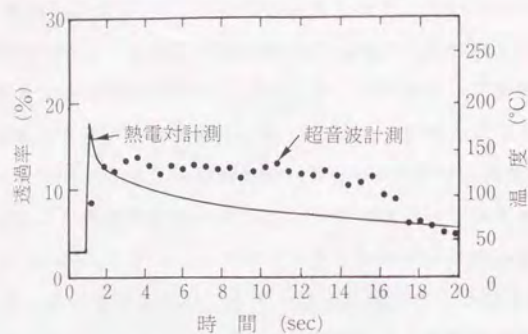


図40 超音波計測法によって得られたキャビティ内樹脂温度変化(高密度ポリエチレン)^{7,11)}

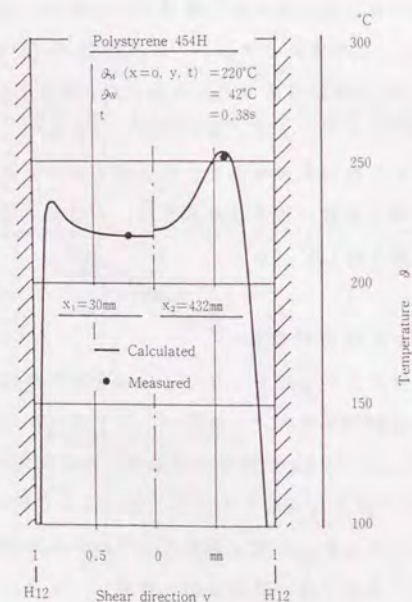


図41 素線熱電対によるキャビティ内温度分布計測例^{7,9)}

方向温度分布の計測を行っている^{3,11)}。本手法は、原理が単純で簡単に計測ができ、特に素線のみを用いる場合は、熱容量を極力小さくできるため、高応答性を引き出せる。しかし、(1)キャビティ厚さ方向の詳細な温度分布を計測するには、多数の熱電対を狭いキャビティ内で樹脂の流れに対し精度良く設置する必要がある。また、(2)カップリング部の集積度およびその位置決め精度に限界があること、さらに、(3)素線強度が低く、繰り返し計測ができないこと等の問題を残している。

5. 確立が求められる実験解析法

第2節から第4節では、従来の型内樹脂流動挙動および型内繊維配向挙動の実験解析法、樹脂温度・圧力の計測法の概要および解析事例、それらの問題点について述べてきた。本節では、これらの実験解析法の問題点を整理し、その結果に基づき、今後、型内成形現象の解明および成形理論の体系化のために確立が求められる実験解析法を明確にする。

5.1 型内樹脂流動挙動

静的可視化法は、動的可視化法に比べて高精度の内部流動情報が得られるために、せん断流、伸長流等のキャビティ内における基本的な樹脂流動挙動の把握に役立てられてきた。しかし、静的可視化法では、着色材埋込法、着色材積層法に代表されるように着色材埋設等の細かな材料調整が必要となる。これら材料調整は、2シリンダ法を除いて加熱シリンダ内で行うことができないために、キャピラリレオメータ等を用いたシミュレーション実験の形態を取らざるを得なかった。シミュレーション実験では、実際の成形運転下で起こる現象を正確に再現できているかどうかという疑問が常に存在し、その検証手段がないのが実状である。また、ゲート着磁法のような実成形運転下で使用可能な観察方法もあるが、しかし、これを成形不良現象の解析に適用した場合、現象が発生する瞬間の状況をリアルタイムで直接捉えられないという問題が生じる。ウェルドラインおよびフローマーク、シルバーストリーク等の成形不良は、その発生様子をリアルタイムで直接観察しないことには解明が困難であると考えられ

る。ショートショット法を併用して、不良が発生する過程を段階的に区切って観察する方法が採られてきたが、前述したようにショートショット法では、取り出された成形品が流動中の樹脂の状態をそのままとどめているかどうかを実証されていないという問題が残っている。これは、ゲート着磁法のみに限らず、ショートショット法と組み合わせて用いられることの多い他の静的可視化法についても同様に言えることである。従来の静的可視化法の問題点は、ここにあるものと分析できる。

一方、動的可視化法では、“フォトモールド”や、Hanらの可視化金型に代表されるように、実際の射出成形機に取り付けた状態でリアルタイム観察できることを前提としたものが数件存在した。しかし、約50年も前から、このような可視化金型が開発されていたにもかかわらず、型内成形現象の系統的、定量的な解明がほとんどなされてこなかったのは、実に不思議と言える。これは、(1)ガラス等の透明材料の低い耐圧強度への配慮から、可視化金型が低射出率、低射出圧力の成形条件下でしか使用できなかったこと、(2)キャビティが小さい、および各種キャビティ形状への変更が容易にできない等の理由により実際の成形現場で発生する多様な型内成形現象の解析まで完全に対応することができなかったこと、(3)ガラス等の透明材料と金属材料の物性（熱伝導率、比熱、ぬれ性等）の差異が樹脂挙動に及ぼす影響がこれまで明確にされてこなかったために、定量的な解析にまで踏み込めず、現象の定性的な解釈にとどまっていたことの、以上3点が原因となっているものと考えられる。

横井らの“ガラスインサート金型”では、金型基本構造がほぼ確立され、上記(1)の問題はほぼ解消されたと言える。しかし、プロトタイプを作った段階にとどまっており、残された(2)、(3)の問題が解決されていないために、これらの特長を十分に活かして各種型内成形現象の定量的解明に適用されていない。また、十分に使い込まれていなかったために、その実用性が確認されていないのが実状である。従来の動的可視化法の問題点は、ここにあるものと分析できる。

以上より、型内樹脂流動挙動の実験解析法に求められるものは、以下の3点に集約されるものと考えられる。

☆射出成形機の高性能化（高射出率化、高射出圧力化）、および成形品形状の複雑化に対応できるような、耐久性と汎用性を同時に備えた可視化金型を提案する。

☆ガラスと金属材料の物性値の差異が樹脂流動挙動に及ぼす影響を把握することで、可視化金型の適用限界を明確にする。

☆可視化金型を各種型内成形現象解析に適用することで、その実用性を実証する。

5.2 型内繊維配向挙動

静的解析法において繊維配向メカニズムの推察に用いられる理論は、単純流動場で、かつ低繊維充填率の場合においてのみ適用できるものであった。したがって、キャビティ形状の複雑化により流動場が複雑になった場合や、通常の成形条件のような繊維充填率が高く繊維間相互干渉作用の影響がある場合には、その理論の適用が極めて困難となっていた。その結果、繊維配向メカニズムの推察にも限界が生じていた。

繊維配向を惹起させるのは、キャビティ内において繊維をとりまく樹脂の3次元流動速度分布である。そのため、繊維回転挙動とともに、樹脂流動速度分布と等価であると考えられる繊維速度分布をリアルタイムで同時観測することが繊維配向メカニズム解明のために最も重要と考えられてきた。動的解析法は、まさにこれを可能とするために検討されてきたものである。しかし、従来の動的可視化法は、(1)ガラスの低い強度への配慮から実成形条件とは異なる極めて低射出率の条件でしか使用できないこと、(2)撮影技術の制約のために、ガラス繊維と物性（剛性、比重等）および寸法を異にするトレーサ繊維を使用していることの2つの理由から、これら実験はすべて実成形条件からかけ離れたシミュレーション実験であった。そのため、前節の型内樹脂流動挙動の実験解析法と同様に、これらシミュレーション実験が実際の成形運転下において金型内で起こっている繊維配向過程をありのまま再現できているのかどうかという疑問が

常に存在していた。また、それに加えて(3)繊維充填率が高くなると、樹脂とガラス繊維との屈折率差によりトレーサ繊維が観察できなくなること、(4)ガラスキャビティ面が繊維配向挙動に及ぼす影響が明らかにされていないこと、(5)光透過方式を矩形キャビティに適用した場合に、キャビティ厚さ方向からの観察が困難となり、その結果、繊維配向挙動を3次元の樹脂(繊維)流動速度分布と関連づけて考察できないこと等も問題となっていた。

以上より、型内繊維配向挙動の実験解析に求められるものは、以下の点に集約される。

☆実際の成形運転下で、ガラス繊維と同じ、あるいは近い物性、形状・寸法を有するトレーサ繊維を用いて、型内ガラス繊維配向挙動を3次元の樹脂(繊維)流動速度分布と関連づけて解析できる手法を確立する。

5.3 樹脂圧力・温度計測

水晶圧電式圧力センサに代表される樹脂圧力計測技術は、すでに確立された汎用技術として、生産現場において成形品の品質管理等に広く利用されている。しかし、これらは、センサ構造およびコストの制約から、ランナー・キャビティ内2~3ヶ所に設置して行うスポット計測法であった。現在では、成形品の転写不良、およびひけ、残留応力等のキャビティ内での樹脂圧力分布の不均一によって惹起される各種不良現象が問題視され、また低圧射出成形法、ガスアシスト射出成形法等のキャビティ内樹脂の圧力分布を能動的に制御し、高品質の製品を得ようとする新成形法の実用化が盛んになってきた。上記成形不良現象および新成形法の成形過程は、点における計測では情報があまりにも少ないために把握が困難で、面情報として捉える以外に解明する方法がないものと考えられる。水晶圧電式圧力センサ等のスポット計測法を用いて面情報を得るためには、センサ設置箇所をその都度変更しながら計測する等の極めて煩雑な作業が必要となる。また、同時計測でないために再現性の問題も生じる。

以上より、今後の樹脂圧力計測技術に求められるものは、以下に集約される。

☆流動から冷却過程における樹脂圧力を、点ではなくキャビティ内全域での面分布(キャビティ面圧分布)として詳細に同時計測できる方法を確立する。

従来の樹脂温度計測センサは、接触式温度計測センサと非接触式温度計測センサの2通りに分類することができる。接触式温度計測センサには熱電対が、一方、非接触式温度計測センサには、赤外線放射温度計測法、超音波温度計測法が該当する。樹脂は熱伝導率が低い断熱材である。そのため、型内流動過程では、スキン層を形成するキャビティ壁面近傍からコア層を形成するキャビティ厚さ中央部にかけてのわずか数mmの狭い範囲内に200℃以上もの温度勾配が生じている。このように樹脂温度は、常に急峻な3次元分布を有しており、この温度分布がフローマークおよびひけ、そり等の各種不良現象を惹起する。非接触式温度計測センサは、4.2節で述べたように平均温度を計測するものである。したがって、非接触式温度計測センサだけでは、成形現象の詳細な解析が困難と言え、熱電対を中心とした接触式温度計測センサに依存せざるを得ない。接触式温度計測センサは、比較的簡単な計測原理に基づいているため、計測値から温度への変換過程が明解であるという利点を有している。しかし、その一方で接触式なるが故の熱伝導誤差、粘性摩擦による発熱誤差等の誤差要因排除の困難さと、温度分布計測では、熱電対の高い集積度と位置決め精度を達成するための煩雑な作業の必要性を伴っている。

以上より、今後の樹脂温度計測技術に求められるものは、以下に集約される。

☆熱電対の誤差要因を排除し、かつ高集積度、高位置決め精度でキャビティ厚さ方向における急峻な樹脂温度分布を計測できる方法を確立する。

6. 本研究の目的と論文構成

本研究では、型内成形現象の系統的、定量的な解明、および成形理論の体系化を達成するために重要な第一ステップとなる、これまでにない高いレベルの新しい実験解析法を提案し、そして本手法を各種成形現象の解析に適用することでその有効性の実証を行い、実験解析手法としての確立を図ることを目的としている。具体的な検討項目を以下に示す。

- [Ⅰ] 耐圧性と汎用性を有した可視化金型を試作し、その適用限界を把握した上で、本金型を各種型内成形現象の解析に適用することでその実用性を実証する。
- [Ⅱ] 実際の成形運転下で、型内ガラス繊維配向挙動を3次元の樹脂（繊維）流動速度分布と関連づけて解析できる手法を確立し、本手法をガラス繊維配向層形成メカニズムの解明に適用することでその有効性を実証する。
- [Ⅲ] キャビティ内の複雑な樹脂圧力・温度分布を詳細に計測できる手法を確立し、実際の成形運転下での計測実験を通じて、それぞれの手法の有効性を実証する。

[Ⅰ]～[Ⅲ]の各項目における詳細な検討事項を、以下に列記する。

[Ⅰ] について

- (1) 横井らが開発した光反射方式のガラスインサート金型を改良し、実成形条件下で発生する各種成形現象の可視化に適用できる広域のガラスキャビティ面と、各種キャビティ形状における観察に対応できる入れ子構造を有する実用的な汎用ガラスインサート金型を提案・試作する。そして、これまでの動的可視化法で検討が行われてこなかったガラスキャビティ面が樹脂流動挙動に及ぼす影響の評価を行い、本金型の適用範囲を明らかにする。

- (2) 汎用ガラスインサート金型を用いて、ショートショット時のフローフロント挙動を可視化解析することにより、従来の静的可視化法の代表的存在であるショートショット法の適用限界を明らかにするとともに、本金型を用いた動的可視化の有効性を実証する。
- (3) 汎用ガラスインサート金型を用いて、多数個取り成形において問題となっている成形品重量バラツキと密接に関係するランナー内樹脂流動挙動を明らかにすることで、上記金型の実用性を実証する。
- (4) 汎用ガラスインサート金型を用いて、成形不良現象の中でこれまで最も解明が求められていたウェルドライン生成メカニズムを解明することで、上記金型の実用性を実証する。

[Ⅱ] について

- (1) 光反射方式の汎用ガラスインサート金型を光透過方式に改良したバックライト金型方式を提案・試作し、従来法では達成することができなかった実際の成形運転下でのキャビティ厚さ方向のガラス繊維配向層形成過程を繊維流動速度分布と併せて直接観察する。
- (2) 繊維追跡撮影装置を提案・試作し、バックライト方式金型と併用することにより、上記(1)で得られたガラス繊維配向層の形成メカニズムを実証的に明らかにするとともに、本手法の有効性を確認する。

[Ⅲ] について

- (1) キャビティ内全域における樹脂圧力分布を詳細に計測するために、圧力伝達ピンアレイと圧力分布計測用触覚センサから構成される新しい計測金型を提案・試作し、流動から冷却過程に至る全成形過程の計測実験を通してその有効性を実証する。
- (2) 樹脂温度分布を計測するために、めっきにより多数の熱電対パターンをポリイミドフィルム上に集積形成した集積熱電対センサを新たに提案・試作し、キャビティ厚さ方向における樹脂温度分布の計測実験を通してその有効性を実証する。

(3) 集積熱電対センサの汎用性を確認するために、本センサを型内成形現象の基本となるノズル流路内樹脂温度分布計測に応用し、スクリュ形状および可塑化条件を変化させた場合のノズル内流路内樹脂温度分布変動を明らかにする。

本論文は、序論と結論を除いて3部、合計9章より構成されている。第I部から第III部は、上記〔I〕から〔III〕についてそれぞれ取り扱っている。

第I部では、まず第1章において汎用ガラスインサート金型の試作、およびガラスキャビティ面の流動特性評価を行う。つぎに、第2章では、本金型を用いて、静的可視化法の代表格であるショートショット法の解析精度検証を行い、本金型による動的可視化の有効性を実証する。さらに、第3章、第4章では、ランナー内樹脂流動挙動、およびウェルドライン生成メカニズムの解析に本金型を適用し、本金型の実用性を実証する。

第II部では、型内ガラス繊維配向挙動の定量解析を行うために、まず第5章においてバックライト金型方式による新しい繊維配向挙動観察手法を確立する。そして、第6章では上記手法と新たに試作した繊維追跡撮影装置を用いて、ガラス繊維配向層形成メカニズムの実証的な解明を行い、本手法の有効性を確認する。

第III部では、まず第7章において、キャビティ面圧分布計測手法を確立し、実際の成形運転下における計測実験を通じて本手法の有効性を実証する。つぎに、第8章では集積熱電対センサの試作を行い、キャビティ厚さ方向の樹脂温度分布計測実験を通じて本センサの有効性を実証する。さらに、第9章では集積熱電対センサの汎用性を確認するために、本センサをノズル流路内の樹脂温度分布計測に応用し、型内成形現象の基本となる上記温度分布状況を明らかにする。

総括では、まず各章で得られた結論の整理を行う。つぎに本研究で確立した各種実験解析法の総合評価を行う。さらに各種実験解析法を用いて得られた解析結果の活用法について述べ、最後に各種実験解析法の今後の展望について述べる。

－ 第 I 部 －

型内樹脂流動挙動の実験解析

第1章 汎用ガラスインサート金型の試作および ガラスキャビティ面の流動特性評価

1.1 緒 言

序論では、これまでに型内樹脂流動挙動の動的可視化法が盛んに提案されてきたにもかかわらず、成形プロセスおよび成形不良現象の系統的、定量的な解明がほとんど進んでいないと述べた。また、その原因が、(1)射出成形機の高性能化および成形品形状の複雑化に対応できるような、耐久性と汎用性を同時に備えた可視化金型が存在しなかったこと、(2)ガラスと金属材料の物性差が樹脂流動挙動に及ぼす影響が明らかにされてこなかったために、可視化金型の適用限界が把握できなかったことにありと分析した。

本章では、上記(1)を解決するために新たに試作した汎用ガラスインサート金型と、本金型に基づく上記(2)の評価実験について述べる。具体的には、まず、横井らが1987年に開発したガラスインサート金型^{39), 77)}をベースとしてさらに改良を加えた、実成形条件下で発生する各種成形現象の可視化に適用できる広域のガラスキャビティ面と、各種キャビティ形状における観察に対応できるキャビティ入れ子構造を有する汎用ガラスインサート金型の提案・試作を行う。そしてつぎに、新たに試作した汎用ガラスインサート金型を用いて、キャビティ壁面の一部を金属からガラスに置き換えたことによる影響、すなわち両者の熱伝導率、比熱等の差異が引き起こす樹脂流動挙動への影響について検討を行う。

1.2 汎用ガラスインサート金型および画像計測システム

1.2.1 汎用ガラスインサート金型の観察原理

汎用ガラスインサート金型は、従来のガラスインサート金型の観察原理をそのまま利用している。図1.1は、型内樹脂流動挙動の観察原理を示している。通常の型構造と射出成形機の中で樹脂流動の観察を行うためには、パーティング面と平行な面からキャビティ内の画像を取り出すことが要求される。本金型で

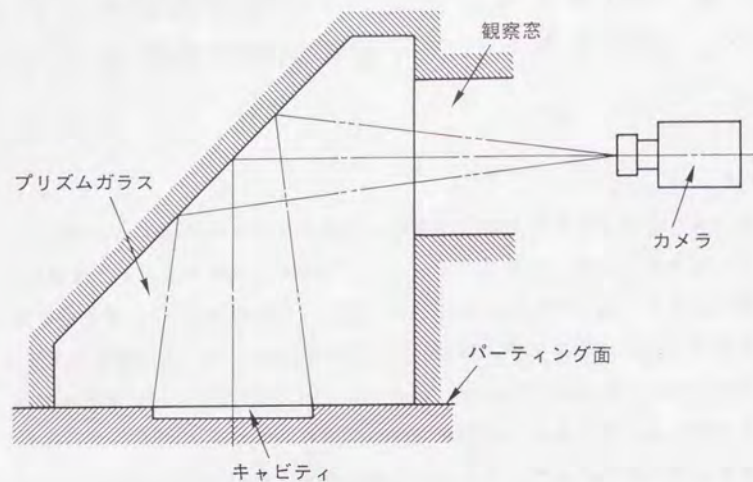


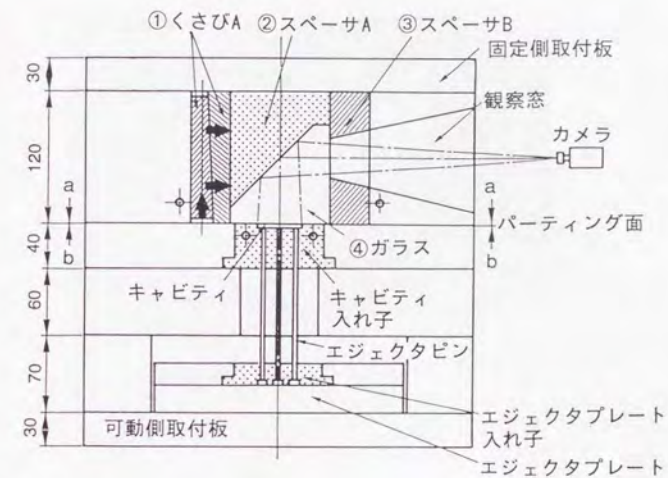
図1.1 型内樹脂流動挙動の観察方法

は、一角をプリズムカットしたガラスの一面をキャビティ面に、これと直交する他の一面を観察窓に接するようにモールドベース内に組み込まれた構造となっている。これによりランナーからゲート、キャビティへと充填される樹脂の流れを、プリズムカット面の全反射を介してパーティティング面から観察することができる。

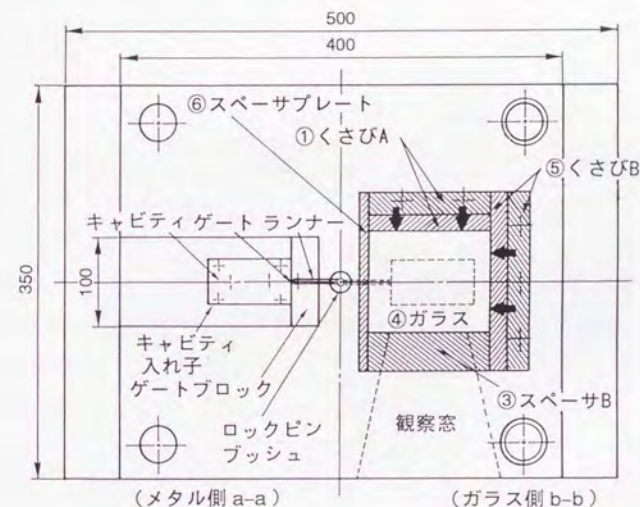
1.2.2 汎用ガラスインサート金型の基本構造

a. 金型固定側

図1.2は、本研究で新たに試作した汎用ガラスインサート金型の基本構造を示している。また、図1.3は、本金型固定側の外観を示している。従来のガラスインサート金型は、ガラスキャビティ面の寸法が80mm×65mmと小さく、そのため、使用可能なキャビティの範囲も最大65mm×25mmと制約されていた。そこで本金型では、モールドベース本体およびガラスブロック、キャビティ、観察窓を大



(a)金型側面



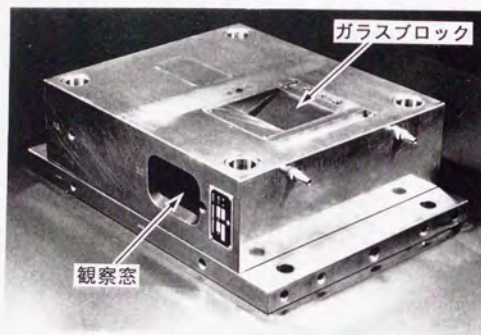
(メタル側 a-a)

(ガラス側 b-b)

単位: mm

(b)パーティティング面

図1.2 汎用ガラスインサート金型の基本構造



モールドベース寸法：400×350×350(mm)

図1.3 汎用ガラスインサート金型固定側の外観

幅に拡大して可視化範囲（ガラスキャビティ面の大きさ）を110mm×90mmとした。その結果、使用可能なキャビティの範囲が最大85mm×40mmとなり、面積比較で従来のガラスインサート金型の2倍以上とした点を大きな特長としている。

図1.4、図1.5にプリズムガラスの形状・寸法、および外観をそれぞれ示す。本ガラスでは、キャビティおよび観察窓に接する面、テーパ面の以上3面がそれぞれ鏡面仕上げ（ $R_y=0.03\mu\text{m}$ ）されている。プリズム用ガラスは、表1.1の諸特性を有する透明石英ガラス（東芝セラミックス㈱：T-1030）を使用した。プリズムガラス④（図1.2参照）の組み込み方法は、従来のガラスインサート金型と同様の方式を採用し、ガラスの低い加工精度と周辺金属材との線膨張係数の違いによるガラスの抜けに対処できるように、くさびA、BとスペーサBにより周りに固定する方式とした。この構造により、表1.1に示すような圧縮強度に比べて引張強度の低い石英ガラスを圧縮応力状態へと導き、樹脂充填時の急激な不均一加圧等による割れを抑止できる。本金型では、実際の成形実験を通じて、従来のガラスインサート金型と同じ50MPa以上の耐圧強度（ランナー内測定値）を確認している。

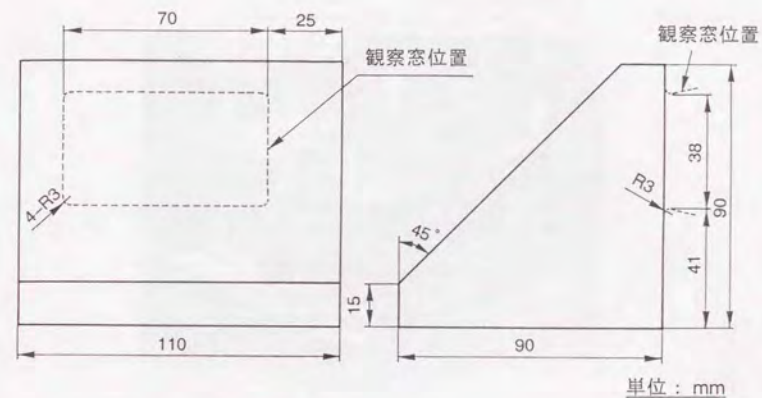


図1.4 プリズムガラスの形状・寸法

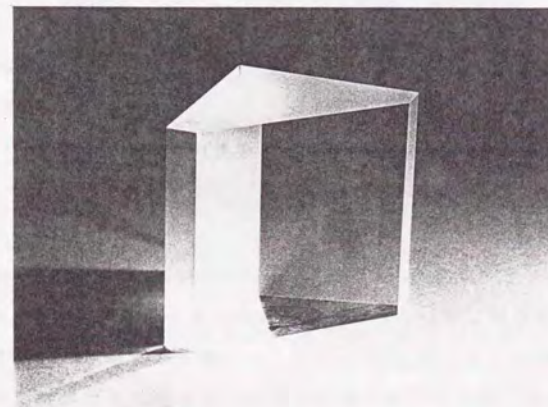


図1.5 プリズムガラスの外観

表1.1 石英ガラスの材料特性^{7,8)}

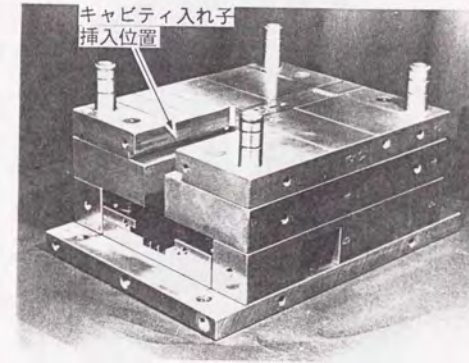
ヤ ン グ 率		72GPa
ポ ア ソ ン 比		0.17
曲 げ 強 さ	横 断	125MPa
	ね じ り	46MPa
引 張 強 度**		48MPa
圧 縮 強 度***		1130MPa

- 室温におけるカタログ値
- *) 径10mm棒状試料
- **) 径5mm棒状試料
- ***) 径24mm棒状試料

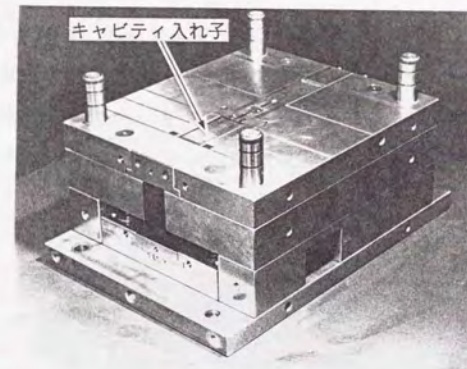
b. 金型可動側

図1.6に汎用ガラスインサート金型可動側の外観を示す。同図(a)は、キャビティ入れ子が挿入される前の状態を、(b)は挿入された後の状態をそれぞれ示している。従来のガラスインサート金型は、キャビティ形状の変更ができない構造であった。本金型では、ゲート、キャビティを入れ子構造とし、しかも、実験の効率化をはかることを目的として、ゲート、キャビティの設けられたキャビティ入れ子が射出成形機上で交換可能となるように金型側面からのスライド挿入機構とした。この構造により、金型全体を射出成形機から取り外して分解、組み立てをするというような煩雑な作業を行わずにゲート・キャビティ形状の変更が可能となる。

図1.7は、エジェクタプレートおよびエジェクタピンが取り付けられたキャビティ入れ子の一例を示している。これが、そのままの状態でも図1.6(a)の溝部に挿入される。本研究では、図1.7のようなキャビティ形状固定の入れ子の他に、図1.8に示すような、ゲート・キャビティ形状、厚みの変更が可能なキャビティ入れ子も同時に製作した。キャビティ末端部には、図1.8に示すような末端部開放用の湯溜まりブロックと、写真には掲げていないが末端部密閉用のブロックをそれぞれ装着することができる。



(a)キャビティ入れ子挿入前



(b)キャビティ入れ子挿入後

図1.6 汎用ガラスインサート金型可動側の外観

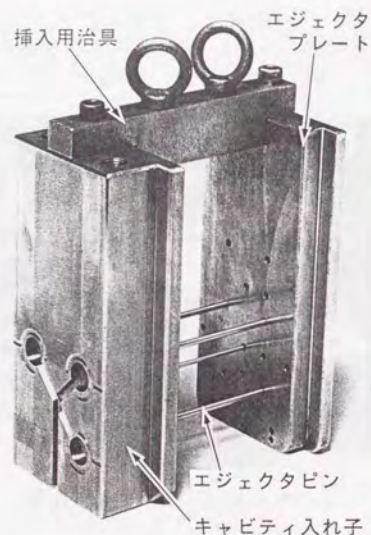


図1.7 キャビティ入れ子挿入前の状態

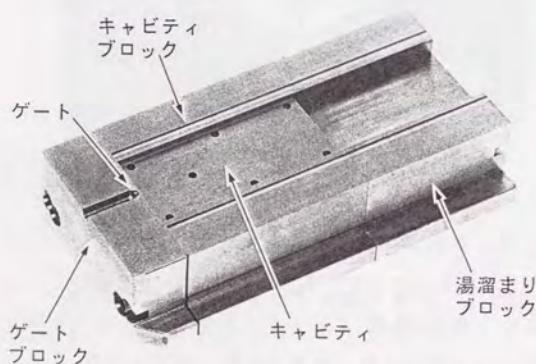


図1.8 ゲート・キャビティ形状可変入れ子の外観

本研究の型内可視化実験で使用したゲートを図1.9に、またキャビティ入れ子を図1.10から図1.12にまとめて示す。図1.11のキャビティ厚さ可変矩形キャビティは、図1.9の3種類のゲートとそれぞれ組み合わせが可能である。一方、図1.12の偏肉キャビティは、偏肉部厚さ等の変更が各種スペーサの組み合わせにより可能であるが、ゲート形状は、サイドゲートで固定となっている。なお、それぞれのゲートとキャビティ寸法については、各章の中で詳しく述べることにする。

本金型では、図1.13に示す水晶圧電式圧力センサ（日本キスラー関：Type 9221）がエジェクタピン下に挿入できる構造となっており、ランナー内1ヶ所、キャビティ内4ヶ所において樹脂圧力計測が可能である。なお、具体的な計測点の位置については、各章の中で詳しく述べることにする。

1.2.3 画像計測システム

a. 撮影方法

型内成形現象を撮影するに際して注意すべき点を、以下に列記する。

- (1)型内成形現象は、数100msオーダの高速現象である。
- (2)樹脂は、加熱シリンダ内の熱履歴によってその流動特性が大きく変化するため、成形サイクル時間を乱さずに連続運転中の現象を捉える必要がある。
- (3)成形条件は、樹脂種類およびキャビティ形状、射出率、樹脂温度、金型温度等のように広範囲に渡っている。

したがって、撮影装置が具備していなければならない点は、以下に集約される。すなわち、(1)を満足するためには、毎秒100コマ以上の録画速度が必要となる。また、(2)、(3)を満足するためには、現象をリアルタイムで連続撮影、同時録画でき、しかも大きい録画容量が必要となる。画像録画方式として、ICメモリ方式とビデオテープ録画方式が現在市販されている。ICメモリ方式では、メモリ容量が小さい（最高340MB）ために、数ショット録画するたびに光磁気ディスク等の媒体に画像データを転送して記録する必要がある。データ転送中は撮影を中断しなければならず、計測実験が極めて煩雑となる。一方、ビデオ

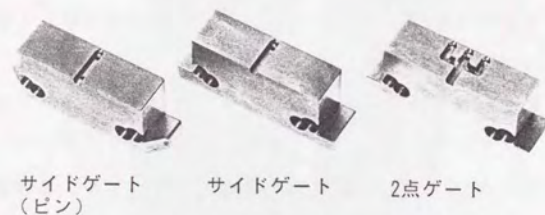


図1.9 各種ゲートブロックの外観

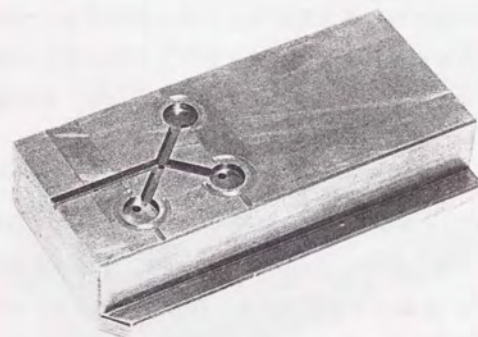
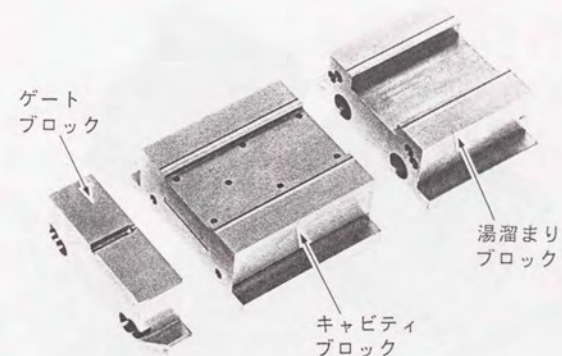
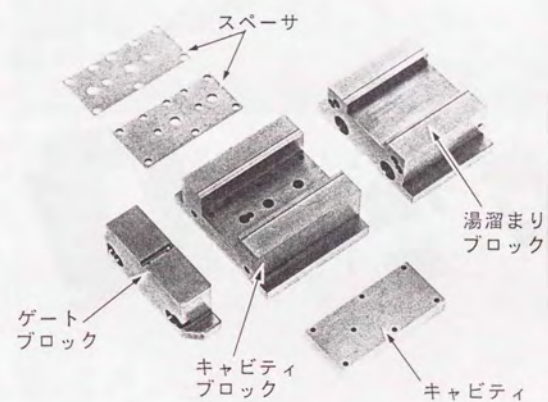


図1.10 ランナー内流動挙動観察用キャビティ入れ子の外観

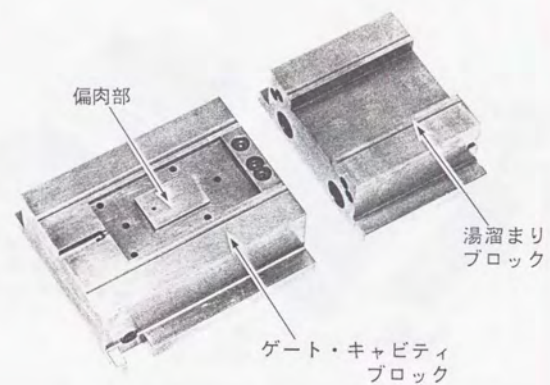


(a)キャビティ厚さ可変入れ子

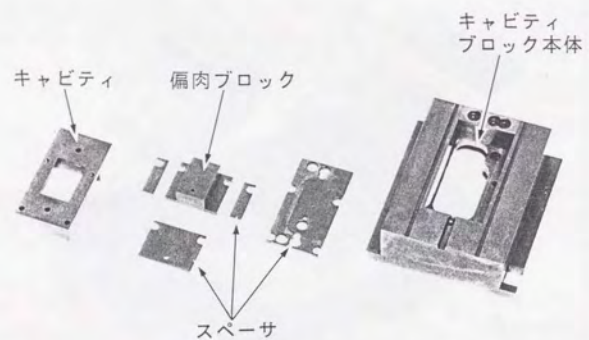


(b)キャビティ厚さ可変入れ子部品

図1.11 キャビティ厚さ可変入れ子の外観



(a) 偏肉部キャビティ入れ子



(b) 偏肉部キャビティ入れ子部品

図1.12 偏肉部流動挙動観察用キャビティ入れ子の外観

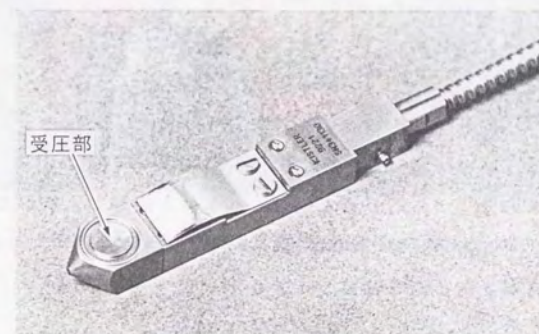


図1.13 水晶圧電式圧力センサの外観
(日本キスラー株) : Type9221)

テープ録画方式では、録画時間が長いために上記問題がなく、(2)、(3)を十分に満足できる。本研究では、上記要求をすべて満足する撮影装置として、ストロボライトと同期した高速ビデオシステム（機ナック：HSV-400）を採用することとした。図1.14に高速ビデオシステムの概要を示す。本高速ビデオシステムは、毎秒200コマ（フルフレーム）または400コマ（ハーフフレーム）の録画速度を有しており、カラー画像でVHSビデオテープに録画するものである。また、本高速ビデオシステムでは、レンズを変更することにより撮影倍率（モニター上）を数倍から80倍まで設定することができる。図1.15に型内樹脂流動挙動の画像観察実験装置の外観を示す。

b. 画像解析方法

撮影された画像は、図1.16に示す画像解析装置（機ナック：ID-8000）を用いて解析処理される。図1.17に画像解析システムの構成を示す。本システムでは、XYコーディネータを介して高速ビデオシステム本体と接続した状態で、パーソナルコンピュータ（日本電気機：PC-9801RX）からの制御信号により録画画像の自動解析処理が可能である点を特長としている。

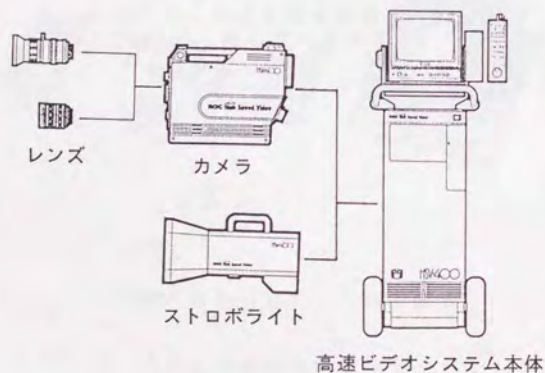


図1.14 高速ビデオシステムの概要
（機ナック：HSV-400）^{7,9)}



図1.15 型内樹脂流動挙動観察装置の外観



図1.16 画像解析システムの外観

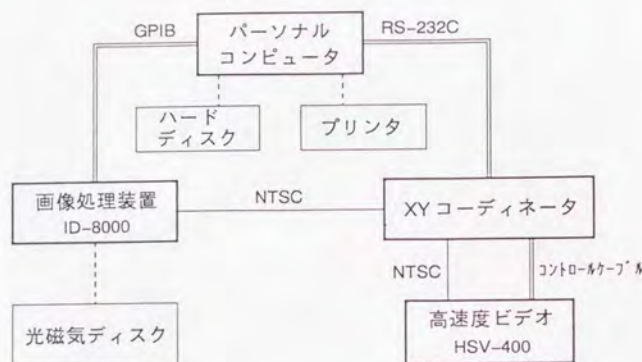


図1.17 画像解析システムの構成

本研究では、この画像解析システムと独自に開発した画像処理プログラムを用いて、以下に示す諸情報の抽出を行った。

- (1)キャビティ内樹脂流動パターン
- (2)フローフロント位置およびフローフロント前進速度
- (3)ガラス繊維配向角およびガラス繊維速度

1.3 ガラスキャビティ面の流動特性評価

1.3.1 ガラスキャビティ面の影響評価方法の検討

金属とガラスの両キャビティ面における流動パターンの等価性の厳密な評価は、両者の動的な流動挙動の比較によって初めて可能となる。しかし、金属面での動的可視化は現状では不可能であるため、流動後の成形品の静的観察によって動的な流動過程を類推する以外に方法はないと考えられる。この方法には、(1)ショートショットサンプルのフローフロント形状比較、(2)フルショットサンプル表面に残留した流動痕跡の比較の2つの方法が挙げられる。

(1)は簡易で実用的な方法ながら、次章にて述べるようにショートショットサンプルのフロント形状は、スクリュ停止後も引き続きフローフロントが相当な

距離に渡って減速前進した結果を表すため、高速流動時の検討も予定される本実験では不適当と判断された。一方、(2)の比較対象としては、ウェルドライン生成パターンが最適であるものと考えられる。これは、ウェルドラインが2つのフローフロントの会合点、すなわち流動パターン変化の特徴点の軌跡をなしており、明確な物理的意味を有することに基づく。ただし、この場合、ウェルドラインを広範囲に生成させられるキャビティ条件の選定が重要な課題となる。

金属とガラスの両キャビティ面上の流動パターンが同じであれば生成ウェルドラインのパターンも同じとなるが、その逆は必ずしも成り立たない。すなわち厳密には、ウェルドラインパターンの一致度を比較評価することで動的流動パターンの等価性を詳細に議論はできないが、複雑多様な複数本のウェルドライン生成系では、それらのウェルドラインを生成し得る流動パターンの可能な形態も一層狭められることとなろう。

以上の検討により、本節では、多様なウェルドライン生成パターンを実現するキャビティ条件下で、金属面とガラス面でのウェルドライン生成パターンを比較することとした。なお、上記に加えて流動に関する時間因子を評価するために、ここではキャビティ内の数箇所に水晶圧電式圧力センサを挿入し、充填の時間経過とともに変化する型内圧力パターンを併せて評価することとした。また本研究では、金属面とガラス面における流動樹脂の温度比較は行わなかった。これは、本キャビティ入れ子では流動樹脂内の温度分布計測が技術的に困難であること、また平均温度を計測できるとされる赤外線放射温度計によっても薄肉キャビティではセンサ対向面温度の影響により樹脂平均温度のみを計測することが難しいためである。

1.3.2 実験方法

a. キャビティ条件

前節に記述した多様なウェルドラインのパターンを生成させるために、ここでは中央部に偏肉部を有する図1.18のキャビティ形状を採用することとした。厚み t_1 が可変の矩形キャビティの中央部に、突出量可変の矩形ブロックが組み込まれ、厚み t_2 を変化させることができる構造とした。 $t_1 > t_2$ であるため、以

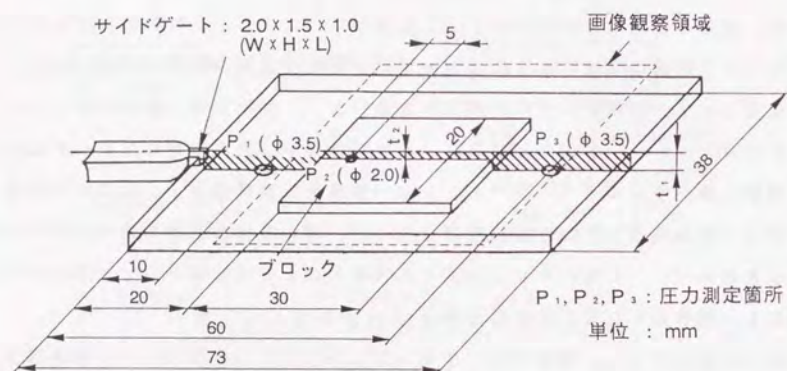


図1.18 キャビティ形状

表1.2 ガラスと金属の熱物性比較^{*)}

材 料	熱 伝 導 率 (W/m・K)	比 熱 (J/K・g)
ガ ラ ス (石英)	1.9	0.89
金 属 (S55C)	48.5	0.52

下では t_1 領域を厚肉部、 t_2 領域を薄肉部と呼ぶことにする。また、金属とガラスの両キャビティ面による影響を比較する目的で、ここでは、図1.2のガラス④とスペーサAの代わりに、必要に応じて、表面性状がガラスの仕上げ面粗さ($R_y=0.03\mu\text{m}$)にできるだけ近くなるように鏡面仕上した金属ブロック($R_y=0.1\mu\text{m}$)を組み替えることとした。すなわち、キャビティ条件を、固定側ガラス面ー可動側金属面、固定側金属面ー可動金属面の2通りの組み合わせに設定して評価を行った。使用したガラス材料は透明石英ガラス、金属キャビティ材料はS55Cとし、各々の熱的性質を表1.2に比較して掲げた。

b. 成形条件

樹脂は、型表面温度の影響を受けやすく成形品よりウェルドライン形状が明瞭に計測できる汎用ポリスチレンGPPS(住友化学工業㈱:エスプライト2V)を使用することとした(粘度等の樹脂物性値および適用成形条件範囲については巻末の付録参照)。表1.3に成形条件を示す。ここでは、可動側、固定側それぞれ2台の金型温調器(㈱松井製作所:MC3-135/31HX)を用いて、金型キャビティの両面温度を独立に制御しその影響調査を行った。ただし、ガラスブロックは、内部に水管等の加工がなされていないなど温度制御性が特に悪く、冷却過程で樹脂からの熱がガラスブロックに蓄積されるために、射出完了直後にガラス表面温度がわずかに上昇する。そこで、射出開始前に3~5分間金型を静置し、熱電対式表面温度計(安立計器㈱:HL-200)を用いてガラス表面温度が表1.3の金型温度条件に戻るのを確認した後、実験を行った。使用した射出成形機は、図1.19に示す東洋機械金属㈱製のTi-80G(型締力80tonf)である。

c. 計測方法

ガラスと金属の両キャビティ面における流動挙動差を評価する上で、適切なキャビティ厚み t_1 、 t_2 、および射出率を選定することが必要となる。この条件設定の適否判断には、汎用ガラスインサート金型によるウェルドライン生成過程の観察結果が有益な情報をもたらす。図1.18の破線で囲まれたキャビティ部分を高速ビデオシステムにより毎秒200コマで拡大撮影することとし、画像解析装置を用いて、樹脂の流動パターンを抽出した。またキャビティ内圧力変動は、

表1.3 成形条件

キャビティ厚さ		射出率 (cm^3/s)	金型温度* ($^{\circ}\text{C}$)	樹脂温度** ($^{\circ}\text{C}$)
t_1 (mm)	t_2 (mm)			
3.0	0.6	5.0	50	220
		30.0	30. 40. 50. 60. 70	
	1.0. 1.6	5.0	50	

*) キャビティ表面実測温度

**) ノズル部設定温度

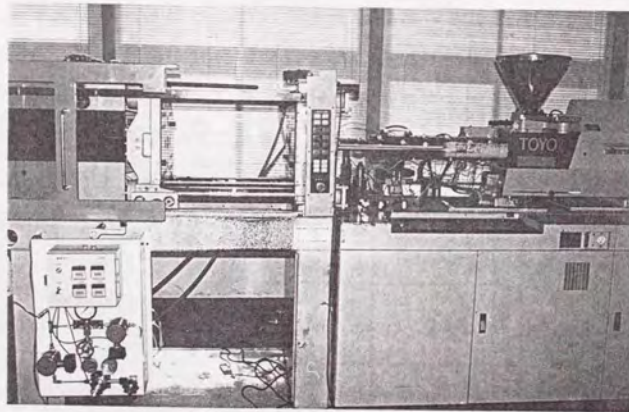


図1.19 実験に使用した射出成形機
(東洋機械金属株: Ti-80G)

図1.18の P_1 、 P_2 、 P_3 のエジェクタピン下に挿入された水晶圧電式圧力センサにより計測を行った。

1.3.3 実験結果および考察

a. 流動挙動差評価条件の検討

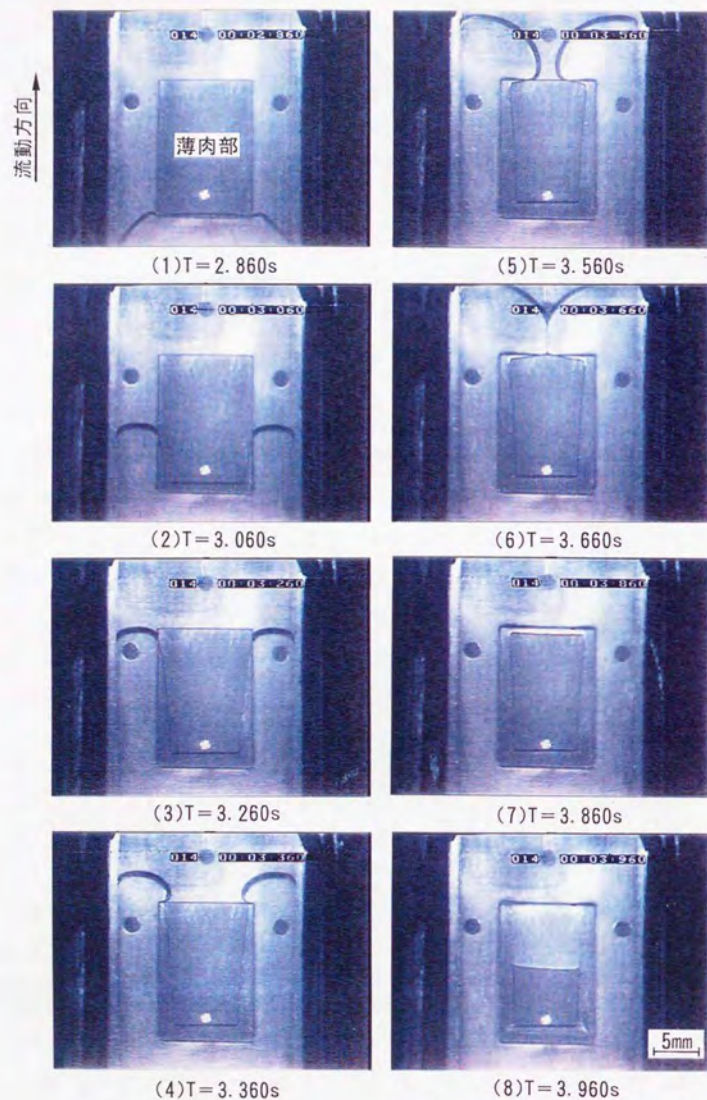
(i) キャビティ偏肉比 t_2/t_1 の影響

図1.20は、 $t_1=3.0\text{mm}$ 、 $t_2=0.6\text{mm}$ のキャビティ条件にて射出率を変化させて得られた型内樹脂流動挙動の観察画像を示している。(a)、(b)の両射出率の場合とも、中央の薄肉部を残して、その周辺の流動抵抗の小さい厚肉部から先に流動が進行する。(a)の $T=3.960\text{s}$ では、薄肉部上において下流側から逆に樹脂が充填される様子(バックフロー現象)が観察される。

図1.21は、樹脂流動挙動観察画像に基づき、画像処理により求められた、 $t_1=3.0\text{mm}$ 一定で t_2 を変化させた場合の流動パターン(実線)である。成形品の表面観察より得られたウェルドライン形状(破線)を重ねて表示した。同図は、流動の対称性を考慮してキャビティ左半分の流動パターンのみを掲げている。 t_2 が小さい(a)においては、薄肉部に比べて厚肉部における流れがかなり先行し、その結果ウェルドラインが薄肉部に生成している。このように、一般に t_2/t_1 が小さい場合ほど、厚肉部と薄肉部におけるフローフロント前進挙動に差が生じ、主として薄肉部に顕著にウェルドラインが発生することが明らかとなった。そこで、本金型のキャビティ厚み可変範囲の中から、最も t_2/t_1 の小さい $t_1=3.0\text{mm}$ 、 $t_2=0.6\text{mm}$ のキャビティを以後の検討に使用することとした。

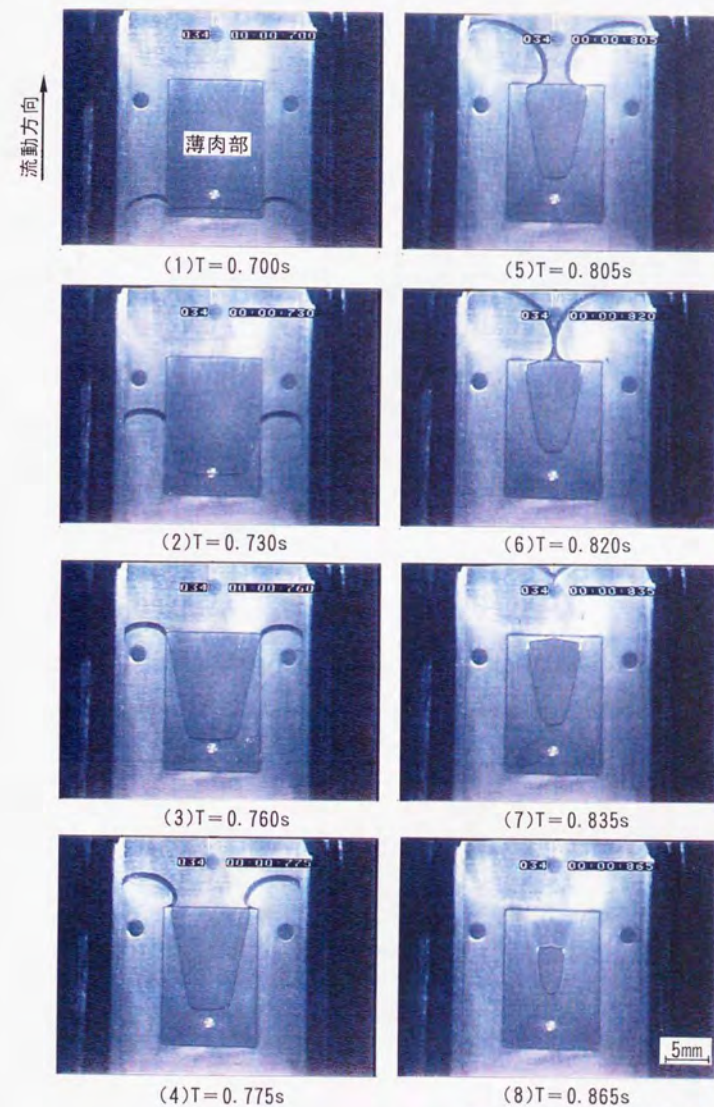
(ii) 射出率の影響

$t_1=3.0\text{mm}$ 、 $t_2=0.6\text{mm}$ のキャビティにおいて射出率を変化させて得られた流動パターンを、図1.22に示す(図1.20の結果に対応)。射出率 $5\text{cm}^3/\text{s}$ の場合は、図1.20(a)にも示されたように厚肉部の流動が相対的に大幅に先行し、一方で薄肉部においてフローフロント前進速度が急減する。そしてG-H-I-Jで流動はほとんど停止する。その後キャビティ先端に樹脂が完全充填されて初めて、G-Hの領域からG-H-I-Jで囲まれる未充填空間に樹脂が流入する。その結果、成形品の薄



T: 射出開始からの経過時間

図1.20(a) 射出率 $5\text{cm}^3/\text{s}$ で成形して得られた偏肉部周辺における樹脂流動挙動観察画像 (キャビティ厚さ: $t_1 = 3.0\text{mm}$, $t_2 = 0.6\text{mm}$, 金型温度: 50°C)



T: 射出開始後の経過時間

図1.20(b) 射出率 $30\text{cm}^3/\text{s}$ で成形して得られた偏肉部周辺における樹脂流動挙動観察画像 (キャビティ厚さ: $t_1 = 3.0\text{mm}$, $t_2 = 0.6\text{mm}$, 金型温度: 50°C)

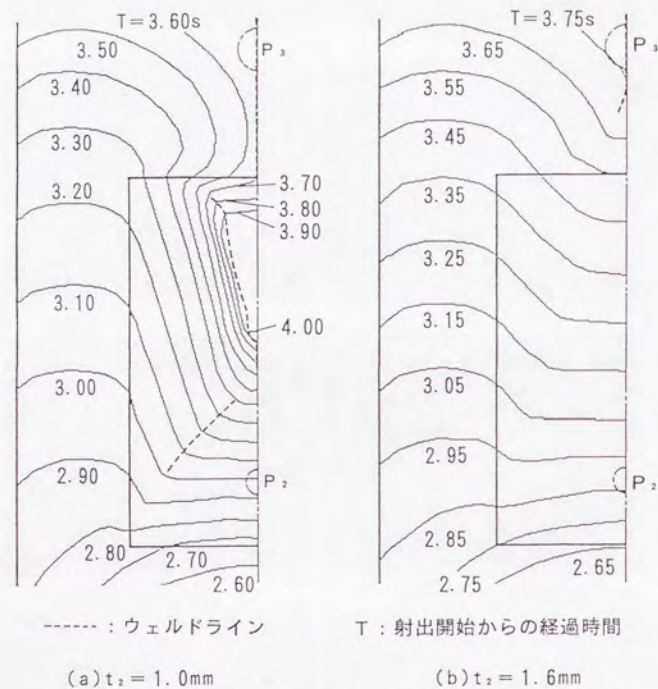


図1.21 偏肉部厚さ t_2 を変化させて得られた樹脂流動パターン
(キャビティ厚さ: $t_1 = 3.0\text{mm}$, 射出率: $5\text{cm}^3/\text{s}$, 金型温度: 50°C)

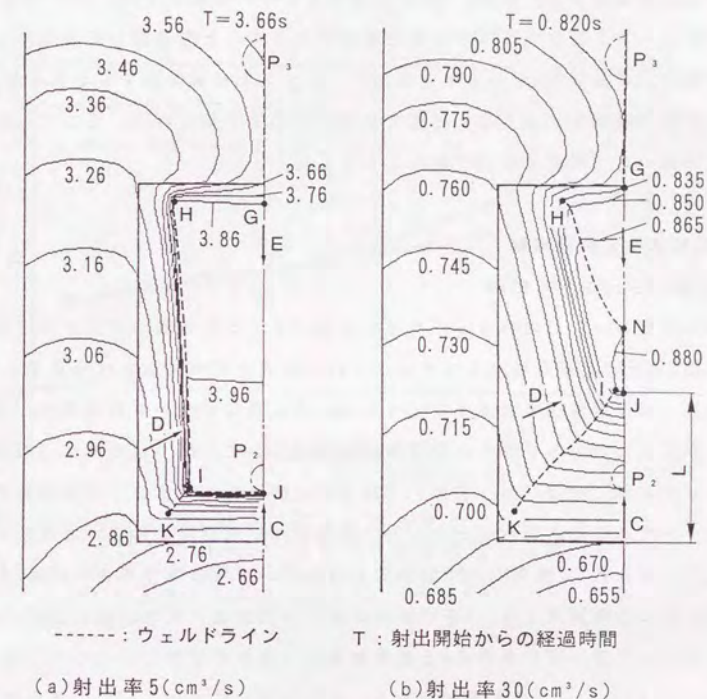


図1.22 射出率を変化させて得られた樹脂流動パターン
(キャビティ厚さ: $t_1 = 3.0\text{mm}$, $t_2 = 0.6\text{mm}$, 金型温度: 50°C)

肉部内周部には、2方向の流れC、Dの会合によるI-KおよびH-I-Jのウェルドラインが痕跡として残る。

一方、 $30\text{cm}^3/\text{s}$ の場合は、C、Dの流れの会合によるJ-I-K、およびD、Eの流れの会合によるH-N、左右キャビティからのDの流れの会合によるJ-Nの3種類のウェルドラインが生成し、 $5\text{cm}^3/\text{s}$ よりも複雑かつ広範囲に展開するウェルドライン発生形態を呈する。また、 $30\text{cm}^3/\text{s}$ よりも小さい射出率では、 $5\text{cm}^3/\text{s}$ と同じ流動パターンおよびウェルドライン生成形態をとることを確認している。したがって射出率の高い $30\text{cm}^3/\text{s}$ の場合の方が、ガラスと金属の両キャビティ面上における流動挙動差を、より高い感度で計測できると予測された。そこで、以下ではこの高い射出率にて検討を行うこととした。

b. 流動挙動差評価実験

(i) 流動パターンへの影響

薄肉部ブロック上のウェルドライン生成パターンを特徴づける点は、H、N、J、Kの4点と考えられる。ここでは、これらの点がガラスおよび金属キャビティの相違、型壁面温度の変化によってどのように遷移するかを調査した。その結果、 30°C から 70°C のすべての壁面温度範囲において、H、Kはガラス、金属の両キャビティ面ではほぼ一致、またJ、Nはガラス面の方がほぼ同一距離流動方向へとシフトすることが明らかとなった。薄肉部での樹脂流動形態が変化すれば、図1.22の会合点Jの位置がまず移動して厚肉部、薄肉部境界からの距離Lが変化する。そこで本研究では、Lをパターン変化の代表値と定め、図1.23に、ガラスと金属キャビティ面におけるLと型壁面温度の関係を示すこととした。なお、各プロットは5ショットの平均値である。同図では、 30°C から 70°C の壁面温度変化に対して、 50°C 以下で両者に差異がほとんど認められず、また 60°C 以上ではLがガラスにおいて約 $0.5\sim 0.8\text{mm}$ 大きくなっている。しかしこの値は、 $30\text{mm}\times 20\text{mm}$ の薄肉部縦横寸法に比較すると極めて小さく、その変動はほとんど無視できるものと考えられた。以上の結果は、キャビティ面の一部にガラスブロックを挿入しても、流動パターンにはほとんど影響をもたらさないことを実証的に明らかにしたものと言える。

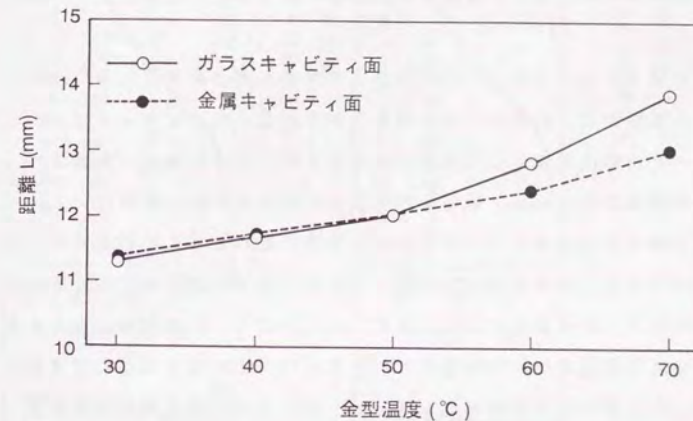


図1.23 ガラスキャビティ面および金属キャビティ面でそれぞれ成形して得られた金型温度と距離Lの関係 (射出率: $30\text{cm}^3/\text{s}$, キャビティ厚さ: $t_1 = 3.0\text{mm}$, $t_2 = 0.6\text{mm}$)

(ii) 圧力特性への影響

図1.24は、 P_1 、 P_2 、 P_3 における樹脂圧力の経時変化を示したものである。50℃以下の壁面温度においては、各部の圧力値がガラス面と金属面でほとんど一致し、また圧縮過程に移行する時刻も一致している。これらは、両者の流動速度が等しく、その背景としてのスキン層形成速度もほぼ等しいことを物語っている。一方60℃以上では、厚肉部 P_1 、 P_3 の圧力値はほぼ一致しているが、薄肉部 P_2 に圧力差が見られ、また金属面では圧縮過程に移行する時刻に若干の遅れが生じている。

図1.23の結果も含め、このように60℃以上でガラス面と金属面に若干の差を生じた主たる原因は、以下のように考察される。もともとガラスブロックはモールドベース内の冷却管による温調効果を受け難いことに加え、金属の約1/25の低い熱伝導率のために、溶融樹脂からの伝熱効果が高い表層部において、ガラスでは流動過程で金属よりもかなり高い温度状態にあるものと推察される。本実験のGPPSのガラス転移点温度 T_g が82℃であること（付録参照）を考慮すれば、射出開始直前の壁面温度が60℃に設定されていても、溶融樹脂にさらされるガラス壁面表層部温度が、流動過程で一時的に T_g 以上に達することは容易に想像される。これがスキン層の形成を遅らせ、加えてコア部の樹脂温度低下（すなわち粘度上昇）を抑止する結果、薄肉部での流動性の向上（特に図1.22(b)の流れCの増加）および流動圧力の低下を引き起こしたものと考えられる。

このように T_g 付近の型表面温度での薄肉成形では、ガラス面と金属面との間に流動挙動ならびに型内圧力パターンの差が現れることが明らかとなった。しかしながら、現実には、 T_g の低いGPPSにおいても T_g 付近の金型温度で成形を行うことは少なく、またさらに T_g が高いその他の樹脂系においてはさらに金型温度が T_g よりも低い温度に設定されるため、ガラスキャビティ面の影響はほとんど無視できるほどに小さくなるものと判断できる。

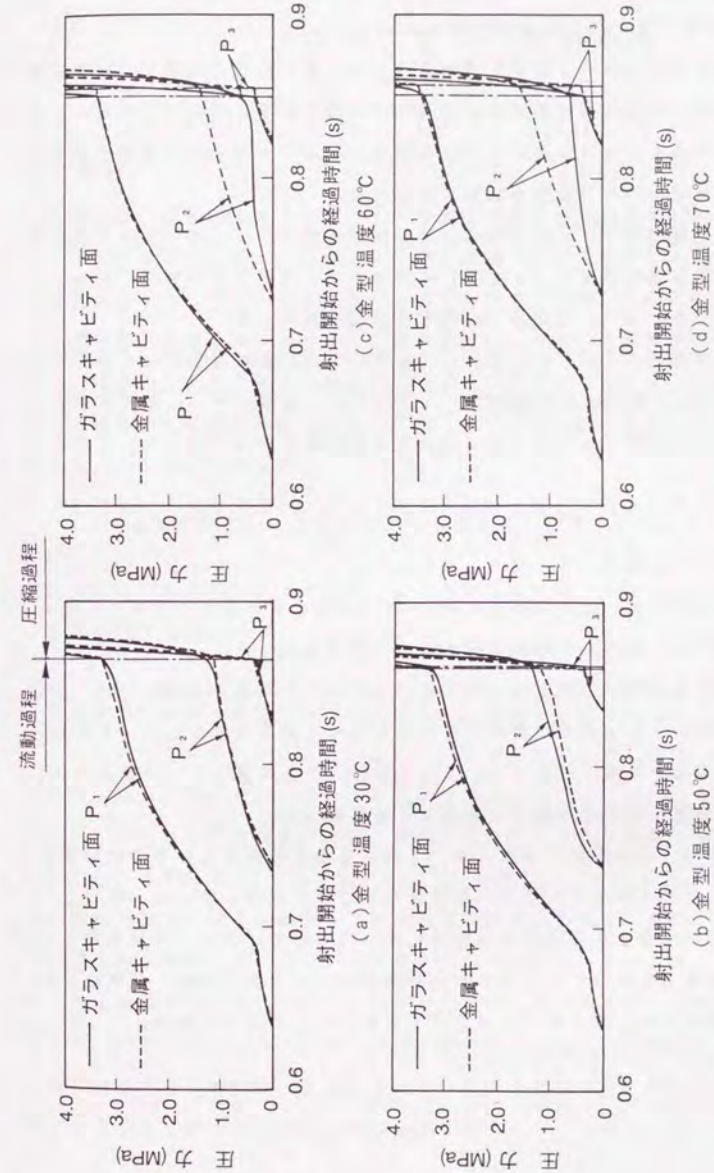


図1.24 ガラスキャビティ面および金属キャビティ面でそれぞれ成形して得られた圧力特性（射出率：30cm³/s、キャビティ厚さ： $t_1=3.0$ mm、 $t_2=0.6$ mm）

1.4 結 言

以下に、本章で得られた結論を列記する。

- (1)従来のガラスインサート金型をベースとして、さらに改良を加えた、実成形条件下で発生する各種成形現象の可視化に適用できる広域のガラスキャビティ面と、各種キャビティ形状における観察に対応できる入れ子構造を有する汎用ガラスインサート金型を提案・試作した。
- (2)ガラスと金属の両キャビティ面における流動挙動差を、キャビティ中央に薄肉部を有する偏肉キャビティを用いて両者のウェルドライン生成パターンを比較することにより、定量的に評価する方法を提案した。
- (3)薄肉部／厚肉部のキャビティ厚さ比は小さい方が、また射出率は大きい方が、薄肉部において複雑かつ広範囲なウェルドライン生成パターンが生成され、金属とガラスの両キャビティ面における流動挙動差評価に適していることを確認した。
- (4)第(2)項の手法によりガラスと金属キャビティ面におけるGPPS流動パターンの比較を行った結果、キャビティの片面にガラスブロックを挿入しても、30℃から70℃の広い型表面温度に対して、0.6mmの薄肉部を含むキャビティ流動パターンにほとんど影響を与えないことを実証した。
- (5)型表面温度をGPPSのT_g点よりも20℃低い温度以上に設定した場合には、0.6mmの薄肉部のガラス面と金属面間に明らかな圧力差を生成するが、それ以下の通常の適用金型温度設定においてはその圧力差も低減され、ガラスキャビティ面の影響をほとんど無視できることを実証した。

以上の結果は、本汎用ガラスインサート金型を通常の成形条件下で使用する範囲内では、ガラスキャビティ面の影響はないことを示唆している。ただし、本章の検討は、流動・圧縮過程での影響に絞ったもので、保圧・冷却過程のように金型との間で長時間にわたって熱の交換が行われる場合では、適用限界があるものと推察され、取り扱いには注意を要するものと考えられる。

第2章 ショートショット時における フローフロント挙動解析

2.1 緒言

前章では、実成形条件下で発生する各種成形現象の可視化に適用できる広域のガラスキャビティ面と、各種キャビティ形状における観察に対応できる入れ子構造を有する汎用ガラスインサート金型を提案・試作した。そして、キャビティ壁面の一部を金属からガラスに置き換えたことによる樹脂流動挙動への影響を、両者のウェルドライン生成パターンを比較することにより評価し、その結果、通常の成形条件範囲内では、ガラスキャビティ面の影響がほとんど無視できることを明らかにした。

本章では、汎用ガラスインサート金型を用いた動的可視化の有効性を確認することを目的として、静的可視化法の代表格であり、かつ着色材埋設法等のその他の静的可視化法と組み合わせて使用されることの多いショートショット法の計測精度の検証を行う。

射出成形における金型内樹脂流動パターンを知る手段として、ショートショット法が最も広く用いられてきたことは、序論においてすでに述べた。同手法は簡単に実施できるため、成形不良現象を回避するために行われる多段射出成形における射出率切替位置の検討、数値シミュレーション結果の検証手段などに広く用いられてきた^{43, 73-103, 812-883}。しかし、ショートショット成形品は型内流動の減速・停止過程ならびに冷却過程を経たもので、そのフローフロントが、流動過程のフローフロント形状を正しく映し出しているかについてはこれまでに検討がなされてこなかった。とりわけ、冷却効果の大きい薄肉部を有するキャビティでは、両者の隔たりは一層大きくなるものと想像される。こうした検討をするためには、まずショートショット時のフローフロント挙動を支配する因子を正確に把握することが必要となる。

そこで本章では、汎用ガラスインサート金型と画像計測システムを用いて、ショートショット時のフローフロント挙動を直接観察し、フローフロント部で発生する諸現象について定量解析を試みる。

2.2 実験方法

本章で使用したキャビティは図2.1の矩形状で、キャビティ厚さを1、2、3、4mmの4段階に変更可能な構造となっている。本成形実験では、生産によく使用される樹脂を評価の対象とした。具体的には、結晶性樹脂としてポリプロピレンPP（昭和電工㈱：ショアロマーMK-511）、ポリアセタールPOM（ポリプラスチックス㈱：ジュラコンM270-02）、低密度ポリエチレンLDPE（三菱化学㈱：ノバテックL-330）、非晶性樹脂として耐衝撃性ポリスチレンHIPS（住友化学工業㈱：エスブライトHH-501）を使用した。表2.1に使用樹脂の物性値を、また表2.2に各々の成形条件を示す（粘度等の樹脂物性および適用成形条件範囲については巻末の付録参照）。射出樹脂量は、スクリュ前進が停止する射出完了時において、フローフロントがゲートからそれぞれ $x=11\pm1$ mm、 30 ± 1 mm、 47 ± 1 mmの位置に到達するように調節した。その際、各キャビティ厚さ間でフロント挙動の比較を行う方法として、射出完了時のキャビティ内フロント位置（前記したxの位置）とゲート通過後の経過時間が厚さに依らずほぼ同一となるように、各々の射出率を可視化計測により求めることとした。

射出完了後におけるフローフロント形状は、(1)射出完了直後のスクリュ挙動と、(2)金型内樹脂挙動とに依存して変化するものと推察される。本章では、まず(1)を検討するために、射出完了直後にスクリュの保持力をゼロとしたスクリュ制御A、スクリュを射出完了位置でそのまま20秒間強制保持したスクリュ制御Bの2通りの条件にてフローフロントの観察を試みた。また、(2)を検討するために、射出完了時のフローフロント位置x、樹脂がゲートを通過してxに到達するまでのキャビティ内流動時間Tf、およびキャビティ厚さt、以上3因子を変化させてフローフロントの観察を試みた。なお(2)の場合、スクリュ制御はAとし、射出開始からの樹脂のゲート到達時間を約4.0秒で一定とした。

画像計測は、高速ビデオシステム（㈱ナック：HSV-400）により、毎秒200コ

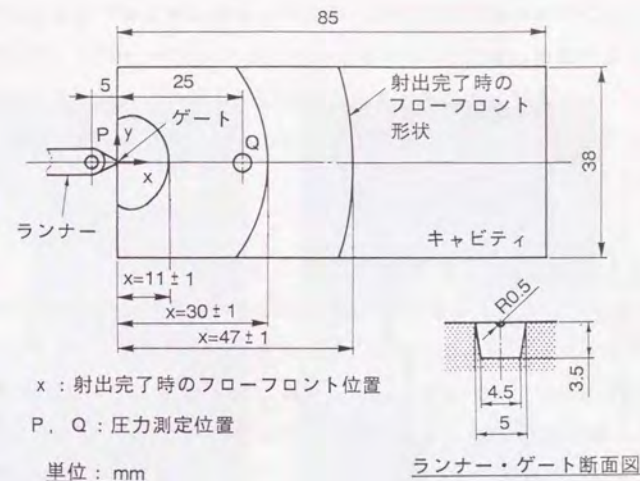


図2.1 キャビティ形状

表2.1 使用した各種樹脂の物性値

樹脂	PP ^{*)}	POM ^{*)}	HIPS ^{*)}	LDPE ^{*)}
結晶化温度 T _c (°C)	120	149	—	87
ガラス転移点温度 T _g (°C)	—	—	94	—
成形収縮率 (%)	1.35—1.5	1.5—1.6	0.36—0.4	1.2—3.2

表2.2 成形条件

樹脂	PP	POM	HIPS	LDPE
樹脂温度* (°C)	190	190	240	210
金型温度** (°C)	50	70	50	50
キャビティ厚さ (mm)	1. 2. 3. 4			2

*) ノズル部設定温度
**) 金型温度調節器設定温度

マでフローフロント部を拡大して行い、得られた画像は画像解析装置を用いて処理した。圧力計測は、図2.1におけるランナー内Pおよびキャビティ内Qの2ヶ所において、エジェクタピン下に挿入された水晶圧電式圧力センサ（日本キスラー ㈱：Type9221）により行った。実験に使用した射出成形機は、東洋機械金属 ㈱製のTi-80G（型締力80tonf）である。

2.3 ショートショット時のフローフロント型内挙動

図2.2は、フローフロント位置 $x=47\text{mm}$ における射出完了時と完了後8秒の各種樹脂のフローフロント形状比較である。射出が完了しているにもかかわらず、各樹脂ともフローフロントが前進し、PP、POMにおいては先端部にくびれ状の縮Cが発生した。特にPOMではその縮が複数生じている。

図2.3は、画像解析装置により得られたフローフロント変位の経時変化である。横軸は射出完了時からの経過時間を、縦軸は射出完了時からの x 方向のフローフロント変位量を示す。各樹脂とも射出完了後0.5秒以内に2.4～4.2mmの急激な変位量増加が認められる。その後、PPでは、一時的に変位量が約0.2mm減少した後、2秒付近から再び緩やかに増加するが、POMでは減少せずそのまま緩やかに増加する。PP、POMとも9秒以降では変位量の減少を示し、またHIPS、LDPEでは初期に変位量がピークに達した後に緩やかに単調減少する。

以下では、0.5秒以内の急激な変位量増加（前進）領域をStageⅠ、それに引き続く減少（後退）領域をStageⅡ、さらにPP、POMに認められる緩やかな前進領域をStageⅢ、最終段階の後退領域をStageⅣと分類して呼称することとした。ただし、POMのようにⅠとⅢが明確に区別できない例では、画像上でくびれの生成が観察される時刻をもってⅢの変位開始点とした。また2.5節に後述するように、ⅣはⅡと同一の機構によって後退しⅡの延長領域と考えられるため、以下ではⅡに含めて議論することとした。

図2.4は、キャビティ内流動時間 T_f と射出完了時のフローフロント位置 x の変化に伴うPPのフロント変位の経時変化を示している。射出率が高く T_f が短いほど、また x が大きくなるほど、変位量が増加傾向を示す。この傾向は、他の樹脂についても同様に確認されている。

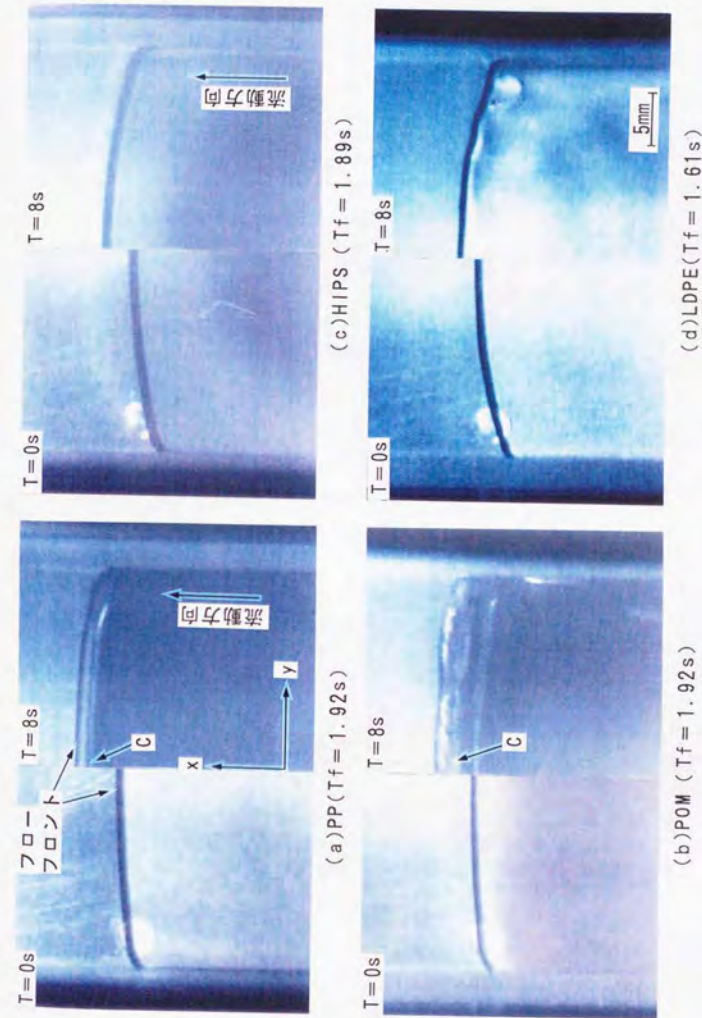


図2.2 各種樹脂の射出完了時と完了後8秒における型内フローフロント形状比較（射出完了時のフローフロント位置： $x=47\text{mm}$ 、キャビティ厚さ：2mm、スクリュ制御：A）
T：射出完了からの経過時間
Tf：キャビティ内流動時間

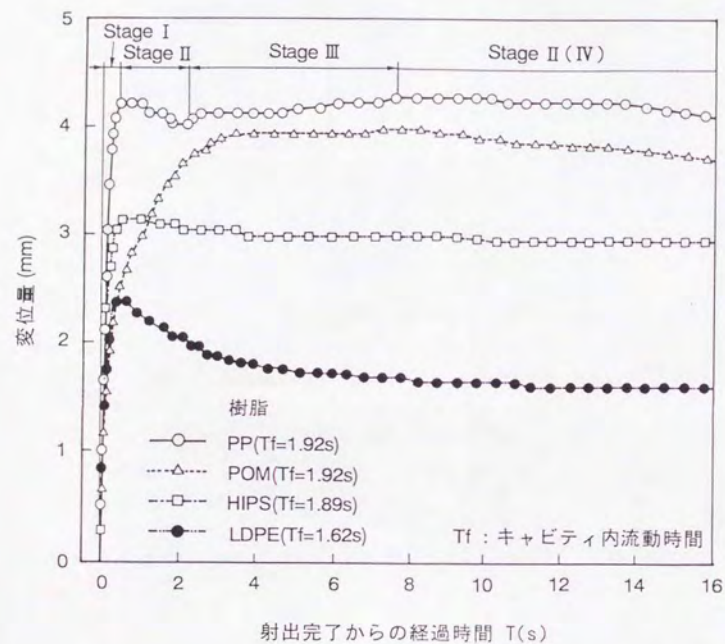


図 2.3 各種樹脂におけるフローフロント変位量と射出完了からの経過時間の関係 (射出完了時のフローフロント位置: $x = 47\text{mm}$, キャビティ厚さ: 2mm , スクリュ制御: A)

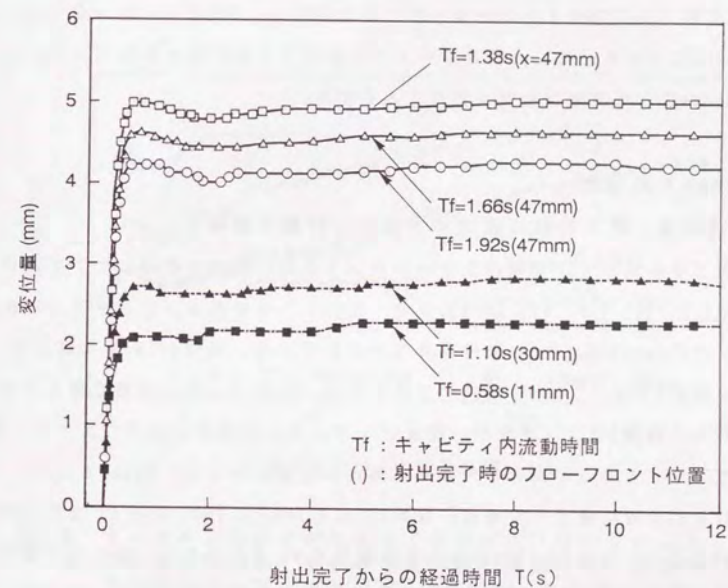


図 2.4 キャビティ内流動時間および射出完了時のフローフロント位置を変化させて得られたフローフロント変位量と射出完了からの経過時間の関係 (PP, キャビティ厚さ: 2mm , スクリュ制御: A)

図2.5は、キャビティ内流動時間 T_f をほぼ一定としキャビティ厚さ t を変化させて求めた、PPのフロント変位の経時変化を表している。StageⅢを伴わない $t=1\text{mm}$ を除けば、いずれの t でも、 t の増大にしたがってStageⅠの最大値は減少しStageⅢの前進量は増加している。

以上より、(1)樹脂種類、およびキャビティ内流動時間、射出完了時のフローフロント位置、厚さにかかわらず射出完了後にフローフロントが変位すること、(2)その挙動としてPPはⅠ→Ⅱ→Ⅲ→Ⅱ（またはⅣ）、POMはⅠ→Ⅲ→Ⅱ（Ⅳ）、HIPS、LDPEはⅠ→Ⅱ（Ⅳ）と固有のパターンを示すことが明らかになった。以後、各Stageごとに詳細な検討を行うこととする。

2.4 StageⅠの検討

2.4.1 前進量・圧力特性に及ぼすスクリュ制御の影響

射出完了後のスクリュ挙動がフローフロント変位に及ぼす影響について検討する。図2.6、図2.7は、PP、LDPEのフローフロント変位量およびスクリュ速度、ランナー内圧力（図2.1のP）の時間変化を表している。両図の(b)の比較より、スクリュ制御Bでは、 $T=0\text{s}$ に速度がゼロとなり、スクリュがその場で停止する。これに対し、制御Aでは、速度が一度負になりゼロに収束する過程でスクリュが後退しており、この点が両者の大きな差異として見い出せる。StageⅠのPP、LDPEそれぞれの変位量ピーク値は、制御Aでは4.2mmと2.4mm、制御Bでは21.8mmと16.8mmとなり、制御Bが10mm以上大きな値を示す。Pの圧力は、変位量の増加に伴い減少する。また制御Aでは、制御Bよりも圧力が速く降下する。さらに、図では表示されていないが、Qの圧力計測ではPの1/10以下と小さい値を示すことが確認されている。なお、以上の傾向はPOM、HIPSにおいても同様に確認された。

2.4.2 前進量とランナー内圧力の関係

図2.8は、StageⅠの前進量とランナー内Pのピーク圧力との関係を示している。ここでは、キャビティ内流動時間 T_f を調節することによりピーク圧力を変化させる方法を用いている。樹脂の違いによる影響を示した(a)の結果では、ピーク

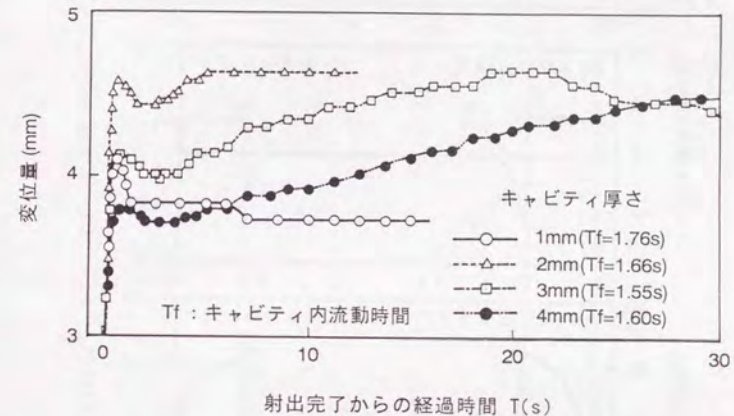


図2.5 キャビティ厚さを変化させて得られたフローフロント変位量と射出完了からの経過時間の関係（PP、射出完了時のフローフロント位置： $x=47\text{mm}$ 、スクリュ制御：A）

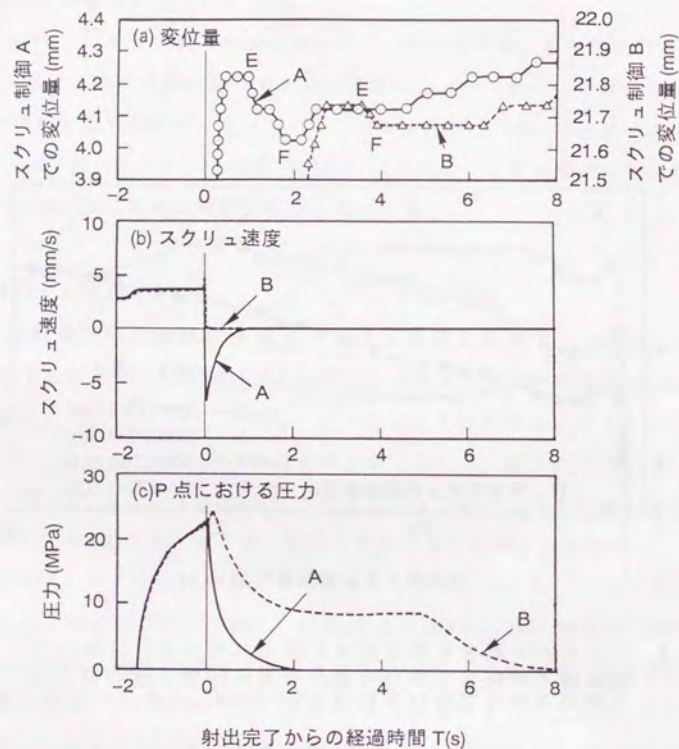


図2.6 PPにおけるフローフロント変位量およびスクリュ速度、圧力と射出完了からの経過時間の関係 (射出完了時のフローフロント位置: $x=47$ mm, キャビティ厚さ: 2mm, キャビティ内流動時間: 1.92s)

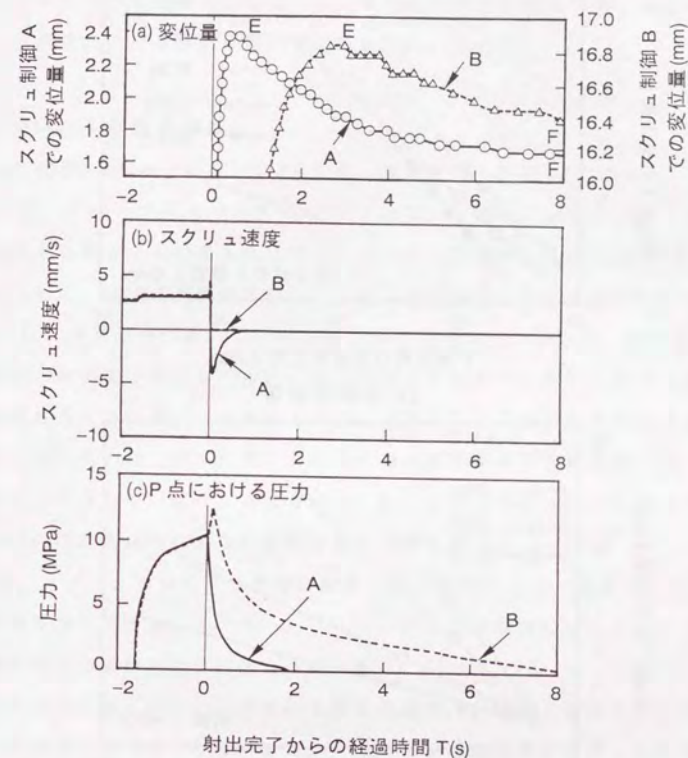
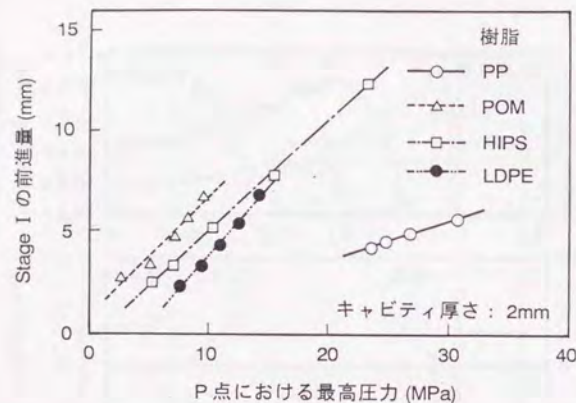
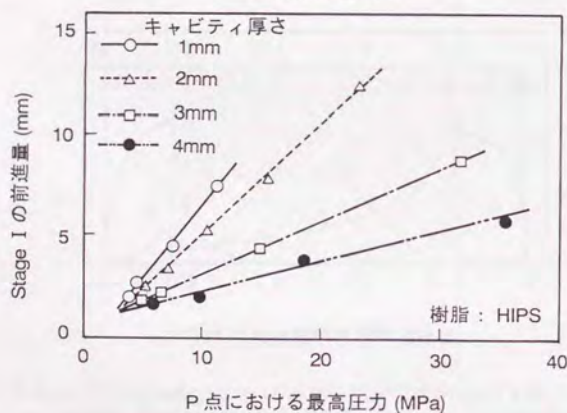


図2.7 LDPEにおけるフローフロント変位量およびスクリュ速度、圧力と射出完了からの経過時間の関係 (射出完了時のフローフロント位置: $x=47$ mm, キャビティ厚さ: 2mm, キャビティ内流動時間: 1.61s)



(a) 樹脂の影響



(b) キャビティ厚さの影響

図 2.8 樹脂およびキャビティ厚さを変化させて得られた Stage I の前進量と P 点における最高圧力の関係 (射出完了時のフローフロント位置: $x = 47\text{mm}$, スクリュ制御: A)

圧力が増加するに伴い、いずれの樹脂もほぼ直線的に前進量が増加する。しかし、PPの前進量は他と比べて小さく示されている。一方、HIPSを例にキャビティ厚さ t の影響を示した(b)では、同じピーク圧力に対しては、 t が小さいほど前進量が大きくなる傾向が示されている。また、いずれの厚さでも、ほぼ原点を通して放射状に広がる増加傾向が確認された。

2.4.3 Stage I の前進機構

以上の結果、Stage I では、(1)スクリュ後退を伴う制御Aより伴わない制御Bにおいて、(2)ピーク圧力が大きく、(3)キャビティ厚さが小さいほど、その前進量は大きくなることが明らかになった。これらの結果は、Stage I の前進機構モデルとして、以下の仮説が正しいことを示唆するものである。すなわち、Stage I は、流動過程においてゲート部上流のスプルー、ランナー内で圧縮された樹脂が、射出完了後にも引き続き圧力の低いキャビティ内へと流入した結果と考えられる。この際、キャビティ内では流動圧による樹脂の弾性圧縮量もともと小さいために、キャビティ内樹脂の弾性回復に伴う体積膨張分は、前進にほとんど寄与しないものとみなされる。以上の前進機構モデルに基づき、上記(1)~(3)の結果は次のように説明することができる。

(1)は、スクリュ後退により瞬時に加熱シリンダのリザーバ内部およびノズル部の樹脂圧力が低下し、スプルー、ランナー内の圧力開放によるキャビティ内への樹脂流入が遮断された結果と推察される。(2)は、ランナー、スプルー部の樹脂が大きく圧縮されてピーク圧が上昇するほど、射出完了後にキャビティ内圧との残留差圧が大きくなりキャビティ内への樹脂流入量が増加した結果と推察される。(3)については、図2.8(b)が、スプルーからノズル側への逆流の可能性を含むスクリュ制御Aでの結果であるため、厳密には定量的な議論ができないと考えられる。しかし、単位圧力当たりの樹脂流入量(フローフロント前進量 \times キャビティ厚さ \times 幅)がほぼ一定となっている結果より、厚さの減少に反比例して前進量が増加したものと考えられる。なお、PPが他の樹脂に比べて前進量が小さくなった結果(図2.8(a)参照)の原因説明については、スクリュ制御Bの状態、樹脂粘度、熱物性等を考慮した詳細な検討が必要と言える。

2.5 Stage II (IV) の検討

図2.6、図2.7のEFはStage IIに対応する。その平均後退速度（単位時間当りの平均フロント後退量）は、PPではスクリュ制御A、Bで各々0.20mm/s、0.23mm/s、またLDPEではいずれも約0.08mm/sとなり、制御A、B間にほとんど差が見られない。また、Stage IIの後退の大部分は、スクリュが一度後退、停止後に起こり、その際、Pの圧力はゼロとなっている。これらは、IIの後退が、スクリュ後退に伴う樹脂の逆流現象に起因していないことを示唆している。また、HIPSよりもLDPEの後退量が大きくなっている。これは、表2.1のようにHIPSよりもLDPEの成形収縮率が大きいことと対応しており、これよりStage IIの後退は成形品の冷却収縮に起因すると推察される。この冷却収縮は、樹脂種類を問わず成形品の固化が完了するまで続くものと考えられ、図2.3において観察されたStage IVのゆっくりした後退領域は、Stage IIの延長領域とみなすことができる。

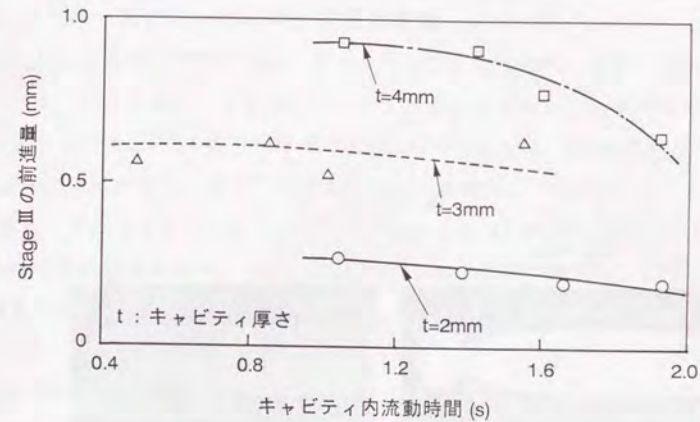
2.6 Stage III の検討

2.6.1 前進量とキャビティ内流動時間の関係

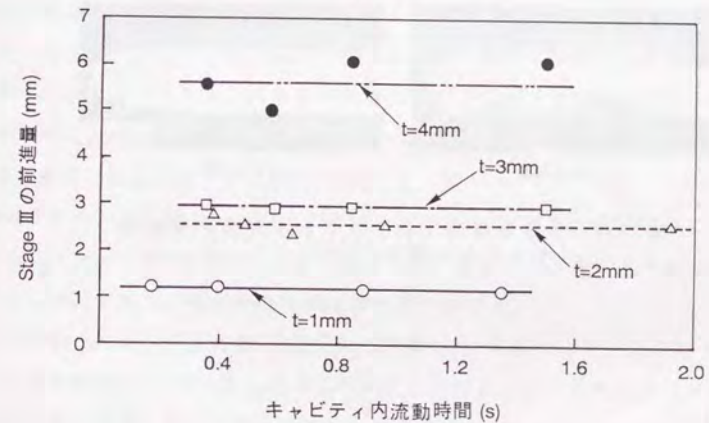
図2.9は、キャビティ厚さ t を変化させて求めた、PP、POMのStage IIIの前進量とキャビティ内流動時間 T_f との関係を示している。両樹脂とも厚さ t の増加に伴い前進量が増加し、前進量とキャビティ厚さの比は、PPで0.1~0.2、POMで1.0~1.5とほぼ一定の値を示している。また、PPでは T_f が長くなるほど前進量が減少するのに対し、POMでは T_f と無関係に一定となる傾向を示した。

2.6.2 フローフロント部の断面観察

各種樹脂による成形品フロント部の板厚方向断面写真を図2.10に示す。Stage IIIの存在しないHIPS、LDPEでは丸い先端形状を呈するが、IIIの存在するPP、POMでは先端部にくびれ状の板厚減少が観察される。PPはくびれが1ヶ所、ゲートからくびれ部に向かうほど板厚が減少するスローブ形状を示す。また、Stage IIIでの前進量が多いPOMは、くびれが複数重なって発生している。さらに、図2.2で見られた稿Cの位置がくびれDの生成開始位置と一致していることが確認された。以上の結果は、Stage IIIの前進機構がくびれ生成と密接に関係する



(a) PP



(b) POM

図2.9 PPとPOMにおけるStage IIIの前進量とキャビティ内流動時間の関係（射出完了時のフローフロント位置：x=47mm、スクリュ制御：A）

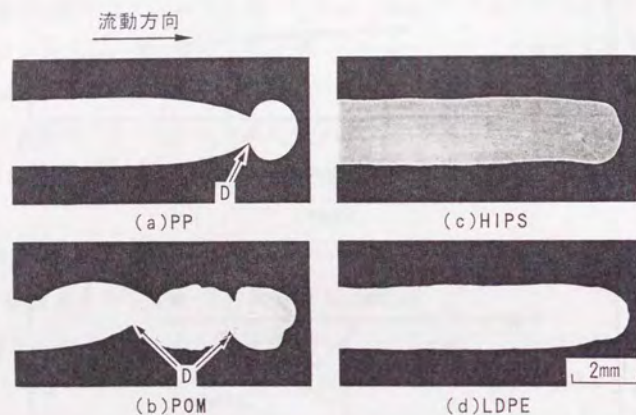


図2.10 各種樹脂のフローフロント断面形状比較
(キャビティ厚さ：2mm)

ことを物語っている。

2.6.3 フローフロント部における圧力特性

図2.11は、射出完了時のフローフロント位置を $x = 30\text{mm}$ に設定して求めたフローフロント変位量およびランナー、キャビティ内圧力 P 、 Q の時間変動を示している。PPの場合、 P の圧力がほぼゼロになった G の後に、約5秒間にわたる StageⅢ の前進が認められる。またその前進の過程では、 Q のプロファイルの中で H をピークとする圧力のわずかな上昇が認められる。POMの場合においても、同様の傾向が確認された。一方、LDPEでは、StageⅢ の前進もキャビティ内圧力の高まりも見られなかった。この傾向は、HIPSにおいても確認された。

2.6.4 StageⅢ の前進機構

StageⅢ の前進量は、①一部の結晶性樹脂PP、POMにおいて、②キャビティ内流動時間が短く、③キャビティ厚さが大きいほど、④冷却過程の長い時間の範囲で、⑤フローフロント部の局所的な現象によってゆっくりと増加する。それに伴って⑥フローフロント近傍には板厚方向のくびれが生成すること、⑦キャビティ内圧力がわずかに上昇することが明らかになった。以上より、StageⅢ の前進機構を 図2.12を用いて説明する。

- (1) 射出直後、コア層からフロント部にかけての $c-f$ は高温の溶融状態にあり、特にフロント部 f の表面は金型と接触しない自由境界面により構成されるために冷却が遅れ、最後まで溶融状態を保ち続ける。
- (2) 冷却過程において、表層 $a-d$ 側に対し内層の $b-e$ 側はゆっくりと冷却され、特に結晶性樹脂では $b-e$ 側に結晶化促進に起因した大きな体積収縮を伴う。その結果、表層に曲げ応力が発生し、成形品表面を凸面とする方向に力が作用する。図2.11で、PPのキャビティ内圧力が H のようにわずかに上昇しているのは、上記反り生成域がちょうど圧力検出部に位置するためと考えられる。

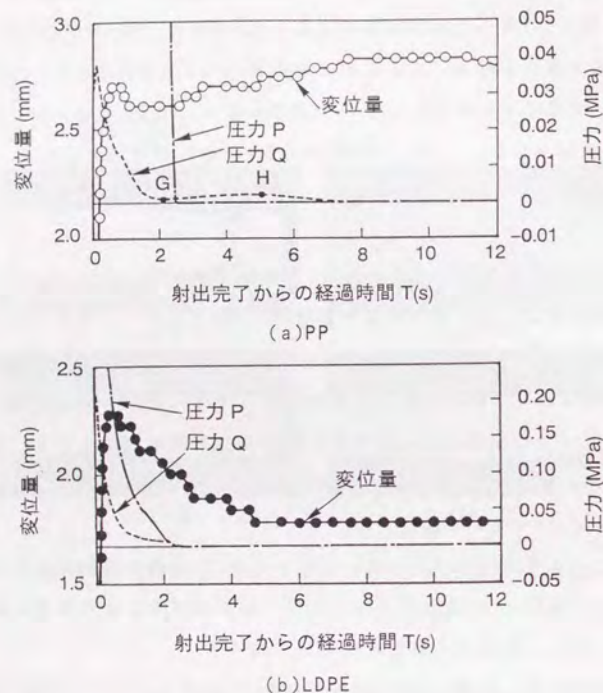


図2.11 フローフロント変位量および圧力と射出完了からの経過時間の関係(射出完了時のフローフロント位置: $x = 30\text{mm}$, キャビティ厚さ: 2mm , スクリュ制御: A)

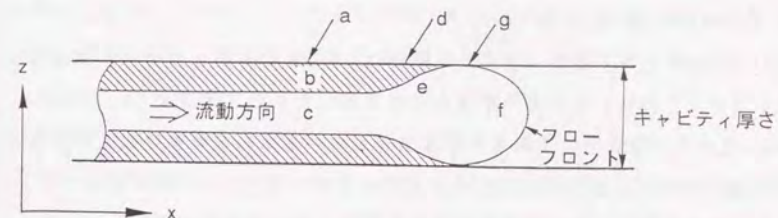


図2.12 StageⅢの前進メカニズムの説明図

(3) a-d面に沿うスキン層は、こうした力により凸状に反ろうとする結果、固化領域とフロント部溶融領域との遷移領域のgにおいて、固化領域がdからe方向に陥没してくぼみを生成させる。それに伴ってeからf方向に溶融樹脂が押し出される。

(4) 押し出されたフロント部fの溶融樹脂はキャビティ面に接し、場合によっては上記(2)~(3)と同様のプロセスを繰り返して幾重ものくびれを生成する。

キャビティ内流動時間が短い場合、樹脂はスプルー、ランナー内でのせん断発熱等により高温となり、キャビティ壁面近傍での温度勾配が大きくなる。中心側の樹脂温度が高い場合には冷却過程での結晶化が促進され、より大きな体積収縮を引き起こす。これによりフロント部のスキン層が板厚中心方向へと大きくそって陥没し、低粘度樹脂が容易に押し出される。POMは、表2.2に示すように結晶化温度 T_c が高く早い段階で硬いスキン層を形成する。また、収縮率が大きい場合射出完了直後から反りが発生し、まだ高温の中央部樹脂を急激に前方に押し出す。LDPEは、 T_c が低いために、反りを引き起こすに必要な厚さの高剛性のスキン層形成が遅れ、成形品全体が緩やかに固化、収縮する。その結果、くびれが生成され難くなったものと考察される。PPは、POMとLDPEとの中間の性質を示し、POMよりも T_c が低いので反りの開始がやや遅れる。また非晶性樹脂のHIPSは収縮率が小さく反りを惹起しない。さらに、キャビティ厚さの増加に伴い前進量が増加したのは、厚さの増加分だけ樹脂の冷却が緩やかとなり、反りによって押し出される樹脂量が多くなったことが原因と考えられる。

2.7 各Stageの重畳効果

POMでStage I とⅢが区別できなかったのは、POMのTcが高いためにIの途中でスキン層が反り始め、IとⅢの前進が同時進行したことに起因する。したがってStageⅢの前進量には、Iのそれが重畳されているものと推察される。キャビティ内流動時間Tfが長い場合には流動過程も含めて厚いスキン層が形成され、スキン層の反りはIの速い段階で発生する。逆にTfが短い場合では、遅い段階で発生することとなる。すなわち、Ⅲの中にIの前進量の占める割合は、前者の場合に大きくなり、後者の場合には小さくなる。これが、図2.9においてTfにかかわらず前進量が一定となった原因と考えられる。さらにPP、POMでは、StageⅢの前進の間にⅡの後退が同時に進行していることも推察される。

2.8 結言

以下に、本章で得られた結果を列記する。

- (1) ショートショットのフローフロントは、射出完了後の型内冷却過程において変位し、①スプルー、ランナー内で圧縮された樹脂の圧力開放による前進、②樹脂の冷却収縮による後退、③一部の結晶性樹脂に見られるフロント部の局所変形による前進が連続、あるいは重畳された形態をとることを明らかにした。
- (2) 圧力開放による前進①は、全前進量の60%以上を占める。この①は特にランナー内残留圧力と強い相関を示し、キャビティ内流動時間が短く、キャビティ厚さが減少するほど増加することを明らかにした。
- (3) 同①は、射出制御方法に大きく左右され、スクリュを射出完了位置で保持した場合には、保持しない場合に比べ10mm以上の前進量が加算されることを示した。
- (4) 一部の結晶性樹脂（PP、POM）で見られるフローフロント部の局所変形③は、冷却過程におけるスキン層とスキン層に隣接する内層部との冷却時間差により、表面を凸状にそらせる力が発生するために引き起こされ、これによりフローフロントのコア部溶融樹脂を前方に押した結果くびれが生成することを明らかにした。

(5) 同③の前進は、キャビティ内流動時間が短く、キャビティ厚さが大きくなるほど顕著となり、前進量はPP、POMの場合それぞれキャビティ厚さの0.1～0.2倍、1.0～1.5倍とほぼ一定値を示すことを明らかにした。

(6) 樹脂の冷却収縮による後退②は、①の流動停止間際から顕在化し、それ以後の冷却過程を通して成形収縮率に対応する収縮後退が起こる結果、特にPP、POMの③に重畳した場合には、多様な変位挙動形態となって観察されることを明らかにした。

以上の結果は、本汎用ガラスインサート金型を用いた動的可視化の有効性を実証すると同時に、ショートショット法を樹脂流動挙動観察に適用する場合に、形状誤差が含まれることを示唆している。すなわち、ショートショット法により得られた計測結果の取り扱いには十分な注意を要することが明らかとなった。

具体的に、以下の点に注意して使用すれば、ショートショット法は、簡易的な流動パターン抽出法として、今後も十分に使用可能であるものと考えられる。

(I) 樹脂の残留圧力開放による前進：樹脂の冷却効果が大きく、固化によりフローフロント部に圧力が充分伝達されない薄肉部を有するキャビティでは、薄肉部と厚肉部との間に前進量差が生じ、ショートショット形状が流動過程のフロント形状とかなり異なるものと予測される。これは特に冷却が促進される低速の射出条件において顕著になるものと推測され、この場合、ショートショット法の適用には注意を必要とする。

(II) 樹脂の収縮による後退：この後退は、収縮方向を拘束するピン、リブ、ボス等のキャビティ条件に大きく依存する。したがって、それぞれの樹脂の収縮率に基づいて、使用キャビティ毎に個別に数値計算等により補正することが必要となる。

(III) フローフロントの局所変形による前進：この前進は局所変形であり、前進量はキャビティ厚さの約1.5倍以下と小さいため、キャビティ面積が大きい場合にはあまり問題とはならない。ただし、影響の大きい面積が小さい場合でも、上記値を用いて補正が可能である。