最近の射出成形技術と基礎研究の動向*

加藤和典**

Recent Progress of Injection Molding and Fundamental Research /
Kazunori KATO

Key words: injection molding, plastics, molding technology, molding characteristics, molding defect, defect generation mechanism

1. はじめに

射出成形の分野は材料から成形機械までかなりの広がりをもっている。その中で成形技術に焦点を絞って過去の雑誌を通覧すると、技術的立場¹⁾²⁾からの詳細な解説あるいは電気³⁾、自動車⁴⁾などの応用分野からの解説が多数報告されている。そこで本稿では、力学に基礎をおく筆者の立場からまず成形技術の最近の状況を概観し、次に成形における各種の不良現象と金型内での材料流動、変形挙動に注目して何がどこまで明らかにされているかを確認する。そして今後の研究、開発の課題についての私見をまとめることとしたい。

なお、プラスチックの成形プロセスに関する報告は最近プラスチック成形加工学会に集中して発表されるようになっていっている。そのために本稿でもその学会誌「成形加工」からの引用が多くなるので、紙面の節約上その雑誌については本文中に著者(年号.月)のみを記することとする。

2. 最近の射出成形技術の動向

成形技術の内容は多種多様であるが、技術開発の大きな流れとして金型内圧力の低減と成形による部品の一体化(複合化)がある。以下これらの技術について順を追って述べる。

2.1 金型内圧力の低減の方法

射出成形においては金型内圧力を均等化しかつショートショット、ひけ、転写不足などを生じない範囲で圧力を低くとることが理想であり、実際に最近開発されているいくつかの技術はこの方向にそうものである。ここで高速射出成形、ガスアシスト射出成形も低圧成形に含めて考えることとする。

(a) 射出圧縮成形

成形機の可動側に圧縮負荷装置を組み込み、必要な量の樹脂を型内に注入した後成形、保圧をすべて圧縮負荷装置によって行う方法[SPモールド、梶井(1996.8)]が開発されている。圧縮負荷装置としては油圧方式が一般的であるが、くさび状カムを利用した薄型のもの[阿部(1997.8)]もある。関連して、両プラテンの平行度を高める方法として「四軸平行制御射出システムプレス成形機⁵⁾」が開発されている。

(b) 高速射出法

射出速度を通常の数倍程度に高めて固化層の成長を抑え効率よく充てんさせる方法を高速射出成形法と呼ぶ[中村(1993.12)]。この成形においてはスクリュウの移動を高速化すると同時にブレーキ特性を向上させ充てん終了時の型内圧力の上昇を抑えることが必要であるが、このような成形機の機能は最近の油圧制御技術の進歩により可能になったものである。

ところで、館山ら⁶⁾は型締力を低減させることが成形機や金型の小形化のために最も本質的であるとして、高速射出において充てん終了近くの急激な圧力上昇をスクリュウ速度の制御により抑える方式を採用した(図1)。そしてさらに、CAEによるゲート、ランナ配置の適正化、材料の改善などを行って金型の薄肉化、アルミニウム化を可能にし、最終的に型締力を1/3以下にすることに成功している。このような総合的な検討法は成形技術改善の方法の見

* 原稿受付 平成12年8月10日

** 東京工業大学大学院(東京都目黒区大岡山2-12-1)

1968年東京工業大学大学院博士課程修了、工学博士。研究内容:(1)プラスチック、短繊維含有樹脂、セラミックスの射出成形および金型内流動特性・すべり特性の研究、(2)圧延、鍛造等の塑性力学的研究

図1 高速充てん低圧制御成形における金型内圧力の推移⁶⁾

図2 GPI (Gas Press Injection) の成形工程⁷⁾

本になるものと言える。

(c) ガスアシスト成形

金型内にある程度まで樹脂を流入させた後同じノズルから高压ガスを注入すると、肉厚が厚く固化の遅れている部分にガスが注入され中空の成形品を成形することができる。また、ガス圧を適当な時間保持すれば肉厚部に生じるひけを防止することが可能になる。H²M法 (Higher Hollow Moldeing 法, 旭化成)⁷⁾は中空部の大きいサンドイッチ断面を成形する方法として有名であるが、図2に示す方法は筐体の成形において内側にガスを注入することによって外面に現れるひけを防止するものである (GPI: Gas Press Injection Molding, 旭化成)⁷⁾。類似の技術として Airmould Contour (独), External Gas Injection (英) がある。

ガスアシスト成形についてはシミュレーション技術も進んでおり、曲がり流路におけるガスの中空部の偏りの状態や分岐部を有する対称な流路における非対称なガス流路の形成 (図3) など、興味ある結果が報告されている⁸⁾。

2.2 成形品の一体化技術

次に、他の一つのすう勢である成形による製品の一体化 (複合化) 技術について述べる。この成形技術はあらかじめ成形された部品を成形品に埋め込むインサート成形と2色または異材質の材料を組み合わせる「2工程成形」とに分けられる⁹⁾。後者においては複数のスクリーを有する成形機が必要である。

図3 分岐流路のある流れのガスアシスト成形の数値シミュレーション⁸⁾

図4 CFI (Coated Film Insert Injection Process) における意匠性付与の例¹⁰⁾

(a) インサート成形

代表的なものとして CFI (Coated Film Insert Injection Process)¹⁰⁾ がある。車の窓ガラスの成形の場合、あらかじめ表面に硬度の高いシリコン系の塗膜を付した PC シートを準備しこれを金型内にセットしてインモールド成形する。この方法は裏面にプリズム状のデザインを施して意匠的に優れた効果を出すことも可能である (図4): IC カードは全体の厚さが薄い (0.76 mm)、その中に IC チップとコイルをインシールド成形して製作する¹¹⁾。車の内装品には発泡層付き織布などの種々の表皮材のインサート成形が広く行われている。岡原ら (1999.5) は、PET 繊維の起毛布のインサート成形について、成形後ガラス転移点以上に再加熱することによって毛倒れを回復させる方法を見出ししている。

(b) 2工程成形 (2色成形)

2色成形とは、文字などを埋め込む製品を、2色または2種類の樹脂の2段階の射出により成形する方法である。この方法を拡張したものに、1次の成形の後金型を少し開きその間隙に第2の樹脂を射出する、という表面コート法やラベル用のシートのインモールド成形がある。また、2色成形機を用いて同じゲートから2種類の樹脂を順次射出すれば、先に射出された樹脂がスキン層を形成しサンドイッチ構造が得られる (サンドイッチ成形法)。この方法によればコアにガラス繊維含有樹脂を配して強化をはかることができる。最近ではリサイクルされた材料をコアに入れたパンパも実用化されている [長岡 (1999.10)]。

図5 DRI (Die Rotary Injection) の成形型の配置¹³⁾ 図6 導電・非導電材料の2色成形法によるMIDの構造¹⁴⁾

中空品の製造には通常ブロー成形が用いられるが、肉厚の不均一分布を避けるためには射出成形を用いる。その一つがDSI (Die Slide Injection Molding)¹²⁾である。この方法では第1工程で二つの部品を同時に成形し、その後固定側の型をスライドして二つの部品を合わせ鉢巻き状に接合成形する。他の一つはDRI (Die Rotary Injection)¹³⁾で、回転方式を採用する。その回転用金型の一例を図5に示す。ここで、「1次射出部」で半割りの二つの部品を成形し、「2次射出部」で接合成形する。ここで成形は順送方式として同時に行う。

さて、MID (Molded Interconnect Device, 成形回路部品) は3次元的電子回路をコンパクトに組み込んだ部品で、その製法としては、めっきにより部品表面を導通させる方法、回路を印刷したフィルムを用いてインモールドコーティングする方法などがあるが、導電性、非導電性プラスチックの2色成形による例を図6にあげる¹⁴⁾。なお、MIDは製法が多様であることより、今後の発展が期待される。

2段階成形法には属さないが、微細形状の射出成形例を図7に示す¹⁵⁾。金型はリソグラフィと電鍍によるもので、六角柱のピッチは88 μmである。また、サブミクロンの

図7 微細形状の射出成形例 (POM, 真空)¹⁵⁾

精度の成形例として光コネクタのフェルールや割りスリーブがある [佐藤 (1999.9)]。

2.3 金型の温度制御による成形特性の改善

(a) 金型の加熱、冷却による方法

射出直前に金型表面を高周波加熱する方法が提案されており [和田 (1991.2)], 5~10 sで120°Cまでの昇温が達成されている。しかしこの方法では成形品形状が平面でない場合それに合わせた形状のコイルを製作することが必要になる。成形中の金型温度を冷却水の温度変化によって制御する方法についてはレンズの成形などの例がある。

(b) 金型表面皮膜の通電加熱による方法

金型表面に絶縁膜を介して導電皮膜を配することができる。通電加熱により膜面のみを急加熱することができる。中村ら¹⁶⁾は厚さ2.5 μmのTiNの膜をAlN上にCVDによって形成させ、Jansenら¹⁷⁾は通電膜の上にポリイミドの保護膜をつけることによって1 sで100°Cの昇温と500回の耐久性能を確認している。また安原ら¹⁸⁾は通電加熱法における転写特性について、完全な転写の得られる膜面温度と圧力の関係を明らかにしている。

(c) 断熱皮膜を用いる方法

石見ら (1997.2) は、キャビティの両側の金型面の温度が異なる場合成形品の離型は低温側から始まることに着目し、筐体の成形について外側の金型面を熱伝導率の低い膜で被覆することによって離型を内側から生じさせ、ひけを内側にのみ集中して生じさせる方法を提案している。黒崎ら (1996.8) はスリット状流路の実験で型板に温度差をつけ、ひけが低温側に生じることを確認している。また片岡ら (1997.11) は断熱皮膜がウェルドラインの消去および金型面粗さの転写性の向上に役立つとして、実験的に次の転写条件を得ている。

$$(T_s - T_g) \Delta t \geq 2.0$$

$$\Delta t: T_s \geq T_g \text{ を満たす時間}$$

$$T_s: \text{金型表面温度}, T_g: \text{ガラス転移点}$$

2.4 金型内圧の制御

金型内圧と温度の計測値を用いてショット間のばらつきを制御することができる。焼本ら(1991.10)は詳細なモデルに基づく制御法を提案し、平野(1997.11)はファジィ制御によりノイズの影響を避ける方法を示している。また稲葉ら¹⁹⁾は電動式射出成形機の優れた制御性を生かして、標準のスクリー圧力波形を常に厳密に再現するように制御することにより安定した成形が可能であるとしている。またGao, Kamalら²⁰⁾はショット間のばらつきの問題に対して、金型の「平均冷却速度」を測定して冷却水温度にフィードバックする方法により、金型内圧力波形をほとんど一定にすることができると述べている。

3. 各種成形欠陥の検討の現状

(a) ひけおよびそり

ひけやそりの生成理由は明確である。したがってここでは2~3の例をあげるにとどめる。ひけはリブの付け根のリブと反対側の面に生じることが多い。これをガスアシスト成形によって防止する場合リブの付け根にガス流路を通すが、そのために冷却の遅れが生じるので注意が必要である[木元(1996.4)]。筐体の成形において外面のひけを防止する技術については2.3節で述べた通りである。

そりは板の両表面の冷却速度の差や面内の過大な圧力差によって生じる。よって、フィルム等をコーティングするインサート成形では注意を要する[河野(2000.4)]。

(b) 転写

しばの転写については小池(1991.8)による詳細な解説がある。微細パターンの転写は特に光学部品で問題になることが多い。安原ら²¹⁾は平滑部の広い光ディスク用スタンパについてピットの多重転写、離型時に生じるスクラッチ(転写ずれ)等の転写不良の発生条件を調べ、その原因について検討している。

(c) ウェルドライン

ウェルドラインは二つのフロントの会合部においてファウンテンフローによる内部の材料の供給が抑制され金型面からの冷却が進むために生じるものと解釈できる。その生成機構は横井ら²²⁾により説明されている。また斉藤ら²³⁾はウェルド部の温度分布を測定し、中子による冷却の影響を指摘している。

(d) フローマーク

横井²²⁾はフローマークを①レコードしま状のもの、②表裏で同位相のもの、および③表裏で逆位相のものの3種類に分類している。吉井ら²⁴⁾は光ディスク基板の成形の研究の中で、第一種のフローマークについて通常のものより1けた小さいもの(マイクロフローマーク、深さ200~20 nm)を見出し、斉藤ら²³⁾はフローマークの発生過程をビデオ撮影してその生成理由をフロント通過直後の薄い固化層の熱応力による曲がりによるものと説明して

図8 フローマーク発生領域(写真の右側半分)の境界のSEM写真²⁷⁾(HDPE, ×1500)

いる。

次に第三種のフローマークについて、Hobbs²⁶⁾は表面組織の観察結果からメルトフラクチャに類似の現象と考え、Heuzeyら²⁷⁾は、フローマーク部で表面層が大きく引き延ばされている観察結果(図8)より、金型との接触部の粘着力と表面の材料の伸び変形との間の相互作用における不安定現象としている。しかしどのモデルもまだ定性的な説明にとどまっており、さらに検討が必要である。

なお、シルバーストリークは材料内部の水分がフロントで暴発するために生じるもの²²⁾であるが、解明ずみの現象と思われるので省略する。

(e) 複屈折

複屈折の生成要因は分子配向の影響と残留応力の影響が重なったものと考えられている。そして光ディスクの断面内の複屈折率の分布²⁸⁾などの詳細な計測は可能になっているが、物理的解明は不十分である。今後複屈折、分子配向および流動変数の間の定量的関係の解明が必要である。

4. 工具面上のすべりおよび繊維配向

成形中の材料の流動挙動および成形品の力学的特性に大きな影響をもつ工具面上のすべりと繊維配向をとりあげ、これらに関する研究の動向を紹介する。

4.1 溶融樹脂と工具面とのすべり

キャピラリー法による粘度測定において円管内壁にすべりを生じる場合、すべりと粘度を同時に求める必要がある。その場合Mooneyの方法を用いる。これは、直径の異なる円管においてはすべりがあると速度分布が相似形でなくなるという性質を利用するものである。岡本ら²⁹⁾は、硬質塩化ビニルについてせん断ひずみ速度 1.0 s^{-1} 程度ですでに大きなすべりを生じることを報告している。セラミックスと樹脂の混合材料においても大きなすべりを生じる。図9は加藤ら³⁰⁾によるもので、円管の入口から出口にわたるすべり速度 u_s およびせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の分布

図9 円管の長手方向にわたるすべり速度 u_s と壁面せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の分布³⁰⁾

円管の直径 $D=0.15$ mm, 見かけ壁面せん断ひずみ速度 $=819.4$ s^{-1} , L : 円管長さ, P_c : 円管出口の背圧, Z : 座標

の一例である。出口側の背圧 $P_c=0$ の場合の出口近くではせん断ひずみ速度は極端に減少し、流れはほとんどプラグフローになる。なおこの結果は、すべりの圧力依存性を導入して高精度化した理論により得たものである。

Lan ら³¹⁾ は LDPE に対してもすべりのあることを認めている。そして、すべりは厳密には時間的に変化することよりこれを記憶現象によるものと考え、次のような関係式を仮定して実験結果をまとめている。

$$u + \lambda_s u_s = a \sigma^m$$

u_s : すべり速度, σ : せん断応力, a, m : 定数

λ_s : 記憶現象の大きさを表すパラメータ

4.2 保圧、冷却過程におけるすべり

Pantani ら³²⁾³³⁾ は固化過程における樹脂のひずみの測定法として次のような方法を考案している。あらかじめ金型キャビティ内面にひずみゲージを仮止めしておき射出成形を実行すると、ひずみゲージは樹脂側に接着される。そしてそれ以後は固化した樹脂のひずみが計測されることになる。

スリット状キャビティへの射出成形において保圧を変化させた場合の結果の一例を図 10 (a) に挙げる。ここで型開きの時間は 25 s である。この結果より、材料の収縮またはすべりは保圧付加中から始まること、保圧が小さい場合はすべり開始時間が早まることが分かる。図 10 (b) は保圧とすべり開始時間との関係である。すべり開始時間は保圧に対して単調に増加する。著者らはこのような現象に対して以下のようなモデルを考えている。すなわちすべりは、内圧に対応する力、摩擦力、および壁面の凹凸による拘束力の合計を固化層内の長手方向応力が越えるとき生じるとする。そして仮に凹凸による拘束力がないものとして開始時間を求めると、図 10 (b) の破線が得られる。こ

(a) 収縮ひずみ (すべり量) の推移

(b) 収縮 (すべり) 開始時間と保圧の関係

図 10 保圧・冷却・型開きの過程における変形挙動³²⁾³³⁾
保圧時間 2.5 s, キャビティ長さ 120 mm, ひずみ検出位置:
ゲートより 15 mm, P_h : 保圧

の計算値と実験値がほぼ一致することより、凹凸による拘束力はなかったものと判断する。

次に型開き後のすべりの大きさ (収縮量) に注目する。その実験値を保圧時間に対してプロットしたところ (図は省略), 保圧時間の短い範囲では上述のモデルによる値より小さく、型開きまですべりを生じないとして求めたすべり量とほぼ一致することが分かった。この結果について著者らは、金型面の凹凸による拘束力が型内でのすべり開始後急速に増大しすべりを阻止したためであるとしている。この報告は、計測の極めて困難な離型時の材料の変形挙動を綿密な考察により推定できている点で、注目値する。

4.3 繊維配向生成の理論および成形例

射出成形においては成形品の強度または剛性の向上のため

めに短繊維を混入する場合がある。繊維の量は通常 10～30 wt%である。これは、繊維間の干渉や繊維の流速分布への影響が大きい高濃度に属する。以下、繊維配向の生成に関する研究を中心として述べる。

竹田 (1990.1) は、低濃度形材料を中心として基本的な流れにおけるスキン層、コア層内の繊維配向、ファウンテンフローの影響等の解説を行っている。高濃度系の場合は繊維間の干渉の影響などが加わるが、低濃度系の特性を理解することは基礎として重要である。

Barbosa ら³⁴⁾ は円管による押出し実験を行い、繊維濃度分布、繊維長さ分布等について検討している。ただし繊維の平均長さがキャピラリー内径 (1.2 mm) より大きい場合を対象としている。また、繊維長さがキャビティ厚さに比べて十分短くない場合、繊維と金型壁面との干渉が繊維や流れの状態に影響を与え、壁面近くに繊維濃度の低層が形成されるため流れがブラックフローに近くなる。これは加藤ら (1990.10) による結果で、繊維含有樹脂のキャピラリー法による粘度測定法に対して問題を提起するものである。

高濃度系の繊維間の干渉を定式化したものとしては現在 Tucker らのモデルが唯一のものといっていよい。これは繊維の回転が隣接する方位角の繊維からの衝突によるとの考えより、繊維の回転速度が配向分布関数中の方位角に関するこう配に比例する、として求めたものである。一般に繊維配向は 2 次のテンソルで近似的に表示できる。Tucker ら³⁵⁾ はこの配向テンソルの発展方程式を過去に求めているが、さらに計算時間の短縮のための実用的な近似解法³⁵⁾を提案している。また Yamamoto ら³⁶⁾ は繊維を多数の球状要素の集合として解析する方法を提案し、繊維の折損の検討に有効であるとしている。

成形技術関係の解説としては、宮崎 (1997.11) によるものがあり、SCORIM、二重円筒による円周方向への配向促進法などが紹介されている。実際の成形のユニークな例として馬場ら³⁷⁾ のスピーカの成形技術の開発がある。対象とするスピーカの振動板は板厚 0.4 mm、流動長 180 mm の超薄物で、LCP の成形のために高速射出を用いている。まず弾性率を高めるために高剛性と高流動性の材料を組み合わせ LCP/LCP アロイを、また低密度化のために PP を用いて LCP/PP アロイを開発している。後者の組織は LCP と PP が非相溶であるため LCP が繊維状に配向し (図 11)、弾性率の向上に寄与している。これらの材料に炭素繊維を 20% 充てんした結果、音速で比較して、前者では繊維含有 PP の 2.73 倍、後者では 1.6 倍の性能の向上を達成している。また、戸倉ら (1999.12) は同様のスピーカ振動板 (肉厚 0.13 mm、直径 80 mm) の製作に対して、超高分子量 PE の高速射出 (850 mm/s) により PET の 3 倍の縦弾性率を得ている。繊維は用いていない。

ところで、結晶化は成形品の剛性、強度の向上のために

図 11 LCP/PP アロイの SEM 写真³⁷⁾ (×500)

重要である。そして結晶化速度は核生成と粒成長の速度によって決まり、その予測のための基礎式はすでに確立されている [伊藤 (1994.4)]。しかし最近ひずみ速度が結晶化を促進する効果をもつことが注目されており、Isayev ら³⁸⁾ はこれらの現象を定式化し、メタロセン iPP の結晶化度を解析して従来の Ziegler-Natta-iPP の結晶化特性と比較検討している。

5. 今後の課題

成形技術については各方面で着実に新技術、改良技術の開発が行われている。その開発の方向は成形圧力の低減と成形品の一体化 (複合化) にある。この中で特にめざましい発展を見せたものがガスアシスト成形である。この基本技術は 30 年前に出されていたが、最近の急速な発達の背景には OA 関連機器の需要の伸び、成形精度向上の必要性などの市場からの要求と成形機等の制御技術の向上がある。新技術の開発の基本姿勢としては、このような成功例を参考として市場や技術の発達に留意しつつ、直面する課題を冷静に分析することが重要であろう。新しい発想を生み出す特效薬はないが、経験者のアドバイスは参考になる⁴⁰⁾。

さて、プラスチックの成形においては各種の成形不良を型設計段階で予測することが重要で、その基礎となるものが CAE である。最近の数値解析の環境は格段によくなっており、CAE も通常用いられる構成式による解析については数値解析上の問題はほとんどなくなってきている。そして、実際に成形に必要な特性はほとんど市販ソフトで解析可能である [松岡 (1999.4)]。しかし解析精度についてはなお十分とはいえず³⁹⁾。誤差の原因の一つは粘度にある (4.1 節参照)。特にそりや残留応力の解析にはガラス転移点近くの低温での粘度が影響するが、この問題の検討も十分でない。結晶化特性の定式化にも検討の余地がある。

ところで、金型内の流動、固化状態の計測技術は過去 10 年に大きく進歩している [横井 (1999.4)、西脇 (1997.

11)]. よって、これらの計測技術を武器として上述の諸問題の見直しを行うことにより CAE の基礎を確かなものにすることは可能であろう。またこれに並行して、3 章に述べた各種成形不良の生成規準を明確なものとし、CAE の結果の適切な評価のために不可欠である。そして、さらに多様な材料への対応のためにそれらを求める試験法を確立することが必要である。

参 考 文 献

- 1) 岩橋俊之：プラスチック溶融成形の技術展開，塑性と加工，**40**，458 (1999) 181.
- 2) 館山弘文，丸橋吉次：プラスチック成形加工の 1990 年代の技術進歩と 21 世紀への展望，塑性と加工，**39**，450 (1998) 686.
- 3) 西村哲郎：家電・情報機器，成形加工，**11**，4 (1999) 304.
- 4) 坪井 淳：自動車用樹脂材料の動向，成形加工，**11**，4 (1999) 296.
- 5) 梶田芳治：四軸平行制御射出システムプレス成形機とその成形効果，プラスチック，**50**，8 (1999) 60.
- 6) 館山弘文，加藤 毅，鈴木淳広，渡辺広三：低圧成形技術と応用技術，成形加工，**9**，8 (1997) 605.
- 7) 和田明敏：ガスアシスト射出成形，成形加工，**11**，4 (1999) 247.
- 8) G. A. A. V. Haagh, H. Zuidema, F. N. van de Vosse, G. W. M. Peters and H. E. H. Meijer: Towards a 3-D Finite Element Model for the Gas-Assisted Injection Moulding Process, *Int. Polym. Process.*, **12**, 3, (1997) 207.
- 9) 寺山正志：実用化が進む複合射出成形機，プラスチック，**47**，8 (1996) 48.
- 10) 泉田敏明，本間精一，島岡悟郎，田原久志，神崎文彰：CFI プロセス（ハードコート PC シートによる一体化成形）技術の開発，成形加工，**9**，8 (1997) 598.
- 11) 春日井賢治：DVD 成形と IC カード成形，成形加工，**10**，3 (1998) 151.
- 12) 西田正三，恵木忠雄，寺岡淳男，上村孝志，数田邦和：ダイスライド方式による中空射出成形の開発，成形加工，**8**，7 (1996) 460.
- 13) 菅 武春：DRI (Die Rotary Injection) 成形技術と応用，塑性加工学会第 12 回プラスチックプロセスセミナー，(2000) 17.
- 14) 岡田常義：MID (成形回路部品) の動向，成形加工，**11**，9 (1999) 734.
- 15) 沼澤稔之：微細加工技術を革新するマイクロモールド技術の極限，成形加工，**11**，12 (1999) 948.
- 16) 中村千明，田中道夫，福田 厚，船木正彦，北市 敏，木元英俊：薄膜電気抵抗体による型壁面急速加熱法，合成樹脂，**41**，3 (1995) 47.
- 17) K. M. B. Jansen and A. A. M. Flamen: Construction of Fast Response Heating Elements for Injection Molding Application, *Polym. Eng. Sci.*, **34**, 11, (1994) 894.
- 18) 安原鋭幸，加藤和典，石原利彦：通電加熱金型による微細凹凸パターンの転写特性，成形加工，**99**，(1999) 197.
- 19) 稲葉善治，上口賢男，根子哲明：電動式射出成形機における圧力波形追従制御（第 1 報）—流動圧力制御における学習制御の適用—，精密工学会誌，**65**，2 (1999) 293.
- 20) F. Gao, W. I. Patterson and M. R. Kamal: Cavity Pressure Control during the Cooling Stage in Thermoplastic Injection Molding, *Polym. Eng. Sci.*, **36**, 19, (1996) 2467.
- 21) 安原鋭幸，加藤和典，藤沢直樹，大竹尚登：光ディスク基板の射出成形における転写特性の研究，成形加工，**12**，6 (2000) 362.
- 22) 横井秀俊：射出成形品の表面不良現象と対策，成形加工，**6**，2 (1994) 100.
- 23) 斉藤卓志，佐藤 勲，上杉憲治，半田浩一：射出成形品の邪魔ピンまわりに生じるウェルドの発現機構に関する研究—充填流動および温度分布の可視化—，成形加工，**12**，6 (2000) 325.
- 24) M. Yoshii, H. Kuramoto, T. Kawada and K. Kato: The Observation and Origin of Micro-Flow Marks in the Precision Injection Molding of Poly-Carbonate, *Polym. Eng. Sci.*, **36**, 6, (1996) 819.
- 25) 斉藤卓志，佐藤 勲，黒崎晏夫：レーザ干渉を利用した射出成形品表面レコード溝状フローマークの発現プロセスの解明，成形加工，**11**，11 (1999) 914.
- 26) S. Y. Hobbs: The Development of Flow Instabilities during the Injection Molding of Multicomponent Resins, *Polym. Eng. Sci.*, **32**, 11, (1996) 1489.
- 27) M. C. Heuzey, J. M. Dealy, D. M. Gao and A. Garcia-Rejon: The Occurrence of Flow Marks during Injection Molding of Linear Polyethylene, *Int. Polym. Process.*, **12**, 4, (1997) 403.
- 28) 吉井正樹，金田愛三，上田雅信：射出成形薄肉円板の三次元屈折に及ぼす成形条件の影響，高分子論文集，**47**，6 (1990) 491.
- 29) 岡本淳一，池田順一，石橋 亮：スリットダイを用いた硬質塩化ビニルの流動特性，塑性加工学会プラスチックプロセス分科会資料，(1992) 47.
- 30) 加藤和典，鄭 湧皓，大竹尚登：セラミックス成形助剤混合材料のキャピラリー内面のすべりと粘度測定法に関する研究，成形加工，**11**，6 (1999) 454.
- 31) S. K. Lan, A. J. Giacomini and F. Ding: Dynamic Slip and Nonlinear Viscoelasticity, *Polym. Eng. Sci.*, **40**, 2, (2000) 507.
- 32) R. Pantani, K. M. B. Jansen and G. Titomanlio: In-Mould Shrinkage Measurements of PS Samples with Strain Gages, *Int. Polym. Process.*, **12**, 4, (1997) 396.
- 33) R. Pantani and G. Titomanlio: Analysis of Shrinkage Development of Injection Moulded PS Samples, *Int. Polym. Process.*, **14**, 2, (1999) 183.
- 34) S. E. Barbosa and J. M. Kenny: Processing of Short-Fiber Reinforced Polypropylene. I. Influence of Processing Conditions on the Morphology of Extruded Filaments, *Polym. Eng. Sci.*, **40**, 1, (2000) 11.
- 35) B. E. VerWeyst, C. L. Tucker III and P. H. Foss: The Optimized Quasi-Planar Approximation for Predicting Fiber Orientation in Injection-Molded Composites, *Int. Polym. Process.*, **12**, 3, (1997) 238.
- 36) S. Yamamoto and T. Matsuoka: Dynamic Simulation of Flow-Induced Fiber Fracture, *Polym. Eng. Sci.*, **35**, 12, (1995) 1022.
- 37) 馬場文明，原 宏造，村上 治：繊維強化液晶ポリマーの高速射出成形技術とスピーカー振動板への適用，成形加工，**10**，8 (1998) 642.
- 38) A. I. Isayev, Y. Churdant and X. Guo: Comparative Study of Ziegler-Natta and Metallocene Based Polypropylenes in Injection Molding, *Int. Polym. Process.*, **15**, 1, (2000) 72.
- 39) 天野 修：射出成形の基本技術に偏った議論，成形加工，**7**，8 (1995) 511.
- 40) 五弓勇雄：塑性加工とのつながり，塑性と加工，**15**，165 (1974) 807.