



contents

I ショートショット未然防止のための成形技術 …… p.2	VII フロアマーク発生の要因と種類 …… p.12
II ばり発生未然防止のための成形技術 …… p.6	VIII ボイドおよびひけ未然防止のための成形技術 p.13
III シルバー未然防止のための成形技術 …… p.6	IX 寸法公差不良未然防止のための成形技術 …… p.14
IV 異物発生の未然防止のための成形技術 …… p.8	X 形状精度不良未然防止のための成形技術 …… p.17
V 転写不良未然防止のための成形技術 …… p.9	XI 成形品破損防止のための成形技術 …… p.18
VI ウエルド未然防止のための成形技術 …… p.11	

射出成形不良発生の未然防止のための成形技術 (工程で作り込む選別や手直しのない直行率 100%)

高野技術士事務所 所長 高野 菊雄

企業の総合的射出成形技術(樹脂グレード・成形品形状設計・金型設計製作・射出成形・二次加工・品質評価の総合技術)の高度なレベルによる直行率100%のものづくりは、コスト低減にもつながる工程不良ゼロ・マーケットクレームゼロ・リコールゼロを達成し、企業の技術レベル・信頼性を高める道として重要な経営方針の1つに掲げられている企業は多い。しかし千差万別の樹脂グレードおよび千差万別の成形品形状での直行率100%成形達成のための不良ゼロ対策に苦慮されているのも現実である。現場・現物・現状の3ゲン主義により不良状況を適確に把握した事例研究に裏打ちされた不良対策経験と、原理(理論)・原則(各企業の技術標準・チェックリスト)とを両輪としての5ゲン主義で、寄与率が高いと予測される要因に対策し、それを検証する事例研究の成功事例の豊富さは総合的成形技術レベルアップの達成には必要不可欠である。

長足の進歩をしてその恩恵を享受している医療分野と同じく、時代と共に進歩している成形技術の「疑問がある古くから守られているこれまでの常識を正し、新しい役に立つと考えられる成形技術を顕在化させて活用する温故知新」が技術の進歩のために必要である。また設計部門に各部門が集まり、意見を申し出て事前の対策を決定する重要保安部品のコンカーレント設計のように、個人の技術依存ではなく、成形各部門の組織としての活動が直行率100%の成形を可能にする有力な方策である。これと同じく品質管理手法の1つであり常識となっているブレ

ンストーミングによる特性要因図でも優先的に検討すべき寄与率の大きい対策が明確でないためによく経験した「船頭多くして、船山に登る」のように有効な方針・対策が決まらない成形不良対策会議は少なくなるであろう。

射出成形は、原料ペレット投入・熔融流動・射出充填・加圧保圧・冷却固化・離型のプロセスによる成形方法であり、それぞれのプロセスに樹脂グレード・成形品形状が関与する一様でない成形不良発生の要因が潜み・介在する。それぞれの成形不良に対する寄与率が高い要因を決めることができる総合的成形技術レベルが成形不良未然防止および成形現場での不良対策の成否を左右すると言える。

直行率100%を目指すこの講座の内容は、2009年に工業調査会から出版された単行本「プラスチック成形技術の要点」を参照にしたものであるが、工業調査会倒産により丸善出版から同名書籍として再出版され、日本合成樹脂技術協会その他のセミナーでテキストとして使用しているものである。「不良ゼロのものづくり技術の構築」という視点で筆者の樹脂メーカーだけでの実績ではなく、技術サービス(現在のソリューションビジネス)での多くのプラスチック業界他社での長年の活動をも含めて蓄積された経験およびそれに対する樹脂メーカーとしての研究・検討成果などの技術伝承のつもりのものであり、全てが正しいとは限らないと思うが、体験した事実を多くの読者が共有して、不良発生のないものづくりに少しでも役に立てばとの期待もある。

1 ショートショット未然防止のための成形技術

1.1 ショートショット発生要因

多数個取り金型による同じ成形品での不良パレートカーブで、ショートショットとばりが1~2位を争うランクになる事例を多く経験しているが、これはそれぞれの寄与率の大きい要因に対策せずに、その不良に対して交互に成形条件の微調整を繰り返して対策しているためと考えられる。ショートショット未然防止の基本的要因は、先ず企画する成形品の厚みおよび流動距離に対して使用を考えている樹脂グレードの流動性余裕度である。特に厚みが薄い成形品では流動性不足が発生しやすい。流動性に余裕があるのにショートショットが発生する次の要因はベント不良であるので、金型および成形機からのベントなどの最適化を検討しなければならない。樹脂からの揮発物析出による金型ベントの閉塞によるベント効率低下に対するクリーニングはベント不良対策に含まれる重要なポイントである。流動性・ベントに問題がない場合の不良発生要因としては、a) 多数個取りランナでの同時充填性、b) 樹脂温度のばらつき(スクリュ構造も重要な要因)、c) スプル・ランナの粉碎したままの再生材とバージンペレットの粒度分布が異なる定量混合成形や比重の異なる成形材料の定量混合成形、d) 熱分解や加水分解の程度が異なる成形材料の定量混合成形、e) ピンゲート・トンネルゲートのゲート切れかすによるゲート閉塞、f) 成形品重量変動係数で判定できる成形条件のばらつきなどの要因がある。

1.2 ショートショット発生場所の確認

ショートショットが発生する次のような場所によって発生主要因が異なるので3ゲン主義による状況確認に際しての重要なポイントである。

- a) 均一厚みおよび対称形状成形品での流動末端
- b) 不均一厚み成形品の中に発生するエアポケット部
- c) 不均一厚み成形品で流動のヘジテーション(一時流動停止)が起こる厚みが薄い部分の最終充填部
- d) 金型構造的にエア・ガスが抜けにくい掘り込み部分
- e) 多点ゲートのウエルド部

1.3 流動性の余裕度検討での留意点

流動性の余裕度はCAEの流動解析(コンピュータ支援による流動解析)によるのが理想的であるが、

中小企業ではスパイラル流動性のデータを利用しての確認が一般的である。またキャピラリーレオメータによる溶融粘度の利用もあるが射出成形の流動性余裕確認には実務的でない。この時次の点に留意しなければならない。

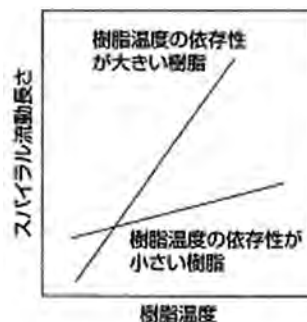


図1 スパイラル流動長さの樹脂温度依存性(イメージ図)

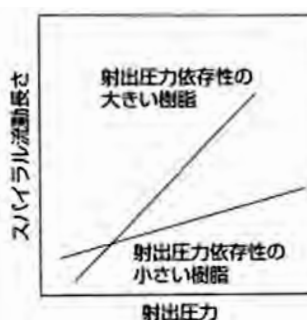


図2 スパイラル流動長さの射出圧力依存性(イメージ図)

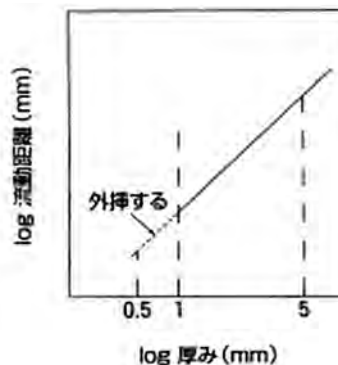


図3 成形品厚みと流動距離の関係

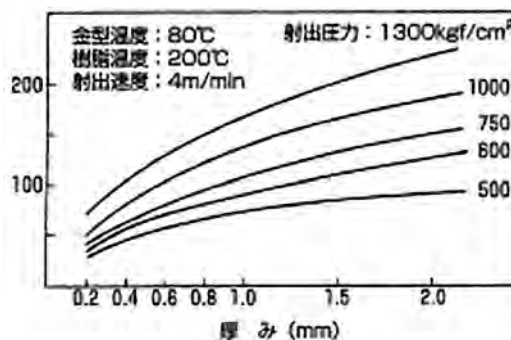


図4 アセタルコポリマー標準グレードのL/tと厚みとの関係

- a) 色相変化・熱分解・加水分解・加熱によるガス発生率などの観点での許容上限樹脂温度の明確化が必要、

- b) さまざまな樹脂グレードのスパイラル流動性は **図 1** の樹脂温度も **図 2** の圧力も、共に依存性の大きいものと依存性が小さいものがあるので、それぞれの複数成形条件での流動性検討が必要である。キャピラリーレオメータである高化式(高分子化学式)フローテスターで測定した各種樹脂の熔融粘度でも同様の傾向で、検討した樹脂では PE・POM・PA6 は依存性が小さく、PS・PC・変性 PPE・PMMA は依存性が大きい樹脂であった。
- c) スパイラル流動性は筆者が 1955 年の米国刊行の本で見たアルキメデスの断面半円形で渦巻き型キャビティ(この文献だけで関西地区の金型メーカーで作製)のものやその後厚みと流動性との関係を知るために一般的となった断面矩形の馬蹄型キャビティや短冊型のものなどがあるが、キャビティ厚みを水力学的相当半径「 $2 \times (\text{断面積} / \text{周の長さ})$ 」で厚みを換算して同じグラフに纏めて比較検討に活用することが可能である。
- d) 厚み 1 mm 以下のスパイラル流動長さのデータがなければ、**図 3** のように厚み 2~3 mm 前後の同じ成形条件のデータを直線外挿して薄い厚みでの流動性を推定できる。しかし結晶化速度や凝固速度が速い樹脂ではあまり薄いところでは直線外挿性がなくなる。
- e) 流動性指標の 1 つとして **図 4** の L/t が使用されることがあるが、 L/t の値は厚みおよび測定条件で変化するから、それらが明記されていない L/t は検討用としては有用でない。

4 金型からのベント設計

ベント設計は金型からと成形機シリンダーおよびホoppaから最適化しなければならない。

(1) 金型からベントしなければならないエアおよびガス

- ① スプル・ランナ・キャビティにはエアおよび樹脂から発生するガスがあり、スプル・ランナの容積に対してキャビティの総容積が非常に小さい場合には、キャビティベントでは不十分でランナベントは必須である。
- ② 成形機シリンダ内の樹脂の熱分解で発生するガスがある。成形機ホoppaから投入されるペレットは 100% 先入れ先出しにならない。スクリュメータリング部やノズル内面で熔融状態の樹脂が付着して長時間滞留し、ここでの熱分解によるガス発生があるので、1 ショット重量・成形サイクル時

間・スクリュフライトの熔融樹脂内容量によって計算してよく使用されるシリンダ内滞留時間での議論・判断は役に立たない。

- ③ 樹脂には重合しなかった残留モノマーや重合度が小さいオリゴマーと言うガス化しやすいもの(VOC---揮発性有機化学物質)があることの理解が必要である。
- ④ 顔料や改質剤によっては樹脂の分解を促進するものがある。pH が酸性の添加剤や顔料で熱分解が促進されるものや pH がアルカリ性の添加剤や顔料で加水分解が促進されるもの、特定の金属で分解が促進されるものなどさまざまである。例えば酸性顔料による POM の例を **図 5** に示す。ポリカーボネートではアルカリ性顔料による加水分解促進やアルカリ性の静電気防止剤添加の帯電防止シートによる PC 成形品の加水分解の海外での事例および光拡散剤添加の改質グレードでガス発生による不良率増大事例などがある。ポリプロピレンの銅害もこの範疇のものとして挙げるができる。また低分子量の改質剤には成形温度でガス化してキャビティ表面に析出するモールドデポジットとなるものもある。成形温度でのガス発生量は **図 6** のように複数の温度で 1~3 時間程度加熱しての重量減少率を事前に測定して検討することが是非必要である。

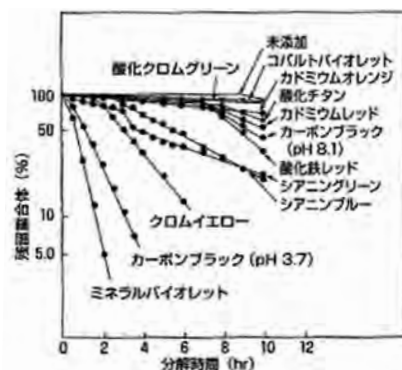


図 5 顔料によるポリアセタールの重量減少速度¹⁾

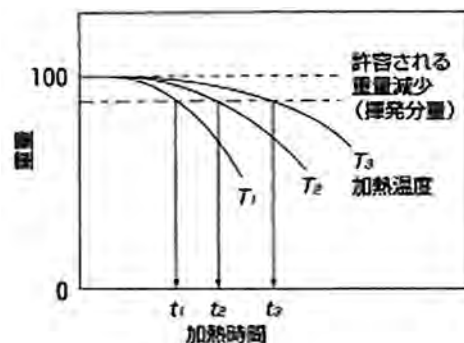


図 6 樹脂の過熱による重量減少と過熱温度・加熱時間の関係

(2) 金型からのベント方式

次のような各種のベント方式がある。

各種樹脂のエアベントの深さの例 (単位: mm)²⁾

ポリエチレン	0.02
ポリプロピレン	0.01~0.02
ポリスチレン	0.02
ABS樹脂	0.03
ポリアセタール	0.01~0.03
ポリアミド	0.01~0.02
PBT	0.01~0.03
ポリカーボネート	0.01~0.03
PPS (注)	0.005

(注) 筆者による追加

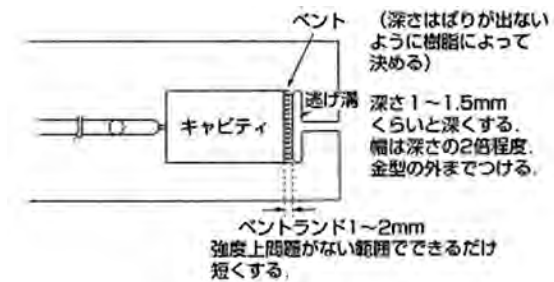


図7 流動、末端に付けるスリットベントのディメンションの一例

①スリットベント

図7のように流動末端につけられる基本的なベントである。ベントからばりが発生しないように樹脂ごとに深さに対する配慮がされているが、ベントランドおよびエア・ガスの逃げ道の深さおよび幅はベント効率に大きく関与するので企業の技術標準として決められていなければならない。またベントランドはできるだけ短くすることに留意しなければならない。

②分割コアによるベント

コアの分割面から排気するもので、ベントの寸法はスリット式と同じ考え方にする。

③ベントピン方式

エアポケット部のベントしたい所にピンを立て、ベントするもので、ベントの寸法はスリット式と同じ考え方である。

④ノックピンからのベント

ノックピンを利用したもので、ベントピン方式と同様である。

⑤ポペット弁方式ベント(負圧ストローク方式)

金属スプリングで支持された円錐の弁がベントを形成し、これを開閉して排気する。熔融樹脂が弁部に到達するまでは弁は開いて排気するが、熔融樹脂が到達すると樹脂圧力で弁が閉じるようになっている。

⑥ポーラスメタル使用によるベント

空隙率が20%程度の多孔質金属の微小空孔を排気路とするものである。

⑦真空ベント

ランナおよびキャビティ部分をシール状態にして、真空ポンプなどによって強制的にエアおよびガスを排気するものである。

(3) 樹脂からの揮発分析出によるベントの閉塞対策

①低分子量デポジット

シリンダ内で発生したガスの一部はキャビティ表面およびベント部に析出(モールドデポジット)する。これによってベントが閉塞されるとベントをつけていないのと同じ状態となるので、何がデポジットしているかを分析して、定期的なクリーニング・メンテナンスしなければベントをつけていないのと同じ状態で成形していることになる。クリーニングは生産計画に組み込まれていなければならない重要なポイントである。

低分子量のデポジットは分析結果により有機溶剤を選定すれば除去できるが、非結晶性樹脂の場合にはソルベントクラックに対する配慮が必要である。

②高分子量デポジット

モノマーがキャビティ表面で重合しての高分子物質(POMの例)や衝撃強さ改質剤として添加されている高分子物質が分離析出したデポジットのクリーニングは樹脂メーカーと個別に検討しなければならない。

(4) 射出成形機からのベント

①ベントタイプ射出成形機

成形機シリンダ内で発生したガスをキャビティまで持ち込み、金型ベントで排気するのは効率的ではないし、十分なベントはできない。理想的にはベントタイプ射出成形機使用のベントである。ベントタイプ射出成形機では図8に示されるように1段目のスクリュで可塑化された熔融樹脂が2段目スクリュの深溝部でガスによって発泡するので、ベントポートから真空で脱気するものである。ペレットを生産する押出成形では、スクリュは連続で回転しているが、ベントタイプ射出成形では成形サイクル中

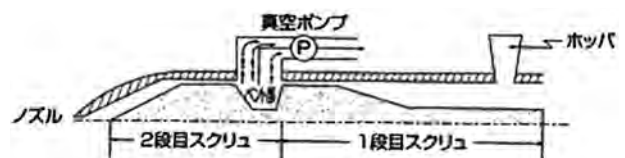


図8 ベントタイプ射出成型機の脱気概念図

の可塑化時のみに回転し、射出・充填・保圧・冷却・離型のサイクルではスクリュは停止状態である。この時ベントポートから発泡している熔融樹脂がスクリュ形状や発生するガス量によってはベントアップ(盛り上がり)して、ベントポートや周辺に付着し、滞留して異物化する。ベントアップを防止するスクリュ形状設計および定期的クリーニングに対する配慮が必要である。

②射出成形機ホッパからの吸引によるベント

図9の射出成形機シリンダ内で発生したガスを成形機ホッパから真空ポンプなどで吸引排気する周辺機器が開発され、ベントタイプ射出成形機のような効果が確認されて、標準装備的に使用することができるようになっている。

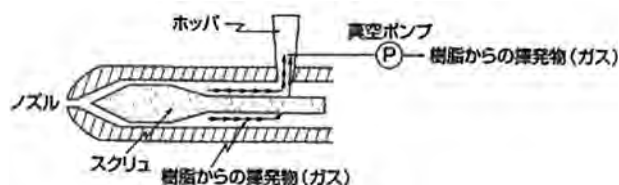


図9 ホッパからの揮発物の脱気概念図

③電動射出成形機プレインジェクションによるベント

サーボモータ使用の電動式射出成形機では、100%型締めをしない状態で射出して金型パーティングから脱気し、バリ発生の直前に完全に型締めしてエア・ガスを抜きながら成形できる。この方式ではどの程度のガスがあるかの目視ができるメリットもある。

④適正型締め力による金型パーティングからのベント

不必要な大きい型締め力にしないで、バリが発生しない程度の適正型締め力で金型パーティングラインからのベントを期待するものである。

(5)多数個取りキャビティの同時充填性

多数個取りキャビティで同時充填性がよくないと、一般的に寸法ばらつきが大きくなるとかキャビティによってショートショット・バリ・気泡などの不良が発生する。均一なばらつきの少ない成形のためには、同時充填性の良いランナ設計を心掛けねばならない。等長8個取りキャビティによるPOM成形で、内側キャビティと外側キャビティの寸法が品質管理図法的に見ると、層別される事例があったが、H型・X型・スポーツトーナメント組み合わせ・車の車輪型などの等長ランナでも同時充填しな

い事例の経験やデータ・解説があるので、等長ランナだからと同時充填を全面的に信じてはならない。また串型やS字タイプなどの不等長ランナの同時充填性のためのランナ設計はCAEでできるが、充填速度を少し変えただけで同時充填性が崩れた経験もある。串型ランナでもスプルから遠い方がショートショットになるのか近い方がショートショットになるのかには、ヘジテーションを起こしやすいキャビティ厚みかどうかによって変化する事例もある。

(6)自動切断ゲートの切断不良関与のゲート詰まり

ピンゲート・トンネルゲートではゲート形状によってはゲート切断が均一にならず、かつ切れ滓が静電気でキャビティ表面に付着しこれがゲート詰まりに関与し、ショートショットの要因となる。

(7)床置き定量混合機によるショートショット

バージンペレットのみの成形では不良発生のない安定した成形が継続されるのに、スプル・ランナの粉碎材とバージン材との定量混合機による混合成形で、さまざまな成形品品質のばらつきが大きくなり、ショートショットが発生する事例もあったので、キャビティに圧力センサを設置して量産成形して図10のような圧力変動のデータが得られた。これは形状不均一の混合成形材が、ホッパドライヤなどの容器内を流下する時に形状や大きさの異なるものに分離が起こり、これが原因で樹脂温度がばらつくことに要因があると推定された事例や比重差のある混合成形およびガラス繊維強化材とバージンペレットとの混合成形でも成形材料の分離による成形不良の事例の経験がある。

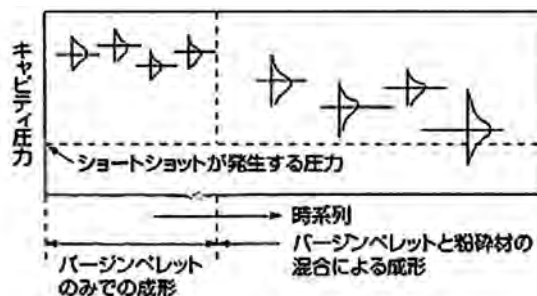


図10 粒度の異なるペレットの混合成形によるキャビティ圧力のばらつき(イメージ図)

(8)エステル結合の樹脂の加水分解のばらつき

休日明けの成形立ち上げや樹脂替えで不十分な予備乾燥の状態で量産に切り替え・移行すると、加水分解の程度差のばらつきが、ショートショットとばりとのばらつき発生要因となる。加水分解防止には成形材の吸湿率の測定による判断が必須である。

I ばり発生未然防止のための成形技術

1 ばり発生の要因

金型は個別に加工されたさまざまな部品が組み立てられて作られているので、①各部品の工作精度と組み合わせ精度、②キャビティプレート・バックプレート・スペーサブロック・ピラーなどによる金型剛性構造と射出圧力による金型変形および成形機プラテンの穴による金型剛性不足、③スライドコアなどの摺動部品および組み立て合わせ面などの摺動部の射出圧力によるずれ発生、④ノックピンなど摺動部のクリアランス、⑤金型分解クリーニングでの再組立て精度など熔融樹脂が入り込む大きさの異なるクリアランス(隙間)がある。ここに熔融樹脂が入り込んでばりが発生するかどうかは、a) 樹脂の熔融粘度特性(熔融粘度の絶対値・温度依存性・圧力依存性)、b) 結晶性樹脂では結晶化速度・非結晶性樹脂では凝固速度、c) エステル結合の樹脂では加水分解の程度、d) 金型鋼材に対する樹脂による腐食性や摩耗性などが関与するので、これらの樹脂特性を理解なしや無視しての金型設計・製作をしてはならない。

2 ばり発生に関与する樹脂特性

上述したように、同じ金型構造・切削加工精度の金型によっても、樹脂・グレードによってばり発生の程度に差異があることを理解していないと、安定したばりレス成形はできないが、これを理解していない金型部門の事例は少なからずの経験がある。ばり発生に関与する特性として次のようなものがある。

- ① 熔融粘度が小さいもの程クリアランスに入り込みやすいので、ばりが発生しやすい。
- ② 熔融粘度の圧力依存性が大きいとばりは発生し難い。圧力依存性が大きいと可塑化時の高い圧力による低い熔融粘度が、キャビティ内流動による流動末端での圧力低下によって熔融粘度が高くなるためである。その一例として架橋タイプのPPSと直鎖タイプのPPSのばり発生差異を図11に示す。これは両者の高分子構造に基づく熔融弾性の差異によると推察される。
- ③ 結晶性樹脂では結晶化速度がばり発生に大きく関与するがその程度が大きいので無視できない。例えば熔融粘度が低く超流動性のPPSと液晶ポリ

マー(LCP)の両者で、PPSはばりが出やすいがLCPはばり発生の心配が殆どないのは、両者の結晶化速度の差異に大きく依存する。結晶性樹脂の結晶化速度は、アブラミ(Avrami)の式などで求められるが、結晶性樹脂の相対的結晶化速度の差異について図12³⁾がある。

結晶性樹脂の結晶化速度はばりだけでなく、転写性・透明化・離型性・冷却速度・成形サイクルにも関与する重要な成形性である。

- ④ 樹脂による金型鋼材の腐食性があり、ばり発生の要因の一つである。例えば、PPS(硫酸)、POM(蟻酸)、ハロゲン系難燃剤、フッ素樹脂(フッ酸)、塩化ビニル樹脂(塩酸)などとモノマーが関与する要因となる。
- ⑤ エステル結合の樹脂では予備乾燥に関連する加水分解のばらつきが、ばりやショートショットが交互に発生するばらつきの要因として見られる。

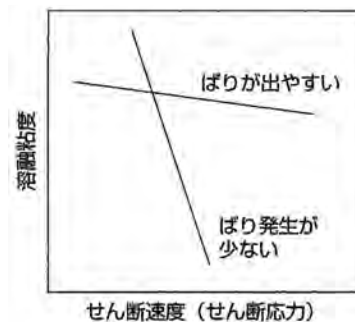


図11 熔融粘度のせん断速度依存性とばり発生の関係 (PPSでばりが出やすい直鎖タイプとばり発生が少ない架橋タイプの熔融粘度特性の差異)

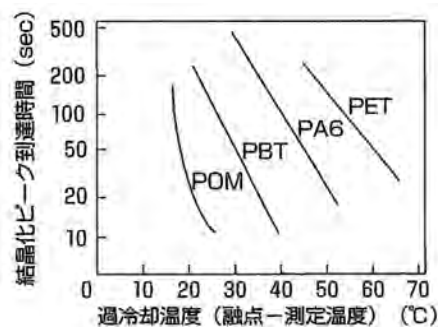


図12 過冷却温度と結晶化速度の関係³⁾

II シルバー未然防止のための成形技術

1 シルバー発生の要因

成形品の表面に熔融樹脂の流れの方向に発生する細く走るような線の束で銀色に見えることから銀条(シルバー)と言われている。キャビティ充填中の溶

融樹脂に気泡が発生し、これがフローフロントに押し出され、さらにキャビティ壁に押し付けられることにより、気泡が押しつぶされて銀条になるのである。シルバーの主要因はペレットが吸湿している水分であるから、許容吸湿率まで乾燥するさまざまなタイプの予備乾燥機の選定に最大のポイントがある。予備乾燥の選定では、シルバーの他に加水分解にウエイトを置かねばならない樹脂もある。許容吸湿率は予備乾燥機の出口の値ではなく、スクリュに投入される直前のペレットの吸湿率が許容値以下になっていなければならないので、予備乾燥機の性能と乾燥機出口からスクリュ投入までの間の吸湿が問題となる。このような予備乾燥システムの構築と吸湿率の日常管理のためには、ペレットの吸湿率が測定できなければならないし、樹脂グレードの許容吸湿率が明確に決められていなければならない。吸湿率が許容値以下であってもシルバーが発生することがあるが、残留モノマー・流路での熱分解ガス・顔料や改質剤による熱分解促進によるガス・流路でのエアの巻き込み・吸湿率の大きい添加剤・ホッパ下の過冷却による結露などが要因となる。

2 予備乾燥機の方式と特徴

(1) 熱風乾燥機

ペレットの吸湿率低下のためには、乾燥温度を水の沸点の100℃以上にするのが効果的であるが、非結晶性樹脂では乾燥する樹脂グレードの荷重たわみ温度以上で乾燥機内のペレットが熱と自重により軟化・相互付着するので荷重たわみ温度以上の熱風は乾燥に使用できない。結晶性樹脂では荷重たわみ温度の制約がなく、目的に合わせ乾燥温度が決められている。しかし結晶性のポリアミド(PA)のナチュラル材では一般的に工程管理のための成形条件表では変色防止の観点から熱風温度80℃としているが、これでは図13⁴⁾のように気泡などの不良が発生しない0.1～0.2%の吸湿率には乾燥できない。空気の膜分離による窒素での高温乾燥や除湿乾燥が選択肢となる。ただしPAに対して水分は可塑剤の効果で流動性に関与することは理解していなければならない。

(2) 除湿乾燥機

エステル結合の樹脂での加水分解防止には、図14⁴⁾のようにペレットの除湿効果が大きい除湿乾燥機の使用は必須である。除湿乾燥の乾燥効果には露点温度が関与する。露点温度を低く設定すると乾燥に使用する空気の絶対水分率が低下するので、この空気を乾燥温度に高めると相対湿度の低い空気とな

る。除湿乾燥機開発初期には露点温度は-30℃であったが、その後の必要性に応じて-40℃以下のものが開発されている。

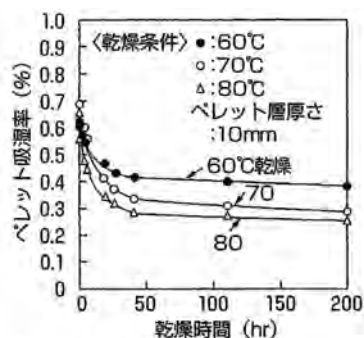


図13 ポリアミド6-6の乾燥による吸湿率変化⁴⁾

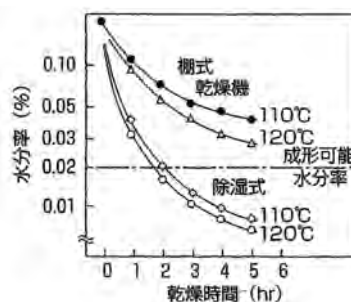


図14 PBTの除湿乾燥と通常の熱風乾燥の比較⁴⁾

(3) 真空乾燥機

真空乾燥機は、初期には実験室で使用されるバッチ式のもので、図15⁴⁾のようにポリアミドでも温度および真空度(減圧度)によっては、吸湿率が0.2%以下に乾燥できる。しかし連続成形となる量産の射出成形には使用できなかったが、射出成形に使用できるホッパドライヤタイプの真空乾燥機が開発された。ペレットの温度上昇は、熱風乾燥機や除湿乾燥機と異なり、空気の対流によるものではなく、熱板とペレットとの熱伝導によるものであり、ホッパドライヤ内の熱板配列設計がペレットの温度分布を支配する。残留モノマーの沸点(温度・圧力)によっては、ホッパドライヤタイプの真空乾燥機使用の量産成形で残留モノマー量が低下してシルバーや気泡発生防止が可能となった樹脂グレードの事例があった。

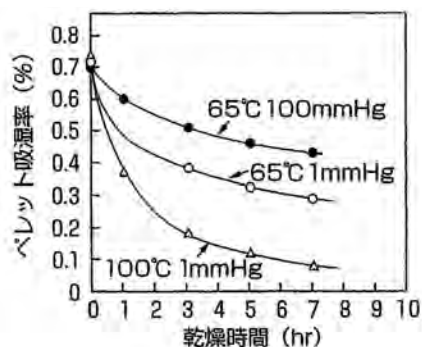


図15 ポリアミド6-6の減圧乾燥機(ペレット層厚さ10mm)による乾燥条件と吸湿率変化⁴⁾

③許容吸湿率の明確化と管理

予備乾燥での許容吸湿率は、外観不良や加水分解などの不良発生防止の目的を明確にして決めていなければならないが、その一例を表1に示す。要求レベルの品質によっては、これらの許容吸湿レベルを変更しなければならない。一般的にはこれらを達成するために何度の熱風で何時間乾燥するかが決められて工程管理をすることになるが、この温度はホップドライヤに吹き込まれる熱風の温度ではなくて、乾燥機内のペレットの温度であることに留意しなければならないことは重要なポイントである。例えばホップドライヤ内にある巣板が樹脂粉末で目詰まりしていると、熱風はホップ内を均一にかつ十分な風量にならないので、許容吸湿率が達成できていないことになる。すなわちドライヤ内のペレット温度を計測しての工程管理でなければ、決められている吸湿レベルになっているかどうかの管理にはならないのである。

表1 各樹脂の許容吸湿率と目安となる乾燥条件

樹脂	許容吸湿率 (%)	乾燥条件	樹脂	許容吸湿率 (%)	乾燥条件
GPPS	—	特に必要はない	PPS	—	130℃, 3hrあるいは140℃, 2hr
ABS	0.1以下	80~85℃, 2~4hr	LCP	0.015	140~160℃, 4hr
PMMA	0.07	80~90℃, 4~6hr	PSU	0.05	145℃, 4hrあるいは160℃, 2hr
PET	0.01	130℃, 4hr	PES	—	160℃, 3hr
PA	0.1	除湿乾燥, 80℃	PAR	—	120℃, 6hrあるいは140℃, 4hr
PC	0.015	120℃, 4~5hr	PEEK	—	150℃, 3hr
POM	0.1	80~90℃, 3~4hr	PEI	—	150℃, 4hr
PBT	0.015	120℃, 5hr			
m-PPE	—	100~110℃, 2~4hr			

④ペレット輸送途中での吸湿防止と吸湿率測定

ペレットの許容吸湿率は、乾燥機出口の値ではなく、図16のように成形機スクリューに投入される直前のペレットで測定された吸湿率である。ペレット輸送方法やそれに使用される空気の湿度および輸送パイプ内の滞留時間などによっての吸湿を無視してはならない。このため吸湿率測定は工程管理のために必須のものであり、次のようなものがあるが、必要とされる測定精度によって選定することになる。

- ①カールフィッシャ法 (JIS K0068) は測定精度が最もよいが、測定機器は高価である。
- ②赤外線での加熱による重量減少率測定での重量減少は水分と揮発する添加剤によるものであるが、測定は簡単で迅速に結果が得られる。
- ③化学実験で使用する秤量瓶・精密天秤・熱風乾燥機を使用しての赤外線加熱と同様の重量減少率測

定であるが、結果がでるのに時間がかかる。

④ミリ波水分測定システム

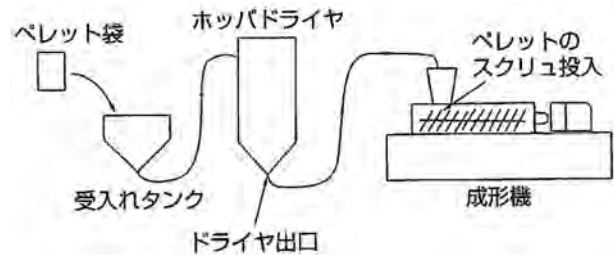


図16 ペレット供給ラインでの吸湿率測定点の例

⑤水分以外のシルバー要因

ショートショットの項のVENTしなければならぬエア・ガスで述べたものがシルバーでも問題となる。すなわち残留モノマー・流路での滞留による熱分解・顔料や添加剤による熱分解促進・流路で巻き込んだエア・吸湿の大きい添加剤などである。

N 異物発生 of 未然防止のための成形技術

①異物発生の要因

異物には、ペレット袋のシール用の糸くずや袋の紙類、手袋や衣類からの繊維類、ペレット輸送工程や粉碎機などからの金属類、前成形などの他樹脂、シリンダ洗浄剤などさまざまなものがあるので、これらの種類が特定できる分析・鑑定のレベルが高いことが必要である。また異物対策ではよく言われる5S (整理・整頓・清掃・清潔・しつけ) が前提になることは当然である。これらのさまざまな異物の中で射出成形での異物対策として最も苦慮するのは、成形している樹脂の異物化である。樹脂メーカーでのペレット製造工程では、スクリュー表面やダイ内面での溶融樹脂の滞留によって異物が発生するが、これと同じ原理で射出成形機の流路内でも異物が発生する。この現象の理解がないと適切な異物フリー成形はできない。対策としては、①樹脂メーカーから納入されるペレットの異物レベルの規格設定と受け入れ検査、②射出成形機流路内で発生する異物量の極小化、③添加剤による異物化があればその変更の可能性、④定期的流路のクリーニング方法である。

②異物の分析・鑑定の方法

- ①顕微鏡などにより異物の形態を観察してその種類

を推定する。

- ②ヒータ付きの顕微鏡などにより、異物が熱溶融するかどうかを確認する。熱溶融しないものとしては、木綿糸くず・紙類・ペレットの金属製輸送管内面の摩耗粉・金属部品類・砂・塵埃・成形室内に浮遊しているごみ類・熱硬化性樹脂・成形材料の熱可塑性樹脂の熱による炭化物などがある。
- ③金属類はマイクロアナライザー・蛍光X線などによりどのような金属かが判定できる。
- ④有機物は赤外線分光分析(IR分析)で推定できる。人間の指紋のように、樹脂の化学構造による特定の波長の吸収チャートが得られるのでこれによって化学物質の判定ができる。

3 射出成形機の流路内での熱分解

ショートショットのベントの項でも述べたが、成形機ホッパから投入されたペレットは、100%先入れ先出しにならない。図17のようにスクリュメータリング部などの表面やノズル内面に熔融樹脂が付着して、そこでの長時間時間滞留によって炭化する。すなわち常識的に計算されているシリンダ内滞留時間による議論は異物発生観点からも役に立たない。スクリュを抜いて観察するとその程度がわかるので、異物対策優先順位の第1位に位置づけなくてはならない。多くの経験による「このような観察を無視した異物対策は成功しない」との教訓を忘れてはならない。

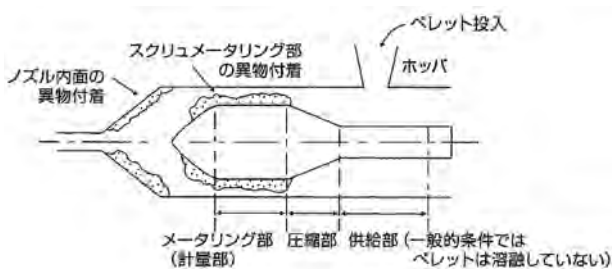


図17 樹脂が異物化して付着する流路部分の概念図

4 射出成形機流路内での異物発生減少対策

射出成形機流路内での異物不良対策としては、異物発生場所のクリーニングおよび異物発生を遅らせる方策などがある。

- ①スクリュを抜いてのクリーニングが最も確実な方法であるが、コストと生産効率の低下などがある。

- ②射出成形では、一般的に使用される樹脂替え・グレード替え・色替え用の洗浄剤では、流路表面に固着している炭化などしている異物はクリーニングできない。流路表面に固着している異物層を透過してスクリュ金属表面に薄膜を形成することによって、固着層を浮かせる作用がある界面化学に立脚した洗浄剤を選択しなければならない。スクリュを抜くクリーニングと界面化学に基づく洗浄剤による洗浄をどのように組み合わせるかが最もコスト的・生産効率的・効果的かを決めなければならないが、PCの透明な自動車部品でスクリュを抜くクリーニングと洗浄剤によるクリーニングとの最適組み合わせを試行錯誤で決めて、3か月間の異物フリーの量産成形を達成した事例がある。しかしこの方法では、洗浄剤使用でフリーショットしたものは廃棄物となるので、その発生量に対する環境問題にも考慮が必要である。

- ③シリンダ温度の保温回路使用による異物発生対策を行うことがある。異物発生は、休日明けの成形立ち上げ時に多く発生するが、これは流路内面に付着している異物と流路金属との熱膨張率の差異によるものである。この防止策として休日中その樹脂の最適温度でシリンダを加熱して置く保温回路使用対策は、有用な方策の1つであり、よく活用されている経験がある。

- ④流路表面コーティングで熔融樹脂の付着を少なくする対策として、クロムめっきや窒化チタン・窒化クロムなどのコーティングが行われることがある。

- ⑤シリンダ内の空気(酸素)により樹脂の熱分解が促進されて異物化するのを、その対策としてシリンダ内を窒素で置換する周辺機器が開発された。しかしこれによって熱分解による異物が完全になくなるものではなく、クリーニング間隔が長くなる効果を期待しての使用と考えるのがよい。

V 転写不良未然防止のための成形技術

1 転写不良の要因

キャビティ表面の転写をよくするためには、キャビティ圧が負荷される転写直前の樹脂温度がポイントである。キャビティ流動中の樹脂温度の低下をできるだけ少なくするための寄与率が最も大きい対策

は金型温度であり、切り替え可能のできるだけ高い金型温度で成形するのが良いことになる。その究極的なものが高温と低温との切り替えによる金型温度可変成形(ホットアンドクール成形)である。樹脂からの揮発分を増大させない限界の高い樹脂温度や充填時間を短くする高速射出も選択肢の1つであるし、キャビティ内のエアやガスは転写を阻害するので、ベント設計にも配慮しなければならない。樹脂からの低分子系揮発物の析出(デポジット)や衝撃強さなどの高分子系改質剤などの樹脂からの分離・析出もあり、これらも転写不良の要因となるので、定期的クリーニングしなければならない。また転写性に大きく関与する樹脂特性として、結晶性樹脂では結晶化速度、非結晶性樹脂では凝固速度を無視してはならない。

2 転写性が重視される成形品

高品質成形のために転写性が重視されるものとしては次のようなものがある。

- a) 鏡面仕上げのキャビティによる成形や成形品の光沢が重視される成形品
- b) シボやヘアラインなどの意匠加工面のキャビティの成形品
- c) 導光板・光学プリズム・光反射板・光ディスク・光学特性上厚みを均一にできない凸レンズ・凹レンズなどの光学機器用のレンズ類

3 転写性に寄与が大きい金型温度

キャビティ面の転写を良くするためには、できるだけ高い金型温度で成形することである。金型温度は、転写性・成形サイクル・成形ひずみ(成形品破損・後収縮による寸法変化など)・厚い厚みの成形品でのひけなどに関連するものであるが、転写性では図18⁴⁾のABS樹脂でのような例がある。しかし度々述べているように非結晶性樹脂では離型の観点から許容される上限金型温度は、樹脂グレードの荷重たわみ温度でありこれ以上の金型温度では離型ができないし、それ以下の金型温度では転写は不十分である。

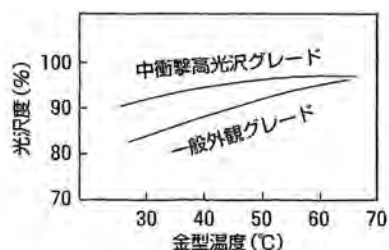


図18 ABS樹脂の金型温度と光沢度⁴⁾

4 ホットアンドクール成形の高温側金型温度

ホットアンドクール成形は、高温側側の金型温度で射出・充填・保圧してから、高温側水から低温側水に切り替えて、金型温度を低くして離型する方法である。この高温側金型を何度に設定するかが問題となるが、一般的な解説書では図19のガラス転移温度としている。ガラス転移温度とは、ガラス状態からゴム状態に変わる温度で、力学特性を含めて樹脂の重要な特性である。非結晶性樹脂ではガラス転移温度が参考になるが、一般的な結晶性樹脂のガラス転移温度が何度かを知らなければ全く参考にならないことが理解できる。結晶性樹脂ではPOMのシート押出の冷却ドラムの温度設定の事例などからも理解できるが、ガラス転移温度ではなく、図20の結晶化温度と融点との間の温度を参考にして決めることになると言える。

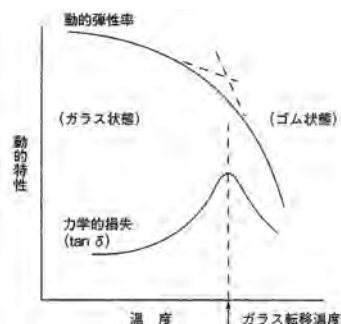


図19 ガラス転移温度のイメージ図

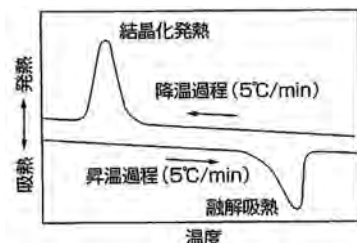


図20 走査示差熱量計による結晶化、溶解挙動

5 結晶性樹脂の結晶化速度

ばりのところで解説したように、アブラミの式で測定される結晶性樹脂の結晶化速度は、重要な成形性であるが、樹脂の一般的な性質の表や技術資料には述べられていない。公表されることが望まれる。

6 結晶化速度が関与する成形事例

次のような事例を挙げるができる。

- ① PETは結晶化速度が遅いのが利点となり、透明性や光沢の良い良外観成形品の成形が可能である。PBTより光沢の良い良外観の成形品が成形

できるので、これを活用して家庭用の電気アイロンのハンドルや電子レンジのハンドルの用途がある。この背反として、十分に結晶化させるためには、高温の金型温度が必要となり、成形サイクルが長くなる。このため低い金型温度で結晶化する易結晶化グレードの開発がある。またPBTの良外観グレードとしてのPBTとPETとのアロイグレードもある。

- ②結晶化速度の遅いPA6と結晶化速度が速いPA66とのアロイによるPA66の高剛性・良外観グレードがある。
- ③液晶ポリマー(LCP)は、結晶化速度が速いのでバリレス成形やハイサイクル成形に有利となるが、その反面ファインピッチコネクタのような穴が多い薄肉厚みの成形品では、そり・変形やウエルド強さの低下が問題になることがあり、この解決のための結晶化速度が遅いグレードの開発がある。
- ④海外生産のPOMで、冷却時間を長くしないと離型の問題があるとの事例があった。この現象は直径の大きい丸棒や厚板の押し出し成形のボイド対策に有利になると予想されるが、コモノマーの差異によるものと推定される。

ウエルド未然防止のための成形技術

1 ウエルド発生の要因

成形品形状や多点ゲート設計によってキャビティ内で分流したフローフロントが再び合流するのがウエルドであり、成形品外観不良や成形品破損の要因となる。穴・窓・薄肉部などがある成形品をウエルドレスで成形する方法として、均一厚みおよび対称形状で成形して、金型に設置した油圧回路のコアによる型内振動打ち抜き法で穴・窓・薄肉部を金型内加工する方法があり、この振動打ち抜き法でコンパクトディスク(CD)のディスクゲートを型内カットした事例もある。離型後に穴・窓・薄肉部などを機械切削加工することも選択肢の1つであり、ウエルド部のガラス繊維の密着が問題となったプルトルージョン法のガラス長繊維強化樹脂による成形品の組み立てでボルト・ナットによる組み立て圧縮荷重によるウエルドからの破壊防止対策として活用した事例がある。量産が行われる成形品には、現実的にはウエルドがあるのが当たり前と考えなければならぬので、CAEの流動解析やチェックリストお

びこれまで事例研究による実績などを活用してウエルド発生位置を予測することは、外観不良や破損防止のため事前予測による対策が必須である。

2 ウエルドを目立たなくする方策

最も有効な方策は、溶融樹脂が会合する時の樹脂温度であるが、次のような方法がある。

- a) 転写性に優れているホットアンドクール成形により高い樹脂温度で会合させるのが最も望ましい方法である。
- b) 予想されるウエルド部の金型温度をカートリッジヒータなどで部分加熱する。
- c) 図21⁵⁾のように耐熱性樹脂でキャビティ表面をコーティングした断熱層被覆金型を使用する。低い設定金型温度で成形しても、ウエルド部の金型表面温度が高いことを利用するものである。
- d) 図22のように、複数個の窓や穴がある形状の成形品では、ゲートに近いとウエルドは目立ち難いが、遠くのウエルドは目立つ事例がある、それぞれの会合部の樹脂温度の差異によるものと考えられ、流路長さを多点ゲート設計で検討するのが対策の1つである。
- e) 複数のホットチップによるホットランナではウエルド状況を見ながら、逐次にゲート開放を検討するのが対策の1つとなる。
- f) 図23のように会合角が大きくなるように金型設計を考慮する。
- g) 顔料着色・金属色のためのアルミ箔・真珠模様のためのパール光沢剤・ガラス繊維や無機充填材による複合グレードはウエルドラインが目立ち易くなるので、それらの添加物の形態およびベースの成形材料の色調との最適化を図る。

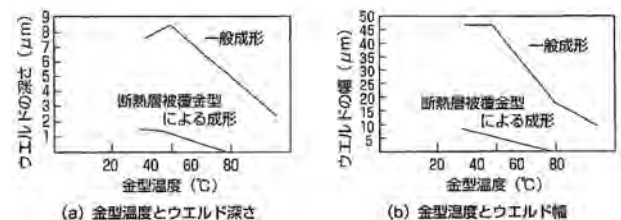


図21 高衝撃ポリスチレンを用いた断熱層被覆金型によるウエルドラインのサイズ

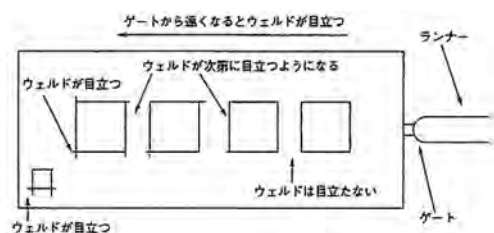


図22 ゲートからの流動距離とウエルドの目立ちやすさ

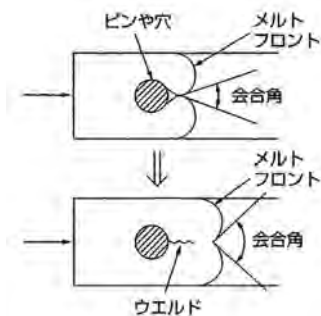


図 23 ウエルドの会合角の例

VI フロアマーク発生の要因と種類

フロアマークにはさまざまな形態のものがあり、その発生要因が異なるので、3ゲン主義で検討してどのようなフロアマークかを特定しなければならない。

1 フロアマークの種類

①あばた模様

蜜柑肌(オレンジピール)のようなあばた状態で、樹脂温度・金型温度・キャビティ圧が低く、転写不良で発生するものである。結晶化速度が速い結晶性樹脂での経験がある。

②さざ波模様

十分に固化していないスキン層が次に流入する溶融樹脂のメルトフロントによって押されて、海岸の波打ち際で見られるさざ波のようなしわ状態のものである。

③ずりマーク状の模様

凹凸文字やノックピンがキャビティ面から凹状態や凸状態に段差があるなどしているときに起こるので、スキンの固化した層が後から流入する溶融樹脂によって流入方向に押し出されて発生する。またスキン層が押し出されてしわ状態になったりするずりマークもある。成形条件的には、金型温度・樹脂温度・充填速度などの最適化によって対策する。

④コールドスラグによるフロアマーク

成形機ノズル部で発生したコールドスラグが、次のショットの溶融樹脂に押されて発生するタイプのフロアマークで、コールドスラグウエルをつけて対策する。

⑤キャビティ内の溶融樹脂の不整流動によるフロアマーク

キャビティ内を流れる溶融樹脂のフローフロントがキャビティ壁に均一に接触した状態で流れずに、フローフロントが揺らぎながら流動するとか、フローフロントの流入速度が一定でなくて断続的に変動して流動するなどにより、転写状態が部分的に異なる表面状態となるフロアマークがある。このようなキャビティ内不整流動が起きる原因としては、a) フローフロントの拡大流や縮小流、b) キャビティの微小段差によるフローフロントの流動の乱れ、c) 成形品形状により急変する流動の乱れ、d) フローフロントが流動中にキャビティ壁面に不均一に接触することに関連する溶融樹脂の溶融弾性があり、複合グレードでの事例がある。

2 ジェットタイプタイプのフロアマーク

溶融樹脂のゲート通過速度が速く、かつキャビティ壁への接触が少ない状態で流入すると、溶融樹脂は蛇行しながらキャビティ内を流れる。これをジェットタイプタイプのフロアマークと言う。ジェットタイプタイプに関する溶融粘度特性としては、メルトフラクチャと溶融弾性がある。

(a) メルトフラクチャは、キャピラリレオメータのノズルから溶融樹脂がある限界を越えたせん断速度(流量)で押し出されると、溶融樹脂のブリッスル(細い棒状態の溶融樹脂)の表面は、図 24 のように荒れてくる。この時せん断応力ーせん断速度の関係は図 25 に示されるように変

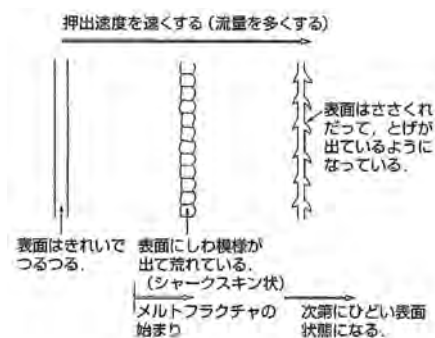


図 24 メルトフラクチャの概念図

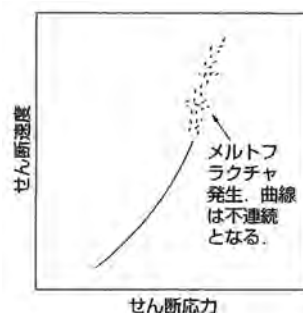


図 25 せん断応力ーせん断速度曲線でのメルトフラクチャ発生(イメージ図)

曲点が現れ、関係曲線は不連続になり乱れる。これがメルトフラクチャ現象である。押出成形での成形品外観に対する重要な特性である。

(b) 溶融弾性(圧力記憶効果 ---Buras 効果)

射出成形機のノズルから溶融樹脂をフリーショットすると、溶融弾性の大きい溶融体はノズル直径より大きい直径で射出される。これは溶融樹脂がシリンダ内加圧によって圧縮されていたものが、圧力解放によって膨張するためである。これをバラス(Buras)効果と言う。ニュートン流動体の水はこのような膨張現象はないが、非ニュートン流動体の溶融樹脂は図26のように溶融樹脂の直径はノズル径より大きくなり、メルトフローレート測定の測定荷重を変えると膨張率が異なるのでこれによって溶融弾性状況を判断することができる。

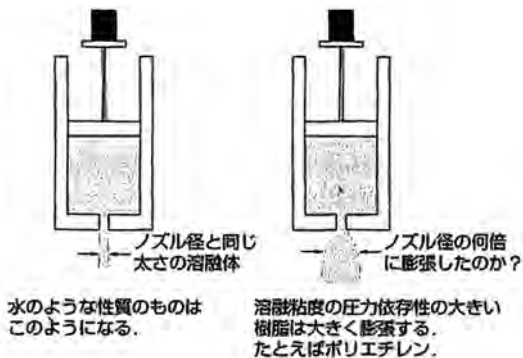


図 26 バラス効果

Ⅵ ボイドおよびひげ未然防止のための成形技術

1 ボイドおよびひげ発生の要因

成形品の厚肉中心部に発生する空洞がボイド(Void)であり、厚肉表面部に発生する凹みがひげ(Sink)である。ボイドは図27のように表面スキン層が厚く剛性が大きいと厚肉中心部で遅れて固化する溶融樹脂の収縮力により表面層の方に引かれて発生するものであり、ひげは図28のように金型温度が高いなどで冷却が遅い厚肉表面のスキン層が厚肉中心部の固化による収縮力によって内側方向に引っ張られて表面に発生する凹みである。何れの不良も成形収縮率の大きい樹脂程発生しやすい。ただしガラス繊維強化グレードなどで強化材などが核となり、小さいボイド集団の形態となり、大きい空洞の非強化グレードと異なるボイド事例の経験がある。

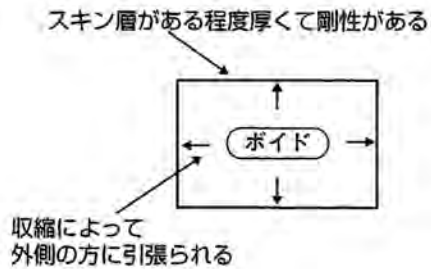


図 27 ボイド発生の原理

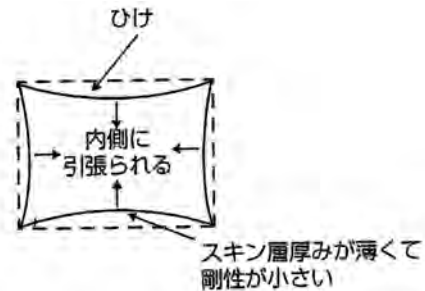


図 28 ひげ発生の原理

2 ボイド未然防止対策の要点

① 熱可塑性樹脂の結晶性と非結晶性の収縮率差異

成形収縮率は厚みおよび成形条件で変化するが、結晶性樹脂の成形収縮率は1.5~2.5%程度で、非結晶性樹脂の0.4~0.6%程度より大きい。各種結晶性樹脂の結晶構造部分と非結晶部分の比容積は表2のように異なり、かつその差は樹脂によって異なるが、これらによって収縮率が変化する。結晶性樹脂は成形で結晶化すると、図29⁶⁾⁷⁾のように結晶化する温度で結晶部と非結晶部の比容積の差によってP-V-T曲線は大きい収縮が発生するが、図30⁶⁾の非結晶性樹脂ではこのような変化は見られない。これが結晶構造あるなしによる両者の収縮率差異の原因である。

表 2 各種結晶性樹脂の比容積

	PA66	PA6	PET	PBT	POM	PP	PEEK	PMP
結晶部	0.81	0.81	0.69	0.72	0.66	1.07	0.76	1.19
非晶部	0.92	0.91	0.75	0.78	0.80	1.18	0.79	1.21

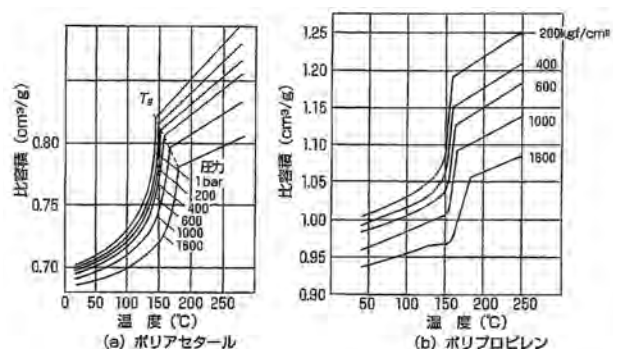


図 29 結晶性樹脂のP-V-T曲線の例⁶⁾⁷⁾

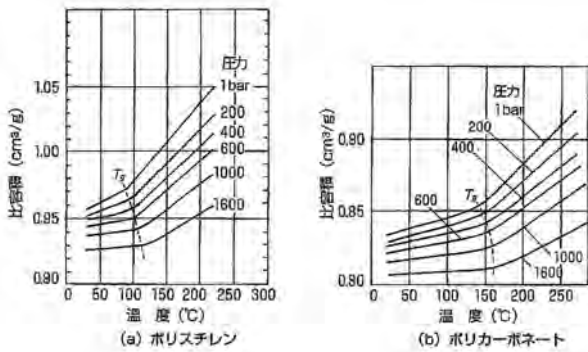


図 30 非結晶性樹脂の P-V-T 曲線の例⁶⁾

②ボイド・ひけ防止の成形品形状設計の基本

樹脂によって異なるがそれぞれの樹脂の限度を越えた厚みにしないのがボイド・ひけ防止の基本である。しかし成形品の剛性や性能などのために厚くしなければならない時には、厚くなることをコアやピンによる肉抜きで対策するのが一般的である。また技術資料の板形状成形品のリブ設計のリブ厚みでは、板厚みの 1/2 程度を基準としていることが多いが、樹脂によっては図 31 のように板厚みの 1/3 程度にし、リブ本数を多くして断面係数を大きくするのが効果的であるとの結果事例がある。また凸レンズや凹レンズなどのように均一厚みにできない成形品では、ホットアンドクール成形、コンパクトディスク (CD) などでは射出圧縮成形などの特殊な射出成形法が活用されるケースもある。ボイドが発生しない厚みでのダブルインジェクションが選択肢の 1 つとして検討された事例もある。

③肉抜きのための部分冷却

肉抜きはコアやピンで行われるが、ここが蓄熱しないように金型設計では部分冷却が必要である。冷却方法としては、a) 水冷、b) ヒートパイプによる冷却、c) 熱伝導の良い鋼材でコアを作り、その根元を水冷か空冷、d) ピンの中心に細い穴をあけて圧縮空気を流しての冷却 (L/D が 5 以上のピンでは冷却が必要) などがある。

④成形品厚みに見合うランナ・ゲート設計

ゲートシールさせることなく、成形収縮で不足する熔融樹脂をキャビティに補給するランナ・ゲートサイズは大きくしなければならないが、1 例を図 32 に示す。

⑤キャビティ充填時間 (射出速度) の最適化

薄肉成形品では、一般的には高速射出成形が選択されるが、厚肉成形品ではボイドレス対策として低速射出成形が有効な事例が多い。またスクリュインライン射出成形機で成形機ノズルを金型にタッチさ

せた状態で、スクリュを回転させて熔融樹脂をキャビティに充填・加圧するイントルージョン法 (フローモルディング法とも言う) もボイド・ひけ対策のための特殊低速射出成形の 1 つであり、自動車部品に適用した経験がある。

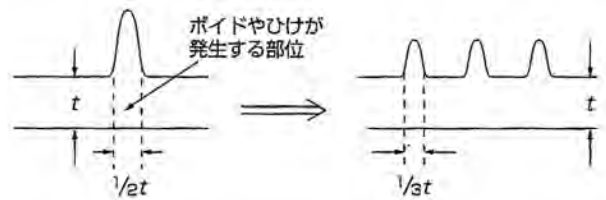


図 31 ボイド・ひけを少なくするためのリブ形状の一例

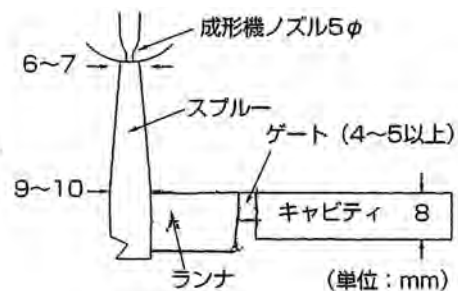


図 32 キャビティ厚みに対する流路の大きさの概念図の例

③ひけ防止のための発泡成形

ひけ防止のために発泡成形が一般的に活用されるが、次のような方法がある。

- ①射出成形で熱分解によってガスが発生する化学発泡剤を使用しての発泡成形を活用する。
- ②超臨界液体による微細発泡成形の活用がある。超臨界液体は、密度が液体に近く、流動性が気体のような液体で分子が密集し、かつ活発に運動している状態で溶剤効果があるものである。温度 31℃・圧力 73atm の炭酸ガス、温度 -147℃・圧力 33.5atm の窒素が使用されている。
- ③中空体射出成形で、ひけ防止することができる。例えば厚みが厚い事務用椅子肘かけや自動車運転席のミラー枠のひけ防止成形に使用された事例がある。これにはガスアシスト成形や水アシスト成形がある。

Ⅹ寸法公差不良未然防止のための成形技術

①寸法ばらつきに関する要因

米国から金属代替可能とのキャッチフレーズでエンジニアリングプラスチックが紹介され、POM では先ず亜鉛ダイカスト部品の樹脂化が目標とされた

が、亜鉛ダイカストと同等の寸法公差での成形品が求められた。当時は油圧作動のプランジャタイプ射出成形機など樹脂の射出成形技術レベルではこれに十分に対応するのが難しく、精密成形技術の高度化が射出成形での重要なテーマになった。精密成形では、a) 図面寸法に適合する予測収縮率の正確性、b) 成形条件ばらつきに関連する寸法公差、c) 成形品の形状精度不良対策技術が関与する。金型製作時の最も重要なデータは、成形品各部で異なることが多い成形収縮率の予測に基づくキャビティ寸法の決定であるが、成形品厚み不均一性・非対称形状などにより成形品各部は均一に収縮しない場合が多く、類似の成形品形状を層別しての見込み収縮率の豊富な蓄積とそれらの正確性向上は、精密成形での重要な技術データである。

②成形収縮率と寸法公差

成形収縮率が高い樹脂程成形条件のばらつきによる寸法ばらつきが大きくなる。油圧作動の射出成形機による射出成形黎明期の古い米国 SPI の各種樹脂の寸法公差のデータとして図 33⁸⁾があり、結晶性樹脂は非結晶性樹脂より大きい公差設定が必要となっているが、この図によれば公差は例えば、結晶性樹脂のある寸法で、 $\pm 0.15 \sim 0.20\%$ 、非結晶性樹脂で同じ寸法で $\pm 0.10 \sim 0.15\%$ である。

また当時の精密成形技術の活用により図 34 のように公差を小さく設定できるとのデータもあつた。その後油圧作動の射出成形機は、プランジャタイプからスクリュインラインタイプ・成形条件フィードバック制御および成形条件のアナログ設定からデジタル設定を経て、サーボモータによる電動式射出成形機となり、精密級精度は格段に向上しているので、設定公差もさらに小さくできることが期待される。射出成形機の精度の査定は、成形品重量の変動係数(成形品重量の標準偏差を成形品重量の平均値で割った百分率)で評価されているが、一般的には 0.05% より小さい変動係数の成形機が精密級とされている。

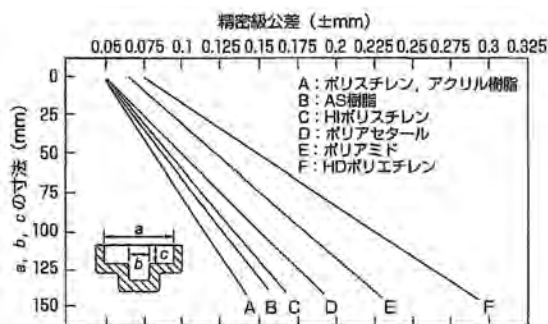


図 33 各種樹脂の成型寸法公差⁸⁾

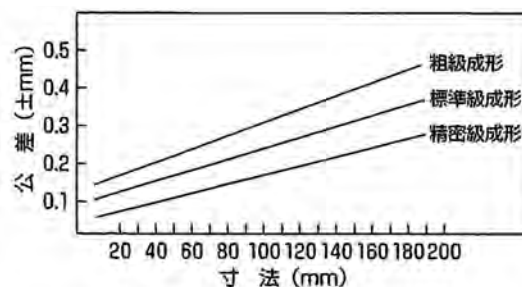


図 34 ポリアセタールの寸法公差 (SPI)

③金型温度の定義と金型温度の工程管理

射出成形工程管理表に記載されている金型温度は一般的に温調機器の出口温度として管理されているが、休日明けや金型交換後の成形立ち上げでキャビティ温度およびコア温度が規定温度に達するにはかなりのショット数が必要である。キャビティ近くに設置した温度計による計測で 200~300 ショット成形しないと、規定温度にならなかった実験結果があるので、成形立ち上げで 20 ショット程度の捨てショットなどで良品とするなどの精密成形管理規定での金型温度は安定した規定温度になっていない筈である。射出成形機が精密級の電動機であっても、このような金型温度管理法では全体として精密級の成形とは言えない品質ばらつきの要因になるとの理解が必要である。キャビティ表面近くに挿入した温度計で計測される温度を金型温度と規定する量産事例の少なからずの経験はあるが、マグネット付き温度計を金型表面の金型毎の所定の位置に取り付け、これで計測される温度を金型温度として管理する方法もあり、こちらの方が成形現場では実施しやすい。この時には量産成形でのマグネット付き温度計の温度とキャビティ・コアの表面温度計測値との相関の把握による金型管理幅などの決定が必要である。

④成形品質巡回チェック時の寸法管理

成形中の定期的に行う品質管理として重要な寸法良否判定には、離型後の冷却を待つ時間遅れがあるので、何らかの急速冷却をしてなるべく早期に合否判定した事例はあるが、成形品重量と寸法には図 35 のように正相関があるので、その成形品の寸法公差幅に対応する成形品重量が分かれば、離型直後の成形品重量を機側で直ちに測定して、寸法が公差に外れていないかどうかの判定が可能である。実務的にこの方法を活用している事例は少なくはなく、海外での実施例もある。

5 ゲートシール時間と寸法ばらつき

精密成形の成形サイクル設定での充填・保圧の合計時間は、ゲートシール時間を測定して決めることを原則としなければならない。これは図 36 のように充填・保圧の合計時間は寸法ばらつきに大きく関与するからである。また保圧時に目視でスクリュが一定位置に停止しているとか、成形品重量測定などで逆流防止弁からの溶融樹脂の漏洩有無確認をする管理方法も重要なチェックポイントである。

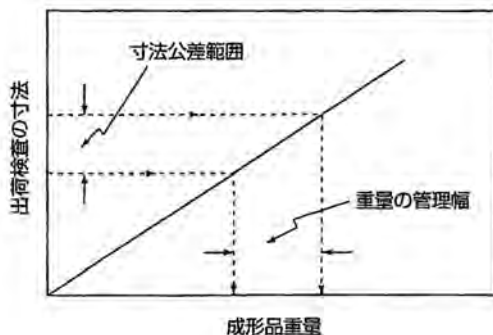


図 35 成形品重量と寸法の関係

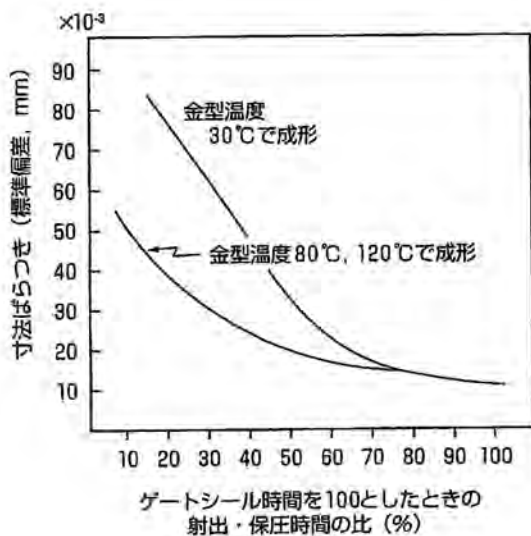


図 36 ポリアセタールコポリマーのゲートシール時間と寸法ばらつき

6 後収縮による寸法公差はずれ

成形で発生する成形ひずみは、成形品が使用される環境条件で緩和されるし、結晶性樹脂では結晶化の進行も加わりこれらによって寸法や形状が変化する。成形条件では特に金型温度に配慮しなければならない。POM の後収縮の例を図 37 に示す。厚みが薄い・金型度が低い・成形品の使用温度が高いと後収縮率は大きくなる。厚みが更に薄くなると図 38 のようにかかなり大きい後収縮率となるのは要注意点である。

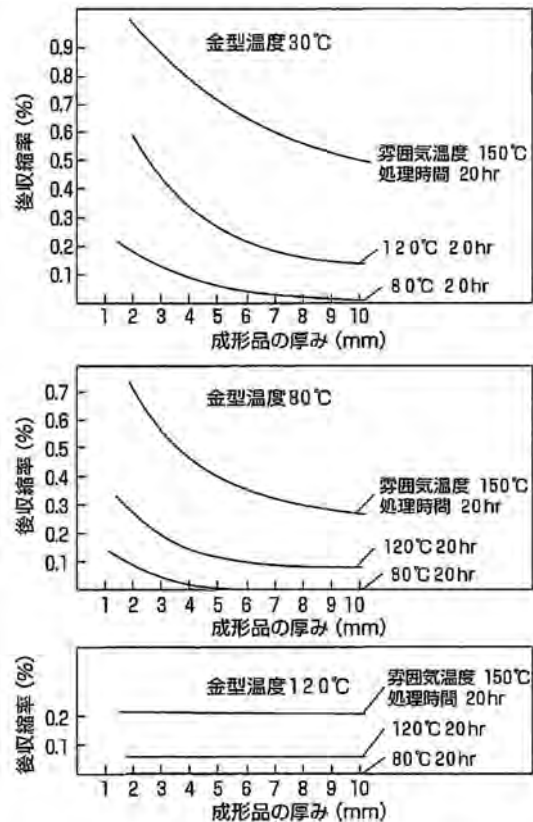


図 37 金型温度、成形品厚み、雰囲気温度と後収縮との関係 (POM 標準グレードの場合)

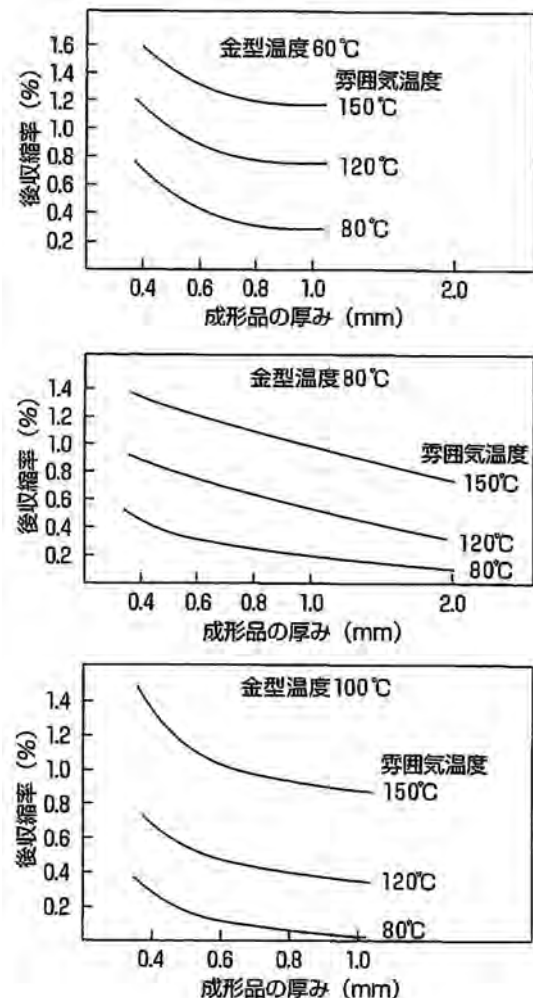


図 38 薄肉成形品の金型温度、成形品厚み、雰囲気温度と後収縮との関係 (POM 高流動グレードの場合、処理時間 2 日)

X形状精度不良未然防止のための成形技術

1形状精度不良の要因

精密成形で対策が最も難しいのは、不均一厚み・非対称形状などに起因する成形品各部の不均一収縮による平面度・垂直度・真円度などの形状不良であり、形状設計段階で対策しなければ、成形条件の微調整・変更では形状精度規格を満足する成形をするのは限度があるし、自由度は小さい。形状設計段階で、これまでの5ゲン主義に基づく事例研究の蓄積で構築されたチェックリストなどを参考として形状を決めなければならない。またCAEによる金型温調設計では、均一な金型表面温度分布になるように温調回路設計をしなければならないとする技術解説があるが、これは均一厚み・対称形状の成形品が前提であるとの注釈が必要であると思うし、そのような事例の経験もある。金型温度回路設計では、多くの事例実績から、成形品各部の冷却速度が均一になるように部分冷却や部分加熱を利用しなければならないと考える。これはハイサイクル成形の場合でも同様である。成形品各部の冷却速度が均一かどうかは、離型直後の成形品表面温度分布を赤外線温度計で観測すると判定できるので是非活用すべき成形技術であり、海外での事例についての報告が業界誌に掲載されたこともある。

金型設計では流動配向に関与するゲート設計も形状精度対策として忘れてはならない。また樹脂グレードの選定では、形状精度不良に成形収縮率の異方性の寄与が大きいので、成形収縮率異方性が小さい低そりグレードの選定を誤らないようにすることも重要な留意点である。

2成形品形状とそり・変形

成形品形状とそり・変形には、一般的な傾向があるので、それらを参考にして形状設計することが、形状精度不良未然防止につながるので、若干の事例を挙げて参考に供する。

① L形状の直角度

図39のように、L字の直角部は内側と外側の冷却速度差によって、内側に倒れるように変形し、直角部は鋭角になる。内側と外側の部分温調回路設計・三角リブをコーナ部につけての倒れ防止・T字形状にする対策がある。

②平板のリブ形状とそり・変形や箱の嵌合性

平板の剛性を高めるために図40のようなリブをつける場合に、板の厚みより薄いリブをつけると凹変形、厚いと凸変形となる。T字形状にすると変形は起こらない。また深さの浅い直径120mmコンパクトディスク(CD)のケースをGPPS(汎用ポリスチレン)での平面度不良が原因での嵌合不良を、金型の固定側と移動側に約25℃の温度差をつけての対策事例がある。ギヤの歯形をつけるウエブ形状もL字であるとウエブの変形による歯筋誤差が大きくなるのでT字形状にするのが原則である。

③細長い円筒形状成形品のそり・変形

注射筒(シリンジ)・ボールペン軸・パイプ形状などのように細長い形状の成形品では、成形時の圧力や不均一なキャビティ流動によってコアが偏心して円筒部の厚みが不均一になり、これによって円筒部の曲がり変形が発生する。細長いコアピンは両持にするのが原則であるが、これができない成形品の場合には両端形状やゲート設計を含めてコア偏心対策を事前に検討していなければならない。

④コの字形状の変形

スライドスイッチなどの成形品では、蓄熱によってコア温度がキャビティ温度より高くなることで、内側に倒れる変形となり、スライド部の平行度不良となる。このためここを摺動するスライドスイッチは円滑な摺動を阻害されるのでコア冷却は絶対的必要条件となる。

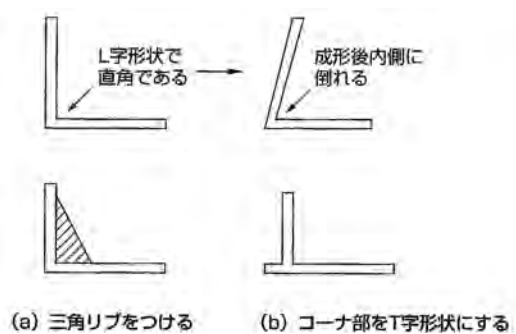


図39 L形状の変形とその対策の例

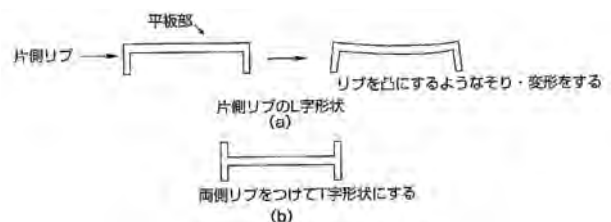


図40 平板のリブ補強形状とそり・変形

3 ゲート設計とそり・変形

ゲート設計は、そり・変形に深く関与するもので、成形品形状と要求精度を考慮して決めなければならない。一般的に、流動配向を乱す観点から多点ゲートが採用されるが、それによる不良発生もある。

①円板形状成形品の多点ピンゲート

一般的には、真円度対策として3点ピンゲートが多いが、ピンゲートの位置によりウエルド不良が発生する。またランナ設計・工作精度によって多点ゲートが同時充填にならないので、必要に応じて同時充填性の影響をチェックしなければならない。

②細長い成形品のゲート位置と変形

バーチカルギヤや細長いハーモニカタイプのコネクタなどでは図41のように軸の中央にゲートを付けると、ゲート側に凹変形するので、細長い成形品の端面にゲートをつけるのが原則である。

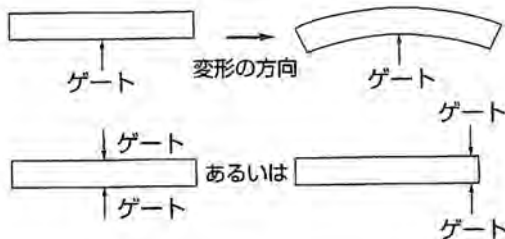


図41 細長い形状の成形品のゲートと変形

X 成形品破損防止のための成形技術

1 成形品破損の要因

成形品の破損要因には、a) 要求性能に対する樹脂グレードの選定の誤り、b) 材料力学設計で粘弾性である樹脂の許容限度を越えた過応力となっている、c) クリープや疲労のような長期的性能に関する破壊寿命推定の設計データの不備もあり適切な設計になっていない、d) 成形技術を無視した形状設計・ゲート設計により、さまざまな破壊発生点となる欠陥が使用時の応力負荷部位に発生する、e) 熱分解・加水分解による重合度(熔融粘度)低下や環境応力亀裂(ソルベントクラック)などの成形上重要な破損要因に関するデータが不足している、f) 再生材を使用した成形品の破損の場合には、再生材の問題だと決めつけずに、エステル結合のある樹脂では加水分解の程度を、熱分解で重合度低下が予測される樹脂では、重合度低下の状況を調べる。g) 重合度の低下が問題ないと考えられる場合には、破面解

析(フラクトグラフィ)による手法による破壊発生点・欠陥の有無の検討を優先する、h) 非結晶性樹脂の場合は、ソルベントクラックの有無を調べることを優先する。それらによって判明した要因に対策してからの再成形でなければならない。

2 成形品破損原因究明の手法

(1) 分解が重合度低下に敏感に反映するグループ

エステル結合のある樹脂(PET・PBT・PC・PAR・LCP・ポリ乳酸など)およびそれらのアロイグレードでは、バージンペレットとの対比に於いて加水分解の程度を調べることを優先する。熱分解による重合度低下が大きい樹脂の場合も同様である。特に加水分解による重合度低下が大きいと認められる場合には、予備乾燥の検討をしての再成形となる。

(2) 分解が重合度低下に敏感に反映しないグループ

POMやPMMAのように熱分解が高分子鎖末端からモノマが1個ずつはずれよう分解するものでは、分解がかなり進行しないと重合度変化として検出されない。このような樹脂では金属材料で行われている破面解析の手法で原因究明する。手続きは次の通りである。

- ① 焦点深度が深く、凹凸が明確で破壊点が良く判定できる走査型電子顕微鏡で破壊発生点を調べる。多くの事例で経験を積みれば20倍程度の拡大鏡による観察でも判定できるようになる。
- ② 破壊発生点近くに表3のような破壊上問題になる欠陥がないかを調べる。あればその対策をしてから再成形する。
- ③ 破壊応力既知の破面と比較してどのような応力による破壊かを推定する。参考としてPOMコポリマーの衝撃破面・疲労破面・クリープ破面を写真1・写真2・写真3に示す。

表3 破壊発生点になり得る欠陥

破壊原因となる欠陥	破壊の主要因
シャープコーナ	応力集中
ウエルド	伸びの低下
ゲート	伸びの低下、成形ひずみ
肉厚急変部	冷却不均一による成形ひずみ
細長いコアのある肉厚部	冷却不十分によるスキニング層の破れ
ばり	ノッチ発生の原因となる
薄肉部	流動配向による性質の異方性
異物	可塑化不良、他樹脂混入、コールドスラグ、ゲートかす、熱分解生成物

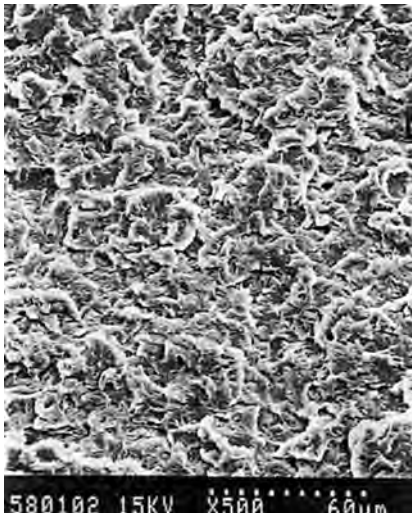


写真1 ポリアセタールコポリマーの衝撃破面

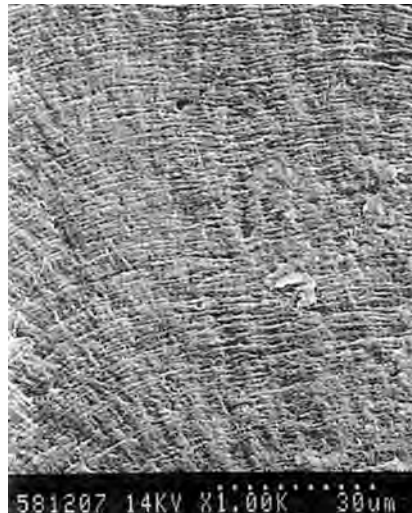


写真2 ポリアセタールコポリマーの疲労破面



写真3 ポリアセタールコポリマーのクリープ破面

(3) ソルベントクラックを起こしやすいグループ

破面解析などで破面に付着している薬品が検出された場合には、赤外線分光分析で薬品の種類を推定し、その樹脂グレードとその薬品との組み合わせでの臨界ひずみに対し使用時の応力・ひずみが許容範囲かどうかを検討する。非結晶性樹脂では重要な検討項目である。

3 粉碎再生材とバージンペレットとの混合成形

成形品が破損した場合には、スプル・ランナなどの再生材の使用の有無が問題になるのが一般的である。これは再生材の重合度低下が寄与率の大きい破損要因として懸念されるからである。このため使用する再生材の劣化の程度は品質管理的に必ず事前にチェックされていなければならない。100%再生材で再生を繰り返し時の樹脂特性の変化については、樹脂メーカーは再生材使用の基本データとして射出成形機を使用して検討している。それらのデータを参考として許容混合比率が検討されるが、エンドユーザの指示や法規で決められていることもある。再生回数が多いものがどの程度混入するのかを計算した1例を表4⁹⁾に示す。バージンペレット80%と再生材20%の混合比率で成形を繰り返すと、100%再生を3回繰り返すまでのものが問題となる。すなわち再生基本データの100%再生3回の特性保持率が許容範囲にある場合には、この混合

表4 再生材20%をバージンペレットに混合使用するときの混合品の組成

繰返し再生回数	バージンペレット	再生1回品(%)	再生2回品(%)	再生3回品(%)	再生4回品(%)	再生5回品(%)
1回	80	20				
2回	80	16	4			
3回	80	16	3.2	0.8		
4回	80	16	3.2	0.6	0.2	
5回	80	16	3.2	0.6	0.12	0.08

成形品の破損要因は再生材の劣化でないと言えるのである。粒度分布や比重の異なる成形材料を定量混合機で均一に混合したとしても、スクリュにチャージまでの輸送中に混合材料が分離して均一性が失われていると、それによる不均一可塑化が成形品破損の要因になるものと推定されるのである。

4 成形品破損に関連する成形技術

表3に成形品破損に対して寄与率の大きい欠陥を挙げたが、これらの中で主なものについてデータの若干補足する。

① シャープコーナ

事例研究で破損起点となる第1順位の欠陥はシャープコーナである。金属材料でもシャープコーナ(ノッチ)の大きさ・形状・応力のかかり方などによって応力集中係数が設計便覧などで与えられているが、プラスチックでも応力集中を避けるために可能な限り大きい曲率をつけるようにしなければならないが、一般的にはプラスチックでは成形品厚みの60%以上の曲率をつけるように推奨されている。参考のためにPOM(コポリマー)の1軸方向の衝撃強さと曲率(ノッチ)の大きさとの関係について、機械加工によるノッチによるものを図42、成形によるノッチについて図43に示す。シャープコーナの影響度が大きいことが理解できる。

② ばり

応力がかかるところにばりがあると、先ずばりにクラックが入り、これがノッチとなって破壊の起点となるのである。ばりを鋭利な刃物で取り除いて破壊評価試験をするとばりの影響度がわかる。問題となるばりであると判断された場合は、金型修正によ

るばり発生防止対策をしてからの再成形となる。

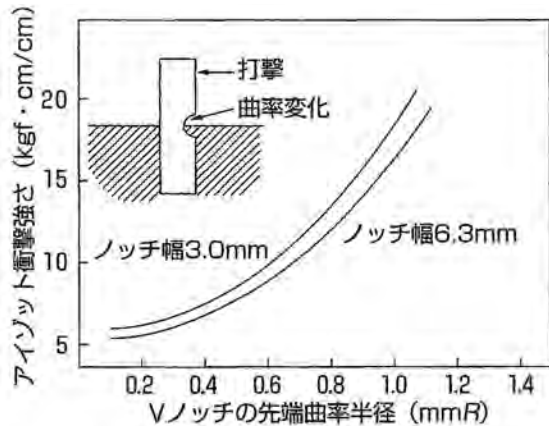


図 42 ポリアセタルコポリマーのアイゾット衝撃強さに対するノッチの先端曲率 (mmR) の影響 (温度 23°C)

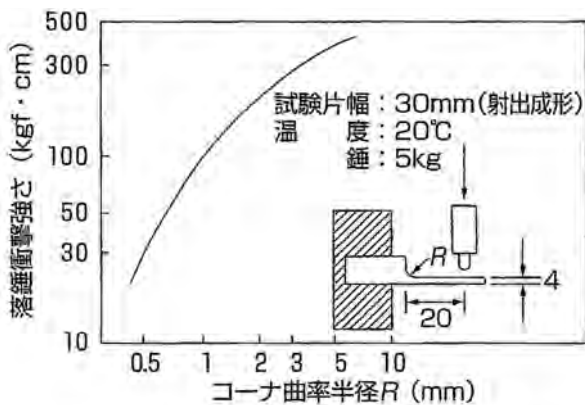


図 43 ポリアセタルコポリマーの落垂錘衝撃強さのコーナ曲率半径依存性

③ウエルド

破損対策事例研究の結果によれば、シャープコーナに次いで破壊発生点となるものにウエルドがある。樹脂によって異なるが POM ダンベル形状の端面 1 点ゲートの引張試験片での破断伸びが約 60% のものが、両端 2 点ゲートのウエルドがあるものでは破断伸びが 3~4% というデータがある。POM は結晶化速度が速いのでその影響を受けやすいから、全ての場合にそうだとは言えないが、ウエルドでの密着不良が原因であることが理解できる。

④ゲート

ゲート部には流動の乱れによる内部ウエルド・圧縮応力など成形による欠陥があるので、これによる破壊発生点となる。このため使用時に応力がかかる場所にゲートをつけてならないのが原則である。

⑤流動配向

溶融樹脂がキャビティを流動するときは、図 44 のようにキャビティに接するところは殆ど流動せずにスキン層を形成する。スキン層の内側はキャビティ内の流入速度差によるせん断応力によって高分

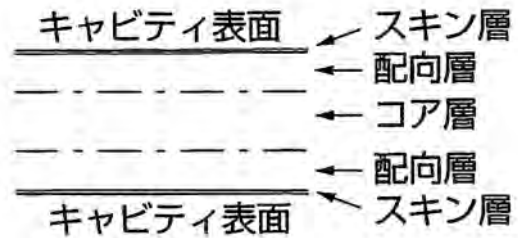


図 44 成形品の内部構造

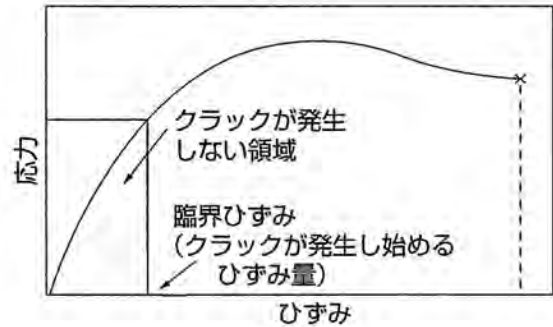


図 45 ソルベントクラックにおける臨界ひずみ (概念図)

子鎖の配向層が形成される。厚みが厚いものでは配向層の中央部付近では高分子鎖の配向緩和により、ランダム構造のコア層が形成される。またガラス繊維強化グレードで観察すると、樹脂グレードで厚みは異なるが、厚い厚みの成形品では、成形品中心部では流動と直角方向にガラス繊維が配向することが認められる。この配向でガラス繊維強化グレードの厚い厚みで曲げ破壊しやすくなった事例がある。このようなキャビティ内流動に基づく配向構造はさまざまな成形品品質の異方性にも大きく影響を及ぼすので、理解する必要がある。

⑥ソルベントクラック (環境応力亀裂、ESC)

非結晶性樹脂では ESC を起こしやすいので、理解すべき重要な評価特性である。ESC を理解するために、ABS 樹脂の引張試験片の平行部に植物油・グリースなどを塗布したガーゼを巻いて引っ張ると、図 45 のように、標準的な引張試験による応力-ひずみ曲線の破断伸びより短い伸びで破断する。この破断点の伸びが使用した樹脂グレードと薬品との組み合わせでの臨界ひずみであり、これに相当する応力が臨界応力である。成形品破損未然防止のために、樹脂グレードと薬品の組み合わせによる臨界ひずみは、その薬品の使用可否を事前に判断しなければならない重要なデータである。臨界ひずみは材料力学的に応力とひずみの関係式がある 3 点支持法・片持ち梁法・1/4 楕円体治具¹⁰⁾や放物線治具を用いる測定結果から計算することができる。ABS 樹脂・POM・PC のデータを図 46、図 47、図 48¹¹⁾に示すが、これらは成形品のひずみ検出にも活用できる有用なデータである。

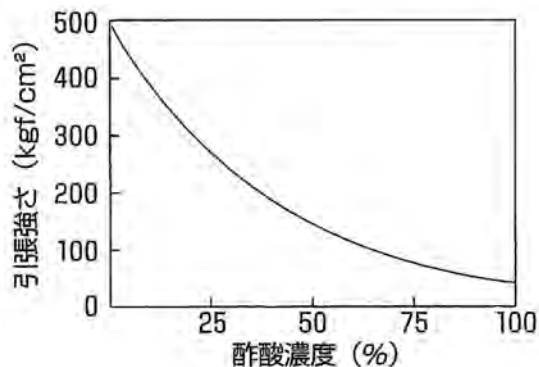


図46 ABS樹脂の酢酸濃度と臨海応力(引張強さ)

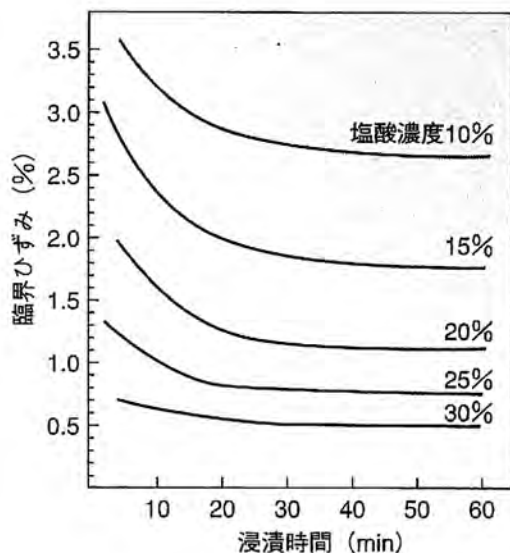


図47 ポリアセタールコポリマーの塩酸濃度・浸漬時間と臨海ひずみ(16~17°C)

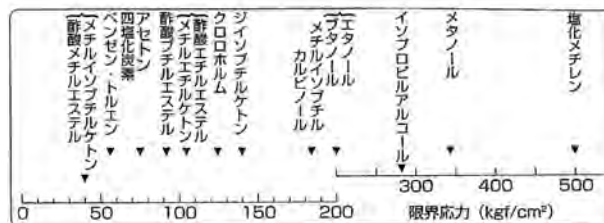


図48 ポリカーボネートの常温における
単独溶剤の限界応力
〔測定法はSPE J.10.12(1954)による(10分浸漬)〕

(完)

- 1) 鈴木健一「プラスチック」15巻8月号 65頁(1964)
- 2) 三谷景造「わかりやすい実践金型設計」(工業調査会) 206頁(1999)
- 3) 井出文雄 プラスチックエージ 43巻 1997年5月号 143頁
- 4) 樹脂メーカ技術資料
- 4) 樹脂メーカ技術資料
- 5) 安田和治 成形加工 12巻 9号 543頁(2000)
- 6) 大柳康、佐藤貞雄 成形加工 2巻 4号 340頁(1990)
- 7) 福嶋雄一 型技術 15巻 4号 83頁(2000)
- 8) プラスチックエージ 8版 SPIアメリカ標準
- 9) 高野菊雄 プラスチックエージ 8月号 2007年
- 10) 高野菊雄編 ポリアセタール 樹脂ハンドブック(日刊工業新聞社 1992)
- 11) 松金幹雄、田原省吾、加藤修士 ポリカーボネート樹脂 日刊工業新聞社(1969)