加工精度の極限を求めて

塚原 裕・細谷俊雄

Hiroshi Tsukahara・Toshio Hosoya, 東芝機械

1. はじめに

最近、マイクロメートル精度の仕上げを要求する部品に、プラスチック成形品が採用されはじめ、プラスチックの超精密成形として注目を集めている。特に先端産業分野での部品が多く、例えば、光通信分野での光ファイバーコネクタ、新しい情報記録装置としての光ディスク、VTR (video tape recorder) 関係の部品、その他、レンズ、プリズムなどがあげられる。

こうした超精密成形は単純に精度よく金型を作り、成形すれば可能であるというのではなく、一連の成形システムとして十分な検討を加え、その成形に適した状況、条件を求めてはじめて可能性が生まれてくるものである。特に、材料の適性（その成形品としての性能を満足させることはむろんであるが、さらに、成

形性としての適応性が大切である）、金型構造などが大きく影響していると考えられる。

以下に、上記超精密部品の成形加工について、二、三紹介する。

2. 光コネクタ

従来、着脱可能な光コネクタには、接続部での光ファイバーと光ファイバーとの突き合わせ精度が光の伝送損失に大きな影響を与えるため、精密切削加工したステンレス金属製品が主流として使われていた。しかし、金属製コネクタは高価であることから、情報伝達が短距離でよい分野ではプラスチック化が検討され、実用化されはじめた。

2.1. 光コネクタの精度

一般的には、光の伝送損失でみると金属製品では 0.5 dB、プラスチック製品では 2 dB 程度のものが市販されている。ただし、プラスチック製でも 0.5 dB のものも報告されている。

光コネクタの寸法精度としては、直径 125 μm の光ファイバーが挿入される穴径と突合せガイド部では ±1 μm、軸ずれは 2 μm 以下が要求されている。

2.2. 成形加工法

成形法としては、トランスファー成形とインジェクション成形の二通りが行なわれている。

トランスファー成形を採用しているメーカーでは、おそらく直径 125 μm 以下という光ファイバーの挿入穴を成形するために、流れのよい材料でかつ硬化後の変形が少ない材料として熱硬化性樹脂を選定し

A View of Precision Molding

塚原 裕 東芝機械(株) 沼津事業所 (410 沼津市大岡 2068-3) 開発本部第一開発技術部・主任研究員 (写真左)

昭和 35 年明治大学工学部機械工学科卒。35 年より東芝機械勤務、現在に至る。

細谷俊雄 同上・化工機営業技術部営業技術課・専任課長 (写真右)

昭和 31 年県立御殿場高校卒。32 年より東芝機械勤務、現在に至る。

表 1 光学用プラスチックの物性¹⁾

性 質	板ガラス	ポリメタクリル酸メチル	ポリスチレン	CR-39*	ポリカーボネート
屈折率 (n_d)	1.50~1.52	1.485~1.50	1.559~1.581	1.504	1.584
分散 (N_n)	—	57.0	30.9	57.8	—
引張り強度 ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	400~1,000	560~700	350~630	350~420	593~663
伸び (%)	—	2~7	1.0~3.5	—	60~100
弾性率 ($10^4 \text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	50~90	2.5~3.5	2.8~4.2	2.1	2.2~2.5
圧縮強度 ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	6,000~12,000	775~1,350	810~1,120	1,580	773
衝撃値 ($\text{kg}\cdot\text{cm}\cdot\text{cm}^{-1}$)	—	2.2~2.8	1.4~2.8	—	80~100
ロックウェル硬度	約 6 度 (モース硬度)	M 80~M 100	M 65~M 90	M 100	M 70, R 118
曲げ強度 ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	450~850	850~1,200	560~1,120	635	773~914
熱伝導率 ($10^{-4} \text{cal}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}\cdot\text{cm}^{-3}$)	23	4~6	2.4~3.3	—	4.6
比熱 ($\text{cal}\cdot^\circ\text{C}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.2(0~50°C)	0.35	0.32	0.55	0.30
熱膨張係数 (10^{-5})	0.9~1	9	6~8	8~15	7
軟化点 (°C)	450~500	65~100	70~100	140	138~142
吸水率 (%) (24 hr)	—	0.3~0.4	0.03~0.05	0.2	0.3
燃焼速度	不燃	遅い	遅い	0.88	自己消火性
光の影響	—	はなはだわず か	わずかに黄色 化	—	わずかに焼ける
酸の影響 (弱酸)	無	無	無	無	無
// (強酸)	HF のみ侵される	酸化性酸に侵される	酸化性酸に侵される	濃硫酸に侵される	酸化性酸に侵される
アルカリの影響 (弱アルカリ)	無	無	無	無	無
// (強アルカリ)	無	無	無	無	徐々に侵される
溶媒の影響	無	ケトン, エステル, 芳香族	溶媒に溶解	無	芳香族バグエン 炭化水素
比重	2.5	1.18~1.19	1.04~1.065	1.32	1.2

* CR-39 は商品名 (1940 年代に Colombia Chemical Division の科学者によって発明された熱硬化性樹脂である)。アクリルグリコールカーボネートが正式の呼び方。モノマーは右式のとおり。

ている。

これは半導体の封止成形に似た考え方であると思われる。IC (半導体素子) も $25\mu\text{m}$ の金線でフレームに配線された状態で、それを損うことなく樹脂で覆わねばならないことから、インジェクション成形ではむずかしく、流れのよいエポキシ樹脂によるトランスファー成形が主流となっている。

一方、生産性を考えたとき、射出工程の際、注入樹脂で金型コアが変形しない成形方法を検討すれば、熱可塑性樹脂によるインジェクション成形も可能となる。

成形方法の一例としては、高速充てんを行ない、しかも直接キャピタリー内に高圧が掛かることを避ける制御方法でのインジェクション成形も行なわれているようである。

また、金型については、特に針のように細いコア部 ($125\mu\text{m}$ の軸) の温度制御についてどのように対応するかが、一つのポイントであると思われる。

3. レンズ

レンズのプラスチック化は、以前からカメラのファインダー系で進められており、特に目新しい分野ということではない。現在、再び注目を浴びているのはより高精度でガラスレンズに近づきうるプラスチックレンズの開発が求められているからである。

特に、VTR カメラ分野では軽量化という点でレンズもプラスチック化したいところである。その他、コスト競争の激しい複写機関係、ビデオプロジェクター、光ディスクのピックアップレンズなどもプラスチック化の対象となっている。

3-1. 光学用プラスチックの特性

光学用プラスチックとして適用できるための条件は、①透明樹脂であること、②高い光線透過率を有していること、③屈折率が安定していること、などであろう。参考までに、表 1 に光学用プラスチックの特性を比較して示す。これらのなかでは主として、PMMA

表 2 光ディスクの仕様²⁾

方 式	コンパクト・ディスク	ビデオ・ディスク
厚 さ	片面 1.2±0.1 mm 両面	1.2±0.1 mm 2.5±0.5 mm
外 径	120±0.3 mm	300±1 mm
内 径	15 ^{+0.1} ₋₀ mm	35 ⁺⁰ _{-0.1} mm
面振れ ^{*1}	±0.5 mm 以下	±1.025 mm 以下
偏 心 ^{*2}	80 μm 以下	80 μm 以下
反 り ^{*3}	±0.6 度以下	±1.0 mm 以下
屈 折 率	1.5±0.1	1.5±0.1
複 屈 折	100 nm 以下 ^{*4}	20 度以下
透明度(反射率) ^{*5}	70~90%	75~85%
ディスク回転速度	1.2~1.4 m/秒 (線速度一定)	約 10~27 m/秒 (角速度一定) 10~11.4 m/秒 (線速度一定)
ディスク回転数	約 500~200 rpm (線速度一定)	1,800 rpm (角速度一定) 約 660~1,800 rpm (線速度一定)
記録時間	片面 60 分 (最大 75 分)	片面 30 分 (角速度一定) 片面 60 分 (線速度一定)
ビット深さ	0.11 μm	0.11 μm
ビット幅	0.4 μm	0.4 μm
トラック・ピッチ	1.6 μm	1.67 μm
レーザー波長	780~820 μm	632.8 μm

^{*1} 回転するディスク面(チャッキング後)の上下動に相当。CD で ±0.5 mm は 500 Hz 以下の面振れに対する要求仕様。500 Hz 以上の面振れは ±1 μm 以下。

^{*2} 回転するディスクの半径方向のトラック振れに相当。

^{*3} ディスクの中心から見たディスク端部の変形量。

^{*4} $(n_x - n_y)d$ の値。

^{*5} ディスクの入射光量に対する反射光量の割合。

(ポリメタクリル酸メチル)樹脂が、レンズに採用されている。

次に、レンズのプラスチックの利点、欠点について述べる。

プラスチックレンズの利点

- (1) 量産性によるコストダウン
- (2) 軽量化
- (3) 機能の複合化
- (4) 耐衝撃性の向上

プラスチックレンズの欠点

- (1) レンズ特性が温度の影響を受けやすい
- (2) 耐熱性が劣る
- (3) 耐溶剤性が劣る
- (4) 硬度が小さく、傷がつきやすい
- (5) 屈折率の選択幅が少ない

特に、PMMA 樹脂では屈折率の温度による変化率が光学ガラスに比べ、2 桁も大きいといわれている。この欠点は何らかの方法で、その屈折率の変化分を吸

収して補正する機構を設けなければ撮像レンズなどへの実用化は困難である。

3-2. プラスチックレンズの成形加工

プラスチックレンズを生産する方法としては、次の方法がある。それぞれの特徴も併せて記しておく。

- (1) 射出成形法……量産に適している
- (2) 圧縮成形法……表面の転写性がよい
- (3) 注形法……眼鏡用レンズに用いられる
- (4) 機械加工……形状精度は最も優れている
- (5) 光重合法……まだ研究段階にある

以上の中で最も注目されているのは射出成形法である。射出成形法でもレンズ形状によって、いろいろの成形法があり、これがレンズ成形法であるという決定的なものはない。

高圧射出成形法——この成形法はキャビティー内に高圧をかけ成形収縮を小さく押さえ込み、しかも金型形状を正確に転写して成形品精度を向上させる成形法である。

射出圧縮成形法——高圧射出成形法では残留応力の点で問題が残ることが多い。この解決法として、本成形法が注目されている。

射出圧縮成形法とは、金型をあらかじめ半開きの状態にしておくか、または型締力を中圧か低圧に保ち、射出圧力で金型が若干開くように設定し、熔融樹脂を射出注入後、型締力を最大にして、圧縮成形を行なう方法である。この成形法の効果としては、①局部的内部応力の少ない成形品が得られる、②ひけの少ない厚肉成形品が得られる、③比較的狭い形状部分にも樹脂を流すことが可能である(転写性の向上)、④小さな射出圧力で良品が得られる(省エネ)、などがあげられる。

ただし、これらの効果を十分発揮させるためには、圧縮工程時に有効に樹脂を圧縮できることが条件となる。

すなわち、ゲート部から熔融樹脂が逆流したり、樹脂が固化しはじめてから圧縮することのないように、金型構造、金型温度に配慮が必要である。

3-3. レンズ成形の問題点と成形条件

成形上の問題点としては、ゴミの混入、シルバーストリーク^{*1}、突出し時の変形、割れ、欠け、離型不良(スプルー部^{*2}を含む)などがある。また、凸レンズなどではジェッティング^{*3}、フローマーク^{*4}、ひけ、

^{*1} シルバーストリーク(銀条)——成形品の表面にゲートを中心にして銀白色のキラキラした流動条痕を発生する現象。

^{*2} スプルー部——金型の入口部に位置し可塑性・熔融された樹脂をランナー(キャビティー)に送る役目をする部分。

^{*3} ジェッティング(噴射流)——成形品の表面にゲートからリボン状の模様が発生する現象。

^{*4} フローマーク(流れ溝)——成形品の表面にゲートを中心として年輪状のざざ波模様を発生する現象。

表 3 米国連邦規格 209b の要旨⁴⁾

クリーン ルーム 級	粒 子		圧 力	温 度			湿 度			気 流	照 度
	粒 径 (μ)	累積粒子数 (個/ft ³)	mmAq	範囲 (°C)	推奨値 (°C)	誤 差 (°C)	最高 (%)	最低 (%)	誤差 (%)	換気回数	(Lx)
100	≥0.5	≤100	1.25	19.4	22.2	±2.8	45	30	±10	乱流方式 0.45m/s ±0.1m/s	1,080
1,000	≥0.5	≤1,000	以上	}							}
	≥5.0	≤10		25		特別には			特別には		1,620
	≥0.5	≤10,000				±0.28					
10,000						±0.28			±5		
	≥5.0	≤65								乱流方式 ≥20回/時	
	≥0.5	≤100,000									
100,000	≥5.0	≤700									

ボイドなど、凹レンズではウェルドマーク⁴⁵⁾などが考えられる。

これらの問題点に対応した成形条件としては、ゲート形状を含めた金型構造、使用樹脂の差などにより、一概にいえないが、一応レンズ形状別に成形条件の特徴を下記に示す。

- (1) 薄肉レンズ……金型温度、樹脂温度は高め、射出速度は大きめがよい
- (2) フレネルレンズ……(1)項と同じ
- (3) 凸レンズ(厚肉)……射出速度は小さく、射出圧力は高めがよい
- (4) 凹レンズ……金型温度、樹脂温度は若干高め、射出速度も若干大きめがよい
- (5) プリズム……金型温度、樹脂温度は若干高め、射出圧力も若干高めがよい

3.4. レンズ金型

レンズ金型としては、nm 単位の形状精度と面あらしが必要であり、ダイヤモンド・バイトによる鏡面切削加工機の開発が進められている。

その他、温度制御も、レンズ形状に応じた的確にできる構造でなければならない。

4. 光 ディ ス ク

光ディスクはレーザー光を使用した情報記録装置であり、再生専用のビデオディスク、オーディオディスクと書き込みと読み出しが行なえる業務用ディスクが実用化されている。そして、これらの光ディスクは基板として透明プラスチック材料が使用され、ほとんど射出成形により製造されている。

4.1. 光ディスクの仕様

コンパクトディスクとビデオディスクの仕様を表2に示す。業務用ディスクは規格化されていないが、一

⁴⁵⁾ ウェルドマーク(融着不良)一樹脂がキャビティ内でピンやコアの周囲を流れたり、また二つ以上に分かれた流れが再び合流するときに完全に融合しないで、糸状の線を生ずる現象。

表 4 用途別清浄度例⁴⁾

用 途	ク ラ ス (0.5 μ m 粒径以上対象)
半導体ステッパー室	1~100
// EB室	1~100
// マスク室	100
磁気ディスク仕上室	100
プラスチックフィルムスリッター室	1,000~10,000
プラスチック超精密成形室	100~1,000
ハムスライスパック包装室	1,000~10,000
製餅包装工場	100~1,000
バイオクリーン手術室	100

般的にビデオディスクより精度的に厳しい仕様が求められている。

ディスクの基板となるプラスチック材料は片面用と両面用とは異なった材料が使用されている。すなわち、片面アルミ蒸着のCD(コンパクトディスク)では、変形、吸湿の少ないPC(ポリカーボネート)樹脂が採用され、両面記録のビデオディスクでは透明性のよいPMMA樹脂が使用されている。これは両面に基板を貼り合わせることによってディスク全体のそりを防ぐためである。

基板の信号面の形状の一例をカットに示す。非常に微細な記録信号の長穴ミゾ(幅0.5 μ m×長さ3.3 μ m×深さ0.11 μ m)が1.6 μ mピッチで配列されている。

4.2. 光ディスクの成形

このように微小なビットを正確に転写し、しかも円板形状としても、厚さむらが少なく、反りの小さい精度に成形することは非常に難しい技術である。

光ディスク成形における要求項目を整理してみると次のようになる。

- (1) 転写性がよいこと
- (2) 反り、変形が小さいこと

- (3) 寸法（特に厚さ）が一定であること
- (4) 内部応力が小さいこと
- (5) 透明で光線透過率が高いこと、変色しないこと
- (6) ゴミの混入がないこと

特に内部応力はレーザー光の屈折の原因になるので極力小さくなるような成形法が必要である。

以上の条件を満足させる成形とはどのようなものであろうか。

＜材料＞ まず薄肉円板成形であること。しかもマイクロメートル・オーダーの転写性を要することから非常に流れのよいプラスチック材料でなければならない。しかも加熱溶融時に変色しないこと、複屈折率が小さいことも大切である。

こうした要求に対し、ビデオディスク用の PMMA 樹脂ではメルト・インデックス (MI) が $10 \sim 30 \text{ g} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ という非常に流動性のよいものがディスク用樹脂として開発されている。ただし、記録再生可能な業務用ディスクの場合は反射膜蒸着温度が高く、耐熱性の高いことが優先し、流動性の悪いものを使用せざるをえないのが現状である。

また、CD 用の PC 樹脂では分子量を 20,000 以下に下げたり、滑剤を入れたりして改良している。

＜成形機＞ 成形条件としては転写性がよく、内部応力の小さいことが最大のポイントであり、内部応力が小さければ反り、ひねりも小さくなる。

一般的には転写性をよくするためには保圧力を上げるが、これでは内部応力が高くなってしまう。

内部応力の発生要因の一つは射出充てん中にキャビティ内壁に接している樹脂と、流動している中心部の樹脂との間で発生する「ずれ現象」によるものである。もう一つは充てん完了後の保圧力により発生する残留応力である。

したがって、これを解決するには、樹脂を均一に溶融し、その溶融樹脂が冷えないうちに短時間 $0.2 \text{ s} \sim 0.5 \text{ s}$ で充てんする高速射出、そして最小必要限の保圧力に正確に切り換える制御機能をもった成形機が必要である。

その他、スムーズな型締、型開きが行なえ、離型の際、微妙な偏荷重を与えない方式のものがよい。また、金型取付盤の平行度、剛性も十分配慮された成形

機でなければならない。周辺機器特に取出し機との関係も考慮しておく必要がある。

＜金型＞ 上記精度を保つには、金型の剛性、精度、温調構造が最も大切である。特にその平面度、面あさは重要であり、鏡面仕上げ ($0.01 \mu\text{m} \sim 0.02 \mu\text{m}$) にする必要がある。金型の温度制御も、中央部、中間部、外周部などキメ細かい制御が必要である。そして、CD やビデオディスクでは金型原盤の交換が容易に行なえる構造であることも大切である。

＜環境＞ 光ディスクはレーザー光で信号を検出するため、その基板にゴミが侵入することは絶対避けねばならない。そのためクリーンルームの設備が必要となる。

クリーン度は 1,000 前後が要求されているが、このためには成形機、周辺機器からの塵埃の発生は極力避けねばならない。塵埃発生源はなるべく外部に設置し、どうしても発生する塵埃は集塵して外部へ排出することが必要である (表 3, 4 参照)。

5. おわりに

以上、今日の射出成形における最先端精密成形について、成形品の例を二、三紹介したが、いずれもマイクロメートル・オーダーの精度を要する成形品であり、初めに述べたように、単に、成形機の高精度化 (例えばフィードバック制御など) を行なっても、これらの成形品を得られるとは限らない。

材料、金型、成形機、周辺機器を含めたトータルの成形システムとしてとらえ、工夫をしてゆく必要がある。

今後も、さらに製品に要求される精密度が高くなり、成形性の困難さを克服して部品のプラスチック化が進むであろうが、その製品固有の成形システムを開発してはじめて、それらが実用化されるのではないだろうか。

文 献

- 1) レンズ・プリズム加工技術 '80, 光学工業技術研究組合, p. 125
- 2) 日経エレクトロニクス, 292 [6-7] 136 (1982)
- 3) 電波新聞, 1981 年 10 月 1 日号
- 4) 射出成形技術の基本と応用, 日本プラスチック加工技術協会 (講演会資料)