多品種少量生産のための低コスト金型の開発
ー亜鉛合金材料を用いた金型試作ー

坂本博宣*・川村浩二*・冨重定三**
*生産技術部、** 情報デザイン部

Development of the Low Cost Dies for Job Shop Type Production

Hironobu SAKAMOTO*, Kouji KAWAMURA*,and Sadami TOMISHIGE**

本研究では、先ず、最近開発された亜鉛合金材(ZAPREC)を金型材として選定し、その加工特性を調べるための切削・研削加工及び放電加工実験を行った。その結果，切削加工能率と放電加工能率は鉄系合金材料の 3 倍向上するが、研削加工能率は半減することが分かった。また、ZAPREC を用いて 2000 個耐用の射出成形金型を試作し、熱可塑性樹脂製品の成形実験を行った結果、3000 個の成形まで充分耐えることを検証した。ZAPREC 金型材による金型製作費は鉄系合金材 NAK80 による製作費の 8 割程度になると試算した。

1. はじめに

近年、消費者嗜好の多様化に伴い、製品機能の多様化、短寿命化、低価格化が進展している。特に、携帯電話、ゲーム機など IT 製品において著しい。このような市場で生き残るためには、低価格で短納期の小ロット生産用金型が必要になる。多くの金型は高温・高圧の成形条件に耐える高強度の鉄系合金で作られているが、材料の熱処理や歪み取りなどに係わる多くの工程が介在する。このことが小ロット金型の採算性を低減する一因であり、金型業界から問題解決が強く求められている。

図 1 は、プラスチック製品用射出成形金型における材料費、設計費、加工費、組立調整費及び成形トライ費の金型製作費に占める割合を百分率で示したものである。材料は鉄系合金材を熱処理したもの、加工は切削加工、研削加工及び研磨加工、並びにワイヤカット放電加工など電気加工を対象にしている。

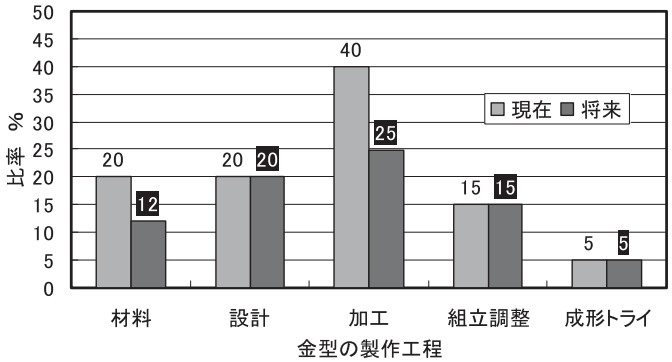

図 1　金型製作費構成要素の分析

本研究の目的は、低価格の新材料を小ロットの金型材として適用できるか検証し、併せて、金型の機械加工及び電気加工時間を短縮することにより、金型の低価格化を図ることである。金型材には最近開発された ZAPREC[1] を用い、切削、研削及び放電加工特性を実験によって調べた。表 1 に ZAPREC 材と金型材として広汎に用いられている NAK80 材（大同特殊鋼㈱）[2] の材料特性を示す。金型材料費と加工時間から ZAPREC 材による金型製作費を試算し、NAK80 の場合と比較した。

ZAPREC 材の金型を用いて手鏡固定枠を製品とする金型を試作し、射出成形実験を行い、製品成形数量と亜鉛合金材の精度劣化の相関を調べた。このことにより、ZAPREC 材が金型材として適用できるかどうか検証した。

表 1　亜鉛合金材と金型材の材料特性

	ZAPREC	NAK80
比重	6.52	7.85
熱膨張係数 [10^{-6}/℃]	28.7	12.5
熱伝導率 [cal/cm･s･℃]	0.27	0.42
比熱 [cal/g･℃]	0.099	
引張強さ [N/mm^2]	280	1.162×10^3
縦弾性係数 [N/mm^2]	1×10^5	2.009×10^5
硬度	120[HB]	40[HRC]
伸び [%]	3.5	15

2. 実験方法および実験条件

2.1　実験１

以下、ZAPREC 材の切削、研削、ワイヤカット放電加工及び研磨加工方法と条件を述べる。表２にその加工条件を示す。

2.1.1　切削実験

切削実験は、M/C(大阪機工㈱製:PCN-40) を用いて、超硬合金のコーティングエンドミルで被削材（50㎜×200㎜×25㎜）を表２の加工条件で行った。実験では、工具を左から右方向へ５回送ったあと被削材の表面粗さを計測し、被削材除去量を計算した。

2.1.2　研削実験

研削実験は、平面研削盤(㈱岡本工作機械製作所製:PFG-525P)で切削実験と同じ被削材を用いて行った。被削材が非磁性であるため平面研削盤の磁力による固定ができないことから、被削材の周囲をパラレルブロックで固定した。トラバース研削法で被削材を５回研削した後、仕上げ面粗さを計測し、被削材除去量を計算した。

2.1.3　ワイヤカット放電加工実験

ワイヤカット放電加工実験は、ワイヤカット放電加工機(ファナック㈱製:α-1iA)を用いて行った。実験は単位時間当たりの被削材除去面積が230㎟となるよう既に登録された加工条件を入力し、AI（人工知能）機能を用いて自動操作で行った。機械加工と同様に、被削材の仕上げ面粗さを計測し、除去量を計算した。

2.1.4　研磨実験

研磨実験は、NC ジグ研削盤(三井精機工業㈱製 3GBN)を用いて、炭化珪素系の C60HD-8 及びアルミナ系の WA320R の二種類の軸付弾性砥石を供試した。

仕上げ面粗さは触針式表面粗さ測定機（㈱東京精密製:surfcom475A）を用い、工具の進行方向と直角方向の仕上げ面を測定した。

2.2　実験２

手鏡固定枠を成形品として図案化し、CAD/CAM を用いて金型を設計・試作した。成形用の樹脂として、射出成形性が良好で、成形後変形が少ない熱可塑性のポリエチレン[3)] を用いた。本研究では 2000 個の小ロット生産を対象としていることから、成形実験は 3000 個まで行った。金型の形状と表面粗さは、成形前、成形数 500 個、1000 個、2000 個、3000 個において測定した。金型の寸法はコア部の内径・外径、キャビ部の内径を三次元測定機（㈱ミツトヨ製:LEGEX910）を用いて行った。表面粗さはコア部を触針式表面粗さ測定機（㈱東京精密製:surfcom475A）を用いて行った。また参考のため、計測した位置座標から成形前後の形状を CRT に描画し、金型の形状変化を目視で観察した。表３に射出成形の実験条件を示す。

表２　ZAPREC 材の加工条件

切削加工条件	
工具(mm)	超硬コーティングエンドミル φ10
切削速度(m/min)	200
送り速度(mm/刃)	0.2
軸方向切込み量(mm)	0.5
径方向切込み量(mm)	20
主軸回転数(min^{-1})	8×10^3
研削加工条件	
砥　石(mm)	WA60I7V (φ205×19×φ50.8)
砥石周速度(m/s)	30
切込み量(mm)	5,10
送り速度(m/min)	10
ワイヤカット放電加工条件	
ワイヤ(mm)	黄銅　φ0.25
電圧(V)	40～50
除去面積(mm^2/min)	230
研磨加工条件	
砥石(mm)	C60HD-8(φ25×25×6), WA320R(φ10×25×6)
砥石周速度(m/s)	26
切込み量(μm)	10
送り速度(m/min)	100

表３　射出成形実験条件

射出成形条件	
シリンダー温度 [℃]	190
金型温度 [℃]	40
型締め圧力 [t]	40
１サイクル [s]	30
シリンダー寸法[mm]	φ 26

3. 実験結果及び考察

3.1 亜鉛合金材の加工特性

亜鉛合金材の切削、研削、ワイヤカット放電及び研磨加工特性を実験によって調べ、鉄系合金材(NAK80)と比較した。図２は各加工法の特性を単位時間当たりの切り屑排出量（cm^3/min）で示したものであり、加工の難易度を表す。図より、亜鉛合金材の切削加工とワイヤカット放電加工における切り屑排出量は、それぞれ、40cm^3/min、138cm^3/min であり、NAK80 材の約３倍に達している。即ち、亜鉛合金材の加工能率は NAK80 材の約３倍である。

亜鉛合金材の切削加工能率が高いのは以下の理由による。亜鉛合金材の材料特性である引張り強さが

280N/mm² と NAK80 材の 1162N/mm² の約 1/4 と低く、材料硬度も 120HB と NAK80 材 40HRC（HB 換算で 380）より軟質であることから、容易に刃物が材料に食込みやすく塑性変形を起こして材料を破断するためである。また、材料の伸び率が 3.5 であり、NAK80 材 15 の約 1/5 と小さいため、切屑が材料から容易に分離することも要因である[4]。さらに、熱伝導率は 0.27cal/g・℃で、NAK80 材の 0.42 cal/g・℃の 6 割であり、切削熱が刃物に蓄積すると考えられるが、4 枚刃のコーティングを施した超硬合金工具を用いたため刃物の摩耗、切り屑の付着が生じなかったことによる[5)、6)]。

研削加工能率は半減している。この理由は以下のように説明できる。砥石 は粗い WA60I7V を用いて砥石の目詰まりを回避するようにしたが、亜鉛合金材は軟質であるため砥粒と被削材が摩擦を生じ、切屑の排出が悪化した。また、摩擦熱によって溶融した切屑が砥石作業面に付着したため被削材の加工面に研削焼けが発生した[7)]。砥石作業面に付着した切屑が研削作業の進行と共に硬化した結果切れ刃となり、被削材面を引っ掻いて仕上げ面を低下させた[8),9)]。このような理由で、仕上げ研削における砥石切込み量を 5μm とした。

ワイヤカット放電加工における亜鉛合金材の切屑排出量は 183cm³/min であり、NAK80 の 40cm³/min に対し 3.5 倍多くなった。亜鉛合金材の融点と沸点が 377℃、907℃、NAK80 が 1543℃、2900℃である。通常、放電加工部では、放電による熱エネルギーで金属の溶解と凝固が超短時間で繰り返されている。このように、亜鉛合金材の場合、融点と沸点の差が NAK80 より小さいため、溶解と同時に定常的な気化が生じ切屑排出量が多くなるからである。

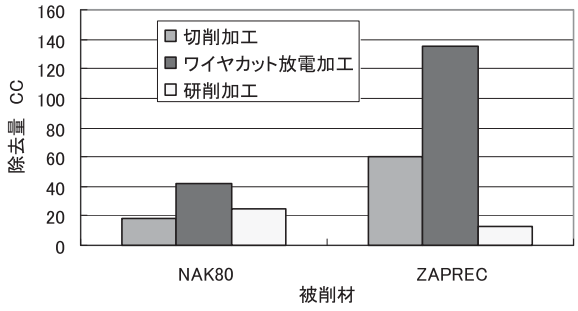

図 2　亜鉛合金材の加工特性

機械加工面のカッターマークを取り除く平滑作業を２種類の弾性砥石を用いて行った。工具の切込みとピックフィード送りによって生じた被削材面の凹凸を除去するため、砥石の接触面が被削材面の凹凸に食込むようゴム及び PVA（ポリビニールアルコール）の結合剤を用いた弾性砥石 を選定した。

図 3 は累積削除量に対する仕上げ面粗さの変化を示す。両者とも、表面粗さ 3μmRy の未加工面が研削の進行に伴い悪化し、累積削除量 80mm³ で 10μmRy まで増大している。C6027D-8 と WA320R の二種類の砥石において、大きな差異は見られない。図 4 に累積削除量 80mm³ における砥石作業面の外観を示す。いずれの砥石も作業面に切屑の付着が観察される。

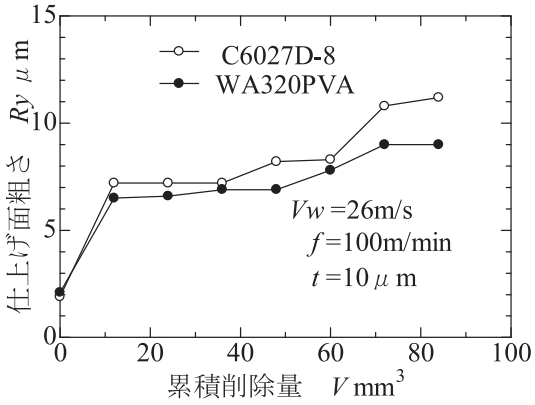

図 3　亜鉛合金材の研磨加工における仕上げ面粗さの変化

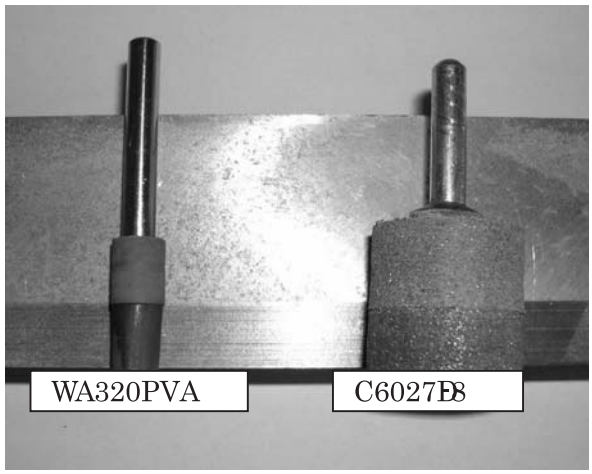

図 4　砥石作業面の外観

3.2　亜鉛合金金型の試作と成形実験

試作した亜鉛合金材金型でポリエチレン樹脂を用いて手鏡固定枠を作製する成形実験を行った。図 5 は成形数と金型コア部の外円と内円の寸法変化を示す。成形前の外円寸法（φ）は 71.748mm、成形数 500 個で 71.743mm、1000 個で 71.745mm、2000 個で 71.745mm、3000 個で 71.740mm である。成形前の内円寸法（φ）61.549mm、成形数 500 個で 61.549mm、1000 個で 61.549mm、2000 個で 61.549mm、3000 個で 61.549mm であった。外円寸法、内円寸法とも成形数 3000 個までミクロンオーダ以内の誤差であり、金型の寸法精度は維

持されている。

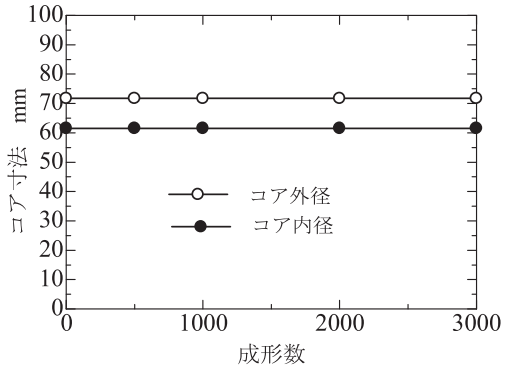

図５　射出成形数と金型寸法の関係

図６は同様に金型コア部とキャビ部の表面粗さについて示したものである。コア部の成形前の表面粗さが 0.25μmRa であり、500 個、1000 個、2000 個、3000 個の成形による変化はほとんどない。キャビ部の表面粗さについても、成形前 0.20μmRa が 3000 個で 0.26μmRa であり、微小の変化である。

以上の実験結果から、亜鉛合金材金型は 3000 個までの射出成形に充分対応できるといえる。

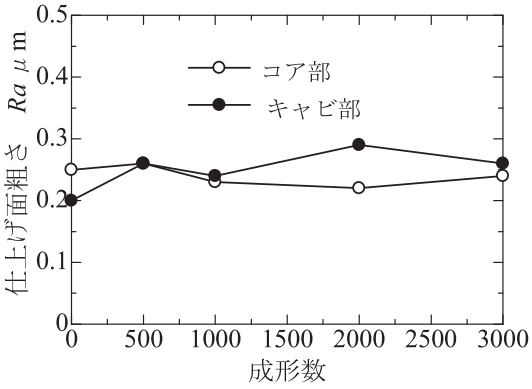

図６　射出成形数と金型の表面粗さの関係

3.3　亜鉛合金金型の製作費

金型の製作費を材料費、設計費、加工費、組立調整費、成形トライ[10]に要する費用に分類し、亜鉛合金材を金型に適用した場合の効果を分析した。図７は製作費を NAK80 材と亜鉛合金材において比較したものである。材料費は 15%から 5%、加工費は 40%から 22%へ低減している。加工費の内訳は、切削加工が 30%から 10%、研削加工が 5%から 10%、ワイヤカット放電加工が 5%から 2%の比率となり、加工費に占める割合が 45%も低減している。NAK80 の指数を 100 と設定した場合、亜鉛合金材金型の指数は 74 となり、26 低減している。

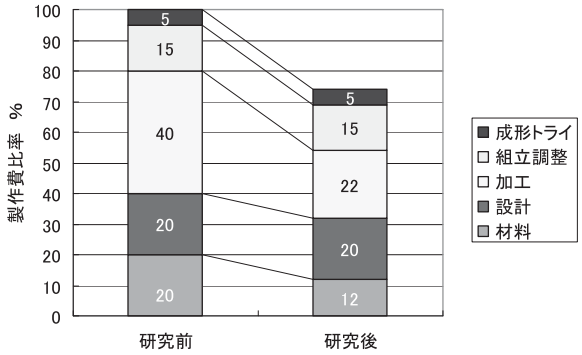

図７　亜鉛合金材を用いた場合の金型製作費

3.4　亜鉛合金金型と成形品

図８に試作した亜鉛合金金型のコア部とキャビ部の外観、図９に成形した手鏡固定枠を示す。手鏡固定枠にはラッピング・ポリシングによって研磨を施したステンレス鋼製の鏡を取付けた。

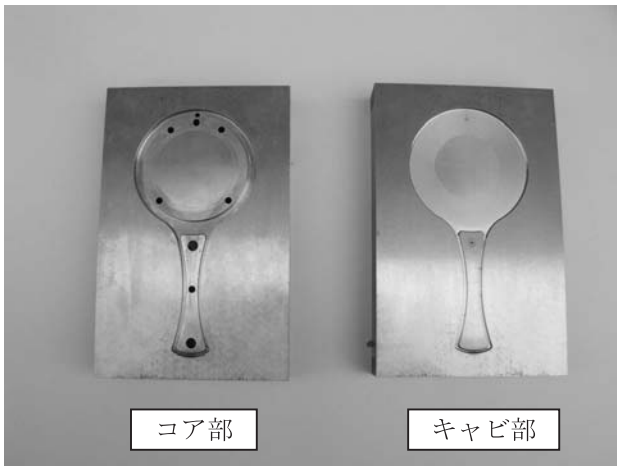

図８　亜鉛合金金型

図９　成形品の手鏡固定枠

4. おわりに

亜鉛合金材料を用いた手鏡固定枠用の射出成形金型を試作し、射出成形実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

1)亜鉛合金材は汎用の鉄系金型材に比べて切削加工及び放電加工に優れた特性を示すが、研削加工では解決すべき問題がある。

2)亜鉛合金材料を用いた手鏡固定枠用の射出成形金型を試作し、3000 個までの小ロット生産に十分対応できることを検証した。

3)亜鉛合金金型の製作費は鉄系合金材金型の８割程度になると試算できる。

文献

1) 大上光生:亜鉛合金 ZAPREC の特性, 金型情報 Factory, Vol. 1.8, 9 (2003)
2) 太田哲:工作機械シリーズ金型技術,大河出版,(1988), 71
3) 浜小路正博：工作機械シリーズ金型技術, 大河出版, (1988), 87
4) 喜多義宏, 石川俊樹, 他２名：切削形状精度を維持したグラインディングセンタ(CG)による研磨, Vol. 48, 3 (2004), 36
5) 田中龍太郎, 山根八洲男, 他３名, 高速度対応型快削鋼のエンドミル加工,精密工学会誌,Vol.73, 7 (2007), 803
6) 竹山秀彦：切削加工, 丸善株式会社, (1999)
7) 松尾哲夫, 末永勝郎, 他３名：機械材料, 朝倉書店, (1990)
8) 庄司克雄監修：超精密加工と非球面加工, 株式会社エヌ・ティ・エス, (2004)
9) 安在正博：高速ミリング, 1004, 73, 9 (2007) 1025
10) プラスチック射出成形技術と金型加工の動向, 第３回精密工学会九州支部産学官交流セミナー, (2007)