

プラスチックによる射出成形用モールドの開発*

町田 俊一**、小林正信**、米倉勇雄***
小向隆志****、鈴木一孝****

本県の鉄鉄鑄物業界にロストワックス鑄造法による精密鑄造技術を導入し、市場の拡大を図るため、ワックス原型を従来の方法に比べて迅速、かつ低廉に製作する技術開発を行った。

開発内容はワックス原型を作成するために用いられているアルミ合金製の金型（モールド）と同等性能の簡易金型を光造形法を用いて樹脂で製作する技術で、複雑形状を有する高精度のモールドを簡便に製作することが可能になった。

キーワード：製作技術、光造形、ロストワックス鑄造、射出成形モールド

Development of Injection Mold Based on Plastics

MACHIDA Toshikazu, KOBAYASHI Masanobu, YONEKURA Isao
KOMUKAI Takashi and SUZUKI Kazunori

To expand a market, by introduction a minute casting technology using lost-wax casting for the foundries in Iwate prefecture, we developed the technology to produce wax model in swiftness and cheapness compared with a current method. The technique developed by this research is to produce a substitute mold for wax model, which has equal performance to the mold by aluminum alloy, by a plastic using stereo lithography molding method.

By this technique, it became possible to produce mold of complicated form with short time easily.

Key Words : Product techniques, Stereo lithography, Lost-wax casting, Injection mold

1 結 言

水沢地域の鉄鉄鑄物製造業では、製品の高付加価値化と新規製品による新分野進出が課題になっているが、通常の砂型鑄造では製品の形状が制限され、表面も粗く、肉厚も3mm以上必要になり、比較的単純な形状で精度の低い製品しか生産できないため、高精度化、軽量化、複雑形状製品等の市場ニーズに対応できないでいる。これらのニーズに対応する一つの方法として、ロストワックス精密鑄造技術の導入が考えられる。ロストワックス鑄造では高精度な精密機械部品や各種金型等の製作が可能になり、従来品の付加価値の向上も図れるが、ワックス成形用金型（以下モールド）の加工コストが高く、加工時間も必要なことから導入が進んでいない。また、現在の切削・放電加工によるモールド作成は製品形状に制約があり、本来は自由な形状を鑄造できるロストワックス鑄造法の長所を生かし切れないでいる。本研究では製品の高付加価値化と新分野進出、新製品開発を促進することを目的に、従来は金属の切削加工により作成されていたワックス原型の射出成形モールドをプラスチックを用いて廉価にかつ短時間で作成する技術開発を行った。

2 研究の目的

現在ロストワックス鑄に使用されているワックス原形作成金型はアルミ合金を切削加工または放電加工して製作しているが、加工に時間がかかり、コストも高い。本研究では、複雑な形状のワックス原形作成用モールドを光造形法により、簡便かつ迅速に作成するための技術開発を目的としている。開発するプラスチック製のモールドは通常使用されている金型用の射出成形装置で使用できるものでなければならず、そのためには以下の項目の開発が必要であった。

2-1 射出成形機での利用に耐える強度の確保

ワックスの射出成形では通常、型締め圧で6 t/cm²前後の圧力が金型にかかり、同時にワックスの射出成形圧も30 kg/cm²前後である。この両者の圧力で、モールドが破損したり、変形しないことが大きな条件となる。また、現在のロストワックス製品のロットは1ロットあたり500個程度が最もポピュラーであるが、反復生産を考慮して1万回程度の射出耐久性も必要であると考えた。

2-2 モールドの耐熱性、ワックスの離型性の向上

通常の作業においては射出作業のサイクルは3分間隔

* 特定中小企業集積支援技術開発事業、** 木工特産部、*** 金属材料部、**** 化学部

程度で行われており、この時間でワックスが硬化することが必要になる。このため、モールドには熱伝導性の良いアルミ合金が使用されているが、今回開発するプラスチック製のモールドも同様の冷却効果が必要になる。

2-3 面の平滑度

センターに設置されている光造形装置（シーメット社製GH-400SP）による物体の作成は複雑形状物体を迅速に作成できる一方、技法上の制約として積層される樹脂層の間に層の厚み分（通常は0.1mm）の段差を生じる。

物体の作成方向が垂直に近ければ段差の形状に及ぼす影響は問題とならないが、作成方向が水平に近い場合は影響が大きくなり、何らかの方法でこの段差による影響を改善することが必要である。

2-4 耐摩耗性の向上による耐久性の確保

ワックスと樹脂は成分が似ており、密着性が良く、離型性がアルミに比べて悪い。同時に樹脂は金属等と比べると硬度がかなり低く、型の表面に傷が付き易い。そのままではアルミ製のモールドに比べて摩耗が激しいため金属のメッキ等により表面硬度を向上し、離型性を向上させる必要がある。以上の事項を中心に検討を実施した

3 方法

上述の開発項目に従い、下記の項目の検討を行った。

- (1) 試験用モールドの設計と製作
- (2) 予備射出実験による樹脂強度の確認
- (3) プラスチック表面へのメッキ処理の検討
- (4) 光造形で生じる表面段差改善の検討
- (5) モールドの強度向上の検討
- (6) モールドの耐熱性向上の検討
- (7) 試作モールドによる射出・鑄造試験

以下、各項目の検討方法、結果の詳細を記す。

3-1 試験用モールドの設計と製作

樹脂モールドはセンター保有のCADシステム（Alias）により作成した。今回は図1に示すように試験用形状として、表面段差の現れやすい曲面と平面とで構成された試験片を設計した。

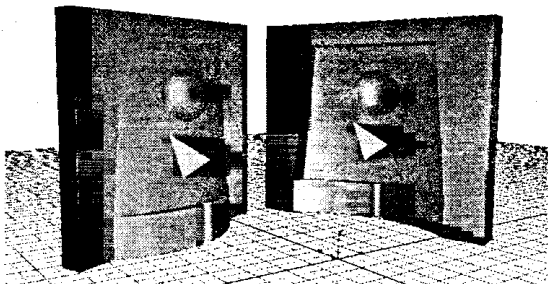


図1 CADによるサンプルの設計

3-2 予備射出実験による樹脂強度の確認

今回開発を行うプラスチック製モールドは現在ワックス原形の射出成形用に使われているアルミニウム合金製金型（以下アルミモールド）の代用を目的としている。

そこで、ワックス成形では一般的な射出成形機（株式会社東京ロストワックス工業TW-6930型）で、光硬化樹脂（アデカHS661）のみで作成したモールドによる射出試験を表1の条件で行った。まず、樹脂製モールドを射出圧で型が開かないように固定し、射出を行った。

その結果、射出の前に型締圧でモールドが破損した。

表1 射出条件

項目	条件
型締圧	6 t/cm ²
射出圧	3.2 kg/cm ²
射出速度	油圧用油吐出量 3 l/min
加圧時間	2.0 sec以上
射出サイクル	3分以内

次に、厚さ2cmの金属板で樹脂モールドの両側を補強した。その結果、型締圧による破損はなくなったが、通常射出圧（30kg/cm²）でワックス漏れが生じたため、低射出圧で射出（19kg/cm²）を行った。ワックス漏れの原因としては、モールド合わせ面の精度が確保されていないことや射出圧によるモールドの変形が考えられる。さらに、連続射出3回目には、樹脂の熱伝導率が悪いために型自体の温度が上昇し、ワックスが型内で充分硬化せず、離型しなくなった。以上のことから、光硬化樹脂だけでは射出成形装置の型締圧及び射出圧に対しての十分な強度を持っておらず、ワックスの迅速な硬化も期待できないことが確認された。

3-3 プラスチック表面へのメッキ処理の検討¹⁾

光硬化樹脂製モールドの耐久性、熱伝導性を向上するために金属による表面処理を行うことを検討した。

表面処理はメッキ、溶射等を施すことが一般的であるが、メッキは、溶射に比べ低温で型精度を維持することができる。また、メッキについては、エポキシ樹脂という絶縁材料にも析出可能な無電解メッキが最適であると考えられるが、メッキ膜を厚くするとメッキの膜応力等によりメッキ膜が剥がれ易くなるという問題がある。一方、光硬化型エポキシ樹脂のような樹脂にメッキをする場合、樹脂表面へ微細孔を形成し、その投錨効果により密着性が確保される。このためメッキ前の樹脂表面の前処理が重要になり、エッチング前処理の有機溶剤への浸漬時間、あるいは温度等により有機溶剤が光硬化エポキシ樹脂の内部まで浸透するようにした場合、クロム酸によるエッチングが容易で、より深くエッチング微細孔が

形成されることからメッキ膜を厚く形成することが可能となり、従来の手法によるメッキ膜の2倍以上の厚みを得られることが判明した。図2の処理工程で行ったメッキ処理前のエッチング処理では、ジメチルホルムアミドが光硬化エポキシ樹脂に対して最も高い膨潤、溶解作用を持ち、次工程のクロム酸エッチングを容易にし、プレエッチング液として最適である。この有機溶剤に浸漬処理すると、光硬化型エポキシ樹脂表面には全面均一で大きく、深い微細孔粗面が形成され、通常の樹脂への無電解ニッケルメッキ工程を行うだけで、密着性のよいメッキ膜が得られる。

A. 処理工程	
1)	脱脂洗浄 アセトン浸漬 (室温) 10min アルコール浸漬 (室温) 10min
2)	エッチング前処理 有機溶剤浸漬 (室温) 10min
3)	エッチング処理 クロム酸溶液 (60℃) 3min エッチング処理材; CrO ₃ 100g/l, H ₂ SO ₄ 500g/l PH ₃ PO ₄ 100g/l
4)	水洗
5)	センタインジグ SnCl ₂ 10g/l, HCl 40ml/l (室温) 1min
6)	アクティベーション PdCl ₂ 0.6g/l, HCl 15ml/l (50℃) 1min
7)	水洗
8)	無電解ニッケルメッキ (60℃) 1時間~4時間
5) 6) 繰り返し2回	

図2 表面処理工程

3-4 光造形で生じる表面段差改善の検討

光造形で作成された物体に生じる段差の解消法として段差の凸部を切削等で削除する方法と、凹部を何らかの方法で充填する方法との2種類が考えられる。凸部の切削についてはサンドブラストによる平滑化を試み、凹部の充填については粉末の充填を試みた。また、金属メッキは凹部充填では効果が得られず、表面硬度向上の観点から、メッキ単独の検討として実施した。

3-4-1 金属メッキによる段差改善

3-3で述べたように、樹脂へのメッキ方法は可能となった。写真1は開発した手法でメッキ処理したサンプルの断面顕微鏡写真である。写真1に示されるように、表面段差の形状どおりに均一にメッキ層が形成され、メッキだけの処理では樹脂表面段差の解消はできないことがわかった。

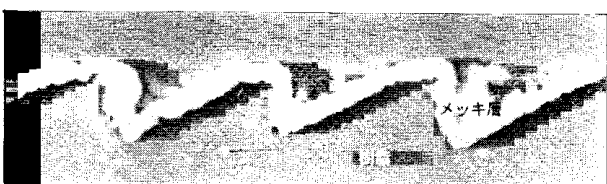


写真1 メッキ後の樹脂断面

3-4-2 サンドブラストによる段差凸部削除

サンドブラストを用いて表面の研削を行った。段差の1/3程度の大きさの粒径を持った研削材では全面均一な研削には適しないことが判明した。サンドブラスト法では、樹脂の硬度が低いために表面の凸部を研削するよりむしろ凸部を研削材が叩き潰すことによる平滑化が行われており、後加工のメッキが全く樹脂表面に密着しない結果となった。(写真2)

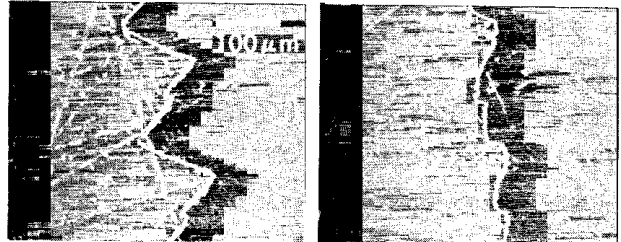


写真2 サンドブラスト処理による樹脂断面の変化

3-4-3 段差凹部への粉末充填による段差改善

次に、粉末の凹部への充填による前処理について検討した。段差を埋める方法としては、パテ等の充填も有効である。しかし、後に研磨する必要性がある充填方法の場合、複雑な曲面や研磨機の届かない部分の段差解消には適応し難い。そこで、後処理が不要な方法として、微粉末による段差解消方法を検討した。実験に使用した粉末は、酸化第二鉄及び3種類の粒径のアルミナ粉末である。粒子を固定させるバインダには光硬化樹脂がエポキシ樹脂であることから、同じ特性を持つ2液性のエポキシ樹脂を使用した。まず、特に段差が顕著に現れている面に樹脂液(バインダ)を薄く塗布した。5分程度放置すると、表面張力により凹部にのみ樹脂液が残るようになる。この状態に達してから、酸化第二鉄やアルミナ等の金属粉末を全体に十分に蒔き付ける。樹脂が多く残っている部分は毛細管現象により粉末が多く付着し、樹脂がほとんど残っていない部分は付着しない。この作業を2回繰り返すことにより凹部への粉末充填を行った。結果は写真3に示されるように、酸化第二鉄が最も厚い粉末層を形成している。

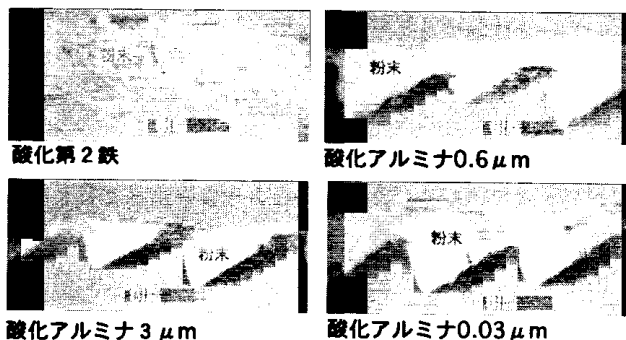


写真3 粉末充填による段差の改善

アルミナ粉末は $3\mu\text{m}$ 、 $0.6\mu\text{m}$ 、 $0.03\mu\text{m}$ と3種類の粒径のものをを用いたが、細かいものほど厚い層を形成し、いずれも凹部を充填していることが確認された。酸化第2鉄粉末は、塗装に用いる顔料として作られたものを使用しており、アルミナに比較して非常に細かい粒径である。今回使用した粉末は厚みの違いが見られるものの、凹部の充填の機能は果たしていることが確認できた。

3-5 モールドの強度向上の検討

予備射出試験の結果から、プラスチック単独のモールドは強度的に使用が不可能であることが判明したので、図3に示すような金属製の外枠を設計し、制作した。金属枠は雌雄の2型割りで、単純な角形状の鉄部材をボルト締めで組んだ構造で様々な寸法の樹脂型に柔軟に対応できるようになっており、射出時にはネジで接合する。

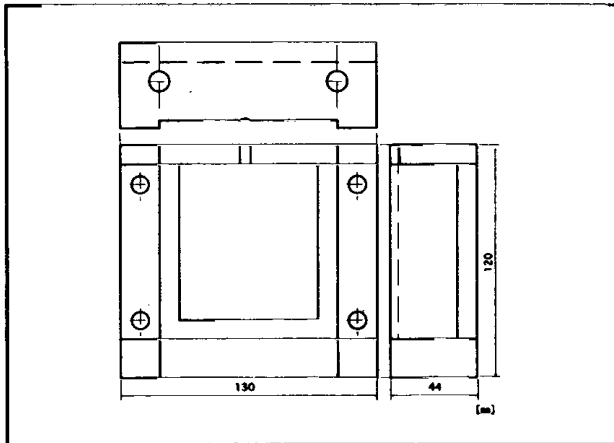


図3 金属製ケーシング概要

この枠を用いることで樹脂モールドの耐熱縮圧を考慮する必要がなくなり、より薄い形状に設計することが可能となった。また、薄くした樹脂の射出圧に対する補強と熱伝導特性の向上を図るため、熱伝導特性に優れた材料の充填によるバックアップを検討することとした。さらに、後に検討を行う冷却機構の組み込みも行える形状とした。金属枠への樹脂モールドの取り付けはネジ止めで行い上から金属版で押さえることで完全に固定した。

3-6 モールドの耐熱性向上の検討

3-6-1 バックアップ部材の検討

3-2における樹脂型の射出実験で、ワックスの冷却が重要な事項であることから、金属に比較して大幅に熱伝導率の悪い樹脂を素材に使用するためには樹脂型をできるだけ薄くすることが肝要であり、しかも外部圧力に対して強度負担をしないで済むような構造が必要となるので、薄肉化した樹脂型とケーシングとの間に熱伝導率の良いバックアップ材を充填して補強することを検討した。ケーシングと樹脂型との間の空隙は複雑形状になるので、バックアップ材はその空隙を均一に充填し、射出圧

に対して強度負担を行い、かつ高い熱伝導率を有するものでなければならない。また、同時に樹脂の熱変形温度は約 70°C であり、熔融金属や、硬化時に発熱反応を起こすような樹脂の使用は適切でない。さらに樹脂は硬化時に収縮するものが多く、樹脂型の変形が懸念される。以上のことから、適切な充填部材として金属粉末を使用することにした。最初は400メッシュの銅粉を充填して射出実験を行ったが、ワックスの射出中に樹脂型が破損した。これは粉末が細かいために圧力がかかったときに流動現象を生じたためであり、樹脂をバインダとして粉末を固定することにした。また、粉末が細かいとバインダとして使用する樹脂の割合が高くなり、熱伝導性に影響を及ぼす恐れがあり、鉄と同程度の熱伝導率を有する100メッシュのジルコンサンドを使用することにした。バインダに使用する樹脂はポリエステル樹脂、エポキシ樹脂双方を試したが、エポキシ樹脂の場合は混合率が低くても完全硬化し、粉末を固定できることから、低粘度エポキシ樹脂をバインダとするジルコンサンドのバックアップで良い結果が得られた。(写真4)

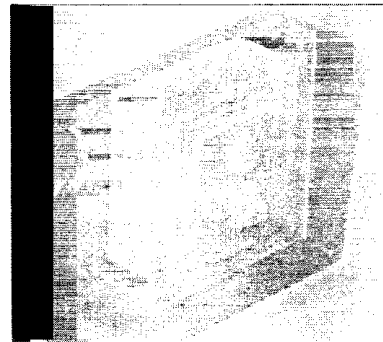


写真4 ジルコンサンドによるバックアップ

また、この部材でのバックアップによる射出成形実験では10回以上射出しても型の温度上昇は見られず、冷却効果の点でも良い結果が得られた。

3-6-2 冷却水循環機構の検討

冷却水循環機構は光造形機で写真5のような循環機構を作成したが、ジルコンサンドのバックアップで十分な結果が得られたので組み込まず試験を続行した。

ただし、ワックス原形の容積が大きな場合は、熱容量

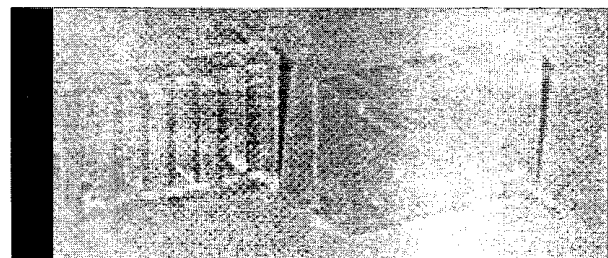


写真5 冷却水循環機構

も大きくなるので写真のような冷却機構を樹脂型になるべく近づけて設置することが必要になると思われる。

3-6-3 薄肉樹脂型の設計と試作

写真6および図4は設計した樹脂モールドの各形状と断面形状である。金属枠の使用を決定してからは、樹脂の厚さは1mmとし、応力集中や不均一な熱分散を防ぐため、全体を均一な厚さとした。バックアップ材による補強をした場合、1mmの厚さでも樹脂の変形、割れは見られなかった。各モデルの主な改良点は、ワックスの漏れにくい雌雄型の接合部分の形状である。接合面を広くした形状や嵌合を深くした形状で射出実験を行った。最終的にはNo.6のモデルで良好な結果が得られた。

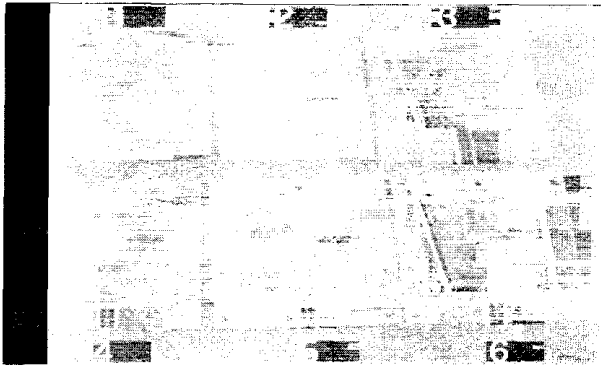


写真6 作成した薄肉樹脂型

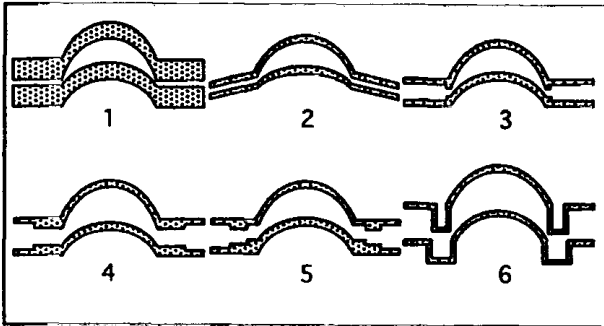


図4 樹脂型断面形状

3-7 試作モールドによる射出・鋳造試験

3-7-1 ワックスの変形防止の検討

今回は、最終的に均一で歩留まりのよい樹脂モールドの開発に成功したが、そこまでの経緯としては、かなり不良率の多いモールドもあった。表2は、射出時のワックスの漏れとひけの関係を見たものである。

表2 射出時の漏れとひけの関係

	総数	ひけ	不良率
ワックス漏れあり	20	12	60%
ワックス漏れなし	33	3	9%

これより射出したワックスの不良率に漏れの有無が関係あることが判明し、形状を改良することで、漏れのない樹脂モールドを完成することができた。また、不良が発生する他の要因についても考え、射出成形において一つのパラメータとなっている射出時間（ワックスがモールド中に一定の圧力で注入し続けられている時間）についても検討を行った。射出実験中に観察した結果、モールド内にワックスが完全に充填されるまでに必要な時間は射出が始まってから約1~2秒で十分である。しかし、実際のワックス原型の製造現場では、15~30秒の射出時間で製造している。射出時間とワックス原形精度の関係を見る一つの方法として、射出時間とワックス原形の重量の関係を実験により調べた。今回行った他の射出実験と同様の条件下（射出圧32kg/cm²、型締圧6t/cm²）で、射出時間を2~30秒（2秒間隔）の範囲で射出したワックス原形の重量を測定した（図5）。

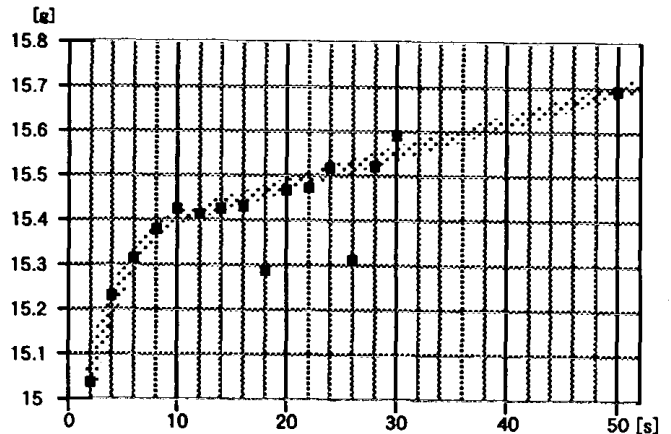


図5 加圧時間とワックス重量

実験では、2秒射出した時点ですでにワックスは完全に充填されていたが、重量を測定すると、射出時間に伴い増加する傾向が見られた。特に、2~10秒までは急激に重量が増加し、個体差が大きくなる可能性が高い。

今回の樹脂モールドの場合では、14秒前後から重量変化量は少なくなったが、50秒の時点でもワックスの重量増加傾向は続いていた。この現象は通常のアルミモールドでも同様に見られるが、実際の製造の観点からは、20秒から30秒の射出時間をとることで実用上必要な精度を得ることができ、20秒以下の射出時間ではひけ等を生じる可能性があることがわかった。

3-7-2 従来の金型との鋳造製品による比較

樹脂モールドとの比較用として、同一形状のモールドをアルミの放電加工および切削加工により制作し（写真7）、両方で射出したワックス原形の鋳造試験を行った（表3）。アルミ金型製のモデルを基準品比較した結果、アルミモールド製のモデルより多少表面の粗い部分

はあるが、全体的には製品として出荷できる水準に達していた。アルミ金型は機械加工によるものであるが、最終的な仕上げは手加工で行っている。そのために、鑄造製品表面の仕上がりも樹脂モールドよりも良くなっているが、その分加工時間も長くなっている。

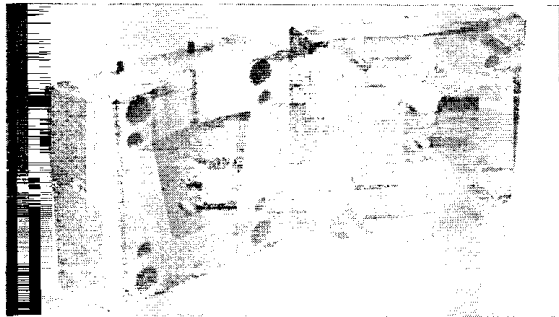


写真7 比較用アルミモールド

4 まとめ

今回の開発の項目は、強度の確保、面平滑度の改善、耐熱性の向上の3点であるが、それぞれの目標達成度は下記のとおりである。

4-1 強度の確保

目標値は、通常の射出条件で1万ショット程度の射出可能な強度であった。樹脂だけの状態で60ショットの射出実験を行った場合では、表面の変形や磨耗等の形状変化は全く見られなかった。また、メッキを施したモールドは、100ショットの射出実験でも変化は見られなかった。これらの結果から、ロストワックス鑄造における一般的なロット数である500個程度の生産については十分に実用に耐える強度を確保できたと考える。

4-2 面の平滑度

目標値は段差の凹みの深さを未処理時の1/3にすることであったが、粉末の充填により、段差が最大な45°の面についても凹みの大半を平滑化することができ、平滑

度の目標を達成した。

4-3 耐熱性の向上

目標値は、150℃までの耐熱性であった。しかし、実際の射出時のワックス温度は約65℃であり、ワックス射出成形に用いるための耐熱性は70~80℃で、今回採用したモールドの構造で、耐熱性を確保することができた。

4-4 その他

現在使用されているアルミ金型は、複雑形状に対応するため、型の割数が3以上のものも多い。このような現状を考慮すると、今回開発した雌雄型モールド以上に複雑な型形状にも対応する必要がある。この問題については、切削加工では不可能な複雑形状も作成できるという利点を持つ光造形法の活用で対応を図る予定である。

5 結 語

本研究により開発を行ったプラスチックモールドは、まだ多数割型への対応等の問題が残されているが、現在最も多く使用されている2つ割型法の場合、金型の製作時間については、本研究で製作したものはCAD入力から3日後には射出成形を行える。これは同じものをアルミ合金で製作した時の最短所要日数である15日間と比較すると大きな時間短縮になる。また、作成にかかる費用も、装置の原価償却を見込んでも、樹脂型の場合はアルミ金型の約1/3と廉価にできる。実用化については実際に幾つかの企業から、本技術の採用について打診があり、複雑形状鑄物の需要とともに普及していくことが期待できる。特に、現在では生産が不可能な、複雑形状の鑄物や小ロットで短期の納品が必要な場合、一品生産等に大きな威力を発揮できるものとする。

文 献

- 1) 鈴木一孝 他 岩手工技セ研報, 4,179, (1997)

表3 鑄造実験結果

1	ワックス原形内訳	3グループ 各6個 計24個				Aグループ プラスチック型1製	Bグループ プラスチック型2製	Cグループ プラスチック型3製	Dグループ アルミ金型製
2	スラリー	初期スラリー バックアップ(ジルコンサンド)				1回 5回			
3	脱漏処理	オートクレーブ使用: 圧力 5 kg/cm ²				温度 120℃ 時間 3時間			
4	鑄造材料	SCS-13 (SUS-304)							
5	鑄湯温度	1590℃							
6	鑄造時のひげ	Aグループ		Bグループ		Cグループ		Dグループ	
		大	0	1	0	0	0	0	0
	小	1	1	1	1	1	1	1	1
	無	5	4	5	5	5	5	5	5
	表面状態	優良		優		良		良	
		大	0	0	4	5	5	5	5
小	6	6	2	1	1	1	1	1	
荒	0	0	0	0	0	0	0	0	
鑄造品の歪み	大		中		小		無		
	大	1	1	0	0	0	0	0	
小	1	2	1	1	1	1	1	1	
無	4	3	5	5	5	5	5	5	
総合評価	表面の段差がそのまま反映されている他は水準に達している		製品のひげが多く、表面状態も段差がでている		表面の荒いものが多少ある他は水準に達している		基準品		