

迅速型成形技術を利用した鋳物製造プロセス

戸羽 篤也, 安田 星季, 岩越 睦郎

Casting Process using the Rapid Prototyping Technology

Atsuya TOBA, Seiki YASUDA, Mutsurou IWAKOSHI

抄 録

3次元CADデータから具体的な立体形状を迅速に製作する迅速型成形技術の進展により、これを利用した製造プロセスの迅速化が注目されている。

本研究は、迅速型成形技術を鋳造工程に応用した鋳造品製造プロセスの開発を目的に、光造形による模型から発泡消失模型を製作して鋳造する「発泡消失模型鋳造法」と、耐火物粉末を積層して得られる成形体を鋳型および中子として用いる鋳造法について具体的な試験を行い、その有効性を評価した。

キーワード：RP(迅速型成形法)、鋳造、消失模型鋳造法、光造形、粉末造型(粉体積層RP)。

Abstract

By the development of the Rapid Prototyping technology which produces concrete three-dimensional shape from three-dimensional CAD data quickly, acceleration of manufacturing process attracts attention.

This study was aimed for development of a process to produce castings quickly by using Rapid-Prototyping technology. We examined the casting process of Evaporative Pattern Casting process which used foam pattern made by stereolithography, and the casting process which used molds and cores made of fireproof powder by 3-D printing, and evaluated the effectiveness.

KEY-WORDS : rapid-prototyping, casting, evaporative pattern casting process, stereolithography, 3-D printing (powder accumulated molding method).

1. はじめに

近年、3次元CADデータを活用した様々な迅速立体成形技術が開発段階を経て実用化の段階へと発展してきた。この種の技術を総称してRP(Rapid Prototyping)技術と呼んでいるが、複雑な形状を取り扱うことが多い素材材産業においては、製作品の寸法精度の高さが要求される一方で、製品製作に要する日数の短さも製作コストに大きく関わってくるため、複雑な立体形状を迅速に成形する技術が確立されれば、市場競争力を飛躍的に伸ばすことが期待される。

RPの分野における具体的な立体形状を成形する材料として、これまで樹脂系の材料が主流をなしてきたが、近年、これらに加えて、砂や金属などのような耐火性を有する材料によるRP技術も実用化されつつある。

筆者らは、ものづくりの基盤をなす鋳造の分野でこれら迅速型成形技術を応用した製品づくりの可能性を探るため、迅速成形型を利用した具体的な鋳造プロセスについて試験を行ったので報告する。

2. 鋳造プロセスへのRP技術の応用

一般に鋳造プロセスは、製作する製品と同等の形状をもつ模型を製作し、これに湯口、湯道、セキ、押し湯といった湯

事業名：一般試験研究

課題名：熱加工成形に対応したプロトタイプング技術の開発

口系方案を付加した原型(一般的に「木型」と呼ばれる)を用いて鋳型を製作し、これに溶融金属を流し込んで冷却し、鋳物製品を得るという工程をたどる。

この中で、いくつかの「型」が必要になるが、特に最初の原型となる「模型」で鋳物の形状や寸法精度が決定されるため、その製作には工数や日程がかかり製造コストの面でも大きな割合を占める。したがって、模型製作の迅速化が図られれば、鋳物製作の迅速化に最も効果的に影響し、さらには鋳物の製造コストを低減させることも可能となる。

2.1 RP技術の種類

RP技術には、立体成形に使用する材料や硬化および積層方法によっていくつかの手法が提案されている。表1にRP技法の主なものを整理した。

「光造形」は「ステレオリソグラフィ」とも呼ばれ、最もよく知られているRP技法の一つである。光造形で用いられる材料はある波長の光を照射すると硬化する性質をもつ液状の樹脂である。この樹脂を一定の膜厚に塗布した面にレーザー光線で断面形状をスキャン照射して硬化後、この樹脂をさらに所定の膜厚になるように塗布し、レーザー光で断面を逐次形成して積層し立体を得る。

次に「溶融堆積法」は、成形材料にABS樹脂やナイロン樹脂など熱を加えると軟化する熱可塑性樹脂を用いるものである。加熱して軟化させた樹脂を専用のノズルで塗布して断面形状を形成し、冷却して固化させた後さらに次の断面を塗布し、堆積して立体を得る。

次に「薄板積層法」は、材料に紙やプラスチックの薄いシートを用い、一層ごとに断面形状をカッターあるいはレーザー光線で切り出して接着剤で貼りあわせ、これらを積層して立体を得る。

次に「粉体固着法」は、材料に樹脂、ワックス、砂、金属などの微細な粉末を用いる成形法である。これらの粉末を固化させる方法には、粉末そのものに熱を加えて粉末どうしを融着させる方法と、粉末をバインダで結合させる方法の2つがある。粉末どうしを融着させる場合、粉末に瞬時に熱を加えて冷却させることが必要であるため、熱源にはレーザー光線を用いる場合が多い。

2.2 RP技術を応用した鋳造プロセス

これらRP技術を利用して製作した型を鋳造プロセスで利用する工程についていくつか提案されており、図1にこれらRP技法と鋳造プロセスの位置づけを模式的に示した。まず、最も一般的な工程として考えられるのは、樹脂を材料として用いるRP成形体を模型として用い、これをセラミックス系の骨材を用いて被覆して焼成する際に、模型を燃焼消失させてキャビティを設けて鋳造する方法である。

この場合、セラミックス系の鋳型は転写性に優れているため、製品と同等の形状を模型に持たせることで極めて寸法精度の高い鋳造品を得ることができる。ここで、「製品形状と同等」と表現するのは、鋳造は金属を溶解し冷却固化して製品形状を得る加工法であり、鋳造時と冷却後の成形時では温度変化が大きいことから、その寸法決定の際には熱膨張による変形を考慮しなければならず、模型の方を製品寸法より幾分大きく製作する必要があるからである。

RP成形体を消失模型として用いる場合、成形体一つで一つの鋳造品の製作になるため、製作コストは高いものになる。RP成形体を量産用の模型として、例えば生型や自硬性鋳型の原型となる「木型」の代わりに用いる用途も考えられるが、これらの方法は鋳型成形時に模型に大きな力加わるので耐久性や寸法精度の面から負荷が大きすぎるため、実用には向かない。

量産を指向した工程を考えた場合、RP成形体を鋳型製作に直接用いるのではなく、模型を製作するための型を製作するために用いる工程が考えられる。例えば、RP成形体を金型を製作するための原型として用い、その金型を用いて発泡

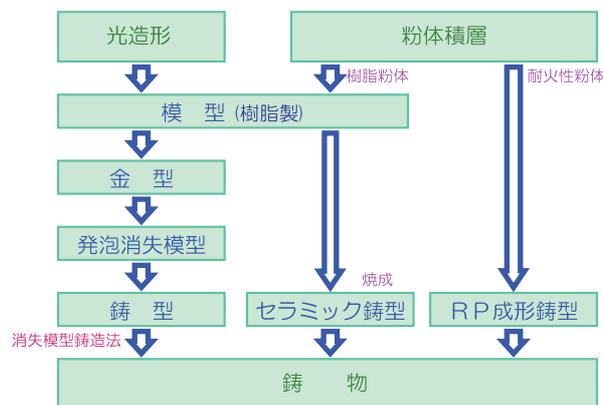


図1 RP技術を応用した鋳造工程

表1 RP技法の分類

	光造形法	溶融体積法	薄板積層法	粉体固着法
成形体材料	光硬化性樹脂	熱可塑性樹脂	紙樹脂フィルム	樹脂、砂、金属(粉末)
断面形状成形法	レーザー光スキャン	加熱塗布	カッター切断 レーザー切込み	レーザー加熱 バインダ塗布
硬化層手法	レーザー光照射	冷却固化	接着剤・貼合せ	加熱融着 糊固化

ポリスチレンの模型を製作してこれを発泡消失模型法で鋳造する工程などである。この方法では、数百個程度の中小ロットの鋳物生産に適用可能である。

さらに、砂のように耐火性のある粉体を積層してRP成形体を得る場合は、これを直接鋳型として用いる鋳造工程が考えられる。この方法では模型を必要としないため、大幅な鋳造工程の縮減を図ることができる。

本報では、中小ロットの生産に対応できると考えられる消失発泡模型鋳造法においてRP樹脂模型を利用する鋳造プロセスと、大幅な工程短縮が期待できる耐火物粉末を用いたRP鋳型・中子による鋳造プロセスの二つについて試験を行い、それらの有効性を検証した。

3. 光造形樹脂模型を用いた発泡消失模型鋳造法

3.1 発泡消失模型鋳造法

発泡消失模型鋳造法は、発泡ポリスチレン製の模型を埋設した鋳型に熔融金属を注入し、溶湯の熱で模型を分解しながら金属に置換して鋳物を得る鋳造法である。

一般に鋳型を造型する場合、鋳造前に模型を取り出す必要があるため、鋳型をいくつかに分割し再度それらを組み合わせる鋳型を作るので、それぞれの合わせ面に「鋳バリ」が生じやすく、鋳造後の後処理でこれらを除去する工程が必要になる。これに対して、消失模型鋳造法は模型を取り出す必要がないため、鋳バリが生じないことから後処理工程を軽減することができる。

また、鋳物内部に空間をもつ製品は、一般に“中子”と呼ばれる鋳型部材を用いるが、主型と中子とで砂や粘結材が異なると鋳造後の砂処理が問題になることもある。消失模型鋳造法では製品と同等形状の模型を使うので、中子を使わずに鋳造品を製作することができるため、砂処理においても有利である。

一方、発泡消失模型鋳造法の欠点として、鋳造時のガスの発生による作業環境や鋳造欠陥への影響、模型の未分解による欠陥、さらに発泡ポリスチレン製の模型強度を補強するための工程が必要なことなどが挙げられる。

3.2 光造形を利用した発泡消失模型鋳造法の工程

前述のとおりRP技術を利用した中小ロット生産向けの鋳造プロセスとして、図2に示すような工程を想定する。

すなわち、3次元CADで作成した形状モデルをもとに光造形RP装置を用いて立体模型を製作する。これを原型として簡易転写金型を製作し、この金型を用いて発泡消失模型を製作する。これに湯口系を接着し塗型を施して鋳型に埋設し、金属溶湯を注いで鋳物を得るという工程である。

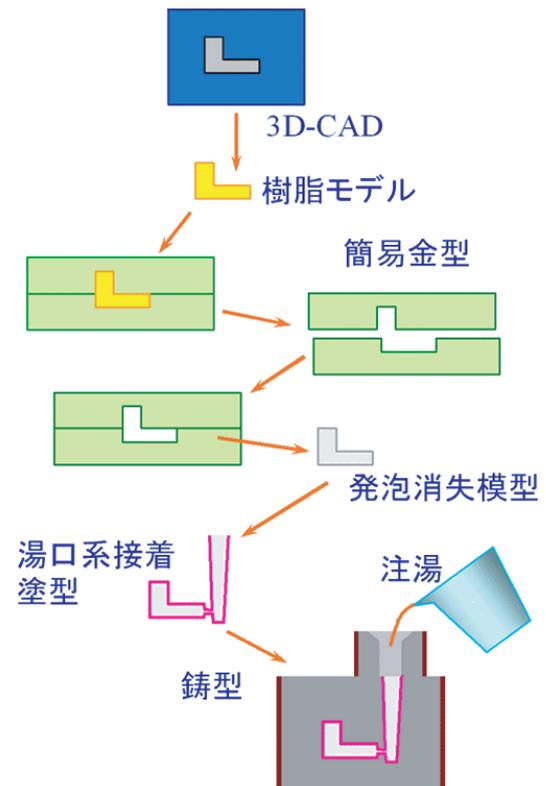


図2 光造形を利用した消失模型鋳造法の工程図



図3 試験模型の形状

3.3 発泡模型の強度と塗型法

発泡消失模型鋳造法において塗型を施す工程が含まれているのは発泡消失模型の強度を補強する目的で行うもので、この鋳造工程の特徴ともなっている。

発泡消失模型に用いる発泡ポリスチレン製の模型は強度が非常に小さいため、鋳型製造工程の中で変形や破損が生じ易い。図3に発泡ポリスチレン模型をそのまま用いて鋳造試験を行った場合に得られた鋳造品の例を示す。

左側の写真は、生型に埋設するために極めて軽く突き固めを行って鋳造したものであるが、不均一な力が加わることで形状や板厚に大きな変形が生じている。一方、右側の写真は乾燥砂を用いた鋳型に振動のみを加えて埋設して鋳造したものである。この場合、板厚に大きな変形は見られないものの模型に加わる力が一様でなかったことから全体的にひずんだ形になっている。これらが示すように、発泡消失模型鋳造法においては模型の補強が不可欠である。

発泡消失模型の強度を確保するために、模型の表面に耐火物の微粉を骨材に用いた塗装を行う「塗型」がしばしば施される。塗型の強度は骨材となる微粉の粒径によって異なり、一般に粒径が微細になるほど塗膜の強度は増す。しかしながら、同時に粒径が微細になるほど塗膜の通気性は悪くなる。塗型の通気性が悪いということは、発泡消失模型が熱分解して発生するガスが排出されにくいことになり、ガス欠陥等の原因となる。塗型材の強度と通気性は両立しにくい、塗型材に用いる骨材の粒径を調節して通気性を確保した塗型膜の成形を試みた。

塗型材の骨材は、一般の鑄型で肌砂として用いられる珪砂

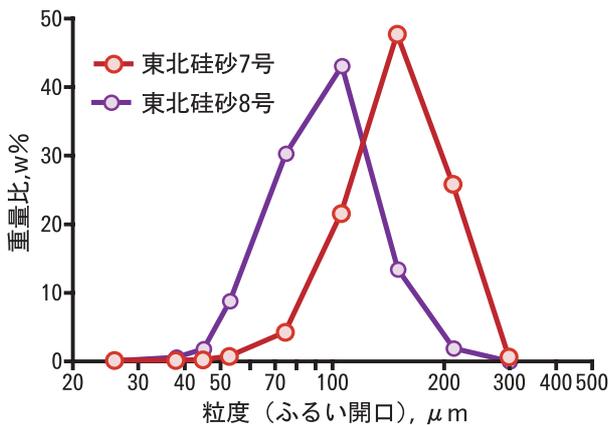


図4 珪砂の粒度分布

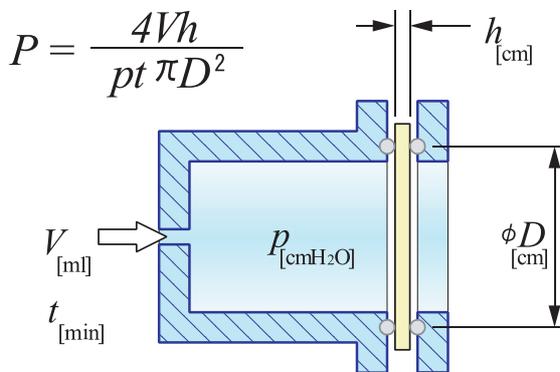


図5 通気度試験方法

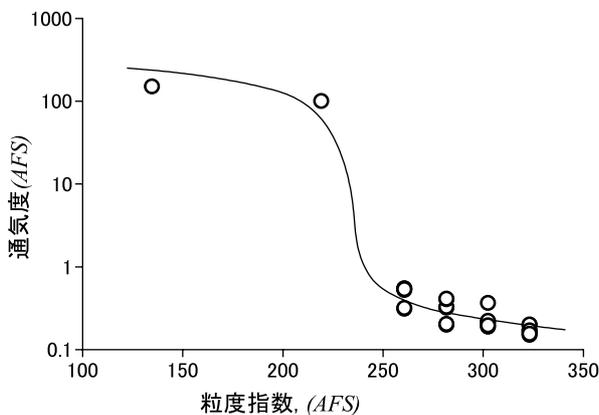


図6 塗型粒度と通気度の関係

7号よりもさらに微細な珪砂8号をベースとした。図4に珪砂の粒度分布を示す。塗型材は珪砂8号に50 μm以下の珪砂微粉を所定の割合で混合したものを使用し、バインダとしてコロイダルシリカを用いて調合し、これを模型に塗布しその通気性を試験した。塗膜の通気度は、生型の通気度測定法 (JIS Z 2603) に準じて図5のような測定方法により計測した。

計測結果を図6に示す。生型の通気度は一般に100~150の値をとるが、塗型皮膜の通気度は1未満の値を示し、極めて通気性の悪いものであることがわかる。

この塗型材を用いて試験片模型におよそ1mm程度の厚さに塗型を施し、アルミ合金(AC4C)を鑄造した。図7に鑄込み温度を変化させて鑄込んだときの湯廻りの状態を示す。鑄込み温度が低い場合は熱分解で発生したガスを排出しきれずに、未分解となった模型が残留した。必ずしも再現性が確保されていないが、鑄込み温度を高くするにつれて未分解領域が減少し、概ね800 程度でほぼ健全な鑄物を得ることができた。

アルミ合金は高温で溶解するとガス吸収による欠陥が懸念されることからなるべく低い温度で溶解し鑄造することが望ましい。この鑄造試験は模型を生型砂でバックアップして大気中で鑄込んだが、鑄型内部を減圧することにより塗型膜の通気性の悪さを補うようにすれば、低い鑄込み温度でも健全な鑄造品を得ることも可能であることを確かめた。



a) 鑄込温度710°C



b) 鑄込温度760°C



c) 鑄込温度800°C

図7 注湯温度と湯廻り状態

この鑄造プロセスにおける鑄物製品の健全性を注湯温度から数値解析で予測する方法についても検討したが、溶湯の熱による発泡模型の熱分解の進展において模型と溶湯は熱分解ガスを介して直接には接していないため、輻射による熱移動が主となることや溶湯の挙動において塗型膜内で熱分解ガスの背圧を考慮しなければならないことなどから熱解析が複雑になり、現段階では適当な手法は未だ見出せていない。

今後、塗型皮膜の厚さ、鑄物形状、鑄造方案等の鑄造条件による適正な鑄込み温度を予測する手法を確立するためにさらに検討が必要である。

4. 粉体積層RP鑄型を用いた鑄造プロセス

4.1 粉体積層RP

本試験で使用した粉体積層RP装置はZPrinter-310型(米国Z社製、図8外観)で、成形容積は203×254×203mmである。

この装置は砂を骨材として、これを一定厚さに敷き詰めた層の上に専用の水性バインダを用いて逐次断面形状を印刷して固化し、逐次1層ずつ積層して立体形状を得る。

本装置で用いる粉体の粒度分布をレーザ光回折計測法により調べた結果を図9に示す。図の中でZP102は石膏の微粉末



図8 粉体積層RP装置の外観 (ZPrinter-310; 米国Z社製)

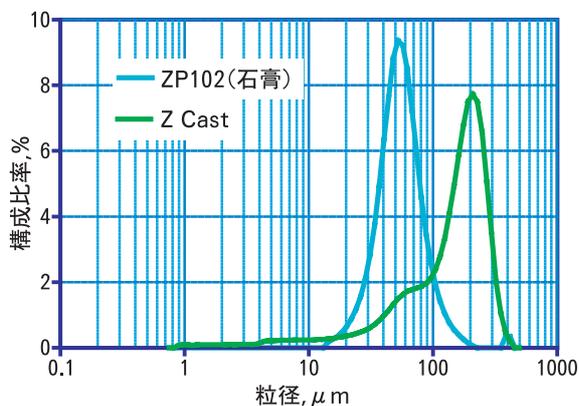


図9 粉体成形骨材の粒度分布

を主体にした材料で、40 μm程度の粒径をピークにもつ比較的粒度の揃った粒度分布をもつことがわかった。一方、ZCastは、鑄造用の鑄型に使用できるように砂を主体に配合された材料で、粉末の粒度は200 μmの粒径をピークに幾分数十 μmの微粉を含んだ粒度分布をなしている。

4.2 粉体積層RP成形体の鑄型特性

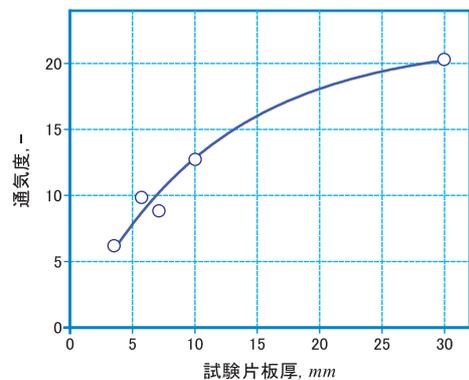
この装置で製作された成形体を鑄型として用いるため把握しておく必要のある、通気性および強度の試験を行った。

通気度の計測結果を図10に示す。試験方法は、前述の生型通気度試験法(JIS Z 2603)に準じた方法を用いた。ただし、この試験方法に用いる試験片形状は、断面が50mm、高さが50±1mmという規定が設けられているが、この通気度試験で用いた試験片は断面有効径を50mmとし、板厚を3~30mmのものを用意して計測した。

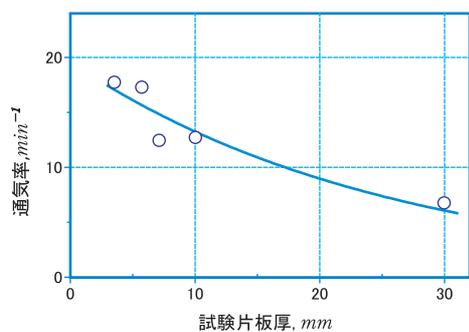
図10-a)によると、直感的な予測に反して試験片厚さが薄くなるほど通気度が悪くなる傾向を示している。これは、生型砂の通気度が、ある断面積Aと高さhをもつ試験片を一定の圧力差pのもとで所定の容積Vの空気が通過するのに要する時間tとの関係により、

$$P_G = \frac{Vh}{pAt}$$

という式で定義されていることに起因する。この試験法では、試験片の断面積と長さがほぼ一定であるという前提があり、試験片高さは補正目的で用いられているに過ぎず、最も大き



a) 粉体積層RP鑄型の通気度 (JIS Z 2603準拠)



b) 粉体積層RP鑄型の通気率

図10 粉体積層RP成形体の通気性

なパラメータは通気に要する時間 t である。ところが、この実験では試験片の厚さが大きく変化したので、試験片厚さ h が薄いほど通気度が小さく計算されてしまう。

そこで、試験片高さに差があればその前後で厳密には圧力差が異なるが、試験片の単位厚さあたりの通気量を通気率として表現し、

$$P_R = \frac{P_G}{h} = \frac{V}{pAt}$$

という式で換算した値で整理し直すと図10-b)のようになる。

生型の通気度は合成砂を用いた場合150程度の値になるので、通気率は試験片高さで割ると概ね30程度の値となる。同図から、試験片厚さ3mm程度のところで生型の約半分の通気率であることから、粉体積層RP鋳型の通気性は生型より若干悪いものと判断される。

このことは、例えば、溶湯を上から落とし込むのではなく、下の方から上へ満たしていくような、鋳造時のガス抜けなどに配慮した鋳造方案が必要であることを示している。

次に、粉体積層RP成形体の強度を調べるために抗折試験

を行った。試験片は16×70mmの形状に板厚を3～7mmに成形した板状試験片を粉体積層RP装置で製作し、スパン60mmの3点曲げ試験法による破壊加重を計測し、曲げ応力に換算して強度を評価した。

図11に抗折試験で得られた粉体積層RP成形体の強度試験の結果を示す。試験片の厚さおよび積層方向によって幅があるが、概ね10MPa(= 1 kgf/mm²)程度の強度であることがわかった。先に測定した通気度の悪さや製造コストを考えるとなるべく肉薄で成形するべきところであるが、鋳造時の溶湯圧力やバックアップサンドの圧力に十分耐え得るように、この強度を参考に肉厚を設計する必要がある。

さらに、成形体の寸法精度に関する試験を行った。3次元CADで板厚2.0mm、4.0mm、6.0mmの3種類の試験片形状を用意し、そのデータをもとに粉体積層RP成形体を製作してその板厚を計測した。

その結果を図12に示す。図は横軸にCAD指示寸法を示し、縦軸は成形体の板厚計測値とCAD指示値との差分を示す。いずれの場合も差分が正值であることから、成形体の板厚はCAD指示寸法よりも大きな値となることがわかる。

試験片製作にあたり、板を水平に配置して成形するのと鉛直に配置する場合で成形寸法にどのような影響があるかを調べた。試験片を水平に配置して成形した板状試験片の板厚誤差は、「積層方向」として示した図のように1～1.5mmの差が生じており、そのばらつきも大きい。

一方、試験片を鉛直に配置して成形した板状試験片の板厚誤差は「水平方向」として示した図のようにやはり1～1.5mmの範囲で差が生じているが、積層方向の場合よりそのばらつきは小さいことがわかる。

この原因として考えられるのは、まず寸法が大きめに誤差を生じるのは、水性バインダが砂膜に吹き付けられると、毛細管現象により砂粒間隙にバインダが浸透し、定義した断面形状より外側に膨らんだと推測することができる。ただし、水平方向の寸法誤差のばらつきが小さいことを考慮すると、その膨張寸法はほぼ一定と考えることができ、CAD設計時にこれを織り込んで置けば、板厚で0.4mm、一つの辺側で考えればその半分の0.2mm程度の精度で粉体成形体を得ることができると考えられる。

一方の積層方向に誤差のばらつきが大きいことは、水性バインダの砂粒間隙への浸透などによる膨張に加え、何らかの誤差発生要因があると考えなければならない。

いまの段階でこれを特定することは困難であるが、考えられるとすれば、成形時に粉体を薄く敷き詰める時の厚さが不ぞろいになっているのかもしれない。これらの原因究明および対策の検討は、今後の課題となるところである。

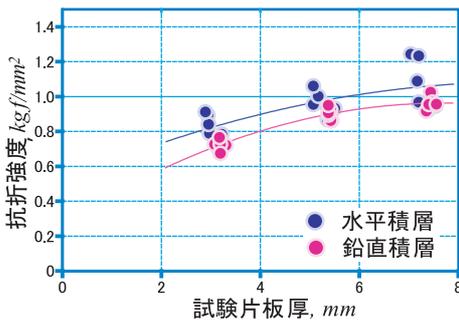


図11 粉体積層RP成形体の強度

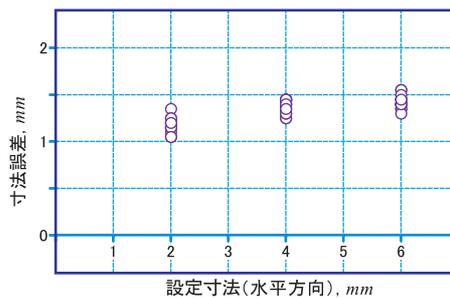
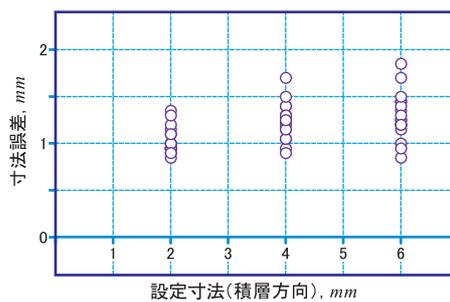


図12 粉体積層RP成形体の寸法精度

4.3 粉体積層RP成形体を用いた鋳造プロセス

粉体積層RPによる成形体を鋳型および中子に使用してアルミ合金を鋳造するプロセスについて具体的な立体モデルを想定して試験を行った。

試験に用意したのは、図13に示すような分岐をもつ薄肉のパイプ状のマニホールドのような形状を想定して仮想的に作成した形状である。この3次元形状データをミッドレンジCADであるSolidWorksで作成し、このデータをもとに肉厚5mmの主型および中子を作成するためのCADデータに展開する。

このとき、主型を薄肉のシェル状にして製作するのは、二つの理由による。すなわち、一つは先に試験を行ったように粉体積層RP成形体の通気性が良くないため、強度が保てる範囲でなるべく肉薄にしなければならないということであり、

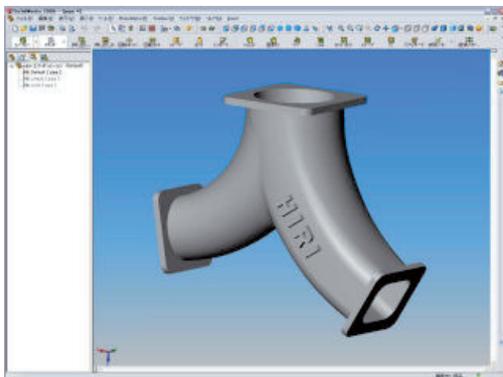


図13 3次元CADによる製品モデル作成

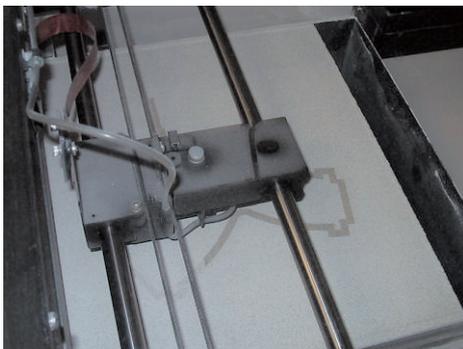


図14 粉体積層RPによる成形工程



図15 粉体積層RP成形体の取り出し

もう一つは一般にRP成形に用いられる材料が高価なため、なるべく使用する材料の量を少なくしなければならないためである。

主型および中子の3次元形状データが作成できたら、これらのデータをSTLというフォーマットで保存する。これは、粉体積層RPに形状データを送信するためにRP装置メーカーから提供される専用のソフトウェアがこのデータフォーマットを取り扱うからである。

同ソフトウェアにより、RP装置の成形槽における配置姿勢を設定し、データを送信すると、RP装置はそのデータに従って一層ずつ材料である砂を薄く敷き詰めてその上に断面形状を専用バインダで印刷しながら立体形状を成形する。このときの様子を図14の写真に示す。

一連の積層動作を完了すると、RP装置の成形槽から成形体を取り出すことができる。成形直後でも取り出しは可能であるが、十分な強度が生じていないため、取出しは成形体を破損しないように慎重に作業しなければならない。図15に成形体を取り出すときの様子を示す。

取り出した成形体は付着した余分な材料をブローで吹き飛ばした後、約200℃のオーブンで2時間程度乾燥する。これらの工程を経て製作した粉体積層RP鋳型と中子を図16に示す。写真に示す中子も肉厚5mmのシェル状の形状に製作した。

これらを組合せ、生型砂などによりバックアップおよび固定して鋳型として用意した後、アルミ合金を溶解し、この鋳型に鋳造を行った。最終的に得られたアルミ合金鋳物の外観を図17に示す。



図16 粉体積層RP鋳型と中子



図17 鋳物表面の溶湯金属の差込み欠陥

製作した鋳型および中子をそのまま使用しても鋳物が製作できたが、鋳肌に粗さが目立ったため簡単な塗型を施すと若干だが鋳肌が改善された。

粉体積層RP装置による鋳型および中子の成形に要する時間は、成形槽の容積の関係で2度の成形作業に分割したため1回につきおおそ1時間かかるので全体で2時間程度を要した。この後2時間程度の乾燥工程を経るので、鋳型として使用するには最短で4時間程度の時間を要することになる。

この製造プロセスでは模型の製作が不要なため、一般の鋳造プロセスに沿って、模型となる木型の製作から鋳型および中子を製作して鋳物を得る工程との比較では、大幅な時間の短縮が図れる。所要時間においてもまた模型等の製作費用から考えても試作品の製作手法として大変に優れたものであると評価できる。



粉体RP鋳型と中子



試作した銅合金鋳物

図18 銅合金による試作例
(試験協力：(株)光合金製作所)

このほか、道内の鋳物メーカーとの協力で銅合金の鋳物の試作例についてこの手法を用いて試験を行った。図18にその試験例を示す。

これにより、銅合金の鋳物についても粉体積層RP成形体による鋳型および中子を用いた手法で鋳物の試作品を製作することができることを確認した。

5. まとめ

近年のRP成形技術の進展を背景に、これらを鋳造工程に利用した迅速な鋳物製造プロセスの可能性を検証するため、中小ロットの生産に対応できると考えられる光造形模型から金型製作に展開し消失発泡模型を用いて鋳物を得る製作プロセスと、大幅な工程短縮を望むことのできる粉体積層RP成形体を直接鋳型および中子として用いて鋳物を得る製作プロセスの二つについて試験を行い、それらの有効性を確認した。

鋳造の分野においてこれらRPによる迅速型成形技術を展開する可能性が確認されたことから、今後の実用化に向けた研究を進め、本道の鋳物製造業における市場競争力の向上を図れるよう技術移転に努めたい。

謝 辞

本研究で使用した超高感度型示差走査熱量計は、日本自転車振興会の補助により整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 小林 武：消失模型鋳造における金属溶湯と発泡模型の置換挙動，関西大学 (2000)
- 2) 日本鋳物協会：「鋳型砂試験法」鋳物便覧，丸善 (1986)
- 3) 岩越睦郎・小林政義・戸羽篤也・三戸正道・中島康博・万城目聡・大参達也・牧野恵春・山本英男：光造形を利用した低コスト型製造技術，北海道立工業試験場報告 No.302 (2003)