

粉末RP鋳型による迅速鋳造プロセスの実用性向上

戸羽 篤也, 稲野 浩行, 平野 繁樹, 桃野 正*, 八幡 一宏**, 小川 貴行**, 名雪 欣也***

Improvement of Casting Process using a Rapid Prototyping Mold

Atsuya TOBA, Hiroyuki INANO, Shigeki HIRANO, Tadashi MOMONO*,
Kazuhiro YAHATA**, Takayuki OGAWA**, Kinya NAYUKI***

抄 録

粉末積層成形技法で製作した鋳型・中子を使用する迅速鋳造プロセスは模型や木型を必要とせず、従来の造型法に比べて型製作費用の低減、工期の短縮などの優位性が期待される。インクジェット式無機粉末積層成形装置では低コストで成形体が得られることに着目し、これまでに耐熱性の高い粉末材料および水性硬化剤の開発等の基礎研究に取り組んだ。これらの成果を踏まえ、無機粉末積層成形法で製作した鋳型・中子を用いる鋳造法の実用化を目的に、粉末成形体の品質向上を図るとともに、従来鋳型で製作した鋳物との品質比較を行って同技法の有用性を検証した。

キーワード：迅速鋳造プロセス，粉末RP（3Dプリント），鋳鉄鋳物，銅合金鋳物

Abstract

The rapid casting process using the molds and the cores made by powdery laminated method does not need models or patterns, and it is expected that has a superiority of low-cost and short work time in comparison with conventional molding process. We are interested in producing low-cost works by using the ink-jet 3D printer with inorganic powder, and we have researched to develop the high heat-resistant powder and the binding solutions.

On the basis of these results, for the purpose of the practical use of molds and cores made by the laminated molding method with inorganic powder, we have investigated the quality improvement of the powdery works, and we inspected utility of 3D printing techniques by comparing the quality of the castings that made by conventional molds.

KEY-WORDS : Rapid casting process, 3D-printing, Castings of cast iron, Copper alloy castings

1. はじめに

3次元形状データから簡便かつ迅速に実立体を製作するRP（Rapid Prototyping）技法は、複雑な立体形状を取り扱う“ものづくり”分野においても、その有効活用が期待されている。RP技法の一つに、無機粉末材料を用いて立体成形する粉体積層成形法がある。この技法で製作した成形体は

他のRP手法で製作したものに比べて極めて高い耐熱性を有する。その耐熱温度は1,000℃を超える水準となるので、これらを鋳型・中子として利用することで、これまで鋳型造りに必須とされている模型や木型を使わずに鋳造品を得るプロセスを提案できる¹⁻²⁾。

筆者らは、耐熱性無機粉末RP技法で製作した鋳型・中子を利用した迅速かつ低コストの鋳物製作プロセスに注目し、

* 室蘭工業大学, ** 株式会社光合金製作所, *** 株式会社田中工業

* Muroran Institute of Technology, ** Hikari-gokin Corporation., *** Tanaka Industry Co., LTD.

事業名：重点研究

課題名：鋳物製造業の競争力強化のための粉末RP鋳型プロセスの実用化（平成22～23年度）

成形体を鋳型や中子として利用するために必要な強度、通気性、寸法再現性等の品質向上を図るための基礎研究に取り組み³⁾、粉末材料素材の選択および配合量の成形性、成形体強度への影響を明らかにするとともに、それらの適切な配合条件を見出した。

本報告は、これまでの基礎試験で得た知見をもとに、インクジェット式無機粉末RP装置で製作した鋳型を使用した鋳造プロセスの実用化を図るため、鋳鉄鋳物および銅合金鋳物の鋳造試験を通して、この技法の有用性を検証した。

2. 基礎研究

耐熱性の高い無機粉末に水硬性バインダを配合した粉末積層成形法（以下、「無機粉末RP」という）を用いて製作した鋳型および中子（以下、「粉末RP鋳型」という）を用いた鋳造法に関して、これまでの基礎研究により得た知見を以下に整理しておく。

2.1 粉末技法と鋳造用鋳型への応用

一般に、積層成形法は成形用材料として樹脂を用いるものが多い⁴⁾。これらの技法で用いられる樹脂材料の耐熱温度は300℃に満たず、錫などの低融点の金属を鋳造する場合でも鋳型としては使用できず、鋳型を作るための模型（消失模型も含む）としての用途に限定される。これに対して無機粉末RPで製作した成形体の耐熱温度は1,000℃以上であり、アルミ合金などであれば、その成形体を鋳型として利用し、鋳物を得ることが可能である。

そこで、無機粉末RP装置のメーカーが提供する粉末材料を用いて鋳型・中子を製作し、これにアルミ鋳物用合金を鋳造する実験を行って、無機粉末RP鋳型を用いる迅速鋳造プロセスの可能性を確認した。

一方、融点の高い鋳鉄を同プロセスで鋳造する試験では、ほとんどの事例で鋳造欠陥が発生し、健全な鋳物を得ることができなかった。また、銅合金を鋳造する実験でも、鋳物の形状によって一部の試料に欠陥が生じた⁵⁾。

2.2 粉末材料の耐熱性向上

無機粉末RP装置のメーカーが供給する粉末材料で製作した粉末RP鋳型を用いた鋳鉄および銅合金の鋳造試験で健全な鋳物が得られなかった事例に関して、その鋳造欠陥の主なものは鋳型内に発生した何らかのガスによるブローホール欠陥であった。

この欠陥について、粉末RP鋳型の成形に水性硬化剤を使用するので、成形体に残留する水分の蒸発がその発生原因の一つではないかと考えられた。この対策として、鋳造する前に粉末RP鋳型を乾燥することでガス欠陥の発生を抑えようとしたが、その効果は限定的であった。

そこで、粉末RP鋳型が高温に熱せられたときのガス発生状況を探るために粉末材料の示差熱分析を行ったところ、粉末材料の粘結材として石膏成分が多く含まれていることが判明した。石膏は水分を含んで硬化する粘結材として機能するが、約150℃以上に熱せられると結晶水の一部が蒸発して焼石膏（半水石膏）に変化し、さらに熱せられて1,200℃に達すると石膏そのものが酸化カルシウム（CaO）と三酸化硫黄（SO₃）とに熱分解する。すなわち、粉末RP鋳型に銅合金や鋳鉄溶湯を鋳込むと鋳型は1,200℃付近まで加熱されるので、粉末RP鋳型の粘結材として配合された石膏が熱分解して鋳型内に三酸化硫黄ガスが発生し、これが鋳物にガス欠陥を生じさせていることが分かった。

そこで、高温溶湯の鋳造にも対応できるように、石膏に替わる水硬性粘結材としてセメント系材料を配合した粉末材料の開発を試みた。積層成形に適するセメント系素材を検討した結果、一般のセメントよりも短時間で硬化する速硬性セメントの配合が有効であり、その配合量を適切に選ぶことで積層成形が可能であることを見出した。この粉末材料を用いて粉末RP鋳型を製作し、これに鋳鉄を鋳造したところ、ガス欠陥のない鋳物が得られた⁶⁾⁷⁾。

2.3 耐熱性粉末成形用水性硬化剤の検討

セメント系粘結材を配合した粉末材料を用いて製作した成形体は、無機粉末RP装置メーカー供給の粉末材料を使用したものに比べて寸法の再現性が劣る傾向が認められた。メーカー供給の粉末および水性硬化剤に成形性に寄与する何らかの添加剤が配合されていると考え、セメント系粘結材を配合した粉末材料の成形性向上に有効な添加剤を見出そうと試みたが、思わしい結果は得られなかった。

無機粉末RP法は、積層厚さの制限から主材粒径を100μm以下としなければならず、配合する水硬性粘結材も極めて微細な粉末となる。無機粉末RP成形法では、インクジェットノズルを介して水性硬化剤を吹き付け、粘結材を硬化させて成形する。このとき、吹き付けた水性硬化剤の一部が粉末や粘結材の微細な間隙に浸透すると、成形体形状よりも少し外側の部分も硬化するため、指示した寸法が再現できない。粉末間隙への水性硬化剤の浸透を抑えるために水溶液の表面張力を増大させると、今度は逆に水性硬化剤が十分浸透せずに成形不良となった。

そこで、セメント系粘結材を含む高耐熱性粉末材料に適合した水性硬化剤の開発を試みた。水性硬化剤は、粘性調整剤と界面活性剤の配合量を変えた水溶液を用意して成形試験を行い、インクジェットノズルから適量の水性硬化剤が噴出すること、成形断面の指示領域に十分に水性硬化剤がいきわたること、粉末材料の成形領域外への浸透が抑えられることなどの視点から良否を評価し、セメント系粘結材を配合した粉末材料に対して最適な溶質成分の配合量を得た⁸⁾。

3. 無機粉末RP技法の実用化に向けた課題

これまでの試験で得られた知見により、銅合金鋳物や鋳鉄鋳物の試作製造において無機粉末RP法で製作した鋳型・中子を使用した迅速な鋳造プロセスの適用可能性が確認されたので、粉末RP鋳型を実際の鋳物製品に適用するために解決すべき技術課題を整理した。

粉末材料に耐熱性の高いオリビン砂とセメント系粘結材を配合したことにより、銅合金や鋳鉄等の高融点金属を鋳造しても熱分解ガスの発生を少なく抑えた粉末RP鋳型を製作することができた。一方、成形性（寸法の再現性）や成形体の強度について課題を残していた。これまでの試験で人工砂を配合した場合に成形体強度の向上に効果があるとの定性的な知見を得ていたが、本技法の実用化に当たり、人工砂を配合した場合の効果について定量的な知見を得る必要がある。

さらに、人工砂を主材とした粉末材料を用いて製作した粉末RP鋳型は、従来の製造現場で用いている砂型と比べて熱的特性が異なることが予想される。鋳物の材質は鋳造後の冷却条件によって大きく影響を受けるので、本技法の実用化の観点から、粉末RP鋳型を使用して製作した鋳物と、従来の鋳型で製作した鋳物との材質の違いについて検証しておく必要がある。

粉末RP鋳型の特徴として、極めて通気性が小さいことが挙げられる。鋳造方案で通気性の悪さを補う工夫も可能であるが、鋳型内に溶湯が満たされた後で何らかのガスが発生すると、それを排出することは困難である。粉末RP鋳型は水硬性粘結材の結合力を保持するのに必要な水分の存在がその強度に寄与しているという特徴的なメカニズムがあり、鋳造後の溶湯熱を受けてこの水分が蒸発したときにこれを鋳型の外に適切に排出されるように配慮しなければならない。しかし、鋳物の形状によっては複雑な中子を使わなければならない、完全に鋳造方案でガス欠陥の解決につなげることは難しい。そこで、鋳造前に粉末RP鋳型を乾燥することにより含有水分を減らした場合のガス欠陥防止効果と鋳型の強度への影響を検証しておく必要がある。

以上の、粉末RP鋳型を用いた迅速鋳造プロセスの実用化に向けた課題にそってそれぞれ試験した結果を報告する。

3.1 人工砂の配合による寸法再現性の向上

無機粉末RP法では、成形表面に粉末材料を薄く敷き詰める「スキージング動作」において、粉末材料の主材にはほぼ真球形状を有する人工砂を使用すると材料の流動性が良くなり、成型体の見かけの密度（かさ密度）が高まる効果により成形体強度が向上することを確かめた。

人工砂の配合に関して、前報⁸⁾ではK社製人工砂を使用した試験の例を紹介したが、その粒径は図1の粒度構成に示すように100 μm を中心とした1ピーク分布を呈しており、最大200 μm 程度の粒径が含まれていた。無機粉末RP成形の積

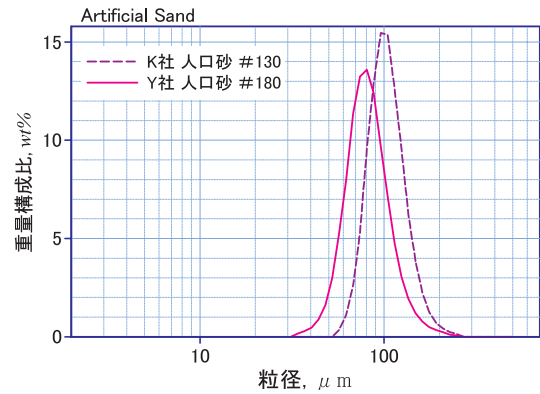


図1 人工砂の粒度構成



a) 天然砂と人工砂を配合した粉末で成形した鋳型

b) 細粒人工砂を用いた粉末材料で成形した鋳型

図2 細粒人工砂配合の効果

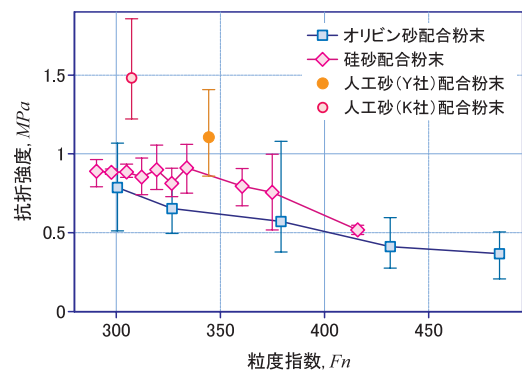


図3 粉末材料の粒度指数と抗折強度の相関性

層厚さは約120 μm に設定されているので、粉末主材の粒径は理論上120 μm 以下であることが望ましい。その後、より細かい粒径を中心とした粒度構成であるY社の人口砂を入手したので、これを粉末材料に配合して粉末RP鋳型を製作した。図2は、天然鉱石のオリビン砂にK社の人工砂を配合した粉末材料で製作した粉末RP鋳型と、Y社の人工砂を主材とした粉末材料で製作した粉末RP鋳型を比較したものである。外観は、Y社の人工砂を用いた材料で製作した成形体の方がよりはっきりとした形状が再現され、成形体の寸法再現性

の向上に効果が認められた。

この原因として、主材の粒径の微細化により比表面積が増大したことで、粉末材料が要求する水性硬化剤の量が増えるが、インクジェットノズルから噴出する量は変わらないので、水性硬化剤量は相対的に不足気味になる。そのため成形領域外に浸透する量も減ったことが推定される。図3に粉末材料の粒度指数と成形体強度との関係を示した。粒度指数は、粉末の粒度構成に関して粒径が小さな粉末を多く含むほど大きい値となる。微細粉末の割合が多いほど比表面積が増大すると相対的に水性硬化剤の量が不足して成形体強度が低下したとする説明と矛盾しない。

また、同図でK社の人工砂を配合した粉末材料で製作した試料とY社の人工砂を配合した粉末材料で製作した試料の強度を比較すると、粒径の小さいY社の人工砂を配合した試料の強度が小さい傾向を示すが、これも同様の考え方で説明できる。

3.2 鑄鉄鑄物の品質に及ぼす粉末RP鑄型材質の影響

鑄物砂には鑄型を成型するため粘結材が配合される。鑄型に高温の溶湯が鑄込まれると、粘結材に含まれる成分が熱分解し、炭素、酸素、硫黄等の化合物ガスが発生する。鑄型に通気性があれば、これらのガスは鑄型の外に排出されるが、粉末RP鑄型は通気性がほとんどないため、これらガス成分の影響を受ける可能性がある。そこで、粉末RP鑄型に鑄鉄溶湯を鑄込んだ際のガスの影響を調べた。

鑄造試験は、図4に示す階段状模型を用いて粉末RP鑄型、

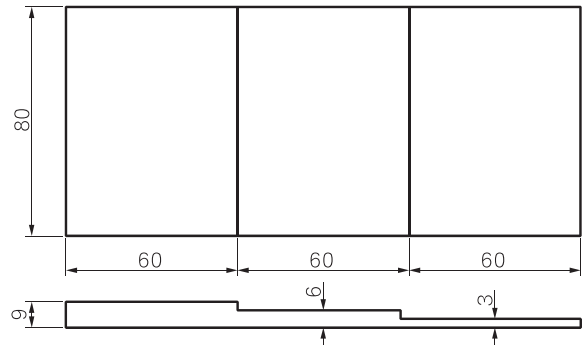


図4 鑄造試験に用いた階段状試験片

生型、CO₂ガス型で鑄型を造型し、これらに球状黒鉛鑄鉄溶湯（FCD450）を1,350℃の鑄込み温度で鑄造した。鑄造後、試験片の各板厚中央部分を切断してその組織を観察した。

それぞれの鑄型で鑄造した鑄物試料の表面付近の組織写真を図5に示す。生型およびCO₂ガス型で鑄込んだ鑄物の組織観察では、いずれも良好な球状黒鉛組織が観察された。鑄物肉厚 $t = 3\text{ mm}$ の試料で黒鉛粒径が小さく粒数が多い。一方、鑄物肉厚が厚くなるに従って黒鉛粒径が大きくなり粒数も減少する。これらの傾向は、鑄造時の冷却速度の影響を受ける球状黒鉛鑄鉄の典型的な組織である。いずれも、ごく表面に酸化膜（黒皮）と思われる薄い層が見られるが、表面付近まではほぼ健全な黒鉛球状組織が得られた。

これらに対して、粉末RP鑄型で鑄込んだ試料の断面組織観察では、鑄物の表面付近に球状化不良となっている部位が見られた。また、肉厚の薄い $t = 3\text{ mm}$ の試料では、基地組

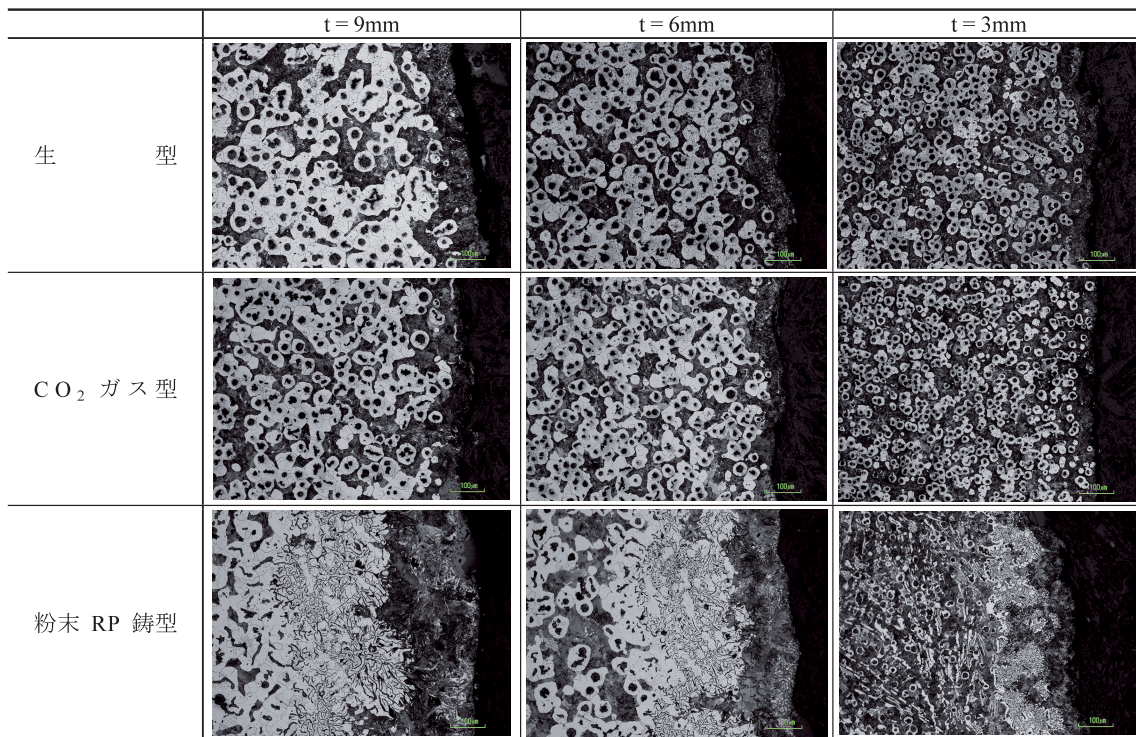


図5 鑄型の違いによる鑄物試料の組織変化

織中に“チル”と呼ばれる鉄の炭化物組織がみられる。この組織はセメントタイト (Fe_3C) が晶出したもので、鑄鉄を鑄造した後の冷却速度が大きいために晶出しやすい硬くて脆い組織である。同じ肉厚でも、生型および CO_2 ガス型で鑄造した試料には見られないことから、粉末RP鑄型は鑄造後の冷却速度を大きくする効果があると推定される。粉末RP鑄型の熱特性については鑄造時の鑄型温度を計測する試験を行っているので、その結果と併せて後項で考察することにする。

粉末RP鑄型で鑄込んだ試料の表面近傍で生じた球状化不良は、粉末RP鑄型の粘結材に配合した速硬性セメントに含まれている少量の石膏成分が熱分解し、高温の溶湯を鑄込んだ際に硫酸化物のガスが発生したものと推察する。

鑄鉄溶湯の凝固過程で晶出する黒鉛の形態に関して、溶湯中の酸素および硫黄濃度が黒鉛の球状化に影響することが知られている⁹⁾。粉末RP鑄型に鑄鉄溶湯を鑄込んだとき、溶湯熱で鑄型表面の石膏成分が熱分解し、三酸化硫黄ガスが生じることは前述の通りであるが、これがさらに分解して硫黄ガス、酸素ガスとなって鑄物表面の硫黄濃度、酸素濃度が高まったことで黒鉛が球状化せずに片状黒鉛として晶出した可能性が考えられる。試験片肉厚が6 mm、9 mmの試料では、表面から中央に向かって、片状黒鉛組織領域からCV黒鉛組織の遷移領域を経て球状黒鉛組織領域に移行している様子が見られる。試験片の肉厚が厚くなるほど黒鉛球状化不良領域の厚さも厚くなっている傾向が認められるが、その厚さは概ね0.5mm程度であった。

鑄物表面の球状化不良対策として、鑄型内面に耐火物の微粉を塗装する“塗型処理”による改善を試みたが、塗型の厚さを厚くすると鑄物の寸法再現性を損なうことになり、効果は限定的であったため、ガス抜きなど鑄造方案による改善を検討すべきとの結論を得た。

黒鉛の形態は鑄物の機械的性質に影響を及ぼすので、粉末RP鑄型を使用した球状黒鉛鑄鉄品の製作においては、表面の一定厚さに球状化不良が発生することを念頭に入れて鑄物の形状を設計するか、必要に応じて機械加工を施すなどして実用に供する。

3.3 銅合金鑄物の品質に及ぼす粉末RP鑄型材質の影響

一般的な鑄造用鑄型は、シリカを主成分とする天然砂に様々な粘結材を混練し、これを成型して用いる。一方、粉末RP鑄型の主材として配合している人工砂は、シリカ (SiO_2) とアルミナ (Al_2O_3) からなるムライト ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) と呼ばれる物質が主成分である。この組成に含まれるアルミナはセラミックスに分類され、高い耐熱性を有するとともに熱伝導率は小さい。

鑄物は、鑄造後の冷却条件が異なると金属組織が変化し、鑄物の機械的性質に影響を及ぼす。したがって、鑄型の熱的特性が異なると鑄造後の冷却条件が変わり、鑄物の材質に影

響を及ぼす可能性がある。そこで、本技法を銅合金鑄物の製作に適用した場合の材質への影響を調べ、粉末RP鑄型の実用性を検討することにした。

鑄造試験は、前項の図4に示した階段状模型を用いて生型と粉末RP鑄型を製作し、銅合金溶湯 (CAC406) を鑄込み温度 $1,150^\circ\text{C}$ で鑄造した。このとき、それぞれの鑄型について、試験片肉厚6 mmの中央部で、鑄型表面および鑄型深さ3 mmと6 mmの3点に熱電対を設置して鑄造後の温度変化を計測した。鑄造した銅合金鑄物は外観観察を行うとともに中央部で切断してそれらのマクロ組織観察を観察した。また、別の試料からは図6に示す部位から引張試験片を切り出し、引張強度、伸び、ブリネル硬さを計測した。

図7に鑄造試験で得られた鑄物の外観写真を示す。図7-a)は生型を用いて鑄造した試料、図7-b)は粉末RP鑄型で鑄造した試料である。生型で鑄造した試料の表面は鑄肌が粗く、これに比べて粉末RP鑄型で鑄造した試料の鑄肌は幾分滑らかである。生型は粘結材に水分を含んでおり、鑄造時に溶湯熱でこれが蒸発して水蒸気を発生する。生型には通気性があるので、大部分の水蒸気は鑄型の外に排出されるが、鑄込ま

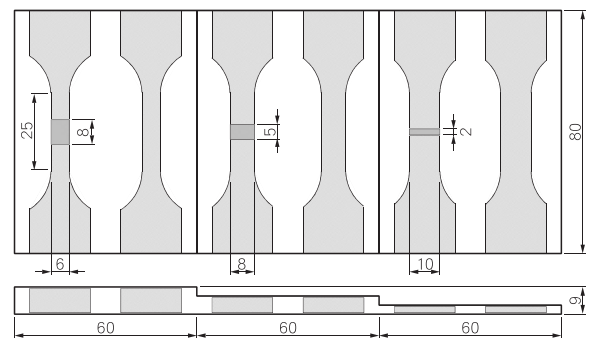


図6 引張試験片の切り出し方法



a) 生型で鑄造した試料



a) 粉末RP鑄型で鑄造した試料

図7 鑄造試料の外観写真

れた溶湯が鋳型に触れて凝固する際に鋳型表面近傍で水蒸気の影響を受けて鋳肌が粗くなったと推定される。一方、粉末RP鋳型に高温溶湯を鋳造したとき鋳型から硫酸化物ガスが発生することを前項の考察で述べた。粉末RP鋳型で鋳込んだ試料の鋳肌はこのガスの影響をあまり受けていないように見えるが、これは鋳込み温度が鋳鉄に比べて200℃ほど低いことや、溶湯が鋳型壁面に触れてその表面層が早々に凝固することでガスの影響が少なかったと考える。

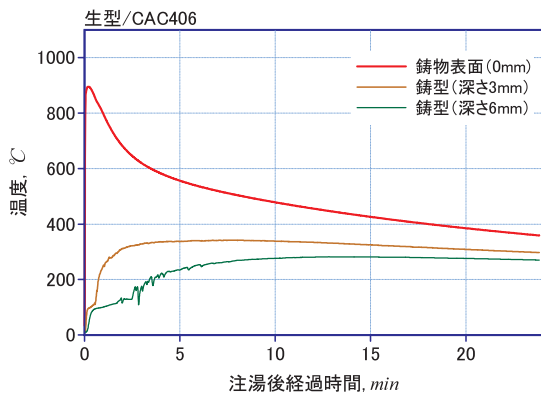
次に、鋳造時の鋳型の温度変化を図8に示す。図8-a)は生型の温度変化、図8-b)は粉末RP鋳型の温度変化を示す。両者を比較すると、鋳型表面温度で示される鋳物表面近傍の冷却過程には大きな差が見られないことが分かる。その一方で、鋳型の深さ方向に関して若干の違いが認められる。すなわち、生型の深さ3mm、6mm位置の温度は粉末RP鋳型のそれらと比較して温度上昇が少ない。特に、粉末RP鋳型の深さ3mmの測定点において温度の立ち上がりが大きく、深さ6mmの測定点においても同様に生型に比べて立ち上がり大きい。

この原因については、水分の蒸発という生型の特徴的な挙動が影響していると考えられる。図9に図8で示した鋳型温度変化から鋳造直後の時間部分を拡大して鋳型の温度変化を示す。生型の深さ3mmの部位では、鋳造後の溶湯熱で鋳型が熱せられ、粘結材に含まれる水分が蒸発して完全に乾燥す

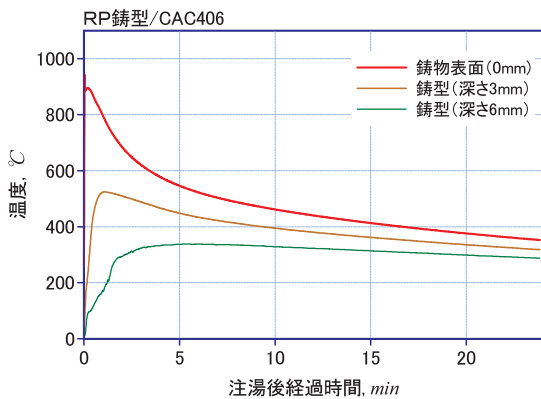
るまでの間、約35秒間にわたり温度が100℃に停滞していることが分かる。深さ6mmの部位では、さらに長時間にわたってこの挙動が継続し、約2分間100℃にとどまっている。これに対して、粉末RP鋳型は鋳型の深さ方向に溶湯熱が伝わって温度が徐々に上昇している。

これら温度計測結果をもとに鋳型の熱伝導率を推定するため、鋳造CAEを利用して伝熱解析の境界条件パラメータを変化させながら計測結果と計算結果の合わせこみを行った。当初、両鋳型の温度計測結果を比較すると粉末RP鋳型の方が熱を伝えやすいように見えた。ところが、両鋳型の温度変化を再現するためには、粉末RP鋳型の熱伝導率を生型より小さく設定しなければならないことが分かった。それは、粉末RP鋳型の3つの温度計測点間の温度差が開いており、特に深さ3mmと6mmの部位間の温度差が生型に比べて粉末RP鋳型の方が大きい、この部位の温度勾配の大きさを説明するには粉末RP鋳型の熱伝導率が生型より小さい必要があるからである。このことは、珪砂を主材とする生型に対して、セラムックス系の材料を含む人工砂を主材とする粉末RP鋳型の方が熱伝導率は小さくなると説明することもできる。

粉末RP鋳型の深さ方向の温度が鋳造後に生型より早く立ち上がったことについて、前述のとおり生型の水分が溶湯熱を受けて蒸発し、その気化熱で温度上昇が抑えられたことが原因の一つとして考えられる。加えて、先の鋳造CAEによ

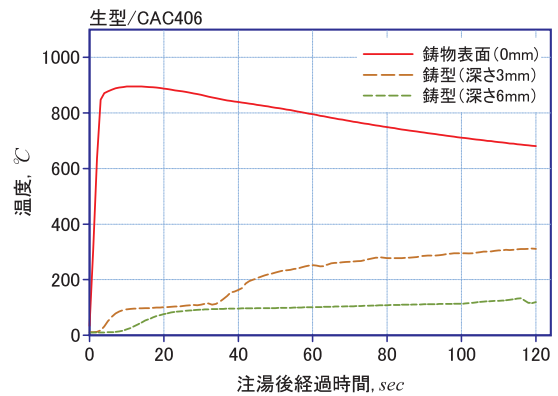


a) 生型の温度変化

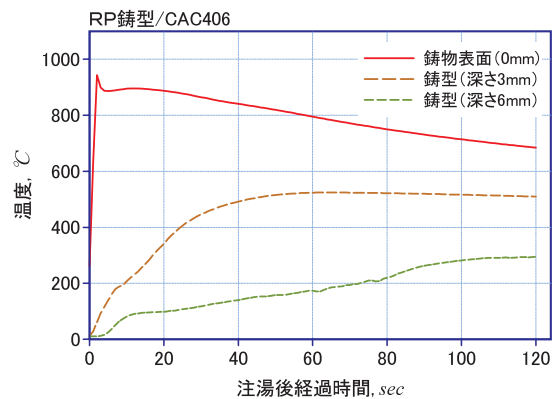


b) 粉末RP鋳型の温度変化

図8 鋳造後の鋳型温度計測結果



a) 生型の温度変化



b) 粉末RP鋳型の温度変化

図9 鋳造直後の鋳型温度変化

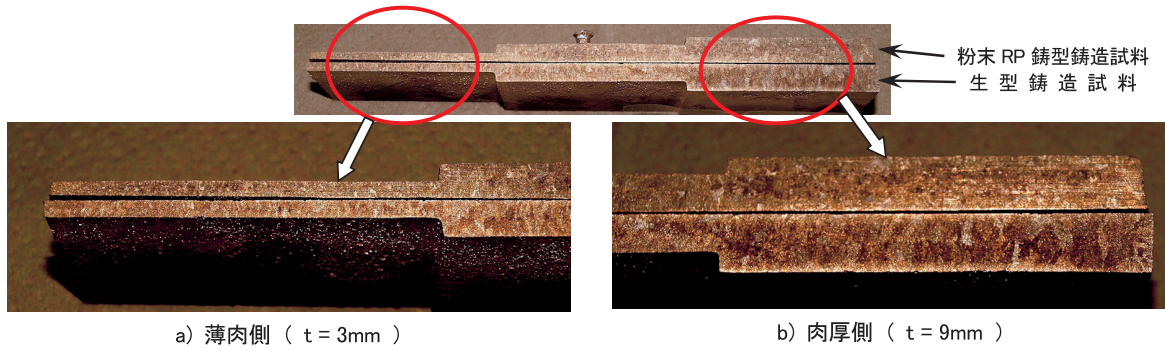


図10 生型と粉末RP鋳型で鋳造した銅合金鋳物のマクロ組織観察

る伝熱解析の境界条件を設定する際に、鋳物と粉末RP鋳型との間の熱伝達率を生型とのそれよりも大きく設定すると計測値の挙動に近づくことを見出した。すなわち、鋳造直後において生型は水蒸気の発生で溶湯熱が鋳型に伝わりづらくなるのに対して、粉末RP鋳型は比較的气体発生量が抑えられ、溶湯熱が鋳型へ伝わりやすい状態になったと推定される。このことは、粉末RP鋳型で製作した鋳物の鋳肌が生型で製作した鋳物表面より滑らかであったことから説明できる。

さらに、生型と粉末RP鋳型の主材を比較すると珪砂よりムライトを主成分とする人工砂の方が比熱は大きい。珪砂も人工砂も比重はあまり変わらないので、同じ熱量を受けたとき、珪砂に比較して人工砂の温度上昇は低く抑えられることになる。熱伝達において熱移動量は温度差に比例するから、生型に比較して鋳型温度が上昇しにくい粉末RP鋳型の方が溶湯の熱を鋳型に移動しやすいことになる。

以上をまとめると、粉末RP鋳型は、その熱容量が大きいこと、ガス等を介在せずに溶湯と接しやすいことから、注湯直後の鋳物と鋳型との熱伝達率が大きくなっていると考えられる。前項の鋳鉄溶湯による鋳造試験において、薄肉部でチル組織が見られたことについて、粉末RP鋳型の熱容量の大きさにより溶湯の冷却速度が大きくなり、セメントタイトが晶出しやすい条件となったと考えることができる。

粉末RP鋳型の実用性評価において、生型と粉末RP鋳型との熱的特性の違いによりどの程度鋳物の材質に影響を及ぼすかを把握しておかなければならない。鋳造した試料断面のマクロ組織を比較した写真を図10に示す。生型鋳造試料、粉末RP鋳型鋳造試料のいずれも薄肉部（肉厚 $t = 3 \text{ mm}$ ）ではほぼ中心部まで柱状晶が見られ、肉厚部（肉厚 $t = 9 \text{ mm}$ ）では表層 1 mm 程度の厚さが柱状晶で中心部は等軸晶であった。写真から、生型で鋳造した試料の肉厚部等軸晶の結晶粒ははっきりと認められるが、粉末RP鋳型で鋳造した試料の同部位の結晶粒は生型のものに比べてはっきりとしていない。しかし、薄肉部および肉厚部の柱状晶の現れ方が似ていることから鋳物の機械的性質に与える影響は小さいものと推定される。

図11は、それぞれの鋳型を用いて鋳造した試料から試験片

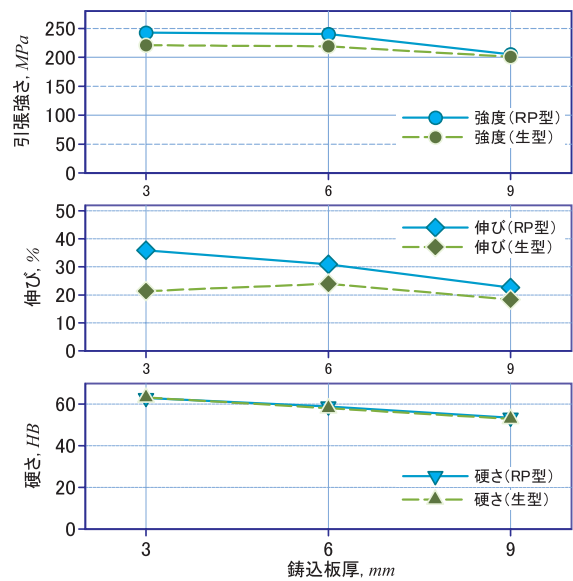


図11 試料から切り出した試験片による機械的性質の比較

を切り出して引張強度、伸び、ブリネル硬さを計測した結果をまとめたものである。引張強度は、薄肉部が少しだけ高強度になっているが、概ね $200 \text{ MPa} \sim 250 \text{ MPa}$ の値が得られた。伸びは、薄肉側でばらつきが見られたが、いずれも概ね 20% 以上の伸びが得られた。これらの値は、いずれも JIS 規格 (JIS H 5120) の規定値である引張強度 195 MPa 、伸び 15% を超えていた¹⁰⁾。鋳造した銅合金材料 (CAC406) に関してブリネル硬さの JIS 規定値はないが、概ね $\text{HB}50 \sim 60$ の値が得られており、ブリネル硬さについては鋳型の違いによる差異は認められなかった。引張強度、伸び、ブリネル硬さに関して、いずれも薄肉部の方が高い値を示している。これは、鋳造後の冷却速度が大きいと結晶粒が微細化するので、これが機械的性質に影響を及ぼしたものと考える。先にも述べたように粉末RP鋳型は熱容量が大きいので、鋳造後の初期段階で鋳物を急冷させる効果があると考えられるが、特に薄肉部で粉末RP鋳型により鋳造した鋳物の強度および伸びが生型鋳造品よりも高い値を示したのも、その効果が結晶の微細化に影響したことによるものと考えられる。

3.4 粉末RP鋳型を用いた銅合金鋳物の試作実験

鋳鉄および銅合金を粉末RP鋳型に鋳込む際、従来の鋳型との差異に関する情報を得るための鋳造実験を行った結果、球状黒鉛鋳鉄を鋳込んだときに鋳物表面近傍の組織への影響はあるものの、鋳鉄および銅合金鋳物の試作鋳造において概ね実用に供して大きな問題がないことを確かめた。そこで、上下水道用配管製品に使用される銅合金部品の中から試作対象を選び、粉末RP鋳型を実際の鋳物製作へ適用した。

上下水道用バルブの銅合金鋳物部品を製作するための粉末RP鋳型の外観写真を図12に示す。鋳物は、長手方向が約80mm、高さ約50mm、幅が約35mmの寸法を有する青銅製バルブボディである。弁の入口と出口で内径が若干異なるが、 $\phi 15\text{mm}$ ～ $\phi 18\text{mm}$ の流路に弁の開閉機構を設けた形状であり、内部流路部分には中子を設置する。

試作した青銅鋳物の外観を図13に示す。外観検査では特にガス欠陥や外引け等の欠陥も見られず、ほぼ健全な鋳物を得ることができた。鋳造方案は、写真に示すようにバルブ流路の入出力面の一部にセキを設け、特にガス抜きや揚がりやを設けなかった。鋳造の際、粉末RP鋳型を乾燥砂でバックアップしたが、鋳造時に鋳型内部で発生したガスは、主型の合わせ面や中子の幅木部分から外に排出されたものと考えられる。

次に、内部構造が少し複雑な鋳物の試作を行った。試作に用いた粉末RP鋳型の外観を図14に示す。鋳物の肉厚は概ね5mm程度である。鋳物の内部構造は少々複雑で、図14-a)に示すように主型の中に中子が2つ設置される。鋳造後、鋳

型が銅合金溶湯で満たされると、これらの中子は周囲を溶湯で囲まれてしまうため、相当の耐熱性と強度が要求される。図14-b)は粉末RP鋳型を組み立てた後の外観である。溶湯の注ぎ口となる湯口は、鋳物の肉厚を考慮して溶湯を素早く満たすように大きい寸法とした。鋳型の製品部分の上部に4つの円筒状の付加形状が見られるが、これらは鋳型内部で発生したガス等を効率よく鋳型外へ排出するための“揚がり”と呼ばれる鋳造方案である。

この鋳型を生型でバックアップし、銅合金溶湯を鋳造した。図15の写真は鋳造時の様子を撮影したものであるが、銅合金溶湯の注湯と同時に揚がりから勢いよくガスが噴出しているのが見える。鋳造後の型ばらしと砂落としした後の鋳物の写真を図16に示す。鋳物の上部には鋳造時に噴出したガスによると思われるブローホール欠陥が見られた。

これまでの試験から得た知見により、鋳型から噴出するガス成分として粉末RP鋳型の粘結材に配合した速硬性セメントに含まれる石膏成分が熱分解して排出されるであろうと想定していたが、噴出の勢いからして、石膏の熱分解ガス以外にセメントの水和硬化を担っている水分の蒸発や中子の空間に存在していた空気が溶湯で熱せられて急膨張して噴出したことなどが考えられる。

その後の試験で、使用する中子を粉末RP鋳型で製作した

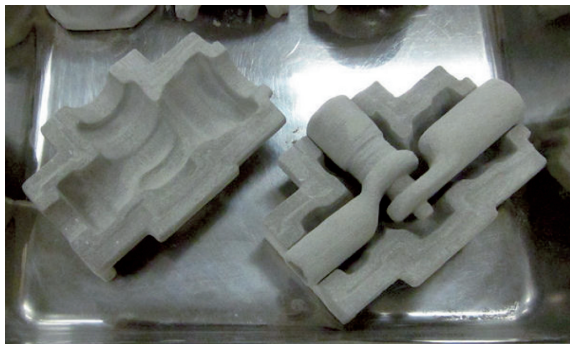


図12 銅合金鋳物試作用粉末RP鋳型の外観

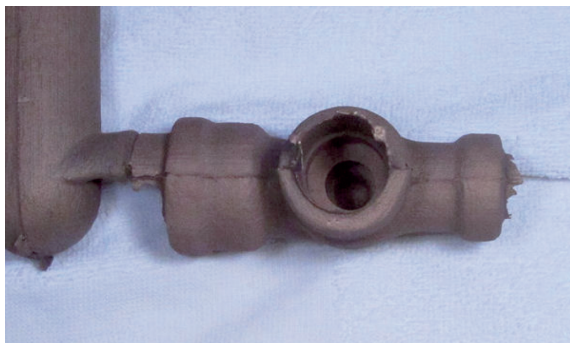


図13 試作した銅合金鋳物の外観写真

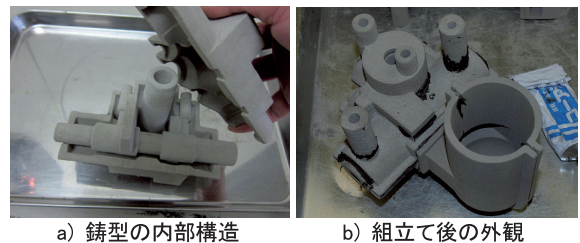


図14 銅合金鋳物試作用粉末RP鋳型の外観



図15 銅合金鋳造試験の様子

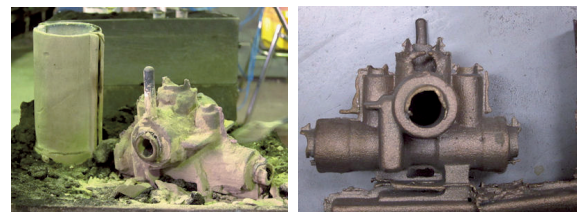


図16 試作した銅合金鋳物の外観写真

中子の代わりに現行使用しているシェル中子を用いた場合にガス欠陥の改善が見られた。シェル鑄型とは鑄物砂にフェノール樹脂をコーティングした材料を用い、これを金型で焼き固めて製作する鑄型や中子をいう。試験に用いた中子形状および寸法から、中子は中実（内部に空間がなく詰まったもの）となるので、中子内部にはほとんど空気を含まない。また、シェル鑄型・中子は通気性がよいので、フェノール樹脂の燃焼ガスや少々空気の膨張があってもこれらのガスは効率よく鑄型の外に排出される。シェル中子を用いることでガス欠陥が抑えられたことから、中子の空間部分に存在した空気の膨張によって鑄型内に大量のガスが発生したことがガス噴出の原因の一つであることが分かった。

一方、粉末RP鑄型の粘結材に含まれる水分の蒸発の影響については、別に試験用鑄型を製作して実験を行った。

3.5 鑄型含有水分と乾燥処理の効果¹¹⁾

粉末RP鑄型の粘結材に含有する水分が、鑄造時の溶湯熱を受けて蒸発することを想定し、鑄型内に発生する水蒸気が鑄物へ与える影響について調べた。実験に用いた供試材は、粉末RP成形で製作した中子によるガス発生の影響を考慮し、図17に示すように中空部の大きい鑄物形状とし、これを製作するために図18に示す粉末RP鑄型と中子を用意した。

鑄造試験に先立って、粉末RP鑄型に含有する水分を蒸発させるための乾燥条件を知るための試験を行った。乾燥試験

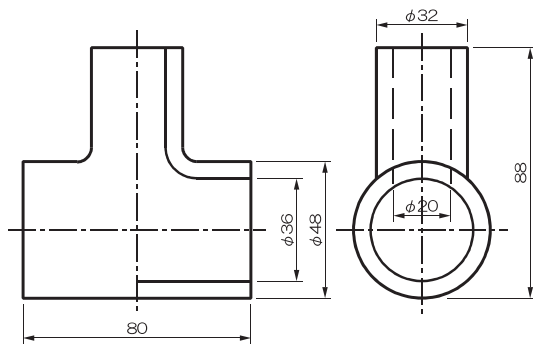


図17 供試材の形状と寸法

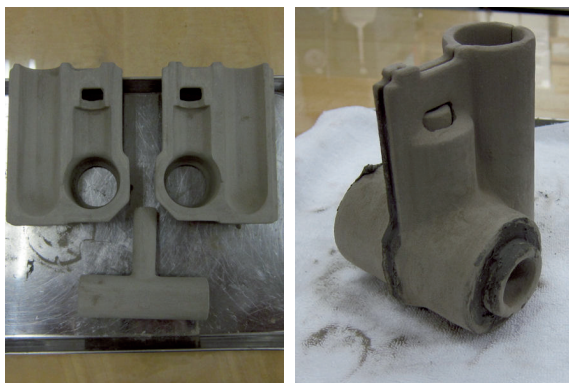


図18 試験用粉末RP鑄型

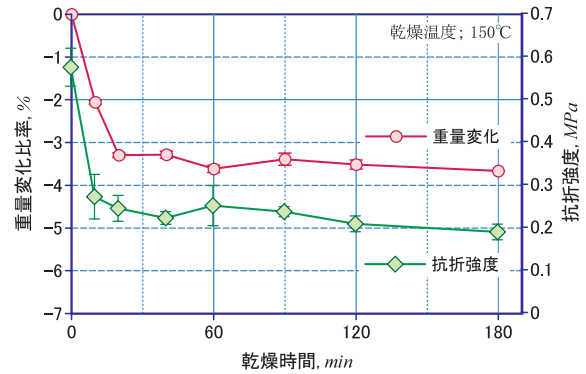


図19 粉末RP鑄型の乾燥と強度変化

は、板厚 6 mm の板状試験片を製作し、形状および重量を計測した後、これを150°Cのオーブンで所定の時間乾燥させ、その重量減量を計測して乾燥によって蒸発した水分量を推定した。また、重量計測後の試料を用いて抗折試験を行い、成形体強度の変化を調べた。

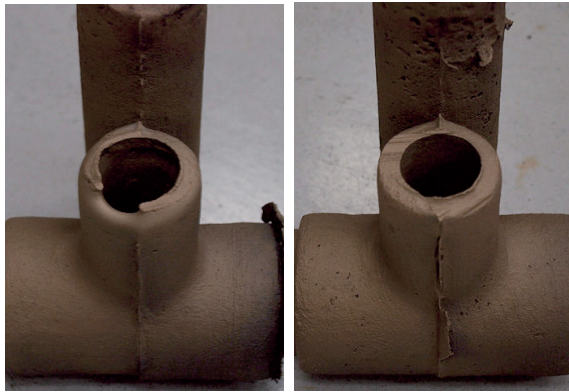
実験の結果を図19に示す。乾燥による重量減量の変化をみると、鑄型内含有水分は乾燥処理後直ちに蒸発し、約30分間の乾燥で約3.5wt%の水分が蒸発することが分かった。粉末RP鑄型は、通気性の観点から概ね肉厚 6 mm で製作することになっているが、150°Cで30分から1時間程度の乾燥条件で粉末RP鑄型の乾燥処理がほぼ完了することが分かった。

前報までに粉末RP鑄型の成形時にインクジェットノズルから吹き付けられる水性硬化剤の量について、成形体重量比で 5 wt%程度となることを明らかにした⁸⁾¹²⁾。粉末RP鑄型の強熱減量試験 (IgLoss/1,000°C, 1時間)を行ったところ、約6.3wt%の減量を得たが、これには水分の蒸発以外に水性硬化剤に配合した有機材料やその他の揮発分も含まれているので、粉末RP鑄型に含有する水分としては 5 wt%程度の割合というは妥当なところと考える。

この試験結果から、150°Cの乾燥温度において1時間以上の乾燥を行っても粉末RP鑄型に含有する水分の3.5wt%分のみの蒸発にとどまることを示している。したがって、150°Cで乾燥した後の粉末RP鑄型には 2 wt%に満たない水分がとどまり、これが成形体強度の維持に寄与していると考えられる。

乾燥後の成形体抗折強度の計測結果をみると、水分の蒸発に伴って抗折強度が低下する傾向が認められ、1時間以上乾燥した試料の抗折強度は約0.2MPaとなった。特に乾燥直後10分以内に抗折強度は急激に低下することが分かった。これらの結果から、粉末RP鑄型の水分含有量と抗折強度との間には強い相関関係があり、150°Cで十分乾燥した粉末RP鑄型にも若干の水分がとどまり、成形体の形状を維持しているとの知見を得た。

成形して水分を含有する粉末RP鑄型と、150°Cで1時間の乾燥処理をして含有水分を減少させた粉末RP鑄型を用いて、銅合金 (CAC406) および鑄鉄溶湯 (FCD450) を鑄造し、ガス欠陥防止の効果を確かめた。



a) 鋳型乾燥なし b) 鋳型乾燥あり

図20 銅合金鋳物における鋳型乾燥の効果



a) 鋳型乾燥なし b) 鋳型乾燥あり

図21 鋳鉄鋳物における鋳型乾燥の効果

粉末RP鋳型を用いて銅合金を鋳造して得られた鋳物の外観を図20に、同様にして得られた鋳鉄鋳物の外観を図21に示す。

水分を含有する粉末RP鋳型を用いて製作した鋳物を観察すると、銅合金鋳物では上部にブローホール欠陥が見られ、鋳鉄鋳物では、ガスによると思われる細かな凹凸が見られた。一方、乾燥処理をした粉末RP鋳型で製作した鋳物ではこれらの欠陥が見られず、鋳型乾燥処理のガス欠陥防止効果を確認することが出来た。

乾燥処理した粉末RP鋳型の抗折強度が0.2MPa程度になると少しの力で成形体が崩壊してしまい、鋳型のハンドリングに注意を要した。また、鋳造時に主型を乾燥砂等でバックアップする際、砂の外圧で鋳型を破損する例や、中子の強度不足により、鋳造時に溶湯の浮力を受けて中子が崩壊してしまう事例などが見られた。

本技法の実用化の観点から、今後、鋳型の乾燥と強度維持を両立させる技術の開発が必要である。

6. まとめ

無機粉末RP技法によって製作した鋳型・中子を用いる鋳造プロセスの実用性を向上させる観点から、これまでの知見を

整理するとともに、従来使用していた鋳型を粉末RP鋳型に代えたときに想定される鋳物材質への影響や鋳型内で発生するガス等への対応策を検討した。

鋳型の違いによる鋳物材質への影響について、球状黒鉛鋳鉄品のごく表面近傍の球状化不良が認められた以外は、鋳鉄鋳物、銅合金鋳物ともに大きな問題は認められなかった。複雑な中子構造を持つ鋳物への適用においては中子内部の空間に存在する空気の膨張に配慮した鋳造方案をとるとともに、乾燥処理によって鋳型に含有する水分を減らすことで改善できた。

ただし、鋳型の乾燥によって強度が低下する傾向があるので、今後は粉末RP鋳型が低水分で強度を得るための技術開発を進めることでさらに本技法の実用性を高めていきたい。

参考文献

- 1) 戸羽 篤也；「RP技術を利用した鋳物製造プロセス」、日本鋳造工学会北海道支部会報No.132 (2006.6).
- 2) 戸羽 篤也, 安田 星季, 岩越 睦郎；「迅速型成形技術を利用した鋳物製造プロセス」、北海道立工業試験場報告 No.305 (2006.8).
- 3) 戸羽 篤也, 安田 星季, 和田 晴司, 清水 一道, 桃野 正, 津村 治, 沖野美佐男；「粉末RP成形体を利用した鋳物づくり」、日本鋳造工学会第149回全国講演大会講演概要集 (2006.10).
- 4) 丸谷 洋二, 早野 誠治, 今中 暎；「積層造形技術資料集」、オプトロニクス社 (2002.10)
- 5) 戸羽 篤也；「粉末RP鋳型による超迅速鋳物づくり技術の開発」、外部資金活用研究(平成19年度シーズ発掘試験研究)報告書 (2008.3).
- 6) 戸羽 篤也, 稲野 浩行, 平野 繁樹, 上野 慶典；「鋳鉄鋳物製作のための高耐熱性RP粉末」、北海道立工業試験場報告No.308 (2009.8).
- 7) 戸羽 篤也, 稲野 浩行, 平野 繁樹；「インクジェット式粉末RP鋳型を利用した鋳鉄鋳物の製造」、日本鋳造工学会第155回全国講演大会講演概要集 (2009.10).
- 8) 戸羽 篤也, 稲野 浩行, 平野 繁樹；「粉末積層成形型による鋳鉄鋳物の迅速鋳造プロセス」、北海道立工業試験場報告No.309 (2010.8).
- 9) 鄭 想勲, 中江 秀雄；「鋳鉄における球状黒鉛の生成機構」、早稲田大学大学院論文集 (2006.3)
- 10) 日本規格協会；「JISハンドブック」、日本規格協会 (2010.1)
- 11) 戸羽 篤也, 稲野 浩行, 平野 繁樹；「無機粉末RP鋳型による鋳物製造におけるガス欠陥対策」、日本鋳造工学会第159回全国講演大会講演概要集 (2011.10).
- 12) 戸羽 篤也, 井家 勝八, 井家 洋；「小ロット鋳鉄・鋳鋼品製造のためのRP造形法による迅速鋳型製造技術」、北海道立工業試験場平成21年度受託研究報告書 (2010.3)