

積層造形装置で作製した砂型の鑄造時ガスの抑制方法

近藤義大*, 金森陽一*, 伊藤恭祐*, 赤田英里*

A Method to Control Gas Blow in Casting 3D-Printed Sand Molds

Yoshihiro KONDO, Yoichi KANAMORI, Kyosuke ITO and Eri AKADA

The technology of three-dimensional printing for manufacturing sand molds is becoming popular because it enables quicker and flexible design than conventional sand molding process. It is important to clarify the basic characteristics of 3D-printed sand molds, but there are no reports on gas blow in casting them. In this report, gas pressure and gas blow were measured in casting. Next, some methods to control gas blow were studied.

The variation of gas pressure in the 3D-printed sand molds in casting showed the same pattern as in shell molds. Gas blow and burn out defects did not occur in the sand mold coated with mold wash. The gas vent hole, of which volume was 1% of sand mold, greatly reduced the gas pressure. In addition, decreasing the binder jet area in the sand mold core suppressed the gas pressure in the late stage of solidification.

Keywords : Three-dimensional Printing, Sand Mold, Gas Blow, Gas Pressure, Binder Jetting

1. はじめに

砂型積層造形技術は、三次元データから直接砂型を積層造形するため、従来プロセスでは必要不可欠だった型（模型）が不要になる等、迅速な試作や自由な発想による鑄造方案の砂型作製への適用が期待されている¹⁾。最近主流となっているバイダジェット式積層造形装置によって作製される砂型には、専用の触媒コーテッドサンドやバインダが使用されることから、その品質は安定していると考えられ、基本的な砂型特性を把握することが、砂型積層造形技術を有効に使いこなすうえで極めて重要である。これまで、積層造形砂型の通気度や崩壊性、加熱減量²⁾、表面粗さと積層段差³⁾、なりより性と単位重量あたりの燃焼ガス量⁴⁾等の評価が報告されているが、積層造形砂型の適用が期待されている中子としての熱間特性、特に鑄造時のガス発生挙動やガス圧に関する報告は見当たらない。鑄造時に中子から発生するガスは、

溶湯凝固中に溶湯中へ気泡として放出されることによってガスブロー（吹かれ）欠陥を引き起こすことや⁵⁾、鑄鉄溶湯を激しく波打たせることで酸化物（ドロス）の発生を促す⁶⁾ことが知られている。これらに対して正しく対策をするためにも、積層造形砂型の鑄造時ガスの発生挙動を把握する必要がある。

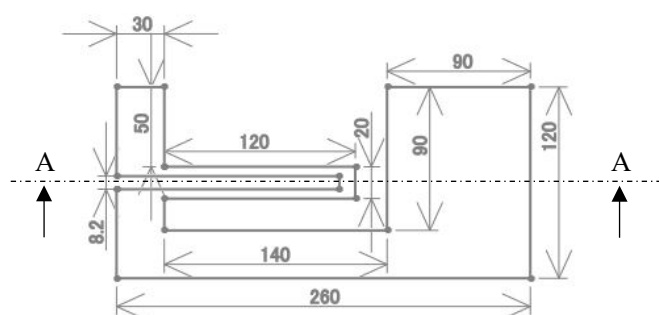
そこで本研究では、砂型積層造形技術の強みを活かして作製されることが多い、中子と主型が一体となった砂型へ、鑄鉄溶湯を注湯した際に中子部から発生する火柱状のガス（以後、バブリングとする）をビデオカメラで撮影し、同時に中子部のガス圧を測定することで、積層造形砂型の鑄造時ガスの発生挙動を明らかにした。また、塗型剤の使用や、ガス抜き穴の設計、中子内部のバインダ吐出部分を減らすことによりバブリングおよびガス圧の抑制が可能かを検証した。

* 金属研究室

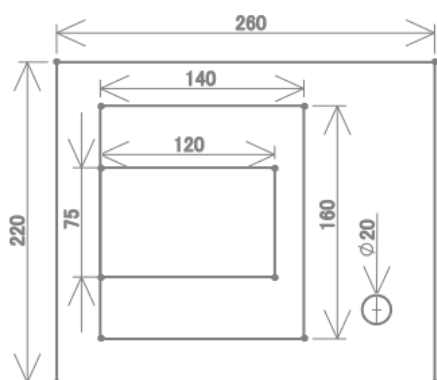
2. 実験方法

2.1 砂型の作製

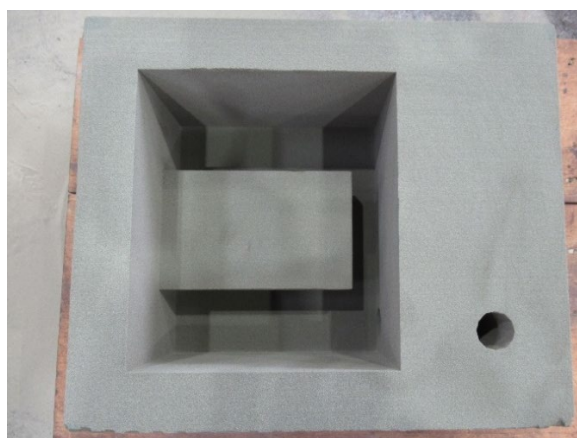
実験に供した砂型は、フラン樹脂のバインダジェット式砂型積層造形装置によって、中子部と主型が一体の押し上げ方案として作製した。図 1a), b) に作製した砂型の図面を、図 1c) に砂型の写真を示す。本砂型は、小松らによる注湯時に発生するシェル中子のガス圧を測定した報告⁷⁾で使用されたモデルをベースとして、中子から発生するバブ



a) 側面図 (中心部分の断面)



b) 平面図 (上から)



c) 砂型写真

図 1 ガス圧測定用砂型 (単位はすべて mm)

リングを直接ビデオカメラで撮影することで視覚的に確認するために、上型部を取り払った形状に設計変更したものである。砂型の三次元データは 3D CAD で作成し、砂型積層造形装置で砂型を作製した。バインダ量は 1.8% から 2.1% の範囲となるように吐出量を調整した。なお、砂型の中子部中央には次節で述べるガス圧測定のためのパイプ穴を設計した。

塗型の効果を検証する実験に供した砂型は、70 ボーメに調整した表 1 の組成の塗型を中子部へムラがないよう刷毛塗りし、自然乾燥した。ガス抜き穴によるガス抜き効果を検証する実験に供した砂型の一例 (断面モデル) を図 2 に示す。中子部中央のガス圧測定用のパイプ穴の左右のスペースの中央に、幅木 (中子と主型を接続する部位) から中子部先端 10 mm 部分まで貫通するよう、全長 140 mm の $\phi 3$ mm または $\phi 7$ mm のガス抜き穴を設計して積層造形し、ガス抜き穴内部の未硬化砂をエアブローで除去したのち実験に供した。中子内部のバインダ吐出部分を減らすことによる効果を検証する実験に供した砂型の断面モデルを図 3 に示す。ガス圧測定用のパイプ穴の左右のスペースについて、中子体積に対して計 6.7% 相当の部分 ($7\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 110\text{ mm} \times 2$ 本) のバインダ吐出を無くし、中子内部を一部未硬化とした。こうした措置をとることで、中子の強度を保ったまま、

表 1 使用した塗型剤 (基材分)

溶媒	化学成分 [mass %]		
水	ZrO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃
	80	10	2

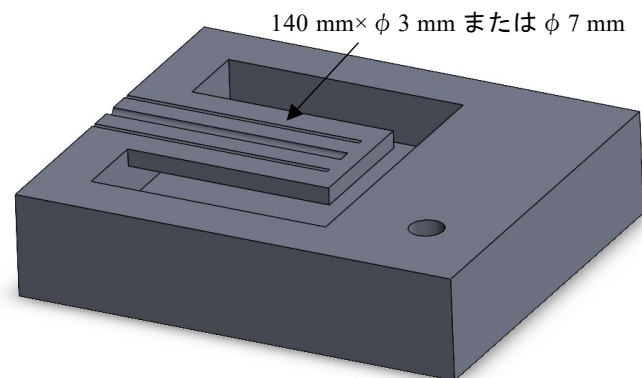


図 2 ガス抜き穴設計砂型の 3D CAD 断面モデル (図 1a)A-A 断面)

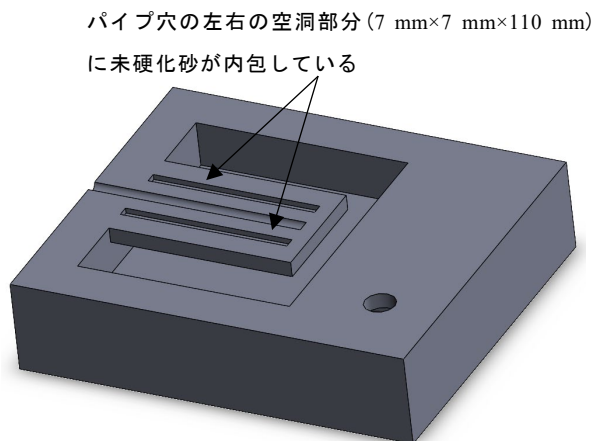


図3 バインダ吐出部分削減砂型の3D CAD断面モデル(図1a)A-A断面)

バインダ燃焼ガスの削減が可能であるかを検証した。なお、幅木部分はバインダを吐出したため、バインダを塗布しなかった部分は中子に内包されており、未硬化砂は中子に入ったままの状態を実験に供した。

2.2 ガス圧の測定

casting時の中子部のガス圧は、幅木部から中子部先端10mm部分まで貫通する形で設計したφ8.2mmのパイプ穴へ、外径8.0mm、内径4.0mm、長さ180mmのステンレスパイプを穴の先端まで挿入し、パイプ内面片端10mm部のM5めねじへ小型圧力センサヘッドを締めて固定することで測定した。その際、アンプからデータロガーへアナログ出力することで0.1秒ごとに記録した。なお、砂型とパイプの間からガスがリークすることを防ぐため、モールドシールで砂型とパイプのクリアランスを全面にわたりシーリングしてから実験に供した。

2.3 溶解実験

溶湯は50kg高周波誘導溶解炉にて、高純度銑鉄、戻り材、鋼板、Fe-75%Siを用いてFC150相当の組成として30kg溶製した。溶湯は約1500℃で取鍋へ出湯し、約1400℃で積層造形砂型へ注湯した。 casting時のバブリングの様子を湯口の反対方向からビデオカメラで撮影した。

2.4 通気度試験

積層造形砂型の通気度を測定するため、φ50mm×高さ50mmの通気度試験片を積層造形し、JIS Z 2601:1993におけるオリフィス法で通気度を

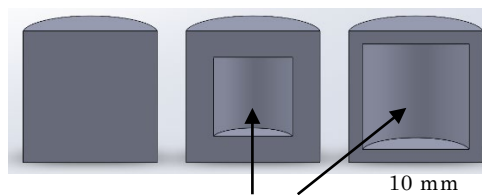


図4 通気度試験片縦断面モデル(左から通常、厚さ10mm、厚さ5mm)

測定した。砂型内部のバインダ吐出を一部無くし、未硬化とすることが密度および通気度に影響を及ぼすかを調査するため、通気度試験片は図4に示すように、全面にバインダを塗布した通常のもの、厚さ10mm、5mm部のみバインダを塗布し、内部を未硬化としたものを作製した。

3. 結果と考察

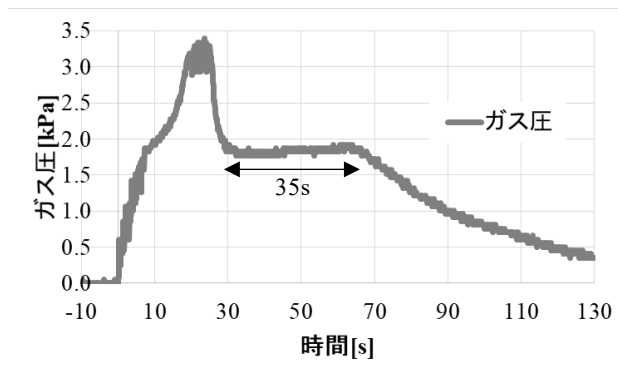
3.1 鑄造時ガスの発生挙動

図5に、通常モデル(図1)へ注湯した際に撮影した動画の静止画像を示す。撮影した動画から、バブリングは注湯中に中子が溶湯に浸漬された直後から7秒間発生し、その後12秒間収まった後、注湯完了後に再び6秒間発生したことが確認された。注湯中のバブリングは中子から直接火柱が吹き上がる様子が(図5a)、注湯完了後のバブリングは溶湯表面を激しく波打たせながら火柱が吹き上がる様子が確認された(図5b)。また、2回目のバブリング後の湯面には、バブリングによると思われる酸化物が浮遊していた(図5c)。

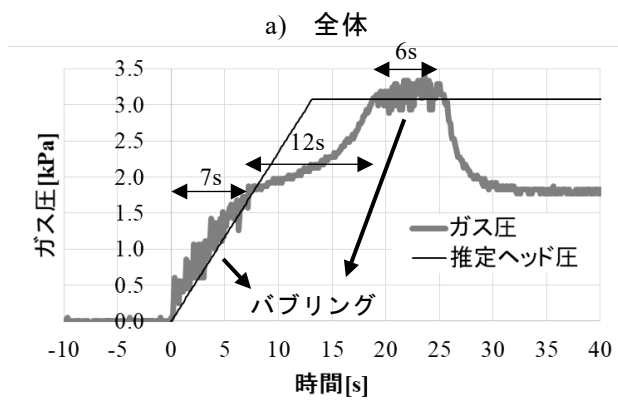
図6にこのモデルのガス圧-時間曲線を示す。図6b)の「推定ヘッド圧」は中子が溶湯に浸漬されてから注湯完了までの時間において、一定速度で溶湯が注湯されたと仮定して推定したヘッド圧(中子上面にかかる溶湯圧力)であり、注湯完了時のヘッド圧(一定)を中子が溶湯に浸漬された時点からの注湯時間で割ることで一次関数の傾きを導出したものである。また、ガス圧測定結果の時間軸の起点(0秒時点)は、ガス圧が測定され始めた点とし、ガス圧の立ち上がりの様子がわかるよう、起点の10秒前からのガス圧測定結果を表示している。撮影されたバブリング時間とガス圧測定の結果から、バブリングは「ガス圧 ≥ ヘッド圧」が成立するタイミングで発生したことがわかり、バブリング中はガス圧が振動している様子が測定された。また、ガス圧の起点と推定ヘッ

ド圧の起点は一致することから、ガス圧は中子が溶湯に浸漬されたタイミングで発生したことが確認された。中子下面が溶湯に接した際にもガスは発生すると考えられるが、ガス圧として測定されなかったことから、このガスは中子の上面を通して大気中へ放出されたものと考えられる。

2 回目のバブリングの後、ガス圧は急激に下がり、約 35 秒間にわたってほぼ一定を示したのち減少に転じ、やがて大気圧に至った。これらのガ



a) 注湯中のバブリング



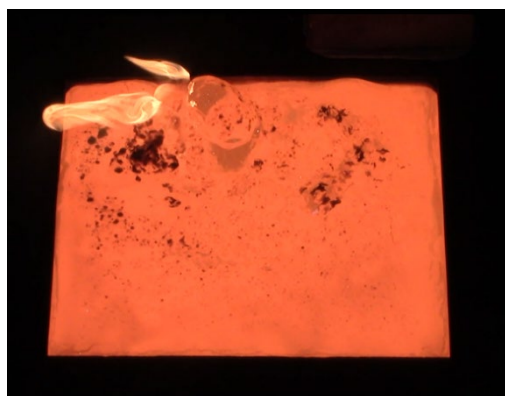
b) バブリング部分拡大

図 6 通常モデルのガス圧-時間曲線

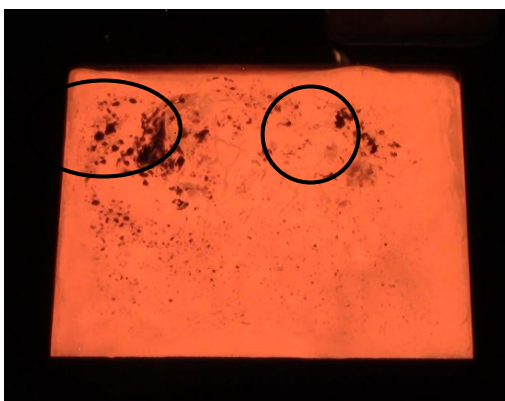
ス圧の挙動は、小松らのシェル中子による実験結果⁷⁾と同様の傾向を示したことから、フラン樹脂のバインダジェット式積層造形砂型の中子は、一般的なシェル中子と同様の casting 時ガス発生挙動を示すことが確認された。この理由は、フラン鑄型、シェル鑄型ともに樹脂による有機自硬性鑄型であり、鑄造時ガスは溶湯熱によって中子内の樹脂が燃焼して発生したためであると考えられる。

3.2 塗型の効果の検証

表 1 の水性塗型剤を施した砂型へ注湯した結果、バブリングは注湯中の 5 秒間発生したのみだった。図 7 にこの実験のガス圧-時間曲線を示す。図 7a) から、ガス圧の全体の挙動は通常モデルと似ているが、図 7b) から、注湯中のガス圧の上昇が通常モデルよりやや鈍化していることが確認された。また、バブリングによるガス圧の振動は測定されなかった。さらに、注湯完了後に約 3 秒間「ガス圧 \geq ヘッド圧」となり、バブリングが発生する条件が成立したが、この塗型をしたモデルはバブリングが発生しなかった。そのうえ、中子部によって鑄物に中空部ができるが、この中空部には、図 8



b) 注湯完了後のバブリング



c) バブリング後の酸化物 (丸で囲った部分)

図 5 通常モデルの実験の様子

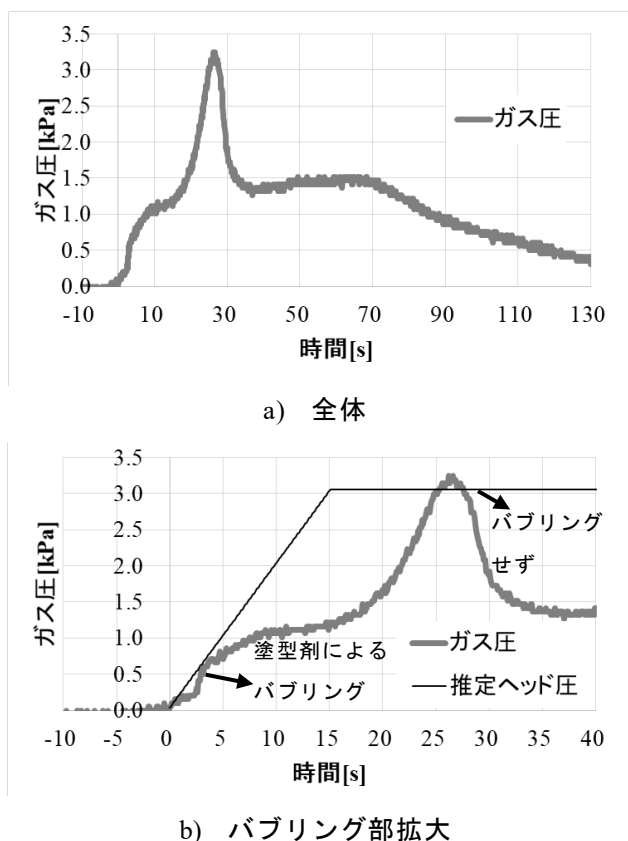


図7 水性塗型を施した中子のガス圧-時間曲線

に示す通り、通常モデルでは発生した焼き着きが発生せず、良好な鑄肌が形成されていた。これらは、本砂型の中子部に施した水性塗型剤の効果によるものと考えられる。すなわち、溶湯と中子の間を耐火性のある塗型剤の層が遮断することで、中子への加熱が穏やかになり、バインダ燃焼ガス

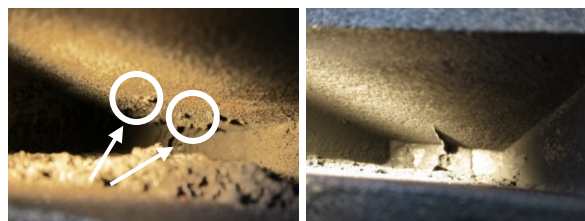


図8 鑄物中空部の写真(左:塗型なし, 右:塗型あり)

の発生を抑制したため注湯中のガス圧の上昇が抑えられたと考えられる。また、中子表面の塗型剤の層がガス・カーテン効果⁸⁾を発揮することにより、中子から溶湯への燃焼ガスの移動(バブリング)と、溶湯から中子への溶湯の移動(焼き着き)を抑えたと考えられる。なお、注湯中に発生したバブリングは、ガス圧が低いとされる幅木部周辺⁷⁾からも発生したことから、バインダが燃焼して発生したガスではなく、増粘、消泡、防腐等を目的として基材とは別に塗型剤に添加される調整剤⁹⁾が燃焼して発生したガスであると考えられる。

3.3 ガス抜き穴の効果の検証

表2に、種々のガス抜き穴を設けた砂型へ注湯した際のバブリングの有無、最大ガス圧、湯面酸化物の様子、ガス抜き穴への湯差しの有無を示す。φ3mm×2本(中子に対する体積率1%)のガス抜き穴を設けることでバブリングおよびガス圧を大幅に軽減することが可能であり、バブリングによる酸化物の発生も抑制できることが確認された。

表2 種々のガス抜き穴を設けた砂型へ注湯した結果

	中子に対する ガス抜き穴の 体積率[%]	バブリング	最大ガス圧 [kPa]	湯面酸化物	ガス抜き穴 への湯差し
通常モデル (ガス抜きなし)	—	あり (計 13 秒間)	3.2	あり	—
φ 3 mm×1	0.5	あり (0.5 秒間)	1.0	なし	なし
φ 3 mm×2	1.0	なし	0.4	なし	なし
φ 7 mm×2	5.2	なし	測定不能 (大気圧)	なし	あり
φ 7 mm×2+ アル コール性塗型	5.2	あり (1 秒間)	測定不能 (大気圧)	なし	なし

中子に $\phi 3 \text{ mm} \times 1$ 本のガス抜き穴を設けた砂型では、注湯中にガス抜き穴がない部分からごくわずかにバブリングが発生したが、1秒未満で収まった。しかし、中子に $\phi 7 \text{ mm}$ のガス抜き穴を設けた砂型では、ガス圧は測定されなかったが、ガス抜き穴内面と中子表面との距離(厚み)が 6.5 mm と薄くなったために溶湯が凝固完了する前に中子が崩壊することでガス抜き穴に溶湯が差し込み、中子としての機能を果たさなかった。そこで、耐焼き着き性能を持たせるため、アルミナ系アルコール性塗型を $\phi 7 \text{ mm}$ のガス抜き穴を設けた中子に施して実験を行ったところ、注湯中に塗型剤の有機物によると思われるバブリングが約1秒間発生したが、ガス圧は測定されず、ガス抜き穴への溶湯の差し込みも発生しなかった。これらのことから、中子に対する体積率1%程度のガス抜き穴でも、中子に偏りなく設けることで十分なガス抜き効果が得られることがわかった。また、中子の厚みが薄い等によりガス抜き穴を設けることで凝固完了前に中子が崩壊する場合は、中子に耐焼き着き性能の塗型を施すことで、十分なガス抜き効果と中子の耐熱強度を両立できることが確認された。

3.4 未硬化砂の通気度への影響調査

図4に示した3種類の通気度試験片の密度および通気度を図9に示す。通気度試験片の内部にバインダを吐出しないことで、密度は削減したバインダの重量分小さくなると考えられたが、結果は予想に反し、バインダを吐出しない部分の大きいほど密度が大きくなった。これは、バインダ吐出の有無による砂粒の詰まり方の違いによると考え

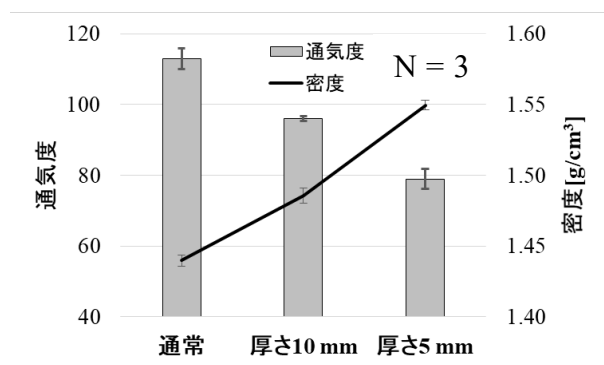


図9 未硬化砂の密度および通気度への影響 (エラーバーは標準偏差)

られる。すなわち、バインダを吐出することで砂粒間に液架橋によるネッキングが形成され¹⁰⁾、これが砂粒の自重により自然に充填される力への抵抗となるため、バインダを吐出したもののほうがかえって密度が小さくなったものと考えられる。また、通気度は密度が高い、すなわち空隙率が低いと低くなるため、バインダを吐出しなかった体積が大きいほど、密度が高く通気度が低くなったと考えられる。

3.5 バインダ吐出部分削減効果の検証

中子内部へのバインダ吐出を図3の通り一部無くした砂型へ注湯した結果を表3に記す。バブリングは注湯中から注湯完了後にわたって27秒間絶え間なく発生し続け、バブリング後の湯面には酸化物が浮遊していた。図10にこの実験のガス圧-時間曲線を示す。図10b)から、中子が溶湯に浸漬された直後から27秒間「ガス圧 \geq ヘッド圧」が成立したため、バブリングが発生し、ガス圧はバブリング終了まで一貫して高かったことがわかる。これらのことから、中子体積に対して6.7%相当の部分のバインダ吐出を無くしても、バブリングや最大ガス圧を抑制する効果は得られず、むしろガス圧は高くなる傾向があることがわかった。これは前節に示したとおり、中子内部に密度の高い未硬化砂がガスの流れる方向に長さ110mmにも渡って内包されており、そのため中子に対する未硬化砂の体積率が6.7%と小さいにもかかわらず砂型の通気度を悪化させ、結果として燃焼ガスが砂型の外部へ放出されにくくなった可能性がある。未硬化砂の体積率とガスの流れる方向への長さ、通気度の関係については今後検討する。

バインダ吐出部分を減らしてもバブリングや最大ガス圧を減らす効果はなかったが、バブリング後のガス圧の挙動に違いがみられた。通常モデルでは図6a)で示したように、ガス圧は急激に低下した後、約35秒間と長時間にわたってほぼ一定を示したのち下降に転じているのに対し、本節の砂型では、図10a)に示した通り、ガス圧は同様に急激に低下した後、約15秒間と短時間だけほぼ一定を示したのち下降に転じている。この理由について、次の通り考察する。そもそもバブリングするガスは、バインダを燃焼して発生するガスの発生速度が、中子-幅木部を介して砂型から大気

表 3 バインダ吐出部分を削減した砂型へ注湯した結果

	中子に対する未硬化 砂の体積率[%]	バブリング	最大ガス圧 [kPa]	湯面酸化物	バブリング後の ガス圧一定時間
通常モデル (ガス抜きなし)	—	あり (計 13 秒間)	3.2	あり	35 秒間
バインダ吐出部分 削減砂型	6.7	あり (27 秒間)	3.5	あり	15 秒間

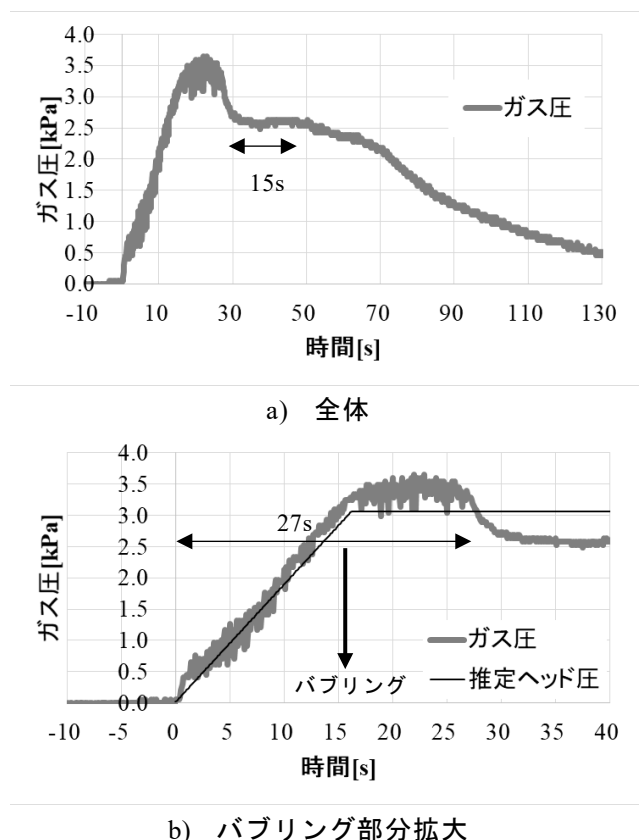


図 10 バインダ吐出部分削減モデルのガス圧—時間曲線

中へ放出されるガスの放出速度よりも大きい場合に、ガス圧を高めながら中子内に留まり、「ガス圧 \geq ヘッド圧」の条件が成立する場合に溶湯中へ気泡として放出されるものである。本報告の実験で確認された中子ガスによるバブリングは、溶湯に直接接触する、中子の表面に近い部分のバインダが急激に熱せられ短時間で発生した燃焼ガスが、中子—幅木部を介した大気中へのガスの放出が追いつかない場合に、気泡として発生したものと考えられる。バブリング終了以降に発生したガスは、溶湯には直接接触しない、中子中心部のバインダを比較的長時間かけて燃焼する際に発生したと考え

られる。通常モデルでは、バブリング終了以降のガス発生速度と中子—幅木部を介したガス放出速度が長時間にわたってほぼ釣り合ったため、ガス圧は長時間ほぼ一定を示した。一方、中子中心部のバインダ吐出を無くしたモデルでは、中子中心部のバインダ燃焼によるガスが少量しか発生しないため、ガス圧は短時間だけほぼ一定値を示したのち減少に転じたものと考えられる。実用上ガスブロー欠陥として問題になるのは、注湯直後に発生するガスではなく、溶湯温度が低下し鋳物が凝固する状態にかけて発生するガスであり、中子内部のバインダ吐出を無くすことによって、このタイミングで発生するガスを選択的に減らすことが可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、バインダジェット方式の砂型積層造形装置で作製した砂型の通気性および鋳造時ガスの発生挙動とその対策を検証し、以下のことが明らかになった。

- ・砂型積層造形装置で作製した中子の鋳造時ガスの発生挙動は、一般的なシェル中子と同様である。
- ・中子体積に対して 1% のガス抜き穴を設けることで、バブリングおよびガス圧を大幅に削減できる。
- ・バブリングが発生すると溶湯表面が激しく波打ち、酸化物が発生する。
- ・中子にジルコニア系水性塗型を施すことで、注湯中のガス圧の立ち上がりが鈍化し、注湯完了後のバブリングと焼き着きを防止した。
- ・ $\phi 50 \text{ mm} \times$ 高さ 50 mm の通気度試験片の内部のみバインダを吐出せず未硬化とすると、未硬化部分が大きくなるほど密度が大きくなり通気度は低くなった。
- ・中子内部のバインダを吐出する部分を削減しても、バブリングや最大ガス圧は削減できなかった。

が、注湯後時間が経ってから発生するガス圧を減少させる効果が確認された。

謝辞

本研究は、公益財団法人岡三加藤文化振興財団による令和2年度研究助成の下で行われました。付記して謝意を表します。

参考論文

- 1) 岡根利光ほか：“3D プリンターの砂型造形への適用による鋳造品と鋳造技術の高度化”。
鋳造工学, 90(6), p266-273 (2018)
- 2) 戸羽篤也ほか：“3D 積層造形鋳型特性の定量評価法の開発”。
鋳造工学, 90(6), p292-297 (2018)
- 3) 金森陽一ほか：“積層造形砂型の表面粗さと積層段差”。
三重県工業研究所研究報告, 44, p36-39 (2020)
- 4) 伊藤恭祐ほか：“砂型積層造形を中子へ適用する際の造型条件の検討”。
三重県工業研究所研究報告, 45, p24-30 (2021)
- 5) 社団法人日本鋳造工学会：“鋳造欠陥とその対策”。
p44-52 (2007)
- 6) 社団法人日本鋳造工学会：“鋳造欠陥とその対策”。
p94 (2007)
- 7) 小松 登ほか：“鋳造時に発生するシェル中子のガス圧”。
鋳物, 47(3), p156-162 (1975)
- 8) 津田昌利ほか：“無機化合物で塗型したフラン鋳型と球状黒鉛鋳鉄溶湯との界面効果”。
鋳物, 51(9), p519-525 (1979)
- 9) 一般財団法人素形材センター：“鋳型の生産技術”。
P267-272 (1995)
- 10) 富田祐輔ほか：“熔融法人工砂を用いたバインダジェット式砂型積層造形における砂の流動性に及ぼす粒径の影響”。
鋳造工学, 93(3), p115-120 (2021)