

3D プリンタを活用した砂型の低資源化設計

服部 俊*

Designing Sand Molds for Reducing Resources by Using 3D Printer

Suguru HATTORI

The mold made for casting by 3D-printing or additive manufacturing technology has a problem of high cost of wasting artificial sand. This research tried to save the amount of artificial sand for 3D-printing by introducing new designing methods of rib-reinforced molds and separated mold parts.

Key words: 3D Modeling, 3D Printing, Sand Mold, Rib-reinforced Mold, Separated Mold Part

1. はじめに

鑄造に必要な砂型を、その設計データをもとに専用の 3D プリンタで作成する手法は、近年では適用が進み、装置や砂型材料である人工砂、バインダの開発、適用した試作例、各種設計技術など様々な報告がある¹⁾。弊所でも砂型の特性²⁾や、上下の主型を一体化した砂型設計³⁾など、その特徴を活かす方策を検討してきた。

しかし、従来手法である木型をベースに砂型を作成する際に用いられる天然けい砂と比べると、3D プリンタ砂型に用いられる人工砂は非常に高価である。そのため、バインダが付着し砂型として使用された人工砂は、一般的に廃棄されるが、そうでない部分（砂型の周囲）の人工砂は極力回収される。回収された人工砂は、分級の後、再度 3D プリンタに投入される。このことを考慮すると、3D プリンタを利用した鑄造においてその生産コストを下げるための手法の一つとして、バインダが付着した人工砂の比率、ひいてはその量を低減できる砂型の軽量化設計は有効であると考えられる。

これに関し、3D プリンタならではの砂型設計として「リブ強化手法」が提案されている^{4,5)}。一般に、砂型の主型は、中に溶湯を注ぐためにシェル形状と

なっている。従来手法の場合、砂型の造形に木型や型枠を使うため、砂型のシェル厚を任意に変更することは難しい。これに対し、リブ強化手法は、3次元 CAD を使うため、鑄造品の肉厚が薄い部分は砂型のシェル厚を薄くするなど、任意に設計することができる。その一方で、砂型の表面には、クロス状のリブを付ける。これにより、砂型を軽量化しつつ、リブにより鑄造時に必要な砂型の強度を確保することができる。このリブ強化手法による砂型の軽量化には、保温や冷却速度制御の効果もあるとしている⁶⁾。

ここでは、文献⁴⁾を参考にした 3D プリンタでのリブ強化砂型、また、3D プリンタならではの方案設計により湯道部分を複数の砂型のパーツに分けたパーツ化砂型など、軽量化に関する砂型作成を試みたので報告する。

2. 実験方法

2. 1 実験に供するリブ強化砂型の設計

図 1 に、実験に供する鑄造品の形状を示す。ここで、文献^{4,5)}に説明されている砂型強度に関する必要条件を説明する。溶湯の流れや凝固収縮、反応ガスの発生、砂型の熱膨張やひずみ、リブ部分への応力集中など、砂型が受ける影響を無視し、砂型のシェルの肉厚が一定であると仮定し、さらに溶湯を十分ゆっくりと注湯して動的な影響が生じないものと仮

* 金属研究室

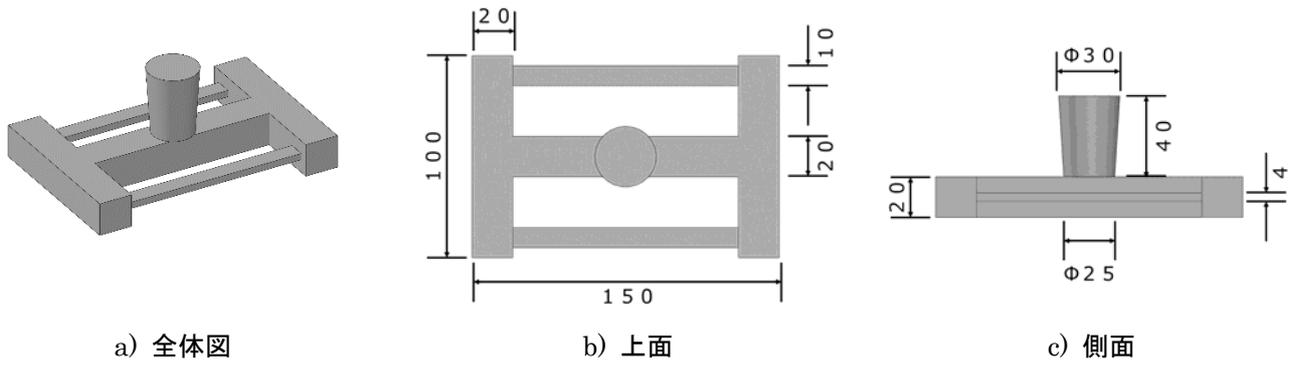


図1 実験に供する鋳造品のモデル (単位: mm)

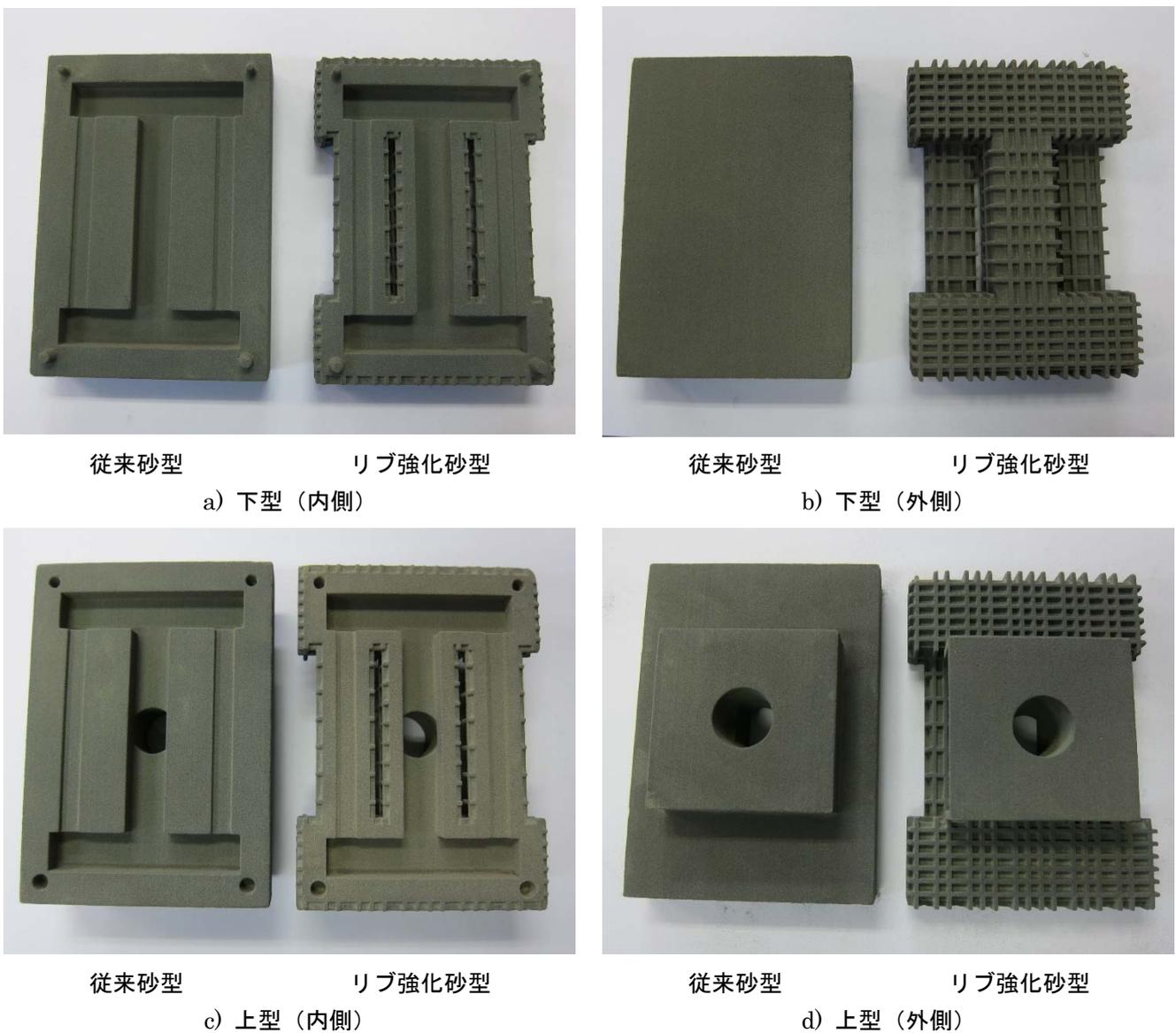


図2 従来砂型とリブ強化砂型

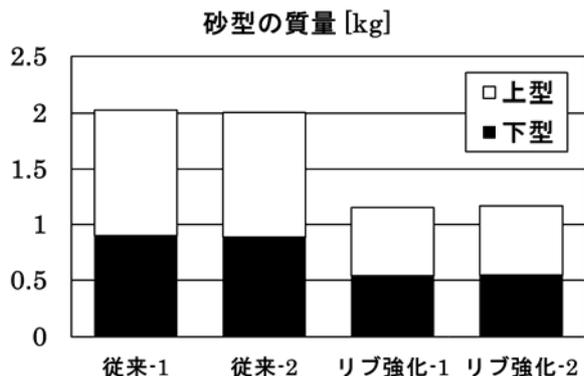


図3 従来砂型とリブ強化砂型の質量の比較

定する. 次に, 温度 T により変化する砂型の強度を $\sigma(T)$, 溶湯の高さを表す変数を h , その最大値 (すなわち鋳造品の高さ) を h_{\max} , 砂型のシェルの肉厚を d とする. さらに高さ h における水平断面を考え, 砂型のシェル部分の溶湯側内面と水平断面が交差して作られる周部分の長さを $l(h)$, その最小値を l_{\min} , そして, リブ部分の水平断面積の総和を S_a , 溶湯の密度を ρ , 重力加速度を g とする. このとき, リブ強化砂型が注湯時に破壊しないための必要条件は二つ考えられる. 一つは, 砂型強度 $\sigma(T)$ が溶湯最深部にあたる底面の圧より大きいとの条件, すなわち

$$\sigma(T) > \rho g h_{\max} \quad (1)$$

である. もう一つは, 砂型のシェル部分の最小断面積 $l_{\min}d$ とリブ部分の総断面積 S_a の和により与えられる砂型の総断面積 (安全側) に, 最大せん断応力 (安全側として砂型強度 $\sigma(T)$ を代用する) を乗じて得られる許容せん断力が, h から h_{\max} までの溶湯により砂型壁面が受ける力より大きいとの条件, すなわち

$$\sigma(T)(l_{\min}d + S_a) > \int_h^{h_{\max}} \rho g h l(h) dh \quad (2)$$

である.

文献⁴⁾ではアルミニウム合金鋳物 ASTM-A356 での実験であることを考慮し, 形状をスケーリングにより小さくしたうえで本研究での供試材料である鋳鉄に合わせたリブ強化砂型の設計を検討した. 具体的には, 鋳造品を文献⁴⁾比で 50%の大きさとしたうえで, 砂型のシェル厚を $d=12.5$ mm, また, リブの幅, 高さ, スパンをそれぞれ 2.5 mm, 3 mm, 4 mm としたリブ強化砂型を造形した.

(1), (2)式に基づき, 砂型の強度が問題ないかを検証する. ここで, 溶湯最深部 (鋳造品の底面) を水

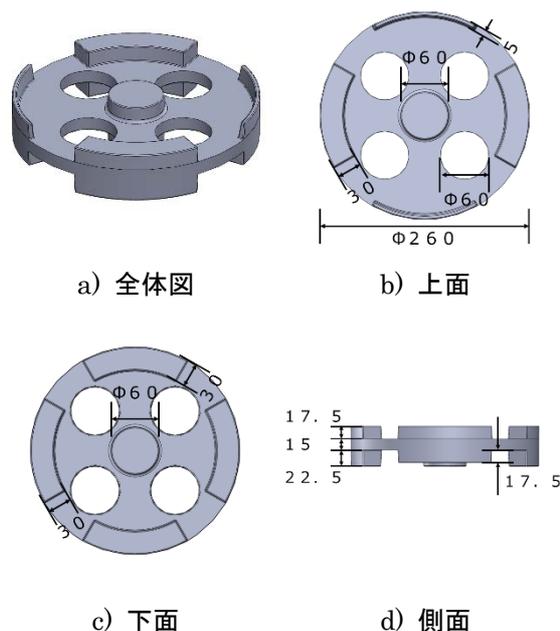


図4 パーツ化砂型の鋳造実験に供する鋳造品のモデル (単位: mm)

平面とする断面を考える. このとき, 交差する砂型のリブの総数は 72 個となる. ゆえに $S_a=2.5 \times 3 \times 72=540$ mm²である. $l(h)$ は図 1 より h の関数として求まる. $h_{\max}=60$ mm, $l_{\min}=78.5$ mm, また $\rho=7.3$ g/cm³, $g=9.8$ m/s²と仮定して両式を計算すると, $\sigma(T) > 1.4$ N/cm²が得られる. この条件は, 弊所の過去の調査²⁾により温度によらず満足されるものと判断した.

また, 従来手法との比較を想定して, 同じ鋳造品を作成するための直方体状の砂型 (以下, 従来砂型と呼ぶ) も造形した. リブ強化砂型と従来砂型で, 最大外形, W185×L131×H78 mm が共通となるように設計した.

図 2 にリブ強化砂型および従来砂型を示す. 3D プリンタはシーメット社 SCM-10 を用い, 材料には同社の供給する人工砂 (Catalyst Coated Sand) および樹脂 (Furan Binder) を用いた. 主型の上下を 1 組とし, リブ強化砂型と従来砂型を 2 組ずつ造形, 作成した. 砂型の質量を測定したところ図 3 のとおりであり, リブ強化砂型は従来砂型に対しおよそ 50%軽量化されており, 人工砂の使用量を 50%減らすことができた.

2. 2 実験に供するパーツ化砂型の設計

パーツ化砂型は, 鋳造品の各部位にあたる砂型を

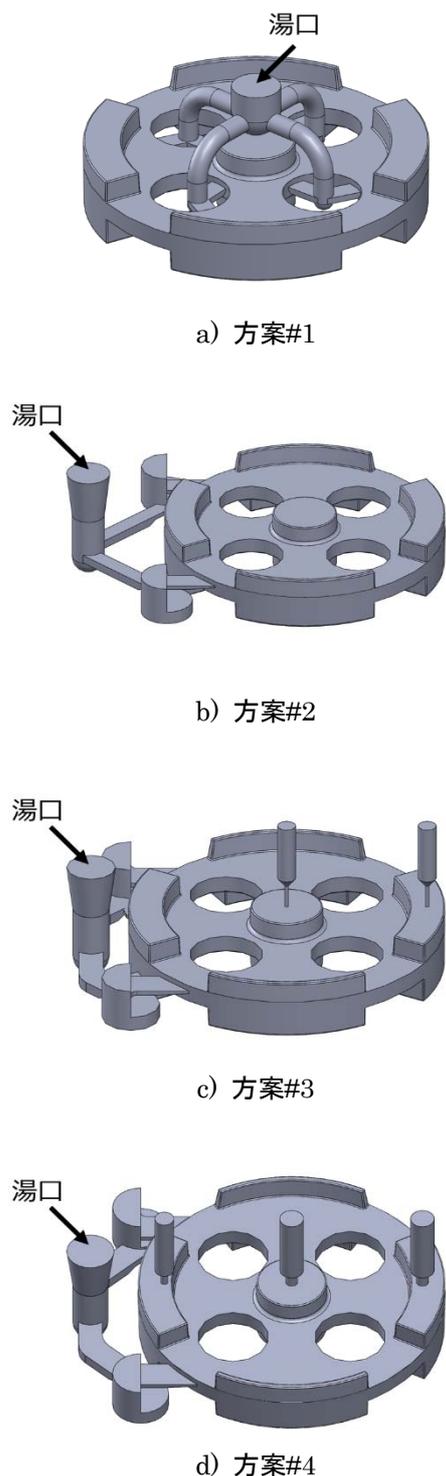


図5 パーツ化砂型の鑄造実験に供する鑄造品の鑄造方案

パーツと称し、それらを個々に造形したものを組付けて1組の砂型とするもので、それぞれのパーツに適切な砂型の肉厚を決定できるため、一体で造形する砂型よりも人工砂の使用量を減らすことができる

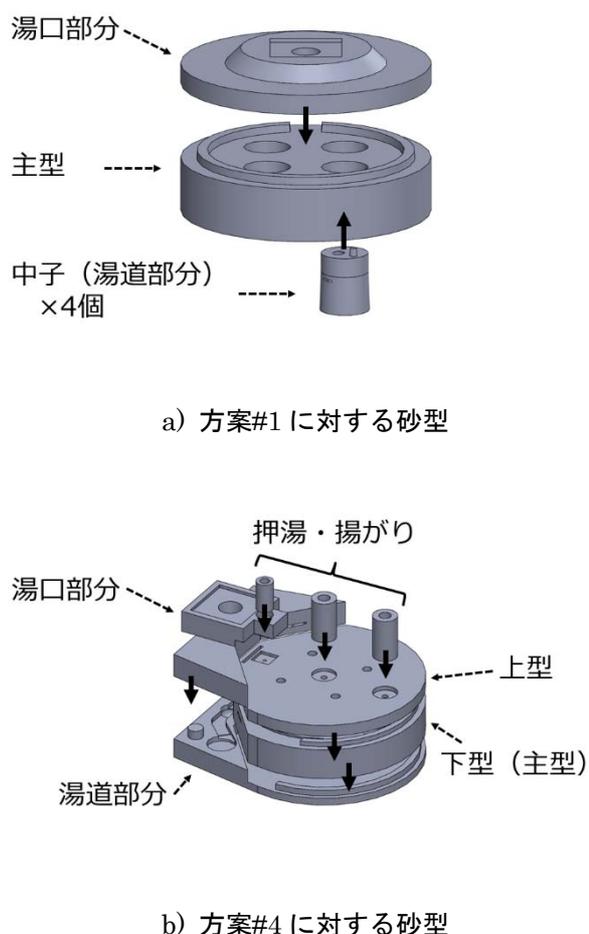


図6 パーツ化砂型の鑄造実験におけるパーツの概要 (実線矢印のとおり組付ける)

と考えられる。図4に実験に供する鑄造品の形状を示す。鑄造品は、円板の外周部分の上下に肉厚の異なる複数のリブがあり、中央部分も厚肉となっており、また4つの円板状の穴がある。これに対し、4種類の方案(#1~#4)を設計した。

図5および図6に設計した#1~#4の鑄造方案、また例として方案#1, #4について砂型のパーツ化の概要を示す。方案#1は円板状穴に対応する中子内に湯道の流路およびセキを設けており、本体部分に分割面が無いのが特徴である。方案#2~#4は円板部分の側面にセキを設けるように湯道の流路を設計し、3つの方案は湯道、セキの寸法や押湯、揚がりの形状が異なる。砂型内部の空洞部分の未硬化砂を抜くため、本体部分の分割面の設計を工夫した。

前節と同様に、3Dプリンタにて砂型のパーツを造形した。その後、エアーなどで砂型内部の未硬化砂



図7 パーツ化砂型の組付け例 (方案#4)

表1 供試材料の化学成分 [mass%]

チャージ (注湯した砂型)	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu
1 (#1×2組)	3.96	2.49	0.12	0.020	0.003	0.039	0.005
2 (#2×2組)	3.95	2.45	0.12	0.022	0.003	0.050	0.006
3 (#3×2組)	3.99	2.36	0.11	0.019	0.004	0.037	0.005
4 (#4×2組)	3.94	2.48	0.12	0.020	0.003	0.034	0.004

を十分に抜いた。その後、図7に例示するとおりパーツを組付け、1組の砂型を完成した。これを方案#1~#4に対し2組ずつ、計8組作製した。

2. 3 鑄造実験

供試材料は、JIS G 5502における球状黒鉛鑄鉄FCD400-18に相当し、原料として高純度銑鉄、添加剤としてFe-75%Siを用いた。これらを目的の組成に調整した後、容量50kgの高周波誘導炉にて溶製した。これを同じ組成にて計4チャージ用意し、それぞれ1500℃にて取鍋に出湯した後、直ちに球状化処理と接種処理を行い、1400℃にて鑄造用フィルターを取付けた砂型に注湯した。凝固後、型ばらしにより鑄造品を取出した後、ショットブラストにて表面を処理した。表1に化学組成を示す。

3. 実験結果および考察

3. 1 リブ強化砂型の鑄造実験の結果

図8に得られた鑄造品を示す。すべての従来砂型およびリブ強化砂型において目的の形状の鑄造品が得られ、外観上の問題はなかった。

従来砂型では、溶湯の熱影響や凝固過程での膨張と収縮による砂型の崩壊はなく、得られた鑄造品の形状にも問題はなかった。

リブ強化砂型では、図9のように注湯後の凝固の過程でバインダが分解され砂型の砂が流出したが、得られた鑄造品の形状に影響はなく、砂型として必要な強度は確保されていたと判断できる。これは、鑄造用フィルターを設置したことや砂型が溶湯から受ける動的な影響があった一方で、砂型の砂が流出した時の溶湯温度が、既に共晶温度よりも十分に低かったためと思われる。

以上により、リブ強化手法により、人工砂の使用量を低減しつつ、従来砂型と同等の鑄造品を得ることができた。

3. 2 パーツ化砂型の鑄造実験の結果

図10に、得られた鑄造品のうちの1組の外観、およびもう1組について湯道を切断後、鑄造品を中央にて切断した断面を示す。方案#1では、中央上部の大きな外ひけと、未硬化砂の除去時に砂型を削ったことに起因するとみられる円板部分のふくらみが認められた。方案#2では、薄いリブ部分にて未硬化砂の除去が完全でなかったことに起因するとみられる鑄造の成形不良などがみられた。方案#3では、引け対策のため押湯を立てたが、まだ内引けが残っていた。また、円板部分の湯回り不良もあった。方案#4では、#3に比べ押湯の数を増やしその径も大き

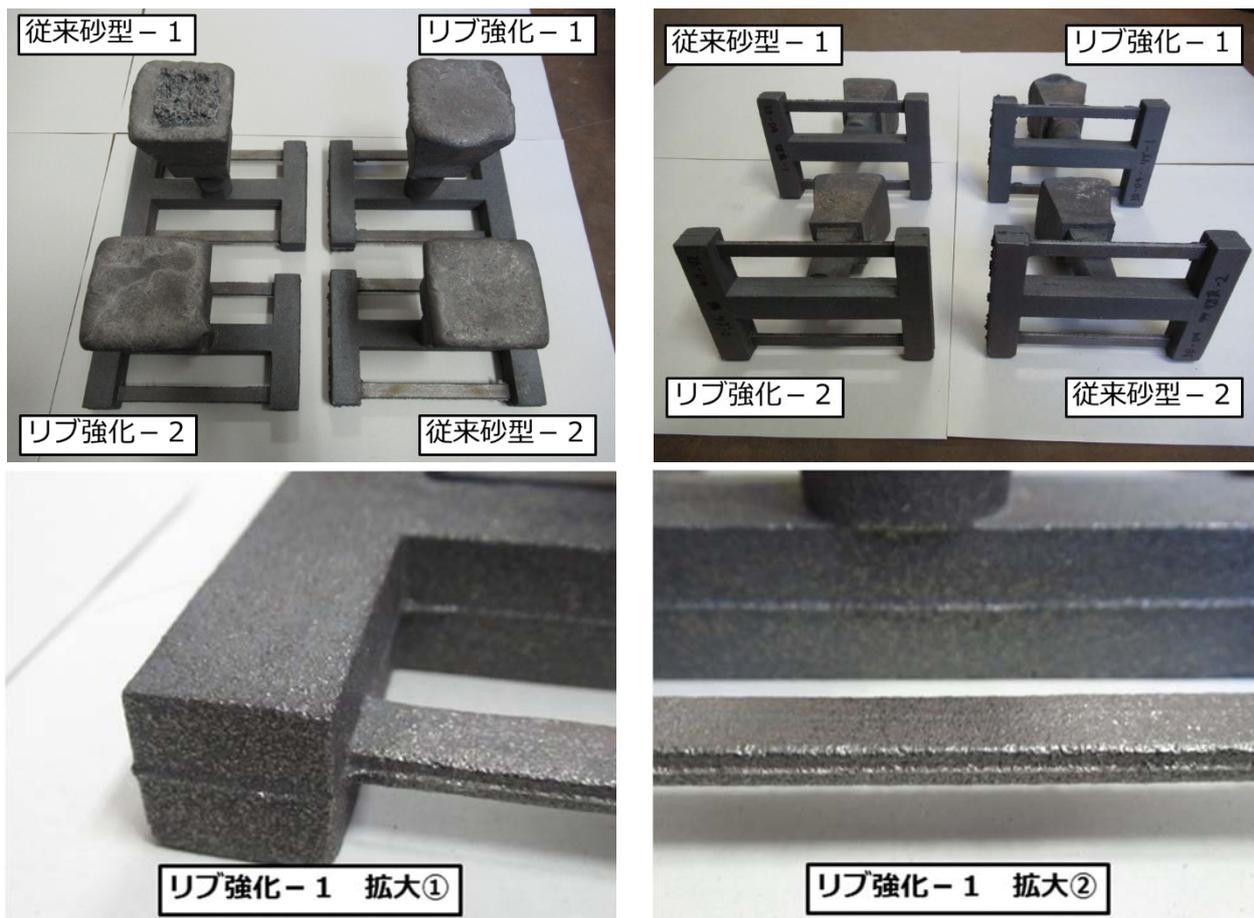


図 8 従来砂型およびリブ強化砂型の鑄造実験により作成した鑄造品

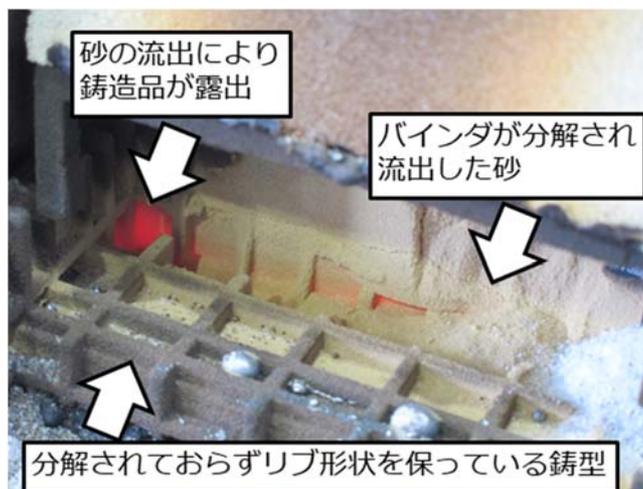


図 9 リブ強化砂型の鑄造実験における鑄鉄の凝固過程での砂型の分解

くしたが、ガス欠陥が認められた。

いずれの方案でも、砂が緻密に充填される 3D プリンタ砂型特有のガス抜き不良による欠陥、鑄鉄溶

湯の注湯条件に起因する湯回り不良などが認められた。

以上を表 2 に整理する。

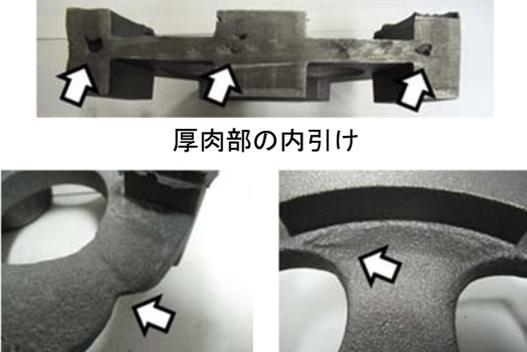
	鑄造品の外観	切断面および観察された主な欠陥
#1		 <p>中央部の内引け</p> <p>中央上部の引け，円板部分のふくらみ</p>
#2		 <p>リブ付近の外・内引け</p> <p>リブ部の砂残りによるくぼみ</p>
#3		 <p>厚肉部の内引け</p> <p>円板部分の湯回り不良，リブ付近の外引け</p>
#4		 <p>発生ガスによる欠陥</p>

図 10 パーツ化砂型の鑄造実験により得られた鑄造品とその切断面および主な欠陥

表 2 パーツ化砂型の各方案に対する実験結果

方案, 砂型の特徴	観察された主な欠陥	考察
#1 直上から注湯する。 円柱状穴に対応する中子内に湯道とセキを設けており、本体部分に分割面が無く、鑄造してもバリが発生しない。	中央の肉厚部分に内引けとその上面に外引け 円板部分に膨らみ	設計：この部分には直の押湯がなく、溶湯補給効果が薄かった。 3D プリンタ砂型特有の問題： 未硬化を抜くために強いエアなどを当てすぎると砂型まで削ってしまう。
#2 側面から注湯する設計だが、本体部分には分割面が無い。押湯は設けていない。	リブ付近に引け 外周リブの成形不良（くぼみ）	設計：極端な肉厚差があり凝固収縮により引けたため、溶湯で補給する必要がある。 3D プリンタ砂型特有の問題： 未硬化砂を抜く工程が不十分であった。 砂を抜く通し穴など設計変更が必要。
#3 #2 に対し湯道を少し変更。未硬化砂を抜きやすいよう主型と下型の形状を変更し、2か所の押湯を設けた。	外周と中央の肉厚部分に内引け 湯回り不良	設計：各部位に直の押湯があるが、細いため溶湯補給効果が薄かった。 溶湯：注湯温度が他に比べ低かった。
#4 #3 に対し上型の形状変更。また、鑄造品の押湯を太くし、かつ3か所とした。	中央の肉厚部分にガス欠陥	3D プリンタ砂型特有の問題： 細かい人工砂が緻密に充填されており、バインダと反応して発生するガスを十分に逃がせない。設計でガス抜きの対策が必要。

4. 結論

本研究では、3D プリンタ砂型における軽量化を目的に、砂型の壁面を薄くしつつ外リブにより補強したリブ強化砂型と、砂型を各部分に分けて作成したものを組付けるパーツ化砂型を試作した。リブ強化砂型では必要な強度を確保しつつ軽量化を実現した。またパーツ化砂型では3D プリンタならではの設計を行ったが、鑄造欠陥が認められたため、設計手法についてより検討したい。

参考文献

- 1) Jiayi Wang et al.: "Re-thinking design methodology for castings: 3D sand-printing and topology optimization". International Journal of Metalcasting, 13(1), p2-17 (2019)
- 2) 金森陽一ほか: "積層造形により作製した砂型の特性". 三重県工業研究所研究報告, 41, p95-101 (2017)
- 3) 服部 俊ほか: "三次元積層造形技術を利用した

鑄造用一体砂型の作製技術の開発". 三重県工業研究所研究報告, 41, p1-7 (2017)

- 4) Hao-long Shangguan et al.: "Controlled cooling of an aluminum alloy casting based on 3D printed rib reinforced shell mold". China Foundry, 15(3), p210-215 (2018)
- 5) Hao-long Shangguan et al.: "3D-printed rib-reinforced shell sand mold for aluminum castings". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 96(10), p2175-2182 (2018)
- 6) Cheng-yang Deng et al.: "Insulation effect of air cavity in sand mold using 3D printing technology". China Foundry, 15(1), p37-43 (2018)

(本研究は、法人県民税の超過課税を財源としています。)