

ねずみ鋳鉄によるマルエージング鋼積層造形体の 鑄ぐるみの接合性評価*

高川 貫仁**、黒須 信吾**、園田 哲也**、岩清水 康二**

マルエージング鋼積層造形体とねずみ鋳鉄の鑄ぐるみ基礎技術の確立を目的に、接合性に及ぼす鋳鉄の注湯温度及び体積比、積層造形体形状の影響について調べた。その結果、凸型の場合、注湯温度 1350℃ 及び 1400℃ では空隙が生じたが、1500℃ では良好な接合が得られた。ただし局所的な溶損も生じた。また空隙の発生箇所は、「上段上面の中央部分」及び「上段の揚がり側側面」に共通していた。形状をドーム型に変更した場合、1400℃ による鑄ぐるみでは、ドーム型（頂点中央）及びドーム型（頂点揚がり側）において良好な接合が得られた。ドーム型（頂点湯口側）においては、揚がり側にのみ、積層造形由来の微細な凹凸に溶湯が入らず空隙が生じ、接合面の平滑化についても検討する必要があることがわかった。

キーワード：ねずみ鋳鉄、金属積層造形、鑄ぐるみ

Evaluation of Cast-in Bondability of Maraging Steel Additive-manufactured Object by Gray Cast Iron

TAKAGAWA Takahito, KUROSU Shingo, SONODA Testuya and IWASHIMIZU Koji

Key words: gray cast iron, additive-manufacturing, insert

1 緒言

近年、省資源・省エネルギーの観点から機械部品の軽量化や高機能化、多機能化が求められている。鋳鉄部品においても同様の要求が高まっており、大幅な特性向上には機能部品や異種材料との複合化が有効な手法となる。一方、形状の自由度により飛躍的な特性向上を見込める製造プロセス技術に金属積層造形技術がある。金属積層造形技術は、従来の加工法では不可能な三次元複雑形状の金属部品の造形が可能であり、航空宇宙部品をはじめ医療関連部品、各種金型など幅広い分野への応用が進められている。しかし、大型部品の製造においては、装置による造形サイズの制約や造形コストが高いなどの課題もある。そこで、鑄造の鑄ぐるみ技術を活用して金属積層造形体と鋳鉄を複合化できれば、鋳鉄材料の大幅な付加価値の向上に寄与できるとともに、金属積層造形体の大型化という課題を補うことができる。

鑄ぐるみとは、鑄型内に予め固体金属部材（心材）等を置き、そこに熔融金属を流して凝固させて両者を一体化させる接合方法である。鑄ぐるみによる接合機構には、①固体金属表面が熔融する接合、②固体金属表面は熔融しないが金属成分が拡散する接合、③固体金属表面は熔融せず接合面におけるアンカー効果による機械的な接合がある¹⁾。鑄ぐるみ接合は、同種材料や異種材料の接合

も可能であり、マルエージング鋼積層造形体のアルミニウム溶湯や球状黒鉛鋳鉄溶湯による鑄ぐるみ研究も行われている²⁾³⁾。

本研究では、鋳鉄溶湯には振動減衰能や熱伝導性、摺動性などが鋼より優れるねずみ鋳鉄、金属積層造形体には金属積層造形における汎用鋼材であるマルエージング鋼を用い、マルエージング鋼積層造形体とねずみ鋳鉄の鑄ぐるみ基礎技術の確立を目的に、接合性に及ぼす鋳鉄の注湯温度及び体積比、積層造形体形状の影響について調べた。

2 実験方法

2-1 積層造形体の形状及び造形条件

鑄ぐるまれる積層造形体の形状及び寸法を図1に示す。図1(a)は異なる径の円柱を2段重ねたものである（以下凸型と記す）。図1(c)は凸型の上段を半球状にしたものであり、この形状を基準に図1(b)及び(d)は頂点位置を左右に振った形状である。以下、図1(b)～(d)を順にドーム型（頂点湯口側）、ドーム型（頂点中央）、ドーム型（頂点揚がり側）と記す。金属粉末は粒度分布 20～45 µm、平均粒径(D50) 35 µm のマルエージング鋼粉末を使用し、粉体床型レーザ照射式の金属粉末積層造形装置 (TRAFAM/要素技術研究機) により造形した。レーザはイッテルビ

* 令和5年度技術シーズ創生・発展研究事業（発展研究）

** 素形材プロセス技術部

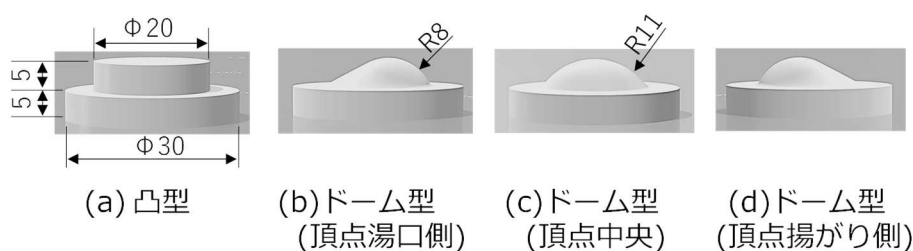


図1 積層造形体の形状及び寸法

表1 積層造形体(マルエージング鋼)の化学組成 (mass%)

C	Ni	Co	Mo	Ti	Cr	Al	Fe
0.01	17.6	9.0	4.9	0.80	0.15	0.15	残

ウム(Yb)ファイバーレーザであり、造形条件はレーザパワー350 W、走査速度 900 mm/秒、ピッチ 0.09 mm、スポット径 0.1 mm、積層厚さ 0.1 mm とした。造形の進行方向は、二次元スライスデータを幅 5 mm の帯状に分割し、レーザを短手方向に振りながら長手方向に造形した。また進行方向は 1 層ごとに 90°回転させた。積層造形体の固体発光分光分析結果を表 1 に示す。材質は 18%Ni マルエージング鋼であり、C は 0.01 mass%以下と低く、時効硬化元素として Mo、Ti 及び Al を含有している。18% Ni マルエージング鋼の融点は 1427~1454°C である⁴⁾。

2-2 铸ぐるみ実験方法

铸ぐるみ試料及び铸造方案の概略図を図 2 に示す。凸型及び各種ドーム型の積層造形体は、下段部分を砂型に埋めて設置し、砂型から突出する上段が铸铁溶湯に铸ぐるまれる。堰は板形状で長さ 15、幅 10、高さ 5 mm である。铸ぐるみ試料の铸铁部分の高さは、凸型の铸ぐるみ実験においては 10、20 及び 50 mm の 3 水準とした。この場合の铸铁と積層造形体の体積比は順に、1.1、2.5、6.6 である。各種ドーム型の铸ぐるみ実験においては铸铁部分の高さは 10 及び 20 mm とし、铸铁と積層造形体の体積比は、高さ 10 mm の場合は 1.5、20 mm の場合は約 3.1 である。铸造方案は、铸ぐるまれる材料と接触した冷えた溶湯を吐き出すとともに、接触時間を長くするため、湯口の反対側に湯口と同様のサイズの揚がりを設置した。

実験は、予め積層造形体を設置した CO₂ 铸型に、高周波溶解炉で溶解した FC250 相当のねずみ铸铁溶湯を 1350~1500°C で注湯し铸ぐるみを行った。铸铁溶湯には注湯直前に Ba 系接種剤を 0.3 mass%湯面添加した。铸铁の固体発光分光分析結果を表 2 に示す。炭素当量 CE_L⁹⁾は 3.7、初晶温度 T_L⁹⁾は計算上 1213°C である。

得られた铸ぐるみ試料について光学顕微鏡により断面観察を行い、凸型及びドーム型の上段の接合性を評価した。また接合界面近傍について SEM-EDS による元素分析を行い、マルエージング鋼の合金成分であるニッケルの铸铁側への拡散状態を調べた。

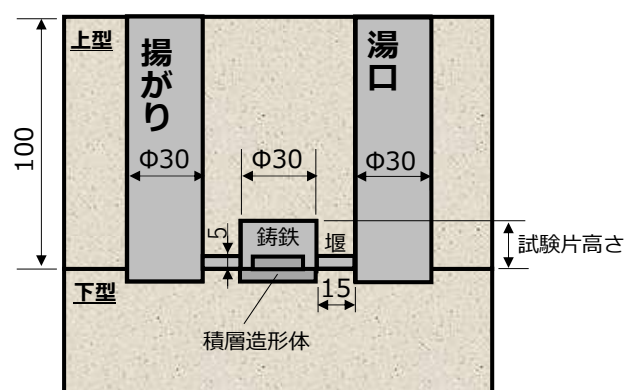


図2 铸ぐるみ試料及び铸造方案概略図

表2 ねずみ铸铁の化学組成(mass%)

C	Si	Mn	P	S	Fe
3.0	1.8	0.65	0.04	0.05	残

3 結果及び考察

3-1 接合性に及ぼす注湯温度及び体積比の影響

図 3 に凸型の積層造形体を注湯温度 1350°C、1420°C 及び 1500°C で铸ぐるみした試料の断面組織写真を示す。接合の良否については、界面に空隙がある場合は接合不良であり、空隙が無い場合でも積層造形体表面の溶融は出来るだけ少ない方が望ましい。図中、黄色で囲った部分は空隙が観察された箇所である。空隙は注湯温度の上昇及び体積比の増加に伴い減少した。これは注湯温度が高くなるに従い積層造形体の温度も上昇し、铸铁溶湯も凝固までの時間が長くなるためと考えられる。また体積比が増加した場合も、溶湯との接触時間が長くなることで積層造形体の温度は上昇し、铸铁溶湯も冷却速度が遅くなることで凝固までの時間が長くなるためと考えられる。

注湯温度 1500°C、体積比 2.5 及び 6.6 において空隙は観察されなかったが、湯口側において溶損が観察された。体積比 1.1 では空隙及び溶損の両方が観察された。空隙の発生については、注湯温度が高い場合でも一定時間以上の溶湯との接触時間が必要であることが推察された。

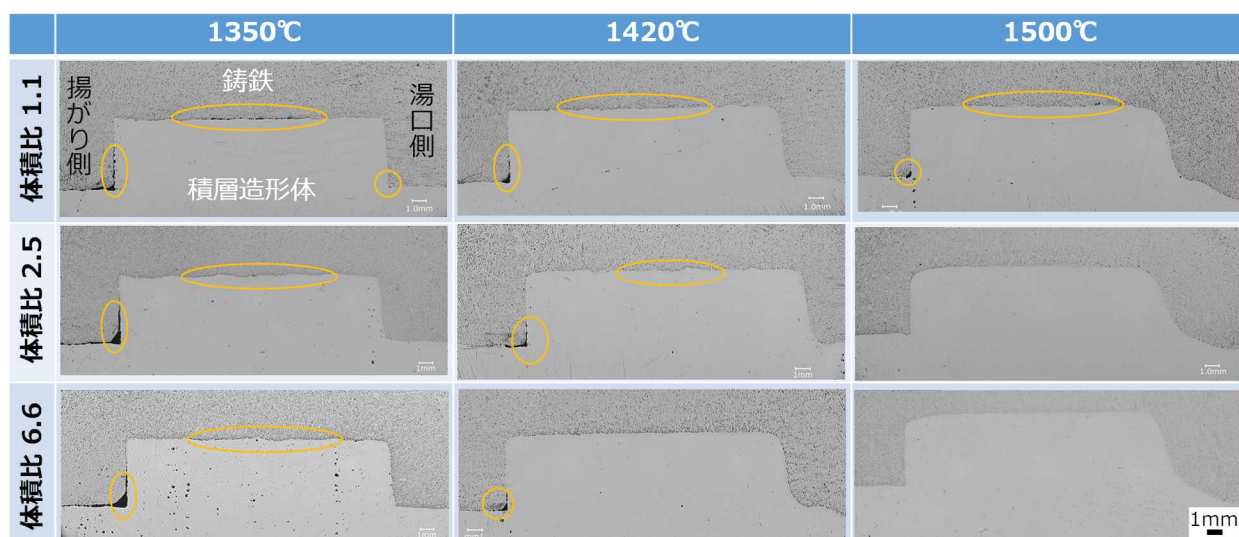


図 3 凸型積層造形体を鑄ぐるみした試料の断面組織写真

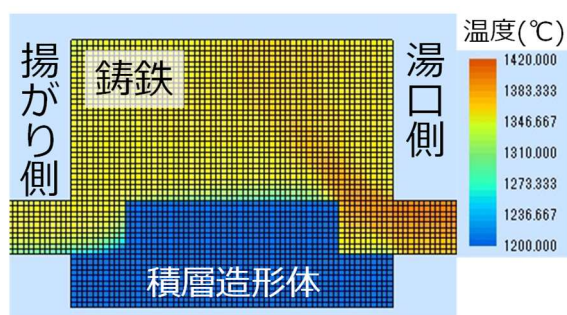


図 4 湯流れシミュレーションによる凸型積層造形体 鑄ぐるみ時の温度分布結果

また溶損については、1500℃では空隙が生じる短い時間でも溶損が生じることから注湯温度としては高いことが伺え、1420℃で良好な接合が得られるのが望ましい。

空隙の発生箇所は、「上段上面の中央部分」及び「上段の揚がり側側面」に共通していた。そこで、湯流れシミュレーションにより注湯時の温度変化を評価した。図 4 に、鑄ぐるみ部が鑄鉄溶湯で満たされた直後の溶湯の温度分布を示す。積層造形体の右側の溶湯温度はオレンジ色で他よりも高く、そのオレンジ色の部分は積層造形体の湯口側の上段側面に沿って上方向に伸びている。積層造形体の上段上面近傍の溶湯温度は、湯口側から中央部にかけて水色であり温度が低くなっている。このことから、堰から供給される高温の溶湯はキャビティに入ってすぐに積層造形体と衝突して跳ね上がり、積層造形体の上段上面には高温の溶湯が通過しないため「上段上面の中央部分」に空隙が発生しやすくなると推察される。また図より、揚がり側の積層造形体の上段側面は黄色であるが、下段との角部は濃い青色であり、溶湯温度が一番低い箇所となっている。ここは積層造形体の上段が湯の

流れの妨げになり溶湯の流速も遅く、冷めた溶湯が滞留するため空隙が発生しやすくなると推察される。特にこの角部は、注湯温度 1400℃において体積比を上げてても最後まで空隙が生じたことから、空隙が発生しやすくなると推察される。

図 5 に注湯温度及び体積比を変化させた場合の鑄鉄側へのニッケルの拡散距離を示す。ニッケルの拡散は、空隙による接合の良否判定と同様に、ニッケルの拡散が全く無い場合は接合不良であるが、拡散している場合でも出来るだけ少ない方が望ましい。図はニッケル含有量が比較的大きく変化する点のみをプロットして、ニッケル含有量及び拡散距離を簡略化して示したものである。ニッケルの拡散距離は場所別では湯口側が一番長く拡散する傾向にあり、また湯口側におけるニッケルの拡散距離は、体積比が大きくなる程、注湯温度が高くなる程長くなった。一方で中央部及び揚がり側の拡散距離は、1500℃において中央部の拡散距離が長くはなったが、体積比と温度の影響は顕著には現れなかった。これらの結果から、接合性の向上のためには注湯温度の上昇や体積比の増加は有効であるが、ニッケルの拡散を抑えながら全体を接合するためには、溶湯が積層造形体の一ヵ所だけ集中的に当たる形状は避け、出来るだけ高温の溶湯が界面全面を通過するような形状づくりが重要である。

3-2 接合性に及ぼす積層造形体形状の影響

図 3 及び図 5 より凸型は積層造形体の「上段上面の中央部分」及び「上段の揚がり側側面」に空隙が生じやすく、またニッケルの拡散は主に湯口側において大きく生じることが分かった。そしてその原因は図 4 より堰から入った溶湯が積層造形体の上段側面と衝突し上に跳ね上がることで、揚がり側では積層造形体の凸部が溶湯の流れの妨げとなるためと推察された。そこで出来るだけ積

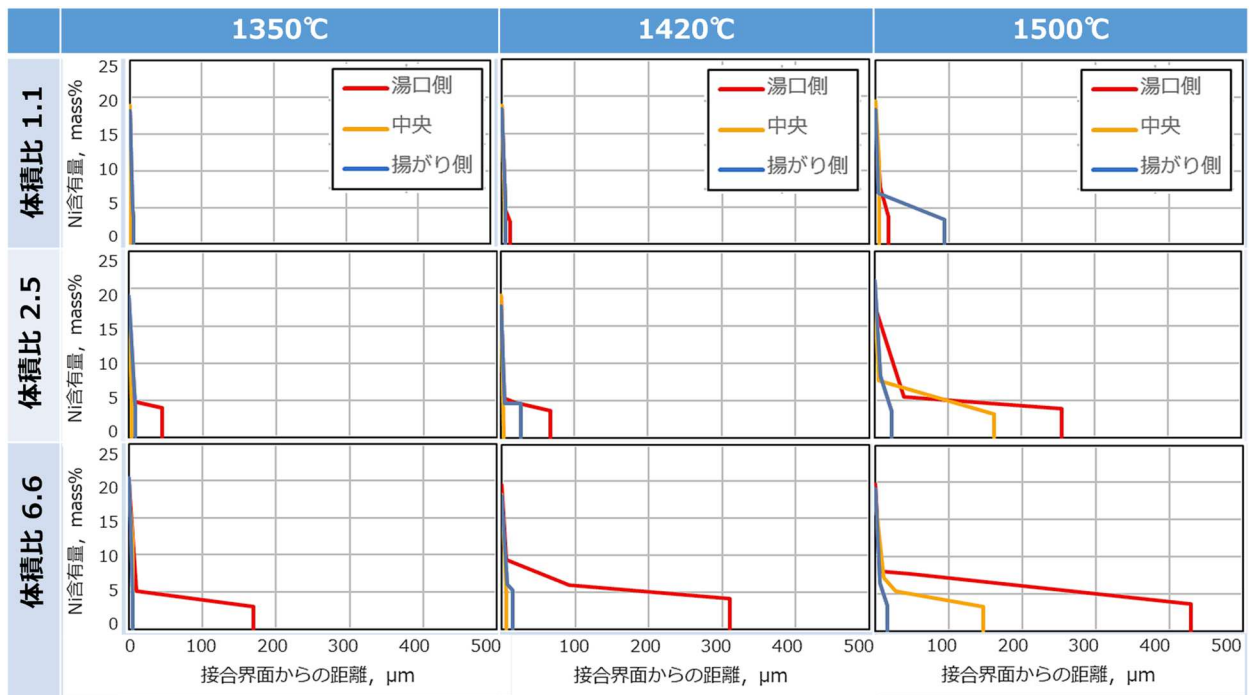


図5 凸型積層造形体を鋳ぐるみした試料の鋳鉄側へのニッケルの拡散距離

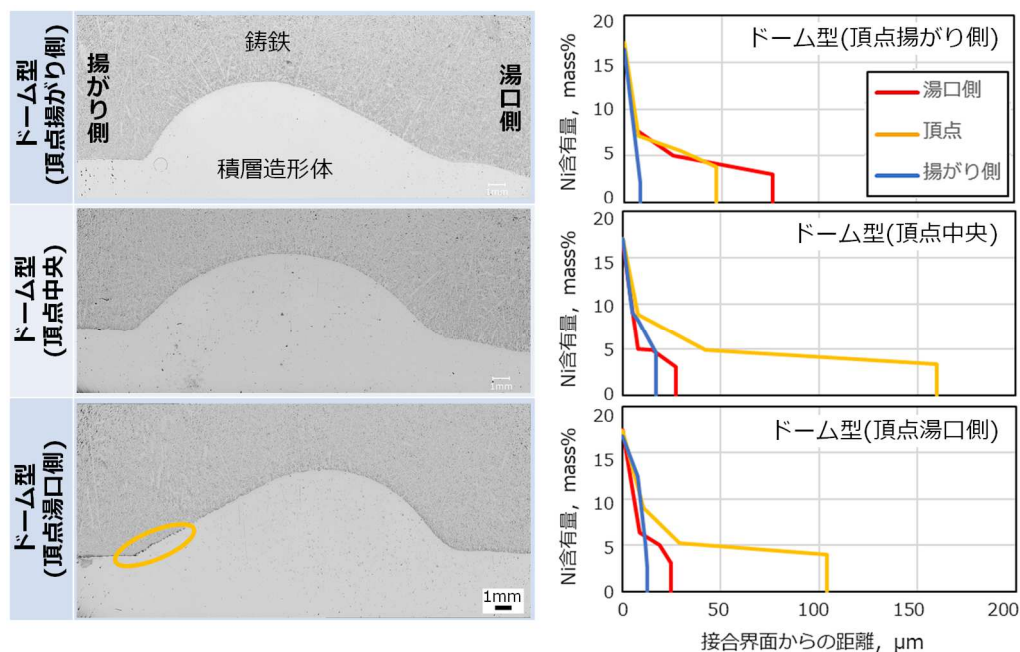


図6 ドーム型積層造形体を鋳ぐるみした試料の断面組織写真及び鋳鉄側へのニッケルの拡散距離

層造形体と溶湯との衝突を緩和させるために、積層造形体の上段に丸みを付けた3種類のドーム型について接合性を評価した。注湯温度は1420℃とした。

図6に各種ドーム型の積層造形体を鋳ぐるみした試料の断面組織写真及びニッケルの拡散距離を示す。ドーム型(頂点湯口側)において揚げり側に空隙が観察されたが、ドーム型(頂点中央)及びドーム型(頂点揚げり側)

ではドーム頂点付近及び揚げり側共に空隙は観察されず、良好な接合が得られた。これより注湯温度1420℃においても接合性を向上させることができた。ニッケルの拡散については、高温の溶湯が衝突しかつ温められやすい頂点部分において拡散が大きくなる傾向にあった。

そこで湯流れシミュレーションにより各種ドーム型における注湯時の温度変化及び流速をシミュレーションし

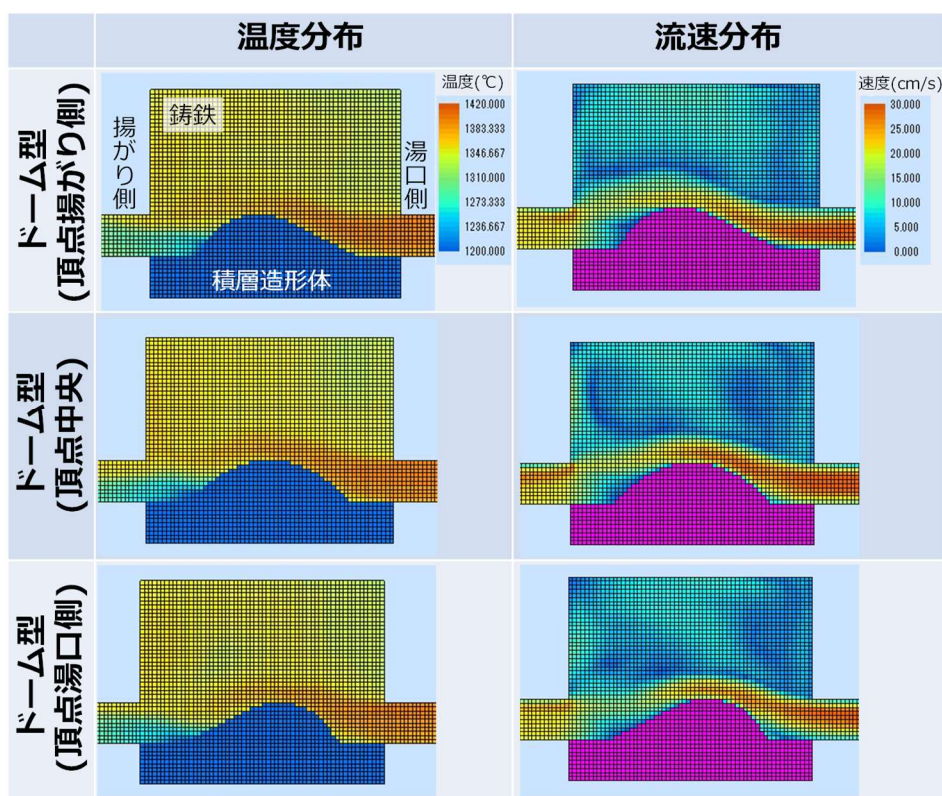


図 7 湯流れシミュレーションによるドーム型積層造形体を鑄ぐるみ時の温度分布及び流速分布結果

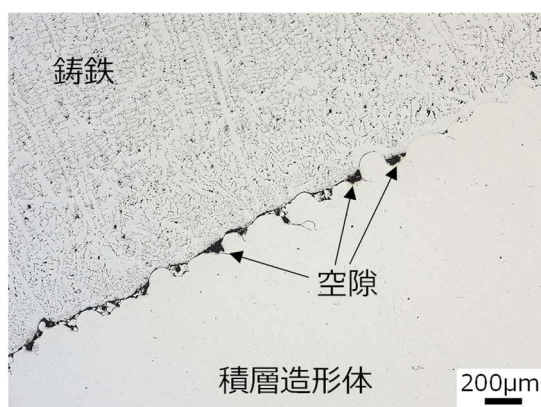


図 8 ドーム型 (頂点湯口側) 未接合部の組織写真

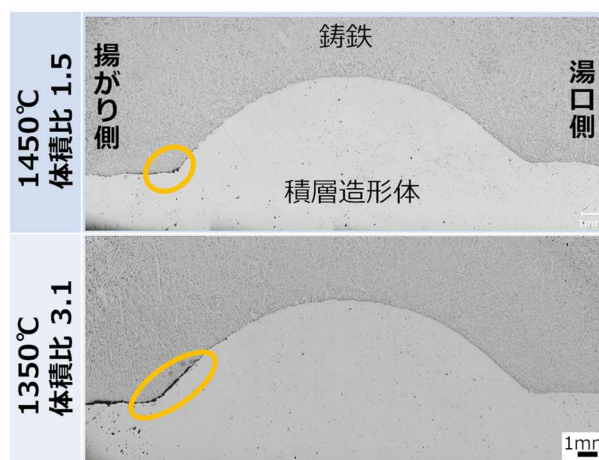


図 9 ドーム型 (頂点中央) における鑄ぐるみ条件を変化させた試料の断面組織写真

た。図 7 に鑄ぐるみ部が鑄鉄溶湯で満たされた直後の溶湯の温度分布及び流速を示す。溶湯温度はいずれの形状においても同様の傾向を示し、湯口側では積層造形体の表面形状に沿って高く、溶湯は積層造形体との衝突により上方向に跳ね上がることなくドーム形状に沿って流れていることが伺える。ただし湯がり側の温度はいずれの形状においても低くなっている。流速もいずれの形状においても、湯口側ではドーム形状に沿って速いが湯がり側では減速している。これらの結果から、積層造形体の「上段上面の中央部分」の接合性を改善できた要因は、上段上面の中央部分に丸みをつけ、堰からの溶湯が何の

障壁も無く直接中央部分に当たるようになったためと推察される。湯がり側の接合性については、ドーム型 (頂点湯口側) のみ空隙が観察されたが、シミュレーション結果では各種形状において差はほとんどなく、温度や流速以外の要因も考えられた。そこでドーム型 (頂点湯口側) の未接合部について詳細に観察した。

図 8 にドーム型 (頂点湯口側) の未接合部の組織写真を示す。積層造形体表面に微細な凹凸が見られ、その凹部に溶湯が入り込めなく空隙となっていることが分かる。この凹凸は積層造形体を作製する際に層状に積層していくために生じる段差で、ドーム型のような傾斜がある積

層造形体では傾斜が緩やかになるほど積層の段差が水平方向に広がり粉末形状が目立ち微細な凹凸が顕著に現れる。そのため、ドーム型（頂点湯口側）においては緩やかな傾斜面には微細な凹凸があり、かつその緩やかな傾斜面が高温の溶湯が届かない揚がり側に位置しているというこの二つの作用により揚がり側に空隙が発生したと考えられる。

次にドーム型（頂点中央）において、良好な接合が得られたため、注湯温度及び体積比をそれぞれ片方だけ 1 水準下げ、注湯温度 1420°C のまま体積比を 1.5、体積比 3.1 のまま注湯温度 1350°C の条件で铸ぐるみ試験を行った。光学顕微鏡による断面組織写真を図 9 に示す。積層造形体のドーム頂点近傍はいずれの条件においても良好な接合が得られたが、図揚がり側では空隙が観察された。このことから、積層造形体の上段上面については、常に高温の溶湯が当たるような対策が接合性の向上に効果的である。揚がり側の接合については、この部分は湯の流れが遅く冷えた溶湯が停滞しやすい箇所になるため、いかに高温の溶湯をこの部分に届けるかが重要になる。

これらの結果から、積層造形体に対して铸ぐるみを行う場合は、以下の対策が有効である。①堰から入った溶湯の流速をあまり落とすことなく接合面全面に行きわたる铸造方案又は積層造形体形状とする。②積層造形体の造形において、接合面にする面、特に溶湯の流速が遅くなる箇所の面には出来るだけ凹凸が生じないように配置し造形する。場合によっては、積層造形体を造形後、積層造形体をベースプレートからワイヤー放電加工で切り離すが、その切断面は平滑であるため、その平滑面を接合面に利用する。

4 結 言

(1) 凸型の铸ぐるみにおいて、注湯温度 1350°C 及び 1400°C ではいずれの体積比においても空隙が観察された。1500°C では体積比 2.5 及び 6.6 において良好な接合が得られたが、積層造形体は局部的に大きく溶損

した。

- (2) 凸型の空隙の発生箇所は、「上段上面の中央部分」及び「上段の揚がり側側面」に共通していた。
- (3) 湯流れシミュレーションの結果、凸型では堰から入った溶湯は積層造形体と衝突し上方に跳ね上がり、上段上面の溶湯温度が低下することを確認した。また揚がり側では積層造形体の上段が溶湯の流れの妨げとなり同様に温度が低下する傾向となった。
- (4) ドーム型の 1400°C による铸ぐるみでは、ドーム型（頂点中央）及びドーム型（頂点揚がり側）において良好な接合が得られた。ドーム型（頂点湯口側）においては、揚がり側にのみ、積層造形由来と考える微細な凹凸に溶湯が入らず空隙が生じ、造形体の形状によって、接合面の平滑化についても検討する必要があることを確認した。

謝 辞

本研究は、岩手大学大学院総合科学研究科 金型・铸造プログラム特別研究(長期インターンシップ)の研究テーマとして小林拓夢氏に多大な協力を頂いた。心から感謝します。

文 献

- 1) 野口徹, 鴨田秀一: 铸ぐるみにおける接合要件と界面の制御, 铸造工学, 70, p.920-927 (1998)
- 2) 谷内大世, 鷹合滋樹, 高野昌宏, 吉田勇太: 石川県工業試験場研究報告, 66, p.5-8 (2016)
- 3) 鈴木逸人, 長船康裕: 接合部形状および材料を変化させた金属 AM 造形材の铸ぐるみにおける接合部の評価, 铸造工学, 95, p.646-652 (2023)
- 4) 大和久重雄: マルエージング鋼, 日本金属学会会報, 3, p.719-728 (1964)
- 5) 菅野利猛, 岩見祐貴, 姜一求: 亜共晶鋳鉄の初晶晶出温度と炭素当量に及ぼす各種元素の影響, 铸造工学, 91, p.87-93 (2019)