

博士論文

PBF-LB/M を用いた離型剤浸透金型の製作
およびダイキャスト鑄造特性の評価

金沢大学大学院自然科学研究科

機械科学専攻

学 籍 番 号 : 2 0 2 4 0 3 2 0 0 9

氏 名 : 堀 裕 生

主任指導教員 : 古 本 達 明

提 出 年 月 : 2023 年 8 月 18 日

目次

第1章 緒論

1.1 緒言

1.1.1 ダイカスト鑄造とは

1.1.2 離型剤とダイカスト金型における課題との関係

1.1.3 付加製造法による金型製作

1.1.4 離型剤を染み出す金型

1.2 本論文の構成

第2章 ポーラス構造体のダイカスト金型への適用

2.1 緒言

2.2 ポーラス構造体の製作と評価

2.2.1 ポーラス構造体造形法

2.2.2 ポーラス構造体の気孔率の算出方法

2.2.3 ポーラス構造体の通気特性の評価

2.2.4 ポーラス構造体の通気特性の評価結果

2.2.5 造形方向の違いによるポーラス構造体の評価結果

2.2.6 カーボンコーティングを実施したポーラス構造体の評価結果

2.2.7 造形ラインの微小観察

2.2.8 造形ラインの微小観察の結果

2.2.9 ポーラス構造体とラティス構造の二層構造の評価

2.2.10 ポーラス構造体とラティス構造の二層構造の評価結果

2.2.11 ポーラス構造体の離型剤の透過特性の評価法

2.2.12 ポーラス構造体の離型剤の透過特性の評価結果

2.2.13 入れ子のみを用いた ADC12 アルミダイカスト材の湯流れ試験

- 2.2.14 ADC12 アルミダイカスト材の湯流れ試験結果
- 2.2.15 ポーラス金型を想定したラティス構造の解析方法
- 2.2.16 ラティス構造強度測定用のテストピース評価解析結果
- 2.2.17 ポーラス金型のダイカスト鑄造実験
- 2.2.18 ポーラス金型によるダイカスト鑄造実験の結果

2.3 結言

- 2.3.1 ポーラス構造体の造形
- 2.3.2 ポーラス構造体を用いた離型剤染み出し金型の特性

第3章 微小管金型の製作と鑄造における特性

3.1 緒言

3.2 微小管の造形方法①

- 3.2.1 微小管の断面形状検討
- 3.2.2 微小管の断面形状検討の結果
- 3.2.3 微小管造形におけるラティス構造の影響評価
- 3.2.4 微小管造形におけるラティス構造の影響評価の結果
- 3.2.5 ラティス構造を持つ微小管造形の通気特性評価
- 3.2.6 ラティス構造を持つ微小管造形の通気特性評価の結果

3.3 微小管の離型剤染み出し金型での鑄造①

- 3.3.1 微小管金型によるダイカスト鑄造実験
- 3.3.2 離型剤を染み出させて行う鑄造実験

3.4 微小管の造形方法②

- 3.4.1 微小管の造形角度における検討
- 3.4.2 微小管の造形角度における検討の結果

3.5 微小管の離型剤染み出し金型での鑄造②

- 3.5.1 離型剤を染み出させて行う鑄造実験

3.5.2 離型剤を染み出させて行う鑄造実験の結果

3.6 結言

第4章 結論

参考文献

謝辞

第1章 緒論

1.1 緒言

1.1.1 鋳造とは

表1に鋳造についての概要をまとめた。鋳造とは、溶融した金属を型に流し込み、成形品を得る製造方法のことで、身近な製品では自動車部品であるエンジンプロックやシリンダーヘッド、建築部品ではドアノブや鉄道のレール、航空宇宙部品ならタービンブレードなど

Table 1 Overview of casting

鋳造方法	特徴	メリット	デメリット
砂型鋳造	木型と呼ばれる原型を使って砂の中に成形品の空洞形状を作る[1,2]	複雑な形状でも成形可能となる形状自由度がある	・砂型を成形のたびに作り直す必要がある ・寸法精度に乏しい
金型鋳造	耐熱鋼で鋳型を作り圧力をかけず重力で溶融金属を流し込む[3,4]	・鋳型を使いまわすことができる ・寸法精度や機械的性質が良好な成形品が得られる	複雑で大型の製品や薄肉の部品の成形には不向き
ダイカスト鋳造	圧力をかけて高速・高圧で金型に溶融した金属を流し込む[5,6]	寸法精度が高く、製品の表面が綺麗に仕上がる上、ハイサイクルで生産することができる	機械強度が必要な部品には適していない
精密鋳造	原型にセラミックス粉を塗布した後、加熱して原型を溶かし除去して型を作り、この型に溶融金属を流し込んで製品を成形[7,8]	・流し込む金属にはほぼ制限なし ・複雑かつ薄肉の形状でも製作可能 ・表面粗度や寸法精度に優れた製造が可能	・使用するセラミックスの型は成形ごとに破壊して成形品を取り出すためランニングコストが増加

様々な部品が生産されている。鋳造では、使用される型を鋳型と言い、鋳造で作られた成形物を鋳物と言う。鋳造では目的に応じて異なる鋳型が使用されるが、大別すると砂型鋳造、金型鋳造、ダイカスト鋳造、精密鋳造が存在する。

本研究ではその中でも大量生産に適正があり、表面粗度が良く、複雑な形状でも成形が可能なダイカスト鋳造について取り扱う。ダイカスト鋳造の工程を図1に示す。

ダイカスト鋳造は、可動型と固定型、もしくは図2のように側面形状を成形するための摺動型に分割され、開放された金型表面にスプレを用いて離型剤を塗布し、金型を閉じた後に溶融アルミニウム合金を射出スリーブと呼ばれる筒状部品から高圧で充てんし、溶融金属の凝固後に成形品を取り出すプロセスである [9, 10]。高圧で射出することで表面における凝固不良のない高品位の鋳肌面が得られ、ハイサイクルな鋳造が可能となる利点がある [11, 12, 13]。一方、そのような工法のため金型温度は高くなる傾向にあり、金型温度が高温になることで発生する課題として存在するのが焼き付きである [14, 15]。

焼き付きとは、600 °C以上まで昇温したアルミニウム合金が金型の主成分である鉄と反応して Al-Si-Fe などの化合物層を形成し、金型の表面層に激しい劣化が生じる現象である [16, 17]。焼き付きによって成形品の取り出し時に強い抵抗が生じるため、ダイカスト鋳造現場では製造停止にもつながる大きな問題となる。ダイカスト鋳造金型では、このような不具合を防ぐため離型剤と呼ばれる薬剤を金型に吹きかけて金型の保護を行っている。

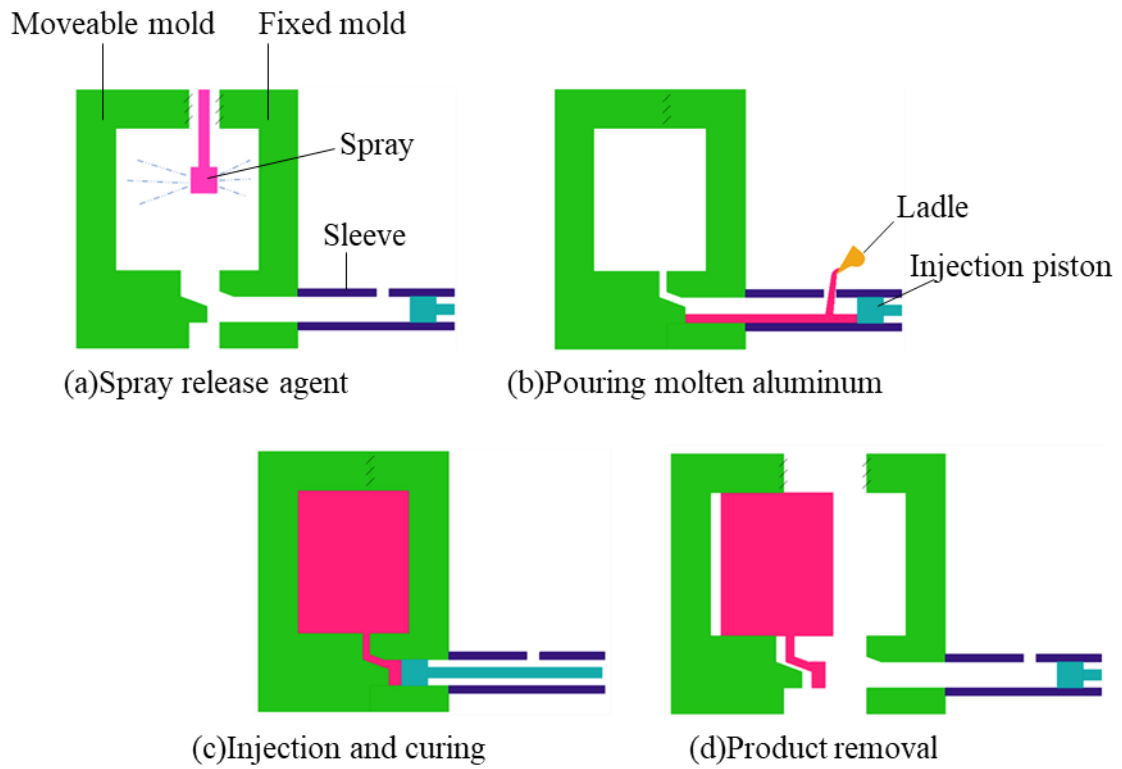


Fig.1 Schematic diagram of die casting process

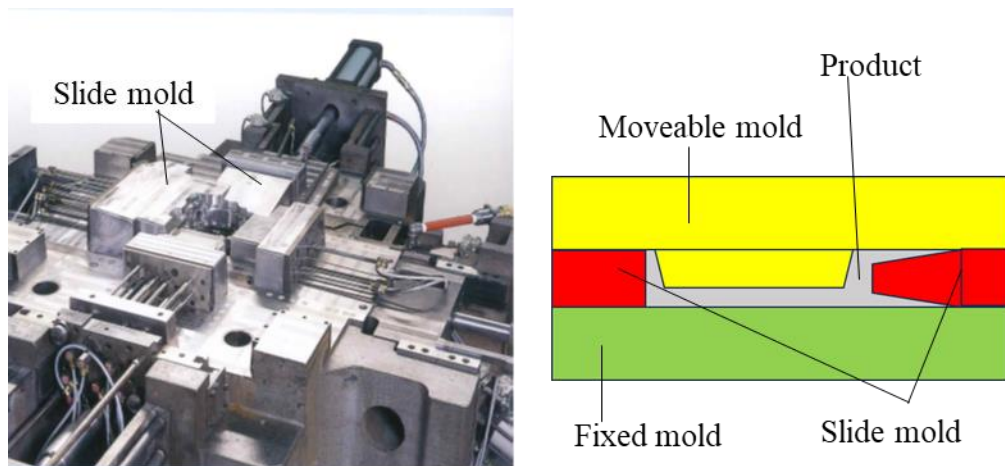


Fig.2 Top view of die casting mold

1.1.2 離型剤とダイカスト金型における課題との関係

離型剤は、金型と成形品との間に潤滑膜を形成させ、両者を隔てることで化学結合的な反応を防ぎ、離型時に潤滑剤の役割を果たして離型抵抗を低減する目的で使用される[18]。現在最も広く使用されている離型剤は、大別すると水溶性離型剤、油性離型剤に分けることができる[19]。

水溶性離型剤は、離型剤を水に溶かし込んだエマルジョンであり、ダイカスト鑄造時に金型に塗布することで離型剤の水分が蒸発し、溶質成分が金型表面で離型膜を形成する。また、水溶性離型剤は離型抵抗を低減するだけでなく、大量塗布されることで金型温度を低下させるという副次的な効果がある[20]。水溶性離型剤は、ダイカストマシンに取り付けられたスプレ機構によって圧縮空気とともに塗布される。しかし、離型剤が高温状態で金型表面に塗布されると、蒸気が発生して離型剤の付着を妨げるライデンフロスト現象が生じて金型表面に保護膜が形成できない[21]。そこで、金型内部に配置した水管に流通させる冷却水と、離型剤を吹きかけたときの気化熱によって離型剤が付着できる温度まで金型を冷却させる必要がある。一般的に水溶性離型剤では適正温度は 240 °C 以下とされる [18]。しかしながら、この製造工程はヒートチェックと呼ばれる課題を発生させる [22]。ヒートチェックとは、図 3 に示すように、熔融アルミニウム合金射出時には金型表面が加熱され膨張するが、内部はすぐに加熱されないため大きく変化しないことで圧縮の応力が発生し、製品取り出し後に離型剤を塗布すると金型表面が急激に冷却される一方で、金型内部は金型表面からの熱伝導により加熱し膨張することで引張の応力が発生する、その引張圧縮の応力発生の一連の繰り返しにより引き起こされる金型表面の熱疲労破壊のことである[23]。

油性離型剤は、少量塗布することで潤滑膜が形成され、水溶性離型剤と異なり 300 °C 以上でも金型表面に付着する特長を有している。そのため、焼き付きに対する抑制効果が高い [19]。また、少量塗布で潤滑膜が形成されるため、水溶性離型剤のように気化熱による急冷が生じないが、金型温度が下がりにくいいため金型温度制御が難しい。横井らは、油性離型剤による被膜は水溶性離型剤による被膜よりも離型抵抗が低減し、金型の冷却効果は小さいが

金型表面に生じる引張応力が小さいと報告している[19]. 表 2 に離型剤について特徴をまとめた.

これらの離型剤は, 前述したようにスプレで金型表面に塗布することが一般的である. しかしながら, ダイカスト金型は複雑な形状および図 2 のような構造を有することが多く, 図 4 に示したようなスプレの噴霧に対して離型剤が付着できない部分が発生してしまう. そのような状況では, 離型剤が付着できなかった部位で焼付きが発生してしまうという不具合がある.

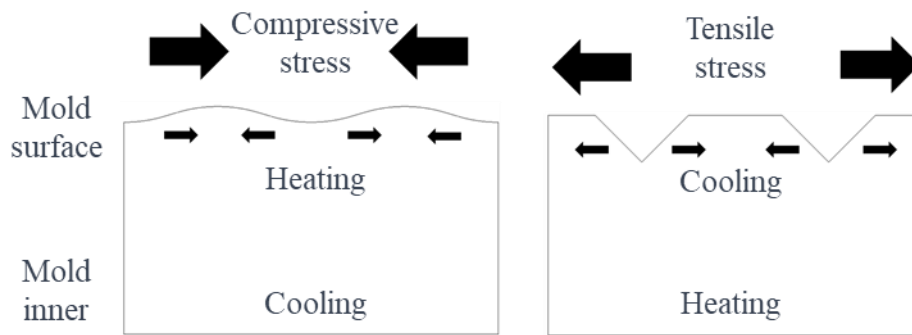


Fig.3 Schematic diagram of heat-checking

Table 2 Overview of release agent

離型剤種類	特徴	メリット	デメリット
水溶性離型剤	<ul style="list-style-type: none"> ・水で希釈して使用する ・大量に塗布 	<ul style="list-style-type: none"> ・金型温度を低下させる 	<ul style="list-style-type: none"> ・ヒートチェックの発生 ・付着可能温度が低い
油性離型剤	<ul style="list-style-type: none"> ・原液のまま使用する ・少量を塗布 	<ul style="list-style-type: none"> ・金型に発生する表面引張応力が少ない ・焼き付き抑制効果が高い 	<ul style="list-style-type: none"> 金型温度が高くなりすぎてしまうため, 金型温度制御が困難

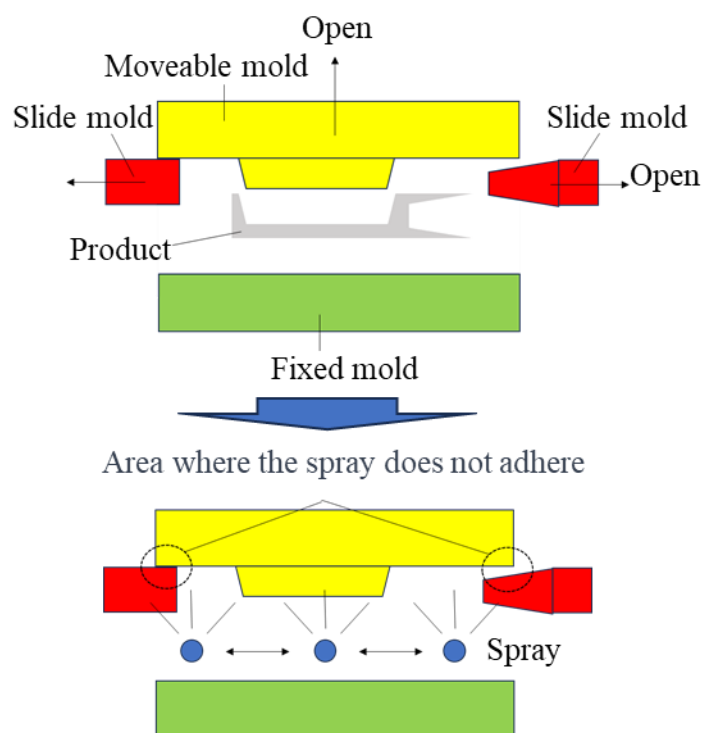


Fig.4 Area where the spray does not adhere

1.1.3 付加製造法による金型製作

近年では、冷却水を流すための経路を付加製造法で成形する金型部品が注目を集めるようになってきた。付加製造法とは樹脂や金属などの材料を結合させて3次元構造物を形成する加工方法である[24]。本研究では金属粉末を材料として取り扱う。金属粉末を材料とする付加製造法には、粉末床溶融結合法：Powder Bed Fusion, 指向性エネルギー蓄積法：Directed Energy Deposition, 結合剤噴射法：Binder Jetting などが存在する。粉末床溶融結合法は、金属粉末を0.03~0.05mmの薄い層状に敷き詰め、レーザービームもしくは電子ビームを照射して必要な部位を溶融凝固させ、これを繰り返すことで立体的な形状を作成する加工方法である[25, 26, 27]。指向性エネルギー蓄積法は、金属粉末とレーザービームを同時に噴射、照射し、目的の場所に溶融凝固させて形状を成形する加工方法である[28]。結合剤噴射法は粉末床溶融結合法と同様に、金属粉末を層状に敷き詰め、これに結合剤を噴射して固め、積層後に焼結する加工方法である[29]。現在、金型を付加製造法で製作する際には多くの場合粉末床溶融結合法が用いられている[30]。粉末床溶融結合法の造形における流れを図5に示す。粉末床溶融

結合法は指向性エネルギー蓄積法と比較して、1層ごとの厚みが0.03~0.05mmという薄層を少しずつ積み重ねていくことにより、内部に微細な形状を形成することができること[31]、さらに結合剤噴射法では造形後の緻密化を目的とした焼結プロセスにより収縮が発生するが[29]、粉末床熔融結合法ではそれが無いことが理由として挙げられる。一方で、指向性エネルギー堆積法は金型の一部のみを造形できることなどから金型補修での利用が広がっている[28]。

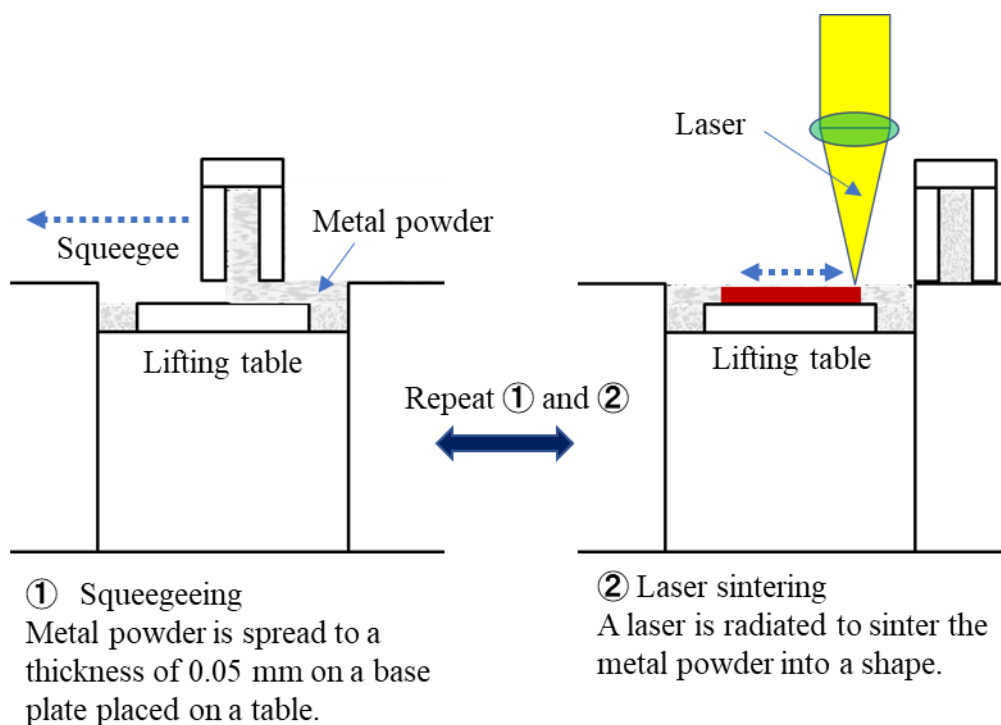


Fig.5 Powder bed fusion (Laser beam melting)

このような利点を生かしてダイカスト用の金型では従来のドリル加工では配置できなかった部位に冷却配管を形成し、効率的に高温部位を冷却できる、形状に沿った冷却管が提案されている。従来のドリル加工では直線的な穴を金型に裏側から加工して作成しており、冷やしたい部位に対して局部的もしくはライン状に冷却管が設計されている[32, 33]。ダイカスト鑄造では前述の通り、600℃を超える溶融アルミニウム合金が金型内部に流し込まれ、焼き付きやヒートチェックなどの不具合を発生させるが、冷却管に水を流し、金型を冷却することによりそれらの不具合が発生しにくい温度まで金型温度を低下させるため、ダイカスト金型には冷却管が必要不可欠なものとなっている[34, 35]。この工法では、形状によって配置できない部位が発生し、その部分は高温のまま前述のような課題が残留してしまう状態となっていたが、付加製造法による形状に沿った冷却管がこれを解消することに寄与した。形状に沿った冷却管は、特に細部にまで配置させることができるため効率的に金型が高温になる部位を冷却することができ、金型温度分布を均一にすることが可能となる[36, 37, 38, 39]。

付加製造法を用いた金型には、他にもポーラス構造体という多孔質材料を付加製造法で成形し、これを金型に一体造形して、金型のキャビティ内に残留する気体を排気し、生産される製品のガス欠陥を低減する目的で使用する手法が提案されている [40, 41, 42, 43]。

1.1.4 離型剤を染み出す金型

上述のような付加製造法を用いた金型について研究が進められる中、本研究では、ダイカスト金型への離型剤塗布について、離型剤が金型内部から染み出す機構を提案し、図4のようなこれまでのダイカスト鑄造における離型剤のスプレ塗布方式では十分に塗布できない部分が発生してしまうという課題に取り組む。具体的には、図6のように付加製造法で微小な気孔を有した造形を行って金型の必要箇所に配置し、微小気孔を離型剤の染み出す吐出口として利用する。吐出口には、形状に沿った管形状を接続させ、金型内部から離型剤を圧送することで適切な量の離型剤が必要なポイントに塗布されることを可能とする。このような構想は、ダイカスト鑄造業界で検討がなされてきたが、金属材料で微小気孔を成形する手法

においてダイカスト金型で使用できる材料が硬さ等の耐久性の観点で困難であること, 微小気孔の空隙サイズを制御することが困難であることから実現されていない.

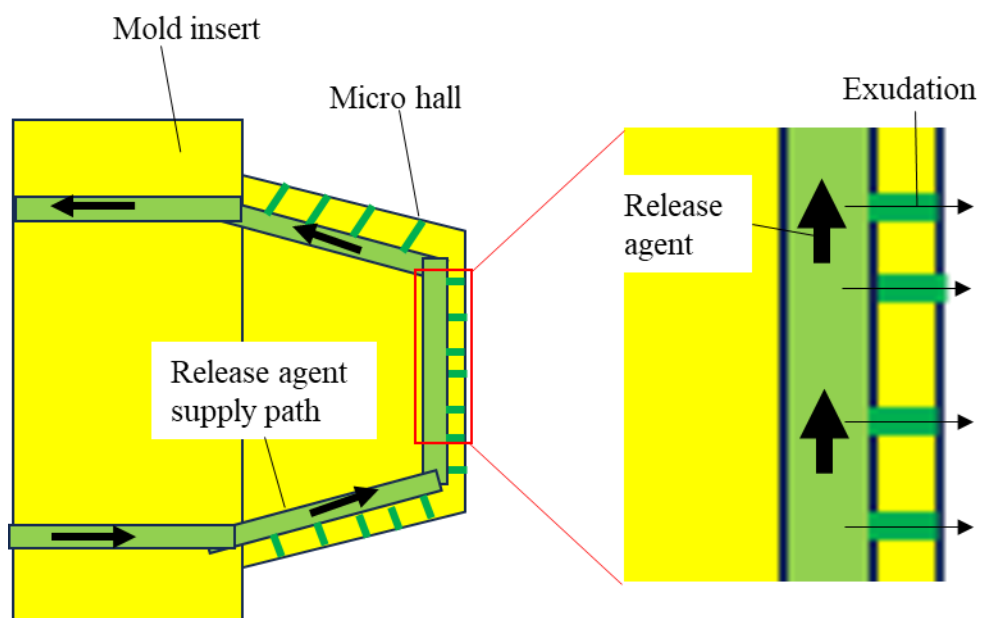


Fig.6 Schematic diagram of mold exuding release agent

1.2 本論文の構成

本論文は第 1 章から第 4 章で構成されており，以下に各章の概要について述べる．

第 2 章では離型剤を染み出させることができる気孔としてポーラス構造体を粉末床溶融結合法にて造形するためのレーザ条件についてレーザ走査速度に着目して検討し，ポーラス構造体の特徴，特性について検証した結果を提示した．この時，レーザ走査速度によって変化する金属粉末の溶融凝固状態について詳細に観察し，ポーラス構造体の成形メカニズムについても考察を行った．また，実際にポーラス構造体をダイカスト金型で使用して離型剤を染み出させながら鋳造した際の結果からその影響についても考察した．

第 3 章では離型剤を染み出させる気孔に粉末床溶融結合法で造形した微小管を適用するため成形する微小管の設計時の断面形状，サイズ，造形方向に対する管の角度およびその造形に係るレーザ条件を検討し，造形した微小管について油性離型剤を浸透させたときの特性について提示した．この章では特に，造形を行う際の熱伝導性が及ぼす粉末の溶融凝固メカニズムに着目しながら微小気孔の形成に大きく影響を及ぼす因子について考察した．また，その結果得られた微小管を実際にダイカスト金型で使用した際の結果からその影響についても考察する．

第 4 章では，本研究から得られた結果を総括的に論ずる．

第2章. ポーラス構造体のダイカスト金型への適用

2.1 緒言

近年、付加製造法を使って金型を製作する手法が盛んに行われている。一般的に利用されることが多いのは射出成形やダイカスト鋳造で、金型の冷却水管を成形品の形状面に沿った形に設計することでより効率的な冷却機能を付与することができる三次元冷却水管である。従来の金型の冷却水管とは、鋼材にドリルで穴を加工し、この穴に冷却水を流すことで金型を冷やすものであった[20, 44]。この冷却水管によって製品成形時の金型は冷却水が流れている部位付近では温度が低下し、そうではない場所では温度が高いままとなることで金型温度分布が均一ではなくなり、ダイカスト鋳造では温度が高い部位で焼付きやカジリといった製品表面や金型の損傷を生じさせる[16]。そのような課題に対し、三次元冷却配管は温度が高くなりやすい形状に合わせて配置できるため効率的に金型温度を低下させることで解決するものである。また、Anders E. W. Jarfors らの研究によれば三次元冷却管は従来のドリル穴加工の冷却管よりも金型の冷却勾配をより大きくすることができるとの報告がされている[45]。三次元冷却配管を配置させた金型は付加製造法における粉末床溶融結合法にて、金属粉末をレーザー照射によって溶融凝固させ金型形状を造形する際に、管形状になる部分にはレーザーを照射せずに空洞を残すことで製作できる。この製作方法で生じる課題として、①市販の鉄鋼材料から削り出して製作するよりも耐久性が低下する可能性がある、②内部の冷却配管の面粗度が粗い、などが挙げられる。①の課題については、付加製造法により得られる造形物は内部に欠陥や析出物、もしくは均一でない金属組織を残留させることがあるためであり[46, 47, 48]、これが既存の鉄鋼材料と比較して耐久性を悪くする可能性を含んでいる[49]。②の課題は、粉末床溶融結合法が金属粉末を溶融凝固させる技術であり、造形した直後の状態は砂型鋳物のような表面性状をしており、内部の冷却配管もそれと同様となるためである[50]。これらの課題を考慮しながら実際の金型製作では冷却配管の設計を行っていく必要があり、同時に金型に施工する表面処理などの後工程についても検討する必要がある。

本研究では微細な気孔形状を金型に成形するポーラス金型の製作とその評価を行った。

ポーラス構造体とは付加製造法にて金属粉末を熔融凝固させる際にあえて空隙が残るようにエネルギー密度を低く設定して成形する構造体である。既存の研究ではこのエネルギー密度を低下させるために、完全熔融凝固の条件よりも、レーザ走査速度を速くする[42, 51]、レーザ同士の走査間隔を広くする[43]、レーザ出力を低くする[51]、などの手法を取っている。既存の研究では、ポーラス構造体を金型に適用する場合は射出成形金型において金型内の残存ガスを排出し、成形品の内部欠陥やガス焼け、充填不良を削減する目的[52]や、三次元冷却配管のように金型の熱を効率的に冷却し、短時間で生産できるように検討する目的[53, 54]で研究された事例が存在する。ダイカスト鋳造では、そのような微細気孔については薄肉を持つ成形品などで最終充填部からのガス排出のための部材として要望があった。そのような部位では完全にガス欠陥のない成形品を得ることが難しい[55, 56, 57]。

本研究では、これらの金型への付加製造法への適用に対し、離型剤を金型から染み出させ、形成したい部位に離型膜を形成できるようにする機構としてポーラス構造体を検討した。ポーラス構造体をダイカスト金型の離型剤吐出部位として利用する最大の目的は現行のスプレ塗布では離型剤を塗布できない場所にも塗布できるようにするということである。ダイカスト金型は様々な形状が存在し、中には多方向から摺動する部品で組み立てられている場合や、深い谷のような形状や高い壁同士が隣接するような形状も存在する。これに対し、現行のダイカスト鋳造工程では離型剤を塗布するためにスプレで吹き付ける手法を取っている。しかしながら、スプレ塗布では前述したような形状に満足に離型剤を塗布することができず、離型剤が付着していない場所では金型と熔融アルミニウム合金が結合する焼き付きが発生してしまう。実際の生産ラインならばこの課題に対し、より多くの離型剤を吹き付けて少量でも付着できるようにするか[18]、それでも対処できない場合はアルミニウム合金が結合してしまった部位を削り取って対処している[58]。本研究では、離型剤を吹き付けられないならばその問題となる部位から吐出させることで解決する手法としてポーラス金型を提案する。

まず、ポーラス構造体を成形する方法について、過去の研究と同様に粉末床溶融結合法でレーザ条件を変化させてポーラス構造体を成形し、その通気性能を評価するとともにポーラス構造体内部の気孔の状態を観察し、そのサイズの計測や形状を把握した。目標の微小気孔サイズは $50\mu\text{m}$ 以下であり[59]、これはダイカスト鑄造で溶融アルミニウム合金が侵入しない幅のしきい値とされており、本研究において微小気孔に溶融アルミニウム合金が侵入してしまうことでその後の生産が不可能となることを予防するためである。一方で、離型剤の染み出しという観点からその制御が可能な気孔のサイズを検討する必要もある。また、このときポーラス構造体の表面加工状態について造形直後と切削加工後の差異を検証した。次に、得られたポーラス構造体に対し離型剤を透過させる実験を行い、離型剤の浸透に必要な圧力や吐出速度を計測した。そして、ポーラス構造体を造形した重力鑄造用の金型を製作し、実際に溶融アルミニウム合金を注ぎ入れたときの流動状態および凝固状態から鑄造時におけるポーラス構造体の影響を考察した。

また、粉末床溶融結合法では粉末表面への投入エネルギーを制御し、造形物内部にポーラス構造体を得るため、造形方向に対する通気方向が、水平方向であるか垂直方向であるかで異方性を有することが予測された[60]。したがって、造形方向に対する通気方向が垂直方向となるポーラス構造体の造形条件について検討し、その通気特性の検証と異方性の発生機構を考察した。

最後に、実際にポーラス構造体を造形した金型を用いてダイカスト鑄造を行い、離型剤を金型側から染み出させながら鑄造を行った際に成形品に及ぼす影響を調査し、従来のスプレ塗布方式に対しての利点を検証した。

2.2 ポーラス構造体の製作と評価

2.2.1 ポーラス構造体造形法

通気率測定用の試験片形状を図 1 に、造形条件を表 1 に示す。試験片は、中心部に直径が 50 mm のポーラス構造体を造形し、その外枠として気孔が存在しない完全溶融部を設けた。造形に使用した装置は粉末床溶融結合法である松浦機械製作所製の LUMEX Avance25 である。試験片の厚さは 5 mm とし、走査速度のみを変更して複数のポーラス構造体を造形した。造形後、試験片と造形プレートの界面をワイヤ放電加工機（三菱電機製：MV2400S）で切り離した。また、造形物表面の切削加工が通気性に及ぼす影響を調べるため、造形物表面を切削した試験片も併せて造形した。このとき、直径 2 mm のボールエンドミルで、送り速度：200 mm/min、主軸回転速度：30,000 r/min、Z ピッチ：0.15 mm、XY ピッチ：0.15 mm とした。実験では、中心部に造形したポーラス構造体へ圧縮空気を通過させた。試験片の完全溶融部は、ポーラス構造体の側面から空気が漏れないために造形した。そして、条件が異なる複数の試験片を造形し、表面および断面を走査型電子顕微鏡で観察するとともに、造形条件と通気特性との関係を調べた。また、エネルギー密度が同じ条件で造形を行い、造形物表面の切削が圧縮空気の流量に及ぼす影響を調べた。さらに、金型にポーラス構造体を適用した際は表面処理を実施することになるため、表面処理がポーラス構造体の特性に与える影響を調査するため、カーボンコーティング処理（(株)メックインターナショナル）を施した試験片についてもその通気特性を調べた。カーボンコーティング処理とは、炭素の同素体であるフラーレンで構成されるカーボンコーティング層を金型表面に形成することができる技術で、形成された表面層は金型に対する熱抵抗層になるとともに、溶湯の流動抵抗を下げるができることとされている[61, 62, 63]。カーボンコーティング処理を行った試験片は処理前にサンドブラスト処理を実施した。

前述のように、通気特性を持つ微小気孔を多数有するポーラス構造体は、造形方向に対して水平方向への通気特性と、造形方向に対して垂直方向への通気特性では同じレーザ条件で積層していても通気率に差異が生じると予測されたため、造形方向に対して垂直方向に通気させ、その通気率を評価できる試験片を製作した。試験片形状を図 2 に、造形条件を表 2 に

示す. 図示したように中心部に直径が 50 mm のポーラス構造体を造形し, その外枠として気孔が存在しない完全熔融部を設けた. 完全熔融部は, 造形の制約により正方形とした. 厚みは 5 mm である. また, 造形方向に対して水平方向に通気する試験片の時と同様に, レーザ条件は走査速度のみ変更して造形を行った.

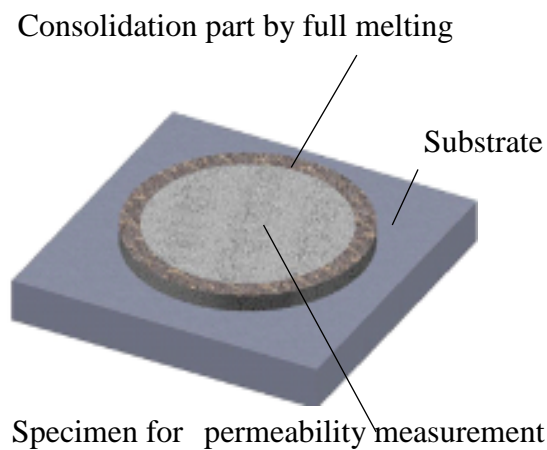


Fig.1 Test piece for air permeability measurement

Table.1 Building conditions for test pieces

Laser irradiation		Porous	Full melting
Laser type		Yb: fiber	
Wavelength	nm	1070	
Laser power P	W	320	
Scan speed V	mm/s	700-3,000	700
Spot size Φ	μm	200	
Substrate		S50C	
Surface roughness R_a	μm	3.5	
Metal powder		Maraging	
Mean diameter	μm	33	
Bulk density	kg/m^3	4260	
Layer thickness	μm	50	

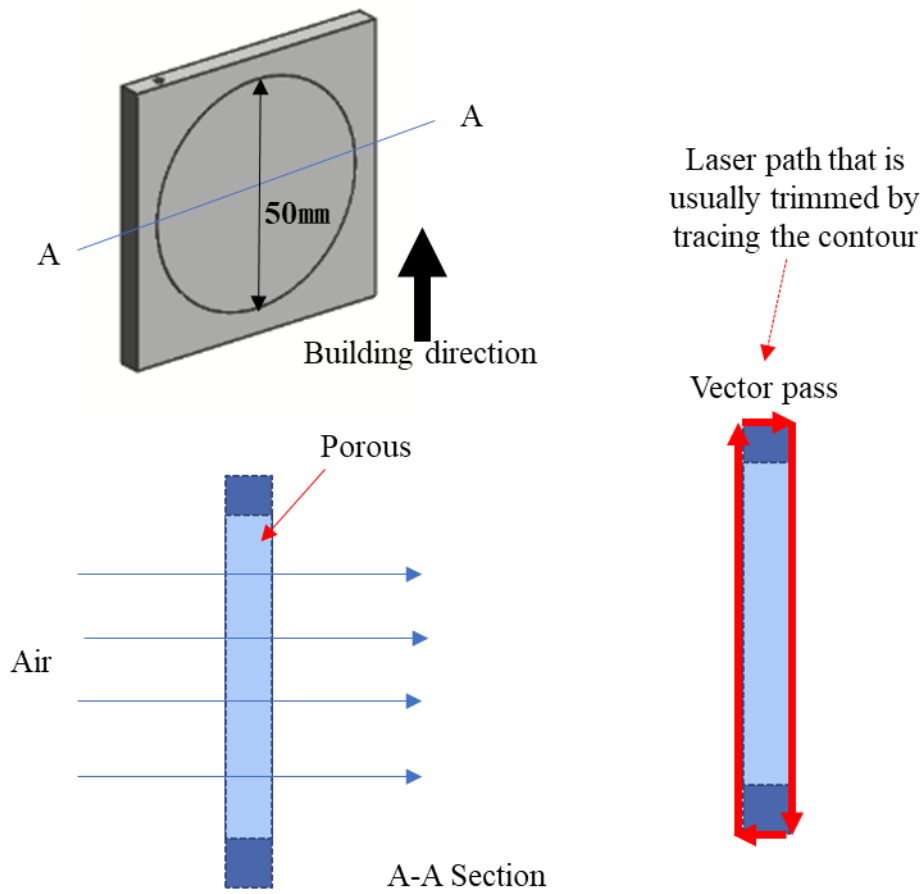


Fig.2 Specimens with ventilation perpendicular to the build direction

Table.2 Building conditions for test pieces

		Porous	Full melting
Laser irradiation			
Laser type		Yb: fiber	
Wavelength	nm	1070	
Laser power P	W	320	
Scan speed V	mm/s	1,750-5,000	700
Spot size Φ	μm	200	
Substrate			
Surface roughness Ra		μm	3.5
Metal powder			
Mean diameter		μm	33
Bulk density		kg/m^3	4260
Layer thickness		μm	50

2.2.2 ポーラス構造体の気孔率の算出方法

造形条件がポーラス構造体の気孔形成に及ぼす影響を定量的に評価するため、造形物に占める気孔量の割合である気孔率を算出した。気孔率の算出には、画像処理ソフトウェア(アメリカ国立衛生研究所製: Image J)を用いた。図3に、画像処理前後のポーラス構造体表面の画像を示す。まず、ポーラス構造体表面を観察した画像について、その濃淡を256の段階(0~255)に分けた。次に、しきい値を設定して画像を黒色部(金属部)と白色部(気孔部)に分割し、全体に占める気孔部の割合を算出した。画像全体の画素数を Px_{all} 、黒色部が占める画素数を Px_{black} とすると、気孔率の割合%は以下の式(1)で求めることができる。

$$\rho_i = \frac{Px_{all} - Px_{black}}{Px_{all}} \times 100 \quad (1)$$

本実験で用いたしきい値は、ポーラス構造体の気孔部と画像処理後の白色部が最も一致していると判断した 90/255 とした。

ポーラス構造体の気孔サイズは、図4に示すようにポーラス構造体表面の SEM 画像上に円を描き、描いた円の直径を測定して算出した。各条件での気孔サイズは、それぞれ6個の気孔を抽出して測定し平均値を求めた。

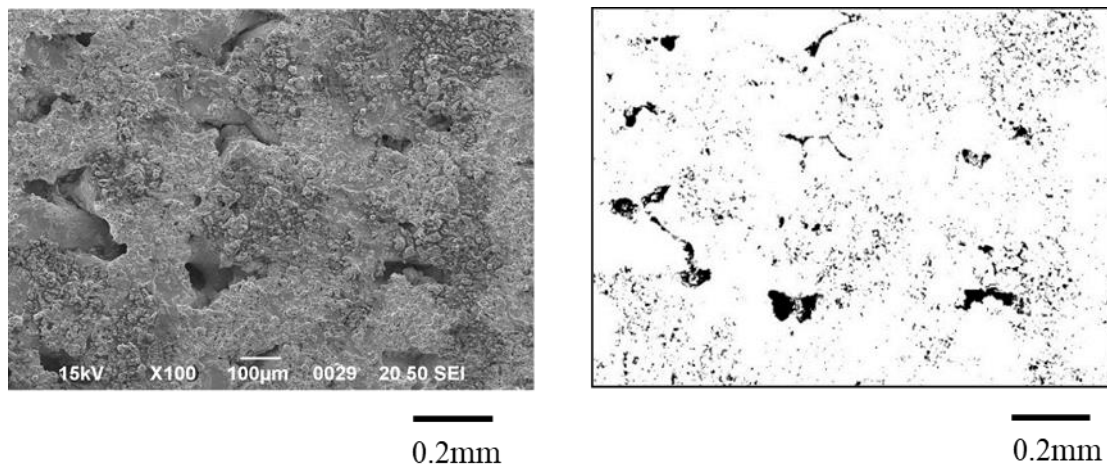
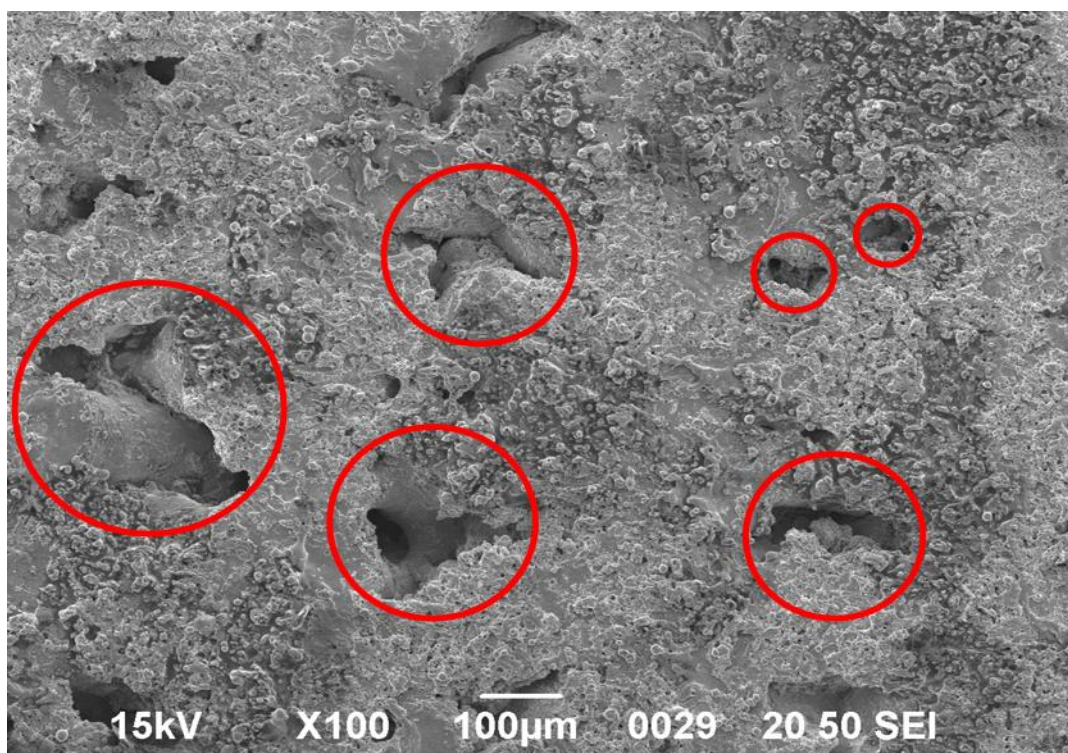


Fig.3 Calculation of porosity by image processing



0.2mm

Fig.4 Pore size measurement method

2.2.3 ポーラス形状部通気特性の評価

ポーラス構造体の通気特性を定量的に評価するため、多孔体の通気特性を通気率として評価する Darcy の法則を用いてポーラス構造体の通気率を測定し、レーザ条件がポーラス構造体の通気特性に与える影響を検証した。通気率とは、流体が多孔体内を通過するときの流れやすさを示す特性係数であり、この係数は多孔体の性質のみによって決まる。ポーラス構造体の通気率 μ [m^2] は、ポーラス構造体を通過するガス量が V [m^3]、ガス量 V がポーラス構造体を通過するのに要する時間が t [s]、試験温度におけるガスの粘度が η [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]、ガスが通過するポーラス構造体の厚み δ [m]、ガスが通過するポーラス構造体の面積が A [m^2]、ポーラス構造体へのガス侵入絶対圧が p_1 [Pa]、ポーラス構造体からのガス離脱絶対圧が p_2 [Pa] とすると、以下の式(2)で表される。

$$\mu = \frac{V}{t} \eta \frac{\delta}{A} \frac{1}{p_1 - p_2} \quad (2)$$

ポーラス構造体の通気率測定装置の概要を図 5 に示す。測定装置は、被測定物の固定容器、レギュレータ、流量計および圧力計で構成されている。実験では、コンプレッサで圧縮した空気について、レギュレータおよび流量計で圧力と流量を調整した後、固定容器に流入させて容器内部に固定した被測定物前後の圧力を測定した。そして、設定した圧縮空気の流量、試験温度における圧縮空気の粘度、圧縮空気が通過する被測定物の厚みと断面積、測定した被測定物前後の圧力差から求めた。固定容器には、厚さを変更したポーラス構造体を固定するため、リング状の厚さ調節機構を設けた。固定容器は円筒形状であり、厚さ調節機構を設けた固定容器の外周面とリング状の厚さ調節機構の内周面にはネジ切りが施されている。このネジ切り部で厚さ調節機構を移動させることで、容器内の被測定物固定部を被測定物の厚さに調節することができる。ポーラス構造体前後の圧力差を測定する圧力計は、圧力変換機(株共和電業製：PG-20KU)を用いた。

この圧力変換機内にはひずみゲージが設置されており、圧力変換機をオシロスコープに接続させることで、図 6 に示すような出力波形が得られる。出力波形は①~③の区間で区切られ、それぞれ以下の状態となる。

- ① 空気の流入を調整するレギュレータ A が閉じ、測定装置内へ空気が流入していない状態。この波形から、圧縮空気流入前に固定容器内のポーラス構造体の前後で圧力差がないことを確認する。
- ② レギュレータ A と空気の流出を調整するレギュレータ B が開いており、装置内に圧縮空気が流入し、被測定物を通過した後に大気に開放されている状態。この区間では、圧縮空気の圧力がポーラス構造体の前後で変化する。実験では、この区間の圧力差を測定することで、通気率が求められる。
- ③ レギュレータ A が開き、レギュレータ B が閉じており、流入した圧縮空気が装置内に充填されている状態。流入した圧縮空気が通気率測定装置から漏れていない場合、ポーラス構造体前の圧力と通過後の圧力が一定値となる。装置外に空気が漏れている場合、前後で圧力差が生じるため、測定が正しく行われているか確認することができる。

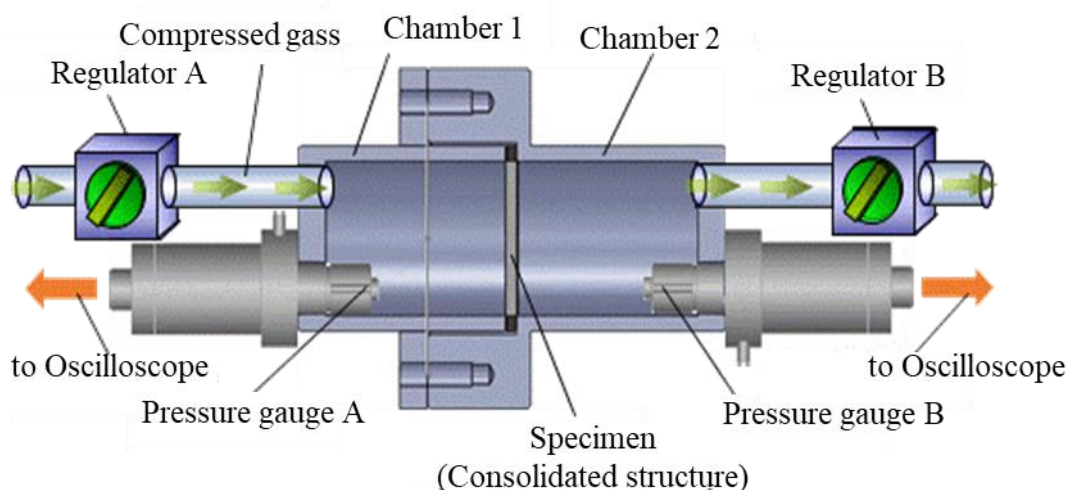


Fig.5 Overview of air permeability measurement device for porous structures

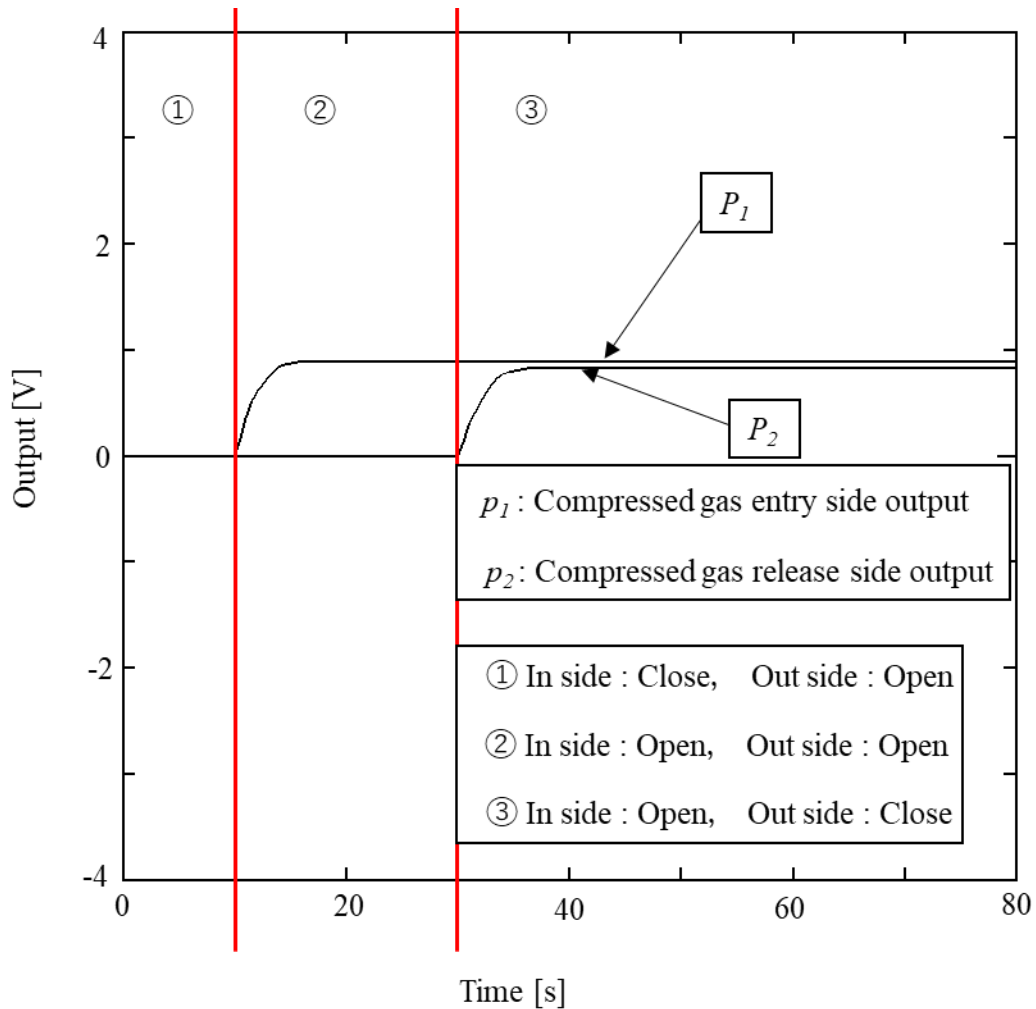


Fig.6 Output waveform from pressure gauge

2.2.4 ポーラス構造の通気特性の評価結果

図7は、レーザ走査速度とポーラス構造体の気孔率との関係調べた結果である。気孔率は、レーザ走査速度が速くなるにつれて大きくなった。レーザ走査速度の増加によって、粉末表面へ与えられるエネルギー密度が減少し、金属粉末が完全熔融から部分焼結へシフトしたためであり、その結果、熔融前の粉末間に存在した空隙が残存し、熔融した金属が固化するときに部分的に結合したと考えられる。本実験の範囲では、レーザ走査速度を変更することで最大で27%の気孔率を有するポーラス構造体を得られた。

レーザ走査速度とポーラス構造体の気孔サイズとの関係調べた結果を図8に、測定に使用した画像を図9に示す。気孔のサイズは、走査速度が増加するにつれて大きくなり、各条

件でのばらつきも大きくなった。これはレーザ走査速度が増加することで一様なビードが形成されず、結果的に発生する微小気孔の大きさにも差異が生じたことが考えられる。

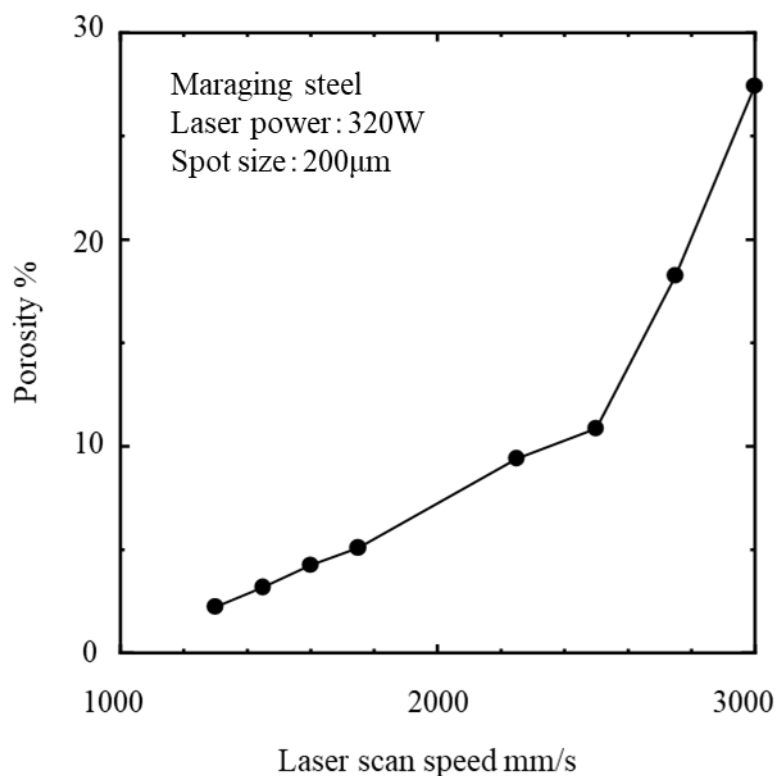


Fig. 7 Relationship between laser scanning speed and porosity

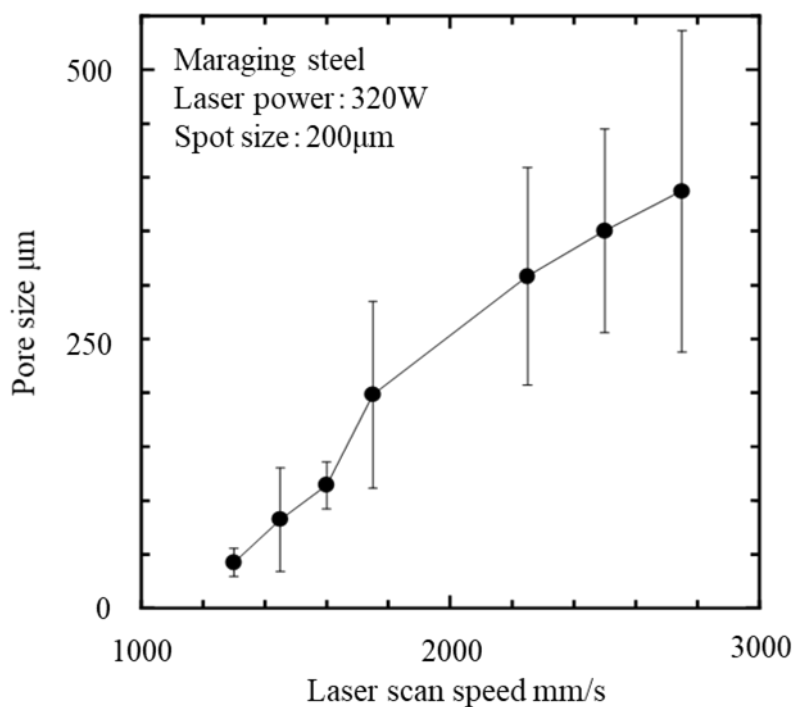


Fig.8 Relationship between laser scanning speed and pore size

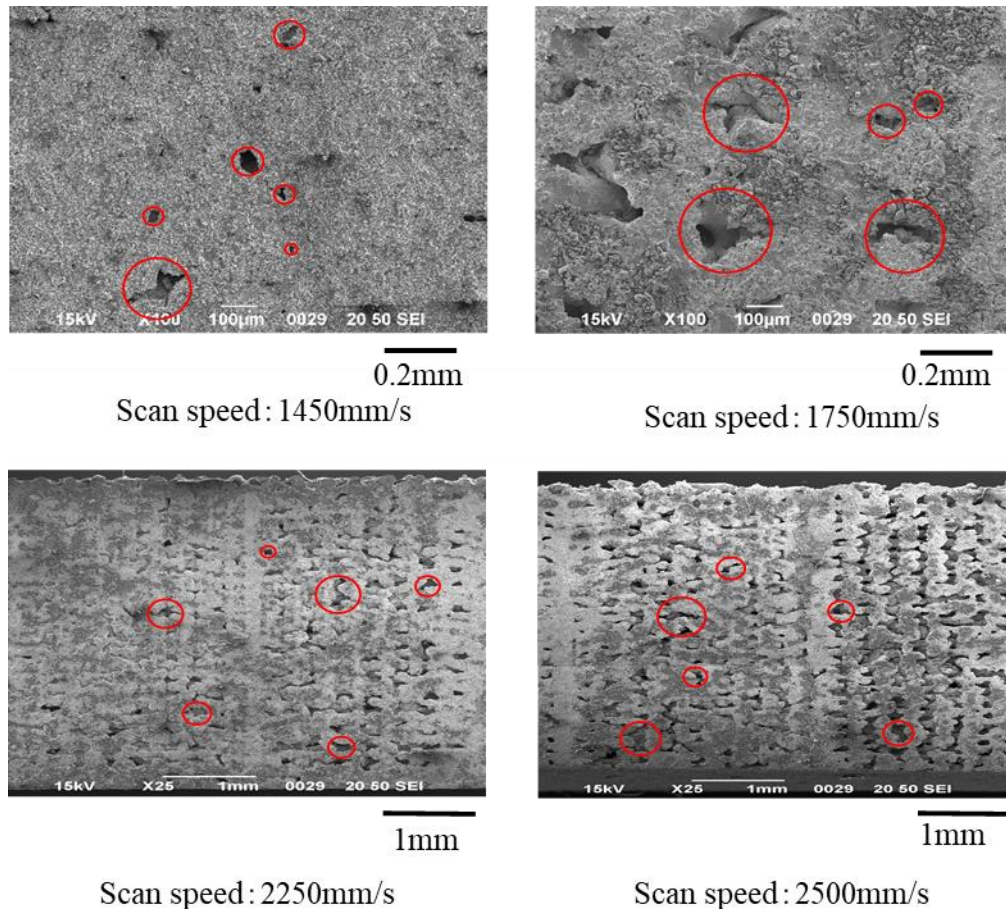


Fig.9 SEM image during pore size measurement

図 10 は、レーザ走査速度と圧縮空気の通気率との関係を示す。図からわかるように、走査速度が 1450 mm/s を超えるとポーラス構造体に通気性が得られ、通気率は走査速度が大きくなるにつれて直線的に大きくなった。これは、走査速度が大きくなるにつれて金属粉末が完全熔融から部分焼結へシフトし、熔融前の粉末間に存在した空隙が残存したためと考えられる。また、走査速度が 2750 mm/s を超えた条件では、十分な強度を有する造形物が得られず、通気率を算出することができなかった。本実験の範囲では、ポーラス構造体の気孔率が 4% を超えると通気性が得られ、気孔サイズが 50 μm で通気が得られる走査速度は 1450 mm/s であることがわかった。また、図 7 および図 8 の結果と図 10 の結果を合わせて考えると、レーザ走査速度が上昇するにつれて通気率が向上したのは、ポーラス構造体中に形成される微小気孔が大きくなったことにより、圧縮空気が流れやすくなったためであると考えられる。

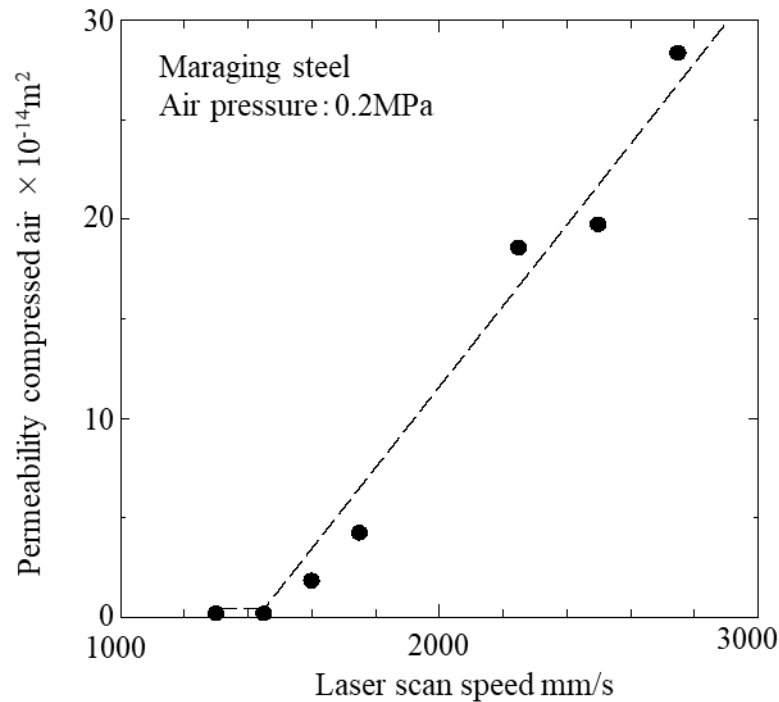


Fig.10 Relationship between laser scanning speed and air permeability

ポーラス構造体表面の切削加工前後を光学顕微鏡で観察した結果を図 11 に示す，切削前のポーラス構造体は，レーザ照射によって熔融した金属粉末が凝固するとき，十分に入熱されなかった粉末が不十分結合層として付着していた．一方，切削後のポーラス構造体表面は表面に気孔が存在していることが確認できた．これらの試験片を用いて，ポーラス構造体表面の切削加工が通気性に及ぼす影響を調べた結果を図 12 に，そのとき得られた通気率測定装置からの出力波形を図 13 に示す．各条件で通気率にばらつきが見られるが，ポーラス構造体の通気率は切削加工を行うことで若干小さくなった．これは，図 13 に示すように試験時にポーラス構造体を通過した圧縮空気の流出が緩やかになっていることから透過性に影響を及ぼしていることがわかる．これは，ポーラス構造体表面を切削することでバリが生じ，バリが気孔を塞ぐことで圧縮空気の流動性が低下したためと考えられる．ポーラス構造体をダイカスト金型へ適用するとき，ポーラス構造体表面の切削加工は不可欠であり，この結果からポーラス構造体の通気性に対して，切削加工は影響を及ぼすが，影響度としては大きなものではないことがわかった．

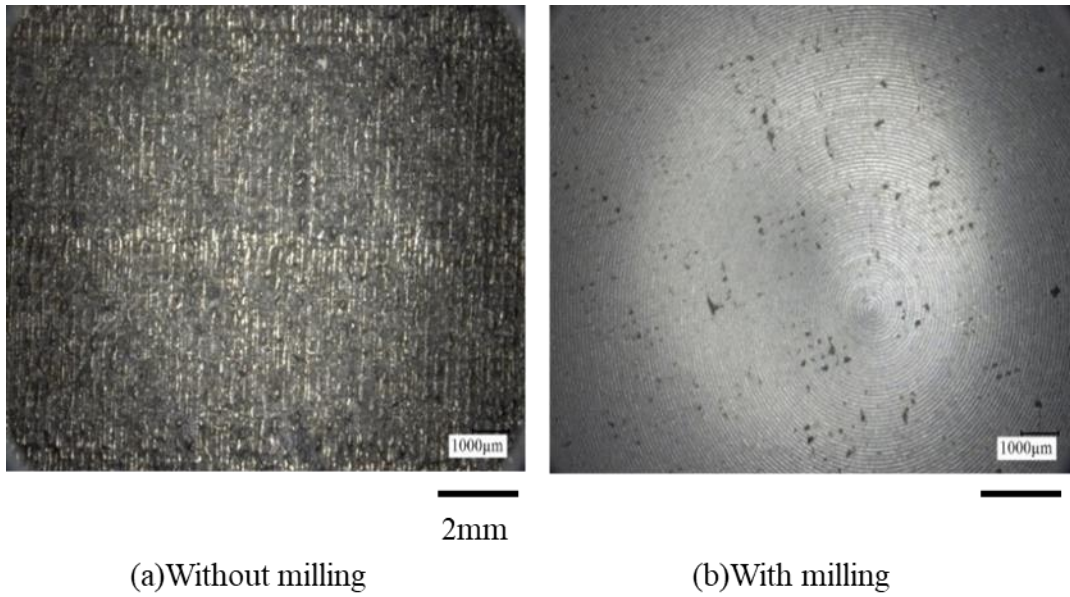


Fig.11 Comparison of porous structure surface without and with milling

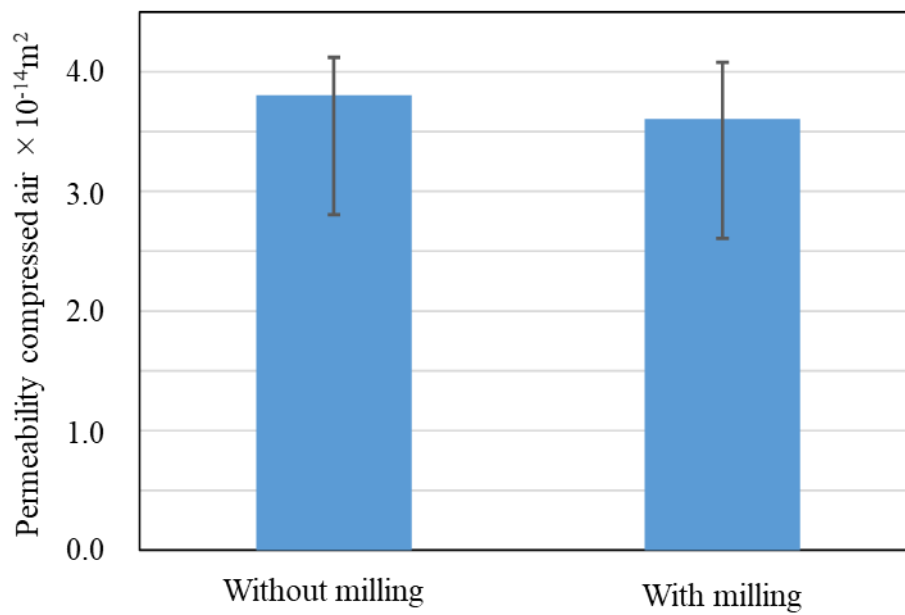
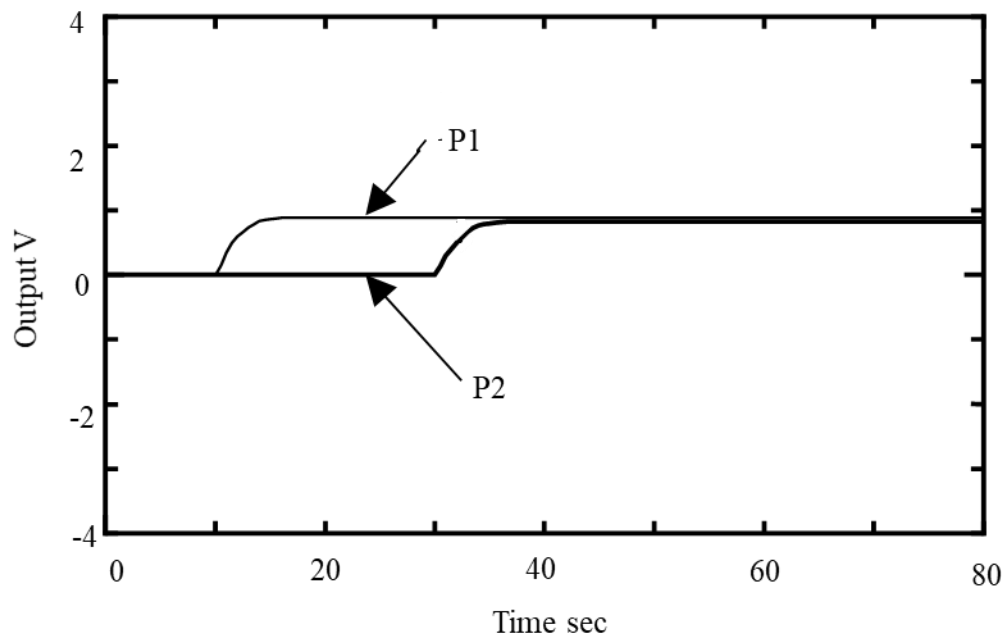
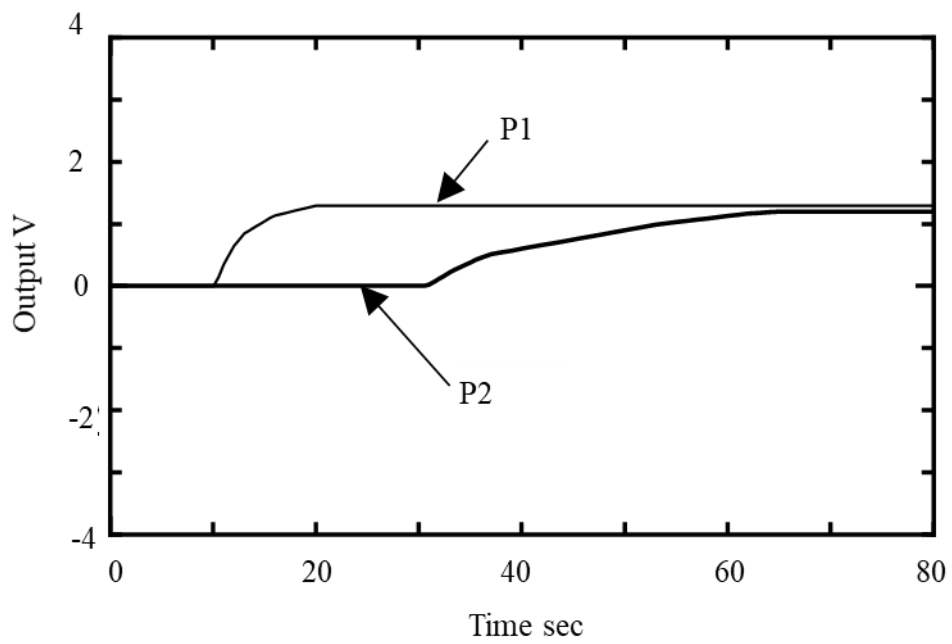


Fig. 12 Comparison of air permeability of porous structure surface without and with milling



(a) Without milling



(b) With milling

Fig. 13 Measured waveforms of porous structure surface without and with milling

2.2.5 造形方向の違いによるポーラス構造体の評価結果

図 14 は、ベクトルパス（各層の造形終了後に造形物の輪郭をなぞるレーザ照射，図中 VP 表記）を含めて造形方向と通気方向が直行するように造形し，得られた造形物の断面を SEM で観察した結果である．造形方向と通気方向が同方向の造形物と同様に，レーザ走査速度が速くなると内部の気孔が増える様子がわかる．しかしながら，造形物表面はベクトルパスとレーザ照射に起因して生じた熱の滞留によって気孔が塞がったことが考えられ，造形方向と通気方向が同方向の造形物では通気が得られていた 2,500～3,000 mm/s のレーザ条件では通気が得られなかった．また，通気が得られた 4,000 mm/s の条件では，造形物内部に形成された気孔が大きかった．そこで，ベクトルパスを照射しない条件で造形を行った結果が図 15 である．ベクトルパスを有していないため造形物の表面粗さは大きい，走査速度が 2,500 mm/s 以上の条件で通気を得ることができた．このように，レーザ走査速度の変更による気孔形成は，そのプロセスパラメータや造形条件によって大きく影響を受けることが明らかとなった．

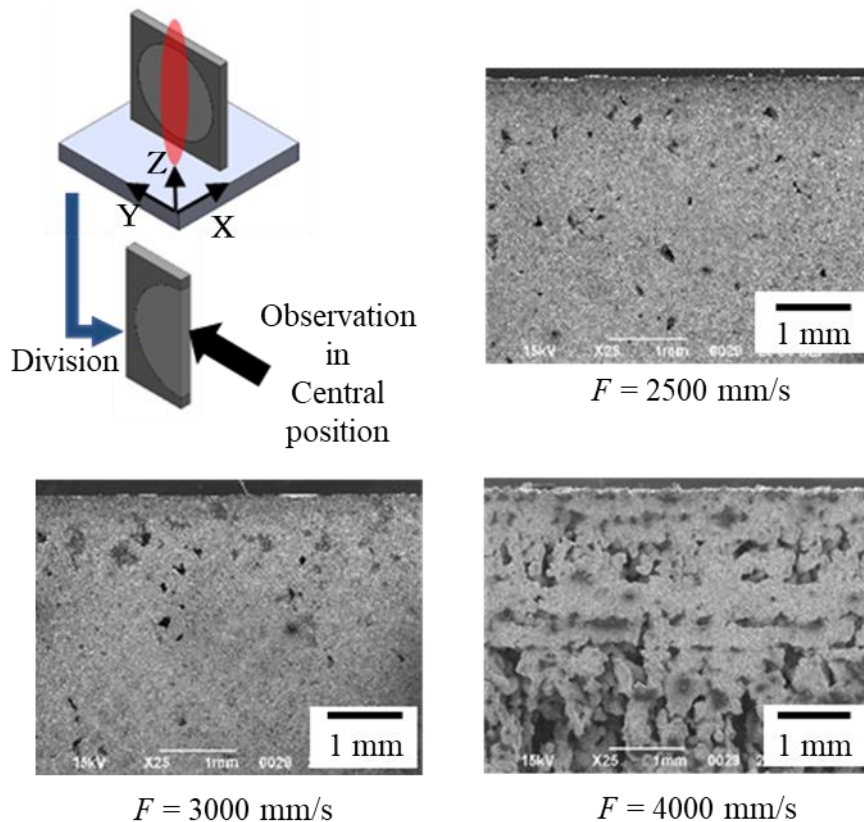


Fig.14 Vertical molding (with VP) model cross section

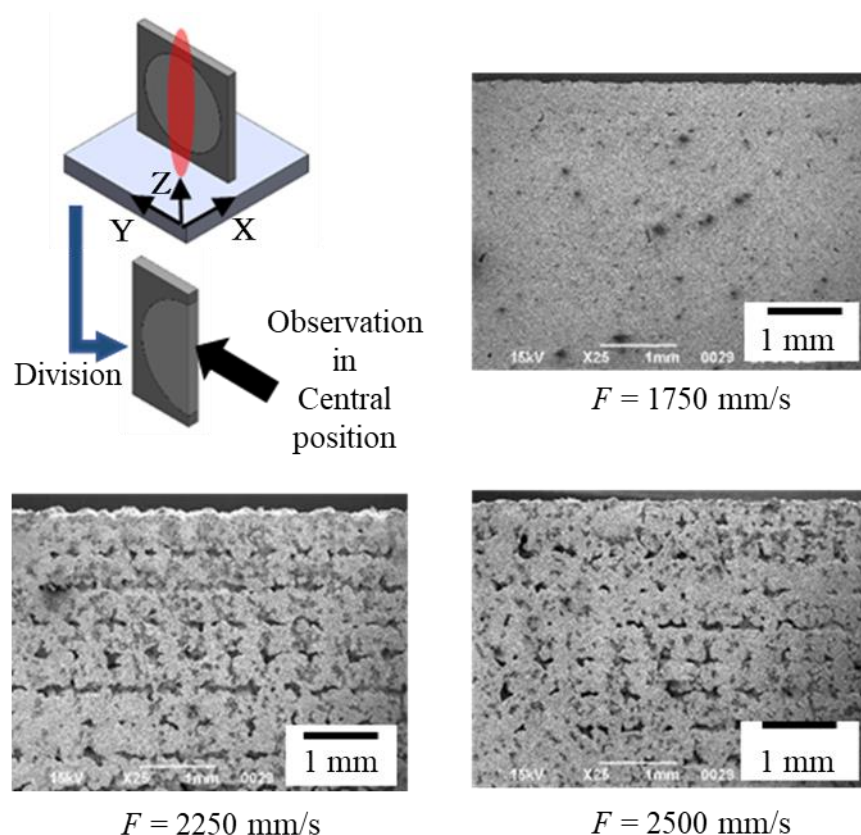


Fig.15 Vertical molding (without VP) model cross section

図 16 は、造形方向やベクトルパスの有無による通気特性の変化を調べた結果である。造形方向と通気方向が同方向の造形物では、レーザー走査速度が $1,450 \text{ mm/s}$ 以上の条件で通気が得られたのに対して、造形方向と通気方向が直行する造形物のベクトルパス有りでは $4,000 \text{ mm/s}$ 以上、ベクトルパス無しでは $1,750 \text{ mm/s}$ 以上の条件で通気が得られた。これらの結果より、ポーラス構造体を金型内部へ組み込む場合は、ベクトルパスを有しないレーザー照射条件で造形しなければならないことがわかった。ベクトルパス無しのレーザー条件は、造形物の面粗度を悪化させるが、付加製造法で造形した金型表面は切削加工で仕上げ加工をするため、大きな問題とはならないと考えられる。

図 17 は、造形方向やベクトルパス有無による気孔サイズの変化を示している。造形方向と通気方向が同方向のポーラス構造体ではレーザー走査速度が速くなると気孔サイズも大きくなったが、造形方向と通気方向が直行するポーラス構造体ではベクトルパスの有無

に関わらず本研究の範囲ではレーザ走査速度の上昇に対して気孔サイズの大きさの変化は小さかった。

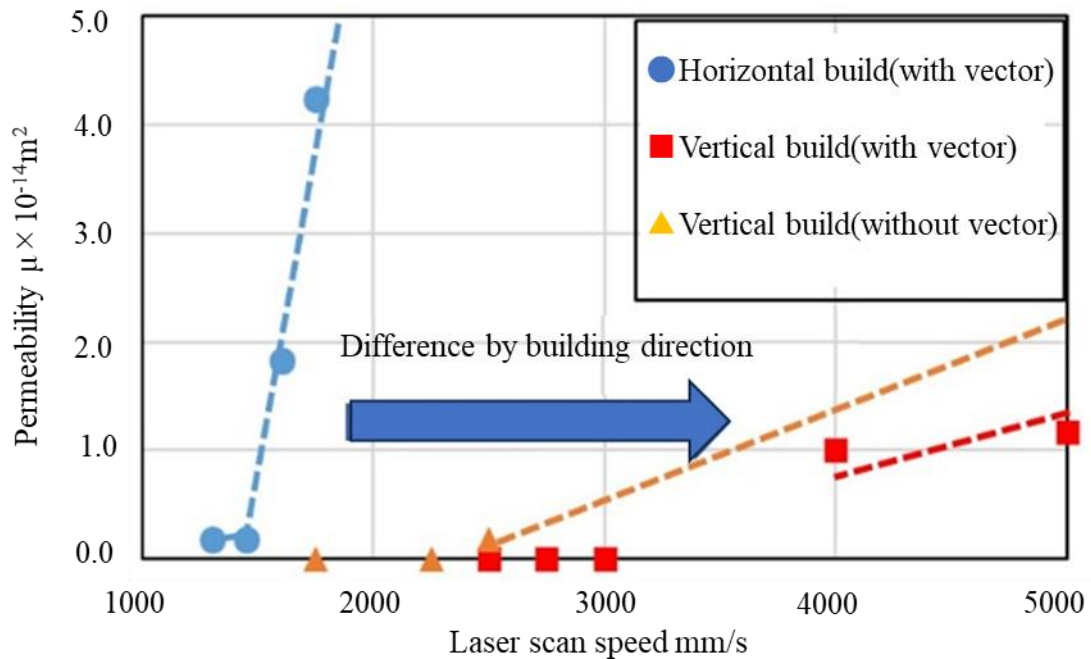


Fig.16 Change in air permeability due to molding direction and presence/absence of VP

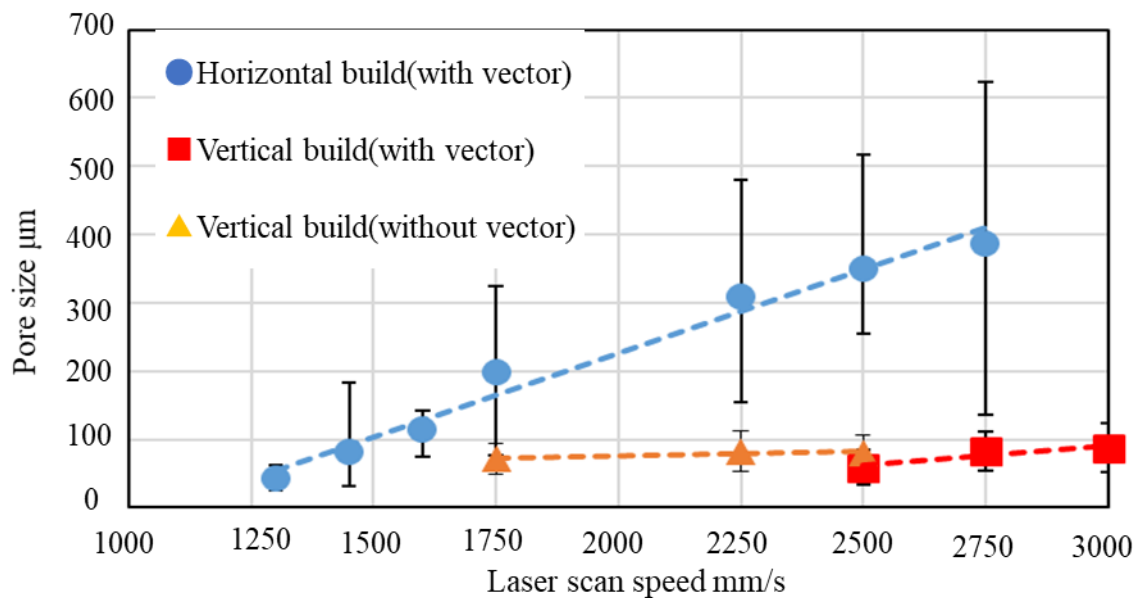


Fig.17 Changes in pore size depending on printing direction and presence/absence of VP

2.2.6 カーボンコーティングを実施したポーラス構造体の評価結果

造形物表面をカーボンコーティングした試験片にて通気特性を調べた。図 18 は、レーザ走査速度が 1,450 mm/s と 1,750 mm/s の条件で造形したポーラス構造体にカーボンコーティングを行い、その断面を観察した結果である。いずれの条件でも造形物表面にコーティング層が形成され、その厚さは 22 μm であった。コーティング前後の通気特性を比較した結果が図 19 である。カーボンコーティングでは、処理前に造形物表面をサンドブラスト処理するため、サンドブラストした造形物表面で通気率を測定した結果も併せて示している。コーティング処理により、1,750 mm/s で造形した試験片からは通気が得られたが、1,450 mm/s では通気が得られなかった。さらにいずれの試験片でもカーボンコーティング処理の前後で通気率が低下していた。これはカーボンコーティング処理により、造形物表面の気孔が閉塞したためであると考えられ、図 18 の観察結果にて微小気孔の表層付近をふさぐようにカーボンコーティングが存在していることからそれが推察される。一方で、サンドブラスト処理のみ実施した結果では、走査速度 1450mm/s では通気率が向上し、走査速度 1750mm/s では通気率が低下するという結果を得た。これは、サンドブラスト処理により表面の気孔が変形した可能性が考えられるが、本実験のレーザ走査速度条件ではばらつきが大きく一定の傾向が見られなかった。サンドブラスト処理によるポーラス構造体への影響は今後検討する必要があると考えている。

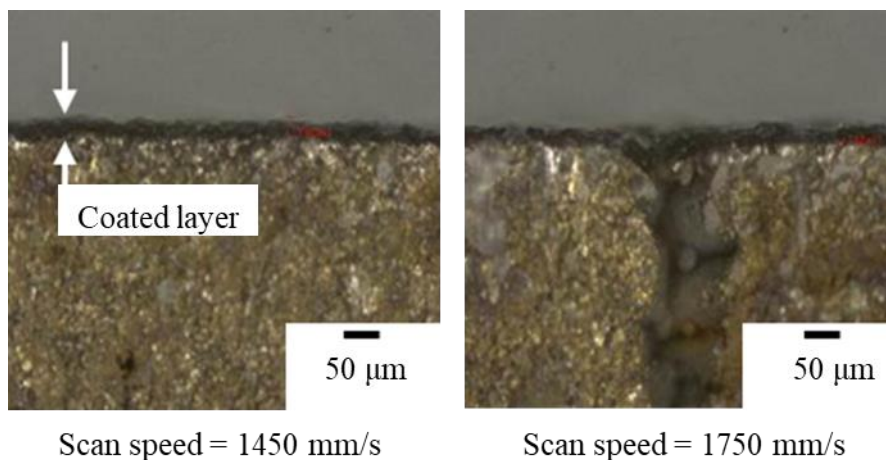


Fig18 Cross section of carbon-coated object

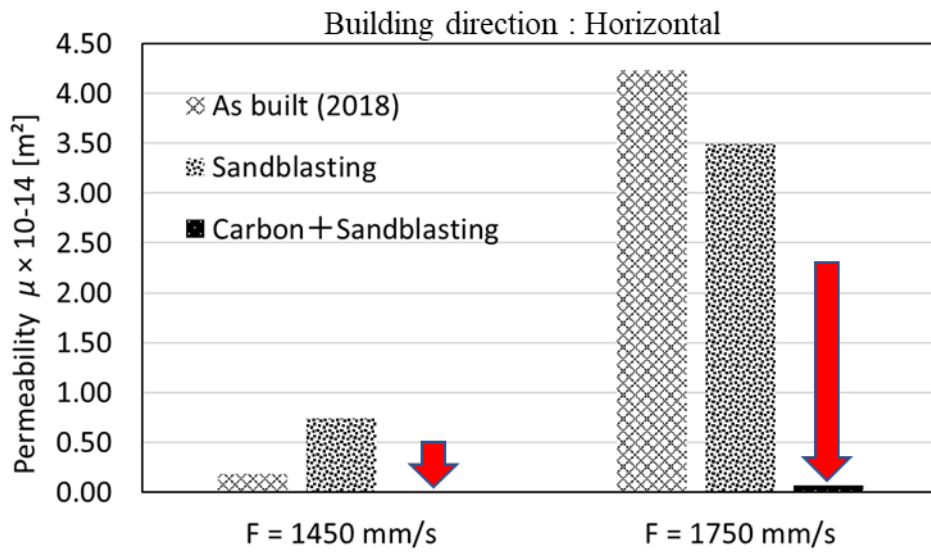


Fig.19 Changes in ventilation properties due to surface treatment

2.2.7 造形ラインの微小観察

ポーラス構造体の微小気孔の発生機構を分析するため、高速度カメラによるレーザー照射部の微小観察を行った。実機で使用しているレーザー条件での可視化を実現するため、レーザー発振器、リニアステージ、高速度カメラの撮影タイミングを同期させる制御システムを使用した。図 20 は可視化システムの概要を図示している。簡易造形装置はレーザー発振器、リニアステージ、高速度カメラから構成され、垂直方向から 40° の角度で照射されたレーザーは焦点距離が 150 mm である集光レンズを介して粉末床表面に導かれる。そして、レーザー照射部直上に設置した高速度カメラを用いて、記録速度が最大 10,000 fps となる条件で、粉末床で生じる熔融・凝固の様子を観察した。使用した金属粉末は、平均粒径が $30\ \mu\text{m}$ であるマルエージング鋼粉末であり、造形プレートは炭素鋼(S50C)を用いた。造形中に金属粉末が酸化することを防ぐため、造形装置内は窒素を充填させた。プレート表面は、平均粒径が $300\ \mu\text{m}$ である WA 砥粒を用いてサンドブラスト処理を行った。そして、スキージングブレードを用いてプレート表面の粉末床の厚さが $50\ \mu\text{m}$ となるように金属粉末を堆積させた。

さらに、単一のライン造形だけでなく連続してライン造形を行ったとき、その形成されたラインからポーラス構造体の形成様式を考察した。造形は表 3 の条件で行った。

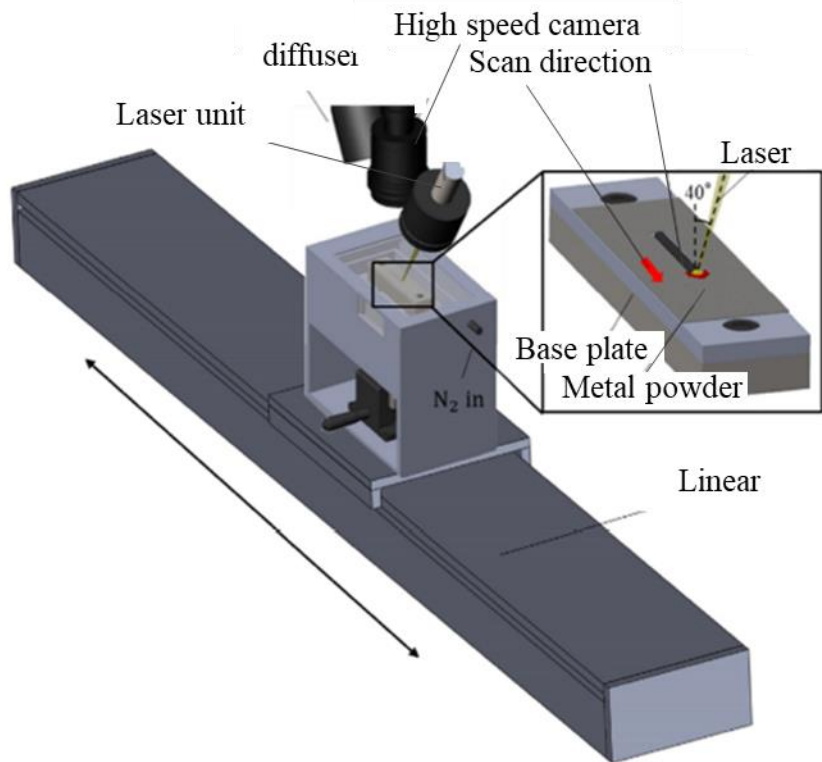


Fig. 20 Laser irradiation part observation system

Table 3 Building conditions for line building

Metal powder		Maraging steel
Average particle size	μm	25
Bulk density	kg/m^3	4260
Base plate		S50C
Temperature	$^{\circ}\text{C}$	25
Surface roughness	μm	3.34
Laser irradiation conditions		
Heat source		Yb-fiber
Wave length	mm	1070
Laser power	W	320
Irradiation angle	$^{\circ}$	40
Scan speed	mm/s	700, 1400
Spot diameter	μm	200
Deposition thickness	mm	0.05
Shooting conditions		
Shutter speed	sec	1/80000
Frame rate	fps	80000
Resolution		512×384
Magnification		4

2.2.8 造形ラインの微小観察の結果

図 21 に高速度カメラで撮影したレーザーによる金属粉末の熔融凝固の観察画像を示す。図 21 はレーザー走査速度が 1400 mm/s の条件で造形したときの照射部を観察した結果である。レーザー走査速度が 1400 mm/s の条件ではメルトプール後方で熔融した金属粉末が球状に凝集し、レーザーが通過すると球状を保ったまま凝固して連続的なビードが形成されなかった。これは、レーザー走査速度が速い場合や、レーザーのエネルギー密度が小さい場合に見られる現象であり、走査速度が速いことに起因して生じるポーリング現象が造形物内部のポーラス形成に寄与していると考えられる。図 22 は、レーザー走査速度が 700 mm/s（フルメルト条件）と 1400 mm/s の条件で得られたビードを比較している。走査速度が速くなることで、熔融粉末が球状に凝固した様子がわかる。図 23 は 5 本のライン造形を行った造形物の画像と積層したポーラス構造体のワイヤーカットによる断面の画像を示している。5 本の連続したライン造形物は図 21 および図 22 で示した結果と同様に連続的なビードが形成されず、不連続な隙間やビード間の隙間が生じていた。この不連続な隙間が図 23 のポーラス構造体の断面画像のように積み重なってポーラス構造体の微小気孔を形成していると考えられる。一方で、この気孔の繋がりには積層方向と同方向に多いが、積層方向と直行する方向には少ない。この差異がポーラス構造体の通気特性に関して積層方向による異方性が生じる原因であると考えられる。

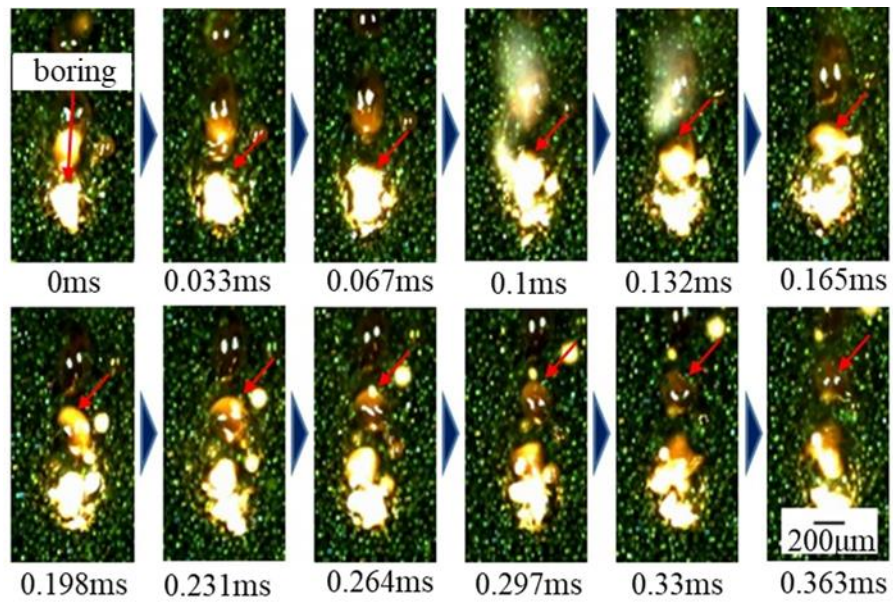


Fig.21 Observation of laser melting and solidification using a high-speed camera

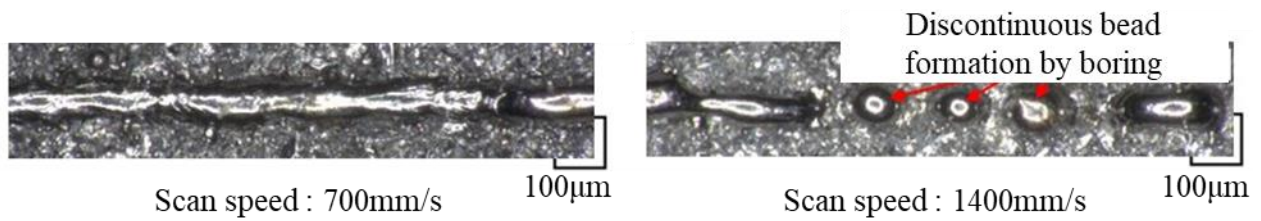


Fig.22 Observation of bead by single line printing

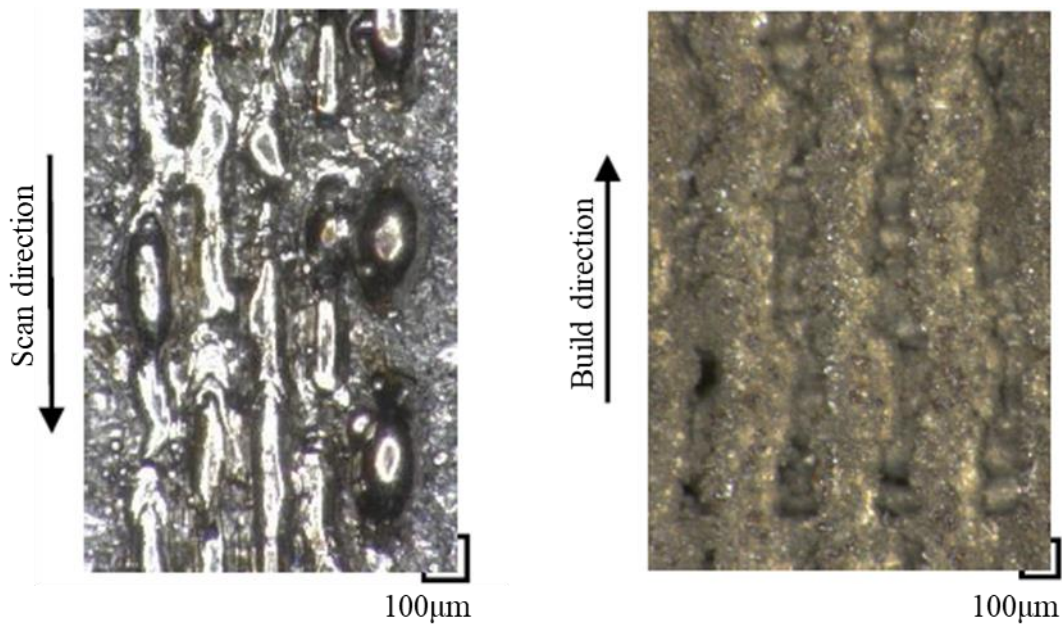


Fig.23 Observation of five continuous beads and cross-section observation of porous structure

2.2.9 ポーラス構造体とラティス構造の二層構造の評価

入子の構造として、ポーラス構造体の直下にラティス構造を形成する方法を検討した。これはポーラス構造体の厚みを小さくすることで通気率を上昇させられることが予測されたためポーラス構造体を薄くした場合の通気特性を検証する目的があるが、このとき、ダイカスト鋳造での使用を想定した場合、ポーラス構造体が鋳造圧力によって破壊されてしまう可能性を考慮して通気特性を損なわず、ポーラス構造体を補強できる構造体としてラティス構造を持つ試験片を作成することとなった。実験方法を図 24 に示す。ポーラス構造体は、レーザー出力 320W に対して、走査速度 1750mm/s という条件で造形した。

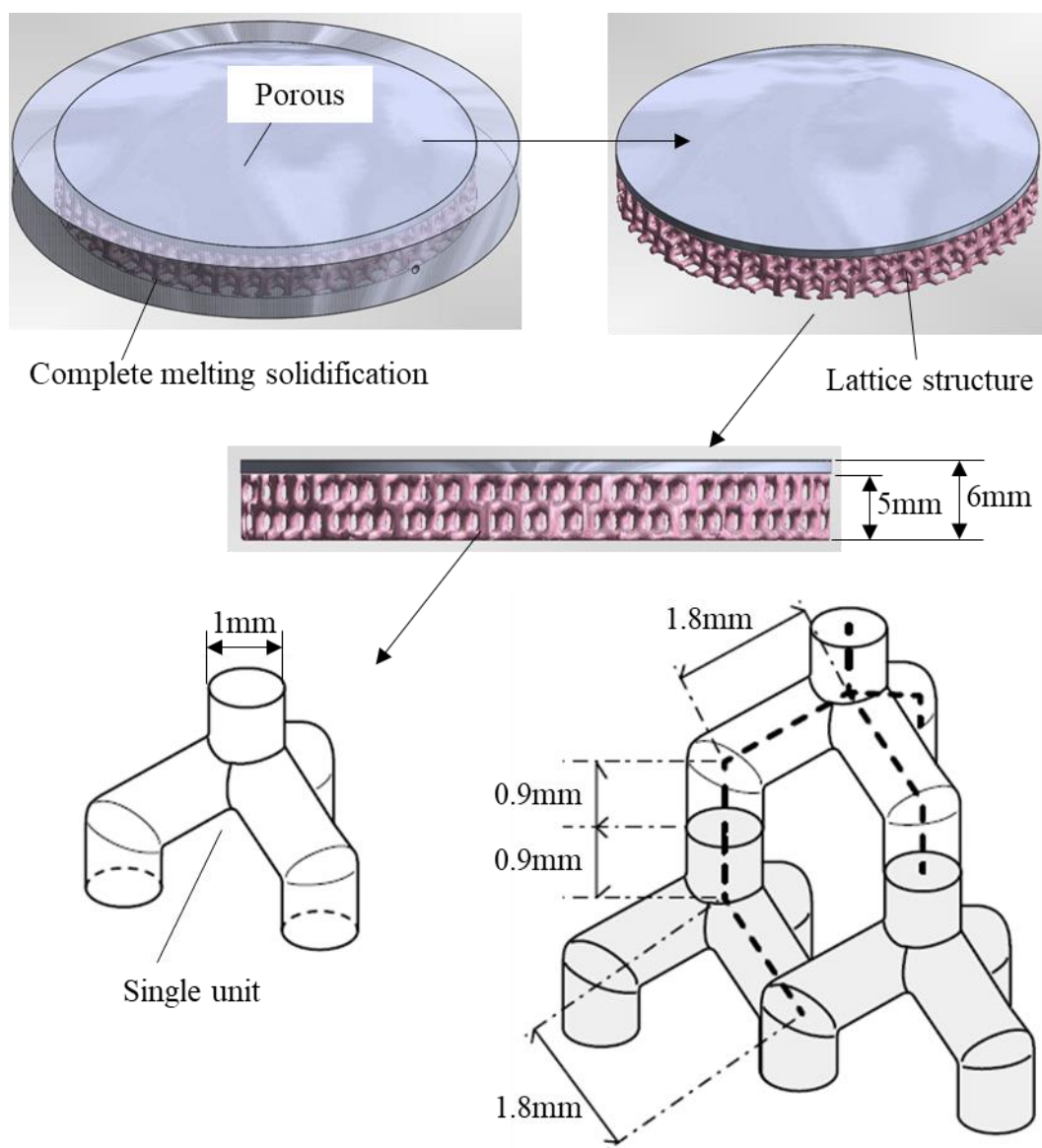


Fig.24 Air permeability of porous structure + lattice structure

ラティス構造は、図 24 に示すようにユニットを積み重ねて形成したダイヤモンド結晶格子構造で、軸径 1mm、格子間ピッチ 1.8mm として設定した。ポーラス構造体及びラティス構造体の厚さはそれぞれ 1 mm と 5 mm で、試験片 1 枚の厚さは計 6 mm となった。

2.2.10 ポーラス構造体とラティス構造の二層構造の評価結果

ポーラス構造体およびラティス構造体を金型内部に製作する場合、図 25 に示すように金型表面に製作する離型剤を染み出させるポーラス構造体と、その下部に製作する離型剤を流通させる、かつポーラス構造体を支持するラティス構造体の 2 層構造とすることで流体の通過性向上を図った。図 26 は、ポーラス構造体を走査速度 1,750 mm/s で造形し、その断面を光学顕微鏡および SEM で観察した結果である。ラティス構造体の上部にポーラス構造体が造形でき、ポーラス構造体には空隙が確認できる。

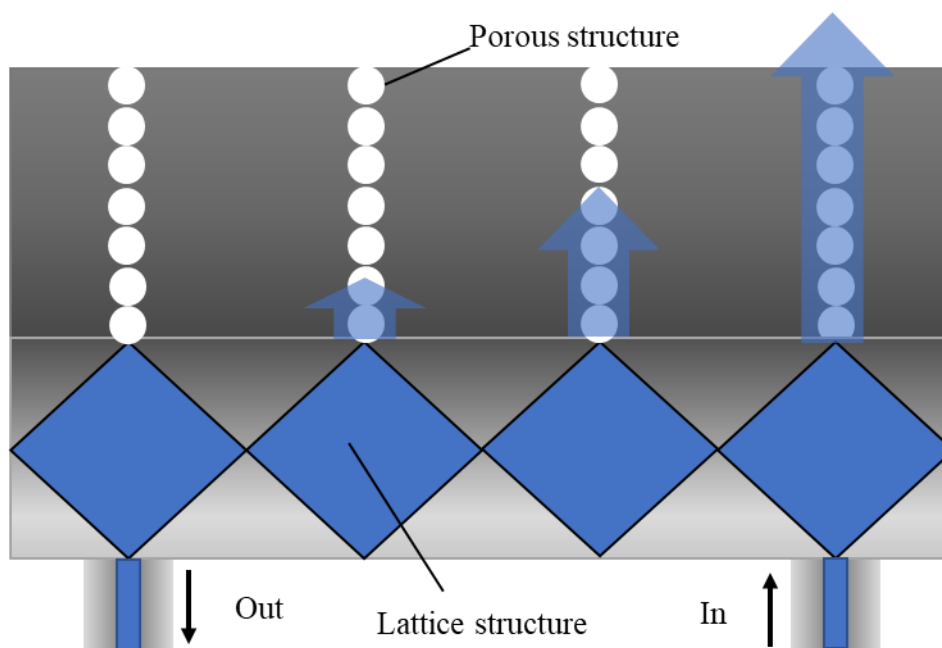
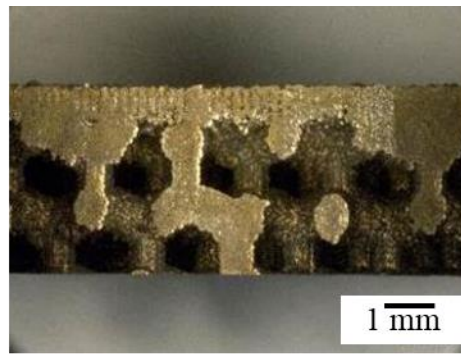
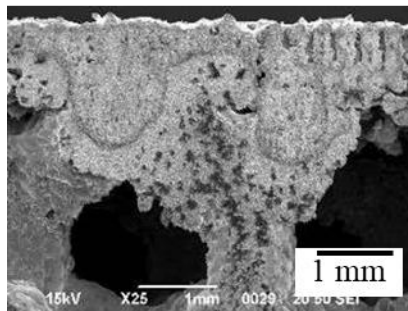


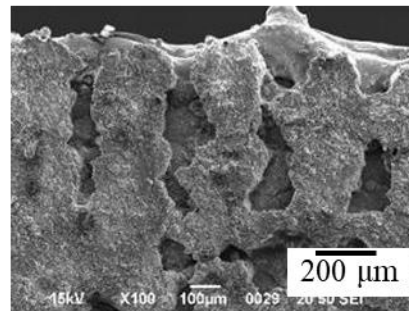
Fig.25 Two-layer structure of the mold for the release material supply section



(a) Cross section of two-layer structure



(b) Lattice area



(c) Porous area

Fig.26 Cross section of two-layer structure

さらに、この造形物を用いて通気量を評価した結果が図 27 である。造形方向に対して通気方向が同方向になるポーラス構造体を造形し、そのとき得られた通気率も併せて示している。図から、ラティス構造との 2 層構造とすることで、通気率が著しく増加していることがわかるが、これはポーラス構造体の通気率は、構造体の厚さが減少すると流体が受ける抵抗が少なくなることで大きくなるため、図 27 の結果が得られたと考えられる。

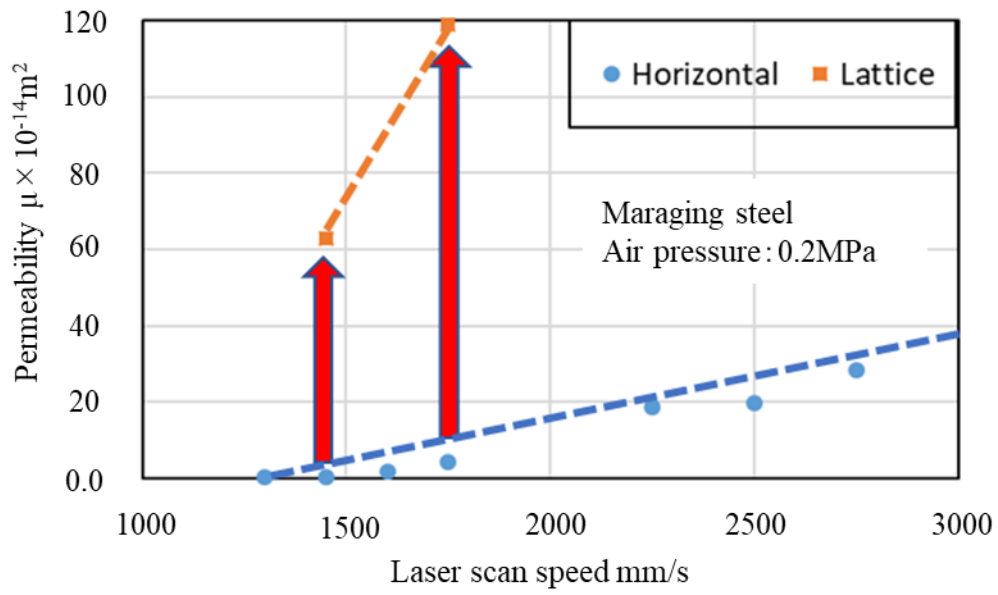


Fig.27 Air permeability of two-layer structure

2.2.11 ポーラス構造体の離型剤の透過特性の評価法

各造形条件で得られたポーラス構造体について離型剤の透過特性を調べた。離型剤の透過量測定の詳細を図 28 に示す。離型剤の透過量測定には、図 28 に示すように内部が中空で下面がポーラス構造体の容器を造形した。ポーラス構造体の造形条件は、前述した通気率試験片の条件と同一で表 1 のようにした。そして、内部に離型剤を入れ、容器上面から圧縮空気を流入させたときにポーラス構造体からしみ出てきた離型剤をビーカーで集め、電子計量器 (株式会社島津製作所製：AUX220) で離型剤重量を測定した。

実験で用いた離型剤の仕様を表 4 に、外観写真を図 29 に示す。離型剤は、密度と粘度が異なる水溶性が 2 種類、油性が 1 種類の合計 3 種類を用意した。

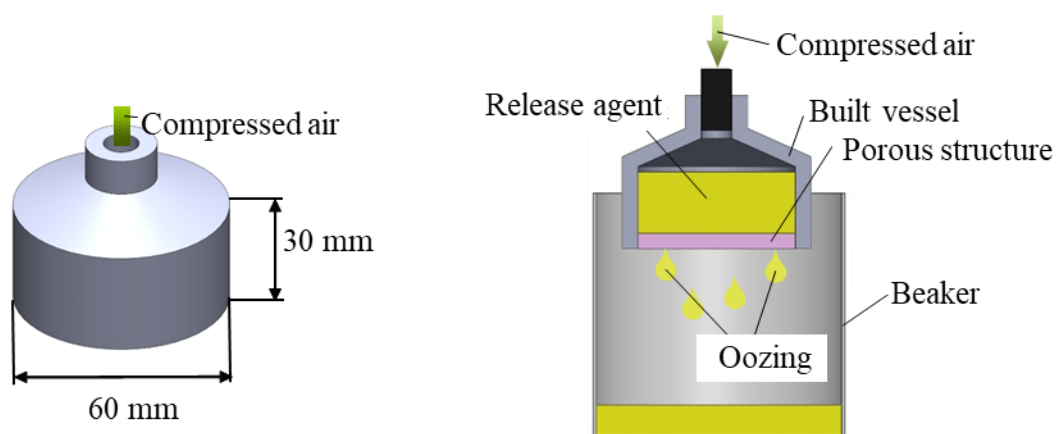


Fig.28 Release agent permeation measuring

Table 4 Release agent specifications

Release agent	Density [kg/m ³]	Viscosity [mPa·s]	pH
SRT200	820	10	-
MQ-500	1000	<10	8.9
AZ7560W	1000	4	10

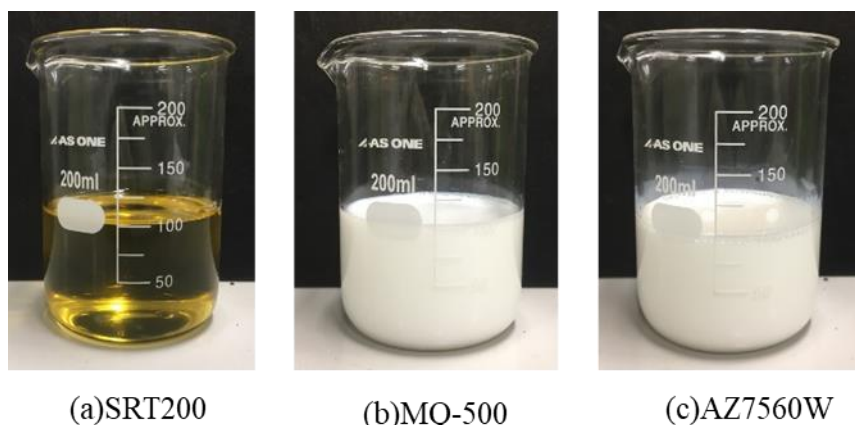


Fig. 29 Appearance image of release agent

2.2.12 ポーラス構造体の離型剤の透過特性の評価結果

図 30 は、レーザ走査速度と離型剤の透過量との関係を調べた結果である。離型剤の透過量は、圧縮空気の通気性と同様に走査速度が増加すると多くなった。また、離型剤が透過し始めたレーザ走査速度は 1600 mm/s であった。これは圧縮空気の通気性がレーザ走査速度の上昇に伴って上昇したことと同様にポーラス構造体の微小気孔の大きさが大きくなったことで離型剤が通過しやすくなったと考えられる。一方、離型剤の種類について比較すると、密度の違いによって透過量は変化せず、粘性が高い油性離型剤の透過量が少なくなった。この結果は、離型剤の粘性が高いものの方がポーラス構造体の微小気孔に対し大きく抵抗を生じさせたためであると考えられ、粘性が低い圧縮空気の方が通気性に優れていることから判断できる。

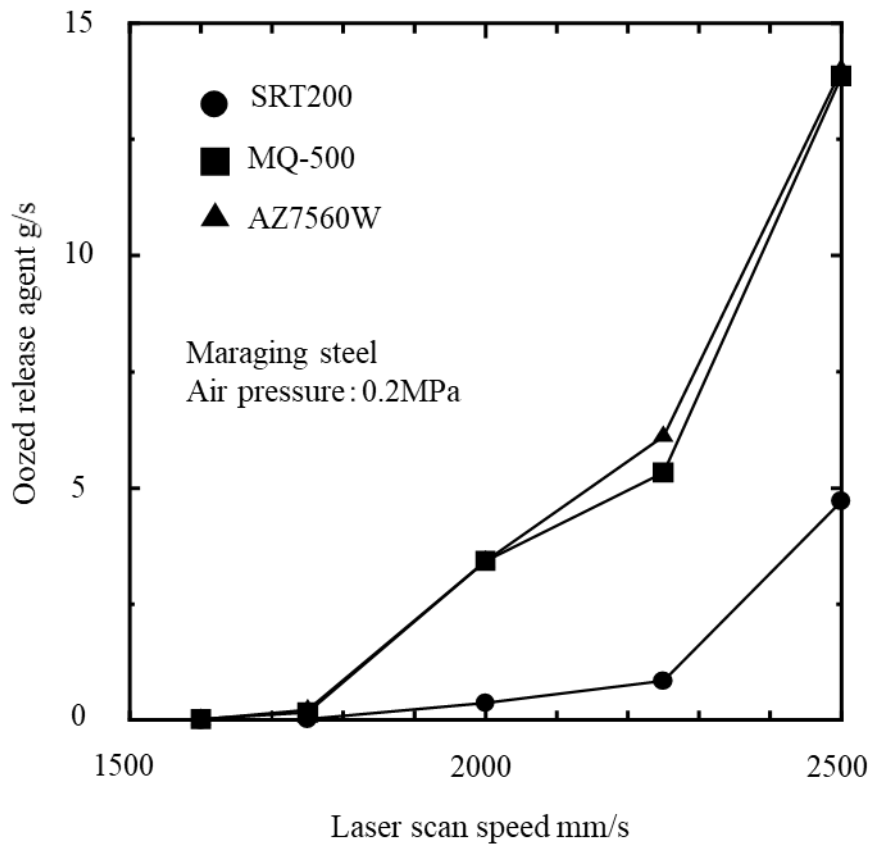


Fig.30 Relationship between laser scanning speed and release agent permeation amount

2.2.13 入れ子のみを用いた ADC12 アルミダイキャスト材の湯流れ試験

金型表面状態の違いが湯流れ性、鋳物の表面性状に及ぼす影響を調査することを目的として、金型重力鋳造実験を実施した。実験方法を図 31 に、造形条件を表 5 に示す。造形した入子の周辺を断熱材で覆い、鋼板を組み合わせることで造形面が下型表面となるように閉空間を構成することによって実験型とした。また、湯口カップは断熱ブロックを加工して製作した。湯口カップの底部には湯口に相当する穴を加工し、注湯時は断熱ブロック製ストッパーにより塞いだ状態となっている。実験時は、湯口カップに ADC12 溶湯 (620°C) を注湯し、溶湯温度が 590°C、600°C となったときにストッパーを上部に引き抜くことによって溶湯を型内の水平方向へ侵入させた。凝固後に得られた平板状鋳物の長さを測定することによって湯流れ性を評価した。また、得られた鋳物を外観評価、組織観察により評価した。

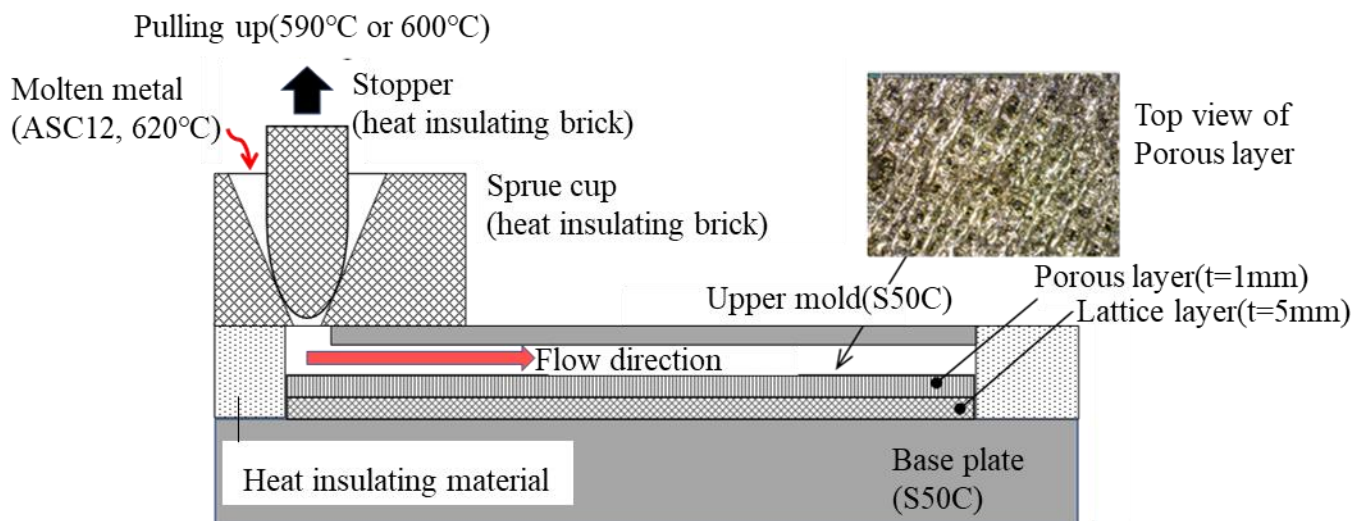


Fig.31 Schematic of gravity casting experiment

Table 5 Building conditions for a mold of gravity casting

Laser irradiation		Porous	Full melting
Laser type		Yb:fiber	
Wavelength	nm	1070	
Laser power P	W	320	
Scan speed V	mm/s	1,750	700
Spot size Φ	μm	200	
Substrate		S50C	
Surface roughness Ra	μm	3.5	
Metal powder		Maraging	
Mean diameter	μm	33	
Bulk density	kg/m^3	4260	
Layer thickness	μm	50	

通常の鋳造と比較して溶湯温度が低いのは実験装置の構造上の問題と、ダイカストを想定したときには金型内に固相が晶出した溶湯が流入するためである。つまり、液相線温度（約 580 °C）に近い温度で溶湯が金型内に流入をさせることによって初期に初晶を晶出させ、ダイカストの溶湯流動時に近い状態で実験を行うためである。図 32 に合金組成から推定した固相率と溶湯温度の関係を示す。

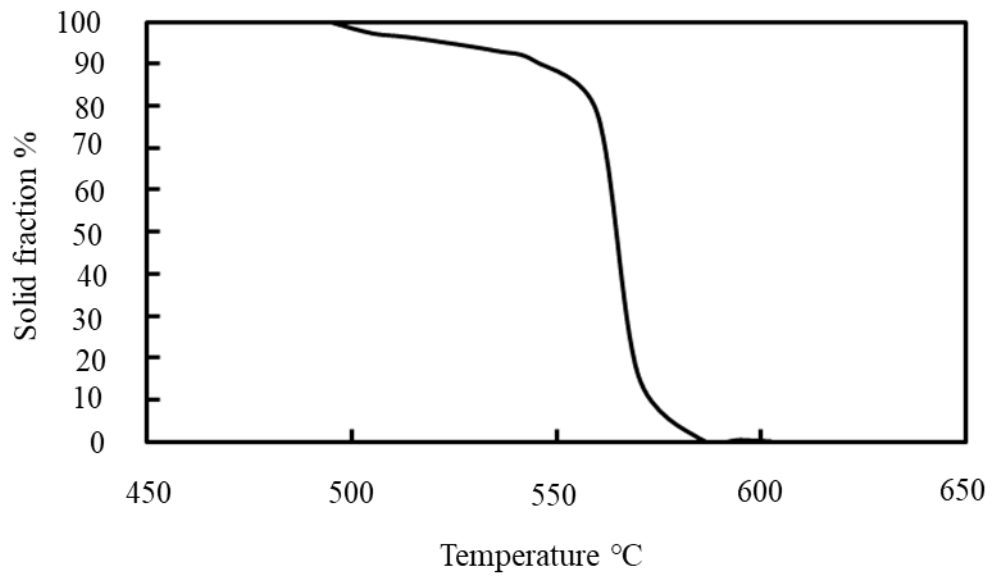


Fig.32 Relationship between solid fraction of ADC12 and molten metal temperature

2.2.14 ADC12 アルミダイキャスト材の湯流れ試験結果

図 33 にポーラス入子により得られた鋳物の外観および鋳物表面の顕微鏡写真を示す。鋳物表面には凹凸が確認された。顕微鏡により詳細に観察したところ、その凹凸は円形状をしていた。ポーラス入子の表面は約 0.2mm の網目状になっている。一方、鋳物表面の凹凸は大きなもので 0.5mm 程度である。今回の実験では型内に充填する前に流動停止しており、溶湯がポーラス孔に入り込む駆動力はほぼ重力で決定されると考えられる。これらより、今回の鋳物凹凸形状は、入子表面の形状が鋳物に転写した結果ではないと考えられた。

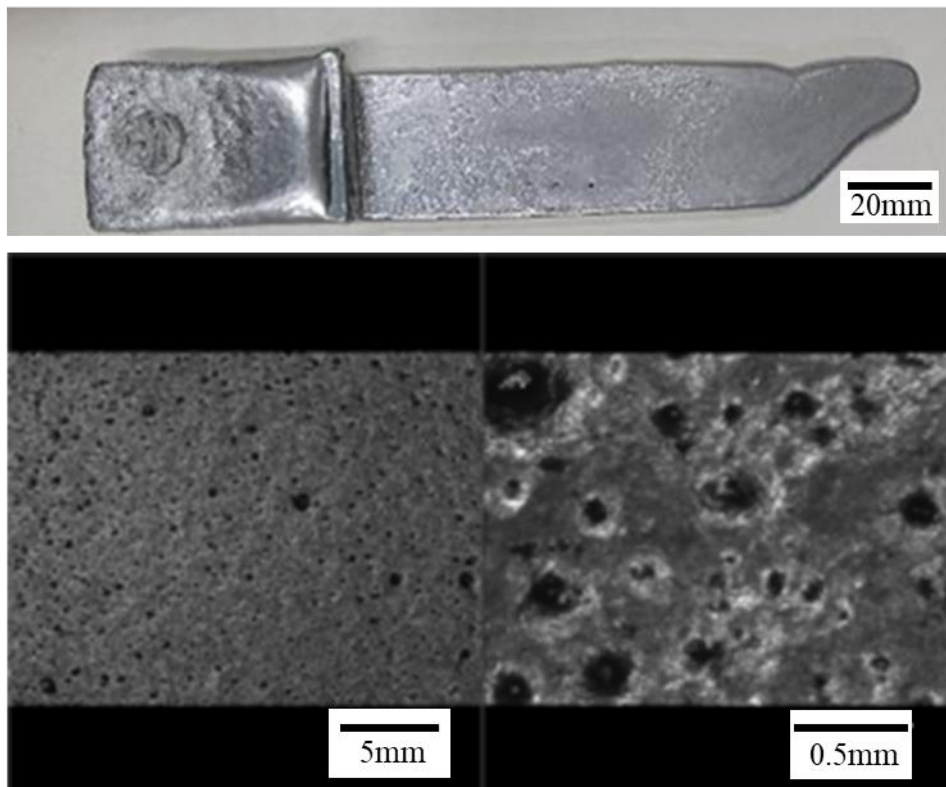


Fig.33 Casting appearance and surface micrograph

図 34 に流動長の比較を示す。ポーラス入子により得られた鋳物の流動長は通常入子より長かった。また、溶湯温度が低くなっても同様であった。

図 35 にポーラス入子により得られた鋳物の表面とポーラス入子の表面との比較を示す。鋳物の凹凸形状とポーラスの微細孔形状に違いがある。また、観察写真を二値化処理し、ポーラス入子の空孔率を画像解析した結果、どの測定位置においてもおよそ 34%であった。一方、鋳物の凹部の割合は流動方向により違いはあったが、最大で 47%程度、最小で 13%程度であった。これらより、鋳物表面の凹凸の要因はポーラス入子の表面が転写された結果では無いと考えられる。鋳物表面の凹部は円形状をしていることから、その生成原因はポーラスの微細孔が存在することによる局所的な凝固速度の違い、および微細孔からの空気・ガスの排出不良であると考えられた。

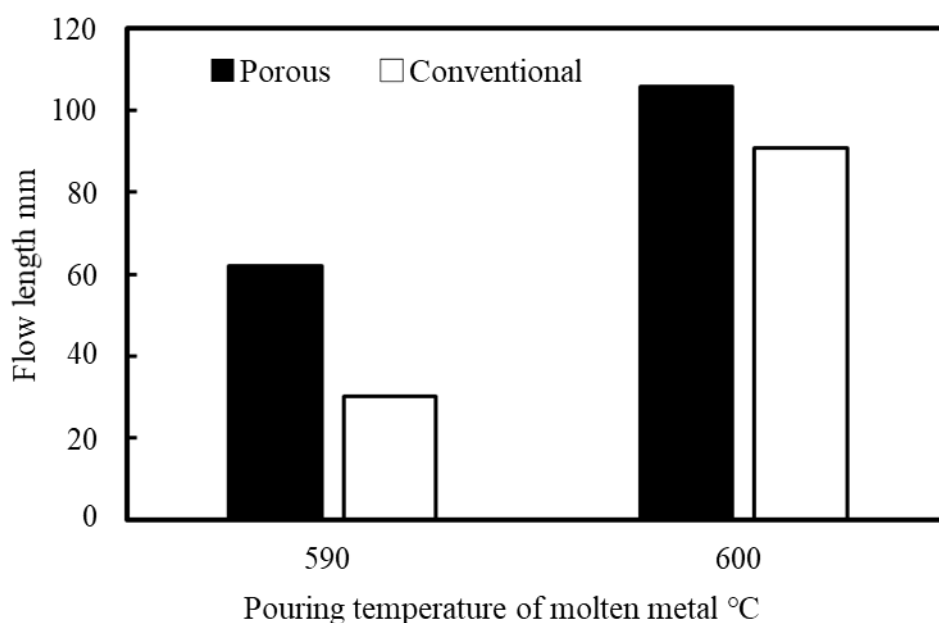


Fig.34 Comparison of flow length due to different nesting

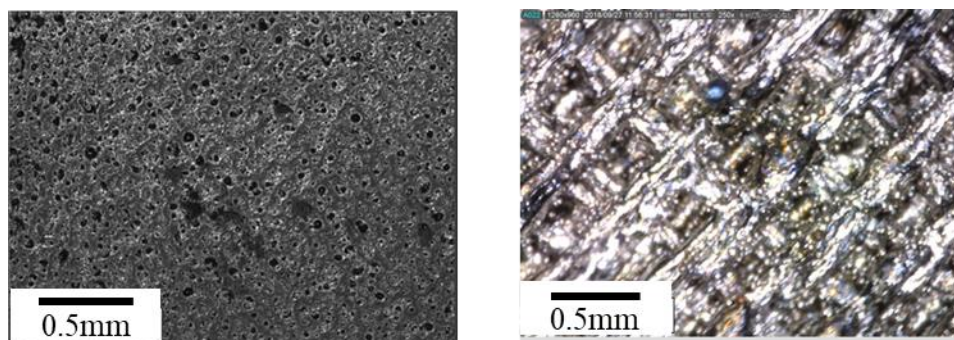


Fig.35 Comparison of the surface of the casting obtained with the porous insert (left) and the surface of the porous insert (right)

図 36 に鋳物の組織写真を示す。初晶と共晶組織が観察され、マクロ的には入子の違いによる組織の違いはない。

図 37 に金型との界面付近の組織写真を示す。通常入子の場合、界面付近は α -Al とと思われる組織が界面付近に存在し成長している。一方、ポーラス入子にも α -Al は確認されるが、通常入子と比較してデンドライトの成長が不十分である。これらのことから、ポーラス入子の冷却速度は通常入子より小さいと考えられる。

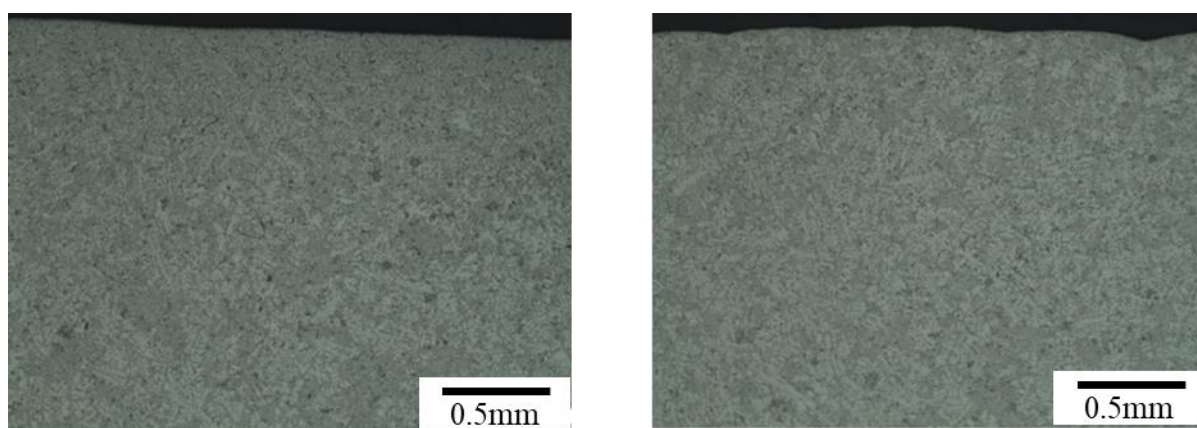


Fig.36 Observation photograph of casting structure. (Left) Porous nest, (Right) Ordinary nest

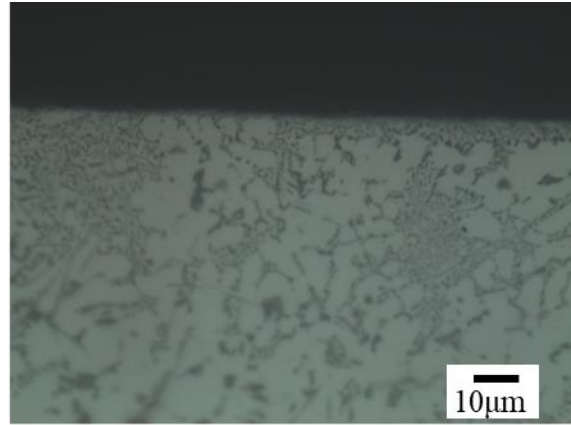
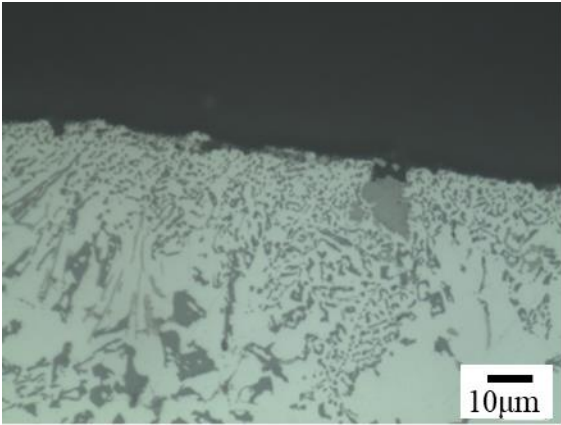


Fig.37 Microstructural observation photograph near the die contact interface of a casting.

(Left) Porous nest, (Right) Ordinary nest

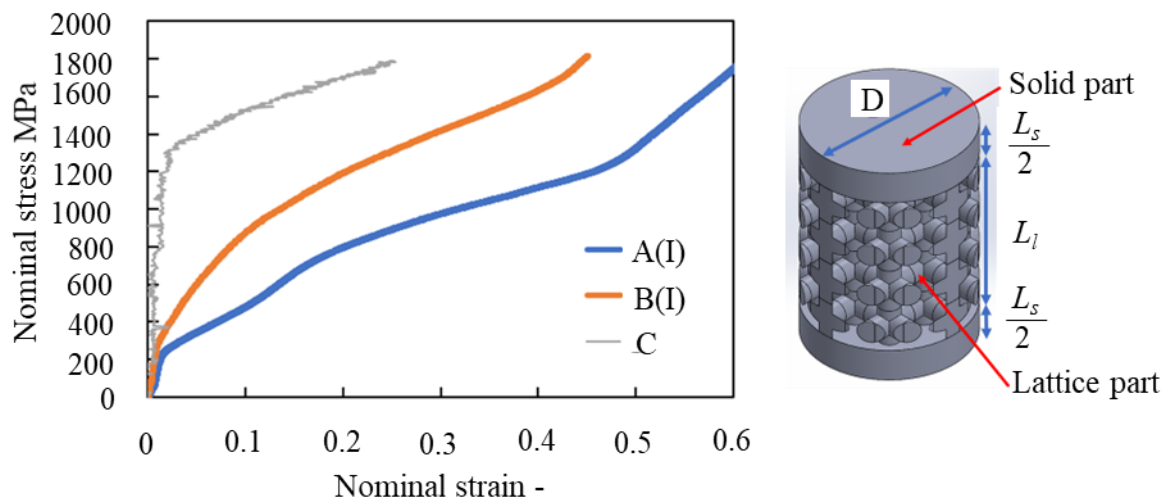
2.2.15 ポーラス金型を想定したラティス構造の解析方法

本研究の金型には、ポーラス／ラティス／ソリッドからなるハイブリッド構造が必要となる。この場合、単一構造の金型と比較して構造体としての機械的特性、熱的特性は変化することが考えられる。また、金型の設計時に必要な構造体としての剛性評価についても、解析対象を離散化させたモデルで計算を行う有限要素解析（以下、FEA）をハイブリッド構造体に適用すると計算コストが膨大になる懸念がある。そこで、均質化法を用いてハイブリッド構造体を等価な均質モデルに置き換えた解析の可能性を検討した。解析には、「Digimat Academic Research」と、汎用 FEA コード（ANSYS）を用いた。金属 AM 法により造形したハイブリッド状のマルエージング鋼製試験片の圧縮試験を実施し、均質化法による計算の妥当性を評価した。また、ダイカストでは、高圧付加時に金型内ではひずみ速度が大きな変形が発生すると予想される。そこで、低速、および高速（ 10^2mm/s 程度）の圧縮試験を実施し、変形モードの比較を行った。

2.2.16 ラティス構造強度測定用のテストピース評価解析結果

図 38 にソリッド部とラティス部が混在した円柱状試験片（ $\phi 10\text{mm}$, $h 14\text{mm}$ ）の静的圧縮試験により得られた公称応力-公称ひずみ曲線を示す。図中モデル A は、ラティス部長さ $L_l=10\text{mm}$ 、ソリッド部長さ $L_s=4\text{mm}$ 、モデル B は $L_l=5.4\text{mm}$ 、ソリッド部長さ $L_s=8.6\text{mm}$ 、モデル C は $L_l=0\text{mm}$ 、ソリッド部長さ $L_s=14\text{mm}$ である。図より、各モデルで変形特性が異なっていることが分かる。また、ラティスを含むモデルの場合は圧縮途中に加工硬化の度合いが変化するような挙動を示した。また、各試料の耐力を算出した結果、 27.1GPa （モデル A）、 36.8GPa （モデル B）、 79.7GPa （モデル C）となり、ソリッド部の割合が小さくなるほど耐力は小さくなった。

表 6 にモデル A、B の 3D-CAD データをもとにした FEA の結果（実物モデルという）、均質化法による等価モデルの FEA の結果（均質モデルという）、および実験結果の比較を示す。実験結果に対して、モデル A では 15-17%、モデル B では 2-7%の誤差となったが、均質化法によりラティス構造物の構造解析は可能であることが分かった。

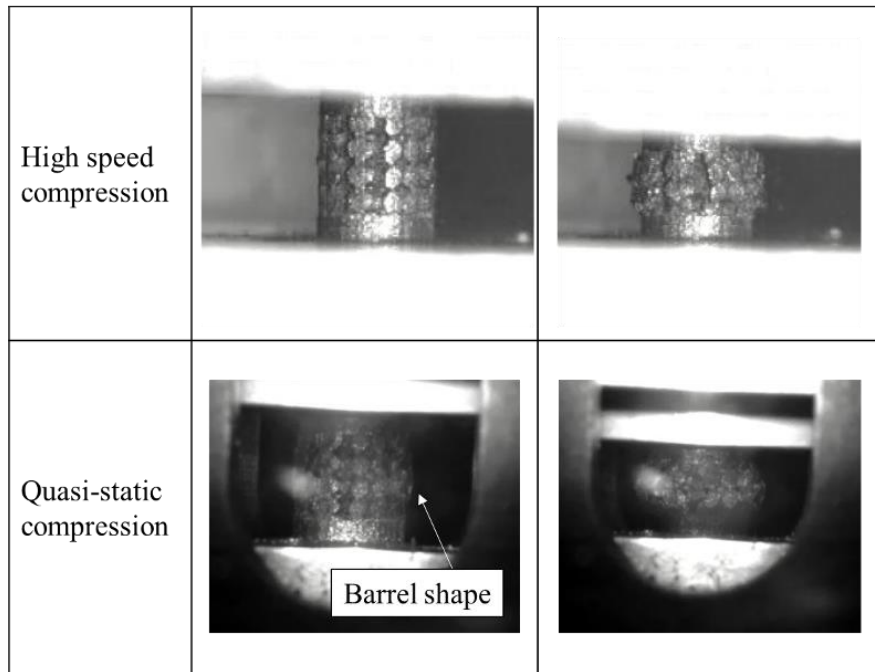


**Fig.38 Result of static compression test using cylindrical test piece
with lattice part and solid part**

Table 6 Calculation results of yield strength due to different calculation methods

	Experiment GPa	FEA (Actual model) GPa	FEA (Homogenized model) GPa
Model A	27.1	22.4	22.9
Model B	36.8	34.5	36.2

図 39 に高速圧縮，準静的圧縮時のモデル A の変形状態を示す．圧下完了時には，樽状に変形しており，ラティス部が外側に広がるような形状となっている．一方，変形途中において，準静的圧縮のほうが，早期に樽状の変形が発生し始めており，変形速度により変形モードが異なる可能性を示唆していた．



**図 39. Comparison of deformation states of cylindrical test pieces
due to different deformation rates**

図 40 にラティス層とソリッド層で構成される円柱状試験片の圧縮試験結果と、その試験片モデルそのものを使用した FE モデルによる計算結果、およびソリッド層のみに置き換えた等価 FE モデルによる計算結果の比較を示す。実験結果をみると、ひずみ=0.12 付近から公称応力値が急激に増加し、ひずみ=0.2 付近からその増加割合は低下した。また、ひずみ=0.48 付近から再度急激に増加した。これは、圧縮の進展に伴いラティス層間の空隙が押しつぶされ、ラティス同士が接したためであると考えられる。一方、2 種類の計算結果を比較すると、その値はほぼ一致した。これら計算結果と実験結果を比較すると、ひずみ=0.1 付近まではほぼ一致した。計算ではラティスの変形による空隙の減少は考慮できていないため、ラティスの変形を伴う不安定な変形時の応力値とは異なる結果となったと考えられる。

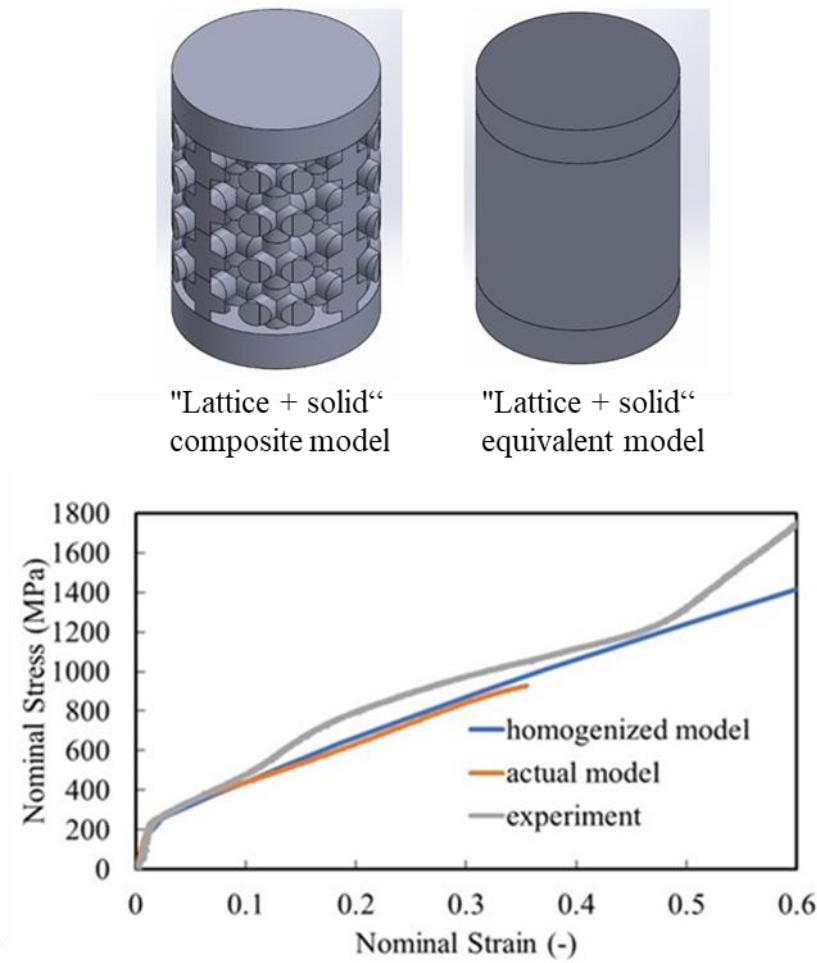


Fig.40 Comparison of Compression Test Results and Structural Analysis Results of Cylindrical Specimens Consisting of Lattice Layers/Solid Layers

2.2.17 ポーラス金型のダイカスト鋳造実験

離型剤塗布方法, 各種入子形状および表面処理の違いによる鋳造性への影響をダイカスト鋳造実験により評価した.

(注釈)

- ・ 離型剤塗布方法：内部から染み出し／外部からスプレ
- ・ 各種入子形状：ポーラス・ラティス・ソリッドからなる構造（以後，ポーラス入子という）／ポーラス無し構造（以後，ポーラス無し入子という）
- ・ 表面処理：カーボンコーティング(以下，CC)／ガス軟窒化／処理無しの3種類

図 41, 42 の実験金型に, 溶湯圧力センサ, ガス圧センサ, および熱電対を設置し, 各センサによりダイカスト中の金型内の評価を行った. 図 41, 42 に金型と各センサの設置位置を示す. ダイカスト中の各センサの出力電圧は, 「グラフテックデータプラットフォーム」にて収録, およびデータ変換を行った. 得られたダイカスト品は X 線 CT により観察し, 欠陥の有無を検証した.

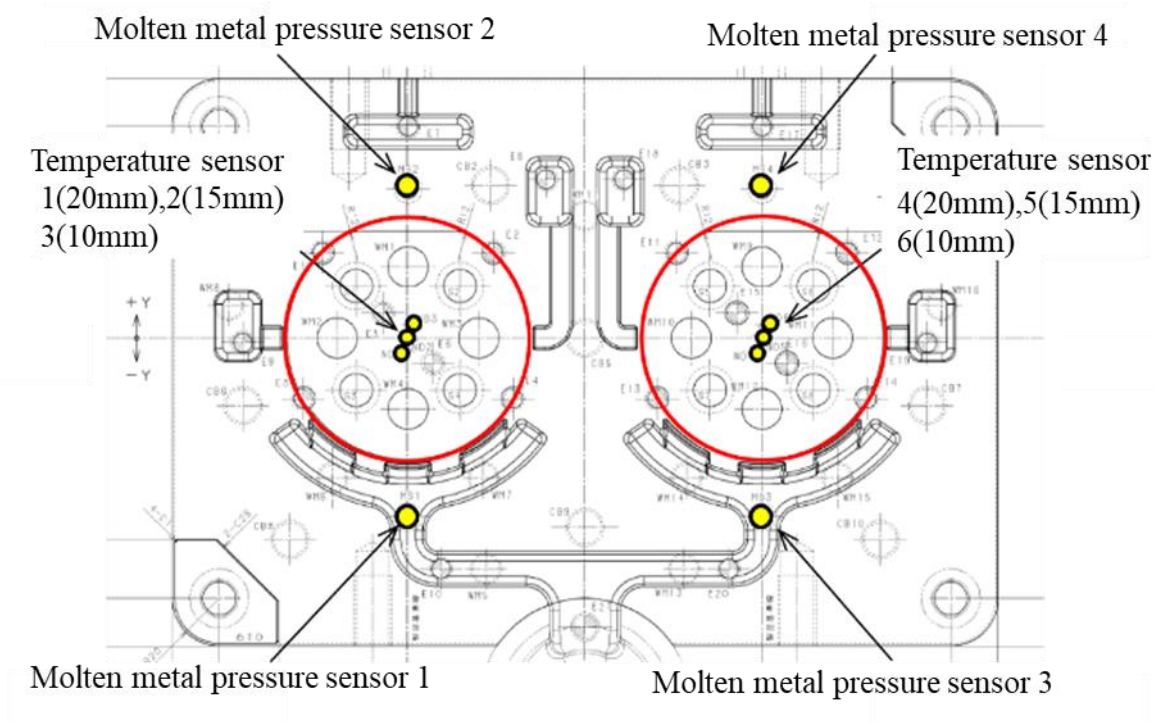


Fig.41 Various sensors and their mounting positions on the experimental mold (movable side)

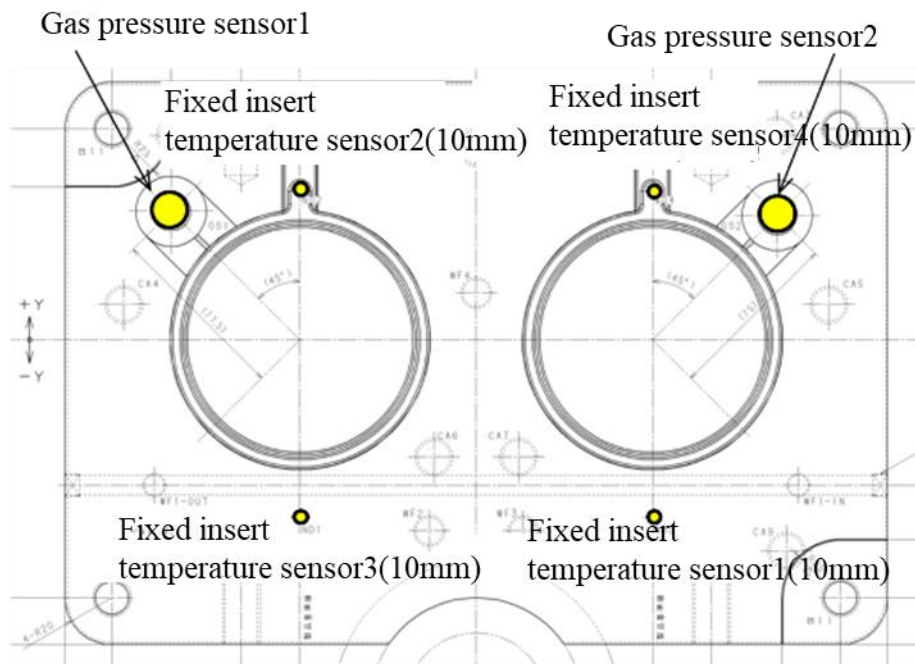


Fig.42 Various sensors and their mounting positions on the experimental mold (fixed side)

ダイカスト中の各センサの出力電圧はサンプリング周波数 1kHz で連続的に収録、およびデータ変換を行った。溶湯には ADC12 を用いて、650°C でスリーブに注湯した。離型剤には油性離型剤である SRT200 を用いた。ダイカスト時の鑄造条件は、鑄造圧力の目標値を 30MPa とし、射出速度は低速 0.5m/s、高速 0.8m/s を設定値として実施した。図 43 に本研究で製作したダイカスト金型の写真を示した。金型は可動型と固定型で構成した。また中子にはカーボンコーティングを施した。カーボンコーティングは湯流れ性を向上させるため、鑄造圧力が低くても良質な製品を形成でき、離型性も良くなるという特徴がある。通常ダイカスト鑄造では大きな圧力を伴うものであるが、ポーラス構造体は脆弱であり、厚さも 1mm しか設定していない。そのため、鑄造時に入子が破損してしまうことも懸念されたため、鑄造圧力を低くするためにもカーボンコーティングを実施した。図 44 には金型に組付けたポーラス入子の概略図を示す。

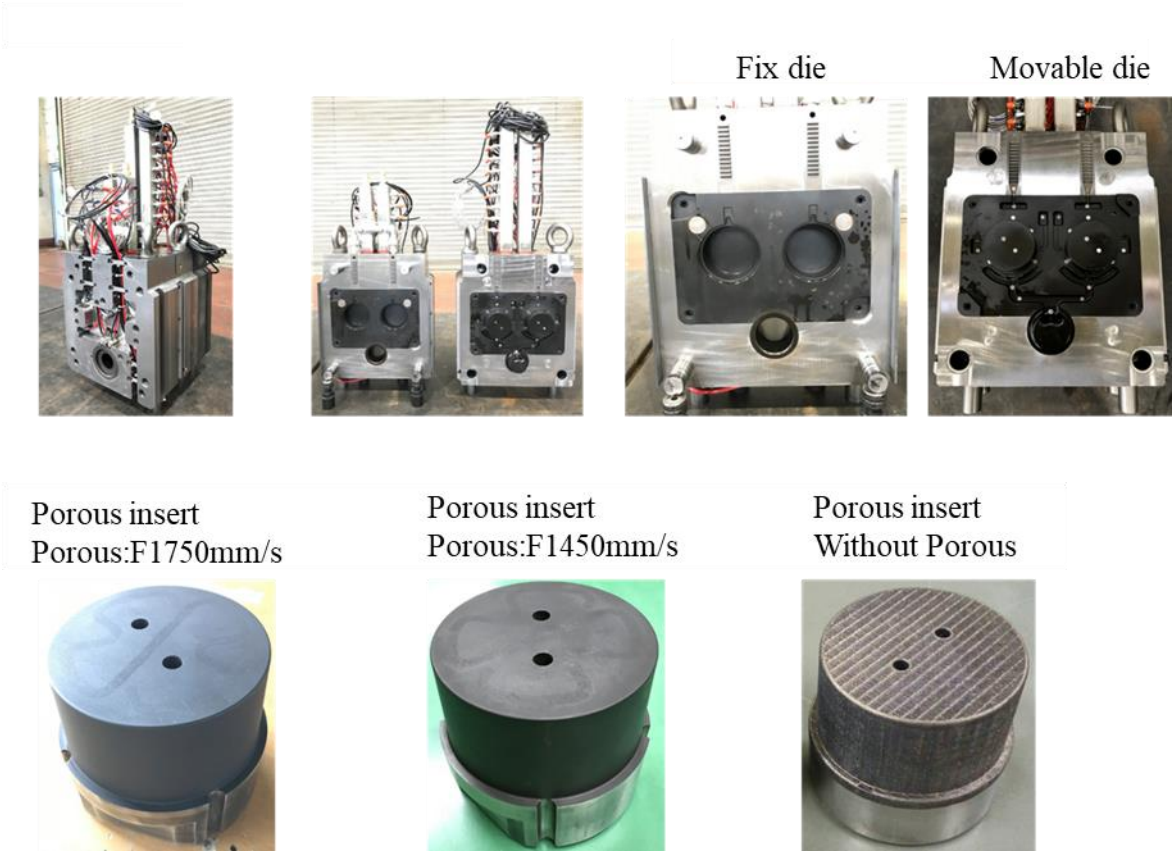


Fig.43 Porous mold for die casting experiment

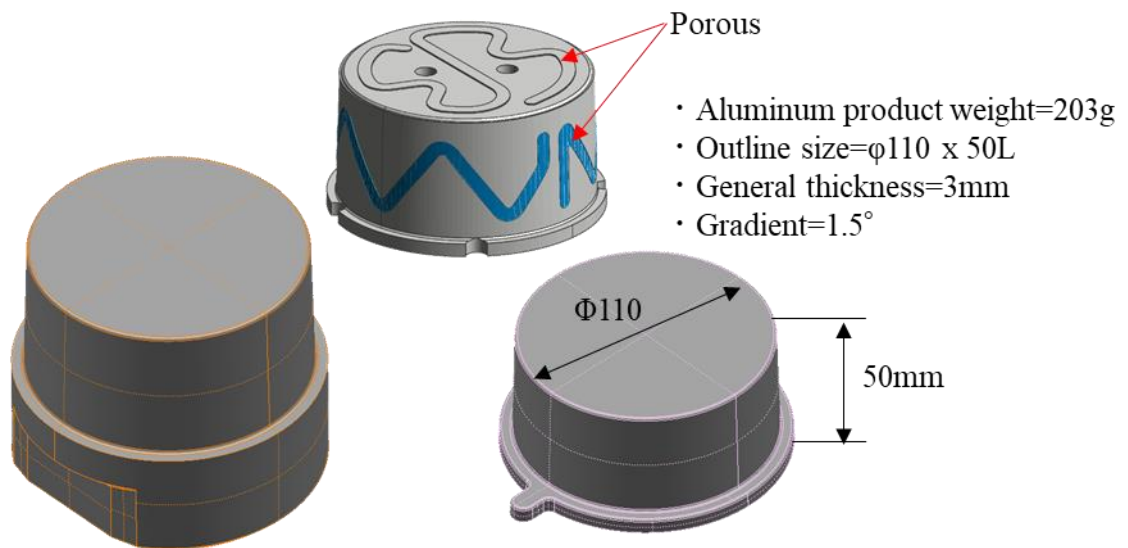


Fig.44 Schematic of porous insert

2.2.18 ポーラス金型によるダイカスト鋳造実験の結果

図 45 に成形したカップ状のアルミ製サンプルの画像を示した。一番左の画像は固定型に接触していた面、中央の画像は可動型に接触していた面をそれぞれ示している。製品の外観はやや離型剤残りからくる湯じわが目立つものの、湯回りにおいて未充填などの問題はないと思われた。

一方で、一番右の写真は、ポーラス構造体に接していた面を拡大した画像になるが、ポーラス構造体から転写されたと思われる 5 mm 幅の経路を蛇行させた痕跡が見られた。このことから鋳造は良好であったと考えられた。なお、この痕跡に関して、実際の製品であっても、意匠面に現れなければ問題ないと判断した。

図 46 にポーラス入子に CC 処理（カーボンコーティング処理）をしたときの溶湯圧力の変化を示す。溶湯が金型内に射出され、充填してから急激に圧力が高くなっている。このときの最大圧力は成形機で出力された 32MPa より低く、ゲート側（図中 1, 3）とベント側（2, 4）の比較でも違いがあることから、圧力損失が確認された。

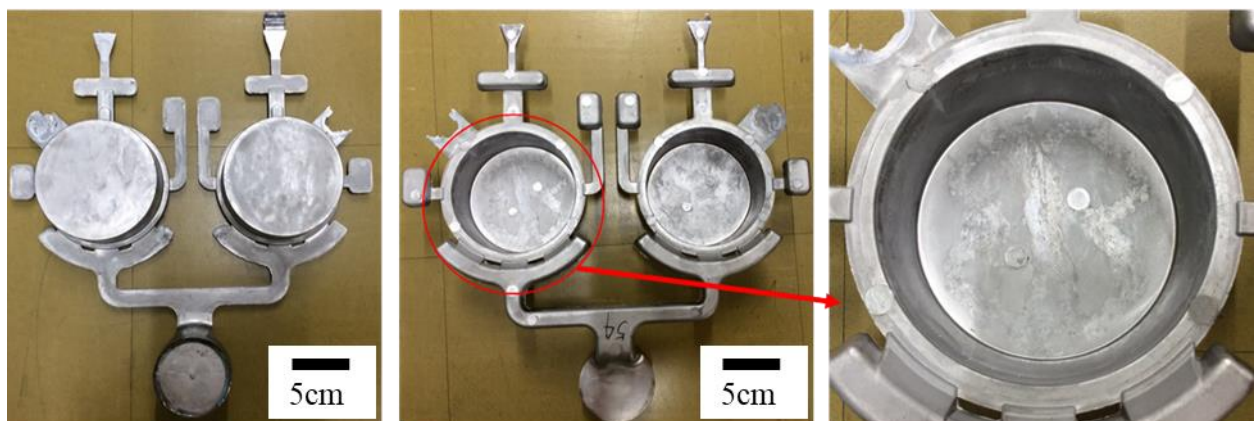


Fig.45 Casting results of aluminum products during the casting verification test

図 47 にポーラス入子にガス軟室化処理をしたときの溶湯圧力の変化を示す。最大圧力は CC 処理時と大きな差はないが、溶湯圧力が付加されている時間は CC 処理時より若干短い。図 48 に表面処理無しのポーラス入子によるダイカスト時の溶湯圧力の変化を示す。全体の挙動は図 46、図 47 とそれほど違いはない。これらのことから、表面処理による鑄造性への影響は、溶湯圧力の付加時間にあると考えられた。図 49 にポーラス入子にガス軟室化処理をしたときのガス圧センサ出力電圧の変化を示す。鑄造中にガス圧が高くなり、金型内のガスが高くなっていることが分かる。また、ポーラス入子を配置したガス圧 2 の値が低くなっていた。このことから、入子のポーラス部からガスが排出されたと推察された。

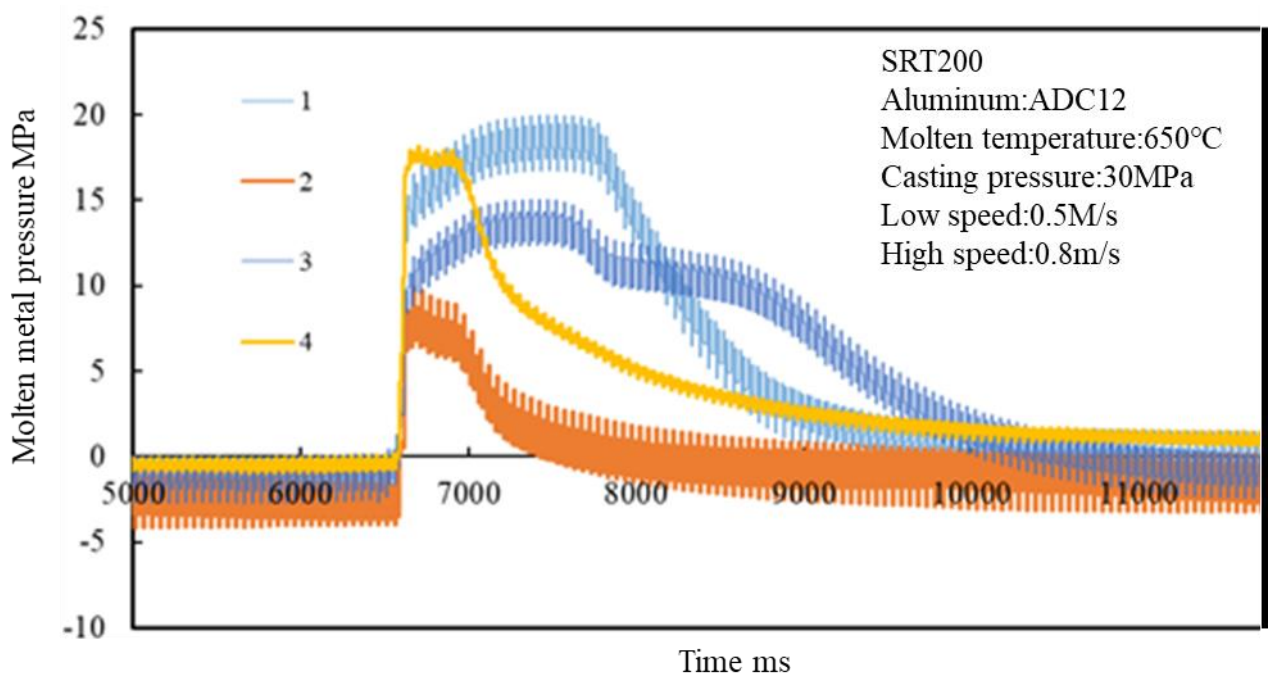


Fig.46 Change in molten metal pressure during die casting due to CC-treated porous insert

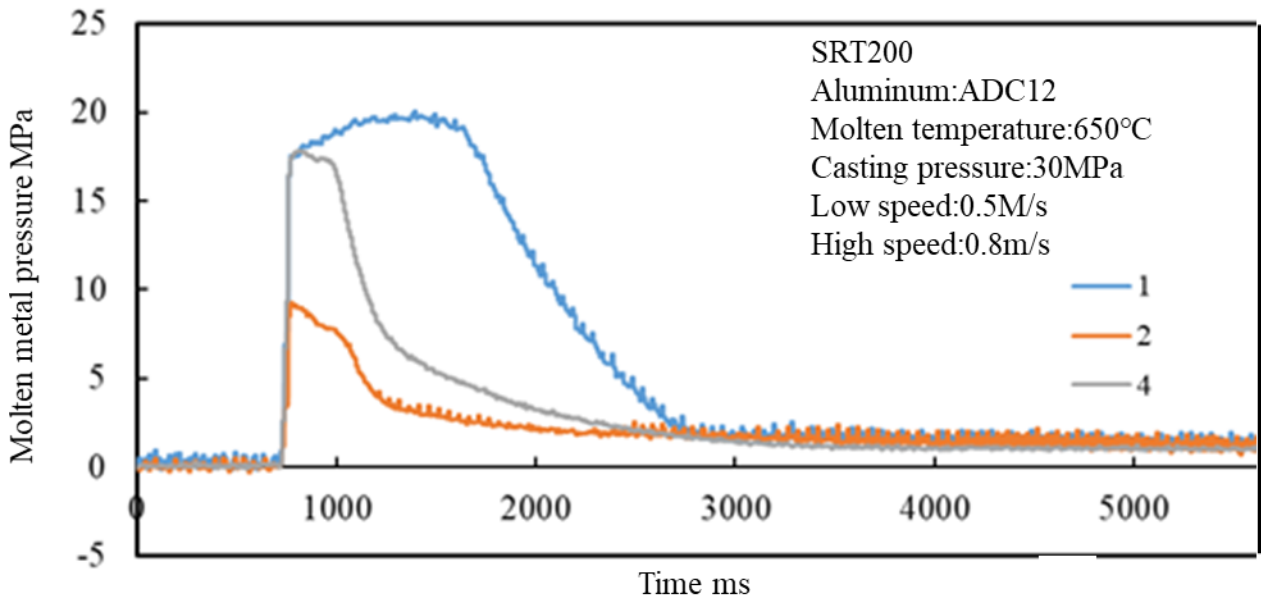


Fig.47 Change in molten metal pressure during die casting due to gas nitrocarburized porous core

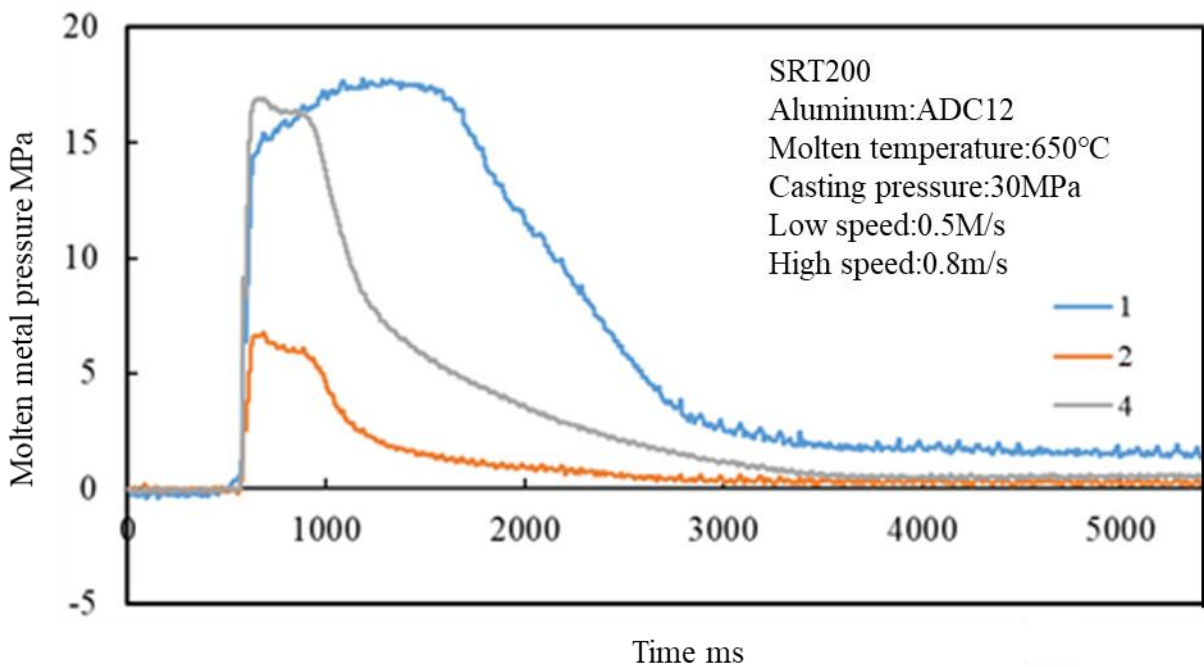


Fig.48 Change in molten metal pressure during die casting with a porous insert without surface treatment

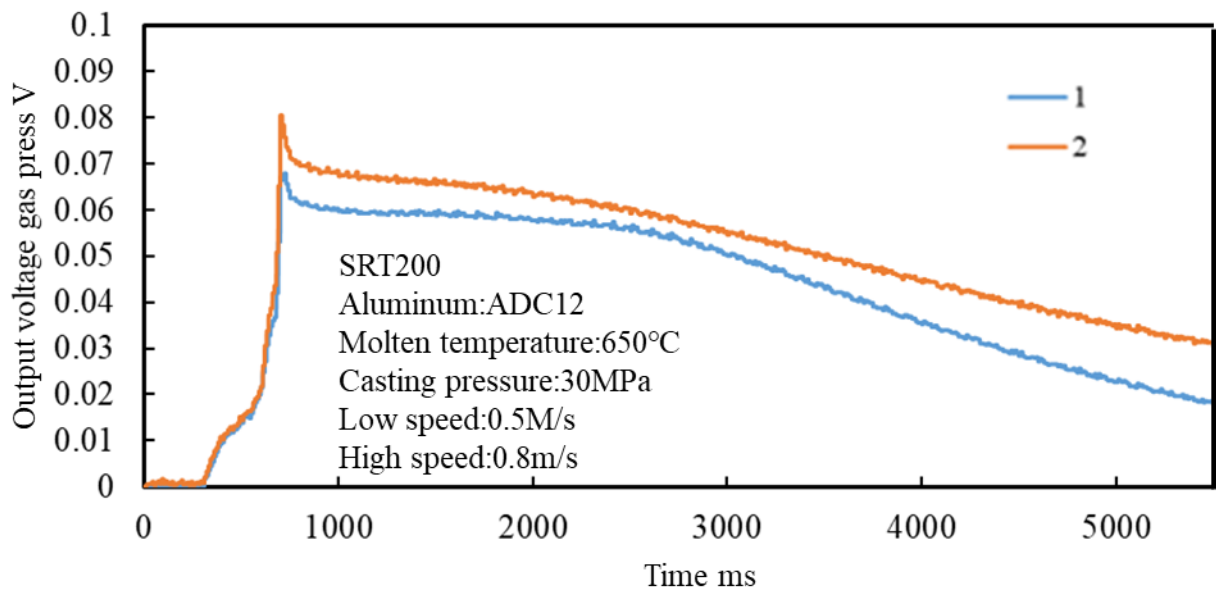


Fig.49. Change in gas pressure sensor output voltage during die casting due to gas nitrocarburized porous insert

図 50 にポーラス入子のダイカスト品の X 線 CT による観察結果を示す。本研究開発において、離型剤は金型入子表面から少量吐出されて供給される。その際に離型剤が残留し、ダイカスト製品中に巻き込まれることによる欠陥の発生が懸念されたが、ポーラス部と接触している面付近に大きな欠陥は見られなかった。これは、ポーラス部からガスが排出されていることがひとつの要因であると推察された。また、離型剤を染み出させながらも通常のダイカストと同等の製品を得ることが可能であることが分かった。

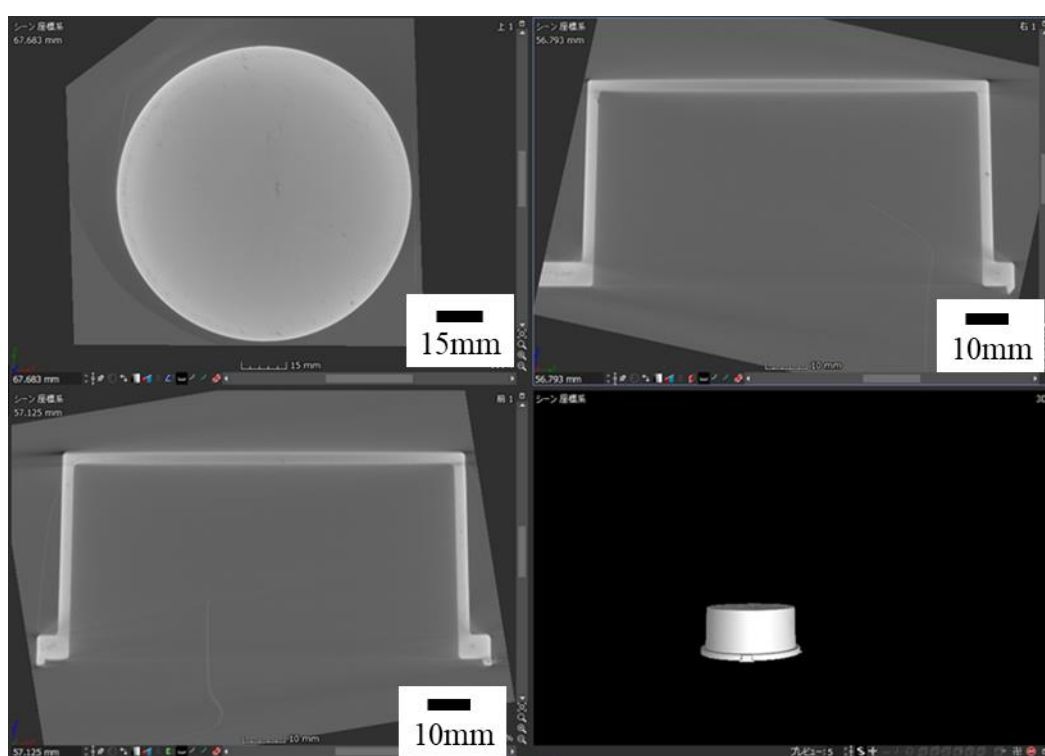


Fig.50 Observation result by X-ray CT of die-cast product obtained by porous insert

鑄造実験で使用したポーラス金型について、内部から離型剤を供給させた様子を観察した結果を図 51 に示す。本金型では、上面と円周上の側面に蛇行する供給路を形成しており、図 51 で泡状に見える液体が内部から供給された離型剤である。離型剤は、いずれの部位からも供給される様子が確認できたが、上面、側面ともに離型剤の供給量が少ない部位があった。

この原因を検討するため、実験で使用した金型のポーラス部を切断し、光学顕微鏡や電子顕微鏡で観察を行った。図 52 は、離型剤の供給量が異なる位置で切断した金型側面を電子顕微鏡で観察した画像を比較している。連続性を有した気孔と金型表面との距離に違いがあり、供給量が少ない部位では表面と気孔部との距離が近く、気孔内部に多くの異物が存在していた。供給量が多い部位でも異物が確認できたが、その量は少なかった。図 53 は、金型上面で良好な供給量が得られた部位を断面観察した結果である。図 52 と同様に、気孔内部に異物の存在は確認できたがその量は少なかった。そこで、図 54 で示す金型側面の気孔内部を EDX 分析し、マルエージング鋼粉末と分析された成分を比較した結果を図 55 および図 56 に示す。本金型は鑄造実験に用いた後に切断しているが、ポーラス部位で検出されたアルミニウムはマルエージング鋼と同等であり、鑄造時にポーラス部位へ Al 溶湯が侵入していないことがわかる。一方、ポーラス部位にはケイ素が多く検出された。粉末準備、造形、仕上げ、鑄造にかかる一連の工程を考慮してケイ素の発生源を検討した結果、離型剤の成分由来である可能性が高かった。離型剤は、ポリジメチルシロキサン(C_2H_6O-Si)_n を有効成分に持ち、鑄造時の金型温度が 200 °C まで昇温されると、図 57 に示す熱酸化分解反応を起こし、その結果 SiO_2 が生成されることがわかっている。気孔内部で検出されたケイ素は、供給された離型剤が気孔内部で SiO_2 に変化したためと考えられる。このように離型剤の成分が分解されて発生した残渣物が微小気孔を閉塞させる可能性があり、離型剤の染み出しにおいて微小気孔に滞留しない構造が必要となると考えられる。

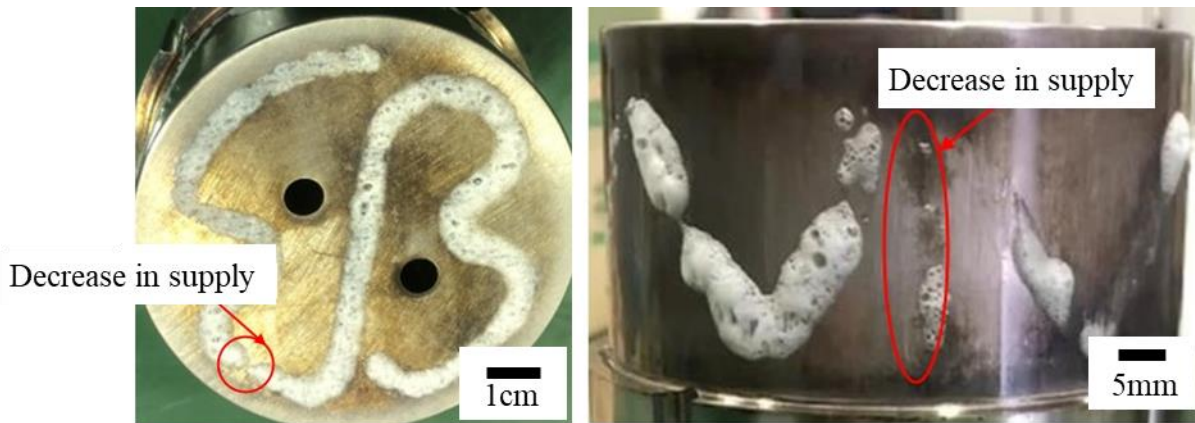
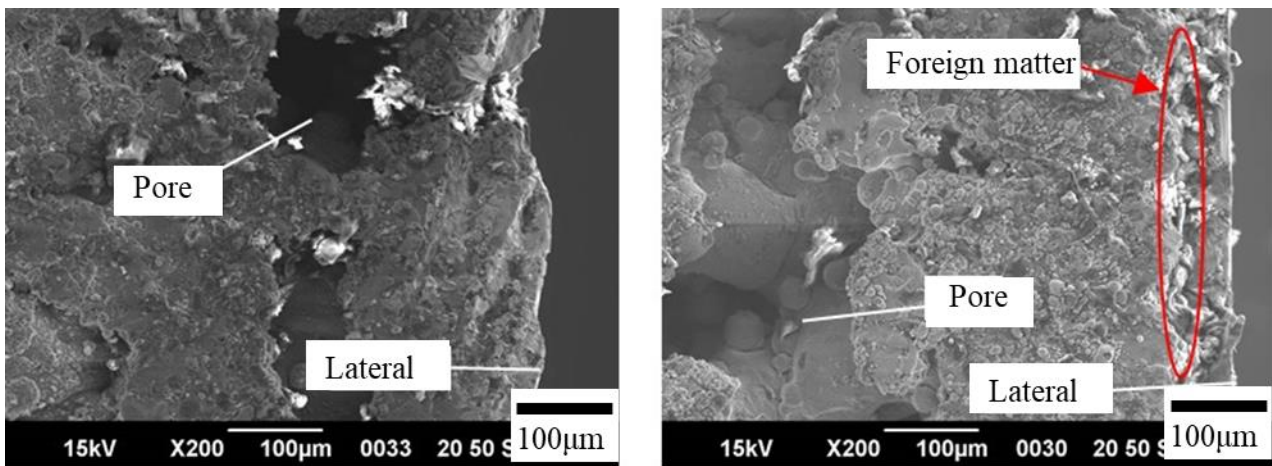


Fig.51 How the mold release material is supplied from the mold surface



(a) Release agent supply: many

(b) Release agent supply: little

Fig.52 Cross-sectional SEM image of the mold side

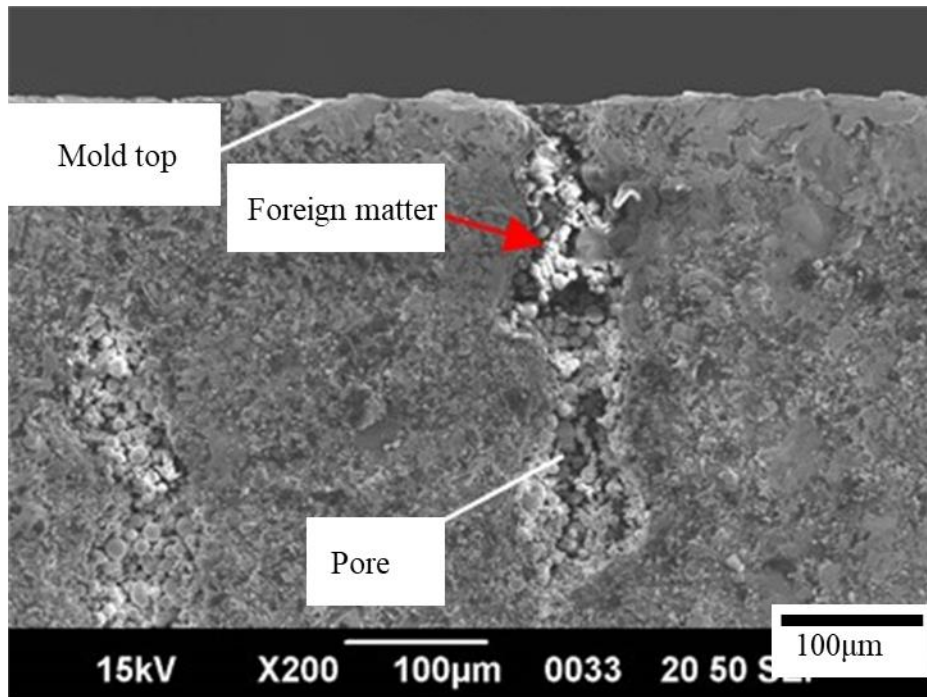


Fig.53 Cross-sectional SEM image of the mold top

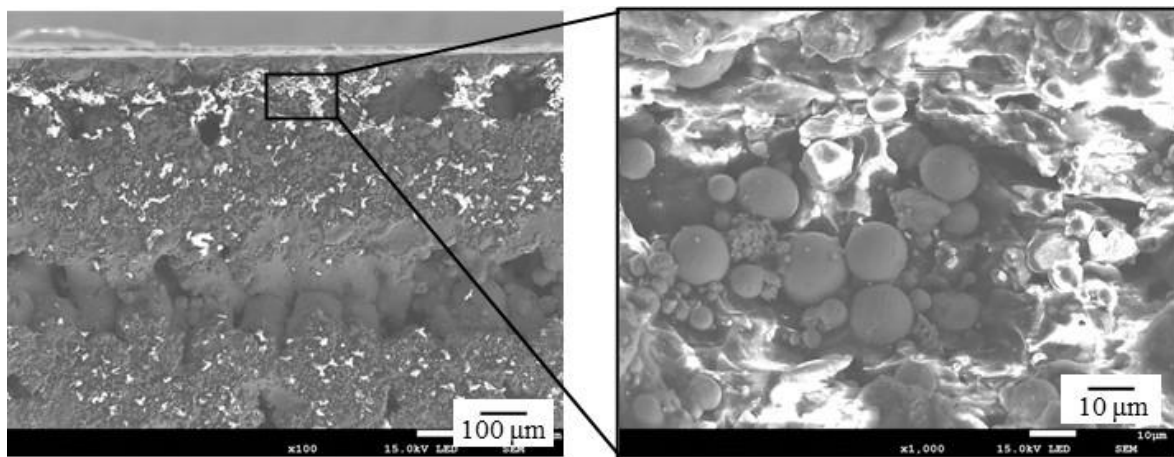


Fig.54 Contaminants analyzed by EDX

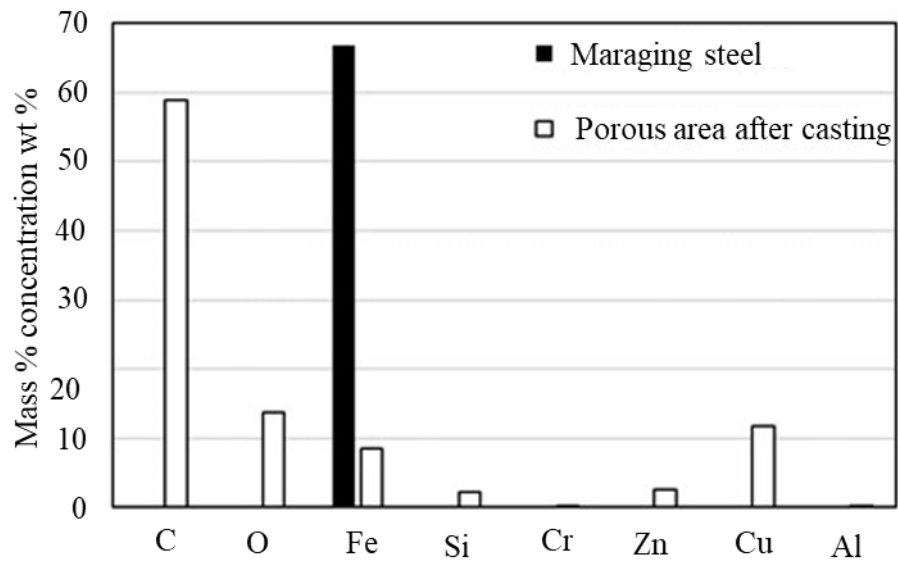


Fig.55 Composition comparison of foreign matter and maraging steel

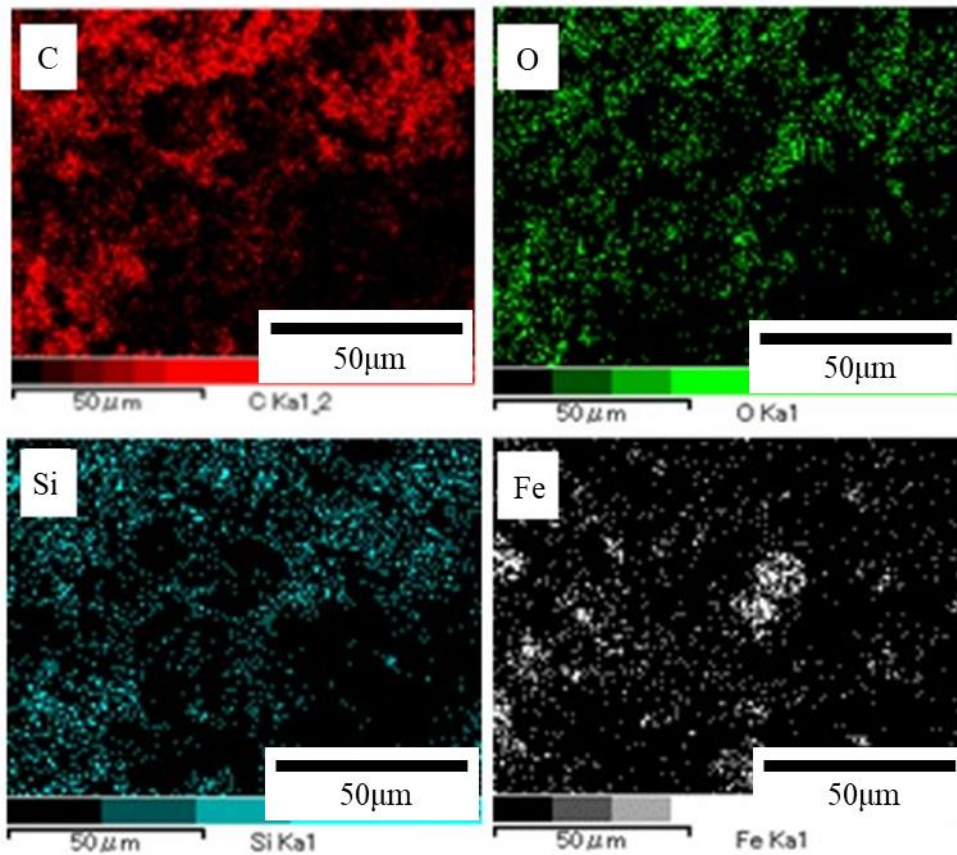


Fig.56 Mapping image of DX analysis

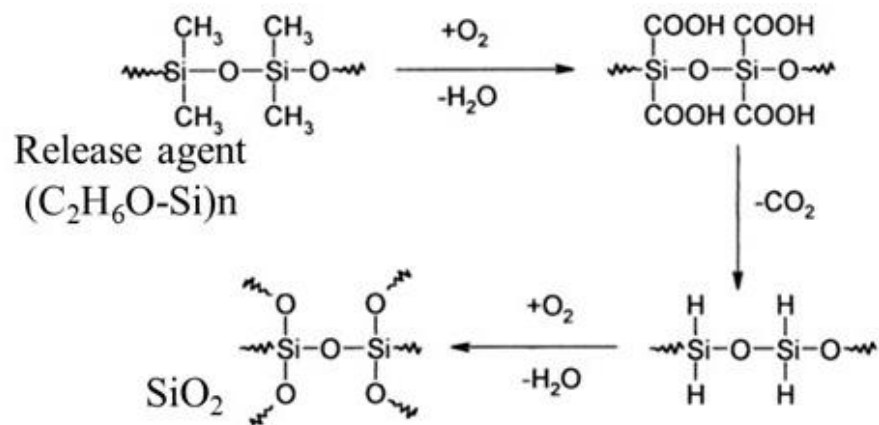


Fig.57 Thermal oxidative decomposition reaction of polydimethylsiloxane

2.3 結言

2.3.1 ポーラス構造体の造形

ポーラス構造体の造形物についてレーザ走査速度を変えて造形し、その通気特性や気孔の状態について調べたところ以下のようなことが分かった。

- (1)造形物内部に形成される気孔はレーザ走査速度が速くなるにつれて増加すること
- (2)内部に形成される気孔は造形時の積層方向に対して連続的につながること
- (3)造形方向に対して通気方向が直行するポーラス構造体の造形ではベクトルパスのレーザ照射によって気孔が閉塞してしまうこと
- (4)離型剤の染み出し量は離型剤の粘性が低い方が多くなること
- (5)ポーラス構造体は気孔の存在により熱伝導率が低く、熔融アルミニウム合金に対して熱抵抗層として作用すること

これまでの結果から、造形方向が異なるとポーラス構造体内部の通気特性が大きく異なる結果となっていたが、ポーラス構造体の断面観察とライン造形の観察によってその原因を明らかとした。具体的には、ポーラス構造体をレーザ照射速度について変更させて造形すると、造形ビードがボーリング現象によって不連続な球状のものとなり、その隙間が積み重なることで微小な気孔となる。しかしながら、この隙間は不規則なものであり、造形方向に対して直行する方向には気孔が繋がりにくいことで通気性が小さくなってしまふことで前述した異方性が発生することが分かった。

2.3.2 ポーラス構造体を用いた離型剤染み出し金型の特性

ポーラス構造体を用いて離型剤を染み出す金型を製作し、ダイカスト鑄造実験を行った。この実験により、以下のようなことが分かった。

- (1)離型剤を染み出させながら行う鑄造であってもダイカスト成形品の内部品質に差異はないこと
- (2)ダイカスト鑄造時に離型剤を染み出させるとき、発生するガスがポーラス構造体に侵入すること

(3)多孔質部分に離型剤の残渣物が発生し，離型剤の染み出しを阻害すること

これらの結果に対し，ポーラス構造体は気孔の形状が不規則であり，金型に造形した部位ごとに離型剤の染み出し量も不規則になること，前述した離型剤の残渣物による微小気孔の閉塞という課題が存在する．このような課題に対し，第3章で検討した微小管は3DCADモデルの設計によって，より狙った位置，大きさ，気孔の数を制御することで解消することを目的とした．そのため，第3章では微小管の成形バラつきを抑え，離型剤の染み出し量制御をより高精度化していく検討を行った．

第3章. 微小管金型の製作と鑄造における特性

3.1 緒言

第2章で検討したポーラス構造体は、金属積層造形における堆積粉末に対する入熱量を制御することで容易に得られ、金型本体は完全溶融として緻密に造形することでポーラス構造体との一体化が可能である。また、離型剤の染み出し位置は設計時に指定するため、従来の供給法では困難であった深リブ位置等へも離型剤が供給できる特長を有している。しかしながら、ポーラス構造体は空隙のサイズ、量、位置を厳密に制御することが困難であり、金型全体に対する離型剤の供給総量は制御できるが、ポーラス構造体の各位置からの染み出し量は制御が難しいという課題が存在することがわかった。

そこで本章は、内部から離型剤を染み出させる金型製作の更なる高精度化を目指し、ポーラス構造体の代替としてCADで設計した微小な管構造を金型表面へ選択的に配し、微小な管構造の各位置で離型剤の染み出し量が制御できる金型製作を検討した。微小な管構造を微小管と定義する。まず、ダイカスト鑄造において、溶融アルミニウム合金が侵入しないとされるサイズである50 μm 以下[59]の微小管もしくは離型剤を染み出させることができる微小管を得るため、粉末床溶融結合法で断面形状やサイズ、造形角度が異なる微小管を造形し、実際に造形された微小管のサイズや離型剤の染み出し特性を調べた。さらに、微小管を配置したダイカスト金型を造形し、鑄造時の離型抵抗や得られたダイカスト製品を調べて提案手法の有効性を評価した。

3.2 微小管の造形方法①

3.2.1 微小管の断面形状検討

微小管造形では、造形して得られる管径は余剰固化によって縮小することが予想され、造形プロセスを考慮した幾何形状が求められる。特に、微小管を造形方向と直行方向に配置させる場合、微小管の上部がオーバーハングとなるため、この部位では余剰固化が促進されて微小管が閉塞しやすくなる。そこで、図1に示す各種断面形状（円、正方形、ひし形、三角形）を作成し、CADでの微小管サイズと実造形サイズとの差を調べるとともに、造形方向の違いによる断面形状を比較した。実験方法を図2に実験条件を表1に示す。設定サイズを50～1000 μm の範囲で変更し、設定サイズの違いによる余剰固化量を評価した。この時、通常では輪郭を走査するベクトルパスを照射しないようにした。造形した試験片について図2のように1 mm ずつワイヤーカットで切断し、その切断面の微小管を顕微鏡でサイズを計測した。また、設定サイズと実際に造形されたサイズの差異を余剰固化量として算出した。

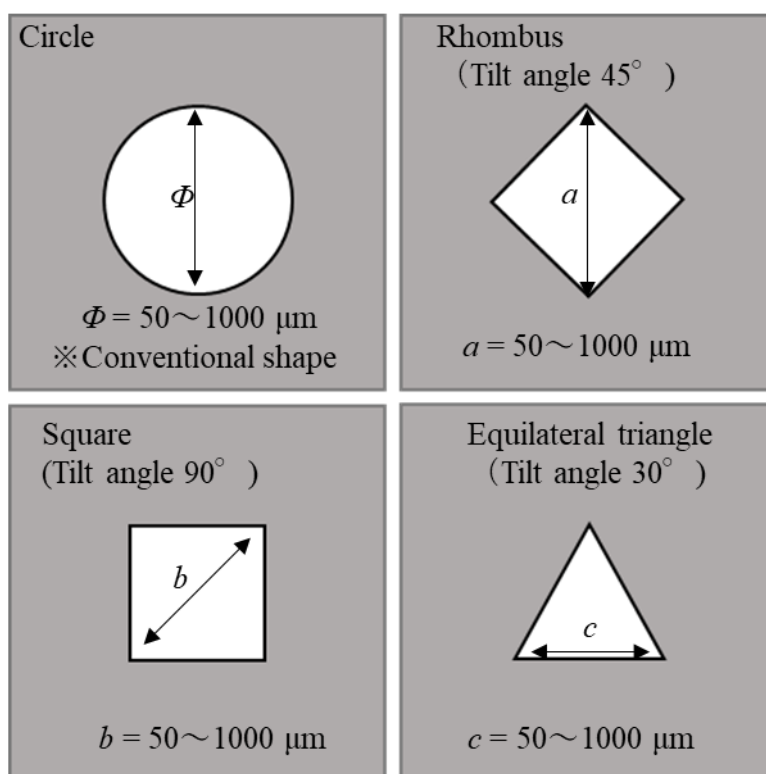


Fig.1 Microtubule cross-sectional geometry

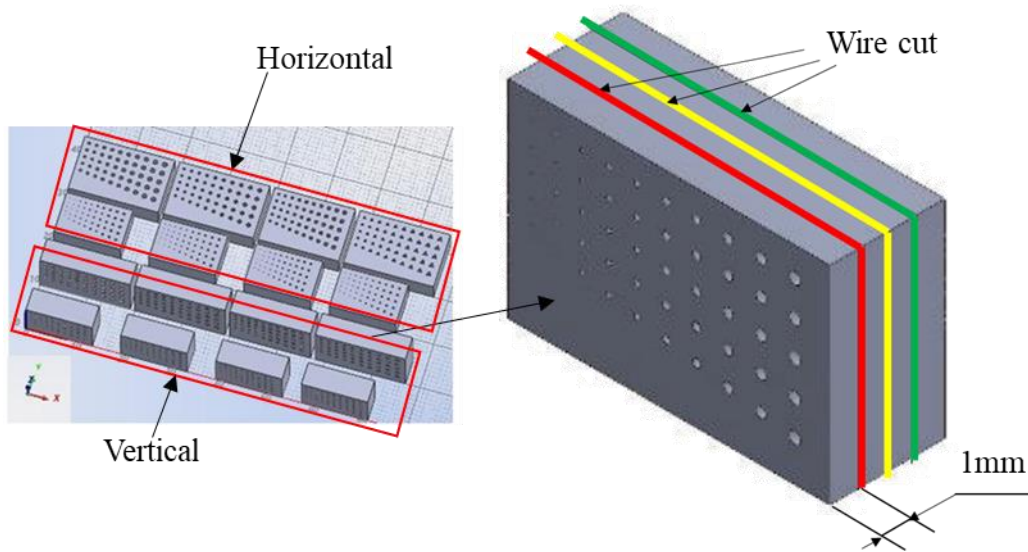


Fig.2 Model used to measure surplus solidified amount

Table 1 Specimen conditions for microtubule cross-sectional shape selection

Laser irradiation conditions		
Heat source		Yb-fiber
Wave length	nm	1070
Laser power	W	320
Irradiation angle	°	40
Scan speed	mm/s	700
Spot diameter	μm	200
Deposition thickness	mm	0.05
Specimen shape		
Cross-sectional shape		Circle, Rhombus, Square, Equilateral triangle
Microtubule size μm		50~1000
Number of microtubules		10
Building direction		Horizontal, Vertical

3.2.2 微小管の断面形状検討の結果

造形方向に対して同方向に微小管を造形した場合の余剰固化測定結果を図3, 得られた各断面の微小管を光学顕微鏡で観察した結果を図4に示す. なおこの造形方向を水平方向とする. 水平方向の造形では, 円の余剰固化量が最も小さく, ひし形, 四角形, 正三角形の余剰固化量は円形状の2~2.5倍となった. このとき, 円形では形状が保たれていたのに対し, その他の形状では角部が消失して原型を留めていなかった. これは, 角部に対してレーザーを照射する軌跡が再現されず, さらに輪郭を走査するベクトルパスがレーザー照射されなかったことで形状が再現されなかったことと, 正三角形, 正方形, ひし形の角部では, レーザ未照射の金属粉末と造形物の接触領域が大きくなり, 造形物の熱が金属粉末へ伝わって余剰固化が促進されたことが考えられる. また, いずれの形状でも設定サイズが300 μm 以下で形状変化が大きくなっていた.

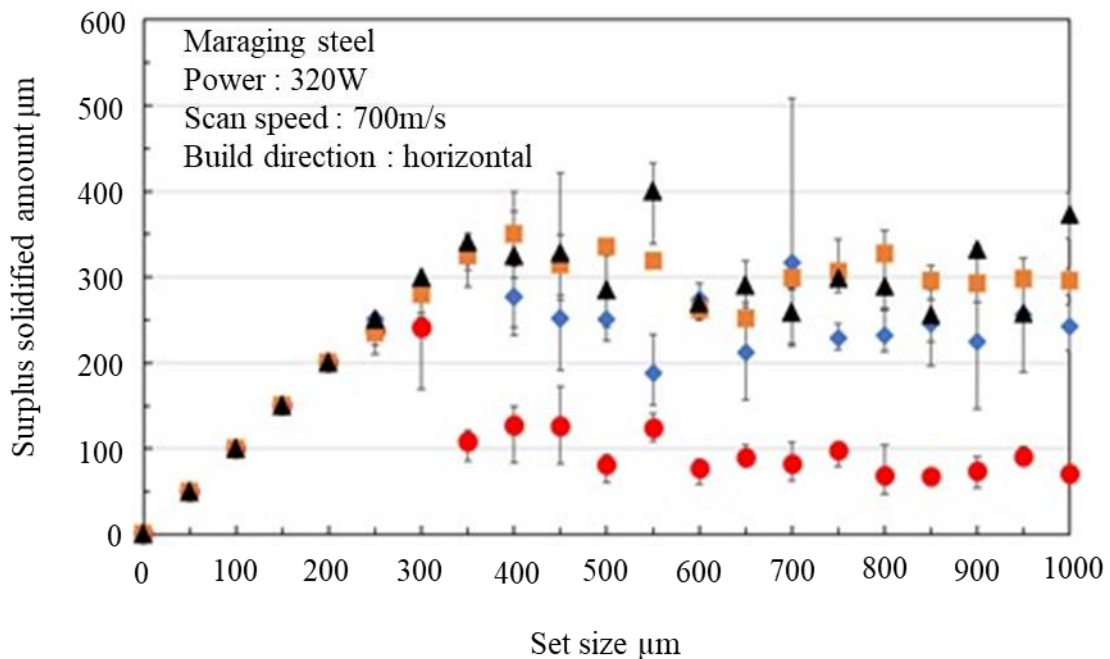


Fig.3 Change in surplus solidification amount in horizontal printing

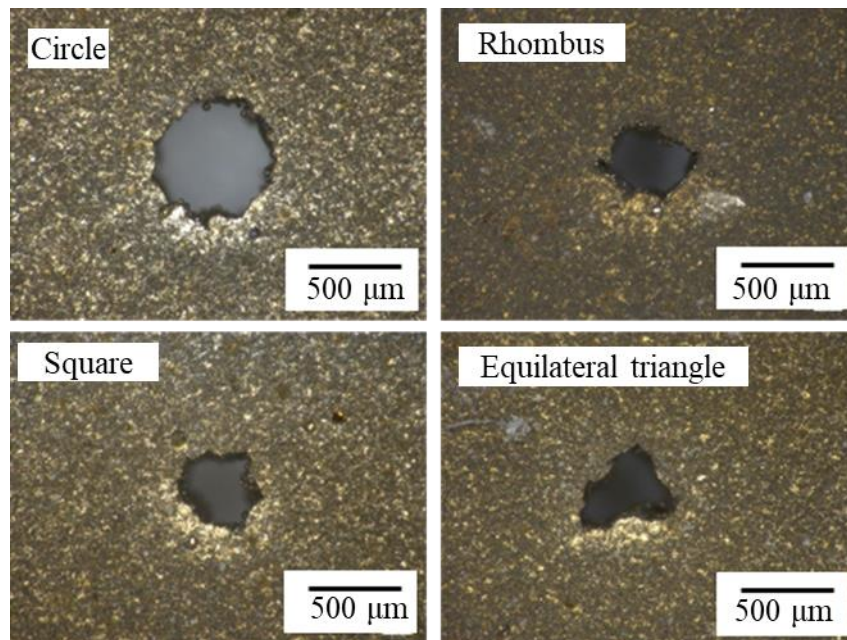


Fig.4 Cross-sectional observation of microtubules

造形方向に対して直行する方向に造形した微小管の余剰固化量測定結果を図5に示す。なおこの造形方向を垂直方向とする。水平方向と同様に円の余剰固化量が最も小さくなったが、正三角形が最も余剰固化量が大きくなっており、四角形は設定サイズ $650\mu\text{m}$ までは円形状と同程度であり、その後に余剰固化量に大きな変化がなくなっており、ひし形は設定サイズ $400\mu\text{m}$ 以上で余剰固化量の変化はなくなった。この水平方向と垂直方向の造形による差異は図3の考察と同様に、角部の存在がレーザーエネルギー集中を引き起こし、余剰固化量を増大させたことによるものと考えられ、その中でも四角形は三角形やひし形と異なり、オーバーハングでのエネルギー集中が少なかったため円形状の余剰固化量に近づいたと推察された。一方で、垂直方向の造形でも、角部を有しない円形状が最も余剰固化が発生しにくかったのは、前述のレーザーエネルギー集中が少なかったためと、円形状の方がオーバーハングでのレーザー溶融凝固に対してボーリング現象によるダレが比較的少なかったことに起因すると考えられる。そのため、以降の微小管造形の断面は円形を採用することとした。

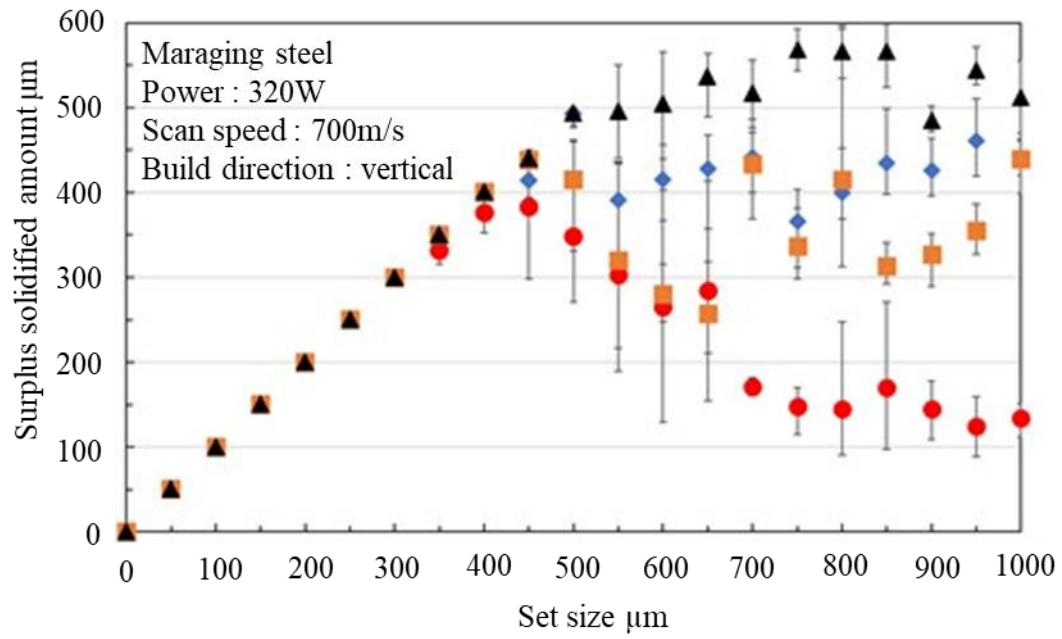


Fig.5 Change in surplus solidification amount in vertical printing

3.2.3 微小管造形におけるラティス構造の影響評価

第2章までの検討では、離型剤の染み出しを円滑にさせることを目的として微小気孔を造形する層は1mmとしていた。これは、ポーラス構造体では、微小気孔の大きさが一定ではなく、一直線に連続した穴が少ない上、ポーラス構造体の層が厚くなればなるほど離型剤を含む流体の通過には抵抗が生じ、支障が出るため、層を薄くすることで流体の通過がしやすくなるようにする目的があった。一方で、ポーラス構造体では、微小気孔が多数存在することで強度が低下してしまう懸念があったため、離型剤供給路内にラティス構造を造形することで、離型剤が通過することができ、かつ微小気孔層を支持させるように設計した。そこで、本節の実験では微小管造形にラティス構造を配置させることによる造形時に生じる熱的様相の変化を調べた。図6は、実験で用いた微小管造形試験片のモデルである。ラティス構造が無いモデルでは、表層の1mm部分に微小管造形部を設け、その下部はフルメルトとした。一方、ラティス構造を付与したモデルでは、実際の金型造形と同じとなるように、表面から微小管、ラティス、フルメルトと配置させた。ラティス構造の厚みは4mmとした。表2に造形条件を示す。

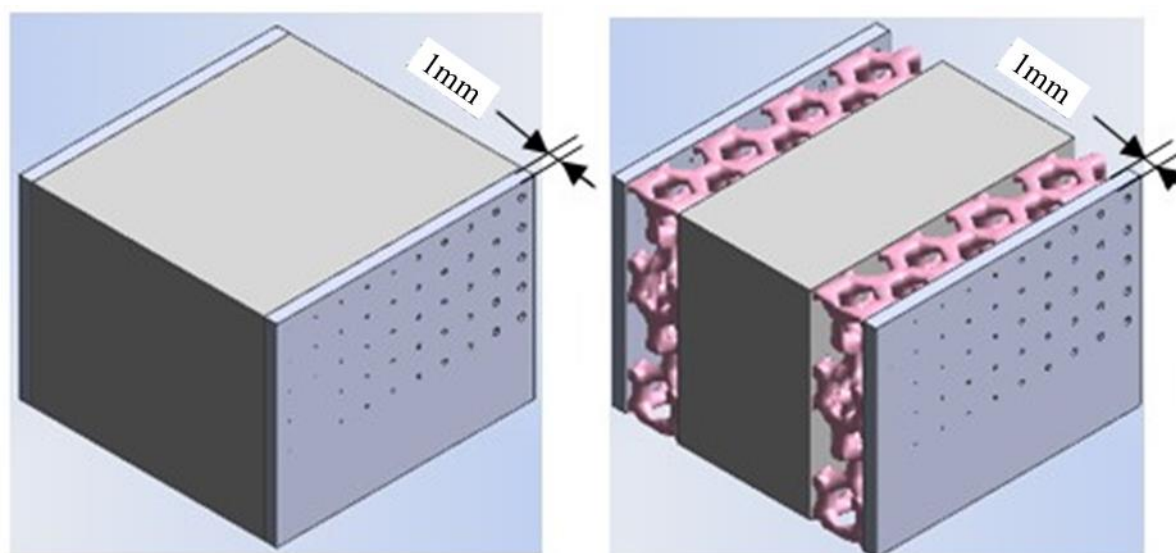


Fig.6 Lattice structure of release agent supply channel

Table 2 Specimen conditions for microtubule cross-sectional shape selection

Laser irradiation conditions		
Heat source		Yb-fiber
Wave length	nm	1070
Laser power	W	320
Irradiation angle	°	40
Scan speed	mm/s	700, 1400
Spot diameter	μm	200
Deposition thickness	mm	0.05
Specimen shape		
Cross-sectional shape		Circle
Microtubule size μm		100~500
Number of microtubules		10
Building direction		Vertical

3.2.4 微小管造形におけるラティス構造の影響評価の結果

図7は、ラティス構造の有無による表層の微小管サイズの変化を示している。実測して得られたプロットが理想ラインに近づくほど、余剰固化量が少ないこととなる。ラティス構造を有した造形では、ラティス構造が無い場合と比較して理想ラインから大きく離れた。また、微小管サイズのばらつきも大きくなった。この結果は、ラティス構造が表層に設ける微小管の造形に及ぼす影響が大きく、余剰固化を促進していることを示している。ラティス構造が無い場合では、微小管部を造形する時の熱が、既に造形された高密度造形部へ移動し、微小管部の冷却が促進することで余剰固化量が小さくなったと考えられる。一方、ラティス構造を付与すると、ラティス部と微小管部の接触領域が小さく、微小管造形時の熱がラティス部へ移動しにくくなり、微小管部で生じた熱が滞留して余剰固化量が大きくなったと考えられる。図8は、ラティス構造の有無による微小管の閉塞確率の変化を示している。ラティス構造を付与することで、微小管が閉塞する確率が大幅に増えていることがわかる。これは前述と同様に、ラティス構造は熱伝導が少なくなり、微小管部での熱の滞留が生じることでレーザ溶融凝固時により多く周囲の粉末を凝固させることで微小管の閉塞する確率が増加したことが考えられる。

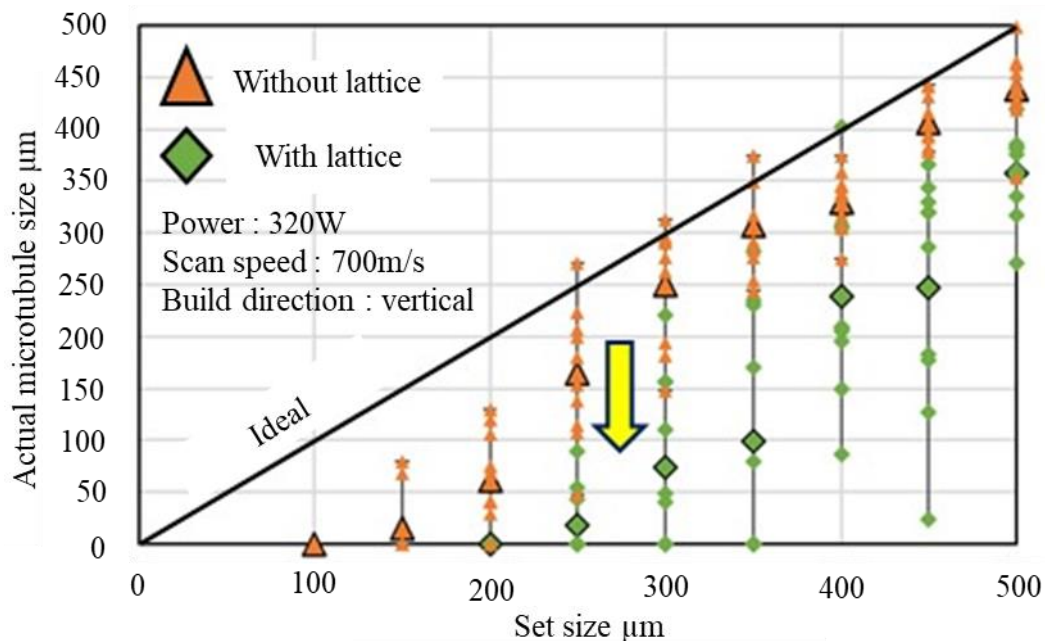


Fig.7 Changes in microtubule size with and without lattices

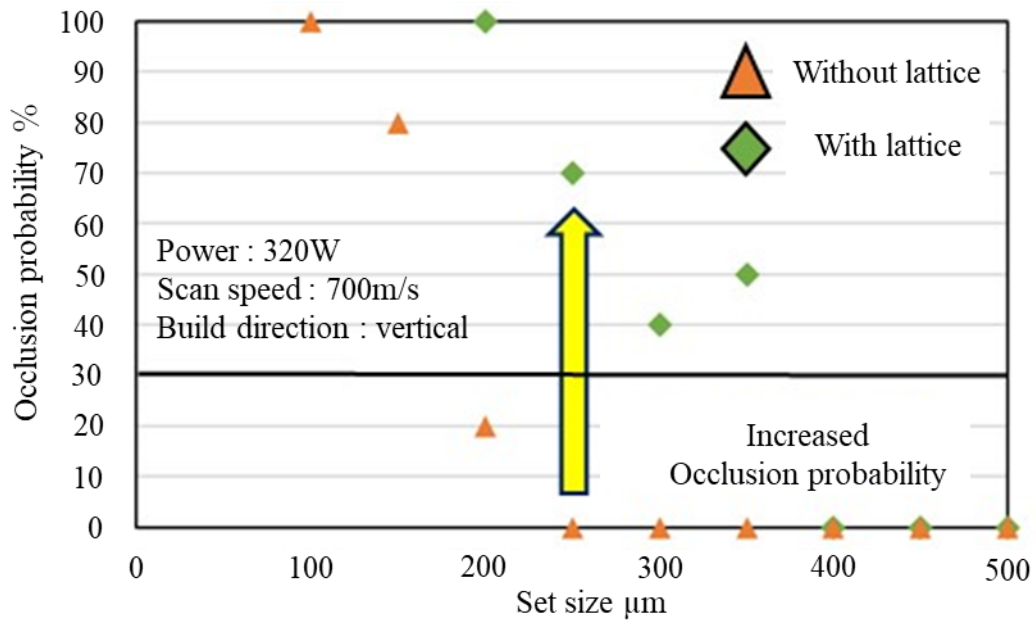


Fig.8 Change in occlusion probability with or without lattice

3.2.5 ラティス構造を持つ微小管造形の通気性評価

造形時の微小管層の形状によって微小管の造形状態が変化することが明らかとなったため、金型へ微小管を組み込む状態を模擬した試験片を作成して微小管の通気性を評価した。図9は、通気特性評価に用いたモデルである。表層に厚さが1 mmである微小管部を設け、その下部に厚さが4 mmであるラティス部を配置させた。透過面となる微小管部位は直径が50 mmであり、その周辺は空隙を有しない完全熔融凝固部とした。そして、微小管部を垂直面へ配置した垂直方向の造形と、微小管部を水平面へ配置した水平方向の造形で通気特性を評価した。垂直方向の造形では、微小管部を厚さ14 mm分、完全熔融凝固部側面からせり出させて造形し、せり出した微小管部は通気特性評価時にワイヤ放電加工機で切断した。微小管部をせり出させて造形したのは前節にてラティス構造に対しては熱伝導が十分ではないことで余剰硬化量が増加したため、微小管部にてより熱伝導が可能となるように設計したためである。微小管の造形は設定サイズを200 μm もしくは250 μm とした。また、通気率の測定実験方法を図10に示す。この時、供給した圧縮空気は0.2 MPaとし、試験片前後の圧力差を測定して、ダルシーの法則により通気率を算出した。

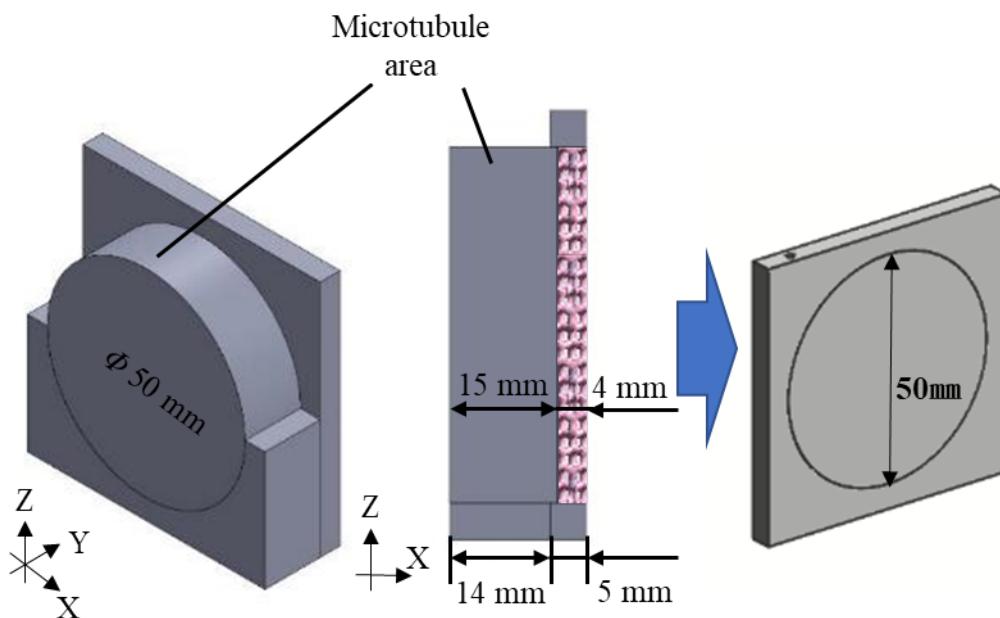


Fig.9 Test piece simulating a porous mold

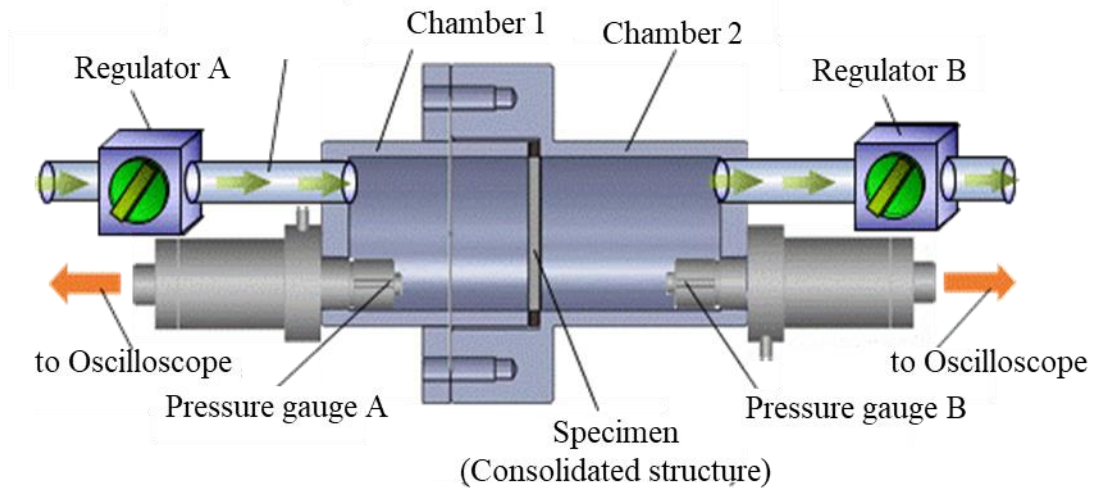


Fig.10 Overview of air permeability measurement device for microtubules

3.2.6 ラティス構造を持つ微小管造形の通気性評価の結果

図 11 は、垂直方向に造形して得られた試験片の通気特性を調べた結果である。微小管の設定サイズが 200 μm の条件では通気性が得られなかったが、設定サイズを 250 μm とすることで通気性が得られた。また、微小管設定サイズが 250 μm のとき、ポーラス構造体を造形するときの条件であるレーザ走査速度が 2500 mm/s と同等の通気性が得られており、微小管設定サイズが 250 μm の条件は実金型への適用が可能であるといえる。図 8 の結果では 250 μm の設計サイズではラティス構造を造形した時の微小管は 70%の閉塞確率であり、通気性に乏しいことが考えられたが、微小管部をせり出させて熱伝導を促すことができ、ラティス構造がないときと同等の効果を得られたものと推察された。

図 12 は、水平方向に造形して得られた試験片の通気特性を調べた結果である。微小管設定サイズが 200 μm , 250 μm のいずれでも通気性が得られた。ポーラス構造体で得られた通気性と比較すると、微小管設定サイズが 200 μm のときに同等であるため、水平方向では微小管の設定サイズは 200 μm とした。以上の結果から、微小管設定サイズは、水平面の造形では 200 μm , 垂直面の造形では 250 μm と設定することとした。

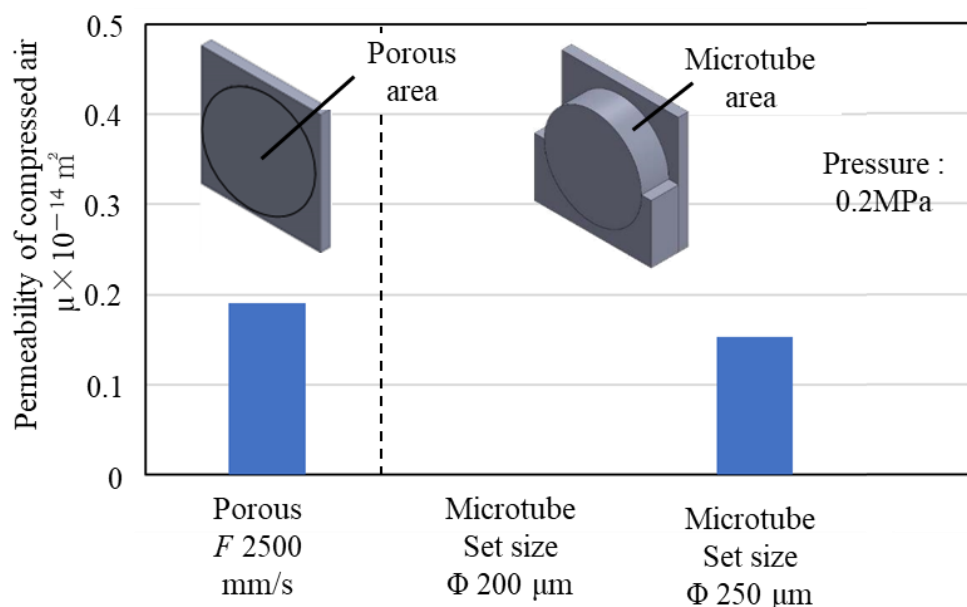


Fig.11 Ventilation in vertical printing

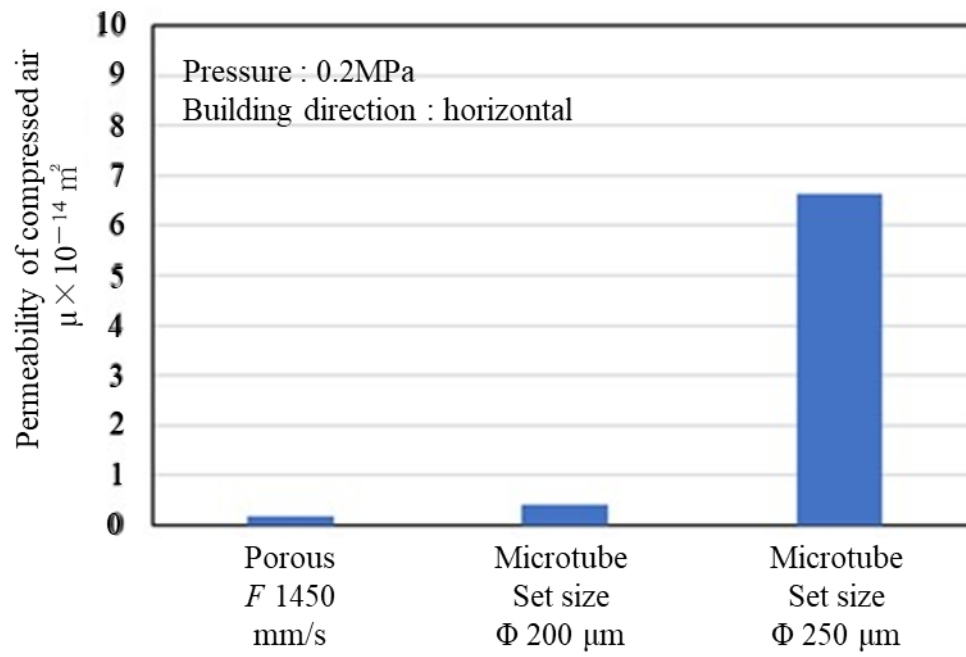


Fig.12 Ventilation in horizontal printing

3.3 微小管の離型剤染み出し金型での鑄造①

3.3.1 微小管金型によるダイカスト鑄造実験

鑄造実験に使用するダイカスト金型を製作した。金型のモデルを図 13 に示す。図中にあるように、可動型・固定型で構成され、可動型には製品部を成形するエリアを入子とした。製品部は 1 個である。

金型には各種センサを組み込んだ。センサの位置を図 13 に示した。

- (1) 可動型の入子部において、リブ部の直下およびリブ部の側方部に熱電対を設置して入子の温度を確認した。
- (2) 可動型の入子部のリブ部に押し出しピンを設置しており、この押し出しピンの裏面に押し出し板からロードセルを接触させて成形品の押し出し抵抗をモニタリングできるようにした。
- (3) 固定型の排気側にガス圧センサを設置してキャビティ内のガスを監視した。

入子の詳細を図に示す。図 14 は、鑄造実験用に作成した、微小管構造体を持つ入子の内部である。入子は直方体で、ダイカスト鑄造を行った場合は図 13 に示したような箱状のアルミ製品を得られる。図のように、上面および側面、リブ部には微小管を形成した。上面の広い範囲をカバーできるようにと意図して、5 mm 幅の経路を蛇行させた。同様の意図で側面部にも蛇行させた離型剤染み出し部位を成形した。

また、図 14 の内部構造を示したもののの中に、熱電対の挿入部を示した。熱電対は一つの入子に対して 2 本を挿入した。入子はパーティングラインの 5 mm 下から造形を開始した。データ取得は、実験金型に、溶湯圧力センサ、ガス圧センサ、および熱電対を設置し、各センサによりダイカスト鑄造中の金型内の評価を行った。ダイカスト中の各センサの出力電圧をサンプリング周波数 1kHz で連続的に収録、およびデータ変換を行った。得られたダイカスト製品は X 線 CT により観察し、欠陥の有無を検証した。溶湯には ADC12 を用いて、650°C でスリーブに注湯した。離型剤には油性離型剤である SRT200 を用いた。ダイカスト時の鑄造条件は、鑄造圧力の目標値は 50MPa とし、射出速度は低速 0.5m/s、高速 1.8m/s を設定値として実施した。

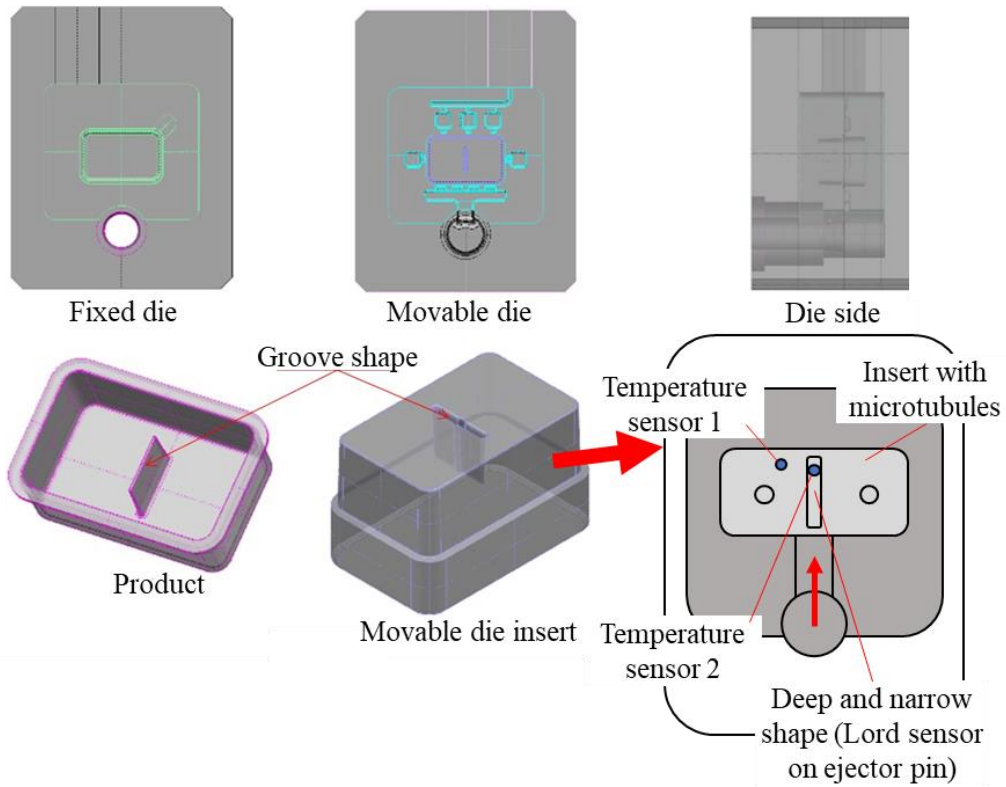


Fig.13 Die for experiment of die casting

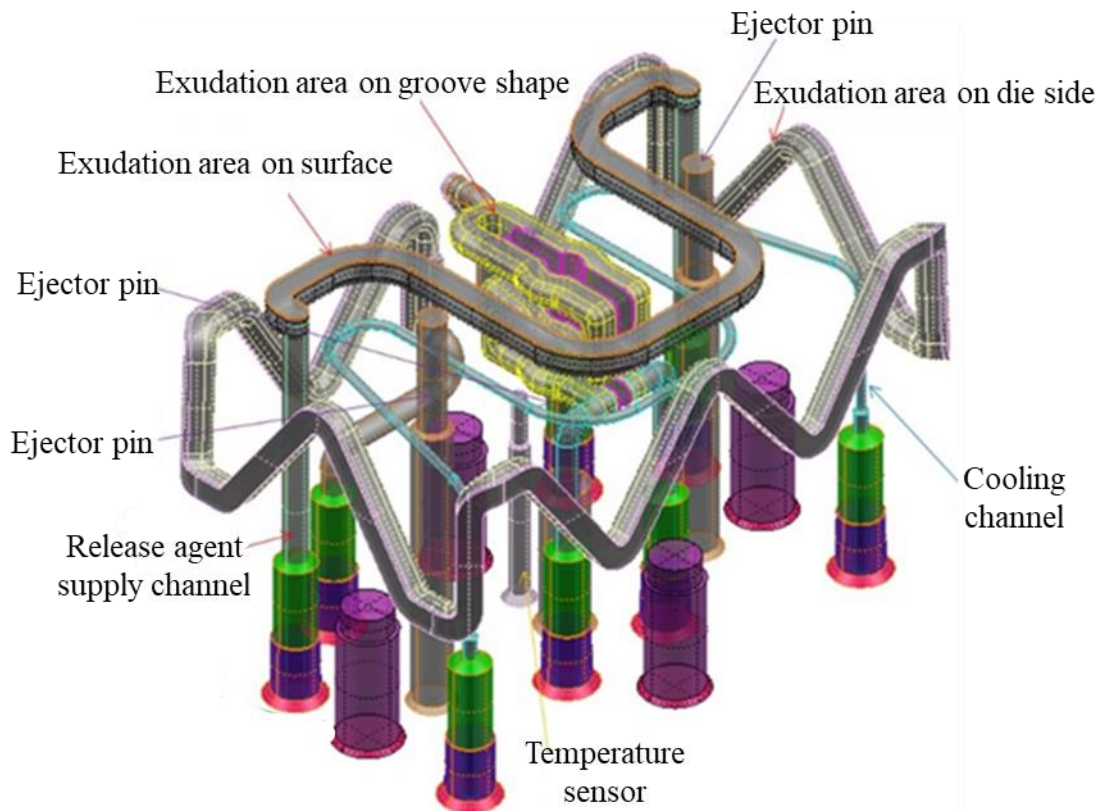


Fig.14 Detail inside the nest of the casting experiment

3.3.2 離型剤を染み出させて行う鑄造実験

図 15 に鑄造実験での成形品を示す。まず入子上面に接していた面を見ると、ポーラス方式の入子には離型剤の痕跡が強く残っていた。一方で、微小管方式の入子には見られなかったが、焼き付きなどは発生していなかった。上面については適切な量の染み出しが実現できていたと考えられる。しかしながら、図 15 でわかるように、側面の離型剤の染み出し量が多くなり、成形品に離型剤残りという結果で見られた。さらに、リブ部では、成形品への多孔質部の転写が確認された。これはリブ部のみ放電加工を実施したことで、他の部位よりも気孔が大きくなってしまったのではないかと考えられ、その結果、より溶融アルミニウム合金の侵入が起こったと推測された。本実験の結果により、上面、側面、さらにリブ部のような狭く複雑な形状からも離型剤を染み出させながら鑄造することが可能であることがわかった。したがって、小さな金型であれば、スプレ塗布を必要とせず、ダイカスト鑄造を実施することができるようになったと考えられる。しかしながら、金型の形状・部位によって微小管の成形状態に違いがあり、アルミニウム成形品の表面性状も部位によって大きく異なっている。したがって、さらに高精度に離型剤の染み出しを制御する必要があるため、より制御が簡便な微小管の成形方法の検討を後述で行った。

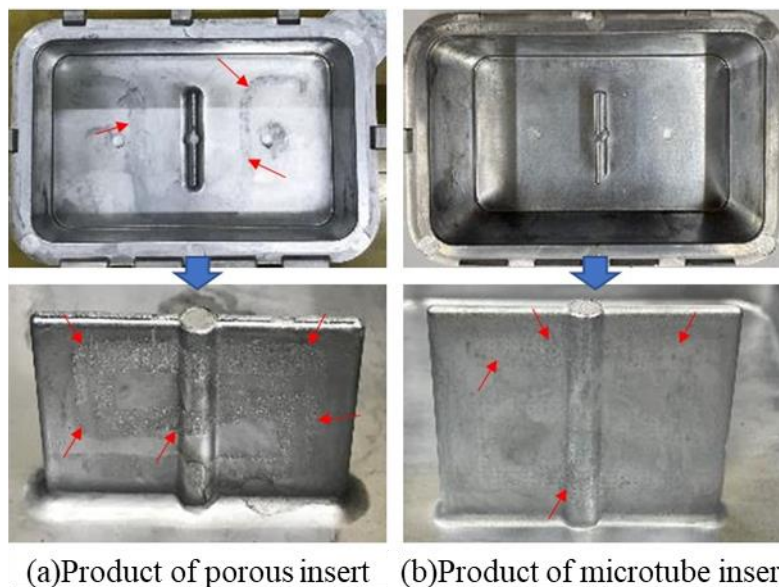


Fig.15 Differences in exuding parts in molded products

図 16 に 91 ショットの連続成形時における 45 ショット目と 85 ショット目の金型温度の変化を示す。45 ショット目では最大でおよそ 230°Cであったが、85 ショット目ではおよそ 330°Cと上昇していた。生産数が増加することで金型に熱が蓄積され金型温度が 1 サイクル通じて上昇していったと考えられる。また、センサ 1 の温度を見ると、45 ショット目と比較して 85 ショット目では射出時で射出から型開きまでの温度差が縮小しており、金型の表面と内部との温度差が減少していることが推察される。この結果は金型の温度差によるクラック発生を抑制することに寄与すると考えられる。

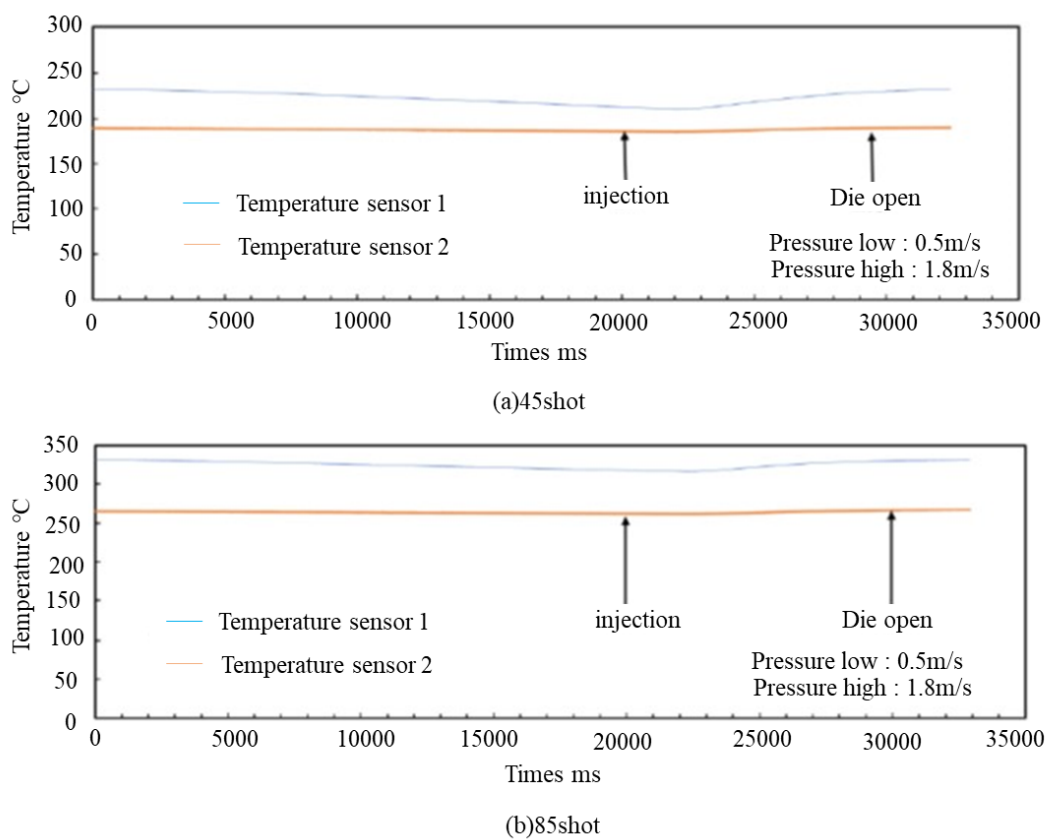


Fig.16 Change in mold temperature during continuous molding

図 17 にダイカスト時のガス圧センサ最大値と金型温度の関係を示す。今回のダイカスト実験において金型の最高温度は 200~330 °C と広い範囲で実施されていた。金型温度が高くなると離型剤が気化することによる発生ガスの増加が想定され、それに伴ってガス圧も高くなると考えられるが、測定値からはその様子は確認できなかった。これは、発生したガスが金型分割面、チルベントから適切に排出されたことを示すと考えられる。また、金型表面の微細孔部から離型剤供給路に向けてガスが排出されたことも考えられた。

図 18 に離型力（リブ部の押出しピンに設置したロードセルの荷重値）と金型温度の関係を示す。金型温度の増加に伴い離型力は増加した。これは、金型過熱による離型剤塗布不良が原因と考えられる。一方で、金型温度が低い領域の離型力は小さい。このことは、金型温度を適切に制御することによって離型膜を形成することが可能であること、また通常の離型剤塗布方法では困難な深リブ部に対して、本手法では離型剤を塗布できていることを示していると考えられる。

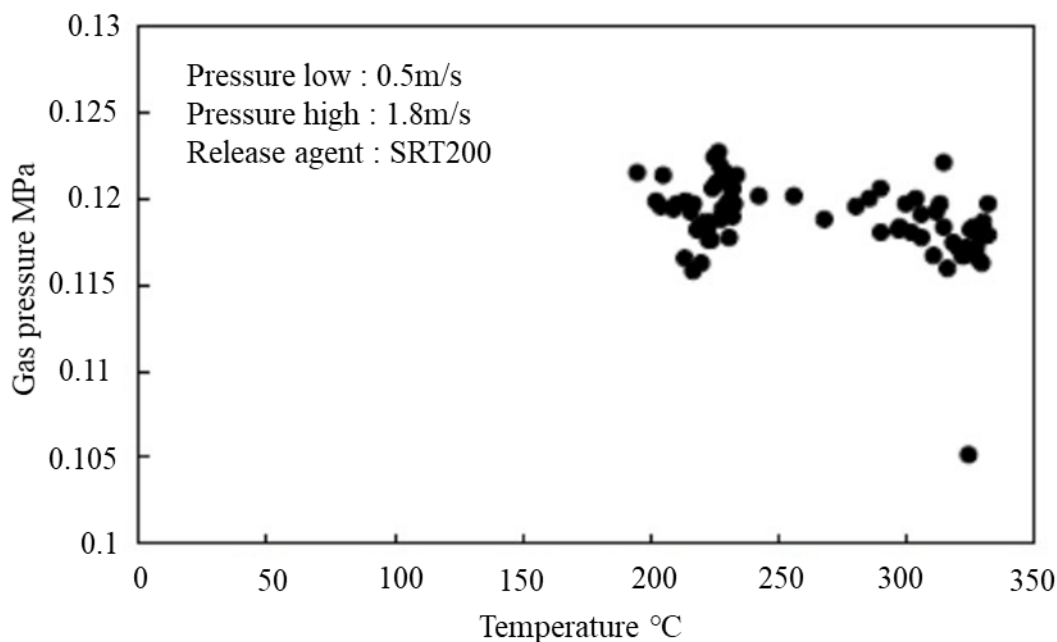


Fig.17 Relationship between maximum gas pressure in mold and mold temperature during continuous molding

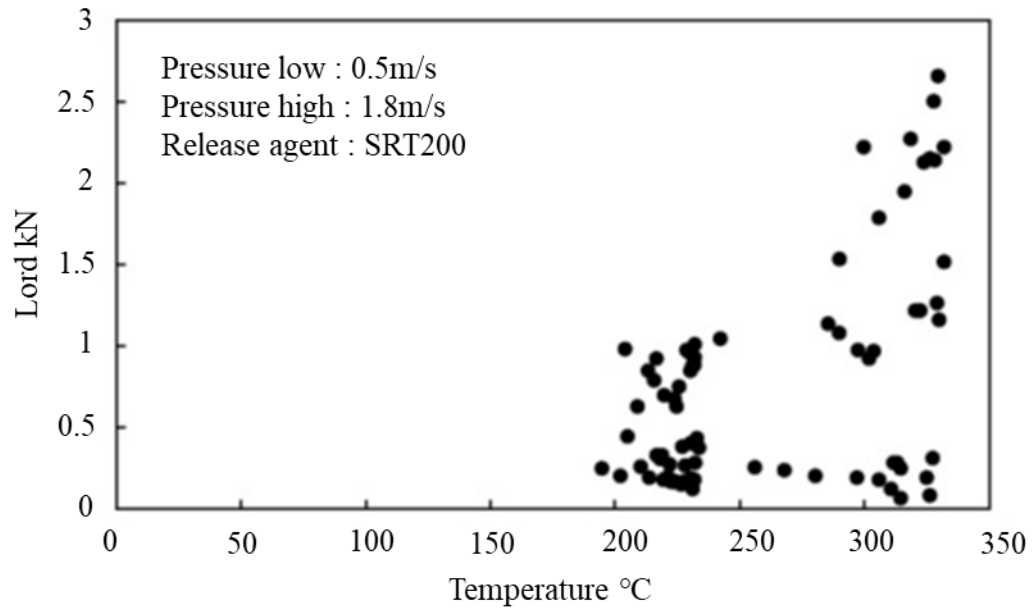


Fig.18 Relationship between mold release force and mold temperature during continuous molding

図 19 に離型剤塗布方法の違いによるダイカスト品内部の X 線 CT による観察結果を示す。リブ部に大きな巣が確認されるが、これは方案や実験時の金型温度、鑄造条件に起因したものであり、熔融アルミニウム合金の流動が円滑に進まなかったことで発生したと考えられる。これを改善するためには方案形状の変更や熔融アルミニウム合金の溶湯保持温度を現状よりも高く設定する、冷却水の供給を減少させるなどして、熔融アルミニウム合金の流動性を向上させるような対策が必要になると考えられる。一方で、塗布方法による内部欠陥の違いはなかった。

図 20 に離型剤塗布方法の違いによるダイカスト品の破断荷重の測定結果を示す。「微小気孔を有する金型+新塗布工法」の破断荷重は、「微小気孔無し金型+従来塗布工法」の値とほぼ同じであり、新工法がダイカスト品の強度に及ぼす影響はなかった。

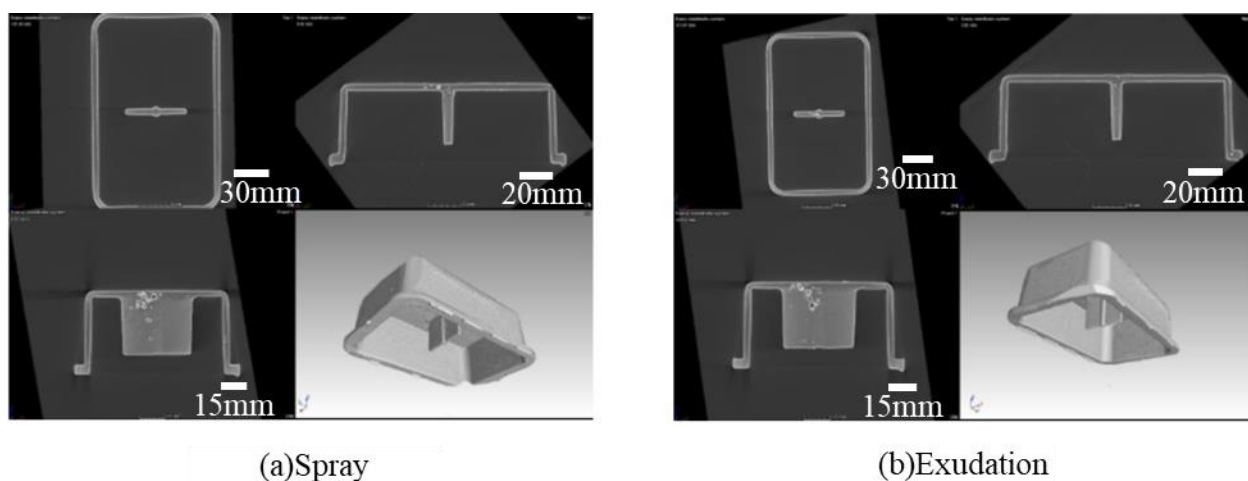


Fig.19 Relationship between mold release force and mold temperature during continuous molding

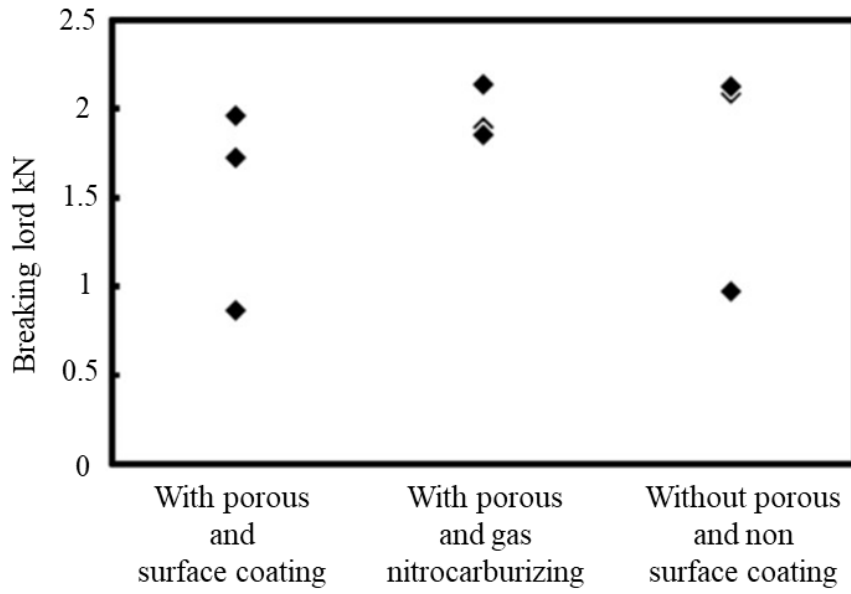


Fig.20 Breaking load of die-cast products with different release agent supply methods

3.4 微小管の造形方法②

3.4.1 微小管の造形角度における検討

本実験では、3次元CADで微小管を設計し、離型剤の染み出し穴として金型面へ配置する。粉末床熔融結合法では、図21に示すように積層方向に対する微小管の配置方向によって、造形して得られた微小管の形状が変化することが知られている。造形時にレーザ照射部の下方も同時に熔融し、下部が堆積粉末の場合にはボーリング現象によってダレが生じるためである[64]。そこで、3次元CADで異なる微小管を設計し、得られた造形物と比較することで設計形状との差異を求めた。実験方法を図22に示す。微小管は、造形物内部に設けた離型剤供給路に対して供給方向の左右に7個ずつ合計で14個配置した。微小管の断面形状は正円とし、直径は100～550 μm、水平方向に対する中心軸角度は0～60°の範囲で変化させた。微小管を含め、試験片は全て造形して製作した。中心軸角度を付与して微小管を造形するため、造形物側面に現れる微小管は付与角度に応じて楕円形となる。

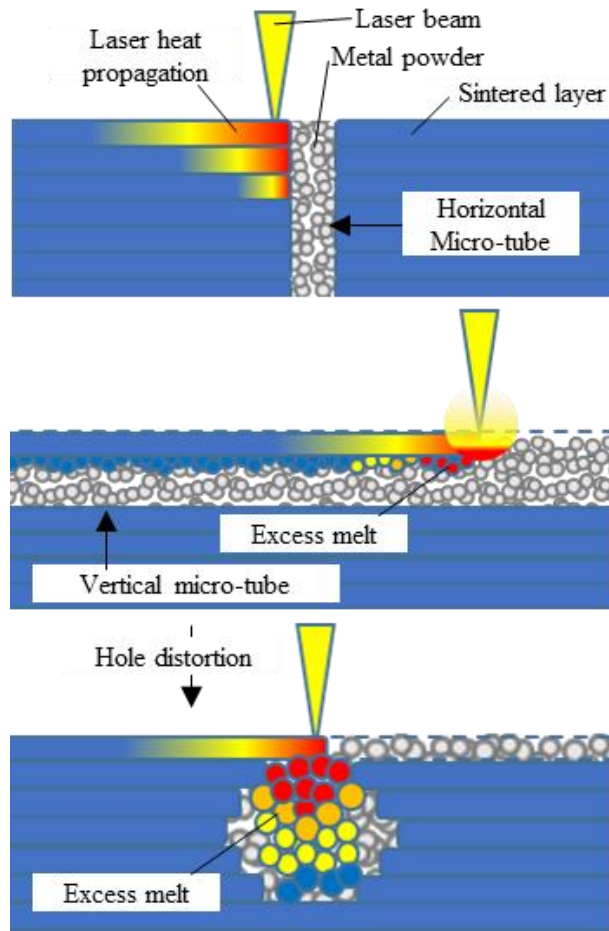


Fig.21 The microtubule morphology changes depending on the direction

得られた造形物は、ワイヤ放電加工機を用いて積層方向に対して垂直に切断し、微小管の断面を光学顕微鏡で観察した。そして、画像処理ソフト(Image J)を用いて微小管断面のエッジを抽出し、エッジに内接する円の直径を微小管径として定義して、設計した微小管の断面径との差異を評価した。図 22 に示した造形した微小管を用いて離型剤の染み出し特性を調べた。実験概要を図 23、実験条件を表 3 に示す。実験装置は、圧送タンクとデジタル圧力計で構成され、微小管が付与された試験片と連結している。そして、供給圧力を 0.04~0.4 MPa の範囲で変化させて離型剤を供給し、微小管から染み出た離型剤を紙片で拭き取り、電子天秤で秤量した。

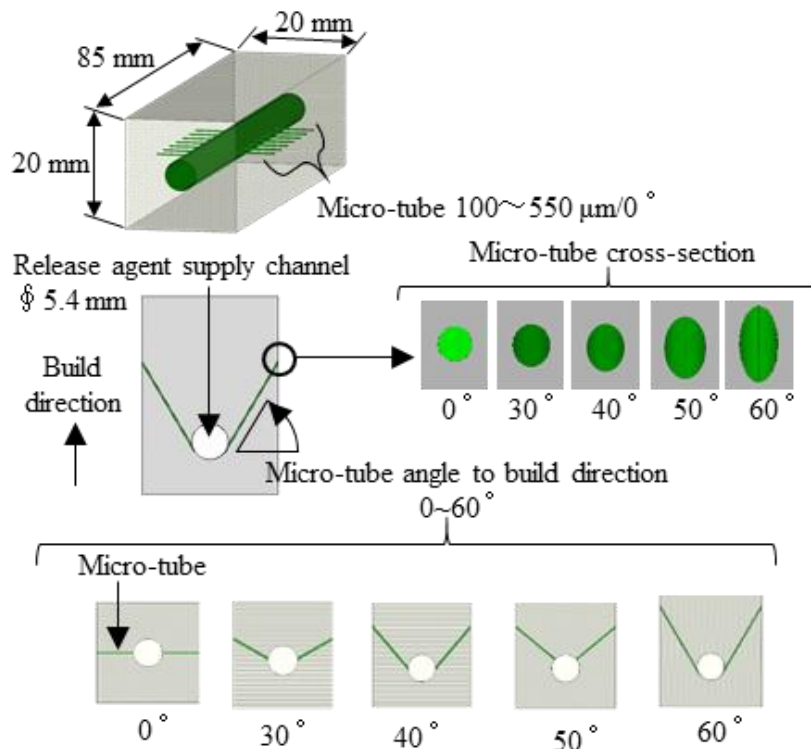


Fig.22 Microtubule test specimen

Table 3 Exudation test conditions for Microtubule specimen

Supply pressure	MPa	0.04,0.08,0.12,0.16,0.2,0.4
Design size	μm	150,250,350,450
Microtubule angle	$^{\circ}$	0,30,40,50,60
Exudation time	sec	3

3.4.2 微小管の造形角度における検討の結果

積層方向に対して水平に造形した微小管について、設計した微小管径と造形で得られた微小管径との関係を調べた結果を図 23 に、各条件の微小管断面を光学顕微鏡で観察した結果を図 24 に示す。設定径が $150\ \mu\text{m}$ を越えると微小管が造形でき、設定径に比例して造形された微小管径も大きくなった。したがって、本研究の条件では、図 21 で示したようなボーリング現象で生じたダレで、図 24 でも見られるように設定径が $150\ \mu\text{m}$ 未満の場合に微小管が閉塞することがわかった。

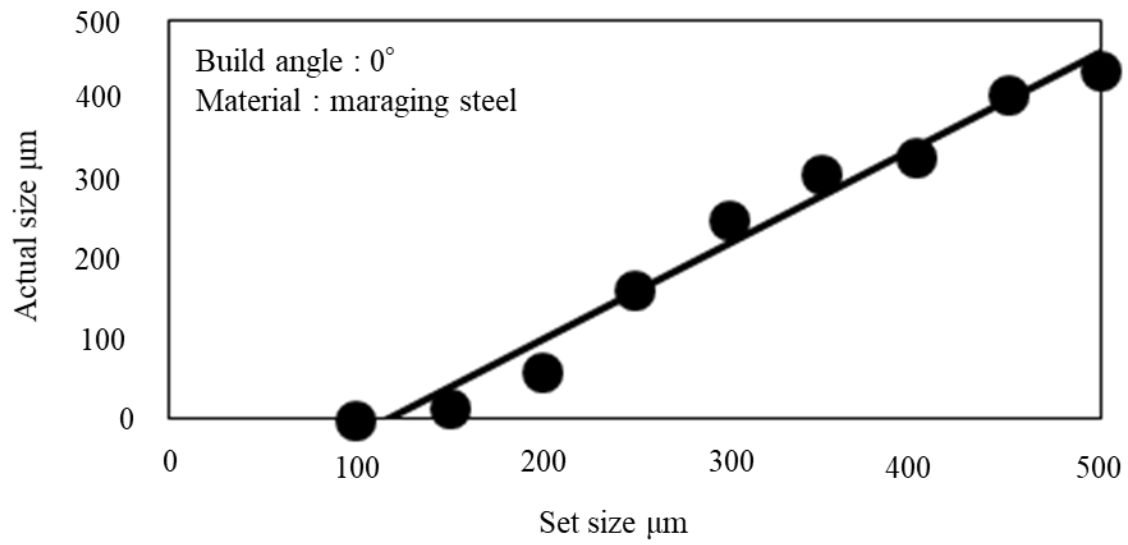


Fig.23 Microtubule actual size to set size

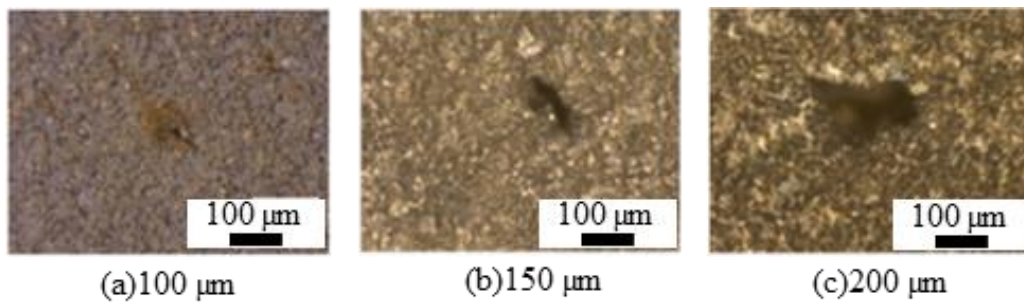


Fig.24 Optical microscope image of microtubules

図 25 は、設計した微小管径の違いによる離型剤の染み出し量を調べた結果である。設計径が 350 μm までの範囲では離型剤供給圧力を 0.2 MPa より大きくして実験しても離型剤は染み出さなかったが、450 μm を越えると離型剤が染み出した。図 23 では 150 μm を超えると微小管が確認できたことから、造形物表面で微小管が確認できても、微小管の内部が閉塞して離型剤が染み出さなかったと考えられる。これらの結果から、以後に実施する金型製作および鋳造実験では、断面が 450 μm の微小管を適用することとした。

図 26 は、微小管径が 450 μm のとき供給圧力による離型剤の染み出し量を調べた結果である。離型剤の吐出圧力が増加するにつれて離型剤の染み出し量は増加し、供給圧力が 0.08 MPa を越えると染み出し量が一定となった。これは微小管から染み出す溶媒の供給量は微小管に負荷する際に微小管側面に生じる抵抗によって決まることが知られており [65, 66]、供給圧力が 0.08 MPa までの条件では、供給圧力が大きくなるにつれて微小管側面で生じる抵抗の影響が小さくなって次第に供給量が増えたが、0.08 MPa を超えると微小管側面からの抵抗が十分に小さくなって供給量が一定になったと考えられる。離型剤の染み出し量は、供給圧力よりも微小管径の影響を受けやすいことを示唆する結果であり、離型剤の染み出し量を増加させるためには染み出させる時間を増加させるか、微小管自体をより多く設計する必要があることがわかった。

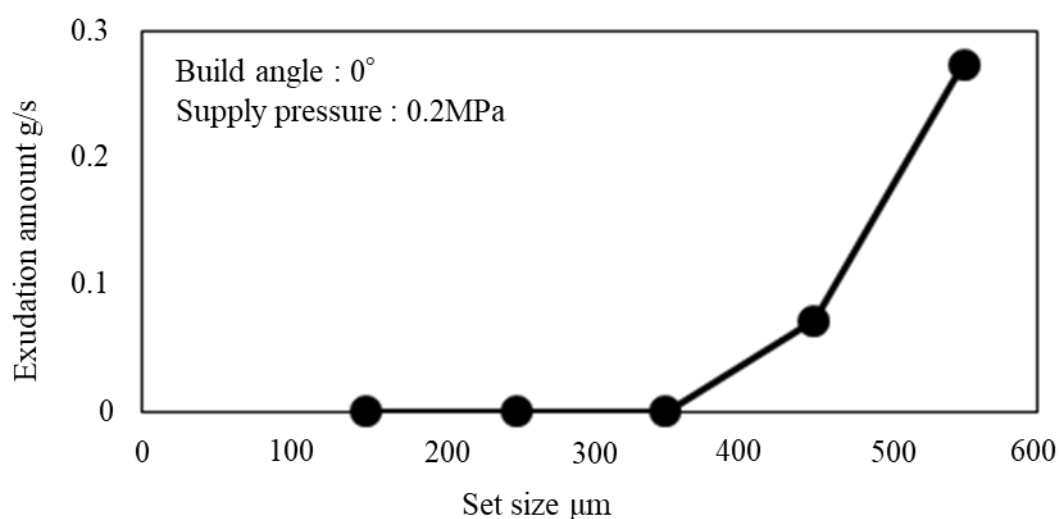


Fig.25 Variation of exudation amount of release agent with microtubule size

図 27 は、微小管の設計サイズが $450\ \mu\text{m}$ 、供給圧力が $0.2\ \text{MPa}$ のとき、微小管の造形角度による離型剤の染み出し量を調べた結果である。造形角度が 0° および 30° の条件では離型剤が染み出さなかった。造形角度が小さいとき、レーザー照射の下部が堆積粉末となり、ポーリング現象でダレが生じて微小管が閉塞したためである。一方、 40° を越えると離型剤の染み出し量が急激に増加した。造形角度が大きくなることで微小管の垂直方向断面が楕円となり、微小管の閉塞が抑制されたためである。これらの結果から、離型剤が染み出す微小管を造形するためには、配置する微小管の角度が重要な因子になることがわかった。さらに粉末床熔融結合法で得られた微小管から離型剤を染み出させるためには、微小管径を大きく設計する必要があるが、微小管が大きくなるとダイカスト鑄造では熔融アルミニウム合金の侵入の可能性が生じる。また、微小管の角度も重要な因子となることから、金型へ適用する時、微小管の設計についてはサイズを $450\ \mu\text{m}$ 、微小管の角度を 40° 以上にするのが有効であることがわかった。

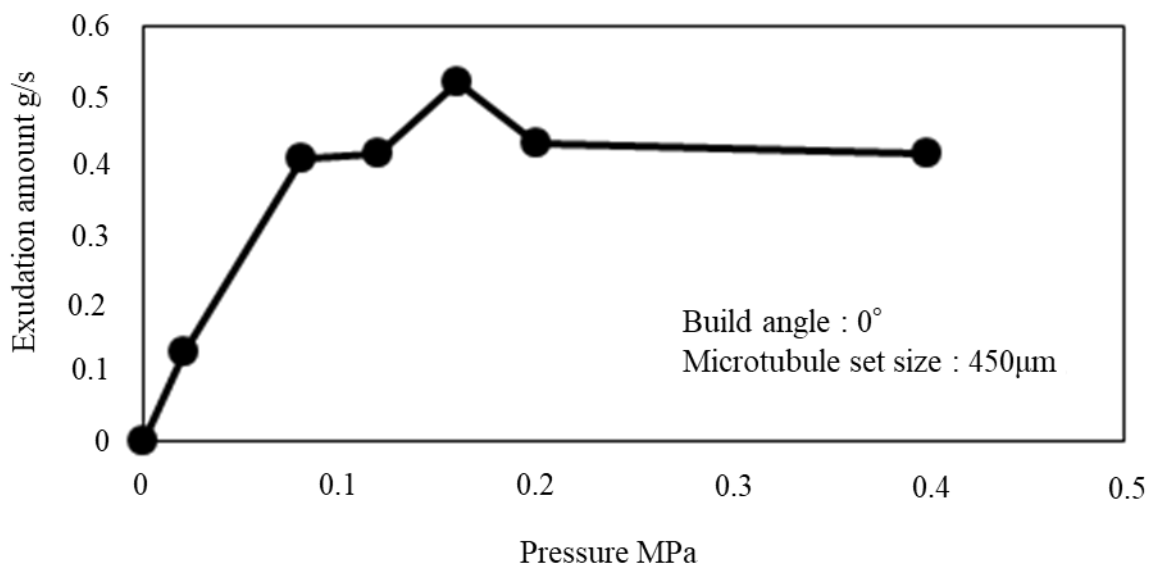


Fig.26 Variation of exudation amount with release agent supply pressure

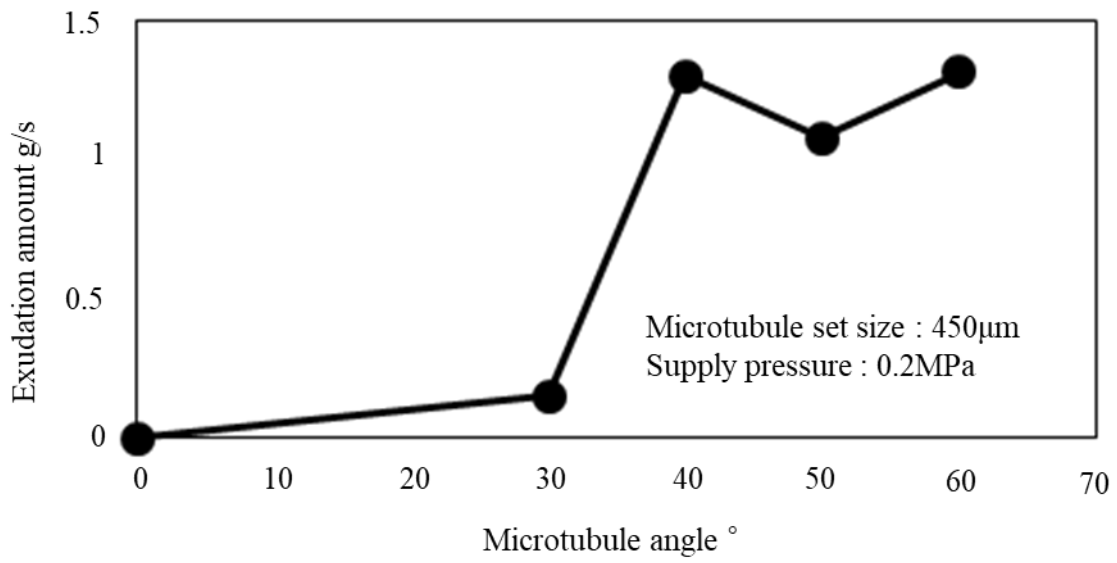


Fig.27 Variation of exudation amount with building angle of microtubule

3.5 微小管の離型剤染み出し金型での鑄造②

3.5.1 離型剤を染み出させて行う鑄造実験

前節の結果を基に、造形サイズ 450 μm となる微小管を 40°の角度として金型入れ子を造形し、鑄造実験を行った。造形した金型入れ子を図 28 に、実験条件を表 4 に示す。金型入れ子は、図 28 に示した製品形状を成形する金型の製品形状部を分割し、図に示すように全ての面および深リブ形状部に微小管を配置し、底面から 35 mm の高さより上部を全て造形で製作した。この時冷却管や離型剤供給路の側面から金型表面までの距離は配管の径以上となるように設計した。鑄造は、アルミニウム合金(JIS:ADC12)を用いて最大荷重が 1323 kN であるダイカストマシン（東芝機械(株)製：コールドチャンバーDC135J）で行った。表 4 で示すように鑄造圧力およびプランジャの移動速度は一定とし、供給圧力を 0.06~0.4 MPa の範囲で変化させながら、離型剤の染み出し量を 200~500 mg/s で変化させた。そして、各条件で 10 回ずつ鑄造し、深リブ形状部を押し出すピンの裏面に設置したロードセル((株)共和電業製：LMR-S-20KNSA2)で離型抵抗を測定した。また、鑄込み、凝固、型開き、製品取り出し、離型剤塗布、型閉じを 1 サイクルとし、製品取り出し後および離型剤塗布後に接触温度計(A-Gas Japan(株)製：表面センサ付高性能デジタル温度計)で金型表面温度を測定した。これらの実験は、微小管を有しない金型入れ子でも実施し、スプレを用いた離型剤供給との比較を行った。得られた製品は、X 線 CT 装置((株)アールエフ製：NAOMI-NX)で内部の鑄巣を調べ、離型剤の供給方法による差異を検証した。

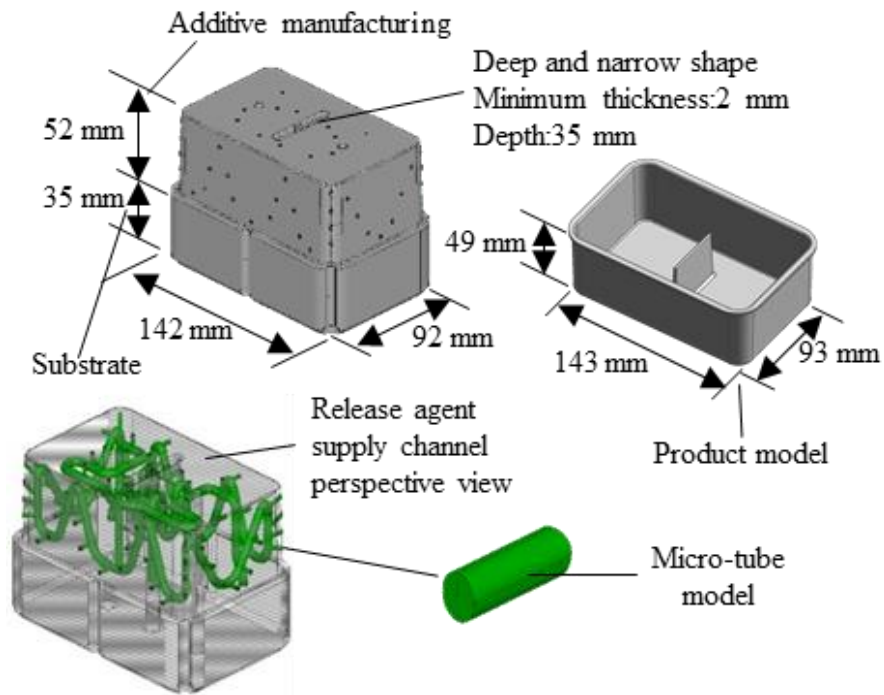


Fig.28 Detail of die-casting die with microtubules

Table 4 Conditions for die-casting experiments

Experimental condition number		①	②	③	④
Presence of micro-tubes		×	○	○	○
Casting pressure	MPa	48	48	48	48
High speed injection	m/s	1.8	1.8	1.8	1.8
Spray volume	mg/s	200	-	-	-
Supply pressure	MPa	-	0.06	0.1	0.4

3.5.2 離型剤を染み出させて行う鑄造実験の結果

図 29 は、離型剤塗布方法の違いによる離型抵抗の変化を比較した結果である。離型剤を染み出させた表 4 の条件②から④では、④の条件で離型抵抗が小さくなった。供給圧力の増大に伴い染み出し量が多くなることで、深リブ部でも離型膜が形成されたためである。一方で、スプレ塗布を行った表 4 の条件①と比較すると、条件②および③のように染み出し量が少ないときは離型抵抗が大きくなった。これは離型剤の染み出し機構における吐出圧力制御による染み出し量の調整によって離型抵抗をコントロール可能であることを示す結果である。以前の結果 [67] で示したポーラス構造体は、一方向に沿って形成されておらず多方向に分岐した経路であったため吐出圧力の制御が効かないほど摩擦損失が発生し、離型剤の吐出圧力を大きくしても染み出し量に大きな変化はなかった。一方で、微小管は設計された一方向に沿って形成する手法を取ったため摩擦損失が少なくなり、吐出圧力の操作による染み出し量の制御が可能になった。図 30 は、離型剤の供給方法が異なるとき、離型剤の供給前後で金型表面の温度を比較した結果である。離型剤をスプレ塗布する条件①では供給前後の温度差が 7°C であるのに対し、離型剤を染み出させる条件②から④では温度差が 13~15°C となり離型剤の供給圧力を大きくすると温度差が大きくなった。このとき、いずれの条件でも塗布時間は 8 秒であり、今回の実験条件の範囲内では離型剤の供給量の差で金型表面の温度低下量に大きな差はなかったが、微小管を適切に配置することによって効率的に金型表面が冷却できることを示す結果である。

図 31, 32 は、離型剤をスプレ塗布して得られた製品と、離型剤の染み出し圧力が 0.06 MPa の条件で得られた製品および染み出し圧力が 0.4 MPa の条件で得られた製品について、外観と X 線 CT 画像を比較した結果である。②の条件では離型剤の染み出しによる製品外観への影響は少なく、製品の内部欠陥も見られなかった。一方、圧送圧力を多くし、染み出し量を増加させた条件④では、図 31 を見ると離型剤巻き込み由来の製品表面の湯境が見られ、図 32 では内部の巻き込み巣が見られた。ポーラス構造体よりも離型剤の染み出し量制御に注意が必要となるが、適切な染み出し量とすることで従来法と変わらない製品が得られることが分かった。加えて離型剤の染み出しによって離型抵抗を低下させることができていたこ

と併せ、本手法はスプレ塗布方式では塗布困難な箇所にも離型剤を供給することができるという点で従来法よりも有効であり、離型剤の染み出し量や微小管の設計位置が高精度にコントロールできることから、提案する本手法の有効性が示された。

一方で、本研究から、粉末床溶融結合法で造形した微小管から離型剤の染み出し性を得るためには、微小管のサイズや角度などを適切に設定する必要があることがわかったが、微小管の設計値や配置箇所が不適当な場合、微小管を起点としたクラックの発生や、微小管に起因した製品表面への凹凸の転写が生じることが懸念される。これらの検討には、ダイカスト casting 時に金型表面へ作用する溶融金属からの面圧や応力分布などを調べ、微小管形態の影響を評価する必要があるが、今後の検討課題である。

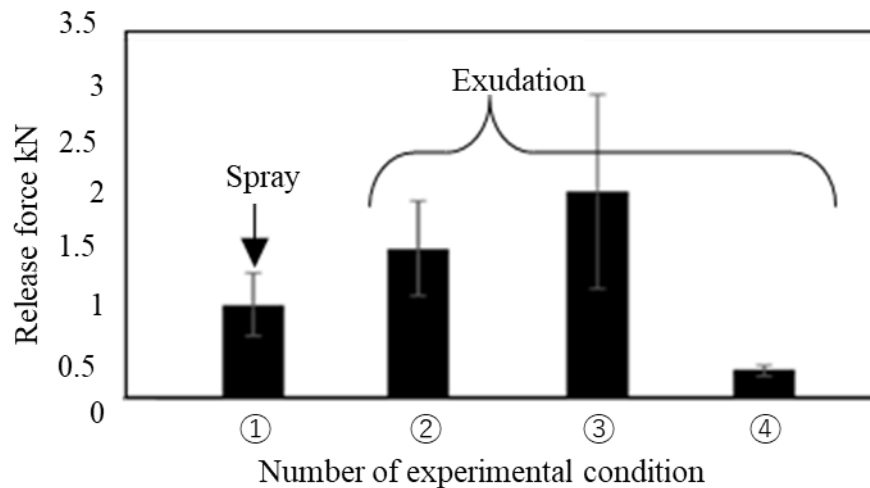


Fig.29 Comparison of release force in different supply of release agent

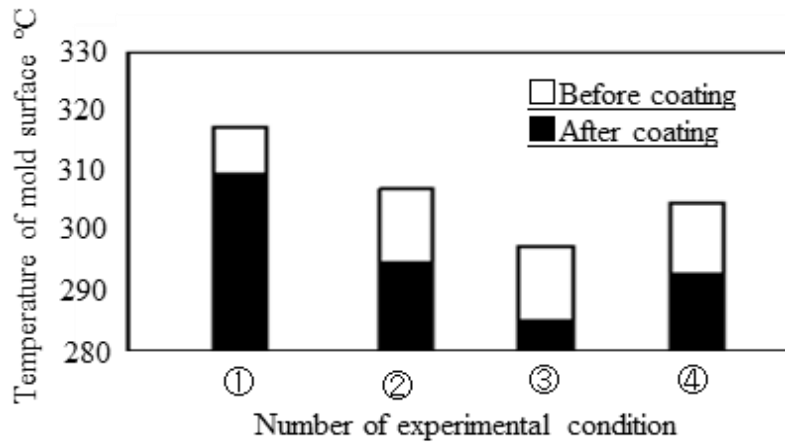


Fig.30 Comparison of surface temperature in different supply of release agent

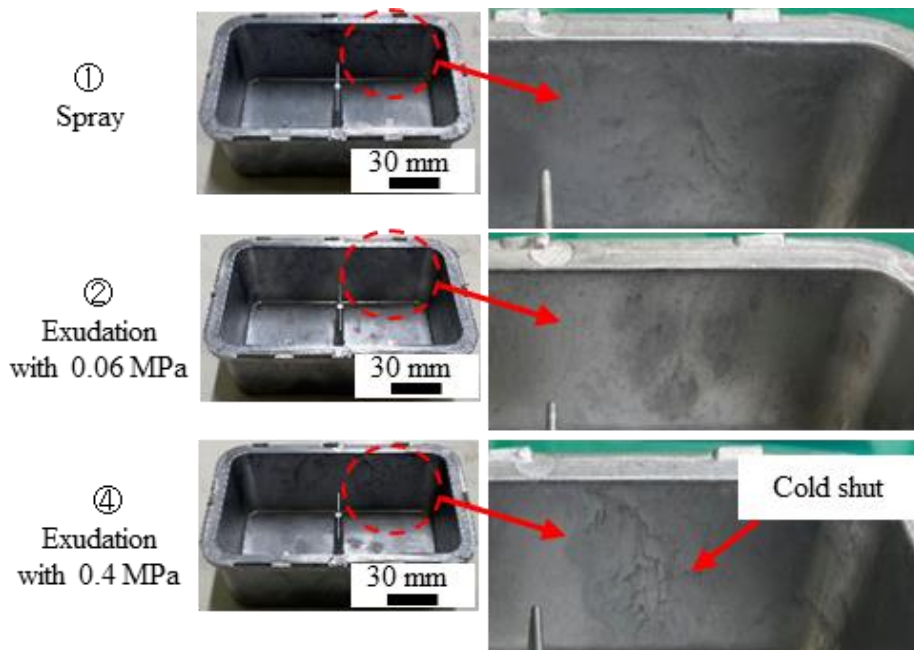


Fig.31 Microscope images of die-castings in different supply of release agent

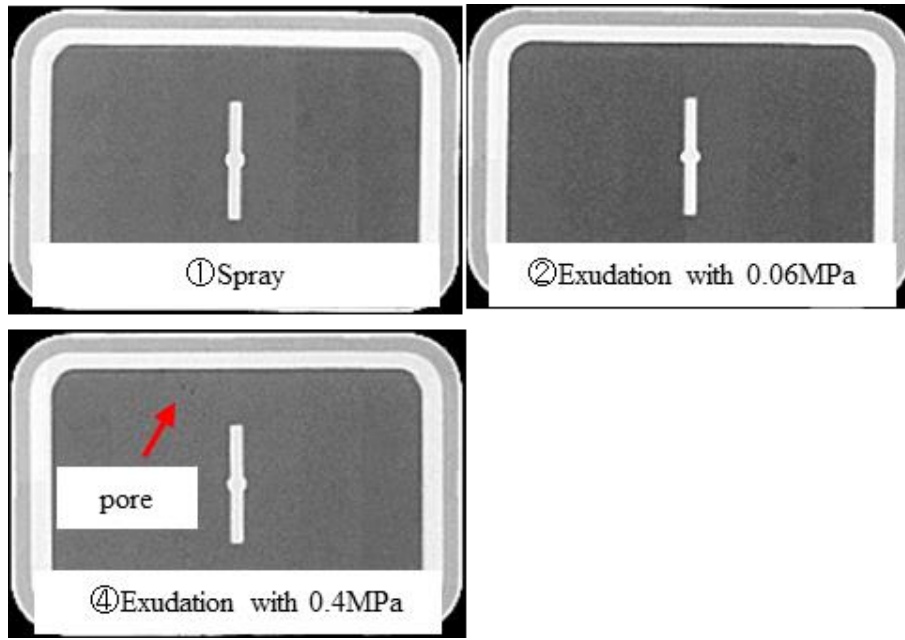


Fig.32 X-ray CT image of die-castings in different supply of release agent

3.6 結言

離型剤の塗布を効率的に実施する方法を検討するため、積層造形法を用いて任意の場所から離型剤を染み出させることができる金型の入子を作成し、鑄造実験にてその有効性を検証した。その際、離型剤を染み出させる微小管の積層造形における特性と通気性、染み出しの特性を調べた。その結果を以下にまとめる。

- (1) 微小管の成形においては断面形状を円形状にすることが最も設計形状に対する変化が少ない。また、ラティス構造の有無により微小管サイズが変化するが、これは造形物の熱伝導に起因する。ラティス構造が存在することで微小管内部における閉塞確率が大幅に上昇する。
- (2) 粉末床溶融結合法で微小管を造形する際、離型剤を染み出させるためには実際に造形されるサイズよりも大きな設定サイズが必要となる。また、微小管の造形角度が大きくなると微小管内の造形精度が向上し離型剤の染み出し量も安定する。
- (3) 微小管を設置した入子で離型剤を染み出させながら鑄造した場合、離型剤染み出し量は吐出圧力にて制御可能であり、良好な成形品を得る条件設定をすることも可能である。これはポーラス構造体からの染み出しより簡便な制御となる。

一方で、金型内部には提案した離型剤の供給路に加え、冷却用の水管などが複雑に配置されている。これらの配置による金型の強度や冷却効率の変化は今後の検討課題である。数値計算を用いた手法によって事前に予測することが適していると考えられるが、そのためにはまず金型として要求される特性を要素技術の特徴量で物理モデル化する検討が必要となる。

第4章 結論

4.1 結論

本研究では粉末床溶融結合法を使って微小な気孔を造形し、この気孔からダイカスト金型における離型剤を染み出させる機構を製作する方法を確立し、この離型剤染み出し機構をダイカスト金型に組み込んでダイカスト鑄造を行ったとき成形品が従来のスプレ塗布方式と比較して品質に差異がないことを確認した。その際、以下の方法で検討を行った。

① 離型剤を染み出す部材として粉末床溶融結合法を使った微小な気孔の製作方式をポーラス構造体と微小管の2種類を提示して検討した。このとき、離型剤の染み出し量の制御、溶融アルミニウム合金の侵入がないこと、という2点について留意し、離型剤が染み出すことが可能で、かつ気孔の大きさが最小となる条件を調査した。ポーラス構造体は積層造形時のレーザ条件を変更することで不完全に溶融凝固し気孔が成形されることを利用しており、微小管は3次元CADモデルで設計した穴形状を高精度に積層造形で再現する検討を実施した。

② 前述で確立した離型剤の染み出し機構を金型に組み込み、離型剤の染み出し条件の検討を行い、製作した金型を用いて離型剤を染み出させながらダイカスト鑄造を実施した。金型には温度センサ、ロードセルを組み込み、金型温度とダイカスト成形品の押し出し抵抗をモニタリングした。

以下に本研究で得られた結論を示す。

第2章

ポーラス構造体の造形物についてレーザ走査速度を変えて造形し、その通気特性や気孔の状態について調べたところ以下のようなことが分かった。

(1) 造形物内部に形成される気孔はレーザ走査速度が速くなるにつれて増加すること

(2) 内部に形成される気孔は造形時の積層方向に対して連続的につながること

- (3)造形方向に対して通気方向が直行するポーラス構造体の造形ではベクトルパスのレーザ照射によって気孔が閉塞してしまうこと
- (4)離型剤の染み出し量は離型剤の粘性が低い方が多くなること
- (5)ポーラス構造体は気孔の存在により熱伝導率が低く， 熔融アルミニウム合金に対して熱抵抗層として作用すること

これまでの結果から，造形方向が異なるとポーラス構造体内部の通気特性が大きく異なる結果となっていたが，ポーラス構造体の断面観察とライン造形の観察によってその原因を明らかとした．具体的には，ポーラス構造体をレーザ照射速度の変更によって造形すると，造形ビードがポーリング現象によって不連続な球状のものとなり，その隙間が積み重なることで微小な気孔となる．しかしながら，この隙間は不規則なものであり，造形方向に対して直行する方向には気孔が繋がりにくいことで通気性が小さくなってしまいうことで前述した異方性が発生することが分かった．

ポーラス構造体を用いて離型剤を染み出す金型を製作し，ダイカスト鑄造実験を行った．この実験により，以下のようなことが分かった．

- (1) 離型剤を染み出させながら行う鑄造であってもダイカスト成形品の内部品質に差異はないこと
- (2) ダイカスト鑄造時に離型剤を染み出すとき，発生するガスがポーラス構造体に侵入すること
- (3) 多孔質部分に離型剤の残渣物が発生し，離型剤の染み出しを阻害すること

これらの結果に対し，ポーラス構造体は気孔の形状が不規則であり，金型に造形した部位ごとに離型剤の染み出し量も不規則になること，前述した離型剤の残渣物による微小気孔の染み出し阻害という課題が存在する．

第3章

離型剤の塗布を効率的に実施する方法を検討するため，積層造形法を用いて任意の場所から離型剤を染み出させることができる金型の入子を作成し鑄造実験にてその有効性を検証

した。その際、離型剤を染み出させる微小管の積層造形における特性と通気性、染み出しの特性を調べた。その結果を以下にまとめる。

- (1) 微小管の成形においては断面形状を円形状にすることが最も設計形状に対する変化が少ない。また、ラティス構造の有無により微小管サイズが変化し、これは造形物の熱伝導に起因する。ラティス構造が存在することで微小管内部における閉塞確率が大幅に上昇する。
- (2) 積層造形法で微小管を設計する際離型剤を染み出させるためには実際に造形されるサイズよりも大きな設定サイズが必要となる。また、微小管の造形角度が大きくなると微小管内の造形精度が向上し離型剤の染み出し量も安定する。
- (3) 微小管を設置した入子で離型剤を染み出させながら鋳造した場合、離型剤染み出し量は吐出圧力にて制御可能であり、良好な成形品を得る条件設定をすることも可能である。これはポーラス構造体からの染み出しより簡便な制御となる。

一方で、金型内部には提案した離型材の供給路に加え、冷却用の水管などが複雑に配置されている。これらの配置による金型の強度や冷却効率の変化は今後の検討課題である。数値計算を用いた手法によって事前に予測することが適していると考えられるが、そのためにはまず金型として要求される特性を要素技術の特徴量で物理モデル化する検討が必要となる。

4.2 今後の展望

本研究では粉末床溶融結合法を使って金型に微小な気孔を成形し、気孔から離型剤を染み出させつつダイカスト鋳造を行う手法の検討を行った。これにより、複雑なダイカスト金型の機構のため従来のスプレ塗布方式では離型剤を付着させられなかった部位であっても、金型から離型剤を染み出させることで焼き付きや摺動抵抗増加による不良を低減する方法を提示できた。さらにこの際、微小気孔の造形条件および離型剤の染み出し量、染み出しに関わる因子について定量的な評価を実施することができ、より高精度に離型剤の染み出し量を制御するためには染み出しにかかる圧力、微小管の造形サイズ、微小管の造形角度が重要であることがわかった。

今後の展望として、まず粉末床溶融結合法で使用した粉末材料の変更が必要になってくると考えている。本研究を開始した当初は付加製造法を用いたダイカスト金型の製作を行う場合、マルエージング鋼を使用することが一般的であり[68]、通常ダイカスト金型のキャビティを含む部品を製作する材質である SKD61 の積層造形用粉末は造形中もしくは造形後の熱処理でクラックが発生してしまうため使用が困難であった[69, 70, 71, 72]。しかしながら、現在ではクラックが入りにくいように造形直後の硬さを抑えた、SKD61 に組成が近い粉末材料が販売されており[73]、今後 SKD61 粉末での微小管およびポーラス構造体造形の検討を行う。

離型剤を染み出させながらダイカスト鑄造を実施するために課題となる染み出しの持続性について量産ラインの中で1万ショット以上の生産が可能となるかを検証し、離型剤染み出しの阻害因子として想定される金型温度上昇時の離型剤残渣物の解消方法検討が必要になると考えられる。またこれに合わせて、離型剤染み出し機構の追加が金型の冷却性能に与える影響を分析し、事前の設計に織り込む解析手法の検証も行う。そのために、まずダイカスト鑄造における金型の、特に付加製造法で製作する場合に関係する各設計変数を把握し、その影響力を分析する必要がある。そのうえで、金型の冷却性能として目指す状態を決定し、制約条件の把握を行い、前述の設計変数と組み合わせて最適化設計を行うことができる手法を検討する[74, 75, 76]。

参考文献

- [1] 宮崎勢四郎：砂型鑄造法，日本機械学会誌，**67**，549（1954）1483.
- [2] 藤山幸二郎，平塚貞人，矢野孝文，八谷朋彦，森和幸，佐藤光和：高精度砂型鑄造法による船舶用大型銅合金鑄物の生産技術開発，鑄造工学，**88**，12（2016）762
- [3] 磯谷三男，近藤靖彦：鑄鉄の金型鑄造への応用，日本金属学会会報，**18**，12（1979）824
- [4] 土田正信：鑄鉄金型鑄造のシステム技術の確立，鑄物，**63**，4（1991）364
- [5] 蓮野昭人：最近のダイカスト技術の紹介，電気製鋼，**78**，4（2007）323
- [6] 太田信之：最近のダイカスト工業の展望，精密機械，**103**，7，299
- [7] 鹿取一男：最近の精密鑄造，精密機械，**30**，3（1964）233
- [8] 鈴木信雄：最近の精密鑄造技術の進歩，電気製鋼，**60**，1（1989）53
- [9] 駒崎徹，松浦一也，西直美：ダイカストの金型キャビティ内の溶湯圧力変化の解析，鑄物，**66**，3（1994）211
- [10] 青山俊三，砂田昌弘，坂本勝美，梅村晃由：アルミニウム合金ダイカストの鑄物と金型間の摩擦係数，軽金属，**41**，6（1991）412
- [11] 西直美：ダイカスト金型の高度化技術，精密工学会誌，**77**，7（2011）648
- [12] 西直美，駒崎徹，佐々木英人：アルミニウムダイカストの金型キャビティ内の溶湯圧力と溶湯温度変化，鑄物，**64**，11（1992）806
- [13] 神尾彰彦：高品質アルミニウム合金ダイカスト，軽金属，**35**，8（1985）478
- [14] 坂本勝美，田下究：ダイカスト引抜き力におよぼす中子ピン形状と鑄造条件の影響，鑄物，**60**，12（1988）747
- [15] 岩田靖，岩堀弘昭，古川雄一：ADC12合金ダイカストの焼付き挙動とそのメカニズム，鑄造工学，**89**，12（2017）757
- [16] 山田銑一，塚原茂男，大塚英夫，廣崎允位：ダイカスト引抜きピンの耐焼付き性，鑄造工学，**79**，6（2007）291

- [17]作井誠太, 折井秀彦, 大野明, 隅野一雄: ダイカストにおける離型剤の挙動について, 日本金属学会誌, **22**, 12 (1958) 617
- [18]天野憲広, 井澤龍介, 佐々木英人, 青山俊三, 吉田誠, 岡田裕二: アルミニウム合金ダイカストの離型剤, 鑄造工学,」 **87**, 11 (2015) 789
- [19]横井光義, 原田雅行, 古川秀樹: Water Free 離型剤 (油性) を適用したダイカスト量産技術の確立, 鑄造工学, **80**, 11 (2008) 631
- [20]天野憲広, 井澤龍介, 佐々木英人, 青山俊三: ダイカストの金型温度管理, 鑄造工学, **87**, 10 (2015) 713
- [21]高島武雄: 油性離型剤液滴の高温個体面上での蒸発挙動と付着性に関する研究, 小山工業高等専門学校研究紀要, **41** (2009) 45
- [22]岩永省吾, 榊原雄二, 小長哲郎, 中村元志, 神谷孝則: Al ダイカスト金型のヒートチェックの発生と進展, 材料, **36**, 405 (1987) 604
- [23]日原政彦: ダイカスト金型の熱疲労特性と寿命評価, 電気加工学会誌, **35**, 78 (2001) 1
- [24]上杉北斗: 特集「デジタルアプリケーション」3D プリンターの実像, 日本印刷学会誌, **51**, 4 (2014) 236
- [25]小笹良輔, 石本卓也, 松垣あいら, 中野貴由: Additive Manufacturing の歩みとレーザービーム粉末床溶融結合法の基礎, スマートプロセス学会誌, **10**, 4 (2021) 131
- [26]宮田淳二, 古川哲義, 三村誠一, 村上和之: 電子ビーム粉末床溶融結合法 (金属 3D プリンタ) の紹介, 軽金属, **72**, 6 (2022) 358
- [27]高瀬文: レーザおよび電子ビームを熱源とした粉末床溶融結合法により造形されたチタン基合金における残留応力と相安定性の関係, 軽金属, **72**, 5 (2022) 227
- [28]小池綾: 金型補修工程のための金属溶融積層造形法に関する基礎研究, 平成 28 年度一般研究開発助成 AF-2016017
- [29]佐々木隆文: 金属材料向けバインダーージェットティング技術の紹介, 日本画像学会誌, **60**, 4 (2021) 343

- [30]早野誠治：粉末焼結積層造形法による金型製作技術，成形加工，**13**，12（2001）771
- [31]廣瀬伸吾，江塚幸敏，小木曾久人：レーザ DED による細書／異種材造形と溶射との関わり，溶射，**58**，4（2021）212
- [32]灘野宏正，河野正来，中迫正一，堀健治：金型の冷却に関する基礎的研究（噴流式冷却管によるスポット冷却），日本機械学会講演論文集，No.065-1（2006）319
- [33]鈴木良佑，鎚木哲志，小宅勝，新井宏章，牧野好晃，黒瀬雅詞，久米原宏之，松原雅昭：次世代自動車用高精度アルミニウムダイカスト金型の深穴ドリル加工における熟練技術の定量的評価，産業応用工学会論文誌，**9**，1（2021）14
- [34]武田秀，新村記男，三中西信治：アルミニウム合金ダイカスト用の薄肉中子ピンの応力解析，鑄造工学，**89**，5（2017）246
- [35]佐々木英人，西直美，長澤政幸，蓮野昭人：連載「鑄造要素技術概論」1. アルミニウム合金ダイカスト ダイカスト金型，鑄造工学，**87**，7（2015）483
- [36]木村有貴，佐藤良輔，鈴木将宏，植田真広，井川秀昭，工藤英弘：3D プリンタを用いた 3 次元冷却回路による高性能金型開発，豊田自動織機技報，**70**，83
- [37]A. Anand, D. Nagarajan, M. El Mansori, T. Sivarupan : Integration of Additive Fabrication with High-Pressure Die Casting for Quality Structural Castings of Aluminium Alloys; Optimising Energy Consumption, Transactions of the Indian Institute of Metals, **76**（2023）347
- [38]C. Karakoc, K. Can Dizdar, D. Dispinar : Investigation of effect of conformal cooling inserts in high-pressure die casting of AlSi9Cu3, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **121**（2022）7311
- [39]B. Müller, R. Hund, R. Malek, N. Gerth : Laser Beam Melting for Tooling Applications –New Perspectives for Resource-Efficient Metal Forming and Die Casting Processes, Laser Beam Melting for Tooling Applications, **411**（2013）124
- [40]天谷浩一：金属光造形複合加工法 LUMEX とアプリケーション紹介，計測と制御，**54**，6（2015）421

- [41]米山猛, 内藤圭亮, 阿部諭, 宮丸充 : 金属光造形金型による薄肉低圧射出成形, 精密工学会誌, **76**, 2 (2010) 188
- [42]A. Dhinakar, B. Li, Y. Chang, K. Chiu, J. Chen : Air Permeability of Maraging Steel Cellular Parts Made by Selective Laser Melting, *Materials*, **14**, 3118 (2021)
- [43]H. Koresawa, H. Fujimaru, H. Narahara : Improvement in the Permeability Characteristics of Injection Mold Fabricated by Additive Manufacturing and Irradiated by Electron Beams, *International Journal of Automation Technology*, **11**, 1 (2017) 97
- [44]呉漢宗, 内田敏夫, 安斎浩一, 新山英輔 : 金型用噴流式水冷管における熱伝達係数, 鋳物, **65**, 1 (1993) 41
- [45]A. E. W. Jarfors, R. Sevastopol, K. Seshendra, Q. Zhang, J. Steggo, R. Stolt : On the Use of Conformal Cooling in High-Pressure Die-Casting and Semisolid Casting, *Technologies*, 39, 9 (2021)
- [46]S. An, D. Eo, I. Sohn, K. Choi : Homogenization on solution treatment and its effects on the precipitation-hardening of selective laser melted 17-4PH stainless steel, *Journal of Materials Science & Technology*, **166** (2023) 47
- [47]E. Gil, A. M. Mancisidor, A. Iturrioz, F. Garciandia, M. San Sebastian : Cracking susceptibility of maraging parts manufactured by laser powder bed fusion additive manufacturing: study on the powder characteristics and baseplate preheating influence, *Powder Metallurgy*, **69** (2023)
- [48]T. Southern, J. E. Campbell, K. I. Kourousis, B. Mooney, Y. T. Tang, T. William Clyne : Indentation Plastometry for Study of Anisotropy and Inhomogeneity in Maraging Steel Produced by Laser Powder Bed Fusion, *Steel Research International*, **94**, 2200881 (2023)
- [49]石井勇五郎 : 溶接欠陥の疲労強度に及ぼす影響の研究, 高圧力, **8**, 3, (1970) 1983
- [50]古本達明, 楠大樹, 網野亨, 細川晃, 田中隆太郎, 上田隆司 : 遊離砥粒を用いた金型内部冷却水管の仕上げ加工 表面突起付加による曲線水管の加工性改善, 砥粒加工学会誌, **56**, 10 (2012) 48

- [51]T. Furumoto, A. Koizumi, M. Rizal Alkahari, R. Anayama, A. Hosokawaa, R. Tanaka, T. Ueda : Permeability and strength of a porous metal structure fabricated by additive manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, **219** (2015) 10
- [52]是澤宏之, 河野匠司, 檜原弘之, 鈴木裕 : 金属光造形複合加工法による通気特性を有する射出成形金型に関する研究, *精密工学会誌*, **80**, 11 (2014) 1018
- [53]S. A. Jahan, T. Wu, Y. Zhang, H. El-Mounayri, A. Tovar, J. Zhang, D. Acheson, R. Nalim, X. Guo, W. H. Lee : Implementation of Conformal Cooling & Topology Optimization in 3D Printed Stainless Steel Porous Structure Injection Molds, *5* (2016) 901
- [54]M. Seidl, J. Bobek, J. Šafka, J. Habr, I. Nováková, L. Běhálek : Utilizing of inner porous structure in injection moulds for application of special cooling method, *Journal of Physics: Conference Series*, **709** (2016) 012003
- [55]山本善章, 岩田靖, 中村元志 : ダイカストの鑄造欠陥とキャビティ内の最終充填部に生成するガス圧力, *軽金属*, **39**, 1 (1988) 21
- [56]山本善章, 岩田靖, 戸沢勝利, 中村元志 : 普通横型ダイカスト鑄造時の溶湯速度とキャビティ内ガス圧力, *軽金属*, **38**, 3 (1987) 129
- [57]松原永吉 : 自動車軽量化のためのアルミ鑄造技術の開発と実用化, *鑄物*, **65**, 2 (1993) 145
- [58]佐々木英人, 菊池政男, 古屋毅文 : 連載「鑄造要素技術概論」1. アルミニウム合金ダイカスト アルミニウム合金ダイカスト金型のメンテナンス, *鑄造工学*, **88**, 6 (2016) 358
- [59]山縣裕, 舟橋弘旭, 谷川昌司, 新川真人 : ダイカスト金型の変形シミュレーションによる ADC12 ダイカストのはり発生予測, *鑄造工学*, **86**, 2 (2014) 121
- [60]古本達明 : 金属粉末積層造形で得られた金型の高機能化, 計測と制御, **54**, 6 (2015) 405
- [61]濱口純吉, 新川真人, 山下実, 岩堀弘昭, 柴田 勉, 加藤 正樹 : 鑄造工学, 第 174 回全国講演大会講演概要集 (2019) 39
- [62]濱田啓太郎, 新川真人, 山下実, 柴田 勉, 加藤 正樹, 岩堀弘昭 : 鑄造工学, 第 176 回全国講演大会講演概要集 (2020) 100

- [63]新川真人, 濱口純吉, 岩堀弘昭, 柴田 勉, 加藤 正樹, 山下実 : ナノカーボンコーティング処理された金型のアルミ合金鑄造時における湯流れ評価, 2020 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2020) 431
- [64]M. Islama , T. Purtonen, H. Piili, A. Salminen, O. Nyrhilä : Temperature profile and imaging analysis of laser additive manufacturing of stainless steel, *Physics Procedia*, **41** (2013) 835
- [65]山本桂一郎, 黒部利次, 山田良穂, 三浦毅彦 : 極細ステンレス鋼管内壁の高速流動研磨 (第 1 報), *精密工学会誌*, **64**, 1 (1998) 126
- [66]山本桂一郎, 黒部利次, 山田良穂, 三浦毅彦 : 極細ステンレス鋼管内壁の高速流動研磨 (第 2 報), *精密工学会誌*, **64**, 8 (1998) 1186
- [67]H, Chiba, T. Furumoto, Y. Hori, M. Nikawa, N. Hayashi, M. Yamaguchi : Fabrication of Release Agent Supply Die with Porous Structure Using Metal-Based Additive Manufacturing, *International Journal of Automation Technology*, **15**, 6 (2021) 868
- [68]S, Shakerin, A. Hadadzadeh, B. Shalchi Amirkhiz, S. Shamsdini, J. Li, M. Mohammadi : Additive manufacturing of maraging steel-H13 bimetals using laser powder bed fusion technique, *Additive Manufacturing*, **29**, 100797 (2019)
- [69]溝口高史, 長濱貴也, 田野誠, 松永茂, 吉見隆行, 米原牧子, 京極秀樹 : 高出力レーザーを用いた積層造形による合金工具鋼 H13 の高速造形と造形品質, 「粉体および粉末冶金」, **68**, 10 (2021) 415
- [70]田中浩司, 岡良樹, 杉本智紀 : 固体銅への金型用鋼 SKD61 の接合造形-第 1 報-レーザー肉盛りにおける積層条件, 銅と銅合金, **60**, 1 (2021) 50
- [71]S. S. Joshi, S. Sharma, S. Mazumder, M. V. Pantawane, N. B. Dahotre : Solidification and microstructure evolution in additively manufactured H13 steel via directed energy deposition: Integrated experimental and computational approach, *Journal of Manufacturing Processes*, **68** (2021) 852

- [72]Y. Hea, M. Zhong, J. Beuth, B. Webler : A study of microstructure and cracking behavior of H13 tool steel produced by laser powder bed fusion using single-tracks, multi-track pads, and 3D cubes, *Journal of Materials Processing Technology*, **286**,116802 (2020)
- [73]【カタログ】金型用高熱伝導率材 HTCTM45,HTCTM40
- [74]松森唯益, 山崎光悦 : プラスチック射出成形金型の冷却管最適配置設計法の研究, *日本機械学会論文集*, **74**, 739 (2008) 731
- [75]坂本康泰, 安部重毅, 吉田総仁 : 最適化法を用いた多段鍛造における中間金型局面決定法, *日本機械学会論文集*, **70**, 692 (2004) 540
- [76]矢地謙太郎 : はじめてのトポロジー最適化, *精密工学会誌*, **85**, 11 (2019) 965

謝辞

本論文の作成にあたり，終始適切な御助言を賜り，また丁寧に指導して下さった金沢大学設計製造研究所の古本達明先生に心より感謝致します．また本研究の遂行と論文作成にあたり，ご多忙中にも関わらず有意義な御助言を賜りました金沢大学設計製造技術研究所助教の山口貢先生に深く感謝致します．本論文の完成にあたり，有益なご教授を賜りました岐阜大学の新川先生に深く感謝致します．本研究の遂行にあたり，金沢大学大学院生および学部生としてご協力いただきました皆様に深く感謝致します．最後に，これまで私をあたたく応援してくれた両親と私を常に傍で支え続けてくれた妻 万智に心から感謝申し上げます．