

産業用金属3Dプリンタにより造形された射出金型を用いた薄肉成形品の成形性に関する研究

研究報告者 是澤 宏之

プロフィール



最終学歴 平成9年3月
九州工業大学大学院 情報工学研究科
情報システム専攻 博士後期課程 修了

専門分野 生産技術

学 位 博士(情報工学)

所属団体 国立大学法人九州工業大学
大学院情報工学研究院
知的システム工学研究系

役 職 名 准教授

今後の抱負

現代の樹脂製の工業製品の大量かつ安価な生産を支える射出成形技術は、これからも重要な生産技術であると予想されます。これを成立させる技術要素のひとつである射出成形金型技術は、製品の高度化や生産性を左右する重要技術でもあります。近年の付加製造技術を基盤とする産業用金属3Dプリンタの登場と技術開発は、従来の除去加工技術では実現できなかった複雑形状あるいは機能性の付与を可能とすることから、これを積極的に金型に適用することで、金型の可能性を更に広げることができると考えられます。日本発の工業製品が世界で高品質や高付加価値を有する魅力ある製品であり続けるために貢献する所存です。

1. はじめに

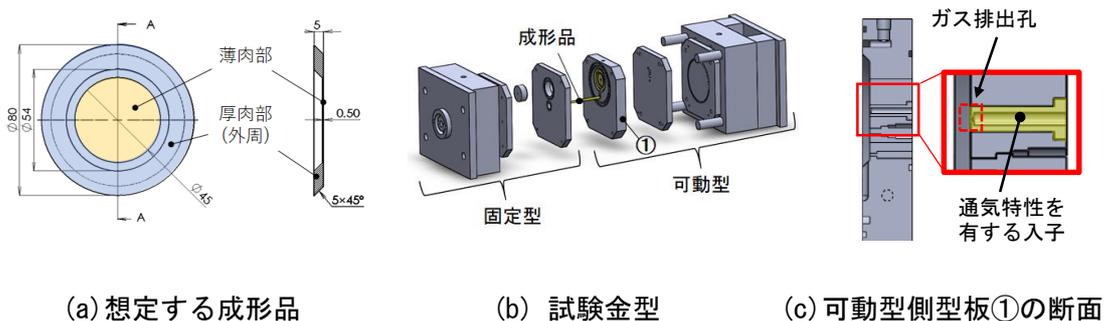
射出成形金型とは、型締により固定型と可動型が勘合されることで金型内に形成させる所望の成形品の形状を含むキャビティ空間内に、射出成形機のパレルにおいてペレットを加熱・溶融して得られる溶融樹脂を高速で金型内に射出し、保圧・冷却中に固化させ、型開後に離型機構を用いて取り出し、所望の樹脂製の成形品を得る成形法である。短時間の成形を可能とし、大量かつ安価に複雑形状の成形品を得られる特徴を有するため、今後とも大量生産を可能とする主要な成形技術の一つであるともいえる。加えて近年の工業製品の小型化あるいは省エネルギー生産への要望から、成形技術の難易度は増している。他方、近年の3D積層造形技術分野において、粉末の金属材料に対して選択的にレーザー光を照射することで造形物を得る装置である産業用金属3Dプリンタの登場とこれを用いた金型設計・製作についての開発・研究が実施されている。産業用金属3Dプリンタは、粉末の金属材料を付加させながら立体を造形する付加製造の手法であることから、切削加工に代表される従来からの除去加工法と比較して、複雑な形状あるいは新たな機能の付与といった特徴を有する。複雑な形状の事例として金型内部に曲線状の3次元状の冷却水管の配置、新たな機能付与の事例としてポラス状の構造による通気特性の付与などがあり、金型の冷却性能の向上、成形不良の防止・低減などが実現される。

本研究では、産業用金属3Dプリンタを使用して製作される射出成形金型を想定する。具体的には、造形によって得られる金型用入子を用いた金型である。造形された入子を用いることで、通気性能のある金型が可能となる。これは除去加工のみでは実現が非常に困難であった機能でもある。対象とする成形品は、薄肉成形品とする。成形品の厚さが薄くなる程、成形時の成形困難性が増すためである。よって、成形中の金型内部のガスを外部に排出する際、排気不良に由来する成形不良を防止するため、産業用金属3Dプリンタを用いて排気孔を有する造形物の製作し、これを金型に組み込み薄肉成形品の成形を想定した成形性の観察を実施する。

2. 想定する成形品と金型

図1に、本実験で想定する成形品とこれを成形する金型の概略を示す。図1(a)は成形品であり、図1(b)はこれを成形する金型であり、成形品形状は可動型側の型板に彫り込まれている。成形品は円形形状であり、その外周部分が厚肉部であり、成形品の中心から一定の半径の範囲で薄肉部となる形状である。射出成形機から射出される溶融樹脂は、金型外周部の端点に設定されたゲートより成形品の内部に流入する。一般的に溶融樹脂の流動・充填の傾向として、流れやすい部分から流れにくい部分への充填となる。本形状の場合は、まず流れやすい厚肉部の外周部分から溶融樹脂の充填が開始され、外周部がほぼ充填された以後、薄肉部分の充填が開始され、流動末端は成形品の形状中心になると予想される。これより、型締工程によって固定型と可動型が勘合された際に形成される金型内のキャビティ空間に当初充填された大気は、通常の場合、溶融樹脂の射出・充填中に、溶融樹脂がまだ未到達の金型分割の僅かな隙間を通じて金型の内部から外部へと排出され、大気と溶融樹脂は射出工程中の極めて短時間に金型キャビティ内部で置換されることになる。本研究で想定した成形品では、前述のとおり、溶融樹脂の流動末端が、成形品の中心となるため、大気の排出が非常に困難となる。

流動の状況によっては、流動の進展に伴い大気は急速に圧縮されることで、ショートショットあるいはヤケといった成形不良を発生する可能性もある。そのため、図1(c)に示す様に、成形品の中心部分の表面と接する可動型側の表面に、大気を排出するためのガス排出孔(図中、破線赤枠)を配置する。この孔の構造あるいは製造方法などについては、複数の方策が考えられるが、本研究では、この部分に金属造形法を用いた造形物した通気特性を有する入子として配置(図中、黄色領域)することで対応する。



(a) 想定する成形品

(b) 試験金型

(c) 可動型側型板①の断面

図1 想定する成形品と実験金型

3. 金属造形によるガス排出孔を有する入子の製作と通気特性

3-1. 貫通タイプのガス排出孔の形成と余剰硬化

金属3Dプリンタによるガス排出孔の造形については、図2(a)に示す様に、造形時に低出力のレーザー光によって造形することで、造形された内部構造に微細孔を形成させ、これが連続的に連結することで、通気孔を得る方法^{1)~4)}がある。特徴として、孔のサイズが小さく確率的に形成され、排気孔としては直線的であるとも限らない等がある。そのため、実成形への適用時の問題点として、成形回数の増加に伴って、徐々に通気特性が低下⁴⁾し、通気孔が閉塞される場合もある。その原因は、熔融樹脂の射出工程において、金型の内部から外部に排出されるガスの成分として、大気成分のみでなく、射出中の熔融樹脂のメルトフロントから発生する樹脂由来のガスを含むためである。排気中にガスの温度低下に伴って、ガスは固体化し、排出孔に付着・堆積することで閉塞する。この様な観点から、意図的にある程度の大きさのガス排出孔を形成するため、図2(b)に示す様な積層方向に貫通するガス排気孔の形成を試みる。その造形手順を図3に示す。まず、1層目は左から右に一定間隔で走査する。この時、造形後のガスの通過が可能な幅が存在する様なピッチとする。その後、2層目は1層目に直交した走査によって造形する。なお、造形のピッチは1層目と同様である。これを繰り返すことで、図2(b)に示した、貫通タイプのガス排気孔⁵⁾を得られる。なお、図4に示す様に、レーザー光の走査の際、レーザー光によって直接照射された硬化領域(青色)の他に、直接照射されていないが硬化している領域(橙色)が存在し、この領域が余剰硬化と呼ばれる。この部分の存在は通気特性に影響を与えることから、後述する造形物の観察や通気特性計測の際は、これを考慮する。

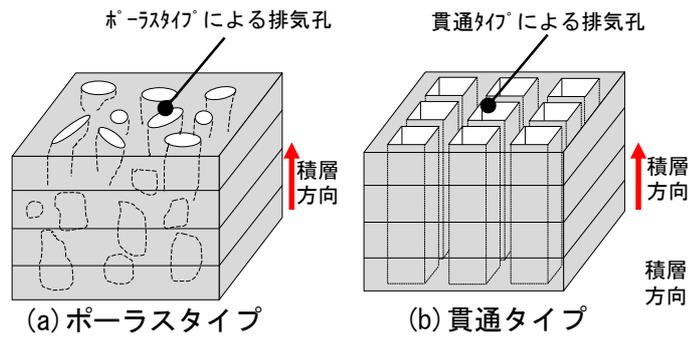


図2 ガス排気孔を有する入子

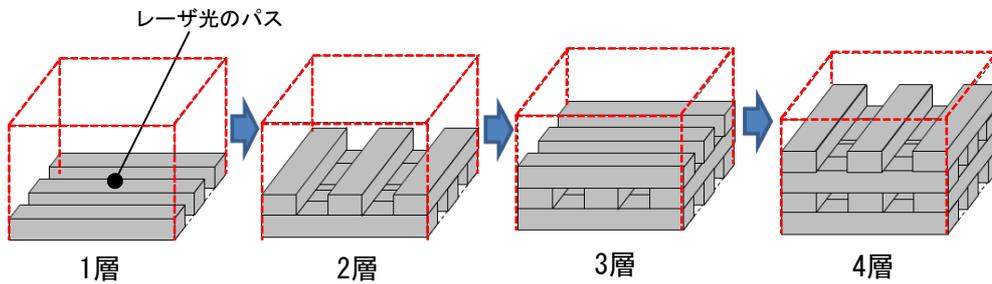


図3 レーザ光の走査による貫通タイプのガス排気孔の形成

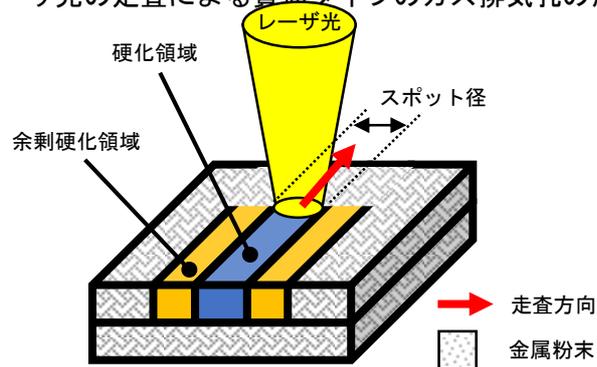


図4 造形時の余剰硬化領域の発生

3-2. 造形による入子の製作

通気特性を有する入子全体を造形により製作した場合、長時間の造形や使用造形材料の増加などのデメリットが存在する。本研究では、基本構造は市販されている構造物を用い、通気が必要な部分のみ造形を実施する方式を採用する。具体的には、金型用に高精度に加工された中実のピンを用いる。まず、中実のピンをドリル加工により貫通穴を加工し、次に、図5 (a) に示す様に、造形機にセットして、図5 (b) に示す様に、ピン上部から、通気特性が必要な厚さ分のみ造形を実施する。なお、ガス排気孔となる格子形状部分は、図5 (c) に示す様に、走査パス間隔 (H1)、格子幅 (H2)、通気幅 (H3) として定義し、格子構造は縦方向および横方向とも同一とする。通気幅 (H3) が実際にガスを排出する孔のサイズであり、設計的な観点からは設定上の狙い値ともいえる。なお、格子幅 (H2) はレーザ光のスポット径と同一である。造形条件を、表1に示す。通気幅 (H3) は、0.16[mm]であり、造形高さは2[mm]とする。

造形物の通気特性は、1つの造形物を2段階で計測する。図6に示す様に、第1段階として、中空ピン上に造形高さ2[mm]の造形物（造形物A）の造形し、その通気特性を計測する。第2段階として、造形物Aを中空ピンの上面から高さ1[mm]だけ残す様にワイヤ放電加工により除去加工した造形物（造形物B）の通気特性を計測する。

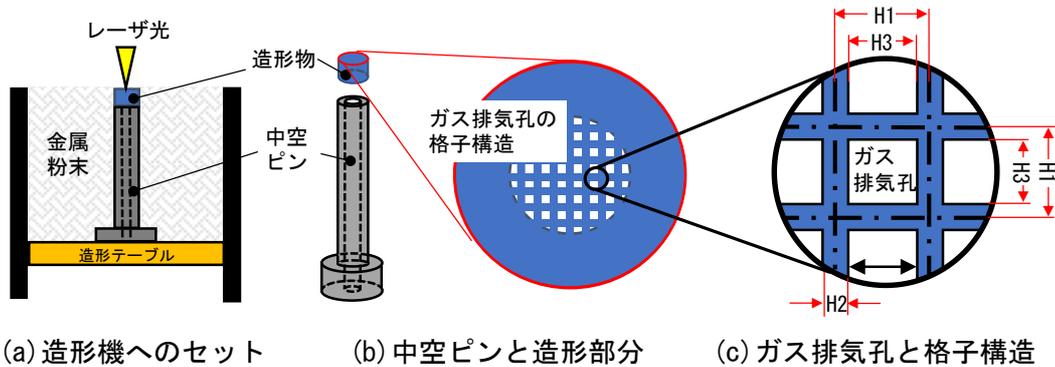


図5 造形状況と造形するガス排気孔の格子構造

表1 造形条件

金属粉末材料	OPM-ULTRA
積層ピッチ [mm]	0.04
走査パス間隔(H1) [mm]	0.26
レーザー出力 [W]	100
スポット径(H2) [mm]	0.1
走査速度 [mm/s]	200

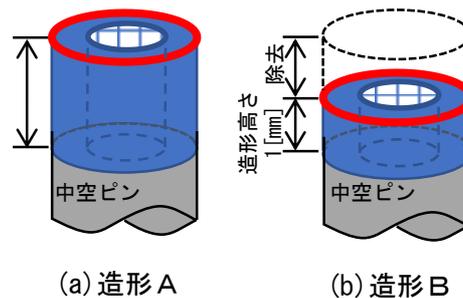


図6 通気特性を計測するための造形物

3-3. 表面性状と通気特性

図7に、中空ピンに造形した状態の造形物を示す。図8に、造形物AとBの表面性状を示す。造形物Aの表面（図8（a））は、造形終了直後の表面性状であり、レーザー光の走査によって形成された溶接のビードのような形状であり、表面は凸凹している。他方、造形物Bの表面（図8（b））は、ワイヤ放電加工によって除去加工されていることから、その表面は梨地模様である。大きな違いは、図8（c）に示す様に、造形物Aは、通気特性に影響を与えるガス排気孔となるH3について、小さくかつ歪な形状となっている点である。造形物Bは、造形物Aと比較して、四角形状がおおよそ判別できる。これは、造形物Aでは、造形時に発生する余剰硬化部分が存在しているが、造形物Bでは、ワイヤ放電加工中に強度的に脆弱な余剰硬化部分が除去されたためと考えられる。表2に、表面性状を計測した結果を示す。造形物Bは、おおよそ設計値どおりのガス排気のための幅が得られていることが確認できる。

図9に、各造形物の圧力差に対する流量の計測結果を示す。造形物Aと比較して、造形物Bは、高い流量特性があることを確認できる。なおこの結果は、造形物の高さによる影響を考慮していない。これを考慮した透過係数を表3に示す。造形物Bは、造形物Aと比較して、約3.26倍の通気特性を

有することが確認させる。これより、余剰硬化の発生を抑えた造形条件あるいは造形後に余剰硬化を除去する重要性を確認できる。

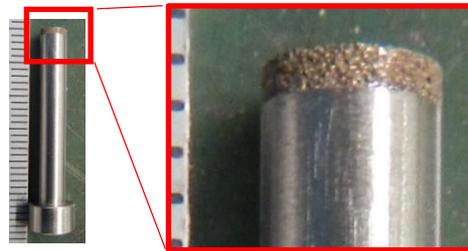
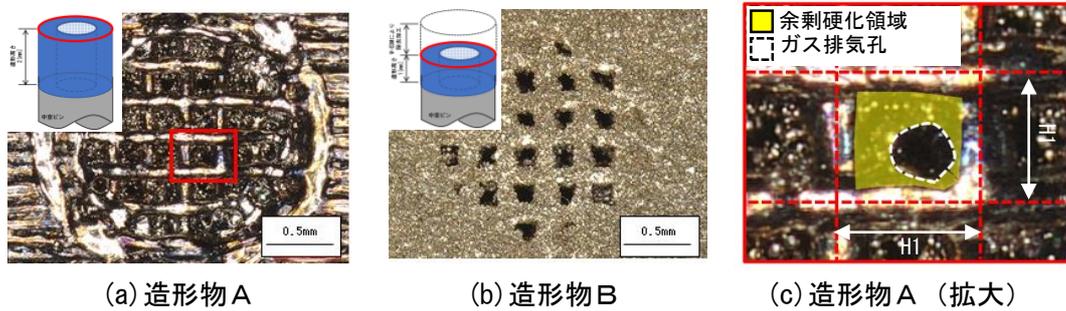


図7 中空ピン上への造形物



(a) 造形物 A

(b) 造形物 B

(c) 造形物 A (拡大)

図8 ガス排出孔の面性状

表2 各造形物の測定結果

	設定値 (設計値)	測定値(造形物表面)	
		造形物 A	造形物 B
格子幅(H2) [mm]	0.10	0.230	0.123
通気幅(H3) [mm]	0.16	0.018	0.151

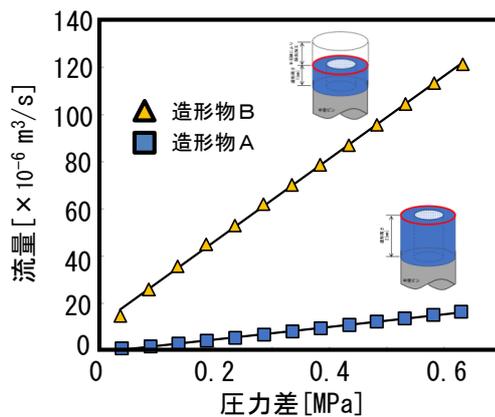


図9 圧力差と流量との関係

表3 各造形物の透過係数

	透過係数 [$\times 10^{-6} \text{ m}^2$]
造形物 B	1.01
造形物 A	0.310

空気の粘度 (Pa·s) : 1.82×10^{-5}

4. 成形中の金型挙動の観察と成形性

4-1. 計測システムおよび成形条件

図10に、本実験で使用した計測システムを示す。成形機からは成形中の各種の成形情報を、金型からはキャビティ内部の成形圧力（樹脂圧力）などのキャビティ内部の物理情報を取得する。前述した様に入子は、金型中央部分（成形品中央部分に相当）にセットされる。

表4に、成形条件を示す。使用樹脂にPPを用いる。樹脂圧力によって、キャビティへの充填量は変化すると予測されることから、保圧力、V/P切替位置、成形品の厚さを変化させて成形実験を実施する。成形機で設定する保圧力は次の様に決定する。まず、射出工程のみ（保圧工程での圧力を0とした成形）で得られる樹脂圧力（ P_i ）を取得する。次に、先に得られた P_i を基準として、 P_i と同じ圧力を保圧力とした P_2 、 P_i に対して+20%倍あるいは-20%倍とした保圧力をそれぞれ P_1 および P_3 とする。なお、V/P切替位置は、射出成形機のインランスクリー上での位置情報における射出工程（速度制御）から保圧工程（圧力制御）への切替位置である。スクリー位置が成形機のノズル先端に近い程、これは小さな値をとり、金型への溶融樹脂の充填量は増加するとともに金型内部の樹脂圧力の上昇を意味する。

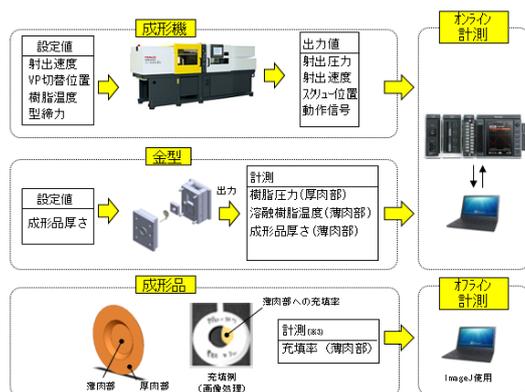


図10 計測システム

表4 成形条件

使用樹脂/樹脂温度 [°C]	PP/220
射出速度 [mm/s]	50
保圧力 [kgf/cm ²]	0/P1/P2/P3
保圧時間 [s]	0/20
冷却時間 [s]	20
計量位置 [mm]	30
V/P切替位置 [mm]	6/5/4
成形品厚さ [mm]	0.4/0.5

4-2. 成形実験結果

表5に、保圧力の無い場合における、V/P切替位置の変化に伴う成形品の薄肉部の充填量の変化を示す。V/Pの切替位置の値が小さくなる程、薄肉部分での溶融樹脂の充填量の増加を確認できる。またこの時、保圧力は作用させていないので、ショートショットでの充填を意味する。図中、ゲートは成形品の上にある。当初の想定のとおり、肉厚部分が先行して充填されることが見てとれる。ただし、ゲート付近の薄肉部分では、そうでない部分と比較して、薄肉部分であっても先行的に溶融樹脂が若干充填され、ゲート付近に作用する樹脂圧力による影響を受けたと考えられる。

図11に、成形品の厚さ毎の金型内の樹脂圧力と薄肉部への充填率の関係を示す。充填率は、薄肉部分の全体の面積に対する充填された面積比の百分率である。これより、成形品の厚さおよびV/P切替位置に伴う射出圧力に関わらず、金型内の樹脂圧力が上昇すると同時に、充填率も上昇することが確認できる。また、成形品の厚さが厚い場合は、薄い場合を場合と比較して、同一の金型内の樹脂圧力では、充填率が高い。成形品の厚さが厚い程、流動性は向上し、成形性の向上を確認することができる。また、射出工程のみで成形した場合と射出工程と保圧工程の一般的な2工程を用いて成形を実

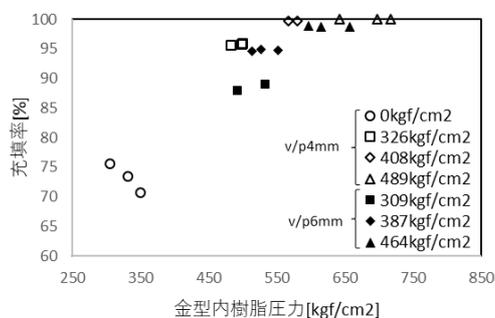
施した場合を比較すると充填率が変化している。例えば、成形品の厚さが0.5[mm]のV/P切替位置が4[mm]の場合、射出工程のみでは約72%程度であった充填率が、保圧工程で射出のみの場合の保圧力(P_i)と同一の保圧力(P₂)である408[kgf/cm²]を作用させることで、充填率が100%となった。同様の傾向は成形品の厚さが0.4[mm]でも見られる。次に、充填率が100%となっていない成形条件下である成形品厚さ0.5[mm]でV/P切替位置が6[mm]の時の保圧力P₁(309[kgf/cm²])からP₃(464[kgf/cm²])の変化による薄肉部への充填量を評価する。保圧力が、P₁からP₃と約1.5倍上昇することで、充填率は、86[%]から99[%]と約1.15倍上昇した。このことから保圧工程における薄肉部分での溶融樹脂の充填進展の関与について、薄肉でない成形品を成形した際の一般的な捉え方と比較すると、かなり高く関与すると推察され、成形性に対して大きな影響を与えると考えられる。

図12に、成形品厚さ毎の金型内の樹脂圧力と最大の樹脂温度との関係を示す。これより、成形品の厚さが厚い程、最大の樹脂温度も高いことを確認できる。成形品が厚くなることで、溶融樹脂の温度の低下が抑制されたと考えられる。樹脂の温度は、溶融樹脂の粘性に関連した流動性と関与することから、その成形性にも影響を与える。

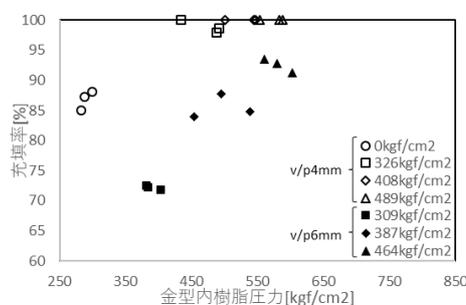
最後に、本成形実験を通じて、産業用金属3Dプリンタで製作したガス排気孔を有する入子による成形中の成形不良、例えばショートショットやヤケなど、を確認できなかったことから、実験に対する通気性能は十分満足したと考えられる。

表5 V/P切替位置と充填量の変化（保圧無）

V/P切替位置	大	—————	—————	小
充填量	小	—————	—————	大
充填状況				

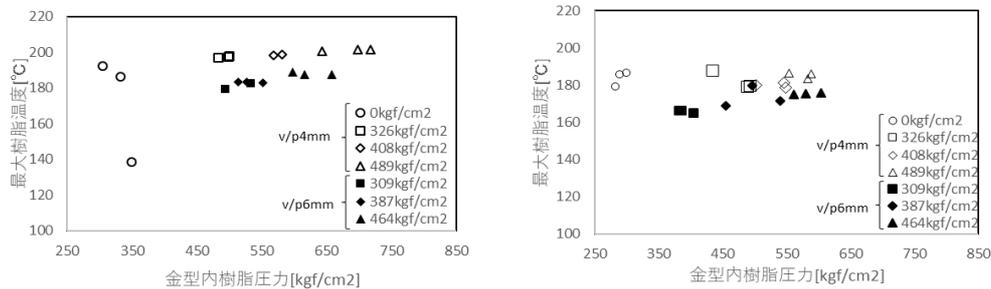


(a) 成形品厚さ0.5[mm]



(b) 成形品厚さ0.4[mm]

図11 金型内樹脂圧力と充填率の関係



(a) 成形品厚さ0.5 [mm]

(b) 成形品厚さ0.4 [mm]

図 1 2 金型内樹脂圧力と最大樹脂温度の関係

5. おわりに

成形中の金型内部のガスを外部に排出する際、排気不良に由来する成形不良を防止するため、産業用金属 3Dプリンタを用いたガス排気孔を有する造形物の製作および薄肉成形品の成形を想定した成形性の観察を実施した。

排気孔を有する造形物の製作については、格子状かつ直線的貫通孔のガス排気孔を有する入子を造形し、その通気特性を評価した。評価の結果、造形による余剰硬化が通気特性に影響を与えていることを確認した。造形した入子を用いて、薄肉成形品を想定した成形実験による成形性を観察した。その結果、薄肉部分への充填は、樹脂圧力と樹脂温度の影響を受け、特に樹脂圧力による流動性進展に高い影響を受けることを確認した。

これより、成形時の排気不良に由来する成形不良に対する改善が期待でき、より難易度の高い射出成形品の実現を期待できると考えている。

謝辞

本研究は、公益財団法人三井金型振興財団による研究助成により実施されました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) M. Kojima, H. Narahara, Y. Nakao, H. Fukumaru, H. Koresawa, H. Suzuki, S. Abe, Permeability Characteristics and Applications of Plastic Injection Molding Fabricated by Metal Laser Sintering Combined with High Speed Milling, Int. J. of Automation Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 175-181 (2008).
- 2) 是澤宏之, 河野匠司, 榎原弘之, 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, Vol. 80, No. 11, pp. 1018-1022 (2014).
- 3) H. Koresawa, K. Tanaka, H. Narahara, Low-Energy Injection Molding Process by a Mold with Permeability Fabricated by Additive Manufacturing, Int. J. of Automation Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 101-105 (2016).
- 4) H. Koresawa, H. Fujimaru, H. Narahara Improvement in the Permeability Characteristics of

Injection Mold Fabricated by Additive Manufacturing and Irradiated by Electron Beams,
Int. J. of Automation Technology, Vol.11, No.1, pp.97-103 (2017).

- 5) 井手章博, 是澤宏之, 檜原弘之, 通気特性を備えた射出成形金型の排気特性に関する研究, 2020 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 , pp. 436-437 (2020).