

令和元年6月25日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06014

研究課題名(和文) 通気特性を有する構造体を用いた射出成形金型における低エネルギー成形に関する研究

研究課題名(英文) Low-energy injection molding process by using a structure with permeability

研究代表者

是澤 宏之 (KORESAWA, HIROSHI)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号：70295012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー光線の選択的照射によって金属粉末を焼結する付加製造技術を基礎とする産業用3Dプリンタは、従来の除去加工では加工困難な複雑形状あるいは新たな機能を実現する。本研究では、産業用3Dプリンタにより造形される通気特性を有した構造体を射出成形金型の入子として適用することで、低エネルギー射出成形に関する検討を行った。その結果、従来のプロセスよりも低エネルギーでの成形を実現する可能性および射出プロセス中に溶融樹脂から発生するガス量を求めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大量生産される樹脂製品は、射出成形機と金型による射出成形法が用いられ、射出成形機では樹脂を溶融・可塑化させて金型に射出・充填し、金型はこれを冷却・固化させて所望の製品を得る。本研究では、産業用3Dプリンタにより金型に通気特性を付与し、成形時における溶融・可塑化および射出・充填に消費されるエネルギーを削減可能とする低エネルギーでの成形を検討した。その結果、より低エネルギーでの成形などが可能性であることを確認した。この成果は、射出成形法で消費される莫大なエネルギーの一部を削減することで、温室効果ガス排出低減への寄与と低炭素社会の実現へ貢献できると考えている。

研究成果の概要(英文)：An industrial 3D printer based on additive manufacturing technique sinters powdered material into a mass that has a desired three-dimensional shape. In comparison to conventional metal removing method, the printer realizes more complex shape and/or provides sophisticated functions to mass. Permeability metal fabricated by the printer is also one of the functions. In this research, energy saving in injection molding process was examined by applying the permeable structure as an insert of injection mold. As a result, it is expected to realize more effective energy saving than non-permeable structure and the amount of gas generated from the molten resin during the injection process were estimated.

研究分野：生産技術

キーワード：金型 付加製造技術 射出成形 産業用3Dプリンタ 成形加工 低エネルギー 通気特性

1. 研究開始当初の背景

射出成形法とは、金型内のキャビティ空間に、射出成形機の加熱シリンダで溶融・可塑化された溶融樹脂を極めて短時間で、射出・充填し、これを固化させて形状（成形品）を得る成形法である。射出前のキャビティ空間は、大気を主成分とするガスが存在し、溶融樹脂の射出とは、このガスを金型内部から外部への排出を意味する。排出が不適切な場合、成形不良（焼け、充填不良等）が発生する。可視化金型を用いた成形実験により、焼けの発火状況の観察[1]、ガスベントの違いによる成形品ウエルド強度などが評価[2]されている。ガスベントは、金型に別部品として組み込まれることが多く、配置・加工等に制限が存在したが、産業用3Dプリンターにより金型にガスベント構造を一体で組み込み可能となった。

これまでの研究成果として、産業用3Dプリンターを用いて金型内部にガスベントとして通気特性を有する構造を形成し、通気特性の向上による充填改善 [3]および通気構造を提案[4]してきた。また先行研究[5]として、同一の成形条件で実験した結果、通気構造のある金型は、通気構造の無い従来構造の金型と比較して、成形機が溶融樹脂を射出する際の消費電力量を削減し、低エネルギー成形の可能性を初めて明らかにした。他方、成形に消費される成形機の全消費エネルギーに対して、ペレットの溶融・可塑化に消費されるエネルギーは約68%程度[6]を占めるといわれることから、成形機の加熱シリンダでの消費エネルギー低減による、低エネルギー成形の実現を期待できる。

2. 研究の目的

樹脂製工業製品の大量生産に利用される射出成形法は、今後も主要な生産技術の一つであると期待されている。反面、大量生産のために使用エネルギーは莫大となり、省エネルギーの観点から、低エネルギー成形技術の確立は必須である。この実現のため、金属粉末をレーザー光線の照射によって選択的に焼結する産業用3Dプリンターを用いる。これは、従来の除去加工法では加工困難あるいは実現不可能とされてきた形状あるいは機能性を付与可能とする付加製造技術である。本研究の目的は、産業用3Dプリンターにより通気特性を付与した金型を用いて、射出成形法における低エネルギー成形の実現である。

3. 研究の方法

(1) 通気構造体による低エネルギー成形性の検討

産業用3Dプリンターを用いて、通気特性を有する構造体（以後、通気構造）を製作する。同様にして通気特性を持たない構造（以後、従来構造）を造形する。この2つの構造を用いて射出成形機による成形実験を実施し、成形中の射出成形機の複数箇所の電力を計測し、通気構造と従来構造について比較・分析することで、通気構造による低エネルギー成形を評価する。

樹脂の流動性を示す粘度は温度に強い影響を受ける。流動性向上のために可塑化のための樹脂温度を上げると、加熱シリンダでの消費エネルギーは上昇する反面、射出時のスクリーアの消費エネルギーは下降する。射出工程において、従来構造と通気構造を比較した場合、通気構造はより低エネルギーでの溶融樹脂の射出が可能となる。そのため、射出時のスクリーアの消費エネルギーを同一とした場合、従来構造と通気構造での溶融樹脂温度に差が発生する。この温度は、加熱シリンダの消費エネルギーとも関連していることから、通気構造での加熱シリンダの温度を下げる事が期待され、その差を削減できたエネルギーとする。

実験用金型

図1(a)に想定した成形品を示す。これは、周囲が厚く中心部が薄い形状であり、射出時に溶融樹脂は厚手部分の成形品外周部分から充填が始まり、その後、薄手部分の成形品の中心部分に向かって充填され、最終的に成形品の中心部が流動末端となる形状である。よって、図1(b)に示

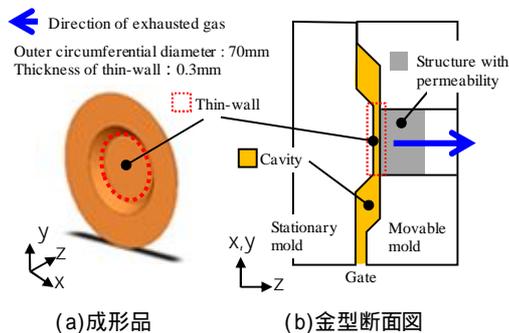


図1 想定成形品および金型断面

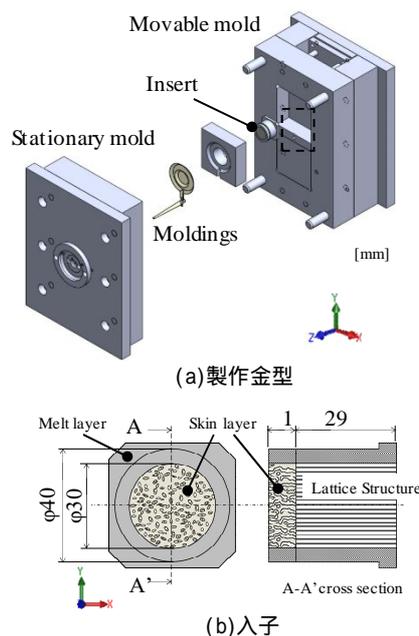


図2 製作金型および入子

す金型断面において、矢印に示す方向にガスは排出されることになる。

図2に製作した金型と入子を示す。入子の通気領域は造形上の形状確保の領域を含んで成形品の薄手部分と同一の面積とする。溶融樹脂と接する表面から1mmの厚さ部分に通気特性のあるスキン層で造形する。この層での通気孔は造形時に形成される微小な空孔が連結されることで形成される排気孔であり、微細な構造でもある。これは厚さが薄い程通気特性は向上する反面、機械強度は低下する。射出成形中の溶融樹脂からの高い成形圧力の作用による破損を回避するため、厚さを1mmとした。スキン層以外の場所での通気構造については、機械強度の高いメルト層による格子構造で通気孔を形成する。

実験方法

表1に実験条件を示す。使用樹脂としてPPを用いる。従来構造と通気構造に対して、成形中の射出成形機内部の電力については、射出時のスクリュウを駆動するモータの電力、ペレットを溶融・可塑化する加熱シリンダのヒータ電力および成形機の電源に相当する総電力を計測する。

射出成形機にはROBOSHOT S-2000i100B(ファナック(株))を、電力等の計測にはNR-HV04およびNR-HA08(株)キーエンス)を使用した。

(2) 溶融樹脂から発生するガス量の検討

成形時に金型内部から外部に排出するガスとは、固定型と可動型が吻合した際に形成されるキャビティ空間に存在するガスと射出中の溶融樹脂から発生するガス(以後、発生ガス)が混合したものである。この発生ガスが気体から固体になると粘着性を有すると同時に、金型メンテナンスが必要となる等の問題を伴うことから、成形中の発生量を検討する。加えて、産業用3Dプリンターで造形したスキン層の排気孔は非常に微細な構造であるため、発生ガスの排気孔への侵入と孔内での固化によって、排気孔が閉塞する可能性のみならず成形実験中の通気特性の低下が想定された。これにより、発生ガスによって排気孔が閉塞されない様、比較的大きな排気孔を有する通気構造を準備する。加えて、成形実験時に発生ガスの量が不安定になる可能性があることから、その原因を低減するため、原料定量供給装置を導入した。

実験用金型

図3(a)に示す様に、直径0.1mmの比較大きな排気孔を複数孔有する通気性入子を製作した。成形中に孔が発生ガスにより塞がれないことを確認した上で成形実験を実施した。また、図3(b)に製作した金型を示す。これは、成形中に金型の内部から外部に排出されるガス(以後、排出ガス)が金型の一カ所から排出される様に考慮された構造である。金型を構成する各部品の接合部分および金型分割面からの気体の漏出防止のためOリングなどを配置した気密性を考慮した金型とする。なお、排出ガスの捕集は水上置換により実施した。また、原料定量供給装置(株)日本油機、HF-I型)を成形機のホッパーと加熱シリンダ入口の間に設置する。これにより、原料である粒子状の樹脂(ペレット)を成形サイクル毎に一定量供給すると同時に真空吸引をすることで、加熱シリンダへのペレットの過剰供給を防止および不要なガス等の加熱シリンダへの供給を低減する効果が期待される。加えて、ペレットの加熱シリンダへの過剰供給状態での成形現象は不安定でもあり、これに伴う排出ガス量は変動すると予想され、本実験では原料定量供給装置により低減する。

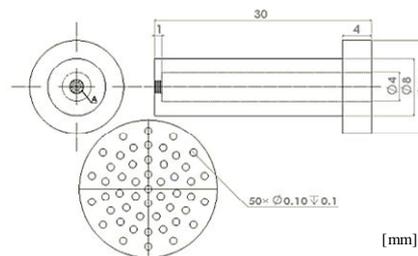
実験方法

表2に実験条件を示す。使用樹脂としてPP

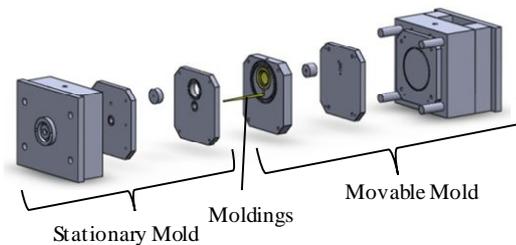
表1 実験条件

Condition	np	p
Resin	PP(SunAllomer)	
Heater Temperature : T [°C]	185 / 200 / 215 / 230	
Moving amount of screw: X[mm]	20 / 21 / 22 / 23	
Injection speed : V[cm ³ /s]	16.1 ~ 160.9	
Holding pressure [kgf/cm ²] / time [s]	0 / 0	
Cooling time [s]	20	
Clamping force [tonf]	50	

np : non-permeable structure (Conventional structure)
p : permeable structure



(a) 複数の排気孔を有する通気性入子



(b) 気密性を考慮した金型

図3 製作した通気性入子と金型

表2 実験条件

Injection Molding	
Resin/Temp.[°C]	PP/220
Injection velocity[mm/s]	100
Holding pressure[kgf/cm ²]/time[s]	0/0
Cooling time[s]	20
V/P switchover position[mm]	17/15/13/11/9/7/5/4
HF (Hungry Feeder : Equipment of fixed-quantity feeding)	
Rotational speed[rpm]	35

を用いる。

まず、原料定量供給装置による成形の安定性を評価した。なお、原料定量供給装置の内部にあるペレット搬送スクリーウの回転数については、回転数を変化させた複数回の予備実験を実施し、排出ガスがより安定状態であると判断できる回転数を採用した。

次に、射出中に溶融樹脂からの発生ガスについて、ショートショット成形とすることで金型キャビティ内へ射出する溶融樹脂量を変化させ、排出ガスを捕集する。その際、実際に射出された溶融樹脂の体積を直接求めることは困難であるため、離型後に成形品重量を計測し、これに使用樹脂の平均的な密度および収縮率を用いて射出された溶融樹脂の体積を推定し、これと排出ガス体積との差をとり、発生ガス量を求める。

4. 研究成果

(1) 通気構造体による低エネルギー成形性の検討

図4に、射出中のスクリーウの電力変化を示す。通気構造（図中：p）は、従来構造（図中：np）よりも電力が低いことが確認できる。斜線で示した面積が、通気構造において低減できたスクリーウのエネルギーを意味する。

図5に、加熱シリンダ温度を変化させた時の平均スクリーウ電力（ P_M ）および成形品の充填率（ ϕ ）を示す。充填率とは、成形品の薄手部分に充填された面積をこの部分の全面積で除した値とし、平均スクリーウ電力とは、スクリーウの電力は充填率と射出時間に影響を受けることから、この電力を射出時間と充填率の積で除した値とする。これより、加熱シリンダ温度が高くなるに従って、平均スクリーウ電力の低下と充填率の上昇を確認できる。これは、加熱シリンダ温度の上昇による、溶融樹脂の流動性の向上を意味する。通気構造と従来構造を比較において、前者がより低エネルギーでの成形が可能である。特に、平均スクリーウ電力が $P_M=66$ の時、通気構造および従来構造の加熱シリンダ温度は、それぞれ 230 および 210 となり、最もその温度差が大きかった。

図6に、加熱シリンダ温度を変化させた時の加熱シリンダのエネルギー（電力量）の変化を示す。温度の上昇とともに、電力量も上昇する。またこれは、通気構造と従来構造で特段の違いは認められないため、各構造の結果は同一として扱う。図5および図6の結果より、通気構造と従来構造で、同一の平均スクリーウ電力場合、溶融温度の差が大きくなる時（図5中、 $P_M=66$ ）の各構造の温度から、加熱シリンダのエネルギー差をとり、従来構造と比較した結果、通気構造では、おおよそ5.3%の低エネルギー成形を実現した。

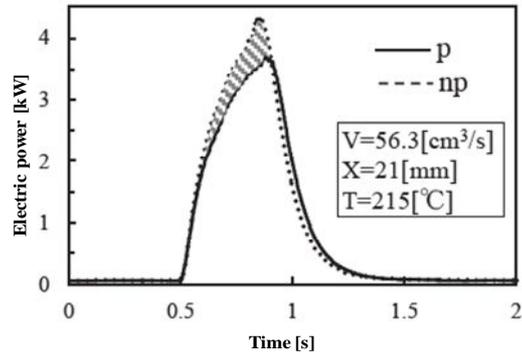


図4 射出中の成形機のスクリーウの電力変化

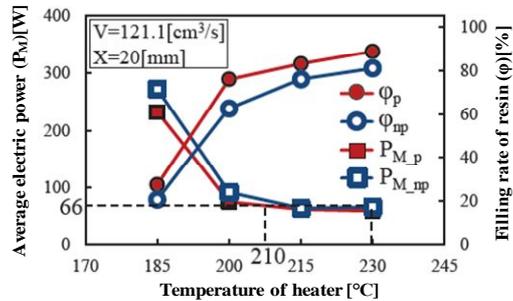


図5 加熱シリンダ温度に対する平均スクリーウ電力および充填率の変化

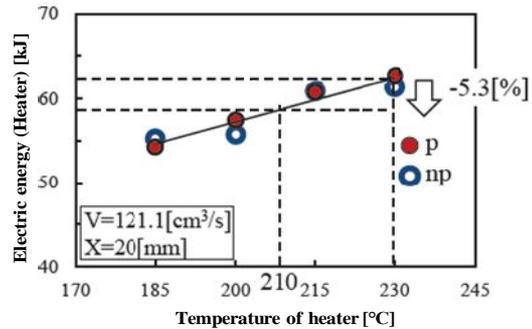


図6 加熱シリンダ温度に対するヒーターのエネルギーの変化

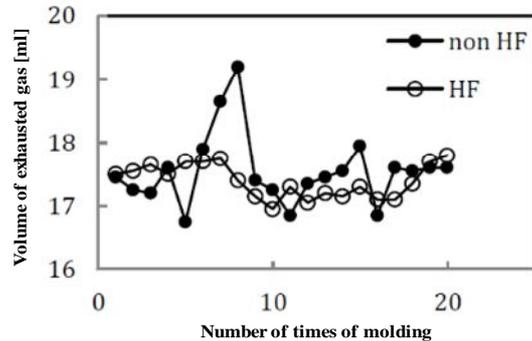


図7 成形サイクルに対する排出ガス量の変化

(2) 溶融樹脂から発生するガス量の検討

原料定量供給装置による成形の安定性評価

図7に、原料定量供給装置の有無による成形サイクルの進展に伴う成形時の排出ガス量の変化を示す。装置がある場合(図中、HF)は、装置がない場合(図中、non-HF)と比較して、排出ガスの変動が少なくなることを確認できる。これより、装置を設置することで、より安定的な成形実験の実現が可能である。

射出中の溶融樹脂からの発生ガス量

図8に、ショートショットによって射出量を変化させた際の排出ガス量の変化を示す。図中横軸は、使用成形機のV/P切り替え位置であり、右側が最も射出量が少ない状態での成形である。射出量の増加に伴って、排出ガス量も増加する。この結果を踏まえ、図9に、射出された溶融樹脂の重量と溶融樹脂からの発生ガス量の変化を示す。溶融樹脂の重量の増加に伴い、溶融樹脂からの発生ガス量も増加する。これより、本実験での使用樹脂における単位重量当たりの発生ガス量は、約0.11[ml/g]程度であることを推定した。

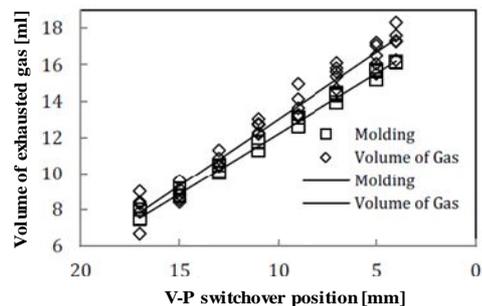


図8 ショートショット成形における排出ガス量の変化

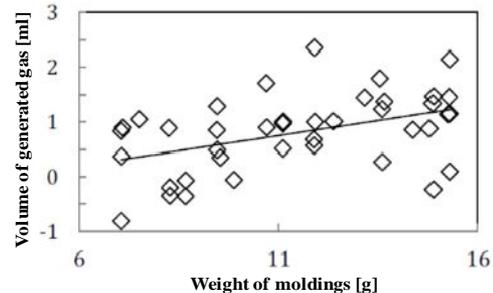


図9 射出された溶融樹脂重量に対する発生ガス量

【参考文献】

- [1]横井他, ウルトライ生成とガス抜けとの相関解析, 成形加工, 12, pp.263-264, 2001.
- [2]武末他, ウルトライ生成とガス抜けとの相関解析, 成形加工シボシア, Vol.2001, pp.247-250, 2001.
- [3] M.Kojima, et al., Permeability Characteristics and Applications of Plastic Injection Molding Fabricated by Metal Laser Sintering Combined with High Speed Milling, Int. J. of Automation Technology, 2, 3, pp.175-181, 2008.
- [4] H.Narahara, et al., Permeability Performance on Porous Structure of Injection Mold Fabricated by Metal Laser Sintering Combined with High Speed Milling, Int. J. of Automation Technology, 6, 5, pp.576-683, 2012.
- [5] H.Koresawa, et.al., Low-Energy Injection Molding Process by a Mold with Permeability Fabricated by Additive Manufacturing, Int. J. of Automation Technology10, 1, pp.101-105 (2016).
- [6]F.Johannaber, Injection Molding Machines 4th Ed., Hanser, 2008.

5. 主な発表論文等

[学会発表](計8件)

- (1)井手章宏, 是澤宏之, 榎原弘之, 通気性射出成形金型に関する研究, 2019年度精密工学会春季大会学術講演会, 2019.
- (2)胡子大樹, 是澤宏之, 榎原弘之, 射出成形金型の成形中のガス排出に関する研究, 2018年度精密工学会春季大会学術講演会, 2018.
- (3)吉岡亮祐, 榎原弘之, 是澤宏之, 通気性射出成形金型の低エネルギー成形に関する研究, 2018年度精密工学会春季大会学術講演会, 2018.
- (4)胡子大樹, 是澤宏之, 榎原弘之, 射出成形中の金型内部のガス排出に関する研究, 2017年度精密工学会九州支部熊本地方講演会, 2017.
- (5)吉岡亮祐, 榎原弘之, 是澤宏之, 付加製造法による通気性金型を用いた低エネルギー射出成形に関する研究, 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2017.
- (6)吉岡亮祐, 榎原弘之, 是澤宏之, 金属造形における造形パターンが造形物にあたる影響, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017.
- (7)胡子大樹, 是澤宏之, 榎原弘之, 成形不良低減のためのガス排出機構の検討, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017.
- (8)吉岡亮祐, 榎原弘之, 是澤宏之, 金属光造形通気性金型による低エネルギー成形を目的とした射出成形時の電力削減効果, 日本機械学会第11回生産加工・工作機械部門講演会, 2016.

6. 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名: 榎原 弘之

ローマ字氏名：NARAHRA, Hiroyuki

(2)研究協力者氏名：吉岡 亮祐

ローマ字氏名：YOSHIOKA, Ryosuke

(3)研究協力者

研究協力者氏名：胡子 大樹

ローマ字氏名：EBISU, Daiki

(4)研究協力者

研究協力者氏名：井手 章宏

ローマ字氏名：IDE, Akihiro

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。