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*

是澤宏之** 河野匠司*** 植原弘之** 鈴木裕**

Characteristics of Air Permeability for Injection Mold Fabricated by the Metal Laser Sintering
with High Speed Milling

Hiroshi KORESAWA, Shoji KAWANO, Hiroyuki NARAHA and Hiroshi SUZUKI

It has been well known that molded defects of injection molding due to exhausting air from cavity can be reduced by permeable metal consisting of micro-structure. In this study, it is focused on that the micro-structure of injection mold is made from powder metal, and is manufactured by the Metal Laser Sintering with High Speed Milling in technology field of additives manufacturing. This paper deals with fabrication method for the structure with air permeability and evaluation for its properties. The first, we proposed a laser scanning path strategy which reduces fabrication defects. This strategy utilizes change of powder metal thermal conductivity which varied before and after sintering. The second, by using the strategy, a structure which consists of straight gas-exhausting tubes like a regular lattice with cubic elements is fabricated. Through fundamental experiments, the structure provides more amount of exhausted-gas and makes the amount have less variance. We confirmed the effectiveness of the proposed strategy, and identified a permeability coefficient of fabricated structure by experiments. The coefficient is expected to be incorporated in the mold design process.

Key words: additive manufacturing, porous structure, cellular lattice structure, injection mold, permeability structure

1. 緒 言

付加工技術は、対象とする形状を複数の層に分割して2次元の形状を造形し、これを層状に積みあげること、目的とする3次元の形状を得る加工技術である。これは、従来からの切削加工にみられる除去加工技術と比較して、自由度の高い形状や除去加工では実現が極めて困難な機能性を付与できる特徴を有する。これを射出金型に用いた場合、例えば、造形物の内部での自由に配管構造の形成高成形サイクルの実現¹⁾³⁾、成形不良の低減の検討⁴⁾⁵⁾、これまで難成形とよばれていた薄物成形品への適用⁶⁾や造形物の内部に異なる機械強度の付与⁷⁾などを可能とし、金型の生産性や成形性の向上が期待されている。

これまで本研究では、金属粉末にレーザ光を選択的に照射することで、立体的な焼結体を得ることが可能な金属粉末積層技術と高速切削加工技術を併用した金属光複合加工法⁸⁾⁹⁾を金型製作に利用することを想定し、焼結体に通気特性を付与する構造¹⁰⁾¹¹⁾などを検討してきた。通気性の付与により、従来の金型では難成形品といわれる薄い厚さの成形品の成形やヤケといわれる成形不良などの回避が可能となる。そのためには、安定的な通気特性の実現や設計で利用可能な指標などが必要不可欠である。本加工技術は比較的新しい技術のために、造形条件などによる通気特性のばらつきなど、解決すべき問題点も存在する。

よって本論文では、造形中に発生する余剰に硬化する焼結体の低減を可能とするレーザ光の走査パスを提案し、基礎的な実験を通じてその効果を確認し、金型設計に適用可能な通気量の透過係数を実験的に求めたので報告する。

2. 余剰焼結体と通気特性

焼結体に通気特性を付与するためには、排出する空気がある側（内部）から排出させたい側（外部）に向かって空気が通過可能な孔を焼結体内部に形成する必要がある。金型においては、内部とは固定型と可動型を吻合させた際にできるキャビティ空間であり、外部とは内部の空気を排出する金型壁面などである。金属光複合加工法を用いた場合、レーザ光の照射エネルギーを低く設定した造形や、図1(a)に示す様な孔¹²⁾の造形により実現できる。しかしながら、内部から外部に向かう単純な孔の場合、図1(b)に示す様に、造形条件によっては、孔の途中で余分な焼結体の発生により孔が閉塞され、通気特性が消失する場合がある。この焼結体は、造形中にレーザ光が直接照射された部分ではなく、照射時に発生する高熱が照射点を中心として拡散し、ある一定温度以上において、焼結を意図しない領域で確率的に発生すると考えられる。この部分を余剰に焼結した体積として、余剰焼結体と定義する。この発生は、焼結体の通気特性の不安定性や特性そのものを消失させる可能性を有する。

Fig.1 Conventional structure with gas-exhausting tubes and tubes blocked by excessive sintered powder metal

* 原稿受付 平成 25 年 9 月 5 日

掲載決定 平成 26 年 8 月 18 日

** 正 会 員 九州工業大学大学院 (福岡県飯塚市川津 680-4)

*** 学生会員 九州工業大学大学院

2.1 余剰焼結体の抑制を意図するレーザ光走査パス

金属粉末の熱伝導率の特性は、レーザ光の照射前後で大きく変化することが知られている。造形前の熱伝導率は $0.14 \sim 0.18 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ であるのに対し、造形後は粉末が溶融・固化し、熱伝導率は $20 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ となり、約 100 倍程度に変化する。本論文ではその特性を生かしたレーザ光の走査パスを以下に提案する。図 2 に、ある一定の幅のレーザ光を用いて直線状の焼結体を造形する場合の概念を示す。

ステップ 1：図 2 (a) に示す様に、金属粉末上に 1 本のレーザ光を走査 (P1) する。

ステップ 2：前ステップで走査した P1 の軌跡の長手方向を中心にみて、左右のいずれかの方向に一定距離ずらした位置から、図 2 (b) に示す様に、新たなレーザ光を走査 (P2) する。図中の例では、P1 に対して、紙面手前側の位置で走査している。この時、P2 と P1 の距離は、先に走査した P1 のレーザ光の強度分布と、P1 の後に走査する P2 のそれが重なる様、レーザスポット径以下とする。これにより、レーザ光の照射で発生した熱が、ステップ 1 で焼結した部分に多く移動することが期待される。

ステップ 3：図 2 (c) に示す様に、ステップ 1 で走査した P1 の軌跡の長手方向を中心にみて、前ステップで P2 を走査させなかった側 (図中の例では P1 に対して紙面奥側の位置) より、前ステップと同様に一定距離ずらした位置から、レーザ光を走査 (P3) させる。

この様に、焼結済みの熱伝導率の高い領域に重なる様にレーザ光を走査させ、焼結中に発生する熱を積極的にその方向へ伝導させ、未焼結部分 (粉末部分) への熱の伝導を抑制させる。

次に、通気特性を付与するための格子状の焼結については、前述の直線状の焼結体造形を組み合わせることで実現する。図 3 (a) に示す様に、目的の焼結領域 (灰色領域) を焼結し、未焼結の領域として正方形の孔 (破線で囲まれた領域) を形成させる場合、第 1 ステップ (図 3 (b)) では、基本となる走査パス (第 1 走査パス) により造形する。この時、X および Y 方向に指定の走査ピッチで走査する、なお、レーザ光の走査パスは、レーザ光中心の軌跡として代表し、走査ピッチは、2 つの走査パス間の距離と定義する。

次に、第 2 ステップ (図 3 (c)) では、第 1 走査パスの走査方向に直交する方向に指定したオフセット量分だけずらした位置に、第 1 走査パスと同方向の走査パス (第 2 走査パス) を生成する。第 3 ステップ (図 3 (d)) では、第 2 走査パスと同様に、第 1 走査パスを基準として第 2 走査パスと対称側に新たなパス (第 3 走査パス) を生成する。図 3 (e) に具体的な関係を示す。これは左側から右側へレーザ光を走査させ、3 本の走査パスにより造形領域を焼結させた場合である。第 1 走査パスを走査後、第 2 走査パスは、第 1 走査パスの走査方向を基準として、同一方向に平行かつ指定のオフセット量ずらした走査パスとなる。第 3 走査パスも同様に、第 1 走査パスを基準として、第 2 走査パスと対称となる位置に走査する。この 3 つの走査パスにより目的の領域が焼結する様に造形する。これにより、既に焼結している部分へ、焼結時に発生する熱を熱伝導させて、空気を排出する孔側への熱伝導を回避しながら焼結体を形成する。なお、格子の造形領域が厚くなる様な場合は、複数の走査パスを用いてその走査パス間の重なる量などを調整することで、本手法は適用可能である。

Fig.2 Concept of laser scanning path strategy

Fig.3 Concept of 2D-laser scanning path for fabricating square-shaped hole on surface

Fig.4 Proposed structure in sintered body for avoiding blocked gas-exhaust tube

Table 1 Experimental conditions

(a) Common conditions			
Laser power		W	220
Laser scanning speed		m/min	160
Laser spot diameter		mm	0.5
Layer thickness		mm	0.05

(b) Individual conditions			unit : mm
Objective size of square-shaped hole		0.7	1.1
CM	Scanning pitch	1.2	1.6
PM	Scanning pitch	1.8	2.2
	Offset	0.3	0.3

CM : Conventional method, PM : Proposed method

CM : Conventional method, PM : Proposed method

2.2 余剰焼結体の発生を前提とした内部の通気孔構造

レーザ光照射による高熱源による金属粉末の焼結を前提とする限り、余剰焼結体の発生の完全な防止は極めて困難といえる。そのため、図1(a)に示した様に、内部から外部への直線的な単純な通気孔のみでの形成ではなく、図4(a)に示す様な隣同士の通気孔を複数の部分で連結させた通気孔を造形した構造（以後、連結通気孔構造と呼ぶ）とする。図4(b)に示す様に、仮に通気孔の一部で余剰焼結体によって孔が閉塞されたとしても、別の孔へ空気を迂回可能とし、通気性能の低下を抑制できると期待できる。

3. 余剰焼結体の低減実験

3.1 実験方法および実験条件

提案手法によるレーザ光の走査パスによる余剰焼結体の低減を確認する。本手法の効果を評価するため、本論文では、提案手法の第1走査パスのみにより焼結体を得る方法（以後、従来方法と呼ぶ）を用いる。これは、図1で示した内部から外部へ排気するための孔を直線的な単純な孔のみで構成された焼結構造を実現する。実験条件を表1に示す。なお、表1(a)および表1(b)は、それぞれ、各手法に共通あるいは異なる実験条件である。なお、以後の実験では、特に断らない限り、表1(a)の実験条件は、常に用いるものとする。

実現したい通気構造の空孔サイズを0.7 mmおよび1.1 mmとした場合、従来手法の走査ピッチは、1.2 mmと1.6 mmとなる。提案手法では、第1走査パスとこれを基準としてオフセットされた2つの走査パスによる合計3本の走査パスで構成されるため、提案手法の第1走査パスを従来方法の走査ピッチと同一にした場合、造形される空孔サイズが小さくなり、従来手法との比較が困難となる。よって、目的の孔を成形するため、提案手法の第1走査パスの走査ピッチは、表1(b)に示す様に、従来手

Fig.5 Condition of gas-exhaust hole after fabrication by proposed method (Objective size of square-shaped hole : 1.1 mm)

Fig.6 Comparison of fabricated width by conventional and proposed method

Table 2 Size of holes in x- and y-direction after fabrication

Method (A)	Scanning direction (B)	Objective size of square-shaped hole (C)							
		0.7 mm				1.1 mm			
Conventional Method	X	398	429	408	449	817	802	903	857
	Y	353	358	348	403	746	736	827	802
Proposed Method	X	439	429	408	429	832	867	862	852
	Y	378	393	378	419	802	852	847	832

unit : μm

Table 3 Analysis of variance

Source of variation	Sum of squares	DF	Mean squares	F	P values
A	4.584E+03	1	4.584E+03	5.853E+00	2.272E-02**
B	1.562E+04	1	1.562E+04	1.995E+01	1.463E-04**
C	1.452E+06	1	1.452E+06	1.854E+03	5.228E-25**
AxB	2.329E+03	1	2.329E+03	2.974E+00	9.685E-02
AxC	5.200E+02	1	5.200E+02	6.640E-01	4.141E-01
BxC	3.781E+00	1	3.781E+00	4.828E-03	9.496E-01
Error	1.958E+04	25	7.831E+02	-	-
Total	1.495E+06	31	-	-	-

**Statistical significance at the level of 5%. DF : Degree of freedom.

A : Method, B : Scanning direction, C : Objective size of square-shaped hole

Table 4 Experimental conditions

Structure	Objective size of square-shaped hole mm	Scanning pitch mm	Offset mm	Number of square-shaped holes on surface	Thickness mm
CS	0.3	0.8	-	100	10
PS	0.1	1.2	0.3	(10 x 10)	

CS : Conventional structure by conventional method,
PS : Proposed structure by proposed method

Fig.7 Experimental set-up for measuring relationship between pressure-drop and amount of flow rate

法よりも大きくとり、孔に接して同一の方向に走査する第2および第3走査パスの各中心線の距離が、従来手法の走査ピッチと同一となる様な走査パスとして調整する。なお、造形装置は、LUMEX25C（松浦機械製作所製）を用いた。

3.2 実験結果および考察

図5に、提案手法で造形した造形物の表面状態を示す。図中左側の孔に示した正方形の破線領域が目的の孔の大きさの領域である。実験の結果、この領域の中にも金属粉末が固化した余剰焼結体の存在が確認でき、実際に得られた孔は、実線で囲まれる領域であった。提案手法の評価として、図中右側の孔に示す様に、最終的に造形された孔の領域のX軸およびY軸の各軸方向の最小幅を計測し、これを従来方法で造形された孔の幅と比較する。

図6に、従来方法と提案方法で生成された孔の幅を示す。造形された孔の幅は、目的の孔の幅よりも小さいことを確認できる。提案手法を分散分析により評価する。表2は、各手法による得られた造形後の孔の最小幅の測定結果である。これを用いて、表3に示す様に、各要因におけるP値が5%以下となっていることから、提案手法による造形は、造形中に発生する余剰焼結体の低減に効果があったといえる。

4. 金型部材適用のための通気特性実験

通気特性を有する焼結体を金型の部材として適用するためには、通気特性の向上はもちろんのこと、得られた焼結体の通気特性にばらつきが低いことが重要である。なぜなら、ばらつきが高い場合、金型完成後の通気特性が異なることで、成形品の品質に大きな影響を与える可能性が高いからである。これより、提案手法に基づく走査パスを用いて、連結通気孔構造を有する構造（以後、これを提案構造と呼ぶ）の通気特性を評価する。

4.1 実験方法および実験条件

表4に各構造の実験条件を示す。比較対象には、従来手法による走査パスを用いて、図1に示す様な、内部から外部への通気孔が直線状の通気孔のみで構成される構造（以後、これを従来構造と呼ぶ）を用いる。その際、今回使用した造形装置の制限により提案構造と従来構造の孔の大きさを同一とした造形が

Fig.8 Pressure vs flow rate

Table 5 Experimental conditions

No.	Square A mm ²	Thickness L mm	Objective size of square-shaped hole mm	Scanning pitch mm	Offset mm
1	100	10	0.1	1.2	0.3
2	36	10			
3	64	10			
4	100	20			
5	100	30

Fig.9 Flow rate vs Pressure drop

困難であったことから、通気特性の評価として厳しい条件となる様に、提案構造の孔の大きさを従来構造のそれよりも小さくすることで評価する。入口側と出口側の孔の個数は同一とする。なお、各構造について、焼結体は各々10個製作する。入力圧力に対する通気量の計測装置の全体図を図7に示す。流量計と圧力計で構成されており、入口より所定の空気圧力を作用させ、出口は大気圧での開放とする。

4.2 実験結果および考察

図8に、各構造における圧力と通気量の関係を示す。各構造ともに、入力圧力の上昇とともに通気量および通気量のばらつきの増加が観察される。提案構造の空孔の大きさは従来構造のそれよりも小さい反面、通気量とそのばらつきの特性は良好で

ある。例えば、圧力 0.5 MPa において、各構造ともに通気量とそのばらつきは最大となり、提案構造では、従来構造と比較して、通気量を約 11% 向上、通気量の標準偏差を約 32% 低減した。これより提案構造は、通気特性の頑健性を向上したと考えられ、金型への通気部材への適用が期待できる。ただしこの向上に寄与した因子について、提案手法による余剰焼結体の低減に基づく因子あるいは連結通気孔構造による通気のための十分な迂回路の確保に基づく因子など、複数の因子を含んだ結果であることから、今後はこれらを明らかにする必要性がある。

5. 提案構造における通気量の透過係数の実験的同定

5.1 透過係数の同定

多孔質材料における定常状態における単位時間当たりの通気量と圧力降下量の関係は、次式で定義¹⁰⁾される。

$$\Delta P = \frac{\mu L}{\phi A} Q \quad (1)$$

ただし、 L は厚さ、 μ は空気粘性係数、 Q は流量、 ΔP は圧力降下量、 A は面積、 ϕ は透過係数を表す。 ϕ の値が、焼結体の構造に関係せず、一定値をとるならば、設計時において、内部から外部へ空気を排出させるのに必要な多孔質の寸法の検討が簡単に計算できることが期待できる。

試験片の寸法を表 5 に示す。なお、空気粘性係数 μ は、 1.8×10^{-5} Pa・s を用いる。

図 9 に、通気量と圧力降下量との関係を示す。各試験片について、傾きが一定となる比例的な関係を確認した。上式と表 5 の値を用いて、 ϕ を計算した結果、 $5.2 \mu\text{m}^2$ となった。この結果に従えば、設計時に適切な焼結体の形状検討や成形不良の回避への利用を期待できる。すなわち設計時に、排出すべき空気の流量と充填中のキャビティの内圧を射出成形 CAE 等の数値解析シミュレーションにより用いて求め、本式より、キャビティの内圧で、排出可能な空気量以上に、熔融樹脂が充填されると確認された場合、成形品にヤケなどの成形不良の発生を予想できると考えられる。

6. 結 言

付加加工法の一つである金属光複合加工法を用いて、通気特性を有する射出成形金型の製作を目的として、焼結体の熱伝導率の違いに注目した新たな造形方法を提案し、通気特性を有する焼結体の金型部材あるいは設計への適用を想定した基礎的実験の実施により、以下の結論を得た。

- (1) 提案手法は、従来手法で製作された焼結体と比較して、焼結体の通気孔で発生する余剰焼結体の低減を可能とした。
- (2) 提案手法を内部に複数の排気のための通気孔を連結させた構造の焼結に適用した結果、通気特性の良好な焼結体を得られる可能性を確認した。
- (3) 通気特性を有する焼結体を金型設計に適用可能とするための通気量の透過係数を実験的に同定した。

参 考 文 献

- 1) 米山猛, 香川博之, 伊藤強, 伊藤豊次, 岩根昭裕, 蔵本義彦, 西本清史, C. Yan: 冷却水路を内蔵した粉体造形金型による射出成形の冷却促進と高精度化 (第 1 報) 冷却構造金型の試作と基本効果の確認, 精密工学会誌, **67**, 12 (2001) 1991.
- 2) 香川博之, 米山猛, 伊藤強, 伊藤豊次, 岩根昭裕, 稲城正高, 瀧野孔延, C. Yan: 冷却水路を内蔵した粉体造形金型による射出成形の冷却促進と高精度化 (第 2 報) 冷却水の温度格差の効果, 精密工学会誌, **68**, 8 (2002) 1057.
- 3) 米山猛, 香川博之, 山出洋司, 伊藤豊次, 稲城正高, 瀧野孔延, Y. A. N. Chin: 冷却水路を内蔵した粉体造形金型による射出成形の冷却促進と高精度化 (第 3 報) オースティール粉体造形金型による冷却一, 精密工学会誌, **71**, 3 (2005) 347.
- 4) 米山猛, 阿部諭, 宮丸充: 金属光造形金型によるウェルド低減と熱風予熱効果, 精密工学会誌, **77**, 10 (2011) 955.
- 5) Takeshi Yoneyama, Satoshi Abe, M. Miyamaru: Reducing Weld Line by Heating Mold Surface with Heater Embedded by Laser Metal Sintering, International Journal of Automation Technology, **6**, 5 (2012) 591.
- 6) 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.
- 7) Hiroshi Koresawa, Hirofumi Fukumaru, Michio Kojima, Jun Iwanaga, Hiroyuki Narahara, H. Suzuki: Design Method for Inner Structure of Injection Mold Fabricated by Metal Laser Sintering, International Journal of Automation Technology, **6**, 5 (2012) 284.
- 8) 阿部諭, 東喜万, 峠山裕彦, 不破勲, 吉田徳雄: 金属光造形複合加工法の開発-金属光造形法と切削仕上げのオンマシン複合化-, 精密工学会誌, **73**, 8 (2007) 912.
- 9) 阿部諭, 不破勲, 東喜万, 峠山裕彦, 吉田徳雄, 太田卯三: 「生産技術」金属光造形複合加工システムによる高機能射出成形金型製作, 松下電工技報, **53**, 2 (2005) 5.
- 10) Michio Kojima, Hiroyuki Narahara, Yoshiyuki Nakao, Hirofumi Fukumaru, Hiroshi Koresawa, Hiroshi Suzuki, S. Abe: Permeability Characteristics and Applications of Plastic Injection Molding Fabricated by Metal Laser Sintering Combined with High Speed Milling, International Journal of Automation Technology, **2**, 3 (2008) 175.
- 11) Hiroyuki Narahara, Sho Takeshita, Hirofumi Fukumaru, Hiroshi Koresawa, H. Suzuki: Permeability Performance on Porous Structure of Injection Mold Fabricated by Metal Laser Sintering Combined with High Speed Milling, International Journal of Automation Technology, **6**, 5 (2012) 576.
- 12) 津田利尚, 是澤宏之, 植原弘之, 鈴木裕: 金属光造形金型における通気構造の造形手法が射出成形の不良低減へ及ぼす効果, 2009 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2009) 371.
- 13) 近藤連一: 多孔質材料-性質と利用-, 技報堂出版, (1978) 353.