



# 金属光造形金型によるウェルド低減と熱風予熱効果\*

米 山 猛\*\* 阿 部 諭† 宮 丸 充††

Reduction of Weld-line by the Laser Metal Sintered Mold and the Effect of Hot Air Preheating

Takeshi YONEYAMA, Satoshi ABE and Michiru MIYAMARU

The effect of weld-line reduction by using the laser metal sintered mold and the effect of hot air supply on the mold surface just before the injection have been investigated. The depth of the weld-line groove in the laser metal sintered mold is smaller than that in the conventional steel mold. Mold pressure increase in the laser metal sintered mold is faster than that in the steel mold and the peak pressure in the laser metal sintered mold is higher than that in the steel mold. This must be due to the low thermal conductivity of the laser metal sintered mold. As a preheating effect of the mold surface before the injection, hot air has been supplied on the mold surface using an air jet bulb. The reduction of the weld-line groove has been promoted in the laser metal sintered mold whereas few effects appeared in the steel mold. Surface temperature increase by the hot air supply in the laser metal sintered mold is larger than that in the steel mold. By this higher temperature increase, temperature of the resin on the weld-line area must be higher and the hardness of the resin must be lower in the laser metal sintered mold so that the resin is deformed well reducing the weld-line groove.

**Key words:** injection molding, laser metal sintering, weld-line, thermal conductivity, hot air

## 1. 緒 言

射出成形において樹脂の流動先端がぶつかり合ったところに残る表面の溝（ウェルドライン、以下ウェルドと略称する）は、表面品質の低下および強度低下を生じる<sup>1)</sup>。金型表面温度を上げるとウェルドは低減するため、ウェルドを低減させる方法として、樹脂の充填時には金型表面温度を上げ、充填後は冷却を早める「ヒートアンドクール」の研究が進められている。ヒートアンドクールとして、金型内水路へのスチームから冷水への切り替え<sup>2)3)</sup>、金型内に埋め込んだヒータによる加熱<sup>4)</sup>、金型の電磁誘導加熱<sup>5)</sup>などが行われている。一方ガス抜きによってウェルドを低減させる方法も開発されている<sup>6)</sup>。

筆者らは、金属光造形複合加工法を用いて射出成形金型を造形（この金型を金属光造形金型と呼ぶ）し、高機能的射出成形を実現する研究を続けている。金属光造形複合加工法とは、金属粉末の薄層にレーザを照射して焼結させ、これを積層するとともに、一定の厚さごとに焼結部の周囲や表面に切削加工を施して、表面粗さの仕上がりのよい立体を造形する方法である<sup>7)</sup>。これまで、①金型の造形時に効果的な冷却水路を作り込むことにより、充填後の樹脂の冷却温度を均一にして、そりなどの形状精度を向上すること<sup>8)</sup>、②効果的な冷却水路組込みにより、金型の冷却を促進して、サイクルタイムを向上すること<sup>9)</sup>、③金型表面においてガス抜きの必要な箇所を多孔質に造形して通気性を持たせてガス排出を可能にし、造形材の低熱伝導特性も活用することで薄肉成形に必要な成形圧力を低減できること<sup>10)</sup>などを示してきた。

本研究では、金属光造形材の低熱伝導特性を活用して、ウェルド低減を図ることを目的とした。まず、金属光造形によって造形された金型材の熱伝導率は通常の鋼材のそれよりも低い（一般的な鋼材の3分の1程度）ため、樹脂充填時に樹脂表面が急冷されず、樹脂表面層の硬さが鋼材の金型の場合よりも低くなり、流動した樹脂がぶつかった箇所での表面層の変形が容易になり、表面に残る境目の溝が小さく期待される。さらに充填時の金型表面の温度を上げる方法として、射出直前に金型表面に熱風を供給することを発案した。ウェルドが生じると予想される金型表面部分に高温の空気を当て、加熱することで、この表面部分の温度を上げ、樹脂流動がぶつかる場所での樹脂表面の温度を上げて、ウェルドを低減しようとするものである。熱風の供給は樹脂の充填前には止めなければならないが、金属光造形材の低熱伝導特性のため、熱風によって加熱された金型表面の温度が鋼材の金型表面が加熱された場合より高い温度に保たれ、接触した樹脂表面の変形を容易にして、ウェルドが低減されると期待される。金型の内部からではなく、表面から加熱することを考えたのは、樹脂と接するのが金型表面であり、この面を直接加熱することに効果があると考えたからである。

本研究では、金属光造形金型と鋼材金型の両方を製作し、金属光造形金型材によるウェルド低減の効果および熱風供給予熱によるウェルド低減の効果について調べる。

## 2. 金型の設計と製作

対象とした成形品の形状とゲート位置、ウェルドの発生箇所を図1に示す。成形品の寸法は70mm×40mm厚さ2mmで、ゲートと成形品中央部との間に縦横11mm厚さ0.2mmの薄肉部分を設ける。ゲートから注入された樹脂がこの薄肉部を迂回して流れ込むため、樹脂が合流したところにウェルドが発生する。樹脂の注入量を減らして、合流にいたるまでの樹脂の流れを見たのが図2である。薄肉部を迂回した樹脂が、ゲートとは反対側の中央で合流することがわかる。

金型の断面構造を図3に示す。金属光造形金型では、金属の

\* 原稿受付 平成23年3月30日

\*\* 正会員 金沢大学理工研究域（金沢市角間町）

† 正会員 パナソニック電工（株）（大阪府門真市大字門真1048）

†† 宮丸精密金型（株）（金沢市東蚊爪町1-31）

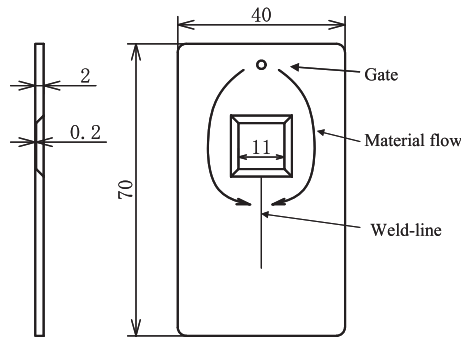


Fig.1 Molding work piece and the weld-line

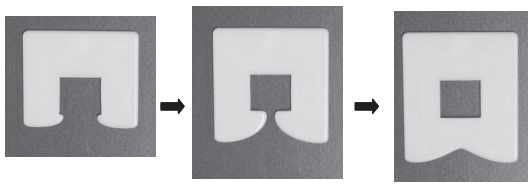


Fig.2 Material flow

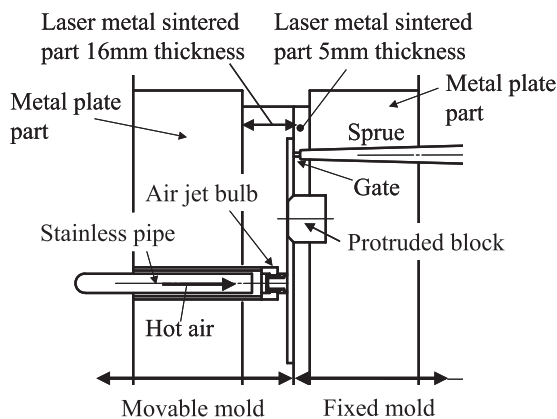


Fig.3 Structure of the mold

プレート上に、可動型では、16mmの厚さ、固定型では、5mmの厚さを金属光造形法で造形して金型を作成する。鋼材金型の場合には、金型材(NAK80)から削り出して金型を製作した。可動型側に射出成形品を作成する深さ2mmのくぼみを作る。固定型側からは薄肉部分を作るための角ブロックが突出している。樹脂が合流する付近に、可動型内に設けたエアジェットバルブから金型内に熱風を供給する。エアジェットバルブは通常、成形品を取り出すときに、金型表面と成形品との界面に空気を供給して離型を助けるために使うものであるが、本方法では、ウェルドの生じる箇所の近くにエアジェットバルブを取り付け、ここから熱風を供給するために用いる。

図4のように、ホットランナーなどの加熱に通常用いられるヒータを活用して、カートリッジヒータを内蔵した加熱ボックスを金型側面に取り付け、圧縮空気の配管をつないで空気を加熱する。加熱された空気は、ステンレスパイプを通して金型内のエアジェットバルブ直下まで導かれる。空気が他へ漏れない

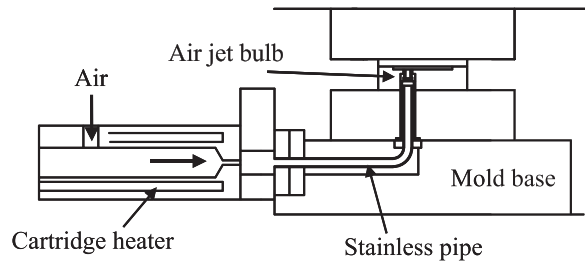


Fig.4 Hot air supply system

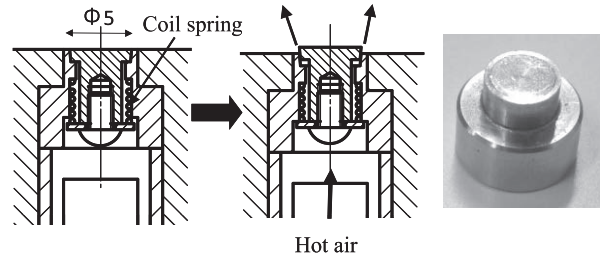


Fig.5 Motion of the air jet bulb

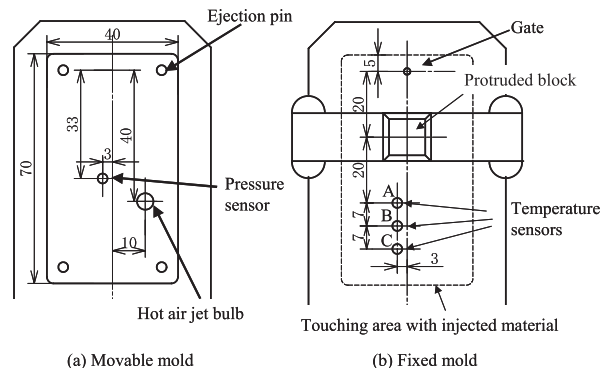


Fig.6 Dimensions of the mold and sensor positions

ように、ステンレスパイプと金型内の穴の入口との間をシールした。エアジェットバルブの構造と動きを図5に示す。バルブの直径が5mmのものを製作した。エアを供給しないときはバネによってバルブが閉じているが、エアを供給するとバルブが浮き上がり、円錐面のすき間からエアが噴出される。エアを供給したときの流量は65l/minで、加熱ボックスのカートリッジヒータの温度を300℃としたとき、バルブの出口に熱電対をおいて噴出する空気の温度を測定したところ、約120℃であった。

金型寸法とセンサの配置を図6に示す。エアジェットバルブは可動型の方に配置されており、熱風が直接当たる固定型表面の3箇所に温度検出ピンを配置した。また可動型側のウェルド発生箇所近くに圧力センサ(双葉電子製EPセンサ)を配置した。

温度検出ピンの構造を図7に示す。直径3mmのピンの側面部に先端面の近くまで溝をほり、さらに溝の先端からピンの先端面まで穴を貫通させて、直径1mmのシース熱電対の先端を通し、先端部を溶接して固定したものである。この温度センサによって、およそ金型表面から深さ1mm程度の深さにおける温度が検出されると考える。この温度を金型表面温度と呼ぶ。

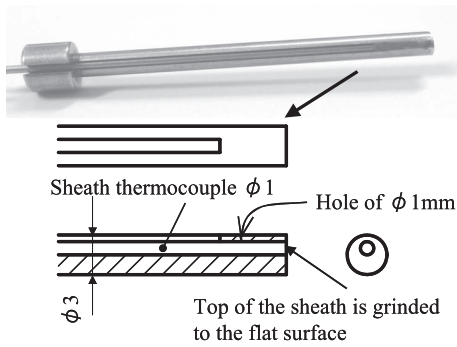


Fig.7 Temperature sensor

### 3. 射出成形

射出成形樹脂はABS（テクノポリマー製 Grade150, 黒色）を用いた。射出成形条件は、ABS樹脂の成形における標準的な条件を選び、射出温度 210°C、射出速度 90mm/s、射出圧力 120MPa、保圧 90MPa、保圧時間 3s、冷却水温度 60°Cとした。

光造形金型で熱風供給を行う場合と行わない場合、鋼材金型で熱風供給を行う場合と行わない場合とを比較した。

熱風供給を行う場合は、型閉め動作中にエアジェットバルブから熱風を供給する。可動型が型閉め終了位置より 16mm 手前に来たところから型閉め速度を 1mm/s に落として型と型との間に隙間を保ち、熱風の逃げ道とした。型閉め開始から終了までの時間は 18.5s であるのに対し、熱風供給時間を型閉め開始 1 秒後から 20 秒後までの 19s 間とし、射出を開始して樹脂が充填される直前まで熱風を金型内に供給した。

熱風供給を行わない場合の射出成形時の金型表面（図 6 における A 点）の温度変化を図 8 に示す。初期の金型温度は冷却水温度と同じ 60°C で、射出によって、鋼材金型では約 70°C、金属光造形金型では約 72°C まで温度上昇した後、徐々に温度が下がる。金属光造形金型の表面の方が、温度上昇が大きいのは、鋼材金型よりも熱伝導率が低いためである。熱風供給を行った場合の金型表面の同じ箇所での温度変化を図 9 に示す。金属光造形金型では、熱風供給開始後 19s で約 87°C まで金型表面温度が上昇しており、その後、射出によって 90°C まで温度が上昇しているが、熱風供給によって上昇した金型温度が射出時に到達するピーク温度とはほぼ同じとなっている。鋼材金型では、熱風供給による温度上昇が金属光造形金型の場合よりも小さく、19s 後に達する温度は約 72°C で、その後射出によって上昇する温度は 77°C となっており、熱風供給によって到達する温度は、射出時に達するピーク温度よりも低い。

射出成形時の金型内圧力の変化を図 10 に示す。金属光造形金型では金型内圧力が 50MPa まで上昇しているのに対し、鋼材金型では約 30MPa 程度となっている。金型内圧力は熱風供給の有無による差がない。金属光造形金型においては、鋼材金型よりも射出圧力が金型内へよく伝わっている。

### 4. ウェルド観察結果

射出成形品の可動型側表面の外観を図 11 に、固定型側表面の外観を図 12 に示す。鋼材金型の成形品表面には、ウェルドが明瞭に見える。金属光造形金型による成形品でもウェルドが残っているが、金属光造形金型で熱風供給を行った成形品では、明確なウェルドが見えなくなっている。

非接触 3 次元表面粗さ計（ZYGO 社, New View5032 垂直方向分解能 0.1nm）を用いて、成形品のウェルドの横断面形状を測定した。

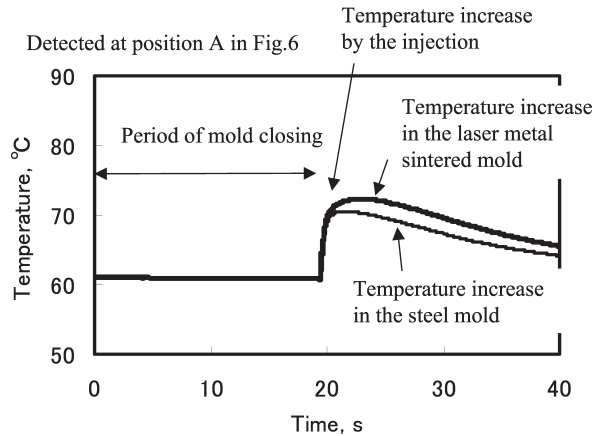


Fig.8 Mold surface temperature increase without hot air supply

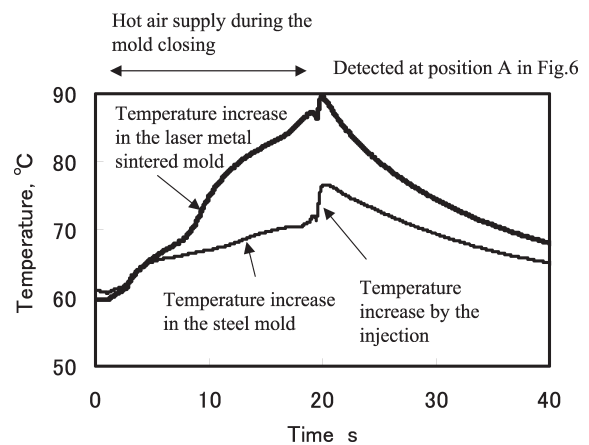


Fig.9 Mold surface temperature increase with hot air supply

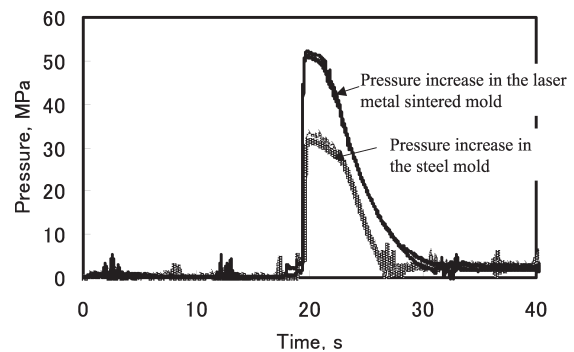


Fig.10 Mold pressure increase during the injection

測定した箇所は、可動型表面の圧力センサ付近および固定型表面の同様の箇所、薄肉部の端から約 5mm の位置である。観察領域を 50 μm × 50 μm とし、ウェルドを直交する 40 ラインの深さデータを平均してウェルドの断面形状とした。各成形条件の成形品について、可動型表面の形状と固定型表面の形状を共に図 13 に示す。

鋼材金型で熱風供給がない場合（図 13(a)）、ウェルドの溝幅は 10 μm 程度、深さ 4 μm となっている。可動型表面も固定型表面も溝の深さは同様である。断面形状は樹脂の流動先端部の曲面どうしがぶつかって、金型表面に押し込まれた形をしている。熱風供給を行った場合（図 13(b)）も、溝の大きさはあまり変わっていない。金属光造

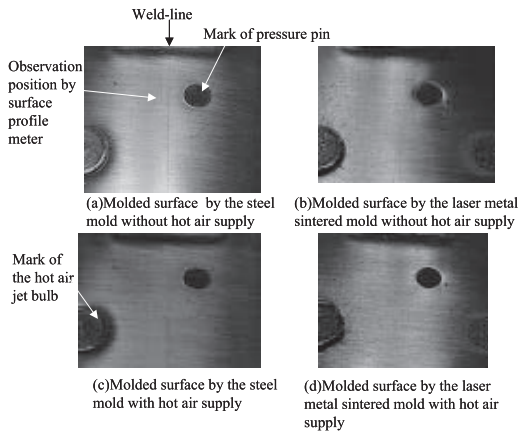


Fig.11 Weld line appeared on the movable mold side

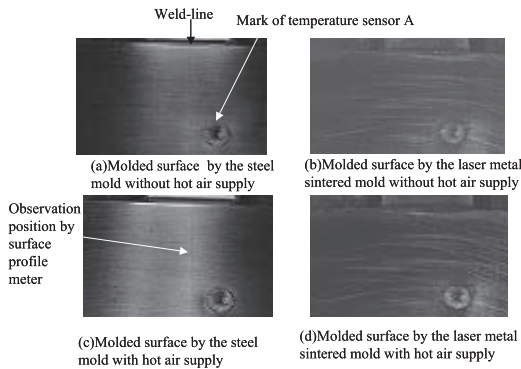


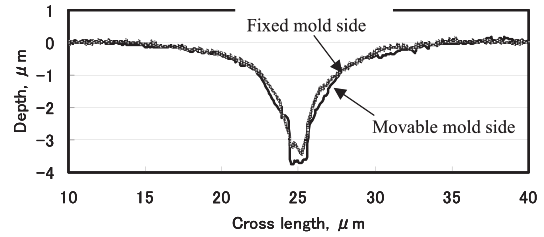
Fig.12 Weld line appeared on the fixed mold side

形金型の場合には、熱風供給を行わない場合（図 13(c)）でも溝幅が約  $5\mu\text{m}$ 、深さ  $2\mu\text{m}$  と小さい。さらに熱風供給を行った場合（図 13(d)）には、溝幅がさらに減少し、深さは約  $1\mu\text{m}$  にまで減少している。なお固定型表面側のウェルドより可動型表面側のウェルドの方が若干大きいのは、エアジェットバルブが可動型側についており、熱風が直接当たる固定型側の方が金型表面温度の上昇が高いからではないかと考えられる。

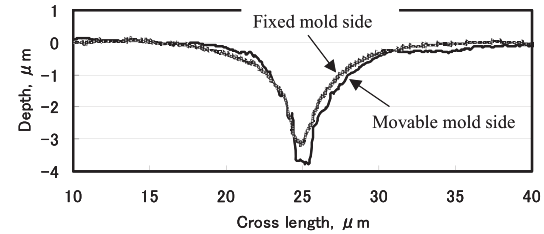
### 5. 考 察

ウェルド観察結果と金型表面温度、金型内圧力との関係について検討し、金属光造形金型のウェルド低減に対する効果および、熱風供給の効果について考察する。

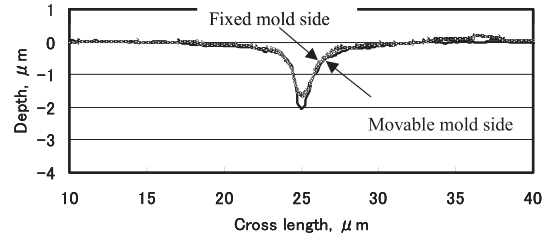
まず熱風供給のない状態で鋼材金型のウェルド図 13(a)と金属光造形金型のウェルド図 13(c)を比べたのが図 14である。金属光造形金型では著しくウェルドが小さくなっている。金型表面温度の上昇は図 8 で見られたように鋼材金型の場合と大きな違いがない。一方、金型内圧力の上昇(図 10)については、充填時の変化を詳しく見たのが図 15 である。鋼材金型の場合も金属光造形金型の場合も最初(図の 19s 前後)は低い一定の圧力がはたらき、その後上昇している。最初の低い圧力は樹脂が金型内に流入している間に作用する圧力で、その後の上昇した圧力が、樹脂充填終了後にはたらく圧力であると考えられる。金属光造形金型では、流入中の圧力が鋼材金型の場合よりも低く、また充填終了によって圧力が上昇する時刻が早い。これは、充填時の樹脂が金属光造形金型の場合のほうが柔らかく、流動が速いためであると考えられる。したがって、金属光造形金型においてウェルドが低減したのは、充填時の樹脂が柔らかく、圧力が良く伝わって、ウェルド発生部分の樹脂の変形を促進させた



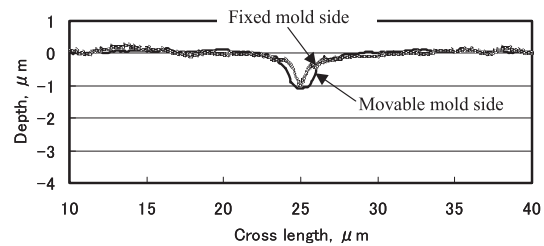
(a) Weld profile by the steel mold without hot air supply



(b) Weld profile by the steel mold with hot air supply



(c) Weld profile by the laser metal sintered mold without hot air supply



(d) Weld profile by the laser metal sintered mold with hot air supply

Fig.13 Weld profile measured by optical surface

からであると考えられる。

ウェルド部の変形に関する樹脂の物性値としては、使用した ABS 樹脂グレード 150 の熱変形温度が  $90^{\circ}\text{C}$  (ASTM-D648) で、 $80^{\circ}\text{C}$  における引張強さは約  $8\text{MPa}$  まで下がっており<sup>11)</sup>、 $80^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$  で樹脂の変形抵抗が非常に低くなると考えられる。したがって、樹脂充填時の金型表面温度がこの温度を超えていることが、樹脂の柔らかさを保つために効果的であると考えられる。

鋼材金型で熱風供給を行った場合、図 8 のように樹脂が充填する前の金型表面温度が上昇しているのに、ウェルドが低減していない。これは、鋼材金型の表面温度上昇がまだ  $70^{\circ}\text{C}$  と低く、樹脂充填時の金型表面ピーク温度も  $80^{\circ}\text{C}$  よりも低いため、樹脂を軟化させる温度以上には至らなかったこと、また金型内圧力が図 9 のように熱風供給を行わなかった場合と同様に低いため、ウェルド発生箇所での樹脂の変形に大きな違いが生じなかったことによると考えられる。

金属光造形金型で熱風供給を行った場合と行わなかった場合のウェルド図 13(c)と図 13(d)を比較したが図 16 である。金属光造形金型の場合には、熱風供給によって、ウェルドが低減している。金属光造形金型の場合には樹脂充填前の金型表面温度が  $90^{\circ}\text{C}$  近くま

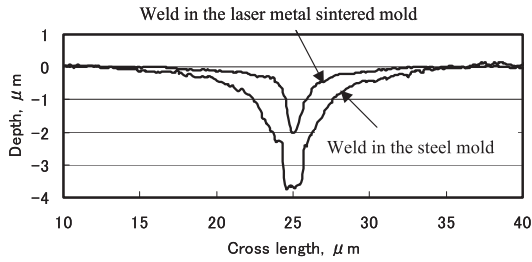


Fig.14 Effect of the laser metal sintered mold on the weld profile

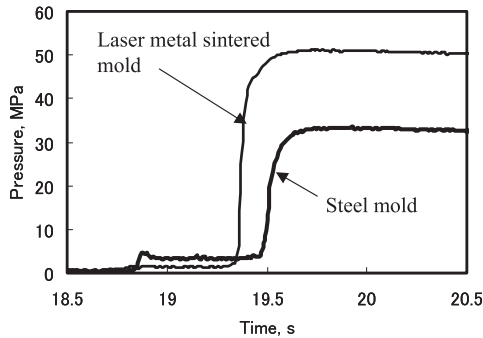


Fig.15 Difference of the filling pressure and filled pressure increase between laser metal sintered mold and steel mold

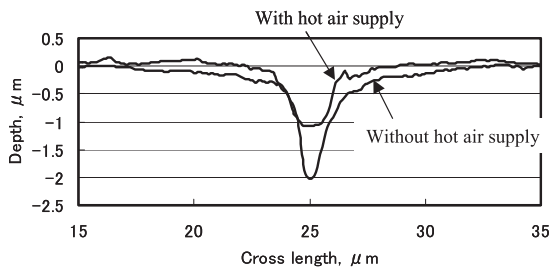


Fig.16 Effect of the hot air supply on the weld profile in the laser metal sintered mold

で上昇し、樹脂充填時の金型表面ピーク温度も 90℃に達しているため、樹脂を軟化させる温度に達しており、樹脂表面が柔らかい状態に保たれたと考えられる。金型内圧力は熱風供給を行わない場合と同様であるが、ウェルド発生箇所の樹脂表面が柔らかいため、変形が促進されてウェルド溝が小さくなったと考えられる。

鋼材金型と金属光造形金型におけるウェルドに関する現象、熱風供給の効果を模式的に表したのが図 17 である。金属光造形金型を用いることで樹脂表面の急冷が防がれ、流動する樹脂温度が高く、柔らかい。金型表面に固着するスキン層も薄くなり、圧力がよく伝わるので、樹脂が合流した箇所、金型表面へ詰めよせる樹脂の変形を促進し、ウェルドを低減させる。さらに熱風供給によって樹脂充填時の金型表面を樹脂の固化温度よりも高くしておくことでウェルドがさらに低減したと考えられる。

## 6. 結 言

金属光造形金型と鋼材金型とで同じ射出成形条件で成形を行い、ウェルドの寸法を比較したところ、金属光造形金型では、ウェルドが著しく低減されることがわかった。これは、金属光造形材の低熱伝導特性により、樹脂の急冷が抑制され、金型内へ圧力がよく伝わるためであると考えられる。

さらに樹脂充填前に金型表面に熱風を供給すると、金属光造形

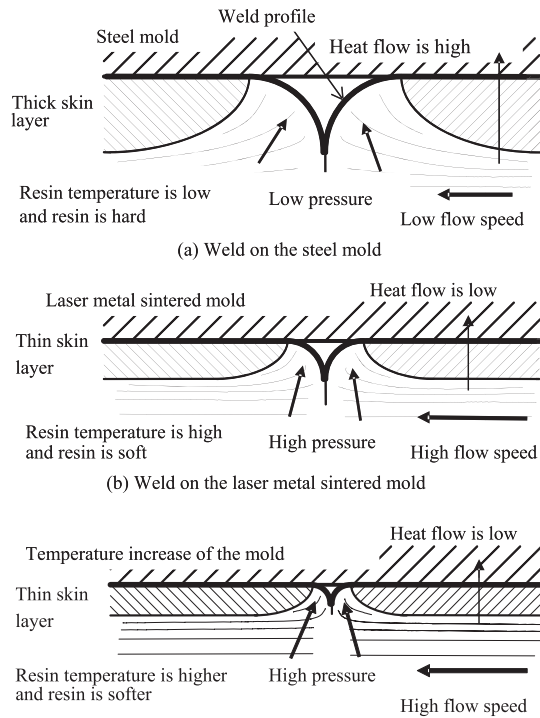


Fig.17 Image of the difference of weld formations among steel mold, laser metal sintered mold and that with hot air supply

金型における金型表面温度の温度上昇は鋼材金型と比べて大きく、さらにウェルドが低減された。これは、樹脂充填時の金型表面が樹脂の固化温度よりも高くなったため、樹脂表面の硬さが低く、ウェルド発生箇所での樹脂の変形が促進されたためと考えられる。

このように、金属光造形金型がウェルド低減の効果を持つことを見出した。また金属光造形金型の低熱伝導特性から、金型表面を樹脂充填前に予熱する効果が大いことを見出した。

本研究に対し地域新生コンソーシアム研究開発事業「金属光造形と成形技術の高度化による企業連携グリッドモデル構築」(平成 18 - 19 年度)の助成を受けた。ウェルド観察にあたって、石川県工業試験場にお世話になった。本研究に協力してくれた金沢大学 倉下達君、中西実君、渡邊拓之君に感謝する。

## 参 考 文 献

- 1) 山田浩二, 村田泰彦, ウェルドライン生成現象と抑止技術, 成形加工, 20, 10(2008) 715.
- 2) シスコ (株), [http://www.sysko.co.jp/products/sa\\_b.html](http://www.sysko.co.jp/products/sa_b.html).
- 3) 小野産業 (株), <http://www.onosg.co.jp/rhcm/index.html>.
- 4) 山下電気 (株), <http://y-heat.com/point.html>.
- 5) 村田泰彦, 余勇, 鐘華, 誘導加熱・冷却金型によるプラスチック射出成形品特性の向上, 型技術者会議 2009 講演論文集(2009), 206.
- 6) サンエイモールド, <http://www.sanei-mold.co.jp/>
- 7) 阿部諭, 東喜万, 峠山祐彦, 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.
- 8) 米山猛, 香川博之, 阿部諭, 末廣栄覚: 金属光造形複合加工金型による射出成形の高精度化, 精密工学会誌, 73, 9 (2007) 1046.
- 9) 米山猛, 香川博之, 阿部諭, 宮丸充: 金属光造形複合加工金型を用いたサイクルタイム短縮, 成形加工, 17, 10(2007)662.
- 10) 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.
- 11) テクノポリマー (株), ABS 一般・高流動グレード技術資料