

金属粉末射出成形における捨てボスのウェルドライン抑制効果の調査

田尻 智基^{*1} 山本 圭一朗^{*1} 内野 正和^{*1} 中村 憲和^{*1}

Investigation of the Weld Line Suppressive Effect on a Dummy Boss at Metal Injection Molding

Tomoki Tajiri, Keiichiro Yamamoto, Masakazu Uchino and Norikazu Nakamura

金属粉末射出成形（以下、MIM）は樹脂の射出成形と同様の成形不良が発生する。成形不良の一つにウェルドラインがあり、焼結時に傷のような外観不良として現れ、強度低下も懸念されることから、製品設計のハードルになっている。ウェルドラインを抑制する対策の一つとして捨てボスという手法が用いられているが、ウェルドラインの抑制効果については調査されていない。そこで、本研究では捨てボスのゲートサイズによるウェルドライン抑制効果の確認と焼結体の強度評価を行った。

1 はじめに

MIMとは金属粉末と樹脂を混練した材料を可塑化し、金型内に充填することで目的の形状に成形し、その後、脱脂工程により樹脂を取り除き、焼結工程で金属粉末を結合するで、金属製品を製造する方法である。

McKinsey & Companyが発行した調査書「Factory of the Future」¹⁾によると、将来的に発展する技術として、3Dプリンターと共に期待されている。その特徴は、難削材が扱えることや、形状の自由度が高いことであり、ニアネットシェイプで大量生産が可能な有用なプロセスである。

しかし、成長が見込まれる技術であるにも関わらず、福岡県内でMIMを活用している企業は少ない。MIMによる製品の製造を行うためには、材料選定や射出成形および脱脂・焼結条件の最適化等、様々なノウハウが必要であり、普及を阻害する要因になっている。そこで、機械電子研究所ではMIMの普及促進のために、令和4年度に「金属粉末造形技術研究会」を立ち上げ、参加企業と意見交換を行いながら製品化に向けた研究を実施している。

本研究では、MIMの成形不良の中から、ウェルドラインとその対策に用いられる捨てボスに着目し、捨てボスを設けた場合のウェルドライン抑制効果の確認と焼結体の強度評価を行った。捨てボスとは、図1のようにウェルドラインが現れる成形材料同士の合流部付近に、成形材料を逃がす領域を設けるものである。

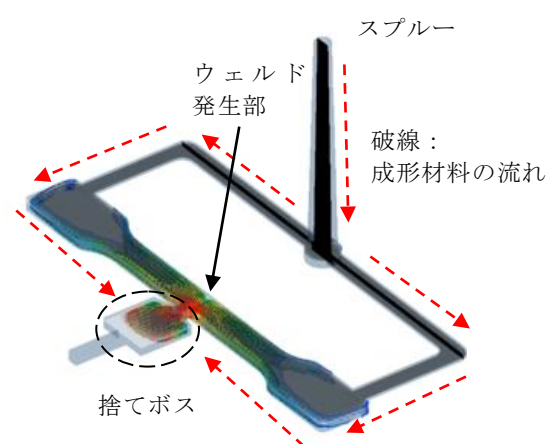


図1 成形材料合流部付近に設けられる捨てボス

2 研究、実験方法

2-1 使用機器および材料

本研究において使用した機器および材料を表1、2に示す。

表1 使用機器

機器名	型式	メーカー
射出成形機	TR20-EHV	(株) ソディック
脱脂焼結炉	VESTA	(株) 島津産機システムズ
熱流体解析ソフトウェア	scFLOW	エムエスシーソフトウェア (株)
非接触式三次元表面形状測定機	Talysurf CCI-Lite	アメテック (株)
引張試験機	AG-100kNX	(株) 島津製作所

^{*1} 機械電子研究所

表2 使用材料

品名	型式	メーカー						
フィード ストック	MMJ-S304-070 (SUS304L)	太盛工業（株）						
化学成分（wt%）								
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
≤0.03	≤ 1.00	≤ 1.00	Max 0.045	Max 0.030	12.00- 15.00	16.00- 18.00	2.00- 3.00	Bal.



図3 試作した金型

2-2 成形実験

図2に成形品の形状を示す。成形品は強度評価を行うための引張試験片とし、試験片の中央で成形材料同士を合流させ、合流部付近に設けた捨てボスのゲート形状は矩形とした。また、通常捨てボスは半円等の形状を持つゲートにより接続されるが、試験片の表裏のウェルドの状態を等しくするため、試験片と同じ厚みを持つ四角形のゲート形状とした。捨てボスゲート幅を変化させて成形を行い、ウェルドラインの生成状況を観察した。各部の寸法を表3に示す。成形条件については図3の金型を用いたテスト成形によってウェルドライン以外の成形不良が発生しない条件を検討し、表4に示す成形条件とした。

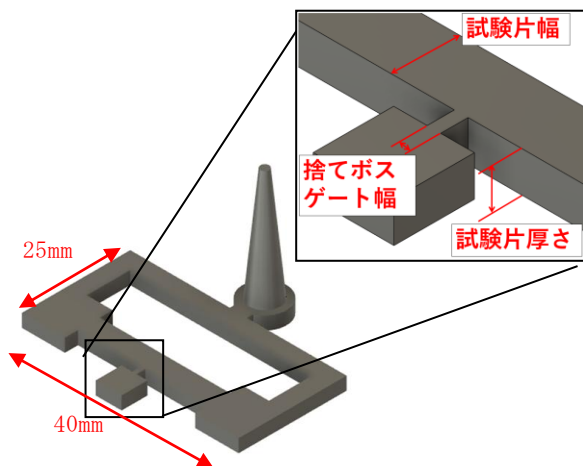


図2 設計した成形モデル

表3 各箇所の設定寸法

試験片幅	6mm
試験片厚さ	3mm
捨てボスの ゲート幅	1, 1.5, 2, 2.5, 3 (mm) もしくは捨てボス無し

表4 成形条件

成形条件	
射出温度	185℃
金型温度	50℃
射出速度	45mm/s
保圧	30MPa
保圧時間	3s

2-3 熱流体解析ソフトウェアによる流動解析の方法

図2の成形品を解析対象として、非定常VOF法（Volume of Fluid 法）を用いて成形時の充填状況の評価した。材料の密度や粘度等のパラメーターは、材料メーカー提供の資料や過去の実験²⁾において測定したデータを用いた。粘性係数は温度とせん断速度の依存性を考慮したカラーモデルを用いた。表4の射出速度から流量に換算した一定流量 $4.522 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ とし、射出温度は185℃、キャビティ表面に50℃を与え、熱伝導により解析領域外へ熱移動するものとした。

成形時の充填状況を解析するのにあたり、パーティング面から空気を逃がすこととし、一般的なエアベント隙間である $10 \mu\text{m}$ 程度の流路にて解析を行うと、クーラン数の観点から時間刻みを小さく取る必要があり、解析に時間を要することになる。そこで、成形材料合流部付近のパーティング面に厚さ0.4mmの流路を設けて解析を行った。成形品のメッシュサイズと形状は、材料合流箇所近傍を0.325mm、他の部分は0.75mmのポリヘドラルメッシュとした。パーティング面に設けた厚さ0.4 mmの流路には0.1875mmのメッシュを挿入した。境界層は厚み係数0.2、変化率1.1の3層とした。解析領域は、対称境界を用いて成形品の半分の領域とした。

2-4 強度評価用試験片の作製方法

試験片幅5mm、厚さ3mmとし、ウェルドラインが生じた捨てボスのゲート幅1mmのものと、ウェルドラインが生じなかった捨てボスのゲート幅1.5mm、3mmの条件

のものを選択した。成形後に捨てボスを除去し、アルゴン雰囲気にて1, 350℃×2hの脱脂焼結を行うことで、図4に示す強度評価用の引張試験片を作製した。

また、比較のために図5に示す金型を用いて成形材料同士の合流が生じない条件で試験片を成形し、合流ありの引張試験片と同じ条件で焼結した。焼結体を図6に示す。



図4 引張試験片

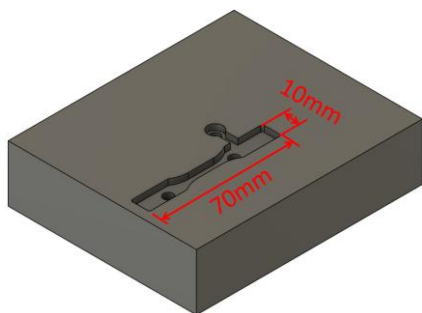


図5 合流部の無い金型の設計モデル

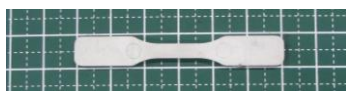


図6 合流部の無い試験片

3 結果と考察

3-1 成形実験および流動解析の結果

試験片幅6mm，厚さ3mm，捨てボスのゲート幅1mmで成形を行った場合，図7，8に示すように，捨てボスから遠く，ガスが逃げにくい下金型底面の位置にウェルドラインが現れた。その位置において表面形状測定を実施した。試験片幅6mm，厚さ3mmとし，捨てボスを設けなかった試験片の測定結果を図9に示す。また，試験片幅3mm，厚さ3mmとし，捨てボスゲート幅1mmと2mmにおける表面形状測定結果を図10，11に示す。



図7 グリーン体（試験片幅6mm，厚さ3mm，捨てボスのゲート幅1mm）

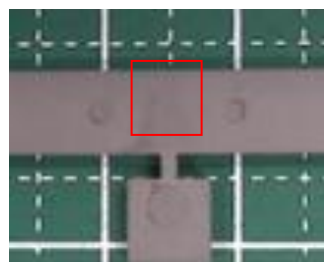


図8 ウェルド部の測定位置

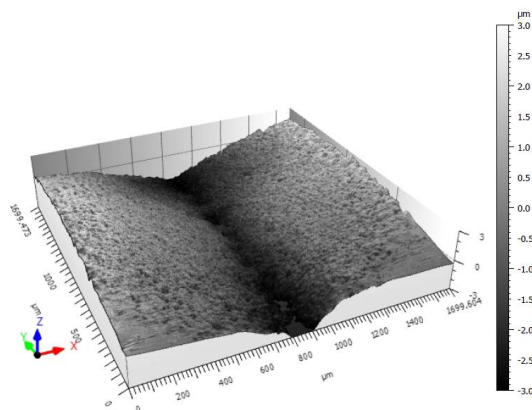


図9 試験片幅6mm，厚さ3mm，捨てボスなしでのウェルド部における表面形状測定結果

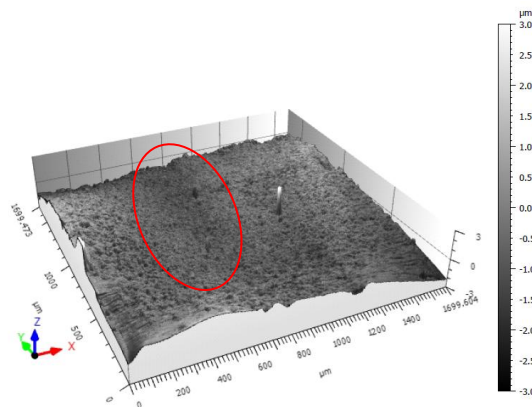


図10 試験片幅6mm，厚さ3mm，捨てボスのゲート幅1mmでのウェルド部における表面形状測定結果

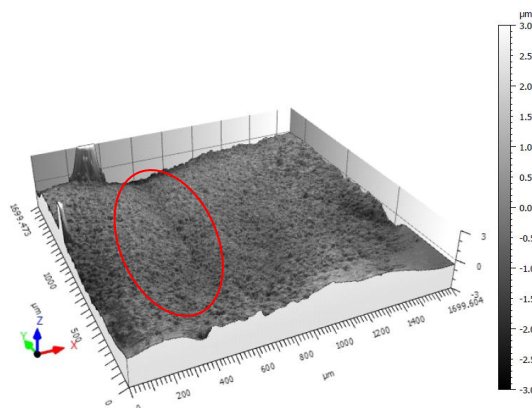


図11 試験片幅6mm，厚さ3mm，捨てボスのゲート幅2mmでのウェルド部における表面形状測定結果

捨てボスのゲート幅が大きいほど溝形状の深さは小さくなっており、捨てボスのゲート幅が大きいほどウェルドラインを抑制できることが確認できた。

熱流体解析により得られた解析結果を図12に示す。捨てボスへ材料が流入する時刻における成形材料合流部付近を拡大した、成形品中央断面における流速のY成分のコンター図である。試験片の幅6mm、厚さ3mmに対し、捨てボスのゲート幅を1mm、2mm、3mmとした場合、捨てボスのゲート幅が大きいほど成形材料が捨てボス方向に向かう範囲が大きくなった。このことから、捨てボスのゲート幅を大きくすることがウェルドラインの抑制に有効であると考えられる。

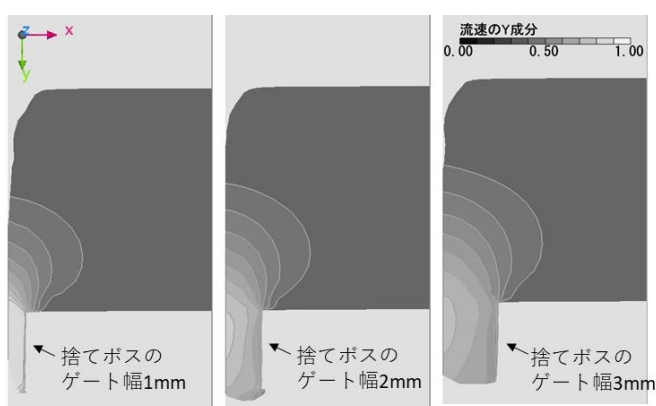


図12 捨てボスへ材料流入時の流速のY成分

3-2 強度評価結果

各試験片の引張試験の平均値を図13に示す。

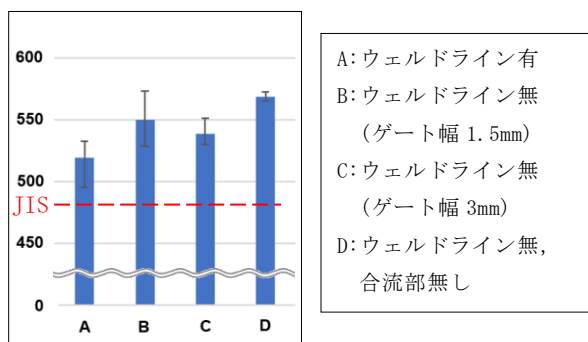


図13 各試験片の引張強さ

引張強さは、合流部無しの試験片が一番大きく、捨てボスを設けずウェルドラインを有する試験片が一番低いという結果が得られた。ただし、すべての試験片でJIS規格規定の480MPa以上の強度を維持していた。

ウェルドライン有りの試験片については、ウェルドライン部（溝深さ約7μm）からのき裂進展の他、引張試験後の破断面に図14、15に示すような空孔の跡が確

認された。このことから、空孔によって有効な断面積が減少し、その結果として強度が低下したのと考えられる。

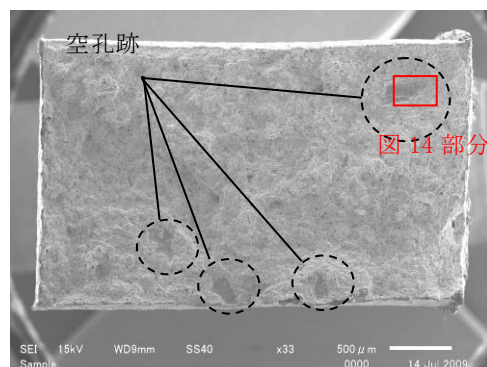


図14 破断面のSEM像

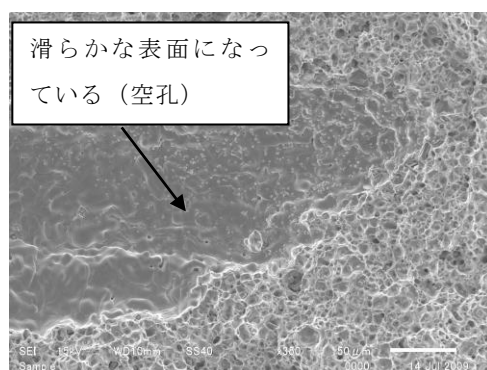


図15 空孔部の拡大画像

4 まとめ

捨てボスによるウェルドライン抑制効果の評価した結果、以下の結論が得られた。

- ・捨てボスのゲート幅毎にウェルドライン部の形状を測定し、捨てボスによって、溝形状の深さが浅くなっていく様子を確認した。解析結果から、捨てボ스에ウェルド発生部の材料が流入することで、抑制効果が得られると考えられる。
- ・ウェルドラインは、焼結により結合していたが、溝形状や空孔による強度低下が認められた。捨てボスによってそれらの原因を取り除くことで、強度低下の防止を見込むことができる。

5 参考文献

- 1) Ben Sheppard 他： Factory of the Future, McKinsey & Company (2014)
- 2) 山本 圭一郎 他： 福岡県工業技術センター研究報告, No. 33, pp. 77-80 (2023)