

金属粉末射出成形技術の最適化に関する研究

機械技術部 岩本竜一, 森田春美, 南 晃

Study on Optimization of Metal Injection Method

Ryuichi IWAMOTO, Harumi MORITA and Akira MINAMI

本研究では、金属粉末射出成形の最適化を図るために、金属粉末にSUS316Lを用い、混練温度・バインダー割合等の要因が引け代および製品強度に及ぼす影響について、品質工学の手法を適用して実験を行った。この結果、焼結品の引けに効果の大きい要因はバインダー割合であり、引張強度に効果の大きい要因は、混練温度・金型温度・焼結温度・脱脂速度であった。それぞれの要因について最適条件を見出し、その最適条件では、引け代を20ミクロン程度まで小さくできた。また、SUS316Lの焼結品として一般的な約400N/mm程度の引張強度が得られた。

1. 緒言

金属粉末射出成形は、混練・成形・脱脂・焼結という工程を経て製品を製作する技術である。本研究では、金属粉末にSUS316Lを用い、混練温度・バインダー割合・金型温度・射出速度・射出圧力・射出筒温度・脱脂時の昇温速度・焼結温度が製品強度および引け代に及ぼす影響について、検討を行った。

2. 実験方法および装置

金属粉末射出成形の原料混練・射出成形・脱脂・焼結の4つの主な工程の中で、表1に示すA～Hまでの8つの要因を取り上げ制御因子とした。これらの要因を表2のようにL₁₈直交表に割り付けて実験を行った。下記にその詳細を述べる。

表1 制御因子と水準値

要因	水準		
	1	2	3
A:混練温度()	140	150	
B:バインダ割合(%)	9	10	11
C:金型温度()	30	40	50
D:射出速度(%)	60	40	20
E:射出圧力(%)	50	55	60
F:射出筒温度()	120	130	140
G:昇温速度(/h)	5	10	15
H:焼結温度()	1350	1300	1250

表2 L₁₈直交表への制御因子の割付

No	制御因子							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
*				*				
*				*				
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

2.1 原料混練工程(要因A, B)

原料は、万能混合攪拌機(ダルトン5DMV-r)を用いて、SUS316L粉末(山陽特殊製鋼:粒径20ミクロン以下,平均粒径10ミクロン)とバインダー(中京油脂NE119:三菱レーヨンBR-105=1:1)を脱泡しながら混練し、粒径約3mm程度まで破砕造粒し作成した。混練中の温度を要因A、バインダー割合(重量%)を要因Bとした。原料混練の過程を図1に示す。

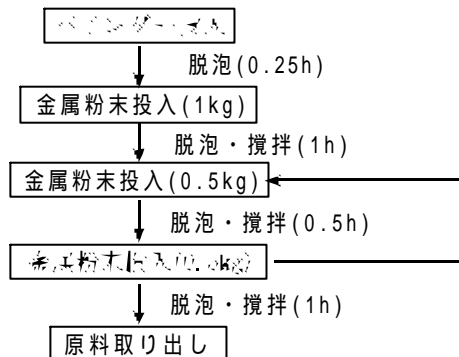


図1 原料混練

2.2 射出成形工程(要因C, D, F)

2.1で作成した原料を金属粉末射出成形機(三菱重工80MS-2.5E)により、図2の引張試験片の形状に成形した。この時の金型温度、射出速度、射出圧力、射出筒温度をそれぞれ要因C, D, E, Fとした。金型にはダイキン工業のフッ素系離型剤(ダイフリーGA-6010)を1ショット毎にスプレーした。

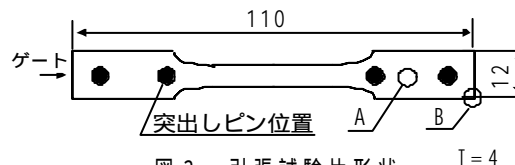


図2 引張試験片形状

2.3 脱脂工程(要因G)

脱脂は、セラミックス製の角サヤの中にアルミナの敷き粉(A-12)を入れ、この中に成形品を埋込み、脱脂炉(光洋リンドバークET0-21CD-55S)を用いて大気圧中で加熱脱脂した。

金属粉末射出成形の工程の中で最も長時間を要する脱脂工程は、生産効率の面からは早い方が望ましいので、加熱脱脂時の昇温速度を要因Gとした。熱分析装置(理学電機 Thermo Plus TG8110)による測定では昇温速度10 /min)、400 においてバインダーは約90%気化することが分かったので、脱脂の最高温度は400 に統一した。

予備実験で、80 以下の範囲で昇温速度が速すぎるとバインダーが気化するより早く成形品が軟化してしまい、反り等の変形を起こし形状を保持できないことが分かったので、80 までの昇温速度は一定とした。

上記の検討に基づき、図3に示す脱脂パターンを決定した。なお、脱脂が不完全となることを防ぐため、400 で2時間保持し、かつ、次工程の焼結の際にも400 で1時間保持することとした。

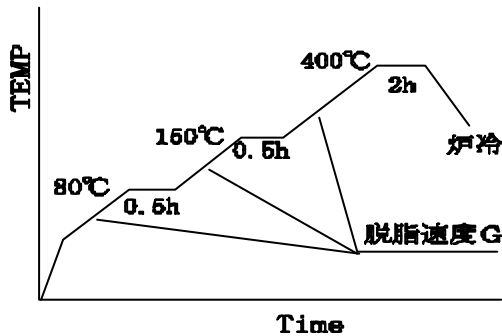


図3 脱脂パターン

2.4 焼結工程(要因H)

焼結は、真空熱処理炉(日本ヘイズVCA-161616)を用いた。炉内真空度が10⁻⁶Pa以上まで低下してから昇温を開始し、焼結の最高温度を要因Hとした。いずれの条件でも最高温度で2時間保持後炉冷した。焼結中の真空度はおおよそ10⁻⁷Paオーダーであった。焼結の熱処理パターンを図4に示す。

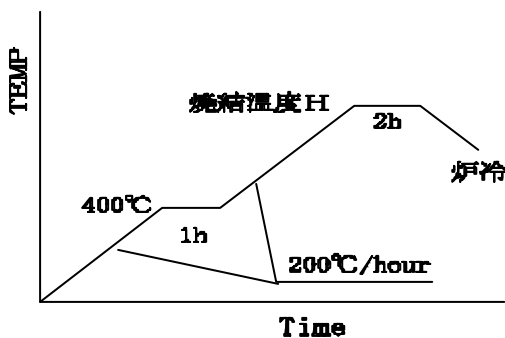


図4 熱処理パターン

2.5 誤差因子

誤差因子は、同一ロット間のバラツキとした。

3. 結果及び考察

3.1 引け代の解析

焼結品の形状を観察すると、L₁₈直交表の全ての行において、引張試験片の輪郭部(図2中のB)より中央部(図2中のA)の方が低くなっており引けが発生していた。

金属粉末射出成形では、バインダーを使用する限り、成形品より焼結品の方が小さくなってしまふことは避けることができないが、製品を量産する場合は、上記のようにある一方向だけ縮小代が異なることなく、全ての方向に同一の割合で縮小することが望ましい。

そこで、中央部代表としてA部、輪郭部代表としてB部の厚さをそれぞれマイクロメータを用いて測定した。この差を引け量とし、望小特性のSN比を求めて解析を行った。ここでSN比は(1)式で与えられる。

$$= 10 \log_{10} (1 / Ve), Ve = (\sum y_i^2) / n \quad (1)$$

表3に式(1)による解析結果を、図5に要因効果図を示す。表に示すとおり、製品の引け代は、おおよそ100~300ミクロン以上だった。この引け代は、金属粉末射出成形の実製品が複雑な三次元形状を有し、かつ、難削材が多いため後加工が困難であることを考慮すると、かなり大きな値と考えられる。

表3 引けの解析結果

	引け代			Ve
	N1	N2		
L1	0.091	0.098	0.02	17.46
L2	0.120	0.120	0.03	15.41
L3	0.102	0.117	0.02	16.18
L4	0.203	0.294	0.13	8.94
L5	0.218	0.259	0.11	9.41
L6	0.244	0.291	0.14	8.41
L7	0.369	0.369	0.27	5.65
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
L17	0.346	0.302	0.21	6.76
L18	0.294	0.327	0.19	7.14

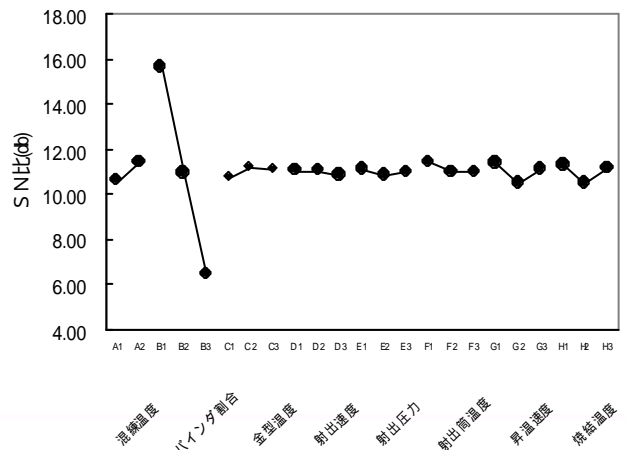


図5 要因効果図(引け)

図より、引けに関しては、バインダー割合以外の要因の効果が少ないことが分かる。バインダー割合が少ない方が高いSN比が得られるのは理解しやすい。当初は脱脂速度の効果が大きいと推測していたが、ほとんど効果が無かった。このことから、脱脂速度は成形品中心部から表面までの距離によって、決定する必要があるのではないかと考えられる。この距離が長い場合、すなわち、製品が大きいあるいは厚い場合には、脱脂速度が速過ぎると製品内部のバインダーが気化してしまい、割れなどの欠陥が生じやすくなり、逆に、遅過ぎれば、脱脂に長時間を要し非効率的になるものと考えられる。今後、異なる大きさの成形品を使って確認を行う必要があるが、脱脂時間の短縮という問題を考慮すると、金属粉末射出成形は小物部品の生産に適していると考えられる。

3.2 引張強度の解析

引張試験は、精密万能試験機(島津製作所AG-10TA)を用いて、試験速度10mm/minで破断強度を測定した。この結果を、望大特性のSN比を式(2)を求めて解析した。

$$= 10 \log_{10} (1 / Ve),$$

$$Ve = ((1/y_i)^2) / n \quad (2)$$

図6に、この結果から得られた要因効果図を示す。なお、実験の中で、著しく低い強度で破断したサンプルがあった。これらのデータは欠測値とし、全データの最小値から3dbを減算して解析を行った。

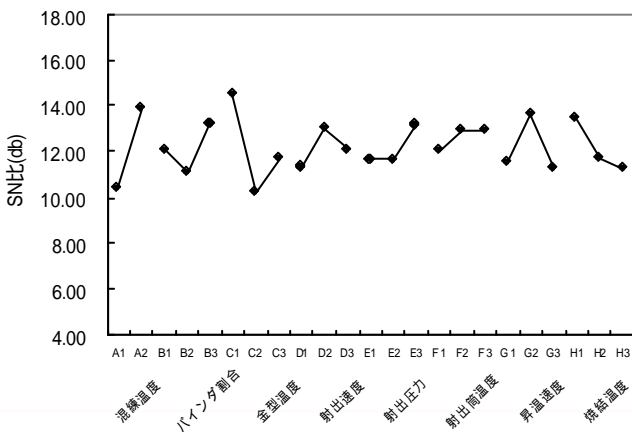


図6 要因効果図(引張強さ)

図より、引張強さには、混練温度、金型温度、昇温速度、焼結温度が効果が大きいことが分かる。

引張試験を行った中で、図2中の黒丸印で示した突出しピン位置から著しく低い強度で破断したサンプルがあった。これらの破断箇所は、全て4箇所の突出しピン位置の内側2箇所のいずれかで、ゲートの方向とは関係が無かった。また、通常の破断面が焼結品表面と同じ灰色であるのに対し、低い強度で破断したサンプルの破断面には、一部に白色の部分が見られた。これらは、製品中の欠陥から破断したものと考えられる。

3.3 確認実験

引け代および引張強度の解析結果から、最適条件を推定して確認実験を行い、引け代および引張強度を測定した。この結果を表4に示す。

表4 最適条件での引け代および引張強度

No	引け代(μm)	引張強度(N/mm ²)
1	1.2	414
2	2.3	409
3	1.8	408
4	1.9	416
5	1.6	394
mean	1.8	408

表に示す通り、引け代については、20ミクロン程度になった。表3のデータでは、100~300ミクロン以上の引け代があったことと比較すると、おおよそ一桁小さくすることができた。

引張強度は、約400N/mm²程度の安定した値が得られた。American Society of MetalsのMetals Handbook Volume7¹⁾からの抜粋を図7に示す。

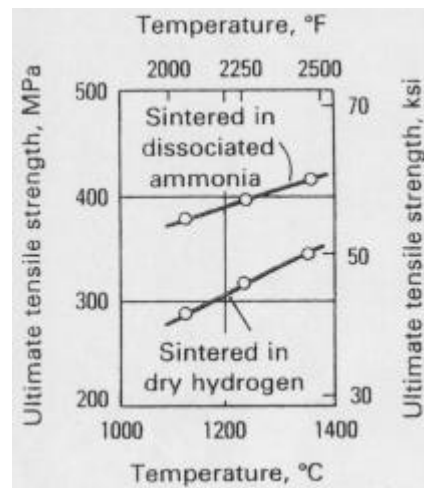


図7 焼結品(SUS316L)の引張強度

これによると、SUS316Lの焼結品引張強度は、1300℃で400N/mm²(1N/mm²=1MPa)強程度であり、実験結果とほぼ同等の値であった。図6、7で明らかなように、焼結温度を上げると引張強度は上昇するが、あまり上げすぎると焼結品の溶融点温度に近くなるため、熱処理炉内の温度のバラツキにより、焼結品を溶融させてしまうことがあり得る。つまり、炉内の温度管理が重要になるが、真空熱処理炉内の温度管理を厳密に行うことは簡単ではないため、焼結温度を高く設定する場合は注意を要する。

ここで、著しく引張強度の低いサンプルがあった原因について検討する。前項で述べたとおり、著しく強度の低いサンプルの破断箇所は、ゲート方向とは関係なく、内側突出しピン位置付近に集中していた。このことから、欠陥が

発生する原因としては、射出成形品の取り出しの際に、突出しピン位置付近から曲がってしまうサンプルがあったことが考えられる。この現象は、バインダー割合が多い場合や金型温度が高い場合などの成形品が柔らかい時に発生しやすく、内側突出しピン位置付近で最大曲率を持つ曲がりであった。この曲がりによって、成形品に微細な欠陥が発生し、焼結品の欠陥になったと思われる。ゲート側あるいは反対側のどちらが曲率が大きいかによって、引張試験時の破断箇所が決定されるものの、欠陥は両側に存在するはずである。50倍程度の工場顕微鏡で成形品の突出しピン付近を観察したが、確認することができなかつたため、非常に微細な欠陥であるか、あるいは成形品内部の欠陥と考えられる。最適条件で射出成形した成形品の中で、取り出し時に偶然曲がってしまったサンプルを選んで引張試験を行った結果、著しく低い強度で破断することを確認した。

つまり、射出成形時に成形品が曲がることによって微小な割れなどを生じ、これを焼結しても欠陥として残るため著しく低い強度で破断するのではないかと考えられる。この微小な欠陥の発生過程などについては、今後さらに検討する必要がある。

4. 結 言

金属粉末射出成形技術の最適化について、品質工学の手法を用いて検討した結果、下記のことが明らかとなった。

(1) L₁₈全ての行において、焼結品には引けが発生した。引

け代はおおよそ100～300ミクロンであった。

- (2) この引けを望小特性のS/N比を求めて解析した結果、バインダー割合の効果が大きく、バインダー割合が小さいほど良いことが分かった。実験前に推測していた脱脂時の昇温速度の影響はほとんど効果がなかった。
- (3) 最適条件では焼結品の引け代を、20ミクロン程度まで小さくすることができた。
- (4) 望大特性のS/N比を用いて解析した結果、混練温度・バインダー割合・金型温度・脱脂速度の効果が大きかった。
- (5) 最適条件で製作した試験片の引張強度は、400N/mm程度の値が得られた。この値は、ASMのデータとほぼ同等であった。
- (6) 引張強度が著しく低かったサンプルは、確認実験の中で製品取り出し時に突出しピン付近で折れ曲がってしまったものであることを確認した。

謝 辞

研究を進めるに当たり、有益な助言を賜りました熊本県工業技術センターの上村 誠氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) American Society of Metals: "Metals Handbook Ninth Edition Volume7 Powder Metallurgy", (1984)p.369