

金属粉末射出成形品の試作迅速化のための製造技術

メカニクス系工学専攻 准教授 西藪 和明
東大阪モノづくり専攻 修士学生 桜井 晋也
太盛工業株式会社 代表取締役社長 田中 茂雄

1. 緒言

金属粉末射出成形 (Metal injection molding, MIM) は、金属粉末とバインダの混練材を金型内に射出成形することにより比較的複雑な形状を持つ金属部品を製造可能な複合技術である。微粉末の使用による緻密化と合金化、さらに製品の小型化と一体化が可能で、小型精密部品を安定して量産できるため普及拡大してきている(1)。しかし、MIM は金型内に MIM 原料を射出して成形体を得るため、離型困難な形状の部品の製造は不適であり、金型製造コストも高く、さらに焼結収縮による寸法予測が困難であるなど、迅速な試作や少量生産には課題がある。

本研究では、切削加工により MIM の成形体 (Green compact) に形状を付与し、複数の切削加工後の成形体を組み合わせて焼結接合を行う金属部品も試作法を提案する。従来はスリップキャスト法により得た成形体の切削による迅速試作法(2)や MIM 部品の焼結接合法(3)などが検討されてきたが、複雑形状の MIM 部品の試作から、迅速に量産移管を行うことを目的に、MIM 成形体の切削加工と焼結接合を組み合わせた評価法の検討は見られない。そこで、切削加工後の成形体およびその焼結体の三次元形状を、非接触三次元デジタイザを用いて測定し、CAD データとの比較から焼結接合体の形状変化について調査した。

2. 製造方法および実験条件

2. 1 製造方法および特長

本研究で提案する加工プロセスを図 1 に示す。本プロセスでは、MIM の射出成形工程により作製した単純な形状の成形体を切削加工により所定の形状付与を行い、その成形体を脱脂および焼結工程を経て複雑形状の金属部品を得るため、多種の部品を製造するのに個々に金型が必要でなく低コストで試作可能である。また、形状付与した成形体どうしを焼結接合することにより、金型では製造不可能な複雑焼結部品の作製も可能である。

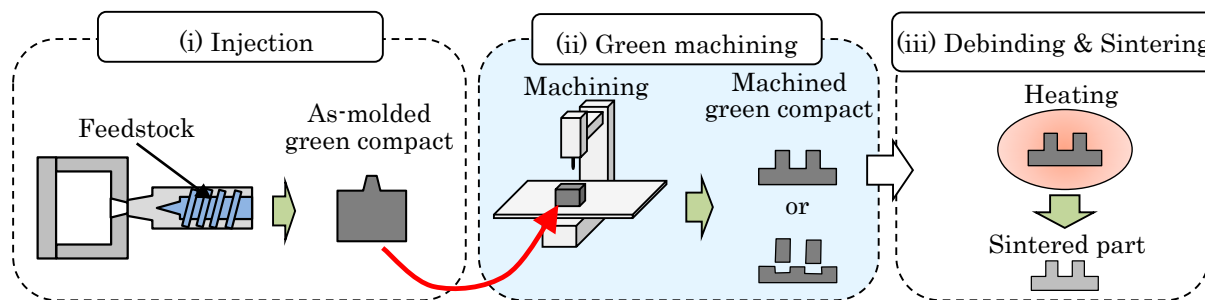


Fig.1 Green machining and sintering joining in MIM process.

2. 2 使用材料および成形体の作製

ステンレス鋼粉末 SUS410L (エプソンアトミックス(株)製) とポリアセタール系バインダをそれぞれ 66 : 34 の体積割合で混練および造粒したペレットを用いて, 図 2 に示すような成形体ブロック (縦 22.75mm×横 22.75mm×高さ 14.15mm) を超小型射出成形 (Babyplast, 6/10) で成形した.

2. 3 成形体の切削加工

立型マシニングセンタ (ファナック(株), α -D21MiA5) を用いて成形体ブロックに切削加工を行った. 通常マシニングセンタで切削加工を行う場合, 材料をバイスで挟んで固定するが, 成形体は非常に脆いためバイスで固定することが困難である. そのため, 本研究では簡易な方法で成形体ブロックをセッターに固定した.

2. 4 脱脂・焼結方法

成形体の脱脂および焼結には, 脱脂焼結炉 (島津メクテム(株), VHSgr40/40/100) を用いた. 窒素雰囲気中 873K で 7.2ks 間保持し, 脱脂処理を行った. その後, アルゴン雰囲気中 1573K で 7.2ks 間保持で焼結処理を行い, 焼結体を得た.

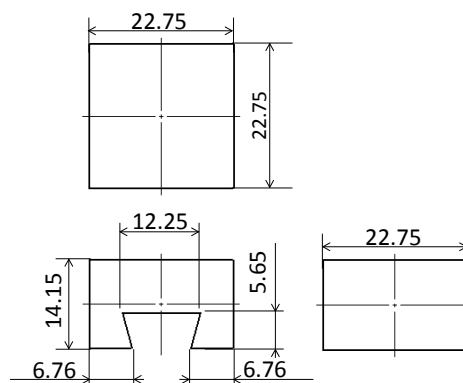


Fig.2 Shape of as-moulded green compact

3. 切削加工による L/S パターンの形状付与

3. 1 L/S パターンの形状

図 3 に示すように, 高さ $h=1.0\text{mm}$, 幅 $w=0.8\text{mm}$ および 1.0mm の L/S パターンを成形体ブロックに切削加工を行った. 図 3 に示す寸法は焼結体の設計値である.

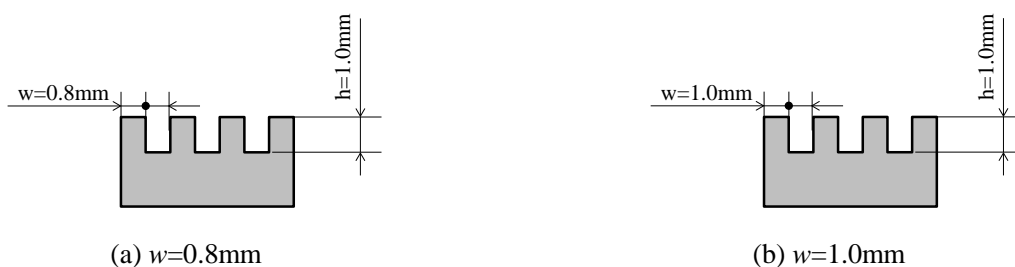


Fig.3 Geometry of L/S patterns.

3. 2 実験結果および考察

切削加工を行った成形体および焼結体をレーザー顕微鏡（オリンパス株，OLS4000）で構造体の形状測定を行い，それぞれ CAD データと形状比較を行った．レーザー顕微鏡は垂直方向に測定するのに不向きなため，本研究では Z 値が $500\ \mu\text{m}$ の地点で構造体の幅の値を読み取った．

図 4 に幅 $w=0.8\text{mm}$ ，図 5 に幅 $w=1.0\text{mm}$ の切削加工を行った成形体および焼結体の形状を示す．CAD データと切削加工後の成形体の形状を比較すると，高さ，幅ともに所望する寸法に近いことが分かった．同様に焼結体も高さ，幅ともに所望する寸法に近いことが分かった．また，図 5 に示すように，幅 $w=1.0\text{mm}$ の切削加工を行った成形体および焼結体も高さ，幅ともに所望する寸法に近いことが分かった．このことから，焼結前に成形体に切削加工を行っても，焼結後に大きな寸法誤差が生じないことが考えられる．

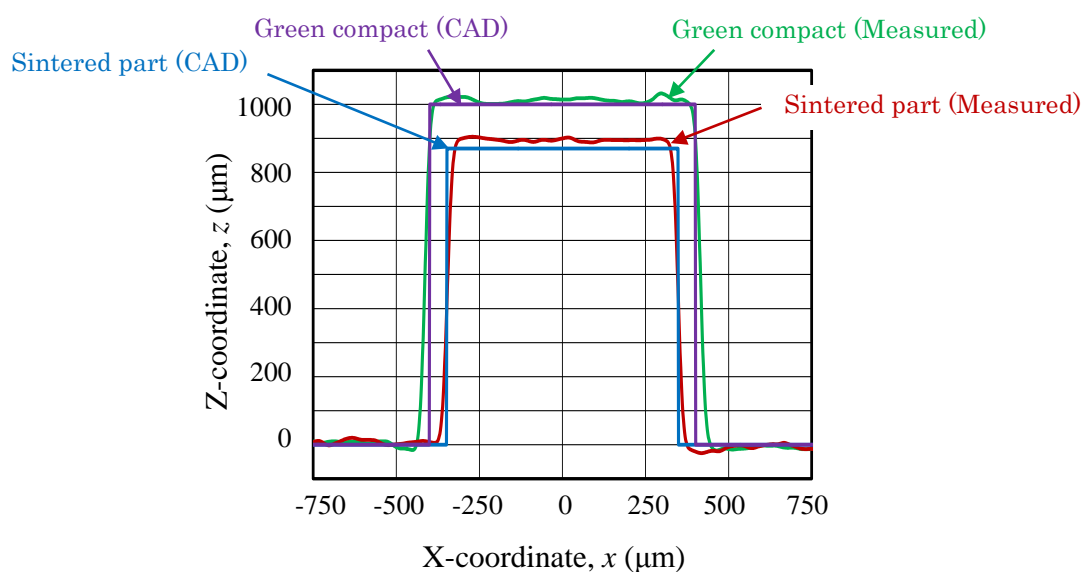


Fig.4 L/S パターンの成形体および焼結体の断面形状 ($w=0.8\text{mm}$ の場合)

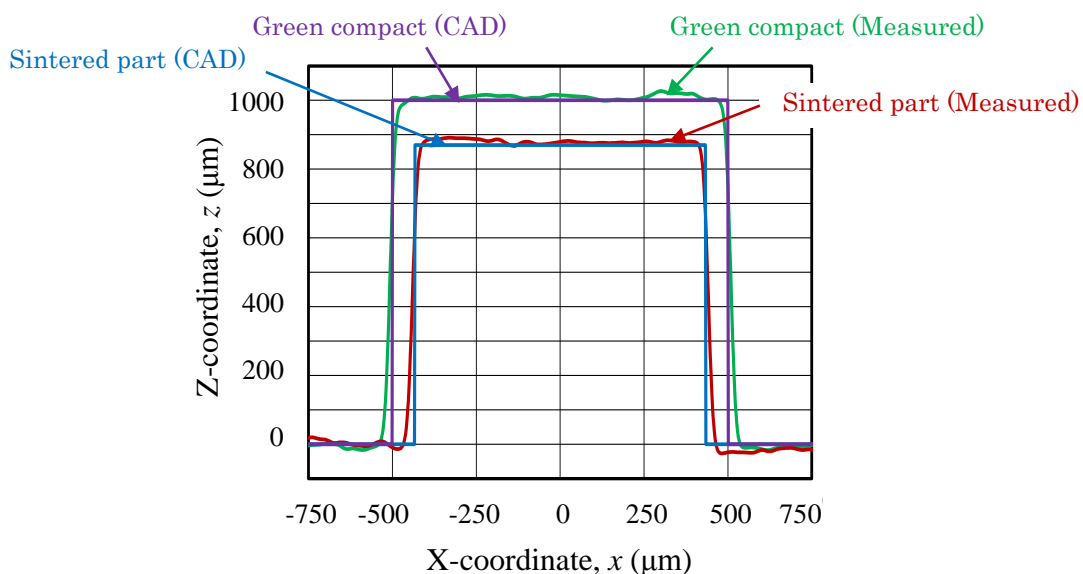


Fig.5 L/S パターンの成形体および焼結体の断面形状 ($w=1.0\text{mm}$ の場合)

Table 1 L/S パターンの成形体および焼結体の CAD との寸法比較 ($w=0.8\text{mm}$ の場合)

	Green compact		Sintered part	
	CAD	Measured	CAD	Measured
Width, w (mm)	0.80	0.83	0.69	0.69
Height, h (mm)	1.00	1.03	0.87	0.90

Table 2 L/S パターンの成形体および焼結体の CAD との寸法比較 ($w=1.0\text{mm}$ の場合)

	Green compact		Sintered part	
	CAD	Measured	CAD	Measured
Width, w (mm)	1.00	1.01	0.87	0.88
Height, h (mm)	1.00	1.03	0.87	0.88

4. L/S パターン形状成形体の焼結接合

4. 1 L/S パターン形状付与および組立て

図 6 に示すように、(a)は幅 $w=0.8\text{mm}$ 、(b)は幅 $w=0.9\text{mm}$ 、(c)は幅 $w=0.98\text{mm}$ の L/S パターンの成形体を切削加工により作製し、それぞれ幅 $w=1.0\text{mm}$ の L/S パターンに切削加工を行った成形体と組み合わせ焼結接合を行った。

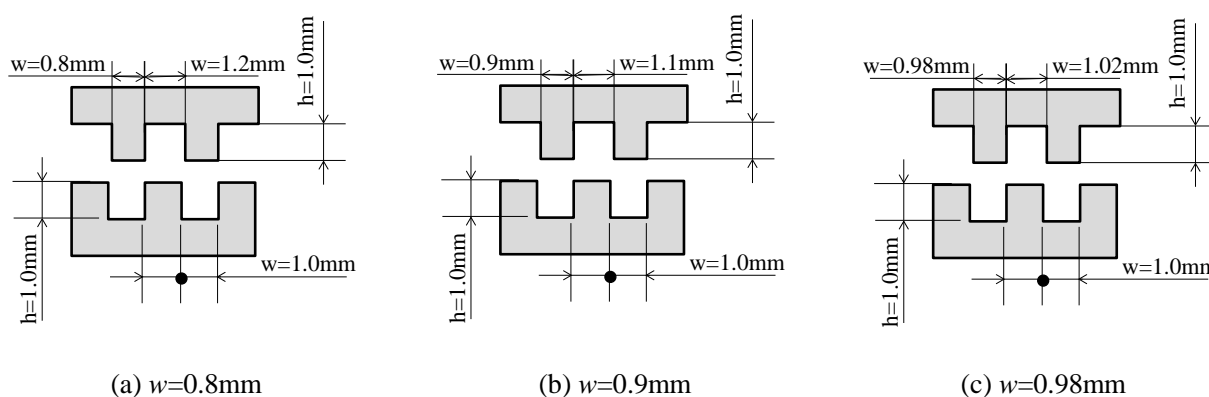


Fig.6 L/S パターン成形体の焼結接合の組み合わせ

4. 2 実験結果および考察

焼結接合体の接合断面部を研磨し、デジタルマイクロスコープ (オリンパス株, DSX500) で接合面の観察を行った。焼結接合体の接合断面図を図 7 に示す。(a)が示すように、 $w=0.8\text{mm}$ と $w=1.0\text{mm}$ の焼結接合体では接合部分に隙間が生じており、片側 $100\mu\text{m}$ 程の隙間が生じていた。しかしながら、(b)の $w=0.9\text{mm}$ と $w=1.0\text{mm}$ 、(c)の $w=0.98\text{mm}$ と $w=1.0\text{mm}$ の焼結接合体では、接合部に大きな隙間が生じていないのが分かった。成形体の組立て時に、片側 0.05mm ほどの隙間があれば焼結接合をおこなっても、大きな隙間が生じないと考えられる。

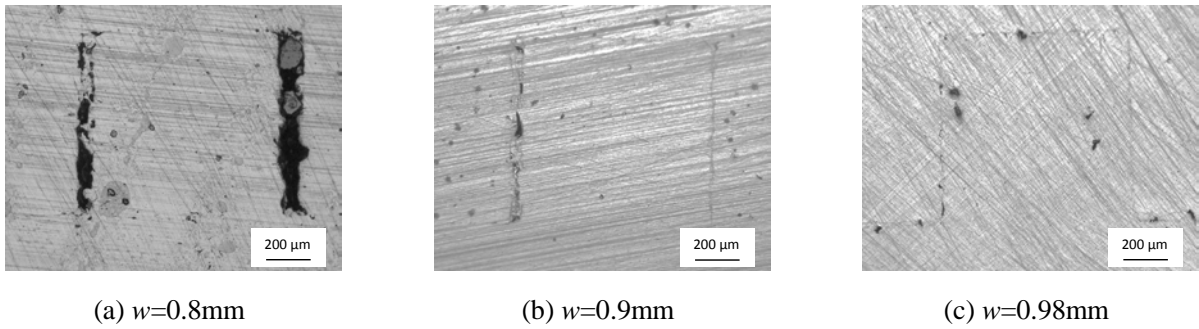


Fig.7 L/S パターンの焼結接合部の断面写真

5. 一体焼結部品と焼結接合部品の形状比較

5. 1 一体焼結部品と焼結接合部品の作製および評価

切削加工後の成形体とその焼結体の形状および寸法を図 8(a)および表 3 に示す. (a)のように一体で切削加工した一体焼結部品と, (b)のように平板と角柱を分けて切削加工した成形体を組み合わせた焼結接合部の形状比較を行った. その際, 間隙を 0.01, 0.05 および 0.1mm に変化させた.

切削加工後の成形体とその焼結体を, 非接触三次元デジタイザ (GOM 社, ATOS™) を用いて三次元形状測定を行った. CAD データと切削加工後の成形体とその焼結体の形状の比較により, 各工程で形状変化を評価した. 本研究で使用した非接触三次元デジタイザは, 1mm 程度の超小型の製品から数 m の構造物をレンズと較正板を視野のサイズに応じて変更するだけで同一の測定装置を用いて高精度に形状測定が可能である. その測定精度は測定サイズや測定環境に依存するが, ほぼ数 μm に達する. また, 焼結接合体は研磨を行い, デジタルマイクロスコープ (オリンパス株, DSX500) で接合部の断面観察を行った.

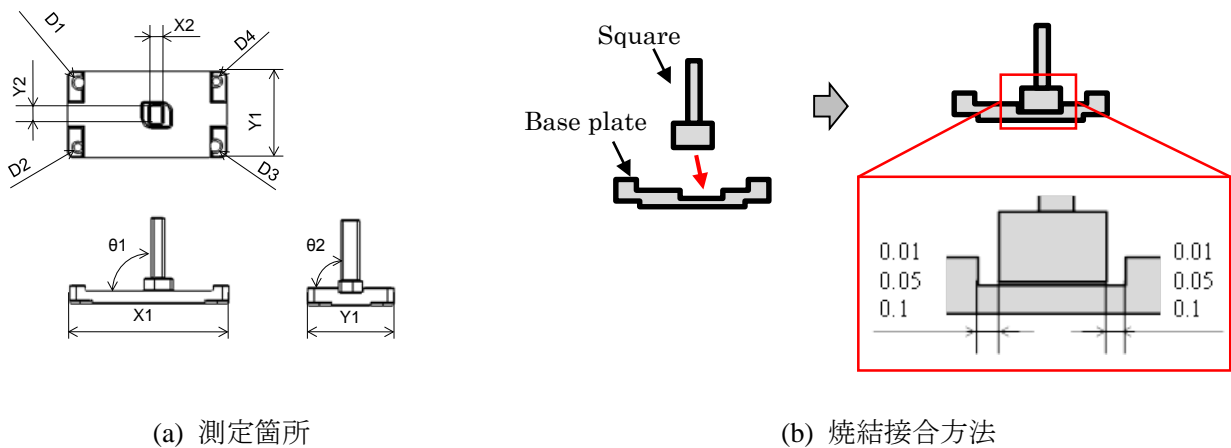


Fig.8 一体焼結部品と焼結接合部品の形状

Table 3 Dimensions of machined green compacts and sintered part (CAD data)

	Tolerance	D1	D2	D3	D4	X1	X2	Y1	Y2	θ_1	θ_2
(a) Machined green compact	± 0.02	0.99	0.76	0.99	0.76	14.89	1.26	8.02	1.78	90°	90°
(b) Sintered part	± 0.02	0.86	0.66	0.86	0.66	13.00	1.10	7.00	1.55	90°	90°

5. 2 実験結果および考察

切削加工後の成形体とその焼結体の微細構造を図9に示す。切削加工後の成形体の表面にはエンドミルの切削加工跡が見られるが、焼結体には見られない。また、焼結体の表面粗さは切削加工後の成形体よりも大きくなっていることが分かる。これは、焼結による収縮が原因であると思われる。

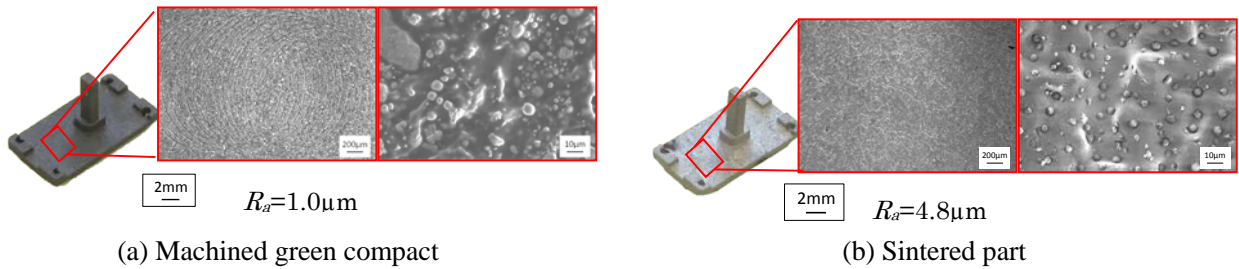


Fig.9 Microstructures of machined green compact and sintered part.

切削加工後の成形体と焼結体の寸法測定を行い、CADデータと形状比較した結果を表4、表5および図11に示す。表4(a)に示すように、切削加工後の成形体は各測定箇所寸法偏差が±0.02以内に加工されていることが分かった。また、図11(a)に示すように表面偏差も差異が5μm以内であり、高精度に切削加工されていることが分かった。しかしながら、表4(b)に示すように焼結体Y1の偏差が+0.13mmであり、また表面偏差も50μm程度の差異がある箇所があり、より詳細な調査および改善が必要であることが分かった。

Table 4 Differences in dimensions of machined green compacts and sintered parts

(a) Machined green compacts				(b) Sintered parts			
	CAD data	Measured data	Difference		CAD data	Measured data	Difference
X1	14.89	14.90	+0.01	X1	13.00	13.00	±0.00
X2	1.26	1.26	±0.00	X2	1.10	1.08	-0.02
Y1	8.02	8.01	-0.01	Y1	7.00	7.13	+0.13
Y2	1.78	1.78	±0.00	Y2	1.55	1.54	-0.01
D1	0.99	0.97	-0.02	D1	0.86	0.85	-0.01
D2	0.76	0.75	-0.01	D2	0.66	0.66	±0.00
D3	0.99	0.97	-0.02	D3	0.86	0.85	-0.01
D4	0.76	0.74	-0.02	D4	0.66	0.66	±0.00

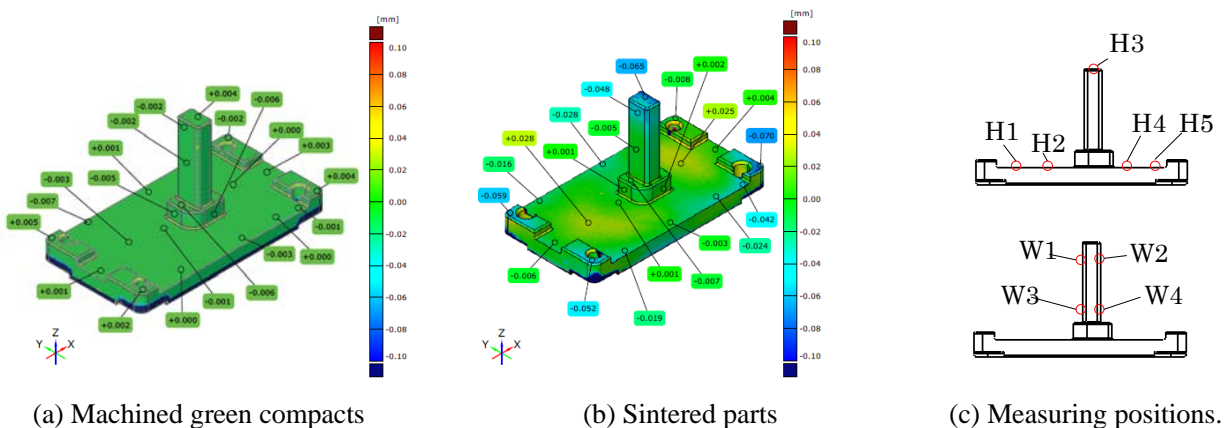


Fig.10 Differences in shape of machined green compact and sintered part to CAD data.

Table 5 Differences in position of machined green compact and sintered part to CAD data

	H1	H2	H3	H4	H5	W1	W2	W3	W4	θ_1	θ_2
(a)Machined green compact	-0.001	-0.001	+0.004	± 0.000	± 0.000	+0.004	-0.006	-	-0.004	90.0°	90.0°
(b) Sintered part	+0.021	+0.029	-0.064	+0.014	+0.030	-0.048	+0.023	-	+0.005	90.4°	90.4°

図 10 のように一体で切削加工した場合と，図 11 に示すように(a)平板と(b)角柱に分けて切削加工した成形体を図 8(b)のように組み合わせて脱脂・焼結を行った．一体焼結部品と焼結接合部品の CAD データの形状比較した結果を図 12(a)および(b)に示す．表 6 に示すように，一体焼結部品の角柱の角度は 90.4°と垂直に近いのに対して，焼結接合部品は 89.4°と 88.2°と傾いている．これは成形体の組立て時に角柱が傾いて焼結したためであると思われる．

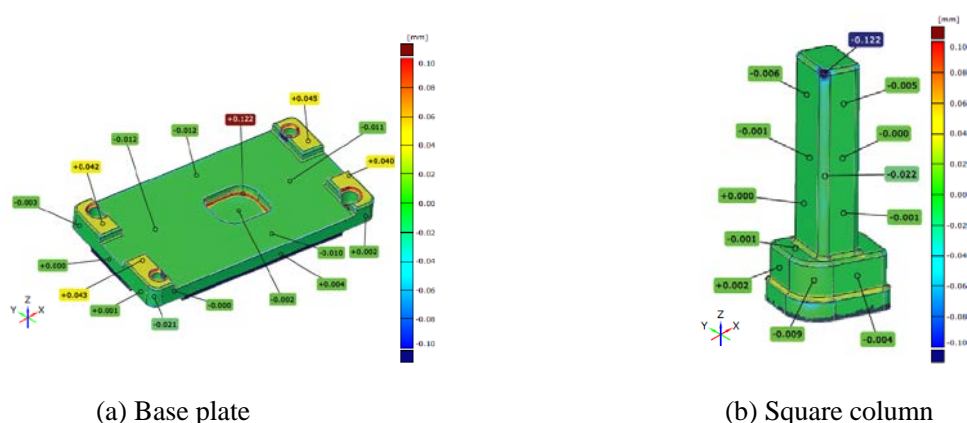


Fig.11 Differences in shape of two separate machined green compacts to CAD data and assemble.

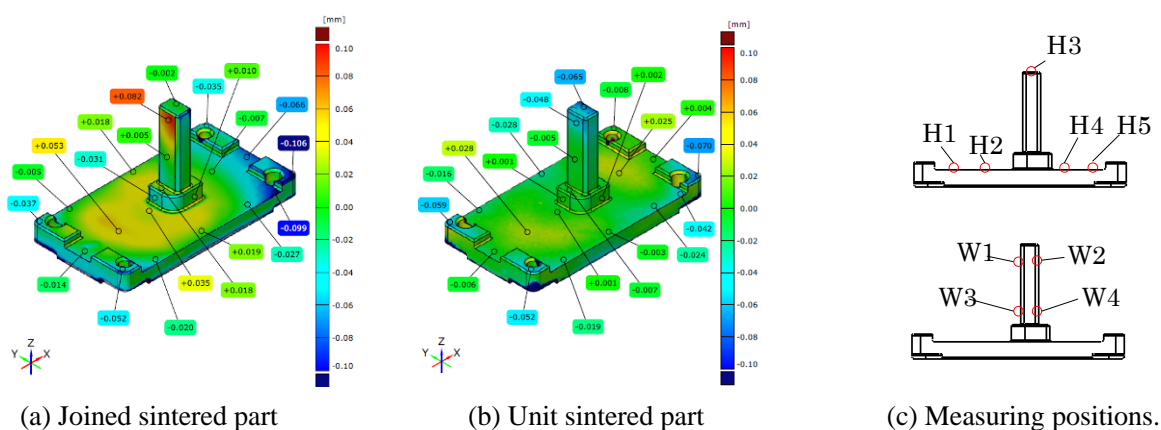


Fig.12 Differences in shape of joined and unit sintered parts and measuring positions.

Table 6 Differences in position of joined and unit sintered parts to CAD data

	H1	H2	H3	H4	H5	W1	W2	W3	W4	θ_1	θ_2
(a)Joined sintered parts	+0.029	+0.055	+0.003	+0.025	-0.014	+0.088	-0.097	-0.017	+0.016	88.2°	89.4°
(b)Unit sintered parts	+0.021	+0.029	-0.064	+0.014	+0.030	-0.048	+0.023	-0.004	+0.005	90.4°	90.4°

焼結接合体の接合部の断面写真を図 13 に示す．間隙が 0.1mm の場合，角柱の底面は平板と接合されている部分もあるが，17 μ m 程度の隙間が生じている部分も見られ，側面は 80 μ m 程度の大きな隙間が生じていることが分かった．一方，間隙が 0.05mm の場合，角柱の底面と平板の隙間は約 11 μ m，側面は 45 μ m 程度の隙

間が生じており，完全に焼結接合されていないことが分かった．なお，間隙が 0.01mm の場合は，角柱が平板の溝に挿入することができず，焼結接合を行うことができなかった．

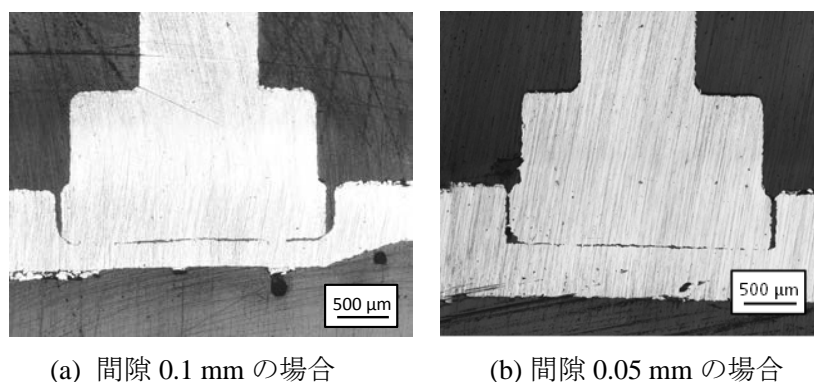


Fig.13 焼結接合部の断面写真

6. 結言

本研究は，金属粉末射出成形品製造における金型製造コストの削減，量産検討のため試作品の短納期化，および少量生産の実現を目的に，射出成形により製造された成形体ブロックを切削加工するグリーンマシニングによる形状付与を試みた．また，複雑の切削加工した成形体を組み合わせて焼結接合を行うことにより，射出成形では製造困難な複雑形状の金属部品を，金型を用いないで低コストかつ迅速に試作可能な製造法を提案した．さらに，非接触三次元デジタイザを用い，切削加工後の成形体とその焼結体および焼結接合後の部品の形状測定を行い，CAD データとの形状の比較から，提案した製造法の実用可能性とその課題について調査した結果，以下の知見が得られた．

- (1)単純形状のライン&スペースパターンを成形体に高精度に切削加工が可能であり，焼結体もほぼ CAD データ通りの寸法が得られた．
- (2)切削加工を行ったライン&スペースパターンの成形体どうしを組み合わせ焼結した場合，凹部と凸部の接合部には大きな間隙も見られず，健全な焼結接合体が得られた．
- (3)実際の製品形状に近い複雑な形状に成形体を切削加工した成形体は CAD データに近いことが分かったが，その焼結体は数十 μm 程度の変形が生じた部分も見られた．
- (4)複数の切削加工した成形体を組み合わせた焼結接合体では一体焼結体に比べて，傾きが大きい部分や焼結接合部に隙間が生じることが分かった．

上記の実験結果から，グリーンマシニングを用いた金属粉末焼結部品の試作・少量生産は実用上有用な製造法であるが，焼結接合による接合部の品質と形状精度は実用上満足できる水準に未到達であるため，焼結接合法の組合せや焼結時の固定方法など，さらなる改善が必要であることが示唆された．

7. 参考文献

- [1] K.Nishiyabu, “Micro Metal Powder Injection Molding”, InTech Published, Some critical issues for injection molding edited by J.Wang, ISBN978-953-51-0297-7 (2012).
- [2] T.Shimizu, K.Matsuzaki and T.Sano, “Rapid Prototype of Metallic Parts Using Green Machining”, Advances of Powder Metallurgy & Particulate Materials Vol.3 pp.156-161 (2003).
- [3] A.Ruh, K.Klimscha, V.Piotter, K.Plewa, H-J.Ritzhaupt-Kleissl, J.Fleischer, “The development of two-component micro powder injection moulding and sinter joining”, Microsystem Technologies. Vol.17, No.10, pp.1547-1556 (2011).