

# 金型プレス成形法による超小型精密部材の創製に関する研究

石島, 善三

<https://hdl.handle.net/2324/1470592>

---

出版情報：九州大学, 2014, 博士（工学）, 課程博士  
バージョン：  
権利関係：やむを得ない事由により本文ファイル非公開（2）

氏 名 : 石島 善三  
論文名 : 金型プレス成形法による超小型精密部材の創製に関する研究  
区分 : 甲

## 論文内容の要旨

粉末冶金法は金属粉末を出発とする材料や部品の製造技術であり、金型プレス成形法（押型成形法）と金属粉末射出成形法（MIM）に大別できる。その中で歯車をはじめとする機械部品や軸受などの成形で広く行われている金型プレス成形法は、金型のキャビティに原料粉をフリー充填し、一軸加圧によって圧密化、拔出しする手法である。しかし、その簡便な手法であるが故に、得られる成形体の形状には制約がある。また、粉体間および粉体と金型間に発生する摩擦抵抗やファンデルワールス力により、流動性が阻害されるため、製品が小型・薄肉になるほど、充填は困難になるとともに、成形時においては圧力勾配が生じ密度勾配を形成する原因ともなる。

本研究では、高密度・複雑形状部品の造形に優れる金属粉末射出成形法のプロセスならびに原料に着目し、まず加熱した押型内でバインダの可塑性を利用した流動成形による小型・薄肉部品の造形ならびに高密度焼結体に関する基礎的研究を行い、ついで冷陰極蛍光ランプ（CCFL）に用いられる薄肉カップ電極やマイクロ歯車を対象とし、最終的には簡便で量産が可能な金型プレス成形法によるマイクロ部品製造技術の確立を目指す。

第1章では研究の背景、意義、目的および研究計画に向けての基礎的事項について述べた。MIMに用いられる原料(コンパウンド)は、バインダが溶融する温度では非圧縮性の流体となる。したがって、成形の際には金型プレス成形のように粉末同士が変形しながら高充填化していく必要がないことから、理論上は極低圧で成形できることになる。しかし、実際には、射出成形機から金型キャビティまでの流路における圧力損失の影響が大きく、薄肉限界を例にとっても、押型成形の限界である0.25mmを超える実績は見られない。本研究では、MIMのスプルー、ランナーに相当し、圧力損失の原因になる駄肉部を排除した押型を考案するとともに、極めて低速で動作させることで、さらなる圧力損失の低減を図る成形方法を考案した。

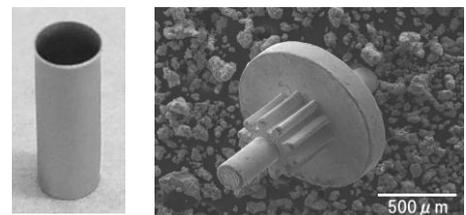
第2章では均質なコンパウンドを得るべく混練条件の最適化、ペレットによる定量充填、コンパウンドのリサイクル性に関する調査結果を述べた。まず、MIMで行われている二軸ニーダを使用し、バインダの添加量と混練条件を最適化した後、より高いせん断力を与えることができるパージ工程を繰り返すことで、均質化されたコンパウンドを得る方法を見出した。次に、製品と同じ体積で形状を単純化させた円柱体が32個採れる金型を製作し、最も重量バラツキが小さくなる射出圧力やリターン条件を見出すとともに、そのバラツキ幅は押型成形と同等以上の1.5%以下を達成した。ついで、薄肉カップ用金型を作製し、成形挙動の解明と薄肉限界について調べた。薄肉成形における変形挙動は、ペレットが据え込みによってダイスと接触するまでの変形初期と、ダイスとの接触からカップ壁部の押出しが始まるまでにキャビティ内を充填する変形中期、さらに壁部の押出しが行われる変形後期の3段階で行われることを明らかにした。その際、コンパウンドは固体の変形から液体の流動へと変化するレオロジー的な挙動を示すことが明らかにされた。また、拔出しにおいては、拔出し荷重と座屈荷重の関係を求め、拔出し温度を最適化することで、座屈のない健全な成形体を得た。以上の結果、日本粉末冶金工業会（JPMA）が発表している金型プレス成形による最小肉厚0.25mmを凌駕する肉厚0.05mm(焼結体で0.04mm)の薄肉カップ成形を実現し、本成形方法の優位性を実証した。一方、量産性については誘導加熱方式、水冷金型によるハイサイクル

機構を考案し、ペレットの投入から成形、抽出し、排出までの1サイクルを10秒で完了させることに成功するとともに、サーボ駆動方式のプレス機による25万個の連続成形では、最も懸念された金型摩耗もなく安定生産できることを明らかにした。さらに成形した薄肉カップの焼結条件について、脱バインダおよび焼結温度を最適化するとともに、縦置き焼結が可能なアルミナ製敷板を利用することで、変形の少ない健全な焼結体を得ることができた。残留気孔は均一に分布しており、一般的な金型プレス成形で見られるようなニュートラルゾーンやコーナー部に発生するすべりクラックも無く、本成形方法の優位性を明らかにすることができた。

第3章では、従来の粉末冶金法や機械加工法では作製困難な軸付多段マイクロ歯車を例に挙げ、原料であるSUS440Cコンパウンドの最適化、さらにペレットに代わる極微量の定量充填方式や金型精度などについて述べた。SUS440Cをベースに混練温度は458K、バインダの添加量は41vol.%にて樹脂溜まりの少ない均一なコンパウンドを得た。また、マイクロ歯車の重量は0.001~0.002gと小さく、ペレットによる定量供給が困難であったため、吐出機構を具備する新規な金型構造を考案した。この吐出部のオリフィス径は0.15mmと極細径であるにも関わらず、約4Nの低荷重で吐出することができた。最終的にマイクロ歯車の成形に要した荷重は約5~8Nであり、カップと同様に極低圧で成形できることを明らかにした。ただ、ワイヤーカットによる微小歯車部の金型加工では、歯幅方向に最大約5 $\mu$ mの加工誤差が生じており、加工精度向上が今後の課題であることを指摘した。また、軸付二段マイクロ歯車の焼結条件について、焼結温度、昇温速度、脱バインダ工程の有無、雰囲気、冷却速度について調べた。成形体をステンレス製ポートにセットした場合、脱炭にともない、金属組織はフェライト化するとともに結晶粒が粗大化することが判った。また、製品サイズが小さいことから、脱炭が起きると、粒径は最大で歯の大きさにまで達し、歯元部に粒界ができ易くなることも判った。一方、マイクロ部品においても脱バインダ工程を設けることが必須であり、これによりバインダの残渣が少なくなり、ピンニングが抑制されることで緻密化が促進することを明らかにした。最終的には、カーボントレーの使用と急速冷却の効果を組み合わせた焼結方法により、相対密度で95%まで緻密化した焼結体を得るとともに硬さは700Hvを示した。旧オーステナイト粒径は原料粉末粒径とほぼ同じ2~5 $\mu$ mであり、溶製材では得ることができない微細結晶化による硬さ上昇の効果を確認した。最後に表面粗さに及ぼす粉末粒径の影響、ならびに得られた軸付二段マイクロ歯車の精度について調べた。焼結体の表面粗さは粉体の粒径に極めて近似することを明らかにするとともに、得られたマイクロ歯車の表面粗さは、現状の時計などの機械加工部品と同等であり、実用レベルであることを実証した。

非接触輪郭形状測定機にて単一ピッチ誤差、累積ピッチ誤差、全歯形誤差、歯溝の振れ、同軸度を求めた結果、それぞれ、2 $\mu$ m、2 $\mu$ m、8.4 $\mu$ m、7 $\mu$ m、7 $\mu$ mの精度を得た。この値はこれまで開発されているMIM製マイクロ歯車の精度と比較しても、同等以上の精度であることを確認した。

以上、本論文による一連の研究成果は、従来製作が困難であった超薄肉、超小型製品の造形を可能とする新たな粉末冶金成形法を確立するとともに、安定量産性や精度計測法、さらには結晶粒微細化による高強度化を示すことができたことで、新興国メーカーとの激しいコスト競争に晒されている国内粉末冶金メーカーの国際競争力を高め、小型化や薄肉の要求が増大しているデジタル家電製品、先端医療機器、IT機器への参入を促すための技術的・学術的支援となるものである。



本成形法で製作した薄肉カップ電極と軸付多段マイクロ歯車