

微小金型による人工粒子の成形技術

水沼 晋, 高橋 肇

1. はじめに

工業的に製造されている粉末粒子の形状は定量化が困難であるものが多く、それらの形状は、“繊維状”、“丸みを帯びた”、“不規則形状”などのように曖昧な定性的表現をしている。大きさも、各種サイズの網目状ふるいを通過したかどうかで決定する 경우가多く、例えば細長い粒子では網目サイズよりも長い粒子が通過する場合があるなど、寸法精度は高いとはいえない。

ところで、粉体の圧縮挙動は、圧密式として知られている各種の式で表現されているが^{1)・2)}、これらの式に含まれる定数と粉末諸特性の間関係については必ずしも明らかにされていない。その理由は、上記のように実験に用いる粉末粒子特性の定量化が高精度に行えないことが一因である。そこで筆者らは、形状、寸法、材質を独立に変化させた微小粒子を作製して圧密実験に利用することにした³⁾。これまで、線材切断、金型成形、ボールミル転動法、油中溶解滴下法などを適宜組み合わせることにより、微小粒子の作製を試みてきた。本稿はそのうちの金型成形により微小球粒子を作製する方法に関するものである⁴⁾。微小球粒子は、本研究の目的だけではなく、マイクロ軸受、マイクロバルブなどのマイクロマシンの主要部品としての用途も考えられる。今後、需要が広がり量産化が必要になった場合、塑性加工法は主要な生産法のひとつになる可能性はあるが、金型で微小球を製作する場合の成形限界や課題などは必ずしも明らかになっていない。以下に、筆者の研究室での実験結果を中心に紹介する。

2. 製作手順

表1は製作を試みた小球と使用した線材の寸法を示したものである。材質は工業用純アルミニウムおよび共晶はんだである。直径0.4~1.2mmの線材を図1のような切断装置を用いて所定の長さに切断した。切断部は2枚の市販の片刃カッター用替刃の間に鋼板製スペーサーを挟んで隙間を調整している。この装置による切断は手動で行ったため生産性は著しく悪いものであり、また、刃の両側の線材は斜めに変形するため材料歩留まりも悪い。しかしながら、各種の方法を試みた結果、切断後のばり、だれ、曲がりなどが最も少なかったため、実験用素材の作製にはこの装置を用いることにした。図2は切断した素材の一例である。筆者らは、微小円柱素材の量産用に材料送りと切断に可変

速小型モータを用いた自動切断装置も試作し、ある程度の成果を得ることが出来た。ただ、線材が細くて軟質材であったため、材料に変形やすべりを生じさせずに精度よく送り出すには、送り用ローラの材質や溝形状および把持力調整などに工夫が必要であった。また、線材の巻きぐせは、送り精度を悪くするだけでなく、細線がガイド部で折れ曲がり、送りを中断してしまう原因にもなった。送り用ローラを多段にし、ローラ径を徐々に大きくして線材にテンションを加えながら送ることである程度回避することは出来たが、金型成形で小球サイズをさらに微小化するためには細線を精度良く送り出して切断する技術が必要である。また、カッター刃の薄型化も重要である。

切断した円柱素材は半球状キャビティをもつ上下金型でプレスすることにより小球に成形した。成形時に円柱粒子上下面を拘束することは座屈の発生を抑制すると考え、

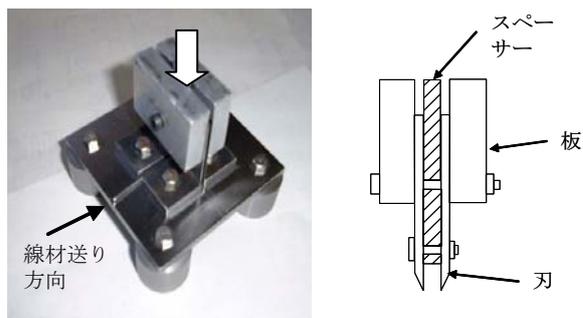
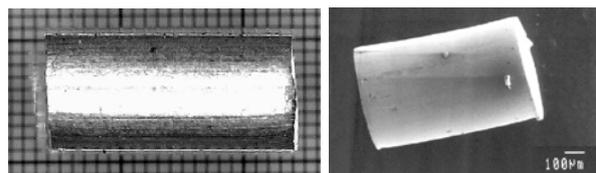


図1 切断装置



(a) φ1.0 アルミニウム (b) φ0.5 はんだ
図2 切断例

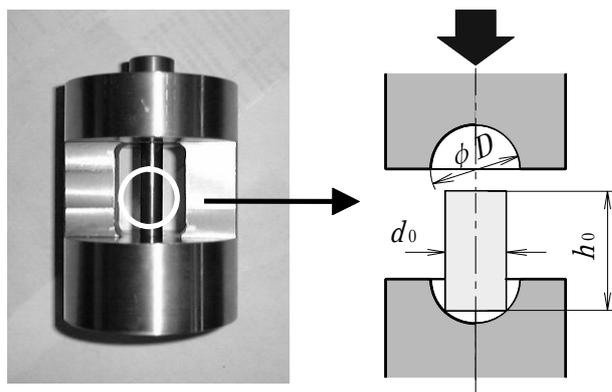


図3 小球成形用金型

表1 小球および使用線材の寸法

	mm	
小球直径 D	1.5	0.8
素材直径 d_0	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2	0.4, 0.5, 0.6
素材高さ h_0	1.8, 1.9, 2.2, 2.3, 2.7, 2.8	1.3, 1.4, 1.9, 2.1, 2.2

潤滑剤は使用しなかった。図3はその金型の概観図である。成形結果の詳細は後述する。

成形した小球はバリを除去し、形状と寸法を整えるため図4のような転動工具で仕上げた。小球の直径ごとに内部のスペーサーを交換して溝高さを調整している。図5は転動工具で仕上げた小球の顕微鏡写真である。低倍率では比較的良好な形状に見えたが、拡大してみるとフライス加工した転動工具の表面の筋目が小球表面に転写されているのがわかる。

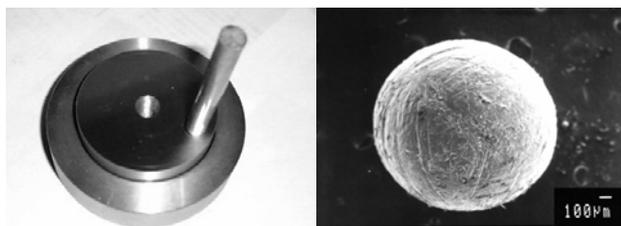


図4 転動工具 図5 Sφ1.5 アルミニウム球

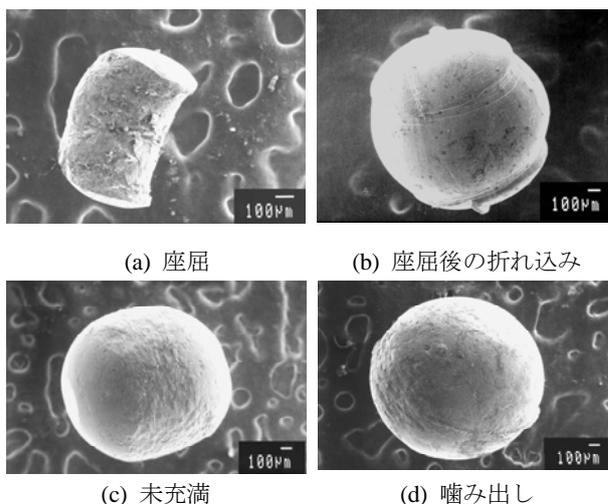
3. 球成形時の形状不良と成形限界

図6(a)~(d)は円柱素材を球成形金型で圧縮した場合の形状不良の例である。図6(a)は円柱素材の高さ一直径比が大きいときの圧縮中に生じる座屈現象の例である。この写真は圧縮の途中で止めた場合のものであるが、最後まで圧縮した場合、成形された小球には折れ込みが生じる。図6(b)はその例である。図6(c)および図6(d)は直径 $d_0=1.0\text{mm}$ 、高さ $h_0=2.2\text{mm}$ および $d_0=1.0\text{mm}$ 、 $h_0=2.3\text{mm}$ のアルミニウム円柱粒子を直径 $D=1.5\text{mm}$ の球金型で成形した例を示している。上下2つ割り金型の上下方向は図6(c)ではほぼ左右方向、図6(d)ではほぼ上下方向である。噛み出し方向はそれに対して直角方向である。図6(c)では天地方向に未充填部が見られるが、水平方向にも未充填部があり噛み出しは見られない。図6(d)にも天地方向に僅かな未充填部はあるが、水平方向には噛み出しが生じている。これらの形状不良が生じない成形範囲について検討した結果を以下に記す。

3.1 座屈限界

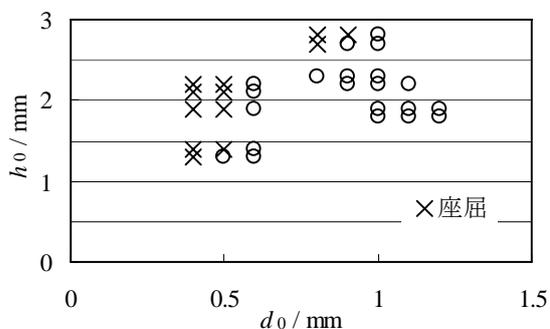
図7(a)および(b)はアルミニウムおよびはんだの座屈限界の実験結果である。図中の右側のデータは直径1.5mm、左側のデータは直径0.8mmの球金型で成形した場合の結果である。これらの図から、座屈が生じる限界高さ一直径比は一定ではなく、直径が小さくなるにつれて急激に小さくなるのがわかる。この座屈限界を直径が小さいほうへ外挿すると、直径が0.2~0.3mm程度で高さが0mmになるので、このあたりが金型成形で小球を成形できる限界であると予想される。直径が小さくなると座屈限界高さ一直径比が急激に小さくなる理由については明らかになっていない。人が材料を金型に設置するときの位置決め精度には限界がある。そのため円柱素材の寸法が小さくなるほど球金型上下方向中心軸に対する円柱素材中心軸の偏心量が相対的に大きくなり、傾きやすくなることが一因ではないかと推測した。しかしながら、比較のために行った平行板によ

る円柱粒子の圧縮結果にも同じような傾向が見られた。図8はその一例であるが、球金型の場合と同様に、直径が小

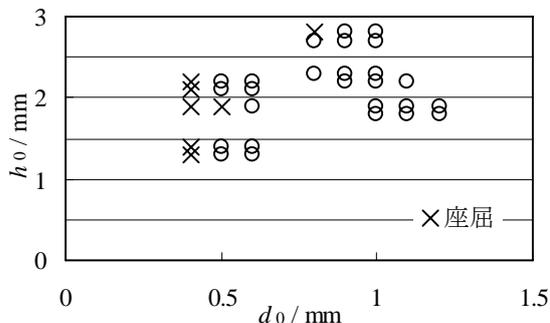


(a) 座屈 (b) 座屈後の折れ込み
(c) 未充填 (d) 噛み出し

図6 小球成形時の形状不良(アルミニウム)



(a) アルミニウム



(b) はんだ

図7 球金型成形における座屈限界

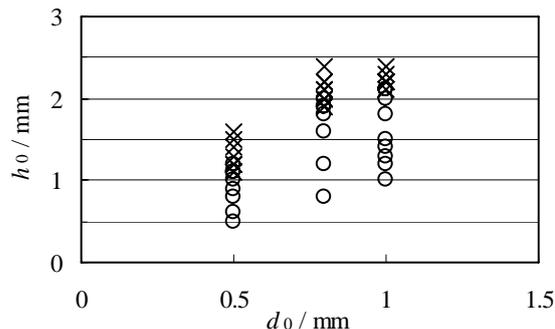


図8 平行板圧縮における座屈限界(アルミニウム)

小さくなると座屈限界高さ一径比が急激に小さくなっている。平行板圧縮の場合、円柱素材の中心軸が平行板の圧縮中心軸より僅かに偏心していても、座屈限界に及ぼす影響はほとんどないと推測されるので、材料の位置決め精度以外の原因があると考えられる。円柱素材の切断時の形状不良、材料組織の結晶粒径や異方性の影響が素材の微小化に伴い大きくなったのかもしれない。なお、平行板圧縮の座屈限界高さ一径比は、球金型の場合よりも小さくなっているが、球金型に比べ材料端面が拘束されにくいためと考えられる。

ところで、図7のアルミニウムとはんだの座屈限界を比較すると、機械的性質の異なる両材料の座屈限界高さ一径比がほぼ同じ値になっているが、この原因についてさらに検討してみる。

短い円柱の座屈限界高さ一径比は、Shanleyの接線係数理論に体積一定則を適用し、素材をn乗硬化型塑性体とすると

$$\frac{h_0}{d_0} = 2.24\sqrt{kn} \quad (1)$$

d_0, h_0 : 圧縮前の円柱直径および高さ

k : 円柱両端の固定係数

n : 加工硬化指数

のように表すことができる⁵⁾。この式より、アルミニウムの加工硬化指数を $n=0.25$ 、素材両端の固定条件を両端固定($k=4$)と仮定すると、座屈限界高さ一径比は2.24となり、この値以上で座屈を生じることになる。図9は座屈限界高さ一径比2.24の直線を図7(a)上に示したものである。実験結果のほうが計算値よりも大きくなっている。接線係数理論では、短柱座屈のときに無視できないせん断応力は考慮されていないため、通常、実験結果よりも座屈限界高さ一径比が小さめに算出されるが、実用上は安全側になる。式(1)より円柱素材の両端の固定条件が一定の場合、座屈限界高さ一径比は加工硬化指数のみの関数となるので、アルミニウムとはんだがほぼ同じ限界高さ直径比になったことはこの式からは説明ができない。

図10はアルミニウムとはんだの小円柱($d_0 = \phi 1.0\text{mm}$, $h_0 = 2.0\text{mm}$)を平行板で10%、30%および50%に圧縮した場合の顕微鏡写真である。アルミニウムは初期高さ $h_0 = 1.6\text{mm}$ ではたる形に変形したが、2.0mmでは高さ減少率30%で座屈を生じた。はんだは実験を行った $h_0 = 1.6\text{mm}$ 以上の円柱試験片のほとんどが、変形初期の段階で一旦座屈しかかった。そしてその形状は“く”の字型だけではなく、試験片の上下端面を潤滑した場合の座屈変形に見られる上下面が左右にせん断変形した形になることが多かった。これは、線材の巻きぐせが完全には取りきれないことや試験片をカッターで切断して製作したことにより、僅かな曲がり、ばり、だれなどが生じ中心軸に対して非対称な形状になっていたためと考えられる。はんだは軟らかいため、この初期形状不良の影響を受け一旦座屈しかかるが、上下端面の摩擦拘束のため、結局 $h_0 = 2.0\text{mm}$ まではほぼたる形になった。

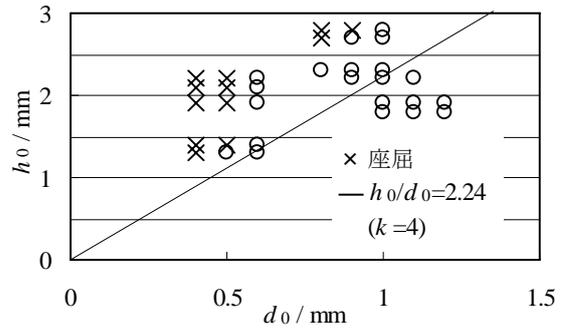
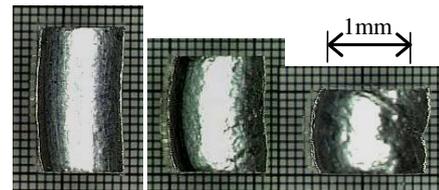
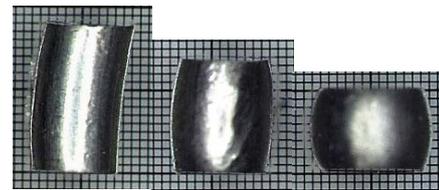


図9 座屈限界(接線係数理論との比較)



(a) アルミニウム



(b) はんだ

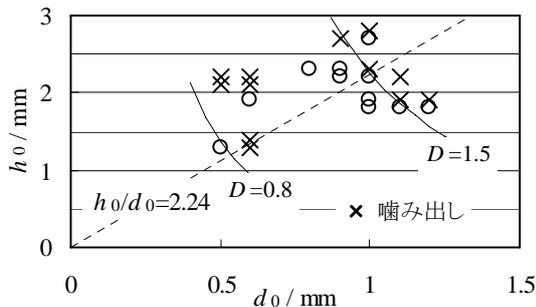
高さ減少率：左 10%、中 30%、右 50%

図10 圧縮後の形状($h_0/d_0=2.0$, 圧縮速度 5mm/min)

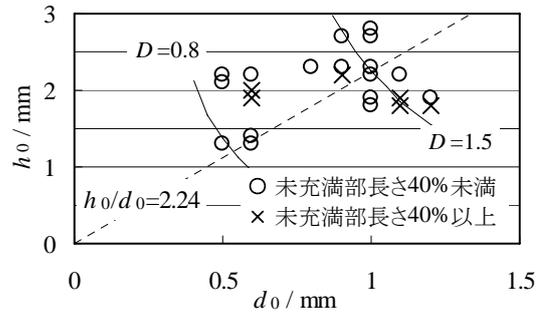
球金型による座屈の判定は、成形後の小球の折れ込み状態から判断していたが、上記の実験結果のように、はんだの場合、圧縮中一時的に塑性座屈状態になってもそれ以上座屈が進行せずに変形する場合があるので、座屈限界高さ直径比がアルミニウムと同程度になったと考えられる。

3.2 噛み出し限界

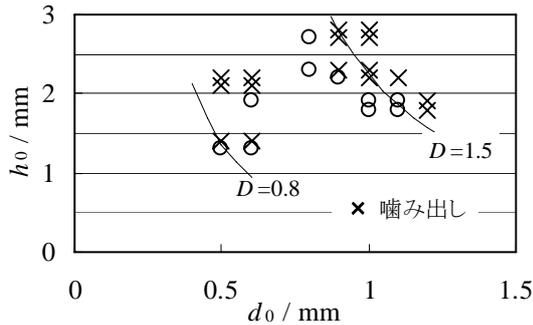
図11はアルミニウムおよびはんだ球成形時の噛み出しに対する素材の寸法条件の影響を示している。×印の場合に噛み出しが生じている。図には直径 $D=0.8$ および 1.5mm の球体積と同じ体積になる円柱の高さ一径比の関係を表す線も示してある。円柱素材が球金型のキャビティ内を満たしてから噛み出しが生じると仮定すれば、この曲線の上側で噛み出しが生じることになる。実際には、後述のように未充填を残したまま噛み出しが生じること、小円柱が微小になるほど切断後の寸法精度が相対的に低下することなどのために、特に、直径 0.8mm の小球側でばらつきが大きい。また、アルミニウムの結果には接線係数理論から求めた座屈限界高さ一径比2.24の直線も示してある。既述のように、この座屈限界高さ一径比は、通常、実験値より小さめに算出されるが、円柱素材直径が小さくなると実験値は急激に小さくなり、図9を参考にすると円柱直径が 0.3mm 前後でこの関係は逆転すると推定される。ところで、噛み



(a) アルミニウム

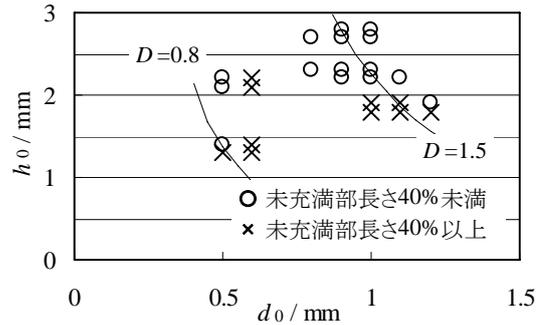


(a) アルミニウム



(b) はんだ

図 11 噛み出し限界



(b) はんだ

図 12 未充填部

出しについては、金型のキャビティ部の孔型形状を工夫し、逃がし部分を設けることにより、実質的な噛み出し限界をかなり向上させることができると考えられる。また、噛み出しに関しては、小球直径が小さくなると急激に噛み出し限界高さが低下するという事は考えにくい。これら2つのことを考慮すると、球の直径が1.5mmより小さい小球の成形性においては、噛み出し限界よりも座屈限界が支配的であると推定される。

3.3 未充填部の影響

未充填部の大きさは、未充填部長さ(投影円の直径)を球の直径で除した値の%表示で定義した。図12はアルミニウムとはんだの未充填部長さを40%を境として表示したものである。図11と同様、球金型のキャビティ体積を表す線と、アルミニウムの場合には座屈限界高さ一直径比の直線も示してある。計算上は、金型キャビティ体積を表す線より下で未充填が生じることになるが、実際には、未充填を残したまま噛み出しが生じるのは前述のとおりである。直径1.5mm球の成形では、金型キャビティ体積を表す線付近でも、高さ一直径比が小さい側で未充填を生じやすいことがわかる。直径0.8mm球の結果には金型キャビティ体積を表す線よりかなり上側でも未充填が見られる。今後、この原因の検討は必要であるが、座屈限界と噛み出し限界が交差する付近であれば、著しい未充填は生じなさそうである。したがって、未充填現象が良好な形状を得るための条件に対して大きく影響することはないといえる。

4. まとめ

金型成形による小球製造は、アトマイズ法などの粉末製造法と比べると形状・寸法精度は高いものの、微細化には限界があるように感じられる。小球化に関してまとめると

- (1) 球成形時に形状不良が生じにくい円柱素材の寸法は、座屈限界と噛み出し限界から決定することができるが、特に、球粒子が微小になると座屈限界の影響が大きくなる。
- (2) 球粒子が微小になると円柱素材の座屈限界高さ一直径比は急激に小さくなる。実験結果から推定すると成形可能な小球直径の限界は0.2~0.3mm程度である。
- (3) 座屈を生じにくくして成形限界を向上させるには、素材円柱の形状精度を上げるための切断技術、素材円柱を精度よく金型に設置するための位置決め法やハンドリング技術が必要である。

謝辞

本研究の一部は、天田金属加工機械技術振興財団の研究助成によって行われたことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 若林隆夫：粉体および粉末冶金，10-3(1963)，83-87
- 2) 島進：塑性と加工，27-309(1986)，1125-1131
- 3) 水沼ほか：平13春塑加講論(2001)，247-248
- 4) 高橋ほか：第52回塑加連講論(2001)，389-390
- 5) 工藤英明：塑性学，(1968)，123-125，森北出版