

発泡アルミニウム用圧粉体を成形する 冷間反復加工

森 謙 一 郎

豊橋技術科学大学

発泡剤粉末を混合した金属粉末を圧粉体に成形し、その圧粉体を加熱するとガスが発生すると同時に圧粉体も軟化して圧粉体が膨らんで発泡金属を製造できる。圧粉体は現状熱間塑性加工されるが、それを冷間塑性加工によって成形する方法を示す。冷間反復加工を発泡金属の圧粉体の成形に応用し、粉末粒子に大きなせん断変形を与えて強固に接合し、加熱時に発生したガスが外部に流出しないような圧粉体を冷間成形する。

1. はじめに

自動車・航空機などの輸送機器において軽量化と安全性向上のために、発泡金属の実用化が期待されており、発泡金属は振動吸収性、防音性、断熱性にもすぐれている。金属粉末を圧粉成形して焼結する通常の粉末冶金材よりも、発泡金属は内部に多くの空隙を含むことができ、相対密度はかなり低くなる。発泡金属において発泡アルミニウムが発泡しやすく最も研究が進んでおり、一般に攪拌されているアルミニウム合金溶湯に発泡剤である水素化チタンを添加すると、水素ガスが発生して発泡が起きる。熔融法では、相対密度が低い発泡体を製造できるが、比較的大きな発泡体を製造して機械加工によって任意の形状に成形されており、材料歩留りが高くない。

発泡剤粉末を混合した金属粉末を適当な塑性加工によって圧粉体に成形し、その圧粉体を加熱するとガスが発生すると同時に圧粉体も軟化して発泡金属を製造できる^{1), 2)}。圧粉体を金型内で発泡させるとネットシェイプ成形が可能になり、材料歩留りが向上し、発泡剤の分散も容易である。また、圧粉体を押し出しながら発泡させて金型に充填する方法も開発されている³⁾。発泡アルミニウムでは、アルミニウム粉末と水素化チタン粉末を混合して圧粉成形を行っている。圧粉体の加熱において、発生した水素ガスが発泡体の外部に流出すると発泡しなくなり、

ガスを流出しにくくするために圧粉体を熱間加工することが一般的に行われている。小橋ら⁴⁾は、冷間圧粉成形、熱間圧粉成形、熱間押し出し加工によって圧粉体をそれぞれ作製して発泡特性を調べており、熱間押し出しによる圧粉体は大きく発泡するが、冷間圧粉成形体はほとんど発泡しないことを報告している。熱間押し出し圧粉体では粉末粒子は冶金的に接合しているが、冷間圧粉成形体では機械的な接合が主であり、少しガスが発生して膨張すると、引張応力が作用し粒子が離れて隙間ができガスが流出して発泡しなくなる。熱間押し出し加工では、金型にヒーターを内蔵して装置が複雑になるため、冷間加工だけで圧粉体を成形する方法が望まれている。

冷間圧粉成形では、粉末粒子は大きな圧縮応力を受けているが、せん断応力は大きくなく、粉末粒子は冶金的には接合しにくい。粉末粒子を強固に接合するために、冷間圧接のように大きなせん断変形を粉末粒子に与えることが必要になる。最近微細結晶粒を得るために、強加工の研究が盛んに行われているが、強加工を応用すると粉末粒子に大きなせん断変形を与えることができる。近藤ら⁵⁾は、マグネシウム合金粉末の固化において反復式塑性加工法を提案しており、後方押し出しと圧縮を繰り返すことによって粉末粒子に強加工を加えて結晶粒を微細化し

ている。反復加工は粉末粒子に強加工を加えることができ、冷間においても粉末粒子を冶金的に接合できる可能性があり、発泡金属圧粉体の成形法として利用できる。

本研究では、冷間反復加工を発泡金属の圧粉体の成形に応用し、粉末粒子に大きなせん断変形を与えて強固に接合し、加熱時に発生したガスが外部に流出しないような圧粉体を冷間成形した。

2. 発泡金属圧粉体のための冷間反復加工

発泡アルミニウムの粉末法では、加熱によって発生する水素ガスが圧粉体から流出しないようにする必要があり、粉末粒子を強固に接合させる必要がある。冷間圧粉成形では、粉末粒子は強固に接合しないため、圧粉体は加熱によってあまり発泡しない。

粉末粒子を強固に接合するために、図1に示す冷間反復加工を応用した。金属粉末と発泡剤を混合し

てダイス内に充填し、平坦パンチで圧縮して円柱状圧粉体を成形する。次に、円柱状圧粉体をテーパパンチで後方押し出しにより容器状に成形し、それを平坦パンチで圧縮して円柱状に戻した。これを繰り返すことによって粉末粒子に大きなせん断変形を与えて粒子を強固に接合する。ここで、最初に円柱状圧粉体を成形したときを反復加工回数 $n=0$ とし、後方押し出しと容器圧縮を1回と数えた。

圧粉成形では、焼なましされた純アルミニウム粉末(平均粒径 $210\mu\text{m}$) に添加割合 α の水素化チタン粉末(平均粒径 $45\mu\text{m}$) を混合した圧粉体を冷間反復加工した。反復加工回数 n を変化させて発泡率に及ぼす影響を調べた。後方押し出しされた容器の深さは 15mm とし、圧粉体の高さと同径は 10mm であり、平坦パンチの成形圧力は 380MPa とした。また、圧粉体の発泡率を向上させるために、圧粉体にシリコン粉末(平均粒径 $10\mu\text{m}$) を添加割合 β で混合した。

発泡実験では、 740°C に加熱した電気炉に圧粉体を入れて約 180s 保持し、炉から取り出した後送風で冷却した。加熱効率を向上させるために、電気炉内に厚さ 10mm の鋼板を敷き、その上に圧粉体を置いた。圧粉体および発泡体の相対密度は、アルキメデス法から測定した体積を用いて計算された。また、発泡アルミニウムの気孔平均直径は気孔の断面積から求めた。

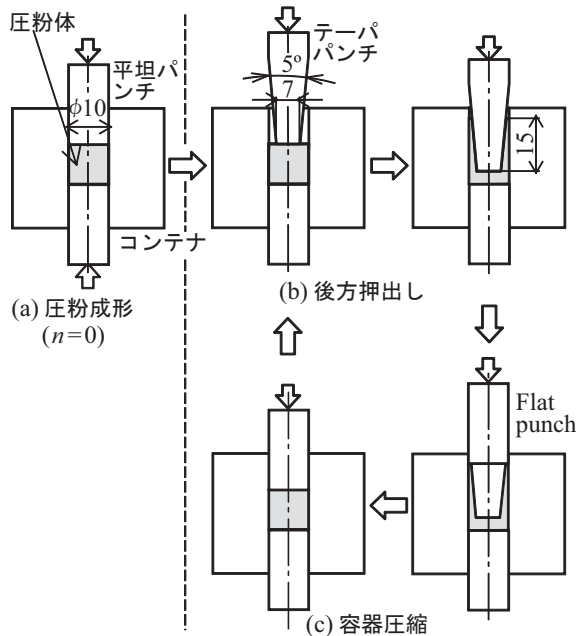


図1 発泡金属圧粉体のための冷間反復加工

3. 冷間反復加工による圧粉体の成形

冷間反復加工によって得られたアルミニウム圧粉体の断面を写真1に示す。ここで、 ρ は相対密度であり、冷間圧粉成形だけでも 0.99 と非常に高くなる。冷間圧粉だけで成形された反復加工回数 $n=0$ の圧粉体では、アルミニウム粉末粒子の境界が観察され、粒子が機械的にしか結合していない。一方、冷間反復加工を行った $n=2$ では材料内に大きな流動が生じており、粉末粒子の境界がなくなって冶金的な接合が観察され、また平坦パンチで圧縮された容器の内面痕は観察されなく内面も接合している。

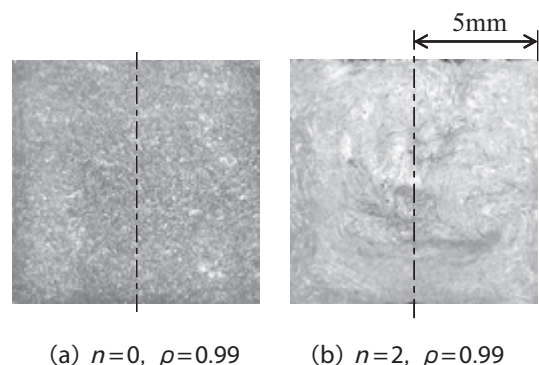


写真1 冷間反復加工なしとありのアルミニウム圧粉体の断面

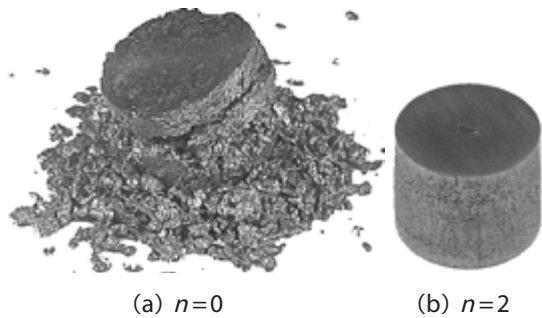


写真2 冷間反復加工なしとありの圧粉体の10%冷間単純圧縮

冷間反復加工によって粉末粒子が強固に接合されているかを調べるために、圧粉体を冷間単純圧縮した。写真2に示すように、冷間圧粉成形だけでは粉末粒子は分離して圧粉体は粉々に破壊するが、冷間反復加工を加えることによって粉末粒子は強固に接合して粒子の分離がなくなり、圧粉体は塑性変形している。

4. 冷間反復加工された圧粉体の発泡

冷間反復加工された圧粉体を電気炉で加熱して発泡させた。水素化チタン粉末添加割合 $\alpha=1.5\text{mass}\%$ 、 $n=0, 2$ における圧粉体および発泡体を写真3に示す。 $n=0$ の発泡体は一部分しか発泡していないが、冷間反復加工を行うことによって発泡体は全体的に膨らんでおり、発泡は大きくなる。

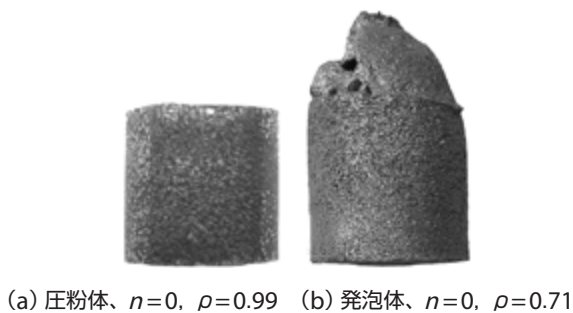


写真3 冷間反復加工なしとありの圧粉体および発泡体

$\alpha=1.5\text{mass}\%$ 、 $n=1, 5$ における発泡体の断面を写真4に示す。 $n=1$ では発泡体の一部に気泡が集中して気孔数が少ないが、 $n=5$ では全体に気泡が分布し気孔数が多い。反復加工回数を多くすることによってガスが流出しなくなって発泡率が向上する。

$\alpha=1.5\text{mass}\%$ における発泡体の相対密度と反復加工回数の関係を図2に示す。比較として、冷間圧粉成形後押し比4の熱間押しを行って製作された圧粉体の発泡率も示した。反復加工回数の増加とともに発泡体の相対密度が減少し、約400℃の熱間押

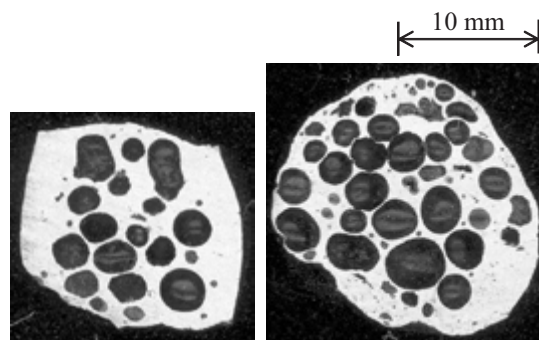


写真4 $\alpha=1.5\text{mass}\%$ における発泡体の断面

出し加工とほぼ同等の値が得られている。熱間押しでは冷間圧粉成形装置の他にヒーターを内蔵した押し装置が必要になるが、冷間反復加工では冷間圧粉成形装置を利用でき、加工が簡単である。

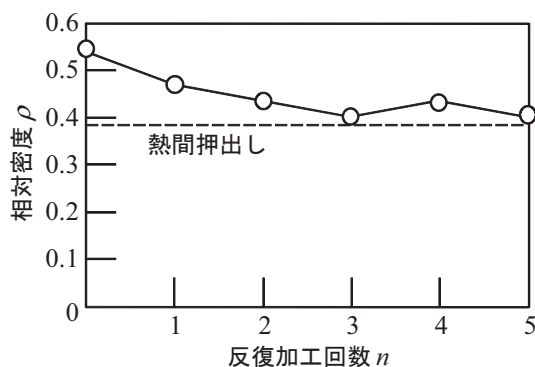


図2 $\alpha=1.5\text{mass}\%$ における発泡体の相対密度と反復加工回数の関係

反復加工回数と水素化チタン粉末添加割合を変化させたときの発泡体の発泡状態を図3に示す。水素化チタン粉末添加割合 α を増加させると気孔は局部的に大きくなる。

発泡アルミニウムでは、水素化チタン発泡剤から水素ガスが発生して膨らむが、純アルミニウムでは

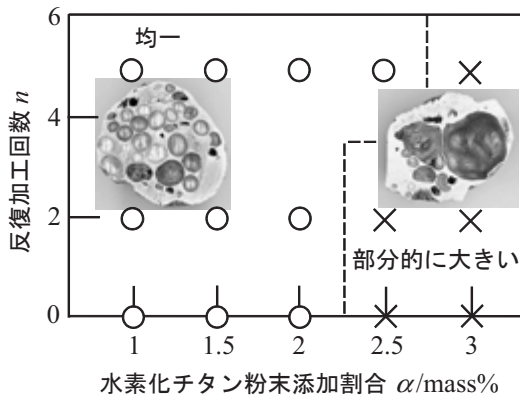


図3 発泡挙動に及ぼす反復加工回数と水酸化チタン粉末添加割合の影響

液相になって粘性が低すぎて水素ガスを圧粉体に内包しにくく、高い発泡率が得られない。そこで、シリコン粉末を添加することによって、加熱中の圧粉体を固液共存状態にさせて粘性を増加させ、圧粉体に水素ガスを内包しやすくした。

シリコン粉末添加割合 $\beta=0$ と 4 mass% における発泡体を写真5に示す。シリコン粉末を添加することによって、発泡体は大きく膨らんでおり、シリコン粉末の添加は発泡率向上に有効である。

相対密度および平均気孔径とシリコン粉末添加割合の関係を図4に示す。シリコン粉末添加割合 β の増加とともに相対密度 ρ が減少し、気孔直径は増加する。シリコン粉末を 1 mass% 以上添加することに



(a) $\beta=0\text{mass}\%$, $\rho=0.48$ (b) $\beta=4\text{mass}\%$, $\rho=0.27$

写真5 シリコン粉末添加なしとありの発泡体

よって相対密度が 0.37 以下になって水に浮く発泡体 が得られた。 $\beta=4\text{mass}\%$ において ρ が 0.27 と最小 になるため、以下の実験では $\beta=4\text{mass}\%$ を用いた。

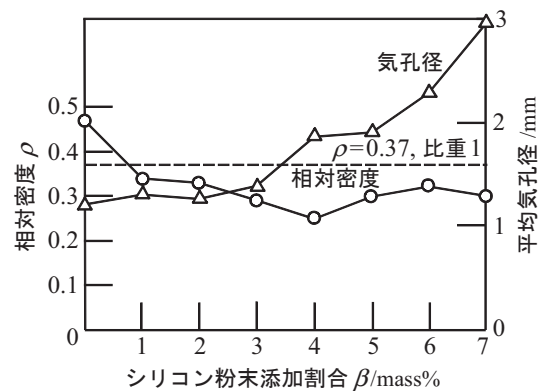


図4 相対密度および平均気孔径とシリコン粉末添加割合の関係

5. 複数個の圧粉体の金型内発泡

大きな発泡体を得るためには、大きな圧粉体を冷間反復加工によって成形する必要があるが、成形圧力が大きくなって困難になる。そこで、複数個の小さな圧粉体を発泡成形して、発泡中に結合させて大きな1個の発泡体を得ることを試みた。図5に示すように、横置きにした2個の圧粉体を円筒金型に設置し、 $T=740\sim 800^\circ\text{C}$ に加熱した電気炉の中に金型を入れ、加熱時間 $t=90\sim 180\text{s}$ 保持した後、金型を取り出して冷却した。

発泡挙動に及ぼす加熱温度と加熱時間の影響を

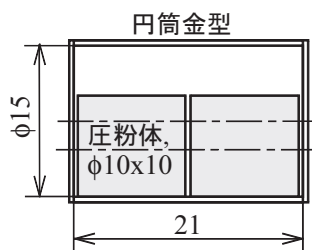


図5 複数個の圧粉体から1個の発泡体の作成

図6に示す。加熱不足による発泡不足を△、良好な発泡を○、過加熱によるガス抜けを×でそれぞれ示している。加熱温度 T の増加とともに良好な発泡体

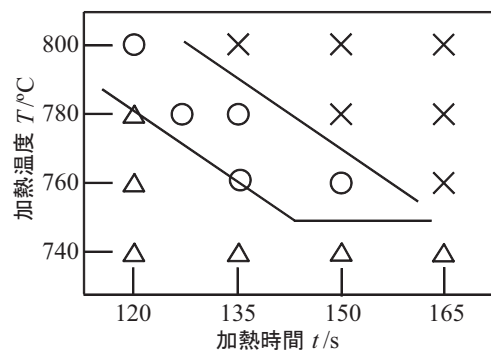


図6 発泡挙動に及ぼす加熱温度と加熱時間の影響

を得るための加熱時間 t は減少する。圧粉体を金型に入れた状態で加熱したため、圧粉体を直接加熱した4章よりも、加熱温度は少し高くなっている。

$t=135$ sにおける相対密度と金型充填率に及ぼす加熱温度の影響を図7に示す。加熱温度 $T=780^\circ\text{C}$ において、相対密度が最も小さく、充填率はほぼ100%になっている。

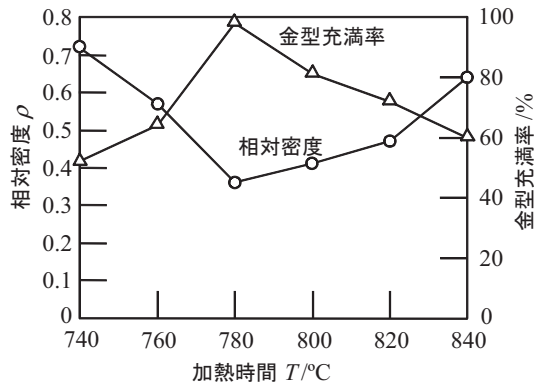
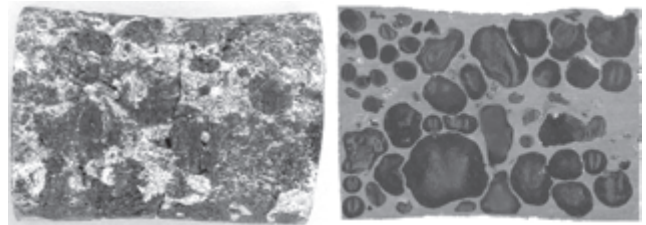


図7 $t=135$ sにおける相対密度と金型充填率に及ぼす加熱温度の影響

$T=780^\circ\text{C}$, $t=135$ sにおける結合した発泡体の外観と断面を写真6に示す。外観では2個の圧粉体の接触部の跡が確認できるが、断面では接触部が観察できなく、十分に結合している。複数個の圧粉体を金型内で発泡させると、1個の大きな発泡体を得ることができる。

圧粉体と金型内発泡実験によって得られた発泡体の冷間単純圧縮試験を行った。圧縮試験から測定さ



(a) 外観 (b) 断面

写真6 $T=780^\circ\text{C}$, $t=135$ sにおける結合した発泡体の外観と断面

れた公称応力-公称ひずみの絶対値の曲線を図8に示す。圧粉体は延性が低く小さい変形で破壊するが、発泡体は十分な延性を有して大きく変形でき、ひずみが増加しても応力が一定となる領域が存在しているおり、衝撃エネルギーを吸収することができる。

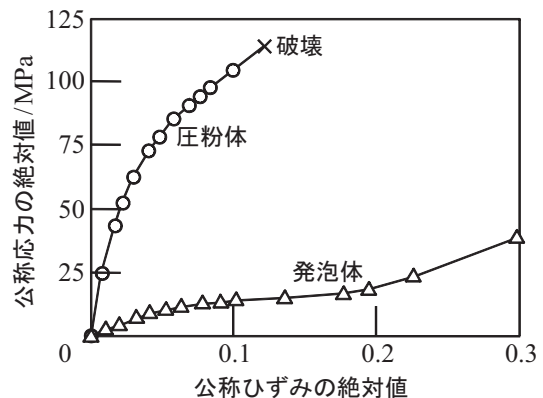


図8 圧縮試験から測定された公称応力-公称ひずみの絶対値の曲線

6. おわりに

発泡金属の圧粉体を成形するための冷間反復加工を開発した。冷間反復加工では、後方押し出しと容器圧縮を繰り返すことによって、圧粉体に大きな変形を与えて粉末粒子を強固に接合できる。冷間反復加工されたアルミニウム圧粉体では、加熱時に水素ガスが外部に流出しにくく、発泡体は全体的に膨らむ。冷間反復加工では、熱間加工と比較して加熱装置が必要でなく、冷間圧粉成形装置を利用でき、加工が簡単になる複数個の圧粉体を金型に入れて発泡させると、結合して1個の発泡体を得られる。

参考文献

- 1) 小橋真：軽金属, 55-7 (2005) 327-332.
- 2) 塩見誠規：機械設計, 51-9 (2007) 22-26.
- 3) 塩見誠規：素形材, 47-6 (2006) 18-21.
- 4) 小橋真・棚橋伸也・金武直幸：軽金属, 53-10 (2003) 427-432.
- 5) 近藤勝義・都筑律子・杜文博・鎌土重晴：軽金属, 43-4 (2004) 275-280.