

アルミニウム合金切削粉から作製した材料の機械的特性

日大生産工（学部） ○中村 嘉顕 SUS(株) 岡田 毅
日大生産工 久保田 正広

1. 緒言

温室効果ガス削減が要求される今日、低炭素社会を構築するために、輸送機械の軽量化による環境負荷の軽減、そして循環型（3R）社会の構築が望まれている。

アルミニウム製品を生産・加工する際、一般的には大量の切削屑が排出される。アルミニウムの一般的リサイクルプロセスは、切削屑をスクラップ材として回収した後、溶解鑄造法により再生地金となる。この再生地金は回収された材料より低品位な特性をもった材料となる。ここで問題となるのは、スクラップ材を再溶解する際に大量のエネルギーを必要とすることである。これは、省エネルギー化、CO₂排出量低減の観点からは無視できない要素である。そこで、溶解鑄造法を用いずにアルミニウムを固相のままリサイクルさせるプロセスの確立は、省エネルギー問題や資源枯渇問題を同時に解決することができると考えられる。また、リサイクルプロセス中で切削屑に付加価値を付与させ、切削屑を上回る特性をもったリサイクル材の作製が実現できれば、資源エネルギーなど様々な観点において大きなメリットをもたらすと考えられる。

このような観点から切削工場などで排出されるアルミニウム屑を効率よくリサイクルできれば、上述した目的達成の一助となり得る。

本研究では、メカニカルミリング（以下 MM）法により切削屑に高い付加価値を付与させると同時に固相で固化成形させ、リサイクル材の創製を試みる。MM 法とは、切削屑とボールを同時に攪拌、混合することでボールから付与され

る機械的エネルギーにより粉末を微細に破碎する。この時、同時に粉末に高い塑性ひずみを付与させることができ、機械的性質の向上がはかれる粉末冶金法の一つである。本研究では、製造工程で排出されるアルミニウム合金切削屑（以下 As-received machined chips）を出発原料とし、MM 時間を変化させたときの粉末の機械的特性の変化、As-received machined chips の圧粉体から作製した熱間押出材の機械的特性および断面の組織を調べる。

2. 実験方法

2.1 MM 粉末の作製

本研究で使用した Al-Mg-Si 合金展伸材の切削屑には切削油が含まれているが、その量は少ないので、本研究では使用する As-received machined chips は前処理を施さずそのまま使用した。

精密天秤を用いて 5.0 g の As-received machined chips とミリング潤滑剤として用いるステアリン酸を 0.25 g になるように秤量して、それらの粉末と直径 6 mm の工具鋼製ボール 70 個（70 g）を直径 44 mm×高さ 65 mm の工具鋼製工具容器へ封入した。封入の際は、グローブボックスを使用し、Ar ガス雰囲気中で封入した。

MM 処理は 0.3 ks, 0.9 ks, 1.8 ks, 3.6 ks, 7.2 ks, 14.4 ks, 28.8 ks, 57.6 ks と時間を変化させた。

2.2 材料特性の評価

硬さ試験は、As-received machined chips お

Properties of bulk materials produced from machined chips of aluminium alloys.

Yoshiaki NAKAMURA, Takeshi OKADA and Masahiro KUBOTA

よび MM 粉末をフェノール樹脂に埋込み、エミリー紙で研磨した後、バフ研磨で鏡面仕上げした面を測定面とした。測定には、マイクロビッカース硬度計を用い、荷重 10 g、保持時間 15 s で 15 ポイント測定とした。

X 線回折には、MM 粉末をイソアミルとコロジオンの混合液を用いて試料ホルダーに固定して測定した。測定は、管電流 40 mA、管電圧 60 kV で CuK α 線を用いて回折速度 1.66×10^{-2} deg/s、回折角度 $2\theta = 20^\circ \sim 80^\circ$ の条件で測定を行った。

As-received machined chips の固化成形は、まず、冷間圧縮によって圧粉体を作製し、それらを予備加熱後、熱間押出をして P/M 材を作製した。押出温度は 623 K、673 K と変化させ、2 種類の P/M 材を作製した。押出温度 623 K、673 K の試料はそれぞれの押出温度で 0.6 ks、1.8 ks の予備加熱を施した。

P/M 材の硬さ試験は As-received machined chips の硬さ試験と同様の手順、条件で測定した。

P/M 材の密度は、アルキメデス法によって求めた。P/M 材の実測した密度とアルミニウム合金の理論密度の比から相対密度を算出した。相対密度を算出する際の理論密度は、 2.695 g/cm^3 を用いた。

P/M 材の横断面は光学顕微鏡により観察した。P/M 材の横断面をフェノール樹脂に埋込み、エミリー紙で研磨した後、バフ研磨で鏡面仕上げした後に腐食させて観察した。観察面は押出材の中心部、外周部、それらの中間部とした。腐食溶液にはケラー氏溶液を使用した。

3. 実験結果および考察

Fig. 1 に MM 処理された As-received machined chips の硬さ試験の結果を示す。As-received machined chips の硬さは 93.6 HV であった。As-received machined chips を MM 処理すると MM 1.8 ks まで硬さは低下する傾向

にあり、MM 1.8 ks における硬さは 71.7 HV を示した。一方、MM 3.6 ks から MM 57.6 ks における硬さは、94.1 HV、133.4 HV、151.6 HV、163.3 HV、190.8 HV となり、1.8 ks 以降では硬さが上昇する傾向へと転じている。MM 1.8 ks まで MM 時間の増加に伴って硬さが低下した理由は、容器内のボール同士が激しい衝突を繰り返す際に発生する摩擦熱が影響し切削工程で導入された塑性ひずみが回復したためと考えられる。また、MM 1.8 ks 以降で硬さが増加へと転じた理由は、MM 処理中の摩擦熱による回復より、導入される加工ひずみが上回ったため、粉末が微細になったことによって結晶の粒微細化が促進されたためと考えられる。

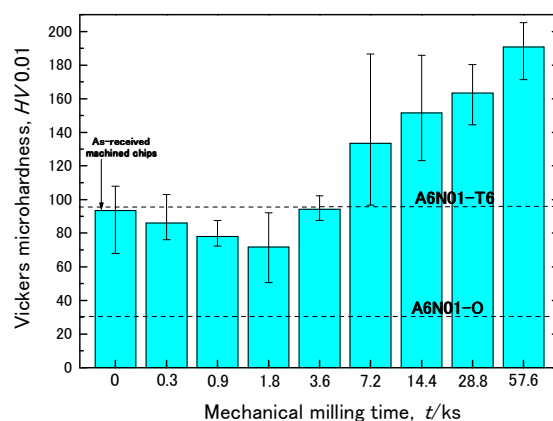


Fig. 1 Vickers micro hardness of As-received machined chips with different amounts of mechanical milling time.

MM 時間を変化させた時の X 線回折結果を **Fig. 2** に示す。全ての MM 時間で Al が同定された。MM 7.2 ks から MM 57.6 ks で化合物を生成している。この化合物のピークは 7.2 ks、14.4 ks で検出されており、28.8 ks、57.6 ks ではブロード化している。この化合物の生成は As-received machined chips の硬さの向上に寄与していると考えられる。**Fig. 1** で As-received machined chips の硬さの変化をみると、この化合物が生成された MM 7.2 ks 以降で、硬さは明確な向上をした。これは、MM 7.2 ks および MM 14.4 ks で分散強化、MM 28.8 ks および

MM 57.6 ks で化合物が微細化されたことで硬さが向上したと考えられる。

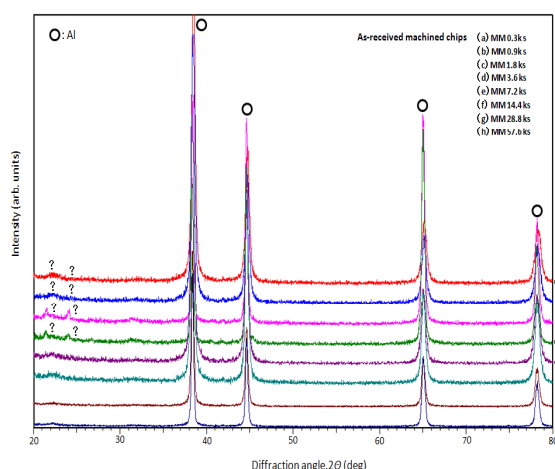


Fig. 2 X-ray diffraction pattern of As-received machined chips with different amounts of mechanical milling time.

Fig. 3 に As-received machined chips から得た圧粉体より作製した P/M 材の硬さおよびアルキメデス法によって算出した相対密度の結果、**Fig. 4** に As-received machined chips から得た圧粉体より作製した P/M 材の断面部分別の硬さを示す。**Fig. 4** では、623K 押出材断面の中心部分を (a)、中心と外周の中間部分を (b)、外周部分を (c) とし、673K 押出材においても同様に (d) (e) (f) とした。**Fig. 3** より、623 K 押出材の硬さは 61.6 HV、673 K 押出材の硬さは 44.1 HV を示した。623 K 押出材より 673 K 押出材の硬さが低い値を示したのは、予備加熱および熱間押出の際の加熱によって、切削工程で As-received machined chips に導入された塑性ひずみが回復したためと考えられる。相対密度は 623 K 押出材で 96.9 %、673 K 押出材で 97.4 %を示した。密度の変化についても同様の理由が考えられる。予備加熱および熱間押出の際の加熱により、圧粉体は軟化するため、温度の増加に伴って押出の際に切削屑同士が密着しやすくなったためであると考えられる。したがって、673 K 押出材の相対密度は 623 K 押出材より高い値を示したと考えられる。**Fig. 4** より、

押出材断面の部分別の硬さは、中心部分より外周部分ほど硬さが高い値を示している。これは、熱間押出の際に中心部よりも外周部分に大きなせん断ひずみが導入されるためであると考えられる。予備加熱および熱間押出の加熱によって塑性ひずみは一度回復したが、押出の際に加わる大きなせん断力によって加工硬化が生じ、せん断力がより大きく加わる観察断面外側ほど硬さは向上したと考えられる。

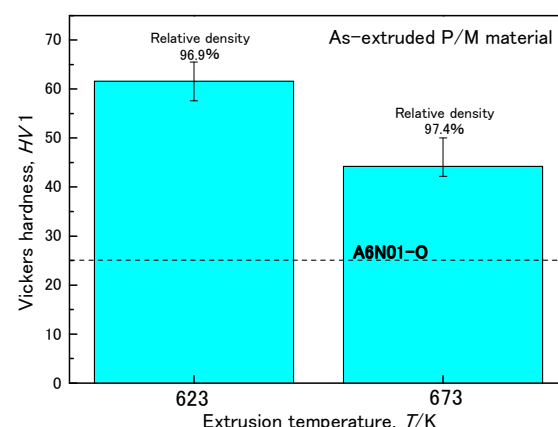


Fig. 3 Vickers hardness and relative density of As-extruded materials with different extrusion temperatures.

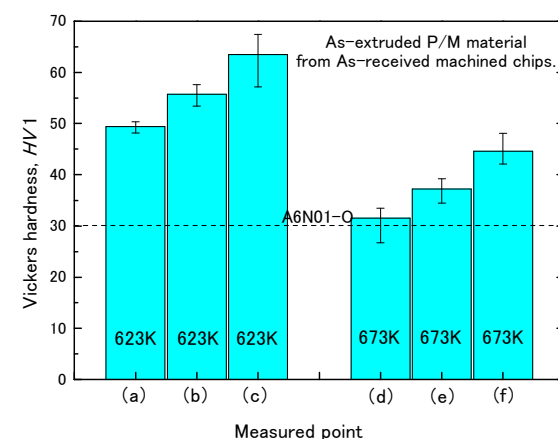


Fig. 4 Vickers hardness of As-extruded materials with different points.

P/M 材の押出方向に垂直な断面を光学顕微鏡により観察した組織写真を **Fig. 5** に示す。623K 押出材断面の中心部分を (a)、中心と外周の中間部分を (b)、外周部分を (c) とし、673K 押出材においても同様に (d) (e) (f) とした。**Fig. 5** の 623 K 押出材はしわ状の隙間になっている

As-received machined chips の界面は, (a) (b) (c) ともにはっきりと確認できる. それに対し, 673 K 押出材では As-received machined chips の界面の間隔は (d), (e) では確認できるものの, (f) では狭くなっている. これは密度の差が関係していると考えられる. また, 観察断面外側へなるにつれてしわの本数が増加するのは, 熱間押出の際, 押出面外周部分の方が中心部分に比べてより大きなせん断力が加わり, 塑性流動が行われていることを示唆している.

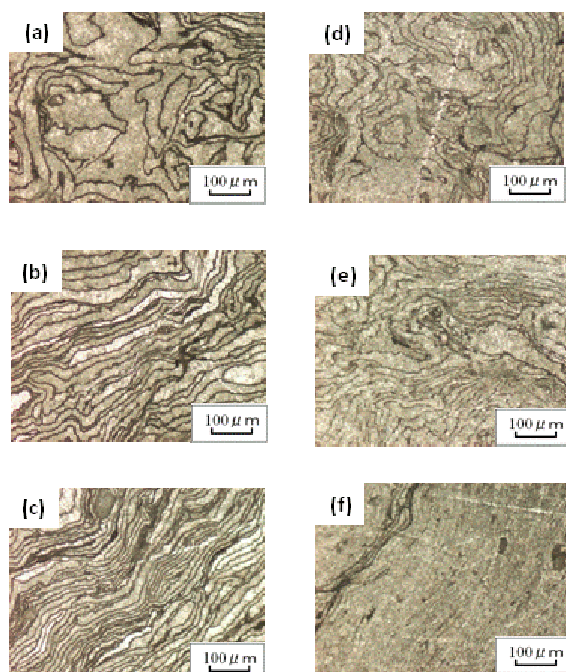


Fig. 5 Optical micrograph of extruded material.
 (a) Center point (b) Middle point (c) Outer point
 (d) Center point (e) Middle point (f) Outer point
 ※(a) (b) (c) : E.T 623 K, (d) (e) (f) : E.T 673 K

4. 結言

- As-received machined chips では 93.6 HV だった硬さは, MM 1.8 ks までは減少する傾向にあり, MM 1.8 ks では 71.7 HV を示し, これは A6N01-T6 の 96HV を下回る. しかし, MM 1.8 ks 以降の硬さは増加する傾向にある. MM 57.6 ks では 190.8 HV を示し, 結果的に MM 57.6 ks では A6N01-T6 の 2 倍ほどの硬さとなった. したがって,

MM 処理による高付加価値の付与は成功したと言える.

- As-received machined chips を MM 処理すると 7.2 ks より長くなると化合物が生成し, 硬さが増加した.
- As-received machined chips から作製した圧粉体を熱間押出加工して得られた P/M 材の硬さは, 予備加熱温度および押出温度の増加に伴って低下した. 一方, 相対密度は予備加熱温度および押出温度の増加とともに向上した.

「参考文献」

- 金子純一, 「メカニカルアロイングの 30 年とアルミニウム基材料学」, 軽金属, No.50, (2000), pp.237-245.
- 金子純一, 須藤正俊, 菅又信, 「新版 基礎機械材料学」, 朝倉書店, (2006), pp.35-37.
- 早稲田嘉夫, 松原英一郎, 「X 線構造解析」, 内田老鶴圃, (1999), pp.119-125