

# 高強度アルミニウム合金の改質リサイクルと塑性加工性

名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻  
教授 金武 直幸  
(平成 23 年度一般研究開発助成 AF-2011014)

キーワード：アルミニウム合金，リサイクル，強ひずみ加工法

## 1. 研究の背景と目的

7000 系の高強度アルミニウム合金は航空宇宙産業で広く用いられており、その多くが機械加工(切削加工)されている。その際、素材の 80~90%が切削屑や加工残材として廃棄されリサイクルされている。しかし、そのリサイクル過程では、他種のアルミニウム合金と共に再溶解されるため Zn など 7000 系特有の合金元素が悪影響し、高価な原素材とは逆に好ましくない廉価な廃棄物となっている。一方、低炭素化社会の要求から車両軽量化の極限が求められる自動車産業では、航空機と同程度の高強度アルミニウム合金の利用展開が望まれるものの、高い材料コストと塑性加工の難しさから、二輪車の一部を除いて満足できる実用化には至っていない。

そこで、7000 系合金の切削屑など廃棄材を、合金組成を変えずに同じ合金として再利用することが望まれる。その一つの方法として、再溶解しないで強ひずみ加工を用いる固相リサイクルプロセスが期待される<sup>1)2)</sup>。金属材料に巨大ひずみを付与する強ひずみ加工法は、その組織制御や高機能化の方法として有力であることが認められている。そして、金属屑を強ひずみ加工して固相のまま素材に再生するリサイクル技術では、同時に組織・材質の改善による機械的塑性や塑性加工性の向上も期待できる。

本研究開発では以下の目的の下、独自に開発した「圧縮ねじり加工法」<sup>3)</sup>により各種実験を実施した。

- 1) 7000 系アルミニウム合金の切削屑を、原材料と同等以上の材質を有する同種合金に再生する固相リサイクル技術を確立する。
- 2) その後の塑性加工(押し出し、鍛造加工など)を可能にするため、高延性・高加工性を有するリサイクル素材を作成

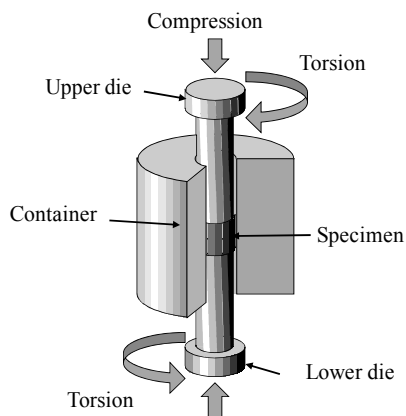


図1 圧縮ねじり加工装置概略図

するための最適加工条件を解明する。  
以下では、それらの研究成果をまとめて報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材料と圧縮ねじり加工

図1に圧縮ねじり加工法の概略図を示す。被加工材を円筒コンテナ内に装入し、上下のダイスによって圧縮負荷とねじり負荷を同時に付与する加工法である。静水圧下で短時間に大きなせん断ひずみを導入できるため、金属粉末や金属チップの緻密固化に有効である。

供試材には 7050 合金(T7451)切削屑を用いた。エタノール中で超音波洗浄を行い切削油や付着物を取り除いた後、40g を油圧プレスでφ40mm (高さ約 12mm) の円柱状に予備成形した後圧縮ねじり加工を行った。図2に切削屑、予備成形体、成形体の外観写真を示す。圧縮ねじり加工条件は圧縮圧力を 100MPa、回転速度を 5rpm で一定とし、加工温度を室温~743K (470°C)、回転回数を 10~50 回の範囲で必要に応じて変化させて固化成形を行った。

### 2.2 固化成形過程および成形体の評価

成形中のトルクと金型(コンテナ)温度を測定した。金型温度は試料から約 3 mm 離れた場所で測定している。成形途中および成形後の円柱試料を縦断面で切断し、光学顕微鏡にて微視組織観察を行った。また、一部の試料について、次のような熱処理を実施した。475°Cで 8 時間保持した後に炉冷する高温焼鈍、475°Cで 8 時間保持した後に水冷し、その後 140°Cで 16 時間保持する T6 処理を行った。

加工後の試料および熱処理後の試料について、微小引張

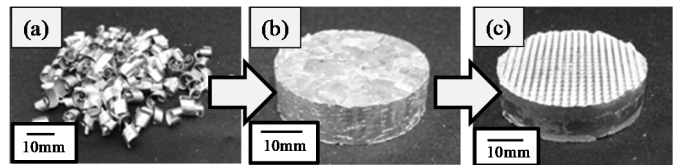


図2 試料外観写真 (a)切削屑, (b)予備成形体, (c)成形体

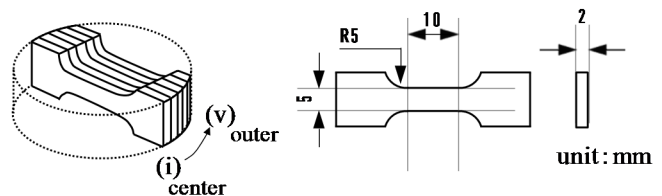


図3 引張試験切り出し位置と形状

試験片を切出して引張試験を行った。図3は引張試験片の切り出し位置とその形状を示す。圧縮ねじり加工後の成形体から平行部長さ 10mm, 幅 5mm, 厚さ 2mmの板状試験片を 5 本切り出し, 室温で引張試験を行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 切削屑の固化成形過程

図4は加工開始温度が室温および 470°Cにおける, 回転回数に対するトルクと金型温度を示す。加工開始温度が室温の場合(図4上), 回転直後にトルクが立ち上がるが, その後 1300 Nmあたりで一定となり, 20回転程度まで変化がない。その後, 数回転で 3000 Nm を超えるまでトルクが上昇するが, その後はなだらかに低下している。金型温度は, 加工発熱によって回転回数の増加とともに高くなっていくが, トルクの変化と対応して, 20 回転程度(温度は 140°C付近)で一気に 50°C以上の上昇があり, その後は再びゆるやかな温度変化となっている。加工温度が 470°Cの場合(図4下), 成形中のトルクや金型温度に大きな変化は無く, ほぼ一定であった。以上のトルク変化を基に, 各図中に示した i から vi までの各段階で成形途中の試料を取出して微視組織を観察した。

#### 3.2 微視組織

図5は, 図4中に示した各成形段階(i~vi)における試料の微視組織写真を示す。なお, 図中に示す円柱試料の観察点にて観察を行っている。室温の場合(図5(a)), トルクが一定の段階 i では, いずれの観察点においても屑界面や, 大きな空隙が観察される。トルクが立ち上がる直前の段階 ii では, 上部(観察部位 3)で屑間の隙間が無くなるほど密になり, 一部変形を受けている屑も観察される。トルク立ち上がり途中の段階 iii では, 上部では屑界面が無く, 組織が変化した固化が起きており, 上部から離れた 8 や 13 の観察位置でも屑が密になっている。その後, ピークトルクの段階 iv からトルクが下降する段階 v にかけて, 固化している部位が上部から試料高さ中心(観察位置 13)へ広がっていき, 最終段階 vi (50 回転後)では, 全体が均一な組織となっている。

470°Cの場合(図5(b)), 圧縮のみ(0 回転)の段階 i では, 屑界面は観察されるものの, 空隙は無く, 成形段階が ii から iii になるにつれて, 屑界面が無くなり, 一部には再結晶後に粒成長していると思われる組織も観察されるようになる。そして, 30 回転後の段階 iv では, 結晶粒径が 30  $\mu\text{m}$  以下の均一な組織が観察された。このように, 加工開始温度によって固化成形過程が異なり, 成形温度が低い場合は急激なトルクおよび温度変化が固化成形の引き金となっている。

#### 3.3 固化成形体の引張特性

図6に, 加工温度 743K(470°C)で各回転回数加工した試料の引張応力-ひずみ曲線を示す。引張試験片切り出し位置は最外周部である。回転回数の増加に伴って引張強度や伸びの向上が顕著に表れ, 30 回転以降で大きな変化は無く固化は完了したと考えられる。引張試験片の位置によって特性が多少異なり, 回転軸に近い試験片では伸びが数%ほど低くなったが, 延性的な破面からも切削屑の固化は確認でき

た。また, このような回転回数による引張特性の変化は, 他の加工温度においても同様の傾向であり, いずれの温度でも 30 回転程度で切削屑の固化が完了するとみられる。

図7に, 回転回数 30 回転で加工温度を変えた試料の引張試験の結果を示す。試験片切り出し位置はすべて最外周部である。加工温度が低い 473K では, 同合金の焼鈍材より高い引張強度と 20%以上の大きな伸びを示した。加工温度が 573K, 673K と高くなると強度が僅かに上昇する一方, 伸びはほぼ半分に低下した。そして, 743K では強度が大きく上昇する結果となった。このように加工温度が高いほど強度が高く伸びが低下する結果になったのは, 強ひずみ加工中あるいは加工後の時効析出によるためと考えられるが, 詳細は今後の課題である。また, 強ひずみ加工のため加工発熱や金型との摩擦発熱もあり, 加工(開始)温度が低いほど加工中の温度変化の影響が顕著となる。いずれにしても全ての加工条件において同合金焼鈍材の強度である約 220MPa を上回るとともに, 10%以上の十分な伸びを示し延性的な破壊挙動を示していることが確認された。

#### 3.4 固化成形体の熱処理性

前節までの研究結果より, 切削屑は 200°C以上の圧縮ねじり加工によって 10%以上の伸びを有するリサイクル素材に固化できることが分かった。しかしながら, その後の熱処理実験

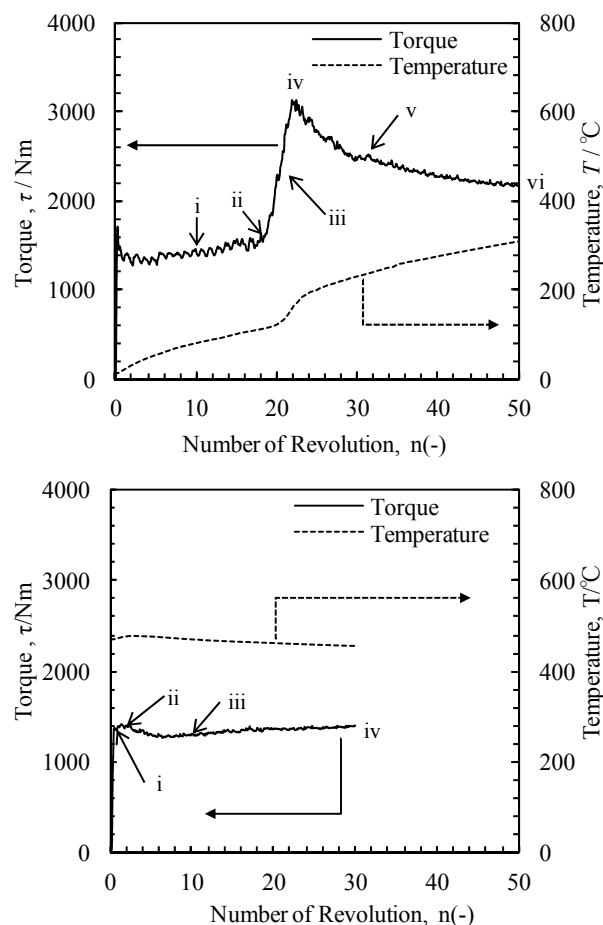


図4 加工トルクと金型温度(加工開始温度, 上: 室温, 下: 470°C)

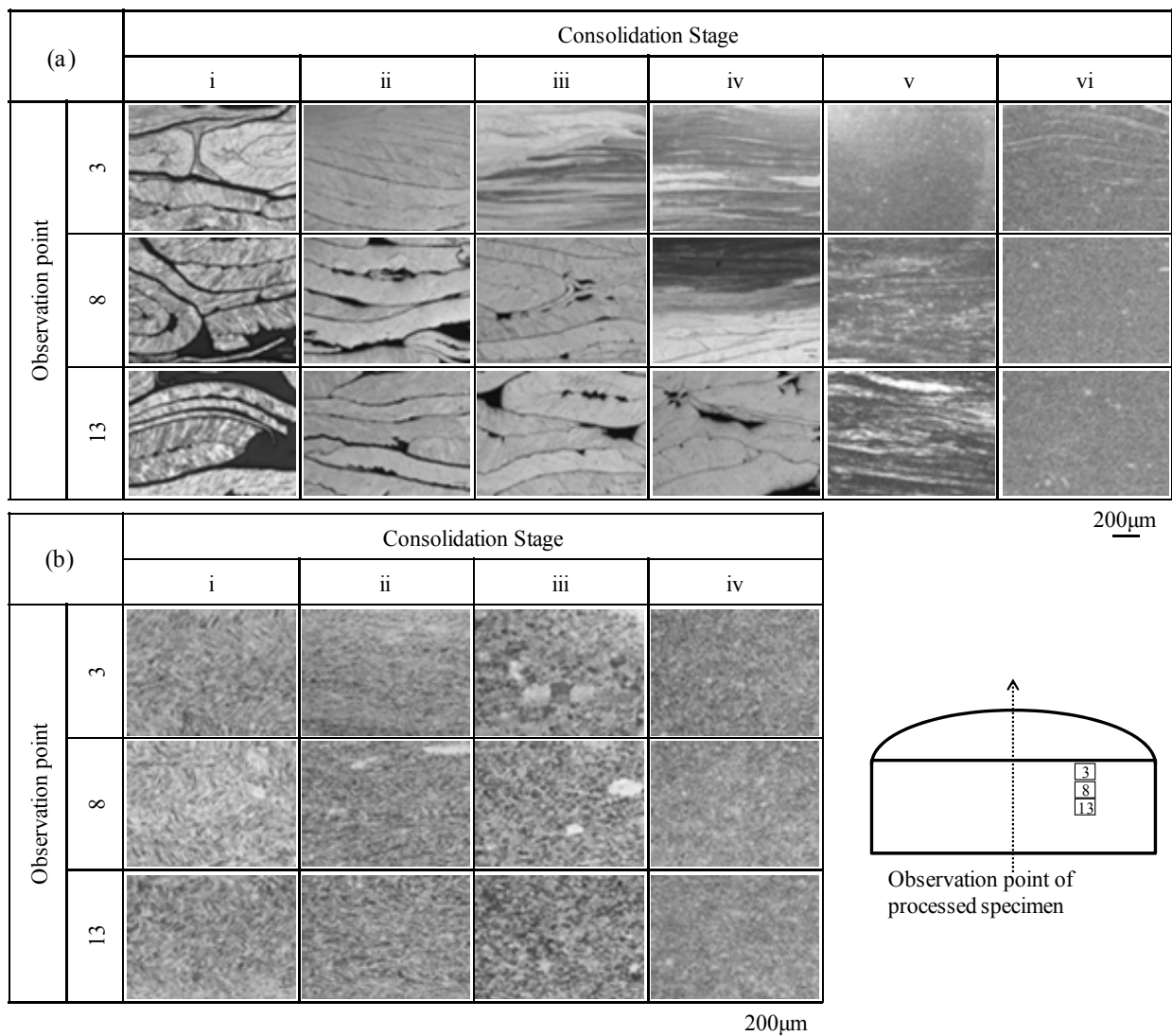


図5 各成形段階における試料内の微視組織写真, (a) 加工開始温度：室温, (b) 加工開始温度：470℃

の過程において、300℃以下の成形体には後述するように加熱後に多数の大きな空隙が発生し、成形体内部に延性を害しない程度の気体が内包していることが予想された。そこで、固化成形過程の切削層の圧密挙動を、成形中の試験機クロスヘッドの変位によって測定した。図8は温度の異なる圧縮

ねじり成形を行った場合のクロスヘッド変位を示している。ここでは、成形温度に達した段階で加圧圧縮し、所定の圧力になった段階でねじり成形を開始している。図では、ねじり加工前の圧縮成形での変位を灰色棒で、ねじり加工開始後の変位を黒色棒で示している。成形温度が高くなると圧縮の段

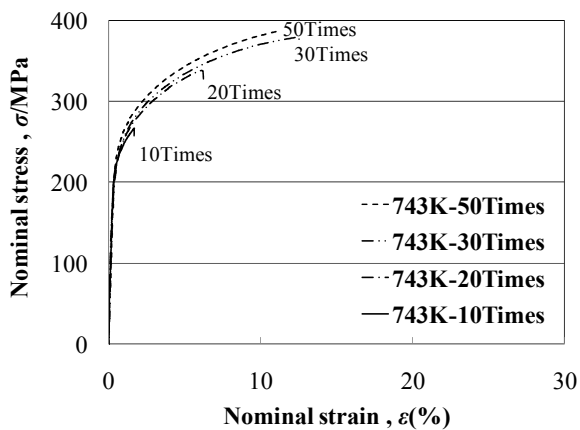


図6 回転回数と引張特性の関係 (加工温度：743K)

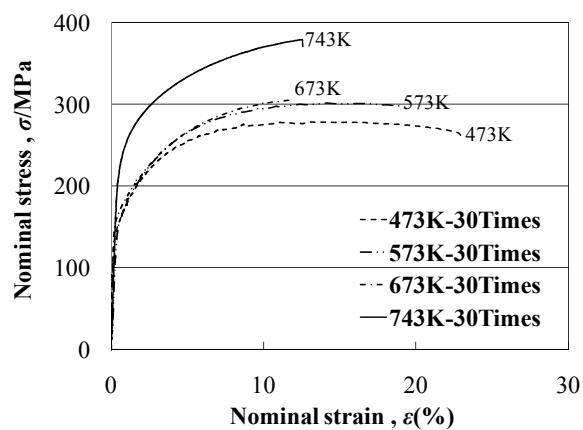


図7 加工温度と引張特性の関係 (30回転)

階での変位増分が増え、ねじり成形中の変位増分が減少している。しかし、いずれの条件でも、最終的には緻密な成形体を得ているため、トータルの変位増分はほぼ同じであり、成形温度は初期の圧縮時と、ねじり成形時との変位増分の割合を変化させている。

一方、図9は低温での圧縮ねじり成形の前に、470°Cで圧縮成形する2段階加工を、470°Cで直接圧縮ねじり成形する場合と比較している。この場合は、熱間圧縮時の変位増分が主となり、ねじり成形中の変位増分はほとんどなくなる。また、熱間圧縮後の成形温度が変化しても、その傾向は変化しなかった。

図10に、各成形体に高温焼鈍を行った場合の微視組織写真を示す。なお、いずれの成形体も焼鈍前の状態では、緻密かつ目立った空隙は観察されていない。通常の圧縮ねじり成形後に焼鈍を行った場合(図10左)、100°Cや300°Cで成形した場合、目視でわかるほどの非常に大きな空隙が観

察された。試料の外周部(観察点 ii)では、それほど多く観察されなかったが、その他の部位では非常に多くの空隙が観察された。一方、成形温度が470°Cでは、大きな空隙は無く、10 $\mu$ m以下の細かな空隙が多数観察された。熱間圧縮後にねじり成形を行い、焼鈍を行った場合(図10右)、通常成形の100°Cや300°Cで観察されたような大きな空隙は観察されなかった。また、470°C成形の場合と比較しても観察される空隙のサイズは小さくなり、その数も減少していた。

以上のように、熱間圧縮後に圧縮ねじり成形を行うことにより、熱処理後の空隙を大幅に減少することが可能となった。この理由として、加工前の予備成形体中の空気の残存が影響していると考えられる。熱間(470°C)圧縮をせずにねじり成形を行うと、ねじり加工前のクロスヘッド変位が少ないことからわかるように、予備成形体中の空気が十分排除できないままねじり加工で緻密化していると考えられ、ねじり加工前に予

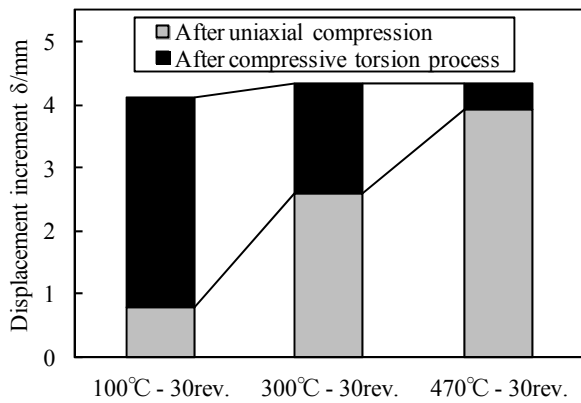


図8 各温度で成形中の圧縮変位量

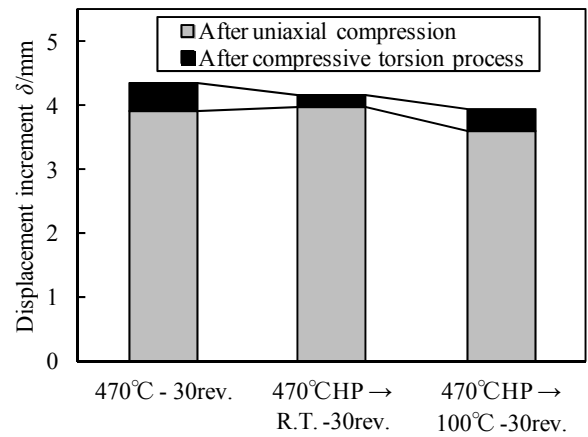


図9 熱間圧縮後の成形中の圧縮変位量

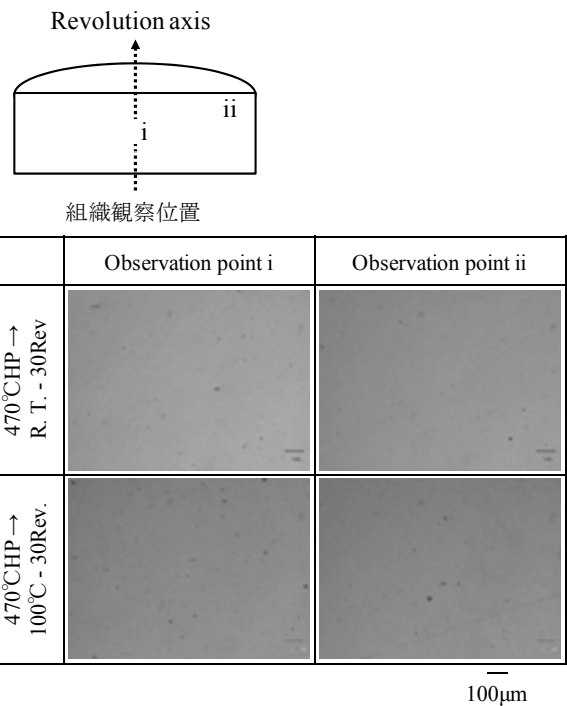
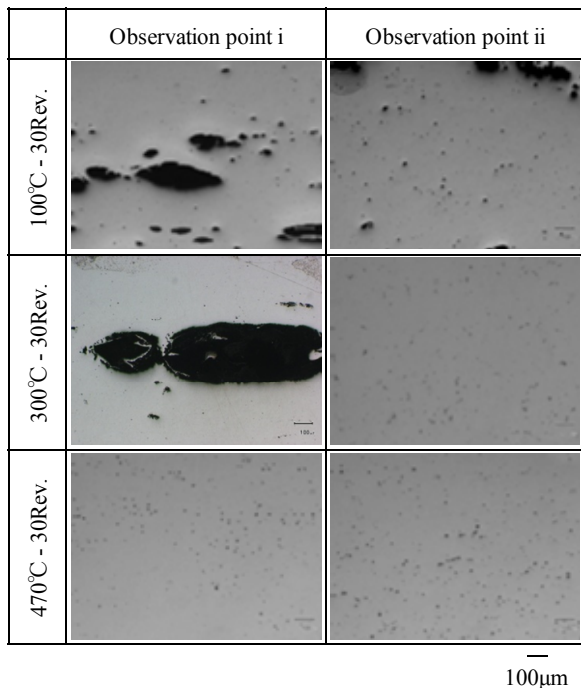


図10 加工条件の異なる成形体の高温焼鈍後の微視組織

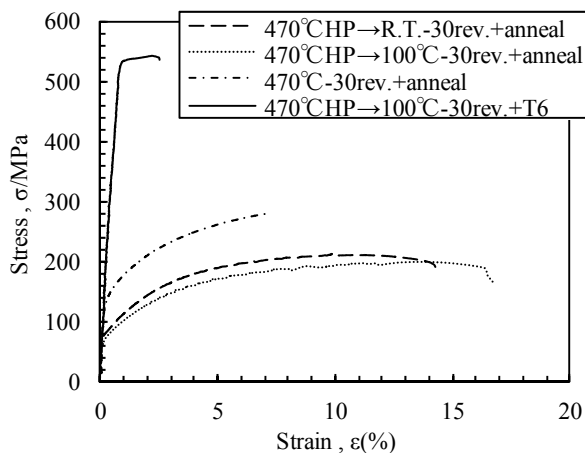


図11 成形体の熱処理後の引張特性

備成形体中の空気を十分に減らすことが重要であると考えられる。7000系の切削屑は時効処理を受けた合金が多く、圧縮ねじり加工で固化成形する前に十分に緻密化しておく加工条件が必要である。

### 3.5 熱処理材の引張特性

図11は470°Cで成形した試料および熱間圧縮後に成形した試料に高温焼鈍あるいはT6処理を行った後の引張の応力-ひずみ線図を示す。470°Cで成形した試料は焼鈍後には300MPa弱の強度を示すが、伸びが7%前後と低い値となっている。一方、熱間圧縮後に室温または100°Cで成形を行った試料の焼鈍後では200MPa以上の強度と15%前後の伸びを示した。伸びの向上は、微視組織中の空隙の減少によると考えられる。一方、T6処理を行った試料は、500MPaを超える高い強度を示したが、伸びが数%となった。T6処理後の伸びの低下については、不明な点が多く今後の課題である。

### 3.6 リサイクル材の押し出し加工

リサイクル材の塑性加工性を確認するため、押し出し加工を行って切削前の原素材と比較検討した。リサイクル材としては、470°Cで熱間圧縮後に150°Cで圧縮ねじり成形した試料を用い、比較材として同合金の切削前の溶製材を用いた。いずれもφ40mmの円柱試料で、焼鈍目的で470°C8時間保持ご炉冷した。押し出し条件は、押し出し温度400°C、押し出し比7.1(押し出し後の直径15mm)、押し出し速度0.22mm/sである。

図12は、両材料の押し出し後の外観写真であり、押し出し先端から後端まで特に差異は見られず、リサイクル材が原材料と同等の良好に押し出し加工ができています。図13は、両材料の押し出し荷重-工程線図である。押し出し荷重についても両者に差は見られず、同等の加工性であると言える。押し出し温度、押し出し比、押し出し速度の影響などについてさらに検討する必要があるものの、固相リサイクル材は溶製原材料と同等に二次加工が可能であると予想される。

## 4. 研究成果のまとめ

圧縮ねじり加工により7050合金切削屑を固相のまま固化成形出来ることを確認し、高強度合金切削屑における固相リサイクルは十分に可能であることが分かった。200°C以上の

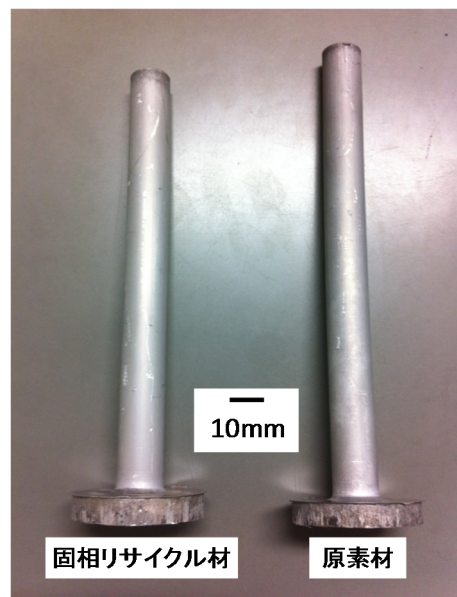


図12 リサイクル材と原素材の押し出し加工

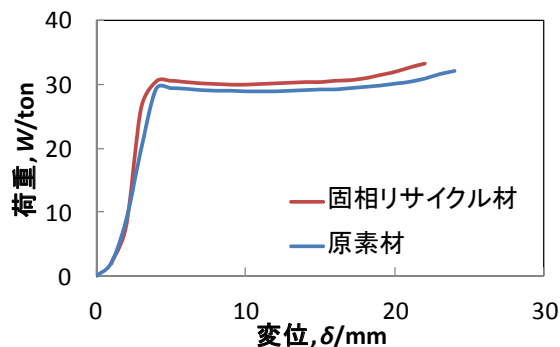


図13 押し出し荷重-変位線図

加工温度で緻密で延性を有する素材に固化成形することが可能であるが、300°C以下の成形体では、その後の加熱処理で粗大な空隙の発生がみられた。従って、400°C以上の高温加工か、高温圧縮成形後の低温加工が適正な固相リサイクル条件である。成形体は同系合金の焼鈍材を上回る強度と10%以上の伸びを有し、その後の熱処理(T6処理など)でも十分な強度が得られるが、延性が多少低い結果となった。固相リサイクル材は溶製原材料と同等に押し出し加工を行うことができ、二次加工も十分可能であると考えられる。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成23年度一般研究開発助成により行われた。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 千野靖正, 馬淵 守: 軽金属, 57(2007), 250.
- 2) 高橋 崇・久米裕二・小橋 眞・金武直幸: 軽金属, 59-7(2009), 354.
- 3) 金武直幸: 塑性と加工, 50-578(2009), 192.