

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：34310

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630030

研究課題名(和文) 超微細結晶アルミニウム合金の製造に向けた高圧ねじり押し連続化研究

研究課題名(英文) Development of continuous high-pressure torsion for the mass production of high-strength aluminum alloy

研究代表者

田中 達也 (Tanaka, Tatsuya)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：70434678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：ねじり押し法は長尺の棒材に対してねじりによりせん断変形を加えながら押し出していく加工法で、構造用金属材料の結晶粒超微細化法である強ひずみ加工(SPD)法の一つである。この手法はSPD法のひとつである高圧ねじる変形(HPT)の弱点であるバッチプロセスを連続化したものであるが、せん断ひずみの局部集中や剛体回転などが存在し、結晶粒微細化の点で効率的な変形ではない。そこで、ねじり率を0から非線形的に増加させることで両者の欠点の克服した、より効果的な金型の設計を行い、微細化に対して一定の効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：Torsion extrusion (TE) is one of severe plastic deformation (SPD), where a long bar billet is subjected to shear strain with extrusion. This is an improved processing of high-pressure torsion (HPT) whose disadvantage is batch processing applicable for only short or small billet. However, in conventional TE, deformation processing is composed of two parts, which are extremely localized straining and rigid body rotation. Thus, the deformation is not efficient in view of grain size reduction and strengthening. In this project, we developed new type of TE where shear straining can be applied in more effective manner by modifying die geometry so that shear strain become more uniform throughout deformation process. We demonstrated the grain size is become smaller than that by the conventional process.

研究分野：材料工学 組織制御

キーワード：教ひずみ加工 結晶粒界 超微細結晶材料

1. 研究開始当初の背景

強ひずみ加工 (SPD) 法によりバルク状のナノクリスタル (NC) や超微細結晶材料 (UFG) の作製が可能である。材料強化法の中でも SPD 法による結晶粒微細化の利点は、(1) 靱性の低下が抑えられる (析出強化等、他の強化法では靱性が著しく低下する)、(2) 純金属にも適応可能である。希少元素の節約が可能で環境負荷が小さく、リサイクルコストが低い、(3) 粒界面積の増大による粒界偏析の希釈効果により粒界腐食、粒界割れ感受性を低減させる。以上の点から UFG のバルク材料は次世代の高強度・高耐食機械構造材料として有望である。SPD 法には HPT 法、ECAP 法などがある。これらの方法はいずれもバッチ処理が基本であり、連続加工が難しく大量生産には不向きである。このため、産業界への移転が進んでいない。一方、SPD 法の連続化に関する研究も行われ、HPT 法を応用したねじり回転押し、圧延ロールと組み合わせた連続 ECAP 方法などが提案されている。著者らは ECAP 法を応用して、ピレットを金型から取り出すことなく、連続的に複数回のパスを加える 6 連 ECAP 法を開発してアルミニウム合金の結晶粒超微細化に成功している。HPT 法はコイン形状の金属を上下の金型により高い静水圧を加えながら回転させることにより、無限のせん断ひずみを加えることができる。この方法で難加工材も含めて多くの材料に適用できる。ねじり回転押しは HPT を連続化させた加工法であるが、金型の一部を数回転させながら少しずつフィードするため、生産性は高くない。そこで我々は長尺のピレットに対して連続的に押しながらかねじり変形を加える方法を考案した。この手法では正方形断面のピレットを基本とし、金型内部のねじれた経路 (チャンネル) を長尺ピレットが連続的に通過しながらねじり変形が受けるしくみになっている。

2. 研究の目的

本課題では上記の連続 HPT 法に対して、変形解析により効果的なせん断変形を与える最適なチャンネル形状を明らかにし、改良された金型による結晶組織微細化への効果を明らかにする

3. 研究の方法

3-1. 金型の設計思想

図 1 は回転角と送り量との関係を表す。図 1 の A のタイプはもっともシンプルなタイプで、ねじり率 (回転角/送り量) が一定であり、金型の作製は容易である。以後、線形ねじりと呼ぶ。しかし、材料はチャンネル部入り口付近でせん断変形を受けた後に、その後は材料が剛体回転に近い変形を受けることが予想される。一方、図 1 の B のタイプはねじり率が送り量とともに上昇するタイプで、せん断変形をチャンネル全体にわたって効果的に加

えることができる。以後、非線形ねじりと呼ぶ。このようにチャンネル形状はねじり率とその変化率の組み合わせで様々なタイプを考案ことができ、金型への負荷、せん断ひずみ量などを考慮して最適な金型形状を決定することが必要である。

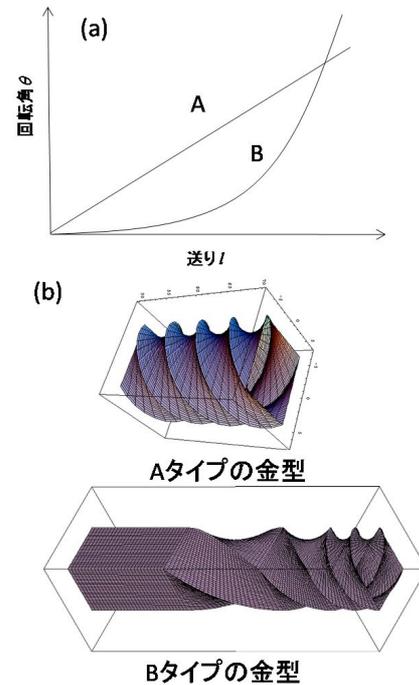


図 1. 線形ねじり (A) および非線形ねじり (B) の金型形状と回転角

3.2 弾塑性解析と金型設計

比較的金型への負荷が小さいアルミニウム合金および銅を想定して、ねじり角度やその変化率など様々なチャンネル形状の金型について汎用有限解析プログラム LS-DYNA により弾塑性変形解析を行う。せん断ひずみ量、応力分布および静水圧、負荷荷重などの予測を行い、効果的にせん断ひずみを加えることができ、金型負荷が少ない金型設計を行う。

3.3. 放電加工による金型製作

高い静水圧を付与する必要があるため、金型は大型で加工精度が要求される。もっとも重要な点である金型内部のチャンネル部は放電加工により穴加工する。おもに次の二つの方法で行う。一つはチャンネル形状と同一のねじれた矩形断面形状をもつ電極を回転させながら放電加工により穴あけ加工する。送り量と回転角は電極のねじり率に合わせる必要がある。この場合は送り量に対してねじり角の増加率は一定となる。電極は任意の曲面加工が可能な数値制御の NC 旋盤を用いて加工する。もうひとつは

チャンネル断面と同一形状の板状の電極を軸方向に送りながら回転させて放電加工する。この場合は送り量にたいして電極の回転角を自由に变化させることでねじり角の増加率を变化させることができるので前項 B タ

タイプのチャンネルの加工が可能である。チャンネル部の精度を高めるために、電極は摩耗量が極力少ないタングステン電極が有力候補である。

3.4 ねじり加工

本研究の最終的目標は連続ラインを想定して、コイル等の棒材を連続的に金型に供給してねじり押し出し加工を行いコイル全体をナノ結晶化することである。しかし、このためには設備費に多額の費用が必要であるため、まずはラボ実験として比較的短い100ミリ程度のピレットを使用して、油圧プレスによりバッチ的にねじり押し出し加工を行う。金型中央部に放電加工により製作されたねじれチャンネルを有する“コア金型”が固定されている。挿入された1本目のピレットにたいして油圧プレスを使ってプランジャー（押し棒）で下方向に押し出す。プランジャーがコア金型中央部に近づけば二本目のピレットを挿入して新たに押し出しを行う。その後、1本目のピレットが金型の下方向に落とされる。この加工においてチャンネル形状、押し出し速度を変化させて、荷重（圧力）変化、試験片の割れなどの欠陥の有無、金型損傷などのデータを収集して評価を行う。対象とする材料は金型への負荷が小さく、加工が比較的容易と判断されるアルミニウム合金を想定していたが、今回はカジリの影響が少ない純銅で行った。

3.5 組織観察と断面硬度分布

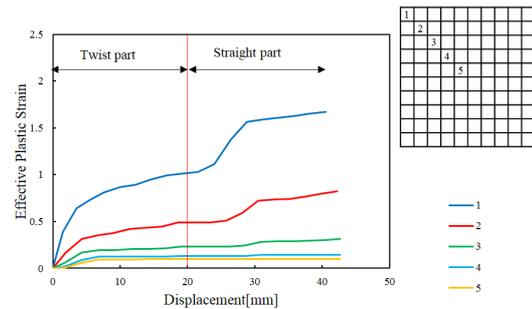
上記の加工で得られたピレットに対して、電子顕微鏡等で結晶粒径の確認、硬さ試験による硬度分布、引張り試験による機械的性質の評価を行った。ピレット断面の回転中央部、周辺部について組織の不均一性も確認した。結晶粒微細化の程度と有限要素解析で得られた塑性ひずみ分布との対応関係について確認する。

4. 研究成果

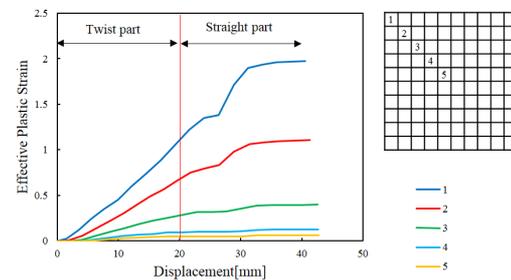
図2に変形解析による定常ねじり、非定常ねじり変形における断面上の代表点の相当塑性ひずみの推移を示した。断面の相当塑性ひずみは中心付近が小さく、頂点に近づくほど大きくなった。これは Yan Beygelzimer らの論文(Yan Beygelzimer, et al., 2009)と一致した。各点での相当塑性ひずみの最高値は定常ねじりより非定常ねじりの方が大きく、中心付近ではどちらもほとんど変化しないことが分かった。ねじり部での相当塑性ひずみの加わり方を比較すると、定常ねじりではねじり部入口付近では相当塑性ひずみが大きく加わるが、ねじり部後半ではほとんど相当塑性ひずみが加わっていない。定常ねじりでは、ねじり部後半では効果的に試験片がねじられていないと考えられる。一方、非定常ねじりではねじり部でほぼ一定の割合で相当塑性ひずみが加わっている。非定常ねじりでは

ねじり部後半でも効果的に相当塑性ひずみを与えていることが分かった。

さらに図3の断面での塑性ひずみ分布を比較すると、非定常ねじりの断面の方が相当塑性ひずみの大きい範囲が広いことが分かる。非定常ねじりの方が定常ねじりと比べて断面全体に広い範囲で大きい相当塑性ひずみを加えることが分かった。



(a) 線形ねじり



(b) 非線形ねじり

図2. 線形および非線形ねじり変形における相当塑性ひずみの変化

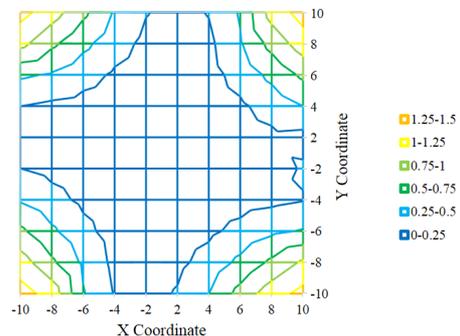
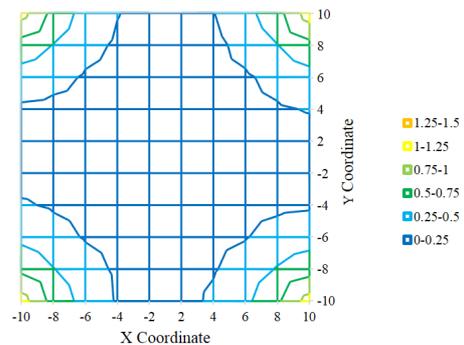


図3. 塑性ひずみの断面分布 (上) 線形ねじり、(下) 非線形ねじり

図4に断面の点3のXY, YZ, ZX平面でのせん断ひずみの変化を示す。定常, 非定常ねじりともにXY, YZ平面ではねじり部でねじられた後, 直線部で逆方向にねじられることが分かった。XY平面のせん断ひずみの最大値を見ると, 非定常ねじりの方が定常ねじりよりも大きなせん断ひずみを与えることが分かった。さらにねじり部でのXY平面のせん断ひずみの傾きは非定常ねじりの方が大きい。定常ねじりではねじり部入口付近からXY平面のせん断ひずみが加わっており, 非定常ねじりではねじり部中間付近からせん断ひずみが加わっている。定常ねじりでは回転角の増加率が一定であるのでねじり部入口付近からせん断ひずみが加わっている。非定常ねじりでは回転角の増加率が送り量とともに増加するので, ねじり部後半から徐々にせん断ひずみが加わっている。非定常ねじりの方が非定常ねじりの方が効果的にせん断ひずみを加えていると考えられる。

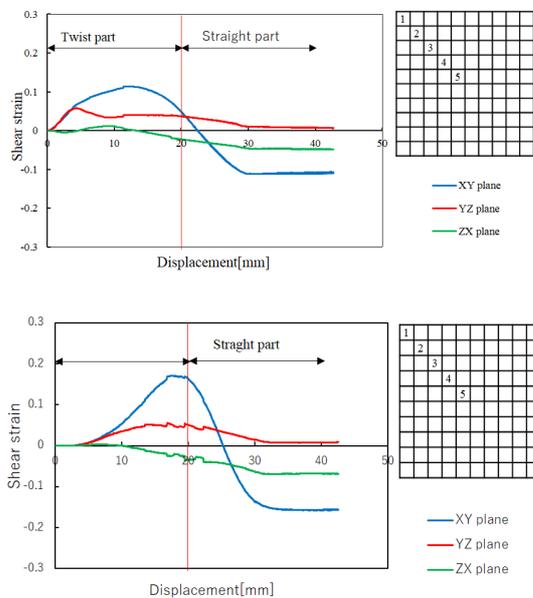


図4 剪断ひずみの変化 (上)線形ねじり、(下)非線形ねじり

図5に変形前, 定常, 非定常ねじりの断面对角線上のビッカース硬度分布, 図6にねじり部通過時の断面对角線上の相当塑性ひずみ分布の解析結果を示す。定常, 非定常ねじりの断面外側の方が中心よりも外側の方が硬くなった。これはH.Zendeheiらの論文と一致した。(H.Zendehei, 2012)そして図6の解析結果の相当塑性ひずみの分布と傾向が一致した。相当塑性ひずみの大きい箇所では加工硬化と結晶粒微細化の影響を受けると考えられる。さらに断面中心では定常, 非定常ねじりとともに変形前よりもビッカース硬度が硬くなった。図6に示すように解析結果では断面中心ではほとんど相当塑性ひずみ加わらない。解析結果よりも実験で

は断面中心でも塑性変形を受けて加工硬化が起こったと考えられる。断面外側では定常ねじり, 非定常ねじりの硬さの差はほとんどなかった。これらは解析結果と一致しなかった。

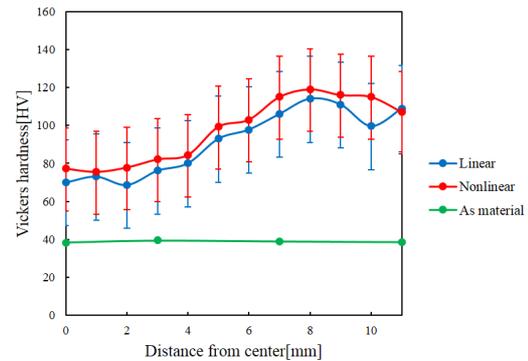


図5. 断面中心から端部の硬度分布

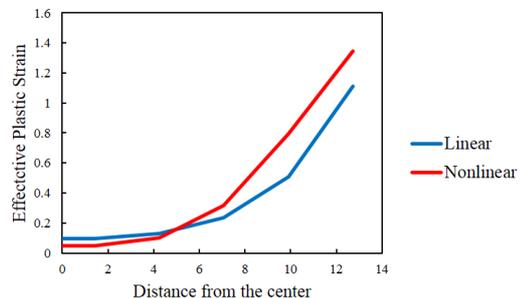


図6. 断面中心から端部の塑性ひずみ分布

図7にEBSDによって組織観察した試験片の軸垂直断面上において断面中心付近を観察した方位マップを示す。断面中心付近であるので, 変形前と比較して, 線形および非線形ねじりとも大きな変化は観察されない。

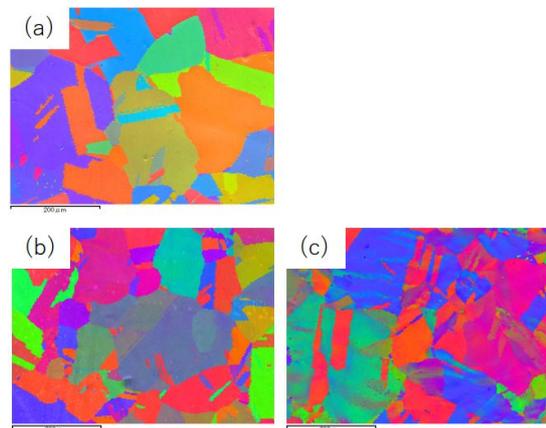


図7. 軸垂直断面から観察した方位マップ (a)変形前、(b)線形ねじり、(c)非線形にじり

一方、**図8**におなじく軸垂直断面からピレット端部を観察した方位マップを示す。ねじり押し後は断面外側では変形前と比べて結晶粒が微細化されている。さらに非線形ねじりは線形に比べて微細化されており、非線形ねじりの効果が明らかになっている。この効果は**図9**の軸方向並行断面からピレット端部を観察した方位マップで顕著に現れている。

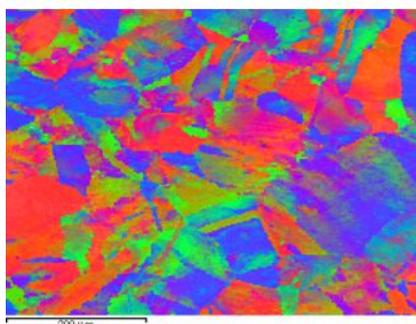
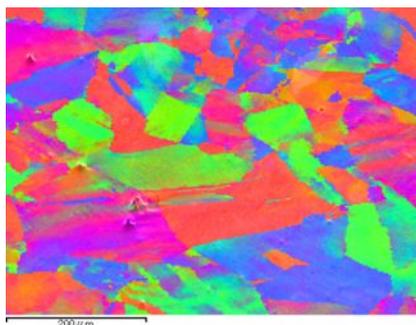


図8．軸垂直断面上のピレット端部の方位マップ；(上) 定常ねじり、(下) 非定常ねじり

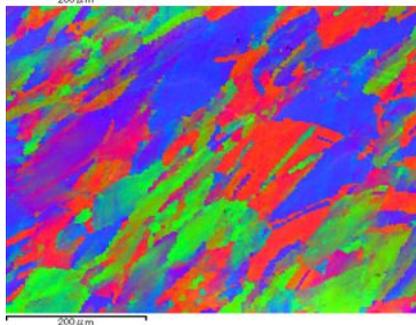
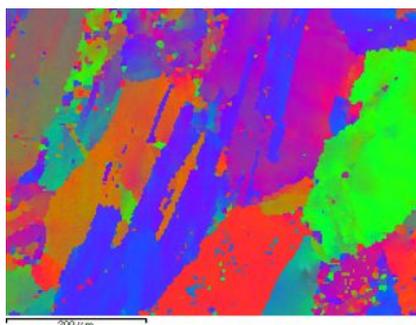


図9．軸並行断面上のピレット端部の方位マップ；(上) 定常ねじり、(下) 非定常ねじり

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

松本崇、藤原弘、宮本博之、田中達也、ねじり押しによる純銅の結晶粒微細化、日本塑性加工学会 第 66 回塑性加工連合講演会 2015 年 10 月 29-31 日 いわき市文化センター

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

田中 達也 (Tanaka Tatsuya)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号：70434678

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：