

# 高強度 Mg 合金ねじの室温転造加工を実現する ねじり戻し調製プロセスの開発

東京工科大学工学部 機械工学科  
教授 古井光明  
(平成 24 年度一般研究開発助成 AF-2012008)

キーワード：マグネシウム合金，室温ねじ転造，ねじり戻し調製プロセス

## 1. 研究の目的と背景

2009 年 12 月にコペンハーゲンで開催された第 15 回国連気候変動会議 (COP15) において、日本は 2020 年までに温室効果ガスの排出を 1990 年に比べて 25%減らすと宣言した。この国際公約を達成するためには、自動車や航空機など輸送機器の軽量化による二酸化炭素の削減が最も効果的であるとされる。一方、日本の産業を支える製造業においても、地球環境保全やコスト低減など社会的ニーズへの対応を迫られている。ダイスと呼ばれる工具によって素材をはさみ込みながら回転させることで、ダイス表面の形状を転写するように素材表面を成形する転造加工をはじめとする金属成形産業においても他ではなく、省資源・省エネルギーはもとより、加工温度の低温化や加工速度の高速化による生産性の向上が至上課題となっている。例えば、難加工材料であるマグネシウム合金のねじ転造を室温に近い冷間温度域で行うことは、加熱に伴う CO<sub>2</sub> 排出を抑えるばかりでなく、ねじ山部におけるマイクロ組織の微細化をもたらす、強度などの機械的性質が飛躍的に向上する。さらには、ダイスの長寿命化や生産性の向上に伴うコストの低減も期待できる。今後、航空機や自動車などの輸送機器や医療福祉機器へマグネシウム合金ねじの適用を拡大していくためには、マグネシウム合金の特徴を活かしながら、ねじの転造性や品質などの諸問題を克服していかなければならない。

工業的に実用化されているシンプルな塑性加工のひとつにねじり加工がある。ねじり加工は被加工材のねじり中心から表面に向けて、導入されるせん断ひずみの量が徐々に増加する原理的な特徴がある。また、一方向にねじった後、同量だけ逆方向へねじり返すねじり戻し加工<sup>1)</sup>では、試料の形状と共に、結晶粒の形状もねじる前に戻るマクロ・ミクロな原形回復現象<sup>2)</sup>が起こることがわかっている。

特に原料素材である金属丸棒の外径変化によって転造の可否が左右されるねじの製造にあっては、ねじり戻しによる形状の原形回復は好都合である。このねじり戻し加工をねじ転造の前工程に組み込み、転造に先立って丸棒素材にねじり戻し加工を施すと、多量のせん断ひずみの導入により押し出しや引拔きの工程で形成した集合組織が、特に素材の表面近傍においてランダム方位化し、結晶粒も微細化する。結晶方位のランダム化はマグネシウムの非底面すべりの活動を促進し、延性を高める。また、最密六方格子構造に起因して加工性に乏しいマグネシウムは本質的に結晶粒径依存性が高い材料であり、結晶粒を微細化することによって加工性が著しく改善される。すなわち、ねじり戻し調製によるランダム・微細結晶組織の形成に伴う加工性の向上によって、ねじ転造の低温・高速化や加工度の増加をはじめとする転造性の改善が図れる。また、ねじり戻し変形に伴って、締め付けトルクが大きいねじが製造できる。大トルク・軽量ねじは部材の強度や信頼性を高めるだけでなく、合計 3000 本ものねじが使用される自動車など輸送機器の燃費向上に伴う省エネルギー・環境保全や安全性の向上にも役立つ。

環境調和性の高いプロセス制御型材料加工研究の一環として、ねじり戻し変形を利用した素形材の調製による転造加工プロセスを開発することが本申請研究の目的である。これまでのねじり調製押し出しの経験や成果を活かして、室温での転造加工とねじ特性の向上をもたらすねじり戻し調製の最適加工条件を確立する。また、ねじり戻しと転造によるせん断変形のシナジー効果によって微細組織を形成し、加えて適切な時効熱処理を施すことにより、高強度と高靱性、良好な表面性状を併せ持つマグネシウム合金ねじの創製を目指す。

## 2. 実験方法

直径 10mm、長さ 230mm の市販 AZ91D マグネシウム合金押し出し丸棒を受入れ材とする。用いた AZ91D マグネシウム合金の化学組成を表 1 に示す。これに 673K、345.6ks の溶体化処理を施し、鑄造時に晶出した  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相を固溶させることで、 $\alpha$ -Mg 単相の組織を得た。その後、片側回転式ねじり戻し加工機を用い、標点間長さ 150mm の丸棒試料に対し、527K にて  $\pm 0.5$ 、 $\pm 1$ 、 $\pm 1.5$ 、 $\pm 2$  のねじり戻し加工を行った。ねじりの回転速度は 1rpm である。

ねじり戻し加工した試料は機械研磨を施した後、マイクロ組織観察および硬さ試験に供した。マイクロ組織は試料のねじり断面を機械研磨した後、10% 硝酸エタノールで腐食させ、光学顕微鏡により観察した。硬さ試験はビッカース硬さ試験機を用い、圧下荷重 0.96N、圧下時間 10s の条件下で行った。また、ねじり戻し加工前後の試料については、丸棒試料の長手方向の面に対して X 線回折を行った。X 線回折パターンは管電圧 40kV、管電流 30mA の条件にて、回折角度  $2\theta$   $\sim 80^\circ$  の範囲を  $2.4^\circ/\text{min}$  で走査し、CuK $\alpha$  線を用いて測定した。

ねじり戻し加工した試料は、CNC 丸ダイス転造盤にて切込み量 0.575mm、切込み速度 1.1mm/s、ダイス回転速度 120rpm の条件下で室温ねじ転造を行った。試料は長さ 78mm に切断した後、両端断面にセンター穴加工を施した。作製したねじは M8 メートル並目ねじであり、デジタルマイクロスコープを用いて、JIS 規格に定められる有効径および外径を実測した。また、ねじ山部および谷部は光学顕微鏡で観察し、割れや剥離の状態を確認した。

より高強度なねじを得る目的で、423K のオイルバス中にて 2.7~1382.4ks の等温時効熱処理を行った。

表 1 AZ91D マグネシウム合金の化学組成

(mass%)								
Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Be	Mg
9.3	0.6	0.31	0.05	0.025	0.001	0.004	0.001	Bal.

## 3. 実験成果

ねじり回転速度 1rpm でねじり戻し加工した試料のマイクロ組織を図 1 に示す。試料の長手方向に平行に切り出した面を対象とし、外周部を観察した結果である。ここで  $\pm 0.5$  回転材とは、 $0.5$  回転 ( $180^\circ$ ) 一方向にねじった後、逆

方向に  $0.5$  回転 ( $180^\circ$ ) ねじり戻した試料を言う。ねじり戻しを加えていない溶体化処理状態の試料の平均結晶粒径は  $104\mu\text{m}$  であるのに対して、673K の温間領域にてねじり戻しを加えると動的再結晶により結晶粒径は細くなる。また、 $\pm 0.5$  回転材の平均結晶粒径は  $9\mu\text{m}$ 、 $\pm 2$  回転材の平均結晶粒径は  $2\mu\text{m}$  となり、ねじり戻しがいほど結晶粒は微細化される傾向がある。これは、加工度が大きいほど導入される転位や原子空孔の密度が高く核生成サイトが多くなることが原因と考えられる。

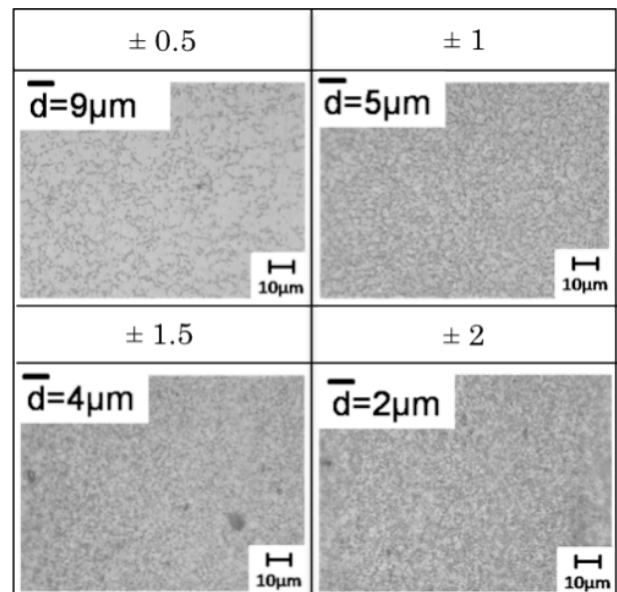


図 1 ねじり戻し加工した AZ91D マグネシウム合金のマイクロ組織

ねじり回転速度 1rpm でねじり戻し加工した  $\pm 2$  回転材の X 線回折図形を、ねじり戻しを施していない受入れ材のそれと共に図 2 に示す。押し出しが施されている受入れ材では底面 (0002) のピークが特に強く現れており、顕著な底面集合組織を有すると考えられる。ねじり戻しを加えることによって底面の強度は低下し、柱面 (1010) や錐面 (1011) の強度が上昇する。また、粉末の X 線回折の標準回折パターンである JCPDS の値との比較を表 2 に示す。ここでは、錐面のピーク強度を 100 とした相対強度で示している。受入れ材は底面の相対強度が 340 であり、高い底面集合組織を呈している。一方、 $\pm 2$  回転のねじり戻し材では底面の相対強度が 29 にまで低下し、柱面、底面共に JCPDS に近い相対強度を示した。典型的な粉末 X 線回折においては

各々の結晶粒は微細かつ互いにランダムな配向を有するものとしている<sup>3)</sup>。そのため JCPDS の値に近づくことにより結晶方位がランダム化し、集合組織が緩和されるものと考えられる。

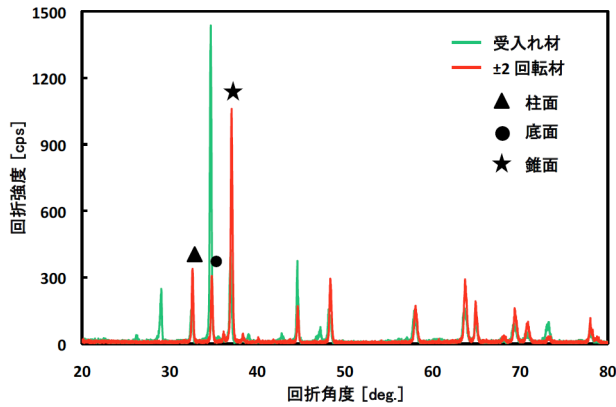


図2 ねじり戻し加工材および受入れ材の X 線回折図形

表2 ピークの相対強度の比較

試料	柱面	底面	錐面
受入れ材	37	340	100
±2回転材	32	29	100
JCPDS	25	36	100

ねじり回転速度 1rpm でねじり戻し加工した試料の断面における硬度分布を図3に示す。ねじり戻しの大きさに伴って硬度のレベルは高くなる。また、±0.5 回転材ではねじりの基礎式<sup>4)</sup>に準じて、中心からの距離が大きくなると硬さが上昇する、明瞭な V 字の変化を示すのに対して、ねじり戻しが大きくなるにつれて、ねじりの中心部と外周部の硬さの差が小さくなる傾向がある。最も大きなねじり戻しを与えた±2 回転材では、95HV を超える高い硬さが得られた。

図4は、ねじり回転速度 1rpm でねじり戻し加工した試料を用いて室温転造した M8 メートル並目ねじの外観である。ねじり戻しが小さい±0.5 回転材では顕著な割れや剥離が見られるねじ山を呈している。ねじり戻しの大きさに伴ってねじ山の状態は改善され、最も大きなねじり戻し加工を与えた±2 回転材では、良好なねじ山を成形できている。なお±2 回転を与えたねじの外径や有効径は、JIS のねじ精度 2 級<sup>5)</sup>に定める M8 メートル並目ねじの規格を満

たしていることを確認している。

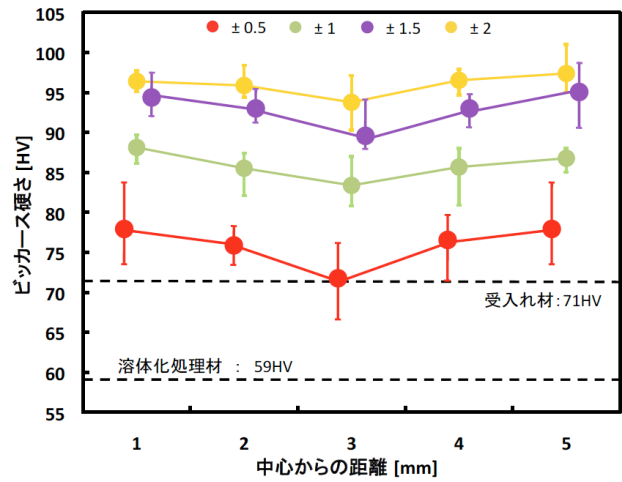


図3 ねじり戻し加工した AZ91D マグネシウム合金のビッカース硬さ分布

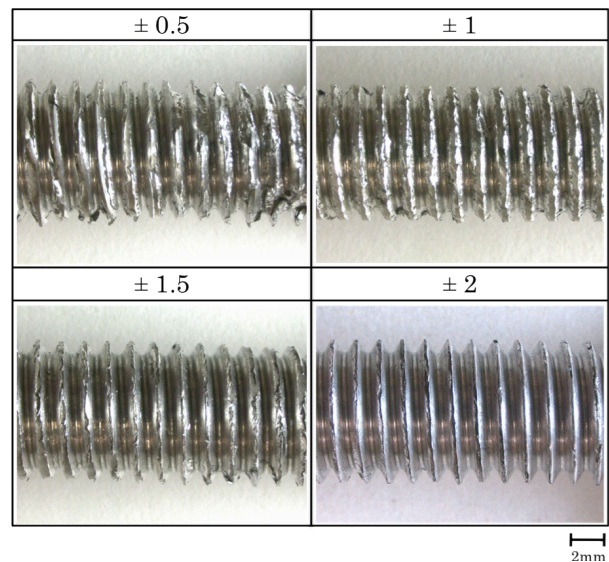


図4 室温転造した AZ91D マグネシウム合金 M8 メートル並目ねじの外観

ねじり回転速度 1rpm でねじり戻し加工した±2 回転材を用いて、室温転造した M8 メートル並目ねじの時効硬化曲線を図5に示す。転造したままのねじは内部の硬さが低く、ねじ山先端の硬さが高い不均一な硬度分布を示す。時効時間の増加に伴って、ねじの内部では  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相が析出し硬度が顕著に上昇する。逆にねじ山先端ではゆるやかに軟化することで、ピーク時効以降の長時間側では、ねじ山先端、中心から 1.75mm、中心はほぼ等しい硬さとなった。つまり、転造の加工硬化によってねじ山部が局部的に

硬い不均一な分布は、時効処理を加えることによってねじ全体の硬度がほぼ均一になることを明らかにした。

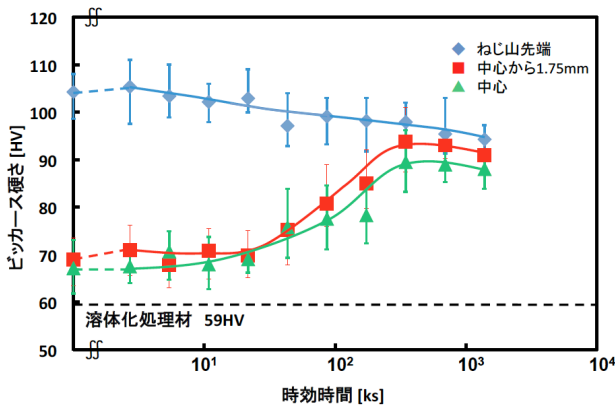


図5 室温転造したAZ91Dマグネシウム合金M8メートル並目ねじの時効硬化曲線

#### 4. 結論

アルミニウム含有量が少ないAZ31のようなマグネシウム合金では、温間あるいは熱間領域での転造加工により製作されたねじが存在する。一方、アルミニウム濃度が高いAZ91マグネシウム合金は、 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相の晶出あるいは析出により室温変形能が乏しい材料である。本研究では、ねじ戻し調製によりAZ91マグネシウム合金の結晶微細化、ランダム化をもたらすことによって、室温でのねじ転造が可能となるねじ戻し調製プロセスの開発を行った。得られた結果は以下のとおりである。

(1)  $\pm 2$ 回転のねじ戻し調製により、平均結晶粒径2 $\mu$ mでランダム配向した組織を形成することができる。

(2)  $\pm 2$ 回転のねじ戻し材を素材として用いると、適正な条件の下では、室温でM8メートル並目ねじを転造できる。

(3) 室温転造によりねじ山が局部的に加工硬化した不均一な硬度分布は、423Kの時効熱処理を施すことによって解消し、ほぼ均一な硬度となる。

#### 謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成24年度一般研究開発助成(AF-2012008)として採択されたものである。ここに記して同財団に心より御礼申し上げます。また押出しねじ加工の実施にあたり多大なご協力をいただいた、富山大学大学院理工学研究部(工学)の會田哲夫准教授に謝意を表します。併せて、卒業研究として実験を担当された、富山大学工学部材料機能工学科の坂下翔洋氏・鈴木祥吾氏に感謝申し上げます。また、ねじ転造は株式会社月星製作所のご厚意により実施された。

#### 参考文献

- 1) 例えば 穴田博・柴田将寿・水林舞・古井光明・佐治重興・内記文夫・高井博明: 軽金属, 53(2003), 169-175.
- 2) 穴田博・田中巖・古井光明・佐治重興: 軽金属, 53(2003), 20-26.
- 3) 早稲田嘉夫・松原英一郎: X線構造解析, (2007), 87. 内田老鶴圃
- 4) 加藤健三: 金属塑性加工学, (1997), 34, 丸善
- 5) 日本規格協会: JISハンドブック ねじ, (1999), 123.