

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420774

研究課題名(和文) Mgの結晶ランダム・微細化により室温でのねじ転造を実現するねじり戻し調製法の開発

研究課題名(英文) Development of Preliminary Back-torsion Process achieving Thread Rolling at Room Temperature through crystal randomizing and refinement

研究代表者

古井 光明 (FURUI, Mitsuaki)

東京工科大学・工学部・教授

研究者番号：90262972

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ねじり戻し変形を与えることによりAZ31BおよびAZ91Dマグネシウム合金の結晶方位がランダム化し、押出しによる異方性が緩和される。また、最適なねじり戻し調製を施すことにより、AZ31BおよびAZ91Dマグネシウム合金丸棒を室温にて転造加工し、良好なM8ねじを作製することに成功した。室温転造したAZ91Dマグネシウム合金ねじに、423K, 460.8ksの時効処理を施すことにより、均一な硬さ分布が得られた。

研究成果の概要(英文)：The crystal orientation of AZ31B and AZ91D magnesium alloy was randomized by torsion working. It was succeed that high quality M8 screw was fabricated by the optimum back-torsion working preliminary thread rolling at room temperature. The distribution of hardness in as thread-rolled AZ91D magnesium alloy screw was modified to uniform distribution by the isothermal aging treatment at 423K for 460.8ks.

研究分野：材料加工・組織制御

キーワード：ねじり戻し調製法 結晶ランダム化 結晶微細化 マグネシウム合金ねじ 室温転造 時効硬化

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 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し、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、航空機や自動車をはじめとする輸送機器や福祉機器などへマグネシウム合金ねじの利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。

(2) 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が起こることがわかって

いる。特に原料である丸棒試料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、ねじり戻しによる試料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や引抜き工程で形成した集合組織がランダム方位化し、結晶も微細化する。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。

(3) 各種産業では、機器装置の高性能化、使用環境の過酷化に伴い、強度、靱性、耐食性およびリサイクル性に優れる機械部材のニーズが高まっている。塑性加工の分野でも、材質の改善を主とし、加工精度の超精密化、サイズの超微細化、形状の自由化、加工表面の高機能化に対応すべく、形と特性の作り込みが実施されている。ねじやボルトを製造する転造加工の業界においても他ではなく、軽量で締め付けトルクが大きいねじの開発が鋭意進められている。ねじは使用頻度、重要度が極めて高い機械要素であり、広く社会に普及している。その一方で、振動を伴う輸送機器や産業機械・装置等において、ねじの緩みから大事故を引き起こすことはよく知られた事実であり、ねじの緩みを抑えることが長年の課題となっている。そのため、二重ねじのような緩みを抑制する様々なねじが提案されているものの、総じて緩みにくさと相反して着脱しにくさを併せ持つことに問題がある。軽量・大トルクなねじは部材の強

度・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。

## 2. 研究の目的

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、ねじり戻し加工を利用した素材の調製による転造プロセスを開発することが本研究の目的である。

(1) これまでのマグネシウム合金を用いたねじり調製押しプロセスの開発を通じた経験や成果を活かして、あくまでも室温でのねじ転造の実現とねじ特性の向上をもたらすねじり戻し調製転造の最適加工条件を確立する。

(2) ねじり戻しによるせん断変形と、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、高強度と高靱性、良好な表面性状と耐食性を併せ持つマグネシウム合金ねじの創製を目指す。

(3) 一連のねじり戻し調製の過程でマグネシウムの結晶がランダム化・微細化するメカニズムを解明すると共に、それらによる知見に基づいて、さらなる結晶ランダム化・結晶粒超微細化を伴うマイクロ組織制御に向けたねじり戻し調製転造プロセスの設計指針を得る。

## 3. 研究の方法

直径 7.2mm, 長さ 230mm の AZ31B および AZ91D マグネシウム合金押し丸棒に、673K, 72ks の均質化処理を施した。片側回転式ねじり加工機を用い、室温にて標点間長さ 150mm の試料に対し、最大 3 回転 (1080°) の一方向ねじりおよびねじり戻し加工を行った。ねじりの回転速度は 5, 15, 25rpm である。ねじ転造加工は丸ダイス CNC 転造装置を用いて、室温にて行った。ダイスの切込み速度は 1.1mm/s, 回転数は 120rpm, 切込み量は 0.575mm である。ねじり加工した試料は、ミ

クロ組織や結晶方位を確認するために、光学顕微鏡, 走査型顕微鏡/EBSP による観察や X 線回折を行った。X 線回折パターンは回折角度 30~80° の範囲を 2.4° /min で走査し、CuK $\alpha$  線を用いて測定した。室温転造により得られた M8 ねじの山部や谷部の形状は、実体顕微鏡を用いて観察した。ねじの機械的特性評価として、ビッカース硬さ試験および引張試験を実施した。

## 4. 研究成果

(1) 図 1 は AZ31B マグネシウム合金丸棒の X 線回折図形を示す。(a) はねじりなし材, (b) は 1080° の一方向ねじり材の結果である。いずれも押し方向に対して垂直な断面について同定を行った。(a) のねじりなし材では (1011) 面や (2021) 面などの錐面も観察されたが、(1010) 面での回折強度が著しく高く、主に柱面により構成されている。一方、3 回転のねじりを与えた (b) では、柱面である (1010) 面の回折強度が低下し、錐面である (1011) 面の回折強度が上昇している。また、ねじりなし材では見られなかった底面の (0002) 面や、錐面の (1012) 面および (1013) 面等のピークも現れている。すなわち、ねじり加工を施すことで結晶方位がランダム化し、押し方向の異方性が緩和されたことが示唆される。

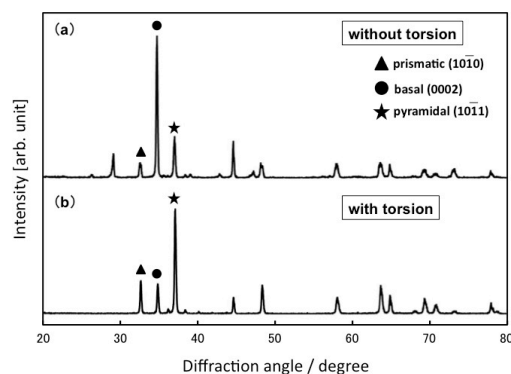


図 1 AZ31B マグネシウム合金の X 線回折図形 (a) ねじりなし材, (b) 1080° ねじり材

錐面の回折強度を 100 としたときの、柱面と底面の強度比を表 1 に示す。1080° の一方向

ねじりを施すことによって底面の強度が著しく減少し、マグネシウム多結晶のピーク強度比である JCPDS のデータにほぼ等しくなる。

表 1 AZ31B マグネシウム合金のピーク強度比

	prismatic	basal	pyramidal
without torsion	37	340	100
with torsion	32	29	100
JCPDS	25	36	100

(2) ねじり回転速度 25rpm でねじり戻し加工した AZ91D マグネシウム合金丸棒の硬さ分布に及ぼすねじり戻し回転角度の影響を図 2 に示す。硬さ分布はねじり戻し回転角度が大きいほど断面の中心部と外周部の硬さの差が大きくなる、ねじりの基礎式に準じた、いわゆる V 字の傾向が顕著になる。

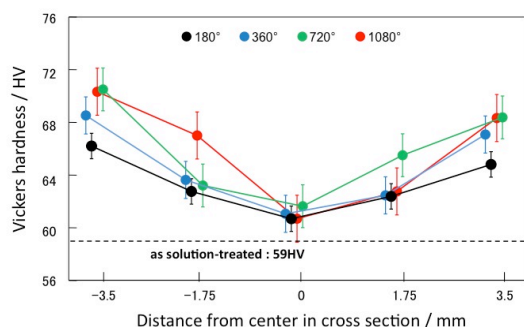
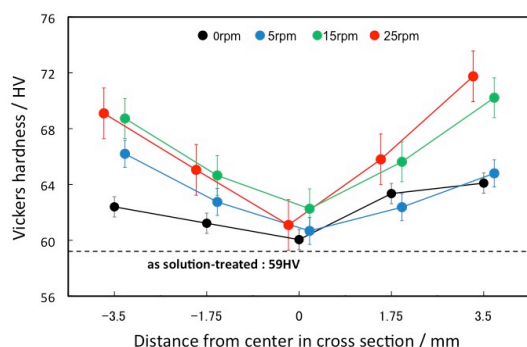


図 2 ねじり回転速度 25rpm でねじり戻し加工した AZ91D マグネシウム合金丸棒の硬さ分布

(3) ねじり戻し回転角度 720° でねじり戻し加工した AZ91D マグネシウム合金丸棒の硬さ分布に及ぼすねじり回転速度の影響を図 3 に示す。ねじり回転速度が大きいほど、硬さのレベルは向上し、V 字の傾向が顕著になる。

図 3 ねじり回転角度 720° でねじり戻し加工した AZ91D マグネシウム合金丸棒の硬さ分布



(4) 室温で転造した AZ91D マグネシウム合

金ねじの表面状態に及ぼすねじり戻し回転角度の影響を図 4 に示す。ねじり戻し回転角度 720° までは、ねじの山部や谷部に割れを伴うのに対して、1080° のねじり戻しを施すと、JIS の M8 規格を満たす健全なねじが転造できることがわかった。

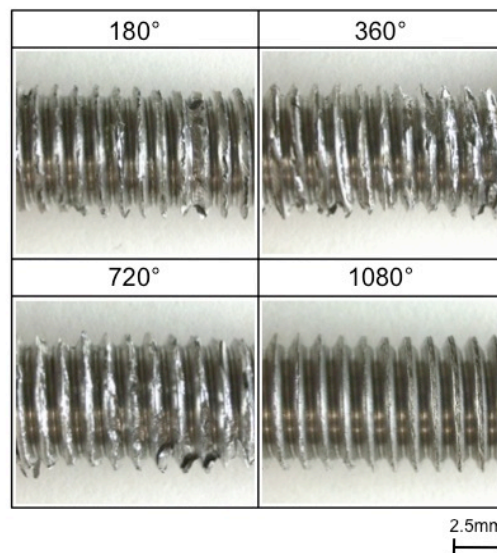


図 4 室温転造した AZ91D マグネシウム合金ねじの表面状態に及ぼすねじり戻し回転角度の影響

(5) 室温で転造した AZ91D マグネシウム合金ねじの時効硬化曲線を図 5 に示す。転造ままの状態はねじ山の頂部と中心部において約 35HV の差があるのに対して、423K, 460.8ks の適切な時効処理を施すことによりその差は著しく減少し、ねじの断面においてほぼ均一な硬さ分布になる。この変化は、図 6 に示すねじ山のマイクロ組織観察より、ねじの中心部における析出反応によって、 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 析出物の体積率が増加することにより起こる。

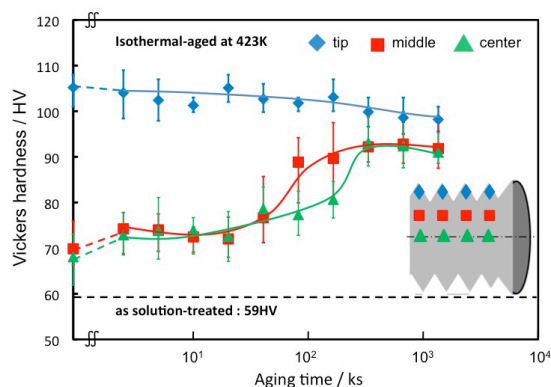


図 5 AZ91D マグネシウム合金ねじの時効硬化曲線

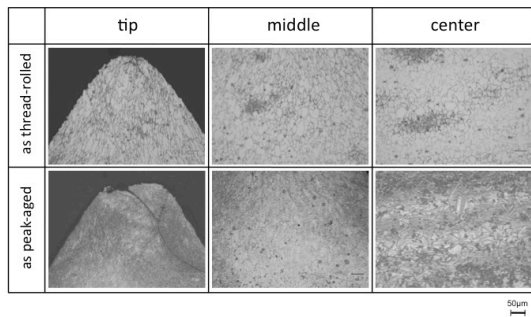


図6 時効処理に伴うAZ91Dマグネシウム合金ねじのマイクロ組織の変化

## 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 5 件)

- ① H. Matsunoshita, K. Edalati, M. Furui, Z. Horita, Ultrafine-grained magnesium-lithium alloy processed by high-pressure torsion: Low-temperature superplasticity and potential for hydroforming, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 640, 2015, pp. 443-448, 査読あり.
- ② M. Furui, T. Aida, Development of Extrusion-Torsion Simultaneous Processing for Grain Refinement in Magnesium Alloys, *Materials Science and Engineering*, Vol. 63, 012005, 2014, pp. 1-7, 査読あり.
- ③ M. Furui, S. Sakashita, K. Shimojima, T. Aida, K. Terayama, Y. Ishisaka, M. Yamamoto, M. Ohta, Room Temperature Screw Form Rolling of AZ91D Magnesium Alloy through Processing by Extrusion-Torsion Simultaneous Working, *Materials Science Forum*, Vol. 783-786, 2013, pp. 375-376, 査読あり.
- ④ M. Furui, S. Sakashita, S. Suzuki, K. Shimojima, T. Aida, K. Terayama, Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference on the Physical Properties and Application of Advanced Materials, 2013,

pp. 63-65, 査読あり.

- ⑤ M. Furui, S. Sakashita, K. Shimojima, T. Aida, K. Terayama, Y. Ishisaka, M. Yamamoto, M. Ohta, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Congress on Advanced Materials and Processing, 2013, pp. 1323-1328, 査読あり.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 泉集心、會田哲夫、丸田丈一郎、高辻則夫、古井光明、山本将之、石坂祐輔、太田昌幸、押出しねじり加工したAZ91Dマグネシウム合金の室温後方押出し加工性、日本塑性加工学会北陸支部第25回講演会、平成28年3月、富山大学、富山県富山市.
- ② 泉集心、會田哲夫、高辻則夫、古井光明、山本将之、石坂祐輔、太田昌幸、押出しねじり加工したAZ91Dマグネシウム合金の室温後方押出し加工性、軽金属学会第129回秋期大会、平成27年11月、日本大学、千葉県津田沼市.
- ③ 熊崎大貴、泉集心、會田哲夫、高辻則夫、古井光明、山本将之、石坂祐輔、太田昌幸、押出しねじり加工したマグネシウム合金の室温鍛造性、軽金属学会第127回秋期大会、平成26年11月、東京工業大学、東京都目黒区.
- ④ 鈴木祥吾、會田哲夫、古井光明、寺山清志、山本将之、石坂祐輔、太田昌幸、押出しねじり加工したAZ91Dマグネシウム合金材のマイクロ組織に及ぼすねじり回転速度の影響、日本金属学会北陸信越支部・日本鉄鋼協会北陸信越支部平成25年度連合講演会、平成25年12月、信州大学、長野県長野市.
- ⑤ 古井光明、會田哲夫、ねじり・ねじり戻し変形に伴う軽金属材料のマイクロ組織変化、軽金属学会第124回春期大会、平成25年5月、富山大学、富山県富山市.

[その他]

研究成果の一部は下記のウェブページに

て公開している。

<http://www.teu.ac.jp/info/lab/project/es/dep.html?id=24>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古井 光明 (FURUI, Mitsuaki)

東京工科大学・工学部・教授

研究者番号：90262972

### (2) 研究分担者

會田 哲夫 (AIDA, Tetsuo)

富山大学・大学院理工学研究部（工学）・

准教授

研究者番号：20283062

### (4) 研究協力者

Terence G. Langdon

サウザンプトン大学・工学環境研究分野

教授