

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「輸送機器等の軽量化に向けた高強度・耐熱マグネシウム合金ねじによる
締結技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 財団法人 大阪産業振興機構

「紙へリサイクル可」

研究開発成果等報告書 目次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標 . . . P. 2
- 1-2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者) . . . P. 2
- 1-3 成果概要 . . . P. 7
- 1-4 当該プロジェクト連絡窓口 . . . P. 8

第2章 本 論

1. ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金押出加工技術の研究開発 (㈱ケーエステクノス、大阪府立大学、木ノ本伸線㈱)

- 1-1 高強度・耐熱マグネシウム合金の押出加工技術の研究開発 . . . P. 9
- 1-2 ねじ用マグネシウム合金の清浄化技術の研究開発 . . . P. 10
- 1-3 ねじ用マグネシウム押出材の巻き取り技術の研究開発 . . . P. 11

2. ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金の伸線材の研究開発 (木ノ本伸線㈱、大阪府立大学)

- 2-1 高強度・耐熱マグネシウム合金の事業化を目的とした低コスト伸線技術の研究開発 . . . P. 12
- 2-2 マグネシウム合金の伸線による結晶粒微細化及び熱処理による再結晶化コントロールの研究開発 . . . P. 14
- 2-3 潤滑処理技術の研究開発 . . . P. 14
- 2-4 ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金の微細組織評価 . . . P. 15

3. 高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの製造及びねじ特性評価に関する研究開発 (㈱丸エム製作所、大阪府立大学、大阪府立産業技術総合研究所、神奈川大学)

- 3-1 生産性の高い塑性加工 (圧造及び転造加工) による高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの成形技術に関する研究開発 . . . P. 19
- 3-2 時効熱処理による耐クリープ性向上に関する研究開発 . . . P. 21
- 3-3 高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの特性評価に関する研究開発 . . . P. 22

4. 終わりに . . . P. 29

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1) 研究開発の背景

我が国の産業基盤である素形材の加工技術の高度化は、極めて波及効果が広く、我が国のあらゆる産業の底上げに有効である。川下製造業者が課題やニーズの解決のために、軽量のマグネシウム合金などを部材として採用するためには、電食や熱応力によるゆれが生じない、信頼性の高い部材締結を実現する高強度・耐熱マグネシウム合金製のねじの開発が極めて重要である。このねじは、ターゲットとする自動車エンジン部品やロボット構造部材等以外の他の産業の幅広い部材の締結にも適用可能であり、更なる軽量化に大きく寄与すると期待されている。

しかし現時点で、耐熱性や耐クリープ性を有するマグネシウム合金は開発されているが、耐熱性や耐クリープ性を有するマグネシウム合金ねじは開発されていない。

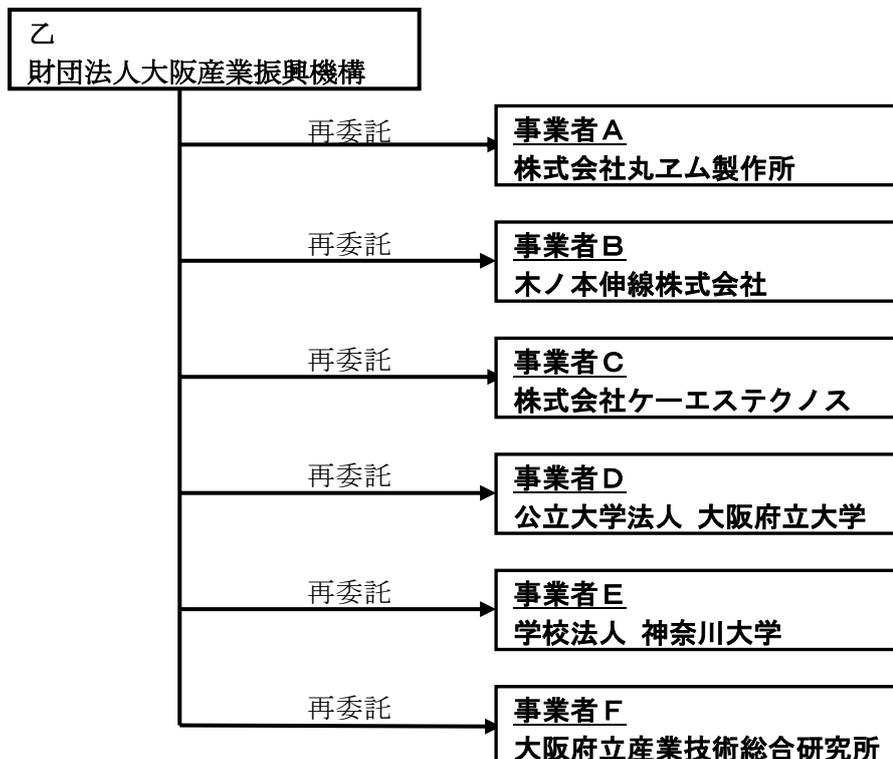
2) 研究の目的

マグネシウム合金に対する市場の需要は、高機能・軽量材料として、省資源化などの視点から自動車生産向けを中心に、ますます拡大している。本研究開発では、このような大きな期待が寄せられているマグネシウム合金の幅広い産業利用の拡大を図る上で重要なポイントとなる「高強度・耐熱マグネシウム合金ねじによる締結技術」の開発を目指し、川下製造業者が要求する電食及び熱応力によるゆれ問題を解決し、環境温度に適応できる耐クリープ性能を有し、比強度で従来のステンレスねじの2.5倍の引張り強さを持った「高強度・耐熱マグネシウム合金ねじ」、すなわち同じ負荷を2分の1以下の質量で締結する技術を開発する。

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）



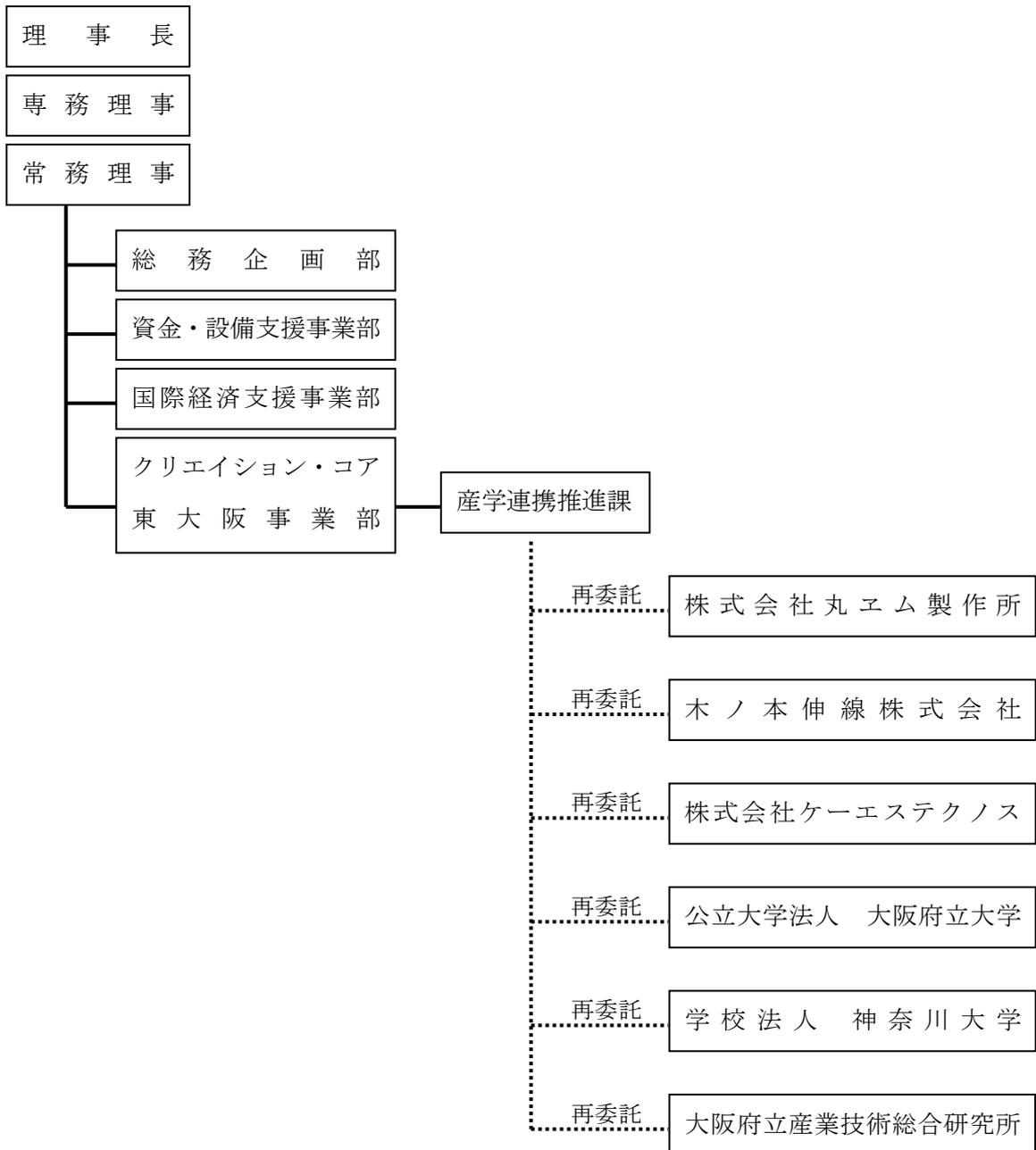
総括研究代表者（PL）
（所 属）株式会社丸エム製作所
（役 職）理 事
（氏 名）山 中 茂（やまなか しげる）

副総括研究代表者（SL）
（所 属）木ノ本伸線株式会社
（役 職）代表取締役社長
（氏 名）木 ノ 本 裕（きのもと ゆたか）

2) 管理体制

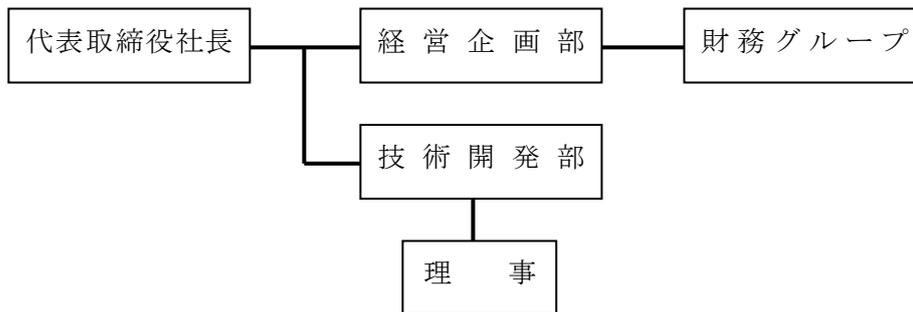
①事業管理者

財団法人大阪産業振興機構

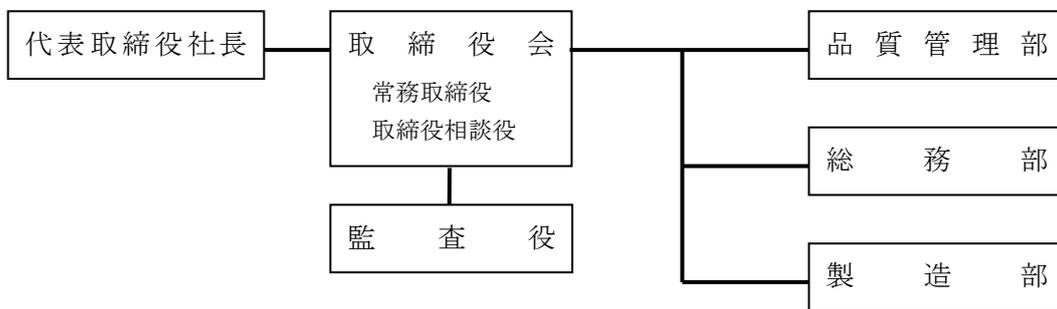


②再委託先

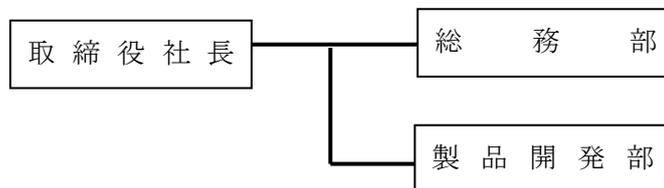
株式会社丸エム製作所



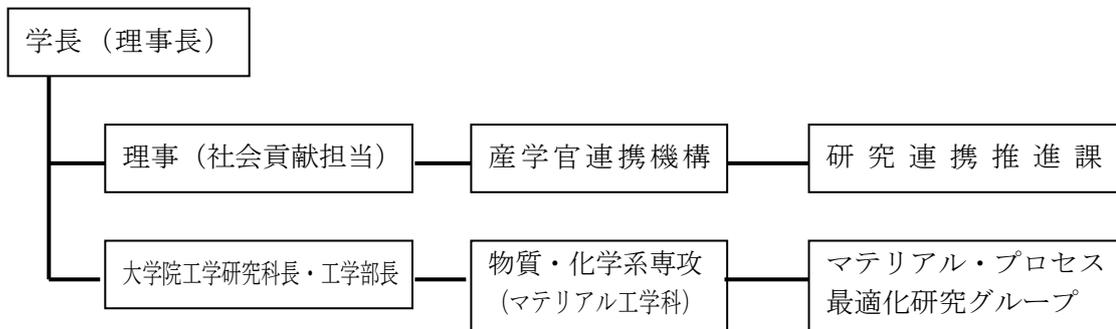
木ノ本伸線株式会社



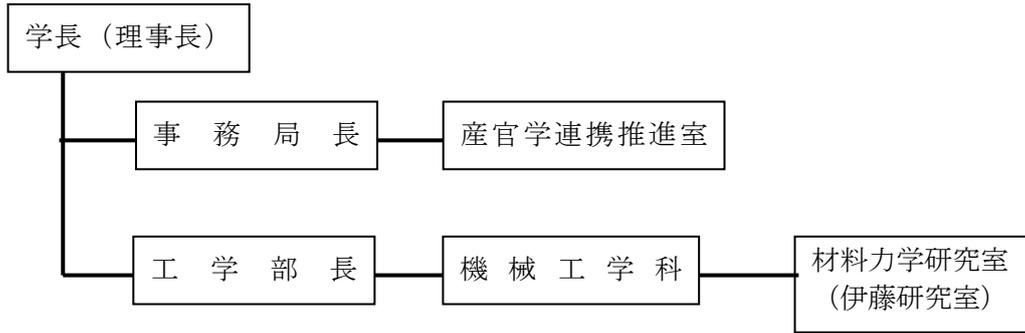
株式会社ケーエステクノス



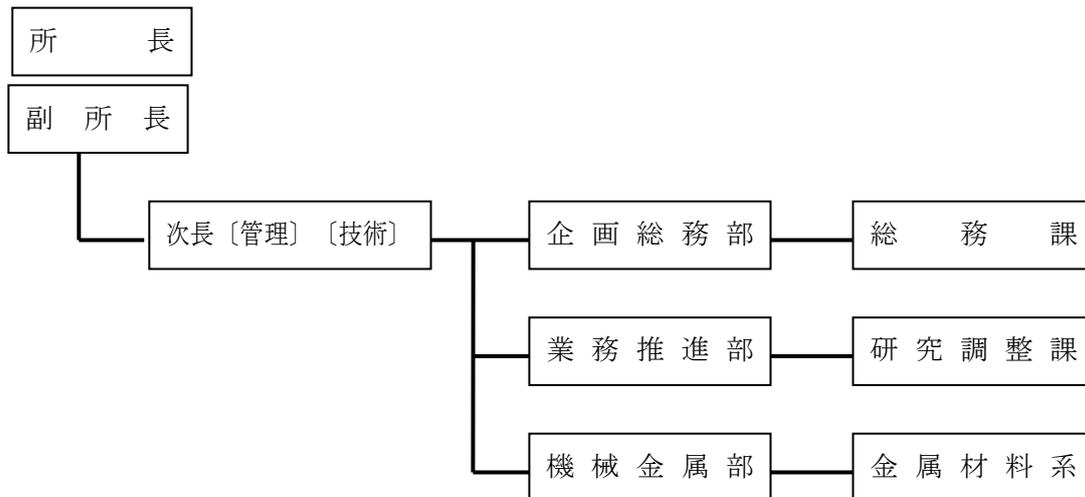
公立大学法人 大阪府立大学



学校法人 神奈川大学



大阪府立産業技術総合研究所



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】財団法人大阪産業振興機構

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
北野光博	クリエイション・コア東大阪事業部 産学連携推進課長	【4】
神木隆夫	クリエイション・コア東大阪事業部 産学連携推進課 課長補佐	【4】

②研究員 (なし)

【再委託先】※研究員のみ

株式会社丸エム製作所

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
矢島 隆	執行役員 技術開発部長	【3】①②③
橋本 謙三郎	理事	【3】①②③
山中 茂	理事	【3】①②③
福田 憲治	技術開発部 チーフ	【3】①②③
日比 玄機	技術開発部 研究員	【3】①②③

木ノ本伸線株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
木ノ本 裕	代表取締役社長	【1】③ 【2】①②③
木ノ本 晃	取締役相談役	【2】①②③
島田 実	常務取締役	【1】③ 【2】①②③
木ノ本 史郎	監査役 兼 主任研究員	【1】③ 【2】①②③
西野 英樹	品質管理部 研究員(品質管理)	【2】①②③
田村 一裕	総務部 研究員	【2】①②③

株式会社ケーエステクノス

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
上田 光二	製品開発部 次長	【1】①②③
中村 喬	製品開発部 係長	【1】①②③

※谷 州博、松岡 憲生、藤田 博文は、人事異動前まで本事業に参加

公立大学法人大阪府立大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
瀧川 順庸	大学院工学研究科(マテリアル・プロセス最適化研究グループ) 准教授	【1】①②、【2】①② 【3】①②

学校法人神奈川大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
細川 修二	工学部 機械工学科 助教	【3】③

大阪府立産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
森岡 亮治郎	機械金属部 金属材料系 主任研究員	【3】②③

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人大阪産業振興機構

(経理担当者) クリエイション・コア東大阪事業部 産学連携推進課 課長補佐 神木 隆夫

(業務管理者) クリエイション・コア東大阪事業部 産学連携推進課長 北野 光博

(再委託先)

株式会社丸エム製作所

(経理担当者) 経営企画部 財務グループ マネジャー 大前 剛

(業務管理者) 執行役員 技術開発部長 矢島 隆

木ノ本伸線株式会社

(経理担当者) 取締役総務部長 寺山 重勝

(業務管理者) 代表取締役社長 木ノ本 裕

株式会社ケーエステクノス

(経理担当者) 製品開発部 次長 上田 光二

(業務管理者) 製品開発部 次長 上田 光二

公立大学法人大阪府立大学

(経理担当者) 産学官連携機構 研究連携推進課 課長補佐 川口 幸男

(業務管理者) 大学院工学研究科 准教授 瀧川 順庸

学校法人神奈川大学

(経理担当者) 産官学連携推進室長 田口 澄也
(業務管理者) 工学部 機械工学科 助教 細川 修二

大阪府立産業技術総合研究所

(経理担当者) 企画総務部 総務課 会計グループ 主査 江川 定子
(業務管理者) 業務推進部 研究調整課 主任研究員 木下 俊行

(4) 所在地

①事業管理者

・財団法人大阪産業振興機構 クレション・コア東大阪事業部 (最寄駅: 近鉄 けいはんな線 荒本駅)
〒577-0011 大阪府東大阪市荒本北1-4-1

②研究実施場所 (主たる研究実施場所については下線で表記)

・株式会社丸エム製作所 (最寄駅: JR西日本 学研都市線 野崎駅)
〒574-0015 大阪府大東市野崎4-7-12

・木ノ本伸線株式会社 (最寄駅: 近鉄 けいはんな線 新石切駅)
〒579-8026 大阪府東大阪市弥生町2-5

・株式会社ケーエステクノス (最寄駅: JR西日本 学研都市線 徳庵駅)
〒577-0002 大阪府東大阪市稲田上町2-2-46

・公立大学法人大阪府立大学 (最寄駅: 南海電鉄高野線・大阪市営地下鉄御堂筋線 中百舌鳥駅)
〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1-1

・学校法人神奈川大学 (最寄駅: 東京急行電鉄 東横線 白楽駅)
〒221-8686 神奈川県横浜市神奈川区六角橋3-27-1

・大阪府立産業技術総合研究所
(最寄駅: 泉北高速鉄道 和泉中央駅/和泉中央駅より南海バス 府立産技研前 バス停)
〒594-1157 大阪府和泉市あゆみ野2-7-1

1-3 成果概要

機械特性、加工性、さらに自動車に要求される信頼性の高い締結ねじを製品化するには、展伸材による製造が不可欠であり、結晶粒の微細化を中心とした素材開発との連携なくしては成立しないものであることから、「押出」「伸線」「ねじ製造」の各工程に対応する次の3つのサブテーマを設定し、相互に連携協力しながら研究開発を推進した。

サブテーマ1) ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金押出加工技術の研究開発

サブテーマ2) ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金の伸線材の研究開発

サブテーマ3) 高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの製造及びねじ特性評価に関する研究開発
平成21年度の成果概要をサブテーマごとに以下に示す。

【1】ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金押出加工技術の研究開発

押出加工技術の研究については、高強度・耐熱マグネシウム合金のAMX602、AZX912、HR1、HR2の適正押出条件が把握できた。また、結晶粒の微細化に対して、フローガイドの効果が有ることが明確になった。そして、ダイス構造のチョーク角度、孔数等が変化しても、安定的に結晶粒度を $30\mu\text{m}$ 未満に制御できることが分かった。また、コストダウンのための3孔押出しに成功した。

マグネシウム合金の清浄化技術の研究については、厚み 22mm 、 10ppi (粗目) のセラミック製フィルターを用いることにより、溶湯に巻き込まれる介在物の大きさを $50\mu\text{m}$ 未満に制御することができ、網目 2mm のステンレス製フィルターを 45°C ずらして用いても、溶湯に巻き込まれる介在物の大きさを小さくすることはできないということが分かった。このため、減圧処理の真空度を上げることに挑戦し溶湯の清浄化に成功した。この手法は、同時にコストダウンにも貢献した。

マグネシウム押出材の巻取り技術の研究については、マグネシウム合金丸棒用巻取り装置を用いて、AMX602、AZX912、HR1 および HR2 の $\phi 7$ および $\phi 9.5$ の押出し丸棒を巻き取れることが分かった。ただし、押出し材の継ぎ目はねじ材料として用いてはいけないことが分かった。

【2】ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金の伸線材の研究開発

伸線技術の研究開発については巻取工程時にコイル内周へかかる圧縮応力で微細な亀裂が生じる問題に対し、伸線・巻取工程間に加熱炉を設置し、ワーク温度が約 120℃以上の加熱処理を行うことで解決できることが分かった。超音波ダイス加工装置については、超音波が安定しない問題に対し、補助ダイス設置による共振コントロールを実施、安定させる研究を行ったところ、ダイス間距離を波長の n 倍にすることで、共振状態が安定し、引き抜き力の低下が確認できた。

結晶粒微細化及び熱処理による再結晶化コントロールの研究開発については、加工前の熱処理条件と限界減面率との関係につき、材質・素材径に関わらず熱処理条件が 415℃・15 分の場合に、最大の減面率で加工可能であることが確認できた。

潤滑処理技術の研究開発については、被膜が原因で表面に異物が発生する問題が起こったが、反応成分の配合比率を最適化し、加熱乾燥炉で 60℃・10 分以上加熱乾燥することで、潤滑被膜が安定して形成することが分かった。更にダイスに、耐焼付性に優れる高硬度コーティングを施すことで、引抜き力が 20%低減でき、潤滑の低コスト化・安定加工につながるということが分かった。

これらのサンプルを用い、大阪府立大学で組織および機械的性質の調査および評価を行った。調査の結果、伸線加工で必要強度を確保するための組織制御ができており、適切な熱処理を施すことによって機械的特性を向上することができる。伸線工程はネジの特性を向上させるのに必須の工程であり、ネジ用材料として実用レベルまで(特に AZX912)材料の性能が向上したという評価を得た。

【3】高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの製造及びねじ特性評価に関する研究開発

マグネシウム合金において、その機械的性質に影響を及ぼす圧造加工および転造加工中の動的再結晶挙動を、有限要素法を用いた解析で予測し、これによりねじの強度を得るための加工条件の設定が可能となった。また、締結後に熱履歴を与えたときのクリープによる軸力の変化を、被締結材にマグネシウム合金を用いて有限要素法解析を行い、熱応力を生じないマグネシウム合金ボルトが、スチールボルトよりも有利であることを示した。

ねじの成形においては、ボルトの頭部の形状を改善し、また、ねじ山形状の異なる 2 種類の成形を行った。さらに生産性を考えたジグの設計および転造装置の開発を行い、量産を可能にした。

成形されたねじのマイクロ組織については、大阪府立大学により、EBSD による配向性の評価がなされ、ねじ成形中に生じる配向性の変化とその効果について明らかにされた。

ねじの特性評価においては、神奈川大学と共同で、マグネシウム合金ボルトが、通常のスチールボルトよりも、小さい締結力(軸力)でゆるみ難いことを、新規に開発した試験装置による実験と理論計算で明らかにした。この結果と、強度試験、クリープ試験、大阪府立産業技術総合研究所による締結状態の熱履歴試験、また、疲労試験等の結果を基に、開発された高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの締結条件を設定することができた。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

(1) 総括研究代表者(PL) ; 株式会社丸エム製作所

: 理事 山中 茂

: 〒574-0015 大東市野崎 4-7-12

: TEL 072-863-0105

: FAX 072-863-0166

(2) 事業管理者 ; 財団法人大阪産業振興機構

: 経理担当 クリエイション・コア東大阪事業部産学連携推進課課長補佐 神木 隆夫

業務管理 クリエイション・コア東大阪事業部産学連携推進課長 北野 光博

: 〒577-0011 東大阪市荒本北 1-4-1 クリエイション・コア東大阪内

: TEL 06-6748-1023

: FAX 06-6745-1162

第2章 本 論

1. ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金押出加工技術の研究開発 (株式会社ケーエステクノス)

1-1 高強度・耐熱マグネシウム合金の押出加工技術の研究開発

高強度・耐熱マグネシウム合金については、塑性加工のためのデータベースはないが、これまでのマグネシウムねじ成型の予備研究で、押出加工後の材料の結晶粒は安定的に $30\mu\text{m}$ 以下にする必要のあることが解明されている。

そこで、結晶粒が $30\mu\text{m}$ 以下になり、かつ安定的に安価に生産できる適正（押出）条件を確立するため、難燃性マグネシウム合金 AMX602(X=Ca. 以下同義)、AZX912、および鑄造用途で耐熱性を有するマグネシウム合金の仮称 HR1、HR2 を用いて、M6 と M8 ねじ用素材のための適正押出条件の研究開発を行い、機能性能と組織の評価およびコストダウンのための押出しの生産性向上の研究を行った。

押出加工は加熱されたマグネシウム合金ビレットをコンテナ（円筒）に挿入して後方から圧力をかけ、ダイスの孔を通して所定の断面形状に押出す加工方法である。この加工法で選択可能な加工条件は、ビレットの加熱温度、押出速度（押出圧力）及びダイスの構造であるが、本研究では、押出速度（押出圧力）とダイスの構造の関係から適正条件の調査を行った。ビレット加熱温度については、これまでの経験と予備実験により、設定温度を 400°C に固定した。

1-1-1 実験結果

- (1) 同じ合金で同じねじ径用丸棒の押出しでは、チョーク角度が 1 度から 3 度の範囲では角度が異なっても適正条件の押出速度はほぼ同じレベルとなるが、押出圧力はチョーク角度が小さいほど低くなった。
 - (2) 合金の種類とダイスのチョーク角度が同じであれば、フローガイドを付けると適正条件の速度が遅くなり、圧力も高くなり、結晶粒の微細化に対して、フローガイドの効果があつた。
 - (3) ダイス構造のチョーク角度、孔数等が変化しても、安定的に結晶粒度を $30\mu\text{m}$ 未満に制御できた。
 - (4) 3 孔押出しについては、1 孔押出し条件に対して押出し速度だけが異なり、適正押出し速度は $5\text{m}/\text{min}$ であつた。
- 3 孔押出しの適正押出し状態を図 1-1-1 に示す。

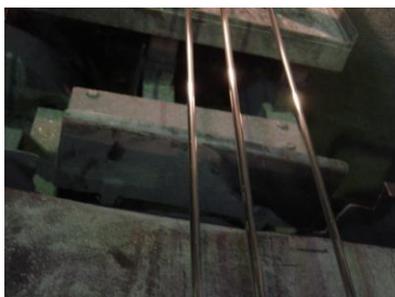


図 1-1-1 3 孔押出し適正状態

1-1-2 研究の成果

本研究は実際に操業している押出機を使つての現実に即した実験であり、ここで得たデータは即実生産に適用できるものであり、非常に有意義な資料である。しかし反面装置の調整や調子などで実験環境の統一性に欠ける面があり、一部データの整理や解釈に困難な側面も含まれることとなつた。この点に関しては実操業を通じて、データを積み上げ補つていかなければならないものである。

このような環境下であつたが、実験結果を整理することにより、AMX602、AZX912、HR1、HR2 の合金ごとに $\phi 9.5\text{mm}$ ねじ用押出材及び $\phi 7\text{mm}$ ねじ用押出材の適正条件がほぼ掴め、最終年度にはコストダウンの方向性を見出した。また、押出し実験を通して、それぞれの合金の押出し要領を習得できた。

1-2 ねじ用マグネシウム合金の清浄化技術の研究開発

良質のマグネシウム合金ねじを作るための素材として、ねじ材料に適した清浄度の押出ビレットを製造生産する必要がある。この押出ビレット内に存在が許容される介在物の大きさは、経験上、 $50\mu\text{m}$ 未満と考えられている。そこで、マグネシウム合金溶湯清浄化の手段として、AMX602 (X=Ca) と AZX912 のマグネシウム合金を対象として、バブリング処理（アルゴンガスを用いて圧力や時間と合金清浄化の関係を解明）と減圧処理（時間と合金清浄化の関係を解明）を用いて、安定的にねじ材料に必要な清浄度を確保できるよう検討した。その後、注湯時にフィルターを用いて清浄化実験を行い、安定的にねじ材料に必要な清浄度を確保できるようにしてきた。最終年度は製造生産のコストダウンを図るため、減圧処理の改善を行い、安定的にねじ材料に必要な清浄度を確保するための研究開発を行った。

1-2-1 溶湯清浄化の実験結果

(1)AMX602、バブリング 5 分+減圧処理 5 分+フィルター無し

バブリング処理を 5 分および減圧処理を 5 分行い注湯時にフィルターを使用しなかった鑄造品 AMX602 の金属組織を観察した結果のうち特徴的な部分の写真を図 1-2-1 に示す。本条件の場合、AZX912 と同様に最大で長手方向の長さが $100\mu\text{m}$ 程度の介在物が少し観察された。また、AZX912 の同条件の金属組織と比べた場合、細かな介在物は少なかった。

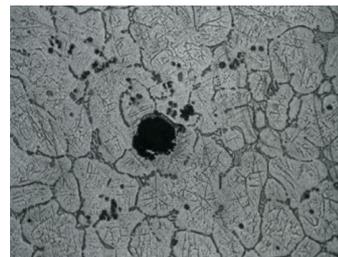


図 1-2-1 金属組織写真 AMX602(5+5)
フィルター使用なし

(2)AMX602、バブリング 5 分+減圧処理 5 分+セラミックフィルター使用

バブリング処理を 5 分および減圧処理を 5 分行い注湯時にセラミックフィルターを使用した鑄造品 AMX602 の金属組織を観察した結果のうち特徴的な部分の写真を図 1-2-2 に示す。本条件の場合、介在物の大きさ、量ともに大幅に改善されており、これはフィルター通過後に溶湯が中央部に集まる整流効果が原因だと思われる。介在物の大きさについては、本研究開発が目標としている $50\mu\text{m}$ 未満を達成できている。



図 1-2-2 金属組織写真 AMX602(5+5)
セラミックフィルター使用

(3)AMX602、バブリング 5 分+高減圧処理 5 分+フィルター無し

バブリング処理を 5 分行った後、高減圧処理を 5 分行った。鑄造した鑄造品 AMX602 の金属組織を図 1-2-3 に示す。黒い部分は、鑄造引けによる空隙で、介在物ではない。いずれの金属組織にも $50\mu\text{m}$ 以上の介在物は見受けられなかった。

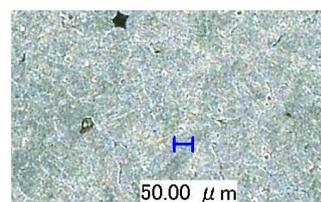


図 1-2-3 金属組織写真 AMX602(5+5)
高減圧処理

1-2-2 研究の成果

平成 19 年度の実験結果により、AZX912 および AMX602 合金を鑄造する上で、バブリング時間と減圧処理時間とともに 10 分行えば介在物の大きさを $50\mu\text{m}$ 未満にできる可能性があるということが分かった。また平成 20 年度の本年度の実験結果から、セラミック製フィルターを用いることによりバブリング時間と減圧処理時間がともに 5 分であっても介在物の大きさを $50\mu\text{m}$ 未満にできることが分かったが、セラミック製フィルターの場合は、使用後に産業廃棄物として処理しなければならない。そこで、平成 21 年度は高減圧処理により介在物減少に効果があることを見出し、バブリング時間と減圧処理時間がともに 5 分であっても介在物の大きさを $50\mu\text{m}$ 未満にできることが分かった。この方法によれば、セラミック製フィルターを用いる場合に比べてコストダウンを図ることができる。

1-3 ねじ用マグネシウム押出材の巻き取り技術の研究開発

押出形材は真直性が必要な製品であるが、伸線工程に供給する押出材料は、加工効率、運搬効率、熱処理効率向上の要請から、材料巻き取り技術の確立が欠かせないものとなる。

そこで、押出ラインの中で、巻き取り装置を設置して実験を重ね、後工程へ効率よく流すために必要な巻き取り技術の確立を目指す研究開発を行った。

導入した巻き取り装置を用いて、最初に研究対象のマグネシウム合金丸棒の量産試作を行うとともに、ビレット継ぎ目に出る丸棒継ぎ目の評価を行い、その後、伸線工程やねじ製造工程で丸棒継ぎ目がねじ材料として使用できるかどうかの評価を行った。

1-3-1 巻き取り装置の設置レイアウトと巻き取り方法

巻き取り方式は、押出ラインの中で、巻き取り装置を後面テーブルの最後端に設置し、30～40mに押出されてテーブルに並んだ丸棒を一流れづつ順次巻き取っていく方法を採用した。

1-3-2 巻き取り装置の概要

(1) 装置仕様

ねじ用マグネシウム押出材巻き取り装置の仕様を表 1-3-1 に示す。

表 1-3-1 巻き取り装置の仕様

処理線材	マグネシウム合金
処理線材最大寸法	最大φ10mm
巻き取り速度	0～5m/min
巻き取り張力	最大 約 1700kg
駆動モーター	巻取用：5kg・M×6P トルクモータ 0.4KW プロワー付き トラバース用： 1KW サーボモータ 1/60減速機
巻 枠	巻同径：φ600mm 外径：φ800mm 巻幅：180mm

1-3-3 丸棒継ぎ目の評価

連続的に押出し生産を行うと、ビレットの継ぎ目に該当する部分が製品である丸棒にも残る。しかし、押出し時の熱と圧力により素材と変わらない程度に溶着していれば、この部分も製品として使用できコストダウン効果も期待できる。最初に丸棒継ぎ目部分の引張強度でもって評価を行い継ぎ目が存在する部分の引張強度が 275MPa 以上あり素材と同等であることが確認できた。また、真の継ぎ目の前に出現するストップマーク（ビレット継ぎのため押出しが一旦止まったときに、材料がダイスのベアリングに当たっていた部分）については、当該工程では特に問題はなかった。ストップマークの例を図 1-3-1 に示す。引き続き、押出しの後工程である伸線工程でこのストップマーク部が加工に耐えられるかどうかの実験を行った。ストップマークの存在する部分を伸線工程に持ち込み、引き抜き加工を施したところ、ストップマーク部では、表面割れを起こした。



図 1-3-1 ストップマーク

1-3-4 研究の成果

マグネシウム合金丸棒用巻き取り装置を用いて、AMX602、AZX912、HR1 材および HR2 材のφ7 およびφ9.5 の押出し丸棒を巻き取れることが分かった。また、丸棒継ぎ目については当該工程では問題が無いことを確認できた。

しかし、巻き取った丸棒継ぎ目が後工程である伸線工程での使用に耐えるものではないことが判明したので、丸棒の継ぎ目をねじ用材料として使用しないことが必要である。

2-1 高強度・耐熱マグネシウム合金の事業化を目的とした低コスト伸線技術の研究開発

一般にマグネシウム合金の加工は結晶構造が最密六方格子であることに起因して室温付近での延性が乏しいため温間で加工する必要がある。図 2-1-1 に開発の目標を図式化した。

低コスト化を実現するためには、設備が単純になる冷間（常温）加工法の開発と、最小限の熱処理の組み合わせが不可欠と考えられる。

平成 20 年度の研究では温間加工が常識となっているマグネシウム合金において、加工コスト低減を目指し、困難とされていた冷間（常温）加工技術の確立を目指す研究開発を行い、その伸線加工試作機の準備や、ダイス形状、伸線速度、減面率、潤滑材などの冷間（常温）伸線加工条件の基準値選定及び検証を行った。

平成 21 年度の研究では前年度までに確立された基準加工条件を基にネジとして要求される性能をみたし、かつ、安定的に、また、低コストでねじ加工用の材料が加工できる条件を確立することを目的とした。

また、加工後のマイクロ組織の評価、機械的性質の評価を大阪府立大学と共に実施した。

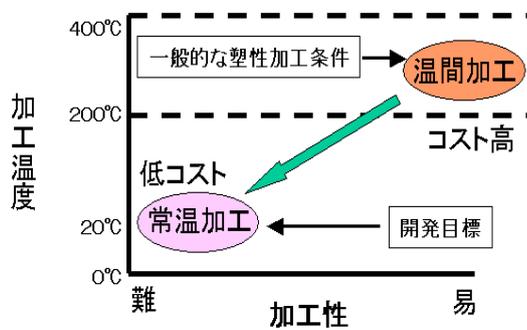


図 2-1-1 伸線技術開発の概念図

2-1-1 伸線機での加工試験

ねじの製造コストを抑えるためには長尺のコイル材が必要になる。

伸線機を用い、コイル材の量産化に向けた研究を行った。

図 2-1-2 に Mg 合金用伸線機の外観および巻き取り状態を示す。



図 2-1-2 Mg 合金用伸線機

テストサンプルとして AMX602（減面率 10%常温）を使い、Mg 合金線材の伸線・巻き取り加工を行った。

巻き取り行程が品質にどのような影響があるかという点に重点を置き、加工条件を設定した。

加工試験後、伸線加工後のマグネシウム合金線材の表面状態を観察するとコイルの内側に図 2-1-3 の写真のようにコイル内側の表面に円周方向に細かい筋が入っているのが発見された。後工程の丸エム製作所でのネジ加工試験においても割れなどの不具合が発生した。この表面不良は微細な亀裂と想定される。巻き取り時にかかる応力は図 2-1-4 のようになっており、ロールに巻き付く際、コイル外周には引っ張り応力が作用し、内周側に圧縮応力が作用する。

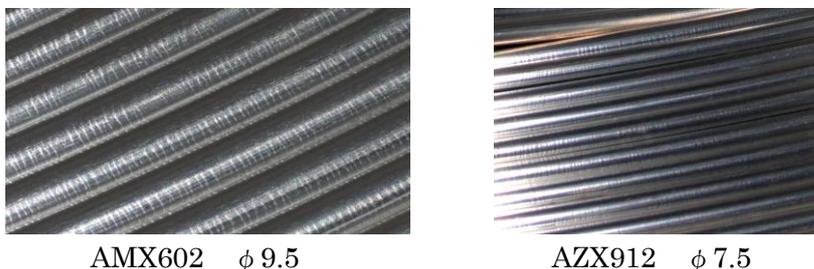


図 2-1-3 伸線・巻き取り後の表面不良例

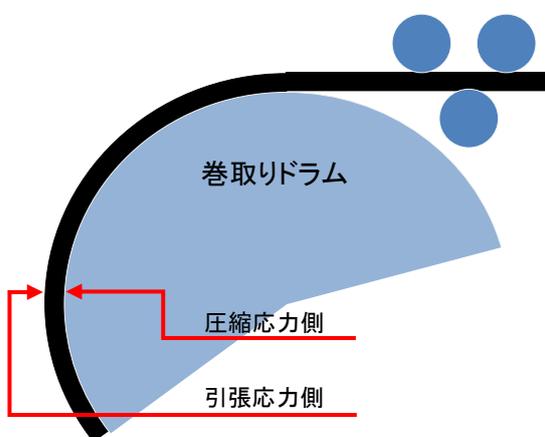
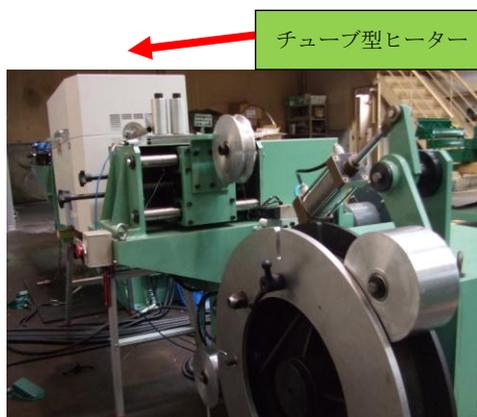


図 2-1-4 巻き取り時の力関係考察



加工コストを低減するために開発目標として常温での加工を目指していたが、コイル内周の不具合を解決するためにあえて、チューブ型のヒーターを設置し、線材を加熱後温間で巻き取りを行った。図 2-1-5 に巻き取り行程の改造後の写真を示す。温度条件を変えて実験した結果、約 120℃以上線材が加熱されていれば、巻き取り時に問題がないことを確認した。

2-1-2 超音波ダイス装置での加工試験

伸線加工の加工性能および潤滑性能を改善すべくダイス加工に超音波ダイス加工装置を採用した。

効率的に超音波振動子の出力をダイスに伝達するために、超音波振動子とホーン・ダイスが平行な直線上にレイアウトされるよう改造を行った。図 2-1-6 に改造後の超音波ダイス加工装置を示す。

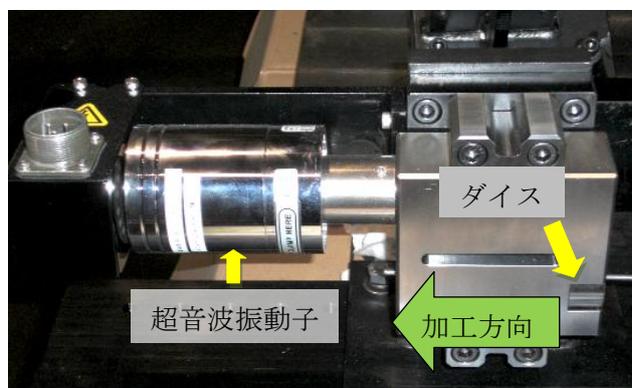


図 2-1-6 改造後の超音波ダイス加工装置

この装置を使い加工実験を行った。

30kHz の超音波ダイス加工装置は効果があると判断できる 5～7%の低減効果があった。ただし、超音波の発振状態に不安定なところがあり、安定発振の追加実験が必要である。

2-2 マグネシウム合金の伸線による結晶粒微細化及び熱処理による再結晶化コントロールの研究開発

加工応力の開放を目的として熱処理を行うが、高温下では、結晶粒の肥大化が問題となる。

目的の強度を得るには、図 2-2-1 のように結晶粒は小さい方がよい。本研究では熱処理による応力除去と結晶粒の肥大化を防ぐ 2 つの条件について研究を進めた。

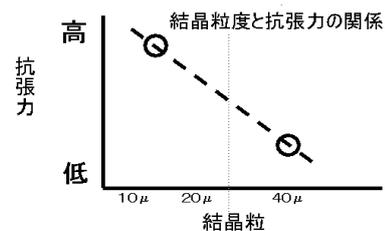


図 2-2-1 結晶粒径と抗張力の関係

2-2-1 熱処理条件別の限界減面率の調査

加工前熱処理は引き抜き加工時の減面率、すなわち、延性の改善に寄与するため、必要な行程といえる。また、結晶粒の微細化の観点から中間熱処理なしで大きな減面率が望まれる。押出加工されたマグネシウム合金（AZX912、HR2）を使い、加工前の熱処理条件と限界減面率の関係を調査する目的で実験を行った。1 回の加工における減面率を 5%とし、中間熱処理なしで、破断するまで引き抜き加工を行った。

その結果、材質に関わらず 415°C・15 分の加工前熱処理を加えた素材が一番大きな減面率が得られた。大阪府立大学の組織調査からは、結晶粒径のコントロールができることが確認された。併せて、機械的特性の改善にも大きく寄与していることが結晶解析によって裏付けできた。

2-3 潤滑処理技術の研究開発

安定した伸線加工のためには潤滑被膜の性能が大きく関与することとなり、熱処理後にも安定した被膜を維持できることが必要である。本年度は表面処理剤・潤滑油の開発・選定に加え、ダイスのコーティングという面にも着目し、より安定した引き抜き（伸線）加工を実現した。

2-3-1 表面処理の改善

リン酸系の表面処理材を基本とし、引き抜き実験及び熱処理実験で実用性を検証してきた。より安定した潤滑被膜とするために以下の点を改善した。

- ① 未反応成分や基剤が悪影響を及ぼすため、表面処理剤の成分比率を変更し、濃度を必要最小限に抑える。
- ② 表面処理剤の使用条件を満たすためにバッチ式乾燥炉を導入する。（図2-3-1）



図2-3-1 バッチ式乾燥炉

乾燥炉設置後、表面処理剤の成分比率を変更し、60°Cで10分以上乾燥を行った。加工結果は薄く均一な被膜が形成されていれば十分効果があることが確認できた。

2-3-2 ダイスコーティングによる加工性の調査

平成 20 年度まではダイスについては超硬チップのダイスを標準としてきたが伸線・引き抜きでは難加工材のステンレス系でコーティングダイスがよく用いられる。

今回は耐焼付き性を重視したコーティングダイスを用意した。（図 2-3-2）ダイスのコーティングにより引抜力が 10%以上低減できた。

このことにより、安定した加工ができる。

また、ダイスコーティング有無が組織や機械的特性に影響することが大阪府立大学の報告に詳細に述べられている。

コーティングにより、機械的性質が変化することは非常に大きな発見であるといえる。



図 2-3-2 コーティングダイス

*本章では、3つの工程（押出し、伸線、ねじ成形）間で関連しあう微細組織について、その評価結果を中心にまとめて報告する。

2-4-1 ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金押出材の組織評価

研究項目「ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金押出加工技術の研究開発」の研究として、押出材の組織評価を行った。これまでのマグネシウムねじ成型の予備研究で、押出加工後の材料の結晶粒は安定的に $30\mu\text{m}$ 以下にする必要のあることが解明されている。そこで、結晶粒が $30\mu\text{m}$ 以下になりかつ安定的に安価に生産できる適正押出条件を確立するため、4種類の高強度・耐熱マグネシウム合金を用いて、M6～M8 ねじ用材料の適正押出条件決定のための組織評価を行った。

まず、押出前のピレット部は、Mg 固溶体を主に Al_2Ca からなる第2相が被覆する典型的な鑄造組織を有していることがわかった。一方、押出をすることにより鑄造組織と比較して等軸な結晶粒が得られており、粒界を被覆していた第2相が微細に分散されていることがわかった。押出の結果、いずれの材料においても、押出比が大きいほど組織の微細化効果が大きいことがわかった。これは、マグネシウム合金の動的再結晶粒径がひずみ速度と熱活性化過程の指数項の積である Z パラメータにより整理されることによるものと推察される。さらに、材料による微細化効果の違いについては、希土類元素が固溶している材料の微細化効果が最も大きく、その他の材料においては Al 固容量が大きいほど微細化効果が大きいことがわかった。これは、固溶元素による積層欠陥エネルギーの低下に関連するものと考えられる。このような積層欠陥エネルギーの低下は耐クリープ性の向上にも効果があり、耐熱性、加工性ともに優れる材料設計のためには、添加元素による積層欠陥エネルギーのコントロールが一つの指針であると考えられる。

押出材の解析の結果、いずれの材料においても最適化された押出加工後の材料の結晶粒は目標値である $30\mu\text{m}$ 以下であり、適正押出条件開発に成功している。

2-4-2 押出、伸線による耐熱性の変化の評価

研究項目「ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金押出加工技術の研究開発」、「ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金の伸線材の研究開発」の研究として、鑄造材および押出加工後、伸線加工後の耐熱性評価を定ひずみ速度高温引張試験により行った。

4種類の材料についてそれぞれの鑄造材、押出加工材、伸線材からゲージ部の外形 $2.5\text{mm}\phi$ 、ゲージ部長さ 13.5mm の引張試験片を作製し、温度 150 、 175 、 200°C 、ひずみ速度 1×10^{-5} 、 1×10^{-4} 、 $1\times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ の各9条件において試験を行った。

いずれの材料においても、鑄造材は応力上昇の途中で破断し大きなひずみを得られていない。一方、押出材においては最も大きな変形応力を示し伸びも大きい。これに対し、伸線を行うことにより高温強度は低下し、伸びも低下していることがわかる。

Mg 合金の高温変形に影響を与える因子として、溶質元素濃度変化による積層欠陥エネルギー変化および第2相による粒界被覆率がある。しかしながら、押出材と伸線材においては固容量、第2相の被覆率ともに大きな差はなく、このような観点からはこの違いを説明できない。応力-ひずみ曲線の形状、組織観察の結果から、このような違いは内部組織に起因するものと推察される。すなわち、伸線材では加工硬化を生じることなく、ひずみ量が低下するのは、伸線時に多くの転位などの欠陥が導入されており、欠陥密度がほぼ一定のまま転位の上昇運動に律速されて変形が進行しているものと考えられる。また、伸線材には双晶が含まれており、このような双晶のうち、ある特定の方位関係を有するものが破壊の起点になりやすいことが報告されているため、ひずみ量が低下したのではないかと推察される。一方、押出材においては、加工硬化を生じていることから、変形機構は伸線材と同様の転位の上昇運動に律速されるものであるが、高温変形中にも欠陥密度は上昇していることが推察される。このような新たに導入された転位が、伸線による低温・高速での条件と比較してより均一に導入されたため、わずかに強度が上昇し、ひずみ量が増加したものと推察される。このような内部組織の変化については、後述する結晶方位解析結果で詳細に述べる。

一方、鑄造材においては、いずれの材料においても Al-Ca 系の化合物が粒界を被覆しており、耐熱性の向上に寄与しているものと考えられる。これを押出加工することにより、粒界被覆率が低下し、固溶量はほとんど変化しないため、耐熱性が低下するものと予想される。しかしながら、今回得られた結果では、押出材のほうが優れた耐熱性を示す場合がほとんどであった。これは、鑄造材に含まれる欠陥によるものであると推察される。すなわち、今回の鑄造材は押出することを前提に作製されたものであり、押出過程で欠陥がつぶされることが予想されたため、欠陥を減らすための特別なプロセスを行っていない。このような材料においては多くの粗大な欠陥が存在することが予想され、それが破壊の起点となっていることが考えられる。鑄造材において大きな伸びが得られなかったこと、また、応力上昇途中で破断が生じていることなどからも、このような欠陥の可能性が示唆される。すなわち、本来健全な材料であれば鑄造材が最も耐熱性に優れ、押出により第 2 相の粒界被覆が破壊されるために耐熱性が低下するという結果になると考えられる。このような傾向は、低ひずみ速度における結果にも表れている。押出による耐熱性低下の定量的な議論をするためには、比較用の鑄造材としてダイカスト材を用いるなどの必要があると考えられる。しかしながら、今回の実験において、ネジ締結条件決定に必要な耐熱性のデータは取得できており、十分なデータが取得できていると考えられる。

2-4-3 ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金の伸線材の組織評価

研究項目「ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金の伸線材の研究開発」の研究として、伸線加工および加工熱処理後の材料の組織評価を行った。マグネシウム合金加工の低コスト化を実現するために、冷間(常温)加工と最小限の熱処理とを組み合わせた加工法の開発を目的とし、マイクロ組織評価を行った。また、目標の強度を得るための結晶粒を $10\mu\text{m}$ 以下と設定し、引抜加工と熱処理の繰り返しによりこれを達成するために、1 回の加工における最適減面率の調査、つまり最終的な結晶粒径が $10\mu\text{m}$ 以下になる減面率を解明するための加工後のマイクロ組織評価を行った。

いずれの材料においても、押出材を常温で伸線することにより、組織の微細化が生じていることがわかった。一般に、再結晶による組織の微細化は加工度と温度の関係で決まることが知られている。すなわち、加工度が大きい場合には低温で再結晶が生じ、小さい場合には再結晶のために高温に保持する必要がある。今回の結果は、伸線時の強加工と加工時の材料とダイスとの摩擦熱に起因して比較的低温で再結晶が生じたものと考えられる。

HR1 については、押出材を常温で伸線することにより組織の微細化が生じており、目標値である結晶粒径 $10\mu\text{m}$ 以下が比較的広い条件範囲で達成できる可能性が示された。

AZX912 においては、伸線まま材に対して $500^{\circ}\text{C}\times 30\text{s}$ の熱処理を施すことにより、結晶粒がわずかに微細化している。これは、伸線まま材が再結晶途中の状態であったことを示唆するものである。すなわち、伸線まま材に対して適切な熱処理を施すことにより、より微細化が生じる可能性が示された。この材料をさらに伸線することにより、結晶粒径が $9.9\mu\text{m}$ にまで微細化した。すなわち、目標値である結晶粒径が $10\mu\text{m}$ 以下になる条件が存在することが示された。30s の熱処理は制御が困難であるため、10min 以上の熱処理による結晶粒径の変化を調べた。 500°C における熱処理では、結晶粒が大きく成長した。一方、 450°C における熱処理では結晶粒が粗大化する場合と微細化する場合の両方の場合があり、この辺りの温度が微細化のための臨界温度であると考えられる。そこで、減面率を変化させ、 415°C での中間熱処理を行った。減面率によってはわずかに結晶粒が微細化するが、この熱処理温度では結晶粒径の大きな変化は得られなかった。すなわち、結晶粒径のコントロールのためには、 $415\sim 450^{\circ}\text{C}$ 程度の温度での熱処理が必要であることが明らかになった。しかしながら、伸線の段階ではこれ以上の精密な検討は困難であることから、最終目標値である結晶粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の達成は最終工程であるねじ加工時に制御することとした。

前述したように、AZX912 においては、減面率を変化させても 415°C での熱処理では結晶粒径は変化しなかった。しかしながら、その硬さは減面率が大きくなるほど増加することがわかった。一方、減面率によらず結晶粒径は一定であり、この結果は結晶粒微細化効果によるものではない。一つの可能性として、前述した内部組織に違いに起因するものであることが考えられる。そこで、後方散乱電子線回折法による結晶方位解析を行い、加工による結晶方位および内部組織の変化について調べた。

結晶方位解析の結果、 15° 以上の方位のずれを表す線で囲まれた領域は、レーザー顕微鏡による組織観察結果と同様であり、押出材と伸線材では結晶粒径がほとんど変化していないことがこの結果からも

確認された。一方、より小さな方位差を表す線は、押出材ではほとんど見られず、伸線材では粒内に顕著に観察される。このような小さな方位差は、加工により導入された転位等が再配列した亜粒界もしくは小角粒界であると考えられ、伸線により多くの転位などの欠陥が導入されていることが確認された。このような転位の集合体である亜粒界もしくは小角粒界の存在が、減面率の増加による硬度上昇の起源であると考えられる。また、このような粒内に存在する集積した転位は、再結晶の際の核となることから、後述するねじ加工の際の再結晶挙動に大きな影響を与えているものと推察される。

2-4-4 ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金の伸線条件による微細組織変化の検討

研究項目「ねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金の伸線材の研究開発」の研究として、伸線加工条件による微細組織変化について検討した。検討項目は伸線ダイス表面のコーティングと、潤滑油についてである。いずれの潤滑油、表面コーティングにおいても、結晶粒径には大きな差は見られなかった。一方、引張強さはダイスコーティング条件により顕著な差が見られた。これは、ダイスと材料の摩擦力の変化による結晶方位関係の変化によるものであると推察される。すなわち、我々の最近の研究 (Mater. Trans., 51 (2010) 477) で、高温圧縮試験において治具と試料の摩擦力が変化することにより、平均結晶粒径は変化しないが、表面近傍に結晶方位が顕著に変化することを報告している。今回得られた強度変化も、そのような摩擦力の変化による結晶方位変化に起因しているものと推察される。

2-4-5 高温圧縮試験による変形特性および微細組織評価

研究項目「高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの製造及びねじ特性評価に関する研究開発」の研究として、HR1 および HR2 における高温圧縮試験による変形特性および微細組織評価を行った。ひずみ速度 $5s^{-1}$ という非常に大きなひずみ速度においては、温度を $350^{\circ}C$ 以上の高温にしなければ割れが生じてしまう。一方、ひずみ速度 $0.005s^{-1}$ の低速においては $250^{\circ}C$ まで加工温度を低下させることが可能である。 $450^{\circ}C$ の高温で加工した試料では結晶粒が押出材と比較して顕著に粗大化していることが分かる。一方、 $200^{\circ}C$ あるいは $250^{\circ}C$ の低温で加工した試料では結晶粒が顕著に微細化していることが分かる。このように、加工性、加工後の結晶粒径は加工温度によって大きく変化することが明らかになった。これら得られたデータはネジの加工条件決定のための基礎データとして有用である。

2-4-6 ねじの組織解析

研究項目「高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの製造及びねじ特性評価に関する研究開発」の研究として、ねじの後方散乱電子線回折法による組織解析を行った。その結果、ねじにおいても伸線材と同様に強い配向性を有していること、粒内に多くの亜粒界または小角粒界を含んでいることがわかった。また、結晶粒径が $7\sim 9\mu m$ まで微細化していることが明らかになった。これはねじ頭の圧造時に高温にするが、その温度の最適化により再結晶をコントロールした結果である。これにより、目標値である結晶粒径 $10\mu m$ 以下を達成した。また、伸線途中に中間熱処理を施した場合でも結晶粒径は $10\mu m$ を達成しており、安定して制御できていることが明らかになった。

一方、伸線途中に中間熱処理を施した場合、結晶粒径はほぼ同等であるが、配向性が弱くなっていることが明らかになった。もう一つ重要な点は、亜粒界あるいは小角粒界の密度が大幅に減少している点である。このような亜粒界あるいは小角粒界の存在により、硬度や強度などの機械特性は大幅に増加する。これらの結果から、中間熱処理なしで伸線を行い、得られた最適温度において圧造することが優れた機械特性を有するねじの最適製造条件であることが示された。

2-4-7 使用環境下での長期安定性、時効硬化の可能性検討

研究項目「高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの製造及びねじ特性評価に関する研究開発」の研究として、使用環境下での長期安定性、時効硬化の可能性検討を行った。すなわち、 $150^{\circ}C$ 程度における長時間使用により特性が低下しないか、 $200^{\circ}C$ 程度の時効処理により強度上昇が生じるか、強度上昇が生じた場合には使用環境下において過時効により特性が劣化しないかなどについての調査を行った。

まず、押出材を用い、 200 および $225^{\circ}C$ で長時間熱処理することによる硬さの変化を調べた。また、押出材に対し $450^{\circ}C \times 2h$ 均質化処理を行い、その後 $200^{\circ}C$ で長時間熱処理することによる硬さの変化も調べた。また、実際に加工したネジについても、 $200^{\circ}C$ で長時間熱処理することによる硬さの変化を調べた。

押出まま材において、200 および 225°Cのいずれの温度での熱処理においても、顕著な硬度上昇は見られなかった。この結果は、析出するための過飽和に固溶した元素が存在しないためではないかと考え、450°Cにおいて均質化熱処理を行い、その後 200°Cで長時間熱処理を行い硬さの変化を調べた。しかしながら、この処理においても顕著な硬度上昇は見られなかった。これは、今回用いた合金において、Al が最大 9%に対しその最大固容量は約 6%であるが、Ca が 2%含まれているため、Al が Al-Ca 系の化合物に消費されてしまっている。そのため、過飽和に固溶した Al が存在せず、時効硬化がみられなかったものと推察される。今後、時効硬化を狙った材料にするためには、Al 量を増やした合金開発などが課題になると考えられる。

一方、ねじにおいては、押出材あるいは押出熱処理材と比べて高い硬度を示した。これは、前述したように、ねじにおいて結晶粒径が微細化していること、結晶内部に転位などの欠陥が蓄積しておりそれにより硬化していることが挙げられる。もう一つ重要な点は、ねじが 200°Cの熱処理においてその特性がほとんど変化しないことである。時効硬化を示す材料において、ある程度時間が経過し過時効となった場合、その強度が低下することが知られている。このような材料は高温での使用に適していない。今回開発したねじにおいては、時効硬化の可能性は低いものの、200°C程度の温度での組織変化はほとんどなく、長期間特性が劣化しない可能性が示された。この点については、今後より長時間の試験が必要であるが、長期使用に適した組成、組織を有しているものと推察される。

3. 高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの製造及びねじ特性評価に関する研究開発

(株式会社丸エム製作所)

3-1 生産性の高い塑性加工（圧造及び転造加工）による高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの成形技術に関する研究開発

マグネシウム合金のねじ成形は、圧造、転造のように大きなひずみを伴うため、加工は主に動的再結晶下で行なわれ、そのため、成形性は、温度、および加工速度に影響される。また、この動的再結晶は、製品の機械特性に影響を与えるので、これらの制御が成形性と合わせて重要になる。これまでの機械プレスでは、特に低速付近の速度の制御が困難であるので、今回、圧造のためにサーボプレスを導入した。

また、ものづくりに数値解析（有限要素法解析）を導入して、より発展性がある高度化された生産システムを構築することを目指した。そのために、まず基本となる材料試験を行い、素材のデータベースを作成した。こうして、ねじの成形を、加工性の見地から最適化すると共に、製品の特性に影響を与える再結晶の分布とその粒径を予測することを目指し、実験と計算を行った。また、ねじの製品評価に重要となるクリープに関するデータも合わせて整理され、熱履歴を受ける締結体の軸力変化と耐熱性の評価に活用された。

3-1-1 素材の基礎データベースの構築

3-1-1-1 変形抵抗データ

開発ねじに使用された4種類の高強度耐熱マグネシウム合金（AZX912, HR1, HR2, AMX602）について、比較材である汎用マグネシウム合金（AZ31）およびアルミニウム合金（A5052）と共に、温度とひずみ速度を変数とした変形抵抗試験を行った。図3-1-1にその結果の例とそのひずみ速度指数 m を示す。試験は、 $\phi 8 \times 12\text{mm}$ の円筒試験片が用いられ、高周波誘導加熱による加工熱処理試験装置（サーモメックマスター）をもちいて圧縮試験が施された。温度は、 $150 \sim 450^\circ\text{C}$ 、ひずみ速度については、 $5 \times 10^{-3} \sim 5 \text{ s}^{-1}$ の範囲としている。動的回復を示すアルミニウム合金に対し、マグネシウム合金は、すべて典型的な動的再結晶を示す。実際の加工速度に近い 0.5 s^{-1} で比較すると、AZ31が 250°C で70%以上の加工が可能であるのに対し、AMX602, AZX912, HR2は 300°C 以上、HR1は 350°C 以上で加工が可能となる。HR1は、希土類金属を含んだ合金であり、それによる固溶強化により、高温での変形抵抗が比較的高くなったものと考えられる。これらの変形抵抗の結果は、圧造及び転造の解析に用いられ、後述のサーボプレスに取り付けられたロードセルにより、妥当性を検証した。

3-1-1-2 クリープデータ

高強度・耐熱マグネシウム合金4種類（AZX912, HR1, HR2, AMX602）について、ビレット、押し出し材、伸線材のそれぞれについて、 $\phi 4\text{mm}$ のクリープ試験片に加工した後、ひずみ速度を低速でかつ一定とした、ひずみ速度-応力測定試験機により、温度を $150 \sim 200^\circ\text{C}$ で、ひずみ速度に対応する応力を求めた。なお、試験は大阪府立大学にて行われ、結果は、Nortonの式に温度依存の項を加えた構成式で整理された。

3-1-1-3 動的再結晶データ

単相組織で、マグネシウム合金の基本となるAZ31について、動的再結晶のための基礎データを採取した。モデルには、鉄鋼の熱間圧延でしばしば用いられるオーステナイト組織の動的再結晶挙動を扱うモデルを採用した。

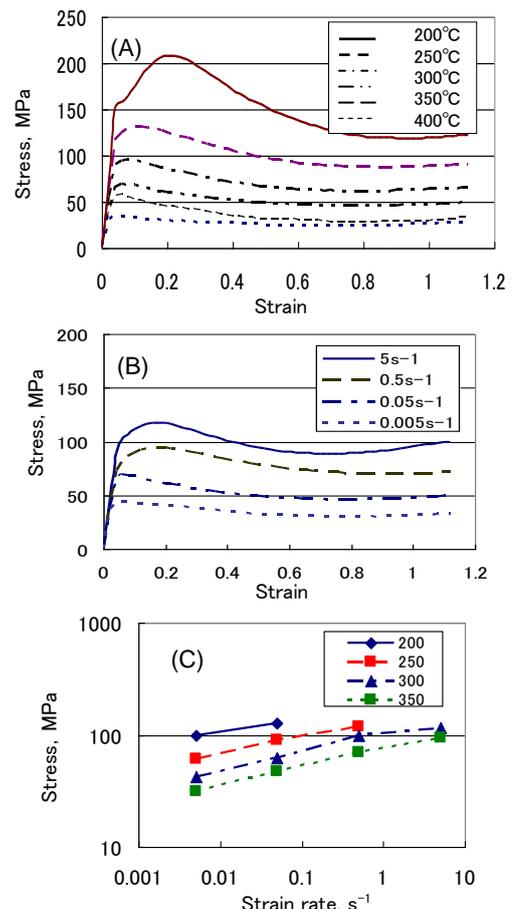


図3-1-1 AZ31の変形抵抗曲線
(A) ひずみ速度 0.05s^{-1} における温度依存性
(B) 300°C におけるひずみ速度依存性
(C) ひずみ 1.0 におけるひずみ速度依存性

この係数を求めるために、初期粒径、ひずみ速度、温度を変化させたときのひずみ量と結晶粒径を測定した。再結晶の開始を表す臨界ひずみは、ピークひずみの 70%とした。マグネシウム合金の動的再結晶は、最近の研究結果で、結晶内のセルが分割されて生成するその場再結晶であり、鉄鋼のオーステナイトにおける不連続析出とは異なるといわれている。ただし、変形抵抗に現れるマクロ的な変化はよく似ており、また、市販の解析コードに唯一含まれていることから、後者のモデルを採用した。

3-1-2 有限要素法（数値解析）による設計システムの構築

リメッシュによる大変形解析に優れる市販の解析コード（Deform および Deform-HT）を用いて、3次元解析を中心に、上記で求めた材料データを用いて計算を行なった。なお、クリープおよび動的再結晶については、2次元軸対称および平面ひずみ問題として扱っている。成形解析は、温度と連成させた剛塑性モデルを用いている。図 3-1-2 に AZX912 における成形時の荷重変化の実験値及び計算値を示す。図 3-1-3 には、成形時のひずみと、加工熱により内部の温度の上昇の情報を与える温度分布を示す。

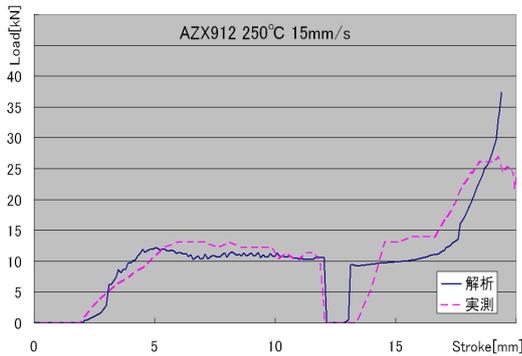


図 3-1-2 圧造時の時間-荷重線図(実験値と計算値)

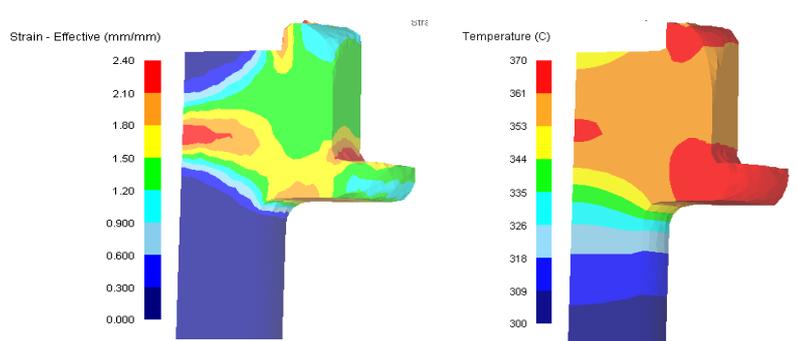


図 3-1-3 仕上げ圧造時のひずみ分布(左)と温度分布(右)(圧造温度 300°C)

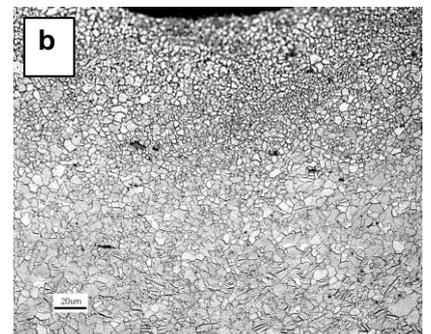
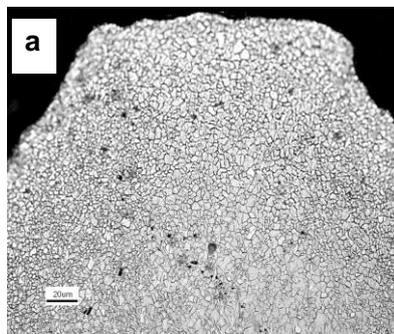
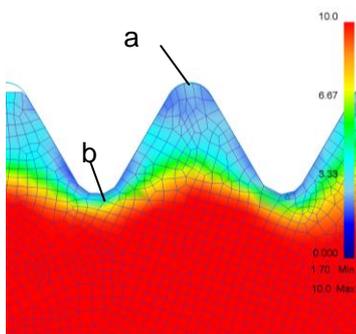
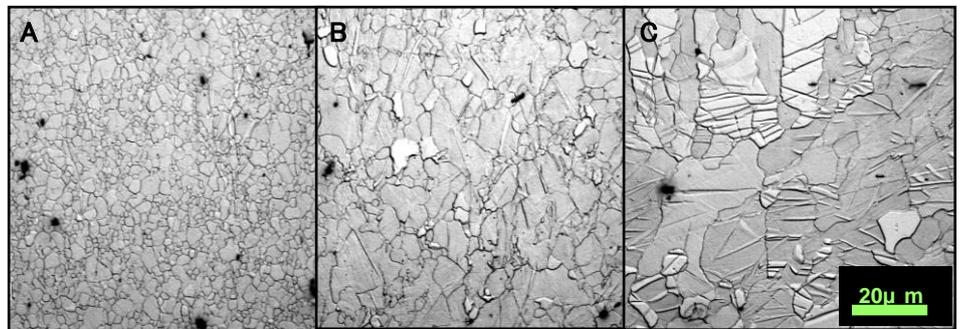
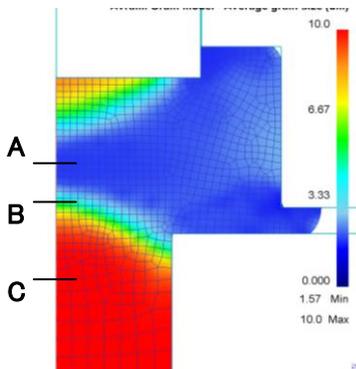


図 3-1-4 AZ31 の加工中の動的再結晶の結晶粒径の解析値と組織 上段：圧造工程，下段：転造工程

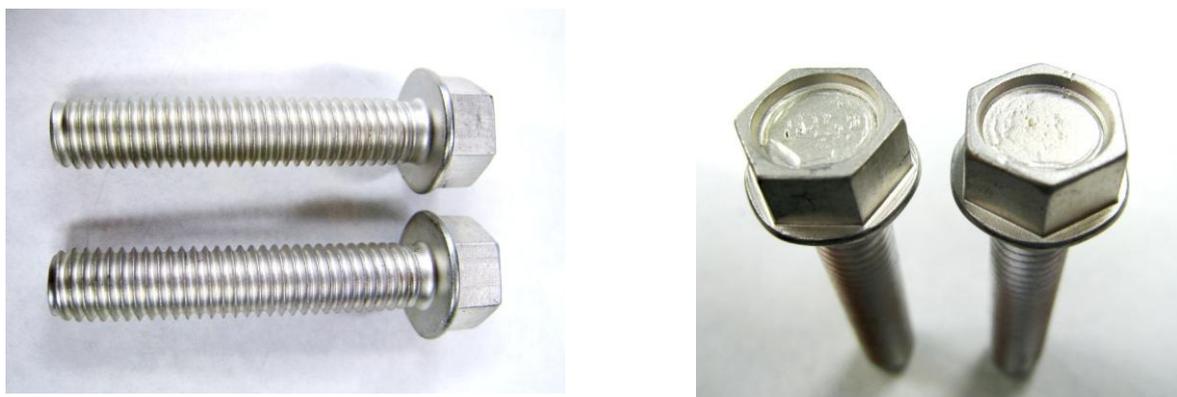


図 3-1-5 成形された高強度耐熱マグネシウム合金ねじ (AZX912) の外観

図 3-1-4 は、AZ31 における圧造および転造における動的再結晶解析の結果で、動的再結晶粒を含めた平均結晶粒度分布をしめす。この結果は、組織写真と比較され、良い一致が得られた。特に、転造においては、加工条件と強度の関係が、この解析を通して明らかになった。

3-1-3 温度速度制御が可能な高剛性圧造機による生産技術の開発

フライホイールからのエネルギーで量産性に優れ、速度制御が困難な従来の横型圧造機に替わり、速度および加速度制御が可能なサーボプレスを導入した。ダイセットには、温度制御システムを組み込み、また半自動で圧造が可能となるよう一部をロボット化した。ターゲットとしては、JIS の M6, M8 のフランジ付 (あるいは無し) 六角ボルトとし、ねじ頭の金型形状を、解析を含めながら最適化することで、工程能力の高い圧造を可能にした。また、転造においても同様に、速度制御の可能転造機を導入して安定したねじを作るとともに、強度の高いねじ部をつくるために、前記の動的再結晶の計算結果を参考に温度と速度を設定した。図 3-1-5 に、成形された高強度・耐熱マグネシウム合金ねじ (AZX912) の外観を示す。

3-2 時効熱処理による耐クリープ性向上に関する研究開発(ねじの特性向上技術に関する研究開発)

3-2-1 成形中の組織改善による特性向上

成形中の組織変化については、押し出し→伸線→ねじ成形の順で系統的に結晶粒径の試験がなされた。金属顕微鏡での結晶粒径の測定結果から、焼なましなどの静的な再結晶は、加工中に生じる動的な再結晶に比較すると小さく、これで制御することは容易でないことがわかった。マグネシウム合金の機械特性を評価する場合、結晶粒だけでは不十分で、配向性や結晶内の形態についての評価が必要である。今回、後方散乱電子線回折法 (EBSD) による解析を行い、各工程における内部の配向性と結晶粒内の変化が評価された*。

3-2-2 ねじ成形後の熱処理による特性向上

ねじ成形後の熱処理によるマグネシウム合金ねじの強度、耐クリープ性の向上をめざした。時効硬化の可能性を検討するために、AMVX602, AZX912, HR1, HR2 を用いて、200℃前後において数分から数時間単位の処理を行なったが、明確な効果は現れなかった。ただし、耐熱性に重要である長期安定性 (応力はかからない状態) は、200℃で確認された**。

*、** 結果の詳細は、2-4 のねじ用高強度・耐熱マグネシウム合金の微細組織評価の章 (大阪府立大学) を参照。

3-3 高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの特性評価に関する研究開発 (「ねじの評価と締結技術」に関する研究開発)

成形されたねじの基本特性である強度（引張り破断強度）と降伏強度、さらに耐熱性に関係するねじ単体のクリープ特性と、締結状態でのボルト軸力に及ぼす初期締結力と熱履歴の影響について評価した。最後に、締結条件を考える際に、きわめて重要となる「ねじのゆるみ」について試験し、ねじの締結条件について検討した。

3-3-1 高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの基本特性評価

3-3-1-1 ねじの強度(室温)

完成した各材質のボルトについて、室温にて、試験速度 0.166 mm/s で引張り試験を行った。その試験結果を図 3-3-1 に示す。ボルトの強度は、破断荷重をボルトの有効断面積 (JIS) で割った値とし、降伏強度は通常の試験片の 0.2%耐力と同様な方法で求めた。このなかで、AZX912 が強度と降伏強度ともに最大値を示している。この値は、汎用マグネシウム合金の約 1.3 倍に相当する。

3-3-1-2 ねじの耐熱性の評価

耐熱性については、クリープ試験機にボルトを取り付けるジグを組み込み、製作したボルトを 90,120,150°C の 3 つの温度条件で、荷重を降伏荷重の 30%, 50%, 70% として行い、それぞれのクリープ速度を測定した。変形抵抗は大きかった HR1 が、クリープ速度が大きく、HR2 < AZX912 < AMX602 < HR1 の順であり、必ずしも変形抵抗との対応はつかなかった。図 3-3-2 に 90°C における各材料のクリープひずみを示す。AZ31 は、AZX912 と比較して約 10 倍のひずみ速度となっている。図 3-3-3 には、AZX912 におけるボルト単体のクリープひずみ速度について、温度および荷重の依存性を示す。

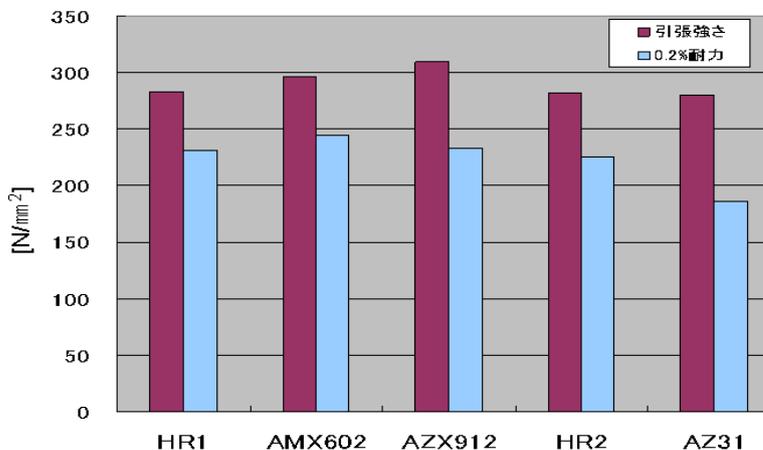


図 3-3-1 開発ボルトの引張り強度と降伏強度

締結した状態での熱履歴に伴う軸力の変化は、専用の実験用ジグを製作して測定された。次章にその結果について詳細を報告する。

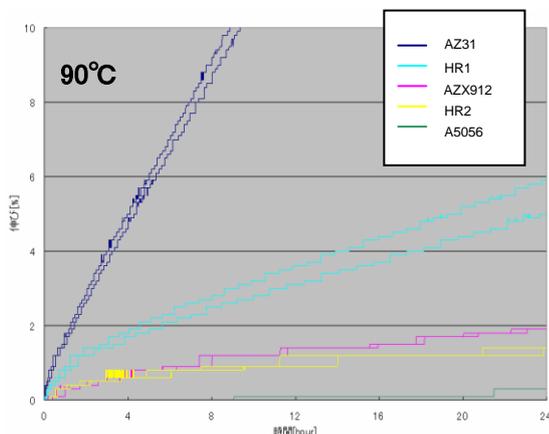


図 3-3-2 開発ボルトのクリープひずみ

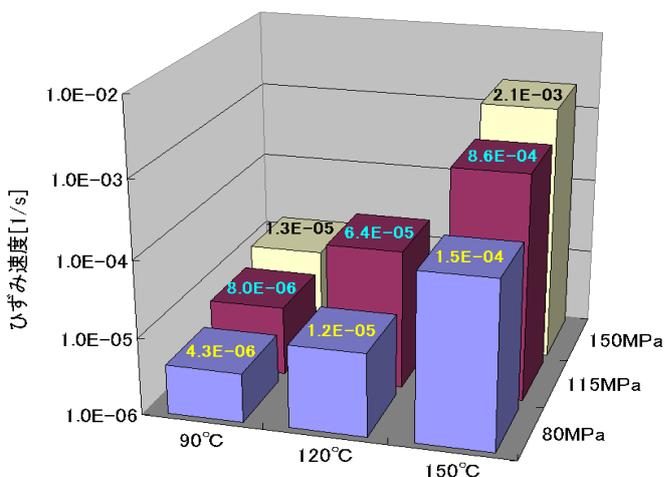


図 3-3-3 AZX912 のボルト単体におけるクリープひずみ速度に及ぼす温度と引張り応力の影響

3-3-1-3 ねじ締結のボルト軸力に及ぼす初期締結力、熱履歴の評価 (大阪府立産業技術総合研究所)

ねじ締結体に熱負荷を与えた場合、各部材の線膨張係数の違いによる熱応力の発生やクリープ等により締付け軸力が変化し、ゆるみや破損などの原因となる。サブテーマ 3-3-1-3 では、本プロジェクトで開発される高強度・耐熱マグネシウム合金ねじが、締付け軸力変化の少ないねじであることを確認する。

開発された高強度・耐熱マグネシウム合金ねじを用いた締結体について、残留締付け軸力に与える初期締付け軸力の影響に関してデータ取りを行った。

3-3-1-3-1 実験方法

3-3-1-3-1-1 締結体材質および締結状態

図 3-3-4 に示すように、比較材ねじまたは開発された高強度・耐熱マグネシウム合金ねじと ADC12 製めねじ部材を用いて、マグネシウム合金鋳物製被締結部材 (ACM522、AM50) を締結した。

3-3-1-3-1-2 初期締付け軸力の影響評価

図 3-3-5 に示すように、各材質で共通した締付け軸力を数レベル設定して室温で締付けを行い、熱風循環式恒温槽中で 150℃、約 95 時間保持した。その後恒温槽の扉を開放して室温まで自然冷却し、ゆるめ作業を行った。(本来 150℃で 100 時間保持する計画であったが、空調稼働時間に制限のある実験室で、締付け作業とゆるめ作業をほぼ同じ温度環境で実施するため時間を短縮した。ただし、この温度でのクリープによる軸力低下は、熱負荷開始後 30 時間程度までに生じており、後半数時間の短縮は結果にほとんど影響を与えない。)

3-3-1-3-1-3 熱負荷温度の影響評価

平成 21 年度開発材については熱負荷温度の影響についても評価した。

初期締付け、熱負荷は、3-3-1-3-1-2 と同様の手法で与え、軸力としては AZ31 の最小降伏締付け軸力の 30% (1.98kN) を選択した。

熱負荷温度は 80℃、100℃、120℃、150℃の 4 レベルとし、150℃のデータについては 3-3-1-3-1-2 の実験で得られた値を採用した。

3-3-1-3-1-4 軸力測定用ひずみゲージ

開発されたねじは全ねじであるため、高温用ひずみゲージ貼付部は、おねじの谷底が無くなってなめらかな円筒状になる程度まで切削してある。ひずみゲージはボルト軸をはさんで対面に 2 枚貼りつけている (曲げの影響を除去)。また、室温におけるひずみ-ボルト軸力関係の校正、20℃~150℃までのひずみゲージ出力 0 点ドリフト特性の測定を事前に実施して使用した。

3-3-1-3-1-5 みかけの軸力変化

本研究では、ボルト軸力を測定するためにひずみゲージを使用しているが、本来、ひずみゲージはその名のとおりひずみを測定するものである。

室温 (一定温度)、短時間で弾性域での測定においては、ボルトに発生している軸力とボルトのひずみ量は比例関係にあるとみなせるので、ひずみを測定し校正係数により換算すればボルト軸力を求めることができる。

しかし、高温で長時間の測定においては、ボルトのひずみ量は弾性変形によるものだけではなくクリープによるひずみも加わるため、単純に校正係数を掛け合わせたのでは実際よりも大きな軸力が発生しているように換算されてしまう。

また、高温によるゲージ素子自体の特性変化や、計測記録装置の電氣的ドリフトなどについても考慮しなくてはならないが、その把握は容易ではない。

本研究では、締付けから熱負荷ゆるめにおける全過程のゲージ出力を記録しているが、前述の問題や、主に残留締付け軸力に着目してねじを評価していることを考慮して、初期締付けにおけるひずみゲージ出力の増加、および、冷却後ゆるめ過程におけるゲージ出力減少を計測し、それぞれ初期締付け軸力、残留締付け軸力に換算している (図 3-3-5)。

3-3-1-3-2 実験結果

3-3-1-3-2-1 初期締付け軸力の影響評価

図 3-3-6 に 150℃における開発材の初期締付け軸力と軸力残存率の関係を示す。熱負荷後の残留締付け軸力は、目標としている初期締付け軸力の 70%以上という値を大きく下回っている。しかし、初期締め付け軸力の低下と共に残存軸力は増加していく。

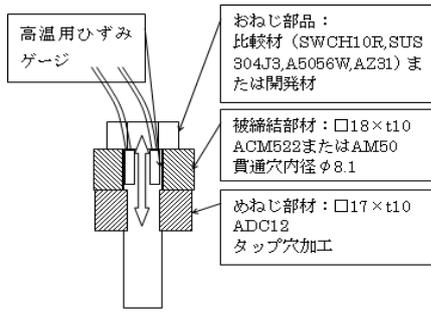


図 3-3-4 熱負荷実験用締結体形状・材質

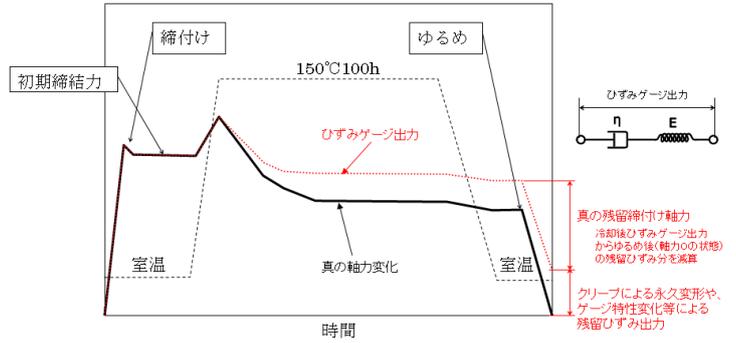


図 3-3-5 みかけの軸力変化

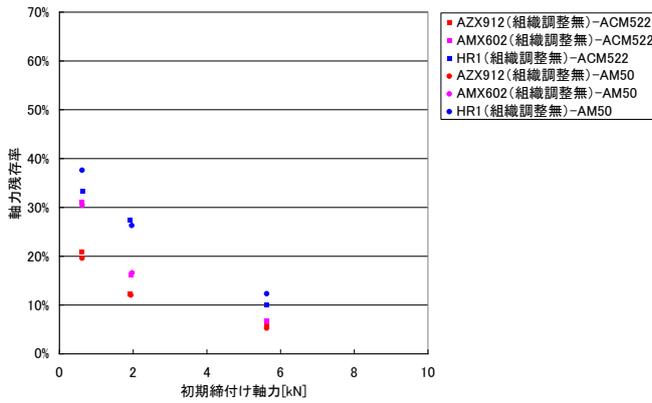


図 3-3-6 初期締付け軸力と軸力残存率の関係 (熱負荷 150°C95h)

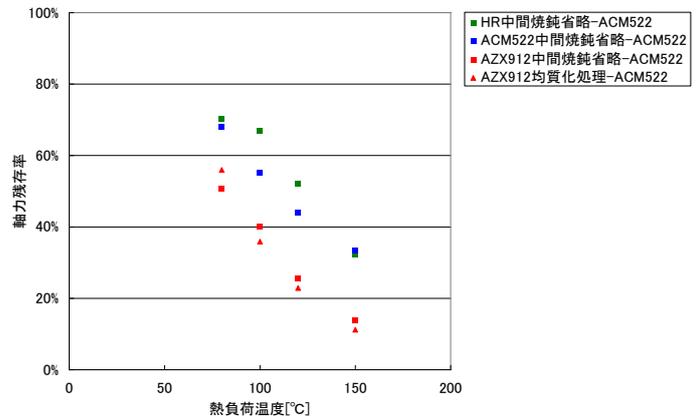


図 3-3-7 熱負荷温度と軸力残存率の関係 (熱負荷 95h、初期締付け軸力 1.98kN)

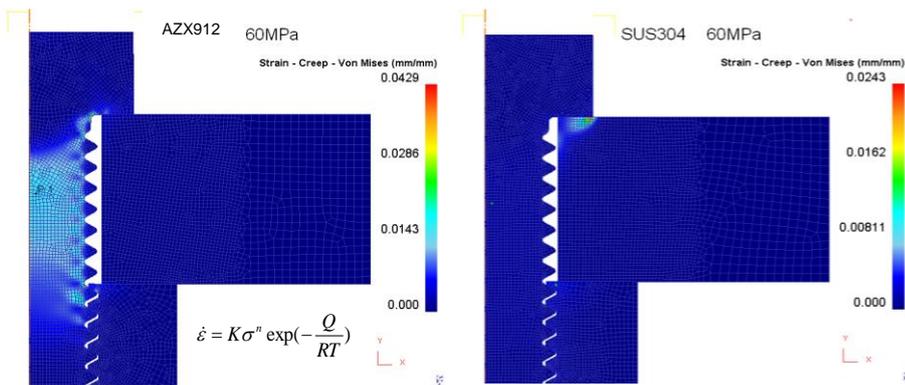


図 3-3-8 マグネシウム部材を締結した際に生じるクリープひずみ
左:マグネシウム合金ボルト
右:スチールボルト

3-3-1-3-2-2 熱負荷温度の影響評価

図 3-3-7 に平成 21 年度開発材の熱負荷温度と軸力残存率の関係を示す。初期締付け軸力の影響評価(3-3-1-3-2-1)と同様に、HR2 中間焼鈍省略品、HR1 中間焼鈍省略品は、80°Cにおける残存軸力は、目標の 70%を達成した。しかし、いずれの材質も熱負荷温度の上昇とともに残留軸力が低下し 150°Cでは目標値を大きく下回った。

マグネシウム合金ボルトで締結した場合は、今回の結果から、150°Cにおいて残存軸力を 50%以上維持することは、初期締結力が降伏荷重の 10%程度でも難しい。60%以上の残存軸力を保持するためには、使用温度は 100°C以下に抑える必要がある。

図 3-3-8 は、試験中の応力-ひずみの有限要素法解析の結果であるが、AZX912 のボルトでマグネシウム部材を締結した場合と、同部材をスチールボルトで締結した場合で、クリープひずみの現れる場所が異なることをしめしている。AZX912 においては、クリープひずみは主にねじ軸に発生するのに対し、スチールでは、被締結材に発生している。このようにマグネシウム合金ボルトで締め付けた場合は、ねじ側のクリープが問題となる。

3-3-2 高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの疲労、腐食、電食、遅れ破壊などの基本特性の評価のまとめと、ねじ形状の研究

3-3-2-1 耐食性試験

3-3-2-1-1 試験方法

耐食試験は、まず JIS に規定される塩水噴霧試験にて行われた。しかし、塩素が含まれた水溶液では、条件が過酷なため合金の耐食性の差がつかなかった。現在、これに替わる試験として、高温高湿試験（JISC0097-2001 環境試験方法-電気・電子-による）を適用し実験を行なった。条件としては、温度 85℃、湿度 85%、試験時間 96 時間として、専用の試験機にて行なわれた。

3-3-2-1-2 実験結果

すべてのボルトにおいて、黒色の変色が見られたが、その程度は、アルミニウムを最も多く含む AZX912 が少なかった。今回、開発されたボルトの中では、AZX912 が比較的耐食性が良好であると考えられる。合わせて、化成皮膜処理品を試験したが、皮膜の形成が十分でなく、そのため同様の黒色変化を生じるとい現象を確認した。

耐食性については、顧客の使用環境に合わせた試験の実施と、必要に応じて表面処理が必須となると考えられる。

3-3-2-2 ボルトの疲労試験

ボルトの疲労試験は、JISB1081 (ISO3800) に従い、M8 用のボルトの取り付けジグを作成し、これを、油圧サーボを用いた動的物理試験機（島津製作所 20kN）を用いて試験した。荷重および変位の任意の波形の繰り返し荷重が付加できるが、今回は荷重制御により試験を行った。負荷荷重は、片側引張りとし、上部荷重-0.1×上部荷重の間で正弦波形を周波数 10Hz で与えて行なわれた。結果は、SN 線図（ウェラ線図）にて整理する。

図 3-3-9 に今回の条件で得られた試験結果のうち AZX912 ボルトを示す。この方法では、疲労限として 40MPa 付近である。また、図 3-3-10 に、軸力を降伏軸力の 30%に想定し平均荷重 60MPa としたときの上側荷重と回数に関する試験結果を示す。疲労限を与える振幅は、平均荷重の 20%程度（12MPa）と判断される。これを締結線図を用いて 60MPa の軸力で締結された締結体にかかる外力に換算すると、その約 1.5 倍の 30%の振幅に相当する。

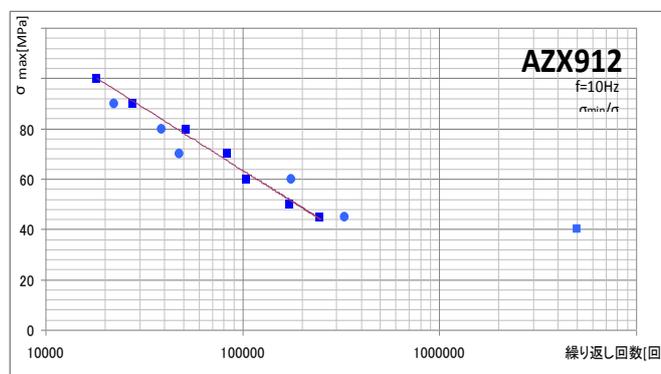


図 3-3-9 AZX912 における上部荷重-0.1×上部荷重（片側引張り）疲労試験結果

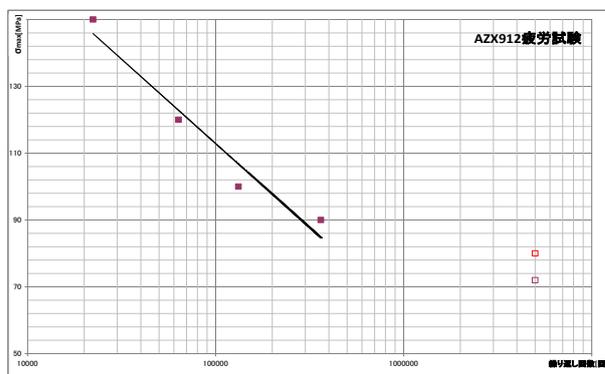


図 3-3-10 AZX912 における平均応力 60MPa における疲労試験結果

3-3-3 高強度・耐熱マグネシウム合金ねじの特性評価に関する研究開発

(最適締結条件と締結方法の確立)

(神奈川大学、株式会社丸エム製作所)

新しい高強度・耐熱マグネシウム合金製ねじの開発において、最適な締結条件と締結方法を確立するための基礎的資料を得ることを目的とし、まず、ねじの大きな締付け力を想定し、高荷重下での滑り摩擦試験を行うために試験機を製作し、マグネシウム合金を主な材料として平板のすべり摩擦試験を行った。次に、新しいねじが信頼性のある締結を得るために、軸方向繰返し荷重による緩み試験を行い、さらに、軸直角方向繰返し変位による緩み試験を行った。その成果について報告する。

3-3-3-1 高荷重での滑り摩擦試験 (平成 19 年度)

3-3-3-1-1 滑り摩擦試験機及び試料

図 3-3-11 は滑り摩擦試験機で、これを 200 kN 容量の万能油圧引張圧縮試験機の圧縮関係部に取付けて作動する。試料(上)、試料(下)を可動体①と固定体②との間にはさみ、棒④を経て荷重 W を加える。ボルト③は固定体に対して可動体を図で左方に引っ張るのに用い、この引張力 Q と荷重 W より摩擦係数は Q/W で算出する。

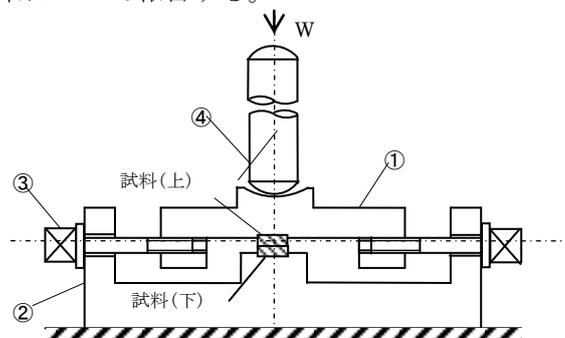


図 3-3-11 滑り摩擦試験機

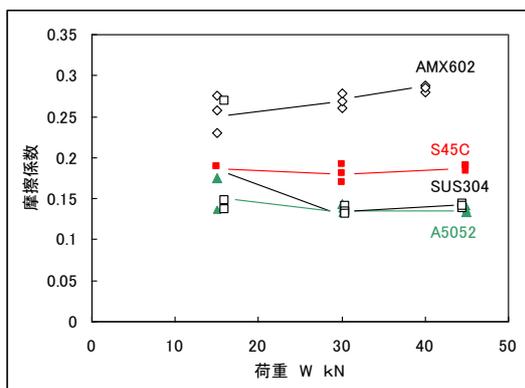


図 3-3-12 同一材料の組合せにおける摩擦係数

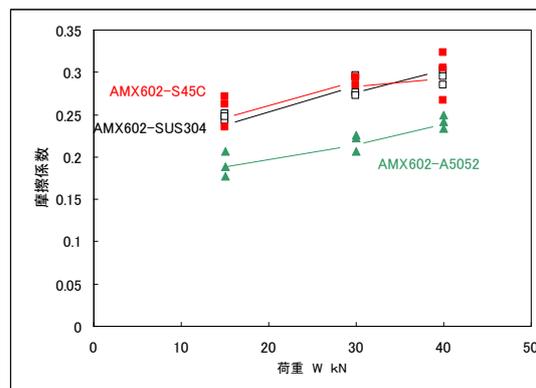


図 3-3-13 異なる材料の組合せにおける摩擦係数

試料はマグネシウム合金 (AMX602)、アルミニウム合金 (A5052)、ステンレス (SUS304)、鋼 (S45C) である。

3-3-3-1-2 試験結果

図 3-3-12 は同一材料の組合せ、図 3-3-13 はマグネシウム合金 (AMX602) と異なる材料との組合せ結果を示す。

3-3-3-1-3 研究成果

- (1) マグネシウム合金 (AMX602) は、アルミニウム合金 (A5052)、ステンレス (SUS304)、鋼 (S45C) の材料に比べて摩擦係数の値が非常に大きい。
- (2) マグネシウム合金 (AMX602) と異なる材料との組合せでは、いずれも荷重が大きくなると摩擦係数の値が大きくなり、荷重の依存性が顕著である。

3-3-3-2 軸方向繰返し荷重による緩み試験 (平成 20 年度)

3-3-3-2-1 試験方法及び試料

軸方向振動緩み試験は、疲労耐久試験機を用いてボルト・ナットの結合および締結の状態での軸方向に荷重を繰返し (10Hz) 作用させ、緩みの特性を調べる。ボルトは中心に直径 1.6mm の穴をあけ、埋め込んだひずみゲージで軸力を測定する。緩み回転角は図 3-3-14 に示すボルト・ナット締結体のボルト頭に取り付けたロータリエンコーダで測定、記録する。試料はフランジ付六角ボルト、ねじの呼び M8×40 のマグネシウム合金 AZX912 である。

3-3-3-2-2 試験結果

表 3-3-1 は目標締付け力をボルトの降伏荷重 F_s の $0.5F_s$ とし、3 種類の引張変動荷重におけるボルト・ナット締結体の緩み試験結果を示す。

表 3-3-1 軸方向繰返し荷重による緩み試験結果

初期 締付け力 F_p (N)	引張 変動荷重 $W_{ah} - W_{al}$ (N)	ゆるみ 回転角 ($^{\circ}$)	残留 締付け力 F_p' (N)	F_p'/F_p
3320	1735—28	0.025	3180	0.96
3478	2595—20	0.025	3434	0.99
2862	864—20	0.00	2753	0.96



図 3-3-14 ロータリエンコーダ取付

3-3-3-2-3 研究成果

- (1) マグネシウム合金ボルト、ナット結合体において、軸方向荷重の繰返しに伴う破断までのボルトの伸びは 0.007mm 程度で非常に小さく、緩みへの影響は少ない。
- (2) マグネシウム合金ボルトは、軸方向荷重の繰返しに伴う戻り回転によるゆるみは生じない。また戻り回転によらないゆるみについても、残留締付け力が 96~99% でゆるみは非常に少ない。

3-3-3-3 軸直角方向繰返し変位による緩み試験 (平成 21 年度)

3-3-3-3-1 軸直角方向ねじ緩み試験機及び試料

図 3-3-15 は軸直角振動方式のねじ緩み試験機の主要部分を示す。この締結体を油圧サーボ式疲労耐久試験機にセットし、ボルト軸に直角方向に繰返し変位 (振幅) を与えてナットの回転による緩みの特性を調べる。

試料はフランジ付六角ボルト、ねじの呼び M8×40 のマグネシウム合金 AZX912 と炭素鋼 SWCH10R の 2 種類である。目標締付け軸力はマグネシウム合金ボルト(AZX912)、炭素鋼製ボルト(SWCH10R)とも 840, 2520, 4200N の 3 種類である。これらの値はマグネシウム合金ボルト(AZX912)の降伏(耐力)荷重の 10, 30, 50% にそれぞれ相当する。繰返し変位 S は 0.1mm と 0.2mm で、締付け間距離(グリッパ長さ)は 27.5mm である。潤滑には二硫化モリブデン入りグリースをねじ部と座面部に塗布し、実験は同一条件で 3 回ずつ行い、変位の繰返しに伴う軸力の変化を測定・記録する。

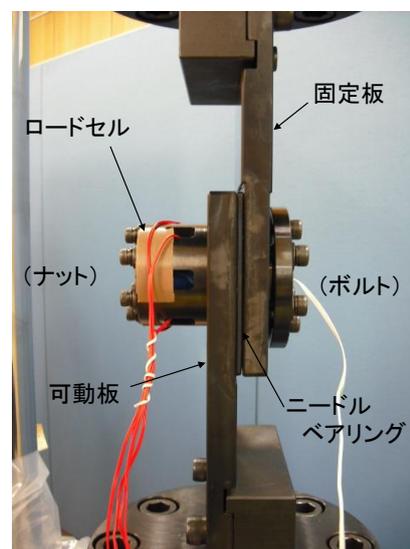


図 3-3-15 締結体主要部

3-3-3-3-2 試験結果

図 3-3-16 は軸力 F —繰返し数 N (ただし時間 t で示し、例えば $t=300\text{sec}$ は繰返し速度が 10Hz のため $N=3000$ 回に相当) の記録線図で、マグネシウム合金ボルト(AZX912)は $S=0.1\text{mm}$ の場合に軸力の低下がほとんど認められない。表 3-3-2 はマグネシウム合金ボルト(AZX912) の 3 回行った緩み試験結果と往復滑りによる緩みが発生しない最大限界の滑り幅 $S_r^{(1)}$ の計算結果を示す。表中の○印は初期締付け軸力に対して 3000 サイクル数における軸力の低下が 20% 未満、△印は軸力低下が 20~80%、×印は軸力低下が 80% 以上、一は未実施を表わす。同様に表 3-3-3 は炭素鋼製ボルト(SWCH10R) の結果を示す。

【脚注】

- (1) 山本 晃・賀勢晋司：軸直角振動によるねじのゆるみに関する研究，精密機械，43-4(1977)470.

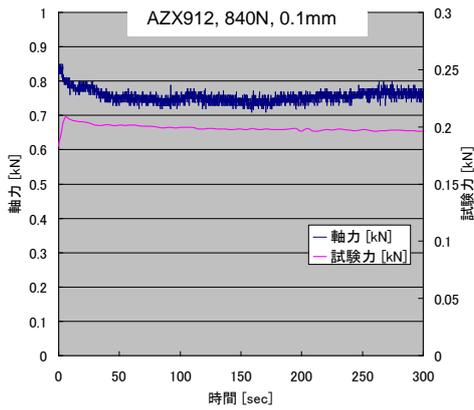


図 3-3-16 軸力—繰返し数の記録線図

表 3-3-2 マグネシウム合金ボルトの緩み試験結果

初期締 付け軸力 F_s (N)	繰返し変位 S (mm)						$S_{cr}/2$ (mm)
	0.1 (mm)			0.2(mm)			
	1	2	3	1	2	3	
840	○	○	○	×	×	×	0.133
2520	○	—	—	○	○	○	0.400
4200	○	—	—	—	—	—	—

表 3-3-3 炭素鋼製ボルトの緩み試験結果

初期締 付け軸力 F_s (N)	繰返し変位 S (mm)						$S_{cr}/2$ (mm)
	0.1 (mm)			0.2(mm)			
	1	2	3	1	2	3	
840	△	×	×	—	—	—	0.0425
2520	×	△	△	×	×	×	0.127
4200	○	○	○	×	×	×	0.212

3-3-3-3 研究成果

- (1) 初期締付け軸力が同じ場合、縦弾性係数の小さいマグネシウム合金ボルト(AZX912) は炭素鋼製ボルト(SWCH10R)に比べて緩み難い。
- (2) 往復滑りによる緩みが発生しない最大限界滑り幅の計算結果と緩み試験結果とはほぼ一致した。
- (3) M8×40 のマグネシウム合金ボルト(AZX912) を用いた締結条件として、降伏(耐力)荷重の 30% (2.52kN)の初期締付けによって 0.2mm の変位の繰返しを受けても緩まないことがわかった。

4. 終わりに

今回のプロジェクトは、それぞれの技術分野に長い歴史をもつ3社が連携し、新しいねじの開発に挑んできたものです。マグネシウム合金を用いたねじの開発には、単に新しい合金、あるいは加工の難しい材料の製造技術にとどまるものでなく、締結技術を含めた総合的な展開を必要としました。

すなわち、マグネシウム合金ねじを用いて「軽量化」という目的を達成するには、マグネシウム部材を同種の素材のねじで締結することによる化学的および機械的な長所をできるだけ見出して、それを最大限に生かしつつ、マグネシウム合金の機械的特性（強度、耐熱性）の欠点をできるだけ低く抑えるように、素材と加工技術を高度化することが要求されました。

素材に使われた合金の中で、本プロジェクトとしては、AZX912（9Al-Zn-2Ca）を標準材として推奨したいと考えております。これは、機械的特性にすぐれ、成形性も今回の合金の中では比較的良好であり、また希土類金属を含まず、将来的に入手性が良いと考えられるからです。

我々は、すべての工程において、加工が困難といわれてきたこのマグネシウム合金の成形を可能にし、展伸材によるマグネシウム合金ボルトの量産工程設計を完成させました。素材から押出し工程においては、清浄度を、現在生産が可能なレベルで最高度に上げ、均質化と結晶粒度を安定させて信頼性を向上させ、多孔押出しによる生産性を考慮した工程を確立しました。伸線工程においては、様々な組織調整を試みた後に到達した最適な工程が採用され、量産性に優れた冷間加工ができるように、周辺技術が改善されました。また、ねじ成形では、サーボプレスを用いた加工法を導入し、一定レベルの組織制御を可能にして、安定した加工ができるように工程が作られました。また、大学により、各工程のマイクロ組織の解析がなされ、マグネシウム合金ねじの加工と特性に関する理論的な基盤の確立とその検証が行われました。一方、締結技術の基礎となるゆるみ難さにおいて、マグネシウム合金ねじが鉄のねじより有利であること、すなわち小さい軸力でゆるみ難いことを見出されました。また、熱履歴を受ける締結体の特徴から、マグネシウム部材は同材のマグネシウム合金ボルトで締結することの長所が明らかとなりました。

このように、プロジェクトを通じてマグネシウム合金ねじを用いる締結に関して、本質的な理解が高まり、3年間の結果から、現段階におけるねじの仕様書が完成いたしました。コストについても、各分野の量産技術に長けた我々が、それを十分に意識して工程を開発してまいりましたので、量産時には、顧客の皆さんに満足していただけるものになると考えております。

実機試験のためのサンプル出荷を計画しております。是非、今回の開発ねじの適用を検討いただける企業の皆様の参画を希望いたします。

(総括研究代表者)