

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「難加工材 難燃性マグネシウム合金を用いた
極細径高精度長尺MIG溶接ワイヤの開発と量産化」

研究開発成果等報告書

平成26年3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 株式会社 大阪シティ総合研究所

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
- 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 1. 低コストで伸線が行える中径コイルを押出し加工するための金型技術の研究開発
 - 1-1 押出機の導入
 - 1-2 中径コイルの開発
 - 1-3 中径コイルの評価
- 2. 高精度・極細径・長尺ワイヤを伸線するための金型技術の研究開発
 - 2-1 細径コイルの開発
 - 2-2 細径コイルの評価
 - 2-3 極細径コイルの開発
 - 2-4 極細径コイルの評価
- 3. M I G溶接ワイヤに適した表面状態の研究開発
 - 3-1 M I G溶接ワイヤの開発
 - 3-2 M I G溶接ワイヤの評価
 - 3-3 低コストM I G溶接ワイヤの開発と改善
 - 3-4 低コストM I G溶接ワイヤの評価

第3章 全体総括

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

鉄道車両分野の新幹線では、さらなる高速営業運転をするために、騒音、地盤振動、低周波発生抑制の観点から、一層の車両構体軽量化が求められている。またリニアモーターカーでは、エネルギー効率を上げるために車両構体の軽量化が求められている。このような背景の下で、一般社団法人 日本マグネシウム協会に「マグネシウム合金高速車両構体実用化技術委員会」が設けられ、難燃性マグネシウム合金を用いた大型形材、大型板材、構体構造等の検討が行われている。ところが、難燃性マグネシウム合金の大型形材や板材を用いて車両構体を作るには、難燃性マグネシウム合金MIG溶接ワイヤが必須の副資材であるが、今は量産に使えるものは市場にもラボレベルでも存在しない（一般マグネシウム合金製MIG溶接ワイヤに領域を広げても輸入品しか存在しない）が、今後必ず国内で必要になるものである。このことは上記委員会でも認識され、川下製造業者である各鉄道車両メーカー等からも開発を望まれている。

また、自動車等の輸送機器分野では、CO₂削減や燃費改善の観点から、一層の車両軽量化が求められている。現状のエンジン車、ハイブリッド車、電気自動車のいずれも、車両軽量化はCO₂削減に結びつくものである。この分野でも輸送機器量産化に適した難燃性マグネシウム合金MIG溶接ワイヤが存在しないことが課題である。

2) 研究目的及び目標

難加工材である難燃性マグネシウム合金を用いてMIG溶接ワイヤとし、25m長さの車両構体を溶接するために、当該材料をアルミニウム合金製MIG溶接ワイヤ並みの直径許容差（JISZ3232）の精度を持つ極細径で長さ300mの長尺ワイヤのコイルを造る伸線技術確立する。

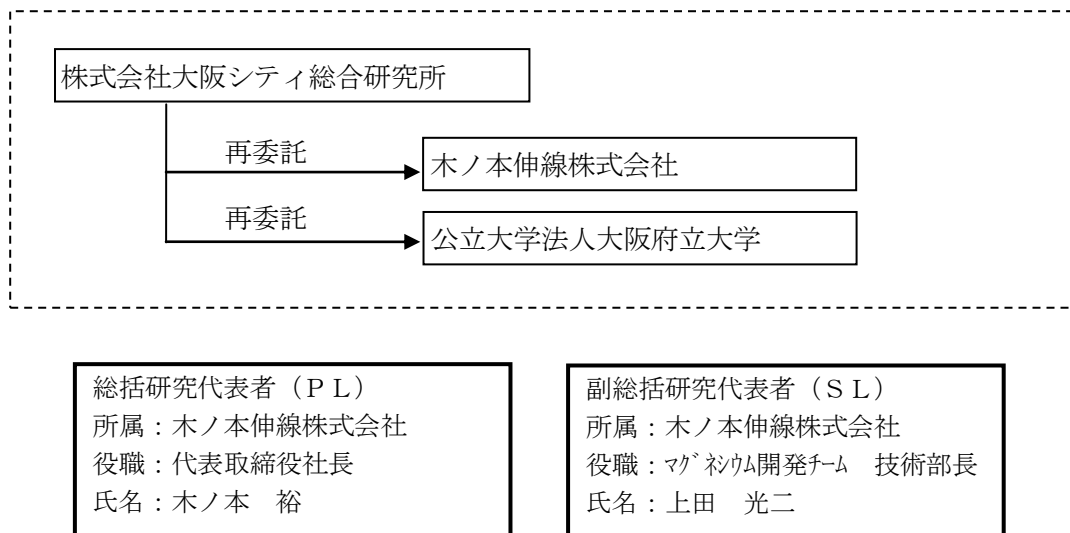
また、マグネシウム合金製MIGワイヤ市場へ早期に参入するため、現在4万円/kg程度で取引されている一般マグネシウム合金製MIG溶接ワイヤ（輸入品）よりも3割以上のコストダウンを図る。

MIG溶接ワイヤには、細径、長尺で高精度の形状、表面状態であることのほかに、低コストであることが求められる。これらの課題解決を伸線や押出しの難加工材の金型技術を高度化することにより実現することを目標とする。

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

（1）研究組織及び管理体制

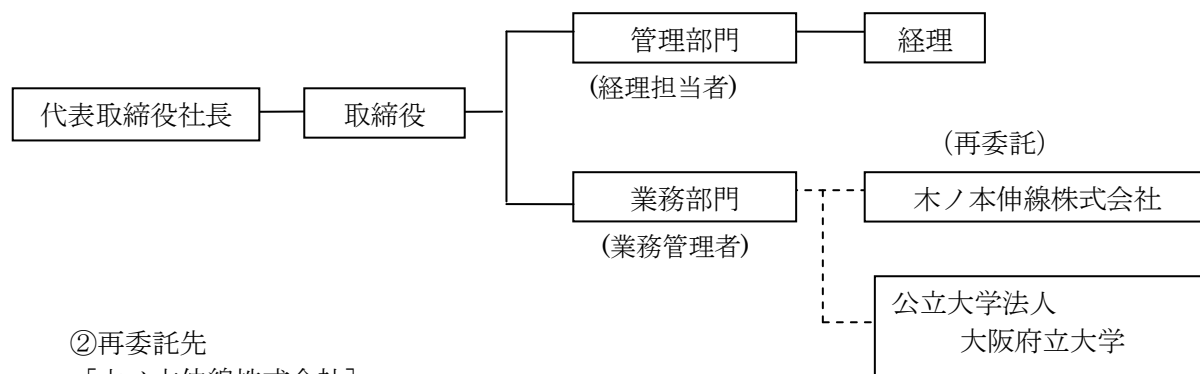
1）研究組織（全体）



2）管理体制

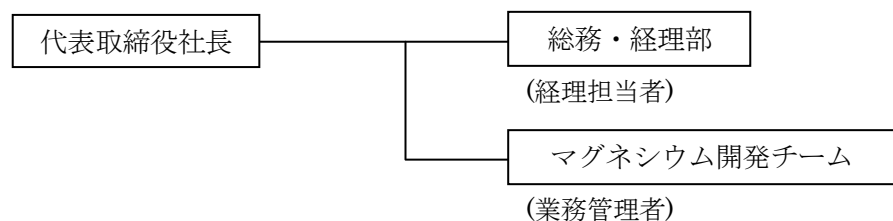
①事業管理者

[株式会社大阪シティ総合研究所]

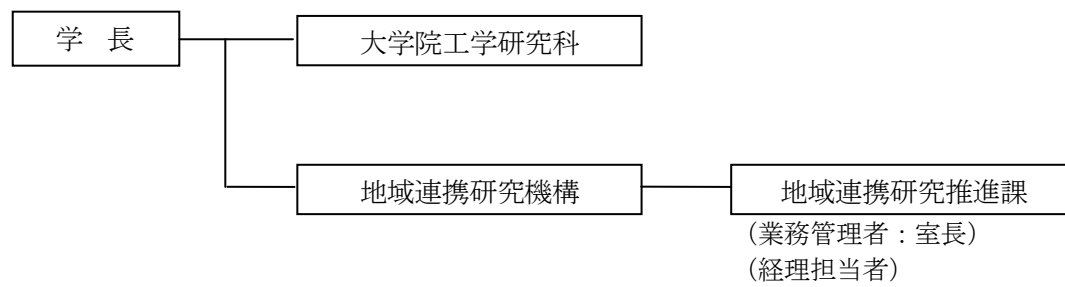


②再委託先

[木ノ本伸線株式会社]



[公立大学法人 大阪府立大学]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 株式会社 大阪シティ総合研究所

① 管 理 員

氏 名	所属・役職	実施内容 (番号)
山 本 俊 史	取締役	【 4 】
酒 井 孝 司	取締役	【 4 】
天 堀 博 史	シニアマネージャー	【 4 】

【再委託先】

②研 究 員

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 】 【 2 】 【 3 】 全般
上 田 光 二	マグネシウム開発チーム 技術部長	【 1 】 【 2 】 【 3 】 全般
木 ノ 本 史 郎	マグネシウム開発チーム 主任研究員	【 1 】 【 2 】 【 3 】 全般
西 野 英 樹	マグネシウム開発チーム 研究員	【 1 】 【 2 】 【 3 】 全般
田 村 一 裕	マグネシウム開発チーム 研究員	【 1 】 【 2 】 【 3 】 全般
田 中 淳 也	マグネシウム開発チーム 研究員	【 1 】 【 2 】 【 3 】 全般
中 平 まき	マグネシウム開発チーム 研究員	【 1 】 【 3 】 全般
桑 原 敏 弘	マグネシウム開発チーム 研究員	【 3 】 全般
井 上 敬 文	マグネシウム開発チーム 研究員	【 3 】 全般

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・准教授	【 1 】 2, 3 【 2 】 2, 4 【 3 】 2, 3, 4
辻 川 正 人	地域連携研究機構 リサーチアドミニストレーションセン ター・教授	【 1 】 2, 3 【 2 】 2, 4 【 3 】 2, 3, 4

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

株式会社 大阪シティ総合研究所

(経理担当者) 取締役 酒 井 孝 司

(業務管理者) 取締役 山 本 俊 史

(再委託先)

木ノ本伸線株式会社

(経理担当者) マグネシウム開発チーム 田村 一裕

(業務管理者) マグネシウム開発チーム 技術部長 上田 光二

公立大学法人 大阪府立大学

(経理担当者)	地域連携研究機構	地域連携研究推進課	専門役	若松	宮子
(業務管理者)	地域連携研究機構	地域連携研究推進課	室長	角谷	佳則

(4) 所在地

①事業管理者

- ・株式会社 大阪シティ総合研究所 (最寄り駅：京阪電気鉄道 京阪本線 北浜駅)
〒541-0041 大阪市中央区北浜2丁目5番4号

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)

- ・木ノ本伸線株式会社 加納工場 (最寄り駅：近畿日本鉄道 けいはんな線 吉田駅)
〒578-0901 大阪府東大阪市加納5丁目2番36号
- ・公立大学法人大阪府立大学 (最寄り駅：大阪市営地下鉄 御堂筋線 なかもず駅)
〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1番1号

1－3 成果概要

鉄道車両等の輸送用機器製造業界で求められている難燃性マグネシウム合金製の大型構造物を溶接組立てするMIG溶接ワイヤの開発について、伸線や押出しの難加工材の金型技術を高度化することで実現するため、以下の3つのサブテーマを設定した。

- 【1】低コストで伸線が行える中径コイルを押出し加工するための金型技術の研究開発
- 【2】高精度・極細径・長尺ワイヤを伸線するための金型技術の研究開発
- 【3】MIG溶接ワイヤに適した表面状態の研究開発(量産化に向けた研究開発)

これらのサブテーマについて研究開発に取り組み、計画通りの研究を行ったので、その研究開発計画および成果概要をサブテーマごとに以下に示す。

【1】低コストで伸線が行える中径コイルを押出し加工するための金型技術の研究開発

溶接ワイヤ用伸線材料の観点から見ると、押出メーカーの押出設備は大型で押出線材が後工程の伸線加工に適した細い線径(φ4)ではないため、細径ワイヤ(φ2～φ3.2)にするためには多くの伸線工程を経なければならない。また伸線工程に必要な直径の許容差(+0～-0.2mm)ではなく、JISH4203「マグネシウム合金棒」普通級のφ4での直径の許容差は+0.5～0mmもあるため大きな減面率になる伸線加工ができず、加工工程全体を通してみると高コストに留まっている。これを解決してコストダウンするために、伸線工程に適した線径(φ4)を適正な押出比で単孔押出できる押出機を導入し、押出温度、押出速度などの最適な押出条件を出すとともに、中径コイル材の組織微細化に適した押出ダイスの設計・製作を行った。

【2】高精度・極細径・長尺ワイヤを伸線するための金型技術の研究開発

難燃性マグネシウム合金製MIG溶接ワイヤ用の伸線ワイヤとして供するためには、難加工材である難燃性マグネシウム合金を用いて、アルミニウム合金製MIG溶接ワイヤ並みの極細径(φ1.2、φ1.4、φ1.6)で、高精度(真円度が0.015mm以下で、直径の許容差が+0.01～-0.04mm)、長尺(300m)のワイヤが必要なので、この製造技術を伸線ダイス形状(金型)の面から研究開発する。ダイス形状については、引張応力が材料の持つ抗張力より大きくならない範囲で減面率が最も大きくなるように、金型の構成要素である減面率、アプローチ角度とベアリング長さの最適化を図った。

その結果、極細径(φ1.2)で、高精度(真円度が0.015mm以下で、直径の許容差が+0.01～-0.04mm)のワイヤを作り出す伸線ダイス構造を把握した。

【3】MIG溶接ワイヤに適した表面状態の研究開発(量産化に向けた研究開発)

難燃性マグネシウム合金製MIG溶接ワイヤとして供するためには、アルミニウム合金製MIG溶接ワイヤ並みに加工された高精度・極細径・長尺の難燃性マグネシウム合金製ワイヤの「表面が滑らかで、使用上有害な欠陥がないもの」(JISZ3200)とされている。

本研究では難燃性マグネシウム合金MIG溶接ワイヤとして必要な滑らかさを定量化した。また、表面処理後もその滑らかさを実現可能な加工したままの材料の表面粗さを決定し、その表面粗さを実現できるように、金型及び加工条件を最適化した。さらに、最適押出条件下および最適伸線条件で試作したMIG溶接ワイヤで実際に溶接を行い、溶接部の生成物やワイヤ送給状態を伸線工程等にフィードバックし、溶接ワイヤの改善を行うとともに、販売促進のために必要となるMIG溶接データベースの蓄積を行った。

なお、本開発ワイヤが消防法の危険物に該当しないことを認定してもらうために、「小ガス炎着火試験」を受け合格し、総務省消防庁の安全データベースに非危険物として登録された。

最終的には、過年度までに研究開発した中径コイルや高精度・極細径ワイヤの製造技術を利用して、アルミニウム合金製MIG溶接ワイヤ並みに加工された高精度・極細径・長尺の難燃性マグネシウム合金製ワイヤの量産品(低コスト品)を完成させた。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

総括研究代表者（PL）：木ノ本伸線株式会社
：代表取締役 木ノ本 裕
：〒579-8026 大阪府東大阪市弥生町 2 番 56 号
：電話 072-986-0009
：FAX 072-988-2814

業務管理者：株式会社 大阪シティ総合研究所
：経理担当 取締役 酒井 孝司
：業務管理 取締役 山本 俊史
：〒541-0041 大阪府大阪市中央区北浜 2 丁目 5 番 4 号
：電話 06-6203-1631
：FAX 06-6203-1632

第2章 本論

1. 低コストで伸線が行える中径コイルを押出し加工するための金型技術の研究開発 (木ノ本伸線株式会社、公立大学法人大阪府立大学)

1-1 押出機の導入

1-1-1 押出機の概要仕様

押出機で押出す際の材料であるビレットの形状は、試作するワイヤの体積を基に押出歩留りを考慮した上で、ビレットの直径と長さのバランスから決めた。押出機の各基本仕様は、ビレット形状と材料特性を元に決めた。油圧圧力は標準的な圧力である 21MPa を選択し、平方センチあたり 10 トン程度の加圧力が必要だと判断したので、メインシリンダ径は 400mm とした。メインシリンダのフルストロークは、ビレット長さ、ビレットをコンテナへ挿入する隙間を確保するため 450mm とした。また、加圧時のラム速度は、0.5mm/s から 1.5mm/s の範囲で調整できるようにした。

1-2 中径コイルの開発

1-2-1 押出ダイスの事前検討

(1) 押出による組織変化

まず、押出過程で材料の微細組織がどのように変化するかを明らかにするために、押出途中のビレット各部分の組織観察を行った。図 1-2-1 に観察箇所の模式図を示す。用いた材料は AZX912 で、ダイスはフローガイド付きのダイスを用いた。また、押出前のビレット温度が 407°C、押出速度は出口側で約 1m/min であった。図 1-2-2 に各場所の組織写真の一例を示す。ビレットからフローガイドに近づくにつれて、結晶粒が微細化していく様子がわかる。また、フローガイドから出口に近づくにつれて、さらなる微細化が生じている様子がわかる。次に、押出条件による微細組織変化を調べるために、同じ材料を同じダイスで押出速度 16m/min において押し出した試料の同様の組織観察を行った。図 1-2-3 に結晶粒径の比較を示す。フローガイド内と違い、結晶粒径はほとんど同じであることがわかった。この理由について考察する。マグネシウム合金において動的再結晶粒径は Z パラメータにより整理できることが知られている。ここで Z パラメータとはひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 、温度 T 、活性化エネルギー Q 、気体定数 R を用いて $\dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$ のように表される加工条件を表すパラメータである。活性化エネルギー Q にはマグネシウムの体拡散の値である 135kJ/mol を用いている。AZX912 については過去に Z パラメータと動的再結晶粒径との関係が調べられていないので、ここでは AZ31 のデータ上にプロットしている。図 1-2-4 に得られた結果を示す。今回の 2 条件では過去の AZ31 において得られた結果のばらつきの範囲に入っており、大きく Z パラメータを変化できなかったためにほぼ同等の結晶粒径が得られたものと推察される。一方、フローガイド内での差については、縦軸が対数であり、 Z がさらに小さい領域ではわずかな Z の違いで結晶粒径が大きく変化することが予想され、このような違いによってフローガイド内では結晶粒径が 2 条件で異なったのではないかと推察される。これらの結果から、押出速度 1m/min という比較的遅い押出によっても結晶粒径 10 μm 程度の非常に微細な結晶粒が得られることがわかった。

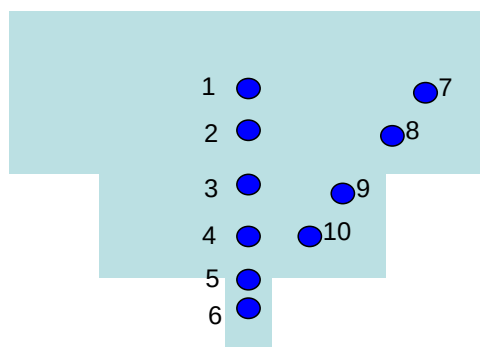


図 1-2-1 押出過程の組織観察箇所

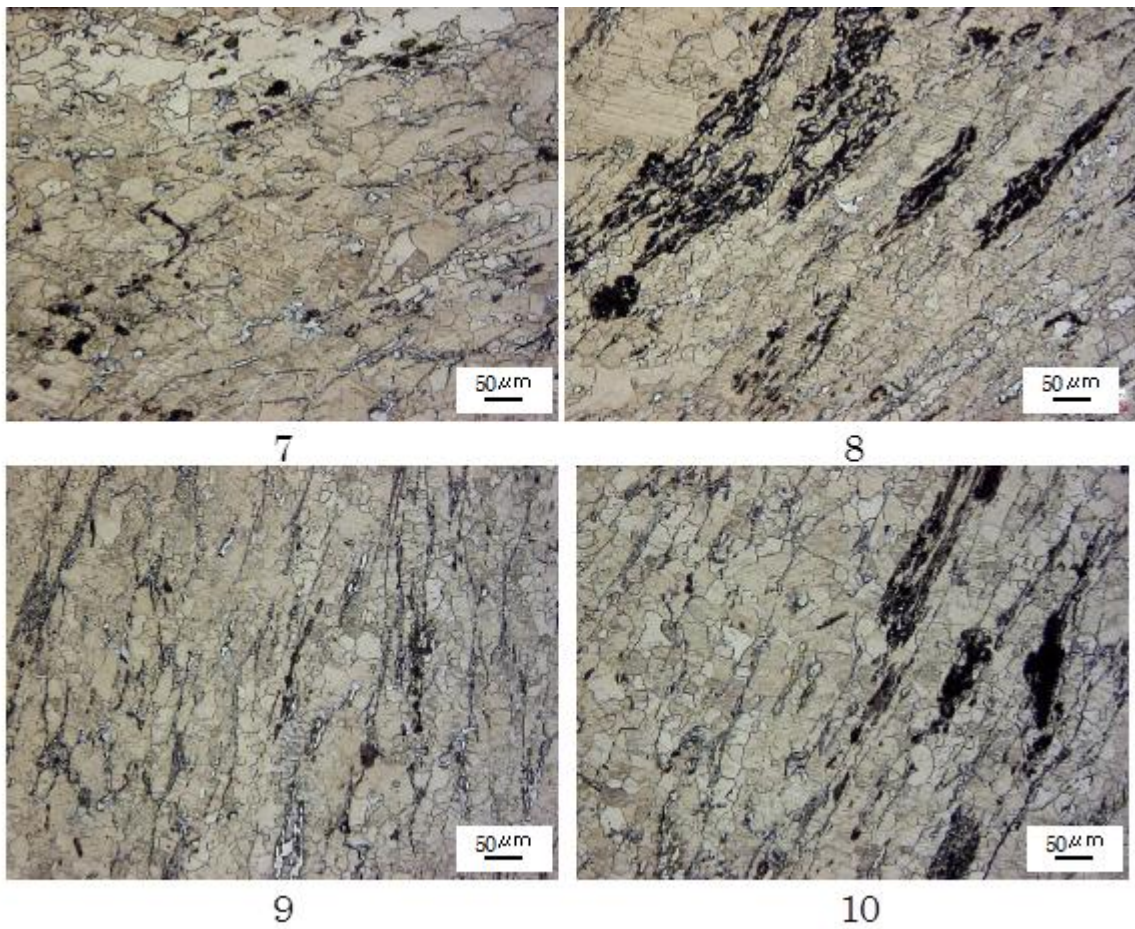


図 1-2-2 押出による組織変化の一例 AZX912、押出速度 1m/min

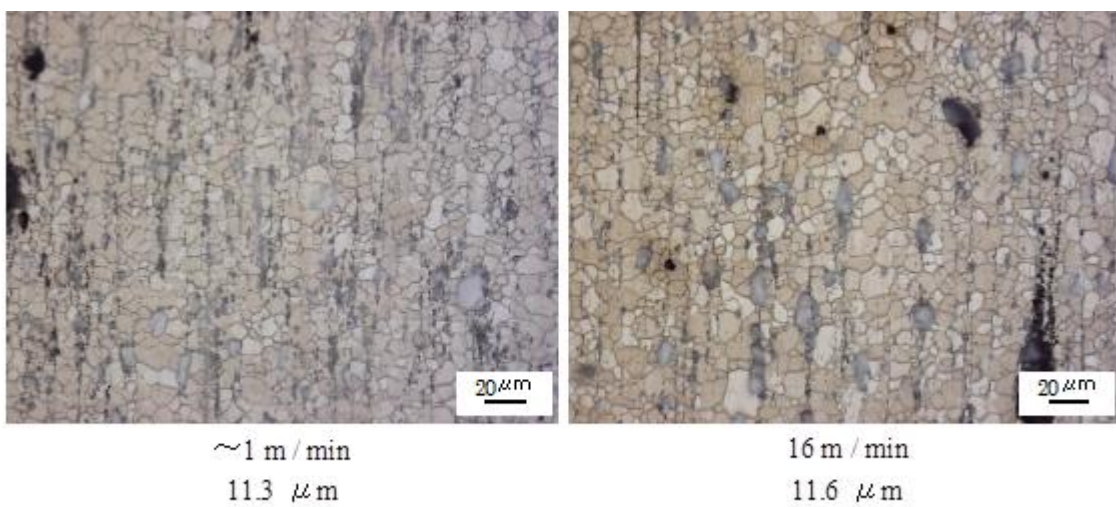


図 1-2-3 押出条件による組織変化

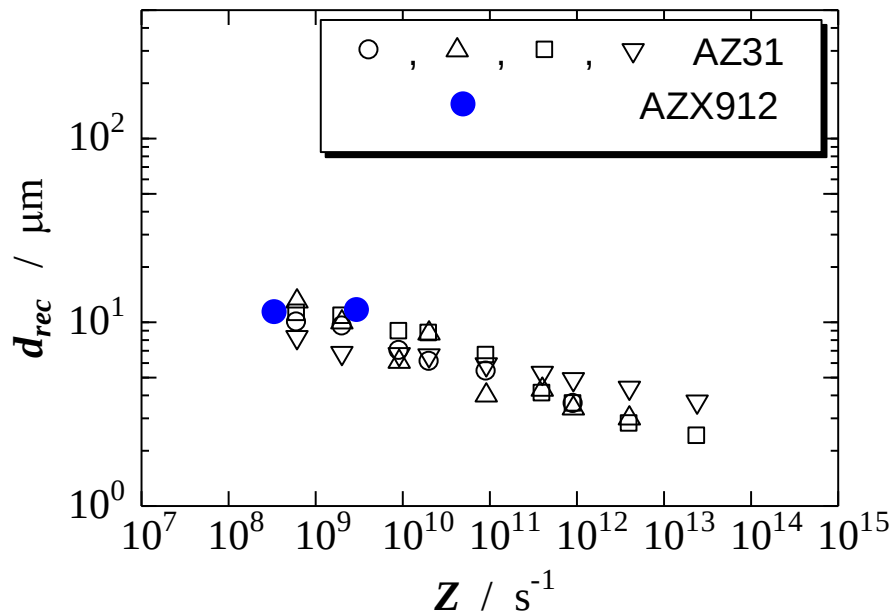


図 1-2-4 Z パラメータによる再結晶粒径の解析結果

(2) ダイス形状の検討

次にダイス形状の検討を行った。図 1-2-5 は用いた 2 種類のダイス形状と、押出後の材料の微細組織を示す。左側がフローガイドのない直接押出、右側がフローガイドを用いた押出である。ビレット径は 89mm であり、押出材の径は 1.6mm である。いずれのダイスを用いた場合でも、10 μ m 程度の非常に微細な結晶粒が得られ、その差は見られなかった。これは、上述した Z パラメータによって説明できる。Z パラメータはひずみ速度と温度の関数であるが、押出のひずみ速度はビレットの送り速度と押出比に依存する。すなわち、フローガイドを用いた場合でも、押出比はビレット径と押出材の径で決まり、フローガイドでの中間的な微細化はほとんど影響しないからである。この解析により、本研究では直接押出ダイスを採用することを決定した。

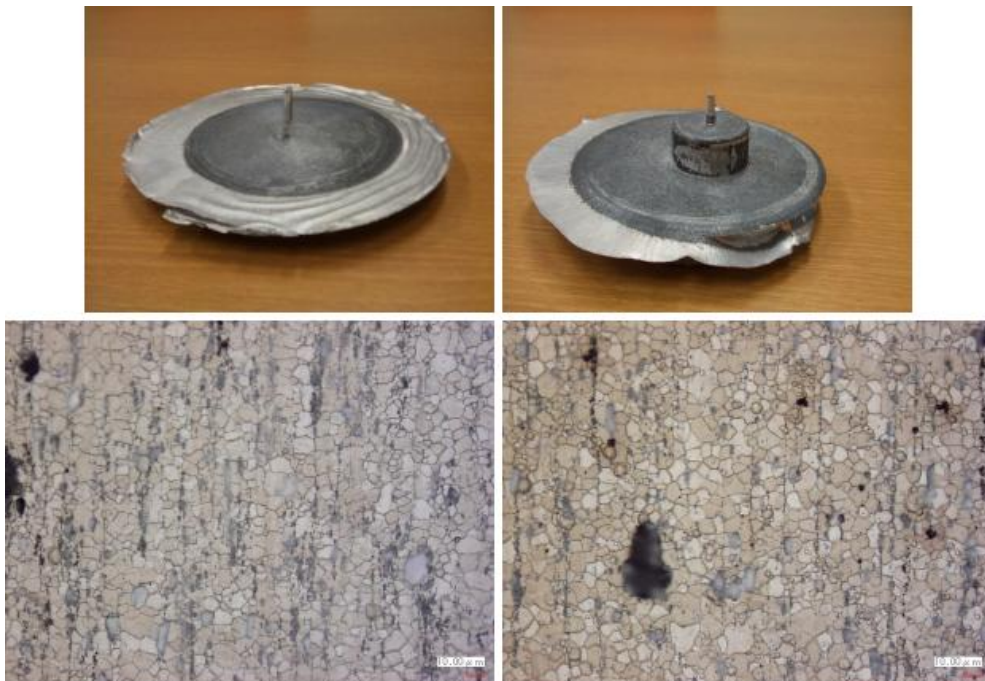


図 1-2-5 ダイス形状と微細組織との関係

1-2-2 押出ダイスの形状

低コストで伸線が行える細い線径のコイルを押出加工するため、押出ダイスの形状を検討した。検討項目は、ダイスの外形形状、コイル形状を決めるベアリング長さおよびビレットがダイスに流れ込んでいく部分の平滑度の3点とした。

ダイス外形形状については、ビレットを挿入・保持する押出機コンテナの内径との関係から、熱膨張を考慮すればダイスの外径が決まる。通常、コンテナ内径とダイス外径のクリアランスが小さければ小さいほど押出時に隙間から漏れたビレットが外部へ出てくることが少ないが、押出条件を絞り込む目的で使用するため、押出に適していない条件での押出をすることもあるので、クリアランスは少し大きめに設定した。

ダイスのベアリング長さについては、23年度に見いだした長さを中心にして、ベアリングが1/2倍の長さのダイスおよび2倍の長さのダイスの3パターンについて深度化した。ベアリングが2倍の長さのダイスについては、材質AZX912の場合、押出圧力が大きくなりすぎたため、採用しないことにした。ベアリングが1/2倍の長さのダイスについては、基本長さのものと材質がAMX602とAZX912の両合金について押出に関する有意差が出ず、また、押出後のコイル表面についても差がなかったため、ダイスのベアリングは1/2倍の長さを採用した。

ビレットがダイスに流れ込んでいく部分の平滑度については、全く平らなダイスを基本に、アプローチ角度が小さなダイスと、アプローチ角度が大きなダイスの3パターンについて深度化した。

結果とすれば、アプローチ角度が有ると押出圧力が大きくなってしまい、有利な点は何も見い出せなかった。特に、アプローチ角度が大きなダイスについては、押出圧力が大きくなりすぎ、押出せないことが分かった。

1-2-3 押出条件

低コストで伸線が行える細い線径のコイルを押出加工するため、押出条件の深度化を行った。検討項目は、後工程である伸線工程で扱いやすいコイルの表面状態と強度に影響が大きいダイス温度、ビレット温度および押出速度とした。当初、コンテナ温度も検討項目としていたが、コンテナの熱容量が大きく、設定温度の切り替えに時間がかかることから、実操業を考慮した場合コストアップの可能性があるため対象外とし、コンテナ設定温度は350℃一定とした。なお、押出比は一定の189で条件の深度化を行った。

ただし、ダイス温度とビレット温度の関係については、23年度の研究開発の成果から次の関係が押出時のメタルフローが良好そうだという感触を得ていたため、それを踏襲した。

$$\text{ダイス温度} \approx \text{ビレット温度} + 20^{\circ}\text{C}$$

ダイス温度は、できるだけ低い方が押出後のワイヤの結晶粒径を小さく制御することができるので、材質AMX602については400℃以下で押出条件を深度化した。一方、材質AZX912については、AMX602に対してプラス20℃程度が良好な押出性であったため、ダイス温度は420℃を上限とした。

押出速度については、ラム速度と製品の押出速度があるが、両者には押出比が決まれば一定の関係があるので、設備の制御で管理がしやすいラム速度で深度化を行った。押出速度が速くなると押出の生産性が上がり押出のコストダウンに結び付くが、押出の加工費に比べて極細径コイルを伸線加工する加工費の方がはるかに大きいので、伸線工程に適した押出コイルの表面状態を重視した。

1-3 中径コイルの評価

平成 23 年度の押出ダイス、押出方法の検討の結果、1 本の線を押出方法で作製された材料が伸線に適していることが明らかになっているため、この方法で押出された材料の押出条件による微細組織変化を調べた。

図 1-3-1 に AMX602 鋳造材と押出材の微細組織の比較を示す。鋳造材では $300\mu\text{m}$ 程度の Mg 粒子が第 2 相である Al-Ca 系の晶出物に囲まれた組織を示している。一方、押出により組織が微細化されるとともに第 2 相が分散されていることがわかる。

図 1-3-2 に最適条件で押出された材料の微細組織を示す。この条件は、様々な条件で押出をした結果、表面状態、機械的特性ともに優れていることが見いだされたものである。図には同一条件で 2 回押出をした時のそれぞれの試料前方および後方部分の微細組織を示している。いずれも結晶粒径 $10\mu\text{m}$ 程度の微細で等軸な結晶粒が得られており、押出のバッチによる違い、押出材の場所による違いは見られなかった。

図 1-3-3 に押出材の表面組織を示す。細かい傷は見られるものの、大きな欠陥等は観察されず、良好な表面が得られている。これらの結果により、最適条件では良好な表面状態と結晶粒径 $10\mu\text{m}$ 程度を有する押出材が安定的に得られていることが明らかになった。

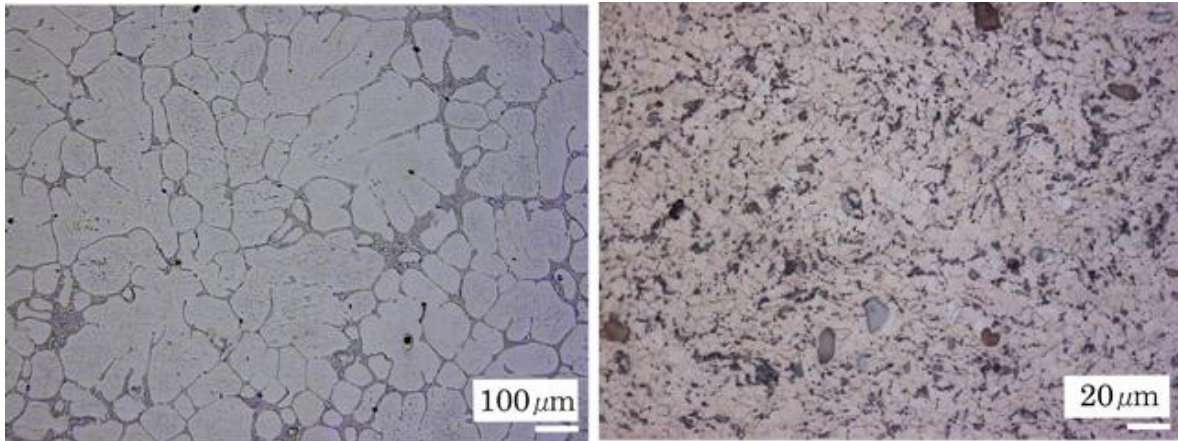


図 1-3-1 AMX602 鋳造材（左）と押出材（右）の微細組織の比較

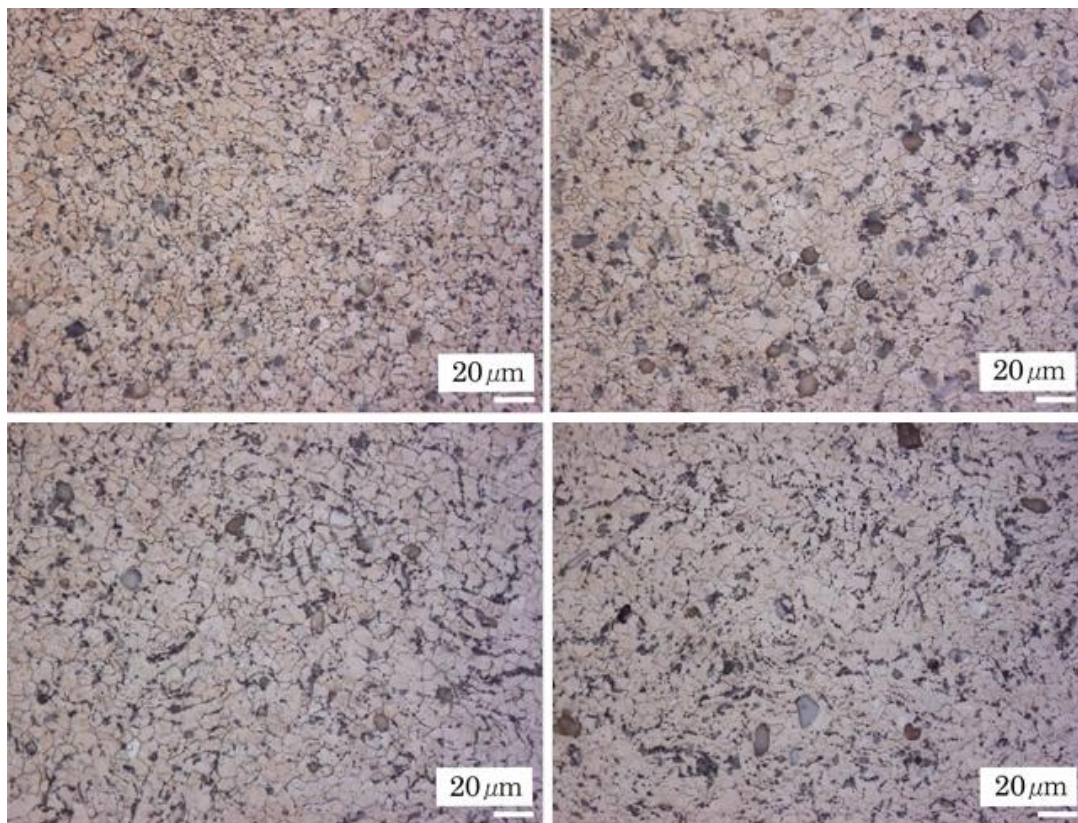


図 1-3-2 最適条件で押出された AMX602 の微細組織

左上	1回目	前方	右上	1回目	後方
左下	2回目	前方	右下	2回目	後方

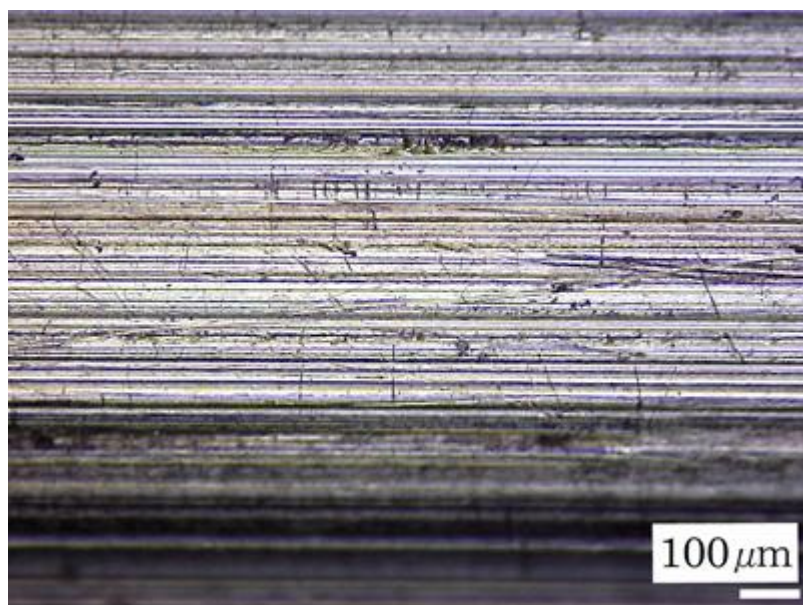


図 1-3-3 AMX602 押出材の表面組織

次に、押出速度の影響について調べた。図 1-3-4 に押出速度による組織変化を示す。押出速度の増加にともない、結晶粒が微細化している様子が見受けられる。

マグネシウム合金において動的再結晶粒径は Z パラメータにより整理できることが知られている。ここで Z パラメータとはひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 、温度 T 、活性化エネルギー Q 、気体定数 R を用いて $\dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$ のように表される加工条件を表すパラメータである。活性化エネルギー Q にはマグネシウムの体拡散の値である 135kJ/mol を用いている。図 1-3-5 に AMX602 の Z パラメータと得られた結晶粒径との関係を示す。図には昨年度得られた AZX912 のデータも示してある。 Z が大きくなるほど結晶粒径が顕著に微細化する傾向が見られた。一般に、結晶粒径の微細化は強度上昇につながることから、後工程である伸線を考えた場合、結晶粒径は微細であるほうが望ましい。今回の結果から、 Z が大きくなる条件、すなわち低温、高速で押出を行うことで、より微細な結晶粒を有する押出材が得られることが確認された。

押出条件の最適化のために、結晶粒径とともに、押出後の材料の表面状態も重要である。そこで、押出条件による表面状態変化を調べた。図 1-3-6 に得られた結果を示す。最適条件 (0.55mm/min) と比較して、押出速度が大きくなるとともに、表面状態が著しく悪化していることがわかる。すなわち、押出速度の上昇は結晶粒径の微細化という観点からは有効であるが、表面状態を考慮するとあまり高速にすることは望ましくないことがわかる。このような検討により、最適押出条件を見出した。

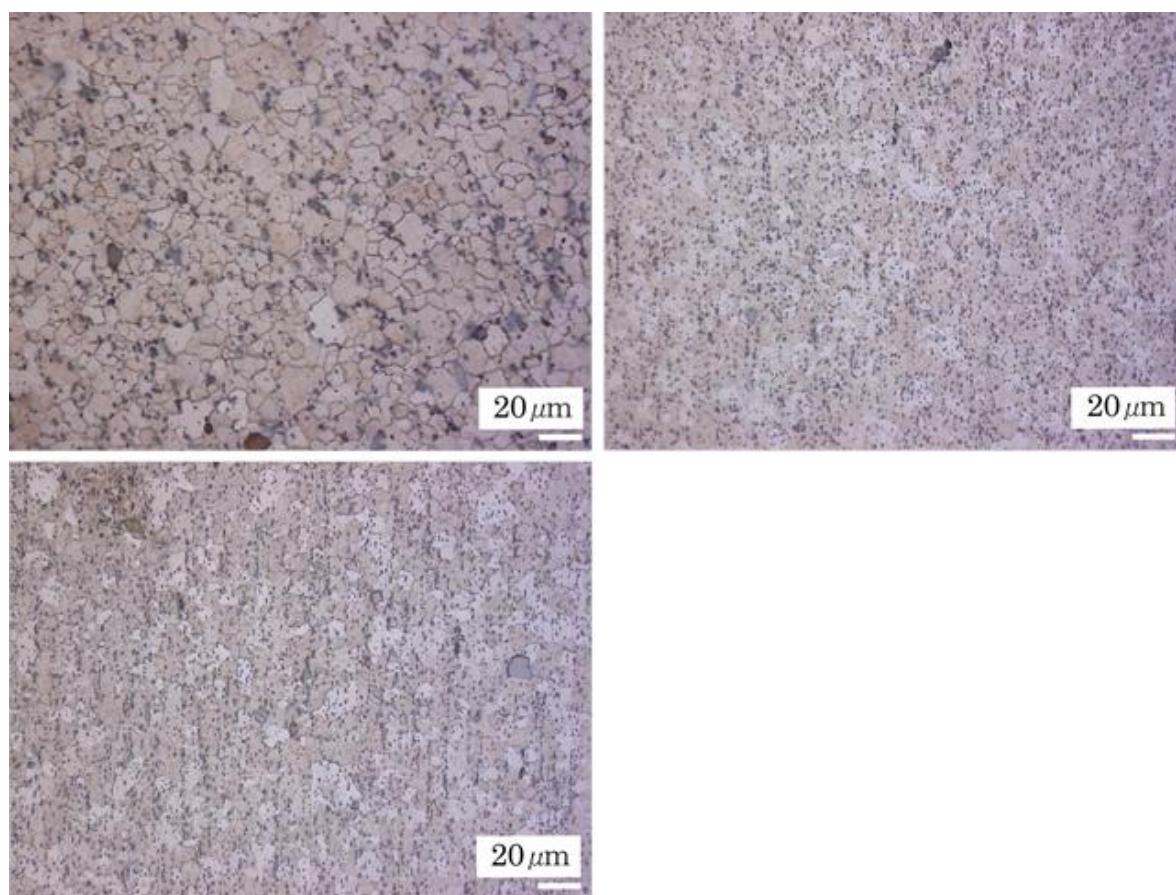


図 1-3-4 AMX602 の押出速度による微細組織変化
左上 0.55mm/min 、右上 0.75mm/min
左下 1.75mm/min

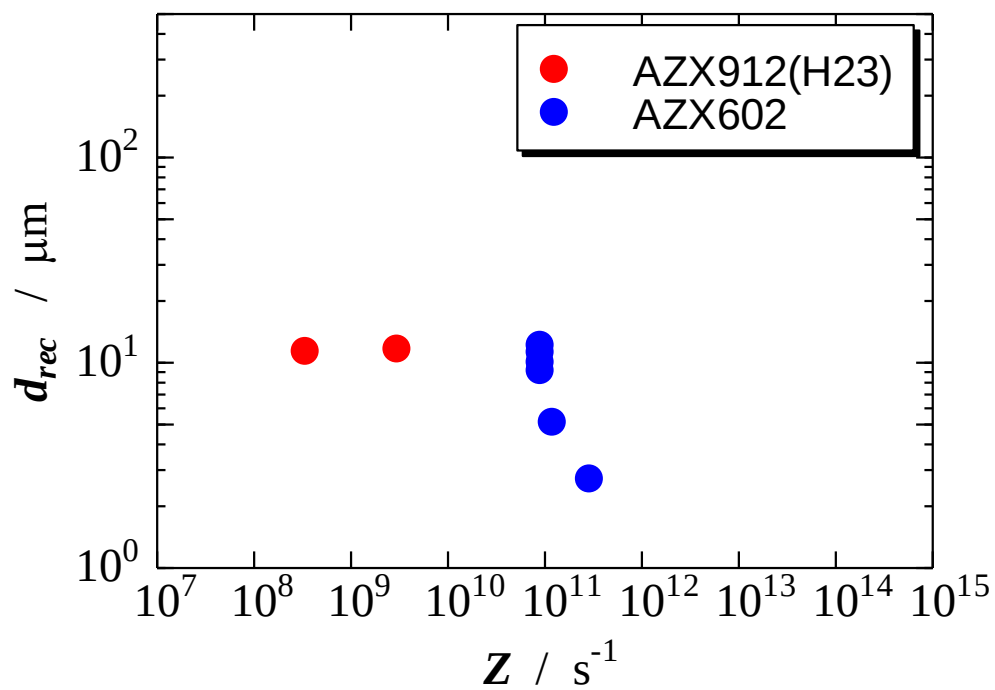


図 1-3-5 AMX602 の Z パラメータと結晶粒径との関係

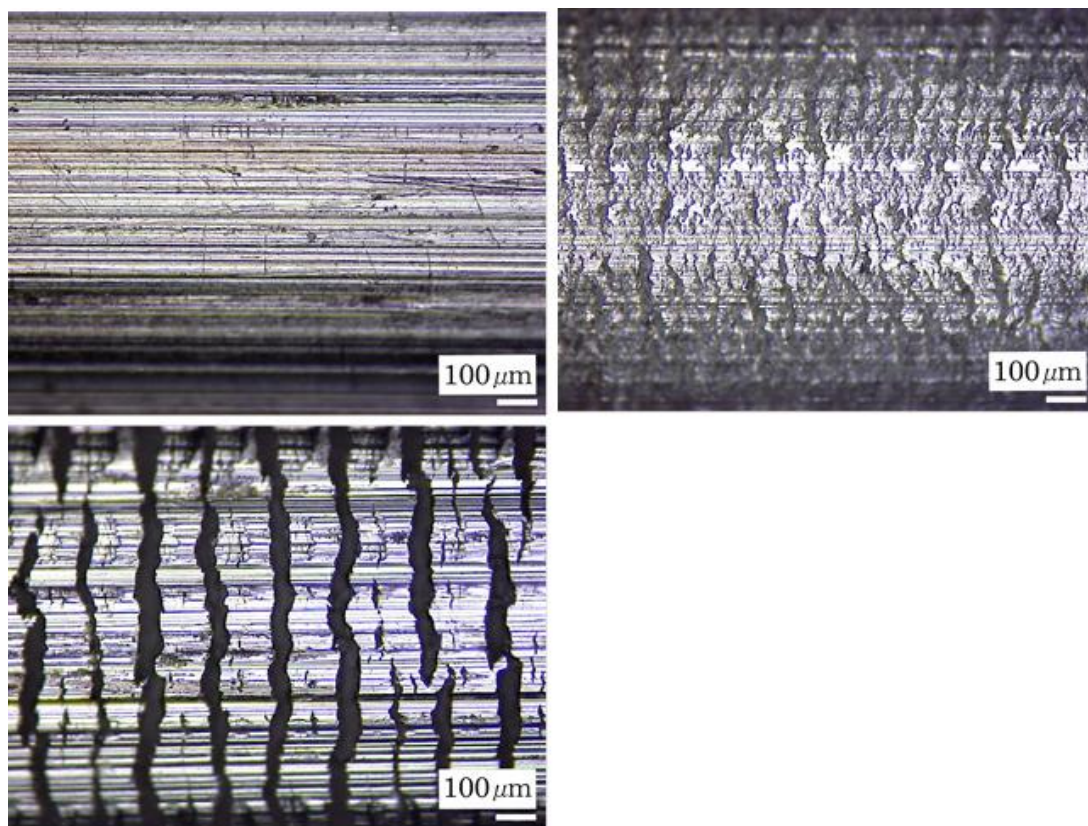


図 1-3-6 押出条件による表面状態変化
 左上 0.55mm/min、右上 0.75mm/min
 左下 1.75mm/min

2. 高精度・極細径・長尺ワイヤを伸線するための金型技術の研究開発 (木ノ本伸線株式会社、公立大学法人大阪府立大学)

2-1 細径コイルの開発

2-1-1 ダイス形状の影響

ここではダイス形状の影響として、引抜き力、結晶粒径に及ぼすアプローチ角度の影響を調べた。図 2-1-1 に AMX602 のアプローチ角度を 12、16、20° とし減面率 25% で伸線した場合の伸線後の微細組織を示す。アプローチ角度が大きくなるにつれて結晶粒径が微細化していくことがわかる。表 2-1-1 にアプローチ角度と得られた物性値をまとめたものを示す。AMX602 では 16° で引抜き力が最も小さくなり、20° で結晶粒径が最も小さくなっている。一方、AZX912 では 16° で結晶粒径が最も小さくなり、20° で引抜き力が最も小さくなっている。この結果から、16° から 20° 付近に最適アプローチ角度が存在することがわかる。本研究ではアプローチ角度 16° を採用した。

同様に、減面率の影響についての解析結果を表 2-1-2 に示す。減面率が大きいほど引抜き力は大きくなるものの、結晶粒径は微細化する。減面率を 25% にしても引抜き力が抗張力と比べて充分小さいことから、生産性も考慮すると減面率は 25% 程度まで上げることができることが明らかになった。

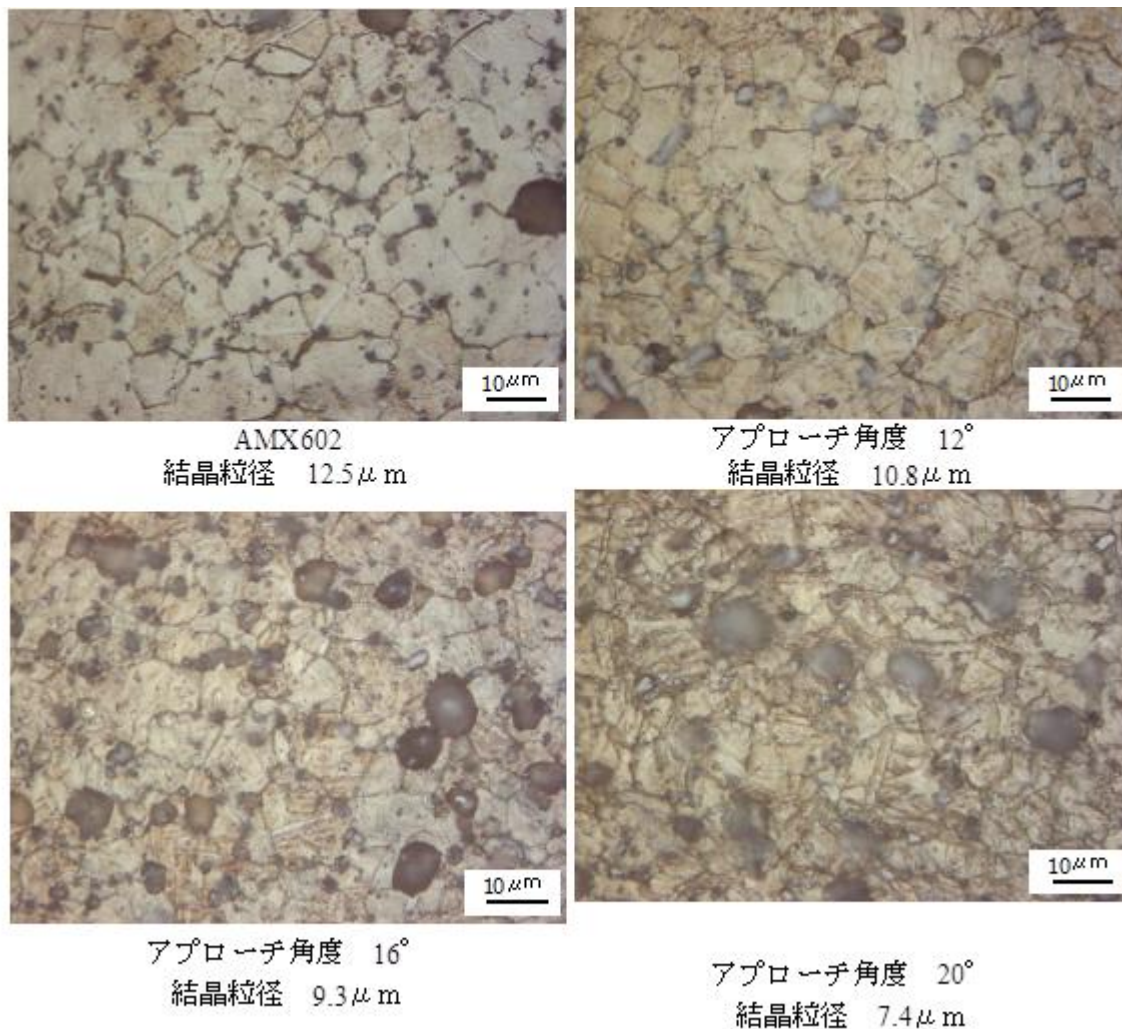


図 2-1-1 アプローチ角度の検討 (AMX602)

表 2-1-1 アプローチ角度と得られた物性値

	減面率 (%)	アプローチ角度 (°)	引抜き力 (kgf)	結晶粒径 (μm)
AMX602	—	—	—	12.5
	25	12	195	10.8
	25	16	170	9.3
	25	20	175	7.4
AZX912	—	—	—	18.2
	25	12	230	11.9
	25	16	210	11.0
	25	20	195	12.0

表 2-1-2 減面率の検討 (アプローチ角度 16°)

	減面率 (%)	引抜き力 (kgf)	結晶粒径 (μm)
AMX602	25	170	9.3
	19	145	9.3
AZX912	25	210	11.0
	19	155	14.2

2-1-2 細径コイルの開発

φ4 の中径コイルを実験開始材料として、順次伸線加工を行うことにより φ2.4 の細径コイルまで加工を行った。大きな減面率にしたり表面の加工硬化した部分を残した状態で加工すると断線したので、改善を加えながら加工・開発を進めた。

2-2 細径コイルの評価

図 2-2-1、2 に AMX602、AZX912 の公称減面率 10%および 15%での伸線過程における微細組織変化の一例を、表 2-2-1、2 に伸線工程と測定した結晶粒径結果を示す。ほとんどの条件において、結晶粒径は伸線による微細化と焼鈍熱処理による粗大化を繰り返し、押出材とほぼ同等の結晶粒径を保っていることが明らかになった。このことから、減面率 15%までの伸線技術が確立できていることが示された。

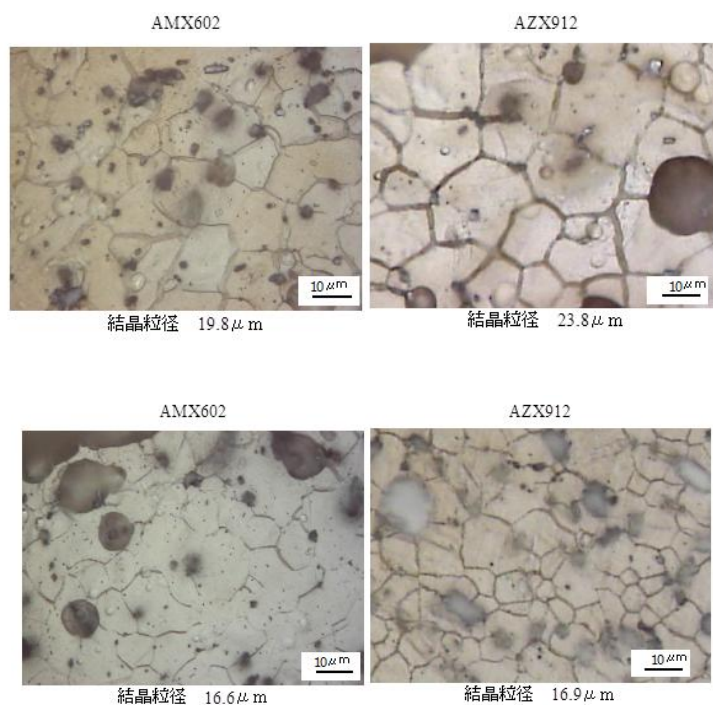
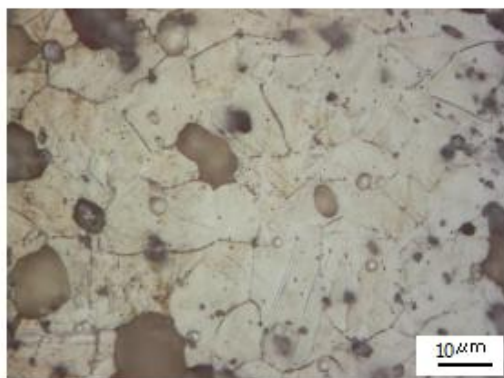


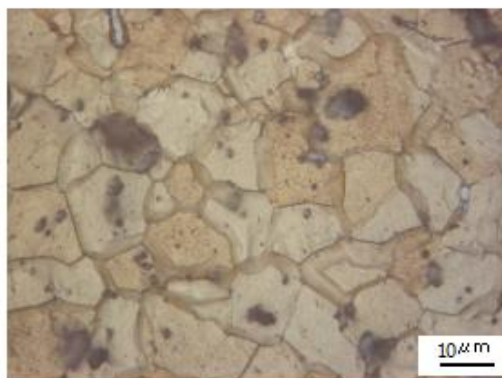
図 2-2-1 伸線前 φ4.0mm、伸線後 φ3.7mm (熱処理 450°C 2分)

熱処理なし

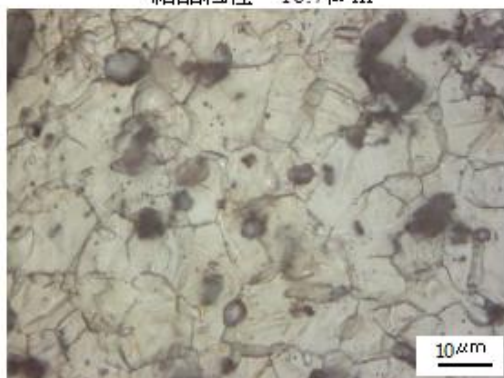
熱処理 450℃ 2分



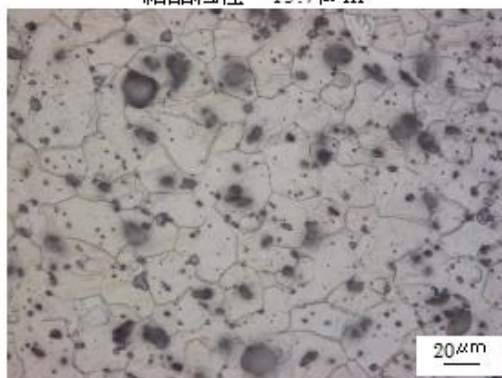
φ 3.515
結晶粒径 16.7 μm



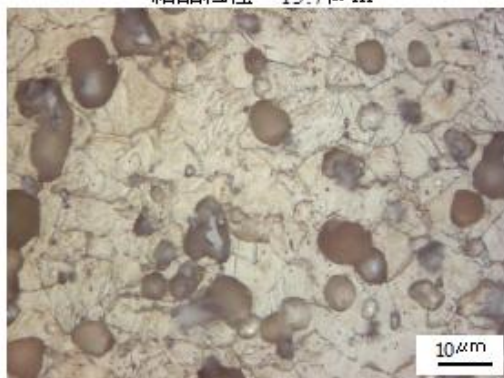
φ 3.515
結晶粒径 15.7 μm



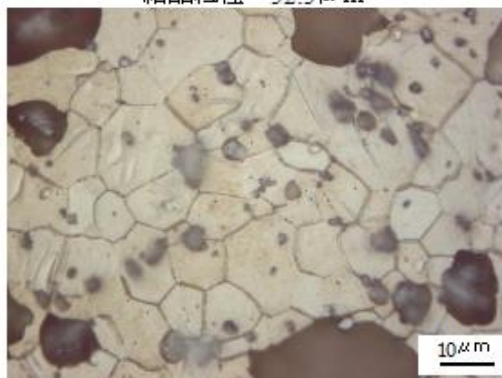
φ 3.435
結晶粒径 13.7 μm



φ 3.435
結晶粒径 32.3 μm



φ 2.405
結晶粒径 12.2 μm



φ 2.405
結晶粒径 14.5 μm

図 2-2-2 AMX602 公称減面率 15%刻み

表 2-2-1 公称減面率 10%刻みの伸線条件と結晶粒径

公称線径 (mm)	真線径 (mm)	減面率(真) (%)	結晶粒径 (μm)			
			AMX602		AZX912	
			熱処理 なし	熱処理 450℃2 分	熱処理 なし	熱処理 450℃2 分
4.0	3.93	—	16.6	—	16.9	—
3.7	3.7	4.2	—	19.8	—	23.8
3.65	3.64	3.2	16.3	52.7	26.1	38.5
3.45	3.44	3.9	12.6	46.2	19.8	23.7
2.4	2.395	7.5	13.7	24.9	21.8	24.4

表 2-2-2 公称減面率 15%刻みの伸線条件と結晶粒径

公称線径 (mm)	真線径 (mm)	減面率(真) (%)	結晶粒径 (μm)			
			AMX602		AZX912	
			熱処理 なし	熱処理 450℃2 分	熱処理 なし	熱処理 450℃2 分
3.53	3.515	9.7	16.7	15.7	30.1	23.8
3.45	3.435	4.5	13.7	32.3	25.5	30.8
2.4	2.405	13.8	12.2	14.5	25.7	23.3

2-3 極細径コイルの開発

φ4 の中径コイルを実験開始材料として、順次伸線加工を行うことにより φ1.2 の細径コイルまで加工を行った。

2-4 極細径コイルの評価

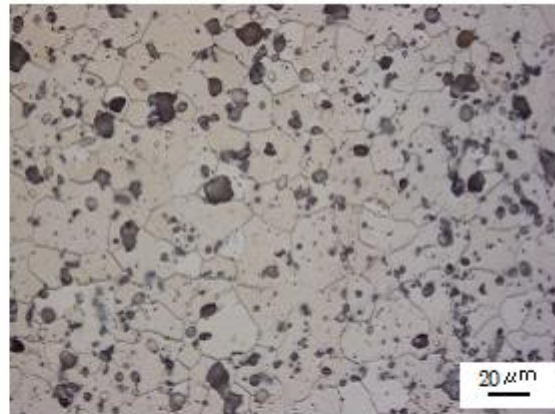
表 2-4-1、図 2-4-1、2 に AMX602 の公称減面率 15%での伸線過程における微細組織変化および伸線工程と測定した結晶粒径結果を示す。細径コイルと同様に、結晶粒径は伸線による微細化と焼鈍熱処理による粗大化を繰り返し、押出材とほぼ同等の結晶粒径を保っていることがわかる。このことから、極細径コイルについても減面率 15%までの伸線技術が確立できていることが示された。

表 2-4-1 極細径コイルにおける公称減面率 15%刻みの伸線条件と結晶粒径 (AMX602)

公称線径 (mm)	真線径 (mm)	減面率(真) (%)	結晶粒径 (μm)	
			熱処理なし	熱処理 450℃ 2 分
2.4	2.39	7.9	—	27.5
2.0	1.98	8.1	30.5	30.5
1.6	1.6	11.2	21.8	23.1
1.2	1.16	15.2	14.9	16.9

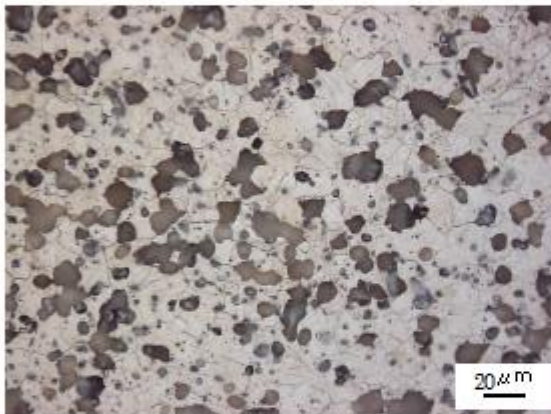
熱処理なし

熱処理 450℃ 2分



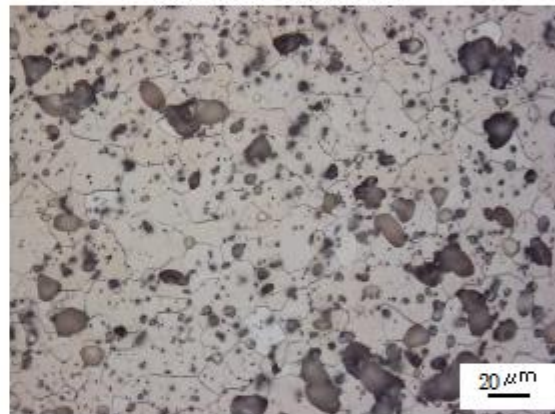
φ 2.39

結晶粒径 27.5 μm



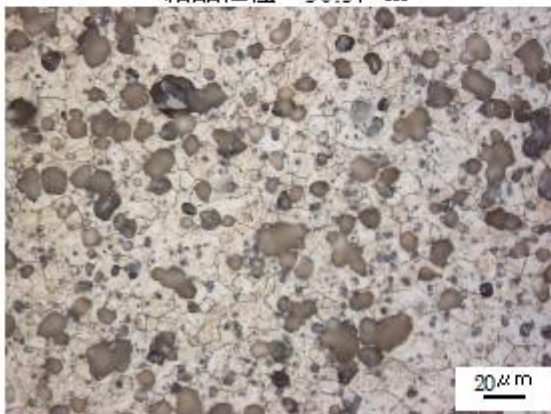
φ 1.98

結晶粒径 30.5 μm



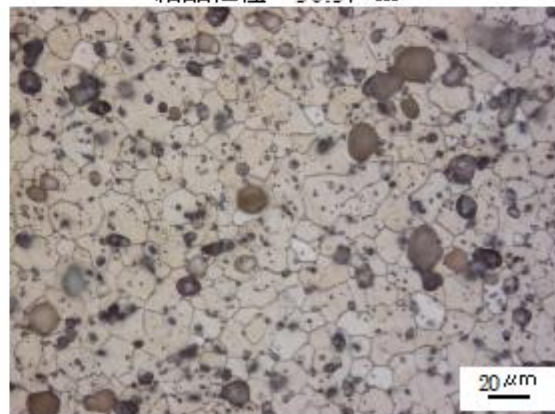
φ 1.98

結晶粒径 30.5 μm



φ 1.60

結晶粒径 21.8 μm

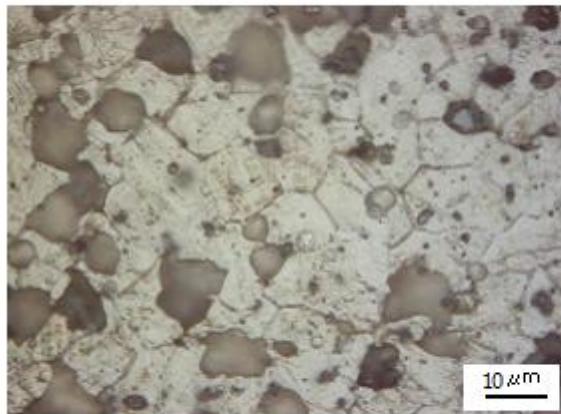


φ 1.60

結晶粒径 23.1 μm

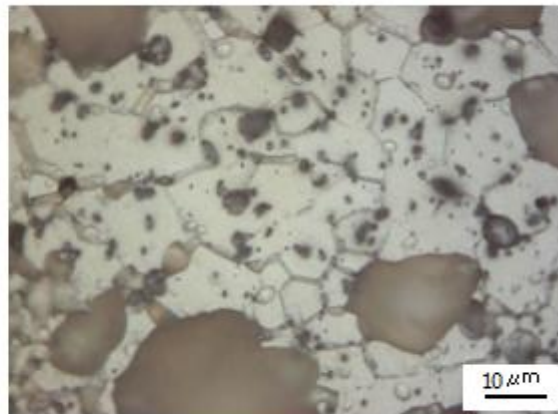
図 2-4-1 極細径ワイヤの評価 (φ 2.39～φ 1.60) 公称減面率 15%刻み

熱処理なし



結晶粒径 14.9 μm

熱処理 450℃ 2分



結晶粒径 16.9 μm

図 2-4-2 極細径ワイヤの評価（φ 1.16）公称減面率 15%刻み

3. MIG溶接ワイヤに適した表面状態の研究開発 (木ノ本伸線株式会社、公立大学法人大阪府立大学)

3-1 MIG溶接ワイヤの開発

1-1 節で開発した中径コイルを用いて、過年度の成果である細径コイルおよび極細径コイルの開発技術を用いて、表面処理を施すことにより、溶接ワイヤの開発を行った。材質 AMX602 の溶接ワイヤの外観を図 3-1-1 に示す。



図 3-1-1 表面処理後の溶接ワイヤの外観

3-2 MIG溶接ワイヤの評価

表面処理を行った AMX602 の表面を分析走査電子顕微鏡で観察した結果を図 3-2-1 に示す。左下の図は、伸線加工後にエアーブラスト装置を用いて表面処理したもので、投射材が打ち付けられた部分が凹んでいるのが分かる。白く見えている部分は、簡易成分分析結果から、表面に残った投射材と思われる。右下の図は、伸線加工後にアルカリ洗浄したもので、洗浄剤により表面処理された黒い部分と、周りを取り除かれて白く浮き上がっている部分がある。簡易成分分析結果から、黒く見えている部分は主に酸化マグネシウムからなり、白く見えている部分は主にマグネシウムとアルミニウムの酸化物と思われる。

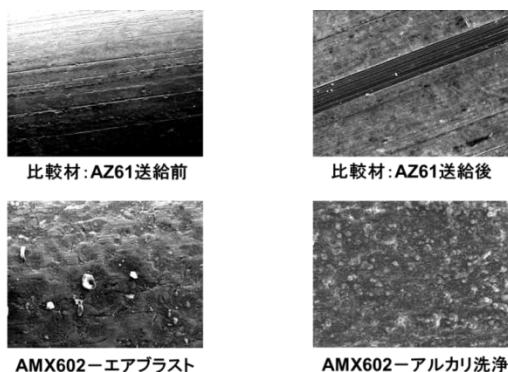


図 3-2-1 加工法の違いによる表面状態

また、今回開発する難燃性マグネシウム合金MIG溶接ワイヤは、最小直径が 1.2mm なので、形状的には消防法上の危険物として定義されてしまう。しかし、政令で定める試験に合格すれば危険物でないと判断され、総務省消防庁の危険物データベースにその旨登録される制度があるので、消防法の制約に縛られないよう政令で定める「第二類 小ガス炎着火試験」を受けた。試験体は AMX602 および AZX912 で、試験体形状は直径 1.2mm とした。試験は、危険物保安技術協会を受けて合格し、総務省消防庁の「危険物データベース」に登録された。その登録証を図 3-2-2 に示す

平成 24 年 12 月 4 日	
危険物データベース登録確認書	
危険物保安技術協会	
1 登録番号	2564X014569
2 登録物品名	マグネシウム合金溶接ワイヤ (AMX602)
3 登録者名	木ノ本伸線株式会社
4 類・品名・性質	非危険物
5 状態	固体
6 引火点	

平成 24 年 12 月 4 日	
危険物データベース登録確認書	
危険物保安技術協会	
1 登録番号	2564X014570
2 登録物品名	マグネシウム合金溶接ワイヤ (AZX912)
3 登録者名	木ノ本伸線株式会社
4 類・品名・性質	非危険物
5 状態	固体
6 引火点	

図 3-2-2 AMX602 および AZX912 の危険物データベース登録証

大阪府立大学では伸線条件による微細組織および強度変化を明らかにするとともに、伸線条件と表面粗さの関係を調べた。

図 3-2-3 に伸線による組織変化の一例を示す。伸線、熱処理の過程において、結晶粒径は再結晶による微細化と成長により変化するが、約 20 μm の安定した結晶粒径が得られた。この傾向は減面率を変化させても同様であった。

次に、伸線条件による強度変化についての解析を行った。室温強度に寄与する組織因子として、結晶粒微細化、固溶強化、第 2 相による強化の 3 種類の強化が考えられる。そこで、それぞれの強化機構の寄与率について検討を行った。まず結晶粒径の影響として、ホール・ペッチの関係がよく知られている。耐力 $\sigma_{0.2}$ は結晶粒径 d を用いて以下の式で表される。

$$\sigma_{0.2} = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \quad \dots (3-2-1)$$

k は比例定数で過去の報告から Mg 合金では 220MPa $\cdot\mu\text{m}^{1/2}$ である。また、 σ_0 は以下のように表される。

$$\sigma_0 = \sigma_{\text{matrix}} + \Delta\sigma_s + \Delta\sigma_p \quad \dots (3-2-2)$$

σ_{matrix} は純 Mg 単結晶の降伏強度で過去の報告から 8MPa としている。また、第 2 項、第 3 項はそれぞれ固溶の効果および第 2 相の効果であり、次式のように表される。

$$\Delta\sigma_s = M \frac{3^{3/4}}{2} \left(\frac{1+\nu}{1-\nu} \right)^{3/2} \mu |\varepsilon|^{3/2} \sqrt{c} \quad \dots (3-2-3)$$

$$\Delta\sigma_p = \frac{0.7\mu b\sqrt{f}}{r} \quad \dots (3-2-4)$$

ここで、 M はテーラー因子、 ν はポアソン比、 μ は剛性率、 ε はミスフィットひずみ、 c は溶質濃度、 b はバーガースベクトル、 f は粒子の体積分率、 r は粒子径である。これらのパラメータを用い、解析を行った。

図 3-2-4 に結果を示す。伸線により押出まま材と比較して結晶粒径が微細化しており、それにより強度が上昇していることがわかる。一方、減面率を変えて伸線した材料では、結晶粒径が同一であるにもかかわらず強度が異なっている。このような違いは、今回の解析で考慮していない内部組織の違いによるものであると考えられる。

図 3-2-5 に後方散乱電子線回折法により得られた結晶方位分布と粒界性格を示す。図から伸線方向に六方晶の底面が配向していることがわかる。上の図で結晶粒径は 15° 以上の角度差と定義し、黒線で表してある。これに対して 5° 以下の角度差の小角粒界は白線で表してある。15° 以上の方位差の結晶粒界で囲まれた結晶粒内部に多くの小角粒界が観察され、減面率に増加による強度上昇はこのような粒内転位組織の増加によるものであることが分かった。

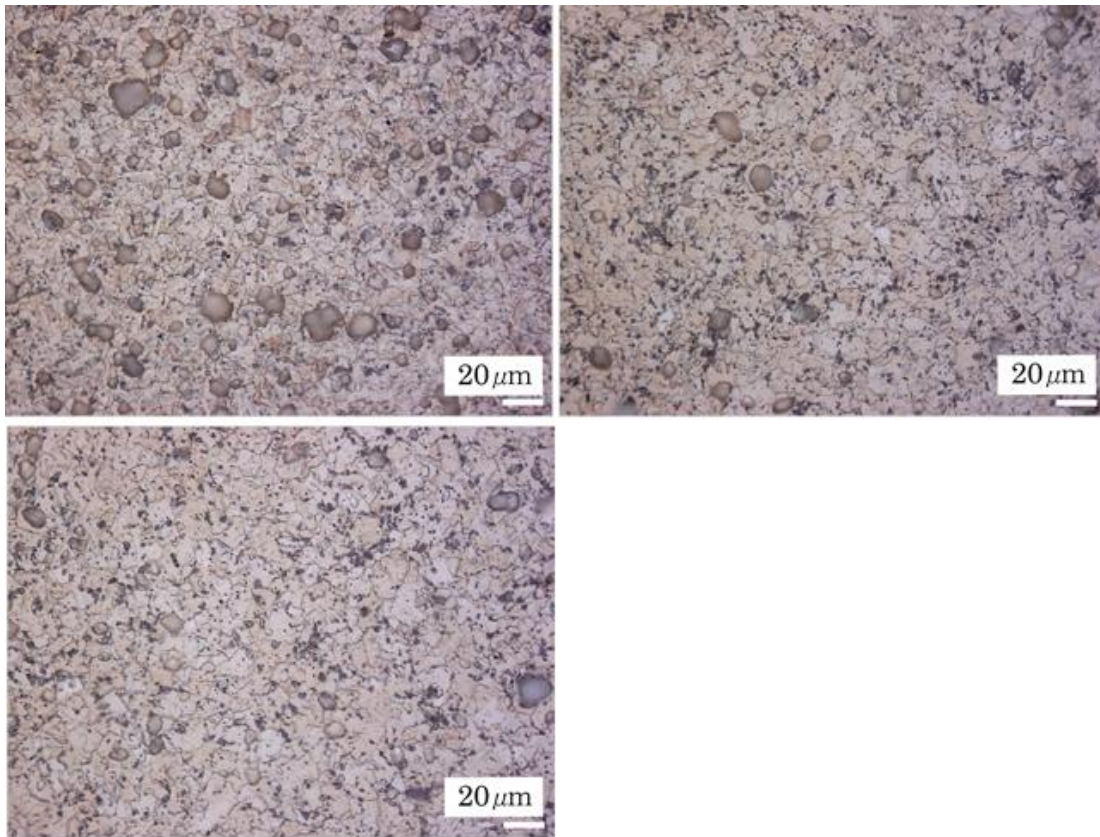


図 3-2-3 伸線による組織変化の一例

左上 伸線材 φ 3.15mm 右上 伸線材 φ 3.15mm+熱処理 左下 伸線材 φ 3.03mm

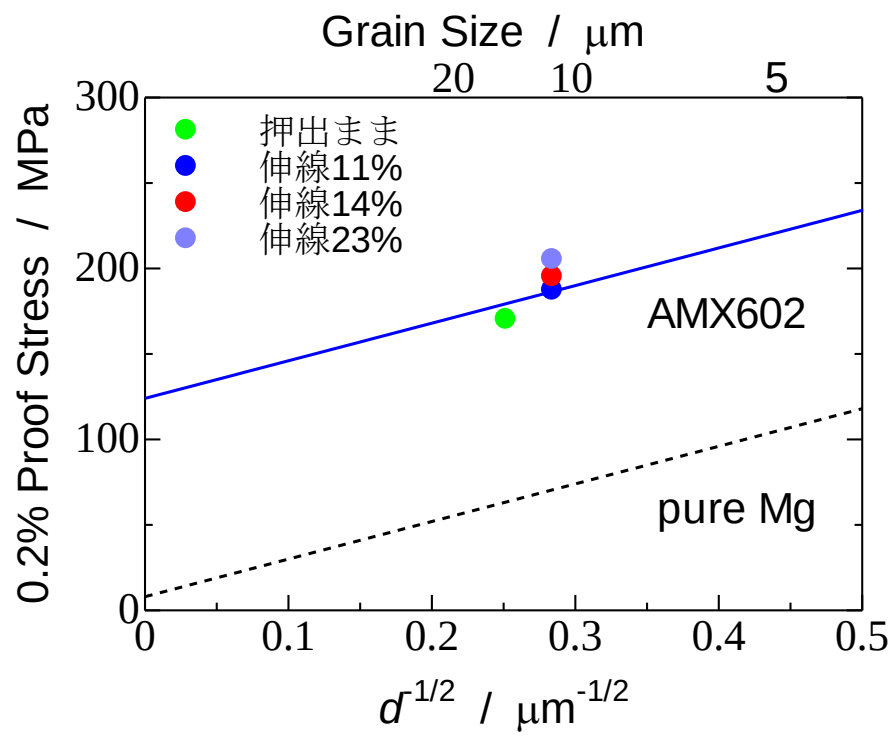


図 3-2-4 AMX602 の結晶粒径と強度の関係

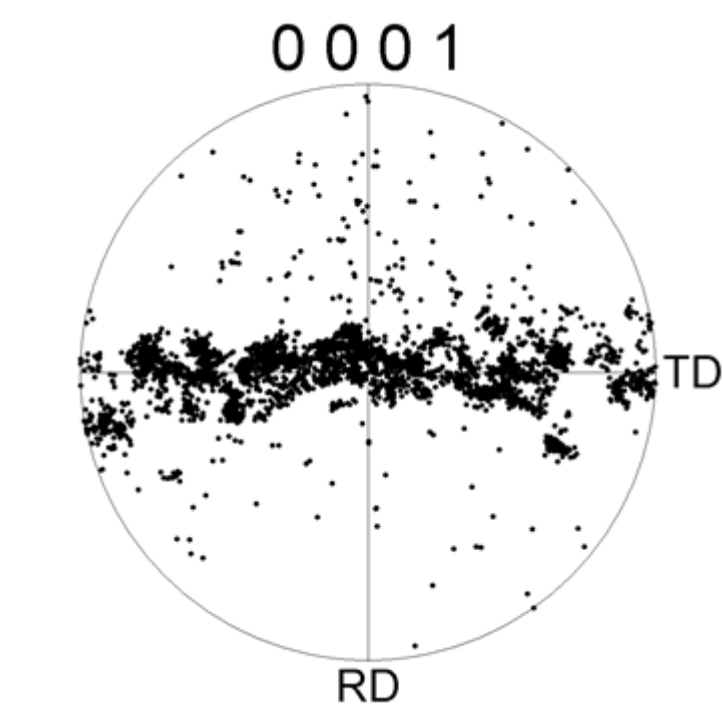
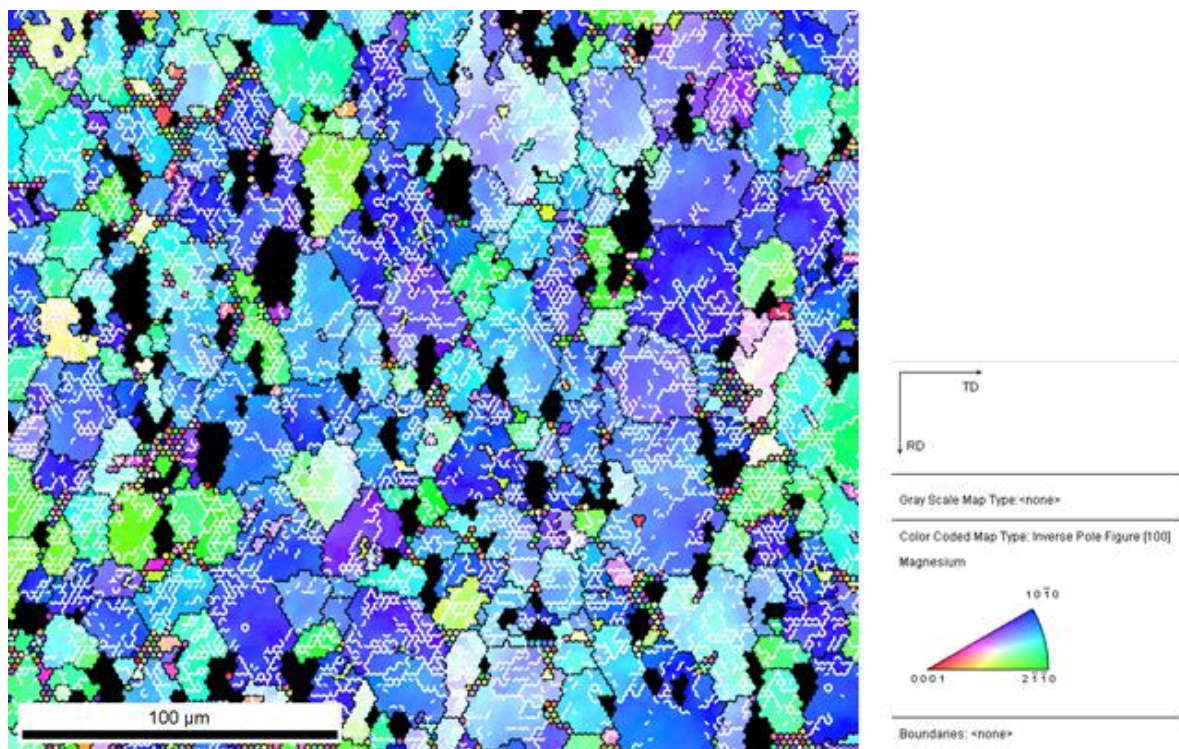


図 3-2-5 後方散乱電子線回折法により得られた結晶方位分布と粒界性格

次に伸線による表面粗さ変化について調べた。図 3-2-6 に押出まま材、伸線まま材、伸線熱処理材の表面写真を示す。それぞれの表面粗さ Ra は押出まま材で $2.5\mu\text{m}$ 、伸線材および伸線熱処理材でそれぞれ、 2.0 、 1.6 、 $1.7\mu\text{m}$ であった。

図 3-2-7 に押出材の押出速度と表面粗さとの関係の既存の報告に今回の実験データをプロットしたものを示す。今回得られた押出材の表面粗さは、表面粗さ改善のために工夫された既存の報告値と同程度の値を示しており、良好な押出表面が得られていることが分かる。また、伸線によりさらに表面粗さは向上しており、表面粗さの観点からは優れた伸線条件を見いだしていることが分かる。

得られた伸線材が、市販の溶接用 MIG ワイヤと比較してどの程度の表面状態を有しているのかを明らかにするために、Al ワイヤ 5356 $\phi 1.2\text{mm}$ 、Al ワイヤ 5356 $\phi 1.6\text{mm}$ 、Mg 合金 AZ61MIG ワイヤ $\phi 1.2\text{mm}$ の 3 種類の表面状態を調べた。その結果を図 3-2-8 に示す。いずれの溶接ワイヤもなめらかな表面状態であった。それぞれの表面粗さは 1.8 、 1.7 、 $3.3\mu\text{m}$ であった。これらの結果から、今回開発した伸線による MIG ワイヤは既存のアルミニウム溶接用 MIG ワイヤと同等の表面状態を有していることが明らかになった。

マグネシウム合金の一つの欠点として、腐食のしやすさが挙げられる。溶接ワイヤにおいても、開封後ある程度の期間表面状態を維持することが必要である。そのために、ある程度の表面処理が必要になると考えられる。一方、表面処理による表面状態の悪化が予想される。どの程度の表面粗さまで良好な MIG 溶接が可能かの検討が次の課題である。

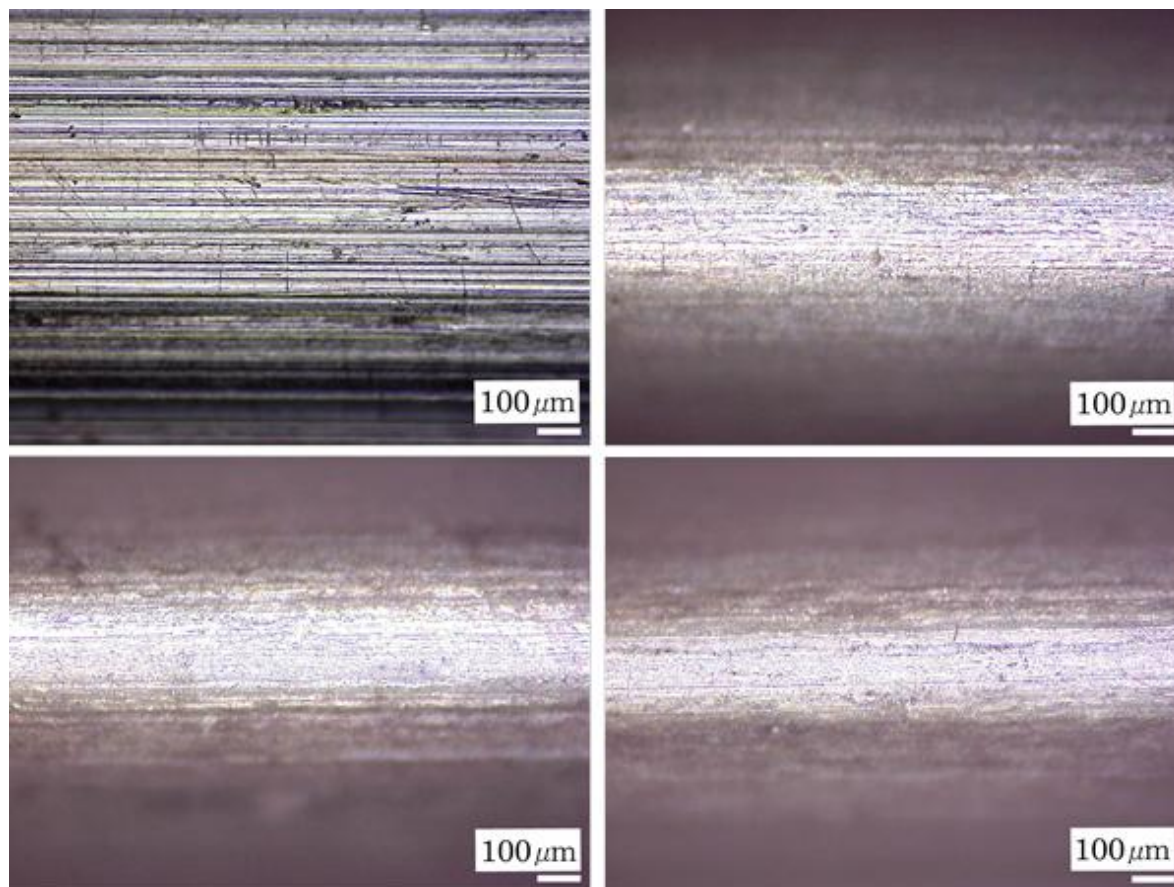


図 3-2-6 伸線による表面粗さ変化

左上 押出まま材 右上 伸線材 $\phi 1.28\text{mm}$
左下 伸線材 $\phi 1.28\text{mm}$ 熱処理 右下 伸線材 $\phi 1.20\text{mm}$

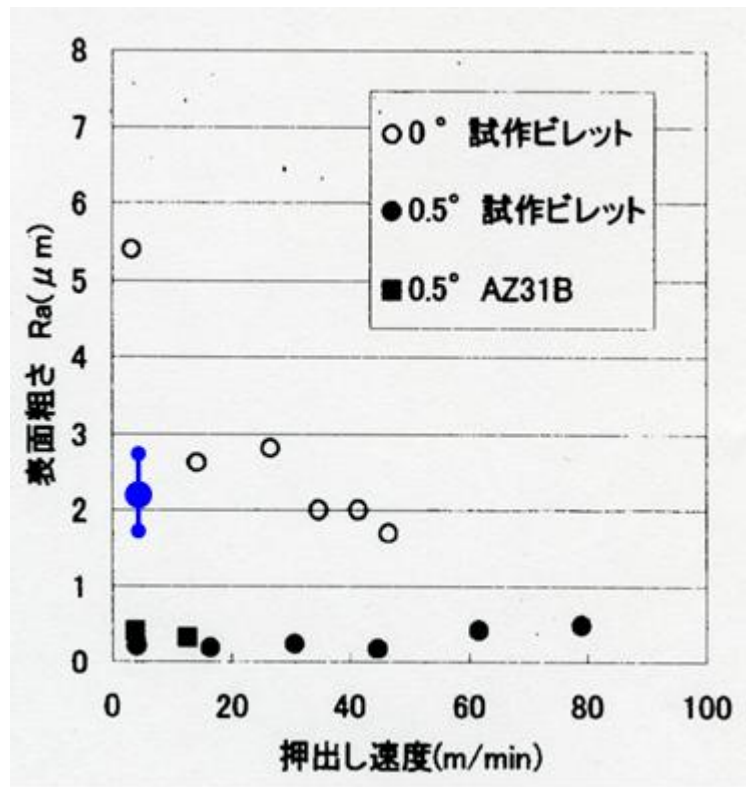


図 3-2-7 押出材の表面粗さ
(元データ : 松岡 他 富山県立大学紀要第 12 巻 (2002))

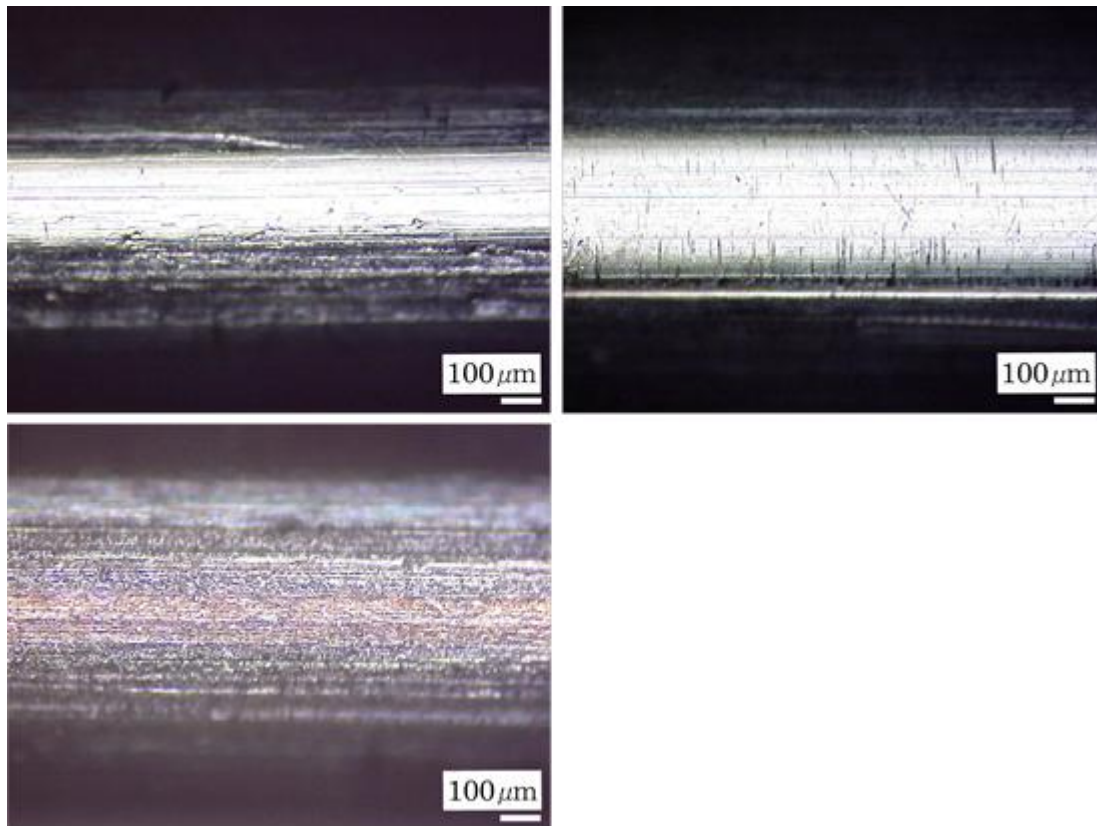


図 3-2-8 既存の溶接用 MIG ワイヤとの表面状態の比較
 左上 Al ワイヤ 5356 φ1.2mm 右上 Al ワイヤ 5356 φ1.6mm
 左下 AZ61 MIG ワイヤ φ1.2mm

3-3 低コストMIG溶接ワイヤの開発と改善

3-3-1 マグネシウム合金細線用バット溶接機の導入

一般的に、金属材料の伸線加工の場合、引抜応力が当該材料の引張強度を超えれば破断するので、金属材料ごとの特性を考慮して、ダイス形状や減面率、加工潤滑方法を調整して適切な伸線条件を見出す。ところが、材料表面にキズが存在していたり材料内部に偏析や介在物等が存在することにより応力集中が起きると、伸線加工時に引張強度より低い引抜力で材料破断してしまう。この材料内部の偏析や介在物については、前工程である鋳造業者の溶湯清浄化技術や鋳造技術の向上に期待しなければならないが、一般的に入手できるマグネシウム合金材料については、技術力が伴っていないのが現状である。伸線途中に材料が破断したままでは、今回のMIG溶接ワイヤが長尺化できないので、この課題を解決するためにマグネシウム合金細線を繋ぐバット溶接機を導入した。図 3-3-1 にバット溶接機の外観写真及び図 3-3-2 にバット溶接を行ったマグネシウム合金細線を示す。また、表 3-3-1 にバット溶接機の溶接条件を示す。バット溶接機は、押込み、予熱（上昇）、冷却、溶接、冷却、予熱（下降）、保持の各項目を、設定時間や設定電流で調整できる仕様である。

表 3-3-1 バット溶接の溶接条件

線径	材質	CH	登録条件(上段:項目、下段:単位)													CH
			t1	Tw	t2	h1	h2	t3	t4	h3	t5	t6	h4	h5	t7	
			s	ms	CY	KA	KA	ms	CY	KA	ms	CY	KA	KA	s	
φ 1.2	AMX602	0CH	3.00	5	0	0.00	0.00	0	5	2.00	0	6	0.70	0.70	0.50	0CH
φ 1.2	AZX912	1CH	3.00	5	0	0.00	0.00	0	2	0.80	0	4	0.55	0.55	0.50	1CH
φ 1.5	AMX602	2CH	3.00	5	3	0.00	0.00	3	3	1.10	0	9	0.80	0.80	0.50	2CH
φ 1.41	AMX602	3CH	3.00	5	0	0.00	0.00	0	3	1.10	0	8	0.70	0.70	0.50	3CH
φ 1.41	AZX912	4CH	3.00	5	2	0.00	0.00	0	2	1.00	0	8	0.65	0.65	0.50	4CH
φ 1.82	AZX912	5CH	3.00	5	3	0.85	0.85	5	3	1.20	3	8	0.85	0.85	0.50	5CH
			押込み	パルス幅	予熱(上昇)			冷却	溶接	冷却	予熱(下降)			保持		

バット溶接を行った部位の後工程での金属組織変化については、3-4 節で詳細を報告する。また、本バット溶接機を用いて、3-4 節の低コストMIG溶接ワイヤの開発を行った。



図 3-3-1 バット溶接機



図 3-3-2 バット溶接したマグネシウム合金細線
上図：溶接不良品、 下図：溶接良品

3-3-2 低コストMIG溶接ワイヤの開発

MIG溶接ワイヤ製造を低コスト化するため、ローラダイスを用いた引抜き加工を検討した。ローラダイスとは、通常のダイスとは異なりリング部が無く、溝が掘られているローラの間に材料を通すダイスで、使用したローラダイスを図 3-3-3 に示す。

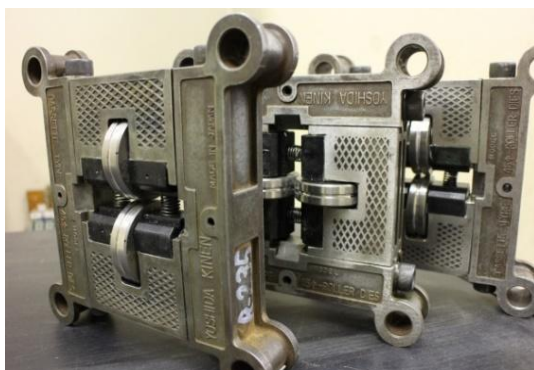


図 3-3-3 ローラダイス

本実験ではローラダイス 2 枚を重ね、2.6mm から 2.3mm まで 1 パスで細径化した結果と、ローラダイスを 3 枚重ね、2.6mm から 2.2mm まで 1 パスで細径化した各加工の断面減少率 R/P 及び総断面減少率 Rt を表 3-3-2、3-3-3 に示す。

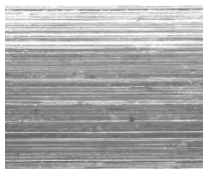
表 3-3-2 $\phi 2.6\text{mm}$ から $\phi 2.3\text{mm}$ の細径化 (2 枚重ね)

枚数	径 H[mm]	R/P[%]	R/P[%]
1	2.45	11.20	11.20
2	2.30	11.87	21.75

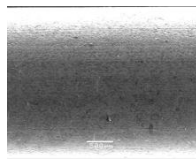
表 3-3-3 $\phi 2.6\text{mm}$ から $\phi 2.2\text{mm}$ の細径化 (3 枚重ね)

枚数	径 H[mm]	R/P[%]	R/P[%]
1	2.45	11.20	11.20
2	2.30	11.87	21.75
3	2.20	8.51	28.40

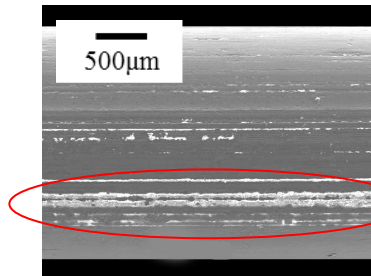
次頁 図 3-3-4 に各線材の表面観察画像を示す。



素線

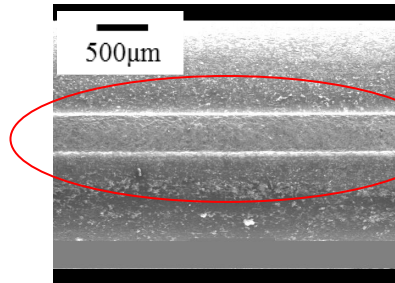


素線



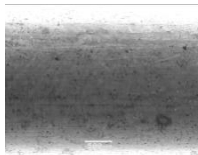
かみ出し

AM60

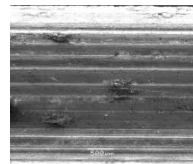


かみ出し

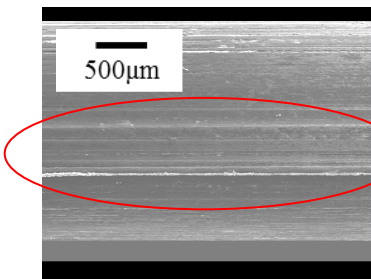
AZ61



素線

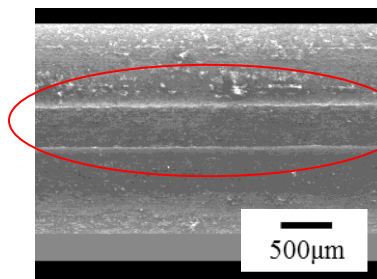


素線



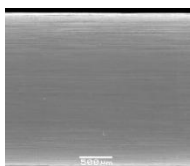
かみ出し

AMX602

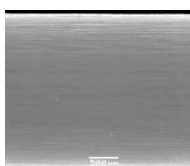


かみ出し

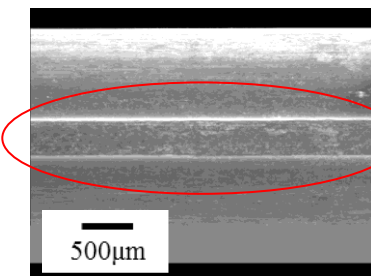
AZX912



素線

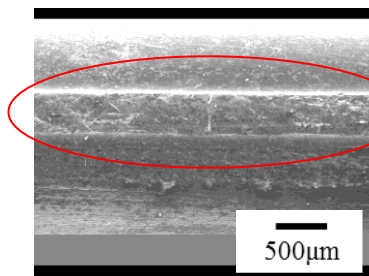


素線



かみ出し

AZ31



かみ出し

AZ91

図 3-3-4 各線材の表面肌

次に、伸線材の機械的性質を調査するために、素線の機械的性質と前報の引抜き可否で加工したφ2.20mmの線材の機械的性質を比較した。

表3-3-4に素線及び加工後の線材の引張り強さと破断ひずみを示す。また素線と加工後の線材のビッカース硬さを表3-3-5に示す。

表 3-3-4 素線と伸線材の引張り強さ及び破断ひずみ

素線 φ 2.60mm	AM60	AZ61	AZX912	AMX602	AZ31	AZ91
引張り強さ[MPa]	244	299	240	247	261	278
破断ひずみ	0.123	0.164	0.111	0.078	0.072	0.039

伸線材 φ 2.20mm	AM60	AM60	AZX912	AMX602	AZ31	AZ91
引張り強さ[MPa]		314		317		
破断ひずみ		0.022		0.023		

表 3-3-5 素線と伸線材のビッカース硬さ

φ 2.20mm (Rt=28.4%)	AM60	AZ61	AZX912	AMX602	AZ31	AZ91
素線[Hv]	78.8	79.5	91.1	69.9	82.3	76.4
伸線材[Hv]		83.7		88.3		

以上の結果より、ローラダイスを用いた冷間引抜き加工を施すことにより、線材に強度を付与できたが、伸びが著しく低下しており脆性が悪化していることが確認できた。

また、AZ61 よりも AMX602 の方が同加工条件でも硬化することが確認できた。

得られた知見を要約すると、次のようになる。

- ・ローラダイスを用いた引抜きの際、引抜き時にローラに材料が流動し、噛み出しが発生する可能性があるため、加工条件を十分に検討する必要がある。
- ・現段階では、多パスで加工を行うには円形ダイスを用いた引抜きが有効であるが、ローラの加工条件を検討することで、ローラダイスでの引抜きでは1パスでより大きな加工率をとることが可能である。

3-4 低コストMIG溶接ワイヤの評価

作製した AMX602 および AZX912MIG 溶接ワイヤを用い、MIG 溶接を行った。AMX602 板に対して AMX602 ワイヤを、AZX912 に対して AZX912 ワイヤをそれぞれ用いて MIG 溶接を行った。

図 3-4-1 に AMX602MIG 溶接継手の微細組織を示す。MIG 溶接体の微細組織は、押出材である母材から、熱により粒成長した熱影響部を経て、铸造組織を示す溶融部からなる。それぞれの結晶粒径は AMX602 で母材が約 22 μm 、熱影響部が約 30 μm 、溶融部が約 115 μm であった。溶融部には大きな欠陥は観察されず、健全な溶接継手を得られている。

次に、機械的特性評価として引張試験を行った。その結果を表 3-4-1 に示す。母材の強度に対する継手効率は、AMX602、AZX912 とともに 70%を超える十分に高い値が得られた。一般に、溶接継手強度は 70%を超えると良好であると言われている。今回作製したワイヤにおいて、ばらつきの下限值においても 70%に近い継手効率が得られており、さらなる溶接条件の最適化により、十分に信頼性の高い溶接継手を得られるものと考えられる。

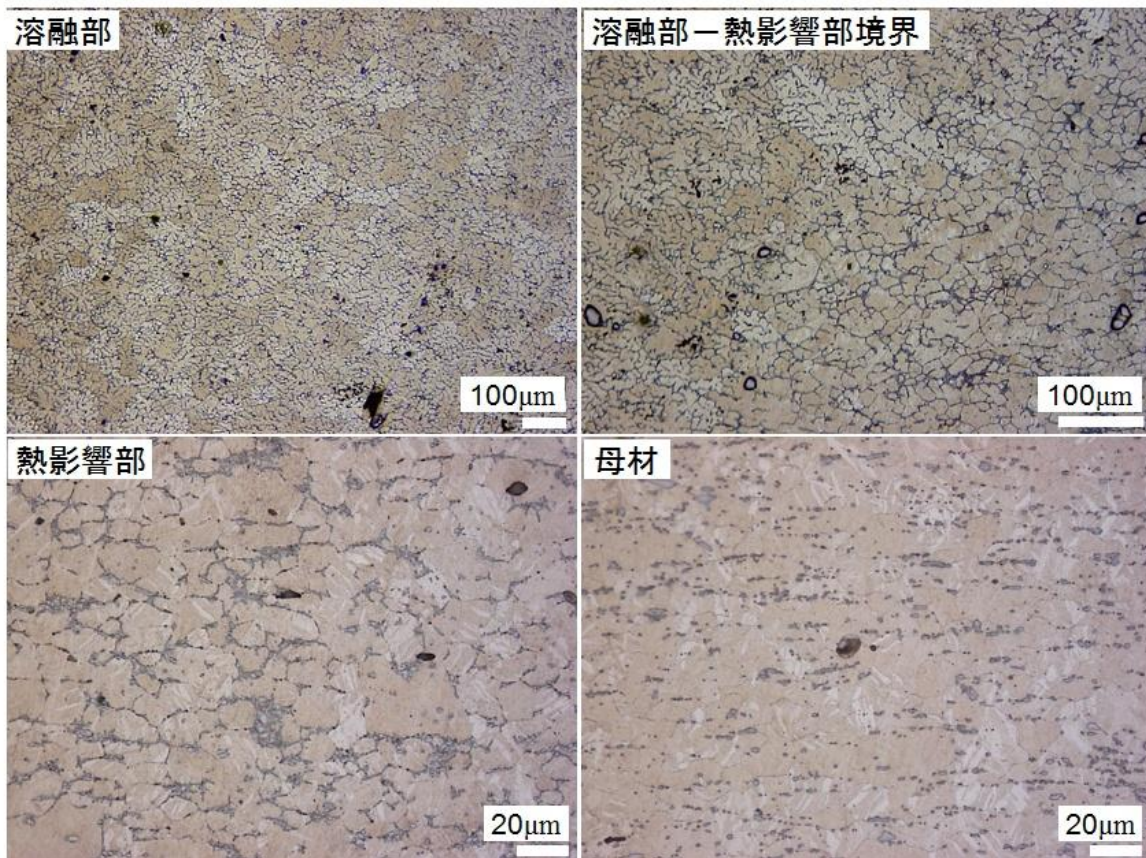


図 3-4-1 AMX602MIG 溶接継手の微細組織

表 3-4-1 AMX602、AZX912MIG 溶接継手の引張試験結果

	AMX602		AZX912	
	引張強度 (MPa)	継手効率 (%)	引張強度 (MPa)	継手効率 (%)
1	185	72.3	220	76.8
2	175	68.3	206	71.9
3	195	76.3	206	71.8
4	184	71.7	211	73.5
5	204	79.9	205	71.7
6	187	73.0	232	81.0
7	191	74.5	209	72.8
8	177	69.3	205	71.4
9	219	85.5	244	85.1
10	190	74.3	-	-

大阪府立大学で行った低コストMIG溶接ワイヤの評価を、木ノ本伸線株式会社にフィードバックすることにより、適正な伸線条件を決定することができた。これにより、難燃性マグネシウム合金AMX602 およびAZX912 について、長さ300m以上のMIG溶接ワイヤを開発することができた。図3-4-2 に完成した難燃性マグネシウム合金MIG溶接ワイヤを示す。

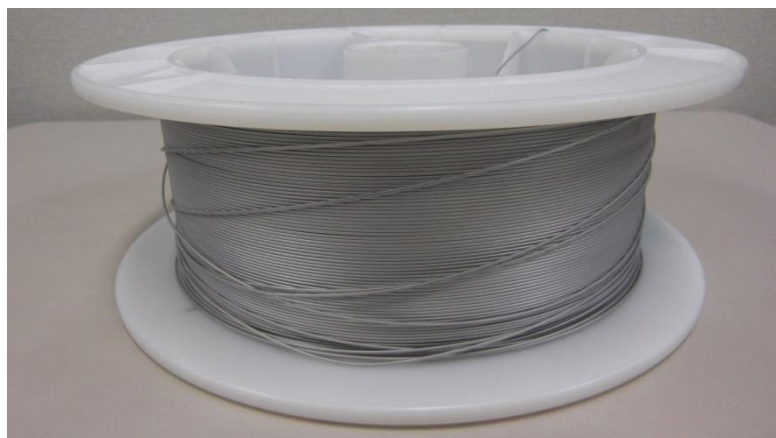


図 3-4-2 難燃性マグネシウム合金MIG溶接ワイヤ

第3章 全体総括（木ノ本伸線株式会社、公立大学法人大阪府立大学）

平成 23 年度から平成 25 年度の 3 か年の研究開発により、難燃性マグネシウム合金 AMX602、AZX912 について、以下の成果が得られた。

- ① 伸線工程に適した線径（ $\phi 4$ ）を適正な押出比で単孔押出できる押出機を導入し、押出温度、押出速度などの最適な押出条件を見い出すとともに、中径コイル材の組織微細化に適した押出ダイスの設計・製作を行えた。
- ② 極細径（ $\phi 1.2$ ）で、高精度（真円度が 0.015mm 以下で、直径の許容差が +0.01～-0.04mm）のワイヤを作り出す伸線ダイス構造を把握できた。
- ③ アルミニウム合金製 M I G 溶接ワイヤ並みに加工された高精度・極細径・長尺の難燃性マグネシウム合金製ワイヤの量産品（低コスト品）を完成させた。また、最適押出条件下および最適伸線条件で試作した M I G 溶接ワイヤで実際に溶接を行い、溶接部の生成物やワイヤ送給状態を伸線工程等にフィードバックし、溶接ワイヤの改善を行うとともに、販売促進のために必要となる M I G 溶接データベースの蓄積を行えた。

また、平成 23 年度から平成 25 年度の 3 か年の研究開発を終えて、今後の課題は次のように考えている。

1. 予定通り、溶接性がアルミニウム合金並みの難燃性マグネシウム合金 M I G 溶接ワイヤは完成したが、溶接構造物の主材料になる展伸材の市場が未成熟なままである。本 M I G 溶接ワイヤを適用する展伸材の用途開発が遅れている。
2. 市場が小さいためスケールメリットの無さから、M I G 溶接ワイヤの元素材である casting 材価格が高止まりしてしまっている。
3. 供給過剰のリスクを避けるため、M I G 溶接ワイヤ作製の途中工程である伸線工程においても、設備投資を図るタイミングの見極めが困難である。