

平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「輸送用機器等の軽量化向け新規耐熱性マグネシウム合金鍛造部品の開発」

研究開発成果等報告書

平成 24 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社新技術研究所

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	3
1-2	研究体制	5
1-3	成果概要	7
1-4	当該研究開発の連絡窓口	9

第 2 章 本論

2-1	合金組成の第一原理計算による設計	9
2-2	Mg-Al-Ca-Sr 系マグネシウム合金の溶製と押出し加工による組織の最適化	9
2-3	押出し技術の確立	10
2-4	鍛造金型の調査、鍛造金型の設計、鍛造金型の製作	11
2-5	鍛造技術の確立	
2-5-1	鍛造条件の設定	12
2-5-2	鍛造技試作	13
2-5-3	鍛造部品の組織と物性目標	16
2-5-4	最適鍛造条件	17

最終章	全体総括	18
-----	------	----

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

【研究開発の背景】

比強度に優れるマグネシウム材による軽量化において、室温および高温における強度特性の絶対値が、アルミニウム材に比較して劣ることが、設計上の制約となっている。このため、室温および高温強度特性を同時に向上することが求められている。

また、従来の耐クリープ性マグネシウム合金は、高価な希少金属を必須成分とするものが多いが、希少金属は産出国が限られているため、供給安定性に問題があり、また、高価である。希少金属に代わる成分元素を選定することで、低コスト化を図ることが要請されている。

高温において応力が付加された場合、マグネシウム合金が変形する要因の一つに、材料の結晶粒同士が、粒界で滑ることによる変形がある。マグネシウム合金では、粒界の析出物によるネットワーク組織に、この粒界滑りを妨げる効果があるため、組織を制御することによって耐クリープ性を高めることができる。マグネシウム合金をビレットに鋳造することによって形成される粒界のネットワーク組織は、強い力で押出されることによって破壊されてしまうので、押出材では、高温における応力に対する変形抵抗力が低下してしまう。

このため、この面でのマグネシウム材の合金組成の最適化及び組織制御の高機能化が求められている。

今後の輸送用機器や産業用ロボットは、高速運動と急速な加減速といった過酷な条件下で、長期間安定した稼働が要請されている。このため、部品の耐久性、信頼性の向上が求められているが、鋳造やダイカスト製品内部の欠陥が、重大な問題を引き起こす恐れがある部品には、鍛造加工品の使用が要請される。しかし、既存の耐熱性マグネシウム合金の素形材は、添加元素の影響で加工性が低い。このため、難加工材の耐熱性マグネシウム合金の鍛造加工技術の確立が急務となっている。

【本研究開発の目的】

従来のダイカスト成形用耐熱、耐クリープ性合金では、強度向上に寄与するアルミニウム添加量を高くすると、ダイカスト成形で溶湯の金型焼きつきなどを生じてダイカスト成形性を阻害するため、アルミニウム添加量に限界があった。しかし、押出し材加工においては、アルミニウム添加量の多い材料を加工できるので、アルミニウムの固溶効果による耐熱性、耐クリープ性改善が期待できるため、計算科学を活用して新規押出し用マグネシウム合金組成を設計する。この設計組成で合金を溶製し、この新規合金が、耐熱性、耐クリープ性と同時に、室温物性も向上できる可能性を確認する。さらに、押出し加工による粒界析出物のネット

ワーク組織の破壊により、変形抑制効果が低下する押出し材において、特に、従来試みられてこなかった、計算科学の活用と実験による実証を併用することで、押出し材でなければ出来ない、添加元素の固溶効果を最大限発揮する新規な組成とその組織を最適化して、耐熱性、耐クリープ性を発揮する鍛造用押出し材を製作する。

実用部品鍛造のため、実用部品の図面を元に金型を設計・製作し、上記事業において製作した鍛造用押出し材で、標物性を持った実用鍛造部品を製作する。また、経験値によることが多かった難加工材のマグネシウム合金の鍛造技術を論理的に整理するため、開発した難加工材の Mg-Al-Ca-Sr 系マグネシウム合金から造られた押出し材を鍛造加工する時に、鍛造加工において最も重要な条件である加工温度、加工速度を、理論的に統合した Z パラメータを利用して最適化する。

【本研究の目標】

本研究の目標は、組織を最適化した新規マグネシウム合金押出し材を鍛造し、該鍛造部材の目標物性値が

○ 室温物性

(NEDO「マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト」における輸送機器、ロボット用鍛造部材での目標値の 80%程度)

引張り強さ： 340 MPa 以上

引張り伸び： 10%以上

○ 高温物性 (150℃)

(Mg-9Al-1Ca-0.5Sr ダイキャストまま材[商品名 ATMag]の特性値)

引張り強さ： 220 MPa 以上

引張り伸び： 10%以上

であって、更に上記目標物性を持った鍛造部材を、安定的に製造できることであり、更に、実用的な鍛造条件を Z パラメータで整理し、鍛造技術の確立を図る。

【用語解説】

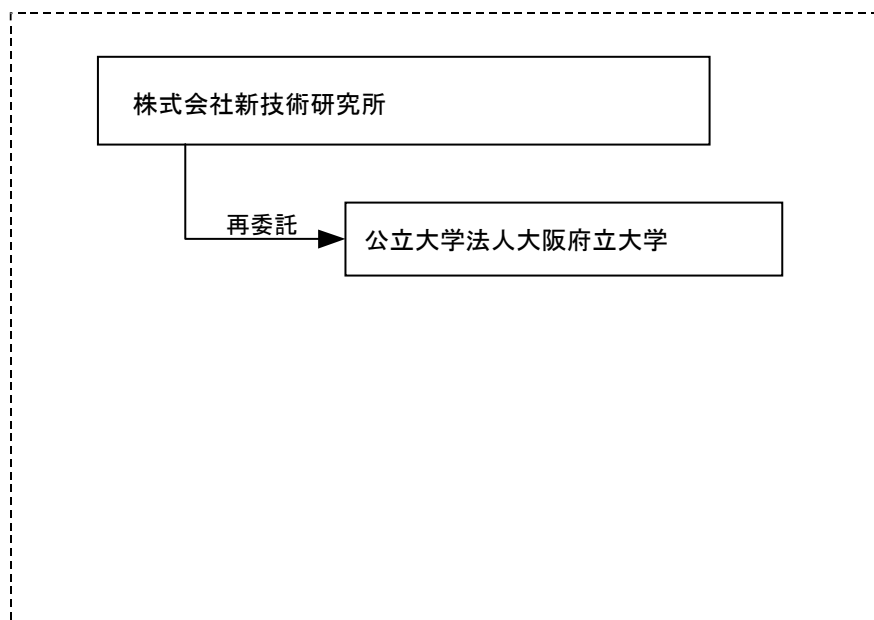
クリープ：クリープ現象とは、材料に荷重を加えたときに、時間とともに変形が増大していく現象のことをいいます。クリープ現象は、高温になると著しくなるため、高温にさらされるような部材では、重点的に考慮する必要があります。

Z パラメータ：Zener-Hollomon パラメータで、式 $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$ であらわされ、加工におけるひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と温度 T の互換性を表す。

1－2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）



統括研究代表者（P L）
株式会社新技術研究所
代表取締役 平井 勤二

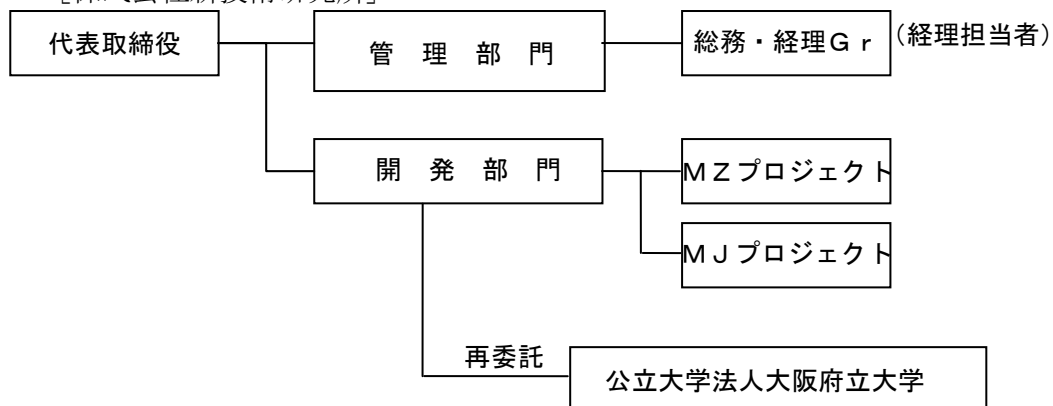
副統括研究代表者（S L）
株式会社新技術研究所
開発部門 波多野 吏

副統括研究代表者（S L）
公立大学法人大阪府立大学
マテリアル工学分野
准教授 瀧川 順庸

2) 管理体制

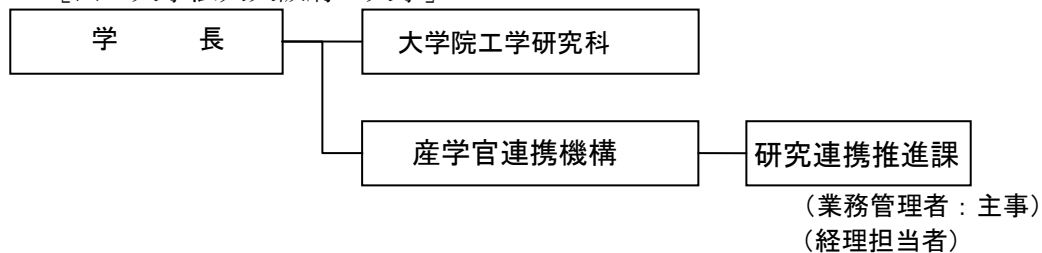
①事業管理者

[株式会社新技術研究所]



② 再委託先

[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】株式会社新技術研究所

① 管理員

氏名	所属・役職
平井 勤二	代表取締役

② 研究員

氏名	所属・役職
波多野 吏	開発部門・研究員
菅谷 卓生	管理部門・研究員

【再委託先】

(研究員)

公立大学法人大阪府立大学

氏名	所属・役職
東 健司	大学院工学研究科・教授
瀧川 順庸	大学院工学研究科・准教授
津田 大	大学院工学研究科・准教授
上杉 徳照	大学院工学研究科・助教

1-3 成果概要

1-3 成果概要

(1) 合金組成の第一原理計算による設計

室温物性、高温物性ともに優れたマグネシウム合金組成の設計において、第一原理計算による高温におけるマグネシウム合金の変形挙動に対する積層欠陥エネルギーの寄与を基礎原理として組成設計を行った。すなわち、マグネシウムに添加元素を加えて合金化することによって積層欠陥エネルギーが低下することで、クリープ速度が大幅に低下することが期待できる。そこで、合金組成の設計指針は、限られた固溶限の範囲内で、効果的に積層欠陥エネルギーを低下させる添加元素を見出すことにある。添加元素がマグネシウムに最大固溶限まで固溶できると考えたときに、本研究の成果と固溶添加元素による積層欠陥エネルギー低下の観点から、最適な添加元素はAlであると結論付けた。

Al添加量を振って5種類の組成を提案し、加えて、添加元素の効果を見るため、比較組成6種類を提案した。

(2) Mg-Al-Ca-Sr系マグネシウム合金の溶製と押出し加工による組織の最適化

第一原理計算により合金設計したものに、比較組成を加えて、11種類の合金を溶製した。

押出し比16で作製した押出し材について、組織解析をしながら熱処理条件の検討を行い、400℃×48時間の熱処理で、第2相が最も微細分散化し、高温での強度が向上することを実証できた。

室温での伸びの目標達成が困難であったが、押出し比を270に高め、結晶を微細化すると共に、熱処理による第2相の微細分散化を図り、鍛造による強加工で目標物性達成可能なことを確認した。

【用語解説】

第一原理計算：現実の原子を仮想世界で再現するために行う、量子力を利用したシミュレーションを、「第一原理計算（First Principle calculation または ab initio calculation）」という。

積層欠陥エネルギー：完全結晶中に単位面積の積層欠陥を導入するのに必要なエネルギーをいう。積層欠陥エネルギーの低い金属ほど、転位は2本の部分転位に分かれて拡張しやすいので、転位の移動による金属材料の変形が起こりにくい。

(3) 押出し技術の確立

押出比 16 の押出しを行い、全ての合金において同一条件下での押出しに成功し、十分な押出し技術が確立できた。

高性能押出し機においては、押出し比 270 において、押出速度 50mm/min という非常に大きな値が得られ、それにより第 2 相を微細に分散できた。

量産用押出し機による押出し材の平均粒径を測定し、目標とした $10\mu\text{m}$ 以下を達成できたことを確認した。

(4) 鍛造金型の調査、鍛造金型の設計、鍛造金型の製作

アドバイザー企業が、アルミ鍛造からマグネシウム鍛造に変更したい実用部品を選定し、その部品の図面が提供された。複雑な形状で、鍛造が困難と思われる形状であった。

図面を提供された実用部品の鍛造試作を行うため、新規に金型を設計・製作した。金型の設計においては、新規材料のため、鍛造における材料のメタルフローの推定が困難であり、また、最適な離型剤の知見がなかったので、成形条件を柔軟に調整できる金型設計を行った。すなわち、ダブルスライド構造、サイドカムを採用した。

(5) 鍛造技術の確立

鍛造技術の確立のため、材料の組織、物性の評価及び解析を実施した。鍛造シミュレーションのための新規合金押出材の鍛造条件下での圧縮変形特性を評価し、これにより、高精度なシミュレーションが可能となった。また、圧縮変形による結晶粒径変化を解析することにより、結晶粒微細化のために必要な鍛造加工条件を見いだした。

鍛造に供した押出し丸棒は、新規マグネシウム材料のため、鍛造温度、鍛造速度といった加工条件に関する知見がなく、また、金型内で新規マグネシウム合金押出し材料がどのように変形、充填、流動するかの知見もなかったので、本金型で新規マグネシウム合金丸棒材を鍛造する場合のシミュレーションを行った。2 種類の鍛造方式（パンチの動き）についてシミュレーションを行い、充填性、成形性の良い方式を選定した。

鍛造条件については、物性向上のために鍛造中に結晶粒が粗大化しないことが条件であるので、押出し材と圧縮試験材の結晶粒径を比較検討し、鍛造ワーク温度と鍛造速度を選定した。

鍛造試験を行い、鍛造部品を得たが、断面の詳細な観察を行ったところ、突起部の根元に亀裂が発生していることが判明した。この原因の究明をシミュレーションを用いて行い、鍛造による金属のフローによることが解明された。亀裂を防ぐ対策についてもシミュレーションで検討した。シミュレーションの結果に従い、ワーク寸法を変更して鍛造したところ、欠陥の無い部品を鍛造できた。

また、鍛造試験を行った鍛造条件を、主要要素の加工温度と鍛造プレス速度を統合的に示すことができる Z パラメータ ($Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$, T: 絶対温度, $\dot{\epsilon}$: 鍛造のプレス速度に関連したひずみ速度) で整理し、最適な鍛造条件を得た。

これにより、新規マグネシウム押出し材を使って複雑形状の実用部品を、鍛造により成形できることを実証した。

得られた鍛造部品から引張試験片を作製し、その室温引張変形特性を調べた。その結果、標値を達成するとともに、部品の要求物性を大幅に上回る特性を有する鍛造部品が得られる組成、鍛造条件を明確にした。鍛造部品の結晶粒径を鍛造加工条件から求めた Z パラメータを用いて解析し、目標値を達成する鍛造部品が得られる条件と合わせて、新規合金の鍛造加工条件最適化指針を得た。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(フリガナ)：ヒライ キンジ

氏名：平井 勤二

所属組織名：

所属役職：代表取締役

Tel：0550-80-1000 Fax：0550-88-3022

E-mail：kinji.hirai@takata.co.jp

第2章 本論

2-1 合金組成の第一原理計算による設計

実施者らは、これまで主として Al と Zn をマグネシウムに添加した AZ 系と呼ばれるマグネシウム合金を基本組成とし、それに耐熱性を向上させる元素を添加した新規な Mg-Al-Ca-Sr 系ダイカスト用マグネシウム合金（以下、商品名である ATMag と呼称する）を開発してきた。ATMag ではマグネシウム合金に固溶しない析出物（ Al_2Ca 、 Al_2Sr 等）が粒界にネットワーク状に晶出しており、ネットワーク状の粒界晶出物が粒界すべりを効果的に抑制することで、高い耐熱性を達成している。しかしながら、素形材化工程における押出し加工においては、その強い加工応力によって、粒界ネットワーク構造が崩壊してしまうため、強度および延性は向上するが、耐熱性が顕著に低下する。本研究開発では、ATMag の組成を元に、押出し加工による組織の破壊にもかかわらず、耐熱性を高められるように、固溶添加元素による積層エネルギーの低下に着目した。

合金化によって積層欠陥エネルギーが低下することで、クリープ速度が大幅に低下することが期待できる。そこで、合金組成の設計指針は、限られた固溶限の範囲内で、効果的に積層欠陥エネルギーを低下させる添加元素を見出すことにある。これまでに第一原理計算から 50 種類ほどのマグネシウム 2 元固溶体合金の中で偏析エネルギーが判明している。添加元素が最大固溶限まで固溶できると考えたときに、第一原理計算の結果から、特に積層欠陥エネルギー低下に有効な元素は、In、Tl、Sc、Pb、Al、Y、Sn、Bi である。ただし、人体への有害性および、密度の増加の観点、固溶添加元素による積層欠陥エネルギー低下の観点から、最適な添加元素は Al であると結論付けた。

そこで、鍛造用押出し材に加工して室温及び高温物性を発揮する組成として、添加元素の Ca、Sr との金属間化合物生成量を考慮しながら、Mg に対する最大固溶量の範囲内で Al 量を最適化した組成の検討を行った。

2-2 Mg-Al-Ca-Sr 系マグネシウム合金の溶製と押出し加工による組織の最適化

全ての組成について直径 40mm のビレットを、温度 350℃、押出し比 16、押出し速度 0.2mm/秒の条件で押出し、直径 10mm の丸棒を成形した。

一部の組成については、押出し比 270 の押出を行った。直径 170mm のビレットを、温度 360～430℃、押出し比 270 で、直径 9.5mm の丸棒を成形した。なお、荷重制御により押出を実施したため、押出速度は合金組成により 0.06～0.24 mm/秒の範囲であった。また、最大荷重においても押出ができなかったものについては、温度を上げて押出を実施した。

合金はいずれも Al の固溶による高温強度向上を狙ったものである。そこで、固溶量増

加のための熱処理条件を検討した。図 2-1 に、熱処理によるミクロ組織変化を示す。熱処理により、第 2 相が顕著に減少していることが分かる。これは、熱処理により、Mg-Al 系の化合物が固溶したことによるものである。

押出後の熱処理は、 $400^{\circ}\text{C} \times 48\text{h}$ とした。これは、 420°C 以上の温度での熱処理においては酸化による劣化が激しく、また母相および第 2 相の粗大化が生じるのに対し、 400°C での熱処理では粒界に第 2 相が微細に分散することから決定した。

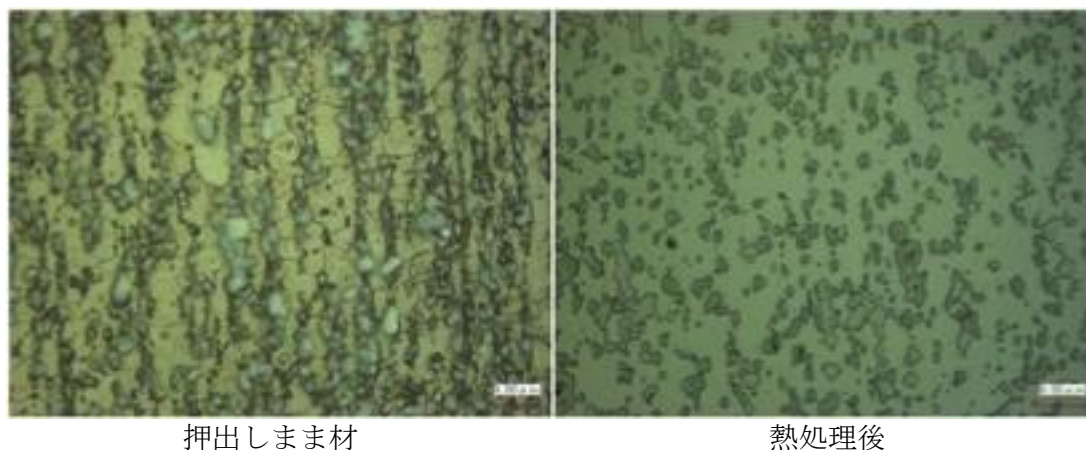


図 2-1 押出し材の熱処理

2-3 押出し技術の確立

押出比 16 の押出については、全ての合金において同一条件下での押出に成功した。押出比 16 については十分な押出技術が確立できた。

一方、押出比 270 の押出については、組成によって押出ができなかったもの、押出温度が 430°C と高温になってしまったもの、 0.06mm/秒 と極端に押出速度が小さくなってしまったものがあった。押出ダイスの形状等については十分に検討しており、押出技術自体は確立できた。一方、押出し性は、押出機的能力により変化する。他の高性能押出においては、押出比 270 においても押出速度 50mm/min という非常に大きな値が得られており、それにより第 2 相が微細に分散できた。

押出比 16 の試料における添加元素量の変化による室温引張特性の変化を解析した。添加元素が増加すると共に耐力は上昇し、伸びは減少する傾向が見られた。一方、Al 固溶量が減少すると耐力が低下し、それに伴い伸びが増加した。

室温における目標物性である強度 340MPa 以上、伸び 10% 以上は、表 2-1 に示すように、押出し比 270 の強加工することで達成できたことから、鍛造による加工により、物性が向上する可能性を確認できた。

押出比	伸び (%)	引張強度 (MPa)	0.2% 耐力 (MPa)
1 6	7.1	311	187
2 7 0	12.4	345	258

表 2-1 押出し材の室温物性

高温での特性については、表 2-2 に示すように、いずれの材料も目標値を大幅に超える高い高温強度を示しており、本研究で開発した合金が優れた高温強度特性を有することが明らかになった。

組成	強度 (MPa)	伸び (%)
A	295	29.6
B	285	21.4
C	297	19.9

表 2-2 押出し材の高温 (150℃) 物性

2-4 鍛造金型の調査、鍛造金型の設計、鍛造金型の製作

アドバイザー企業において、アルミニウム鍛造材からマグネシウム鍛造材に変更を希望する図 2-2 の製品の複雑形状の部品が提示されたので、この部品の鍛造による試作を行うことにした。尚、本部品の要求物性は、引張り強さ 210MPa 以上、耐力 121MPa 以上である。

鍛造に使用する新規マグネシウム合金の成形性、鍛造時のメタルフローの推定が困難であり、また、離型剤の選定により成形性が変化するが、最適な離型剤の知見がなかったため、金型の設計に当たっては、成形条件の自由度を高めるため、以下の工夫をした。

- ・ ダブルスライドのサーボプレス機による鍛造とし、金型も、それに対応する構造とした。
- ・ 成形性が悪いと推定されたので、サイドカムを使用して、難しい局面の端部における成形性向上を図った。
- ・ 鍛造シミュレーションを利用した。



図 2-2 鍛造部品の適用製品

2-5 鍛造技術の確立

2-5-1 鍛造条件の設定

室温における機械特性向上のためには、固溶量が同程度の場合、結晶粒径微細化が重要である。結晶粒径の微細化について、 Z パラメータを用いた解析を行った。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。過去の研究において、 Mg 合金の動的再結晶粒径は Z パラメータにより整理できることが知られている。そこで、圧縮試験後の結晶粒径を Z パラメータで整理した。図 2-3 に得られた結果を示す。

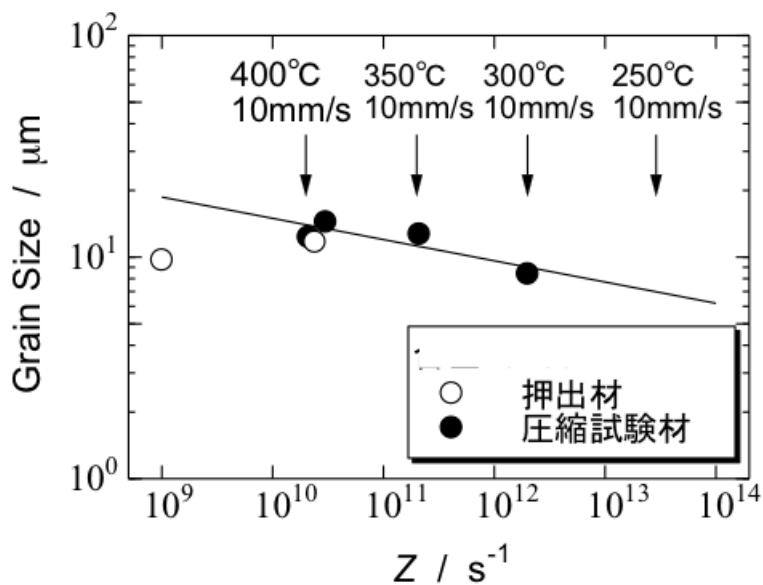


図 2-3 鍛造による結晶粒形と Z パラメータ

この図から、 Z パラメータが 10^{11} から 10^{12}s^{-1} の間で結晶粒径が試験前の押出材よりも

微細化することがわかる。すなわち、鍛造によるさらなる高強度化を目指す場合、鍛造条件として10mm/minで加工するのであれば、少なくとも350℃以下の温度で鍛造を実施しなくてはならないことがわかる。この結果を基に、鍛造条件を350℃以下と決定した。

成形順序の異なる2種類の鍛造方法についての検討を行った。図2-4にそれぞれの鍛造シミュレーションの結果を示す。タイプ1は独立に動く2つのパンチで鍛造を行うタイプであり、タイプ2は外側のパンチ01は閉じた状態にしておき、内側のパンチ02のみが動いて鍛造を行うタイプである。このシミュレーションの結果、鍛造加工法として、タイプ2を選択した。

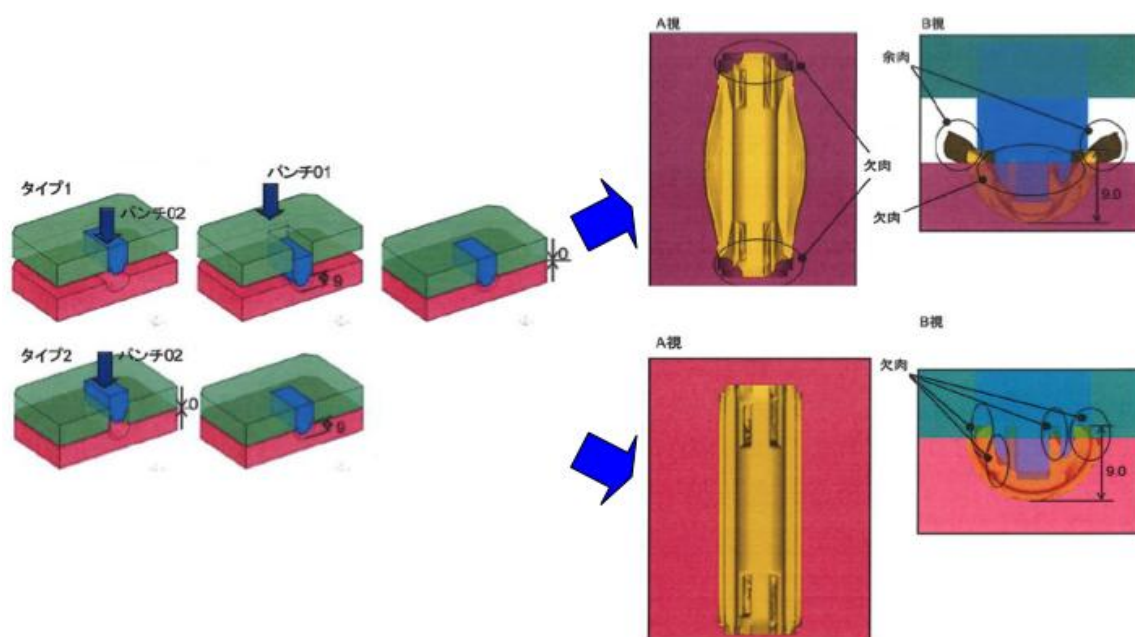


図2-4 鍛造シミュレーション

2-5-2 鍛造技試作

鍛造試験は280、300、3258、337、350℃、鍛造速度7、10、40mm/秒で行った。図2-5に得られた鍛造部材の断面組織を示す。条件は材料の初期寸法がφ8.2×47mmであり、鍛造条件は350℃×10mm/minである。図に示すように、突起部の右下部にクラックが観察された。

この亀裂発生の原因を、シミュレーションにより検討した。その結果を、図2-5に示す。

図2-5において、鍛造により、先に突起部が充填し、その後に金属材料が横方向に流動して突起部の根元に亀裂が生じることが示された。金属材料の横方向への流動を防ぐことにより、亀裂の発生を抑制できると推定された。シミュレーションを行い、ワークの寸法を長くすることにより、亀裂発生を避けることができるかを確認した。その結果を、図2-6に示した。その結果、推定の通り、ワーク寸法を長くして金属材料の横方向への流動を避けることで、亀裂の発生を避けられることが確認できた。

そこで、初期材料長さを52mm前後とし、いくつかの条件で鍛造を実施した。図2-6に、初期材料長さ52mmで鍛造した部材の断面組織を示す。条件は、初期材料寸法φ8×52mm、鍛造条件350℃×10mm/minである。初期材料長さを長くすることにより、図

2-5 で見られた亀裂は観察されなくなった。これにより、健全な鍛造部材を得ることができた。以上により、本研究の新規マグネシウム合金押出し材により、実用部品を鍛造できることを実証した。

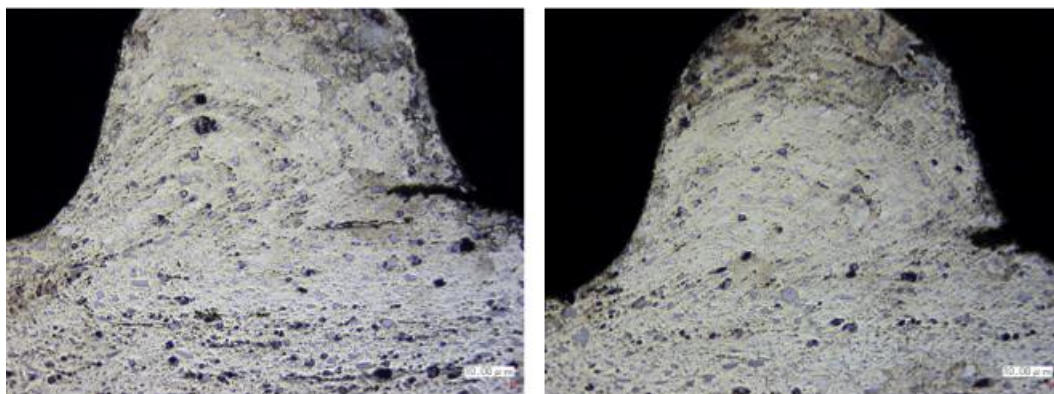


図 2-5 鍛造部材の断面

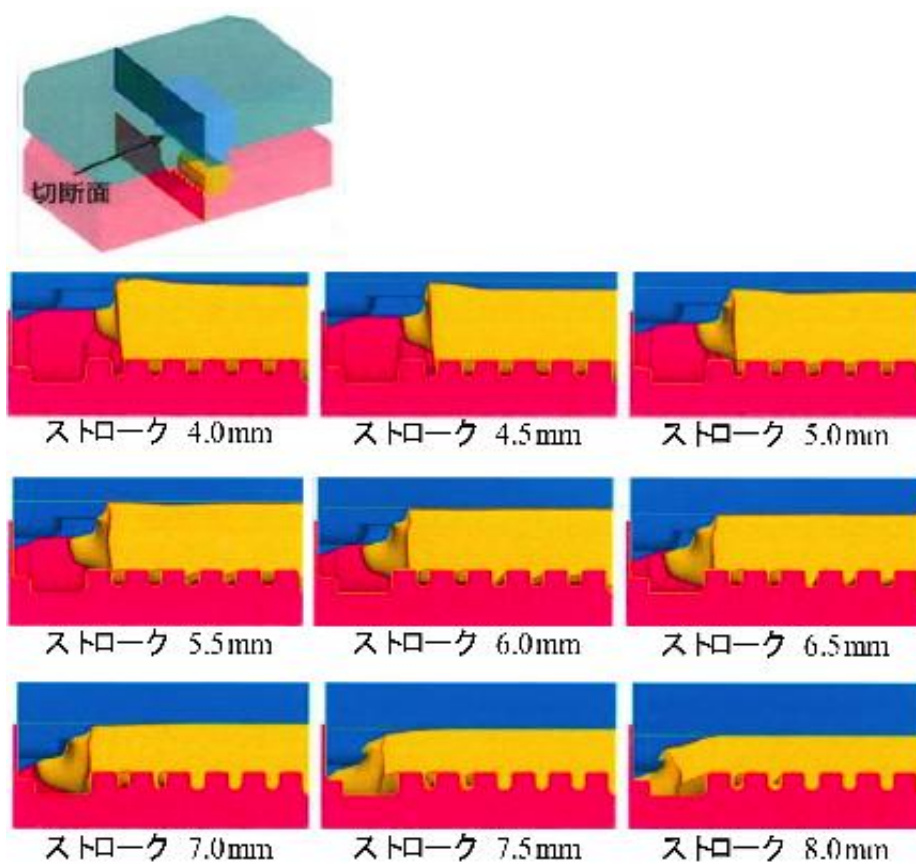


図 2-5 亀裂発生シミュレーション

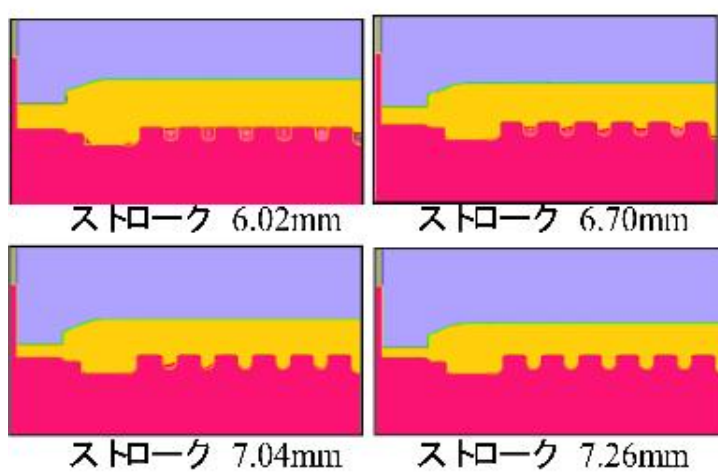
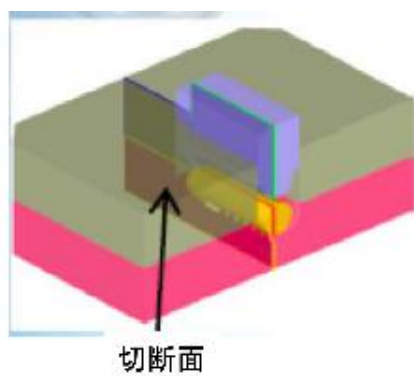


図 2-6 亀裂防止の鍛造シミュレーション

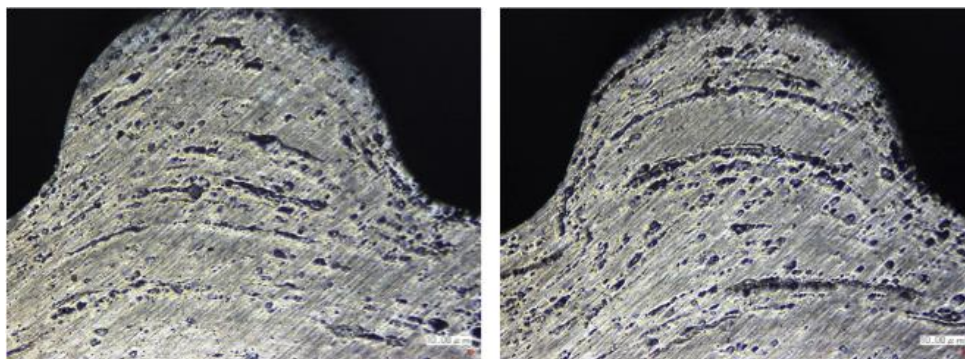


図 2-7 亀裂発生対策の結果

2-5-3 鍛造部品の組織と物性目標

鍛造部品の結晶組織と物性を評価した。

図 2-7 に結晶組織を示した。結晶粒径が微細化していることがわかる。この結果は、図 2-3 から設定した鍛造条件が妥当であったことを示している。

表 2-3 に、鍛造部品の物性測定値を示した。いくつかの条件において本研究の目標値である伸び 10%を満たしながら強度も 340MPa 以上に高強度化していることがわかる。この結果は、前述したように鍛造時の結晶粒微細化に依るものである。一方、高温強度については、この合金の使用条件下では結晶粒依存性がないことがわかっている。この結果から、本研究で開発した合金は、適切な条件で鍛造することにより、高温強度と室温強度ともに優れた性質を示すことが明らかになった。一方、本部品に対する要求物性値の引張り強さ 240MPa 以上、耐力 121MPa 以上に対しては、大きく上回る物性を得ることができた。

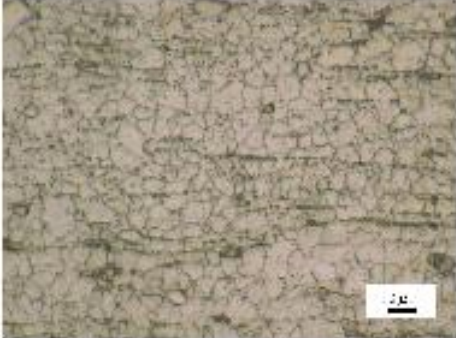
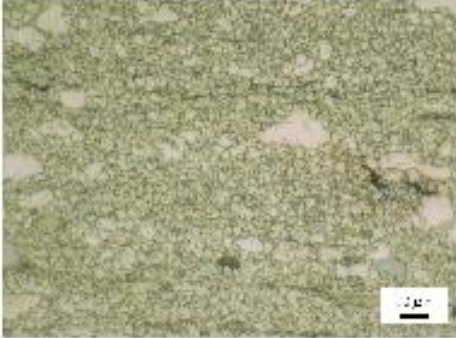
温度 (°C)	鍛造速度 (mm/s)	組織写真	結晶粒径 (μm)
325	10		8.8
300	10		6.6
280	10		4.2

図 2-7 鍛造条件と結晶組織

鍛造条件	伸び (%)	引張強度 (MPa)	0.2%耐力 (MPa)
280℃ 10mm/sec	11.1	367	270
300℃ 10mm/sec	13.7	360	251
325℃ 10mm/sec	9.5	346	250

表 2-3 鍛造部品の物性

2-5-4 最適鍛造条件

鍛造時の結晶粒径微細化により高温強度と室温強度ともに優れた性質を示す鍛造部材を作製可能であることが明らかになった。そこで、最適鍛造条件の設定にあたり、鍛造条件と結晶粒径との関係について Z パラメータを用いた整理を行った。図 3-20 にその結果を示す。 Z が大きくなるほど、すなわち低温、高ひずみ速度下で鍛造をするほど結晶粒が微細化することがわかる。図 3-20 結果から、 $Z=2 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$ 以上の Z において全ての組成で結晶粒が微細化していることがわかる。このことから、 $Z=2 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$ 以上の条件、例えば 300℃、ひずみ速度 1s^{-1} や 350℃、ひずみ速度 10s^{-1} などが最適鍛造条件であることが明らかになった。

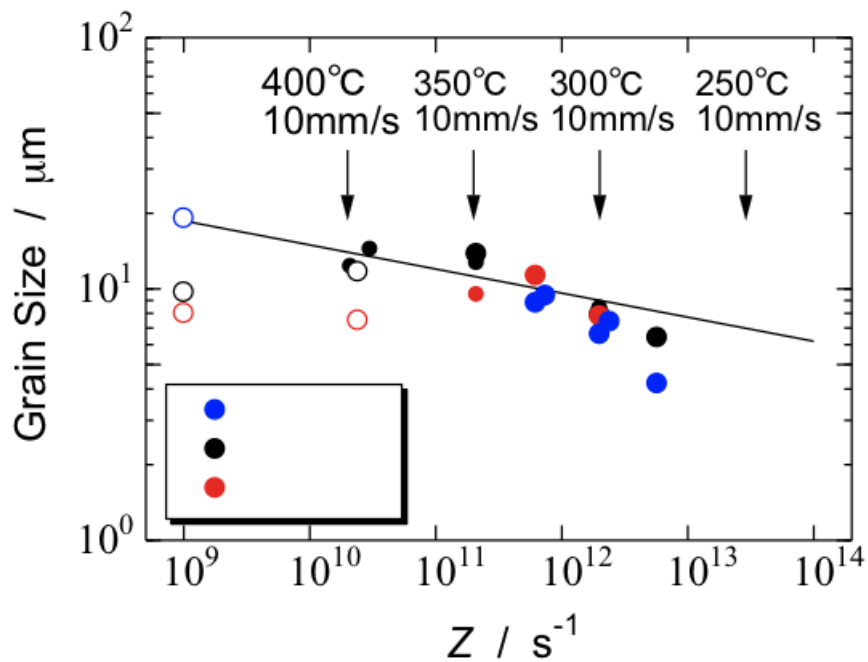


図 2-8 鍛造条件の Z パラメータによる整理

最終章 全体総括

【複数年の研究開発成果】

(6) 合金組成の第一原理計算による設計

室温物性、高温物性ともに優れたマグネシウム合金組成の設計において、第一原理計算による高温におけるマグネシウム合金の変形挙動に対する積層欠陥エネルギーの寄与を基礎原理として組成設計を行った。すなわち、マグネシウムに添加元素を加えて合金化によって積層欠陥エネルギーが低下することで、クリープ速度が大幅に低下することが期待できる。そこで、合金組成の設計指針は、限られた固溶限の範囲内で、効果的に積層欠陥エネルギーを低下させる添加元素を見出すことにある。添加元素がマグネシウムに最大固溶限まで固溶できると考えたときに、本研究の成果と固溶添加元素による積層欠陥エネルギー低下の観点から、最適な添加元素はAlであると結論付けた。

Al添加量を振って5種類の組成を提案し、加えて、添加元素の効果を見るため、比較組成6種類を提案した。

(7) Mg-Al-Ca-Sr系マグネシウム合金の溶製と押出し加工による組織の最適化

第一原理計算により合金設計したものに、比較組成を加えて、11種類の合金を溶製した。

押出し比16で作製した押出し材について、組織解析をしながら熱処理条件の検討を行い、400℃×48時間の熱処理で、第2相が最も微細分散化し、高温での強度が向上することを実証できた。

室温での伸びの目標達成が困難であったが、押出し比を270に高め、結晶を微細化すると共に、熱処理による第2相の微細分散化を図り、鍛造による強加工で目標物性達成可能なことを確認した。

(8) 押出し技術の確立

押出し比16の押出しを行い、全ての合金において同一条件下での押出しに成功し、十分な押出し技術が確立できた。

一方、量産用押出し機を使用した押出し比270の押出しについては、組成によっては押出しができなかったものもあったが、押出しダイスの形状等については十分に検討しており、押出し技術自体は確立できた。量産用押出し機による押出し材の平均粒径を測定し、目標とした10μm以下を確認した。

(9) 鍛造金型の調査、鍛造金型の設計、鍛造金型の製作

アドバイザー企業が、アルミ鍛造からマグネシウム鍛造に変更したい実用部品を選定し、その部品の図面が提供された。複雑な形状で、鍛造が困難な形状であった。

図面を提供された実用部品の鍛造試作を行うため、新規に金型を設計・製作した。金型の設計においては、新規材料のため、鍛造における材料のメタルフローの推定が困難であり、また、最適な離型剤の知見がなかったので、成形条件を柔軟に調整できる金型設計を行った。すなわち、ダブルスライド構造、サイドカムを採用した。

(10) 鍛造技術の確立

鍛造技術の確立のための材料の組織、物性の評価及び解析を実施した。まず、鍛造シミュレーションのための新規合金押出材の鍛造条件下での圧縮変形特性を評価した。これにより、高精度なシミュレーションが可能となった。

鍛造に供した押出し丸棒は、新規マグネシウム材料のため、鍛造温度、鍛造速度といった加工条件に関する知見がなく、また、金型内で新規マグネシウム合金押出し材料がどのように変形、充填、流動するかの知見もなかったので、本金型で新

規マグネシウム合金丸棒材を鍛造する場合のシミュレーションを行った。2種類の鍛造方式（パンチの動き）についてシミュレーションを行い、充填性、成形性の良い方式を選定した。

鍛造条件については、物性向上のために鍛造中に結晶粒が粗大化しないことが条件であるので、押出し材と圧縮試験材の結晶粒径を比較検討し、Zパラメータで整理して、鍛造ワーク温度として350℃以上、鍛造速度10mm/秒以上を選定した。

ワーク寸法を、直径8.2mm、長さ47mmこの条件で鍛造試験を行い、鍛造部品を得たが、断面の詳細な観察を行ったところ、突起部の根元に亀裂が発生していることが判明した。この原因を究明するため、シミュレーションを行い、鍛造による金属のフローによることが解明された。亀裂を防ぐ対策をシミュレーションで検討した。この金属のフローを防ぐためには、ワークの長さを長くすることが有効であることが、シミュレーションで示されたので、ワーク寸法を直径8mm、長さ52mmに変更して鍛造したところ、欠陥の無い部品を鍛造できた。

また、鍛造試験を行った鍛造条件を、主要要素の加工温度と鍛造プレス速度を統合的に示すことができるZパラメータで整理し、最適な鍛造条件として、 $Z = 2 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ 以上の条件を得た。

これにより、新規マグネシウム押出し材を使って複雑形状の実用部品を、鍛造により成形できることを実証した。

得られた鍛造部品から引張試験片を作製し、その室温引張変形特性を調べた。その結果、目標値を達成するとともに、部品の要求物性を大幅に上回る特性を有する鍛造部品が得られる組成、鍛造条件を明確にした。鍛造部品の結晶粒径を鍛造加工条件から求めたZパラメータを用いて解析し、目標値を達成する鍛造部品が得られる条件と合わせて、新規合金の鍛造加工条件最適化指針を得た。

- (11) 新規耐熱性Mg-Al-Ca-Sr系マグネシウム合金に関する特許出願
開発した押出し鍛造用の新規耐熱性マグネシウム合金の特許出願を行った。
特願2011-72505 「マグネシウム合金」

【研究開発後の課題・事業化展開】

(1) 課題

実用鍛造部品の材料費を比較すると、表4-1に示すように、アルミニウム鍛造用押出し丸棒の単価が500円/kgであるのに対し、本研究によるマグネシウム合金の押出し丸棒の単価は、4,000円と見積もられた。

本研究で鍛造した実用部品の重量は、アルミニウム鍛造部品で3gであるのに対し、同じ寸法のマグネシウムの鍛造部品は、比重の差で2gと軽量になる。1個当たりの材料費は、アルミニウムで1.5円、マグネシウムが8円となった。

この鍛造部品は、アルミニウム鍛造材の要求物性よりも強度、耐力がはるかに高いので、最適な設計により、必要材料を6gに削減できるが、材料費は6円で、アルミニウムの4倍である。

この実用部品の生産数量として、月産50万個、100万個を想定できる。この数量での量産単価見積りを行った。

最適設計した場合、月産数量が100万個になると、アルミニウム鍛造部品との量産単価の差が、大幅に縮小し、機能上のメリットを考慮すると、実用可能なコストの領域にあると考えられる。

このように、本研究の新規マグネシウム合金押し出し材の鍛造製品の実用化においては、マグネシウム化による軽量化の価値が高く、量産数量によるコスト削減効果が大きい用途を選択することが好ましいことが理解される。

シートベルト部品	月間 生産数 (個)	押出し丸棒 単価 (¥/kg)	材料 使用量 (g/個)	材料費 ¥/個
アルミニウム鍛造	500,000	500	3	1.5
	1,000,000			
マグネシウム鍛造	500,000	4,000	2	8.0
	1,000,000			
マグネシウム鍛造 設計最適化	500,000	4,000	1.5	6.0
	1,000,000			

表 4-1 鍛造部品の材料費

一方、押出し丸棒の単価は、生産性を支配する押出し速度に比例するといわれている。アルミニウム押出し丸棒では、押出し速度が数十m/分以上であるのに対し、本研究のマグネシウム合金の押出し速度は、1～2m/分と非常に遅いことが、丸棒単価の差の大きな要因である。丸棒単価は、アルミニウムが500円/kgに対し、本研究のマグネシウム材が4000円/kgであるが、マグネシウムの比重がアルミニウムの2/3であり、また、本研究のマグネシウム合金の鍛造部品の物性が高いため、最適化設計によってアルミニウム部品よりも少ない材料で製品を設計できることを考慮すると、マグネシウム押出し材の目標単価は、4,000円から1,000円/kg程度に削減することが目標になる。従って、アルミニウム材押出し丸棒の単価と同等にするには、本研究の新規マグネシウム合金の加工条件を緩和し、押出し速度を、本研究の4倍以上に向上させる必要がある。

加工条件緩和のために、補完研究を行う計画である。

(2) 事業化展開

本研究成果の事業化の要素は、多岐にわたる。表4-3にまとめた。

本研究の合金組成に関する特許を、合金メーカーにライセンスするとともに、製造した合金を押出し材メーカーに供給することが、一つの事業化目標である。

押出し材丸棒を利用し、鍛造部品を供給することが、他の事業化目標である。

競合材料であるアルミニウム押出し材に対するコスト競争力が必要であるので、加工条件緩和の課題を解決する必要がある。加工条件緩和の研究の進展に合わせて、合金製造の事業化に向けた活動を並行して進める。

事業化の要素	事業の概要
新規 Mg-Al-Ca-Sr 系マグネシウム合金	本事業により開発した素形材用マグネシウム合金は、室温物性及び高温特性の優れた押出し材を製造できるので、合金材料を、押出し材メーカーに販売する。
新規 Mg-Al-Ca-Sr 系マグネシウム合金の鍛造技術	本事業により開発したマグネシウム合金押出し材と鍛造技術により、自動車用シートベルト部品を製造する。
新規 Mg-Al-Ca-Sr 系マグネシウム合金に関わる特許権	本事業によって開発した素形材用マグネシウム合金に関わる特許権を取得し、合金メーカーにライセンスの供与を行う。

表 4-3 本研究成果の事業化

以上