

システム開発
20 - F - 6

革新的高強度マグネシウム合金用射出成形 技術に関するフィージビリティスタディ -要旨-

平成21年3月

財団法人 機械システム振興協会

委託先 財団法人 金属系材料研究開発センター



この事業は、競輪の補助金を受けて実施した
ものです。

<http://ringring-keirin.jp/>



序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、都市、防災、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには技術開発力の強化に加えて、多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢の変化に対応するため、財団法人機械システム振興協会では、財団法人JKAから機械工業振興資金の交付を受けて、システム技術開発調査研究事業、システム開発事業、新機械システム普及促進事業を実施しております。

このうち、システム技術開発調査研究事業及びシステム開発事業については、当協会に総合システム調査開発委員会(委員長：東京大学名誉教授 藤正 巖氏)を設置し、同委員会のご指導のもとに推進しております。

本「革新的高強度マグネシウム合金用射出成形技術に関するフィージビリティスタディ」は、上記事業の一環として、当協会が財団法人金属系材料研究開発センターに委託し、実施した成果をまとめたもので、関係諸分野の皆様方のお役に立てれば幸いです。

平成21年3月

財団法人 機械システム振興協会

はじめに

マグネシウムは資源量が多く、樹脂などに比較してリサイクルが容易で、超軽量材料（密度 1.8g/cm^3 以下）であり、比強度と比剛性の高さが際立っています。それによる重量削減はスチールに比較して60%、アルミニウムと比較して25%に達します。更に、振動を吸収する減衰能にすぐれ、熱膨張が低いことによる寸法安定性や、切削性、耐くぼみ性、電磁遮蔽性などの優れた性質を有しています。

マグネシウム合金は、これまで、特殊な製造技術を適用した限定された分野で利用される材料と考えられてきましたが、軽量化などへの強いニーズを背景に、自動車部品やノートパソコン、携帯電話などのモバイル機器の筐体に採用され、大きく需要が喚起され、その普及により、徐々に汎用素材として浸透しつつあります。特に近年は、地球温暖化対策（二酸化炭素排出削減）のために自動車の燃費規制は強化され、自動車の軽量化が強く求められており、実用金属の中で最も軽いマグネシウムが注目されていますが、従来のマグネシウム合金はアルミニウム合金に比べて機械的強度の点で優位性が少ないことが大きな課題となっています、

一方、マグネシウム合金の成形方法としては、ダイキャスト方式、チクソーモールド方式、ビレット方式などがあります。ダイキャスト方式は大きな釜でマグネシウムを溶かし、金型へ注入する方法です。この方法の場合、釜には常に不活性ガスを混入させてマグネシウムの発火を抑制する必要があります。チクソーモールド方式ではマグネシウム合金を切削加工して得られる数mmの粒状のチップを原料とするため、粒と粒の間に空気が混入し、この空気により酸化物が生成されてしまう恐れがあります。それに対しビレット方式では、棒状の材料を使い、極力空気との接触を押しえた成形が可能です。

そこで本フェージビリティスタディでは、近年、熊本大学で発見されて世界的に注目されている新しいタイプの高強度マグネシウム合金を用い、その特性を活かすことができる新しい射出成形機をビレット方式により開発することを目的としました。

本報告書の作成にあたり、ここにあらためて、加藤マネジメントコンサル株式会社 代表取締役 加藤委員長、熊本大学 マテリアル工学専攻教授 河村講師 他 委員の方々、及び、財団法人機械システム振興協会、及びご指導とご協力をいただいた多くの関係者の方々に深く感謝申し上げます。

平成21年3月

財団法人 金属系材料研究開発センター

目次

序

はじめに

1	スタディの目的	4
2	スタディの実態体制	11
3	スタディ成果の要約	14
3.1	熊大マグネシウム合金ビレット方式射出成形機の開発	16
3.1.1	ビレット方式の新しい成形機の開発	16
3.1.2	ビレット方式射出成形機用金型の開発	18
3.1.3	熊大マグネシウム合金ビレット方式射出成形機の開発まとめ	19
3.2	ビレット方式射出成形機用熊大マグネシウム合金の開発	19
3.2.1	熊大マグネシウム合金の成分のチューンナップ	19
3.2.2	熊大マグネシウム合金の熱処理技術の開発	34
3.2.3	ビレット方式射出成形機用熊大マグネシウム合金の開発まとめ	38
3.3	熊大マグネシウム合金製ビレット方式射出成形品の可能性検証	38
3.3.1	熊大マグネシウム合金の機械的特性	38
3.3.2	外観評価	42
3.3.3	熊大マグネシウム合金製ビレット方式射出成形品の可能性検証まとめ	48
4	スタディの今後の課題及び展開	51
4.1	期待される成果と成果の展開	51
4.1.1	熊大マグネシウム合金製品の採用による軽量化、省エネや新規事業の創出	51
4.1.2	大型ビレット方式射出成形機への展開	52

1 スタディの目的

1.1 背景と目的

1.1.1 マグネシウム産業

マグネシウムは 1808 年に H.Davy によって発見され、商業生産は 1886 年アルミニウムと同時期に始まった。しかし、マグネシウム製錬が難しいため、アルミニウムと比べ産業として遅れたが、第一次世界大戦を契機に主に軍事利用を目的とした金属マグネシウムの需要が伸び、1939 年の総生産量は 32,850 トン、1943 年には米国だけで 184,000 トンになり、現在（1995 年データ）は、西側諸国だけで 300,000 トンを上回っている。

マグネシウムの製錬方法は、大きく分けて熱還元法と電解法の 2 つがあり、熱還元法は、酸化マグネシウムに還元剤を添加して減圧下で高温に加熱し製錬する方法。電解法は、主に海水などを原料に塩化マグネシウムを得て、これを電解して精製する方法。一口に特長といえば、熱還元法は純度がよく、電解法はコストが安い。現在、生産量の多くは電解法で製錬されている。

マグネシウムの用途は、世界的に見て、アルミニウムをベースとした合金種への添加が約 2 分の 1、次にダイカスト向け、脱硫、ノジュラーとなり、最近は、構造材としての用途に需要が伸びている。自動車用ではホイール、ステアリングカラム、シートフレームなど。携帯用としては、ノート型パソコンの筐体、カメラ、携帯電話など、どの利用も軽量化を狙っている。

1.1.2 マグネシウムの特徴

マグネシウムは、実用金属中最も軽く、地球上で 6 番目に豊富な金属であり、鉱物として地殻組成の 2.5%を占め、無限に存在し、海水にも 0.13%溶解している。加工資源として豊富な上、数々の有能な特性を持つ。今、人類が直面している地球環境保護の観点からリサイクルに大いに有効な金属として注目され、まさに時代の要請に応える、次代を担う金属である。マグネシウムの特性として表-1.1.1 に示すように、比重はアルミニウムの 2/3 で実用金属としては最も軽い金属であり、その他に比強度や比剛性が銅やアルミニウムより優れ、振動吸収性、切削性、耐くぼみ性、温度や時間が変化しても寸法変化が少なく、機械的特性に優れている。しかし、超々ジュラルミンなどの合金によりも特性が劣る。

		比重	融点	熱伝導率	引張り強さ	耐力	伸び	比強度	ヤング率
			(℃)	(w/mk)	(Mpa)	(Mpa)	(%)	(/)	(GPa)
マグネシウム合金	AZ91D	1.81	598	54	250	160	3	138	45
	AM60B	1.8	615	61	240	130	8	133	45
アルミニウム合金	A380	2.7	595	100	315	160	3	116	71
	A7050	2.8	638	121	560	490	12	130	72
鉄鋼	炭素鋼	7.86	1520	42	517	400	22	80	200
プラスチック	ABS	1.03	*	0.9	96	*	60	93	*
	PC	1.23	*	*	118	*	2.7	95	*

表-1.1.1 各材料の機械的特性

1.1.3 マグネシウム合金の成形方法

マグネシウム合金を使った成形方法にはダイカスト方式（ホットチャンバー法、コールドチャンバー法）チクソーム方式、ピレット方式射出成形法などがあり、ホットチャンバー法とコールドチャンバー法は図-1.1.2 に示すように、マグネシウム合金を大きな溶解炉（釜）にて溶解し、その溶解したマグネシウムを射出圧入部より圧力を掛け、金型に射出、又は溶解炉（釜）より溶解したマグネシウムをラドルにて射出部に入れ込み、プランジャーに圧力を掛けて金型へ射出させる。このとき、熔融したマグネシウムは空気と接触した際に発火する恐れがあるため、常に溶解炉（釜）には防燃ガスを充満させ、発火防止をする必要がある。溶解炉（釜）の底に溜まったスラッジなどの不要物を取り除く定期的なメンテナンスが必要であり、また溶解炉にひび割れなどが発生した場合、熔融したマグネシウムが漏れ出す危険性が伴う。

機械構成としては比較的簡素であるが、射出圧や計量値などにバラツキが発生しやすく、均一な製品を成形しにくいと考えられる。

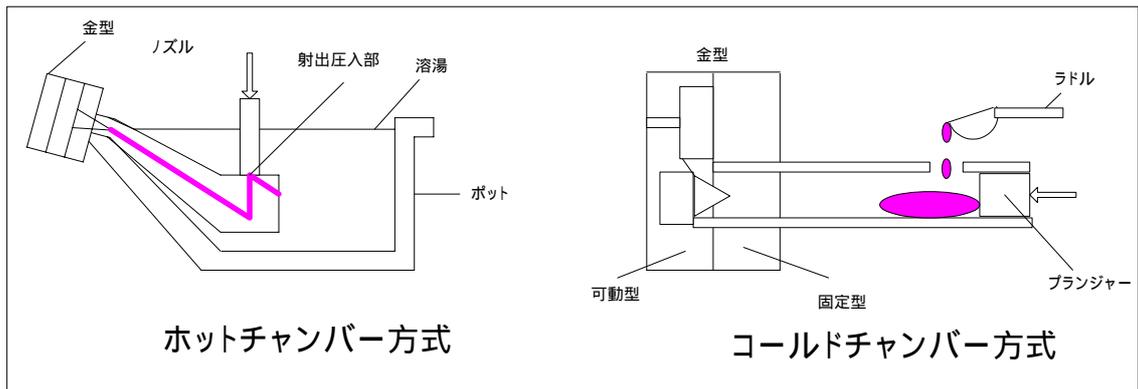


図-1.1.3-1 ダイキャスト方式概要

チクソーモールド方式は、図-1.1.3-2 で示すようにマグネシウム合金を切削加工して得られる数 mm の粒状のチップを原料とし、そのチップを原料投入部(フィーダ)よりシリンダ内に供給し、スクリュの回転によって前方へと移送する。スクリュは前方へ行くほど溝が浅くなり、粉碎されながら前方へ移送されていく。シリンダ外周部に取り付けられた電気ヒータと粉碎によって発生した熱により、スクリュ前方の貯留部に溶融した状態で蓄積されていく。貯留部に蓄積されたマグネシウム合金は、スクリュを高速で前進させることによって、金型キャビティへと射出成形されていく。このチクソーモールド法は射出圧や計量値が正確に設定され、均一な成形が可能となる。しかしながら、この方法の場合、材料チップの粒と粒の間に空気が混入し、この空気により酸化物が生成されてしまう恐れがある。そのため空気の混入を防止する機構や、材料の保管管理が必要になる。

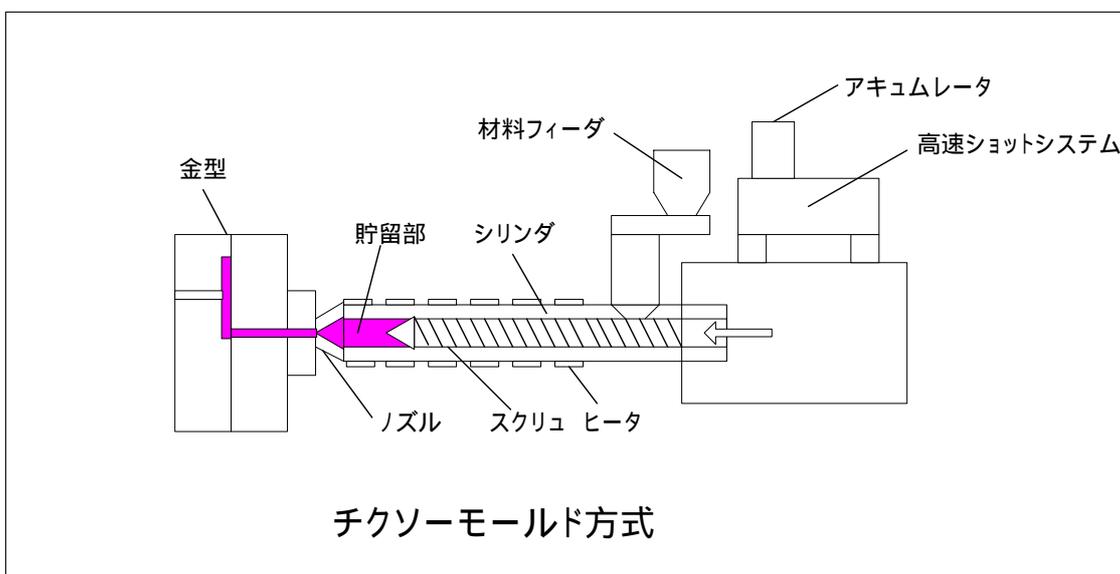


図-1.1.3-2 チクソーモールド方式概要

ビレット方式射出成形法は図-1.1.3-3 で示すように、マグネシウム合金のインゴットより、 $60\text{mm} \times \text{L}300 \pm 0.1\text{mm}$ の棒状のビレットに加工し、それを材料とする。

ビレット方式射出成形法は装置上部にある溶解シリンダの後方よりビレット材料が挿入され、溶解シリンダに取り付けられた加熱ヒータにより溶解する。材料挿入装置を使用して溶解した材料を下部の射出シリンダに流し入れる。このとき、材料挿入装置は必要な計量値を計算し溶解したマグネシウムを射出シリンダに流し入れるため、射出シリンダ内には毎回同量の材料が流し込まれることになる。射出シリンダに流し込まれた材料は射出プランジャーによって金型内へ射出される。

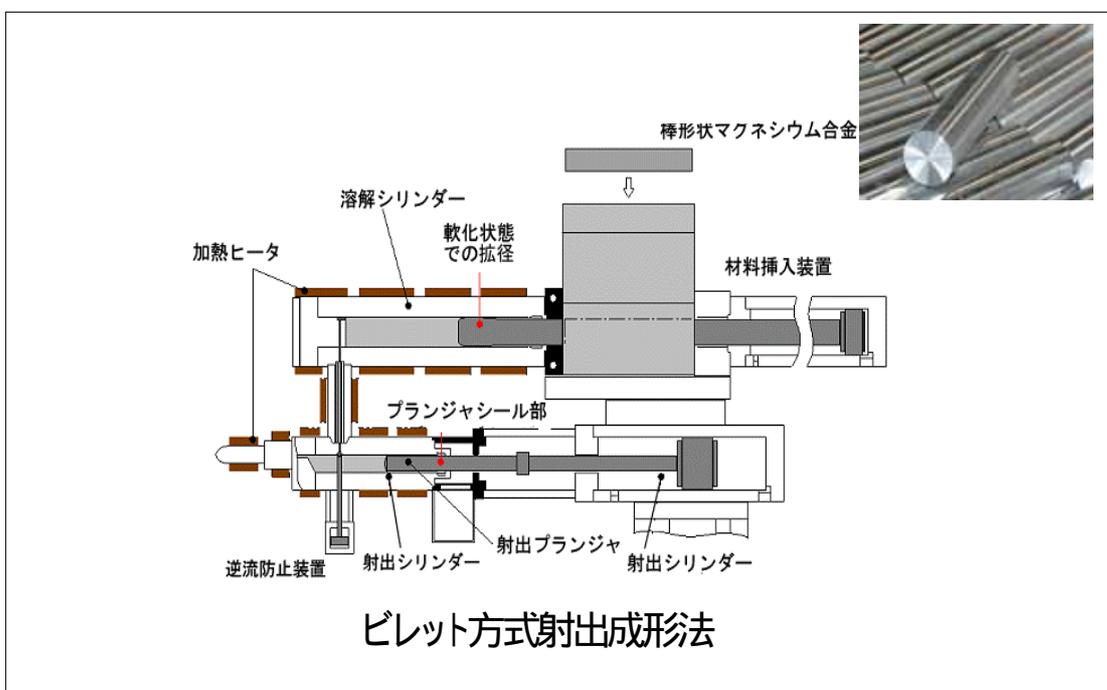


図-1.1.3-3 ビレット方式射出成形機の概要とビレット材料

ピレット方式射出成形法の特徴は下記の 10 項目がある。

直径 60mm の棒形状マグネシウム合金であるため、材料の取り扱いに危険性がない。

空気を巻き込まずマグネシウム合金を溶解するため、酸化スラッジが発生せず、その除去作業の必要がない。

防燃ガスを使用することがなく環境面での配慮がなされる。また、成形中も含め一切の防燃ガスを必要としない。

プランジャー方式の射出機構は、精度良くマグネシウム合金の完全溶解した材料を計量し射出する。

射出シリンダのシールには、ピストンリングを使用せず、磨耗のない独自のシール方式を採用。

小、中物の成形品に対応。

高温帯に対応ができ AZ91D 以外の AM 材・カルシウム入り材料などの高温成形領域のマグネシウム材料に対応。

溶解と射出のシリンダが分かれているため、射出率を変えずに、成形量に合わせた溶解シリンダの選択が可能。

成形品の成形量に近い量を溶解し成形するため電気代などが節約。

メンテナンス部品が少ないため、メンテナンスに必要な時間、費用が減少しコストダウンが可能。

これらの特徴を備え持っているピレット方式射出成形法は、従来の成形方法に比べ、製品の精密化、均一化、酸化スラッジなどの抑制、高温帯への対応、さまざまな材料への対応、そして安全面でも優秀である。

1.1.4 スタディの概要

地球温暖化対策（二酸化炭素排出削減）のために自動車の燃費規制は強化され、自動車の軽量化が強く求められており、実用金属の中で最も軽いマグネシウムが注目されているが、従来のマグネシウム合金はアルミニウム合金に比べて軽量だが機械的強度の点で優位性が少ない。

しかしながら、近年熊本大学で新しいタイプの高強度マグネシウム合金（新規の長周期積層構造を持つ合金）が開発され、世界的に注目されている。

一方、マグネシウム合金の成形機としては、ダイカスト方式（ホットチャンバー、コールドチャンバー）チクソーモールド方式などが開発されているが、酸化物の巻き込みや気泡の発生などが問題となっている。環境・エネルギー問題が深刻化する中、高品質のマグネシウム合金製品の成形技術にはどの国も高い関心を寄せているが、どの国においても実用化・商用化レベルでは実現していない。本テーマでは、熊大マグネシウム合金の特徴を活かすことができる画期的な射出成形機を新たなピレット方式を採用して開発する。

1.1.5 背景と必要性

マグネシウム合金は、これまで特殊な製造技術を適用した限定された分野で利用される材料と考えられてきたが、軽量化などへの強いニーズを背景に近年、自動車部品やノートパソコンや携帯電話などのモバイル機器の筐体に採用され、大きく需要が喚起され、その普及により、徐々に汎用素材として浸透しつつある。

マグネシウムは資源が多く、樹脂などに比較してリサイクルが容易で、超軽量材料（密度 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ 以下）であり、比強度と比剛性の高さが際立っている。それによる重量削減はスチールに比較して 60%、アルミニウムと比較して 25% に達する。更に合金の種類にもよるが、振動を吸収する減衰能に優れ、熱膨張が低いことによる寸法安定性や、切削性、耐くぼみ性、電磁遮蔽性などの優れた性質を有している。

マグネシウム合金は六方晶構造であるために、温室では低面すべりが支配的であり、冷間加工性は比較的制約を受ける。また熱間加工に際して、塑性変形の不均一性が同時に起こる双晶を伴う結晶粒粗大化によって大きくなり、これにより材料破断が早く起きてしまう。これが、延性と強度特性が他の六方晶の金属に比例して結晶粒の大きさの影響を、より強く受ける原因であり、同時に結晶粒が微細であれば、変形能が良いことの理由でもある。この変形能の不足

のために、マグネシウム合金の成形加工には主に鋳造法の一つであるダイカスト法とチクソーモールドイング法が工業的に用いられている。チクソーモールドイング法も現状は、筐体が主であり、共に溶融状態で成形されている。組織制御の難しさやマグネシウム合金特有の湯流れ性、そして成形板厚が薄くできないなどの理由で、軽量化による燃費向上を目的とした二輪車、鉄道車両及び自動車などの構造部材への適用が遅れている。

国際的にもこのマグネシウムの弱点を解決するために研究が進んでおり、EUにおいては「EUCAR プロジェクト」、ドイツにおいては「SFB390 プロジェクト」、アメリカでは「USCAR プロジェクト」、その他、オーストラリア、中国など、国家プロジェクトとしてマグネシウム材料開発に取り組んでいる。

近年、我が国においてもECAE (Equal Channel Angular Extrusion) 加工法やレオキャスト法などの加工プロセス研究や、希土類元素添加による耐クリープ性改善の研究が進められている。特に熊本大学の開発した高耐熱性・高強度を備えた特殊マグネシウム合金は、世界的にも高く評価されている。

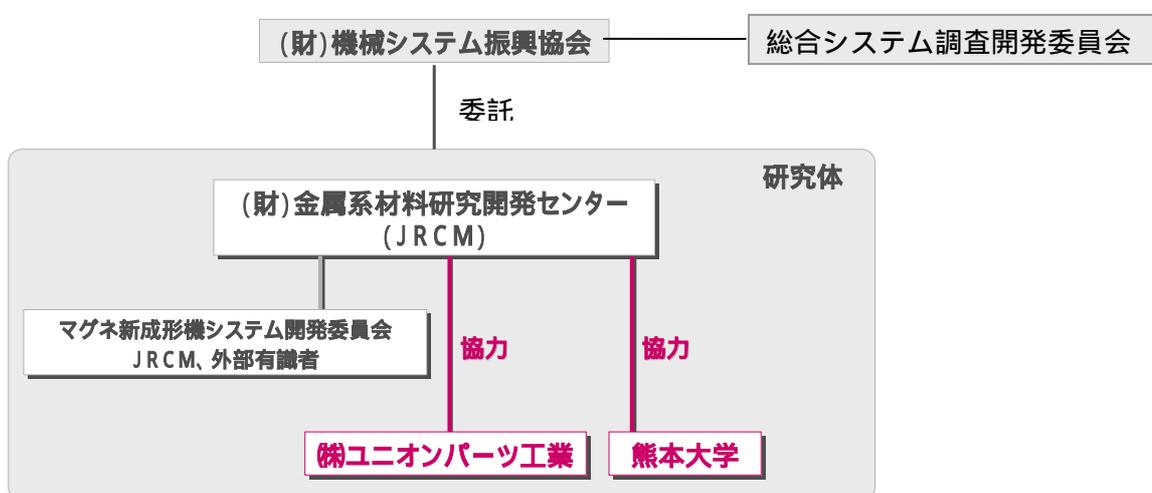
市場は全体の流れとしては、今後もマグネ採用率は高まる傾向にあり、年率20%の市場拡大基調は続くと見られている。しかし、その反面課題も出てきている。AV・通信といった弱電部品では筐体などの外装部品への使用が多く、表面品質に対する要求特性のレベルが高く、そのため、成形時の歩留まりの低下や二次加工処理がコストアップの大きな要因となっている。一方、二輪車や自動車などの構造部材には、これまで高い温度がかからない部材や応力負荷の小さな部材、すなわちステアリングブラケット、エンジンヘッドカバー、ブレーキペダル、シートカバーなどに採用されてきたが、マグネシウム合金のクリープ特性、剛性、靱性などの特性不足が、車体の効果的な軽量化ができる部品、とくにエンジンまわりなどのパワートレイン関連部品への拡大を阻止している。

本フィージビリティスタディにより、自動車部品、情報機器部品などの更なる応用が見込まれ、これらの技術を早期に開発し、国際競争力を維持したマグネシウム合金の成形技術を確立することが求められている。

2. スタディの実施体制

2.1 実施体制

(財)金属系材料研究開発センター内に「マグネシウム新成形機システム開発委員会」を組織し、同委員会の調整のもとに開発に関するフィージビリティスタディを実施する。また、熊本大学及びユニオンパーツ工業社と協力して本フィージビリティスタディを実施した。



総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	東京大学 名誉教授	藤 正 巖
委 員	埼玉大学 総合研究機構 教授	太 田 公 廣
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 研究部門長	金 丸 正 剛
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 デジタルものづくり研究センター 招聘研究員	志 村 洋 文
委 員	東北大学大学院 工学研究科 教授	中 島 一 郎
委 員	東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授	廣 田 薫
委 員	東京大学大学院 工学系研究科 准教授	藤 岡 健 彦
委 員	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授	大 和 裕 幸

マグネ新成形機システム開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	加藤マネジメントコンサル株式会社 代表取締役	加藤 義信
委員	熊本大学 マテリアル工学専攻 教授	河村 能人
委員	株式会社 ユニオンパーツ工業 開発部 開発課 課長	田江 正和
事務局	財団法人 金属系材料研究開発センター 主任研究員	井口 景吾
事務局	財団法人 金属系材料研究開発センター 主任研究員	古賀 慎介
事務局	財団法人 金属系材料研究開発センター 専務理事	小紫 正樹
事務局	財団法人 金属系材料研究開発センター 主任研究員	松浦 尚

3 スタディ成果の要約

現在、世界で最も機械的性質が優れている熊大マグネシウム合金専用のビレット方式の射出成形機を開発する。また、該当射出成形機で製造した熊大マグネシウム合金製の成形品の品質などについて評価し、自動車部品などへの適用可能性を検証する。本フェージビリティスタディにより、熊本大学の河村教授が世界を先導している高耐熱性・高強度を備えた特殊マグネシウム合金による射出成形法を世界に先駆けて開発をする。

具体的な内容を以下に記す。

(1) 熊大マグネシウム合金ビレット方式射出成形機の開発

ビレット方式の新しい成形機の開発

ビレット方式の射出成形機として唯一商品化されているソディックプラスティック製のビレット式成形機(Mg-PLUS)の射出部と熔解部を改造して、空気の巻き込み、酸化物の発生とその巻き込みなどを防ぐ工法を開発する。

ビレット方式射出成形機用金型の開発

熊大マグネシウム合金に適したビレット方式射出成形機用金型を開発する。

(2) ビレット方式射出成形機用熊大マグネシウム合金の開発

熊大マグネシウム合金の成分のチューンナップ

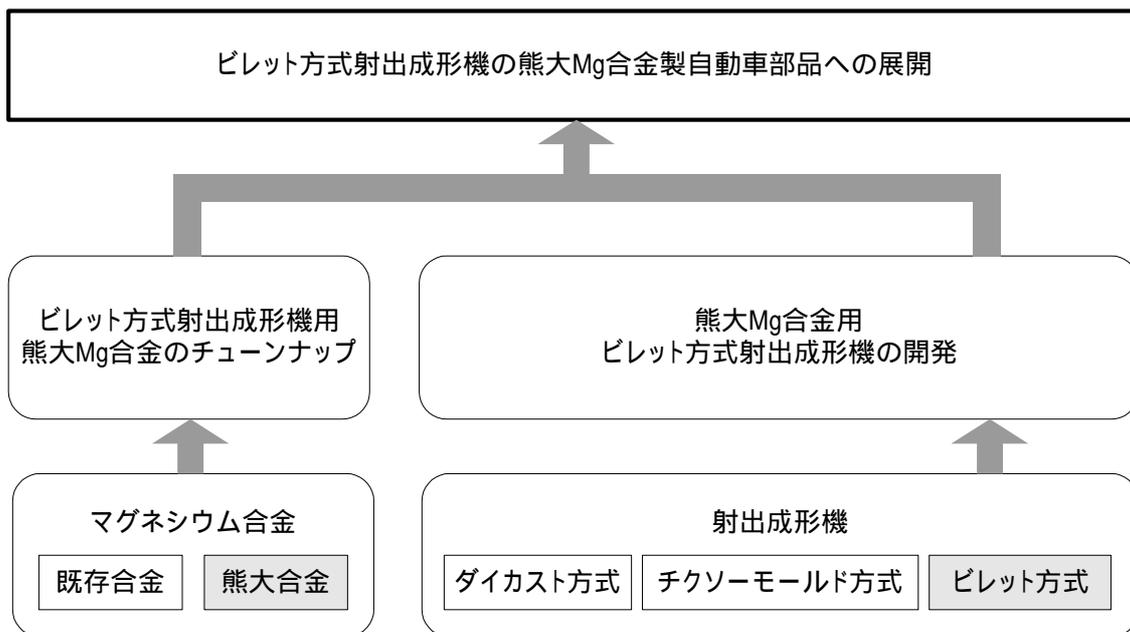
現在開発されている熊大マグネシウム合金(複数種類の合金成分のものが作製されている)を基にビレット方式射出成形に適した合金成分を開発する。

熊大マグネシウム合金の熱処理技術の開発

ビレット方式射出成形機用にチューンナップされた熊大マグネシウム合金のビレット方式射出成形品の熱処理条件を確立する。

(3) 熊大マグネシウム合金製ビレット方式射出成形品の可能性検証

開発するビレット方式射出成形機で作製した熊大マグネシウム合金製品の機械的性質、欠陥発生状況（巣、気泡巻き込み、酸化物巻き込み、湯ジワ）を評価し、ビレット方式射出成形機と熊大マグネシウム合金製ビレット方式射出成形品の自動車部品などへの実用化可能性を検証する。



3.1 熊大マグネシウム合金ビレット方式射出成形機の開発

3.1.1 ビレット方式の新しい成形機の開発

ビレット方式の射出成形機として唯一製品化されているソディックプラスチック製のビレット式射出成形機 (Mg-PLUS) (図-3.1.1-1 左) の射出部と熔解部を改造して、空気の巻き込み、酸化物の発生とその巻き込みなどを防ぐ工法を開発するために、熊大マグネシウム合金専用のビレット方式用射出部と熔解部 (図-3.1.1-1 右) をそれぞれ作製しソディックプラスチック社製の成形機に組み込み、組立調整を行った。



図-3.1.1-1 左：ビレット方式射出成形機 右：射出部と溶解部

またホットランナー機構 (図-3.1.1-2) を導入して、空気の巻き込みを抑える工法を確立した。ホットランナー機構の仕組みは金型の固定側に電磁誘導加熱ヒータを取り付け、湯道である製品のスプルーやランナーの形状を縮小することにより、湯道の体積を抑えることが可能である。

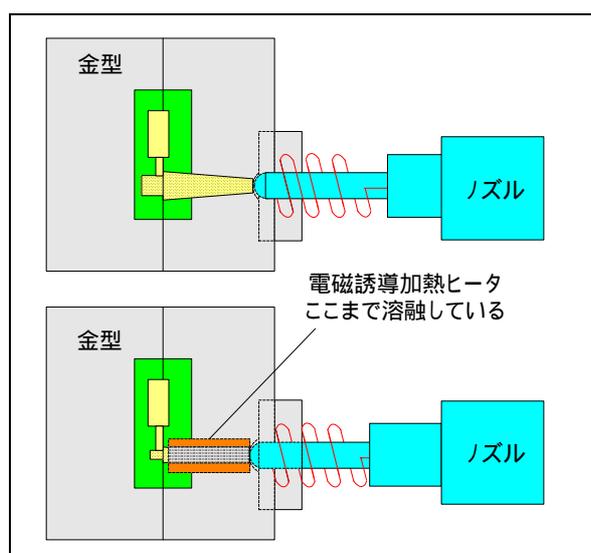


図-3.1.1-2 ホットランナー機構

体積及び重量は、通常のスプルーに比べ図-3.1.1-3 で示すように約 70%縮小させ、空気やガスの巻き込みを軽減させる設計を行った。結果、重量の理論値と実測がほぼ近い値であり、空気やガスの巻き込みを軽減したと考えられる。

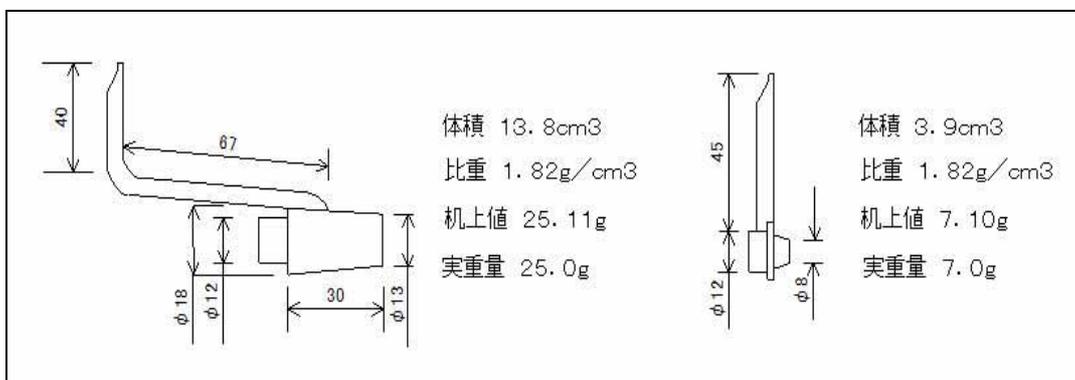


図-3.1.1-3 スプルーの比較 (体積及び重量)

また、通常の商品とホットランナーを使用した場合の商品について外観評価を行った。結果、図-3.1.1-4 で示すように、目視による外観の違いは見られず、通常の商品と同等の成形が可能であるといえる。



図-3.1.1-4 成形品の外観比較 (左:AZ91D、右:Mg96Y2Z2)

更に、金型内の空気及びガスについて、製品に含まれる酸化物を測定し、その数値の差異でガスによる影響の評価を実施した。

結果、図-3.1.1-5 で示すように、それぞれのピーク位置は変わらず通常仕様とホットランナー仕様は同等物性だと判断できる。

また、真空引き装置の使用有無での水素ガス分析を行った結果、水素ガス含有量は真空引き装置有りが 78.2cc / 100g、真空引き装置なしが 66.9cc / 100g となり、真空引き装置有無による因果関係は薄いと考えられる。

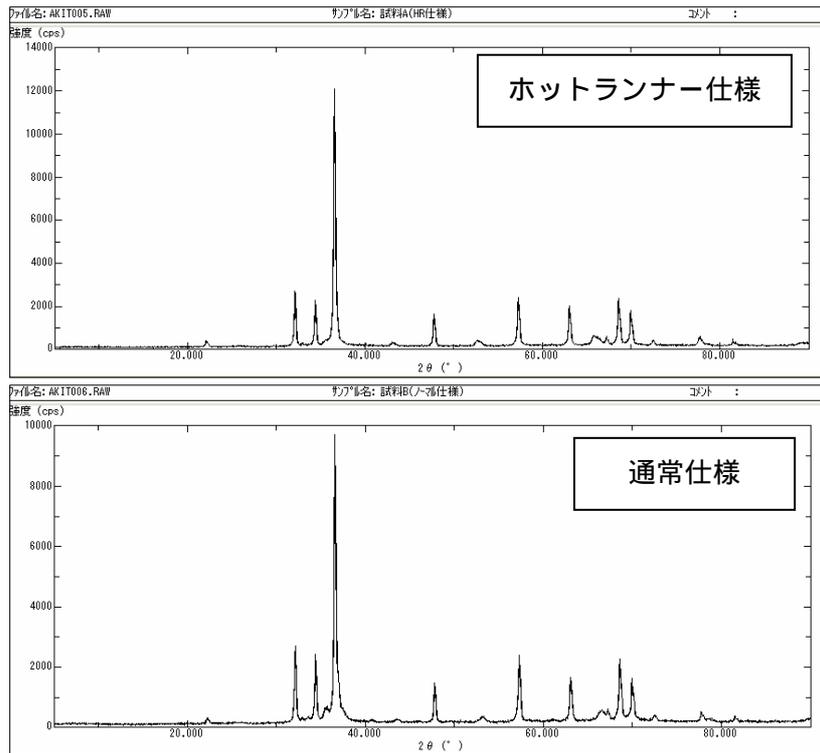


図-3.1.1-5 スプルー違いの X 線回折
(上:ホットランナー仕様、下:通常仕様)

3.1.2 ピレット方式射出成形機用金型の開発

熊大マグネシウム合金に適したピレット方式射出成形機用金型を開発する。

金型は図-3.1.2-1 で示すように熊大マグネシウム合金の機械的特性が判断できるような設計にて作製を実施した。形状は板状(150mm×25mm×t=3mm)の試験片とし、真空装置を用いるためのチルベントとホットランナー機構盛り込んだスプルー縮小型を用意し、空気及びガスの巻き込みを軽減する仕組みを設計段階で盛り込んだ。

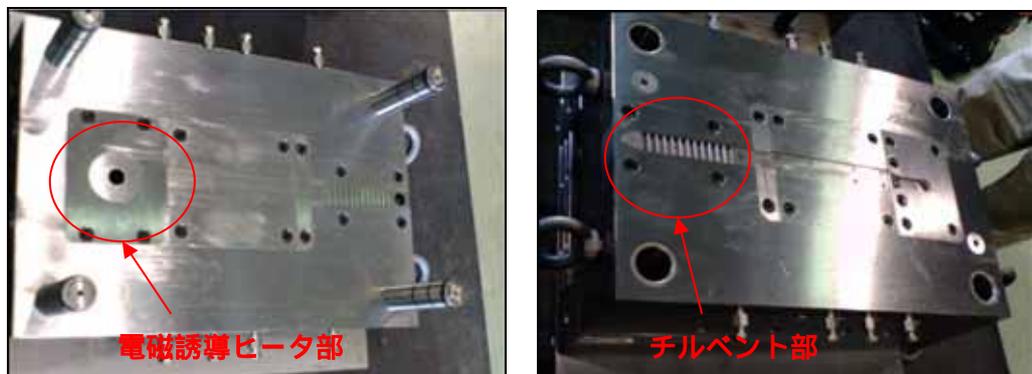


図-3.1.2-1 金型可動側写真(左上)金型固定側写真(右上)

3.1.3 熊大マグネシウム合金ビレット方式射出成形機の開発まとめ

熊大マグネシウム合金専用の射出部と熔解部の作製及び、ホットランナー機構を盛り込む改造を行い、調整組立を行った。また熊大マグネシウム合金専用の金型を作製し、実際に熊大マグネシウム合金専用のビレット方式射出成形機で成形を可能にした。図-3.1.3-1は装置全体の構成図である。

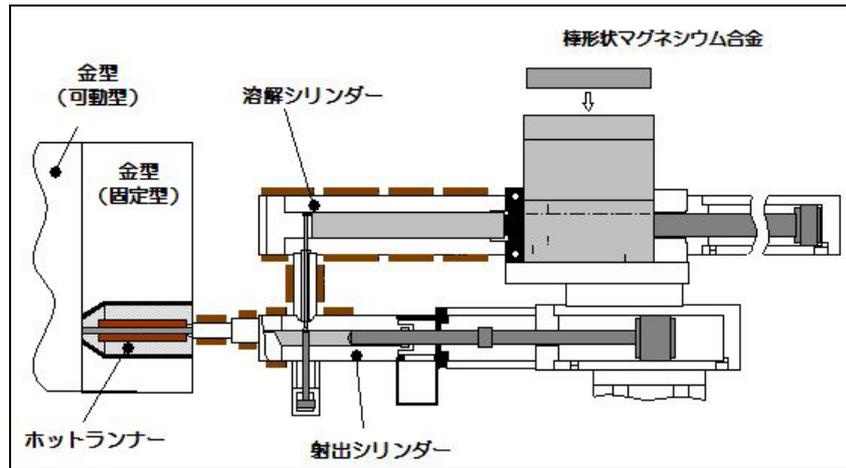


図-3.1.3-1 装置全体の構成図

3.2 ビレット方式射出成形機用熊大マグネシウム合金の開発

3.2.1 熊大マグネシウム合金の成分のチューンナップ

現在開発されている熊大マグネシウム合金（複数種類の合金成分のものが作製されている）を基にビレット方式射出成形に適した合金成分を開発するために、まず、熊大マグネシウム合金の基となる組成情報などを参考にし、それに基づきビレット方式用材料の作製を行った。成分は Mg96Y2Z2(at%)で、既存材料(AZ91D)のビレット生成法と同じ方式にて鑄造を行い、鑄造された製品を旋盤にて 60mm×L300mm±0.1の寸法に加工した。

次にビレット方式射出成形機を使用する上で、図-3.2.1-1に示すビレット方式射出成形機駆動部分及びビレット材料挿入口部分にマグネシウム合金によるMgシール形成が必要になる。駆動部分のMgシール形成は、ビレット方式射出成形機を手動で操作し、溶解した既存材料(AZ91D)を金型内へ射出させる。この操作を数十回繰り返すことにより、駆動部分にマグネシウム合金によるMgシールが形成される仕組みである。Mgシール形成後、既存材料(AZ91D)から熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)に替え、十分な材料の入れ替えを行えば成分的にも問題ないと判断し、Mgシール形成及び材料の入れ替え作業を行い、熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)を使用したビレット方式射出成形機での第一回成形実験を行った。

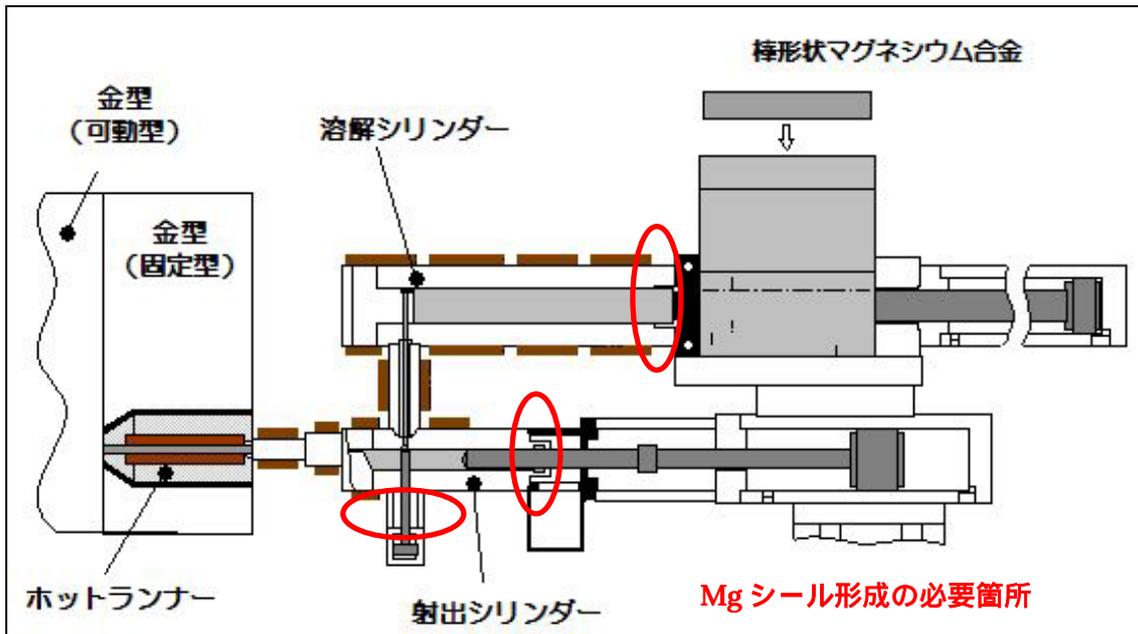


図-3.2.1-1 Mg シール形成の必要箇所

第一回成形実験は図-3.2.1-2 で示す形状の金型で行い、既存材料(AZ91D)での駆動部分の Mg シールを形成し、その後既存材料(AZ91D)での成形条件を決め、その条件を基とし熊本マグネシウム合金 (Mg96Y2Z2) でのピレット方式射出成形機の成形実験を実施する。

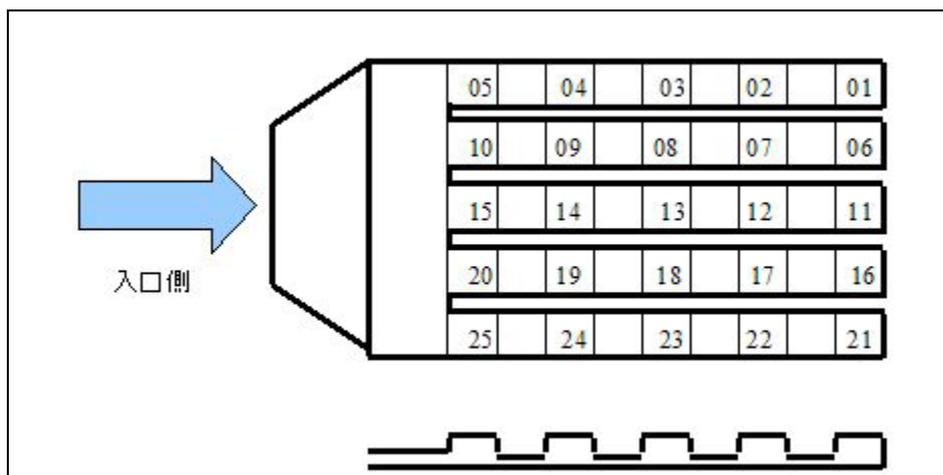


図-3.2.1-2 第一回成形実験の成形品形状

まず、既存材料(AZ91D)を使用し駆動部分と材料挿入口の Mg シール形成を行い、その後実験の基となる既存材料(AZ91D)での成形条件を重量と外観を確認しながら決定した。

次に熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)を使った成形を同射出成形機で行った。60mm×L300mm±0.1のピレット材料の重量をそれぞれ熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)、既存材料(AZ91D)で測定し重量比率を求めた。その結果1.04倍の比率であったため、この比率から目的の成形品重量(計量値)を求めることにした。また射出条件は、最高充填圧を射出速度で調整を行い既存材料(AZ91D)と同等の圧力になるようにした。その条件を表-3.2.1-1に示す。

射出成形条件						
	計量値	射出速度	最高充填圧	射出部温度		
AZ91D	15.5mm	1500	60Mpa	AZ91D設定値		
Mg96Y2Z2	17.0mm	1200	60Mpa	AZ91D設定+20		
溶解温度と金型温度・真空装置条件						
溶解温度	金型温度					
	150		200		250	
	真空有り	真空無し	真空有り	真空無し	真空有り	真空無し
AZ91D設定値						

:実施

表-3.2.1-1 熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)の成形条件

第一回成形実験の結果、既存材料(AZ91D)の計量値15.5mmに対して平均重量は72.23(g)であり、熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)の計量値17mmに対して平均重量は74.36(g)であった。これらの重量比率は約1.04に近い値であり、比重比率の1.04と同等であるため、既存材料(AZ91D)から熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)へ材料が入れ替わったと推測できる。

但し、既存材料(AZ91D)から熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)へ材料の入れ替えが行われた際、射出成形機から異音が発生し始めた。その際、成形が安定しない状態が続き、最高充填圧に大きなバラツキが発生した。その後、熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)に入れ替わった付近から射出成形機からの異音が減り、最高充填圧も安定し始めた。また、熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)の成形実験が完了した後、再び既存材料(AZ91D)へ材料の入れ替えを実施したところ、再び射出成形機に異音がし始め、最高充填圧にバラツキが発生した。この結果よりこの最高充填圧のバラツキと射出成形機からの異音は既存材料(AZ91D)と熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)が混ざる際に発生しているものと推測できる。

この射出成形で成形された成形品の機械的特性を表-3.2.1-2 及び図-3.2.1-3 で示す。機械的特性の結果から、多少ではあるが、既存材料(AZ91D)に比べ熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)の優位性がみられる結果となった。

素材	金型温度	引張り強さ (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)
AZ91D	200	191.1	157.3
Mg96Y2Z2	200	190.0	170.1
	150	215.0	173.7
	250	202.6	180.0

表-3.2.1-2 第一回成形品の機械的特性

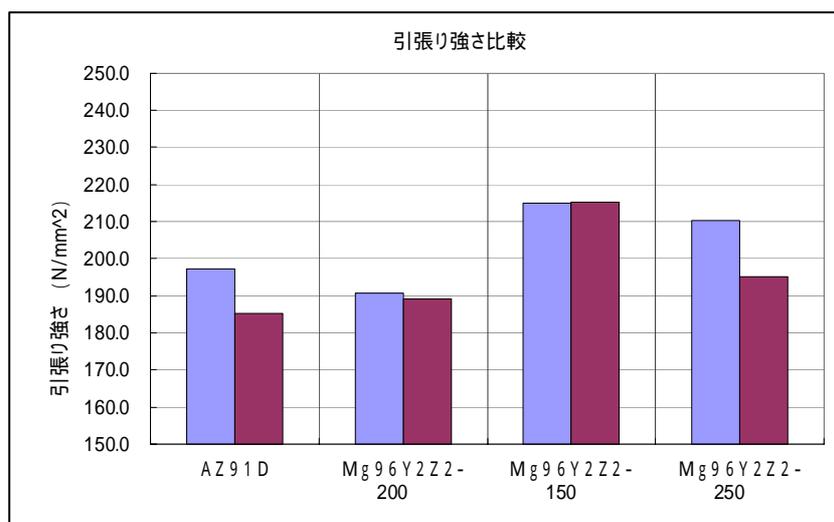
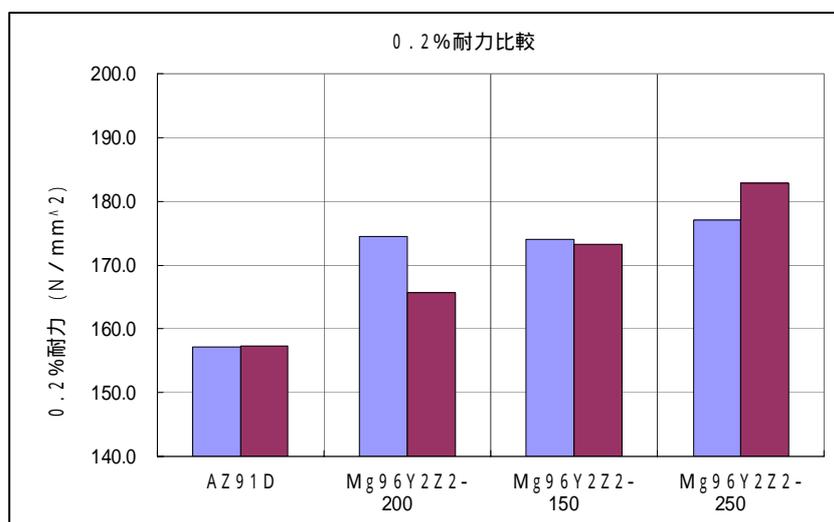


図-3.2.1-3 第一回成形品の機械的特性

この成形品の電子顕微鏡による表面観察を図-3.2.1-4で示す。既存材料(AZ91D)にはない大きな粒子群が確認できるのが判る。大きな粒子と粒子の間に発生しているものが長周期積層構造(LPSO)であり、小さな白い粒子は酸化物である。

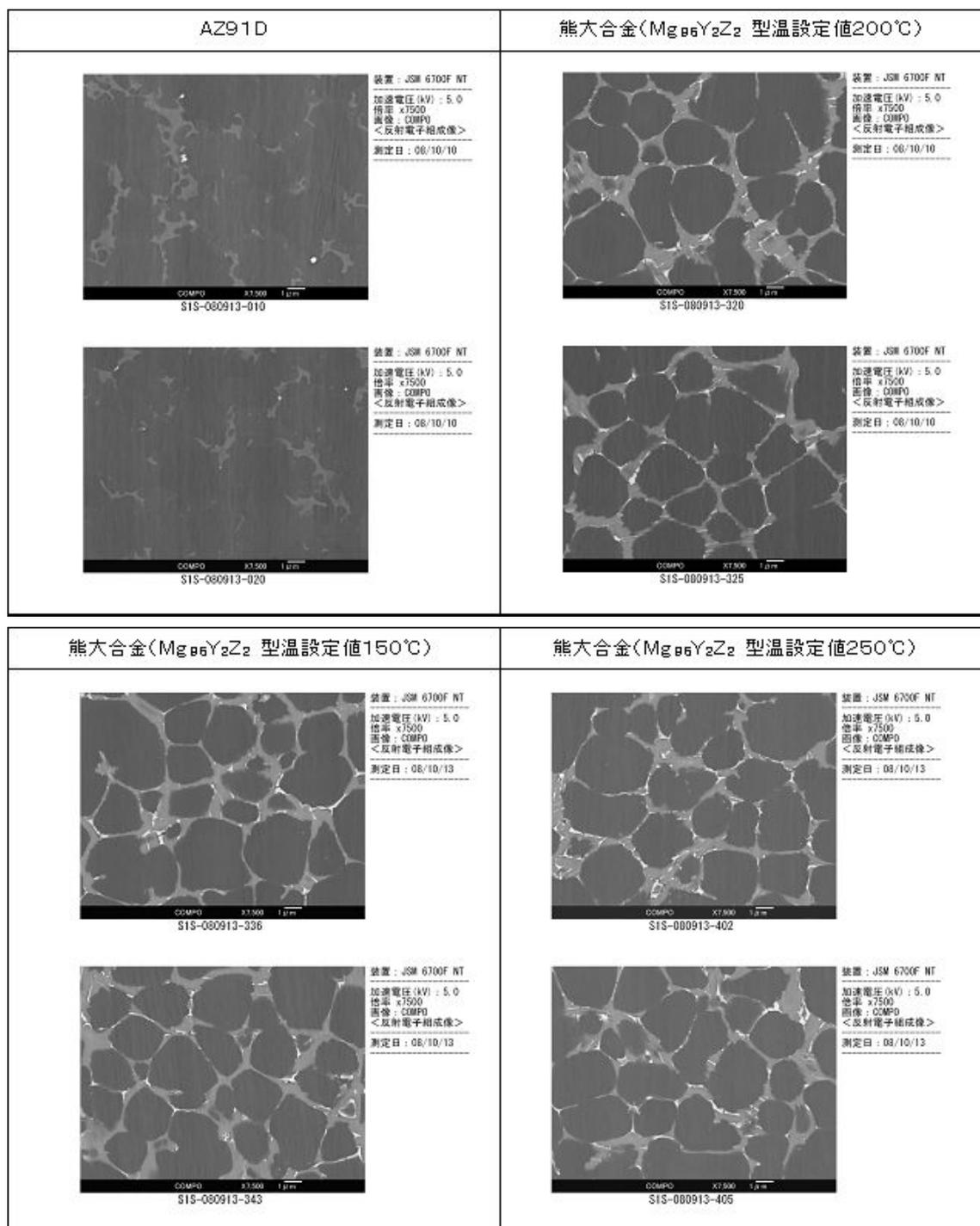


図-3.2.1-4 第一回成形品の表面観察

また、蛍光 X 線装置による成分分析を実施し、材料入れ替えの信憑性を確認するために測定を行った。表-3.2.1-3 に示すように、十分に材料入れ替えを行ったと思われる成形品に対しても、既存材料(AZ91D)に含まれる Al が 1%(wt%) 近く含まれている結果となった。

	Mg	Al	Zn	Y	成形機	真空引き	温調
050	88.12	11.43	0.45	0.00	AZ91	有り	200
061	87.55	11.98	0.46	0.00	AZ91	無し	
110	89.71	9.55	0.70	0.03	材料変更2本目	有り	
148	90.35	7.44	2.03	0.18	材料変更3本目	有り	
155	92.90	3.85	2.86	0.39	材料変更4本目(成形品もろい)	有り	
170	86.29	2.08	5.07	6.56	計量14.5 2速	有り	
202	88.10	1.05	4.55	6.30	計量15.5 2速	無し	
236	86.58	1.84	4.98	6.60	計量15.5 2速	有り	
268	88.18	1.37	4.42	6.02	計量16.5 2速	有り	
298	87.01	1.39	4.90	6.71	計量17.0 2速	無し	

表-3.2.1-3 第一回成形品成分表

外観評価は成形品に対し湯ジワの大きさや深さを点数化して評価を行った。表-3.2.1-4 は点数化した合計の平均値である。結果として、熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)は既存材料(AZ91D)に比べ外観に欠陥が多く見られる傾向があり、また金型温度が高いと欠陥少なくなる傾向があると考えられる。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
AZ91D 真空有り																									
AZ91D 真空無し																									
熊大 計量17 真空有り 2速(1000, 1200)																									
熊大 計量17 真空無し 2速(1000, 1200)																									
熊大 計量17 2速(1000, 1200) 真空有り 温調150																									
熊大 計量17 2速(1000, 1200) 真空無し 温調150																									
熊大 計量17 2速(1000, 1200) 真空有り 温調250																									
熊大 計量17 2速(1000, 1200) 真空無し 温調250																									

表-3.2.1-4 第一回成形品の外観評価表

第一回成形実験で判ったことは、熊大マグネシウム合金（Mg96Y2Z2）と既存材料（AZ91D）が混在した場合、ビレット方式射出成形機から異音が発生し、射出成形機の成形が不安定になることと、十分な材料替えを実施しても、既存材料（AZ91D）の Al が残留する恐れがあり、このため、ビレット方式射出成形機の Mg シール形成から熊大マグネシウム合金のみで Mg シールの形成を行い、既存材料（AZ91D）の混在を防止する必要がある。

また、表面観察においては長周期積層構造（LPS0）が確認できたが、機械的特性では多少の優位性が確認できたものの、既存材料（AZ91D）と熊大マグネシウム合金（Mg96Y2Z2）で明確な差は現れなかった。

この結果、既存材料（AZ91D）との混在ではあるもの、熊大マグネシウム合金（Mg96Y2Z2）を使用したビレット方式射出成形機での射出成形が可能である見通しは立ったといえそうである。

第一回の成形実験結果を踏まえ、次回の成形実験では熊大マグネシウム合金（Mg96Y2Z2）のみを使用した Mg シール形成工法の開発を行った。

熊大マグネシウム合金（Mg96Y2Z2）のみで成形を行う成形実験の前に、前回使用したビレット方式射出成形機の射出部及び溶解部を塩酸などで洗浄し、既存材料（AZ91D）の除去を行った。

その後 Mg 材料を除去した射出部及び溶解部の組立調整を行い、駆動部分及び材料挿入口に対して、熊大マグネシウム合金（Mg96Y2Z2）のみを使用した Mg シールの形成を試み、結果、既存材料（AZ91D）同様の Mg シール形成に成功した。

熊大マグネシウム合金（Mg96Y2Z2）のみを使用した成形実験を図-3.2.1-5 で示すような板状の成形品にて行った。成形品形状は（150mm×25mm×t=3mm）の板状であり、既存材料（AZ91D）の射出条件を基準として、その後熊大マグネシウム合金（Mg96Y2Z2）で同条件にて成形を行う。成形条件は表-3.2.1-5 で示す。



図-3.2.1-5 熊大マグネシウム合金（Mg96Y2Z2）を使用した成形品形状（150mm×25mm×t=3mm）

Mg96Y2Z2のみを使用した成形条件						
	計量値	射出速度	最高充填圧	溶解温度		
AZ91D	9.5mm	1400	60Mpa	AZ91D設定値		
Mg96Y2Z2	11.0mm	1400	60Mpa	AZ91D設定+20、640、650、670 一定		

溶解温度と金型温度・真空装置条件						
溶解温度	金型温度					
	150		200		250	
	真空有り	真空無し	真空有り	真空無し	真空有り	真空無し
AZ91D設定値	-	-			-	-
640 一定	-	-			-	-
650 一定						
670 一定						

:実施 - :未実施

表-3.2.1-5 Mg96Y2Z2のみを使用した成形実験の射出条件

尚、溶解温度を一定にした理由として、温度変化における成形品の機械的特性に差が生じる可能性があり、射出部及び溶解部を一定温度の設定で試験を行うことにした。また、参考までに既存材料(AZ91D)の溶解温度設定でも実験を行った。

この射出条件で成形された成形品の成分分析を実施し、結果を表-3.2.1-6で示す。熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)のみを使用したMgシール形成工法を確立したために、既存材料(AZ91D)のによるAlなどの混入を防止することに成功した。

	Mg	Al	Zn	Y	成形機	真空引き	温調
目標値	89.00		6.00	5.00			
10	89.80	0.06	4.41	5.74	AZ91ベース	有り	200
11	88.69	0.03	5.00	6.27	640 一定	有り	
10	89.78	0.06	4.54	5.62	650 一定	有り	
40	89.68	0.07	4.61	5.65	650 一定	無し	
10	90.09	0.06	4.36	5.49	650 一定	有り	150
30	90.12	0.05	4.43	5.40	650 一定	無し	
10	90.20	0.04	4.36	5.40	650 一定	有り	250
30	90.13	0.05	4.39	5.43	650 一定	無し	

表-3.2.1-6 蛍光X線による成分分析表(Mg96Y2Z2)

この射出条件にて成形品の平均重量を求めたものが図-3.2.1-6 である。計量値に関しては既存材料(AZ91D)の重量と熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)の重量比率が約 1.04 であり、比重比率の理論である 1.04 と同等であり、十分な計量値であると判断できる。よってこの射出条件にて成形を行うことにした。

熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)のみを使用した成形では、既存材料(AZ91D)に比べ少し機械音が高いが、既存材料(AZ91D)と熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)の混在した状態よりも機械音が抑えられており、最高充填圧のバラツキも軽減しているために成形は安定して行えていたと考えられる。

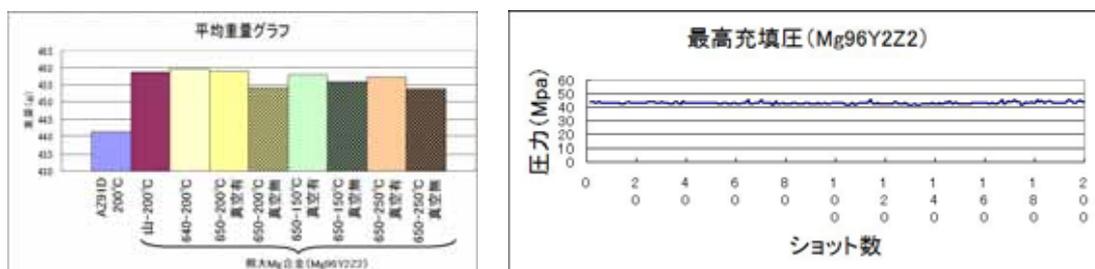


図-3.2.1-6 左：平均重量 右：最高充填圧 (Mg96Y2Z2)

次に熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)のみで成形された成形品を図-3.2.1-7で示すような JIS13 号試験片寸法に加工し、その機械的特性を測定した。

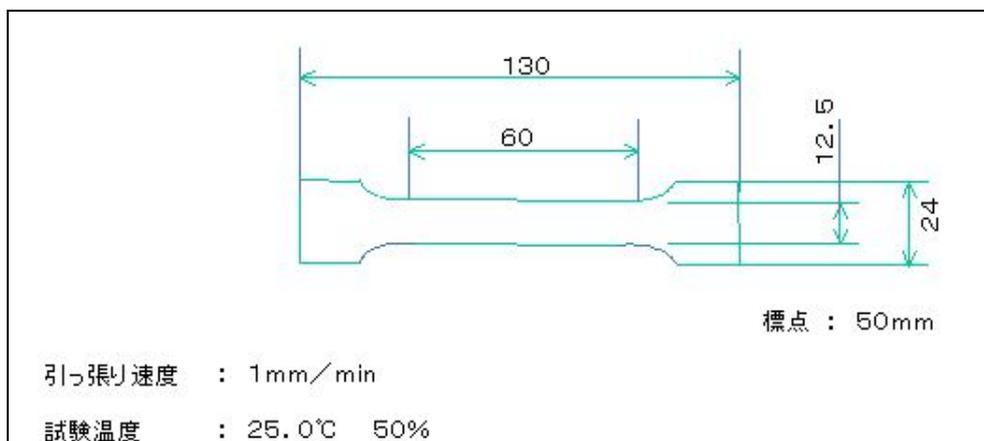


図-3.2.1-7 JIS13 号試験片

測定結果を表-3.2.1-7及び図-3.2.1-8で示す。0.2%耐力については熊大マグネシウム合金(Mg96Y2Z2)の優位性が確認できたが、引張り強さに関しては既存材料(AZ91D)とあまり変わらない結果となった。

素材	成形温度	金型温度	引張り強さ (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	ひずみ (%)
AZ91D	AZ91D設定	200	241.7	158.7	8.3
MG96Y2Z2	AZ91Dベース	200	211.4	176.2	4.4
	640 一定	200	206.5	173.8	3.8
	650 一定	200	209.8	173.8	4.5
		150	213.2	177.5	4.7
		250	225.6	177.7	5.4

表-3.2.1-7 機械的特性 (Mg96Y2Z2)

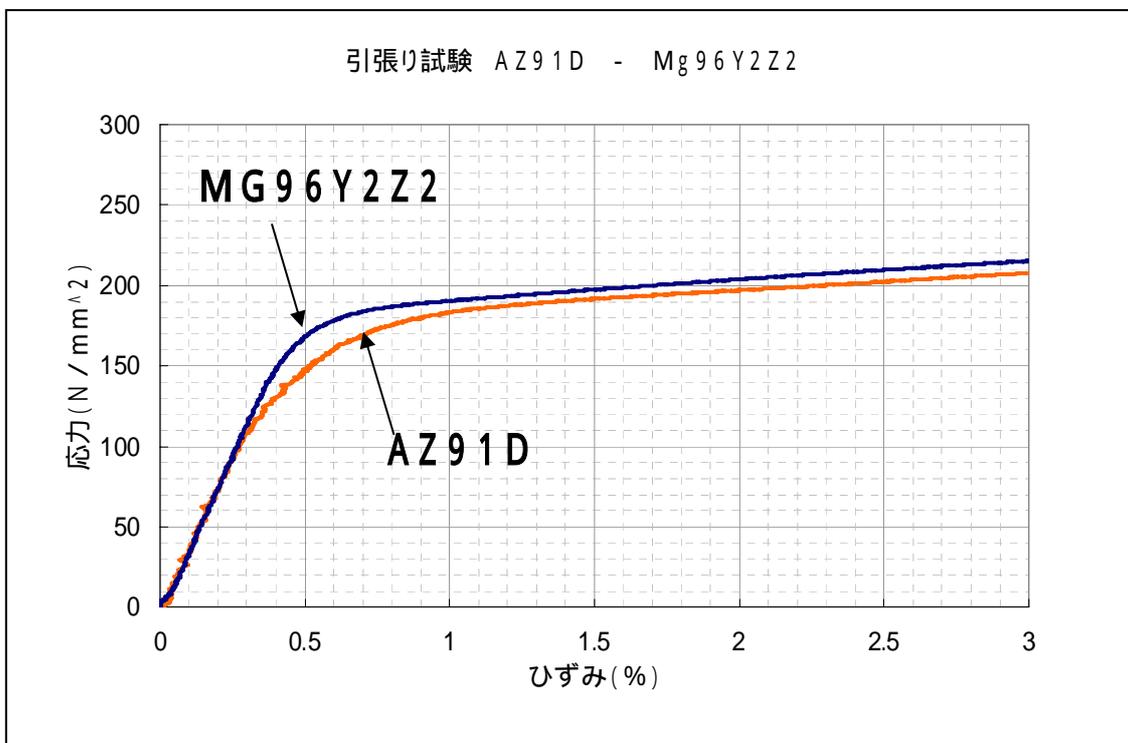
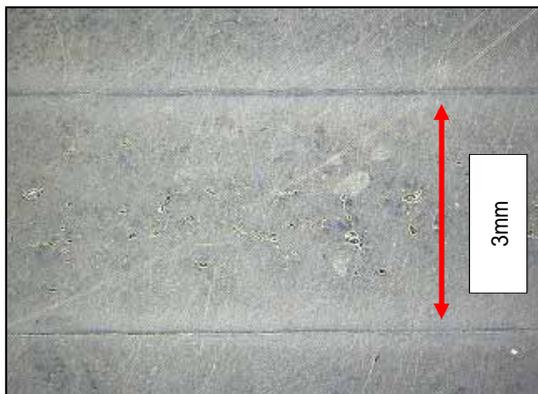
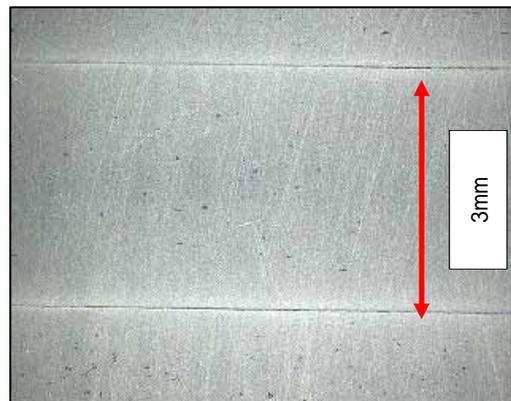


図-3.2.1-8 機械的特性 (Mg96Y2Z2)

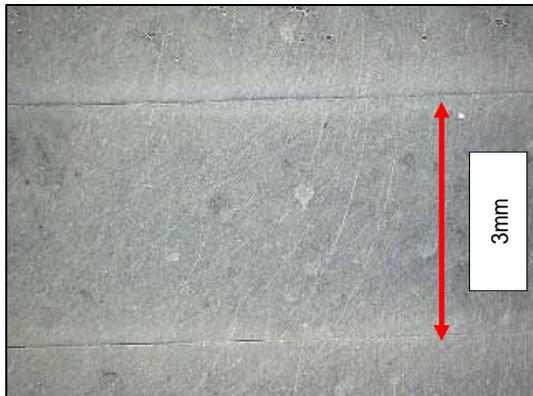
表面観察を光学顕微鏡で測定した結果を図-3.2.1-9 で示す。光学顕微鏡では金型低温時に巣穴が発生していることが判り、熊大マグネシウム合金 (Mg96Y2Z2) の成形では金型温度は 200 から 250 の温度帯がよいと考えられる。また、金属顕微鏡及び電子顕微鏡を使用し高倍率にて測定した結果を図-3.2.1-10 及び図-3.2.1-11 で示す。この電子顕微鏡で測定した BSE 画像からも長周期積層構造 (LPSO) が観察された。



150 の表面観察



200 の表面観察



250 の表面観察

図-3.2.1-9 Mg96Y2Z2 の金型温度別の表面観察



図-3.2.1-10 Mg96Y2Z2 金属顕微鏡の画像 (×400 内部)

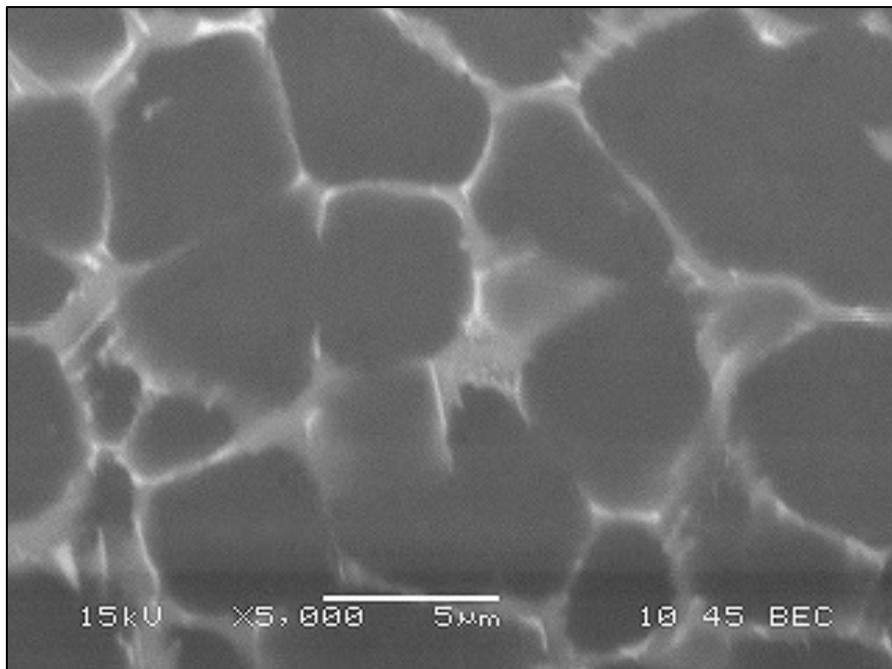


図-3.2.1-11 Mg96Y2Z2 の BSE 画像 (×5000 未熱処理)

熊大マグネシウム合金 (Mg96Y2Z2) のみを使用した成形品を電子顕微鏡で測定した BSE 画像より、長周期積層構造 (LPSO) を有する成形品であることが確認され、このため Mg96Y2Z2 を使用した熊大マグネシウム合金のピレット方式射出成形機の射出成形に成功したといえる。

ピレット方式射出成形機にて長周期積層構造 (LPSO) を含む成形品が成形可能である見通しが立ったために、他の成分比率による熊大マグネシウム合金の実験を行うことにした。Mg96Y2Z2 の成分から、Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2 に替えた材料を使用し実験を行った。実験方法は Mg96Y2Z2 と同様に、熊大マグネシウム合金 Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2 のみで Mg シールを形成し、Mg96Y2Z2 と同じ成形条件にて成形を行った。成形条件は表-3-2.1-8 で示す。

Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2のみを使用した成形条件				
	計量値	射出速度	最高充填圧	溶解温度
AZ91D	9.5mm	1400	60Mpa	AZ91D設定値
Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2	11.0mm	1400	60Mpa	650 一定、670 一定

溶解温度と金型温度・真空装置条件			
溶解温度	金型温度		
	150	200	250
	真空有り	真空有り	真空有り
650 一定			
670 一定	-		-

:実施 - :未実施

表-3.2.1-8 成形実験条件 (Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2)

Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2 のみを使用した成形実験中の最高充填圧は Mg96Y2Z2 に比べバラツキが発生する結果となったが、ピレット方式射出成形機からの機械音(異音)は静かであり、既存材料(AZ91D)と同等の機械音であった。このことから Mg 合金に含まれる成分により異音の発生に影響を及ぼしていると推測できる

Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2 の成形品の平均重量は、ピレット材料の重量より求めた既存材料(AZ91D)との比率が 1.062 であり、成形品を実測した結果、目標値と同等の数値であった。この結果より、成形条件の計量値などは適正であると判断できる。

蛍光 X 線による成分分析は表-3.2.1-9 で示すように、それぞれの成分が目標値に近いためこちらも適正であると判断した。

	Mg	Zn	Gd	成形機	真空引き	温調
50	89.63	0.53	9.84	650 一定	有り	200
50	88.86	0.59	10.55	650 一定	有り	250
25	88.98	0.57	10.45	670 一定	有り	200

表-3.2.1-9 蛍光 X 線 (Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2)

Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2 の機械的特性は表-3.2.1-10 及び図-3.2.1-12 で示すような結果であり、金属顕微鏡及び電子顕微鏡を使用した成形品の表面組織観察を図-3.2.1-13 及び図-3.2.1-14 で示す。

電子顕微鏡を使った表面観察では長周期積層構造(LPSO)が確認され、これにより Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2 を使用した熊大マグネシウム合金に対してもピレット方式射出成形機の射出成形が成功したと考えられる。

名前 単位	引っ張り強さ N/mm2	ひずみ %	0.2%耐力 N/mm2	弾性率_Standard GPa
AZ91D (F)	232.2	5.4	164.5	37.7
Y (F)	193.0	2.1	175.9	39.5
Gd (F)	242.1	8.5	177.0	31.1

表-3.2.1-10 各機械的特性表

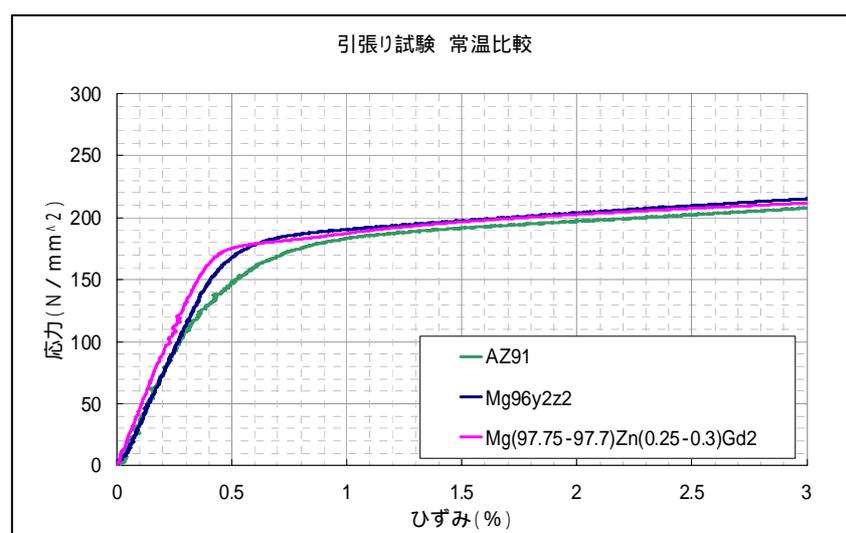


図-3.2.1-12 各機械的特性表



図-3.2.1-13 Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2
金属顕微鏡の画像 (×400 内部)

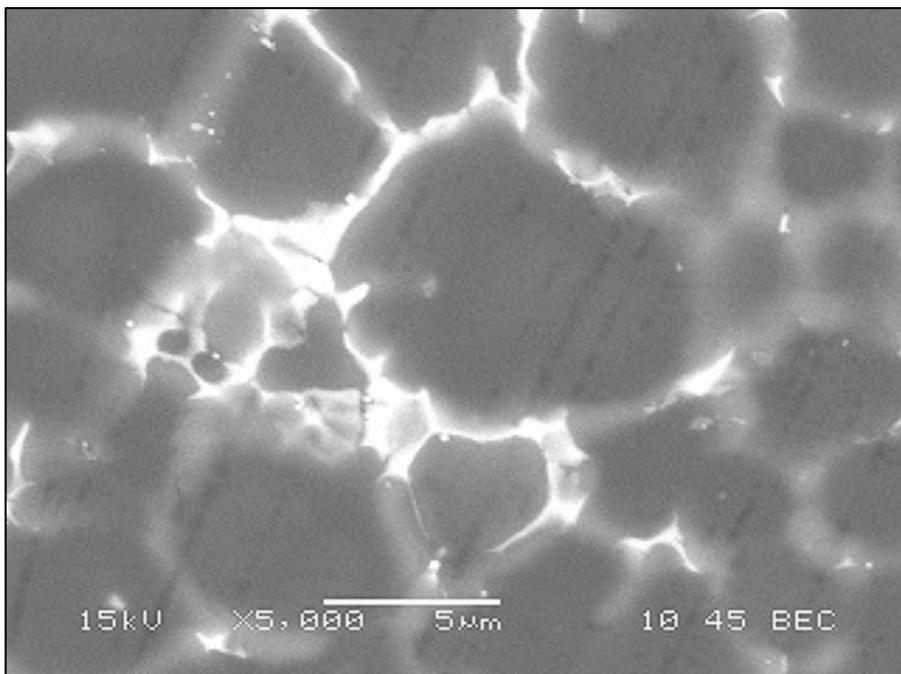


図-3.2.1-14 Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2
BSE 画像 (×5000 未熱処理)

3.2.2 熊大マグネシウム合金の熱処理技術の開発

ピレット方式射出成形機用にチューンナップされた熊大マグネシウム合金のピレット方式射出成形品の熱処理条件を検討した。

熊大マグネシウム合金は複数種類の合金成分が作製されており、含まれる希土類の種類にて TYPE1、TYPE2 と大きく分類されている。TYPE1、TYPE2 は共に既存材料 (AZ91D) に比べ機械的特性の優位性が確認されており、TYPE2 に関しては熱処理を施すことで強度を増す特性があるとの報告があるため、本組織での成形を行い希土類に Y を使用した標準品との差異について評価を進めた。

熱処理条件と熱処理後の硬度を表-3.2.2-1 で示し、その熱処理後の成形品に対する機械的強度を表-3.2.2-2 及び図-3.2.2-1 で示す。

また、金属顕微鏡と電子顕微鏡による表面観察を実施し、その結果を図-3.2.2-2 から図-3.2.2-5 で示す

この結果より、熱処理を実施した熊大マグネシウム合金 (Mg96Y2Z2) と既存材料 (AZ91D) での機械的特性の比較は 0.2%耐力などの一部の特性で優位性がみられ、また Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2 と既存材料 (AZ91D) では大きく熊大マグネシウム合金の優位性が確認できた。よって熱処理を実施することによる機械的特性の向上が見込める結果となったといえる。

熱処理条件

		(HRB)			
溶体化処理	時効処理	素材 \ 状態	F	T4	T6
415 × 16h (強制空冷) (T4)		AZ91D	37	15	46
415 × 16h (強制空冷)		Mg96Y2Z2	44	30	32
	215 × 4h (強制空冷) (T6)	Mg97Gd2Z1	40	49	53

		(HRB)			
溶体化処理	時効処理	素材 \ 状態	F	T4	T6
450 × 5h (強制空冷) (T4)		Mg96Y2Z2	44	32	36
450 × 5h (強制空冷)		Mg97Gd2Z1	40	45	50
	215 × 4h (強制空冷) (T6)				

表-3.2.2-1 熱処理条件と硬度表

	名前 単位	引っ張り強さ N/mm ²	ひずみ %	0.2%耐力 N/mm ²	弾性率 Standard GPa
	AZ91D (F)	232.2	5.4	164.5	37.7
	Y (F)	193.0	2.1	175.9	39.5
	Y 450 × 5h(T4)	190.2	2.9	174.9	11.7
	Y 415 × 16h(T4)	203.6	4.9	175.0	5.8
	Y 450 × 5h(T6)	198.1	3.7	175.8	15.9
	Y 415 × 16h(T6)	192.3	3.0	176.6	22.1
	Gd (F)	242.1	8.5	177.0	31.1
	Gd 450 × 5h(T4)	271.1	12.8	187.0	39.0
	Gd 415 × 16h(T4)	256.8	10.4	183.9	36.8
	Gd 450 × 5h(T6)	265.8	8.8	190.6	39.5
	Gd 415 × 16h(T6)	265.2	10.0	191.6	41.1

表-3.2.2-2 機械的特性表

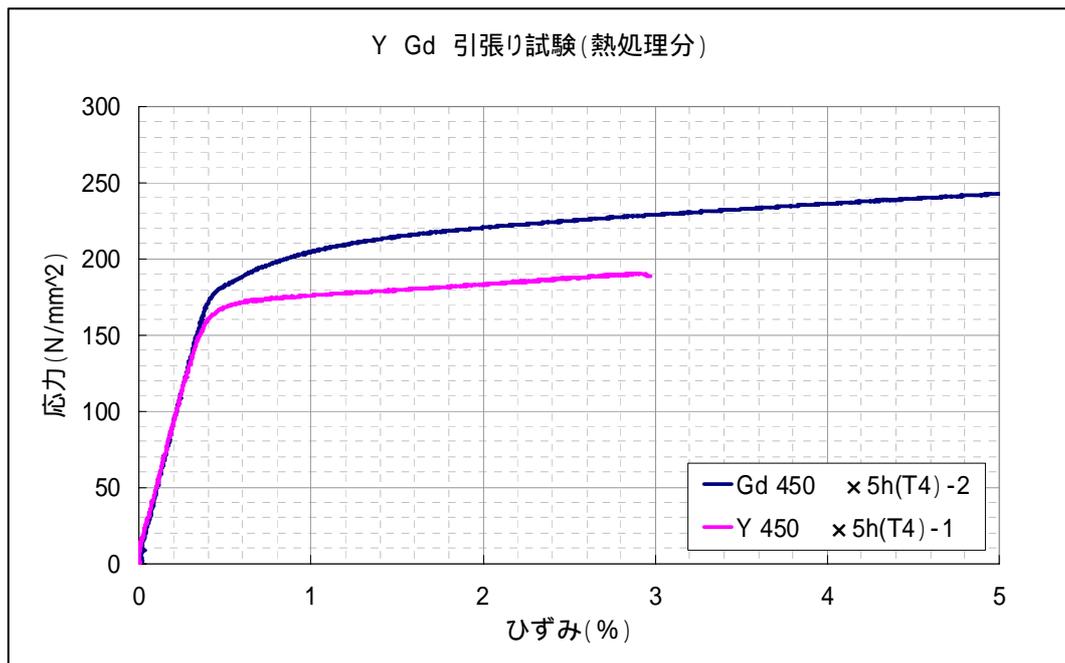


図-3.2.2-1 熊大マグネシウム合金の引張り試験 (熱処理後)



図-3.2.2-2 Mg96Y2Z2 金属顕微鏡の画像
(× 400 450 × 5h-T4 内部)

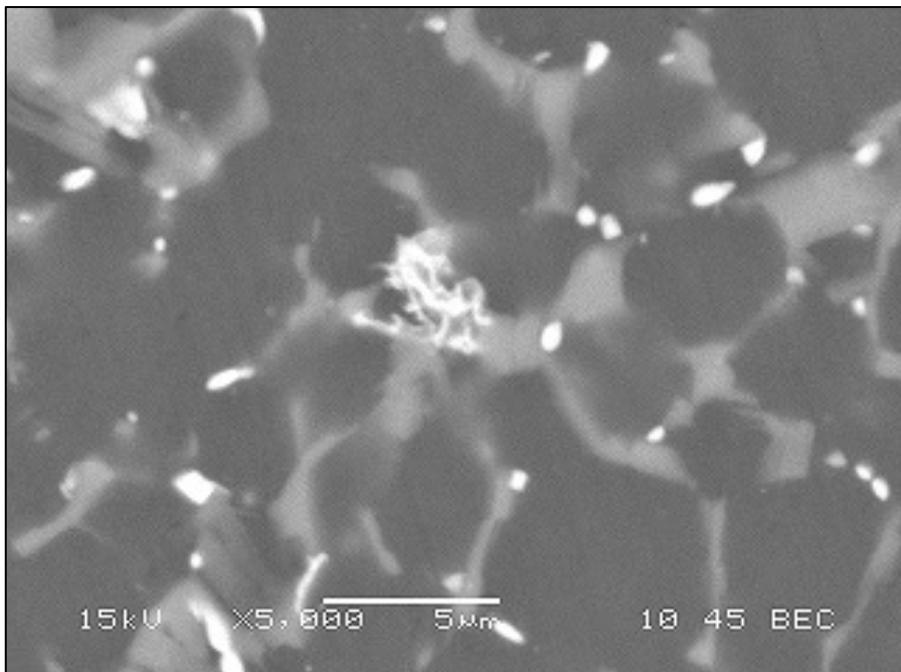


図-3.2.2-3 Mg96Y2Z2 の BSE 画像
(× 5000 450 × 5h-T4)



図-3.2.2-4 Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2
金属顕微鏡の画像 (× 400 450 × 5h-T4 内部)

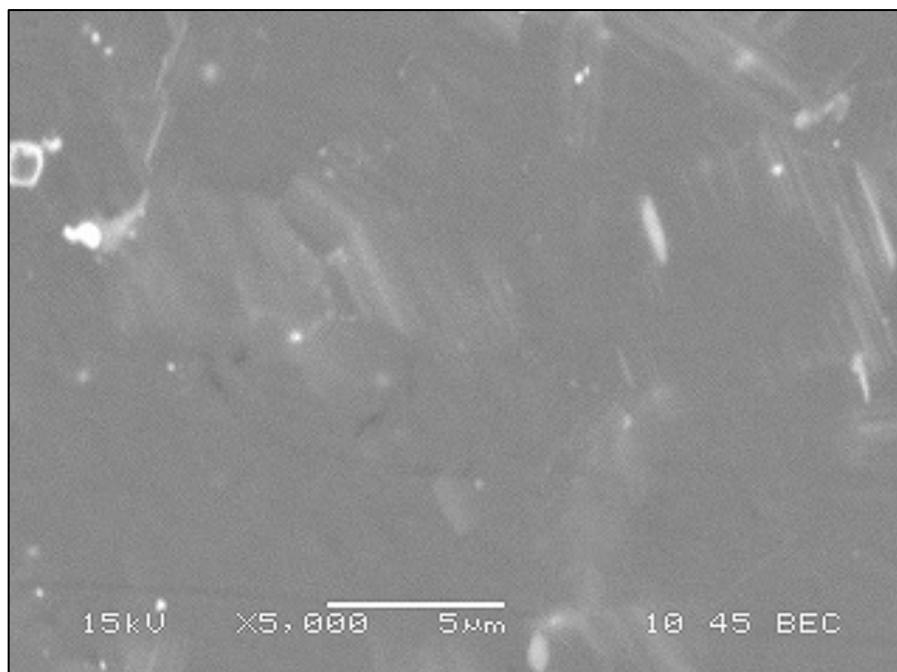


図-3.2.2-5 Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2
BSE 画像 (× 5000 450 × 5h-T4)

3.2.3 ビレット方式射出成形機用熊大マグネシウム合金の開発まとめ

熊大マグネシウム合金の希土類 Y を使用した TYPE1 (Mg96Y2Z2)、及び希土類 Gd を使用した TYPE2 (Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2) にて、ビレット方式射出成形機で熊大マグネシウム合金の核となる長周期積層構造(LPSO)がそれぞれ確認できた。機械的特性では既存材料(AZ91D)よりも強度が増している結果が得られ、TYPE2 では熱処理を施すことにより、強度が増す結果も得られたため、熊大マグネシウム合金が既存材料(AZ91D)に比べて優位性があるといえる。

数回の成形実験では既存材料(AZ91D)との比較を行うために同一の条件下で成形を実施していたが、各熊大マグネシウム合金に合わせた射出成形機の設定及び金型温度の設定、TYPE2 に関しては熱処理条件の設定など、成形実験を繰り返すことにより、更なる好結果が得られる可能性が高いと思われる。

3.3 熊大マグネシウム合金製ビレット方式射出成形品の可能性検証

開発するビレット方式射出成形機で作製した熊大マグネシウム合金製品の機械的性質、欠陥発生状況(巣、気泡巻き込み、酸化物巻き込み、湯ジワ)を評価し、ビレット方式射出成形機と熊大マグネシウム合金製ビレット方式射出成形品の自動車部品などへの実用化可能性を検証した。

3.3.1 熊大マグネシウム合金の機械的特性

熊大マグネシウム合金において、伸び、クリープ、強度の向上により部品点数が削減できれば、実用化の可能性はある。熊大マグネシウム合金は特に高温での特性が優れているため、Mg96Y2Z2、Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2 の成形品に対して 150 及び 250 の環境下での引張り強度試験を実施し雰囲気温度による特性を評価した。結果を表-3.3.1-1 及び図-3.3.1-1 から図-3.3.1-5 で示す。

試験温度	S/N	引張り強さ N/mm ²	弾性率 Gpa	耐力 N/mm ²
常温	AZ91D F	232.2	37.7	164.5
	Y F	193.0	39.5	175.9
	Y450x5(T4)	190.2	11.7	174.9
	Y415x16(T4)	203.6	5.8	175.0
	Y450x5(T6)	198.1	15.9	175.8
	Y415x16(T6)	192.3	22.1	176.6
	Gd F	242.1	31.1	177.0
	Gd450x5(T4)	271.1	39.0	187.0
	Gd415x16(T4)	256.8	36.8	183.9
	Gd450x5(T6)	265.8	39.5	190.6
Gd415x16(T6)	265.2	41.1	191.6	
150	AZ91D F	151.2	33.1	104.6
	Y F	184.2	40.4	161.2
	Y450x5(T4)	198.7	43.4	145.2
	Y415x16(T4)	177.0	38.0	138.0
	Gd F	245.8	38.3	158.6
	Gd415x16(T4)	265.0	41.0	169.0
250	AZ91D F	49.9	16.4	42.1
	Y F	190.6	37.3	144.5
	Y450x5(T4)	146.1	38.5	126.1
	Y415x16(T4)	138.7	32.3	118.7
	Y450x5(T6)	144.5	37.2	123.3
	Y415x16(T6)	140.8	37.4	119.5
	Gd F	212.0	37.5	153.1
	Gd450x5(T4)	203.1	35.5	152.7
	Gd415x16(T4)	208.6	37.3	153.8
	Gd450x5(T6)	234.0	35.2	169.5
Gd415x16(T6)	227.6	34.6	171.2	

表-3.3.1-1 高温環境下の機械的特性表

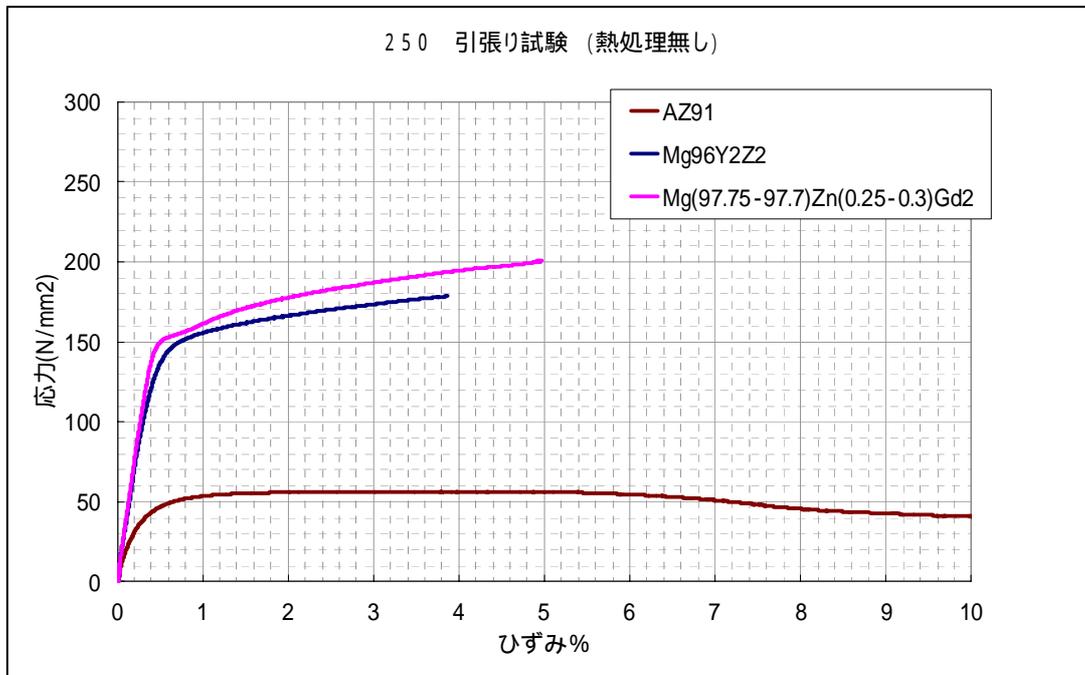


図-3.3.1-1 高温張り試験 (上: Mg96Y2Z2 下: Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2)

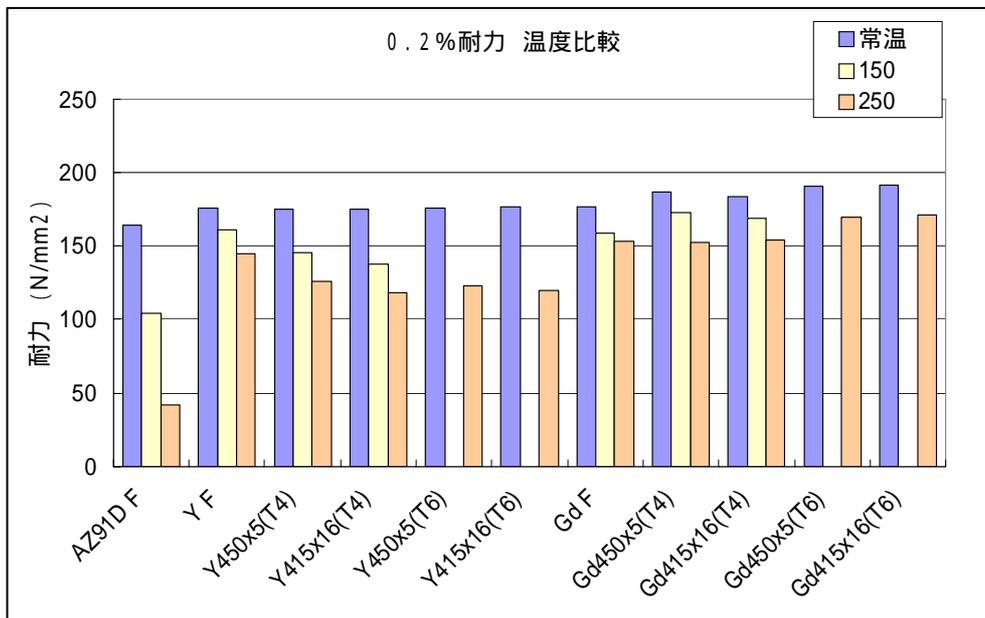


図-3.3.1-2 高温環境下での0.2%耐力

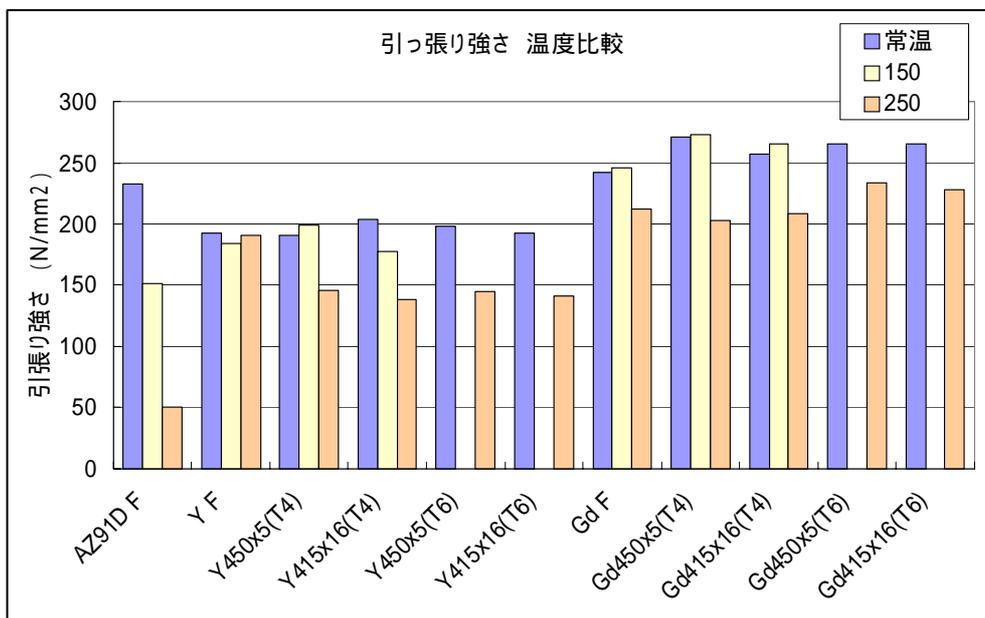


図-3.3.1-3 高温環境下での引張り強さ

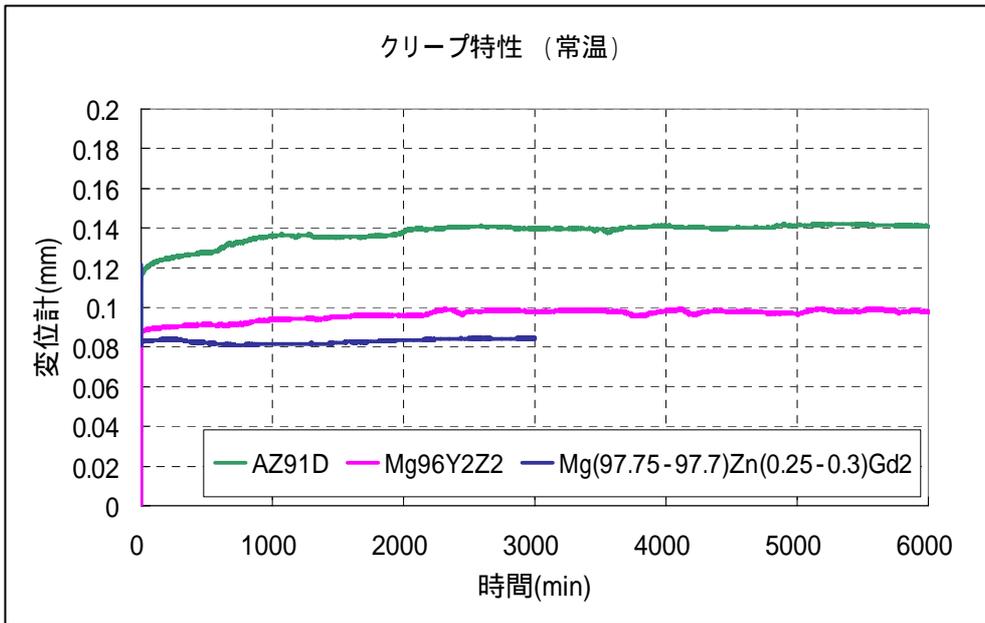


図-3.3.1-4 高温環境下のクリープ特性 (常温、140Mpa)

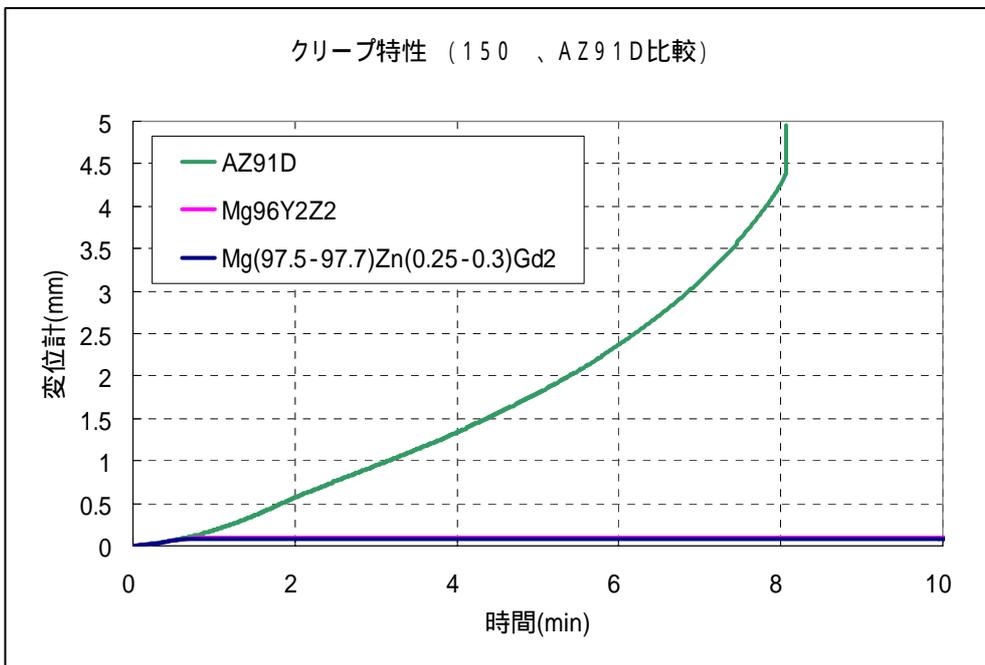


図-3.3.1-5 高温環境下のクリープ特性 (150℃、140Mpa)

これらの熊大マグネシウム合金における高温環境下での機械的特性は、既存材料（AZ91D）に比べ雰囲気温度による強度の減少が緩やかであるといえる。また、クリープ特性では、既存材料（AZ91D）は短時間で破断する結果となったが、熊大マグネシウム合金では時間経過での数値の変化はみられない。これにより高温特性が良好であると判断できる。

既存材料（AZ91D）では高温環境下での使用は難しいとされていたが、この熊大マグネシウム合金は熱による影響が少ないため、高温環境下でのアイテム実用化は有効であると推測できる。

3.3.2 外観評価

熊大マグネシウム合金（Mg96Y2Z2）のみで成形された成形品図-3.3.2-1で湯流れ性の評価を実施した。評価方法としては、成形品の外観欠陥（湯ジワ、クラック）の大きさや深さを点数化した外観評価表に沿って点数化し、その各部位の合計を調べてその良否を判定した。



図-3.3.2-1 Mg96Y2Z2での成形品（左：表側 右：裏側）

結果として、既存材料（AZ91D）と熊大マグネシウム合金（Mg96Y2Z2）の比較を行うと、出口側で外観欠陥の発生に違いが生じたが、これは金型製品部の溶損による傷が原因であったため、再度評価を実施した。目視による再評価では、既存材料（AZ91D）と同等の外観欠陥であると判明した。

この外観評価結果から、板状の成形品では外観欠陥の評価が難しいため、更に複雑な形状の金型にて外観評価を行うことにした。複雑にした形状の成形品は図-3.3.2-2で示すような形状で、左右の湯道より中央へ射出したマグネシウム合金が流れ込む構造であり、外観欠陥を故意に作り出すように設計された金型である。この成形品による外観評価を先ほどの板状の成形品と同様に実施した。図3.3.2-3は実際の湯ジワ写真であり、図-3.3.2-4はその結果である。

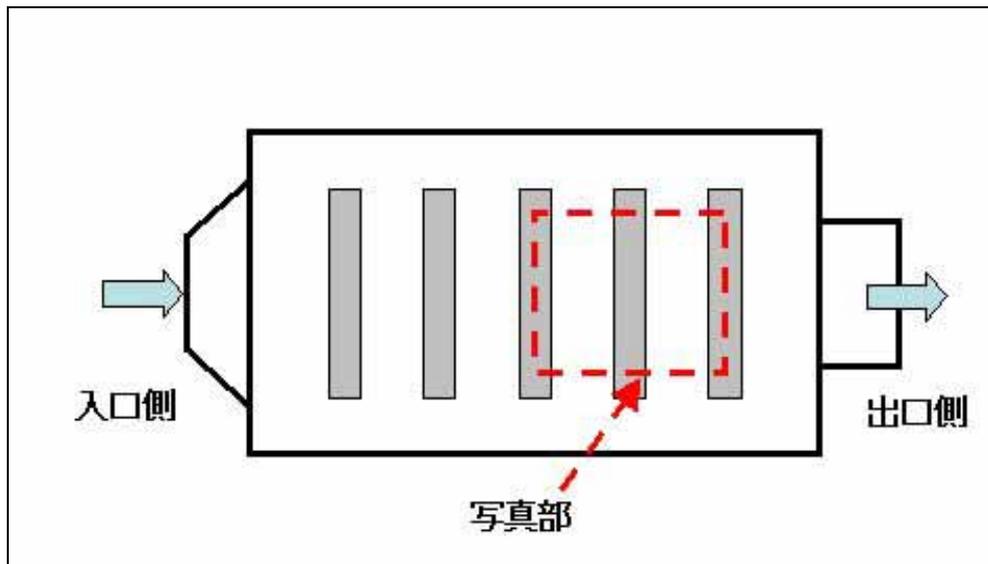


図 3.3.2-2 湯ジワ評価部位 (Mg96Y2Z2)

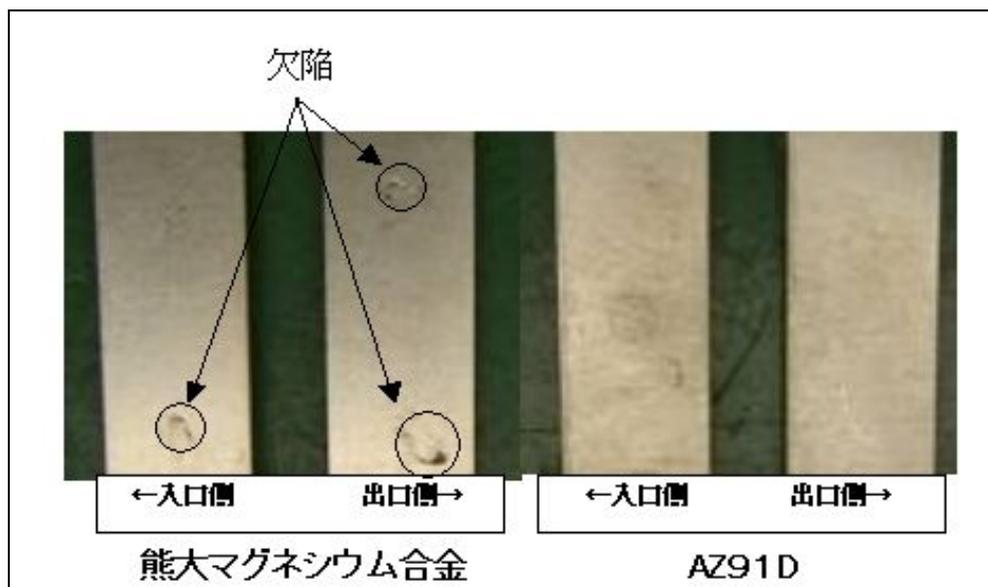


図 3.3.2-3 成形品写真 (Mg96Y2Z2)

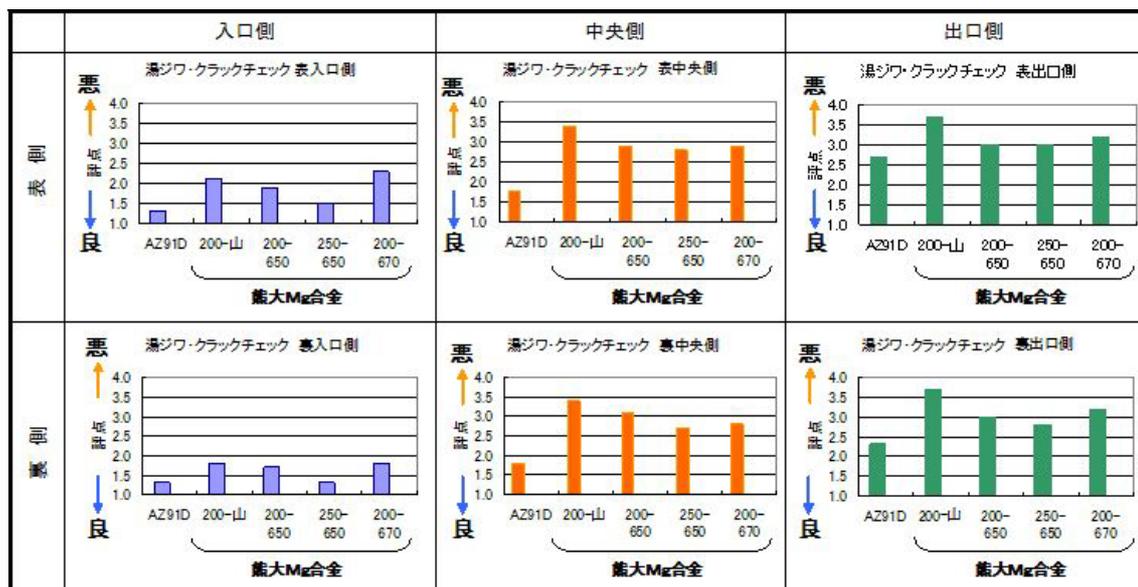


図-3.3.2-4 成形条件での湯ジワ良否判定 (Mg96Y2Z2)

湯ジワ良否判定の結果、熊大マグネシウム合金 (Mg96Y2Z2) は、溶解温度や金型温度が外観欠陥に影響を及ぼし、金型温度 150 では湯流れ性が悪く巣穴が発生しやすい。また、金型温度が 200 以上での成形が必要であると推測できる。射出部に近い入口側は成形条件により既存材料 (AZ911D) と同等の外観状態まで向上すると推測できるが、出口側では依然欠陥が多くみられるため、更に成形条件の改善、及び見直しが必要であることが判る。また、真空引き装置の有無によっても欠陥発生に影響があることが判った。

熊大マグネシウム合金 (Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2) についても Mg96Y2Z2 と同様の外観評価を実施し、その結果を図-3.3.2-5 で示す。

この熊大マグネシウム合金(Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2)を使った成形実験の際、離型剤の種類を変えたものと、射出速度を変えて成形を行ったデータも参考として表記した。

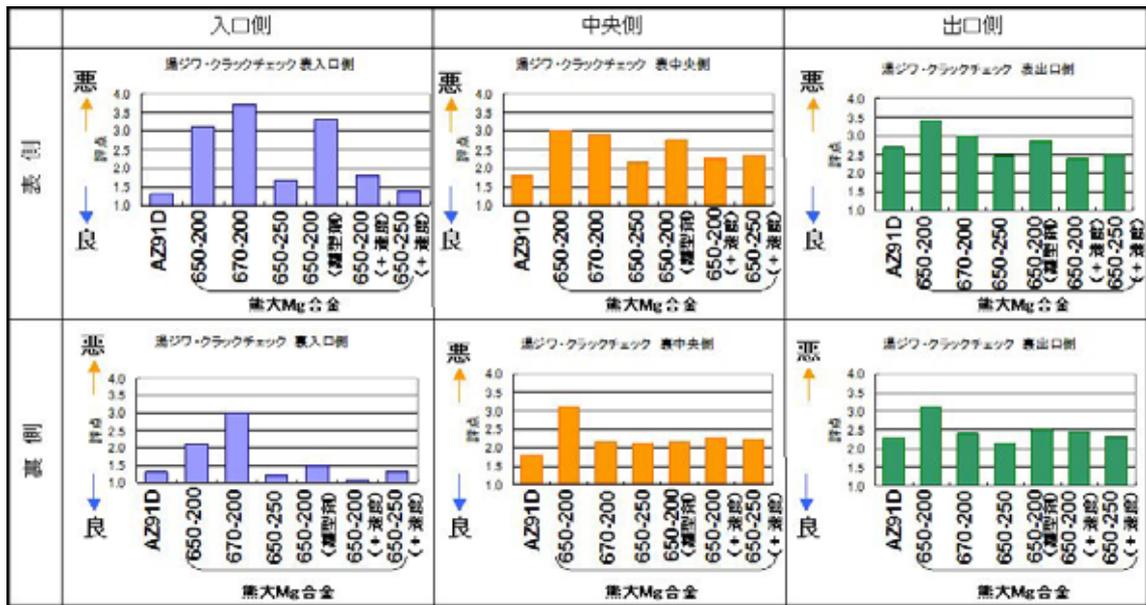


図-3.3.2-5 成形条件での湯ジワ良否判定
(Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2)

結果として、Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2 を使用した成形品の外観欠陥は、既存材料(AZ91D)に比べ若干多くみられる傾向が伺える。この外観欠陥の発生原因となる要因としては、金型温度、溶解温度、また射出速度などが予想され、更なる成形実験を繰り返して外観欠陥の発生要因を調べる必要がある。

次に熊大マグネシウム合金製ピレット方式射出成形品の自動車部品などへの実用化可能性を検証する上で、より現実的な形状での評価が必要であると考え、図-3.3.2-6で示すような半円筒形の形状をした金型を作製し成形を行った。

この半円筒形状の金型は、入口側から出口側で肉厚を 3mm から 1mm へ薄く変化させてあり、溶解したマグネシウム合金が充填しにくい設計にした。充填不足は湯ジワなどの外観欠陥として現れるため、外観欠陥を評価するには最適な成形品であるといえる。

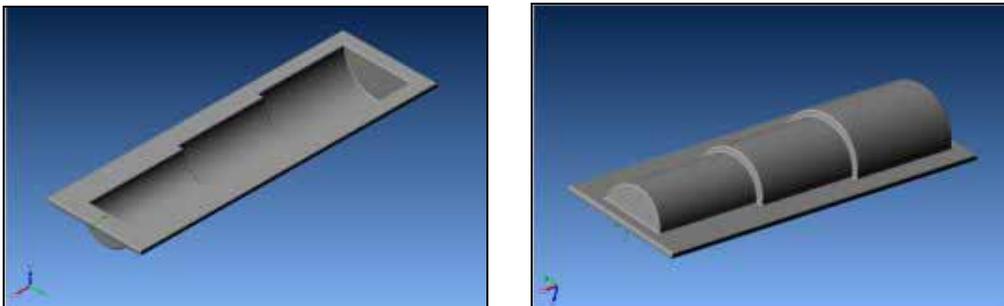


図-3.3.2-6 半円筒形の成形外観 3D 図

この半円筒形状の成形品に対しても、前回同様に既存材料(AZ91D)を使用して最適な成形条件を決め、その成形条件を基に熊大マグネシウム合金(Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2)の成形を行うことにする。

この成形実験でも Mg シールは既存材料(AZ91D)を使用せず、全て熊大マグネシウム合金(Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2)で形成している。この成形実験での成形条件を表-3.3.2-1で示す。

Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2のみを使用した半円筒形状の成形条件				
	計量値	射出速度	最高充填圧	溶解温度
AZ91D	16.0mm	1400	60Mpa	AZ91D設定値
Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2	17.0mm	1400	60Mpa	650 一定、670 一定

溶解温度と金型温度・真空装置条件		
溶解温度	金型温度	
	200	250
	真空有り	真空有り
650 一定		
670 一定		

:実施

表-3.3.2-1 半円筒形の成形条件表

成形品は図-3.3.2-7で示すように、既存材料(AZ91D)を基準とした成形条件で問題なく成形が可能であった。また、この半円筒成形品による外観評価を行った結果、既存材料(AZ91D)及び Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2では、それぞれ若干クラックの発生が見られるものの、外観欠陥レベルは同一であった。

前項で既存材料(AZ91D)及び Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2の比較を行った際には、明らかに既存材料(AZ91D)との外観欠陥に差がみられたが、この半円筒形の成形品では、外観欠陥における差はあまりみられなかった。

両金型は意図的に湯流れを悪くして、外観欠陥を評価する設計のもとに作られており、両金型で同じ傾向がみられると予測していたが、結果はこの半円筒形では外観欠陥が同一レベルであったため、この結果の要因を調べる必要がある。

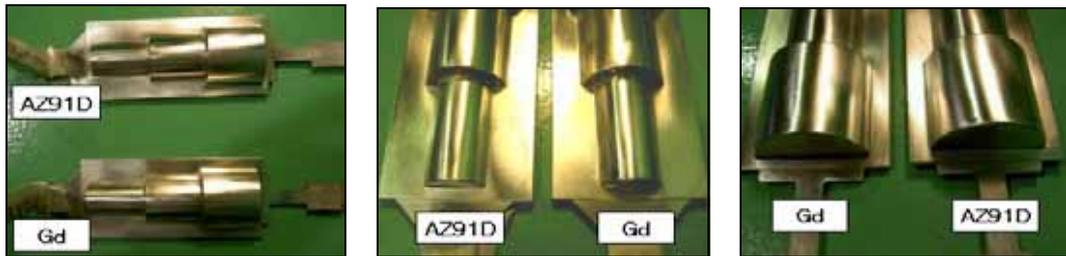


図-3.3.2-7 半円筒製品による外観比較

電磁シールド性についても測定を実施し、結果を表-3.3.2-2 に示す。結果よりシールド性能は既存材料(AZ91D)とほぼ同性能である。電磁遮蔽材に用いられるアルミ合金(ADC12)とも、遜色ない結果となった。また、振動吸収性について測定を実施し、結果を表-3.3.2-3 で示す。結果よりアルミ合金(ADC12)より熊大マグネシウム合金は振動吸収性に優れていると考えられる。

	30MHz	100MHz	200MHz	300MHz	500MHz	1000MHz
熊大Mg合金	56	63	69	72	80	78
AZ91D	55	63	69	74	80	78
ADC12	56	64	69	73	80	78

表-3.3.2-2 シールド測定結果表

熊大Mg合金	AZ91D	ADC12
0.0089	0.0078	0.0156

表-3.3.2-3 損失係数比較

CAI 確認試験を実施し、衝撃に対しての圧縮強度を測定した。図-3.3.2-8 で示すように既存材料 (AZ91D) と熊大マグネシウム合金の衝撃に対しての圧縮強度の比較では影響がないと判断できる。また、粘度測定を実施した結果、既存材料 (AZ91D) が 0.02(Pa·s)、熊大マグネシウム合金 (Mg96Y2Z2) が 0.005(Pa·s) であり、熊大マグネシウム合金の低い粘性を示す結果となった。

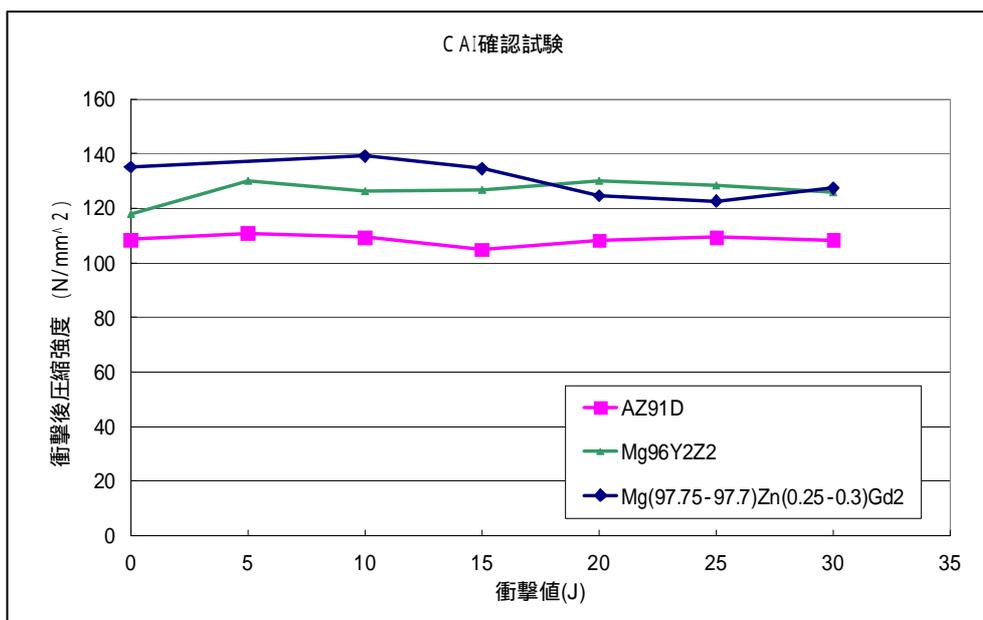


図-3.3.2-8 CAI 試験による比較

3.3.3 熊大マグネシウム合金製ビレット方式射出成形品の可能性検証まとめ

表-3.3.3-1 で示すように熊大マグネシウム合金の希土類 Y を使用した TYPE1、及び希土類 Gd を使用した TYPE2 のどちらも既存材料 (AZ91D) に比べ機械的特性の優位性が確認され、熱処理を施した機械的特性は更に機械的特性が向上する結果が得られた。

		引張り強さ (N/mm ²)	耐力 (N/mm ²)
マグネシウム合金	AZ91D	232.2	164.5
	AM60B	240.0	130.0
熊大Mg合金	Mg96Y2Z2	193.0	175.9
	Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2	242.1	177.0
アルミニウム合金	A380	315.0	160.0
	A7050	560.0	490.0
鉄鋼	炭素鋼	517.0	400.0

表-3.3.3-1 他金属との機械的特性比較

外観評価については図-3.3.3-1 及び表-3.3.3-2 で示すように、既存材料 (AZ91D)、Mg96Y2Z2、Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2 で実施した。 ~ まだが Mg96Y2Z2、以降は Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2 を使用したものである。

Mg96Y2Z2 は既存材料 (AZ91D) に比べ若干外観が劣るものの、金型温度などを变化させた場合、外観評価が向上する傾向がある結果が出ているため、ピレット方式射出成形機の条件次第では更に良い成形品が成形可能でありそうである。

また、Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd2 と既存材料 (AZ91D) とを比べてみると、外観欠陥は同等であるといえそうである。既存材料を含む Mg 合金 3 種類で共通していえることは、入口側と出口側を比較すると、出口側で外観欠陥が多く発生し、また、真空引き装置を使用した場合の方が成形条件がよいと考えられる。このため出口側のチルベントの改善及び調整により更に外観欠陥の発生抑制が見込め、ピレット方式射出成形機の成形条件の見直しを行えば、既存材料 (AZ91D) に近い外観が得られそうである。

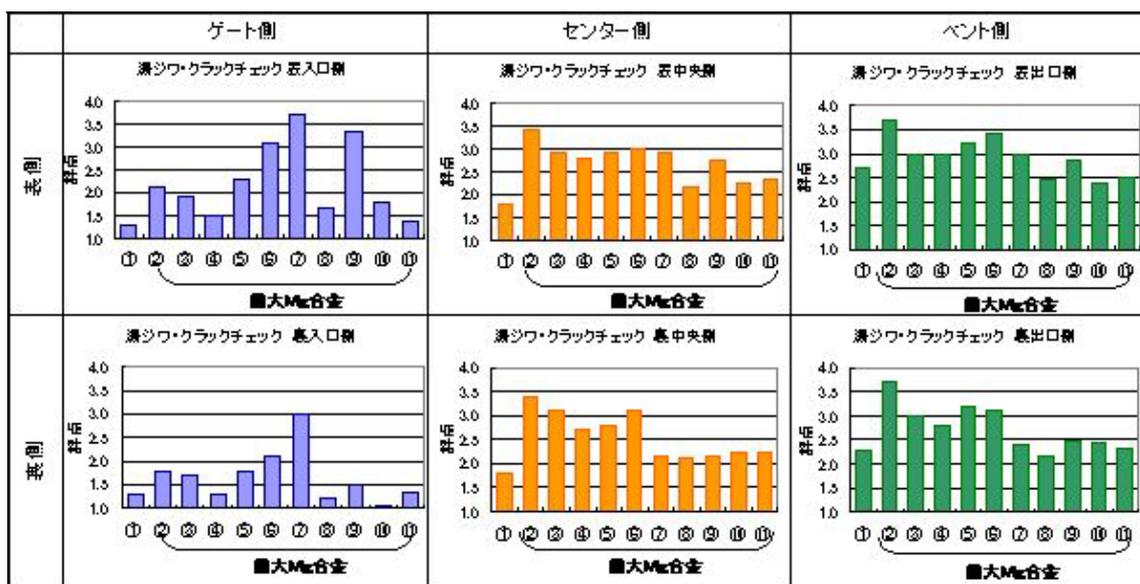


図-3.3.3-1 湯ジワ良否判定

AZ91D	Gd: 650 一定 - 金型200
Y: 山なり - 金型200	Gd: 670 一定 - 金型200
Y: 650 一定 - 金型200	Gd: 650 一定 - 金型250
Y: 650 一定 - 金型250	Gd: の離型剤変更
Y: 670 一定 - 金型200	Gd: の射出スピード + 300
	Gd: の射出スピード + 300

表-3.3.3-2 各成形条件

これらの結果から、熊大マグネシウム合金を使ったピレット方式射出成形機の成形品は既存材料(AZ91D)に比べ高強度であり、外観も既存材料(AZ91D)と同等な成形品を得ることが可能であることが判る。

また Mg(97.75-97.7)Zn(0.25-0.3)Gd₂ を使用した場合、高温時の機械的特性に優れていることから、高強度・高耐熱の実用化も可能であると考えられる。

この高強度・高耐熱、更に軽量化が見込める熊大マグネシウム合金について、実用化可能分野の検討を行った。自動車分野では、エンジン周りの雰囲気温度が約 200 くらい的环境下になるということから、過給器のインペラなどの駆動回転部やフレーム、カバー、ブラケットなどが適応すると考える。また、これから普及されていく燃料電池車やハイブリッド車のモーター部材も見込みがありそうである。二輪車分野に関しても同様に駆動回転部材などが見込めそうである。その他の分野では、ロボットなどのモーター軸やモーターフレームなどの部材を始め、適応すると考えられる部材は多数存在する。軽量化に伴う CO₂ 排出や省エネ効果など、この熊大マグネシウム合金は幅広い分野で採用される可能性が高いといえる。

4. スタディの今後の課題及び展開

4.1 期待される成果と成果の展開

熊大マグネシウム合金とビレット方式射出成形機との更なる良好な条件の開発、及び熱処理条件の開発を行い、高強度・高耐熱な成形品の開発、また熊大マグネシウム合金は複数種類の合金成分のものが作製されており、他の合金についても調査開発を行っていく。これにより自動車用実部材製作への目処を立てることができ、下記展開が考えられる。

4.1.1 熊大マグネシウム合金製品の採用による軽量化、省エネや新規事業の創出

(1) 自動車部材への熊大マグネシウム合金適用

自動車のエンジン周りは約 200 温度まで上昇するといわれている。このため、熊大マグネシウム合金の高強度・高耐熱、軽量化をエンジン周りの部材に関して両立させるニーズを持つと考えられ、これらの構造材についての用途拡大が期待できる。

自動車のエンジン周りにおける熊大マグネシウム合金対象候補事例としては、過給器のインペラ部や、フレーム、カバー、ブラケットなど、現在アルミニウム合金を用いている部材に関して、これらを熊大マグネシウム合金への代替を行うことにより、高強度・高耐熱による強度の向上が計られ、部材設計の最適化により熊大マグネシウム合金の採用が進み、軽量化が可能となる。このため耐久性能の向上と同時に軽量化による燃費向上、その結果 CO₂ 排出などに貢献できる。

(2) 自動二輪車、自転車への熊大マグネシウム合金の適用

自動二輪車、自転車でのハイエンド商品のフレーム部材に軽量化したアルミニウム合金が用いられているが、このフレーム部に熊大マグネシウム合金を採用することにより、更に軽量化が可能になり、自動二輪車では燃費向上及び CO₂ 排出抑制が可能となる。

(3) 駆動部品及び医療関係への適用

駆動及び回転する部材に対し、高強度・高耐熱特性がある熊大マグネシウム合金を採用することにより、熱による影響が軽減され、それによりデザインや構造強度的最適設計が計られ、ユーザーにとって耐久性や使い勝手の良い製品が実現化されそうである。また、今後拡大していくと予想される医療・介護分野でも、軽量化及び高強度な部材に熊大マグネシウム合金が実用化されていくと予測される。

4.1.2 大型ビレット方式射出成形機への展開

現在のビレット方式射出成形機はソディックプラステック社のみであり、また型締め圧が 400t の成形機が上限である。この熊大マグネシウム合金の良好な特性を自動車業界へ展開していくには、型締め圧 400t を超える更なる大型の成形機が必要であり、大型フレームの成形を行うには現状の型締め圧では実現が難しいと思われる。よって大型ビレット方式射出成形機の開発が望まれる。この大型ビレット射出成形機が開発されれば、大型部材への適応、また小型部材では複数個同時に成形が可能になりコストの削減などが可能であると考えられ、熊大マグネシウム合金の適応が加速すると予想される。

- 禁無断転載 -

システム開発 20 - F - 6

革新的高強度マグネシウム合金用射出成形技術に関するフィージビリティスタディ (要旨)

平成 21 年 3 月

作 成 財団法人機械システム振興協会
東京都港区三田一丁目 4 番 2 8 号
TEL 03-3454-1311

委託先名 財団法人金属系材料研究開発センター
東京都港区西新橋 1-5-11 第 11 東洋海事ビル 6F
TEL 03-3592-1282

