

(軽金属(アルミニウム・マグネシウム)の高機能部材化技術の開発)

8 AZ91D マグネシウム合金の恒温鍛造プロセスの開発

藤井敏男, 府山伸行, 苅山信行, 丹下俊之*, 草部一郎*

(Development of Advanced Functional Technology for Light metals)

Development of Isothermal Forging Process for AZ91D Magnesium Alloys

FUJII Toshio, FUYAMA Nobuyuki, KARIYAMA Nobuyuki, TANGE Toshiyuki and KUSABE Ichiro

Formability of AZ91D magnesium alloy by casting-forging process was investigated. The main results are as follows:

(1) The grain size of AZ91D magnesium alloys that were fabricated by the casting-forging process were refined to about $7\ \mu\text{m}$ most by dynamic recrystallization in the isothermal forging condition (reduction rate: 70%, temperature: 400°C , strain rate: $10^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$). (2) Transmission components ($150\times\text{h}75\times\text{t}7\text{mm}$) for a car could be forged directly by isothermal sealed forging at 400°C . (3) The strength, the elongation and the fatigue strength of these components by the isothermal sealed forging were 320MPa, 24% and 130MPa, respectively.

キーワード: マグネシウム合金, AZ91D, 恒温鍛造, 鋳造鍛造, 据込圧縮試験

1 緒 言

軽量・リサイクル性を特徴とする軽金属に対して、欧米の自動車メーカーを中心に、地球環境問題の観点から採用が強力に推進されている。特にマグネシウム合金部材はノートパソコンの筐体等へ大幅に採用されているが、一般的に強度・熱特性等の信頼性が低いため、現状では自動車等の構造部材にほとんど応用されていない。その成形技術も流動成形(キャスト)を主体とした製法に限定されており¹⁾、ダイカスト等の主な成形法では破断チルの巻き込み、介在物の影響等から構造部材に適用可能な材料特性を達成し難い。

このような軽金属材料の高機能化と多様な部材化ニーズに対し、鍛造等の各種塑性加工技術が注目されている²⁾。従来の鍛造法(冷間・熱間)は、メタルファイバーを持つことで高強度高靱性の製品を得ることが出来る³⁾が、成形ブランクは高価な連続鋳造の切り出し材である。また、金型温度が材料の成形温度に比べて低い場合、短時間で成形しなければならず、複雑形状の部品は多工程となり、ニアネットシェイプ加工が出来ない。

一方、恒温(等温)鍛造⁴⁾は、金型を素材の成形に適した同程度の温度にコントロールして鍛造成形を行う新しい技術である。そのため、成形中の温度低下による変形抵抗の増加を防ぐことで、難加工材料のニア

ネットシェイプ加工が可能となり、かつ目的とする微細組織が得られ、高強度高靱性が達成される。このように従来法と比べ金型の温度管理などに問題はあがあるが、変形能が極端に乏しいマグネシウム合金の成形には有効と考えられ、鍛造素材として適さなかった高いアルミニウム配合率のマグネシウム合金もニアネット成形ができ、高強度な素材が期待できる。

本報では最も一般的で、強度・耐食性等バランスの取れた鋳造用合金であるAZ91Dマグネシウム合金(Mg-9Al-1Zn)を鍛造素材として用い、恒温据込圧縮試験を行って変形特性ならびに組織変化を調査した。この鍛造性データをもとに、任意形状のプリフォームを鋳造したのち、恒温密閉鍛造によりマグネシウム合金製の自動車用変速機部品を試作し、その機械的特性を評価した。

2 実験方法

2.1 押出材の高温引張特性の評価

AZ91Dマグネシウム合金の高圧凝固鋳造材を押出比25(40°C - 8°C)、コンテナ温度 390°C 、ダイス温度 300°C 、押出速度15mm/secの条件で熱間押出した。この押出材から引張試験片(平行部直径4mm、平行部長さ10mm)を加工し、歪み速度領域を $10^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ から $10^0\cdot\text{s}^{-1}$ に変化させ、固相線温度(SL:428)近傍の高温引張強度特性を評価した。

* 花野商事株式会社

2.2 据込圧縮試験による恒温鍛造性の評価

AZ91D合金の高圧凝固鑄造材から 40 × h60mmに切削加工した円柱試験片を圧縮ジグおよび雰囲気を所定の同一温度に制御し、50ton油圧複動プレス機を用いて、据込圧縮（自由鍛造）試験^{5), 6)}を行った。歪み速度は $1 \times 10^{-1} \cdot s^{-1}$ とし、試験温度は200 から425 に変化させ、試験温度による変形抵抗および金属組織について調査した。端面拘束を抑制するため圧縮ジグ表面に黒鉛離型剤を塗布した。

2.3 自動車用変速機部品の試作

後方押出形式の恒温密閉鍛造法により、自動車用変速機部品の試作を検討した。現行素材はADC12アルミニウム合金製でダイカスト法によって製造されている。試作品は 150 × h75 × t7mmのお椀型形状の部品であるため、鑄造法でドーナツ形状のプリフォームを作製し、後方押出形式によって精密鍛造を試みた。図1に試作品の鍛造成形モーションを示す。圧下率が約70%となるよう、プリフォーム寸法を外径140mm、内径60mm、厚さ26.5mmとした。

恒温鍛造金型は、400 以上の温度領域まで加熱できるように設計し、主シリンダの加圧力が1000tonの2軸精密複動油圧プレス機を用いた。鍛造用プリフォームはアルゴン雰囲気下において所定温度に加熱した。試作品は鍛造組織の調査後、側壁部より試験片を切り出し、引張強度、回転曲げ疲労試験を実施し、成形品の機械的特性を求めた。

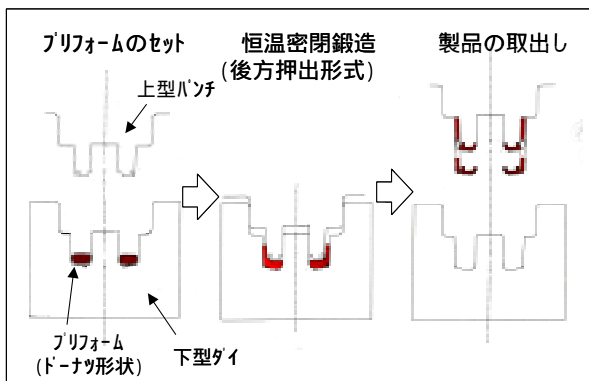


図1 自動車用変速機部品の鍛造成形モーション

3 実験結果および考察

3.1 AZ91D マグネシウム合金押出材の高温引張特性

図2にAZ91D合金押出材の各種初期歪み速度条件による高温引張特性を示す。引張強度は温度上昇に伴って低下し、各初期歪み速度領域とも390 以上で変形抵抗が100MPaを下回った。一方、破断伸びは固相線近傍の400 付近で最大となり、400 以上では飽和した。

よって、据込圧縮試験はプレス鍛造領域内の $1 \times 10^{-1} \cdot s^{-1}$ の歪み速度領域で、引張強度100MPa以下、破断伸び100%程度の高引張特性を有する約400 を中心に恒温鍛造特性を評価した。

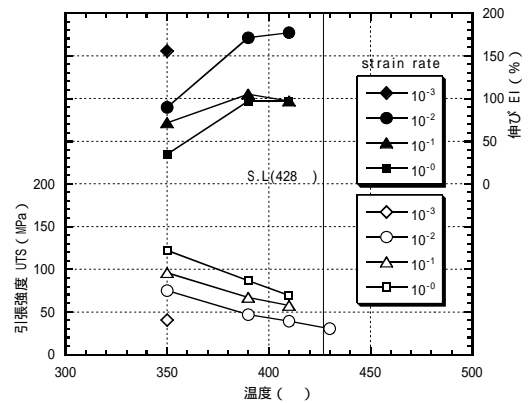


図2 AZ91Dマグネシウム合金押出材の高温引張特性

3.2 AZ91D マグネシウム合金高圧凝固鑄造材の据込圧縮試験による恒温鍛造性

図3に恒温条件（試験片と金型が同一温度）による据込圧縮試験後の試験片外観を示す。加工率は70%、圧下速度は $1 \times 10^{-1} \cdot s^{-1}$ である。200 の恒温圧縮条件では圧下後に鍛造方向に対して45度方向に大きな割れが発生している。400 では同心円状に圧下が可能であり、試料端部に割れは確認されなかった。

このような良好な鍛造性は、低温領域でほとんどの変形が底面すべりのみであるのに対し、300 以上の高温領域では非底面すべりも活性化し⁷⁾、すべり面の数が増大したためと考えられる。なお、425 付近では固相線付近に達し、粒界酸化が始まって高温強度が低下するとともに崩壊した。

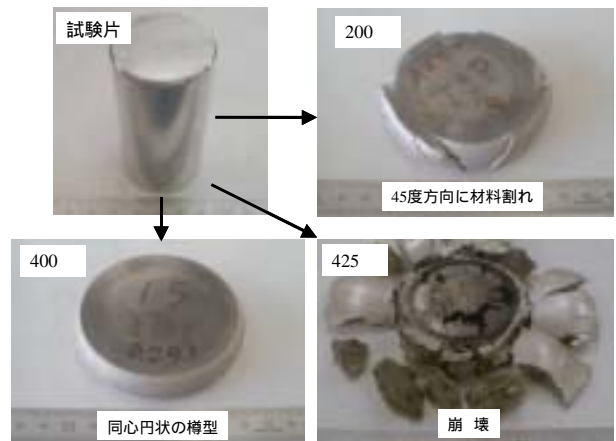


図3 恒温条件による圧縮試験後の試験片外観

図4に素材温度400 の場合で、金型温度を変化させて据込圧縮試験した素材断面の塑性流動状態および

組織を示す。加工率は70%，圧下速度は $1 \times 10^{-1} \cdot s^{-1}$ である。従来のように金型と素材に温度差がある場合，加工中に素材温度の低下によって圧縮ジグとの接触面に3角形の顕著な不変形域（Died Metal Zone）が観察された。一方の恒温方式では素材温度の低下が抑制されるため，不変形域は殆ど存在せず，ほぼ全域で塑性流動が起きている。この結果，均一に歪みが導入され，動的再結晶が起こり，結晶粒径は約 $10 \mu m$ まで微細化されていた。

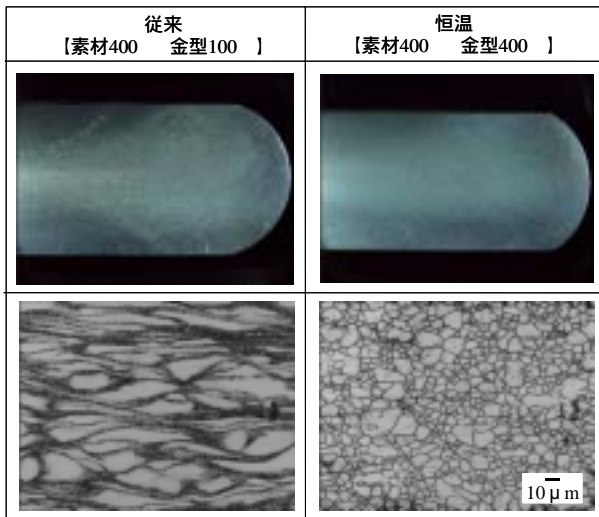


図4 据込圧縮試験後の塑性流動状態および組織

図5に各温度における恒温据込圧縮試験後の断面組織を示す。加工率は70%，圧下速度は $1 \times 10^{-1} \cdot s^{-1}$ である。400 付近では異方性がなく最も均一に微細化されていることが分かる。このように，400 付近の温度領域で恒温鍛造を行えば，鍛造後の素材は均質な過飽和固溶体（T4状態）の微細組織を維持できると考える。

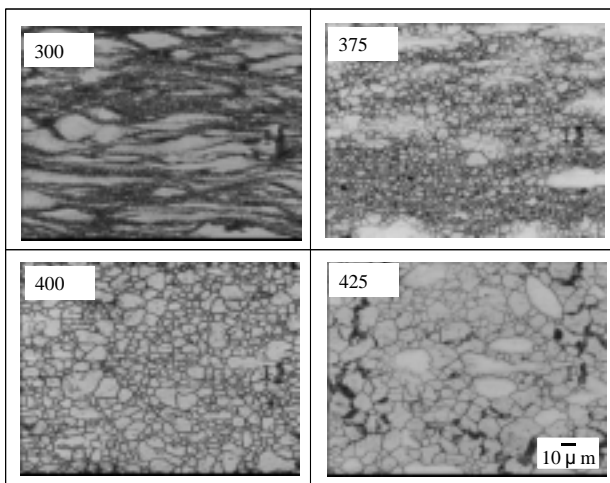


図5 恒温据込圧縮試験後の断面組織

図6に恒温条件で圧縮試験した変形抵抗曲線を示す。400 の恒温圧縮条件では加工初期の変形抵抗の増加は小さく，200 と比べて最高値は約1/3まで減少した。かつ，加工に伴う変形抵抗は動的再結晶によって増加せず，ほぼ一定を保持しており，低応力で大加工が可能であることを示唆している。

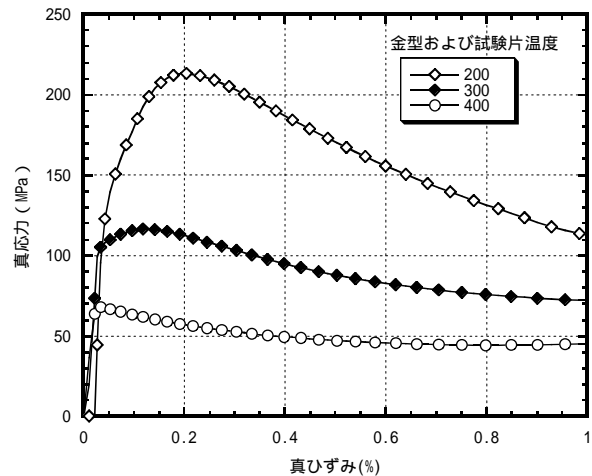


図6 恒温条件で圧縮試験した変形抵抗曲線

3.3 恒温密閉鍛造による自動車用変速機部品の製作

高温引張試験，据込圧縮試験による鍛造性データをもとに，AZ91D合金プリフォームを用い，鍛造温度約400，歪み速度 $1 \times 10^{-1} \cdot s^{-1}$ の恒温鍛造領域で試作品の作製を行った。プリフォームは，据込圧縮試験と同様，高圧凝固鑄造法で作製し，鍛造素材段階で結晶粒の微細化をはかった。

図7に試作した自動車用変速機部品の外観を示す。



図7 自動車用変速機部品の外観

素材変形抵抗の低下により、一回の工程で約50%の体積移動率を伴う成形を可能とした。最大荷重は約600tonであった。このように、試作品は通常の熱間鍛造では一工程で成形困難な形状であるが、任意形状の鋳造プリフォームを用いた恒温鍛造法によって、非常に大きな材料の立ち上がりを実現した。

3.4 自動車変速機部品の恒温鍛造組織

図8に試作品の断面組織を示す。鍛造前のプリフォームはおよそ200~300 μm の結晶粒径であったが、鍛造後の結晶粒径は7 μm 程度であり、均質な鍛造組織となった。AZ91D合金は耐食性と強度特性を兼ね備えた鋳造用合金であり、鍛造には適さないが、恒温鍛造法によって大規模な変形が可能となり、シングルミクロンまで結晶粒が微細化できた。

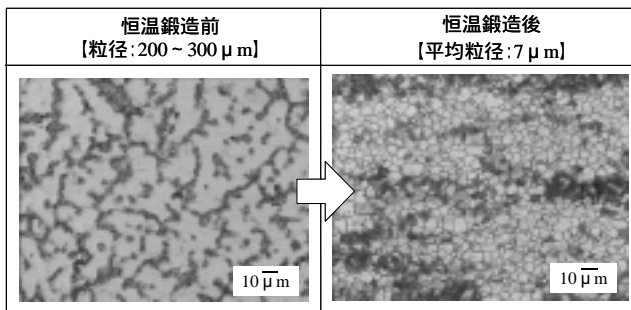


図8 自動車用変速機部品の恒温鍛造組織

3.5 自動車用変速機部品の強度特性

表1に試作品の側壁部から取り出した実体試験片による強度特性を示す。AZ91D合金は、鍛造のままの場合、破断強度320MPa、耐力200MPa、疲労強度130MPaに達した。特に破断伸びは20%を上回り、高強度でかつ高信頼性を有した製品が得られた。

表1 自動車用変速機部品の常温特性

	AZ91D合金		
	ダイカスト ⁸⁾	恒温鍛造	
		H	T5
破断強度 (MPa)	230	326	352
0.2耐力 (MPa)	160	203	257
破断伸び (%)	3	24.1	14.3
疲労強度 (MPa)	100	130	

H：鍛造のまま，T5熱処理：175 -6h 空冷

4 結 言

鋳造用合金であるAZ91D合金を鍛造プリフォーム素材に適用するため、恒温据込圧縮試験により、鍛造性を調査し、自動車用構造部品のニアネット成形を試みた。

- (1) AZ91D合金高圧凝固鋳造材では鍛造温度約400 $^{\circ}\text{C}$ 、加工率約70%、歪み速度 $10^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ の恒温鍛造領域で均質な結晶粒微細化(5~7 μm)が可能であった。
- (2) 後方押出形式の恒温密閉鍛造法により、歪み速度 $10^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ で、約50%体積移動させ、複雑形状の自動車用変速機部品(150 \times h75 \times t7mmのお椀形状)をニアネットで作製できた。
- (3) 試作品の断面組織はシングルミクロンまで均質に微細化し、強度特性は現行素材(ADC12アルミニウム合金)と同等以上で、引張強度320MPa、耐力200MPa、伸び24%、疲労強度130MPaに向上した。

なお、本研究の一部は中小企業技術開発産学官連携促進事業により実施した。終わりに、ご協力いただいた住野工業(株)他関係者に深く感謝する。

文 献

- 1) T.Sano et al.: Proc. 6th ICTP,1(1999),589
- 2) 松下:塑性と加工, 日本塑性加工学会誌, 40 (1999) 11,35
- 3) J.Becker et al.: Umformtechnik an der Schwelle zum nachsten Jahrtausend, 16. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, (1999), 245
- 4) 野中:鍛造 第13回国際鍛造会議報告書 全日本鍛造工業会, 263
- 5) 千野他:材料, 50 (2001) 11, 1228
- 6) 小川他:平成12年度塑性加工学会春期講演会概要集, 481
- 7) H. Yoshinaga and R. Horiuchi: Trans. JIM, 5, 13(1964)
- 8) R.S.Busk: マグネシウム設計, 軽金属協会 マグネシウム委員会(1988), 123~189