

# (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)

## 5 Al-Si 系合金の恒温鍛造プロセスの開発(第4報)

府山伸行, 問山清和, 寺山 朗, 筒本隆博, 丹下俊之\*, 草部一郎\*

(Development of Advanced Functional Technology for Light Metals)

Development of Isothermal Forging Process for Aluminum-Silicon Alloys (The 4th Report)

FUYAMA Nobuyuki, TOIYAMA Kiyokazu, TERAYAMA Akira, TSUTSUMOTO Takahiro,  
TANGE Toshiyuki\* and KUSABE Ichiro\*

Formability of Al-Si alloys (ADC12, A390, and AC9A) by cast/forging process was investigated. The main results are as follows: (1) The grain size of silicon particles of ADC12 alloys were refined to about 3 $\mu$ m most, and this particles were distributed in the matrix uniformly by the open die forging (reduction rate: 70%, temperature: 425 , strain rate: 10<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>). (2) Cylinder components ( $\phi$ 110×h110×t12mm) of Al-high Si alloys were forged directly by isothermal sealed forging. (3) The strength, the elongation and the fatigue strength of ADC12 alloys by isothermal sealed forging were 390 MPa, 16.5% and 160MPa respectively.

キーワード: Al-Si 系合金, ADC12, A390, AC9A, 恒温鍛造, 鋳造鍛造, 据込圧縮試験, 後方押出

### 1 結 言

地球環境問題や資源の有効利用の観点から, 自動車など輸送機械の軽量化は必須であり, 鋼の代替を中心にアルミニウム合金やマグネシウム合金などの軽金属材料が数多く利用されている。しかし, その製造方法は鋳造プロセスが主流であり, 構造部材としての使用例は少ない<sup>1)</sup>。現在, 高強度高靱性の軽金属材料部材を量産可能なプロセスとして, 半溶融・半凝固鍛造法, 鋳造鍛造法や高速超塑性加工法などの開発が進められており<sup>2)-5)</sup>, 動向が注目されている。

これらの中で, 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恒温鍛造<sup>6)</sup>は,  $\beta$ 型 Ti 合金や Ni 基耐熱合金等の難加工材が鍛造可能な優れたプロセスである。当センターでは, 鋳造用マグネシウム合金 (Mg-Al-Zn) に対して本鍛造技術の適用を検討し, 10<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>の高歪み速度で50%以上の大規模体積移動を行い, 組織制御されたニアネット鍛造材の高信頼性を明らかにした<sup>7)</sup>。このように, 本方法は変形能が極端に乏しいマグネシウム合金の成形に非常に有効であり, シリコンなどを含有した難成形性アルミニウム合金に対しても, ニアネット成形法として期待できる。

本報ではアルミニウム-シリコン (Al-Si) 系合金を対象に, 一般的なダイカスト用合金である共晶系のADC12 (12%Si) に関して恒温据込圧縮試験を行い,

\* (株)アルマテック

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, 鋳造プリフォームを用いて, 後方押出方式の恒温密閉鍛造によりカップ形状部材を試作した。試作に際しては, ハイシリコン系鋳造用合金である過共晶系の A390 (17%Si), AC9A (23%Si) を含めた3種類の合金を用いて成形を試み, その機械的特性を評価した。

### 2 実験方法

#### 2.1 供試材料

実験に用いた Al-Si 系合金である ADC12, A390及び AC9A の化学成分を表1に示す。それぞれ初晶及び共晶の微細化処理剤として, Na, P を適量添加した。

表1 供試材料の主要な合金組成 (mass%)

	Cu	Si	Mg	Zn
ADC12	1.5~3.5	9.6~12.0	<0.3	<1.0
A390	4.0~5.0	16~18	0.45~0.65	<0.1
AC9A	0.5~1.5	22~24	0.5~1.5	<0.2

#### 2.2 据込圧縮試験による恒温鍛造性の評価

供試材のうち ADC12高圧凝固鋳造材から  $\phi$ 40×h60 mm に切削加工した円柱試験片を圧縮ジグとともに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<sup>5)6)</sup>を行った。ひず

み速度は $10^{-1}s^{-1}$ とし、試験温度は200 から450 に変化させ、変形抵抗及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 後方押出によるカップ形状部材の試作

供試材の3合金を用い後方押出形式の恒温密閉鍛造法により、フランジ部にバリを設けたカップ形状部材(約 $\phi 110 \times h110 \times t12mm$ )の試作を検討した。圧下率が約70%となるよう高圧凝固鑄造法で作製した円盤状プリフォーム(約 $\phi 100 \times h40mm$ )を用いた。恒温鍛造金型は、400 以上の温度領域まで加熱可能に設計し、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て鍛造した。

試作品は光学顕微鏡組織の調査後、側壁部より試験片を切り出し、常温における引張試験、疲労試験及び摩耗試験を行った。引張試験は平行部直径4mm、平行部長さ10mm に加工した試験片を用い、試験速度0.5mm/min にて実施した。疲労試験は小野式回転曲げ試験機により、**図1**に示す形状の試験片を用いて回数3000rpm にて各応力制御下で行った。

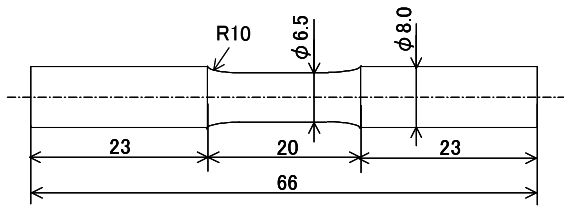


図1 疲労試験片の形状

摩耗試験はスガ式摩耗試験機を用いた。スガ式は往復運動する SiC 研磨紙に試料を一定荷重で押しつけて摩耗量を評価する試験方法である。研磨紙を#320、荷重を2kgf、回転数を3000回で固定し、試験前後の減量(総摩耗量)を測定した。比較試料はダイカスト材もしくは重力鑄造材とした。

## 3 実験結果及び考察

### 3.1 据込圧縮試験による ADC12鑄造材の恒温鍛造性

**図2**に恒温条件で圧縮試験した変形抵抗曲線を示す。

425 付近から圧下率70%まで、試料端部に割れを伴わず同心円状に圧縮可能であった。425 以上の恒温圧縮条件では、加工初期の変形抵抗の増加が小さく、300 と比べて最高値は約1/2まで減少した。かつ、加工に伴う変形抵抗はほぼ一定であり、低応力で大加工が可能であることを示唆している。

**図3**に恒温据込圧縮試験前後の断面組織のうち、一

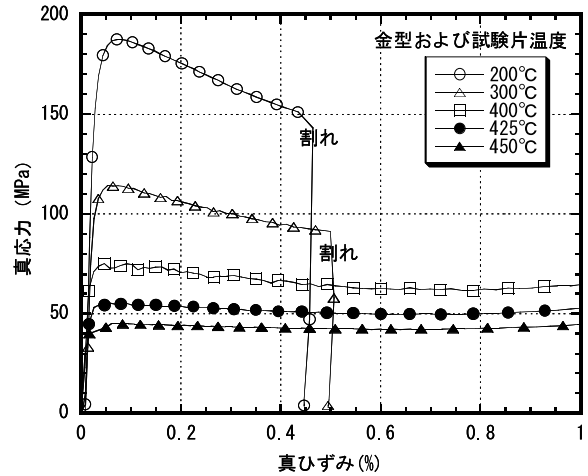


図2 恒温条件で圧縮試験した変形抵抗曲線

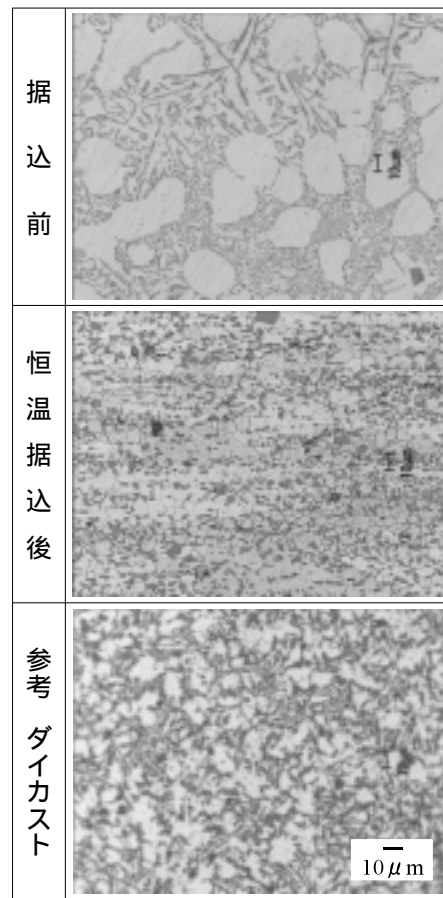


図3 恒温据込圧縮試験前後の断面組織

例として試験温度425 , 加工率70%の場合を示す。据込前の高圧凝固組織は初晶 Al が点在し、Si が初晶針状と粒状の混合(10~15 $\mu m$ )した状態であった。この恒温据込条件付近から、恒温鍛造により再析出した微細な粒状 Si(2~5 $\mu m$ )が均一分散した組織に変化し、かつ結晶粒径は10 $\mu m$ 以下となった。初晶針状 Si(20 $\mu m$ )が分散するダイカスト組織と比較しても、恒温鍛造組織は粉末冶金手法で得られる理想に近

い粒状 Si が分散する形態制御によって、強度、摩耗性等の改善が期待できる<sup>8)</sup>。

### 3.2 後方押出によるカップ形状部材の試作

据込圧縮試験による鍛造性データをもとに、ADC12、A390及び AC9A 合金の高圧凝固鑄造プリフォームを用い、鍛造温度約425℃、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。

図4に試作した後方押出部材の外観を示す。素材変形抵抗の低下により、ハイシリコンの難加工アルミニウム

ウム合金でありながらニアネット成形が可能であった。最大荷重は約500tonを示した。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、鑄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。

### 3.3 後方押出部材の恒温鍛造組織

図5に試作品の断面組織を示す。恒温据込試験結果と同様、各 Si 配合量とも鑄造組織は破壊され、Si が粒状に組織制御された。過共晶系合金に見られる初晶 Si は鍛造前後で変化なく、20~30 $\mu$ m の粒状のままであった。このように恒温鍛造後において、共晶系合金で見られた針状 Si は分断などにより制御されるが、粗大な初晶 Si の制御は困難であった。よって、プリフォーム段階での微細化元素の添加等による改良が重要となる<sup>9)</sup>。

### 3.4 後方押出部材の機械的特性

図6に試作品の側壁部から取り出した実体試験片による引張強度特性を示す。共晶及び過共晶系合金ともに恒温鍛造化によって、展伸材水準の強度、靱性を示した。特に Si の粒状化などによって伸びの改善は著しく、ダイカスト法による ADC12では一般的に3%前後であることから、約5倍に向上したことになる。

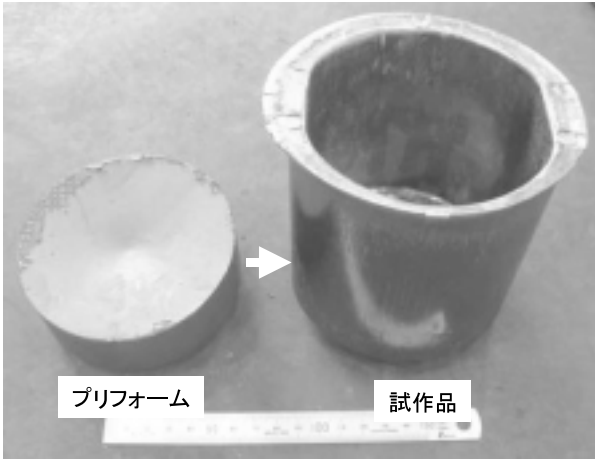


図4 後方押出部材の外観

	鍛造前	鍛造後
ADC12 (12Si)		
A390 (17Si)		
AC9A (23Si)		

図5 後方押出部材の光学顕微鏡組織

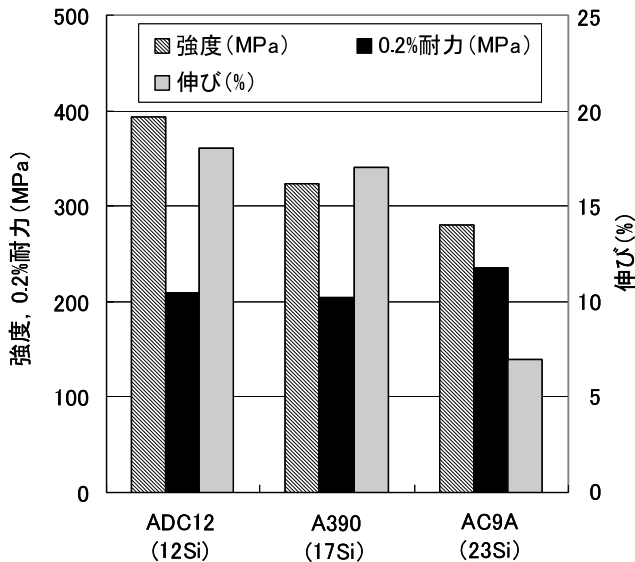


図6 後方押出部材の引張強度特性

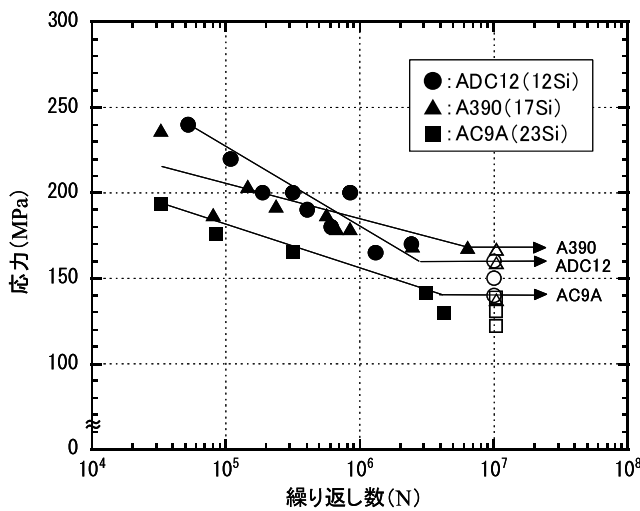


図7 後方押出部材の疲労強度特性

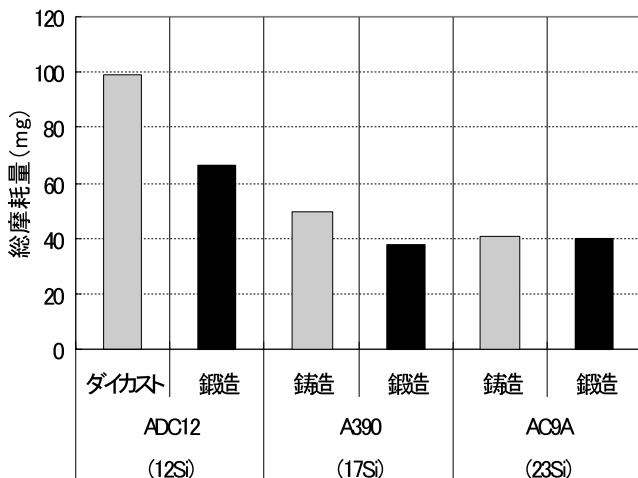


図8 後方押出部材のスガ式摩耗試験結果

図7に小野式による回転曲げ疲労試験結果を示す。3合金共に難塑性加工の鋳造合金にも拘わらず、150 MPa 前後の高い疲労強度を示した。中間の Si 配合量とした A390が最大値を示しており、恒温鍛造化における最適 Si 量に近いと考えられるが、その他添加元素の影響を検討する必要がある。

図8にスガ式摩耗試験結果を示す。最大 Si 配合量である AC9A は鋳造材と同等レベルであったが、ADC12及び A390は恒温鍛造化によって耐摩耗性が向上した。特に ADC12は総摩耗量が40%ほど大幅に減少しており、粒状化した Si を取り囲むマトリックスの靱性効果によって、粒のはく離を抑制でき、高い耐摩耗性を示したと考えられる。

## 4 結 言

難成形性アルミニウム合金 (Al-Si 系) に対し、大規模塑性加工が可能な恒温鍛造条件を据込圧縮試験で検討し、後方押出成形によってカップ形状のニアネット鍛造部材を試作した。

ハイシリコン系を含む ADC12, A390, AC9A 合金とともに、Si 粒子の形態制御とマトリックスの微細化によって展伸材並みの材料特性を得た。特に ADC12は従来のダイカスト法と比較し、組織制御によって高強度高靱性化され、破断強度390MPa、耐力200 MPa、伸び16.5%、疲労強度160MPa まで向上し、耐摩耗特性も優れていた。

## 文 献

- 1) T. Sano et al.: Proc. 6th ICTP, **1** (1999), 589
- 2) 小野他: 軽金属, **45** (1995) 4, 187
- 3) 神戸他: 軽金属, **48** (1998) 2, 103
- 4) 西村: 軽金属, **47** (1997) 11, 587
- 5) 石原他: 軽金属, **47** (1997) 8, 427
- 6) 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
- 7) 藤井他: 広島県西部工技研究報告, **46** (2003), 29
- 8) 額見他: までりあ, **36** (1997) 4, 349
- 9) 北見: 鋳造工学, **74** (2002) 1, 45