

# アルミニウム鋳造品の高強度化技術

- HIP 処理による疲労強度向上と X 線 CT による欠陥評価 -

藤井要\* 谷内大世\*

アルミニウム合金鋳物は、車両軽量化のニーズから自動車部材等へ広く利用されている。今後さらに需要を広げるためには、材料強度特性を向上させることが必要であり、そのため、内在する微少欠陥を抑制することが重要課題とされている。鋳造欠陥を押しつぶし疲労強度を向上させる目的で用いられる HIP 処理は、近年アルミニウム合金鋳物への適用が急速に進む技術の一つである。一方、欠陥の検査手法において、X 線 CT の利用が進み、製品内部の微少な欠陥の位置と大きさを三次元的に捉えることが可能となった。そこで、本報告では、HIP 処理による欠陥抑制に注目し、それによる疲労強度向上と X 線 CT による微少欠陥観察に対する有効性の検討を行った。その結果、HIP 処理は疲労強度を大幅に改善させることを確認した。また、未処理品の X 線 CT による観察では、三次元的に連結した収縮欠陥の形状が観察された。それに対し、HIP 処理品の収縮欠陥は、観察領域全体にわたって抑制されていること等が明らかになった。

キーワード: HIP, アルミニウム鋳造合金, X 線 CT

Study on High Strength Al Casting alloy for the Machine Parts  
- Effects of HIP processing and Defects inspection by X-ray CT -

Kaname FUJII and Taisei YACHI

Aluminum alloy casting is widely used in areas such as automobile parts in response to the trend of building lighter vehicles. To further increase its demand, it is important to increase its strength property. To do so, it is crucial to control its internal micro defects. HIP processing, used for the purpose of removing casting defects to improve fatigue strength, is one of the techniques whose application on Aluminum alloy casting has quickly advanced in recent years. As for detecting methods, X-ray CT has made it possible to grasp the location and exact size of internal micro defects in three dimensions. In this report, we focused on defect control by HIP processing, and examined the improvement in fatigue strength by HIP processing and its effectiveness to counter micro defects discovered by X-ray CT. The following results were obtained. (1) We confirmed that HIP processing greatly improves fatigue strength. (2) From X-ray CTs of non-HIP processed samples, we observed three-dimensionally connected micro-shrinkages. (3) In contrast, it has become obvious that the HIP processed sample's micro-shrinkages have been controlled over the entire domain observed.

Keywords : HIP, Al cast alloy, Xray-CT

## 1. 緒 言

近年、地球環境問題への対応から自動車を中心とした輸送機器の軽量化の要求がある。その要求を満たすため、エンジンとその周辺部分に、アルミニウム合金鋳物が強度部材として使用されはじめている。

強度部材として使用されるアルミニウム合金鋳物は、繰り返し応力がかかる状況にあるため、その疲労特性を十分に確保することが重要である。しかしながら、鋳物は、凝固組織をそのまま用いるため、内部には気孔、収縮孔等多くの鋳造欠陥を含んでいる。通常、鋳

物は熱処理を行ってもその後の加工は行わないため、これら鋳造欠陥の多くはそのままマイクロ組織中に残存する。その結果、鋳造製品の疲労強度のばらつきや強度低下が発生し、設計上大きな問題となっている<sup>1)</sup>。

その対策として、鋳造後の製品を高温高圧下で保持し、空隙欠陥を押しつぶす HIP 処理がある。本処理は Ni 基超合金（ジェットエンジンのタービンブレード）への適用から始まり、近年では、アルミニウム合金鋳物への適用が進んでいる<sup>2)~4)</sup>。また一方で、鋳物の欠陥検査手法においては、X 線コンピュータトモグラフィ（以下 X 線 CT）の利用が進み、内部欠陥の位置と大

\*機械金属部

きを三次元的に捉えることが可能となっている<sup>5)</sup>。そこで、本報告では、HIP処理を施した鑄造品の疲労強度向上とその欠陥抑制効果を、X線CTを用いて検討した内容について報告する。

## 2. 供試材および試験方法

### 2.1 供試材

実験に使用したアルミニウム鑄造材は、県内鑄造工場において、市販材のJIS AC4B合金塊を溶解し、改良処理剤としてNaを添加した後、直径30mm、長さ200mmの円筒形状に砂型重力鑄造した。これら鑄造材の一部は、HIP処理材とするため、大気圧の室温から、圧力と温度を98MPa及び500℃まで加圧昇温し、その後1.5時間保持した。HIP処理材とHIP処理を施さない鑄造材の両共試材は、500℃で4時間の溶体化処理後、60℃の温水中に焼入れを行い、180℃で4時間の時効処理を行ったものを用いた(図1)。

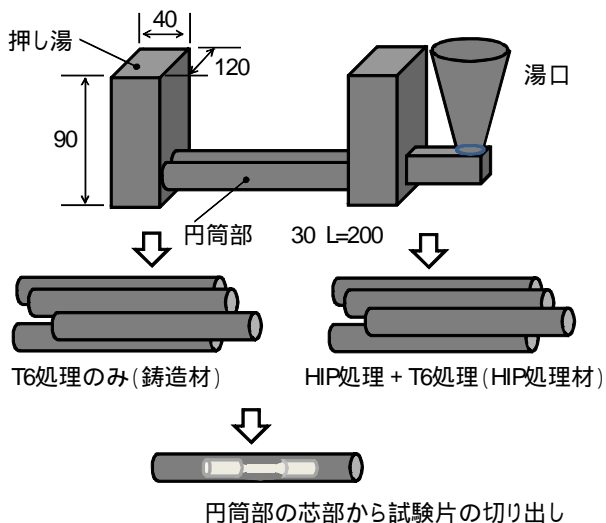


図1 共試材作成のフロー図

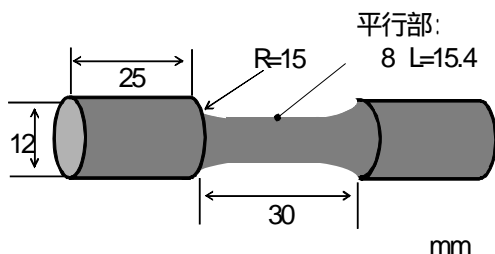


図2 試験片の模式図

機械的性質及び組織観察のための試験片は、円筒鑄造材中心部より削りだし、平行部直径8mmの試験片形状に仕上げた。平行部の表面粗さは、 $Ra=1.0\mu m \pm 1\mu m$ 以内とした(図2)。

### 2.2 材料試験

引張り試験は、ひずみ速度2mm/min、伸びの測定は突き合わせ法で行った。また、疲労試験は3600rpmの小野式回転曲げ試験機を用い、室温下で行った。さらに、疲労破断原因の特定のため、SEMを用いて試験片の破断面を観察した。

金属組織の観察は、試験片掴み部を切断、鏡面研磨後、エッチング処理をしないまま、金属顕微鏡で行った。また、内部鑄造欠陥観察にはX線CTを用いた。その際、試料の撮影領域は試験片の平行部中心部の $\phi 8\text{mm} \times 10\text{mm}$ とした。CT像の撮影は、試料を回転して行われるが、撮影された初期画像には、回転中心にアーティファクト(疑似画像)が現れる。そのアーティファクトを除くため、観察領域は撮影領域全てを用いず、撮影領域のほぼ半分の $4.5 \times 2.6 \times 10\text{mm}$ の領域とした。

## 3. 試験結果及び考察

### 3.1 機械的性質

表1に、引張強さ、伸び、硬さ値を示す。HIP処理材は鑄造材と比較して引張強さ、硬さの向上がみられたが、伸びは減少した。強度向上の理由として、欠陥抑制、HIP処理時の高温熱処理によるマトリックスの溶質と濃度の向上(鑄造材よりも長時間溶体化処理を施されたことになるため)による析出硬化の促進が考えられる。を検証するため、マイクロビッカース硬度計で空隙欠陥の影響を受けない $\alpha$ デントライト相の硬度を測定した。その結果、 $\alpha$ デントライト相の硬度は、HIP処理材は134HV、鑄造材は102HVとHIP処理材の値が大きかった。

表1 機械的性質

	引張強さ ( $\text{N/mm}^2$ )	伸び (%)	硬さ (HRB)
鑄造材	223	2.9	63.3
	228	2.7	62.7
HIP処理材	287	0.9	70.7
	266	0.5	72.9

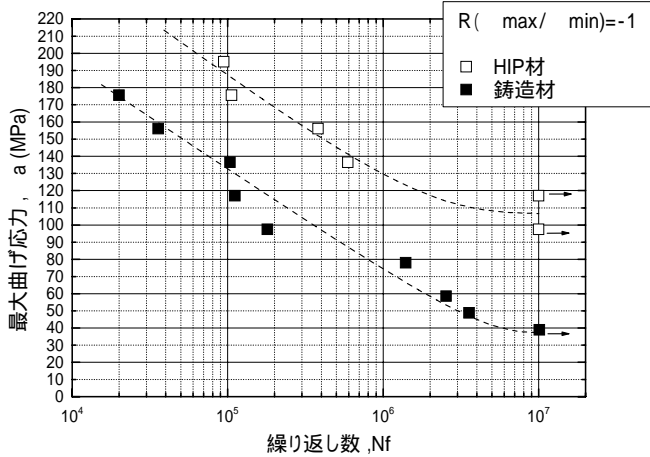


図3 回転曲げ疲労試験による疲労強度

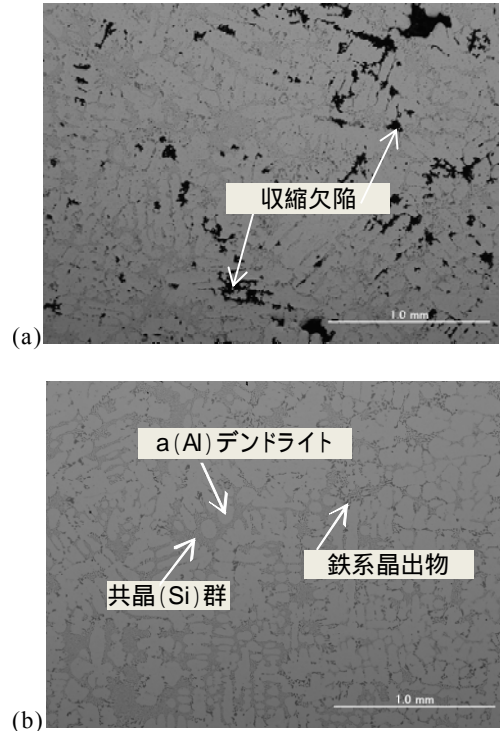


図5 光学顕微鏡組織写真

(a)鑄造材 (b)HIP処理材

結果を図4に示す。(a)鑄造材は、破壊起点部、及び破断面に収縮欠陥がみられるものが多数存在した。それに対し、(b)HIP処理材では、表面付近の収縮欠陥が観察される例はほとんどなく、表面、もしくは杉山ら<sup>3)</sup>が報告する共晶Si群を破壊起点としているものと考えられる。

### 3.2 欠陥の観察

図5に、鑄造材、HIP処理材の金属顕微鏡組織写真を示す。金属顕微鏡写真には、白色のコントラストとしてみられる $\alpha$ (Al)デンドライト、灰色のコントラストとして共晶(Si)群及び若干それより濃い灰色のコントラストとして鉄系晶出物が観察される。共晶(Si)をさらに高倍率で観察したところ、両共試材において、共晶SiがNaの改良処理により丸みを帯びて微細化されていることが確認できた。

また、(a)鑄造材には、黒色のコントラストとしてみられる微細な空隙欠陥が多数観察されるのに対し、(b)HIP処理材では、空隙欠陥はほとんど観察されなかった。空隙欠陥の形状は、デンドライト間の隙間を埋める形で存在しているため、球形状を呈して発生するガス欠陥とは異なる収縮欠陥であると確認できた。

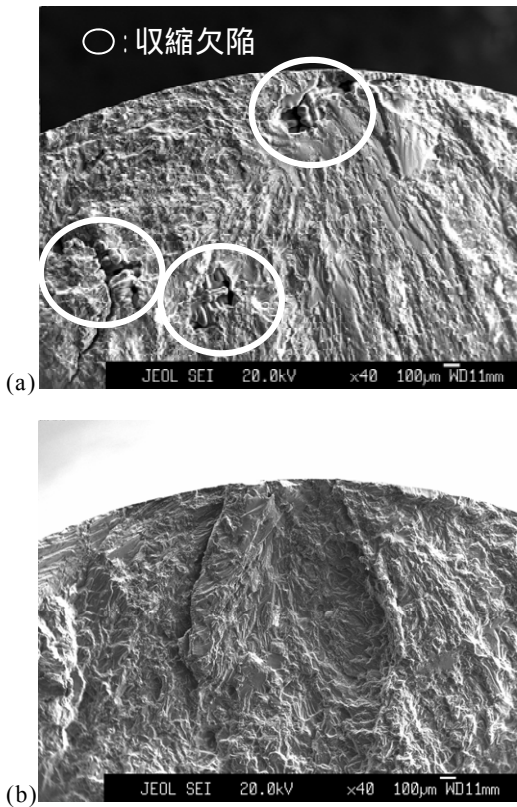


図4 破壊起点部のSEM観察

(a)鑄造材 (b)HIP処理材

硬度上昇の理由にHIP処理時の高温熱処理による時効硬化促進の影響が考えられるが、詳細を把握するにはマトリクス中の析出物の分布を確認する必要がある。次に、回転曲げ疲労試験の結果を図3に示す。HIP処理材は鑄造材と比較して、疲労限度が約70MPa改善されていた。さらに、試験片の破断面のSEM観察

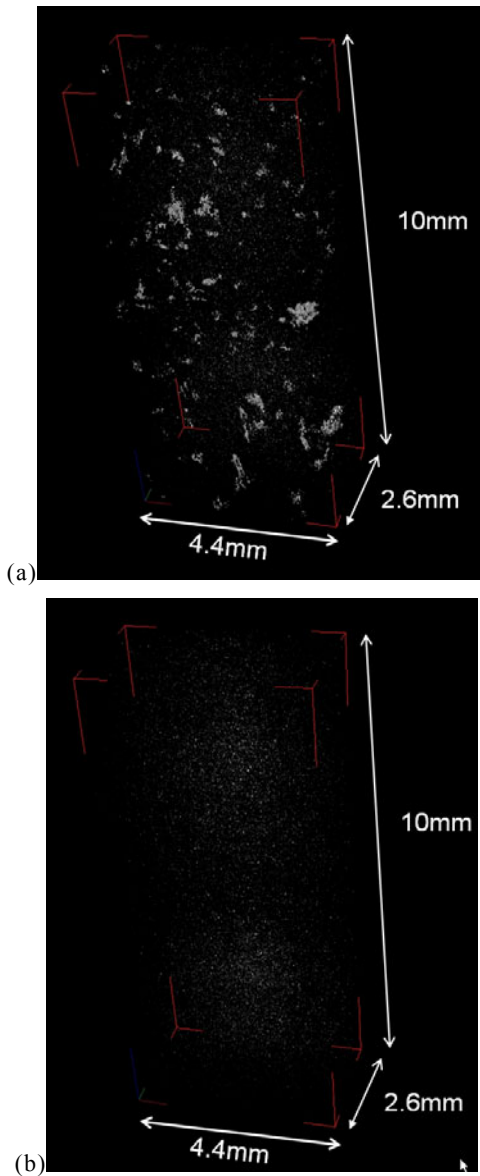


図6 X線CT像 (a)鋳造材 (b)HIP処理材

さらに、これら金属組織写真を用い、DAS（デンドライト二次アーム間隔）の測定を行った。一般的に、DASが微細化するほど疲労特性が向上することが知られているが<sup>1)</sup>、今回の両共試材に関しては、いずれのDASも、 $50\mu\text{m}\pm 5\mu\text{m}$ 以内とほぼ同じであることから、両材を疲労強度で比較する上で、DASの影響は少ないと考えられる。

また、図6は(a)鋳造材(b)HIP処理材のX線CT像である。(a)鋳造材において、白いコントラストで収縮欠陥が観察領域全体でみられた。収縮欠陥は、空隙が連結し、かつ、デンドライト間隔の形状を反映した鋭利

な形状で三次元的に観察された。本研究で用いたCTの画素（分解能）は $10\mu\text{m}$ 程度であり、それ以下の大きさの微小欠陥は、検出限界を下まわるためコントラストとして確認できないと考えられるが、(b)のHIP処理材に関しては、明白な収縮欠陥を示すコントラストが確認できないことから、欠陥が抑制されていることが明らかとなった。

#### 4. 結 言

アルミニウム合金鋳物AC4Bについて、HIP処理による疲労強度改善効果を金属組織中の欠陥根絶の観察により検討した結果以下のことがわかった。

- (1)HIP処理により疲労強度が大幅に改善される。
- (2)疲労試験片の破壊起点部を観察した結果、鋳造材は、収縮欠陥が破壊起点部に確認されたのに対し、HIP処理材では観察されない。
- (3)X線CT装置により試験片内部収縮欠陥を観察したところ、デンドライト間隔の形状を呈した収縮欠陥の三次元的形状が観察できた。また、HIP処理材は収縮欠陥が観察領域全体にわたって抑制されている。

#### 謝 辞

本研究を遂行するに当たり、貴重なサンプルを提供頂きました谷田合金(株)の皆様へ感謝します。

#### 参考文献

- 1) 小林俊郎編著。「アルミニウム合金の強度」. 内田老鶴圃, p.195.
- 2) 真鍋康夫, 小舟恵生, 米田慎, 藤川隆男. “アルミ専用HIP処理装置の開発”. 神戸製鋼技法, 2004, vol.54, No.3, p.73.
- 3) 杉山好弘, 水島秀和. アルミニウム合金AC4CHの疲労強度に及ぼす欠陥の影響と疲労限度評価. 鋳造工学. 1996, 第68巻, 2号, p.118.
- 4) Wang, Q.G., Apelian, D., Lados, D.A.. Fatigue behavior of A356-T6 aluminum cast alloys Part . Effect of casting defects. Journal of Light Metals, 2001, 1, p.73-78.
- 5) 藤井正司. X線透過法とCTによる内部検査. 検査技術10月号, 2007, p.62-69.