

μ CT による鋳造アルミニウム合金の内在欠陥調査と 応力拡大係数による定量的評価

沖縄高専 ○政木 清孝 沖縄高専 當山 雄一郎 (株)東芝 佐野 雄二
(株)東芝 久保 達也 JASRI 梶原 堅太郎 電通大 越智 保雄

Investigation of casting defect by μ CT technique with synchrotron radiation
and evaluation of fatigue fracture by stress intensity factor on Casting Aluminum alloy

Kiyotaka MASAKI, Yuichiro TOYAMA, Yuji SANO,
Tatsuya KUBO, Kentaro KAJIWARA and Yasuo OCHI

1 緒 言

鋳造アルミニウム合金の疲労特性は、材料中に存在する鋳造欠陥の位置、形状などに大きく依存する。その鋳造欠陥の影響については、一般に荷重軸方向に対する鋳造欠陥の投影面積の平方根を代表寸法として算出される応力拡大係数によって評価されてきた⁽¹⁾。しかし従来では、疲労破面や組織観察で露出した鋳造欠陥の形状以外の情報を容易に得ることができなかったことから、疲労試験前に材料内部に存在する三次元形状の鋳造欠陥の影響を評価することは困難であった。しかし近年、X線を用いた μ CTの普及にともなって、アルミニウム合金内部の鋳造欠陥を、非破壊で三次元的に測定することが可能となった。そこで本研究では、疲労試験実施前に μ CTによって鋳造欠陥の位置、寸法を調査し、疲労特性に与える影響を応力拡大係数によって予測・検討した。

2 供試材および実験方法

2.1 供試材および試験片 供試材は Al-Si-Mg 系鋳造アルミニウム合金 AC4CH である。鋳造欠陥の発生を防止するような溶湯処理などは施さず、金型を用いた通常の重力鋳造にて素材の舟形を作成した。舟形を T6 処理した後、Fig. 1 に示す最小部直径 7mm の単純な砂時計型試験片を作成した。その際、舟形下面からの高さ 30mm の位置と、試験片の中心軸がほぼ一致するようにした。

2.2 μ CT による鋳造欠陥の観察 μ CT による鋳造欠陥の観察は、大型放射光施設 SPring-8 の BL19B2 (第1ハッチ)を利用した。観察体系を Fig. 2 に示す。X線エネルギーは 28keV、試験片と検出器 (冷却 CCD カメラ: 画素数 1024×1024) の距離は 800mm とした。実効的なピクセルサイズは約 2.85 μ m/pixel である。透過データは 0~180 度まで 0.5 度ごとに、積算時間 2 秒にて取得した。画像

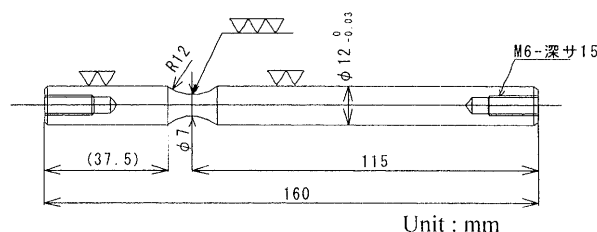


Fig. 1 Shape of the test specimen.

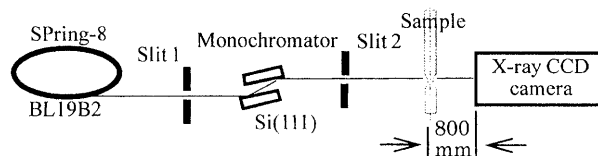


Fig. 2 Experimental setup for μ CT at SPring-8.

再構成にはフィルタード・バックプロジェクションアルゴリズムを使用した。なお、観察対象は試験片の最小断面位置を中心とする厚さ約 4mm の領域とした。

2.3 レーザピーニング処理 μ CT により鋳造欠陥を調査した後、試験片中央部にはレーザピーニング処理 (LP 処理) を施した。試験片に圧縮残留応力を付与し、表面からのき裂発生を抑制することが目的である。LP 処理条件は、Table 1 に示す過去の研究と同一とした⁽²⁾。この LP 処理条件によって生じる圧縮残留応力分布については、過去の研究結果から表面近傍で 100MPa、1mm 程度内部ではほぼ 0MPa となる直線分布と仮定した⁽²⁾。

2.4 疲労試験 鋳造欠陥からのき裂発生の確認には、回転曲げ疲労試験を利用した。鋳造欠陥のほとんど存在しない LP 処理した AC4CH-T6 材の疲労限度 160MPa を基準応力として⁽²⁾、160MPa、180MPa、200MPa の 3 応力のいずれかの応力振幅にて実施した。疲労試験には、著者らの開発した二連式小型片持ち回転曲げ疲労試験機 (3000rpm) を使用した⁽³⁾。

3 実験結果および考察

3.1 μ CT による鋳造欠陥の観察と応力拡大係数の推測 材料中の鋳造欠陥を寸上のルートエリアパラメータにより評価する際には、荷重軸方向への投影面積を基準として用いるため、試験片を軸方向から透過して鋳造欠陥を可視化した。可視化像の例を Fig. 3 に示す。試験片中心付近のリング状の陰は「ring artifact」であり欠陥ではない。基地組織中に存在する黒点が欠陥であるが、欠陥の存在パターンには、表面に露出する場合 (Fig. 3 中の A)、表面近傍に存在する場合 (同 B)、内部に存在する場合

Table 1 Condition of laser peening treatment.

Pulse energy	Spot diameter	Pulse number density
100 [mJ]	0.6 [mm]	27.3 [pulse/mm ²]

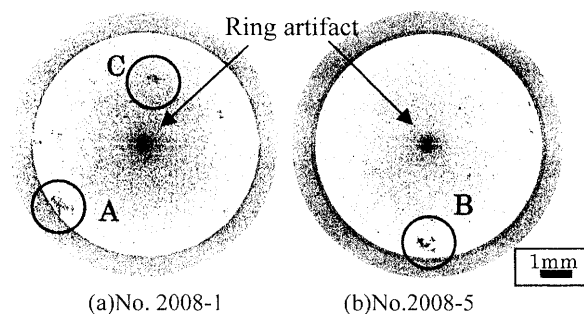


Fig. 3 Example of casting defects in the transmission image

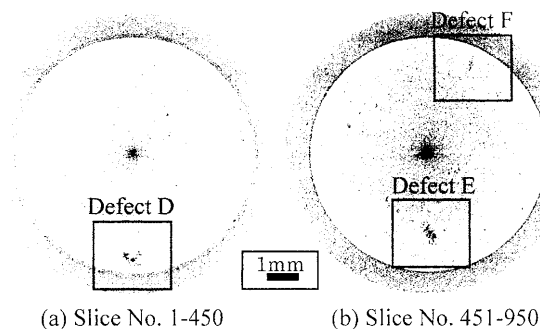
合(同C)の3通りが確認できる。20本の試験片について、鑄造欠陥の大きさ、位置を調査した後、試験片内部に比較的大きな鑄造欠陥を有する試験片を選別し、LP処理を施工した後に疲労試験を行った。

3.2 応力拡大係数の推測と疲労試験 鑄造欠陥の応力拡大係数は以下の村上等の式により推測するが、鑄造欠陥の面積(area)を欠陥の外周を包絡曲線で囲んだ面積として定義した。

$$K_{I_{max}} = F_{loc} \sigma_0 \sqrt{\pi \sqrt{\text{area}}}$$

ここで、 F_{loc} は欠陥が表面に露出・もしくは接する場合に0.65、内部に存在する場合に0.50をとる。 σ_0 は計算位置における実応力であり、回転曲げ疲労試験時の負荷応力勾配のほか、レーザピーニング処理による残留応力も考慮して計算した。このとき、実応力が降伏応力(230MPa)を超えた場合には、超えた値だけ残留応力が減衰するとした。また処理に伴う表面近傍の塑性変形によって鑄造欠陥寸法が縮小することが知られているが、本研究では初期寸法を対象とした。試験片 No.2008-5 に関する応力拡大係数の計算結果例を Fig.4 に示す。過去の研究から、得られた応力拡大係数が $1.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ を超えると、き裂の発生が予想される⁽³⁾。

3.3 疲労破面と破壊起点 試験片 No.2008-5 の疲労破面のマクロ写真を Fig. 5 に示す。欠陥の応力拡大係数が比較的大きかったため、き裂の発生が予想されたが、図中矢印付近より発生した表面き裂が主き裂となって疲労破断している。破面を SEM により観察したところ、Fig.6(a)に示すように線状の鑄造欠陥「F」が確認された。



	D	E	F
Defect			
Area [μm^2]	2.68×10^5	2.42×10^5	7.92×10^4
$K_{I_{max}}$ [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$]	3.14	2.60	2.07

Fig.4 Example of stress intensity factor estimation of defects. (Specimen No.2008-5)

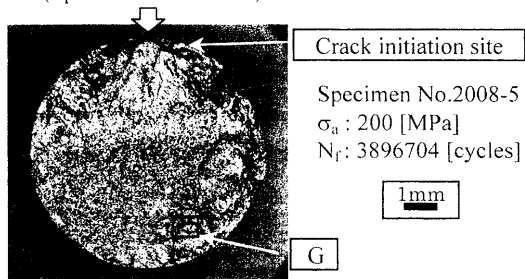


Fig.5 Macro image of fracture surface.

しかし、鑄造欠陥を起点として疲労き裂が発生したのではなく、破面上に露出したものであった。そのほか Fig. 4 中の鑄造欠陥「E」が存在しているはずの領域では (Fig.5 中 G の部分)、Fig. 6(b)に示すように擬へき壊破面が観察され、大きな鑄造欠陥は観察されなかった。しかし結晶粒内に小さなボイドが多数観察された。

μCT によって観察された鑄造欠陥の応力拡大係数がき裂発生限界以上であるにもかかわらず、き裂発生起点とならなかったのは、小さなボイドの集合体であったためと考えられる。鑄造欠陥「D」および「F」について μCT によって三次元的に調査した結果が Fig. 7, Fig. 8 である。小さなボイド状の欠陥が試験片軸方向へ分散しており、荷重軸方向への投影面積を基準とした応力拡大係数評価は、必ずしも的確ではないことが分かる。安全側に応力拡大係数を見積っており実用上は問題ないが、小さな欠陥が集合しているような場合の応力拡大係数については、今後検討の必要があることがわかった。

謝辞

本研究は、財団法人高輝度光科学研究センター大型放射光施設の産業用ビームラインで実施した課題番号 2007B1954, 2008A1887 の成果の一部であり、一部、科学研究費若手(B)の援助を受けた。関係者に謝意を表す。

結言・参考文献 省略

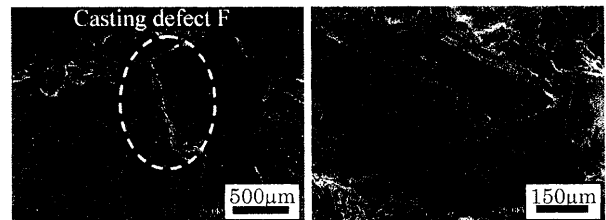


Fig.6 Fracture surface observed by SEM. (Specimen No.2008-5)

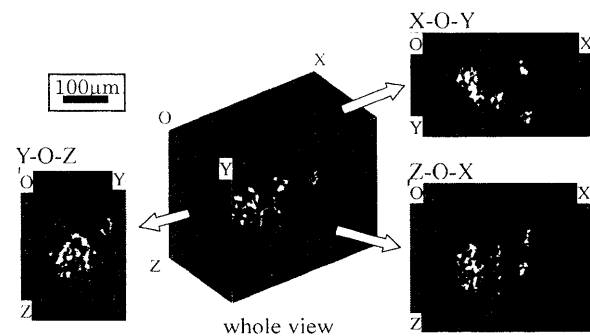


Fig.7 3D-image of the defect D in Fig.4

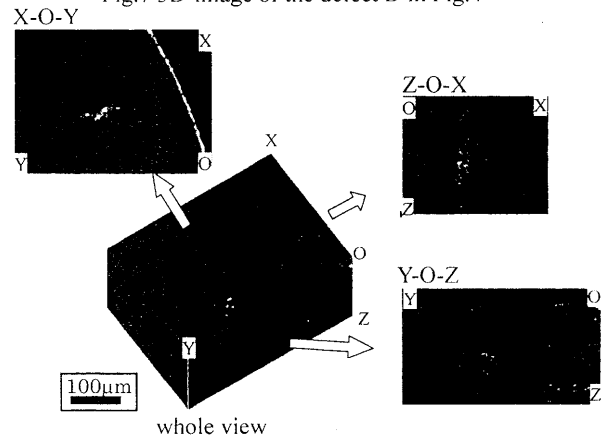


Fig.8 3D-image of the defect F in Fig.4