

アルミ複合材料の摩擦条件下におけるき裂発生メカニズムの解明

Strength Evaluation of Aluminium Cast Alloy Locally Reinforced by SiC Particles and Al₂O₃ Whiskers and Its Fractography

荒居 善雄^{1*}

Yoshio ARAI¹

1 埼玉大学大学院理工学研究科

1 School of Science and Engineering, Saitama University

Abstract

In this paper, fracture mechanisms under monotonic and cyclic load and its stress distribution of an aluminum cast alloy locally reinforced by SiC particles and Al₂O₃ whiskers are investigated experimentally and numerically. The material is monotonically and cyclically deformed to failure at room temperature. The fracture origin and the fracture path are investigated on the fracture surfaces. The fracture occurs in the reinforced part under both monotonic and cyclic loads. SEM analysis of the fracture surface shows that the fatigue fracture is controlled by the fracture of coarse Al₂O₃ whiskers. On the other hand the static fracture (monotonic loading) shows that the fracture mechanism is the combination of reinforcing particle fracture and interfacial debonding between reinforcing ceramics and matrix metal. The stress distributions around the boundary between the reinforced part and unreinforced part are calculated based on an inclusion array model considering the microscopic inhomogeneous effects. Both the experimental results and the finite element simulation results show that the critical location for fracture is changed by the external stress level which controls the local stress distribution through plastic constraint between reinforcing particle and matrix alloy.

Keywords: Metal Matrix Composites (MMCs), Fracture, Fatigue, Fractography, Locally Reinforced Material

1. 緒 言

低密度の金属をマトリックスに用いセラミックスの繊維、ウイスカあるいは粒子を強化材とした金属基複合材料(MMC)は比剛性、比強度が高く、耐磨耗性に加えて耐熱性も優れている¹⁾。本研究では、MMC(SiC粒子とAl₂O₃ウイスカ強化)/Al(アルミニウム鑄造合金)接合材の静的破壊試験および疲労試験を行うとともに、破断面の解析と成分分析を行い、その破壊機構を明らかにした。さらに、MMC部とアルミ合金部の境界部近傍の破壊挙動を解明する目的で、強化材の存在を考慮した介在物配列モデルについて弾塑性応力解析を行い、その最大応力発生位置および歪振幅を検討した。

2. 実験方法

SiC/Al₂O₃プリフォームを部分的に配置した高圧金型鑄造(圧力100MPa)で円板を製造した後、熱処理としてT7処理を行った。円板より短冊形状の試験片を切り出した。セラミックによる強化層(MMC部)厚さは約7mmであり、MMC部とアルミ合金部の巨視的境界は四点曲げ(内スパン10mm, 外スパン20mm, 対称荷重)内スパン内に位置するが、その中央から3mm程ずれている。界面部の光学顕微鏡写真を図1に示す。MMC部の母材はアルミ合金部の材料そのものであり、微視的にはMMC部とアルミ合金部の境界面は存在しない。SiC粒子の平均粒径は約23 μm, Al₂O₃ウイスカの平均長さは約33 μm, 平均直径は約2 μm, Al合金の平均粒径は約48 μmであった。図1(b)に一例を破線で示すように、SiC粒子とAl₂O₃ウイスカはクラスターを形成しており、その平均直径は約90 μmであった。

(* 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

電話 : 048-858-3438 FAX : 048-856-2577

E-mail: yarai@mech.saitama-u.ac.jp)

単調曲げ試験は四点曲げで、荷重点の変位速度 0.0025 mm/s 一定で破断まで負荷した。最大荷重から公称曲げ応力を算出し、曲げ強度とした。疲労試験は荷重制御で行い、応力比は0.1、周波数は 1 および10Hz である。試験片表面を光学顕微鏡で、破面を走査型電子顕微鏡で観察するとともに、X線による成分分析(EDX)を行った。特に、マッチング破面の様相と成分を調べ、破壊機構を考察した。破面を構成するアルミ合金のディンプル、SiC 粒子割れ、SiC 粒子/母材界面はく離、Al₂O₃ ウィスカ割れ、Al₂O₃ ウィスカ/母材界面はく離の破面率を、引張側表面から深さ50 μm の範囲を試験片全幅に渡って調べ、その平均値を算出した。

3. 実験結果および考察

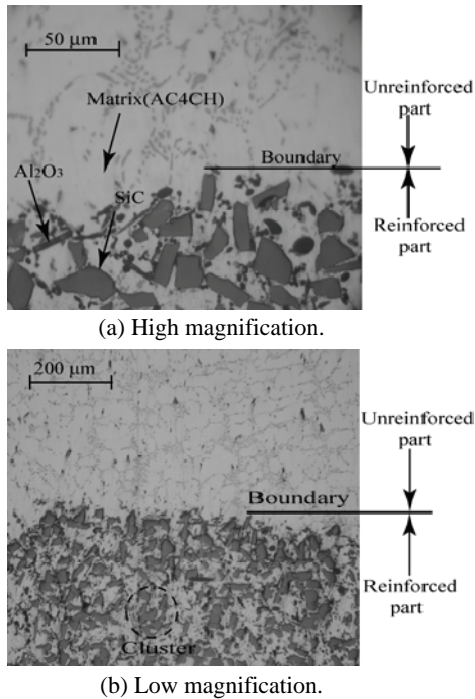


Fig. 1 Optical microscope photograph of the specimen around the boundary between reinforced part and unreinforced part.

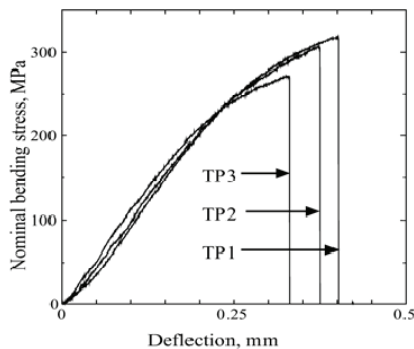


Fig. 2 Nominal bending stress versus deflection curves under monotonic loading.

単調曲げ試験における公称応力-荷重点変位曲線を図2に示す。応力が200MPa以上において公称応力-荷重点変位曲線に非線形性が顕著に現れている。平均曲げ強度は298MPaであった。MMC/Al接合材の単調曲げ試験による破壊後の引張応力側表面の巨視的様相を図3に、破壊起点MMC/Al境界の距離を表3に示す。破壊起点はAlとMMCの境界部の一つないし二つ目のSiC 粒子割れ、またはSiC粒子/母材界面であった。図4に単調曲げ試験の破面(図3の表面写真に対応した位置)のマッチング写真を示す。破面上には、アルミ合金のディンプル破面に加えて、SiC粒子割れ、SiC粒子/母材界面はく離、Al₂O₃ ウィスカ/母材界面はく離破面が観察された。破面のEDX分析において、図4のPの矢印ではSiと少量のAlが検出され、SiC粒子、Mの矢印ではAlと少量のSiが検出され、Al母材、Wの矢印ではAlが検出され、Al₂O₃ウィスカと、それぞれ考えられる。そこで、破面のマッチング写真上でPとPのペアはSiC粒子割れ、PとMのペアはSiC粒子/母材界面はく離、WとMのペアはAl₂O₃ウィスカ/母材界面はく離と、それぞれ判断される。破面率を表4に示す。Monotonic はTP1, 2, 3の結果の平均値、Cyclic は後述する疲労試験のCTP4とCTP5の平均値である。単調曲げ試験の破面では、SiC粒子割れ、SiC 粒子/母材界面はく離、Al₂O₃ウィスカ/母材界面はく離の破面率がほぼ同率であった。すなわち、強化粒子と母材の界面はく離のみならず、SiC粒子割れも生じており、強化粒子内に高い応力が発生していることが考えられる。単調曲げ負荷時に、強化粒子は弾性変形し、母材は弾塑性変形する。強化粒子と母材の間の塑性拘束が強化粒子内に高い応力を生じさせていると考えられる。

疲労試験におけるS-N線図を図5に示す。水平の矢印は10⁷回で打ち切った試験結果を示す。疲労破壊は単調曲げ強度の約1/2の繰返し応力における公称応力の最大値(以下σ_{max}と略す)まで生じている。表5に示すように、σ_{max}が低く、母材が弾性変形する状態においては(表5のCTP4, 5, 6, 7)破壊起点はMMCとAlの境界部からはるか遠いMMC内(0.28mm)であった。単調曲げ試験においては、MMCとAlの境界部の一つないし二つ目のSiC 粒子で破壊した。

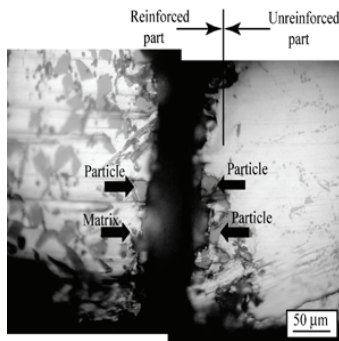


Fig. 3 Matching surface view of fractured specimen (under monotonic loading, $\sigma_f = 272$ MPa).

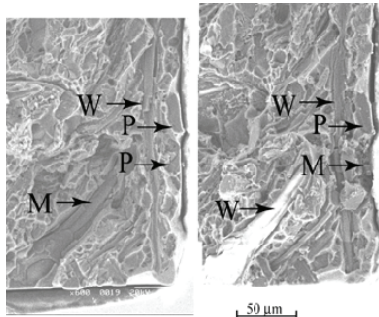


Fig. 4 Matching fracture surface of locally reinforced material under monotonic loading, $\sigma_f = 272$ MPa.

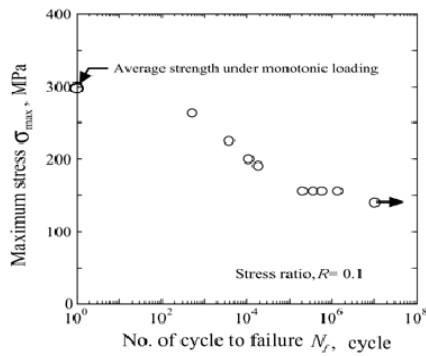


Fig. 5 Stress versus fatigue life behavior (stress ratio, $R=0.1$).

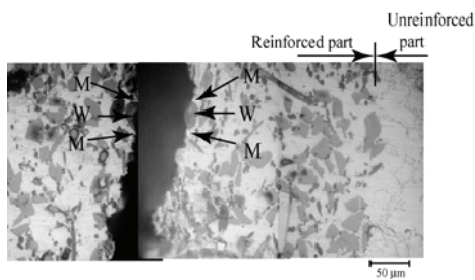


Fig. 6 Matching surface view of fatigue fractured specimen under cyclic loading, maximum stress $\sigma_{\max} = 156$ MPa, $N_f = 5.73 \times 10^5$.

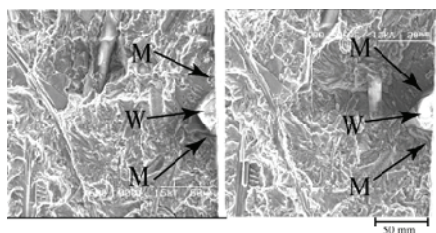


Fig. 7 Matching fracture surface after fatigue fracture, $\sigma_{\max} = 156$ MPa, $N_f = 5.73 \times 10^5$.

疲労試験においても、その σ_{\max} が高くMMC内の母材の塑性歪が大きい場合、破壊起点はMMCとAlの境界部に極めて近い(表5のCTP1参照)。単調試験と疲労試験の破壊起点の相違は、異なる変形様式(塑性変形/弾性変形)が原因と考えられる。MMC/Al接合材の疲労試験による破壊後の引張応力側表面の巨視的様相を図6に、疲労試験の破面のマッチング写真を図7に示す。図6と図7は対応した表面と破面である。図6と図7において、破面のEDX分析結果を示すWとMの矢印の意味は単調曲げ試験の場合と同様である。WとWのペアは Al_2O_3 ウィスカの割れ、MとMのペアはAlの疲労破面と判断される。すなわち、疲労き裂は粗大 Al_2O_3 ウィスカの割れから発生し、母材中を進展したと考えられる。疲労破壊の破面率を表4のCyclicの行に示す。疲労破壊においては、SiC粒子/母材界面はく離、 Al_2O_3 ウィスカ/母材界面はく離の破面が支配的であった。単調曲げ試験と疲労試験では破面率に明確な差が現れた。単調曲げ試験では強化粒子と母材の界面はく離のみならず、SiC粒子割れも生じたが、疲労試験ではSiC粒子割れは極めてまれであった。

MMC/Al接合材の破壊挙動を考察する目的で、2次元弾塑性有限要素解析を行った。解析は平面歪状態を仮定した。介在物配列モデルにおけるMMC部は、円形介在物を含む単位セルを格子の上に配列したものとなっている。 $x=0$ 、以外の三つの境界($y = \pm L_y/2, x = h_x$)に、均質材同志の接合材モデルの計算結果の対応する位置における変位を与えた。アルミ合金およびMMCの流動応力と塑性歪の関係を表6に示す。介在物配列モデルは強化粒子の存在を円形介在物でモデル化したものであり、供試材はSiC粒子と Al_2O_3 の二種類の強化粒子を含む。しかし、本研究では試みの第一歩として、一種類の弾性係数を有する介在物を想定し、その円形介在物の弾性係数には、SiCの弾性係数を用いた。均質材同志の接合材モデルのMMC部の弾性係数は、同様の円形介在物を含む単位セルが二次元的に無限に配列するモデルの一軸引張りの解析結果から計算した。セラミック粒子は弾性体と仮定し、粒子と母材界面は完全接着とした。数値計算に用いた寸法を表7に示す。8節点アイソパラメトリック要素と3節点歪要素を用いた。要素寸法を変え、計算結果の収束を確認した。最小要素寸法は、均質材同志の接合材モデルの場合 $25 \mu m \times 11 \mu m$ 、介在物配列モデルの場合 $2.3 \mu m \times 4.6 \mu m$ であった。考察の対象とする力学因子として、相当応力や主応力も考えられるが、応力成分の内、最も

支配的なy方向垂直応力を選んだ。疲労試験結果の考察の為に、引張側表面近傍の母材の全歪変化に着目し、負荷に引き続く除荷過程の解析を行った。

単調曲げ試験において試験片が破断した、公称曲げ応力300MPa 下の介在物配列モデルにおける引張側表面に隣接した介在物列近傍の σ_y の分布を図8に示す。また、疲労試験における最も低い σ_{max} である公称曲げ応力156MPa 下の同様の分布を図9に示す。図8 および図9 は、介在物内の最大応力(四角印) と介在物/母材界面の最大応力(丸印) の、介在物ごとのy 方向分布を示す。図8 より公称曲げ応力が300MPa の場合には、最大応力(図9 の345MPa) はMMC 部とアルミ合金部の境界の一つ目の介在物内に発生することがわかる。この最大応力は介在物と母材の塑性拘束によって生じ、粒子割れの原因となると考えられる。この計算結果は、単調曲げ試験においてMMC とAl の境界部の一つないし二つ目のSiC 粒子で破壊が発生すること、および強化粒子と母材の界面はく離のみならず、SiC 粒子割れが生じることと対応している。一方、図9 に示すとおり、公称曲げ応力が156MPa の場合には、最大応力(図9 の197MPa) は介在物と母材の界面に生じ、疲労試験の破面において強化粒子と母材の界面はく離が支配的であることと対応している。

疲労試験における最も低い σ_{max} である公称曲げ応力156MPa における最大応力時と完全除荷時の全歪のy 方向分布を図10 に示す。公称曲げ応力が156MPa と低く、介在物の強化作用により母材の大部分が弾性変形する状態において、介在物配列モデルは、MMC部の歪振幅の方がアルミ合金部のそれよりも大きいことを予測できる。

4. 結 言

本研究では、部分的にSiC 粒子とAl₂O₃ ウィスカで強化されたアルミニウム鋳造合金の静的破壊試験および疲労試験を行うとともに、破断面の解析と成分分析を行い、その破壊機構を明らかにした。MMC部とアルミ合金部の境界部近傍の破壊挙動を解明する目的で、強化材の存在を考慮した介在物配列モデルについて弾塑性応力解析を行い、その最大応力発生位置および歪振幅を検討した。得られた結果を要約すれば、以下のとおりである。

- (1) 単調曲げ荷重下および繰返し曲げ荷重下の両方において、破壊はMMC 内で生じる。
- (2) 疲労試験の破面においては、強化粒子と母材の界面はく離が支配的であり、単調曲げ試験では、強化粒子と母材の界面はく離のみならず、SiC 粒子割れも生じる。強化材の存在を考慮した介在物配列モデルは、

最大応力の発生位置として、公称曲げ応力が低い場合には介在物と母材の界面、公称曲げ応力が高い場合には介在物内に発生することを予測できる。

- (3) 疲労破壊は、最大の公称曲げ応力が低く、母材が弾性変形する状態においては、MMC とAl の境界部からはるか遠いMMC 内で生じ、単調曲げ破壊は、MMC とAl の境界部の一番目又は二番目のSiC 粒子の位置で生じる。単調負荷における公称曲げ応力が高い場合には、最大応力はMMC 部とアルミ合金部の境界の一つ目の介在物内に発生し、繰返し負荷における歪振幅は、MMC 部の方がアルミ合金部よりも大きいことを、介在物配列モデルは予測できる。

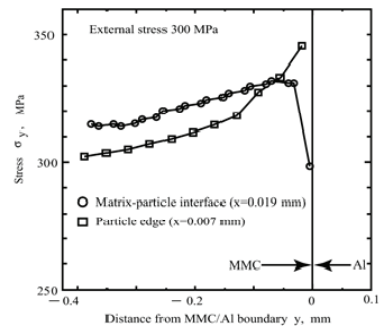


Fig. 8 Stress distribution along y direction of inclusion array model under nominal bending stress 300 MPa.

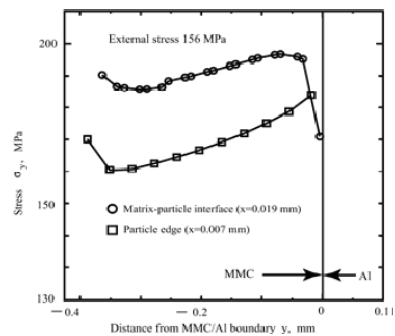


Fig. 9 Stress distribution along y direction of inclusion array model under nominal bending stress 156 MPa.

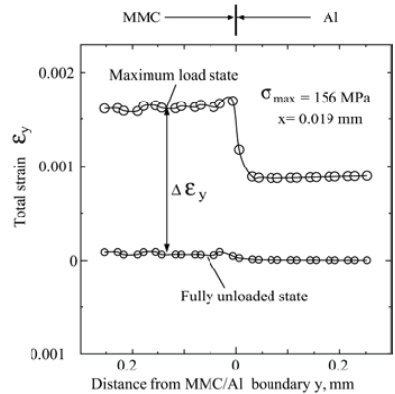


Fig. 10 Distribution of total strain in matrix along normal to the boundary of inclusion array model under cyclic loading at maximum stress 156 MPa.