

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560090

研究課題名(和文) 表面改質処理による自動車用構造部材の疲労強度向上と軽量化に関する研究

研究課題名(英文) Fatigue Strength Characteristics Improvement and Weight Reduction of Structural Material for Automobile by Surface Reforming Treatment

研究代表者

松村 隆 (MATSUMURA, TAKASHI)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：00251710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：自動車用構造部材として将来を嘱望されている軽合金を対象に、超高サイクル疲労強度特性、表面改質処理による疲労強度特性、変動荷重による疲労強度特性を調べて、それぞれのメカニズムを把握し疲労安全性の向上を目指した。その結果、軽合金(アルミニウム合金、マグネシウム合金)は、超高サイクル領域で疲労破壊を起こすこと、表面改質処理を施すことよって疲労寿命・疲労強度は未処理材に比べて向上する。しかし、表面改質処理によって表面が粗くなる、または超高サイクル領域で内部破壊を起こすようになると疲労強度特性は改善しない。二段多重変動荷重疲労試験結果から、全ての試験で累積損傷値は1より大きくなった。

研究成果の概要(英文)：The light alloys are promising as future structural material for the automobile. In this study, the fatigue strength characteristics in the very high cycle area, by the surface reforming treatments and by the variable amplitude are investigated. The each mechanism was grasped and the safety improvement in the fatigue strength characteristics is a purpose. From the results of this study, the fatigue strength of light alloys (Al alloy, Mg alloy) is improved in comparison with untreated test specimens and the light alloys was fractured by the fatigue in the very high cycle area. But, in the case that the surface of the specimen developed the roughness or the crack origin developed the inside in the very high cycle life area by the surface reforming treatments, the fatigue strength characteristics are not improved. From the results of the fatigue test by repeated two-step loading, in the testing conditions of this study, the linear cumulative damage rules of all tests were larger than one.

研究分野：機械工学

キーワード：超高サイクル疲労 表面改質処理 軽合金

1. 研究開始当初の背景

(1) 電気自動車が環境に優しい車として注目を集めているが、一回の充電での航続距離が短いことが問題となっている。そのために、リチウムイオン電池の性能向上を進めて、電気自動車の航続距離を伸ばそうとしている。電気自動車の航続距離を伸ばす他の方法として、自動車の構造部材を従来の鉄鋼材料から軽合金(アルミニウム合金、マグネシウム合金)に完全に切り換えることによって自動車の車重を軽量化することが考えられる。しかし、現状では、自動車における軽合金の使用はごく一部に限られている。そこで、軽合金を自動車構造部材に用いて軽量化を図るとともに、その疲労破壊を防止し、安全性・信頼性向上を図ることは、それらの設計、製造および使用に携わる技術者、研究者にとってきわめて重要な課題となる。

(2) 材料の疲労強度特性の調査は、一般的に、一定応力振幅で行われるが、先に取り上げた自動車は、走行中に変動荷重を受ける環境下で使用される。従って、自動車の構造部材として、軽合金を使用するためには、一定応力振幅での疲労強度・疲労き裂進展特性だけでは疲労破壊を防止し、安全性・信頼性向上させることは不可能で、変動荷重下での疲労強度特性の把握が不可欠である。

(3) 疲労強度特性の向上及び疲労き裂発生を抑制させる方法として、表面改質処理が実製品で多く行われている。そこで、自動車用構造部材として将来が囑望されている軽合金に表面改質処理を施し疲労強度特性を改善し、そのメカニズムを把握することは重要である。

2. 研究の目的

(1) 自動車用構造部材として将来を囑望されている軽合金(アルミニウム合金、マグネシウム合金)を対象に、超高サイクル疲労強度特性、表面改質処理による疲労強度特性を調査検討し、それぞれのメカニズムを調べて、疲労安全性の向上を目指す。

(2) 自動車用構造部材として将来を囑望されている軽合金(アルミニウム合金)を対象に変動荷重下での疲労強度特性を調査し、

(1)で求めた一定応力振幅条件下の疲労強度特性との比較検討を行い、変動荷重下での疲労強度特性のメカニズムを調べて、疲労安全性の向上を目指す。

3. 研究の方法

(1) 軽合金(アルミニウム合金)を供試材として、試験片表面を鏡面仕上げしたノーマル材(鏡面仕上材)、表面改質処理を施した表面改質材を用意する。片持ち回転曲げ疲労試験機、軸荷重疲労試験機を用いて一定応力振幅下で超高サイクル疲労試験を行い、疲労強度曲線(S-N曲線)を求め、疲労強度特性の向上を確認する。疲労破壊後に走査型電子顕微鏡を用いて破面観察を実施して疲労き

裂発生起点を調べる。以上より疲労強度向上ならびに疲労き裂発生・進展の抑制効果を検証する。さらに軸荷重疲労試験機を用いて変動荷重下での疲労試験を行い、疲労寿命を調べ、一定応力振幅下の疲労強度特性との比較検討を行い、変動荷重が疲労強度特性に及ぼす影響を調査する。

(2) 軽合金(マグネシウム合金)を供試材として、試験片表面を鏡面仕上げしたノーマル材(鏡面仕上材)、表面改質処理材を用意する。片持ち回転曲げ疲労試験機、軸荷重疲労試験機を用いて一定応力振幅下で超高サイクル疲労試験を行い、疲労強度曲線(S-N曲線)を求め、疲労強度特性の向上を確認する。疲労破壊後に走査型電子顕微鏡を用いて破面観察を実施して疲労き裂発生起点を調べることにより、疲労強度向上ならびに疲労き裂発生・進展の抑制効果を検証する。さらに、疲労強度特性の及ぼす湿度の影響を調査する。

4. 研究成果

(1) 供試材はアルミニウム合金 A7050 である。試験片形状寸法を図1に示す。試験片中央の切欠き部を鏡面仕上げした試験片と表面改質処理(レーザーピーニング処理)を施した試験片を用意した。

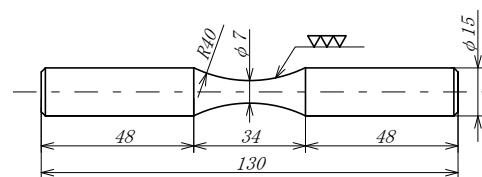


図1 試験片の形状寸法

疲労試験には油圧サーボ疲労試験機を用いて、一定応力振幅疲労試験(R=-1, 0.1)と二段多重変動荷重疲労試験(R=-1)を、周波数f=30~40Hz, 荷重制御, 室温大気中で行った。破断した試験片の破面観察を走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて行った。

一定応力振幅での疲労試験結果を図2に示す。図中の*は内部起点型破壊による破断を表す。高応力・短~中寿命域では表面改質材の疲労寿命が鏡面仕上材よりも長く、疲労寿命の向上が確認された。低応力・超高サイクル領域における疲労強度は、表面改質材よりも鏡面仕上材の方が高い結果となった。

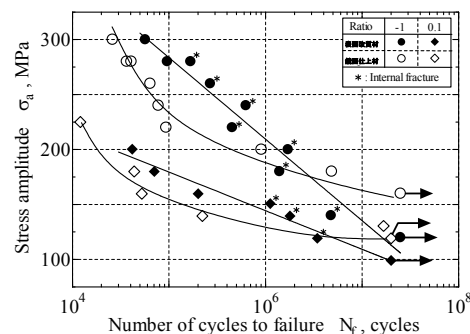
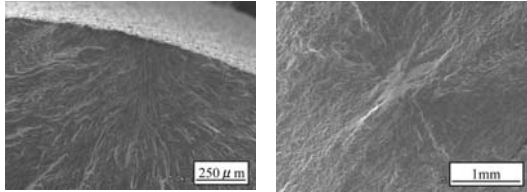


図2 S-N線図

疲労試験により破断した試験片の疲労破面を観察した例を図3に示す。観察結果より、表面起点型破壊と内部起点型破壊の2種類の破壊形態が観察された。表面起点型破壊は全ての鏡面仕上材と表面改質材の短寿命域で観察された。一方の内部起点型破壊は、図2中に*で示すように表面改質材の中寿命・超高サイクル領域で観察された。以上より、表面改質材の破壊形態は、表面起点型破壊から内部起点型破壊に遷移することが明らかとなった。



(a) 表面き裂起点型 (b)内部き裂起点型
図3 表面改質材のき裂起点観察例

鏡面仕上材の二段多重荷重疲労試験は、高応力 $\sigma_H=220\text{MPa}$ 、低応力 $\sigma_L=180\text{MPa}$ 、表面改質材の二段多重荷重疲労試験は、高応力 $\sigma_H=280\text{MPa}$ 、低応力 $\sigma_L=140\text{MPa}$ とした。 $n_H=1 \times 10^3$ 回に固定して、 n_L を変化させた。線形累積損傷則（マイナー則）を用いた累積損傷 D は、次式により計算した。

$$D = D_H + D_L = \frac{\sum n_H}{N_H} + \frac{\sum n_L}{N_L} \quad (1)$$

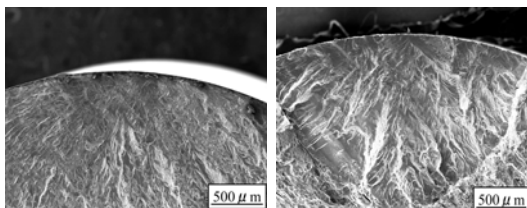
ここで、 D_H, D_L はそれぞれ σ_H, σ_L の時の累積損傷を表す。二段多重荷重疲労試験の条件と疲労試験結果を表1に示す。累積損傷値の計算結果を表2に示す。また、二段多重荷重疲労試験で破断した試験片の破断面の観察結果を図4に示す。

表1 二段多重荷重疲労試験の条件

Specimen No.	σ_H [MPa]	σ_L [MPa]	n_H [cycles]	n_L [cycles]	n_H/n_L	N_f [cycles]	Fracture origin
LP	280	140	1.0×10^3	1.0×10^4	1	3.32×10^5	Surface
PL-C-22				1.0×10^4	0.1	1.44×10^6	Surface
PL-C-23				1.0×10^5	0.01	1.05×10^7	Surface
n.p	220	180	1.0×10^3	1.0×10^4	1	1.02×10^6	Surface
PL-C-61				1.0×10^4	0.1	2.43×10^6	Surface

表2 累積損傷値の計算結果

Specimen No.	$\sum n_H$ [cycles]	$\sum n_L$ [cycles]	N_H [cycles]	N_L [cycles]	$D_H = \sum n_H / N_H$	$D_L = \sum n_L / N_L$	$D = D_H + D_L$
LP	1.66×10^3	1.66×10^3	9.60×10^4	4.77×10^6	1.73	0.03	1.76
PL-C-22	1.31×10^5	1.31×10^6			1.36	0.27	1.64
PL-C-23	1.03×10^8	1.04×10^8			1.07	2.17	3.25
n.p	5.12×10^4	5.12×10^5	9.35×10^4	4.85×10^6	5.47	0.11	5.58
PL-C-61	2.20×10^4	2.21×10^5			2.35	0.46	2.81

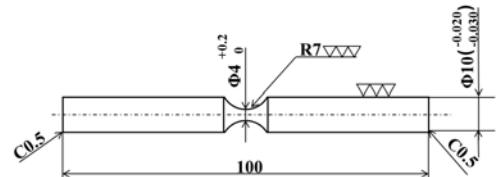


(a) 鏡面仕上材 (b) 表面改質材
図4 二段多重疲労試験のき裂起点観察例

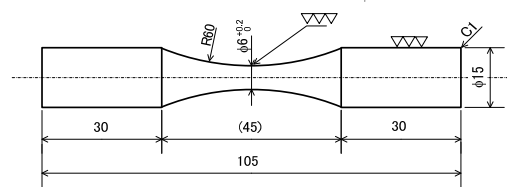
二段多重荷重疲労試験を行った結果、表面改質材では、 n_H/n_L の変化に伴い、低応力 σ_L の D_L は連動して変動したが、高応力の σ_H の D_H はほぼ一定の1.07~1.73であること、き裂起点が全て表面き裂起であったことから、低応力 σ_L は疲労寿命に及ぼす影響は相対的に小さく、高応力の σ_H の影響が大きいのではないかと考えられる。鏡面仕上材は、 n_H/n_L が $1 \rightarrow 0.1 \rightarrow 0.01$ が1/10倍ずつ減少すると、表面改質材と同様に、 D_H は減少、 D_L は増加するが明瞭な傾向は見られない。なお、き裂起点は表面改質材と同様に全て表面き裂起点であった。

(2) 供試材は鋳造アルミニウム合金ADC12である。試験片形状寸法は図5に示すように片持ち回転曲げ疲労試験片と軸荷重疲労試験片の2種類である。試験片中央の切欠き部を鏡面仕上げした試験片を用意した。

疲労試験には片持ち回転曲げ疲労試験機（応力比 $R=-1$ 、周波数 $f=3120\text{rpm}$ 、室温大気中）と油圧サーボ疲労試験機（応力比 $R=-1$ 、周波数 $f=30 \sim 50\text{Hz}$ 、荷重制御、室温大気中）を用いて、一定応力振幅と二段多重変動荷重疲労試験（ $R=-1$ ）を行った。破断した試験片の破面観察を走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて行った。



(a) 片持ち回転曲げ疲労試験片



(b) 軸力疲労試験片
図5 試験片の形状寸法

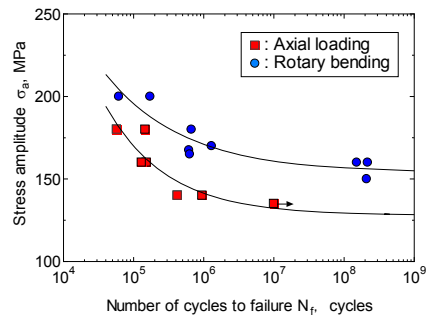
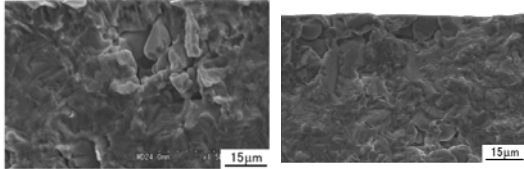


図6 S-N線図

一定応力振幅での軸力疲労試験結果と片持ち回転曲げ疲労試験結果を図6に示す。疲労試験の結果、片持ち回転曲げ疲労試験の疲労寿命に比べて、軸力疲労試験の疲労寿命の

方が短寿命になる傾向が見られ、軸力疲労試験の $N_f=1.0 \times 10^7$ 回の時間強度は、片持ち回転曲げ疲労試験の $N_f=1.0 \times 10^7$ 回の疲労強度に比べて低下した。片持ち回転曲げ疲労試験の方は、 $N_f=1.0 \times 10^8$ 回を超える超高サイクル領域での疲労破壊が観察された。

片持ち回転曲げ疲労試験と軸力疲労試験の破断面の観察結果を図7に示す。片持ち回転曲げ疲労試験、軸力疲労試験共に、き裂起点は表面、または表面極近傍の空孔であった。



(a)片持ち回転曲げ試験 (b)軸力疲労試験
図7 き裂起点観察例

鏡面仕上材の二段多重荷重疲労試験は、高応力 $\sigma_H=160\text{MPa}$ 、低応力 $\sigma_L=130, 140\text{MPa}$ とした。 $n_H=1 \times 10^3$ 回に固定して、 n_L を変化させた。線形累積損傷則（マイナー則）を用いた累積損傷 D は、(1)式により計算した。

二段多重荷重疲労試験の試験条件、試験結果、累積損傷値を表3に示す。図8に累積損傷値 D と繰返し数比 n_H/n_L の関係に示す。二段多重変動荷重疲労試験の結果、累積損傷値 D は全て1以上で、 $n_H/n_L=0.5$ の場合、 $D=1.5 \sim 2.8$ で小さく、 $n_H/n_L=0.1, 1.0$ の場合、 $D>7.2$ で大きく4本中3本が $\Sigma n_L + \Sigma n_H = 1.0 \times 10^7$ 回で打切りとなった。

表3 二段多重荷重疲労試験の結果

Specimen No.	σ_L [MPa]	σ_H [MPa]	n_H/n_L	$\Sigma n_L + \Sigma n_H$ [cycles]	Σn_L [cycles]	$D_L = \Sigma n_L / N_L$	Σn_H [cycles]	$D_H = \Sigma n_H / N_H$	$D = D_L + D_H$	$\sqrt{D} \sigma_H$ [MPa]
12	140	160	1	1.00×10^7 (打切り)	$> 5.00 \times 10^7$	> 6.11	$> 5.00 \times 10^7$	> 44.03	> 50.15	not observed
13	130	160	1	1.50×10^7	7.50×10^7	0.68	7.53×10^7	7.21	7.27	61.00
5	130	160	1	1.00×10^7 (打切り)	$> 5.00 \times 10^7$	> 0.17	$> 5.00 \times 10^7$	> 44.03	> 44.20	Unknown
16	130	160	0.5	1.07×10^7	8.90×10^7	0.03	1.77×10^7	1.56	1.59	119.67
19	130	160	0.5	1.84×10^7	1.54×10^7	0.05	3.07×10^7	2.71	2.76	56.40
18	130	160	0.1	1.00×10^7 (打切り)	$> 9.10 \times 10^7$	> 0.31	$> 9.10 \times 10^7$	> 8.01	> 8.32	not observed

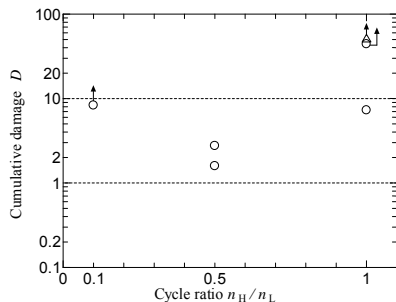
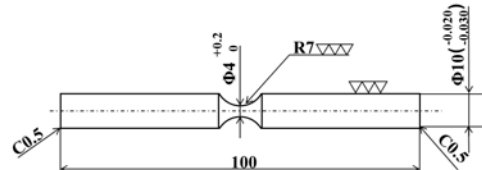


図8 累積損傷値 D と繰返し数比 n_H/n_L 関係

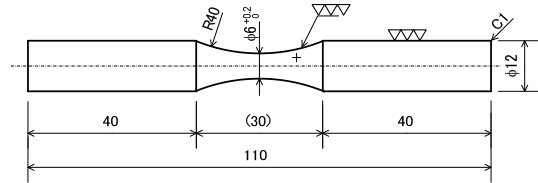
(3) 供試材はマグネシウム合金 AZ61, AZ80 である。試験片形状寸法は図9に示すように片持ち回転曲げ疲労試験片と軸荷重疲労試験片の2種類である。試験片中央の切欠き部を鏡面仕上げした試験片と表面改質処理を施した試験片を用意した。

疲労試験には片持ち回転曲げ疲労試験機（応力比 $R=-1$ 、周波数 $f=3120\text{rpm}$ 、室温大気

中）と油圧サーボ疲労試験機（応力比 $R=-1$ 、周波数 $f=30 \sim 50\text{Hz}$ 、荷重制御、室温大気中）を用いて、一定応力振幅で疲労試験を行った。破断した試験片の破面観察を走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて行った。

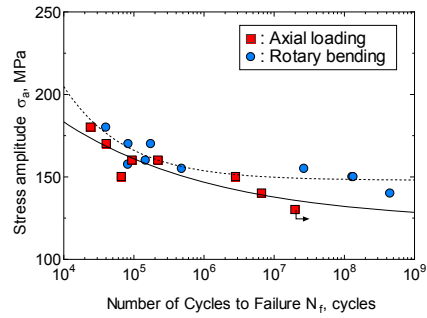


(a) 片持ち回転曲げ疲労試験片

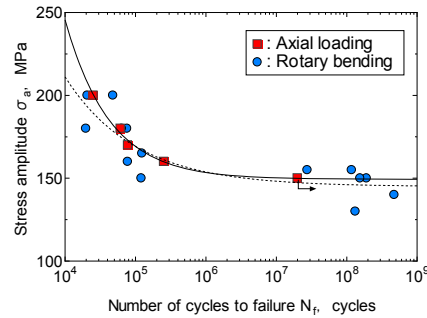


(b) 軸力疲労試験片

図9 試験片の形状寸法



(a) AZ61



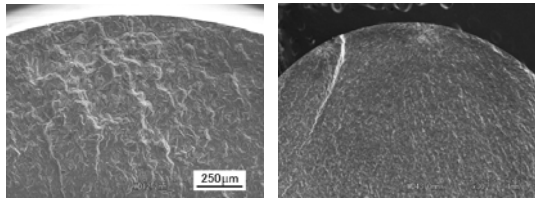
(b) AZ80

図10 S-N線図

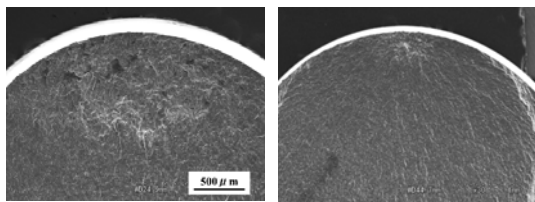
AZ61 の軸力疲労試験結果と片持ち回転曲げ疲労試験結果を図10(a)に示す。疲労寿命が $N_f=10 \times 10^5$ 回付近で、軸力疲労試験と片持ち回転曲げ疲労試験の疲労寿命がほぼ等しくなるが、それ以外の領域では、片持ち回転曲げ疲労試験の疲労寿命に比べて、軸力疲労試験の疲労寿命の方がわずかに短くなる傾向が見られた。片持ち回転曲げ疲労試験は、 $N_f=1.0 \times 10^8$ 回を超える超高サイクル領域での疲労破壊が観察された。長寿命領域では、片持ち回転曲げ疲労試験の方が軸力疲労試験よりも疲労寿命が長くなる傾向が見られた。

AZ80 の軸力疲労試験結果と片持ち回転曲げ疲労試験結果を図10(b)に示す。軸力疲労試験

験と片持ち回転曲げ疲労試験の疲労寿命がほぼ等しくなった。片持ち回転曲げ疲労試験の方は、 $N_f=1.0 \times 10^8$ 回を超える超高サイクル領域での疲労破壊が観察された。なお、長寿命領域では、片持ち回転曲げ疲労試験と軸力疲労試験の疲労寿命はほぼ等しい。



(a)片持ち回転曲げ試験 (b)軸力疲労試験
図 11 AZ61 のき裂起点観察例



(a)片持ち回転曲げ試験 (b)軸力疲労試験
図 12 AZ80 のき裂起点観察例

AZ61 と AZ80 の片持ち回転曲げ疲労試験と軸力疲労試験の破断面の観察結果を図 11, 12 に示す。片持ち回転曲げ疲労試験、軸力疲労試験共にき裂起点は表面、または表面極近傍であった。また、高応力短寿命域のき裂起点はファセット、低応力長寿命域のき裂起点はすべりであった。

別ロットのマグネシウム合金 AZ61 の供試材を用いて、鏡面仕上材と表面改質材の一定応力振幅での疲労試験結果を図 13 に示す。表面改質材は表面の粗さを大（中心線平均粗さ $Ra=1.85\mu\text{m}$ ）、中（ $Ra=1.03\mu\text{m}$ ）、小（ $Ra=0.49\mu\text{m}$ ）の 3 種類に変えた試験片を用意した。鏡面仕上材の表面粗さは $Ra=0.18\mu\text{m}$ である。図 13 より表面粗さがほぼ等しい表面改質材（表面粗さ小）と鏡面仕上材の疲労強度特性を比較すると、表面改質材（表面粗さ小）の疲労寿命が長く、 $N_f=10 \times 10^7$ 回の疲労強度も大幅に向上していることがわかる。しかし、表面粗さが小→中→大と粗くなるに従って、表面改質材（表面粗さ中）と鏡面仕上材の疲労強度特性がほぼ等しくなるが、表面改質材（表面粗さ大）の疲労寿命は、鏡面仕上材と比較して短く $N_f=10 \times 10^7$ 回の疲労強度も低下している。従って、表面改質処理によって試験片表面に圧縮残留応力を付与しても、試験片の表面の粗さが粗いと表面改質効果がないばかりか鏡面仕上材よりも疲労強度特性が悪化する場合がある。

次に、表面改質材の疲労試験と同じロットの AZ61 を用いて、大気中、高湿度環境（湿度 85%）、純水滴下の 3 種類の環境下で疲労試験を行った結果を図 14 に示す。大気中と純水滴下の環境下の疲労試験結果を比較す

ると、中・長寿命領域で、純水滴下環境下では疲労寿命が短く、 $N_f=10 \times 10^7$ 回の疲労強度が大幅に低下していることがわかる。これは純水滴下環境では腐食の影響が顕著に表れたことが原因である。大気中と高湿度環境では、短・中寿命領域では疲労寿命の差はほとんど見られないが、高湿度環境下での $N_f=10 \times 10^7$ 回の疲労強度は、大気中の疲労強度と比較して低下することから、長寿命領域では、高湿度の影響が現れていると考えられる。

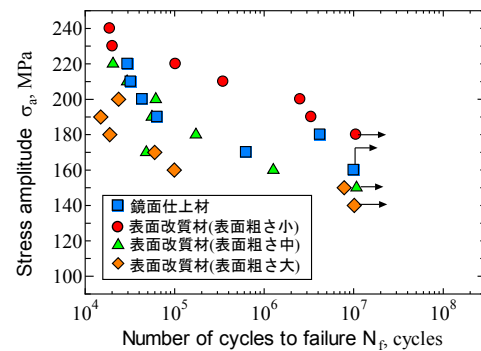


図 13 AZ61 の S-N 線図

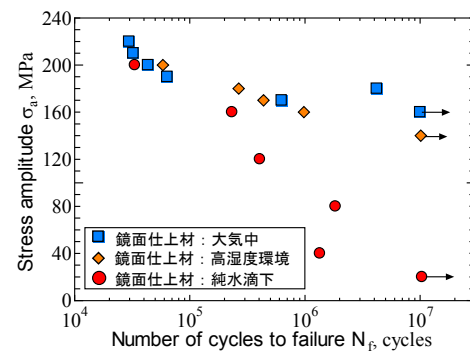
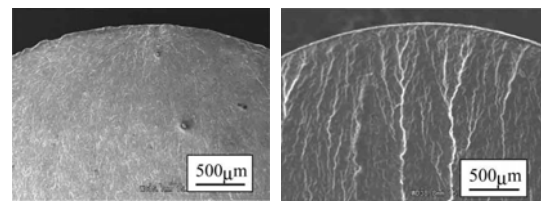
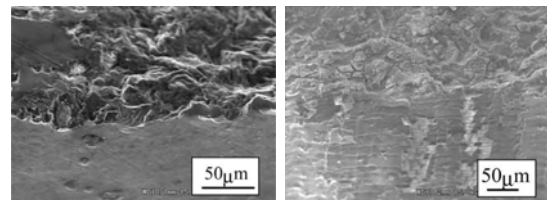


図 14 AZ61 の S-N 線図



(a)鏡面仕上材 (b)表面改質材(表面粗さ大)

図 15 AZ61 のき裂起点観察例



(a)大気中 (b)純水滴下環境

図 16 AZ61 のき裂起点観察例

鏡面仕上材と表面改質材（表面粗さ大）の片持ち回転曲げ疲労試験の破面観察結果を図 15 に示す。図 15(a)の鏡面仕上材のき裂起点は、試験片表面または表面近傍であった。

図 15(b)の表面改質材(表面粗さ大)の破面は、試験片表面の複数の箇所からき裂が発生する様相が確認され、き裂が合体したためできた段差も見られた。これは、表面粗さが切欠きとして作用したことが原因である。

大気中と純水滴下環境の片持ち回転曲げ疲労試験の破面観察結果例を図 16 に示す。

図 16(a)の大気中の破面のき裂起点は、表面または表面近傍であった。図 16(b)の純水滴下環境下のき裂起点付近の試験片表面には、筋状の模様が観察された。これはすべり帯であると考えられる。

以上の結果をまとめると、軽合金(アルミニウム合金、マグネシウム合金)は、超高サイクル領域で疲労破壊を起こすこと、表面改質処理を施すことよって疲労寿命・疲労強度は未処理材に比べて向上する。しかし、表面改質処理によって表面が粗くなる、または超高サイクル領域で内部破壊を起こすようになると疲労強度特性は改善しない。二段多重変動荷重疲労試験結果から、全ての試験で累積損傷値は1より大きくなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計6件)

- ① 土屋 大輔, 齋藤 雄介, 松村 隆, 鋳造アルミニウム合金の疲労強度特性に及ぼす二段多重変動荷重の影響 No.16-1 日本機械学会 2016 年度年次大会, 査読無, 2016 (発表予定).
- ② 松井 翔, 齋藤 雄介, 松村 隆, 鋳造アルミニウム合金の疲労特性に関する研究, No.15-1 日本機械学会 2015 年度年次大会 DVD-ROM, 査読無, 2015, pp.1-5.
- ③ 保科 直義, 高階 薫, 松村 隆, マグネシウム合金極細線の疲労強度特性に関する研究, No.15-1 日本機械学会 2015 年度年次大会 DVD-ROM, 査読無, 2015, pp.1-5.
- ④ 松村 隆, 齋藤 雄介, 山田 浩二, 越智 保雄, 鋳造アルミニウム合金の疲労特性と疲労き裂発生寿命に関する研究, 日本材料学会第 32 回疲労シンポジウム講演論文集, 査読無, 2014, pp.242-246.
- ⑤ 勝田 健哉, 松村 隆, 大隅 正一, 越智 保雄, 極細線の静的強度特性及び疲労強度特性に及ぼす経時の影響, 日本材料学会第 27 回信頼性シンポジウム・第 16 回破壊力学シンポジウム講演論文集, 査読無, 2013, pp.53-57.
- ⑥ 松村 隆, 山田 浩二, 越智 保雄, 佐野雄二, 足立 隆史, AL 合金の軸荷重下における高サイクル疲労特性に及ぼす二段多重変動荷重の影響, 日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集, 査読無, 2012, pp.1-3.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松村 隆 (MATSUMURA Takashi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号 : 00251710