

湿潤環境に暴露されるマグネシウム合金構造体 における疲労強度への影響

植松美彦*

1. はじめに

マグネシウム (Mg) 合金は実用上最も軽い金属であり、機械構造物の省エネルギー化や環境調和などの要求に応える軽量構造材料として注目されている。特に展伸Mg合金は鋳造Mg合金よりも高強度であり、構造体への適用が期待できる。しかし、現在のところ携帯用電子機器の筐体などへの利用が主流であり、強度部材への利用は進んでいない。その一つの理由として、Mg合金は水あるいは塩水中のような腐食環境中はもちろん、大気中の湿度によっても腐食するという耐食性の低さがある。したがって、屋外使用を想定した場合には表面に厚い保護皮膜を塗着せねばならない。しかし、Mg合金の強度部材としての用途を考えると、設計上重要となる繰返し荷重下における疲労特性の検討が重要であり、特に湿潤環境に暴露された状態での基本的な疲労特性を把握する必要がある。

本研究は、湿潤環境に暴露された状態での、展伸Mg合金の基礎的な腐食疲労挙動を明らかにすることを目的とする。そこで、一般的な構造用Mg合金であるAZ系合金でAl添加量の異なるAZ80A、AZ61A押出材および、AZ系合金よりも延性があるとされ、Znの添加量が小さいAM系合金のAM60押出材を用い、大気中および純水中で回転曲げ疲労試験を行い、その疲労挙動について検討した。

2. 供試材および実験方法

供試材は、Mg-Al系合金のAZ61A、AZ80AおよびAM60押出材である。素材は、押出比19.5で直径20.4mmの丸棒に加工されている。図1に横断面で観察した各材の微視組織を示す。いずれもほぼ等軸粒となっており、平均結晶粒径は、それぞれ12 μm 、17.9 μm 、8.7 μm である。各材の化学組成を表1に、引張り試験により実測した機械的性質を表2に示す。引張強さ σ_B は、Al含有量の増加に伴って向上しており、一般的な傾向と一致している。

機械加工によって、素材から試験片軸が押し出し方向と一致するように、図2に示すような平行部直径8mm、平行部長さ10mmの回転曲げ疲労試験片を採取した。試験片はエメリー紙で順次研磨した後、バフ研磨により鏡面に仕上げ試験に供した。

試験には小野式回転曲げ疲労試験機を用いた。繰返し速度は約20Hzである。腐食疲労試験は、流量140ml/minの定量ポンプを用いて、純水を試験片平行部に滴下しながら行った。微小き裂の観察は、レプリカ法によって行った。また、電気化学的な面からMg合金の耐食性について検討するため、アノード分極曲線を測定した。

3. 実験結果

3.1 疲労強度

図3に室温大気中および純水中におけるS-N曲線を示す。中空印の大気中の結果に注目すると、有限寿命域の疲労強度には材料間でほとんど差がない。一方、 $N=10^7$ 回に対する疲労強度を疲労限度とすれば、AZ61AとAM60では80MPa、AZ80A

* 岐阜大学 工学部 機械システム工学科
准教授

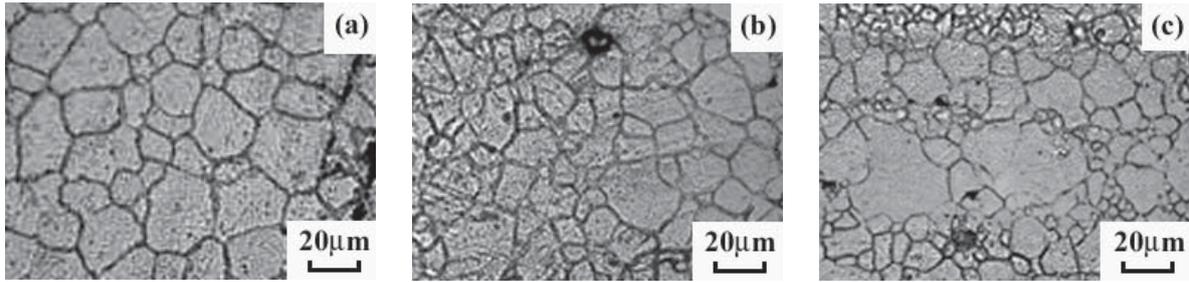


図1 微視組織様相：(a) AZ80A, (b) AZ61A, (c) AM60.

表1 各材の化学成分 (wt%).

Material	Al	Zn	Mn	Ni	Cu	Fe	Si	Pb	Ca	Sn	Mg
AZ80A	8.3	0.6	0.23	0.001	0.002	0.002	0.03	—	—	—	Bal.
AZ61A	6.4	0.74	0.35	0.0012	0.0029	0.001	0.015	0.001	0.001	<0.001	Bal.
AM60	6	0.02	0.32	0.0005	0.003	0.0031	0.03	—	—	—	Bal.

表2 各材の機械的性質.

Material	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation δ (%)	Reduction of area Ψ (%)	Elastic modulus, E (GPa)	Vickers hardness, HV
AZ80A	196	273	14.6	13.1	50	69
AZ61A	186	248	14	23.8	52	66
AM60	196	246	13.1	32.6	58	64

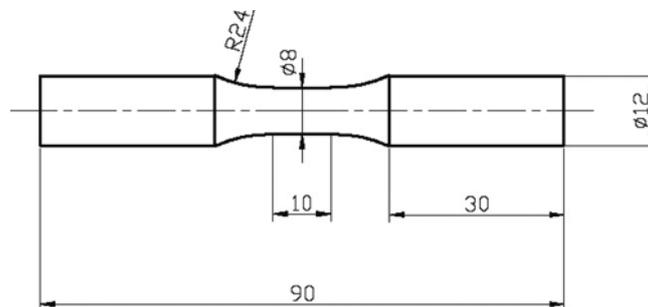


図2 疲労試験片形状.

では100MPaであり、Al含有量の多いAZ80Aが最も高い疲労限度を示した。すなわち、Al含有量の増加によって引張り強さが上昇したのと同じ傾向となっている。

これに対し、大気中と純水中（中実印）の結果を比較すると、大気中の有限寿命域における疲労強度は純水中とほぼ一致するが、純水中では大気中の疲労限度よりも低い応力レベルでも破壊が生じている。また、各材料間で純水中の疲労強度に差がないことから、大気中での疲労限度が最も高

いAZ80Aが、結果的に腐食に対して敏感であることを示している。

3. 2 き裂発生挙動

まず、大気中のき裂発生挙動について検討する。図4はAM60材の $\sigma=140\text{MPa}$ におけるき裂発生起点のSEM観察結果である。き裂は $30\mu\text{m}$ 程度の介在物が割れて発生していることがわかる。EDS分析の結果、介在物からはMgが検出されず、AlとMnの金属間化合物であることが判明した。

このような寸法が数十 μm 程度の金属間化合物は、AZ81AおよびAZ60Aの表面でも確認された。図5は、高応力の $\sigma=150\text{MPa}$ における各材料のき裂発生起点近傍の破面写真である。図中の矢印で示すように、いずれの場合もき裂発生起点の表面近傍には介在物が確認される。一方、図6は $\sigma=110\text{MPa}$ における破面であるが、き裂発生起点に介在物は認められない。すなわち、いずれの材料も高応力レベルでは介在物を起点とし、低応力レベルではすべりによってき裂が発生することが判明した。なお $\sigma=130\text{MPa}$ における破面でも、き裂発生起点に介在物が認められる場合があり、き裂発生機構の遷移は応力が110~130MPaで生じるよ

うである。またこのようなAl-Mn系の金属間化合物からの疲労き裂発生は、AZ系合金でしばしば報告されている^{(1), (2)}。

一方、図7(a)は純水中 $\sigma=50\text{MPa}$ で行った試験終了後の、AM60材の表面様相である。表面はMg(OH)₂もしくはMgOの皮膜で覆われており、ひび割れが生じていることがわかる。無負荷状態の試料を腐食させた場合には、このような割れは生じておらず、荷重負荷によって皮膜が割れたと考えられる。また、矢印で示すような腐食ピットが表面皮膜が割れた部分から発生しており、AZ80A, AZ61Aでもほぼ同様の表面様相が確認された。図7(b)は、AZ80A ($\sigma=80\text{MPa}$) のき裂発生起点の

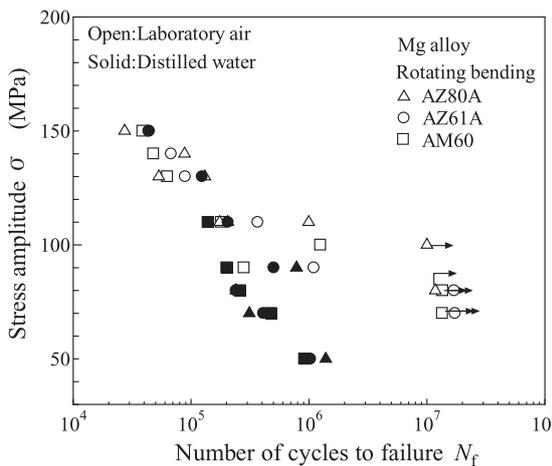


図3 大気中および純水中におけるS-N曲線。

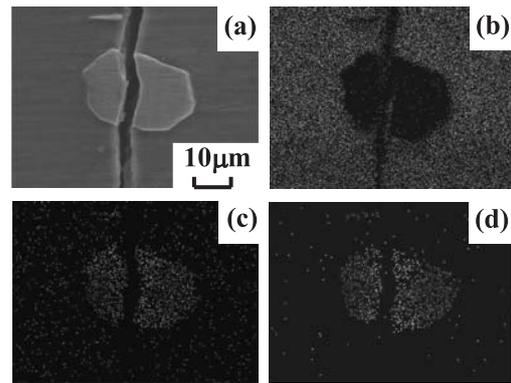


図4 き裂発生起点となった介在物のEDX分析結果 (AM60, $\sigma=140\text{MPa}$): (a) SEM像, (b) Mg, (c) Al, (d) Mn.

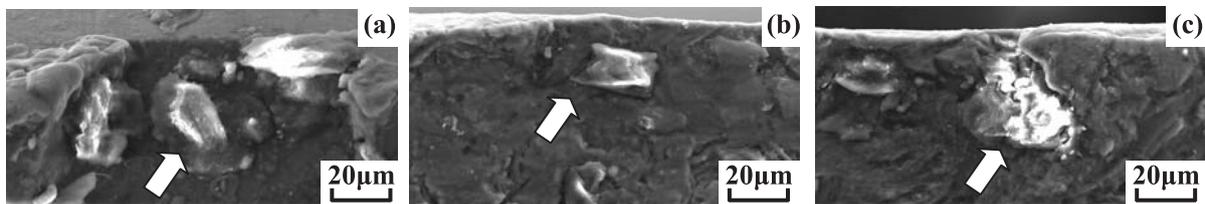


図5 大気中の高応力下におけるき裂発生起点観察例 ($\sigma=150\text{MPa}$): (a) AZ80A, (b) AZ61A, (c) AM60.

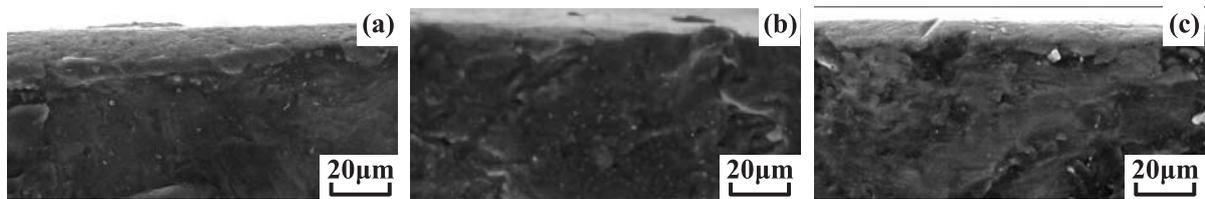


図6 大気中の低応力下におけるき裂発生起点観察例 ($\sigma=110\text{MPa}$): (a) AZ80A, (b) AZ61A, (c) AM60.

表面をSEMで観察した例である。き裂が腐食ピットから発生していることがわかる。図8は、AZ61AおよびAM60 ($\sigma = 50\text{MPa}$) のき裂発生起点近傍破面を、約45°傾けた状態でSEM観察した例である。いずれの場合も、表面層では皮膜が割れが生じ、き裂発生起点の破面には矢印で示す腐食ピットが認められた。なおAZ80Aの場合、破面のたたきあわせによって、破面上の腐食ピットが

明瞭ではなかった。

図9に大気中 ($\sigma = 140\text{MPa}$) および純水中 ($\sigma = 80\text{MPa}$) における各材のき裂長さ $2c$ と繰返し数比 N/N_f (N_f : 疲労寿命) の関係を示す。大気中では、AZ80AおよびAZ61Aは $N/N_f \approx 0.1$ 、AM60は $N/N_f \approx 0.3$ で介在物からき裂が発生した。一方純水中では、いずれの材料もき裂は $N/N_f > 0.4$ で発生している。

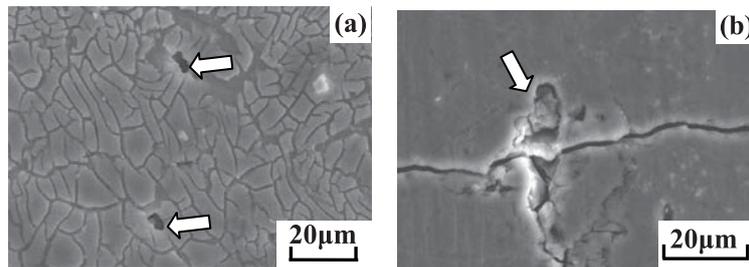


図7 試験終了後の試験片表面様相：(a) AM60, $\sigma = 50\text{MPa}$, (b) AZ80A, $\sigma = 80\text{MPa}$.

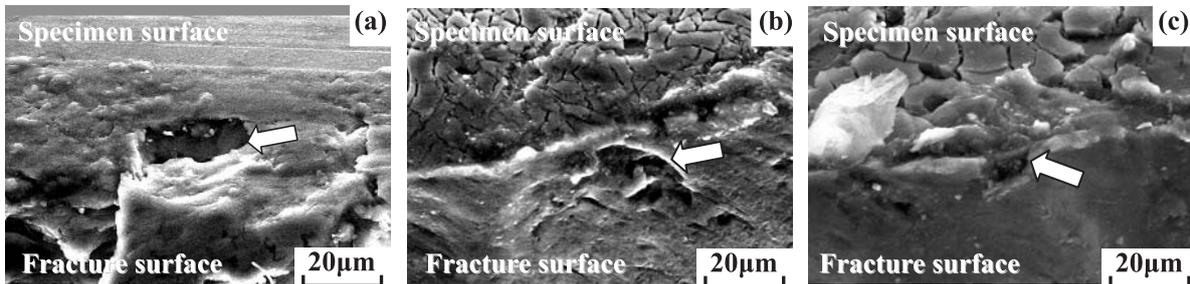


図8 純水中におけるき裂発生起点観察例 ($\sigma = 50\text{MPa}$)：(a) AZ80, (b) AZ61, (c) AM60.

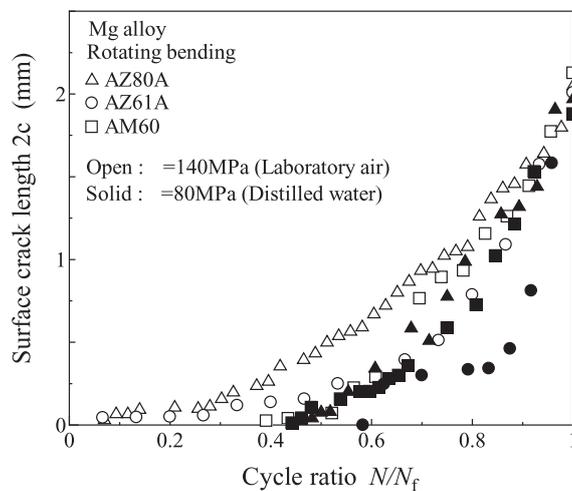


図9 大気中 ($\sigma = 140\text{MPa}$) および純水中 ($\sigma = 80\text{MPa}$) における各材のき裂長さ $2c$ と繰返し数比 N/N_f (N_f : 疲労寿命) の関係。

3. 3 微小き裂成長挙動

図10にき裂成長速度 da/dN と最大応力拡大係数 K_{max} の関係を示す。大気中ではAlの含有量が多いAZ80Aの da/dN が遅い傾向が見られる。しかし、純水中では材料間での da/dN の差が小さく、大気中とほぼ同程度の da/dN になった。すなわち、腐食によるき裂進展の加速、あるいは腐食生成物による顕著なくさび効果などは認められなかった。また破面様相は、大気中と純水中ではほぼ同様であった。

4. 考 察

4. 1 大気中における疲労特性

すべての材料において、高応力レベルでき裂発生起点となった介在物のAl-Mn系の金属間化合物は、状態図より $MnAl_4$ あるいは $MnAl_6$ と推測される。介在物分布の定量的評価は行っていないが、試験片表面や破面上で認められる介在物の量は少なく、また介在物の大きさや分布に材料間で顕著な差は認められなかった。これはいずれの材料も、添加元素Mnの含有量がほぼ同程度であるためと考えられる。

図3から有限寿命域における疲労強度に材料間でほとんど差が見られなかった。これは、図10で示したようにき裂成長速度に若干の差が認められたものの、いずれの材料も応力レベルが高い場合には、Al-Mn系金属間化合物を起点としてき裂が発生し、その大きさや分布の相違が材料間で小さかったためと思われる。一方、低応力レベルでは、き裂はすべり変形によって発生した。したがって、Al含有量が最も多く、高強度のAZ81Aで疲労限度が最も高くなったと考えられる。

4. 2 純水中における疲労特性

図7、8で示したように、いずれの材料も荷重負荷によって表面皮膜が割れ、腐食ピットが発生することによって大気中の疲労限度以下の応力でもき裂が発生し、破断にいたったと考えられる。今後ピットの成長速度や、ピットからのき裂発生について力学的に検討する必要がある。また、純水中と塩水中におけるアノード分極曲線の測定結果を図11に示す。腐食電位にはほとんど差が無いが、純水中ではAZ80Aの腐食速度が最も速いことがわかる。すなわち、AZ80Aが腐食に対して最も

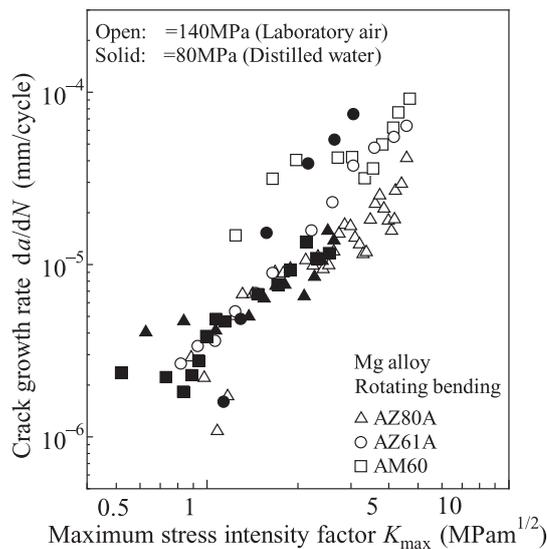


図10 大気中 ($\sigma=140\text{MPa}$) および純水中 ($\sigma=80\text{MPa}$) における各材のき裂成長速度 da/dN と最大応力拡大係数 K_{max} の関係

敏感であったのは、このような電気化学的特性に起因すると考えられる。Mnの添加はMg合金の耐食性向上に有効であるが、Alは有害とされている。したがって、AZ80AではAl含有量が最も多いために、腐食に対して敏感となったと考えられる。またZnについては、AZ61AとAM60の結果にほとんど差がないことから、耐食性に与える影響が小さいことを示している。

5. まとめ

本報告では、大気中および純水中において、合金成分が異なる3種類の展伸Mg合金AZ81A、AZ61AおよびAM60を用いて回転曲げ疲労試験を行い、それらの疲労挙動について検討した。その結果、大気中ではいずれの材料でも高応力ではAl-Mn系の金属間化合物がき裂発生起点となり、低応力レベルではすべりによりき裂が発生すること、有限寿命域における疲労強度は材料間で差が見られないが、Al含有量の最も多いAZ81Aの疲労限度が最も高くなることなどを明らかにした。また純

水中では、大気中の疲労限度より低い応力状態でも腐食ピットを形成して破断が生じ、Al含有量が最も多く、大気中での引張り強さと疲労限度が高いAZ80Aが、腐食による強度低下も大きいことを示した。

参考文献

- (1) Y. Uematsu, K. Tokaji, M. Kamakura, K. Uchida, H. Shibata and N. Bekku, "Effect of Extrusion Conditions on Grain Refinement and Fatigue Behaviour in Magnesium Alloys", *Materials Science and Engineering: A*, Vol.473, pp.131-140 (2006) .
- (2) Z.B. Sajuri, Y. Miyashita, Y. Hosokai and Y. Mutoh, "Effects of Mn content and texture on fatigue properties of as-cast and extruded AZ61 magnesium alloys", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vo.48, pp.198-209 (2006) .

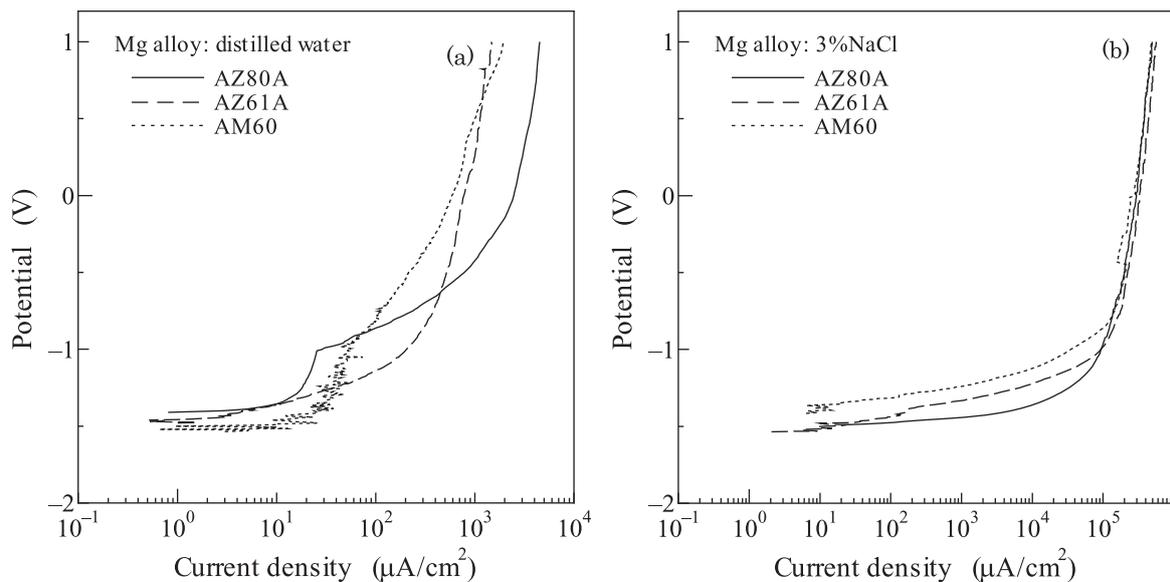


図11 分極特性：(a) 純水中、(b) 3%NaCl水溶液中。