展伸マグネシウム合金 AZ31 の低サイクル疲労強度特性*

塩澤和章^{*1}, 上梨智弘^{*2}, 北島 純^{*3}, 村井 勉^{*4}, 高橋 泰^{*5}

Low-Cycle Fatigue Properties of Extruded AZ31 Magnesium Alloy

Kazuaki SHIOZAWA^{*1}, Tomohiro KAMINASHI, Jun KITAJIMA,
Tutomu MURAI and Tooru TAKAHASHI

^{*1} University of Toyama, Graduate School of Science and Engineering
3190 Gofuku, Toyama, 930-8555 Japan

Fully reversed tension-compression low-cycle fatigue tests controlled by both of total strain and stress were conducted on extruded AZ31 magnesium alloy using smooth round bar specimens in ambient atmosphere at room temperature. The stress-strain hysteresis loops exhibited a characteristic asymmetric shape with a positive mean stress during total strain-controlled fatigue cycle, in comparison with those with a compressive mean strain under stress-controlled fatigue test. The mean stress was associated with the ratio of compressive yield stress and tensile one in the material, which resulted in mechanical twinning in the compressive phase. The fatigue lives obtained from both controlled experiments were nicely described by the Coffin-Manson relationship. From the plastic strain range-life curves, fatigue life under total strain-controlled fatigue test was shorter than that under stress-controlled one because of an effect of tensile mean stress. Fatigue criteria considering the mean stress effect previously proposed were evaluated in terms of fatigue life predictions based on the experimental results. Also, an energy-based model taken into account of plastic and elastic energy density was discussed to predict the fatigue lives obtained from total strain- and stress-controlled fatigue experiments.

Key Words : Low-Cycle Fatigue, Magnesium Alloy, Anisotropy, Life Prediction, Twin, Mean Stress, Mean Strain

1. 緒 言

実用金属中で最軽量であり、比強度、リサイクル性、振動吸収性などにも優れているマグネシウム (Mg) およびその合金は、地球環境の保全並びに環境負荷物質低減の立場から、機器の軽量化、燃費向上、高効率化などを目指した航空機、鉄道車両、自動車などの輸送用機器への適用が進められている。とりわけ、鋳造などの欠陥が懸念される鋳造材に替わって、機械的強度特性に優れた展伸材の構造部材への適用が検討されてきている。展伸 Mg 合金の構造部材への適用・使用に際しては疲労信頼性を含む材料の安全性や信頼性の保証は欠かすことができない重要な課題である。

稠密六方格子構造 (hcp) を有する Mg の室温における主すべり系の数は 3 と少なく、結晶のすべり変形に加えて双晶変形が極めて重要な塑性変形の機構となる^{(1),(2)}。また、展伸 Mg 合金は塑性加工時に底面 (0001) が配向し、押出し材では結晶の c 軸が押出し方向と垂直になる集合組織を生じる^{(3),(5)}。これら結晶構造および集合組織に起因して、展伸 Mg 合金の圧縮降伏応力は引張りのそれに比べて低下し、顕著な異方性を生じることが知られており^{(6),(11)}、この低下は主として変形双晶に起因するものである。Mg 合金に現れる顕著な変形双晶の影響は疲

* 原稿受付 2010 年 10 月 5 日

^{*1} 正員, フェロー, 富山大学大学院理工学研究部 (〒930-8555 富山県富山市五福 3190)

^{*2} 日産化学工業(株) (〒939-2753 富山県富山市婦中町笹倉 635)

^{*3} 学生員, 富山大学大学院理工学教育部

^{*4} 正員, フェロー, 三協・立山ホールディングス(株) (〒933-8610 富山県高岡市早川 70)

^{*5} 三協マテリアル(株) (〒934-8515 富山県射水市奈呉の江 8-3)

E-mail: shiozawa@eng.u-toyama.ac.jp

疲労特性にも影響することが指摘され⁽¹²⁾⁻⁽²⁰⁾、塑性ひずみ振幅－疲労寿命線図 (Coffin-Manson 則)⁽¹⁷⁾や $S-N$ 曲線⁽²¹⁾⁻⁽²³⁾に特有な変曲点の生じることが報告されている。しかし、疲労変形挙動および疲労寿命に及ぼす変形異方性の影響に着目した研究は少なく、必ずしも明らかになっていないのが現状である。著者らはこれまでに、展伸 Mg 合金 AZ61 および AZ80 の全ひずみ制御低サイクル疲労試験を行い、変形異方性の影響に付いて検討してきた。その結果、疲労過程での圧縮ひずみ負荷中に生じる変形双晶とその回復によってヒステリシス・ループは特異な非対称性を示し、平均応力を生じることを明らかにした^{(24),(25)}。

本研究では、圧縮と引張りの降伏応力の違いが顕著に現れる展伸 Mg 合金の低サイクル疲労強度特性を明らかにすることを目的として、AZ31 の全ひずみ制御および応力制御の両低サイクル疲労試験を行い、疲労変形挙動に及ぼす変形異方性の影響を検討すると共に、両負荷制御条件下における疲労寿命評価を行った。

2. 供試材および実験方法

2・1 供試材

本研究に用いた試験片材料は Mg-Al-Zn 系 Mg 合金 AZ31 である。化学組成を表 1 に示す。なお、実験結果の比較のために前報⁽²⁴⁾の AZ61 および AZ80 に付いても併記した。素材は、押出し比 99.4、押出し温度 623K、押出し速度 5m/min の条件で押出した直径 16mm の丸棒である。試験片は押出し丸棒材より図 1 に示す形状・寸法（標点部直径 7mm、平行部長さ 7mm）の平滑試験片に機械加工したものであり、試験片軸方向を押出し方向と平行に採取した。表 2 に供試材、AZ61 および AZ80 の静的引張試験結果およびビッカース硬さ測定結果（荷重 300gf（2.94N）、30s 保持）を示す。AZ31 の 0.2%耐力、引張強さおよび硬さは他の 2 材に比べて低いが、伸びは AZ61 と同程度である。

金属顕微鏡による AZ31 の微視的組織観察結果を図 2 に示す。観察は押出し方向（試験片軸方向）に平行な面の観察結果であるが、同垂直な面も同様であり、結晶粒径に差異は認められなかった。平均結晶粒径（ISO 643

Table 1 Chemical compositions of materials tested (mass %)

	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Mg
AZ31	3.10	0.93	0.33	0.001	0.005	0.001	-	Bal
AZ61	6.30	0.61	0.28	0.005	0.012	0.001	0.0010	Bal
AZ80	8.53	0.57	0.17	0.005	0.012	0.001	0.0008	Bal

Table 2 Mechanical properties of materials tested.

	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation δ (%)	Vickers hardness HV
AZ31	209	232	19.2	54.0
AZ61	227	298	19.2	59.8
AZ80	226	329	15.4	62.0

Fig.1 Shape and dimensions of specimen.

Fig. 2 Microstructure of extruded AZ31 observed by optical microscope.

交差線分法による測定) は $88.4\mu\text{m}$ であり, AZ61 ($13.7\mu\text{m}$) および AZ80 ($16.0\mu\text{m}$) に比較して大きい.

2・2 実験方法

低サイクル疲労試験は電気・油圧サーボ式軸荷重疲労試験機を用いて, 室温・大気中の実験室雰囲気下で全ひずみ制御および応力制御の軸荷重疲労試験を行った. 試験片の変位計測は差動変圧器を備えた伸び計(標点間距離 5mm)を用いて行った. 全ひずみ制御低サイクル疲労試験のひずみ波形は三角波であり, 完全両振り($R_\varepsilon = \varepsilon_{\min} / \varepsilon_{\max} = -1$), ひずみ速度 $0.2\%/s$ の条件下で行った. この際の破損繰返し数 N_f は疲労過程中的最大引張応力 $\sigma_{\max}$ が定常値の $3/4$ に低下した時点の繰返し数と定義した. 一方, 応力制御低サイクル疲労試験は繰返し速度 0.05Hz の完全両振り ($R_\sigma = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$), 正弦波の波形で行った. 試験中の応力およびひずみはパーソナルコンピュータおよび XY レコーダに随時記録した. また, 試験片表面は機械加工による切削傷除去のために #2000 までのエメリー紙仕上げおよびバフ仕上げを施して実験に供した.

3. 実験結果

3・1 負荷除荷試験による変形異方性

押出しによって生じる引張負荷と圧縮負荷の非対称性, すなわち異方性, を検証するために, 図 3 の模式図に示す引張りまたは圧縮の負荷除荷試験を行った. すなわち, 所定のひずみまで負荷を行った後, 荷重を零まで除荷し, その後再負荷を行う試験を繰り返した. 試験は約 0.1% のひずみ増分を与え 4% のひずみまで行った. これによって得られた応力-ひずみ曲線を静的引張試験結果と併せて図 4 に示す. 図から明らかなように, 負荷除荷

Fig.3 Schematic presentation of loading-unloading test and definition of anelastic strain, ε_{an} .

Fig. 4 Stress-strain curve of AZ31 obtained from stepwise loading-unloading test.

Table 3 Experimental measurement of proof stress obtained from stepwise loading-unloading test.

	0.2% proof stress (MPa)		$\sigma_{0.2}^C / \sigma_{0.2}^T$
	Tension $\sigma_{0.2}^T$	Compression $\sigma_{0.2}^C$	
AZ31	200	65	0.325
AZ61	230	100	0.435
AZ80	225	150	0.667

Fig. 5 Change in anelastic recovery strain with applied total strain during stepwise loading and unloading test of tensile side and compressive one.

試験から求めた引張側の応力-ひずみ曲線は静的引張試験結果とほぼ一致する．この応力-ひずみ曲線と圧縮側のそれは非対称であり，後者は著しく低い．実験から求めた引張側の 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}^T$ ，圧縮側のそれ $\sigma_{0.2}^C$ およびそれらの比 $\sigma_{0.2}^C/\sigma_{0.2}^T$ を AZ61 および AZ80 と併せて表 3 に示す．圧縮側の耐力の大きさは引張側のそれに比べて小さい．この差は圧縮負荷時に双晶変形が容易に生じて塑性変形を開始するためであることが知られており⁽⁶⁾⁽¹¹⁾，本供試材においても変形双晶の影響を顕著に受けることが理解できる．また， $\sigma_{0.2}^C/\sigma_{0.2}^T$ の値は材料の種類によって異なり，AZ31 は他の 2 材に比べて小さい．

図 3 に定義した引張荷重除荷時および圧縮荷重除荷時に生じる擬弾性回復ひずみ ε_{an} と全ひずみ ε_t の関係を図 5 に示す． ε_{an} の大きさは引張りと圧縮において異なり，圧縮荷重除荷試験において大きくなる．引張側の ε_{an} の ε_t に対する割合は 2% 程度と少ないのに対して，圧縮側では ε_t の小さな領域で 20% 程度となり， $\varepsilon_t=1\%$ 以上では飽和して負荷ひずみの増加によって若干減少する傾向を示す．荷重除荷時に生じる擬弾性回復ひずみは転位の可逆運動によって生じるものの他，双晶変形の回復によって生じる．圧縮負荷時に形成された変形双晶は，除荷過程で回復して大きな擬弾性回復ひずみを生じることになる．一方，引張負荷では双晶の発生が困難であるため，転位の可逆性にに基づく擬弾性回復ひずみが生ずるのみである．

結晶の配向を検討するために，シュルツの反射法による極点図測定を行った．なお，測定はリガク製自動 X 線回折装置 (RINT2000) を用い，Cr-K α 線 (管電圧 40kV，管電流 30mA) で実施した．図 6 に (0002) 面の測定結果を示す．同図(a)は押し出し材の結果であり，結晶の c 軸が押し出し方向に対して垂直に配向する顕著な集合組織を呈していることがわかる．この結果，圧縮荷重を押し出し方向に平行に負荷した場合には双晶変形が容易に生じる．圧縮変形によって生じる $\{10\bar{1}2\}$ 双晶変形領域は母相に対して 86.3° の c 軸傾斜を生じて，c 軸は押し出し方向にほぼ平行となる⁽⁵⁾⁽⁶⁾．圧縮の除荷過程では双晶が回復するが，圧縮荷重が零の時点では完全な回復を生じず，変

Fig. 6 X-ray measurement of (0002) pole figure in AZ31; (a) before test, (b) incremental stepwise loading-unloading test in compression and (c) that in tension.

Fig. 7 Strain vs. fatigue life diagram obtained from total strain-controlled fatigue test and S-N curve obtained from stress-controlled fatigue test.

Fig. 8 Hysteresis loop of AZ31 at $0.5N_f$ obtained from total strain-controlled fatigue test under various total strain ranges.

形双晶が残留する。図 6(b)は圧縮の負荷除荷試験を $\epsilon_t = -4\%$ まで行った後の極点図測定結果である。c 軸の配向は分散化する傾向を示し、変形双晶の不完全な回復が認められる。一方、引張りの負荷除荷試験では双晶の発生が無いいため c 軸の配向に変化はほとんど無い (図 6(c))。以上より、双晶変形に起因した引張りと圧縮の異方性は疲労変形挙動並びに疲労寿命に影響を与えることが予想され、また荷重負荷様式による違いも考えられ興味ある課題である。

3・2 ひずみ-寿命線図

AZ31 の全ひずみ制御低サイクル疲労試験から得られた全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t$ と疲労寿命 N_f の関係および応力制御低サイクル疲労試験から得られた $S-N$ 曲線を図 7 に示す。図中には前報の AZ61 および AZ80 の結果を併せて示した。全ひずみ制御疲労試験の結果から、AZ61 と AZ80 の疲労寿命の間には差異が無いのに対して、AZ31 のそれは両者に比べて低くなる。なお、全ひずみ制御と応力制御疲労試験結果の比較は後述する。

3・3 全ひずみ制御疲労試験における変形挙動

AZ31 の全ひずみ制御疲労試験から得られた $N=0.5N_f$ におけるヒステリシスループを図 8 に示す。ヒステリシスループの形状は引張側と圧縮側で非対称となる特異なものであり、前報の AZ61 および AZ80 と同様の傾向が認められた。図 9 は $\Delta \epsilon_t = 1.0, 2.0$ および 4.0% の疲労過程に伴う最大応力 $\sigma_{\max}$ 、最小応力 $\sigma_{\min}$ および平均応力 $\sigma_{\text{mean}} (= (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2)$ の変化挙動である。最大応力および最小応力は繰返しに伴って増加および減少し、繰返し硬化挙動を呈するが、 $\Delta \epsilon_t = 4.0\%$ の場合最大応力の増加は少なく繰返し軟化を生ずる傾向を示す。ヒステリシス

Fig. 9 Change in the maximum, minimum and mean stress during total strain-controlled fatigue cycles.

Fig. 10 Schematic presentation of stress-strain hysteresis loop and definition of parameters.

Fig. 11 Change in plastic strain range during total strain-controlled fatigue cycles.

Fig. 12 Change in anelastic recovery strain during total strain-controlled fatigue cycles.

ループの非対称性により、最大応力の大きさは最小応力のそれに比べて大きく引張りの平均応力を生じる。この平均応力は引張側と圧縮側の繰返し硬化挙動の違いによって、 $\Delta \varepsilon_f = 1.0$ および 2.0% では繰返しに伴って増加する傾向を示し、一方、 $\Delta \varepsilon_f = 4.0\%$ では減少する。

応力零時点におけるヒステリシスループの幅から求めた塑性ひずみ幅 $\Delta \varepsilon_p$ (図 10 の定義を参照) と繰返し数 N の関係を図 11 に示す。実験を行った何れの全ひずみ幅においても $\Delta \varepsilon_p$ は繰返しの初期においてほぼ一定値を示すが、約 $N = 0.1N_f$ 以降は繰返しに伴って減少する傾向を示す。図 12 はヒステリシスループから求めた引張側および圧縮側の擬弾性回復ひずみ $\Delta \varepsilon_{an}$ (図 10 参照) と繰返し数 N の関係である。疲労過程に生じる擬弾性回復ひずみは引張側に比べて圧縮側で 10 倍程度大きく、前述した負荷除荷試験と同様の傾向を示す。この $\Delta \varepsilon_{an}$ は疲労過程にほぼ一定値を示し、繰返し中の圧縮負荷時に生じた変形双晶は除荷過程および引張の再負荷時に回復してヒステリシスループの非対称性を生じることになる。

3・4 応力制御疲労試験における変形挙動

応力制御低サイクル疲労試験から得られたヒステリシスループを図 13 に示す。供試材の引張りの耐力 $\sigma_{0.2}^T$ ($=209\text{MPa}$) を越える $\sigma_a = 230\text{MPa}$ の場合 (図 13(a))、1 サイクル目の引張側で塑性変形を生じ、負荷反転後の圧縮負荷時には低応力で塑性変形を開始する。また、 $\sigma_{0.2}^T$ 以下の $\sigma_a = 150\text{MPa}$ の場合 (同図(b)) では、1 サイクル目の引張負荷時には塑性変形を生じないが、圧縮側負荷時には大きな塑性変形を生じる。両図には 4 サイクルまでおよび $0.5N_f$ 時のヒステリシスループを示すが、ヒステリシスループの形状は繰返しの初期に大きく変化し、 $0.5N_f$ 時の形状とは大きく異なる。図 14 に各応力振幅 σ_a の実験から得た $0.5N_f$ 時のヒステリシスループを示す。

Fig. 13 Typical example of hysteresis loop during stress-controlled fatigue cycles, (a) $\sigma_a = 230\text{ MPa}$ and (b) $\sigma_a = 150\text{ MPa}$.

Fig. 14 Hysteresis loop at $0.5N_f$ obtained from stress-controlled fatigue test.

Fig. 15 Experimental relation between the maximum, minimum and mean strain and cycle ratio under stress-controlled fatigue test.

Fig. 16 Change in total, plastic, and elastic strain range during stress-controlled fatigue cycling.

Fig. 17 Change in anelastic recovery strain at tensile and compressive side during stress-controlled fatigue cycles.

図 8 に示した全ひずみ制御疲労試験から得られたヒステリシスループと比較して、応力制御条件下での形状の非対称性は小さいことがわかる。

ヒステリシスループから得られた最大ひずみ $\varepsilon_{\max}$ 、最小ひずみ $\varepsilon_{\min}$ および平均ひずみ $\varepsilon_{\text{mean}} (= (\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min})/2)$ と繰返し数比 N/N_f の関係 ($\sigma_a = 130$ および 210 MPa) を図 15 に示す。 $\varepsilon_{\max}$ および $\varepsilon_{\min}$ 共にその大きさは繰返しの初期 ($0.1N_f$ 以下) に大きく減少して、ほぼ一定値になる。これに伴って $\varepsilon_{\text{mean}}$ は圧縮となる。ひずみ制御疲労試験では引張平均応力を生じたのに対して、応力制御疲労試験では圧縮平均ひずみを生じることは対照的である。1 サイクル中に生じる全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_t$ 、塑性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_p$ および弾性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_e (= \Delta\varepsilon_t - \Delta\varepsilon_p)$ と繰返し数比の関係を図 16 に示す。各ひずみ範囲は繰返しの初期に大きく減少し、その後なだらかに減少する傾向を示し、 $\Delta\varepsilon_p$ は必ずしも一定値とはならない。

図 10 に示した定義に従って求めた擬弾性回復ひずみ $\Delta\varepsilon_{\text{an}}$ と繰返し数の関係を図 17 に示す。圧縮除荷時の $\Delta\varepsilon_{\text{an}}$ は引張除荷時のそれに比べて大きい。しかし、全ひずみ制御疲労試験から得られた結果 (図 12) と比較すると、両者の差異は小さく、その大きさも小さい。擬弾性回復ひずみが双晶の可逆性に起因して生じるものと考え、応力制御の繰返しではひずみ制御のそれに比べて可逆性は低く、繰返しに伴って変形双晶が累積される可能性が示唆される。この非可逆性によって応力制御疲労試験に現れるヒステリシスループの非対称性がひずみ制御のそれに比べて小さくなるものと考えられる。

3・5 破面観察

全ひずみおよび応力の両制御低サイクル疲労試験から得られたき裂発生起点近傍の SEM 観察結果例を図 18 に示す。き裂発生起点近傍の特徴的差異は両試験において認められず、筋状模様が観察された。この模様は AZ61 および AZ80 の両材のひずみ制御低サイクル疲労、および回転曲げ並びに軸荷重の高サイクル疲労試験における高応力振幅域でも観察されている^{(22)・(24)}。筋状模様の形成機構は現時点では不明であるが、変形双晶が影響していることが推察される。

 Fig. 18 SEM observation of fracture surface around crack initiation site tested under total strain-controlled fatigue test at $\Delta\varepsilon_t = 4.0\%$ (a), $\Delta\varepsilon_t = 1.5\%$ (b) and stress-controlled one at $\sigma_a = 210 \text{ MPa}$ (c).

4. 考 察

4・1 ひずみ－寿命線図

全ひずみ制御および応力制御の低サイクル疲労試験の疲労寿命を比較するために、 $\Delta \varepsilon_p$ と N_f の関係 (Coffin-Manson 則) および $\Delta \varepsilon_e$ と N_f の関係 (Basquin 則) で整理した。その結果を図 19 に示す。なお、 $\Delta \varepsilon_p$ および $\Delta \varepsilon_e$ は前述したように疲労過程で変化する、鉄鋼材料やアルミニウム合金のように一定の繰返し後に一定値を取らない。本整理では便宜上、 $0.5N_f$ 時の値を用いた。Hasegawa ら⁽¹²⁾は AZ31B を用いて応力制御およびひずみ制御の低サイクル疲労試験を行った結果、前者では Coffin-Manson 則が成立つものに対して、後者では引張の平均応力を生じるために成立しないことを報告している。しかし本供試材では図から明らかなように、両試験結果共に両対数グラフ上で良好な直線関係が認められ、式(1)および(2)が成立つ。

$$\Delta \varepsilon_p N_f^{\alpha_p} = C_p \quad (1)$$

$$\Delta \varepsilon_e N_f^{\alpha_e} = C_e \quad (2)$$

ここで、 α_p および α_e は指数則における指数、 C_p および C_e は定数である。全ひずみ制御低サイクル疲労試験から得られた指数 α_p^ε 、 α_e^ε および定数 C_p^ε 、 C_e^ε 、および応力制御低サイクル疲労試験から得られた指数 α_p^σ 、 α_e^σ および定数 C_p^σ 、 C_e^σ を表 4 に示す。なお、前報で求めた AZ61 および AZ80 の結果を表中に併記した。 α_p および C_p の値は鉄鋼材料ではそれぞれ 0.5～0.7 程度および真破断ひずみ程度であることが知られているが、ひずみ制御疲労試験から得られた本供試材の α_p および C_p はこれらに比べて大きな値を示し、材料依存性が認められる。一方、応力制御疲労試験から得られた値は全ひずみ制御のそれに比べて小さな値であり、鉄鋼材料の値と同程度である。

全ひずみ制御疲労試験から得られた α_p^ε 、 C_p^ε 、 α_e^ε および C_e^ε の材料の機械的性質との関係を検討した結果を図 20 に示す。3 供試材の α_p^ε および C_p^ε は圧縮と引張りの耐力の比 $\sigma_{0.2}^C / \sigma_{0.2}^T$ と良い相関性が認められる (図(a))。すなわち、疲労寿命は圧縮負荷時に生じる変形双晶の影響を受けると考えられる。一方、 α_e^ε

Fig. 19 Strain vs. fatigue life diagram obtained from strain- and stress-controlled fatigue test of AZ31.

Table 4 Experimental values of exponents and coefficients in Eq. (1) and (2)

	Strain-controlled				Stress-controlled			
	α_p^ε	C_p^ε	α_e^ε	C_e^ε	α_p^σ	C_p^σ	α_e^σ	C_e^σ
AZ31	1.403	26.40	0.124	0.0270	0.722	0.932	0.175	0.0307
AZ61	1.225	19.44	0.213	0.0839	—	—	—	—
AZ80	1.134	12.98	0.246	0.0974	—	—	—	—

Fig. 20 Experimental relation between exponents and coefficients in Eqs. (1) and (2) and mechanical properties of materials.

Fig. 21 Mean stress at $0.5N_f$ occurred by total strain-controlled fatigue test against plastic strain range.

および C_e^ϵ は材料の引張強さ σ_B と相関性がある (図(b)). $\Delta \epsilon_p - N_f$ 線図から, 全ひずみ制御疲労試験の疲労寿命は応力制御のそれに比べて短い. これは両試験の指数 α_p および定数 C_p の値の比較から, 前者において変形双晶の影響が顕著に現れることに起因することが予想されるが, 引張平均応力の影響も考えられる.

4・2 平均応力を考慮した寿命評価

全ひずみ制御低サイクル疲労試験では変形双晶に起因するヒステリシスループの非対称性から引張の平均応力を生じる. 一方, 応力制御低サイクル疲労試験では圧縮の平均ひずみを生じる. 図 21 はひずみ制御疲労試験において発生する平均応力の供試材依存性を整理した結果である. 引張りと圧縮の耐力の違いによって平均応力を生じることから, $\sigma_{\text{mean}} (\sigma_{0.2}^C / \sigma_{0.2}^T)$ と塑性ひずみ幅 $\Delta \epsilon_p$ の関係によって 3 供試材を整理した結果, 実験結果のばらつきはやや大きい, 良好な関係を得ることができた. 平均応力は $\Delta \epsilon_p$ の増加に伴って大きくなり, $\Delta \epsilon_p = 0.3 \sim 0.5\%$ 程度で最大値を示した後に減少する. これら引張平均応力の影響によって疲労寿命が低下する可能性がある (図 19). 本節では平均応力の影響を考慮した疲労寿命評価について考察を行った.

疲労寿命に及ぼす平均応力の影響を考慮する方法として, Morrow のモデル⁽²⁶⁾, Lorenzo-Laird のモデル⁽²⁷⁾, Smith-Watson-Topper (SWT) のモデル⁽²⁸⁾などが提案されている. Goodenberger ら⁽²⁹⁾は AZ91E-T6 の実験結果を用いて前述の 3 モデルによる寿命評価を行った結果, 疲労寿命を過大に評価する結果を得ている. また, Hasegawa らは AZ31B の異なった平均応力を持つ疲労試験結果を基に同様のモデルによって評価した結果, 鉄鋼材料などの立方格子結晶材料に比べて Mg 合金の評価精度が劣ることから, 新たな DIT モデルを提案している⁽¹²⁾. 本研究では, AZ31 の平均応力を生じない応力制御疲労試験から得られた式(3)を基にして, ひずみ制御疲労試験の疲労寿命を評価することを試みた.

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} N_f^b + \epsilon_f' N_f^c \quad (3)$$

Fig. 22 Predicted result of fatigue life by Morrow's, SWT and DIT model, respectively.

なお、上式における指数および定数と式(1)および(2)の関係は、 $b = -\alpha_e^\sigma$ 、 $c = -\alpha_p^\sigma$ 、 $\sigma_f'/E = C_e^\sigma/2$ 、 $\varepsilon_f' = C_p^\sigma/2$ であり、 E ($=42.8\text{GPa}$) はヤング率である。本研究で評価を試みたモデルは以下の式で与えられる。

$$\frac{\Delta\varepsilon_t}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_{mean}}{E} N_f^b + \varepsilon_f' N_f^c \quad : \text{Morrow's モデル} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta\varepsilon_t}{2} \sigma_{max} = \frac{(\sigma_f')^2}{E} N_f^{2b} + \sigma_f' \varepsilon_f' N_f^{b+c} \quad : \text{SWT モデル} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta\varepsilon_t}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} N_f^b + \varepsilon_f' N_f^c - \frac{\sigma_{mean}}{2E} \quad : \text{DIT モデル} \quad (6)$$

図22は上記3モデルによって寿命評価を行った結果である。いずれのモデルも予測寿命と実験結果の間に factor of 2 のばらつき範囲内に納まっており、寿命評価が可能である。詳細には、Morrow のモデルが最も良好な対応関係にある。すなわち、弾性ひずみ幅と疲労寿命の関係に平均応力の影響を考慮することによって評価できることになる。

4・3 ひずみエネルギーによる寿命評価

上述の寿命評価は応力制御疲労試験結果を基準としており、この場合に生じる圧縮平均ひずみの影響は考慮していない。そこで、ヒステリシスループから得られるひずみエネルギーを基に寿命評価を試みた。図10に模式的に示した $0.5N_f$ 時の1サイクルのヒステリシスループの面積から求めた塑性ひずみエネルギー密度 ΔW_p と N_f の関係を図23(a)に示す。図には、ひずみ制御疲労試験から得た3供試材の結果および応力制御疲労試験から得た AZ31 の結果を併記した。図より、本方法によって供試材間の影響並びに疲労試験条件の影響を統一的に整理することはできない。これは平均応力および平均ひずみの影響によるものであると考えられる。図10に示した弾性ひずみエネルギー密度 ΔW_e (面積 ABF) を求めて、全ひずみエネルギー密度 $\Delta W_T (= \Delta W_p + \Delta W_e)$ による整理を試みた。このことは、全ひずみ制御疲労試験における平均応力の影響を考慮したことを意味する。すなわち、平均応力の大小によって ΔW_e は変化することになる。なお、同様な取り扱いが最近 Park ら⁽³⁰⁾によって提案されている。図23(b)に ΔW_T と N_f の関係を示す。供試材間の差異および疲労試験法の影響が無くなり、全ての実験点を最小二乗法で近似した式(6)で示される良好な関係が得られた。

$$\Delta W_T N_f^{0.735} = 360 \quad (7)$$

Fig. 23 Fatigue life prediction with energy-based model based on a plastic strain energy density (a) and total strain energy density (b).

前節および本節の考察より、本供試材の応力制御と全ひずみ制御の両疲労寿命は引張りと圧縮の耐力の違いによって生じる平均応力の影響を考慮することによって評価可能であると考えられる。なお、応力制御疲労試験の寿命評価に圧縮の平均ひずみの影響は考慮されていない。この平均ひずみは比較的小さく、疲労寿命に影響を及ぼさないとする指摘もある⁽³⁰⁾が、AZ61 および AZ80 の実験結果を追加して更に検討する必要がある。

5. 結 言

引張りと圧縮の降伏応力の異なる展伸 Mg 合金 AZ31 の全ひずみ制御および応力制御の低サイクル疲労試験を行い、疲労変形挙動および疲労寿命に及ぼす負荷制御方法の違いを明らかにすると共に、疲労寿命評価について考察を試みた。本研究から得られた結論は以下の通りである。

- (1) 負荷除荷試験から求めた AZ31 材の圧縮耐力は引張耐力の 33%程度であり、AZ61 の 44%および AZ80 の 67%に比べて大きな差違を生じた。
- (2) 全ひずみ制御疲労試験の結果、ヒステリシスループの非対称性により疲労過程に引張りの平均応力を生じた。この平均応力は圧縮と引張りの耐力の比に依存して生じる。
- (3) 応力制御疲労試験ではヒステリシスループの非対称性により、疲労過程に圧縮の平均ひずみを生じる。
- (4) 両疲労試験結果を Coffin-Manson 則によって整理した結果、塑性ひずみ範囲と疲労寿命の間に良好な直線関係が得られた。本整理法の結果より、全ひずみ制御疲労試験の疲労寿命は応力制御疲労試験のそれに比べて低下する。
- (5) 平均応力の影響を考慮した Morrow, SWT, および DIT モデルにより疲労寿命を評価した結果、いずれのモデルも実験結果と良好な対応が得られたが、本供試材では Morrow のモデルが最も良い対応を示した。
- (6) ヒステリシスループの面積から求めた塑性ひずみエネルギー密度と引張りの弾性ひずみエネルギー密度の和で与えられる全ひずみエネルギー密度により、両疲労試験の疲労寿命は統一的に評価可能である。

本実験の実施に際して協力を得た、富山大学技術専門職員 友坂敏信氏、卒業研究の一環として協力を得た当時富山大学学生 芦田裕哉君に謝意を表す。また、本研究は科学研究費補助金（基盤研究(C) No. 22560075）を得て実施したものであり、関係各位に謝意を表す。

文 献

- (1) 安藤新二, 頓田英機, “Mg の変形機構と疲労破壊”, までりあ, Vol.42, No.2 (2003), pp.124-132.
- (2) 小池淳一, 宮村剛夫, “多結晶マグネシウム合金の塑性変形の微視的機構”, 軽金属, Vol. 54, No.11 (2004), pp.460-464.
- (3) 染川英俊, “マグネシウム合金の破壊靱性に関する問題点とその改善策”, までりあ, Vol. 47, No.3 (2008), pp.157-160.
- (4) Yang, P., Yu, Y., Chen, L. and Mao, W., “Experimental determination and theoretical prediction of twin orientation in magnesium alloy AZ31”, *Scripta Materialia*, Vol.50 (2004), pp.1163- 1168.

- (5) Wang, Y. N. and Huang, J. C., “The role of twinning and untwining in yield behavior in hot-extruded Mg-Al-Zn alloy”, *Acta materialia*, Vol. 55 (2007), pp. 897-905.
- (6) Kleiner, S. and Uggowitzer, P.J., “Mechanical anisotropy of extruded Mg-6%Al-1%Zn alloy”, *Materials Science and Engineering, A*, Vol.379 (2004), pp.258-263.
- (7) Cáceres, C.H., Sumitomo, T. and Veidt, M., “Pseudoelastic behaviour of cast magnesium AZ91 alloy under cyclic loading-unloading”, *Acta Materialia*, Vol.51 (2003), pp. 6211-6218.
- (8) Zenner, H., and Renner, F., “Cyclic material behaviour of magnesium die castings and extrusions”, *International Journal of Fatigue*, Vol.24 (2002), pp.1255-1260.
- (9) Klimanek, P. and Pötzsch, A., “Microstructure evolution under compressive plastic deformation of magnesium at different temperatures and strain rates”, *Materials Science and Engineering, A*, Vol.324 (2002), pp.145-150.
- (10) Srivatsan, T.S. and Wei, L., “The cyclic strain resistance, fatigue life and final fracture behavior of magnesium alloys”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.56, No.6 (1997), pp.735-758.
- (11) Nobre, J.P., Noster, U., Kornmeier, M., Dias, A.M. and Scholtes, B., “Deformation asymmetry of AZ31 wrought magnesium alloy”, *Key Engineering Materials*, Vol.230-232 (2002), pp. 267-270.
- (12) Hasegawa, S., Tsuchida, Y., Yano, H. and Matsui, M., “Evaluation of low cycle fatigue life in AZ31 magnesium alloy”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 29 (2007), pp.1839-1845.
- (13) Shih, T.S., Liu, W.S. and Chen, Y.J., “Fatigue of as-extruded AZ61A magnesium alloy”, *Materials Science and Engineering, A*, Vol. 38 (2002), pp.152-162.
- (14) Li, Q., Yu, Q., Zhang, J. and Jiang, Y., “Effect of strain amplitude on tension-compression fatigue behavior of extruded Mg-6Al-1Zn magnesium alloy”, *Scripta Materialia*, Vol. 62 (2001), pp. 778-781.
- (15) Wu, L., Jain H.J., Brown, D.W., Stoica, G.M., Agnew, S.R., Clausen, B., Fielden, D.E. and Liaw P.K., “Twinning-detwinning behavior during the strain-controlled low-cycle fatigue testing of a wrought magnesium alloy ZK60A”, *Acta Materialia*, Vol. 56 (2008), pp.688-695.
- (16) Yin, S.M., Yang, H.J., Li, S.X., Wu, S.D. and Yang, F., “Cyclic deformation behavior of as-extruded Mg-3%Al-1%Zn”, *Scripta Materialia*, Vol.58 (2008), pp.751-754.
- (17) Begum, S., Chen, D. L., Xu, S. and Luo, A. A., “Effect of strain ratio and strain rate on low cycle fatigue behavior of AZ31 wrought magnesium alloy”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 517, No. 1-2 (2009), pp.334-343.
- (18) Begum, S., Chen, D. L., Xu, S. and Luo, A. A., “Low cycle fatigue properties of an extruded AZ31 magnesium alloy”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 31 (2009), pp. 726-735.
- (19) Li, F., Wang, Y., Chen, L., Liu, Z. and Zhou, J., “Low-cycle fatigue behavior of two magnesium alloys”, *Journal of Materials Science*, Vol. 40 (2005), pp. 1529-1531.
- (20) Matsuzuki, M. and Horibe, S., “Analysis of fatigue damage process in magnesium alloy AZ31”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 504, No. 1-2 (2009), pp. 169-174.
- (21) 塩澤和章, 柏木友貴, 村井勉, 高橋泰, “マグネシウム合金 AZ80 展伸材のギガサイクル疲労挙動とフラクトグラフィ”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 75, No. 754 (2009), pp. 733-741.
- (22) 塩澤和章, 長田浩平, “展伸マグネシウム合金 AZ61 の高サイクル疲労強度特性に及ぼす応力比の影響”, 材料, Vol. 58, No. 12 (2009), pp. 982-989.
- (23) Shiozawa, K., Kashiwagi, T., Murai, T. and Takahashi, T., “Fatigue behaviour and fractography of extruded AZ80 magnesium alloys in very high cycle regime”, *Procedia Engineering*, Vol. 2 (2010), pp.183-191.
- (24) 塩澤和章, 永井将之, 村井勉, 高橋泰, “マグネシウム合金 AZ61 および AZ80 押出し材の低サイクル疲労挙動”, 材料, Vol. 58, No. 3 (2009), pp.235-242.
- (25) Shiozawa, K., Nagai, M. and Kaminashi, T., “Low cycle fatigue behavior of extruded magnesium alloys”, *Proceedings of 12th International Conference on Fracture* (2009.7, Canada), CD-ROM #01174.
- (26) Morrow, J. D., “Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals”, *ASTM STP 378, Internal Friction Damping and Cyclic Plasticity*, (1965), pp.45-87, ASTM.

- (27) Lorenzo, F. and Laird, C., “A new approach to predicting fatigue life behavior under the action of mean stresses”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 62, No. 2 (1984), pp. 205-210.
 - (28) Smith, R. N., Watson, P. and Topper, T. H., “A stress-strain parameter for the fatigue of metals”, *Journal of Materials Science*, Vol. 5, No. 4 (1970), pp. 767-778.
 - (29) Goodenberger, D. L. and Stephens, R. I., “Fatigue of AZ91E-T6 cast magnesium alloy”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 115, No. 4 (1993), pp. 391-397.
 - (30) Park, S. H., Hong, S. G., Lee, B. H., Bang, W. and Lee, C. S., “Low-cycle fatigue characteristics of rolled Mg-3Al-1Zn alloy”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, No. 11 (2010), pp. 1835-1842.
-