

マグネシウム合金 AZ92A における
疲労き裂発生挙動

高知工科大学

知能機械システム工学科 4年

1010180 中澤 由佳

目次

1.緒言	1
2.材料および試験片について	2
3.実験方法	5
4.実験結果・考察	
4-1 平滑材における疲労強度	7
4-2 表面連続観察結果	7
4-3 破面観察	9
4-4 切欠き材における疲労強度	9
4-5 切欠き感度	9
5.結言	12
6.謝辞	13
7.参考文献	13

1. 緒言

マグネシウムは実用金属中でもっとも軽く、地球上で6番目に豊富な金属であり、その合金は比強度、切削性、減衰性、放熱性、吸振性、寸法安定性、などに優れた材料である。しかし、わが国におけるマグネシウムの使用用途は他の合金への添加材や還元材としての使用が7割を占めており、構造用としてのマグネシウム合金は、鋳造、圧延、押出などの様々な加工法により成形され使われている。鋳物としての使用が大部分で、大量生産にはダイカスト法などが用いられている。航空機やロケット、自動車などの産業部品などは、砂型鋳造が多く使用されている。また、地球環境保護の観点からも、リサイクル性に有効な金属として注目されている金属である。

機械や構造物における材料を考えると、基本的要求のひとつとして、それらの全体または各部分がその使用中に荷重に耐え破壊しないという安全性がある。装置や機械、構造物が大型化、高性能化する現代は、材料は非常に過酷な環境下におかれることになる。材料の持つ強さよりも大きな力がかかれば破壊するのは当然であるが、フックの法則が十分成り立つと思われるときでも、小さな荷重で、連続して長時間、又は長時間繰り返し負荷されると、材料のどこかに割れ目が生じ、成長進展して破壊にいたる。いわゆる疲労破壊が生じる。このような金属疲労の過程は一般的に、き裂発生過程とき裂伝ば過程に分けられる。き裂発生過程は大きく二つに分類でき、すべりの開始からき裂成長までの過程が連続的に起こり、点発生的なき裂発生過程を経るものである。このようなき裂生成段階は、き裂進展の第1段階とよばれる。一方、鋼、黄銅、チタンなどの多くの金属では、結晶粒程度の有限な領域を単位としてき裂が発生する。いずれにおいても、疲労き裂の発生には結晶粒内のすべりの繰返しによって疲労寿命の比較的初期に起こる。

一方、切欠きのような、形状が複雑に変化する部分では、応力の分布が不均一になり、切欠き底では応力が集中的に高くなる。このことを応力集中というが、応力集中が生じる場合の疲労挙動も実際の機械・構造物の設計の際には重要になる。

材料中に切欠きがあると、その部分に担うべき応力をその周辺がかわってささえなければならぬことから、応力集中が生じる。このような応力集中部での材料強度特性は線形切欠き力学の考え方によりうまく評価できる。線形切欠き力学の概念は、応力集中による最大応力と、切欠き半径の2つのパラメータにより現象を統一的に扱うものである。本研究では、もっとも一般的に使用されている鋳物用マグネシウム合金である Mg-Al-Zn 系合金の代表種である AZ92A についての平面曲げ疲労試験を行い、疲労き裂発生挙動ならびに切欠き感度についての調査を行った。

2 . 材料および試験片について

実験に使用した材料は、Mg-Al-Zn 系合金、AZ92Z-T6(JIS,MC3)で、その化学成分を表 1 に、また機械的性質を表 2 にそれぞれ示す。

表 1 化学成分 (w t %)

Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Mg
8.69	1.94	0.14	0.023	0.002	0.002	bol.

表 2 機械的性質

耐力 0.2 MPa	引張応力 B MPa	伸び %	ヤング率 E GPa
148	282	7	43

納入材は約 270 × 100 × 20mm に鑄造された鑄塊で、試験片は、図 1(平滑材試験片)、図 2 (両側切欠き試験片) に示す形状・寸法に以下の手順で機械加工を行った。

フライス盤で端部の加工をする。

帯のこ盤で厚さ約 5 mm、長さ 9 0 mm に切断。

フライス盤で表面を切削し、厚さ 4.5 mm に仕上げる。

側面のばりをやすりで除去。

7 ~ 8 枚の試験片をフライス盤に置き側面を仕上げ加工。(0.5mm ずつ)

反対側の面をノギスではかりながら、板幅を仕上げる。

すべてのばりをやすりでとる。

試験機チャック部のボルトの逃げ部を加工する。

球面くぼみ部、切欠き部をつける。(R = 2、1、0.5、0.2、0.1)

シートペーパーで表面を磨く。

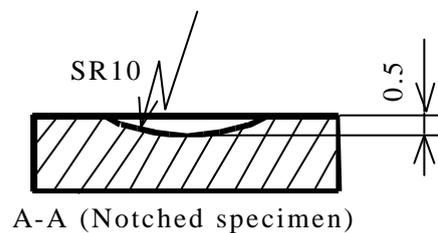
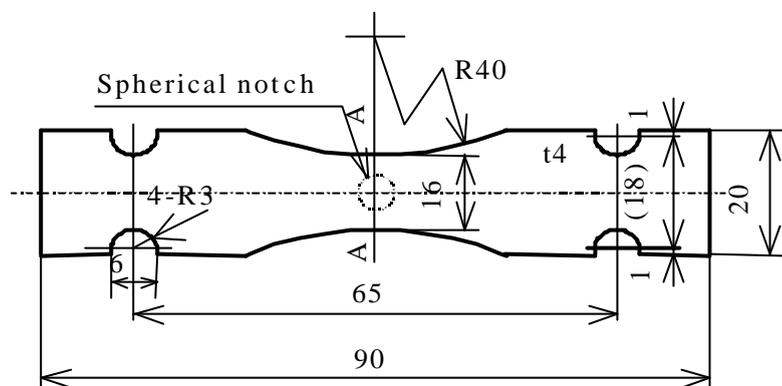
(目の粗い 150 320 800 の順で)

球面くぼみ部を、バフ研磨、切欠き部をカーボンランダム粉(#2000 まで)で磨く。

電解研磨により表面をきれいに加工する。

陽極溶解により研磨する

- ・ リン酸 (H_3PO_4) 3部、エチルアルコール ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) 5部
- ・ 5.5V、1.5A で1時間、後に、6.5V、1.5A で5分研磨する
- ・ 10%水酸化ナトリウムで洗う (酸をアルカリで中和するため)
- ・ 水で十分洗浄後、ガーゼであらう。
- ・ アルコールをかけて、ドライヤーで乾かす。
- ・ 顕微鏡で表面の観察をおこない、結晶粒を確認をする。



(単位 :mm)

図1 . 平滑材試験片の形状および寸法

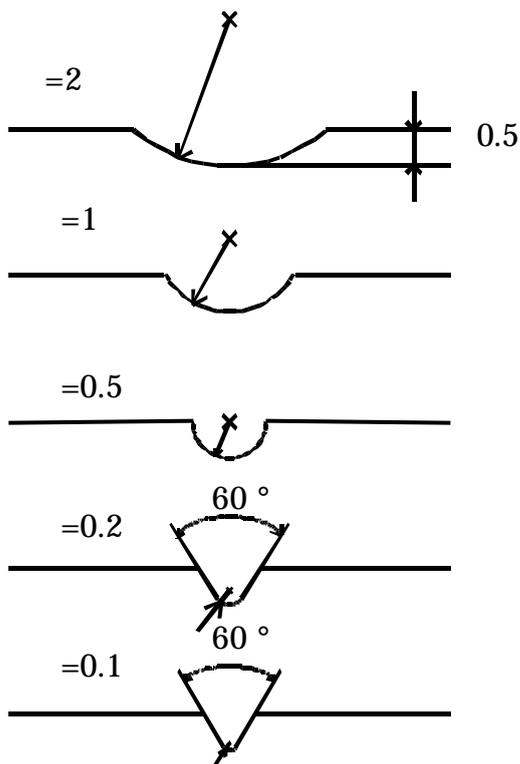
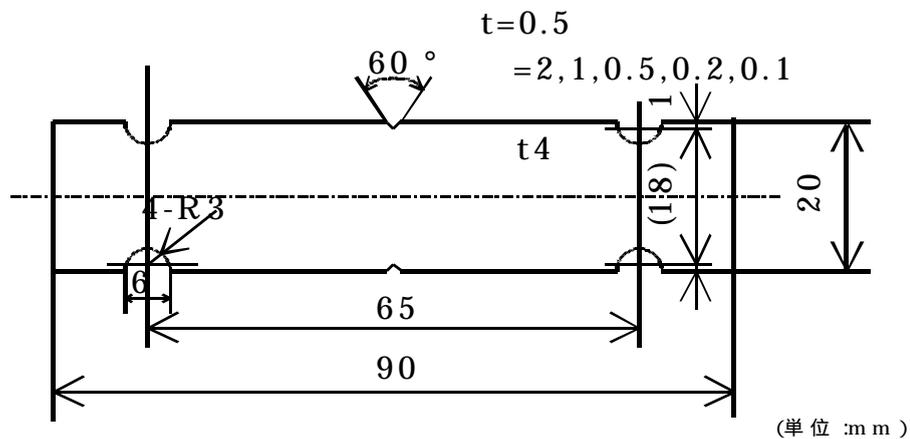
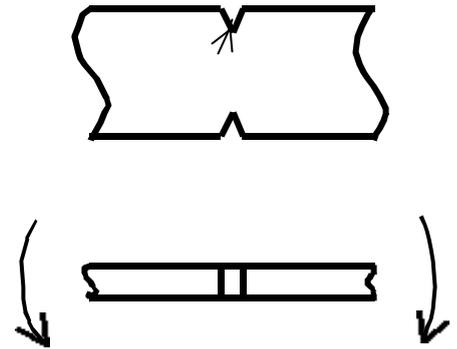


図 2 . 両側切欠き試験片の形状および寸法

各切欠き試験片の平面曲げにおける応力集中係数 K_t は、有限要素法解析解析パッケージ ANSYS を用い計算した結果を表 3 に示す。応力集中係数とは、切欠き底の最大応力 σ_{max} を最小断面における公称応力で割った値である。

表3．応力集中係数

	2	1	0.5	0.2	0.1
Kt	1.36	1.53	1.75	2.28	2.88



3．実験装置・方法

実験にて用いた試験機は、平面曲げ疲労試験機（東京衝機製）で諸元を表4に示す。鉄、非鉄金属、高分子材料などの試験片の動的疲労試験を行う目的でつくられている。

表4．疲労試験機諸元

最大動的モーメント	± 15Nm
最大静的モーメント	30Nm
最大組合わせモーメント	30Nm
駆動繰返し角度	max ± 12 °
静的初期負荷角度	max ± 18 °
平形試験片厚さ	0.6 ~ 12mm
繰返し負荷周波数	約 300 ~ 1500cpm
繰返し回数	999999 × 100 回
重量	約 71kgW
ユーティリティー	単相 200/220V 0.2kVA

負荷する必要な曲げモーメントの計算は以下のとおりである
繰返し曲げ応力振幅を σ_a とする。

試験片の断面係数 Z は次式により計算される。

$$Z = bh^2/6 \quad (1)$$

ここで、 b は幅、 h は板厚である

必要な曲げモーメント M は次式により計算される。

$$M = Z \times \sigma_a \quad (2)$$

実際の試験手順を図3のフローチャートに示す。

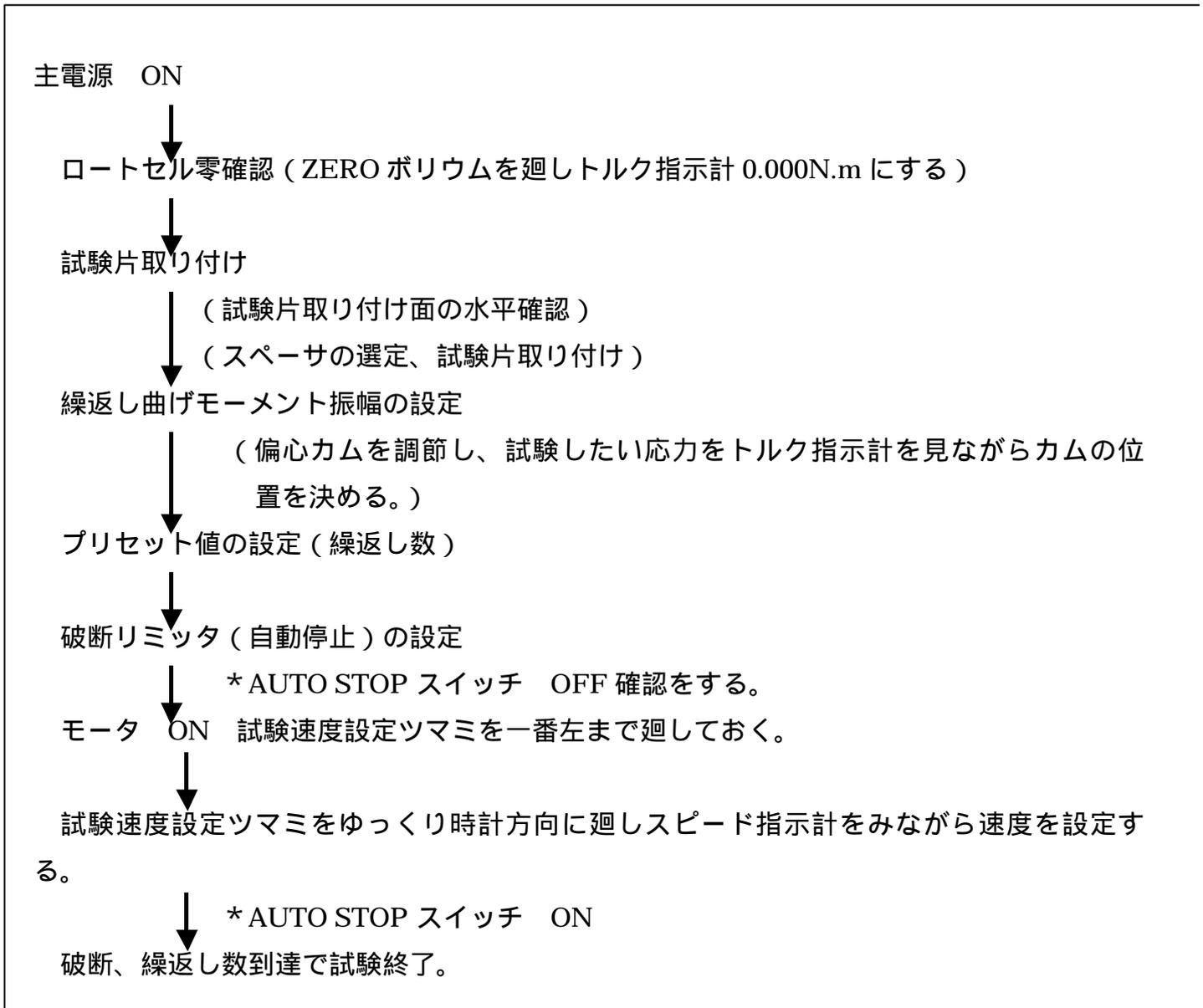


図3 . 試験手順

なお、負荷した曲げモーメントの最大値が70%まで低下したときでお破断とみなして、試験を終了した。

き裂の発生過程の連続観察にはレプリカ法を用いた。この方法は以下のとおりである。まず、ピンセットでアセチルロースをアセトンに浸して、試験片のき裂観察面に貼り付ける。この時、試験片とアセチルロースの間に気泡が入らないようにすばやく作業を行う。1~1.5分で貼り付けたアセチルロースは乾燥するので、き裂観察面にピンセットが触れて傷をつけないように注意して試験片からはがす。そしてガラス板に両面テープを貼り付け、その上に先ほどのレプリカを試験片に接していた面を上にして貼り付ける。その後、き裂発生箇所をさか登り光学顕微鏡で観察、撮影する。このときイオンスプッターを用いて、レプリカを貼り付けたガラス板に真空状態の中で15秒間、20mAかけて、レプリカの表面の反射率を向上させ観測を容易にさせた。後に20倍の対物レンズで、写真をとっていく。

フィルムの現像は、暗室で専用の器具にネガを入れ、以下の順で、処理した。

- 1 . 現像液マイクロファインを約 20 分を用いて 7 ~ 8 分現像。
- 2 . 酢酸に 1 分弱停止。
- 3 . 定着液で定着 3 分。
- 4 . 水洗い 40 ~ 50 分。
- 5 . 乾燥。

次に暗室で、ネガから感光時間を調節し印画紙に以下の手順で焼き付ける。

- 1 . 露光
- 2 . 現像液コレクトロールを用いて現像。
- 3 . 酢酸につける。
- 4 . 印画紙定着液 5 ~ 6 分。
- 5 . 水洗い 40 から 50 分。
- 6 . 乾燥。

き裂の発生していく過程についての観察を行う。

破面の観察は走査型電子顕微鏡を用いた。試料の準備は以下のとおりである。破断面を切欠き部を含めて切断しアセトンにつけ、超音波洗浄をした後、試料を乾かす。試料台に両面テープをはり、試料をのせ、電気を通すため、隙間に銀をしみこませる。

4 . 実験結果および考察

4 - 1 . 平滑材における疲労強度

疲労試験の結果として、S-N 曲線を図 4 に示す。図中 印が球面くぼみ無し（平滑材）、印が球面くぼみ有の試験のデータであるが、平滑材も球面くぼみつき試験片もどちらもほとんど差はみられない。また、鋼などの SN 曲線に見られる明瞭な折れ曲がりとは 2×10^7 回までの繰返し範囲においては観察されなかった。すなわち、未破断であった試験片について、き裂発生は認められなかった。 10^7 回時間強度は、約 80MPa で引張り強さ σ_B に対する比は 0.28 であった。

4 - 2 . 表面連続観察結果

疲労き裂発生挙動の一例として応力振幅 σ_a が 110MPa における表面連続観察結果を図 5 に示す。本材料は白地の 固溶体の粒界より、 $Mg_{17}Al_{12}$ が不連続析出した微視組織を有する。試験荷重 0.25N でビッカース硬さを測定したところ、 相は Hv=110、不連続析出部

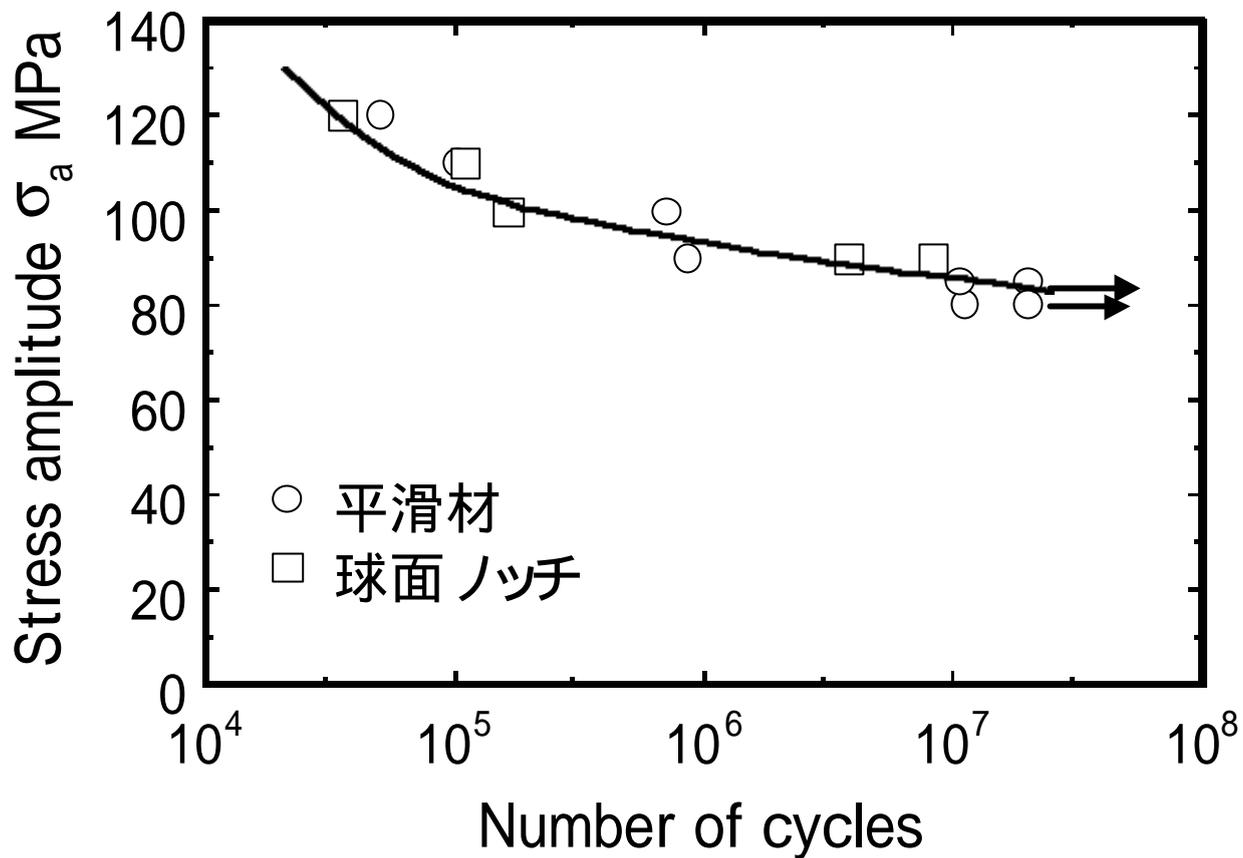


図4 . S-N 曲線 (平滑材試験片)

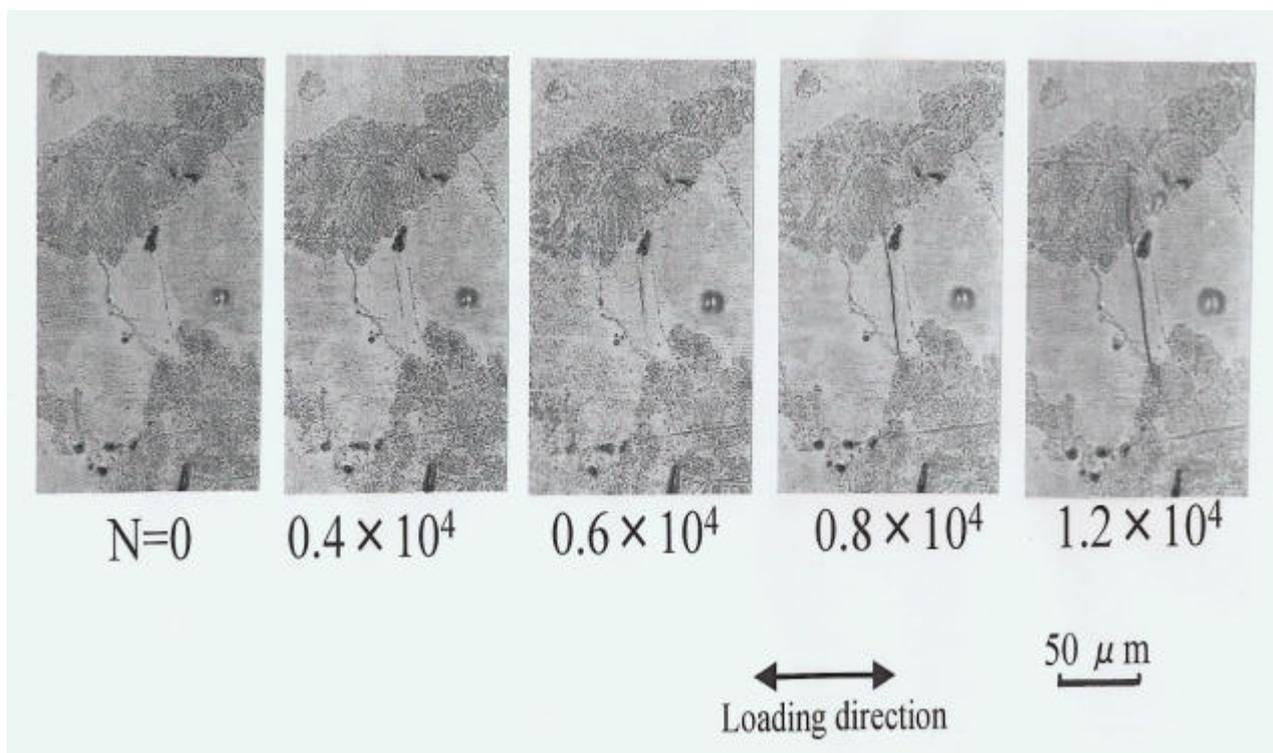


図5 . 応力振幅 110Mpa における表面観察

は $Hv=147$ であった。

き裂発生に至るまでの過程として、まず繰返しに伴い 相内に多数のすべり帯が出現する。これらのすべり帯に沿ってき裂が発生するが、走査型電子顕微鏡により詳細に観察すると複数の微小き裂が発生しこれらが連結して一結晶粒程度のき裂に成長し伝ばを開始することが分かった。このすべりはおそらく底面すべりであり、き裂発生挙動は他の Mg 合金とほぼ同様である。

ここでのき裂発生寿命は 0.6×10^4 回程度であり全破断寿命の約 5 % であった。

4 - 3 . 破面観察

応力振幅の低い場合、表面からのき裂ではなく、内部の欠陥からき裂が発生する場合もあった。応力振幅 90MPa において実験した時、表面においてき裂発生が確認できず急に破断に至った。このような場合、後述するようにき裂発生は内部の欠陥から生じている。

疲労試験後、破面を走査型電子顕微鏡により詳細に観察をすると、図 6 に示すような十数 μm 程度の欠陥表面より約 10 μm 内部に見られ、ここを起点としてき裂が発生し破断に至ったことが分かった。

図 5 に示した表面連続観察部の破面の SEM 写真で図 7 に示す。破面を観察するとき裂が発生した 相の破面は比較的平坦であるが、微小き裂が連結した跡が明瞭に確認できた。同じ稠密六方晶である純チタンにみられるような隣接する結晶に発生したき裂同士が連結するような発生挙動はいずれの応力振幅においても観察されなかった。

4 - 4 . 切欠き材における疲労強度

図 8 に切欠き材についての実験で得られた S - N 曲線を示す。本材料は S-N 曲線には明確な折れ点が見られず、いずれの切欠き材についても 10^7 回で応力を繰返しても破断せず試験片にはき裂の発生がみられなかった。切欠き半径 2mm、1mm の時 10^7 回時間強度は 70MPa、切欠き半径 0.5mm の時 10^7 回時間強度は 65MPa、切欠き半径 0.2 mm の時 10^7 回時間強度は 44.5MPa、切欠き半径 0.1mm の時 10^7 回時間強度は 40MPa であった。有限寿命領域においても当然ながらさらに、切欠きが最も鋭い $r=0.1$ においても停留き裂に観察されなかった。切欠き半径が小さくなるほど同一応力振幅における破断寿命は低下した。

4 - 5 . 切欠き感度

切欠き感度を評価するため線形力学に基づき、疲労試験の結果をまとめたものを図 9 に示す。この図は、縦軸に切欠き材の 10^7 回時間強度における切欠き底の弾性最大応力 Kt_w を、平滑材の疲労限度 w_0 で無次元化した値を、横軸には切欠き半径の逆数をとったもので、縦軸の値が大きいほど切欠きに対して鈍感であることを表している。したがっ

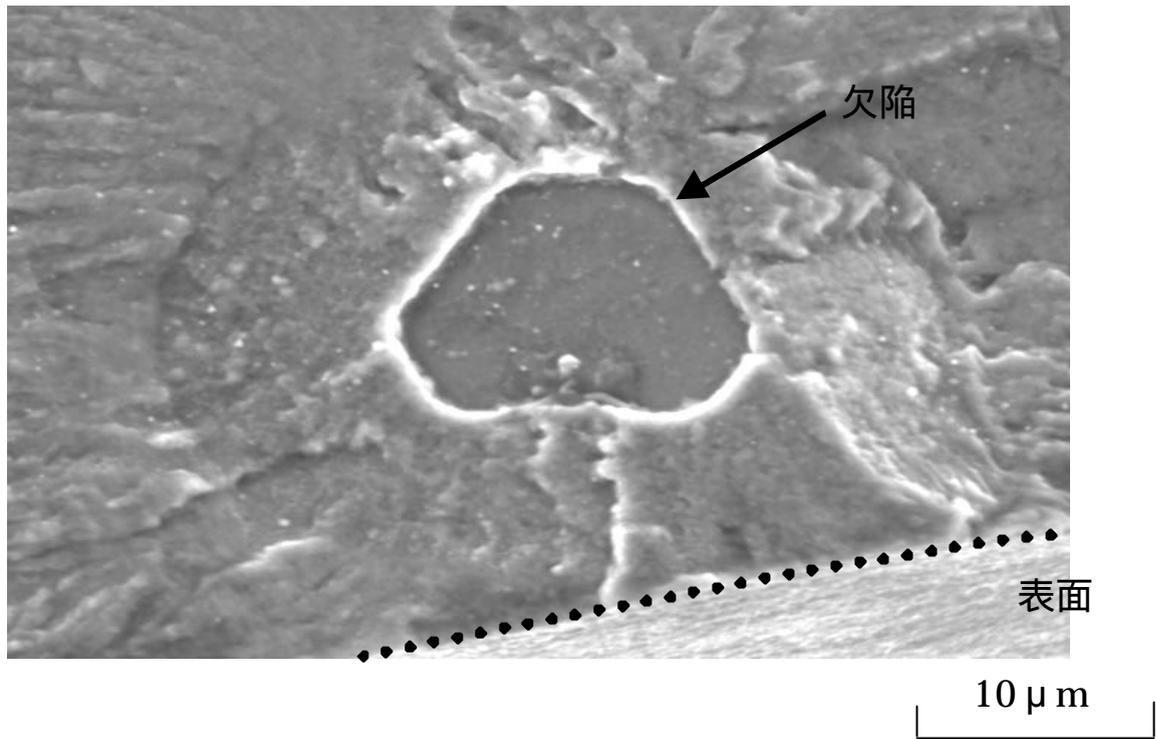


図 6.応力振幅 90MPa における破断面



図 7 . 破面
10

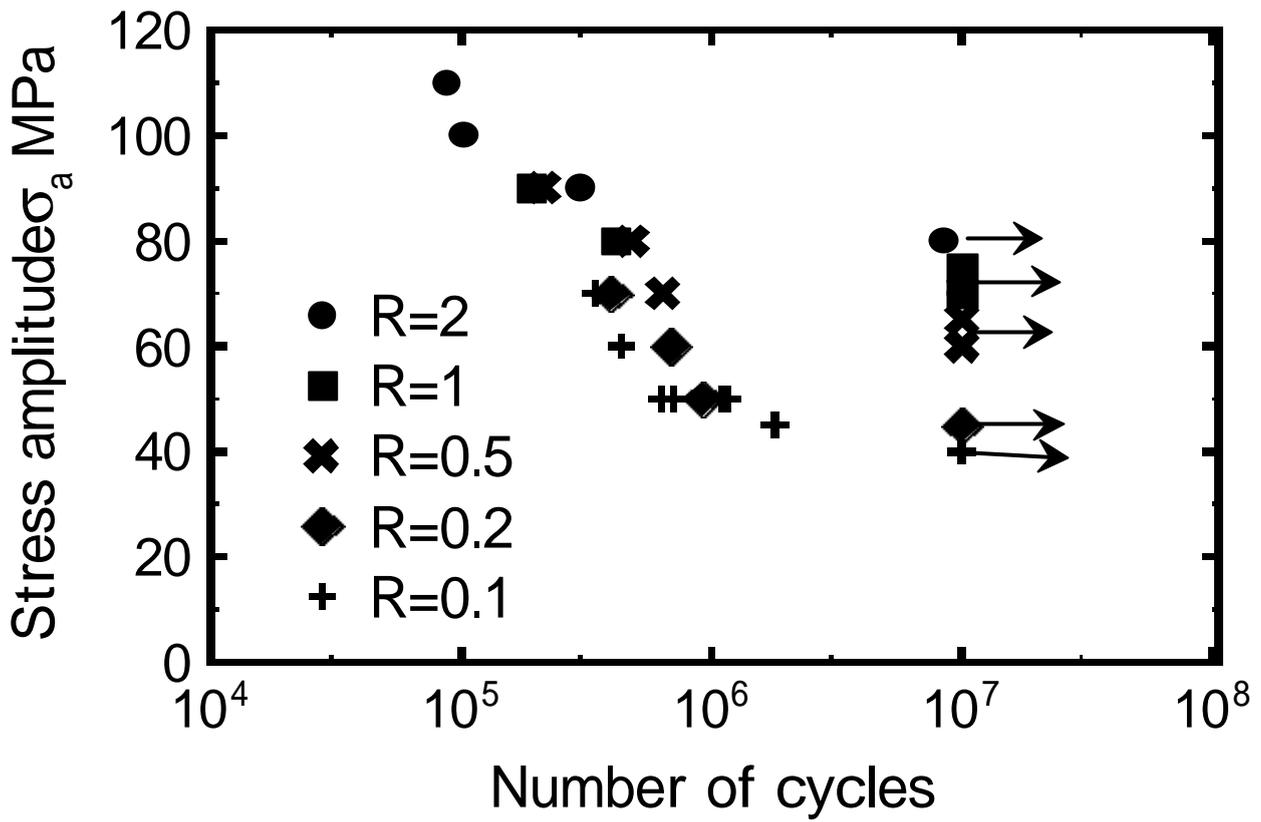


図8 . S-N 曲線 (両側切欠き試験片)

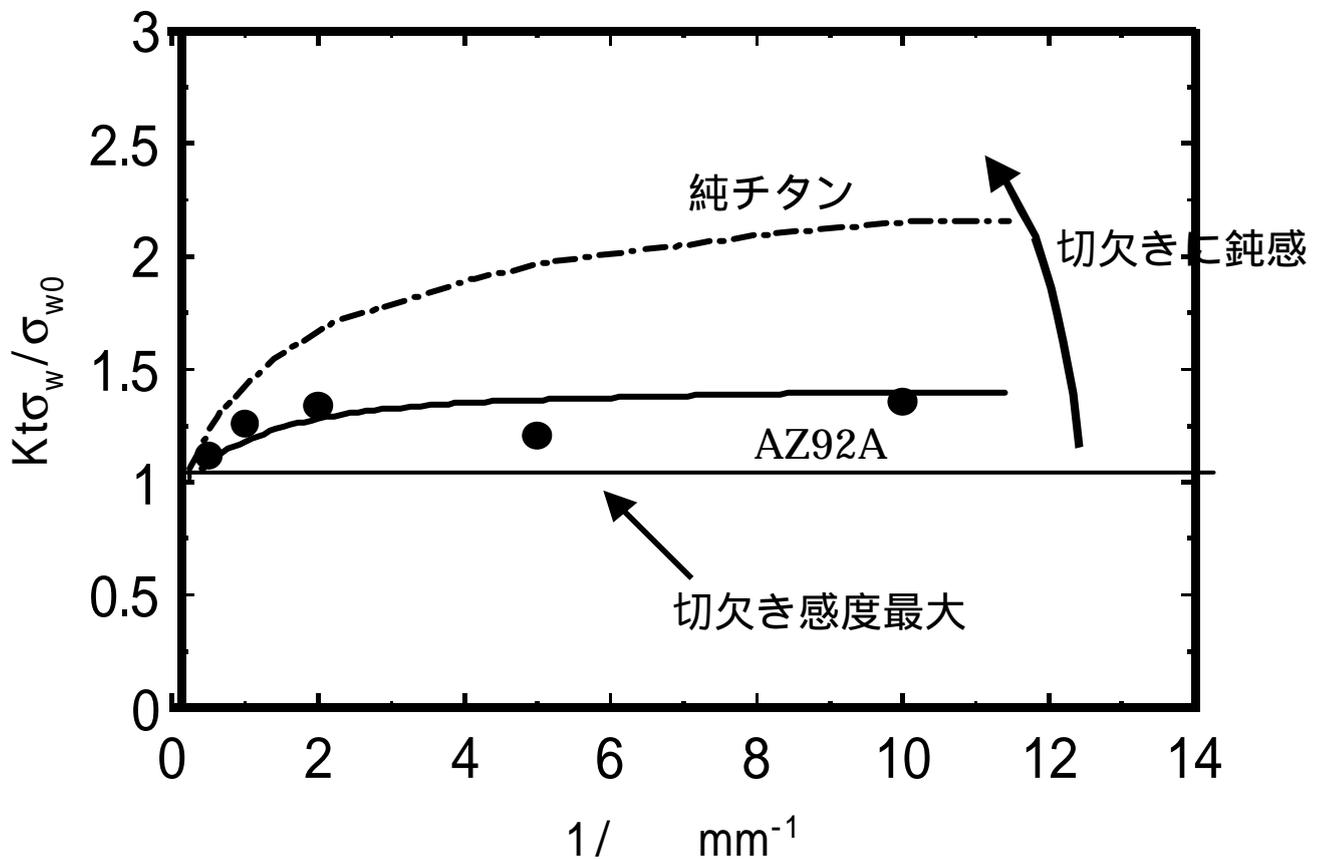


図9 . 切欠き感度

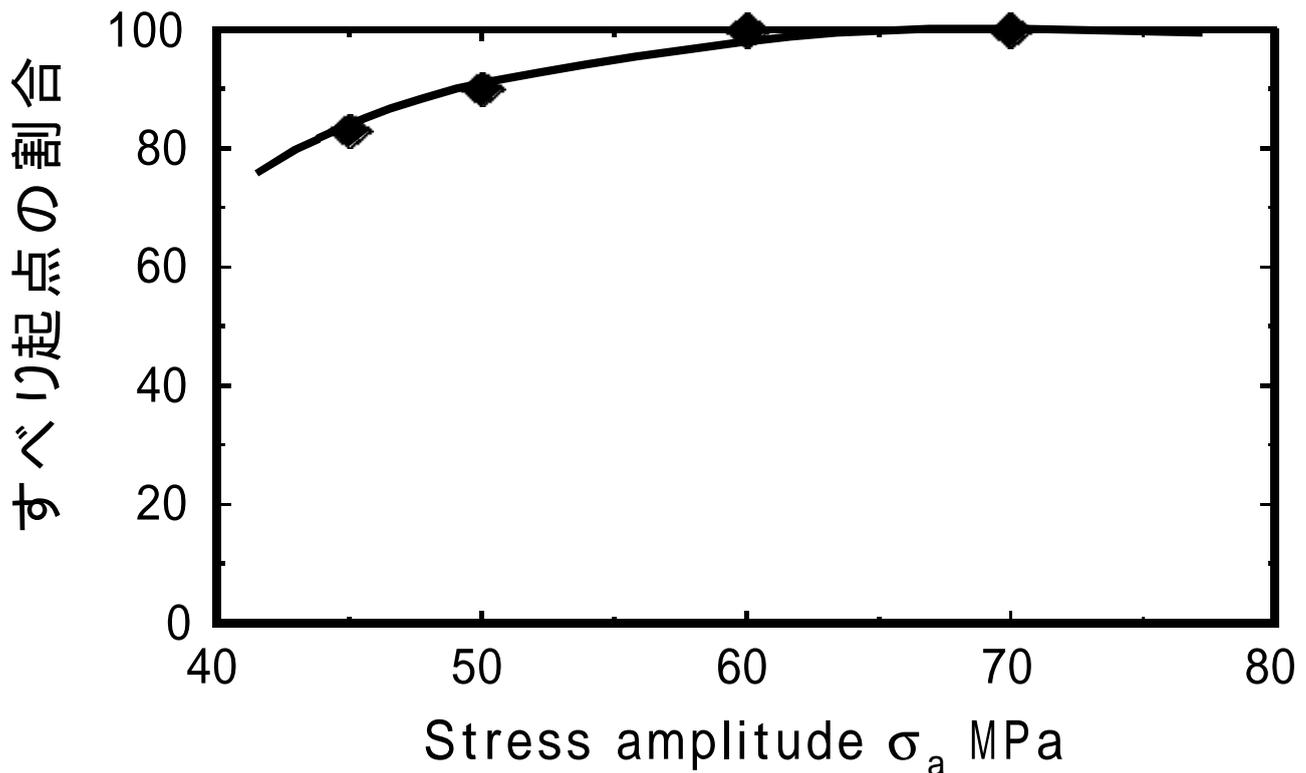


図 10 . すべりによるき裂発生割合

て、縦軸の値が 1 であることは切欠き感度が最大であることを表している。この図には、同じ稠密六方構造を有する純チタンの結果を比較のために示した。本材料は純チタンに比べてかなり切欠きに敏感であることがわかる。

切欠き材においても疲労き裂は、表面のすべりと内部の欠陥から発生する場合があった。破断した切欠き半径 0.1mm の切欠き試験片について走査型電子顕微鏡により破面を観察し、き裂発生部をすべりか欠陥かを判断した。その結果を図 10 に示す。応力振幅が低い時に表面からき裂が発生せず内部の欠陥からき裂が発生する割合が高くなることがわかった。

5 . 結言

マグネシウム合金 AZ92A の平滑材および切欠き材について、平面曲げ疲労試験を行い、疲労強度ならびにき裂発生挙動について、詳細に検討した結果、以下の結論が得られた。

- 1 . き裂は表面の 相に生じるすべり帯に沿って発生する場合と、表面近くの材料内部にある微小欠陥を起点として発生する場合がある。
- 2 . AZ92A は同じ稠密六方の純チタンに比べて切欠き感度が高いことがわかる。
- 3 . 応力振幅が低いときに表面からき裂が発生せず内部の欠陥からき裂が発生する割合が高い。

6. 謝辞

本実験研究および学部論文作成にあたり、ご指導下さいました楠川量啓助教授に心から感謝の意を表します。

7. 参考文献

- 村上 理一 高尾 健一 萩山 博之 著 材料強度学入門
村上 敬宜 著 金属疲労微小欠陥と介在物の影響
日本機械学会 一般・寸法効果・切欠き効果