

マグネシウム合金AZ92Aの疲労き裂伝ば速度に及ぼす水環境の影響

知能機械システム工学科

1010153

白倉 一人

目次

1. 緒言
2. 試験片および実験方法
 - 2-1. 試験片
 - 2-2. 腐食環境用チャンバー
3. 疲労試験
4. 実験結果および考察
5. 結言
6. 謝辞
7. 参考文献
8. 付録

1. 緒言

今日、数多く使用されている工業用金属材料は環境の影響を強く受けるため、腐食疲労抵抗は大変重要な問題である。本実験対象である鋳造用マグネシウム合金は、非常に軽量で比強度が高く、寸法安定性、振動吸収性に優れているゆえに構造用材料としても使用されている。特に航空機、船舶、自動車、および産業部品などの砂型鋳造品としてはAZ92Aが多く用いられている。そのため地球環境保護の観点から見ても、リサイクルの多いに有効な金属として注目されている。しかし、マグネシウム合金は耐食性の悪さ（マイナスイオンが反応して、マグネシウム合金の表面を保護している膜を除去して腐食抵抗を減少させる）が指摘されているため、水や人工海水中などの環境下における疲労特性を明らかにすることは、上記に挙げたようなマグネシウム合金の実用性という観点からも重要なことである。

本実験では水環境における腐食疲労に注目して試験を行った。腐食疲労とは、腐食環境中で繰返し応力を受けるとき、腐食（金属が取り囲まれる環境とあるいは化学的反応を起こして損傷すること）により、金属イオンが溶け出す事などによって疲労強度の低下が著しく、大気中の疲労と異なった挙動を示すようになる。疲労き裂は公称応力が降伏点よりもはるかに低い状況のもとで進行し、塑性変形がき裂先端近傍に限られているので、多くの場合小規模降伏の条件が成立する。これより金属材料の疲労き裂伝ば過程を、線形破壊力学によって取り扱うことができる。き裂長さ a が繰返し数 N の間に a だけ成長したとき、その成長速度を da / dN と表し、疲労き裂伝ば速度といい、 K は繰返される応力の最大値 σ_{max} による K_{max} (式 1) と最小値 σ_{min} による K_{min} (式 2) の差をとったものでこれを応力拡大係数幅 ΔK (式 3) という。疲労き裂進展速度 da / dN と応力拡大係数幅 ΔK には何らかの関係があることが見出され、パリス則(式 4)が疲労き裂伝ば速度のデータを整理するために導入された。

$$K_{max} = \sigma_{max} \sqrt{\pi} \cdot F \left(\frac{a}{W} \right) \quad (1)$$

$$K_{min} = \sigma_{min} \sqrt{\pi} \cdot F \left(\frac{a}{W} \right) \quad (2)$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = \Delta \sigma \sqrt{\pi} \cdot F \left(\frac{a}{W} \right) \quad (3)$$

$$da / dN = C (\Delta K)^m \quad (4)$$

(a : き裂長さ F : 補正係数 W : 試験片の幅)

また、繰返される応力については、最大応力 σ_{max} と最小応力 σ_{min} の差を応力幅 (式 5) といい、最小応力 σ_{min} に対する最大応力 σ_{max} の比を応力比 R (式 6) という。 C およ

びmは材料と負荷条件で決まる定数とされている。

$$\Delta S = S_{\max} - S_{\min} \quad (5)$$

$$R = S_{\min} / S_{\max} = K_{\min} / K_{\max} \quad (6)$$

この疲労き裂伝ば速度 da / dN と応力拡大係数幅 K を両対数プロットすることにより図1に示すような曲線を得られることが分かっている。この曲線は三つの領域に分けることができる。応力拡大係数幅 K の低い領域では、それ以下の応力拡大係数幅 K で、き裂が伝ばしない応力拡大係数幅 K があり、これを下限界応力拡大係数 K_{th} といい、この領域をモード という。また、応力拡大係数幅 K の高領域では、それ以上の K では静的破壊が起こる疲労じん性値 K_{fc} がありこの領域をモード という。これらの二つの中間領域においてき裂は伝ばしており、疲労き裂進展速度 da / dN が一定で、一本の直線で近似することが出来るこの領域をモード といい、この区間でパリス則は成立する。本研究では水環境下におけるAZ92マグネシウム合金の疲労き裂伝ば挙動を前述したパリス則に基づいて評価し、疲労き裂伝ば速度 da / dN 、応力拡大係数幅 K の関係を明らかにし、大気中における疲労試験の結果と比較、検討することが目的である。

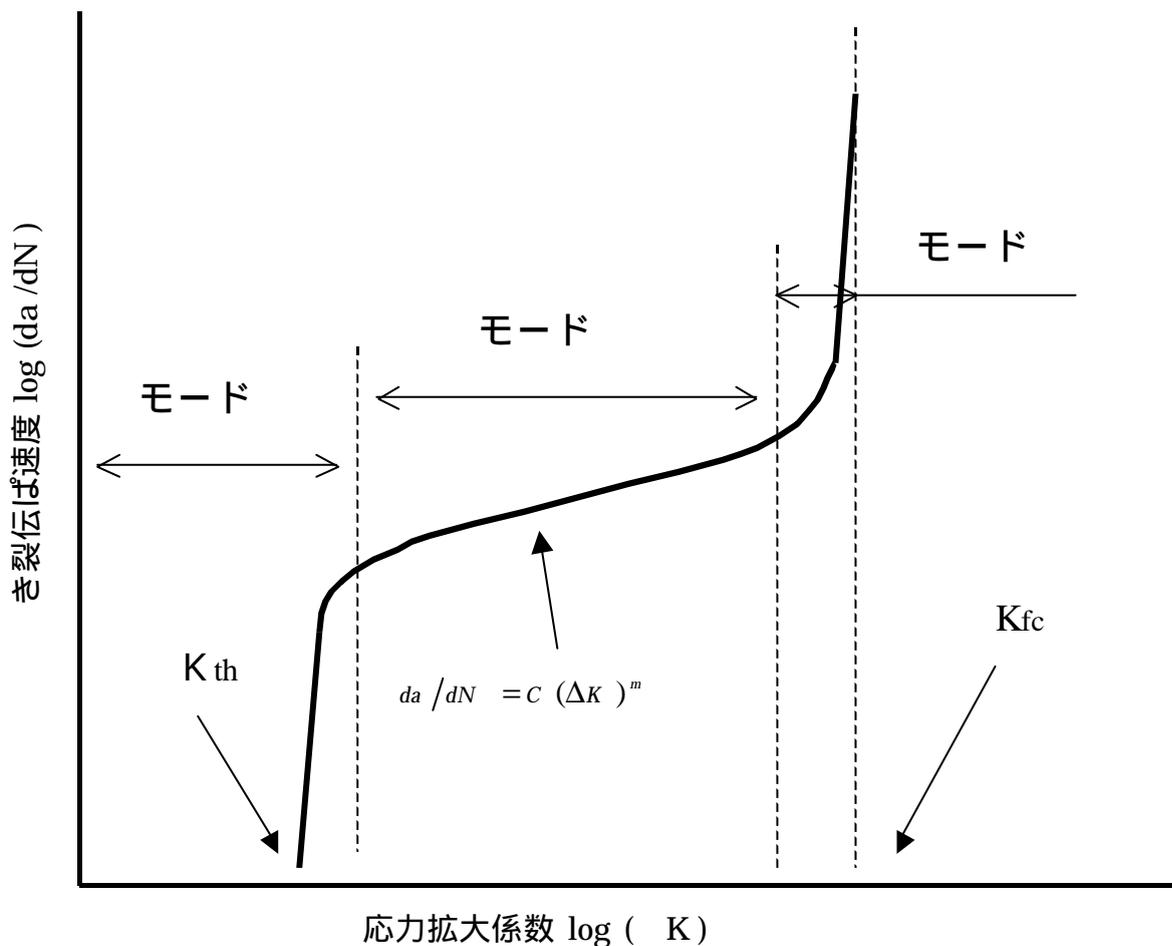


Fig.1 da / dN と K の関係

2. 試験片および実験方法

2-1. 試験片

本実験に使用した材料は Mg-Al-Zn 系合金 AZ92A-T6 (JIS , MC3)で、その化学成分を表 1 に、機械的性質を表 2 に示す。引張り強さは 282MPa、0.2%耐力は 148MPa となっている。0.2%耐力とは、降伏応力に明瞭な特徴がなく、材料の強度特性が明確に表れないような場合に、降伏応力に相当する強度として引張り試験の途中から除荷したときに 0.2%の残留ひずみが残るような応力をいい、材料の強度特性として用いる。

Table 1 Chemical composition (wt%)

A L	Z n	M n	S i	C u	N i	M g
8.69	1.94	0.14	0.023	0.002	0.002	bal.

Table 2 Mechanical properties (AZ92A-T6)

Tensile strength	Elongation	Proof stress
282 MPa	7.0 %	148MPa

試験片の形状および寸法を図 2 に示した。本実験には中央切り欠き試験片を使用した。実験材料である AZ92A-T6 マグネシウム合金は、納入材が鋳塊であったため、まず帯のこ盤を使用して板状に切り出した。次にフライス盤で図 2 に示す寸法に機械加工し、更に中央にスリット(切り欠き)をつけるためにボール盤を使用して 2mm の穴をあけ、穴の両縁に糸のこぎりを使用してスリット(切り欠き)1mm をつけた。それらの作業の後に、試験片の両面をサンドペーパーの 150, 320, 800 番の順で研磨し、き裂観察面は仕上げに研磨剤(カーボンランダム)の 800, 2000 番)をガーゼにつけて研磨することによって、試験片の表面を鏡面仕上げにした。鏡面仕上げにした理由は、実験終了後、マグネシウム合金の表面がどのように腐食されているか見るためと、き裂長さを読み取り顕微鏡で測定しやすくするためである。鏡面仕上げにした裏面の、予想き裂伝ば経路上にひずみゲージを二枚貼った。ひずみゲージを貼る場所はスリット寄りに一つ、端に一つとした。ひずみゲージを二枚貼る理由は、き裂の伝ばによりひずみゲージが破損して、測定不能にならないようにするためである。ひずみゲージを貼った後、ひずみを測定する動ひずみ計と接続するための導線をハンダを使用して接続した。これらの作業後、漏電しないようにシリコンでシールドを施した。このゲージは後述するき裂開閉口荷重を測定するためのものである。

2-2. 腐食環境用チャンバー

本実験は腐食環境中で行うためにアクリル板を使用してチャンバーを製作した。アク

リル板を使用したのは、透明で観察が容易であることに加え、軽量で加工しやすかったためである。帯のこ盤を使用してアクリル板を切り出した後、フライス盤を使用して所定の寸法に機械加工した（詳細な図面は付録参照）。本実験は水を循環させるために、側面になるアクリル板に 10mm の穴をあけた。この穴にはチューブジョイントを取り付け、ホースをつないで水を循環させるためである。これらの加工後、試験片とチャンバーとの固定には、試験片につけた Oリングをアクリル板で挟み込むという方法を用いた。試験片がチャンバーの中央を貫通するように設置するため、本体側と挟み込む側の両方ともフライス盤を使用して、中央に 5mm の穴を連続して空け、角の部分は棒やすりで削り、挟み込む側のアクリル板にはフライス盤を使用して Oリングを挟むための 5mm の溝を作り、所定の寸法に加工した（詳細な図面は付録参照）。これらの加工後、接着剤を使用して各部を組み立てた。チャンバー全体の模式図を図 3 に示す。

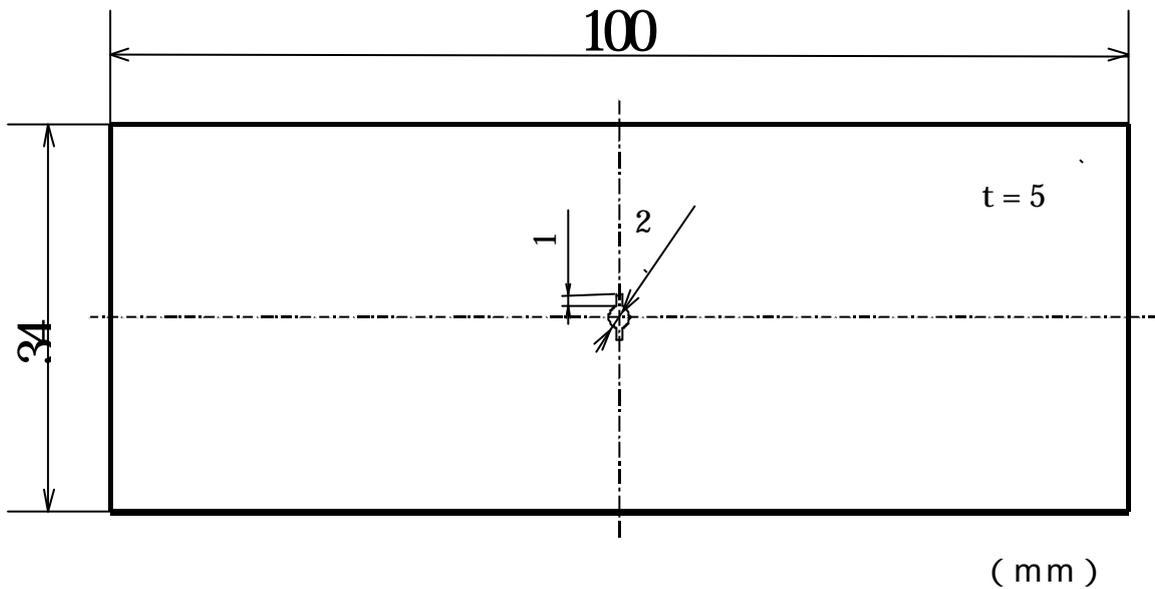


Fig. 2 試験片の形状および寸法

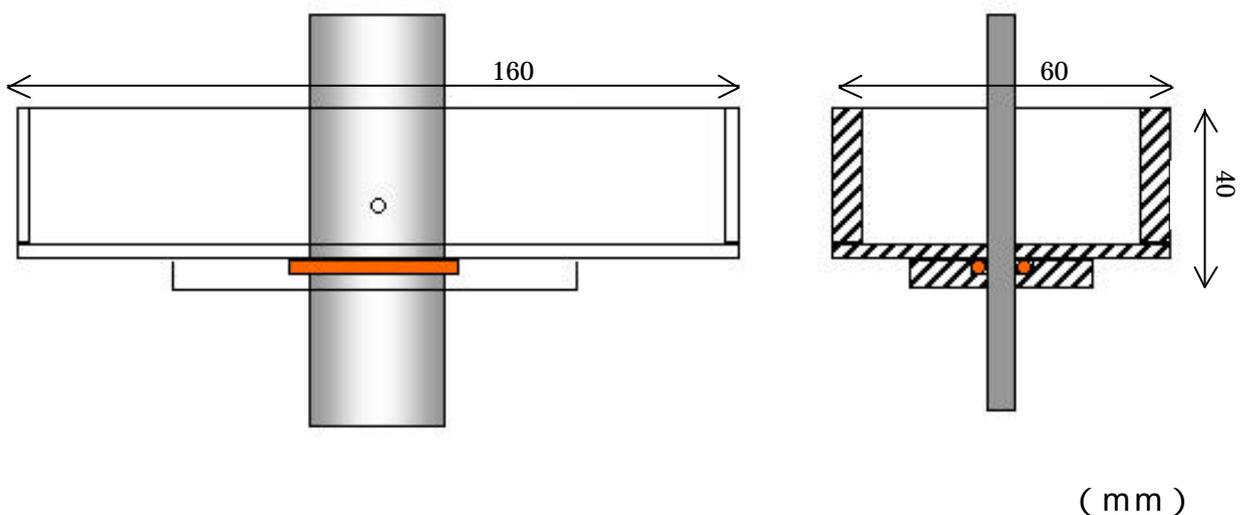


Fig. 3 アクリル製チャンバー

腐食環境装置を含めた試験装置のシステムを図4に示す。前述の亚克力製チャンバーにおいては、タンク、ポンプ、流量調節弁、チャンバー、タンクの順で水が流量 2.86 L / min で循環している。連結にはそれぞれ 12mm、 10mm、 8mmのテトロンブレードホースを使用した。流量が 2.86 L / min であるのは、ポンプの吐出量とチャンバーの許容量より、流量調節弁を調節して最適な状態（チャンバーから水が溢れ出ない）における流量を計測した結果から得られたものである。データレコーダは荷重やひずみの波形データの計測、およびエクセルへの変換等のデータ処理を行うために使用した。また、水が漏れた時のことを考え、疲労試験機に水がかからないようにするために、チャンバーの下には受け皿を用意しておいた。

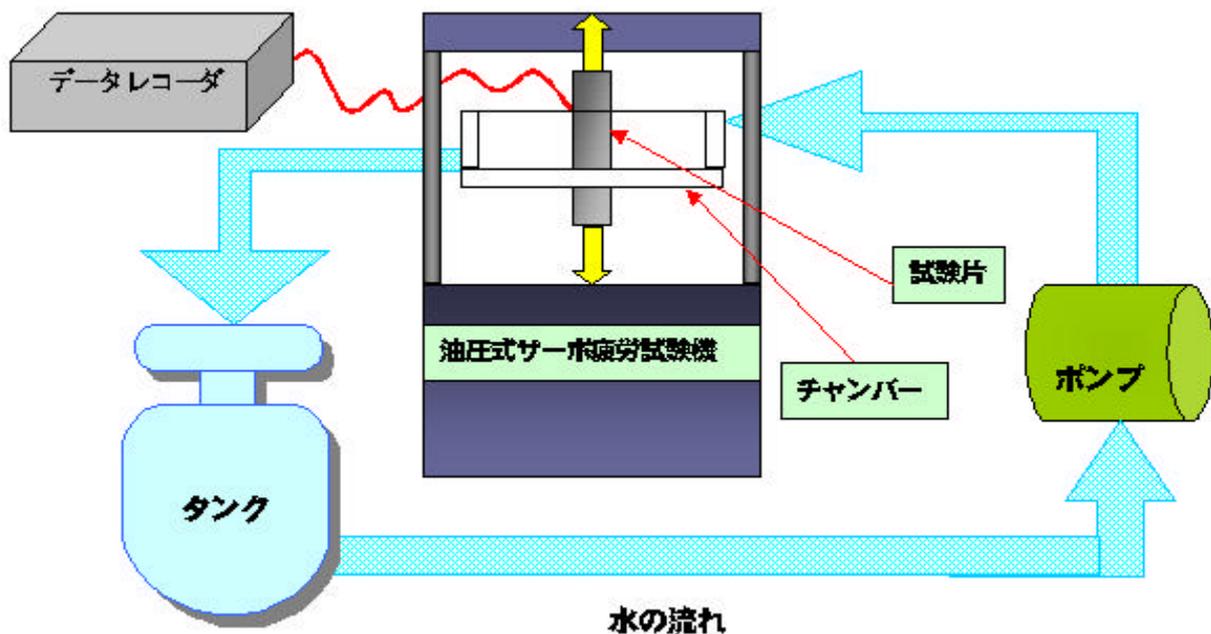


Fig .4 試験装置のシステム概略図

3. 疲労試験

本実験には油圧式サーボ疲労試験機を使用した。疲労試験には疲労予き裂の導入が義務付けられている。そのため予き裂の導入のために、大気中で予き裂が入るまで繰り返し速度 $f = 20\text{Hz}$ (正弦波荷重)、最大荷重 $P_{\max} = 4\text{ kN}$ 、最小荷重 $P_{\min} = -4\text{ kN}$ で負荷し、き裂の全長で約 4mmの予き裂を導入した後、水道水を流量 2.86 L / min で循環させている腐食環境チャンバーの中で、繰り返し引張り荷重を破断に至るまで負荷し続ける。本実験は応力比 $R = 0$, $R = 0.3$ の2種類を行った。 $R = 0$ は最大荷重 $P_{\max} = 4\text{ kN}$ 、最小荷重 $P_{\min} = 0$ 、 $f = 1\text{ Hz}$ (正弦波荷重)、 $R = 0.3$ においては、最大荷重 $P_{\max} = 4.5\text{ kN}$ 、最小荷重 $P_{\min} = 1.35\text{ kN}$ 、 $f = 1\text{ Hz}$ (正弦波荷重) で負荷した。繰り返し速度 $f = 1\text{ Hz}$ で負荷するのは環境効果を大きくさせるためである。き裂が片側で 0.2 mm 伸びるごとにその時の繰り返し数とき裂長さ、荷重 - 変位曲線の波形データを記録した。

波形は $10\ \mu\text{s}$ のサンプリング速度で計測した。き裂の伸び、およびき裂長さの測定には読み取り顕微鏡を使用した。

4. 実験結果および考察

AZ92A-T6 マグネシウム合金の各応力比 R における水中での疲労き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 K の関係を図 5 にそれぞれ示す。本実験は水環境で行ったが、環境における影響との比較をするために、大気中で行った実験結果を同じ図 5 に示した大気中での実験は応力比 $R = 0, R = 0.3$ とともに繰返し速度 $f = 20\ \text{Hz}$ (正弦波荷重) で行っている。

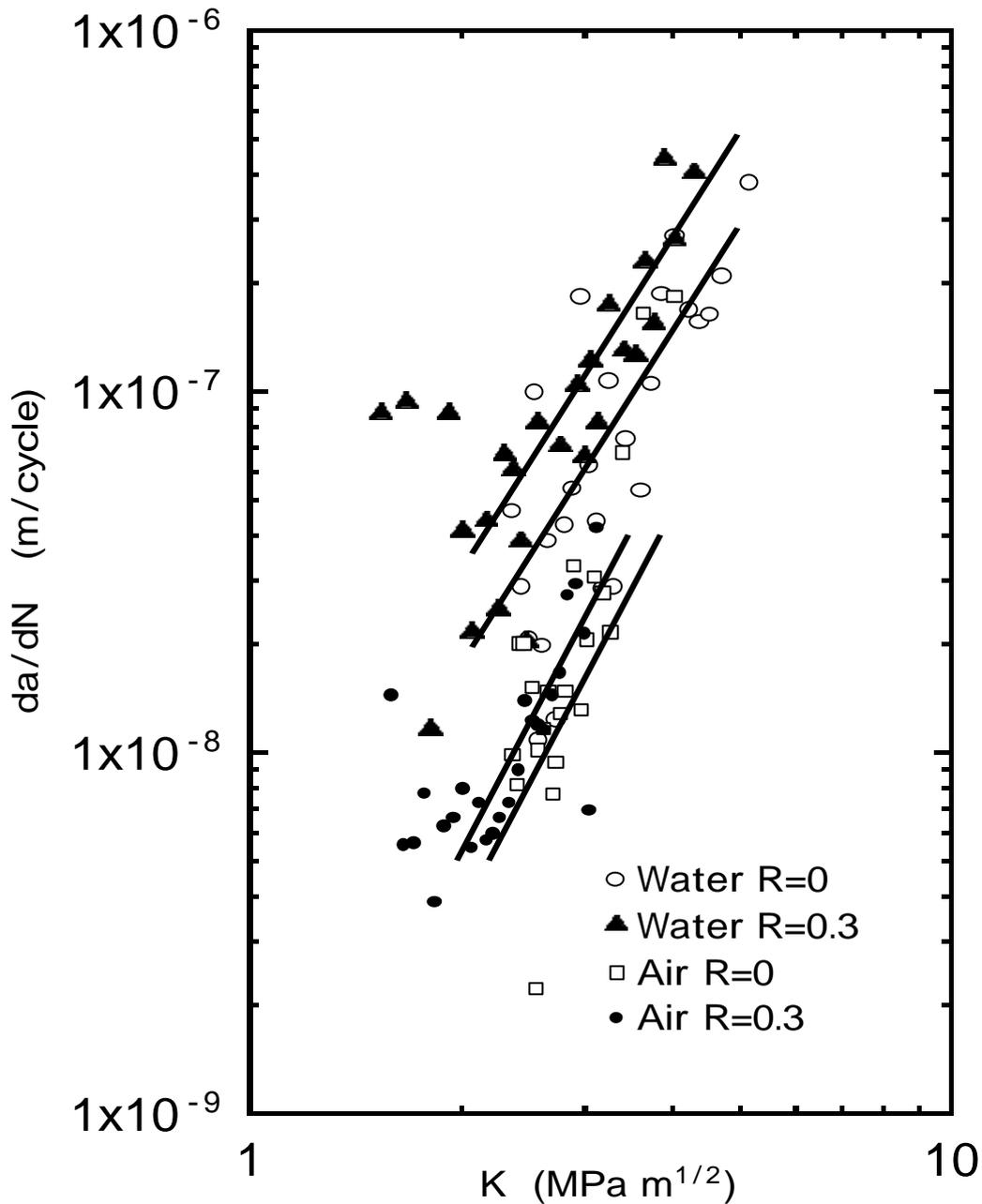


Fig.5 疲労き裂伝ば速度 da/dN と応力拡大係数幅 K

いずれの環境においても疲労き裂伝ば速度 da / dN と応力拡大係数幅 K には相関があり、両対数プロットでほぼ直線で示される。また、同一の応力拡大係数幅 K において比較した場合、水中での疲労き裂伝ば速度 da / dN が大気中よりも 4 から 6 倍大きいことが分かる。このことは、水中で繰返し速度を $f = 1 \text{ Hz}$ (正弦波荷重) という低速で行ったために、環境効果が大きく現れ、疲労き裂伝ば速度 da / dN が大きく増加したと考えられる。ここでの環境効果とは、応力がかかるたびにすべりが起こって金属の新生面が現われ、水環境により電気化学的な局部電池が構成され、マグネシウム合金が溶け出したことにより、き裂の進展速度が高くなったのではないかと考えられる。また、同じ環境において応力比 R が大きい方が疲労き裂伝ば速度 da / dN が大きくなっていることが分かる。応力比 R が大きい方がき裂伝ば速度 da / dN が大きくなったのは、相対的にき裂開口荷重が低下したと考えられる。すなわち、このような応力比 R の効果は、き裂閉口現象により説明することができる。き裂閉口とは疲労き裂が特定の K レベルまでは開口しないことをいう (図 6)。

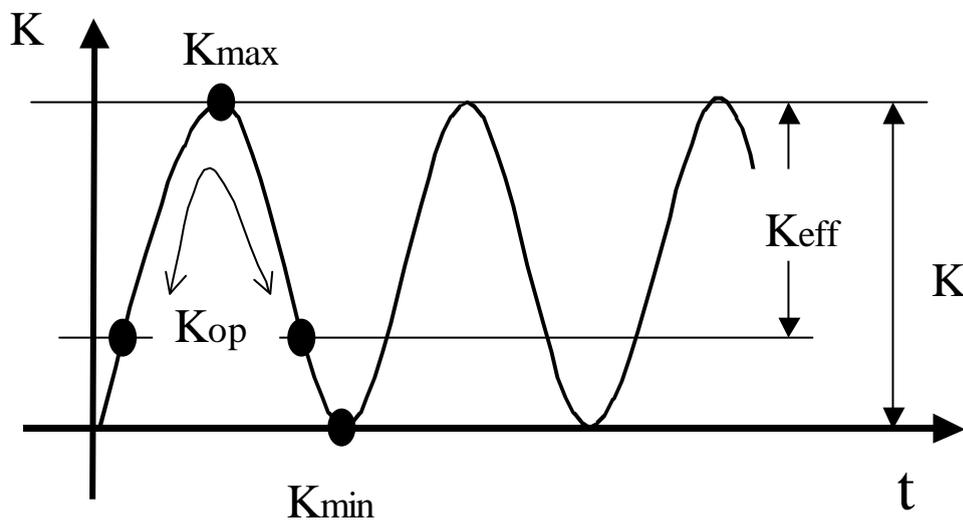


Fig. 6 き裂開口区間とき裂閉口区間

き裂閉口現象を考え、この時の開口荷重を測定するには除荷コンプライアンス法を用いる。除荷コンプライアンス法とは、き裂が伸びるごとに計測していたひずみのデータから P_{\max} より P_{\min} を求め、一サイクル分の荷重 P とそれに対応する P をプロットすることにより荷重 - 変位曲線図を得ることをいう (図 7)。ここで得た荷重変位曲線から繰返し荷重によって生じるき裂開口状態がき裂閉口状態に変わる折れ曲り点を見つけ、そこから最大応力拡大係数 K_{\max} 、折れ曲り点、最小応力拡大係数 K_{\min} の値を読み取り、これらの値から開口比 U (式 7) を求めるこという。この開口比 U を用いて得られるき裂の伝ばに純粋に作用している応力のことを、有効応力拡大係数幅 K_{eff} (式 8) という。

$$U = (K_{\max} - K_{op}) / (K_{\max} - K_{\min}) \quad (7)$$

$$\Delta K_{\text{eff}} = K_{\max} - K_{op} = U \cdot \Delta K \quad (8)$$

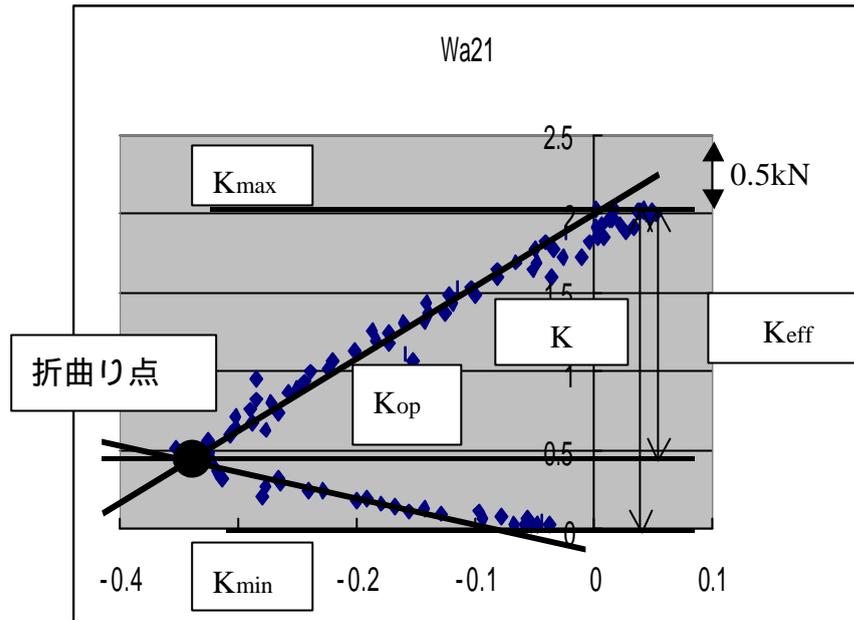


Fig. 7 荷重 - 変位曲線図

求めた有効応力拡大係数幅 K_{eff} を使い、疲労き裂伝ば速度 da/dN と有効応力拡大係数幅 K_{eff} の関係を図 8 に示す。応力拡大係数幅 K と疲労き裂伝ば速度 da/dN の両対数プロットにおいては、応力比 R の影響により疲労き裂伝ば速度 da/dN に大きな差が生じていたが、開口比 U から求めた有効応力拡大係数幅 K_{eff} と疲労き裂伝ば速度 da/dN は、両対数プロットでほぼ一本の直線で近値することができ、ほとんど差がなくなっている。これは疲労き裂伝ば速度 da/dN に及ぼす応力比 R の影響が、き裂閉口現象によって説明できることを意味している。このことから、有効応力拡大係数幅 K_{eff} を求める事によって、応力比 R に関係なく疲労き裂伝ば速度 da/dN を計測できることが分かる。このように応力比 R の影響を著しくさせたき裂閉口が生じる理由として、本研究は腐食環境中で行ったため、腐食生成物によるくさび効果などが考えられる。くさび効果とは腐食生成物がき裂の中に発生して、それらがき裂の中で蓄積され、正の応力拡大係数 K の値で開いているはずのき裂面が、ある開口応力拡大係数 K_{op} で閉じてしまう。また逆にいうと、き裂が開いているのは、開口応力拡大係数 K_{op} 以上のときに限られる。開口応力拡大係数 K_{op} は材料が柔らかく摩耗しやすければ大きいといわれている。き裂は材料を形成している組織が粗大で破面の凹凸が激しいと、それが接触して開口応力拡大係数 K_{op} が大きくなる場合もあるとも考えられる。本研究において、前述のことより水環境によりマグネシウム合金が溶解し、くさび効果となる腐食生成物がき裂内に付着して、破面の凹凸を激しくしたのではないかと考えられる。実験終了後、破断した試験片の破面についている腐食生成物の写真を図 9 に、また鏡面仕上げにした面が腐食して損傷している写真を図 10

に示す。本研究において、塩素等さまざまな腐食の要因となる化学物質が含まれた水道水を使用したために、マグネシウム合金が何と反応し、腐食生成物が生成されたのか、またそれが何であるか特定出来なかった。また、鏡面仕上げにした表面は腐食生成物の厚い膜で覆われているが、写真に見られるような膜状の物質の破壊は表面のいたるところで観察された。無数に膜がはげている場所の中心に何らかの介材物が見られるが、何であるかは特定できなかった。き裂は開閉口を繰り返しているためこのような厚い膜が出来ることがないが、き裂閉口に何らかの関連があると思われる。

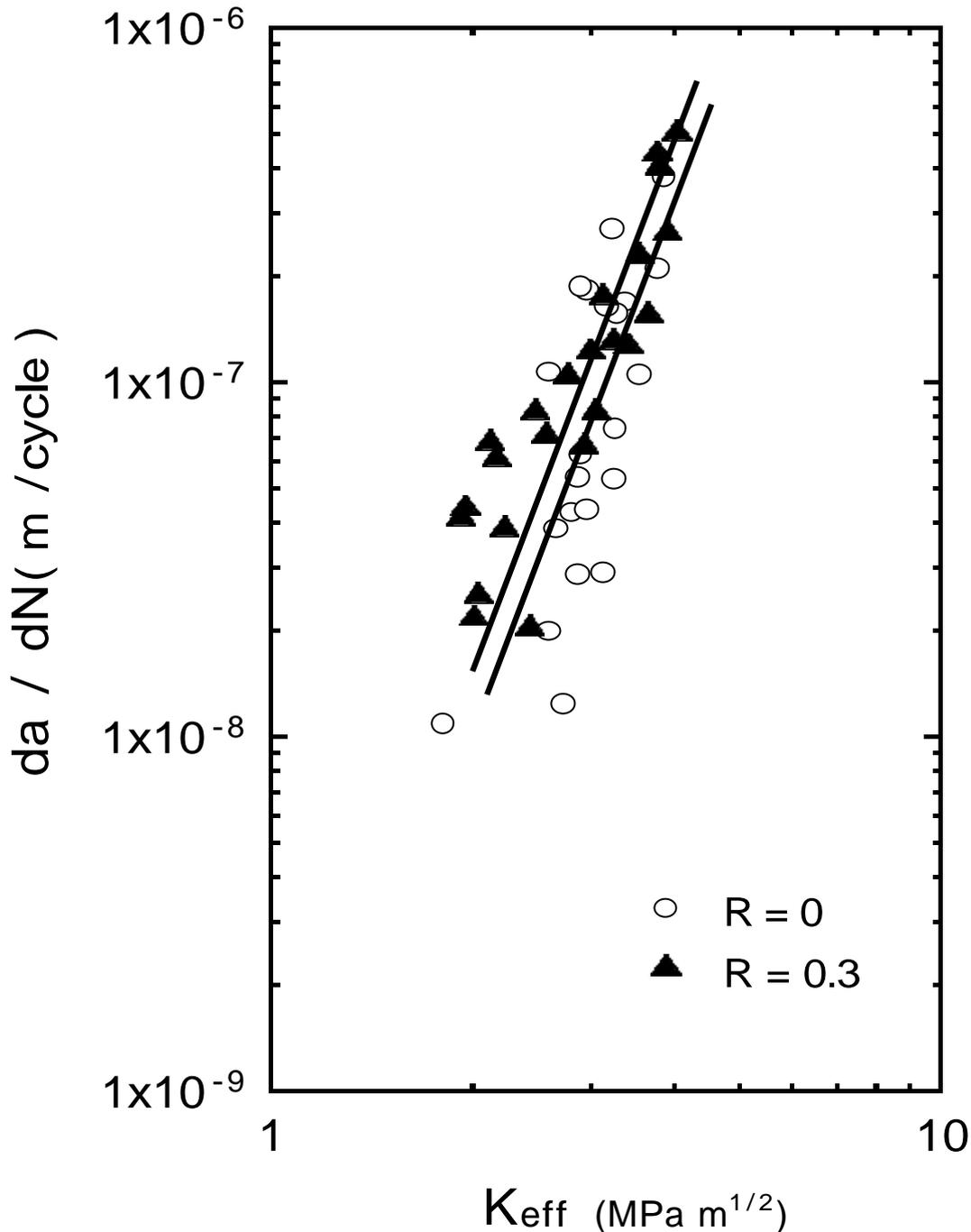


Fig .8 疲労き裂伝ば速度 da/dN と有効応力拡大係数幅 K_{eff} の関係

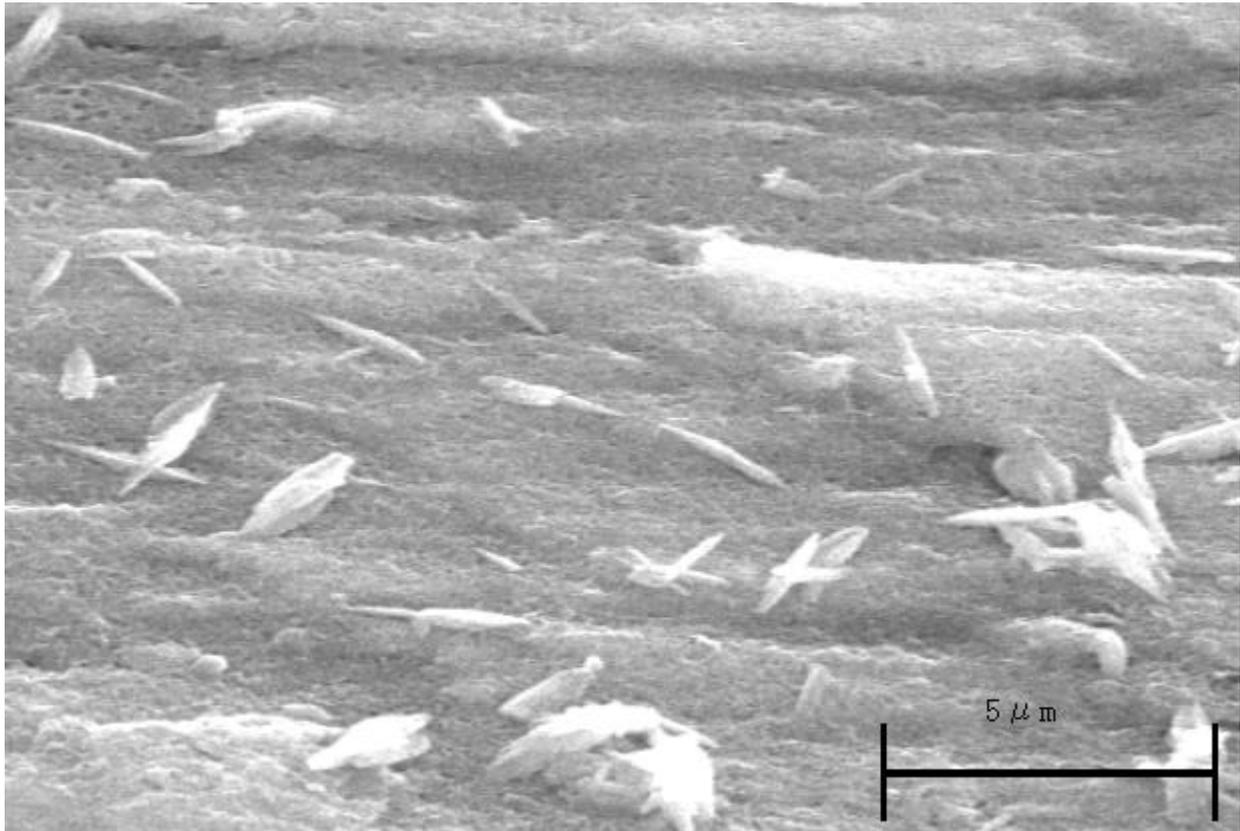


Fig .9 腐食生成物

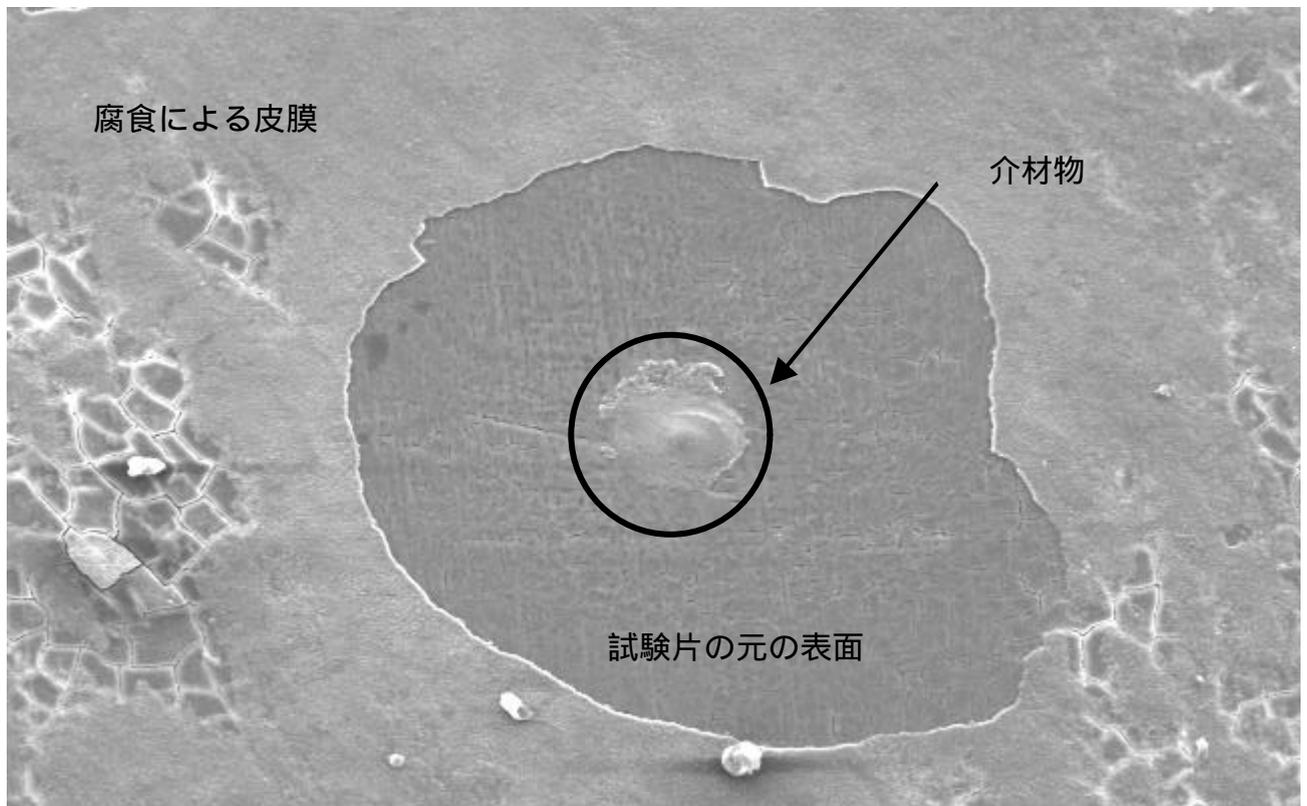


Fig .10 腐食された試験片の表面

5. 結言

本研究では、Mg-Al-Zn 系合金、マグネシウム合金 AZ92A - T6 を用いて疲労き裂伝ば速度に及ぼす水環境の影響を調べた。得られた結果は以下のとおりである。

- 1 . 疲労き裂伝ば速度 da / dN と応力拡大係数幅 K の両対数プロットによって、パリス則が成立することが認められた。水環境下での疲労き裂伝ば速度 da / dN は大気中に比べ、4 から 6 倍大きくなるということから、水環境には何らかのき裂伝ば速度を加速させる効果があるということが認められた。
- 2 . 大気中、水中いずれの場合においても応力比 R が増加すると、疲労き裂進展速度 da / dN は増加した。疲労き裂伝ば速度 da / dN と、除荷コンプライス法を用いて得た有効応力拡大係数幅 K_{eff} は、両対数プロットでほぼ一本の直線で近似された。これより応力比 R の、疲労き裂進展速度 da / dN に及ぼす影響はき裂閉口現象により説明することができた。

6. 謝辞

本研究および学部論文作成を進めるにあたり、御指導くださいました楠川先生に心から感謝の意を表します

7. 参考文献

- (1) 青木 顕一郎 著 基礎機械材料
- (2) 加藤 康司 小野 陽 前川 一郎 著 機械材料学
- (3) 村上 理一 高尾 健一 萩山 博之 著 材料強度学入門

8. 付録