

平成 12 年度 卒業論文

**マグネシウム合金 AZ92A による
疲労き裂伝ば特性**

**高知工科大学 知能機械システム工学科
材料強度学研究室
1010184 長岡 誠光**

目次

1 . 緒言	1
2 . 材料および実験方法	3
2 - 1 材料と試験片	3
2 - 2 疲労試験	5
(1) 実験方法	5
(2) 実験結果の測定・解析方法	6
(3) 実験条件	7
3 . 実験結果および考察	8
3 - 1 応力拡大係数とき裂伝ば速度の関係	8
3 - 2 き裂閉口現象	10
3 - 3 パリス即の定数	13
3 - 4 考察	13
4 . 結言	14
5 . 謝辞	14
6 . 参考文献	14
7 . 付録	15

1. 緒言

マグネシウムは比重が 1.74 g / cm^3 、鉄の $1/4$ 、アルミニウムの $2/3$ と実用金属中もっとも軽量な材料である。またマグネシウムは、加工資源として豊富であり、数々の有能な特性を持っている。中でも比強度、振動減衰性（吸収性）、被削性、電磁遮蔽性、寸法安定性、並びにリサイクル性に優れた金属である。資源的にも地球の地殻構造物質の 8 番目に位置する豊富な元素で、海水中の塩化物として、またドロマイト、マグネサイトの鉱石の形で広く分布している。（1）

主な用途としては合金の添加材として用いられているが、構造材としても鋳造、鍛造などで加工されている。（航空・宇宙・自動車・二輪・PC・カメラ・工具・・・）

このような構造用としての鋳造用マグネシウム合金は大量生産向けに、ダイカストが多く使用されるが、一般的の産業用機械には砂型鋳造品も用いられる。この鋳造品に最も普通に使われている合金は Mg-Al-Zn 系合金(MC1～MC3)である。

構造用材料についてはその強度特性を十分に把握しておくことが重要となる。機械構造物が破断する原因の約 8 割が疲労によるものであり、これらの設計においては疲労強度について十分な注意を払う必要がある。このため材料の疲労強度データの蓄積は、その材料を使用する機械などの信頼性向上に不可欠なものである。

疲労とはき裂発生、そしてき裂伝ば過程よりなる。き裂伝ばについては破壊力学的評価が可能であり、き裂伝ば速度 da/dN と応力拡大係数範囲 K との関係で表される。

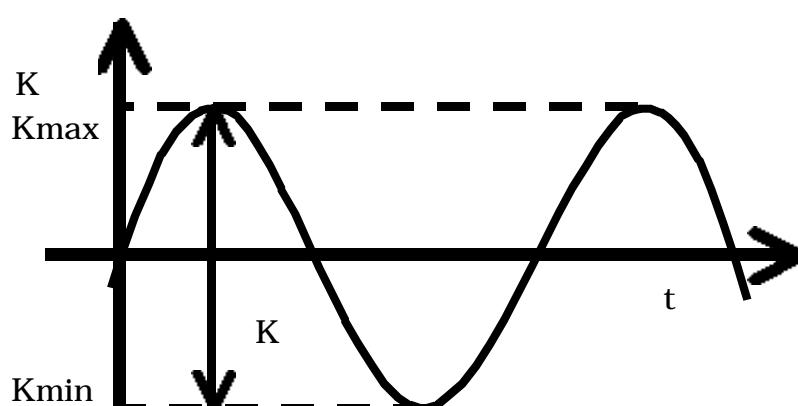


図 1 応力拡大係数範囲

応力拡大係数 K とは、応力と幾何学条件（き裂長さおよび外力、試験片の形など）で決まるき裂先端の応力場の強さを表すパラメータである。応力およびき裂長さは時間と共に変化するので、き裂伝ば特性は一般的に応力の最大値と最小値に相当する応力拡大係数の差 ($K_{\max} - K_{\min}$) で表現される。これは応力拡大

係数幅(stress intensity factor range) K という。[1] 図 1 に応力拡大係数範囲の説明図を示す。

また一般的に応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度の関係を表すには $da/dN - K$ 曲線が使用される。

da/dn K 曲線の全体的様子を図 2 に示す。 da/dN と K の関係は両対数グラフ上

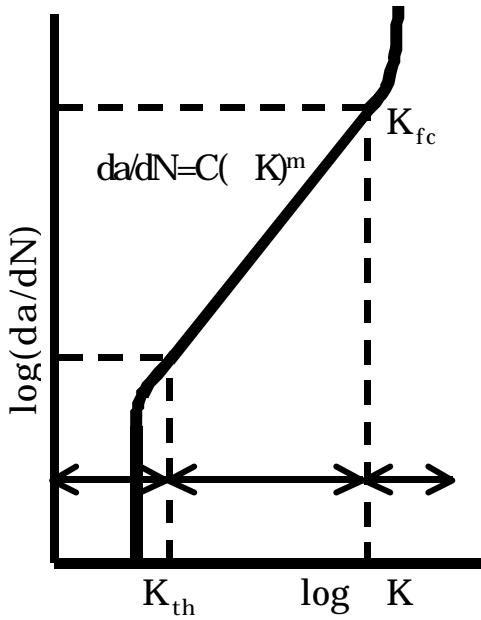


図 2 da/dN - K 曲線

で傾き m の直線で表される。図中の da/dn K 曲線はその形態との関連で、 \cdot 、 \cdot とその領域の区分ができる。まず第 1 領域は疲労き裂の進展開始に関する領域であり、疲労き裂が腐食環境因子もしくは小頻度の過大応力の作用などによりあるき裂長さ、すなわち疲労限界き裂長さ (fatigue critical crack length・ a_{cr}) まで成長し、以後安定な成長過程に入ろうとするとき、この a_{cr} に対応する K の大きさを下限界応力拡大係数範囲 (threshold stress intensity factor range) といい、 K_{th} で表す。この K_{th} を越えるほど K の値が大きくなると安定成長段階 (threshold stress intensity factor range) に入るが、この領域を第 1 領域と呼ぶ。疲労き裂進展則に関する論議はこの領域に集中しており、本研究もこの領域で疲労き裂進展則を考える。最後に、急速に疲労き裂が伝ばする不安定破壊の段階 (unstable fracture stage) に入るが、この領域を第 3 領域と呼ぶ。ここでの論議は、 K よりむしろ K_{max} に向けられ、不安定破壊開始時の K_{max} の値を特に疲労破壊靱性 (fatigue fracture toughness) K_{fc} とする。[2]

また第 2 領域は、パリス則と呼ばれる関係が成立する領域である。パリス則とは、種々の材料のき裂伝ば抵抗を比較したり、疲労き裂伝ば寿命を推定するのに用いられる重要な式である。最近では非破壊検査によって機器の傷やき裂をかなりの高感度で検出ができ、このようなき裂伝ば則に基づいて検査間隔を決めたり、余寿命の評価が行われる。式(1)にパリス則を示す。

$$\frac{da}{dn} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

また応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度の関係には応力比 R の影響があり、応力比が大きいほどき裂伝ば速度は高くなることが一般的に知られている。応力比とは最小応力に対する最大応力の比であり、平均応力を代表するものである。

本研究は、マグネシウム AZ 92A-T6 という材料について疲労き裂伝ば速度に及ぼす応力比の影響を破壊力学的に評価したものである。具体的には AZ 92A-T6 の中心に予き裂の入った試験片を製作し、応力比を変えて疲労試験をすることによって、なぜ応

力比を大きくすると伝ば速度が高くなるのかを有効応力拡大係数幅 (K_{eff}) で説明することによりマグネシウム合金 AZ 92A - T6 という材料の疲労き裂伝ば挙動を明らかにするものである。

2 . 材料および実験方法

2 - 1 材料と試験片

本実験に使用した材料はマグネシウム合金 AZ 92A - T6 であり、その化学成分を表 1 に、機械的性質を表 2 に示す。

表 1 Chemical composition w t %

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

表 2 Mechanical properties

Proof stress _{0.2} MPa	Tensile strength _β MPa	Elongation %	Young Modulus E GPa
148	282	7.0	4.3

A S T M 規格 E 647 - 81 では、コンパクト (CT) 試験片あるいは中央き裂引張 (CCT) 試験片のいずれかの使用が推奨されている。本実験では後者の中央き裂引張試験片を作成・使用した。

図 3 に試験片の形状および寸法を示す。

まず市販されている長方形の厚いマグネシウム合金 AZ 92A の鋳塊を、帯のこ盤によってある程度の形に切断する。このとき材料にひずみが生じないようにできるだけ慎重に切断する。フライス盤によって所定の寸法値になるように機械加工をする。このとなるべく表面をなめらかに仕上げるように最後のほうはゆっくり丁寧にハンドルを動かすようする。そして試験片にスリットを入れる。これは試験片の中心に高速精密卓上ボール盤を使用し直径 2mm の穴を開け、長手垂直方向に糸鋸で 1 ミリづつの溝を作ることによって作成する。

次にき裂を読み取る試験片の表面を研磨によって鏡面仕上げをする。研磨には 150 番 320 番 800 番のサンドペーパーと 800 番と 2000 番のカーボランダムを粗い順に使用した。カーボランダムは水に溶かし、ガーゼにつけて使用する。この作業をしっかり

しておかないと読み取り顕微鏡を使用した場合にき裂を観察しにくくなり、また後で説明するひずみゲージを貼った後では研磨することは望ましくないため、丁寧にすることが必要である。

実際の実験では応力比を変えた実験を3回するので、製作した試験片の中から目標としていたものに近い試験片を3つ選んだ。

試験片には、き裂閉口荷重を測定するための荷重変位曲線を求めるためのひずみゲージを添付する。表面をアセトンで拭き、汚れを落としてからスリットの中心と予想き裂伝ば領域にひずみゲージを2枚接着剤で貼り付ける。2枚貼るのは中心に貼ったゲージがひずみの増加によって切れてしまい測定不可になるのを防ぐためである。

そして試験機にチャックに正確に取りつけられるように作成した試験片の中心線と長手方向の両端から25mmの位置に印しを付けつかみ部とする。

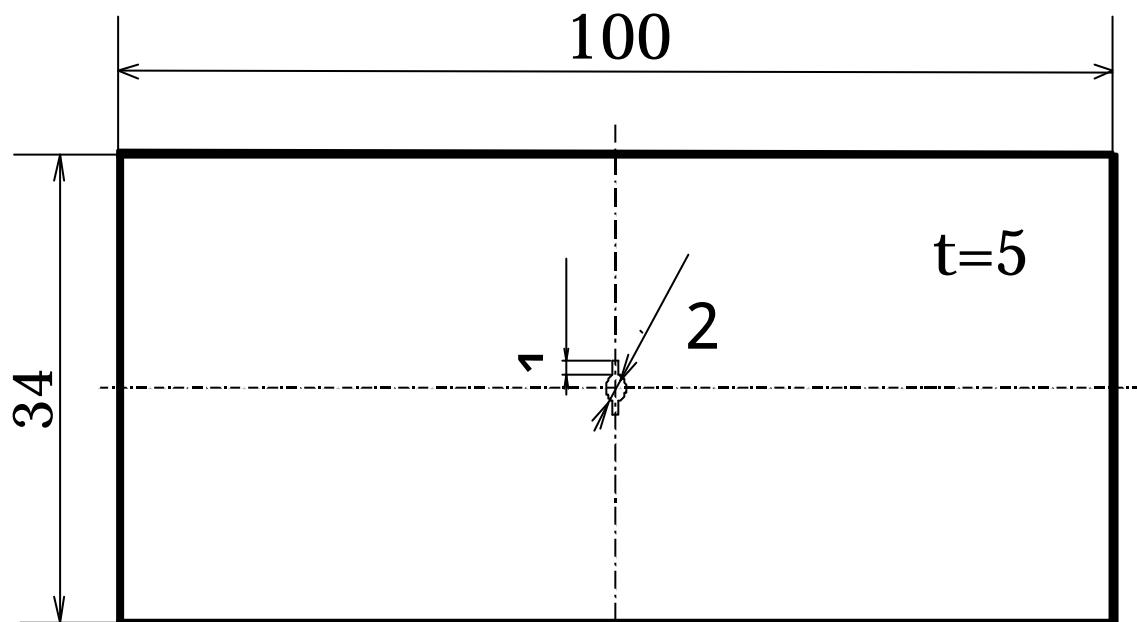


図3. 試験片

実際に製作した試験片の寸法を表3に示す。

表3. 実際の試験片

試験片番号	長さ	厚み	幅	スリット
1	100	5.0	34.05	4.22
2	99.5	5.0	34.15	5.5
3	100	5.0	34	4.7

単位: mm

2 - 2 疲労試験

(1) 実験方法

装置を模式化したものを図4に示す。

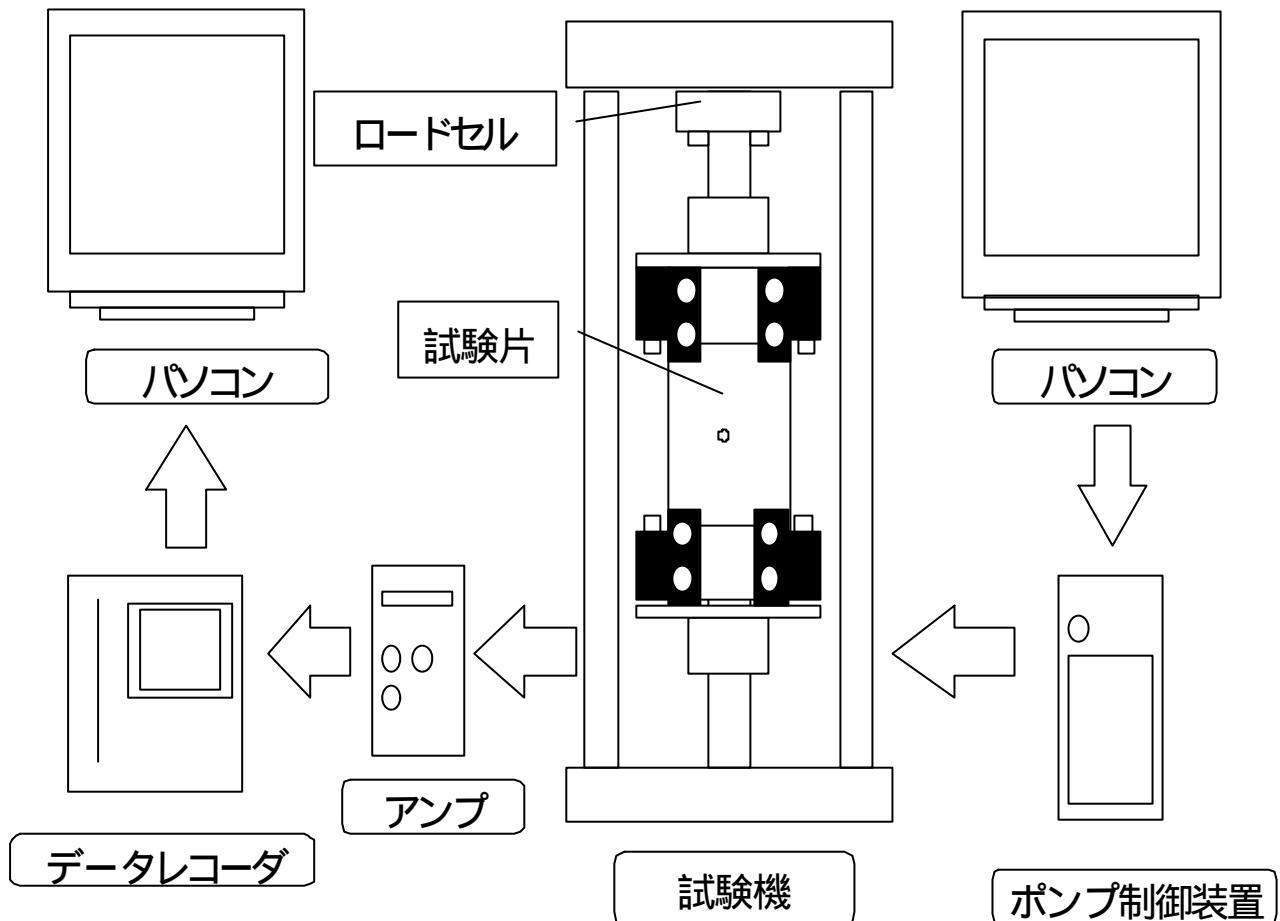


図4. 装置の模式図

まず最初に試験片を疲労試験機のチャックに取り付ける。このとき試験片がしっかりと取り付けていたり、ずれて取り付けられていたりすると、き裂の伸びに影響があり実験失敗の原因となるので注意する。試験片のスリット中心に貼られたひずみゲージをホイートストンブリッジ、電圧増幅アンプを通してデータレコーダに接続する。ひずみゲージが使用不可能になった場合は、予想き裂伝ば範囲に貼ったほうのひずみゲージを使用する。実験を始めるために必要な試験片の寸法、応力比によって変わる最大荷重・最小荷重、荷重限界値、繰返し速度をコントローラーであるパソコンに入力する。次に油圧から発生する熱を冷却するため、冷却塔を作動させる。それから油圧サーボ疲労試験機を用い作成した試験片にそれぞれの応力比で長手方向に繰返し荷重をかける。

またこのとき実験室の状態は常温であり、空气中での実験とした。スリット先端から予き裂が発生するまでは、3つの実験とも応力比 $R = -1$ （最大荷重 $P_{\max} = 4$ 、最小荷重 $P_{\min} = -4$ ）とし、繰り返し荷重をかける。結果的に約5万回から8万回繰り返し荷重をかけた時にスリットの両端から予き裂が発生した。

次に、ひずみの電圧データが小さいため電圧を増幅させるアンプを通して、約1万回ごとに応力とひずみのデータをデータレコーダ（omniace RT330/NEC）により計測する。データを取る間隔は約1秒ほどである。また実験中に波形データが観察できなくなった場合はアンプの感度を調整する。

そしてその時のき裂の伸びを測定する。方法としては、読み取り顕微鏡でき裂が確認しづらい初期のほうでは、レプリカ法を使用し光学顕微鏡によりき裂の長さを測定する。

レプリカ法の手順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。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。このようにして出来たアセチルロースをレプリカと呼ぶ。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。以上をレプリカ法と呼ぶ。

次に両面テープに貼り付けたレプリカを光学顕微鏡でき裂の長さを観察、計測する。このときき裂発生箇所をさか登り光学顕微鏡で観察する。方法はイオンスパッターを用いて、レプリカを貼り付けたガラス板に真空状態の中で16秒間、20mAかけて、レプリカの表面の反射率を向上させ計測を容易にさせるものである。また両面テープにレプリカを貼り付けるときは、き裂の向きを揃えて貼り付けることに注意すれば、き裂の長さを観測、計測しやすい。

またき裂の長さを光学顕微鏡で計測するときは、対物レンズに付いている長さを計る目盛りを用いる。目盛りは、倍率が10倍のとき100目盛りで1mm、20倍のとき100目盛りで0.5mmなので注意する。また、試験片にもともとあった傷をき裂と間違えて観察する場合があるため注意する。また、レプリカを取っている際、気泡やほこりなどが入り、光学顕微鏡を使用したとき裂が消えたり、突然現れたりするので注意する必要がある。そして、き裂があるついで伸びた段階では、読み取り顕微鏡を用いて繰り返し荷重をかけている試験中に測定する。これは繰り返し荷重をかけている状態のほうが静止している状態よりもき裂がよく観察できるためである。そしてき裂長さを計測した時の繰り返し数をいっしょに記録する。

（2）実験結果の測定・解析方法

実験結果の測定・解析方法を以下に示す。

1. 応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度の関係図

光学顕微鏡・読み取り顕微鏡から得られたき裂長さと繰返し数からき裂伝ば速度(da/dN)を計算し、式(2)を用いて応力拡大係数範囲(K)を計算した。計算にはエクセルを用いてた。そして、求められたき裂伝ば速度と応力拡大係数範囲の関係で両対数グラフ($da/dn - \Delta k$)をカイプロット(kypplot)によってプロットする。

$$\begin{aligned}\Delta K &= K_{\max} - K_{\min} = \Delta S \sqrt{pa} F \quad (K_{\min} > 0) \\ &= K_{\max} \quad (K_{\min} \leq 0) \\ &= \Delta S \sqrt{pa} \sqrt{\sec pa / w}\end{aligned}\quad (2)$$

また式(2)の F は補正係数、 a はき裂長さ w は試験片の幅である。

2. 荷重とひずみの関係図

データレコーダで計測した応力とひずみの波形データをパソコンで処理し、荷重変位曲線を描く。この線図より開口比 U を決定した。この方法を除荷弾性コンプライアンス法と言う。

3. 有効応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度の関係図

除荷弾性コンプライアンス法を用いて求められた開口比 U から有効応力拡大係数範囲 K_{eff} を求め、有効応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度の関係を表す図を作成する。

4. マグネシウム合金 AZ 92A - T6 についてパリス則へのあてはめ

応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度の関係図から最小自乗法により、パリス則の定数を求める。

(3) 実験条件

油圧サーボ疲労試験機のコントローラーであるパソコンに、入力する実験での条件を表 4 に示す。本実験では応力比を -1 、 0 および 0.3 と変えて実験する。

表 4 . 実験の条件

試験片番号	繰返し速度 (Hz)	荷重幅 (KN)	応力比
1	20.0	8.0	-1.0
2	20.0	4.0	0
3	20.0	2.8	0.3

このとき 3 つの実験とも、最大荷重を 4 KN と合わせて設定した。

また試験片が破断してしまった場合に、荷重をかけ続けるのは大変危険なため、荷重限界値を設定する。荷重限界値は最大応力の場合 0.5 大きく、最小応力の場合は 0.5 小さく

設定する。そうすることにより、この荷重限界を越えた荷重がかかると油圧サーボ疲労試験機は自動的にストップするよう設定する。

3 . 実験結果および考察

3 - 1 応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度の関係

応力拡大係数範囲 (K) とき裂伝ば速度 (da/dn) の関係を図に示す。図より応力比 R の影響があり、 R が大きくなるほどき裂伝ば速度が高くなることが分かる。またそれぞれがほぼ一直線上に並び、ほぼパリス則が成り立っていると確かめられる。

ここで応力比の違いでき裂伝ば速度が高くなる理由としてき裂閉口という現象が考えられる。その現象を解明するために、除荷弾性コンプライアンス法を用い有効応力拡大係数範囲を求め、応力比の影響がどのように出るかどうかを確かめる。

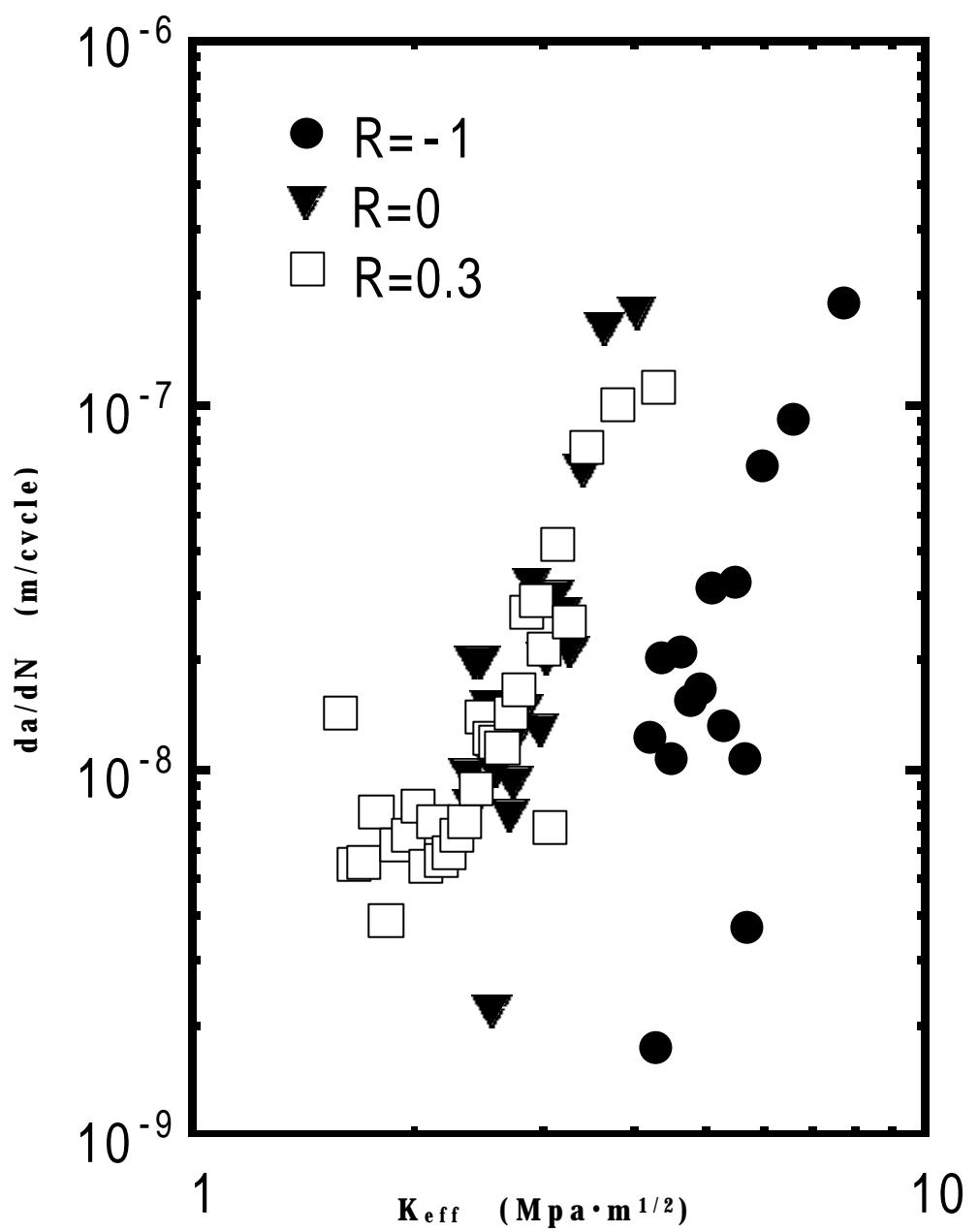


図 6 応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度の関係

3 - 2 き裂閉口現象

疲労き裂はそれ自身が形成した塑性域を切って進展しており、き裂壁に塑性ストレッチが残留している。その結果疲労き裂は特定の荷重レベル(P_{op})まで開口しない。これは残留塑性ストレッチに起因するき裂閉口であり塑性誘起き裂閉口という。この他に酸化誘起き裂閉口、破面粗さ誘起き裂閉口などがある。

き裂閉口を実測する手法は直接測定と間接測定の2つに大別される。前者はき裂面をはさむ変位計、き裂面をまたぐひずみゲージあるいは光学的観察により、試験表面においてき裂面の接触を測定するものである。後者はき裂面の接触によってたらされる間接的な情報量の変化に着目し、それからき裂閉口を推定するもので、除荷コンプライアンス・電位差・AE・超音波およびフラクトグラフィなどが使用される。[3]

本実験ではき裂閉口荷重を測定するために、後者の除荷弾性コンプライアンス法を用いた。除荷弾性コンプライアンス法とは荷重とひずみの関係を表すことである。例として本実験の実験結果から $R = 1$ の場合の荷重とひずみの関係を図7に示す。

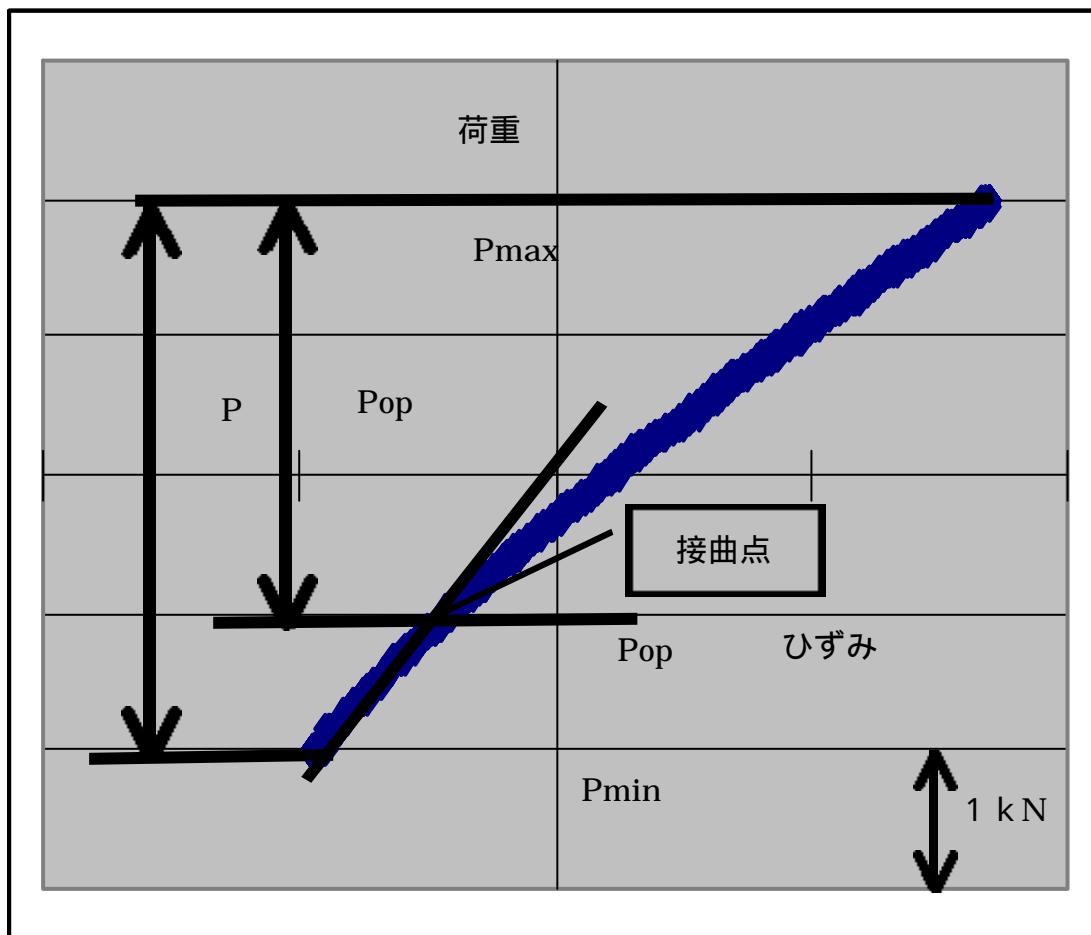


図7 荷重とひずみの関係（荷重変位曲線）

この図（荷重変位曲線）から、き裂閉口状態からき裂閉口状態に変わる点である

折曲点を見つけ、最大荷重 P_{max} と最小荷重 P_{min} 及びき裂の開口する時の荷重 P_{op} の値を読み取り、式(3)を用い開口比を求める。

$$U = \frac{\Delta P - \Delta P_{op}}{\Delta P} \quad (3)$$

このときの最大応力拡大係数範囲 K_{max} からき裂が開口する時の応力拡大係数範囲 K_{op} をひいたものを有効応力拡大係数範囲 K_{eff} という。以下では K_{op} を用い、負荷の際の有効応力拡大係数範囲 K_{eff} について考える。 K_{eff} は式(4)によって定義される。

$$K_{eff} = K - K_{op} \quad (4)$$

$K < K_{op}$ ではき裂閉口が起こっているので、常に $K_{eff} = 0$ である。

$K < K_{op}$ の場合を含めて、有効応力拡大係数範囲 K_{eff} の定義は式(5)である。

$$\Delta K_{eff} = \begin{cases} K_{max} - K_{op} & (K_{op} \geq K_{min}) \\ K_{max} - K_{min} & (K_{op} < K_{min}) \end{cases} \quad (5)$$

$K_{op} < K_{min}$ の場合の K_{op} は、通常の方法では実測できない。本実験では $K_{op} > K_{min}$ の場合のみで考える。また K_{eff} は次式(6)で表すことができる。

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} = U \Delta K \quad (6)$$

ここで U ($U = K_{eff} / K$) は開口比であり、 K_{op}/K_{max} あるいは U は応力比 R に依存する。また疲労き裂の CTOD(き裂先端開口変位)や a は上記の K_{eff} に支配されている。したがって、

K_{eff} は疲労き裂に対する真の力学環境のパラメータと考えることができる。[4]

除荷弾性コンプライアンス法を用いて式(3)から求めた開口比 R と応力拡大係数範囲 K から式(6)を用い有効応力拡大係数を求める。そして、求めた有効応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度との関係を調べる。

有効応力拡大係数範囲 K_{eff} と疲労き裂伝ば速度 da/dN の関係を図8に示す。図より開口比から求めた K_{eff} を用いれば、 R に関係なくき裂伝ば速度はほぼ一直線上に並ぶことが分かる。またこれは、き裂伝ば速度に及ぼす応力比 R の影響がき裂閉口挙動により説明できることを意味するものである。

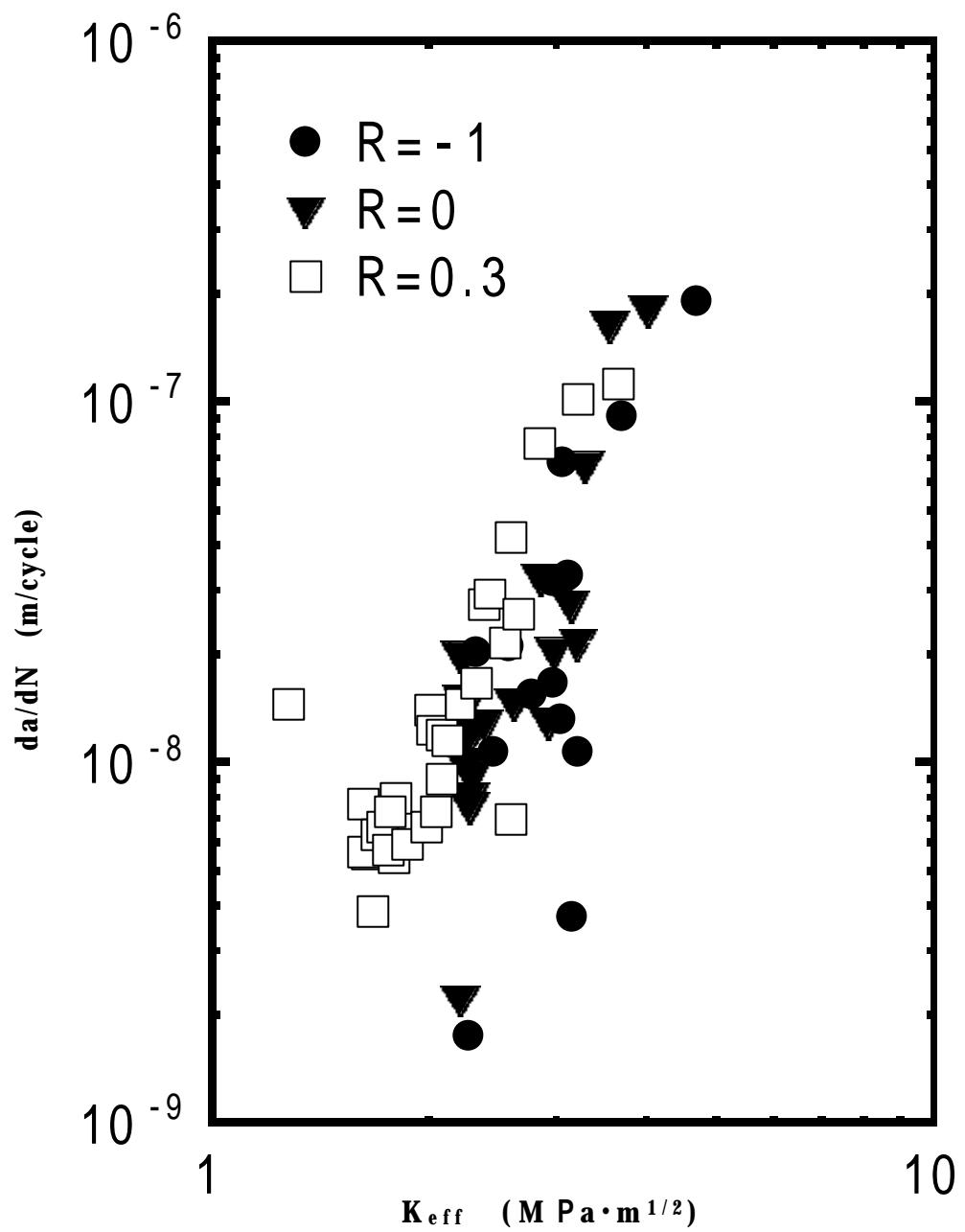


図 8 有効応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度の関係

3 - 3 パリス則の定数

応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度の関係から最小自乗法を用いてパリス則の材料定数C及びmを求めた。パリス則とは式(1)であり、式(1)を書きかえると以下の式(7)ようになる。

$$\log \frac{da}{dN} = m \log \Delta K + \log C \quad (7)$$

この式(7)で特にmは傾きを表す。表5に応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度の関係図から求めた材料定数を示す。

表5 材料定数

R	-1	0	0.3
m	4.69	5.61	3.00
c	8.91E-10	5.5E-11	8.91E-11

この材料定数を用いれば応力比が-1、0及び0.3の場合にマグネシウム合金AZ92Aのき裂伝ば速度を測ることができ、予寿命の測定が可能となる。

また有効応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度の関係から求めた材料定数は応力比に関係なくほぼ同様の数値となった。

3 - 4 考察

以上の実験結果から、応力拡大係数範囲とき裂伝ば速度の関係は応力比Rの影響が著しいことが分かった。また、応力比が大きいほど疲労き裂伝ば速度は高くなることが確かめられた。また応力比を変えたそれぞれの実験結果で両対数プロットがほぼ一直線に並ぶということから、き裂伝ば速度da/dNと応力拡大係数範囲Kの関係において両対数グラフ上で傾きmの直線で表されるというパリス則が成立するということが証明された。

そして除荷弾性コンプライアンス法を用いて求めた開口比Jから有効応力拡大係数範囲K_{eff}を求めることによって、き裂伝ば速度da/dNと有効応力拡大係数範囲K_{eff}の関係は、ほぼ全ての両対数プロットが一直線上に並ぶことが分かった。その結果、有効応力拡大係数範囲K_{eff}を用いれば、応力比Rに関係なくき裂伝ば速度を測ることができるということが分かり、応力拡大係数Kでは見かけ上のき裂伝ば速度しか求められないことが分かった。

また、応力拡大係数とき裂伝ば速度の関係と有効応力拡大係数とき裂伝ば速度の関係を照らし合わせてみると、き裂伝ば速度が応力比Rの影響を受ける理由としてき裂閉口が起こったためであると確かめられた。

また両対数プロットにおいてばらつきのあった原因として、材料自体に問題があったため、試験片を作成した際に材料自体にひずみが生じたため、き裂が伸びている実験中に実

験を中断したためなどが考えられる。

4 . 結言

マグネシウム合金 A Z 9 2 A - T 6 について疲労き裂伝ば速度に及ぼす応力比の影響を破壊力学的に評価した結果、以下の結論が得られた。

- 1 . 応力比の違いは疲労き裂伝ば速度に大きな影響を与える。
- 2 . き裂閉口挙動を考慮した有効応力拡大係数範囲でき裂伝ば速度を評価すると、応力比の影響を取り除くことができる。
- 3 . 実験結果から求めた応力拡大係数範囲、開口比、有効応力拡大係数範囲からパリス則の材料定数を求めることにより本材料の疲労き裂伝ば挙動を明らかにすることができた。

4 . 謝辞

本研究および学部論文作成を進めるにあたり、ご指導くださいました楠川量啓助教授と、イオンスパッタの使用に協力してくださった河田耕一教授に心から感謝の意を表します。

6 . 参考文献

- [1] 材料強度学入門 村上理一 高尾健一 萩山博之 著 171 - 174 西日本法規出版 1995
- [2] 破壊力学入門 村上裕則 大南正 共編 135 オーム社 1979
- [3] 破壊力学実験法 國尾武 中沢一 林郁彦 岡村弘之 編集 169 - 170 朝倉書店 1984
- [4] 疲労き裂進展特性とき裂閉口 小林英男 著 日本機械学会論文集（A編）49巻 443号 P.P.773 - 774 (昭58 7)

7 . 付録

R = -1 の場合の荷重とひずみの関係

荷重 k N	ひずみ
1.99	0.85
1.98	0.848
1.98	0.85
1.98	0.85
1.99	0.85
1.98	0.85
1.98	0.848
1.98	0.85
1.98	0.848
1.98	0.848
1.98	0.848

R = -1 場合のき裂長さ a、応力拡大係数範囲 K、き裂伝ば速度のデータと計算結果

a	a/10^3	a/w	1/cosb	K	d n	a	da/dN
2.4	0.08681014	0.221322	1.012424	4.184669	10000	0.1225	1.225E-08
2.5225	0.08899803	0.232618	1.013745	4.247223	10000	0.0175	1.75E-09
2.54	0.08930621	0.234232	1.01394	4.343287	10000	0.2025	2.025E-08
2.7425	0.09279779	0.252906	1.016295	4.477568	10000	0.1075	1.075E-08
2.85	0.09459915	0.262819	1.017625	4.61173	10000	0.21	2.1E-08
3.06	0.09802245	0.282185	1.020382	4.76384	10000	0.155	1.55E-08
3.215	0.10047437	0.296479	1.022555	4.895845	10000	0.1675	1.675E-08
3.3825	0.10305848	0.311925	1.025038	5.090716	10000	0.3175	3.175E-08
3.7	0.10778683	0.341204	1.030133	5.269671	10000	0.1325	1.325E-08
3.8325	0.10969982	0.353423	1.032414	5.451361	10000	0.3325	3.325E-08
4.165	0.11435952	0.384085	1.038549	5.622403	10000	0.1075	1.075E-08
4.2725	0.11582595	0.393999	1.040661	5.67839	10000	0.0375	3.75E-09
4.31	0.11633314	0.397457	1.041413	5.955318	10000	0.685	6.85E-08
4.995	0.12523698	0.460626	1.056576	6.570015	10000	0.915	9.15E-08
5.91	0.13622555	0.545004	1.081397	7.707107	10000	1.905	1.905E-07
7.815	0.15664961	0.720678	1.153656		10000		

R = -1 の場合の応力拡大係数、開口比、有効応力拡大係数範囲データ

K	U	k eff	da/dN
4.129863	0.525	2.235551	1.23E-05
4.239475	0.54321	2.267095	1.75E-06
4.254972	0.52439	2.319278	2.03E-05
4.431603	0.54321	2.447617	1.08E-05
4.523532	0.55	2.565826	0.000021
4.699928	0.5625	2.77018	1.55E-05
4.827752	0.6	2.968532	1.68E-05
4.963939	0.6125	2.955017	3.18E-05
5.217493	0.55	3.031365	1.33E-05
5.321849	0.6	3.112347	3.33E-05
5.580873	0.54321	3.214973	1.08E-05
5.663934	0.6	3.139962	3.75E-06
5.692846	0.506173	3.052802	6.85E-05
6.21779	0.518519	3.688692	9.15E-05
6.92224	0.6	4.677339	0.000191
8.491974	0.6125		