

# モードⅡ疲労試験装置の製作

(第2報, 装置の改良とモードⅡ疲労き裂進展試験)

高 行男・長谷川達也・大塚昭夫  
井藤賀久岳・加藤泰世・小川武史

## 1. 緒 言

転がり疲労の主要な損傷形態であるはくり型破損には、モードⅡ（せん断）型疲労き裂進展が重要な役割を果たしていると考えられている<sup>1)</sup>。したがって、転がり疲労の機構の解明ならびに耐転がり疲労特性の判定には、材料のモードⅡ疲労に対する抵抗度を把握することが有効であると考えられる。しかし、従来、材料の転がり疲労特性を調べるには転がり疲労試験を行う他ないと考えられ、実際、転がり軸受け用材料の材質判定は転がり疲労試験によって行われている。また、大型圧延ロール用材等については、實際上、転がり疲労試験を行うことができないので、硬度、靱性等を参考値として経験に基づいて材料開発などが行われているのが現状である。これに対し、もし、材料の転がり疲労特性とモードⅡ疲労特性との関係が解明されると、材料の耐転がり疲労特性の判定や転がり疲労特性が優れた材料の開発などを、材料のモードⅡ疲労特性に基づいて行うことが可能になると考えられる。

前報<sup>2)</sup>では、以上の観点から、材料のモードⅡ疲労特性を明らかにするために製作した試験装置の概要を述べた。この試験装置は、その後の使用過程における検討によって、一部改造が行われた。本報告では、その改造の詳細と改造した装置によって行ったモードⅡ疲労試験の結果について述べる。モードⅡ疲労試験装置の基本的考え方<sup>3), 4)</sup>および基本的構成等については、変更がないので、前報を参照されたい。

## 2. 試験装置の改良点の概要

改造した試験装置を試験機に設置した状況を図1に、試験装置の形状を図2に示す。この装置は、図2に示すように①試験片のチャックへの固定と同時に静的圧縮負荷を与える部分、②4点せん断方式のせん断荷重負荷（モードⅡ負荷）を与えるためのはりの部分、③き裂面に静的 $K_I$ を負荷するための部分等から成っている。

試験装置の改良点は、静的 $K_I$ の負荷方法の変更である。前回の装置では静的 $K_I$ の負荷を試験片に曲げを与える方式によって行ったが、今回の装置では引張りを与える方式に変更した。曲げによる方式から引張りによる方式に変更したのは、曲げによる方式ではモードⅡ負荷のための荷重と静的 $K_I$ 負荷のための荷重とが干渉して正確な静的 $K_I$ 負荷が困難であることが判明したから

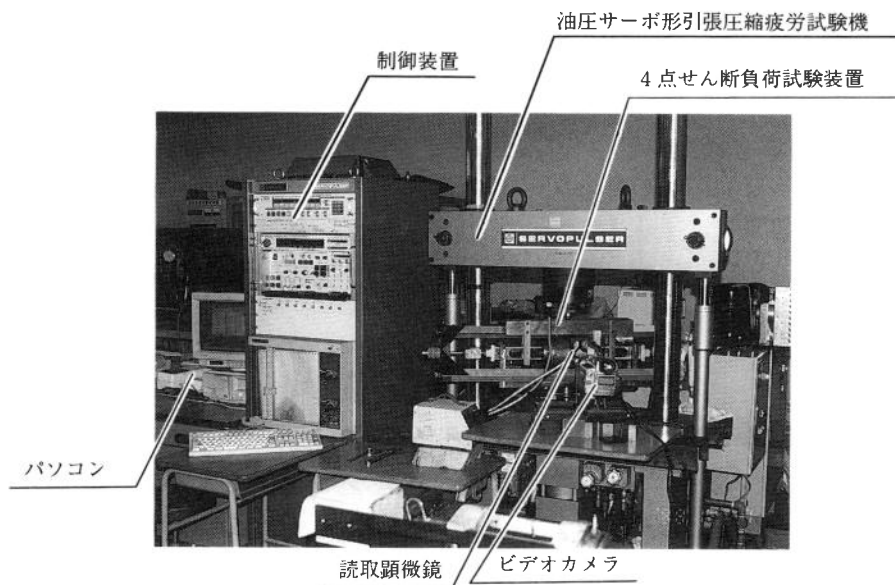


図1 4点せん断負荷試験装置の外観

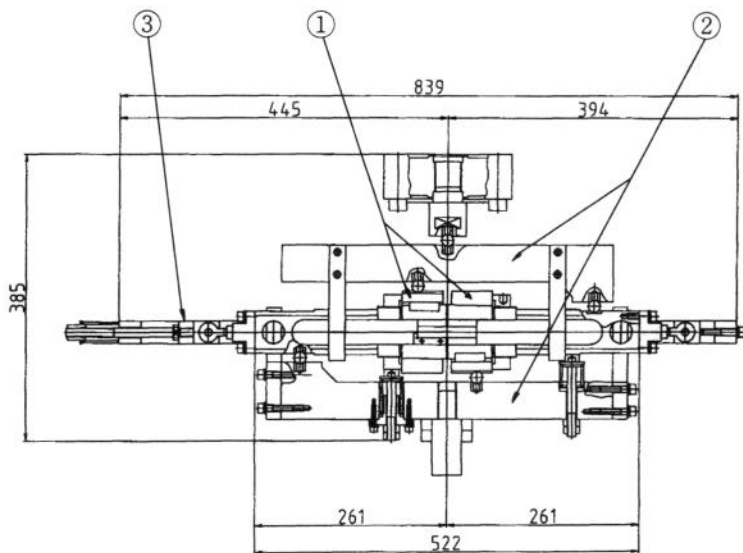


図2 4点せん断負荷試験治具の形状

である。き裂面に静的モードⅠ荷重を負荷するのは、き裂面間の摩擦を除去するためである。すなわち、材料特性値としてのモードⅡ疲労き裂進展抵抗を求めるためには、き裂面間の摩擦による影響を除く必要がある。そのため、モードⅡ疲労試験時には、き裂面に平行方向の静的圧縮応力を負荷すると同時に、静的 $K_1$ を加え、き裂面間の干渉を無視できる程度まで開口させた状態で試験を行う。

今回製作した引張荷重による静的 $K_I$ 負荷装置の構造を図3に示す。アルミニウム製フレームとばねの利用により試験片に静的引張荷重を与え、き裂面に静的モードⅠ荷重を負荷してき裂面を開口させる。図中のばねを圧縮すると、左右の試験片チャック治具の端面に取付けたバーの端部に力 ( $P_s$ ) が負荷され、試験片両端に引張荷重 ( $P_s$ ) を作用させる方式である。

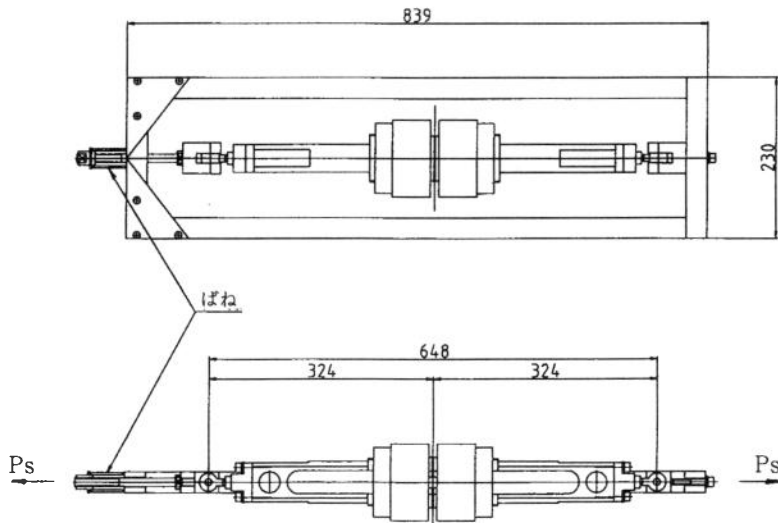


図3 静的モードⅠ負荷用フレーム治具

### 3. モードⅡ疲労き裂試験方法

使用した試験機は、(株)島津製作所社製の油圧サーボ形引張圧縮疲労試験機（荷重容量 $9.8 \times 10^4 \text{N}$ ）である。この試験機に製作した試験装置を取付けモードⅡ疲労き裂進展挙動を調査した。その調査状況の外観を図4に示す。

試験片の形状は、図5に示すような片側切欠き付平板試験片である。中央の疲労き裂導入部分に、直径120mm、厚さ1mm、刃先角30度のフライスカッターで幅1mm、長さ3.5mmの切欠きを加工した。き裂進展の観察と静的圧縮応力の状態を確認する歪ゲージを貼付するため、試験片両面を研磨した。その後、き裂長さの計測のため、ケガキ線を試験片切欠き側端面3.5mmの位置から0.5mm間隔に入れ、切欠き部に所要のモードⅠの予き裂を1.5mm導入し、歪ゲージを貼付する。所要の長さの予き裂は、4点曲げ疲労により導入した。

試験片への静的圧縮応力の付加および試験片の固定をする方法には、テーパチャック方式を採用した。試験片とチャックとの間には、浸炭焼入れを施したSCM415の間座を挿入し、ねじによってテーパカラーを移動させ試験片の降伏応力（0.2%耐力）程度の静的圧縮応力を加える。負荷される静的圧縮応力の試験片左右および両面の均一性を確認するため、試験片の片面に2枚、両面計4枚の歪ゲージを貼付した。貼付箇所は、試験片の中央から左右へ4mmの両面とした。

4点せん断負荷試験装置

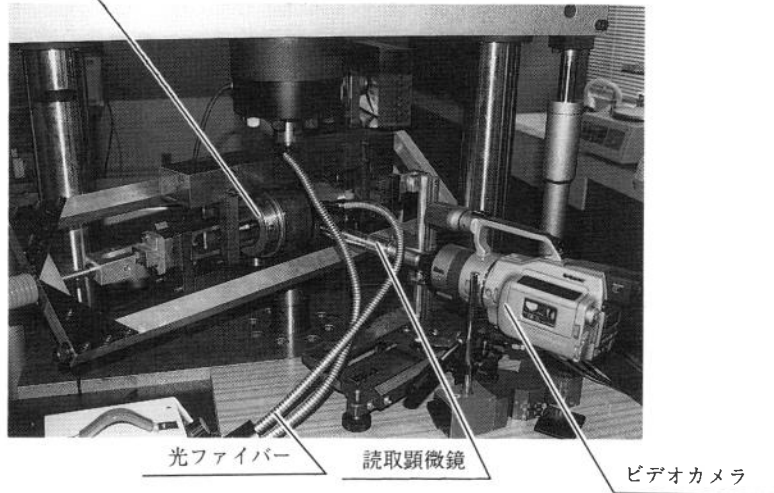


図4 4点せん断負荷試験状況

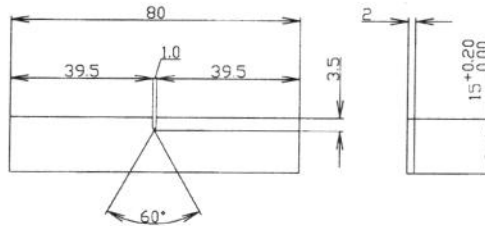


図5 片側切欠き付平板試験片

試験片に静的圧縮応力を加えた治具を油圧サーボ形引張圧縮疲労試験機に設置後、図3に示したコイルスプリングの圧縮量を調節して、静的引張力 $P_s$ を与え、予き裂をき裂面間の干渉が無視できる程度まで開口させた状態にする。その後、繰返しせん断応力を負荷し、き裂進展長さの変化を測定し、き裂進展速度を求める。

き裂進展長さの計測には、き裂先端部を光ファイバで照らし、20倍の読取顕微鏡およびビデオカメラを介して42インチのモニターに映し出した。これにより拡大率は約40倍ほどとなる。き裂の0.05mmごとの進展に要する繰返し数を測定し、き裂進展速度 $da/dN$ を算出してモードIIの応力拡大係数範囲 $\Delta K_{II}$ との関係を求めた。

モードIIの応力拡大係数 $K_{II}$ の値は式(1)により求められる<sup>5)</sup>。式中の記号を図6に示す。

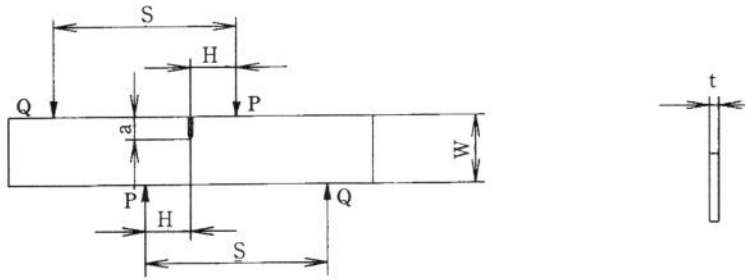


図6 本文式(1)中の記号の説明

$$K_{II} = F_{II} \tau_0 \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

ここで， $\tau_0 = (P-Q)/Wt$ ，  $a = a/W$

$$F_{II} = -0.2915 + 6.3229 a - 9.1199 a^2 + 6.0570 a^3$$

ただし， $0.167 \leq a/W \leq 0.833$

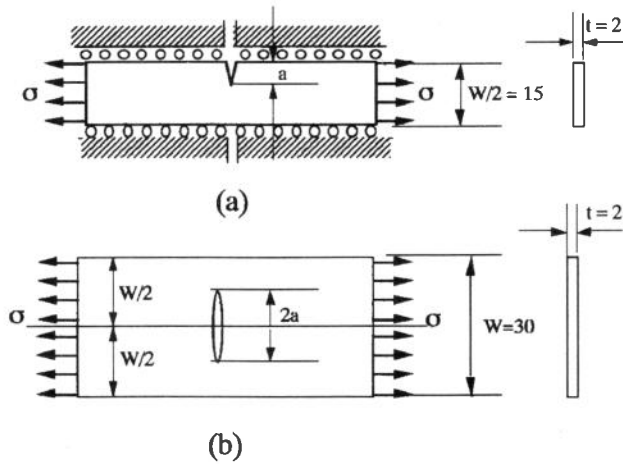


図7 静的 $K_I$ の負荷

- (a) モードⅡ試験装置における試験片の拘束状況の模式図  
 (b) (a)の状態に対応すると考えられる一様引張りを受ける中央き裂試験片

静的引張力 $P_s$ による予き裂の静的 $K_I$ の値 ( $K_{Is}$ ) は，次のような考え方により，有限板幅の中央き裂試験片に対する式(2)<sup>6)</sup>により求めた。すなわち，本装置における試験片の拘束状態は，模式的に図7(a)に示すように，試験片の曲り変形が拘束されているので，近似的に図7(b)に示すような引張りを受ける中央き裂試験片の片側半分に対応していると考えられる。

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\sec(\pi \xi)} \quad (2)$$

ここで， $\xi = a/W$ ，  $\sigma = 2 P_s / Wt$

実験時に試験片に加える静的 $K_I$ は、き裂面の接触による摩擦の影響を除くことができるなるべく小さい値とする。通常 $K_I=10\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度の負荷で摩擦の影響を除くことができ、この程度の値であればモードII疲労き裂進展挙動に与える影響は無視できると考えられる<sup>9)</sup>。

#### 4. モードII疲労き裂進展試験

製作したモードII疲労き裂試験装置によるアルミニウム合金の実験結果について述べる。アルミニウム合金について実験を行ったのは、次のような理由による。前報<sup>2)</sup>で詳細に述べたように、鉄鋼材料などにおいては、本装置のようにき裂面に平行方向の圧縮応力を加えて引張り型進展を阻止しないとモードII疲労き裂進展を起こさない。一方、アルミニウム合金においては、材料、応力状態によってはモードII疲労き裂進展を起こさないこともあるが、圧縮応力を加えなくてもモードII疲労き裂進展を起こす。したがって、アルミニウム合金については既にモードII疲労き裂進展のデータが得られている<sup>7), 8)</sup>ので、それらの結果と今回の結果を比較することにより、本装置の精度等を確認することを一つの主要な目的としているためである。

##### 4.1 試験方法

供試材は、市販のアルミニウム合金2017-T3の圧延板で、その機械的性質を表1に示す。試験片の採取方向は、き裂の進展方向が供試材の圧延方向と一致するものと圧延方向と直交する方

表1 アルミニウム合金2017-T3の機械的性質

0.2% 耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
294	422	19

向にき裂を進展させるものとの2種類とした。すなわち、2017-T3の従来<sup>7), 8)</sup>の結果と比較するため、図5に示した試験片の長手方向が圧延方向となるようにした。また、モードII疲労き裂進展挙動に及ぼす異方性の影響を検討するため、試験片の長手方向が圧延方向と直

交する試験片についても調査した。

試験片切欠き部先端から1.5mmのモードIの予き裂導入には、4点曲げ疲労で $\Delta K_I=7.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  (荷重1176N, 応力比0.1), 周波数20Hzのサイン波で行った。

モードII疲労試験は、応力比0.1, 周波数2Hzのサイン波で行ったが、静的引張荷重 $P_s$ の値は、2000N ( $K_I=8.8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )とした。なお、き裂面間の摩擦の影響を減少させる別の手法として、き裂面間に市販の潤滑剤(商品名CRC)を注入した実験も行った。

##### 4.2 試験結果

一例として、試験片の長手方向が圧延方向の場合で、モードII負荷 $\Delta(P-Q)=1882\text{N}$ , 静的引張力2000N, 潤滑剤無しにおけるき裂長さ $a$ と繰返し数 $N$ との関係を図8に示す。き裂長さ $a$ は試験片端面からき裂先端までの長さであり、切欠き部および予き裂部を含んでいる。実験は $a$ が5mmから開始している。このようなデータを基に、き裂進展速度 $da/dN$ と $\Delta K_{II}$ との関係を求めた結果を図9に示す。図中の一点鎖線は、アルミニウム合金2017-T3に対する報告結果<sup>7), 8)</sup>を引用して示したものである。この結果は、試験片の長手方向が圧延方向であり、 $K_{IS}$ が

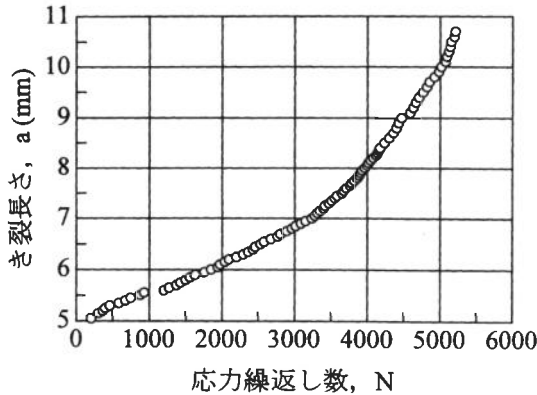


図8 モードII試験疲労き裂進展試験における応力繰返し数Nとき裂長さaとの関係，材料；2017-T3，荷重条件： $\Delta(P-Q)=1882N$ ，静的 $K_I=8.8MPa\sqrt{m}$ （実験開始時の値）

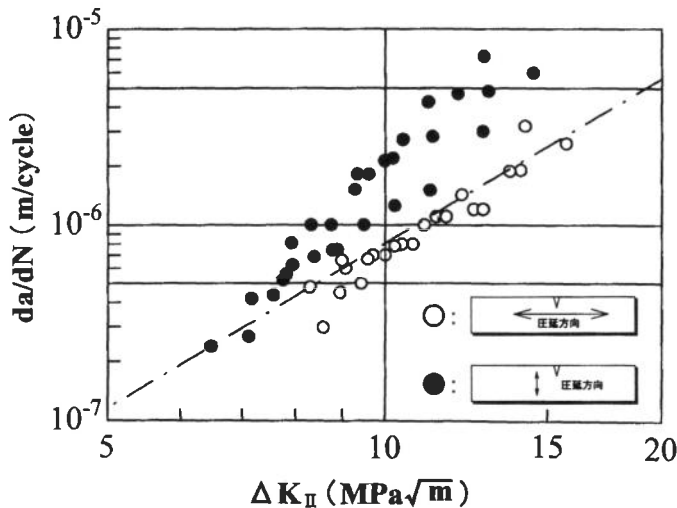


図9 モードII疲労き裂進展試験における $\Delta K_{II}$ と $da/dN$ との関係，材料 2017-T3，荷重条件 $\Delta(P-Q)=1882N$ ，静的  $K_I=8.8MPa\sqrt{m}$ （実験開始時の値）  
応力比  $R=0.1$ ，応力繰返し速度 2 Hz

モードII疲労の場合は，モードI疲労の場合と異なり，組織の影響が大きいことが指摘されているので<sup>8),9)</sup>，組織の影響が反映されていることも考えられる。

#### 4. 3 補足

静的引張荷重 $P_s$ を設定した過程について若干補足する。

き裂面間の摩擦は進展挙動に影響するが，その影響の程度を推定することは極めて困難であ

負荷されているが，本試験装置におけるような圧縮応力の重畳は行っていない実験装置で得られたものである。図示のように，本試験結果は報告されている結果と良く一致しており，き裂面に平行方向の静的圧縮応力重畳の影響は認められない。

また，図9には，試験片の長手方向が圧延方向と直交する試験片についても同一の実験条件で，き裂進展挙動を確認した結果も併せて示してある。この結果によると，き裂の進展方向が圧延方向に一致する場合の方が，き裂の進展方向が圧延方向と直交する場合に比べ，進展速度はかなり大きい傾向が認められる。通常の引張・圧縮等によるモードI疲労においては， $\Delta K_I$ の小さい領域（ $\Delta K_I$ -threshold近傍）および $\Delta K_I$ の大きい領域（静的破壊が混じる領域）を除いて組織の影響はあまりないとされており，圧延方向による異方性の影響も小さいと考えられる。しかし，モー

る。そこで、定量的データを得るため、適当な大きさの引張荷重 $P_s$ を負荷し、き裂面間の干渉を無視できる程度まで開口させた状態で試験を行うことが必要である。

試験条件の設定のために行った調査結果を図10に示す。試験片の長手方向は圧延方向であり、予き裂部に潤滑剤を塗布しない4種類 ( $P_s$ は900, 1500, 2000, 2500N,  $K_{Ist}$ は4.0, 6.6, 8.8, 11.0

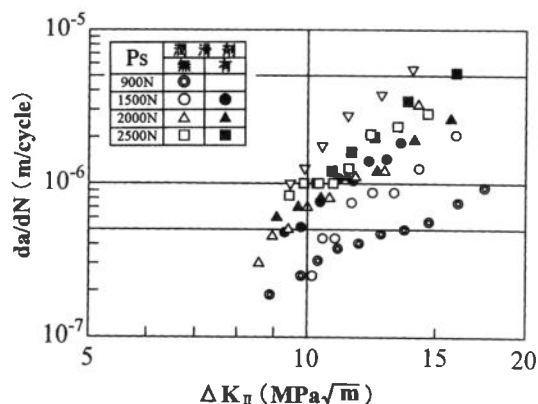


図10 モードII疲労き裂進展試験における $\Delta K_{II}$ と $da/dN$ との関係に及ぼす静的 $K_I$ の大きさとき裂面に注入した潤滑剤の影響

MPa $\sqrt{m}$ )と潤滑剤(呉工業株式会社製の第3石油類CRC5-56)を塗布した3種類 ( $P_s$ は1500, 2000, 2500N)の合計7種類についての結果である。図より、潤滑剤の有無にかかわらず、引張荷重 $P_s$ の増加に伴いき裂進展速度が大きくなる。 $P_s$ が1500Nでは潤滑剤の有無によりき裂進展速度が異なるが、2000N、2500Nのそれぞれにおいては、潤滑剤の有無による影響は認められない。潤滑剤は破面間の接触抵抗を低下させるものと考えられる。その影響が認められないことがき裂面間の接触がない

状態であると推察され、また $P_s$ が大きすぎるとモードII疲労き裂進展挙動に影響を与えると考えられるので、今回の実験では $P_s$ の値を2000Nとした。

### 5. おわりに

本報告では、平成8~10年度科学研究費補助金(基礎研究(B)(1), 転がり疲労損傷モデルとしてのセラミックス材料のモードII疲労試験法の開発)による研究の遂行にあたり、その基礎となる試験装置の概要と、試験装置の有効性を確認するため行ったアルミニウム合金2017-T3のモードII疲労き裂進展特性の調査結果を述べた。装置の有効性が確認できたので、鉄鋼材など順次実験して装置の改良を進め、セラミックス材料の検討を目指したいと考えている。

付記; 筆者の大塚昭夫は名古屋大学名誉教授, 小川武史は青山学院大学理工学部機械工学科助教教授である。

### 参考文献

- 1) たとえば, 木村好次, 岡部平八郎, トライボロジー概論, 養賢堂(1988) P.227.
- 2) 高 行男, 長谷川達也, 大塚昭夫, 小川武史, モードII疲労試験装置の製作, 中日本自動車短期大学論叢, 第28号(1998) P. 1.
- 3) A. Otsuka and M. Aoyama, Mode II fatigue under a compressive stress field: A simplified model of rolling contact fatigue, Mixed- Mode Fatigue and Fracture, Ed. by H. P. Rosmanith and K. J. Miller,



European Structural Integrity Society (1993) P.49

- 4) A . Otsuka , H . Sugawara and M . Shomura , A test method for modeⅡ fatigue crack growth relating to a model for rolling contact fatigue , Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures , Vol .19, No . 10 (1996) P . 1265.
- 5) Stress Intensity Factors Handbook , Vol . 2 , Y . Murakami Editor- in- Chief , Pergamon Press (1987) P . 941.
- 6) 岡村弘之，線形破壊力学入門，培風館（1976）P.217.
- 7) 大塚昭夫，東郷敬一郎，榊原幸二，吉田 享，材料，34（1985）P.1174.
- 8) A . Otsuka , K . Mori and K . Tohgo , ModeⅡ fatigue crack growth in aluminum alloys , Current Research on Fatigue Cracks , Current Japanese Materials Research Vol . I , Ed . by T . Tanaka , M . Jono and K . Komai , Elsevier Applied Science (1987) P. 149.
- 9) A . Otsuka , K . Tohgo and C . E . Skjølstrup , Fatigue crack growth in high strength aluminum alloy weldments under modeⅡ loading , The Mechanism of Fatigue , Proc . Intern . Conf . Fatigue , Fracture Mechanics and Failure Analysis , ASM (1985) P . 265.