

モードⅡ疲労試験装置の製作

高 行男・長谷川達也
大塚昭夫・小川 武史

1. はじめに

転がり軸受の寿命を決定する主な要因である転がり疲労は、転がり接触荷重を受ける部材表面層が損傷する現象である。転がり疲労の主要な損傷形態であるはくり形破損は、モードⅡ(せん断)形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¹⁾。したがって、その機構の解明にはモードⅡ形疲労き裂進展則を明確にする必要がある。しかし、単純なモードⅡ負荷を与えると、ある種のアルミニウム合金を除く鉄鋼材料など多くの構造材料ではモードⅡ疲労き裂進展を起こさない。そのため、モードⅡ疲労き裂進展特性に関する報告は非常に数少なく、その特性はアルミニウム合金についての大塚らによる研究^{2), 3)}がある他、鉄鋼材料に関してはほとんど解明されていない。また、大塚ら^{4), 5)}は、転がり疲労によるはくり形損傷は圧縮応力重畳下におけるモードⅡ疲労であることに着目し、モードⅡ疲労特性を検討している。

実用的観点からは、モードⅡ疲労特性は各種材料の転がり疲労に対する強度を判定する特性値として有用である。また、一般の構造部材が圧縮とせん断負荷を同時に受ける場合にはモードⅡ疲労による破損の可能性があるので、構造物の疲労に対する安全性確保の観点からもモードⅡ疲労特性の解明は重要な意義があると考えられる。

本稿では、以上のような観点から、セラミックスを含む各種材料のモードⅡ疲労き裂の進展特性を明らかにするため、圧縮応力重畳下におけるモードⅡ疲労試験装置の製作を行ったので、その概要を述べる。

2. モードⅡ疲労試験方法

圧縮応力重畳下におけるモードⅡ疲労試験装置の概要を述べるにあたり、装置に関する基本事項を述べる。

2.1 き裂の変形様式

き裂の変形様式には、図1に示すような三つの基本形がある。それぞれの変形様式をモードⅠ(開口形)、モードⅡ(面内せん断形)、モードⅢ(面外せん断形)と言う。実際の機械・構造物に発生するき裂は、モードⅠの変形様式を受ける場合が最も多い。そのため、従来行われてきた疲労に関する膨大な研究はほとんどすべてモードⅠ疲労に関するもので、モードⅡおよびモードⅢ疲

劣に関する研究はほとんど行われていない。これは、モードⅠ疲労が重要であるという理由の他に、モードⅡおよびモードⅢ疲労に関する実験がモードⅠ疲労実験と異なり、実験技術上種々の工夫と精度を要し、モードⅠ疲労実験に比べ格段に困難であることも一因であると考えられる。

2.2 試験装置製作の基本的考え方

今回製作した試験装置の基本的考え方として、重要な点は次の(a)および(b)の2点⁴⁾・⁵⁾である。

(a) き裂面に平行方向の圧縮応力の負荷

図2に示すように、鉄鋼材料などのき裂材に単純にモードⅡ繰返し負荷を与えると、き裂はモードⅡで進展せず、き裂先端の最大引張り応力作用面に近い方向に引張り形(モードⅠ)進展を起こす。一方、転がり疲労におけるはくり形破損(いわゆるFlaking)は、接触応力のせん断応力成分の繰返し負荷によるモードⅡ疲労であることが以前より指摘され、ほぼ定説となっている。ベアリングの設計もこのせん断応力が基準とされている¹⁾。しかし、単純に鉄鋼材料などにモードⅡ繰返し負荷を与えても、モードⅡ疲労き裂進展を出現させることは出来ない。

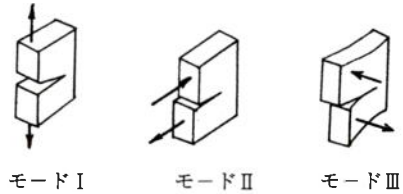


図1 き裂の基本変形様式

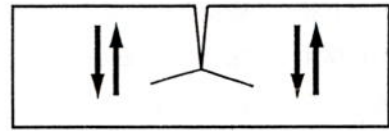


図2 単純なモードⅡ繰返し負荷による疲労き裂進展(引張り形き裂)

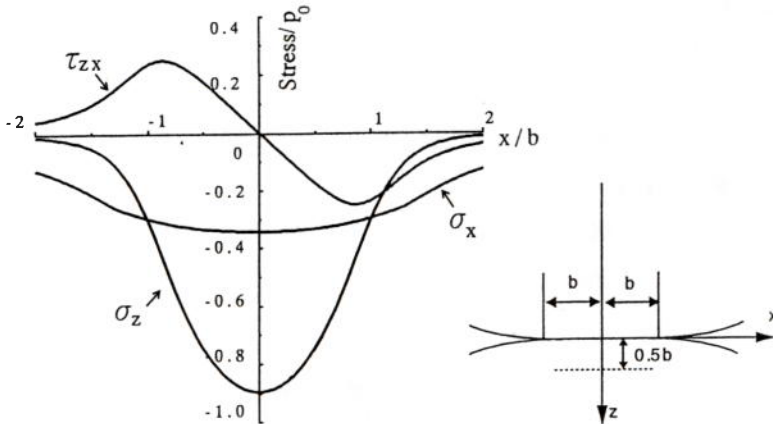


図3 2円筒の接触により接触面からの深さ $z = 0.5b$ の面(τ_{zx} が最大となる面)内に生じる応力分布⁶⁾
($2b$ =接触幅, P_0 =最大接触圧, x および z は接触面に対する接線方向および垂直方向)

転がり疲労におけるはくり形破損がモードⅡ疲労き裂進展により起こると考えられるにも関わらず、実際にモードⅡ疲労試験を行うとモードⅡ疲労き裂の進展が起きないと言うことは、一見大きな矛盾である。今までその理由は明らかにされていなかったが、筆者らは、接触圧力による応力状態と単純なモードⅡ負荷による応力状態との差によるものとする。すなわち、接触圧力による応力状態は図3⁶⁾に示すように、単純なせん断応力負荷ではなく接触面に平行方向のせん

断応力 τ_{zx} の他に、これと平行方向および垂直方向の圧縮応力 σ_x 、 σ_z が、 τ_{zx} と重畳して作用している。疲労き裂の引張り形進展は、き裂の開閉口によって進展するので、十分な圧縮応力が負荷されていると、き裂は閉じたままなので引張り形進展は起きないと考えられる。一方、モードⅡ疲労き裂進展は、き裂先端のせん断変位によって起こると推察されるので、き裂の開閉口は必要とせず、圧縮応力下でも進展するものと考えられる。したがって、接触応力作用下では、圧縮応力によって引張り形疲労き裂の発生および進展が抑制され、接触面に平行方向のせん断応力（図3の τ_{zx} ）によってモードⅡ進展が起きると考えられる。

本試験装置では上述の応力状態を再現させるため、図4に示すように、繰返しせん断負荷に重畳して、き裂面に平行方向の圧縮力を重畳負荷させる構造となっている。接触応力の場合は、接触面に平行方向および垂直方向の圧縮応力が作用している。しかし、モードⅡ負荷をかけた場合、き裂がモードⅡき裂の延長面からそれて

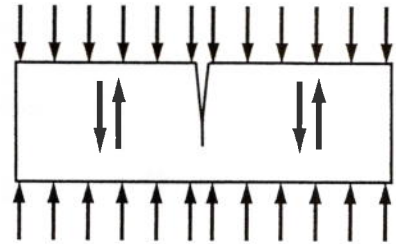


図4 き裂面に平行な圧縮応力重畳下におけるモードⅡ疲労（せん断形き裂）

引張り形進展するのを防ぐのに有効な圧縮応力は、き裂面に平行方向の応力で、き裂面に垂直な圧縮応力はこの目的には不要である。本試験装置においては、次項(b)で述べるように、き裂と垂直方向には圧縮ではなく、逆に引張り応力を重畳負荷するようになっている。

(b) 静的 K_I の負荷

転がり疲労におけるはくり形破損においては、き裂面に垂直方向の圧縮応力も重要な役割を果たしていると考えられる。この圧縮応力は、き裂面間の摩擦力を大きくすることによってき裂先端に生じる K_I の値を減少させるように働くと考えられるので、実際の転がり疲労強度の推定には重要である。しかし、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、上述のように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_I を加え、き裂をわずかに開口させた状態で試験を行うようになっている。すなわち、き裂面間で摩擦が起こると、その影響の程度を推定することは極めて困難であるので、定量的に正確なデータを得るためには適当な大きさの静的 K_I 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。本装置では、後述のように曲げモーメントにより、この静的 K_I を与える構造になっている。

2.3 試験装置の構成

モードⅡ疲労試験に使用する試験機は、(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治具を用いて試験片を取付け実験を行う。図5に試験状況の外観と各部の構成を示す。使用する試験片は、図6に示すような片側切欠き付平板試験片である。この切欠き部に所要のモードⅠの予き裂を入れた後、圧縮応力重畳下におけるモードⅡ疲労試験を行う。

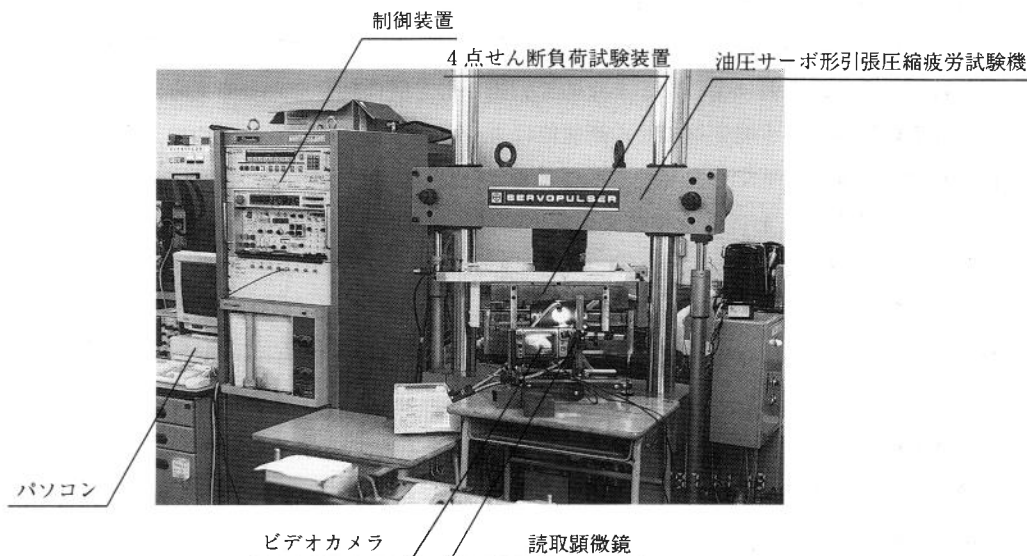


図5 4点せん断負荷試験状況

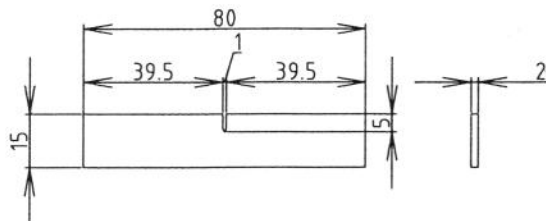


図6 片側切欠き付平板試験片

製作した装置は、図7に模式的に示す4点せん断負荷試験法である。図中に示すように、はりに荷重 P, Q を負荷すると、はりの中央部分には一様なせん断力が作用し、かつ中央断面では曲げモーメントが0になることを利用する方法である。切欠き部に発生させた予き裂は、せん断応力の作用を受け進展することとなる。

このとき負荷したモードII負荷が、き裂面間の摩擦による干渉効果を受けることなく有効にき裂先端に作用することが必要である。そのため、図8に示すように、試験片中心から ℓ の位置に静的引張力 P_s を負荷することにより試験片に曲げモーメントをかけ、これにより静的 K_I を負荷するようにした。

本試験法におけるモードIIの応力拡大係数 K_{II} の値は式(1)により求められる⁷⁾。計算式に対応する記号を図9に示す。また、静的 K_I の値(K_{I_s})は式(2)により求めた⁸⁾。

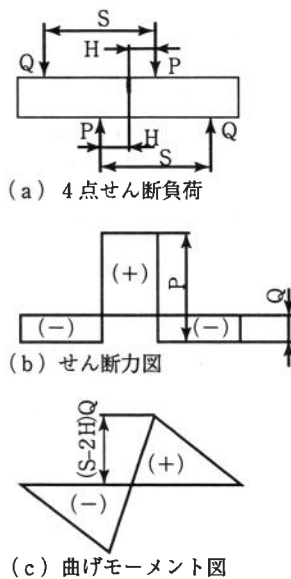


図7 4点せん断負荷試験法

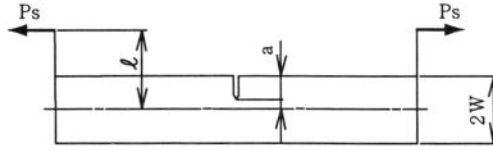


図8 静的モードⅠ荷重の負荷

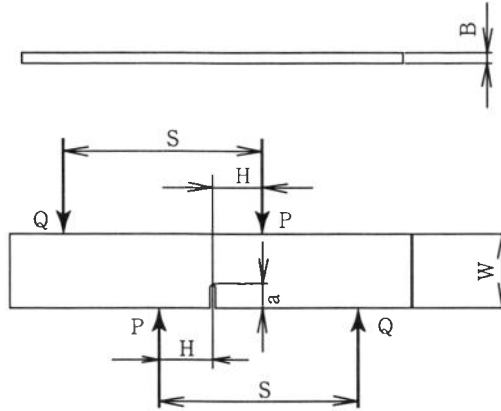


図9 計算式の記号

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

ここで、 $\tau_0 = \frac{P-Q}{WB}$ 、 $\alpha = \frac{a}{W}$

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

ただし、 $0.167 \leq \frac{a}{W} \leq 0.833$

$$K_{Is} = \left\{ \frac{6\ell}{W^2} F_m(\xi) + \frac{1}{W} F_p(\xi) \right\} \times \frac{P_s}{t} \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

ここで、 $F_m(\xi) = \sqrt{\frac{2}{\pi\xi} \tan\left[\frac{\pi\xi}{2}\right]} \frac{0.923 + 0.199 \{1 - \sin\left[\frac{\pi\xi}{2}\right]\}^4}{\cos\left[\frac{\pi\xi}{2}\right]}$

$$F_p(\xi) = \sqrt{\frac{2}{\pi\xi} \tan\left[\frac{\pi\xi}{2}\right]} \frac{0.752 + 2.02\xi + 0.37 \{1 - \sin\left[\frac{\pi\xi}{2}\right]\}^3}{\cos\left[\frac{\pi\xi}{2}\right]}$$

ただし、 $\xi = \frac{a}{W}$

4点せん断負荷試験法の特徴は、比較的純粋なモードⅡ負荷状態を実現できることその他、試験片寸法、形状などに制限が少なく、試験治具の構成が単純なことにある。き裂長さの計測も容易であり、さらにK値の計算精度も高いなど、数多くの利点を有している。しかし、両振り試験が困難なこと、対象となる試験材料によっては、試験片のチャッキングに特別な配慮や治具の加工精度が高いことが必要である。

3. 試験装置の製作

製作した試験装置の外観を図10に、その形状を図11に示す。この装置は、図中に示す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き裂面に静的モードⅠ荷重を負荷するための構造等から成っている。試験装置の材料には主にS45Cを用いた。①の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方法としては、テーパ式チャックを用い、圧縮の負荷量と負荷が均一にかかることを確認するため試験片に4枚の歪ゲージを貼付した。②の4点せん断方式のせん断荷重の負荷部には鋼球を用い、荷重の負荷精度に留意した。③の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。以下に、製作した装置の概要および若干の補足を述べる。

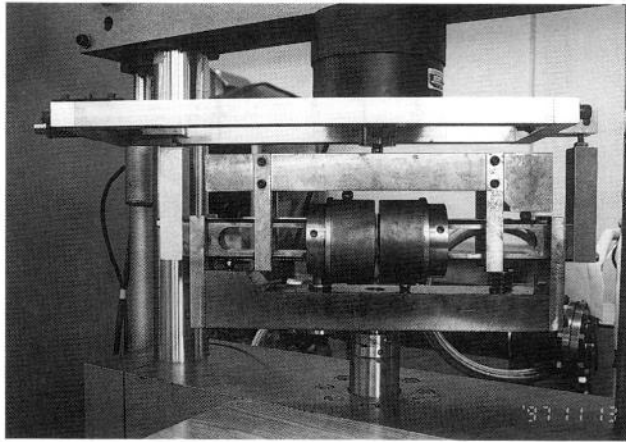


図10 4点せん断負荷試験装置の外観

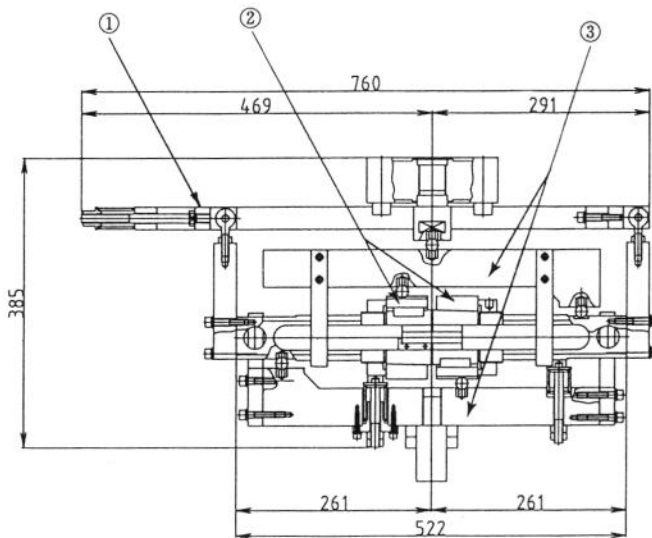


図11 4点せん断負荷試験治具の形状

3. 1 試験片のチャッキングに静的圧縮力の負荷

試験片に静的圧縮負荷を与えると同時にチャックの固定をする方法として、テーパ式チャックを用い、圧縮負荷が均一にかかるようにした。図12に示すようにテーパを利用し、ねじによってテーパカラーを移動させ静的圧縮負荷が均一にかかるように締め付ける。圧縮負荷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。貼付場所は、モードⅡ疲労き裂進展経路となる部分に近い試験片の中央から左右へ5mmの両面とした。試験片とチャックとの間には試験片の上下端面に、浸炭焼入れを施したSCM415の間座を挿入した。この間座の厚さを変えることにより、試験片の寸法が若干異なる場合にも実験は可能である。長さ80mmの試験片に対し両端より39.5mmを静的圧縮負荷部とし、中央1mm間を圧縮応力重畳下におけるモードⅡ疲労き裂進展挙動の観察部とした。

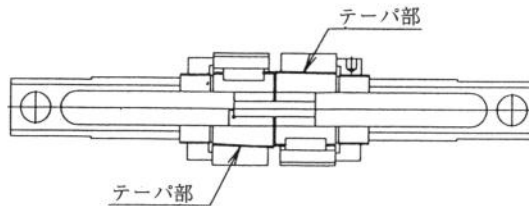


図12 テーパ部の圧入による静的圧縮負荷部分の断面形

3. 2 4点せん断方式のせん断荷重の負荷部

4点せん断方式の荷重の負荷部には鋼球を用い、荷重の負荷精度に留意した。図13に示すように、支点にはφ16mmの鋼球を用い、鋼球の受け側には浸炭焼入れを施したカラーブッシュを採用して治具の座りを良くし、支点となる位置の加工精度に留意した。また、左右のチャック部が同一平面上で上下運動をするように、治具本体の側面にサイドガイドを取付けた。試験機による荷重が試験片に対し直接かかるようにするためには治具の自重の影響を打ち消す構造にする必要がある。そのため、左右の試験片テーパ式チャック治具の下にコイルばねを利用したばね式バランス調整治具を付け、治具の自重が試験片に作用しない方法を考案した。

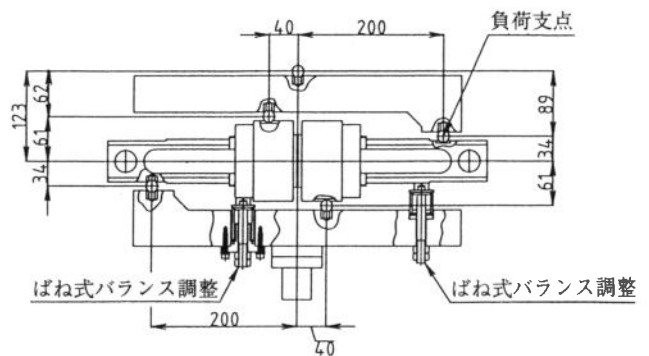


図13 せん断荷重の負荷部及びばね式バランス調整治具

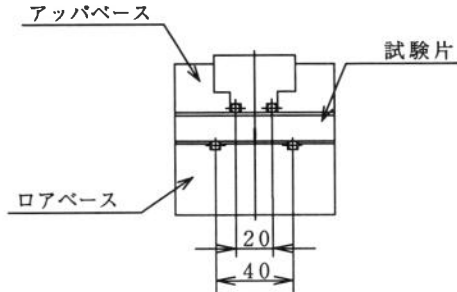


図15 モードⅠの予き裂導入治具

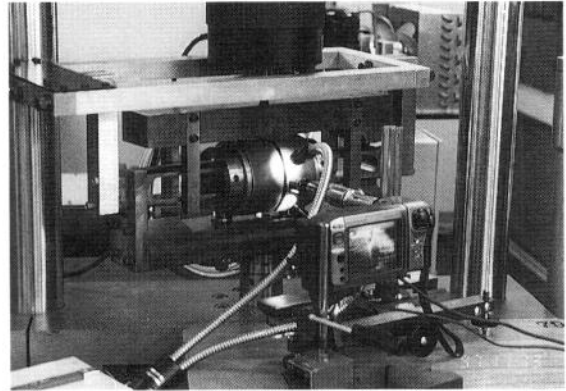


図16 き裂先端位置の観察

4. おわりに

本稿では、平成8年度科学研究費補助金(基盤研究(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製作概要を述べた。今後、本試験装置によりセラミックスを含む各種材料のモードⅡ疲労き裂の進展特性を明らかにして行きたいと考えている。

装置の製作並びにき裂の計測手法等について、研究協力者である本学加藤泰世講師、井藤賀久岳教務技術職員には、多大の御協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

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) A. Otsuka, K. Tohgo, T. Kiba and S. Yamada, Mode II Fatigue crack growth characteristics and mechanism in aluminum alloy 7N01-T4 weldments under mode II loading, Advances in Fracture Research, Proc. ICF 6 (1984) P.1671.
- 3) A. Otsuka, K. Mori and K. Tohgo, Mode II 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.
- 4) A. Otsuka and M. Aoyama, Mode II fatigue under a compressive stress field: A simplified model for rolling contact fatigue, Mixed-Mode Fatigue and Fracture, Ed by H. P. Rosmanith and K. J. Miller, European Structural Integrity Society (1993) P.49.
- 5) A. Otsuka, H. Sugawara and M. Shomura, A test method for mode II 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.
- 6) K. L. Johnson, Contact Mechanics, Cambridge University Press (1985) P.289.
- 7) Stress Intensity Factors Handbook, Vo1. 2, Y. Murakami Editor-in-Chief, Pergamon Press (1987) P.941.
- 8) 岡村弘之, 線形破壊力学入門, 培風館(1976)