鉛フリーはんだにおけるモード I および II
荷重条件下での疲労き裂進展*田中啓介^{*1}, 岩田吉史^{*2}, 秋庭義明^{*3}Fatigue Crack Propagation in Lead-Free Solder
under Mode I and II LoadingKeisuke TANAKA^{*4}, Yoshifumi IWATA and Yoshiaki AKINIWA^{*4} Department of Mechanical Engineering, Meijo University,
1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya-shi, Aichi, 468-8502 Japan

Crack propagation tests of lead-free solder were conducted using center-cracked plates (CCP) for tension-compression loading (mode I loading) and thin-walled tubular specimens for torsional loading (mode II loading). Both specimens have an initial slit as a crack starter. The path of crack propagation under mode I loading was macroscopically straight, and perpendicular to the maximum principal stress direction. In tubular specimens under mode II loading, at the high strain amplitude, the crack propagate in shear mode along the maximum shear direction. At low strain amplitude, four cracks are formed from the initial slit and propagate showing macroscopically tensile-mode propagation. The crack propagation rate is expressed as a power function of the J -integral range for both mode I and II loadings. The relation was not much different between mode I and II loadings. Fatigue crack propagation takes place by joining microcracks formed along the maximum shear planes ahead of the crack tip. At high strain ranges of mode II loading, microcracks ahead of the main crack tip were long and abundant, and their connection with the main crack gave rise shear-mode crack propagation.

Key Words: Fatigue, Lead-Free Solder, Crack Propagation, J -Integral, Mode I, Mode II

1. 結 言

電子デバイスにおけるはんだ接合部では、熱膨張係数の差に起因する熱疲労を受けるため、信頼性の確保のためには疲労に対する寿命評価が必要である。はんだ接合部では、通常き裂はかなり初期に入り、寿命の大部分はき裂進展に費やされるため、き裂の進展挙動の予測が重要となる。

はんだにおけるき裂進展挙動の予測に関する従来の手法を大別すると、き裂先端での材料の損傷蓄積を考える累積損傷手法⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾と、破壊力学的手法⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾がある。累積損傷手法はき裂先端に微小材料を考え、この微小材料がマンソン・コフィン則を満たすとき裂になることからき裂進展則を導く。この手法は実際のはんだ接合部に対して、

有限要素法(FEM)によるひずみ解析と結合してき裂経路を予測することに成功しているが、FEMのメッシュ寸法あるいはき裂先端の微小材料に適用するマンソン・コフィン則などに任意性があり、物理的根拠にも不明確さがある⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

一方、破壊力学的手法では、非弾性破壊力学パラメータである J 積分が適用され、き裂進展速度との間にべき乗関係が導かれている⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾。しかし、従来の研究の大部分は、モード I の荷重条件で行われており、負荷条件に対する検討が十分でない。また、熱膨張係数の差に起因する疲労ではせん断応力を受けるが、せん断荷重条件下でのき裂進展に対する J 積分の適用はほとんどなされていない。

本研究では、破壊力学的手法を用いたき裂進展挙動の予測手法の開発を目的とする。そこで、鉛フリーはんだを実験材料として使用し、中央切欠き平板に引張圧縮を加えるモード I 条件でのき裂進展とともに、薄肉円筒試験片に円周方向に初期スリットをつけ、繰返しねじり条件下でのモード II き裂進展挙動を観察し、き裂進展挙動を J 積分

* 原稿受付 2009 年 6 月 5 日。

^{*1} 正員, フェロー, 名城大学理工学部(☎ 468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)。^{*2} (株)デンソー, ディーゼル噴射技術 2 部(☎ 448-8661 刈谷市昭和町 1-1)。^{*3} 正員, 横浜国立大学工学研究院(☎ 240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1)。

E-mail: ktanaka@ccmfs.meijo-u.ac.jp

で整理するとともに、モード I き裂進展挙動と比較した。

2. 実験方法

2.1 材料および試験片

材料は鉛フリーはんだで Sn-3.0Ag-0.5Cu である。試験片は、鋳造した丸棒から機械加工で作製した。図1に試験片形状を示す。(a)は中央切欠き平板で、平行部長さ22mm、板厚6mm、板幅16mmの平板の中央に、放電加工により全長5mmの切欠きを導入した。このときの切欠きの幅は0.15mmで先端半径は0.07mmである。一方、(b)は薄肉円筒試験片で、外径は16mm、内径は13mmで平行部の長さは30mmである。試験片の中央部に円周方向に全長約2mmのスリットを導入した。

両試験片ともスリット加工後研磨仕上げをした後に、156°C 24hの焼鈍をした。微視組織は β -Snの初晶をAgとSnの共晶網目構造が取り囲んでいる。 β -Sn粒の大きさは、約30から50 μ mである。

2.2 疲労試験 中央切欠き平板には、電気油圧サーボ疲労試験機を使用して、室温大気中で、引張圧縮荷重を負荷した。本論文ではこれをモード I 試験と称する。スリットをはさんだ標点間距離20mmでの変位をストレインゲージ式の変位計（島津製作所製ダイナストレイン）で測定し、変位制御の両振り試験を実施した。荷重波形は三角波で、ひずみ速度は $\dot{\epsilon} = 0.50\%/s$ とした。ひずみ範囲は、 $\Delta\epsilon = 0.05, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8\%$ の5種類である。このひずみ速度は、日本材料学会のはんだの

Fig. 1 Shape and dimension of fatigue specimens

疲労試験標準⁽¹⁰⁾でのひずみ速度0.1%/sよりも高速であり、この条件ではクリープ変形は小さいと考えられる。

薄肉円筒試験片は電気油圧サーボ引張圧縮ねじり複合疲労試験機（島津製作所製 EHF-ED10/TQ-40L）を用いて、室温大気中で、ねじり荷重を負荷した。これをモード II 試験と称する。標点間距離が25mmの2軸変位計（MTS製 632.80F-04）を使用して計測したねじれ角を制御信号として、完全両振りの三角波形の変位制御で行った。せん断ひずみ速度は $\dot{\gamma} = 1.33\%/s$ であり、ひずみ範囲は $\Delta\gamma = 0.13, 0.27, 0.53, 1.07, 1.60\%$ の5種類でき裂進展試験を行った。引張圧縮の場合のひずみ速度より等価ひずみで速い速度となっている。

モード I 試験ではき裂長さはデジタルマイクロスコープ（キーエンス製 VHX-900）で測定した。モード II 試験では、適当な繰返し数で試験を中断し、

Fig. 2 Evaluation of J-integral range

レプリカを取得してき裂長さを光学顕微鏡で測長することにより求めた。

2・3 J積分評価 J積分評価には荷重と変位の関係から簡便法を用いて評価した。モード I 試験では、図 2(a)に示す荷重変位曲線を記録し、図中の面積 S を用いて次式で評価した⁽¹¹⁾⁽¹³⁾。

$$\Delta J = \frac{(\Delta K)^2}{E} + \frac{S}{t(W-a)} \quad (1)$$

ここで、 ΔK は荷重範囲 ΔP^* に対応する応力拡大係数範囲、 E はヤング率、 t は板厚、 W は板幅の半分、 a はき裂半長である。なお、 K 値の算出には中央き裂平板の Tada らの式⁽¹⁴⁾を用いた。また上式の変位として荷重点変位を採用した。一方、モード II 試験では次式によって評価した。

$$\Delta J = \frac{S^*}{2t(\pi R - a)} \quad (2)$$

ここで、 R は薄肉円筒の半径、 S^* は図 2(b)に示す面積である。J 積分の簡便法の詳細は付録に述べる。

2・4 微視的観察 き裂先端近傍の変形状態を走査型電子顕微鏡(SEM: JOEL JSM-6500F, JSM-7000F)により観察した。また、き裂の経路と微視組織の相関を電子線後方散乱回折(EBSD)法で観察した。

3. 実験結果および考察

3・1 疲労き裂の進展経路 モード I 試験での疲労き裂の進展様相は、負荷ひずみによって少し異なった。図 3 に、(a) $\Delta \varepsilon = 0.2\%$ 、(b) $\Delta \varepsilon = 0.8\%$ の場合の切欠き底からのき裂進展様相の SEM 写真を示す。図の白矢印は主き裂先端を示す。ひずみ振幅が 0.6% 以下の場合には、(a)の例に見られるように主き裂は切欠き底から一本がほぼ直線的に進展した。一方、 0.8% の場合には、切欠き底に二本のき裂が形成され、そのうち一本が長く成長した。巨視的には主応力方向である軸方向(上下方向)に垂直に進展する。

モード II 試験ではき裂が明確に異なる二つの様相で進展した。図 4 には、(a) $\Delta \gamma = 0.23\%$ 、(b) $\Delta \gamma = 0.53\%$ の SEM 写真を示す。図の白矢印は主き裂先端を示す。低ひずみ振幅では、初期スリット先端から二本のき裂が、約 80 から 90 度の角度をなして進展する。き裂はほぼ主応力方向に垂直に進展する。一方、高ひずみ振幅では、き裂は初期スリットの方角、つまり最大せん断応力の方向にせん断型で進展する。このき裂進展様式の遷移はせん断ひずみ振幅が 0.53% と 0.23% の間にある。

(a) $\Delta \varepsilon = 0.2\%$

(b) $\Delta \varepsilon = 0.8\%$

Fig. 3 Crack propagation path under mode I loading

(a) $\Delta \gamma = 0.27\%$

(b) $\Delta \gamma = 0.53\%$

Fig. 4 Crack propagation path under mode II loading

3・2 疲労き裂の進展挙動 モード I および II 試験ともに、き裂長さは初期スリットを含めて、試験片の軸に垂直な面に投影した最大長さを測定し、き裂長さとした。モード I 試験では、き裂半長が約 5mm とな

った時点で、モード II 試験では約 3mm 進展した時点で実験を終了した。測定したき裂長さと繰返し数との関係の例を図 5 に等価ひずみが 0.2% の場合を示すが、(a)モード I、(b)モード II のいずれの場合にもき裂は繰返し数とともに線形的に成長し、き裂進展速度はほぼ一定である。また、他の条件の実験においても測定範囲では速度は一定であった。

3.3 荷重変位関係と J 積分 図 6 には、図 5 の実験中に測定した荷重変位関係の例を示す。図には測定時のき裂長さを示す。(a) モード I の荷重と変位関係、および(b)モード II のトルクとねじれ角との関係に見られるように、ヒステリシスは大きく広がっており、非弾性変形が大きいことが分かる。また、いずれのループにおいても、き裂開口に対応するような変曲点は認められない。他の条件でも同様に変曲点は認められなかった。

図 7 には簡便法で求めた J 積分範囲 ΔJ のき裂長さに対する変化を示す。(a)モード I および(b)モード II とともに、 ΔJ はややばらつきがあるがほぼ一定である。このことから、き裂進展速度がき裂長さによらずほぼ一定であった理由は、 ΔJ がほぼ一定であったためと理解される。以下では、き裂進展速度および J 積分に

(a) Mode I, $\Delta \varepsilon = 0.2\%$

(b) Mode II, $\Delta \gamma = 0.53\%$

Fig. 5 Crack propagation curves

ついて測定き裂長さの領域での平均値をもとに両者の関係を検討する。

3.4 き裂進展速度と J 積分の関係 図 8 には、モード I と II に対するき裂進展速度と J 積分との関係を示す。J 積分が大きい領域では、モード I と II でほとんど差はないが、J 積分の低い領域ではモード I の方が進展速度が大きくなる。き裂進展速度 da/dN (m/cycle) と ΔJ (N/m) の関係をべき関数で近似すると、モード I に対し

$$da/dN = 7.96 \times 10^{-12} (\Delta J)^{1.34} \quad (3)$$

となり、モード II に対しては

$$da/dN = 1.70 \times 10^{-12} (\Delta J)^{1.51} \quad (4)$$

となる。モード II 試験では、き裂経路がひずみ振幅によって異なったが、それによる差は小さい。

本実験でのき裂長さの範囲では、き裂進展速度はき裂長さには依存せず、従ってひずみ範囲の関数としても表すことができる。図 9 にはき裂進展速度とひずみ範囲との関係を示す。ここで、横軸のひずみは等価ひずみ範囲で、せん断ひずみ範囲は、 $\Delta \varepsilon = \Delta \gamma / \sqrt{3}$ で変換した。両者の関係はモード I に対しては、

(a) Mode I, $\Delta \varepsilon = 0.2\%$, $a = 3.23\text{mm}$

(b) Mode II, $\Delta \gamma = 0.53\%$, $a = 2.68\text{mm}$

Fig. 6 Load-displacement curves for mode I and II

(a) Mode I, $\Delta\epsilon = 0.2\%$

(b) Mode II, $\Delta\gamma = 0.53\%$

Fig. 7 Variation of J-integral range with crack length

Fig. 8 Relation between crack propagation rate and J-integral range

$$da/dN = 8.64 \times 10^{-2} (\Delta\epsilon)^{2.21} \quad (5)$$

また、モード II に対しては、

$$da/dN = 1.46 \times 10^{-1} (\Delta\epsilon)^{2.35} \quad (6)$$

となる。

Fig. 9 Relation between crack propagation rate and strain range

3・5 き裂の微視的観察 モード I および II ともにき裂先端近傍には多数の微視き裂が認められた。図 10 には、モード I 試験でのひずみ範囲 $\Delta\epsilon = 0.2\%$ の試験終了時のき裂の先端近傍の SEM 写真を示す。このき裂は Fig. 3(a) に示すき裂で、図において軸方向 (上下方向) に対して $\pm 45^\circ$ 方向のすべり線が観察されるが、図 10 に示す拡大写真では粒界あるいは粒内のすべりに沿った微視き裂が多数認められる。

き裂と結晶組織との関係を詳細に検討するため、表面を 500 μm 研磨除去した後、コロイダルシリカによる研磨仕上げをし、EBSD 観察した。表面層を除去すると、主き裂近傍の大部分の微視き裂が消失した。図 11 には、ひずみ範囲 $\Delta\epsilon = 0.2\%$ のときの左側のき裂近傍の逆極点図マップを示す。切欠きは図の右側にあり、き裂は右から左に進展している。主き裂は粒界、共晶相、粒内を進展している。また、粒界④、⑤、⑥に示すように微視的なボイド状のき裂が認められる。以上のように、試験片の内部では微視的なき裂は非常に少なく、表面で観察されたように、先端の微小き裂を連結する様式で主き裂が進展するのかどうかは今後の検討が必要である。

モード II 試験では、き裂の進展様相は負荷したひずみ振幅により大きく異なった。ひずみ範囲が $\Delta\gamma = 0.53, 1.07, 1.60\%$ では、き裂は図 4 に示したように初期スリットの方にせん断型のモード II で進展した。図 12 はき裂先端の拡大写真を示すが、高ひずみ振幅ではき裂先端での変形が大きく、多数の微視き裂が主き裂先端領域に認められる。これらの微視き裂は、大きな変形により最大せん断ひずみ方向に形成されておりき裂方向に形成されており、主き裂はそれらを連結しながら成長をする。一方、ひずみ範囲 $\Delta\gamma = 0.14, 0.27\%$ では、図 4 に示したようにき裂は初期スリットから分岐し

(a)

(b) Enlargement of part A

Fig. 10 SEM micrograph of tip region of right crack under mode I, $\Delta\varepsilon = 0.2\%$

① Intergranular

② Eutectic phase

③ Transgranular

④⑤⑥ Intergranular (void)

Fig. 11 IPF map of crack tip region for mode I, $\Delta\varepsilon = 0.2\%$ (Crack propagates from right to left.)

(a)

(b) Enlargement of part B

Fig. 12 SEM micrograph of tip region of right crack under mode II, $\Delta\gamma = 0.53\%$

(a)

(b) Enlargement of part C

Fig. 13 SEM micrograph of tip region of left upper crack under mode II, $\Delta\gamma = 0.27\%$

て、4 方向にき裂が進展した。図 13 左の上側のき裂の拡大写真を示す。主き裂先端近傍には微視き裂が認められるが、高ひずみ振幅の場合に比較して長さが短く、かつ方向が分散している。このき裂はジグザグしながら、引張りによるき裂の開口とせん断によるすべりとの複合で進展している。

図 14 はモード II 負荷でのき裂進展経路の遷移の状況を図示する。高ひずみ範囲では、主き裂先端近傍に最大せん断ひずみの方向に沿って、水平および垂直方向に多数形成され、主き裂はこれらを連結することによって成長する。そのため、せん断型の進展にはき裂進行方向における微視き裂なんどの損傷の蓄積が必要と考えられる。一方、低ひずみ振幅では、き裂先端近傍に形成される微視き裂の数も長さも小さくなるため、主き裂はこれらの微視き裂を連結するがせん断のみでは進行し難く、引張型との混合となり、マクロ的には 45 度方向に進展する。なお、このようなモード II 荷重を受ける疲労き裂の進展様式の遷移は、マレージング鋼など他の金属材料においても報告されているが¹⁵⁾⁽¹⁶⁾、はんだの場合には大変形により主き裂先端領域でき裂進行方向に多数の微小き裂が形成され、それを連結するためせん断き裂進展が生じやすいと考えられる。はんだにおける遷移は、き裂先端の非弾性ひずみの状態と密接に関連していると予想され、き裂先端の局所パラメータをもとにしたき裂進展様式の遷移条件の検討が必要である。

Fig. 14 Crack propagation mode under cyclic torsion

4. 結 言

鉛フリーはんだについて、中央切欠き平板に引張圧縮を加えたモード I 試験、および薄肉円筒に繰返しねじりを負荷するモード II 試験を両振りの変位制御で行い、き裂進展挙動を検討した。主な結果は以下のとおりである。

(1) モード I 試験では、き裂は初期切欠きから巨視的には荷重軸に垂直方向に進展した。一方、モード II 試験では、負荷ひずみ振幅が小さい場合には、巨視的に 45 度方向に進展するが、負荷ひずみが大きくなると初期切欠き方向にせん断型で進展した。

(2) き裂の進展速度は、実験を行ったき裂長さの範囲ではき裂長さによらずほぼ一定であった。また、このとき荷重と変位の関係から求めた J 積分範囲もほぼ一定であり、き裂進展速度が一定であることと対応している。

(3) き裂進展速度 da/dN (m/cycle) と J 積分範囲 ΔJ (N/m) の関係は、べき乗関係で近似され、モード I に対しては、

$$da/dN = 7.96 \times 10^{-12} (\Delta J)^{1.34}$$

また、モード II に対しては

$$da/dN = 1.70 \times 10^{-12} (\Delta J)^{1.51}$$

となる。両モード間の差は小さい。

(4) 表面観察では、き裂先端近傍には多数の微視き裂が粒界あるいは粒内のすべり帯に形成され、主き裂はこれらを連結するようにして進展する。微視き裂は最大せん断ひずみ面に沿った方向に形成され、モード II で負荷ひずみ範囲が大きい場合には、この微視き裂が長くしかも多数形成されるために、巨視的に初期切欠き方向にせん断型で進展する。

付録 J 積分の簡便評価

中央き裂平板のモード I 荷重での J 積分の簡便評価式(1)は、き裂長さが長い場合の Rice らによる評価を基礎としている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。き裂が短くなると荷重点変位の代わりにき裂中央開口変位を使用すると短いき裂に対しても同様の式が適用できることが示されている⁽¹³⁾。モード I の実験ではき裂を挟んで 3mm の標点距離の変位も測定した。この変位から評価した J 積分と、荷重点変位を使用して求めた J 積分はほぼ一致した。そこで本論文では測定の容易な荷重点変位を採用した。

モード II の場合の簡便評価式は提案されていないので、上記の場合と同様の手法で導出する。半径 R の薄肉円筒に $2a$ の長さの貫通き裂が円周方向にあり、それにトルク T が作用する場合を考える。このき裂が荷重一定で進展するとき、 J 積分はコンプリメンタリエネルギーの増加に等しい⁽¹¹⁾。

$$J = \frac{1}{2t} \int_0^{\pi} \left(\frac{\partial \theta}{\partial a} \right)_{\tau} dT = \frac{1}{2t} \int_0^{\pi} \left(-\frac{\partial \theta}{\partial b} \right)_{\tau} dT \quad (7)$$

ここで、ねじれ角は θ 、リガメント長さ $b = \pi R - a$ である。ここで、変形がリガメント領域の集中すると、ねじれ角は次式で表される。

$$\theta = f(T/b) \quad (8)$$

ここで、

$$\left(-\frac{\partial \theta}{\partial b} \right)_{\tau} = \frac{T}{b^2} \cdot f' \left(\frac{T}{b} \right) = \frac{T}{b} \cdot \left(\frac{\partial \theta}{\partial T} \right)_{\tau} \quad (9)$$

を考慮して次式を得る。

$$J = \frac{1}{2bt} \int_0^{\pi} T \cdot d\theta = \frac{S^*}{2bt} \quad (10)$$

上式にリガメント長さ $b = \pi R - a$ を代入すると式(2)となる。

文 献

- (1) Tanie, H. and Terasaki, T., Crack Propagation Model for Reproduction of Crack Paths in Micro-Solder Joints, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 72, No.717 (2006), pp. 638-645.
- (2) Tanie, H. and Terasaki, T., Fracture Life Evaluation of Solder Joints in Semiconductor Structures Using Crack Propagation Analysis, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 73, No.727 (2007), pp. 372-378.
- (3) Mukai, M., Monda, T., Hirohata, K., Takahashi, H., Kawakami, T. and Takahashi, K., Damage Path Simulation of Solder Joints, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 72, No.721 (2006), pp. 1364-1369.
- (4) Mukai, M., Monda, T., Hirohata, K., Takahashi, H. and Kawakami, T., Damage Path Simulation of Solder Bumps Under Mechanical Fatigue Tests, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 73, No.736 (2007), pp. 1341-1343.
- (5) Takahashi, H., Mukai, M. and Kawakami, T., Evaluation of Creep-Fatigue Crack Propagation of Sn-37Pb Solder, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 66, No.647 (2000), pp. 1343-1349.
- (6) Terasaki, K., Kitano, M. and Miura, H., Evaluation of Strain-Rate-Dependent Fatigue Crack Propagation in 60Sn/40Pb Solder, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 66, No.648 (2000), pp. 1506-1511.
- (7) Zhao, J., Mutoh, Y., Miyashita, Y. and Wang, L., Fatigue Crack Growth Behavior of Sn-Pb and Sn-Based Lead-Free Solders, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70 (2003), pp. 2187-2197.
- (8) Nose, H., Sakane, M., Yamashita, M. and Shiokawa, K., Crack Propagation Behaviour of Four Types of Lead and Lead-Free Solders in Push-Pull Low Cycle Fatigue, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 68, No. 665 (2003), pp. 88-95.
- (9) Nose, H., Sakane, M., Yamashita, M. and Shiokawa, K., Crack Initiation and Propagation Behaviour of Three Types of Solders in Torsion Low Cycle Fatigue, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 69, No. 684 (2003), pp. 1222-1229.
- (10) The Society of Materials Science, Japan, Standard for Low Cycle Fatigue Tests of Solder, JSMS-SD-3-00 (2000), Society of Materials Science, Japan.
- (11) Rice, J. R., Paris, P.C. and Merkle, J. G. Jr., Some Further Results of J-Integral Analysis and Estimate, *ASTM STP 536, Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing*, (1973), pp. 231-245, American Society for Testing and Materials.
- (12) Dowling, Geometry Effects and J Integral Approach to Elastic Plastic Fatigue Crack Growth, *ASTM STP 590, Mechanics of Crack Growth*, Edited by Rice, J.R. and Paris, P.C., (1976), pp. 82-103, American Society for Testing and Materials.
- (13) Hoshide, T., Yamada, A. and Tanaka, K., Evaluation of J Integral for Center-Cracked Plate under Gross and General Yieldings and Its Application to fatigue Crack Growth, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 31, No. 347 (1982), pp. 810-816.
- (14) Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R., *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, Third Edition (2000) p.41, ASM International Publication.
- (15) Pinna, C. and Doquet, V., The Preferred Fatigue Crack Propagation Mode in a M250 Maraging Steel Loaded in Shear, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 22 (1999), pp. 173-183.
- (16) Tanaka, K., Fatigue Crack Propagation Under Complex Loading, (Review), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 74, No.742 (2008), pp. 786-795.