鉛フリーはんだにおけるクリープ・疲労き裂進展挙動
に及ぼす荷重・変位保持の影響田中 啓介^{*1}, 水野 良輔^{*2}, 藤井 貴之^{*2}, 坂井 亮太^{*2}, 藤山 一成^{*1}

Effect of hold time on creep-fatigue crack propagation in lead-free solder

Keisuke TANAKA^{*1}, Ryosuke MIZUNO^{*2}, Takashi FUJII^{*2}, Ryota SAKAI^{*2}
and Kazunari FUJIYAMA^{*1}^{*1} Department of Mechanical Engineering, Meijo University

1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya 468-8502, Japan

^{*2} Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Meijo University

1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya 468-8502, Japan

Received 16 April 2015

Abstract

Crack propagation tests of lead-free solder were conducted using center-notched plates under load- and displacement-controlled conditions of cyclic tension-compression. Four waveforms were adopted for tests: pp waveform having fast loading and unloading, cc-h waveform having a hold time under tension and compression, cp-h waveform having a hold time under tension, and pc-h waveform having a hold time under compression. The crack propagation rate was correlated to fatigue and creep components of the J -integral range determined from load-displacement curves. For pp waveforms, the crack propagation rate was expressed as a power function of fatigue J integral range and the relation was identical for load-controlled and displacement-controlled conditions. The creep component due to the hold time greatly accelerated the crack propagation rate when compared at the same values of the fatigue J integral, especially under load-controlled conditions of cc-h and cp-h waveforms. Not much acceleration of crack propagation was observed for displacement-controlled conditions. The creep crack propagation rate was expressed as a power function of the creep J integral range for each case of cp-h and cc-h waveforms. The crack propagation rate for cp-h waveforms is higher than that for cc-h waveforms. As a simple estimate, the apparent J -integral range was evaluated from the area between the loading curve and the straight line connecting maximum and minimum loads in load-displacement relations. The relation between crack propagation rate and apparent J -integral range for symmetrical loading waveforms such as cc-h was only slightly higher than that obtained for pp waveforms, and the relation for unsymmetrical loading waveforms with tensile hold such as cp-h was much higher.

Key words : Crack propagation, Lead-free solder, J integral, J -range partitioning, Hold time effect, Creep-fatigue interaction

1. 緒 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、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。また、はんだは融点が低いために、室温においてもクリープの影響は大きく、き裂は疲労とクリープの重畳状態で進展することが多い。

はんだにおけるき裂進展挙動予測のための破壊力学的手法として、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（寺崎他，2000，高橋他，2000，能瀬他，2002）。寺崎ら（寺崎他，2000）は、き裂進展速度と J 積分範囲との関係には、繰返し周波数の影響がないことが報告し

た。しかし、ここでは、 J 積分の疲労成分とクリープ成分は区別されていない。

一方、金属の高温クリープ・疲労き裂進展に対して、大谷ら（平他，1979，大谷他，1988，1991）は J 積分範囲を疲労成分とクリープ成分に分割する方法を提案した。この方法は荷重と変位のヒステリシスループを使用した簡便評価による分割法であり、平滑材の寿命に関する Manson (Manson, 1973) のひずみ範囲分割法に対応するものとみなされ、本報告では J 範囲分割法(J -range portioning method)と称することにする。

J 範囲分割法は高橋ら（高橋他，2000）によってはんだに適用されている。彼らは荷重制御で、引張側に保持を持つ波形 cp-h，および圧縮側と引張側に保持を持つ波形 cc-h におけるき裂進展に対して、き裂進展速度とクリープ J 積分範囲との関係を求め、波形 cc-h の加速は小さいが、cp-h では大きく加速することを報告している。また、Woo ら（Woo, et al., 2010）は、変位制御の疲労試験を行い、鉛フリーはんだのき裂進展速度に対して疲労 J 積分とクリープ J 積分範囲による整理を試みているが、十分ではない。

筆者ら（田中他，2010, 2011）は、鉛フリーはんだの中央き裂平板を用いて、荷重制御条件下で、ひずみ速度の速い 3 角波形である波形 pp，保持を有する波形 cc-h および cp-h の場合のき裂進展試験を行い、き裂進展速度と疲労 J 積分範囲およびクリープ J 積分範囲との関係を求めた。その結果、波形 cc-h, cp-h ではクリープの寄与による加速が認められ、同一クリープ J 積分範囲で比較すると、cp-h の場合が cc-h の場合よりも 10 倍程度高速となった。しかし、ここでの荷重保持時間の条件は限られていた。さらに、変位制御で 3 角波形下のき裂進展に対しても J 範囲分割法による同様な検討を行った。一方、実際の熱疲労状態に近いと考えられる変位制御条件で変位保持がある場合のき裂進展に関する報告はない。また、変位保持を有する場合の J 範囲分割に関しては不明の点が多い。

本研究では、鉛フリーはんだの中央き裂平板を用いて、荷重制御条件下で、pp を基本の波形として、引張側と圧縮側に保持を有する cc-h，および引張側に保持を有する cp-h の 2 種類で、種々の保持時間でのき裂進展試験を行った。さらに、変位制御条件で引張側と圧縮側に保持を有する cc-h(s)，引張側に保持を有する cp-h(s)，および圧縮側に保持を有する pc-h(s) の 3 種類で試験を行った。これらの負荷条件での J 範囲分割の方法を検討したのちに、き裂進展速度と疲労 J 積分範囲およびクリープ J 積分範囲との関係を求め、クリープ・疲労き裂進展挙動の J 範囲分割法を基にした予測法を明らかにした。

2. 試 験 方 法

2・1 材料および試験片

本研究で用いた供試材は前報（田中他，2010，2011）と同じ鉛フリーはんだ(Sn-3.0Ag-0.5Cu)である。試験片は鋳造した丸棒から、試験片形状に加工した。試験片形状も前報と同一で、平行部は幅 16 mm，厚さ 6 mm で、長さは 22 mm である。機械加工後、試験片平行部の中央に直径 1 mm のドリル穴から、放電加工で軸垂直方向に幅 0.15 mm，全長 5 mm の貫通切欠きを設け、研磨後に 429 K で 24 h の焼きなまし熱処理を施した。熱処理後の材料組織は、円形状の β -Sn の初晶を共晶組織が網目状に取り囲んでいる。共晶組織は、Sn マトリックス中に粒子状の Ag_3Sn が分散している。なお円形状の β -Sn 初晶の大きさはばらついているが、15 から 50 μm 程度である（田中他，2011）。

2・2 き裂進展試験

疲労試験は、電気油圧サーボ式疲労試験機を用いて、室温、大気中にて実施した。変位の計測には、切欠きを中央に挟んだ標点間距離 20mm の変位を、ストレインゲージ式変位計（島津製作所製ダイナストレーン）を用いて測定した。試験中の荷重と変位データについては AD 変換器(KEYENCE NR-2000)を用いて記録した。

き裂進展試験は荷重制御および変位制御で行った。負荷波形を図 1 に示す。荷重制御での試験条件を表 1 にまとめる。波形は pp，cc-h，cp-h，pc-h の 4 種類であるが、荷重制御の圧縮側に保持を有する pc-h ではき裂は進展しなかったため実験は行っていない。また、荷重制御での急速負荷の速度は、ひずみ速度で 0.2%/s 以上となるように決定した。また、表中の最大応力は切欠きのない断面に対する総体応力(gross stress)である。荷重制御試験では最大応力を一定としたが、実験中に引張側にラチェッティング変形が生じるのを防ぐために、引張側の最大ひずみが圧縮側の最大ひずみにほぼ一致するように、圧縮応力を調整しながら試験を行った。変位制御は表 2 に

Fig. 1 Loading waveforms.

Table 1 Loading conditions for load-controlled tests.

Specimen number	Stress waveform	Maximum stress $\sigma_{\max}$, MPa	Loading rate $\dot{\sigma}$, MPa/s	Hold time t_h , s
pp1	pp	12.3	123	0
pp2	pp	14.3	143	0
cc-h1	cc-h	12.3	123	1.5
cc-h2	cc-h	12.3	123	10
cc-h3	cc-h	12.3	123	60
cc-h4	cc-h	14.3	143	1.5
cc-h5	cc-h	14.3	143	10
cc-h6	cc-h	14.3	143	60
cc-h7	cc-h	14.3	143	600
cp-h1	cp-h	12.3	123	60
cp-h2	cp-h	14.3	143	60

Table 2 Loading conditions for displacement-controlled tests.

Specimen number	Strain waveform	Strain range $\Delta\epsilon$, %	Loading rate $\dot{\epsilon}$, %/s	Hold time t_h , s
pp(s)	pp	0.4	0.5	0
cc-h(s)	cc-h	0.4	0.5	60
cp-h(s)	cp-h	0.4	0.5	60
pc-h(s)	pc-h	0.4	0.5	60

示す4種類で行ったが、波形cc-h(s)のように(s)をつけて示し荷重制御と区別する。以下、各試験片に対する結果を表中の試験片番号で示す。

き裂長さは適当な繰返し数においてデジタルマイクロスコープ(KEYENCE VHX-900)を用いて観察倍率100倍にて測定した。なお、き裂長さは応力軸に垂直な面への投影長さを測定し、初期切欠き長さを加えた長さをき裂全長 $2a$ とした。き裂進展速度は、き裂長さと繰返し数のデータを逐次5点を2次関数近似し、中点での傾きからそのき裂長さに対するき裂進展速度とした。

2・3 J積分範囲の評価

疲労J積分範囲 ΔJ_f は、Dowlingら(Dowling, 1976)が提案した次の簡便評価式を用いて求めた。

$$\Delta J_f = \frac{(\Delta K)^2}{E} + \frac{S_p}{B(W-a)} \quad (1)$$

ここで、 ΔK は応力拡大係数範囲、 E はヤング率で、 B は板厚、 W は板幅の半分、 a はき裂半長で、 S_p は図2(a)に示す荷重-変位ループの面積である。なお、 $E=38.8\text{GPa}$ である。また、 K 値の算出には中央き裂平板のTadaら(Tada, et al., 2000)の式を用いた。さらに、荷重-変位ループにき裂の閉口が認められた場合は、閉口点以上の荷重範囲に対して面積 S_p を求めた(Dowling, 1976)。上式の第2項が塑性によるJ積分である。面積 S_p の評価は本来図2(b)に示す荷重と塑性変位のループに対して適用すべきだが(Rice, et al., 1973)、弾性では荷重と弾性変位が比例するため、図2(a)に示すようにして荷重と全変位のループで求めた値と異ならない。

荷重制御におけるクリープを含むcc-h, cp-hに関しては、平ら(平他, 1979)の提案に従い、図3(a), (b)に示すように荷重の負荷サイクルで S_p を求め式(1)に代入して疲労J積分範囲 ΔJ_f を求め、荷重保持によるクリープ変形領域に対してクリープJ積分範囲 ΔJ_c を、次式で評価した。

Fig. 2 Estimation of fatigue J -integral range.

Fig. 3 Partitioning to J -integral ranges for cp-h in load-controlled test.

Fig. 4 Partitioning of J -integral ranges for cc-h(s) in displacement-controlled test.

Fig. 5 Partitioning of J -integral range for cp-h(s) and pc-h(s) in displacement-controlled test.

$$\Delta J_c = \frac{m-1}{m+1} \cdot \frac{S_c}{2Bb} \quad (2)$$

ここで S_c は図 3 (a), (b) に示す荷重保持中の荷重-変位ループの面積, m はクリープ指数であり, 本材料のクリープ指数 $m=14.3$ は, 同一材料のはんだ試験片を常温のクリープ試験を行い, 定常クリープ速度と応力の関係から求めた. なお, 長野ら (長野他, 2006) は同種の Sn-3.0Ag-0.5Cu に対して 40°C でのクリープ指数として 15.1 を報告しているが, これに近い.

変位制御の cc-h(s) に対する J 範囲分割法は提案されていない. 図 4 に提案する分割法を示す. (a) の荷重-変位ループにおいて一定保持時間中にクリープによる応力緩和が生じ, 負荷荷重が減少する. 圧縮側では圧縮荷重が減少し, 保持後の急速変形は緩和した圧縮荷重から始まる. このループから求められる荷重-非弾性変形ループを (b) に示す. このループは (c) の塑性のループと (d) のクリープのループの和と見なされる. 非弾性変位幅は, pp 変位幅と, cc 変位幅の和に等しい. (c) のループから S_p が, (d) のループの引張側の面積 S_c が求められる. これらの面積を (a) の荷重-変位ループに示すが, 圧縮側は負荷直線 (弾性変形) を延長して, 最大荷重と一致する点を原点として, 最大荷重点とを結び, 図に示すように S_p を求めることに対応する. これは, 圧縮保持による応力緩和においてすでに, き裂に対しては弾塑性負荷が始まっていることを意味する.

同様にして $cp-h(s)$, $pc-h(s)$ に対する J 範囲分割を図 5 に示す. 前者では引張ループから (a) に示すように S_p を求め, さらに引張保持中に, 応力緩和によるクリープの寄与 S_c を求め, それぞれ式 (1), (2) に代入して疲労 J 積分範囲とクリープ J 積分範囲を求める. 一方, 後者では, 圧縮保持による応力緩和に対応して, 圧縮側は負荷直線 (弾性変形) を延長して, 最大荷重と一致する点を原点として, 最大荷重点とを結んで面積 S_p を求める. この場合には, クリープは圧縮で生じているためクリープ J 積分範囲の寄与はなく, 疲労 J 積分範囲のみがき裂推進力である.

3. 実験結果および考察

3・1 荷重制御条件でのき裂進展挙動

3・1・1 き裂進展挙動

切欠き底から進展するき裂の進展経路については前報 (田中他, 2010, 2011) で報告した. つまり, pp の場合にはき裂は切欠き底から, 屈曲を伴うが, マクロ的には初期切欠きの方向に進展した. 一方, クリープ成分が大きい $cc-h$ の場合には, き裂は切欠き底から上下方向に約 45 度方向に, 両き裂とも進展を続ける. 一方, $cp-h$ では, pp と同様にマクロ的には引張型であるが, き裂の蛇行の程度はやや大きい. 変位制御においてもき裂進展経路の傾向は, 荷重制御の場合と同様であった. いずれの場合にも, き裂長さとして切欠きを含めたき裂の試験片軸に垂直な面への投影長さを測定した. き裂長さと繰返し数との関係を 5 点の 2 次曲線逐次近似を行い中央点での傾きからき裂進展速度を求めた.

図 6 には, 荷重制御でのき裂進展速度のき裂長さに伴う変化を示す. いずれの場合にも, き裂の進展とともにき裂進展速度が速くなる. また, き裂進展速度は, 同一波形では, 最大荷重が大きい方が速く, また同一最大応力では, pp が遅く, $cp-h$, $cc-h$ の順に速くなる. また, $cc-h$ で同一最大応力では, 保持時間が長い方がき裂進展は速い.

3・1・2 荷重—変位関係と J 積分範囲の評価

疲労試験においては, 繰返しに伴う引張方向へのラチェッティング変形を防ぐために, き裂進展により最小圧縮荷重を変化させた. このときの応力比の変化は前報 (田中他, 2010) で述べた. pp , $cc-h$ ではやや圧縮側となるが, ほぼ -1 に近い. また, $cp-h$ では負側に大きく, かつき裂長さとともに負側に大きくなる. 図 7 には最大応力が 12.3MPa でき裂長さが 3.0mm のときの, 一サイクルの荷重—変位ループを示す. pp では, 引張側の荷重より圧縮側の荷重がほぼ等しいが, $cp-h$ では圧縮側の方が大きい. 一方, $cc-h$ のループの幅は, pp , $cp-h$ に比較して大きく, 保持時間が長くなるとともに大きくなる. また, 負荷曲線は波形によって異なる. なお, き裂閉口がある場合には, 荷重と変位のループにおいて圧縮最大荷重近傍で変曲点が現れるが, 図中のいずれの波形においても認められない. しかし, pp , $cp-h$ の場合には, き裂が半長で 4mm 程度以上になると, 変曲点が認められるようになるがその程度は小さい. この場合の疲労 J 積分範囲の評価は, き裂閉口点に対応する変曲点以上の部分のループに対して求めた.

Fig. 6 Change of crack propagation rate with crack length in load-controlled tests.

Fig. 7 Load-displacement hysteresis loops for load-controlled tests.

Fig. 8 Changes of J -integral ranges with crack length in load-controlled tests.

Fig. 9 Change of creep J -integral fraction with crack length in load-controlled tests.

図8には J 積分とき裂長さの関係を示す。(a)が疲労 J 積分範囲で、(b)がクリープ J 積分範囲である。疲労 J 積分はき裂長さとともに増大し、波形にはあまり依存せず、最大応力によって支配される傾向がある。また、クリープ J 積分は、同一波形では応力が高い方が大きく、また、cc-hはcp-hより10倍程度大きい。cc-hでは引張での保持時間が大きい方が大きなクリープ J 積分となる。ここで、クリープ J 積分範囲が、疲労 J 積分範囲とクリープ J 積分の和に対する割合を求めた。

$$\lambda = \Delta J_c / (\Delta J_f + \Delta J_c) \quad (3)$$

図9に λ のき裂長さに対する変化を示す。cc-hでは、クリープ J 積分範囲の占める割合が50%以上と大きく、き裂長さとともに大きくなる。一方、cp-hでは、初期には10%程度で、き裂長さとともに増加するが30%程度である。

3・1・3 き裂進展速度と J 積分範囲との関係

波形ppの場合のき裂進展は疲労によるものであり、き裂進展速度 $(da/dN)_f$ と、疲労 J 積分 ΔJ_f との関係を図10に示す。図中には前報(田中他, 2010, 2011)の荷重制御、変位制御試験の結果も含めて示す。また、実線は変位制御試験(田中他, 2011)で得た回帰曲線である。荷重制御の結果も変位制御試験と同一のデータバンド上に位置する、つまり、制御方式、荷重レベルによらず疲労き裂進展速度 $(da/dN)_f$ (m/cycle)は疲労 J 積分範囲 ΔJ_f (N/m)と次の関係にある。

$$(da/dN)_f = 7.96 \times 10^{-12} (\Delta J_f)^{1.34} \quad (4)$$

図中の破線は、き裂進展速度の2倍、2分の1の範囲であるが、すべての実験データはほぼこの範囲に収まっている。

cc-h, cp-hに対して、き裂進展速度を疲労 J 積分範囲 ΔJ_f で整理した結果を図11に示す。図中の実線は図10の関係である。これと比較してcc-hは加速しており、負荷応力が大きくなるほど、また保持時間が大きくなるほど大きな加速となる傾向がある。また、cp-hはppの場合より上方にあるが、cc-hよりはやや下方である。

ここで、き裂進展において線形累積損傷則が成立し、き裂進展速度が加算的であると仮定し、クリープ・疲労重畳条件下におけるクリープき裂進展速度 $(da/dN)_c$ とクリープ J 積分範囲 ΔJ_c の関係を導く。実験で測定されるき裂進展速度は、疲労き裂進展速度 $(da/dN)_f$ とクリープき裂進展速度 $(da/dN)_c$ の和とする。

$$da/dN = (da/dN)_f + (da/dN)_c \quad (5)$$

cc-hとcp-hの実験で求められる疲労 J 積分から、式(4)の関係をを用いて $(da/dN)_f$ を求め、ついで式(5)を用いて、 $(da/dN)_c$ を求め、この速度と実測したクリープ J 積分範囲 ΔJ_c と関係を求める。

Fig. 10 Relation between crack propagation rate and fatigue J -integral range for pp waveform.

Fig. 11 Relation between crack propagation rate and fatigue J -integral range for load-controlled tests with hold.

Fig. 12 Relation between crack propagation rate and creep J -integral range for load-controlled tests with hold.

図 12 にはこのようにして求めた $(da/dN)_c$ と ΔJ_c の関係を示す．図中の実線は式(5)の疲労の関係である．cc-h と cp-h の関係は，疲労の場合よりも加速する．また，両波形の関係は一致しない．おのおのに対して，ばらつきはあるものの両対数グラフ上で直線関係を示している．この結果は前報でも報告したが，本研究でより広範囲の条件で確認された．ここで cc-h のクリープき裂進展速度を $(da/dN)_{c-cc}$ (m/cycle)，cp-h のクリープき裂進展速度を $(da/dN)_{c-cp}$ (m/cycle) とし，クリープ J 積分範囲 ΔJ_c (N/m) との関係をもとに，本データの範囲で最小 2 乗法による回帰曲線を求めると以下のようになる．

$$(da/dN)_{c-cc} = 8.85 \times 10^{-11} (\Delta J_c)^{1.25} \quad (6)$$

$$(da/dN)_{c-cp} = 2.09 \times 10^{-9} (\Delta J_c)^{1.15} \quad (7)$$

図中にはこの関係と，破線でき裂進展速度の 2 倍，2 分の 1 の範囲を示した．

上記のように、クリープき裂進展速度とクリープ J 積分の関係において、cc-h と cp-h で異なり、cp-h の方が高速になる結果は、高橋ら（高橋他，2000）によって共晶はんだに対して報告されている。さらに、大谷ら（大谷他，1991）によってステンレス鋼の 1073K における高温クリープ・疲労き裂進展挙動においても報告されている。この理由として、筆者ら（Tanaka, et al., 2014）は先に試験片内部の SEM 観察より、cp-h では断面観察で主き裂近傍に多くの微視き裂が認められるのに対して、cc-h ではあまり認められないことを報告した。cc-h では圧縮保持中に微視き裂のヒーリングなどの損傷の回復が生じるものと考えられる。

3・2 変位制御条件でのき裂進展挙動

3・2・1 き裂進展挙動

ひずみ幅 0.4% の変位制御で保持を有する場合には、圧縮のみに保持がある pc-h(s) においてもき裂の連続的な進展が認められた。また、き裂はマクロ的には荷重軸に垂直に進展した。荷重制御の場合と同様にして求めたき裂進展速度とき裂長さの関係を図 13 に示す。荷重制御の場合とは異なり、き裂進展速度はき裂長さに対してあまり変化しない。進展速度は、pp が低く、cp-h(s), pc-h(s) が高くなる傾向があるが大差はない。

3・2・2 荷重—変位関係と J 積分範囲の評価

き裂長さが 3.0mm における荷重—変位のヒステリシスループを図 14 に示す。cc-h(s), cp-h(s) における引張保持時のリラクゼーション量は両者でほぼ等しく、cc-h(s), pc-h(s) における圧縮保持時のリラクゼーション量もほぼ等

Fig. 13 Change of crack propagation rate with crack length in displacement-controlled tests.

Fig. 14 Load-displacement hysteresis loops for displacement-controlled tests.

Fig. 15 Changes of maximum, mean and minimum stresses with crack length in displacement-controlled tests.

しい。また、引張保持および圧縮保持でのクリープによるリラクゼーション後の高速負荷曲線は、pp における曲線とは異なるが、最大圧縮、引張荷重は pp とほぼ一致する。図 15 には、最大応力、最小応力、平均応力のき裂長さに対する変化を示す。最大の引張荷重と圧縮荷重は、pp(s) に対するループにおける値とき裂長さによらずほぼ一致している。

図 16 には疲労 J 積分範囲とクリープ J 積分範囲のき裂長さに対する変化を示す。この値は cp-h(s) の方が大きめで、き裂長さに対してあまり変化しない。また、クリープ成分の全 J 積分範囲に対する比率は 4% 程度と非常に小さい。つまり、変位保持中の応力リラクゼーションによるクリープ J 積分範囲への寄与は、疲労 J 積分範囲に比較して小さい。このことは、前項で述べた荷重保持の場合とは大きく異なる。

3・2・3 き裂進展速度と J 積分範囲との関係

き裂進展速度と疲労 J 積分の関係を図 17 に示す。図中の直線は pp に対する式 (4) の関係である。3 種類の波形ともにやや上部に位置する破線内には含まれている。クリープの寄与は小さく、考慮しなくても大略の予測は可能であるといえる。ついで、cc-h(s)、cp-h(s) に対して、同様の手法でクリープき裂進展速度を求めてクリープ J 積分との関係を図 18 に示す。データはばらついているが、cc-h(s) は式 (6) で、cp-h(s) は式 (7) で近似することが可能であると見なされる。

Fig. 16 Changes of J -integral ranges with crack length in displacement-controlled tests.

Fig. 17 Relation between crack propagation rate and fatigue J -integral range for displacement-controlled tests with hold.

Fig. 18 Relation between crack propagation rate and creep J -integral range for displacement-controlled tests with hold.

3・3 き裂進展速度と見かけの J 積分範囲との関係

寺崎ら（寺崎他，2000）は，はんだの応力制御の両振りの繰返し荷重下で，き裂進展を J 積分で整理すると，繰返し周波数の影響がないことが報告した．同様に高橋ら（高橋他，2000）も周波数の依存性が小さいことを報告している．この整理では，周波数が遅くなるとクリープ成分が入ってくるが，弾塑性成分とクリープ成分とを区別せずに式(1)で J 積分を評価しており，この場合にはいわば見かけの J 積分による評価となる．この手法は簡便であり実用性があるため，本実験で行った種々の波形に対して有効性を検討することは意味があると考えられる．

そこで荷重-変位ループの最小荷重（ただしき裂閉口がある場合には閉口点荷重）点と最大荷重点を結んだ直線と，負荷ループの面積を S として，次式で見かけの J 積分範囲 ΔJ_{ap} を評価する．

$$\Delta J_{ap} = \frac{(\Delta K)^2}{E} + \frac{S}{B(W-a)} \quad (8)$$

Fig. 19 Relation between crack propagation rate and apparent J -integral range for load-controlled tests with hold.

Fig. 20 Relation between crack propagation rate and apparent J -integral range for displacement-controlled tests with hold.

図 19 には荷重制御試験の保持を有する場合について、き裂進展速度と J 積分範囲の関係を示す。これらの波形ではすべてクリープ成分を含んでいる。cc-h の場合、式(4)の関係よりやや加速側となるがその程度は小さい。一方、cp-h は大きな加速となる。変位制御の cc-h(s), cp-h(s), pc-h(s) の場合の見かけの J 積分範囲による整理を図 20 に示す。これらのデータは式(4)でほぼ近似できる。さらに図中には、前報（田中他，2011）で報告した 3 種類の 3 角波形の結果も示す。これらは、ひずみ速度の遅い負荷と遅い除荷の slow-slow の cc、遅い負荷と早い除荷 slow-fast の cp、早い負荷と遅い除荷の fast-slow の pc である。図において、cc での加速は小さいが、cp, pc での加速は大きい。なお、pc においては fast 負荷の最大引張で、slow 除荷に反転した直後に、cp-h(s) での応力リラクゼーションと同じく、引張側でのクリープがき裂の加速に寄与する。

以上、見かけの J 積分範囲を用いた場合のき裂進展速度との関係を、疲労とクリープの J 積分範囲に分割した場合の関係とともに表 3 にまとめる。荷重制御、変位制御によらず対称波形の場合には、見かけの J 積分範囲を基にしてき裂進展速度を予測することは可能である。しかし、荷重制御の非対称波形で引張側クリープが大きい場合には見かけの J 積分範囲を基にした予測は危険側となる。一方、変位制御の場合で非対称波形の cp, pc の場合にはクリープ成分が大きく加速が顕著となるが、引張側に保持を有する cp-h(s) では、応力リラクゼーションのともなうクリープの寄与は小さく、近似的に見かけの J 積分範囲によるき裂進展の予測が可能である。なお、本報告では、き裂進展速度を支配する破壊力学パラメータを中心にき裂進展法則について検討したが、これら種々の負荷波形下のクリープ・疲労き裂進展の破面およびき裂近傍の SEM, EBSD などによる微視的観察を基にした進展機構の検討は次報に述べる。

Table 3 Creep-fatigue crack propagation law under various loading waveforms.

Crack growth mode	Fatigue, creep J -integrals $\Delta J_f, \Delta J_c$	Apparent ΔJ_{ap}	Waveforms
Fatigue crack growth	$\left(\frac{da}{dN}\right)_f = C_f (\Delta J_f)^{m_f}$	$\frac{da}{dN} = C_f (\Delta J_{ap})^{m_f}$	pp pp(s), pc-h(s)
Creep crack growth cc-type	$\left(\frac{da}{dN}\right)_{c-cc} = C_{cc} (\Delta J_c)^{m_{cc}}$	$\frac{da}{dN} \approx C_f (\Delta J_{ap})^{m_f}$	cc-h cc(s), cc-h(s)
Creep crack growth cp-type	$\left(\frac{da}{dN}\right)_{c-cp} = C_{cp} (\Delta J_c)^{m_{cp}}$	$\frac{da}{dN} > C_f (\Delta J_{ap})^{m_f}$	cp-h cp(s), pc(s), cp-h(s)

4. 結 言

中央スリットを有する鉛フリーはんだ平板に、荷重制御では引張・圧縮に保持をもつ台形波形 cc-h, 引張側のみに保持を持つ波形 cp-h の 2 種類, また, 変位制御では cc-h(s), cp-h(s) に加えて引張側のみに保持を持つ波形 cp-h(s) の 3 種類条件で, き裂試験を行い, J -範囲分割法によりクリープ・疲労き裂進展挙動を検討した. 得られた主な結果を以下にまとめる.

- (1) 波形 pp の場合のき裂進展速度 da/dN (m/cycle) と疲労 J 積分範囲 ΔJ_f (N/m) の関係は, 荷重制御および変位制御にかかわらず, 次の関係となることが広範囲の負荷条件下で確認された.

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

- (2) 荷重制御で保持を有する cc-h, cp-h の場合には, クリープ成分の寄与が大きく, き裂進展速度を疲労 J 積分範囲で整理すると, pp の場合の場合よりも加速する.

- (3) 荷重制御においてクリープ・疲労重畳下でのき裂進展速度が, 両成分の線形和で与えられるとして求められるクリープき裂進展速度 da/dN (m/cycle) とクリープ J 積分範囲 ΔJ_c (N/m) との関係は, cc-h, cp-h に対して次式で表され, 同一 ΔJ_c に対しても cp-h の方が cc-h の場合より速い.

$$(da/dN)_{c-cc} = 8.85 \times 10^{-11} (\Delta J_c)^{1.25}$$

$$(da/dN)_{c-cp} = 2.09 \times 10^{-9} (\Delta J_c)^{1.15}$$

- (4) 変位制御で保持を有する cc-h(s), cp-h(s), pc-h(s) でのき裂進展速度は疲労 J 積分範囲でほぼ予測できる. より厳密には, cc-h(s), cp-h(s) でのリラクゼーション中のクリープによる加速があり, クリープ J 積分範囲で予測できるがその加速の程度は小さい.

- (5) 保持を有する波形下で荷重-変位の負荷ループの面積から評価される見かけの J 積分範囲とき裂進展速度との関係において, 対称波形では, pp における関係で近似可能である. 荷重制御において引張のみにクリープを生じる非対称波形では見かけの J 積分範囲による予測は危険側となる. 一方, 変位制御で引張保持の非対称波形の場合はクリープの寄与は小さく, 近似的に見かけの J 積分範囲によるき裂進展の予測が可能である.

文 献

- Dowling, N. E., Geometry effects and J integral approach to elastic plastic fatigue crack growth, ASTM STP 601, Cracks and Fracture, Edited by Swedlow, J.L. and Williams, M.L., American Society for Testing and Materials (1976), pp. 19-32.
- Manson, S. S., The challenge to unify treatment of high temperature fatigue – A partisan proposed based on strainrange partitioning, ASTM STP 520, Fatigue at Elevated Temperature, Edited by Carden, A. E. McEvily, A. J. and Wells, C. H., American Society for Testing and Materials (1973), pp. 744-775.
- 長野 恵, 日高 昇, 渡辺裕彦, 下田将義, 小野真裕, Sn-Ag-Cu 系鉛フリーはんだのクリープ特性における微量添加元素の影響, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 9, No. 3 (2006), pp. 171-179.
- 能瀬春雄, 坂根政男, 山下満男, 塩川国夫, 鉛系および非鉛系はんだの引張・圧縮低サイクル疲労き裂進展挙動, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 68, No. 665 (2002), pp. 88-95.
- 大谷隆一, 北村隆行, 榎本聖一, 除荷過程中的クリープき裂伝ば, 材料, Vol. 37, No. 414 (1988), pp. 283-288.
- 大谷隆一, 北村隆行, 周 瑋生, SUS316 の時間依存性クリープ疲労巨視き裂伝ばに及ぼす圧縮クリープの影響, 材料, Vol. 40, No. 457 (1991), pp. 1290-1296.
- Rice, J. R., Paris, P. C. and Merkle, J. G., Some further results of J -integral analysis and estimates, ASTM STP 536, Progress in Flow Growth and Fracture Toughness Testing, Edited by J. Kaufman, J. Swedlow, H. Corten, R. Heyer, E. Wessel and G. Irwin, American Society for Testing and Materials (1973), pp. 231-245.
- Tada, H., Paris, P. C. and Irwin, G. R., The Stress Analysis of Cracks Handbook, Third Edition, ASM International Publication (2000), p.41.
- 平 修二, 大谷隆一, 北村隆行, 山田勝彦, クリープ・疲労重畳下のき裂伝ばに関する J 積分による検討, 材料, Vol. 28, No. 308 (1979), pp. 414-420.

- 高橋浩之, 向井 稔, 川上 崇, Sn-37Pb はんだのクリープ疲労き裂進展挙動, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 66, No. 647 (2000), pp. 1343-1349.
- Tanaka, K., Fujii, T. and Fujiyama, K., *J*-integral approach to creep-fatigue crack propagation in lead-free solder under various loading waveforms, Advanced Materials Research, Vols. 891-892 (2014), pp. 365-370.
- 田中啓介, 平澤拓哉, 坂川雄祐, 藤山一成, 鉛フリーはんだにおけるクリープ・疲労き裂進展挙動に及ぼす荷重破系の影響, 材料, Vol. 59, No. 11 (2010), pp. 833-839.
- 田中啓介, 坂井亮太, 平澤拓哉, 坂川雄祐, 藤山一成, 鉛フリーはんだにおけるひずみ制御条件下でのクリープ・疲労き裂進展, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 77, No. 775 (2011), pp. 402-414.
- 寺崎 健, 北野 誠, 三浦英生, 60 Sn/40 Pb はんだのひずみ速度を考慮した疲労き裂進展特性評価, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 66, No. 648 (2000), pp. 1506-1511.
- Woo, T. W., Sakane, M., Kim, K. S., Kobayashi, K. and Park, H. C., Creep-fatigue crack growth in Sn-3.0Ag-0.5Cu solder, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 4, No. 9 (2010), pp. 1410-1426.

References

- Dowling, N. E., Geometry effects and *J* integral approach to elastic plastic fatigue crack growth, ASTM STP 601, Cracks and Fracture, Edited by Swedlow, J.L. and Williams, M.L., American Society for Testing and Materials (1976), pp. 19-32.
- Manson, S. S., The challenge to unify treatment of high temperature fatigue – A partisan proposed based on strainrange partitioning, ASTM STP 520, Fatigue at Elevated Temperature, Edited by Carden, A. E. McEvily, A. J. and Wells, C. H., American Society for Testing and Materials (1973), pp. 744-775.
- Nagano, M., Hidaka, N., Watanabe, H., Shimode, M. and Ono, M., Effect of addition element on creep properties of the Sn-Ag-Cu lead solder, Journal of the Japan Institute of Electronics Packaging, Vol. 9, No. 3 (2006), pp. 171-179 (in Japanese).
- 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 (2002), pp. 88-95 (in Japanese).
- Ohtani, R., Kitamura, T. and Enomoto, S., Creep crack propagation under decreasing load condition, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 37, No. 414 (1988), pp. 283-288 (in Japanese).
- Ohtani, R., Kitamura, T. and Zhou, W., Effect of compressive creep on crack propagation of type 304 stainless steel under time-dependent creep-fatigue conditions, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 40, No. 457 (1991), pp. 1290-1296 (in Japanese).
- Rice, J. R., Paris, P. C. and Merkle, J. G., Some further results of *J*-integral analysis and estimates, ASTM STP 536, Progress in Flow Growth and Fracture Toughness Testing, Edited by J. Kaufman, J. Swedlow, H. Corten, R. Heyer, E. Wessel, G. Irwin, American Society for Testing and Materials (1973), pp. 231-245.
- Tada, H., Paris, P. C. and Irwin, G. R., The Stress Analysis of Cracks Handbook, Third Edition, ASM International Publication (2000), p.41.
- Taira, S., Ohtani, R., Kitamura, T. and Yamada, K., *J*-integral approach to crack propagation under combined creep and fatigue condition, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 28, No. 308 (1979), pp. 414-420 (in Japanese).
- 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 (in Japanese).
- Tanaka, K., Fujii, T. and Fujiyama, K., *J*-integral approach to creep-fatigue crack propagation in lead-free solder under various loading waveforms, Advanced Materials Research, Vols. 891-892 (2014), pp. 365-370 (in Japanese).
- Tanaka, K., Hiraiwa, T., Sakagawa, Y. and Fujiyama, K., Effect of load waveform on creep-fatigue crack propagation in lead-free solder, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 59, No. 11 (2010), pp. 833-839 (in Japanese).
- Tanaka, K., Sakai, R., Hirasawa, T., Sakagawa, Y. and Fujiyama, K., Creep-fatigue crack propagation in lead-free solder under various strain waveform, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol. 77, No. 775 (2011), pp. 402-414 (in Japanese).

Tanaka, Mizuno, Fujii, Sakai and Fujiyama, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.81, No.830 (2015)

Terasaki, T., Kitano, M. and Miura, H., Evaluation of strain-rate-dependent fatigue crack propagation in 60 Sn/40 Pb solder, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.66, No.648 (2002), pp. 1506-1511 (in Japanese).

Woo, T. W., Sakane, M., Kim, K. S. , Kobayashi, K. and Park, H. C., Creep-fatigue crack growth in Sn-3.0Ag-0.5Cu solder, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 4, No. 9 (2010), pp. 1410-1426.