電子機器用はんだ材料の疲労寿命評価法[†]

種 田 元 治* 上 西 研* 奥 康 浩**

A Method for Fatigue Life Evaluation of Solder for Electronic Equipments

by

Motoharu TANEDA*, Ken KAMINISHI* and Yasuhiro OKU**

In order to clarify the effect of cycling frequency on the fatigue life of solder, strain controlled fully reversed torsional fatigue tests were carried out on thin-walled cylinder type 60Sn-40Pb solder specimens under six strain cycling frequencies of 0.001, 0.01, 0.03, 0.05, 0.5 and 1.0 Hz at 303K. The results obtained in this study are summarized as follows:

(1) As a general strength trend of the solder, the lower was the strain cycling frequency the shorter was the fatigue life. But, the solder showed an opposite strength trend in the inelastic strain range exceeding about 1.4 %, presumably depending on the creep effect.

(2) Two different expressions were constructed to evaluate the fatigue life of the solder under relatively high cycling frequencies over 0.03 Hz, and under all cycling frequencies (0.001~1.0 Hz), respectively. The expression for the former case was constructed on the basis of the Coffin's frequency modified fatigue life estimation method. And the expression for the latter case was a general one constructed by using the strain-range partitioning approach and linear cumulative damage concept to take account of the superposed effect of both plastic and creep deformations. The fatigue lives estimated by the above two expressions coincided well with the corresponding experimental results.

Key words: Solder, Fatigue life evaluation, Cycling frequency, Strain-range partitioning approach

1 緒 言

電子機器内部の微細はんだ接続部には、電子部品の発熱等により繰返し熱応力の発生することが多い。条件によっては熱疲労により接続部が破断に至る恐れがある。最近のように半導体デバイスがますます高集積化・小形化され、一方では回路基板上の実装がますます高密度化されるなかで、この微細はんだ接続部の信頼性がより重要な問題となってきた。

はんだは一般に室温においても再結晶温度以上の状態にあるので、その疲労寿命は繰返し速度と温度の影響を大きく受ける。このうち、温度に関しては北野^{1),2)}、熊沢ら³⁾および Solomon^{4),5)}の研究がある。

繰返し速度に関する研究はまだ一般に少なく、不明な点が多い。その研究のなかでは、比較的広範囲に検討された Solomon^{4),5)} のものが代表的である。この研究では、疲労試験は有限長、有限幅で厚さが約 0.2 mm のごく薄いはんだ層が上下面からせん断力を受ける場合について行われている。したがって、実際の表面実装形 LSI パッケージのリード接続面等のはんだ疲労評価に対しては、実用的にも有効な結果が種々得られ

ている。しかし、この試験では有限長のはんだ層がせん断力を受けるため、はんだ層前、後端部のせん断応力が大きくなるいわゆるせん断遅れ現象の発生している可能性が考えられる。またはんだ・接合相手材(銅等)界面には金属間化合物の生成している可能性⁶⁾が考えられる。

そこで筆者らははんだ素材(60Sn-40Pb)について一様なせん断応力下での繰返し速度の影響を求めるため、薄肉円筒形試験片によるねじり疲労試験を行った。そしてこの結果をもとに疲労寿命の評価方法について検討したので、以下に報告する。

2 実験方法

疲労試験には簡易形試験機を試作し使用した。その全体図を Fig. 1 に示す。試験機はひずみ制御であり、モーター(可変速)とカムによりスウィングアームを一定角度で揺動させ、軸を通じ試験片に正弦波状の繰返しねじりを加えるものである。試験片の軸方向変位は直動玉軸受により拘束されない構造となっている。試験片外周には定温槽を設け、雰囲気温度を設定温度の $\pm 1.5\text{K}$ 内に保つようにした。試験片に加わるトル

[†] 原稿受理 平成 3 年 10 月 2 日 Received Oct. 2, 1991

* 正 会 員 山口大学工学部機械工学科 〒755 宇部市常盤台, Dept. of Mech. Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755

** 宇部興産(株)機械事業本部 〒755 宇部市小串沖の山, Machinery Division, Ube Ind. Ltd., Kogushi, Ube, 755

Fig. 1. Testing apparatus.

クの時間的変化は、他端を固定したひずみゲージ式トルク変換器で記録した。一方、軸のスウィングアーム側端面には軸心より5 mm 下方に偏心させてロッドを取り付け、この動きを非接触変位計で検出することにより、軸系のねじれ角の時間的変化を記録した。これら二つの同時記録より、試験片の任意時点における応力ひずみヒステリシスループを求めることができるようにした。

なお、試験片表面の全せん断ひずみ範囲 $\Delta\gamma_r$ の値は、試験片の部分のみが変形するとしてカムの偏心量より算出した値 $\Delta\gamma_{TA}$ の79.4%とした。この79.4%という値は、ひずみゲージで直接測定した試験片表面

Fig. 2. Specimen.

Table I. Chemical compositions of test materials.

(wt %)							
Group	Sn	Pb	Sb	Cu	Bi	As	In
I	59.73	40.22	0.002	0.024	0.009	0.018	—
II	60.15	39.84	—	—	—	—	—
III	59.77	40.19	0.003	0.009	0.002	0.019	0.003

Table II. Mechanical properties of test materials.

Group	Strain rate (%/sec)	Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_b (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus E (GPa)
I	7×10^{-3}	21.2	23.5	68.3	28.9
II	2×10^{-3}	20.3	23.5	—	28.0
	3×10^{-3}	20.3	24.1	—	—

(Temp. 30°C)

のひずみ $\Delta\gamma_{TG}$ と $\Delta\gamma_{TA}$ との比を55件の試験についてそれぞれ求めそれらを平均した値である。

試験片の形状と寸法をFig. 2に示す。形状は薄肉円筒形であり、半径方向にもほぼ様なひずみ状態とみなせるよう狙ったものである。平行部はバフ研磨した。供試材料は高純度(99.9%以上)のSnおよびPbをそれぞれ60%および40%の割合で鋳造したものである。はんだは室温においても時効によって機械的性質が変化するので、材質安定化のため鋳造後1か月以上放置したのち実験に使用した。供試材料の化学成分をTable Iに示す。グループI, II, IIIはそれぞれ別のロットのものである。これらの引張試験結果をTable IIに示す。なお、グループIIIはグループIとほぼ同成分のため試験を省略した。この表より各グループの機械的性質にはほとんど差のないことが分かる。したがって疲労試験では、各グループの材料にとくに区別は設けないことにした。なおSn 60%, Pb 40%の材料は一般に多用されているものである。

繰返し速度 ν は0.001, 0.01, 0.03, 0.05, 0.5, 1.0 Hzの6種類とし、ひずみ比は-1、雰囲気温度は303K [30°C]とした。

3 実験結果および検討

繰返し数 N の増加に伴うせん断応力範囲 $\Delta\tau$ の変化の一例をFig. 3に示す。横軸は N を疲労寿命 N_f で割り無次元化してある。北野^{1), 2)}、熊沢³⁾と同様に、疲労寿命 N_f は、 $0.5N_f$ 時のせん断応力範囲 $\Delta\tau_{N_f/2}$ が20%ほど低下したときの繰返し数とした。図にみるように、繰返し初期において疲労軟化が顕著である。また、繰返し速度 ν が増加すると $\Delta\tau$ も増加してゆくが、0.5 Hz 以上になると $\Delta\tau$ の増加がほとんどなくなる傾向のあることが分かる。図は全せん断ひずみ範囲 $\Delta\gamma_r$ が2.0%の場合であるが、他の場合もこの傾向が認められた。

Fig. 4に繰返し応力ひずみ曲線の一例を示す。せん

Fig. 3. Change of shearing stress range.

Fig. 4. Cyclic stress-strain curve.

断応力 τ の値は N がほぼ $0.5N_f$ のときの値である。図から、高ひずみになると τ の増加率が急減することが分かる。

試験片表面は当初バフ研磨されていたが、繰返し数 N が約 $0.1N_f$ になると、表面の鏡面状態が消失した。この時点で顕微鏡により、粒界からと見られるすべりが数 $\sim 20\mu\text{m}$ 程度の間隔で網目状に、試験片表面の広い範囲にわたって観察された。Fig. 5 は、 N の増加に伴う試験片表面状態の変化例を示したものである。網目状のパターンは N が増すにつれてより明瞭となり、その中の一部が巨視き裂に成長していった。肉眼でも確認できる長さ 1mm 程度のき裂（主として円周方向）は N/N_f が $0.8\sim 0.9$ で生じた。なお、 N/N_f の値で整理するとき裂の成長状態には、繰返し速度の違いによる差はあまり認められなかった。

疲労寿命 N_f と全せん断ひずみ範囲 $\Delta\gamma_T$ との関係を、繰返し速度 ν をパラメータとして Fig. 6 に示す。また、非弾性ひずみ範囲 $\Delta\gamma_{in}$ との関係も、同様に Fig. 7 に示す。 $\Delta\gamma_{in}$ は $\Delta\gamma_T$ より弾性ひずみ範囲 $\Delta\gamma_e$ を差し引いた値である。 $\Delta\gamma_e$ は $\Delta\tau_{N_f/2}$ を、応力ひずみヒステリシスループの弾性部分こう配等より決定した横

(a) $N = 0$ ($N/N_f = 0$) (b) $N = 20$ ($N/N_f = 0.13$) (c) $N = 40$ ($N/N_f = 0.26$)

100 μm Circumferential direction

($\nu = 1.0\text{Hz}$, $\Delta\gamma_T = 7\%$)

Fig. 5. Change of specimen surface appearance.

Fig. 6. Total strain range.

弾性係数 $G = 11.1\text{GPa}$ で除した値とした。以下、ひずみはすべて % で表す。

Fig. 7 にみるように、 $\Delta\gamma_{in}$ と N_f との関係は各繰返し速度 ν に対し、それぞれ 1 本の直線で近似でき、Coffin-Manson 則と同形の次式がほぼ成立している (k_{in} および C_{in} は材料定数)。

$$\Delta\gamma_{in} \cdot N_f^{k_{in}} = C_{in} \quad (1)$$

ただし、高ひずみ域では、低ひずみ域の場合とは逆に ν が小さいほど高寿命となる傾向のあることが分かる。

Fig. 7. Inelastic strain range.

Table III. Constants k_{in} , C_{in} .

ν (Hz)	0.001	0.01	0.03	0.05	0.5	1.0
k_{in}	0.927	0.614	0.774	0.739	0.478	0.497
C_{in}	1190	102	286	200	27.2	38.0

これは後述のクリープ効果によるものと考えられる。定数 k_{in} と C_{in} の値を Table III に示す。

4 疲労寿命評価法に関する考察

繰返し速度 ν が小さくなると、非弾性ひずみ範囲 $\Delta\gamma_{in}$ のなかでクリープ成分の占める割合が大きくなり、寿命評価にこの効果を考慮する必要があると考えられる。本章では、最初に ν が比較的大きくクリープ効果を考慮しない場合を述べ、次にそれを考慮した一般の場合を述べる。

4・1 繰返し速度が比較的大きくクリープ効果を考慮しない場合の寿命評価法

ここでは一応繰返し速度 ν が 0.03 Hz 以上を対象とし、また非弾性ひずみ範囲 $\Delta\gamma_{in}$ はそのまま塑性ひずみ範囲 $\Delta\gamma_p$ であるとする。Eckel は ν (Hz) と疲労寿命時間 t_f ($t_f = N_f/\nu$) との間に同一ひずみ範囲に対

Fig. 8. Time to failure versus cycling frequency.

Table IV. Constants k , C .

$\Delta\gamma_{in}$ (%)	0.278	0.541	0.793	1.33	1.80
k	0.724	0.887	0.974	1.10	1.18
C	18300	4460	2010	663	348

Fig. 9. Relationship between k and $\Delta\gamma_{in}$.

し次式が成立することを示している。

$$\nu^k t_f = C \quad (2)$$

ここで k および C は材料定数である。Fig. 8 は、縦軸に t_f 、横軸に ν をとり、各 $\Delta\gamma_{in}$ ごとに今回の結果をプロットしたものである (式 (1), Table III および $t_f = N_f/\nu$ を使用)。この図をみると各 $\Delta\gamma_{in}$ ごとにデータはほぼ直線で近似することができ、今回ののはんだ材についての正弦波による疲労試験に対しても、式 (2) がほぼ成立することが分かる。

各 $\Delta\gamma_{in}$ に対する k および C の値を Table IV に示す。 $\Delta\gamma_{in}$ が大きくなるにつれ k は大きくなることが分かる。これらの値を使用し最小二乗法により、 $\Delta\gamma_{in}$ と k の関係式として次式を得た (Fig. 9)。

$$k = 0.553 \log_{10}(\Delta\gamma_{in}) + 1.03 \quad (3)$$

一方、 $t_f = N_f/\nu$ より式 (2) の左辺は $N_f \nu^{k-1}$ となる。Coffin はこの $N_f \nu^{k-1}$ と $\Delta\gamma_p$ との間に次の繰返し速度修正疲労寿命式の成立を示している。

$$\Delta\gamma_p (N_f \nu^{k-1})^\alpha = \theta \quad (4)$$

α および θ は材料定数である。Fig. 10 は縦軸に $\Delta\gamma_{in}$ 、横軸に $N_f \nu^{k-1}$ をとり今回の試験結果をプロットしたものである。今回ののはんだ材の場合も 1 本の直線でよく近似でき、式 (4) (ただし $\Delta\gamma_p$ は $\Delta\gamma_{in}$ で置き換え) の成立することが分かる。

α および θ の値として

$$\alpha = 0.471, \quad \theta = 28.5$$

を得た。これらの値と式 (3) を式 (4) に代入し、 $\Delta\gamma_p$ を $\Delta\gamma_{in}$ で置き換え整理すると、疲労寿命 N_f の評価式として次式を得る。

$$\log_{10} N_f = 3.09 - 0.03 \log_{10} \nu - (2.12 + 0.553 \log_{10} \nu) \log_{10} \Delta\gamma_{in} \quad (5)$$

Fig. 10. Inelastic strain range versus frequency modified fatigue life.

Fig. 11. Comparison of calculated values [Eq. (5)] with tested values.

繰返し速度 ν (Hz) と非弾性ひずみ範囲 $\Delta\gamma_{in}$ (%) が分かれば、上式より N_f を推算することができる。

Fig. 7 に示した疲労寿命の試験結果のうち、代表として 1.0 Hz と 0.05 Hz のものを取り出し、式 (5) による計算値とそれぞれ比較すると Fig. 11 のようになる。両者は全体的にはほぼ一致している。

4.2 クリープ効果を考慮した一般的な寿命評価法

ここでは非弾性ひずみ範囲 $\Delta\gamma_{in}$ は塑性ひずみ範囲 $\Delta\gamma_{pp}$ とクリープひずみ範囲 $\Delta\gamma_{cc}$ より成ると考え、ひ

Fig. 12. Strain-range partitioning.

Fig. 13. Plastic strain range.

ずみ範囲分割法により疲労寿命の評価方法を検討した。 $\Delta\gamma_{pp}$ と $\Delta\gamma_{cc}$ への分割には Fig. 12 に示す半サイクル急速変形挿入法を使用した。図において、実線は一般の繰返し速度の場合の応力ひずみヒステリシスループ（応力範囲は $\Delta\tau_{Nf/2}$ ）であり、破線は急速変形の場合のヒステリシスループである。今回は後者のヒステリシスループとしてひずみ速度の大きい $\nu=1.0$ Hz, $\Delta\gamma_T=2.0\%$ の場合のループを使用した。そして、急速変形ではクリープ変形は含まれないものとしてこの場合のループを基準にとり、図のように、両ループのせん断ひずみ γ の最小点 S を一致させて両ループを重ね合わせることで、 $\Delta\gamma_{in}$ を $\Delta\gamma_{pp}$ と $\Delta\gamma_{cc}$ とに分割した。^{*1}

このようにして求めた塑性ひずみ範囲 $\Delta\gamma_{pp}$ と疲労寿命 N_f との関係を Fig. 13 に示す。図にみるように、各繰返し速度ごとにそれぞれ 1 本の直線でほぼ近似でき、Coffin-Manson 則が成立している。直線のこう配の絶対値すなわち疲労延性指数は多くのもので 0.5～0.6 の値となっている。1.0 Hz の場合の直線は次式で表せる。

$$\Delta\gamma_{pp} \cdot N_f^{0.562} = 60.4 \quad (6)$$

つぎに寿命評価法について検討する。いま N_{pp} を塑性変形のための繰返しを受ける場合（すなわち繰返し速度が極めて大きい場合）の寿命とし、 N_{cc} をクリープ変形のための繰返しを受ける場合（極めて小さい場合）の寿命とする。塑性変形とクリープ変形が重畳するような一般の場合、寿命 N_f は線形累積損傷則によれば次式で表すことができる。

$$1/N_f = 1/N_{pp} + 1/N_{cc} \quad (7)$$

N_{pp} は一般に次式 (8) の Coffin-Manson 則に従う。 N_{cc} も同様な形の式 (9) に従うものとする。

*1 Fig. 3 において ν が 0.5 Hz 以上の場合、また Fig. 4 において γ が約 0.75% 以上（ $\Delta\gamma_T$ が約 1.5% 以上）の場合、いずれも $\Delta\tau$ の増加がきわめて小さくなることは、 $\nu=1.0$ Hz, $\Delta\gamma_T=2.0\%$ の場合のヒステリシスループ使用の妥当性がある程度裏づけているように思われる。

Fig. 14. Creep strain range.

$$\Delta\gamma_{pp} \cdot N_{pp}^{\beta_{pp}} = C_{pp} \quad (8)$$

$$\Delta\gamma_{cc} \cdot N_{cc}^{\beta_{cc}} = C_{cc} \quad (9)$$

ここで β_{pp} , C_{pp} , β_{cc} , C_{cc} : 材料定数

本研究では式(8)の代りに, $\nu=1.0$ Hz が高速であるとして, 式(6)の N_f を N_{pp} で置き換えた次式を使用することにする。

$$\Delta\gamma_{pp} \cdot N_{pp}^{0.562} = 60.4 \quad (8')$$

$\Delta\gamma_{cc}$ と N_{cc} との具体的な関係は, 各疲労試験とひずみ範囲分割から得られる N_f , $\Delta\gamma_{pp}$, $\Delta\gamma_{cc}$ の値を使用し, 式(8')と式(7)から求めることができる。このようにして求めた各値をプロットしたものが Fig. 14 である。さらにこれらを1本の直線で近似すれば, 具体的な式(9)として次式が得られる。

$$\Delta\gamma_{cc} \cdot N_{cc}^{1.03} = 1540 \quad (9')$$

以上より, $\Delta\gamma_{pp}$ と $\Delta\gamma_{cc}$ が分かれば, 式(7), (8'), (9')より寿命 N_f を推算することができる。

実用上は $\Delta\gamma_{pp}$ と $\Delta\gamma_{cc}$ を, はんだ接続部の弾塑性応力解析から得られる全ひずみ範囲 $\Delta\gamma_r$, 応力範囲 $\Delta\tau$ および繰返し速度 ν で表しておく方が便利である。

Fig. 15 は $\Delta\gamma_{pp}$ と非弾性ひずみ範囲 $\Delta\gamma_{in}(=\Delta\gamma_r - \Delta\tau/G)$ の関係をプロットしたものである。両者の関係は各 ν に対しそれぞれ原点を通る1本の直線で近似で

Fig. 15. $\Delta\gamma_{pp}$ versus $\Delta\gamma_{in}$. Fig. 16. a versus ν .

ることが分かる。これらの直線のこう配 a と ν との関係は Fig. 16 に示したようになり, 次の2本の直線で近似できる。

$$\left. \begin{aligned} \nu \geq 0.5 \text{ Hz} & \cdots \cdots a = 1 \\ \nu \leq 0.5 \text{ Hz} & \cdots \cdots a = 1.70\nu^{0.766} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

したがって

$$\left. \begin{aligned} \nu \geq 0.5 \text{ Hz} & \cdots \cdots \Delta\gamma_{pp} = \Delta\gamma_{in}, \Delta\gamma_{cc} = 0 \\ \nu \leq 0.5 \text{ Hz} & \cdots \cdots \Delta\gamma_{pp} = 1.70\nu^{0.766} \Delta\gamma_{in}, \\ & \Delta\gamma_{cc} = \Delta\gamma_{in} - \Delta\gamma_{pp} \\ & = (1 - 1.70\nu^{0.766}) \Delta\gamma_{in} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)と式(7), (8'), (9')を使用し, 寿命 N_f は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \nu \geq 0.5 \text{ Hz} & \cdots \cdots N_f = 1480 \Delta\gamma_{in}^{-1.78} \\ \nu \leq 0.5 \text{ Hz} & \cdots \cdots N_f^{-1} = 1.74 \times 10^{-3} \nu^{1.36} \Delta\gamma_{in}^{1.78} \\ & + 8.03 \times 10^{-4} (1 - 1.70\nu^{0.766}) \Delta\gamma_{in}^{0.971} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここで $\Delta\gamma_{in} = \Delta\gamma_r - \Delta\tau/G$

繰返し速度 ν (Hz), 全せん断ひずみ範囲 $\Delta\gamma_r$ (%) および応力範囲 $\Delta\tau$ が分かれば, 上式より疲労寿命 N_f を推算することができる。

Fig. 7 に示した試験結果のうち 1.0 Hz, 0.05 Hz, 0.001 Hz のものを取り出し, 式(12)による計算値と比較すると Fig. 17 のようになる。参考のため, 4・1 節

Fig. 17. Comparison of calculated values [Eq. (12), Eq. (5)] with tested values.

の式(5)による計算値も示した。1.0 Hz については式(5)の近似度が式(12)よりもややよいようであるが、0.001 Hz については式(5)は当然ながら悪い。これに対し式(12)は全体の傾向をよく近似しているといえる。

5 結 言

簡易形の疲労試験機を試作し、60Sn-40Pb はんだについて繰返し速度 0.001~1.0 Hz、雰囲気温度 303K の条件下でねじり疲労試験を行い、疲労寿命の評価法を検討した。得られた結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 繰返し数が疲労寿命 N_f ($0.5 N_f$ 時のせん断応力範囲が 20 % ほど低下したときの繰返し数) の約 10% になると、試験片表面に数~20 μm の間隔で網目状にすべりが観察された。肉眼でも確認できる長さ 1 mm 程度のき裂は N_f の 80~90% の繰返し数で発生した。

(2) 一般的には繰返し速度が小さいほど低寿命となったが、非弾性ひずみ範囲が約 1.4 % を越える高ひずみ域では逆に高寿命となった。これはクリープ効果によるものと考えられる。

(3) 半サイクル急速変形挿入法を使用したひずみ範囲分割により、非弾性ひずみ範囲から分離して得た塑性ひずみ範囲と、疲労寿命との間には、各繰返し速度に対しそれぞれ Coffin-Manson 則が成立した。

(4) 繰返し速度が比較的大きく (0.03 Hz 以上) クリープ効果を考慮しない場合およびクリープ効果を考慮した一般的な場合について、それぞれ疲労寿命評価式を得た。前者の評価式は疲労試験より求めた材料定数 (繰返し速度に対する指数) の実験式と繰返し速度修正疲労寿命式とを元にしたものである。後者の評価

式は上記のひずみ範囲分割により、また塑性変形とクリープ変形の重量に対し線形累積損傷則を使用し得たものである。

各評価式による計算値はそれぞれ対応する試験結果と全体的にはほぼ一致した。

本研究の後半は文部省科研費総合研究 A (01302025, 研究代表者 東北大学 阿部博之教授) の分担として行ったものである。また、種々のご討論とご援助をいただいた(株)日立製作所・曾我太佐男主任研究員並びに保川彰夫主任研究員に対し謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) M. Kitano, T. Shimizu and T. Kumazawa, Current Japanese Material Research, **2**, 235 (1987).
- 2) 北野 誠, 坂本達事, 日本機械学会講演論文集, 830-10, 125 (1983).
- 3) 熊沢道夫, 吉岡純夫, 谷 周一, 前野和雄, 日本材料学会第37期学術講演会前刷集, p. 229 (1988).
- 4) H. D. Solomon, IEEE Trans., CHMT9, 4, 423 (1986).
- 5) H. D. Solomon, Trans. ASME, J. Elect. Pack., **111**, 75 (1989).
- 6) 竹本 正, 佐藤了平, “高信頼度マイクロソルダリング技術”, p. 307 (1991) 工業調査会
- 7) 上記6) の p. 68.
- 8) J. F. Eckel, Proc. ASTM, **51**, 745 (1951).
- 9) L. F. Coffin, Proc. 2nd Int. Conf. Fracture, 643 (1969).
- 10) G. R. Halford, M. H. Hirschberg and S. S. Manson, ASTM STP520, 658 (1973).
- 11) 平 修二, 大谷隆一, “材料の高温強度論”, p. 233 (1980) オーム社