Sn/Pb 共晶はんだ接合部における 熱疲労き裂発生寿命の相成長による評価*

佐山利彦^{*1}, 高柳 毅^{*2}
洞口 勉^{*3}, 森 孝男^{*4}

Evaluation of Thermal Fatigue Crack Initiation in Sn/Pb Eutectic Solder Joint by Phase Growth Approach

Toshihiko SAYAMA^{*5}, Takeshi TAKAYANAGI,
Tsutomu HORAGUCHI and Takao MORI

^{*5} Machinery & Electronics Research Institute, Toyama Industrial Technology Center,
383 Takata, Toyama, Toyama, 930-0866 Japan

Thermal fatigue damage of solder joint is considered to be closely related to microstructural phase growth. In order to evaluate the relation between the microstructural change and thermal fatigue crack initiation, thermal cycle tests were carried out by using fabricated PCB on which various chip capacitors were mounted. Following results were obtained through the microstructural observation. The phase growth is characterized by phase growth parameter S which is defined as average phase size to the 4th power d^4 and proceeds such that S increases proportional to the number of thermal cycles N . Furthermore, there exists simple relation between average number of cycles to thermal fatigue crack initiation N_i and average increase in parameter S_c per one cycle ΔS_c , where S_c is component of S , represents strain induced phase growth and corresponds to total equivalent creep strain approximately. That is, power law relation $\Delta S_c = CN_i^{-\beta}$ is found out. The relation enables us to evaluate the thermal crack initiation of solder joint based on the observation of microstructural evolution.

Key Words: Creep, Thermal Stress, Reliability, Thermal Fatigue, Solder Joint, Phase Growth, Surface Mount Technology

1. 緒 言

電子基板上のはんだ接合部における熱疲労は、電子基板の信頼性を左右する非常に大きな問題となっている⁽¹⁾。この熱疲労損傷に対する強度を評価するために、非弾性ひずみ振幅などの力学パラメータを用いて、Coffin-Manson 則に代表される低サイクル疲労強度評価法を適用することが行われている⁽²⁾。しかし、はんだ接合部におけるひずみを直接計測することは非常に困難であるため、現状では有限要素法などの解析手法が、唯一の評価方法といっても過言ではない。また、解析によって得られたひずみには、使用する要素の種類や要素分割方法、あるいは変形を表す材料モデルの設定などが影響するという問題がある⁽³⁾。

他方、熱疲労損傷の特徴の一つとして、損傷部分のはんだ組織において相の凝集粗大化が起こることが指

摘されている⁽⁴⁾。さらに、Sn/Pb 共晶はんだ(以下、共晶はんだ)については、結晶粒径が熱疲労損傷の評価パラメータとなる可能性も示されている⁽⁵⁾。しかし、熱疲労寿命の評価にとって非常に重要な問題であるにもかかわらず、相の成長過程およびその熱疲労損傷との関係は、実験的に十分に明らかにされていない。そこで、著者らは、ラップジョイント形せん断試験片⁽⁷⁾を考案して、共晶はんだの組織変化を系統的に観察した⁽⁶⁾。その結果、平均相寸法の4乗 d^4 が相当クリープひずみ速度および時間に比例して増加することを見出し、新たに相成長パラメータ $S(=d^4)$ を導入して、共晶はんだの相成長過程をモデル化した。

本研究においては、試験基板を用い、熱サイクル負荷によるはんだ接合部での相成長過程およびその疲労き裂発生寿命との関係を調べて、相成長パラメータ S を適用した疲労き裂発生寿命の評価方法を検討した。まず、セラミックコンデンサを表面実装した試験基板を作成し、規格に基づく加速熱サイクル試験および実際の電子基板の使用条件を模擬した熱サイクル試験を実施した。熱サイクル試験の途中でサンプルを抜き取り、はんだ接合部の組織変化を観察して、相成長パラメータ S を用いてその相成長過程を評価した。次に、

* 原稿受付 1999 年 12 月 20 日。

^{*1} 正員、富山県立大学大学院、富山県工業技術センター機械電子研究所 (☎ 930-0866 富山市高田 383)。

^{*2} コーセル株式会社 (☎ 930-0816 富山市上赤江町 1-6-43)。

^{*3} 富山県立大学大学院 (☎ 939-0398 富山県射水郡小杉町黒河 5180)。

^{*4} 正員、富山県立大学工学部。

E-mail: sayama@itc.pref.toyama.jp

同じ組織観察の結果に基づいて疲労き裂の発生寿命 N_i を定義し、ひずみ誘起による相成長を表すパラメータ S_c と N_i との関係を明らかにした。さらに、 S_c を適用し、組織観察に基づいて相成長過程を調べることで、はんだ接合部における熱疲労き裂発生に対する信頼性を評価する手法について検討した。

2. Sn/Pb 共晶はんだの相成長過程⁽⁶⁾

電子基板のはんだ接合部における相成長過程と熱疲労強度との関係を明らかにするに先だって、著者らは、共晶はんだの相成長過程を系統的に観察した⁽⁶⁾。以下に、相成長過程の観察結果およびモデル化の概要を述べる。

相成長過程の観察には、著者らが考案したラップジョイント形せん断試験片⁽⁷⁾を用いた。また、機械的負荷を行わずに一定温度に放置したはんだ、および一定温度で一定ひずみ速度試験を実施したはんだを、観察の対象とした。その結果、共晶はんだにおいては、平均相寸法の4乗 d^4 が、相当クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ および時間 t に比例して増加することが明らかとなった。

この結果は、純金属の粒界における拡散モデル⁽⁸⁾⁽⁹⁾ および Zn/Al 共晶合金の相成長モデル⁽¹⁰⁾ によって導かれた結論と類似している。そこで、共晶はんだにおいても、相境界において原子あるいは空孔が拡散することによって相成長が起こるものと仮定し、これらのモデルに改良を加えて、次の相成長を表す基礎式を得た。

$$(d^4)' = A_1 D_b \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 D_b は相境界における拡散係数、 A_1 は定数であり、ダッシュはカッコ内の関数の時間微分を表す。また、式(1)は、次式のようにも書き換えることができる。

$$(d^2)' = A_1 D_b / 2d^2 \dots\dots\dots (2)$$

この式は、相境界における原子あるいは空孔の拡散に

より、相の平均表面積の変化速度が、相境界における拡散係数の大きさに比例し、また相の平均表面積自体に反比例することを表している。

さらに、組織観察の結果より、共晶はんだにおいては、相境界あるいは再結晶化した微細な粒界におけるすべりが、相成長に重要な役割を果たしていると推測される。そこで、相境界におけるすべりによって相境界に過剰空孔が発生し、この過剰空孔により相境界における拡散係数が増加するという。過剰空孔の拡散機構⁽¹¹⁾ を想定する。また、簡単のために次式で定義される相成長パラメータ S を導入する。

$$S = d^4 \dots\dots\dots (3)$$

最終的に、相成長を表す式(1)より、 S の成長速度を表す基礎式を次のように導いた。

$$\dot{S} = \dot{S}_t + \dot{S}_c \dots\dots\dots (4)$$

$$\dot{S}_t = C_1 \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{S}_c = C_2 \dot{\epsilon}_c \{1 - \exp(-t/\tau_c)\} + \dot{S}_{c0} \exp(-t/\tau_c) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\dot{S}_t$ は熱平衡による S の成長速度、 $\dot{S}_c$ はひずみ誘起による S の成長速度であり、 $\dot{S}_{c0}$ は $\dot{S}_c$ の初期値である。また、 τ_c は空孔の消滅に関する時定数、 C_1 および C_2 は温度依存性の相成長物性値である。

さて、式(6)において、 τ_c は常温においては 10^{-2} s のオーダーであり⁽⁶⁾、クリープ時間と比較して非常に小さな値をとる。したがって、一定ひずみ速度の負荷条件において、はんだのクリープ変形が十分に進行した後であれば、 $\dot{S}_c$ は次式で近似することができる。

$$\dot{S}_c = C_2 \bar{\epsilon}_c \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\bar{\epsilon}_c$ は全相当クリープひずみであり、 $\bar{\epsilon}_c = \dot{\epsilon}_c t$ とおいた。この式より、ひずみ誘起による相成長パラメータ S_c は、近似的に $\bar{\epsilon}_c$ に対応する量であることがわかる。したがって、 S_c は、はんだ接合部におけるクリープひずみの累積の程度を表す指標であるといえる。

3. 熱サイクル試験

熱サイクル負荷による実際の電子基板のはんだ接合部における相成長過程を観察するために、デバイスを表面実装した種々の試験基板を作成し、熱サイクル試験を実施した。すなわち、典型的なチップ形部品であるセラミックコンデンサを表面実装した金属基板を熱サイクル試験の対象とした。図1は、アセンブリの断面を模式的に示す。この基板は、アルミニウムベースの表面をエポキシ樹脂/アルミナ複合体の電気絶縁層で被覆した構造を有している。また、はんだ接合部に発生するひずみの振幅量を広い範囲で変化させるため

Fig.1 Cross section of the surface mount assembly

に、コンデンサチップの寸法および絶縁層の材質を変えた種々の試験体を用いた。表1は、コンデンサチップの概略寸法を示す。なお、基板厚さ1.5 mm、絶縁層厚さ0.15 mmを公称寸法と設定して試験基板を作成した。

熱サイクル試験においては、図2に示す異なる2種類の温度プロファイルを用いた。一つは、JIS規格C0025環境試験方法(電気・電子)温度変化試験方法⁽¹²⁾に準拠した加速条件による熱サイクル試験である。高温保持温度 $T_H=125^\circ\text{C}$ 、低温保持温度 $T_L=-40^\circ\text{C}$ 、保持時間 $t_d=30\text{ min}$ 、およびランプ時間 $t_r=2\text{ min}$ の熱サイクル負荷条件を設定した。もう一つは、実際の電子基板の使用条件を模擬した熱サイクル試験であり、加速条件による熱サイクル試験の有効性を評価するために実施した。 $T_H=80^\circ\text{C}$ 、 $T_L=20^\circ\text{C}$ 、 $t_d=4\text{ h}$ 、および $t_r=5\text{ min}$ の条件であり、比較的温度変化が小さく、保持時間が長いのが特徴である。

4. 相成長過程の観察

4.1 はんだ組織の観察方法 熱サイクル試験途中の任意のサイクル数において複数のサンプルを抜き取り、はんだ接合部の組織変化を観察した。図3は、アセンブリ断面の電子顕微鏡反射電子像の一例を示す。はんだ接合部において、明るい部分が α 相(Pbを多く含む相)、暗い部分が β 相(Snを多く含む相)を表す。点Aから点Bにかけての領域において相の凝集粗大化が認められる。この領域は、有限要素解析によって得られた結果が示すひずみ集中領域と一致してい

る⁽¹³⁾。しかし、相の粗大化の分布は、ひずみの集中に対してさほど鋭敏ではない。これは、式(3)に示すように、相成長パラメータ S が平均相寸法の4乗 d^4 により定義される量であること、また式(7)に示すように、ひずみ誘起による相成長パラメータ S_c が近似的に全相当クリープひずみ $\bar{\epsilon}_c$ に対応する量であることから説明される。すなわち、 d の分布は $\bar{\epsilon}_c^{1/4}$ の分布と近似的に対応するので、ひずみが集中している領域であつても d 成分は隠やかなものになると考えられる。

はんだ組織の観察点としては、特に相の粗大化が著しく、かつ疲労き裂の発生点に対応する点A付近を選定した。組織観察の手順は、まず点A付近において $40\text{ }\mu\text{m} \times 20\text{ }\mu\text{m}$ の長方形領域を設定して、はんだ組織の電子顕微鏡反射電子画像を撮影する。次に、この画像において、直線切断法により α 相および β 相の平均相寸法 d_α 、 d_β を各々計測する。このとき、組織全体の平均相寸法 d を次式により定義する。

$$d^{-3} = v_\alpha d_\alpha^{-3} + v_\beta d_\beta^{-3} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 v_α 、 v_β は各相の体積率であり、同じ画像から計算された各相の面積率によって近似した。さらに、式(3)により、相成長パラメータ S を計算する。 S の変化を調べることで、熱サイクル試験における相成長過程を評価することができる。また、熱サイクル試験前の初期のはんだ組織における S の初期値 S_0 は、相成長過程を評価する上で基本となる量である。12体のコンデンサチップのはんだ接合部において求めた S の平均値より、 $S_0=1.85\text{ }\mu\text{m}^4$ と得られた。

4.2 相成長パラメータの変化 図4は、実際の電子基板の使用条件を模擬した熱サイクル試験における組織変化の例を示す。初期組織($S=2.16\text{ }\mu\text{m}^4$)に対して、 $N=40$ ($S=50.2\text{ }\mu\text{m}^4$)、 $N=300$ ($S=284\text{ }\mu\text{m}^4$)とサイクル数 N の増加に伴い、劇的に相成長が進行している様子がわかる。

Table 1 Dimensions of some capacitor chips

Chip type	Length l	Hieght h	Width w
CA	5.62	1.83	5.10
CB	4.30	1.46	3.90
CC	3.03	1.04	2.40
CD	1.89	0.84	1.20
CE	1.51	0.76	0.79

unit : mm

(a) Acceleration test (b) Actual use condition test

Fig. 2 Temperature profile of thermal cycle tests

Fig. 3 SEM backscattered image of microstructure and evaluation point of average phase size in the solder joint

また、図5は、サンプルを抜き取った任意のサイクル数 N に対する相成長パラメータ S の変化を示す。各サイクル数に対して、12体以上のコンデンサチップのはんだ接合部において組織観察を行い S を求めた。加速条件による熱サイクル試験および使用条件を模擬した熱サイクル試験のいずれにおいても、データのばらつきは大きいものの、次式に示すように、 S が N に

(a) Initial state, $S=2.16 \mu\text{m}^4$

(b) $N=40$, $S=50.2 \mu\text{m}^4$

(c) $N=300$, $S=284 \mu\text{m}^4$

Fig. 4 SEM backscattered images of phase growth process in solder joint by thermal cycle test under actual use condition

近似的に比例して増加することがわかる。

$$S = AN + S_0 \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 A は一サイクル当たりの S の平均増加量に対応する係数であり、熱サイクルの負荷条件によって定まる。

式(9)が成り立つことは、相成長モデルに基づいて次のように考えることができる。まず、相成長を表す基礎式(4)において、熱平衡による相成長パラメータの変化 $\dot{S}_t$ は、温度のみの関数であるから、熱サイクル負荷においては、 S_t は N に比例して増加する。他方、ひずみ誘起による相成長パラメータの変化 $\dot{S}_c$ は、式(6)に示すように、相当クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ および温度の関数と考えられる⁽⁶⁾。このため、 $\dot{\epsilon}_c$ が周期的に変化しない一般の負荷条件においては、 S_c は N に比例しない。しかし、電子基板の熱サイクル負荷においては、はんだ接合部は変位制御形の繰返し変形状態であるから、各サイクルにおける $\dot{\epsilon}_c$ の変化は周期的となる。したがって、近似的に S_c も N に比例して

Fig. 5 Phase growth parameter S change by thermal cycle tests

Fig. 6 An example of stress vs. strain change in thermal cycle test under actual use condition⁽¹³⁾

増加する。

実際、有限要素解析を実施してはんだ接合部における応力とひずみの変化を調べると、ごく初期のサイクルを除いてヒステリシスループはほぼ同一の形状となる。図6は、著者らが行った解析⁽¹³⁾において、はんだ接合部におけるせん断応力 σ_{xy} とクリープせん断ひずみ ε_{cxy} の変化の一例を示す。これは、図1に示すアセンブリに対し、図2(b)に示す使用条件を模擬した熱サイクル負荷を6サイクルかけた場合の解析結果である。また、評価点は図3の点Aに対応する要素の積分点である。これより、熱サイクル負荷に対して応力が周期的に変化しているの、定常クリープ状態を想定して Norton 則のようなクリープ構成式を適用すれば、 $\dot{\varepsilon}_c$ も周期的に変化することがわかる。

また、著者らは、ラップジョイント形せん断試験片を用いた繰返しのクリープリラクセーション試験によって、 S が N に比例して増加することが実験および解析の両面から示した⁽⁶⁾。したがって、熱サイクル負荷を受けるはんだ接合部においては、式(9)の関係によって相成長が進行することが、電子基板のレベルにおいても確認された。

5. 疲労き裂発生寿命の評価

5.1 疲労き裂発生寿命の定義 熱サイクル試験を続けると、相成長に伴って疲労き裂が観察されるようになる。図3および図4(c)においては、はんだ接合部の端部にある点A付近に疲労き裂が発生し、また、はんだ接合部の内部にある点B付近の相境界にも、比較的小さく不連続なき裂が認められる。いずれのき裂も、相境界あるいは再結晶化した微細な粒界に沿った割れであると考えられる。また、点A付近に

発生したき裂が成長し、点B付近の微細なき裂と連結することにより、マクロな疲労き裂が形成される。そこで、点A付近におけるき裂の有無により、疲労き裂の発生を判定した。すなわち、点A付近に $10\ \mu\text{m}$ 以上の長さのき裂が観察された場合に、疲労き裂が発生したものと定めた。

熱サイクル試験途中の任意のサイクル数 N において、複数のサンプルを抜き取り、はんだ接合部の組織を観察した。このとき、抜き取りサンプル数に対する疲労き裂の発生サンプル数の比を、サイクル数 N における疲労き裂発生の累積確率 $F(N)$ とした。さらに、 N と $F(N)$ とを Weibull プロットし、分布の平均値となるサイクル数を平均疲労き裂発生寿命 N_i と定義した。図7は、異なる寸法のコンデンサチップのはんだ接合部における N と $F(N)$ との Weibull プロットの例を示す。図中の記号は、表1に示すチップ名と対応している。これより、はんだ接合部における疲労き裂の発生が Weibull 分布で表され、 N_i がその平均値として求められることがわかる。

5.2 疲労き裂発生寿命と相成長パラメータとの関係

平均疲労き裂発生寿命 N_i において、はんだ接合部の組織観察を実施し、このときの平均相寸法 d_i を計測した。さらに、式(3)に基づいて、 N_i に対応する相成長パラメータ S_i を計算した。図8は、 N_i に対する S_i の変化を示す。加速条件による熱サイクル試験の結果も、また使用条件を模擬した熱サイクル試験の結果も、ほぼ同一の曲線上に位置していると見ることができる。

次に、図8の結果を、相成長パラメータ S の成長速度を表す式(4)、(5)および式(6)に基づいて評価する。すなわち、 S は、次式のように、熱平衡による相

Fig. 7 Weibull's plot of number of cycles N and probability of fatigue crack initiation $F(N)$ in thermal cycle tests

Fig. 8 Relation between number of cycles to fatigue crack initiation N_i and corresponding phase growth parameter S_i

成長パラメータ S_i とひずみ誘起による相成長パラメータ S_c との和として表される。

$$S = S_i + S_c + S_0 \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 S_0 は、 S の初期値である。相成長モデルに基づき、著者らが行った有限要素解析⁽¹³⁾によると、通常の熱サイクル試験では S_i は S_c の約 1/10 程度の大きさである。また、十分に相成長が進行した後では S_0 は相対的に微小な量となる。したがって、図 8 に示す N_i と S_i との関係が成立するのは、ひずみ誘起による相成長パラメータ S_c に起因するものであると考えられる。

そこで、 N_i における S_c の値を S_{ci} とし、 N_i に対する S_{ci} の変化を図 9 に示す。これより、 N_i と S_{ci} との間には、図 8 の N_i と S_i との関係よりもさらに明確な関係があることがわかる。すなわち、次式に示す累乗則の関係が成立する。

$$S_{ci} = CN_i^\alpha \dots \dots \dots (11)$$

ここに、定数は、 $C = 1.99 \times 10^1 \mu\text{m}^4$ 、 $\alpha = 0.462$ と得られた。これより、緩やかな熱サイクル試験条件ほど、平均疲労き裂発生寿命 N_i における相成長パラメータ S_{ci} が大きく、かつ両者の間には熱サイクル試験条件によらない累乗則の関係があることが明らかとなった。

さらに、前述のように、図 5 に基づいた考察により、相成長パラメータ S_c の一サイクル当たりの平均増加量 ΔS_c は、近似的に一定である。そこで、 $\Delta S_c = S_{ci}/N_i$ として ΔS_c を計算すると、式(11)により次の関係が得られる。

$$\Delta S_c = CN_i^{\alpha-1} \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 $\beta = 0.538$ の定数である。図 10 は、図 9 のデータに基づいて、 ΔS_c と N_i との関係を示したもので

ある。 ΔS_c が大きいほど、平均疲労き裂発生寿命 N_i が短く、かつ両者の間には累乗則の関係が成立する。

また、式(12)は、低サイクル疲労寿命を評価する手法である Coffin-Manson 則と類似の式である。式(12)が成り立つことは、以下に示すように、ひずみ誘起による成長パラメータ S_c の増加が、全相当クリープひずみ $\bar{\epsilon}_c$ の増加と対応するものであることから理解できる。

まず、図 3 および図 4 より、共晶はんだにおける熱疲労損傷の形態は、相境界あるいは再結晶化した微細な粒界におけるすべりに起因する広い意味での粒界割れである。粒界におけるすべり量とマクロなクリープひずみとは比例関係にある⁽¹⁴⁾ ことから、Coffin-Manson 則は、このような疲労損傷を評価する有効な手段となりうる。他方、相成長モデルにおいては、相境界におけるすべりにより過剰空孔が生成され、これが相境界を拡散することによって相成長が進行するものと考えた。すなわち、はんだの相成長は、相境界におけるすべりの一側面を表す現象であるといえる。ひずみ誘起による相成長パラメータ S_c は、すべりに起因する相成長を表すパラメータであり、また、式(7)に示したように、近似的にはんだの全相当クリープひずみ $\bar{\epsilon}_c$ と対応する量である。さらに、著者らは、ラップジョイント形せん断試験片を用いた繰返しクリープリラクセーション試験を実施し、一サイクル当たりの ΔS_c と全相当クリープひずみ振幅 $\Delta \bar{\epsilon}_c$ とが対応することを実験および解析によって示した⁽⁶⁾。したがって、式(12)の ΔS_c による評価法は、Coffin-Manson 則による評価法と同じく、相境界におけるすべりによる疲労損傷を間接的に評価する手法であるといえる。

Fig. 9 Relation between number of cycles to fatigue crack initiation N_i and corresponding strain induced phase growth parameter S_{ci}

Fig. 10 Relation between number of cycles to fatigue crack initiation N_i and corresponding average increase in strain induced phase growth parameter per one cycle ΔS_c

6. 相成長観察による疲労き裂発生に対する信頼性評価方法

疲労き裂発生寿命 N_i の評価について、式(12)による方法と Coffin-Manson 則による方法との最も大きな違いは、全相当クリープひずみ増分などの力学パラメータが有限要素法など解析的手法によって求められるものであるのに対して、 ΔS_c は組織観察に基づいて得られる量であるということである。ここでは、組織観察に基づいて相成長の過程を調べることににより、はんだ接合部における熱疲労き裂発生に対する信頼性評価を行う手法について述べる。

図 11 は、ある熱サイクル負荷条件における相成長過程を相成長パラメータ S_c とサイクル数 N との関係において模式的に示したものである。図中には、式(11)あるいは図 9 で表される疲労き裂が発生する限界線もあわせて示す。また、図 12 は、図 11 を一サイクル当たりの S_c の平均増加量 ΔS_c と N との関係に置換えて示したものである。熱サイクル負荷の進行に伴い、 S_c は N に比例して増加する。この熱サイクル負荷条件においては、点 a ($N=N_a$)、点 b ($N=N_b$) を経て相成長が進行し、点 c ($N=N_c$) において疲労き裂が発生する。そこで、まず、熱サイクル負荷途中の点 a および点 b において、はんだ接合部の組織観察を行い、その時点での相成長パラメータ $S_c(N_a)$ および $S_c(N_b)$ を決定する。次に、 $S_c(N_a)$ および $S_c(N_b)$ を用いて区間(a, b)における一サイクル当たりの S_c の平均増加量 ΔS_c を計算すると、式(12)あるいは図 12 から点 c における試験サイクル数 N_c を求めることができる。 N_c は、平均疲労き裂発生寿命 N_i の推定値となる。

Fig. 11 Phase growth diagram illustrated in the relation between number of cycles N and strain induced phase growth parameter S_c .

さて、はんだ接合部における熱疲労損傷に対する実用的な強度評価方法として、加速熱サイクル試験によって得られた疲労寿命を基準とし、これに Coffin-Manson 則を適用して、実使用における疲労寿命を推定することが行われている。これに対して、組織観察に基づいて相成長過程を調べる評価法であれば、想定される実使用条件の熱サイクル試験を、加速熱サイクル試験に必要な時間と同程度の時間をかけて実施するだけで、前述の方法を適用して平均疲労き裂発生寿命 N_i を推定することが可能である。また、この評価法では、基板に過剰な熱サイクル負荷をかける加速熱サイクル試験を実施する必要がなく、複雑なクリープ変形解析を行ってのはんだ接合部のクリープひずみ振幅を評価する必要もない。さらに、あらかじめ基板上にダミーのデバイスを実装し、定期的にこのはんだ接合部における相成長をモニタすることによって、基板の熱サイクル負荷による疲労き裂発生に対する余寿命を評価することも可能である。

ただし、これらの評価法の適用に際しては、次の点に留意しなければならない。式(10)を用いて S_c を正確に評価するためには、熱サイクル負荷を開始する前の初期組織を観察し、 S_0 を定めておく必要がある。また、図 8 あるいは図 9 から明らかなように、組織観察によって求めた相成長パラメータは、そのばらつきが大きいので、複数個のサンプルのはんだ接合部において組織観察を行う必要がある。さらに、組織の観察点は、ひずみが集中する領域に設定すべきである。例えば、有限要素法などの解析手法を用いて、あらかじめ推定することも可能である⁽¹³⁾。しかし、式(7)に示したように、 S_c は近似的にはんだの全相当クリープひずみ $\bar{\epsilon}_c$ と対応する量であるから、初期組織と比較

Fig. 12 Phase growth diagram illustrated in the relation between number of cycles N and average increase in strain induced phase growth parameter per one cycle ΔS_c .

して相成長が著しく進行している領域を観察点とすればよい。

7. 結 言

熱サイクル負荷によるはんだ接合部における相成長過程と疲労き裂発生寿命との関係を明らかにするために、セラミックコンデンサを表面実装した試験基板を用いて熱サイクル試験を実施した。はんだ接合部における相成長の観察に基づき、相成長を表すパラメータ S を適用して、疲労き裂の発生寿命を評価する新しい実用上有効と考えられる方法を開発した。本研究において得られた結論を以下にまとめる。

(1) 加速条件による熱サイクル試験においても、また使用条件を模擬した熱サイクル試験においても、相成長パラメータ S が試験サイクル数 N に比例して増加するように、相成長が進行する。

(2) 平均疲労き裂発生寿命 N_i とそのときのひずみ誘起による相成長を表すパラメータ S_{ci} との間には、 $S_{ci} = CN_i^a$ で表される累乗則の関係が成立する。さらに、一サイクル当たりの S_c の平均増加量 ΔS_c と N_i との間には、Coffin-Manson 則と類似の関係式 $\Delta S_c = CN_i^{-\beta}$ が成立する。このことは、 S_c がはんだ接合部における全相当クリープひずみ $\bar{\epsilon}_c$ と近似的に対応する量であることから説明される。

(3) 熱サイクル負荷の途中においては、はんだ接合部の組織観察を実施し、 ΔS_c を求めることにより、関係式 $\Delta S_c = CN_i^{-\beta}$ に基づいて N_i を推定することが

可能である。

最後に、本研究の遂行にあたりご指導をいただいた横浜国立大学工学部の白鳥教授ならびに于助教教授に心より謝意を表する。

文 献

- (1) 例えば、白鳥正樹、機論, **60**-577, A(1994), 1905-1912.
- (2) 例えば、Yu, Q. and Shiratori, M., *IEEE Trans. Comp. Packag. Manufact. Technol.*, **20**-3 (1997), 266-273.
- (3) 于強・白鳥正樹・大嶋洋一・大石真哉、機講論, No. 98-1(II) (1998-3), 48-49.
- (4) Morris, Jr., J. W., Tribula, D., Summers, T. S. E. and Grivas, D. (Lau, J. H. 編), *Solder Joint Reliability*, (1991), 225, Van Nostrand Reinhold, New York.
- (5) Frear, D. R., Burchett, S. N. and Neilsen, M. K., *Advances in Electronic Packaging*, EEP-19-2, (1997), 1515, ASME.
- (6) 佐山利彦・高柳毅・洞口勉・森孝男、機論, **65**-640, A (1999), 2553-2560.
- (7) 佐山利彦・高柳毅・高柳光弘・森孝男、機論, **65**-632, A (1999), 894-900.
- (8) Speight, M. V., *Acta Met.*, **16** (1968), 133-135.
- (9) Ardell, A. J., *Acta Met.*, **20** (1972), 601-609.
- (10) Senkov, O. N. and Myshlyaev, M. M., *Acta Met.*, **34** (1986), 97-106.
- (11) Clark, M. A. and Alden, T. H., *Acta Met.*, **21** (1973), 1195-1206.
- (12) 日本工業規格, JIS C 0025 環境試験方法(電気・電子)温度変化試験方法, (1988).
- (13) Sayama, T., Takayanagi, T. and Mori, T., *Advances in Electronic Packaging*, EEP-26-1, (1999), 581-587, ASME.
- (14) 平修二・大谷隆一、材料の高温強度論, (1980), 68, オーム社.