金属材料の低サイクル疲労

Low Cycle Fatigue in Metallic Materials

熊井 真次^{*1}

加藤 雅治^{*2}

1. はじめに

今日のエレクトロニクス社会を支える多くの電子機器には、高速化と高密度化（小型化）がたえず要求されている。実装技術もベアチップ実装からそれらをフル搭載したマルチチップモジュール実装へと展開されるなどますます高密度化し、これに伴いこのような高密度実装を支えるキーテクノロジーの1つであるマイクロ接合技術の重要性は一段と大きくなっている。たとえば、ある種の汎用大型コンピュータでは、1枚の基板上に20個の高密度モジュールを搭載し、これに40個あまりのLSIをはんだボールを用いたフリップチップ接合を行って高密度実装を達成しているという。つまり、100～300 μm 径のマイクロはんだ接合が、なんと数百万点に及ぶ箇所で行われているのである。

したがって、この膨大な量のマイクロ接合への信頼性を確保することは、エレクトロニクス社会の機能を維持する上で極めて重要である。

さて、疲労は、材料や部品の信頼性を議論する上で欠かすことができない要素の1つである。特にマイクロ接合においては、現在のはんだの低サイクル疲労による破壊が重要な問題となっていると聞いている。そこで、ここでは、実装に携わる方々の一助になればと念じ、金属の低サイクル疲労を中心に疲労寿命評価について概説することにする。

2. 耐疲労設計に関するいくつかの考え方²⁾

金属材料の疲労過程を細かく追えば、(1)繰り返し変形によるひずみの蓄積（転位下部組織やミクロ組織の変化）、(2)微視き裂の発生、(3)微視き裂の成長あるいは合体による主き裂への発達、(4)主き裂の安定成長、(5)主き裂の不安定成長と最終破壊ということになる。

疲労寿命は、き裂が発生するまでに要した繰返し数とき裂が成長し、材料が破壊するか、あるいは任意のき裂長さにまで成長するのに要した繰返し数の和であると定義できる。したがって、き裂の発生ならびに成長過程をいかに定量的に取り扱うかが疲労を理解し、また耐疲労設計を行うための重要な鍵となる。ただし、これはき裂の発生をどう定義するかという問題を含んでいる。

さて、疲労を対象とした設計思想は、大きく2つに分類することができる。1つは、平滑試験片に応力あるいはひずみ振幅を制御した条件で繰返し変形を与え、試験片が破断するのに要する繰返し数を求める試験に基づくもので、き裂を含まない材料が疲労き裂を生じ、最終的に疲労破壊するまでの全寿命を問題とするものである。一定応力振幅条件に関連するのがS-N曲線、一定ひずみ振幅条件に関連するのがCoffin-Manson則である³⁾。この方法により得られる疲労寿命は疲労き裂の発生とそれが成長する両方の過程を含んでおり、このうち、き裂発生までの繰返し数は通常、全寿命の90%近くを占める。したがって、繰返し応力、繰返しひず

* 1 Shinji Kumai, * 2 Masaharu Kato

東京工業大学・大学院総合理工学研究科材料科学専攻/Department of Materials Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology

みに基づくこのような方法は、疲労き裂発生に重きを置いた設計思想と言える。

もう1つは、材料は不可避免的に欠陥（き裂）を含んでおり、そのき裂の成長を破壊力学的手法を用いて解析することによって材料の寿命を取り扱うものである。通常、非破壊検査等で検出可能な欠陥寸法を基準として初期き裂長さを規定し、これが破壊靱性値等を基準として決めるある臨界長さまで成長するのに必要な繰返し数を有効な疲労寿命として定義する。このような寿命推定の根拠となるのが、破壊力学試験片を用いて行った疲労き裂成長試験により得られる経験的き裂成長則（パリズ則）である。この方法は損傷許容設計と呼ばれ、疲労破壊が特に問題となる航空機や原子力発電関係設備の設計基準として用いられている。なお、この破壊力学のアプローチに関しては、ここでは割愛する。

3. 繰返し応力に基づく疲労寿命曲線⁴⁾

S-N 曲線（Wöhler 曲線）は一定応力振幅の下、通常砂時計型の切り欠きのない平滑な丸棒試験片に平面曲げ、回転曲げ、単軸引張一圧縮あるいは引張一引張等の繰返し負荷を与え、試験片の破断に要した繰返し数 N_f を応力振幅 σ_a に対してプロットすることにより得られる。

Fig.1 に2種類の S-N 曲線を模式的に示す。通常、縦軸の σ_a はリニアスケール、横軸の N_f は対数スケールで示す。図中 a は軟鋼あるいはひずみ時効現象を示す材料において典型的な曲線である。一定応力振幅下では、およそ 10^6 回を越える繰返し数で曲線は横軸に平行と

Fig.1 Schematic drawing of fatigue life curve (S-N curve). σ_a : stress amplitude, N_f : number of cycles to fracture, σ_c : endurance limit.

Fig.2 Nomenclature for stress parameters which affect fatigue life. The variation of stress σ with time t is shown.

なり、これはこの応力振幅以下では疲労破壊しないことを意味している。この応力振幅は疲労限あるいは耐久限として知られ、鋼や銅合金では、通常の引張試験で得られる引張強度（UTS）の30～50％である。高強度鋼、アルミニウム合金をはじめとする多くの材料では、図中 b で示すように疲労限が現れず、繰返し数増加とともに応力振幅が低下する。

このような場合、耐久限は試験片が少なくとも 10^7 回の繰返しに耐えられる応力振幅として定義される。ア

Fig.3 Division of S-N curve into various regions for (a) symmetrical cycling, (b) pulsating cycling.

ルミニウム合金では耐久限は UTS の20～35%であり、鋼や銅合金に比べて低い。

Fig.2 に示すような応力振幅制御の繰返し負荷の場合、S-N 曲線はいろいろな平均応力値 σ_m に対して求めることができる。

さて、Fig.3(a)と(b)は、平均応力値が異なる2通りの σ_a - N_f 関係(両振りの場合($\sigma_m=0$)と片振りの場合($\sigma_a=\sigma_m$))を今度は両対数表示したものである。これら2つの曲線は、繰返し数と応力に従ういくつかの領域に分割される。 N_c より低い繰返し数の領域、つまり、 $N_f < N_c$ の領域は有限寿命領域と呼ばれることがある。応力振幅が非常に高い場合、対称の両振り繰返しでは単調引張試験の際のディンプル状延性破壊に似た擬静的破壊が起こり、一方、片振り繰返しでは、繰返しとともに平均ひずみが増加する動的クリープが生じる。低サイクル疲労の領域は、普通 $10^2 < N_f < 10^3$ の範囲であ

Fig.4 Fatigue life curve for dynamic creep region (Carbon steel).

Fig.5 Dependence of true strain ϵ_N of dynamic creep on number of loading cycles (Carbon steel).

り、高サイクル疲労は $N_f > 10^5$ の領域であるとされている。疲労の原因は繰返し塑性変形であるという観点からすれば、疲労を低サイクル領域と高サイクル領域に分け、さらに低サイクル領域を塑性ひずみ疲労、高サイクル疲労を弾性ひずみ疲労と関連づけるといったやり方は意味のないことかもしれないが、これらは破断繰返し数による疲労の分類法として従来、広く用いられている。

さて、応力制御試験でもひずみ制御試験でも振幅が極めて高い領域では、負荷を受けた物体は最初の半サイクル、もしくはたかだか数十サイクル程度で破断してしまう。これは疲労破壊というよりも延性破壊に近い擬静的破壊である。擬静的破壊は、対称負荷でも非対称負荷でも起こるが、引張平均応力をもつ非対称負荷の場合には、その前に動的クリープが起こる。

Fig.4 は動的クリープ領域での疲労寿命曲線(室温)で、試験片がくびれて破断するまでの繰返し数と繰返し応力の最大値との関係が示されている。また Fig.5 は炭素鋼について、ある一定応力振幅試験での動的クリープによる真ひずみ ϵ_N と繰返し数との関係を示したものである。

動的クリープ曲線は次の関係式で近似される。

$$\epsilon_N = \epsilon_0 + C_1 (N - 1) \tag{1}$$

ここで、 ϵ_0 は最初の半サイクルの変形量であり、動的クリープ速度を ϵ'_N 、繰返し周波数を f とすると $C_1 = \epsilon'_N / f$ である。

Fig.6 は種々の応力振幅に対する真クリープひずみと繰返し数の関係である。ここで ϵ_{pn} は単調引張で破断した際の破断時の真ひずみを示している。片振りの場合、動的クリープによる破断時の真ひずみは(図中 a)は ϵ_{pn} より高い。この場合の破断時の真ひずみの大きさ(ϵ_{pn})_{cyc} は、次の関係式で表される。

Fig.6 Dependence of true strain ϵ_N of dynamic creep on number of loading cycles for different stress amplitudes (Carbon steel).

$$(\epsilon_{pn})_{cyc} = \epsilon_{pn} + C_2 \log N_f \quad (2)$$

ここで、 C_2 はひずみの増加に伴う材料の変形抵抗(応力)の増加の程度を表す指標である加工硬化率と関係した材料定数である。片振りの場合、低サイクル疲労域にある応力値の場合にも動的クリープが起こるが、クリープ速度は繰返し数の増加とともに低下する。

さて、応力振幅と疲労寿命との関係を応力振幅 σ_a を縦軸に、荷重反転回数(繰返し数の2倍)を横軸にとって両対数表示すると、S-N 曲線は通常、直線関係が近似される。この関係を式で表すと、

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (3)$$

ここで、 σ'_f はS-N 曲線を最初の半サイクル($2N_f=1$)に外挿して得られる疲労強度係数であり、 b はS-N 曲線の指数である。この式は、低サイクル、高サイクルの両領域で実験結果とよく一致する。疲労強度係数 σ'_f は、ある意味で引張試験から得られた真破断応力 σ_t と類似している。このため σ'_f と σ_t の間にはいくつかの関係式が提案されているが、 σ'_f と σ_t の間には明瞭な相関関係はないことを示す実験結果も多い。

以上のような繰返し応力に基づいた取り扱いは、交番応力にさらされる回転物や周期的な負荷、除荷にさらされる压力容器、加圧、減圧を繰返し受ける飛行機の胴体等の疲労を取り扱う上で重要である。しかし、これらの適用は問題としている構造物や機械部品の変形が拘束されていない場合に限られることに注意すべきである。

4. 繰返しひずみに基づく疲労寿命曲線⁴⁾

多くの構造物や機械部品は何らかの形でその変形が拘束されている。このような場合、なかでも応力集中箇所での疲労を問題とする場合には、ひずみに基づいた疲労の解析を行う必要がある。

Fig.7 Coffin-Manson curve covering both low-cycle and high-cycle region (Carbon steel).

Fig.8 Schematic drawing of ϵ_{at} - N_f fatigue life curve.

塑性ひずみ振幅 ϵ_{ap} と破断繰返し数の関係を表す Coffin-Manson の関係は、

$$\epsilon_{ap} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (4)$$

の形で表される。ここで、 ϵ'_f はCoffin-Manson 曲線を最初の半サイクル($2N_f=1$)に外挿して得られる疲労延性係数であり、 c はCoffin-Manson 曲線の指数で、だいたい0.5程度の値をとる³⁾。

広い破断繰返し数範囲に渡る実験によって求めた Coffin-Manson 曲線の一例を Fig.7 に示す。これは(4)式のべき乗則関係がよく成立することを示している。

さて、これまでは塑性ひずみ振幅を取り扱ってきたが、実際の機械部品の多くは、全ひずみが一定の状態で作動している。全ひずみ振幅は、塑性ひずみ振幅 ϵ_{ap} と弾性ひずみ振幅 ϵ_{ae} とからなっている。弾性ひずみ振幅 ϵ_{ae} は Hook の法則($\epsilon_{ae} = \sigma_a/E$, E はヤング率)によって応力振幅 σ_a に変換することができるので、(3)式と(4)式を用いて疲労寿命曲線を全ひずみ振幅 ϵ_{at} を用いて表すことができる。これが(5)式である。

$$\epsilon_{at} = \epsilon_{ae} + \epsilon_{ap} = (\sigma'_f/E) (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (5)$$

S-N 曲線と Coffin-Manson 曲線の重ね合わせを Fig. 8 に示した。いま弾性ひずみ成分と塑性ひずみ成分が等しい点を $2N_t$ とすると低寿命側、 $2N_f \ll 2N_t$ では塑性ひずみが支配的であり、材料の疲労寿命は延性により支配される。

一方、 $2N_f \gg 2N_t$ では弾性ひずみが支配的で、疲労寿命は破断強度に支配される。これは疲労特性を総合的に向上させるには材料の強度と延性のバランスが重要であることを示唆している。低サイクル領域と高サイクル領域のいろいろな疲労寿命曲線、すなわちS-N 曲線やCoffin-Manson 曲線、そして ϵ_{at} - N_f 曲線は、次に示すように繰返し応力-ひずみ曲線の助けを借りて相互に

Fig.9 Schematic drawing of hysteresis loop.

σ_a : stress amplitude, ϵ_{at} : total strain amplitude, ϵ_{ae} : elastic strain amplitude, ϵ_{ap} : plastic strain amplitude.

変換することができる。

5. 繰り返し応力-ひずみ応答と 疲労寿命曲線の変換⁵⁾

金属や合金は繰り返し負荷によって、その組織が変化する。これらの変化は機械的性質、電気的性質、磁気的性質の変化を伴うが、通常これらの変化は繰り返し数の増加に伴い飽和するという特徴をもつ。ここでは、これらの変化の中でも最も重要な機械的性質の変化について述べる。

繰り返し変形により材料に生じる最初の機械的性質の

Fig.10 Fatigue hardening/softening curves for different regimes of cycling.

変化は、疲労軟化もしくは疲労硬化である。これは主として材料の元の状態および応力やひずみ振幅に依存し、負荷を受けた金属全体の転位下部組織の変化によって特徴づけられる。

硬化／軟化の検出は繰り返し過程での応力-ひずみ応答、すなわちヒステリシスループを測定することにより行われる。Fig.9はヒステリシスループの模式図であり、 σ_a は応力振幅、 ϵ_{at} は全ひずみ振幅、 ϵ_{ap} は塑性ひずみ振幅、 ϵ_{ae} は弾性ひずみ振幅である。

一定応力振幅で疲労試験を行った場合、ひずみ振幅（全ひずみ振幅、または塑性ひずみ振幅）が繰り返し数とともに減少するとき、これを疲労硬化と呼んでいる。一方、これとは逆にひずみ振幅が増加する場合が疲労軟化である。つまり、ひずみ振幅一定で疲労試験を行った場合には、繰り返し数とともに応力振幅が増加する場合が疲労硬化であり、減少する場合が疲労軟化である。これらの関係を Fig.10に示す。疲労硬化は焼きなまし材に典型的であり、他方、疲労軟化は加工硬化や析出硬化された材料に典型的である。ただし疲労硬化／軟化過程は、普通破壊までの全繰り返し数のうちわずかな割合を占めるにすぎない。

さて、疲労硬化／軟化が完了すると、繰り返し負荷を受けた材料は定常的な挙動をとる。応力振幅やひずみ振幅は飽和値に達し、ヒステリシスループの形状や面積に変化は見られなくなる。

Fig.11のように一連の応力制御試験、あるいはひずみ制御試験をいろいろな振幅で行って得られる飽和（定常）ヒステリシスループの先端を結んだ曲線は、飽和後の応力振幅とひずみ振幅の関係を示すもので、繰り返し

Fig.11 Construction of cyclic stress-strain curve from steady-state cyclic loops.

応力一ひずみ曲線と呼ばれている。繰り返し応力一ひずみ曲線は材料の最も重要で定量的な疲労特性である。単純引張の際の単純応力一ひずみ曲線は、最初の1/2サイクルにおける材料の応力一ひずみ応答を示していると考えてよい。

Fig.12は飽和応力振幅値を塑性ひずみ振幅値に対して両対数関係でプロットしたものである。繰り返し応力一ひずみ曲線は、両対数プロットで直線となることが多く、そのときにはべき乗関係によって説明できる。

$$\sigma_a = k'(\epsilon_{ap})^{n'} \tag{6}$$

ここで、 k' は繰り返し強度係数、 n' は繰り返しひずみ硬化指数である。

なお、単一のすべり面で繰り返し変形が起こるように方位制御した単結晶試料の場合には、Fig.13に示すようにプラトー領域を有する繰り返し応力一ひずみ曲線が得られる。ここで縦軸は分解せん断応力振幅、横軸は分解

せん断塑性ひずみ振幅である⁴⁾。このプラトー領域は繰り返しすべりがPSB（固執すべり帯）と呼ばれる領域で集中的に起こることに起因しており、面心立方構造（fcc）をもつCu、Ni、Ag、Alなどの単結晶で見られる。

さて、繰り返し応力一ひずみ曲線は、単純引張の応力一ひずみ曲線と同様に温度やひずみ速度（繰り返し速度）に依存する。温度が低ければ低いほど、あるひずみ振幅での飽和応力振幅は高くなる。これはfcc金属、bcc金属の両方に当てはまり、また温度の影響は単純変形の場合とは異なり、fcc、bcc金属の両方で大きい。

疲労寿命曲線ならびに繰り返し応力一ひずみ応答のそれぞれがべき乗則

$\sigma_a = k'(\epsilon_{ap})^{n'}$ および $\sigma_{ap} = \sigma_f'(2N_f)^b$ で表される場合には、これらより、

$$b = n'c \tag{7}$$

Fig.12 Cyclic stress-strain curve covering both low-and high-cycle regions (Carbon steel).

Fig.14 Relationship between exponents of cyclic stress-strain curve n' and fatigue-life curve c (Coffin-Manson curve) and b (S-N curve).

Fig.13 Cyclic stress-strain curve of copper single crystal. τ_a : resolved shear stress amplitude, γ_{ap} : resolved shear plastic strain amplitude.

Fig.15 Relationship between parameter of cyclic stress-strain curve k' and fatigue fracture parameters σ_f' and ϵ_f' .

Fig.16 Influence of temperature on Coffin-Manson curve in air (Stainless steel).

Fig.17 Influence of temperature on cyclic stress-strain curve (Stainless steel).

$$k' = \sigma_f' (\epsilon_f')^n \quad (8)$$

が得られる。

Fig.14とFig.15は高サイクル領域のデータを基に、これらの関係がどの位満足されているかを示しているが、よく一致していることがわかる。

6. 疲労寿命に及ぼす温度の影響⁴⁾

温度は疲労寿命に影響を及ぼす最も重要な外的パラメータの1つである。疲労は繰り返し塑性変形によって条件づけられるが、塑性変形の過程は一般に温度依存性がある。このため、温度は疲労のすべての段階に影響を与えていると考えられる。後述するようにマイクロ接合に用いられているはんだの低サイクル疲労は、繰り返し温度変化に起因するものであるが、この平均温度（あるいは最高温度）ははんだの融点を考えるとかなり高く、はんだにとっては十分な高温疲労であると考えられる。高

温での疲労過程は、クリープや活発な拡散を伴い、また環境の影響が顕著となる。

また、高温では材料組織（たとえば結晶粒）の粗大化や、き裂の発生や伝播機構の変化（たとえば、き裂伝播の粒内型から粒界型への変化）を伴う。一方、低温ではbcc構造やhcp構造をもつ金属の場合、脆性破壊が優先的に生じる。

ここでは、高温の影響について述べよう。Coffin-Mansonの関係（ $\epsilon_{ap} = \epsilon_f' (2N_f)^c$ (4)）は全温度範囲に当てはまる。この関係式の定数 ϵ_f' と c は材料だけでなく、温度、繰り返し速度および環境に依存している。

Fig.16は、オーステナイト系ステンレス鋼のCoffin-Manson曲線に及ぼす試験温度の影響を示している。試験環境は大気中である。

また、Fig.17は、それに対応する繰り返し応力-ひずみ曲線である。疲労寿命は高温ほど低下することがわかる。オーステナイト鋼はfcc金属であり、単純変形での温度依存性は非常に小さいが、繰り返し変形の場合では温度依存性は無視できないことがわかる。このようなfcc金属の繰り返し応力-ひずみ応答に及ぼす温度の影響は、材料の転位組織の温度依存性に起因するものである。

一方、繰り返し試験を真空中で行うとCoffin-Manson曲線の温度依存性は小さくなる。これは大気中でのCoffin-Manson曲線の強い温度依存性が、酸化による疲労き裂の発生や伝播の機構の変化の影響を含んでいることを示唆している。また、大気中の試験では繰り返し速度の低下、保持時間の増加により疲労寿命は短くなる。真空中では繰り返し速度の影響も保持時間の影響も見られないことから、これらの影響もまた酸化に関係していると考えられる。

Fig.18 Structure of solder bond region and shear strain due to thermal cycling.

7. 低サイクル疲労寿命曲線と 実装技術とのかかわり

最後に、マイクロ接合の信頼性向上のため低サイクル疲労寿命評価がどのように利用されているかについてその一例を紹介する。

Fig.18は、フリップチップ接合におけるはんだ接合部の構造と熱サイクルによるせん断変位を示している。たとえば、自動車のエンジンルーム内に組み込まれたオートドライブコンピュータ内部のICは、オンオフの繰り返しで0~150℃の熱サイクルを受ける。アルミ基板とSiチップは熱膨張係数が異なるため、はんだに繰り返しせん断ひずみが生じ、このためはんだの疲労が起こることが大きな問題となっている⁶⁾。

Steidelは、低サイクル疲労試験により得られたCoffin-Manson関係を用い、温度変化により生じるはんだ内部のせん断ひずみを最小にし、チップ-基板界面で最も強い強度を達成することができるはんだバンプの幾何学的な形状を求めている⁷⁾。

Fig.19はフリップチップ接合の際の幾何学的パラメータならびに応力と変位の関係を示す模式図である。いま、はんだバンプの疲労寿命がCoffin-Manson式で記述できるとしよう。前掲の(4)のCoffin-Manson式について別な表現をすると、

$$N_f = C_T C_S (1/\gamma_a)^m \quad (9)$$

Fig.19 Schematic drawing of flip chip bonding.

r_0, r_1, h, h_t and V : geometrical parameters, F : shear force, τ_s : shear stress, d : displacement.

ここで、 γ_a は局所的なせん断ひずみ振幅、 m は実験により求められる定数である。 C_T は温度サイクル、ひずみ速度、および滞留時間の関数であり、 C_S は材料の特性の関数である。静的な試験での破壊に要するサイクル数は $1/2$ サイクルであり、このときのせん断ひずみ（振幅）を γ_f とすると、

$$1/2 = C_T' C_S (1/\gamma_f)^m \quad (10)$$

ここで、 C_T' は試験サイクルだけの関数である。式(9)と式(10)より、

$$N_f = K_T (\gamma_f/\gamma)^m \quad (11)$$

ここで、 K_T は γ_f を決定するのに用いられる試験方法だけに依存する関数である。

はんだのせん断応力-ひずみ曲線が A と n とを定数として次式で表されるならば、

$$\tau = A \gamma^n \quad (12)$$

これより、

$$N_f = K_T (\tau_f/\tau)^{m/n} \quad (13)$$

ここで、 τ_f は γ_f に対応するせん断応力である。

平均せん断応力は、Fig.19のせん断力 F を断面積 V/h で割った値であるとする、平均せん断ひずみは δ/h である。ここで、 δ は図のはんだ柱のせん断変位である。そこで、これらの値を式(12)に代入すると、式(14)または式(15)となる。

$$Fh/V = A (\delta/h)^n \quad (14)$$

または、

$$F = AV \delta^n / h^{(1+n)} \quad (15)$$

そのとき最大せん断応力 τ は、断面積 πr^2 の界面で式(16)ようになる。

$$\tau = A \delta^n (V/\pi r^2 h^{(1+n)}) \quad (16)$$

これを式(13)に代入して式(17)を得る。

$$N_f = K_T [(\tau_f \pi r_f^2) (h^{(1+n)}/AV)]^{m/n} (1/\delta)^m \quad (17)$$

ここで、 r_f は疲労破壊する箇所の半径である。

温度サイクルによって生じる変位は、次式で表される。

$$\delta = (\alpha_{cer} - \alpha_{Si}) \Delta T d \quad (18)$$

ここで、 α_{cer} は基板の膨張係数であり、 α_{Si} はシリコンの膨張係数であり、 d はチップの中心点からの距離（通常、チップの対角線の $1/2$ ）である。

はんだバンプ形状は、球状シリンダであるとみなすことができるので、

$$V = (\pi h/6) [h^2 + 3(r_0^2 + r_1^2)] \quad (19)$$

よって、式(17)~(19)を利用して疲労寿命向上を目途としたはんだバンプ形状の最適化を行うことができる。

8. おわりに

以上、低サイクル疲労を中心に金属の疲労寿命評価に

ついて概説するとともに実装とのかかわり合いについて触れた。従来の金属疲労の研究は研究室規模の小さな試験片を用いて、いかに大型構造物や輸送機器の疲労を評価するかについて腐心してきたと言えよう。しかし、今回、実装の問題に触れ、取り扱い可能な大きさの研究室規模の試験片を用いて、いかにマイクロ接合のような微細な対称物の疲労評価を可能にするかが今後の大きな課題のひとつであることが認識できた。

参 考 文 献

- 1) 佐藤了平: 超高速コンピュータ実装技術とマイクロ接合の課題, まてりあ, **35**, [4], (1996) 326~331.
- 2) S. Suresh: Fatigue in Materials, Cambridge University Press (1991) 127~139.
- 3) M. Kato and T. Mori: Mechanics of Materials, **13**, [2], (1992) 155~163.
- 4) Mirko Klesnil and Peter Lukas: FATIGUE OF METAL-

- LIC MATERIALS, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York (1980) 131~183.
- 5) Mirko Klesnil and Peter Lukas: FATIGUE OF METAL-LIC MATERIALS, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York (1980) 12~21.
 - 6) 小林英男: 破壊力学, 共立出版株式会社, (1993) 160.
 - 7) C. A. Steidel, S. M. Sze 編: 超 LSI テクノロジー, 総研出版, 605~610.

【執筆者紹介】

熊井真次 (くまい しんじ)

1985年, 東京工業大学・大学院博士課程修了。同年, 東京工業大学・精密工学研究所助手。1987~89年, ケンブリッジ大学・客員研究員。1995年, 東京工業大学助教授。工学博士。

加藤雅治 (かとう まさはる)

1978年, 東京工業大学・大学院博士課程修了。同年, ノースウェスタン大学・博士研究員。1979年, ミシガン州立大学助教授。1983年, 東京工業大学助教授。1995年, 東京工業大学教授。工学博士。

SHM 出版物のご案内

IMC(International Microelectronics Conference) Proceedings

					会員価格	一般価格
1992(Yokohama)	A4 版	論文数	107 件	622 頁	10,000 円	12,000 円
1994(Omiya)	A4 版	論文数	93 件	490 頁	10,000 円	12,000 円
1996(Omiya)	A4 版	論文数	85 件	418 頁	10,000 円	12,000 円

(価格は送料込みです)

MES (マイクロエレクトロニクスシンポジウム) 論文集

					会員価格	一般価格
第 5 回(1993)	A4 版	論文数	66 件	566 頁	5,000 円	5,000 円
第 6 回(1995)	A4 版	論文数	91 件	334 頁	6,000 円	6,000 円

(価格は送料込みです)

ISHM Proceedings

					会員価格	一般価格
1996(Mineapolis, Minnesota)	A4 版		610 頁		9,000 円	10,800 円

(価格は送料込みです)

ISHM USA 会誌

					会員価格	一般価格
1996 No.4	(July/August)		52 頁		1,000 円	1,000 円
1996 No.5	(September/October)		104 頁		1,000 円	1,000 円

(価格は送料込みです)

お申込み・お問合せは **SHM** 事務局までファクシミリでご連絡ください。

FAX 番号: 03-5802-5367