フレキシブルプリント配線板の
耐折寿命に関する強度学的研究*鈴木 秀 人^{*1}A Study on the Lifetime of Flexible Printed Circuits under Bending
Based on the Conventional Works of Fatigue

Hidetoshi SUZUKI

The mechanical reliability of flexible printed circuits, FPC was studied upon the basis of the conventional works on fatigue of structural materials. The lifetime of FPC, N_f was related to the maximum strain of copper $\Delta\epsilon_{cu}$ as the straight relation of $\Delta\epsilon_{cu} \propto N_f^{-0.36}$ in the log-log diagram. It was found by experiment that the lifetime of FPC could be varied by controlling the tensile properties of adhesives and the thickness of copper foil, Kapton of the base material and adhesives. The lifetime, N_f could be improved by thinning the copper foil and adhesive and inversely by thickening Kapton of the base material. Also, there was an optimum rigidity-coefficient of the adhesive for the lifetime, N_f of FPC. During the lifetime of FPC, the fatigue process observed on copper foil could be divided into three stages as follows: (I) the crack initiation, (II) the crack density increase, (III) the crack opening. The NG life of FPC, that is the electric resistance rising up to 10 % of the original value, was corresponded to stage of (I), the crack initiation.

Key Words: Fatigue, Tensile Property, Fractography, Bending, Crack Initiation, Composite Material, Flexible Printed circuit

1. 緒 論

近年、エレクトロニクス機器の小形軽量化に伴う高密度実装が要求されるなかで、FPC、フレキシブル基板が極めて頻繁に使われている。特に最近、3.5 インチのフロッピーディスク、CD プレイヤ等の多用化に伴って使用条件もますます厳しくなっている。FPC は、図 1 のように導体に銅はくを、ベースの絶縁材料にカプトン等のプラスチック薄膜を使うことにより、厚さを 0.1 mm 程度として回路に柔軟性を具備させたものである。これによって、従来の硬質プリント配線(RPC)では実現困難であった屈曲使用や稼働部における使用を可能としている^{(1)~(3)}。

しかしながら、繰返し屈曲使用により導体に生じる疲労損傷が原因で FPC は抵抗値の増大する機能劣化に陥る⁽⁴⁾⁽⁵⁾。そのため、FPC の疲労に関心が持たれているが、依然として疲労機構の解明まで掘り下げた体系的な研究が行われておらず、強度学的にも重要な課題である。従来の疲労研究では主として機械、構造物の安全性に関連して、その破局的破壊防止のためにき裂の伝ば挙動に焦点を合わせて実施されてきた。一方、

FPC の機能劣化に関連した疲労では最終破断が問題ではなく、それ以前の寿命が問題となるようである。

そこで、本研究では FPC の機能劣化に関連して、疲労き裂の発生挙動とその支配因子解明に焦点を合わせて、従来の疲労の研究成果^{(6)~(8)}に基づいて検討を加えた。特に、SEM によるフラクトグラフィ等の観察を実施し、FPC の導体の銅はくにおける疲労過程の解明まで掘り下げることを試みた。

2. 材料と実験方法

耐久試験に供した FPC は図 1 に示すように、ベースのポリイミドカプトンにアクリル-エポキシ系接着剤にて導体の銅はくをはりさらに耐久性の改善のため上面をカプトンによって覆ったものである。銅はくの

図 1 耐久試験に供した FPC

* 原稿受付 平成 2 年 5 月 23 日。

*¹ 正員、小山工業高等専門学校 (〒323 小山市中久喜 771)。

パターン幅は、0.3 mm、その間は0.3 mmで本数は13本である。加工条件等を表1に示す。FPCの機能劣化の原因を明らかにするために、FPC構成材料の厚さの影響について調べた。すなわち、銅はくの厚さを35, 18 μm 、カプトンの厚さを25, 12 μm さらに接着剤の厚さを10, 15, 20 μm と種々変動させて、それに伴ったFPCの耐折寿命の変化について検討した。

耐久性評価は、電子機器での実働状態に近い図2に示すIPC耐屈曲性試験機⁽⁹⁾と称される片面曲げ試験によって行った。IPC試験はストローク30 mmで屈曲速度180回/分で最終破断に至るまで実施した。加えて、250回ごとに導通抵抗を測定して、屈曲回数の増加に伴った抵抗の変化から機能劣化寿命を検討した。

さらに、疲労損傷と機能劣化の関係について検討を加えるために、一定間隔の耐折回数で試験を停止させ導体の銅はく中の疲労損傷の有無をSEMによって観察し、併せて破断面のフラクトグラフィを行った。

表1 加工条件

Surface Treating for Copper Foil	Ammonium Hypersulfate 20wt% treated for 1 minute
Pattern Forming	Photographic Method
Etching	Ferrous Chloride
Cover lay	Multistage Press, Temp. 170°C, Pre. 3MPa, 30min.

図2 IPC試験の原理

図3 曲率半径Rと耐折寿命 N_f の関係

3. 実験結果と考察

3.1 銅はくのひずみ-耐折寿命, ϵ_{cu} - N_f 線図

FPCの耐折寿命が銅はく中に発生する疲労損傷とどのように関連するか明らかにするために、銅はくにかかる最大ひずみ ϵ_{cu} と耐折寿命 N_f の関係を検討した。そこでIPC試験における曲率半径 R を種々変化させることにより ϵ_{cu} を変動させた。図3に曲率半径 R と N_f の関係を示す。本図より耐折寿命, N_f に曲率半径 R の影響が極めて大きいことが理解できる。曲率半径 R と銅はくにかかる最大ひずみ ϵ_{cu} の間には次式の関係がある。

$$\epsilon_{cu} = t_{cu} / (2R + T)$$

ここで、 t_{cu} :銅はく厚さ(35 μm)、 T :FPC厚さ(0.1 mm)、さらに図3の結果を、上式の関係から銅はくにかかる最大ひずみ ϵ_{cu} を求め両対数グラフを用いて、 ϵ_{cu} - N_f 線図に再整理して図4に示した。本図より次式の関係が認められる。

$$\epsilon_{cu} = 0.55 N_f^{-0.36}$$

したがって、FPCの耐折寿命は、銅はくにかかる最大ひずみ ϵ_{cu} の大きさによって支配される。

3.2 構成材料の厚さと耐折寿命 N_f の関係

銅はく、カプトン、接着剤の厚さが機能劣化寿命に及ぼす影響について検討を加えた。銅はく厚さの効果は、図5に示すように顕著に大きく、35 μm から18 μm と薄くなると寿命は4倍に伸びている。一方、カプトン厚さの効果は図6に示すように、12.5 μm から25 μm と厚くなると寿命は伸びている。これらの結果を ϵ_{cu} - N_f 線図に再整理して図4に示すと、各点は $\epsilon_{cu} = 0.55 N_f^{-0.36}$ の直線上に乗る。したがって、銅はくとカプトンの厚さの効果は、銅はくひずみ ϵ_{cu} を小さくするこ

図4 銅はくのひずみ ϵ_{cu} と耐折寿命 N_f の関係
(Cu 35 PI 25 A 10は銅はく厚さ35 μm 、ポリイミド厚さ25 μm 、接着剤厚さ10 μm を意味する。他も同様)

とによって寿命を伸ばしているものと示唆される。一方、接着剤の厚さの効果は図7に示すように20 μm から10 μm と薄くなると4.5倍寿命が伸びる。この効果

図5 耐折寿命 N_f に及ぼす銅はくの厚さ t_{cu} の影響

図6 耐折寿命 N_f に及ぼすポリイミドカプトンの厚さの影響

図7 耐折寿命 N_f に及ぼす接着剤の厚さの影響

は極めて大きく、しかも接着剤の厚さを薄くすることはむしろ銅はくひずみ ϵ_{cu} を大きくする。これらの結果を $\epsilon_{cu}-N_f$ 線図に再整理して図4に示すと、各点は $\epsilon_{cu}=0.55 N_f^{-0.36}$ に乗らない。これは、接着剤の厚さの効果がそれ自体の疲労挙動と密接に関連していると考えられる。そこで、さらに接着剤の特性と耐折寿命の関係について次節で検討を加えた。

3.3 接着剤の特性と耐折寿命の関係 耐折寿命に及ぼす接着剤の特性の影響を把握するために前節までに用いた接着剤に別の3種類を加えて調べた。4種類の接着剤は、図8に示すように応力-ひずみ線図に顕著な有意差を示す。これらの4種類の接着剤を用いて作成したFPCの機能劣化について、互いに比較検討した。本図より加工硬化性を $n=\sigma/\epsilon$ と定義し、その

図8 接着剤の応力-ひずみ線図

図9 接着剤の対数減衰率の温度依存性
(ガラス転移温度を表す頂点を記号で示した)

大きい順に A, B, C そして D と称す。前節で用いた接着剤は B である。加えて、図 9 に対数減衰率の温度特性を示すが、ガラス遷移温度も含め曲線は A, B, C, D と低温側へシフトした。これらの 4 種類の接着剤を用いて作成した FPC の耐折寿命について、互いに比較検討した。図 8 における $\epsilon \geq 10\%$ での $n = \sigma/\epsilon$ の数値と FPC の最終破断寿命 N_f の関係を図 10 に示した。本図より耐折寿命を改善するには最適な n 値が存在する。さらに、耐折寿命の結果を $\epsilon_{cu}-N_f$ 線図に示したのが図 11 である。最も優れた FPC の耐折性を示した B は前節で明らかにした結果を、逆に、最も劣った FPC の耐折性を示す D は同様に曲率半径 R を変化させ試験した結果を、さらに A と C は $R=1.5\text{ mm}$ での実測値から推定して直線を引いた。本図よりそれぞれの接着剤を用いた FPC の耐折寿命は以下の関係となる。

$$A: (\Delta\epsilon_{cu}=0.50 \quad N_f^{-0.36})$$

$$B: \Delta\epsilon_{hu}=0.55 \quad N_f^{-0.36}$$

$$C: (\Delta\epsilon_{cu}=0.38 \quad N_f^{-0.36})$$

$$D: \Delta\epsilon_{cu}=0.36 \quad N_f^{-0.36}$$

A, C については推定結果であるのでカッコでくくった。以上の結果より、機能劣化寿命に及ばず接着剤の上昇などによって柔軟性と強さの両面を具備することによって、顕著に FPC の耐折性を改善し得る。

3.4 疲労破壊過程と機能劣化 本節では、SEM によって疲労破壊過程を観察し、その知見に基づき FPC の繰返し屈曲による機能劣化の本質について検討した。IPC 屈曲試験下で、繰返しひずみの回数が増すに従って、図 12 のように抵抗値は増大し、機能劣化が生じる。実際の使用下では抵抗が 10% 程度 up したとき NG となるから、本図において NG 寿命、 N_{NG} は 5×10^3 程度となり、最終破壊寿命と比べ 10 分の 1 程度と極めて短いことに注目される。

一方、FPC に繰返しひずみを加えると銅はくには、図 13~15 に示すようにき裂が発生し、き裂密度を増し、さらに開口量を増大して最終破断に至る。まず図 13 は上記 N_{NG} 段階であるが、銅はく内に初めてき裂が認められている。本図を詳細に観察すると、この段

図 10 耐折寿命 N_f に及ぼす接着剤の引張特性 n の影響 (n はひずみが 10% での応力とひずみの比)

図 11 異なる接着剤での作成した FPC の $\epsilon_{cu}-N_f$ 線図

図 12 抵抗値の変化と屈曲繰返し数

図 13 銅はくでの疲労き裂の発生状況 ($N=5 \times 10^3$)

階ではき裂は1個であるが、すでに0.3mmの銅はくの幅をほぼ貫通し比較的開口していることがわかる。このような機能劣化NG寿命で観察されたこのき裂は発生時点のもので、き裂発生寿命 N_i は 5×10^3 であると考えられる。したがって、機能劣化NG寿命、 N_{NG} = き裂発生寿命、 N_i である。

さらに、繰返し数を増すときき裂は銅はくを貫通し、その密度は図14のように増大しほぼ飽和している。最終破断直前の 5×10^4 に至って図15に示すように0.3mmの銅はく幅を貫通したき裂の開口量が大きくなっている。本図より銅はく中に生じた多数のき裂の形成は、いずれも0.1~0.2mmのほぼ等間隔でなされ、複合材料における強化繊維の破断状況と同様である。さらに、最終破断させた銅はくの破面をSEMによって観察した例を図16に示すが、延性的な疲労破面を呈している。これは、上記図13~15のき裂形態とも対応する。したがってFPC中の銅はくに発生するき裂は通常のパルクな銅における疲労き裂と同様と考えられる。

耐折寿命中に導体の銅はくに生じる疲労破壊過程にさらに理解を深めるために繰返し増大に伴うき裂密度の変化を図17に示した。マーク△は銅はく幅を貫

通していないき裂であり、またマーク○は貫通き裂であった。本図より、全耐折寿命中の疲労過程は以下の三段階に分類し得る。

(I) き裂が発生し銅はく幅をほぼ貫通する。

(II) き裂が次々と発生し、複合材料のアスペクト比に相当すると考えられる0.1~0.2mmのほぼ等間隔に形成がなされるまでき裂密度は増加する。

(III) 発生したき裂が銅はく幅を貫通するまで成長し、さらにその開口量を増大させて最終破断する。

この状況を図4, 11の $\epsilon_{cu}-N_f$ 線図に重ねて考えると機能劣化NG寿命、 N_{NG} は耐折寿命のごく初期に到達することが理解し得る。すなわち耐折寿命の大半は(III)段階であった。現在のところFPCの耐折寿命として最終破断寿命をもって評価する 경우가多いが、比較試験から一歩進めて電子機器の要素設計に対応した試験としては機能劣化寿命で評価すべきであろう。そのためにき裂発生状況についてさらに掘り下げるのが今後の研究課題として指摘されよう。

図14 銅はくでの多数の疲労き裂 ($N=1.5 \times 10^4$)

図15 最終破断直前での銅はくでの開口した疲労き裂 ($N=5 \times 10^4$)

図16 銅はく破面のSEMによるフラクトグラフィ

図17 き裂密度の変化と屈曲繰返し数の関係

4. 結 論

FPCの機能劣化に及ぼす要因解析を、極薄積層板の疲労解析の観点から実施し、以下の結論を得た。

(1) 銅はくにかかる繰返しひずみ ϵ_{cu} と FPC の耐折寿命 N_f との間には以下の関係が認められた。

$$\epsilon_{cu} \propto N_f^{-0.36}$$

(2) FPC の耐折寿命 N_f は、銅はくを薄くすることによって、逆にベースのカプトンを厚くすることによって改善される。このような銅はくとカプトンの厚さの効果は、銅はくにかかる最大ひずみ ϵ_{cu} に及ぼす効果として解釈し得る。

(3) N_f に及ぼす接着剤の力学的特性の影響は極めて顕著である。接着剤はガラス遷移温度の上昇などによって柔軟性と強さをバランス良く具備させて FPC の耐折性を改善し得る。

(4) 疲労破壊過程の連続的追跡から、全耐折寿命中の疲労過程は以下の三段階に分類し得る。

①き裂が発生し銅はく幅をほぼ貫通する、②き裂が次々と発生し、アスペクト比に相当する 0.1~0.2 mm のほぼ等間隔に形成されるまでき裂密度は増加する。③発生したき裂が銅はく幅を貫通するまで成長し、さらにその開口量を増大させて最終破断する。この段階で耐折寿命の大半を費やす。

(5) FPC の機能劣化寿命 N_{NG} は、耐折寿命中の

ごく初期の上記①段階での銅はく中にき裂発生寿命 N_i と一致する。

本研究の一部が、平成元年、二年度の文部省科学研究費・一般研究(c)の援助を受けたことを記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) 沼倉, フレキシブル基板の機能設計, (1987), 97, 情報調査会.
- (2) 鈴木, フレキシブル配線板, 電子技術, 27-7(1985), 45.
- (3) JIS C 5016-1988 フレキシブルプリント配線板試験方法.
- (4) Engelmaier, W., *A New Ductility and Flexural Fatigue Test Method for Copper Foil and Flexible Printed Wiring*, (1978), IPC-TP-204, Tech. Paper 8.
- (5) Hayashi, H., Nishikawa, S. and Sitta, K., *New Evaluation Method for Flexion Life Time of Flexible Printed Circuits(FPC)*, *Printed Circuit World Convention VI*, WCIV-75(1987), 1 Tokyo, Japan.
- (6) Manson, S. S., *Fatigue: A Complex Subject-Some Simple Approximation*, *Exp. Mech.*, 5-7(1965), 193.
- (7) Suzuki, H. and McFvily, A. J., *Microstructural Effects on Fatigue Crack Growth in Carbon Steel*, *Met. Trans., A*, 10(1979), 475.
- (8) Suzuki, H., Ayuta, T., Oota, Y. and Kunio, T., *Effects of Metallizing and Brazing Treatments on Static and Cyclic Fatigue of Polycrystalline Alumina*, *JSME Int. J., Ser. I*, 32-4(1989), 581.
- (9) ANSI/IPC-FC-241 B, *Flexible Metal-Clad Interconnects for use in Fabrication of Flexible Printed Wiring*, (1986), 1 American Nat. Stan. Ins.