

特集 エポキシ樹脂の疲労寿命信頼性解析*

Reliability Study of Epoxy Resin Fatigue Life

長坂進介

Shinsuke NAGASAKA

新帯亮

Akira SHINTAI

青木孝司

Takashi AOKI

加藤和生

Kazuo KATO

An extensive reliability analysis was carried out on epoxy resin fatigue life. When analyzing epoxy resin fatigue life under a thermal cycle test, we considered the fatigue behavior with the maximum loaded stress. However, we found that this idea does not always apply to all epoxy resins.

In this research, we considered the idea that the creep behavior of epoxy resin affects its fatigue life. The creep strain was measured and the stress-strain hysteresis loop was simulated by the finite element method. It was found that the hysteresis loop width predicts the epoxy resin fatigue life.

Key words: Epoxy resin, Thermal cycle, Fatigue life, Creep behavior, Stress-strain hysteresis loop

1. 緒言

自動車用電装部品の搭載環境の変化・長寿命化への要求から、構成部品の寿命予測を正確に行い信頼性を保証することがこれまで以上に重要な課題となっている。そこで本報告では、特に電子部品の封止・注型に多用されるエポキシ樹脂を対象として、車載温度サイクルにおける樹脂クラック発生までの寿命解析について検討したので報告する。

2. 現状課題

材料はその実車環境で温度サイクルにさらされ、繰返し疲労応力を受ける。従来、この繰返し応力が樹脂に損傷を与えると考え、この最大応力値での疲労寿命を評価、エポキシ樹脂の疲労S-N曲線から寿命を予測していた (Fig. 1)。しかし実際の使用環境を詳細に検討すると、瞬間的に負荷される最大応力よりもむしろある一定時間負荷される応力の方が問題となることがある。一定応力すなわちクリープ損傷を受ける場合は、

単純な応力の繰返しという考え方では寿命が正確に予想できない場合があることが分かった。そこで繰返し(疲労)応力と一定(クリープ)応力という複合環境下での寿命予測を検討した。

3. 封止用エポキシ樹脂の信頼性評価

今回の報告では、Fig. 2のような封止構造で、通常のエポキシ樹脂と応力低減を考慮したシリコン変性エポキシ樹脂の2種類を評価した。封止構造の温度サイクル試験にて、エポキシ樹脂のクラック発生寿命を評価するとFig. 3のように通常エポキシ樹脂の方がシリコン変性エポキシ樹脂よりも寿命が長く、差があることが分かった。これは樹脂そのものの疲労寿命に差があると推定しテストピースでの疲労寿命を評価した。しかしながら使用環境下での発生応力を考慮した寿命にはFig. 4のように差がほとんど無く、単純な疲労破壊では説明できないことが分かった。この寿命差は、温度サイクル中のクリープが材料に損傷を与えていると推定される。

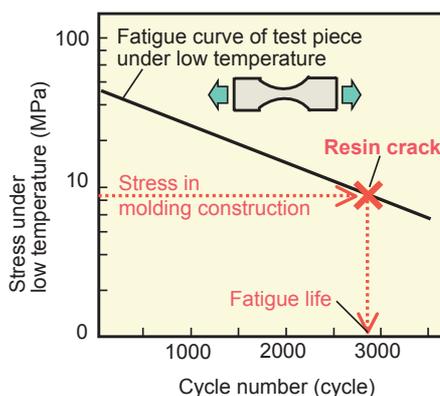


Fig. 1 Method of life prediction

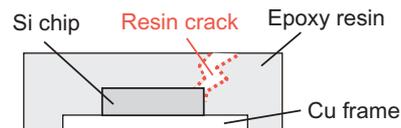


Fig. 2 Epoxy molding construction

* (財)日本科学技術連盟の了解を得て、「2003年第33回信頼性・保安性シンポジウム発表論文集127」より、一部加筆して転載

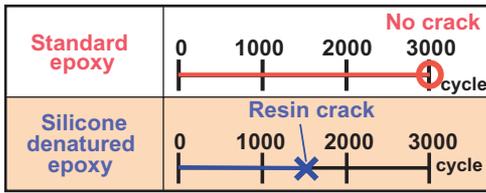


Fig. 3 Crack life under thermal cycle test

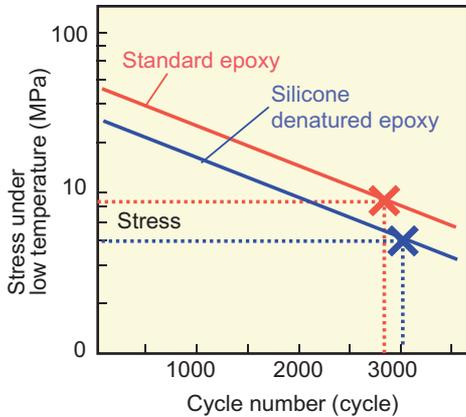


Fig. 4 Fatigue curve of resin test piece

4. 繰返し(疲労)応力による破壊の考え方

温度サイクル環境の樹脂の損傷モデルを金属材料との対比で考察した。

4.1 金属の場合¹⁾

静的引張り試験の際の金属の応力-歪みの関係を考えてみる。最初に弾性域があり、塑性域を経て破断に至る。この塑性域では金属原子の滑りによって金属は損傷を受ける。この塑性域での低サイクル疲労試験を行うと、Fig. 5のように金属は塑性歪み分だけヒステリシスループを描くことが知られている。このヒステリシスループの幅が塑性歪みであり、この塑性歪みは1ループ分の材料の損傷度を表している。金属ではこの塑性歪みからCoffin-Manson則により寿命を推測している。

4.2 樹脂の場合²⁾³⁾

樹脂の時間と歪みの関係を考えると、最初に弾性域があり、1次クリープ域、2次クリープ域を経てクリープ破断に至る。このクリープ域は樹脂が徐々に変形するという粘弾性的性質によって引き起こされるため粘弾性域と言える。ここでは樹脂中の高分子鎖がマイクロな破壊をすることによって歪みが増加していく。この粘弾性域での冷熱サイクルを行うと、Fig. 6のように樹脂は粘性変形した分だけヒステリシスループを描き、ループの幅で表されるクリープ歪みが樹脂の材料損傷に影響を与え、このクリープ歪みから金属同様に寿命が推定できるのではないかと考えた。

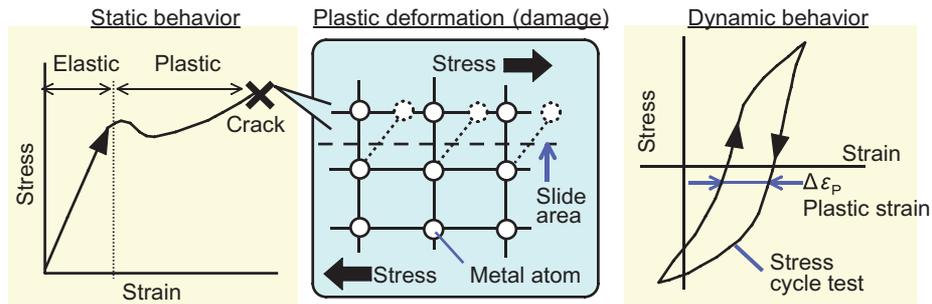


Fig. 5 Stress-Strain behavior of metal

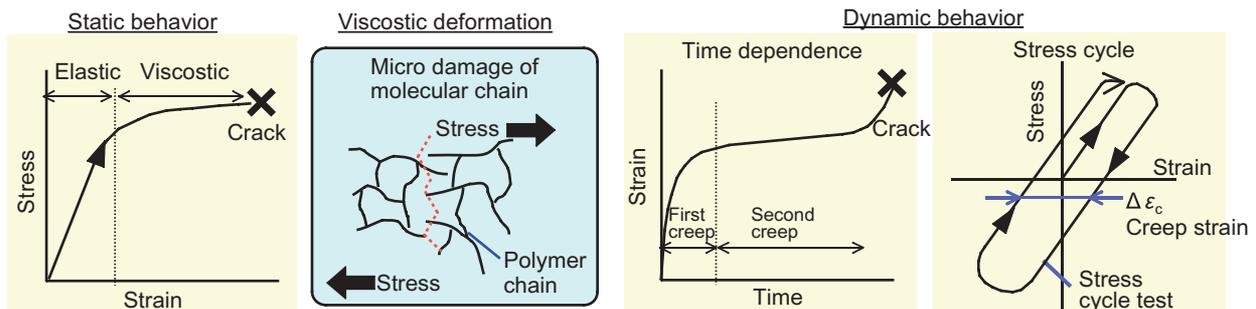


Fig. 6 Stress-Strain behavior of resin

5. 封止用エポキシ樹脂のクリープ挙動定量化

5.1 クリープ挙動の実測

ヒステリシスループの幅で表されるクリープ歪みを算出するためクリープ挙動を定式化する必要がある。そこで静的な一定荷重を負荷したダンベル片テストピースのクリープ挙動を測定した。Fig. 7は80℃での測定結果例である。荷重負荷後、歪みが急激に増加し、その後時間経過とともに徐々に歪みが増加する。シリコン変性エポキシ樹脂は通常エポキシ樹脂よりもクリープ歪みが大きく、変形しやすい。この結果をみるとシリコン変性エポキシ樹脂は特に1次クリープ域の歪みが大きく温度サイクル環境の歪み変化を検討する際に無視できないことが分かる。一般にクリープ挙動を定量化する際は2次クリープ域のみを定式化するが、それに加え今回報告ではすべてのクリープ域を定量化することを試みた。

5.2 粘弾性モデルの設定³⁾

樹脂挙動を定式化するために粘弾性を表すモデルを考えてみる。Fig. 8のように、粘弾性は弾性体であるバネと粘性体であるダッシュポットで示される。バネに応力を加えると瞬時的に歪みが増加し、その歪みが保持される。一方、ダッシュポットに応力を加えると歪みは時間とともに増加していく。粘弾性はこのバネとダッシュポットを組合せた4要素モデルによりその挙動が近似的に記述されることが知られている。4要素モデルの独立したバネの部分の部分がクリープ挙動の瞬間弾性域、バネとダッシュポットが並列に組合わさった部分が1次クリープ域、独立したダッシュポットの部分が2次クリープ域を表している。そこでFig. 8で示された全クリープ歪み式の定式化を行なうため、Fig. 7の測定結果を基に全クリープ歪み式の各係数を求めた。ここで温度サイクル環境での応力の応答を有限要素法(FEM解析)で求めるためには、各係数を温度の関数として定式化しなければならない。そのため本報告ではTable 1のように各係数を温度の一次式で近似した。

Table 1 Formularization result of each coefficient in the case of silicone denatured epoxy

Coefficient	Formularization result
E_0 (MPa)	$-5.0 \times 10^1 T + 2.0 \times 10^4$
E_1 (MPa)	$5.4 \times 10^2 T + 1.9 \times 10^5$
η_2 (MPa·s)	$-1.8 \times 10^1 T + 1.1 \times 10^3$
τ (s)	$-3.1 \times 10^6 T + 2.0 \times 10^9$

T: Absolute temperature

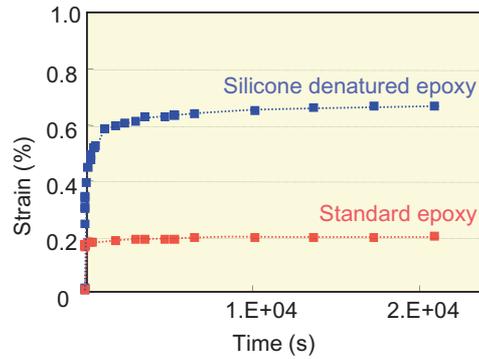


Fig. 7 Creep behavior test result

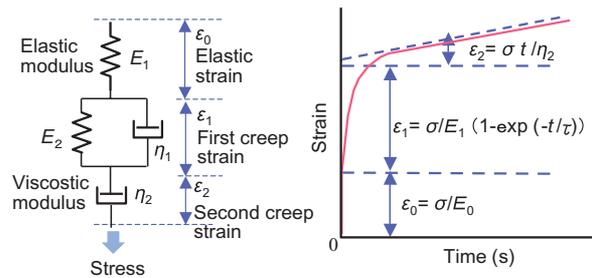


Fig. 8 Four-element model and creep formularization

5.3 ダンベル片でのFEM解析

この定式化から得られたクリープ歪みの式を微分することにより、クリープ速度式を求めた。クリープ挙動を測定したダンベル片をモデル化し、これに一定応力を加える解析をすることで時間と歪みの関係を生じさせた。解析結果を測定結果と比較すると、Fig. 9のように高温側では多少精度が落ちるものの挙動がほぼ一致した。高温側で精度が落ちる原因は、クリープ挙動を1次で近似したためであると考えられる。解析結果の妥当性が確認できたため、次に封止構造での解析を実施した。

6. 封止構造での検証

6.1 ヒステリシスループ評価

Fig. 2の封止構造の温度サイクル環境の応力-歪み挙動をFEM解析により検討した。温度履歴を与えたときのシリコン変性エポキシ樹脂の時間と応力、時間と歪みの関係をFig. 10に示した。高温側で温度保持中、歪みは粘性により増加していき、応力は応力緩和により減少していくことが分かる。この応力と歪みの応答を時間を追ってプロットしたのがFig. 11である。応力・歪みとともに0からスタートしたと仮定すると、サイクルが進むにつれてループを描く位置が変わっていくが、最終的にはある位置に落ち着く。温度上昇時に

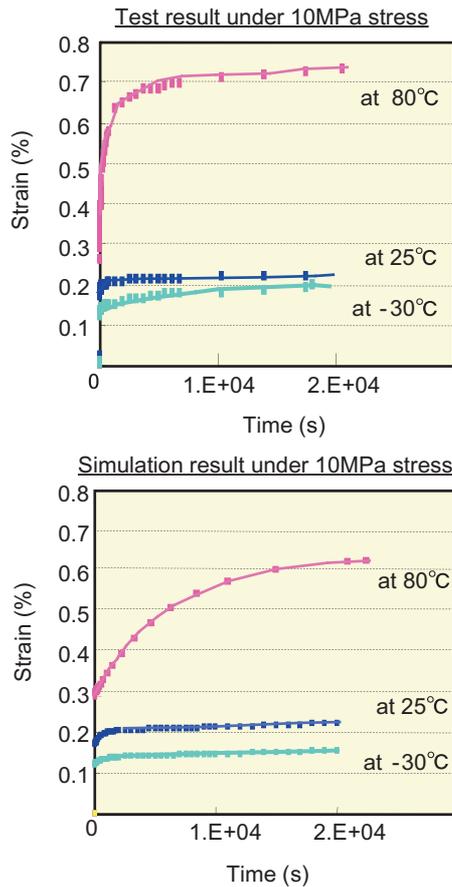


Fig. 9 Comparison of creep test result with simulation

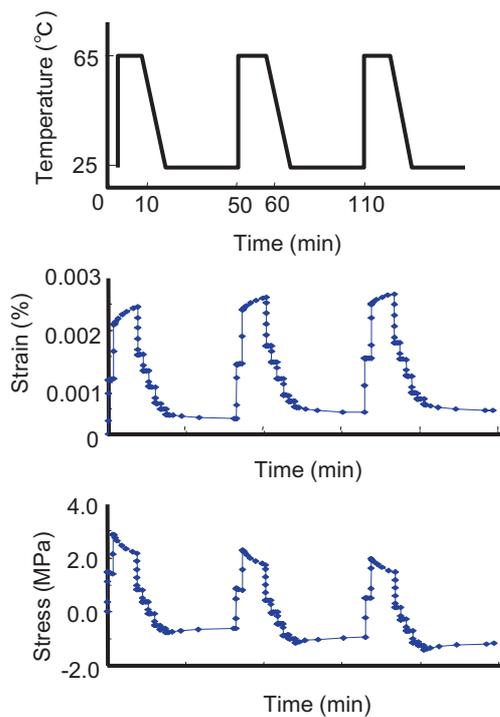


Fig. 10 Stress-Strength behavior under thermal cycle

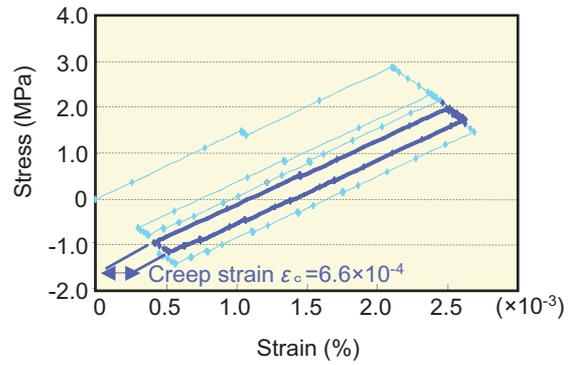


Fig. 11 Stress-Strength behavior of silicone denatured epoxy

応力と歪みが増加していき、高温側で温度保持中は応力は減少・歪みが増加、温度下降時に応力と歪みが減少していき、低温側で温度保持中は応力増加・歪みが減少した。Fig. 11では3サイクル目のループを太線で示した。

6.2 樹脂の違いによる温度サイクル環境下の挙動

樹脂の違いを検証するために、通常エポキシ樹脂に関しても同様にクリープ挙動を測定、挙動を定式化しFEM解析によって温度サイクル中の応力-歪み挙動を出力した。結果はFig. 12となり、挙動の傾向は変わらないものの、寿命に影響を及ぼすループ幅はシリコン変性エポキシ樹脂に比べ小さい。これは通常エポキシ樹脂そのもののクリープ歪みが小さいためである。この結果よりシリコン変性エポキシ樹脂は温度サイクル環境下での損傷が大きく寿命が短くなると推測できる。

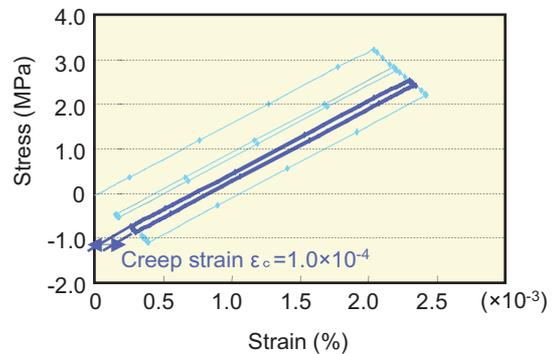


Fig. 12 Stress-Strength behavior of standard epoxy

6.3 封止構造の温度サイクル試験結果との比較

$N=K/(\Delta \epsilon)^m$ で示されるCoffin-Mansonの式より、少なくともクリープ歪みの対数と寿命の対数が比例していることが推定される。そこで種々の温度サイクル環境でのクリープ歪みを解析し、Fig. 13にクリープ歪みの逆数と封止構造の実クラック寿命を比較した。精度よく寿命を推測できていることが分かる。

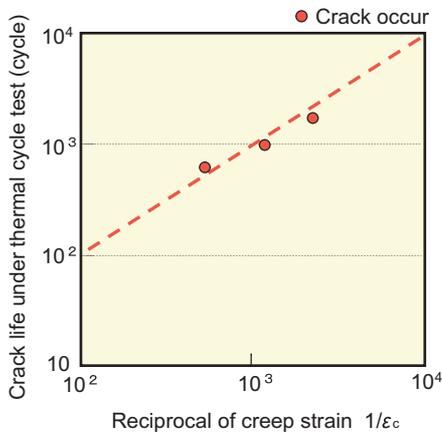


Fig. 13 Correlation of creep strain and crack life

7. 結言

以上の解析によりエポキシの寿命予測手法について以下のことが明らかとなった。

- (1) クリープ挙動を考慮する場合、樹脂材料によってはその1次クリープ歪みが極めて大きく無視できない。
- (2) クリープ歪み—実機寿命との関係は、疲労のみを考慮した結果よりも寿命予測精度がより良いモデルであり、本手法は樹脂の疲労・クリープが複合された場合の材料寿命予測手法の一つの考え方として、妥当性がある。

<参考文献>

- 1) 河本寛：金属の疲れと設計（1972）.
- 2) 中田政之：強化プラスチック（1993）.
- 3) 村上謙吉：レオロジー基礎論（1999）.



<著 者>



長坂 進介
(ながさか しんすけ)
生産技術部
2006年12月まで電子材料の研究に従事



新帯 亮
(しんたい あきら)
材料技術部
電子材料の研究に従事



青木 孝司
(あおき たかし)
材料技術部
接着材料の研究に従事



加藤 和生
(かとう かずお)
材料技術部
有機材料の研究に従事