

| Title        | EFPI光ファイバセンサを用いたエポキシモールド品の<br>内部ひずみ計測 |
|--------------|---------------------------------------|
| Author(s)    | 宮川, 博司; 吉岡, 靖浩; 逢坂, 勝彦 他              |
| Citation     | 電気材料技術雑誌. 2004, 13, p. 87-92          |
| Version Type | VoR                                   |
| URL          | https://hdl.handle.net/11094/76783    |
| rights       |                                       |
| Note         |                                       |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

## EFPI光ファイバセンサを用いた

# エポキシモールド品の内部ひずみ計測

### 宮川 博司、吉岡 靖浩

株式会社明電舎 総合研究所 基盤技術研究部 〒141-8565 品川区大崎2-1-17

逢坂 勝彦、福田 武人

大阪市立大学大学院 工学研究科 〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138

### Internal Strain Measurement for Epoxy Molds

### by Using EFPI Optical Fiber Sensors

Hiroshi Miyagawa, Yasuhiro Yoshioka

Core Technology Research Department Central Research Laboratory,r&d Center,Meisensha Corporation 2-1-17,Ohsaki,Shinagawa-ku,Tokyo,141-8565 Japan

Katsuhiko OSAKA, Takehito Fukuda

Guraduate School Of Engineering, OSAKA City University 3-3-138,Sugimoto,Sumiyoshi-ku,OSAKA,558-8585,Japan

#### Abstract

In recent years, the need for long-term use of equipments and apparatus has been increasing.

In relation to it, a degradation diagnostic technology has received much attention.

In the present study, an internal strain measurement technique by using embedded Extrinsic Fably-Perot Interferometer (EFPI) optical fiber sensors was adopted as the degradation diagnostic method for epoxy molds and its measurement ability was investigated.

In the experiments, internal strains were measured with the EFPI sensor embedded in the epoxy mold including a metal cylinder during its molding and heat cycle fatigue.

From the results, it was found that the embedded EFPI sensor has abilities of internal strain measurement during molding and crack detection under heat cycle fatigue.

Key words: EFPI、光ファイバ、センサ、エポキシ、モールド、ひずみ

### 電気材料技術雑誌 第13巻第1号

J. Soc. Elect. Mat. Eng. Vol.13, No.1 2004

#### 1. はじめに

近年、設備・機器の老朽化や経済低迷による インフラ設備の投資抑制などから、設備・機器 の延命化の要望が強まっている。これに伴い、 設備・機器の劣化診断技術や劣化メカニズムの 究明に関する研究が注目されている。

エポキシ樹脂は、その電気特性・機械特性・ 接着性が良好であることから、古くから回転機 のコイル絶縁や変圧器等の静止機器絶縁などの 大型成形品を始めとして、半導体パッケージに 代表される小型・高精度品まで、電気絶縁材料 として広く使用されてきた。

ここでは、樹脂がいしに代表される、内部に 金属インサートを含んだモールド品と呼ばれ る、高電圧下で、絶縁特性および構造物として の機械特性の両立が求められる成形品を対象と して、その機械劣化のメカニズム究明と、将来 の高電圧絶縁物のオンライン劣化診断への展開 を目指して検討している、光ファイバセンサに よるモニタリング方式を用いたエポキシ樹脂モ ールド品内部のひずみ挙動の連続計測結果につ いてまとめる。

・ 金挙動の測定は、モールド品製作過程から、 成形品となって実際に使用され、機械劣化によ りクラック発生に至るまでを想定して実施した。

## 2. モールド品の機械劣化挙動とひずみゲージ による連続計測

金属のインサートを含んだエポキシ樹脂モー ルド成形品の機械劣化は、環境温度変化あるい は電力の負荷変動に伴う温度変化によるヒート サイクルを受けた際、エポキシ樹脂と金属との 熱膨張係数の違いから発生するひずみが原因と なり、ヒートサイクルの繰り返しから、破壊強 度の低いエポキシ樹脂が疲労を受け最終的にク ラックが発生するとされている。

図1に機械劣化の挙動把握を目的に、ガラス 円筒を埋め込んだ(エポキシ樹脂との熱膨張係 数の差を大きく取るため)モールド品を用いて、 クラック発生に至るまで高・低温のヒートサイ クル疲労試験を繰り返した結果を示す。

なお、図中の縦軸には、ヒートサイクル試験 の高温側を0とし、低温側までの温度差により エポキシ樹脂とガラスの熱膨張係数差によって 発生するひずみに、インサート形状による応力 集中係数を考慮して計算した応力集中部近傍の 樹脂ひずみとして記している。

また、図中にはヒートサイクル試験に使用し たモールド品と同一のエポキシ樹脂を用い、樹 脂単体の繰り返し定ひずみ疲労試験(周波数0.1 ~10Hz)を行った時の設定ひずみと破断回数の 結果を併記した。

これから分かるようにモールド品のヒートサイ クル疲労と樹脂単体のS-N曲線にほぼ良い一 致が見られる。



図 1 ヒートサイクルおよび定ひずみ疲労試験結果 Fig.1 Results of the heat-cycle and constant strain fatigue tests.

図2にクラック発生の予兆もしくは前駆現象 の知見を得る目的で、ヒートサイクル疲労時の モールド品表面に抵抗式のひずみゲージを貼り 付け連続測定した結果の代表例を示す。

図2の結果では、ガラスインサートを包み込 むことで発生ひずみが大きく出る周方向で、誤 差範囲内であるが繰り返し回数に伴い多少ひず みが大きくなる傾向が認められる程度で、周方 向に直交する軸方向のひずみ挙動はまったく変 化が認められない。また、破断直前についても その予兆と言えるものは認められず破断してい る。



Fig.2 Surface strains of the mold easured with strain gages under heat-cycle atigue.

以上のようにインサートを内部に含むモール ド品の機械劣化挙動については把握することが できたが、劣化メカニズムと劣化診断につなが るクラック発生前の前駆現象については知見を 得ることができなかった。

これはエポキシ樹脂自体が三次元架橋によっ て剛構造となっている上に、モールド品の熱膨 張係数をインサートの金属に近づけるために無 機充填材を多量添加していることで更に剛性が 増していることが原因となっている。この様な 材料構成で応力あるいはひずみの高い場所は、 インサート近傍のさらに極所部分に集中する傾 向にあり、機械劣化を受けてクラックが発生し た場合は、発生即全破断に至るとされている。 このため極所部分から離れた場所で計測しても 集中部の変化を捉えきれないと考えられる。

## EFPI光ファイバセンサを用いたエポキ シモールド品の内部ひずみ計測

3-1. 光ファィバセンサの概要説明

インサートを含むモールド品の劣化を含めた 機械的挙動を正確に知るためには、インサート 近傍の応力集中している極所部分の情報を計測 する必要がある。

このためのセンサとしての必要条件は大きく 以下の4項目となる。

- センサを埋め込むことで応力なりひずみ分 布が攪乱されない
- ② 温度による変動がない
- ③ 大きな圧縮ひずみに耐え尚かつ感度が良い
- ④ 電気的ストレスに対して耐える

この観点から干渉計型センサの一種であるフ ァブリ・ペロー干渉計型(EFPI:Extrinsic Fabry-Perot Interferometer)光ファィバセンサを 選択した。(以下センサと略す) 以下に、センサの特長と原理を、またセンシン グ部の概略図を図3に示す。

[EFPI光ファイバセンサの特長]

・細径である
・軽量である
・可とう性がある
・無誘導性である
・高絶縁性である
・高耐腐食性である

原理は、図3に示す光ファイバ端面(A, B) で反射し、干渉した光を測定することで、端面 間の距離(Air gap)を測定し、ひずみに換算す る手法である。



図 3 EFPIセンサのセンシング部の概略図 Fig.3 Schematic diagram of the sensing part in the EFPI sensors.

- 89 -

# 電気材料技術雑誌 第13巻第1号

J. Soc. Elect. Mat. Eng. Vol.13, No.1 2004

# 3-2. エポキシ樹脂中に埋め込んだ時のひず み挙動計測

まず、センサをモールド中に埋め込み、計測 の可否および計測値が正確にエポキシ樹脂の情 報を反映しているのかを知るために、以下の2 つの実験を行った。

[実験1] モールド成形過程のひずみ連続計測 センサをモデル金型の内に設置し、それを包み 込む形で液状のエポキシ樹脂を注型し、所定温 度によって熱硬化させた後、室温まで冷却させ る全過程の連続計測を行った。また、センササ イズ(2種類)の検討を行った。

[実験2] 金属インサート有りでのモールド成 形過程のひずみ連続計測

金属インサートをモデル金型に設置し、応力解 析による最大応力の発生箇所近傍にセンサを貼 り付け、[実験1]と同様に、注型→硬化→冷却に 至る全過程のひずみ挙動を連続計測した。

金属インサートを埋め込んだエポキシモールド 供試体の構成を図4に示す。





図5に[実験1]の測定結果を示す。この結果か ら分かるように全体のひずみ挙動としては、セ ンサ径の細いタイプが高感度を示している。 さらに、特筆すべきことは両タイブともエポキ シ樹脂のゲル化の硬化収縮を捕らえていること と、ガラス転移温度と転移温度前後熱膨張係数 の違いを計測していることである。



図5 埋め込み EFPI センサにより測定された モールド過程における温度-ひずみ曲線 Fig.5 Strain-temperature curve measued with the embedded EFPI sensor during molding.

図6にインサートを含んだモデルモールド品 で計測したひずみ挙動と、[実験1]でインサート を含まないモデルモールドで計測したひずみの 挙動を併記した。また、図中には温度毎に両者 のひずみ差(残留ひずみ)に樹脂の弾性率を掛 けることで導かれる、樹脂がインサートに拘束 されている応力計算結果も併記した。



図6より最終硬化温度150℃を応力発生点と 考え、30℃まで冷却した場合の発生ひずみは 3300×10-6、その時の応力は16MPaと計算で きる。

この値は応力解析から求めたセンサ張付け部 の応力値17~21MPa と比較するとほぼ良い一 致を示している。

## 3-3. モールド品のヒートサイクル疲労時の ひずみ挙動計測

3-2.の結果から、センサをモールド品内部 に埋め込んだ場合でも、エポキシ樹脂の正確な 挙動を計測していることが分かり、この結果を 基にヒートサイクル繰り返しによる機械的劣化 を負荷させ、クラック発生に至るまでの内部ひ ずみ挙動の計測を行った。

ヒートサイクル疲労を行うに当たっては、ク ラックの入り易い条件として、一つは今まで使 用していた金属インサートより応力集中し易い 形状を応力解析を用いて検討した。

図7にモールド品のひずみ解析に用いた金属 インサートの形状と寸法を示す。

尚、計測はType2を採用し実施した。

いま一つは、モールド樹脂と金属インサート の熱膨張係数差を大きくするため、エポキシ樹 脂配合時の無機充填材量を半減させ、モールド 樹脂の熱膨張率を大きくした樹脂配合のものを 使用することとした。

図8にヒートサイクル試験用エポキシモール ド供試体を示す。

図9に無機充填材含有率55vol%(Mold A)と 含有率27vol%(Mold B)のヒートサイクル試験 におけるセンサによる内部ひずみ測定結果を示 す。

なお、ヒートサイクル条件の上限温度は85℃、 下限温度は-20℃に固定し、サイクル毎にクラ ック発生の有無の観察を行いながらひずみの連 続計測を行った。

内部応力を高くした Mold B についてはヒー トサイクル9サイクル目でクラック発生が見ら れており、内部ひずみ計測の結果を非常に良く 反映している。

MoldAについては20サイクルでもクラックの発生は認められない。

図9の結果から上述したようにクラック発生 時点でひずみ挙動に連続性が無くなっており、 さらにクラックの発生は、低温時(正確には下 限温度になる直前に発生したことが分かる。

また、疲労挙動としてもサイクル数に比例し

て、ひずみの振幅が MoldAでは徐々に、Mold Bでは急激に増加していることが明確となった。



図7 モール、品のひずみ解析に用いた金属インサート Fig.7 Shape and dimensions of the included metal cylinders used for strain analysis of the epoxy molds.



図8 ヒートサイクル試験用エポキシモールド供試体 Fig.8 Schematic diagram of the epoxy molds used in the heat-cycle tests.





### 電気材料技術雑誌 第13巻第1号

J. Soc. Elect. Mat. Eng. Vol.13, No.1 2 0 0 4

#### 4. むすび

本稿では、内部に金属インサートを含むエポ キシモールド品を対象として、光ファイバひず みセンサであるEFPIセンサを使った内部ひ ずみ計測について行った検討の結果を述べた。 得られた成果は、エポキシ樹脂のモールド過程 における応力集中部近傍のひずみがリアルタイ ムで測定可能であること、また、そのひずみ測 定値から残留応力を求めることができることを 示した。さらに、ヒートサイクル負荷を受ける モールド品に発生するクラックが、内部に埋め 込んだEFPIセンサによるひずみモニタリン グにより検出可能であることを示した。

以上、EFPIセンサを用いたエポキシモー ルド品のひずみモニタリングにより、モールド 過程に発生する残留応力の測定から運用時にお けるクラック等の損傷検出が可能であることを 示した。今後、これらの計測技術の更なる検討 と、データの蓄積、劣化メカニズムの究明と、 劣化限界あるいは劣化予知の知見を得て、将来 のオンライン劣化診断につなげていきたいと考 える。

(2004年7月2日受理)



#### 宮川博司

1949年2月11日生まれ。1971年東京 理科大学理工学部工業化学科卒 業。同年、株式会社明電舎入社。 以来、エネルギー関連機器・変電

機器の開発及び材料技術開発(関連分野)に従事。 現在、研究開発センター総合研究所基盤技術研究部



部長

### 吉 岡 靖 浩

1965年5月15日生まれ。1989年玉川 大学工学部電子工学科卒業。同年、 株式会社明電舎入社。以来、エネ ルギー関連機器・変電機器の開発

(関連分野)に従事。現在、変電機器の劣化診断技術の開発に従事。電気学会会員



#### 逢坂勝彦

1955年4月10日生まれ、昭和1981年 大阪市立大学大学院工学研究科前 期博士課程修了、同年三洋電機㈱ 入社、1983年大阪市立大学工学部

機械工学科助手を経て、平成10年より現職。複合材料の知能化に関する研究、複合材料接着継手の力学 的特性に関する研究等に従事。現在、大阪市立大学大学 院工学研究科助教授。1986年・1991年強化プラスチック 協会論文賞受賞。日本材料学会、日本機械学会等会員。



### 福 田 武 人

1939年5月5日生まれ。1968年京都 大学大学院工学研究科博士課程単 位取得の上退学。同年大阪市立大 学工学部助手、同講師、助教授を

経て1987年教授。この間、スマート複合材料の研究 等に従事。2003年3月退職。同名誉教授。現在、同新 産業創生研究センター長。1986年・1991年強化プラス チック協会論文賞受賞。日本機械学会フェロー、日 本複合材料学会等会員。

(本論文は平成15年度電気材料技術優秀論文賞の受 賞内容をまとめたものである)