モールド変圧器の光診断法による熱劣化診断技術

正 員 片桐 純一*

正 員 竹澤 由高*

正 員 山中 功治**

Deterioration Diagnosis for Molded Power Transformers by Optical Fiber Sensor

Jun'ichi Katagiri*, Member, Yoshitaka Takezawa*, Member, Kouji Yamanaka**, Member

The application possibility of an optical diagnosis was examined as simple and non-destructive technique for diagnosing the degree of thermal deterioration of molded transformers. The optical diagnosis is the technology of estimating the degree of the thermal deterioration of organic insulating resins from the reflective absorbance difference between two wavelengths containing near-infrared light, and life prediction is also possible by using chemical kinetics. First, as a result of investigating the correlation with the glass transition temperature related to the degree of the thermal deterioration of epoxy resins obtained from the dynamic viscoelastic characteristics and the reflective absorbance difference which was a diagnostic parameter, with the correlation coefficient of 0.9 or more it was theoretically judged that an optical diagnosis was applicable. Then, the diagnostic master curve was obtained from the accelerated thermal degradation examination using model samples. Next, the optical fiber cable and the probe of a portable optical diagnostic apparatus were improved using bundle fibers. As a result of evaluating six sets of operating transformers using the improved diagnostic apparatus, it has confirmed that the residual life could be estimated.

キーワード：診断，エポキシ，モールド変圧器，熱劣化，反射吸光度

Keywords : Non-destructive diagnosis, Epoxy resin, Transformer, Thermal deterioration, Optical analysis

1. ま え が き

受変電設備は安全性，信頼性確保のために定期点検や運転状況に応じた保守点検が実施されている。この受変電設備の主要機器である変圧器として公共施設，ビル，工場等では防災性，安全性等の観点から主にモールド変圧器が用いられている⁽¹⁾，より一層の信頼性向上を図るために寿命評価などの技術開発が重要な課題となっている。モールド変圧器にはエポキシ樹脂等の絶縁材料が用いられており，変圧器の寿命はこの絶縁材料の物性低下が支配的であるが，負荷の変動，周囲温度の変化等により寿命を明確にすることは難しい。部分放電試験等での診断が行われているが，電気的ノイズ，周囲温度や湿度等の試験雰囲気の変化

による影響が大きく，内部異常が発生しない限り顕著な変化が観測されないため余寿命を推定するには至っていない⁽²⁾⁽³⁾。

我々は，絶縁材料の劣化度を簡便に診断・保守点検するための手法として，近赤外光を含む2波長間の反射吸光度差から絶縁材料の熱劣化の進行度を非破壊的に予測する光診断法の適用可能性について検討を行った。絶縁材料等の有機材料は熱劣化に伴う化学構造の変化が化学反応速度論に従うため，寿命予測も原理的に可能である^{(4)~(6)}。また，光診断法は電気的ノイズや試験雰囲気の影響を全く受けず，内部異常が発生する前から材料の劣化の進行度を捕らえることが可能なため，モールド変圧器絶縁材料の熱劣化診断として有望と考えた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本論文では，モールド変圧器コイル用絶縁材料の熱劣化診断技術として，光診断法の適用可能性を検討することを目的として，モデル試料にエポキシ樹脂を用いた樹脂板を作製し，加速劣化試験を実施して，光診断のパラメータとなる樹脂板の反射吸光度差と劣化度の指標になる動的粘弾性特性から求めたガラス転移温度との相関関係を調べた。さらに，化学反応速度論に基づき，寿命診断用のマスタカ

* (株)日立製作所 日立研究所
〒319-1292 日立市大みか町 7-1-1
Hitachi Research Labs., Hitachi, Ltd.
7-1-1 Oomika-cho, Hitachi 319-1292

** (株)日立産機システム 中条事業所
〒959-2608 新潟県北蒲原郡中条町富岡 46-1
Hitachi Industrial Equipment Systems Co., Ltd.
46-1 Tomioka, Nakazyo-machi, Kitakabahara-gun, Niigata
959-2608

ープを作成し、携帯型光診断装置を用いて実器評価を行った。以下に、これらの結果について述べる。

2. 実験方法

〈2・1〉 モデル試料の作成 モールド変圧器用の絶縁材料に用いられているエポキシ樹脂とシリカ充填材からなる材料を金型に注入し、加熱硬化して耐熱性B種のエポキシ樹脂板を作製した。この樹脂板を大きさ $30 \times 50 \times 5\text{mm}$ に切断してモデル試料とした。

〈2・2〉 反射吸光度スペクトルの測定 モデル試料の反射吸光度スペクトルは、 150mm ϕ の積分球ユニットを設置した自記分光光度計 (U-4000 型：日立製) を用い、波長 $400 \sim 1000\text{nm}$ の領域で測定した。各波長における反射吸光度 (A_R) は、アルミナ標準白板における反射光強度を $I_0(\text{nW})$ 、測定材料表面での反射光強度を $I(\text{nW})$ とすると (1) 式で定義され、値が大きいほど反射による光損失が大きいことを示す。

$$A_R = -\log(I/I_0) \dots\dots\dots (1)$$

〈2・3〉 加速劣化試験 モデル試料を用いて、恒温槽で3種の温度条件 (130°C , 150°C , 180°C) で空気中での加速劣化試験を行った。

〈2・4〉 寿命予測の考え方⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾と診断マスタカーブの作成 熱劣化による材料の諸特性 P の変化は、すべて材料の化学構造の変化量 x に起因すると仮定すると

$$P = f(x) \dots\dots\dots (2)$$

となる。化学構造の変化が化学反応速度論に従うと仮定すれば、時間 t に対して (3) 式の関係が成り立つ。

$$dx/dt = a \cdot \exp(-\Delta E/RT) \cdot g(x) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 a は頻度因子、 ΔE は反応の活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は絶対温度、 $g(x)$ は熱劣化反応を表す関数である。

$t=0$ のとき $x=0$, $t=t$ のとき $x=x$ として、(3) 式を t で積分すると、

$$\int_0^x \{1/g(x)\} dx = a \cdot \int_0^t \exp(-\Delta E/RT) dt \dots\dots\dots (4)$$

が得られる。(4) 式の右辺の積分項 θ は、時間の単位を有するので換算時間 (劣化度) と呼ばれる。すなわち、(5) 式である。

$$\begin{aligned} \theta &\equiv \int_0^t \exp(-\Delta E/RT) dt \\ &= t \cdot \exp(-\Delta E/RT) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

(4), (5) 式から θ は x の関数であり、(2) 式から任意の特性 P も x の関数なので、 P を測定すれば θ を求めることができる。

次に、材料の寿命点 t_0 での換算時間を θ_0 とすれば、時間 t での実測から求めた換算時間 θ との差 $\Delta\theta$ が余寿命に相当する換算時間になり、(6) 式で表される。

$$\Delta\theta = \theta_0 - \theta = \int_t^{t_0} \exp(-\Delta E/RT) dt \dots\dots\dots (6)$$

(5), (6) 式より、時間 t 以降の温度条件が定まれば、余寿命の時間 Δt を (7) 式で求めることができる。

$$\Delta t = \Delta\theta / \exp(-\Delta E/RT) \dots\dots\dots (7)$$

診断マスタカーブは、加速劣化試験結果から反射吸光度差がある一定値になるまでの時間を各温度について求め、その時間を各温度 (絶対温度) の逆数に対してプロット (アレニウスプロット) し、その傾きから活性化エネルギー ΔE を算出して、(5) 式に代入し、加熱時間 t を換算時間 θ に変換後、再プロットして作成した。

〈2・5〉 動的粘弾性測定 DVE レオスペクトラ (DVE-V4 型：レオロジ社製) を用い、モデル試料から大きさ約 $5 \times 30 \times 1\text{mm}$ の短冊状に切断した試料を用いて、正弦波歪みを用いた引張振動 (周波数 10Hz 、変位 $1\mu\text{m}$) における貯蔵弾性率 E' 、損失正接 $\tan\delta$ を昇温速度 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ で温度依存性を測定した。ここで、 $\tan\delta$ の極大ピーク時の温度をガラス転移温度と定義した。

〈2・6〉 光ファイバプローブを用いた反射吸光度差の測定 図1に携帯型光診断装置の構成図を示す。光源として波長 670nm 及び 830nm の半導体レーザ (LD) を内蔵した安定化光源を用い、検出部には Si フォトダイオードを内蔵した光パワーメータを用いた。なお、光源、光パワーメータは電池駆動型である。また、光ファイバケーブルには多成分ガラス光ファイバからなるバンドルファイバを用いた。

まず、基準となるアルミナ標準白板を用いて、波長 670nm と 830nm のベース反射光強度 $I_0(\text{nW})$ を測定し、次に測定試料での反射光強度 $I(\text{nW})$ を測定した。これらのデータを B5 サイズの携帯型パーソナルコンピュータに入力して、反射吸光度 (A_R) を反射スペクトル測定の場合と同様 (1) 式を用いて算出した。さらに、診断パラメータとしての反

図1 携帯型光診断装置の外観写真
Fig. 1. Photograph of the developed diagnostic apparatus.

射吸光度差は波長 670nm の反射吸光度から波長 830nm の反射吸光度を差し引いて求めた。

3. 結果と考察

〈3・1〉 熱劣化に伴う反射吸光度スペクトル変化 図 2 に自記分光光度計で測定した空气中 150℃加熱におけるエポキシ樹脂板の熱劣化に伴う反射吸光度スペクトル変化の一例を示す。

熱劣化の進行に伴って短波長域 (550~750nm) で反射吸光度が増大した。この挙動は、その他の 130℃, 180℃の加速劣化温度でも同様の傾向を示し、温度が高いほど顕著に現れた。有機材料の光吸収因子は、CH, OH 結合等の分子振動に起因した近赤外で支配的な高調波吸収と、 $>C=C<$, $>C=O$ 等の二重結合による $\pi \rightarrow \pi^*$, $n \rightarrow \pi^*$ 遷移に起因した可視~紫外域で支配的な電子遷移吸収がある⁽¹¹⁾。短波長域での反射吸光度の増大はエポキシ樹脂の熱酸化劣化に基づく電子遷移吸収の増大であると考えられる。なお、波長 750nm 以上の近赤外域では劣化の進行に伴って反射吸光度が低下する現象が見られたが、この原因は表面のエポキシ樹脂スキン層の減量によりシリカ充填材が表面に析出した影響と考えられる。

次に、反射吸光度スペクトルの形状変化から劣化を感度よく検出するために、反射吸光度差の算出に使用できる特定波長の選定を行った。劣化に伴って顕著に変化する波長 700nm 以下の領域と、変化の少ない 800nm 以上の領域から、市販の半導体レーザ (LD) 光源が存在する波長 670nm と 830nm の 2 波長を選定し、その反射吸光度差 (2 波長間のスペクトルの傾き) を診断パラメータとすることにした。

〈3・2〉 ガラス転移温度との相関性及び寿命診断マスターカーブの作成 反射光方式の光診断法は、本論文で対象とするモールド変圧器絶縁材料 (充填材含有エポキシ樹脂) のような不透明材料に対して、表面のみの劣化度を検知す

ることになる。樹脂板の熱酸化反応では、特に表層 0.1mm 程度の着色が著しいことが観測されているので、厚さ 5mm の樹脂板を用いて表層だけの反射吸光度差と板状試料の平均的な物性変化を比較評価することにした。板状試料の平均的な劣化の程度を調べるためには、動力学的分析が適しているので、エポキシ樹脂板の動的粘弾性測定で得られる $\tan \delta$ の極大ピーク時の温度をガラス転移温度と定義し、これを用いて板状試料内部の平均的な劣化の程度を評価した。板状試料内部の樹脂が熱酸化劣化すると樹脂内部には酸化に伴った架橋構造が新たに形成されるので、樹脂の弾性率は増加し剛直となる。その後、主鎖切断等の分解反応が顕著になると、材料は脆くなり寿命に達する。ガラス転移温度の変化で言い換えれば、劣化の初期では増大し、さらに劣化が進行し分解反応が伴うと逆に低下する傾向を示すと考えられる⁽⁴⁾。

図 3 に 2 波長間の反射吸光度差と動的粘弾性により測定されたガラス転移温度の関係を示す。劣化に伴ってガラス転移温度が高くなる傾向となっており、反射吸光度差との相関係数が 0.91 と概ね良い相関が確認され、樹脂表面の劣化と樹脂板の平均的な劣化度に概ね相関があると判断された。

次に、携帯型光診断装置を用いた診断のデータベースとなる劣化度との相関曲線、即ち寿命診断マスターカーブを作成した。図 4 にモデル試料の各温度における加速劣化試験での反射吸光度差を測定した結果を示す。劣化温度が高いほど反射吸光度差の増大が著しい傾向を示した。この結果をベースに、アレニウス則に従って活性化エネルギー ΔE を算出した結果、 $1.1 \times 10^5 \text{J/mol}$ となった。

次に、(5) 式を用いて各劣化温度の加熱時間 t を換算時間 θ に変換して、再プロットすると図 5 に示す寿命診断マスターカーブが得られた。

図 2 熱劣化に伴うエポキシ樹脂板の
反射吸光度スペクトル変化

Fig. 2. Time dependence of absorbance spectra of thermally deteriorated molding epoxy resins.

図 3 樹脂板のガラス転移温度と反射吸光度差との関係

Fig. 3. Relation between glass transition temperature and reflective absorbance difference.

図4 エポキシ樹脂板の反射吸光度差の経時変化
Fig. 4. Heating time dependence of reflective absorbance difference of molding epoxy resin.

図5 寿命診断マスターカーブ

Fig. 5. Diagnostic master curve of molding epoxy resin using reflective absorbance difference.

図4で示した3本の線が1本のバラツキの少ないカーブに重ね合わせできたことと、図3でのガラス転移温度との相関性の結果とあわせ、光診断の可能性を確認できた。

〈3・3〉 光ファイバプローブの構造最適化 既報⁽⁵⁾で使用了劣化診断装置はセンサ部にプラスチック光ファイバ (POF) プローブを用いていたが、この POF は曲げによる光伝送損失が大きいため⁽¹²⁾、測定毎にベース光強度の補正が必要であり、光伝送損失も比較的大きい等、改善すべき課題が生じた。

上記課題を改善するため、今回新たに開発した光ファイバプローブの外観写真と構造の概略図を図6及び図7に示す。

図6 光ファイバプローブの外観写真

Fig. 6. Photograph of the developed optical sensor probe.

図7 光ファイバプローブの構造概略

Fig. 7. Schematic diagram of the developed sensor.

Φ50 μmの細いガラス光ファイバ素線を多数用いたバンドルファイバを用いることにより、曲げによる光伝送損失を約70%低減し、ファイバの柔軟性を約60%向上させた。さらに、従来のPOFプローブでは、2つの光源からの照射光を途中で光結合器を介して1本のファイバへと導いていたが、照射用第1光源及び照射用第2光源の光ファイバ素線をミキシングすることにより光結合器を省略し、カップリング損失を低減した。また、従来の先端形状は照射部コアと受光部コアからなる2心構造であったが、図7に示したように受光用光ファイバ素線を照射用光ファイバ素線の外周に配置した同心式構造にすることで受光効率を約50%向上させた光ファイバプローブを開発し、携帯型光診断装置に適用した。

〈3・4〉 実器調査結果 表1に実器調査したモールド変圧器の仕様を示す。モデル試料と同一の絶縁材料を用いたモールド変圧器で、約10年間使用した定格容量100kVA～500kVAの計6機種(A～F)である。

光診断による実器評価を行う前に、電源遮断直後のモールドコイル表面温度を非接触型温度計(型式:PT-3LF;オ

表 1 調査対象変圧器の仕様

Table 1. Specification of investigated transformers.

TR	Capacity	Voltage	Frequency	Manufactured
A	500kVA	6.6kV/210V	50Hz	1988
B	400kVA	6.6kV/210V	50Hz	1988
C	300kVA	6.6kV/210V	50Hz	1988
D	200kVA	6.6kV/210V	50Hz	1988
E	200kVA	6.6kV/210V	50Hz	1988
F	100kVA	6.6kV/210-105V	50Hz	1988

図 8 診断マスターカーブ上での実器の測定値

Fig. 8. Evaluation of reduced time for six transformers by developed diagnosis.

ブテックス社製)で測定した。その結果、高圧コイル側面の温度よりも、低圧コイル(内部コイル)の上端面温度が約10℃高いことがわかった。この結果から、光診断の測定ポイントとしてコイルの表面温度で最も高い温度と予想される低圧コイルの上端面を中心に測定することにした。図8に開発した光ファイバプローブを用いた携帯型光診断装置で測定を行った結果を示す。なお、測定は布等でコイル表面の埃等を除去してから行った。

変圧器A～D, Fの反射吸光度差の平均値はいずれも0.21で、その時の換算時間は図8から読取ると 2.2×10^{-10} hである。ほぼ同じ値となったのは負荷率等の使用状況が同じ程度だったためと考えられる。設計寿命の考え方は、一般的に樹脂の曲げ強度半減時を寿命点としており⁽¹³⁾、この寿命点となる加速劣化条件で得られたモデル試料の反射吸光度差は0.29、同様にして読取った換算時間は 6.5×10^{-10} hとなる。この値から、余寿命を(7)式を用いて算出すると約20年と推定された。モールド変圧器は設計上の耐久年数が約30年であるため、得られた数値はほぼ妥当な値であると考えられた。なお、変圧器Eは一時的に使用する機種で使用頻度が非常に少ないため劣化度が小さかったと考

えられる。

今回得られた余寿命(樹脂の曲げ強度半減時を寿命点とした時の余寿命)はモールド樹脂の熱劣化の進行度から判断したもので、現実には電磁振動、ヒートサイクル等による機械的疲労等も考慮しなければならない⁽²⁾⁽³⁾。熱劣化以外の劣化要因の影響割合については、今後の調査課題とした。

4. ま と め

モールド変圧器絶縁材料の熱劣化度を簡便に診断するための手法として、光診断法の適用可能性について検討した結果、得られた結論をまとめると次の通りとなる。

(1) モールド変圧器絶縁材料(シリカ充填材含有エポキシ樹脂)の光診断パラメータとなる2波長間の反射吸光度差と動的粘弾性により測定されたガラス転移温度の関係で、相関係数が0.91と概ね良い相関が確認され、樹脂表面の劣化と樹脂板の平均的な劣化度に概ね相関があると判断された。

(2) モールド変圧器の新しい劣化診断の分野に、反射光方式の光診断技術を提案し、加速劣化試験を行ったモールド変圧器用絶縁材料の2波長間の反射吸光度差を診断パラメータとする寿命診断用マスターカーブを作成できた。

(3) 携帯型光診断装置の光ファイバケーブルに50μmの細いガラス光ファイバからなるバンドルファイバを用い、照射用の各光ファイバ素線をミキシングでカップリングする構造としたことで受光効率を改善した新型プローブを開発した。

(4) 実器モールド変圧器表面の反射吸光度差を測定することにより、熱劣化要因ベースの余寿命を表面からでも十分推定できることを確認できた。

今後は、実器モールド変圧器でのデータを積上げ、実適用を検討していく。

(平成14年9月3日受付, 平成15年2月20日再受付)

文 献

- (1) 佐藤文彦, 他: 耐熱・絶縁材料, 共立出版(1988)
- (2) 山村 昌・磯部昭二: 電気・電子部品の寿命診断, 日本規格協会(1989)
- (3) 絶縁材料の劣化と機器・ケーブルの絶縁劣化判定の実態, 電気学会技報, No.752(2000)
- (4) Y.Takezawa, S.Akasaka, H.Miya, and M.Shimodera: *Polym. Eng. Sci.*, Vol.36, No.4, pp.586-591(1996)
- (5) Y.Takezawa, Y.Itoh, M.Shimodera, and H.Miya: *IEEE Trans. Dielectrics & Electrical Insulation*, Vol.5, No.2, pp.290-295(1998)
- (6) Y.Takezawa, M.Saeki, H.Yoshida, and A.Saito: *IEEE Trans. Dielectrics & Electrical Insulation*, Vol.8, No.1, pp.104-110(2001)
- (7) J.katagiri, Y.Takezawa, and Y.Itoh: "Deterioration Diagnosis of Molded Power Transformer by Optical Analysis", 1998 National Convention Record, IEE Japan, No.2, p.12(1998)(in Japanese) 片桐純一・竹澤由高・伊藤雄三:「光診断によるモールド変圧器の劣化度評価」, 平成10年電気学会全国大会, No.2, p.12(1998)
- (8) J.katagiri, Y.Takezawa, K.Yamanaka, and T.Izuna: "Deterioration Diagnosis by Optical Fiber Sensor for Molded

Power Transformer”, Proc. of the Eleventh Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, pp.520-521 (2000) (in Japanese)

片桐純一・竹澤由高・山中功治・伊豆名具巳：「光によるモールド変圧器の熱劣化診断」，平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会，pp.520-521 (2000)

(9) T.W.Dakin : “Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon”, *AIEE Trans.*, Vol.67, pp.113-122 (1948)

(10) 小沢丈夫：マテリアルライフ，Vol.6, No.4, pp.171-180 (1994)

(11) 井出文雄：オプトエレクトロニクスと高分子材料，共立出版 (1995)

(12) POF コンソーシアム編：プラスチック光ファイバ，共立出版 (1997)

(13) 磯部昭二・松延謙次・三井久安：電気機器絶縁の実際，開発社 (1994)

片 桐 純 一 (正員) 1949 年 6 月 28 日生まれ。1968 年 3 月山形県立山形工業高校工業化学科卒業。同年 (株)日立製作所日立研究所入所。主として，有機絶縁材料の開発、物性に関する研究に従事。現在，同所エネルギー材料研究部技師。

竹 澤 由 高 (正員) 1963 年 3 月 25 日生まれ。1987 年 3 月慶応義塾大学大学院理工学研究科修士課程終了。同年(株)日立製作所日立研究所入所。主として，電気絶縁材料の熱劣化と光物性との研究に従事。現在，同所エネルギー材料研究部主任研究員。1998 年電気学会論文賞受賞。工学博士。

山 中 功 治 (正員) 1949 年 9 月 30 日生まれ。1973 年 3 月立命館大学電気工学科卒業。同年(株)日立製作所亀戸工場入所。主として，配電用変圧器の設計開発に従事。2002 年 4 月 (株) 日立産機システムに転属。