

# 変圧器寿命評価のための新しい絶縁紙劣化度評価技術の開発

紙の繊維100本から紙の劣化度を評価する

## A New Diagnosis Method for Aging Degradation of Insulating Paper in Power Transformer Evaluation for Degradation of Paper by Using Dozens Sample of Cellulose Fibers on Paper

(電力技術研究所 電力ネットワークG 送変電T)

電力用変圧器を健全な状態で長期間にわたって使用するためには、変圧器の劣化状態(とりわけ内部で使用される絶縁紙の劣化状態)を把握することが重要である。今回、絶縁紙の表面や端部に付着している紙繊維(数十本~百本程度)を試料として、その光の屈折率を測定することにより、絶縁紙の劣化度を推定する手法を開発したので紹介する。

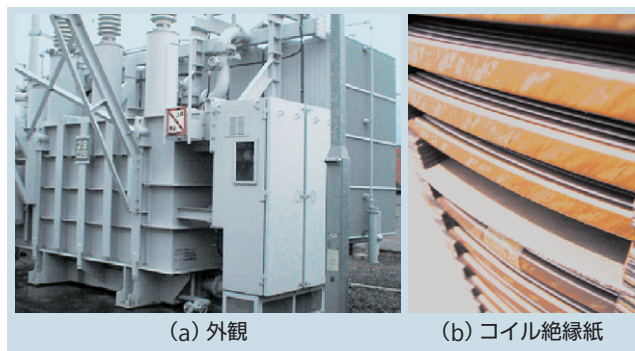
(Transmission and Substation Engineering Team, Power Network Group, Electric Power Research and Development Center)

This report proposes a new diagnosis method for aging degradation of insulating paper in power transformer. In conventional diagnosis method, it requires dozens centimeters of insulating paper to measure the degree of aging degradation, which results in reduction of insulation performance of transformer. Therefore, we studied new diagnosis method which makes it possible to diagnose degradation with dozens of cellulose fibers that adhere to paper surface. We measured the refractive indices of the cellulose fibers using a phase contrast dispersion microscope, because aging degradation accompanies an increase in the refractive indices of the cellulose fibers. In this report, the relationship between degradation of paper and refractive indices of cellulose fibers is described.

### 1 背景と目的

電力用変圧器の寿命とは「コイル銅線に巻かれている電気絶縁紙(以下絶縁紙)が劣化し、コイルに加わる電磁機械力により損傷する危険性が高い状態」とされており、電力用変圧器を健全な状態で使用するために絶縁紙の劣化状態を把握することは重要である。しかしながら、従来の絶縁紙劣化評価試験は絶縁紙を1g程度(標準的な絶縁紙で数十cm程度)切り取る必要があり、これにより変圧器の絶縁信頼性を低下させる可能性があるため、稼働中の変圧器に対して実施することは困難であった。

そこで、絶縁紙の表面や端部に付着している紙繊維(数十本~百本程度)から絶縁紙の劣化度を評価する手法を構築した。



第1図 電力用変圧器

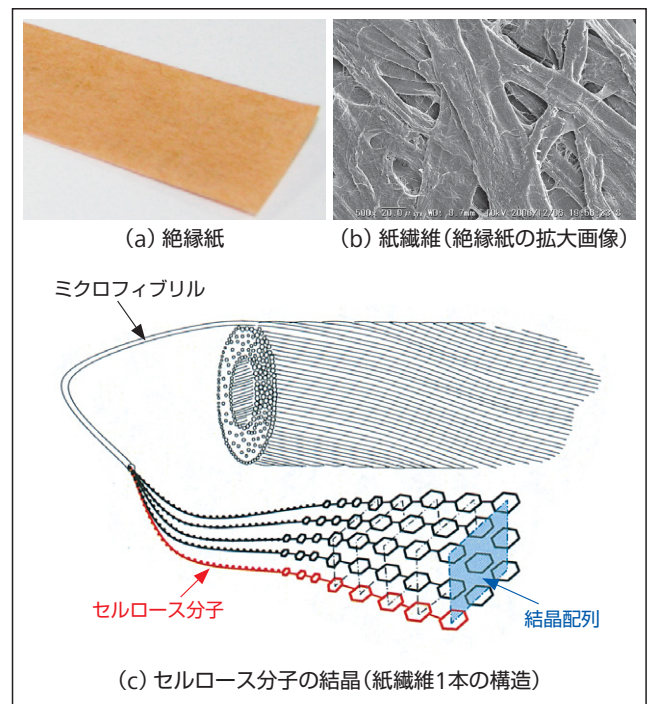
### 2 屈折率測定による絶縁紙繊維の劣化度評価

絶縁紙は複数の紙繊維によって構成されている(第2図(b))。1本の紙繊維は、マイクロフィブリルと呼ばれる微細繊維が撚りあっており、マイクロフィブリルは主にセルロース分子から成り立っている。

また、隣り合うセルロース分子は部分的に水素結合し、結晶構造を成している(第2図(c))。絶縁紙の劣化度の指

標である「重合度」とはセルロース分子の鎖長(長さ)に相当するものであり、新品変圧器の絶縁紙の重合度平均値(DP)は1000程度、変圧器の劣化取替の目安はDP450とされる。

一方、紙は劣化すると、その結晶性は高くなる(結晶化)ことが知られており、結晶化(劣化)は紙繊維の屈折率の増大として顕れる。したがって、紙繊維の屈折率を測定することにより、紙繊維の劣化度を評価することができる。



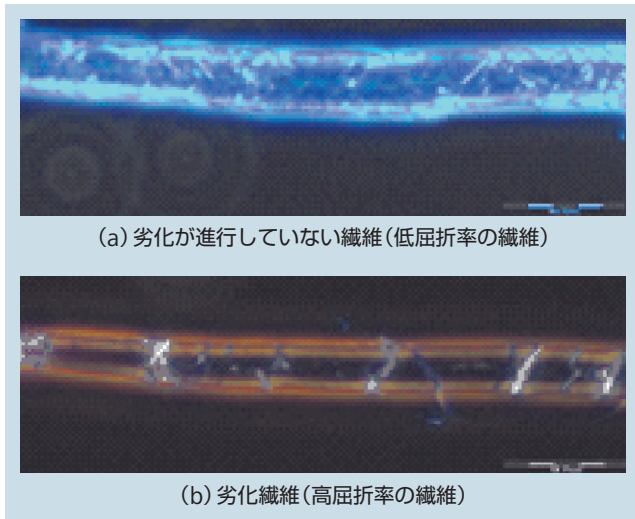
第2図 絶縁紙の構造

### 3 分散染色法による紙繊維の屈折率測定

微小な固体物質の屈折率測定手法の一つである「分散染色法」を用いて紙繊維の屈折率測定を試みた。

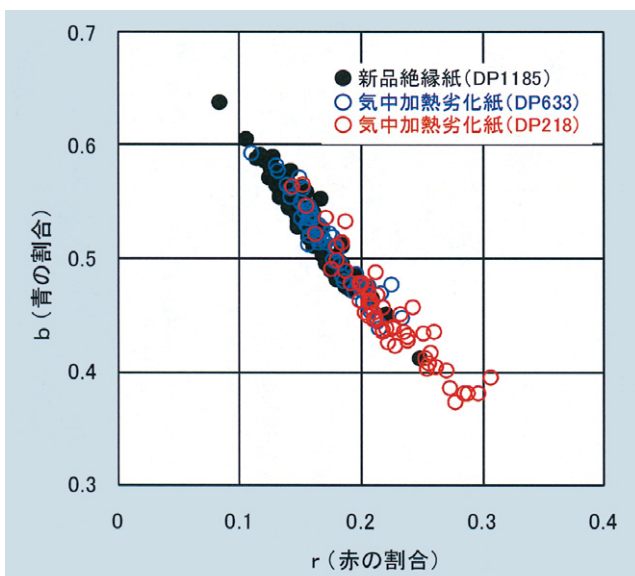
分散染色法とは、物質の「屈折率」の変化を「色調(分散色)」によって表現する手法である。第3図に紙繊維の分散色測定結果の一例を示す。

紙繊維の屈折率測定に適した試験条件を選定することで、劣化が進行していない繊維は青みを帯びた分散色(第3図(a))、劣化繊維は赤みを帯びた分散色(第3図(b))として表現される。



第3図 紙繊維の分散色(分散染色法による)

分散色の色調を光の三原色(赤、緑、青)の強度比として数値化し、赤の割合rを横軸、青の割合bを縦軸とした二次元グラフ上で分散色を表現した\*。様々な劣化状態の絶縁紙から50本程度の紙繊維を採取し、その分散色の分布を測定した結果を第4図に示す。図中の●、○、○はそれぞれ、新品絶縁紙(DP1185)、劣化絶縁紙(DP633)、極度の劣化絶縁紙(DP218)の分布を示している。



第4図 紙繊維の分散色分布

\*赤、緑、青の強度比をr、g、b ( $r + g + b = 1$ )と表現する

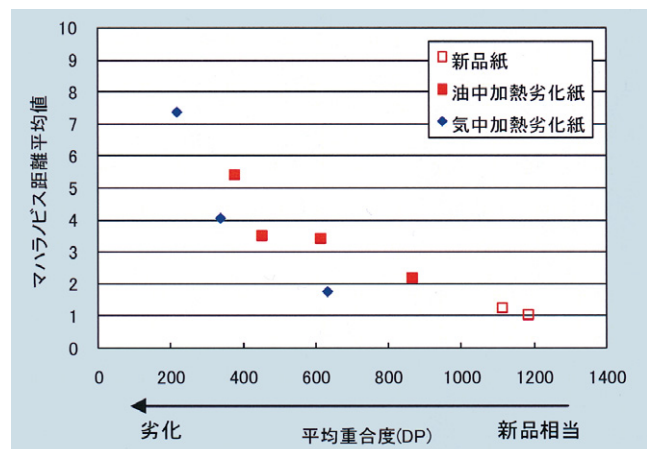
絶縁紙は天然の木材から製造されるため、新品の絶縁紙を構成する紙繊維であっても、分散色は均一ではなく、

ある程度の分布を有している。絶縁紙の劣化状態によって分散色の分布は変化し、劣化が進行するほど図の右下(赤色の色調が強い領域: 屈折率が高い領域)に移移することが確認できた。

## 4 絶縁紙の劣化度と分散色の関係

劣化した絶縁紙の分散色の分布と新品絶縁紙の分布との差異を数値的に評価するため、「マハラノビス・タグチ法(MT法)」の適用を検討した。MT法は品質評価に用いられる手法であり、評価される対象(本研究の場合は劣化した紙繊維の分散色)が標準分布(新品の紙繊維の分散色分布)からどの程度逸脱しているのかを、統計的に算出する手法である。逸脱の度合いは「マハラノビス距離」とよばれる数値で表され、数値が大きいほど「標準品(新品の紙繊維)から逸脱している(劣化している)」と判断される。

劣化した絶縁紙のDPと紙繊維の分散色のマハラノビス距離平均値の相関関係図を第5図に示す。絶縁紙が劣化するとマハラノビス距離平均値が増大する傾向が認められる。この関係図をマスターカーブとすることで、絶縁紙表面から採取した紙繊維の分散色分布から、その絶縁紙の劣化度(DP)を推定することが可能である。



第5図 紙の劣化度(平均重合度)と紙繊維の分散色の相関図(マハラノビス・タグチ法による評価)

## 5 今後の展開

変圧器のコイルは電気絶縁油(以下絶縁油)に浸せきされており、絶縁油中には絶縁紙から剥離した紙繊維が浮遊している。本成果により、変圧器から少量の絶縁油を抜き取り、絶縁油中に含まれる紙繊維を採取し、屈折率を測定することによって、変圧器外部から絶縁紙の劣化度を診断できる目途を得た。

現在、手法の現場適用に向けて、判定手法の精度向上ならびに現場での実施方法について検討を進めている。



執筆者 / 吉田昌展