

鉄道の運用環境を考慮した変圧器余寿命評価

赤木 雅陽* 吉井 剣* 今村 英樹**

Life Time Estimation Method for the Feeding Transformers

Masataka AKAGI Tsurugi YOSHII Hideki IMAMURA

In order to prevent equipment damage and to extend equipment lifetime, the early detection of the deterioration and residual life assessment are necessary in feeding transformers. So, we constructed three types of the condition databases related to the feeding transformers. First, we researched load characteristics to evaluate the thermal deterioration. Second, we researched analytical data of the dissolved gas-in-oil to evaluate the damages of partial electric discharge. Third, we researched the amount of furfural to evaluate the deterioration characteristics of the insulating paper for feeding transformers. Based on the results of the above-mentioned researches, we developed a life time estimation method for the feeding transformers. The validity of the estimation method is verified by a comparison between the experimental values and the values estimated.

キーワード：変電所機器，絶縁紙，温度上昇，平均重合度，油中ガス，フルフラール量

1. はじめに

電気鉄道用変電所における変電機器の劣化状況は、主に定期検査で把握している。例えば変圧器の大半を占める油入変圧器では、運用に伴い温度が上昇することから種々の劣化生成物（ガス成分，フルフラール等）が絶縁紙や絶縁油から分解されてくるほか，故障に伴う過熱や放電に伴い種々の劣化生成物が生じる^{1) 2)}。そこで，絶縁油に溶解した劣化生成物を定期的に分析している。また，老朽化が進んだ変圧器については，検査データの管理値や各事業者で定める指針に基づきオーバーホールや取り替えを行っている。

ところで，製造メーカーや業界団体が策定する変圧器の取り替え推奨時期³⁾は概ね25～30年程度である。しかし，電気鉄道用変電所は通常夜間の限られた時間しか設備を停止できないことから，設備更新工事に多額の費用を要することや施工スケジュール確保の都合上更新が遅れ気味であることが報告されている⁴⁾。上記に伴い，経年30年以上の変圧器について更新工事により取替すべきか，メンテナンスの拡充により寿命を延伸すべきかを検討する手法が求められている。

変圧器の絶縁油中成分に基づく劣化分析は，主に電力会社設備を対象として1980年代以降に技術検討が進められ，例えば電気協同研究会が1999年に取りまとめた文献⁵⁾に詳細な検討事例が報告されている。しかし，電気鉄道用変圧器の寿命診断を趣旨とした報告は少なく⁶⁾，

* 電力技術研究部 き電研究室

** 電力技術研究部 き電研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）

変圧器停止時または取替時にしか実施することができない巻線絶縁紙の調査事例はほとんどないのが現状である。加えて，1日24時間における負荷変動（日負荷特性の変化）が比較的少ない電力会社設備と異なり，電気鉄道ではラッシュ時と閑散時での負荷変動が大きいことから，電力会社設備用劣化推定特性の電気鉄道への適用可否について検証が求められている。

このような状況を踏まえ筆者らは，電気鉄道用変圧器を対象とし，まず鉄道事業者の協力を仰ぎ油温データや油中ガス分析データを始めとして種々の運用環境データを収集した。次に，収集データを元にデータベースを作成し，例えば変圧器経年（使用年数）と油中ガス要注意判定検体数との相関関係などを求め，余寿命評価への適用可否について検討した。加えて，解体工事中の変圧器から巻線絶縁紙を採取分析し，フルフラール量から推定した絶縁紙劣化度と実測値（真値）を比較することで，鉄道会社の変圧器運用環境に適した絶縁紙劣化推定特性や余寿命評価手法を検証した。本稿ではその内容を紹介する。

2. 電気鉄道用変圧器の運用環境調査

2.1 変圧器の劣化モデルと検査周期，耐用年数

変圧器は主に鉄心，銅製の巻線，巻線に絶縁性能を付与する絶縁物（絶縁紙，絶縁油，樹脂，ガスなどの絶縁媒体）から構成されている。このうち，変圧器の大半を占める油入変圧器では，前述のように運用に伴い劣化生成物が生じることから，絶縁油中の生成物を分析することで変圧器の健全度を管理している。図1に代表的な変

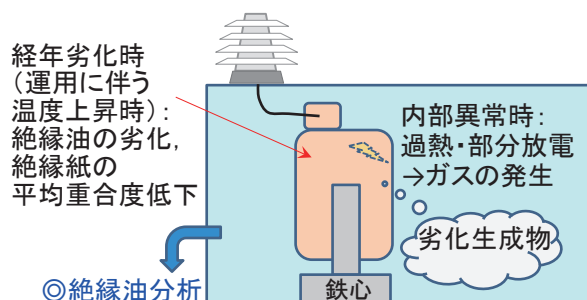


図1 油入変圧器の劣化モデル¹⁾

圧器の劣化モデルを示す。

各鉄道事業者では、社内規程等により検査の方法と周期を定めている。しかし油中ガス分析は旧国鉄時代の保全マニュアルには明文化されておらず、その運用は各事業者の判断に任されている。そこで鉄道事業者に協力を仰ぎ、油中ガス分析の検査周期を確認した。電力会社の検査周期も含めた調査結果を表1に示す。

油中ガス分析は相応の費用を要することなどから、表1に示す様に鉄道会社の各保守区の事情に合わせた分析周期にて運用されている。また、一部の事業者では、変圧器の標準耐用年数を30年と定めた上で、経年24年を目途に油中フルフラール量分析を実施していた。一方電力会社においても、分析周期は設備の重要度等を考慮し様々に設定されていた⁷⁾。

表1 油中ガス分析の検査周期例⁷⁾

鉄道会社保守区	保守区 A		保守区 B・C	
実施基準（検査マニュアル）に記載の周期	必要の都度		5年	
実際に適用中の周期	経年10年以上の変圧器を中心に数年毎		5年毎が基本も、高経年品は1年毎	
電力会社	電力会社①		電力会社②	
適用箇所	154kV以上の主要系統	それ以下の系統	送電用	配電用
設定周期（文献 ⁷⁾ ）	1年	3年	1年	3年

2.2 運用環境データベースの作成

変圧器の余寿命評価に当たっては、種々のデータから余寿命評価に適した情報を抽出する必要がある。ところで、変圧器は製造メーカー毎の差異が少なく、比較的同種構造の設備が同種の検査方法でまとめて運用されている。また、変圧器の絶縁物の劣化は運用環境（温度、負荷の状況）等にも影響を受けるが、こちらも負荷管理の一貫として巡回等の際に定期的に標本が収集されることが一般的であり、統計処理し易い形態で収集可能であった。そこで、本研究では鉄道事業者の協力を仰ぎ、油温データや油中ガス分析データを始めとして種々の運用環境データを収集した。

負荷記録装置の有無や検査周期の都合などの制約から、全ての運用環境データを具備した変圧器は少なかった。そこで、データ収集目的（温度上昇による劣化・放電による劣化・絶縁紙の健全度）毎に3種類のデータベースを構築することとした。本研究で構築したデータベースの一覧を表2に示す。

表2 変圧器運用環境データベースのデータ数（単位：台）

設備群	油温・負荷率データ	油中ガス分析データ	フルフラール量データ
整流器用変圧器	239	182	42
高配用変圧器	73	60	21
き電用変圧器等	13	20	6
所内用変圧器	—	6	—
油入整流器	—	16	—
合計（設備数量）	325	284	69
調査の趣旨	温度上昇による劣化把握	放電による劣化把握	絶縁紙の健全度把握

2.3 油温・負荷率に着目した劣化傾向把握

2.3.1 各項目間の相関関係

一般に変圧器は負荷率（平均負荷/最大負荷）や需要率（最大負荷/定格容量）が高い程油温が上昇し絶縁物の劣化が進行するが、鉄道負荷は時間変動が大きいため必ずしもそのような関係とならない可能性が考えられた。そこで調査対象のうち台数の多い整流器用変圧器と高配用変圧器について、設備容量や負荷率、需要率と夏期最高油温に関する各データ間の相関関係を把握するべく相関係数を導出した。また統計分析手法であるt検定⁸⁾を用いて有意水準5%にて「各データ間に相関がない」という帰無仮説を検定した。今回用いた式を(1)式、(2)式に示す。

$$C_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad (1)$$

$$T = \sqrt{\frac{(n-2)C_{xy}^2}{1-C_{xy}^2}} \quad (2)$$

ここで C_{xy} : 相関係数, s_{xy} : 油温等各データ間の共分散, s_x, s_y : 各データの分散, T : 検定統計量, n : 標本数とする。なお、相関係数は1に近づくほど正の相関があることを示し、検定統計量 T が判定値（例えば $n=239$, 有意水準5%なら1.970）より大きい場合は「相関がない」という帰無仮説が棄却される。

表3に整流器用変圧器、表4に高配用変圧器における各項目間の相関関係を検定した結果を示す。また図2に散布図に表した各項目間の特性例を示す。表より、各項目間には基本的に相関関係はほとんど認められず、帰無仮説が棄却できた需要率-最高油温特性についても相関係数の最高値は0.331と強い相関関係ではなかった。ま

た、散布図からも各項目間に明瞭な関係を示す兆候は特に認められずばらつきの大い特性となっていた。これらの原因については次項で油温の日負荷特性の観点から考察を加える。

なお、整流器用変圧器の需要率の平均は41%、負荷率の平均は31%、定格容量の平均は4250kVA、最高温度の平均は47℃であり、高配用変圧器の需要率の平均は38%、負荷率の平均は31%、定格容量の平均は2530kVA、最高温度の平均は50℃であった。

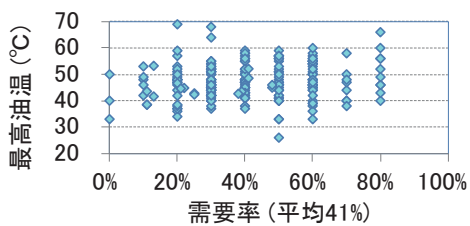
一方、調査対象の変圧器における夏期最高油温の分布を図3に示す。多くの変圧器の最高油温は60℃以下であり、JEC2200規格で定める油温の上昇限度値（例えば周囲温度25℃における限度：55K+25℃=80℃）に対して十分余裕があった。整流器用変圧器に比べると高配用変圧器の方がやや温度が高い傾向にあった。

表3 項目間の相関関係（整流器用変圧器）

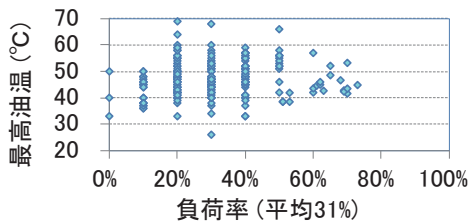
項目	相関係数	T 値	検定結果（有意水準5%・標本数 n=239・判定値 1.970）
油温 - 需要率特性	0.142	2.213	相関有り（帰無仮説を棄却できる）
油温 - 負荷率特性	0.124	1.920	棄却できない
油温 - 定格容量特性	0.052	0.798	棄却できない

表4 項目間の相関関係（高配用変圧器）

項目	相関係数	T 値	検定結果（有意水準5%・標本数 n=73・判定値 1.994）
油温 - 需要率特性	0.331	2.957	相関有り（帰無仮説を棄却できる）
油温 - 負荷率特性	-0.028	0.236	棄却できない
油温 - 定格容量特性	-0.070	0.588	棄却できない

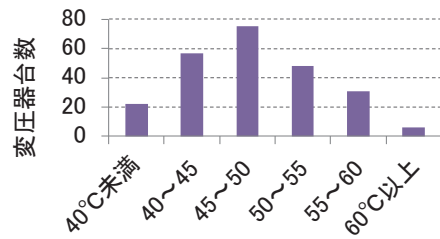


(a) 需要率－夏期最高油温特性

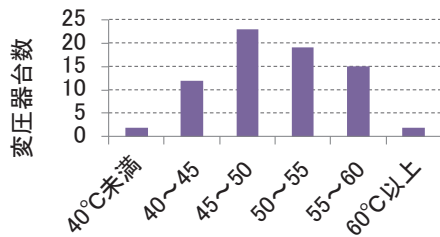


(b) 負荷率－夏期最高油温特性

図2 散布図による整流器用変圧器の特性検討



(a) 整流器用変圧器



(b) 高配用変圧器

図3 夏期最高油温の分布

2.3.2 油温の日負荷特性に関する考察

前述のように最高油温と負荷率などには明確な相関関係が見られなかった。そこで、1時間毎に油温を記録できる変電所のデータを用いて各変圧器の日負荷特性を検討した。調査対象としては同じ線区（調査対象線区は10両編成の電車が昼でも10分に1本程度走る都市近郊線区である）の整流器用変圧器と高配用変圧器を選定した。調査対象日は2015年8月のある水曜日（天候：晴れ、外気温の最高値：31℃）である。

図4に特性データ例を示す。整流器用変圧器については、夜間に運転停止となることから早朝にかけて温度が低下している。その後ラッシュ時以降に徐々に温度が上がり始め、午後から夕方にかけて温度が最高になっていることがわかる。同じ線区の他の12台の変圧器についても午後から深夜にかけて最高油温となっていた。一方、高配用変圧器では、午後から深夜にかけて最高油温になる場合と、時間帯を問わずほぼ同じ温度の場合があった。

上記のことから多くの整流器用変圧器では負荷の大きい朝のラッシュ時に油温が最高とならないために最高油温と負荷率などの間に明瞭な相関関係が見られなかったことが考えられる。高配用変圧器で油温と需要率の相関係数が他よりやや高かったのは、整流器用変圧器と異な

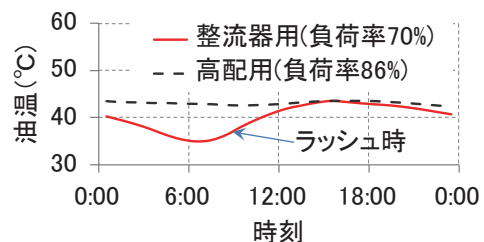


図4 夏期における変圧器油温の日負荷特性例

特集：電力技術

り高配用変圧器は夜間にあまり停止することがなく、照明などの負荷損失、及び変圧器鉄心での無負荷損失等により変圧器の温度が維持されたためと思われる。

2.4 変圧器油中ガスデータの検討

2章で述べたように、変圧器内の絶縁物が劣化すると種々のガス成分が生成し油中に溶解することから分析時点での変圧器内部の健全度を把握することができる。そこで表2で収集した種々の油中ガスデータについて変圧器の経年に着目して分析し、変圧器内部絶縁物の余寿命評価への適用可否について検討した。一部の変圧器では複数回検査を行っていることを考慮し、検査年の異なるデータは別データとして取りまとめ、参考として油入整流器も調査対象とした。収集したデータを設備群毎にまとめた結果を表5に、文献5)が推奨する注意基準値の内容を表6に、経年毎の注意判定の割合を取りまとめた結果を図5にそれぞれ示す。

調査の結果、全検体数のうち約20%の検体で1つ以上の検出ガス項目が注意基準値を上回っていた。特に高配用変圧器において比較的経年の短い時点(経年10～15年目)から注意判定が現れるのが特徴的である。文献5)では3種類のガス成分(エタン・エチレン・アセチレン)の割合から故障様相を判定する手法を提案しているが、その3種類が同時に検出された検体は2検体しか無く、多くは個別ないし2種類のガスが検出される傾向にあった。

次に、可燃性ガス総量(表6中の6要素の合計)の蓄積傾向に基づく経年劣化把握手法の妥当性を検証すべく、両者の関係を確認した。図6に評価結果を示すが、経年により可燃性ガス総量が急激に増加するような特性とはなっておらず、経年と可燃性ガス量との相関係数も0.259とさほど大きな値ではなかった。これらのことから、油中ガスデータは検体分析時点での健全度確認には適しているものの、余寿命評価の指標に適用するのは難しいと考えられる。

次に、可燃性ガス総量(表6中の6要素の合計)の蓄積傾向に基づく経年劣化把握手法の妥当性を検証すべく、両者の関係を確認した。図6に評価結果を示すが、経年により可燃性ガス総量が急激に増加するような特性とはなっておらず、経年と可燃性ガス量との相関係数も0.259とさほど大きな値ではなかった。これらのことから、油中ガスデータは検体分析時点での健全度確認には適しているものの、余寿命評価の指標に適用するのは難しいと考えられる。

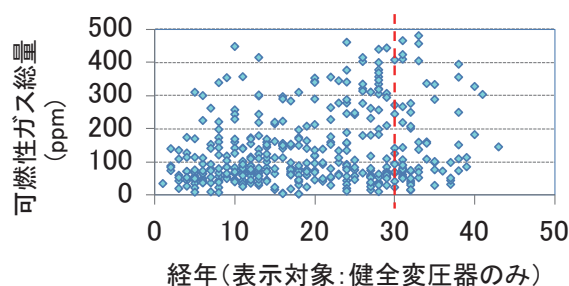


図6 経年と可燃性ガス総量の関係

表5 油中ガスデータベース

設備群	変圧器の調査台数(箇所数)	油中ガスの検体数	注意判定(検体数)	各設備群に対する注意判定検体数の割合	各設備群の平均経年(検体数基準)
油入整流器	16	31	10	32%	22.7年
整流器用変圧器	182	350	40	11%	18.5年
高配用変圧器	60	114	48	42%	17.6年
き電用変圧器等	20	33	6	18%	24.0年
所内用変圧器	6	6	1	17%	28.5年
合計	284台	534検体	105検体	-	18.3年

表6 油中ガスの注意基準値⁵⁾(単位 ppm)

ガスの名称	水素	メタン	エタン	エチレン	アセチレン	一酸化炭素	可燃性ガス総量
基準値	400	100	150	10	0.5	300	500

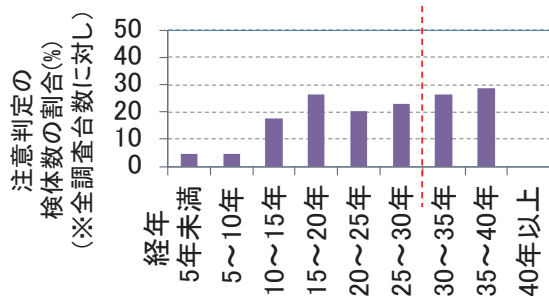


図5 経年と注意判定検体の割合

3. 変圧器の余寿命評価手法の検討

3.1 解体検査及び文献調査に基づく変圧器巻線絶縁紙の健全度評価

変圧器巻線絶縁紙の機械的強度に大きく影響する指標の一つに平均重合度(健全度)が挙げられる。巻線絶縁紙の機械強度が低下すると過電流が流れた際に重篤な事故になり得ること、運転中の変圧器から絶縁紙を直接採取することや交換することは高額な費用を要することから、絶縁紙の健全度が低下した変圧器は寿命と見なすことができる。絶縁紙の健全度は、絶縁紙(セルロース)からの分解物である油中フルフラール量を分析することにより推定するのが一般的である。

変圧器の各部材から生じるフルフラールの発生割合は負荷の状況により差異が見られる。例えば重負荷の変圧器における絶縁油の温度上昇は巻線上部付近が主であることから、巻線の上部側の健全度が劣化し易く、重負荷になるほどフルフラールの発生箇所は巻線上部に集中する傾向が強くなる⁵⁾。そこで新幹線変電所の交流き電用変圧器から撤去された絶縁紙を採取して健全度を実測すると共に、文献調査により電気鉄道用(直流き電用)⁶⁾及び電力会社設備用変圧器における絶縁紙の健全度調査事例⁹⁾を収集し、劣化傾向について比較検証した。図7に絶縁紙の採取方法を、表7に健全度初期値を100%と仮定した場合の調査結果を示す。

表7より、電力会社設備では巻線の上下で健全度に差があり、なおかつ上部で劣化が進行していることが分かる。一方、電気鉄道用変圧器ではその経年を考慮すると劣化の進行が遅いほか、巻線の上下で健全度の差が小さいことが特徴として挙げられる。これらにより、電気鉄道用変圧器における巻線絶縁紙の劣化は、中負荷～軽負荷の負荷状況を前提に、巻線の上下によらず満遍なく徐々に進行するというモデルが妥当と考えられる。



図7 巻線絶縁紙の採取方法

表7 巻線絶縁紙の健全度実測例

経年	絶縁紙健全度実測部位 (初期値の45%以下：NG)		用途
	変圧器上部	変圧器下部	
34	56%	65%	電力会社（※文献9）
37	50%	68%	電力会社（※文献9）
36	65%	64%	電気鉄道用-1
41	65%	66%	電気鉄道用-2
38	63%	65%	電気鉄道用（※文献6）

3.2 フルフラール量から導出する絶縁紙健全度と実測値との照合

解体検査で絶縁紙の健全度評価を行うことは高額な費用を要することから通常は実施困難である。そこで、運転中に安価に採取できる、絶縁油中のフルフラール量から絶縁紙の健全度を把握する必要があるが、実際には

種々の影響を適切に考慮しなければ正しい特性が得られない。そこで、表7の変圧器（電気鉄道用-1と-2）を例に取り、フルフラール量から導出する健全度と実測値を照合した。まず(3)式により絶縁紙単位質量当たりのフルフラール量を求める必要がある⁵⁾。

$$F = (f_1/d) \times O \times S/P_a \quad (3)$$

ここでF：絶縁紙単位質量当たりフルフラール量 (mg/g紙)、 f_1 ：油中フルフラール量の測定値すなわち絶縁油単位質量当たりのフルフラール量 (mg/g油)、O：絶縁油量 (L)、S=絶縁油の密度 (kg/L) = 0.89、 P_a ：フルフラール発生に寄与する絶縁紙量（※例えば油温が高い場合は変圧器上部巻線を中心とした箇所の重量）(kg)、d：油中へのフルフラール溶解割合である。

(3)式より、絶縁紙の健全度評価にはフルフラール発生に寄与する絶縁紙量を適切に設定する必要がある。鉄道事業者殿によれば調査対象変圧器の負荷率と需要率は20%以下と軽負荷であり、最高油温も限度値(80℃)に対して十分余裕があったことを考慮し、本検討では絶縁紙の使用重量にプレスボードを含む全絶縁紙重量を用い、溶解割合 $d=1$ (絶縁紙への吸着を考慮せず) とした。

一方、油中フルフラール量Fから絶縁紙の健全度PRを推定する特性についてはこれまで種々の特性が提案されている⁵⁾が、鉄道の運用環境に適した推定特性は未解明であった。今回はそれらの中から2つの特性を選定し、フルフラール量から導出する健全度と実測値とを照合した。図8に比較した特性を示す。

今回実測値と比較的よい一致が得られたのは、油温が低いことを考慮した条件を採用して計算した場合（推定手法A）であった。一方、油温が高い電力会社設備を想定した特性を用いた場合（推定手法B）、実測値と大きな乖離が見られた。上記を鑑み、実測値に対して同等か劣化が進行している側（余寿命が短い側）に推定値を判定している推定手法Aを適用することで、余寿命を長く誤判定するリスクは避けられるものとする。

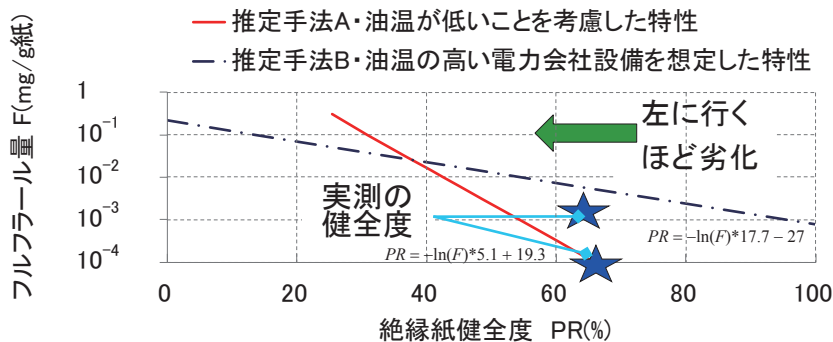


図8 絶縁紙健全度推定特性の評価結果

特集：電力技術

3.3 フルフラール量データを用いた巻線絶縁紙の健全度推定

本項では巻線絶縁紙の健全度と余寿命について考察する。変圧器運転期間（経年）に従いある一定の寿命低下率の元で絶縁紙（平均重合度）の劣化が進行すると仮定すると、一般に巻線絶縁紙の寿命は(4)式の回帰式⁵⁾及び(5)式の換算式にて表現できる。

$$PR/PR_0 = (1-r)^N \quad (4)$$

$$Y = \ln(PR_E/PR_0)/\ln(1-r) \quad (5)$$

ここで、 PR_0 ：新品の絶縁紙の健全度(100%)、 PR ：健全度の測定値ないし推定値、 PR_E ：寿命限度と考えられる健全度(45%)、 r ：絶縁紙の1年毎の寿命低下率、 N ：運転期間・経年(年)、 Y ：変圧器の推定寿命年(年)である。例えば表7の電気鉄道用-2の検体について推定手法Aと上式を適用すると、 $PR=65$ 、 $N=41$ 年から $1-r=0.9895$ と計算され、 $Y=76$ 年、余寿命は35年と求まる。

上式と推定手法Aの判定特性を用いて鉄道事業者殿より受領したフルフラール量検査データ(表2参照)を健全度推定値に変換した特性を図9に示す。なお、曲線は標準耐用年数である経年30年の時点で巻線絶縁紙が寿命レベルに達すると想定した場合の劣化進展特性を示す。図9より、基本的には経年が経過するにつれ徐々に劣化が進展しているが、経年30年以前以後を問わず寿命レベルを超えて劣化が進展したサンプルはなかった。また寿命レベルに対して健全度に余裕のある巻線絶縁紙は、油温が低く劣化の少ない運用環境にあると想定されるので、標準耐用年数である経年30年を超えて運用しても短期的な支障はないと考えられる。

なお、負荷率が高く巻線上部の油温が高い場合は、フルフラール生成に寄与する絶縁紙重量の割合を小さく修正しないと劣化が誤って小さく判定される可能性がある。このため、日頃の負荷管理が重要であるほか、変圧器の上部と下部の温度差についても留意すべきである。

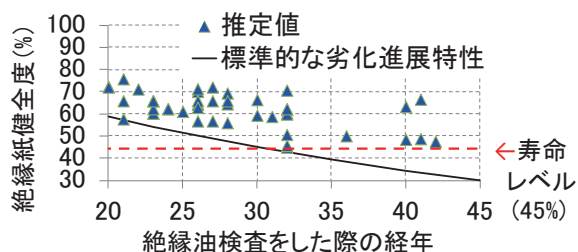


図9 絶縁紙健全度推定結果と経年の関係

4. まとめ

電気鉄道用変電所の機器である変圧器を対象として、鉄道会社の変圧器運用環境の実態を調査しデータベース

を構築するとともに、上記特性を考慮した絶縁紙劣化推定特性や余寿命評価手法を検証した。結果を以下に要約する。

- (1) 電気鉄道用変圧器の運用環境データベースを作成し、各指標の余寿命評価への適用可否について検討した。その結果、設備容量や負荷率、夏期最高油温などの項目については、各項目間に強い相関関係は認められず、それら単独で余寿命評価の指標に適用するのは難しいと考えられる。また、変圧器経年と油中ガス中の可燃性ガス量との間にはあまり相関が見られず、こちらも余寿命評価の指標に適用するのは難しいと考えられる。
- (2) 電気鉄道用変圧器から巻線絶縁紙を採取分析した結果を基に、絶縁紙の健全度を推定する特性の検証を行った。その結果、油温が低いことを考慮した特性を用いて絶縁紙健全度を推定する手法は、実測値(真値)と比較的よく一致していた。また、全ての調査対象において、推定値・実測値いずれも絶縁紙の推奨される寿命レベルを下回るものはなかった。

謝辞

本研究にご協力頂いた東日本旅客鉄道(株)、西日本旅客鉄道(株)、九州旅客鉄道(株)、(株)かんてんエンジニアリングの関係各位に謝意を表する。

文献

- 1) 電力設備の絶縁材料から見た劣化診断技術調査専門委員会：電力設備の絶縁材料と劣化診断技術，電気学会技術報告1245号，2012
- 2) 油入変圧器保守診断技術の最新動向調査専門委員会：油入変圧器保守診断技術の最新動向，電気学会技術報告1191号，2010
- 3) 一般社団法人日本電機工業会：受変電設備保守点検の要点(第3版)，pp.5，2007
- 4) 古閑隆章，吉永純，工藤希，森本大観：鉄道事業者における電鉄用変電設備余寿命管理に関する動向調査結果，平成21年電気学会全国大会，講演No.5-S18-5，2009
- 5) 電気協同研究会：油入変圧器の保守管理，第54巻第5号，1999
- 6) 森野行信，他：経年油入変圧器の余寿命診断事例，平成27年電気学会産業応用大会，講演No.5-9，2015
- 7) 電気学会変圧器予防保全調査専門委員会：変圧器の予防保全技術の現状とその動向，電気学会技術報告II部-344，1990
- 8) 薩摩順吉：確率・統計，岩波書店，pp.163，1990
- 9) 三橋真臣，他：変圧器各部の絶縁紙平均重合度の分布，平成11年電気学会全国大会，講演No.1290，1999