Evaluation of the Deterioration Degree of Insulators for Breakers Using Chemical Analysis and the Mahalanobis-Taguchi (MT) Method

Shinsuke Miki Member (Mitsubishi Electric Corporation)

Hiroshi Okazawa Non-member (Mitsubishi Electric Corporation)

Hiroshi Inujima Member (Graduate School of IPS, Waseda University)

Keywords: evaluation of deterioration degree, insulators, breakers, Mahalanobis-Taguchi method, chemical analysis

To prevent an unexpected power outage resulting from an accident, technology is needed for evaluating the deterioration degree of insulators with great accuracy and nondestructively on-site. Studies have been conducted mainly on electrical evaluation methods such as partial electric discharge and megohmmeters. However, to date it has been possible to evaluate insulator abnormalities by these methods only, and it cannot be said that they are sufficiently reliable. This paper describes our novel evaluation technique of the deterioration degree of insulators for breakers, which uses a chemical analysis and the MT method to improve the evaluation accuracy and the range of the deterioration degree that can be evaluated.

New insulators for breakers, as well as those already used commercially were sampled. In addition to the chemical analyses of ion concentration, color difference, gloss, and component analysis, surface resistivity was measured as reference data. Figure 1 shows the concept chart of the evaluation method that applies the MT method. The main objective of the MT method is to introduce a scale based on all input characteristics to measure the degree of abnormality. Mahalanobis distance is used to construct such a scale. The larger the sample's degree of abnormality becomes, the larger the Mahalanobis distance from the reference space (data group of new insulators). Figure 2 shows the results of a comparison between the Mahalanobis distance calculated from the chemical analysis results and the actual measurement results for surface resistivity. We confirmed that the deterioration degree of insulators could be evaluated by this technique because a linear relationship existed between the results judged by the MT method and the actual measurement results for surface resistivity.

Surface resistivity can be obtained with great accuracy (average $\pm$ one order of magnitude) by this technology. However, it is impossible to measure the surface resistivity between $10^9 \Omega$ and $10^{16} \Omega$ by electrical methods and the measured results for used insulators fluctuated by about five orders of magnitude when the humidity was not constant. From these results, it may be concluded that in comparison

Fig. 2. Relationship between the Mahalanobis distance and surface resistivity

Fig. 3. Mechanism of surface resistivity reduction

Fig. 1. Concept chart of evaluation of insulators using the MT method

to electrical methods, the evaluation accuracy has been improved by about three orders of magnitude and the range of the deterioration degree that could be evaluated was expanded by about seven orders of magnitude.

In addition, it was clarified that the main mechanism of surface resistivity reduction was due to NOx and SOx in the air. The mechanism due to NOx is as follows (Fig. 3).

- (1) Nitric acid is generated by the reaction of NOx with water.
- (2) Calcium nitrate is generated by the reaction of nitric acid with calcium carbonate (the insulator's filling material).
- (3) The insulator's surface resistivity is reduced since calcium nitrate is a deliquescent ion compound.

化学的分析とマハラノビス・タグチ (MT) 法の適用による 遮断器用絶縁物の劣化評価

正員 三木 伸介* 非会員 岡澤 周**
正員 犬島 浩***

Evaluation of the Deterioration Degree of Insulators for Breakers Using Chemical Analysis and the Mahalanobis-Taguchi (MT) Method

Shinsuke Miki*, Member, Hiroshi Okazawa**, Non-member, Hiroshi Inujima***, Member

We have developed a novel evaluation technique of the deterioration degree of insulators for breakers using a chemical analysis and the Mahalanobis-Taguchi (MT) method. It is possible to evaluate the deterioration degree with great accuracy and nondestructively on-site by this technique without the effect of humidity and external noise such as electromagnetic wave. The mechanism of insulator's surface resistivity reduction was clarified, and it was found that the deterioration degree of insulators could be evaluated by this technique because a linear relationship existed between the results judged by the MT method and the actual measurement results for surface resistivity. In comparison to electrical methods such as partial electric discharge and megohmmeters, the evaluation accuracy has been improved by three digits and the range of the deterioration degree that could be evaluated was expanded by seven digits.

キーワード：劣化評価，絶縁物，遮断器，マハラノビス・タグチ法，化学的分析

Keywords: evaluation of deterioration degree, insulators, breakers, Mahalanobis-Taguchi method, chemical analysis

1. はじめに

受配電設備は電気エネルギーを工場や建物へ供給する役目を負っている設備であり，信頼性，安定性を確保して稼動することが要求される。受配電設備の信頼性を支配する絶縁物が長期間にわたる使用により劣化し電氣的トラブルが発生すると，生産損失や設備補修など工場や建物に与える影響が大きいので，精度の良い絶縁物の評価技術が望まれている。

絶縁物の評価法としてこれまで絶縁抵抗測定や部分放電測定等の電氣的評価法が主に研究されてきたが^{(1)~(4)}，評価精度は十分と言えないのが現状である。電氣的評価法は湿度や電磁波ノイズの影響を強く受け，測定する季節，時間，

及び周囲環境により結果が大きく異なる。評価精度が不十分なのは，絶縁物の劣化メカニズムに基づいた評価を実施していないことが一因であると考えられる。また，これらの方法では電氣的な異常を検出するため，検出可能な範囲は約 $10^9 \Omega$ 以下の絶縁抵抗であり，異常検出の域をでない。電氣的トラブルを未然に防止するとともにメンテナンス周期を適正化し保守コストを削減するには，電氣的な異常が発生する以前から劣化度を定量的に精度良く評価することが重要である。

本論文では絶縁劣化評価精度の向上と評価可能な範囲の拡大を目的に，湿度や電磁波ノイズの影響を受けない化学的方法で遮断器用絶縁物を分析し，分析結果を品質工学の1手法であるMT法で評価した。化学的分析は，絶縁物付着イオン濃度，色彩，光沢等である。これらのデータをMT法で評価した結果と実験室で行った表面抵抗率測定結果は高い相関性があったことから，本手法により受配電設備の高精度な絶縁劣化評価が可能であることを確認した。さらに絶縁物の劣化メカニズムを明確化し，電氣的な異常が発生しない段階での劣化度の把握が可能になったので，その詳細を報告する。

2. 評価対象

受配電設備は多数の部品から構成されているが，本報告

* 三菱電機 (株) 先端技術総合研究所
〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1
Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation
8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 661-8661

** 三菱電機 (株) 受配電システム製作所
〒763-8516 丸亀市蓬萊町 8
Power Distribution System Center, Mitsubishi Electric Corporation
8, Horai-cho, Marugame 763-8516

*** 早稲田大学大学院 情報生産システム研究科
〒808-0135 北九州市若松区ひびきの 2-7
Graduate School of IPS, Waseda University
2-7, Hibikino, Wakamatsu-ku, Kita-Kyushu 808-0135

では遮断器用絶縁物を評価対象として取りあげた。絶縁物は定期点検等で交換が困難あるいは交換に費用が高む非修理系の部品であり、経年劣化により事故が発生すると影響が甚大であることから、受配電設備の寿命を決定する重要部品となっている。

絶縁物が劣化する要因として一般的に熱劣化、電圧劣化、機械的劣化、及び環境劣化が考えられる⁽¹⁾。受配電設備内部の温度は外気温 +20°C 程度であり変圧器等と比較して使用温度が低いいため、絶縁物の熱劣化は発生しにくい。また、常時運転しているため運転・停止の過渡電圧がほとんどないこと、製品出荷時に絶縁物のボイド等がないことを確認しているため放電が発生しないことから電圧劣化も絶縁物劣化の主因でないと考えられる。受配電設備は振動やヒートサイクルが小さいことから、絶縁物の機械的劣化も発生しにくい。これらを考慮し絶縁物の表面における環境劣化に着目して評価技術の開発を行った。

絶縁物表面の劣化度は使用環境によって大きく影響され、複数の要因によって劣化が進展すると予想される。表面劣化による絶縁破壊プロセスは一般的に、「(1)絶縁物表面の抵抗低下、(2)漏れ電流によるジュール熱で局所的な乾燥帯が形成、(3)乾燥帯への電圧集中によりシンチレーション放電が発生、(4)放電による有機物の炭化、炭化導電路の形成による絶縁破壊」と考えられている⁽²⁾。絶縁物の環境劣化を評価するには、抵抗低下の原因となる絶縁物表面の化学変化を明確にすることが必要である。

以上より本報では遮断器用絶縁物の表面における環境劣化に着目し、電氣的な異常が発生する以前 ($10^{16} \sim 10^9 \Omega$ 程度の抵抗) から劣化評価を行うために、絶縁物の表面を化学的方法により分析した。

3. 実験方法

〈3・1〉 サンプル 遮断器用絶縁物 ($41.0 \times 20.5 \times 31.5 \text{ cm}$) の新品と市場使用品をサンプルとした。絶縁物の成分を表 1 に示す。絶縁物はポリエステル樹脂、炭酸カルシウム、ガラス繊維等からなり、サンプル数は新品が 16 個 (ロットが異なる)、市場使用品が 14 個である。市場使用品の設置場所と区分を表 2 に示す。使用年数は 5~15 年である。また、他の絶縁物への本技術の展開可否を評価するために、木粉基材フェノール絶縁物 ($11.8 \times 16.1 \times 19.2 \text{ cm}$) についても評価を実施した。

〈3・2〉 評価項目と装置・測定条件 遮断器用絶縁物の新品と市場使用品について、色彩・光沢測定 (4 項目)、成

分分析 (6 項目)、イオン付着量分析 (9 項目) の合計 19 項目による化学的分析と外観観察、表面抵抗率測定を行った。装置と測定条件を表 3 に示す。色彩、光沢は絶縁物の表面を直接測定した。赤外分析は表面層をサンプリングし、透過法により分析した。イオン付着量分析は純水を含ませたろ紙を絶縁物表面に約 1 分間押し当て、付着イオンをろ紙に回収してイオンクロマトグラフで分析した。表面抵抗率は比較データとして取得した。絶縁物の表面に櫛形電極を蒸着し、恒温恒湿槽を用いて湿度 50%、温度 20°C の条件下で測定した。

表 2 遮断器用絶縁物の設置場所と区分

Table 2. Location and cubicle type of insulators for breakers.

Sample No.	Location	Cubicle type	Elapsed time (years)
1~16	-	-	-
17	Hino City, Tokyo	Indoor type	6
18	Hikawa-gun, Shimane	outdoor type	7
19	Chuo-ku, Tokyo	outdoor type	7
20	Matsuto City, Ishikawa	Indoor type	5
21	Adachi-ku, Tokyo	outdoor type	8
22	Akashi City, Hyogo	outdoor type	6
23	Tohaku-gun, Tottori	outdoor type	12
24	Saku City, Nagano	outdoor type	5
25	Nagoya City, Aichi	outdoor type	8
26	Nerima-ku, Tokyo	outdoor type	15
27	Osaka City, Osaka	outdoor type	8
28	Omiya City, Saitama	outdoor type	7
29	Konan-ku, Kanagawa	outdoor type	7
30	Ota-ku, Tokyo	outdoor type	6

*1~16: New samples

表 3 装置・測定条件

Table 3. Apparatus and measurement conditions.

Analysis item	apparatus	item and condition
Coloration	Chroma meter	Color mode: Lab
	MINOLTA CR321	
Gloss	Gloss meter	Insertion reflection angle: 60°, 85°
	MINOLTA GM268	
Infrared analysis	Infrared spectrophotometer	Resolution: 4cm^{-1} Integration times: 30
	JEOL JIR-5500	
Ion analysis	-Cation-	-Cation-
	Ion chromatograph	Column: YOKOGAWA
	-Cation-	Exelpak ICS-C15
	YOKOGAWA IC7000S	Flow velocity: 1.0 ml/min
Ion analysis	-anion-	-anion-
	DIONEX 2010i	Column: DIONEX
		IonpakCS3
		Flow velocity: 1.5 ml/min
Surface resistivity		Voltage: 100 V
	pA Metrer / DC	Humidity: 50%
	Voltage Source	Temperature: 20°C
	HEWLETT-PACKARD 4140B	Electrode: Ctenoid electrode, W687mm, L0.3mm

表 1 絶縁物の成分

Table 1. Composition of insulator.

Composition		Content (%)
Resin	Polyester resin	20~30
Filler	Calcium carbonate	55~75
Reinforcer	Glass fiber	10~25
Additive	Antioxidant etc.	3~5

図1 MT法による絶縁劣化評価の概念

Fig. 1. Concept chart of evaluation of insulators using the MT Method.

〈3・3〉 加速劣化試験 絶縁物劣化メカニズムを検証するために加速試験を行った。硝酸が入ったビーカーと絶縁物（5×5 cm）をデシケーター（30×30×22 cm）に入れ、硝酸曝露試験を実施した。試験条件は、硝酸濃度 8N、温度 25℃、試験時間 5～9 日間である。試験後の絶縁物を 50℃、1 時間で乾燥し、分析を実施した。

〈3・4〉 MT 法 MT法は様々な情報を総合して1つの物差しで判断する技術で、品質工学の1手法である。正常なサンプルのデータから評価の基準となるデータ群（基準空間）を作成して、基準空間からの乖離度で評価対象の劣化度を判断する（図1）。乖離度は従来から統計学の分野で使用されているマハラノビスの距離⁵⁾を用いて表し、距離が大きいほど劣化度が大きいと判断する。MT法は製品の外観検査、文字認識、官能検査、健康診断、故障診断等の分野で適用されている。本論文では、データ処理方法は割愛する（文献(5)～(7)参照）。

4. 結果と考察

〈4・1〉 絶縁物の評価結果

〈4・1・1〉 外観観察結果 遮断器用モールドフレーム（絶縁物）の外観観察結果を図2に示す。絶縁物の遮断器設置側と設置裏側を目視で観察した結果、遮断器設置裏側の全面に塵埃が付着していた。遮断器設置裏側と比較して遮断器設置側の方が表面抵抗率の低下が大きかったため、絶縁物の評価は遮断器設置側の導体支持部付近について実施した。

〈4・1・2〉 色彩・光沢測定結果 色彩測定結果を図3に、光沢測定結果を図4に示す。色彩はLab表示モードで表した。色彩Lは明度、色彩aのプラス方向は赤、マイナス方向は緑、色彩bのプラス方向は黄色、マイナス方向は青を示す。色彩、光沢の測定値は基準値との相対値で示した。新品と比較して市場使用品の色彩Lは低下しているサンプルがあった。色彩aは変化がなかったが、色彩bは増加する傾向があった。市場使用品の光沢は低下する傾向があった。

〈4・1・3〉 赤外分析による成分分析結果 赤外分析による成分分析結果を図5に示す。赤外スペクトルから各成分のピーク面積を求め、絶縁物の充填材である炭酸カルシ

(a) 遮断器設置側

(b) 遮断器設置裏側

図2 外観観察結果

Fig. 2. Observation results of a insulator.

図3 色彩 (L, a, b) 測定結果

Fig. 3. Coloration (L, a, b) measurement results.

ウムのピーク面積に対する比で各成分を表した。新品と比較して市場使用品の水、硫酸塩、硝酸塩、ケイ酸塩は増加する傾向があった。炭化水素、エステルはほとんど変わらなかった。硫酸塩、硝酸塩はカルシウム塩として存在し潮解性であるため、市場使用品では水の付着が見られ、表面抵抗率が低下すると考えられる。

〈4・1・4〉 イオン付着量分析結果 イオン付着量分析結果を図6、図7に示す。新品と比較して市場使用品の硝酸、硫酸、塩素の各陰イオン濃度とナトリウムイオン濃度

図 4 光沢測定結果

Fig. 4. Gloss measurement results.

図 6 陰イオン分析結果

Fig. 6. Anion measurement results.

図 5 赤外分析結果

Fig. 5. Infrared analysis results.

図 7 陽イオン分析結果

Fig. 7. Cation measurement results.

は増加する傾向があった。陰イオンの主成分は硝酸イオンと硫酸イオンであった。赤外分析と相関する結果であり、硝酸カルシウム、硫酸カルシウムがイオン化していると考えられる。陽イオンの主成分はカルシウムイオンであり他の陽イオンの50~100倍であった。これは絶縁物に充填材として含まれている炭酸カルシウムが原因だと考えられる。遮断器の設置場所、区分と絶縁物付着硝酸、硫酸イオン濃度との関係を表4に示す。硝酸イオン、硫酸イオン濃度とも東京、神奈川等の大都市の屋外キュービクルで高い傾向があった。中小都市と比較して大都市では大気中のNO_x、SO_xが多いことから、絶縁物表面の硝酸、硫酸イオン濃度にはNO_x、SO_xが影響していると考えられる。

〈4・1・5〉表面抵抗率測定結果 表面抵抗率の測定結果を図8に示す。表3に示した通り、ギャップが0.3mmの櫛形電極を絶縁物に蒸着し、温度20℃、湿度RH50%の条件下で表面抵抗率を測定した。赤外分析とイオン測定の結果から、新品と比較して市場使用品の表面抵抗率が約4~8桁低下しているのは前記の通り、イオン性物質が原因だと考えられる。

〈4・1・6〉化学的分析結果のばらつき 化学的分析の各項目ごとに求めた変動係数を、表面抵抗率実測値の変動係数とともに表5に示す。化学的分析、表面抵抗率とも新

表 4 遮断器の設置場所、区分とイオン付着量との関係

Table 4. Relationship between Location, cubicle type of breakers and ion concentration.

Nitric acid ion (mg/cm ²)	Sulfuric acid ion (mg/cm ²)	Location	Cubicle type
7.32x10 ⁻⁴	2.62x10 ⁻⁴	Hino City, Tokyo	Indoor type
1.82x10 ⁻³	1.93x10 ⁻³	Matsuto City, Ishikawa	Indoor type
1.93x10 ⁻³	2.78x10 ⁻³	Hikawa-gun, Shimane	outdoor type
3.24x10 ⁻³	3.80x10 ⁻³	Tohaku-gun, Tottori	outdoor type
5.03x10 ⁻³	4.48x10 ⁻³	Akeshi City, Hyogo	outdoor type
6.23x10 ⁻³	2.05x10 ⁻³	Saku City, Nagano	outdoor type
7.32x10 ⁻³	3.95x10 ⁻³	Osaka City, Osaka	outdoor type
7.48x10 ⁻³	1.91x10 ⁻²	Adachi-ku, Tokyo	outdoor type
8.85x10 ⁻³	1.65x10 ⁻²	Chuo-ku, Tokyo	outdoor type
1.61x10 ⁻²	2.46x10 ⁻²	Nagoya City, Aichi	outdoor type
2.28x10 ⁻²	1.85x10 ⁻²	Nerima-ku, Tokyo	outdoor type
2.48x10 ⁻²	1.42x10 ⁻²	Omiya City, Saitama	outdoor type
3.02x10 ⁻¹	1.78x10 ⁻²	Ota-ku, Tokyo	outdoor type
4.46x10 ⁻¹	2.76x10 ⁻²	Konan-ku, Kanagawa	outdoor type

品絶縁物のデータを対象とした。化学的分析の変動係数は0.11~0.70、表面抵抗率の変動係数は0.39であることから、化学的分析は表面抵抗率と同レベルのばらつきで分析可能であることを確認できた。

図 8 表面抵抗率測定結果

Fig. 8. Measurement results of surface resistivity.

表 5 化学的分析結果のばらつき

Table 5. Variation of chemical analysis results.

Analysis item	Coefficient of variation(a.u.)
Coloration	0.21
Gloss	0.11
Infrared analysis	0.43
Anion	0.53
Cation	0.70
Surface resistivity	0.39

〈4・2〉 表面抵抗率低下メカニズムの解明

〈4・2・1〉 表面抵抗率低下メカニズムの想定 評価結

果から絶縁物の市場使用品について以下のことが分かった。

- (1) 赤外分析とイオン測定の結果から、絶縁物付着イオンの主成分は硝酸イオン、硫酸イオン、カルシウムイオンであり、これらは潮解性の化合物である硝酸カルシウム、硫酸カルシウムとして存在していた。
- (2) 絶縁物の化学的分析は塵埃の付着が見られない遮断器設置側について実施したことから、硝酸カルシウム、硫酸カルシウムの付着は塵埃と関係しない。
- (3) 地方より都市部に設置していた遮断器用絶縁物の方が硝酸イオン濃度、硫酸イオン濃度が高く、大気中の NO_x 、 SO_x が影響していると考えられる。

これらの結果から、 NO_x 、 SO_x が表面抵抗率の低下に関係していると考えられる。 NO_x による絶縁物の表面抵抗率低下メカニズムは図 9 のように想定できる。大気中の NO_x (NO_2) が硝酸 (HNO_3) になり、絶縁物の充填材である炭酸カルシウム (CaCO_3) と反応して硝酸カルシウム ($\text{Ca(NO}_3)_2$) が生成する。硝酸カルシウムは潮解性のイオン性化合物であるので、吸湿した水に溶け込みイオン化して、絶縁物の表面抵抗率を低下させると考えられる。以上より表面抵抗率が低下するのは、大気中の NO_x 、 SO_x が原因で硝酸カルシウム、硫酸カルシウムが生成することが主要因だと考えられる。

〈4・2・2〉 想定したメカニズムの検証 大気中の NO_x

による絶縁物の表面抵抗率低下メカニズムを検証するために、デシケーター中で絶縁物を硝酸に曝露する加速試験を

図 9 表面抵抗率低下メカニズム

Fig. 9. Mechanism of surface resistivity reduction.

図 10 絶縁物加速試験品の表面抵抗率とイオン付着量測定結果

Fig. 10. Measurement results of surface resistivity and ion concentration of acceleration test samples.

行った。試験後の絶縁物の表面抵抗率と硝酸イオン濃度の測定結果を図 10 に示す。試験時間とともに表面抵抗率は低下し、硝酸イオン濃度は増加した。硝酸イオン濃度の増加の傾向と表面抵抗率の低下の傾向が一致していることから、硝酸イオンが表面抵抗率の低下に影響していることを確認することができた。試験後の絶縁物の赤外分析結果を新品、市場使用品の結果とともに図 11 に示す。試験後の絶縁物には新品に見られない硝酸カルシウムが存在していたことから、硝酸イオンは硝酸カルシウムとして存在することが明確になった。また、市場使用品も硝酸カルシウムが生成していることを確認できた。 SO_x の場合も同じ無機酸である硫酸が発生することから、同様の反応が起こる。以上から大気中の NO_x 、 SO_x により生成した硝酸カルシウム、硫酸カルシウムが主要因となり、絶縁物の表面抵抗率が低下するメカニズムは妥当であると考えられる。

図 11 絶縁物加速試験品の赤外分析結果

Fig.11. Infrared analysis results of acceleration test samples.

表 6 MT 法に適用した評価項目

Table 6. Evaluation item for the MT Method.

No.	Evaluation item	No.	Evaluation item	No.	Evaluation item
A	Coloration (L)	F	Silicate	K	Sulfuric acid ion
B	Coloration (b)	G	Fatty acid	L	Sodium ion
C	Gloss	H	Chloride ion	M	Ammonium ion
D	Hydrocarbon	I	Nitrous acid ion	N	Potassium ion
E	Ester	J	Nitric acid ion	O	Calcium ion

〈4・3〉 MT 法による絶縁劣化評価

〈4・3・1〉 評価に用いた項目

評価に用いた項目は以下とした。劣化メカニズムから硝酸イオン、硫酸イオン、及びカルシウムイオンは評価項目として必須である。色彩 a (色彩測定)、硝酸塩、硫酸塩、水 (以上 3 項目は赤外分析) の 4 項目は評価対象から除外し、上記 3 項目を含む 15 個の評価項目 (表 6) を用いた。色彩 a は新品、市場使用品とも測定結果にほとんど変化がないこと、硝酸塩、硫酸塩は水に溶けてイオン化すると硝酸イオン、硫酸イオンになるため、評価項目として取り挙げている硝酸イオン、硫酸イオンと等価であること、及び水は硝酸カルシウム等の吸湿により検出された測定値であり、湿度により測定値が異なることが理由である。

〈4・3・2〉 MT 法による絶縁劣化評価結果

上記 15 項目の評価結果から求めたマハラノビスの距離と表面抵抗率の実測値 (図 8 参照) との関係を図 12 に示す。マハラノビスの距離と表面抵抗率は良好な相関 (相関係数 0.96) を示すことから、化学的分析結果に MT 法を適用することにより絶縁劣化評価が可能であることを検証できた。絶縁抵抗測定や部分放電測定では検出可能な範囲は約 $10^9 \Omega$ 以下であり、今回の市場使用品のほとんどが異常なしとの判定しかできない。これらの方法は劣化度が分からないため評価法として不十分であるのに対して、本手法では全てのサンプルについて劣化度を評価可能である。本手法では $10^9 \sim 10^{16} \Omega$ の範囲の絶縁物に対しても評価可能であるので、電気的評価法と比較して評価可能な範囲を 7 桁程度拡大することができた。

図 12 マハラノビスの距離と表面抵抗率の関係

Fig.12. Relationship between the Mahalanobis distance and surface resistivity.

図 13 表面抵抗率の湿度依存性

Fig.13. Influence of humidity on surface resistivity.

市場使用品 No.30 について、表面抵抗率の湿度依存性を図 13 に示す。市場使用品 No.30 の表面抵抗率は湿度 RH50%では約 $10^9 \Omega$ だが、RH30%では約 $10^{11} \Omega$ 、RH90%では約 $10^6 \Omega$ となり、湿度条件を一定に決めて測定しなければ表面抵抗率は大きく変化する。測定する季節や時間により湿度が変化するため、電気的評価法では抵抗測定値や放電開始抵抗値は 5 桁程度バラツク可能性がある。図 12 に示す通り、開発した手法は平均値 ± 1 桁 (Ω) 程度のバラツキなので、電気的評価法と比較して精度が 3 桁程度改善すると考えられる。

以上から本手法の適用により絶縁物の劣化度を電気的な異常が発生する前に、定量的に精度良く評価可能であることが分かった。

〈4・3・3〉 MT 法適用の有効性評価 10 個の未知サンプルを用いて MT 法の有効性を評価した。未知サンプルは今回使用した 14 個の市場使用品と異なるサンプルである。今回使用した新品、市場使用品の合計 30 サンプルから硝酸イオン濃度と表面抵抗率の相関直線を求め、図 14(a) に示した。この図に未知サンプルの硝酸イオン濃度と表面抵抗率測定値をプロットした結果から、硝酸イオン濃度のみで評価すれば 2 桁程度の誤差が生じることが分かる。同様

(a) Deterioration diagnosis using nitric acid ion concentration

(b) Deterioration diagnosis using sulfuric acid ion concentration

(c) Deterioration diagnosis using MT method

図 14 MT 法適用の有効性評価結果

Fig. 14. Effectiveness evaluation results of the MT method application.

に硫酸イオン濃度と表面抵抗率測定値の関係(図 14(b))から表面抵抗率を推定すると 2 桁程度の誤差が生じる。

マハラノビスの距離と表面抵抗率測定値の関係を同様にプロットした結果を図 14(c) に示す。今回使用したサンプル、未知サンプルとも、相関直線を用いて求めた表面抵抗率の推定値は誤差が 1 桁以内であった。これより硝酸イオン濃度、硫酸イオン濃度のみで表面抵抗率を求める場合と比較して MT 法を用いると、約 1 桁評価精度が改善し、表面抵抗率の推定値は 95% の信頼度で平均値 ± 1 桁 (Ω) の間にあることが分かった。

〈4・3・4〉 他の絶縁物への展開 他の絶縁物への本技術の展開可否を評価するために、木粉基材フェノール絶縁物(図 15)についても同様に評価を実施した。ポリエステル絶縁物と同様にフェノール絶縁物の新品、使用品の合計 24 サンプルを化学的方法により分析し、分析結果を MT 法で評価した。マハラノビスの距離と表面抵抗率の実測値との関係を図 16 に示す。マハラノビスの距離と表面抵抗率は良好な相関(相関係数 0.98)を示すことから、材質、形

図 15 フェノール絶縁物

Fig. 15. Phenol insulator.

図 16 フェノール絶縁物に対するマハラノビスの距離と表面抵抗率の関係

Fig. 16. Relationship between the Mahalanobis distance and surface resistivity for phenol insulators.

状等が異なる絶縁物に対しても本技術が有効であることを確認できた⁽⁸⁾。

5. まとめ

本論文では絶縁劣化評価精度の向上と評価可能な範囲の拡大を目的に、化学的方法で遮断器用絶縁物を分析し、分析結果を MT 法で評価した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 絶縁物の化学的分析結果を MT 法で評価した結果と表面抵抗率の実測値は良好な相関を示したことから、本手法を適用することにより絶縁劣化評価が可能であることを明確にした。

(2) 絶縁抵抗測定等の電気的評価法と比較して、本手法では評価精度は約 3 桁改善し、評価可能な範囲は約 7 桁拡大することができた。本手法の適用により電気的な異常が発生する前に、定量的に精度良く評価することが可能となる。

(3) 絶縁物市場使用品の分析と加速試験から、今回評価した遮断器絶縁物の表面抵抗率低下メカニズムは以下であることを明確にした。大気中の NOx, SOx が原因で硝酸

カルシウム、硫酸カルシウムが生成する。これらは潮解性のイオン性化合物であるので、吸湿した水に溶解・イオン化して絶縁物の表面抵抗率を低下させる。

(4) 材質、形状等が異なる絶縁物に対しても本技術が有効であることを確認できた。

(平成18年12月28日受付, 平成19年3月30日再受付)

文 献

- (1) 河村達雄・田中祀捷: 電気設備の診断技術, 電気学会編, オーム社 (2003)
- (2) 設備診断更新技術調査専門委員会編: 「工場電気設備の診断・更新技術」, 電気学会技術報告, No.831 (2001)
- (3) 絶縁材料の劣化と機器・ケーブルの絶縁劣化判定調査専門委員会編: 「絶縁材料の劣化と機器・ケーブルの絶縁劣化判定の実態」, 電気学会技術報告, No.752 (2000)
- (4) T. Watanabe, I. Kasama, H. Ishii, and Y. Takagi: "Partial Discharge Detector for Substation Predictive Maintenance System", *T. IEE Japan*, Vol.116-B, No.1, pp.65-73 (1996-1) (in Japanese)
渡部剛士・笠間一郎・石井秀和・高木義之: 「受配電設備診断用部分放電検出装置」, 電学論 B, **116**, 1, pp.65-73 (1996-1)
- (5) M. Qunigoh: "An Introduction to Mahalanobis Distance for MTS Methods", *Quality Engineering*, Vol.9, No.1, pp.13-21 (2001-1) (in Japanese)
救仁郷誠: 「マハラノビスの距離 入門」, 品質工学, **9**, 1, pp.13-21 (2001-1)
- (6) 田口玄一・兼高達武: 「MT システムにおける技術開発」, 品質工学応用講座, 日本規格協会 (2002)
- (7) S. Miki and H. Okazawa: "Diagnosis of the Degradation of Insulating Material Using the Mahalanobis-Taguchi System Method", The Paper of Technical Meeting on General Industry, IEE Japan, GID-01-24, pp.21-26 (2001) (in Japanese)
三木伸介・岡澤 周: 「絶縁劣化診断へのマハラノビス・タグチシステム法の適用」, 電気学会一般産業研資, GID-01-24, pp.21-26 (2001)
- (8) S. Miki and H. Okazawa: "Degradation Diagnosis of the Insulators for the Power Distribution Equipments Using the Mahalanobis-Taguchi Method", The Paper of Joint Technical Meeting on Electrical Discharge, Switching and Protecting Engineering, IEE Japan, ED-05-121, SP-05-59, HV-05-63, pp.49-54 (2005) (in Japanese)

三木伸介・岡澤 周: 「MT 法による受配電機器絶縁物の劣化診断」, 電気学会放電・開閉保護・高電圧合同研資, ED-05-121, SP-05-59, HV-05-63, pp.49-54 (2005)

三 木 伸 介 (正員) 1993 年大阪府立大学大学院工学研究科修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。先端技術総合研究所において、主として有機材料や潤滑油の評価・診断に関する研究に従事。

岡 澤 周 (非会員) 1998 年姫路工業大学工学部機械工学科を卒業。同年三菱電機(株)入社。現在、三菱電機(株)受配電システム製作所受配計課に勤務し、主に予防保全技術開発、予防保全活動に従事。

犬 島 浩 (正員) 1975 年北海道大学工学部電子工学科卒。同年、三菱電機(株)入社。同社中央研究所、産業システム研究所に所属。プラント・機器の診断・監視・制御に関する研究に従事。2002 年 4 月から、早稲田大学大学院情報生産システム研究科・教授。工学博士。1991 年電気学会論文賞受賞。電気学会、日本原子力学会、計測自動制御学会、情報処理学会会員。