

スマート保安実現に向けた センシングによる配電盤内の環境評価と 絶縁物劣化診断技術

■折戸 由貴
Yuki Orito

近年では設備管理の負担軽減や設備保安力の向上のため、デジタル技術を活用した「スマート保安」の動きが加速している。東光高岳では配電盤メンテナンスの負担軽減を目指し、スマート保安の考え方による配電盤内絶縁物の劣化診断技術を開発している。今回は盤内の環境診断法を確立すべく環境センサによるモニタリング検証を実施し、その結果センサ出力と容積絶対湿度の関係から盤内環境を数値で把握できることが明らかになった。さらに、センサ出力から樹脂絶縁物の表面抵抗も推定可能であり、これによってセンサを通して絶縁物の絶縁低下を定量的に把握可能となった。

1 はじめに

近年では、労働人口の減少やそれに伴う技術継承力の低下などにより、設備管理者側の負担が増加する傾向にある。また、昨今の自然災害の激甚化を受けてBCP（事業継続計画）対策にも注目が集まり、レジリエンスの強化が喫緊の課題となっている。この流れを受け、設備管理者の負担軽減や設備保安力の向上のため、官民の協力によるIoTやAIなどのデジタル技術を活用した「スマート保安^{注1)}」の動きが加速している。この動きは変電所の監視だけでなく、油入変圧器や配電盤の状態診断についても適用され、昨今活発に研究開発が進められている。

配電盤内（以下、盤内）には真空遮断器（VCB）などの機器が収められており、VCBの絶縁フレームには主に不飽和ポリエステル系繊維強化プラスチックなどの樹脂絶縁材料が用いられている。絶縁材料には高い絶縁性能が求められるが、経年に伴って塵埃や海塩粒子などの汚れが樹脂表面に堆積していき、これに降雨時などの高温状態が重なることで樹脂表面の絶縁性能が低下してしまうことが一般に知られている。多くの配電盤は半密閉筐体であるため堆積した汚損物質は風雨で除去されにくく、特に塩害地域や工業地帯では汚れによる絶縁破壊のリスクが大きい⁽¹⁾。よって、予防保全の観点において清掃などのメンテナンスは不可欠であり、個々の設置条件に合わせたメンテナンスの実施には盤内の汚損状態の把握が重要である。しかし、盤内に付着した汚損量の把握やその成分の分析には、専門の分析装置や分析技術が必要であった。このような課題に対し、東光高岳ではスマート保安の考え方による配電盤メンテナンスの負担軽減を目指し、センシング技術による盤内絶縁物の劣化診断技術の開発を進めている。

今回は環境センサとして選定した大気腐食モニタリングセンサ（以下、ACM^{注2)}センサ）での実器環境および暴露試験場環境でのモニタリング検証を実施したので

その検証結果と、検証結果より導出した盤内環境診断法について報告する。

2 検証方法

2.1 実器環境における検証

選定したACMセンサで盤内の汚損を定量^{注3)}的に表せるか確認するため、お客さまが実際に配電盤を使用している環境で検証を実施した。表1に各検証先の塩害区分と検証期間を示す。

表1 検証先諸元

検証先	塩害区分	検証期間	付近の状況
A	岩礁隣接地域	10 か月	海、工業地帯
B	塩害地域	10 か月	住宅街
C	非塩害地域	10 か月	住宅街、線路沿い
D	非塩害地域	4 か月	工業地帯、盤内塵埃少
E	非塩害地域	3 か月	工業地帯、盤内塵埃多
F	非塩害地域	3 か月	工業地帯、盤内塵埃少
G	非塩害地域	3 か月	暴露試験場
H	岩礁隣接地域	継続中	暴露試験場

※区分は東光高岳基準による

検証では汚損検知用センサとしてJIS Z 2384:2019に規定されたACMセンサを使用し、専用ロガーにて10分ごとに出力を取得した。ACMセンサは図1に示すとおり、異種金属接触腐食反応^{注4)}を利用して大気環境の腐食性をモニタリング可能な積層型ガルバニック対^{注4)}を有しており、主に鉄塔や橋梁の腐食監視に利用されているセンサである。

実器環境での検証では需要家変電所の盤内にこの

<ACMセンサの概略図>

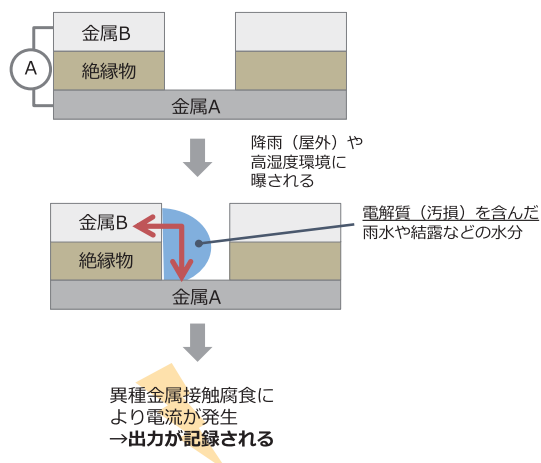


図1 ACM センサの反応原理

ACM センサと温湿度センサを設置し、一部の検証先へは絶縁物を模擬するため樹脂製の平板を併せて設置した。なお、使用した樹脂サンプルは遮断器に用いられているものと同質の素材である、不飽和ポリエステル系繊維強化プラスチックの円板（以下、FRP 板）を選定した。これらを設置から一定期間ののちに回収し、ACM センサ表面の付着物（以下、汚損）を回収してイオンクロマトグラフ^{注5)}による陰イオン分析を行った。樹脂サンプルに対しては同様に汚損分析を行ったほか、絶縁特性把握のため表面抵抗測定も行った。測定には同心円電極および超絶縁計を用い、印加電圧 100 V、室内高湿度条件（20～25℃、80%RH 以上）にて 1 分値を測定した。

2.2 暴露試験場での検証実器環境における検証

暴露試験場（表 1 参照）での検証では、図 2 に示す小型キャビネットの内部に ACM センサを設置してセンサ出力を取得した。キャビネット内には ACM センサおよび温湿度センサと FRP 板を設置し、ACM センサについては一定期間ののち回収して 2.1 節に示す分析を実施した。樹脂サンプルは設置から 1 か月ごとに回収し、2.1 節と同様の表面分析の実施、および表面抵抗を測定した。



図2 暴露試験場での試験のようす（試験場 H）

3 結果

図 3 に検証後の ACM センサ表面 1 cm² あたりの陰イオン性汚損付着量を、図 4 に試験場 G、H から 1 か月ごとに回収した樹脂サンプルの表面抵抗を示す。なお、試験場 H の汚損付着量については現在も検証継続中のため、比較用に検証 3 か月経過時点で回収した FRP 板表面の汚損付着量にて代替した。図 3 より検証期間 10 か月のグループでは検証先 A、B、C の順にセンサ表面の汚損付着量が多く、検証 3～4 か月のグループでは検証先 E の汚損付着量が特に多い結果となった。また、暴露試験場である試験場 G、H では検証先 E よりも汚損付着量が多い結果であった。

図 4 に示す表面抵抗については設置期間の経過に伴って表面抵抗が低下する FRP 板が多くなっていき、ばらつきも増大した。これは時間経過で FRP 板表面の汚損付着量が増加したことにより、表面抵抗が悪化したためと推測される。設置した FRP 板は設置後 3 か月で表面抵抗がおおよそ 10⁸Ω、5 か月で表面抵抗測定エラー（通電状態）になる試料が出始めた。エラーが出る手前のサンプルの表面抵抗は 10⁶Ω～10⁷Ωであったことから、不飽和ポリエステル系 FRP の場合は表面抵抗が

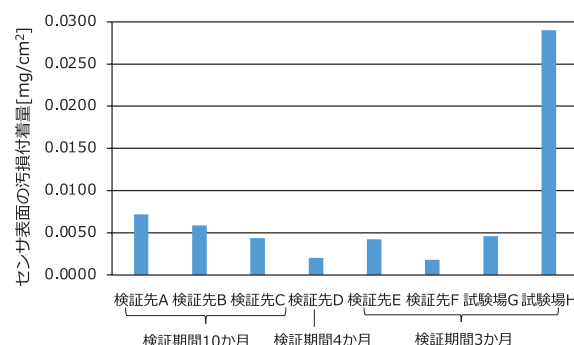


図3 各検証先より回収したセンサ表面の陰イオン性汚損付着量

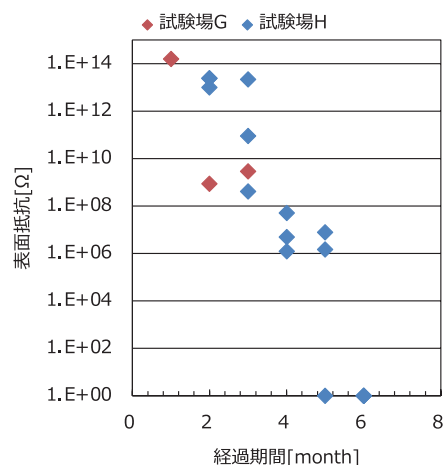


図4 暴露試験場より回収した FRP 板の表面抵抗

$10^6\Omega\sim 10^7\Omega$ まで低下するほど表面へ汚損が付着すると、以降は部分放電や絶縁破壊のおそれがあることがわかった。

図5に各検証先と暴露試験場で取得したACMセンサ出力と容積絶対湿度^{注6)}の関係を示す。また、図6は図5のうち、特徴的な結果を示した検証先を抜粋したものである。容積絶対湿度については、ACMセンサと合わせて設置していた温湿度センサの値より算出した。

検証先ごとのプロットの分布傾向を見ると、盤内の汚損が少なかった検証先DやFでは低出力域にプロットが集中し、一方で汚損の多かった検証先A、E、Gでは高出力域までプロットが広がった。また、両者の中間程度の汚損付着量であった検証先B、Cは中間程度の位置にとどまった。以上から、盤内に汚損の多い環境や塩害を受ける環境ではセンサ出力が増加するという想定とおおむね一致する結果が得られた。

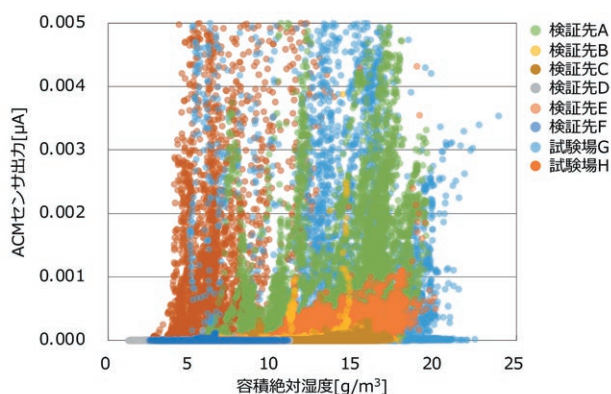


図5 ACMセンサ出力と容積絶対湿度の関係

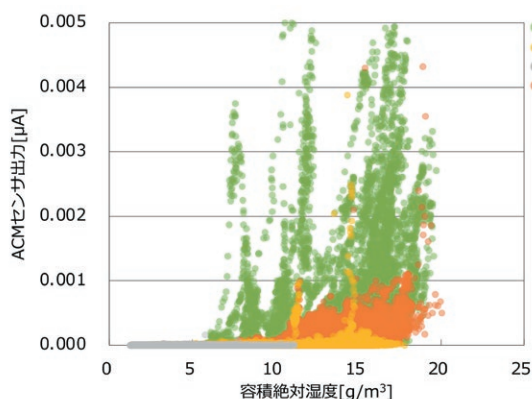


図6 ACMセンサ出力と容積絶対湿度の関係（抜粋）

4 盤内の環境診断法および絶縁物表面抵抗推定法の検討

4.1 盤内環境診断法の検討

ACMセンサは腐食の原理を利用しており、センサ表面の反応部に陰イオン成分など腐食因子となる汚損が

堆積した状態で高湿度環境に曝されると表面に電池が形成され、微小電流を出力する。これに対し、不飽和ポリエステル系FRPの表面抵抗は図4および既報⁽²⁾のとおり、表面への汚損付着と高湿度環境が重なることで低下するため、ACMセンサの出力原理と不飽和ポリエステル系FRPの表面抵抗低下の条件は近いと推測される。よって、今回得られたようにACMセンサの出力を参照することで汚損による絶縁性能低下のリスクを把握できると考えられる。なお、試験場Hでの検証では盤内の湿度が低いにも関わらずセンサ出力が高い結果が得られているため、センサ表面により多くの汚損が付着している場合は低湿度でもセンサ出力が高くなると推測している。

上記から盤内環境の診断法として、図5の関係に対してまず縦軸のセンサ出力と横軸の容積絶対湿度のそれぞれに閾値を設け、図7のように低リスク領域と高リスク領域をエリア1～4までレベル分けした。

四つのエリアのうち、ACMセンサ出力の高いエリア3、4は分布が集中すると絶縁破壊のリスクが高い、高リスクエリアとしている。次に、このレベル分けしたグラフ上のプロット分布状況を算出することで、環境リスクが判定できるかについて検討した。プロット全体における高リスクエリアのプロット分布を表したものが図8である。図8のうち高リスクエリアに着目すると、10か月検証のグループでは検証先Aが、3～4か月検証のグループでは検証先Eが高くなっていた。この傾向は、表1にまとめた各検証先の環境および図3に示す汚損

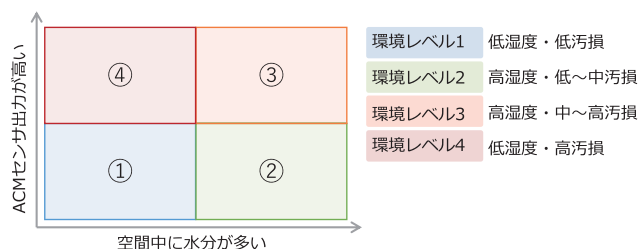


図7 エリア分けの考え方

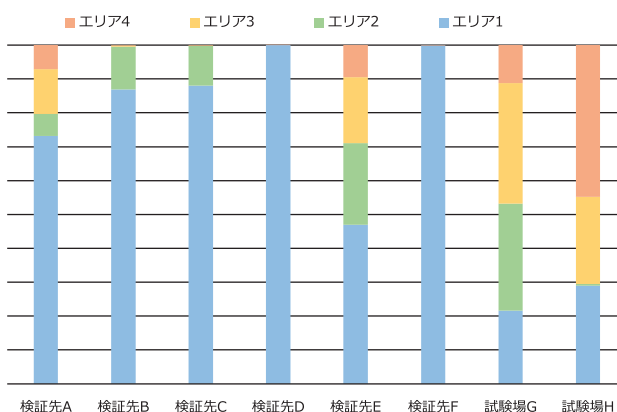


図8 検証先ごとのリスク評価結果

付着量とも相関性がみられた。よって、ACM センサ出力と容積絶対湿度との関係を見ることで、対象盤内の環境リスクを診断できる可能性が示唆された。

4.2 盤内絶縁物表面抵抗推定法の検討

ACM センサ出力と絶縁物表面の汚損付着量に相関性があることから、ACM センサ出力から間接的に絶縁物の表面抵抗を算出可能かについて検討した。

図9に実器検証終了後のACM センサ表面の汚損付着量から導出した、汚損堆積速度と高リスクエリアの関係を示す。なお、汚損堆積速度は汚れが少なく、ACM センサ出力も低い検証先Dを基準とした。

近似式の詳細は割愛するが、図9では汚損堆積速度と高リスクエリアの間に相関性があることが確認できた。これにこれまでの検証で取得した汚損付着量と表面抵抗の関係から得た近似式を用いることにより、ACM センサ設置近辺の不飽和ポリエステル系樹脂絶縁物の表面抵抗を推定できることがわかった。

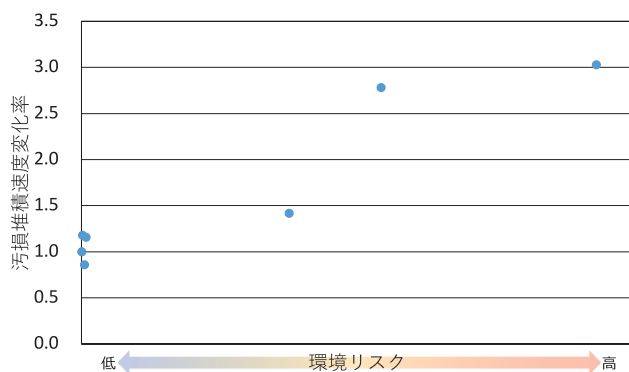


図9 汚損堆積速度と高リスクエリア比率の関係

5 まとめ

センシングによる配電盤内絶縁物の劣化診断技術開発のため、実器環境および屋外暴露試験場にてACM センサによるモニタリング検証を実施した。

検証結果より、取得したACM センサ出力と容積絶対湿度の関係から対象盤内の環境を数値で把握可能と判明した。また、ACM センサの出力と汚損の堆積速度、そして汚損付着量と表面抵抗の間には相関性があるため、ACM センサの出力を参照することで、設置近辺の不飽和ポリエステル系樹脂絶縁物の表面抵抗を推定できることもわかった。併せて、不飽和ポリエステル系樹脂絶縁物の絶縁性能的な寿命についても知見を得られた。これ

らを組み合わせることにより、センサを通して盤内の環境状態を確認しつつ、汚損付着による絶縁物の絶縁低下も定量的に把握できる可能性が示唆された。

配電盤内絶縁物の性能把握が容易になれば、個々の設置環境や機器の状態を鑑みて適切にメンテナンス時期や回数を決定することができ、設備保守にかかるお客さま負担の軽減に貢献できる。今後は当該技術を盛り込んだ配電盤メンテナンスのスマート化サービス構築に向け、絶縁物表面抵抗の推定精度向上に取り組んでいく。

■参考文献

- (1) 電気協同研究会編：「変電設備保安の高度化・効率化」、電気協同研究，第50巻2号，p.142（1994）
- (2) 折戸由貴，栗原二三夫：「配電盤スマートメンテナンス化へ向けた盤内絶縁物の絶縁性低下評価と劣化診断技術」，東光高岳技報，Vol.6，pp.4-7（2019）

■語句説明

- 注1) スマート保安：技術革新や少子高齢化に伴う労働人口の減少といった社会構造の変化に対応すべく，メンテナンスの省人化・効率化など保安力向上を目的として国と民間が協力して行っている取り組みのこと。
- 注2) ACM：Atmospheric Corrosion Monitorの略であり，ACM センサは大気環境の腐食性を評価するモニタリングセンサの一種である。本稿の検証に使用したACM センサはJIS Z 2384：2019に規定されたものである。
- 注3) 定量：対象物質の量を数値で求めることを示す。対象物質の種類を知ることは定性という。
- 注4) 異種金属接触腐食反応，積層型ガルバニック対：異なる種類の二つの金属が塩分などの電解質を含む液体，つまり電解液を通して接触した際に片方の金属の腐食が促進される現象を異種金属接触腐食，またはガルバニック腐食という。本稿の検証で使用したACM センサに用いられる積層型ガルバニック対は鉄鋼の上に絶縁層を挟んで銀が塗布された層状の構造をしており，この鉄と銀の対の間に水分を含んだ汚損が接触することでガルバニック腐食が発生し，同時に微小電流が発生する。
- 注5) イオンクロマトグラフ：イオンクロマトグラフィーという分析手法に用いる装置のこと。溶液中に含まれるイオンの定性分析および定量分析が可能であり，本稿では溶液中の陰イオンの定量分析に用いた。
- 注6) 容積絶対湿度：空間中に存在する水蒸気量を示す単位のこと。

折戸 由貴

戦略技術研究所 技術開発センター
材料技術グループ 所属