

最適なメンテナンスタイミングを提案する センシング技術による配電盤内の環境評価と 環境診断システムの開発

■折戸 由貴
Yuki Orito

東光高岳では受変電設備管理者の負担軽減に貢献すべく、スマート保安の考え方に則ったセンシング技術による配電盤内の環境診断技術の開発を進めている。現在は環境センサによる検証で得られた絶縁物の汚損に関する各種知見を活用して配電盤内環境の遠隔診断手法を構築しており、インターネット環境があれば端末を問わず手で状況を確認できるシステムを開発中である。本システムにて盤内環境の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メンテナンス周期を最適化することができ、設備保守にかかる負担軽減に貢献できる。今回は選定した環境センサによる検証と、開発中の配電盤内環境診断システムについて紹介する。

1 はじめに

受変電設備の保守において、近年では設備の高経年化や労働人口の減少、それに伴う技術継承力の低下などによって、設備管理者側の負担が大きくなっている。また、昨今では台風など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。こうした流れを受け、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、所内機器の状態診断についても適用され、当社でも配電盤内（以下、盤内）の環境診断技術や油入変圧器の状態診断技術について開発を進めている。

盤内機器に起こりうるリスクの一つとして、絶縁物表面への塵埃の堆積による絶縁性能低下がある。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（以下、FRP）などの樹脂絶縁材料が用いられている。こうした樹脂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（図1）。

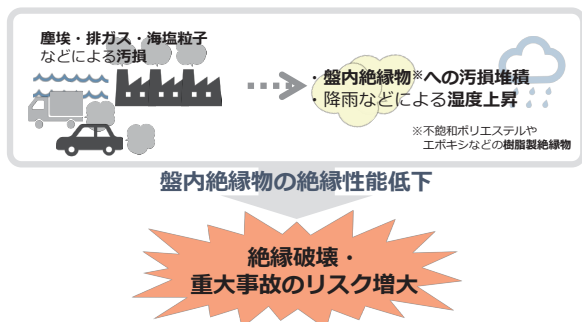


図1 絶縁物の汚れと絶縁破壊リスクのイメージ

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が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になる。

当社ではこのような課題に対し、図2に示すような、センシング技術による盤内の環境診断技術と、蓄積データの遠隔可視化技術を組み合わせた環境診断システムを構築することで、盤内の汚損状態の把握を支援し、スマート保安の考え方に基づく配電盤メンテナンスの負担軽減を目指している。

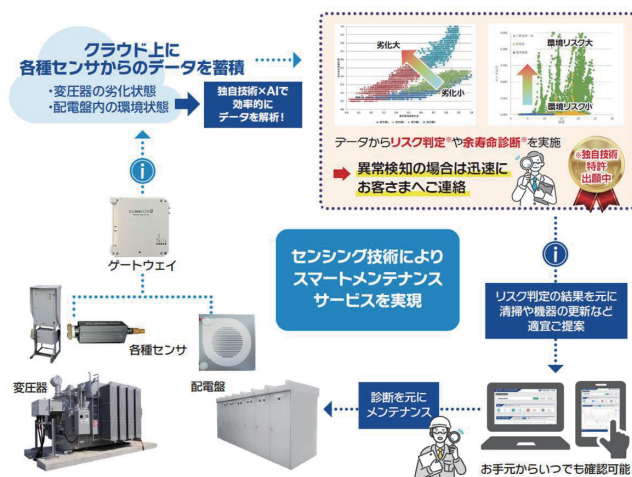


図2 センシング技術を活用した診断システムの構成

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（Atmospheric Corrosion Monitor）センサ（以下、ACM^{注2)}センサ）の特徴および各種環境でのモニタリング検証の結果と、現在開発中の盤内の環境診断システム（以下、本システム）について紹介する。

2 ACM センサの原理と特徴

次章にて紹介する検証では、汚損検知用センサとして JIS Z 2384:2019 に規定された ACM センサを採用した。ACM センサは積層型ガルバニック対と呼ばれる構造を有しており、図 3 のように異なる種類の金属が電解質を通して接触した際に腐食が進行する、異種金属接触腐食反応^{注3)}を利用して大気環境の腐食性をモニタリングするセンサである。用途としては、主に鉄塔や橋梁の腐食監視に利用されている。

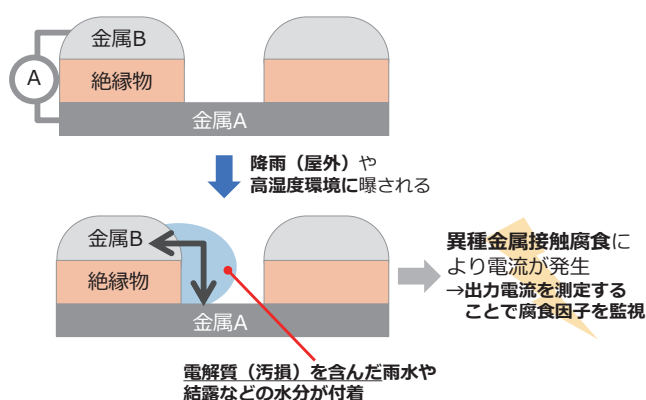


図 3 ACM センサの概略図

図 4 に ACM センサの特徴を示す。本センサの特徴は、腐食性をモニタリングするため、塩化物、硫化物、硝酸化合物などの陰イオンを含む塵埃・雰囲気や、湿気（水分）などの腐食を促進させる因子をセンサ単体で総合的に捉えることが可能になる点である。

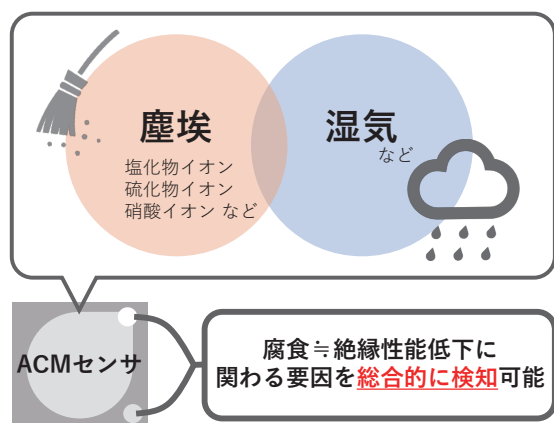


図 4 ACM センサの特徴

また、当社既報⁽²⁾により、これらの腐食因子は塵埃などの形で樹脂絶縁材料の一つである FRP 表面に付着すると、湿度が上昇した際に FRP の表面抵抗が低下することが判明している。

3 検証

3.1 実器環境における検証

選定した ACM センサにて盤内の汚損を検知可能を確認するため、実際に使用されている配電盤にて実施した検証内容について紹介する。表 1 に各検証先の塩害区分と検証期間を示す。

実器環境での検証では、需要家変電所の盤内にこの ACM センサと温湿度センサを設置した。これらを設置から一定期間経過後に回収し、ACM センサ表面の付着物（以下、汚損）についてイオンクロマトグラフ^{注4)}による陰イオン分析を行った。

表 1 検証先諸元

検証先	塩害区分	周辺状況等	検証期間
A	岩礁隣接地域	海、工業地帯	10 か月
B	塩害地域	住宅街	10 か月
C	非塩害地域	住宅街、線路沿い	10 か月
D	非塩害地域	工業地帯、盤内塵埃少	4 か月
E	非塩害地域	工業地帯、盤内塵埃多	3 か月
F	非塩害地域	工業地帯、盤内塵埃少	3 か月
G	非塩害地域	暴露試験場	3 か月
H	岩礁隣接地域	暴露試験場	6 か月

3.2 暴露試験場における検証

暴露試験場（表 1 内 G, H）での検証では、配電盤を模擬した小型キャビネットを設置した。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、一定期間経過後に回収して分析を実施した。FRP 板に対しては ACM センサと同様に汚損分析を行ったほか、絶縁特性把握のため、印加電圧 100 V、室内高湿度条件（20～25℃、80% RH 以上にて 1 時間静置）にて表面抵抗測定（1 分値）を行った。

4 結果と考察

図 5 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示す。なお、検証の都合により試験場 H の汚損付着量については検証 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 5 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

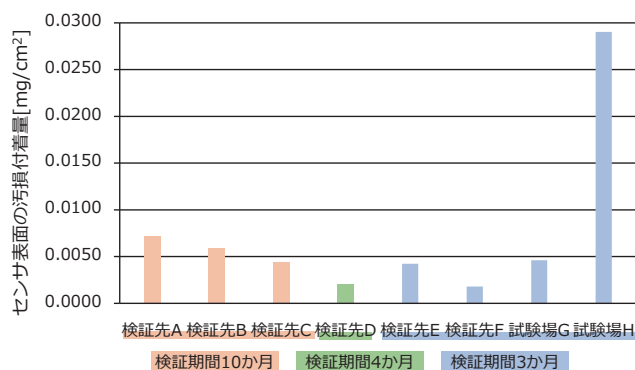


図5 各検証先より回収したセンサ表面の陰イオン性汚損付着量

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6に試験場 G, H から1か月毎に回収したFRP板の表面抵抗を示す。FRP板の表面抵抗は設置期間の経過に伴って次第に低下していき、ばらつきも増大した。この表面抵抗低下とばらつきの増大は、時間経過でFRP板表面の汚損付着量が増加したことによるものと推測する。

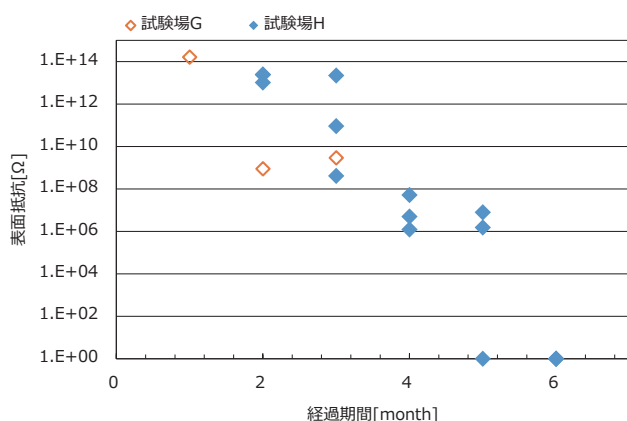


図6 暴露試験場より回収したFRP板の表面抵抗

また、回収したFRP板の中には設置後3か月で表面抵抗が約 $10^8 \Omega$ まで低下し、5か月で測定エラー（導通状態： 10Ω 未満）になる試料が確認された。エラー手前のサンプルの表面抵抗は $10^6 \sim 10^7 \Omega$ であったことから、不飽和ポリエステル系FRP板の場合は表面抵抗が $10^6 \sim 10^7 \Omega$ 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恐れがあることがわかった。一般に絶縁材料の表面抵抗は $10^7 \sim 10^{18} \Omega$ の値をとるとされる⁽³⁾ ため、この絶縁材料としての下限値は上記の結果とも合致している。

図7に取得したACMセンサ出力と容積絶対湿度^{注5)}の関係（抜粋）を示す。図中には今回の検証先6か所と暴露試験場のうち、図5に示す検証先で特徴的な岩礁隣接地域の検証先A、塩害地域の検証先B、非塩害地

域で塵埃が少なかった検証先D、非塩害地域で塵埃が多かった検証先Eをプロットしている。

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では低出力域にプロットが集中し、一方で汚損が多かった検証先A, E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。

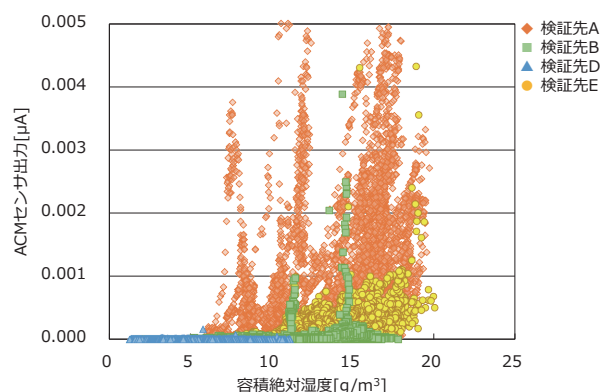


図7 ACMセンサ出力と容積絶対湿度の関係（抜粋）

ACMセンサは2章にて述べた通り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6および既報⁽³⁾の通り、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FRPの表面抵抗低下の条件は近いと推測される。よって、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。

5 ACMセンサを活用した盤内環境診断システム

5.1 盤内の環境リスク診断方法

盤内環境の診断法として、図7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8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。

4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

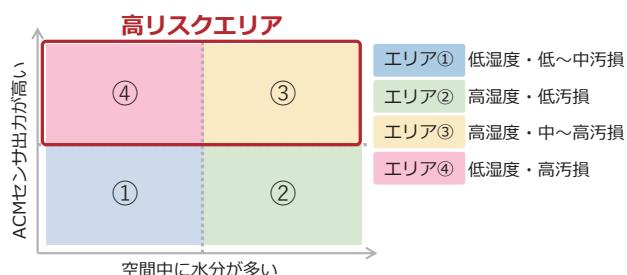


図8 リスク診断方法のエリア分けの考え方

リスクエリアのプロット分布を表したものが図9である。

図9のうち高リスクエリアに着目すると、A～Cの10か月検証のグループでは検証先Aが、D～Fの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5に示す汚損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参照することで、対象盤内の環境リスクの診断が可能であることが確認できた。

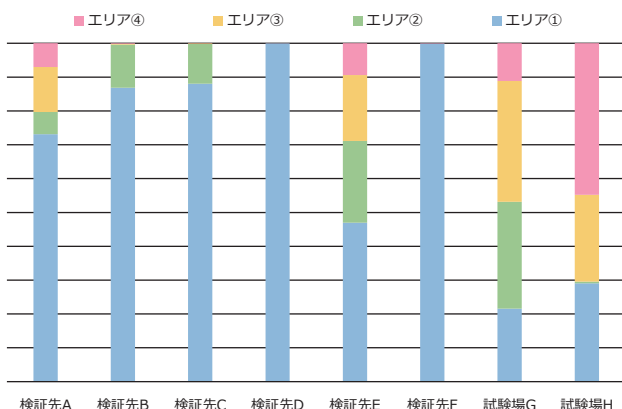


図9 検証先ごとのリスク評価結果

5.2 環境診断システム

本システムは、センサヘッドと計測器本体（図10）を盤内に設置し、モバイルネットワークを介して蓄積したセンサのデータをクラウドサーバ上で処理することで、盤内の環境を常時遠隔で見える化できる。

センサヘッドは磁石による取り付け方式を採用しており、DIN レール不要で盤内の壁へ直接取り付けられるため、設置場所の自由度が高くなっている。計測器のサンプリング周期は1分であり、昨今増加傾向にあるゲリラ豪雨（局所的な短時間豪雨）などの急な降雨とその後の湿度上昇によるリスク増加についてもレスポンス良く捉えることが可能である。

本システムはクラウドサーバに蓄積された各種情報をweb 画面で閲覧する形式のため、既存設備へのソフトウェアインストールは不要であり、インターネットブラウザがあればパソコン、スマートフォンなど端末を問わず遠隔で状況を確認できる。

図11に端末からの遠隔監視を可能とする開発中の



図10 センサヘッドおよび計測器外観（開発中）



図11 本システムのweb 画面イメージ

web 画面イメージを示す。端末からの遠隔監視画面では、盤内の温湿度と環境レベル（清掃推奨度として表示）、センサ測定値の経時変化といった盤内の汚損検知、環境リスクで重要となる情報をビジュアル的に分かりやすく表示している。

これらの情報をユーザーに活用いただくことで、盤内環境の把握だけでなく、汚損堆積による盤内機器トラブル予防のための効率的なメンテナンス計画の立案にも貢献できる。

6 おわりに

センシング技術を用いた盤内の環境診断システム開発にあたり、実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 センサ出力と湿度の関係から盤内の環境評価が可能であることを明らかとした。併せて、盤内で主要な絶縁材料である不飽和ポリエステル系 FRP 表面への汚損物付着と表面抵抗低下の関係を取得し、絶縁破壊リスクに関わる知見も得た。

現在は上記の診断技術を搭載した本システムを開発中であり、インターネット環境があれば端末を問わず盤内の状態を簡便に常時遠隔監視できる。

本システムにより盤内環境の把握が容易になることで、盤内設備の安心・安全な稼働の実現とメンテナンス時期の最適化ができ、設備保守にかかる負担の軽減に貢献できる。当社では今後も配電盤メンテナンスのスマート化サービス構築に向け、環境診断システムの開発を進めていく。

■参考文献

- (1) 電気協同研究会編：「電気協同研究第 50 巻 2 号変電設備保安の高度化・効率化」，電気協同研究会，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，No.6，pp.4-7（2019）
- (3) 電気学会直流機長寿命化技術調査専門委員会編：「経年使用直流機の長寿命化技術について」，電気学会直流機長寿命化技術調査専門委員会，p.37（2004）

■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) 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 2 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 4) 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（塩化物イオン，硝酸イオン，硫酸イオン）の定量分析に用いた。
- 注 5) 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