

# 路上機器の劣化診断技術に関する研究

平木 勲<sup>\*1</sup> 田中 邦明<sup>\*2</sup>

## 1. まえがき

近年、路上機器の電極部の絶縁劣化に起因する地絡事故が発生しているが、路上機器は、充電部が隠蔽化された構造のため目視点検が困難であり、内部点検のための停電も困難であることから、絶縁劣化状況の把握が十分にされていない。そのため、無停電で路上機器の劣化を精度良く診断できる手法が求められている。

そこで、今回、部分放電発生箇所が生じる「AE」(Acoustic Emission：微小振動、音波)を測定する「AE測定法」<sup>1)2)</sup>、部分放電に伴い発生するNO<sub>x</sub>を機器内に設置した吸着液で吸着し濃度を分析する「NO<sub>x</sub>測定法」が劣化診断手法として有効であることを確認したのでその概要を報告する。

## 2. 路上機器電極部と絶縁劣化メカニズム

### (1) 電極部の構造

気中多回路開閉器は、主に歩道上に設置され、高圧地中配電線路の負荷開閉に用いられる機器である(以下「路上気中開閉器」と呼ぶ)。電極部は、エポキシ樹脂でモールドされた可動部および固定部から構成されている。電極部の構造を第1図に示す。尚、高圧引込開閉器及び路上変圧器三極型の電極部も基本的に同様な構成となっている。

### (2) 絶縁劣化のメカニズム

路上気中開閉器の絶縁劣化は、機器内部への水分侵入が要因としてあげられ、扉のパッキング部からの雨水やケーブル引込口からのハンドホール内の湿気の侵入が主な経路と考えられる。以下に絶縁劣化メカニズム<sup>3)</sup>を示す。

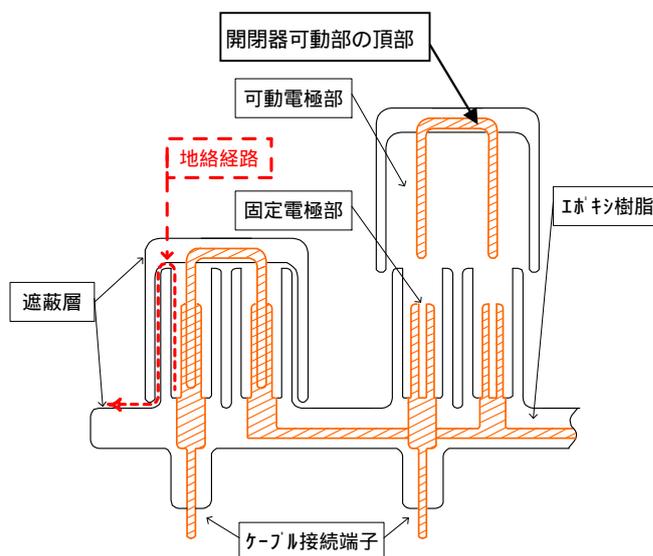
機器内部に侵入した水分は電極部に結露し、蓋用緩衝パッキンからヒートサイクルにより可動電極部と固定電極部の間に侵入する。

この水分が固定電極部エポキシ表面に結露すると、絶縁距離が等価的に短くなり、電界強度が局部的に高まって、エポキシ表面で部分放電が

発生する。

部分放電により、窒素分子と酸素分子が活性化されて大量のNO<sub>x</sub>が発生する。これらが水分と反応して硝酸となり、エポキシの表面劣化を加速し、耐トラッキング性が低下する。

水分の供給が絶たれると部分放電は消滅するが、再び水分が供給されると部分放電の発生が繰り返される。これより、局部的絶縁劣化が拡大、トラッキングが発生し第1図の経路で地絡にいたる。



第1図 路上気中開閉器電極部の構造

## 3. AE測定法による部分放電検出法

### (1) AE測定法

AE測定法とは、回転機の異常振動やコンクリート・岩盤のひずみ調査などの診断装置として従来から利用されている診断技術を改良したもので、部分放電により発生する振動を、AEセンサにより検出するものであり、他電力においては既に劣化診断にて成果を挙げているものである。

装置はAEセンサと各種増幅器で構成され、部分放電による振動をAEセンサが電気信号へ変換し、プリアンプにより微小AE信号をセンサ直近で増幅しSN比を向上させる。さらにメインアンプにてAE信号を信号処理に必要なレベルまで増

\*1 技術開発・環境保全センター 技術開発チーム

\*2 福井支店 営業部 配電サービス課

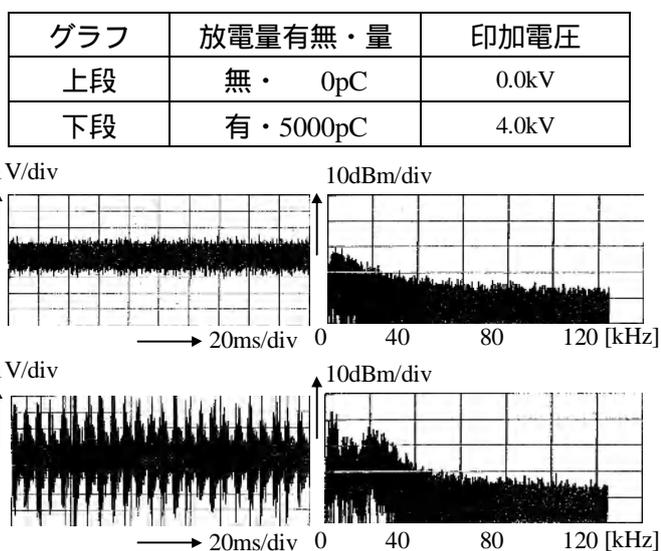
幅するとともに、不要な帯域の信号のフィルタリングやエンベロープ検波による信号情報の圧縮などを行い、オシロスコープ等で波形を観測する。

### (2) AE 測定法による部分放電検出試験

「モールド開閉器」での部分放電により発生する AE の特徴を明らかにするため、「模擬モールド開閉器」と「路上気中開閉器（撤去品）」を用いた部分放電検出試験を実施した。試験は、被試験モールド開閉器可動部の頂部に広域型 AE センサを接触媒質としてシリコングリスを介して接触させ、交流電圧を印加し、部分放電量を測定しながら AE 計測を行った。

### (3) 放電有無による AE 波形の変化

部分放電の有無による AE の変化を確認した。計測波形を第 2 図に示す。



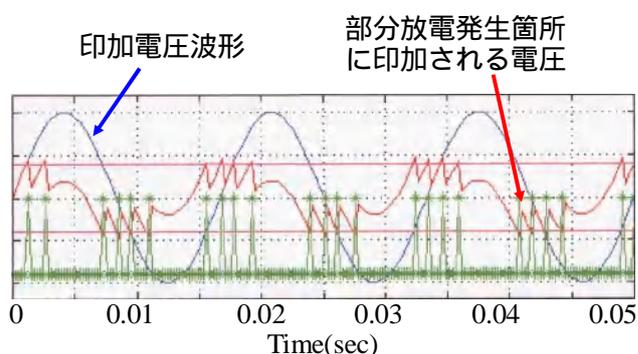
第 2 図 部分放電の有無による AE 波形

(左：AE-時間波形 右：FFT 波形)

時間波形から、部分放電が発生している場合の計測波形には、明瞭な周期性が認められ、その周期は約 8.3ms(120Hz)であった。また FFT 波形においては、部分放電発生時に 60kHz 以下の帯域の信号成分に増加が見られた。

第 3 図は、交流電圧を印加したときの、部分放電発生箇所に印加される電圧と部分放電発生タイミングの関係を示したものである。部分放電発生箇所に印加される電圧が部分放電発生電圧に達すると部分放電が発生する。部分放電が発生すると部分放電発生箇所に逆電界が形成され、部分放電発生箇所の電圧は瞬間的に低下する。同様に部分放電発生箇所に印加される電圧が負の場合にも、

部分放電発生電圧に達すると部分放電が発生する。この結果からも計測された波形が印加電圧の 2 倍の発生周波数を持っていれば、部分放電によるものと判断することができる。

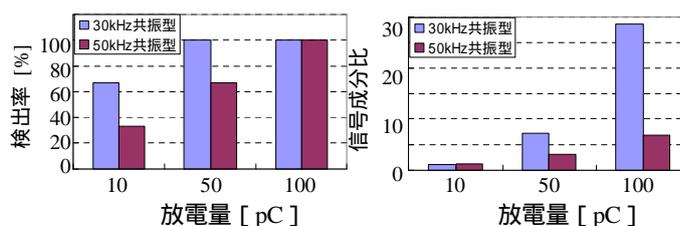


第 3 図 印加電圧と部分放電発生タイミング

### (4) AE センサの選定

第 3 図から部分放電発生時は 60kHz 以下の帯域の信号成分を持っているため、特に 60kHz 以下の帯域において感度の高いセンサを用いることにより、部分放電の検出感度の向上が期待できる。今回の試験では 50kHz 共振型センサと 30kHz 共振型センサを用いて検出感度の比較試験を実施した。試験では、部分放電を発生させているサンプルに対して 2 つの AE センサを用いて計測を行い、計測波形に対して包絡線検波処理を行った後に、周波数解析を行った。ここで(検出回数 / 試験回数)を「検出率」、(部分放電周波数値の最大値 / それ以外の成分の最大値)を「信号成分比」と記し、本装置での部分放電検出感度とした。放電量とは部分放電発生電気量のことでありこれが小さい値で検出できれば検出感度が高いということになる。試験条件及び試験結果を第 4 図に示す。

放電量	接触媒質	AE センサ
10, 50, 100 pC	シリコングリス	30kHz 共振型 50kHz 共振型



第 4 図 30kHz 共振型と 50kHz 共振型センサの比較

検出率、信号成分比ともに、30kHz 共振型 AE センサの方が優れている結果となり本測定では

30kHz 共振型 AE センサを使用することとした。

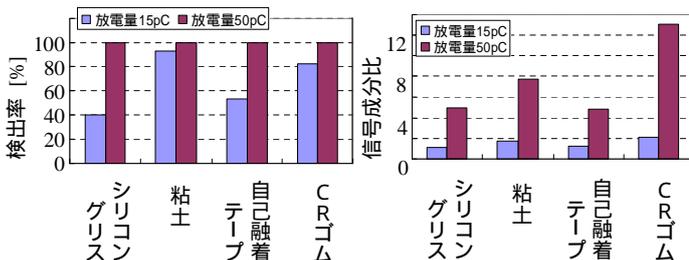
#### (5) 接触媒質の選定

AE 測定時には、被測定物（モールド開閉器可動部の頂部）からの振動を効率的に AE センサに伝えるための接触媒質として、通常シリコングリスが使用されるが、シリコングリスは診断時にセンサがずれ易く、安定した測定ができないために診断精度が落ちる恐れがある。また、診断毎にシリコングリスのセンサへの塗り込みと、診断後の拭き取りが必要であり、作業性に問題がある(第5図)。そこで AE 測定時の検出感度と作業性の向上を目的に材質の検討を行った。



第5図 シリコングリスを使用したAE測定

今回比較した接触媒質としては、AE センサとモールド開閉器可動部の頂部とが十分に密着するか、入手はし易いか等を勘案し、粘土、自己融着テープ、ゴム板を選定し、比較試験を行った。接触媒質ごとの「検出率」および「信号成分比」を第6図に示す。ここで、CR ゴムとはクロロブレンゴムの事であり、数種類のゴムを比較検討した結果、最も検出率・信号成分比の高いCRゴムを選定した。



第6図 接触媒質の比較

検出率、信号成分比ともに粘土とCRゴムが高くなった。ただし粘土は、シリコングリスと同様に、測定毎のセンサへの取付けと開閉器可動部からの除去が必要であり作業性は悪い。そのため本測定装置では接触媒質としてCRゴムを採用した。

#### 4. AE測定法によるフィールド測定

AE 測定法の実フィールドでの診断精度を確認するため、試作した AE 測定装置を用いてフィールド測定を行った。測定結果を第1表に示す。部分放電を検出した機器の内、停電にて目視点検を実施した機器の約7割に電極腐食、エポキシ樹脂変色といった劣化が認められ、AE 測定法の有効性を確認できた。部分放電は劣化進行に伴い数十pCの単発な放電パルスから数百～数千pCの連続パルスに移行することが報告<sup>4)</sup>されており、劣化が確認できなかった3台についての信号成分比は3未満であり、信号成分比から推定される部分放電量は10pC程度と小さい。現在は劣化の初期段階にあり電極腐食等が目視で確認できるレベルには至っていないと推察される。当該機器については引き続き測定を行い劣化の進行状況に注意する必要がある。

第1表. フィールド測定および停電点検結果

測定月	場所	測定台数	部分放電検出による停電点検実施数	劣化確認台数	検出率
7,8月	富山	15台	1台	1台	100%
	石川	14台	1台	1台	100%
	福井	7台	2台	2台	100%
1,2月	富山	28台	1台	1台	100%
	石川	27台	4台	1台	25%
合計		91台	9台	6台	67%

#### 5. NOx測定法による部分放電検出法

##### (1) NOx測定法

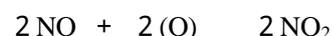
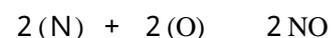
部分放電が発生すると窒素酸化物 (NOx) が生成されることを利用したもので、路上機器内のNOx濃度を測定することにより劣化診断するものである。

空気中で部分放電が発生すると、そのエネルギーにより以下の化学反応が起こり、窒素酸化物が生成される。

窒素分子，酸素分子の放電による活性化



活性化原子と分子の反応



##### (2) NOx測定方法の検討

気体中のNOxを直接測定する方法では、機器の扉を開くと内部のNOxが拡散してしまうため、外箱に空気採取孔を空けるなど特別な改造を施さな

ければ、本来の内部の NO<sub>x</sub> 濃度が測定できない。そのため、路上機器内部の NO<sub>x</sub> 濃度を測定するには、あらかじめ路上機器内に NO<sub>x</sub> を吸着できる物質を一定期間置いておき、後日その物質を回収し分析するなどの間接的な方法が適当である。

部分放電により生成した二酸化窒素は空気中に残留する他、水に溶けると亜硝酸および硝酸を生じる。



よって NO<sub>x</sub> 吸着物質としては水または水溶液を選定し、そこに含まれる亜硝酸または硝酸の濃度を測定することにより溶けた亜硝酸濃度を把握する方法を検討した。

本研究においては、吸着液の分析方法として、ザルツマン試薬を用いた吸光光度法(第7図)と、簡易型の水質分析試薬(第8図)による方法を併用することとした。どちらの分析方法とも、試薬には亜硝酸と反応し発色する成分が含まれており、その発色度合いで溶液中の亜硝酸イオン濃度を測定している。また硝酸を測定する場合には試薬で亜硝酸に還元させてから測定している。



第7図 比色計と吸着液の発色



第8図 水質分析試薬と水質計による測定

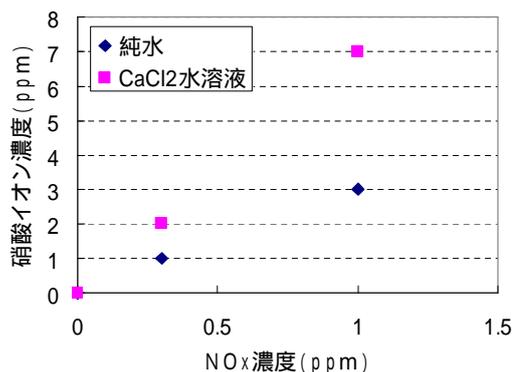
### (3) 吸着液の選定

純水を吸着液に用いた場合、設置後数日で蒸発し測定が不可能であるとともに、路上機器にとって劣化の原因となる水分を放出することから、吸着液に CaCl<sub>2</sub> 水溶液を用いる方法を検討した。

CaCl<sub>2</sub> は押し入れ用除湿剤や凍結防止剤として

用いられる物質で、吸湿、保水性に富み、水によく溶解するという性質を持つ。水分を保持する性質を持つため、路上機器内に一定期間設置しても、蒸発により測定が不可能となったり、水分を機器内部に放出することはない。

CaCl<sub>2</sub> 水溶液の NO<sub>x</sub> 吸着効果を把握するため、市販の除湿剤で作った CaCl<sub>2</sub> 水溶液および純水を24時間 NO<sub>x</sub> 雰囲気中に置き、硝酸イオン濃度を測定した結果を第9図に示す。



第9図 NO<sub>x</sub> 濃度と硝酸イオン濃度

CaCl<sub>2</sub> 水溶液の硝酸イオン濃度は純水の約2倍を示した。また硝酸イオン濃度は雰囲気中の NO<sub>x</sub> 濃度に比例する結果となった。CaCl<sub>2</sub> 水溶液が純水より吸着量が多くなったのは、CaCl<sub>2</sub> 水溶液がアルカリ性であり、酸性物質である NO<sub>2</sub> がアルカリ水溶液に溶解し易いためと考えられる。以上の検討により、吸着液としては CaCl<sub>2</sub> 水溶液を用いることとした。

### (4) NO<sub>x</sub> 測定器の性能把握試験

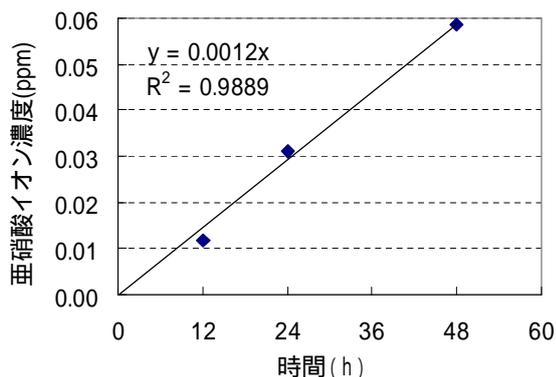
試作した NO<sub>x</sub> 測定器の性能を把握するため、路上気中開閉器(撤去品)において部分放電を発生させ亜硝酸イオン濃度測定により NO<sub>x</sub> 検出試験を行った。

#### 部分放電時間と吸着量の関係

部分放電時間を変えたときの NO<sub>x</sub> 吸着量を測定した。試験条件は以下の通り。

放電量	放電時間	室温
50pC	12, 24, 48h	約 23

試験結果を第10図に示す。



第 10 図 放電時間と亜硝酸イオン濃度変化

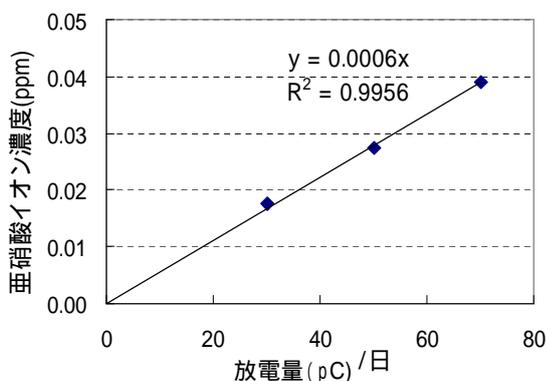
試験結果より部分放電時間に比例して溶液中の亜硝酸イオン濃度が直線的に増加することを確認した。

#### 部分放電量と吸着量の関係

発生させる部分放電量を変えたときの NO<sub>x</sub> 吸着量を測定した。試験条件は以下の通り。

放電量	放電時間	室温
30, 50, 70pC	24h	約 23

試験結果を第 11 図に示す。



第 11 図 放電量と亜硝酸イオン濃度変化

部分放電量に比例して溶液中の亜硝酸イオン濃度が増加することを確認した。このことから、路上機器内に NO<sub>x</sub> 測定器をある一定期間設置した場合の亜硝酸イオン濃度の変化量から、その期間のおおよその部分放電量が推定できると考えられる。例えば、1日あたりの亜硝酸イオン濃度変化が 0.006ppm であった場合、発生していた部分放電量は 10pC であったと推定できる。

#### (5) 劣化判定基準(閾値)の設定

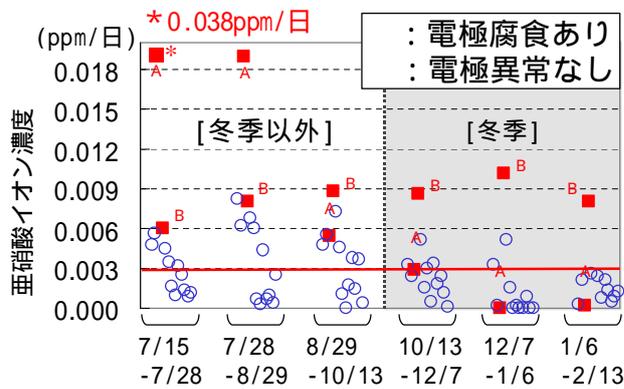
亜硝酸イオン濃度変化から劣化判定基準(閾値)

の設定が必要であるが、部分放電量と、劣化の進行との関係は明らかになっていない。そこで劣化判定基準の設定に当たっては、路上気中開閉器および高圧引込開閉器の購入仕様書に規定されている部分放電量を参考とし、部分放電量が 10pC 以下であれば、連続して発生しても機器に影響を与えないと考え、閾値設定の基準とした。

路上気中開閉器(撤去品)を用いた部分放電発生試験において、部分放電量に比例して溶液中の亜硝酸イオン濃度が増加し(第 11 図)、10pC の部分放電量を 1 日発生させた時の亜硝酸イオン濃度変化は、約 0.006ppm であることを確認した。実フィールドの路上機器においては、部分放電が間欠性を持つと考えられるため、その 2 分の 1 である 1 日当たり 0.003ppm を閾値に設定した。

#### 6. NO<sub>x</sub> 測定法によるフィールド測定

試作した NO<sub>x</sub> 測定器を用いてフィールド測定を行った。フィールド測定では路上気中開閉器 28 台に加えて低圧分岐箱 8 台においても測定を実施したが、低圧分岐箱における亜硝酸イオン濃度が路上気中開閉器よりも大きい事が判明した。これは低圧分岐箱にはその構造上外気を取り込む通気孔が設けられており、排ガスなど大気に含まれる NO<sub>x</sub> が通気孔より進入し反応したものと考えられる。その為、路上気中開閉器において外箱に穴が開いているタイプについては、本測定法の適用外とした。外箱に穴がなく、停電点検が完了している路上気中開閉器 13 台について、停電点検にて電極腐食の確認できた機器(A, B として表示)と、電極腐食が発生していなかった機器に分けて、各期間における 1 日当りの亜硝酸イオン濃度変化を求めたものを第 12 図に示す。



第 12 図 各期間における 1 日当りの亜硝酸イオン濃度変化

第 12 図より、冬季以外では電極腐食の発生している機器において、劣化判定基準を下回っている機器は発生しておらず、不良機器の検出漏れが全くなかったことから、設定した劣化判定基準が適正であったことが確認できた。しかし、冬季間においては、全体的な傾向として亜硝酸イオン濃度は低く、不良機器 A では劣化判定基準以下であった。原因としては外箱内に結露が発生し、NO<sub>x</sub> が測定器に吸着される前に結露に溶けてしまうことが考えられる。1-2 月の測定時では測定した機器の 45% で結露が発生しており、不良機器 A においては測定器取付・取外し時には結露が発生していなかったが、機器外部ケースに結露が発生した痕跡があり、測定期間中に結露が発生していた可能性がある。これらの結果より冬季以外での測定に NO<sub>x</sub> 測定は適していることがわかった。NO<sub>x</sub> 測定器による測定結果を劣化判定基準により良否判定したものと、停電点検結果を比較した結果を第 2 表に示す。

第 2 表 停電点検結果との比較（冬季以外）

		停電点検結果	
		不良	良
NO <sub>x</sub> 測定法 による判定	不良	2 台	5 台
	良	0 台	6 台

## 7. まとめ

本研究では、試作した AE 測定装置及び NO<sub>x</sub> 測定器によりフィールド測定を実施し、各測定法の有効性を確認した。AE 測定法は約 7 割の劣化を検出することが出来た。NO<sub>x</sub> 測定法は冬季以外では全ての劣化機器を検出したが、冬季は検出できないものがあった。今後はこの 2 つの検出法を効果的に組み合わせる方法を考案し、更なる検出精度の向上を目指したいと考えている。今後施設後 10 年を超過する経年機器がますます増加することから、それら機器の保守点検ニーズは高まるものと考えられる。

最後に、フィールド試験実施等にご協力いただいた富山支店、石川支店、福井支店の配電サービス課の皆様へ感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 小田将広他：「電力設備における部分放電検知への AE の適用性検討」, 検査技術 2003.10
- 2) 谷内清晴他：「地中埋設線関連電力設備劣化診断への AE 法の適用」, 現場技術 2005.1
- 3) 村田他：「配電線設備劣化診断技術の動向」, 電気学会技術報告 第 555 号, 1995 年
- 4) 渡部他：平成 3 年度電気学会電力・エネルギー部門大会 No. 352