

電力設備モニタリングの開発状況について

The Study of monitoring method for railway electrification infrastructure



貴志 俊英*



小貫 素彦*



山本 浩志**

JR East Technical Center has studied the monitoring method for the Condition Based Maintenance of railway electrification infrastructure, completed the development of a sensor to monitor the temperature of the compressed connection part of the DC-feeder wire, already used in the Joban Line. Moreover, prototype high-voltage cable partial discharge monitoring device is provided for field tests. In addition, we have been studying to grasp the trend of deterioration of the arrester and the switchboard. As ambitious research, we are trying to monitoring by the sound emitted by the substation equipment. In this paper, we introduce these summaries.

●キーワード：時間基準保全、状態基準保全、無線式センサ、部分放電、避雷器

1. はじめに

電気鉄道の電力系統にはさまざまな電線や機器が使用されているが、その中には劣化や故障の兆候を把握するのが難しい設備がある。

そのような設備は、故障すると大きな輸送障害に結びつくものが多く、現状では、標準取替周期を定めて定期的に張替えや交換を実施して未然に故障を防止している。この保全方法がTBM(時間基準保全: Time Based Maintenance)であるが、これには多くの手間と大きなコストが必要であり、今後の当社の経営環境の変化を鑑みるといつまでも続けられる方法ではない。

そこで、筆者らは、設備の状態を常に把握(モニタリング)し、その状態に応じて補修や交換を行う保全方法、すなわちCBM(状態基準保全: Condition Based Maintenance)を適用する研究開発を進めている。そのうち、営業用車両に電力設備のモニタリング装置を搭載する取組みについては別稿に譲り、本稿ではそれ以外の取組みについて述べる。

2. 直流き電線圧縮接続部のモニタリング

直流電化区間におけるき電線は、変電所から電車に電力を送る重要な電線であり、経年50~60年で張り替えている。き電線は数百mごとに直線圧縮という方法でつなぎ合わせており、この圧縮接続部が劣化すると直流電化特有の大電流によって発熱し溶断するリスクがある。

そのリスクを回避するには圧縮接続部の温度管理が重要であり、テクニカルセンターでは「電車線路設備モニタリングシステム」と称して、太陽光発電パネルを電源とする無線式

の温度センサ(図1)を開発した。このセンサは、専用のリーダを持参して列車巡視を実施することで多数箇所データを効率的に収集可能であり¹⁾、2015年度から常磐線北千住~我孫子間の快速線の一部(174箇所)にて使用開始した。筆者らは東京電車線技術センターおよび我孫子電力技術センターと共にき電線圧縮接続部のCBMに向けたデータ収集・分析に取り組んでいる。

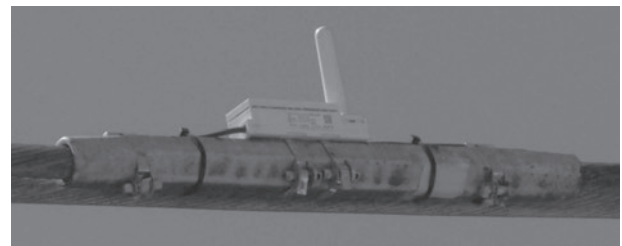


図1 き電線圧縮部に取り付けた無線式温度センサ

この取組みにおいては、圧縮接続部のどのような温度傾向を把握すれば劣化を把握できるか、が要点となった。そこで筆者らは、無線式センサに備えた2つの温度プローブの温度差から判断する手法を見出し、劣化の傾向を示している圧縮接続部を2箇所発見し対処することができた(図2参照)。

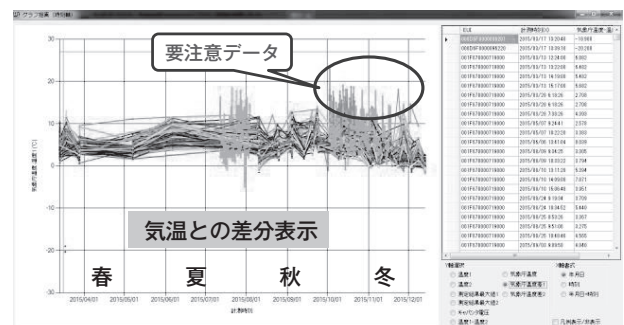


図2 圧縮接続部の劣化を示す温度データ

劣化の傾向が見えてきた圧縮接続部をサーモカメラで撮影すると図3のようになり、接続箇所における抵抗値の増大によって発生した熱がき電線のより線を伝播している（そのため離れたところに発熱箇所が現れる）ことがわかる。これは、従来のサーモカメラによる定期的な検査（首都圏では2年に1回）で把握するのは困難であり、温度センサによる連続したモニタリングの有効性を示している。



図3 劣化した圧縮接続部のサーモカメラ画像

現在、無線式温度センサの導入範囲拡大に伴うデータ量の増大に備え（先行導入した174箇所のデータでも半年間で表計算ソフトでの処理が困難なほどの量になった）、リーダで受信したデータをサーバに直送し処理する仕組みの構築に取り組んでいる。これにより、経年によるき電線張替えを改め、劣化傾向が把握できるまで継続的に設備を使用するCBMに移行し、設備の長期使用に伴うリスクの低減とコストダウンの効果が期待できる。

3. 高圧ケーブルのモニタリング

高圧ケーブルは変電所や配電所から信号設備や駅設備などに電力を供給する重要設備であるが、その劣化が経年により進行するメカニズムが複雑であり、また、外観から劣化の状況を把握し難いため、有効な検査方法を見出すのが困難な設備でもある。

当社では、6kV配電線用高圧ケーブルの検査に、ケーブル内部で発生する放電パルスを検出する「部分放電法」を採用している。この方法は、図4のように検査装置を現場に持ち込んで活線下で短時間に検査が行える利点があるが、高圧ケーブルは線路沿線に敷設されていることから、検査結果が列車によるノイズの影響を受けるという課題がある。

そのことを端的に示すデータを図5に示す。これは首都圏A駅の配電所に引き込まれている高圧ケーブルにおいて部分放電の検出頻度を連続的に測定したものであるが、列車本

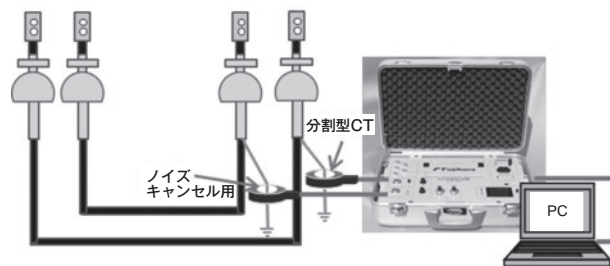


図4 部分放電法による高圧ケーブルの検査

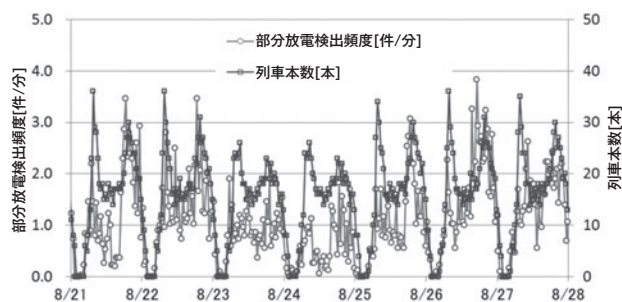


図5 首都圏A駅配電所における高圧ケーブル部分放電検出回数と列車本数の相関

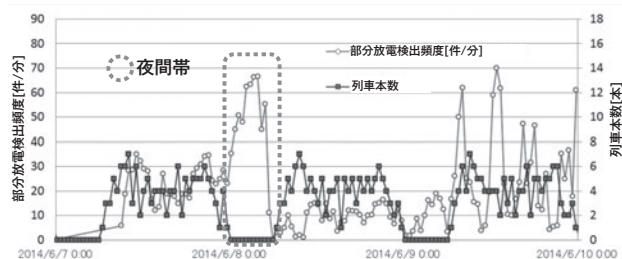


図6 新幹線B駅配電所における高圧ケーブル部分放電検出回数と列車本数の相関

数との相関が見られることがわかる²⁾。特に、列車が来ない深夜の時間帯には検出されず、逆にこの時間帯に着目すれば、ノイズの影響を回避した部分放電法の検査が可能になると思われる。

図6はその一例で、図5とは別の新幹線B駅の配電所に引き込まれている高圧ケーブルの部分放電検出回数をプロットしたものであるが、深夜帯でも顕著に検出されていることがあり、設備の異常が疑われた。そして、実際に設備を点検したところ、図7のようにケーブルの端末部において放電の痕跡が発見され、部分放電の連続測定は、高圧ケーブルの検査方法として有効であることが判明した。

現在、この部分放電法の測定器を低コスト化し、長期のモニタリングに対応できるように仕様を見直した「高圧ケーブルモニタリング装置」を試作し、フィールド試験を進めている。

なお、本装置はすべての高圧ケーブルに取り付けることはコスト面で課題があるが、信号高圧配電線が1回線しか無い区間や、重要な負荷へ電力を供給している回線のケーブル

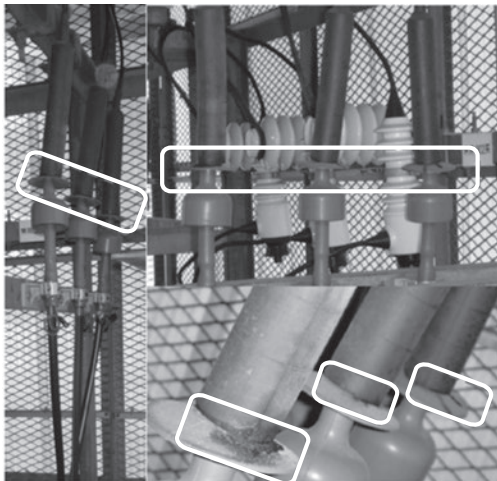


図7 ケーブル端末部の放電痕

に取り付けて信頼性を確保するなどの使い方ができるものと考えている。

4. 避雷器モニタリング

避雷器は、電力設備を雷害から保護する設備であり、その検査は目視点検と5年に1回の漏洩電流測定により行っている。現在の検査方法では、検査時点での良否判定は行えるが、検査間隔が長いことから劣化傾向を把握することは難しい。そこで、避雷器のCBM適用に向けて継続的な漏洩電流によるモニタリング手法の検討に取り組んでいる。

モニタリングの対象は、状況把握が難しい線路沿線避雷器としている。線路沿線では、避雷器は制御電源の確保が困難な場所にあり、連続して漏洩電流を記録することが難しい。そのため、モニタリング手法の検討のための基礎データ取得及びモニタリング装置の基本構成の検討を目的として、外部電源の取込みが不要で、漏洩電流を連続的に測定できる計測器を試作した(図8)。データは装置側に記録され、無線通信でデータ収集装置へ回収できる。

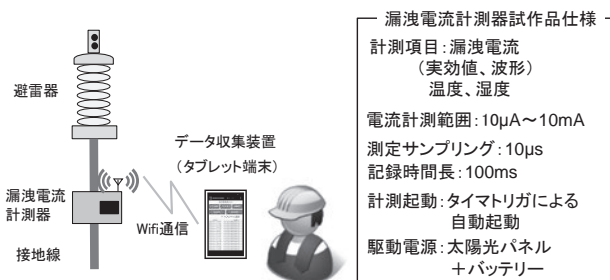


図8 線路沿線避雷器漏洩電流計測器試作品概要

試作機は新幹線C駅構内に仮設し、漏洩電流計測を行った。2016年2月3日~12日までの漏洩電流実効値と温度データを図9に示す。漏洩電流値は300 μ A付近で推移し、大きな変動は見られていない。

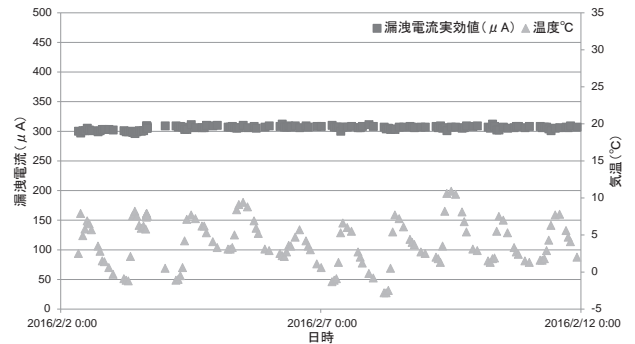


図9 漏洩電流実効値(C駅構内)

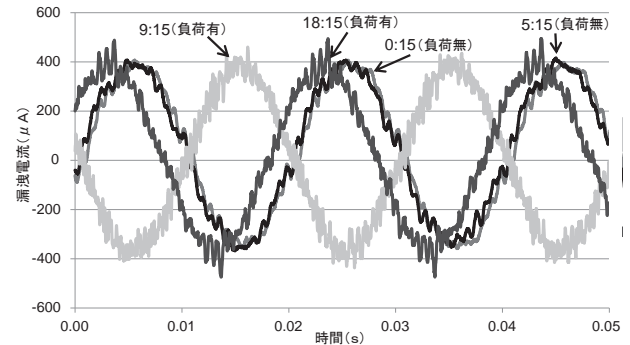


図10 避雷器漏洩電流波形(2月4日 C駅構内)

計測した線路沿線避雷器の漏洩電流波形を図10に示す。比較のため、波形は同日中に計測した異なる時間帯の波形データを並べている。当該線に負荷がある(負荷有のグラフ)場合はノイズ成分が重畳していることが確認できる。新幹線C駅構内の測定では負荷がある場合のノイズ成分が他箇所と比較して小さく、漏洩電流実効値に大きな変動が見られなかったが、ノイズ成分が大きい箇所では漏洩電流実効値に大きな変動が見られる。そこで、負荷有・負荷無の状態における波形データに対し、周波数解析(FFT)を行い、電流中の含有成分について確認した(図11)。

その結果、1500Hz以上の周波数成分で負荷の有無により変動が生じることが確認できる。このことから、漏洩電流値に大きな変動が見られた場合であっても、周波数解析を行うことで列車負荷による変動が判断できると言える。一方、1500Hz以下の周波数成分は負荷の有無による常時変動が殆どみられなかった。この点に着目し、今後、避雷器が劣化したときの漏洩電流の傾向が見出せれば、モニタリングした波形を解析することで劣化診断を行える可能性があると考えている。

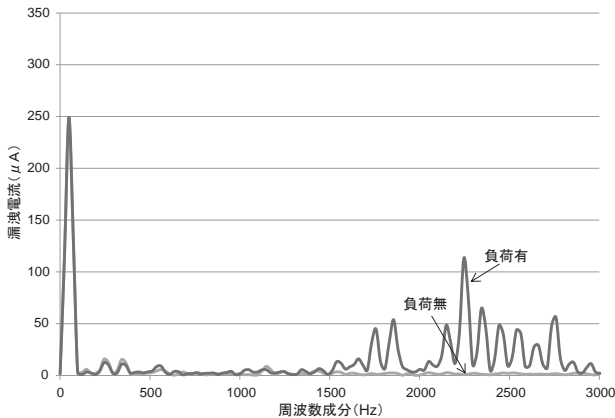


図11 漏洩電流の周波数解析比較（負荷有と負荷無）

5. 配電盤の基板のCBM化

配電盤の基板は経年を基準とした定期的な取替え（TBM）を行っているが、取り外した基板がどのように劣化しているか把握はできていない。今後、CBMへ移行するには、基板の劣化に伴う電気的な特性の変化を把握し、残存寿命を推定する技術を確認していく必要がある。そこで、基板を加速劣化させ、特性の変化が現われるか調査を進めている。

加速劣化試験では、模擬負荷装置を用いて基板に負荷電流を通電させた状態とし、恒温恒湿器内で温湿度ストレスを印加して劣化を進めている。加速劣化係数は温度係数と湿度係数を乗じた値で決まるが³⁾、今回は基板が試験条件に耐えられる値を選定し40倍（9日で1年相当）とした。

供試基板は、当社の一部の変電所で使用されているA社製の基板4枚である。定格及び供試基板呼称を以下に示す。

定 格：定格入力電圧DC24V、出力電圧DC5V、
出力電流容量7A
製造年：2014年製 試験基板呼称：A1、A2、A3、A4

電気的特性の測定は、ある程度劣化が進んだ後に実施とし、A1・A2及びA3・A4の組み合わせで恒温恒湿器から取り出す時期を変えて測定を行った。A1・A2は14年、19年、20年経過相当時に、A3・A4は5年、12年、18年経過相当時に測定した。経年により変化が見られた特性の一例として、電源立ち上がり時間、基板のインピーダンス値と共振周波数があつた。

電源立ち上がり時間は、基板に電圧を加えた瞬間から、既定電圧（動作保証値4.8V）となるまでの時間測定を行い、経年による変化を確認した（図12）。

A2を除く基板は、経年とともに到達時間が長くなり、最も変化が見られたA3基板で約0.9ms遅延した。4枚中3枚で

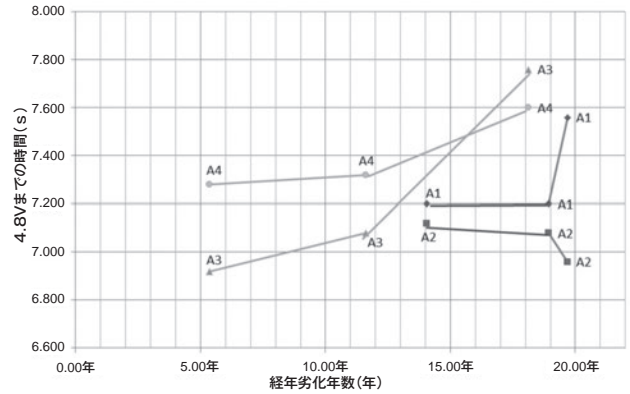


図12 経年と電源立ち上がり時間の関係

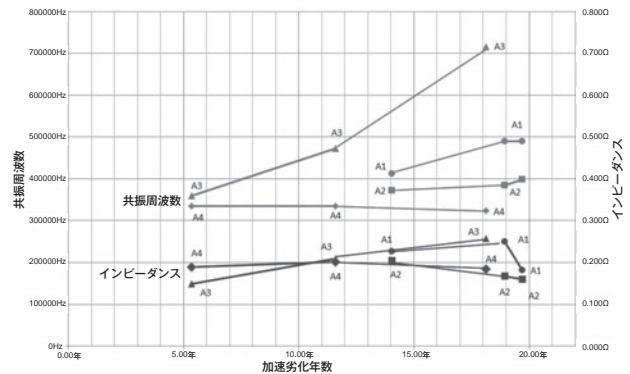


図13 経年とインピーダンス・共振周波数の関係

動作遅延が見られており、電源立ち上がり時間は経年により変化する特性の1つと考えられる。

次に、基板のインピーダンス値と共振周波数について経年による変化を確認した（図13）。入力側はA1、A2、A3基板で共振周波数の上昇傾向と、A3基板でインピーダンス値の上昇傾向が見られた。また、A3以外のインピーダンス値は上下動があり、一定した変化傾向は確認できなかった。共振周波数の変化は、回路定数のインダクタンス分が変化することは考えにくいことから、キャパシタンス分の変化に起因して現れていると考えられる。

今回の試験では、経年で変化する特性をいくつか確認することができた。しかし、基板が壊れた状態、すなわち電圧を出力しなくなる状態には至っていない。今後は、基板が壊れた状態まで加速劣化を進め、経年による特性の変化と基板の機能が失われたときの特性の数値を把握し、モニタリングによる劣化判定手法を見出していく。

6. 音響による変電所モニタリング

変電所設備は人間の視覚、聴覚、嗅覚を頼りとした巡視点検で異常の有無を確認している。確認部位は機器毎に各々異なるが、確認項目は腐食損傷などの外観異常、異臭、異音等、共通した項目が多い。今後、設備メンテナンスのCBMへの移行を考慮すると、コストを抑えて機器の状態把握を行う必要があり、音響に着目した変電所モニタリングの検討を進めている。

音響による変電所状態把握を検討するため基礎データとして、変電所機器室内の音響を調査した。実施場所は、外部からの騒音の影響を比較的受けにくいと思われる屋内変電所を選定した。音響測定に用いたマイクロホンは無指向性と指向性の2種類である(図14)。



図14 マイクロホン(左:無指向性 右:指向性)

無指向性マイクロホンは機器本体付近、指向性マイクロホンは機器から離れた位置に設置し機器を狙いながら機器室内の全体的な音を採取した。データは、ウェーブレット変換し時間経過に対する信号強度と周波数分布に着目した解析を実施した。屋内に変圧器や整流器等の主要機器がある変電所の機器室の音響及び変圧器の音響、遮断器の音響を調査対象とした。

機器室及び変圧器の音響解析を示す(図15、16)。図15は指向性マイクロホン、図16は無指向性マイクロホンを使って音を記録している。図の上段は音響信号の波形であり、振幅が強度(AD値)を示している。下段は音響信号に含まれる周波数分布を示しており、表示色の濃淡で信号強度も同時に示している。

2つの図の比較から、信号強度の違いはあるものの周波数分布は同一であり、電源周波数の2倍の整数倍付近に分布している。周波数分布の特徴は、変圧器騒音に関する特徴⁴⁾と合致しており、図15のデータは変圧器音響を捉えていると判断できる。このことから、機器本体にマイクロホンを付けなくても、指向性マイクロホンをを用い、離れた位置の機器を狙いながら機器室内の全域的な音響を採取できる可能性があると言える。

遮断器の音響事例として、66kVクラスのGISガス遮断器

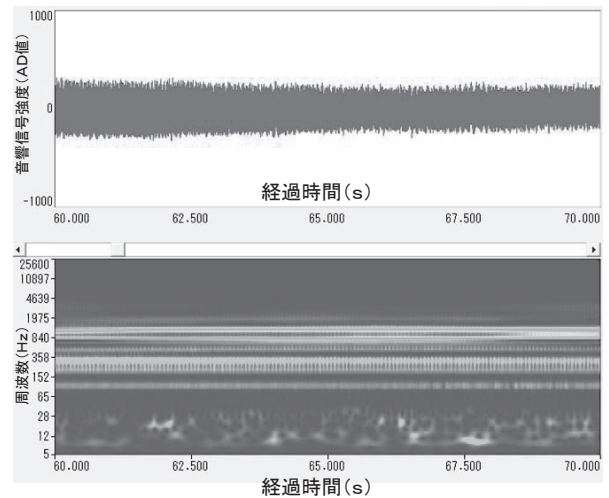


図15 屋内変電所における機器室の音響

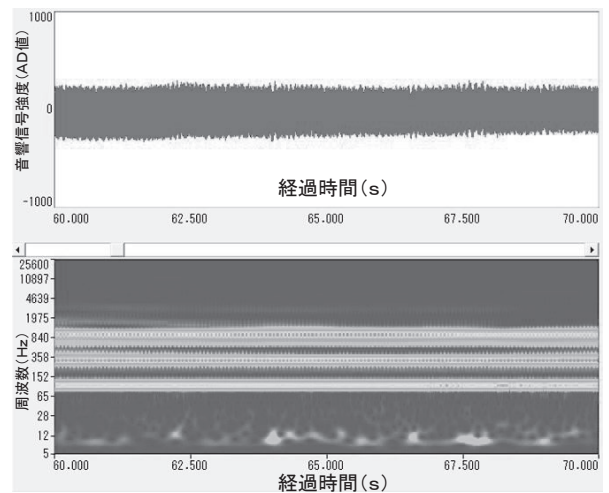


図16 屋内変電所における変圧器の音響

動作時(入と切)の音響解析を示す(図17、18)。これらは指向性マイクロホンをを用い、設備から離れた位置より採取したデータを解析したものである。

2つの図の比較から、入動作と切動作で音の信号強度や周波数分布が異なっており、特徴があることがわかる。各動作を数回実施して入動作毎と切動作毎の相関性を確認したところ、双方で0.8以上の相関が得られた。遮断器はモータ、ローラ、カムやバネ等を用いて駆動させており、機械的な動作が伴うことから、劣化による異音の発生や、発生音の音響信号強度や周波数帯が変化する可能性がある。よって、音響信号の類似性を用い、健全時とのデータ比較を行うことで劣化傾向を把握できる可能性があると考えられる。

これまでの調査は一部の実態把握に留まっており、機器室音響に含まれる変圧器以外の機器の周波数帯域、環境の差異による影響等、調査・検討すべき事柄は多い。今後は、更なる実態把握を進め、それらの結果からモニタリング手法を見出していく考えである。

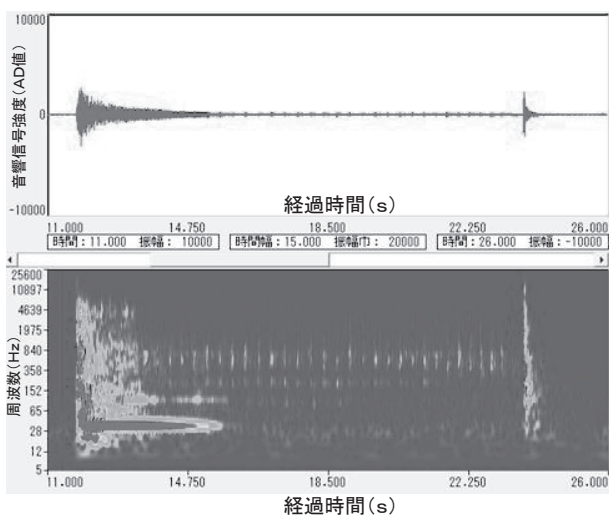


図17 GISガス遮断器動作時(入)の音響

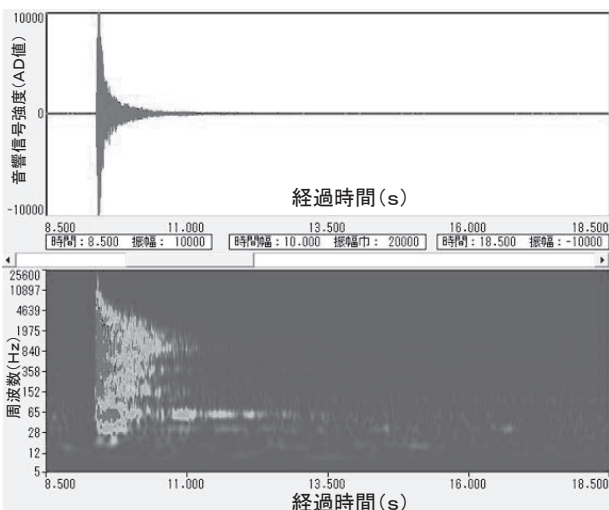


図18 GISガス遮断器動作時(切)の音響

7. おわりに

本稿では、無線式センサによる電線圧縮部の温度モニタリング、高圧ケーブルの部分放電のモニタリング、避雷器の漏洩電流のモニタリング、配電盤の基板のCBM、変電所における機器動作音のモニタリングについてご紹介した。

すでに基本原理を確立したもから、モニタリングすべき項目の選定をする段階のものまで、さまざまな研究開発段階の案件があることがわかる。

電力設備のモニタリング、そしてその発展としてのCBMを実施するうえで特に難しいのは、実際に経年で故障した事例が少なく、劣化したときにどのような現象が発生するか不明確な機器や設備が多いことである。テクニカルセンターではデータ分析や大規模な加速劣化試験により、この困難なテーマに対しても取り組みを続けている。それについては、また稿を改めて述べる。

参考文献

- 1) 甘利智、和木浩、出野市郎：電車線路設備モニタリングシステムの開発, JR East Technical Review, No.39, pp.7~10, 2012.spring.
- 2) 下原光幸、菅間陽二、小川達也：鉄道沿線に敷設された高圧ケーブル劣化診断の基礎研究, 2016年3月電気学会全国大会 論文番号5-178
- 3) 鹿沼 陽次 他：信頼性加速試験の効率的な進め方とその実際, pp.213~217, 株式会社 日本テクノセンター, 2001.05.
- 4) オーム社；電気工学ハンドブック(第6版) pp.715, 社団法人電気学会, 2001.2.