

高圧電線における電気トリーの拠点となる侵入異物の非破壊分析 II Non-destructive Analysis of the Electrical Treeing in High-voltage Cables II

伊藤 桂介^a、曾根 宏^a、遠藤 崇正^a、下村 鈴之介^b、三浦 俊範^b、大友 孝之^b
Keisuke Itoh^a, Hiroshi Sone^a, Suzunosuke Shimomura^b, Toshinori Miura^b, T. Otomo^b

^a 宮城県産業技術総合センター、^b 北日本電線株式会社

^a Industrial Technology Institute, Miyagi Prefectural Government, ^b Kitanihon Electric Cable Co. Ltd.

高圧線路に用いられるケーブルの故障モードである電気トリー現象のメカニズム解明のため、X線CT分析とX線回折の複合実験により、電気トリーの起点となる異物の高精度三次元観察と分析を試みた。その結果、異物由来の回折ピークを母材から分離して抽出することに成功した。

キーワード： 高圧電線、電気トリー、X線CT

背景と研究目的：

高圧電線は、長距離送電網から工場・事業所内の配線まで、産業のあらゆる段階において欠かすことのできない存在である。高い信頼性と安全性が求められる資材であり、その故障（絶縁破壊）の予測と防止は、産業インフラを維持するために欠かすことの出来ない基盤技術となっている。現在までに、高圧電線における主な故障モードとして、電気トリーと呼ばれるマイクロメータオーダーの樹枝状欠陥が知られている。これは、絶縁層（主にポリエチレン）の内部に発生した微小欠陥を起点として樹枝状の欠陥が表面に向け成長し、最終的に絶縁破壊に至る現象である。その成長過程は、模擬試験やシミュレーションによる精力的な研究がなされている。

しかし、実用電線における電気トリー発生の初期過程については、実験的な検証がほとんど存在しない。これは、実用電線から「出来かけの電気トリー」を検出するのが著しく困難であることに起因する。すなわち、十分に成長した（＝既に絶縁破壊が起きた）電気トリーについては外部から視認可能であるが、初期の電気トリーは外部からでは全く分からないため、「切った場所にたまたま存在する」ことを期待し、被覆を多数スライスしていく以外に探す術が存在しない。また、切断時の荒れやコンタミネーションが必ず発生するため、あるがままの状態を捉えることは実質不可能となる。電気トリーの姿を非破壊で捉え、さらにはその成長メカニズムを解明することは、産業インフラの信頼性・安全性向上のうえで非常に重要なテーマである。

申請者らはこれまでに、数十年にわたり使用された実用高圧電線（製造メーカー不詳）についてラボ機および放射光施設におけるX線CT分析を実施し、初期電気トリーの存在を非破壊で見出すことに成功した。この初期電気トリーを詳細に観察すると、数十 μm の微小異物を起点として放射状にトリーが成長していく様子が明瞭に映し出されており、異物の詳細（組成、起源）に強く興味を持たれる。そこで2021B期において、出来る限り非破壊のまま異物の同定を行うため、BL47XUにおいてエネルギー差分X線CT法による異物の元素分析を実施した。その結果、当初候補元素として想定していた製造装置由来の金属粉等のコンタミネーションではないことが判明した。そこで、異物種の同定をさらに進めるため、2022A期（課題番号2022A1658）から、X線回折や蛍光X線分析を組み合わせた複合型のX線イメージング実験に取り組んでいる。今回の課題では、X線CTとX線回折の複合実験を実施した。

実験：

実験は、前回課題に引き続きBL20B2にて実施した。解像度 $1\mu\text{m}/\text{pixel}$ の一般的なX線CT光学系に、XRDの検出系（フラットパネル検出器）を追加した測定システムを利用した。2種類のカメラ長で試料・回折角標準試料ともに測定することで、カメラ長の正確なキャリブレーションと、広い回折角レンジでのデータ取得を行った。CT測定においては、試料と検出器間の距離を十分離して屈折コントラストを利用することで、異物の視認性を高めた。測定試料は高圧電線の高分子被覆を切り出したものであり、 $\Phi 5\text{mm}$ 程度の角柱状に切り出し、測定装置にマウントした。

前回課題（2022A1658）では、カメラ長およびビームセンターの算出誤差が大きく、2次元イメージから1次元プロファイルへの変換が困難であったため、散乱角度が既知の鉍物を用いて散乱角導出時の信頼性を担保することとした。

結果および考察：

図1に、異物部とその近傍（正常部）における回折プロファイルを示す。前回課題と比べ、標準物質の散乱角を比較・校正することで、信頼に足る一次元プロファイルへの変換が可能となった。正常部（青線）では、母材樹脂由来のブロードな構造が主であるのに対し、異物部においては、細く強度の強い回折線が多数観測された。この結果は、得られた回折線が確かに異物由来のものであること、異物は結晶質であることを強く示唆している。現在、得られたデータをもとに、所有している粉末回折データベースとのパターンマッチングによる異物組成同定を試みているところである。

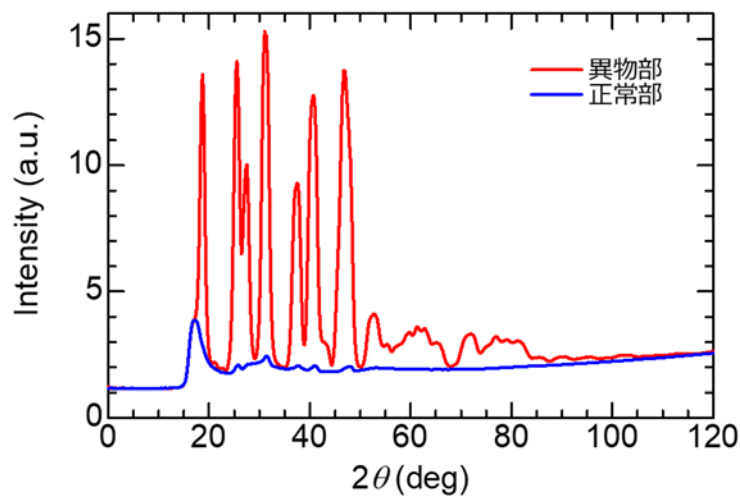


図1 回折パターンを一次元化して得られた異物部（赤線）および正常部（青線）の回折プロファイル。