

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 Non-destructive Analysis of the Electrical Treeing in High-voltage Cables

伊藤 桂介^a, 曾根 宏^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, Takayuki 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、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。X線回折および蛍光X線分析を組み合わせた複合型のX線イメージングによる分析から、異物の構成元素は鉄や銅などの金属元素ではなく、比較的軽い元素からなることを強く示唆する結果を得た。

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ーオーダーの樹枝状欠陥が知られている。これは、絶縁層（主に架橋ポリエチレン）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、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を実施した。

実験：

実験は、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、回折パターンを収録するためのフラットパネルディテクター、蛍光X線検出のための半導体検出器を組み合わせ、適宜検出器を切り替えることで、全く同一視野にてイメージング・回折・蛍光X線の核種分析が実施できる配置とした。フラットパネルディテクターはX線CT検出器の直前に、蛍光X線検出器はビーム進行方向に対して90度の方向に設置している。X線のエネルギーは40 keVを用いた。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。

結果および考察：

図1に、異物とその近傍の正常部で取得した X 線回折パターンをそれぞれ示す。異物部では、非常に多数かつ明るい回折線が観測された（上図）。これに対し、正常部では樹脂（架橋ポリエチレン）由来のハローが観測されているのみで、特徴的な回折線は観測されなかった（下図）ことを考えると、得られた回折線は異物由来のものであることが強く示唆される。更なる検証を進めるために、蛍光 X 線分析から得た元素データと組み合わせ、回折パターンの一次元化とデータベースとの照合を実施しているところである。

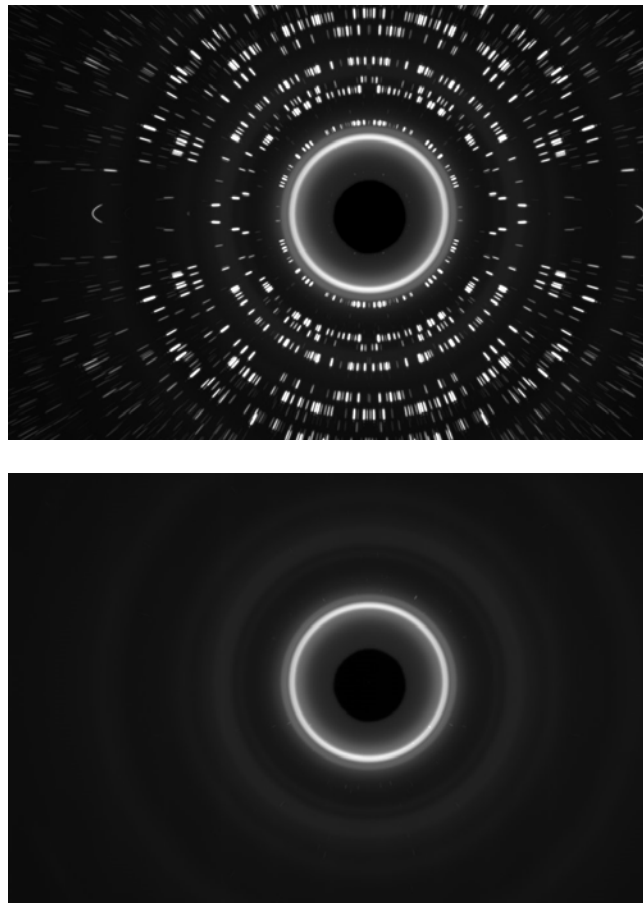


図1 異物部で得られた回折パターン（上）および異物近傍の正常部で得られた回折パターン（下）。