

# 高圧電線における電気トリ形成初期過程の非破壊分析 Non-destructive Analysis of the Electrical Treeing in High-voltage Cables

伊藤 桂介<sup>a</sup>, 曾根 宏<sup>a</sup>, 下村 鈴之介<sup>b</sup>, 三浦 俊範<sup>b</sup>  
Keisuke Itoh<sup>a</sup>, Hiroshi Sone<sup>a</sup>, Suzunosuke Shimomura<sup>b</sup>, Toshinori Miura<sup>b</sup>

<sup>a</sup> 宮城県産業技術総合センター, <sup>b</sup> 北日本電線株式会社

<sup>a</sup> Industrial Technology Institute, Miyagi Prefectural Government, <sup>b</sup> 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現象のメカニズム解明のため、電気トリの起点となる異物の高精度三次元観察と分析を試みた。エネルギー差分 X 線 CT 法を用いた非破壊分析の結果、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, 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発生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」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）電気トリについては外部から視認可能であるが、初期の電気トリ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、ラボおよびあいちシンクロトロン光センターの X 線 CT 装置を利用して、実用電線中において微小異物を起点としたごく初期の電気トリを見出すことに成功した。次のステップとして異物の組成同定が重要な課題となるが、サンプリング時の紛失やコンタミネーションが強く懸念されることから、非破壊で実施可能な分析が必要である。そこで本課題では、吸収端近傍での急峻な吸収係数変化を利用したエネルギー差分 X 線 CT 法（図 1）による元素種の同定を試みた。

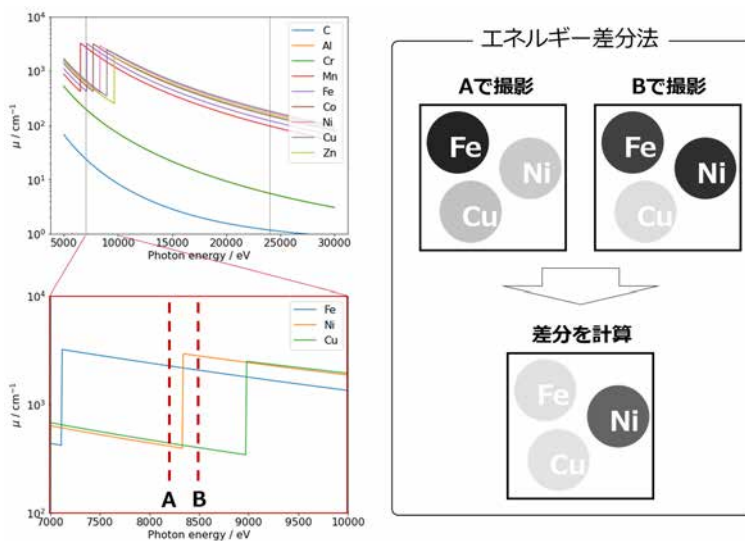


図 1. エネルギー差分 X 線 CT 法の概略図

### 実験：

エネルギー差分 X 線 CT 法は、目的元素の X 線吸収端直下・直上のエネルギーで三次元像を撮影したのち両者の差分を取ることで、目的元素の分布を可視化する手法である。現状、樹脂の中に埋もれた  $\mu\text{m}$  オーダーの微小異物の元素同定を行うための、最も強力な非破壊分析手法と想定される。ビームラインには BL47XU を用いた。異物の候補元素として製造装置に多く含まれる金属元素である Fe(鉄), Ni(ニッケル), Cu(銅), Zn(亜鉛)を想定し、それぞれの吸収端直下・直上のエネルギーにて空間分解能 $\sim 1\ \mu\text{m}$ での X 線 CT 撮影を実施した。測定試料は高压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 2 に、候補元素の吸収端直下・直上のエネルギーで撮影した X 線透過像を示す。どの候補元素においても、吸収端直下・直上での透過像はほぼ同じ画像が得られ、コントラストには大きな違いが見出されなかった。このことを定量的に確かめるために、各測定について画素値のヒストグラムを解析により求めた。図 3 は、Fe(鉄)の吸収端直下・直上のエネルギーで取得されたヒストグラムである。ほぼ同一の形状を示しており、大きく輝度が変わる(=鉄の存在を示す)画素が存在しないことを強く示唆している。他の候補元素についても同様に、コントラストの大きな変化は見出されなかった。この結果は、注目している異物の主成分が今回候補とした四種類の金属元素ではないことを強く示唆しており、混入経路を特定するうえで非常に興味深い結果である。更なる検証を進めるために、今後、マイクロビームを用いた X 線回折や蛍光 X 線分析による異物の同定を計画している。

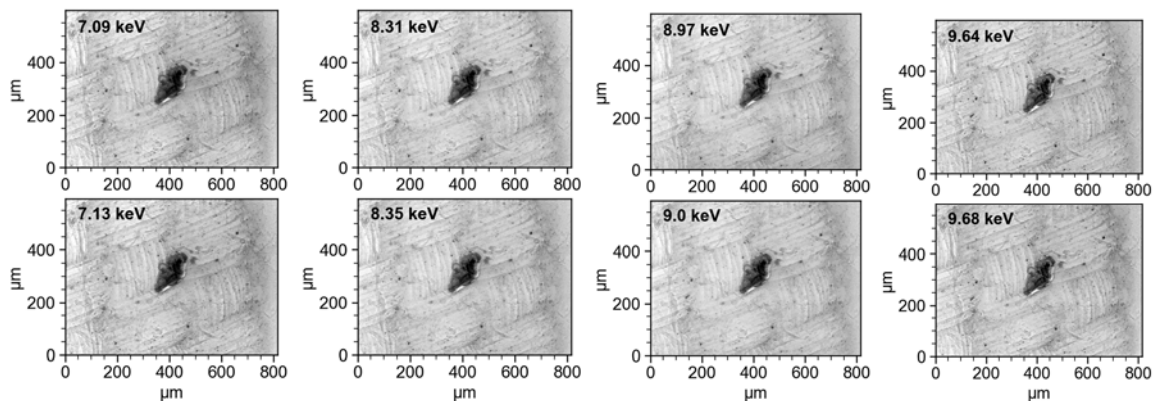


図 2. 異物近傍での X 線透過像の X 線エネルギー依存性。左からそれぞれ Fe, Ni, Cu, Zn の X 線吸収端の直下 (上段), 直上 (下段) に対応

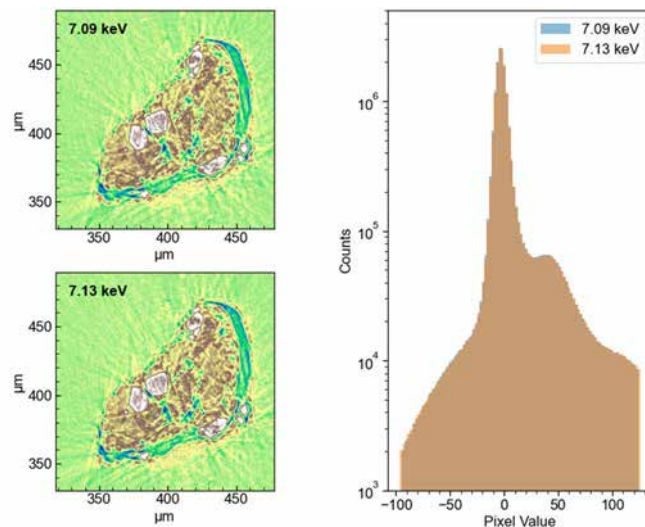


図 3. Fe(鉄) の吸収端直下・直上における画素値のヒストグラム