

ダイナミックX線CT観察によるケーブル評価

Cable Evaluation Using Dynamic X-ray Computed Tomography

星名 豊*
Yutaka Hoshina

上村 重明
Shigeaki Uemura

山本 琢磨
Takuma Yamamoto

電線ケーブル製品はその実使用環境を想定し、曲げをはじめとした様々な外力印加時の振る舞いを評価することが重要である。我々は、最新のX線CT装置を用いた外力を印加しながら観察を行う技術、および画像解析を始めとしたデータ解析技術、を活用し、ケーブル製品の外力に対する動的振る舞いの評価を推進している。本稿では前半で、最新のX線CT観察事例（曲げた状態での観察および、従来困難であった1メートル級の大きな試料の観察）を紹介し、後半では曲げ変形を受けたケーブル製品のX線CTデータに対する画像解析技術を紹介する。これらには当社独自の技術が詰まっており、ハード面・ソフト面の両方の技術に基づき、各種製品の外力下での動的振る舞いを明らかにすることで、よりよい設計や品質課題の解決に活かしている。

Evaluating the performance of electric cable products under external forces, such as bending, is crucial for assessing their behavior in real-world environments. We utilize a cutting-edge X-ray computed tomography (XCT) system to observe the effects of external forces and employ data analysis techniques, such as image analysis, to enhance our understanding of how cable products respond dynamically to these forces. The first part of this paper introduces XCT observation results of different samples, including a bent cable and a large 1-meter sample, which were previously difficult to evaluate. The latter part focuses on the data analysis techniques for bent cable products, highlighting our unique technology. Through a combination of advancements in hardware and software, we can improve design processes and address quality issues by clarifying the dynamic behavior of various products under external forces.

キーワード：X線CT、その場観察、ケーブル、カーブトラックスライシング

1. 緒言

一般に工業製品は、その実使用環境を模擬した様々な耐久試験をクリアする必要がある。それら試験「前後」の状態だけでなく試験「中」の製品状態を正確に知ることは、新製品の開発および既存製品の品質課題解決にとって極めて重要といえる。例えば当社グループの主力製品のひとつである電線ケーブルは、実使用環境において曲げ応力を頻繁に受けることになるため、曲げに関する試験を多数課される。電線ケーブルは、製品によって様々であるが例えば、数百本あるいは数千本以上の素線（金属細線）およびそれらを覆う被覆等の集合体であり、かつそれぞれの素線は単独で存在するわけではなく互いに撚り合わされた状態となっているため、曲げを受けた際に起こる現象は決して単純ではない。図1は一般的な電線ケーブルを曲げた状態の模式図である。カーブの内側（図1の①）では素線同士が互いに接近しこすれあい、逆にカーブの外側（図1の②）では素線同士が互いに離れる傾向にある。例えば電線ケーブルの最も重要な特性のひとつである曲げ剛性は、この素線同士の相互作用に大きく左右されることが知られており、素線実形状の正確な把握は電線ケーブルの設計にとって極めて重要である。

当社の解析技術研究センターでは、このような電線ケーブルが曲げを受けている最中の、内部の様子を可視化・定量化する技術開発を推進している。これにはハード面・ソ

フト面の両方が重要であり、まず本論文の2章においてハード面の技術としてX線CT観察^{*1}について述べる。試料に対して、曲げをはじめとする何らかの外的な力を印加した状態でのX線CT観察のことを以降「その場観察」と呼ぶ。その後3章ではソフト面の技術として、その場観察の結果得られたCT画像に対する最新のデータ解析技術を紹介する。

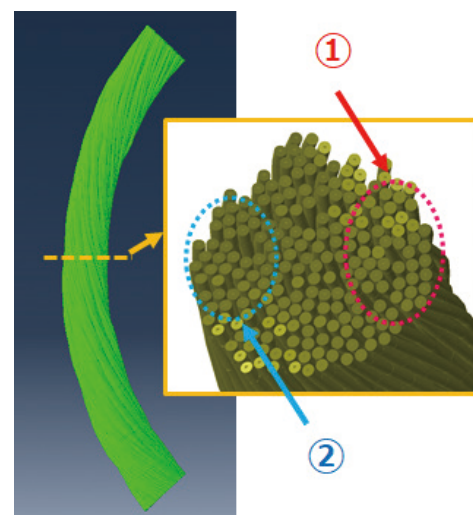


図1 電線ケーブルを曲げた状態の模式図

2. ダイナミックX線CT装置による観察事例

電線ケーブルをはじめとする様々な製品のその場観察への需要に応えるべく、当社では2023年夏より新型のX線CT装置（本論文ではその場観察を行うためのX線CT装置という意味で「ダイナミックX線CT」とよぶ）を導入し、様々な観察技術の開発を進めている。この章ではダイナミックX線CTを活用したその場観察事例をいくつか紹介する。

2-1 ダイナミックX線CT装置

図2に本論文の主役となる、ダイナミックX線CTの外観を示す。機種はTESCAN社製UniTOM XLであり、日本国内では当社が最初の導入となる。管電圧/管電流はそれぞれ、最大230kV/1300 μ Aであり、3 μ mのマイクロフォーカス線源を持つX線CT装置の中では最大クラスの出力を有する。この観察能力により、従来の装置で評価してきた多様な観察需要に応えることがもちろん可能である。その一方で最大の特徴はサイズ ϕ 600mm × H1150mm、耐荷重45kg、という試料ステージであり、これにより本論文の2-2、3-1で述べるような、試料と試験機を丸ごと乗せた状態での観察や、2-3で述べるような大きな試料の観察が可能となる。またその場観察をサポートする、負荷を制御しながら試料に外力を印加することのできる機構も備えており、具体例を2-2で紹介する。

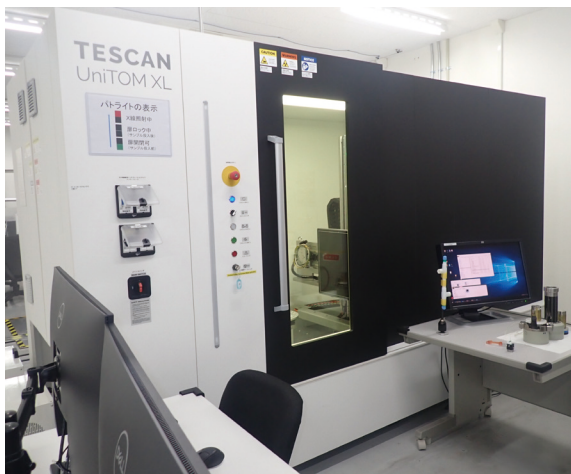


図2 ダイナミックX線CT装置の全体写真

2-2 小型試験機を用いたケーブル屈曲評価

図2のダイナミックX線CTでは、装置に付属の小型試験機（DEBEN社製CT5000、図3(A)）を用いて圧力（100～5000N）、温度（-20～160 $^{\circ}$ C）、変位（最大10mm）を試料に印加しながらその場観察を行うことができる。2-2ではこの小型試験機の変位制御機構を用いたその場観察事例を紹介する。

試験機のなかで図3(B)に示すように、電線ケーブル試料に対してストロークを制御しながら外力を印加し、ケーブルを曲げることができる。これを用いて図4(A)～(C)に透視像を示すように、曲げを少しずつつきつづきながらその場観察を行うことが可能となる。なお、得られたデータに対して「素線追跡」^{*2}を行うことで、図4(D)に一例を示すように、様々な曲げ応力を受けた状態における素線1本1本の実形状を抽出することができる。異なる曲げ状態でその場観察した画像データ群に対して素線追跡を行うと、曲げに伴う素線1本1本の挙動を捉えることができ、その知見を設計や品質課題解決に活かすことができる。

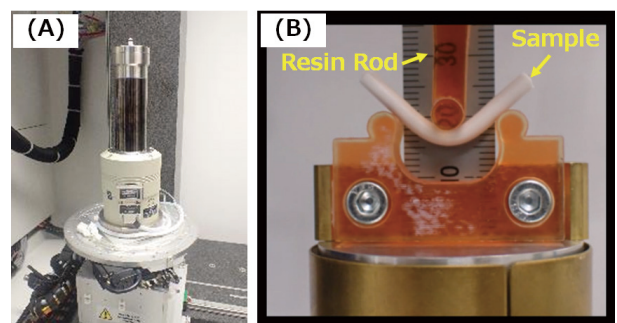


図3 (A) 装置付属の小型試験機
(B) 試験機を用いた曲げ応力印加の様子

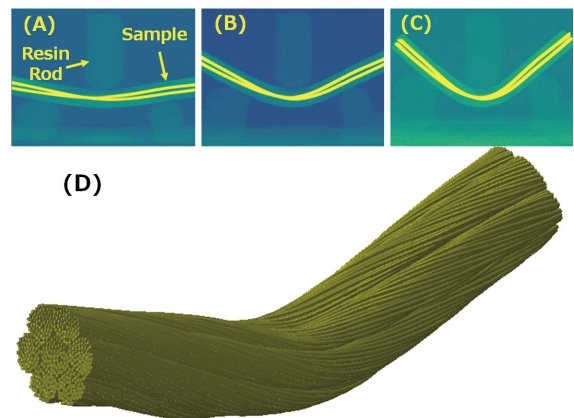


図4 図3の機構を用いたケーブル曲げ観察例

2-3 電力用ケーブルの評価

本事例は「その場観察」の範疇ではないが、ダイナミックX線CTの重要な特徴である「大きな試料を観察可能」という例として紹介する。図5(A)に示す電力用ケーブル試料（長さ1m程度。成人男性の腰以上の高さがある）について、観察中に倒れないよう円形の樹脂製治具で固定したのち図5(B)のようにダイナミックX線CTの試料ステー

ジに乗せ、観察を行った。この試料は銅線61本が撚り合わさった構造になっており、CT観察により図6 (A) に示すような断面CT像が、試料の長さ方向1m程度にわたって取得できる。これらの画像データに対して2-2と同様「素線追跡」を行うと図6 (B) のように61本の素線ごとに全長にわたってインデックスが付与される。

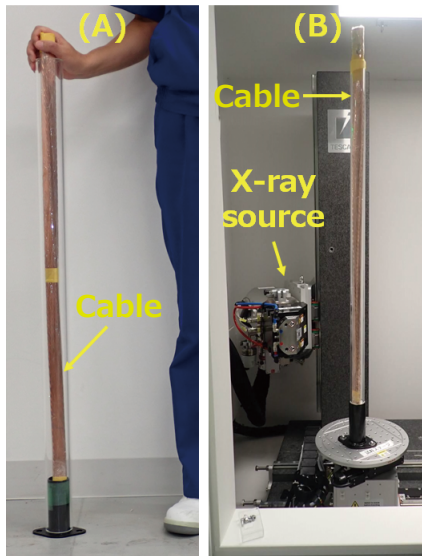


図5 (A) 電力ケーブル試料 (B) 観察の様子

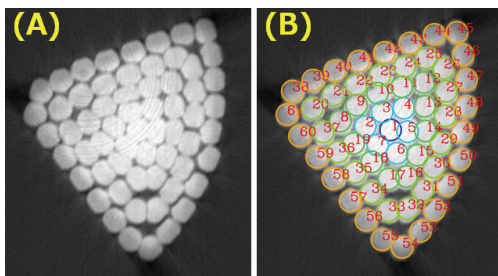


図6 (A) 断面CT像 (B) 素線追跡結果 の例

得られた軌跡データをZ (長さ方向) -X (画像の左右方向)、Z-Y (画像の上下方向) のグラフとして表示したものを図7に示す。61本の素線は中心から層状 (1, 6, 12, 18, 24本) になっているが、この5層ごとに色分けして表示している。横軸が1m (1000mm) 弱までであることに注目されたい。このように分離することで層ごとに撚りピッチなどの定量指標を実測することができ、試料の出来栄評価やその他品質の議論につなげることが可能である。電線ケーブル製品は2-2のような細いものから2-3のような太いものまで様々なスケールにわたるが、ダイナミックX線CTを用いることで多様な製品の評価に対応可能である。

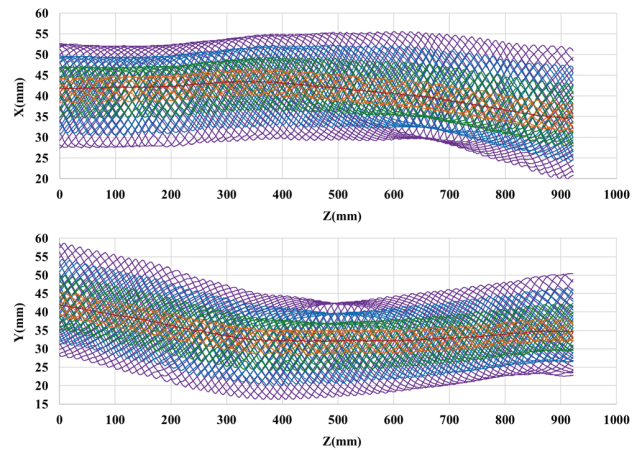


図7 図5 (B) の素線追跡結果をグラフ表示した例 (上: X座標 下: Y座標)

2-4 その他のその場観察

本論文では紙面の都合上割愛するが、当社でのその場観察は上記で示したものの以外にも多岐にわたっている。図2のダイナミックX線CTが大型の試料観察に対応できることを活用し、実使用環境を想定した所望の外力を印加する独自の治具等を作製して試料と治具ごとその場観察し、素線追跡をはじめとした各種画像解析技術による定量化を行い外力下での振る舞いを把握し設計改善に活かす、といった取り組みを様々な製品で進めている。

3. カーブトラックスライシングを用いた曲げ電線ケーブルの素線追跡

2-2、2-3でも紹介したように、電線ケーブルに対する素線追跡が標準的な定量化ツールとして用いられる。一方でダイナミックX線CTを活用したその場観察技術の進展により、大きく曲がった状態のケーブルを評価対象とすることが増えており、元々曲げの小さい状態を想定し開発された素線追跡の技術をそのまま適用することが難しくなっている。本章では、曲がったケーブルのその場観察データの画像解析に用いる当社独自技術「カーブトラックスライシング」を用いた素線追跡について紹介する。

3-1 ケーブル曲げ観察の事例

本論文では大きく曲げた状態での電線ケーブル観察事例として、図8に示すような試料の観察を取り上げる。実際のケーブル製品においてもこのような「U字曲げ」に関わる試験項目が存在し、その最中のケーブル全体および素線1本1本の評価を目的としている。この試料は21本の素線 (金属細線) を19束撚り合わせた、計399本の素線からなる電線ケーブルである。

3-2 カーブトラックスライシング

図8のように大きく曲がった状態のケーブルに対する素線追跡を、「真っすぐなケーブル」に関する素線追跡のス

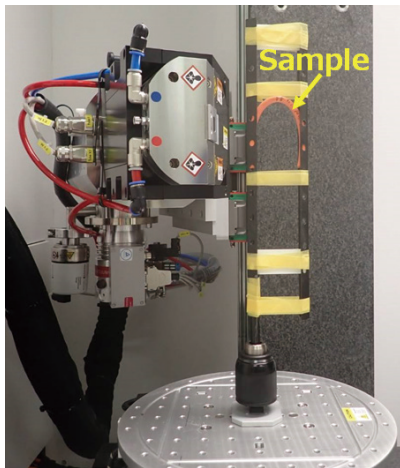


図8 U字に曲げた電線ケーブルの観察

キームに落とし込むための前処理技術について述べる。

一般的にX線CT装置は図9に示すように、空間のある方向（この例では装置の鉛直方向）に沿った断面像を出力する。この画像群においては①～③に示すように、ケーブル全体の断面および素線の形状が画像間で激しく変化するため、素線の座標抽出が容易ではない。そこでケーブルの長さ方向に沿った断面（カーブトラックスライス像）を構成する「カーブトラックスライシング」という技術を開発した。元の断面像のデータ（図9）からケーブルを3次元物体として認識し、その重心の軌跡に沿った局所的な（曲がった）座標系を定める。この局所座標に沿って元の3次元画像データを切断することで、空間の一方向ではなくケーブルの長さ方向に対して垂直な断面を構築できる。

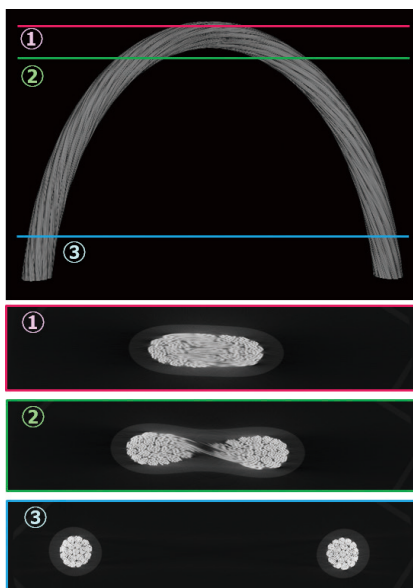


図9 X線CT装置が出力するスライス像データ

このカーブトラックスライシングは図8に示すU字のほかにも任意の形状に曲げたケーブルに対応可能であり、今後のケーブルに関するその場観察を推進していく上で必須の前処理技術となっている。

図10にカーブトラックスライス像の例を示す。このように表示すると、ケーブル端部（U字に曲げた領域から遠い箇所。①③）に比べ、U字曲げの中心部（②）ではケーブルが変形を受けていることが明瞭にわかる。今回の例では元のスライス像（図9）1129枚から、ケーブル長さ方向に沿った2666枚のカーブトラックスライス像を得た。後者はケーブル長さ方向に沿って、元のスライス像のボクセルサイズと同じピッチで出力されている。そのため曲がったケーブルでは一般に画像の枚数が数倍程度になる。

カーブトラックスライシングは一種の座標変換に相当し、データをケーブルに沿って曲がった座標系に移し、仮想的に真っすぐなケーブルとして扱うことを可能とする。

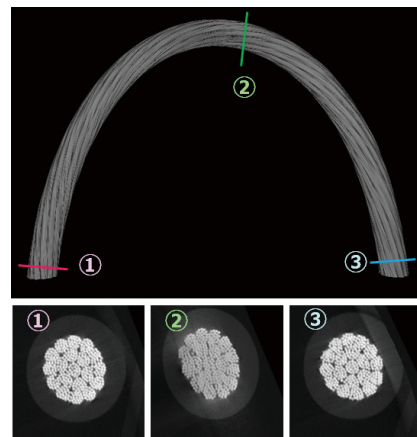


図10 図9から構築したカーブトラックスライス像

3-3 素線追跡の結果

図11はその、仮想的に真っすぐであるとして扱った素線追跡の結果例である。素線追跡はカーブトラックスライス像全2666枚に対して行われるが、ここでは図10の画像①（端部：“Cable End”）および、変形の激しい画像②（U字曲げ中央付近：“Center of U-shape”）の結果を示している。“Input”はカーブトラックスライス像、“Output”はそれに抽出した素線の座標を色付き円で重ね書きしたものである。円の色は撚り束ごとに分けている。軌跡データに対してクラスタリングを施すことで、ケーブルの撚り束ごとに自動で分離することができる。これを用いて撚りピッチなどの各種指標を撚り束ごとに算出することが可能となる。素線追跡を行うとすべての素線にインデックスが付与されるが、図11では参考に、番号1番、番号399番が付与された素線近傍の拡大図も載せている。

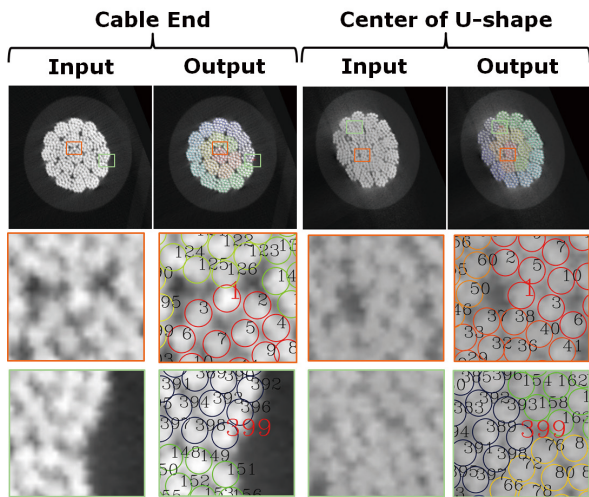


図11 図10の像に対する素線追跡結果例

今回の観察ではU字に曲げたケーブル全体を観察しなければならず、真っすぐのケーブルを観察する場合に比べ観察の倍率を高くとることができない。さらに曲げにともない、曲げない観察に比べX線が通過しなければならない物体の体積が増える。それらの影響で入力画像 (Input) において素線はやや不鮮明であるが、我々の画像解析技術によって399本すべての素線座標を捉え、長さ方向に座標接続することができた (Output)。一般にケーブルを曲げた状態などのその場観察におけるCT像は、曲げていない状態のCT像より不鮮明になるが、ここに述べたカーブトラックスライシングをはじめとした画像解析技術の進歩により、多様な変形状態での定量化を可能にしている。

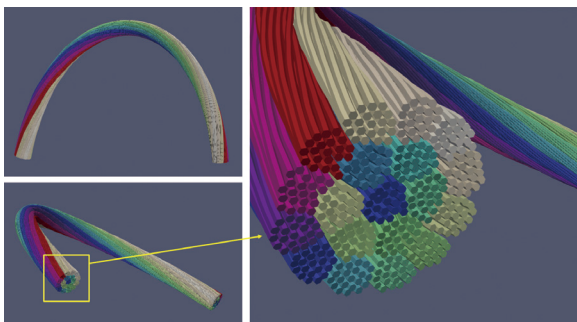


図12 最終的な曲げケーブルの軌跡データ

上記フローにより、仮想的に真っすぐとしたケーブルの軌跡を求めることができた。最後はその軌跡に対して、カーブトラックスライシングの逆変換に相当する座標変換を行うことで、真の曲がったケーブルの軌跡を得ることができ

る。その結果を図12に示す。ここでも19個の撚り束ごとに色分けして表示している。このように、ケーブルを曲げた状態のままその場観察を行うことで、曲げを受けている最中のケーブル全体および素線1本1本の実形状を明らかにすることができ、品質改善や最適設計に活かすことができる。

4. 結 言

各種製品の実使用環境を模擬した、外的負荷を印加した状態におけるX線CT観察 (その場観察) およびそのデータの各種定量化が、製品の設計および不具合改善に重要である。本論文では電線ケーブルを中心に、曲げた状態での観察、さらに曲げたケーブルの「素線追跡」を行うための重要な前処理技術である「カーブトラックスライシング」を紹介した。これらの独自技術を活用して製品設計のDX (Digital Transformation) を強化し、開発期間の短縮、製品のさらなる差別化などを推進していく。

用語集

※1 X線CT観察

X線を用いたCT (Computed Tomography) 技術。試料をさまざまな方向からX線で撮影し、その多数の「影絵」の情報から、コンピュータにより対象空間におけるX線吸収係数の空間分布を推定し、白黒のコントラストとして表示する。この技術を用いると試料の内部構造を非破壊で調べることが可能であり、本論文で述べたような、外力の印加機構およびデータ解析技術と組み合わせることで、外力による試料の形状変化に関する様々な情報を得ることが可能となる。

※2 素線追跡 (Wire-Tracking)

ケーブル製品を構成する素線1本1本の実形状を抽出する、住友電気工業の独自技術。ケーブル試料のX線CT観察を行った画像データから深層学習等を用いて素線群の座標を捉え、それらを画像間で接続する。これまでに真っすぐなケーブル⁽¹⁾、⁽²⁾ および (本論文で述べたカーブトラックスライシングが不要な) 少し曲げた状態のケーブル⁽³⁾ については事例を報告済である。

また当社では、この素線追跡の全工程を特例子会社すみでんフレンド(株)に所属する知的障がい者の方々为主体となって実行する「インクルーシブな人工知能開発」(Inclusive Artificial Intelligence Development: InAID) の取り組みを推進している⁽⁴⁾。独自技術に基づいてケーブル製品の差別化を目指すとともに、インクルーシブな組織構築を目指す多面的な取り組みとなっている。本取り組み (具体的には (2) の論文) は人工知能学会より2023年度の研究会優秀賞に選出されている。

(人工知能学会の受賞者紹介サイト)

https://www.ai-gakkai.or.jp/about/award/jsai_award-sig/

(当社ニュースサイト)

<https://sumitomoelectric.com/jp/press/2024/07/prs074>

参 考 文 献

- (1) 星名豊、山本琢磨、塩崎学、真鍋賢、中村聡、佐藤文昭、「光通信ケーブルの常温/低温形状評価」、住友電工テクニカルレビュー第202号(2023)
https://sumitomoelectric.com/jp/sites/japan/files/2023-01/download_documents/J202-13.pdf
- (2) 星名豊、加藤馨、中村聡、山本琢磨、上村重明、植木竜佑、「障がい者参加型能動学習スキームを用いた電線ケーブル製品の素線追跡と詳細品質評価」、人工知能学会第二種研究会資料 SAI-048 (2023)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsaisigtwo/2023/SAI-048/2023_01/_article/-char/ja
- (3) Y. Hoshina, T. Yamamoto, and S. Uemura, "Wire-tracking of bent electric cable using X-ray CT and deep active learning," Microscopy, dfae028 (2024)
- (4) 星名豊、「インクルーシブ人工知能開発スキームを用いたケーブル製品の評価」、KEC情報 No. 272 (2025年1月掲載予定)

執 筆 者

星名 豊* : 解析技術研究センター 主席
博士 (工学)



上村 重明 : 解析技術研究センター 主席
博士 (理学)



山本 琢磨 : 解析技術研究センター 主査



* 主執筆者