

光通信ケーブルの常温 / 低温形状評価

Shape Evaluation of Optical Fiber Cables at Room and Low Temperatures

星名 豊*
Yutaka Hoshina

山本 琢磨
Takuma Yamamoto

塩崎 学
Manabu Shiozaki

真鍋 賢
Ken Manabe

中村 聡
Satoshi Nakamura

佐藤 文昭
Fumiaki Satou

光通信ケーブルの低温環境における伝送ロス増大は長年の課題であるが、そのメカニズムはいまだ未知の部分が多い。我々はメカニズム解明に向けた最大の障害のひとつであった、光ケーブル実試料の低温環境における形状評価技術を開発し、分析・データ解析・CAEの三位一体の体制でこの課題に取り組んでいる。具体的には、既存の一般的なX線CT装置に対する簡便な後付け機構で低温観察を実施する独自技術、および不明瞭なCT像から正確にファイバ1本1本の形状を抽出し3次元的に定量化する独自技術を開発した。特に後者の技術は光ケーブルのみならず幅広いケーブル製品に適用可能で、ビッグデータを活用したケーブル製品設計のDX推進に多方面で貢献している。本論文では多心光ケーブルの低温環境での形状評価を例に、実測とCAEの両面からケーブル評価を実施する取り組みを紹介する。

The increased transmission loss of optical communication cables in low-temperature environments has been a longstanding issue. However, the mechanism of the loss is still largely unknown. We have developed a technique for evaluating the shape of actual optical cable samples in a low-temperature environment, which was one of the biggest challenges in elucidating the mechanism. The proprietary technologies include the method to perform low-temperature observation with a simple retrofit mechanism for existing general X-ray computed tomography (CT) systems and the method for accurately extracting the shape of individual fibers from indistinct CT images and quantifying them three-dimensionally. In particular, the latter technology is applicable not only to optical cables but also to a wide range of cable products, contributing in many ways to the digital transformation promotion of cable product design using big data. This paper introduces an effort to conduct cable evaluation from the viewpoints of both actual measurement and computer-aided engineering, using the shape evaluation of multi-core optical cables in a low-temperature environment as an example.

キーワード：光通信ケーブル、低温、X線CT、素線追跡、CAE

1. 緒言

現代の高度な情報通信社会を支える光通信ケーブルは非常に多数の、多いものでは数万本程度の光ファイバが束になった構造をしている(図1)。これら光ファイバの中を光が伝達されるが、ファイバ1本1本の形状特徴が伝送ロスに大きく関係する。また、光通信ケーブルは一般的に-40℃などの低温環境において伝送ロスが増加することが知られている。その原因として低温環境下でのファイバ曲がり増加など、様々な説が唱えられているものの、低温環境における光ケーブル実物の直接的な形状評価が困難であったこ

とから、それらの仮説検証およびそれを踏まえた品質改善がしにくい状況であった。

そこで当社の解析技術研究センターでは、従来より活用していた高度な分析技術およびCAE技術に、両者を橋渡しする独自のデータ解析技術を加えた体制を構築し低温ロス増のメカニズム解明に挑んでいる。

特に本テーマに対して、分析技術では低温環境における実試料観察技術を新たに開発し、さらにデータ解析技術ではCT画像データからファイバ1本1本の形状を正確に抽出する「素線追跡」の技術を新たに開発した。本論文ではこれらの取り組みを紹介する。

2. 低温環境におけるX線CT観察技術

まずは「分析技術」について述べる。本研究テーマでは光通信ケーブルを構成するファイバ1本1本の形状を捉える必要があるが、現実的な試料サイズ(数cm×数cm×数十cm程度)に対してこれを遂行可能なのはX線CT観察^{*1}のみといえる。X線CT観察自体はすでに成熟した技術であるが、本論文では光ケーブルの低温観察のために独自開発した技術について述べる。

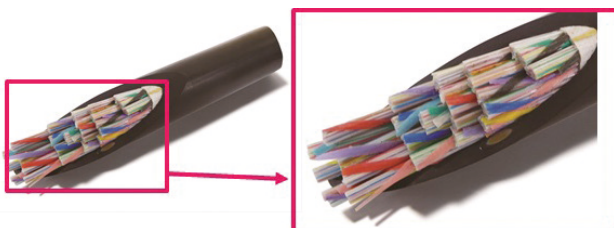


図1 光通信ケーブルの構造

2-1 低温観察の困難さ

低温環境におけるX線CT観察を行うには、単純に考えれば、試料周辺の環境を低温にした状態でX線CT観察を行えばよい。これまでに、装置自体を巨大な冷凍庫の中に置く方式⁽¹⁾や、試料を回転シャフトに吊り下げる方式⁽²⁾などが報告されている。しかしこれらの方法では、現実的な試料サイズでの冷却観察が難しい、装置の大規模な改造が必要、などの課題がある。そこで我々は、既存のX線CT装置を改造することなく、-40℃などの低温におけるX線CT観察が可能となる独自の方法を開発した。

2-2 低温観察の方法

我々が開発した方法の評価系を図2に示す。基本的な考え方は、対象試料を、装置に後付け可能な冷却機構の中に収め、その冷却機構ごとX線CT観察する、というものである。そのため冷却機構にはX線を吸収しやすい金属などは用いることができず、軽元素で、しかもなるべく低密度なものだけで構成することが必須となる。ここでは樹脂製のメスシリンダーに冷媒液体（ドライアイスとエタノールの混合液）を満たし、その中に対象試料を固定している。またメスシリンダーの周囲を、断熱のため発泡スチロールにより囲んでいる。冷媒のドライアイス対エタノールの混合比を変えることで、温度を制御することが可能となる。冷却機構は対象試料に近い順からエタノール、メスシリンダー、発泡スチロールとなり、いずれもX線吸収係数が小さいため、冷却機構ごとCT観察を行うことが可能である。なお上記冷媒はCT装置の外部で準備するため、この冷却機構に電源は不要である。

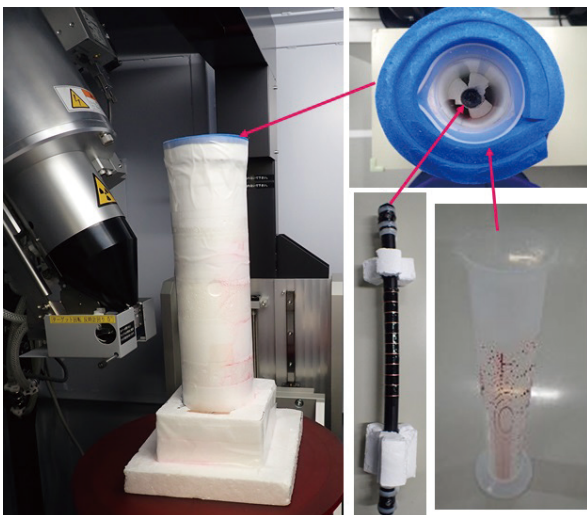


図2 独自開発した、低温X線CT観察の評価系

X線CT観察には島津製作所製SMX-225CTを用いた。一般的な市販の装置であり、特別な冷却機構などは元々設

けられてはいない。上記の手法を用いることで、このような一般的なCT装置に対して一切の改造を行うことなく、後付けで冷却機構を設けることができる。他の方法では困難であった、現実的なサイズの試料を万遍なく冷却した状態でのX線CT観察が簡便に行えるようになり、低温ロスメカニズム解明に大きな一歩を踏み出せることとなった。

なお、本論文では図2の評価系を用い、864心光ケーブルについて室温（以下のグラフなどでは“RT”と表示）、低温（-40℃。以下“Low”と表示）、低温状態から室温に戻した状態（以下“Low⇒RT”と表示）の3条件でX線CT観察を行った。

2-3 低温X線CT観察で得られる画像

2-2の低温観察手法はその簡便さの裏返しとして、以下の2つの理由により、得られるCT画像の画質が通常のCT観察よりは劣る。1つ目の理由は測定時間である。図2の冷却機構は、外部から絶えずエネルギーを供給するのではなく、事前に冷却した冷媒がその温度を保ってくれることに依存している。測定時間をかけすぎると徐々に冷媒が常温に戻っていくため、観察時間を通常必要とされる時間より短くせざるを得ず、一般的な条件での観察に比べ像の質が低下する。2つ目の理由は系の構成である。図2の簡易冷却機構では、対象試料（今回は直径1cm程度の光ケーブル）が、周囲を冷媒液体（直径数cm程度）や発泡スチロール（直径10cm程度）で囲まれた状態となる。これらは軽元素材料であるとはいえ、10cm程度の厚みになるとX線をある程度吸収してしまうため、中心に位置する光ケーブルの画質が、ケーブル単体で観察する場合に比べ低下する。以上の結果として、光ケーブルの冷却観察で得られるCT像はファイバがボケた、ノイズな状態となる（図3）。

光ファイバ1本1本の場所を人間が画像から目視で認識するだけなら、このような画質でも問題はない。しかしケーブルを構成する全てのファイバの形状を正確にデジタルデータ化するためにはコンピュータによる自動処理が必須である。住友電工グループでは、次の3章で述べる独自の画像処理技術と合わせて用いることで、このような低温観察のデータ活用を推進している。

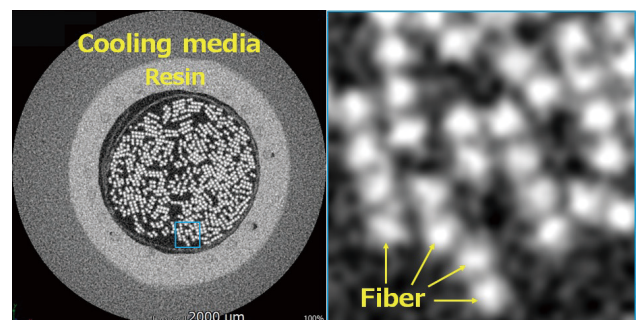


図3 低温X線CT観察の画像例

3. X線CT画像からの素線追跡技術

分析技術の次に、分析とCAEを橋渡しする「データ解析技術」について述べる。CT画像から、ケーブルを構成するファイバ1本1本の形状を正確に捉え定量化するため、住友電工独自の「素線追跡」技術を開発した。

3-1 素線追跡技術の全体概要

CT観察で得られるケーブル画像のデータは、**図3**に示したような「断層写真」がケーブル長さ方向に、典型的には数千枚～5千枚程度連なった3次元輝度データである(**図4**)。そこから、各種データ解析の手法を用いて最終的に、全てのファイバの中心座標の「軌跡」をデジタルデータとして抽出することが目的である。

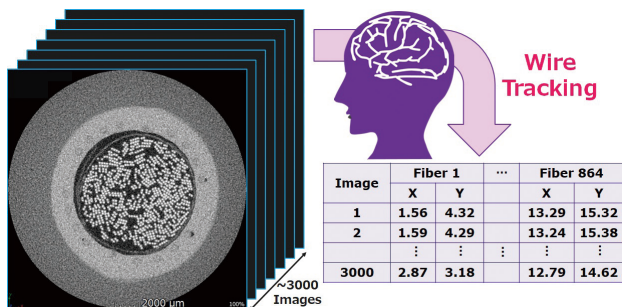


図4 素線追跡の入出力データ

軌跡を抽出するために各CT画像においてファイバ1本1本の位置を求めたいが、**図3**のようなやや不明瞭な画像に対して、単純な2値化等の画像処理を施すだけでは抽出精度が悪くなる。我々は、データから特徴を自動抽出する機械学習と、ケーブルに関する住友電工グループの知識をルールベースとして用いる古典的画像処理をブレンドした独自の画像処理技術を開発し、これをはじめて可能とした。

3-2 教師データの作成工程

素線追跡においても一般的な物体検出AIプロジェクトと同様に「教師あり機械学習」^{*2}を一部用いているが、その実施のためには良質な教師データの準備が肝となる。素線追跡技術の教師データの作成には、すみでんフレンド(株) (障がい者雇用を専門に行う特例子会社) に全面的に参加いただいている。今回の光ケーブル低温評価における教師データの例を**図5**に示す。ファイバの位置に丸をうつ(今回の例では青い丸)、という、物体検出タスクにおける「アノテーション」^{*3}作業を実施する。このアノテーション済画像(**図5 (b)**)と元画像(**図5 (a)**)のペアをAIに学習させ、さらに独自の古典的画像処理を組み合わせることで、ボケたCT像から高精度にファイバ(素線)座標を自動抽出することが可能となる。

機械学習プロジェクトにおける教師データの作成は、一般に多くの工数を必要とし、本件においても長年の間ボトルネックとなっていた。すみでんフレンドの参加により、大量のケーブルデータの解析作業を遂行可能な体制を整えることができた。現在、本論文の主題である光ケーブル評価に加え、このあと3-4で述べる電線ケーブルなど、他の評価も同じスキームで遂行しており、今後対象をさらに拡大予定である。

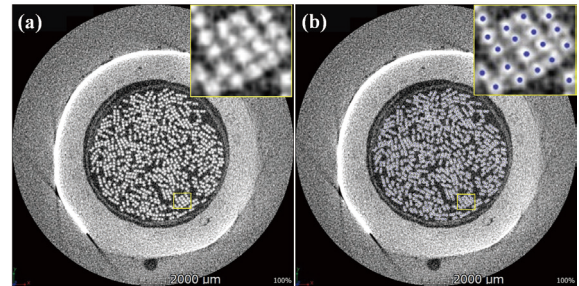


図5 すみでんフレンドにおける教師データ作成事例

3-3 光ケーブル素線追跡の結果例

今回取り上げる864心ケーブルについて、温度3条件におけるX線CT観察データに対して素線追跡を行った。常温データ解析の結果を**図6**に示す。(a)および(b)はCTスライス像1枚目および最終枚目と、得られた軌跡データとの番号対応を示す。このように全てのCT像に映るファイバ864心に番号が付与され、観察した全長にわたって「追跡」される。(c)は軌跡の一部である。グラフが混み合うため20心ずつ間引いて表示しているが、このようなX座標

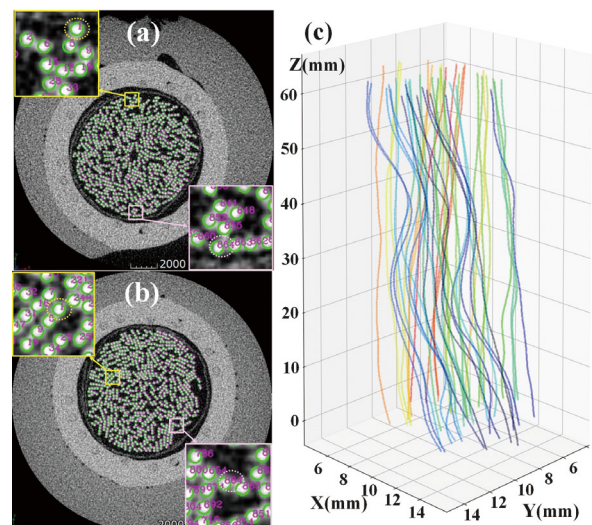


図6 光通信ケーブル素線追跡の結果例

およびY座標の数値データが全864心のファイバに対して得られる。

この軌跡データをベースにして、様々な定量指標を計算可能である。ここでは一例としてファイバの曲率半径評価を取り上げる。軌跡データを局所的に、例えば球面で近似する方法により、ファイバ1心ごとの曲率半径を、ケーブル長さ方向の関数として求めることができる。そのデータは膨大でこの紙面に表示しきれないため、代表として、求めた曲率半径のうち、観察した範囲における最小値（つまり最も曲がりやすい箇所の値）を、ファイバ864心に対して算出した結果を図7に示す。観察3条件に対して、上記最小値を大きい順に、1番目から864番目までプロットしている。これより常温から低温（-40℃）に変化することで、ファイバの曲率半径が一様に小さくなる（つまり、ファイバの曲がりやすくなる）ことがわかる。また冷却した状態から常温に戻すことで曲率半径も元に戻り、この変化は可逆的であることもわかる。このことは後述の、ケーブル全体の収縮評価の結果とも整合する。

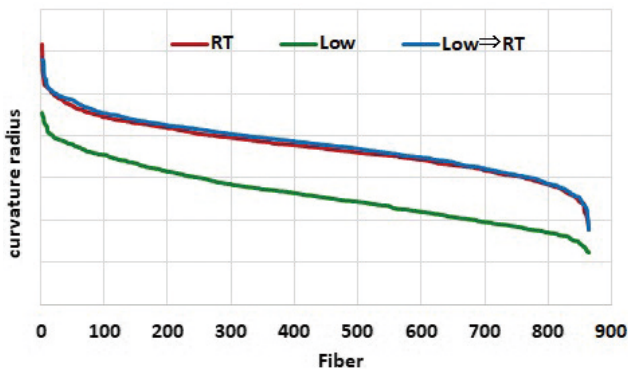


図7 曲率半径の算出結果

ファイバ1心ずつの軌跡に加え、温度変化に伴うケーブル全体の収縮評価も行った。図8(a)に示すように、対象の光ケーブル試料について事前に10mm間隔で銅箔テープを貼り付け、そのまま温度3条件においてX線CT観察を行った。Cuテープはこの系に含まれる材料の中で圧倒的に原子番号が大きいため、CT画像において白く映る（図8(b)）。このCuテープを全画像内で自動認識し（図8(c)）その面積を、ケーブルの長さを横軸としてプロットすることでケーブルの収縮評価が可能となる。

図9は、温度3条件のデータからCuテープを抽出した結果を、1番のCuテープのZ方向位置を基準に示している。これを見ると、低温においてCuテープ位置のピッチがわずかに縮んでおり、その後常温に戻すことでピッチも元に戻ることがわかる。前述の曲率半径と同様、ケーブルの収縮も可逆的である。

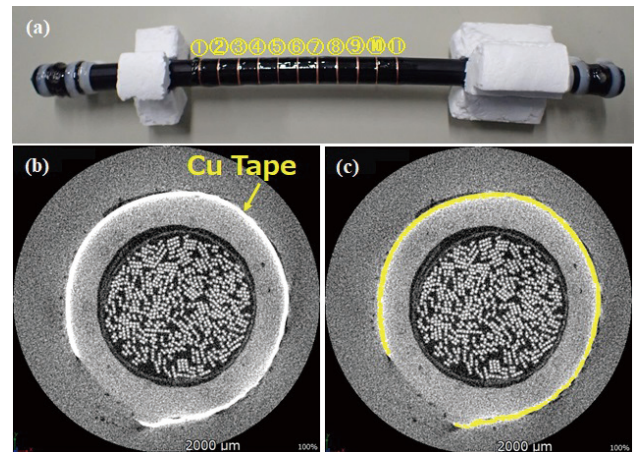


図8 ケーブル収縮評価の方法

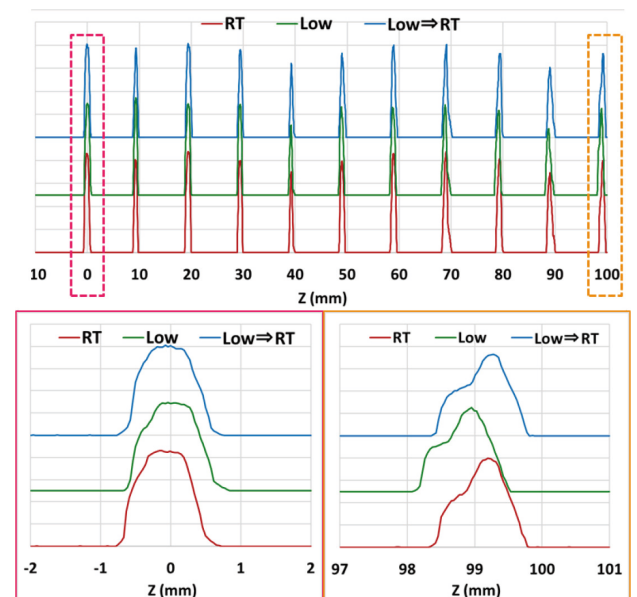


図9 ケーブル収縮評価の結果

2章で述べた独自の低温X線CT観察技術と画像解析技術を組み合わせることで、ファイバの曲率半径や、ケーブルの低温における収縮を実試料で測定することが可能となった。低温における光ケーブルのロス増加メカニズム解明、およびその改良・評価のための重要な技術である。

3-4 他のケーブル製品評価例

本論文では光ケーブルの評価をメインに述べるが、ケーブルを構成する素線1本1本の形状を正確に捉える、という技術は光通信ケーブルに限らず、住友電工グループで製造する多種多様なケーブル製品に適用可能である。ここではその一例として、電線ケーブルの評価例を述べる。

図10はCu線173本を撚り合わせた19束をさらに撚り合わせた、2重撚り構造の電線(a)を評価した例である。ケーブルは $173 \times 19 = 3287$ 本のCu線からなり、このよ

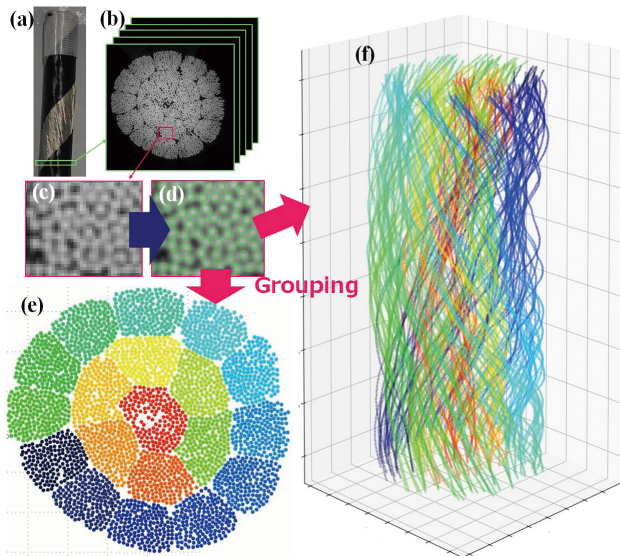


図10 電線ケーブル評価の例

うな系を現実的な時間でX線CT観察すると、図10 (b)、(c)に示すように、1本のCu線あたり4×4ピクセル程度という、自動認識が簡単ではない画像となる。光ケーブルに対するものと同じ技術を用いて、このような系に対しても図10 (d)に示すように素線の認識が可能である。実際に3287本の軌跡データを抽出することができた。

この電線は2重撚り線であり、3287本の軌跡を撚りグループごとに分けて扱うと便利である。抽出した軌跡データはデジタル数値データであるため、各種データ解析の手法を適用できる。ここでは19個のグループにクラスタリングを行った。図10 (e)に3287本のCu線を19色に色分けした結果を示す。そのグループ分け結果を用いて3次元の軌跡として表示したものが図10 (f)である(3287本を間引いて示している)。詳細は割愛するがこの結果を用いて撚りピッチや曲率など、様々な定量指標を撚りグループごとに抽出できる。当社ではこの技術を、電線ケーブルの設計や出来栄評価に活用している。

4. CAE技術によるケーブル特性評価

素線追跡技術により、素線の座標を求めることは可能であるが、ケーブル全体が収縮する時にファイバ1心にどのような側圧荷重がかかるのを見極めるのは難しい。そこで収縮時のケーブル挙動の詳細を把握することを目的として、素線追跡技術で得られたファイバ軌跡を用いて、図11に示すCAEモデルを考案した。ケーブル外被はもちろんのこと、864心の全ファイバを再現することで、ファイバ同士の接触を1心単位で把握することが可能であり、最終的にファイバ1本1本の変形形状が得られる。

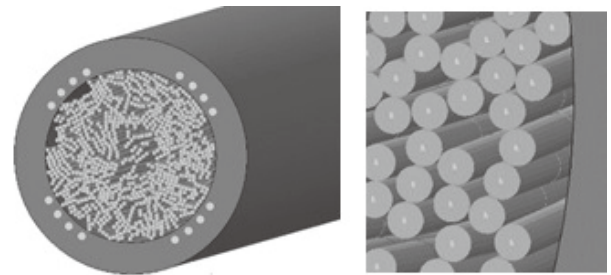


図11 光通信ケーブルのCAEモデル

4-1 ケーブル収縮および曲率半径の予測

光ケーブル低温環境でのロス増の原因として、以下のメカニズムが考えられている。まず線膨張係数の大きなケーブル外被が低温時に収縮する。一方で光ファイバは線膨張係数が小さいため、ケーブル内部で余長が生じ屈曲によりロスが増加するというものである。すなわち、3章で測定したケーブル全体の収縮及び低温環境における曲率の増加が、ロス増加現象を理解する上で重要な指標となる。これら測定値の妥当性を確認するため、上述のCAEモデルを用いて低温環境での変形挙動を解析し、測定値と比較した。

図12は、光通信ケーブルを低温環境に置いた際のケーブル全体の収縮度合い (Cable Shrink)、およびファイバ1本1本の曲がり (Curvature Radius : 曲率半径) に関する、CAEの結果に対する測定値の割合を示している。ケーブル収縮・曲率半径ともに両者はよく一致していることが分かる。このことから、X線CTと素線追跡を用いた本測定技術の妥当性が確認されると共に、本CAEモデルを用いることでこれら指標の予測も可能であると言える。

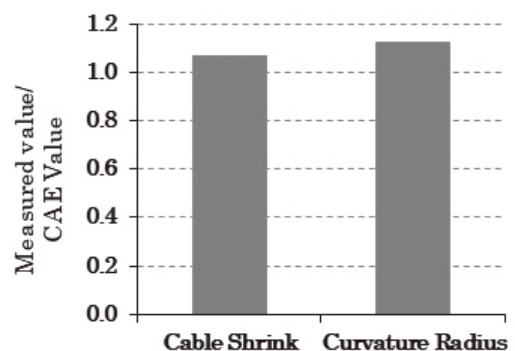


図12 実測値とCAEの比較

5. 結 言

光通信ケーブルの長年の課題であった「低温環境における伝送ロス増加」のメカニズム解明に向け、最大の障害のひとつとなっていた、ケーブル実試料の低温環境における

形状評価技術を開発した。独自開発した冷却観察技術およびCT像からの「素線追跡」技術を用いた結果、ロス増に起因すると予想されてきた低温環境におけるファイバの曲率半径減少やケーブル全体の収縮を、実測で評価できるようになり、CAE計算の結果とも整合した。

これまで直接見ることが困難であった、低温環境における光通信ケーブルの「すがた」を実測と計算の両面から評価できるようになったことで、様々な品質改善策が遂行できるようになった。光通信ケーブルを始め、住友電工グループで手掛ける多種多様なケーブル製品に対して本技術を応用し設計のDX化を推進し、革新的なケーブル製品の開発を進めていく所存である。

用語集

※1 X線CT観察

X線を用いたCT (Computed Tomography) 技術。物体を様々な方向から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物体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データ解析技術と組み合わせることで試料の形状に関する様々な定量化が可能となる。

※2 (教師あり) 機械学習

データに対して人間が明示的に処理内容を記述するのではなく、入力と出力の「事例」を(一般に)多数与えることによってその対応関係をコンピュータ自身が「学習」し、その対応をうまく再現するような処理を作り出すプロセス。本論文の事例では、元のCT画像と、すみでんフレンドの作成したアノテーション画像とのペアをAIが学習し、その対応関係を再現する処理をAI自身が構築する。いわばAIが、すみでんフレンドの作業結果を模倣していることになる。

※3 アノテーション

アノテーション (annotation) という言葉自体は「注釈」などの意味を指すが、特に教師あり機械学習の文脈では、データに何らかの情報を付加して機械学習しやすく加工すること、また教師データを作成することそのものを指すことも多い。本論文の例では図5 (a) のような元画像に対して図5 (b) のように「ここがファイバの位置である」ことを示す印を打ち、AIにそれを学習させている。データドリブンである教師あり機械学習の成否を直接的に左右する最も重要な工程のひとつ。

参考文献

- (1) 京都工芸繊維大学産学公連携センター、西川幸宏准教授研究紹介「低温下でのX線CT観察」
<https://www.liaison.kit.ac.jp/liaison/db/c02/>
- (2) 竹谷敏、表面と真空 Vol. 62, No. 2, pp. 83-87

執筆者

星名 豊* : 解析技術研究センター 主査
博士 (工学)



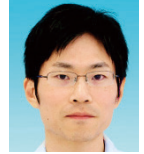
山本 琢磨 : 解析技術研究センター 主査



塩崎 学 : シニアスペシャリスト
解析技術研究センター 主幹



真鍋 賢 : 解析技術研究センター 主幹



中村 聡 : すみでんフレンド(株) マネジャー



佐藤 文昭 : 光通信事業部 主幹



*主執筆者