

## 論文の要旨

題目 微細試料分析における X線マイクロ CT の法科学的応用に関する研究  
(Forensic applications of X-ray micro-computed tomography for analyzing fragmented samples)

氏名 多田野 渉

### 第1章 序論

犯罪の手口が巧妙化・複雑化し、公判では客観的証拠の存在が重視されるようになっていく。犯罪の現場に犯人が無意識のうちに遺留する微細試料（微物）を適切に採取して科学的に分析し、犯罪との関連を客観的に明らかにすることの重要性は、ますます高まっている。日本の各都道府県警察内にある科学捜査研究所では、事件現場で採取された微物と対照試料の工業製品を比較し、同一工場で同時期に生産されたものか否かを判断する「異同識別」鑑定が行われる。代表的な微物の1つである単繊維の異同識別鑑定では、生物顕微鏡による形態観察、紫外・可視顕微分光分析による色検査、赤外分光分析による材質検査を中心に様々な検査が行われる。合成繊維は製造方法により様々な断面形状を持つことが知られ、異同識別の重要な指標の1つであるが、繊維の断面を作製して観察する必要があった。公判維持の観点から、鑑定では試料の破壊を最小限に抑える必要があるため、断面観察を省略されることも多い。

近年、低エネルギーの特性X線を利用して、有機物を高分解能で観察できる市販のX線マイクロCT装置が開発された。また、単色光の場合、光学密度（投影データ、CT値）は線吸収係数に対応し、CT画像から試料の密度が得られる。一方で、有機物微細試料に対し、X線マイクロCTを用いた数 $\mu\text{m}$ 程度の微細構造観察や密度推定はまだ行われていない。X線マイクロCTが微細試料分析に活用できることが明らかになれば、法科学的異同識別にも応用できると期待される。

このような背景から、本研究では、X線マイクロCTを用いた微細な有機物試料の分析を実現し、法科学的異同識別に応用することを目指して、単繊維の形態観察及び密度比較に取り組んだ。

### 第2章 X線マイクロCT装置及び試料保持法

#### 2.1. X線マイクロCT装置

本研究で使用したX線マイクロCT装置nano3DXの特徴について述べた。nano3DXは擬似平行ビーム方式を採用していることで、最高数百nmオーダーの高分解能測定が可能である。また、ターゲットからの特性X線の寄与が大きいことや、低エネルギーX線が有機物の測定に適している点も特徴として挙げられる。

市販のCT装置の場合、放射光とは異なり単色光ではないため、密度推定を行うには、X線を準単色光と近似できる条件を明らかにする必要がある。そこで、Cuターゲットによるアルミニウム箔の投影像撮影を行い、準単色光近似が可能な条件、具体的には、光学密度が試料の厚さに対して線形性を示す範囲について検討した。透過率が50%以上の条件下であれば、Cu  $K\alpha$ 特性X線の影響が支配的であり、準単色光近似が可能で、X線マイクロCTによる密度推定が可能と考えられる。

#### 2.2 試料保持法の検討

単繊維のCT測定を行うための試料保持法について検討した。単繊維はやわらかいため自立せず、CT測定中の試料台の回転に伴って試料が動くことと再構成に支障をきたしてしまう。単繊維を自立した状態で保持でき、取り付け及び回収が簡便で、紛失のリスクが少なく、透過率の低減やその後の検査への影響を最小限に抑えられる方法を検討した。試料保持のためにチューブ状の試料ホルダーを作製し、単繊維の保持法を3種類提案し、比較した。本研究では、広島県警察の鑑識実務で試料採取に使用されている粘着シートによる方法を採用した。粘着シートに採取された状態の単繊維をそのままチューブホルダー内に入れるだけで、完浴状態でCT測定ができた。また、単繊維の断面形状の違いを $\mu\text{m}$ スケー

ルで測定し、識別することができた。

### 第3章 中空単繊維の形態観察

異形断面の繊維の中には、中空加工して内部に空気層を持たせることで保湿性を向上させるなどの機能性繊維として製造されたものがある。X線マイクロCTは3大合成繊維とされるポリエステル、ナイロン、アクリルをはじめ、対象に制限がなく幅広く利用可能である。本章では、中空単繊維のX線マイクロCT測定を行い、断面の形態観察を行うとともに、開口率及び体積を抽出し、単繊維片の質量を推定した。

X線マイクロCTにより、直径10 $\mu\text{m}$ 以下の微細な空気層を観察することができ、単繊維の断面形状の違いを明確に識別できた。オープンソースソフトウェアImageJ Fijiを用いた2値化処理によって、繊維や空気層の部分を画像から認識し、開口率及び体積を抽出した。鉛直方向に100スライス分のCT断層像から面積等の平均値及び相対標準偏差(CV)を求めたところ、抽出量のCVは3%以内であった。中空単繊維の法科学鑑定において、X線マイクロCTにより開口率の違いを新たな識別指標の1つとすることが可能である。

CT画像から体積が測定でき、さらに密度がわかれば、微細な単繊維片の質量が推定できる。X線マイクロCT測定により、マイクロ電子天秤では秤量が困難な単繊維片の質量を推定できた。

### 第4章 単繊維の密度比較

2.2節で求めた準単色光近似の条件下で、材質の異なる単繊維のX線マイクロCT測定を行い、光学密度による密度差の比較に取り組んだ。1枚の断層像では、X線の屈折により界面が過剰に強調されることや、試料が極微細であることによる画素数の不足で単繊維本来の光学密度を評価できない。そこで、試料中心画素のまわり9画素の光学密度を鉛直方向の断層像複数枚から評価する方法を提案した。この方法であれば、外径が30 $\mu\text{m}$ 以上、長さ35 $\mu\text{m}$ 以上の単繊維であれば十分と考えられる。材質の異なる複数の単繊維を含むポリマーの密度を比較した結果、オレフィン(ポリプロピレン, PP)繊維とナイロン繊維や、ナイロン繊維とPET(またはポリイミド)の密度差は明確に識別できたが、密度の近いナイロン6とナイロン6,6や、PETとポリイミドの密度差を識別することは困難であった。

また、光学密度と密度参照値、線吸収係数の関係を調べ、検量線を作成した結果、光学密度は密度参照値、線吸収係数のいずれともよい相関を示した。グラフの切片は空気吸収に対応することから、Kaptonチューブと空気の2点で検量線を作成すれば、未知試料の密度及び質量が推定できると考えられる。さらに光学密度は、試料密度との関係に比べ、線吸収係数に対する相関係数の方が高いことが確認された。有機物どうしの密度を比較する場合は、酸素など炭素以外の元素の質量分率が光学密度に影響すると考えられる。以上のことから、密度差だけでなく線吸収係数を比較することで、単繊維を含むポリマーをより幅広く識別できる可能性がある。

### 第5章 結論

本研究では、X線マイクロCTを用いた微細な有機物試料の分析を実現し、法科学的異同識別に応用することを目指して、単繊維の形態観察及び密度比較に取り組んだ。

単繊維のCT測定を行うための試料保持用ホルダーを作製した。鑑識実務で使用されている粘着シートに採取した単繊維をホルダー内に入れるだけで、完浴状態でのCT測定ができた。機能性繊維として用いられている中空単繊維のX線マイクロCT測定を行い、断面形状の違いが明確に識別できた。オープンソースソフトウェアを用いた2値化処理と認識によって、開口率及び体積を3%以内のCVで抽出することができた。さらに、得られた体積と密度参照値を用いて、マイクロ電子天秤では秤量が困難な単繊維片の質量を推定することができた。

透過率が50%以上のとき、nano3DXのCuターゲットからのX線は、特性X線の影響

が支配的であり、準単色光近似が可能で、X線マイクロCTによる密度推定が可能である。CT断層像を複数枚用いる方法により単繊維を含むポリマーの光学密度を比較した。PP繊維とナイロン繊維の密度差や、ナイロン繊維とPET（またはポリイミド）の密度差を明確に識別することができた。

光学密度は試料密度、線吸収係数のいずれに対してもよい相関を示し、空気とポリイミド（試料ホルダー）の光学密度から、密度に関する検量線を作成することがわかった。検量線から未知の微細試料の密度及び質量の推定ができるとともに、密度差だけでなく線吸収係数を比較することで、単繊維を含むポリマーをより幅広く識別することができる可能性が示唆された。

X線マイクロCT法は、単繊維など数十 $\mu\text{m}$ 以下の微細な有機物試料の分析における新たな手法として、開口率及び体積の抽出を含む形態観察に加え、密度や質量の推定ができ、法科学的異同識別にも応用可能である。