

【ノート】

【令和7年度 放射光施設利用促進事業】

放射光の特性を生かした三次元物性イメージングの研究

伊藤 桂介、内海 宏和、曾根 宏
材料開発・分析技術部

放射光の特性を活用した非破壊三次元観察技術の県内製造業への応用可能性を検討した。本年度は、すずめっき銅線を対象として、ナノテラスBL09WにおけるX線CT測定を実施し、すず浴中で生じる銅食われの観察を試みた。その結果、高解像度かつ高コントラストな断層像が得られ、銅線がすずにより侵食される様子を可視化できた。また、放射光X線CTの活用支援に向けた前処理・スクリーニング技術として、超高エネルギーX線CTによる大型金属製品の非破壊内部観察について調査した。一体型自動車部品であるトランスアクスルを対象とした測定では、通常のラボX線CTでは観察が困難な大型金属部品の内部構造を確認でき、放射光実験に先立つ測定部位の絞り込みや相補的評価に有用であることが示された。

キーワード：放射光、X線Computed Tomography (X線CT)、すずめっき

1 緒言

X線コンピュータトモグラフィ(X線CT)は、試料を多方向からX線で透過撮影し、得られた投影像を再構成することで、内部構造を非破壊かつ三次元的に可視化する分析技術である。材料開発、不良解析、製品評価など幅広い産業分野で利用されており、実験室のX線CT装置および放射光施設のいずれにおいても同じ測定原理に基づいて実施される。一方で、ラボ機X線CTと放射光X線CTでは、使用するX線の性質が異なるため、得意とする測定対象や測定条件が異なる。ラボ機X線CTは、比較的大きな視野を確保しやすく、装置利用の自由度が高いことから、製品全体の確認や金属材料を含む試料の初期評価に適している。一方、放射光X線CTは、高輝度、高い指向性、単色化の容易さといった特徴を有し、高解像度・高S/Nの観察や、微小領域の詳細解析に有効である。

本研究では、放射光X線CTの県内製造業への活用可能性とそのための支援力向上を見据え、二つの観点から調査を行った。第一に、すずめっき銅線を対象として、放射光施設ナノテラスにおけるX線CT測定を実施し、微細な界面変化の可視化可能性を検討した。第二に、放射光実験に取り組む際の前処理、測定部位の選定、フォローアップに資する技術として、非破壊での三次元内部可視の限界を知るため、超高エネルギーX線CTによる大型金属製品の非破壊内部観察の有用性を調査した。

2 調査内容

2.1 ナノテラスにおけるすずめっき銅線の観察

すずめっきは、耐食性、防食性、はんだ付け性、装飾性の付与などを目的として、電子部品、自動車部品、建材など多様な分野で広く用いられている。めっき層の厚さや界面状態は、製品の信頼性や耐久性に影響するため、正確な評価が重要である。しかし、従来の評価では、試料を切断・研磨し、断面を電子顕微鏡等で観察する方法が一般的であり、作業に手間を要するうえ、試料が破壊されるという課題がある。本年度は、すずめっき銅線を対象として、ナノテラスBL09WにおけるX線CT測定を実施した。測定条件は、X線エネルギー4~30 keVの白色光、視野サイズ700 μm 、画素サイズ0.35 $\mu\text{m}/\text{pix}$ である。特に、銅がすずに溶け込むことで銅側が減肉する

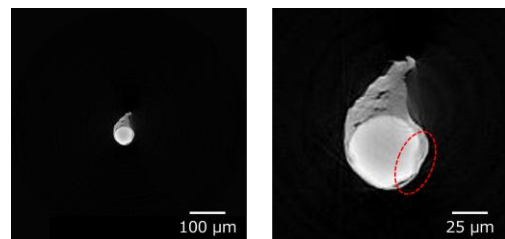


図1 ナノテラス BL09W により取得したすずめっき銅線の X 線 CT 像の断層像(左図)および拡大図(右図)。拡大像中の赤破線部において、銅がすずにより侵食された領域が確認される。

「銅食われ」に着目し、すず浴中で銅線が侵食される様子を非破壊に観察することを目的とした。

図1に、ナノテラスBL09Wで取得したすずめっき銅線のX線CT像を示す。断層像では、銅線およびその周囲のすず領域が明瞭に観察され、拡大像では銅線表面の一部が侵食されている様子が確認された。放射光に由来する高い輝度と良好な空間分解能により、銅とすずの界面形状が高コントラストに可視化されており、銅食われの進行状態を非破壊で把握できる可能性が示された。

2.2 放射光利用支援に向けたスクリーニング技術の調査

放射光X線CTは、高解像度かつ高コントラストな測定が可能であり、微小試料や局所構造の詳細解析に有効である。一方で、実際の製品をそのまま放射光施設で測定することは、多くの場合困難である。放射光CTの主な観察対象は、ミリメートルからマイクロメートルオーダーの比較的小さな試料であり、大型製品や複雑形状部品については、測定前に分解や切り出しを行う必要がある。しかし、製品の分解や試料加工には費用と時間を要し、企業にとって大きな負担となる。このため、放射光実験に先立ち、非破壊で製品内部のおおまかな構造を把握し、分析すべき部位を絞り込むスクリーニングが重要となる。一般的にはラボX線CT装置がこの役割を担うが、大型製品や金属部品が多用された製品では、X線の透過不足により良好な画像が得られない場合がある。そこで本研究では、超高エネルギーX線CTによる大型金属製品の内部観察について調査した。

超高エネルギーX線CTは、リニア加速器を線源とするX線CTであり、9 MV級の高エネルギーX線を用いることで、通常のラボX線CTでは透過困難な厚肉金属材料

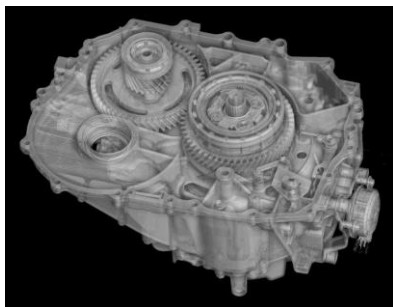


図2 超高エネルギーX線CTにより取得したトランスアクスルの透過像。大型金属部品内部のギア、軸、ケース構造が確認できる。

や大型構造体の観察が可能となる¹⁾。調査対象として、トランスミッションとディファレンシャルギアを一体化した自動車部品であるトランスアクスルを用いた。トランスアクスルは、金属製のケース内部にギア、軸、ベアリング等を含む複雑な構造を有しており、通常のX線CTでは内部全体の把握が難しい対象である。図2に、超高エネルギーX線CTにより取得したトランスアクスルの透過像を示す。撮影視野はφ600 mm×300 mm、画素サイズは0.2 mm/pixである。大型金属部品であるにもかかわらず、内部のギアや軸、ケース形状などの構造を確認することができた。この結果から、超高エネルギーX線CTは、放射光X線CTの代替というよりも、放射光実験の前段階における部位選定や、測定後の相補的評価に有効であると考えられる。すなわち、まず大型製品全体を非破壊で観察し、内部構造や注目箇所を把握したうえで、必要に応じて局所的な試料を切り出し、放射光CTやその他の高分解能分析に進むという分析フローが有効である。

3 結言

本調査研究では、放射光の特性を生かした三次元物性イメージング技術の産業応用を目的として、ナノテラスにおけるすずめっき銅線のX線CT観察、および放射光利用支援に向けた超高エネルギーX線CTの調査を実施した。すずめっき銅線の観察では、ナノテラスBL09Wを用いることで、高解像度・高コントラストな断層像が得られ、銅食われにより銅線が侵食される様子を非破壊で可視化できた。この結果は、ナノテラスのX線CTが、微細なめっき界面や金属材料界面の評価に有効であることを示している。また、県内製造業の放射光利用支援に向けた技術調査として、超高エネルギーX線CTによる大型金属製品の内部観察を実施した。トランスアクスルの観察結果から、通常のラボX線CTでは困難な大型金属部品の内部構造把握が可能であり、放射光実験に先立つスクリーニング技術として有用であることが確認された。今後は、ラボX線CT、超高エネルギーX線CT、放射光X線CTを試料サイズや分析目的に応じて適切に組み合わせることで、県内企業に対する分析提案力を高め、材料評価や不良解析の高度化に貢献していく。

参考文献

- 1) W. Sun *et al.*, Rep. Prog. Phys. **85**, 016102 (2022).