

散乱X線を用いた元素イメージングの検討

馬場理香¹, 米山明男^{1,2}

¹株式会社日立製作所, ²九州シンクロトロン光研究センター

1. はじめに

X線の高い透過能を利用したレントゲンやX線CT(Computed Tomography)は、被写体の内部を非破壊で観察する方法として、医療診断から製品の不良検査に至る様々な分野で幅広く利用されている^[1-4]。しかし、被写体の吸収率に対応した形状情報は得られるが、物体を構成する元素組成に関する情報を得ることは難しい。一方、元素分析として広く利用されている蛍光X線分析では元素固有のエネルギーの蛍光X線を対象とするため、多くの場合において試料表面近傍の分析に限定されており、数 mm より深い領域の情報を得ることは難しい。これらの課題に対応するために、本研究では散乱X線に基づいたイメージング法の検討を行った。

X線を物体に照射すると、全方向に散乱される。近年、後方（入射側）に散乱されたX線を用いるイメージング法が開発されており、透過X線の検出が不可能なトンネル壁面などインフラ構造体の非破壊検査方法や、空港などにおける高感度なセキュリティーチェック法として注目されている。高い透過能が不要なために低いエネルギーのX線の利用が可能で、金属に加えて軽元素も高感度に検出することができるが、現状では従来の透過X線イメージングと同様に試料の形状観察や定性的な材質の識別に留まっている。一方、X線散乱に関する理論的な研究は20世紀初頭から行われており、入射X線のエネルギー、散乱X線の強度、損失エネルギー、および散乱角度などを正確に計測することができれば、クライン・仁科の公式などにより元素情報が取得可能になる。

本研究では、試料によって散乱されたX線の強度、エネルギー損失、および方向を詳細に計測して元素との関連を明らかにし、元素に関する情報を得る散乱元素イメージング法を構築することを目的とする。

2. 実験

2-1 試料

計測に用いた材料サンプルの外観を図1に示す。被写体として、銅 (Cu, 原子番号: 29), ステンレス (SUS, 実効原子番号: 約 25.8), アルミニウム (Al, 原子番号: 13), 樹脂 (Resin, 実効原子番号: 約 6.5) の4種類の材料サンプルの計測を行った。



図1 試料

2-2 実験方法

実験系を図2に示す。測定対象のサンプルに対して様々なエネルギーの単色放射光を入射し、エネルギー分別型半導体X線検出器を用いて散乱X線の強度、散乱角度、及びエネルギー分布を測定する。

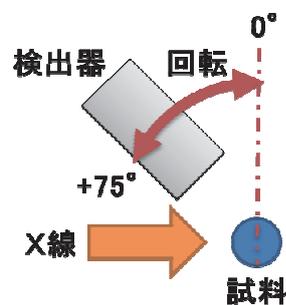


図2 実験装置

被写体に照射するX線の領域を限定するためにX線源の出力をスリットで絞り、被写体の正面から照射する。また、被写体から出てくる散乱X線を高精度で

検出するため、エネルギー分解能の高いシリコンドリフト検出器 (Silicon Drift Detector: SDD) を用いる。検出器が被写体の真上にある角度を 0 度とし、X線源側に角度+75°まで回転させることで、被写体からの後方散乱を計測する。

3. 結果及び考察

各物質に対してエネルギーと散乱量の関係を求めた。散乱角度 0 度における結果を図 3 に、散乱角度 75 度における結果を図 4 に示す。0 度と 75 度で散乱量は同様の傾向を示しており、樹脂の散乱量はエネルギーが大きくなるに従って急激に減少するが、Al, SUS, Cu の金属類では変化は小さい。15 keV、25 keV では樹脂, Al, SUS, Cu の順で散乱量は小さくなっており、35 keV では樹脂と Al が逆転し、Al, 樹脂, SUS, Cu の順で散乱量は減少する。各物質の実効原子番号は樹脂 約 6.5, Al 13, SUS 約 25.8, Cu 29 であり、15 keV、25 keV では実効原子番号が大きいほど後方散乱量が少ない傾向となっている。

金属材料において、原子番号 13 のアルミニウム(Al)、実効原子番号 25.8 のステンレス(SUS)、原子番号 29 の銅(Cu)を比較した結果、原子番号の大きい元素の散乱量が少なくなった。この結果から後方散乱X線は原子番号の大きい元素で減少する傾向がある。また、エネルギーで見ると、アルミニウムとステンレスでは 25 keV、銅では 35 keV で散乱量のピークが現れており、原子番号の増加に伴ってエネルギーの高い方にシフトしている。これらはコンプトン散乱の特徴と一致している。

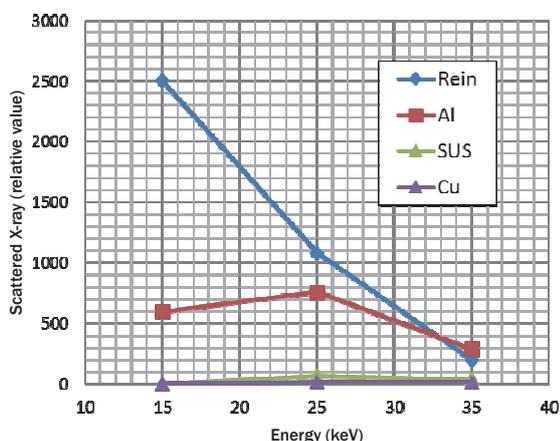


図 3 0 度における散乱量

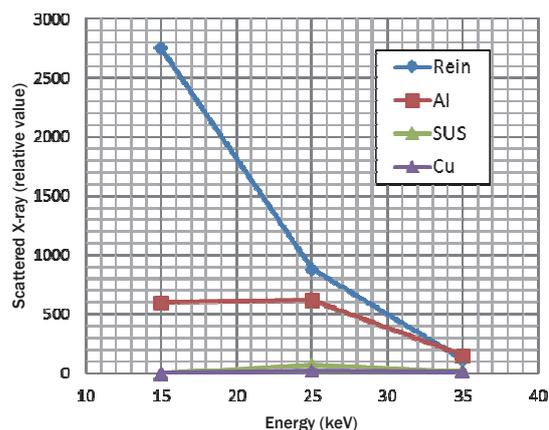


図 4 75 度における散乱量

4. まとめ

本実験では、試料によって散乱されたX線の強度、エネルギー損失、および方向を計測し、元素との関係について検討を行った。その結果、コンプトン散乱を主成分とする後方散乱X線を測定することにより、被写体内部の元素情報を非破壊で測定可能な見通しが得られた。今後、試料深部の元素分析を可能とすることにより、新しい医療診断法、インフラ等の劣化評価、メタンハイドレートなどエネルギー資源の検証など様々な分野への適用が可能になると期待される。

参考文献

- [1] 米山明男, "放射光イメージングの産業利用と今後の展望", 第 10 回九州シンクロトロン光研究センター研究成果報告会, 佐賀県鳥栖市 (2016).
- [2] A. Yoneyama, R. Baba, and K. Hyodo, "Novel segmentation method using absorption- and phase images", European Congress of Radiology 2017, B-0313 (2017).
- [3] R. Baba, A. Yoneyama, and K. Takahashi, "Three-dimensional non-destructive imaging method of structural and elemental information using scattering X-rays", 5th International Paleontological Congress (2018).
- [4] A. Yoneyama, R. Baba, and Y. Hira, "Detailed three-dimensional modeling of paleontological samples using combination of synchrotron-based fine CT and 3D printings techniques", 5th International Paleontological Congress (2018)