

〔報告〕 文化財の X 線透過撮影時における 照射条件評価法の開発

犬塚 将英

1. はじめに

文化財の科学調査では、資料採取が許されず、非破壊・非接触を大前提とした手法を要求されるケースが多いことから、X線を用いた調査方法は保存科学の歴史の中で重要な役割を担ってきた。例えば文化財の内部構造を調べるためにX線透過撮影が行われてきたが、①調査用の機器は一般に大型、複雑かつ高価である、②よって、移動が困難な文化財の現地調査が難しい、③管電圧、管電流、照射時間、照射距離などのX線照射条件は文化財を構成している物質に大きく依存するが、照射条件に関する定量的な情報は十分に整理されていない、などのように改善の余地が残されていると考えられる。

本研究では、文化財を構成している物質とX線との相互作用を定量的に評価するための理論的及び実験的手法を確立し、新しく開発を行っているX線検出器を用いて移動が困難な文化財の内部構造に関する調査を行うことを目指している。これまでに、移動が困難な文化財を現地において非破壊調査をすることを目的として、信号増幅の主要な部分にガス電子増幅フォイルを用いた新しいX線検出器の開発を行ってきた^{1~3)}。ここでは、これまでに行ってきた検出器開発の経過報告に加えて、X線透過撮影のための最適条件を導き出す手法を確立するために、シミュレーションソフトウェア「GEANT4」を導入してみたので、その紹介及び得られた結果について報告をする。

2. 文化財を構成する材料とX線との相互作用の定量的な評価方法の構築

X線透過撮影を用いた調査では、修理を予定している文化財の内部構造を調べたい時などに重要な情報を提供することができる。このような保存科学的な調査のみならず、絵画技法、彫刻や工芸品の構造などを明らかにすることが可能なので、美術史や考古学などの研究分野でも重要な役割を果たしている¹⁾。

しかし、調査を行いたい文化財の種類、そしてそれらを構成している材質の種類（金属、木材等）や寸法は多岐にわたっている。さらに、調査対象の文化財が単一の材質で構成されている場合よりは、むしろ異なる材質により複合的に構成されている文化財を調査する場合の方が一般的である。よって、X線透過撮影を行って内部構造を調査する時に、X線管球の管電圧、管電流、照射時間、照射距離などの最適条件は被写体の大きさや材料の種類に大きく依存する。このような状況を鑑みると、文化財を構成する材料とX線との相互作用を定量的に評価し、調査に先立ってX線を照射する時の最適条件を予測することができれば、移動が困難な文化財を現地で調査する時の効率や得られる結果の再現性が向上することが期待できる。このような事前の定量的な評価や基礎データの蓄積は、可搬型X線検出器の開発と同様に重要な課題である。

2-1. GEANT4シミュレーション

このようなX線照射条件に関する定量的な評価を行うために、シミュレーションソフトウェア「GEANT4」を用いることにした。GEANT4は素粒子が物質中で引き起こす相互作用を計算し、その振る舞いを再現するためのC++で書かれたソフトウェアである⁴⁾。高エネルギー物理学の分野で開発され、その有用性は大型加速器実験や宇宙物理実験、近年では医療機器の開発分野でも実証されている。

GEANT4を用いると、X線照射条件を検討するための必要事項である①照射X線の条件、②光電効果やコンプトン散乱など、物質とX線との相互作用（幾何学的な歪みや散乱による影響を含む）、③検出器の応答（検出効率やダイナミックレンジなど）、を定量的に評価することができる。ここでは②に着目し、異なるエネルギーのX線を入射した場合の物体との相互作用に関する計算結果を視覚的に示して報告する。

3. GEANT4を用いた計算例

本研究では、OS環境としては、LinuxディストリビューションのひとつであるScientific Linux 4.7を用いた。Scientific Linux 4.7上でGEANT4をインストールし、以下に示すような計算モデルを作成して計算を行った。

ここでは、内削りを有する木彫像を被写体としてX線撮影を行うケースを想定した。GEANT4には、図1に示すような5cm×5cm×20cmの穴が空けられた10cm×10cm×30cmの物体を入力した。この物体はセルロースでできていると仮定し、その元素の構成比をC:H:O=6:10:5とした。また、この物体の密度は0.4g/cm³とした。そして、空気中にあるこの物体にX線を入射した時に、物体中でどのように相互作用するのかをGEANT4を用いて計算した。

エネルギーが15keVの光子を1000個発生させて、物体に対して垂直に照射した場合の計算結果は図2のようになった。この計算では、物体中でのX線の光電効果とコンプトン散乱、物体表面での反射が考慮されている。また図3では、図2で示されている結果を入射X線の方向とは垂直の方向から見ることにより、物質量に対するX線の透過量がどのように変わるのかを示した。物体中に空洞がある部分は空洞が無い部分よりもX線の透過率が高い様子を視覚的にとらえることができる。一方、図4では100keVの光子を発生させた場合の計算結果を示した。このエネルギー領域では透過率が高いために空洞の有無によるコントラストが得られないことがわかる。このようにして得られる透過X線の分布を調べることにより、X線透過画像のコン

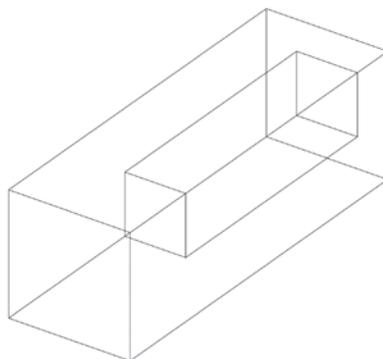


図1 GEANT4に入力した空洞を有する木材

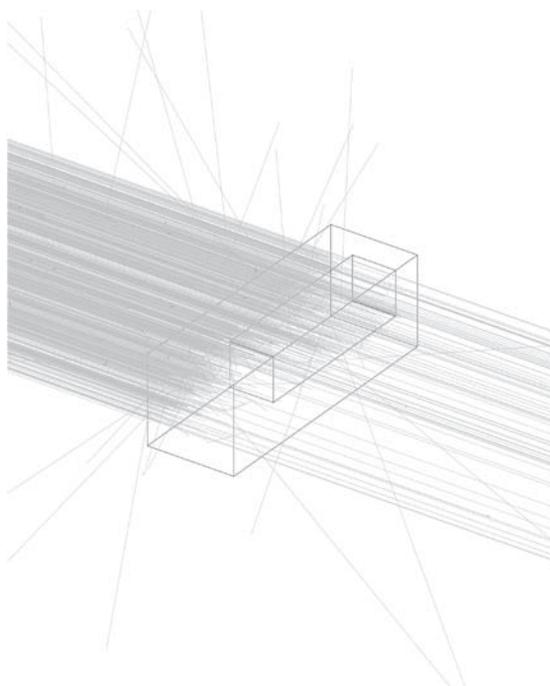


図2 15keVのX線を照射した時の相互作用

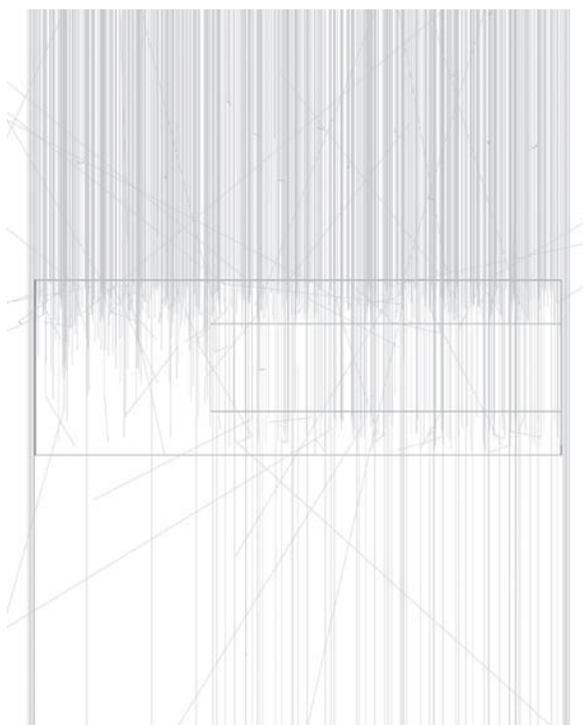


図3 物質質量とX線(15keV)の透過量との関係

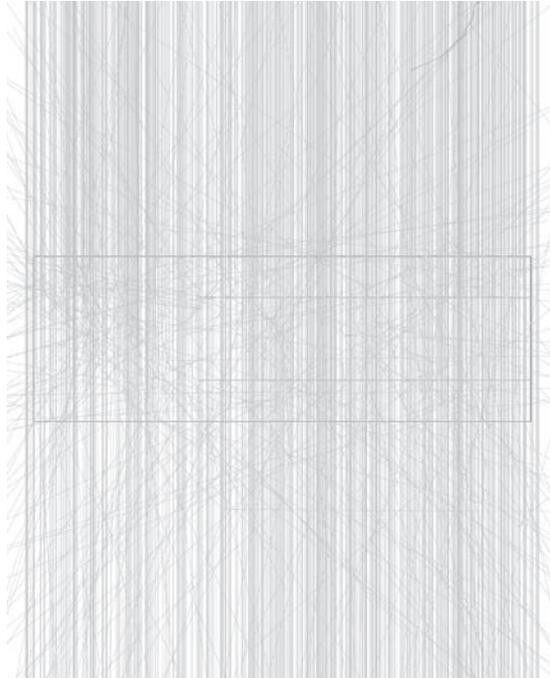


図4 物質量と X 線 (100keV) の透過量との関係

トラストを定量的に予測することが可能となる。今後は検出器の応答も考慮したうえで、実際の撮影結果との比較を行うことにより、文化財の X 線透過撮影における GEANT 4 の有用性の評価を行う予定である。

4. まとめと今後の予定

X 線透過撮影のための最適条件を導き出す手法を確立するために、シミュレーションソフトウェア GEANT 4 を使用してみた。その有用性を示すために、ここでは空洞を有する木材を被写体として想定し、15keV の X 線と 100keV の X 線を入射した場合の物体との相互作用に関する計算結果を視覚的に示した。

今後は、検出器の応答も考慮したうえで、計算で得られる透過 X 線のコントラストと実際の撮影結果との比較を行うことにより、文化財の X 線透過撮影における GEANT 4 の有用性の評価を行う予定である。さらに、近年では博物館等でも文化財の X 線透過撮影を行うところが増えているが、作業者の安全を考慮した放射線防護のための計算も GEANT 4 を用いて行う予定である。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金若手研究 (A) 「移動が困難な文化財のためのエックス線を用いた非破壊調査法の構築」(平成21年度)によるものです。また、GEANT 4 を導入するにあたり、高エネルギー加速器研究機構の岩井剛氏には多大なるご協力をいただきましたので、ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 犬塚将英：ガス電子増幅フォイルを用いた文化財調査用X線検出器の開発，保存科学，45，121-132（2006）
- 2) 犬塚将英，李栄篤：ガス電子増幅フォイルを用いた文化財のX線透過撮影のための検出器の開発，保存科学，46，95-104（2007）
- 3) 犬塚将英：ガス電子増幅フォイルを用いた文化財のX線透過撮影のための検出器の開発II，保存科学，47，173-178（2008）
- 4) S. Agostinelli et al.: GEANT 4 – a simulation toolkit, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 506 (2003) 250-303

キーワード：X線透過撮影（X-ray radiography）；可搬型検出器（portable detector）；相互作用（interaction）；GEANT 4 シミュレーション（GEANT 4 simulation）

Development of Methods for Evaluating the Conditions for X-ray Radiography of Cultural Properties

Masahide INUZUKA

X-ray radiography has played an important role in the field of conservation science. Recently, the demand for *in-situ* analysis has increased further. In this situation, it is valuable for conservation scientists to develop new X-ray detectors that are suitable for their own studies. In addition, it is also valuable to develop methods for evaluating quantitatively the conditions for X-ray radiography — for instance, X-ray tube voltage and irradiation time.

For this purpose, the GEANT4 simulation software is one of the candidate tools. In this study, a wooden block with a hole was selected as a material for X-ray radiography, and interaction of X-ray and the material was calculated using GEANT4. The result of calculations was visualized also by using GEANT4.