

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月15日現在

機関番号：82620

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21680056

研究課題名（和文） 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手法の構築

研究課題名（英文） Development of method of non-destructive investigation using X-rays for cultural properties which are difficult to be transported

研究代表者

犬塚 将英 (INUZUKA MASAHIDE)

独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存修復科学センター・主任研究員

研究者番号：00392548

研究成果の概要（和文）：エックス線透過撮影は文化財の内部構造を非破壊・非接触で調べるための重要な調査手法のひとつである。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手法の開発、移動が困難な文化財を調査するための機材の開発、そしてこれらの成果を踏まえて現地調査を実施した。

研究成果の概要（英文）：X-ray radiography is one of the important methods for non-destructive investigation of inner structure of cultural properties. In this study, the method for evaluating quantitatively the conditions for X-ray radiography by computing interaction of material and X-ray has been developed, and equipments for X-ray radiography of cultural properties which are difficult to be transported has been constructed. Furthermore, some *in-situ* investigations have been conducted by using the above results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	8,300,000	2,490,000	10,790,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：文化財科学、文化財科学

キーワード：文化財の内部構造、X線照射条件、シミュレーション、可搬型検出器

1. 研究開始当初の背景

文化財保存科学の研究分野では、文化財を構成する材料と製作技法を科学的に解明することが重要な研究課題の一つであると言える。しかし文化財の調査では、試料採取が許されず、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線透過撮影、X線回折、蛍光X線分析などの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、X線透

過撮影は、修理を予定している木製文化財の虫害の状況を把握したい時や、地震対策を要する仏像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ため、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。

X線透過撮影を行うにあたっては、X線管球に与える電圧（管電圧）などの照射条件を

最適にすることが重要である。従来の調査では、条件の最適化は担当者の経験や勘によるところが大きかったが、結果の再現性や調査の効率に問題があった。ところが、素粒子物理学の分野で開発されたシミュレーションソフトウェア「GEANT4」を用いることにより、文化財のX線透過撮影のための最適条件を、科学的な計算結果に基づいて、定量的に与えることができることに着目した。

一方、X線検出器の方へ眼を向けると、これまでに主に医療分野で利用されてきたイメージングプレートやフラットパネルディテクタなどが文化財調査へ適用されるようになってきた。広いダイナミックレンジを有すること、デジタル化された画像データを得られるので補正や画像処理が可能であることなどが特長である。しかし、これらの装置は非常に大型、複雑かつ高価である。よって、移動が困難な文化財に関する現地調査は依然として容易ではない。そこで、ガス電子増幅フォイル（以下はGEMと略す）を利用することにより、簡便、安価かつ可搬なX線検出器を製作できる可能性にも着目した。平成17～19年度文部科学省科学研究費補助金若手研究(A)「文化財の透過撮影および材質調査を目的とした新しいX線検出器の開発」により、GEMを用いたプロトタイプ検出器を製作し、本研究につながる基礎研究を行った。

2. 研究の目的

文化財のX線透過撮影を行うにあたっては、その大きさや材質に応じて、X線管球の管電圧、管電流、照射時間などのパラメータを最適な値に設定しなければならない。しかし従来の調査では、条件の最適化は担当者の経験や勘によるところが大きかったため、科学的な根拠に乏しく、結果の再現性や調査の効率に問題があった。このような現状を改善するために、素粒子物理学の分野で開発されたシミュレーションソフトウェア GEANT4を導入することにより、文化財を構成する物質とX線との相互作用を計算して、X線透過撮影のための最適条件を定量的に導き出す手法を確立することが研究目的の一つである。

移動が困難な仏像の内部構造の調査、日本の音楽史に関わる龍笛等の横笛の構造調査、修理を要する木製文化財の内部調査など、X線透過撮影を用いた現地調査への要望は増加する一方である。本研究では、可搬型の空冷式X線管球（～200kV）を用いて、移動が困難であるが故にこれまで調査が困難であった文化財の内部構造の非破壊調査を目的としたフィールドワークを行うことも研究目的のもうひとつの課題である。

GEMを用いたX線検出器本体の開発につ

いては、信号増幅率に関する性能評価は平成20年度までの研究成果により明らかになり、残された課題は信号を高速に読み出す回路の開発であった。しかし、信号読み出し部分の開発は本研究の枠組みを超えるので、他の研究事業の課題に預けることにした。

以上のようにして得られた研究成果から、移動が困難な文化財のための非破壊調査の方向性の検討を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 文化財を構成している材料に応じたX線透過撮影のための最適条件を定量的に導き出すために、素粒子物理学の分野で開発されたシミュレーションソフトウェア GEANT4を用いて、文化財を構成する物質とX線との相互作用を計算し、X線の透過率を定量的に算出するための手法の確立を行った。

本研究では、内剝りを有する木彫像や古墳壁画を想定し、様々なエネルギーのX線を入射させた場合の透過率の違いを計算して、X線管球の管電圧の最適条件の考察を行った。

(2) X線透過撮影による調査を行うにあたっては、X線を発生させるためのX線管球と（イメージングプレート、フラットパネルディテクター、開発中のGEM検出器などの）X線検出器が必要となる。調査の対象となる文化財はこれら2つの機材の間に置かれることになる。よって、機材の転倒などによる事故が万一にも起こらないようにするための万全の準備が必要である。このような状況を鑑みて、本研究では、X線管球とX線検出器のための専用の固定具の設計と製作を行った。移動が困難な文化財の現地調査に必要な機材なので、分容易に分解と組立が行えるような構造となるように設計を行った。

(3) 移動が困難な文化財として、例えば塑像や建造物など、通常美術工芸品などと比較すると物質量が大きい調査対象も想定される。このような文化財の内部構造を調査するためには、透過率を上げるために、高いエネルギーのX線を用いる必要が生じる。本研究では、(1)で示した方法でX線照射のための最適条件をあらかじめ算出しておく、

(2)で示した専用固定具でX線管球と検出器の設置を行い、文化財の内部構造の現地調査を行った。

4. 研究成果

(1) GEANT4を用いたX線の照射条件を評価した例をここでは2つ報告する。

ひとつめは、内剝りを有する木彫像を被写体として想定した計算例である。被写体の材質はセルローズ、元素の構成比はC:H:O=6:10:5、密度は0.4g/cm³と仮定した。

また被写体の幾何学的な構造は図1に示したように、5cm×5cm×20cmの穴が空けられた10cm×10cm×30cmの直方体とした。そして、コンピュータ上でエネルギーが15keVの光子を1000個発生させて、被写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。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3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。

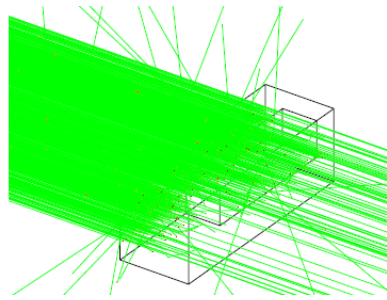


図1 内割りを有する木材にX線を照射した時の相互作用の様子

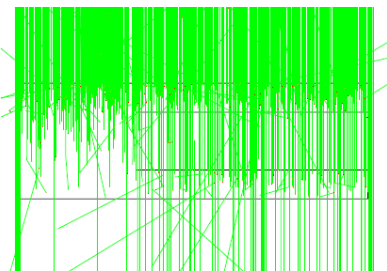


図2 物質とX線(15keV)の透過量との関係

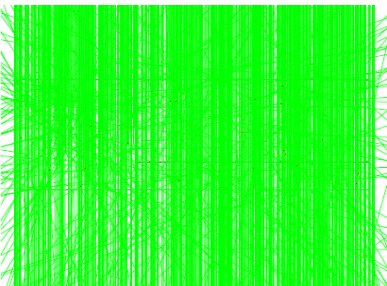


図3 物質とX線(100keV)の透過量との関係

もうひとつの例は、顔料を塗ったしっくい板の場合の計算結果である。図4に示したように、このようにして得られる透過X線の分布を調べることで、X線透過画像のコントラストを定量的に予測することが可能と

なった。

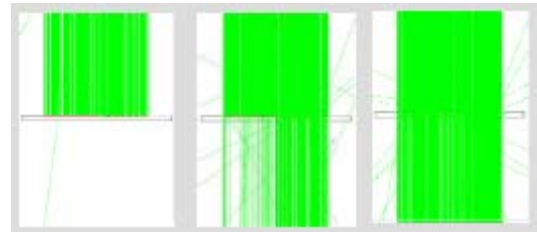


図4 顔料を塗った板に10keV(左)、30keV(中)、50keV(右)のX線を入射させた時のX線の透過量

(2) X線透過撮影による調査を行うにあたっては、X線管球と検出器が必要となる。調査の対象となる文化財はこれら2つの機材の間に置かれることになるので、機材の転倒などによる事故が万一にも起こらないようにするための万全の準備が必要である。このような状況を鑑みて、本研究では、専用の可搬型固定具の設計と製作を行った。図5に製作を行った固定具の写真を示す。手前にあるのが、管電圧を200kVまで上げることができるX線管球とそれを固定するための機材である。また、奥に見える機材はイメージングプレート用の固定具である。屏風などの大面積の文化財の撮影にも対応できるように、X線管球と検出器を上下左右に動かすことができる構造となっている。また、これらは移動が困難な文化財の現地調査に用いるための機材であるので、組立と分解を容易に行えるように設計をした。



図5 X線管球と検出器用の専用固定具

(3) (1)で示したGEANT4を用いた方法でX線照射条件のための最適条件をあらかじめ算出しておき、(2)で示した専用固定具でX線管球と検出器の設置を行い、文化財の

内部構造の現地調査を行った。ここでは実際に行った調査の事例を2つ報告する。

ひとつめは外部へ持ち出すことが許されなかった仏像の内部構造や納入品の有無を調べた調査事例である。図6はその仏像の頭部のX線透過撮影によって得られた画像の一例である。



図6 仏像の頭部の内部構造を示すX線透過画像の例

もうひとつの事例は、大型の哺乳類の標本資料を調査した時のX線透過画像である(図7)。この大型標本の展示のための内部構造を調べた結果、木造の骨組みと大量の釘が用いられていることが明らかとなった。



図7 標本資料の内部構造を示すX線透過画像の例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① 犬塚将英、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、保存科学、査読有、49号、2010、125 - 130

[学会発表] (計2件)

① 犬塚将英、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 日本文化財科学会第28回大会 筑波大学 2011.6.11-12

② 犬塚将英、文化財調査用可搬型X線検出器の開発研究 日本文化財科学会第26回大会 名古屋大学 2009.7.11-12

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

犬塚 将英 (INUZUKA MASAHIDE)

独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存修復科学センター・主任研究員

研究者番号：00392548