

論文

高エネルギーX線を集光する多段屈折レンズの性能向上と評価

河原 大吾*¹⁾

Development and evaluation of x-ray refractive lens for high-energy x-ray focusing

Daigo Kawahara*¹⁾

An x-ray compound refractive lens (CRL) is suited for high resolution imaging with hard x-rays. We produced several prototype CRLs by machining holes in polystyrene and aluminum rods. We exposed imaging plates, positioned at various distances from the lens end, to hard X-rays that had passed through the CLR. Using this method, we confirmed the refraction of the hard X-rays.

In this study, we improved the CRL and investigated the influence on x-rays; by machining a groove on a board we could increase the amount of transmitted x-rays. The developed CRLs obtained an increase in transmitted x-rays of 10-100times which is enough to be used in x-ray radiography. The focusing effects of the CRLs increased with decreasing x-ray energy.

キーワード：X線, 多段屈折レンズ, 高解像度イメージング

Keywords：X-ray, Compound refractive lens, High resolution imaging

1. 背景と目的

非破壊検査において、X線透過像による内在欠陥評価は直感的な理解が容易なためよく利用されている。製品の小型化が進むにつれ、部品中の微小な欠陥を検査する需要は高まってきている。

解像度を高める方法としては発生させるX線のビーム径を小さくするマイクロフォーカスシステム等の技術が用いられているが、X線発生部が小さいほどX線発生時の熱による陰極の損耗が激しくなるため高エネルギーで透過力の高いX線を使用することが困難である。

近年、真空状態を必要としない極微細観察を目的として全反射や屈折を利用したX線レンズの開発が進められている⁽¹⁾。しかし、高エネルギーX線になるほど集光に向かわないX線の除去が困難になるなどの理由から高エネルギーX線に適用はされていない⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

現在、X線に対する多段凹面レンズの適用はシンクロトロン等の加速器を用いて行われている。このとき用いられているX線はコヒーレントで扱いが容易であり、20~50keVと比較的低エネルギーのビームである。

多段凹面X線レンズを一般的な工業用X線管球を用いた透過試験に適用するためにはいくつかの課題がある。まず、工業製品の多くを占める金属製品を透過試験するためには100keV以上の高エネルギーで使用可能でなければならない。X線レンズは反射型、屈折型などが研究されているが、

高エネルギーX線への適用を考えると、凹面レンズを多段に重ね合わせる屈折型が適している。このときX線の屈折は高エネルギーX線になるほど小さくなるため、焦点距離の短縮が課題となる。また、一般的な工業用X線管球の発生するX線は放射状であり、散乱線等の集光に向かわないX線の影響低減がもうひとつの課題となる。

多段凹面レンズ適用時の焦点距離(f)は、凹面曲率(R)、レンズ重ね数(N)、屈折率(n)と次式の関係にある(図1)。

$$f = \frac{R}{2N(1-n)} \dots (1)$$

これらのX線レンズにおいて、レンズ凹面曲率・レンズ数等の設計を行い、集光度・焦点距離・集光するX線の透過率等について最適な設計を模索する。

また、一般のX線源から発生する放射状のX線について、レンズ中心近傍に入射するX線の中には集光に向かわない方向のX線も含まれる。それらは集光に向かうX線に比べてレンズ内の光路が長くなるため、レンズ材による吸収によ

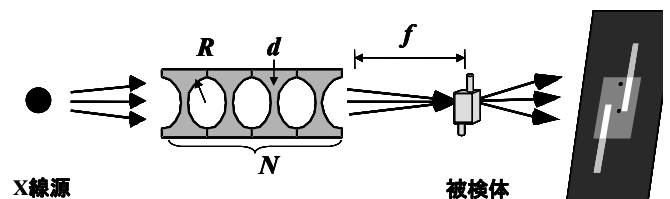


図1. 多段凹面レンズによる集光の概略

R: 凹面レンズ曲率, d: 凹面レンズ間距離, N: レンズ数, f: 焦点距離:

り直進成分の多いX線と比べて相対的に弱められると考えられる。

最終的には室内における実用を考え、焦点距離 100cm 程度、解像度 100 μm 以下の観察可能な系を、現行の透過試験で用いる実効 X 線エネルギー条件 (50~400keV) に適用する必要がある。これにより、依頼試験として従来請け負ってきた透過試験の幅が広がりより特殊なニーズに応えることができるかと期待する。実際、X線透過撮影試験においてより小さな欠陥の有無を判定したいという要望が毎年数件寄せられており、潜在的な要望はさらにあると思われる。また、加速器のような施設を必要としないため、一般の試験機関における透過試験や X 線マイクロ CT 試験においても同様の効果が期待できる。

これまでの研究において、X線の屈折と透過を利用して、凹面レンズを多段に配置することで集光度を高める X 線レンズの試作を行い、高エネルギー X 線の集光を検証してきた。しかし、試作したレンズにおいて透過する X 線の量が少なく、改良が必要であった⁽⁵⁾。

本研究では、凹面間距離の短縮を行うレンズ加工法の変更により、透過 X 線量の改善を行った。また使用する X 線エネルギーによる X 線のレンズによる集光度を調べた。

2. 実験方法

2.1 凹面間距離を短縮する多段凹面レンズの製作 過去に試作した丸棒に連続孔加工を施したレンズでは微小加工用工具の剛性の限界からレンズ凹面間距離が1mmとなり特にアルミニウムレンズにおいてX線透過撮影に用いるには透過X線量が不足した。

そこでレンズ凹面の加工法を、工具に負担の少ない板材への溝加工に変更した。レンズ材料にはポリスチレン、及びアルミニウムを用いた。

厚さ 3.1mm 及び 5.1mm、縦横 45mm×45mm の板材に、NC ボール盤を用いて溝底における残り板厚 (凹面間距離: d) が 0.1mm となるように断面曲率 (凹面曲率: R) をそれぞれ 3mm, 5mm として溝加工を施した (図 2)。これらを適宜枚数組み合わせることで多段凹面レンズとして用いた。レンズ凹面間距離は加工法変更前の 1/10 まで短縮することができた。

2.2 多段凹面レンズのX線透過率 試作した多段凹面レンズのX線透過率を測定して、過去に試作した多段凹面レンズ、及び一般的に透過撮影に用いられる付加ろ過板装着時の透過率と比較した。

図 3 のように X 線発生装置 (MG452: エクスロンインターナショナル社) に試作した多段凹面レンズを装着した。多段凹面レンズには曲率 3.0mm, または 5.0mm のアルミニウムレンズをそれぞれ 30 枚, 24 枚組み合わせることで用いた。凹面位置を揃えるためレンズ凹面方向を統一した。X 線照射条件と測定について、管電圧 100kV, 200kV, 400kV のそれぞれを、管電流 10mA で発生させ、その後方 300mm の位置で線量計 (RAMTEC1000D: TMC 社) を用いて多段凹面レンズを

透過した X 線量を測定した。測定した透過 X 線量から透過率を算出した。

比較対照として、過去に試作したポリスチレン及びアルミニウムの丸棒 330mm に、直径 5.0mm の連続孔加工を施した多段凹面レンズについて同様に透過 X 線量の測定を行い、透過率を算出した。この多段凹面レンズ中の孔数は 54 個、凹面間距離は 1mm であった。

また、実際の透過撮影時に用いる付加ろ過板との比較を行った。X 線エネルギー 100 kV, 200 kV, 400 kV に対して、

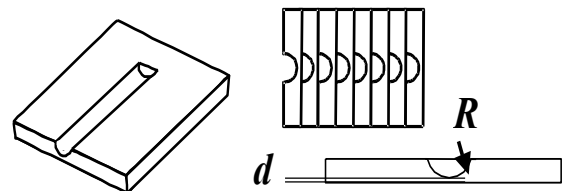
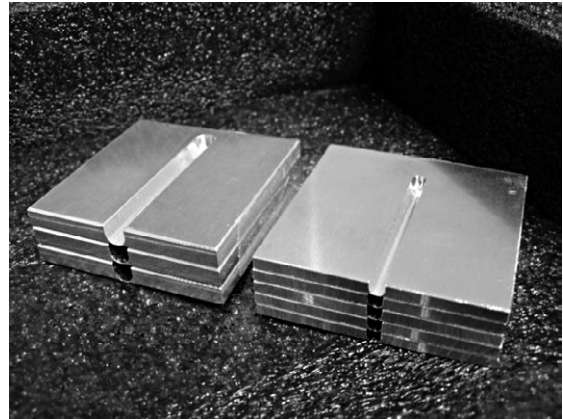


図 2. 凹面レンズ
R: 凹面曲率, d: 凹面間距離

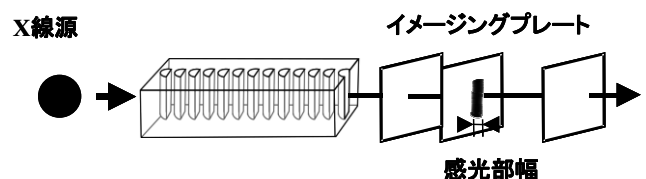
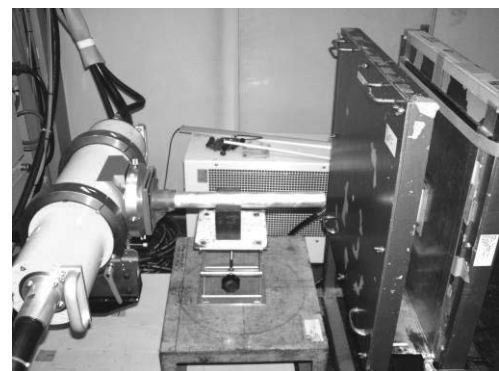


図 3. 多段凹面レンズの装着
多段凹面レンズを通過した X 線をイメージングプレートを用いて撮影する

多段凹面レンズの代わりに厚さ1mm, 2mm, 4mmの銅板を置き, 透過X線量を測定し, 透過率を算出した。

2.3 X線エネルギーと多段凹面レンズによるX線の集光

アルミニウム多段凹面レンズによるX線の屈折を確認するために, 多段凹面レンズを透過線量の測定時と同様にX線管に密着させて装着し, その後方のいくつかの距離にイメージングプレート(ST-VI型:フジフィルム社)を配置した。レンズを通過したX線によりイメージングプレート有感光させ, その感光部形状よりX線の屈折を確認した。

多段凹面レンズとして, 曲率5.0mmのアルミニウムレンズを20枚組み合わせ用いた。この時, X線発生焦点から多段凹面レンズ終端までの距離は250mmであった。

X線を, 管電圧30kV, 50kV, 100kVのそれぞれについて, 管電流3.0mAで発生させた。多段凹面レンズを通過したX線を用いて, レンズ後方800, 1000, 1300, 1800mmの位置でそれぞれイメージングプレートを1min感光させた。感光させたイメージングプレートを一定の条件で読み取り, 読み取り画像から感光部の幅をそれぞれ測定した。

また, 対照群として, 開口5mmの鉛コリメーターを, X線発生焦点からコリメーター終端が250mmとなるようにX線管に密着させて装着し, 1000, 1800mmの位置でそれぞれイメージングプレートを1min感光させた。感光させたイメージングプレートを一定の条件で読み取り, 読み取り画像から感光部の幅をそれぞれ測定した。

3. 結果と考察

X線管電圧と透過率の関係を図4に示す。多段凹面レンズのX線透過率は凹面間距離の短縮によって大幅に改善された。

加工法変更後のレンズにおけるX線透過率は, X線エネルギーの増加に伴って増加し, 管電圧100kVにおいても5%以上の透過率を得られた。X線透過の大きなポリスチレン材を用いた改良前のレンズとの比較では, 各管電圧条件において10から100倍に改善された。

X線の透過率 (I : 透過X線量, I_0 : 照射X線量) と厚さ (T) の関係は,

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu T} \dots (2)$$

となる。この時 μ はX線源弱係数で, アルミニウムの場合, 100keVの単色X線に対して厚さ1/10となれば約60倍の透過率となる。実際には一般のX線発生装置からは管電圧100kVでは, 最大100keVとなる連続エネルギーのX線が発生されている。このため厚さの減少による透過率の増加は単一エネルギーのX線の場合より顕著である。

X線撮影時に用いる付加ろ過板と多段凹面レンズとのX線透過率の比較では, それぞれのX線管電圧条件において両者の透過率は同程度であった。

図5に撮影地点のX線発生焦点からの距離と, 多段凹面レンズまたは鉛コリメーターを通過したX線によるイメージ

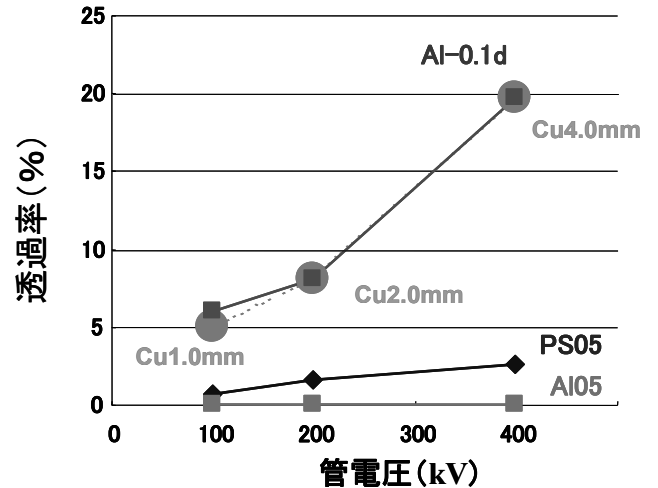


図4. 多段凹面レンズのX線透過率

Al-0.1d: 加工法変更後の凹面間距離0.1mmのアルミニウム多段凹面レンズ, PS05: 加工法変更前のポリスチレン多段凹面レンズ, Al05: 加工法変更前のアルミニウム多段凹面レンズ, Cu x mm: 厚さx mmの銅板

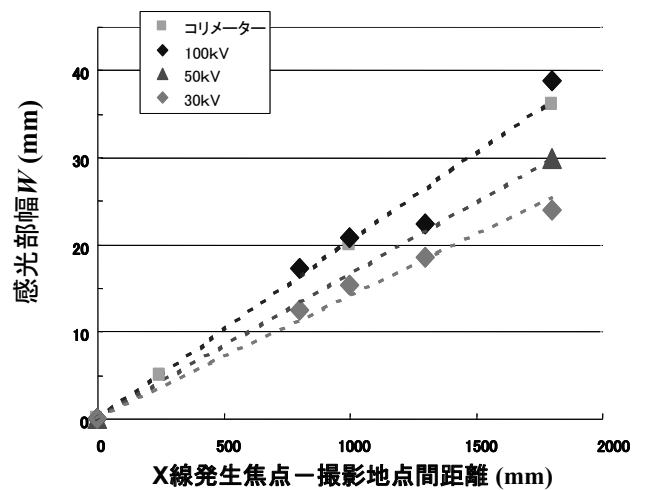


図5. X線管電圧と多段凹面レンズによる集光度の関係

コリメーター: アルミニウム製 開口5mm

ングプレートの感光部幅との関係を示す。

5mm幅の鉛コリメーターを通過したX線によるイメージングプレート感光部幅は, コリメーター終端であるX線発生焦点からの距離250mmの点で5mmであり, 距離の増加につれて幾何学的に増加した。

多段凹面レンズを通過したX線によるイメージングプレート感光部幅も, X線発生焦点からの距離の増加に伴い増加した。管電圧100kVでは感光部幅の増加傾向はコリメーター使用の場合と差が見られなかったが, X線エネルギーが小さいほど小さくなった。

管電圧が低いほど感光部幅の増加が小さくなるのは、X線の屈折はX線のエネルギーが高いほど小さくなることによると思われる。100kVのX線に対して、55段のアルミニウムレンズによる集光が認められなかった原因は、レンズ数の不足、あるいは集光に向かわないX線の影響であると考えられる。

今後の課題として、多段凹面レンズによる集光が確かめられたがレンズを通過したX線が焦点を結ぶためにはレンズ数を増やすと同時に効率よくX線を集光するレンズ設計が必要である。レンズ曲率、屈折率(レンズ部材)、レンズ数の集光度に与える影響を調べる必要がある。また、集光に向かわないX線の影響低減のための工夫が必要である。

4. まとめ

過去に試作した多段凹面レンズは凹面間距離が大きく、透過X線量が極めて微小であった。そこで多段凹面レンズの透過X線量を実際の透過撮影に用いられる程度に増加させるために丸底溝を有する板材の組み合わせとして多段凹面レンズを改良した。この変更により微小加工時の工具負担が低減され、凹面間距離を1/10倍まで短縮することができた。

凹面間距離短縮の効果を確かめるため、多段凹面レンズに対するX線透過率を測定した。加工法変更前の試作レンズ及び銅板に対するX線透過率も同様に測定し比較した。銅板は実際に透過撮影を行う際に試験品を透過しない弱いX線を除去する目的で使用する付加ろ過板を想定して厚さを決定した。加工法変更前のレンズに比べて、凹面間距離短縮された多段凹面レンズでは10から100倍のX線透過率が得られた。また、このX線透過率は銅板のX線透過率と同程度であり、実用範囲のX線透過率が得られたことが確かめられた。

多段凹面レンズの集光度をコリメーターとの比較によって行った。レンズまたはコリメーターを通過したX線を用いてイメージングプレートを感光させて、その感光幅を測定した。感光幅はX線発生焦点からの距離に伴い増大し、今回作成したレンズ数では拡大撮影に必要な焦点を結ぶには至らなかった。X線エネルギーが低いほど感光幅の増大は小さく、X線エネルギーとX線屈折率との関係を裏付けるものであり、多段凹面レンズの集光効果を示す結果となった。実際にレンズによる焦点を結ぶにはレンズ数を増やし、さらに効率よい集光のためのレンズ設計が必要である。

(平成24年5月18日受付, 平成24年8月30日再受付)

文 献

- (1) I. Snigireva, A. Snigirev: "High energy X-ray micro-optics", C. R. Physique, 9, pp.507-516(2008).
- (2) I. Snigireva et.al.: "High resolution imaging and lithography with hard x rays using parabolic compound refractive lens", Rev. Sci. Instrum., 73(3), pp.1640-1642(2002).
- (3) I. Snigireva, J. Tummler, et. al.: "A microscope for hard x rays based on parabolic compound refractive lenses", appl. Phys. Lett., 26(28), pp. 3924-3926(1999).
- (4) R. Tatchyn, R.H. Pantell, et. al.: "Cylindrical compound refractive x-ray lenses using plastic substrates", Rev. Sci. Instrum., 70(9), pp.3545-3548(1999).
- (5) 河原大吾, 高田茂: 「X線の屈折と透過を利用した凹面レンズによる集光と高解像度イメージング」, 東京都立産業技術研究センター研究報告, 第5号, pp.5-8 (2010)