

論文

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

河原 大吾*¹⁾ 高田 茂*¹⁾

Study of high-resolution radiography by x-ray with refractive lens

Daigo Kawahara*¹⁾, Shigeru Takada*¹⁾

The x-ray compound refractive lens (CRL) are lens with array of concave wall, and suited for high resolution imaging with hard x-ray. However, there are problems to apply CRLs to nondestructive test with hard x-ray; cause of low refractive index of hard x-ray, and radiating x-ray to out of focus. In this study, we produced CRLs experimentally with polystyrene or aluminum round bars, have array of holes. We measure dose rate of hard x-ray passing through CRL, and take images by their x-ray with imaging-plate (IP) at some distances from end of CRLs. As a result, transit dose rate of hard x-ray passing through CRLs was lower than dose rate used general radiographic testing. Then, aspect ratio of images taken with hard x-ray passing through CRLs were increasing with distance from edge of CRL.

We confirmed that hard prototype of CRLs refracted hard x-ray with 400kV of tube voltage. However we must develop the CRL to advanced stage, with design of lens parameters; curvature factor, gap of concave faces, and optimal rate between lens materials to shorten focal distance and to decrease radiating x-ray.

キーワード：非破壊検査，X線，屈折レンズ，高解像度イメージング

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

1. 緒言

透過 X 線像を用いた非破壊検査は視覚的に理解しやすいためよく利用されている。近年，商品の小型化が進むにつれ，加工品中の微小なキズを検査する需要は高まっている。そのため，透過 X 線像を拡大する方法が開発されてきた。

拡大された透過 X 線像を得る方法として，X 線発生源の径を小さくする（微小焦点）方法が利用されているが，ターゲットの冷却や厚さの問題があり，高エネルギー X 線の発生は困難とされている。別の方法として全反射や屈折を利用した X 線レンズ法があり，開発が進められてきた¹⁾。例えば，屈折を利用した X 線レンズはシンクロトロン等の大規模な加速器から発生する放射光に実際に適用されている。しかし，適用されている X 線は方向の揃った 20～50 keV の低エネルギー X 線であり，一般的な X 線管からの X 線や高エネルギー X 線への適用例はない。⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾

以上の状況から，屈折を利用した X 線レンズを試作して，一般的な工業用 X 線管球からの高エネルギー X 線に適用し，拡大された透過 X 線像の撮影を試みた。レンズ試作のためにはいくつかの解決すべき課題があった。

まず，X 線の屈折率の低さがある。X 線の屈折率は可視光とは異なり，1 より僅かに小さいだけなので，屈折される角度は非常に小さい。そのため，本研究では，曲率の強い凹レンズを多段にして使うことで X 線の集光を試みた。図 1 の上段に凹面レンズを多段に並べたときの概念を示した。レンズ材質中に球状の空間が薄い壁を隔てて直線状に並んだような形状になる。

2 番目の課題として，X 線管から放射される X 線の向きが揃っていないという問題がある。一般にレンズで集光される

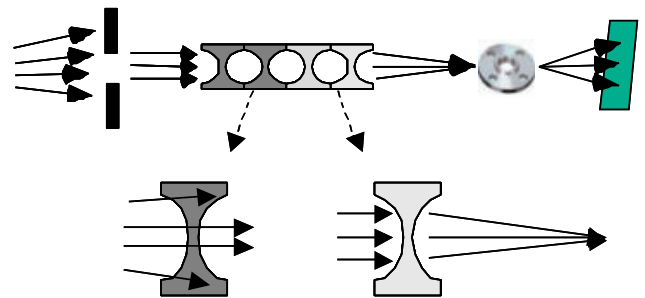


図 1. 多段凹面レンズによる X 線の集光

(凹面レンズを多段に組み合わせることにより集光度が向上する。また，レンズ材を段階的に変更して集光に向かない X 線を低減する段階・X 線をなるべく低減させずに集光する段階という役割分担が可能である。)

*¹⁾ 技術経営支援室

のは平行な光線か1点から放射状に出ている光線である。X線管のX線発生源（通常、焦点と呼ばれるが、ここではレンズの焦点と混同しないため発生源と呼ぶ）は通常数mmの寸法を持つため、放射されるX線の方向は平行でも放射状でもないものになる。また、レンズ内では方向がまちまちな散乱線も発生する。そのため、屈折で絞るだけではX線は1点に集光されない可能性がある。この課題は、多段凹面レンズの特性により改善できると考えられた。つまり、凹面レンズは周辺が厚いため、周辺部を通過するX線は吸収を受けやすく、多くのレンズを通過する間に、レンズの中心軸付近を平行に進むX線だけが選択的に残される。さらにX線の透過率が異なる材料のレンズを組み合わせることで、一層X線の平行度が良くなると予想された（図1の下の方参照）。

3番目の課題はレンズの精度と寸法である。多段球面凹面レンズの焦点距離 (f) は、凹面曲率 (R)、レンズ重ね数 (N)、屈折率 (n) との間で次式の関係にある。

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

X線の $(1-n)$ は 10^{-5} 程度であるから、 f をmのオーダーにするためには、 R をmm、 N を100のオーダーにする必要がある。材料内に直径数mmの球形空間100個を、薄い壁を隔てて直線状にずれなく並べたレンズを製作することは非常に高度な技術が必要である。そこで、本研究では球面の代わりに側面に円筒状の孔をあけた多重レンズ（以下、多段孔式凹面レンズ）を作製することにした。このレンズは、球面レンズより製作しやすいが、X線は孔の軸に直角な方向にしか集光されないため、拡大されたX線透過像を得ることはできない。しかし、X線の屈折の効果を確かめることができ、将来の球面凹面レンズ作製のための情報を得ることができる。

2. 実験

2.1 多段孔式凹面レンズの製作 レンズ材料は、比較的X線を通しやすいポリスチレン、およびアルミニウムを選んだ。レンズは、上記材料の長さ500mm、直径50mmの丸棒の側面に、NCフライス盤を用いて直径5mmの孔を長軸方向に沿って1mmの隔壁を残しながら加工することで製作した。孔はレンズの強度を保つため貫通させず深さ45mmまでとした。製作したレンズの孔の個数は82本になった。図2の上段の上はアルミニウム製、下はポリスチレン製の多段孔式凹面レンズ、下段はアルミニウム製レンズの孔の部分拡大した写真である。

2.2 X線発生装置の選択とレンズ取り付け 本研究の目的の一つは高エネルギーX線の集光である。そのためには高い管電圧が掛けられるX線発生装置が望ましい。それで、今回はエクスロン・インターナショナル製MG452型（最大管電圧450kV、管電流10mA）を選んだ。

製作した多段孔式凹面レンズは長さが500mmあるので、

レンズの軸とX線管から出てくるX線の方向を合わせないと、レンズを通過するX線量が大きく減少してしまう。そのため、レンズ後方に撮像体を置き、レンズの位置と向きを少しずつ変えながらレンズを透過したX線像の形状と濃度を調べ、レンズの最適な位置と向きを決めた。X線像の撮像は富士フィルム製のイメージングプレートST-VIとIP画像読取装置AC-7を用いた。レンズとX線発生装置の照射窓接合部の隙間やレンズの側面からX線が漏れるのを防ぐため、接

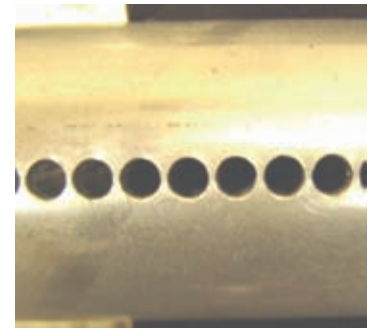
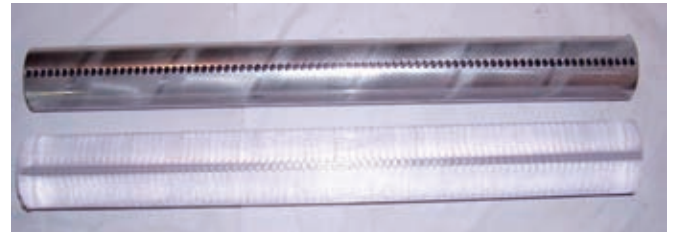


図2. 試作多段凹面レンズ
(レンズ長500mm中に82個の凹面を配列。凹面曲率は5mm、凹面間隔は1mm)

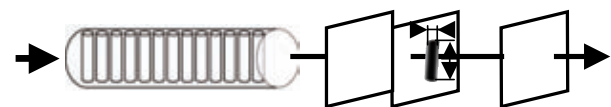


図3. 試験装置
(X線装置に装着された多段凹面レンズ。その後方に線量計を配置して透過線量率の測定を行う。また、イメージングプレートを配置して透過X線の撮像を行う。透過X線像のアスペクト比(縦横比)より集光度を評価する)

合部を含めレンズ側面全体を厚さ2mmの鉛板で覆った。

2.3 多段孔式凹面レンズのX線透過率の測定 試作した多段孔式凹面レンズは透過写真撮影に使う目的があるので、レンズを透過してくるX線の量は多い方が望ましい。そこで、試作レンズのX線透過率を次のように測定した。X線発生装置に多段孔式凹面レンズを図3のように接続し、レンズの後方300mmの位置で電離箱型線量計（本体：東洋メディック製RAMTEC1000D，電離箱プローブ：エクストラディン製model A4）を用いて透過X線の線量率を測定した。レンズを置かないときの線量率と比較してレンズの透過率を算出した。レンズはポリスチレン製とアルミニウム製のもののほか、ポリスチレン製を2本及びアルミニウム製1本とポリスチレン製1本を直列に繋いだ場合も試した。また、4mmの銅板の透過率も比較のために測定した。X線装置の管電圧は50～400kV，管電流10mAとした。

2.4 X線の屈折の確認 試作した多段孔式凹面レンズにより高エネルギーX線が屈折されていることを確認するため、次の実験をした。

試作レンズを透過線量の測定時と同様にX線管に装着し、レンズの前後に幅5mmの鉛製スリットを設けた。両スリットを通過したX線の像をレンズ後方に2.2で用いたのと同じイメージングプレートを設置して撮影した。レンズとイメージングプレートの距離を変え、感光部の形状の変化を面積及びアスペクト比（感光部の縦横比）で調べた。この形状の変化と距離の関係から屈折が起きているかどうかを確認した。レンズ後面とイメージングプレートの距離は1.5, 21.5, 118.5cmとした。レンズは、ポリスチレン製レンズを2本つなげたものとポリスチレン製1本とアルミニウム製レンズをつなげたもの（アルミニウム製をX線源側）を用いた。後者はX線をアルミニウム製レンズでレンズ中心軸付近を通る細い平行ビームに絞り、ポリスチレン製レンズでさらに屈折させることを考慮したものである。X線装置の管電圧は400kV，管電流は10mAとした。

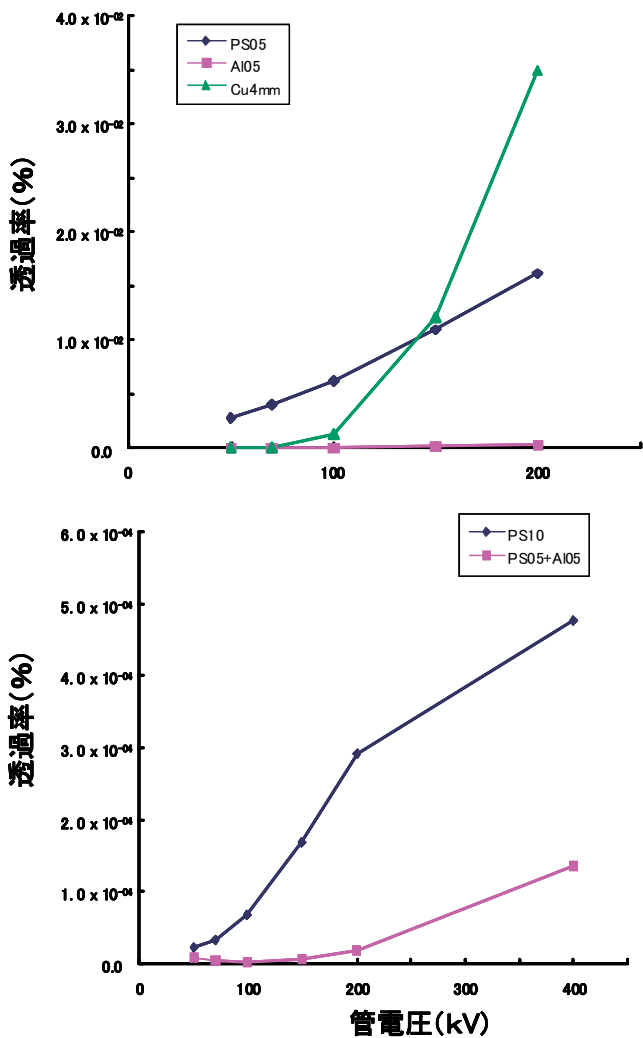


図4. 多段凹面レンズに対するX線透過率

(PS05：ポリスチレンレンズ500mm，PS10：ポリスチレンレンズ1000mm，Al05：アルミニウムレンズ500mm，Cu4mm：銅板4mm)

3. 結果と考察

図4にX線のエネルギーと試作した多段孔式凹面レンズに対するX線の透過率を示す。

管電圧200kVまでのX線の場合の透過率を図4の上段に示した。アルミニウム製レンズでは透過X線を検出できなかった。ポリスチレン製レンズでは1/10,000程度の透過率であり、150kV以上では4mm銅板より小さかった。通常のX線

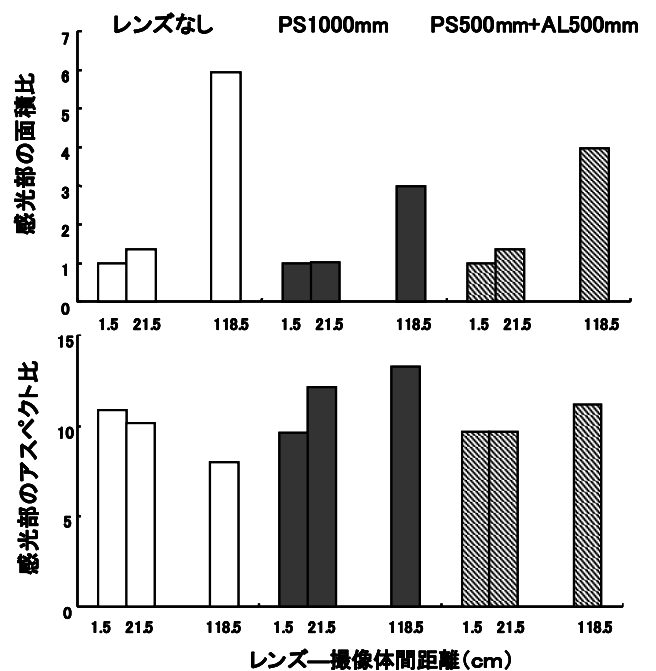


図5. 多段凹面レンズによるX線の屈折

(PS：ポリスチレンレンズ，Al：アルミニウムレンズ。面積比：レンズ—撮像耐間距離1.5cmを基準とした感光部面積の比。アスペクト比：感光部長さ×感光部幅)

透過写真撮影ではX線を硬くする目的で銅板をろ過板として使用することがあり、管電圧200kVのX線に対しては2mmの銅板が使われる。2mmより厚い銅板は透過X線の量が少なくなり過ぎるので使われない。今回、4mm銅板より透過X線量が少ないことは、レンズのX線透過率が透過写真撮影用としては小さすぎることを意味している。

200kVから400kVまででは、図4の下段に示すように、ポリスチレン2本のレンズもアルミニウムとポリスチレンをつないだレンズも1/1,000,000のオーダーの透過率であった。これは200kVのときのポリスチレン製レンズ1本に対する透過率のさらに1/100であり、レンズには、透過するX線量に大きな問題があることが分かった。

この原因の一つは孔と孔の間にある壁による吸収である。壁の厚さは最も薄いところでは1mmしかないが、80箇所以上あるため、全体としての透過率は大きく低下していると思われる。壁厚を小さくすることが直接的な解決策であるが、加工精度の問題やレンズ強度の問題があり、今後の課題である。イメージプレートなどの高感度撮像装置を使うことである程度のX線量不足はカバーできるが、今回の試作レンズのX線量不足はカバーできる範囲を超えていた。

図5にイメージングプレート感光部の距離による面積変化とアスペクト比をレンズ無しの場合と共に示した。感光部面積は、もしX線がレンズで集光されていれば距離と共に減少するはずである。しかし、図5の上段に示すように実際には増加しており、少なくとも今回の試作レンズではX線が焦点に向かって集光されてはいないことが分かった。

感光部のアスペクト比については、多段孔式凹面レンズの場合、孔の軸に直角方向にのみ集光されるので、集光効果があれば感光部のアスペクト比は大きくなる、すなわち、感光部の形状が距離と共に集光された方向に相対的に狭くなっていくと考えられる。図5の下段から判るように、レンズ有りの場合、アスペクト比は距離と共に大きくなっている。レンズ無しの場合にアスペクト比は距離と共に減少していることと較べると、試作レンズにおいてもX線の屈折による集光効果は起きていると判断できた。

以上の結果から、試作レンズは高エネルギーのX線を屈折させて曲げていることが判った。しかし、実際に焦点に集光させるだけの屈折能力はなかった。X線をより強く屈折させ集光するには、孔の曲率半径を小さくする、孔の数を増やす、ことが考えられる。しかし、丸棒に加工する深孔の半径を小さくすることは、高精度の加工技術を必要とすることに加え、X線の透過率の面では不利な方法であり、今後の課題である。凹面の加工の改善策として、丸棒への深孔加工ではなく、溝加工を施した板材を重ね合わせるといったアプローチ等が考えられる。材質の面では、ポリスチレンが透過率でもアスペクト比でも良い特性を示した。アルミニウムは透過率の面で大幅な改善が必要であった。レンズ材の組み合わせの配分について、最適な条件を模索する必要がある。

4. 結言

高エネルギーX線の屈折を確認するために、丸棒に連続孔をあけた多段孔式凹面レンズを試作した。レンズを通過したX線像のアスペクト比の変化から、管電圧400kVの高エネルギーX線が屈折されているのを確認できた。

試作した多段孔式凹面レンズを実用に向けて設計するにあたって、透過率の向上、焦点距離の短縮、連続球面の作製に取り組む必要である。

本研究のレンズ加工にあたって、産技研城東支所の皆様に指導いただいたことに謝意を表する。

(平成22年7月5日受付, 平成22年9月3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 lenses, 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).