

トピックス

X線バブルレンズと SPring-8

香村 芳樹

理化学研究所播磨研究所*

X-ray Bubble Lens and SPring-8

Yoshiki KOHMURA

X-ray Interferometry Laboratory, RIKEN Harima Institute

The X-ray refractive lenses using liquids and glues were developed at SPring-8 and at the Belarusian State University. Due to the extremely small refractive index decrement, many bubbles were placed along the optical axis and the interfaces between gas bubbles and the liquid worked effectively for focusing. Fabrications of several different types of the bubble lens are described. The results of the focusing tests and simple microscopy experiments using bubble lenses at BL47XU (an undulator beamline at SPring-8) were summarized. Magnified images of a gold mesh were successfully taken with the magnification factor of around 3. We plan to use longer beamlines for future experiments.

1. はじめに

通常の物体中の X 線の屈折率は、1 よりも僅かに小さく、凹レンズを光軸上に多数並べると、光を集めることが出来る。X 線の屈折レンズは、日本で最初に着目され¹⁾、アルミニウム合金にピンホール列を開けた、一次元集光用の X 線屈折レンズが、ESRF の Snigirev 等によって実現された²⁾。一次元型をクロスさせて二次元集光を行う物³⁾、球面収差による像の歪みの小さい放物面レンズの提案などもなされている^{4,5)}。

SPring-8 では、焦点距離をビームラインの光源との距離の 45 m 程度に合わせたアクリル、ベリリウム的一次元レンズが製作され、アンジュレーターの垂直発散をさらに絞る「コリメーター」として使用され、非弾性散乱、核共鳴散乱など、高エネルギー分解能、高角度分解能を要する実験での有用性が確認された^{6,7)}。一方、ここで述べる X 線バブルレンズは、液体と気泡との間の界面を凹レンズとして使い、二次元集光レンズを実現する (Fig. 1)。精密加工を必要としない、安価で便利なレンズの製法と現状での性能を紹介してゆきたい。

X 線屈折レンズでは、材質、エネルギー、焦点距離にもよるが、典型的に、20 から 200 程度のマイクロレンズを一行に並べることが必要となる。この数は、実現したい焦

点距離と、媒質による吸収があまり大きくならないという考慮のもとで決める。マイクロレンズが半径 R の球面で、マイクロレンズの数が N の場合の焦点距離 F は以下の式に従う。

$$F = R / 2\delta N \quad (1)$$

ただし、 $\delta = 1 - n$ は、屈折率の 1 との差に対応する。

レンズの媒質としては、屈折のみを起こして、X 線の吸収はしないものが理想的だが、それに近いものとして、なるべく軽元素を使った物を高エネルギーで使用する。例えば、アルミニウムよりは、ベリリウムやプラスチックなどが良く、水やグリセリンなどの液体を利用したものも良いが、媒質自体にむらや、粒状構造がある物は、小角散乱を起こしてレンズの性能を下げるので、避けたい所である。

屈折レンズには、(1) 式から分かるように、開口を大きくしようとする、焦点距離が長くなってしまいう特長がある。例えば、グリセリン上に、半径 1 mm の気泡が 200 個並んでいると、18 keV の硬 X 線に対して、焦点距離 2.5 m 程度のレンズとして働く。焦点距離が長めなのが欠点ではあるが、上の開口は、アンジュレータービームライン

* 理化学研究所播磨研究所 X 線干渉光学研究室 〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1
TEL 0791-58-2806 FAX 0791-58-2807 e-mail kohmura@sp8sun.spring8.or.jp

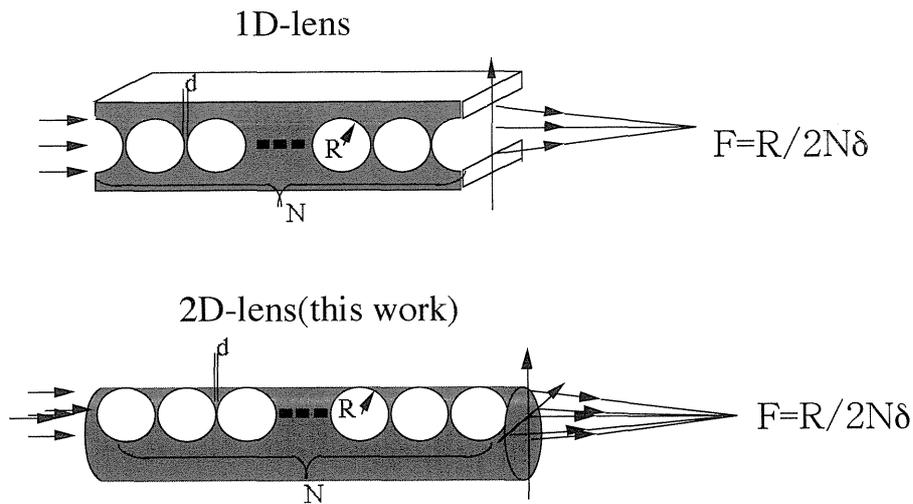


Figure 1. The schematic diagram showing the principle of the two-dimensional focusing using the X-ray bubble lens.

のビームサイズ (実験ステーションで $1\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 程度) とのマッチングも良く、多くの長いビームラインの建設が計画されている SPring-8 に適したレンズと言えよう。

2. 初期のバブルレンズの作り方

皆さんも良く御存じのように、世のバブルの常として、崩壊しやすいという特長がある。なるべく安定なバブルを造るために、我々は、非常に粘性の高い液体を選び、この上にバブルを載せることにした。さてバブルの作り方が、プラグ卿が結晶格子の配列や、格子欠陥を説明するため、液面一杯に大きさ一定の泡を並べて、あるいは一部に大きさ異なる泡を混ぜて、その配列を調べており、このデモ実験⁸⁾にならって造ることにした。

液体として、三液混合した物⁹⁾を使い、ヘリウムボンベから、ニードルバルブ、注射針を介して、一定流量でヘリウムを流した。液体とバブル用の二箇所の出入り口を持ち、バブルを一直線に並べるためのV字溝の天井をもったアクリル製容器を製作した (Fig. 2)。上下流はカプトン膜でシールした。液上に直径2.8 mm のバブルを168個作ったが、X線を当てない限りは、非常に安定だった。

バブルレンズの第一号機をアンジュレータービームライン BL47 の光源から約45 m の位置にセットし、分光器は19 keV にセットして、約5 m 下流でX線像を撮影した所、水平方向に細長い像が生じていて、確かに光源の像が撮れている事が分かった。垂直方向の像のサイズは、約60マイクロンで、マイクロレンズの形状精度を反映しているものと思われる。放射線に対する耐久性には問題があり、蓄積リングの蓄積電流20 mA 運転時、ギャップを20 mm にセットすると、数分で液体中に直径数百マイクロン程度の小さな新しい泡が生じ、レンズの機能が低下した。このレンズは、フラットなビームに対する透過率が16% (19 keV) と高く、焦点面でのゲイン (フラットな入射ビ

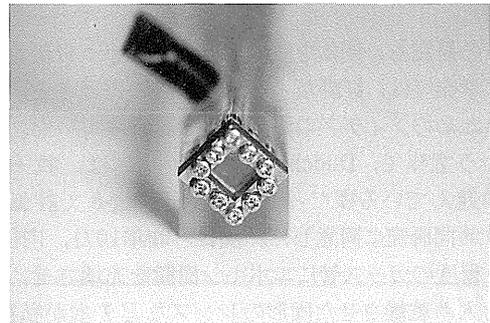


Figure 2. The liquid container for the X-ray bubble lens made from acrylic resin and Kapton films (left). Two pipes worked as the inlet & outlet of the bubbles and a triangular ceiling kept the bubbles in a straight line.

ームと焦点スポットの輝度の比) で12が達成された。

気泡は、形状の制御が困難で、安定性にも問題があったため、中空プラスチックボールを水に浮かべるレンズも試した^{9,10)}。中空プラスチックボールは、阪大レーザー核融合研で、ターゲットとして用いられている直径約2 mm の物を分けて頂いた (Fig. 3)。残念ながら、シェルの厚みが均一でなく、また、厚さが150マイクロンと比較的厚かったので、X線の吸収も効いて、透過率の点で今一つだった。

3. ベラルーシから届いたバブルレンズ

1998年の7月に、ここまでの我々の屈折レンズの開発をまとめて、アメリカの San Diego で開かれた、SPIE (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers) の国際学会で報告した¹¹⁾。ちょうど、アメリカに発つ前日に、私に、ベラルーシ (旧ロシア) の Dudchik さんという方から、電子メールが届いた。彼も、バブルを使った屈折レンズを作っており、細いガラス管に、液体を充填し、

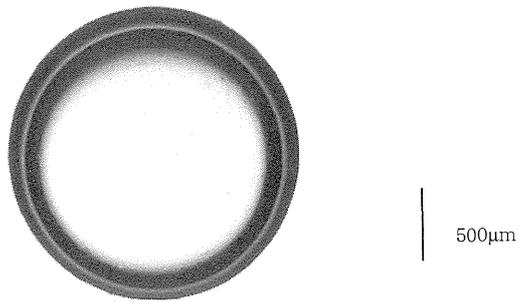


Figure 3. Image of a polystyrene ball with an optical microscope. The (outer) diameter of the ball is approximately 2 mm.

中にバブルを密に充填させた物を、「マイクロキャピラリーレンズ」と呼んでいた。このレンズでは、バブルにガラス管の内面との表面張力が効いて、ちょうど、ガラス管の内面のサイズと合った球面の界面が得られるとの事だった。

我々の研究も、液体を使ったレンズという目新しさが受けて、学会では、好評だったが、製法の煩雑さと、精度を上げるためのアイデアの面で、行き詰まっていた。形状制御という意味で、Dudchik さんのレンズは、我々の物より一歩進んでいる様だったので、SPring-8 で評価を行うという共同研究に同意した。後日、昨年10月、内径200ミクロン程度のガラス管にエポキシ樹脂を充填させ、バブル71個を入れ乾燥させた固形のレンズなど7本が私宛てに、送られてきた¹²⁾。これ以降、電子メールと郵便のみで、見知らぬ相手と議論するという一風変わった共同研究が続いている。

彼等の製法を、我々なりに再現しようと編み出した新製法を、ここで御紹介しよう。市販のガラス管（直径1 mm 程度、Chase Instrument 社製）の両端を、ゴム管を介して注射器二本につなぐ。中に粘性の高い液体（エポキシ樹脂やグリセリン）を少量入れる（Fig. 4）。注射器の一方を加圧し、他方を減圧すると、液体をガラス管内面をすばやく通すことが出来る。液体は流れた後、均一に薄く内面に残るが、多少の厚みのむらがあり、厚い所は凝集して、溜まりたがる。この結果、ガラス管の内径の1~数倍程度の間隔で、液体の壁が生じる。壁と壁との間に、バブルが生じるが、丸い方が安定なので、各々の壁が変型し、あっという間に、ガラス管の内径程度の球面の界面を持ったマイクロレンズとなる。液体の表面張力は強力なので、そこそこ形状が揃ったレンズが出来るのである。ただし、ガラス管の内径が大きいレンズでは、バブルや壁の間隔も大きく、液体（樹脂）による X 線の吸収が効き過ぎて使いにくいのが問題である。

4. ベラルーシのバブルレンズの評価

内径200ミクロン、マイクロレンズ数71、長さ59 mm

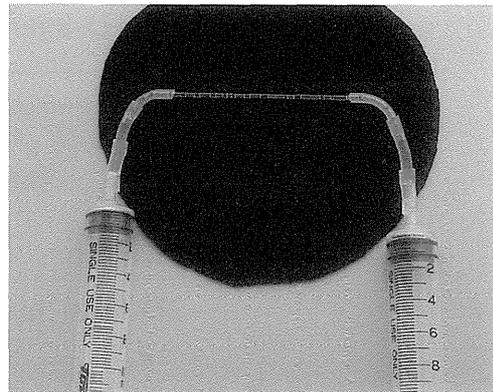


Figure 4. The setup for producing glycerol micro-capillary lens. To flow glycerol through the capillary, two injectors and the capillary were connected with rubber tubes. One of them was pressurized while the other was depressurized. Glycerol quickly passed through the capillary to form thin films in the inner surface. Many small drops inside the capillary eventually formed many bubbles close to each other.

の樹脂製のレンズによる光源の像を撮影することにしたが、このバブルレンズは、ガラス管をV字溝のホルダーに、直に置く程度で使用でき、なかなか便利な代物だった。蓄積リングの蓄積電流70 mA 程度で運転されていたので、分光器結晶が熱負荷で歪んで、像が変型を受ける可能性が高く、アンジュレーターのギャップを40 mm とした。レンズは、光源から約45 m の位置にセットし、分光器は18 keV 近辺にセットして、約0.9 m 下流で X 線像を撮影する事にした。光源の縮小像のサイズは、約8ミクロン（垂直方向）×約16ミクロン（水平方向）程度だった（Fig. 5）。焦点距離は約0.9 m であり、我々のバブルレンズよりも、精度が上がっているようである。水平サイズは、縮小率から期待されるのと、ほぼ等しいが、垂直サイズは、球面収差などから予想されるのは2ミクロン以下であるので、まだまだ改良の余地がある様である。

このレンズも、フラットなビームに対する透過率が18%（18.3 keV）と高く、焦点面でのゲイン12が達成された。このレンズの開口には、例えば、蓄積電流100 mA、ギャップ10 mm で、3次光のピークの18 keV のエネルギーの X 線フラックス 5×10^{12} photons/sec¹³⁾ 程度が入るが、分光器結晶の熱変型が無視でき、同様の集光が出来るなら、 10^{12} photons/sec/100 μm のオーダーの X 線の輝度が期待できることになる。一方、放射線損傷に対して、樹脂製のバブルレンズは、なかなか丈夫なことが分かってきたが、これについては、6章でまとめることにする（Fig. 5a, b）。

開口200ミクロンは小さすぎて、ちょっとしたビームのふらつきにも、敏感に反応する。昨年の年末の実験では、他の多くの ID がギャップを絞っている日中は、ビームが不安定な傾向があり、夜中12時過ぎでないともまとまらな測定が出来なくて困った覚えがある。また、曲率半径が小さ

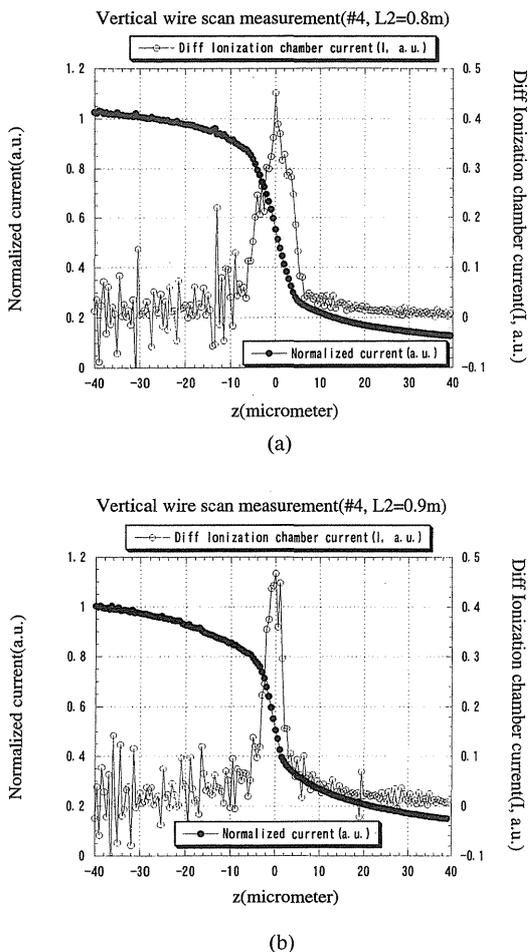


Figure 5. The result of the vertical wire scan measurement with (a) $L_2=80$ cm and (b) $L_2=90$ cm, where L_2 stands for the distance between the lens and the wire. The measurement was done at 18.3 keV using an ionization chamber and a gold wire with the diameter of $200\ \mu\text{m}$. A diaphragm (with the diameter of $200\ \mu\text{m}$) was closely placed downstream of the lens to exclude the X-rays outside the aperture of the lens. The differentiated profiles together with the raw data are shown.

いと、球面収差がもろに効くという弱点もあり、焦点出しが難しい上、結像実験で、像にぼけや歪曲などが生じやすい (Fig. 7)。マイクロレンズの曲率半径 R を大きくすれば、球面収差は小さくできるが、その代わりに、マイクロレンズ数が一定なら、焦点距離が大きくなってしまいますので、実験に合わせて最適化する必要がある。

Dudchik さんは、レンズの製作と性能のシミュレーション

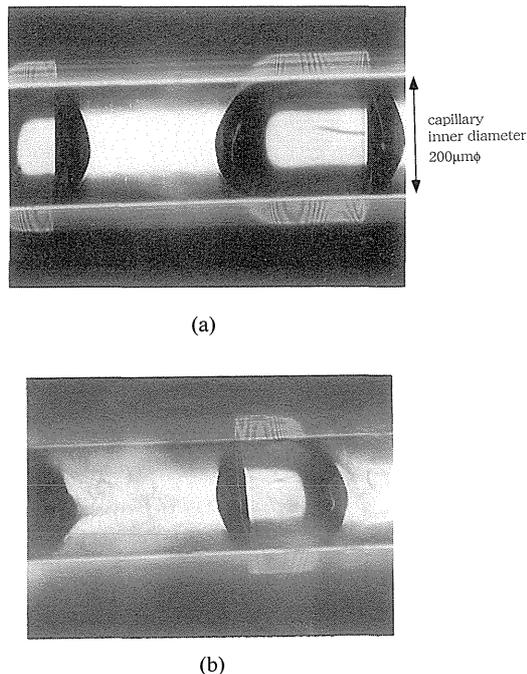


Figure 6. Image of a glue micro-capillary lens with an optical microscope (a) before and (b) after a radiation damage test to an undulator radiation for one hour exposure (gap=10 mm, 18 keV 3rd order harmonics, flux $\sim 4 \times 10^{12}$ Photons/sec/0.03 mm 2). The inner diameter and the length of the glass capillary was 0.2 mm and 59 mm, respectively and the number of the bubbles was 71.

ョンで論文を書き、我々が実験結果で論文を書くということになっていた。Dudchik さんの英語を我々が直すということをして数度くり返し、共著の論文を仕上げた。200ミクロンの内径のレンズ前面に直径40ミクロン程度の絞りを入れると、球面収差を減らす事が出来て、焦点面での集光サイズを1ミクロン程度に出来るというレイトレース計算の結果を示すもので、Rev. Sci. Instr. に投稿した¹⁴⁾。

一方で、我々は、球面収差の影響を減らすために、大きい(管径の太い)レンズを作ろうと相談していた。先ほどの樹脂製のレンズと同様の製法では、太いレンズでのX線の吸収が大き過ぎるので、新しい方法で作る事になった。Dudchik さん達は、直径約800ミクロンのガラス管にグリセリンを詰め、これに、バブルを詰めたレンズ2本を作り、送ってきてくれた。バブルの数は185個/120個で、グリセリンは液体のままだが、粘性が高いため、バブルの形状が良く保たれたまま、郵便で送られてきた。末端

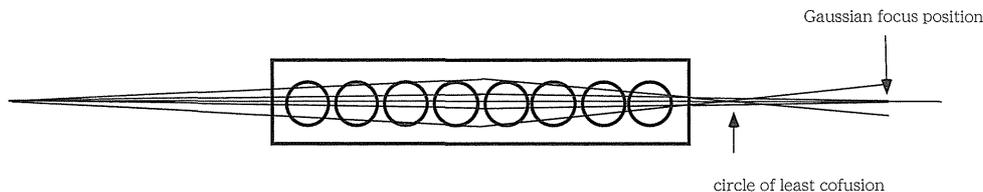


Figure 7. The schematic diagram of the focusing using a spherical lens. Spherical aberrations are shown.

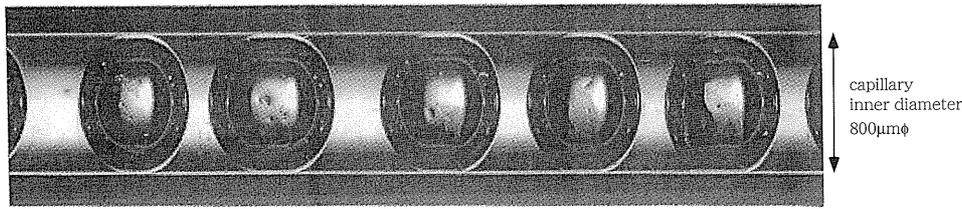


Figure 8. Image of a glycerol micro-capillary lens with an optical microscope. The inner diameter and the length of the glass capillary was 0.8 mm and 225 mm, respectively and the number of the bubbles was 185.

のみ接着剤でシールされており、全長が225 mm/166 mm だった (Fig. 8)。

5. バブルレンズの結像テスト

さて、せっかくのレンズだから、ただ、X線を集めるだけでなく、結像性能も調べてみたくなる。20 keV程度の硬X線でのレンズというと、フレネルゾーンプレート、ブラッグフレネルゾーンプレート、全反射鏡などもあるが、前二者は一次以外の次数の光が結像性能を低下させる難点がある。後二者は、レンズが光軸の向きを変えるので、アライメントが多少、面倒である。

我々は、ベラルーシのグリセリン製のレンズ一個を用い、単純な拡大像を撮る事から始めた。対象物体は、英国 GoodFellow 社の金メッシュ (ピッチ17ミクロン、金細線の幅5.6ミクロン, Fig. 9) であり、使用したビームラインは、BL47XU (アンジュレーター-BL) である。SPring-8 でよく使われているビームモニタ装置で直接、金メッシュの透過像を撮ってみた所、かすかに細線が判別できる程度に見えた。visibility $[(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})]$ で言うと、18 keV で0.07程度だった。ビームモニタ装置は、蛍光版により X線を可視光に変換した後、リレーレンズで二倍に拡大し、冷却 CCD で観察するもので、空間分解能約10ミクロンの物を使用した。

一方、金メッシュをグリセリン製バブルレンズの2 m 上流に置き、ビームモニタをレンズの5 m 下流に置き、約3倍の倍率の拡大像を撮ってみた (Fig. 10, Fig. 11a)¹⁵⁾。メッシュは、より明瞭となり、visibility は予想される約40%になった。金細線を素通ししてくる光は、光源との距離に対応した位置に像を結び、金細線の像は別の焦点面に結像するが、両者の干渉も生じるはずである。ホログラムの顕微鏡版である約3倍の倍率では、この干

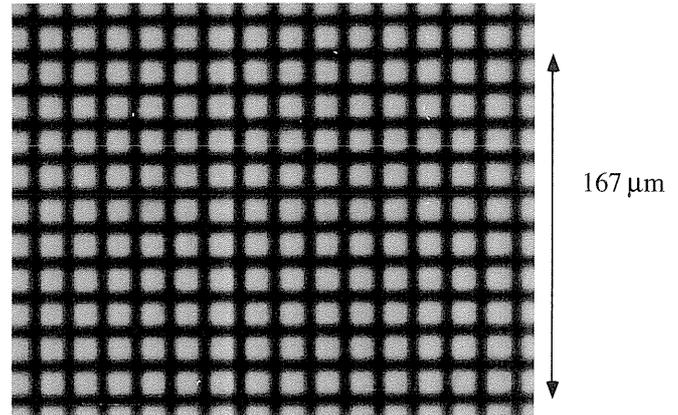


Figure 9. The image of a gold mesh (Good-Fellow Co.) using the optical microscope with the magnification factor of 200.

渉効果は明瞭には見えず、前者の効果が支配的で、金細線の影が入った像が見られた。像の歪曲に関しては、光源からの光を平行光と仮定して、レイトレース法によるシミュレーション計算を行った。金細線の影の位置を計算させた結果は、よく実際の像を再現するものとなった (Fig. 11b)¹⁵⁾。

6. バブルレンズに X線を当てても大丈夫?

ベラルーシ製のバブルレンズの放射線損傷について調べた結果をまとめよう。樹脂製のレンズの方は、70 mA 運転時に、BL47XU (アンジュレーター-BL) で、ギャップ10 mm (最小は8 mm) にし、3次光のピークエネルギーの18 keV の X線 (4×10^{12} photons/sec/0.03 mm² 程度のフラックス¹³⁾) を照射してみた1時間の照射によって、最上流から約1 cm 程度の長さにわたって、樹脂が緑色から黄色に変色を受けた。同時に、多少の密度むらのような

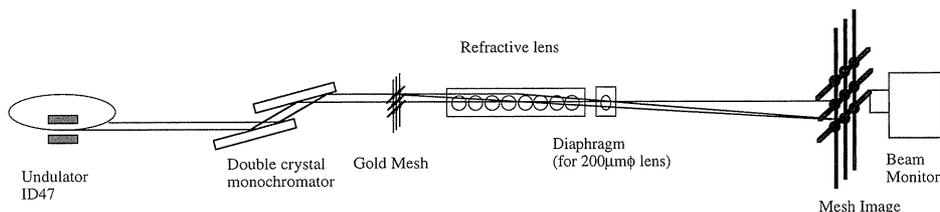


Figure 10. The experimental setup for taking the magnified X-ray image of a gold mesh using the micro-capillary lens.

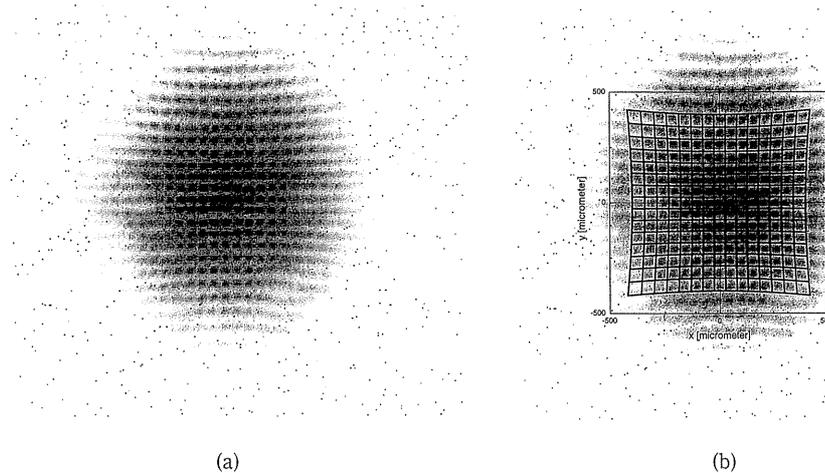


Figure 11. (a) The magnified image of a gold mesh (Good-Fellow Co.) using the micro-capillary lens with the magnification factor of about 3 at the X-ray energy of 17.1 keV at BL47XU (the distance between mesh and lens & between lens and the detector chosen to be 2 m and 5 m, respectively). (b) The simulated mesh image by a ray-trace calculation and the observed image overlapped. The field distortion (from the lattice) was well reproduced in the simulation.

物が生じたが、結像性能に大きな影響を与えるものとは思われない (Fig. 6a, b)。放射線損傷に強いというのは、実際の応用を考える上では、有望と言えよう。

一方、グリセリン製のレンズの方は、BL47XUで、ギャップ40 mmで実験をした所、バブルの数が増え、焦点距離がいつの間にか変化していた。分光器は、1次光の低エネルギー側の裾の16.5 keVにセットされており、 6×10^{10} photons/sec/0.5 mm²程度のフラックス¹³⁾が照射されていた。このタイプのレンズは、少々、放射線損傷には弱いようである。ギャップ50 mmでは大丈夫だったので、偏向電磁石ビームラインの単色光では問題なく使えるように思われる (例えば、BL20B2などでは、18 keVで 5×10^9 photons/sec/0.5 mm²程度¹³⁾と一桁弱い)。

7. 屈折レンズの今後

屈折レンズを使った光学系 (例えば X 線顕微鏡など) は、レイトレース計算なども容易で、設計しやすい。5章で述べた透過による物体の拡大像の撮影なども極めて容易である。倍率は、ビームラインの長さから従って、さらに大きくしてゆくことが可能であり、SPring-8の長尺のビームラインを活用した実験として適していると思われる。例えば、現在立ち上げ中のBL20B2などでは、160 mのカメラ長がとれ、焦点距離が2 mであれば、80倍程度の倍率の画像を撮る事が可能である。位相物体によるホログラムの拡大像も80倍程度になれば容易にとれると思われる。実験提案が通れば、結果を続編として当学会誌に報告させて頂きたいと思う。

今回は、X線バブルレンズとして、液体 (樹脂) を使ったレンズに話を絞ったが、SPring-8での屈折レンズの開発としては、もっと広く、高精度の物を追求してゆく必要もあるであろう。まず、(i)レンズ自体の精度が解像度を

左右するので、精度を上げたい。球面収差が問題となる実験用には、放物面や回転楕円面など収差の小さいレンズの開発を行いたい。さらに、(ii)リアルタイムで像を撮るには、高いフラックス下での使用が不可欠となるので、放射線損傷に対する安定性を上げたい。それには、レンズの材質も何通りか再検討の必要があると思われる。

追記

Lengeler et al. (Applied Physics Letters, 74, 26, 3924, 1999) が報告した所によると、プレス加工で製作されたアルミ製の放物面形状のレンズを用い、歪曲収差がほとんどない拡大像がとれたそうである。

謝辞

本研究は、理化学研究所 石川哲也氏との共同研究からスタートし、以下の方々の御協力のもとで行われた。理化学研究所 佐藤一道氏、高輝度光科学研究センター 鈴木芳生氏、淡路晃弘氏、A. Baron 氏、SPring-8 Service 石澤康秀氏、Belarusian State University Yu. I. Dudchik 氏、N. N. Kolchvsky 氏、F. F. Komarov 氏。この場を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) S. Suehiro, H. Miyaji and H. Hayashi: NATURE 352, 385 (1991).
- 2) A. Snigirev, et al.: NATURE 384, 49 (1996).
- 3) P. Elleaume: Journal of Synchrotron Radiation 5, 1 (1997).
- 4) A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, A. Souvorov and B. Lengeler: Applied Optics 37, 653 (1998).
- 5) B. Lengeler, J. Tummer, A. Snigirev, I. Snigireva and C. Raven: Journal of Applied Physics 84(11), 855 (1998).
- 6) A. Q. R. Baron, Y. Kohmura, Y. Ohishi and T. Ishikawa: Applied Physics Letters 74(10), 1492 (1999).

- 7) A. Q. R. Baron, V. V. Krishnamurthy, Y. Kohmura, Yu. V. Shvyd'ko and T. Ishikawa: submitted to the Journal of Synchrotron Radiation
- 8) W. L. Bragg: Proc. Roy. Soc. Lon. **190**, 474 (1947).
- 9) M. Takagi, et al.: J. Vacuum Science & Technology **A 9**(4), 2145 (1991).
- 10) M. Takagi, et al.: J. Vacuum Science & Technology **A 11**(5), 2837 (1993).
- 11) Y. Kohmura, M. Awaji, Y. Suzuki and T. Ishikawa: Proc. of SPIE **3449**, 185 (1998).
- 12) Yu. I. Dudchik and N. N. Kolchvsky: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A 421**, 361 (1999).
- 13) H. Kitamura and T. Tanaka: "SPECTRA" for windows PC.
- 14) Yu. I. Dudchik, N. N. Kolchvsky, F. F. Komarov, Y. Kohmura, M. Awaji, Y. Suzuki and T. Ishikawa: submitted to the Rev. Sci. Instrum.
- 15) Y. Kohmura, M. Awaji, Y. Suzuki, T. Ishikawa, Yu. I. Dudchik, N. N. Kolchvsky and F. F. Komarov: submitted to the Rev. Sci. Instrum.

きいわーど

球面収差

X線に限らず、球面形状の屈折レンズでは、球面収差と呼ばれる収差が生じる。平行光が入射した場合に、中心軸付近を通る光が集光される点を正焦点と呼ぶが、縁を通る光は正焦点よりもレンズに近い marginal focus (周辺焦点) で中心軸と交わり、正焦点面で集光スポットの裾を広げる。光軸方向に移動しながら、平行光による集光プロファイルを調

べ、像のサイズが最小になる所を circle of least confusion (最小錯乱円) と呼ぶが、これは、正焦点と必ずしも一致しない。

球面レンズでは、物体平面で、光軸と交わる直線は、直線として結像するが、他のすべての直線の像は曲がって結像するという歪曲収差が見られる。歪曲収差を減らすためには、回転楕円面、放物面形状が望ましい。