

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651109

研究課題名(和文)高輝度X線用ファイバー光学要素の開拓

研究課題名(英文)Development of fiber optics for brilliant X-ray beam

研究代表者

田中 義人(Tanaka, Yoshihito)

独立行政法人理化学研究所・放射光科学総合研究センター・ユニットリーダー

研究者番号：80260222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：ファイバー光学系によるX線ビームの方向や照射位置の制御を行う新手法を開発・実証した。X線伝搬用の中空ガラスファイバーでは、曲率半径が小さいと伝搬しなくなるという難点がある。これを克服するため、肉厚を調整したファイバーを用いることでビーム軌道の曲率を制限した。長さ1.5 m、内径20ミクロンのケイ酸ガラスファイバーのX線伝搬特性を高輝度放射光X線ビームにて評価し、透過率最大数十%、ビーム軸を約10 cmシフトさせることに成功した。また、固定試料に対して、ファイバー終端掃引による吸収率マッピング測定のデモンストレーションを行った。本性能はX線パルスの照射時間制御等にも応用できることを示している。

研究成果の概要(英文)：A meter-length flexible hollow glass fiber with 20 micron-bore and 1.5 mm-cladding diameters has been examined to transport a synchrotron X-ray beam for controlling the trajectory. The large cladding diameter keeps the moderate curvature to satisfy the shallow glancing angle of total reflection. The observed transmission efficiency was more than 20 % at 12.4 keV. As a demonstration, we performed the wide-area scan of a synchrotron radiation beam to identify the elements for a fixed metal film through its absorption spectra. The result obtained at the project suggests that the optics is applicable to control an arrival time of X-ray pulses toward future X-ray pump-probe experiments.

研究分野：量子ビーム科学

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：光ファイバー X線 放射光 量子ビーム

1. 研究開始当初の背景

放射光をはじめとする近年の強力な高輝度 X 線光源の開発に伴い、X 線吸収測定、蛍光 X 線測定、X 線回折散乱測定、X 線透過像撮影など、様々な測定が迅速に行えるようになった。さらに高度な測定、例えば、迅速 X 線吸収微細構造測定や、マイクロビームによる高解像度の蛍光マッピング、時間分解 X 線回折法なども身近な測定になりつつある。しかしながら、入射 X 線の試料への導入方法については、X 線領域の光学素子に、可視光領域のように簡便な鏡やレンズなどの光学素子がないためそのハンドリングに難がある。例えば、固定された試料周りに X 線ビームを導入する際には、高精度に加工された全反射鏡や、ゾーンプレート等が用いられ、単に入射方向を変えるだけでも大がかりでかつ様々な制約があるのが実状である。

そこで、我々はガラスキャピラリでできた光学素子で偏向する方法を試みた。市販のキャピラリレンズ(ガラスキャピラリが束になってレンズの役割を果たす素子)を用いて、その素子の姿勢制御だけで X 線ビームを偏向させる手法について特許出願(特願 2011-44376 2011 年 3 月 1 日)を行い、それを実証した。また、長さ 70 cm の単芯キャピラリを用いて、その透過率を測定し、偏向角 $\pm 5^\circ$ で 60 % 以上の高い透過率を確認した。ただし、平行度の高い放射光をキャピラリ内に導入する際、単芯キャピラリの姿勢の調整が困難で、多大な時間を費やした。そこで、平行 X 線をキャピラリへ迅速に導入できるカブラの開発と、その手法の確立、および、メートル長キャピラリ(X 線ファイバー)を利用した試料への照射位置、角度制御、ならびに時間遅延制御法の開発に着手するに至った。

2. 研究の目的

本課題では、放射光 X 線を用いて、ガラスキャピラリを基本とした光学系によって、高輝度 X 線ビームの照射位置制御、照射角度制御、遅延時間制御等ができることを実証し、固定された試料に X 線を任意の条件で照射する操作を簡便にかつ汎用的に行える方法を開拓することを目的とする。この目的のため、特に X 線を自由空間からキャピラリ内に X 線を導入するカブラの部分の条件と方法を確立することに重点をおいた。この光学系の実現は、X 線ファイバーを用いた簡便な光学系の構築と新しい X 線計測への展開につながることを期待できる。

3. 研究の方法

当課題は、(1) X 線ファイバー形状の設計、(2) X 線ファイバーへの X 線導入方法の確立、(3) X 線ファイバーの特性評価、(4) X 線ビーム偏向機能の応用に関するデモンストラーションという順で行われた。以下、各手法について示す。

(1) X 線は中空ガラスファイバー中で全反射を繰り返しそのファイバー方向に導かれる。このとき、全反射臨界角が存在するため、ファイバーの曲率に制限があり、その姿勢制御が重要となる。そこで、曲率を制御する方法として、肉厚を調整した中空ガラスファイバーの設計を行った。内径を決めることにより、X 線を導ける最小曲率半径が決まる。一方、その曲率を達成するのによい外径を決めるといった手順でそれらの大きさを決めた。本課題では、長さ 1.5 m、内径 20 ミクロン、外径 1.5 mm のケイ酸ガラスファイバーを用意した。

(2) X 線を中空ファイバーに導入するために、コンパクトな回転、スイベル、並進自動ステージを組み込み、ファイバーを挟み込める治具を取り付けた入力カブラ機構を製作した。これを SPring-8 のアンジュレータービームライン BL19LXU の実験ハッチに設置し、X 線用 2 次元検出器で治具の陰を観測しながら治具が X 線ビームに平行になるように調整した。次に、内径 50 ミクロン、長さ 70 cm のキャピラリを取り付け、その陰を見ながらキャピラリの中を X 線ビームが通過するように、カブラの角度を調整した。最後に、キャピラリを外し、今回導入した長さ 1.5 m、内径 20 ミクロンのファイバーを設置し、2 次元検出器で伝搬してきた X 線ビームを見ながら角度、位置の微調整を行った。

(3) X 線ファイバーの特性評価を、高平行度、単色性、波長可変性の優れるアンジュレーター光を用いて評価した。まず、入力部の受け入れ角の範囲を、入力カブラの角度を掃引することにより調べた。また、透過率は、入力 X 線のビーム径を内径より小さくなるようにスリットで絞り込み、ファイバーを設置したときと取り除いたときの比で評価した。また、透過強度については、アンジュレーターのギャップを最小にして、放射パワーを最大にし、イオンチャンバーや校正されたフォトダイオードにて強度の評価を行った。波長特性については、アンジュレーター光を受ける 2 結晶分光器を掃引して、透過率を調べた。また、出射ビームの発散角については、出射直後のビーム径をナイフエッジスキャン法にて測定し、1 m 以上離れた地点では 2 次元検出器でビーム径を測定して、発散角を見積もった。ファイバーの偏向角依存性については、出射部にフォトダイオードを設置して測定した。

(4) X 線ファイバーシステムが、固定試料に対するマッピング測定に応用できることを示すために、ファイバー軸のシフト機構を製作した。水平・垂直方向にシフトさせるためには、入力部、出力部をつかむ治具をつかって、出力部の治具を位置掃引する必要がある。その際、ファイバーが重力のために、垂れるのを防ぐため、紐により上部より数力所つり下げられた構造を採用した。また、出力端の治

具は、ビーム軸方向にファイバーが滑ることができるような機構にして、曲げることによるファイバーの出射端のビーム軸方向の位置変化に対応できるようにした。図1にその構成図を示す。出力直後のビーム強度は透過型の検出器である小型イオンチャンバーにより測定し、試料透過後の強度はフォトダイオードにより測定した。

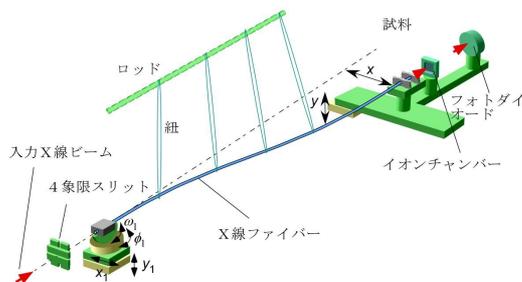


図1 ビームシフト機構の全体図

4. 研究成果

長さ1.5 m、内径20ミクロンのケイ酸ガラスファイバーのX線透過率および強度の、波長、曲げ角特性、出力ビーム発散角を測定した結果を示す。

(1) 図2は、ファイバーの透過率のX線光子エネルギー(波長)依存性である。この光子エネルギーの範囲では、高エネルギーになるほど、透過率が高くなっている。また、12.4 keVのX線(波長0.1 nm)で、最大20%の透過率が得られた。最大の透過強度は、 8×10^9

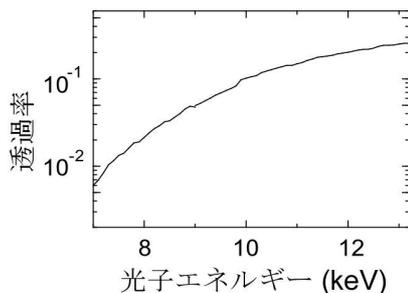


図2 ファイバーの透過率の光子エネルギー(波長)特性

photon であり、これは、BL19LXUの最大強度で制限されている。

(2) 透過率のビームシフト量依存性を測定した結果を図3に示す。水平方向の掃引した場合の透過強度の特性が図3(a)である。 ± 75 mm程の範囲を掃引できることがわかる。ここで、掃引可能な範囲として、最大強度の半分になるところと定義した。2次元掃引もおこ

なってその強度分布を測定した結果が、図3(b)である。水平方向に比べて、垂直方向の掃引範囲がやや狭くなっているのは、図1で示したように、紐で吊しているものの、水平方向に比べればスムーズに変形しないためと思われる。将来的には、垂直方向にも均一に変形できる機構を開発する必要がある。

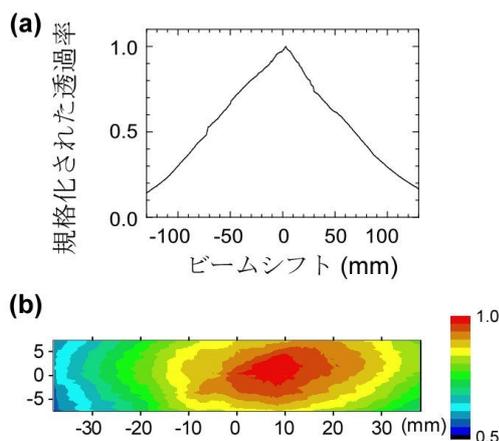


図3 (a)透過率の水平方向のビームシフト量依存性。(b) 2次元のシフト量依存性。横軸、縦軸が、それぞれ水平、垂直方向に対応する。

(3) 図4に、出力ビームの発散角を測定した結果を示す。ファイバーの終端から28 mm離れた場所でのビームプロファイルは50ミクロン程度なので、ナイフエッジスキャンにより測定した(図4(a))。一方、1.89 m離れた

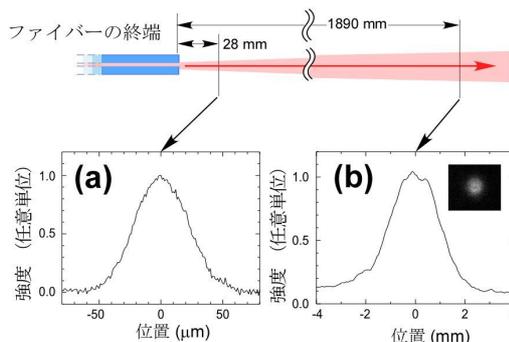


図4 出力ビームの発散角

位置では、ビーム径は約2 mmなので、ピクセルサイズが50ミクロンの2次元検出器を用いて測定した(図4(b))。この2つの結果より、ビーム発散角は1.1 mradと見積もられた。一方、入力側の受入角の測定から見積もった入力側の許容角度幅は、1.6 mradであるため、同様のファイバー光学系でロスなく接続、伝搬されることがわかった。

(4)サイズ 60 mm×15 mm の固定薄膜試料に対して、ファイバー終端掃引による吸収率マッピング測定の実験を行った結果を図 5 に示す。(a) は厚み 15 ミクロンのコバルト箔、厚み 10 ミクロンのニッケル箔および銅箔を貼り付けたデモ用試料である。マッピングがなされていることを明確に示すために、アルファベットの文字の一部をくりぬいた。(b) は波長 0.1 nm の X 線での吸光度マッピングの結果である。(c) は、それぞれの試料の特定の位置で、波長を掃引し、それぞれの吸収端付近で吸光度が大きく変化している様子を示した。X 線ファイバー光学系では、透過できる X 線の帯域が広いので、このような波長掃引による吸収測定も可能であることを示すことができた。

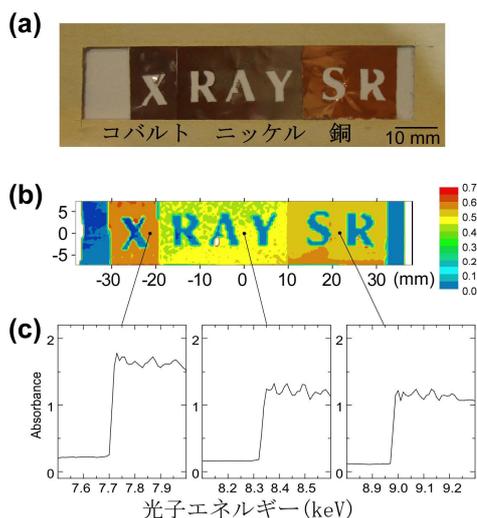


図 5 2次元ビーム位置掃引による X 線吸収率マッピング測定。(a) はデモ用に用意したサイズ 60 mm×15 mm の薄膜試料で(b) は X 線ファイバー掃引による吸光度マッピング。(c) は (b) に示した位置での吸光度スペクトル。

以上、X 線ファイバーの基本的な特性と、そのデモ実験を示すことができた。一方で、さらに性能向上をめざして、材質や設計について検討を行った。ファイバーの材質については、合成石英を採用したところ、内径 20 ミクロン、外径 1.5 mm、長さ 1.5 m のもので、70%以上という高い透過率が得られた。さらに長いファイバー光学系を達成するために、ファイバー接続についても実際に、2本の 1.5 m 長のファイバーを接続し、3 m 長の伝搬を実証することができた。以上の結果から、これらのファイバーを用いた場合、16 ps 以上の時間遅延が得られることが見積もられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Y. Tanaka, T. Nakatani, R. Onitsuka, K. Sawada, I. Takahashi, Controlling X-ray

beam trajectory with a flexible hollow glass fibre, J. Synchrotron Rad., 査読有, 21, 2014, pp. 61-65.
Y. Tanaka, K. Ito, Y. Matsushita, Y. Oji, T. Nakatani, K. Sawada, I. Takahashi, X-ray beam deflection control with a flexible capillary, J. Phy. Conf. Ser., 査読有, 425, 2013, 052017.

〔学会発表〕(計 4 件)

Y. Tanaka, Time-resolved X-ray Diffraction Experiment on Crystal Lattice Dynamics Using Optical Laser and Accelerator-based X-ray Source, Conference on Laser and Synchrotron Radiation Combination Experiment (LSC2014), Yokohama, Japan, April 23-24 (2014).

田中義人、鬼塚怜奈、西森一喜、二澤宏司、澤田桂、高橋功中空ガラスファイバーを用いた X 線ビーム伝送系の開発, 第 27 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、広島市、1 月(2014)

田中義人、伊藤基巳紀、中谷貴司、鬼塚怜奈、澤田桂、高橋功、中空ファイバーによる X 線ビーム伝送とその特性, 第 26 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、名古屋市、1 月(2013).

Y. Tanaka, K. Ito, Y. Matsushita, Y. Oji, T. Nakatani, K. Sawada, I. Takahashi X-ray beam deflection using flexible capillary, 11th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI2012), Lyon, France, 2012 7/9-13.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.riken.jp/SRmaterials/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 義人 (TANAKA Yoshihito)

独立行政法人理化学研究所 放射光科学
総合研究センター・ユニットリーダー

研究者番号：80260222

(2) 研究分担者

伊藤基巳紀 (ITO Kiminori)

独立行政法人理化学研究所 放射光科学
総合研究センター・リサーチアソシエイト

研究者番号：20506109