

光の形を整形する (反射鏡編)

宇留賀朋哉 勸高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

E-mail: urugat@spring8.or.jp

野村昌治

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

E-mail: masaharu.nomura@kek.jp

1. はじめに

放射光実験では、試料の大きさに合わせて光を小さく絞ったり、あるいは逆に拡大します。今回は光の形を整形する最も一般的な光学素子である反射鏡（以下、通常呼ばれているように「ミラー」と呼びます）について説明します。屈折・回折素子を用いた光の整形については次の回で扱います。また、すでに前号で真空紫外（VUV）から軟 X 線（SX）の領域で使用されるミラーの役割や機能について詳しく解説されました。そこで今回は、主に硬 X 線領域（およそ 3-60 keV）におけるミラーについて、目的に応じてどのようなミラーがありどのように使われているのか、をミラーを使う立場から分かり易く記述することを試みます。なお、ミラーに関するより詳細な解説については、参考文献¹⁻⁴⁾を参照下さい。

Fig. 1 に、SPring-8 の BL01B1（XAFS ビームライン）の光学ハッチ内の装置配置を示します。ここでは二結晶分光器の上流と下流にミラーが一台ずつ設置されています。利用者に提供されている光は、エネルギー幅が狭く、なおかつ不要なエネルギー成分が取り除かれ、しかも試料位置で絞られた放射光です。このとき多くの利用者はミラーを意識することはありません。ミラーがどのようにしてこうした働きするのかを簡単に理解するために、最初に X 線の反射現象から復習することにしましょう。

2. X 線の反射の基礎知識

2.1 X 線の反射とは？

第 4 回 2-2 節で、光の屈折と反射について解説されました。そこでは、特にエネルギーの高い硬 X 線領域になるほど、ミラーに対する X 線の入射角度を小さな角度（斜入射配置）にしないと反射しないことが説明されました。ここでは、X 線の反射のメカニズムについて、可視光の反射と比較しながら、もう少し詳しく考えてみます。

光が屈折率の異なる物質に入射すると、第 4 回で説明されたように境界面で屈折と反射が起こります。光が屈折率 n_0 の物質から屈折率 n の物質に進む時、下記の関係式（スネルの法則）が成り立ちます。

$$n/n_0 = \cos \theta_i / \cos \theta_r \quad (1)$$

ここで、 θ_i 及び θ_r は、それぞれ境界面から測った光の入射角及び屈折角です。X 線と可視光の反射の相違は、屈折率から説明できます。真空中（屈折率 $n_0=1$ ）から物質の内部に進む光は、可視光領域では、物質の屈折率 n が 1 より大きな値なので、第 4 回の Fig. 2 のように $\theta_r > \theta_i$ の方向に屈折します。残りは境界面で反射されます。一方、X 線領域では、物質の屈折率 n は 1 よりも僅かに小さな値をとるため、Fig. 2 (a) のように $\theta_r < \theta_i$ の方向に屈折します。入射角 θ_i が次式

$$n = \cos \theta_c \quad (2)$$

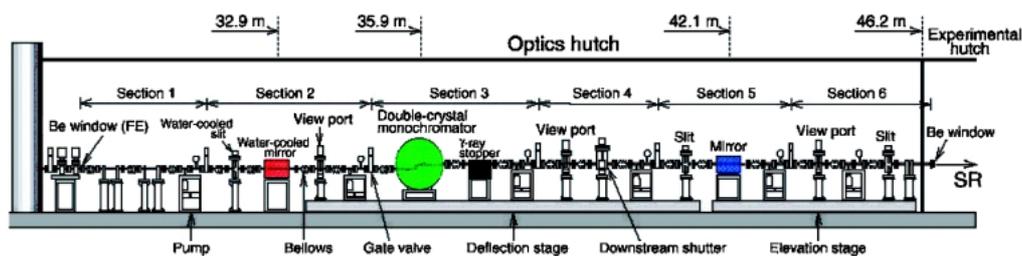


Fig. 1 Layout in optics hutch at BL01B1 at SPring-8.

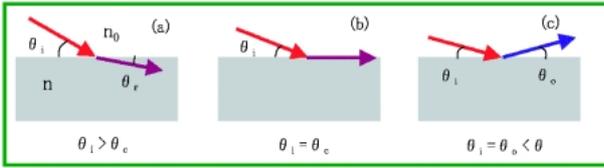


Fig. 2 Refraction and total reflection of x-rays at surface.

を満足する角度 θ_c よりも小さい時、X線は物質の奥へ進行せず、境界面で Fig. 2(c) のように反射されます（厳密には、極浅いところ（nm 程度）までは侵入します）。この現象を全反射（あるいは単に反射）、また θ_c を全反射臨界角と呼びます。一方、 θ_c よりも大きな入射角では、全反射はほとんど起こりません。X線用のミラーはこの全反射現象を利用した光学素子なのです。実は、可視光が屈折率の大きな物質から小さな物質（例えば、ガラス中から空気中）に進む場合も、境界面で同様の全反射が起こります。この現象は、光ファイバー中の光伝播の原理として広く利用されています。

ここで X 線の全反射が起こる θ_c を見積もってみましょう。光が真空中から屈折率 $n = 1 - \delta + i\beta$ の物質に入射する場合、フレネルの理論から反射率は第 6 回 2-3 節の式(4)及び(5)で表されます¹⁾。硬 X 線領域では θ_i が小さいため、偏光による差はほとんどありません。屈折率 n は、吸収項 β を無視すると、 $n \sim 1 - \delta$ となり、X 線領域では、 $\delta = 10^{-5} - 10^{-6}$ なので、

$$\theta_c \sim (2\delta)^{1/2} \sim 20\rho^{1/2}/E \quad (\text{mrad}) \quad (\theta_c \ll 1) \quad (3)$$

と近似できます^{1,2)}。ここで ρ は物質の密度 (g/cm^3)、 E は X 線のエネルギー (keV) です。式(3)からわかるように、エネルギーの高い X 線を反射するためには、入射角を小さくする必要があります。例えば、3-60 keV の硬 X 線領域では、

$$\theta_c \sim 1-20 \text{ mrad} \sim 0.05-1 \text{ deg} \quad (4)$$

と非常に小さな値になります。従って X 線ミラーは入射 X 線に対して斜入射、つまりすれすれに入射するように設置しなければなりません。また拡がりのある放射光を受けるためには、長いミラーが必要になります。

2.2 X 線の反射率に影響するもの

ミラーの反射率は、実験ステーションに届く光量とエネルギー範囲に直接影響します。ここで、反射率がどのような物理量によって影響されるのかを説明します。

式(3)を書き換えると、X 線ミラーを傾斜角 θ_i に設定した場合、

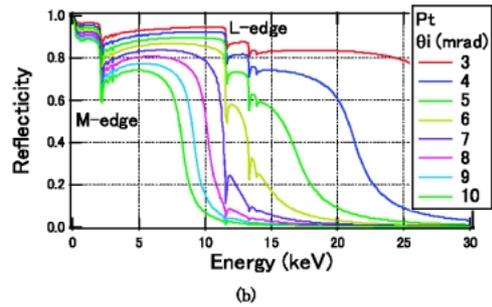
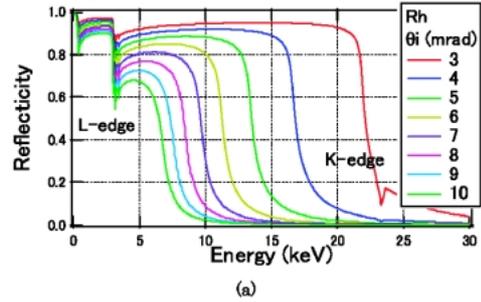


Fig. 3 Reflectivity of Rh (a) and Pt (b) with ideal surface as a function of photon energy.

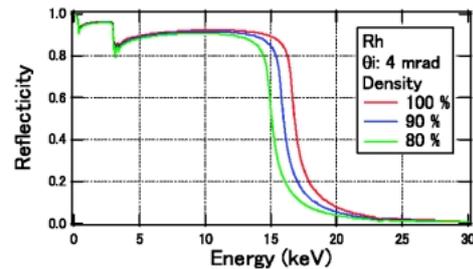


Fig. 4 Effect of coat density (bulk: 100%) on reflectivity of Rh.

$$E_c \sim 20\rho^{1/2}/\theta_i \quad (5)$$

よりも高いエネルギーの X 線は全反射しません。 E_c は全反射臨界エネルギーと呼ばれます。式(5)は、密度の高い物質を用いるほど、高いエネルギーの X 線まで反射できることを示します。Fig. 3 に X 線ミラーの代表的な反射材であるロジウム (Rh, 原子番号 45) と白金 (Pt, 原子番号 78) の反射率のエネルギー依存性を示します。同じ傾斜角では Pt ($\rho = 21.4 \text{ g}/\text{cm}^3$) の方が Rh ($\rho = 12.4 \text{ g}/\text{cm}^3$) よりも全反射臨界エネルギー E_c が $(21.4/12.4)^{1/2} = 1.3$ 倍大きくなります。また Fig. 4 に示すように、同じ反射材を使っても密度が低い状態では臨界エネルギーが小さくなってしまいますので、ミラーを製作する際には、反射材の選択だけでなく、実際の密度にも注意を払う必要があります。

放射光ビームラインでは、ミラーの位置や後で述べる表面形状の調整の限界から、入射角の下限は 1 mrad 程度です。KEK-AR の NW10A では、2 方向集光 Pt ミラーが

傾斜角1.5 mrad で設置され、42 keV まで使用されています。また、SPring-8のBL01B1では、1方向集光Rhミラーが1-10 mradの範囲で設置され、4-60 keVで使用されています。

Fig. 3をみると全反射臨界エネルギーとは別のエネルギーで、反射率の急激な減少が見られます。これは、反射材として用いた物質のX線吸収端(K, L, M-edge)に由来するものです。エネルギーをスキャンするような実験(XAFS等)では邪魔をすることもあります。

ミラーの反射率に影響するもう一つの要因は、表面粗さ(microroughness)と呼ばれる量です。これは走査型トンネル顕微鏡(STM)等でミラー表面のマイクロな領域(μm ~ nm)を観察した際に見られるサブnmオーダーの凹凸のことを指します(Fig. 5(a)参照)。可視光のミラーでも表面に傷があると光は散乱され、反射光の強度が減少します。X線ミラーの場合も表面の粗さが反射率を低下させます。ただし、X線は非常に波長が短い(10^{-2} - 1 nm)光であるため、問題となる凹凸のスケールも非常に小さく、ナノメートルのオーダーとなります。表面粗さの程度は、次式の平均自乗(rms)表面粗さ σ で定義されます(座標系はFig. 5(a)参照)。

$$\sigma = \left[\frac{\iint z(x, y)^2 dx dy}{\iint dx dy} \right]^{1/2} \quad (6)$$

表面粗さをもつミラーの反射率Rは、次式に示すように理想的な鏡面による反射率 R_0 に、表面粗さによる減衰因子を乗ずることで得られます。

$$R = R_0 \exp[-(4\pi\sigma/\lambda)^2 \sin^2 \theta_i] \quad (7)$$

この減衰因子はDebye-Waller因子¹⁾と呼ばれるものです。他に、Nevot-Croce因子⁷⁾があります。前者は凹凸面による散乱過程の記述から、後者は凹凸面を密度(即ち、屈折率)の勾配と捉えて導出したものです。両者は表面粗さの状態により使い分けられますが、近年両者を繋ぐ統一的な理論式が導出されています⁸⁾。現在実用されているX線ミラーの多くは、Nevot-Croce因子がよくフィットします。Fig. 5(c)に反射率の計算例を示します。実用のミラーは、Nevot-Croce因子で $\sigma = 1-2\text{ nm}$ 程度に研磨されています。表面粗さの値は、計測手法により異なった値を示すため注意が必要です。例えば、8-1節で述べるヘテロダイン干渉計で計測すると、実用のミラーは $\sigma = 0.1-0.3\text{ nm}$ 程度と測定されます。この相違は、主に測定している空間周波数の領域の違いに起因します。

なお、ミラーの反射率の計算や物性値はWEBサイト^{5,6)}から入手可能となっており、初めての方でも簡単に計算ができますので、是非お試しください。

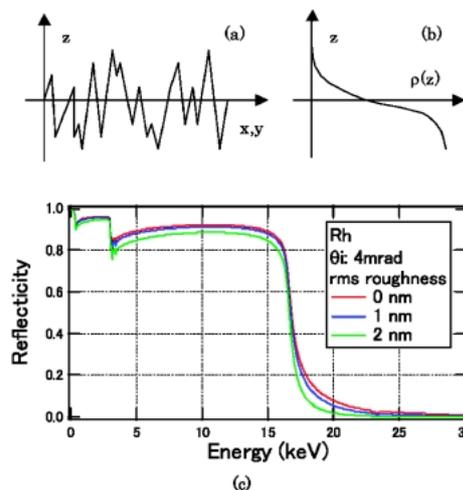


Fig. 5 Model for surface roughness (a) and density gradient of Nevot-Croce factor (b). Effect of surface roughness on reflectivity of Rh (c).

2.3 多層膜を用いたミラー

上記の全反射現象を利用したミラー以外に、多層膜を利用したミラーがあります。紙面の都合で簡単に紹介します。多層膜とは、基盤の上に屈折率の大きな物質の層と小さな物質の層を交互に数十から数百層積層したものです。各層の厚さは1-10 nm程度です。各層を同じ厚さで周期的に繰り返し積層したものを周期多層膜と呼びます。周期多層膜は、1次元周期を持った結晶と同様に、回折条件を満足するエネルギーの放射光のみ反射することができ、結晶に比べエネルギー幅が広い単色光が得られます。周期多層膜は分光と集光とを同時に実現する光学素子として用いられます。一方、各層の厚さを連続的に変化させた多層膜は、各層で反射する放射光のエネルギーが異なり、全反射ミラーと同様に連続的なエネルギーを持つ反射光が得られます。同じ入射角で全反射ミラーよりも3倍程度高いエネルギーの放射光まで反射できるミラーも開発されており、スーパーミラーと呼ばれています⁸⁾。スーパーミラーは、高エネルギー領域の反射光学素子やX線望遠鏡として用いられています。

3. ミラーの用途

3.1 集光

X線のミラーによる集光を可視光領域と同じように幾何光学で説明しましょう。点光源からの光を点に集光するミラーの理想的な表面形状は回転楕円面です。平行光を点に集光する理想表面形状は回転放物面です(逆に発散光を平行光にする場合も回転放物面です)。また1方向の集光を行う場合は、それぞれ楕円面と放物面になります。X線ミラーの特徴は、斜入射配置である点です。集光ミラーには多様な種類があるため、詳細については次章で述べま

す。

次号で解説される回折・屈折素子を用いると非常に小さな集光サイズが得られますが、X線のエネルギーにより回折角や屈折角が変化するため、それに追従して焦点距離が変わるといった短所があります。一方、ミラーを用いるとX線のエネルギーに対し反射角が変わらないため、エネルギーを変化させながら行う実験（XAFS等）では有効です。また、ミラーによる集光は入射光の強度のロスが小さいという長所があり、多くのビームラインで汎用的な集光素子として利用されています。

3.2 コリメーション（平行光化）

第5回5章および第6回2章で説明されたように、色々なエネルギーのX線が含まれる放射光（白色光と呼びます）の中から、特定のエネルギーのX線を取り出すために分光器を用います。分光されたX線のエネルギーの幅（エネルギー分解能と呼ばれます）は、分光器に入射する放射光の角度広がりが多いほど大きくなります。従って、光源から出た発散光を分光器の上流で平行にすれば（あるいは角度広がりを狭めれば）、エネルギー分解能の高いX線を得ることができます。この平行光化を行なうミラーをコリメーティングミラーと呼びます。分光器の上流に設置することから前置ミラーとも呼ばれます（ちなみに分光器の下流のミラーは後置ミラー）。スリット幅を狭めることでもエネルギー分解能は向上しますが、入射光がカットされるため強度をロスします。SPring-8のBL01B1ではコリメーティングミラーにより、スリットを用いる場合と比べると、例えば10 keVでは約5倍のビーム強度が得られています。

点光源からでた光は、放物面（1方向）または回転放物面（2方向）形状のミラーで反射すると平行光になります。懐中電灯や自動車のヘッドランプの反射板と同じ原理です。ただし、エネルギー分解能の向上に大きな効果があるのは、分光結晶の偏向方向と平行な方向の平行光化です。即ち、上下偏向の分光結晶に対しては、上下方向の平行光化が有効です。また、まれに見受けられる誤りですが、コリメーティングミラーを用いたビームラインではスリット幅を変えても、エネルギー分解能はほとんど変わりません（実際のミラーには形状のエラーがあるため、多少の変化はあります）。

3.3 高次光カット

第5回6章および第5回2-4節で説明されたように、分光器で分光された光には実験で邪魔になる高次光が混入します。例えば、Si(111)分光結晶の場合、基本光の3倍のエネルギーをもつ高次光が混入します。これを除去する方法の一つは、硬X線領域では、分光器の2つの結晶のディチューンです。もう一つの方法は、ミラーの反射を利用する方法です。2-2節で述べたように、全反射臨界エネ

ルギーよりも高いエネルギーのX線の反射率は極めて小さく、ミラー反射一回で高次光を1/100-1/1000程度に減衰させることが可能です。多くの実験では、この程度のカットで十分です。高次光が測定データに大きな影響を与える実験（XAFS等）では、より高い除去を行なうためにミラーを2枚用います。一般にミラーを用いる方法はディチューン法と比べ、高次光をより効果的にかつ安定にカットすることができます。

実験で用いるX線のエネルギーを大きく変える場合は、ミラーの全反射臨界エネルギーを変えることが必要となります。これを実現する一つの方法は、ミラーの傾斜角を変更する方法です（Fig. 3参照）。この方法はミラーの下流のコンポーネントの位置を移動する必要があり、調整に手間がかかることがあります（例：SPing-8 BL01B1）。もう一つの方法は、ミラーの反射材を切り替える方法です。予めミラーに複数種の反射材をストライプ状に塗り分けておきます。ミラーの傾斜角を固定したまま、平行移動することで反射材を切り替えます（例：SPing-8 BL02B2）。この方法は簡便に行える点で優れていますが、ミラーの傾斜角が最少角度（最大エネルギーに対する全反射臨界角以下）に固定されるので入射光の受光巾が制限され、ロスが大きいという短所もあります。上記の2つの方法を併用するビームラインもあります（例：KEK-PF BL-9A, SPring-8 BL13XU, BL37XU）。

3.4 軟X線用ミラーの特徴

第6回で説明されたように、軟X線ビームラインでは試料位置での集光という用途以外に、分光器の中で放射光を集光して回折格子とあわせて分光するためにもミラーが用いられます。軟X線ミラーは、入射角が大きいこと、反射率が低いことや収差の影響が大きいこと、またミラーの表面の汚れて反射率が大きく損なわれるなどの点で注意が必要です。

4. 集光ミラーのいろいろ

集光ミラーを集光点のサイズにより2つに分けて説明します。一つは、適度な集光サイズ（数十-200 μm 程度）で、できるだけ多くの放射光を試料位置で簡便に集めることを目的としたミラーです。ここでは「汎用ミラー」と呼ぶことにします。もう一つは、試料位置での放射光の強度は多少犠牲にしてマイクロメーター以下の集光を得ることを目的とした「マイクロフォーカスマイラー」です。以下では、多くのビームラインで利用される「汎用ミラー」を中心に述べます。

4.1 集光ミラーの表面形状

まず、X線ミラーの表面にはどの程度の「曲がり具合」が必要か述べます。Fig. 6(a)において光軸方向（x方向）

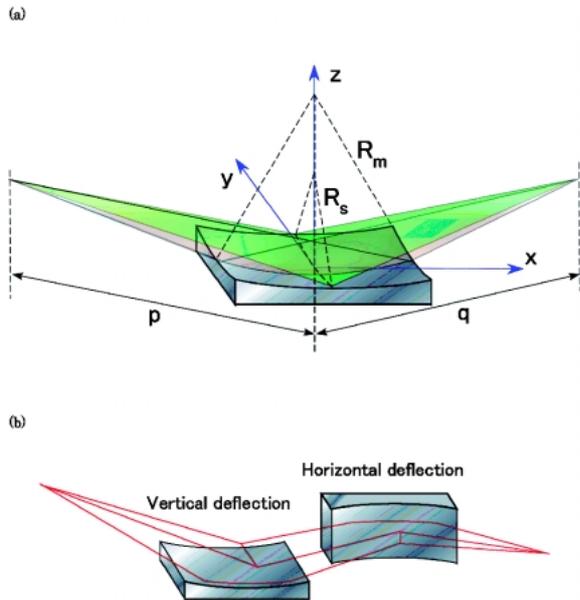


Fig. 6 Definition of parameters for ellipsoid (a) and KB mirrors (b).

を子午線方向、光軸に垂直な方向 (y 方向) をサジタル方向と呼びます。曲面の曲がり具合を表す量として、曲率半径をいう量を使います。これは、曲面の微小領域を円で近似したときの半径に相当するものです。大きな曲率半径ほど曲がり小さいこと (平面に近いこと) を示します。集光ミラーの子午線およびサジタル方向に対する曲率半径をそれぞれ R_m および R_s とすると次式で計算されます¹⁾。

$$R_m = 2 / (1/p + 1/q) / \sin \theta_i \quad (8)$$

$$R_s = 2 \sin \theta_i / (1/p + 1/q) = R_m \sin^2 \theta_i \quad (9)$$

ここで、 p は光源からミラーまでの距離、 q はミラーから集光点までの距離です。(ちなみに、コリメーティングミラーの場合は、 $q = \infty$ 即ち $1/q = 0$ として計算します。) 硬 X 線領域の汎用ミラーの場合、 $p = 15\text{--}50\text{ m}$ 、 $q = 5\text{--}20\text{ m}$ 、 $\theta_i = 1\text{--}10\text{ mrad}$ ですから、 $R_m = 0.1\text{--}10\text{ km}$ 、 $R_s = 30\text{--}100\text{ mm}$ となります。両者には 4-6 桁の開きがある点に注意しましょう。高エネルギーでは、入射角 θ_i を小さくするため、 R_m は大きく、逆に R_s は小さくなりすぎることにより、共にミラー表面形状の製作が難しくなります。

また、光源および集光点のサイズをそれぞれ、 Σ および F とすると、理想的な条件下では、光源サイズと角度発散を掛けた量は一定なので、

$$F = \Sigma \times q / p \quad (10)$$

が成り立ちます。 $M = q/p$ は光源に対する集光点のサイズの倍率になります。汎用ミラーでは $M = 0.1\text{--}1$ で用いられます。

4.2 1 方向の集光

1 方向 (1 次元) の集光には、子午線方向の曲面を用いた方法とサジタル方向の曲面を用いた方法があります。子午線方向の曲面は、4-1 節で述べたように曲率半径が km オーダーと大きな値になります。例えば、1 m 長のミラーを $R_m = 1\text{ km}$ の円筒面にする場合、中心の変位量 (たわみ量) は 0.1 mm と大変小さな量になります。この曲面をミラー基板の研削加工で形成することは困難です。そこで平面形状のミラーを湾曲装置で曲げることにより曲面を形成します。理想的なミラー表面形状は楕円面または放物面ですが、曲率半径が km オーダーの場合、円筒面がこれらの良い近似になります。円筒面曲げ機構は設計がシンプルで調整も容易なため、多くのビームラインで採用されています。湾曲機構については 7 章で述べます。

一方、サジタル方向の曲率半径は数十 mm と小さく、湾曲機構で曲げることは困難なため、ミラー基板の研削加工により形成します。形状が円筒面なので、サジタルシリンダーミラーと呼ばれます。サジタルシリンダーミラーは曲率半径が固定されているため、入射角を変更する場合は焦点距離が変わり、集光点の光軸方向の位置が移動する短所があります。そのため多くの場合、1 方向の集光は子午線湾曲ミラーで行われます。

4.3 2 方向の集光

反射により入射光線の向きを上下方向、水平方向に変えるミラーをそれぞれ、上下偏向ミラー (縦振りミラー)、水平偏向ミラー (横振りミラー) と呼びます (Fig. 6(b) 参照)。偏向電磁石ビームラインでは、ミラー位置での放射光の拡がり上下方向は数 mm ですが、水平方向は数十 mm と大きいので、水平偏向ミラーでは入射光を受けきれずに大部分をこぼしてしまいます。そこで、Fig. 6(a) のように 1 枚の上下偏向ミラーを用いて 2 方向 (2 次元) の集光を行います。しばしばサジタルシリンダーミラーに対して子午線方向を湾曲機構により曲げることで、回転楕円面の近似が行われます。このような 2 つの方向に対して異なる曲率半径をもつミラーをトロイダルミラーと呼びます。回転楕円面ミラーの研磨は難しく、 R_m が小さい (100 m 程度) ものについて製作できるメーカー (Zeiss 社等) は現状では限られています。

回転放物面ミラーに対する良い近似としては、湾曲円錐台ミラーがあります。これは円錐の斜面を切り取った形状 (サジタル方向の曲率半径が連続的に変わった形状) のミラーを子午線方向に曲げたものです。KEK-PF のビームライン BL9A では、一対の湾曲円錐台ミラーを前置コリメーティングミラーと後置集光ミラーとして用いて 2 方向の平行光化と集光を行い、エネルギー分解能が高く、かつきれいな 2 方向集光を実現しています¹⁰⁾。

アンジュレータービームラインでは、ミラー位置での放射光の拡がり上下・水平両方向共に 1-2 mm と小さい

ため、子午線湾曲ミラーを2枚用いて上下と水平の集光を独立に行い2方向集光することも可能です (Fig. 6(b))。この配置のミラーは Kirkpatrick-Baez (KB) ミラー¹⁾と呼ばれています。KB ミラーはトロイダルミラーよりも収差が少なくより良い集光が得られます。

偏向電磁石ビームラインでは、上下集光は子午線湾曲ミラーで、水平集光は薄い分光結晶をサジタル湾曲し2方向集光を行う場合もあります。分光結晶は、エネルギーに追従して曲率を変えることが可能なため、サジタルシリンダーミラーと異なり集光位置を固定できる点に利点があります。また、ミラーによるサジタル集光が容易でない高エネルギー領域で利用できる点も有効です。ただし、調整はあまり容易ではありません。

4.4 高い集光性能をもったミラー

ここでは、マイクロメーター以下の集光を得る「マイクロフォーカスマイラー」について簡単に紹介します。SPRING-8 アンジュレーターの場合、光源のサイズは、15 μm (縦方向) 600 μm (水平方向) 程度です。従ってマイクロメーター以下の集光を得るには、倍率を1/100以下にすることが必要です。このような高い縮小率の場合、5章で述べるように汎用ミラーのような円筒面近似は成立せず、厳密な楕円筒面ミラーを用いることが必要です。2方向集光する場合は、楕円筒面 KB ミラーが利用されます。楕円筒面を形成するには、予めミラー表面を楕円筒面に研削加工する方法と、平面ミラーを楕円筒面に湾曲する方法があります。現状、40 nm を下回るほど小さなビームサイズが達成されています。マイクロビーム用のミラーは、製作上の技術的な問題と、焦点距離(ミラーから集光点までの距離)が短いことから、長さ100 mm 程度のものが製作されています。このサイズでは光源によっては入射する放射光の全てを受光することはできず、光量をスリットで切り出して使用します。既に多くのアンジュレータービームラインで、マイクロビーム用ミラーが一般的に利用されています。高エネルギー X 線領域 (70 keV まで) 用のマイクロビーム用ミラーも開発されています。

理想的な光源と理想的な形状の集光光学素子を用いても、得られる集光サイズには限界があります。これは、光学素子上の有限な光照射領域からの回折に起因するもので、回折限界と呼ばれます。硬 X 線領域のミラーの場合、数十 nm 程度になります。近年、新しいミラーの製作法の開発により、nm オーダーで形状制御された楕円筒面ミラーが開発されるなど、技術革新が続いており、回折限界に近い集光サイズが達成されつつあります。

放射光のロスを防ぐため、長尺の楕円筒面を形成するミラーも実現されつつあります。その一つが、バイモルフミラー¹⁾です。バイモルフミラーでは、ミラー基板に圧電バイモルフ材を用い、それに電圧をかけることにより基板を曲げ、楕円筒面を形成します。現在、1650 mm までの長さのミラーが入手可能です。アンジュレータービームラ

インでは、5 μm 程度までの集光が得られています。

5. 集光サイズに影響する要因

実際のミラーによる集光のサイズは、ミラー表面形状のエラー (加工時の精度、湾曲の精度、ミラー自重によるたわみ、熱負荷による変形など) と収差により決まります。以下では子午線湾曲集光ミラーを例に考えてみます。ミラーの表面形状エラーは、ミラー表面のマクロな領域 (ミラー長の1/100-1/1 程度の範囲) を観察した際に、理想とする形状からのずれ (0.1 μm ~ 10 μm 程度の表面の高さ方向のうねり) として観察されます。このずれの大きさはミラー表面の各点における傾斜角のずれで記述され、スロープエラー (slope error) と呼ばれます。Fig. 6(a) の座標系を用いると、x 方向の rms スロープエラー $\Delta\theta_{\text{slope error}}$ は、ミラー表面上の位置 (x, y) での表面の高さを z とすると、次式で定義されます。

$$\Delta\theta_{\text{slope error}} = \left[\iint (dz/dx)^2 dx dy / \iint dx dy \right]^{1/2} \quad (11)$$

スロープエラーにより、ミラーから $q = Mp$ だけ離れた位置では、反射光の z 方向のプロファイルが次の量だけ拡がります。

$$F_{\text{slope error}} = 2 \times 2.35 \times Mp \Delta\theta_{\text{slope error}} \quad (12)$$

斜入射配置のミラーの場合、集光サイズに対し影響の大きな収差としては、非球面収差とコマ収差があります。非球面収差とは、ここでは理想形状である楕円面を円筒面で近似したことにより生ずるエラーです。コマ収差は、4-1 節で述べた光源サイズと倍率 M の積で決まる集光サイズとなります。以上の影響を考慮すると、集光ビームサイズ F_{total} は下記の式で表されます⁴⁾。

$$F_{\text{spherical}} = 3/16 \times l_m^2 / p \times \theta_i \times (1-M^2) / M \quad (13)$$

$$F_{\text{coma}} = M \times \Sigma \quad (14)$$

$$F_{\text{total}} \sim [(F_{\text{coma}} + F_{\text{spherical}})^2 + F_{\text{slope error}}^2]^{1/2} \quad (15)$$

ここで、 l_m はミラーの長さです。Fig. 7 に SPRING-8 での標準的なパラメーターを用いて計算した集光サイズ F_{total} と倍率 M の関係を示します。アンジュレータービームラインの場合は $M > 0.1$ 、偏向電磁石ビームラインの場合は $M > 0.2$ の時に非球面収差の影響は他の要因に比べ無視できることが分かります。これは、汎用ミラーにおいては円筒面で楕円面を近似することが妥当であることを示します。逆に、マイクロビームを形成するには、楕円筒面ミラーが必要となります。

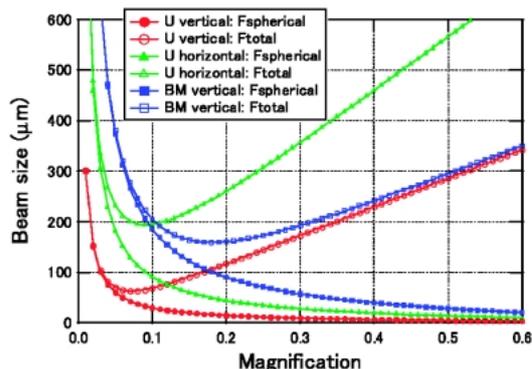


Fig. 7 Calculated beam sizes for typical SPring-8 mirrors as a function of magnification. p : 30 m, θ_i : 4 mrad, $\Delta\theta_{\text{slope error}}$: $3 \mu\text{rad}$, Σ : $35 \mu\text{m}$ (vertical deflection mirror in undulator (U)), $406 \mu\text{m}$ (horizontal deflection mirror in U) and $50 \mu\text{m}$ (vertical deflection mirror in bending magnet (BM)), l_m : 0.4 m (vertical U), 0.7 m (horizontal U) and 1 m (BM).

6. 硬 X 線ビームラインにおけるミラーの配置

各ビームラインでは実験の種類により、設置するミラーの種類、位置、台数等が決定されます。建設予算が重要なファクターとなることもあります。まず偏向電磁石ビームラインについて述べます。コリメーティングミラー、集光ミラーは、それぞれ分光器の上流および下流に設置されます。コリメーティングミラーは、傾斜角の変更に伴う下流の光学素子の位置調整が複雑になるため、高いエネルギー分解能が必要なビームラインでのみ設置されます。その多くは XAFS に関するビームラインです。後置ミラーのみのビームラインでは、多くの場合、一枚のトロイダルミラーによる 2 方向集光が行われます。またビームラインによっては、高次光をより低減したり、出射光の向きを入射光と平行に保つために 2 台の後置ミラーが用いられます。

アンジュレータービームラインの場合、放射光の上下方向の角度拡がり元々極めて小さい(平行光に近い)ため、通常コリメーティングミラーは必要とされません。集光ミラーは、水平集光 1 枚、水平集光 2 枚組 (一枚は平板)、トロイダルミラー 1 枚、KB ミラーなど多様性に富みます。

マイクロフォーカス用のミラーは、ミラーから集光点までの距離が数十 cm 未満と短いため、実験ハッチ内の定盤上に測定対象と近接して設置されます。

7. どのようなミラーを作ればよいか

7.1 ミラーの基本構造

Fig. 8 にミラーの模式図を示します (各部分の厚さの単位に注意)。ミラーは、まず X 線が反射するように、基板材の表面を極めて滑らかに鏡面研磨します。その上に、反

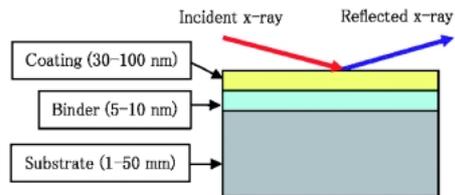


Fig. 8 Schematic drawing of mirror.

射率を高めるために金属の薄膜をコーティングします。ミラーの表面の滑らかさは、金属膜のコーティングが適切に行われれば、基板表面の滑らかさで決まります。X 線は、金属薄膜の表面近傍で反射されます。金属薄膜と基盤との間には、金属膜の剥離を防ぐため、バインダーと呼ばれる接着剤の役割を果す物質 (クロム等) が挿入される場合があります。

7.2 必要な長さ

放射光のミラー表面上での形をビームフットプリント (beam footprint) と呼びます。入射光はミラー上流のスリットで長方形に整形されますので、平板ミラーの場合、フットプリントは子午線方向に伸びた長方形になります。平面ミラーに必要な長さ l_m は、入射光の角度発散 $\Delta\theta_i$ 、光源からの距離 p および入射角 θ_i とすると、

$$l_m \sim p \cdot \Delta\theta_i / \theta_i \quad (16)$$

となります。 $\Delta\theta_i$ は、SPring-8 の場合を例にとると、偏向電磁石光の場合、上下方向は $\sim 120 \mu\text{rad}$ 、アンジュレーター光の場合、上下方向は $\sim 13 \mu\text{rad}$ 、水平方向は $\sim 30 \mu\text{rad}$ です。標準のミラー長として、光源から 30-45 m 付近に傾斜角 3.5 mrad ($= 0.20 \text{ deg}$) でミラーを設置した時に放射光の大部分を受けられる長さが設定されています。偏向電磁石光の場合は 1000 mm、アンジュレーター光の場合は上下偏向および水平偏向ミラーに対しそれぞれ 400 mm および 700 mm となっています。

サジタルシリンドラーミラーの場合、フットプリントは U 字状になります。特に、偏向電磁石光は水平方向の拡がり大きいので、U 字フットプリントの両端が上流方向に大きく伸び、ミラーからの放射光のこぼれが大きくなります。そのため、ミラーの形状や設置位置を決める際には注意が必要です。現在、世界的に製作可能なミラーの長さは 1700 mm までですが、製作コストや取り扱い易さ等を考慮して、多くのビームラインでは 1000 mm までのミラーが使用されています。

7.3 基板材質の選択

ミラー基板の材質には、(1)高い反射率を得るために鏡面研磨がし易いこと、(2)長大な材料が容易に得られること、

(3)真空下でガス放出が少ないこと、(4)湾曲により塑性変形しないこと、(5)放射線損傷を受け難いことなどが要求されます。放射光による熱負荷が小さい後置ミラーには、入手し易さやコストなどから石英がよく用いられます。周囲の温度変化に対してミラーの僅かな熱変形も抑えたい場合は、熱膨張率の極めて小さいガラスやガラスセラミック材料（ULE, Zerodur 等）が用いられます。

一方、前置ミラーには白色 X 線の照射により大きな熱負荷がかかります。そのため、熱特性が優れていることが追加して要求されます。熱特性は、熱伝導率 κ が大きく熱膨張率 α が小さいこと、即ち α/κ が小さいものほど優れています。 α/κ は熱に関する利得（figure of merit）と呼ばれます⁴⁾。シリコンはダイヤモンド、CVD-SiC に次いで優れた figure of merit を持ち、また半導体産業用のインゴットとして長大なものが容易に入手できるため、多くのビームラインで用いられています。CVD-SiC は基板材として用いられる焼結 SiC からのガス放出のため、最近はあまり使用されません。また、金属ミラーも研磨し易さと熱特性の面でシリコンよりも劣っており、あまり用いられていません。

7.4 表面の研削・研磨

ミラー基板の表面を加工する際には、表面粗さとスロープエラーの両方を小さく抑えるように研削・研磨することが要求されます。現状の技術では 1 m 長の平面ミラーでは、rms 表面粗さ：1-2 nm 程度に、rms スロープエラー：1-3 μrad 程度に製作されています。

7.5 反射材の選択

ミラー表面にコーティングされる反射材は、(1)滑らかで稠密な薄膜を形成しやすいこと、(2)放射線照射による経年劣化で剥離しないことが要求されます。これらの条件をクリアし、よく使われるものに、Al, Ni, Rh, Pt, Au があります。この中から、(1)ミラーの傾斜角を固定する場合、全反射臨界エネルギーが適切な物質であること、(2)測定するエネルギー領域に X 線吸収端を持たないことを条件として選定が行われます。多くの硬 X 線ビームラインでは、密度が高い Pt が使用されます。エネルギースキャンを伴う実験（XAFS 等）では、Pt や Au は 10-15 keV に 3 つの L 吸収端をもつため、Rh コートミラーが多くの場合用いられます（Fig. 3 参照）。X 線のエネルギーが低い領域では、反射材による X 線の吸収が大きくなるため、特に注意が必要となります（例：Rh L 吸収端）。長いミラーのコーティングは通常、電子ビーム真空蒸着により行われ、バルク金属の 80-90% の重量密度で成膜されます。

7.6 ミラー調整機構

ビームラインでミラーは調整機構に設置されます。ミラー調整機構は、真空チェンバーと位置調整機構、場合に

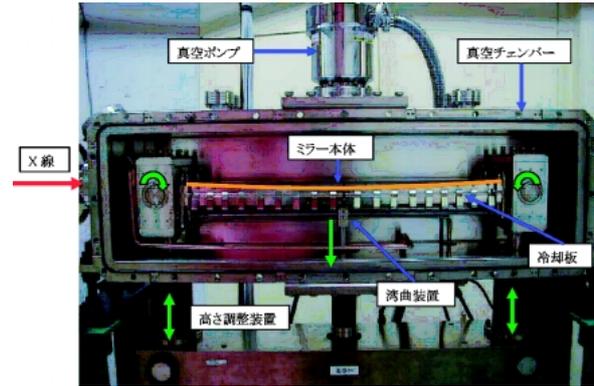


Fig. 9 Standard mirror system for vertical deflection in bending magnet beamline. Mirror length: 1 m.

よって湾曲機構や冷却機構が含まれます。Fig. 9 に硬 X 線ビームラインで標準的に使用されているミラー調整機構を示します。以下では、これを例にとり説明します。

大気中でミラーを使用すると不純物（特にカーボン化合物）でミラー表面に堆積物が付着するため、ミラーは真空チェンバー内に設置します。表面の汚れは、反射率の低下を引き起こします。また、真空中に設置することで、空気による放射光の吸収・散乱を防ぎます。X 線用のミラー調整機構の真空度はおおよそ 10^{-4} - 10^{-5} Pa です。

位置調整軸は、上下、水平および傾斜角の 3 軸があります。700 mm 以上のミラーでは並進軸 2 軸を反対方向に移動することにより、傾斜角の精密調整が行われます。

湾曲機構としては円筒面曲げ機構を採用しています。ミラーの両端を挟み込んでいる箱状のクランプがミラーの下を通っている棒に連結されており、この棒を弓状に曲げることでクランプに回転モーメントが与えられます。これによりミラーの両端に等しい曲げモーメントが加わるので、円筒面曲げになります。長さ l_m のミラーを曲げる場合、中心でのたわみ量 d_r は、 $d_r \sim l_m^2 / (8R)$ で与えられます。例えば、 $l_m = 1$ m, $R_m = 1$ km の場合、 $d_r = 0.1$ mm と大変小さな量になり、精密な湾曲量の調整が必要となります。位置調整機構や湾曲機構などグリスを使用する駆動部分は、放射光照射下でカーボン源となりミラー表面を汚す恐れがあるので、真空チェンバーの外に設置しています。真空ポンプにはオイルフリーポンプ（スクロールポンプと磁気浮上ターボ分子ポンプの組み合わせやイオンポンプ）を使用します。

SPring-8 の偏向電磁石ビームラインの前置ミラーには最大 100 W 程度の熱がかかりますが、ミラー表面上で放射光のフットプリントが長く伸びますので、熱の密度はそれほど大きくありません。そのため、ミラーの基板の側面に水冷した銅ブロックを接触させる方式（間接水冷方式）で十分な熱除去が可能です。ミラー基板と冷却ブロックの間には、In 箔や In-Ga 合金（液体状）を挿入することで接触面積を広くし、冷却効率を良くしています。

8. ミラーの性能評価と調整

8.1 オフラインでの評価

ミラーをビームラインに取り付ける前に、メーカや放射光施設の光学ラボで表面の粗さと形状評価をオフラインで行います。表面粗さの評価には、走査型トンネル顕微鏡 (STM) や可視光ヘテロダイン干渉計 (精度 ~ 0.1 nm) が用いられます。後者による計測値は2-2節で述べたように、Nevot-Croce 因子によるモデル計算値と異なった値を示しますが、表面粗さの相対的な指標として経験的に用いられます。一方、表面形状の評価には、可視光を使った斜入射干渉縞計測法 (参照ミラーとの干渉を計測し、高さのずれを評価) や Long Trace Profiler (ミラー表面の各ポイントでの表面のスロープをレーザーの反射により評価、精度 $\sim 0.5 \mu\text{rad}$)¹²⁾ が用いられます。最近 Round Robin プロジェクトというものがあり、ESRF, APS および SPring-8 の光学ラボの間で行われています。これは、同じミラーを持ちまわって、計測手法・装置の違いを超えて計測しようというプロジェクトで、計測器・手法の評価を行うという目的があります。

8.2 放射光を用いた評価と調整

ミラーの X 線反射率の測定は放射光ビームラインで行なわれ、入射角を固定してエネルギーをスキャンする方法が一般的です。放射光のエネルギーを固定して入射角をスキャンする方法は、下流の光学素子を移動することが必要で煩雑になるため、あまり行なわれません。Fig. 10 に実際のミラー (2 枚組み) の反射率測定値とモデル計算結果を示します。反射率の波打ちは反射材コーティング膜の表面と裏面の反射の干渉によるものです。モデル計算により、ミラー表面粗さや、コーティング膜の密度、厚さ、場所ムラなどの情報を得ることができ、設計仕様との相違があれば、原因の特定が比較的容易に行なえます。

集光ミラーの湾曲量の調整や集光性能の評価は、X 線用の CCD カメラ等により直接集光ビームの形状を見ながら行うのが簡便です。マイクロビームの場合は、CCD カ

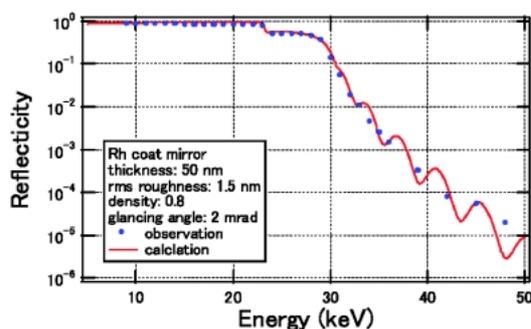


Fig. 10 Observed and calculated reflectivity of Rh double mirror at BL01B1 at SPring-8.

メラの空間分解能が足りないため、ナイフエッジスキャンや人工的に作った微細パターンに対するスキャンにより、集光サイズを評価します。ナイフエッジスキャンデータは微分すると集光ビームの形状になります。

コリメーティングミラーの湾曲量調整や性能評価は、放射光のエネルギー分解能を測定して行います。これは、アナライザ結晶を用いた回折幅の測定や、吸収スペクトルに鋭い微細構造を持つ物質に対するスペクトルの幅の測定により行います。

9. トラブルと対策

9.1 ミラー本体

ミラーをメーカに発注する際に、いくつか注意する点があります。放射光用ミラーのほとんどは特注品ですので、ミラーの仕様 (形状、大きさ、表面粗さ、形状誤差など) によって納期や価格が実にさまざまという点です。平面ミラーやデジタルシリンダーミラーと比べ、特殊な形状のミラー (円錐台ミラー等) の場合、半年から年単位で納期がかかります。平面ミラーでも限界ぎりぎりの仕様を指定すると、びっくりするような価格や納期になってしまいます。

ミラーの反射材コーティングの不良 (密度が低いなど) はまれに発生します。しかし、オフラインでの検査やビームライン上に設置した状態では、不良の特定が難しいケースがあります。そこでミラー本体のコーティングの際に、直径 2 インチ程度の Si ウェハを同時にコーティングしてもらいます。この Si ウェハの反射率測定を行うことにより、反射材コーティングの不良が容易に判明する場合があります。

ミラー基板は割れ物なので、輸送の最中に割れや欠けが生ずることがまれにあります。特に海外のメーカとやり取りをする場合、輸送中の取り扱いで破損した例もあります。高価だけでなく、納期のかかる素子なので、梱包にも取扱にも注意が必要です。

9.2 振動

ビームライン内には、真空ポンプ、冷却水、床上の移動物など色々な振動源があります。ミラーがこれらの振動を拾うと、実験ハッチ内で放射光ビームが揺れます。ミラーから実験ハッチまでの距離が 10 m の場合、ミラーの傾斜角が $1 \mu\text{rad}$ ($= 0.000057^\circ$) ずれると、ビームが $20 \mu\text{m}$ 変移します。集光サイズが数十 μm の場合、これはかなり大きな量です。 $1 \mu\text{rad}$ は、1 m 長のミラーの場合、端が僅か $1 \mu\text{m}$ 変移することに相当します。小さな振動がいかに大きなビーム位置のずれに拡大されるかが分かります。

床からの振動の対策には、ミラー本体を真空チェンバー用の架台とは別の剛性の高い架台に設置することが有効です。また、真空ポンプと真空チェンバーの間に防振ダン

パーを入れることも有効です。冷却水の振動は、冷却配管の引き回し、配管の共振防止策 (錘を巻く等)、水量の最適化などに注意を払うことで低減されます。

9.3 曲げ

ミラーの湾曲に関する問題としては、ミラーの自重によるたわみがあります。上下偏向ミラーの場合、ミラーは自重によるたわみがミラー形状に影響します。自重たわみ量がミラーの湾曲量よりも十分に小さくなるようにミラー基板の厚さを設計すれば、この問題はクリアされます。しかし、エネルギー領域により入射角を変える必要がある場合、湾曲量も追従して変化します。その場合、最大湾曲量に合わせてミラー基板の厚さが決定されるため、湾曲量が小さい条件では、自重たわみが無視できない大きさになります。しかし自重たわみは2次曲線で近似できるので、円筒面湾曲量を適当に調整することでその影響を小さくすることが可能です。

9.4 経年劣化

オイルフリーポンプを使ったとしてもミラー表面には汚れが生じます。多くの場合、汚れはオゾンアッシング法によりクリーニングできます。微量の酸素雰囲気下で放射光を照射する (オゾンアッシングと同様のメカニズム) ときれいになるという報告もあります。白色 X 線の照射に対する破損も Si 基板ミラーでは現状では問題とされていません。また、湾曲装置による曲げ量の再現性は比較的高く、経年変化は小さいといえます。

10. おわりに

X 線ミラーについて、実際的な場面を想定して説明を試みました。汎用ミラーについては、現在安定なシステムが半カタログ化され入手可能になっています。また近い将来、高精度な形状をもつ研磨ミラーやバイモルフミラーのような、より高い集光性能をもったシステムが汎用化され、既存のものに置き換わっていくことが期待されます。マイクロ・ナノフォーカス用のミラーについてはあまり触れませんでした。その集光性能は近年著しく進歩しつつあります。これは、ミラーの性能だけではなく、光源の性

能の向上があいまって実現されたものといえます。また、応用研究の増加に伴い、ビームラインへの整備も急速に進んでいます。

今後開発が期待されるミラーの一例としては、入射光のロスが小さく、サブマイクロメートルの集光ができ、高エネルギー X 線領域まで利用できる長尺ミラーが挙げられます。また試料位置での集光サイズをサブマイクロメートルから 100 μm まで連続的にかつ容易に調整できるミラーシステムが開発されれば、測定自由度が増大し、特にマッピングを行う測定に威力を発揮することが期待されます。

ビームラインで実験をする時、ミラーは何のために使っているのか、どのような調整を行えばよいのかを考えて頂く折に、本稿が一助になれば幸いです。

お願い

本シリーズでは、初心者ユーザが陥りやすい誤りやビームライン担当者の貴重な経験談を募集しております。最終回でご紹介したいと考えております。また、本シリーズに関してご意見・ご要望がございましたら編集担当 (Spring-8 JASRI 大橋治彦/hohashi@spring8.or.jp, KEK-PF 平野馨一/keiichi.hirano@kek.jp) までどうぞお便りください。

参考文献

- 1) シンクロトロン放射光の基礎 (4.8, 5.3, 5.4節), 大柳宏之編 (丸善, 1996).
- 2) S. M. Heald: Nucl. Instrum. Methods **195**, 59 (1982).
- 3) D. H. Bilderback and S. Hubbard: Nucl. Instrum. Methods **195**, 85 (1982).
- 4) J. Susini: Opt. Eng. **34**, 361 (1995).
- 5) http://www-cxro.lbl.gov/optical_constants/
- 6) <http://www.esrf.fr/computing/scientific/xop/>
- 7) L. Nevot and P. Croce: Rev. Phys. Appl. **15**, 761 (1980).
- 8) D. K. G. de Boer: Phys. Rev. B **49**, 5817 (1994).
- 9) K. D. Joensen et al.: Proc. SPIE. **2011**, 360 (1994).
- 10) M. Nomura and A. Koyama: Nucl. Instrum. Methods A, **467-468**, 733 (2001).
- 11) R. Signorato and T. Ishikawa: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **467/468**, 271 (2001).
- 12) S.-N. Qian, W. Jark and P. Z. Takacs: Rev. Sci. Instrum. **66**, 2562 (1995).