

完全結晶の回折条件近傍における透過 X 線ビームの位置シフトに関する研究

物質系専攻 56113 栗山 徹

指導教員：雨宮 慶幸（教授）

キーワード：X線、シンクロトロン放射光、偏光、動力学的回折理論、結晶歪、ベリー位相

研究の背景

シンクロトロン放射光は、高い輝度、遠赤外線から硬 X 線までの広範囲にわたる連続的なスペクトル、偏光性、などのユニークな特長をもつため、医学・生物・物理・化学などの分野で積極的に活用されている。

そのうち、X 線領域の偏光性を利用した研究では X 線磁気円二色性 (X-ray Magnetic Circular Dichroism, XMCD)、X 線自然直線二色性 (X-ray Natural Linear Dichroism, XNLD) などが盛んに行われており、物質の磁性やカイラリティを解明するのに大きな役割を果たしている。

透過型 X 線移相子

X 線、特に 6-12 keV の硬 X 線領域の偏光を制御する素子としては、透過型 X 線移相子が利用される。透過型 X 線移相子は、ダイヤモンドなどの完全結晶を用い、動力学的回折効果による生ずるブラッグ条件近傍での複屈折を利用している。

電場ベクトルが入射面内にある π 偏光と、電場ベクトルが入射面に垂直な σ 偏光の位相差 δ は、結晶の厚さ l 、ブラッグ条件からのずれ角 $\Delta\theta$ と $\delta \propto l / \Delta\theta$ のような関係にある。

すなわち、ブラッグ条件からのずれ角を制御することにより、偏光状態を任意にコントロールすることができる。例えば、左右の円偏光を得たい場合は -20° or 20° 、縦偏光を得たい場合は -10° or 10° のようにずれ角をつける。

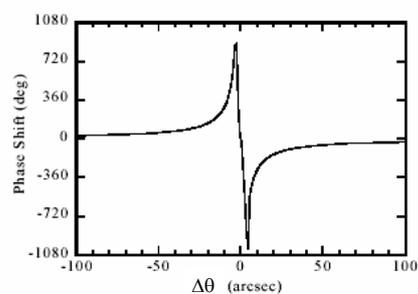


図 1 ブラッグ角からのずれ角 $\Delta\theta$ と移相量 δ の関係

X 線偏光解消子

高い偏光 X 線が得られるということはシンクロトロン放射光の大きな特長のひとつであるが、かえって偏光の存在がデータ解析を困難にする場合も存在する。シンクロトロン放射光の高い輝度という特長は利用したいが、偏光は必要ない場合に、偏光を解消する素子があれば非常に有用である。そこで雨宮研では、先に述べた透過型 X 線移相子を利用した X 線偏光解消素子を開発した。通常、偏光素子として用いる場合、移相子はブラッグ角より外れた $\Delta\theta$ を用いるが、偏光解消子として利用する場合にはジャストブラッグで利用する。ジャストブラッグにおいては移相量が激しく変化する。入射 X 線は発散しているため、発散角の内部で異なる変調を受けた X 線が混合し、擬似的に偏光が解消されたビームが生成される。

X線のビーム位置シフト

透過型 X 線移相子を用いる際、生成する偏光状態によってビーム位置がシフトする現象(以下ビームシフト)が知られていた。ビームシフトが存在すると、厚さムラのある試料を対象とする場合正しい測定を行うことが出来なくなるため、定量的評価が望まれる。また、ビームシフトは、ボルマンファンと呼ばれる扇形の領域中におけるビームの広がり、歪んだ結晶中での動力的回折効果、歪んだ結晶中での波束に関するベリ一位相の変化による効果[1]、などの複合要因から発生すると考えられる。ビームシフトの観察から逆にそれらの物理現象を評価できる可能性があり、物理的にも興味がある。

そこでわれわれは

- スリットを用いた実験(予備実験)
- CCD型 X 線検出器を用いた直接観察

により、ビームシフトに関する定性・定量的評価を試みた。

スリットを用いた実験(予備実験)では、スリットによるビーム形状の走査、スリットでさえぎった部分の強度変化からシフトの大まかなふるまいを調べた。

CCD型 X 線検出器を用いた直接観察では、ビームの形状・位置を直接観察することによって、どのようにシフトしているかを調べた。

実験

本要旨では、紙面の関係から CCD 型 X 線検出器を用いた実験のみを要約する。

ダイヤモンド移相子は 0.4 mm の結晶を用いる。Si の (511) 面で単色化した X 線をダイヤモンド (111) 面のブラッグ条件近傍で $\Delta\theta$ を振って CCD 型 X 線検出器を用いてビームのシフトを観察する。散乱ベクトルの方位角(図 2 参照)は、移相子ゴニオの χ 軸回転機能により自由に設定可能である。通常、移相子として用いる状況では、 σ 偏光と π 偏光が 1:1 の割合になるように $\chi=45^\circ$ の方向に散乱ベクトルの方位角をとるが、本実験ではその他の複数の角度でも実験を行った。

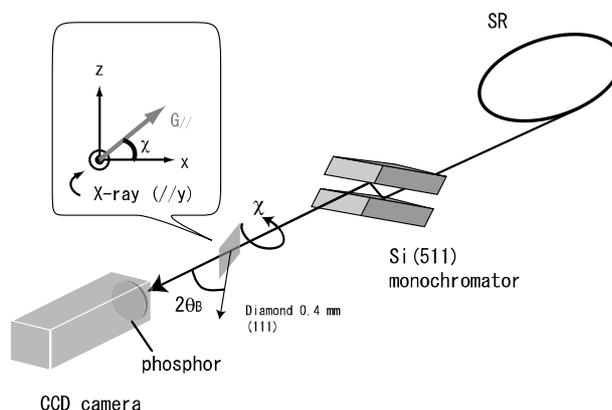


図 2 実験配置と散乱ベクトルの方位角 χ の定義

結果と考察

$\chi=90^\circ$ のときのビームシフトの CCD 画像を図 3 に示す。ジャストブラッグに近づくにつれて、ビームの形が広がり、ビームのエッジ位置がシフトしていることが分かる(図 3 の水平ラインは -12° のときのビーム上側のエッジ位置)。シフトの方向は、散乱ベクトルの方位角に等しい。代表的な値として、ビーム位置の重心位置をプロットした(図 4 実線)。ジャストブラッグに近傍でシフト量が大きくなっていることがわかる。ビームの広がりに対しては、ボルマンファン中での X 線の伝播を考えれば容易に説明できる。しかし、ビームの

エッジがシフトする現象は完全結晶中での動力的回折理論では説明できない。われわれはシフトの起源は、結晶歪みなどの効果で光線軌道が曲げられるためと予想した。同じ結晶の別の(111)面(裏面)を使用した結果を図4の破線に示してある。裏面を使用した以外、同じ実験条件にもかかわらずシフト量が大きく変化していた。このことから、結晶の位置で局所的に異なる量である歪がビームシフトに大きく関わっていることが予想される。

われわれはこの現象を、

- ボルマンファン中のビームの広がり
 - 歪んだ結晶中での動力的回折効果
 - 歪んだ結晶中での波束に関するベリ一位相の変化による効果
- から検証した。

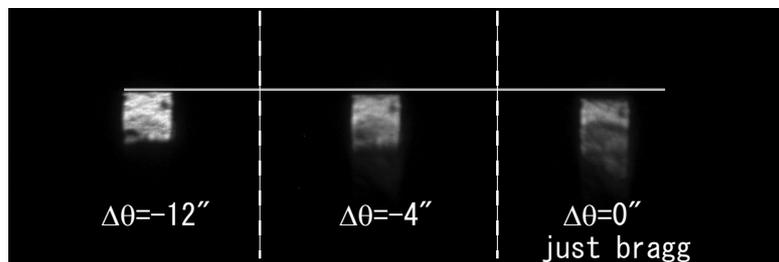


図 3 ビーム位置の変動のようす($\chi=90^\circ$ 、ダイレクトビームサイズは約 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$)

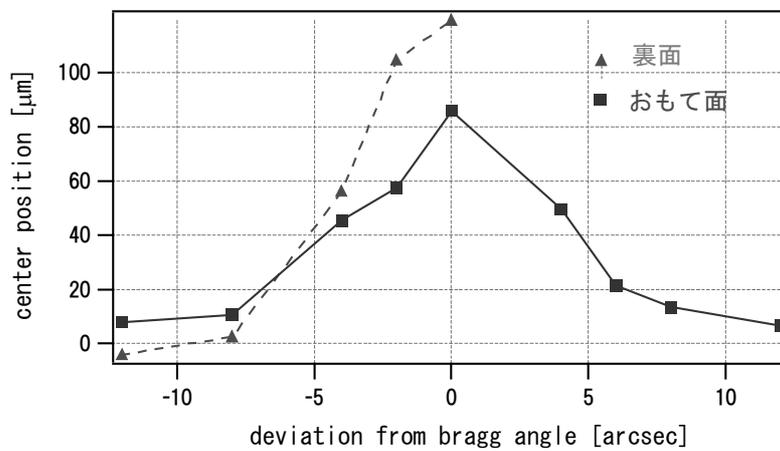


図 4 ビームの重心位置の変化(実線：おもて面、破線：裏面)

参考文献

- [1] Kei Sawada, Shuichi Murakami, and Naoto Nagaosa: Phys. Rev. Lett. 96, 154802 (2006).