

X線撮像偏光観測に向けた曲がった Si 結晶反射鏡の作製

栗屋 崇[†]、得能 敦、岡田 豪太、坪井 陽子、飯塚 亮、
村上 弘明（中央大学）、浜根 大輔（東京大学）

[†]awaya@phys.chuo-u.ac.jp

X線偏光の観測

天体からやってくる X 線から得られるイメージ・時間変動・スペクトル・偏光の 4 つの情報のうち、偏光に関してはその観測機器の開発が遅れこれまで有意な観測が行われてきていない。偏光 X 線はシンクロトン放射やトムソン散乱を起源とし、磁場構造や降着円盤の構造を特定することができるなど、その観測意義は高い。そこで我々は新しい X 線偏光検出素子の開発を試みようとして、高い偏光検出能力(Modulation Factor)を期待できる結晶におけるブラッグ反射の原理に着目した。入射する X 線を平行成分と垂直成分に分けると、結晶面でのブラッグの反射率はそれぞれ 1 と $\cos^2 2\theta$ で表わされる。つまり 45° で入射した X 線は垂直成分は打ち消され、平行成分だけを欠損なく取り出すことができるというわけである。

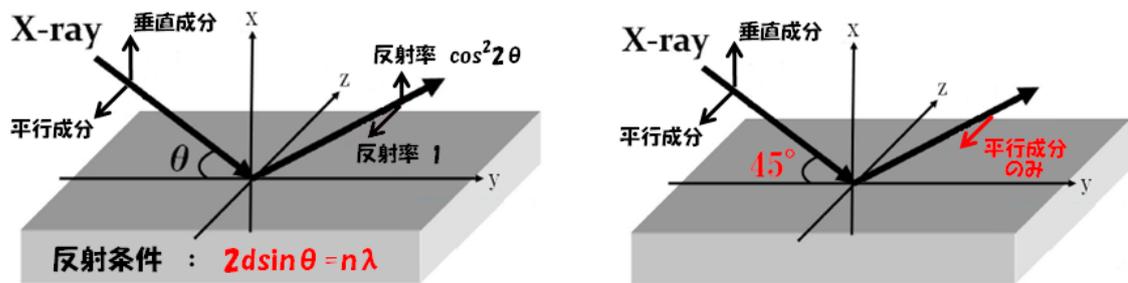


図1 ブラッグ反射

ブラッグの反射条件式

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (1)$$

ここで、 d : 結晶の格子面間隔、 θ : X 線の入射角度、 λ : X 線の波長、 $n = 0, 1, 2, \dots$ 。

我々は、X 線天文学で重要とされる鉄の特性 X 線(6.4~6.9keV)に対して高い Modulation Factor を持つような素子を開発しようと考えた。(1)式において鉄輝線のエネルギーに対応する波長を 45° 付近で反射する格子面間隔を持つ結晶のうち、実験への利便性を考えて Si(400)を反射鏡の基板に採用した。

しかしブラッグの反射条件のために、X線の連続成分が入射しても反射できるのはその角度に対応するエネルギーに限られてしまう。そこで、反射鏡となる結晶を曲げることで反射できるエネルギー帯域に幅を持たせようと考えた。さらに、曲がった反射鏡を用いると異なる位置で反射したX線を集光するため、検出器を小さくできS/N比も上がるというメリットも生まれる。

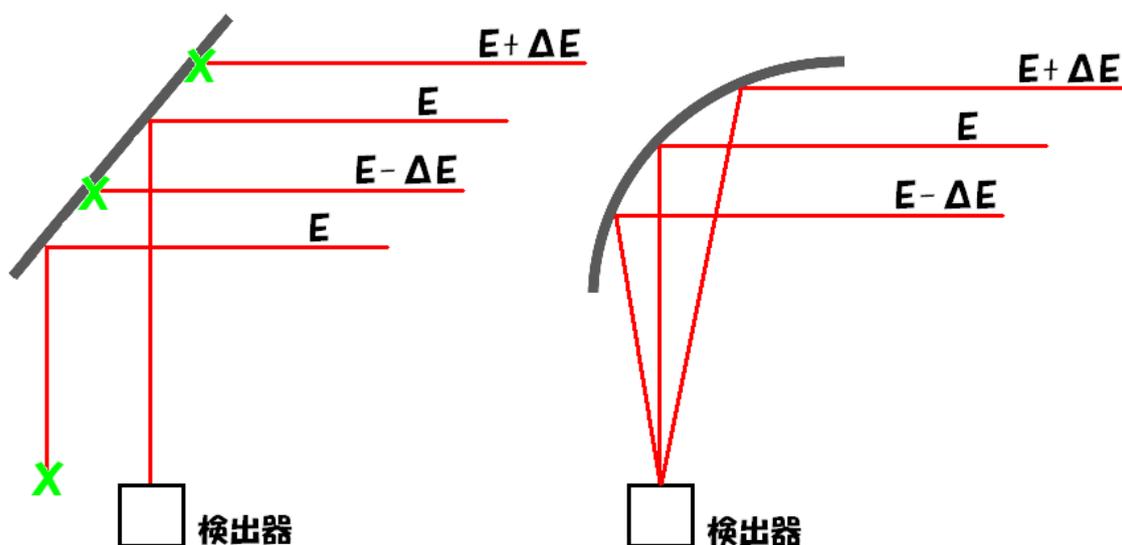


図2 形状によって反射するエネルギーと方向の違い

曲がった Si 結晶の作製

プラズマ CVD 装置を用いて Si 結晶の反射面と反対の面に Diamond-like Carbon(DLC) 薄膜を蒸着する。原料ガス C_2H_2 を CVD 装置内に流し込むと、発生させたプラズマによって分解された C が Si 結晶上に叩きつけられ DLC 薄膜が形成される。薄膜を蒸着するに従って結晶と薄膜の間に残留応力が発生し、蒸着面が凸となる方向に滑らかな円筒状に曲げることになった。

蒸着条件は、基板の大きさ： $\phi 203.2\text{mm} \times 50,75,100 \mu\text{m}$ 、プラズマ：5kV,3A、ガス流入量：30SCCM、DLC 蒸着速度：19.36nm/min、蒸着時間：60,120,180,240min。

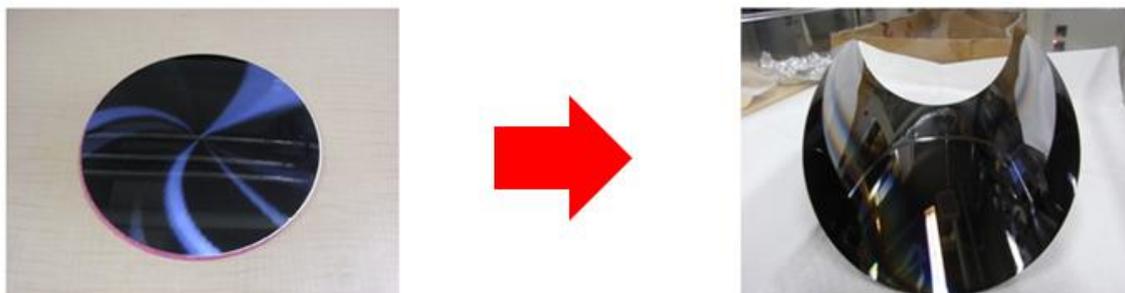


図3 曲がった Si 結晶

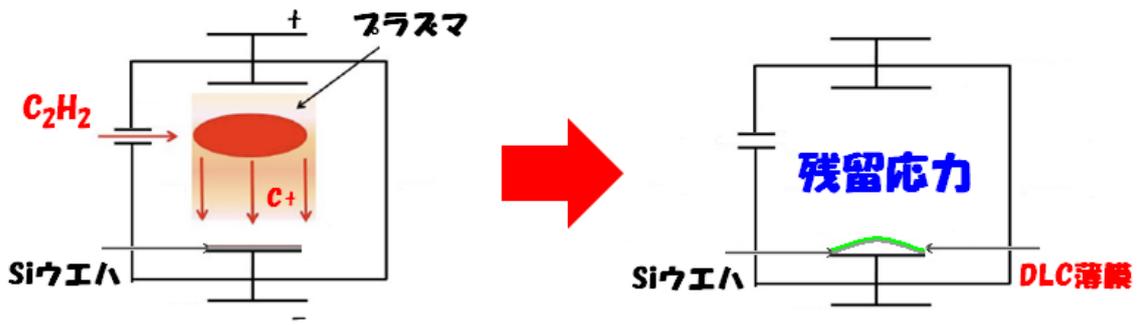


図4 CVD 装置による蒸着法

DLC の特性評価

DLC とは高硬度・電気絶縁性などを持つカーボンの総称であり、ダイヤモンド・グラファイト双方の結合・電子軌道を持ちさらに水素を含有しているとされている。

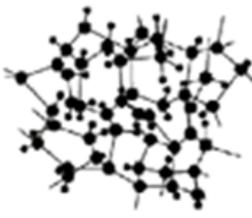
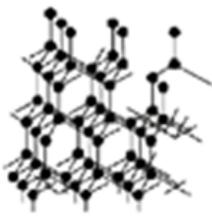
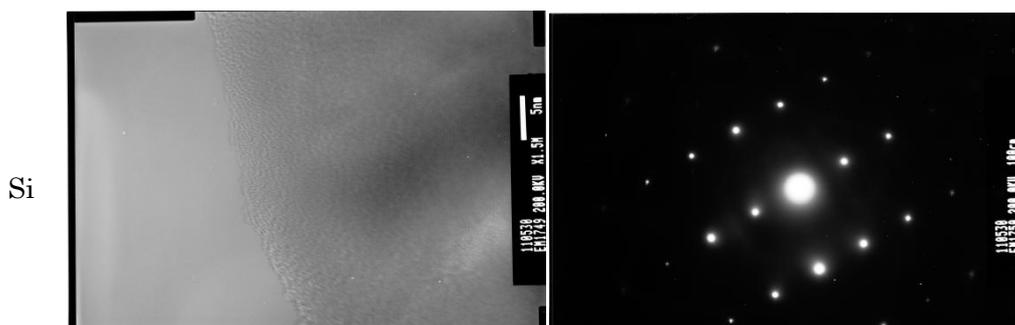
| | グラファイト | DLC | ダイヤモンド |
|----|--|--|--|
| 結合 |  |  |  |
| 構造 | 6方晶sp2構造 | sp3/sp2が混在 | 立方晶sp3構造 |
| 元素 | C | C+H | C |

図5 DLC の性質

東京大学電子顕微鏡室の走査透過型電子顕微鏡(STEM)を用いて作製した DLC 薄膜の観察を行った。DLC を蒸着した Si を細かく粉砕して STEM にセッティングし、目で探して組成分析をかけながら DLC 部分の破片を見つける。拡大像や回折像のディフラクションパターンをとることで、それぞれ結晶構造の有無を確認することができる。

拡大像

回折像



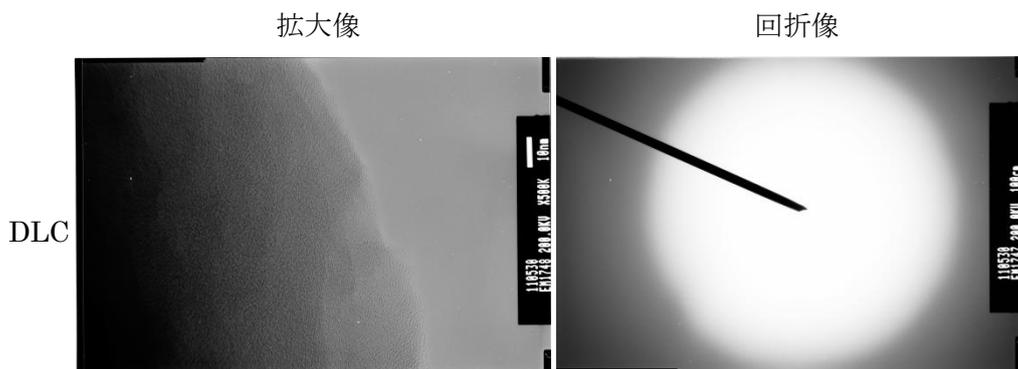


図6 電子顕微鏡像（試料の厚さ<100nm、加速電圧 200kV）

Si の拡大像は写真右側に破片があり、そこに原子配列が見える。回折像でもディフラクションパターンがはっきりと表れており、結晶構造を持っていることが分かる。それに対して DLC の拡大像は写真左側に破片があるがそこにきれいな配列は見られず、回折像でもディフラクションパターンは表れなかった。よって DLC 薄膜は結晶構造を持たないアモルファス構造をしていることが確認できた。この結果から基板の結晶構造によらず DLC 膜を成長させることができると予想され、Si 以外の結晶を用いた場合にも CVD 法によって同様の曲がった反射鏡が作成可能であると考えられる。

曲がった Si 結晶の形状測定

レーザー変位計を用いて作成した結晶の曲面の形状を測定する。円筒状に曲がっている試料の地面に設置している線を母線と呼び、その母線と垂直方向にスキャンすることで表面の形状を高さと測定距離の 2 次元データにすることができる。そのデータを正円の一部としてフィッティングすることで、曲がった Si の曲率半径を求める。Si 結晶の厚さを 3 段階、DLC 薄膜の厚さを 4 段階に変化させた試料を作製しそれぞれ評価した。

表1 試料ごとの曲率半径

| [mm] | | DLC薄膜の厚さ | | | |
|-------------------|---------|----------|--------|--------|--------|
| | | 1200nm | 2400nm | 3600nm | 4800nm |
| Si の 厚 さ | 50 μ m | 153 | | 49 | 40 |
| | 75 μ m | 271 | 147 | 102 | |
| | 100 μ m | 561 | 291 | 169 | |

平坦な円盤状基板の片面に薄膜を形成させることで歪んだ基板の曲率半径の関係は(2)式で与えられるとされている。

曲率半径の関係式

$$\rho = \frac{Et^2}{6(1-\nu)\sigma d} \quad (2)$$

ここで、 ρ : 曲率半径、 E : 基板のヤング率 (130GPa)、 t : 基板の厚さ、 ν : 基板のポアソン比 (0.28)、 σ : 残留応力 (0.3GPa)、 d : 薄膜の厚さ。

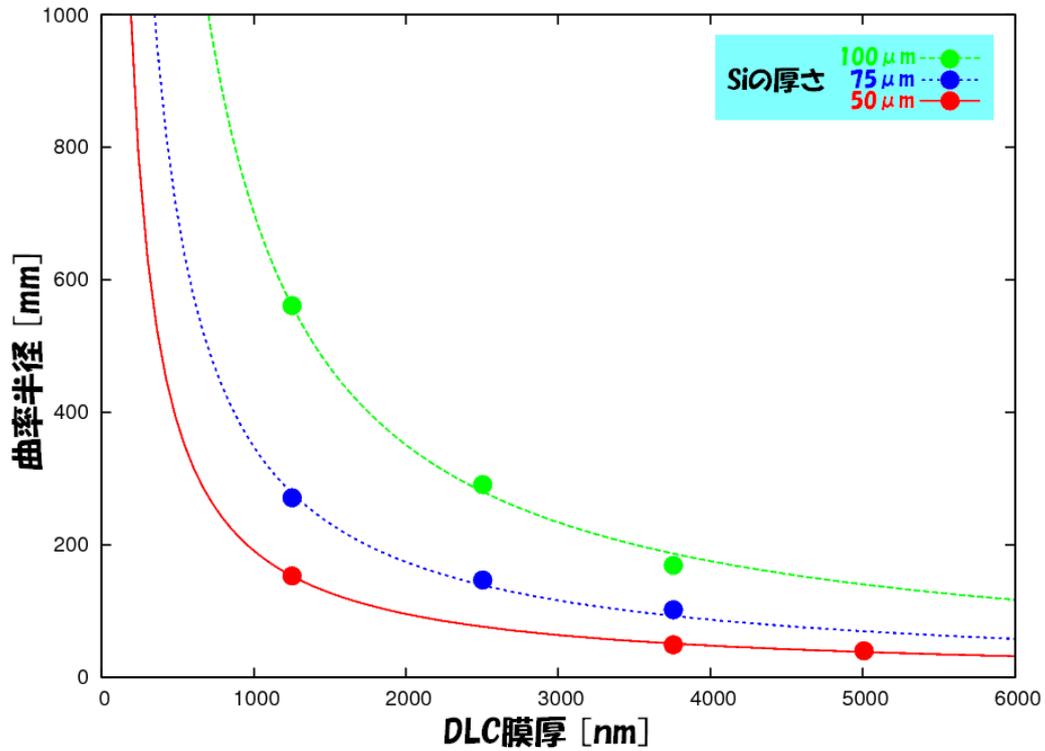


図7 DLC 薄膜の厚さによる曲率半径の変化

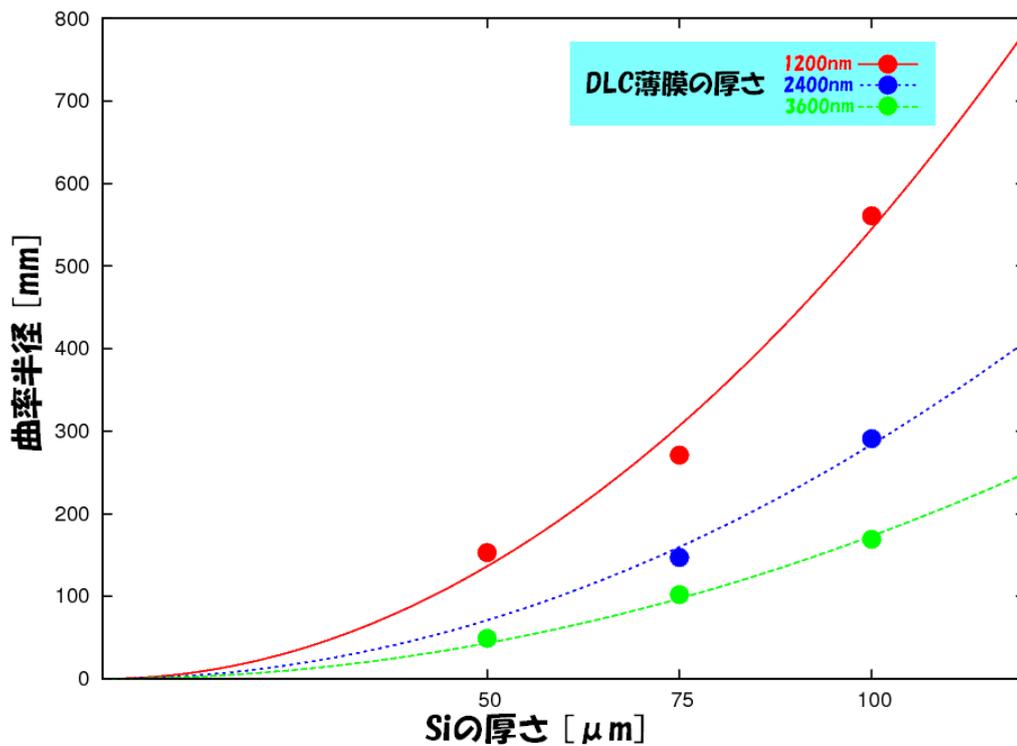


図8 Si の厚さによる曲率半径の変化

以上の結果から、我々が作成した曲がった Si 結晶も(2)式の関係性をもつことを見出し、以後求める曲率を自由に再現できるようになった。

曲がった Si 結晶を用いた光学系

今後新しい光学系を構築してゆく上で、現在円筒状に曲がっている結晶を回転放物面に曲げることが目標となる。回転放物面は入射した X 線を一点に集光するため、設置する検出器を小さくし S/N 比を高くすることができる。さらに 4 枚の反射鏡を組み合わせ、それぞれの焦点に CCD カメラなどの検出器を置くことで撮像も可能となる。結晶におけるブラッグ反射による鉄基線に対する高い偏光検出能力、曲がった結晶反射鏡による幅のあるエネルギー帯域に加え、高い S/N 比と撮像能力を持った素子の実現できれば、新たな X 線天文学の大きな進歩が生まれると期待される。

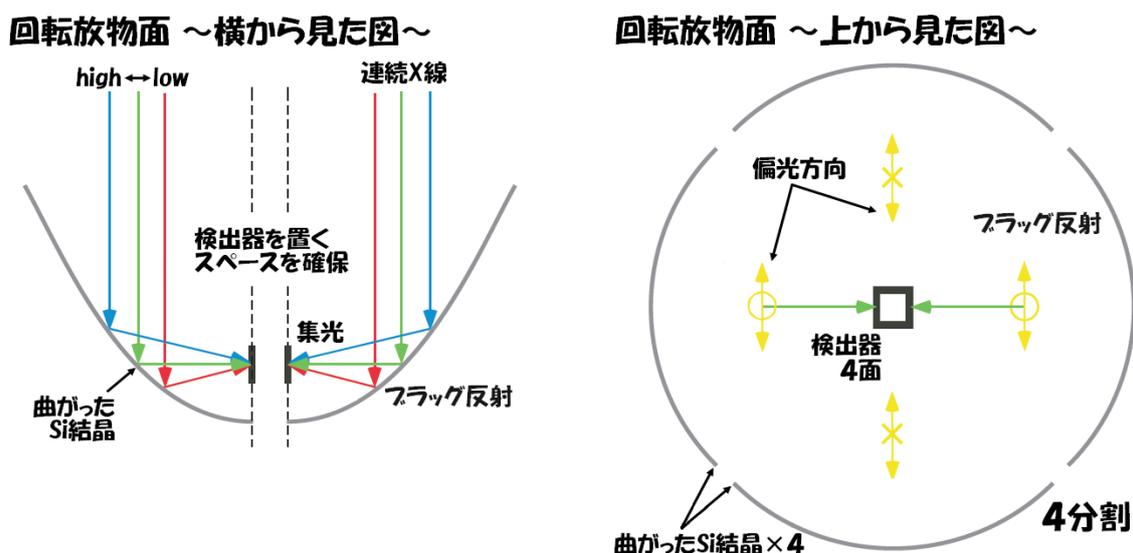


図9 新しい光学系の提案

Reference

- [1] 菊田惺志『X線回折・散乱技術 上』(理工学実験 15) 東京大学出版会 (1992)
- [2] 斎藤秀俊 大竹尚登 中東孝浩 ほか『DLC膜ハンドブック』NTS (2006)
- [3] 須藤一『残留応力とゆがみ』内田老鶴圃 (1988)