

高輝度放射光屈折撮影技術に係る基礎理論の構築

総合研究大学院大学 複合科学研究科 統計科学専攻
博士後期課程 石綿 元 (統計数理研究所)

屈折撮影技術とロッキングカーブ

高輝度放射光とは、SPring-8(Super Photon ring 8GeV/理化学研究所-高輝度光科学研究センター)、PF(Photon Factory/高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所)などのシンクロトロン放射光施設によって得られるコヒーレントな高エネルギー光であり、電子を加速しながらリング状の加速器に沿って曲げる際に、その接線方向に発生する光である。この高輝度放射光を使った医療用 X 線撮影技術である屈折コントラスト撮影法の開発が世界的に行われている。屈折コントラスト撮影法は、生体などの撮影対象を通過して屈折した光を、アナライザーと呼ばれる Si 結晶にあてて回折させることにより、直進してきたときに得られるロッキングカーブからのずれを測定し、ベクトル強度分布情報に変換することで画像の再合成を行っている。吸収 X 線撮影法に比べて軟組織の撮影も可能な技術である。

ロッキングカーブとは、シリコン結晶などの完全結晶での回折強度のブラッグ角周辺のプロファイルを表すものであり、Ewald-Laue 理論から導かれるものである^{1,2)}。Ewald-Laue 理論では完全な平面波を扱うため、波面に垂直な成分は考えていない。したがって、ロッキングカーブは平面波面内の回折強度を表している。

研究の目的と展開

研究の目的として屈折撮影法により得られる情報をさらに増やすことができないかを考えてきた。そこで、撮影技術において非常に重要な役割を担っているロッキングカーブに着目し、平面波面内条件下のロッキングカーブの面外を考えることを試みた。そのために、回折波を多波に拡張することを提案し、平面波ではなく球面波による技術開発を中心に研究を進めてきた。そもそも X 線多波回折の研究は、従来技術の基礎にある平面波理論の Ewald-Laue 理論では扱いが難しいため、あまり行われていない。しかし、X 線動力学理論では、Ewald-Laue 理論と同じく Maxwell 方程式から回折の基本方程式を経て直接導かれる高木-Taupin 理論³⁻⁵⁾があり、近年になって多波へと拡張され^{7,8)}、かつ、Ewald-Laue 理論との等価性が指摘されている⁹⁾。そこで、多波回折を扱うに当たって、線形連立偏微分方程式であらわされる拡張された高木-Taupin 理論を使い、アナライザーでの回折後の撮影画像を統計数理研究所のスーパーコンピューター群を用いてシミュレーション計算により求めてきたが、多波回折では、ブラッグ角に合わせた場合、鮮明な画像が得られないことが分かってきた。したがって、拡張された高木-Taupin 理論とロッキングカーブの関係を詳しく知る必要が生じた。

多波回折によるロッキングカーブ

高木-Taupin 理論と Ewald-Laue 理論の間には、互いにフーリエ変換の関係があり、どちらからも簡単に往復できる⁶⁻⁹⁾。そこで、高木-Taupin 理論の数値計算解であるトポグラフと Ewald-Laue 理論の解であるロッキングカーブの関係もこれらの関係の延長上に存在すると考えられるため、トポグラフを数値計算によってフーリエ変換することを試みた。その結果、二波回折での「ロッキングカーブ」と「トポグラフのフーリエ変換」での一致が確認されただけでなく、拡張された高木-Taupin 理論を用いた多波回折でのトポグラフを用い

た場合でも、図1に示すように高木-Taupin理論の解をフーリエ変換するとEwald-Laue理論の解であるロッキングカーブと一致することが分かった¹⁰⁾。図1に示した結果は、対称ラウエケースで、シリコン結晶の厚さが0.075mm、入射光エネルギーが12keVの場合を想定したものである。

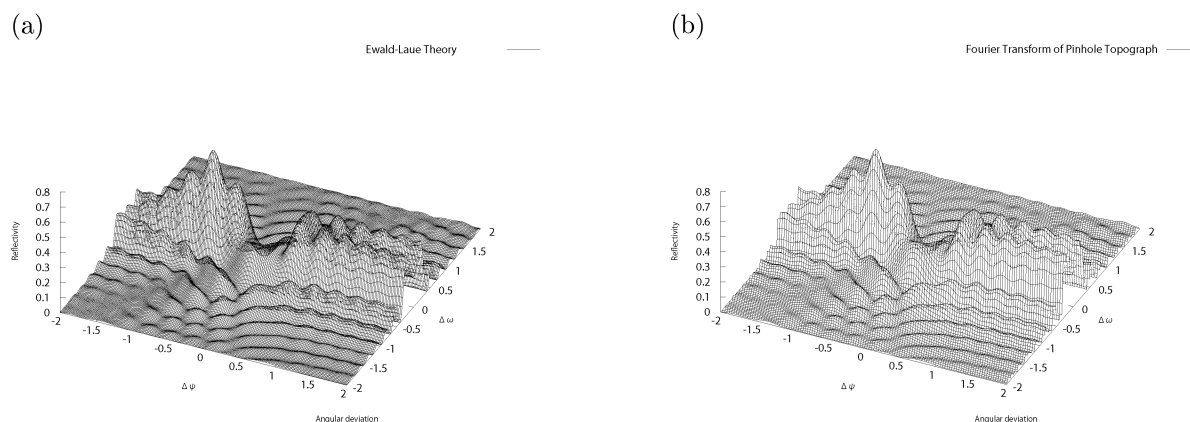


図1:(a)Ewald-Laue理論から求めた三波ロッキングカーブ (b)高木-Taupin理論の解である三波トポグラフィをフーリエ変換したもの。

上記の結果を受けて、ブラッグ反射を使った多波を用いた回折画像の鮮明化を目指すさらなる研究の展開を進めている。

SPring-8 実験

拡張された高木-Taupin理論により得られたトポグラフィを確認するための多波回折実験を世界最高輝度を誇るSPring-8において2010年2月1日から8日にかけて行ってきた。多波回折トポグラフィを実験により撮影することに成功し、目的とする理論の確認を行うための対象を得ることができた。この実験結果についても併せて報告を行う。

参考文献

- [1] P.P.Ewald: Ann. Phys. **359** (1917) 519 [in Germany].
- [2] M.von.Laue: Ergeb. Exakten Naturwiss. **10** (1931) 133 [in Germany].
- [3] S.Takagi Acta Cryst., **15**, (1962) 1311.
- [4] S.Takagi J.Phys.Soc.Jpn., **26**, (1969) 1239.
- [5] D.Taupin: Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristallogr. **87** (1964) 469 [in French].
- [6] A.Authier, D.Simon Acta Cryst. **A24**, 517-526 (1968).
- [7] A.Authier "Dynamical Theory of X-Ray Diffraction", Revised Edition(2004), Oxford University Press.
- [8] K.Okitsu Acta Cryst., **A59** (2003) 235.
- [9] K.Okitsu Adv.X-Ray.Chem.Anal.,Japan **36** 95-131 (2005) [in Japanese].
- [10] G.Ishiwata, K.Okitsu, M.Ishiguro Submitted to Acta Cryst., (2010).