

■第10回日本放射光学会奨励賞受賞報告

回折過程における X 線コヒーレンスの伝播の研究

山崎裕史 (財団法人高輝度光科学研究センター)

ビームの波動場は振幅と位相により定義される。ところが、単純に検出器を使う場合には、波動場の強度の記録しかできないので、振幅の情報は取得できるが、位相の情報は失われてしまう。つまり、波動場のもつ情報の半分を捨てていることになる。複数のビームを上手く重ね合わせることで位相の差を強度に変換すれば、位相情報も有効に利用できる。これが干渉計測である。位相差の計測とは「波長を物差しとして物理量を測る」ことである。X 線を使えば、オングストロームの波長ゆえに、高分解能・高精度計測が期待できる。

時間的にも空間的にも隔たりのある 2 点のビームを重ねて強度を測定したとする。干渉が起こるためには、その 2 点の波動場の間に振幅と位相の相関が必要である。相関の程度を表す量がコヒーレンスである。コヒーレンスが高いビームは干渉を鮮明にする。コヒーレンスに関して理想的な極限として単色平面波がある。単色平面波では振幅と位相の相関は無限の時間と空間にわたって維持される。しかし、現実のビームにはバンド幅や角度発散があり、相関の高い領域は有限な時間領域と空間領域に限定される。このことが干渉計測をデザインする上での制約となる。

高コヒーレントなビームを使う干渉計測は、線源の技術革新によって全く新しい展望が拓かれる。可視光の干渉計測が 1960 年代のレーザーの発明によって飛躍的に発展したのがその典型である。X 線領域においても、第 3 世代放射光の出現により X 線コヒーレンスが注目され、各種干渉計測が生まれつつある。さらに、次世代放射光（自由電子レーザー、エネルギー回収型ライナック）の優れたコヒーレンス特性への期待も高まっている。

X 線コヒーレンスの本格的な利用に伴って、X 線光学に新たな役割が求められるようになった。まず、光源のコヒーレンスを必要以上に劣化させずに試料まで導くという、ビームライン技術としての基盤的な光学系の設計。次に、目的に合わせてコヒーレンスを制御する手法の開発。最後に、X 線コヒーレンスを解析する方法の確立。現在はこれらの途上にある。

コヒーレンスに関する研究は可視光領域を中心に積み上げられてきたが、光としての本質に違いがないにも関わらず、私の X 線コヒーレンスの研究¹⁻³⁾にはそれほど反映されていない。可視光においては準単色光源が使用できるために、単色性に依存する時間的なコヒーレンスと、光源サイズと伝播距離に依存する空間的なコヒーレンスを切り分けて扱うことが多くの場合許された。また、コヒーレンスに関

わる光学素子（レンズ、ミラー等）も幾何光学の範疇で記述できるものがほとんどである。一方、X 線に関しては、現状では、強力な X 線源の中で準単色と見なせるものがない。また、基本的な分光素子である結晶に対して、波動場の潜り込みは波長の数百万倍に及び、波動光学による記述が必要になる。波動光学に基づいた解析により、結晶による回折過程では X 線コヒーレンスを時間・空間成分に分ける扱いに問題があり、両者を統合した相互コヒーレンスによる記述が必要になることを示した¹⁾。

以下、私の X 線コヒーレンスに関する研究の中から、完全結晶の回折強度曲線から X 線コヒーレンス関数を抽出する方法³⁾について紹介する。

可視光領域では、二光束干渉を用いてコヒーレンスを定量化できる。しかし、X 線領域では、空間的に隔たりのある任意の 2 点の波動場を重ね合わせることは困難である。そこで、ビームのもつバンド幅と角度発散に注目する。コヒーレンスは単色平面波への近さを表す尺度とも捉えることができるから、単色平面波からのずれである波数ベクトルの分布を知れば、コヒーレンスを解析することができるであろう。

バンド幅と角度発散の影響を受ける現象としては、完全結晶による回折強度曲線がある。結晶を回転させて、ある格子面に対する視射角 θ_0 を変化させたときの反射強度を記録する。準単色な X 線に対して、ブラッグ角 θ_B 近傍の数秒の角度範囲で反射が起こる。入射 X 線が単色平面波のときの回折強度曲線は動力学的回折理論から計算できる。測定と計算の差異が入射波の波数ベクトルの分布に対応する。

回折強度曲線の測定を、干渉計測の立場から再解釈しよう。X 線は結晶内で多重散乱を受けて、反射波として出て行く。Fig. 1 に模式的に示すように、反射側の点 Q に届く光線を遡ると、ある時刻に z_0 軸上にいたことになる。ここで、 z_0 軸は回折に関わる逆格子ベクトル \mathbf{h} に反平行な座標軸である。結晶を回転させることは、入射波に対して z_0 軸を傾けることに対応し、点 Q で重なり合う波動場に位相差をつけることになる。したがって、回折強度曲線は多光束干渉のインターフェログラムであるとも言える。回折強度曲線から入射波の逆格子ベクトル方向のコヒーレンスに関する情報を引き出せそうである。

コヒーレンスとロッキングカーブの関係を導出する詳細な計算は原論文^{1,3)}をご参照願いたい。手順の概略は以下のようなになる。現実の X 線は時間的にも空間的にも構造

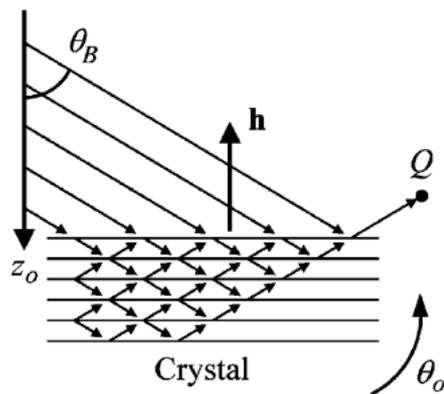


Fig. 1 Multiple-beam interference caused by multiple scattering.

をもつ波束から構成される。このような一般的な入射波に対する反射波を求めるために、基本方程式として、時間微分項を含むように拡張した Takagi-Taupin 方程式を採用した。反射波を入射波の積分変換形式で表現することにより、任意の入射波を扱うことができるようになった。回折強度曲線は反射波の絶対値の2乗を空間積分して求めることができる。入射ビームの z_0 軸方向の広がりと同方向の相関の維持される距離（コヒーレンス長）に対して十分大きいとき、正規化されたコヒーレンス関数は

$$g(\Delta z_0) = \frac{\int d\theta_o R(\theta_o - \theta_B) \exp[-iK(\theta_o - \theta_B)\Delta z_0 \cos \theta_B]}{\int d\theta_o R_i(\theta_o - \theta_B) \exp[-iK(\theta_o - \theta_B)\Delta z_0 \cos \theta_B]}$$

と与えられる。 R は測定された回折強度曲線、 R_i は計算によって得られる単色平面波に対する回折強度曲線、 K は入射波の中心波数である。 Δz_0 は z_0 軸方向の2点の隔たりを表す。Fig. 1に示すように z_0 軸は入射波の波面からブラッグ角 θ_B だけ傾いている。したがって、異なる回折格子面を使用すれば、離散的にはあるが、散乱面内のコヒーレンス関数を解析することができる。

Fig. 2は SPring-8の長尺アンジュレータビームライン BL19LXUで解析されたコヒーレンス関数の分布である。シリコン二結晶分光器の111反射と333反射を用いて0.661 Åに単色化された放射光を、実験ハッチにセットしたシリコン結晶の111面とその高次面を用いて解析した。横軸 Δz は進行方向の空間的隔たりを、縦軸 Δx は鉛直方向の空間的隔たりを表す。左が111反射、右が333反射のコヒーレンス関数であり、等高線は内側から0.8, 0.6, 0.4, 0.2を表す。

この結果にはまだ至らない点がある。分光器の111反射で得たX線に対して、 Δx 方向のコヒーレンスが解析できていない。これは回折格子面が離散的にしか選択できないことに起因する。現在、統計的手法による推定を試みている。

X線コヒーレンスの解析は、これから益々発展するであろうX線干渉計測をデザインする上での基礎になる。

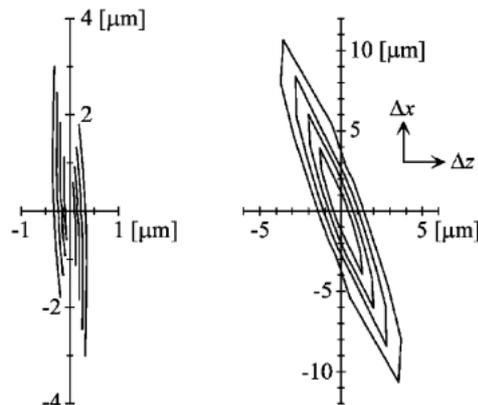


Fig. 2 The mutual coherence functions of monochromatized undulator beams.

また、自由電子レーザーは、X線量子光学やX線非線型光学の可能性を抱かせる。コヒーレンスは新しいX線光学への重要な基盤であり、コヒーレンス関連の研究を進展させたい。

本研究は、X線コヒーレンスから光源サイズを解析することを目的として始まった。干渉計測の結果と光源サイズの間当初期待された関係が見出されなかったことが、X線コヒーレンスに関してより深く考察する契機となり、結果的に実りの多いものになったと信じている。今回の奨励賞により研究が評価されて非常に嬉しく思う。

本研究を進めるにあたり、SPring-8や東京大学の諸氏にお世話になった。特に、SPring-8の石川哲也部門長、菊田惺志参与、東京大学の雨宮慶幸教授、高橋敏男教授、百生敦助教授に厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) H. Yamazaki and T. Ishikawa: *J. Appl. Cryst.* **35**, 314 (2002).
- 2) H. Yamazaki and T. Ishikawa: *J. Appl. Cryst.* **36**, 213 (2003).
- 3) H. Yamazaki and T. Ishikawa: *J. Appl. Cryst.* **37**, 48 (2004).

● 著者紹介 ●



山崎裕史

財団法人高輝度光科学研究センター
E-mail: yamazaki@spring8.or.jp
専門: X線光学

【略歴】

1996年3月東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了、同年4月より財団法人高輝度光科学研究センター入所。SPring-8の分光器開発を中心にビームライン建設に携わる。現在は、高コヒーレントX線を利用する干渉計測技術の開発に興味がある。X線のコヒーレンスを評価し制御するための研究を行い、2005年3月「動力学的回折によるX線コヒーレンスの伝播と解析」で博士(科学)号取得。