

光のコヒーレンスを使う

百生 敦 東京大学大学院新領域創成科学研究科 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5
E-mail : momose@exp.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

X線が光であることをあらためていう必要は無いでしょう。光は波であるのでX線も波としての性質を持ちます。このことは、たとえば結晶によるX線のブラッグ回折の説明として必須であり、本企画においても触れられています¹⁾。しかし、それ以外の場面においては、X線が波であるという意識は薄いのではないのでしょうか。放射光ビームラインにおいては、結晶などの光学素子によって積極的に進行方向を変える場合を除いて、X線は直進すると仮定しています。物体内部を透視するためにX線が使われますが、その際に得られる画像は、物体中を直進して抜けてきたX線の強度分布であるとして通常考えます。しかし、近年のシンクロトロン放射光源の発展は、この近似を成り立たなくさせています。シンクロトロン放射光を扱う場合、X線の伝播を波として理解し、且つ、制御する必要があります。同時にそれを積極的に利用することによって面白い応用も拓けます。

その際必要な概念はX線のコヒーレンス（干渉性あるいは可干渉性）です。波と波が重なり合うとき、波の山と山が同時にやってくると山がさらに大きくなり、それが山と谷であれば打ち消しあいます。その結果、特徴的な模様が観察され、我々はそれを干渉縞と呼んでいます。ただし、いつも容易に干渉縞が観察されるわけではありません。いいかげんに2本のX線ビームを重ねても干渉縞は現れません。干渉縞の現れ易さを表す概念がコヒーレンスであり、高いコヒーレンスを準備するには、それなりの技術的要請を満たす必要があります。

ここでは、コヒーレンスの概念についてできるだけ平易に解説します。次に、コヒーレンスが高いことによって嬉しいこと（あるいは場合によっては困ること）を考え、コヒーレンスを制御する技術について紹介します。最後に、コヒーレンスを利用した研究を俯瞰し、今後の放射光科学におけるコヒーレンスの重要性について述べます。

2. コヒーレンス

一言で波と表現しても、波が波らしく見える場合とそうでない場合があります。穏やかな水面に水滴が落ちると、きれいな円形の波紋ができます。しかし、雨が激しく降っている状況では、水面は波立った状態になります。たくさんの波紋の重ねあわせの結果、特別な規則性は見づらくなります。両者の違いを定量的に表現するためにコヒーレンスの概念が便利です。

コヒーレンスを調べる有名な実験に、ヤングの二重スリットによる干渉縞の観察があります。ヤングの二重スリットについては本シリーズの第4回目²⁾に丁寧に解説されていますが、**Fig. 1**に再度模式的に示しました。細いふたつのスリットが、微小な距離を隔てて作られており、そこに光が照射されているとします。スリットからは波（光）が広がりながら伝播してゆき、二重スリットから適当な距離だけ離れたスクリーン上で重なり合って干渉縞を形成します。

しかし、干渉縞が観察されるためには条件があります。それは、波面の揃った光で二重スリットが照射されていることです。これが意味するところは、それぞれのスリット

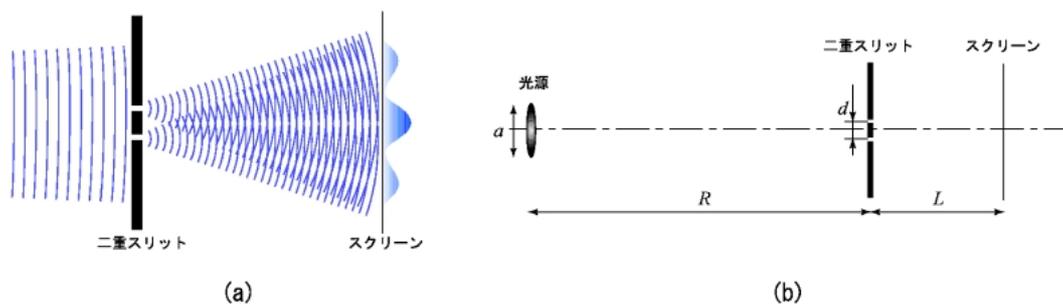


Fig. 1 Young's double-slit experiment.

を通過する波に相関があるということです。言葉を変えれば、それぞれのスリットを通る波の間に決まった位相関係があるということです。例えば、一方のスリットを波の山(谷)が通過しているとき、他方のスリットで常に波の山(谷)が通過する状況が保証されていればOKです。

二重スリットの代わりに、その位置にふたつの光源を置けば干渉縞は観察されるでしょうか？ 答えはNOです。ふたつの光源は全く独立に発光しており、それぞれの光源からの光(波)の間には相関が無いからです。

さて、一般に光源は有限の大きさを持っています。すなわち、勝手ばらばらの発光体の集合とみなされます。シンクロトロン放射光源もその範疇に入ります。このとき干渉縞はどのようになるのでしょうか？ 光源内で特定の位置から発せられた光(波)だけに注目すると、二重スリットを通過してスクリーン上に干渉縞を生成します。別の位置から発せられた光についても同様です。ただし、干渉縞が現れる位置は全体的に少しくずれることになります。光源サイズがある程度大きくなると、実際に観察される干渉縞は、様々にずれた干渉縞の重ね合せになるので、平均化されて見えなくなります。干渉縞が消滅しないための条件は以下のように考えられます。

間隔 d の二重スリットからスクリーンまでの距離を L とすると、干渉縞の間隔は近似的に $\lambda L/d$ で与えられます (L は d に比べて十分大きいと仮定しています)。 λ は光の波長です。光源から二重スリットまでの距離を R とし、発光点が光軸上から x だけ離れると、干渉縞は近似的に xL/R だけ平行移動することが計算できます。したがって、干渉縞が消滅しないためには、光源サイズ $2x(=a)$ が $\lambda R/d$ より小さいことが必要になります。または、二重スリットの間隔 d が $\lambda R/a$ より小さいことが必要です。

これが二重スリットの位置にやってくる光のコヒーレンスに要求される条件を表しています。 $\lambda R/a$ はコヒーレンス長と呼ばれる量です*。コヒーレンス長より小さい領域でのみ波の相関(位相関係)が保証されています。二重スリットの間隔がコヒーレンス長より大きくなると、各スリットを通る波の相関は失われます。

波長が長い方が、すなわち、硬X線領域より軟X線領域において、高いコヒーレンスを得やすいと言えます。また、光源サイズが小さいこと、および、光源から離れていることが、コヒーレンス長を大きくするために求められます。SPring-8などの第三世代光源はこの要請を十分に満たします。例えば、波長0.1 nmのX線をサイズ30 μm の光源から100 m離れて利用するとき、コヒーレンス長は約

50 μm になります(脚注参照)。

最初のたとえに戻って、水滴による波紋はコヒーレンスが高い(コヒーレンス長が長い)と言え、光源が小さいことに対応します。雨によって波立った状況はコヒーレンスが低い(コヒーレンス長が短い)と言え、光源が大きいことに対応します。

完全な相関が保証されている場合はコヒーレンス長が無限大になり、この状態をコヒーレントと呼びます。全く相関が無ければコヒーレンス長は零であり、インコヒーレントと呼びます。上で議論したように、多くの場合で光はその中間状態にあります。これを部分的にコヒーレントであるといいます。

上で述べた概念は、正確には空間的コヒーレンス (spatial coherence, lateral coherence or transverse coherence) と呼ばれているものです。すなわち、空間的な広がりのある波に対して、異なる場所の間で相関を議論しているからです。一方、波は時々刻々変化しますので、時間的コヒーレンス (temporal coherence or longitudinal coherence) と呼ばれる概念も存在します。これは同じ場所に注目し、異なる時刻間での相関を議論する概念です。ある時刻に波の山が通過したとして、それからある特定の時間経過したときに通過する波の様子が予想できるのでしょうか？ 一般的に、経過時間が短ければある程度は可能ですが、経過時間が長くなるに従い難しくなります。その度合いを示すものが時間的コヒーレンスです。

光が理想的に単色であるとします。このとき、光の波長は決まっているので、どんなに時間を経過してもその後やってくる波は予想できます。もし、いろいろな波長の光が混在している場合はどうでしょうか？ Fig. 2 に模式的に示すように、ある時刻で山であった波の Δt 後の位相は波長によって様々な値をとります。 Δt が大きくなると、谷と山が混在して、平均化されてしまうでしょう。波の相関が保証される最大の時間差 Δt_{max} は、光の波長幅を $\Delta\lambda$ とし、おおよそ $\lambda^2/c\Delta\lambda$ で与えられます。 c は光速です。これをコヒーレンス時間と呼び、 $c\Delta t_{\text{max}} \approx \lambda^2/\Delta\lambda$ を時間的コヒーレンス長と呼んでいます。時間的コヒーレンス長が大きいということは、 $\Delta\lambda$ が小さい、すなわち単色性が高いことを意味します。

ビームライン結晶モノクロメータを通して単色化されたシンクロトロン放射光では、単色度 $\Delta\lambda/\lambda$ はおよそ 10^{-4} になります。このとき、時間的コヒーレンス長はおよそ 1

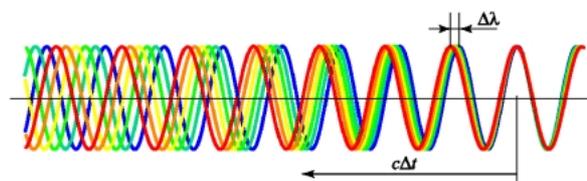


Fig. 2 Illustration for explaining temporal coherence.

* ストレージリングをまわる電子バンチ内の電子分布は分散 σ を用いて与えられています。これをシンクロトロン放射光源のサイズとみなすと、コヒーレンス長を $\lambda R/2\pi\sigma$ とするのがより正確です。また、電子バンチのサイズは水平方向に比べて鉛直方向で一桁ほど小さく、したがって、鉛直方向の空間的コヒーレンス長の方が長くなっています。

μm になります。これは、光路差が $1\mu\text{m}$ 以下であれば干渉が観察されることを意味しています。

X線のコヒーレンス、あるいは、干渉を利用した実験では、この時間的コヒーレンスの要請は大抵満たされています。より大きい時間的コヒーレンス長、言い換えればより高い単色性が必要なコヒーレンス関連実験は比較的特殊なものであるため、ここでは触れないことにします。高い単色性は多くの実験で求められています。これはむしろ分光学的要請から生じている場合が多いといえます。実際問題において、先に述べた空間的コヒーレンスがより重要となるケースが多く、以下の議論においては空間的コヒーレンスによる効果に絞って記述することにします。

3. X線の位相シフトと伝播

それでは、コヒーレンスの高いX線を通すビームラインでは、どのような事象が起こるのでしょうか？ 以下、X線の位相シフトと伝播の切り口でこれを説明します。

X線は物体を透過する際に位相シフトを受けます。位相シフトは屈折率差を光路に沿って積分した量に比例します。位相シフト量は一般に場所によって異なりますので、Fig. 3に示すように波面が変形することになります。X線をあまり吸収しない物体であっても、有意な大きさの位相

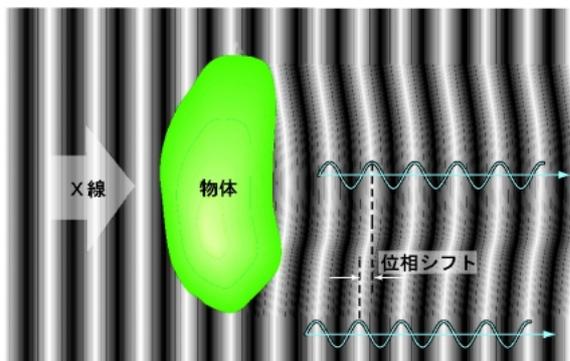


Fig. 3 Phase shift and wavefront deformation.

シフトが発生することが重要なところです。このことは、波面の変形を可視化する位相コントラストイメージングに利用されています^{3,4)}。一方、X線窓として使われているベリリウム窓が、場合によってはX線の波面を乱して実験に影響してしまうという問題の原因でもあります。

Fig. 1(a)ではスリットを通過した波が球面波のように広がってゆく様子を描きました。これは回折（回り込み）による効果です。この効果は、スリットを通る場合以外でも、Fig. 3のように波面が曲がっている場合に普遍的に起こります。波は波面に垂直な方向に伝播する性質を持っています。したがって、曲がった波面では、場所によって波の進行方向が異なることとなります。特に、大きく波面が曲がっているところでは、局所的に隣接する波が重なり合い、干渉による波の強弱が発生します。これをフレネル回折縞と呼んでいます。あるいは、物体から観察面までの距離が大きい場合には、フラウンホーファー回折縞と呼ばれます。

波が強く曲げられる部位で顕著になるこの効果を模式的に Fig. 4に示しました。コヒーレンスが十分高いときは複数の回折縞が観察されます。特に、物体表面や構造の境界に当たる部位で回折縞は明瞭であり、観察面までの距離を L として、その間隔はおおよそ $\sqrt{L\lambda}$ で与えられます。 L の大きさによりますが、硬X線の場合その値は数 μm 程度になります。コヒーレンス長が短くなると縞コントラストは均されてゆき、その結果白黒二重線で物体表面や構造の境界を縁取るようにコントラストが残ります。さらにコヒーレンス長が小さくなると、この輪郭コントラストも消滅し、物体が弱吸収物体であればその存在を確認できなくなってゆきます。このような輪郭コントラストを確認するためには、おおよそ $\sqrt{L\lambda}$ のコヒーレンス長を有するX線を物体に照射する必要があります。

この現象は第三世代シンクロトロン放射光源が建設される以前にはあまり認識されていませんでした。コヒーレンスが十分でなかったことや、物体と検出面の間に積極的に距離を設けて撮像することがあまり行われなかったことなどがその原因として考えられます。

この現象が認識されたきっかけはベリリウム窓でし

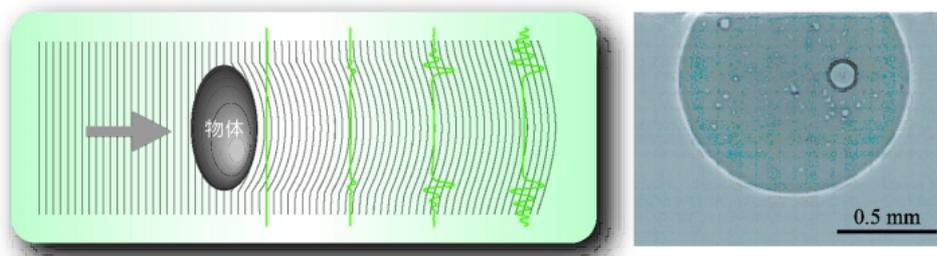


Fig. 4 Diagram of generation of Fresnel diffraction fringes caused by phase shift (wavefront deformation) and wave propagation. Photo shows a plastic sphere with air bubbles inside observed 40 cm downstream with 12.4 keV X-rays at SPring-8, 20XU.

た⁵⁾。ベリリウム窓は真空中から大気中へ X 線を取り出すための窓として一般的に使われています。放射光ビームラインにおいても多用されています。ベリリウム窓は X 線の減衰を最小に留め、それ以外には影響を及ぼさないと考えられていました。しかしながら、第3世代シンクロトロン放射光源が完成して、ベリリウム窓にコヒーレンスの高い X 線を通してみると、均一でない、表面が平らでない、あるいはごみが付着している、などの理由により、ベリリウム窓からフレネル回折（あるいはフラウンホーファー回折）に基づく不規則な模様（スペックルと呼ばれます）が発生するという問題が生じました。ベリリウム窓が X 線の波面を乱している効果が、コヒーレンスの向上によって顕在化した結果です。これによって、ベリリウム窓には高い品質が求められることになりました。X 線ミラーや分光結晶などにも同様に注意を払う必要性が認識されるようになっていきます。

4. X 線コヒーレンスの制御

コヒーレンスの高い X 線が利用できるようになると、それを制御する必要も出てきます。上で述べた窓材や光学素子の品質管理もひとつの重要な要件です。しかし、現実問題として窓材や光学素子からのスペックルの発生を完全に抑えることは難しく、ある程度は妥協の上で実験が行われているのが実情でしょう。皮肉なようですが、イメージング実験の種類によっては第3世代シンクロトロン放射光のコヒーレンスが高すぎるという言い方もできます。試料からのコントラストより、ベリリウム窓などからのスペックルのコントラストが目立つ場合が多々あるからです。ただし、デジタル画像であればスペックルの影響をかなり除くことも可能です（Fig. 5）。

また、拡散板を用いて見かけ上のコヒーレンスを抑えることも行われています。例えばグラファイトの粉末を塗布した板を拡散板とします。これにコヒーレント X 線を照射すると強いスペックルが発生します。拡散板を例えば回転して動かすと、スペックルパターンは時々刻々変化しますので、時間平均すると一様な強度分布として観察されま

す。ベリリウム窓などからのスペックルも、これによって目立たなくすることができます。

Fig. 6 に一例を示しました⁶⁾。これはフレネルゾーンプレートを用いた硬 X 線顕微鏡における拡散板の使用例です。スペックルの影響は、顕微鏡のように小さい空間を可視化するとき特に目立ってきます。ここでは金メッシュをテスト試料として使っています。窓材や光学素子からのスペックルが、像をひどく劣化させていますが、拡散板を使うことによって画質が大幅に改善されています。

逆に、コヒーレンスを向上させることも可能です。上で述べたコヒーレンス長の定義から、光源からの距離を大きくとること、および、光源サイズを小さくすることがその対策として挙げられます。長中尺ビームラインでは、光源からより離れているという意味で、高コヒーレンス X 線を使う上で有利となります。ただし、見かけ上の光源サイズを小さくする方が汎用性の高いアプローチと言えます。そのための最も簡単な方法はピンホール（あるいはスリット）を設けることでしょう（Fig. 7a）。所望の大きさのピンホールを設置して、X 線の一部だけを取り出すようにすれば、ピンホールを仮想的な光源とみなすことができます。これにより、コヒーレンス長をデザインすることができます。

少し複雑ですが、シリコンなどの完全な結晶によるブラッグ回折によっても、空間的コヒーレンス長を大きくすることが可能です。ブラッグ回折は極めて小さい角度範囲

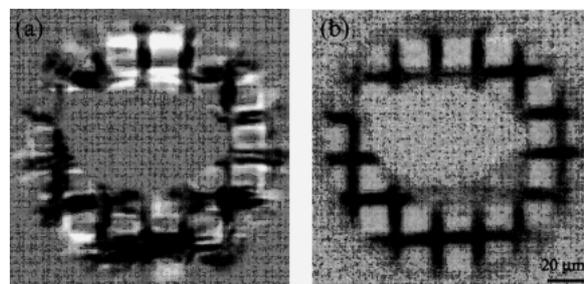


Fig. 6 Images generated by X-ray microscope (a) without and (b) with diffuser at BL20XU of SPring-8⁶⁾.

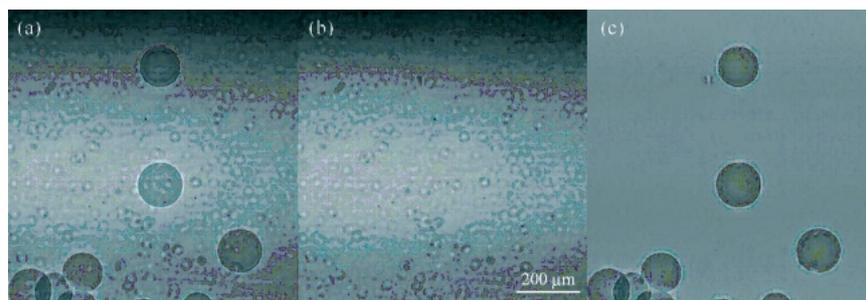


Fig. 5 Removal of speckle in (a) by image (b) without samples, resulting in (c), where plastic spheres were observed with outline contrast (12.4 keV, SPring-8, 20XU).

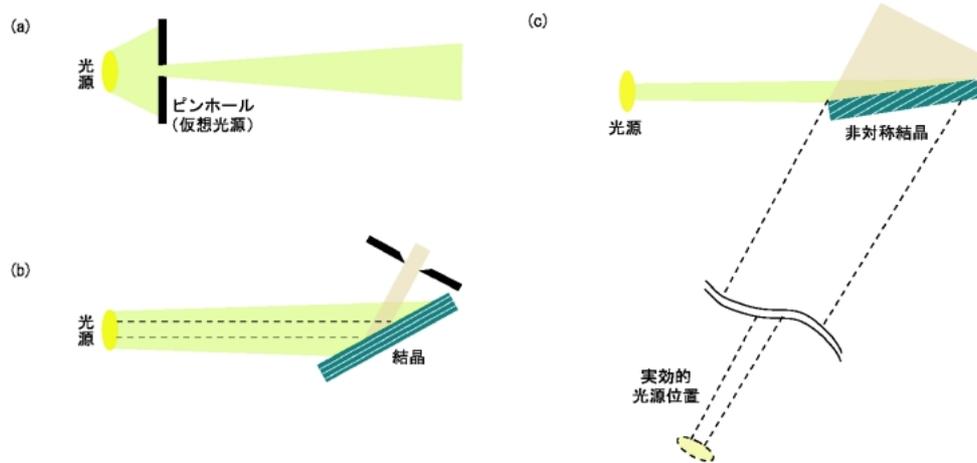


Fig. 7 Approaches for improving spatial coherence.

(数十万分の1度)でしか生じません。したがって、結晶によって回折されてある点に到達したX線を、逆に光源側に辿ってゆくと、それは光源のある一部だけの寄与によることになります。すなわち、見かけ上、光源が小さくなったとみなすことができます (Fig. 7b)。さらに非対称結晶による回折を用いると、実効的に光源が遠くにあるようにできます。非対称結晶とは、ブラッグ回折に参与する格子面と結晶表面が傾いている結晶板を指します。Fig. 7cのようにすると、ビームが広がると共により平面波に近づき、あたかも光源が遠くにあるような振る舞いを示します。ただし、Fig. 7b, 7cの構成では、紙面に垂直な方向の空間的コヒーレンス長はなんら変化を受けません。

結晶を使ってコヒーレンスを高める場合は、実際には時間的コヒーレンスも絡み合って変化するので、正確な議論はやや複雑です。また、この方法で際限なくコヒーレンスを向上させることはできません。実験室のX線源や前の世代のシンクロトロン放射光源では有効です。SPring-8などの第三世代シンクロトロン放射光源では水平方向の空間的コヒーレンスを向上させる場合には有効でしょう。シンクロトロン放射光源では、一般に鉛直方向の光源サイズが水平方向の光源サイズよりかなり小さくなっており、SPring-8の鉛直方向の空間的コヒーレンスは何もしなくてもかなり高い状態にあります。

Fig. 7は光源からのX線の一部を切り出す形でコヒーレンスを高めています。したがって、X線の強度はその分だけ低下することになります。Fig. 7のやり方により、実験室のX線源を用いても、コヒーレンス利用実験は原理的に可能ですが、現実的なX線強度を確保することが極めて難しくなります。すなわち、実際問題として、高輝度光源であることが重要といえます。したがって、高輝度であることと高コヒーレンスであることが、似た意味で議論されています。コヒーレントフラックスという言葉が最近使われます。これは空間的コヒーレンスの保証のもとで利用

できるX線強度を指すもので、X線源の性能を示す指標になります。

最後にX線源のレーザー化に言及しましょう。レーザーでは、発光媒体の各所において、その発光に相関があります。発光そのものがコヒーレントです。これをコヒーレント光源と呼びます。もちろん、レーザー光は空間的にコヒーレントであるといえます。一方、普通のランプは各所でばらばらに発光しており、これをカオス光源と呼びます。シンクロトロン放射光源もカオス光源であるといえます。シンクロトロン放射光はある大きさの塊に集合した電子(バンチ)から発せられますが、それぞれの電子が相関無く発光しているからです。

その意味で、シンクロトロン放射光源はインコヒーレントです。しかし、それから得られるX線は(部分的に)コヒーレントになり得ます。この点が混乱される場合がありますが、本稿で議論しているように、シンクロトロン放射光源によるコヒーレンス利用は十分に可能です。

もし、バンチ内の全ての電子が相関をもって発光すれば、それはX線レーザーということになります。このとき、コヒーレンスの意味はより高度な部分で変わってきます。立ち入って議論はしませんが、光子統計がカオス光とは異なり、高次のコヒーレンスや高いポーズ縮退度などを利用した全く新しい研究も期待されます。X線自由電子レーザー開発^{7,8)}は、これを実現すべく精力的に進められているプロジェクトです。専門家の予想をも超えた、まさに夢の領域が拓けそうです。

5. コヒーレンス応用研究

5.1 位相イメージング

空間的コヒーレンスの高いX線が使えるようになって、硬X線イメージング分野は大きく変わりました。X線位相コントラストが容易に使えるようになったことが

X線画像の常識を変えつつあります。ソフトマテリアルや生体軟組織などのX線に対する弱吸収物体において、透視画像のコントラストは従来法ではあまり望めません。それが、X線の位相シフトによってコントラストを形成することにより、明瞭に弱吸収物体の構造を可視化できるようになりました。最も効率よくX線位相シフトを検出する方法では、吸収コントラスト法に比べて約千倍の高感度化が、軽元素からなる弱吸収物体に対して実現します⁹⁾。

X線の位相シフトを画像コントラストに利用する方法としては、干渉による方法、屈折波を選別する方法、既に例として挙げた伝播による輪郭強調の方法など、多くの方式が提案・実証されています^{3,4)}。三次元観察を可能とするX線CTにもこれらの技術が取り入れられ、高感度な三次元観察も実現しています。これらの技術の医用画像分野への波及も図られています。

位相コントラストの利用はX線顕微鏡開発においてもトレンドを形成しています。従来のX線顕微鏡開発はおもに、軟X線領域で進められていました¹⁰⁾。いわゆる「水の窓」のスペクトル領域で得られる比較的明瞭な吸収コントラストに頼ったものです。しかし、真空環境が必要なことや、照射ダメージの問題など、必ずしも柔軟な実験が行えるとは言えません。X線の吸収はエネルギーの約三乗に反比例して小さくなるので、硬X線領域ならば比較的low損傷で且つ大気中（あるいは溶液中）で観察が可能となります。もちろん、それに伴って吸収コントラストは激減しますが、それは位相コントラストを利用することである程度補うことが可能です。その結果、X線顕微鏡のアクティビティが軟X線領域から硬X線領域へシフトしていることも注目に値するでしょう。

X線ホログラフィも長く研究が続けられています¹¹⁾。撮像視野よりコヒーレンス長が長くはならないという条件が付くので、やはり当初は軟X線領域のみで研究が行われていました。しかし、現在では硬X線領域までその試みが及んでいます。

なお、ホログラフィといえば立体像の再生技術ということで捉えられがちです。可視光のホログラフィ技術ではそれは正しいのですが、X線ホログラフィでは必ずしもそうとは言えません。ホログラフィでは、干渉を利用して物体からの散乱波をその位相を含めて記録しますが、立体像が作れるのは様々な方向の散乱波が記録できる場合のことで、X線では、殆ど前方にしか有意な強度で散乱が起きないので、理想的なX線ホログラムが記録できたとしても、光軸に沿った方向の重なりを区別できるほどの情報は含まれていません。三次元情報を得るためには、やはり複数の投影方向で撮像する必要があります。

5.2 回折顕微法

シンクロトロン放射光は、蛋白結晶構造解析に積極的に利用されています。多くのブラッグ回折スポットを計測す

ることによって蛋白分子の構造が決定されます。最近、非結晶試料に対しても構造決定を可能とする方法が注目されています。非結晶試料の場合回折スポットは現れませんが、試料からの連続的な散乱強度パターンを記録します。このとき、試料に照射するX線のコヒーレント長が観察領域より大きいことを要請します。この点で小角散乱法と異なります。これは、全ての散乱に相関があることを意味し、散乱というよりも回折（先のにべたフラウンホーファー回折にあたる）と表現したほうが良いでしょう。上で述べたスペckルに分類されるとも言えます。現在、非結晶試料に対して構造解析を可能とするこの手法は回折顕微法¹²⁾と呼ばれています。

構造解析にはいわゆる位相問題を克服する必要があります。回折顕微法ではこれをオーバーサンプリング法と呼ばれる方法で解決します。これは、試料周りに何も無い領域を一定面積以上確保した上で、繰り返し数値演算により実験データを処理し、試料の構造（電子密度分布）を画像として収束させる方法です。

この方法は小さな試料を高い分解能で観察する方法として特徴があるといえます。その場合、コヒーレント長が観察領域より大きくなければならないという条件は、特に留意しなくても満たされることになるでしょう。むしろ、小さな試料からの微弱な散乱を検出することになるので、極めて高い輝度のX線を照射する必要があります。上で述べたX線自由電子レーザーはこの意味で大変有力な光源になります。将来的には一個の分子のイメージングも可能とし得るとして、熱い議論が展開されているところです。

5.3 スペckル分光

ベリリウム窓や光学素子からのスペckルが実験を妨げることに上で触れました。しかし、試料に起因するスペckルからは時として貴重な情報を得ることができます。すなわち、スペckルは構造に不均一性がある場合にあらわれるので、試料の不均一性に関心がある場合は、スペckルを積極的に利用すべきです。空間的な不均一性が時間変化する場合は、スペckルの時分割観察とその相関解析によって、構造ダイナミクスの研究にも有用です（X線光子相関分光法¹³⁾）。拡散、相分離、相転移、分子ダイナミクスなど対象となる領域は多岐にわたります。より高輝度のコヒーレントX線が使えらると、より早い時間揺らぎに対応できるようになるので、今後の光源の進歩によって一層加速される分野と言えるでしょう。

5.4 ビーム集光

科学や技術の発展は、微細な領域の理解の必要性をますます高めています。X線集光技術は、そのためには必須のものであると言えます。集光ビームサイズは探ることができる最小空間スケールを決定しますので、なるべく細いビーム形成が望まれます。同時にX線を照射する領域の

サイズが小さくなればなるほど相対的に得られる信号が小さくなってゆきます。したがって、集光ビームには同時に十分な強度が必要になってきます。この両者を実現するためには、コヒーレントな X 線が必須です。

X 線の集光技術に関しては、本シリーズの 7, 8 回目で述べられていますので参照ください^{14,15)}。集光素子の機能は、集光点を中心とする球状波面を形成することであると言えます。完全にコヒーレントな X 線で集光素子が照明されれば、X 線の波長で決まる回折限界まで集光することが原理的に可能です。しかし、部分的にコヒーレントな照明下では、光源が有限の大きさを持っていて、いろいろな方向を向いた光が混在することになるわけですから、集光素子が理想的であっても、集光サイズは結果的に大きくなってしまいます。別の言い方をすれば、集光素子の大きさよりもコヒーレンス長が大きいことが理想的な集光のために必要であると言えます。

集光素子の性能は日々発展しており、現在は 100 nm を下回るサイズのビームが形成できるようになっています¹⁵⁾。ただし、SPring-8 のような第三世代シンクロトロン放射光源により、空間的コヒーレンスが高く、且つ、高強度の X 線を利用して初めて可能になっていることを忘れてはならないでしょう。

6. おわりに

SPring-8 建設の計画時から、コヒーレンスの高い X 線が得られることは度々強調され、可能となる研究について様々な議論が行われていました。しかし、コヒーレンスの高い X 線を扱うためにどのようなことに留意しなければならないかは、必ずしもよく認識されていなかったと思います。

SPring-8 が建設中であった頃、SPring-8 サイトで催された会合から帰るために相生行きのバスに乗っているときのことでした。おそらくレーザーを専門とする先生だったのだと思います。「X 線のコヒーレンスが高くなるのは理解できるが、スペックルなどの問題があるからそう簡単には使えないよ!」と、スペックルの問題に関する議論が不足していることを嘆く会話を小耳に挟んだ経験があります。

コヒーレンスは、X 線源開発の将来計画において常に議論される重要な項目になっています。X 線自由電子レーザーなど、高度な光源になると、コヒーレンスの重要性はますます際立ってきます。そして、より高度なコヒーレンス利用研究が展開されてゆくものと期待され、中でも上で述べた回折顕微鏡はかなり具体的に議論が進んでいる

課題です。ひとつの分子が観察できるようになれば、それはまさに画期的なことと言えます。

しかし、バス中で耳にした指摘を思い起こします。分子サイズのイメージングを行う領域に入ってゆくと、真空ダクト中あるいは大気中に関らず、ビームラインに残留する同サイズの粒子や分子からのスペックルノイズが無視できなくなると思われるからです。X 線源のコヒーレンスをうまく試料および検出器まで運ぶビームライン光学技術を更に高度化してゆく必要があると感じます。

以上、コヒーレンスは比較的馴染みの薄い概念だと思いき、かなり平易に解説してきました。専門家の目からは、厳密性の欠如や、記述の物足りなさがあったかと思いますがご容赦ください。また、紙面の制限上ここには記述しきれない重要な話題もあります。ご興味をお持ちの読者には、参考文献などをご参照いただきますようお願い致します。

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) 山崎裕史, 後藤俊治: 放射光 **19**, 106 (2006).
- 2) 繁政英治, 矢橋牧名: 放射光 **19**, 33 (2006).
- 3) R. Fitzgerald: Phys. Today, June, 23 (2000).
- 4) A. Momose: Jpn. J. Appl. Phys. **44**, 6355 (2005).
- 5) A. Snigirev, I. Snigireva, V. G. Kohn and S. N. Kuznetsov: Nucl. Instrum. & Methods A **370**, 634 (1996).
- 6) M. Awaji, Y. Suzuki, A. Takeuchi, H. Takano, N. Kamijo, S. Tamura and M. Yasumoto: Nucl. Instrum. & Methods A **467-468**, 845 (2001).
- 7) 新竹 積: 放射光 **18**, 35 (2005).
- 8) 新竹 積: 放射光 **19**, 258 (2006).
- 9) A. Momose and J. Fukuda: Med. Phys. **22**, 375 (1995).
- 10) J. Kirz, C. Jacobsen and M. Howells: Q. Rev. Biol. **28**, 33 (1995).
- 11) 最近のものとして, S. Eisebitt, J. Luning, W. F. Schlotter, M. Lurgen, O. Hellwig, W. Eberhardt and J. Stohr: Nature **432**, 885 (2004).
- 12) 西野吉則, 石川哲也: 放射光 **19**, 3 (2006).
- 13) M. Sutton, K. Laaziri, F. Livet and F. Bley: Opt. Express **11**, 2268 (2003).
- 14) 宇留賀朋哉, 野村昌治: 放射光 **19**, 248 (2006).
- 15) 高野秀和, 香村芳樹: 放射光 **19**, 314 (2006).