

X線観察は新たなフェーズへ 位相コントラストX線CTシステムの原理紹介

小島 佳奈 佐藤 渉

ユーザーベネフィット

- ◆ 最大Φ100 mmの視野サイズで、微細なクラックが検出可能です。
- ◆ 「繊維配向解析機能」を標準搭載しており、広視野における繊維配向観察が可能です。
- ◆ 材質の異なる樹脂製品など、X線の吸収差が小さい試料でも高コントラスト観察が可能です。

■はじめに

位相コントラストX線CTシステムは、物体を透過したX線の位相変化を画像化する新しいイメージング手法です。従来のX線CTシステムでは物体を透過したX線吸収量の差を可視化していますが、本システムではX線の位相変化を検出し計算することで散乱量や屈折角に基づく材質の違いをイメージングします。これにより従来のX線CTシステムでは不可能であった広い視野での微細なクラックの検知や、高分子材料や生体組織など軽元素の高コントラスト撮影などに活用できます。さらに、本システムでは繊維束によるX線の散乱を可視化することで、最大Φ100 mmの広視野で炭素繊維複合材料 (CFRP) などの繊維強化樹脂の繊維配向解析が可能です。これらの機能を備えた本装置は、樹脂材料の品質管理や、生体試料や複合材料などの分野における研究・開発に有用です。

本稿では位相コントラストX線CTシステムXctal™ 5000 (図1) の原理および撮影事例について紹介します。



図1 位相コントラストX線CTシステム Xctal™ 5000

■回折格子の役割

図2にXctal 5000の装置構成を示します。従来のX線CTシステムにはなかった3枚の回折格子をX線発生装置とX線検出器の間に搭載するタルボ・ロー干渉計を採用しています。3枚の回折格子はX線発生装置側から順に、G0格子、G1格子、G2格子と呼びます。X線は電磁波の一種であるため、これらの回折格子をX線が透過することで、自己像と呼ばれる明暗の干渉縞が発生します。試料設置前と設置後の自己像の変化を取得することで、X線の散乱や屈折を検出し、散乱像、屈折像として出力します。

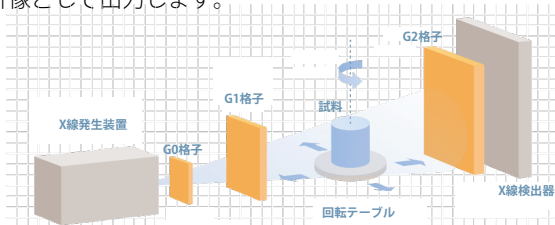


図2 Xctal 5000の装置構成 (タルボ・ロー干渉計) 概要図

各格子の役割について説明します。X線がG1格子を透過した際に形成される自己像は図3左のようになり、明部・暗部の干渉縞が発生します。G1格子+試料透過後は、試料に入射したX線の位相変化を反映し、図3中央のように自己像が変化します。この自己像の変化は非常に小さいため、通常のX線検出器では検出できません。そこで、G1格子に加えG2格子を重ね合わせることで、図3右のようなモアレ模様を発生させ、モアレ模様の変化を検出します。

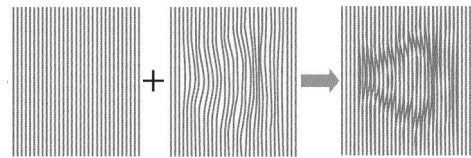


図3 自己像のイメージ例¹⁾

左: G1格子透過後 中央: G1格子+試料透過後
右: G1格子、試料、G2格子透過後 (モアレ模様)

モアレ模様から吸収像、散乱像、屈折像を出力する方法としてXctal 5000では、G2格子を上下に走査させるステッピング撮影 (縞走査) 法を採用しています。G2格子の移動にともない、自己像のモアレ模様の変化します。各ステップにおける自己像のグレースケール値を取得すると図4のようなサインカーブが得られます。試料がない時とある時のサインカーブを元に、平均グレースケール値の変化率 (C_s/C_r) から吸収像を算出し、サインカーブの平均振幅変化率 (A_s/A_r) から散乱像、サインカーブのピーク位置のずれ ($Const \times \Delta\Phi$) から屈折像を算出します。これにより、一度の撮影で、吸収像、散乱像、屈折像の三種類の画像を取得できます。

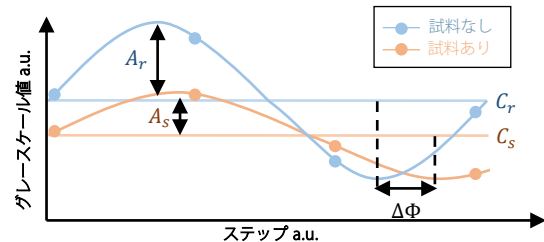


図4 ステッピング撮影によるグレースケール値の変化

また、このような位相変化を検出する上で、自己像のコントラストノイズ比 (CNR) に寄与するX線発生装置の選定も重要になります。図5上のようにX線発生装置の焦点サイズが小さければ小さいほど、波面の揃ったX線を出力できるため、鮮明な自己像が得られますが、単位時間あたりに出力されるX線量が少ないため、撮影時間が非常に長くなるという問題があります。

一方、単位時間あたりに出力されるX線量を多くするには、X線発生装置の焦点サイズを大きくする必要があります。しかし、X線の波面が揃いにくくなり、自己像の鮮明さが損なわれ、散乱像や屈折像を高コントラストで撮影することができません。そこで、本システムではX線発生装置の前にG0格子を設置し、G0格子のスリットにX線を通すことで、仮想的に微小焦点のX線源の配列を作っています。これにより、疑似的にX線の波面が揃ったX線を出力できるため、短時間で鮮明な自己像を取得できます。これら3枚の回折格子は、図5下で示すようにG0格子のスリットを透過したX線により発生した自己像が重なるようにG1格子、G2格子が設置されており、鮮明な位相変化を短時間で画像化することができます。

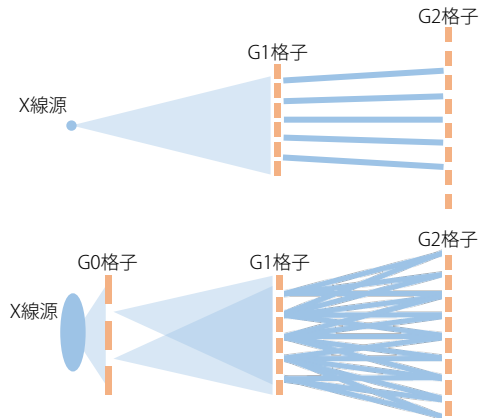


図5 自己像の重なり イメージ図
上: 小さい焦点サイズでG0格子なし
下: 大きい焦点サイズでG0格子あり

■ 位相変化の発生原理

X線の位相変化は試料の構造に起因して発生し、特に試料の表面および内部にある勾配に反応します。そのため図6左のように、中央に切り込みがある試料では、試料の輪郭と中央の切り込み箇所の勾配に起因した位相変化が生じます。一方、図6右では試料輪郭に起因した位相変化のみが生じます。

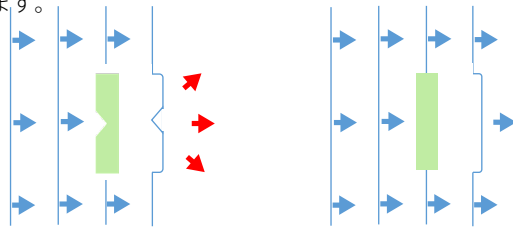


図6 勾配による位相変化イメージ図
左: 中央部に勾配がある場合の位相変化
右: 中央部に勾配が無い場合の位相変化

■ 回折格子の方向による検出感度

勾配で生じた位相変化をG2格子のステッピング走査によって検出するには、ステッピング走査の方向とX線の小角散乱および屈折方向が直交する必要があります。図7に示すように、縦にクラックの入った試料をX線が透過すると、水平方向にX線が小角散乱、屈折します。そのため、図7上のように、水平方向にステッピング走査を行う場合にクラックを観察することができます。

そのため撮影の際には、クラックや繊維束の方向と回折格子の方向が平行になるように回折格子角度を設定します。

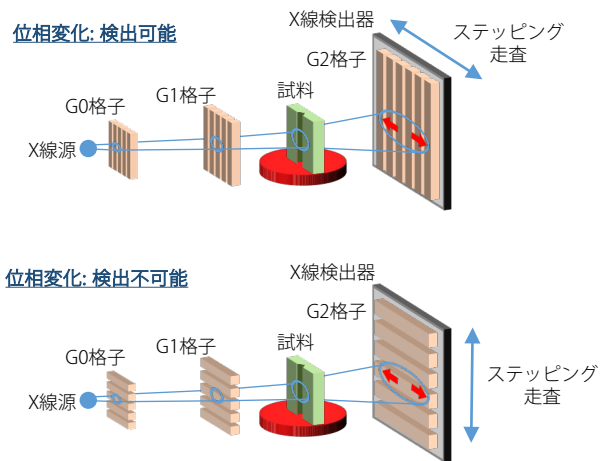


図7 回折格子の方向と位相変化の関係 イメージ図
上: 回折格子が垂直方向 下: 回折格子が水平方向

図8に縦筋クラックの入ったSDカードの透視撮影事例を示します。クラックは黄色枠内に存在しますが、吸収像（図8左）では、クラックが微細なため分解能が足りず観察できません。図8中央は散乱像ですが、回折格子を水平方向に設定しており、図7で示す原理の通りクラックによる位相変化を検出できないため可視化できません。一方で回折格子を垂直方向に設定した散乱像（図8右）では、回折格子の方向とクラックの方向が揃っているため、位相変化が検出可能であり、クラックを可視化することができます。

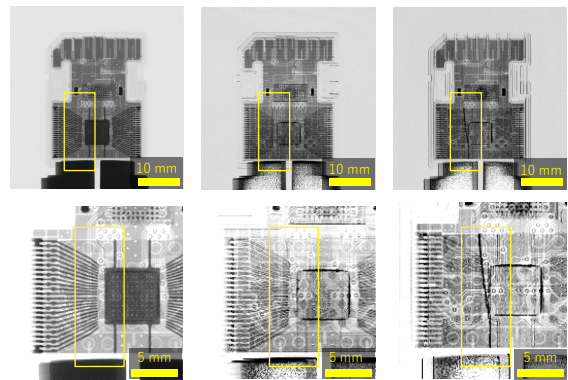


図8 SDカードの透視撮影事例
左: 吸収像 中央: 回折格子が水平方向の散乱像
右: 回折格子が垂直方向の散乱像

■ まとめ

本稿では、位相コントラストX線CTシステム Xctal 5000の原理を紹介しました。タルボ・ロー干渉計という新しい撮影方式によりX線の位相変化を検出し計算することで、散乱量や屈折角に基づく材質の違いをイメージングできます。観察対象物の構造に合わせて回折格子の角度を最適化することで、X線の散乱や屈折を鮮明に画像化できます。

この撮影方式によって従来のX線CTシステムでは観察できなかった「広視野におけるマイクロオーダーの微細構造群」、「高分子材料や生体組織などの軽元素物質」など、さまざまな分析が可能になります。

<関連アプリケーション>

1. X線観察は新たなフェーズへ 位相コントラストX線CTシステムの原理紹介 - Application News 01-00527-JP

<参考文献>

- 1) 百瀬敦 タルボ・ロー干渉計によるX線位相イメージング 光学 38 (2009),510-515. より引用し一部改変

Xctalは、株式会社島津製作所またはその関係会社の日本およびその他の国における商標です。