

屈折コントラスト法のポテンシャル

岡本 博之

金沢大学医薬保健研究域保健学系 〒920-0942 石川県金沢市小立野 5-11-80
(2012年6月2日受理)

Potential of the X-ray phase-contrast imaging

Hiroyuki OKAMOTO

School of Health Sciences, Kanazawa University
5-11-80 Kodatsuno, Kanazawa, Ishikawa, 920-0942, Japan
(Received on June 2, 2012)

Abstract : Recently, a new X-ray imaging technique called phase contrast imaging has been developed. This approach offers improved contrast sensitivity, especially when imaging weakly absorbing specimens. The phase contrast X-ray imaging technique has been successfully used, and is seeing excellent and rapid progress as a diagnostic tool in medicine, biology and materials science. In this paper, we report several methods for the phase contrast X-ray imaging technique.

Key words : Phase contrast, Imaging, Hard X-rays, Radiography

1. はじめに

量子力学によれば、原子や電子、素粒子等のナノサイズよりも小さなスケールの粒子は、粒子としての性質をもつと同時に波としての性質をもつ。これを物質波と呼んでいる。また、電波や可視光などの電磁波についても、波としての性質をもつと同時に粒子としての特徴をもつ。これを光量子と呼んでいる。このように、粒子も電磁波も実は2面性を持っており、このことは「量子」という概念により説明されている。もちろん、医療用に用いられるX線も電磁波の一種であるので、このような2面性を持ち、観測条件によっては光子と考えることも可能であるし、波動と考えることも可能である。

X線は1895年にヴィルヘルム・レントゲンにより発見されてから、比較的早い時期に医療分野へ応用されている。その後、コンピュータ断層撮影(CT)の発明やデジタル化等、幾つかの革新的な発展を遂げてきた。そして、1世紀以上の間、医療分野を中心に、材料工学や物流等において物体内部を透視するために、様々な場所で活用されている。この間、特に医療分野における利用に限るならば、X線を電磁波としてとらえたときの、強度変化のみを情報として利用してきた。このことは、波が持つ情報のうちの、振幅のみを利用し、もう一つの情報である位相については無視してきたと言い換えることもできる。このX線の振幅変化、つまり減弱を利用してコントラストを得る方法は、物体中の減弱係数の分布を画像化する方法である。したがって、この手法においては、減弱係数の小さい軟組織などを検出することは困難であり、これまでの手法では、X線により軟組織の観察をすることは難しかった。特に、軟組織が並存しているような場合においては、その間の差を正しく区別し画像化することは大変困難であったといえる。このことは、物体内部の三次元情報を得ることができるCT撮影においても、基本的には減弱を観測しているため同様のことが言える。

しかし近年、X線の減弱を利用する方法、すなわちX線の振幅変化を観察する方法とは別の原理により、波の位

相情報を画像化することができるX位相コントラスト法と呼ばれる幾つかの方法が注目され始めている。これらの手法は、前述した、これまでは無視されてきた情報である、X線“波”が物質を透過する際に生じる位相変化を捉え、画像化する手法である。この位相変化は、軟組織などにおける減弱に比べて桁違いに大きく、そのため減弱が小さい物質の検出には優れていると考えられている[1]。特に、ここ十年間は、放射光の利用機会の増加や、新しい光学素子の開発に伴って、X線位相コントラスト法の開発が急激に進んできた。一部の手法については、既に臨床応用されているものも有る。また、幾つかの内外の医療機器メーカーにおいても、撮影装置の開発が進んでいると聞く。そのような背景から、理工系研究者のみならず、医療関係者の間でもこの手法に関する興味が徐々に高まっていると感じている。そこで本稿では、現在使われている位相コントラスト法の内、代表的な手法を取り上げ、簡単な原理と、実際に観察している情報は何かということを中心に述べるつもりである。また最後に、これら新しい手法における装置の分解能測定法についても提案を行いたいと思う。

2. 波動についての基本的な知識

位相コントラスト法に用いられている主な物理現象は、波の回折と屈折現象である。また、位相情報を検出するために光学素子として、Siなどの単結晶を利用する。このとき利用されるのが、結晶によるX線回折現象(ブラッグ回折)である。以下に、これらの物理現象を簡単に説明する。

2.1 電磁波を数式で表現する

まず、電磁波とは空間の一部に生じた電場もしくは磁場の振動が、周りの空間に広がり電場の振動と、磁場の振動を交互に誘導し合って伝わる波と考えられる。また、よほど大きな磁場でない限り、人体などの常磁性体から出来ている物体は、磁気的には真空と同じであるとみなすことができる。したがって、人体との相互作用を考える際には電

場の振動だけを考慮すれば良い。そこで、電磁波の電場部分だけを取り出し、波動を表す式を、複素指数関数を使って (2.1)式のように書くことにする。

$$E(\mathbf{r}, t) = E \exp\{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)\} \quad (2.1)$$

ここで、 $E(\mathbf{r}, t)$ は、位置 \mathbf{r} 、時刻 t における電場ベクトルとする。また \mathbf{k} は波数ベクトルと呼ばれ、電磁波の進行方向を向き、その大きさは波長 λ を用いて、 $k = 2\pi/\lambda$ と表される。 ω は角振動数、 E は振幅である。この数式の表現を借りるならば、これまでの減弱を観察する手法では、物体を通過する前後での X 線の振幅 E の変化を観察していたということである。一方、位相コントラスト法で検出、画像化しようとしている情報は、指数部に相当する $i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)$ の部分であり、これを位相と呼ぶ。振幅 E は減弱率に依存して変化するが、位相は物体の屈折率 n に依存して変化することが知られている。つまり、位相コントラスト法は物体中の屈折率 n の情報を可視化する方法であるということができる。

さらに、(2.1)式で示した電磁波が異なる 2 点の波源から発生し、これらを位置 \mathbf{r} で、時刻 t に観測した場合、(2.2)式の関係が成り立つ。

$$E(\mathbf{r}, t) = E_1(\mathbf{r}, t) + E_2(\mathbf{r}, t) \quad (2.2)$$

この関係を重ねあわせの原理と言い、複数の波が重ねあわせることにより、元の波とは異なる形の波が生じる。この現象を干渉と言い、波長が単一で指向性が高い波（コヒーレントな波）ほど顕著に現れることが知られている。

2.2 波の回折現象

電磁波が持つ粒子（光子）と波動の 2 面性については既に述べたが、この両者の性質の違いがよく表れるのが、回折という現象である。そこで、このことを簡単に考えるために、仮想的にダブルスリットの実験を行う。まず、Fig.1(a) に示したように、多数の粒子が 2 つ穴のスリットに垂直に入射した場合を考える。スリットを通過した粒子の多くはそのまま直進し、検出器上の X 印の部分に到達するであろう。つまり、検出器には Fig.1(a) の上部に示したような 2 つのピークを持つ強度分布が得られるはずである。一方、Fig.1(b) に示したように、平面波がスリットに垂直に入射した場合は結果が異なる。波線を波面とすると、スリットを通過した波はホイヘンスの原理によりスリットを新たな波源とし、2 次波と呼ばれる球面波を生じ

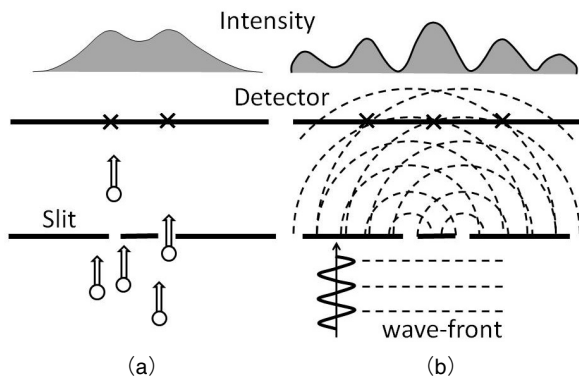


Fig.1 粒子と波動の性質の違いを表す、ダブルスリット実験。(a) は粒子、(b) は波動がスリットを通過した際の結果で、上部に強度分布を示す。

る。この現象は、両スリットで生じるため、それぞれのスリットを波源とした球面波は位相が一致する点（波線が重なり合う点）においては (2.2)式の関係に従った干渉により強度を増す。しかし、位相が合わない点について、強度は減少する。このような干渉という現象を考慮すると、検出器上で波の強度が強い部分は位相が合っている部分であり、X 印の部分であろう。そして位相がずれるに従って強度は減少する。つまりこのことは、検出器には Fig.1(b) の上部に示したように複数のピークを持つ、振動する強度分布が得られることを意味する。これが回折と呼ばれる現象であり、位相情報を取り出す手法の一つとして利用されている。

2.3 波の屈折現象

粒子と波動の性質の違いを表す現象としても一つ、屈折という現象がある。波は前節で述べたように、波面上の一点が新たな波源として 2 次波を作る。このような 2 次波は、スリットを通過する時だけでなく、通常の伝播や媒質の境界面を通過する際にも発生している。例えば、Fig.2 に示すように、波線を波面とする平面波が入射角 θ_i で異なる媒質 1 と 2 の境界面に入射した場合、境界面の各点において入射波は新たな 2 次波を作る。入射波が平面波である場合、媒質 2 においても平面波が生じなければならない。また、媒質によって波が伝わる速さも異なる。これらのことから、干渉が起こり 2 次波の位相がそろって波が強めあう条件をもとめることができる。異なる経路 A, B, C, を伝わる波の位相が一致するように幾何学的な計算を行うと、入射角 θ_i と屈折角 θ_t の間に (2.3)式の関係が得られる。

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{c_1}{c_2} = n \quad (2.3)$$

この関係式は可視光においてはスネルの法則としてよく知られており、 n が屈折率で、 c_1, c_2 はそれぞれ媒質 1, 2 における波の速さである。X 線についても同様の関係が成り立ち、この場合 c_1, c_2 は媒質 1, 2 における光速である。また、X 線については物体の絶対屈折率は 1 以下で、1 に非常に近いことが知られている。そのため、減弱の効果を無視した場合には、屈折率を微量 δ を使って (2.4)式のように表現する。

$$n = 1 - \delta \quad (2.4)$$

上述したように、X 線に対する一般の物体の屈折率は 1 に非常に近く、 δ は 10^{-5} から 10^{-6} 程度である。これは、屈折角にして数 μrad 以下で、X 線の波長が長くなるほど大きくなることが知られている。したがって、これまでの一般的な撮影方法で物体による X 線の屈折像を撮影することは困難である。

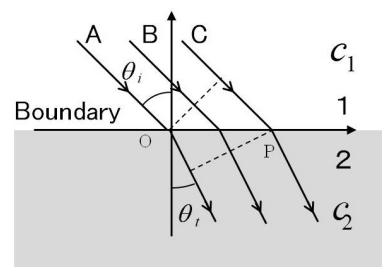


Fig.2 媒質 1 から 2 へ平面波が入射した際の、屈折現象。波線は波面を表す。 θ_i 入射角、 θ_t 屈折角、 c_1 媒質 1 中の光速、 c_2 媒質 2 中の光速である。

2.4 結晶によるX線の回折（ブラッグ回折）

Si等の単結晶では理想的には原子が規則正しく、周期的に並んでいると考えられる。その間隔は1 nm以下である。その間隔よりも短い波長のX線が結晶に入射すると、結晶が回折格子の役割を果たして、特定の方向のみに回折現象が生じる。例えばFig.3に示すように、原子の間隔が d の結晶に波長 λ のX線が入射したとき、各原子で散乱されたX線同士が干渉して強めあう条件、すなわち回折の条件は、それぞれの散乱波の位相がちょうど 2π の整数倍だけずれて重なり合うときである。このための条件は、幾何学的な計算によると(2.5)式を満たす時である[2]。

$$2d\sin\theta_B = m\lambda \quad (2.5)$$

ただし、 m は正の整数である。この条件をブラッグ条件と言い、この条件を満たす角度 θ_B をブラッグ角という。この条件は、原子の並びを面として捉えるならば、鏡による反射と同様に見えることから、原子面による反射と表現されることもある。この結晶によるX線のブラッグ回折を利用して、位相変化の情報を取り出すことが可能である。

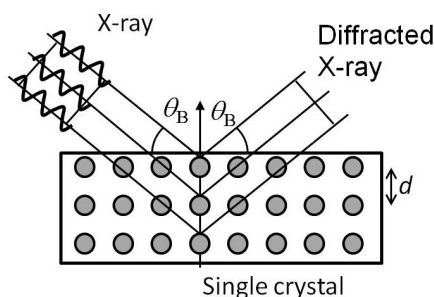


Fig.3 整然とならんだ原子によるブラッグ回折。 d 原子の間隔、 θ_B ブラッグ角である。

3. 位相コントラスト法

前節で述べた、干渉、回折、屈折という現象を使って、物体を通過した際のX線の位相の変化を検出する幾つかの方法が提案されている。そのうちの、代表的な手法について、位相情報をとりだすメカニズムを簡単に紹介したい。

なお本稿では、これらの手法の総称として「位相コントラスト法」という呼称を使い、そのうちの屈折現象を主に使用する方法を「屈折コントラスト法」と呼ぶことにする。位相コントラスト法の代表的な方法を大まかに分類すると、

- ①インライン法
- ②単結晶による干渉計を使った方法
- ③単結晶アナライザを使った方法
- ④格子型干渉計を使った方法
- ⑤その他（ゾンプレート、干渉散乱、等）

がある。①～⑤の手法はいずれも、前節で述べた回折現象と屈折現象をうまく組み合わせて、位相情報を検出し画像化している。特に、③については主に屈折現象を利用するため、先に述べたように屈折コントラスト法と呼ばれている。なお、⑤については興味ある手法ではあるが、臨床用のイメージング法として応用されるまでにはしばらく時間がかかると思われたため、本稿では取り上げない。

3.1 インライン法

まず、物体のエッジ部分で生じる、フレネル回折を利用して位相情報を画像化する方法について述べる。この方法は、インライン法とも呼ばれている[3-6]。Fig.4に示したよう

に、分光器（モノクロメータ）で単色化された平行度の高いX線、あるいは微小点光源から発せられたX線を試料に照射した際、そのエッジ部でスリットを通過した波と同様の回折現象が生じる。試料と検出器間の距離を数メートル離すと、回折したX線は、回折しなかったX線と検出器部分で干渉を起こし、両者の位相のずれに対応して、(2.2)式で表される関係に従い強度を変化させる。このときもちろん、試料によるX線の減弱の影響も検出されるため、検出器では減弱像と、干渉による強度変化が合成された像が得られる。回折現象は特に試料のエッジ部で生じるので、観察される像は、減弱像の輪郭を干渉像が縁取った、輪郭強調像となる。この手法では、減弱が小さい試料においても輪郭が強調されるため、物体の存在の有無を確認することが容易となる。

この手法の光学系は簡便であるが、試料と検出器の距離を数メートル離す必要があること、微小点光源からのX線もしくは、高平行度のX線が必要であること、また撮影した像については減弱像と屈折像が分離されていないので、撮影結果から位相情報のみを取り出すことが難しいなどの課題も挙げられる。

この手法を応用したマンモグラフィ用の製品として、コニカミノルタ社からPCMシステムが既に市販されている。

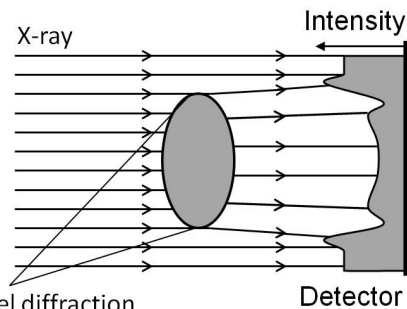


Fig.4 インライン法の原理。試料のエッジ部でフレネル回折を生じる。

3.2 単結晶による干渉計を使った方法

この方法は、単結晶によるX線の回折を利用し、X線が物体を透過した際の位相変化を画像化して取り出す方法である[7, 8]。高平行度で単色のX線を考えると、Fig.5に示すように、波面は平面である。このX線が物体を透過する際に、(2.3)式に応じて光速が変化する。それに伴い、物体を透過したX線と透過しなかったX線の間に位相のずれが生じる。別な表現をすると、Fig.5に示すように透過前には平面波であったX線の波面が透過後にゆがむ。この波面のゆがみの情報をSi単結晶から作製した、干渉計と呼ばれる光学素子により取り出すことが出来る。

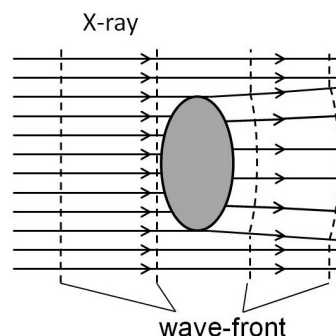


Fig.5 平面波が物体を通過した際の波面のゆがみ。媒質の違いにより光速が変化するため、位相がずれ結果として波面がゆがむ。

3枚のSi単結晶板からなる、干渉計を使った方法をFig.6に示す。まず、単色X線をSi結晶板Aによって回折させ、2経路に分離する。その後、再びBで回折させそれぞれ方向を変え、一方のX線(参照波SW)はそのままで、もう一方のX線は試料を透過させて、2つがちょうど一点で交わる部分で再び、Cにより回折をさせる。すると2経路のX線は合成され、一方の経路では位相情報の差分像DWが、もう一方は合成像CWが形成される。例えば、差分像では試料が無ければお互いの波が打ち消しあい、強度はゼロである。しかし、試料を透過することにより位相がずれるならば、差分像は波面のゆがみに応じた強度の像を形成する。この方法は、試料の形状による位相の変化に応じた情報を取り出すことができるので、位相情報の検出能力に優れている。しかし、干渉計は非常に高い精度を必要とするため、シリコンの単結晶から一体で切り出して作製される。そのため、そのサイズ a は高々数十cmであり、試料スペースも10cm程度しか確保できないので、人体の胸部のような大きなサイズのものに対しては実用的ではない。また、そのような問題点を改良するために分離型の干渉計の作製も試みられているが、設置条件に非常に高い精度を必要とするため、あまり一般化していない[9]。

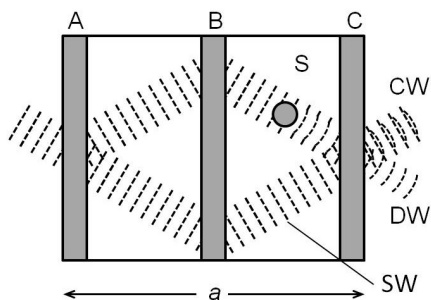


Fig.6 単結晶による干渉計を使った方法の原理。A, B, Cは薄いSi結晶板である。Sは試料である。SWは参照波、DWでは位相情報の差分像が、CWでは位相情報の合成像が形成される。 a は干渉計のサイズである。

3.3 単結晶アナライザーを使った方法(屈折コントラスト法)

この方法も、Si単結晶による回折を用いて位相情報を取り出す方法であるが、用いる結晶の形状により2つの方法に分けることができる。厚い単結晶を利用し、結晶表面に平行な原子面でX線を回折させる方法をDiffraction-Enhanced X-Ray Imaging Method (DEI法)と呼び、それに対して、薄い単結晶を利用し、結晶表面に垂直な原子面を利用してX線を回折させる方法をX-Ray Dark Field Imaging Method (X線暗視野法)と呼んでいる。これらの手法の原理となるブラッグ回折については既に述べたが、ここでさらに補足をしたい。この手法で用いるSi単結晶のことをアナライザー結晶と呼ぶ。ブラッグ条件(2.5)式を満たす付近で、アナライザー結晶の角度を動かしながら回折X線の強度を測定すると、理想的には厳密にブラッグ条件を満足する角度でだけX線が観測されるはずである。しかし実際には、格子振動や結晶中の欠陥の存在による完全な周期性からのずれ、入射X線の平行度の低さ等により、Fig.7に実線で示すような、有限の角度幅を持った回折強度曲線が得られる。この曲線をロッキングカーブといい、その幅 $\Delta\theta$ は $1\ \mu\text{rad}$ 以下である。もし結晶が厚い場合は回折X線の強度によらずX線は透過しないが、薄い場合は透過強度が波線のように変化する。つまり、X線がより回折されるならば、透過X線の強度は弱くなり、X線が回

折されないならば、透過X線の強度は強くなる。ブラッグ角より小さな角度は低角側、大きな角度は高角側と呼ばれる。このような、ロッキングカーブを利用して、物体によるX線の極めてわずかな屈折の違いに対応させてコントラストを生じさせ画像化する方法が、DEI法や暗視野法である。以下にそれらの方法について述べる。

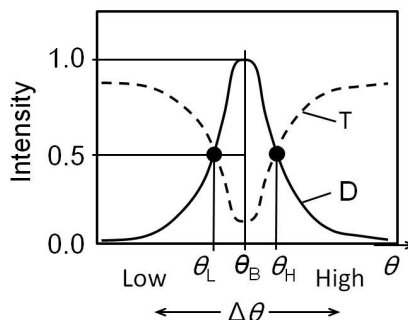


Fig.7 Si結晶への入射角度を変化させた際の回折・透過X線強度曲線(ロッキングカーブ)。曲線Dは回折X線の強度を、曲線Tは透過X線の強度を表す。 θ_B はブラッグ角であり、Lowは θ_B よりも低角側、Highは高角側であることを表す。

3.3.1 DEI法による屈折X線の検出

DEI法では厚い結晶を使い、回折X線の最大強度を1としたとき、その半値0.5になるような高角側、低角側の二箇所の角度にアナライザーの角度を合わせた状態で撮影を行う[10, 11]。つまり、Fig.7において低角側では θ_L 、高角側では θ_H で撮影を行う。このような条件にアナライザー結晶を設置した後、Fig.8のように試料、アナライザー結晶、検出器を配置する。ここで仮に、アナライザー結晶の角度を θ_H に設置したとき、経路AのX線について考える。このX線が試料を透過したことにより屈折が生じ、アナライザーに入射する角度が θ_H よりも大きくなったとする。すると、ロッキングカーブの強度変化に従い、回折X線の強度は小さくなる。逆に、経路BのX線のように、低角側にずれたときには、強度は大きくなる。一方、アナライザー結晶を θ_L に設置した場合は、同じ試料でも回折X線の強度の変化が逆転する。この性質を利用して、 θ_L と θ_H の両方で撮影した画像のうち明、暗が反転していれば屈折像であることが確認できる。しかし、像の明暗が反転していなければ、減弱像であることが確認できる。このように、DEI法では減弱像と屈折像を分離して観察することが出来るため、物性測定などの定量的な解析を行いたい場合に用いられる[12]。アナライザー結晶の前までのX線の強度変化は、試料中の減弱率分布による強度変化だけであるが、アナライザーを適用することにより、屈折率分布に起因する屈折角を強度変化に変換し、画像化する方法がDEI法であるということもできる。

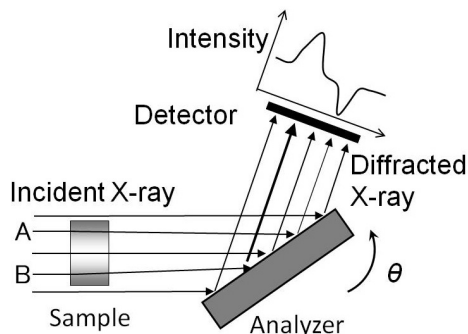


Fig.8 DEI法の原理。試料により屈折したX線は、アナライザーによりコントラストが生成される。

3.3.2 暗視野法による屈折 X 線の検出

暗視野法も、DEI 法と同様にアナライザ結晶のロックアップカーブを利用して画像を形成する。しかし、DEI 法ではアナライザ結晶の表面で X 線を鏡面反射のように回折させていたのに対して、暗視野法では結晶内部を透過させる[13, 14]。この際、結晶表面に垂直方向に存在する結晶面が X 線を回折する面となる。そのため、DEI 法では 10~20 mm 程度の厚い Si 単結晶を用いるのに対して、暗視野法では透過しやすいよう 1~5 mm 程度の薄い結晶を用いることが多い。DEI 法では、回折 X 線の強度が最大強度の半値になる角度にアナライザの角度を合わせた。暗視野法ではいくつかの撮影法があるが、仮にアナライザ結晶の角度を、ブラッグ角、つまり Fig.7 における θ_B の角度に設置したときを考える。そして、Fig.9 に示すように試料、アナライザ結晶、検出器を配置する。もし、入射 X 線が試料を透過する過程で屈折しなかったならば、アナライザ結晶でブラッグ条件を満足するため、ほとんどの X 線は回折し、透過する X 線はわずかである。このことは、Fig.7 の強度曲線からも明らかである。一方、試料を透過する過程で経路 A、B のように屈折が生じた場合は、アナライザ結晶のロックアップカーブに従って強度が変化する。このとき、屈折の程度によりブラッグ角からのずれが決まるので、回折 X 線の強度は小さくなり、透過 X 線の強度は大きくなる。つまり、X 線はアナライザ結晶で透過および、回折 X 線に分離されるが、この比率は屈折の程度により変化するため、試料の屈折率の分布に応じたコントラストが得られる。回折 X 線によって得られる像を明視野像（回折像）、透過 X 線によって得られる像を暗視野像（透過像）という。

DEI 法では、アナライザ結晶の表面に平行な原子面による回折を用いたが、暗視野法では表面に垂直な原子面による回折を使用するため、大視野での撮影が可能である。胸部のような広い面での撮影が必要な場合には、暗視野法が向いていると言える。

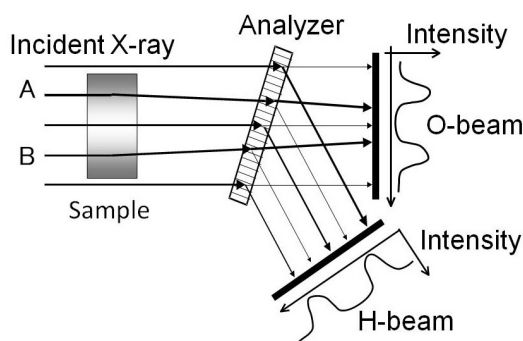


Fig.9 暗視野法の原理。試料により屈折した X 線は、アナライザにより H-beam（回折像）と O-beam（透過像）に分けられる。前者を明視野像、後者を暗視野像という。

3.4 格子型干渉計を使った方法

格子型干渉計は、タルボ効果と呼ばれる現象を利用した干渉計であるため、タルボ干渉計とも呼ばれている[15]。タルボ効果とは、可視光について、X 線が発見される以前、タルボによって報告された現象で、Fig.10 に示すように格子状スリット G1 に平面波を照射したとき、各格子部分から新たな 2 次波が生じ、これらの回折波が重なり合った結果として、格子の下流側に、 $Z=d^2/\lambda$ ごとに格子の直後と同じ光の強度分布が得られる現象である。この現象が X 線でも生じることが、近年になって発見された。

仮に Fig.11 に示すように G1 格子の前に物体を置くと、

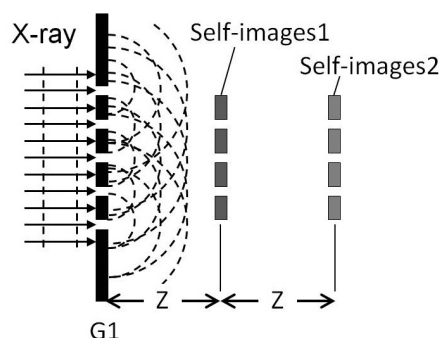


Fig.10 タルボ効果の原理。平面波が入射されると、格子状スリット G1 の下流に、周期的にスリットの自己像が形成される。

屈折率の違いにより物体中での光速が変わることから、物体を透過した後の波面がゆがむ。その結果、格子の自己像にもゆがみが生じる。つまり、本来の自己像の発生位置に検出器を置き観察すると、画像には物体の形状を反映した格子周期の乱れが観られるはずである。そこで、この位置に G1 と同じ周期を持つ格子 G2 を置くと、物体の形状に依存したモアレ干渉縞が観察される。この干渉縞を処理することにより、位相情報を反映した画像を検出できる。ただし、この手法に必要な X 線は単色で高平行度でなければならないため、通常の X 線管からの X 線を使用することが出来ない。そこで改良が行われ、光源の後ろにもう一枚間隔の細かい格子を置くことにより、タルボ効果と同様の効果を得ることが可能であることが分かった。この原理を応用したものが、タルボ・ロー干渉計である[16, 17]。このタルボ・ロー干渉計を用いた手法が、位相像と減弱像を分離して検出する方法の内では最も臨床应用到に近い手法と考えられ、研究機関のみならず医療機器メーカーにおいても精力的に研究されている。

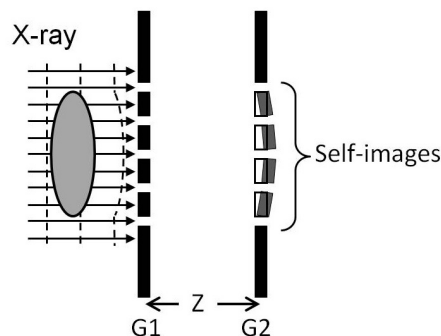


Fig.11 格子型干渉計を使った方法の原理。タルボ効果により、格子状スリット G1 の下流に、周期的にスリットの自己像が形成されるが、試料により位相がずれ自己像がゆがむ。この位置に G2 を置くと、物体の形状に依存したモアレ干渉縞が観察される。

4. 撮影例

前節で位相コントラスト法について、幾つかの代表的な方法を紹介した。その中から、我々の研究グループで使用している 3 つの手法で得られた画像の例を紹介したい。他の方法で得られる画像については、参考文献を参照されたい。例えば、単結晶による干渉計を使った方法については文献[7-9]が、格子型干渉計（タルボ干渉計）を使った方法については文献[15-17]などが詳しい。

4.1 インライン法

インライン法がマンモグラフィに応用されていることは既に述べた。そこで、我々もこの方法をマンモグラフィに

応用した際の減弱像との違いを検討するため、ACR156ファントムの撮影を行ってみた。撮影は、放射光施設Spring8においてBL-20B2を使用し、30 keVの単色X線で行った。ファントムと、フィルムは2 m離れた。また、フィルムはコダック社マンモグラフィ用フィルムMIN-R2000を用いた。Fig.12に示すファントムの、繊維組織試料のうちa, b, 石灰化試料のうちc, 腫瘍試料のうちdの部分撮影した結果をFig.13に示す。通常マンモグラフィ撮影のエネルギーよりも高エネルギーでの撮影を行っているため、各試料について減弱によるコントラストは低い。しかし、輪郭強調画像により試料の形状が明瞭に確認できる。特に、試料そのものではなく試料をファントム中に固定する際に混入したと思われる、気泡らしき物が多数確認されることは、減弱を利用した撮影方法と最も異なる点である。このことからインライン法は、輪郭強調像を得ることにより、減弱の小さい試料でも検出できる可能性を示している。

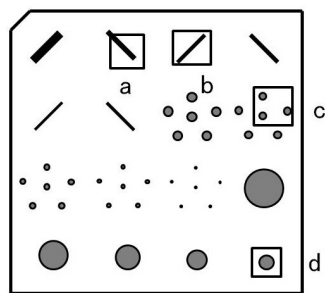


Fig.12 マンモグラフィ用ACR156ファントム。黒枠部分a-dを撮影した。

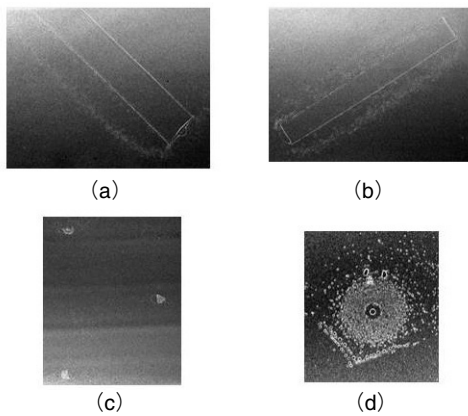


Fig.13 インライン法によるACR156ファントムの撮影結果。各記号はFig.12の記号に対応し、(a), (b)は繊維組織試料、(c)は石灰化試料、(d)は腫瘍試料である。

4.2 DEI法

DEI法はアナライザー結晶のロッキングカーブを利用して、試料によるX線の屈折角をコントラストに変換する手法である。つまり、このことはアナライザー結晶の設置条件により、撮影される像が異なることを意味している。そこで、設置条件の違いにより、生体試料の観察にどのような影響が現れるか調べるため、ヒト大腿骨遠位端の市販病理標本(冠状断切片)を、30 keVの単色X線を用いて撮影した。実験は高エネルギー加速器研究機構の光子ファクトリーBL-14Bで行った。Fig.14(a)に示す試料の黒枠で囲まれた部分についてCCDカメラを用いて観察した。Fig.14(b)にアナライザーロッキングカーブのピークで撮影した像を、(c)に低角側半値で撮影した像を、(d)

に高角側半値で撮影した画像を示す。ピークの結果(b)では屈折像をほとんど検出できないので、頼り切りに何も描写されておらず、ロッキングカーブのピーク平坦部を超える程度屈折したと思われる関節軟骨の辺縁Bが、わずかに見える程度である。低角側像(c)では靭帯Aが繊維組織まで鮮明に描写され、断裂部位の様子も捉えている。高角側(d)では関節軟骨Bの表面形状が鮮明に描写されているのがわかる。軟骨部分についてのみ見てみると、低角側(c)では黒く、高角側(d)では白く観察することができる。これは、先に述べたように、ロッキングカーブの低角側と高角側で撮影した屈折像はコントラストが反転することによる。このことから、屈折像を検出していることが分かる。

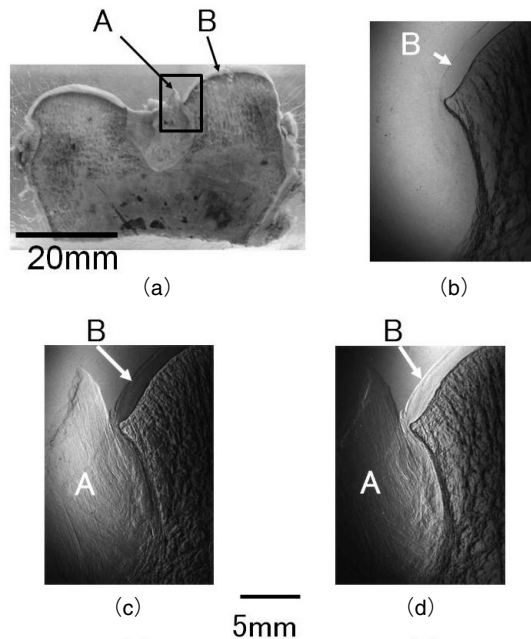


Fig.14 DEI法によるヒト大腿骨遠位端の市販病理標本(冠状断切片)の観察。(a)は撮影した試料の光学写真である。黒枠部分を撮影した。Aは靭帯、Bは軟骨部である。(b)はアナライザーロッキングカーブのピークで、(c)は低角側半値で、(d)は高角側半値で撮影した画像である。

4.3 暗視野法

暗視野法もDEI法と同様、アナライザー結晶のロッキングカーブを利用して、試料によるX線の屈折角をコントラストに変換する手法である。今回は、アナライザー結晶のロッキングカーブが極値をとる角度で撮影を行った。DEI法との比較のため、入射X線エネルギー30 keVにおいて、ヒト大腿骨遠位端の病理標本を撮影した。実験は高エネルギー加速器研究機構の光子ファクトリーBL-14Cで行った。暗視野法は、DEI法よりも広い視野での撮影が可能であるので、Fig.15(a)に示す試料の黒枠で囲まれた部分について、イメージングプレート(IP)を用いて撮影した。Fig.15(b)に明視野像、(c)に暗視野像を示す。大腿骨遠位端周囲の構造物、特に靭帯Aと関節軟骨Bが鮮明に描写されている。靭帯像では、これを形成する繊維組織が描写されている。関節軟骨ではその表面形状が描写されている。また、靭帯と軟骨の両方において明視野像で白かった部分が、暗視野像では黒くなっていることから、屈折像であることもわかる。

DEI法と、暗視野法は同じようにアナライザー結晶を使用する方法であるにも関わらず、得られた画像についてコントラストのつきかたが異なるのは、使用したロッキング

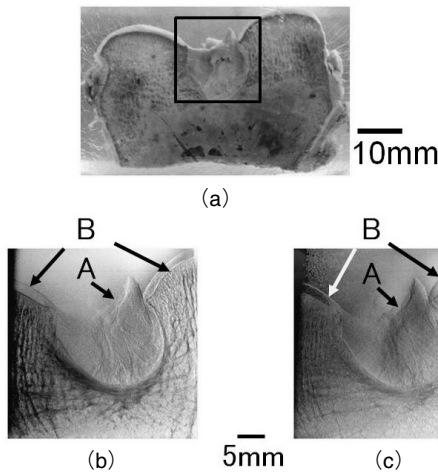


Fig.15 暗視野法によるヒト大腿骨遠位端の市販病理標本（冠状断切片）の観察。(a)は撮影した試料の光学写真である。黒枠部分を撮影した。(b)は明視野像,(c)は暗視野像を示す。Aは靭帯,Bは軟骨部である。

カーブの位置が異なるためと、検出器の特性が異なるためであると思われる。

5. 分解能評価方法の提案

これまで述べてきたように、位相コントラスト法には、撮像原理により幾つかの手法が存在する。また同じ手法であっても、用いる線源や光学素子等の組み合わせにより、得られる画像の質に大きな違いが生じると考えられる。一般に、このような違いは分解能の違い等として評価される。位相コントラスト法においても空間分解能評価については、これまでと同様の方法が使用できると思われる。しかしながら、コントラストに関する分解能は、減弱を利用した場合と撮像原理が全く異なるため、新しい評価方法が必要である。そこで我々の研究グループでは、新しい原理に基づく評価用ファントムを開発している。以下に、定量的な評価が行いやすい撮影法である DEI 法について、現在開発中のコントラスト分解能評価方法の簡単な原理と、得られた分解能について述べる。

まず、Fig.16 に示すような、均一な物質でできているクサビ形の物体に、 y 軸方向に X 線を照射したとする。このとき (2.3), (2.4) 式に従い、 δ とクサビの傾斜角 α により、透過後の X 線の屈折角が決まる。もちろん同じ材質であるならば、可視光のプリズムによる屈折と同様に、 α が大きいほど屈折角は大きい。詳細な議論は別にして、結果のみ述べると、屈折角 $\Delta\theta$ について (5.1) 式の関係が得られる。

$$\Delta\theta = \delta \tan(\alpha) \quad (5.1)$$

この関係式から、均一な材質で出来た、くさび形の物体による屈折角は、物体の傾斜角 α のみで決まるといえる。また、DEI 法では屈折角の大きさに応じてコントラストが決まる。このことは、角 α を減少させた時、屈折が生じた部分と、生じていない部分の間にコントラストが観察できる限界の値をもとめることにより、屈折角 $\Delta\theta$ に関する分解能をもとめることが出来ることを意味している。つまり、どれくらい小さな $\Delta\theta$ まで、アナライザーによりコントラストを生成することが出来るかという、概念としてはこれまでの低コントラスト分解能に対比できる分解能をも

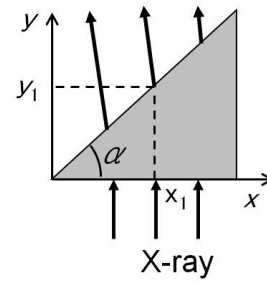


Fig.16 均一な物質でできているクサビ形の物体による X 線の屈折。屈折角は δ の値と、クサビの傾斜角 α により決まる。

とめることが可能であると考えている。

この原理を元に、Fig.17 のようなアクリル製の評価用ファントムを作製した。このファントムは傾斜角が常に 0° である A 部分と、傾斜角 α が $0^\circ \sim 45^\circ$ まで連続的に変化する B 部分からなる。また、(5.1) 式と形状から (5.2) 式を導くことができる。

$$\Delta\theta = \delta \frac{h}{100} \quad (5.2)$$

このファントムに矢印の方向から X 線を照射する。この際に得られる像について、A と B の境界部分では厚みが等しくなるために、境界部では減弱によるコントラストは生じないと考えられる。一方、屈折像については、A と B の境界部分で傾斜角の変化が大きいため、コントラストが生じると考えられる。このことから、境界部分でコントラストが観察できれば、X 線の屈折が観測されていると考えられる。したがってファントムを撮影し、境界部分でコントラストが観察できる最小の h をもとめることができれば、屈折角に関する分解能を得ることが可能である。

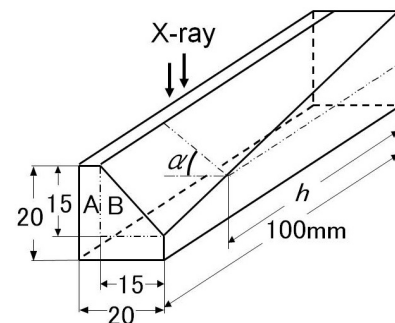


Fig.17 屈折角 $\Delta\theta$ に関する分解能評価用ファントム。コントラストが読み取れる h についての限界位置から分解能をもとめることが出来る。

このファントムを、高エネルギー加速器研究機構放射光施設フォトンファクトリー BL-14B において 30 keV で、DEI 法を用いて CCD カメラにより撮影したところ、ロッキングカーブの高角側で Fig.18 のような像を得た。この像から、AB 間にコントラストが観察できる最小の h は 13.5 (mm) であったので、アクリルの $\delta = 2.7 \times 10^{-7}$ を使っ



Fig.18 DEI 法による、分解能評価用ファントムの撮影結果。黒矢印は A, B 部分の境界である。コントラストが読み取れる h についての限界は 14 mm 程度である。

て分解能を計算すると $\Delta\theta=0.36\times 10^{-7}\text{rad}$ であった。つまりこのことは、使用した光学系においては、試料により屈折が生じた場合、この程度の屈折角までコントラストをつけて観察可能であることを意味している。

6. まとめ

今回紹介したように、X線が物体を透過する際の位相変化を利用した撮影法には、幾つかの種類が存在する。ただし、現時点ではそれらの手法の多くは、高平行度光や点光源から発生するコヒーレントなX線を必要とする。その中でも、臨床用の線源を利用できるインライン法やタルボ・ロー干渉計を用いる方法等は近い将来の本格的な臨床応用が期待される。将来、このような手法が応用された際に気をつけなければならないことは、いずれの手法についても画像化されている量がこれまでの吸収係数とは全く異なる、屈折率に関する量であることである。また、画像化する物理量は、手法ごとに撮像原理が異なるため同じではない。つまり、このようなことを理解した上で画像を観察しなければ、得られた画像の意味を正しく理解することは出来ないと考える。そのようなことを理解した上でこれらの手法を使うならば、これまでの減弱像では検出が困難であった軟組織等の低密度物質の描出が可能になり、非常に有益な観察手法に成り得ると考える。

7. 謝辞

この原稿は、2012年6月2日(土)に、金沢大学で開催された医用画像情報学会平成24年度年次(第163回)大会での講演内容を元に執筆しました。講演に際して細かいことまでお世話になりました。大会長の市川勝弘先生に感謝いたします。また、会長の藤田広志先生をはじめ、特に杜下淳次先生、松本政雄先生には原稿の提出に関して大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。さらに、位相コントラスト法の研究に関して、いつも適切なアドバイスを頂いている島根大学の水野薫先生、在学中に昼夜を問わず研究に協力してくれた猪上兼三君、藤森茜さんには特に感謝の意を表したいと思います。

参考文献

- [1] A. Momose and J. Fukuda: Phase-contrast radiographs of nonstained rat cerebellar specimen, *Med. Phys.*, 22, 375-379, 1995.
- [2] 菊田惺志: X線回折・散乱技術(上), 東京大学出版

会, 63, 1992.

- [3] A. Snigirev, I. Snigireva, et al.: On the possibility of x-ray phase contrast microimaging by coherent high-energy synchrotron radiation, *Rev Sci Instrum*, 66, 5486-5492, 1995.
- [4] SW. Wilkins, TE. Gureyev, D. Gao, et al.: Phase-contrast imaging using polychromatic hard x-rays, *Nature*, 384, 335-338, 1996.
- [5] N. Yagi, Y. Suzuki, K. Umetani, et al.: Refraction-enhancement x-ray imaging of mouse lung using synchrotron radiation source, *Med Phys*, 26, 2190-2193, 1999.
- [6] 水野薫, 岡本博之, et al.: X線屈折コントラスト法による, TiおよびTiAl合金中の水素化物の可視化, *軽金属*, 55(12), 678-681, 2005.
- [7] U. Bonse and M. Hart: An x-ray interferometer, *Appl Phys Lett*, 6, 155-156, 1965.
- [8] P. Becker and U. Bonse: The skew-symmetric two-crystal X-ray interferometer, *J. Appl. Cryst*, 7, 593-598, 1974.
- [9] 米山明男, 武田徹, et al.: 結晶分離型X線干渉計を用いた位相コントラストX線イメージング, *放射光*, 15(3), 153-155, 2002.
- [10] J. Davis, D. Gao, TE. Gureyev, et al.: Phase-contrast imaging of weakly absorbing materials using hard x-rays, *Nature*, 373, 595-598, 1995.
- [11] D. Chapman, W. Thomlinson, R. E. Johnston, et al.: Diffraction enhanced x-ray imaging, *Phys Med Bio*, 42, 2015-2025, 1997.
- [12] K. Mizuno, H. Okamoto, et al.: Distribution of Hydride of Titanium Determined by X-ray Diffraction-Enhanced Imaging Method with Asymmetric Reflection Analyzer, *Mater. Res. Soc. Jpn.*, 34(2), 229-232, 2009.
- [13] 安藤正海, 杉山弘: X線暗視野法(DFI)の開発と臨床応用への道, *応用物理*, 74(4), 0446-0452, 2005.
- [14] D. Shimao, M. Ando, et al.: Refraction-Enhanced Tomosynthesis of a Finger Joint by X-Ray Dark-Field Imaging, *Jpn. J. Appl. Phys*, 46(25), 2007.
- [15] A. Momose: Demonstration of X-Ray Talbot Interferometry, *Jpn. J. Appl. Phys*, 42, L866-868, 2003.
- [16] A. Momose, et. al.: Grating-Based X-ray Phase Imaging Using Multiline X-ray Source. *Jpn. J. Appl. Phys*, 48, 076512-1-5, 2009.
- [17] 木戸一博, 米山努, et al.: タルボ・ロー干渉計によるX線画像技術, *KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT*, 8, 82-85, 2011.