

※スライドショーは、下記URLにてご覧いただけます。
http://www.sci.u-hyogo.ac.jp/material/x-ray_optics/kago/presentations/

イメージング Imaging

兵庫県立大学大学院物質理学研究科
籠島 靖
第1回放射光基礎技術講習会
2009年9月7日@東京大学



YK_U.Hyogo©2009



Outline

- イメージングとは？
- X線イメージングと放射光
- X線と物質との相互作用
- 各種イメージング法の原理と実際
 - 硬X線イメージング
 - 位相コントラスト（投影型、顕微鏡）
 - 蛍光X線（ μ -XRF）、マイクロ回折（ μ -XRD）など
 - 軟X線イメージング
 - 吸収イメージング（顕微鏡）： μ -MCD、 μ -XAFS
 - 光電子（ μ -XPS）など
 - トモグラフィーへの応用

イメージングとは？

➤プローブ（光、電子、X線等）と対象とする試料との相互作用について、その種類や強さを試料内の位置情報として視覚化・画像化する研究手法の総称

- 光（可視光） → 写真、光学顕微鏡
- 電子線 → 電子顕微鏡
- X線 → レントゲン写真 ← 医療、工業等
X線顕微鏡など ← **放射光**

- **軟X線**（エネルギーが**低い**＝波長が**長い**）
- **硬X線**（エネルギーが**高い**＝波長が**短い**）

3

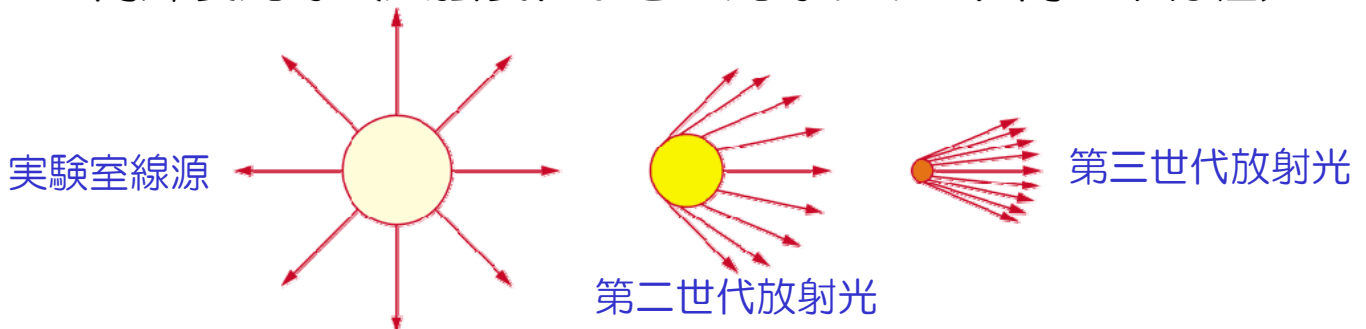
X線イメージングと放射光

➤X線プローブの特長

- 波長が短い → 顕微鏡において高い空間分解能の可能性
- 物質との多様な相互作用 → 様々な情報が取得可能
- 高い透過能 → 大気中での非破壊観察が可能（硬X線）

➤SPring-8に代表される第三世代放射光

- 高輝度光源（大強度、小さい光源サイズ、高い平行性）

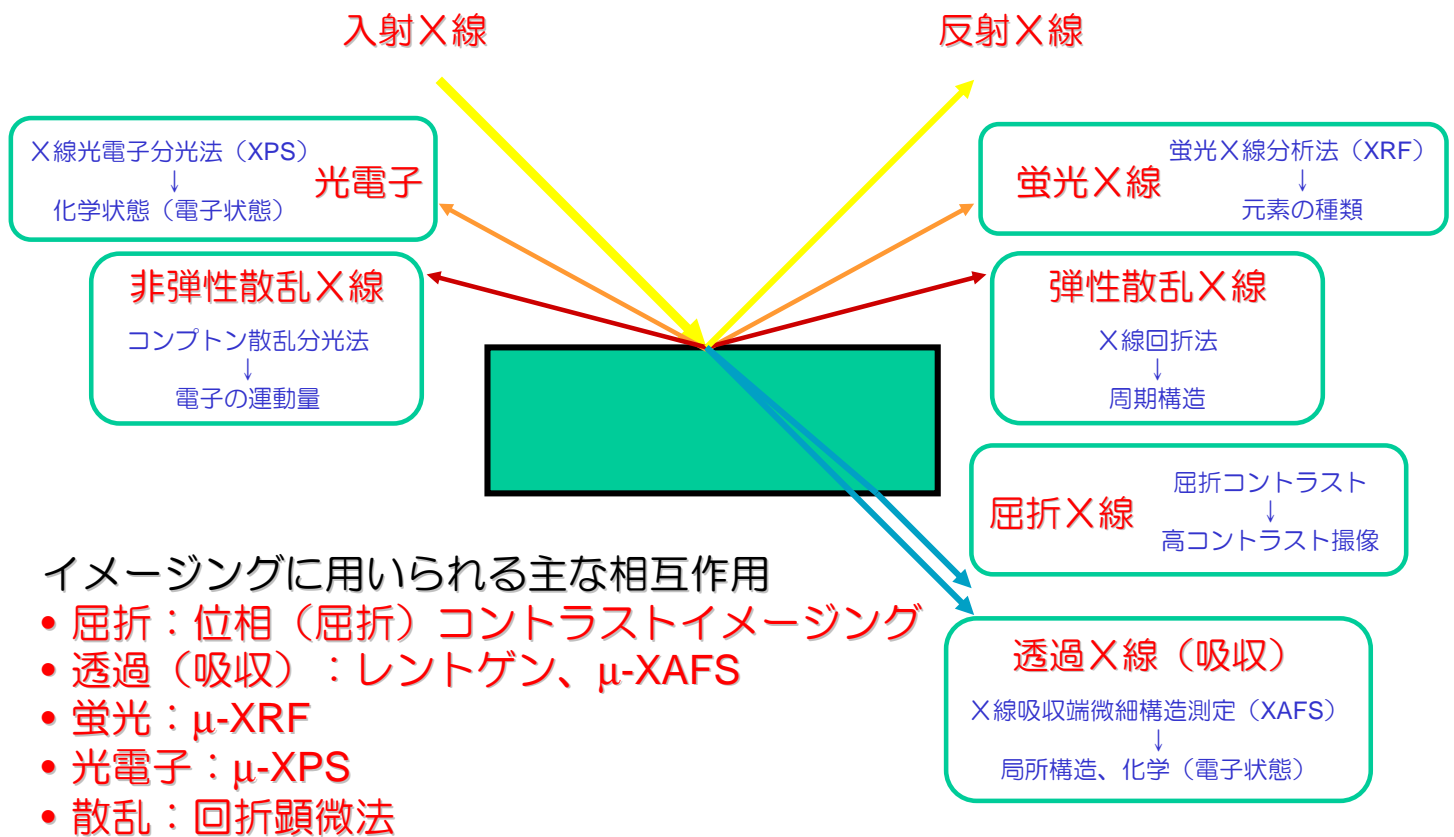


➤X線イメージング

- より高い分解能（空間、角度、時間、エネルギー etc.）

4

X線と物質との相互作用①



5

X線と物質との相互作用②

➤ 原子散乱因子 f と複素屈折率 n

➤ 原子散乱因子； $f = f_1 + if_2$

$$f(\mathbf{K}) = \int_{atom} \rho(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{r}, \quad \rho(\mathbf{r}) = |\psi(\mathbf{r})|^2$$

$\rho(\mathbf{r})$ ：電子密度分布、 $\psi(\mathbf{r})$ ：波動関数

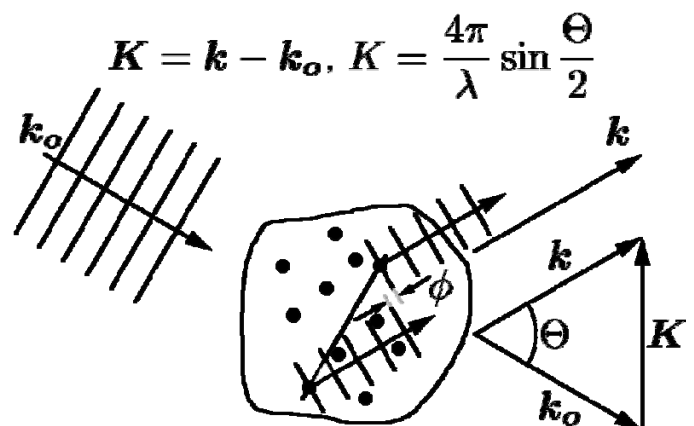
➤ 複素屈折率； $n = 1 - \delta + i\beta$

$$\delta = \frac{Nr_0\lambda^2 f_1}{2\pi}, \quad \beta = \frac{Nr_0\lambda^2 f_2}{2\pi}$$

$$N = \frac{\rho N_A}{A_w}, \quad r_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 mc^2}$$

N_A ：アボガドロ数

$r_0 = 2.8 \times 10^{-13}$ cm：古典電子半径



6

X線と物質との相互作用③

➤ 複素屈折率 n の物理的イメージ

$$\phi = \frac{2\pi\delta}{\lambda}t : \text{位相シフト}$$

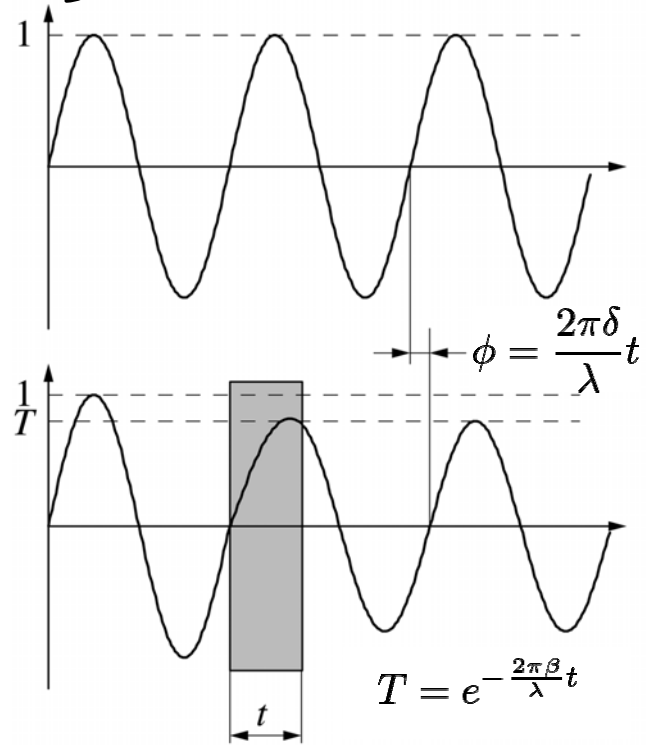
⇒ 位相コントラスト

$$T = e^{-\frac{2\pi\beta}{\lambda}t} : \text{振幅の減衰}$$

$$I = I_0 e^{-\frac{4\pi\beta}{\lambda}t}, \frac{I}{I_0} = T^2, \frac{4\pi\beta}{\lambda} = \mu_l$$

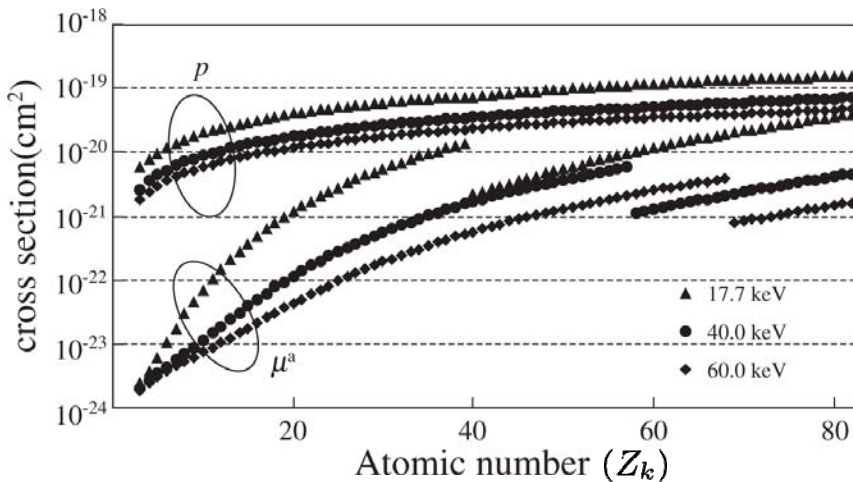
⇒ 吸収コントラスト
(レントゲン写真)
(強度 = |振幅|^2)

μ_l : 線吸収係数



なぜ位相コントラストか？

➤ 相互作用の大きさ : δ (位相) \gg β (吸収) 特に軽元素



$$-\ln T(x, y) = \int \mu_l(x, y, z) dz$$

$$= \int \sum_k N_k(x, y, z) \mu_k^a dz,$$

吸収

$$\Phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int \delta(x, y, z) dz$$

$$= \int \sum_k N_k(x, y, z) p_k dz,$$

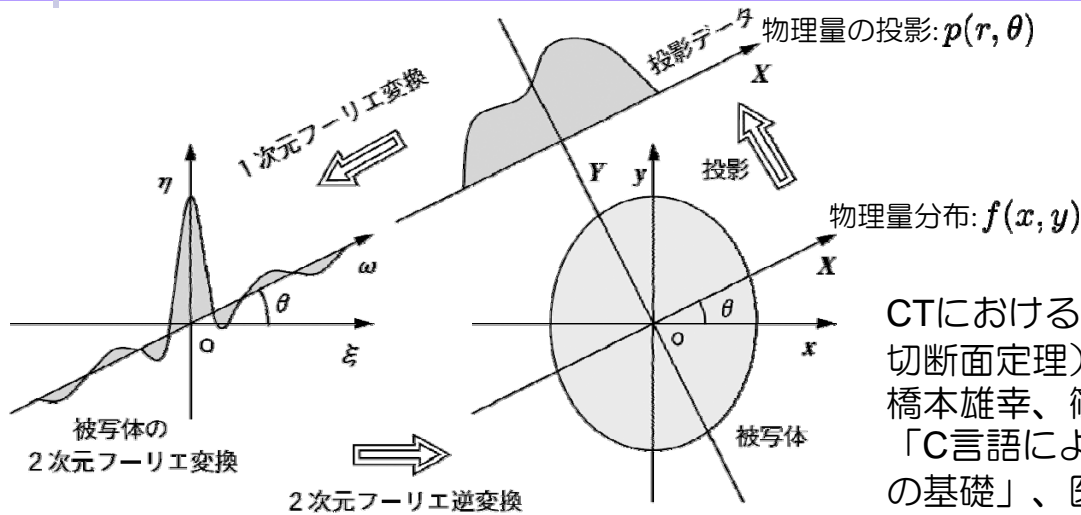
位相

$p_k \equiv r_e \lambda (Z_k + f'_k) N_k$ 原子密度

	δ	β	δ/β
ポリエチレン	3.41×10^{-6}	4.32×10^{-9}	790
水	3.62×10^{-6}	1.25×10^{-8}	290
ガラス	8.20×10^{-6}	1.07×10^{-7}	76.3
鉄	2.27×10^{-5}	2.96×10^{-6}	7.65

吸収 (μ^a) と位相シフト (p) による相互作用の断面積の比較
A. Momose: JJAP 44 (2005) 6355.
8 keVのX線に対する δ と β の値とその比率

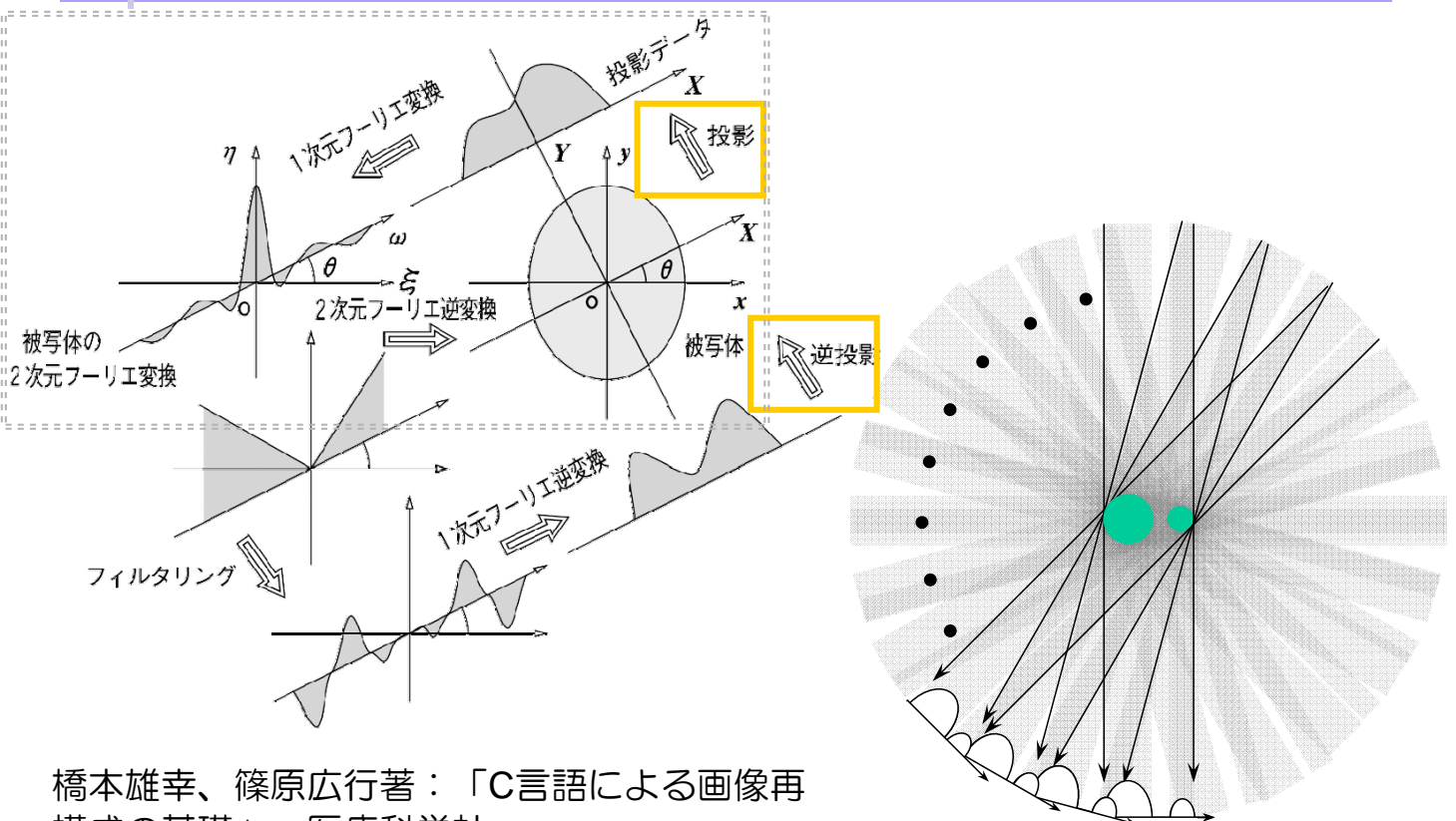
トモグラフィー (CT) の原理



CTにおける解析解 (投影
切断面定理)
橋本雄幸、篠原広行著：
「C言語による画像再構成
の基礎」、医療科学社

	物理量の分布	物理量の投影
吸収コントラストCT	$f(x, y) = \mu(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} \beta(x, y)$ 吸収係数	$p(r, \theta) = \int \mu(x, y) ds = -\ln \frac{I(r, \theta)}{I_0(r, \theta)}$ 透過率
位相コントラストCT	$f(x, y) = \delta(x, y)$ 屈折率	$p(r, \theta) = \frac{2\pi}{\lambda} \int \delta(x, y) ds = \Phi(r, \theta)$ 位相シフト

FBP (Filtered Back-Projection) 法



橋本雄幸、篠原広行著：「C言語による画像再
構成の基礎」、医療科学社

位相コントラストイメージング 手法と特徴

	手法	コントラスト	位相計測	三次元観察	空間分解能
投影型X線イメージング	結晶を用いた干渉計	$A\cos\phi$	◎	◎	数 μm ~ 数10 μm
	プリズムを用いた干渉計	$\partial\phi/\partial x$	◎	○	
	回折格子を用いた干渉計	$\partial\phi/\partial x$	◎	◎	
	屈折角を検出する手法	$\partial\phi/\partial x$	◎	◎	
	光の伝播に基づく手法	$\nabla^2\phi$	◎	◎	
顕微鏡的手法	Zernikeの位相差顕微鏡	ϕ^*	△	△	~50 nm
	微分干渉顕微鏡	$\partial\phi/\partial x^*$	△	△	~200 nm
	X線ホログラフィ	ホログラム	◎	○	~50 nm
	走査型顕微鏡	$\partial\phi/\partial x$	◎	○	~100 nm
	回折顕微法	回折強度	◎	◎	~8 nm
	顕微干渉計	ϕ	◎	◎	~60 nm

*弱吸収弱位相物体($A\approx 1$ 、 $\phi\ll 1$)*弱吸収物体($A\approx 1$)

◎：実現されている

○：可能

@2007年3月時点

11

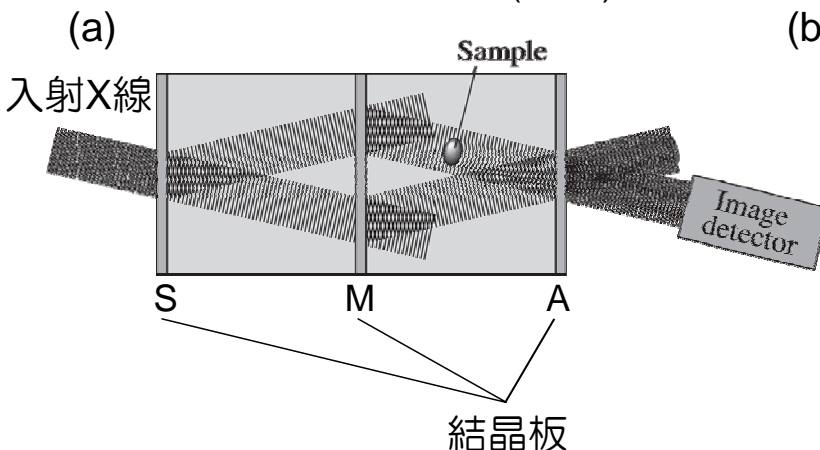
結晶を用いた干渉計

➤ Bonse-Hart型干渉計

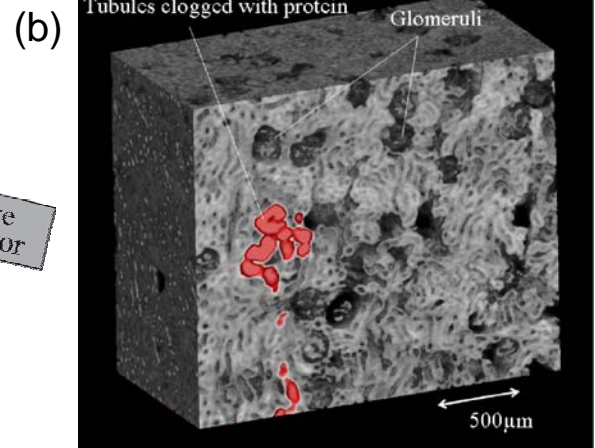
- U. Bonse and M. Hart: APL 6 (1965) 155, APL 7 (1965) 99.

➤ 位相トモグラフィーへ展開 (Momoseら)

- A. Momose: NIM A352 (1995) 622.



(a) Bonse-Hart (LLL)型干渉計の模式図
(A. Momose: JJAP 44 (2005) 6355.)



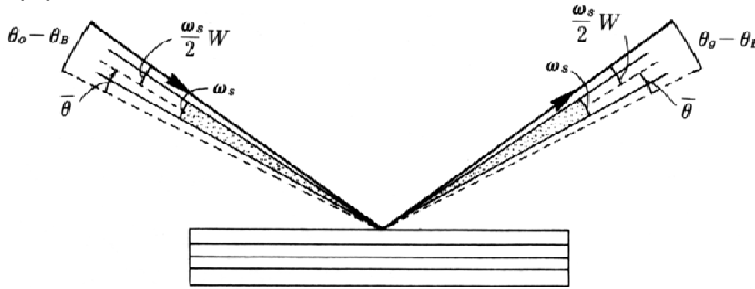
(b) ラット肝臓組織の三次元像
(A. Momose: Opt. Express 11 (2003) 2303.)

12

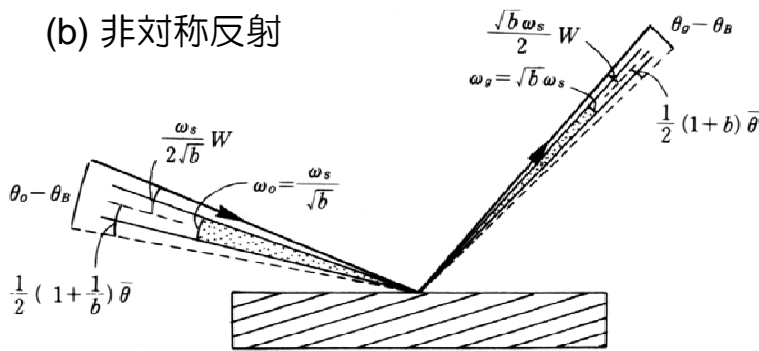
動力学的回折理論 (完全結晶)

➤ 完全結晶 ⇒ 多重散乱を考慮した動力学的回折理論

(a) 対称反射



(b) 非対称反射



- 全反射の角度幅 ω_s : 数秒~10数秒
- 屈折によるブラッグ角 θ_B からのズレ $\bar{\theta}$

$$\omega_s = \frac{2|P||\chi_g|}{\sin 2\theta_B}, \quad \bar{\theta} = \frac{|\chi_o|}{\sin 2\theta_B}$$
- 非対称因子 $b = \frac{\sin(\theta_B - \alpha)}{\sin(\theta_B + \alpha)} \leq 1$
- 入射線角度幅 ω_o と回折線角度幅 ω_g

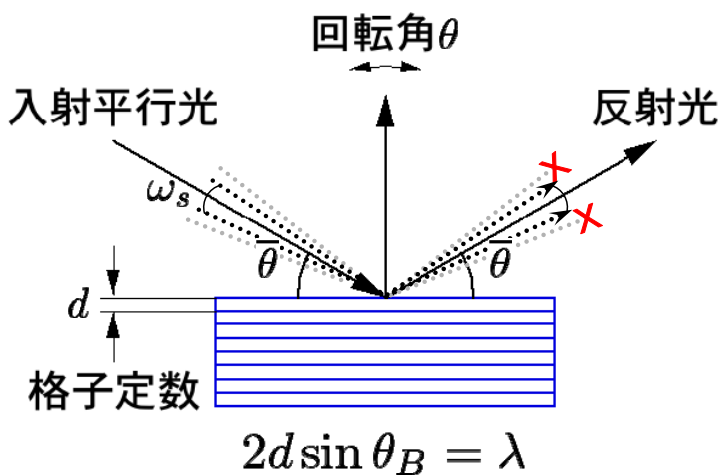
$$\omega_o = \frac{\omega_s}{\sqrt{b}}, \quad \omega_g = \sqrt{b}\omega_s$$
- 角度幅とビームサイズの関係

$$\omega_g = b\omega_o, \quad l_g = \frac{l_o}{b} \Rightarrow \omega_o l_o = \omega_g l_g$$

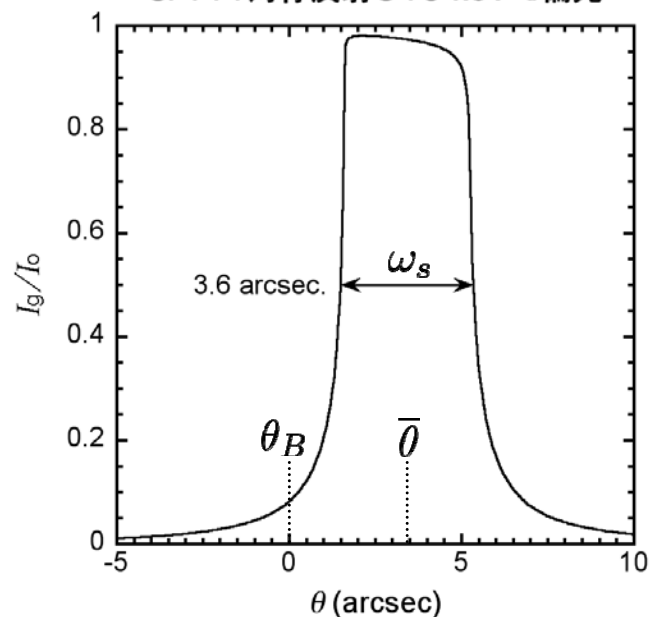
菊田惺志著：「X線回折・散乱技術 上」
東京大学出版会

ロッキングカーブ (回折強度曲線)

➤ 完全結晶のロッキングカーブ (回折強度曲線)



Si 111対称反射@15 keV σ 偏光

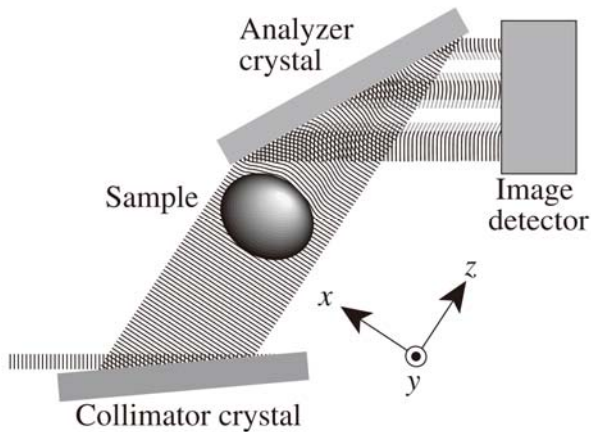


➤ 角度幅 ω_s : 数秒 ⇒ 微小角範囲の入射X線のみを反射 (アナライザ結晶)

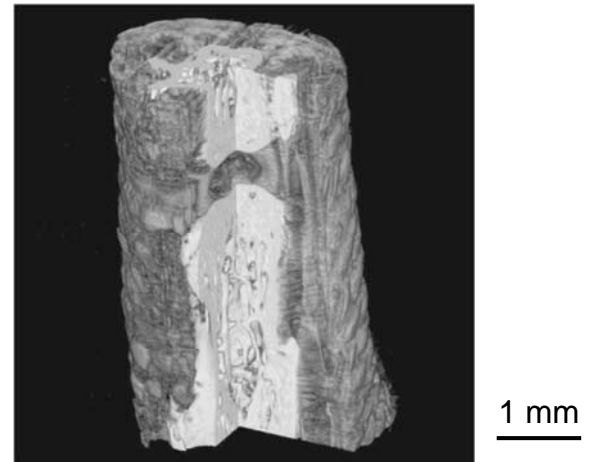
屈折角を検出する手法

➤ **DEI** (Diffraction Enhanced Imaging) は、完全結晶(アナライザ結晶)による回折を用いて、屈折したX線を選別する方法

- T. J. Davis et al.: Nature **373** (1995) 595.
- D. Chapman et al.: Phys. Med. Biol. **42** (1997) 2015.



典型的なDEIの実験配置
A. Momose: JJAP **44** (2005) 6355.

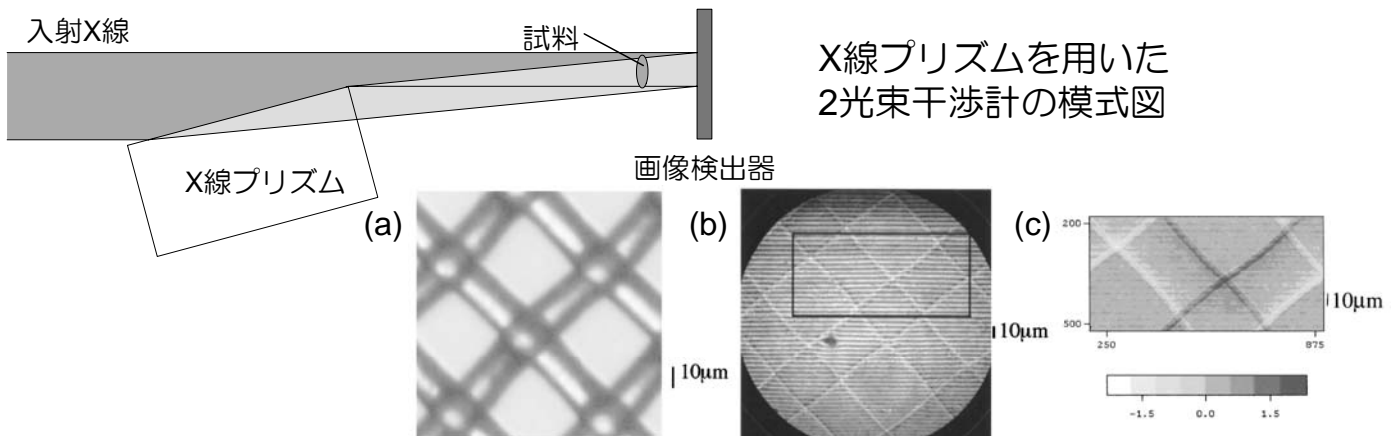


DEIによる位相CTで計測したマウスの尾
I. Koyama et al.: JJAP **44** (2005) 8219.

15

プリズムを用いた干渉計

➤ プリズムでX線ビームの一部を偏向 ⇒ プリズムを通らずに直進するX線と重なり合い干渉領域を形成 (Y. Suzuki: JJAP **41** (2002) L1019.)。波面分割型干渉計であり、光源には高い空間的コヒーレンスが必要。プリズムによる偏向角は数十 μrad 程度なので、十分な干渉領域を得るためにはプリズムと画像検出器を数m離す必要がある。



ナイロンメッシュ(ピッチ93 μm)の観察例・ (a)光学顕微鏡写真、(b)干渉像、(c)黒線部の試料による微分位相像。
Y. Kohmura et al: JAP **93** (2003) 2283.

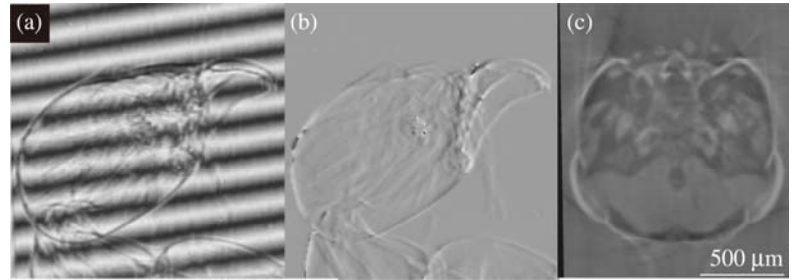
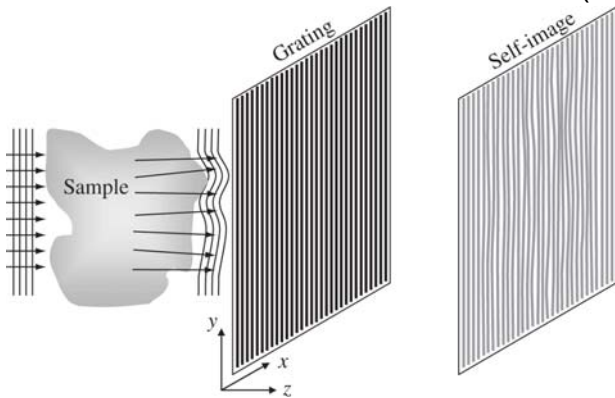
16

回折格子を用いた干渉計

➤ **タルボ効果**：空間的に可干渉な照明下にある回折格子があると、回折格子から特定の距離において、回折格子と同じ周期の強度パターン(自己像)が形成される効果 (H. F. Talbot: Philos. Mag. **9** (1836) 401.)

➤ **位相計測・トモグラフィーへ展開** (Momoseら)

• A. Momose et al.: JJAP **42** (2003) L866.



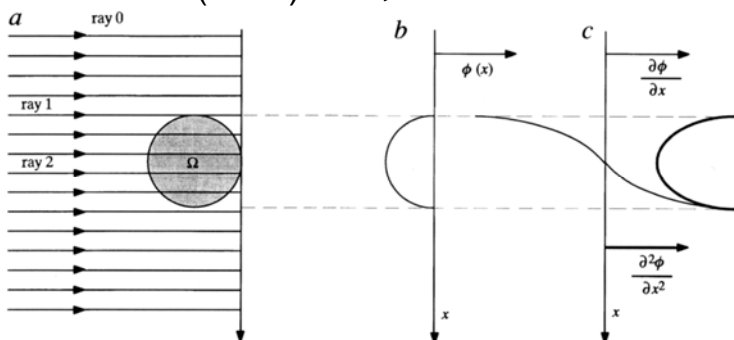
試料の屈折による自己像の変形。
d < 空間コヒーレンスが必要。

蟻の位相イメージング。(a)モアレ図形、(b)微分位相像、(c)位相CT断面像

A. Momose: JJAP **44** (2005) 6355, **45** (2006) 5254.

光の伝播に基づく手法①

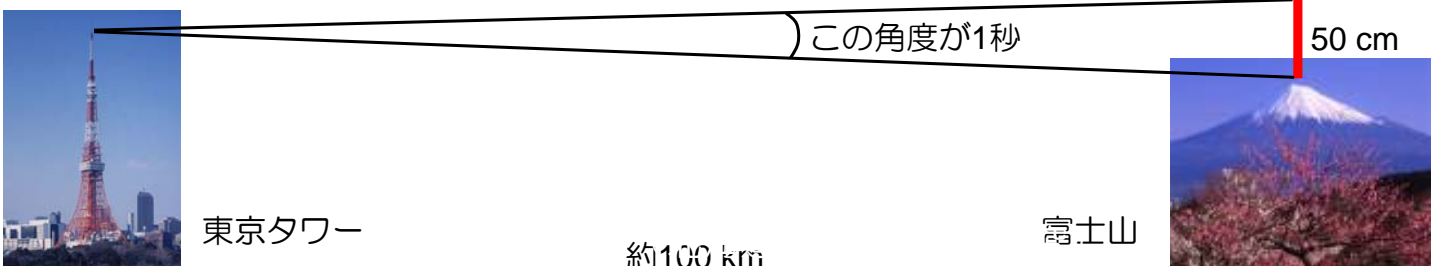
➤ **屈折コントラストイメージング法** (S. W. Wilkins et al: Nature **384** (1996) 335.)



Φ は試料による位相シフト
 $\Delta\alpha \approx \frac{1}{k} |\nabla_{x,y} \Phi(x, y, z)|$
 $I(x, y, z) \approx 1 + \frac{\lambda z}{2\pi} \nabla_{x,y}^2 \Phi(x, y, 0)$
 $\Delta\alpha$ は秒のオーダー

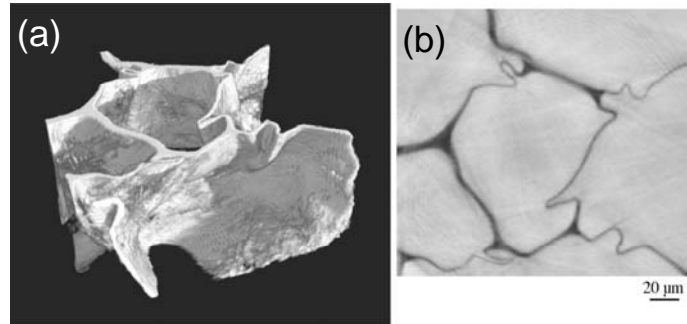
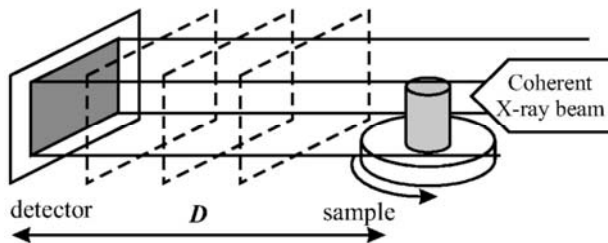
S. W. Wilkins et al: Nature **384** (1996) 335.

角度の単位：1度=60分、1分=60秒、1度=3600秒、∴1秒=3600分の1度=0.00028度



光の伝播に基づく手法②

- コヒーレント照明下で特定の距離だけ離れて観察
 ⇒ フレネル回折やフラウンホーファー回折を観測 ⇒ 被写体と検出器の距離を離すだけで構造の輪郭が強調された像を得ることが可能。波面の変形の度合いを定式化した強度伝播方程式(TIE)を解くことによって位相を求める方法有り



光の伝播に基づく方法の実験配置。フレネル回折の領域内で被写体と画像検出器の距離を変えながら複数枚の画像を取ることでTIEを解くことができる。

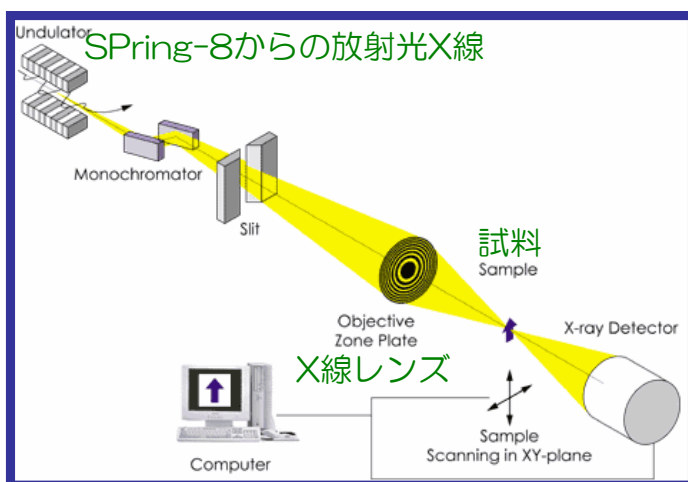
発泡スチロールの位相CT像。(a)三次元レンダリング像、(b)位相CT断面像

P. Cloetens et al.: APL 75 (1999) 2912.

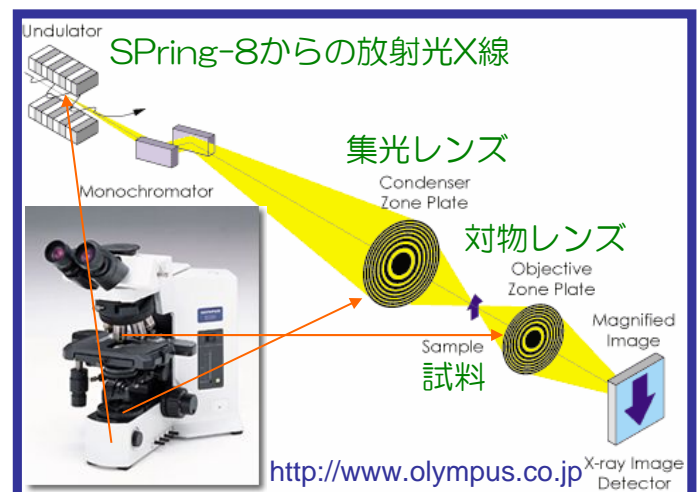
19

X線顕微鏡

走査型X線顕微鏡



結像型X線顕微鏡



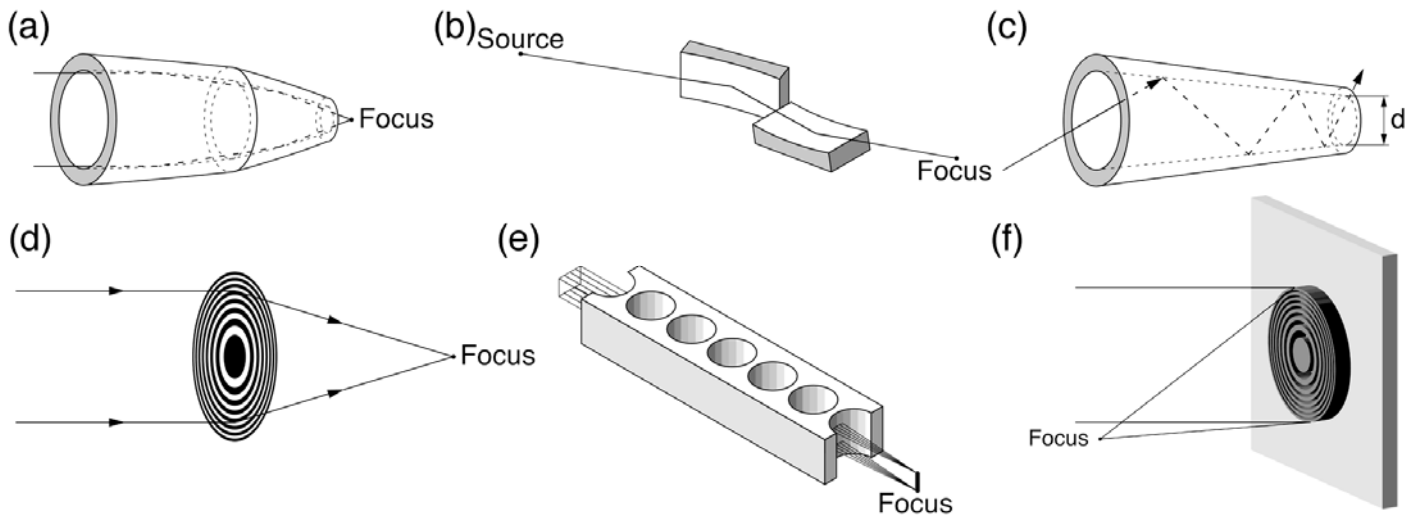
- 取得情報がデジタル (定量分析◎)
- 試料からの様々な情報が一度に得られる (多様なスペクトロスコピー)
- 試料の被曝線量を最小限に抑えられる
- 露光時間：長

- 直接の拡大像が得られる
- 実時間観察 (動的観察) が可能
- ゼルニケの位相差顕微鏡が可能
- 露光時間：短

20

X線光学素子

▶ 様々な光学素子が開発され利用されている。

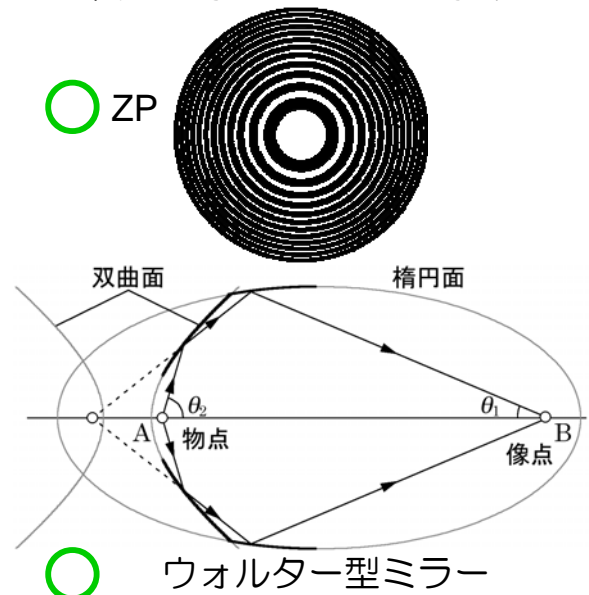
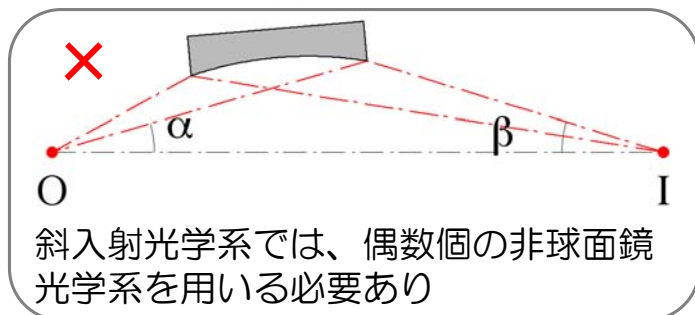
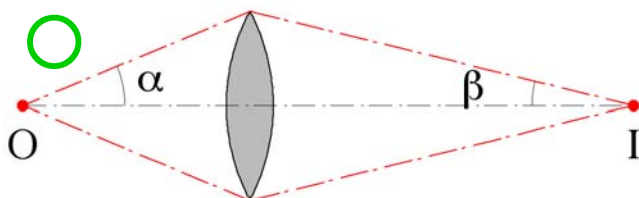


(a) Wolter mirror, (b) K-B mirror, (c) Capillary,
 (d) Fresnel zone plate, (e) Refractive lens, (f) Bragg-Fresnel lens
 現在, Fresnel zone plateが最も利用され、高い性能を有している。

集光・結像光学系の条件

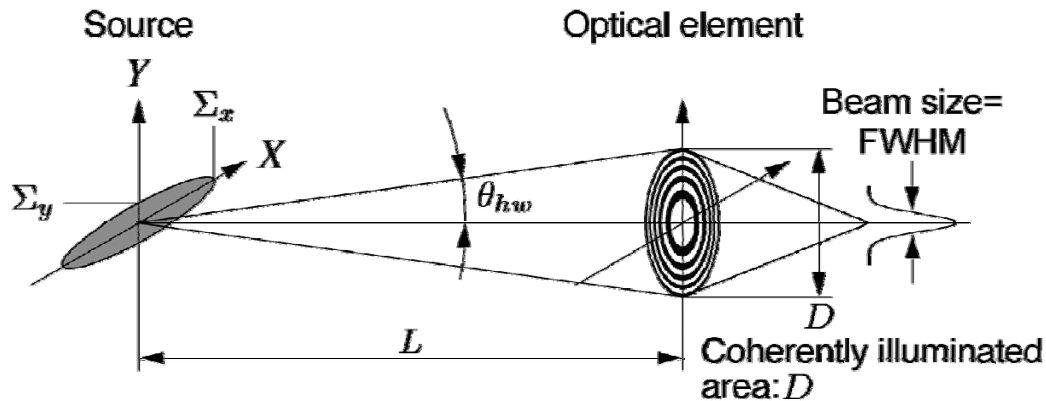
▶ 良質な集光 or 結像光学系に必要な条件

- (1) 物点から像点までの光路差の絶対値： $|\Delta l| \leq \lambda/4$
- (2) アッベの正弦条件： $\sin \alpha / \sin \beta = \text{const.}$ を満足すること
 (近似的に集光系あるいは結像系の倍率。この条件が満足されない光学系では、光軸から離れた物点の像はゆがむ。)



回折限界集光の条件

➤ 回折限界集光 ⇒ 光学素子をコヒーレントに照明



$$4\pi^2 \Sigma_x \Sigma_y \theta_{hw}^2 \leq \lambda^2$$

$$\Rightarrow \theta_{hw} \leq \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{\Sigma_x \Sigma_y}}$$

$$\Rightarrow D \leq 2\theta_{hw} \cdot L$$



BL24XU@10 keV

$$\Sigma_x = 297.9 \mu m, \Sigma_y = 6.704 \mu m$$

$$\Rightarrow \theta_{hw} \leq 0.442 \mu rad$$

$$\Rightarrow D \leq 2\theta_{hw} \cdot L (= 70 m) = 62 \mu m$$

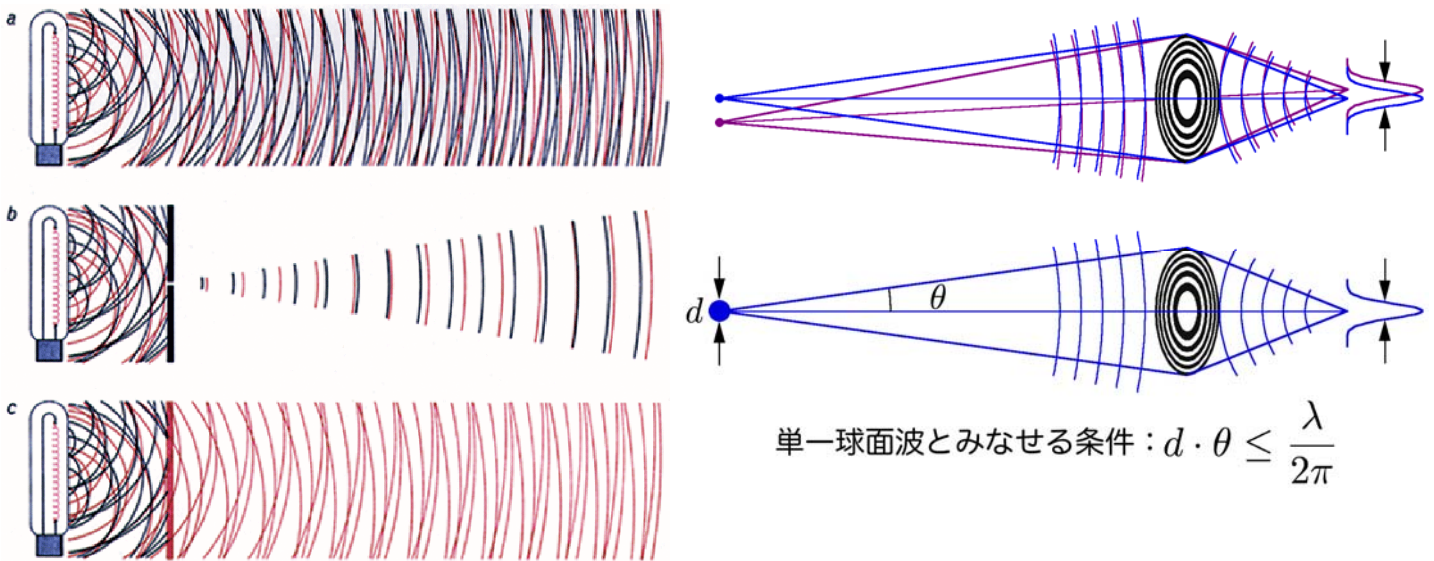
$$F_c = Br \cdot \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 = \frac{F_t \lambda^2}{(4\pi)^2 \Sigma_x \Sigma_y \Sigma_{x'} \Sigma_{y'}}$$



Coherent Flux ~ 0.08%
⇒ 99.92%は不要な光子

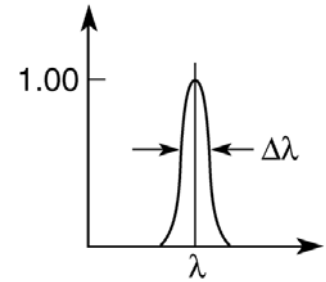
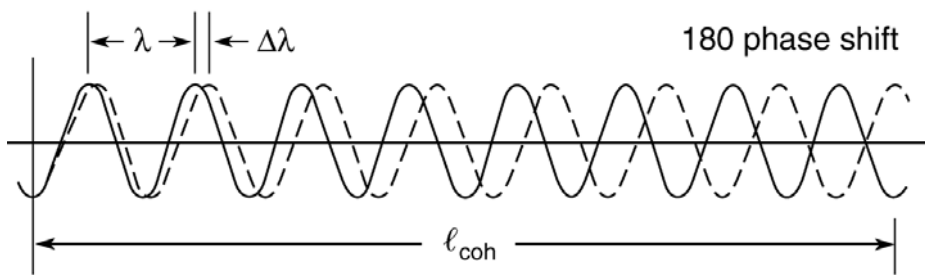
時間・空間フィルタリング

➤ コヒーレント照明のための時間・空間フィルタリング



D. Attwood: "Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications" (Cambridge University Press, 1999), p.309.

スペクトル幅と時間コヒーレンス



Define a coherence length ℓ_{coh} as the distance of propagation over which radiation of spectral width $\Delta\lambda$ becomes 180° out of phase. For a wavelength λ propagating through N cycles

$$\ell_{\text{coh}} = N\lambda$$

and for a wavelength $\lambda + \Delta\lambda$, a half cycle less ($N - \frac{1}{2}$)

$$\ell_{\text{coh}} = (N - \frac{1}{2})(\lambda + \Delta\lambda)$$

Equating the two

$$N = \lambda / 2\Delta\lambda$$

so that

$$\ell_{\text{coh}} = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda}$$

D. Attwood: "Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications" (Cambridge University Press, 1999) , p.303.

位相コントラストイメージング 手法と特徴

	手法	コントラスト	位相計測	三次元観察	空間分解能
投影型X線イメージング	結晶を用いた干渉計	$A\cos\phi$	◎	◎	数 μm ~ 数10 μm
	プリズムを用いた干渉計	$\partial\phi/\partial x$	◎	○	
	回折格子を用いた干渉計	$\partial\phi/\partial x$	◎	◎	
	屈折角を検出する手法	$\partial\phi/\partial x$	◎	◎	
	光の伝播に基づく手法	$\nabla^2\phi$	◎	◎	
顕微鏡的手法	Zernikeの位相差顕微鏡	ϕ^*	△	△	~50 nm
	微分干渉顕微鏡	$\partial\phi/\partial x^*$	△	△	~200 nm
	X線ホログラフィ	ホログラム	◎	○	~50 nm
	走査型顕微鏡	$\partial\phi/\partial x$	◎	○	~100 nm
	回折顕微法	回折強度	◎	◎	~8 nm
	顕微干渉計	ϕ	◎	◎	~60 nm

*弱吸収弱位相物体 ($A \approx 1$, $\phi \ll 1$)

*弱吸収物体 ($A \approx 1$)

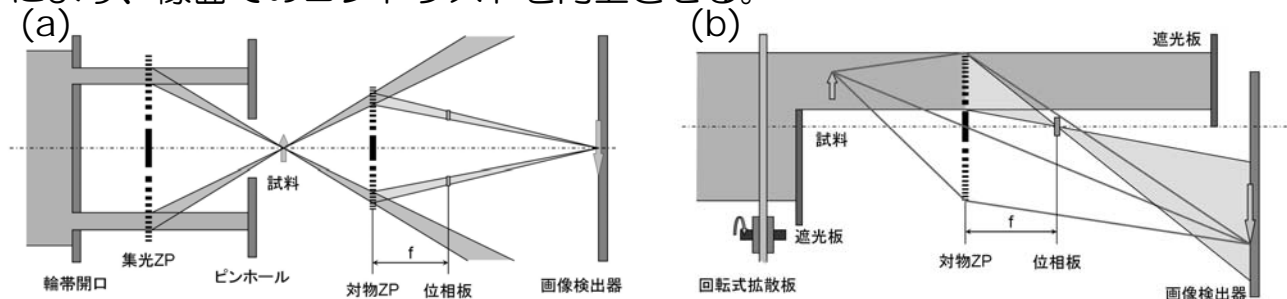
◎ : 実現されている

○ : 可能

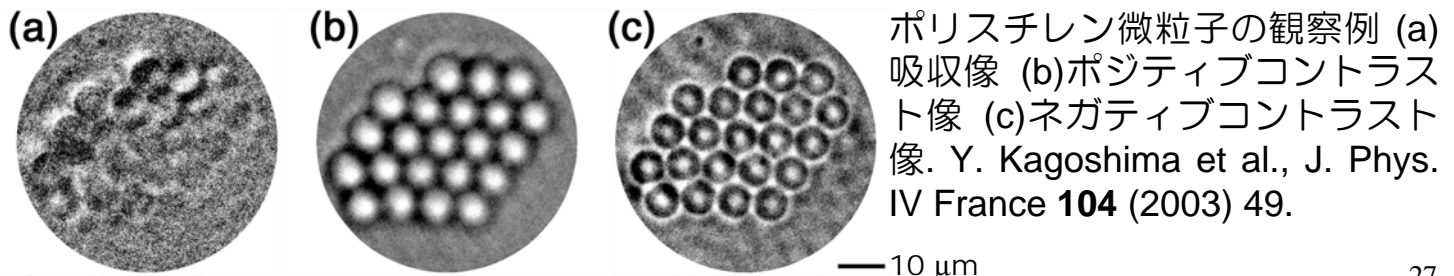
@2007年3月時点

Zernikeの位相差顕微鏡

- 光学の原理 ⇒ 結像レンズの後側焦平面には物体のフーリエスペクトル
- Zernikeの位相差顕微鏡の原理 (F. Zernike: Z. Tech. Phys. **16** (1935) 454.)
⇒ 後側焦平面に位相板を置き、0次のスペクトルにのみ位相変調を与えることにより、像面でのコントラストを向上させる。



Zernikeの位相差顕微鏡の模式図。(a) 臨界照明系 (b) 準平行照明系

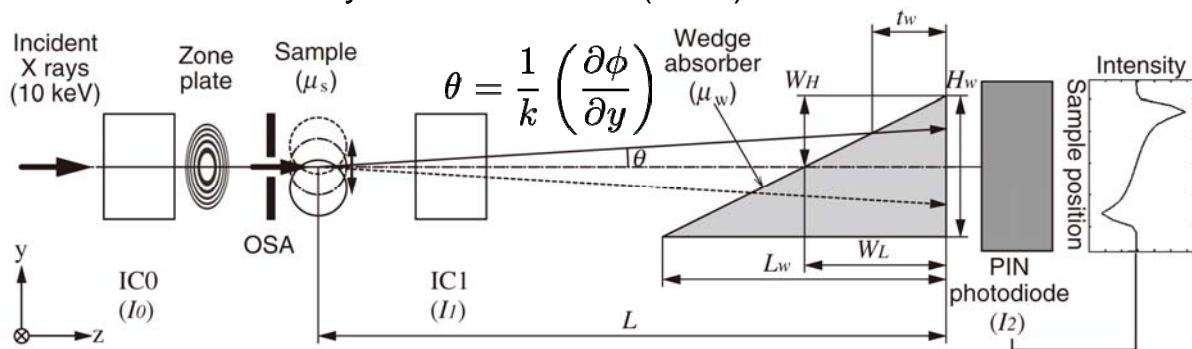


ポリスチレン微粒子の観察例 (a) 吸収像 (b) ポジティブコントラスト像 (c) ネガティブコントラスト像. Y. Kagoshima et al., J. Phys. IV France **104** (2003) 49.

27

走査型顕微鏡

- 集光ビームを焦点深度内で試料に照射
⇒ 試料は集光ビームサイズの平行光束に照明される → 入射光は屈折
⇒ 屈折の方向と角度を求める → 試料による位相勾配
⇒ 全走査点に対して位相勾配を求め経路積算 → 試料の相対位相分布が求まる。
- 位相勾配の検出方法
 - 分割型検出器 (M. Feser et al.: Proc. SPIE **4506** (2001) 146. [軟X線])
 - CCDカメラ (H. N. Chapman et al.: RSI **66** (1995) 1332. [軟X線], H. Takano et al.: J. Phys. IV France **104** (2003) 41. [硬X線])



楔形吸収体を用いた位相イメージングの光学配置

Y. Kagoshima et al.: JJAP **43** (2004) L1449.

28

回折顕微法

➤ X線結晶構造解析法を空間的周期構造を持たない試料に拡張した新しい手法 (J. Miao et al: Nature **400** (1999) 342.)

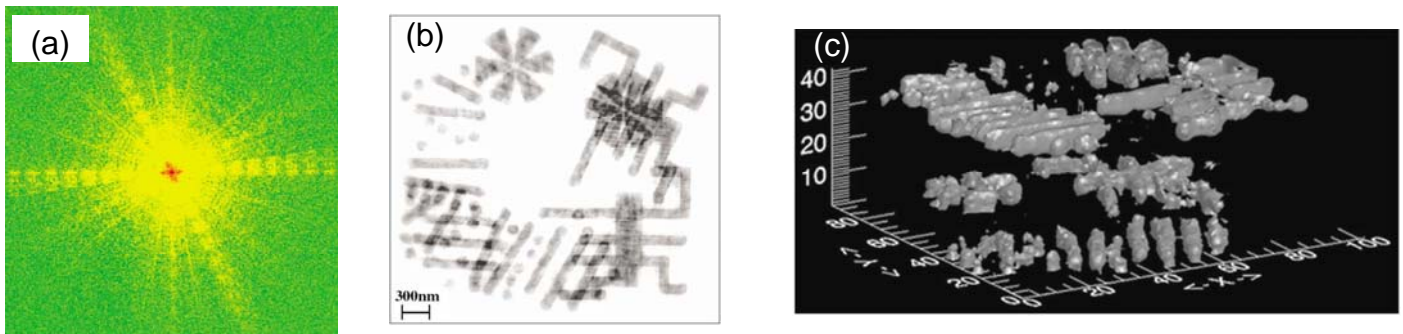
➤ 位相回復

⇒ 試料領域全体がコヒーレントに照明

⇒ 回折強度パターンを逆空間で十分細かく測定 (オーバーサンプリング)

⇒ 反復的位相回復法で再構成し二次元の投影像を取得

※詳しい解説：西野吉則、石川哲也：放射光 **19**, No.1 (2006) 3.



Si₃N₄膜の両側に形成されたNiテストパターンの観察例。(a)回折パターン、(b)反復的位相回復法による再構成像、(c)三次元レンダリング像。J. Miao et al.: PRL **89** (2002) 088303.

29

顕微干涉計 (ZP光学系)

➤ 結像光学系と干涉計の組み合わせ

⇒ 高空間分解能の位相計測 (T. Koyama et al.: JJAP **43** (2004) L421)

⇒ CTを適用して、3次元位相計測 (T. Koyama et al.: JJAP **45** (2006) L1159.)

ポリエステル・ナイロン複合繊維

ナイロン

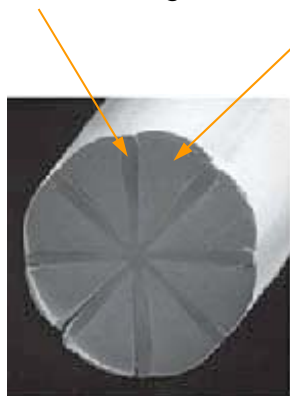
ポリエステル

検出器倍率：×10、露光時間：30 s/image

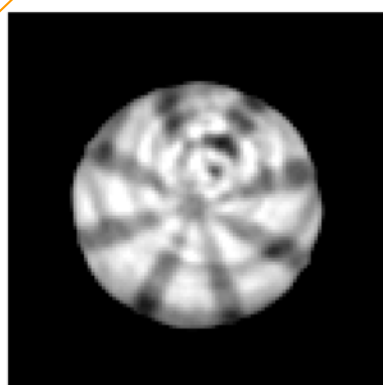
密度：1.12 g/cm³

密度：1.38 g/cm³

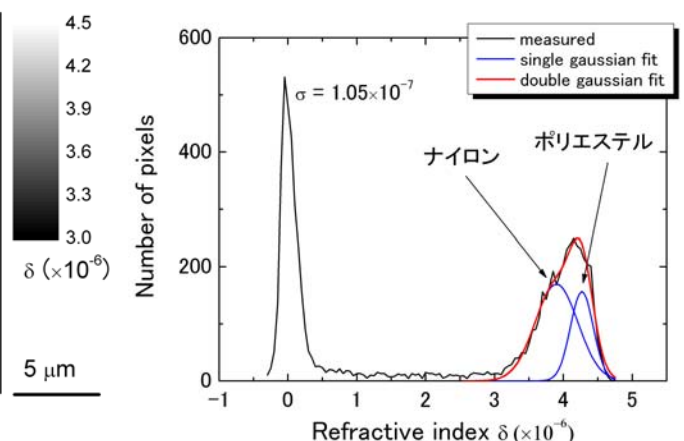
縞走査ステップ：4、投影数：180 (1° 間隔)



電子顕微鏡写真



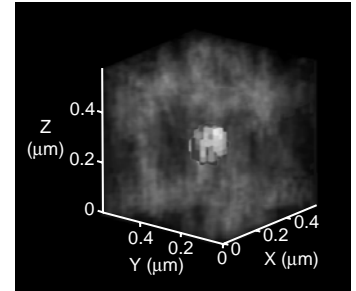
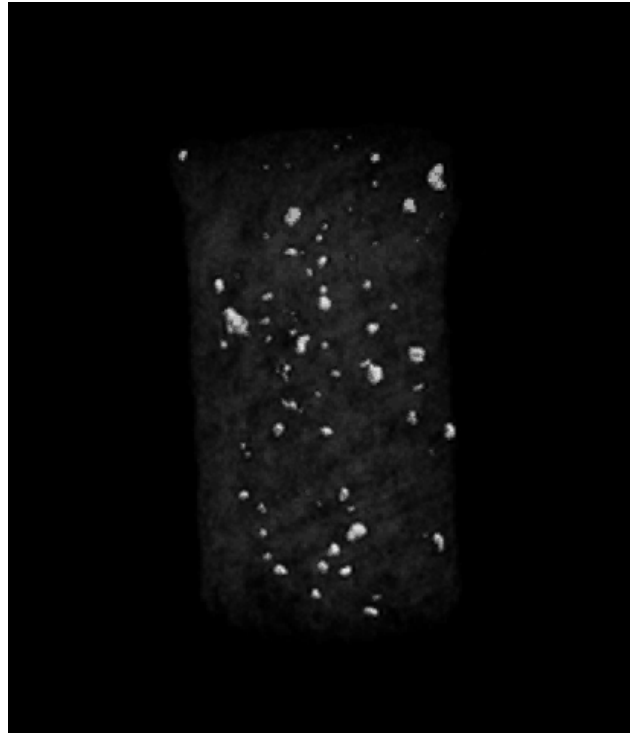
位相CT断面像



30

顕微位相CT

- ポリマー繊維（直径：7.5 μm ）（酸化チタン微粒子が添加）



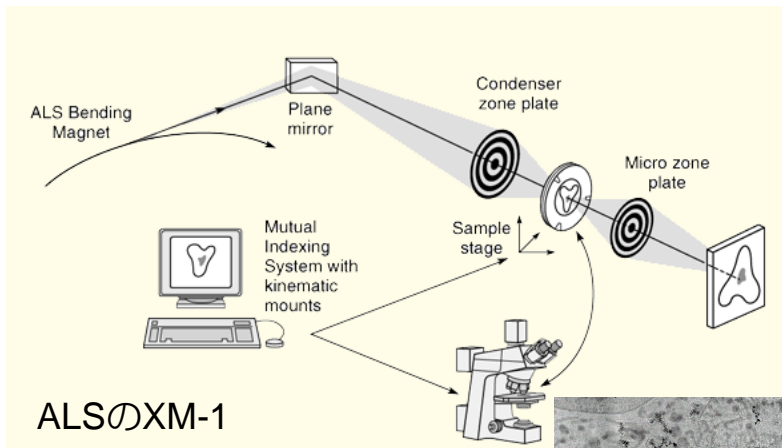
31

位相コントラスト以外の顕微法

- 結像型軟X線顕微鏡
- MCD（磁気円二色性）顕微鏡
- X線ホログラフィ（MCDコントラスト）
- μ -XAFS
- μ -XRF
- μ -XPS

32

結像型軟X線顕微鏡



➤吸収コントラスト
(軟X線なら吸収大)

$$I = I_0 e^{-\mu_l t}$$

μ_l : 線吸収係数

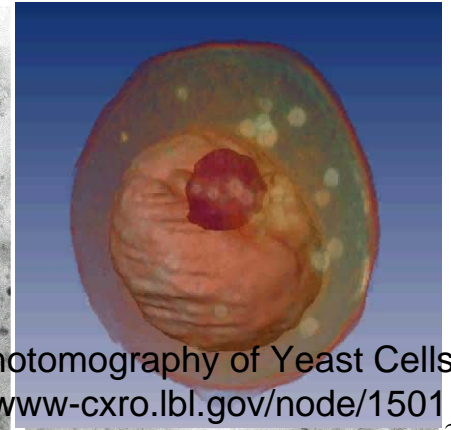
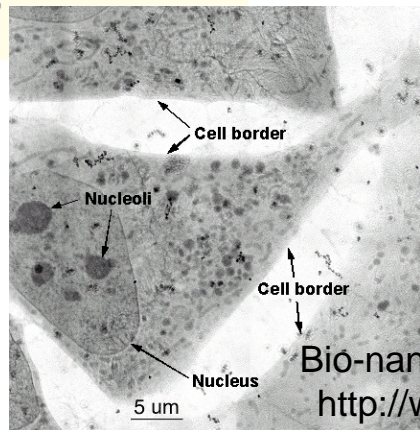
➤トモグラフィー
 μ_l の3次元分布

ALSのXM-1

3T3繊維芽細胞

ウェットな比較的厚みのある試料をそのまま凍結させて観察
($\lambda=2.4$ nm)

Center for X-Ray Optics,
D. Attwood 氏提供



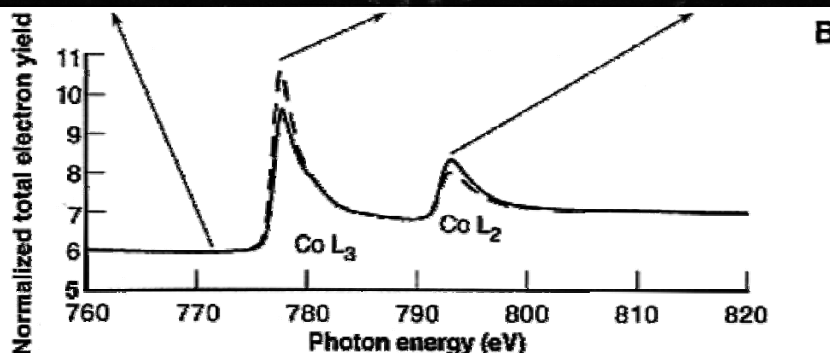
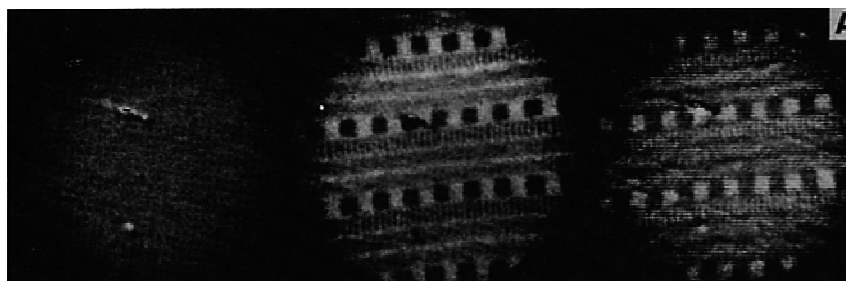
Bio-nanotomography of Yeast Cells
<http://www-cxro.lbl.gov/node/1501>

Magnetic Circular Dichroism (磁気円二色性) 顕微鏡

➤MCD顕微鏡 (J. Stöhr et al.: Science **259** (1993) 658.)

⇒ MCD: 右回り円偏光と左回り円偏光との吸収の差

⇒ 全光電子収量や吸収を画像化 (PEEM、ZPマイクロビーム、結像型顕微鏡)



J. Stöhr et al.: Science **259** (1993) 658.

X線ホログラフィ

➤ Gaborによるホログラフィ (D. Gabor: Nature **161** (1948) 777.)

⇒ X線にも応用可 (S. Kikuta et al.: Opt. Commun. **5** (1972) 86.が初)

• Gabor型、フーリエ変換型など

➤ Magnetic spectro-holography (S. Eisebitt et al.)

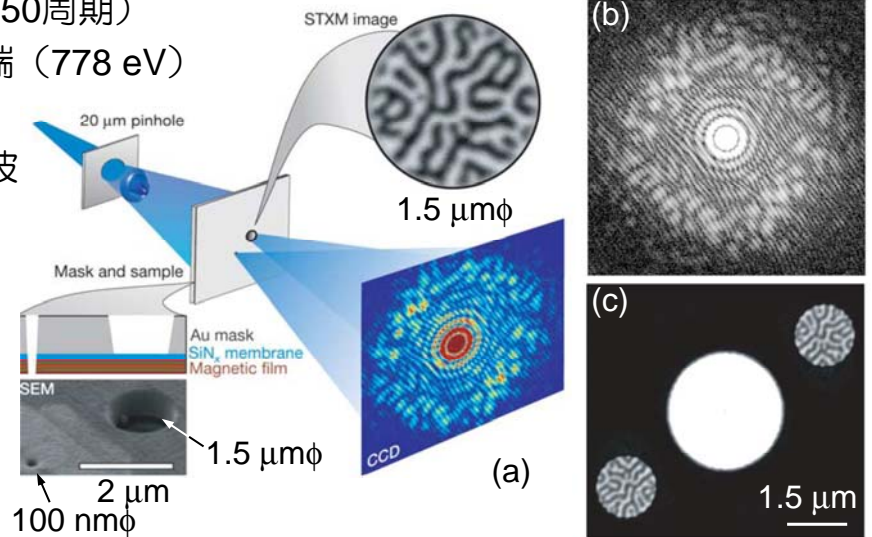
• 磁気フィルム (Co(4 Å)/Pt(7 Å)50周期)

• X線のエネルギー: Co L₃吸収端 (778 eV)

• 視野を決める1.5 μmの孔

• 点光源となる100 nm孔→参照波

(a) Magnetic spectro-holographyの光学系の模式図、(b)ホログラム、(c)ホログラムからの再構成像 (S. Eisebitt et al.: Nature **432** (2004) 885.)



35

μ-XAFS

➤ XAFSによる化学状態識別顕微鏡 (H. Ade et al.: Science **258** (1992) 972.)

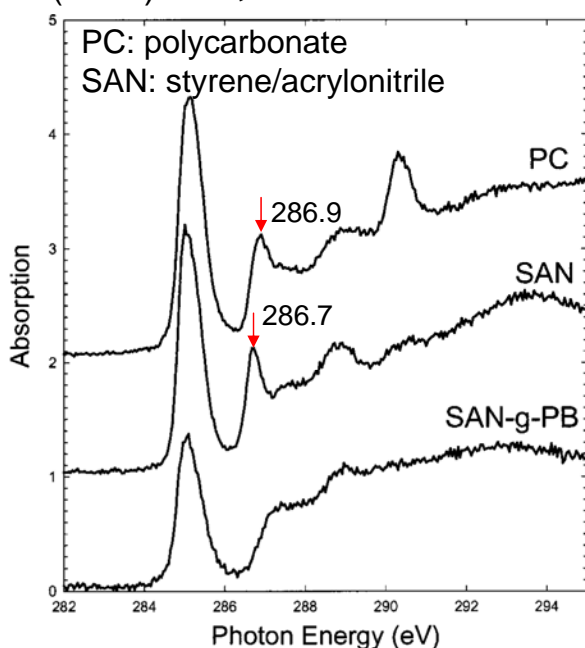


Figure 1. Carbon K-edge NEXAFS spectra of PC, SAN, and SAN-g-PB.

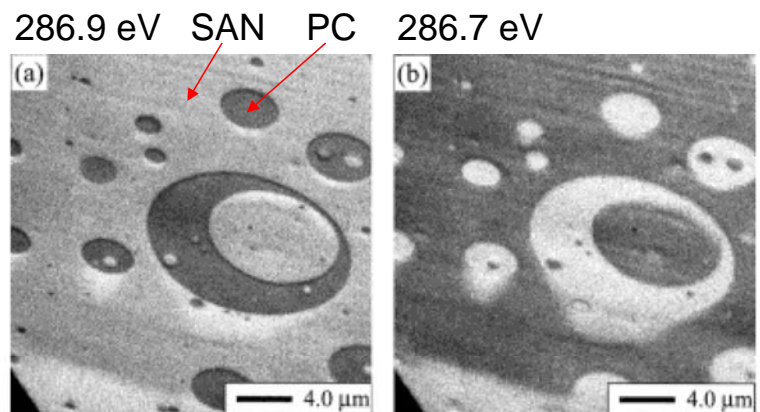


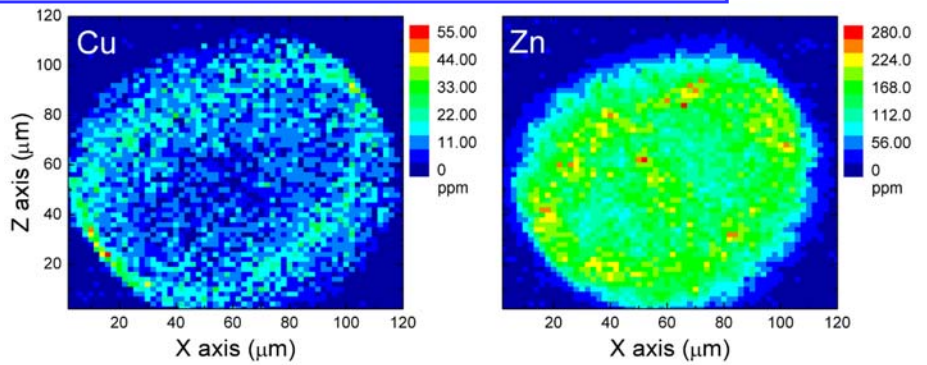
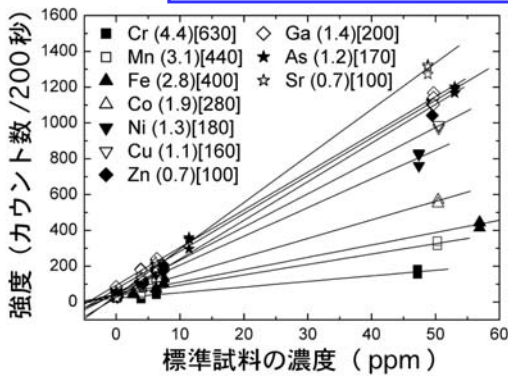
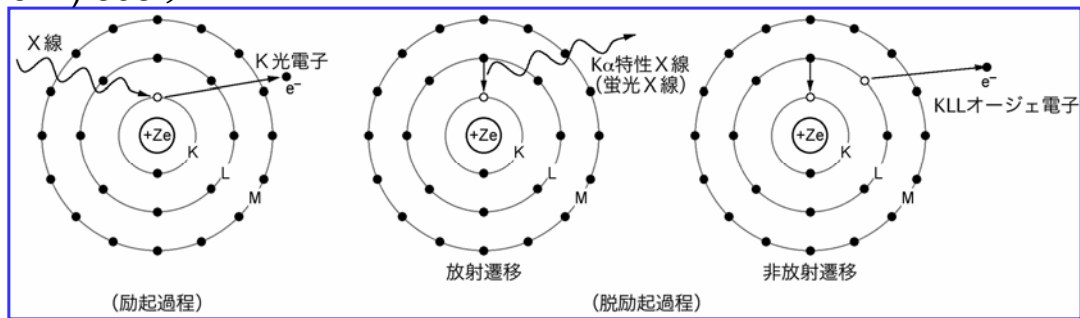
Figure 3. NEXAFS images of a 50/50 wt % PC/SAN blend acquired at (a) 286.9 and (b) 286.7 eV. At 286.9 eV, PC is the dark phase, whereas at 286.7 eV, SAN is the dark phase because of AN absorption (see Fig. 1 and the text for a discussion of NEXAFS absorption peaks).

C. C. Sloop et al: J. Pol. Sci. B: Pol. Phys. **39** (2001) 531.

36

μ-XRF

➤ 蛍光X線による元素識別顕微鏡 (P. Horowitz et al.: Science **178** (1972) 608.)

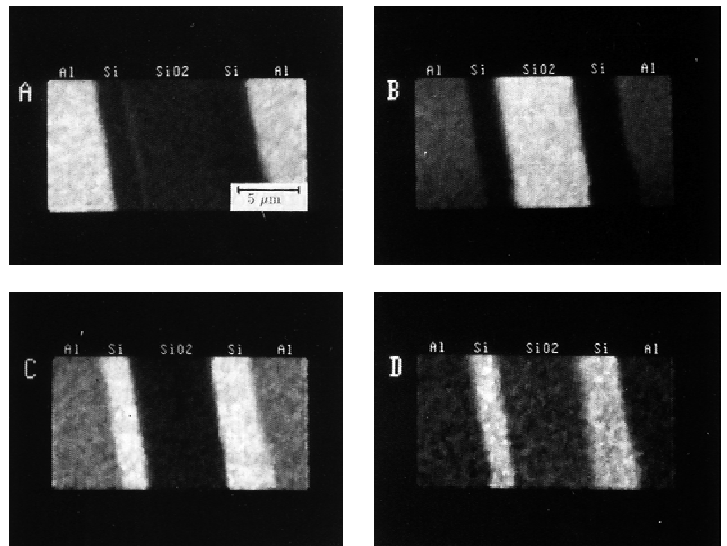
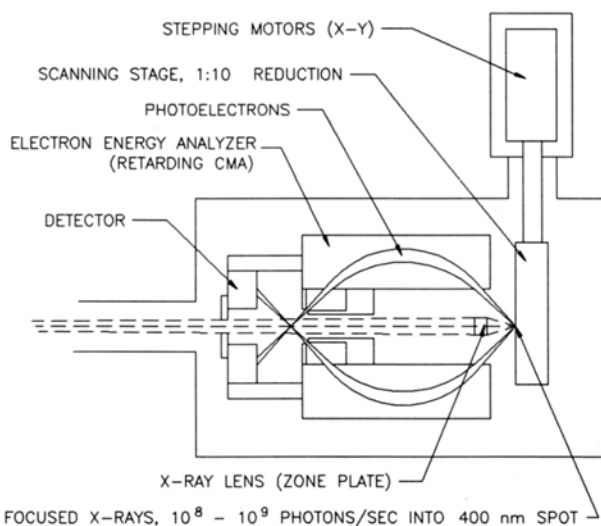


Y. Kagoshima et al.: IPAP Conference Series 7 (2006) 53.

μ-XPS

➤ 光電子分光 (XPS) + 顕微鏡 ⇒ μ-XPS (G. Beamson et al.: Nature **290** (1981) 556.)

- 顕微鏡 ⇒ 電子光学系 (PEEM)、集光X線ビーム (ZP、ミラー、湾曲結晶等)



Al/SiO₂ sample acquired at A: 575 eV (Al 2P), B: 508 eV (O KVV), C: 550 eV (Si 2p), D: 546 eV (Si 2p)

上 : H. Ade et al.: APL **56** (1990) 1841.
 右 : R. Garrett: SR News **3** (No.5, 1990) 19.

まとめ

➤放射光を利用したイメージング法

- 投影型 ⇒ 位相コントラストが主流
 - 干渉計（結晶、プリズム、タルボ）、DEI、伝播法など
- 顕微鏡（走査型、結像型など）
 - 吸収コントラスト（透過像、 μ -XAFS、 μ -MCD）
 - 位相コントラスト（ゼルニケ、顕微干渉計、屈折角を検出 [CCDカメラ、楔形吸収体])
 - 蛍光X線 (μ -XRF)
 - 光電子 (μ -XPS、 μ -MCD)
 - 回折顕微法 T → 要コヒーレント照明
 - ホログラフィー J
- 各手法のトモグラフィーへの応用
⇒ いずれも第3世代放射光施設の出現で、急速に進歩

➤XFELにより新しい進展が期待される。