

# X線イメージング



兵庫県立大学  
大学院物質理学研究科X線光学分野  
箆 島 靖

SPring-8秋の学校2017  
2017年9月19日

## 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、天体顕微鏡など

❖電子線 → 電子顕微鏡

❖X線 → レントゲン写真、X線顕微鏡 ← 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）

（波長  $\propto 1/\text{エネルギー}$  ←  $E = h\nu = hc/\lambda$ ）



Wikipediaより

## 講義内容



Keyword：放射光X線で見えるミクロの世界  
→ 放射光X線イメージング

※ イントロダクション

- ・ イメージングとは？
- ・ X線と物質の相互作用・・・

- ① 微小ビームの生成（X線顕微鏡の構築）
- ② 極微量元素の分析（X線顕微鏡の応用1）
- ③ 顕微トモグラフィー（X線顕微鏡の応用2）
- ④ 屈折コントラストイメージング（医学利用）
- ⑤ コヒーレントX線回折イメージング法（新しい手法）

## X線イメージングと放射光



・ X線プローブの特長

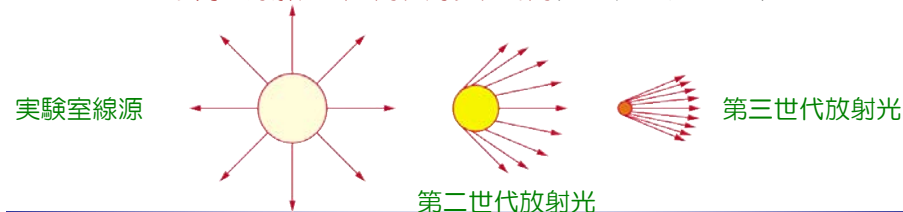
- 波長が短い → 顕微鏡において高い空間分解能の可能性
- 物質との多様な相互作用 → 様々な情報が取得可能
- 高い透過能 → 大気中での非破壊観察が可能

・ SPring-8に代表される第三世代放射光

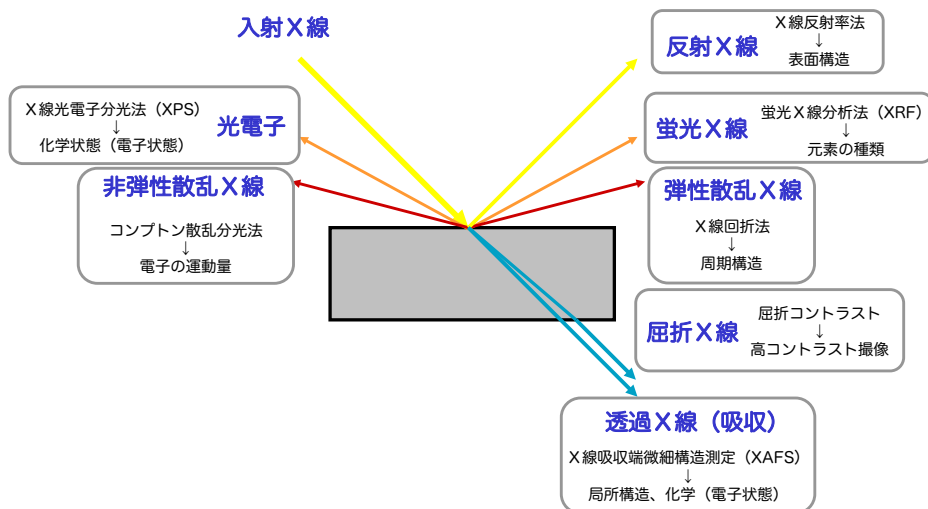
- 高輝度X線源（大強度、小さい光源サイズ、高い平行性）

・ 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.）



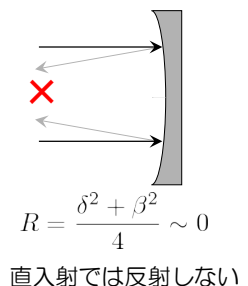
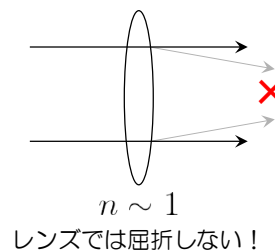
## X線と物質の相互作用



## X線の屈折率



- X線の屈折率  $n \sim 1 \rightarrow$  屈折レンズや反射鏡が利用できない。
- 複素屈折率  $n = 1 - \delta + i\beta$ ,  $\delta, \beta \ll 1 (10^{-6} \sim 10^{-8})$

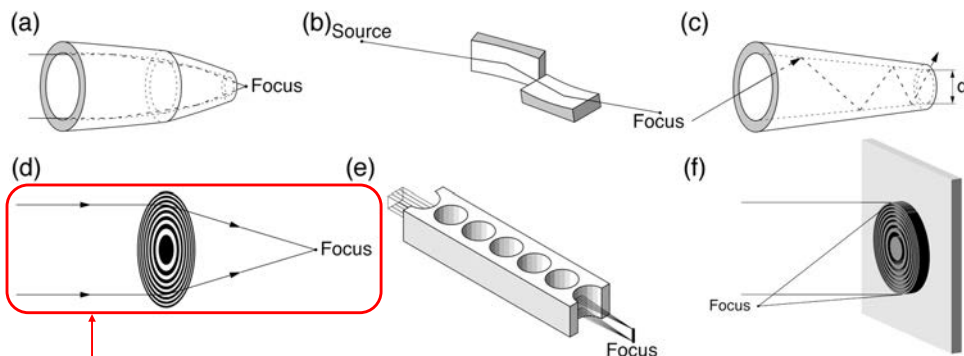


- 斜入射であれば全反射が起こる  $\rightarrow$  全反射鏡
- 回折・干渉現象でX線は曲がる  $\rightarrow$  フレネルゾーンプレート
- ブラック回折でX線は反射する  $\rightarrow$  ブラック・フレネルレンズ

## X線レンズ（光学素子）



屈折率  $n \sim 1$  であるが、様々な光学素子が開発され利用されている。



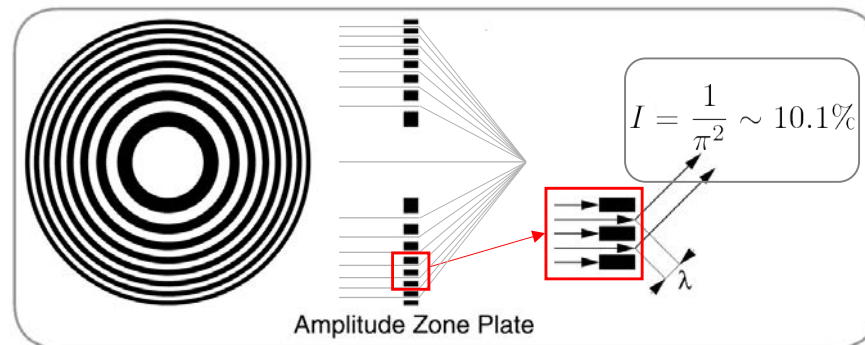
- (a) ウォルターミラー、(b) K-Bミラー、(c) キャピラリー、  
(d) フレネルゾーンプレート、(e) 屈折レンズ、(f) B-レンズ

現在、フレネルゾーンプレートが最も利用され、高い性能を有している。

## フレネルゾーンプレート (FZP)



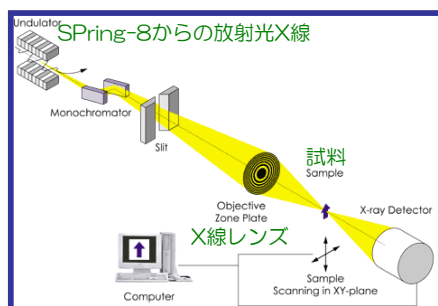
FZP：円形の透過型回折格子  
回折と干渉現象に基づいて、レンズと同じ働きをする。



$$\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} = \frac{1}{f} \rightarrow \text{レンズの結像公式を満たす。}$$

## X線顕微鏡の種類

### 走査型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

### 結像型X線顕微鏡

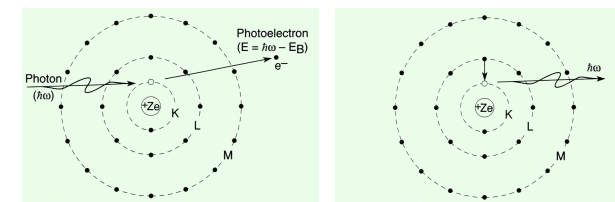


- ・直接の拡大像が得られる
- ・実時間観察（動的観察）が可能
- ・ゼルニケの位相差顕微鏡が可能
- ・露光時間：短

<http://www.olympus.co.jp>

## 蛍光X線による元素分析

### 蛍光X線の発生



#### 励起過程

#### 脱励起過程

- ・元素固有のエネルギーの蛍光X線を発生
- ・生体内微量元素の空間分布測定、定量分析
  - **生きたまま**の分析
  - 生命現象と対応した**微量元素の挙動**
    - ①試料の前処理が簡便
    - ②非破壊的測定
    - ③多元素同時分析

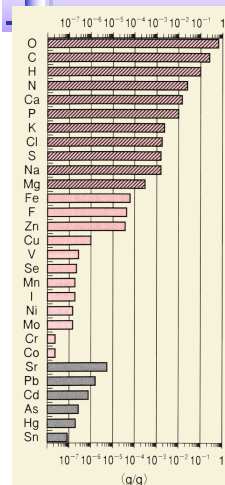
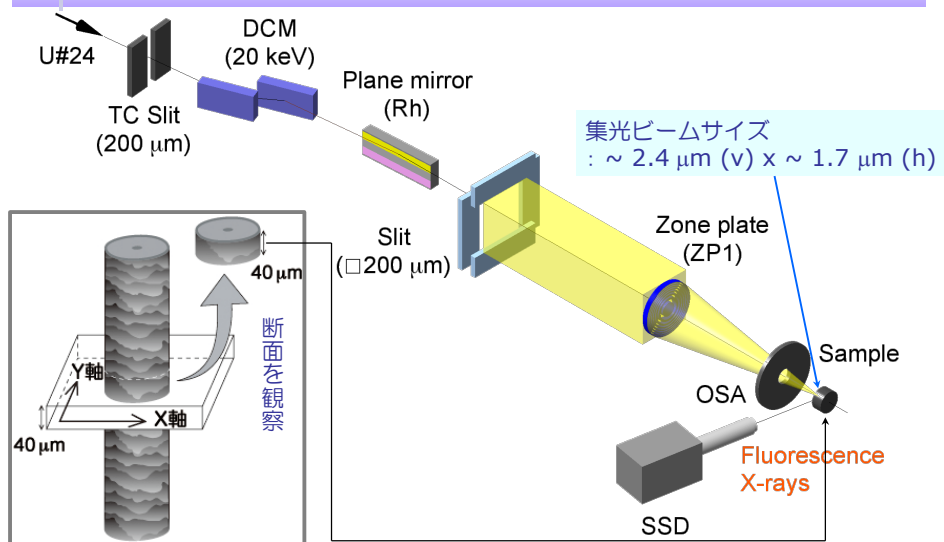


図1 生体に含まれる元素

組織あたりの重量比 (g/g) で示した<sup>1,2</sup>。■：多量元素、□：微量元素、■：必須性が認められている元素、■：汚染元素。

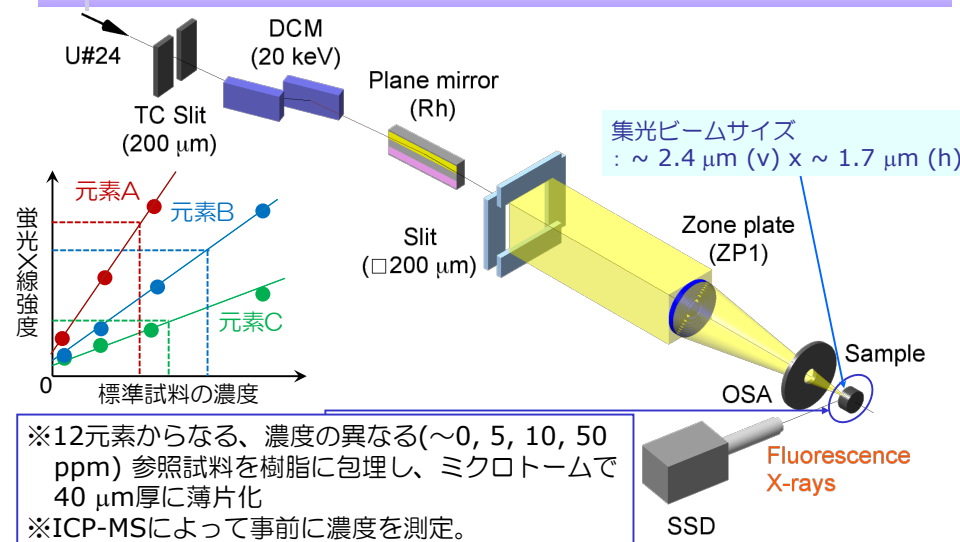
（左図）安岡則武、木原裕 編集、「夢の光—放射光が拓く生命の神秘」日本光生物学協会編、共立出版、p.129

## 測定光学系



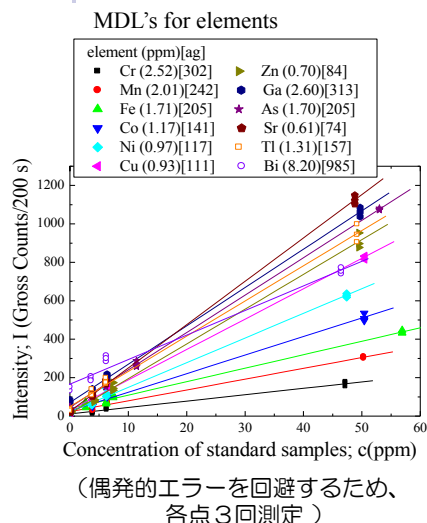
集光ビームサイズ  
: ~ 2.4 μm (v) x ~ 1.7 μm (h)

## 定量分析（検量線法）



※12元素からなる、濃度の異なる(~0, 5, 10, 50 ppm) 参照試料を樹脂に包埋し、マイクロームで40 μm厚に薄片化  
※ICP-MSによって事前に濃度を測定。

## 検量線と検出下限



検出限界は検量線の傾きと切片から求まる。  
ストロンチウム (Sr) の例

傾き: 17.8 (counts/ppm), 切片: 13.4 (counts)

$$MDL_c = \frac{3 \times \sqrt{13.4}}{17.8} = 0.66(\text{ppm})$$

・密度:  $\rho = 0.93(\text{g/cm}^3)$

・ビームサイズ:  $S = 3.23 \times 10^{-8}(\text{cm}^2)$

・厚さ:  $t = 4 \times 10^{-3}(\text{cm})$

検出下限の絶対量:  $M_{MDL}$  of MDL

$$M_{MDL} = \rho S t \cdot MDL_c$$

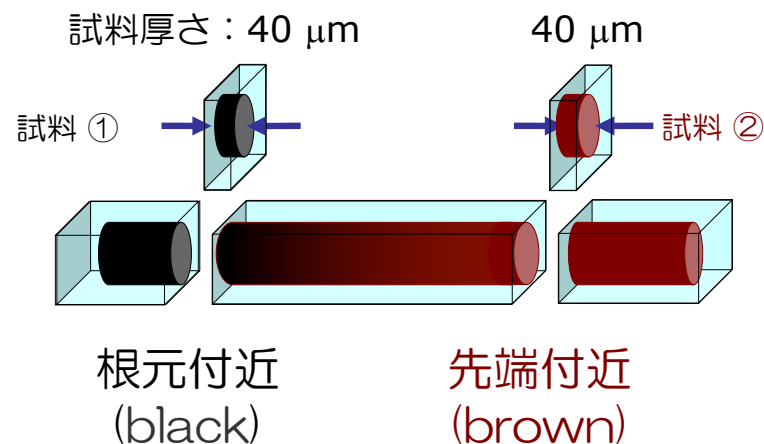
$$= 0.93 \times 3.23 \times 10^{-8} \times 4 \times 10^{-3} \times 0.66 \times 10^{-6}$$

$$= 79(\text{ag}) \quad [1(\text{ag}) = 10^{-18}(\text{g})]$$

$$\equiv \text{Sr} : \sim 5 \times 10^5 \leq 80 \times 80 \times 80$$

赤穂化成(株)との共同研究

## 染色した毛髪試料の例



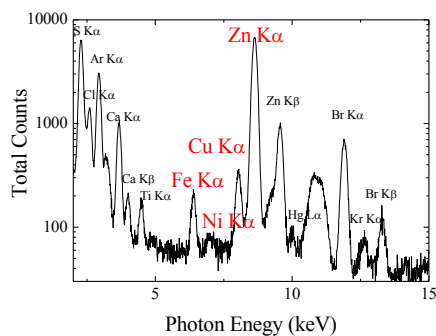
赤穂化成(株)との共同研究

## 蛍光X線分析結果

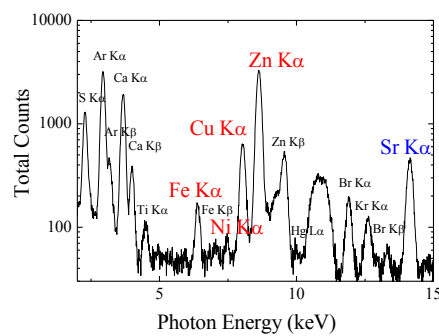


試料① (根元)

試料② (先端)



黒



茶

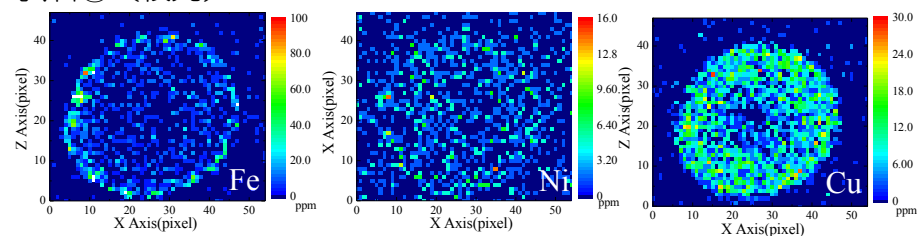
赤穂化成(株)との共同研究

## 微量元素の二次元分布測定①

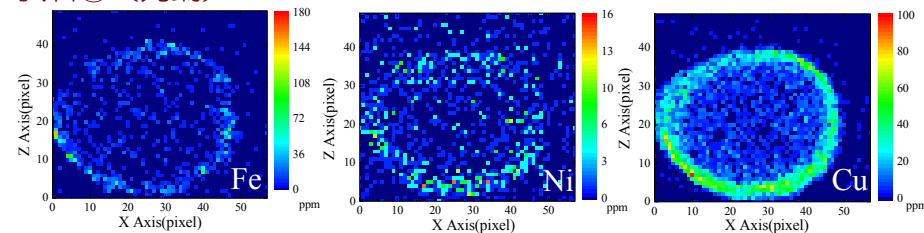


試料① (根元)

赤穂化成(株)との共同研究

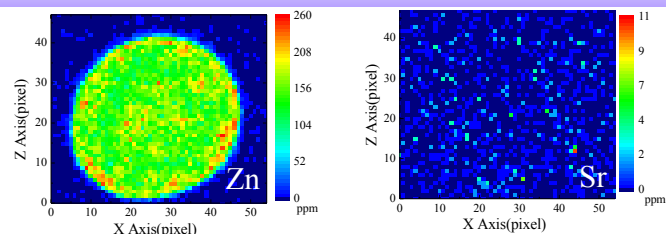


試料② (先端)

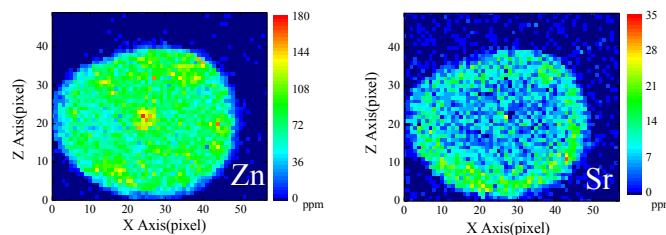


## 微量元素の二次元分布測定②

試料①  
(根元)



試料②  
(先端)

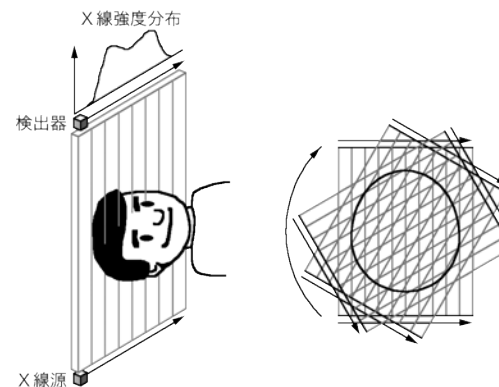


※ステップサイズ; 2.0  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ , 測定時間; 4.0 秒/pixel

赤穂化成(株)との共同研究

## コンピュータトモグラフィー (CT)

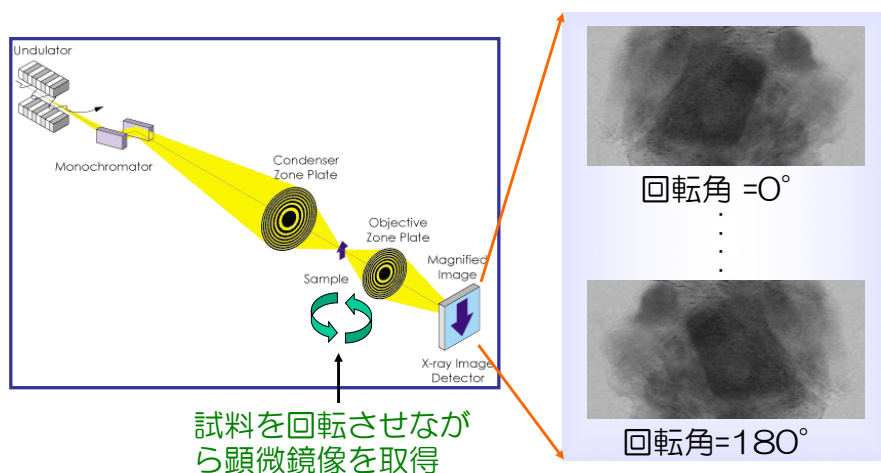
- トモグラフィー → 断層映像法または断層影相法と呼ばれている。
- ・病院の検査、工業製品の非破壊検査などに使われている。



<http://www.myqol.jp/check/101adf2bed5.woa/wa/read/102d8acf8e1+6++/index.html>

- ・スケールダウンすれば、顕微トモグラフィーとなる。

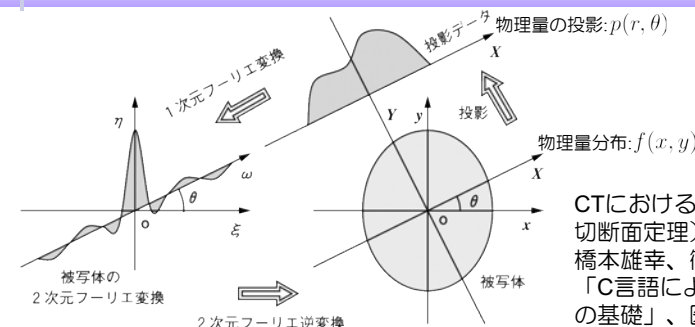
## X線顕微CTによる内部構造観察



試料を回転させながら顕微鏡像を取得

X線顕微鏡の分解能は約60 nm

## トモグラフィー (CT) の原理

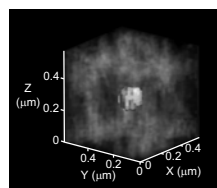
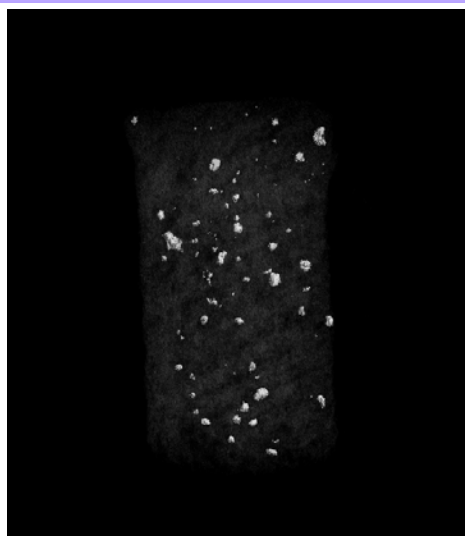


CTにおける解析解 (投影切断定理)  
橋本雄幸、篠原広行著:  
「C言語による画像再構成の基礎」、医療科学社

	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



## ポリマー繊維（直径：7.5 μm）



酸化チタン微粒子が  
添加されている

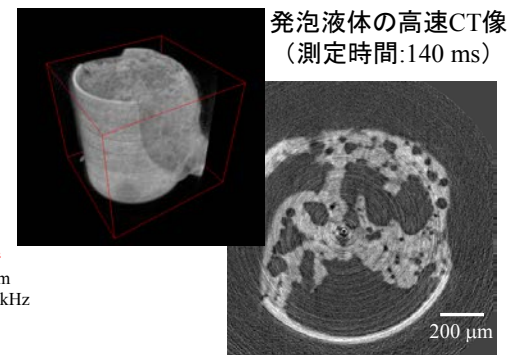
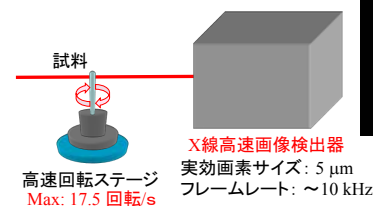
T. Koyama *et al.*,  
Jpn. J. Appl. Phys. **45** (2006)  
L1159-L1161.

## 速い動きをみる --- 4D-CT

### ➤ 4次元CT光学系

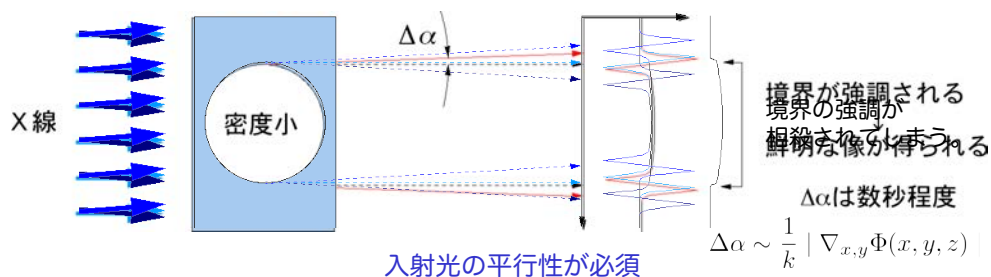
- 3次元（空間）+ 時間分解 = 4次元CT
- 空間分解能 10ミクロンでリアルタイムCT測定が可能

入射強度： $7 \times 10^{12}$  photons/sec  
視野：1.7 mm(H) × 1.2 mm(V)



H. Takano *et al.*, SPing-8 Research Frontiers 2010, 140 (2011).

## 屈折コントラストイメージング法

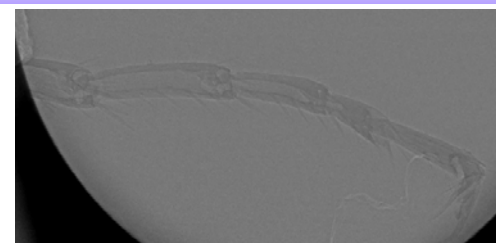


角度の単位：1度=60分、1分=60秒、1度=3600秒、∴1秒=3600分の1度=0.00028度



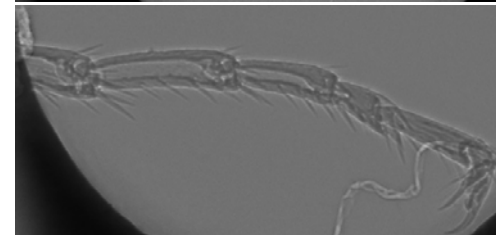
## 観察例 I - 昆虫の足

4 cm



エネルギー：10 keV

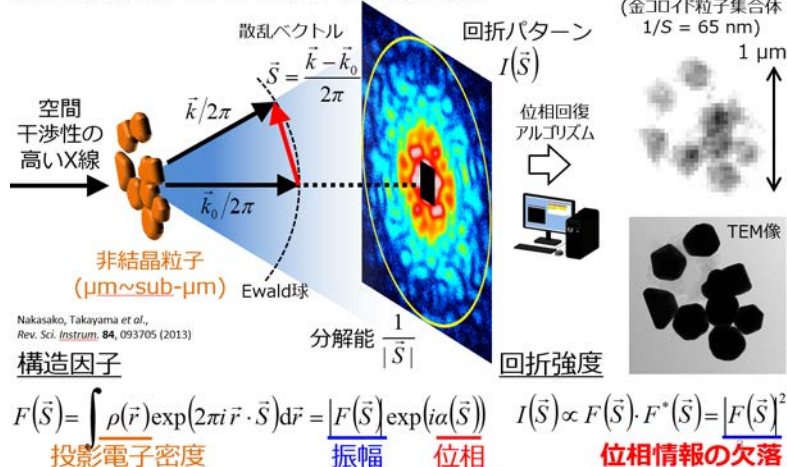
30 cm



距離を離すと屈折効果が顕著になる

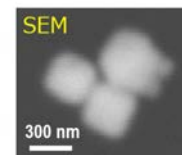
## コヒーレントX線回折イメージング (CXDI) 法

μm~sub-μmサイズの非結晶試料内部構造を高空間分解能・高コントラストで非侵襲観察



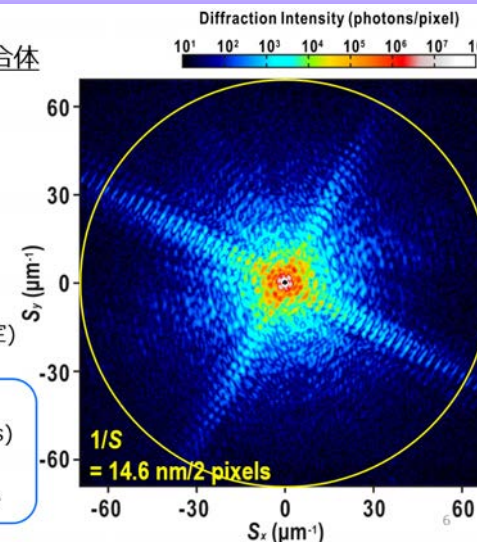
## 金コロイド粒子内部空隙のイメージング

試料: 金コロイド粒子集合体



光子エネルギー: 8 keV  
露光時間: 1 hour  
(回折パターンを3分割して測定)

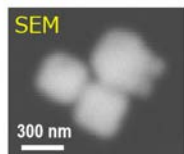
検出器端  
( $1/S = 14.6 \text{ nm}/2 \text{ pixels}$ )  
に到達する  
明瞭なスペckルを観測。



## 金コロイド粒子内部空隙のイメージング

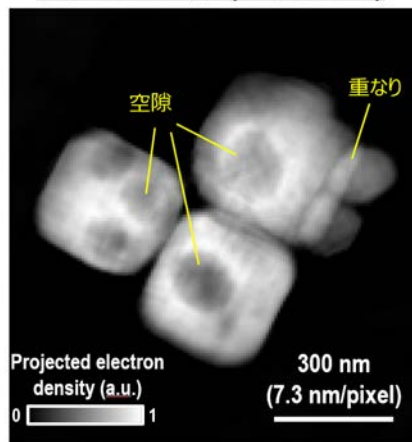
試料: 金コロイド粒子集合体

投影電子密度像 (50試行平均)



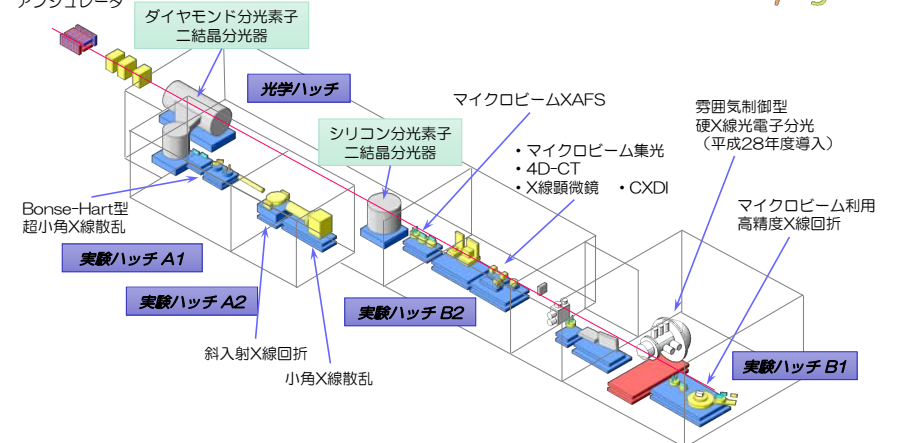
光子エネルギー: 8 keV  
露光時間: 1 hour  
(回折パターンを3分割して測定)

有効分解能29.1 nmの  
投影電子密度再生に成功。  
粒子内部の空隙を  
明瞭に可視化。



## 兵庫県ビームライン (BL24XU)

Figure-8  
アンジュレータ



透過型の X 線イメージングに関する以下の三問から、一問を選択してレポートにまとめて下さい。

#### 問 1.

通常の X 線源では、物体の直後に画像検出器（フィルムや画像検出器）を置いて投影像を記録する。画像検出器を離して観察すると像がボケてしまう。これは X 線源が有限の大きさを持つ発散光源であるため、物体の 1 点を様々な角度で入射してくる X 線が通過するからである。

この文章の意味を、図を用いてわかりやすく説明して下さい。キーワードは「半影」です。

#### 問 2.

屈折コントラストの効果は物体と検出器の距離を離すほど大きくなるが、回折による拡がりの分、検出器上での空間分解能が低下してしまうので、注意が必要である。この文章の意味を、図を用いてわかりやすく説明して下さい。キーワードは「フレネル回折」です。

#### 問 3.

屈折コントラストイメージングでは、試料からある程度の距離を隔てて透過像を観察すると、試料の境界（エッジ）が強調されて、鮮明な画像が得られる。

半径  $500\text{ }\mu\text{m}$  の円筒に平行 X 線が入射する場合を考える。屈折の法則を用いて、検出器上での X 線の強度分布を求め、距離を隔てるとエッジが強調されることを確かめよ。円筒内部の屈折率の実部を  $n = 1 - \delta$  ( $\delta = 3 \times 10^{-6}$ )、円筒外部の屈折率を 1 とし、円筒は X 線を吸収しない ( $\beta = 0$ ) ものとする。

<ヒント> 図 1 に示したように、入射 X 線はまず点 P で屈折し、次に点 Q でもう一度屈折して試料外に出射する。入射角を  $\theta_1$ 、屈折角を  $\theta_2$  とした場合、偏向角  $\phi$  はどのように表されるか？円筒内では  $n < 1$  なので、偏向方向は可視光とは逆になる ( $\theta_2 > \theta_1$ ) ことに注意すること。

【計算の手順例】入射 X 線を光軸 ( $z$  軸) に平行に、一定の間隔で入射させる（例えば  $\Delta x = 50\text{ nm}$ ）。 $z = 0.1\text{ cm}$  と  $z = 50\text{ cm}$  において、一定の間隔毎（例えば  $\Delta X = 5\text{ }\mu\text{m}$ ）に検出される X 線の個数  $N_{\text{tot}}(i)$  を数えてプロットする（ヒストグラムの作成）。ある程度距離を離すと図 2 のようなエッジが強調された強度分布が得られる。円筒直後ではエッジは強調されない。

※計算は全て Excel でできます。ヒストグラムも FREQUENCY 関数を使えば簡単にできます。 $x_{\text{tot}} \geq 0$  の場合についてのみ計算すれば OK です。

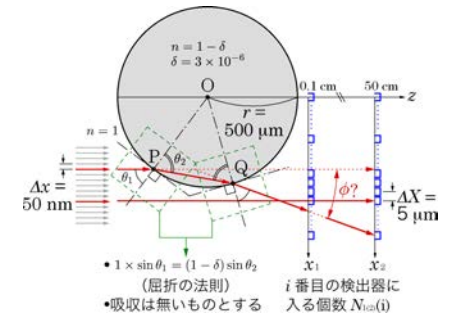


図 1

【レポート課題】  
 屈折コントラストの効果  
 (エッジが強調される) を確かめる。

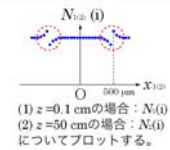


図 2