

## X線位相イメージングによる物質・材料評価

百生 敦

東北大学、多元物質科学研究所

X線画像は外からでは見えない物体内部を可視化する目的で様々な分野で利用されている。X線CT（コンピュータ断層撮影法）に基づく三次元観察を可能とするところは、X線が成し得る重要な長所であろう。高空間分解能での観察に重きを置くX線顕微鏡の開発も進められてきた。材料やデバイスの評価においてその有効性はいうまでもない。

X線透視画像を見ると、どのような利用形態においても、X線吸収コントラストに頼ってきた。X線吸収コントラストは、物体中でX線吸収係数に差異がある構造があるときに強く現れるが、一方でX線に対する弱吸収物体については十分なコントラストが得られないという問題も孕んでいる。X線吸収係数は重元素になるほど急激に増すので、軽元素からなる物質については軒並この欠点が顕著になる。

そこで、X線の位相情報に頼るコントラスト形成手法が注目されている[1]。軽元素について、X線位相シフトの相互作用の大きさは、吸収のそれに比べて約千倍大きいという事実がある。すなわち、X線位相コントラスト法であれば弱吸収物体であっても観察可能となる。

しかしながら、可視光に比べて遥かに扱いが難しいX線では、位相コントラストを生成するだけでも決して容易なことではない。1990年代よりX線位相コントラスト法が本格的に研究されるようになり、シンクロトロン放射光はその開発舞台として極めて重要な働きを果たしてきた。また、画像検出器やデジタル画像処理の発展も重要な要素である。これにより、位相コントラスト画像を単純に写真撮影するのではなく、デジタル検出に基づくX線位相シフトの定量的画像計測がなされ、より高度な撮影が可能となっている事にも注意を払うべきである。位相コントラスト法とX線CTを融合させたX線位相CTなどは、これがベースとなって実現した。私はこのことを強調するために、『X線位相イメージング』という言葉を使ってX線位相コントラスト法と区別している。この技術により、高分子材料や生体軟組織の観察が数多く行われている。

最近、シンクロトロン放射光施設を飛び出して、実験室にてX線位相イメージングを可能とする技術も立ち上がってきた。これにより、当該技術の応用展開が益々広がり、X線画像分野において新たな局面を迎える時代になってきたと考えている。講演では、X線位相イメージング開発の経緯、その原理、及び、いくつかの観察例を示し、今後の展開を議論したい。

[1] A. Momose, "Recent advances in X-ray phase imaging", Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005) 6355-6367

## X線位相イメージングによる 物質・材料評価

百生 敦  
東北大学多元物質科学研究所

## X線位相イメージング開発の背景

### X線イメージング分野のニーズ

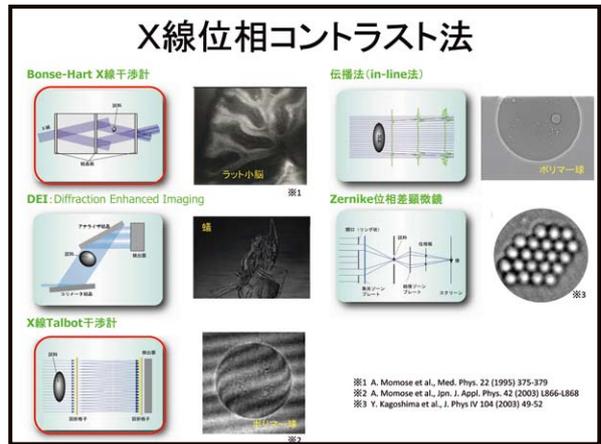
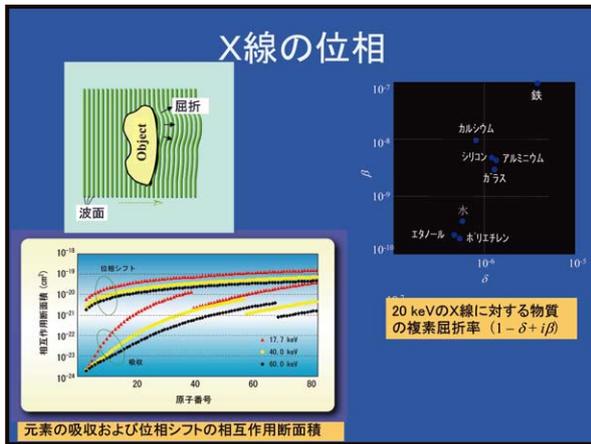
- 弱吸収物体(生体軟組織や高分子材料など)に対する低感度の克服  
硬X線位相情報を使うことによる理論的に1000倍の感度向上
- X線照射線量の軽減  
同じ画質であれば理論的に1000倍の照射線量の軽減
- X線顕微鏡高空間分解能化による感度(コントラスト分解能)低下の補償  
X線波動光学的設計が必須になってきたX線顕微鏡学

### X線光学からのシーズ

- 精密X線光学(X線結晶光学)
- X線幾何光学
- X線波動光学
- X線光学素子 設計・製作技術  
(完全結晶、ミラー、ハーフミラー、多層膜、  
回折格子、Fresnel Zone Plate、  
Borner-Hart干渉計、...)



X線位相イメージング



### X線位相イメージング

位相コントラスト撮影:  
光学系の工夫により、波面(等位相面)の形状を強度に変換して記録する。位相コントラスト画像といっても、吸収コントラストも通常含まれている。

位相計測(位相回復):  
位相コントラスト画像からコンピュータによる処理を経て、波面の形状を定量的に得ること。その際、吸収の寄与は分別される。

**X線位相コントラスト撮影 + X線位相計測技術**  
↓  
**X線位相イメージング**

- 光学系の不完全さなどに寄生するコントラストを比較的容易に除去することができる。
- 一般に、複数の画像の取得が要請される。  
ただし、フーリエ変換法や回折顕微鏡法を除く
- 複素屈折率の三次元分布を調べるX線位相CTが可能。

### X線断層撮影法

#### X-ray Computed Tomography (CT)

CTスキャナ

シンクロトロン放射光を用いる場合には、試料を回転させる。

従来のX線CTとX線位相CTとの関連

	計測画像 [g]	再構成画像 [f]
従来型 X線CT	$\mu$ (光学濃度) $= \frac{4\pi}{\lambda} \int \beta dz$	$\beta(x, y, z)$
位相CT	$\Phi$ (位相シフト) $= \frac{2\pi}{\lambda} \int \delta dz$	$\delta(x, y, z)$

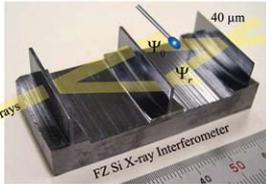
複素屈折率:  $1 - \delta + i\beta$

◆  $\delta/\beta \approx 1000$  に基づく高感度三次元観察が実現  
◆ 位相シフトは位相計測技術により取得

### 二光束干渉計による方法

Bonse-Hart X-ray Interferometer

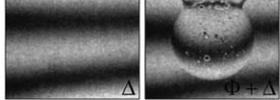
A. Momose, Nucl. Instrum. Methods A 352 (1995) 622



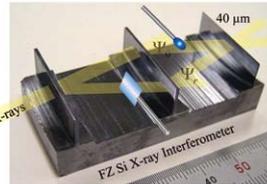
$$I = |\Psi_o + \Psi_r|^2$$

$$= A + B \cos[\Phi(x, y) + \Delta(x, y)]$$

A: average intensity B: fringe contrast



### 位相シフトの定量計測—縞走査法—

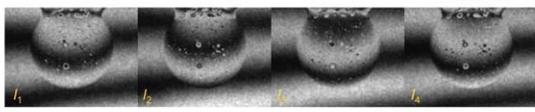


$$I_k = |\Psi_o + \Psi_r|^2$$

$$= A + B \cos(\Phi + \Delta + 2\pi k / M)$$

$$k = 1, 2, \dots, M$$

when  $M = 4$

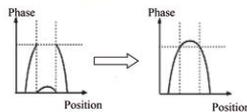
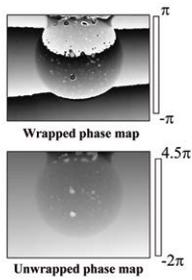


### 位相シフトの定量計測—位相アンラップ—

$$\Phi + \Delta = \arg \left[ \sum_{k=1}^M I_k \exp(-2\pi i \frac{k}{M}) \right]$$

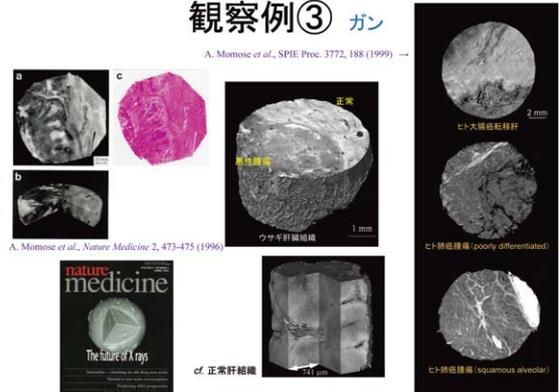
$$= \tan^{-1} \left( \frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3} \right) \text{ when } M = 4.$$

Phase unwrapping

### 観察例③ ガン

A. Momose et al., SPIE Proc. 3772, 188 (1999)

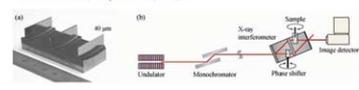


正常  
癌組織  
ヒト大腸癌転移肝  
ヒト肺癌 (poorly differentiated)  
ヒト肺癌 (squamous alveolar)

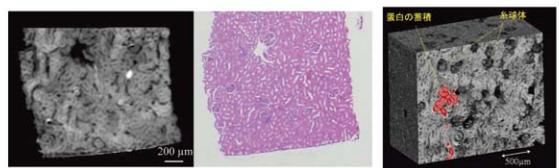
cf. 正常肝組織

### 観察例④ ラット腎臓

A. Momose et al., J Phys. IV 104 (2003) 599



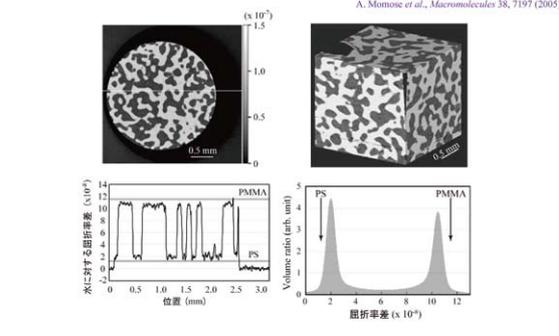
A. Momose et al., Opt. Express 11 (2003) 2305  
J. Wu et al., Kidney Int. 75 (2009) 945



蛋白質の集積  
脂質体

### 観察例⑥ ポリマーブレンド

A. Momose et al., Macromolecules 38, 7197 (2005)

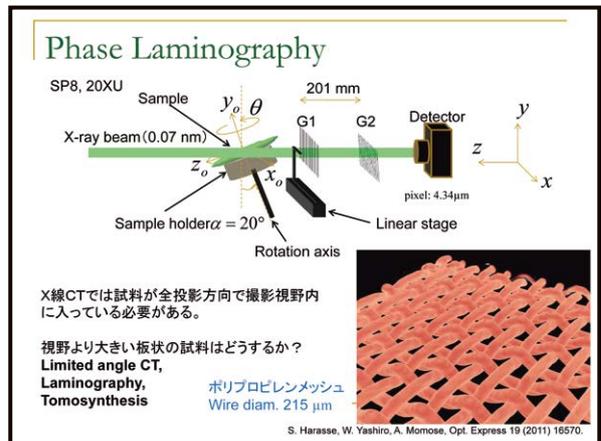
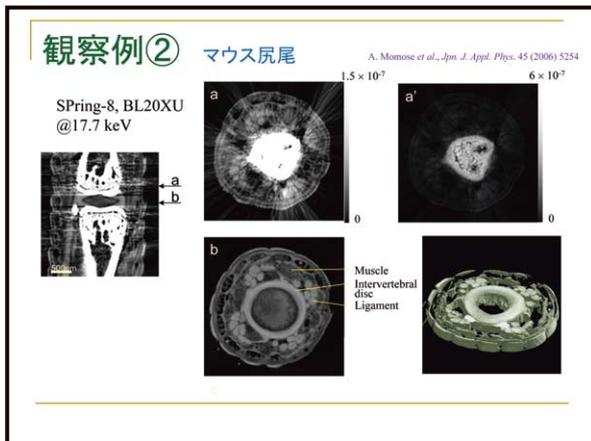
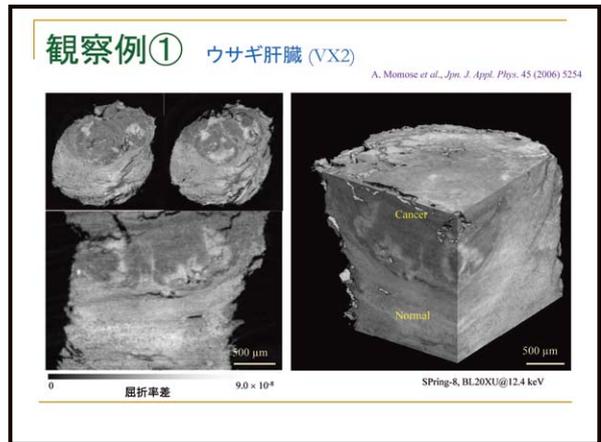
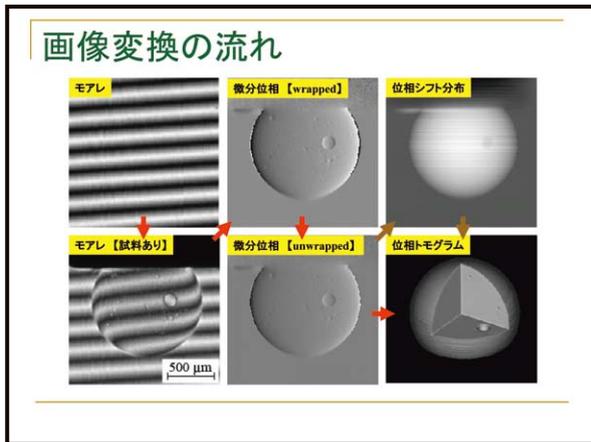
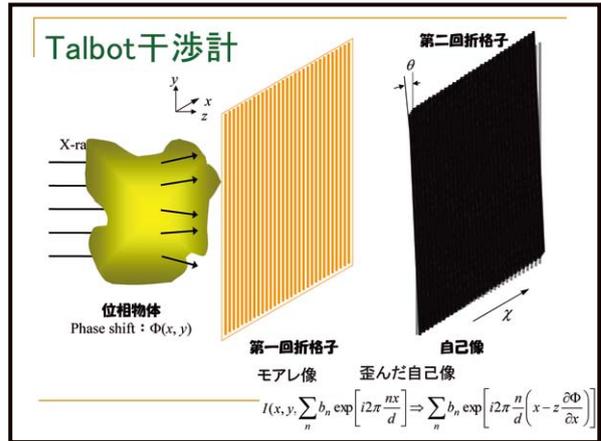
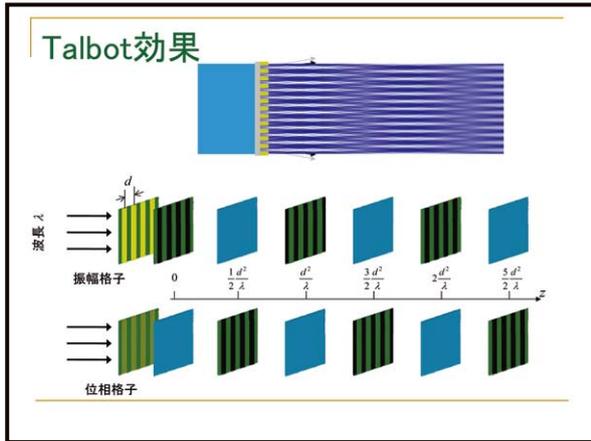


水に対する相対屈折率 (x 10<sup>-3</sup>)

位置 (mm)

Volume ratio (arb. unit)

屈折率差 (x 10<sup>-3</sup>)



### X-ray Talbot interferometer

- ➔ 光学系が扱い易い
- ➔ 微分位相コントラストを生成
- ➔ コーンビームが使用可能 (X線結像顕微鏡との融合)
- ➔ 準単色X線 ( $\Delta E/E < 0.1$ ) が使用可能 (高速イメージング)
- ➔ シンクロトロン放射光以外のコンパクトX線源で展開可能
- 高アスペクト比のX線透過格子の製作
- 感度は結晶干渉計を用いる場合に及ばない

A. Momose et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 42 (2003) 1866.

### X線Talbot(-Lau)干渉計のための光学素子 —X線回折格子の製作—

### Talbot干渉計とX線顕微鏡の融合

#### Projection microscope

#### Imaging microscope

A. Momose et al., *SPIE Proc.* 6318 (2006) 63180T.  
Y. Takada et al., *Appl. Phys. Express* 1 (2008) 117002.

### 観察例⑤ ポリマーブレンド @ 9 keV

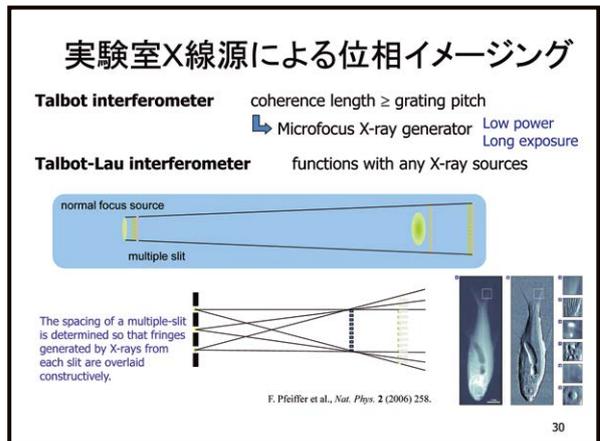
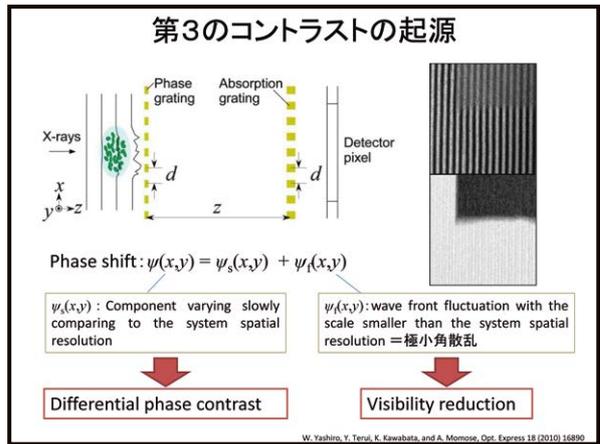
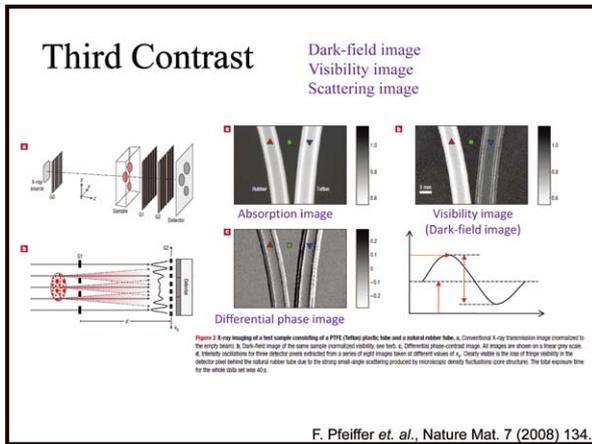
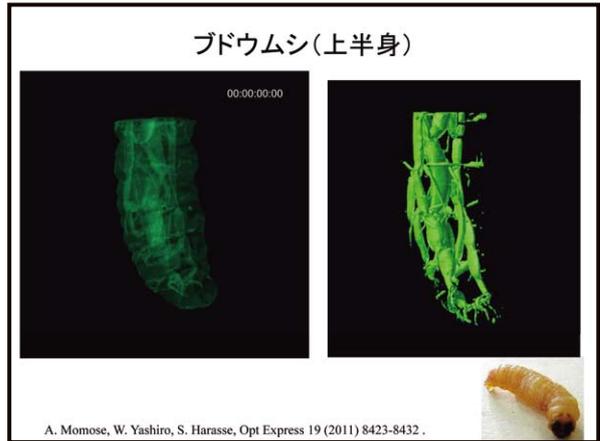
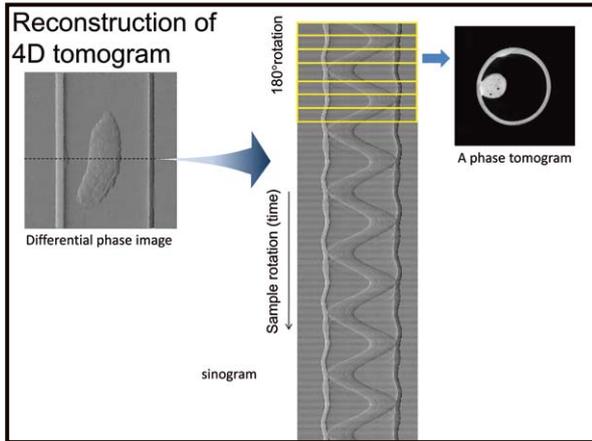
PS/PMMA binary blend      PS/PMMA/PB ternary blend

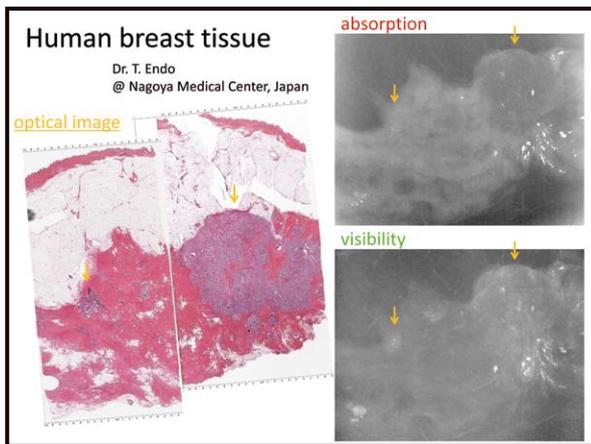
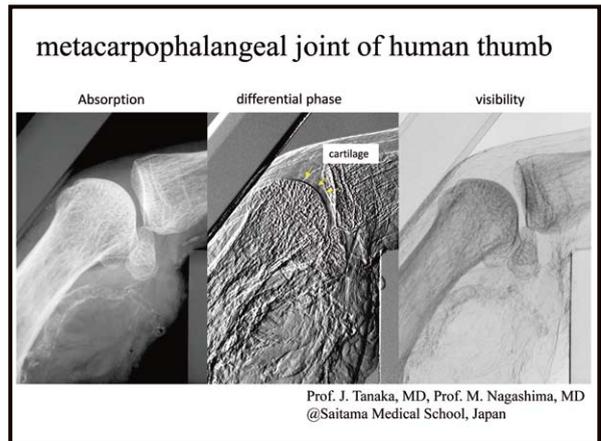
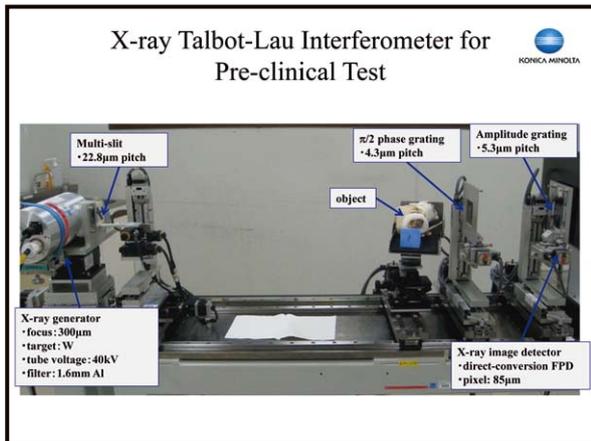
A. Momose et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* 186 (2009) 012044.

### 白色放射光による高速位相イメージング

### Image processing —Fourier transform method—

Rotation moiré fringes as carrier fringes





- ### まとめ：X線格子を用いた手法
- ◎シンクロトロン放射光施設
    - 標準的位相イメージング/トモグラフィ(空間分解能 > 20  $\mu$ m)
    - X線結像顕微鏡との融合(空間分解能 < 1  $\mu$ m)
    - X線位相ラミノグラフィ
    - 高速X線位相イメージング・4次元位相トモグラフィ
    - 波面計測(ナノビーム集光特性評価、ミラー評価etc.)
  - ◎実験室
    - 医用機器開発
      - ✓ リウマチ診断機器(埼玉医科大学)
      - ✓ 乳がん診断機器(名古屋医療センター)
    - 非破壊検査応用
  - ◎その他(新規X線源との融合)
    - レーザー逆コンプトン散乱X線源
    - 液体金属ターゲット線源
    - 中性子位相イメージング