

# SAGA LSにおける 先端イメージングの現状と将来計画

SAGA Light Source  
米山明男

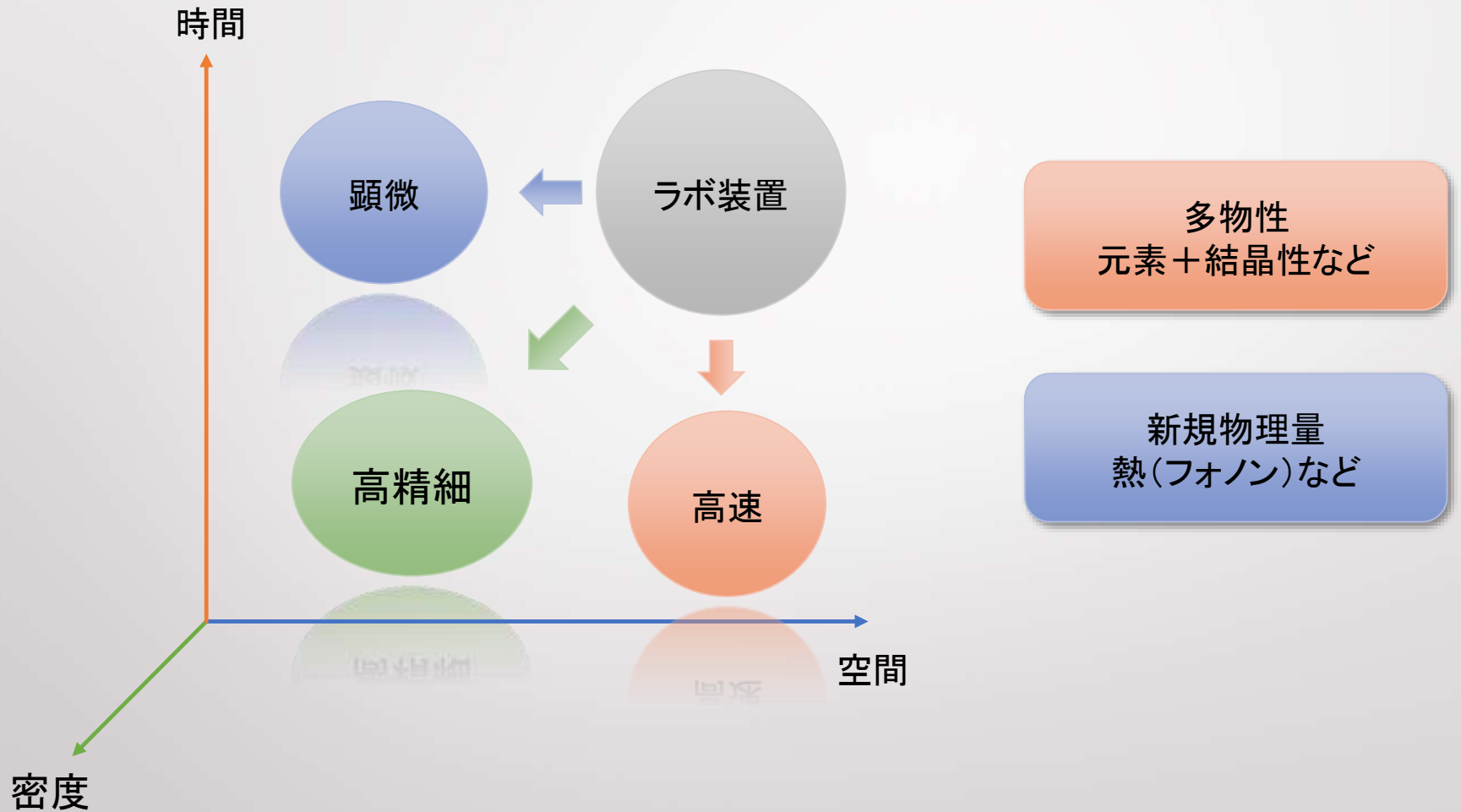
# Contents

1. 放射光と先端イメージング
2. 高空間分解能イメージング
3. 高時間分解能イメージング
4. 高密度分解能イメージング
5. トポグラフィー

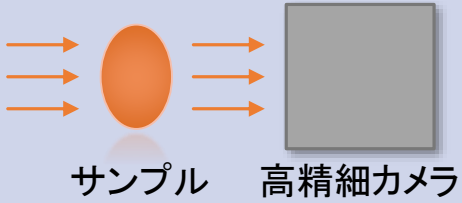
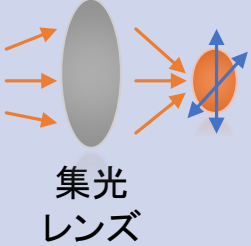
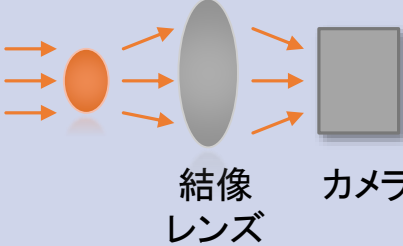


# 1. 放射光と先端イメージング

放射光：**大強度、平行、単色**：レーザーに近い光

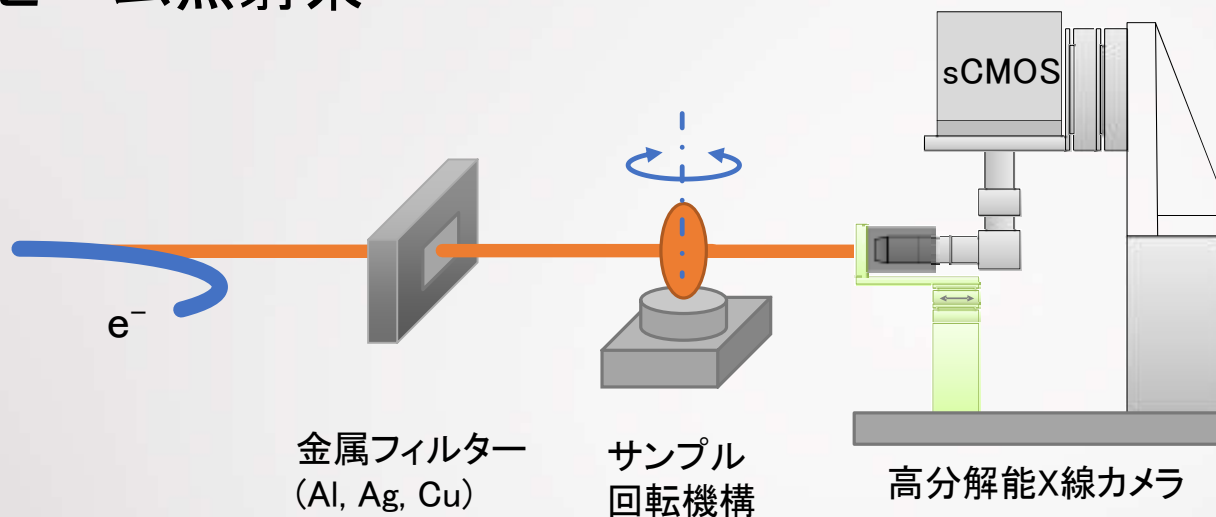


## 2. 高空間分解能イメージング

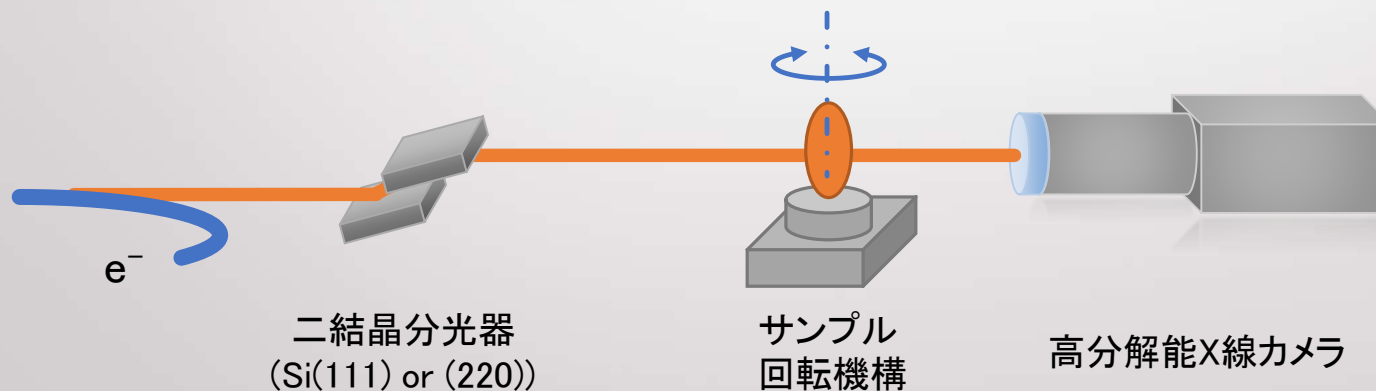
	平行ビーム	顕微鏡(光学系)	
		走査型	結像型
光学構成	 <p>サンプル 高精細カメラ</p>	 <p>集光 レンズ</p>	 <p>結像 レンズ カメラ</p>
空間分解能	~ミクロン	<サブミクロン	<サブミクロン
時間分解能	◎	△	○
視野	数mm	数100ミクロン	<100ミクロン
その他	・高エネルギーX線 (20 keV以上)	・多物性観察 (点分析)	・ワンショット

## 2.1 SAGA-LSにおける高空間分解能イメージング

### —平行ビーム照射系—



### 準単色放射光を利用した高速マイクロCT

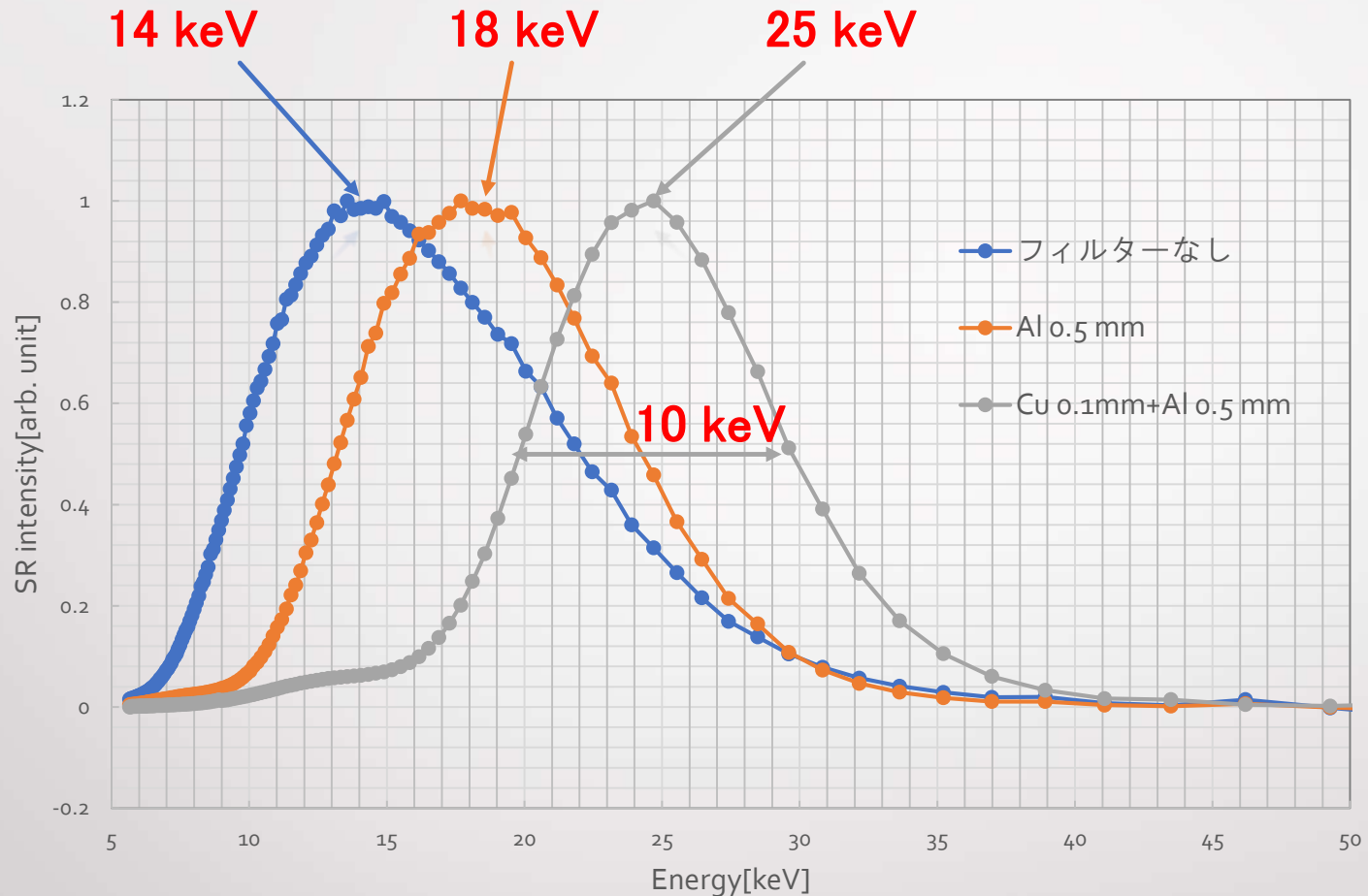


### 単色放射光を利用した高精細マイクロCT

## 2.1 SAGA-LSにおける高空間分解能イメージング

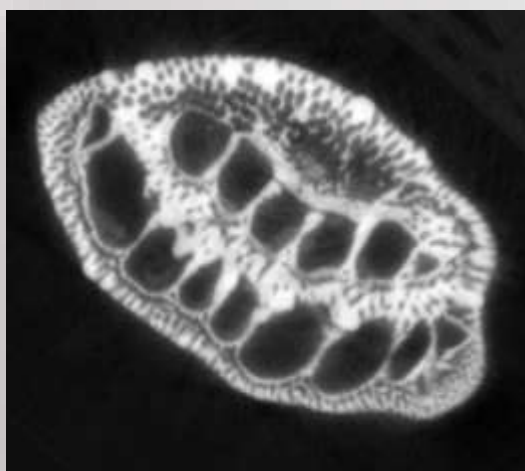
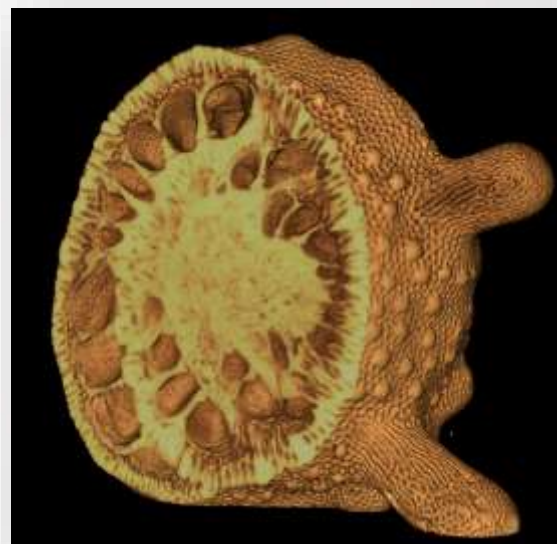
	準単色マイクロCT	単色マイクロCT
空間分解能	2～3ミクロン (画素サイズ:0.65ミクロン (10倍レンズ))	2～3ミクロン (画素サイズ:0.65ミクロン (10倍レンズ))
観察視野	2倍レンズ: 6x5 mm 5倍レンズ: 3x2.5 mm 10倍レンズ: 1.5x1.25 mm	5倍レンズ: 2.5x2.5 mm 10倍レンズ: 1.25x1.25 mm
露光時間	～100 ms	～5 s (GeDCMにより1 s予定)
3次元 計測時間	～100秒 (連続スキャン)	～2時間 (ステップスキャン)
エネルギー	12～25 keV	8～30 keV
その他	サンプルによっては照射ダメージあり (BL16XUダイレクト程度の強度)	

## 2.2 準単色放射光のスペクトル



金属フィルターの種類、厚さにより  
中心エネルギーを変更可能

## 2.3 準単色放射光を用いたマイクロCT—微化石—



0.2 mm

露光時間	100 ms
投影数	1000
計測時間	100 s
空間分解能	3ミクロン

2018秋 応用物理学会

Making the invisible visible

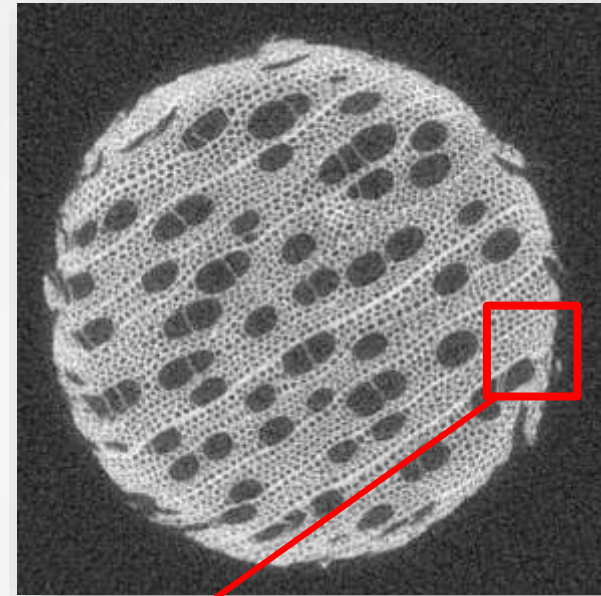




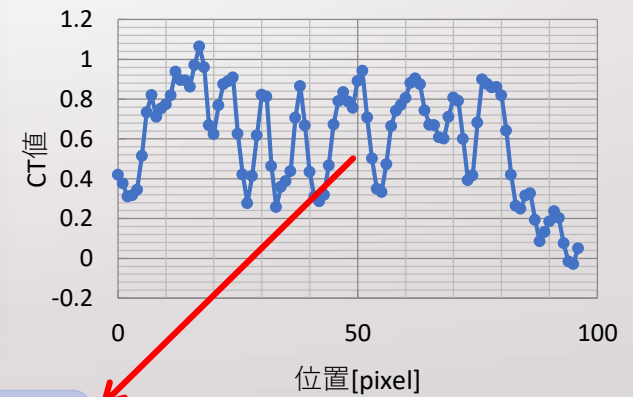
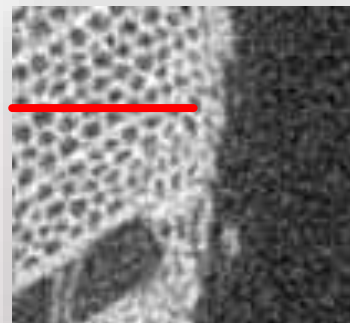
## 2.4 準単色放射光を用いたマイクロCTー木材ー



全体3次元像

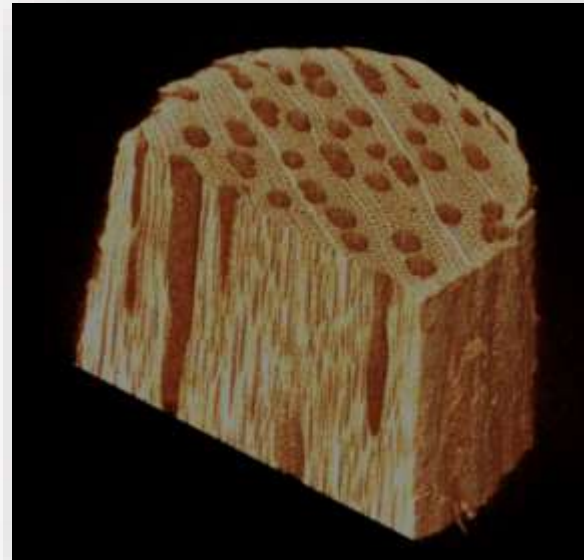
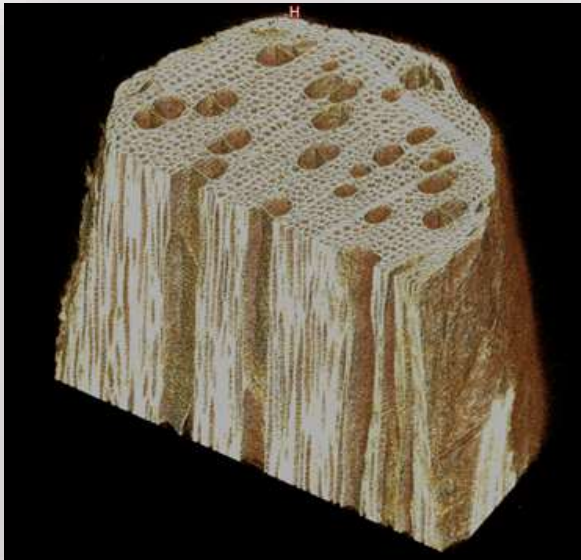


0.5 mm



2.5ミクロンの空間分解能

## 2.5 単色放射光との比較



ビームライン	SP8 BL16XU
エネルギー	9 keV
露光時間/投影	5秒(デチューン1/10)
プロジェクション数	900 投影/360度
計測時間	1.5時間

ビームライン	SAGA LS BL07
エネルギー	~15 keV
露光時間/投影	100 ms
プロジェクション数	1000 投影/360度
計測時間	100 秒

両者に大きな違いは見られない。

## 2.6 単色放射光を用いたマイクロCT—種—



種の写真  
(直径0.5 mm程度)

固定用テープ

種



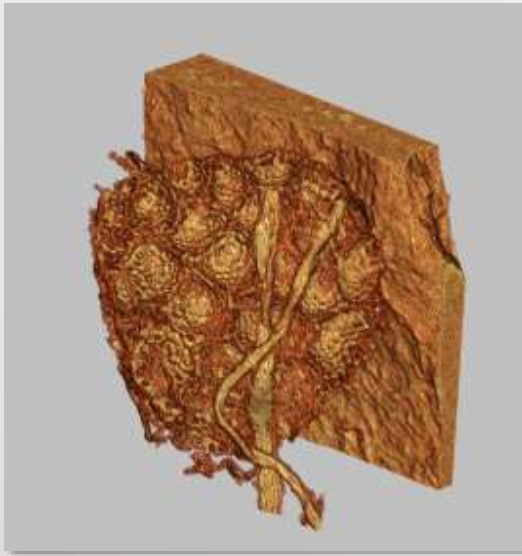
全体3次元像

0.5 mm

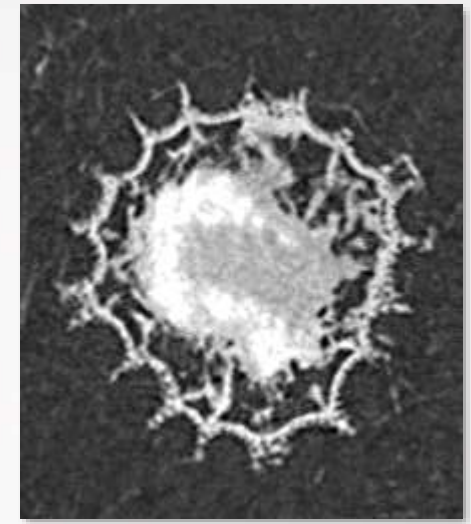
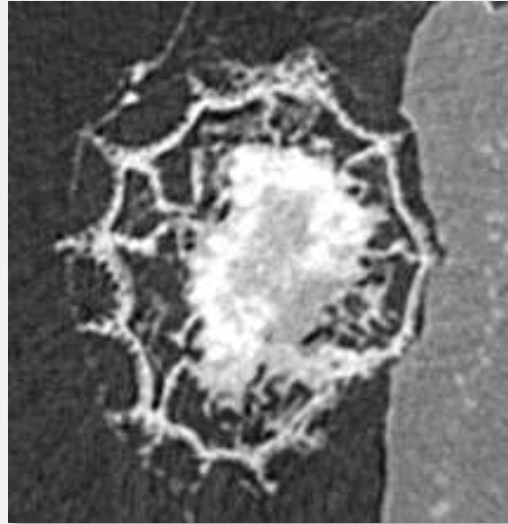
試料提供: 佐賀県農業試験研究センター

Making the invisible visible

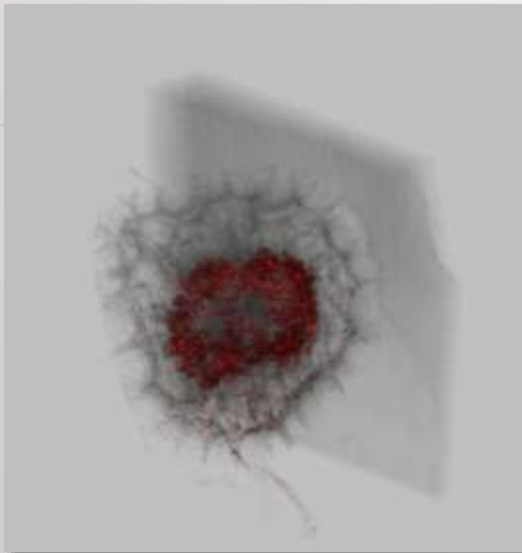




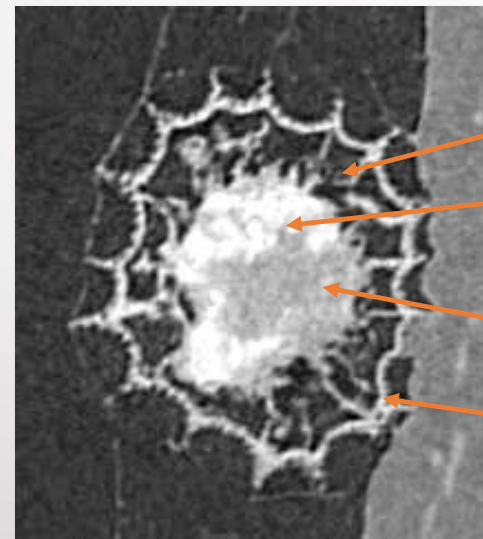
拡大3次元像



0.2 mm



内部高密度可視化像



空隙

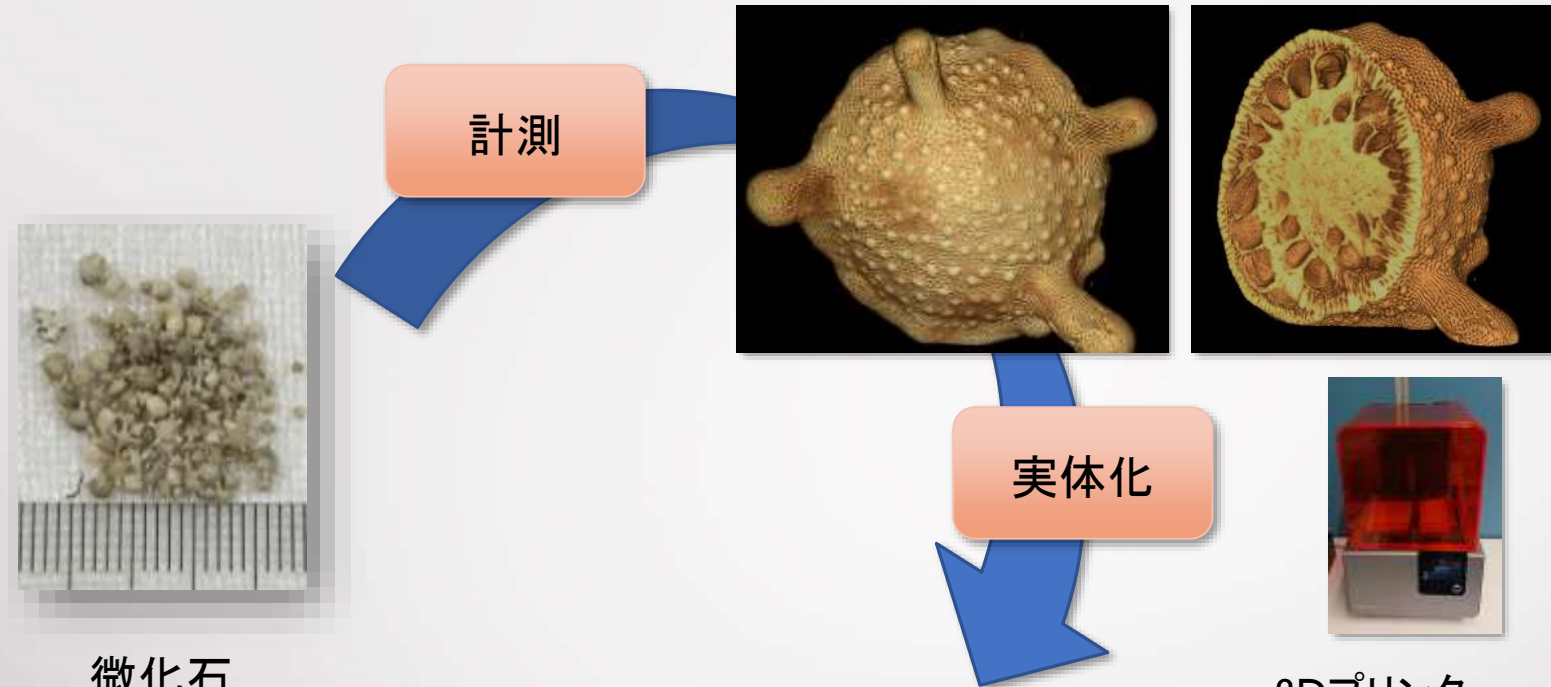
子葉？

胚乳

種皮

種子内部の詳細な構造を可視化可能

## 2.7 3次元実体化



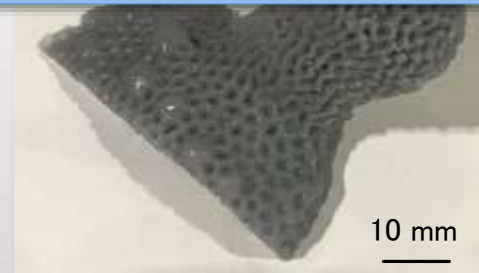
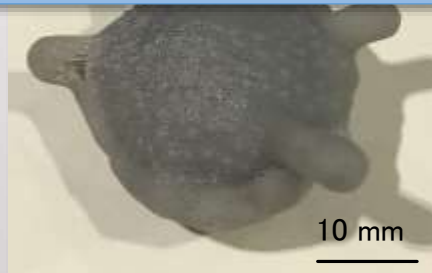
微化石

実体化

3Dプリンター

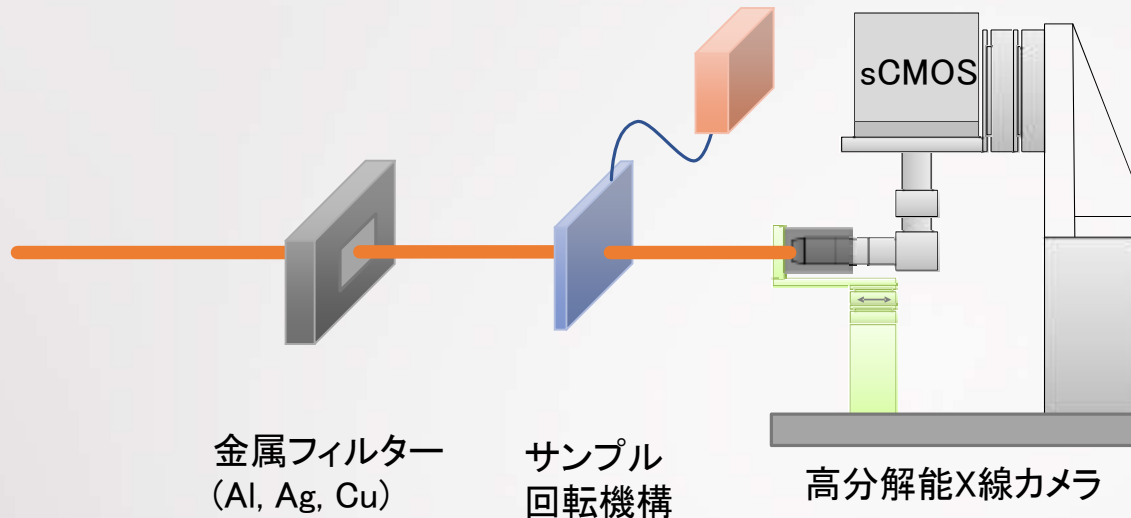
**ミクロンオーダーの三次元立体化も可能**

実体像(20倍)

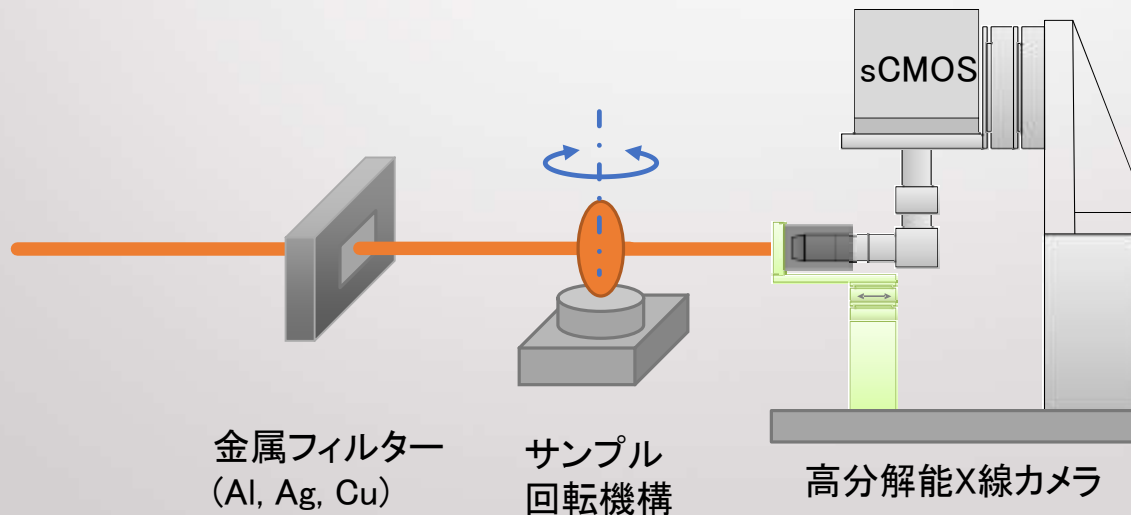


実体像(50倍)

### 3.1 高時間分解能(高速)イメージング



準単色放射光を利用したリアルタイム観察



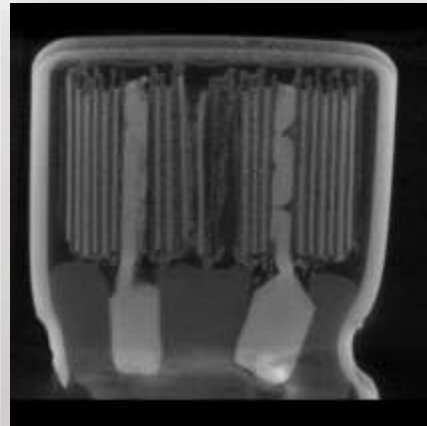
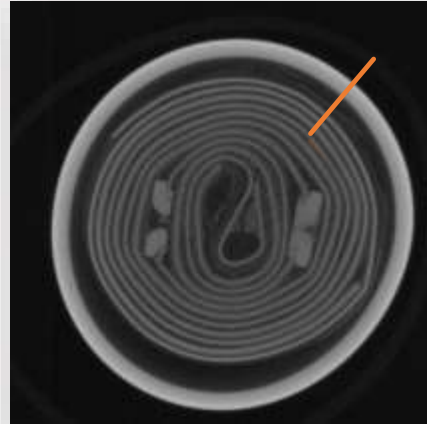
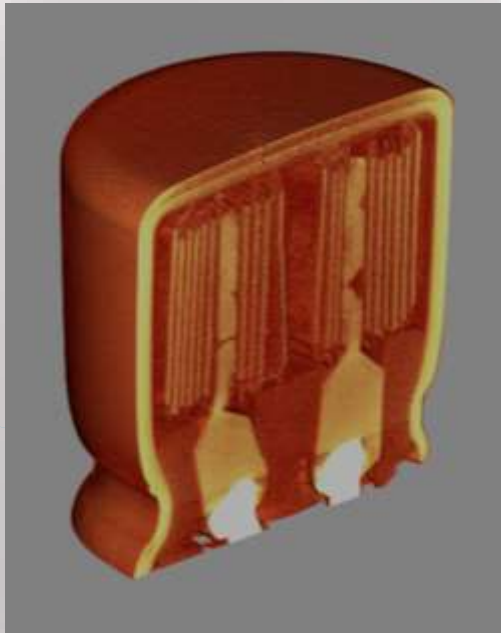
準単色放射光を利用した高速CT

### 3.1 高時間分解能(高速)イメージング

	投影撮像	高速CT
空間分解能	10～20ミクロン (画素サイズ:3ミクロン (2倍レンズ))	10～20ミクロン (画素サイズ:3ミクロン (2倍レンズ))
観察視野	1倍レンズ:16x12 mm 2倍レンズ:8x6 mm	1倍レンズ:16x12 mm 2倍レンズ:8x6 mm
撮像時間	～0.1 ms	<20 s(3次元計測)
エネルギー	12～25 keV	12～25 keV
その他	サンプルによっては照射ダメージあり (BL16XUダイレクト程度の強度)	サンプルによっては照射ダメージあり (BL16XUダイレクト程度の強度)

### 3.3 高速CTの例

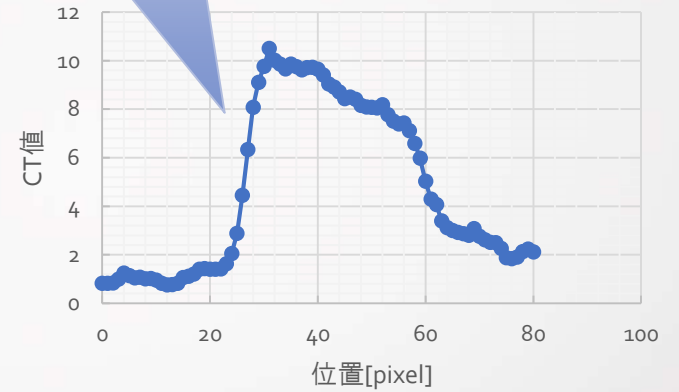
#### —電解コンデンサ—



16 keV(Zr 0.08mm+Al 0.5 mm)

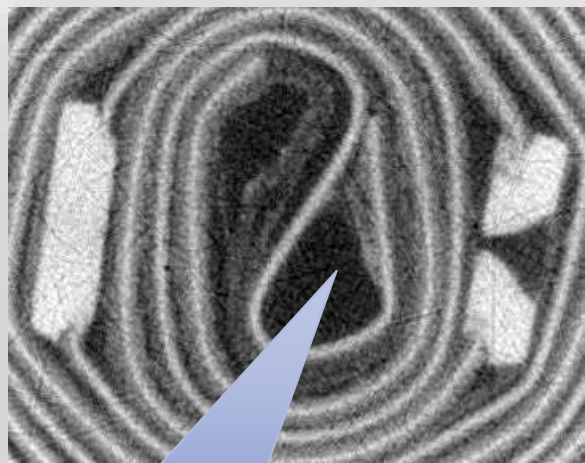
1 mm

2画素=13 ミクロン

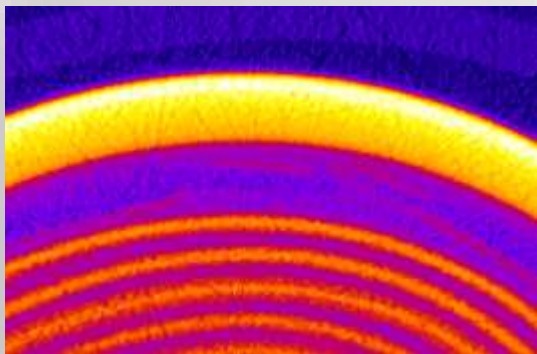


露光時間	20 ms
投影数	1000
計測時間	20 s
空間分解能	15ミクロン

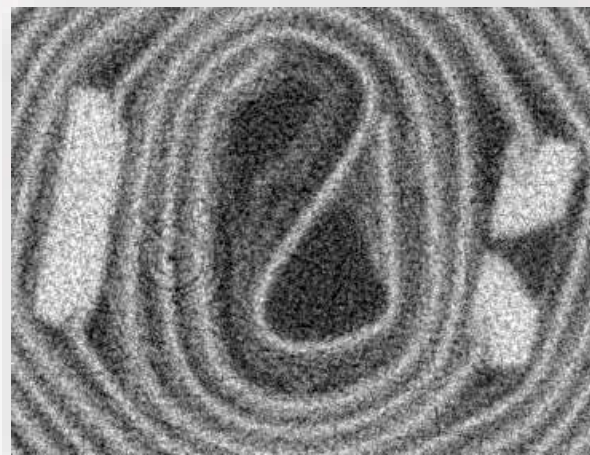




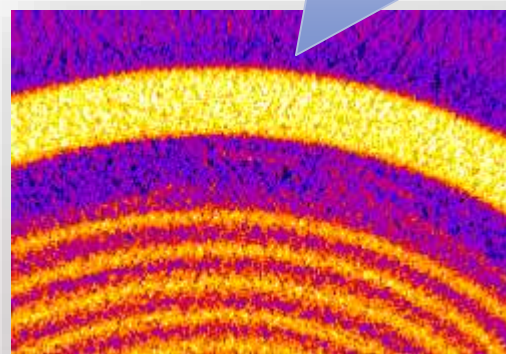
電解紙を高精細に可視化



16 keV(Zr 0.08mm+Al 0.5 mm)



ビームハードニングなし



28 keV(Cu 0.3mm+Al 0.5 mm)

# 4.1 高密度分解能(高感度)イメージング

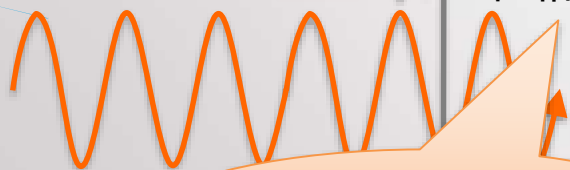
吸収  
イメージング

振幅の変化



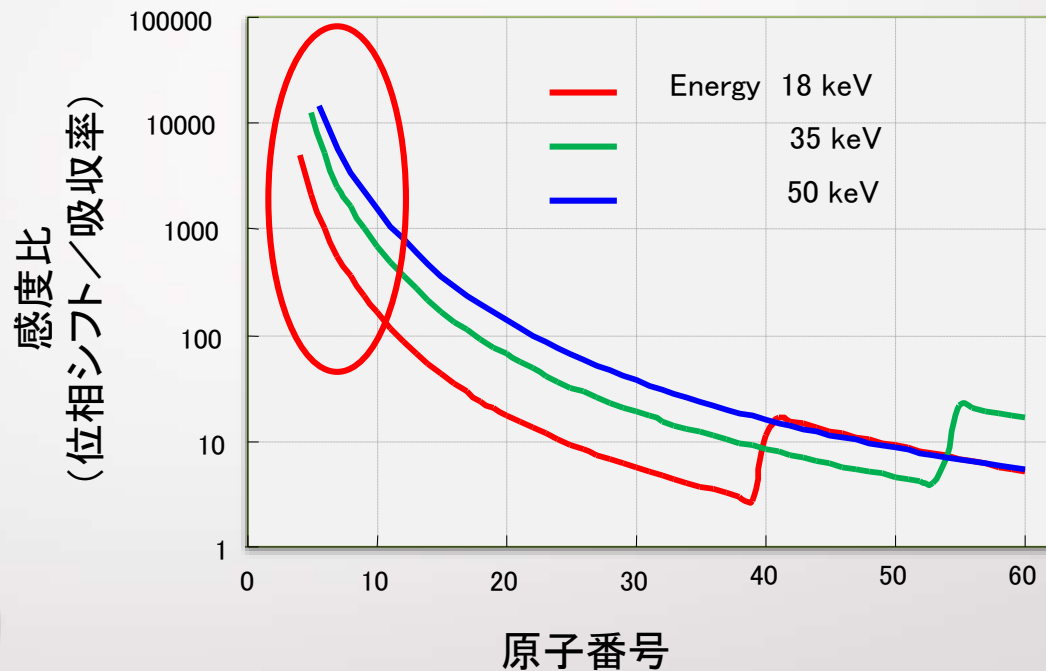
サンプル

位相シフト



位相  
イメージング

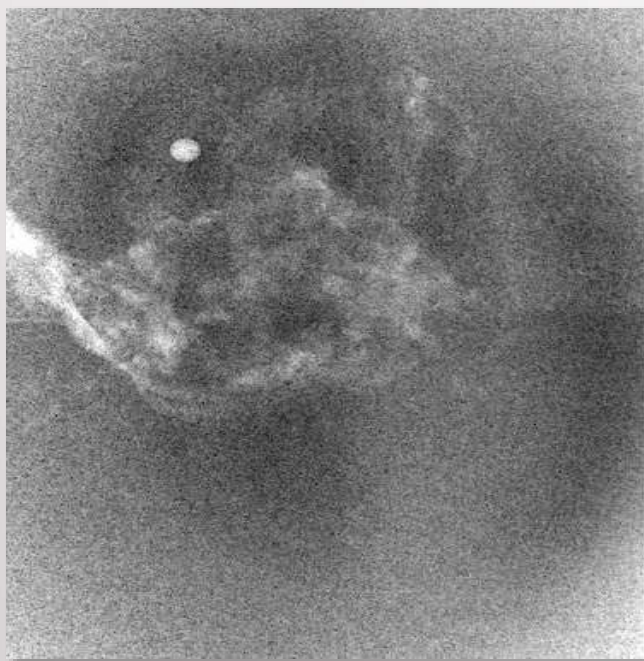
1000倍以上



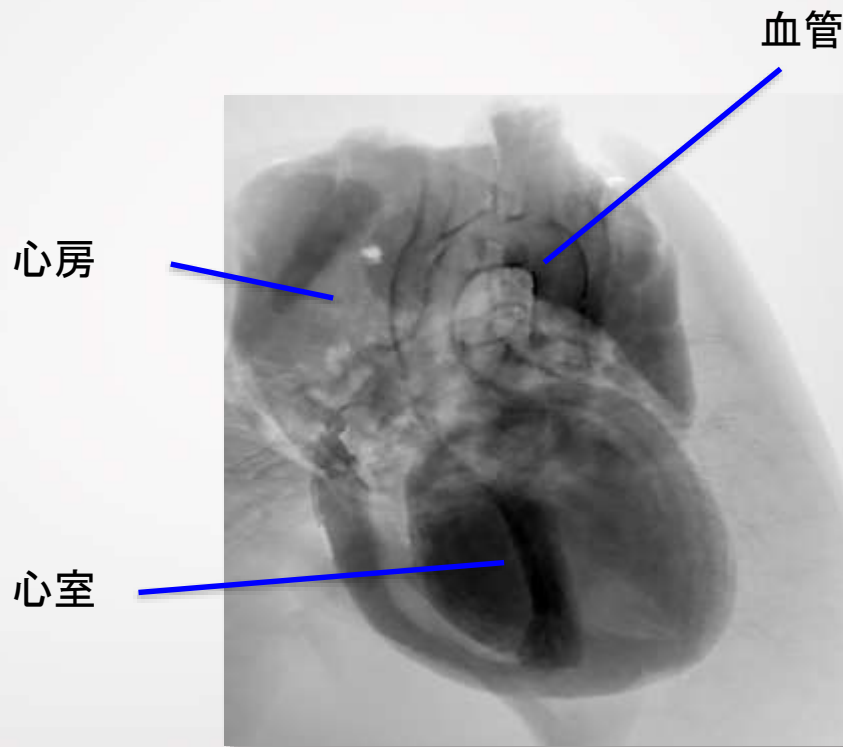
有機材料・生体を高感度に観察可能

## 4.2 位相イメージングの例

### —超高感度計測—



吸収イメージング  
(レントゲン)



位相イメージング

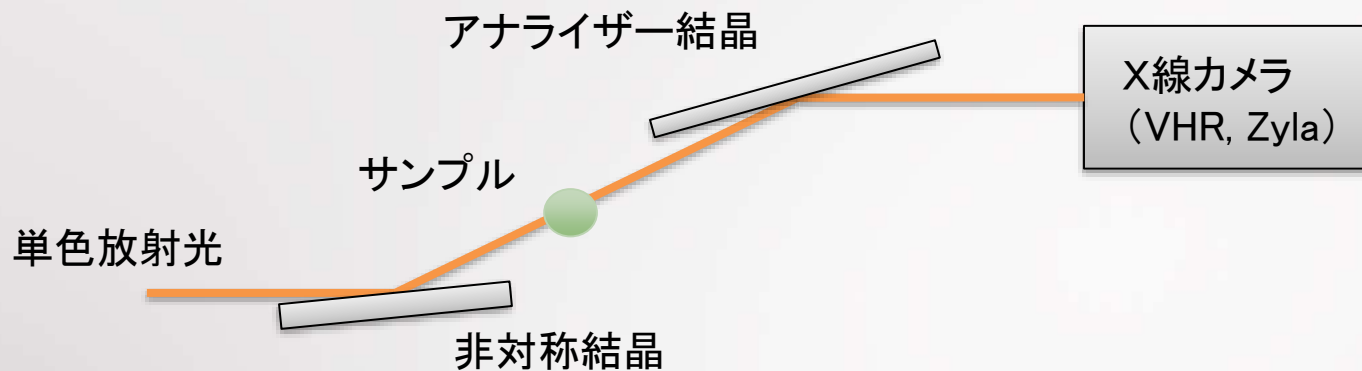
ラット心臓の測定例(同一被曝量)

試料提供：北里大学

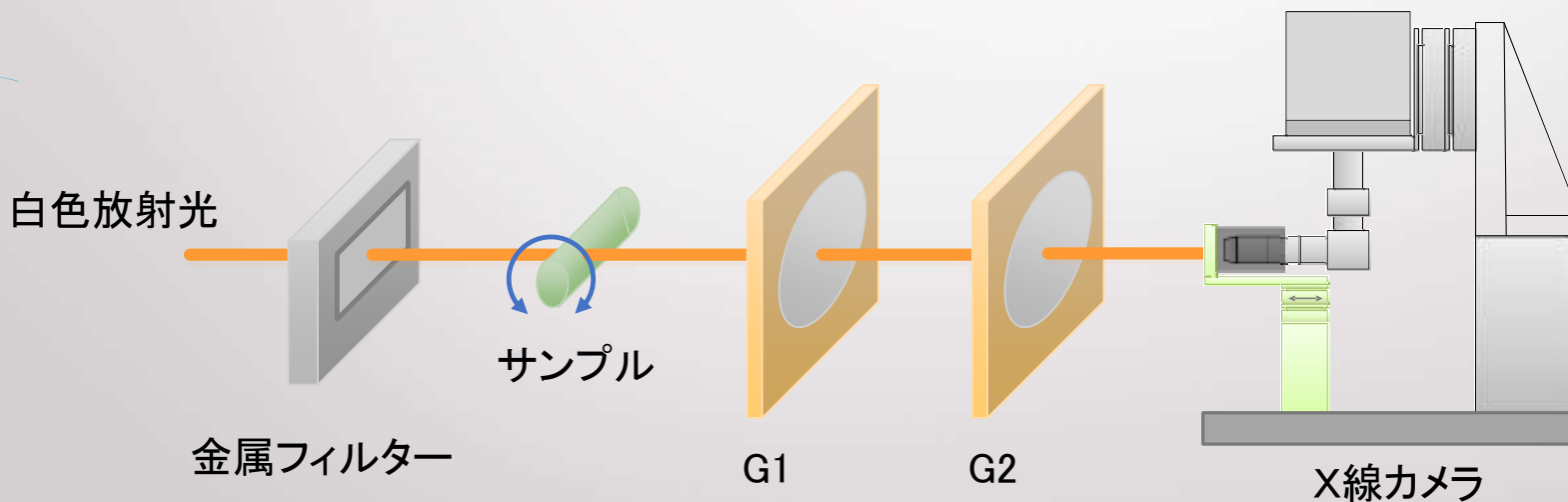
Making the invisible visible



## 4.3 SAGA-LSにおける位相イメージング



屈折コントラスト (DEI) : 高精細

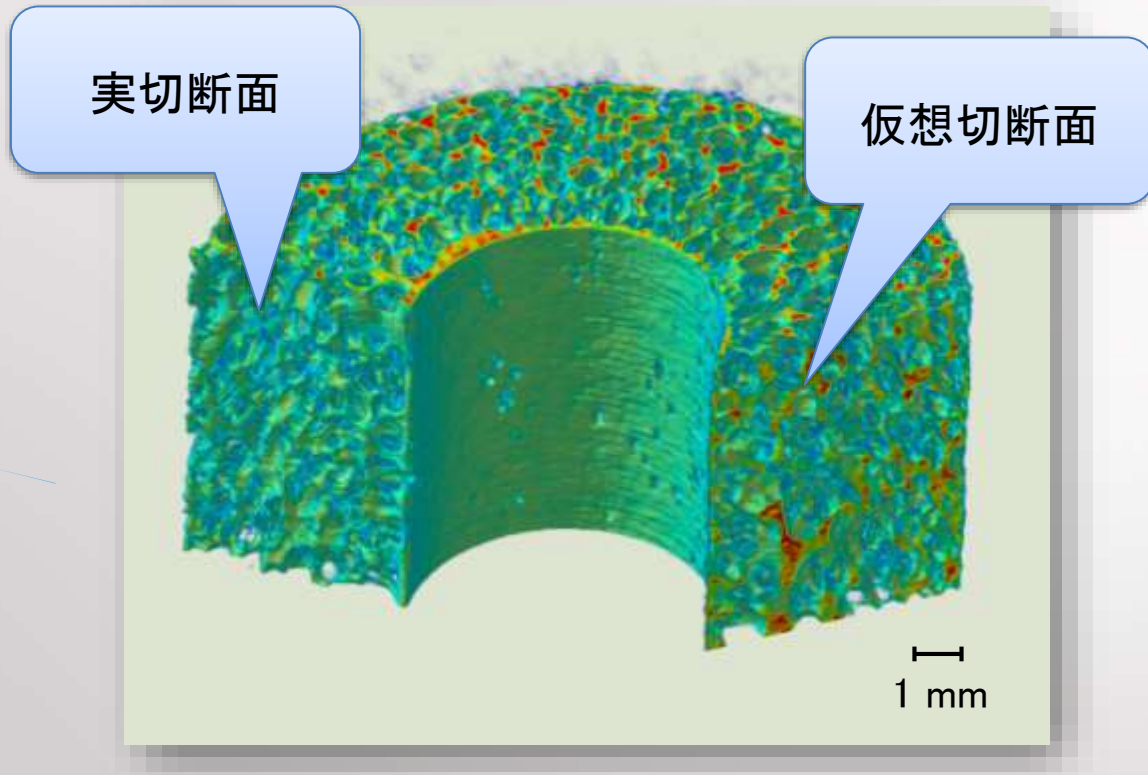


タルボ干渉法 : 高速

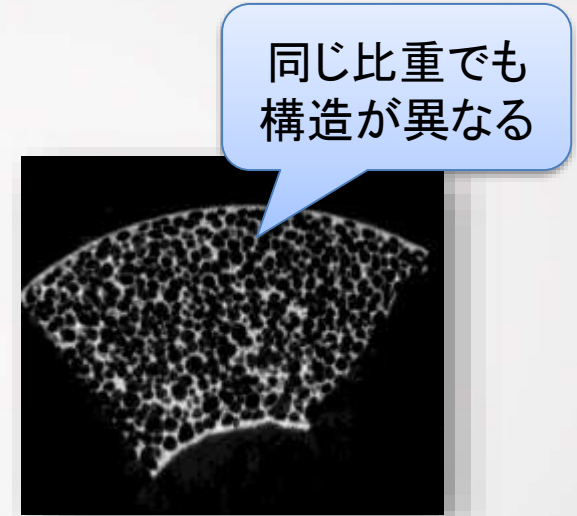
## 4.3 SAGA-LSにおける位相イメージング

	屈折コントラスト (Diffraction Enhanced Imaging)	タルボ干渉法
空間分解能	20～30ミクロン (画素サイズ:6.5ミクロン)	20～30ミクロン (画素サイズ:6.5ミクロン (1倍レンズ))
観察視野	16x12 mm (Zyla) 27x16 mm (VHR)	1倍レンズ: 16x12 mm
投影像の 撮像時間	<10 s (密度ダイナミックレンジに依存)	<1 s
3次元 計測時間	～2時間 (連続スキャンにより短縮検討中)	<100秒 (連続スキャン)
エネルギー	12～35 keV	8～30 keV
密度分解能	～mg/cm <sup>3</sup>	～10 mg/cm <sup>3</sup>

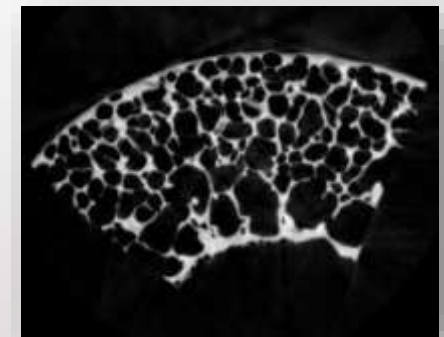
## 4.4 DEIを用いた観察例ー発泡ポリマー



3次元像



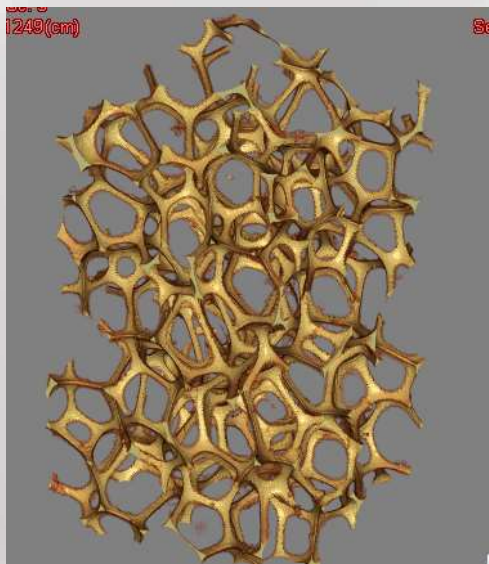
Sample A



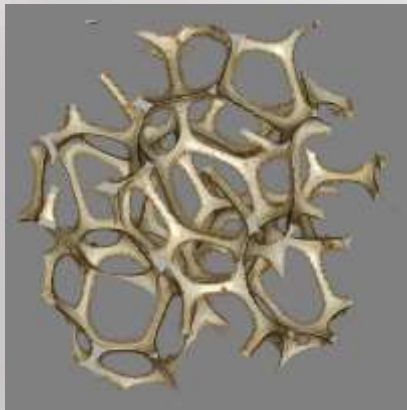
Sample B

発泡ポリマー(絶縁材料)の測定例

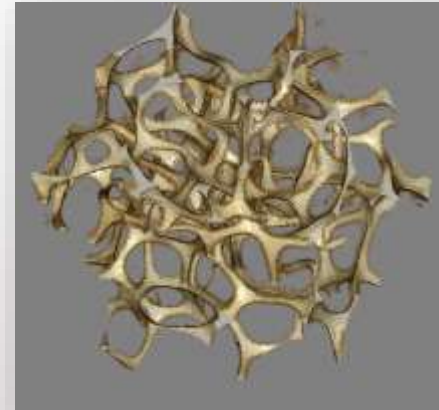
## 4.5 DEIを用いた観察例ースポンジーー



加圧



圧縮前



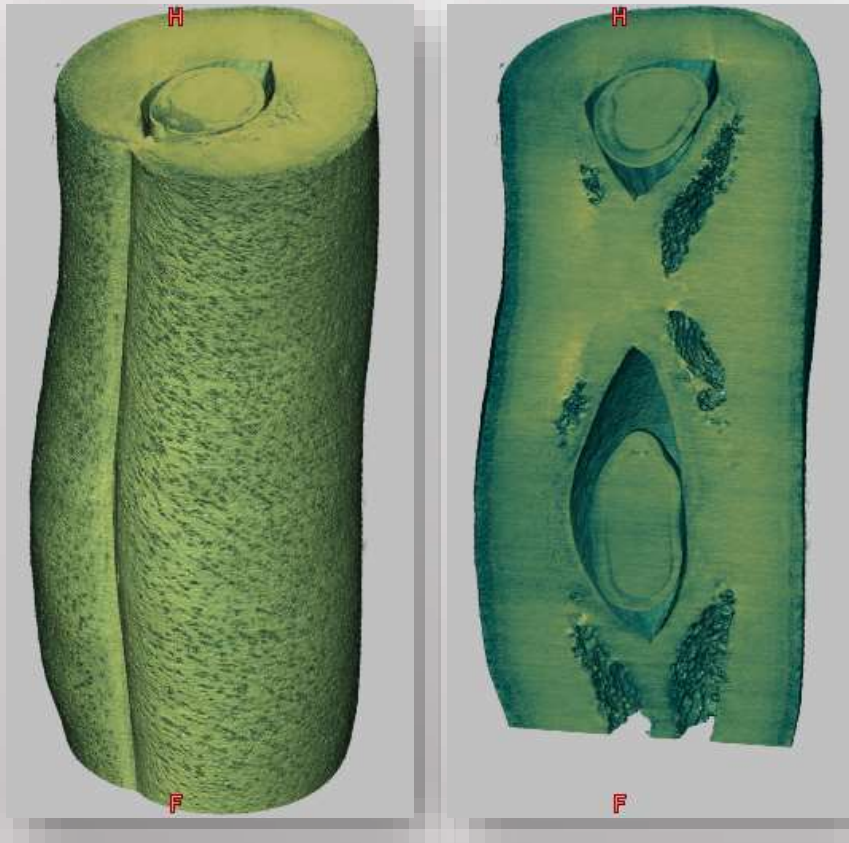
圧縮後

0.5 mm



スポンジ圧縮前後の3次元像

## 4.6 DEIを用いた観察例－野菜－



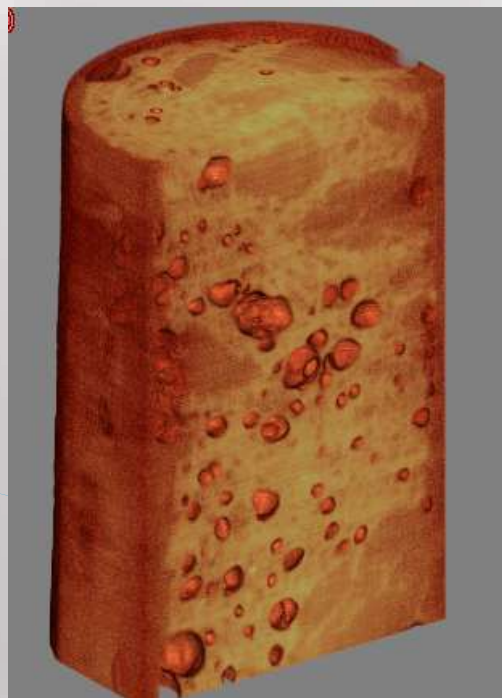
インゲン豆



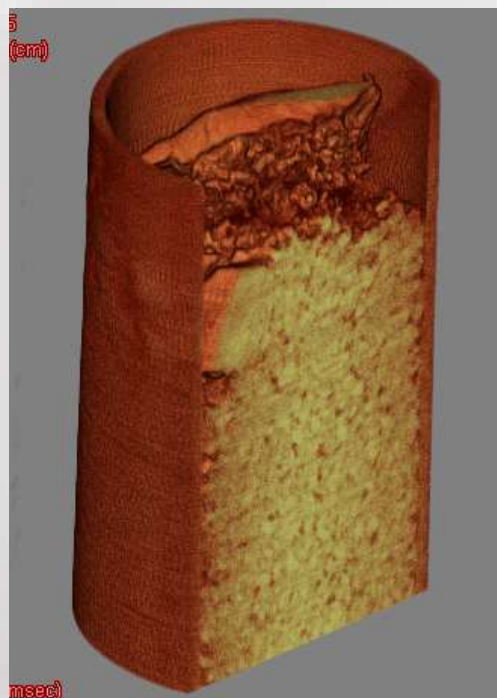
ブロッコリー



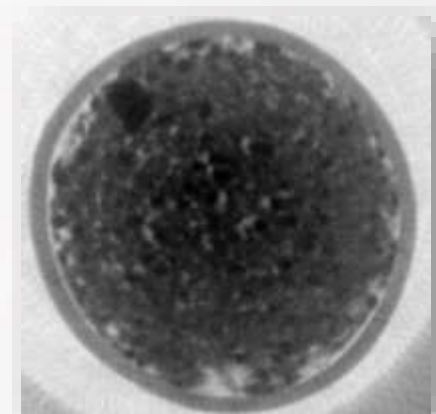
## 4.7 タルボ干渉法を用いた観察例



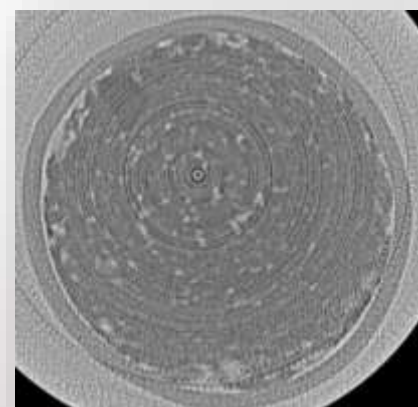
サラミ



フーセンガム



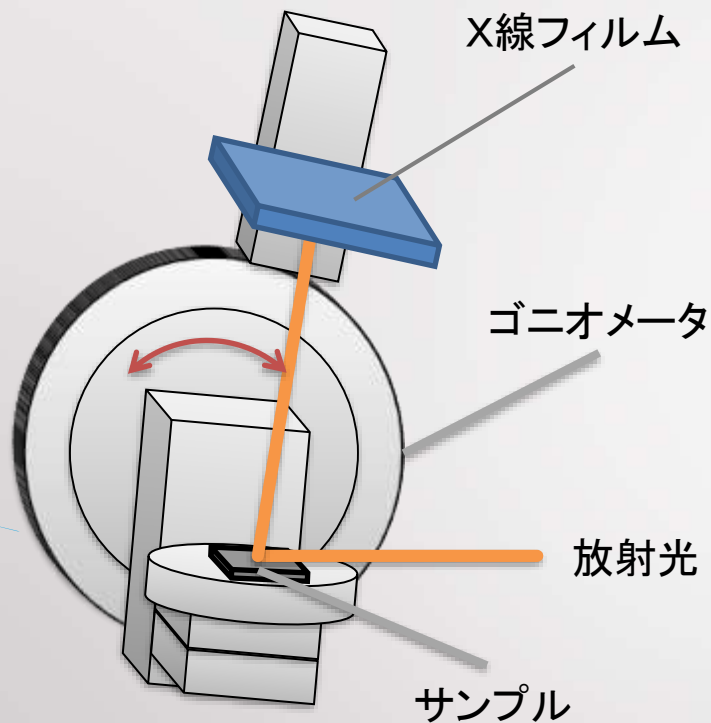
位相CT像



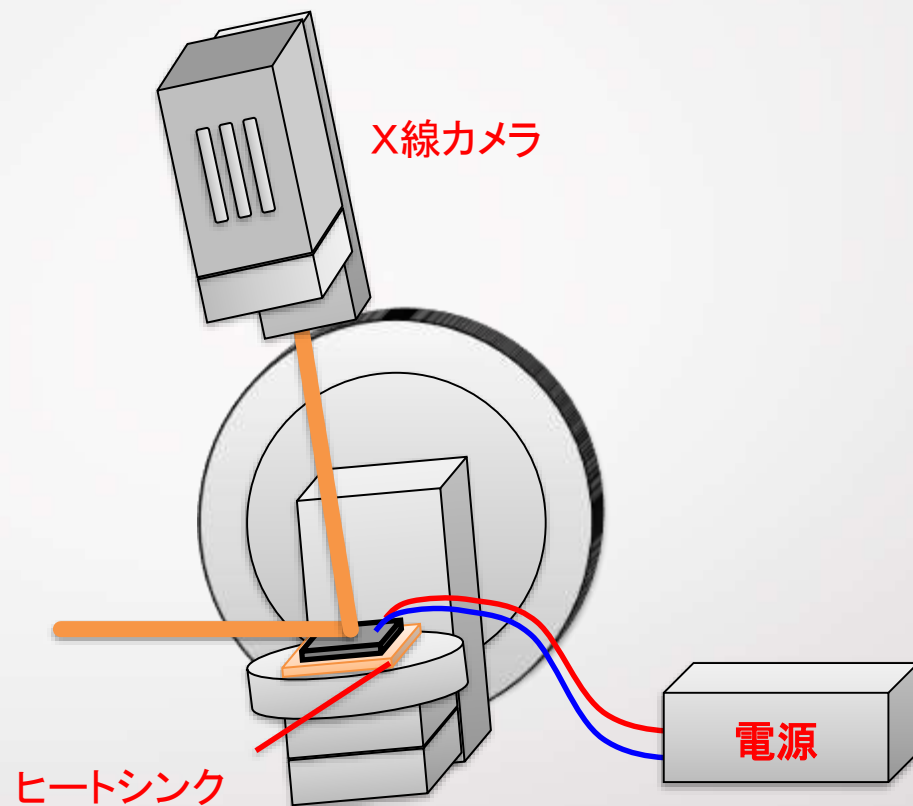
吸収CT像

位相と吸収の感度比 (S/N比)  
約 20

## 5. トポグラフィー



従来X線トポグラフィー装置



オペランドX線トポグラフィー装置  
(2020年度以降)

## 5.1 SAGA-LSにおけるトポグラフィー

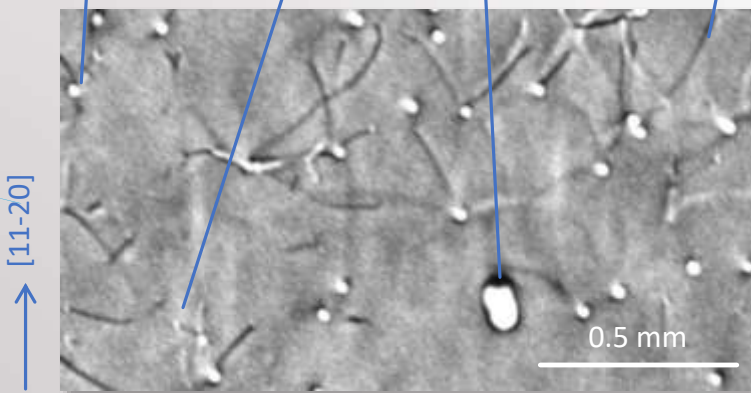
	従来のトポグラフィー (BL-09)	オペラントトポグラフィー (BL-07)
観察視野	白色: 400x8 mm 単色: 140x8 mm(6インチまで)	単色: 15x8 mm
エネルギー	白色: 中心エネルギー8 keV 単色: 5~20 keV (単色⇔白色の切替は約1分)	8~35 keV
検出器	X線フィルム フラットパネル (画素サイズ50 ミクロン) X線CCDイメージャー (画素サイズ7.5 ミクロン)	X線カメラ(Zyla) (画素サイズ6.5ミクロン) (19年度導入予定)
露光時間	白色: 10mm <sup>2</sup> チップ1枚あたり3分 (X線フィルム撮影) 単色: 10mm <sup>2</sup> チップ1枚あたり10分 (X線フィルム撮影)	~1秒
その他	高温下でのトポも可能 セクショントポによる3次元像可	

## 5.2 SAGA-LSにおけるトポグラフィー

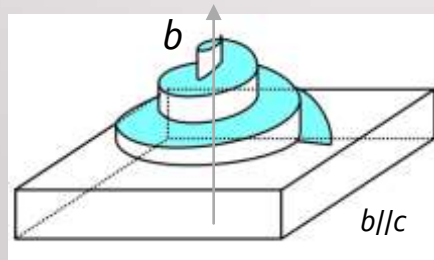
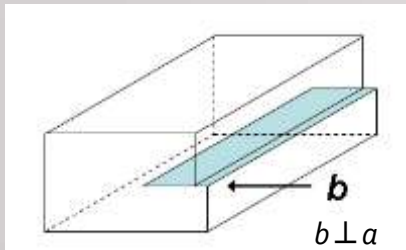
### SiC結晶内の転位イメージ

反射型の単色X線トポグラフの典型例。SiC結晶の転位周囲の歪み場が見えている。観察深さを変える、複数の回折を観察するなど転位の特性を解析。

らせん転位    刃状転位    マイクロパイプ    基底面転位



転位分布の例(4H-SiC -1-128回折)

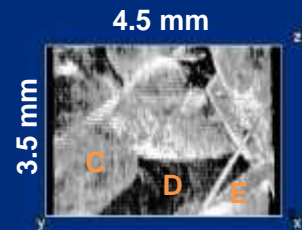


刃状転位(左)とらせん転位(右)の概念

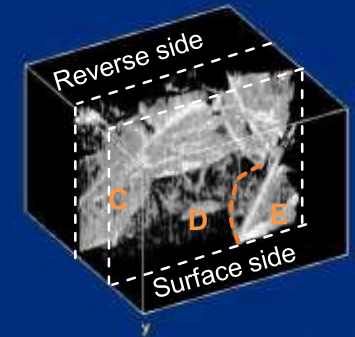
### MgOサブグレインの3次元構造

ビーム縦幅を0.1 mm以下に狭くし、白色光でスライス画像をCCDイメージャーで撮影。スキャンしながら多くのスライス画像を収集し、ImageJ(画像ソフト)で3次元構築。

(a)  $X = 0^\circ, Y = 0^\circ$



(b)  $X = 30^\circ, Y = 30^\circ$



MgO 020回折の3次元化トポグラフ。

左: 平面像, 右: 3次元像

MgO結晶内のサブグレイン境界の重なりが立体的に分かる。グレインEが表面側、Dが裏面側に配置。