

SAGA Light Source における放射光を用いた先端イメージング

○米山 明男¹, 馬場 理香^{1, 2}, 竹谷 敏³,

瀬戸山 寛之¹, 河本 正秀¹

九州シンクロトロン光研究センター¹, (株)日立製作所研究開発グループ²,

産業技術総合研究所物質計測標準研究部門³

九州シンクロトロン光研究センター(SAGA Light Source)では、多種多様な先端イメージング系を構築しており、現在のところ表 1 に示す計測を BL07 の光学及び実験ハッチで実施することが出来る。X線が試料を透過する際に生じた位相の変化から画像を形成する位相コントラスト CT に関しては、世界の放射光施設で唯一、全 4 種類の手法を網羅しており、世界最高レベルの密度分解能を有する結晶 X 線干渉法[1]による生体軟組織の高精細観察から、準単色を利用した高速タルボ干渉法による経時観察まで可能である。また、KB 配置の全反射集光ミラーで形成した 1 ミクロンビームによる走査型蛍光マッピング[2]や、小型 Ge 分光器と組み合わせたマイクロ・イメージング XAFS など可能である。

[1] A. Yoneyama, Vacuum and Surface Science 62 (2), 92-96 (2019).

[2] A. Yoneyama, et al., J. of Instrumentation 15 (12), P12029-P12029 (2020).

表 1 SAGA LS BL07 で可能な代表的な先端イメージング

イメージング法	空間分解能	計測時間	その他	主な観察実績
マイクロ CT (白色・準単色)	~2 μm	<100 秒	放射線損傷あり	木材、骨、微化石
マイクロ CT (単色)	~3 μm	~1000 秒	低温 (<-20℃) も可能	食品(含冷凍)、植物、ハイドレート
位相 CT (結晶干渉法)	30 μm	~3 時間	密度分解能 1 mg/cm ³ 以下	生体軟組織、有機材料、食品
位相 CT (屈折)	30 μm	~2 時間		生体組織、食品、ハイドレート
位相 CT (タルボ)	100 μm	~20 分	極小角も計測可能	食品
位相 CT (伝搬法)	<5 μm	~1000 秒	形態観察(定量 性なし)	琥珀中の化石
走査型蛍光顕微鏡	~1 μm	~1 時間	10 keV 以下	植物種、火山灰
イメージング XAFS	~3 μm	<1 時間	20 keV 以下	金属粉

SAGA Light Sourceにおける 放射光を用いた先端イメージング

○米山 明男¹, 馬場 理香^{1,2}, 竹谷 敏³,
瀬戸山 寛之¹, 河本 正秀¹

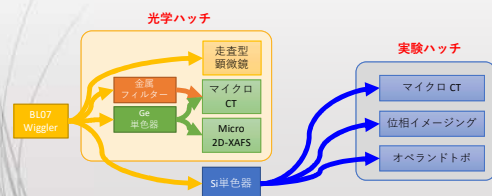
¹九州シンクロtron光研究センター
²(株)日立製作所研究開発グループ
³産業技術総合研究所物質計測標準研究部門

1. はじめに

九州シンクロtron光研究センター(SAGA Light Source)では、S D G s への貢献に資する多種多様な先端イメージング系を構築している。現在、BL07において超伝導ウィグラーから放射された放射光を利用して、

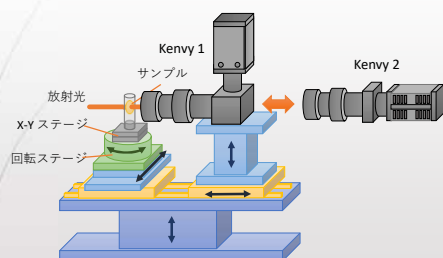
1. 空間分解能2ミクロンのマイクロCT (含む低温観察)
2. 空間分解能1ミクロンの走査型蛍光X線顕微鏡
3. 密度分解能1 mg/cm³の位相コントラストCT
4. 空間分解能3ミクロンのイメージングXAFS

などが可能である。



2.1 マイクロCT

大視野かつ高効率の平行ビーム照射型のマイクロCTを採用している。白色、金属フィルターを用いた準単色、Ge分光による単色の各放射光を利用することができる。

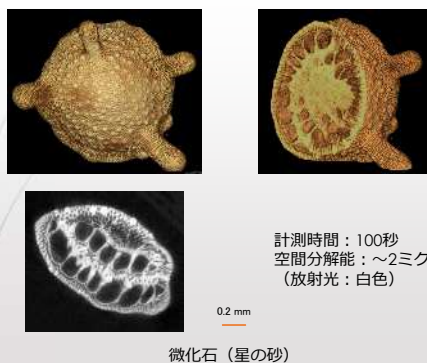


マイクロCTの構成。放射光の種類によりKenvey1と2を切り替えて使用

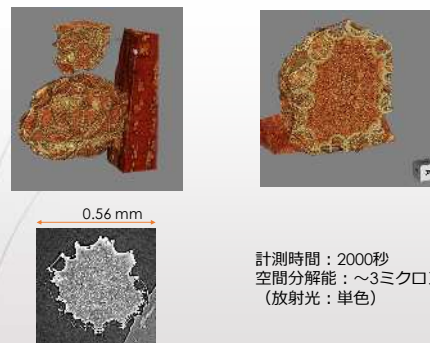
2.2 マイクロCTの仕様

	Kenvey 1利用	Kenvey 2利用
放射光の種類	白色 準単色	単色
空間分解能	2ミクロン	2~3ミクロン
観察視野	2.6 mm角(5倍レンズ) 1.3 mm角(10倍レンズ)	2.6 mm角(5倍レンズ) 1.3 mm角(10倍レンズ)
計測時間	<100秒	2000秒
放射線損傷	あり	なし
密度定量性	なし	あり
計測環境	室温	-100℃~室温
計測例	微化石、木材	植物種、食品、ハイドレート

2.3 マイクロCTの計測例



微化石(星の砂)



トルコキキョウの種

試料提供: 佐賀県農業試験研究センター

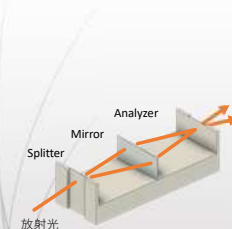
3.1 位相イメージング

位相イメージング法は、サンプルを透過する際に生じたX線の位相シフトを画像化する手法で、従来法より1000倍高感度である。現在、位相シフトを検出する方法として以下の4種類がある。SAGA LSは、全手法が実施可能な世界唯一の放射光施設で、サンプルの状態に応じた最適な手法により低被曝で高精細な3次元観察を行うことできる。

変換方法	概要	検出量	感度	密度レンジ
結晶干渉法	干渉（重ね合わせ）により強度に変換して検出	$\cos(p)$	◎	狭
屈折コントラスト法(DEI)	屈折角を結晶の回折現象を利用して検出	$\frac{\partial p}{\partial x}$	○	広
タルボ干渉法	回折格子によるタルボ効果を用いて検出	$\cos(\frac{\partial p}{\partial x})$	△	中
伝搬法	フレネル回折を利用して検出	$\nabla^2 p$	○	広

3.2 結晶干渉法

結晶X線干渉計（左図）を用いて、波の重ね合わせにより位相シフトを検出する方法で、最も高感度（密度分解能＜1 mg/cm³）である。



結晶干渉法の主な仕様

観察視野	12x10 mm角
空間分解能	～20ミクロン
密度分解能	<1 mg/cm ³
計測時間	5000秒（C T）
放射線損傷	なし
計測環境	サンプルは液体中に保持
計測例	生体軟部組織 有機材料

3.3 屈折コントラスト法（DEI）

サンプルによって生じた屈折角から位相を検出する方法で、ダイナミックレンジが広いことが特徴である。



DEIの主な仕様

観察視野	12x10 mm角
空間分解能	～30ミクロン
密度分解能	～1 mg/cm ³
計測時間	2000秒（C T）
放射線損傷	なし
計測環境	室温
計測例	生体組織 有機材料 食品

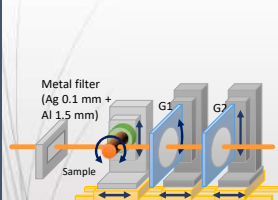


インゲン豆

ラット尾

3.4 タルボ干渉法

格子を用いてサンプルによって生じた屈折角から位相を検出する方法で、準単色利用による高速C Tなどが特徴である。

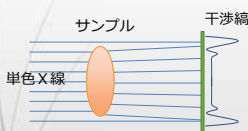


タルボ干渉法の主な仕様

観察視野	12x10 mm角
空間分解能	～100ミクロン
密度分解能	～数 mg/cm ³
計測時間	10秒（C T）
放射線損傷	あり
計測環境	室温
計測例	生体組織 有機材料 食品

3.5 伝搬法

サンプルによって生じたフレネル干渉縞から位相を検出する方法で、空間分解能が高く顕微鏡的な観察も可能である。

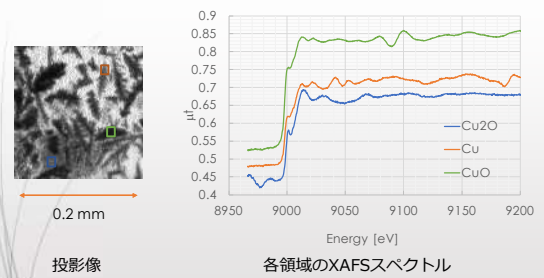
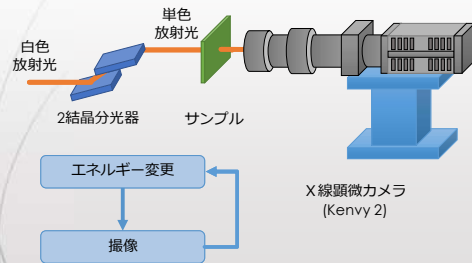


伝搬の主な仕様

観察視野	2 mm角
空間分解能	～5ミクロン
密度分解能	定量性無し
計測時間	2000秒（C T）
放射線損傷	なし
計測環境	室温
計測例	生体組織 有機材料 食品

4.1 イメージングXAFS

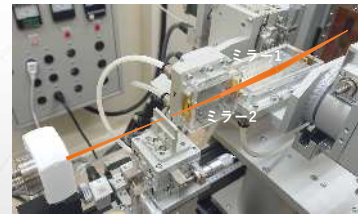
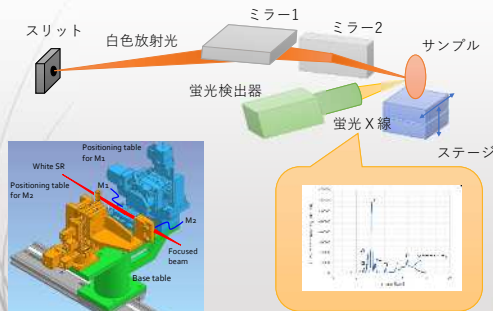
エネルギーสแกนとX線顕微カメラを組み合わせることで、数ミクロンの空間分解能で化学状態等を計測できる。



Cu金属粒子の観察結果

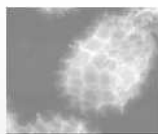
5.1 走査型蛍光X線顕微鏡

全反射ミラー（2枚）により1ミクロンまで集光したX線をサンプル上で走査し、各照射点における蛍光X線を検出



顕微鏡の主な仕様

ビームサイズ	1 ミクロン	対象元素	Si-Cu
視野	1 mm	中心エネルギー	6 keV
計測時間	1~10 h		



投影像

計測時間：2時間
空間分解能：1ミクロン

250 μm



トルコキキョウ種の元素マップ

A. Yoneyama, et al., J. inst., 15 (12), P12029 (2020)

6. まとめ

九州シンクロトロン光研究センター(SAGA Light Source)では、BL07において超伝導ウィグラーから放射された放射光を利用して、

1. 空間分解能2ミクロンのマイクロCT (含む低温観察)
2. 空間分解能1ミクロンの走査型蛍光X線顕微鏡
3. 密度分解能1 mg/cm³の位相コントラストCT
4. 空間分解能3ミクロンのイメージングXAFS

を実施することができる。