

## 研究論文

## 屈折コントラスト X 線 CT 測定に関する研究

杉山信之\*1、福岡修\*1、榎原啓介\*2

## Study on Refraction-Contrast X-ray CT Measurement

Nobuyuki SUGIYAMA\*1, Osamu FUKUOKA\*1 and Keisuke SAKAKIBARA\*2

Research Support Department\*1\*2

BL8S2 に整備された屈折コントラスト X 線 CT について、通常の実験装置と比較することで装置の特徴や適切な試料調製の方法などを可視化することを目的に、いろいろな試料を測定した。屈折コントラスト X 線 CT は BL8S2 での通常の CT 装置より分解能で劣るが、コントラストはつきやすいため、密度差が少なく、大きな構造をもつ試料が適していることが判明した。また、空気からのアーチファクトを防ぐため、試料調製には細心の注意や工夫が必要となることが分かった。

## 1. はじめに

X 線 CT は、X 線を利用して物体を走査した情報を元に、コンピュータを用いて処理し、物体の 3 次元的な内部構造を画像として構成する技術である(図 1)。一般的に用いられるのは X 線の吸収量を画像化する吸収 CT であるが、近年は位相情報を取得し 3 次元情報に変換する位相 CT も行われるようになってきている。位相の情報の取り出し方にはいくつか種類があり<sup>1)</sup>、屈折コントラスト X 線 CT はその 1 種である(図 2)。

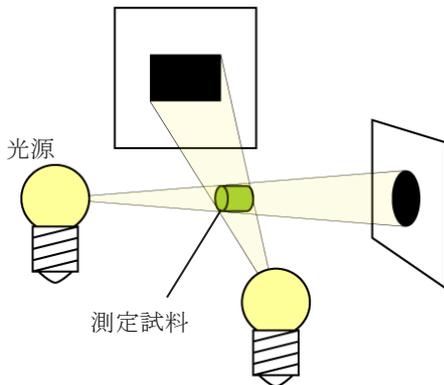


図 1 X 線 CT の原理

本研究では、知の拠点あいち重点研究プロジェクトⅢ期の研究テーマ「革新的シンクロトロン光 CT 技術による次世代モノづくり産業創成」において BL8S2 に整備された屈折コントラスト X 線 CT<sup>2)</sup>について、その測定例を増やして BL8S2 の屈折コントラスト X 線 CT の紹介が出来るようにするとともに、試料調製のコツや屈折コントラスト X 線 CT 測定に向く試料等の情報を共有し、容易に測定できる技術として普及させることを目的とし

た。

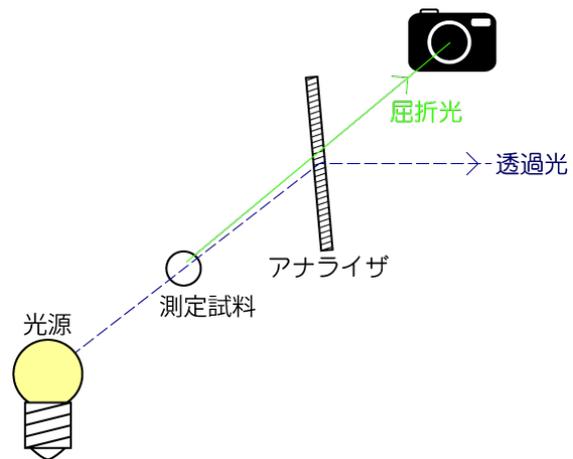


図 2 屈折コントラスト X 線 CT の原理

## 2. 実験方法

実験は BL8S2 の屈折コントラスト X 線 CT と、比較検討として実験室の装置である株式会社リガク製 3 次元 X 線顕微鏡 nano3DX と株式会社島津製作所製マイクロフォーカス X 線 CT SMX-160LT を用いて行った。BL8S2 の屈折コントラスト X 線 CT 装置の外観を図 3 に、その仕様を表 1 に示す。また、比較用の各装置の仕様に関しては表 2 のとおりとなる。比較検討用の試料として、今回は大豆ミート、炊飯米、たまねぎを選択して測定を行った。いずれも食品で、金属元素を含まないため、今回用いた各装置で十分に透過することは確認している。

## 2.1 屈折コントラスト X 線 CT 装置における試料調製

屈折コントラスト X 線 CT は、試料内外の空気が強い

\*1 共同研究支援部 シンクロトロン光活用推進室 (現技術支援部 シンクロトロン光活用推進室) \*2 共同研究支援部 シンクロトロン光活用推進室 (現あいちシンクロトロン光センター)

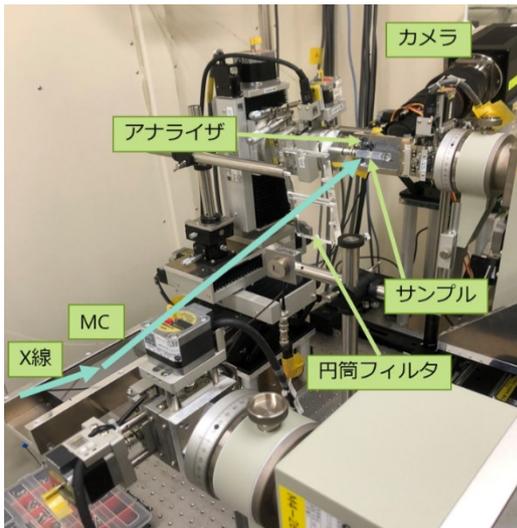


図3 BL8S2の屈折コントラストX線CT装置

表1 BL8S2 屈折コントラストX線CTの主な仕様

倍率	1倍	3.54倍
画素サイズ	5.5 $\mu\text{m}$	1.5 $\mu\text{m}$
視野範囲(横)	$\phi 25.3 \text{ mm}$	$\phi 7.1 \text{ mm}$
視野範囲(縦)	H14.3 mm	H4.0 mm
測定時間	2~4 時間	6~7 時間
エネルギー	典型的には 19.8 keV	

表2 比較用装置の外観及び主な仕様

3次元X線顕微鏡	マイクロフォーカスX線CT
----------	---------------



X線ターゲット:Cu、Mo  
管電圧:40 kV  
管電流:30 mA  
最高空間分解能:0.8 $\mu\text{m}$   
(視野範囲  $\phi 0.7 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$ )  
最大視野:10.6 mm  $\times$  10.6 mm



X線源:LaB<sub>6</sub> フィラメント  
(焦点 0.4  $\mu\text{m}$ )  
最大加速電圧:160kV  
平面CT装置

アーチファクトを出すことが知られているため、それぞれゲル等で試料を包む処理をした。具体的には、大豆ミートは $\phi 3 \text{ mm}$ のカプトンチューブに入れてUV硬化樹脂で固めた後、BL8S2の屈折コントラストX線CTの標準試料ホルダである $\phi 10 \text{ mm}$ アクリルチューブに1%アガロース溶液とともに入れ、冷却して固定した。炊飯米は、あらかじめ硬化前のUV硬化樹脂を入れ脱気したマイクロチューブにそっと沈め、UVを照射して全体を硬化させた。たまねぎは水中で真空引きすることで内部の空気を水に置換後、 $\phi 10 \text{ mm}$ アクリルチューブに1%アガロース溶液とともに入れ、冷却して固定化した。なお、大豆ミート及びたまねぎは倍率1倍、炊飯米は倍率3.54倍で測定した。

### 2.2.3 次元X線顕微鏡装置とその試料調製

3次元X線顕微鏡は、試料ホルダとして $\phi 3 \text{ mm}$ のピンを採用しているため、その上に固定することが基本である。ただし、大豆ミートはもろいため、 $\phi 3 \text{ mm}$ のカプトンチューブを保護ケースとして使用し、 $\phi 3 \text{ mm}$ のピンに固定した。炊飯米は測定中に水分の出入りが問題になることが予想されたため、ふたのできる1.5 mLマイクロチューブ内に炊飯米を1粒入れた状態で試料ホルダである $\phi 3 \text{ mm}$ のピンに固定した。一方、たまねぎは試料ホルダに直接接着した。

### 2.3 マイクロフォーカスX線CT装置とその試料調製

マイクロフォーカスX線CTは、平板の試料台を持っており、測定時間も最大で30分と短いため、すべての試料において、試料台に直接乗せて測定した。

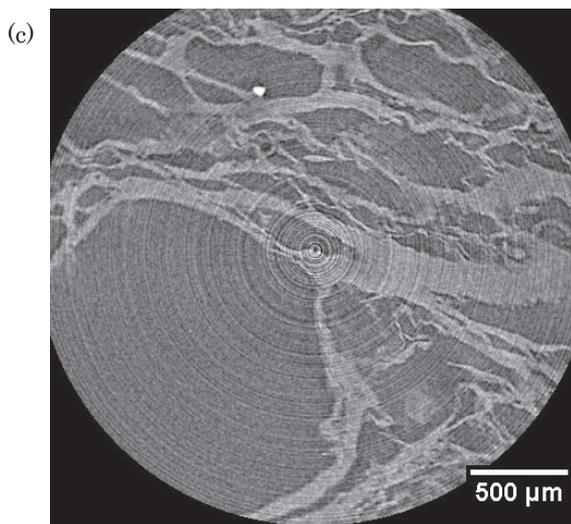
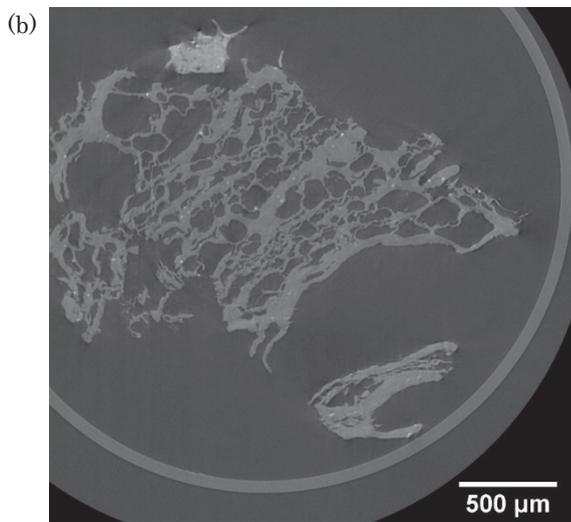
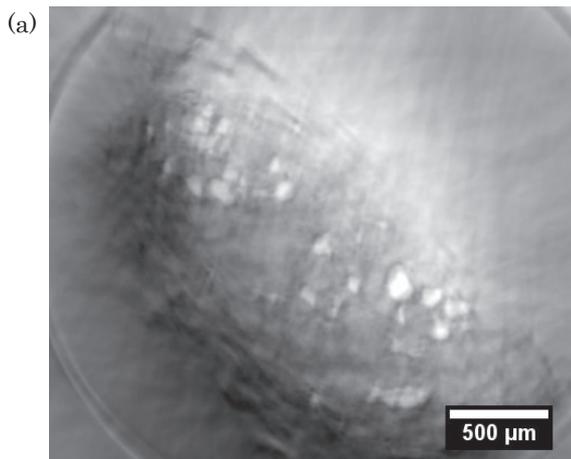
## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 大豆ミートの測定結果

大豆ミートの測定結果を図4に示す。大豆ミートは空隙と大豆成分の2つが比較的コントラストが付きやすい半面、網目構造の細い部分などは高分解能を必要とする。そのため、コントラストが付きやすい反面、分解能が少し劣る屈折コントラストX線CTは、そのメリットを生かせず、ぼやけて観察された。3次元X線顕微鏡およびマイクロフォーカスX線CTはどちらも網目構造を捉えることができているが、マイクロフォーカスX線CTは視野が狭く、空隙率や空隙サイズ分布等の詳細な解析には向かないデータとなった。

### 3.2 炊飯米の測定結果

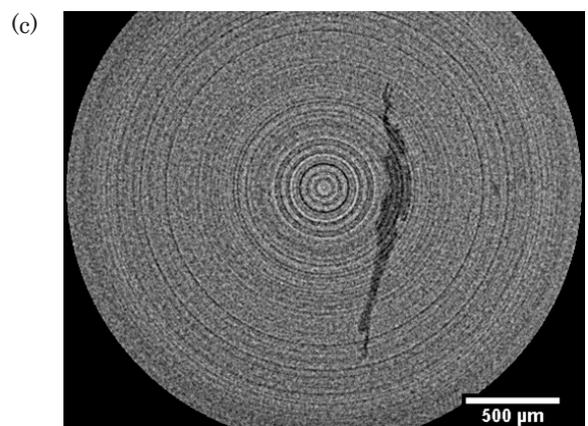
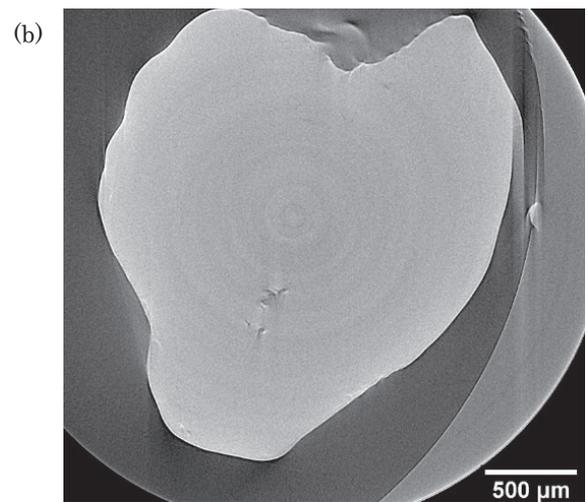
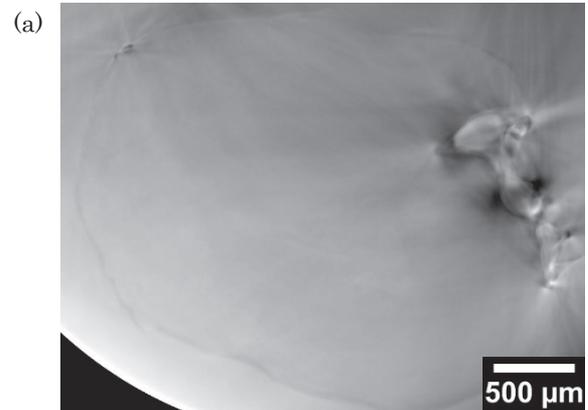
炊飯米の測定結果を図5に示す。炊飯米は予備的な実験で、水を含むゲルに入れてしまうと膨潤する様子が観察されたため、固定が必要な屈折コントラストX線CTでは水を含まないゲルを採用した。しかしながら、長時間測定の際に試料内部などから気泡が発生し、その気泡



(a) 屈折コントラスト X 線 CT  
 (b) 3 次元 X 線顕微鏡  
 (c) マイクロフォーカス X 線 CT

図 4 各装置による大豆ミートの CT 断層像

からのアーチファクトが目立つ結果となった。一方、3次元 X 線顕微鏡においても長時間測定が必要で、その間に水分が抜けて試料が動いてしまい、再構成が正しく行えない状態だった。マイクロフォーカス X 線 CT は、短時間の測定であったためか、大きな問題は起こらなかったものの、割れが観察された以外に目立つ構造は確認されなかった。

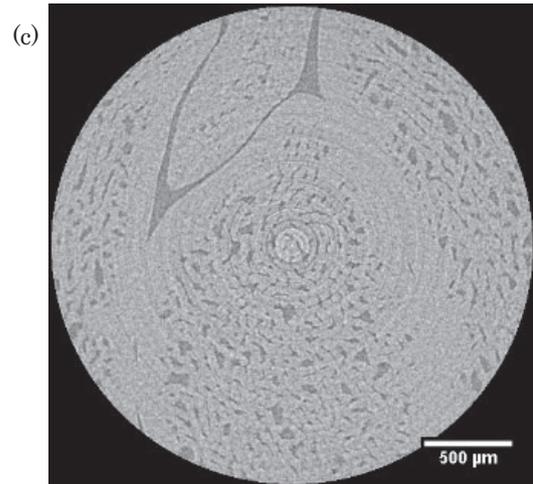
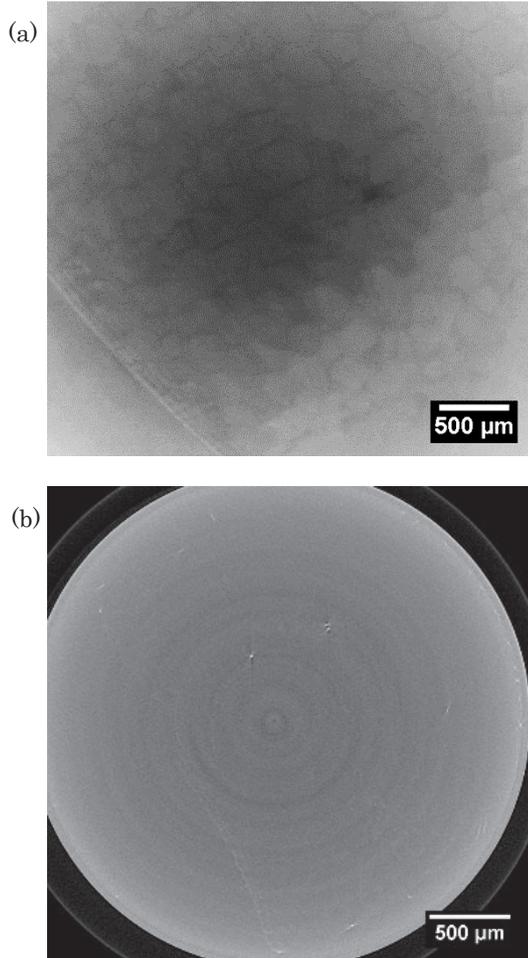


(a) 屈折コントラスト X 線 CT  
 (b) 3 次元 X 線顕微鏡  
 (c) マイクロフォーカス X 線 CT

図 5 各装置による炊飯米の CT 断層像

### 3.3 たまねぎの測定結果

たまねぎの測定結果を図6に示す。たまねぎの細胞壁は、光学顕微鏡等では比較的簡単に見える構造であるが、CTではコントラストがつきにくい上に長時間の固定が困難で、測定が難しい。3次元X線顕微鏡ではほとんど何の構造も見られない結果となったが、測定時間が短いマイクロフォーカスX線CTでは、壁のような構造は見られた。一方、屈折コントラストX線CTでは、コントラストが強くなるため、細胞壁の構造と思われる状態をはっきりと観察することができた。



(a) 屈折コントラスト X 線 CT  
 (b) 3 次元 X 線顕微鏡  
 (c) マイクロフォーカス X 線 CT

図6 各装置によるたまねぎの CT 断層像

## 4. 結び

屈折コントラスト X 線 CT はありふれた物質である空気が邪魔になるため、試料調製は慎重に行う必要がある。必要な測定時間も長く、簡単に使える技術ではないことが明らかとなったが、上手に測定ができれば、通常の CT では考えられないほど微妙な密度差を検出することができる。

## 文献

- 1) A. Yoneyama, R. Baba, T. T. Lwin and M. Kawamoto: *Journal of Physics: Conference Series*, **2380**, 012117 (2022)
- 2) Naoki Sunaguchi, Tetsuya Yuasa, Daisuke Shimao, Shu Ichihara, Rajiv Gupta and Masami Ando: *Appl. Phys. Lett.*, **122**, 123702 (2023)