

# 油揚の網目構造形成過程の解析

太子食品工業株式会社

企画本部 企画部 技術開発室 副部長 井戸川詩織  
企画本部 企画部 技術開発室 桜井萌々子◎

- 太子食品工業の紹介
- 研修参加の背景・目的
- 放射光施設利用について
- 測定結果
- まとめ
- 謝辞
- 宮城県産業技術総合センター 浅野様より

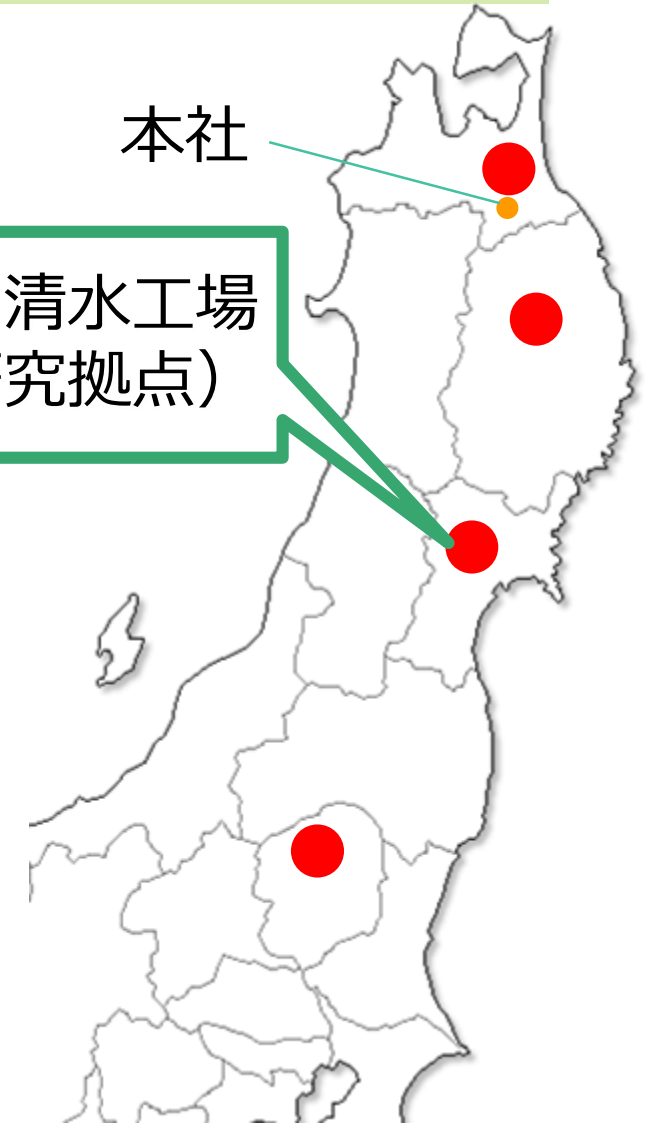
# 会社概要



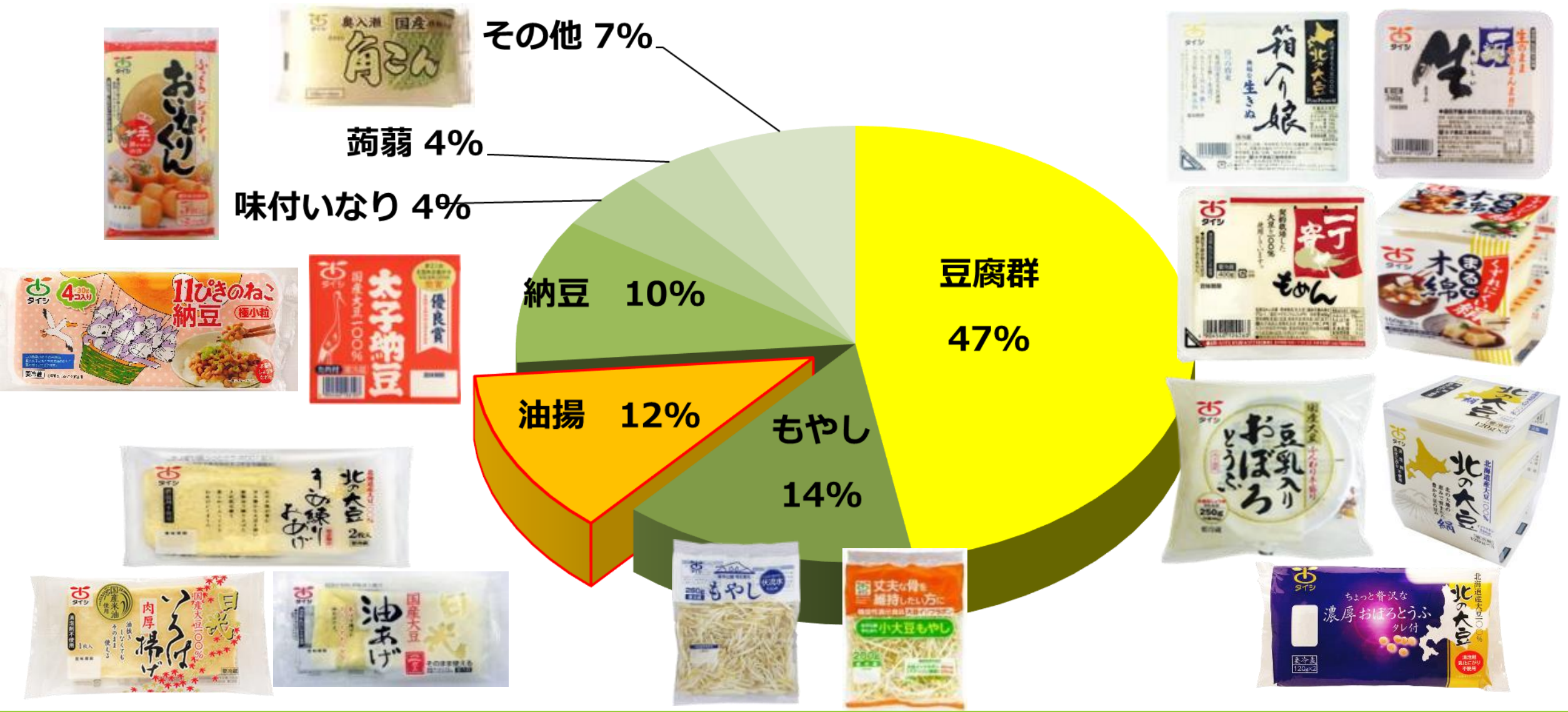
- 社名：太子食品工業株式会社
- 本社：青森県三戸郡三戸町
- 創業：1940年
- 社長：工藤 茂雄
- 資本金：7,000万円
- 従業員数：約650名（2018年度）
- 売上高：約180億円（2018年度）
- 工場：十和田・雫石・古川清水・日光・蔵王高原フーズ
- 営業所：北東北（青森・八戸・盛岡）・仙台・東京



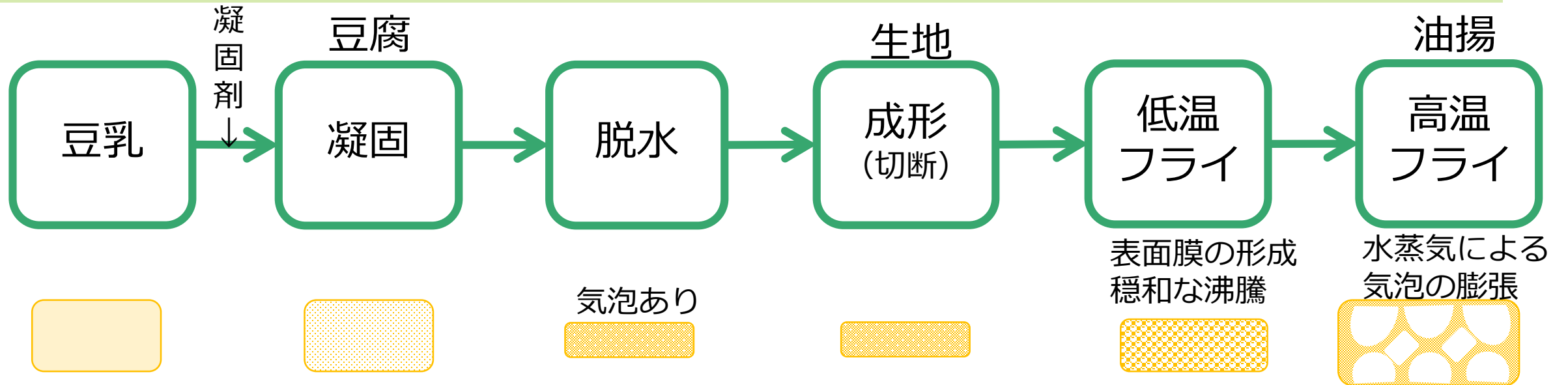
古川清水工場  
(研究拠点)



# 事業内容



# 油揚の製造方法

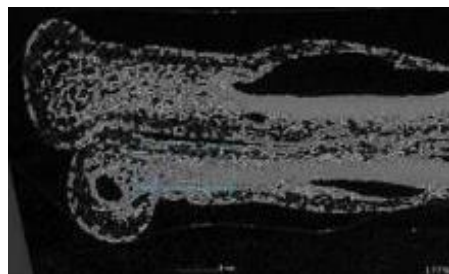
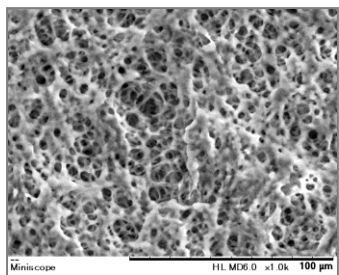


**油揚の製造は伝統的製法の機械化である  
→科学的な根拠に乏しいことが原因**



# 今回の目的

	テーマ①	テーマ②	テーマ③
課題	<p>タンパクの網目構造（ネットワーク）の違いを定量的に評価できていない</p> <p>→ 官能評価に頼っている</p>	<p>油揚の製造工程での内部構造の変化が不明</p> <p>→ 新製法の開発がしにくい</p>	<p>油揚の品質評価方法が確立していない</p> <p>→ 製法による違い、他社品との違いを表現できない</p>
目的	<p>タンパクのネットワーク構造（網目構造）を3次元解析</p> <p>→ 製造方法による網目構造の違いを定量的に評価</p>	<p>油揚げ生地～製品までの内部構造の変化を可視化</p> <p>→ 品質差に大きな影響を与える重要なポイントを押さえる</p>	<p>油揚製品の内部構造を数値化</p> <p>→ 油揚の品質評価方法の確立</p>

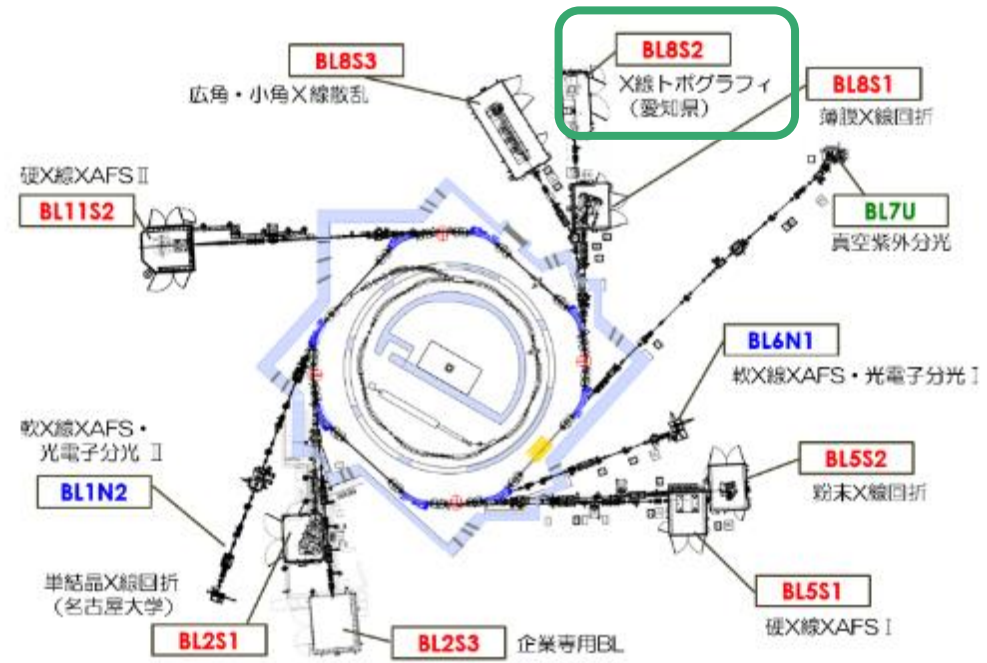


**各製法・各工程の網目構造を  
高解像度・3次元で観察したい**

豆腐の電子顕微鏡観察画像

油揚の工業用X線CT測定画像

# あいちSRについて

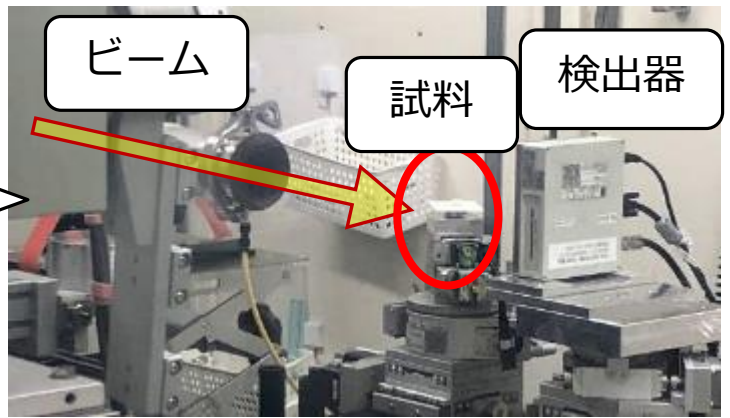


## 【使用ビームライン (BL8S2) について】

- X線トポグラフィ、LIGA (マイクロ加工)、**X線CT**、X線照射による育種改良などが可能

放射光ビームを試料にあて、透過したX線を二次元検出器で検出  
 →3次元および断面微細構造の非破壊観察

- 白色X線と単色X線 (エネルギー: 7~24 keV, 波長: 0.18~0.05 nm) が利用可能



X線	倍率	試料サイズ (直径)	イメージ分解能
白色	10倍	1 mm	2 $\mu$ m
単色 (7~24 keV)	等倍	10 mm	10 $\mu$ m

# スケジュール



	2020年					2021年	
	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月
事前説明 @宮城県産技センター	○						
事前打ち合わせ @あいちSR		○					
事前準備		○	○				
シンクロトロン光計測 入門講習会@あいちSR				○			
本測定@あいちSR							
データ解析・まとめ							

放射線業務従事者教育訓練  
 データ保存用SSD・HDD、PC用メモリ、治具、サンプル  
 電離放射線健康診断  
 VGStudioMAX、ImageJ、Molcer  
 4シフト (16時間)



# 事前準備

## 【事前打ち合わせ（2020/9/17）】

- 測定の目的を資料にまとめ、共有
- 実際のサンプル（豆腐、油揚げ）を持参し、  
ご確認いただく
- 測定エリア内に入り、BL8S2の見学と測定方法を  
大まかに説明いただく
- **データ保存用SSD(1.9TB)**を持参し、  
接続に問題がないか確認
- 測定日の決定・利用予約
- 申請書などの確認 → 後日メールにて送付

水分蒸発を防ぐため、  
**ポリイミドチューブ**に試料を入れて測定

内径1.0 mm×1 m  
(古河電工製)



- 1データ70 GB程度（360度撮影）
- SSDのほうが転送速度が速く好ましい
- 後日HDD（8.0 TB）も購入

水分が多く、測定の難航が予測  
& サンプル数が多い  
→ 11/26, 27の4シフト  
(10:00-18:30 ×2日間)  
→ 20分/1サンプル → 最大40サンプル

## 【シンクロトロン光計測入門講習会（2020/11/9-10）】

1日目：X線CT測定に関する基礎的な講義

2日目：サンプル測定・解析実習（3グループで2時間）

- 豆腐測定が可能かどうかの確認（白色X線測定）
  - 気泡発生のため試料が動いてしまい、撮影不可
  - ・測定当日は熱負荷を抑える条件検討が必要
  - ・測定状況によっては単色光に切り替える
  - ・豆腐よりも油揚げにフォーカス

### 【X線CT入門1】

「X線CTの基本原理およびX線暗視野法を用いる屈折コントラストCTの近年の成果」

名古屋大学 医学系研究科 准教授 砂口 尚輝 氏

### 【X線CT入門2】

「あいちシンクロトロン光センターでのX線CT測定 ～試料準備からデータ取得まで～」

名古屋大学シンクロトロン光研究センター  
特任准教授 櫻井 郁也 氏

## 【その他】

- 電離放射線健康診断
- 放射線業務従事者教育訓練

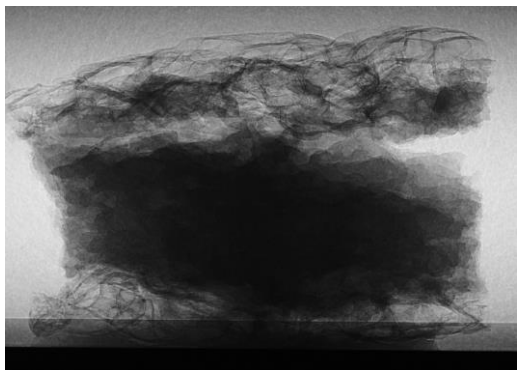
(2020/9/24 13:30~16:40・あいちSR主催・Zoom参加)

# 測定のおおまかな流れ

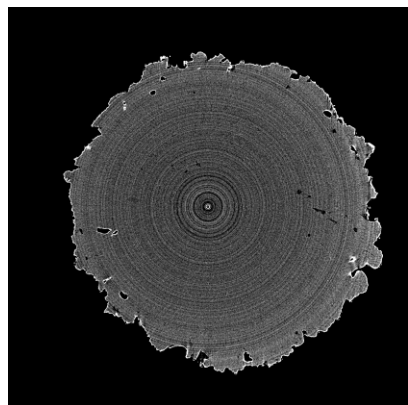
- ① 白色光、単色光の選択を行い装置をセッティングしていただく
- ② 単色光の場合はエネルギーを選択する (7~24 keV)
- ③ サンプルをステージ上に設置し、位置合わせを行う
- ④ 撮影開始  
→サンプルセット~撮影終了まで20分程度
- ⑤ データ処理  
→1801枚/180度、3601枚/360度 (工業用CTは1000枚/360度)

白色→単色：30分程度で可能  
単色→白色：同日には困難

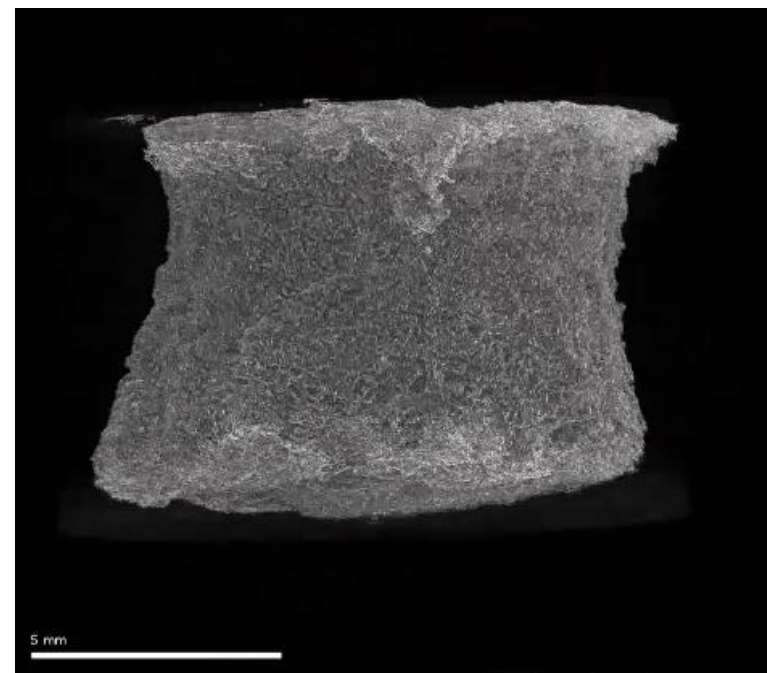
今回の単色光測定は14 keV



×3601枚 →  
(1801枚)



×2047枚 →



油揚のX線透過像

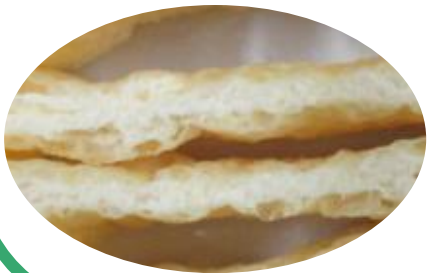
断面CT像

\* 直径13 mmのストローでくり抜き、そのまま撮影  
(コーティング等なし)

油揚げを製法で作り分け（原材料は水・大豆・にがり・油のみ）



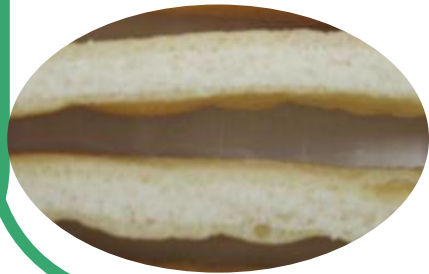
商品名：日光油あげ  
特徴：フライ層が厚く、丈夫  
ふわっとして汁含み良い  
用途：稲荷寿司、汁もの



厚み 5 mm  
フライ層：豆腐質  
6：4



商品名：きぬ練りおあげ  
特徴：フライ層が柔らかい  
全体的になめらか食感  
用途：生食（パン代替）



厚み 5 mm  
フライ層：豆腐質  
4：6



商品名：日光いろは揚げ  
特徴：フライ層が薄く柔らかい  
厚みがあり豆腐感が残る  
用途：煮物、軽く焼いて



厚み 6.5 mm  
フライ層：豆腐質  
2：8

# テーマ① 白色X線測定 of 検討



変性・乾燥・  
離水・気泡発生

白色X線測定

幅広いエネルギーのX線を含み輝度が高い  
= 高倍率で測定可能だが、熱負荷が大きい

カプトン  
チューブ

UV  
硬化樹脂



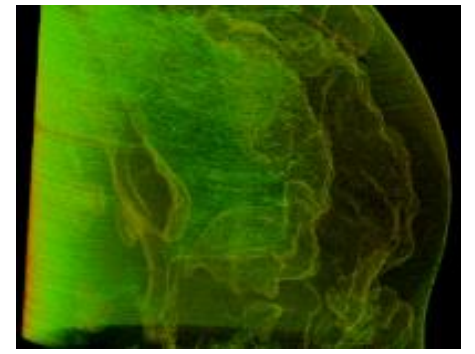
## 熱負荷への対応策

- ① 光源と試料の間にアルミ板 (150 μm) をはさむ → 熱負荷抑制には不十分だが必須
- ② 撮影時間を短縮 (180度回転、露光時間短く) → 検討不十分だったが実施
- ③ カプトンチューブ内に入れたまま測定 → チューブと試料の間に気泡発生
- ④ チューブのまま直前まで冷凍 → 測定中に溶解し、効果なし
- ⑤ UV硬化樹脂でコーティング → 水分約80%以下かつ表面に油が付着していない場合測定可能

↓しかし…

透過しやすい試料&アルミ板・撮影時間短縮によりコントラスト差が足りない

樹脂と試料の境界が不鮮明であるため、  
白色X線でサンプルの構造は解析できなかった



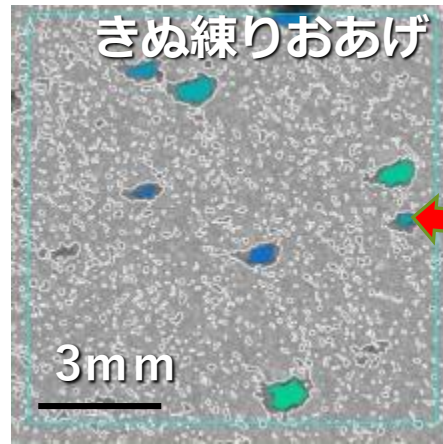
油揚生地 白色X線撮影像



# 工業用X線と放射光単色X線測定と比較

## 工業用X線CT

栃木県産業技術センターのX線CT  
(ニコンMCT225)で撮影、  
VGStudioMAXで欠陥解析  
(色分けはサイズ別)



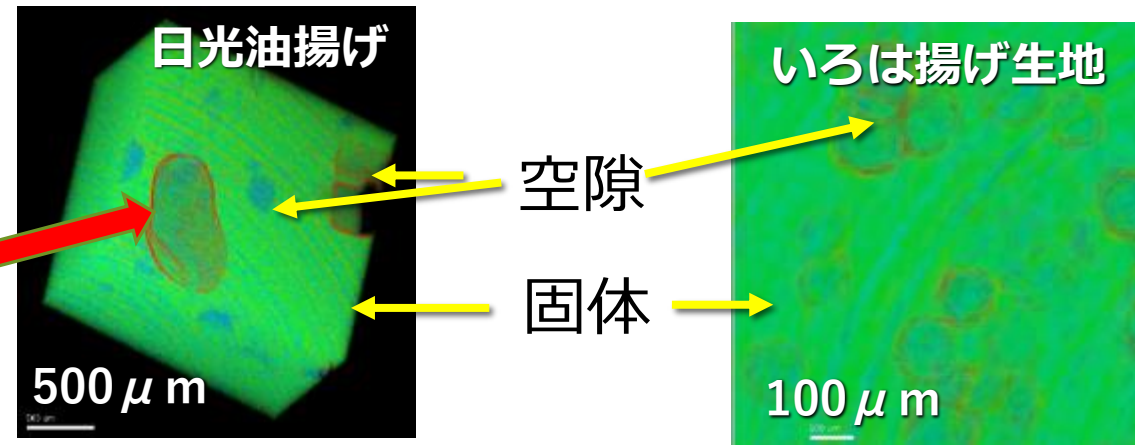
同程度の  
大きさ

- 欠陥解析可能
- 0.5 mm程度の空隙を検出
- 最小0.1 mm程度も検出しているがノイズとの区別が困難

## 放射光X線CT

単色X線測定 of 3次元画像をMolcerにより色分け

低コントラスト 液体・気体      固体      高コントラスト 高密度固体



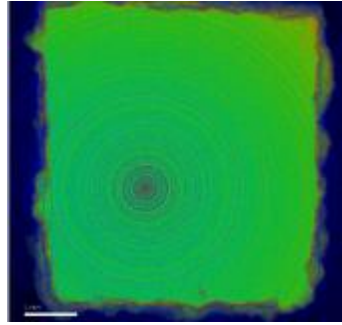
- 2相 (気体 or 液体と固体) を分離して観察可能
- 固体のうち、高密度部分も区別可能 (赤色)
- 0.1 mmのセル構造を明確に認識可能
- ノイズが大きく、欠陥解析はできない
- ネットワーク構造は観察できない

# テーマ② フライ中の変化（3次元観察）

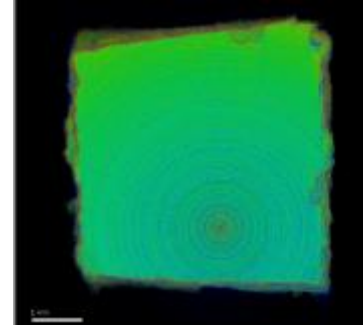
生地

膨化前

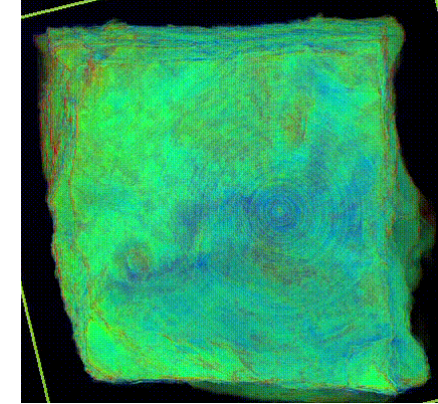
膨化後



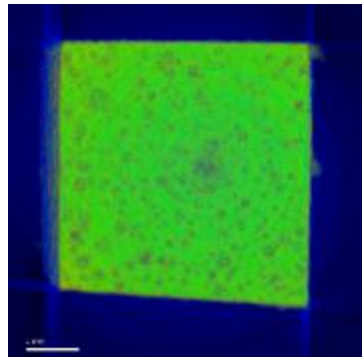
空隙見えず



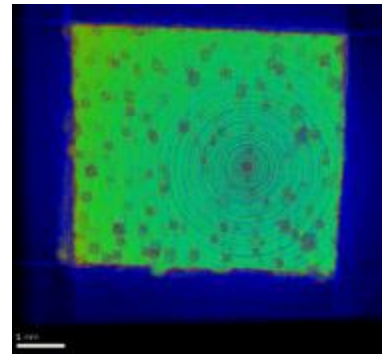
空隙見えず



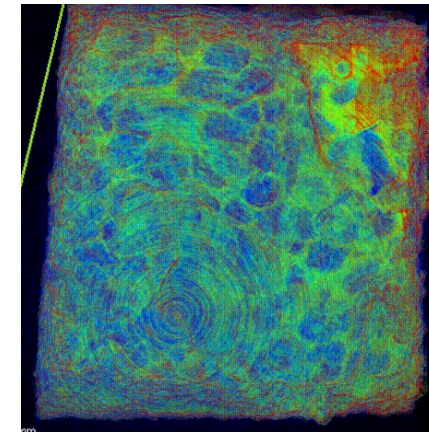
境界不鮮明な  
空隙



0.3 mm程度のセルあり



0.5 mm程度のセルあり

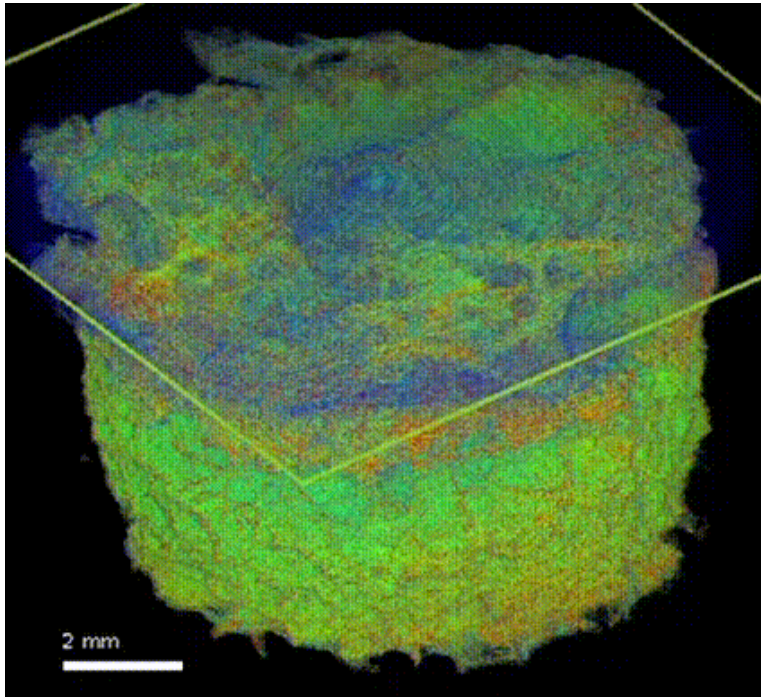


境界不鮮明な  
空隙（セル状）

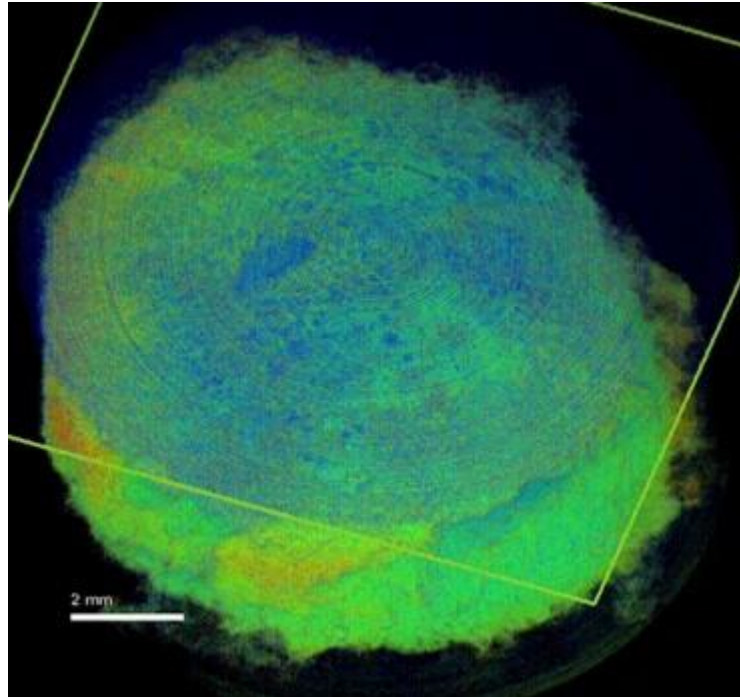
製法毎のフライ中の構造変化を観察 → メカニズム解明につながる



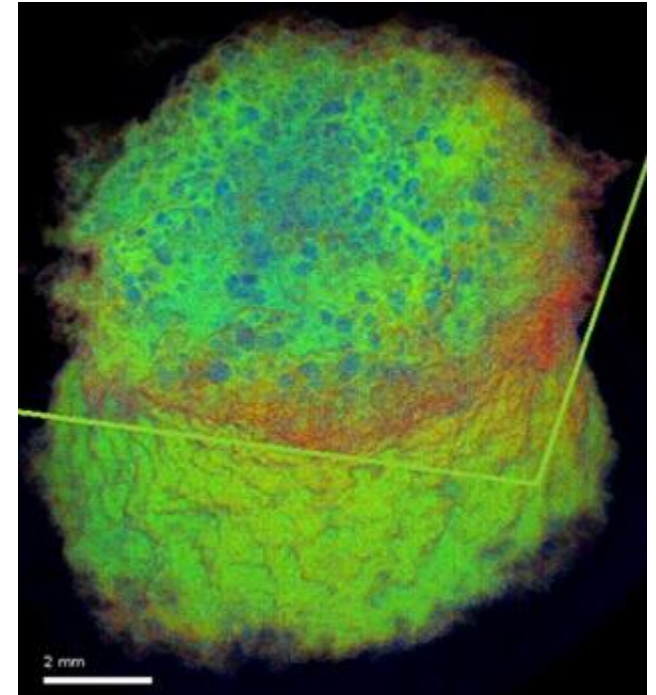
# テーマ③ 製法による違い（3次元観察）



フライ層：しっかり  
内部：ふわっと



フライ層：柔らかい  
内部：ほどける



フライ層：柔らかい  
内部：ぎっしり

# テーマ③ 製法による違い（品質評価）



フライ層	空隙率	84 %	66 %	41 %
	空隙数	69個	179個	164個
	品質	膜状→しっかり	多孔質→柔らかい	多孔質→柔らかい
豆腐質	空隙率	18 %	27 %	14 %
	品質	ふわっと →今回の測定範囲では 検出されない大きな空隙	ほどける	ぎっしり

※空隙数は、10 mm × 10 mmあたりに存在する100～300 μmの空隙をカウント

**2次元解析により、空隙構造を数値化 → 品質評価への活用の可能性**

# 実地研修の達成度と今後に向けて



	テーマ①	テーマ②	テーマ③
目的	タンパクのネットワーク構造 (網目構造) を3次元解析	油揚生地～製品までの 内部構造の変化を可視化	油揚製品の内部構造を数値化
達成度	白色光による測定は できなかった	フライ中の構造変化を 観察できた	0.1 mm程度の空隙が 明確に観察でき、 空隙構造の数値化ができた
今後の課題	白色光での測定  →変質しにくい試料の 設置方法	コントラスト差をつける  →軟X線、単色光高倍率、 位相CT	測定範囲を広げる  →測定数を増やす

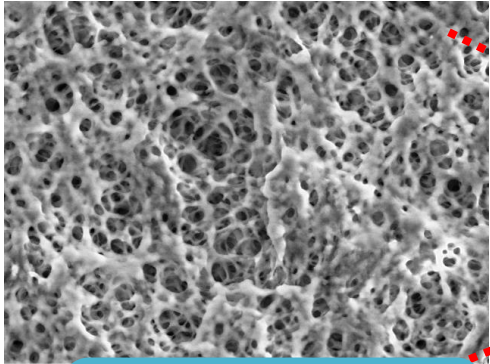


ナノメートル

サブマイクロメートル

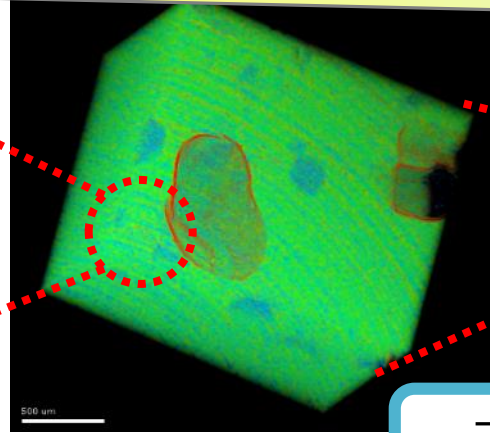
マイクロメートル

ミリメートル



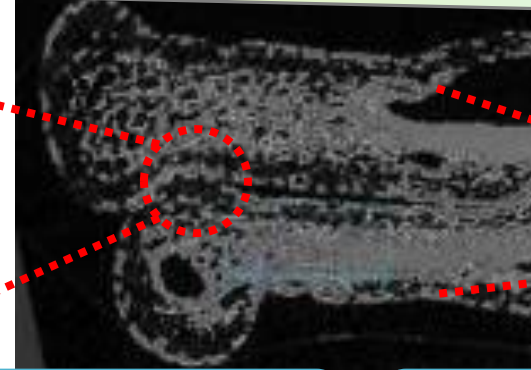
Microscop

電子顕微鏡

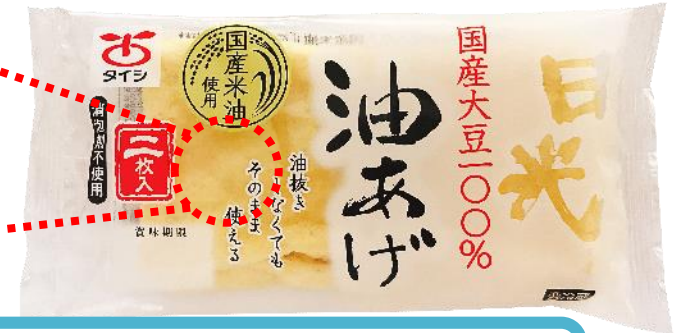


500 μm

放射光X線CT



工業用X線CT



光学顕微鏡・目視



次世代放射光施設完成予想図

食品は多成分、多分散であるため測定が難しい  
→評価系を明確にし、自社の開発に  
活かすための可能性を探る

今回の宮城県放射光利用実地研修参加にあたりご協力いただきました、

あいちシンクロトロン光センター

シンクロトロン光産業利用コーディネーター

東様

ビームライン課 技術研究員

花田様

名古屋大学

シンクロトロン光研究センター 特任准教授

櫻井様

あいち産業科学技術総合センター

共同研究支援部 シンクロトロン光活用推進室

村瀬様

宮城県産業技術総合センター

太田様、羽生様、浅野様、伊藤様

千代窪様、畑中様

宮城県経済商工観光部新産業振興課

管野様

関係各位に厚く御礼申し上げます。