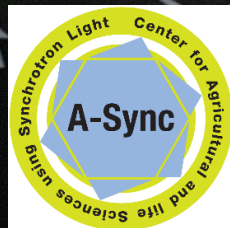


放射光活用事例と測定手法の概要

仙台市トライアルユース事業でのFS研究およびナノテラスにおける事例集
2025



A-Sync 広報・教育部門
ナノテラス利用者委員会
金子 淳

ナノテラス利用の手続き（概要）

実験責任者としてナノテラスを利用する場合

1) 東北大学放射線取扱者となる

- 資格を取得 eラーニングで行う全学講習会
- 健康診断（すでに取得している場合は半年ごとに受診済み）
- 個人用放射線被曝モニター（ガラスバッジ）

2) ナノテラス放射線業務従事者となる（QST担当）

ナノテラス放射線業務従事者等申請システム

3) ナノテラスの利用者登録（研究推進担当、PhoSIC）

「農学研究科コアリション」の利用者となる

4) ビームライン利用予約

- 農学研究科ナノテラス利用者委員会に連絡
- ナノテラス共創推進課 HPから予約システムで予約



教育訓練修了証

放射線業務従事者

金子 淳
カネコ ジュン

2026年03月31日まで有効

NT-WD87LW83KMSVCOU709E203H206BH09TK

非常時連絡先

中央設備監視室 022-721-5180
放射線受付 022-785-9991
BL担当者

※ご自身で記入ください

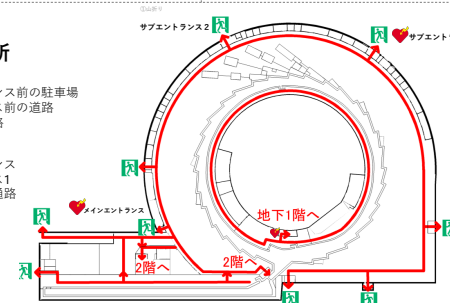
避難経路図 AED設置場所

避難先

- メインエントランス前の駐車場
- サブエントランス前の道路
- 各非常口前の道路

AED

- メインエントランス
- サブエントランス1
- 蓄積リング内周道路（放射線管理区域内）



一般安全注意事項

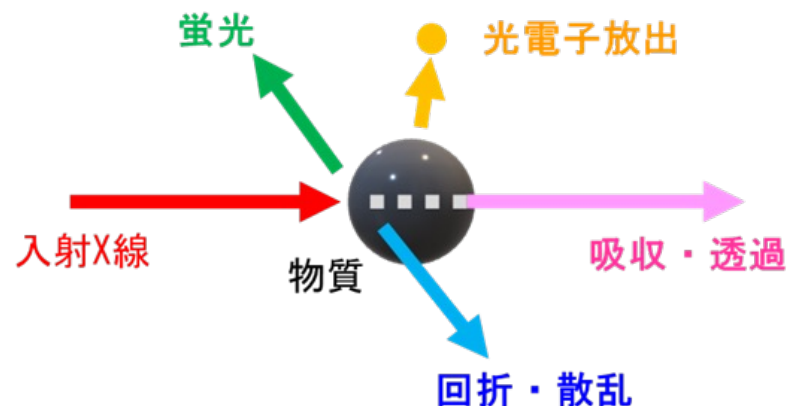
- 安全管理に関する諸規則を守って行動し、あわせて放射線発生装置責任者やBL担当者など施設側の責任者の指示に従うこと。
- 火災時・災害時は、館内放送の指示に従い行動すること。
- NanoTerasuにおける飲食等が可能な部屋・区域：
 - サブエントランス1・2（飲食及び調理可）
 - メインエントランス、会議室、休養室、各BL区域（飲料及び菓子等摂取可）
 - 各装置準備室（運営管理事務の下、飲食可）
- 飲食等で発生する一般廃棄物（可燃物、プラスチック・ビン等）は、施設内に掲示した方法に従って廃棄すること。
- NanoTerasuに持ち込んだものは、利用者が全て持ち帰ること。
- 化学試料準備室等の周辺室の利用は、掲示やBL担当者の指示に従うこと。
- 化学物質・高圧ガス等を持ち込みたい場合は、事前にBL担当者と相談すること。

放射線安全注意事項

- 放射光ビームライン（BL）を使用する者は、NanoTerasuにおける放射線障害を防止するために必要な教育及び訓練をすること。
- 指定された個人線量計（ルミネスバッチ、DIS線量計等）を着用すること（男子は胸部、女子は腹部に着用すること）。
- 放射光BLを構成する真空パイプ、遮蔽物等は、勝手に取り外さないこと。
- ハッチ内で放射光を使用する場合、当該ハッチ内に人がいないことを確認すること。
- インターロックに動作不良が発生した場合は、直ちに使用を中止して、BL担当者へ連絡すること。
- 放射性物質（密封微量線源等）を取り扱う場合は、予めBL担当者と相談し、所定の手続きを行うこと。

【放射光とは】

中野俊樹 著、SUNATEC e-Magazine、vol.201、2022年12月号より引用



放射光(シンクロトン軌道放射光)

初期:タンパク質結晶構造解析



硬X線領域 (0.2 nm ~ 1 pm、数keV以上)

(テンダーX線 境界領域 数keV)

軟X線領域 (10 ~ 0.2 nm 数十 ~ 数keV)

フォトンファクトリー(高エネ研)、Spring-8(理研)

SAGA-LS (九州シンクロトン光研究セ)

結晶構造解析、タンパク質溶液散乱、

時分割実験、X-線イメージング



次世代放射光 (NanoTerasu)



1) 吸収: **X線吸収微細構造 (XAFS)**

フーリエ変換赤外分光法 (FTIR),
軟/硬X線顕微鏡 (走査型透過X線顕微鏡、STXM)

X線コンピュータ断層撮影法 (XRCT)

2) 散乱: X線回折 (XRD)、

X線結晶構造解析 (PX),

X線小角散乱 (SAXS)

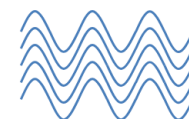
赤字: 生体物質や食品
等のソフトマテリアルを
対象とした測定で多用

3) 二次粒子放出:

X線光電子分光法 (XPS),

X線蛍光分光法 (XRF)

コヒーレントX線



~1 Å



軟X線: コヒーレント
(位相が揃った) 光波

X線結晶構造解析



2025年度整備予定

比較的大量の純粋なタンパク質の結晶を得る



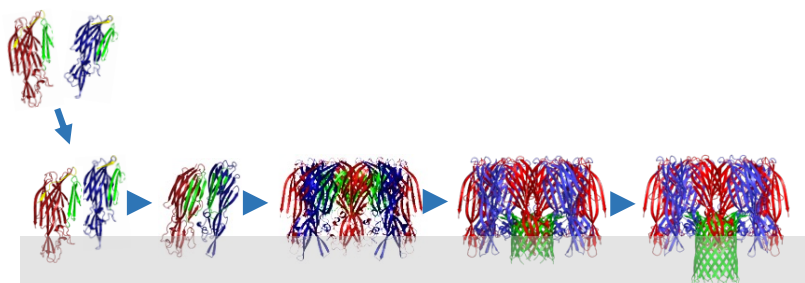
規則正しく並んだ多数の同一分子がつくる反復構造に照射したX線が作る回折点を測定



フーリエ変換により、分子構造(電子密度)を計算



コンピュータによる可視化



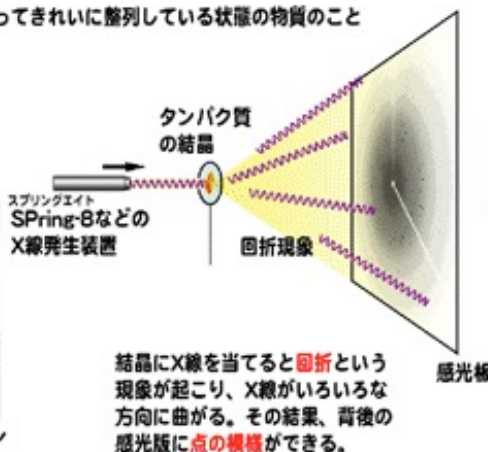
Yamashita et al., *Nat. commun.* (2014), modified



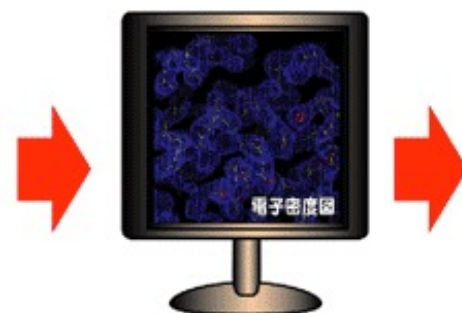
タンパク質の結晶
結晶とは、分子が一定の規則に従ってきれいに整列している状態の物質のこと



Spring-8のBL26B2ビームライン



結晶にX線を当てると回折という現象が起こり、X線がいろいろな方向に曲がる。その結果、背後の感光版に点の模様ができる。



コンピュータによって点の模様を解析する

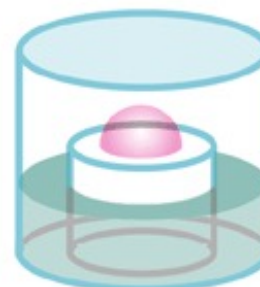


タンパク質の立体構造

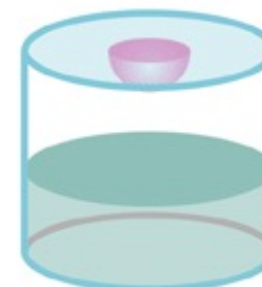
図1 X線結晶構造解析の概略



マイクロバッチ法



シットイングドロップ
蒸気拡散法



ハンギングドロップ
蒸気拡散法

Spring-8「高度好熱菌 丸ごと一匹 プロジェクト」
プレスリリースより (2008年)

X線小角散乱法 (Small-Angle X-ray Scattering; SAXS)



BL08W

NanoTerasu

- ①超小角散乱法(USAXS)を含め、1～1,000 nmの構造を測定可能
- ②合成・生体高分子や分子会合体のサイズ、形状、距離情報変えられる
- ③金属やゲル、濃厚溶液、希薄溶液などをそのまま測定可能
- ④スナップショットではなく系全体の平均構造情報を評価可能
- ⑤非破壊で測定が可能

佐藤ら、化学と生物 55(4), 249–255(2017)
より、抜粋

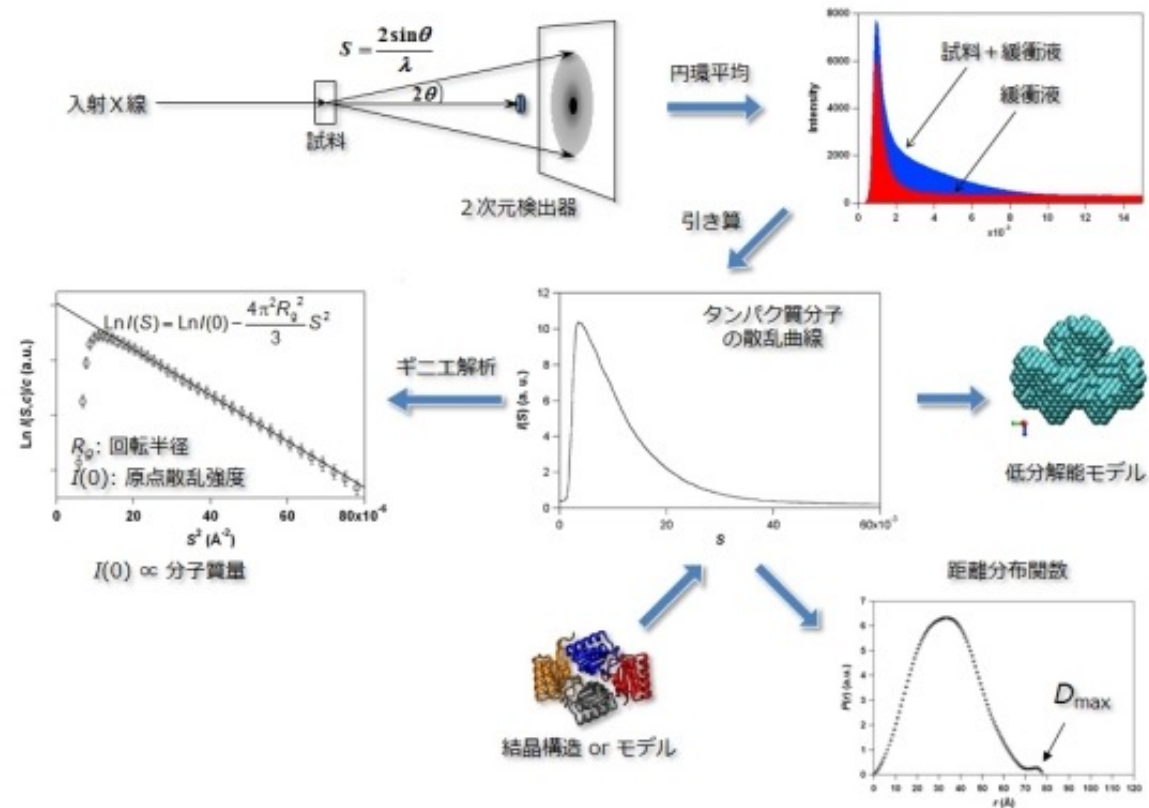
結晶化は不要

水溶液中のタンパク質分子に照射したX線が分子と相互作用して生じる散乱X線を検出
散乱X線強度の角度分布を解析することにより分子の形状を推測

結晶構造解析より分解能は低い、より生理的な環境下で分子の形を調べることも可能

形状の時間変化をリアルタイムで追跡することが可能

生体高分子のX線溶液散乱



X線吸収微細構造(XAFS)



BL08W (テンダーX線)
BL08U (軟X線)

結晶のような周期的構造
をとらない微細粒子

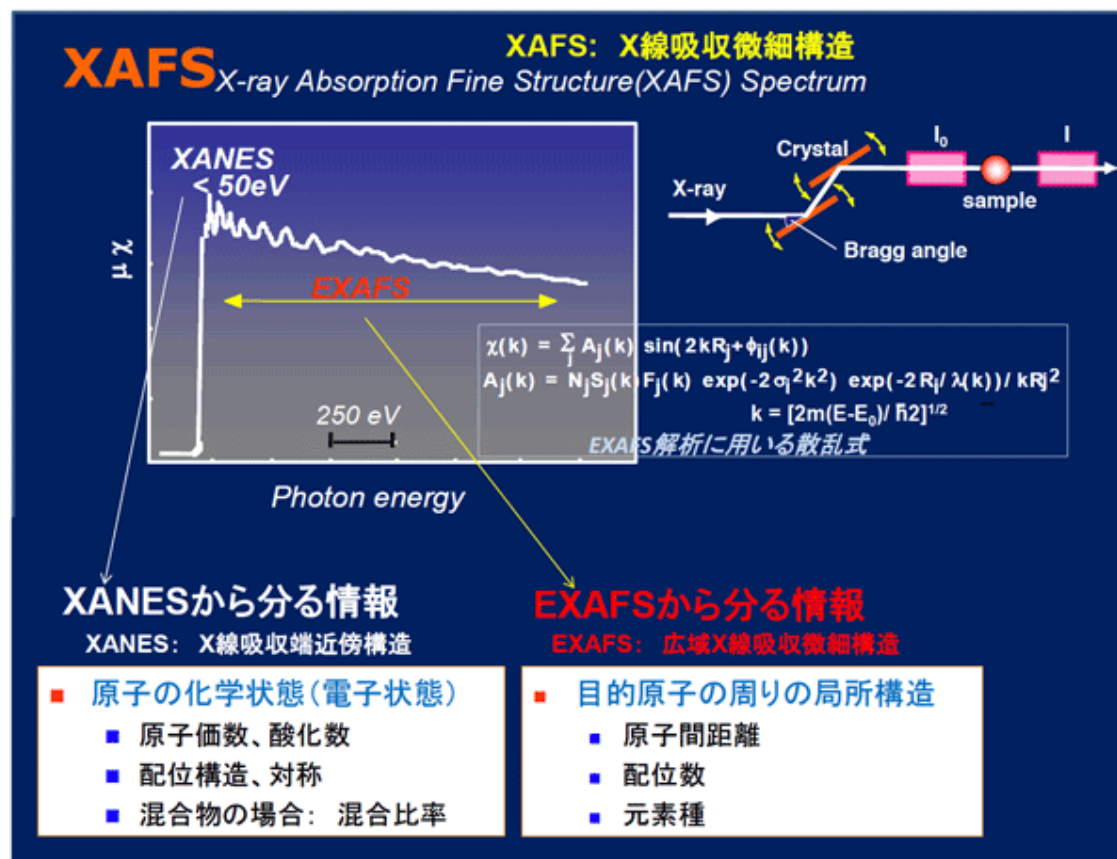
結晶構造：X線回折(XRD)不可
分子構造：電子顕微鏡では不明

X線の吸収に伴い測定対象原子
から飛び出した電子が、周辺原子
によって散乱・干渉

X線吸収スペクトルに反映

XAFS (ザフス) スペクトル

XANES X線吸収端近傍構造
EXAFS 広域X線吸収微細構造



Spring-8 BL36XUのウェブページより

測定対象原子

硬X線 Pより重い元素 (K吸収端の場合)

軟X線 Pより軽い元素

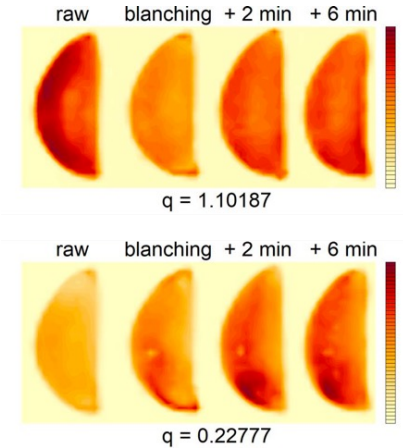
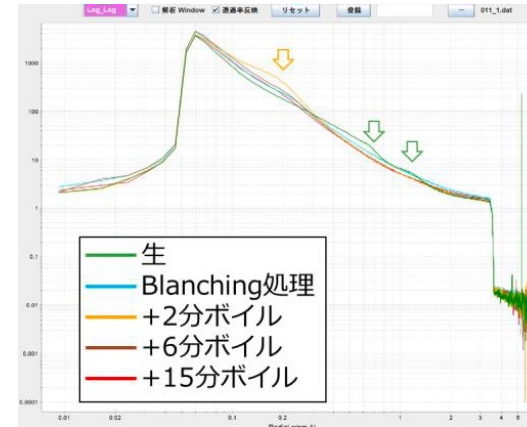
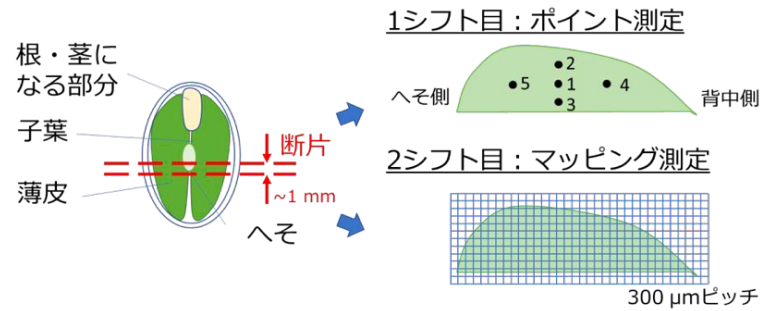
P, S, Mn, FeなどのL殻: 軟X線より豊富な情報

Li, B, C, N, OなどのK殻: 軟X線でしか測れない

SPring-8:BL19B2 (5~72 keV) の例 1

X線小角散乱 (SAXS) (18 keV)

約1mm厚スライスを
SAXS解析、さらに
マッピング測定により
散乱光の分布を
可視化



共同研究

仙台農業協同組合
(宮城県仙台市)

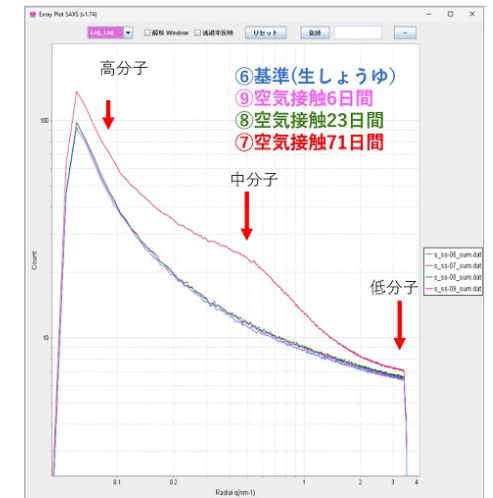
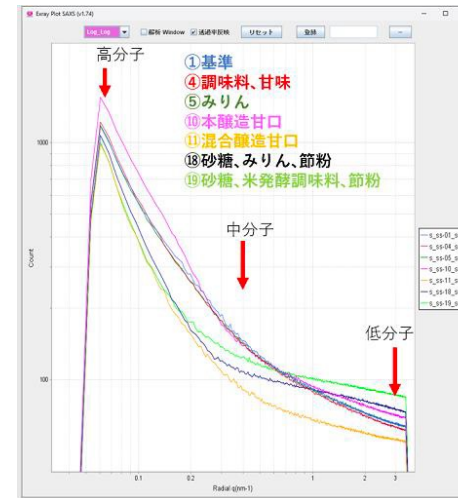
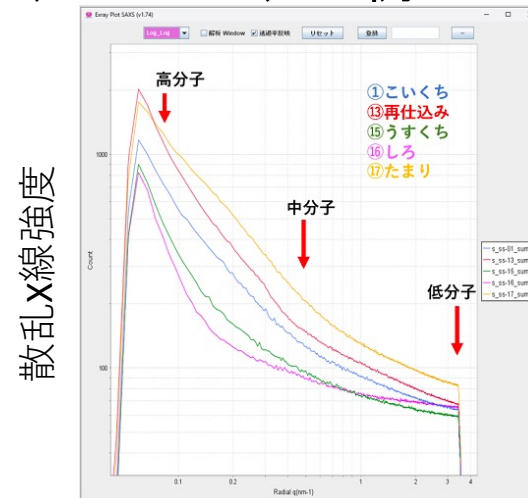
仙台市トライアルユース令和元年、2年度

テクスチャーと関わる可能性の高い、タンパク質・油脂・炭水化物の高次構造が茹でることによって消失／出現する(変化)を可視化できる

SPring-8:BL19B2 (5~72 keV) の例 1

飲料 (液体)

X線小角散乱 (SAXS)
超小角散乱 (USAXS)
(18 keV)



共同研究

(株)東北アグリサイエンスイノベーション
(宮城県仙台市)

仙台市トライアルユース令和4年度

醤油、調味料 (SAXS)

製造方法、添加物、貯蔵期間で散乱が異なり、味や風味も異なる

SPRING-8: BL19B2 (5~72 keV) の例 2

鰹節

X線小角散乱 (SAXS)
超小角散乱 (USAXS)
(0.6889 Å=18 keV)

鰹節の硬化(ガラス化)から
加熱や加水による軟化へ変
化する機構の解析

共同研究

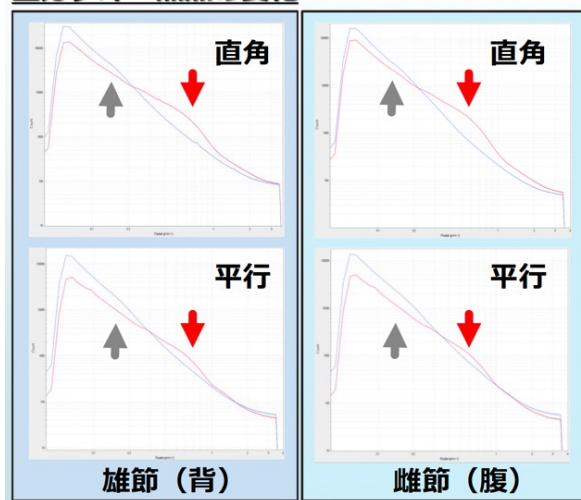
阿部亀商店
(宮城県塩竈市)

仙台市トライアルユース令和2年度

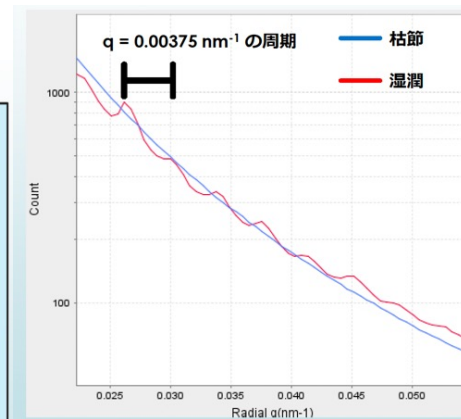
SAXS(加工状態の違い)

— 生 — 煮熟後

生カツオ→煮熟の変化



USAXS(水戻しの影響)



$q = 0.00375 \text{ nm}^{-1}$ は1.67 μm の構造に相当

カツオ節の電子顕微鏡によるSEM観察画像



カツオ節断面(ガラス面)のSEM画像で見られる
周期構造が1.4~1.7 μm
(東北大通研の低真空走査型電顕で撮影)

乾燥時: 非晶質ガラス 湿潤時: 周期構造

加工状態によってピーク位置が変化

SAGA-LS: BL11

ニンニク臭 (気体)

食品に含まれる濃度の
イオウ化合物の硫黄の
状態の違いを検出

XAFS (ザフス) スペクトル
(2.5 keV前後で測定)

XANES (X ray Absorption Near Edge Structure)
ゼーンズ 吸収端極近傍の吸収スペクトル

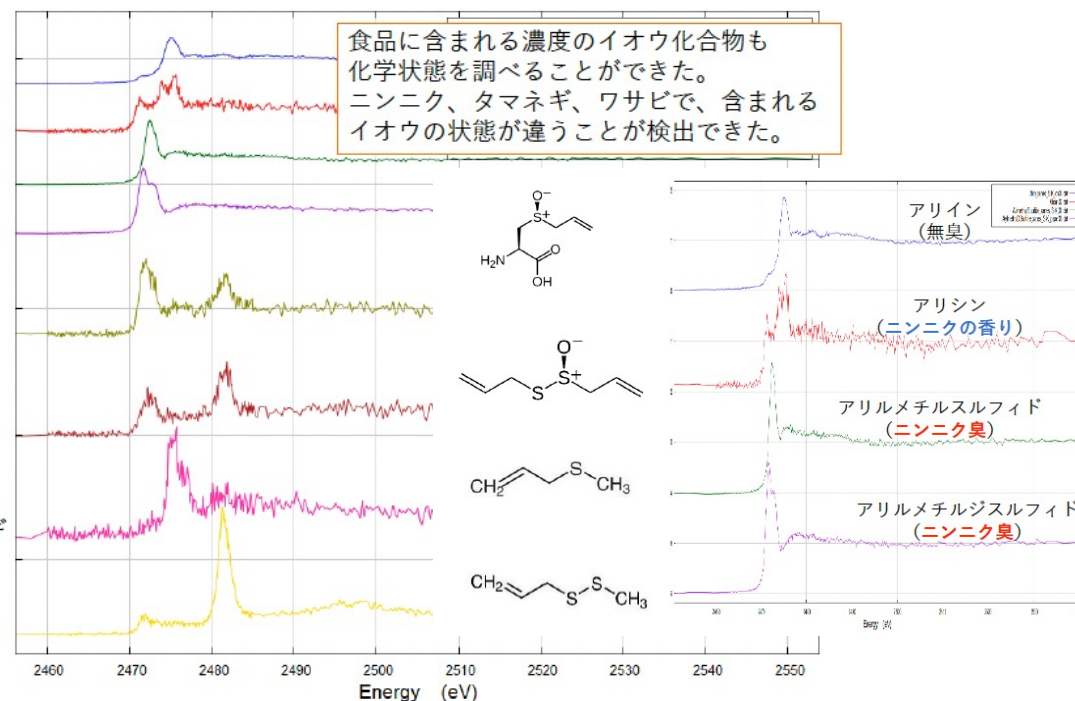
共同研究

会津天宝醸造株式
(福島県会津若松)

仙台市トライアルユース令和4年度

測定結果③ 食品の測定

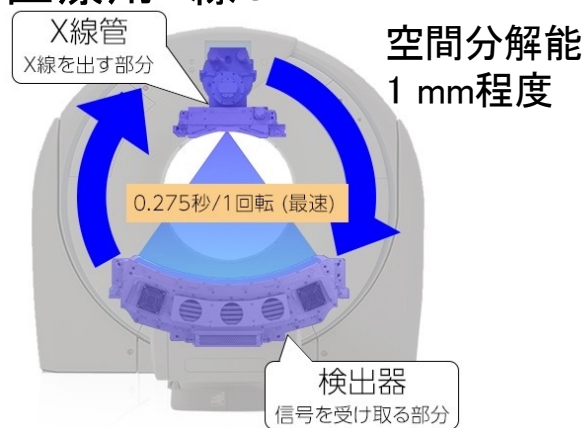
アリイン (無臭)
アリシン (ニンニクの香り)
アリルメチルスルフィド (ニンニク臭)
アリルメチルジスルフィド (ニンニク臭)
スライスニンニク
チューブニンニク
スライスタマネギ
ワサビ



X線CT (computed tomography)

CT: コンピュータで情報を処理して画像を構成する技術

医療用X線CT Canon ホームページ



放射光X線CT { X線マイクロCT: 空間分解能 $1 \mu\text{m}$
X線ナノCT: 空間分解能 10 nm オーダー

観測法 { 走査型X線顕微鏡
結像型X線顕微鏡

手段 { 吸収
位相差
蛍光X線

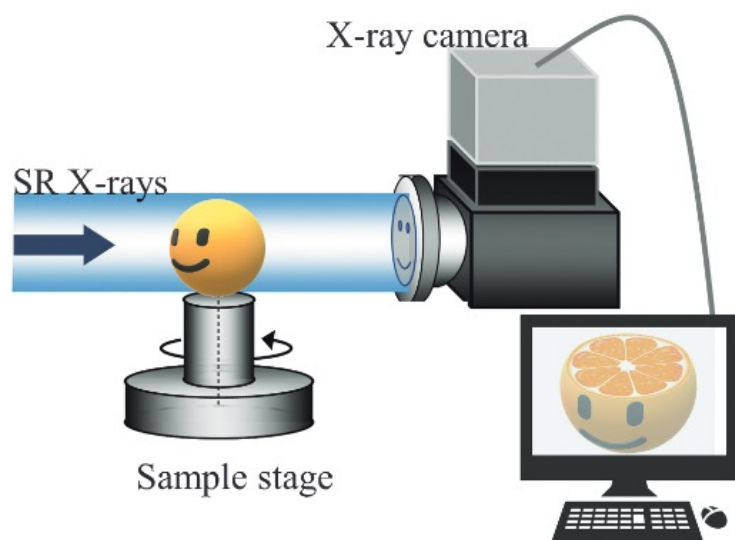


図1 放射光X線マイクロCT装置の模式図。(オンラインカラー)

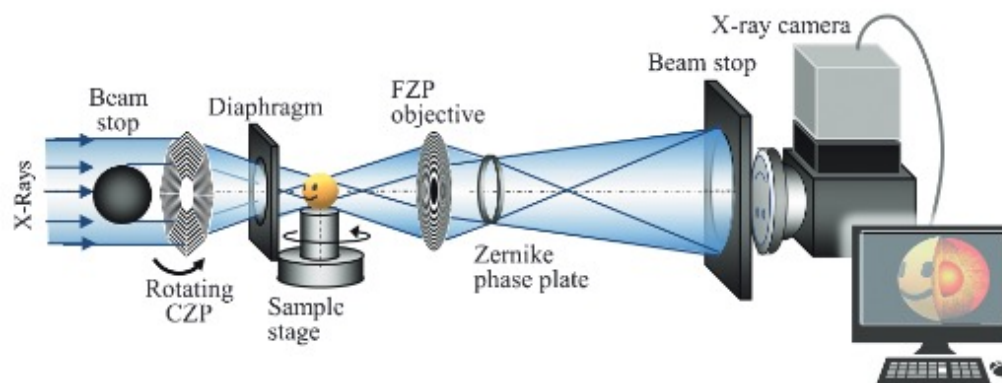


図2 X線顕微鏡光学系を利用したX線ナノCT装置の模式図。(オンラインカラー)

Spring-8 BL14B

3.8–72keV(テンダーX線～硬X線)

冷凍水産物

X線CT (1 Å = 12.39 keV)

サンプル: 冷凍マグロの大トロ
液体窒素で凍結した状態で測定

凍結組織の非破壊的リアルタイム観察

共同研究

マルセ秋山商店
(宮城県石巻市)

仙台市トライアルユース令和元年度

緩慢凍結

急速凍結

擬似
カラー化

タンパク質など

氷

脂質

立体再構成
(3Dモデル)化

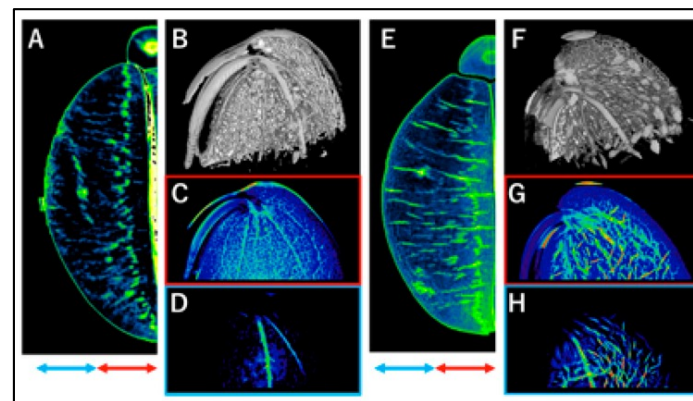
内部構造変化や氷結晶サイズの
制御、品質の向上につなげる。

SPring-8: BL20B2 (28.9 keV)

エダマメ

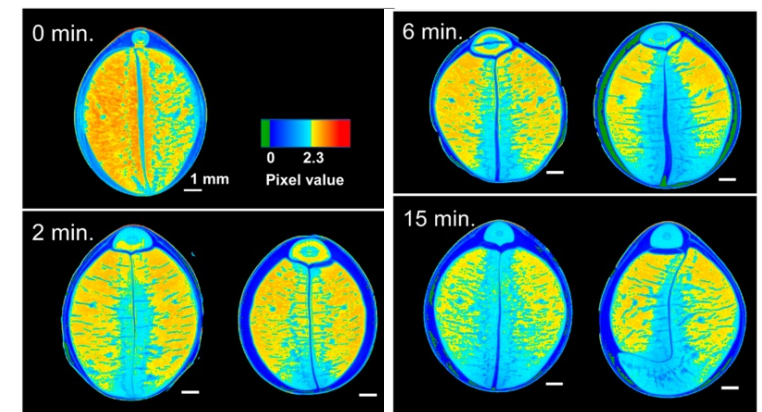
X線位相差CT

内部構造の非破壊解析
で美味しさを見える化



茹でる前

茹でた後



茹で時間による内部密度変化を可視化

Spring-8 BL14B の使用例 2

かまぼこうどん

X線CT ($1 \text{ \AA} = 12.39 \text{ keV}$)

内部構造の差の可視化に成功。
3次元データから均一性・不均一性の
定量的評価ができる可能性を示唆。

共同研究

(株)東北アグリサイエンスイノベーション
(宮城県仙台市)

仙台市トライアルユース令和2年度



麺の画像解析法を活用



BL10U (μCT)

うどん

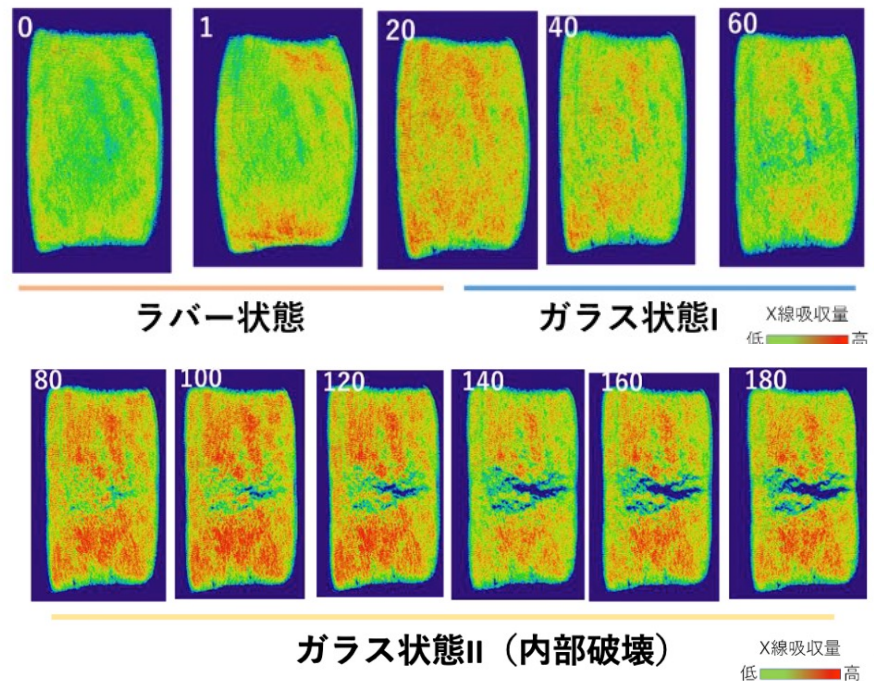
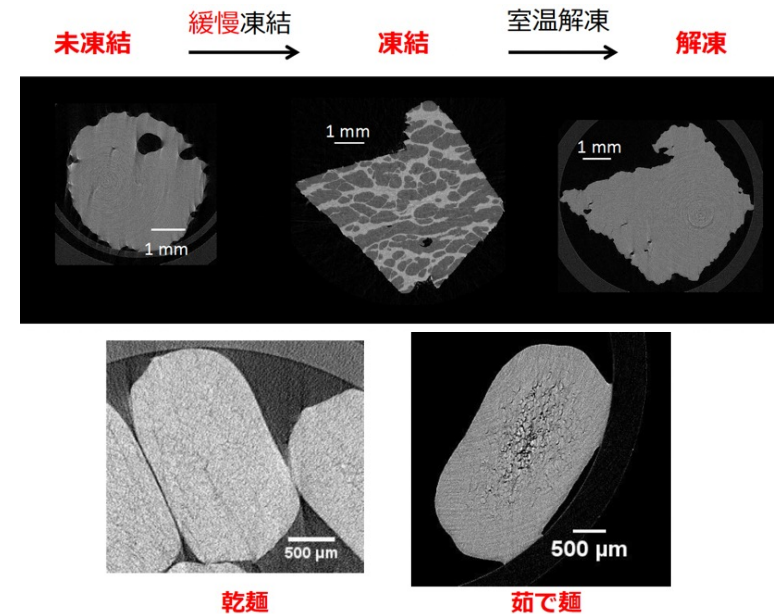
単色X線CT → コントラストの理論的解釈可能

サンプルステージ上で麺を乾燥、掲示的に測定
乾麺の製造時の密度変化や水分変化を可視化

共同研究

はたけなか製麺(株)
(宮城県白石市)

仙台市トライアルユース令和3年度



仙台市トライアルユース事業

https://www.city.sendai.jp/renkesuishin/jigyosha/kezai/sangaku/housyakou_trial-use.html

事業の目的

本事業では、様々な分野の事業者には、その事業分野において放射光施設を利用した測定・研究事例の創出を委託します。報告された事例を使って、多様な分野での活用が期待される3GeV高輝度放射光施設「NanoTerasu（ナノテラス）」をはじめ、放射光施設の産業利用促進に向けた普及啓発を行います。

令和元年度～令和5年度は全国の放射光施設を活用して事業を行っていましたが、NanoTerasuの運用が開始した令和6年度からは、NanoTerasuを利用した事例創出を実施しております。

それぞれの事例の詳細は
仙台市トライアルユース
事業のホームページから
報告書・発表資料として
閲覧できます。

令和7年度の受託者募集について

公募概要

募集内容は、以下のリンクよりご覧ください。

- [令和7年度NanoTerasuトライアルユース事業の受託者を募集します](#)

創出事例一覧

- [令和6年度](#)
- [令和5年度](#)
- [令和4年度](#)
- [令和3年度](#)
- [令和2年度](#)
- [令和元年度](#)

受託者	提案概要	報告書	発表資料
appcycle株式会社 (青森県青森市)	自社製品であるリンゴ残渣（ざんさ）を利用したビーガンレザーの耐久性をはじめとした性能の高さの要因と、残渣の含有率・乾燥度等が与える因果関係を把握し、より品質の良いビーガンレザーの生産方法を模索する。 【測定ビームライン・手法】 BL09W（白色X線CT） BL10U（単色X線CT）	PDF 報告書 (PDF : 1,925KB)	PDF 発表資料 (PDF : 2,867KB)
株式会社金トビ志賀 (愛知県蒲郡市)	独自の製法で製造した小麦粉について、製麺性や食感（こし）などの小麦粉の性質に影響を与える物質の結合状態を確認し、その特長や優位性を科学的に評価することで、品質優位性の維持や向上、ユーザーニーズに対応した新規製品の開発につなげる。 【測定ビームライン・手法】 BL08W（テンダーX線XAFS）	PDF 報告書 (PDF : 1,231KB)	PDF 発表資料 (PDF : 3,518KB)
久慈琥珀株式会社 (岩手県久慈市)	自社で販売する久慈産琥珀（こはく）と、海外産琥珀を測定し、それぞれの特徴や構造的な違いを明らかにするとともに、久慈産琥珀から抽出される新規物質の生成過程の手がかりを得る。 【測定ビームライン・手法】 BL08U（軟X線XAFS）	PDF 報告書 (PDF : 847KB)	PDF 発表資料 (PDF : 2,948KB)
※ 令和6年度は「令和6年度」に於いて、白粉の活用			

仙台市トライアルユース事業ナノテラス測定事例（令和6年度）

受託者	試料	測定内容	BLと手法
Appcycle（株）	リンゴ残渣を原料としたビーガンレザー	構造	BL09W（白色X線CT） BL10U（単色X線CT）
株式会社金トビ志賀 （愛知県蒲郡市）	小麦粉	物質の結合状態	BL08W（テンダーX線XAFS）
久慈琥珀株式会社 （岩手県久慈市）	久慈産琥珀（こはく） と、海外産琥珀	炭素と酸素の化学状態	BL08U（軟X線XAFS）
株式会社サン海苔 （佐賀県佐賀市）	海苔	生育に必要な元素の 化学状態	BL08U（軟X線XAFS） BL08W（テンダーX線XAFS）
太子食品工業株式会社 （青森県三戸郡）	乳、豆腐	加熱過程における構造変化	BL08U（軟X線XAFS） BL08W（小角X線散乱）
株式会社舞台ファーム （仙台市）	レタス	元素の組成と、元素の化学状態	BL08U（軟X線XAFS） BL08W（テンダーX線XAFS）
マルニ食品株式会社 （宮城県登米市）	フリーズドライ麺	湯戻し時間と表面構造	BL09W（白色X線CT）
宮城東洋株式会社 （宮城県石巻市）	生鮮・冷凍ギンザケ	塩蔵処理とミネラル分布	BL08W（テンダーX線XAFS） BL09W（白色X線CT）