

【ノート】

【令和7年度 放射光施設利用促進事業】

## NanoTerasuの活用に向けた食品測定事例の蓄積

羽生 幸弘、星野 友花

食品バイオ技術部

3Gev高輝度放射光施設「NanoTerasu」の食品分野への応用を検討するため、笹かまぼこやチーズ等の加工食品を対象にX線CTによる内部構造の観察を行った。また、当センター保有機器であるX線分析顕微鏡(XRM)との比較を行い、放射光測定の有用性・可能性を調査した。その結果、NanoTerasuではXRMと同程度の解像度の測定が短時間でできること、位相回復処理を行うことで構造をより明確に表すことができることが分かった。さらに、笹かまぼこに関する企業ニーズへ適応した結果、冷凍条件下での観察で凍結方法の違いによると思われる構造の差を確認できた。

キーワード：放射光、X線Computed Tomography(X線CT)、食品

### 1 緒言

令和6年度に運用が開始された次世代放射光施設(NanoTerasu)は軟X線領域の性能に特徴があり、硬X線と比較して物質を透過する力は弱いが生体試料を構成するような軽元素の可視化が可能で、また元素や分子の電子状態を可視化することができるという特徴を有している。そのため食品、農畜水産物、生体試料、化成品などへの応用が期待されている<sup>1)</sup>。当県には食品関連企業が多いことから施設の活用が期待されているものの、放射光施設の利用経験が乏しいため、施設の利活用促進のためには有効性・可能性を確認する必要がある。

そこで本調査では、特産品である笹かまぼこや過去の調査<sup>2)</sup>においてラボ機(X線分析顕微鏡(XRM))でX線CT像を取得した食品(チーズ等)を対象にNanoTerasuで得られた画像との比較を行った。さらに、冷凍保存した笹かまぼこを解凍した際、冷蔵保存品と比較して硬くなる現象を構造面から評価したいというニーズに対して放射光測定を適用し可能性を検討した。

### 2 調査方法および内容

#### 2.1 ラボ機と放射光の比較

##### 2.1.1 試料

県内の特産品として製造者の異なる笹かまぼこを2種

(以下、笹かまぼこ①、笹かまぼこ②)、過去の調査で取り上げた食品のうち、チーズ、米を試料とした。チーズについては、カマンベールチーズ、チェダーチーズ、ミモレットチーズの3種類を用いた。米は精米後の酒米とアルファ化米を用いた。

##### 2.1.2 X線分析顕微鏡(XRM)

ラボ機としてX線分析顕微鏡((株)リガク、Nano3D)を用いた。測定条件は、解像度1.25  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ (ビニング2 $\times$ 2)とし、露光時間3.6 秒/枚、投影枚数800 枚のフルスキャン、測定温度を室温とした。サンプルは試料を $\phi$  3.5 mmのストローでくり抜き、試料台に設置した。かまぼこ測定時には上部を乾燥防止のため紫外線硬化樹脂で蓋をした。画像の再構成には機器付属の再構成ソフトウェアを用いた。

##### 2.1.3 放射光測定

放射光を用いたX線CT測定をNanoTerasuのBL09Wで行った。測定条件は、高倍率ユニットを用いて解像度を0.65  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ とし3 mmのAlフィルターを設置の上、露光時間60 ms/枚、投影枚数1,800 枚、測定温度を4  $^{\circ}\text{C}$ (冷蔵条件)とした。サンプルは試料を $\phi$  2 mmの生検トレパンでくり抜き、試料台に設置した。画像の再構成にはビームラインに付属のソフトを用いた。

#### 2.2 企業ニーズへの適用可能性調査

県内の蒲鉾製造業者より、製品を冷凍保存し、需要に応じて解凍、冷蔵温度帯で販売することを検討しているが、解凍品では冷蔵保存品と比較して食感が硬くなるなどの相談があった。今後製品改良を進めるに当たり現在用いている硬さの評価に加えて、内部構造の違いも含められないか検討したいということであった。このため、凍結品と冷蔵品の硬さ評価をテクスチャー評価装置で、内部構造観察をラボ機及びNanoTerasuのBL09Wにて行った。

#### 2.2.1 試料

測定サンプルとして、冷蔵温度にて保存した笹かまぼこ(以下、チルド品)、および異なる方法で冷凍を行った笹かまぼこ(以下、凍結品①、凍結品②、凍結品③)を用いた。

#### 2.2.2 テクスチャー評価

テクスチャー評価装置((株)山電、クリープメータ)により、笹かまぼこの応力ひずみ曲線の取得を行った。笹かまぼこを3等分に切断したものを測定サンプルとして用いた。測定条件はプランジャーとしてφ20 mmの円盤、圧縮速度10 mm/sec、歪率90 %とし、サンプルの中央部分を加圧した。サンプルについて、チルド品は室温で静置して常温に戻し、凍結品①から③については冷蔵庫内に一晩静置した後、室温で静置して常温に戻した

ものを用いた。

#### 2.2.3 X線分析顕微鏡(XRM)

測定条件は2.1.2に述べたものと同様とした。

#### 2.2.4 放射光測定

測定条件は解像度および露光時間を2.1.3に述べたものと同様とし、測定温度を4℃(冷蔵条件)および-20℃(冷凍条件)とした。

### 3 結果と考察

#### 3.1 食品を対象としたラボ機と放射光の比較

各試料のラボ機での測定結果(図1)を示す。笹かまぼこは構造の違いによるコントラストの差は見られず、サンプル全体の吸収が同様となっていた。また、サンプルの端にズレが見られたことから測定中に試料が動いていると考えられた。これは、照射したX線をサンプル中の水分が吸収することによって熱が発生したことによるものと考えられた。一方チーズでは、ミモレットチーズ、チェダーチーズ、カマンベールチーズすべてでX線の吸収によるサンプルへの影響は見られなかった。観察の結果、カマンベールチーズでは全体が同様となっていたが、ミモレットチーズ、チェダーチーズでは部分的に吸収が強

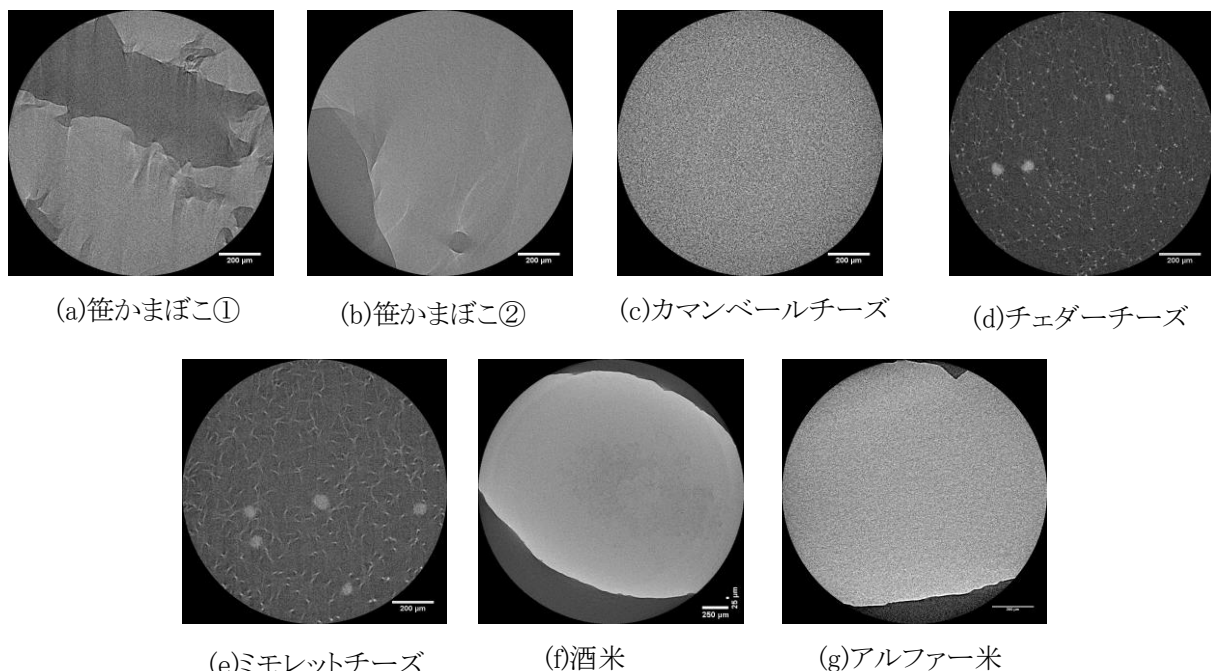


図1 加工食品等のラボCT測定結果(酒米の画像は過去の報告より引用)

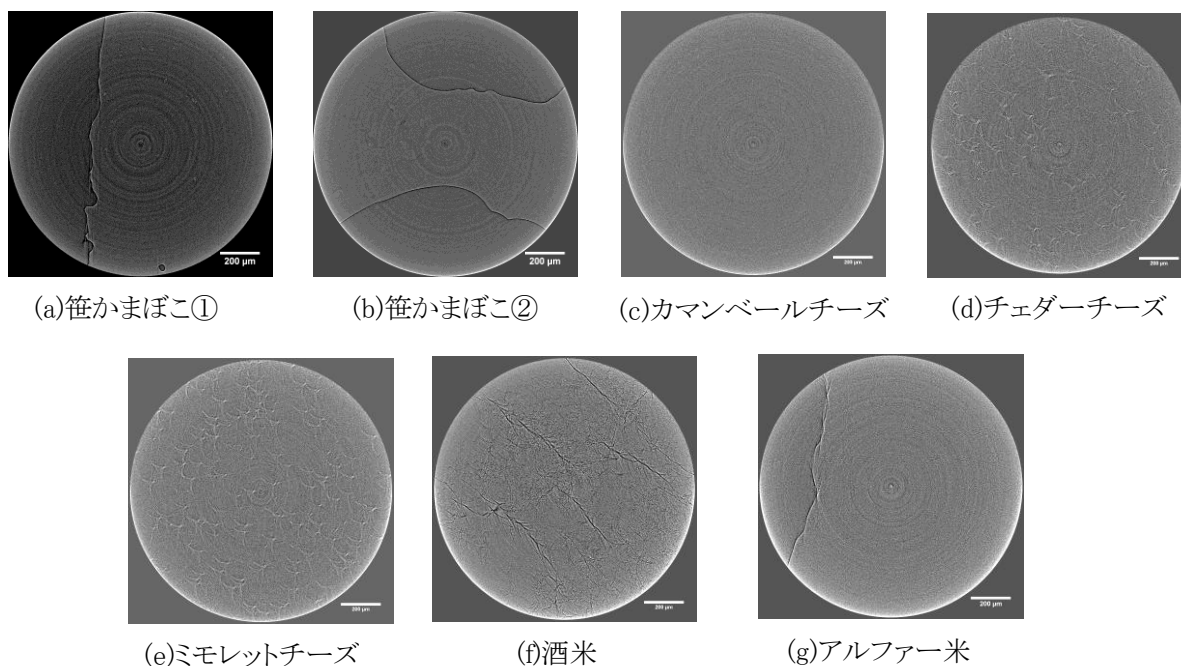


図 2 加工食品等の放射光 CT 測定結果

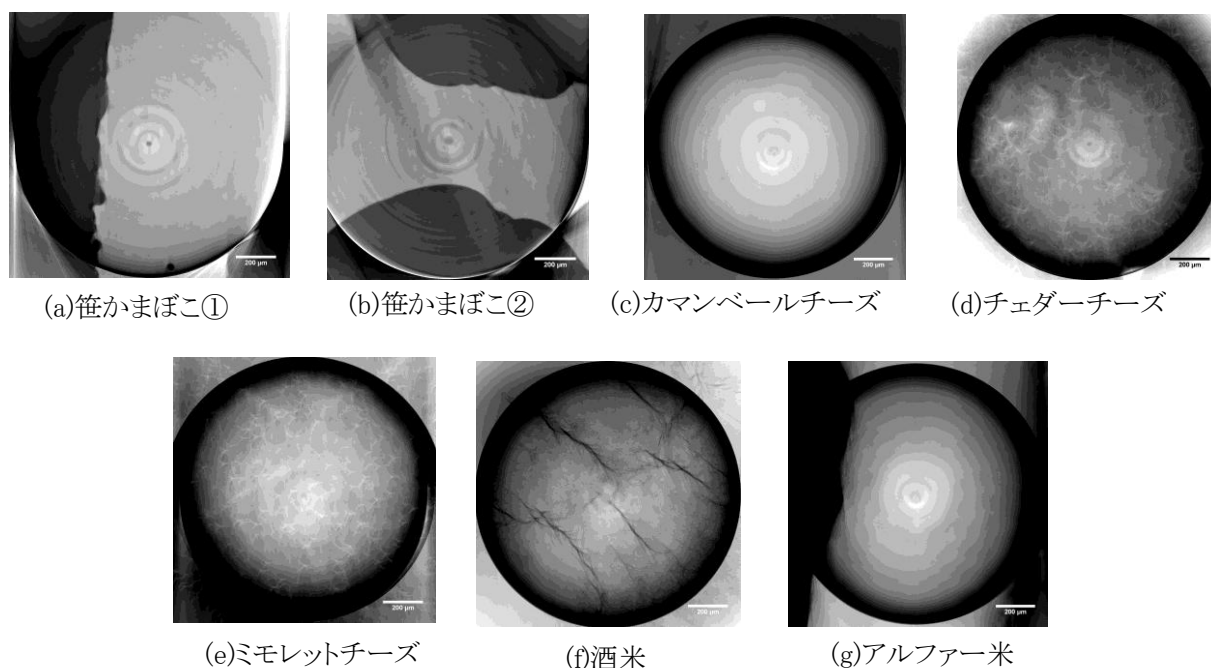


図 3 加工食品等の放射光 CT 測定結果(位相回復処理像)

い構造を有していることを確認した。

NanoTerasuではX線照射による影響を低減するため、サンプルを4℃に保持し測定した。測定結果を図2に示す。カマンベールチーズとアルファーマイではサンプル内部でコントラストの差が見られず、全体が一樣となっていた。一方、笹かまぼこ、ミモレットチーズ、チェダーチーズ、酒米ではサンプル内でコントラストの差が見られ、構造または構成する物質に違いがあるものと考えられた。さらに、各サンプルについて位相回復処理を行ったとこ

ろ(図3)、酒米において吸収像では確認が難しかった吸収の小さい構造が強調された。

### 3.2 企業ニーズへの適応可能性調査

#### 3.2.1 かまぼこの応力ひずみ曲線の取得

チルド品と凍結品①から③の応力ひずみ曲線を図4に示す。これより、凍結品はチルド品と比較してかかる

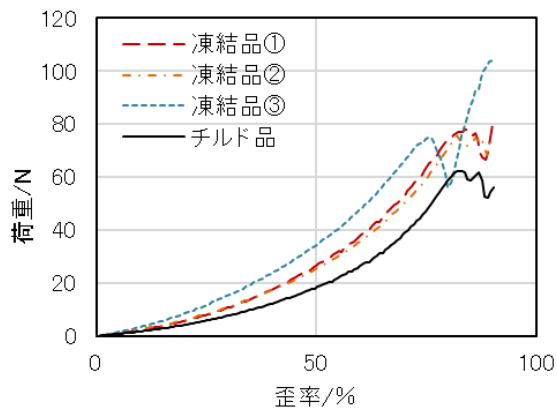


図4 笹かまぼこのテクスチャー評価結果

荷重が大きいことが分かった。特に凍結品③は凍結品①、凍結品②よりも大きく、産業技術総合センター職員12名による官能評価の結果(表1)と同様の傾向を示した。

### 3.2.2 内部構造観察

ラボ機を用いてチルド品および凍結品の内部構造観察を行ったが、チルド品と凍結品とでは構造の違いは確認できなかった(図5)。XRMによる測定では詳細な構造の観察が難しかったことから、NanoTerasuにて放射光を用いた観察を実施した。4℃での測定結果(図6)ではチルド品、凍結品ともに試料のコントラストが均一となっており詳細な内部構造の観察には至らなかった。そのため、小さい密度差を強調して微細な構造の観察を試みるため位相回復処理を施したが同様の結果となった。

チルド品と凍結品の比較が難しいことから、冷凍方法による内部構造の違いの評価を試みるため-20℃でX線CT測定を行った。その結果(図7)、吸収像および位相回復処理像において吸収の弱い構造(図中点線矢印(以下、構造①))と強い構造(図中実線矢印(以下、構造②))が見られた。先の調査にて、凍結状態のかまぼこをSPring-8にてX線CT測定した際、X線吸収の濃淡が見られたという報告<sup>3)</sup>があり、今回の結果と類似の吸収像が得られた。また、特に構造①において、凍結方法によりその大きさの違いが確認でき、構造②は網目構造状となっているのが確認できた。凍結方法により内部構造の違いを確認できたが、冷凍方法に起因する違いであるかは他の手法で得られる分析結果と併せて検討する必要があると思われた。

## 4 まとめ

表1 冷凍品の硬さの官能評価結果

| サンプル | 硬さ (噛み始め) |      |    |        |      |
|------|-----------|------|----|--------|------|
|      | 硬い        | やや硬い | 普通 | やや柔らかい | 柔らかい |
| 凍結品① | 2         | 10   |    |        |      |
| 凍結品② | 1         | 8    | 3  |        |      |
| 凍結品③ | 7         | 5    |    |        |      |

放射光の食品への応用を検討するため、ラボ機のX線分析顕微鏡(XRM)およびNanoTerasuで測定を行った。XRMでは水分の多いサンプルではX線の吸収によって発生する熱の影響で微細な構造を確認することは難しかったが、NanoTerasuにてサンプル温度を低温に保つことによって内部構造の観察を行うことが可能であると分かった。また、食品の様に含まれる成分間の密度差が小さいサンプルにおいて位相回復処理を適応することで構造が明確になる場合があったが、さらなる事例の蓄積が必要であることが分かった。

さらに、宮城県の特産品である笹かまぼこについて冷凍方法による硬さの違いの評価について、硬さに起因する構造の把握には至らなかったが、冷凍方法によって内部構造が異なることを確認できた。

以上の結果から、NanoTerasuにおいて食品のX線CT測定は温度制御を行うことによって試料への影響を低減できることが分かった。このことから他の分析手法と組み合わせることで内部構造の違いを評価できる可能性があることが分かった。

## 謝辞

本調査の放射光測定に当たり、東北大学大学院農学研究科 教授 原田昌彦先生、教授 高山裕貴先生、准教授 日高将文先生をはじめとする皆様に多大なる御協力をいただきました。ここに記し感謝の意を表します。

## 参考文献、引用URL

- 1) 原田昌彦、高田昌樹、村松淳司. 次世代放射光施設の特徴と利活用に向けた取り組み. オレオサイエンス. 2022、22(2)、pp.55-60
- 2) 活用支援FS事例集. “食品企業ニーズに基づく

放射光利用に関する調査”。宮城県産業技術総合センターWebサイト.

[https://www.mit.pref.miyagi.jp/wp-content/uploads/2024/03/2-20XRM\\_food\\_tomography\\_R4.pdf](https://www.mit.pref.miyagi.jp/wp-content/uploads/2024/03/2-20XRM_food_tomography_R4.pdf) (2026-02-24 参照)

- 3) 令和2年度仙台市既存放射光施設活用事例創出事業(トライアルユース)創出事例報告書

[https://www.city.sendai.jp/renkesuishin/jigyosha/kezai/sangaku/documents/r2\\_tohoku\\_agriscience\\_innovation\\_report.pdf](https://www.city.sendai.jp/renkesuishin/jigyosha/kezai/sangaku/documents/r2_tohoku_agriscience_innovation_report.pdf) (2026-5-21 参照)

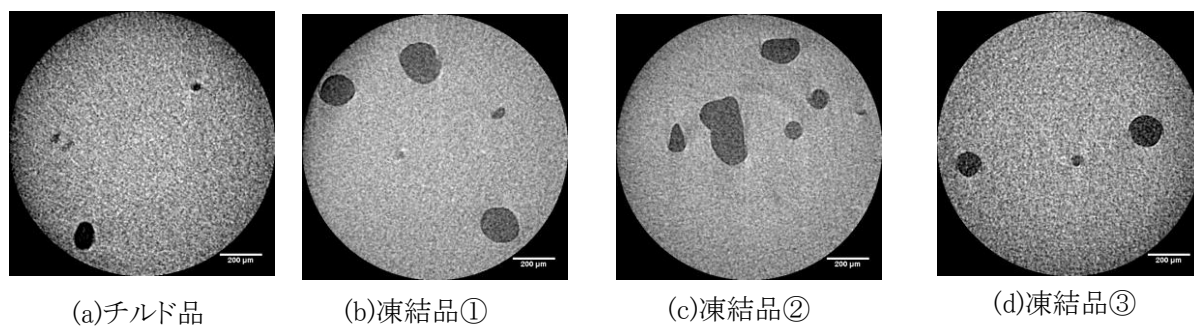


図 5 笹かまぼこのラボ CT 測定結果

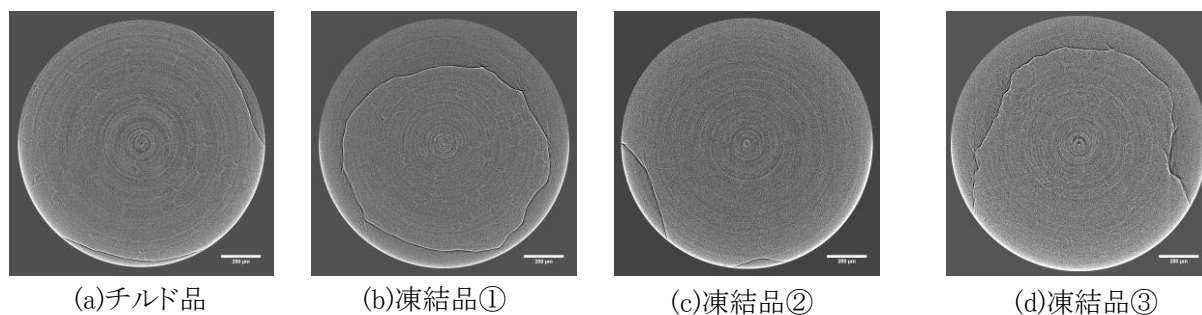


図 6 笹かまぼこの放射光 CT 測定結果(冷蔵条件)

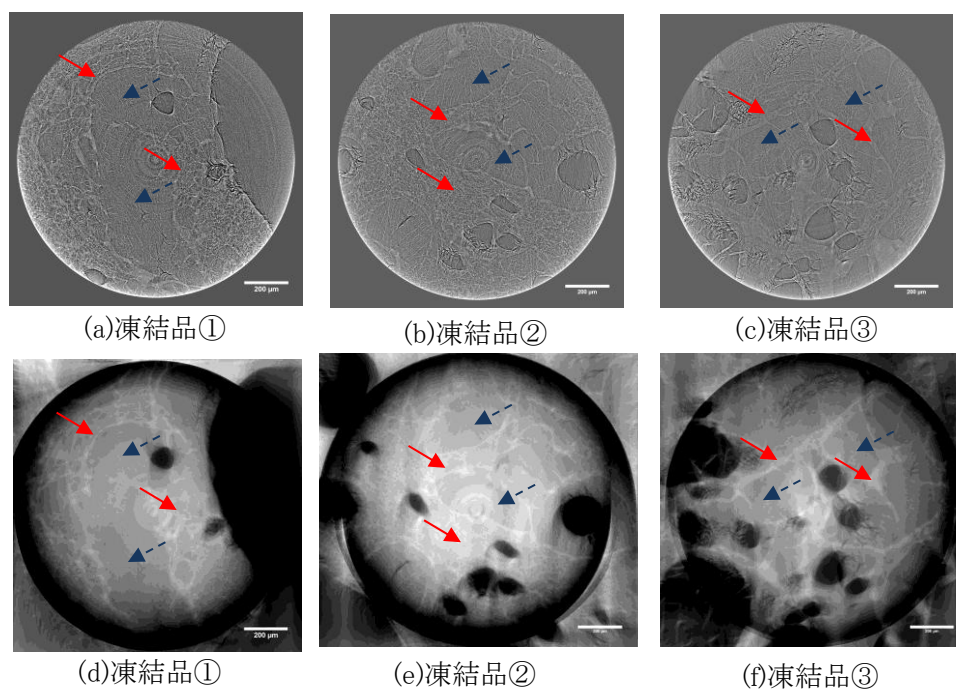


図 7 笹かまぼこの放射光 CT 測定結果(冷蔵条件、(a)~(c):吸収像、  
(d)~(f):位相回復処理像)