

## 令和 6 年度仙台市 NanoTerasu トライアルユース事業 事例報告書

### 1 課題名

フリーズドライ麺高機能化のためのマイクロ・ナノ構造指標化

### 2 測定にあたっての体制（社外委託先を含め記載）

研究代表機関: マルニ食品株式会社（試料調整・放射光測定・摩擦測定・解析）

共同研究機関: 東北大学（放射光測定・摩擦測定・解析）

高山 裕貴 准教授

（国際放射光イノベーション・スマート研究センター/農学研究科附属放射光生命農学センター）

原田 昌彦 教授

（農学研究科附属放射光生命農学センター/国際放射光イノベーション・スマート研究センター）

日高 将文 助教

（農学研究科附属放射光生命農学センター/国際放射光イノベーション・スマート研究センター）

利用施設 : 3 GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu BL09W (放射光 X 線 CT)

協力: 平本 尚三 様 (一般財団法人光科学イノベーションセンター)

宮城県産業技術総合センター (摩擦測定)

協力: 佐藤 信行 様、羽生 幸弘 様 (宮城県産業技術総合センター)

### 3 背景と測定目的

#### ○背景

単身世帯や共働き世帯の増加による中食への食形態の変化が進んで久しく、中でもほとんど調理などの作業を必要とせずに食せる冷凍食品やフリーズドライ食品の需要は増加傾向が続き、世界市場規模は 467 億円に上る(調査会社エクスパートリサーチマーケット, 2020 年)。**特にフリーズドライ食品は、現代の家族形態への適合による Quality of Life の向上のみならず、低い水分含量に起因する高い保存性や調理不要性、高い携帯性から、フードロスの削減や災害・紛争地域への供給といった食の安全保障といった社会課題解決にも資すると期待される。**製麺事業を創業して 140 年となる提案者においても、消費者および社会ニーズに応えるべくフリーズドライ麺の開発を進めてきた。特に令和 5 年度からは放射光を活用したフリーズドライプロセスの評価と最適化の取り組みを開始したところである。

フリーズドライ麺の製造では、「冷凍工程」と「乾燥工程」により、保存性が高く、栄養成分が保持され、湯戻しのみにより麺がほぐれるとともに食感・食味が復元するという機能の創出を目指している(図 1)。**提案者らは冷凍および乾燥条件範囲の最適化を目的として、SPring-8 冷凍下 X 線 CT[1]や NanoTerasu X 線回折測定[2]により、フリーズドライプロセスの理解と指標化に取り組んできた。**冷凍工程においては、冷凍パラメータに応じて茹で麺表面の水の昇華や麺の内部で相分離が生じることを明らかにした(図 2)。また、麺を噛んだ際の食感の基となるデンプンの結晶・非晶状態について、X 線回折により定量評価できることを確認した(図 3)。以上の**放射光 X 線を用いたマイクロからナノメートルスケールの構造可視化の取り組みにより、フリーズドライのプロセスとパラメータの関係を理解し、条件範囲を最適化するための客観的な指標が得られつつある。**

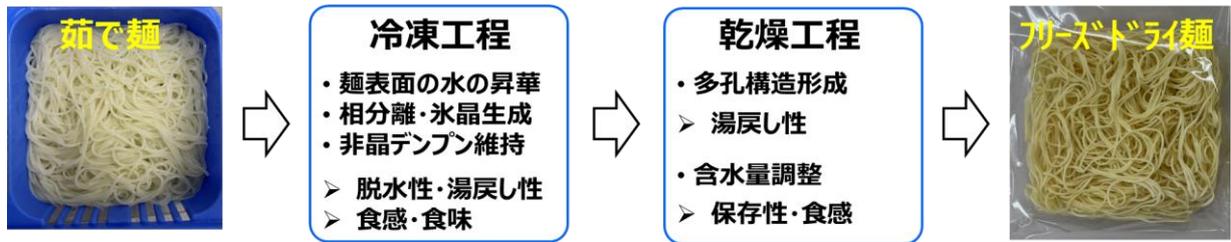


図1 フリーズドライプロセス。

冷凍パラメーター →

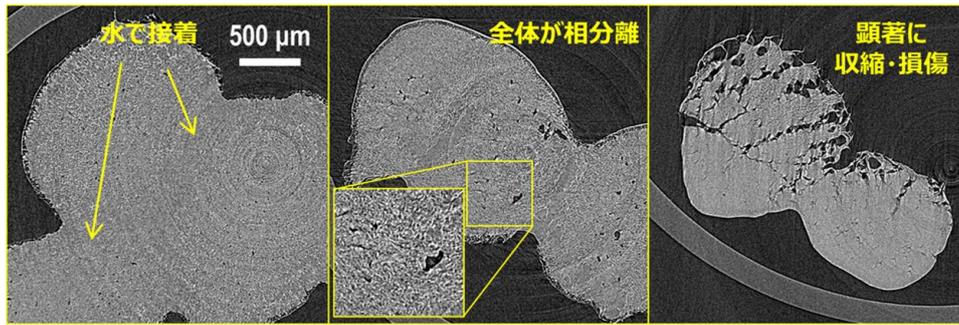


図2 冷凍工程で生じる茹で麺表面の水の昇華と内部相分離[1]。

SPring-8  
BL14B2  
冷凍CT

R5年度既存放射光施設設計ライアルユース報告書より転載

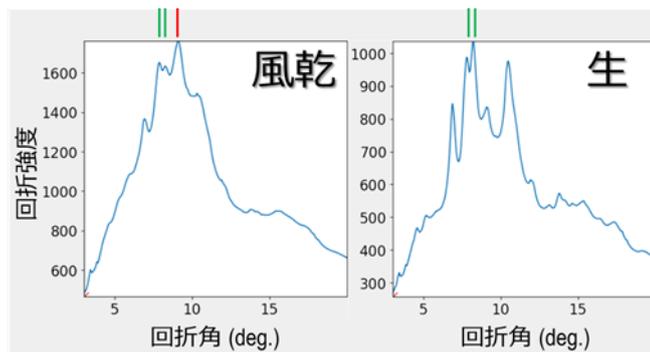


図3 X線回折によるデンプンの結晶・非晶状態の評価[2]。

緑：A型結晶、赤：非晶に特徴的なピーク。

**現状の課題は湯戻し時間の短縮および麺のつるみ(表面の滑らかさ)の評価**である。湯戻し時間に関係する因子として、フリーズドライ工程で生じた麺の孔構造が麺内部への湯の浸透を促進するものと予想される。多孔構造の形成には、冷凍工程で麺内部の相分離を十分成長させることが有効と予想されるが、相分離の進行による麺表面の損傷も確認されている(図2)。以上より、**課題解決のためには、フリーズドライ麺の多孔構造の評価と、湯戻し麺表面の付着性および摩擦の評価の方法を確立し、湯戻し時間の短縮と麺の良好なつるみを両立するためのフリーズドライ条件の指標を得る必要がある。**

### 〇目的

本提案では、フリーズドライ麺の湯戻し時間の短縮と麺のつるみの両立に向けて、**(1)NanoTerasuの位相コントラスト放射光 X線マイクロCTによる、フリーズドライ麺のマイクロメートルスケールの多孔構造および表面構造の可視化と多孔構造の定量指標化、(2)テクスチャー測定器による湯戻し麺表面の付着性・摩擦性の指標化**の方法を検討した。

#### 4 測定方法（測定手法、測定セットアップ、使用ビームラインなど）

##### ○放射光実験

冷凍麺およびフリーズドライ麺の放射光 X 線マイクロ CT は、3 GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu の白色 X 線 CT ビームライン BL09W で行った(図 4)。冷凍麺の測定のため、Deben 社製 CT 用温調ステージ CT160 を独自に設置して用いた。冷凍麺の測定では同装置の設定温度を  $-20^{\circ}\text{C}$  に設定した。フリーズドライ麺の観察は室温に設定して行った。X 線エネルギーは、厚さ 20 mm のアルミアブソーバーを挿入して比較的高エネルギーの X 線を利用した。X 線カメラは視野約 20 mm(W) $\times$ 5 mm(H)、画素サイズ 4.6  $\mu\text{m}$  であり、試料-カメラ間距離を 150 mm および 1000 mm に設定して伝搬コントラスト法(X 線の屈折による輪郭強調効果を利用する方法)で測定を行った。CT 測定条件はビームライン標準の条件( $0\sim 180^{\circ}$  方向の投影像を角度ステップ  $0.1^{\circ}$ 、露光時間 50 ms/frame)とした。測定時間は試料交換を含めて 15 分程度であった。伝搬(屈折)コントラスト投影像に位相回復計算[3]を施して位相コントラスト像に変換し、ビームライン既設のソフトウェアで CT 再構成を行った。画像の表示および解析には ImageJ (Fiji) [4]を用いた。

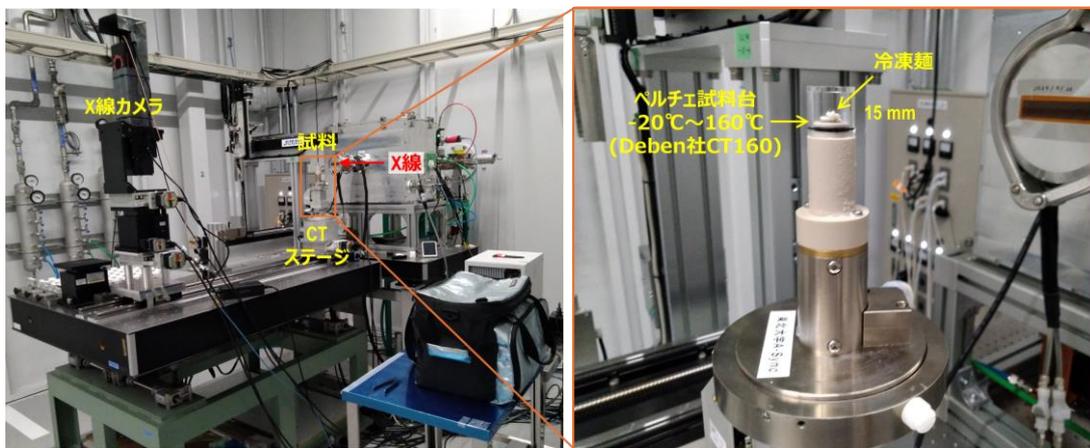


図 4 NanoTerasu BL09W の白色 X 線 CT 装置(左)と温調ステージ(右)。

##### ○摩擦測定

湯戻ししたフリーズドライ麺の表面の摩擦測定は、宮城県産業技術総合センターの二軸テクスチャー試験機 (山電製)を用いて行った(図 5)。プランジヤーは施設に既設のものを用いた。湯戻し後 2 分、5 分、7 分のフリーズドライ麺 1 本を耐水紙やすりに載せ、プランジヤーで抑えて麺表面の摩擦特性を評価した。

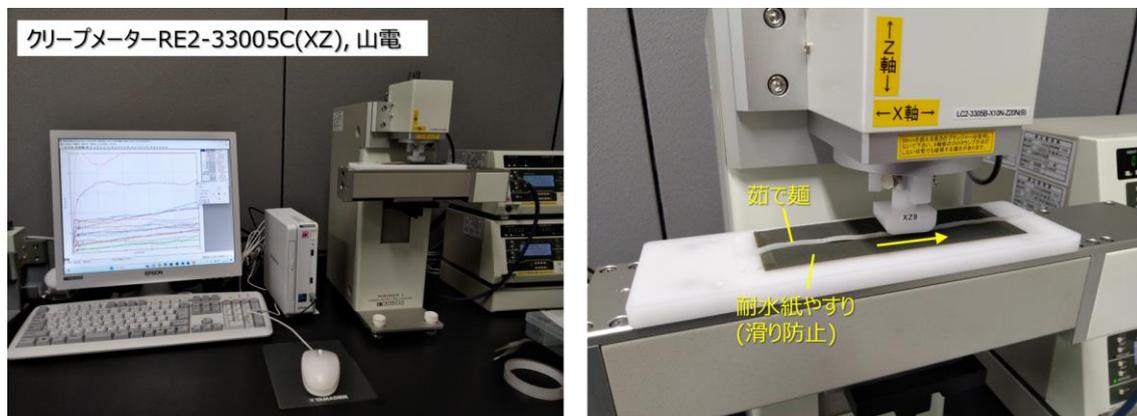


図 5 二軸テクスチャー試験機

5 結果及び考察 (代表的なグラフや図を用いて分かりやすく説明すること)

○NanoTerasu での冷凍麺相分離構造およびフリーズドライ麺多孔構造の観察

冷凍麺の伝搬距離 150 mm および 1000 mm で測定した伝搬コントラスト像および位相コントラスト像を図 6 に示す。何れの伝搬距離でも冷凍麺の相分離構造が明瞭に観察できているが、1000 mm の条件の方がより相分離構造が鮮明であった。伝搬コントラスト像は輪郭の強調により微細構造が明瞭な一方で、麺内部と周囲の空気部分の画素値の差が小さくなっており、二値化による相分離構造や空隙構造の抽出が難しいと予想された。位相コントラスト像ではコントラストの鮮明さを維持しながら輪郭強調が抑えられ、密度を反映した自然なコントラストが得られた。伝搬距離 1000 mm で測定した位相コントラスト像の方が比較的コントラストが高く、この条件を測定条件に採用した。

図 7 はフリーズドライ麺の伝搬コントラスト像と位相コントラスト像である。フリーズドライ麺でも冷凍麺と同様に伝搬コントラスト像から位相コントラスト像へ変換することで、麺と空隙の画素値の差が明確になり、画像解析が行い易くなるものと期待された。

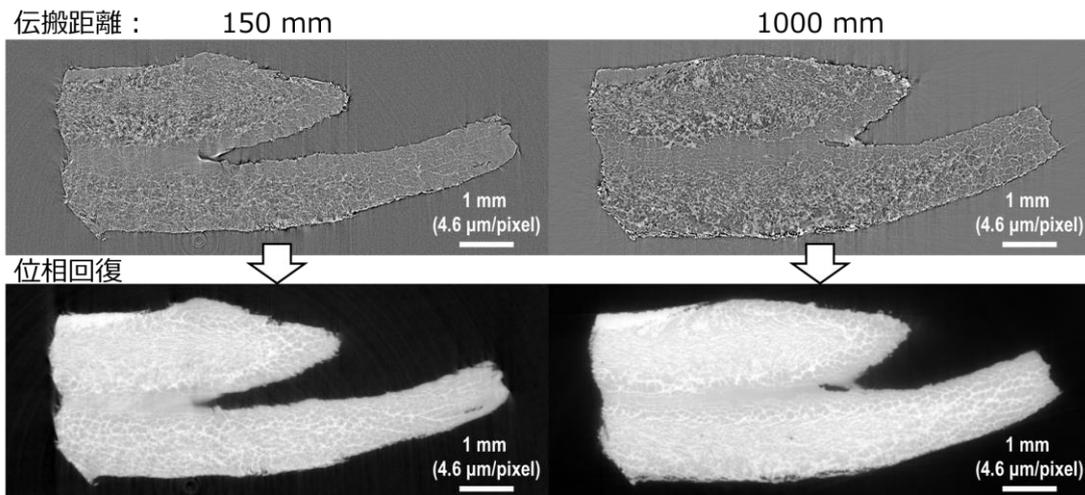


図 6 伝搬距離 150 mm および 1000 mm で測定した冷凍麺の伝搬コントラスト像(上)と位相コントラスト像(下)。

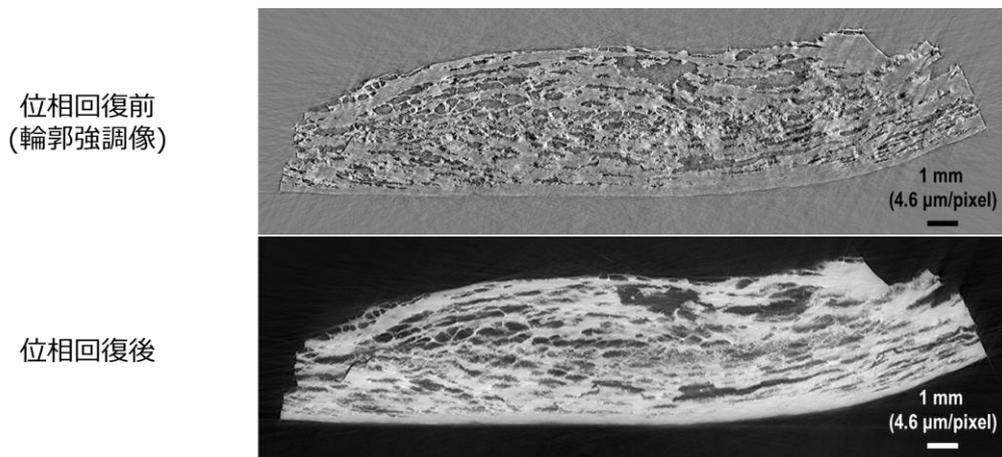


図 7 伝搬距離 1000 mm で測定したフリーズドライ麺の伝搬コントラスト像(上)と位相コントラスト像(下)。

○多孔構造の定量解析

多孔構造の定量解析のため、まず CT 像の二値化処理による空隙の分離を行った。ImageJ を用いた二値化結果を図 8 に示す。Auto Local Threshold 機能で複数の二値化アルゴリズムを試した結果、位相コントラスト像に Phansalkar 法を適用することで良好な二値化結果を得ることができた。伝搬コントラスト像では輪郭強調効果および麺と空隙の画素値の差が小さいことにより、輪郭のみが抽出され、麺と空隙を分離することができなかった。

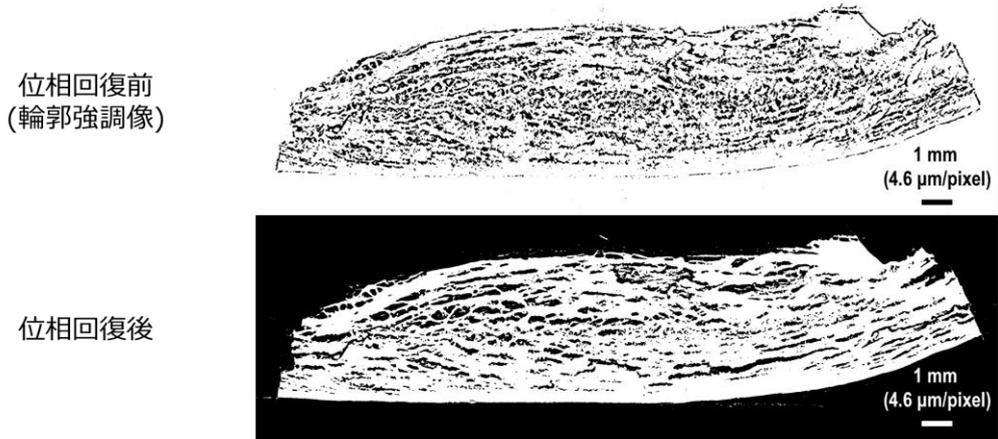


図 8 ImageJ を用いた伝搬コントラスト像と位相コントラスト像の二値化処理。

Phansalkar 法により二値化した位相コントラスト像に Analyze Particles 機能を適用し、空隙のラベリングと形状パラメータの抽出を行った。結果を図 9 に示す。個々の空隙の真円度や周長などの、麺内部への湯の浸透性に関する空隙の形状パラメータを定量化し、真円度の頻度分布や周長と真円度の相関などの評価を行うことが可能となった。その結果、麺線方向に湯を浸透させる細長い空隙の他に円形の微細な空隙が多数存在することが明らかとなった。今後、湯戻し性と加工条件、空隙構造の関係を定量比較し最適化を図る。

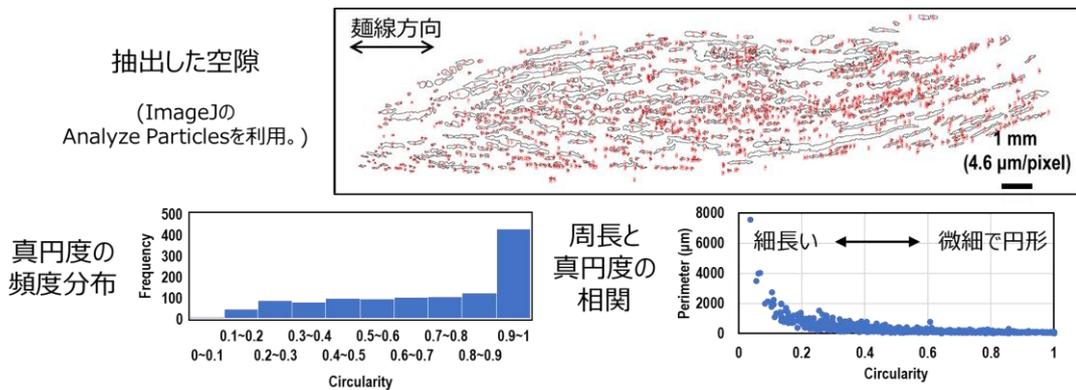


図 9 ImageJ を用いた空隙の統計解析。

○摩擦測定による麺のつるみの評価

茹でた生麺および乾麺、湯戻ししたフリーズドライ麺の 2、5、7 分後の摩擦測定結果を図 10 に示す。試料は生麺、乾麺、湯戻し性・官能性の良いフリーズドライ麺、湯戻し性・官能性が悪いフリーズドライ麺とした。何れの試料でも、湯戻し後は経時的に摩擦力が増加し、乾燥によるつるみの低下が示唆された。茹であるいは湯戻し後 2 分および 5 分の麺の摩擦プロファイルと比較すると、湯戻し性・官能性の良いフリーズドライ麺は生麺や乾麺と同程度の摩擦力、類似の摩擦特性を示し

たのに対し、湯戻し性・官能性の悪いフリーズドライ麺は他の麺に比べて摩擦力が著しく低下しており、変動も大きかった。以上の結果より、摩擦測定により麺の表面状態を定量評価できる可能性が示唆された。

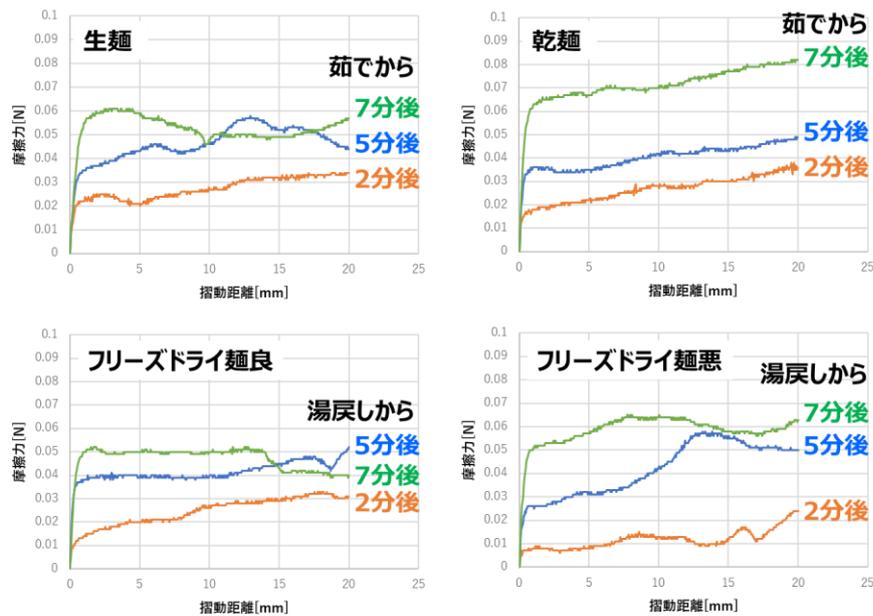


図 10 茹でた生麺と乾麺および官能性の異なるフリーズドライ麺湯戻し麺の摩擦特性

## 6 今後の課題

本課題を通じて、多孔構造およびつるみの定量指標化を行うことができた。これまでの取り組みと併せて、フリーズドライ工程と関係する構造指標としては「冷凍麺の相分離構造」、「フリーズドライ麺の多孔構造」と「フリーズドライ麺デンプンの結晶/非晶状態」、官能性と関係する力学指標としては「破断特性」と「摩擦特性」の定量指標が得られた。今後、これらの定量指標に基づいて、フリーズドライ条件の最適化を検討していく。その際、構造と官能の定量指標の相関を見出し、最適条件を予測するための解析方法が課題である。これは、例えば細うどんで見出した条件を中華麺など他の麺へと適用する際に重要な課題である。

前年度のトライアルユース事業では SPring-8 での測定であったため、冷凍麺の測定では液体窒素凍結や専用保冷容器での輸送など敷居が高かった。長距離・長時間の冷凍麺の運搬は温度変化による構造変化の懸念もあった。今回は工場から距離が近い NanoTerasu で実験を行ったため、ドライアイス冷却で運搬し、当日の内に測定できたため実験が容易であった。状態変化し易い食品の加工プロセスを評価する場合、工場と放射光施設の立地が近いことは強みに感じた。今後も NanoTerasu を有効活用して製品開発を進めていきたい。

## 7 参考文献

- [1] 令和 5 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  
([https://www.city.sendai.jp/research/risakon/trialuse/documents/marunishokuhin\\_report.pdf](https://www.city.sendai.jp/research/risakon/trialuse/documents/marunishokuhin_report.pdf))
- [2] NanoTerasu シェアリング 2000 利用報告書  
([https://www.city.sendai.jp/research/risakon/contents/documents/hokoku\\_ippan\\_kosetsu\\_maruni.pdf](https://www.city.sendai.jp/research/risakon/contents/documents/hokoku_ippan_kosetsu_maruni.pdf))
- [3] Paganin *et al.*, *Journal of Microscopy* **206**, 33–40 (2002)
- [4] Schindelin *et al.*, *Nature Methods* **9**, 676–682 (2012)