

令和 7 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

NanoTerasu と機械学習を活用した新規フリーズドライ麺製造プロセス構築の試み

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 (試料調製、放射光実験、評価結果の検討)
共同研究機関: 東北大学 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
高山 裕貴 准教授 (放射光実験、データ解析、評価結果の検討)
利用施設 : 3 GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu BL09W (白色 X 線 CT)
協力 : 東北大学 ナノテラス共創推進機構 高田 昌樹 副機構長
一般財団法人光科学イノベーションセンター 高橋 聖弥 博士

3 背景と測定目的

【背景】

創業 140 年を迎えるマルニ食品では、伝統の製麺技術を礎にフリーズドライ (FD) 麺の開発を進めている。単身世帯や共働き世帯の増加などライフスタイルが多様化する中、長期保存が可能で調理不要な FD 食品は、フードロス削減や災害地域への供給といった社会課題解決にも資すると期待されている。これまでの SPring-8 (2023 年) や NanoTerasu (2024 年) におけるトライアルユース等[1,2]を通じて、FD プロセスにおける素材内部の微細な変化 (相分離や多孔構造の形成メカニズム) を捉え、「湯戻りの悪さ」や「食感の劣化」といった課題を克服する指針を得て、テストマーケティング段階へ移行している。次に解決すべき課題は「高品質」と「購入しやすい価格」の両立であり、製品を広く展開するための製造プロセスの飛躍的な革新が求められている。

【目的】

本課題では、これまでの「高品質フリーズドライ麺」の知見を基盤とし、製造工程を科学的に最適化する解析基盤の構築を目的とした。具体的には、NanoTerasu の高空間分解能な位相コントラスト X 線マイクロ CT による高度な分析能力 (多孔構造の可視化) と、機械学習による情報抽出技術を組み合わせることで、「食感 (品質)」と「製造コスト (プロセス時間等)」という二律背反する要素をかつけない高いレベルで両立させる最適条件の予測法の構築を目指した。

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）

【試料調製】

製麺工程および冷凍工程の条件（高・低）を組み合わせた 6 水準（サンプル A～F；表 1）の FD 麺を用意した。各条件に対し、冷凍工程や乾燥工程に要する時間等の生産性を総合的に勘案し、製造コストを 3 段階（1：高コスト～3：低コスト）でスコア化して評価指標とした。

表 1 サンプル水準

ラベル	A	B	C	D	E	F
製麺工程	高	低	低	高	低	低
冷凍工程	高	高	高	高	高	低
スコア	1	2	2	1	2	3

【放射光実験（BL09W）】

FD 麺の湯戻し性に寄与する空隙構造の非破壊観察と定量化のため、NanoTerasu の白色 X 線 CT ビームライン BL09W にて高空間分解能 μ CT 測定を実施した。4～30 keV の連続スペクトルに対し、厚さ 100 μm の Ag アブソーバーを挿入し、主に 25 keV 付近（波長 0.05 nm）の X 線を利用した。高空間分解能カメラ（画素サイズ 0.65 μm 、視野 1.3 mmW \times 1.3 mmH）を搭載し、試料検出器間距離を 55 mm に設定することで、X 線の屈折による輪郭強調コントラストを利用して高精細な断層像の測定を行った。

【画像解析と機械学習】

取得した CT 像に対し、画像解析ソフト Fiji[3]の Phansalkar 法[4]による Auto Local Threshold 機能を用いて局所的な閾値処理による二値化を実施し、麺実質部と空隙を分離した。その後、Analyze Particles 機能で個々の空隙情報を数値化し、空隙面積の規格化頻度分布を計算した。この空隙サイズ分布データに対し、機械学習の手法である自己組織化マップ（Self-Organized Map, SOM）[5]を適用し、空隙分布の類似度と製造コストとの関係性を総合的に評価した。

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）

【多孔構造の非破壊観察】

NanoTerasu の高空間分解能 μ CT により、FD 麺内部のデンプンが粒状性を保持したまま乾燥により収縮している様子が観察された。また、湯戻し工程において湯の浸透経路となる 3 μm 程度の微細な空隙構造を非破壊で明瞭に可視化することに成功した（図 1）。放射光 X 線ならではの高い透過能と空間分解能により、従来の破壊検査では評価が困難であった内部の複雑な多孔構造の正確な把握が可能となった。

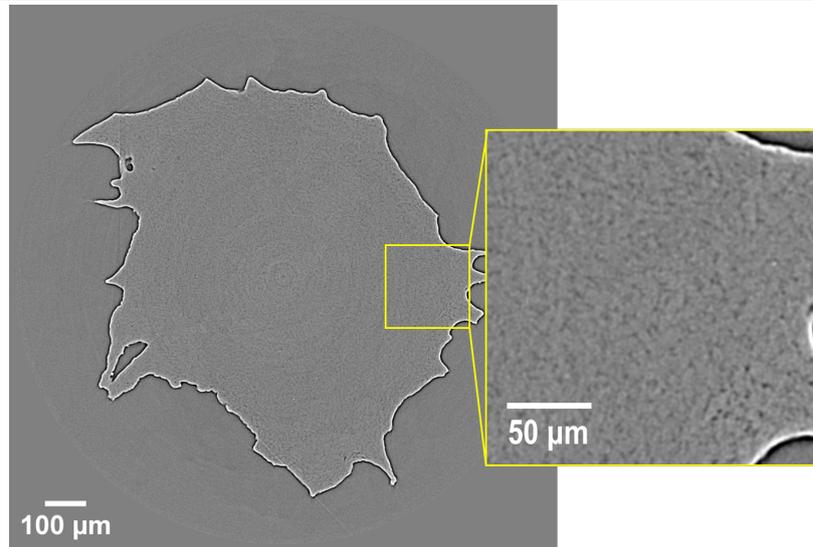


図 1 NanoTerasu BL09W で取得したフリーズドライ麺の高空間分解能 μ CT 断層像

【空隙サイズ分布の定量解析】

Fiji を用いた二値化処理により空隙情報を適切に抽出し、サンプル A~F について空隙面積の規格化頻度分布を算出した (図 2)。グラフから明らかなように、全体としては小面積の微細な空隙が高い頻度を示す分布傾向を持っていたが、条件間で傾向は類似しているものの、製造条件 (製麺・冷凍パラメータ) に応じてやや異なるサイズ分布を持つことが定量的に確認された。

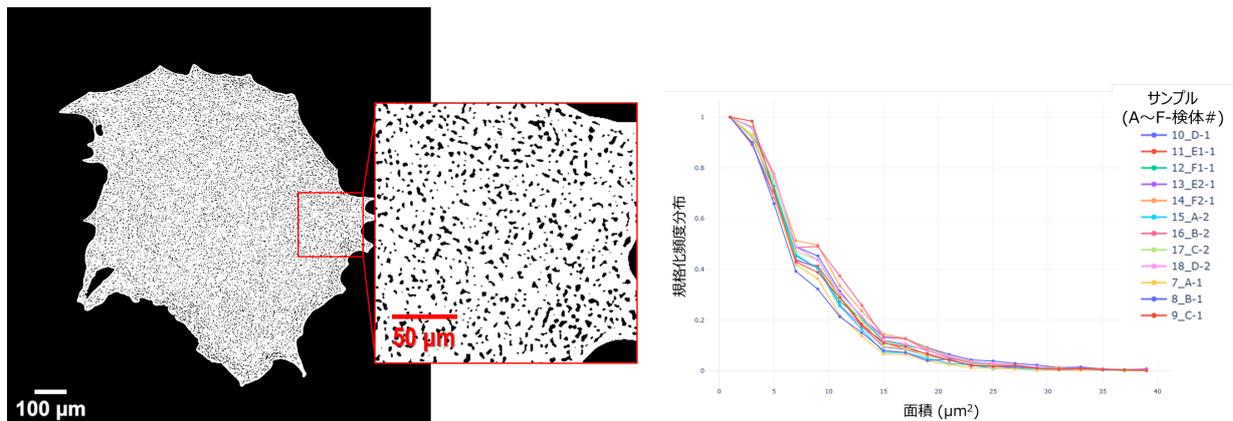


図 2 Fiji による空隙情報の抽出 (左) および空隙サイズ (面積) の規格化頻度分布 (右)

【SOM による分類とコストの相関評価】

得られた空隙の形状 (サイズ) 分布の差異を俯瞰して比較するため、自己組織化マップ (SOM) を用いて分類した。その結果、分布が似ている条件はマップ上で近くに、異なる条件は遠くに配置された。このマップのプロットを 3 段階の製造コストスコアで色付けすることで、湯戻しに重要な空隙構造と製造コストとの相関性を視覚的に可視化・評価する方法論を構築することができた (図 3)。これにより、比較したパラメータは限定的であるが、プロセスとコストのバランスを最適化するための強力な評価基盤を構築できたといえる。



図 3 自己組織化マップ(SOM)を用いた空隙サイズ分布の分類と製造コストスコア（色）の相関

6 今後の課題

本課題を通じて、空隙の形状分布に基づく分類と、製造コストとの相関性を視覚的に評価する解析基盤を構築できた。今後は、比較する FD 麵の製造条件数を増やすことで、データセットを拡充し、SOM の分類軸 (X および Y) が自動抽出した多孔構造と製造プロセス間の関係性の意味をより詳細に同定・解釈できると期待される。さらに、空隙の形状分布のみならず、X 線回折によるデンプンの再結晶化度や官能評価結果など多面的な指標を組み合わせることで、食感と製造コストを最適化するプロセス構築の精度を飛躍的に向上させていきたい。

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）創出事例報告書「フリーズドライ麺製造のためのマイクロ・ナノ構造指標化への取り組み」
- [2] 令和 6 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「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」
- [3] Schindelin et al., *Nature Methods* **9**, 676–682 (2012)
- [4] Phansalkar et al., *2011 International Conference on Communications and Signal Processing*, 218–220 (2011)
- [5] Qian et al., *Results in Materials* **4**, 100020 (2019)