

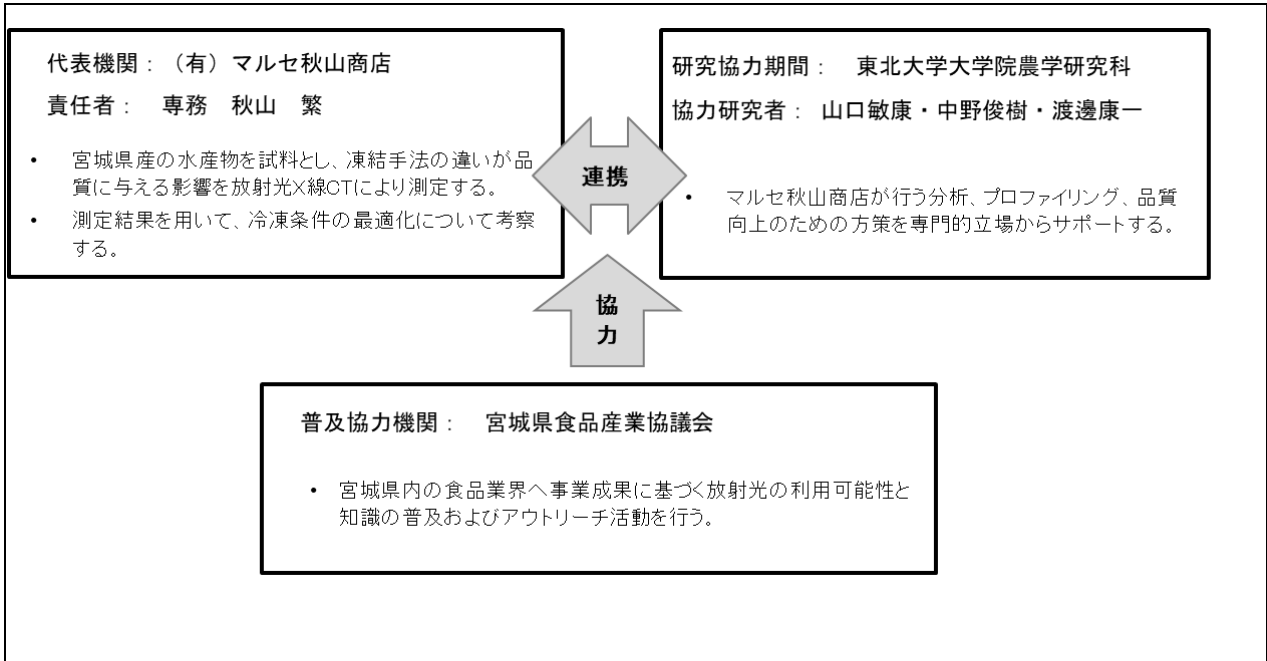
(様式第7号)

「仙台市放射光施設活用事例創出事業（トライアルユース事業）」 成果報告書詳細

1 課題名

放射光イメージングによる冷凍水産物組織の可視化と冷凍条件の最適化

2 測定にあたっての体制（社外委託先を含め記載）



3 背景と測定目的

○背景

世界的に水産物に対する需要が高まっており、国内でも今後の消費拡大が期待される¹⁾。水産物は食料の安全保障の点からも重要であるが、漁獲は自然の影響を受け不安定、鮮度低下が早く腐敗しやすい、旬が存在する、水分量が多いなどの特徴により生状態での取り扱いが難しく、多くは冷凍により流通する。このため、冷凍・解凍技術は水産物の品質維持に欠かせない。

本県において水産業は基幹産業の一つであり、水揚げ高を誇る大きな漁港を複数有し水産加工も盛んである。加えてギンザケやカキの養殖は全国でもトップクラスであり、取り扱い水産物の高品質化とブランディングは国内外の流通を増やし我が国の水産業を成長産業とするためにも極めて重要である。

冷凍水産物の品質は主に組織の氷結晶サイズと解凍時の処理方法に大きく左右されるといわれている。従って、冷凍水産物組織のダメージを軽減するためには氷結晶の形成制御が重要と考えられるが、凍結状態で組織を非破壊的に観察することは極めて困難であり知見に乏しい^{2, 3)}。さらに冷凍水産物の解凍過程における組織の変化についても観察事例は見当たらない²⁾。

○測定目的

冷凍水産物の組織状態を解凍処理することなく凍結状態でリアルタイムに観察することを目指し、本県塩釜港でも多く水揚げされ「ひがしもの」としてブランド化されるマグロをモデル試料として、凍結方法（緩慢および急速凍結法）の違いが組織の状態に与える影響について検討した。すなわち、従来は観察が困難だった組織内部の氷結晶組織（水分）とそれ以外の細胞成分（タンパク質および脂質成分）の状態を大型放射光施設 Spring-8 の放射光 X 線 CT により非破壊的に 3 次元可視化し、それら成分の状態をプロファイリングした。そして冷凍条件が組織の状態に及ぼす影響を考察し、科学的根拠に基づき水産物の品質を維持・向上するための基礎的知見を得ようとした。

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）

○材料

測定サンプルの種類

供試サンプルとして付加価値が高いクロマグロ（大トロ）を生鮮状態で購入した。

この生サンプルについて送風（エアブラスト）式フリーザーによる急速凍結および一般的従来型フリーザーによる緩慢凍結の条件を用意し-25℃にて凍結した。

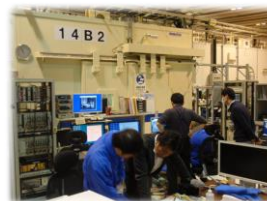
○方法



凍結試料の作製



測定装置への試料のセット



X線 CT 測定と 3 次元構成
写真は BL14B のハッチ付近

（1）サンプルの前処理

SPring-8 に供試用クロマグロ大トロをドライアイスと共に凍結状態で持ち込み、低温下で 5 ミリ角に成型して測定用サンプルとした。

（2）放射光測定条件

測定は SPring-8 のビームライン BL14B にて、液体窒素により凍結状態で行った。測定波長は 1 Å、250 ミリ秒の露光時間でサンプルを 0.5 度刻みで回転させて 360 枚（180 度回転）の透過像を撮影した。撮影像から、BL14B2 の解析用コンピューターで 3 次元構成を行った。

（3）データ解析

3 次元構成したデータは東北大学農学研究科において解析用ソフトウェア Image J で解析した。

5 結果および考察（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）

（1） 冷凍クロマグロ大トロの断層像

X線 CT 観察した冷凍クロマグロ大トロの断層像を図 1 に示す。CT 画像上で背景を除き暗く黒い部分、明るい灰色部分および白い部分の 3 区分が認められた。

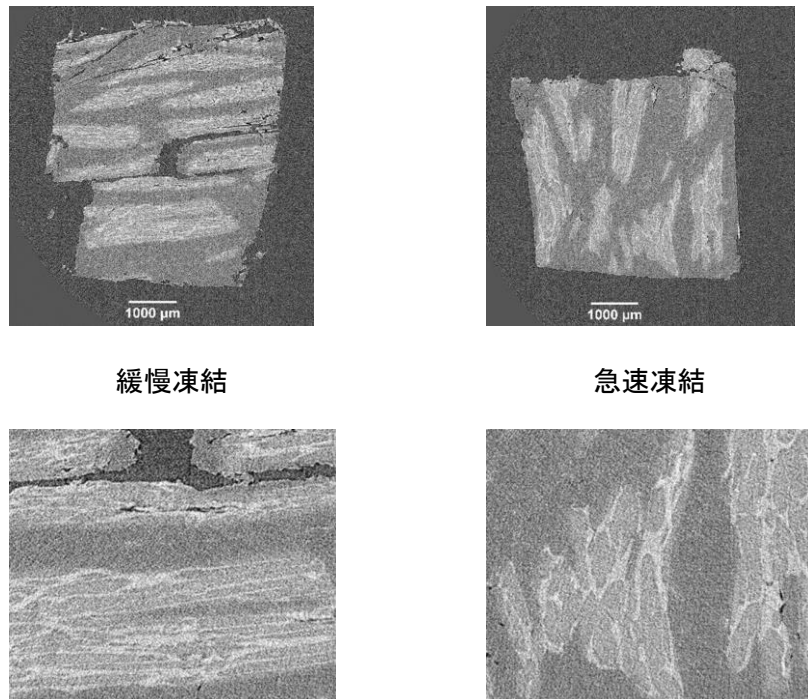


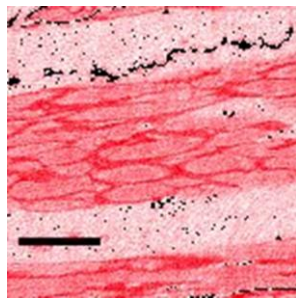
図 1 冷凍クロマグロ大トロの断層像
全体像（上）と部分拡大図（下）

（2） 冷凍クロマグロ大トロ断層像の疑似カラー化

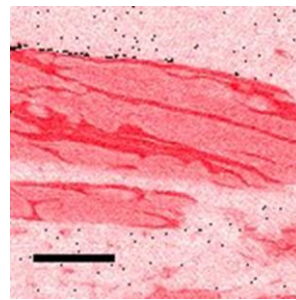
CT 画像中の画素を構成する物質が持つ固有の X 線線吸収係数を基に図 1 で認められた組織成分に由来すると思われる三つの部分を疑似カラーで彩色を施し、組織の方向を揃え、拡大したものを図 2 に示す。

これにより、グレースケールでは判別が難しかった 3 成分の分布の違いが明確となった。すなわち、淡いピンクが脂質、ピンクが氷、そして濃い赤色がタンパク質などの成分にそれぞれ由来すると推察される。

マグロの一種キハダの生状態の赤身の X 線 CT 観察では成分が均一に分布することを示す断層像が得られたが、それを凍結するとその断層像には濃淡が生じ氷と水分以外のタンパク質などの部分に分離することが報告されている³⁾。今回の冷凍クロマグロ大トロの X 線 CT による画像解析では、急速凍結に比べ緩慢凍結で氷結晶部分とタンパク質などに由来する部分の分離が約 10 倍も進んでいることが示唆された。



緩慢凍結



急速凍結

脂質
氷
タンパク質など

図 2 冷凍クロマグロ大トロの疑似カラー彩色済み断層像
スケールは 0.5 mm

(3) 冷凍クロマグロ大トロの 3 次元再構成像

急速凍結大トロの断層像を基に、試料内の一部分を 3 次元再構成して得た像と代表的なマグロ大トロの写真（写真素材サイト photoAC より引用）を図 3 に示す。一般的に大トロでは赤身部分に脂質がサシとなって入っているが（図 3 右）、3 次元再構築された画像より凍結状態では脂質成分の中に氷結晶と濃縮されたタンパク質などの成分が浮遊したような状態で存在していることが示唆された（図 3 左）。

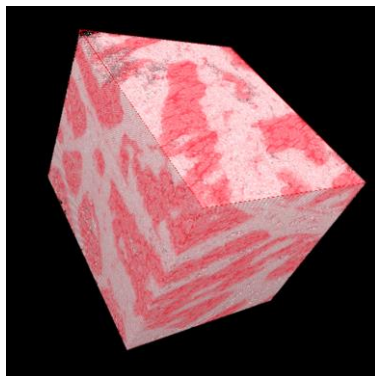


図 3 冷凍クロマグロ大トロの 3 次元再構成像（左）と生マグロ大トロ（右）

○結 論

クロマグロ大トロにより得られた(1)～(3)の結果は、キハダ赤身を用いて放射光X線CTにより観察した結果を追認したことに加え、冷凍された組織中の脂質、水分およびそれら以外のタンパク質を中心とした成分の三者の関係について新たな知見を明らかにできた³⁾。画像解析の結果、凍結された大トロ中では、急速凍結法に比べ緩慢凍結法においてタンパク質などの成分の分離・濃縮が促進されていることが示唆された。従って、主な細胞成分であるタンパク質の凍結時の存在状態、すなわちタンパク質の水分からの分離と濃縮の程度が解凍後のドリップ(タンパク質やアミノ酸など栄養・うまみ成分が含まれる組織浸出液)の量、味、歯ごたえなどの品質に影響するものと推察される。

本研究では、凍結組織切片による従来法の組織観察も試みたが、低温下でも流動性を保つ高度不飽和脂肪酸に富む魚類脂質は、陸上動物のそれと異なり凍結状態でも切片作製時に溶解が始まるため、薄切することが極めて困難であった。従って、凍結状態で魚類筋肉に含まれる主な成分をリアルタイムに「見える化」観察した放射光X線CTによる本報告は極めて貴重である。すなわち放射光X線CTによる観察は、今までの冷凍食品の組織観察手法では氷結晶の直接観察は困難、そして凍結時の状態は解凍後の組織観察や品質変化より推測するしかなかった従来の冷凍食品分野の研究と考察に対して科学的根拠を与えるものである。

今後、解凍後の品質評価と合わせ考察することで水産物の冷凍条件の最適化が図られれば水産物の品質は格段に向上し、販路の拡大と新たなブランディングが期待され、水産を成長産業にらしめるための大きな一助になると確信する。

6 今後の課題

- 画像上ではタンパク質などの成分の違いが顕著に認められた。しかし、この違いが冷凍クロマグロ大トロの品質にどのように関係しているのかについては不明である。今後は、放射光以外の実験手法を用いドリップ量、色合い、味、歯ごたえなどの品質に関わる評価項目のデータを取得し、画像データとの相関解析が必要と思われる。
- 今回は先行研究事例のほとんどない水産物の放射光による測定を最大の目的としたため、画像で得られたサンプル間の違いが冷凍手法に由来するのか部位などの違いに由来するものなのかを検証できなかった。今後は個体差や部位などを考慮した実験設定と検証を行う必要がある。
- 画像の解析については東北大学大学院農学研究科の研究サポートグループに依頼した。冷凍水産物については知見がほとんどないため解析データの評価が難しかったが、本測定のような冷凍食品の網羅的非破壊評価は、品質に関して科学的根拠が得られる大きな可能性を秘めている。
- 測定データはサイズが極めて大きく、一般的なハードディスクでは容量が不足した。また、解析に用いるコンピューターもメモリを大きく確保したものが必須であり、東北大学大学院農学研究科のサポートは不可欠であったと感じている。

7 参考文献

- 1) 平成 30 年度水産白書、水産庁 (2019)
https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/h30_h/index.html
- 2) 中野俊樹、水産分野における放射光利用の可能性と期待、放射光利用の手引き（東北放射光施設推進会議推進室編）、アグネ技術センター、東京、pp. 42-48 (2019).
- 3) Sato, M., Kajiwara, K., Sano, N. Non-destructive three-dimensional observation of structure of ice grains in frozen food by X-ray computed tomography using synchrotron radiation, *Jpn. J. Food Engineer.*, 17, 83-88 (2016).