

X線CTによる冷凍パスタ中に形成される氷結晶の形状解析 X-ray CT Analysis of Ice Crystal Shape Formed in Frozen Pasta

入江 謙太朗^a, 平内 亨^a, 田中 昭宏^a, 野中 純子^a, 張替 敬裕^a, 村勢 則郎^b, 植竹 由紀^b,
佐藤 眞直^c, 梶原 堅太郎^c, 佐野 則道^c,
Kentaro Irie^a, Toru Hirauchi^a, Akihiro Tanaka^a, Junko Nonaka^a, Takahiro Harigae^a,
Norio Murase^b, Yuki Uetake^b, Masugu Sato^c, Kentaro Kajiwara^c, Norimichi Sano^c

^a(株)日清製粉グループ本社, ^b東京電機大学, ^c(公財)高輝度光科学研究センター
^aNisshin Seifun Group Inc., ^bTokyo Denki University, ^cJASRI

X線CTにより保管期間を経た冷凍パスタ断片内のパスタの組織及び氷結晶の観察を試みた。その結果、冷凍保管中にパスタの組成成分であるでん粉質やたんぱく質と考えられる箇所に凝集が起こり、またパスタ内の氷とみられる箇所の粗大化が観察された。また、冷凍焼けが目視で明確に確認されるサンプルでは、パスタの表層から内部の深部にかけて明白な空隙が生じていることが確認された。

キーワード： X線CT、冷凍パスタ、氷結晶形状解析、冷凍焼け、劣化

背景と研究目的：

ゲル状食品の冷凍保存において、生成する氷結晶のサイズ・形状は品質に大きな影響を及ぼす。冷凍麺類においては、保管中に生じる食感の劣化(ボソボソ感の発生)や冷凍焼け等の発生は、品質維持上の大きな課題となっている。冷凍麺の保管中の品質劣化は、氷結晶の成長と密接な関係があると想定され、これらの課題解決のためには冷凍麺の凍結状態における氷結晶の形状をそのまま観察して、その挙動をとらえる必要がある。先に実施した実験において、凍結状態の冷凍パスタのX線CT観察を行ったところ、でん粉質やたんぱく質といったパスタの組成成分や氷と見られる組織が確認された。また、冷凍保管期間0ヶ月と6ヶ月経過したサンプルを比較したところ、パスタの表層付近に空隙のような箇所が見られ、冷凍焼けの兆候と見られる状態が観察された[1]。これらを踏まえ、冷凍焼けが発生するまでの過程で冷凍パスタ内の凍結組織がどのように変化するかを調べるために、管理された環境下で冷凍保管した冷凍パスタについて、保管期間を変えたサンプルを用意してX線CT測定を行い、その内部組織に保管期間による系統的な変化の特徴がないかを調べた。さらに実際の商品の形態で冷凍庫内で長期間保存された目視で著しい冷凍焼けが確認されるサンプルと比較して、保管期間による内部組織変化に冷凍焼けの原因となる現象がみられるかどうかについて観察・評価した。

実験：

冷凍パスタは、1.7 mmの乾麺を茹でて水冷し、-40℃の庫内でパスタ1本ずつを急速凍結して包装し、その後-20℃で温度管理した環境下で保管した。この保管期間について1週間保管したものを冷凍保管0ヶ月のサンプルとし、1年間保管したものを冷凍保管1年のサンプルとした。これらとは別に、1.7 mmの乾麺を茹でて水冷し、実際の冷凍パスタ製品に近い形で包装したもの(200 gずつを成型トレイにいれる)を-40℃の庫内で急速凍結して、庫内温度-20℃の冷凍庫内で1年以上冷凍保管して、著しく冷凍焼けが発生しているサンプルを準備した。これらのサンプルを凍結したまま1本ずつ試料ホルダーにセットして測定に用いた。ビームラインBL19B2の実験ハッチ内に設置された回転ステージに試料をセットし、液体窒素蒸気を吹き付けて冷却した。熱電対(クロメル-アルメル)を用いて測定した試料台の雰囲気温度は約-80℃であった。X線のエネルギーは12.4 keVに設定し、高調波除去のためX線ミラーをミラー角4 mradに設定した。試料ステージ下流側にはX線CCDカメラを設置した。凍結試料を回転させながら透過X線をCCDカメラで取り込み、1画素のサイズが2.9 μmの二次元画像を再構成した。試料からCCDカメラまでのカメラ長は30 mm、試料は1.2 %sで回転させ、露光時間は120 msであった。

結果および考察：

得られた冷凍パスタの断面の二次元画像を Fig.1 に示した。左から保管期間 0 か月サンプル、保管期間 1 年サンプル、顕著な冷凍焼けを示すサンプル、のデータである。画像の色は物質の密度を反映した X 線の線吸収係数を意味し、明るい色になるほどその位置の物質の線吸収係数が大きいことを示している。パスタ内で線吸収係数が 0 であることを示す濃い灰色を呈する領域は空隙、線吸収係数が大きいことを示す白色の領域は密度が大きいパスタ組織、その中間的な色の領域はパスタよりも密度が小さい氷であると推察される。

保管期間 0 か月サンプルを基準に保管期間 1 年サンプル、顕著な冷凍焼けを示すサンプルを比較すると、後者にはパスタ表層から内部の深部にかけて顕著に空隙が発生しているが、前者にも表面に若干冷凍焼けの兆候と見られる空隙が見られる。空隙以外の部分を比較すると保管期間 0 か月ではほぼ均一な状態であるが、保管期間 1 年サンプルではパスタ組織の白色部分と氷の中間的な色の部分が相分離して氷結晶組織が生じており、顕著な冷凍焼けを示すサンプルではさらに氷が粗大化していることが確認された。これは保管期間中にパスタ組織が凝集し、パスタ中の氷結晶が成長しているものと見られた。また、成長した氷結晶の形態は、空隙の形態によく似ていることが今回初めて認められ、氷が昇華して空隙ができることにより冷凍焼けが発生したことが推察された。

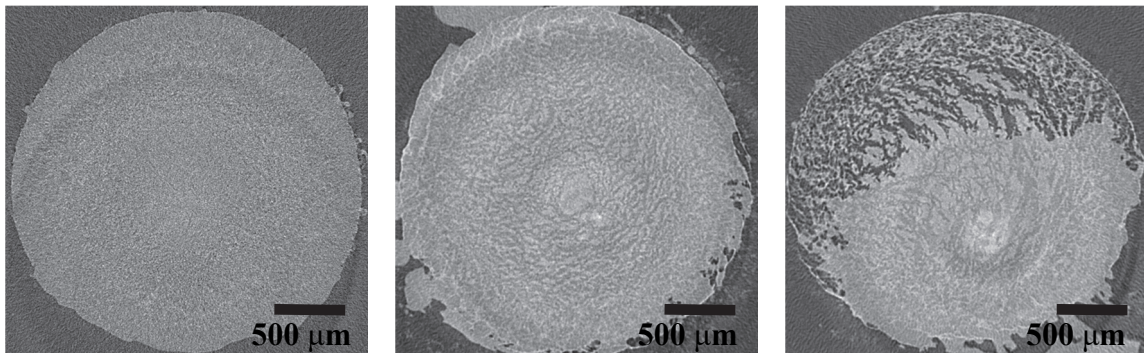


Fig.1. Two-dimensional X-ray CT images of cross sections of frozen pasta. Left: storage period for 0 month; center: storage period for 1 year; right: visually observed “freezer burn”.

今後の課題：

今回の実験において、冷凍保管 1 年後のサンプル及び著しく冷凍焼けを発生しているサンプルについて氷結晶の粗大化等の組織構造の変化を確認し、冷凍焼けに密接に関わる挙動を見出した。

ただし、冷凍保管中の劣化や冷凍焼けの発生メカニズムについては未だ不明な点が多く残されており、より詳細な観察が必要であると考えている。今後は、測定中のサンプルに温度変化を与えるなどして、リアルタイムに組織構造の変化を観察したいと考えている。

参考文献：

[1] 入江謙太郎 他、利用課題実験報告書, 2015B1782.