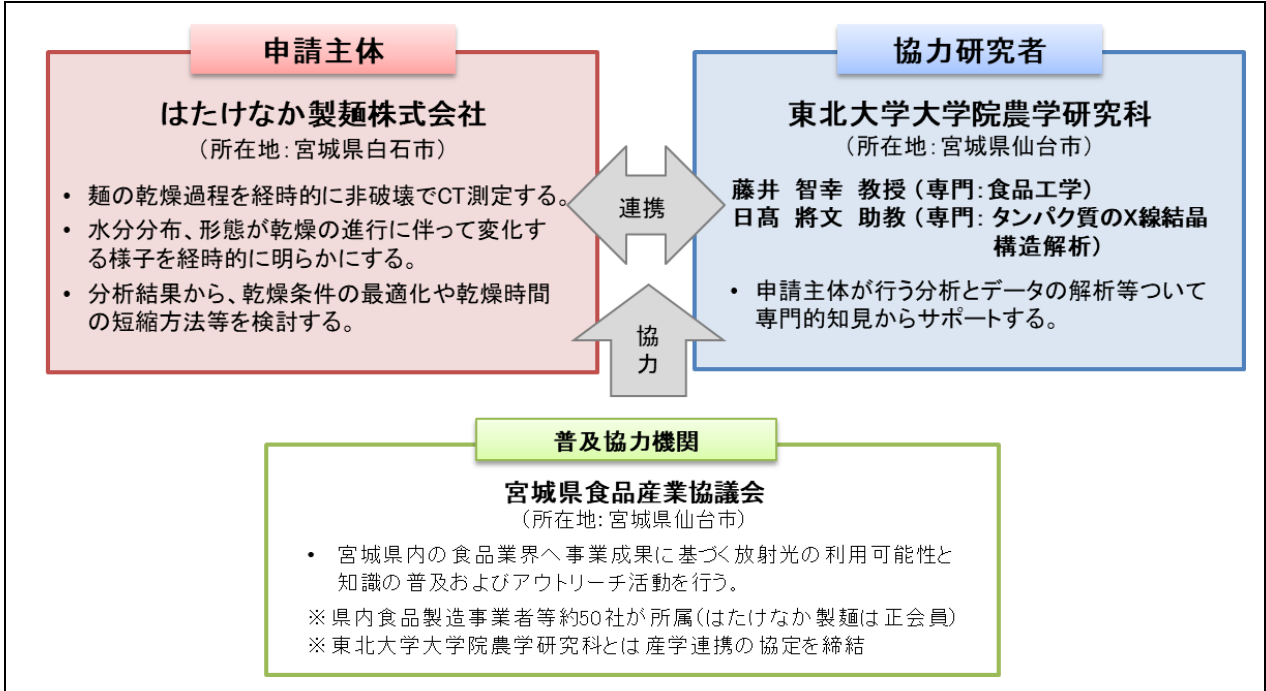


令和3年度仙台市既存放射光施設活用事例創出事業（トライアルユース） 事例報告書

1 課題名

乾めんの乾燥過程における水分分布変化の可視化

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

乾めん製造において乾燥工程は非常に重要な工程で、水分を微生物が繁殖し得ない水分値以下になるまで減らすことによって長期保存可能な製品となる。「機械式乾めん」は、小麦粉に水を加えてミキサーで混捏した後ローラーで展延し、麺の形に切り出す。そして切り出された麺を半日以上乾燥室で乾燥させて製造される。従って生麺を乾燥させるためには膨大なエネルギーを必要とし、乾燥時間の短縮は消費エネルギーの削減につながる。しかし、水分を減らすことのみ注目していると高品質な乾めんは製造できない。

小麦粉を原料とする麺を乾燥させるには、ただ単に風を当てて乾燥しているのではなく、多くのノウハウが必要である。

乾燥過程には、乾燥初期の水分減少速度が一定である**定率乾燥期間**と、乾燥中・後期の水分減少速度が減速する**減率乾燥期間**に大別される。

まず乾燥初期の定率乾燥期間では加えた熱量が全て表面蒸発に消費されるため、一定品温にて定速で水分が減少する。表面が十分に乾燥し内部の水分が表面に移動する減率乾燥期間になると、表面がガラス状態、内部がラバー状態になり次第にラバー領域が減少していく。この時、変形を抑制する必要がある。また、急激に乾燥すると表面変形が顕著となり亀裂が生じる。すると、麺が縦に割れ、非常に折れやすくもろい麺になってしまう。このような状態になると規格不適合品となり廃棄せざるを得なくなる。乾燥工程でのロスもあるが乾燥工程での消費エネルギーも無視できない。

1日ばかりで製造した麺が製品化出来ない事は企業経営においては非常にマイナスとなるが、乾燥

時間の短縮も重要である。製品のロス、すなわち製造における歩留まりの低下とエネルギー消費は長期に及べば重大な損失につながると考えている。

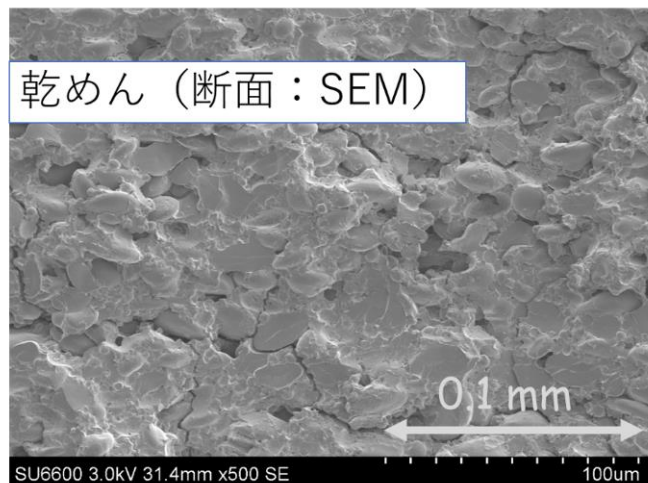
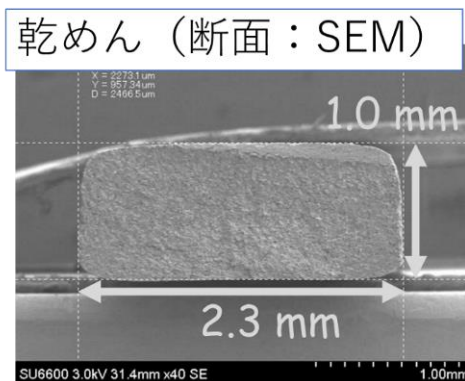
麵乾燥においては、定率乾燥期間におけるガラス転移や定率乾燥期間から減率乾燥期間への移行など乾燥機構は複雑である。故に水分減少に伴う重量変化と品温変化を同時測定することによって、品温変化が認められない定率乾燥期間と水分分布と品温変化が顕著な減率乾燥期間を区別して評価する必要があるが、乾めんに関しては乾燥現象に人為的影響を与えないように重量及び品温を測定することが困難であるためその詳細は充分には解明されていない。

定率乾燥期間	(移行期間)	減率乾燥期間
<ul style="list-style-type: none"> ● 水分が急速に減少 ● 表面の蒸発による乾燥 ● 内部はラバー状態 ● 品温に変化なし 		<ul style="list-style-type: none"> ● 表面の水分が少なくなり、内部の水分が表面に移動し逃散することで、水分含量はゆっくりと減少 ● ラバー状態からガラス状態に変化する ● 品温が上昇する
←----- (全行程 約 X 時間：期間の割合は製法により異なる。) -----> 期間に応じた製造法のコントロールが重要。各工程の時間に応じた品質の変化を追跡したい。		

従って、条件設定しながらの経時変化を研究することで新しい発見があると考えている。半日以上かけていた乾燥時間の短縮が可能となれば製麺業界にとってのイノベーションにつながると考えている。

乾めんの乾燥過程を調べる方法として、従来は顕微鏡観察のような手法をとっているが、この方法は測定サンプル調製の段階で生じる亀裂と乾燥で生じた亀裂を区別することが難しく、また水分の分布については目で見て判断できる範囲でしか評価することができず、正確に評価することが難しい。内部の水分が抜けていく様子や亀裂形成を評価するためには、非破壊で水分をコントラストとしたイメージングが必要となる。

弊社乾めん製品の走査型電子顕微鏡写真



表面の凹凸は、破断による凹凸なのか乾燥による凹凸なのか区別できない。
真空測定のため、水分の様子は見る事ができない。

○目的

本研究課題では、麵の乾燥過程を経時的に非破壊で CT を測定し、水分分布、形態が乾燥の進行

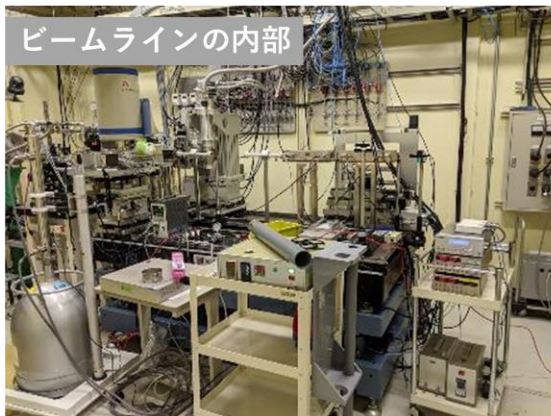
に伴って変化する様子を経時的に明らかにする。特に、同一サンプルの変化を追う測定をすることによって、乾燥による水分の変化や亀裂の形成の様子を評価できるようになると考えている。そのために、まず実験場に製麺場の乾燥過程を簡易的に再現した乾燥装置を持ち込み、乾燥と CT 測定を組み合わせた実験を実施する。

さらにチャレンジングな測定として、BL14B2 のサンプルステージ上で麺を乾燥させながら測定するという手法にチャレンジしたい（測定内容についてはビームライン担当者に照会済み）。これは、BL14B2 にはサンプルを冷却しながら測定するための低温ガス吹付装置が設置されていることに注目し、冷却ガスの代わりに乾燥空気を吹き付けることで、サンプルを動かすことなく、乾燥の段階で特に重要な乾燥初期の内部変化を連続的に測定できるというメリットがある。

令和 2 年度の本業務で麺を試料とした分析がなされているが、それらは「手延べ素麺の製法に由来するおいしさのメカニズムの解明」や、「うどんの食感（テクスチャー）に関する新たな評価方法を確立」を目的とした取組であった。本研究課題は、乾燥による麺の状態変化を、同一サンプルで経時的に測定するため、これまでの創出事例とは目的が異なり、新規性がある。

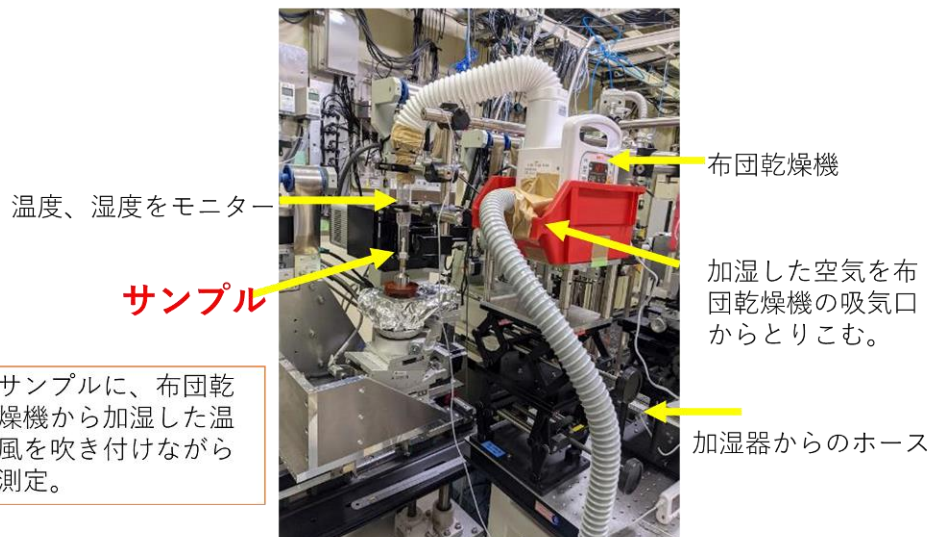
4 測定方法（測定手法、測定セットアップ、使用ビームラインなど）

放射光測定：SPring-8・BL14B2



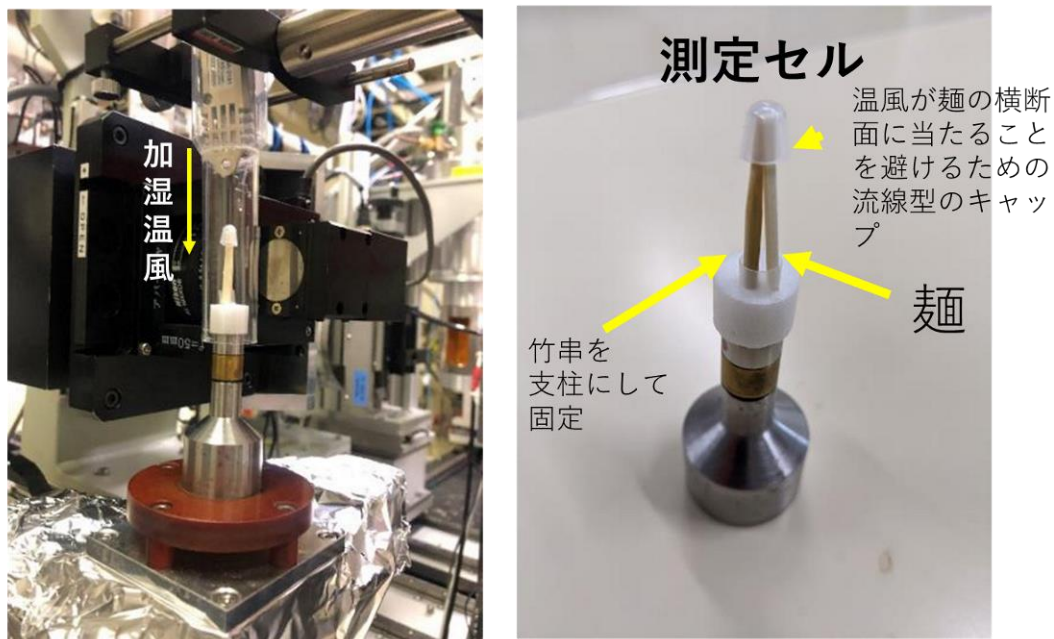
測定は SPring-8（兵庫県）の BL14B2 で実施しました。

放射光測定：乾燥工程を放射光測定で再現



測定場所に布団乾燥機と加湿器を持ち込み、湿度を含む温風を麺に吹き付けながら測定しました。

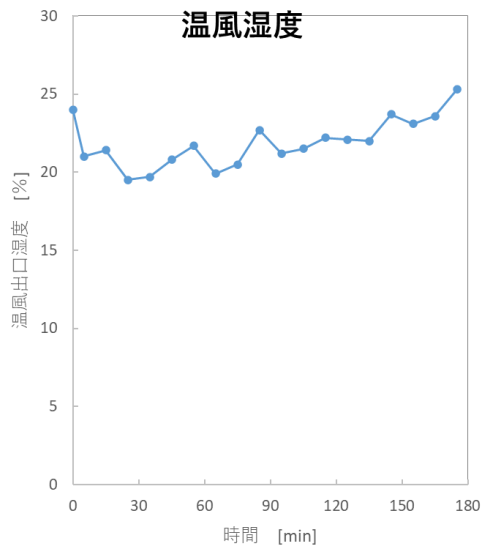
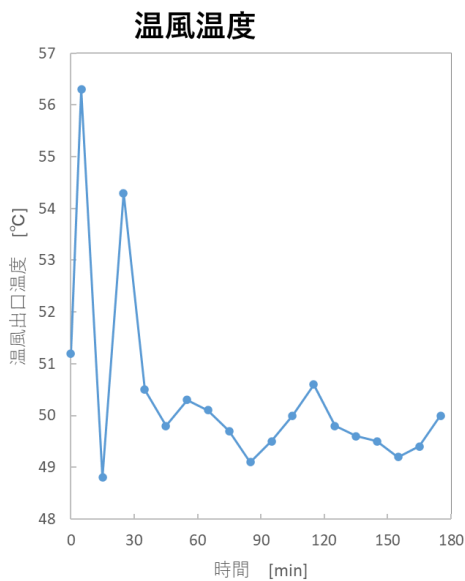
放射光測定：乾燥工程を放射光測定で再現



温風送風機から排出された加湿温風を内径18mmの円筒に導入しました。

麺を乾燥0分（乾燥前）、乾燥開始後1、20、40・・・以降20分ごとに180分までX線CTを測定しました。1測定あたりの測定時間は約5分です。

生うどんを放射光測定と同条件（50℃）で乾燥した時の 経時変化：温風の温度と湿度



温風温度も品温も速やかに一定となりました。

湿度も±5%の範囲で安定しました。

放射光で実施した測定方法を実験室で再現したところ、麺に吹き付けられる温風と湿度は一定していたことを確認しました。

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）

① 実験室で実施した麺の物性測定

生うどんを放射光測定と同条件（50℃）で乾燥した時の 麺の物性（曲げヤング率・曲げ破断応力）の挙動

50℃で様々な湿度（含水率）に調湿した麺をサンプルとして、クリープメーターを用いて、曲げヤング率と曲げ破断応力を求めました。

調湿方法：飽和塩溶液法

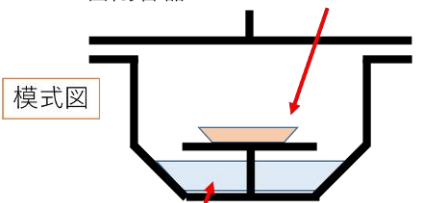
測定方法：三点曲げ試験



密閉容器

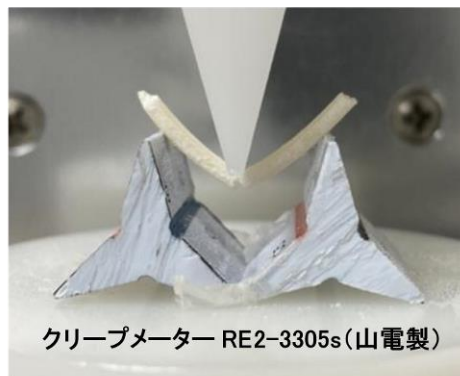


うどんを載せた皿



模式図

飽和塩溶液で密閉容器内を調湿
飽和塩溶液雰囲気下、50℃で
48時間保持して平衡化



クリープメーター RE2-3305s(山電製)

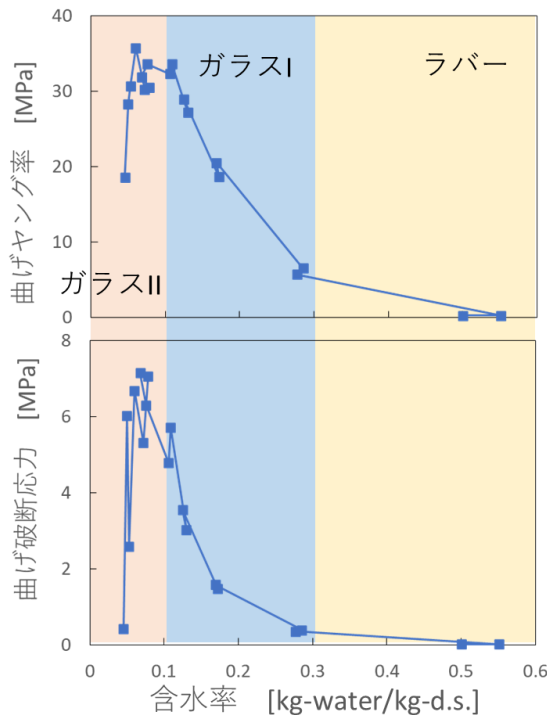
曲げヤング率＝麺の硬さ(数値が大きいと硬い)

曲げ破断応力＝麺が割れるのに要する応力

15

麺の含水率に応じた物性について、クリープメーターを用いて曲げヤング率（麺の硬さ）と曲げ破断応力を調べました。

生うどんを放射光測定と同条件（50℃）で乾燥した時の 麺の物性（曲げヤング率・曲げ破断応力）の挙動



- 曲げヤング率は含水率が低下するにつれて高くなり、含水率が0.1を下回ると壊れやすくなることがわかりました。
- 曲げ破断応力についても、含水率が低下するにつれて高くなり、含水率がさらに低くなると壊れやすくなる傾向を示しました。

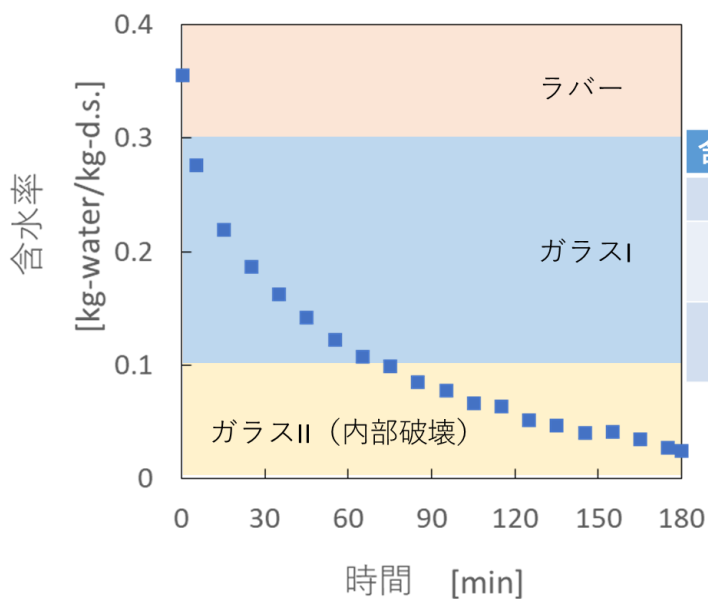
いずれの測定項目でも、含水率に依存して、うどんには3つの状態があることが示されました。

含水率	状態名	
0 ~0.1	ガラスII	内部に亀裂が入って壊れやすい状態
0.1 ~0.3	ガラスI	高分子が固まった状態
0.3~	ラバー	高分子に流動性があるゴムのような状態

16

麺の状態は、物性の違いから3つに分けられました。それぞれの含水率と紐づけて、ガラスII（含水率0~0.1）、ガラスI（含水率0.1~0.3）、ラバー（含水率0.3~）と呼びます。

含水率と麺の物性（曲げヤング率・曲げ破断応力）の 変化から見積もられる麺の状態の経時変化

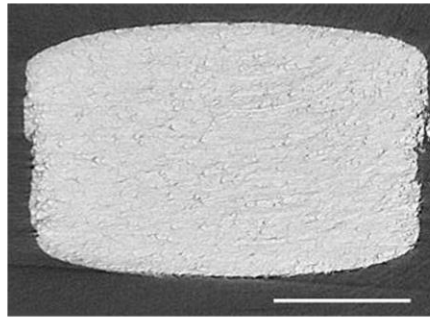
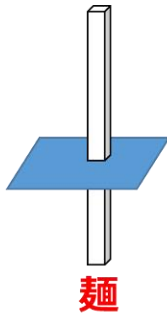


含水率	状態名	乾燥時間
0.3~	ラバー	0~5分
0.1 ~0.3	ガラスI	5分~70分
0 ~0.1	ガラスII (内部破壊)	70分~

含水率の時間変化から、麺の状態変化を乾燥時間で見ると、ラバー（0~5分）、ガラスI（5~70分）、ガラスII（70分以降）となります。

② 放射光で測定した麺の画像解析

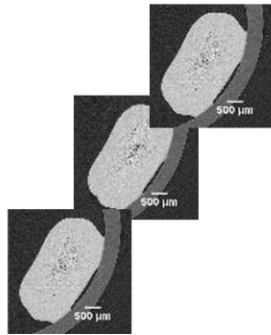
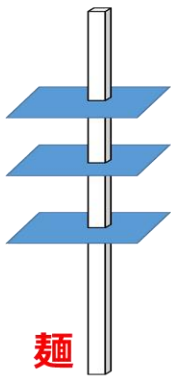
生うどんの断層画像



スケールバー 1 mm

1測定5分
解像度：2.9 μm/pixel

麺の断層画像が得られました。

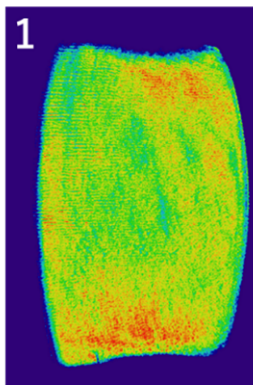


画像平均化

仙台市トライアルユース事業（令和2年度）
東北アグリサイエンスイノベーション様が
開発した麺の画像解析方法 20

放射光では麺の断層画像が得られました。画像解析は、令和2年度の仙台市トライアルユース事業で東北アグリサイエンスイノベーション様が実施した、断層画像を平均化する方法を用いました。

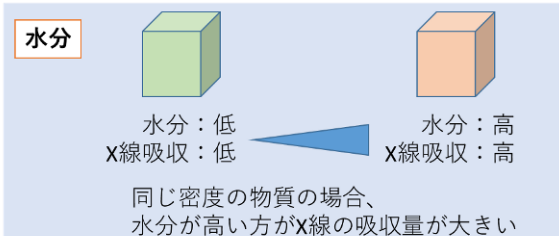
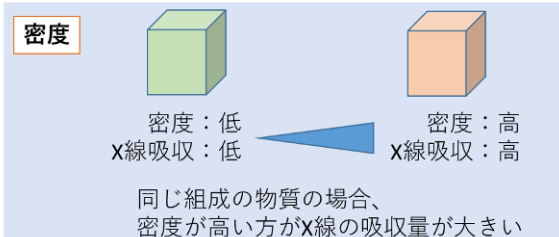
うどんの断層平均画像（画像解析後）



X線吸収量
低 高

左上の数字は
乾燥時間 [分]

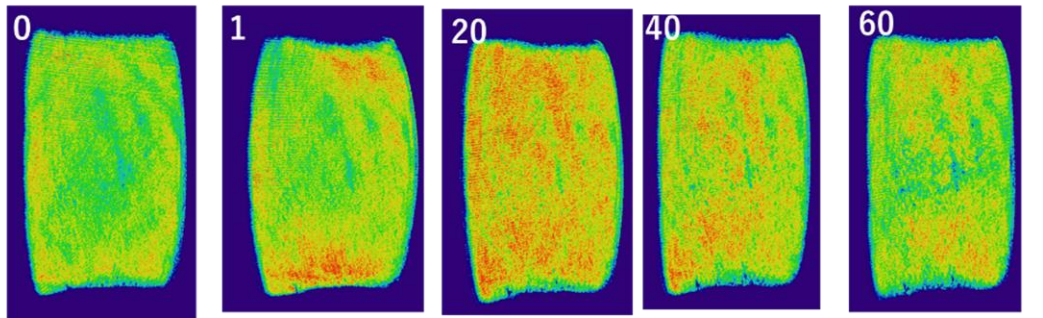
放射光の単色X線という特徴を使う場合、
X線の吸収量は麺の密度と水分で変わる。



X線の吸収が大きいところ（画像の赤いところ）は
他の所より **密度が高い** または **水分が多い**

画像解析の結果、麺には濃淡があることが分かりました。この濃淡は、麺の密度と水分で変わるため、濃淡の時間変化は密度もしくは水分分布の変化を見ていると考えられます。

うどんの乾燥過程の断層平均画像・その1



ラバー状態

ガラス状態I

X線吸収量
低 高
左上の数字が
乾燥経過時間 [分]

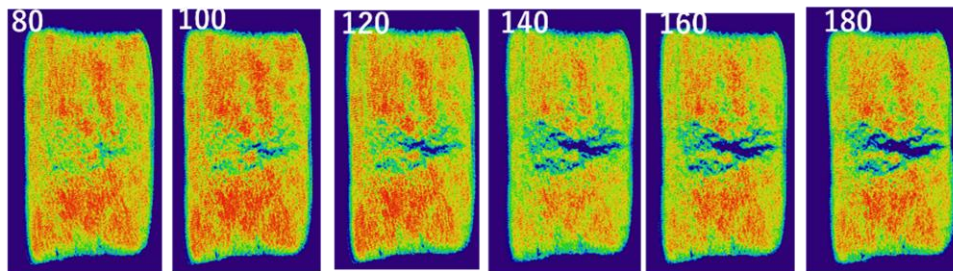
画像解析の結果から分かったこと

0～20分（ラバー状態）は、経時的にX線吸収量が大きくなっており、**密度の上昇**（麺の収縮）の寄与が大きい。

20～60分（ガラス状態）は、経時的にX線吸収量が小さくなっており、**水分の減少**の寄与が大きく表れた。

22

うどんの乾燥過程の断層平均画像・その2



ガラス状態II（内部破壊）

X線吸収量
低 高
左上の数字が
乾燥経過時間 [分]

画像解析の結果から分かったこと

80分以降（ガラス・内部破壊状態）は、経時的に**空隙（亀裂）**が顕著になっており、壊れやすくなる現象と一致していました。

23

麺の乾燥過程では、含水率に応じて

乾燥初期 ラバー（含水率0.3以上）
乾燥中期 ガラスI（含水率0.1～0.3）
乾燥後期 ガラスII（含水率0.1未満）

の3状態がありました。

画像解析の結果

→ 麺が収縮して密度が増加する。
→ 水分の減少と麺の収縮が減速する。
→ 内部に亀裂が生じる。
ことが示唆されました。

- 加湿乾燥機を持ち込んで X 線 CT を使うことで、麺の乾燥工程を非破壊で観察できる可能性を示すことができました。
- 単色 X 線を選ぶことによって、X 線吸収から麺の状態変化を理論的に解釈することが出来そうでした。
- 麺の内部亀裂は製品不良の原因となるため、麺がガラス状態になるまで含水率を下げつつ、その一方で麺の内部亀裂が生じないようにすることが不可欠であることが分かりました。
- 非破壊 X 線吸収測定によってフードロスを抑制する乾燥条件が決定できる可能性が示されました。

6 今後の課題

- X 線 CT 測定に乾燥機を組み合わせることができました。実験室 CT 装置では、このような大掛かりな装置を組み込むことは難しいです。
- 放射光の単色 X 線を利用することで、画像のコントラストを理論的に解釈することができます。
- さらに、ノイズの少ない画像データを利用することができることから、水分やうどんの組成に基づく X 線吸収量から、乾燥や密度の変化を数値化し、評価に用いることができます。
- 含水率や曲げヤング率などを測定して麺の状態を判定するのは手間がかかりますが、X 線 CT で麺の画像診断が非破壊でできれば、全量検査によって、不良品の出荷を防止することができるのではないかと期待しています。

7 参考文献

藤井智幸、滝口美緒、山田栞菜、楊嘉敏、日高將文
低含水率生物素材の乾燥過程の解析
日本食品工学会 2022 年度年次大会ポスター発表