

## X線CT装置による黒糖の測定条件

広瀬直人、棚原靖

非破壊による固形黒糖の内部構造解析を目的として、X線CTによる測定条件を検討した。管電圧100 kV、管電流300  $\mu$ A、露光時間1.0 sの円形スキャンで得られた720枚のCTデータから3D画像を再構築した。欠陥解析による黒糖内部の空隙評価は、測定試料内部に解析領域を指定して境界面を定義したのちに、補間修正した自動閾値モードによる二値化処理によって適切に測定できた。また、領域指定を行わずに境界面を定義してグレイバリュー解析を行うことで、黒糖の「詰まり具合」解析が可能であった。

### 1 はじめに

X線は物質に対する透過性が大きく直進性が高いことや、物質の原子量や密度によって吸収量が変わることから、医療用をはじめ、工業での非破壊検査や食品の異物検査などで広く利用されている。X線CT (Computed Tomography) は被撮影体から得られた投影データをコンピュータ処理し、非破壊で三次元の断層像を作成する。また、産業用X線CT装置では、X線の減弱から得られたCT値(Hounsfield numberまたはCT value)をボクセル(二次元におけるピクセルと同義)単位のグレイバリューとして表現し、内部欠陥や繊維配向などのマテリアル解析に利用されている。食品の内部構造解析についても、特に食感にもたらす影響の解明を中心に、X線CTが利用されている<sup>1)</sup>。

黒糖は90%程度のショ糖と、5~6%程度のショ糖以外の可溶性固形分(蜜分)や水分からなる<sup>2)</sup>。黒糖の表面構造を顕微鏡観察すると、金属のように緻密で均質ではなく、ショ糖の小結晶や蜜分が散在する、不均質で空隙が多く存在する構造であることがわかる(図1)。



図1 黒糖の表面

バーは250  $\mu$ mを示す。

米菓では、内部の気泡サイズや気泡数が口どけ感に大きく影響することが報告されている<sup>3)</sup>が、固形の黒糖においても、この空隙が物性に大きく影響すると考えられる。しかしながら、黒糖中の空隙の量や構造については、これまでに詳細な報告例はない。本稿では、黒糖の非破

壊による内部構造解析を目的として、X線CT装置による黒糖の測定条件を検討した結果について報告する。

### 2 実験方法

#### 2-1 供試材料

黒糖は、沖縄県内のA工場で製造された固形黒糖(試料1:2021年1月13日、試料2:2021年3月18日製造)を用いた。30kgの固形黒糖は、2~3kgのセメント状黒糖塊を層状に詰めて製造する。そこで、この黒糖の一層を取り出し、その中央部から3×4×5cm程度の直方体状に測定用試料を3個ずつ削り出して、密度と気泡含有量の測定に用いた。同様に、同じ黒糖層の中央部より約5cm角の直方体状に試料を3個ずつ削り出し、X線CTによる測定に供した(図2)。



図2 測定用黒糖試料調製例

30kg固形黒糖(左)の一層から、上下方向を変えないように測定用試料を削り出した。図中の黄色矢印は、上下方向を示す。

#### 2-2 物理的手法による黒糖の密度と気泡含有量の測定

黒糖試料を0.08 mm厚のポリエチレン(ユニパック、生産日本社)で真空パックし、比重測定装置(SGM-330H、島津製作所)で水中重量を測定した。水の密度を0.997 g/mLとして、試料重量と水中重量から試料体積(式1)および「見かけの密度」(式2)を算出した。

$$(式1) \text{ 試料体積 (mL)} = \frac{\text{試料重量} - \text{水中重量 (g)}}{\text{水の密度 (0.997 g/mL)}}$$

$$(式2) \text{ 見かけの密度 (g/mL)} = \frac{\text{試料重量 (g)}}{\text{試料体積 (mL)}}$$

黒糖試料中の気泡含有量は、水上置換法により測定した。微量の洗剤を添加したイオン交換水をビーカーに入れ、黒糖試料を水中で完全に溶解させた。黒糖の溶解に伴って発生した気泡をロートでメスシリンダー中に捕集し(図3)、気泡含有量とした。なお、メスシリンダー中には消泡のため、適量のヘキサンを重層した。気泡含有量と試料体積および見かけの密度から、気泡含有率(式3)と密度(式4)を算出した。なお、分析は全て3連以上で実施して平均値を示し、Welchの*t*検定により*P* < 0.01を有意差ありとした。

$$(式3) \text{ 気泡含有率 (\%)} = \frac{\text{気泡含有量 (mL)}}{\text{試料体積 (mL)}} \times 100$$

$$(式4) \text{ 密度 (g/mL)} = \frac{\text{試料重量 (g)}}{\text{試料体積} - \text{気泡含有量 (mL)}}$$

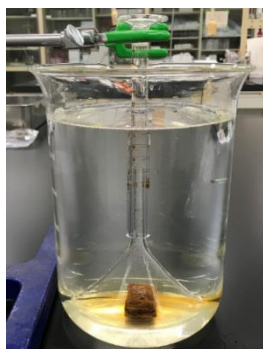


図3 水上置換法による黒糖中の気泡捕集例

### 2-3 X線CT装置による黒糖の測定

黒糖試料は、X線CT装置(XT H 225 ST、ニコンソリューションズ)により円形CTスキャンで撮像した。測定条件は、管電圧100 kV、管電流300 μA、露光時間1.0 s、撮影枚数は720枚(0.5 deg/枚)、ボリウムサイズは2,000×2,000×2,000 ボクセルとした。得られた撮像データは再構成ソフト(CT Pro 3D、ニコンソリューションズ)によって三次元データに再構成し、三次元画像処理ソフト(VGSTUDIO MAX 3.3、ボリウムグラフィックス)で解析した。

## 3 実験結果および考察

### 3-1 供試材料の密度と気泡含有量

固形黒糖は、同一工場であっても製造時期によって物理化学的特性に差異がみられる<sup>4)</sup>。本試験で供試した黒糖(試料1および2)においても、見かけの密度や気泡含有率に有意な差が検出された(表1)。一方、気泡含

有量を差し引いた黒糖の密度は1.6~1.7 g/mLであり、文献値<sup>5)</sup>の1.57~1.63 g/mLとよく一致した。

表1 黒糖試料の密度と気泡含有率

	見かけの密度 (g/mL)	気泡含有率 (%)	密度 (g/mL)
黒糖試料1	1.25	24.6	1.65
黒糖試料2	1.08	34.0	1.64
(有意差検定)	**	**	

\*\*試料1, 2間で有意差あり(*P* < 0.01)。

### 3-2 X線CT装置による黒糖解析条件の検討

物理的手法による分析では、固形黒糖中に含有される空隙の総体積を気泡量として測定できるものの、空隙のサイズや分布状態は評価できない。そこで、X線CT装置による空隙の評価を目的として、解析条件を検討した。

#### 3-2-1 3D画像解析における境界面の定義条件

X線CT装置の撮像データから再構成した三次元データを解析するためには、オブジェクト(試料)とそれ以外の領域を区別する「境界面」の定義が必要である。そこでまず、金属部品などで内部の欠陥(空洞)を解析する手順を参考に、下記の設定で解析を試みた。

##### 【境界面の定義条件設定】

- ・方法：拡張(クラシック)\*
- ・開始外形：ヒストグラムから
- ・マテリアルの定義：自動
- ・開始外形修復：全てのボイドを削除

\*局所的なグレイバリューの差異をもとにマテリアルの境界を定義する手法。

解析の結果、X線CT像において黒糖内部に多くの空隙を観察することができた(図4左)。しかし、試料表面の空隙や、内部の空隙の多くは“欠陥”として認識されなかった(図4右)。

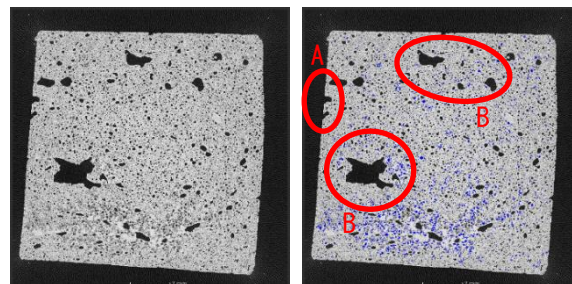


図4 黒糖のX線CT画像例

X線CT像(左)で黒く示された空隙部分のうち、“欠陥”として認識された部分は青く表示される(右)。表面から続く空隙(A)のほか、内部に存在する空隙(B)も認識されていない。

本研究で使用した解析ソフトでは、試料の表面から連続した空間は欠陥として認識できない。また、黒糖内部に存在するにもかかわらず欠陥として認識されない空隙は、外部空間と繋がっている空隙として認識されていることが考えられた。そこで、試料内部に円柱状（直径800ボクセル=27.88 mm、高さ700ボクセル=24.40 mm）の領域を指定し、領域内部に限定した解析を行うこととした（図5）。

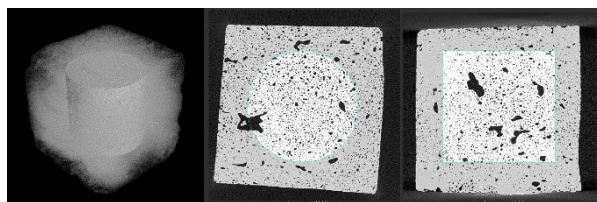


図5 黒糖のX線CT解析における領域指定例

試料内部に円柱状の領域を指定している（左）。上方（中央）および側方（右）のX線CT像で、青枠内の明るく表示されている部分が指定された領域。

### 3-2-2 3D画像解析における欠陥解析アルゴリズム

黒糖内部に指定した領域について、欠陥解析による空隙の検出を試みた。欠陥解析の条件は、境界面と同様に金属部品などを解析する設定で行った。

#### 【欠陥解析条件設定】

- ・アルゴリズム：VGDefX
- ・解析モード：ボイド
- ・マテリアル定義：定義面を使用
- ・欠陥性の基準：面から（表示どおり）

解析の結果、境界面に接している空隙や、内部に存在する大きな空隙は認識できなかった（図6左）。解析に用いたアルゴリズム（VGDefX）は欠陥候補点位置のノイズ削減などによるグレイバリュー変化を考慮し、周囲の空気と接する欠陥も検出できるが、黒糖のようにマテリアルの組成が均一でなく、空隙が多い試料の解析には適さないように思われた。食品試料中の空間を評価する場合には、三次元データを二値化したのちに解析する手法が報告されている<sup>3)</sup>。そこで、解析アルゴリズムを「閾値のみ（自動閾値モード）」としたところ、画像上では全ての空隙を認識することができた（図6右）が、定法による解析とは異なるカラーイメージが示された。認識された領域のカラーイメージは、青色が約10 mm<sup>3</sup>、緑色が約4,000 mm<sup>3</sup>の体積を有する空隙に分類される。解析領域の総体積は17,500 mm<sup>3</sup>程度であることから、空隙は総体積の1/4程度を占めることとなり、黒糖中の空隙は10 mm<sup>3</sup>程度の小空間が多数存在するのではなく、結晶間の空隙が繋がった構造であると推察された。

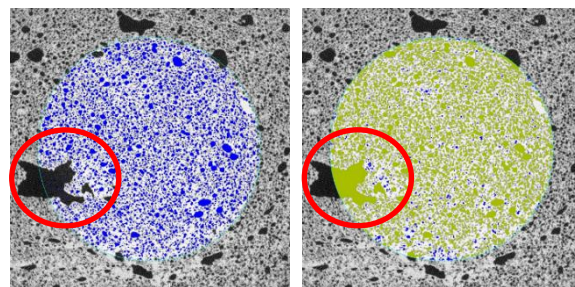


図6 黒糖X線CT画像の欠陥解析例1

欠陥解析で認識された領域のカラーイメージは、青色が約10 mm<sup>3</sup>、緑色が約4,000 mm<sup>3</sup>の体積を有する空隙を示す。常用されるアルゴリズム（VGDefX）では認識されない空隙部分が認められるが（左、赤丸で示した黒色部分）、閾値（二値化）で解析すると認識される（右）。

欠陥解析で得られた黒糖試料1および2の欠陥率を気泡含有率として物理的手法による測定値と比較したところ、いずれも物理的測定値より低い値を示した（表2）。

表2 物理的手法による黒糖試料の気泡含有率測定値とX線CTによる解析値の比較

	物理的手法 気泡含有率 (%)	X線CT解析値 気泡含有率 (%) <sup>注1</sup>	
		補正前	補正後 <sup>注2</sup>
黒糖試料1	24.6	11.4 **	24.2
黒糖試料2	34.0	25.8	34.0

注1) 欠陥率を気泡含有率とした。

注2) 補間修正値（補正係数 0.8）。

\*\*物理的測定値に対して有意差あり（ $P < 0.01$ ）。

本研究で用いたソフトの自動計算設定では、バックグラウンド（周囲の空気）とマテリアル（黒糖試料）のピークを検出して各々の平均グレイバリュー値を算出し、その中間値を閾値として用いている（図7）。黒糖はショ糖の結晶と固化した蜜が混在する不均一な物体であり、それぞれの成分に対するX線の透過率が異なることが予想される。そのため、黒糖試料が示すグレイバリュー値の幅が広くなり、その平均値から自動計算された閾値をそのまま使用すると、本来は空間として認識されるべきボクセルのうち比較的グレイバリュー値が高い領域を試料として誤認識したと考えた。そこで、バックグラウンドの平均値にグレイバリュー分布におけるバックグラウンドとマテリアルピークの差を加える「補間修正（補正係数0.8）」を行ったところ、気泡含有率が異なる黒糖試料1および2のいずれの解析値も、物理的測定値と良く一致した（表2）。本設定による欠陥解析例を図8に示す。認識された領域のカラーイメージは約6,000 mm<sup>3</sup>の体積を示す赤色となり、ここでも黒糖中の空隙は繋がった構造であることが示唆された。



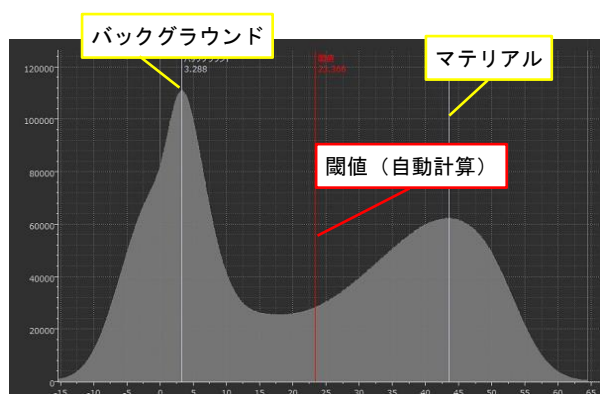


図7 黒糖試料のグレイバリュー解析例

黒糖試料の解析領域におけるグレイバリューのヒストグラム。横軸はグレイバリュー、縦軸は検出されたボクセル数を表す。空間を示すバックグラウンド（左側）には明瞭なピークが観察されるが、試料を示すマテリアル（右側）のピーク形状は幅広い。中央の赤線は、自動計算された閾値を示す。

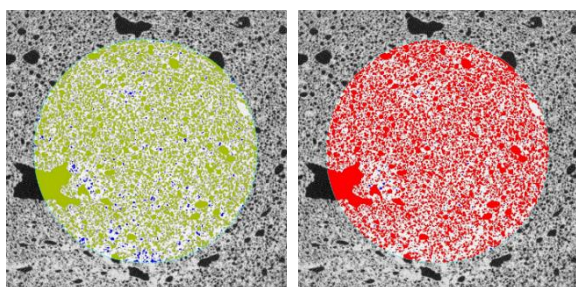


図8 黒糖X線CT画像の欠陥解析例2

自動閾値解析（左）を補間修正（右、補正係数は0.8）して解析した例。赤色は約6,000 mm<sup>3</sup>の体積を有する空隙を示す。

### 3-2-3 3D画像解析におけるグレイバリュー解析

X線CT装置による解析では、ボクセル単位の平均グレイバリュー値をカラーイメージに変換して描画することで、部位による密度の差、すなわち「詰まり具合」をビジュアル化することが可能である。図9に黒糖試料のグレイバリュー解析結果例を示す。黒糖試料が示すグレイバリューのヒストグラム（図9上）は幅が広く、部位によって密度が大きく異なることが示された。また、固形黒糖は箱詰め時に上から抑えながら詰めていくためか、上下方向の表層に沿って「詰まっている領域（図9下、赤で着色された部分）」が観察された。なお、グレイバリュー解析条件は下記のとおりである。

#### 【グレイバリュー解析条件設定】

- ・境界面の定義方法：拡張（クラシック）
- ・解析領域：マテリアル
- ・局所密度：10 vox

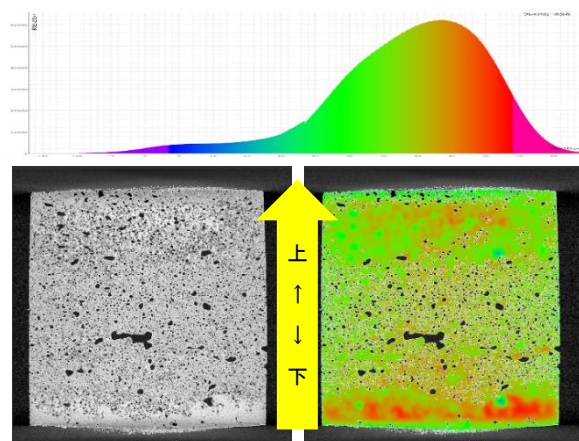


図9 黒糖X線CT画像のグレイバリュー解析例

上は試料全体のヒストグラム。下はX線CT画像（左）とグレイバリュー解析（右）。カラーイメージは、疎（紫）～中間（緑）～密（赤）を示す。

## 4 まとめ

非破壊による固形黒糖の内部構造解析を目的として、X線CTによる測定条件を検討した。その結果、欠陥解析条件の最適化によって、黒糖中の空隙量を評価することが可能であった。また、グレイバリュー解析により、黒糖の「詰まり具合」を可視化できた。今後は、黒糖の製造地域（工場）や製造時期による空隙量や詰まり具合の差異を評価し、黒糖のさらなる高品質化につなげたい。

本研究は、「沖縄黒糖安定供給支援事業（黒糖品質検査指導）、2020技027」で実施した。

## 謝辞

本研究にあたり、沖縄県黒砂糖協同組合をはじめ多大なるご協力を賜りました関係の皆様にご感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 西津貴久, 小麦粉製品の内部構造と食感の評価, 化学と生物誌, **52** (10), 671-679 (2014).
- 2) 広瀬直人, 黒糖利用に関する研究の現状と課題, 砂糖類・でん粉情報誌, (3), 2-5 (2021).
- 3) 山谷健太, 細井友加里, 竹井亮, 鷲尾英明, 西津貴久, 米菓の口どけ感の定量的評価, 日食科工誌, **66** (3), 90-99 (2019).
- 4) 広瀬直人, 前田剛希, 高良健作, 和田浩二, 黒糖製造期間中におけるサトウキビ搾汁液の成分変動と黒糖品質の関係, 日食保蔵誌, **45** (3), 141-147 (2019).
- 5) 秋永孝義, 岡留博司, 國府田佳弘, 黒糖の品質に関する基礎的研究（第1報）黒糖の物理化学的特性, 農業機械誌, **56** (5), 51-56 (1994).

# Conditions for non-centrifugal brown sugar measurement with an X-ray CT scanner

Naoto HIROSE, Yasushi TANAHARA

Okinawa Industrial Technology Center

The conditions for non-centrifugal brown sugar measurement with an X-ray CT scanner were examined to analyze its internal structure in a non-destructive manner. A 3D image was reconstructed from the 720 CT data collected by circular scanning with a tube voltage of 100 kV, a tube current of 300  $\mu$ A, and an exposure time of 1.0 s. In the void evaluation of non-centrifugal brown sugar by porosity analysis, the area of analysis was identified in a measurement sample to define the boundary surface, thus allowing appropriate measurement by binarization using an automatic threshold mode with interpolation correction. Furthermore, the “clogging” of non-centrifugal brown sugar was analyzed by defining the boundary surface to perform gray value analysis without area identification.

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターに

ご連絡ください。