

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15791

研究課題名（和文）マルチX線CT解析とシミュレーション技術の融合による青果物の物性値マッピング

研究課題名（英文）Mapping of Physical Properties of Fruit and Vegetables Using Multi-X-ray CT Analysis and Simulation Technology

研究代表者

田中 良奈（Tanaka, Fumina）

九州大学・農学研究院・助教

研究者番号：80817263

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：分解能の異なる2種類のX線CT装置を用いて、カキ果実の細胞組織および果実全体の連続スライス画像を取得し、部位ごと、貯蔵期間ごとの構造特性を明らかにするとともに、画像解析により空隙率を抽出し、CT値との関係を明らかにした。また、3次元立体構造モデルを再構築し、ソルバーを用いて熱移動解析およびガス移動解析を行った。空隙率などの構造的特徴量と各物性値との関係を明らかにするとともに、CT値と空隙率、空隙率と熱伝導率およびガス拡散係数との関係を定量化し、得られた関係式をノーマル分解能X線CT画像に適用、青果物内部の物性値分布の可視化を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

青果物の収穫後の品質低下の抑制やロスの低減のため、最適な貯蔵条件に関する研究が多くなされているが、青果物を構成する微小空間構造は複雑であり、このスケールにおける諸物性値の計測は困難であるため、青果物の諸物性値分布を可視化した例は稀少である。

光学技術や画像処理技術を駆使することによって不均質な食材等の微細構造を明らかにし、品質の劣化に伴い“青果物の内部で何が起きているのか？”を細胞組織レベルで解析・可視化することにより、より適切な鮮度保持技術の開発が可能となると考える。

研究成果の概要（英文）：Using two types of X-ray CT systems with different resolution, continuous slice images of cellular tissue and whole fruit of persimmon fruit were acquired to clarify the structural characteristics of each region and storage period, and porosity was extracted by image analysis and its relationship with CT values was clarified. In addition, a three-dimensional structural model was reconstructed, and heat transfer and gas transfer analyses were performed using a solver. In addition to clarifying the relationship between structural characteristics such as porosity and each property value, the relationship between CT value and porosity, porosity and thermal conductivity, and gas diffusion coefficient were quantified, and the obtained equations were applied to normal resolution X-ray CT images to visualize the distribution of physical properties inside fruit and vegetables.

研究分野：ポストハーベスト工学

キーワード：青果物 熱伝導率 ガス拡散係数 X線CT シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

青果物は収穫後も生命活動を維持しており、時間の経過とともに品質が劣化していく。国内外を問わず青果物が流通する現代では、青果物の品質低下の抑制やロスの低減が不可欠であり、最適な貯蔵条件に関する研究が多くなされている。ここで、欧州委員会が進めた第7次研究・技術開発のための枠組み計画 (FP7) 課題のひとつとして **Inside Food** プロジェクトがある。この **Inside Food** プロジェクトは、最新の光学技術や画像処理技術を駆使することによって不均質な食材等の微細構造を明らかにし、高品質な食品の提供に寄与するものである。品質の劣化に伴い、“青果物の内部で何が起きているのか?”を細胞組織レベルで解析・可視化することにより、より適切な鮮度保持技術の開発が可能となると考えられ、青果物の $\mu$ X線CTによる微細構造解析と諸現象を模倣する数値シミュレーションに関する研究が進められている。しかし、これらの研究は微小スケールの範囲にとどまり、個体レベルの研究とリンクしていないのが現状である。“微小スケールで得た多くの情報を、如何にして青果物個体レベルの評価に生かすか”が課題であり、このためには微細構造スケールと果実スケール間で得た知見を相互に生かし合うためのフレームワークを作成する必要があった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、空間分解能および観察視野の異なる2つのX線CT装置で取得した画像情報から、これまで不可能であった青果物内部の諸物性値分布を直接計測可能とすることである。微細スケールで取得したCT画像情報と諸物性値を関連付け、これを個体レベル画像情報に反映、互いのスケール間で情報を生かし合うことにより、ノーマル分解能X線CT画像から空隙率や熱伝導率、水分等の果実内分布を個体レベルで、リアルタイムに同時推定できるようにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) CT値と空隙率の関係

分解能の異なる2種類のX線CT装置①SkyScan (Bruker) および②Latheta LCT-100 (日立アロカメディカル(株))を用いて、カキ果実の①細胞組織および②果実全体スケールで連続スライス画像を取得し、部位ごと、貯蔵期間ごとの構造特性を明らかにした。また、画像解析により空隙率を抽出し、CT値との関係を明らかにした。

#### (2) 空隙率と熱伝導率の関係

マルチスライス画像をスライス厚さ方向に積み重ね、一片が $3.0 \times 10^{-4}$ mの立法体につなぎ合わせ、3次元立体構造モデル (以下、細胞組織モデル) を再構築した。その後、解析条件を与え、ソルバー (COMSOL Multiphysics 5.3) を用いて熱移動解析を行った。なお、空隙部分には空気の熱伝導率を、細胞部分には水の熱伝導率を与えた。細胞組織は不均質な構造を持つため、異方向性を考慮し、x軸方向、y軸方向、z軸方向それぞれについて解析を行った。また、計算領域を均質と仮定した材料についても解析を行い、不均質材料で得た計算結果と比較し、微小領域平均の物性値として求め、空隙率などの構造的特徴量と各物性値との関係を明らかにするとともに、CT値と空隙率、空隙率と熱伝導率との関係を定量した。

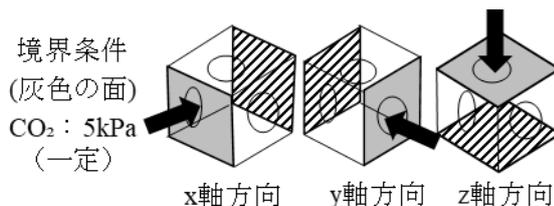


図1 解析の方向

#### (3) 空隙率とガス拡散係数の関係

熱移動解析と同様に、細胞組織モデルを用い、空隙部分には空気のガス拡散係数を、細胞部分には水のガス拡散係数を与え、x軸方向、y軸方向、z軸方向それぞれについてガス移動解析を行い、空隙率とガス拡散係数の関係を定量した。

また、空隙の形状とガス拡散係数の関係を整理するため、細胞組織モデルに加え、簡易空隙モデルとして、円柱形の空隙が $3 \times 3 \times 3$ 個ずつ等間隔で配置された、一片の長さが $3.0 \times 10^{-4}$ mの立方体のモデルも作成した (図2)。円柱の高さを $3.0 \times 10^{-5} \sim 9.0 \times 10^{-5}$ mの間で $1.0 \times 10^{-5}$ mずつ、空隙率を0.05~0.30の間で0.05ずつ変化させた計40個のモデルを用いて解析を行った。

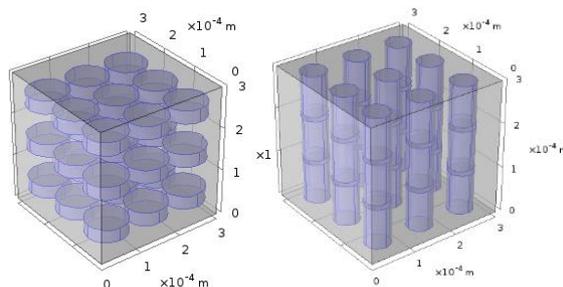


図2 簡易空隙モデル

(4) 物性値分布の可視化

得られた関係式をノーマル分解能 X 線 CT 画像に適用し、青果物内部の物性値分布の可視化を行った。

4. 研究成果

(1) CT 値と空隙率の関係

図3に取得したカキ細胞組織のCT画像の一部を示す。細胞間の境界を明確に確認することはできなかったが、細胞と空隙を区別することはできた。また、部位ごとに細胞密度に大きな違いがあることが確認された。CT値と空隙率には高い相関関係が認められ、CT値が大きくなるにつれ空隙率は小さくなった。

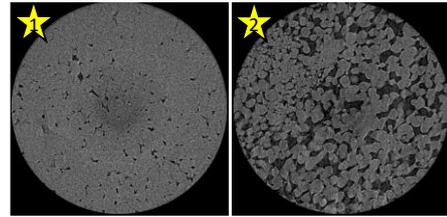


図3 カキ細胞組織のCT画像

(2) 空隙率と熱伝導率の関係

細胞組織モデルを用いて熱移動解析を行った結果、経時的にモデル内の温度が変化していることが確認できた。異方性を考慮した熱移動解析では、方向を変えて解析することで、熱の伝わり方に違いが生じた。熱伝導率は空隙率が大きくなるほど低い値となり、異方性の影響も大きくなった。空隙率と熱伝導率の関係式は Brailsford モデル式を用いて整理することができた。

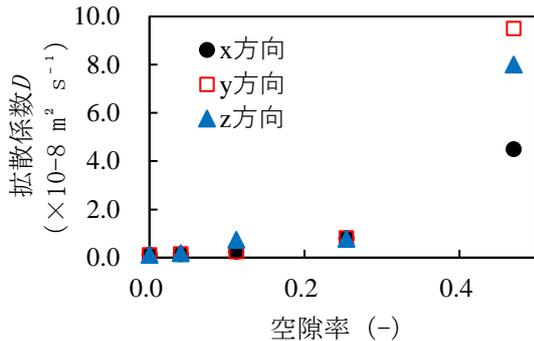


図4 空隙率とガス拡散係数の関係

(3) 空隙率とガス拡散係数の関係

細胞組織モデルを用い、熱伝導率の解析と同様に、空隙部分には空気のガス拡散係数を、細胞部分には水のガス拡散係数を与えてガス移動解析を行った結果、空隙率が高いほど早く平衡に達することが明らかとなった(図4)。また、ガスを流入させる方向によって平衡に達するまでの時間が異なった。気体中と液体中それぞれのガス拡散係数は大きく異なることから、空隙の形状がガスの流入方向に沿っているほど拡散係数は大きい。熱伝導率に比べガス拡散係数は空隙率や空隙の分布に大きく影響を受ける結果となった。

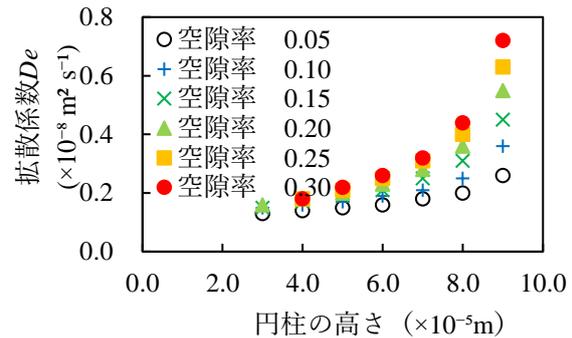


図5 簡易空隙モデル(空隙率0.30)における底面平均CO<sub>2</sub>濃度の経時変化

次に、簡易空隙モデルにおける底面平均CO<sub>2</sub>濃度の経時変化を図5に示す。円柱の高さが大きくなるほど、つまりガス移動の方向と平行に空隙が長い形状であるほど、ガスの拡散が早くなると考えられる。図5に空隙率0.30における解析値と推算モデルの比較を示す。円柱配列モデル式に定数を乗じた修正円柱配列モデル式をガス拡散係数の推算式として提案した。

(4) 物性値分布の可視化

細胞スケールで解析した結果を、CT値を介して果物の貯蔵試験に適用した。結果の一例を、カキ果実断面におけるCT値分布、空隙率分布、熱伝導率分布として図6に示す。このように、貯蔵中のカキ果実のX線CT画像から諸物性値分布の可視化が可能となった。

以上から、細胞組織モデルにおける解析結果(ミクロスケール)を、CT値を介して青果物の貯蔵試験(マクロスケール)に活かす、マルチスケール解析が可能となった。

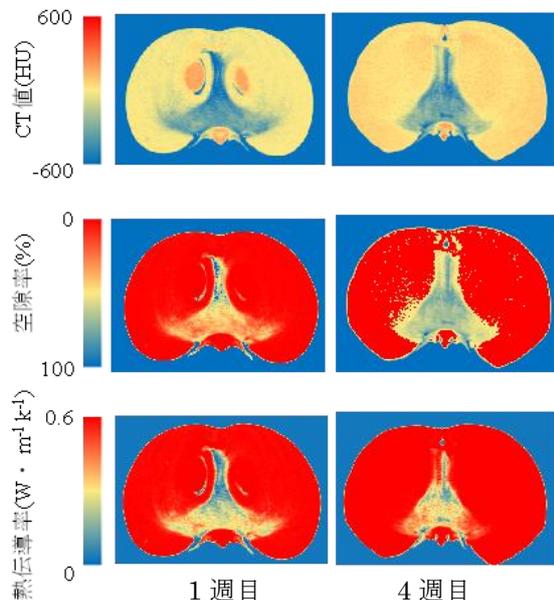


図6 カキ果実における物性値分布の可視化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Karmoker Poly, Obatake Wako, Tanaka Fumina, Tanaka Fumihiko	4. 巻 12
2. 論文標題 Visualization of porosity and thermal conductivity distributions of Japanese apricot and pear during storage using X-ray computed tomography	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering in Agriculture, Environment and Food	6. 最初と最後の頁 505 ~ 510
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.eaef.2019.11.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 豊田光希, 田中良奈, 田中史彦
2. 発表標題 青果物内部の三次元構造を用いたガス移動シミュレーションと有効拡散係数の推算
3. 学会等名 農業食料工学会第79回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部怜香, 豊田光希, 田中良奈, 田中史彦
2. 発表標題 青果物内部の2次元構造を用いたガス移動解析と有効拡散係数の推算
3. 学会等名 第75回九州農業食料工学会例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中史彦, 田中良奈
2. 発表標題 X線CTマルチスケール解析による青果物諸物性値の非破壊3次元分布計測
3. 学会等名 FOOMA Japan 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 田中史彦、田中良奈	4. 発行年 2019年
2. 出版社 北隆館	5. 総ページ数 5
3. 書名 アグリバイオ 2019年7月号	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------