

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03899

研究課題名(和文) ナノ・マイクロスケールからの多面的アプローチによる青果物細胞健全性診断と品質評価

研究課題名(英文) Multiple Approach based on nano and micro structure observations to evaluation of the cell integrity and quality of fruit and vegetables

研究代表者

田中 史彦 (TANAKA, Fumihito)

九州大学・農学研究院・教授

研究者番号：30284912

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、生体の微細構造解析とマルチフィジックス・シミュレーション解析、セル・アクティビティ解析という静的・動的な多面的アプローチから青果物細胞(組織)の健全性を診断し、青果物の品質評価に生かすことを目的としたものである。微細構造解析では、青果物細胞組織の微細構造解析や化学分析によって、その形態的特徴量抽出と成分の関係を調査、品質劣化によって生じる諸変化を明らかにした。シミュレーション解析では、構造変化に伴う輸送現象に係る物性値の変化を3次元微細構造モデル解析によって求めた。セル・アクティビティ解析では、バイオスペckルパターンの局所的ゆらぎを計測し、活性度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

最先端の機器による微細構造観察とコンピュータによる高度な画像解析との融合によって、マイクロからナノ情報に基づく新たな青果物の品質評価法の可能性を示した点でその学術的意義は高い。これまで検知できなかった青果物の品質劣化を、光学技術やこれとシミュレーション技術を融合させることで早期に察知したり、青果物の活きの良さを直接計測できる新たな品質判定法を開発した点は選別技術の高度化に資する成果であり、フードロス低減にも寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：The study aimed to develop new quality evaluation methods of fruit and vegetables by means of static and dynamic approach such as fine-structural analysis of living cell tissue, multi-physics simulation and cell activity analysis. For the fine structure observation and analysis, the structural features were extracted and quantified during fruit storage. For the multi-physics simulation in a fruit, the three dimensional micro-structure of fruit tissue was reconstructed using image processing software and heat transfer simulation was carried out based on the real structure model to determine some physical properties of fruit. In the cell activity observation, bio-speckle technology was applied to evaluate freshness of fruits. We could visualize the activity distribution of living cells by using the developed device.

研究分野：ポストハーベスト工学

キーワード：農業工学 X線CT シミュレーション工学 バイオスペckル AFM

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 欧州委員会が第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進めた 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った。

(2) 申請者らは、2013年4月にベルギーで国際シンポジウムを開催し (Scientific Committee として参画)、欧米における研究シーズを俯瞰的に調査し、最新の光学技術を駆使した微細構造解析と生体での数値モデリングの融合と生体そのものの活性度を直接計測する光技術開発の必要性を認識した。

(3) 今後、この研究は観察技術の飛躍的な進歩によって、その対象がマイクロレベルからナノレベルまで拡がり、微細構造解析はさらに深化するものと期待された。

(4) よって、本研究では、特に、青果物のマクロからナノ微細構造を  $\mu\text{X}$  線 CT や顕微ラマン分光装置、分子間力顕微鏡 (AFM) 等最新の機器を用いて観察し、構造的特徴と巨視的な品質の関係を明らかにするとともに、これに物質移動や熱移動、化学反応、力学的変形などを予測するマルチフィジックス・シミュレーション技術を融合させることで、微細スケールで起こる諸現象を動的に解析することとした。

(5) 青果物の品質を評価、健全性を診断するためには、生体の微細構造解析とマルチフィジックス・シミュレーション解析、セル・アクティビティ解析という多面的アプローチが不可欠となると結論し、総合的研究を計画した。

### 2. 研究の目的

本研究は、生体の微細構造解析とマルチフィジックス・シミュレーション解析、セル・アクティビティ解析という静的・動的な多面的アプローチから青果物細胞 (組織) の健全性を診断し、青果物の品質評価に生かすことを目的としたものである。微細構造解析では、最先端観察機器を駆使し、青果物細胞組織構造の形態的特徴等を行うことで、収穫後、品質の劣化によって生じる変化を明らかにした。

シミュレーション解析

では、構造変化に伴う輸送現象に係る物性値の変化を3次元微細構造モデル解析によって求め、物性値の組織構造への依存性を明らかにすることとした。セル・アクティビティ解析では、バイオスペクトルパターンの局所的ゆらぎを計測し、活性度分布の可視化を行った。以上を総合して細胞組織の健全性を診断、品質評価につなぐことを最終目的とした。

これらを達成するため、具体的には、(1) 微細構造解析、(2) シミュレーション解析、(3) アクティビティ解析の3つのアプローチから(4) 青果物細胞の健全性を診断し、品質評価につなぐ研究を遂行することとした (図1)。

### 3. 研究の方法

本研究では、ナノ・マイクロでの多面的アプローチによる青果物細胞組織の健全性の診断と品質の評価を行った。 $\mu\text{X}$  線 CT 等によるマイクロレベル微細構造観察、分子間力顕微鏡によるナノレベル観察・解析を行うとともに3次元微細構造モデルを構築した。そして、この場でのマルチフィジックス・シミュレーションを行い、青果物細胞内で何が起きているかを予測するとともに、収穫後、経時変化する諸物性値を求めた。さらに、バイオスペクトル観察によって、収穫からの細胞の活性度を計測した。最後に、微細構造と諸物性値、細胞活動度から青果物細胞の健全性を診断し、微細空間情報から青果物の品質を評価する手法を提案した。

#### (1) 青果物細胞組織のナノ・マイクロ構造の観察と解析

$\mu\text{X}$  線 CT 装置によるマイクロレベルでの微細構造観察と分子間力顕微鏡によるナノレベルでの観察と解析を行った。マイクロレベルでの観察では、 $\mu\text{X}$  線 CT により青果物のマルチスライス画像を取得し、細胞組織の立体画像をコンピュータ上に構築することとした。画像解析による細胞壁の抽出は、二値化処理によって行い、ボクセル3方向の重み付け平均によって平滑な細胞壁面を得た。細胞間隙と細胞、細胞壁の区分けはラベリング機能により行い、各部位の構成比率、細胞間隙の樹状構造、細胞形状や寸法等の特徴量を抽出、これらの解析データに基づき収穫後の青果物の構造変化を定量化した。AFM による細胞壁の観察では、AFM の持つタッピングモードで探針を振動させ、それぞれの表面状態を計測した。これによって、細胞壁を構成するペクチンな

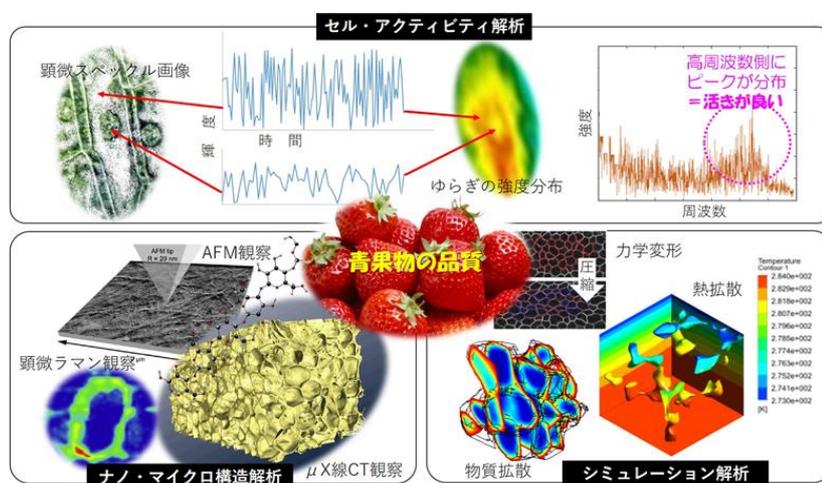


図1 多面的細胞解析アプローチによる青果物の品質評価

どの鎖状構造の長さ、繊維径の分布を統計処理するとともに化学分析結果との関連を調査した。

(2) マルチフィジックス・シミュレーションによる細胞組織の諸物性値の推算

(1) で得た青果物の3次元形状ジオメトリを用いて、細胞組織や細胞壁マトリックスレベルでのマルチフィジックス・シミュレーションを行い、実験結果と比較、妥当性の検証後、これを用いて収穫後、貯蔵中に変化する諸物性値を推定した。

(3) バイオスペckル法による細胞アクティビティの計測と活性度マッピング

青果物は貯蔵が進むにつれ品質が劣化し、外観のみならず細胞・分子レベルにおいても構造の変化や内容物の消失が生じてしまう。このため、貯蔵過程で観測されるバイオスペckルパターンは鮮度の低下とともに経時的に変化することとなる。バイオスペckル観測では、レーザー偏光ビーム装置によりレーザー光を発生、エクスペンダーによってレーザー光照射領域を拡大し青果物細胞表面に照射、散乱光の干渉を CCD カメラで観測・記録し、データ解析に資した。スペckルパターン解析では、時系列画像(動画)から時空間輝度分布データをグレースケール画像データとして取得し、統計処理ならびに同時生起行列による画像処理を行うことで空間・時系列解析を行った。これによりゆらぎ等の特徴をとらえ、貯蔵中に変化する生体としての活動度の大きさを評価した。

(4) 細胞組織の健全性の診断と青果物の品質評価

本課題については、(3)のバイオスペckル法によるセル・アクティビティ計測法が核になるものであり、(1)の構造解析データとのマッチング解析により、構造に関する特徴量と細胞のアクティビティ指標を比較し、細胞構造と機能の健全性を診断した。

#### 4. 研究成果

(1) 青果物細胞組織のナノ・マイクロ構造の観察と解析

マイクロレベルの観察で得た画像からコンピュータ上に果肉細胞組織の立体構造を再構築した(図2)。連続した細胞組織 CT 画像の一部を一辺 0.3 mm の立方体にくり抜き、これを構成する全画像から画像解析ソフトウェア (CT-Analyzer, Bruker) を用いて CT 値を抽出、平均値を算出した。次に、くり抜いた連続 CT 画像から、細胞と細胞間隙の輪郭を抽出し、二相から成るカキ細胞組織の三次元 (3D) 立体構造を再構築した。この際、300 ボクセル以下の微小部位はアーチファクトとみなして除去した。ここで、3D 再構築したジオメトリにおいて細胞部分と空隙部分の体積をそれぞれ計測し、細胞組織内における空隙率を算出した。3D 形状の再構築および空隙率の計測には 3D 解析が可能な前出の画像処理ソフト Amira 6.0 を用いた。連続 CT 画像中から抽出した平均 CT 値と、その連続画像を 3D 再構築した際の空隙率の関係を実験式で整理すると、以下の関係となった。

$$\varepsilon = 1.372 - 1.368 / [1 + \{CT / (-590.7)\}^{1.9}]$$

ここで、 $\varepsilon$  : 空隙率 (decimal)、CT : CT 値 (HU) である。本式より、CT 撮影で得られた CT 値から空隙率が推算される。図 3 (a) に 25°C で加速貯蔵試験を行った際のカキ果実果肉空隙率の刑事変化を示す。その他にも、キュウリ、ウメ、ナシ果実でも貯蔵中に空隙率が増加することが確認された。

マイクロレベルよりさらに微細なナノ構造を対象とする AFM 観察では、現在、細胞壁を構成する多糖類 (セルロース、ヘミセルロース、ペクチンなど) に注目して高分子鎖の長さや枝分かれ、網状構造と果実硬度との関係を明らかにする研究が行われている (Kozioł *et al.*, 2017, Zdunek *et al.*, 2014, 2016)。特に果実や野菜の組織では、ペクチンがその構造の維持に重要な役割を担っており、果実の成熟時や加熱加工時における組織の軟化はペクチンの可溶化が大きな要因となっている。ペクチンは植物の細胞壁や中葉に含まれる複合多糖類で、ガラクトuron酸が  $\alpha$ -1,4-結合したポリガラクトuron酸が主成分である。ここでは、ニンジン (直径 15mm、長さ 10mm 円柱状試料) のブランシング工程において、その加熱条件の違いがペクチンの構造に与える影響について調査した例を示す。実験では、生の材料と 95°C で 2 分間ブランシング処理 (HTB)、60°C で 60 分ブランシング処理 (LTB)、LTB 処理の後 HTB 処理した試料を準備し、水溶性 (WSP)、キレート可溶性 (CSP)、稀アルカリ可溶性ペクチン (DASP) の構造変化を AFM によって観察した。その結果、LBT 処理では、WSP 構造についての差は他とは認められなかったものの、CSP と DASP の鎖状構造をより複雑化することが分かった。つまり、LBT 処理はニンジンを加熱処理した際にも硬さの維持に役に立つということである。ここでは、MultiMode 8 AFM システム (Bruker) によって観察された DASP の鎖状構造を示す (図 5)。ペクチン鎖の特徴量計測実験では、生のニン

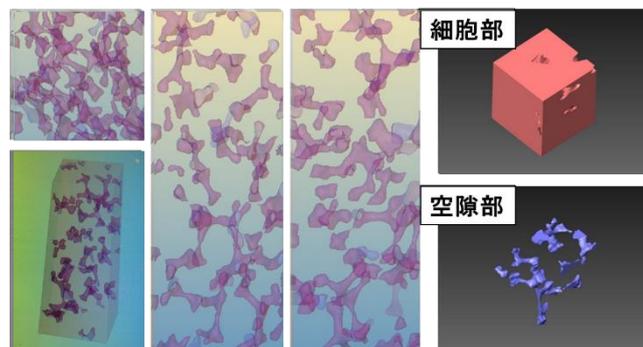


図2  $\mu$ X 線 CT 画像から再構築されたカキ果肉の三次元細胞組織と細胞・空隙の抽出結果

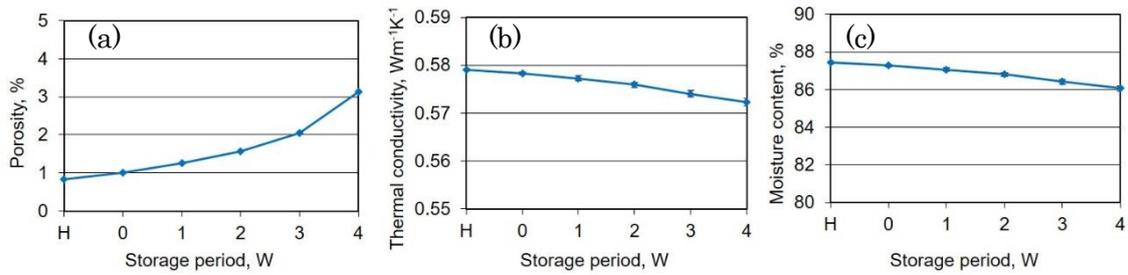


図3 25°Cで貯蔵したカキ果実の平均空隙率(a), 熱伝導率(b), 水分の経時変化(c) (H:収穫時)

ジンから各種処理によって抽出した各種ペクチン懸濁液を雲母劈開面上に滴下、乾燥し、これを観察用試料とした。AFM計測はタッピングモードで行い、 $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ 面をスキミングすることで3D情報を取得、SPIP 6.6.4ソフトウェア (Image Metrology)を用いてフィルタリング処理し、AFM立体画像を得た。このデータを基にペクチン鎖の長さ、厚さ(高さ)分布を調べ、ブランチング処理条件の違いによるペクチン鎖構造への影響を定量的に明らかにした。ペクチン鎖の網目構造の複雑さが失われるとニンジンの硬度も軟化する傾向にありことから、ナノレベル観察結果はマクロな世界にも密接に関連することが示された。この他、モモ、カキの1-MCP施用による品質保持効果と微細構造変化についても実験を行い、1-MCP処理の品質保持効果を各種ペクチン含有量と構造変化との関係で明らかにした。

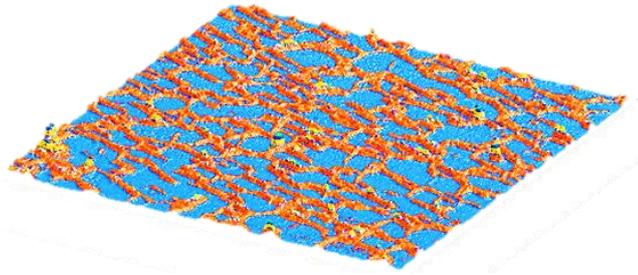


図4 ニンジンに含まれる DASP の三次元立体構造の可視化

(2) マルチフィジックス・シミュレーションによる細胞組織の諸物性値の推算

次に、完成したジオメトリを STL 形式ファイルで保存し、ICEM CFD 17.1 (ANSYS) にエクスポート、各節点、表面、ボディを認識させ、メッシュ・ジェネレータ機能を用いて計算要素に分割した。計算に用いたジオメトリの一例を前出の図2に示す。この図は空隙率が0.04の密組織立体像の例であるが、ガスなどの通路となる空隙の形状が明瞭に分かる。空隙率が0.3以上となる部分は果実全体4%以下でしかないが、空隙に含まれる気体の熱伝導率は細胞が含む水の約1/25倍となるため、この存在は無視できない。空隙が細胞組織内の熱移動に与える影響を調べるため、空隙率が0.04~0.47となる0.3mm角の立方体ジオメトリサンプルを準備し、その一面から加熱、側面は断熱条件を与え、加熱面とは反対面の平均温度の経時変化を求めた。同時に、熱伝導率をモデル入力パラメータとする0.3mm角の均質材料を仮定した加熱解析を行い、加熱面に向き合う対面における平均温度の経時変化と細胞組織モデル解析結果を比較し、最も適合性の高くなる熱伝導率の値を細胞組織モデルの有効熱伝導率とした。ここでは材料の異方性を考慮し、三次元方向それぞれについて有効熱伝導率を決定した。図5に異方性を持つ細胞組織の熱移動シミュレーション解析の可視化例を示す。解析は熱流体解析ソフトFluent17.1 (ANSYS)を用いて行った。この解析では280.6Kに保った材料の一面を300Kとすることで加熱を開始したが、材料はわずか1秒程度で平衡温度に達した。細胞組織の有効熱伝導率は空隙の増加とともに減少した。二相から成る材料の熱伝導率と空隙との関係を表す式については直列モデルや並列モデル、多分散系モデル、Maxwell-Euckenモデル、Brailsfordモデルなど多くのモデルが提案されている。この中で、カキ果実の熱伝導率と空隙率の関係はBrailsfordモデルで関係づけられることが分かった。

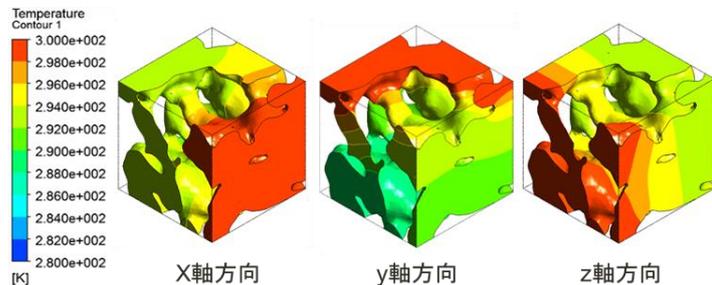


図5 細胞組織内熱移動シミュレーション(0.5秒後)

(1)で求めたCT値と空隙率の関係と本法で求めた空隙率と平均有効熱伝導率の関係から貯蔵中のカキの熱伝導率の経時変化を図2(b)に示す。空隙率の増加に伴い、有効伝導率が減少することが推定された。図2(c)には、Sweat (1974)の式を用いて推定した水分の経時変化の推定結果を示す。この他にも、細胞組織レベルでの力学的変形モデルの開発も行ったが、ここでは割愛する。

### (3) バイオスペックル法による細胞アクティビティの計測と活性度マッピング

撮影した動画を画像解析ソフトウェア (ImageJ) 読み込み、スペックルパターン of の揺らぎを確認できる長方形エリア内の各ピクセルを対象に、連続する 300 フレーム間の輝度値を抽出した。その後、長方形部分の 300 フレームの平均輝度値を算出した。また、画像解析ソフト (KNIME) に撮影したバイオスペックル動画を読み込み、連続した 1024 フレーム間すべてのピクセルに対して同時生起行列 (Gray Level Co-occurrence Matrix) 解析を行った。本研究では、同時生起行列を計算する角度は  $180^\circ$  とし、距離は 1 とした。なお、今回採用した特徴量は、Angular Second Moment (均一性)、Cluster Prominence (明暗の変化の強さ)、Cluster Shade (エッジの強さ)、Cluster Contrast (濃度差の高い画素対の多さ)、Correlation (相関性)、Entropy (乱雑さ)、Texture Homogeneity (差が小さい画素対の多さ)、Variance (不均一性) の 8 個である。

図 6 (a) はカキの貯蔵期間 0 日目と 10 日目の温度ごとの平均輝度値である。貯蔵期間が長くなるに連れ平均輝度値は低下すること、また、温度が高くなると平均輝度値も高くなる傾向にあり、温度の上昇による細胞活動の活発化と見られる現象が観察された。つぎに、図 6 (b) は動画から抽出した特徴量のうち、画素間の濃淡差の大きさ、すなわちエッジの強さを表す Cluster Shade の温度・貯蔵期間への依存性を示す。Cluster Shade でも細胞活動の活性度が表れた。その他、一部のバイオスペックル特徴量と物性値との関連について、質量損失、硬度については相関がみられた。以上の結果から、細胞の活性度は温度の上昇とともに高くなり、貯蔵中に低下することが示唆された。この他、モモ、ミカン、ナシについても同様の傾向を得た。

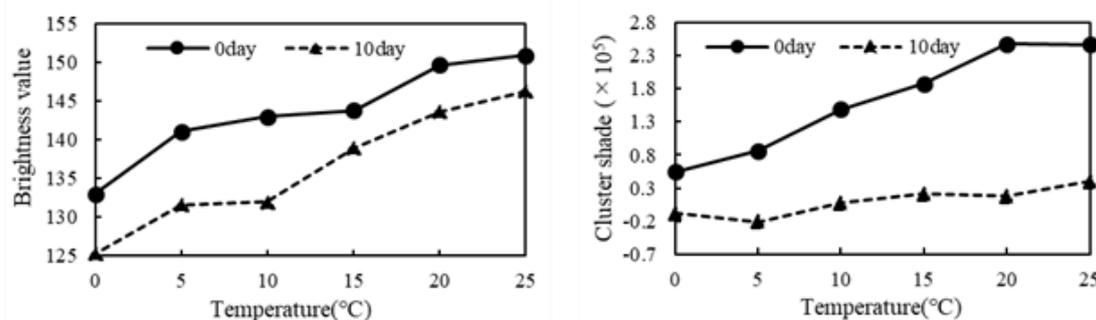


図 6 貯蔵前後のカキの平均輝度値(a)と Cluster shade 値(b)の温度依存性

### (4) 細胞組織の健全性の診断と青果物の品質評価

中課題(1)~(3)で青果物の品質評価を行う手法とこれを支援するソフトを開発してきた。(1)と(2)より非破壊物性測定、(3)より非破壊細胞活性度測定が可能となった(図7)。例えば、図7では画面上の植物の葉脈が赤く表示され、活性度分布が可視化された。両者をつなぐ品質指標としては、空隙率や硬度、呼吸速度などが有力な指標であり、今後は両者をつなぐフレームワーク構築を目指し、ナノからマイクロ、さらにはマクロの連携を強化して行きたい。

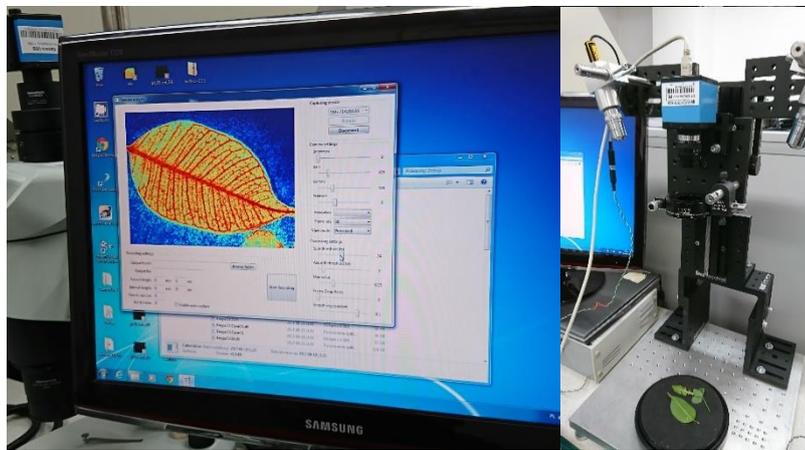


図 7 開発中の鮮度可視化装置 (PAN, Poland との共同研究中)

#### 参考文献

- Kozioł, A., Cybulska, J., Pieczywek, P.M., Zdunek, A., 2017. Changes of pectin nanostructure and cell wall stiffness induced in vitro by pectinase. *Carbohydrate Polymers*, 161, 197-207.
- Sweat, V. E., 1974. Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. *Journal of Food Engineering*, 11, 147-158.
- Zdunek, A., Kozioł, A., Cybulska, J., Lekka, M., Pieczywek, P.M., 2016. The stiffening of the cell walls observed during physiological softening of pears. *Planta* 243, 519-529.
- Zdunek, A., Kozioł, A., Pieczywek, P.M., Cybulska, J., 2014. Evaluation of the nanostructure of pectin, hemicellulose and cellulose in the cell walls of pears of different texture and firmness. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 3525-3535.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tanaka Fumihiko、Nashiro Kohei、Obatake Wako、Tanaka Fumina、Uchino Toshitaka	4. 巻 11
2. 論文標題 Observation and analysis of internal structure of cucumber fruit during storage using X-ray computed tomography	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Engineering in Agriculture, Environment and Food	6. 最初と最後の頁 51 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eaef.2017.12.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Karmoker Poly、Obatake Wako、Tanaka Fumina、Tanaka Fumihiko	4. 巻 24
2. 論文標題 Quality Evaluation of 1-Methylcyclopropene Treated Japanese Apricot Using X-ray Computed Tomography	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Food Science and Technology Research	6. 最初と最後の頁 377 ~ 384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.3136/fstr.24.377	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 KARMOKER Poly、OBATAKE Wako、TANAKA Fumina、TANAKA Fumihiko	4. 巻 56
2. 論文標題 Efficacy of 1-MCP for Modulating the Ethylene Sensitivity of Japanese Persimmon in Relation with Internal Structure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Environment Control in Biology	6. 最初と最後の頁 177 ~ 185
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.2525/ecb.56.177	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 田中史彦、田中良奈	4. 巻 2
2. 論文標題 マルチスケール解析による青果物の物性値分布の可視化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 アグリバイオ	6. 最初と最後の頁 481 ~ 485
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 田中史彦、田中良奈	4. 巻 49
2. 論文標題 農業施設に関わる研究・技術の最近の展開 - 青果物の低温流通と貯蔵施設について -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 農業施設	6. 最初と最後の頁 59-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 田中史彦、田中良奈	4. 巻 3
2. 論文標題 解像度の異なる2種類のX線CT装置を用いた青果物物性値分布の非破壊計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 アグリバイオ	6. 最初と最後の頁 191 ~ 196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Imaizumi Teppei, Szymanska-Chargot Monika, Pieczywek Piotr M., Chylinska Monika, Koziol Arkadiusz, Ganczarenko Diana, Tanaka Fumihiko, Uchino Toshitaka, Zdunek Artur	4. 巻 84
2. 論文標題 Evaluation of pectin nanostructure by atomic force microscopy in blanched carrot	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 LWT	6. 最初と最後の頁 658 ~ 667
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.lwt.2017.06.038	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 該当する

1. 著者名 Tanaka Fumihiko, Imamura Keitaro, Tanaka Fumina, Uchino Toshitaka	4. 巻 221
2. 論文標題 Determination of thermal diffusivity of persimmon flesh tissue using three-dimensional structure model based on X-ray computed tomography	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Food Engineering	6. 最初と最後の頁 151 ~ 157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.021	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 -

1. 著者名 田中史彦、田中良奈	4. 巻 3
2. 論文標題 X線CTによる貯蔵青果物の内部構造解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 アグリバイオ	6. 最初と最後の頁 662 ~ 667
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

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) doi.org/10.1016/j.eaef.2019.11.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Poly Karmoker、Wako Obatake、Fumina Tanaka、Fumihiko Tanaka
2. 発表標題 Efficacy of 1-MCP on the internal structure of Japanese persimmon
3. 学会等名 ISMAB 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中史彦、田中良奈
2. 発表標題 青果物用二温度帯鮮度保持コンテナの開発とバイオスペックル法による鮮度評価
3. 学会等名 FOOMA Japan 2018、アカデミックプラザ (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福岡圭、豊島健人、田中良奈、田中史彦
2. 発表標題 バイオスペックルを用いた青果物の鮮度測定に関する研究
3. 学会等名 農業環境工学関連 5 学会2018年合同大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中史彦、今村桂太郎、内野敏剛
2. 発表標題 三次元微細構造モデル解析に基づくカキ果実の熱伝導率推算とその内部分布の可視化
3. 学会等名 農業食料工学会第76回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大島和子、カルモカー ポリー、田中史彦、内野敏剛
2. 発表標題 X線CTによる青果物の内部構造解析
3. 学会等名 2017年度農業施設学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 豊島健人、田口隼也、田中史彦、内野敏剛
2. 発表標題 青果物の鮮度評価に向けたバイオスペックルの特性に関する研究
3. 学会等名 第71回農業食料工学会九州支部例会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Poly Karmoker、Wako Obatake、Fumina Tanaka、Fumihiko Tanaka、Toshitaka Uchino
2. 発表標題 Efficacy of 1-MCP on the quality and internal structure of persimmon fruit
3. 学会等名 第71回農業食料工学会九州支部例会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中史彦、今村桂太郎、田中良奈、内野敏剛
2. 発表標題 X線CTマルチスケール解析による青果物の熱物性マッピング
3. 学会等名 2017年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今泉鉄平、Szymanska-Chargot Monika、Pieczywek M. Piotr、Chylinska Monika、Kozioł Arkadiusz、Ganczarenko Diana、田中史彦、内野敏剛、Zdunek Artur
2. 発表標題 冷凍加工の前処理がニンジンの内在ペクチンに及ぼす影響
3. 学会等名 2017年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2017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、アカデミックプラザ（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沖香菜子、田中良奈、田中史彦
2. 発表標題 バイオスペックルを用いた青果物の品質評価
3. 学会等名 第73回農業食料工学会九州支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沖香菜子、田中良奈、田中史彦
2. 発表標題 バイオスペックルを用いた青果物の鮮度評価
3. 学会等名 2019年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2020年度農業食料工学会学術賞、田中史彦、X線CTによる青果物内部構造の解析と物性値分布の可視化
---

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
研究 分 担 者	内野 敏剛  (UCHINO Toshitaka)	九州大学・農学研究院・特任教授  (17102)	2017年度のみ
	(70134393)		