

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26292135

研究課題名(和文) 生体材料の3次元構造解析とマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション

研究課題名(英文) Three-dimensional structural analysis of bio-materials and multiscale and multiphysics simulation in postharvest systems

研究代表者

田中 史彦 (Tanaka, Fumihiko)

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) 10,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、収穫後の青果物が貯蔵される低温施設とそこに置かれた青果物内部で何が起きているかを個体～微細レベルで予測するマルチフィジックス(MP)・シミュレーションモデルを構築するとともに、各スケール間で解析データを相互利用するマルチスケール(MS)解析フレーム作成を目的とした。ここでは、主に以下の研究を行った。(1)青果物の貯蔵・輸送庫内の空調制御シミュレーション、(2)X線CTによる青果物内部構造観察とMPシミュレーション、(3)μX線CTによる細胞組織の観察とMPシミュレーションである。また、MS間で情報を利活用することにより、単一のスケール解析では達成できなかったMS解析法も確立した。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to develop some multiscale and multiphysics analysis models by means of computational fluid dynamics (CFD) approach. We developed some heat and mass transfer models to design and control cold storage system for fruit and vegetables (FV) and predicted physical and chemical phenomenon in FV loaded in the storage by using CFD simulation technique. In order to achieve these purposes, we carried out the following research topics: (1) Air conditioning simulation in cold store, (2) Observation of whole structure of FV using an X-ray computational tomography (CT) and multiphysics simulation based on the reconstructed three-dimensional shape geometry obtained from the X-ray CT images, and (3) Observation of micro structure of FV using an high-resolution X-ray CT and multiphysics simulation. Furthermore, we constructed the procedure for flame work to utilize multiscale analysis.

研究分野：ポストハーベスト工学

キーワード：農業工学 シミュレーション工学 マルチスケール解析 マルチフィジックス解析

1. 研究開始当初の背景

- (1) 欧州委員会が進めてきた第7次研究・技術開発のための枠組み計画 (FP7) の課題のひとつとして Inside Food プロジェクトがあげられる。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、さらにはコンピュータシミュレーション技術を駆使することによって食材等の微細構造を解析するとともに、この中で起こる諸現象を厳密に再現し、食品の品質評価や新しい食感の創造、最適加工や調理に生かすものである。
- (2) 2013年4月に Inside Food プロジェクトについての国際シンポジウムがベルギーで開催され、日欧米における研究シーズ・ニーズを俯瞰的に調査するとともに、本分野の重要性を強調した。また、同年9月に Rousseauらが中心となり Elsevier から学術雑誌 Food Structure を創刊するなど食品分野における微細構造解析の重要性が再認識されている。
- (3) この研究は観察技術の飛躍的な発展によって対象がマイクロレベルからナノレベルまで拡がり、ナノ構造と食品の品質との関係が明らかにされることが期待されている。
- (4) さらに、異なるスケール下で得たデータをいかにしてスケール間で相互活用していくか、そのフレームワーク作りが重要となっている。

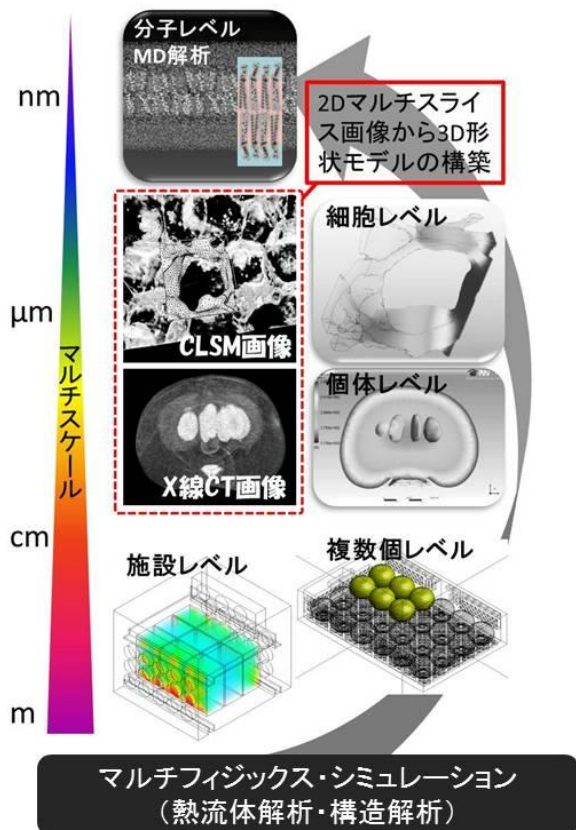


図1 マルチスケール・シミュレーションの概要

2. 研究の目的

本研究では、貯蔵あるいは低温流通環境下に置かれた青果物の巨視的な諸現象とその

内部で起きる細胞レベル・分子レベルでの諸現象を連成して予測するマルチスケール・シミュレーション法 (マイクロ、マクロの融合) を確立することによって、品質保持・評価に生かすことを目的とする。

これを達成するため、収穫後の青果物が貯蔵される低温施設の空調制御の最適化とそこに置かれた青果物の内部で何が起きているかをマルチスケールで予測するマルチフィジックス・シミュレーションモデルを構築した (図1参照)。具体的には、以下の中課題について基礎から応用に至る多面的アプローチを行った。

- (1) 青果物の貯蔵・輸送庫内の空調制御シミュレーション  
 青果物を貯蔵する低温庫内の空調制御シミュレーションでは、従来の低温高湿維持に加え、エチレンの分解による品質の劣化抑制など化学種輸送シミュレーションモデルを開発することにより、青果物が置かれる環境とその内部との熱・物質の授受を予測可能とすることを目的とした。
- (2) X線CTによる青果物内部構造観察とマルチフィジックス・シミュレーション  
 X線CTによってマルチスライス画像を取得し、青果物の3次元形状モデルを作成、CT値の分布から青果物内部組織の粗密を推定する。画像処理によって、タネや空隙、果肉組織の粗密を抽出し不均質形状モデルを構築、個体レベルでの材料内拡散解析を行うことを目的とする。
- (3) マイクロX線CTによる細胞組織の観察とマルチフィジックス・シミュレーション

μX線CT等によって得た青果物の2次元スライス画像から3次元微細構造モデルを構築し、細胞組織レベルでの拡散シミュレーションを行い、細胞組織における熱特性を推定することを目的とする。また、拡散場を求めることで、今後、非定常場における分子動力学 (MD) シミュレーションにつなぎたい。

3. 研究の方法

いずれのスケール解析でも、以下の数値流体力学解析の式が基本となる。すなわち、流体の流れは連続の式と運動方程式、温度場はエネルギー方程式である。

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right]$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{u_i' u_j'}) - (\rho - \rho_{ref}) g + S_u$$

(2)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho C_{pf}T) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i C_{pf}T) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}) - \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho C_{pf} \overline{u_i' T'}) + S_e \end{aligned} \quad (3)$$

また、固体内部の温度場は、適当な条件下で熱伝導方程式を解き算出した。

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T \quad (4)$$

この他に、化学反応を伴う化学種輸送方程式等を組み合わせて、スケールごとでマルチフィジックス・シミュレーションを行った。

(1) 青果物の貯蔵・輸送庫内の空調制御シミュレーション

おもに、青果物を積み付けした二温度帯 20ft コンテナ内の温湿度、風速、エチレン濃度分布の経時変化を予測し、蒸散や結露、低温障害、エチレン障害を抑制するためのシミュレーション法の開発について検討した。

(2) X線 CT による青果物内部構造観察とマルチフィジックス・シミュレーション

供試材料として、福岡県 (JA 筑前あさくら) で収穫された収穫直後のカキ(富有)他を使用した。対象とした果実は多種に亘るが、ここではカキのみについて報告する。CT 画像の撮影は、普通解像度については実験動物用 X線 CT 装置 (Latheta LCT-100、日立) を用いて行い、X線源管電圧 50kV、管電流 1mA、スライス幅を 2mm として CT 画像を取得した。これに基づき、三次元形状の再構築および CT 値分布調査を行った。

(3) マイクロ X線 CT による細胞組織の観察とマルチフィジックス・シミュレーション

供試材料として、前述のカキ(富有)を使用した。μX線 CT 装置 (Skyscan 1172、Bruker) を用いて行い、X線源管電圧 60kV、管電流 100mA、スライス幅を 3.24μm とした。高解像度 X線 CT 装置で取得したカキ細胞組織の連続 CT 画像中の一部を、一辺 0.2 mm の立方体にくり抜いた後、それぞれの画像から CT 値を抽出し、平均値を算出した。CT 値の抽出は画像解析ソフトウェア (CT-Analyzer、Bruker) を用いた。次に、くり抜いた連続 CT 画像から、細胞部分と細胞間隙部分の輪郭をそれぞれ抽出することで、カキ細胞組織の三次元形状の再構築を行った。空隙率の異なるカキ果肉細胞組織について三次元形状の再構築および空隙率の計測を 3D 可視化解析システム (Amira、マックスネット) を用いて行った。完成した三次元ジオメトリを 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、この構造解析から空隙率

を求めた。次に、空隙が細胞組織内の熱移動に与える影響を知るため、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 (上面) から冷却、他の面は断熱条件を与え、冷却面とは反対面 (下面) の平均温度の経時変化を求めた。同時に、熱伝導率をモデルインプットパラメータとする 0.3mm 角の均質材料を仮定した冷却計算を行い、下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とを比較、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て決定した。この解析では、細胞及び空隙内に移流と拡散がある場合と、拡散のみを考慮した場合について解析を行った。

最後に、(2)と(3)を連成し、CT 値から果実個体内の空隙率、熱伝導率、水分の分布を求める方法を検討した。

#### 4. 研究成果

(1) 青果物の貯蔵・輸送庫内の空調制御シミュレーション

① 低温貯蔵庫内の空調制御

一般に青果物は水分が 3~5%減少すると商品価値が失われると言われ、収穫後において蒸散を防止することは非常に重要な課題となる。特に、船舶輸送による青果物の輸出では、輸送期間が長く、蒸散の抑制が鮮度保持の鍵となる。蒸散の駆動力は青果物表面の蒸気圧と周囲気の蒸気圧の差であり、この差を極力小さく保つことが蒸散抑制の基本となる。蒸散は風速などの影響を受け、一般に、風速が大きくなるほど濃度境界層の厚さが薄くなるため蒸散はより速やかとなる。このため、青果物に直接風を送ることは品質保持の観点から極力避けなければならず、当然、風速を抑える必要が生じる。相対湿度 90%以上の高湿度で貯蔵しても、青果物表面の水分活性  $a_w$  が 0.98 以上であることから蒸散は完全には防止することはできず、ほぼ 100%に近い湿度での貯蔵が望まれる。しかしながら、低温での湿度管理は難しく、0°C付近ではわずかな温度変化が結露発生の原因となって

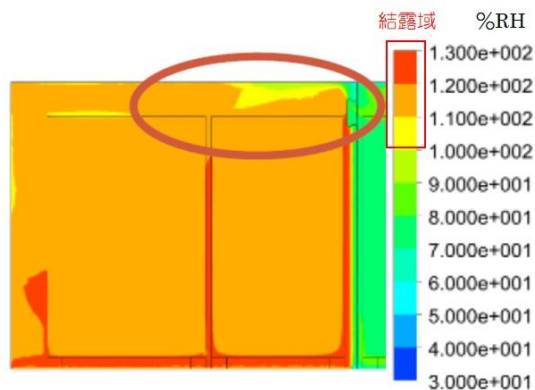


図2 定温庫系外からの高温空気流入による結露発生評価

しまう。図2には 10°C-60%RH の空気が 0°C 室に上部ダクトから侵入した場合の湿度分布を示す。入口付近で急激に冷やされた空気は低温で飽和し、結露することが分かる。これを防止するためには、十分な除湿能力を持つ冷凍機を設置する必要があり、本シミュレーションを実行することにより適切な冷凍機の選定を可能とすることができる。

図3は冷凍機吹出口からの冷風が積荷に直接当たる様子を可視化したものである。吹出口付近では風速が大きくなり、先に示した蒸散の促進が懸念されることとなる。これを緩和する工夫が必要であることが解析から明らかとなった。

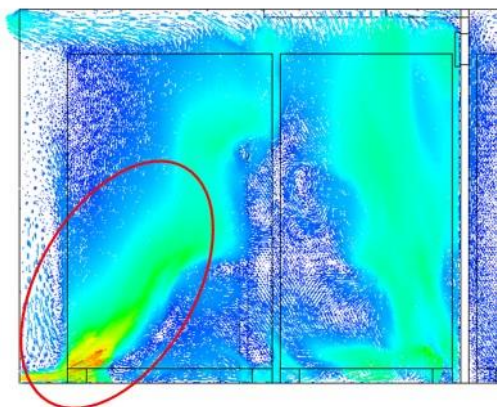


図3 冷凍機からの吹出風が積荷に当たる様子による結露発生評価

## ② 青果物の成熟を促すエチレンの分解

青果物の混載輸送用コンテナを設計する際の指針となる CFD 解析結果について述べる。青果物の貯蔵、流通では多品目の混載が避けられない。特に、エチレン生成量が多いリンゴとの混載では、エチレン感受性が高い品目の成熟を抑制するために、エチレンを除去する必要がある。著者らはパルス放電によってエチレンを分解する装置を開発し、CFDシミュレーションによって適切に貯蔵庫内のエチレン除去する方法について検討した。

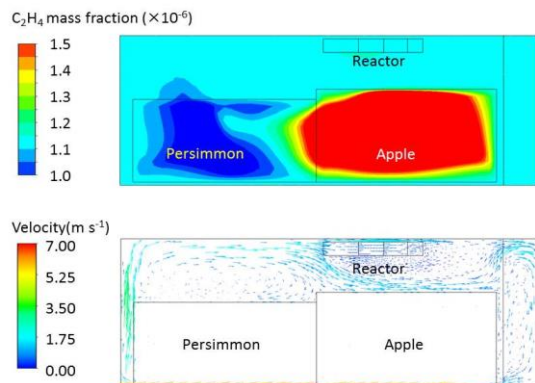


図4 青果物を混載した 20ft コンテナ内のエチレン濃度および風速分布 (混載 30 分後)

図4はカキとリンゴを 20ft コンテナ内に混載した際のエチレン濃度および風速分布を示した例であるが、リンゴ積荷から発生したエチレンがカキ積荷側に拡がって行く様子が分かる。コンテナの右上部にエチレン分解装置を設置しているが、この研究では、化学反応を伴う化学種輸送シミュレーションによってどの位置に分解装置を設置すべきかや各品目の積付け位置、品目間に仕切り板を設置した際の効果などについて検討し、設計・制御の最適化に資する成果を挙げた。

## (2) X 線 CT による青果物内部構造観察とマルチフィジックス・シミュレーション

X 線 CT 断面画像から再構築したカキ果実内部の熱移動解析を行い、不均質材料における内部温度の経時変化を予測・可視化する手法を確立した。図5は、カキ果実を 0°C の低温庫から 25°C の室内に取り出したときの計算例である。外部から温度が上昇する様子が分かる。図からは分かりにくい、種の位置で果肉とは異なる不均一昇温が確認された。現段階では部位ごとの熱伝導率を推算するための解析となっているが、(3)で遂行したミクロスケールの画像解析と熱移動解析結果から、空間領域内の熱拡散率分布の推算も可能であることから、今後はこれらを組み込んだより厳密な解析が可能となると考える。本手法を適用することにより、イチジクやリンゴ、スイカなどの熱解析も行った。

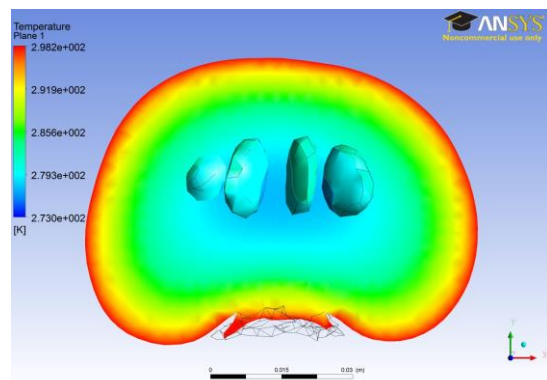


図5 不均質性を考慮したカキ果実内部の熱移動予測

## (3) マイクロ X 線 CT による細胞組織の観察とマルチフィジックス・シミュレーション

熱伝導解析では、細胞及び空隙内に移流と拡散がある場合と、拡散のみを考慮した場合について、空隙率と有効熱伝達率の関係を明らかにした。図6は移流項を考慮した場合における空隙率 4%材料の冷却過程を示した例である。不均質材料の冷却される様子が明瞭に示された。この解析結果を基に空隙率と有効熱伝達率の関係について調査した結果、移流項を考慮した解析では Brailsford モデルが、拡散のみを考慮した解析では十六面体モデ

ルが両者間の関係を表すのに適したモデルであることを明らかにした。これにより、有効熱伝導率は空隙率の関数として整理された。一方、空隙率と CT 値との間には次の関係式が成り立つことから、CT 値の計測のみで空隙率と有効熱伝導率が求められることとなった。

$$\text{空隙率(\%)} = 137.2 - \frac{136.8}{1 + \left(\frac{CT}{-590.7}\right)^{1.9}} \quad (5)$$

これにより、カキ細胞組織において、CT 値から空隙率を推定可能であることを示した。

最後に、(2)と(3)を連成し、CT 値から果実個体内の空隙率、熱伝導率、水分の分布を求める方法を検討した。水分の推定には、熱伝導率の水分依存性を示す Sweat 式を用いた。図7に X 線 CT 画像を基に推算した空隙率、熱伝導率および水分分布の計算例を示す。このように異なるスケール間の情報を相互に生かし合うことで、単独のスケール解析では達成できない新たなフレームの作成が可能となった。本研究は、測定対象となる青果物を X 線 CT 装置によって細胞組織レベルと個体レベルで観察し、X 線の吸収度合いの指標となる CT 値を介して両者間の情報をつなぎ合わせるものである。つまり、X 線 CT 装置では空気の CT 値は-1000、水は 0 となることが原則であり、異なる X 線 CT 装置でも原則的には物質によって固有の CT 値が得られることとなる。実際は、X 線源の特性や劣化に

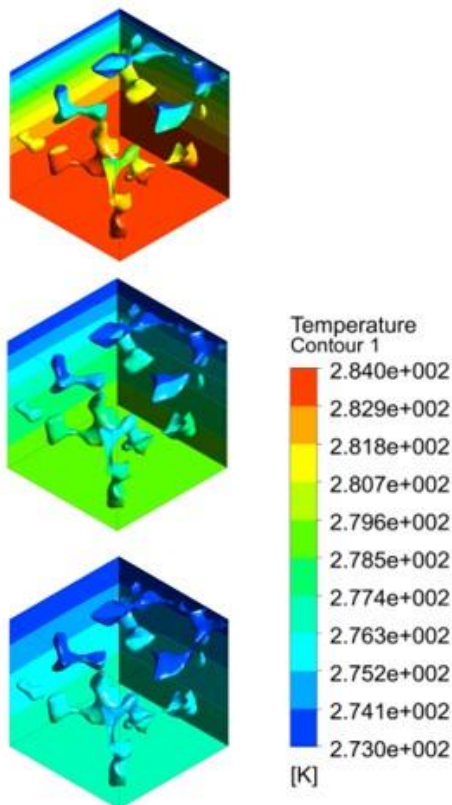


図6 果肉細胞組織内の熱移動予測例

より CT 値のキャリブレーションが必要であり、これらの影響をキャンセルできるロバスト性の高いアプリケーションの開発が今後必要となる。

以上で示した研究の以外にも「5. 主な発表論文等」に列挙した研究を遂行した。紙面の都合上、割愛する。

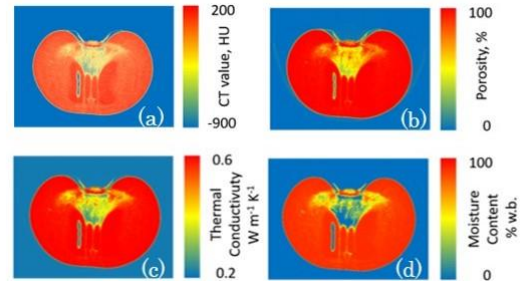


図7 カキ果実断面における各物性値分布の可視化 (a: CT 値, b: 空隙率, c: 熱伝導率, d: 水分)

#### 記号

##### 主記号

- $\beta$ : 空気の膨張係数 ( $K^{-1}$ )
- $\lambda$ : 熱伝導率 ( $W m^{-1} K^{-1}$ )
- $\mu$ : 動粘性係数 ( $kg m^{-1} s^{-1}$ )
- $\rho$ : 密度 ( $kg m^{-3}$ )
- $C_p$ : 比熱 ( $kJ kg^{-1} K^{-1}$ )
- $CT$ : CT 値 (HU)
- $g$ : 重力加速度 ( $m s^{-2}$ )
- $p$ : 圧力 (Pa)
- $Se$ : 体積発熱 ( $kW m^{-3}$ )
- $T$ : 温度 (K)
- $t$ : 時間 (s)
- $u$ : 風速 ( $m s^{-1}$ )
- $x$ : 長さ (m)

##### 下付記号

- 0: 初期
- f: 空気
- i,j: 要素
- ref: 参照
- s: 固体

#### 参考文献

- Mebatsion, H. K., Verboven, P., Ho, Q. T., Verlinden, B. E. and Nicolai, B. M., 2008 Modelling fruit (micro) structures, why and how? Trends in Food Science and Technology, 19, 59-66.
- Mees, F., Swennen, R., Van Geet, M. and Jacobs, B., 2003. Application of X-ray Computed Tomography in the Geosciences. The Geological Society, London, pp. 205.
- Sweat, V. E., 1974. Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. Journal of Food Engineering, 11, 147-158. 56.
- 田中史彦、2016、農産物・食品の安全と品質の確保技術 (第 14 回) -CFD/CAE アプロ

イチによるポストハーベストシステムの最適化、農業食料工学会誌、78(1)、28-34。  
Tanaka, F., Imamura, K., Tanaka, F., Uchino, T., 2018. Determination of thermal diffusivity of persimmon flesh tissue using three-dimensional structure model based on X-ray computed tomography. *Journal of Food Engineering*, 151-157.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① Karmoker, P., Obatake, W., Tanaka, F., Tanaka, F. 2018. Quality evaluation of 1-monocyclopropan treated Japanese apricot using X-ray computed tomography, *Food Science and Technology Research*, 査読有, 24(3), 377-384.
- ② Tanaka, F., Imamura, K., Tanaka, F., Uchino, T., 2018. Determination of thermal diffusivity of persimmon flesh tissue using three-dimensional structure model based on X-ray computed tomography. *Journal of Food Engineering*, 査読有, 151-157.
- ③ Tanaka, F., Nashiro, K., Obatake, W., Uchino, T., 2018. Observation and analysis of internal structure of cucumber fruit during storage using X-ray computed tomography. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 査読有, 11(2), 51-56.
- ④ Chhe, C., Imaizumi, T., Tanaka, F., Uchino, T., 2018. Effects of Hot-water blanching on the biological and physicochemical properties of sweet potato slices. *Engineering in Agriculture, Environmental and Food*, 査読有, 11(1), 19-24.
- ⑤ Imaizumi, T., Tanaka, F., Sato, Y., Yoshida, Y., Uchino, T., 2017. Evaluation of electrical and other physical properties of heated sweet potato, *Journal of Food Process Engineering*, 査読有, 40: e12490.
- ⑥ Imaizumi, T., Tanaka, F., Uchino, T., 2017. Numerical modeling of peroxidase inactivation in potato tubers, *Transaction of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 査読有, 60(2), 545-550.
- ⑦ Imaizumi, T., Szymańska-Chargot, M., Pieczywek, P. M., Tanaka, F., Uchino, T., Zdunek, A., 2017 Microscopic evaluation of pectic substances in blanched carrot, *LWT-Food Science and Technology*, 査読有, 84, 658-667.
- ⑧ 吉田有花、今泉鉄平、田中史彦、内野敏剛、2017. ズッキーニ冷凍加工時におけるマイクロ波ブランチングの適用. *農業食料工学会*、査読有、79(2)、140-148.
- ⑨ 高橋敦子、田中良奈、田中史彦、内野敏剛、2017、米ゲルの乾燥特性と吸水復元

性評価. *農業食料工学会誌*、査読有、79(2)、131-139.

- ⑩ Tanaka, F., Nashiro, K., Trivittayasil, V., Uchino, T., 2016. Simulation of UV-C dose distribution and inactivation of mold spores on strawberries in a conveyor system. *Food Science Technology Research*, 査読有、22(4), 461-466.

[学会発表] (計 8 件)

- ① 飯田有貴、田中史彦、内野敏剛、数値流体力学解析によるイチゴの電磁波殺菌予測と最適化、農業食料工学会第 76 回年次大会、2017、東京農業大学 (東京都世田谷区)
- ② 田中良奈、關屋まどか、田中史彦、内野敏剛、CFD による船舶輸送用二温度帯コンテナの設計に関する研究、農業食料工学会第 76 回年次大会、2017、東京農業大学 (東京都世田谷区)
- ③ 田中史彦、今村桂太郎、内野敏剛、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、農業食料工学会第 76 回年次大会、2017、東京農業大学 (東京都世田谷区)
- ④ Karmoker, P., Obatake, W., Tanaka, F., Tanaka, F., Uchino, T., Efficacy of 1-MCP on the quality and internal structure of persimmon fruit, 第 71 回農業食料工学会九州支部例会, 佐賀大学 (佐賀市)
- ⑤ 關屋まどか、田中良奈、田中史彦、内野敏剛、数値流体力学 (CFD) を用いた二温度帯コンテナ設計指針の検討、2017 年度日本冷凍空調学会年次大会、2017、玉川大学 (町田市)
- ⑥ 田中史彦、今村桂太郎、田中良奈、内野敏剛、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、2017 年度日本冷凍空調学会年次大会、2017、玉川大学 (町田市)
- ⑦ 今村桂太郎、田中史彦、内野敏剛、青果物の三次元微細構造解析と熱移動シミュレーション、第 70 回農業食料工学会九州支部例会、2016、九州大学 (福岡市)
- ⑧ 梅野裕太、田中史彦、内野敏剛、馬場紀子、法村奈保子、CFD によるフジコナカイガラムシ殺虫剤制御の最適化、農業食料工学会第 75 回年次大会、2016、京都大学 (京都市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 史彦 (TANAKA, Fumihiko)  
九州大学・大学院農学研究院・教授  
研究者番号：30284912

### (2) 研究分担者

内野 敏剛 (UCHINO, Toshitaka)  
九州大学・大学院農学研究院・教授  
研究者番号：70134393