



研究室紹介

九州大学大学院農学研究院環境農学部門 生産環境科学講座農産食料流通工学研究室

キーワード：フードチェーン，マルチフィジックスシミュレーション，可食コーティング，バイオスペックル
Food chain, Multi-physics simulation, Edible coating, Biospeckle

教授 田中 史彦 Fumihiko TANAKA 助教 田中 良奈 Fumina TANAKA

1. はじめに

九州大学農学部は、1919(大正8)年に九州帝国大学農学部として福岡県粕屋郡箱崎町(現・福岡市東区箱崎)に設置され、2018(平成30)年に伊都キャンパス(同市西区元岡)に移転の後、2019(令和元)年に創立百周年を迎えました。当研究室は、新キャンパスに自然をモチーフとして建築されたウエスト5号館(図1)の最上階に居を構え、眼下には長閑な田園風景が広がる新環境の中でこれまでの伝統を引き継ぎつつ教育研究に従事しています。当研究室の歴史は当時の科学技術庁資源調査会(現・文部科学省科学技術・学術審議会資源調査分科会)が、いわゆる「コールドチェーン勧告」を出した1965(昭和40)年に遡ります。この勧告は我が国の低温流通におけるインフラ整備を推し進める原動力となり、食品産業の発展に大きく寄与しました。これに呼応するかの如く、中馬豊先生(九州大学、本研究室初代教授)と石橋貞人先生(当時鹿児島大学、後に本研究室第二代教授)は九州の北と南に農産物低温流通の教育研究拠点となる新講座をそれぞれ設立し、九州におけるポストハーベスト工学研究の礎が築かれました。第三代教授の村田敏先生は本学会で

もなじみが深く、本誌にも「温度による比熱変化に対応した $-5\sim 300^{\circ}\text{C}$ 湿り空気線図¹⁾」など数多くの業績を残されています。我が研究室の歩みはコールドチェーン技術の教育研究とともにあり、この伝統は半世紀以上が過ぎた今も変わりありません。国内外を問わず、農産物および食品の安全かつ高品質流通を支えるための基礎から応用に至る幅広い研究を展開しています。本稿では、以下にいくつかの研究事例を紹介させていただきます。

2. 青果物の物性を非破壊計測するためのフレームワークの構築

青果物の低温貯蔵ではその熱特性を知ることが重要です。特に、低温貯蔵やCA(Controlled Atmosphere)貯蔵、MA(Modified Atmosphere)包装では、果実の熱伝導率や内部での気体の拡散係数がわからない状態では適切な環境制御が行えない場合があります。そこで本研究室では、青果物の三次元構造解析とマルチフィジックスシミュレーションにより非破壊的にこれらの物性値の三次元分布を推定するフレームワークを作成しました。図2にその概要を示します。この研究では、解像度の異なる二つのX線CT装置と熱・ガス移動シミュレーショ



図1 九州大学ウエスト5号館(農学部)
(上:南側,下:北側)

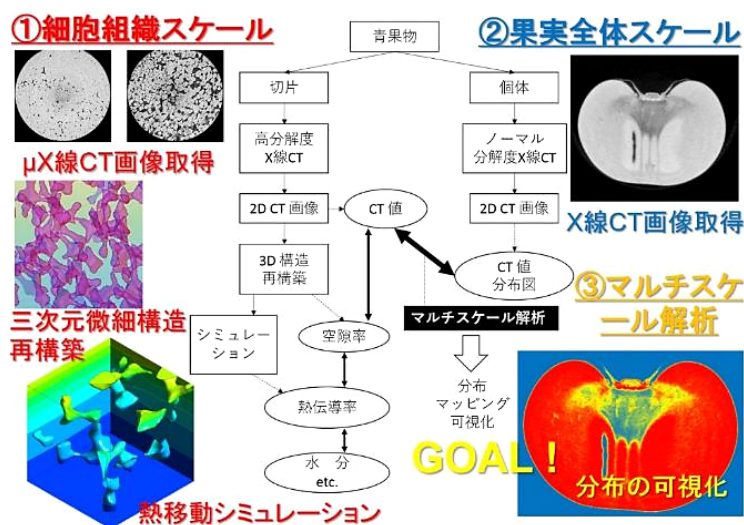


図2 マルチスケール解析による果実内物性値可視化
フレームワーク

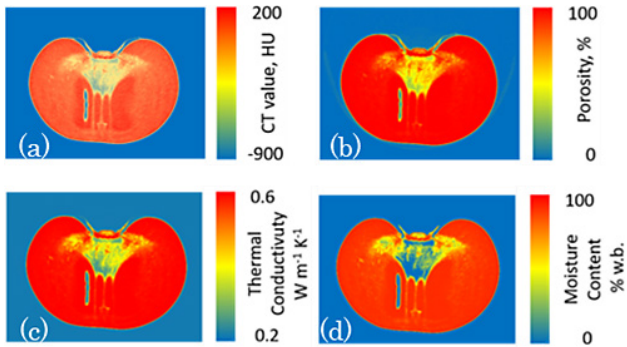


図3 カキ果実のCT値(a)データに基づく空隙率(b), 熱伝導率(c), 水分(d)の可視化

ン技術を用いて、果実内部の空隙率、熱伝導率、気体の拡散係数(溶存を含む)、水分分布を可視化することを目的としています。高解像度X線CT画像を基にコンピュータ上で三次元再構築した細胞組織の立体像の平均CT値を算出するとともに、画像解析と数値シミュレーションによって空隙率や熱伝導率などを決定し、空間の平均CT値から諸物性値を推算するモデル式を提案、これを基に低解像度X線CT画像からCT値を橋渡しとして果実内全体の諸物性値分布を非破壊的に三次元で可視化する手法を確立しました(図3)²⁴⁾。現在、果実内での呼吸を制御するために、酸素や二酸化炭素などの細胞質への溶存を含む拡散と内部ガス環境を知るための研究を鋭意遂行中です。

3. 青果物の日持ち期間を延ばす生物由来機能性可食コーティング剤の開発

青果物は収穫後も生命活動を継続し、呼吸による内容成分の消費や成熟による老化、蒸散による目減り、微生物の増殖による腐敗、光による変色、輸送中の振動や打撃による外傷など、様々な要因によってその品質が変化します。青果物の貯蔵・輸送では各種包装材が使用されますが、その多くは石油由来のプラスチック材で廃棄時における環境負荷の問題があります。この代替となる資材として生物由来機能性可食コーティング剤の開発を目指しています。ゼラチンやキトサン、多糖類など生物由来高分子を骨格とし、これにエッセンシャルオイルなどの抗菌効果等の機能性を持つ成分や架橋を形成する成分を必要量添加し、エマルジョン化を制御することで目的に合ったコーティング剤の開発が可能です。

図4はアロエベラジェルに微量の界面活性剤とバジルオイル 1 mL L^{-1} を加えてエマルジョン化し、イチゴ果実をコーティング処理したときのSEM画像です。コーティング処理をしない対照区では矢印で示すように気孔が鮮明に観察されますが、コーティング処理したイチゴでは気孔や毛茸が確認しづらいことがわかります。低温

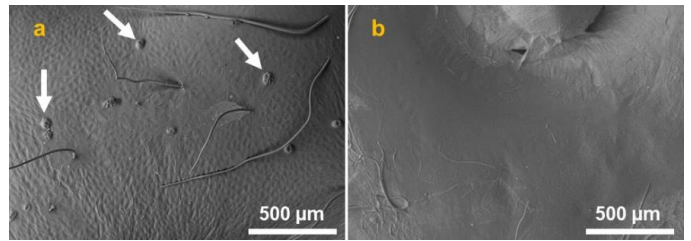


図4 イチゴ果実表面のSEM画像 (a: 対象区, b: アロエベラジェル+バジル精油コーティング処理区, 矢印は気孔)



図5 ゼラチン+カエル皮膚油脂コーティング処理したカキ果実の抑菌効果比較

高湿(4℃-85% RH)下で12日間貯蔵した結果、対照区では商品価値を失うとされる5%の目減りを超える5.5%の減量が確認されましたが、コーティング区では3.4%と蒸散を抑えることができました。また、呼吸速度も半分以下に抑制でき、そのほかにも硬さやクエン酸含有量、可溶性固形物含量、灰色かび病の原因菌となる*Botrytis cinerea*の成長抑制など有意な結果が得られています⁵⁾。

図5は*Botrytis cinerea*菌株をカキ果実赤道面に植菌後、カエル皮膚から取り出した油脂(FSO)をゼラチンベースのコーティング溶液にゼラチン質量比0~50%で添加したものをコーティングし、室温(25℃)で9日間培養したときの外観の比較ですが、対象区と抑菌効果の無いゼラチンのみのコーティング区では菌が(内部で)繁殖し、外観品質が著しく低下することが観察できます。一方、FSOを添加した区では色つやも良く、植菌しない果実で呼吸速度を測定した実験ではFSO濃度が高くなるほど呼吸量が抑えられることを明らかにしています^{6,7)}。このほかにもアロエベラジェル-バジル精油コーティング処理でマッシュルームの褐変が抑制できること⁸⁾、キトサン-椿油コーティング処理でモモの腐敗を抑制できること⁹⁾、クエン酸添加によるコーンスターチ-ヒマワリ油コーティング構造の制御¹⁰⁾、ナノ金属粒子添加による抗菌作用の向上¹¹⁾などを明らかにしており、実用化に向けた準備も整いつつあります。

4. グローバルな青果物輸送を可能にする高鮮度輸送システムの開発

少子化に伴い国内食市場が縮小する一方で、アジアな

どでは中間所得層の台頭により食市場は拡大することが見込まれるため、日本産農産物や食品の輸出をなお一層促進することが期待されています。この達成のためには技術的な支援が不可欠です。農産物を大量かつ安価に輸出するためには船舶による輸送が必要ですが、消費地に着くまでに長い期間を要するため、ある意味では貯蔵を想定した対策が必要となります。このため本研究室では、収穫された農産物に表在する初発菌を電磁波殺菌し、日持ち期間を延長する技術¹²⁾やナノミスト調湿による濡れの無いコンテナ輸送技術¹³⁾、検疫の問題から害虫を低温炭酸ガスで殺虫する技術¹⁴⁾などを開発し、農産物の輸出促進を支えてきました。近年は、バイオスペックル観察とAI画像解析により日持ち性の高い個体のみを選別し、国外向けに仕分けを行う技術の開発や長距離輸送を想定した青果物の品質を予測するフードシミュレータの開発、産地広域連携クラウドシステムの開発により最適集荷・輸出パッケージの作成・需給マッチングなどを可能にするソフト技術、混載輸送を可能にする多温度帯コンテナ(混載輸送コンテナ)の開発など、JSPSやSIPなどの外部資金助成の下、産官学の連携により多くの高鮮度保持輸送に資する研究開発を推進しています。

このうち、まず、バイオスペックルAI解析による日持ち性の評価に関する研究では、カキ果実の日持ちを約70%の確率で予測することに成功しています(図6)。この確率は低いと感じられるかもしれませんが、長距離輸送でロス率が20%ある場合、判別率70%を超えればロス率が10ポイント低下するということになりますので、既に一定の成果が挙げられています。今後はさらにその精度を上げ、最終的にはロス率ゼロに限りなく近づくことを夢見ています。

次に、長距離輸送を想定した青果物の品質を予測するフードシミュレータの開発では、青果物が輸送される環境によってどのような品質変化を起こすかについて、品質劣化を予測するプログラムの開発に着手しています。現在、食の安全を確保する手法としてトレーサビリティシステムが導入されていますが、これを超える試みとし

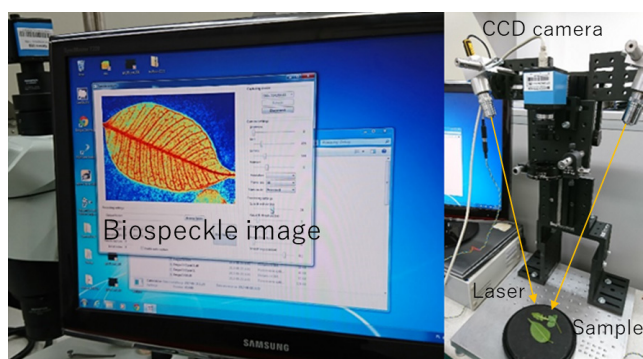


図6 バイオスペックルによる青果物の活性計測

てブロックチェーンシステムの導入が提唱されています。私たちは食品がどのように手元に届いているのか驚くほど知りません。ましてや手元に届いた食品がどのような環境にさらされ、本来の味をどれほど失っているかを想像することはたやすくありません。ブロックチェーンの強みはクラウド分散管理による偽装の防止と複雑な流通ルートの遡及と追跡にあります。同時に多くの環境データを記録・紐づけすることも可能です。ただし、環境データを記録するのみでは芸がなく、これを加工して初めて情報が生きてきますし、そこから新たな付加価値が生まれます。導入コストやデータ入力の手間などがあるため簡単には普及しないかと思いますが、世界共通のプラットフォームとしての期待は大きいものがあります。さて、フードシミュレータですが、たとえば算出された総呼吸量に基づく品質劣化の予測モデルや温湿度など外的要因と青果物自体の健全性に由来する内的要因を考慮した蒸散予測モデルの開発などを行っています。このうち、青果物からの蒸散を予測するモデルでは、キュウリ果実の貯蔵期間で表皮からの蒸散抵抗が変化することを考慮した上で、シンガポールへの空輸および船舶輸送時の温湿度の時系列データからそれぞれの目減りを推算し、高い予測精度を得ています。この結果、空輸では6日(集荷からバイヤーまで)、船舶輸送では19日かかる輸送期間で、空輸は船舶輸送に比べ2倍~4.5倍の目減りの発生があることを予測しています。これは、空輸では低温管理がなされないためです。本シミュレータの開発は緒に就いたばかりですが、将来的には品質や安全度を簡単な点数で表すなど、高鮮度輸送の強力な支援ツールになると期待しています。

最後に、社会実装に向け準備中の産地広域連携クラウドシステムの開発と農産物の混載輸送を可能にする混載輸送コンテナの開発につきましては別紙面をご準備いただきましたので¹⁵⁾、ここでは混載輸送コンテナの外観(図7)のみ掲載させていただき、詳細はそちらに譲ります。



図7 農産物の混載輸送可能な多温度帯コンテナ(混載輸送コンテナ)の外観

5. おわりに

本研究室では、ポストハーベスト工学に関する幅広い教育研究を推進しています。ホームページには研究室の沿革や研究テーマ、論文一覧などを掲載しておりますので、QRコードからアクセスください。共同研究や社会人博士を含む大学院への進学を希望される方がいらっしゃいましたら是非ご連絡願います。

謝 辞

本稿で紹介した研究成果の一部は、JSPS 科研費基盤研究 (A) JP21H04748 ならびに若手研究 JP19K15791 の助成により遂行したものです。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) 村田敏：冷凍, 78 (914), 982-984 (2003).
- 2) F. Tanaka, K. Imamura, F. Tanaka and T. Uchino : J. Food Eng., 221, 151-157 (2018).
- 3) P. Karmoker, W. Obatake, F. Tanaka and F. Tanaka : Environ. Control. Biol., 56 (4), 177-185 (2018).
- 4) P. Karmoker, W. Obatake, F. Tanaka and F. Tanaka : Eng. Agric. Environ. Food, 12 (4), 505-510 (2019).
- 5) L. Mohammadi, A. Ramezani, F. Tanaka and F. Tanaka : J. Food Meas. Charact., 15, 353-362 (2021).
- 6) P. Kingwascharapong, S. Karnjanapratum, F. Tanaka and F. Tanaka : Food Sci. Technol. Res., 26 (1), 47-52 (2020a).
- 7) P. Kingwascharapong, A. Koga, S. Karnjanapratum, F. Tanaka and F. Tanaka : Sci. Hortic., 260, Article 108864 (2020b).
- 8) L. Mohammadi, H. H. Khankahdani, F. Tanaka and F. Tanaka : Environ. Control. Biol., 59 (2), 87-98 (2021b).
- 9) V. T. Tran, P. Kingwascharapong, F. Tanaka and F. Tanaka : Sci. Hortic., 288, Article 110314 (2021).
- 10) M. H. Wardak, P. Kingwascharapong, S. Aryan, F.

Tanaka and F. Tanaka : J. Food Meas. Charact., 15, 1907-1915 (2021).

- 11) A. A. Wardana, F. Tanaka and F. Tanaka : Key Eng. Mater., 862, 83-87 (2020).
- 12) D. Hamanaka, N. Norimura, N. Baba, K. Mano, M. Kakiuchi, F. Tanaka and T. Uchino : Food Control, 22 (3-4), 375-380 (2011).
- 13) H. V. Duong, S. Tong, F. Tanaka, E. Yasunaga, D. Hamanaka, N. Hiruma and T. Uchino : J. Food Eng., 106 (4), 325-330 (2011).
- 14) 法村奈保子, 江嶋亜祐子, 塚崎守啓, 馬場紀子, 中山孝, 武田在満, 服部良隆, 田中史彦, 内野敏剛 : 福岡農林試研報, 2, 58-63 (2016).
- 15) 田中史彦, 田中良奈 : 冷凍, 96 (1128), 522-526 (2021).

研究室ホームページ QR コード



田中 史彦 Fumihiko TANAKA

九州大学大学院博士後期課程修了
九州大学大学院農学研究院
Kyushu University
教授



田中 良奈 Fumina TANAKA

九州大学大学院修士課程修了
九州大学大学院農学研究院
Kyushu University
助教

原稿受理 2021年8月24日

“日本冷凍空調学会論文集”へ投稿のご案内

当論文集は低温、冷凍、空調、食品冷凍、生物、医学などの科学・技術の研究開発成果の発表誌として2021年版で発刊38巻を数え、この間の論文収録数は研究レビューを含め約1400編に達しています。

特筆すべきことは、①上記各分野の広範な読者層(産、官、学)を対象として、②学術性はもちろんのこと、③技術上の価値、④速報性(投稿から掲載まで3~6カ月)も重視しており、また⑤毎年優れた論文には学術賞を贈呈する表彰制度を設けるなどにより、高い評価を得ております。

申込先：公益社団法人日本冷凍空調学会 論文集編集担当 E-mail : ronbun@jsrae.or.jp

日本冷凍空調学会ホームページ : <https://www.jsrae.or.jp/>