

◇◇◇ 解説記事 ◇◇◇

農業生産・食品加工プロセスにおける光センシングと電磁波利用

橋本 篤^{1,†}, 亀岡孝治¹, 末原憲一郎²

¹ 三重大学大学院生物資源学研究科, ² 三重大学大学院地域イノベーション学研究科

1. はじめに

「衣食住」はわれわれの生活において不可欠であり、とくに「食べる」という行為は最も根源的な欲求のひとつといえる。また、昨今の健康ブームや超高齢化社会などの社会現象を考えると、「食べる」ことの重要性はますます高まっている。食品の機能性に関しては、これまで国が個別に許可した特定保健用食品（トクホ）と国の規格基準に適合した栄養機能食品に限られていたが、機能性食品に関する消費者の選択肢の増加を目的とし、平成 27 年（2015 年）4 月に「機能性表示食品」制度 [i] が始まった。

一方、「生産」、「貯蔵」、「流通」、「加工」、「販売」、「消費」の各ステージにおける安全率を高めるため、食品の大量廃棄の問題が引き起こされている。また、加工食品の多くは、農産物などの一次産物を原材料として生産されているが、食・農に関わる専門分野が縦割りで、境界領域を扱う研究者・技術者が極めて少ないのが現状である。

生食用や加工食品の原材料となる農作物の安定供給を目指すには、栽培時における農作物の栄養状態の定量的把握、およびその情報に基づいた適切な対応が非常に重要である。また、近年の異常気象や大気汚染による外的環境因子は植物内の栄養状態バランスに大きな変化を与え、結果として農作物の収穫率減を引き起こすことになる。このような観点において、農作物の栄養状態を栽培現場レベルで把握することは非常に重要なポイントとなる。また、農業従事者の減少と高齢化により、農業 ICT の導入による生産性の向上・収益

向上・人材育成などへの取り組みが期待されている。さらに、安全・安心で高品質な農産物の持続的生産のために、科学的エビデンス構築を可能とする食・農の IoT 基盤が求められている。一方、2005 年には会員企業 9 社から構成される北米の農業 ICT の標準化団体 AgGateway [ii] が設立され、2016 年には 250 社まで拡大した。また、AgGateway Europe など設立され、日本を中心として AgGateway Asia の設立に向けた準備がおこなわれている。

このような「食」に関する社会的背景を鑑み、農業を起点としたフードシステムにおける光センシングと食品加工プロセスに関連した電磁波利用研究について、われわれの研究を中心に紹介する。

2. 植物フェノミクスおよびフードミクス研究に関する光センシング

食品加工原料となる農作物の遺伝子の読み解きが高速化し、遺伝子発現が体内時計や環境との相互作用で大きく変化することも徐々に明らかになり、高速の表現型計測がますます重要になっている [1]。植物体の高速センシング技術は、植物表現型研究（フェノミクス）の推進において重要であるとともに、栽培管理システムのコア技術になることが期待される。

一方、食品の多機能化が強く求められるようになり、その客観的かつ包括的な評価が重要となる近年、フードミクス（Foodomics）研究が注目を集め始めている。フードミクスは、2009 年に Cifuentes らによって提唱され [2]、食品の特性を物理的、化学的、栄養学的などから多岐に亘って捉え、それらを網羅的に解析、理解することが重要であると考えられる。

ところで、農業や食品加工・流通現場では、「食べ物」を取り扱うため、その現場計測においては、ケミカルフリーな手法を導入することは必要不可欠である。また、現場計測においては、高度なテクニックや専門的な知識を必要とせず、迅速かつ簡易な計測手法でなくてはならない。光センシング手法は、このような条件を満たしているものと考えられる。

光センシングの最大の特徴は、様々な波長（エネルギー）の光を用いた一斉同時計測により、多角的な情

著者略歴

橋本篤 Atsushi HASHIMOTO

1992 年 東京農工大学大学院工学研究科物質生物学専攻博士課程修了

同年 三重大学生物資源学部 助手

1998 年 三重大学生物資源学部 助教授

2004 年 三重大学生物資源学部 教授

2006 年 三重大学大学院生物資源学研究科 教授

¹ 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

² 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

† Fax: 059-231-9603, E-mail: hasimoto@bio.mie-u.ac.jp

報を含んでいることである。また、光センシングでは計測データが有する一次情報には基本的に情報の欠落がなく、「光センシングにおいて取得したスペクトル情報などを保存しておくこと」と「試料を保存しておくこと」がほぼ同様の意義をもつことがある。このような特徴は、農作物や食品を対象とした品質計測などにおいて極めて大きなアドバンテージとなる。

われわれの研究グループでは、細胞・植物組織を含めた生命体や農作物とその加工品である食品を対象とし、様々な光センシング手法の確立を目指してきた [3]。以下、農作物およびそれらを起点として生産される加工食品の網羅的かつ総合的な特徴量（表現型）計測への光センシングの応用例について紹介する。

2.1 植物フェノミクス研究への光センシングの応用

土中に根を張った植物は移動してその場から逃げることができず、自然環境から被るストレスの影響は深刻である。そこで、糖・有機成分の測定が可能な赤外分光法、複数の元素情報の同時計測が可能な蛍光 X 線分光法、および色彩計測法を用い、様々な窒素施肥量の環境下において栽培した栄養状態の異なるトマト樹体のマルチバンド光計測をおこなった [3]。第一花房開花時における花房直下の本葉の光センシング情報に及ぼす窒素 (N) 施肥量の影響を検討した結果を Fig. 1 に示す。赤外分光情報において、硝酸に関する吸収帯 (黒色) では有意な差異がみられなかったが、多糖類に関する吸収帯 (赤色) では標準の N 施肥量 (0.5) において最大値を示した。蛍光 X 線分光情報においてはカルシウム (Ca) の正規化面積強度は N 施肥量が多いほど小さくなり、過剰な N 施肥に対して Ca 吸収が抑制されたと考えられる。また、色彩情報においては N 施肥量が多いほど色相 H 値は大きく、彩度 S 値は小さくなる

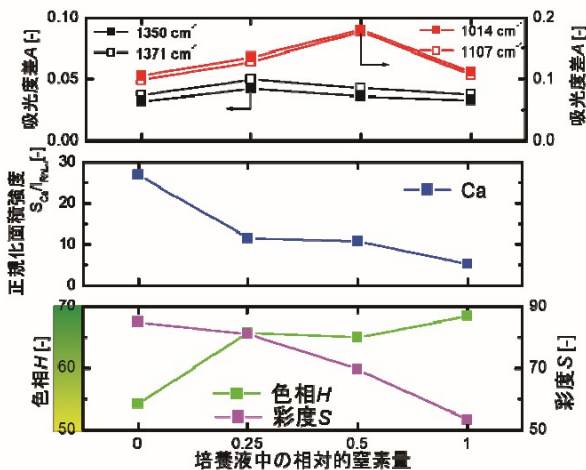


Fig. 1 トマト葉の蛍光 X 線分光、赤外分光、色彩情報センシング情報に及ぼす窒素施肥量の影響

り、葉中のクロロフィル含量を反映した結果と考えられた。つまり、複数の光センシング情報を組み合わせることで、トマト樹体の栄養状態を反映した情報が得られることが示された。

ところで、最も身近で安価な光センシング手法は、汎用的デジタルカメラの利用といえる。しかしながら、食・農現場における光環境はきわめて多種多様であり、デジタルカメラで取得した色彩情報の定量的な評価は困難である。ここでは、自然環境下での農作物の色彩情報の簡易的な取得方法について紹介する [4]。

色彩画像の RGB 値は、カメラ素子が受光した光の量 (受光感度 Hm) を底としたべき関数で表現される。

$$RGB = a \cdot Hm^b \quad (1)$$

ここで、係数 a は照射光の色に関するパラメータであり、係数 b はイメージセンサとしてのカメラの見かけの感度特性である。また、色彩情報の定量的評価の基準となる赤・緑・青色を有している標準カラーチャート画像に対し、正規化 Hm と取得した画像の正規化 RGB 値との関係は、撮影条件に関わらず一本の曲線として表現できる。つまり、係数 a は照射光情報から算出可能なパラメータであるので、式 (1) に基づいて仮想カラーチャートの RGB 値を予測できることになる。Fig. 2 は、カメラに固有な b 値もしくは複数のカメラの平均 b 値を用いて予測した仮想カラーチャートに基づき、トマト果実画像を色補正した際の色彩パラメータの比較である。両者が良好に一致し、構築した手法は汎用的である可能性が示されている。また、この手法は、施設栽培などで用いられる人工光下において撮影された画像にも適応可能であることが確認されている [5]。

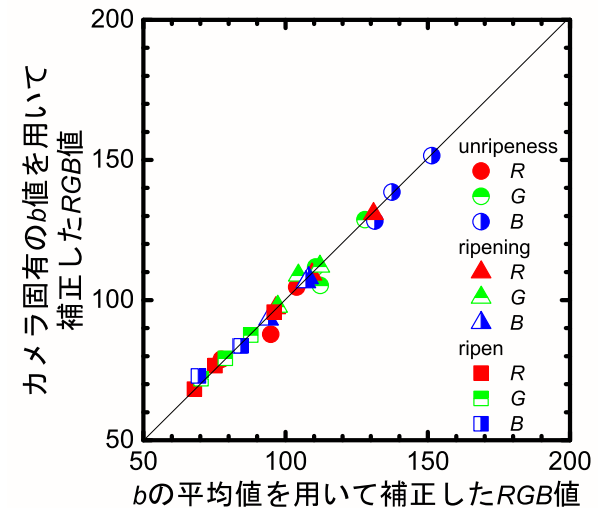


Fig. 2 仮想カラーチャートに基づいて色補正したトマト果実画像の色彩パラメータの比較

2.2 フードミクス研究への光センシングの応用

食味の評価に関しては、人間の味覚を模倣するアプローチとし、都甲らのグループによる、食品を味わう人間の舌の味覚をシミュレートする研究がある [6]。それらは人間の味覚の認知過程を模倣するものであり、基本味（甘み、酸味、塩味、苦味、うま味）を基本単位とし、個々の基本味の程度を個別の化学センサー（例：糖度計、塩分計など）で計測し、それらを組み合わせたパターン表現で全体の味覚を表現する。一方、物理センサーによる代表的なアプローチは、分光分析法およびそれとケモメトリックス（Chemometrics）手法との併用による方法である。基本的には、電磁波（紫外線、可視光線、赤外線など）を計測対象となる物質に照射して異なる波長ごとの光の吸収強度と吸収パターンを解析することで、対象物質に含まれる成分やその含有量を推定する手法である。Lendl らのグループは、これらの特性を援用した“Optical Tongue”という考えを 2002 年に発表した [7]。分光法によるアプローチは、食品中の様々な含有成分による吸光パターンと官能検査結果との対応を事前に調べておき、食品の成分の定性・定量分析情報に基づいて官能検査への対応づけをおこなうものである。

ここでは、われわれが開発した味見ロボットに関する研究例を紹介する [8]。味見ロボットは、NEC のパートナーロボット PaPeRo [9] に人間の舌の役割をする赤外線センサーを装着し、作成した。食品の赤外吸収スペクトル情報を解析することにより、特徴的な成分の定量分析とパターン認識による食品名の推定をおこなう。また、予め登録しておいた個人の身体情報をマッチングさせることにより、ロボットが食品や健康に関するアドバイスをおこなうことができる。さらに、このようなコンセプトと機能をベースとし、人間のソムリエのように、お客様の好みに合わせて必要最小限の質問をすることで、多くのワインから 1 つのワインに絞込む機能を搭載したソムリエロボットも開発した。その結果、数十種類のワインの識別とその特徴を言葉で表現することができた。

つぎに、代表的な嗜好飲料であるコーヒーの赤外吸収特性について説明する。コーヒーは、ホットコーヒーやアイスコーヒーなどのように、異なる温度で飲まれる。そこで、コーヒー抽出液中の主要成分スペクトルの温度および pH 依存性を、解離平衡の理論を用いて検討した [10]。Fig. 3 は、主要成分を混合して調製したコーヒーモデルと、個々の成分スペクトルの温度および pH を考慮して計算から求めた合成スペクトルとの比較である。Fig. 3 中の矢印に示した吸収帯において、コーヒー抽出液およびコーヒーモデルスペクトルに及ぼす温度および pH 変化の影響が認められた。また、コーヒーモデルスペクトルの温度および pH 依存性を合成スペクトル

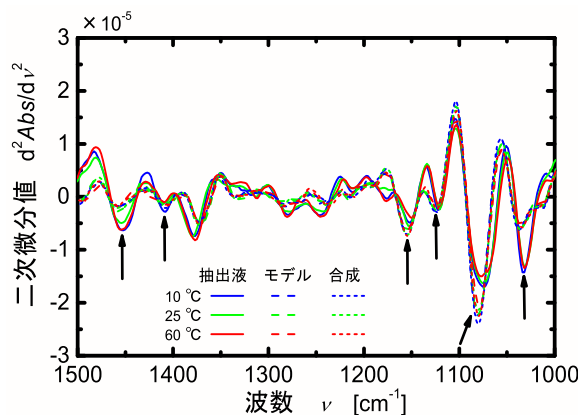


Fig. 3 コーヒー、コーヒーモデルおよび合成スペクトルに及ぼす温度の影響 (pH4.7)

ルにより説明することができた。これらの結果より、コーヒー抽出液の特徴抽出に関し、赤外吸収スペクトルの温度および pH 依存性により説明でき、コーヒーの状態を考慮した評価が可能であることが示された。さらに、これらの知見をベースとし、加熱保存中のコーヒー飲料を対象とし、赤外分光情報に基づいた官能試験結果の予測を可能とするとともに [11]、コーヒー飲料の評価には、飲料中に含まれるミルク由来の脂肪分や糖類の分布が重要であることが実験的に示されている [12]。

嗜好飲料のように複数成分が共存する水溶液系の赤外吸収情報は、成分間の相互作用や pH の影響が反映されている [13, 14]。そのため、分離分析において成分のみ情報と比べ、食品の包括的な特性を反映しているものと考えられる。

3. 食品加工への応用

食品加工プロセスにおける電磁波の利用は、前述したような成分センシングに代表される分光分析ツールとしての利用と、熱エネルギー源としての利用に大別される [15]。後者の代表的な熱的操作としては、乾燥や殺菌が挙げられる。電磁波を利用した加熱は、物理的な側面としては食品の水分活性を低下させるための乾燥が挙げられ、微生物学的側面としては加工食品の初発菌数を低減させるための殺菌が挙げられる。また、電磁波を利用した乾燥は、様々な分野で広く用いられており、食品分野でもその伝熱効率の良さと仕上がり製品の風味などが優れているとの理由から多用されている。

ここでは、近年ますます需要が広がっているフリーズドライにおける電磁波利用に関する研究例を紹介する。インスタントコーヒーや味噌汁・スープの具材などは、フリーズドライという冷凍された水を真空中に

において、熱伝導または赤外線放射による伝熱で昇華させる乾燥技術を採用している。われわれは、高周波誘電加熱を併用したフリーズドライの時間短縮の效果に着目し、市販の真空乾燥器に高周波誘電加熱部を組み付けて改造試作機を用いて基礎的な検討をおこなった。

食品モデルとして凍結寒天およびスクロース（砂糖）もしくは塩化ナトリウム（食塩）を添加した凍結寒天を用い、高周波誘電加熱併用真空凍結乾燥をおこなった結果の一例を Fig. 4 に示す [16]。Fig. 4 中の実線は、添加物を含まない凍結寒天試料を対象とし、高周波を照射しない場合 (0%_0W) の含水率の経時変化である。乾燥初期においては高周波併用の影響はほとんど認められなかったが、乾燥時間が2時間以降においては、高周波照射を併用することにより、含水率の低下が促進された。また、その傾向は、スクロースを添加した試料 (Suc20%_10W) が最も顕著であり、つぎに塩化ナトリウムを添加した試料 (NaCl5%_10W)、無添加の凍結寒天 (0%_10W) の順番であった。つまり、凍結寒天中の添加物の種類により、高周波誘電併用の効果が認められる時間、およびその後の乾燥速度に差異が認められた。また、このような高周波併用の影響は、スクロースもしくは塩化ナトリウム添加濃度によっても差異が認められた。Fig. 4 に示したように、フリーズドライ操作に高周波誘電過熱を併用することにより乾燥中盤以降における乾燥速度の促進効果が確認されたが、乾燥資料中に多くの氷を含んでいる乾燥前半においては、その影響はほとんど認められなかった。そこで、氷によく吸収される赤外線に着目し、乾燥前半における赤外線照射の併用が提案されている [17]。

4. おわりに

光センシング手法は、農産物や食品に求められる機能を包括的に把握できるポテンシャルを有しているも

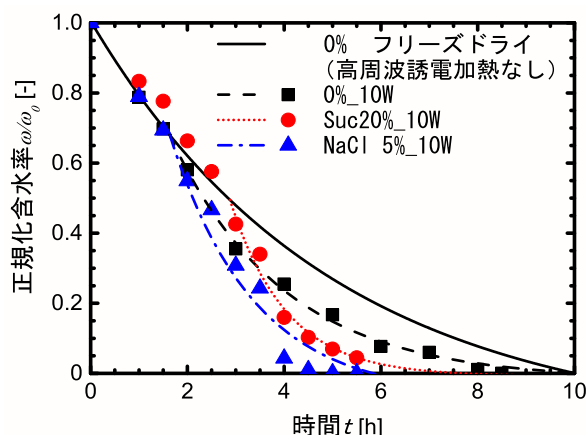


Fig. 4 含水率の経時変化に及ぼす添加物の影響

のと考えられる。現在、先端的な光計測法の研究のみならず、小型かつ安価で実用的な光学センサーの開発も進んでおり、農産物や食品内部の動的な特徴量の理解が進むものと期待される。一方、情報可視化学など複雑な情報を人間に判読しやすい形式で可視化する技術研究が盛んとなっている。さらに、食・農分野において上述した技術がIoTとリンク [18] することにより社会実装されるためには、進歩が著しいビッグデータ解析や深層学習などの分野と光センシング技術との連携が必要不可欠と考えられる。また、これらセンシング情報と食品加工における電磁波による解析は、光学的特性の把握の部分では同義であり、食品や農産物の包括的な光学特性の理解に有用であると考えられる。

引用文献

- 1) D. Houle, D. R. Govindaraju, S. Omholtet; Phenomics: the next challenge. *Nature Rev., Genetics*, **11**, 855-866 (2010).
- 2) A. Cifuentes; *J. Chromatogr. A*, **1216**, 7109 (2009).
- 3) 橋本篤, 亀岡孝治, 末原憲一郎; 農業・食品分野における表現型計測への光放射応用. *照明学会誌*, **100**, 497-501 (2016).
- 4) A. Hashimoto, K. Suehara, T. Kameoka; Quantitative surface color measurement of tomato fruit using illuminating spectral information of natural lighting. *Chem. Eng. Trans.*, **44**, 163-168 (2015).
- 5) A. Hashimoto, Y. Toyoshi, K. Suehara, T. Kameoka; Quantitative color evaluation of digital images based on illuminating spectral information. *Int. J. Sustain. Agr. Manage. Informatics*, **1**, 358-369 (2015).
- 6) 都甲潔: 感性バイオセンサー, 朝倉書店 (2001).
- 7) A. Edelmann, B. Lendl; Toward the optical tongue: flow-through sensing of tannin-protein interactions based on FTIR spectroscopy. *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, 14741-14747 (2002).
- 8) 橋本篤, 亀岡孝治, 島津秀雄; 味見ができるロボットの開発. *日本VR学誌*, **18**, 88-92 (2013).
- 9) Y. Fujita; Personal robot PaPeRo. *J. Robot. Mechatron.*, **14**, 60-63 (2002).
- 10) A. Hashimoto, Y. Sugimoto, K. Suehara, T. Kameoka; Influences of pH and temperature on infrared spectroscopic features of brewed coffee. *Procedia Food Science*, **1**, 1132-1138 (2011).
- 11) 橋本篤, 亀岡孝治, 末原憲一郎: 特許第 60108294 号 (2016年9月30日登録).
- 12) A. Hashimoto, M. Koide, K. Suehara, T. Kameoka; Evaluation of coffee beverage characteristics using infrared macro- and micro-spectroscopic method. *Abstracts of ICEF12 (Québec City, June 14-18, 2015)*, P2.134 (2015).

- 13) M. Kanou, T. Kameoka, K. Suehara, A. Hashimoto; Mid-infrared spectroscopic analysis of saccharides in aqueous solutions with sodium chloride. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **81**, 735–742, (2017).
- 14) K. Nakanishi, A. Hashimoto, M. Kanou, T. Pan, T. Kameoka; Mid-infrared spectroscopic measurement of ionic dissociative materials in metabolic pathway. *Appl. Spectrosc.*, **57**, 1510–1516 (2003).
- 15) 橋本篤; 食品加工プロセスにおける赤外線利用技術の開発. *日食工誌*, **7**, 61–73 (2006).
- 16) K. Kawamura, K. Suehara, T. Kameoka, A. Hashimoto; Characteristics of Combined vacuum freeze drying and high frequency dielectric heating of a food model. *Proc. of 20th IDS (Gifu, August 7–10, 2016)*, C-4–5 (2016).
- 17) A. Hashimoto, K. Suehara, T. Kameoka, K. Kawamura; Effects of assistance of high frequency dielectric and infrared heating on vacuum freeze drying characteristics of food model. *Proc. of 21th IDS (València, September 11–14, 2018)*, pp. 795–802 (2018).
- 18) S. Kameoka, S. Isoda, A. Hashimoto, R. Ito, S. Miyamoto, G. Wada, N. Watanabe, T. Yamakami, K. Suzuki, T. Kameoka; Wireless sensor network for growth environment measurement and multi-band optical sensing to diagnose tree vigor, *Sensors*, **17**, 966 (2017).

引用 URL

- i) https://www.caa.go.jp/policies/policy/food_labeling/about_foods_with_function_claims/pdf/150810_2.pdf (Feb. 18, 2019).
- ii) <http://www.aggateway.org/> (Feb. 18, 2019).

[化学工学 Vol.82, pp.303–306 より転載]