

◇◇◇ 解説記事 ◇◇◇

# AI と光センシング技術を利用した生鮮食品の非破壊品質評価

牧野 義雄

香川短期大学 生活文化学科

## はじめに

光を対象物に照射し、反射あるいは透過した光量を計測することにより、対象物に関する情報を得る、いわゆる光センシングは、地球環境の観測から電子部品の細かな傷の検出まで、あらゆる分野で応用されている、極めて汎用性の高い技術である [1]。最大の特徴は、非破壊かつ迅速なデータ取得が可能である点である。本稿では、光センシングと人工知能 (AI) を利用した様々な生鮮食品の品質評価法に関する研究成果を紹介する。

### 1. 光センシング法と人工知能 (AI) の関係

光センシングに必要なハードウェアの基本構成は、光源、分光器または光学フィルター、光センサーである。これらの光学部品には様々な種類があり、対象物質を計測するために必要な光波長 (範囲) を特定し、S/N 比を最大限向上させることを考慮して、適切な構成を選択する。

得られたデータの処理は PC を用いて解析されるが、その手法は千差万別である。例えば、近赤外分光分析であれば、統計解析により分光吸収スペクトルから物質濃度を推定する計算式を構築する。線形モデルであれば重回帰分析や部分最小二乗重回帰分析 (PLSR) などの手法が用いられ、ニューラルネットワーク (ANNs) のような非線形モデル化手法が用いられることもある。また、カメラで撮影した空間情報を併せ持つ光計測データであれば、画像解析が行われる。

人工知能 (AI) は、近年研究が進み、急速に社会への浸透が進んでいる技術であるが、その範疇は曖昧で

ある。従来多変量解析とよばれていた統計解析手法を、最近では機械学習とよぶ場合もあり、従来のニューラルネットワークや急速に応用が進むディープラーニングを含めて AI 技術に含まれると考えられる。

そこで本稿では、光センシング技術の中でも AI 技術と相性の良いビッグデータを得るハイパースペクトルカメラを用いた生鮮食品の非破壊品質評価について紹介する。ハイパースペクトルカメラは従前から、主に森林などのリモートセンシングに利用されてきたが [2]、近年、室内において様々な食品品質の非破壊評価に利用する研究例も増大している [3]。本稿では、著者らが行ってきた研究例を中心に紹介したい。

### 2. ハイパースペクトルカメラによる生鮮食品の非破壊品質評価

#### 2.1 ハイパースペクトルカメラの概要

ハイパースペクトルカメラとは、1 画素ごとに分光吸収/反射スペクトルを格納したデータセットを取得可能な特殊な撮影装置であり [3]、カメラというよりはむしろ、分光光度計に近い特徴を持つ。基本的にはラインセンサーであるため、撮影対象物またはカメラ自身を移動させることにより、面状の空間情報をもつデータを得る。

著者が所属していた研究室で使用していたシステムの概要を図 1 に示す [4]。2 種類の光源を備え、キセノンランプは可視領域、タングステンハロゲンランプは

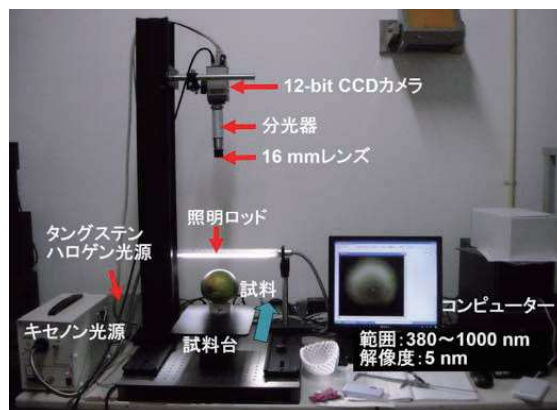


図1 ハイパースペクトルカメラの概要

#### 著者略歴

牧野義雄 (Yoshio MAKINO)

1986年 香川大学農学部食品学科卒業

同年 香川県庁入庁、農業試験場、食品試験場、発酵食品試験場、産業技術センター等に配属

2004年 東京大学大学院農学生命科学研究科 講師

2007年 同 准教授

2021年 香川短期大学生活文化学科 教授

〒769-0201 香川県綾歌郡宇多津町浜一番丁10番地

E-mail: makino\_y@kjc.ac.jp

近赤外領域において、それぞれ強い光を照射する特徴があり、広い波長範囲において正確なデータ計測が可能である。試料から反射した光はレンズと  $80 \mu\text{m}$  幅のスリットを通過した後、透過型回折格子により  $400 \sim 1,000 \text{ nm}$  の波長に分解される。その後、シリコン半導体検出器で受光された光は光電効果により電気信号に変換され、「空間(縦)×空間(横)×波長(nm)×光強度」の4次元データとしてPCに記録される。なお、当該光検出器は12-bitの性能で、光の強弱を4,096 階調の精度で判別可能である。

## 2.2 農産物への応用

ハイパースペクトル画像(HSI)は1点計測の分光分析結果を二次元空間に拡大したものと解釈できることから、分光分析と同様の非破壊検査に応用することが可能である。リンゴ、イチゴ、モモの糖度(可溶性固形分濃度)測定や傷検出、キュウリの低温障害の検出に応用した研究例が報告されている[5]。マンゴー果実の等級は、果皮に占める鮮紅色の割合に基づいて決定される[6]。鮮紅色は植物色素「アントシアニン」に由来することから、著者らは、果皮中のアントシアニン濃度をPLSRで推定する方法について検討した[4]。アントシアニン濃度は、交差検証相関係数0.88、交差検証平均二乗誤差  $2.96 \text{ mg} \cdot 100\text{g f.w.}^{-1}$  の精度で予測可能であった(図2)。

青果物の衛生管理における応用例についても、近年いくつかの研究例が報告されている。Siripatrawan, Makino et al. [7] はANNsモデルを用い、ホウレンソウを汚染した *Escherichia coli* (Migula 1895) Castellani and Chalmers 1919 の数を決定係数 ( $R^2$ ) 0.97、予測最小二乗誤差 (RMSEP)  $0.038 \text{ log CFU} \cdot \text{g}^{-1}$  の精度で予測した。予測モデルに基づき、ホウレンソウ葉表面における *E. coli* の空間分布の可視化についても可能にした

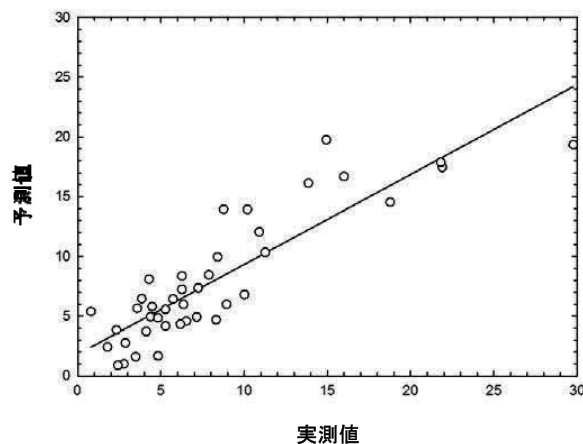


図2 部分最小二乗回帰分析によるマンゴー果皮に含まれるアントシアニン濃度 ( $\text{mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$ ) の予測結果

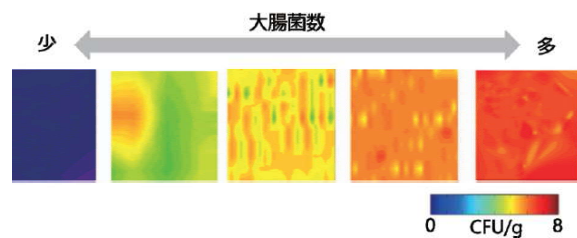


図3 ハイパースペクトルカメラを利用したホウレンソウ葉上大腸菌増殖の可視化

(図3)。Siripatrawan and Makino [8] はPLSRを用い、玄米に増殖した *Aspergillus oryzae* (Ahlburg) Cohn, 1884 の数を  $R^2$  0.97, RMSEP  $0.39 \text{ log CFU} \cdot \text{g}^{-1}$  の精度で予測した。

## 2.3 畜水産物への応用

ダブリン大学の研究チームを中心に、食肉の品質評価へのハイパースペクトルカメラの応用研究が活発に行われている。様々な具材が散りばめられているピザを撮影し、スペクトル形状の違いから、肉、チーズ、基材(パン)などを分類するデモンストレーションが行われたほか、牛、豚、鶏、魚の脂質、水分、塩分の空間分布を可視化した例が紹介されている[5]。

食肉の衛生状態の可視化にも利用され、牛肉[9]、豚肉[10]、鶏肉[11]の一般生菌数の空間分布の可視化に関する研究例が報告されている。

その後、内容成分の可視化機能に着目し、食肉偽装の判別への応用についていくつか研究が行なわれている。牛ミンチ肉に馬ミンチ肉を2~50%の割合で混合したパテを調整し、撮影したHSIを機械学習モデル(PLSR)に入力して混合割合の空間分布を可視化した例[12]を図4に示す。肉眼での観察に近いデジタルカメラで撮影した画像(上段)では、馬肉の混合状況を把握することは不可能である一方、HSI画像に基づき混合率を可視化すれば(下段)、牛肉の偽装を容易に見破ることが可能になる。なお、予測精度は  $R^2$  0.98, RMSEP 2.2%であった。豚ミンチ肉の牛ミンチ肉への混合についても調べられ、予測精度は  $R^2$  0.95, RMSEP 1.955% [13]、鶏ミンチ肉の牛ミンチ肉への混合の予測精度は  $R^2$  0.99, RMSEP 1.79% [14]であった。

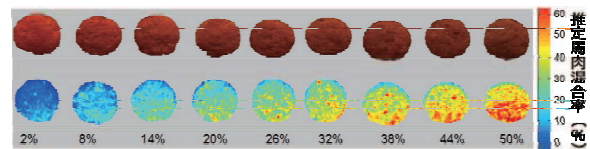


図4 擬似カラー画像(上段)および馬肉混合率のハイパースペクトル可視化画像(下段)  
下部の値は牛肉への馬肉の実際の混合率

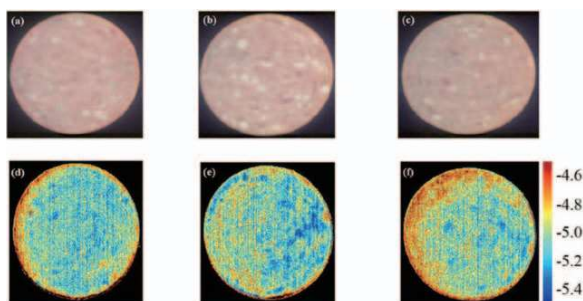


図5 ウィンナーソーセージに含まれるアデノシン5'-三リン酸 (ATP) 濃度分布の可視化  
擬似カラー画像 (上段) およびハイパースペクトル可視化画像 (下段)  
Group I (a,d) : 1 d, Group II (b,e) : 3 d, Group III (c, f) : 5 d 貯蔵 (いずれも 35°C)  
平均値 ( $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) ; Group I : 実測  $-5.09 \log$ , 推定  $-5.04 \log$  ; Group II : 実測  $-5.07 \log$ , 推定  $-5.03 \log$  ; Group III : 実測  $-4.99 \log$ , 推定  $-4.94 \log$

## 2.4 畜産加工品への応用

スライスソーセージを研究対象とし、ハイパースペクトルカメラで撮影した二次元分光分析データをAIに入力し、スライスソーセージの鮮度や腐敗の指標となるアデノシン5'-三リン酸(ATP)濃度分布を非破壊予測するシステムの開発を試みた。試料を35°C、相対湿度15%で5d貯蔵し、経時的に分光分析とATP測定を行った。ATP濃度は経時的に増加する傾向がみられたことから、貯蔵中における品質低下は、鮮度低下によるATP濃度減少よりも腐敗によるATP増加の方が優勢であることが明らかになった。さらにAIで予測を試みたところ、 $R^2$  0.86以上、RMSEP  $0.14 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下の精度でATP濃度を予測可能であった[15]。

## おわりに

光センシングにより得られたビッグデータは主として多変量解析あるいは機械学習とよばれる統計的手法で解析され、生鮮物の内部・外観品質の定量や濃度分布の可視化に利用されてきた。現在のAIでは、ディープラーニングとよばれる多層化されたニューラルネットワークなどによって駆動されるシステムが急増し、車の自動運転、医療画像診断補助などの分野で威力を発揮している[16]。食品分野においても応用研究が進んでいることから[17]、今後は複雑で精度の高い予測モデルが考案され、PC性能の強化にも後押しされて、一層高精度の予測技術が進展して行くものと期待したい。

## 謝 辞

本報告の一部は科学研究費補助金(基盤研究A)研

究課題番号25252045,(基盤研究B)研究課題番号21380155,15KT0026,(特別研究員奨励費)研究課題番号08F08441,13F03395,16F16104,日本学術振興会二国間交流事業(インドネシアとの共同研究)の支援を受けて行った。

## 参 考 文 献

- 1) 宮尾巨, 白水俊次, 中川靖夫; “光センシング工学”, (株)日本理工出版会, 1995.
- 2) A. F. H. Goetz, G. Vane, J. E. Solomon, B. N. Rock; Imaging spectrometry for earth remote sensing. *Science*, **228**, 1147-1153 (1985).
- 3) B. Park, R. Lu; “Hyperspectral Imaging Technology in Food and Agriculture”, Springer Science + Business Media LLC, 2015, pp. 3-403
- 4) Y. Makino, A. Isami, T. Suhara, K. Goto, S. Oshita, Y. Kawagoe, S. Kuroki, Y. A. Purwanto, U. Ahmad, Sutrisno; Nondestructive evaluation of anthocyanin concentration and soluble solid content at the vine and blossom ends of green mature mangoes during storage by hyperspectral spectroscopy. *Food Sci. Technol. Res.*, **21**, 59-65 (2015).
- 5) G. Elmasry, M. Kamruzzaman, D. W. Sun, P. Allen; Principles and applications of hyperspectral imaging in quality evaluation of agro-food products: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, **52**, 999-1023 (2012).
- 6) 菊池香, 平良英三, 中村哲也, “沖縄におけるマンゴー産地の課題と展望”, 農林統計出版(株), 2011.
- 7) U. Siripatrawan, Y. Makino, Y. Kawagoe, S. Oshita; Rapid detection of Escherichia coli contamination in packaged fresh spinach using hyperspectral imaging. *Talanta*, **85**, 276-281 (2011).
- 8) U. Siripatrawan, Y. Makino; Monitoring fungal growth on brown rice grains using rapid and non-destructive hyperspectral imaging. *Int. J. Food Microbiol.* **199**, 93-100 (2015).
- 9) Y. Peng, J. Zhang, W. Wang, Y. Li, J. Wu, H. Huang, X. Gao, W. Jiang; Potential prediction of the microbial spoilage of beef using spatially resolved hyperspectral scattering profiles. *J. Food Eng.*, **102**, 163-169 (2011).
- 10) W. Wang, Y. Peng, H. Huang, J. Wu; Application of hyperspectral imaging technique for the detection of total viable bacteria count in pork. *Sens. Lett.*, **9**, 1024-1030 (2011).
- 11) Y. Z. Feng, D. W. Sun, Determination of total viable count (TVC) in chicken breast fillets by near-infrared hyperspectral imaging and spectroscopic transforms. *Talanta*, **105**, 244-249 (2013).
- 12) M. Kamruzzaman, Y. Makino, S. Oshita, S. Liu; Assessment of visible near-infrared hyperspectral imaging as a tool for

- detection of horsemeat adulteration in minced beef. *Food Bioprocess Technol.*, **8**, 1054–1062 (2015).
- 13) M. Kamruzzaman, Y. Makino, S. Oshita; Hyperspectral imaging in tandem with multivariate analysis and image processing for non-invasive detection and visualization of pork adulteration in minced beef. *Anal. Method.*, **7**, 7496–7502 (2015).
- 14) M. Kamruzzaman, Y. Makino, S. Oshita; Rapid and non-destructive detection of chicken adulteration in minced beef using visible near-infrared hyperspectral imaging and machine learning. *J. Food Eng.*, **170**, 8–15 (2016).
- 15) C. H. Feng, Y. Makino, M. Yoshimura, F. J. Rodríguez-Pulido; Estimation of adenosine triphosphate content in ready-to-eat sausages with different storage days, using hyperspectral imaging coupled with R statistics. *Food Chem.*, **264**, 419–426 (2018).
- 16) 山下隆義；“ディープラーニング”，(株)講談社，2016.
- 17) L. Zhou, C. Zhang, F. Liu, Z. Qiu, Y. He; Application of deep learning in food: A review. *Comprehensive Rev. Food Sci. Food Safety*, **18**, 1793–1811 (2019).