



農業および環境分野における IR イメージング

橋 本 篤, 亀 岡 孝 治

1 はじめに

赤外分光分析は、化学構造を解析する最も重要な分析法の一つであり、バイオ、医療、食品、工業材料、エレクトロニクス、エネルギーなどのきわめて広範囲な分野で用いられている。赤外分光法が食品成分などの分析に用いられた初期の例として、1967年のBiggsによる分散型分光器を用いた牛乳中の乳脂肪、タンパク質、ラクトースの定量に関する研究¹⁾がある。それぞれの成分の帰属波長には、乳脂肪でエステル結合中のカルボニル基の吸収である 1745 cm^{-1} 、タンパク質でペプチド結合の吸収である 1548 cm^{-1} 、ラクトースで糖分子水酸基の吸収である 1042 cm^{-1} が採用され、これらは現在 AOAC によって承認された赤外牛乳成分分析の基準波長²⁾となっている。この後、フーリエ変換赤外分光法 (FT-IR) と全反射吸収法 (ATR) の普及により、生物・食品分野での研究が急速に展開した。さらに、顕微赤外分光法の進展とコンピュータの廉価化に伴い画像解析が容易となり、赤外分光によるイメージング (IR イメージング) がさまざまな分野において多岐の目的に応用されるようになった。

IR イメージングとは、測定位置を一次元 (線分析) または二次元 (面分析) 的に変化させ、各測定ポイントの赤外スペクトルもしくはそこから抽出した官能基の振動情報を並べ、可視化して (画像として) 表示することである。したがって、IR イメージングは、赤外分光情報を基に試料成分の分子振動情報を非破壊的にとらえる手法であり、材料分析を始めさまざまな分野で大きく発展してきた。たとえば、顕微赤外分光法を利用した IR イメージングは、自動車材料を始め各種工業材料の塗装・接着分野全般の技術開発研究において採用されている。そして、IR イメージングは、非破壊的性質とその情報量の多さから、材料、医学、食品などの分野における応用が試みられ、それらの分野においてなくてはならない手法として現在の地位を確立してきた。

たとえば、我々が日常的に食品として摂取している農産物の IR イメージングを例に考えてみる。農産物の主要な味覚成分や栄養成分である糖・酸類の赤外分光情報^{3)~9)}と、それらに基づくイメージング^{10)~13)}に関する研究がある。これらは、農作物栽培管理情報や品質評価指標^{14)~18)}として重要である。ま

た、農産物の栽培現場である農場のリモートセンシング情報は、農産物生産情報や栽培現場の環境情報^{19,20)}として、さらによりグローバルな環境情報^{21)~23)}としての意味を有している。

IR イメージングの原理とさまざまな分野への応用については、これまでも優れた総説などが多い^{24)~35)}。ここでは、生物分野、とくに食品・農業・環境分野における分光計測およびイメージング研究の重要性を簡単に説明し、その上で IR イメージング研究の最近 5 年間の進歩を中心に述べる。

2 顕微 (ミクロ) イメージング

FT-IR と顕微鏡を組み合わせる用いられる顕微 FT-IR は、短時間で広範囲な面分析が行え、また可視イメージと IR イメージを対比することにより、微小部の FT-IR マッピングが可能となる。そのため、生体組織や細胞などの変異の観測や食品中に含まれる異物の分析に関する顕微 FT-IR イメージングの研究が活発に行われている。

Mossoba らは、顕微 IR イメージング法を用いた迅速な細菌の同定法の構築を試みた³⁶⁾。彼らは、炭水化物とリン酸エステルの吸収帯がある $1200\sim960\text{ cm}^{-1}$ 間の面積強度の二次元および三次元分布に及ぼす細菌懸濁液滴下量の影響を解析し、測定条件の最適化を図った。そして、得られた分光イメージング情報をクラスタ解析することにより、8 種の細菌群を判別することができた。また、Miyazawa らは、近赤外 (NIR) 域におけるイメージング情報を用い、自然環境下および食品加工プロセスプラント中における微生物の迅速な検出法を提示した³⁷⁾。これらの研究は、学術的意味を有するだけでなく、細菌をはじめとする微生物による食中毒や感染症が社会問題となっている今日において、食品・飲料やそれらの生産工程の衛生管理手法としての応用も期待される技術である。さらに、微生物以外の細胞を対象とし、細胞内成分変化についての興味深い研究報告も多々ある^{38)~40)}。

食・農・環境分野における計測、とくに光学的手法を用いた計測では、計測精度をある程度犠牲にしても簡易かつ迅速な現場対応型の手法が求められる場合が多々ある。Baranska らは、ラマン分光法と FT-IR 法を併用し、ユーカリ葉中のエッセンシャルオイルの分析方法を構築した⁴¹⁾。 652 cm^{-1} におけるラマン強度に基づき、ユーカリ葉中のエッセンシャルオイル分布を二次元表示した結果は、ガスクロマトグラフィーによる定量値とも良好に一致した。

Infrared Spectroscopic Imaging Studies Related to Agricultural and Environmental.

3 マクロイメージング

マクロなイメージング情報は、我々が目にしたり触れたりするのはほぼ同等のオーダーのスケールの情報である。Kazarianらは、生体、食品、薬品などのマクロな分布を理解、解析するために、さまざまなサンプリングアクセサリーを作製し、不均一な物質や固体内における物質移動の解析を目的とし、マクロイメージングに関する研究を行った^{42)~44)}。不均一高分子混合材料への水蒸気収着現象を把握するために、透過型のFT-IRイメージング用サンプリングアクセサリーを作製した⁴²⁾。試料室内の温度・湿度を制御することにより、試料への水分収着過程における二次元計測が可能になった。1240, 1540, 3700~3100 cm⁻¹のスペクトルピーク情報を用いてポリエチレングリコール、グリセオフルビン、水のキャラクタリゼーションを行った。Kazarianらのアプローチはモデル系を対象としたものが多いが、実験手法やその結果は、不均質さや主要成分分布がその品質と密接にかかわっている食品・農産物を対象とした計測においても非常に有益である。

一方、実際の植物や食品・農産物を対象とした研究でも興味深い進展がある。Chaerleらは、タバコとアラビドピシスの葉の熱画像を可視画像と対比させることにより、バクテリオオプシン遺伝子を導入したタバコ葉の細胞の過程について研究した⁴⁵⁾。その結果、死細胞部分の温度が健全細胞部分より温度が低下していく過程が観察できた。農作物の栽培管理・制御において、Chaerleらの成果はきわめて価値のあるものと考えられる。

食品としての農産物の品質、とくに味覚関連情報とそのIRスペクトル情報との関連性に関する研究も著しい進展がみられる。Sugiyamaは、従来一つの受光部によるポイント測定であった近赤外分光法を二次元・三次元計測に拡張し、CCDカメラの各画素を分光器の受光部として扱うことにより、874 nmと902 nmのスクロースの吸収ピークを用い、NIR分光イメージングによるメロンの糖度分布の可視化を試みた¹⁴⁾。CCDカメラの各ピクセルで取得した分光情報を解析することにより、メロン果肉表面の糖分情報として提示することができた。また、Ishizawaらは、FT-NIRスペクトル測定およびNIR画像測定をトマトへ適用し、熟度が異なるトマトの対比較法による官能検査を実施した¹⁶⁾。その際、各形容語に対して、「どちともいえない」を0点とし、「最も〜でない」から「最も〜である」を-2〜+2の評点を与える5段階評価法により比較した。実験環境条件は室温25℃、湿度50%RHとした。用いた形容語は、「甘い」、「すっぱい」、「やわらかい」、「みずみずしい」、「歯ざわりが良い」、「舌ざわりが良い」、「あっさりする」、「味が濃い」、「おいしい」の9語であった。その結果、NIRスペクトル情報と、従来熟練者の目視で評価されてきたトマトの熟度がクロロフィル量や糖という植物の生育に関連するパラメーターで評価できることが示された。

さらに、近年、さまざまな観点からセキュリティに関する関心が急速に強まっており、生体識別技術の一つとしてIRイメージングの活用が試みられている。Chenらは、人の顔の可視画像と熱画像を併用し、顔のイメージング情報から人の識別を可能とした⁴⁶⁾。この成果は、セキュリティ技術のみなら

ず、さまざまな生体識別技術としての応用も考えられる。

以上のように、マクロIRイメージング情報は、食品や農産物の品質・味などといった特性や、農作物栽培管理・制御情報などのように、我々の生活に密着した情報と関連しており、食・農・環境分野におけるIRイメージング技術として中心的な役割を果たすものと考えられる。

4 二次元リモートセンシング

湿地の環境を守っていくという国際条約であるラムサール条約において、湿地目録に最適なりモートセンシングデータ取得方法の一つとして、IRイメージングが取り上げられている⁴⁷⁾。このように、リモートセンシング技術としてのイメージングは、環境計測とその維持・保全に欠かせない手法となっている。

Asnerらは、火山からの溶岩の流失とその広がりに応じて多湿多雨地域、乾燥地域、火山帯などさまざまな自然環境を呈するハワイ島(Big Island)を対象として、生態系分布およびその展開・変化過程を解析することを目的とし、NASAが開発した可視・赤外画像分光器(AVIRIS⁴⁸⁾)を用いたハワイ島のIRイメージングデータの取得・解析を行った⁴⁹⁾。そして、さまざまな自然環境下における生態系に関する研究にIRイメージングを中心とした分光画像計測法が有効であることを実証した。また、Smithらは、アフリカのサバンナの森林火災の影響を把握するため、森林火災のモデル実験を行い、その温度変化や植物、土壌の火災前後における分光特性などという基礎知見を蓄積し、NIRイメージングを利用したリモートセンシングの有効性を示した⁵⁰⁾。

一方、IRイメージング情報を農作物の栽培や環境計測に有効利用するためには、フィールドレベルにおける植物や土壌などといった各対象物の分光データ、つまりグランドトゥルース(ground truth:地上での実測値)データとの関係性をきちんと把握しておくことがきわめて重要な因子となる。たとえば、Harrisらは、地表のコケ類のNIRスペクトルに及ぼす水分ストレスの影響に関して、水分や葉緑素の分光情報に基づき詳細に解析し、リモートセンシングを有効に利用するためにグランドトゥルースデータに関する基礎的な研究を行った⁵¹⁾。

以上のように、赤外画像リモートセンシング技術は、農作物栽培の基盤をなしている環境計測に欠かせない技術となっている。ただし、リモートセンシング情報は、農業利用を考える際にきわめて高価なこと、また実用化のためにはグランドトゥルースデータの蓄積が重要であるなど、多くの課題が残されている。

5 おわりに

食・農・環境分野に関連したIRイメージングの最近の展開に関して、顕微(ミクロ)イメージング、マクロイメージング、リモートセンシングというように、IRイメージングのスケールに着目して整理してみた。各スケールにおいては、学術的・実用的価値があり、興味深い進展が多い。

一方、これまで、基礎研究のみならず産業的にあまり利用されることはなく、未開拓電磁波領域とも呼ばれていたテラヘルツ波を利用したイメージング技術の研究・開発が可能となり、

不可視情報の可視化という観点から、そのイメージング研究も世界中で精力的になされている^{52)~56)}。テラヘルツ波イメージングは、電波の物質透過性を有する最短波長域であり、かつ光波の直進性をもつ最長波長であるという点から、これまで困難とされていた食味などのセンシングや、視点の異なった発酵過程のモニタリングなど、食品関連分野においてもテラヘルツ分光技術・イメージング技術の展開が強く期待されている。

今後、顕微(ミクロ)イメージング、マクロイメージング、リモートセンシングの各スケールのIRイメージングに関する成果を結びつける研究、およびIRイメージングとテラヘルツイメージングの特性把握と併用など、食・農・環境分野に関連した分光イメージング研究の新展開が望まれる。

文 献

- 1) D. A. Biggs: *J. Dairy Sci.*, **50**, 799 (1967).
- 2) 日本食品工業学会: “食品分析法, 第3版”, p. 845 (1992) (光琳).
- 3) T. Pan, A. Hashimoto, M. Kanou, K. Nakanishi, T. Kameoka: *Bioprocess Biosyst. Eng.*, **26**, 133 (2003).
- 4) K. Nakanishi, A. Hashimoto, M. Kanou, T. Pan, T. Kameoka: *Appl. Spectrosc.*, **57**, 1510 (2003).
- 5) S. G. Kazarian, K. L. A. Chan, V. Maquet, A. R. Boccacini: *Biomater.*, **25**, 3931 (2004).
- 6) H. Schulz: *Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture*, **44**, 345 (2004).
- 7) W. H. Nosal, D. W. Thompson, L. Yan, S. Sarkar, A. Subramanian, J. A. Woollam: *Colloids Surf. B*, **43**, 131 (2005).
- 8) M. Kanou, K. Nakanishi, A. Hashimoto, T. Kameoka: *Appl. Spectrosc.*, **59**, 885 (2005).
- 9) A. Hashimoto, K. Asada, T. Matsuo, C. Teraura, T. Yamamura, K. Yasui, A. Yamanaka, M. Kanou, T. Kameoka: Proc. of the 7th Asia-Pacific Conference of Biochemical Engineering, p. CUR-06 (2005), Jeju.
- 10) J. Varith, G. M. Hyde, A. L. Baritelle, J. K. Fellman, T. Sattabongkot: *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, **4**, 211 (2003).
- 11) P. M. Mehl, Y.-R. Chen, M. S. Kim, D. E. Chan: *J. Food Eng.*, **61**, 67 (2004).
- 12) E. N. C. Mills, M. L. Parker, N. Wellner, G. Toole, K. Feeney, P. R. Shewry: *J. Cereal Sci.*, **41**, 193 (2005).
- 13) 都 甲洙, 薦 瑞樹, 杉山純一, 上野茂昭, 相良泰行: 日本冷凍空調学会論文集, **22**, 195 (2005).
- 14) J. Sugiyama: *J. Agric. Food Chem.*, **47**, 2715 (1999).
- 15) M. Tsuta, J. Sugiyama, Y. Sagara: *J. Agric. Food Chem.*, **50**, 48 (2002).
- 16) H. Ishizawa, M. Takeuchi, T. Nishimatsu, E. Toba: Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, p. 3-6 (2002), Anchorage.
- 17) H. Ishizawa, K. Miyamoto, T. Nishimatsu, E. Toba, M. Kamijou, S. Tsuchiya: Proceedings of the 20th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, p. 27-30 (2003), Vail.
- 18) T. K. Raab, J. P. Vogel: *Infrared Phys. Technol.*, **45**, 393 (2004).
- 19) M. Zhang, Z. Qin, X. Liu, S. L. Ustin: *Intl. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.*, **4**, 295 (2003).
- 20) G. S. Okin, T. H. Painter: *Remote Sens. Environ.*, **89**, 272 (2004).
- 21) R. Latifovic, Z.-L. Zhu, J. Cihlar, C. Giri, I. Olthof: *Remote Sens. Environ.*, **89**, 116 (2004).
- 22) X. Xiao, S. Boles, J. Liu, D. Zhuang, S. Frolking, C. Li, W. Salas, B. Moore III: *Remote Sens. Environ.*, **95**, 480 (2005).
- 23) A. Jung, P. Kardeván, L. Tökei: *Phys. Chem. Earth*, **30**, 255 (2005).
- 24) C. M. Snively, J. L. Koenig: *Appl. Spectrosc.*, **53**, 1700 (1999).
- 25) C. M. Snively, S. Katzenberger, G. Oskarsdottir, J. Lauterbach: *Opt. Lett.*, **24**, 1841 (1999).
- 26) R. Bhargava, S.-Q. Wang, J. L. Koenig: *Appl. Spectrosc.*, **54**, 1690 (2000).
- 27) R. Salzer, G. Steiner, H. H. Mantsch, J. Mansfield, E. N. Lewis: *Fresenius J. Anal. Chem.*, **366**, 712 (2000).
- 28) R. Bhargava, D. C. Fernandez, M. D. Schaeberle, I. W. Levin: *Appl. Spectrosc.*, **55**, 1580 (2001).
- 29) R. Bhargava, I. W. Levin: *Anal. Chem.*, **73**, 5157 (2001).
- 30) J. L. Koenig, S.-Q. Wang, R. Bhargava: *Anal. Chem.*, **73**, 360 (2001).
- 31) S. W. Huffman, R. Bhargava, I. W. Levin: *Appl. Spectrosc.*, **56**, 965 (2002).
- 32) C. Coutts-Lendon, J. L. Koenig: *Appl. Spectrosc.*, **59**, 717 (2005).
- 33) K. Gough, M. Rak, A. Bookatz, M. C. Bigio, S. Mai, D. Westaway: *Vib. Spectrosc.*, **38**, 133 (2005).
- 34) I. W. Levin, R. Bhargava: *Annual Rev. Phys. Chem.*, **56**, 429 (2005).
- 35) C. D. Tran: *Anal. Lett.*, **38**, 735 (2005).
- 36) M. M. Mossoba, S. F. Al-Khaldi, J. Kirkwood, F. S. Fry, J. Sedman, A. A. Ismail: *Vib. Spectrosc.*, **38**, 229 (2005).
- 37) K. Miyazawa, K. Kobayashi, S. Nakauchi, A. Hiraishi: *Image Anal.*, **3540**, 419 (2005).
- 38) Q. Wang, A. Kretlow, M. Beekes, D. Naumann, L. Miller: *Vib. Spectrosc.*, **38**, 61 (2005).
- 39) Q. Wang, W. Sanad, L. M. Miller, A. Voigt, K. Klingel, R. Kandolf, K. Stangl, G. Baumann: *Vib. Spectrosc.*, **38**, 217 (2005).
- 40) F. Stracke, I. Rieman, K. König: *J. Photochem. Photobiol.*, **B 81**, 136 (2005).
- 41) M. Baranska, H. Schulz, S. Reitzenstein, U. Uhlemann, M. A. Strehle, H. Kruger, R. Quilitzsch, W. Foley, J. Popp: *Biopolymers*, **78**, 237 (2005).
- 42) K. L. A. Chan, S. G. Kazarian: *Vib. Spectrosc.*, **35**, 45 (2004).
- 43) S. G. Kazarian, K. L. A. Chan: *Macromolecules*, **37**, 579 (2004).
- 44) A. Gupper, S. G. Kazarian: *Macromolecules*, **38**, 2327 (2005).
- 45) L. Chaerle, F. de Boever, M. van Montagu, D. van der Straeten: *Plant Cell Environ.*, **24**, 15 (2001).
- 46) X. Chen, P. J. Flynn, K. W. Bowyer: *Comput. Vision Image Understanding*, **99**, 332 (2005).
- 47) 環境省: ラムサール条約第8回締約国会議の記録 (<http://www.env.go.jp/nature/ramsar/08/0406.pdf>).
- 48) R. O. Green, M. L. Eastwood, C. M. Sarture, T. G. Chrien, M. Aronsson, B. J. Chippendale, J. A. Faust, B. E. Pavri, C. J. Chovit, M. Solis, M. R. Olah, O. Williams: *Remote Sens. Environ.*, **65**, 227 (1998).
- 49) G. P. Asner, A. J. Elmore, R. F. Hughes, A. S. Warner, P. M. Vitousek: *Remote Sens. Environ.*, **96**, 497 (2005).
- 50) A. M. S. Smith, M. J. Wooster, N. A. Drake, F. M. Dipotso, M. J. Falkowski, A. T. Hudak: *Remote Sens. Environ.*, **97**, 92 (2005).

橋本 篤 (Atsushi HASHIMOTO)

三重大学大学院生物資源学研究所 (〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577)。東京農工大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。<現在の研究テーマ>植物・農産物(食品)の蛍光X線・UV・VIS・IR・THz 分光解析。
E-mail: hasimoto@bio.mie-u.ac.jp



亀岡孝治 (Takaharu KAMEOKA)

三重大学 (〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577)。東京大学大学院農学系研究科博士課程修了。農学博士。<現在の研究テーマ>食品工学, 農業情報工学, 生物化学工学に関連した研究。
E-mail: kameoka@mie-u.ac.jp



- 51) A. Harris, R. G. Bryant, A. J. Baird : *Remote Sens. Environ.*, **97**, 371 (2005).
- 52) 阪井清美 : 分光研究, **50**, 261 (2001).
- 53) M. Nagel, P. H. Bolivar, M. Brucherseifer, H. Kurz : *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 154 (2002).
- 54) 川瀬晃道, 伊藤弘昌 : 日本放射線技術学会雑誌, **58**, 441 (2002).
- 55) Y. Watanabe, K. Kawase, T. Ikari, H. Ito, Y. Ishikawa, M. Minamide : *Opt. Commun.*, **234**, 125 (2004).
- 56) 川瀬晃道, 渡部裕輝, 小川雄一, 伊藤弘昌 : 電学論 C, **124**, 1339 (2004).
-