

進化する赤外イメージング技術



川口 俊一

1 はじめに

近年、浜松ホトニクスがInGaAsを使った様々な光デバイスの販売を開始した。InGaAsは、0.5 μm から 2.6 μm の範囲で光センシングすることができる素子である。この素子は非常に安価でリソグラフで加工することができるため、フォトダイオードアレイや光増感素子、イメージングカメラ用素子として活用できる。赤外イメージングカメラの検出可能な波長領域は遠赤外線領域(8 μm 以上)にまで達していることから、これまで計測するのが困難だった遠赤外線検出器としての応用や指紋領域を含む中赤外線領域(2.5 μm から 8 μm)でのイメージングも可能になった。これまで、赤外イメージングといえば、監視カメラなどに使われている近赤外線領域(780 nm から 2.5 μm)が主流であった。近赤外線領域にはクロロフィルの蛍光波長が存在するため、衛星などに搭載した近赤外線カメラを使って、農地の光合成量をイメージングすることができる。そのため、近赤外線カメラはIoT (internet of things) 農業を支える重要なセンサの一つとして活用されている。分析化学の分野においては、中赤外線領域が使えるようになったことから、赤外分光測定によって同定してきた種々の官能基を持った物質の濃度をイメージングで分析できるようになるため、実験室ではTLC (thin-layer chromatography) やゲル中での電気泳動などの分離技術と組み合わせれば、新しい分析手法を開発することができるだろう。また、非破壊測定であることから環境保全技術や工業生産、医療創薬など様々な分野での新規の分析技術が期待できる。

2 赤外イメージングの原理

1800年にWilliam F. Herschelがプリズムを使った実験で可視領域の外側にある赤外線を発見した。目には見えないが、温度と関係を持った光を赤外線と名付けた。温度とエネルギーの関係はStefan-Boltzmannの式で表され、黒体が放射するエネルギー密度は温度の4乗に比例することが知られている。その最大放射波長はWienの変位則($T\lambda_{\max}=0.2898 \text{ cm K}$)によって簡単に計算することができる。この式から生体温度範囲では放射光が8 μm から 12 μm に変曲点を持つことが示唆される。この領域の放射光を使った遠赤外線イメージングがサーモグラフィである。コロナウィルスから人々を守るために大型のショッピングセンターやレストラン、イベント会場などでは、この赤外イメージングが大いに活用

されている。

赤外光が物体に入射されると物体は回転エネルギーとして吸収され、物体の温度が上昇する。また、入射光の一部は透過光や反射光として物体から放出される。そのとき、物体固有の回転エネルギーの振動数分の光が指紋として記録されている。赤外イメージングで得られる信号の入射光は反射光+放射光+透過光である。そのため、赤外イメージングで特定の物質を定量するためには、いくつかの補正が必要となる。

一番大きな補正項目は放射光である。物体の温度を遠赤外線領域でイメージングさせて、物体の温度を決めて、得られた画像から減算する必要がある。この放射エネルギーは上述したStefan-Boltzmannの式で見積もることができる。ただし、物体が鏡面になっていたり、黒色をしていたりすると、放射率が大きく変わることが知られている。放射率が高い物質ほど、赤外イメージングに大きな影響を与える。したがって、赤外イメージングは可視光カメラと異なり、得られた信号をそのまま使うことはできない。さらにMEMS (micro electro mechanical systems) で作られたマイクロメートルスケールで設計された素子はそれぞれゲイン・オフセットが異なるため、はじめにそれぞれの素子ごとに補正係数を求めなければならない。さらに、温度による放射光の影響は被写体からの放射光だけではなく、カメラ筐体(きょうたい)内部からの放射光、素子そのものの放射光、レンズからの放射光も減算しなければならない。そこで、はじめに黒体面の撮影を行い、標準偏差をとってオフセット画像を得るといった補正が必要となる。

さらに、被写体の放射光を補正しなければならず、異なる温度でキャリブレーションして、正しい温度計測のために、線形補正もしくは n 次曲線補正が必要となる。

赤外光の指紋領域を使ったイメージングを行う場合には、レンズにバンドパスフィルターなどを固定して特定波長の画像を取得する。最近の赤外領域のフィルターはZnSやカルコゲナイドなどを使った安価なフィルターが市場にあり、以前のような高額なダイヤモンドフィルターなどを使う必要がなくなった。

3 赤外イメージングの実用化

赤外分光測定は1942年にBeckman社が赤外分光装置IR-1を発売し、その後、PerkinElmerが分散型赤外分光装置を一般向けに販売した。赤外の信号は可視光に比べてノイズが入りやすいため、1960年後半以降はフーリエ変換型赤外分光装置が市場のほとんどを占めるようになった。

従来の顕微赤外イメージングには透過法と反射法による測定方法がある。透過法では、クリアなイメージング像を得ることができ、また低いS/N (signal-to-noise ratio) 比のスペクトルを得ることができる。この手法の課題は光を透過させる必要があるため、試料を薄く切断する必要がある。またこの切片の厚さの勾配によって透過光強度が変わってくるため、定量測定には不向きである。また、この透過光は屈折や散乱の影響を受けるため、分析手法として活用するには難しい。しかし、パルスオキシメーターではこの問題を解決させて、赤外光を入射させて、指先の血管中を流れる赤血球中のヘモグロビンと結合した酸素濃度を計測するのに活用している。

一方で、反射法では、レーザーの焦点をフォーカスで調整して全反射させてイメージングを行う。従来の検出方式では二次元アレイ検出器を使ってきたが、MEMSの技術を用いた新しいアレイの配置方法が開発されている。この改良により、測定時間が大きく短縮され、測定範囲も広く設定し、なおかつ高解像度で赤外イメージン

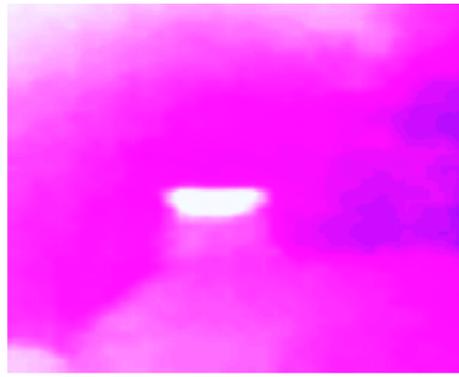
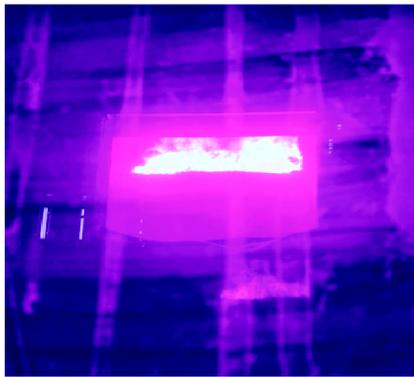


図1 焼却炉の炉内の通常の写真(右図)と開発中の水分量赤外イメージングで得られた炉内の水蒸気流出の様子(左図) 共に同じスケールで撮影したもの

ができるようになる。

Thermo Fisher Scientific は、顕微ラマン・顕微 FT-IR (Fourier transform infrared spectroscopy) を組み合わせたシステムを開発し、新しいラマン・赤外イメージングの技術を発表した¹⁾。彼らは、デモンストレーションとして、環境中に存在するマイクロプラスチックの分析を行った。海洋中のマイクロプラスチックは環境問題の一つとしてよく知られているが、大気環境中にも広く分布している。このマイクロプラスチックを草食動物(反芻(はんすう)動物)が摂取すると消化器官から肉や内臓に移動して蓄積される恐れがある。さらに日本人の多くは消化器官も直接食べる文化があることから、この問題は食文化にとって非常に懸念される問題である。Thermo Fisher Scientific のイメージングシステムを使った顕微観察では、試料中に点在する 10 μm 程度のマイクロプラスチックの分布をイメージングするだけでなく、それぞれのマイクロプラスチック粒子の FT-IR RAS (Fourier transform infrared reflection absorption spectroscopy) スペクトルとラマンスペクトルを同時に得ることができるため、その粒子を構成するプラスチック材料を同定することが可能である。

微小領域のイメージングと組成解析が同時に行えることは医療分野にも応用が期待できる。島津製作所は、近赤外光を利用したイメージング装置(製品名: SPEED-NIRS)を医学分野に提供している²⁾。パルスオキシメーターと同様に近赤外光を使って毛細血管中の酸素化ヘモグロビンをイメージングする方法により、脳の活動状態をリアルタイムにマッピングすることができる。近赤外光の特徴は、可視光では光の強度が 10% に減衰するのに 1 mm 以下であるのに対して、数 cm の深さまで進むことができることである。そこで、光ファイバーを人間の頭部に多点で接触させて強力な近赤外線を入射させて、光電子増倍管で受光して電気信号へと変換する。検出器と送光器はマイクロアレイで交互に配置させている。得られた信号は Modified Lambert-Beer 則によって酸素化ヘモグロビン量へと変換する。このようにして得られた信号を二次元アレイに配置させて、マッピング=イメージングを行う。脳卒中や脳梗塞によって生じた高次脳機能障害は脳内血管の損傷によるものであるが、リハビリテーションによって運動麻痺や感覚障害などの機能障害を改善させることができる。このとき、脳内の酸素化ヘモグロビン量をイメージングで観察していれば、リハビリテーションの方法論に基づいて、効果的な機能回復が期待できる。

4 工業への応用事例

赤外光を使ったイメージング技術は工業分野にも大き

な進歩をもたらす可能性を秘めている。産総研の研究では、コンクリートの劣化診断に応用できる可能性が報告されている³⁾。波長が 1410 nm のイメージングでコンクリートの中性化の度合いが診断できるし、1750 nm 付近では硫酸劣化の度合いがわかる。また、2266 nm 付近の赤外イメージングでは塩分量を定量することができる。この技術を実用化することができれば、遠隔から短時間のうちに上述した項目をイメージングすることができ、インフラの維持管理に大いに役立つことになるだろう。

工業生産現場でも赤外イメージングによる物質移動のモニタリングへの応用が期待できる。著者らが測定した焼却炉内の水蒸気(水分量)のイメージングの一例を紹介する(図1)。可視光のカメラには放射された光と反射光による光しか映像では捉えられていないが、赤外イメージングでは、炉から滝のように流れ出てくる水蒸気の動画を得ることができた。同様にして、赤外光を使ったイメージングによって、焼却炉から生じる様々なガス種が移動している動画を取得することが期待されている。

5 おわりに

コロナウイルスによる感染予防として、赤外イメージング技術が広く普及することになった。そのため、赤外イメージング装置の価格が大幅に下落することとなった。安価に手に入ることができるようになった赤外イメージング装置は、今後、分析化学の分野に大きく貢献していくことと期待している。

文 献

- 1) FT-IR・ラマンを用いたマイクロプラスチックの分析, Thermofisher Scientific, <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Application-Notes/an-081-ftir-microplastics-analysis-an081-ja.pdf> (2020年11月1日確認)。
- 2) 近赤外イメージング装置, 島津製作所, <https://www.med.shimadzu.co.jp/application/other/index2.html> (2020年11月1日確認)。
- 3) 高感度近赤外分光を用いたインフラの遠隔診断技術の研究開発, SIP 戦略的イノベーション創造プログラム, JST <https://www.jst.go.jp/sip/event/k07/20141105/www/pdf/5-2.pdf> (2020年11月1日確認)。

川口俊一 (Toshikazu KAWAGUCHI)

北海道大学大学院国際食資源学院/地球環境科学研究科 (〒080-0810 北海道札幌市北区北 10 条西 5 丁目)。北海道大学大学院地球環境科学研究科修士・博士課程修了。博士(地球環境)。《現在の研究テーマ》ナノ制御界面を用いたセンシングデバイスの開発。《趣味》最新の科学技術、フィールドワーク(天文や犬とのジョギングなど)。

E-mail: t_kawa@ees.hokudai.ac.jp