

フォトダイオードはリンゴと地球を救う

アブデル・K・ルバルカバ・ペレス、グンター・シー、フォルカー・ベーム、
アンドレアス・トゥンナーマン

食品ロスおよび食品廃棄は人類と地球にとって深刻な問題だが、低コストのセンサを活用すれば、バリューチェーン全体にわたり果実の品質評価が可能となる。

食品廃棄物は深刻な世界的問題だが、多くの人が想像している以上に深刻な状況であり、その規模は拡大の一途をたどっている。

最近の調査によると、「2014年には、人間が消費するために生産された食品のおよそ3分の1から4分の1がロスまたは廃棄された」ことが判明した⁽¹⁾。一般的に、「ロス」は生産、輸送、加工過程での損失を指し、「廃棄」は小売店や家庭で捨てられた食品を指す。

科学者らが121カ国のデータを精査した結果、2004年のデータと比較して、食品ロスおよび食品廃棄物 (FLW) が24%増加していることが判明した。北米では、FLWは一人当たり毎日約3ポンド (約1.4kg) に達する。米国環境保護庁 (EPA) の推計によると、2019年には、食品廃棄物の約60%に相当する約4000万トンが埋立地で処分さ

れたとのことだ⁽²⁾。

この状況は、環境に関する重大な問題を提起している。有機物がすべて腐敗した場合、どのくらいの温室効果ガスが排出されるのだろうか。前述の研究では、当著者らは米国の温室効果ガス排出量の3.9%がFLWに起因すると計算している。

世界全体で見ると、これは4.4%、すなわち二酸化炭素 (CO₂) 換算で18億トンに相当し、日本やブラジルが2015年に排出した量を上回る⁽³⁾。

フォトダイオードが解決策に

本稿の著者らは、フォトニクス技術によってこの問題に対処できないかと考え、研究対象として、誰もが知っている果物であるリンゴに着目した。独イエナの科学者とエンジニアらが研究チームを結成した。そのメンバーには、

ams OSRAMグループの子会社であるams Sensors Germany社 (ams Sensors Germany GmbH) のセンサの専門家、フリードリヒ・シラー大 (Friedrich Schiller University) の食品科学者、フラウンホーファー応用光学・精密工学研究所 (Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering: フラウンホーファー IOF) の所長らが含まれる。

FLWは世界的かつ多面的な問題であり、その一部は果物生産における損失であるため、当科学者らはリンゴ生産について詳しく調査するべく地元のリンゴ農園に着目した。目標は、最適な収穫時期を検知するセンシング技術を見出すことだった。というのは、果物生産や品質において収穫時期が決定的な影響を与えており、その期間はわずか1週間であるためだ。

センシングの専門家らの科学的アプローチは、まず果実の分光特性を詳細に測定することだった。次に、大規模展開が可能なセンサ技術を見出す必要があった。リンゴの成熟度を測定するための第一条件は、非侵襲的な方法を用いることだった。これは、実験室では検査対象物を消費せずに済むように、資源を大量に消費する検査を回避するためだ。

科学者らは、2023年の生育期に、ガラ、ピロル、グラヴェンシュタイナーの3品種のリンゴに対して単一点反射率測定を行った。開花期 (第1週) から第18週までのガラ種リンゴの反射率測定の結果を図1に示す。ガラ種リンゴには400~1300nmの波長範囲の分



光計を使用した。異なる時期や複数サンプルのスペクトルを比較するため、NIR (近赤外) 領域での正規化帯域基準として、生育期間を通じて値が安定している800nmの波長帯域を選択した。

我々消費者は、リンゴを緑色、黄色、赤色として見ている(図2)。科学的な視点から見ると、これらの色のほとんどは、カロテノイド、アントシアニン、クロロフィルといった特定の色素の変化や発現過程に関連しており、これらの色素はそれぞれ480、550、670nmの波長の光を最も強く反射する。測定されたスペクトルから、成熟過程における色素の変化を捉えることができた。NIR領域およびSWIR(短波長赤外)領域のスペクトル特性を使用して、炭化水素化合物(C-H)、水分子(H₂O)のスペクトル指紋を識別できた。

スペクトル特性の経時の変化は、植物およびその構成要素の発育段階と、以下のように関連している(図3)。

- ・12週目までの3つのVIS(可視)帯域の増加は、クロロフィルの分解に関連している可能性があり、18週目には670nmで最小値を示す。
- ・アントシアニンは15週目から現れ始め、18週目まで、550nm付近で吸収量が減少する谷を形成する。
- ・アントシアニンの変化と並行して、カロテノイドにおいて15週目に、480nm付近で吸収量が増加し、吸収帯域を形成する。
- ・12週目までデンプンの蓄積に伴い、H₂OおよびC-Hにおいて970nm～1190nm付近で吸収帯域を形成する。
- ・15週目以降は、デンプンの減少に伴い、H₂OおよびC-Hにおいて1154nm～1190nm付近の吸収帯域が縮小し始める。

この結果から、重要な結論が導き出される。反射率測定は果物の成熟過程

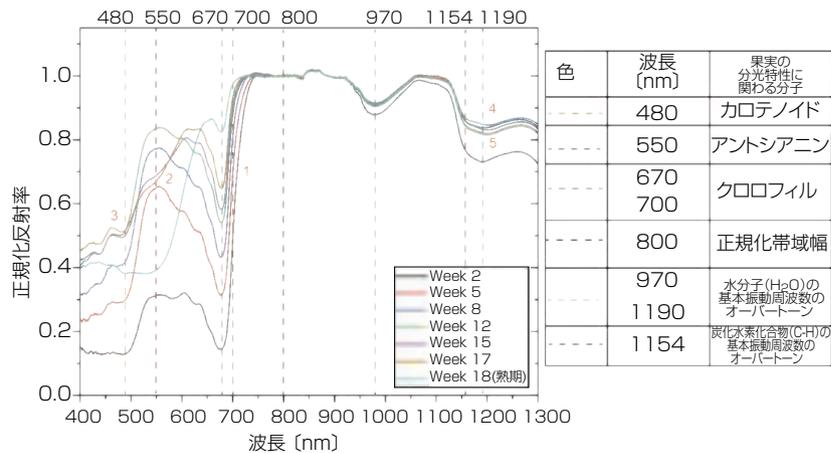


図1 ガラ種リンゴの分光測定(左)は、開花後2週目(開花から1週間後)からリンゴが熟す18週目まで行われた。この進化に関連するラインと波長帯域が同定されている(右)



図2 リンゴの成熟過程の写真

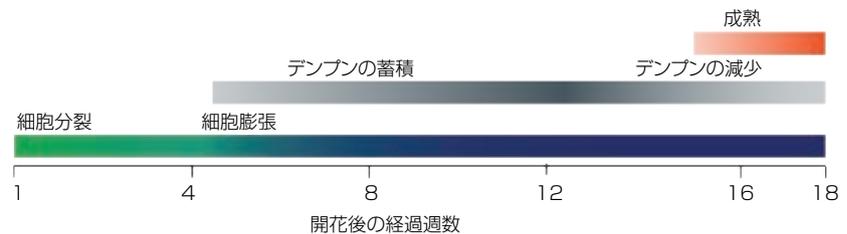


図3 成熟過程ではいくつかの生理学的プロセスが発生するが、そのほとんどは果実色素の反射率の変化と水分子(H₂O)および炭化水素化合物(C-H)の振動に関連している

を詳細に示している。これにより、収穫の適切なタイミングを予測し、完熟する前に収穫を行うことで、収穫後の熟成も含め、最適に貯蔵できるようになるのだ。スペクトルの観点から見ると、VIS領域には3つの異なるスペクトル帯域があり、これらが成熟状態の判定に有用になる。さらに、SWIR領域には2つの帯域があり、この判定を裏付ける。ただし、スペクトル特性の変化過程はリンゴの品種ごとに異なる

ため、成熟過程のスペクトル特性は品種ごとに個別に判定する必要がある。

低コストのソリューション

現在、さまざまなリンゴ品種のスペクトルデータをまだ評価中である。しかし、スペクトル特性に基づいて、カスタマイズされたセンサを構成することが可能だ。

ams OSRAMグループのセンサ部門は、すでにこのようなカラー測定シス

テムを開発している。同グループ製「AS7341」カラーセンサシリーズのセンサユニットは、11種類のフォトダイオードを用いたカラーセンシング機能を搭載しており、スペクトルフィルタ(干渉コーティング)を通して光を測定する。

同ユニットのセンサは、350～700nmの波長範囲と、IR(赤外)領域の1点のチャンネルに対応するように設計されており、モジュール上の2つの発光ダイオード(LED)が測定用光源として機能する。そのうち主要なLEDは広帯域の冷白色タイプ(6500K)であり、380～780nmの波長範囲を持つ。NIRセンシングの追加も可能である(図4)。6台の積分型アナログ・デジタル・コンバータ(ADC)が、フォトダイオードからの光エネルギーを同時に測定して加算する。光測定モジュールの重量はわずか数グラムで、-40～85°Cの温度範囲で動作する。

今後の展望

2023年の生育期における3品種のリンゴのスペクトル特性の測定により、スペクトル測定によって成熟段階を判定できることが判明した。この判定には、3種類の色素に基づくスペクトル帯域を使用している。そのため、確立されたフォトダイオード技術に基づくセンサ・ソリューション技術を提案している。大規模生産に移行するには、カラーフィルタにわずかな変更を加えるだけで済む。

このようなソリューション技術は果実の品種ごとにカスタマイズする必要があるが、垂直的にも水平的にも拡張できるため、リンゴの品質についてバリューチェーン全体でのモニタリングが可能になる。バリューチェーンには、取り扱い、貯蔵、加工、マーケティング

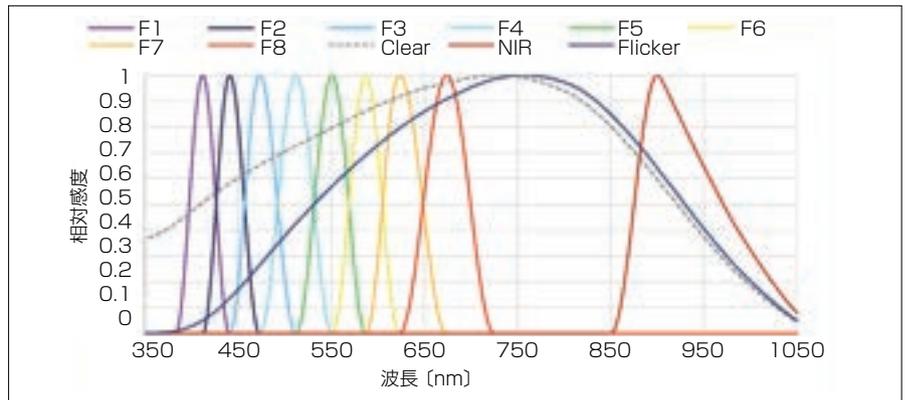


図4 ams OSRAMグループ製「AS7341」スペクトルカラーセンサの画像。センサパッケージ(左下)、センサのCAD組立図(右下)、NIRを含む各チャンネルにおけるセンサの正規化された感度特性(上部)。(画像提供:ams OSRAMグループ)

グも含まれる。さらに、他の果物にも同様の方法で試験できるだろう。この構想は(当筆頭著者の)博士論文から派生したものであり、持続可能なソリューション技術に不可欠な2つの要素を結びつけている。それは、科学的分光測定と産業用センサ技術である。

このセンシングの概念は、さらに有望な将来性を秘めている。現在、センサプラットフォームはインチサイズの

モジュールに組み込まれているが、さらなる小型化と統合が可能になる。最近のタブレットやスマートフォンに搭載されているライダー(LiDAR)モジュールのように、このセンサも家電製品に組み込むことができる。そうなれば、このような分光技術は、専門的なサプライチェーンの枠を超えて使用範囲が広がり、最終消費者の手に渡ることになるだろう。

参考文献

- (1) A. Gatto and M. Chepeliev, Nat. Food, 5, 136-147 (2024); <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00915-6>.
- (2) See www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/food-material-specific-data.
- (3) See https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023.

著者紹介

アブデル・K・ルバルカバ・ベレス (Abdel K. Ruvalcaba Perez) は、ams OSRAM グループの研究開発部門の光学システム・エンジニアであり、フリードリヒ・シラー大の物理学博士課程の学生、グンター・シース (Gunter Siess) は、同グループの主任エキスパート・エンジニアであり、システムおよびモジュール研究開発部門の主要エキスパート、フォルカー・ベーム (Volker Böhm) は、フリードリヒ・シラー大の食品化学の教授、アンドレアス・トゥンナーマン (Andreas Tünnemann) は、フラウンホーファー応用光学・精密工学研究所(フラウンホーファー IOF)の所長。(上記組織はすべて、独イエナに所在。) e-mail: andreas.tuennemann@iof.fraunhofer.de