食品分野におけるレーザーの利用

魚 住 純*

Application of Laser in Food Science and Industry

Jun UOZUMI*

* Research Institute of Applied Electricity, Hokkaido University,
N-12 W-6, Sapporo, Hokkaido 060

近年、食品の非破壊品質評価への関心が高まりつつあり、光、電磁気、力学、放射線など、さまざまなエネルギーを用いた計測法の適用が試みられている¹⁾²⁾。そのなかでも、光エネルギーを用いる方法は、人間の視覚に最も関連が深いことから、色、形、光沢などの外観の計測、吸光あるいは蛍光分光法による成分分析、屈折率や濁度による濃度の測定などに古くから用いられ、食品の非破壊品質評価法の中心的役割を担ってきた。

一方、現代の光計測技術は、エレクトロニクスや材料・素子技術の発展によって、より小型化、高速化、高精度化するとともに、食品や生体系などのより複雑な系へとその計測対象を広げつつある。この光計測技術を支える優れた光源として、レーザーは大きな役割を果たしている。すなわち、レーザーの出現により、従来にない、明るくコヒーレントな光がもたらされ、それまで机上の理論に留まっていた多くの計測法や、全く新しい原理に基づく計測法が実用化されると同時に、その強力なエネルギーを利用した、光による加工技術にも新しい道が開かれた。

食品科学や食品工業の分野においても、非破壊品質評価のための計測技術を中心にレーザー利用の試みが増えており、効率的な加工のための光源としても、次第に注目されるようになってきた³⁾⁴⁾。本稿では、食品分野における計測および加工へのレーザーの応用について、公表された研究報告などをもとに、その光学的原理を踏まえながら解説する。

レーザーの性質

食品への応用について述べる前に、レーザー光の性質に

ついて簡単に解説する。通常我々の目に入る、太陽、電灯、蛍光灯、LEDなどの光（以下、通常光と呼ぶ）は、光源を構成する物質中の分子、原子あるいは電子などが、互いに無関係に、ランダムに光子を放出（自然放出）することによって生じている。これに対しレーザーでは、これら無数のミクロな光源からの光子の放出を、人為的に制御する（誘導放出）ことによって、位相のそろったきれいな光を発生させている。LASER-Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation（放射の誘導放出による光の増幅）とは、この発光のメカニズムを表す言葉であるが、一般には、この現象を利用した光の発振器（すなわちレーザー装置）を指す場合が多い。このような発光メカニズムにより生まれるレーザー光は、次のような特性を備えている。

(1)空間的コヒーレンス 少々荒っぽい例えであるが、光を水面の波に例えると、レーザー光は、静かな水面に1本の棒あるいは一枚の板を入れ、それを上下に周期的に振動させたときに生じる波に似ており、空間的に一定した位相関係を保ちながら伝播する。この特性を空間的コヒーレンスと呼ぶが、このような波では、干渉によって生じる干渉縞が、時間的・空間的に一定して現れ、はっきりと視認されるという特徴がある。このため、光路中の物体によって進路を曲げられた光の間の干渉として生じる回折あるいは散乱パターンも、物体の特徴を反映した明瞭なものとなる。また、レーザー光が示す良好な集光性や、ビームの広がり小さいことも、この空間的なコヒーレンスの良さに起因している。

これに対して、通常光は、水面に多くの石をでたらめ

* 北海道大学応用電気研究所（〒060 札幌市北区北12条西6丁目）

に投げ入れたときに生じる乱れた波のように、その位相は、空間的にも時間的にもランダムに変動しており、一定した干渉縞は観測できず、回折及び散乱パターンも不明瞭なものとなる。

(2) 時間的コヒーレンス これは、スペクトルの純粋性(すなわち単色性)と言い替えてよく、これもまた、干渉性の良さに寄与している。

これら2つのコヒーレンスは、程度の差はあれ、ほとんどのレーザ光が備える特性であり、レーザの示すさまざまな性質も、結局はこの2つのコヒーレンスに還元されるものが多い。また、レーザによっては、出力の極めて高いものや、極めて短いパルスで発振するものがあり、レーザ技術の応用性を一層広いものにしていく。図1に、光の一般的性質とレーザ光に特有の性質、および、それらが計測・加工へおよぼす効果について簡単にまとめた。レーザには、特性の異なる多くの種類があるが、個々のレーザの特徴とその応用例等については、他の解説^{3)5)~7)}や成書^{8)~10)}を参考にしていきたい。本稿では、便宜上、食品への応用を、図1に示した性質に従って分類した。

計測への応用

1. 平行性・集光性

レーザ発振器(特にガスレーザなど)から出るレーザ光は、そのままでも細く(典型的な He-Ne レーザで、0.5~数 mm)、ほぼ平行なビームであるが、レンズなどを用いて、ビームの太さと発散角を自由に変えることができる。ほぼ平行なビームを凸レンズを用いて集光させる場合、レンズの焦点位置におけるスポットの半径 w

は、近似的に、 $w = f\lambda / (\pi w_0)$ となる。ただし、 f はレンズの焦点距離、 λ はレーザ光の波長、 w_0 はレンズに入射するビームの半径である。したがって、 f と w_0 を調節することで、 w を自由に設定できる。ただし、最小限界は波長程度である。

レーザ光の平行性や集光性は、比較的均一な物体の表面や、透明な物体の内部に存在する異物や欠陥などの検出に利用される。検出の感度は、物体を照射するビームのスポットの径に左右されるが、スポットを小さくすると、焦点領域の許容範囲が狭くなるため、表面の凹凸が大きい物体には、あまり小さなスポットサイズは適さない。

このような原理に基づき、鶏卵殻の割れを検査する装置が開発されている¹¹⁾。この装置では、鶏卵全体をレーザビームで走査できる特殊な光学系を用いることで、幅 50 μm 程度以上の割れの有無を、毎時 3 000 個の速度で検査できる。

とうもろこしの粒に損傷があると、貯蔵中に微生物に冒されやすいうえ、乾燥などの処理工程の妨げともなる。個々のとうもろこし粒の表面をレーザビームで走査し、その反射光の強度を測定することにより、表皮の裂け、表皮の一部欠損、胚乳の一部欠損、粒の破壊などの損傷の種類と程度を同時に判定することが試みられている(図2)。GUNASEKARAN¹²⁾によれば、1 mW He-Ne レーザを用い、直径約 18 μm のスポットで照射した場合、検出可能な最小の欠陥幅は 0.1 mm ほどで、損傷の検出率は、損傷の種類にもよるが、およそ 80~100% である。

空き瓶あるいは透明な飲料を充填した瓶の傷、ひび、

図1 レーザ光の性質と、計測および加工におけるその効果

図 2 トウモロコシ粒からのレーザー反射光¹²⁾

(a) 正常な粒, (b) 一部欠損のある粒, (c) 裂けのある粒

混入異物などの検査装置にも、同様の原理が用いられる^{13)~16)}。図 3 は空き瓶検査装置の光学系の一例¹⁵⁾で、ポリゴンミラー、固定ミラーなどを組み合わせることにより、直径約 1mm の He-Ne レーザのビームで、空瓶をさまざまな角度からくまなく走査、照射している。

図 3 空き瓶検査装置の光学系¹⁵⁾

レーザーによる透明容器の検査は、毎時数万本の性能に達しており、疲労度の大きい従来の眼視による方法に取って代わろうとしている¹⁶⁾。

培地上のバクテリアコロニーの計数にも、光の散乱が利用されている。これは、スパイラルプレーティング法により培養したコロニーを、レーザービームでシャーレの周辺から中心へ向かって螺旋状に走査し、コロニーによる光の散乱を検出、計数する方法で、この方法による計数値は、眼視による計数値と高い相関を示すことが報告されている¹⁷⁾¹⁸⁾。

2. 回折

物体に光を照射したときに、その透過光あるいは反射光中に現れるパターンを回折パターンと呼ぶ。照射光がレーザー光のようなコヒーレントな光の場合、物体から十分離れた領域、あるいは凸レンズの焦点領域に生じる回折パターン（ファークフィールドパターンと呼ぶ）には、物体の光学的透過率（位相変化を含む複素透過率）の空間的フーリエ変換が含まれている（図 4）。フーリエ変換とその逆変換は、数学的にも物理的にも簡明な性質をもち、回折パターンから、もとの物体の構造的特徴を簡単な関係式を用いて推定できることが多い。これは、物体の巨視的および微視的構造の非接触計測という観点から極めて重要な性質である。

ファークフィールドパターンの広がり、その原因となる物体の大きさに反比例する。この関係を利用して、粉末微粒子や、液体中の懸濁微粒子の粒径計測が行われている。レーザーを用いた粒径計測には、他の原理による方法もいくつかあるが、食品の分野においては、この回折を利用した方法が多く用いられる。例えば、トマトペー

図 4 光学的フーリエ変換

- (a) レンズを用いない場合 (自由空間)
 (b) レンズを用いる場合
 (c) 周期性物体のフーリエ変換

ストやトマトケチャップの品質パラメータとして重要な WIS (Water Insoluble Solid) の粒径は、数 μm から 1 mm 程度までの広範囲にわたるが、測定レンジ 3.3 ~ 300 μm および 33 ~ 1000 μm の 2 つの市販の測定装置を用いてこのレンジをほぼカバーできる¹⁹⁾。レーザ回折法は、従来のコールターカウンタを用いる方法と異なり、液体中だけでなく、気体中の微粒子にも適用できることから、小麦粉などの粉体の粒径計測にも適している²⁰⁾。

物体が周期構造を持つ場合には、そのフーリエ変換にも周期構造が現れ、その周期 T は対象物の周期 T_0 に反比例する ($T = R\lambda / (\pi T_0)$, 図 4 参照)。この性質を応用したものに、畜肉の筋節 (サルコメアー隣合う Z 膜の間隔) の長さの測定がある。筋節の長さは肉の柔らかさとの相関が高く、その迅速な測定は肉質の評価において重要であるが、筋繊維は筋節を単位とする周期構造を示すことから、筋節の長さの測定に、この回折の原理が応用できる。通常は、油浸顕微鏡に位相差法などを併用し、個々の筋節の長さを眼視により多数計数し、その平均値を計算する方法が用いられるが、レーザ回折法に

よる測定値は、顕微鏡法による測定値との相関が高く (0.95 以上)、一つの回折像がすでに多くの筋節の回折像を平均したものになっているために、測定精度が向上するとともに、測定時間が大幅に短縮できる²¹⁾²²⁾。

3. 散乱

光の散乱には多くの種類があるが、ここでは、液体中の微粒子によるランダムな回折現象による散乱について述べる。なお、1. 平行性・集光性の項で述べた応用例は、物体表面あるいは内部の巨視的な構造による散乱を利用した計測法と考えることができる。

液体に入射したレーザビームが、懸濁する微粒子によって散乱される度合を測定することにより、微粒子に関連するさまざまな特性を推定することができる。粒子密度が低く、個々の粒子からの散乱光を判別できる場合には、2. 回折の項で述べたように、粒子の粒径分布を求めることができる。しかし、目的によっては、測定した散乱光強度を直接粒径分布に結びつけず、浮遊する微粒子の粒径に関連する他の特性との相関を論じることも多い。

ワイン²³⁾ およびコーラ²⁴⁾ 中の微粒子による散乱の強度を、散乱角の関数として測定し、飲料の品質判定に適用しようという試みがある (図 5)。米国のあるカリフォルニアワインメーカーでは、散乱パターンをラベルに印刷して販売し、消費者が好みのワインを選ぶ際の参考に供しているという²⁵⁾。また、同様の測定法が、家畜体内の残留薬物の測定を目的として、家畜のミルク、血清、尿、胆汁などに適用されている²⁶⁾。

ビールの懸濁度の測定にも、He-Ne レーザが応用されており、従来法に比べて測定の再現性が著しく向上するという²⁷⁾。

液体中の微粒子や高分子による散乱光強度を光子計数

図 5 各種コーラのレーザ散乱パターン²⁴⁾

法により測定し、その時間的な揺らぎの自己相関関数から、微粒子や高分子の大きさや分子量、あるいは分子の形状などの情報を得る方法は光子相関分光法とよばれる。最近では微粒子だけではなく、食品のテクスチャモディファイアとして重要なカラゲナンゲルなどのゲル状高分子の物性の測定も試みられている²⁸⁾。

4. 干渉

上述の回折や散乱を利用する方法は、間接的にはレーザー光の干渉性の良さを利用したものであるが、レーザー光の干渉をもっと積極的に用いる計測技術は、一般に干渉法と呼ばれる。なかでもホログラフィ干渉法は、不定形な物体の変位、変形あるいは振動などを高精度で測定できるため、工業的に広く用いられており、食品分野においては、温州ミカンのウキ皮の測定に応用した例がある²⁹⁾。

5. 単色性-分光計測

スペクトル幅が狭く、明るいというレーザー光の特性は、特定の波長のみを用いる吸光分光分析や蛍光分析の光源として好ましいものである。しかし、ほとんどのレーザーでは、発振波長が固定されており、連続スペクトルを得ることはできず、波長を連続的に変えられる色素レーザーは、高価であるなどの理由から、その用途は限られる。したがって、赤外・近赤外分光による成分分析のように、高い波長精度を必要とする分光法には、目的とする波長と存在するレーザーの発振波長とが一致しない限り、レーザーはあまり適さない。これに対し、食品の色素などの可視域での吸収は、一般にブロードであり、その吸収範囲内に発振波長を持つ比較的安価なレーザーを見つけることが可能な場合が多い。

(1) 吸光分光

透過率の測定は、従来から広く用いられてきた品質評価法であるが、レーザーを用いることにより、透過率の低い試料の測定が容易になる。例えば、不完全甘ガキの渋判定には、渋カキと脱渋カキとで透過分光特性の異なる 500 nm 前後、および 600 ~ 670 nm 付近の光源が適することから、この条件に適合する Ar⁺ レーザの 515 nm の波長と He-Ne レーザの 633 nm の波長が用いられる³⁰⁾。

食品内部の分光透過率を、表層の影響を受けずに測定するには、測定部位への入射光の導入と、透過光の取り出しに光ファイバを用いる。これは、ドライソーセージの熟成過程におけるソーセージ内部の光の浸透距離の変化の測定に適用されており³¹⁾、光ファイバを注射針内に固定して、試料内部に導入することにより、Ar⁺ レー

図 6 (a) 製造日および (b) 28 日後におけるドライソーセージ内部のレーザー光透過強度の変化³¹⁾

波長 (nm) : Δ -457, $\blacksquare$ -488, $\star$ -514 (以上 Ar⁺ レーザ)
 $\circ$ -625, $\bullet$ -650 (以上色素レーザー)

ザの 457 nm および色素レーザーの 625 nm の波長において、浸透距離の変化が観測されている (図 6)。光ファイバを用いる場合、光ファイバのコアに効率よく光を導入する必要があるが、この点においても、集光性の高いレーザー光は、通常光に比べて遙かに有利である。

(2) 蛍光分光

食品中のマイコトキシンの検出や菌体の計数などに用いられる蛍光分光分析では、レーザーが効率的かつ選択的な励起光源として有効である。蛍光の励起には、通常 Ar⁺ レーザ、He-Cd⁺ レーザ、N₂ レーザなどの青〜紫外領域で発振するレーザーが用いられる。

たとえば、膜フィルタ上に捕集した大腸菌の数を色素レーザーで励起し、その蛍光により自動計数したり³²⁾、酵母中の DNA と蛋白質を Ar⁺ レーザで励起することにより、両成分の同時定量を行い、酵母の生育段階を判定する方法³³⁾ などが開発されている。

マイコトキシンのような微量物質の定量を目的とした HPLC の検出部へのレーザー励起蛍光法の応用も行われている³⁴⁾。

(3) 光音響分光法

光音響分光法 (PAS) は、物体に吸収された光エネルギーの一部が熱に変換され、試料の近傍の気体を膨張させる現象を利用した分光法で、入射光の強度を音響周波数で変調することによって生じる気体の周期的な膨張と収縮を、高感度マイクロフォンにより音として検出する。入射した光エネルギーを、音響エネルギーに変換し

て検出するため、試料による光の散乱の影響を受けにくく、粉体や生体などの強い散乱を伴う物体からも良質なスペクトルが得られるという特徴がある。入射光として、通常光を分光した単色光を用い、波長を連続的に変化させると、通常の吸収スペクトルに相似なものが測定されるが、特定の波長における吸収を求める場合には、レーザー光を用いることで、一層高感度な測定が可能となる。

粉末コーヒー中の偽和物（コーヒー豆の殻、トウモロコシ、大麦などを炒ったもの）の混入率の検出に、レーザー励起光音響分光法を応用した例があり³⁵⁾、1 t の圧力で錠剤状に圧縮成形した試料をセルに入れ、Ar⁺ レーザおよび Kr⁺ レーザ（458, 488, 515, 647 nm）による PAS 信号を検出することにより、混入率 1% 程度までの検出性能が得られている。

加工への応用

1. 高エネルギー性・高光子密度性

Ar⁺ レーザ、CO₂ レーザ、YAG レーザ、エキシマレーザなどの高出力レーザは、物理的（切断、穿孔、加熱）、生物学的（殺菌）あるいは化学的（化学反応）処理などの加工処理に適している。これらの処理技術は、医学や一般の工業分野において広く応用されつつあるが、食品分野においては、適用例は少ない。その理由は、レーザのエネルギー変換効率が低く、他の技術と比べてコスト的に不利であることが大きい。このため、食品分野でのレーザ加工は、他に適当な方法がない、特殊な用途に限られよう。

レーザによる物理的処理の応用例として、ナッツ類の硬い殻の切断³⁶⁾や、カキ貝の除殻を目的とした貝柱付着部位の局所加熱³⁷⁾があり、いずれにも、CO₂ レーザが用いられている。

He-Cd⁺ レーザ、N₂ レーザ、エキシマレーザ、Ar⁺ レーザなどの青から紫外にかけて発振するレーザは、強い殺菌力を持っている。牛乳の殺菌には、N₂ レーザ及び Ar⁺ レーザが有効であり、熱処理したものに比べて透過スペクトルの変化が少ないうえ、官能検査の結果でも香、味、色に有意な変化が認められないという報告がある³⁸⁾。

また、紫外域の光は分子の結合を切断するほどのエネルギーを持っており、殺菌の外にも、化学反応への応用が期待できる。特に、エキシマレーザなどの高出力レーザでは、弱い光では起こりにくい 2 光子吸収を高効率で起こすことができ、化学工業における選択的かつ高効率な物質合成のための有力な手段として、活発な研究が進

められている⁷⁾³⁹⁾⁴⁰⁾。

エキシマレーザによる化学合成の例としては、メタンの酸化によるメタノールの生成（F₂ レーザ）や、7-DHC からのビタミン D 前駆体の生成（KrF レーザ + N₂ レーザ）、カルボン酸アンモニウム塩からのアミノ酸の生成（Nd⁺ : YAG レーザ）などがある。食品工業への応用性は、未だ未知数であるが、今後の研究が期待される。

おわりに

食品分野におけるレーザの応用は始まったばかりであり、本稿で述べた応用も、実験の段階を越えないものが多い。特に、実用技術として確立したものは、本稿でも触れた食品容器の欠陥検出装置のほか、食品容器・王冠などへのレーザ印字（マーキング）など、食品工業の周辺技術が主であり、直接食品を対象にした計測や加工技術はまだないといってよい。レーザ応用技術の普及には、小型・軽量で制御のしやすいレーザが必要であるが、この条件を満たす半導体レーザの短波長化が現在進んでおり、室温で連続発振する赤色半導体レーザも開発されている。また、従来の近赤外半導体レーザも高出力化、低価格化してきており、分光分析の光源としての可能性も大きい。レーザの半導体化により、光ファイバ、小型レンズなどのマイクロブティクスとの組合せによる光計測システムの小型化・高信頼化が期待できることから、食品の分野においても、計測技術を中心に、レーザ光の利用が活発になるものと思われる。

文 献

- 1) 岩元睦夫・魚住 純：油化学，**32**，112 (1983)。
- 2) 魚住 純：ワークショップ「食品工業における非破壊計測法」講演要旨集，1，日本食品工業学会 (1985)。
- 3) 魚住 純：新しい食品加工技術（第 6 章），工業技術会 (1986)。
- 4) 魚住 純：計装，**30** (5)，29 (1987)。
- 5) 松岡 徹：*O plus E*，No. 52，66 (1984)。
- 6) 相木國男：*O plus E*，No. 51，89 (1984)。
- 7) 村原正隆・豊田浩一：*O plus E*，No. 45，102 (1983)。
- 8) 田幸敏治・大井みさほ：レーザ入門，共立出版 (1985)。
- 9) 稲場文男他編：レーザハンドブック，朝倉書店 (1973)。
- 10) 田幸敏治他編：光学的測定ハンドブック，朝倉書店 (1981)。
- 11) Bol, J.: Quality of Eggs. Proceeding of the First European Symposium.

- 12) GUNASEKARAN, S.: *Transaction of ASAE*, **29**, 294 (1986).
- 13) 斎藤寿俊: 食品工業における科学・技術の進歩, 日本食品工業学会編, 光⌘ (1983).
- 14) 藤川敬文: 食品機械装置, No. 10, 75 (1977).
- 15) ZURCHER, Ch.: *Brauwelt*, No. 17, 863 (1985).
- 16) ANON.: *Internat. Bottler Packer*, Jan., 24 (1986).
- 17) KRAMER, J.M., et al.: *European J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **6**, 289 (1979).
- 18) RICHARD, J.: *Science des Aliments*, **2**, 31 (1982).
- 19) GETCHELL, R.N. and SCHLIMME, D.V.: *J. Food Sci.*, **50**, 1495 (1985).
- 20) EVERS, A.D.: *Laboratory Practice*, **31**, 215 (1982).
- 21) CROSS, H.R., et al.: *Meat Science*, **5**, 261 (1981).
- 22) KOOPMEES, P.A., et al.: *Food Microstructure*, **5**, 71 (1986).
- 23) WYATT, P.J.: *Science*, **212**, 1212 (1981).
- 24) WYATT, P.J.: *Appl. Optics*, **21**, 2471 (1981).
- 25) 著者不明: *O plus E*, No. 47, 50 (1983).
- 26) WYATT, P.J., et al.: *J. Agric. Food Chem.*, **24**, 984 (1976).
- 27) MOLL, M., et al.: *J. Am. Soc. Brew. Chem.*, **39**, 15 (1981).
- 28) MORRIS, V.J.: *Progress in Food and Nutrition Science*, vol. 6 (ed. PHILLIPS, G.O., et al., Pergamon Press, 1982), p. 119.
- 29) 大森豊明: *OHM*, **64**, 57 (1977).
- 30) 秋元浩一: 果実日本, **35**, 62 (1980).
- 31) FYHN, P.-G. and SLINDE, E.: *J. Food Sci.*, **50**, 1213 (1985).
- 32) DRAPAEAU, A.J. and LAURENCE, R.A.: *Water Research*, **11**, 937 (1977).
- 33) HUTTER, K.-J. and EIPPEL, H.E.: *European J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **6**, 223 (1979).
- 34) DIEBOLD, G.J., et al.: *Anal. Chem.*, **51**, 67 (1979).
- 35) CESAR, C.L., et al.: *J. Agric. Food Chem.*, **32**, 1355 (1984).
- 36) PATEL, C.K.N.: United States Patent USA 4 358 467 (1982).
- 37) SINGH, G.: *Food Technol.*, Dec., 60 (1972).
- 38) ANTONOV, S.F., et al.: XXI International Dairy Congress. Vol. 1, Book 2, p. 435 (1982).
- 39) 大内秋比古・矢部明: レーザ研究, **13**, 746 (1985).
- 40) 下 紳郎: *O plus E*, No. 80, 59 (1986).

(昭和62年5月25日受理)