微弱発光を用いた食品品質評価に関する研究

菰 原 昌 司*

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所

Development of Food Quality Estimation Methods Using Weak Luminescence

Shoji Hagiwara*

National Food Research Institute, NARO, 2-1-12 Kan-nondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8642

This study was conducted in order to reveal the weak luminescence phenomena, such as spontaneous ultra-weak photon emission, chemiluminescence and Photo-Stimulated Luminescence (PSL), in food materials. Additionally, new food-quality evaluation methods using weak luminescence were developed as screening methods. Spontaneous ultra weak photoemission from potato chips, rice grain and roasted sesame oil were measured using photon counting and imaging techniques. Ultra weak photon emissions from the food materials were related to quality changes. Chemiluminescent reagents have advantages in improving emission levels and enabling functional selectivity, such as toward reactive oxygen species, antioxidants and so on. *Sake* quality and buck wheat antioxidative property could analyze using chemiluminescence. The PSL method provides a rapid and remarkably sensitive technique for identifying irradiated foods that contain minerals, such as spices and dried vegetables. A novel PSL method that detects irradiated foods, based on time-dependent intensity decline, was developed. These weak luminescence techniques might use in quality analysis for food processing and distribution. (Accepted Oct. 3, 2012)

Keywords : spontaneous ultra-weak photon emission, chemiluminescence, Photo-Stimulated Luminescence (PSL), quality, food irradiation

キーワード : 極微弱発光, 化学発光, 光ルミネッセンス (PSL), 品質, 食品照射

1. はじめに

近年, 消費者の食品の安心や信頼に対する関心は高まっており, 遺伝子組み換え (GMO) 食品の検出技術, DNA 判別によるコメの偽品判別技術, 残留農薬やポリ・アクリルアミドの分析などの高精度な分析技術が開発・利用されている。しかしながら, このような高度な分析方法は熟練した技術習得が不可欠であり, 専用の実験施設や高額な分析機器も必要となることから, 流通過程のすべてで分析することは難しい。危害要因や品質を高精度に分析する技術は重要であるが, 「産地」から「消費者」までの品質管理を徹底するには迅速性のある簡易なスクリーニング技術も必要である。スクリーニング技術としては, 測定者の熟練を必要としない機器分析法や簡単な分析キットなどが適している。

人体や植物体の生体反応にともない, 非常に微弱な光「極微弱発光」を生ずる。この極微弱発光は, 光電子増倍管や高感度カメラにより計測することが可能であり, 疾病や喫

煙の有無等により発光量に変化が生じる¹⁾。

食品分野では, 食用油が劣化すると化学発光が増加し, 魚や食肉や米が劣化すると同様に発光が増加すること, さらに油脂に抗酸化剤を添加するとその発光量が減衰すること等から, 油の酸化により発光が生じるものと考えられてきた^{2)~5)}。この発光現象を利用して, 品質劣化を簡易に計測する手法が期待されたが, 油脂の種類で発光量 (発光強度) が異なること, 使用済みの食用油 (揚げ油) に対しては, 調理した食材によって発光挙動が異なるなど, 食品製造現場で利用するには解決すべき課題が残されていた。

食品の清浄度指標として ATP 量を数値化する化学発光法, 食品の機能性を評価する化学発光も食品製造現場で使用されている。自発発光に比べ発光させるために試薬の準備・混合操作を必要とするが, 他の分析方法と比べて非常に簡易であり, 発光試薬の注入は簡単に機械化できるため, 装置化し自動計測することも可能である。

食品や農産物に電子線やガンマ線などの放射線を照射することは, 殺菌, 殺虫, 発芽抑制などに有効な技術の一つであり, 50 カ国以上で認可され実用化が進められている。日本では食品衛生法により馬鈴薯 (ばれいしょ) の発芽抑

〒305-8642 茨城県つくば市観音台 2-1-12

* 連絡先 (Corresponding author), shoji@affrc.go.jp

図1 極微弱発光計数装置の概略 (PMT タイプ)

制のため 150 Gy 以下のガンマ線照射が例外的に認められているが、殺菌や殺虫を目的とした食品への放射線照射は禁止されており、海外で照射処理された食品の輸入も一切認められていない。この殺菌履歴の検知には、熱ルミネッセンスや光ルミネッセンス等の発光法や ESR 法等が使用される^{6)~8)}。熱ルミネッセンス法は、食品素材から発光物となる鉱物を分離し、加熱時の発光プロファイルを計測する方法であり、高精度度であることから、日本国の通知法（公定法）としても用いられる¹⁾ⁱⁱ⁾。しかしながら、鉱物を分離するための前処理は、非常に煩雑であり操作に熟練を要する。一方、光ルミネッセンス法は対象物をそのまま測定できるため、非常に簡易な発光計測法である。ただし、計測に使用できる機器の入手が困難であり、食品毎に判別基準が異なるなどの課題がある。

本研究では、迅速で簡易な品質計測法（スクリーニング法）開発を目的に、自発極微弱発光現象を二次元画像で計測することにより詳細に分析し、発光に関与する要因を解明するとともに、発光計測による品質評価の可能性を検討した。また、発光試薬を添加する化学発光による品質評価や光（励起）ルミネッセンスによる照射食品判別に関しては、極微弱発光計測装置および操作の改良によって品質評価への応用を試みた。

2. 自発極微弱発光計測による食品品質評価

食品分野では、光電子増倍管（PMT）タイプの計数装置を利用した研究がなされ、食用油が劣化に伴い化学発光が増加すること²⁾、食肉や魚が劣化に伴い極微弱発光量が増加すること³⁾、150℃の高温で発光量を計測すると大豆油の劣化度を計測できること⁵⁾、リノール酸に抗酸化剤を添加し発光量の減衰で抗酸化性を評価できること⁹⁾、碎米からの微弱発光がチオバルビツール酸値（Thiobarbituric acid Value, TBA 値）と相関があること¹⁰⁾、等が明らかになり、自発極微弱発光現象は油脂の酸化によるものと考えられてきた。

本研究においては、高感度カメラも用いて二次元画像として対象食品の発光現象を計測し発光部位を明らかにし、

図2 極微弱発光画像計測装置の概略

I, カメラ (VIM カメラ, 浜松ホトニクス); II, レンズ (F=25 mm, f=0.95); III, 恒温チャンバ; IV, 画像処理装置 (ARGUS-20: 浜松ホトニクス); V, コントローラ。

周囲の酸素濃度や温度を変化させて発光現象を詳細に分析した。さらに、自発極微弱発光計測の分光が可能な装置を用いて分光データからも発光要因を分析した。

具体的な食品として、ポテトチップス、精米、焙煎ゴマ油を用いて自発極微弱発光の解明および品質評価の可能性を検討した。

(1) 発光計測装置の概要

人間の眼は非常に高感度であり、肉眼の検出限界は 10^{-4} lx（星明かりの夜空の明るさに相当）程度であるが、食品からの自発的に生じる極微弱発光は、 10^{-6} lx 以下の強度であり肉眼で捉えることはできない。これらの微弱光計測には光電子増倍管（Photomultiplier Tube, PMT）を用いた光子カウンティング計測や超高感度カメラ等が用いられる。感度面では、PMT タイプの計数装置が優れている（図1）。PMT タイプでは、対象物からの発光部位に関する位置情報は得られないため、均質に発光が生じる液体や粉体などの計測に適している。一方、高感度カメラでは、各種発光現象の位置情報が明らかになるため、発光メカニズム解明等に有効な計測装置である（図2）。高感度カメラが開発された当初は、大豆の根からのバイオフィトン計測に用いられ、根の先端の細胞分裂の盛んなどところからの発光が生じることが明らかになった¹¹⁾。また、検出感度と発光体までの距離は2乗に反比例する性質があるため、試料と検出器までの距離が短いほど高感度に計測できる。さらに、発光計測は検出限界付近であるため、装置の感度はカメラの感度以外に使用するレンズの明るさ（f 値）も非常に影響する。自発極微弱発光では f 値の小さい明るいレンズを使用する必要があり、本研究では f = 0.95 の高明度のレンズを使用した。

発光波長解析からはその発光種や発光に関与する因子の解明に極めて重要な情報が得られる。しかしながら、PMT や高感度カメラ等の微弱発光計数装置では、光質（波長）までを計測ことはできない。極微弱発光を分光する装置として、PMT 検出器の前にバンドパスフィルターを配

図 3 ポテトチップの極微弱発光現象
(積算時間 30 min, 25℃).

図 4 ポテトチップの自発極微弱発光に及ぼす周囲温度の影響
(積算時間 10 min).

した①フィルター差分-PMT方式、スリットを通った光を分光し高感度カメラで計測する②回折格子-ICCD方式(多波長同時分光方式)がある。フィルター差分方式は感度が良い反面、フィルターを交換しながら測定するため、発光強度が安定しない発光対象には不向きである。後者は同時分光方式であるため、化学発光のように発光の減衰が速い発光現象に適している¹⁾。また近年、③サバール板偏光干渉-フーリエ変換方式が開発され、微弱光を高感度に分光できる装置として期待される¹²⁾。

また、自発極微弱発光現象は、計測前の光照射の影響を受けやすく遅延発光を生じるため、測定装置への試料をセット後、一定時間の暗順化時間を要する。

(2) ポテトチップスからの極微弱発光¹³⁾

ポテトチップスは油脂を含む代表的な食品であり、油脂の酸化による微弱発光の発生が期待できる。本研究では、微弱発光を二次元計測可能な高感度カメラを用いて、劣化時の発光量の変化を計測するとともに、周囲の酸素濃度や温度が発光に及ぼす影響、さらに品質評価の可能性を検討

した。

市販されているポテトチップスはアルミニウム包材で窒素ガス充填包装されているため、貯蔵中の劣化(酸化)が抑制されている。開封した後計測用暗箱に並べられたポテトチップは、酸素と接触し酸化速度が速くなり、自発極微弱発光量も多くなった(図3)。極微弱発光は微弱であり断続的に発生するため、画像処理装置により10~30分積算することで評価画像が得られる。この画像で明るく表示されるところは発光量が多く、暗いところは発光量が少ないことを意味している。測定環境を制御し温度および酸素濃度を変化させると、温度上昇とともに発光量は増加し、酸素濃度を低下させると発光量は減少した(図4, 5)。このことから、ポテトチップからの自発極微弱発光は酸素が必要な化学反応によって生じることが確認された。また、一枚のポテトチップ中には外周より少し内側の部分に黒く褐変している部分があり、極微弱発光もこの褐変した部分から多く発光していた(図3)。ポテトチップの揚げ色は、ジャガイモ中に含まれるアミノ酸と還元糖の化学反応(アミ

図5 周囲酸度濃度がポテトチップの極微弱発光に及ぼす影響
(積算時間 1min, 25℃).

図6 製造後日数の異なる製品からの極微弱発光
開封4時間後の発光状況を比較 (積算時間 30min, 25℃).

ノ・カルボニル反応)の結果生じる褐色物質が影響する。還元糖は果皮から維管束環までは増加し、そこから中央部までは減少するといわれており¹⁴⁾、ポテトチップの着色状況もこの維管束環の分布と一致していた。このことから、還元糖が多く分布している維管束環付近はアミノ・カルボニル反応が盛んになり、生成物(褐変物質)が生じる。この生成物の酸化により極微弱発光が多く生じたと考えられる。ポテトチップスから極微弱発光を二次元画像により計測したことで、発光が油の酸化だけでなく、褐変反応物質も関与することが明らかになった。

さらに、極微弱発光計測による品質計測への応用可能性を検討するため、製造日の異なるポテトチップを計測すると、未開封の賞味期限内のポテトチップであっても、貯蔵中に発光量が減少することが確認された。特に、発光量の減少は製造後1ヶ月以内に極端に少なくなった(図6)。賞味期限内のポテトチップの品質変化は、品質指標となる過酸化価(POV)や酸価(AV)では製造後1ヶ月ではほとんど変化しない。しかしながら、開封し極微弱発光を計測すると製造後日数の差異により明確な違いとして検出できる。このことから、自発極微弱発光計測は、ポテトチップ等の揚げ加工品の初期段階の品質変化の計測に利用できる可能性が示された。

図7 米粒(精米)からの極微弱発光現象
(きらら397, 積算時間 10min, 60℃).

(3) 精米の発光現象¹⁵⁾

赤外分光分析法を用いた食味計の開発により、良食味米のおいしさを食味値で表せるようになった。しかしながら、品質の指標となる脂肪酸度は、有機溶媒による抽出後、水酸化カリウム(KOH)溶液の中和滴定で求められており、分析に約3時間を要する。

米に関しては、金田ら¹⁰⁾が碎米の極微弱発光(化学発光)は貯蔵が長期になると発光量が増加し、チオバルビツール酸(TBA)値と相関があったと報告している。一方、西場らは¹⁶⁾玄米の製粉を劣化させて発光計測すると発光量は減少すると報告しており、貯蔵に伴う発光の変化は明らかになっていなかった。

本研究では、コメの極微弱発光による品質評価の可能性を検討するため、高感度カメラにより画像極微弱発光を計測し、品質変化に伴う発光量の変化を明らかにした。

図7に、米の微弱発光の画像計測結果の一例を示した。米粒からの発光量は一粒ごとに異なっており、通常画像と比較することで、発光量が多い米粒は白濁した未熟粒であることが簡単に確認できる。そこで、正常粒と白濁した未熟粒の発光量と品質を比較すると、未熟粒は精米に対して発光量は1.7倍多く、品質指標となる脂肪酸度も高いことが明らかになった(図8)。また、精米歩合の調整により作製した脂肪酸度の異なるモデル試料では、発光と脂肪酸度の間に正の相関が確認された(図9)。

発光因子を明らかにするために、米からの極微弱発光の分光測定を試みた(図10)。発光量を増加させるため測定温度を100℃にして分光測定した。玄米、精米ともに発光強度に違いはあったが、測定した400~800nmの範囲にいくつかの発光ピークがあり、極微弱発光現象は複数の発光要因により生じていることが確認された。発光スペクトルから、米以外の多くの試料の極微弱発光の発光要因とされている一重項酸素(ピーク波長; 520, 585, 635nm)や励起三重項カルボニル(ピーク波長; 435, 480~530nm)¹⁷⁾の発光が生じていた。さらに、米の微弱発光には670~680nmに特有の強いピークがあることが今回明らかになった。この発光ピークは光合成時のクロロフィルbの発光

図 8 精米からの極微弱発光と脂肪酸度の関係

(コシヒカリ, 積算時間 10 min, 50℃).

図 9 コメの極微弱発光と脂肪酸度*の関係

(コシヒカリ, 積算時間 10 min, 60℃).

*試料の脂肪酸度は精米歩合の調整により作製.

図 10 玄米と精米からの極微弱発光の分光計測結果

(コシヒカリ, 積算時間 10 min, 100℃).

波長に近いことから、光の吸収ではなく、熱により励起され発光が生じたとも考えられるが、本研究ではこのことを証明するまでには至らなかった。

(4) 焙煎ゴマ油の極微弱発光¹⁸⁾

焙煎ゴマ油は他の食用油に比べ非常に高い抗酸化性（酸化安定性）を示す。また焙煎処理により油脂の持つ抗酸化性が高まることもよく知られている¹⁹⁾。焙煎ゴマ油は性状が均質であるため、極微弱発光の計測にはPMTタイプの発光計測機を用いた。搾油（圧搾）前のゴマ種子の微弱発光を計測したところ、焙煎温度が高くなるほど焙煎種子からの発光量は多くなった（図11）。すなわち、ゴマ種子焙煎時の高温加熱により褐変物質（アミノ・カルボニル反応物、セサモール等）生成され、これらの抗酸化性物質が発光に関与したと考えられる。また、品質変化による発光量の変動を明らかにするため、焙煎ゴマ油 120℃で加熱劣化させ、常温に戻した後、発光量の計測を行った。焙煎ゴマ油からの発光量は、品質劣化の初期段階において品質劣化に伴い極微弱発光量が減少し、加熱処理時間が35時間を過ぎPOVも7を超えると、急激に発光量は増加し、POVも急激に増加した（図12）。このときの微量成分の変動に

図 11 焙煎処理が油脂の色度と発光量に及ぼす影響

着目すると、発光量の減少時には抗酸化性分であるセサモールおよびその前駆体であるセサモリン含量の変化（減少）に連動して発光量は減少し、抗酸化成分がなくなると再び発光量が増加し始めることが確認された（図13）。

通常、自発極微弱発光は油脂類の酸化に伴い発光量が増加すると考えられてきたが、焙煎ゴマ油のように抗酸化成分の影響（抗酸化成分の酸化による発光）で生じることも確認された。

自発極微弱発光は装置に試料を入れ、計測を開始するだけの非常に簡単な操作で、貯蔵中の品質評価を簡単に評価する可能である。しかしながら、食品素材から発生する微弱発光は非常に弱いため、超高感度光検出器(=高価)が必要となる。また、農産物などの天候に左右され品質の個体差が大きいもの等は品質変化による発光量の変化より個体差が多くなるという課題が残っている。今後、発光計測機器の感度が格段に向上し安価になることで、焙煎ゴマ油のような均質な加工食品を製造している工場等の品質評価に自発極微弱発光計測機器を導入することは可能である。

3. 化学発光の食品計測への応用

広い意味で、油脂の酸化等(化学反応)を起因とする自発極微弱発光も化学発光の一種と分類することもあるが、ここでは、発光試薬を用いる「化学発光」に限定する。化学発光は、試薬の調製や食品試料への試薬注入操作等が必要

であり、分析操作には若干の慣れが必要である。しかし、試薬の選定次第で多種多様な品質情報を微弱発光として計測でき、しかも発光強度を増幅できるため、計測上のメリットは大きい。食品素材中の機能性(活性酸素消去能)の測定やATP法(生物発光法)による衛生状態の計測なども化学発光により分析される。本研究では、応用例として清酒の熟度評価やソバ種子の機能性評価に関して検討した。

(1) 清酒の熟度への化学発光の応用²⁰⁾

現在、清酒の品質評価は感覚の優れたパネリストの官能評価により行われており、清酒製造現場では客観的な品質評価指標の開発が求められている。清酒の化学分析手法として、3-デオキシグルコソール(3-DG)法、TBA法、DPPH法等が検討されているが、操作が煩雑であり、より簡易な評価手法の開発が必要とされている。

そこで、次亜塩素酸ナトリウム添加発光(NaClO発光)や、 O_2^- の消去能で抗酸化性を評価するMPEC発光(ATTO社製)などの化学発光を用いた清酒の品質評価の可能性を検討した。NaClO発光は75 μ Lの0.44 M次亜塩素酸ナトリウム(NaClO)水溶液に清酒3 mLを注入するだけの単純な発生現象である。一方、MPEC発光はキット化されている発光計測方法であり、MPEC試薬以外にバッファーや酵素(キサンチンオキシダーゼ)などを調製し混合する必要がある。

モデル清酒の貯蔵に伴うNaClO発光量の変化を確認したところ、貯蔵に伴い発光量が多くなることが明らかになった(図14)。また、清酒のNaClO発光は、化学発光の中でも光量が多く、3-DG法の化学分析値と相関があることが確認されたことから、清酒の熟度指標として最適と考えられた。NaClO発光やMPEC発光の計測に要する時間

図12 加熱劣化時の焙煎ゴマ油の品質と極微弱発光の変化

図13 焙煎ゴマ油の品質劣化(劣化加速試験)時の極微弱発光量と抗酸化性成分セサモリン、セサモールの変動

図 14 清酒の貯蔵期間が NaClO 発光に及ぼす影響

図 15 ソバの化学発光による抗酸化性評価

(積算画像と発光強度の経時変化)。

はそれぞれ6秒、60秒であり、3-DG法、TBA法、DPPH法等の化学分析の30～60分に比べ短時間である。NaClO発光は、分析に必要な操作も試薬の注入だけと非常に簡便であることから、検査に熟練しない者でも簡単に分析可能である。このような化学発光計測が、清酒製造工程中の熟度管理や新たな商品開発に貴重な情報を提供できるものと期待される。

(2) ソバ種子の機能性評価への化学発光の応用²¹⁾

ソバに含まれるルチン等の抗酸化性物質も注目され、重要なソバ品質の1つとなっている。これまでの分析法では、ソバ種子は製粉され粉体中に含まれる成分量のみで評価が行われ、機能性成分の局在に着目した品種間評価は行われていなかった。そこで、普通ソバとダッタンソバ種子

の抗酸化性物質の分布を化学発光により分析・評価した。再現性良く機能性成分の分布を可視化するため、ソバ種子をパラフィンに包埋した後、薄切片を作製し²²⁾、測定試料とした。この薄切片試料を使用して、普通ソバとダッタンソバ種子の抗酸化性成分の分布を化学発光(XYZ系活性酸素消去発光)により高感度カメラで画像計測した。化学発光の経時変化を比較すると、普通ソバは外皮部から20分間ほぼ一定発光量を維持し、ダッタンソバは15分経過後まで発光は増加し、種子内部の胚芽を中心に発光が観測された(図15)。

測定試料を同一形状に調製し化学発光により計測することで、通常の化学分析では得られない多くの情報を得ることが出来る。

4. 光ルミネッセンス (PSL) 法による食品照射検知²³⁾²⁴⁾

食品への放射線照射は、有効な殺菌法として海外では約50ヶ国で認可され利用されている。照射食品の適正な流通管理のため、欧州標準化委員会 (CEN 規格) には10種類の分析方法が採用されており、香辛料の放射線照射履歴の検知法には、熱ルミネッセンス (Thermoluminescence, TL) 法や光ルミネッセンス (Photostimulated luminescence, PSL) 法などの発光計測法がある⁶⁾。TL法、PSL法とも食品中に含まれる微量な鉱物にトラップされた放射線由来のエネルギーを熱あるいは光で励起して、発光として計測する方法である。TL法では、約400℃まで加熱するため、光計測前に食品から鉱物だけを分離する必要がある。一方、PSL法は、近赤外光励起 (刺激) により放射線照射で蓄えられたエネルギーを可視

光として放出させる方法であるため、事前の鉱物分離は不要であり、分析時間は1~2分と非常に短時間である。ただし、CEN法に採用されているPSL法は判別の基準値となる発光量を装置や食品毎に設定する必要があるため、より客観性の高い判別方法が必要であった。

そこで、より客観的なPSL判別方法の開発を目的に実験装置の装置開発および判別手法の開発を行った。実験用のPSL計測装置は、PMTタイプの自発微弱発光計測装置を改造し、光励起用に近赤外光源、励起光除去用にフィルターを取り付けて作製した (図16)。試作したPSL装置で、照射食品の測定したところ、照射試料ではPSLが生じ (発光量が増加し)、トラップされていたエネルギーが放出されるため発光量は時間経過に伴い発光量は徐々に減衰した。一方、非照射試料では、鉱物内に放射線由来のエネルギーが蓄積されていないため、PSLは生じない。このように光励起 (刺激) 後にPSLシグナルの強度が変化すること

図16 PSL装置の概念図

PMTタイプの発光計測装置に励起光源、励起光カットフィルターを追加し作製。

図17 PSL強度変化に基づく照射履歴判別方法（新規PSL判別法）

照射試料は光励起後発光量が増加し徐々に減衰する。非照射試料は光励起後発光量は変化しない。

図18 開発PSL装置によるパブリカのPSL発光
(2004/08/22照射処理、2006/09/08測定)。

が、多くの食品に確認され、判別の基準発光量の設定の必要のない PSL シグナルの強度変化に基づく照射履歴判別方法が見いだされた (図 17, 18)。現在、この原理を利用した国産の PSL 装置は香辛料や乾燥野菜の流通に関わるに企業に導入され自主的なスクリーニング検査に利用され、食品の信頼性確保に貢献している。

5. おわりに

以上、食品からの自発極微弱発光の発光因子の解明と品質評価への応用および化学発光や光ルミネッセンスによる品質評価の可能性を検討した。

食品からの自発極微弱発光や光ルミネッセンスは、計測装置や操作は非常に簡単であり、品質変化に伴い発光量が変化するため、品質管理用の簡易計測技術としては非常に有効な計測方法である。化学発光は試薬の準備に若干手間が掛かる反面、発光種が特定できる得られる分析データの質が向上するものと考えられる。

今回紹介した一連の研究成果に興味をお持ちいただき、分析業務の一部にスクリーニング技術として微弱発光計測機器が導入されれば幸いである。

本研究を実施するにあたり、ご指導いただいた志賀徹先生 (宇都宮大学教授)、齋藤高弘先生 (宇都宮大学教授)、大谷敏郎氏 (食品総合研究所企画管理部長)、鍋谷浩志氏 (食品総合研究所業務推進室長)、等々力節子氏 (食品総合研究所上席研究員)、後藤典子氏 (元東京都立産業技術センター)、山崎正夫氏 (元東京都立産業技術センター)、関口正之氏 (東京都立産業技術センター)、本田克徳氏 (日本放射線エンジニアリング株式会社) に心から御礼申し上げます。また、本研究に対し有意義なご助言をくださいました、林 清氏 (食品総合研究所所長)、中嶋光敏先生 (筑波大学教授、前食品総合研究所食品工学研究領域長)、五十部誠一郎氏 (食品総合研究所食品工学研究領域長) に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 創造科学技術推進事業 稲場生物フォトンプロジェクト研究概要集, 新技術事業団稲場生物フォトンプロジェクト (1991).
- 2) Usuki, R., Kaneda, T., Yamagishi, A., Takyu, C. and Inaba, H., Estimation of Oxidative Deterioration of Oils and Foods by Measurement of Ultraweak Chemiluminescence. *J. Food Sci.*, **44**, 1573-1576 (1979).
- 3) 薄木理一郎, 鷹左紀子, 金田尚志, 極微弱発光測定によるフライ油の劣化度判定, 日本食品科学工学会誌, **27**, 332-336 (1980).
- 4) Miyazawa, T., Kikuchi, M., Fujimoto, K., Endo, Y., Cho, S.-Y., Usuki, R. and Kaneda, T., Shelf-Life Dating of Fish and Meats in Terms of Oxidative Rancidity as Measured by Chemiluminescence. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **68**, 39-43 (1991).
- 5) Miyazawa, T., Fujimoto, K., Konoshita, M. and Usuki, R., Rapid Estimation of Peroxide Content of Soybean Oil by Measuring Thermoluminescence. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **71**, 343-345 (1994).
- 6) 林 徹, 食品照射をめぐる情勢, 日本食品科学工学会誌, **54**, 389-394 (2007).
- 7) EN1788, 2001, Foodstuffs, Thermoluminescence detection of irradiated food from which silicate minerals can be isolated (2001).
- 8) EN13751, 2001, Foodstuffs, Detection of irradiated food using photostimulated luminescence (2002).
- 9) 薄木理一郎, 遠藤泰志, ケミルミネッセンス測定による抗効力の酸化効力の簡易微量判定法, 日本食品工業学会誌, **28**, 583-587 (1981).
- 10) 金田弘孝, 狩野幸信, 越野昌平, 碎米の化学発光, 醸協, **89**, 412-413 (1994).
- 11) 早川 毅, 超高感度 VIM カメラシステム, 生物物理, **24**, 173-178 (1984).
- 12) 月野和雄, 熊谷 淳, 微弱分光計測装置の開発—ケミルミネッセンス測定への応用—, マテリアルライフ学会誌, **18**, 115-122 (2006).
- 13) 穂原昌司, 大谷敏郎, ポテトチップからの極微弱発光現象の画像計測, 日本食品科学工学会誌, **47**, 588-595 (2000).
- 14) Smith, O., ポテトの栽培と加工, Talburt, W. F. and Smith, O., (スナックフーズ, 東京), p275 (1978).
- 15) 穂原昌司, 大谷敏郎, 齋藤高弘, 志賀 徹, 米の極微弱発光現象の画像計測と脂肪酸度の推定, 日本食品科学工学会誌, **49**, 719-725 (2002).
- 16) 西場洋一, 古田 収, 須田郁夫, 化学発光分析による貯蔵米の品質劣化判定技術の開発, 第 13 回非破壊計測シンポジウム講演要旨集, 97-102 (1997).
- 17) 宮澤陽夫, 稲場文男, 極微弱発光, 「生物発光と化学発光」, 今井一洋編, (廣川書店, 東京), 126-143 (1990).
- 18) 穂原昌司, 元下伸二, 関 圭吾, 齋藤高弘, 志賀 徹, 大谷敏郎, 焙煎ゴマ油の焙煎温度および品質劣化が極微弱発光現象に及ぼす影響, 日本食品科学工学会誌, **50**, 303-309 (2003).
- 19) 小泉幸道, 福田靖子, 並木満夫, ゴマ種子焙煎条件が油の酸化安定性に及ぼす影響, 日本食品科学工学会誌, **43**, 686-694 (1996).
- 20) 山口貴之, 齋藤高弘, 岡本竹己, 佐々木隆浩, 杉江正美, 穂原昌司, 志賀 徹, 化学発光法を用いた清酒の熟度・抗酸化能の評価, 日本醸造学会, **104**, 303-311 (2009).
- 21) 藤田かおり, 井上直人, 穂原昌司, 楊 重法, 加藤昌和, ソバ種子における活性酸素消去部位の種間・種内変異 北陸作物学会報, **40**, 82-85 (2004).
- 22) Ogawa, Y., Sugiyama, J., Kuensting, H., Ohtani, T., Hagiwara, S., Kokubo, M., Kudoh, K. and Higuchi, T., Development of Visualization Technique for Three-Dimensional Distribution of Protein and Starch in a Brown Rice Grain Using Sequentially Stained Sections. *Food Sci. Technol. Res.*, **6**, 176-178 (2000).
- 23) 穂原昌司, 等々力節子, 鍋谷浩志, 光ルミネッセンス (PSL) 法の原理と測定の実際, 食品照射, **44** (1・2号), 28-31 (2009).
- 24) 穂原昌司, 鈴木節子, 鈴木茂市, 後藤典子, 山崎正夫, 放射線照射判別方法および放射線照射判別システム, 特許 4599529 号 (2010.10.8).

引用 URL

- i) 厚生労働省, <http://www.mhlw.go.jp/topics/yunyu/hassayutu/dl/263.pdf> (2012.8.30).
- ii) 厚生労働省, <http://www.mhlw.go.jp/topics/yunyu/hassayutu/2009/dl/100330-1.pdf> (2012.8.30).

(平成 24 年 10 月 3 日受理)