

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K05533

研究課題名(和文)近赤外光の時間分解計測を基盤とした多面的抗酸化活性評価技術の構築

研究課題名(英文)Construction of multifaceted antioxidant activity evaluation procedures based on time-resolved measurement of near-infrared light

研究代表者

小原 敬士(Ohara, Keishi)

愛媛大学・理工学研究科(理学系)・教授

研究者番号：10284390

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：食品・飲料、野菜・果実等の抗酸化反応活性を、簡単な前処理とシンプルで一貫した測定手法で多面的に評価して総合表示する汎用性の高い手法を提示することを目的とした研究を実施した。紫外・可視部の光吸収や白濁による散乱の妨害を受けにくい近赤外光の時間分解計測の特徴を活用して一重項酸素消去活性を評価する手法を構築し、生野菜、果実、加工食品の評価が可能であることを実証した。また、活性酸素動態を近赤外発光で追跡するために、拡張したBODIPYに活性酸素と特異的に反応し分子内蛍光消光を起こす置換基を導入した発光型検出プローブを設計・合成し、一重項酸素やアルキルラジカル検出特性を有する分子3種を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な抗酸化評価法とそれに対する多数の結果が提示される中、文献を収集する、あるいは複数の評価手法を実行すれば、多くのパラメータを得ることができるが、それは同時に多大な労力の消費と評価基準の一貫性の欠如を生む。また、生産者・消費者が本当に知りたい生の食材・食品の評価は、時間も労力も多大にかかる。本研究の手法は、手間がかかる、結果がまちまち、評価の正当性の十分な吟味が必要など、研究者を悩ませてきた既存の問題の多くを解決に導く。研究者、企業、生産者が、自らそれぞれ評価したい多様な試料を少量・簡単に前処理して短時間で計測し、納得できる総合的かつ比較可能なデータを取得できる、高い汎用性を持つ。

研究成果の概要(英文)：The study was carried out in order to present a highly versatile method for evaluating and displaying antioxidant activities of foods, beverages, vegetables, fruits, etc. using simple procedures and reliable measurement methods. The time-resolved near-infrared measurements used in kinetic studies have a superior feature that is less susceptible to interference from light absorption and scattering in the ultraviolet/visible region. It was demonstrated that the constructed procedures could be evaluated singlet oxygen quenching activities of some raw vegetables, fruits, and processed beans. Furthermore, some luminescent molecular probes for detecting ROS were designed and synthesized. Each probe has a substituent that specifically reacts with target ROS and induces intramolecular fluorescence quenching to a π -extended BODIPY chromophore. Obtained three molecules showed fluorescence switching properties as detection probes for singlet oxygen and alkyl radicals.

研究分野：反応物理化学

キーワード：抗酸化評価 近赤外 一重項酸素 ラジカル 食品・飲料

1. 研究開始当初の背景

活性酸素 (ROS)・フリーラジカルは生体組織に傷害を与え、機能障害や疾病を引き起こすとされ、細胞や微小器官を構成する脂質膜中や体液中に含有される抗酸化物質が、活性酸素種による傷害を抑制し、生体維持に寄与している。このような天然の機能成分が含有される食品・飲料が消費者の興味の対象となり、食品機能性を科学的根拠に基づき定量的に表示することが広く望まれている。そのため、医薬学・農学・食品化学などの分野では、基準となる信頼性の高い ROS 消去パラメーターと迅速で再現性・汎用性の高い抗酸化活性評価法の大きなニーズがある。一般に、抗酸化活性評価では、活性酸素発生モデル系に指標物質を反応させ、光吸収・発光の強度を計測する方法をとる。多数の手法・評価系が広く利用され、多くの知見をもたらしている一方で、可視領域の強い着色や濁りを有する試料では、直接の評価は難しく、測定のための前処理が煩雑となり敬遠されがちである。スピントラップ ESR 法は、光学的透明性に縛られない一方で、水分の多い試料の計測に弱点がある。実のところ、食品や飲料、植物や組織細胞など、広範囲のサンプルを一律に機能評価するのは容易ではない。

近赤外領域 (750 - 1700 nm) の光計測技術は、検出機器の高性能化につれて急速に進歩し、様々な分野への応用が可能となった。種々の産業のサンプリング・オンラインで実施される評価において、試料の紫外・可視部での強い光吸収や白濁による散乱が妨害となるケースは多く、比較的透明度の高い近赤外領域での光計測評価技術は利用価値が高い。報告者は、一重項酸素 ($^1\text{O}_2$) の近赤外発光 (1274 nm) の時間分解計測に基づく $^1\text{O}_2$ 動態の研究や、光学的透明性が低い油滴・微細粒子分散系の天然抗酸化剤による活性酸素種消去過程の時間分解吸収 / 発光計測による研究を実施し、例として、油滴形成による $^1\text{O}_2$ 寿命の増大という動的過程や、薬剤のミセル溶解に伴う $^1\text{O}_2$ 寿命の特異な変化の観測に成功した。研究の過程で、多くの試料において近赤外領域には妨害となる吸収が少ないこと、発光の時間分解計測では白濁や不均一が原因の強度の揺らぎがさして問題にならないことを体感し、近赤外光の時間分解計測を食品・飲料を含む幅広いサンプルの評価に応用することを考えた。平成 23 年度科学技術振興機構研究成果最適展開支援プログラムの支援で「飲料・食品のための簡便・短時間で計測可能な抗酸化力評価法の開発」を行い、カロテノイドリッチで濁った生の野菜ジュース飲料の $^1\text{O}_2$ 消去活性を前処理無しで定量的に再現性高く決定できる方法を開発した。ジュースの $^1\text{O}_2$ 消去活性 (図 1) は、含有されるカロテノイドの種類と量に相関する当然の結果であるが、この成果は飲料メーカーの研究者から存外の高い関心と評価をいただいた。

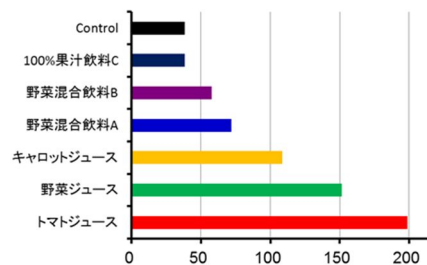


図 1 野菜系飲料の $^1\text{O}_2$ 減衰速度 $k_d / 10^3 \text{ s}^{-1}$

一概に抗酸化といっても、作用機序・評価法により異なる活性値が示される。近年注目されているカロテノイド系化合物群は $^1\text{O}_2$ 消去活性が極めて高いが、フリーラジカルに対してはさほど効果を示さない。植物由来の食品・飲料に多く含有されるフェノール系化合物群は、 $^1\text{O}_2$ 消去能はカロテノイドにはるかに劣るがフリーラジカル消去に優れた活性を示す。また、抗酸化剤成分によって水溶性・脂溶性が異なる上、活性酸素に対する応答も反応環境・溶媒等により変化する。有機溶媒中ではビタミン E 含有サンプルが高い活性を示す一方、水系ではビタミン C が圧倒的な存在感を示す。様々な成分を含有する食品・飲料、野菜・果実等をターゲットに考えると、一手法・一条件での抗酸化評価が不合理であるのは明らかで、多面的・総合的な評価を包含した表示が望ましい。だからと言って、系統の異なる手法を混在させると、様々な試料処理・測定に習熟する必要から現場に過度の負担を強いることになるし、評価値を左右する要因が複雑化し結果の矛盾が生じたときなどに混乱を招く。試料によらず一貫したサンプリング操作・計測法で複合的な抗酸化機能を評価することができれば、少ない負担で再現性が高いデータが得られ、サンプル間の比較も容易となる。適切なチャート表示を行えば、一般の人々にも直感的に試料の抗酸化機能の特徴が理解されるはずである。

2. 研究の目的

本研究では、紫外・可視部の光吸収や白濁による散乱の妨害を受けにくい近赤外光の時間分解計測の優位性を生かし、食品・飲料、野菜・果実等にそのまま適用できる高い汎用性と計測原理・操作の一貫性を有する抗酸化活性評価法を構築し、得られる多面的データを総合的に表示する手法を提示することを目標とした。ROS と抗酸化成分の反応を時間分解計測で追跡する技術を開発し、多成分含有サンプルの抗酸化反応活性をシンプルで一貫したシーケンスにより多面的に評価する汎用性の高い手法とする。開発する手法では、単離された抗酸化物質と多成分含有の食品・飲料を同じステージで評価し比較することが可能となる。技術基盤は「活性酸素と抗酸化成分の反応を近赤外発光の時間分解計測でリアルタイム追跡する」ことにあり、プローブ分子の変更で評価対象の ROS ($^1\text{O}_2$ や $\text{HO}\cdot$ など) をスイッチできるようにする。この方法は、(a) 少量の試料で短時間に計測できる、(b) 着色・白濁・不均一などの妨害に強く再現性が高い、(c) 同一条件 (溶媒・温度等) 下で異なる活性酸素を類似のプロトコルに従って評価し比較可能なデータセットが得られる、特徴を持つ。同時に、食品・飲料、野菜・果実等にそのまま適用できるので、有効成分の溶解性・反応環境依存性の視点を含め溶媒等の条件を変更した多面的評価が実施できる。最終的には、生野菜・果実・加工食品等の実サンプルに構築した手法を適用し、総合的

抗酸化表示の実用性・有効性の提示を目指す。

様々な抗酸化評価法とそれに対する多数の結果が提示される中、文献を収集する、あるいは複数の評価手法を実行すれば、多くのパラメーターを得ることができるが、それは同時に多大な労力の消費と評価基準の一貫性の欠如を生む。本研究の手法の実現は、手間がかかる、結果がまちまち、評価の正当性の十分な吟味が必要など、研究者を悩ませてきた問題の多くを解決に導く。到達点は、個々の研究者や企業が、同じ技術基盤のもとで評価したい生の試料を少ない労力で自ら計測でき、納得できる総合的かつ比較可能なデータを取得できる状況を用意することである。

3. 研究の方法

(1) 近赤外に吸収・発光を示す抗酸化評価のための新奇プローブ化合物の設計・合成を試みた。BODIPYの光吸収波長を700 nm付近あるいはそれより長波化する化学修飾の選択肢のうち、本研究では既報^[1]にあるDi(acenaphtho)BODIPY (DAB)に溶解性向上のための *tert*-butyl 基を配した構造を選択した。DABの *meso* 位または 1 位に、ROSと特異的に反応し、かつ、分子内蛍光消光を誘導する置換基を配置しプローブとする設計で、候補としてDAB 1a, 2 (図2)の合成を試みた。DAB-Aのアントラセン置換基及びDAB-Cのマレイミド(MI)置換基は、BODIPYに分子内蛍光消光を起こすことが報告されている^[2]。アントラセンには¹O₂が、MIにはフリーラジカルが付加する反応が起こるので、その結果として蛍光消光が解消された発光分子に変換されるはずである。合成した化合物に複数のROS発生系の暴露試験を行い、発光回復過程の追跡によりプローブ特性を検証した。

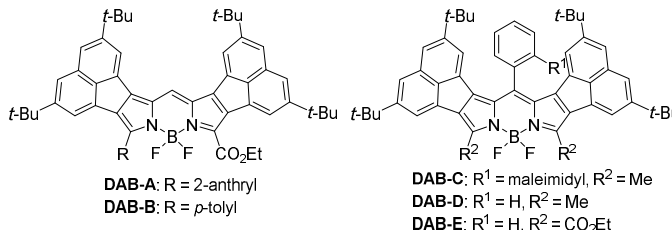


図2 近赤外発光プローブ分子の構造

(2) 多成分含有サンプルの抗酸化活性を多面的に評価するための測定系セットについて検討した。近赤外発光計測は、測定溶媒を選ばず、着色や濁りの影響を受けにくい特徴を有し、同じプロトコルで多様な条件での評価に適用できる。従って試料中の有効成分の溶解特性等による活性の違いを、異なる極性を有する溶媒系で比較することで顕わにできる。水分を多く含む食材等を単純に投入できる評価系とするために、水を含有する極性の異なる混合溶媒を候補とし、溶媒中の水含有率が計測に与える影響を実測により精査して、複数の評価系を候補から抽出した。また、操作ができるだけ簡単となるよう試料処理方法の検討を行った。測定には、既存の近赤外発光寿命測定装置(浜松ホトニクス C7990-01)に多光子計数ユニットを接続し計測を高速化した改良装置を用いた。ROS発生には、励起光として本課題の経費等で購入した半導体パルスレーザー(266 nm, 355nm DPSS YAG レーザー)を用いた。

(3) 構築した手法を生野菜・果実・加工食品に適用して実用性を検証した。評価対象とする生の食材系サンプルは、物性に差異がある多様な成分を含有することもあり、その「抗酸化活性」には対象とするROSの種類、性質、溶媒、反応条件により異なる側面が現れる。得られた活性値を消費者に理解しやすい指標値として表示するために、多くの溶媒に可溶性標準抗酸化物質の抗酸化速度定数を用いて規格化する方法を考案した。標準抗酸化物質には α -Tocopherol, Zingerone のように標品の入手が容易で、消去速度定数が比較的大きく、極性が異なる多様な溶媒に可溶で一般によく知られた天然抗酸化剤を選択した。¹O₂消去活性の場合、評価キットの溶媒で α -Tocopherol の ¹O₂ 消去速度定数 k_Q を計測し、本法で得られた消去速度パラメーターを k_Q により規格化することで、活性値を試料 1 g 中のビタミン E 相当量 (α -Toc-EQ [mg / g]) として換算表示する方法とした。種々の食品・食材サンプルを実際に評価し、その結果を吟味することで、抗酸化機能として一般の人々にも理解しやすい評価値の表示法を検討した。

4. 研究成果

(1) ROS・フリーラジカル検出のための近赤外発光プローブの合成とプローブ特性評価

680 nm 前後に吸収・発光を有するプローブ候補化合物として、低収率ながら DAB-A, C の合成・単離に成功した(合成経路等は割愛)。DAB-B, D, E は分子内蛍光消光が起こらない設計の分子で、DAB-A, C の蛍光消光度の基準とするために新たに合成した。DAB-A の蛍光は、非極性溶媒中で消光しなかったが、極性溶媒中では大きな蛍光消光が確認され、設計性能が実現されていた(図3a)。DAB の蛍光を ¹O₂ や HO \cdot 、CP (2-cyano-2-propyl radical) の ROS 発生系を構築し、複数の溶媒中で ROS 曝露試験によるプローブ機能の確認を行うと、DAB-A では、特定の溶媒において ¹O₂ 及び \cdot CP 曝露で蛍光強度が 10 倍以上増大した(図3b)。ROS 曝露後の吸収スペクトルは blue shift しており、蛍光性の DAB-B (Tolyl 置換) に類似していた。DAB-A, B の蛍光量子収量が期待される値よりかなり小さいことに関しては、DAB-D, E の蛍光挙動から 1 位のエステル置換基の影響であることが分かった。一方 DAB-C (MI 置換) は、分子内蛍光消光の挙動を示すものの(図3c)、 \cdot OH や \cdot CP の曝露下で蛍光に変化が見られず、当初想定した ROS プローブ機能を示さなかった。DAB-C の合成過程で偶然得られた中間体 DAB-X は、680 nm 前後に吸収を有し、極性溶媒と一部の非極性溶媒で大きな蛍光消光を示し、プローブ特性が期待された(図3c)。ROS 曝露試験においては、Acetonitrile, Ethanol 中で \cdot CP 曝露で蛍光が急速に増大するプローブ特性を示す一方で、 \cdot OH に対しては機能しなかった。DAB-X が A,

C と異なる溶媒依存性を示すのは、分子内蛍光消光の機構が異なるためと考えられる。

これらの DAB プローブは、ROS 曝露に対して分解挙動を示し、化学的安定性の向上が課題である。また、複数の ROS に対して蛍光増大挙動を示す結果から、プローブ物性としての ROS 特異性の改善も課題である。(本研究成果について、学術誌に投稿中)

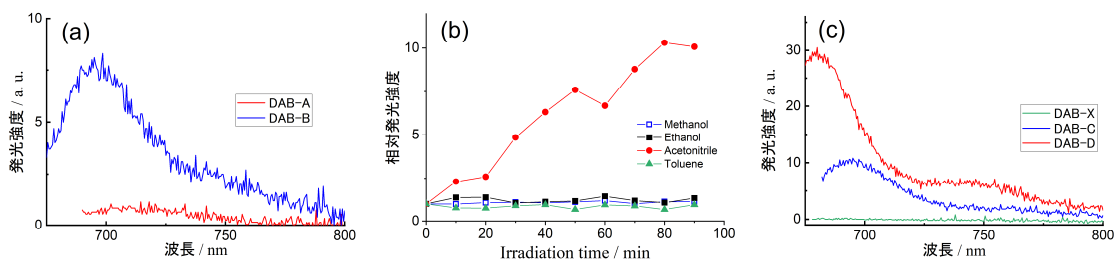


図 3 DAB の蛍光スペクトルと ROS プローブ特性。(a) DAB-A の蛍光消光(メタノール中), (b) DAB-A の $^1\text{O}_2$ 曝露試験における蛍光回復挙動の溶媒依存性, (c) DAB-C, X の蛍光消光(メタノール中)。

ROS 特異性の改善のために、捕捉した ROS を同定できるプローブの開発を検討した。BODIPY 等の発色団に不対電子を持つ置換基が存在すると項間交差が加速 (E-ISC) し無蛍光となる報告があり^[3]、この機構を応用した DAB プローブを設計し合成に着手した。ターゲット分子は、*meso* または 1 位にスピントラップを有し、ROS を捕捉すると安定ラジカルのスピンドクトを形成するので、ESR で検出し ROS の種類を判別できると同時に E-ISC により蛍光を消失する二重の特性を有する高機能プローブとなる。合成検討の結果、微量の前駆体を得る段階まで到達した。今後さらに検討を進める予定である。

(2) 近赤外発光計測により抗酸化活性を多面的に評価するための測定系のセットの開発

生の食材・食品などに適用して抗酸化活性を多面的に評価する測定系セットを開発するため、溶媒とサンプル処理法の検討を行った。有効成分の溶解性・活性の溶媒依存性の特徴が顕わになるように、アルコール、ヘキサン、トルエンなどをベースとして極性の異なる複数の溶媒を混合し極性・水含有率を変化させた複数の評価系を試作・検討した。(実用化時の安全衛生を考慮して特別有機溶剤(クロロホルムなど)の使用は避けた。)生の食材・食品等の活性計測において問題となるのが評価系中の水含量の揺らぎである。特に $^1\text{O}_2$ 寿命が溶媒の水含量により大きく影響される^[4]ことから、試料投入による水含有率の変化でも計測値の揺らぎが最小となる条件を探索した。結果、評価溶媒に投入する試料量と同等程度(2~10%)の水をあらかじめ評価系に含有させておくことで、試料が含む水分による影響を最小とできることが分かった。開発した $^1\text{O}_2$ 消去活性評価のプロトコルは以下のとおりである。破碎したサンプル 1 g に抽出溶媒 20 mL を加え、ろ過することなくその抽出液を定量的に希釈して光増感剤(ローズベンガルまたはペリナフテノン)を加え測定溶液とする。この方法で測定溶液中の水含有量の揺らぎを 5%未満に抑えられる。半導体パルスレーザー光の照射で $^1\text{O}_2$ を発生させ、改良した近赤外発光寿命測定装置により 1270 nm の $^1\text{O}_2$ 発光の時間変化を 1~3 分間で測定する。その減衰速度の抽出液量依存性からサンプル 1 g 当たりの $^1\text{O}_2$ 消去活性値(α -Toc-EQ)を算出する。この評価法を市販の生野菜・加工食品・果実等を適用し、 $^1\text{O}_2$ 消去活性評価の実証試験を行った。

(3) 生野菜, 果実, 加工食品等の抗酸化活性評価の実証試験

(i) 生野菜の品種別活性(図 4)

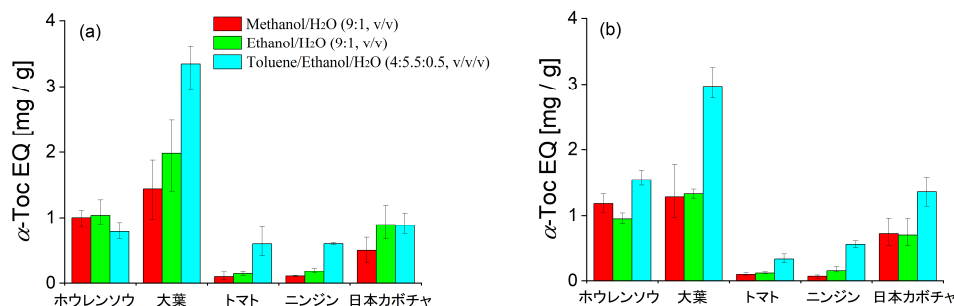


図 4 生野菜の $^1\text{O}_2$ 消去活性値(α -TocEQ)。(a) 生のまま処理, (b) 凍結乾燥処理(処理前の重量で規格化)

開発した手法で、市販の生野菜(ホウレン草、大葉、トマト、ニンジン、日本カボチャ)の $^1\text{O}_2$ 消去活性を評価・比較した。これらの野菜には、ビタミン E, C, カロテノイド・リコピン類など、極性が異なる多様な有効成分が含有されており^[5]、本課題の実証試験に適している。溶媒、サンプル処理法について検討し、特に生の状態と凍結乾燥処理した場合の比較を行った。結果、試料の水含量を補正すれば、凍結乾燥処理の有無で評価値に大きな差異は見られなかった。ホウレン草、カボチャでは溶媒による評価値の差異が小さいのに対して、大葉、トマト、ニンジンでは、低極性のトルエン混合溶媒においてアルコール系溶媒より顕著に高い活性値が得られた。これは、評価した野菜に含まれるカロテノイド・リコピン類など $^1\text{O}_2$ 消去能が高い低極性成分がト

ルエン系溶媒に抽出されやすいことを反映している。このように複数の溶媒系による評価を同一プロトコルで行う本法では、サンプルに含有される活性成分の特徴を容易に明示することができる。また、トマトにおいて、低極性溶媒での活性値が凍結乾燥処理により顕著に減少していることは、高活性成分のリコピン類が凍結乾燥処理により一部が失われるという指摘を支持する。以上の結果から、凍結乾燥処理を行わず生のまま評価に供した方が、実サンプルに即した活性値が得られると考えられる。本法の評価に必要な抽出液量は数 mL なので、サンプルと評価溶媒の混合比を一定とすれば少量のサンプルで十分評価可能である。例えば、シソ科植物のアロマティカスの抗酸化活性を 1 枚の葉の採取で評価できた。

(ii) 加工豆食品（冷凍枝豆，水煮大豆，納豆）の活性（図 5）

加工食材・食品への適用試験として、市販の冷凍枝豆，水煮大豆，納豆について $^1\text{O}_2$ 消去活性を評価・比較した。豆類はビタミン E 等の含有量が多く、高い抗酸化活性を示すことが予測できる。評価には、エタノール，トルエン，ヘキサンをベースとする混合溶媒 3 種類（それぞれ水 2% 含有）を使用し、サンプリング・計測・解析は生野菜の場合と同様に行った。加工豆食品の α -Toc-EQ 値は、文部科学省公表資料^[5]における該当食品中の総ビタミン E 量の数倍の値を示し、試料中の活性成分の総量に対する評価値が得られたと推察できる。また、枝豆では γ -トコフェロールとカロテノイド，納豆ではビタミン K が高活性成分として含まれることが、試料・溶媒セットによる活性の相違に反映されたと考えられる。一方、低極性溶媒では、評価値が得られないケース（水煮大豆）があり、溶媒選択とサンプル処理の方法には課題が残る。

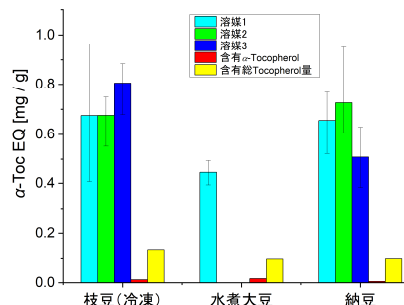


図 5 加工豆食品（冷凍枝豆，水煮大豆，納豆）の $^1\text{O}_2$ 消去活性値 (α -TocEQ) $N=3$, Tocopherol 含有量は参考値。^[5]

(iii) 果実（キウイフルーツ）の品種別・部位別活性（図 6）

評価に要するサンプルが少量であることを活用して、果実の品種別・部位別活性評価を検討した。ゴールドキウイ及びグリーンキウイの果肉，皮，芯，種子をそれぞれ分離し、開発した 4 種類の抽出溶媒を用い同一の処理・計測法で $^1\text{O}_2$ 消去活性評価を行った。結果、皮，種子で活性が高く、品種差では種・芯においてゴールドキウイの活性がグリーンキウイより高かった。これらは、キウイに含有される抗酸化物質の種類・量の一般知見と一致する。抽出溶媒の極性による活性値の差異から、試料中の有効成分の分布に関する示唆が得られた。また、生野菜のブロッコリーの部位別評価では、花序が茎部の 5 倍の活性を示す結果が得られた。このように、本法で生野菜・植物の直接評価が可能であり、農作物の品種，産地，個体，部位による活性の差異，有効成分分布などを少量のサンプルで簡単な操作で定量し比較検討できることが実証された。

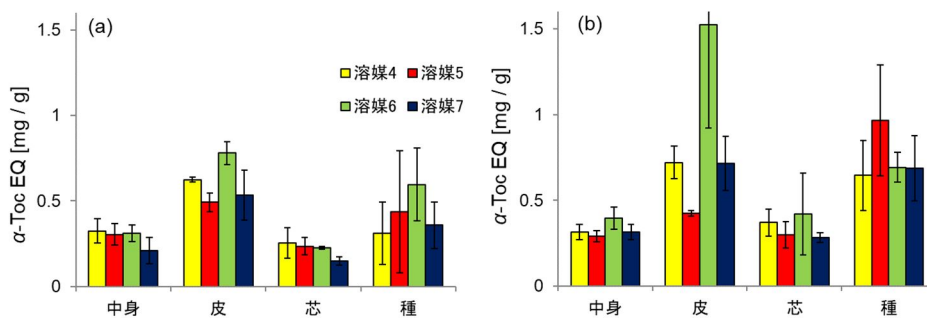


図 6 キウイの品種別，部位別 $^1\text{O}_2$ 消去活性値 (α -TocEQ)。(a) グリーンキウイ，(b) ゴールドキウイ。

(4) まとめと展望

本研究の評価手法は、簡単な操作にもかかわらず、科学的根拠のある評価値を多様な条件で得ることができる。さらに洗練すれば、(i) 専門知識や熟練技術がなくとも多少の練習でだれでも操作可能で、(ii) 現場で短時間で計測し、(iii) サンプルの個体差を数値化できる、手法が実現される。例えば、生産者が食材・食品の評価を望む場合に、単なる平均活性値のみではなく、素材や調理・工夫が与える様々な「違い」の影響を数値として与え、役立てることが可能になる。

< References >

- 1) H. Uno, et. al., *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2019**, 92, 1001.
- 2) M.A. Filatov, et. al., *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, 139, 6282.
- 3) Z. Wang, et. al., *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, 139, 7831.
- 4) S. Nagaoka, et. al., *Int. J. Chem. Kin.* **2022**, 54, 570.
- 5) 日本食品標準成分表 2015 年版（七訂）文部科学省科学技術・学術審議会資源調査分科会。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Okujima Tetsuo, Ueda Yuki, Inoue Manami, Mori Shigeki, Ohara Keishi, Takase Masayoshi, Uno Hidemitsu, Naito Toshio	4. 巻 27
2. 論文標題 Synthesis of bicyclo[2.2.2]octadiene-fused 5,15-diazaporphyrin and 10-azacorrole with meso-imine bridges	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Porphyrins and Phthalocyanines	6. 最初と最後の頁 402 ~ 407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S1088424623500074	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nagaoka Shin ichi, Nomoto Nanaho, Tasaka Tomohiko, Nagashima Umpei, Matsumoto Takatoshi, Ohara Keishi	4. 巻 54
2. 論文標題 Solvent effect on activities of aryloxy radical scavenging and singlet oxygen quenching reactions by vitamin E: Addition of water to ethanol solution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Chemical Kinetics	6. 最初と最後の頁 570 ~ 576
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/kin.21596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nagaoka Shin-ichi, Bandoh Yuki, Matsuhiroya Satoki, Inoue Kazumasa, Nagashima Umpei, Ohara Keishi	4. 巻 409
2. 論文標題 Activity correlation among singlet-oxygen quenching, free-radical scavenging and excited-state proton-transfer in hydroxyflavones: Substituent and solvent effects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry	6. 最初と最後の頁 113122 ~ 113122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jphotochem.2020.113122	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sasaki Yoshiki, Takase Masayoshi, Kobayashi Nagao, Mori Shigeki, Ohara Keishi, Okujima Tetsuo, Uno Hidemitsu	4. 巻 86
2. 論文標題 Radially -Extended Pyrrole-Fused Azacoronene: A Series of Crystal Structures of HPHAC with Various Oxidation States	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Organic Chemistry	6. 最初と最後の頁 4290 ~ 4295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.joc.0c02825	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Oki Kosuke, Takase Masayoshi, Mori Shigeki, Shiotari Akitoshi, Sugimoto Yoshiaki, Ohara Keishi, Okujima Tetsuo, Uno Hidemitsu	4. 巻 140
2. 論文標題 Synthesis, Structures, and Properties of Core-Expanded Azacoronene Analogue: A Twisted System with Two N-Doped Heptagons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the American Chemical Society	6. 最初と最後の頁 10430 ~ 10434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/jacs.8b06079	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 小原敬士, 渡部匠海, 中野英之, 奥島鉄雄
2. 発表標題 活性酸素検出能を付加したDi(acenaphtho)BODIPYの開発
3. 学会等名 2022年日本化学会中国四国支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡部匠海, 皆越映馨, 小原敬士
2. 発表標題 近赤外発光測定による加工豆類の一重項酸素消去能の評価
3. 学会等名 日本食品化学学会 第27回総会・学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡部匠海, 小原敬士
2. 発表標題 近赤外発光測定を用いた野菜の一重項酸素消去能の評価法
3. 学会等名 日本食品化学学会第26回総会 (紙面開催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石井遥暁, 渡部匠海, 中野英之, 奥島鉄雄, 小原敬士
2. 発表標題 活性酸素を検出するNIR発光型プローブとしての -置換Di(acenaphtho)BODIPYの合成
3. 学会等名 日本化学会 第101春季年会 (2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野本七帆, 井上和優, 小原敬士, 長岡伸一
2. 発表標題 エタノール中のトコフェロール類の一重項酸素消去速度に対する水の添加の効果
3. 学会等名 第31回ビタミンE研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 増田有作, 奥島鉄雄, 小原敬士
2. 発表標題 活性酸素を検出する新規蛍光プローブの合成
3. 学会等名 2018年日本化学会中国四国支部大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------