

食肉の非破壊品質評価の最前線

世界の食肉生産量は2050年までに倍になると予測され、来る Society 5.0 や Industry 4.0 においてはデータ統合により生産から消費に至る流れが把握可能になると言われている。食肉品質の非破壊評価技術は、この新しい社会の恩恵の最大化に貢献できるか？期待される分析技術について標準化の視点を交えながら解説する。

本 山 三知代

1 食肉の品質評価法の開発トレンド

食肉は重要なタンパク質源であり、様々な加工・調理法によりバラエティ豊富なメインディッシュとして食卓を豊かにしてくれている。世界の食肉の消費量は、OECD-FAO（経済協力開発機構および国連食糧農業機構）によると最近10年間で約20%増加し、これからの10年間でさらに15%増加すると予測されている。主に鶏肉生産の増加により、2050年までに食肉生産量は倍になるとも言われている。

Society 5.0 や Industry 4.0 などIoTやビッグデータの活用が今後不可欠な社会になると言われる中、今日の食品産業の課題の一つは、サプライチェーンのすべての段階のデータを統合してフードシステムの一連の流れを把握可能にすることである。具体的には、食肉産業では農場からのデータを食肉の生産歩留や品質と結び付けることであり¹⁾、同時に、安全性にかかわる問題が起きたときに各国政府からトレーサビリティが求められるという、食肉流通のグローバル化の要請に応えることにもつながる。また、持続可能な開発目標（SDGs）の達成に食肉生産が負うところも大きく、フードロス削減や循環型社会構築などSDGsへの貢献度を数値で評価・証明する必要も出ている。これらの情報は、政府にとっても、食肉産業にとっても、消費者にとっても重要である。

そして、これらの課題解決に分析技術が貢献できたら、食肉生産の川上から川下にいたる各重要管理ポイントにおける、品質や安全性の数値化・データ化と、それらの標準化だと考えられる。食肉生産と一口に言っても複雑で様々な要素からなり、分野としては家畜の育種に始まり、新規飼料資材を含む家畜飼養技術、と畜・枝肉生産技術、加工技術、保存技術（冷蔵、冷却等）に大別され、これらすべてが影響して食肉の品質が作られている。

食肉品質の指標も実に様々あるためすべてについて触れることはできないが、これからの社会の要請に応えるため活用が期待される計測技術という観点から、以下にその背景とともに紹介したい。

2 分光法による食肉品質評価

食肉の成分分析には、食品一般に共通する確立された手法が広く用いられている。具体的には、一般成分（水分・タンパク質・脂肪）の分析に加熱乾燥法、ケルダール法、エーテル抽出法など、ビタミン・ミネラル等は高速液体クロマトグラフィーや原子吸光法など、アミノ酸組成・脂肪酸組成にはクロマトグラフィーなどが用いられ、どれも公定法として学会や民間団体などが認定している²⁾。また、微生物汚染やアレルギー物質検出にはPCR法やイムノアッセイなどが用いられる。

これら従来の分析技術は信頼性が高く、確定結果が得られる長所がある一方、サンプルの前処理が必要なことが多く時間も掛かるため、リアルタイムやオンラインで分析する必要がある全品検査などには向かない。生産されてから消費までの時間が短い生鮮品である食肉では、分析のための時間が取れないため、迅速、*in-situ*、非破壊といった長所がある分光技術が開発されている。

物質には、取り込みやすいエネルギーを持った波長の光のみ吸収するという性質がある。分光法は、対象がどのような光を吸収するかを調べることで、様々な情報を非破壊的に得ることができる。「光」としては、目に見える可視光だけでなく、紫外光や近赤外光、赤外光など幅広く用いることが出来る（図1）。これらの光は持っているエネルギーが違うため、試料に当たったときに見える情報が異なる。

これらのエネルギー領域の中でも、近赤外光を用いた技術は、広く食品分野で研究開発されてきた歴史がある。食肉分野では、牛肉のブランド化や品評会（全国和牛共進会）で品質指標になっている脂肪の構成オレイン酸含量等の迅速評価に近赤外分光が用いられている⁴⁾。

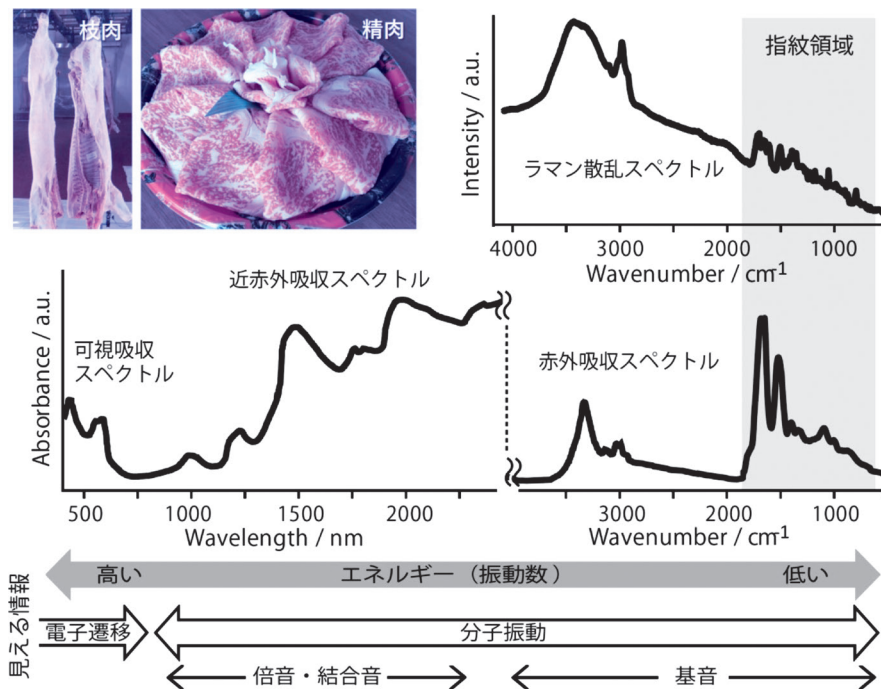


図1 食肉の様々なエネルギー領域のスペクトル³⁾



図2 近赤外分光を用いた牛肉脂肪の脂肪酸組成測定装置
(資料提供 (株)相馬光学, <https://somaopt.co.jp/products/s7040/>)

光ファイバプローブを備えた専用ポータブル分光器とケモメトリックスの利用により、食肉生産現場での非破壊評価を可能にしている⁵⁾(図2)。

近赤外領域の光を使うと、食品に多く含まれる分子の官能基、特にC-H、N-H、O-HなどH(水素原子)を含む官能基の振動の、倍音・結合音を観測することができる。「倍音・結合音」とは、「基音」(後出)の振動数を整数倍したり加算したりした振動の意味で、基音よりも振動数が1~数オクターブ高いエネルギー範囲(波長750~2500 nm)にある。ヒトの目では検出できないので、分光器と検出器を使ってスペクトルを取得し、そこから情報を得る。倍音・結合音の振動は複雑に重なっておりスペクトルのバンド構造ははっきりしないため(図1)、スペクトルのなるべく広い範囲をケモメトリックスを用いたり多変量解析にかけて統計的に情報を得るのが一般的である。

2009年の「信州プレミアム牛肉」に始まり、2016

年までに七つの県において牛肉のブランド化にこの技術が貢献している⁶⁾。日本固有の品種である黒毛和牛は脂肪の不飽和度が遺伝的に高く、加えて不飽和度を高めるような飼養管理がおこなわれることが多いため⁷⁾、この特長を数値化し他の牛肉と差別化して付加価値を付け輸出しようという動きもある。また、牛肉だけでなく豚肉においても同技術により脂肪の構成脂肪酸組成、一般成分等の迅速評価が可能になっており、豚肉のブランド化や高品質化への活用も期待されている⁸⁾。

食のグローバル化が進む中で日本からイスラム圏への「ハラール食肉」の輸出も増えている。ハラール食肉とは、一般的な食品衛生の確保に加えて、イスラム法に則って家畜をと畜し、「ナジス(イスラム法で禁忌とされているもの)」に触れないように品質管理された食肉である。食肉の畜種(牛、豚、馬など)の偽装は世界的な問題であるが、特にナジスである豚の検出法の開発は、イスラム圏の人口増加を背景に重要性を増している。

豚肉の検出には豚由来のタンパク質やDNAをELISA法やPCR法で検出するのが一般的であるが、脂肪のスペクトル解析によっても可能である⁹⁾。図3は、ラマン散乱スペクトルから得た「基音」の情報を用いて、豚の脂肪を特異的に見える化した結果である。

分子は原子と原子の結合でできているが、その結合はよくバネに例えられ、バネ両端にかかる重さや環境に応じて一番振動しやすい振動数で伸びたり縮んだり、横にゆれたりしている。その振動は「基音」あるいは「基準振動」と呼ばれ、赤外光のエネルギー範囲(波長2500~25000 nm、波数に換算すると4000~400 cm⁻¹)に

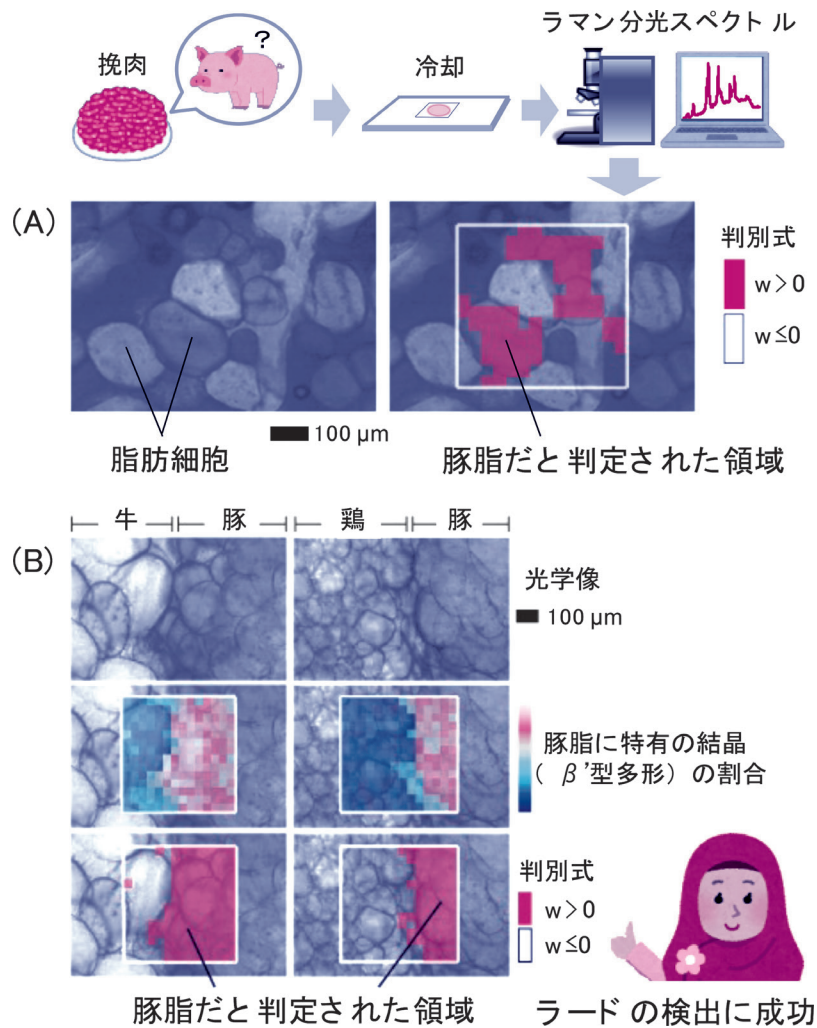


図3 ラマン分光による豚脂の検出⁹⁾

(A) 牛豚合挽肉試料，判別式 w は試料中の脂肪の結晶に占める β' 型多形の割合（ラマン分光計測値）が閾値より大きい場合に正となり豚脂と判定する．(B) 異なる畜種の脂肪を隣接させた標準試料における豚脂の検出結果．

ある（図1）．C-H，N-H，C-C，C=C，C=O…など結合のバネごとに固有の振動数があるので，スペクトルを調べると，どのグループがどの位どんな環境下にあるのか直接的に分かる．先に紹介した近赤外光からは統計的な情報が得られる一方，赤外光のエネルギー範囲からは分子化学的な情報が得られる．

食肉の脂肪は冷蔵により一部が結晶化した状態にあり，豚の脂肪には，牛や鶏の脂肪にはあまり含まれないタイプの結晶多形（ β' 型多形）が多く含まれている．この結晶多形の結晶副格子構造に由来する基準振動のバンド強度を調べることで，豚の脂かどうかを判別したのが先の結果である（図3）．脂肪細胞の中の脂のスペクトルを顕微鏡下で取る必要があるため，オンラインでの利用はできないが，新しい豚肉検出法になりうる．

また，「分子の指紋」が得られる指紋領域（図1）のスペクトルには，食肉の品質にかかわる沢山の情報が含まれている．例えば，ラマン散乱スペクトルの指紋領域の解析によりこれまで様々なアプリケーションが開発されており，上述した脂肪の結晶多形の定性・定量や畜種

の推定だけでなく，例えば，脂肪の過酸化度や不飽和度，*cis* 異性体含量の定量，筋肉内脂肪含量と構成脂肪酸の定量，などがある．コンピュータサイエンスの進歩により将来，1本の指紋領域のスペクトルからこれらの情報がすべて同時に，しかもサンプルの前処理なく得られるようになると考えられる．

特にラマン分光は，食品一般に含まれる水の妨害を受けずに指紋領域のスペクトルを測定できる長所があり，食肉も前処理なく計測可能で装置も低価格化と小型化が進んだことから，現場への展開が期待されている．

また，商品ロスの生じる破壊的な方法ではあるが，核磁気共鳴分光法などを応用した技術として，一般成分（水分・脂肪）を5分程度と迅速に計測可能なシステム（図4）が開発されており，食肉専用の比較的安価な装置も上市されている．国際規格化などの標準化も進められており，技術保持者が必要だったり有機溶媒を使用する人体・環境・コストの負荷が大きい従来法が，これらの迅速法に時代の要請を受けて置き換えられていくと思われる．



図4 食肉の一般成分の迅速分析システム
(資料提供 CEM 社, <https://cem.com/ja/oracle/>)

以上のように、今後も分光法により多くの食肉品質が迅速に評価可能になっていだろう。ただ、分光法を用いる際に留意したいのは、検出対象となる分子の周囲のマトリックスの成分や構造の変動の影響が大きいことと、それゆえ検出精度・再現性に問題が生じ確定法になり難いことである。マトリックスの変動は、個体差が常にある生物由来試料の分析に一般的な課題だが、分光においてはファントムや標品など装置キャリブレーション技術や、ベースライン補正などのスペクトル処理技術など、標準化に必要な技術開発を適切におこなうことにより、越えられる壁であると考えている。

3 イメージングによる食肉品質評価

先述した分光法を応用した技術は、目に見えない食肉の品質を評価することが目的である一方、可視光域の色の情報を主に用いるコンピュータビジョンの利用も進んでおり、「霜降り」や形などの目に見える食肉品質の数値化・データ化のためのイメージング技術が開発されている。

和牛肉に特徴的な「霜降り」は、食肉流通においてロース芯と別名呼ばれる最長筋の、筋肉内脂肪の量と細かさの程度などで評価される。霜降りの評価基準の開発・導入とともに和牛肉も高度に発達し今日の世界的評価を獲得した歴史があり、その肉のやわらかさと霜降りの関係が広く認識され、現在では日本だけでなく食肉生産各国で独自の基準で評価されるようになってきている。

霜降りは枝肉（部分肉に分割される前の食肉の形態）をロース芯が見えるように切開し、その切開面から評価する。これまで肉眼で評価されてきたが、狭い切開面に対して小角からの撮影にも対応した装置とアプリケーションの開発により、クラウド上でロース芯の自動検出と霜降り程度などの品質が数値化可能になっており（図5）、技術の国際標準化も目指されている。

また、グラフィックスプロセッシングユニット（GPU）の開発など近年のコンピュータの画像処理性能の向上に

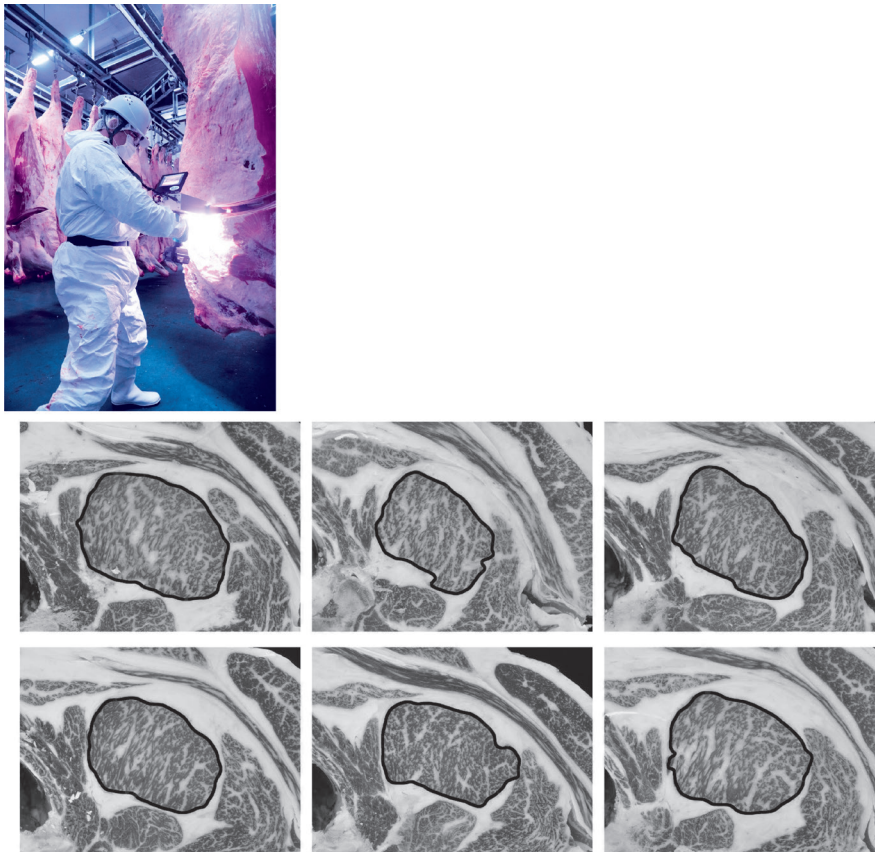
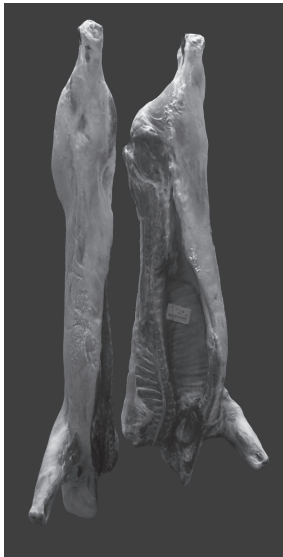


図5 撮影風景とロース芯の自動検出
(資料提供 (一社) ミート・イメージ ジャパン)



(C) 2019 NARO

図6 豚枝肉の3Dグラフィック

より、物体や空間を二次元のモニタ上に奥行き感（立体感）を持って視覚表現する三次元（3D）グラフィック技術は、様々なゲームやデジタル映像など我々の身近なものとなり、その作製と表示のための技術進歩と低価格化が目覚ましい。

食肉分野ではこれまでも、産業上最重要な品質である歩留の予測と、ひいては流通取引の円滑化に貢献するとして、特に枝肉の立体形態の計測に関する技術開発がおこなわれてきた。しかし、既存技術は計測のために生産ラインを流れている枝肉を一瞬でも止めなければならないことや、得られるのは枝肉の撮影した片面の情報のみで正確な体積や断面積は評価できない欠点があった。これが今日では、瞬時に撮影した大量の画像データを迅速に処理できるようになり、生産ラインの流れを止めずとも枝肉の3Dグラフィックが簡単に得られるようになっている（図6）。

日本だけでなく、海外でも枝肉の3D計測技術がほぼ同時に開発されているが、どちらも時間のかかるスキャン方式ではなく、写真計測を応用したものになっている。約40台の静止画カメラを用いて枝肉の全周から略同時に写真を撮り、それらから計算により枝肉の立体座標を求めている。枝肉表面のテクスチャも写真から合成された色で再現されている。

立体計測により、これまで取引にあまり活用できなかった形態や外観を新たに数値化できるようになっただけでなく、体積・断面積も正確に評価可能であるため、今後、家畜育種も含めた技術開発につながる可能性がある。歩留の予測という重要課題に対しても、赤肉部分とトリミングする脂肪の部分の色のコントラストが比較的是っきりしているので、カラーで提供される3Dグラフィックの貢献が期待できる。

3Dグラフィックはそれ自体がリアルな品質表現とし

て広く活用が見込まれる。ICT技術と組み合わせることで、スマートフォン等でまるで実物のような枝肉を自由視点で確認することが簡単に可能になり、オンライン化に対応した新しい品質データとして海外取引だけでなく、家畜伝染病まん延防止の観点から国内でも枝肉を直接確認することが難しくなってきたことへの対応策として利用できるかもしれない。このように広く活用が期待できるため、データム（幾何学的基準）や色校正など、データの比較時などに特に必要になる標準化のための技術開発も適切に進める必要がある。

4 展 望

昨今のCOVID-19で、世界では作業員から食品へのウイルス混入と操業停止が問題になり、プロセスの自動化による食品の安全性向上と通常操業を続けられるメリットが明確になった。しかし、食肉は生体組織でありやわらかく変形しやすく、また個体差も大きいことから自動化につながる計測技術を開発するには難しい対象である。

したがって、Society 5.0やIndustry 4.0において食肉分野でまず実用化が見られるのは、計測の必要が無く既存データの統合で対応できる、トレーサビリティの確保、廃棄の削減、稼働率向上、消費期限等在庫管理などの分野と思われる。これらはSDGs達成にも貢献すると考えられる。

しかし、これらとは別に食肉の品質にこそ畜産農家ははじめ食肉生産者の努力が現れており、品質を適切に評価・格付する技術が、生産者と円滑な流通を根幹で支えている。分析技術は、食肉特有の個体差などの課題を超えて、この品質の数値化・データ化技術の開発と標準化を通じてフードシステムに統合できる品質情報を増やすことで、新しいオンライン化社会の恩恵の最大化に貢献できると考えられる。

データの統合にも必要とされる標準化は、その基準・評価技術・データの普及と利用を強力に推進し、近視眼的には食肉流通を円滑にするという分かりやすい利点がある。一方、標準化のやり方次第では技術漏洩や品質の差別化を難しくしてしまう恐れがあり、分かりやすい例に「霜降り」がある。霜降りの多いものほど等級が上になる基準が日本で開発・導入されたことにより、高い等級を得ようとする一般的な心理が生産者に働き、和牛の霜降り程度の上昇と輸入牛肉との差別化に貢献したが、もしもこの基準をそのまま国際化した場合、海外牛肉の霜降り程度が和牛に近づき将来的に和牛の国際市場における差別化が難しくなるものと推測される。

本稿では、食肉品質の最新の非破壊評価法を分光とイメージングの二つに大別して紹介したが、枝肉に付着した獣毛や最終製品に混入した軟骨の検出など、AI技術の応用も試みられている古くて新しい難題もあり、分光

とイメージングの両者を組み合わせたハイパースペクトルカメラやセンサーフュージョンなども、装置の低価格化とアプリケーション開発により実用化していくと思われる。食肉特有の個体差の問題解決にも貢献するかもしれない、今後の技術開発に期待したい。

文 献

- 1) S. Barbut : *Anim. Front.*, **10**, 38 (2020).
- 2) “AOAC Official Method, 39. Meat and Meat Products”, (2012).
- 3) 本山三知代 : 化学と生物, **57**, 395 (2019)
- 4) 入江正和 : 食肉の科学, **60**, 219 (2019).
- 5) S. Piao, T. Okura, M. Irie : *Meat Sci.*, **137**, 258 (2018).
- 6) 大倉 力 : 応用物理, **87**, 6 (2015).
- 7) M. Motoyama, K. Sasaki, A. Watanabe : *Meat Sci.*, **120**, 10 (2016).
- 8) (独)家畜改良センター プレスリリース, www.nlbc.go.jp/

pressrelease/210419press_honsyo.pdf (2021.4.19).

- 9) “農研機構技術パンフレット集. 9. 食品中の豚肉を光で直接検出する方法”, (2019).



本山三知代 (Michiyo MOTOYAMA)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 畜産研究部門/同機構 知的財産部国際標準化推進室 (〒305-0901 茨城県つくば市池の台2. 東京大学理学系研究科化学専攻博士課程. 技術士(農業部門), 博士(理学)《現在の研究テーマ》食肉の非破壊分析手法, 特に光を使った評価法の開発. 《主な著書》M. Motoyama : Chapter 8, “Raman spectroscopy for meat quality and safety assessment”, *Advances in Meat Processing Technology*. A.E.-D. (Bekhit. Boca Raton), (CRC Press) pp.269-297 (2017). 《趣味》肉料理を作って食べること, 世界の珍料理食べ歩き.

E-mail : mmichiyo@affrc.go.jp

新刊紹介

理科年表 2022 ポケット版

国立天文台 編

本書は、大正14年(1925年)に創刊し、戦時中の数年の休刊を除き毎年発行され、2022年版が95冊目となる。目次から順に①暦部、②天文部、③気象部、④物理/化学部、⑤地学部、⑥生物部、⑦環境部の7部門と付録から成る。2005年に新設された環境部では、年平均気温の偏差、海面水温の長期変化傾向、オホーツク海の海水域面積などの地球温暖化への移り変わりがデータで示される。日本の温室効果ガスの総排出量は2013年をピークに下がっているのは京都議定書の効果が発揮されたのではないかと安堵を覚える。

価格が手頃なので登山が趣味の友人にプレゼントをしてみたい。世界の高山や日本の山がリストアップされ、各地の日の出入りや地域別降水量の月別平均値もチェック出来る。また、スマホの時代にあって中学生の子どもへの手軽なプレゼントにもしてみたい。中学生にはまだ難しい漢字も多いが、WEBからコピーしてレポートを済ませてしまうことなく、データベースの宝庫である本書の中から、気になる分野をじっくり調べてレポートにまとめる、という基本学習を身につけてくれることを期待し、高校、大学でのサイエンスの探求に繋げてくれる書となることを期待させてくれる。

[ISBN 978-4-621-30648-2・規格外・1204ページ・1,500円+税・2021年刊・丸善出版]

有機スペクトル解析入門

横山 泰, 石原晋次, 生方 俊, 川村 出 著

有機化合物のスペクトル分析は有機合成化学をはじめ、様々な研究分野に対して基礎となる化学分析である。本書は、質量分析法、赤外分光法、核磁気共鳴分光法、紫外可視分光法について順に解説した入門的な教科書となっている。これらの分析法について、基本原理とその実例をバランスよく組み合わせることで、初学者であっても理解できる内容となっていることが特長である。これらのスペクトル測定は広く一般的に利用されているため、その原理を深く学ぶというよりも如何に使い方を身に付けるか、得られる結果をうまく読み解くかというところに関心が向けられがちである。本書では6章 構造解析へのアプローチでの実例の解説、7章 演習問題の章でそのようなニーズに応えつつ、1~5章において基本原理を丁寧に解説されている。卒業研究を始めた学部学生から、既に構造解析の経験を持つ大学院生や、新しい分野に挑戦することになった企業研究者など、幅広い層の研究者にとって大いに参考になる入門書となるであろう。

[ISBN 978-4-8079-0973-5・B5版・194ページ・2,800円+税・2022年刊・東京化学同人]