

『ポストハーベスト工学』ダウンロード付録

Ver.2026.1.1

この PDF は、書籍本文の補助的な解説、より応用的・拡張的な事項、紙幅の制限からやむを得ず本文から割愛した記述などをまとめたものです。書籍本文中の対応する箇所に **※1** のマークが付けられています。学習の参考としてご活用ください。

2章 保存

※1 混合乾燥の混合比

通常の籾殻の水分は 10～11 % (w.b.)であるため、混合乾燥では籾殻用の乾燥機により籾殻の水分を 2～3 % (w.b.)程度まで乾燥させて用いられている。乾燥籾殻と生籾の混合比は体積比で、生籾：籾殻=1:1.5～2 である。1 回の混合貯留で 3～4 % 程度の水分減を基本として数回に分けて乾燥を行っている。

※2 ヒートポンプの成績係数

ヒートポンプの成績係数 COP は以下の式で表される。

$$COP \text{ (加熱時)} = \frac{Q_1}{L}$$

$$COP \text{ (冷却時)} = \frac{Q_0}{L}$$

ここで、 Q_1 は加熱（放熱）のエネルギー [kW]、 Q_0 は冷却（吸熱）のエネルギー [kW]、 L は冷凍機動力 [kW]である。除湿乾燥機において、蒸発器に着霜（フロスト）すると、COP は小さくなってエネルギー効率は低下するため、排気の循環利用などにより着霜対策（デフロスト）が行われている。

温度 θ_1 [°C]、絶対湿度 x_1 [kg/kg']の外気を乾き空気流量 m_a [kg'/s]の条件で t 秒間送風し、除湿機を通過後の空気温度 θ_2 [°C]、絶対湿度 x_2 [kg/kg']、水の蒸発潜熱を r [kJ/kg]とすると、除湿量 w [kg]は $m_a(x_1-x_2)t$ となり、凝縮熱量 Q_0 は rw [kW]となる。また、湿り空気における乾き空気あたりの定圧比熱を c_p [kJ/kg'·°C]とすると、外気からの加温熱量 Q_1 は $Q_0 + L = m_a c_p (\theta_2 - \theta_1)t$ で表される。ここで、除湿乾燥における除湿機の動作係数 ε_d を $(Q_0 + Q_1)/L$ と定義すると、動作係数 ε_d が 3 以上であれば、除湿機は能力を発揮しているとされる。

※3 マイクロ波加熱の特徴

本文に示した四つの特性の内容は次の通りである。①スピード加熱：マイクロ波の浸透深さが数 cm であることに起因する。すなわち、熱伝導時間を必要としないため、極めて短時間で加熱できる。②クール加熱：マイクロ波は空気に吸収されないために、庫内を温めることなく食品が昇温する特徴を持つ半面、焼いた時に得られる食感や風味を得ることは難しい。③内部加熱：前述のとおり電波の浸透距離が深いことに起因する。④選択加熱：物質ごとの誘電損失の違いに起因し、水の誘電損失は大きいいため、加熱されやすい。食品を乾燥する際、熱風乾燥にマイクロ波乾燥を組み合わせることにより、水分を迅速に除去することができる。下図はトマトの乾燥にマイクロ波を利用した時の含水率経時変化を表すが、水分を途中まで熱風乾燥で除去し、その後、マイクロ波乾燥を行うことにより、極めて短時間で水分を除去できることがわかる。ただし、水分が低い状態でマイクロ波を照射し続けた場合、試料が焦げることがあるので、注意が必要である。近年では、減圧マイクロ波乾燥のように、更なる高品質化が可能なマイクロ波乾燥法に関する研究が進んでおり、色調の保持、収縮抑制、省エネルギーなどの効果が報告されている。

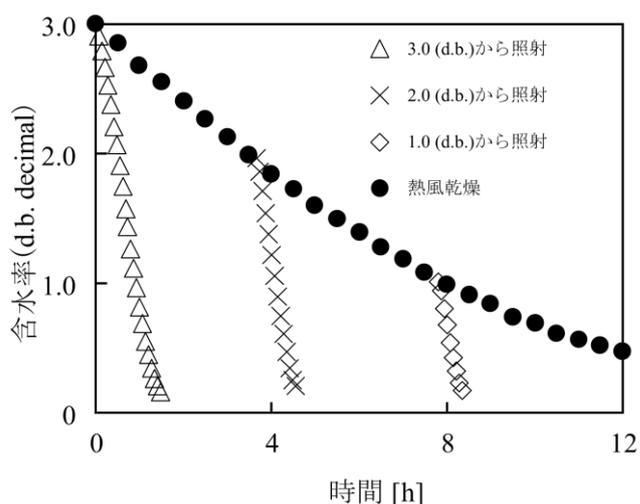


図 マイクロ波乾燥（マイクロ波出力 50W/g-乾物）における含水率の経時変化(安藤泰雅ほか, 2010. 日本食品科学工学会誌, 57(5), 191-197)

※4 青果物の気孔蒸散

これまで、青果物における蒸散は、収穫後には気孔が閉鎖されるため、主にクチクラ蒸散が支配的であると考えられてきた (Kader, 1993)。しかし近年、バナナを

対象とした研究において、成熟果実の気孔は開閉機能を喪失しているものの、63%が開口状態にあり、気孔蒸散が全体の44%、クチクラ蒸散が56%を占めることが報告されている (Khanal et al., 2022)。また、レタスにおいては、近赤外光を照射すると気孔開度が小さくなり、蒸散が抑制されたことが示されている (Kozuki et al., 2015)。これらの結果は、収穫後の青果物においても気孔蒸散が無視できない割合を占める可能性を示唆しており、今後さらに水分移動経路に関する詳細な検討が求められる。

※5 呼吸の生化学

呼吸は、グルコースと酸素を利用し、二酸化炭素と水を生じさせる過程で ATP を産生する一連の生化学反応である。呼吸代謝は、①解糖系、②トリカルボン酸 (TCA) サイクル、③電子伝達系の三つの段階からなる。解糖系はグルコースをピルビン酸に代謝する過程で、細胞質基質内において進行する。ミトコンドリアに取り込まれたピルビン酸は、アセチル Co-A に変換され、TCA サイクルにおいて段階的に二酸化炭素と水に分解される。電子伝達系においては、解糖系や TCA サイクルで生じた還元型ニコチンアミドジヌクレオチド (NADH) や還元型フラビンアデニンジヌクレオチド (FADH₂) を起点とした酸化還元反応がミトコンドリア内膜上で連鎖的に進行する。その過程で大量の ATP が産生されるとともに、最終段階では酸素に電子が受け渡され水が生成される。上記は、酸素が十分に存在する場で行われる、いわゆる、好気呼吸のプロセスである。一方、酸素が十分に供給されない場合、一般の植物細胞では解糖系で生じたピルビン酸は、TCA サイクルに渡されることなく、アセトアルデヒドやエタノールに代謝され、ATP 生産に必要な酸化型ニコチンアミドジヌクレオチド (NAD⁺) を産生する。この過程は嫌気呼吸と呼ばれるが、悪臭成分の生成を伴うため、青果物の保蔵・貯蔵においては避けられなければならない。

※6 呼吸速度の計測法

呼吸速度の計測は、密閉式と通気式が代表的である。前者は、密閉容器内に測定対象の青果物を入れ、ヘッドスペースの酸素あるいは二酸化炭素濃度の変化を観測する。後者は、一定流量のガスを青果物が入った容器に通気して、通気前後のガス

濃度差を得る方法である。

※7 青果物と酸素濃度

青果物を低酸素環境に置くと、呼吸が抑制される(図)。これは主に、電子伝達系末端の電子受容体としての酸素が不足すると電子の流れが滞り、電子伝達系やそれに付随して TCA サイクルが停滞することに起因する。過度な低酸素は嫌気呼吸を引き起こすため、青果物の品質保持には不適である。一方、好気呼吸が維持される範囲内で呼吸速度を最大限に抑制するような低酸素環境は、品質保持に最も効果的である。呼吸速度の酸素依存性は、ミカエリス・メンテン型の呼吸モデルによって定量化できる。

$$R = R_{\max} [O_2] / (K_m + [O_2])$$

ここで、R：呼吸速度 (mmol kg⁻¹ hr⁻¹)、R_{max}：最大呼吸速度 (mmol kg⁻¹ hr⁻¹)、[O₂]：酸素濃度 (%)、K_m：ミカエリス定数 (%)である。特に、ミカエリス定数は、呼吸速度が R_{max} の半分となる酸素濃度であり、青果物品目によってかなり異なる。低酸素による呼吸抑制を原理とする品質保持技術において有効な効果を得るためには、先述の LOL から K_m の範囲内で酸素濃度を制御する必要がある (Beaudry, 2000)。

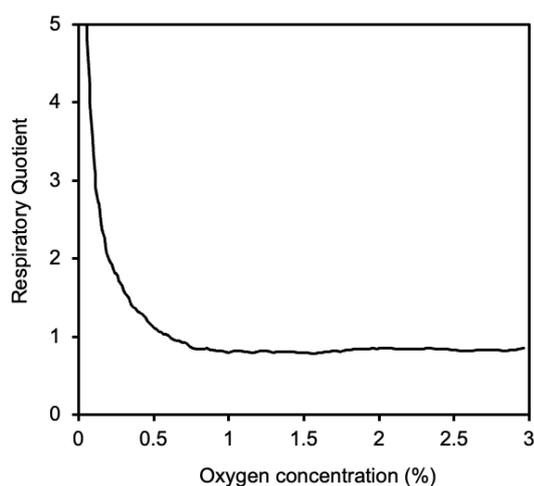


図 富有柿の呼吸速度と酸素濃度の関係
(5°C)

※8 青果物と二酸化炭素濃度

Kubo ら(1989) は、数種青果物を高二酸化炭素 (60%) に暴露した時の呼吸速度とエチレン生成速度の変化について検討し、温州ミカンやブドウ等のエチレンを生

成しない青果物では、高二酸化炭素では呼吸は抑制されないことを認めた。一方、モモやトマト等のエチレンを生成している青果物では呼吸が抑制され、高二酸化炭素の呼吸抑制効果は、エチレン生成や作用（後述）の抑制による間接的な効果であることを示唆した。また、レタスやナス等では高二酸化炭素によって逆に呼吸が促進され、生理障害発生のリスクを指摘した。

※9 エチレン生合成

エチレン生合成においては、アミノ酸の一種である①メチオニンが出発物質となる。まず、メチオニンから②S-アデノシルメチオニン（SAM）が合成され、次いで、1-アミノシクロプロパン 1-カルボン酸（ACC）合成酵素の作用により、③ACCが生成される。さらに、ACC酸化酵素の働きによって④エチレンが生成される。この経路において、ACC合成酵素とACC酸化酵素は、転写レベルや酵素活性レベルで制御されているが、特に、ACCの合成反応がエチレン生合成の律速段階となっている。なお、上述のエチレン生合成経路は、発見者の名前からYang回路と呼ばれる（Yang & Hoffman, 1984）。一方、エチレンの作用機作については、内生あるいは外生エチレンが、小胞体膜上のエチレン受容体タンパク質（Ethylene Response, ETR系）と結合すると、受容体タンパク質と結びついてシグナル伝達を抑制している抑制因子タンパク質（Constitutive Triple Response, CTR系）との結合が解け、シグナル伝達を開始される。最終的にエチレン応答遺伝子群の発現が促進され、成熟や老化に関連する様々な生理反応が引き起こされる。

※10 障害エチレン

Maoら（1995）は、イチジクに6Gまでの振動を与え、振動加速度が大きくなる程、呼吸速度が上昇することを認めた。Luら（2020）は、リンゴを3Hzで0.5Gの振動加速度で加振したところ、加振時間の延長と共に呼吸速度は増加する傾向にあることを示した。Xuら（2020）は、落下高さを変えてリンゴに衝撃を与えたところ、衝撃の程度に応じて呼吸速度が上昇したことを示した。上記のいずれの研究例においても、呼吸の上昇と共にエチレン生成の増加が認められており、振動・衝撃による呼吸速度の上昇は、障害エチレンの関与が示唆される。

※11 バナナの追熟

バナナは植物防疫上の規制により、黄色に着色した状態では輸入できない。そのため、輸入時は緑熟の状態でも搬入され、国内においてバナナ加工室（むろ）でエチレン処理が施される。この処理により、果実の追熟が一齐に進行し、均一な品質での流通が可能となる（Sugianti, 2022）。

※12 フーリエの法則

熱伝導を記述する基本的な法則としてフーリエの法則がある。この法則は、熱の伝わる速さを定量的に示すもので、以下の式で表される。図に示すような平板壁での熱伝導を考える。

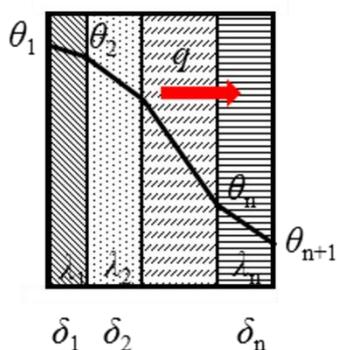


図 多層平板の一次元定常熱伝導

物体内の単位面積を単位時間に通過する熱量 q [W/m²] は、一般に熱の流れる方向の温度勾配 $d\theta/dx$ に比例する。面積を A [m²] とし、これを式で表すと、

$$q = \frac{Q}{A} = -\lambda \frac{d\theta}{dx}$$

ここに λ [W/m・K] は比例定数で、熱伝導率と呼ばれる物質固有の値である。また、右辺のマイナス記号は熱の流れる方向に対して温度勾配 $d\theta/dx$ が負となるため、 q が正になるように付ける。

熱伝導率は熱の伝導の良否を示し、この値が大きいものほど、熱がよく伝わる物質と解釈できる。一般に固体金属（特に、銀、銅、アルミなど）は値が大きく、次いで液体、気体の順となる。様々な物質の熱伝導率 [W/m・K] の値は、銀；約 400、銅；約 380、アルミ；約 250、ガラス；0.75、水；約 0.6、空気；0.02、断熱材（フォームポリスチレン）：約 0.038 とされる。

平板壁の熱伝導について考える。壁の厚さを δ [m]、高温側の壁面温度を

θ_1 [K], 低温側の壁面温度を θ_2 [K]とすると, 壁面を単位時間に通過する熱量 Q [W]は次式で表すことができる.

$$Q = \lambda A \frac{\theta_1 - \theta_2}{\delta}$$

[証明] $q = -\lambda \frac{d\theta}{dx}$ より $d\theta = -\frac{q}{\lambda} dx$ これを積分して, $\theta = -\frac{q}{\lambda} x + C$

積分定数は境界条件から決める.

$x=0$ で $\theta = \theta_1$ なので, $C = \theta_1$ また, $x = \delta$ で $\theta = \theta_2$ なので, $\theta_2 = -\frac{q}{\lambda} \delta + \theta_1$

$$\therefore Q = qA = \lambda A \frac{\theta_1 - \theta_2}{\delta} \left(= \lambda A \frac{\Delta\theta}{\delta} \right)$$

このように, 単一材料からなる熱交換器の伝熱平面での熱伝量 Q が求められる.

つぎに, 複合板 (多層平板) の熱伝導について考える. 各層を通過して単位時間に伝わる熱量はいずれの層でも等しく, 熱流は変化しない. よって, 各層で次式が成り立つ.

$$Q = qA = \lambda_1 A \frac{\theta_1 - \theta_2}{\delta_1} = \lambda_2 A \frac{\theta_2 - \theta_3}{\delta_2} = \lambda_3 A \frac{\theta_3 - \theta_4}{\delta_3}$$

$$\therefore Q = \frac{\theta_1 - \theta_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 A} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 A} + \frac{\delta_3}{\lambda_3 A}} = \frac{\Delta\theta}{R_1 + R_2 + R_3}$$

[証明] n 層の複合板について考える.

定常状態では熱流束 q はすべての層について同一であるから,

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (\theta_1 - \theta_2) \quad \therefore \theta_1 - \theta_2 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} q$$

$$q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (\theta_2 - \theta_3) \quad \therefore \theta_2 - \theta_3 = \frac{\delta_2}{\lambda_2} q$$

:

$$q = \frac{\lambda_n}{\delta_n}(\theta_n - \theta_{n+1}) \quad \therefore \theta_n - \theta_{n+1} = \frac{\delta_n}{\lambda_n} q$$

左辺の各温度差を和したものが全体の温度差になるから、各式を辺々相加えると、

$$\theta_1 - \theta_{n+1} = q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \right) = q \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad \therefore q = \frac{\theta_1 - \theta_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$$

よって、熱流束 q は、各層の接合面の温度は分からなくても、複合板の両端の温度差が分かっているだけで求められることとなる。

壁面の熱通過では、熱伝達の影響が無視できない。一般に、固体表面は流体と接しており、両者の間では熱の授受が生じる。このように、流体と固体壁との間で熱が伝わる現象を熱伝達という。

たとえば、温度 θ_{w1} の物体表面が温度 θ_{f1} の流体に接している場合を考える。このとき、 θ_{f1} 固体表面から十分離れた流体内部の温度を表す。物体表面と流体の間に温度差 ($\theta_{f1} - \theta_{w1}$) が存在すると、これが熱伝達の駆動力となり、熱の移動が生じる。単位時間あたりに物体表面積 A を通して流れる熱量を Q とすると、次のように表される。これはニュートンの冷却の法則として知られている。

$$Q = hA(\theta_{f1} - \theta_{w1})$$

ここで、比例定数 h は熱伝達係数と呼ばれ、単位は $[W/m^2 \cdot K]$ である。この係数は、流体の種類や流れの状態、固体表面の性状などによって異なる。

つぎに、熱通過について考える。高温の流体から低温の流体へと熱が移動する場合、その過程には複数の伝熱メカニズム（対流・熱伝導・ふたたび対流）が関与する。この一連の過程をまとめて表すために、熱通過という考え方が用いられる。壁を介して二つの流体間で熱が伝わる時、各々の箇所における熱流束は以下のように表される。

$$\begin{aligned} q &= h_1(\theta_{f1} - \theta_{w1}) & \therefore \theta_{f1} - \theta_{w1} &= q/h_1 \\ q &= (\lambda/\delta)(\theta_{w1} - \theta_{w2}) & \therefore \theta_{w1} - \theta_{w2} &= q\delta/\lambda \\ q &= h_2(\theta_{w2} - \theta_{f2}) & \therefore \theta_{w2} - \theta_{f2} &= q/h_2 \end{aligned}$$

これら3式を加えると、

$$\theta_{f1} - \theta_{f2} = q \left(\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \right)$$

$$\therefore q = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} (\theta_{f1} - \theta_{f2})$$

ここで $k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}$ とおくと、

$q = k(\theta_{f1} - \theta_{f2})$ となる。

この k を熱通過率または熱貫流率といい、 $1/k$ を全熱抵抗という。 n 層の複合板では、

$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2}}$ となる。このようにして、複数の材料を通じて熱が伝わる場

合でも、全体としての熱通過率 k を求めることが可能となる。

※13 低温貯蔵のメリット

低温貯蔵による貯蔵可能期間の延長は、販売時期を柔軟に調整できるという副次的なメリットももたらす。たとえば、端境期や天候不良時の需給バランスをとったり、価格変動を緩和したりすることが可能になり、生産・流通の両面で有用な戦略となり得る。

※14 減圧貯蔵の応用例

例えばバナナを 40 kPa や 13 kPa で貯蔵すると、常圧の対照区に比べて黄化（熟度進行）が大幅に遅れることが報告されている。トマトやアボカドなどの果実でも、低圧下での追熟抑制が認められ、パセリやグリーンアスパラガスではビタミン C やクロロフィルの保持率が高まり鮮度を長期間維持できた例が知られている。リンゴやナシなどの一部の品目では、従来の CA 貯蔵でも延長しきれない保存期間をさらに伸ばせる可能性が指摘されている。

※14 エディブルコーティング

エディブルコーティングはプラスチック使用量の削減や環境負荷の低減に寄与し得る点で大きな注目を集めている。加工コストが高くなる場合や、コーティング剥離の問題、アレルギーとなるタンパク質の使用など、安全性・品質保持とのバランスを慎重に見極めつつ、将来的には、ナノテクノロジーを応用した超薄膜コーティングや、ナノエマルジョン・ナノカプセル化技術を利用した機能性成分（ビタミン、抗菌ペプチドなど）の徐放性コントロールなど、さらに高度で多機能なコーティングの実現が期待されている。

※15 インテリジェントパッケージングの課題と展望

インテリジェントパッケージングは各国の食品安全基準を満たす必要があるため、規制の整備が求められるほか、リサイクル可能な素材の開発が進められなければ、環境負荷の増加につながってしまう可能性もある。農産物は包装廃棄物の発生が特に多い分野であるため、持続可能なパッケージング技術の確立は喫緊の課題である。今後は、AI や IoT の活用による高度な品質管理や、環境負荷の少ない包装材料の開発が求められる。これらの技術革新が進めば、インテリジェントパッケージングの普及が促進され、農産物の品質と安全性の管理がより精密かつ持続可能なものとなるだろうと期待される。

3章 加工

※1 直捏法と中種法

直捏法は、原材料を同時に混捏して生地を作り、発酵、仕上げ（生地の分割と丸め）、最終発酵（生地の発酵と膨化）、焼成をする製パン法である。この方法は、発酵時間が短く風味の良いセミハード系のパンが作られる反面、ボリュームが出ずに伸展性が悪いため機械にかけると生地が傷んで劣化しやすい特徴がある。中種法は、50-70%の小麦粉に酵母と水を加えて中種を作り、2時間以上発酵してから残りの原料を加えて本捏をし、フロアタイムを取って生地を休ませた後に仕上げ、最終発酵、焼成をする製パン法である。この方法は、きめが細かく伸展性やボリュームのあるパンが製造できるが、直捏法に比べて手間や時間がかかり風味が劣る。

しかし、生地が機械耐性に優れ日持ちもするため、菓子パンや食パンの大量生産に用いられる。

※2 筋肉の構造と成分

食肉の源でも有り、生体で運動を司る体の筋肉は横紋筋(striated muscle)である。横紋筋は、多数の筋束の集合体であり、筋束は筋繊維(muscle fiber)の集まりで、筋繊維が細胞単位である。筋繊維は多核細胞である。

筋繊維を大別すると赤色筋繊維と白色筋繊維、その中間型がある。赤色筋繊維が多いと筋肉自体が赤く見え、白色筋繊維が多いと筋肉自体が白く見える。肉色が畜種によって違うのも筋肉部位によって違うのも、主にこの筋繊維構成の違いに係している。

赤色筋繊維はミオグロビン(myoglobin)が多く、生体では好氣的なエネルギーを利用し、ゆっくりではあるが、持続的な収縮に向いている。一方、白色筋繊維は、嫌氣的代謝で、持続力は無いが、迅速に力強く収縮できるという特徴を持っている。

筋肉を構造的に支えているのは、結合組織で、筋繊維の筋内膜、筋束の筋周膜、筋肉の筋上膜、腱等を構成している。これら結合組織を構成する主成分はコラーゲン(collagen)で、動物体内で最も多いタンパク質である。コラーゲンは皮膚、血管、内臓、骨、軟骨等ほとんどの組織に存在し、また細胞外マトリックスの主成分にもなる。コラーゲンは繊維状で、3重らせん構造をしており、様々なタイプ

(型)が存在し、タイプにより強靱性、弾力性、加熱溶解性等が異なる。一部は加熱により容易に可溶化し、ゼラチン(gelatin)となる。コラーゲンはさらに分子間に架橋結合を作る。このようにコラーゲンはその種類や量、物理的構造によって食肉の硬さ等の物性に大きな影響を及ぼす。

筋肉周辺には、皮下脂肪、筋間脂肪、筋肉内脂肪等がある。筋肉内脂肪は筋束を取り囲む筋周膜部の血管周辺に蓄積する。筋肉内脂肪は脂肪交雑(霜降り)を形成し、て食味に影響するため価値が高いが、皮下脂肪は一部除去(トリム)されることが多い。筋肉内脂肪と皮下脂肪、筋間脂肪のそれぞれの多さは必ずしも比例しない。

骨格筋以外の筋肉には心筋と平滑筋があり、心筋は単核で横紋がある不随意筋

で、平滑筋は単核で横紋のない不随意筋である。心筋、平滑筋ともにと畜解体後は、ホルモンまたはモツ等として利用される。

※3 肉の pH と肉色

通常肉では pH は徐々に低下するが、急速な乳酸生成によって pH が急速に低下する場合には組織の微細構造が破壊され、主に光が表面反射しやすくなるため肉色が淡くなり、肉汁が出て、保水性が低下する。軟質で滲出性のみられる場合には PSE(pale soft exudative) (ムレ肉、フケ肉) と呼ばれる低品質肉となる。逆に乳酸の生成が少なく、pH が高いままだと主に組織が密着化し、光を吸収し内部の濃いミオグロビンが見えやすくなるため濃くなり、硬くしまり、乾燥した感じを呈し、DFD(dark firm dry)になる。PSE、DFD の発生は豚肉で有名であるが、牛肉や各種家禽肉でもみられる。PSE、DFD は見栄えの問題だけでなく、特に PSE では食味や加工特性も劣る。DFD では保水性が高まるため、食味性は良いが、やや微生物が繁殖しやすく、特に赤身肉では見栄えの問題が大きく、欧米ではダークカッティングビーフ(dark cutting beef)と呼ばれ問題視される。

肉色は、ミオグロビンの量だけでなく、上述した組織の微細構造、色素の化学的变化にも影響される。切断直後の肉はデオキシミオグロビンの暗い赤色を呈するが、空気にしばらく触れると酸素化され、肉本来のオキシミオグロビンの鮮紅色に変化する(ブルーミング)。さらに時間が経過すると酸化し、古い肉でよくみられる褐色のメトミオグロビンに変化する。加工品では硝酸塩の利用によってニトロソミオグロビンとなるので、加熱されてもピンク色を保つ。

※4 脂肪質

脂肪質は従来ガスクロマトグラフにより測定されていたが、近年、携帯型の光ファイバ近赤外分析装置が開発され、食肉市場のライン上の枝肉において非破壊で簡易、安全、安価に脂肪酸組成が客観的に評価できるようになった。装置は 200 台以上が販売され、その応用が進んでいる。実用化例では、全国和牛共進会での肉質評価や、神戸ビーフで知られる但馬牛等の育種改良、種畜の遺伝的評価、脂肪質に特徴あるブランド牛肉(信州プレミアム牛肉、鳥取和牛オレイン 55 等)の生産、さらには食肉市場での取引の指標にまで利用され、既に日本食肉格付協会は希望に

より牛枝肉や豚枝肉で安価に脂肪質測定を行う制度を整備している。さらに本装置は脂肪の質だけでなく、牛肉や豚肉の筋肉内脂肪含量に対しても迅速評価が可能であり、将来の発展が期待されている。

なお低品質牛肉としては、異臭肉（グラスフェッド臭や雄臭）、^か疵（シミ、シコリ、ズル等）が知られている。

※5 アイスクリームの製造工程

アイスクリームの製造工程は、①原料の混合・溶解、②ろ過と均質化（乳化）、③殺菌、④冷却、⑤エージング、⑥凍結、⑦充填・包装、⑧硬化、⑨検査、⑩保管となる。

※6 バターの製造工程

バターの製造工程は、①クリーム分離、②殺菌・冷却、③エージング（5℃前後で8～12時間、低温保持）、④チャーニング（攪拌：激しく攪拌し、液体バターミルクを分離）、⑤水洗、⑥加塩、⑦ワーキング（練圧）、⑧充填・包装、となる。

※7 ナチュラルチーズの製造工程

ナチュラルチーズの製造工程は次の通りである。①原料乳の加熱殺菌、②乳酸菌・凝乳酵素添加、③チーズカード切断、④攪拌・加熱、⑤型詰・圧搾（カード粒を型詰めし、圧搾機にかけホエイをさらに排出。フレッシュチーズはここで終了）、⑥加塩、⑦熟成（独特の風味を与えるため細菌やカビを接種し、各チーズに適した温度、湿度、期間で熟成）。

4章 品質

※1 粘弾性

式(4.1.1.1)、(4.1.1.2)に示される応力-ひずみの関係式には時間項がなく、ひずみ（変形）速度には依存しないことを意味している。農畜水産物の場合、ひずみ（変形）速度が変わると弾性率も変わることが多い。このように応力-ひずみ関係に時間依存性があるような性質を粘弾性(viscoelasticity)と呼ぶ。これは固体と液

体の両方の性質を兼ね備えた性質といえる。応力とひずみの比が時間の関数で、応力の大きさに依存しないものを**線形粘弾性**と呼び、時間と応力の関数となるものを**非線形粘弾性**と呼ぶ。農畜水産物は厳密には非線形粘弾性体であるが、理論上の扱いが困難であることから線形粘弾性体として扱うことが多い。

線形粘弾性の応力－ひずみ関係を模擬するためには、ばね（弾性抵抗）とダッシュポット（粘性抵抗）から構成される力学モデル（レオロジーモデル）が用いられることが多い。ばねはフックの法則に従い、ダッシュポットはニュートン粘性抵抗、つまり速度に比例した抵抗が発生するものとする。これらの組み合わせの代表例として、ばねとダッシュポットを一つずつ並列に結合した Kelvin モデルと直列に結合した Maxwell モデルがある。前者のモデルは一定応力を与えた直後から時間とともにひずみが増加し、やがて一定となる**クリープ**を、後者のモデルは一定ひずみを与えたときの応力が零になるまで時間とともに減少していく**応力緩和**をそれぞれ表すことができる。

※2 温度伝導率

比熱に密度をかけると、単位時間、単位「体積」あたりの 1 K の温度変化を生じせしめるのに必要なエネルギーとなる。この ρc で伝熱の速度である熱伝導率を除ずるということは、単位時間あたり 1 K の温度変化を生じせしめるエネルギーを 1 単位としたときにその何単位分のエネルギーを物体から他へ移動させることができるかということである。この単位数が多いほど、単位時間あたりの温度変化量が比例して増えていく。 α が温度変化速度を表す温度伝導率と呼ばれる所以である。

※3 単位の表記

2.5 (kg) や F [N] という表記を見かけることがある。単位の本来の考え方に従えば (kg) のように括弧で括る必要はない。また F は「数値×単位」を表す記号であり単位を追記する必要はない。「量」どうしの計算における単位の扱いについて考えるために、次の問題について 2 通りの解答例を示す。

(問 1) 1 時間に平均して 4.5 km 歩くことができる人は、40 分間に平均して何 km 歩くことができるか？

(解答例 1-1)

平均速度に時間をかけることで距離を計算することができる。平均時速は 4.5 km/h (h は SI 単位ではないが併用できることが SI で認められている) であるが、かけることになる 40 分の単位が min (これも併用することが SI で認められている) なので、平均時速を分速に変換しなければならない。1 h は 60 min なので、頭の中であらかじめ 60 で割ることを考えた上で次式のように書いて答えを求める。

$$\frac{4.5}{60} \times 40 = 3 \text{ km} \quad (1)$$

(解答例 1-2)

平均速度に時間をかけることで距離を計算することができる。平均時速は 4.5 km/h で時間は 40 min であるので、次式のように h と min の時間の単位の違いを何ら考慮することなく書き、数式内で変換する。

$$\begin{aligned} 4.5 \text{ km/h} \times 40 \text{ min} &= \frac{4.5 \times \text{km}}{\text{h}} \times 40 \text{ min} = \frac{4.5 \times (1 \text{ km})}{(1 \text{ h})} \times 40 \text{ min} \\ &= \frac{4.5 \times (1 \text{ km})}{(60 \text{ min})} \times 40 \text{ min} = \frac{4.5 \times (1 \text{ km})}{60 \times \cancel{\text{min}}} \times 40 \cancel{\text{min}} = 3 \text{ km} \quad (2) \end{aligned}$$

おそらく日本で義務教育を受けた読者は解答例 1-1 の解法になじみがあるのではないだろうか。式(1)は単位合わせをした数値同士の計算をした後に単位を付け加えるという操作をそのまま表記したものであるため、左辺には単位がないが、右辺には km という単位がついており、等式としては成立していない。SI の定めでは解答例 1-2 のように単位を含めた計算をすることになっている。この方法の利点は、矛盾のない等式表記ができるだけでなく、単位換算を計算過程の中で一つ一つの単位について考えればよく、計算上のミスをするのを防ぐことができる点にもある。

※4 誤差の統計的記述

偶然誤差を減らすために、ある一つの試料の測定を複数回行い、測定値のヒストグラムを作ると単峰性の釣り鐘形分布となることが知られている。仮にこの測定回数を無限に増やすことができたとする、その測定系の完全無欠のデータセット(母集団)が得られるはずである。図にその曲線を示す。その積分値が 1 となるように正規化すると、図中斜線部の面積は、測定値が x_1 から x_2 の範囲に入る確率を表す。この曲線を**確率密度関数**と呼び、この分布を**正規分布**として扱うことが

多い。正規分布は**母集団**の平均値である**母平均** μ ，母集団の分散である**母分散** σ^2 を用いて次のように表される。

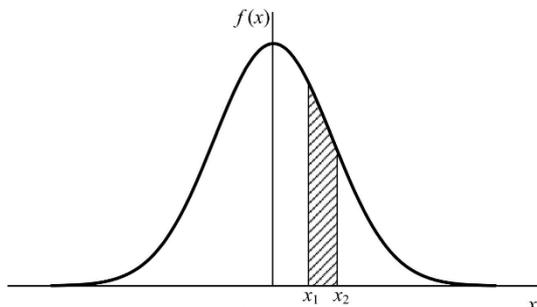


図 測定値の確率密度関数

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

実際の測定では、無限回数の測定を行うことはできず、 n 回の測定から $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ という有限個数の測定値しか得られない。このデータセットを**標本**と呼び、このデータセットから計算できる平均値と分散値をそれぞれ**標本平均** \bar{x} 、**標本分散** S_n^2 (S は大文字)と呼ぶ。母数を標本の結果から推定する際には、母数 θ とその推定量 $\hat{\theta}$ の期待値が等しい、つまり $E(\hat{\theta}) = \theta$ を満足する不偏性があるかどうかが重要になる。母平均 μ の不偏推定量は標本平均 \bar{x} となるが、 $E(S_n^2) \neq \sigma^2$ であり、母分散 σ^2 の不偏推定量は標本分散 S_n^2 ではなく、次式で定義される s_n^2 (s が小文字であることに注意)が不偏性を持った推定量となる。

$$s_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

これを**標本不偏分散**と呼ぶ。

母平均 μ と真の値の差は系統誤差により生ずるが、この差を特に**偏り**と呼び、偏りの小さい程度を**正確さ**と呼ぶ。一方、偶然誤差により生ずる差は**ばらつき**と呼び、ばらつきの小さい程度を**精密さ**と呼ぶ。つまり正確さと精密さは定義の異なることに注意が必要である。

n 回の測定で得られた標本平均 \bar{x} は平均 μ に一致することはない。 \bar{x} のばらつく範囲の中に μ が存在する確率から、 \bar{x} のばらつく範囲 $\bar{x} \pm k$ を決定することができる。この範囲を \bar{x} に対する**信頼区間**と呼ぶ。

母分散 σ^2 が既知の場合

信頼水準 $100(1-\alpha)$ (単位%, α は危険率) のとき, 信頼区間 $\bar{x} \pm k$ の k は標準正規分布表 (付表 1) の確率変数 z と標本数 n を用いて次式から求めることができる.

$$k = z \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} \quad (14)$$

(問 2)

質量の単位をもつ物理量の測定系で, 母分散 $\sigma^2 = 1.00 \times 10^{-2} \text{ g}^2$ であることが分かっている. 10 回分の測定値の平均は 3.48 g であった. 95%の信頼区間を示せ.

(解答例) 信頼水準 95%= $100(1-\alpha)$ より危険率 α は 0.05 である. 標準正規分布表 (付表 2) より, 上側危険率 $\frac{\alpha}{2} = 0.025$ の z が 1.96 であることがわかる.

$$k = 1.96 \times \sqrt{\frac{1.00 \times 10^{-2} \text{ g}^2}{10}} = 6.2 \times 10^{-2} \text{ g}$$

よって 95%信頼区間は $3.48 \pm 0.06 \text{ g}$ と表すことができる.

母分散 σ^2 が未知の場合

信頼水準 $100(1-\alpha)$ (単位%, α は危険率) で自由度 $n-1$ のとき, 信頼区間 $\bar{x} \pm k$ の k は t 分布表 (表 3) の統計量 t を用いて次式から求めることができる.

$$k = t \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} \quad (15)$$

(問 3)

質量の単位をもつ物理量の測定系で 10 回分の測定値の平均は 3.48 g であった. 95%の信頼区間を示せ. 但し, 母分散はわかっていない.

(解答例) 信頼水準 95%= $100(1-\alpha)$ より危険率 α は 0.05 である. t 分布表 (表 3) より, 上側危険率 $\frac{\alpha}{2} = 0.025$, 自由度 $10-1=9$ のときの t が 2.262 であることがわかる.

$$k = 2.262 \times \sqrt{\frac{1.00 \times 10^{-2} \text{ g}^2}{10}} = 7.2 \times 10^{-2} \text{ g}$$

よって 95%信頼区間は $3.48 \pm 0.07 \text{ g}$ と表すことができる.

付表 1 標準正規分布（上側確率）

z_α	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
.0	.50000	.49601	.49202	.48803	.48405	.48006	.47608	.47210	.46812	.46414
.1	.46017	.45620	.45224	.44828	.44433	.44038	.43644	.43251	.42858	.42465
.2	.42074	.41683	.41294	.40905	.40517	.40129	.39743	.39358	.38974	.38591
.3	.38209	.37828	.37448	.37070	.36693	.36317	.35942	.35569	.35197	.34827
.4	.34458	.34090	.33724	.33360	.32997	.32636	.32276	.31918	.31561	.31207
.5	.30854	.30503	.30153	.29806	.29460	.29116	.28774	.28434	.28096	.27760
.6	.27425	.27093	.26763	.26435	.26109	.25785	.25463	.25143	.24825	.24510
.7	.24196	.23885	.23576	.23270	.22965	.22663	.22363	.22065	.21770	.21476
.8	.21186	.20897	.20611	.20327	.20045	.19766	.19489	.19215	.18943	.18673
.9	.18406	.18141	.17879	.17619	.17361	.17106	.16853	.16602	.16354	.16109
1.0	.15866	.15625	.15386	.15151	.14917	.14686	.14457	.14231	.14007	.13786
1.1	.13567	.13350	.13136	.12924	.12714	.12507	.12302	.12100	.11900	.11702
1.2	.11507	.11314	.11123	.10935	.10749	.10565	.10383	.10204	.10027	.098525
1.3	.096800	.095098	.093418	.091759	.090123	.088508	.086915	.085343	.083793	.082264
1.4	.080757	.079270	.077804	.076359	.074934	.073529	.072145	.070781	.069437	.068112
1.5	.066807	.065522	.064255	.063008	.061730	.060571	.059380	.058206	.057053	.055917
1.6	.054799	.053699	.052616	.051551	.050503	.049471	.048457	.047460	.046479	.045514
1.7	.044565	.043633	.042716	.041815	.040930	.040059	.039204	.038364	.037538	.036727
1.8	.035930	.035148	.034380	.033625	.032884	.032157	.031443	.030742	.030054	.029379
1.9	.028717	.028067	.027429	.026803	.026190	.025588	.024998	.024419	.023852	.023295
2.0	.022750	.022216	.021692	.021178	.020675	.020182	.019699	.019226	.018763	.018309
2.1	.017864	.017429	.017003	.016586	.016177	.015778	.015386	.015003	.014629	.014262
2.2	.013903	.013553	.013209	.012874	.012545	.012224	.011911	.011604	.011304	.011011
2.3	.010724	.010444	.010170	.0099031	.0096419	.0093867	.0091375	.0088940	.0086563	.0084242
2.4	.0081975	.0079763	.0077603	.0075494	.0073436	.0071428	.0069469	.0067557	.0065691	.0063872
2.5	.0062097	.0060366	.0058677	.0057031	.0055426	.0053861	.0052336	.0050849	.0049400	.0047988
2.6	.0046612	.0045271	.0043965	.0042692	.0041453	.0040246	.0039070	.0037926	.0036811	.0035726
2.7	.0034670	.0033642	.0032641	.0031667	.0030720	.0029798	.0028901	.0028028	.0027179	.0026354
2.8	.0025551	.0024771	.0024012	.0023274	.0022557	.0021860	.0021182	.0020524	.0019884	.0019262
2.9	.0018658	.0018071	.0017502	.0016948	.0016411	.0015889	.0015382	.0014890	.0014412	.0013949
3.0	.0013499	.0013062	.0012639	.0012228	.0011829	.0011442	.0011067	.0010703	.0010350	.0010008
3.1	.0096760	.0093544	.0090426	.0087403	.0084474	.0081635	.0078885	.0076219	.0073638	.0071136
3.2	.0068714	.0066367	.0064095	.0061895	.0059765	.0057703	.0055706	.0053774	.0051904	.0050094
3.3	.0048342	.0046648	.0045009	.0043423	.0041889	.0040406	.0038971	.0037584	.0036243	.0034946
3.4	.0033693	.0032481	.0031311	.0030179	.0029086	.0028029	.0027009	.0026023	.0025071	.0024151
3.5	.0023263	.0022405	.0021577	.0020778	.0020006	.0019262	.0018543	.0017849	.0017180	.0016534
3.6	.0015911	.0015310	.0014730	.0014171	.0013632	.0013112	.0012611	.0012128	.0011662	.0011213
3.7	.0010780	.0010363	.0009961	.00095740	.00092010	.00088417	.00084957	.00081624	.00078414	.00075324
3.8	.0072348	.0069483	.0066726	.0064072	.0061517	.0059059	.0056694	.0054418	.0052228	.0050122
3.9	.0048096	.0046148	.0044274	.0042473	.0040741	.0039076	.0037475	.0035936	.0034458	.0033037
4.0	.0031671	.0030359	.0029099	.0027888	.0026726	.0025609	.0024536	.0023507	.0022518	.0021569
4.1	.0020658	.0019783	.0018944	.0018138	.0017365	.0016624	.0015912	.0015230	.0014575	.0013948
4.2	.0013346	.0012769	.0012215	.0011685	.0011176	.0010689	.0010221	.00097736	.00093447	.00089337
4.3	.0085399	.0081627	.0078015	.0074555	.0071241	.0068069	.0065031	.0062123	.0059340	.0056675
4.4	.0054125	.0051685	.0049350	.0047117	.0044979	.0042935	.0040980	.0039110	.0037322	.0035612
4.5	.0033977	.0032414	.0030920	.0029492	.0028127	.0026823	.0025577	.0024386	.0023249	.0022162
4.6	.0021125	.0020133	.0019187	.0018283	.0017420	.0016597	.0015810	.0015060	.0014344	.0013660
4.7	.0013008	.0012386	.0011792	.0011226	.0010686	.0010171	.00096796	.00092113	.00087648	.00083391
4.8	.0079333	.0075465	.0071779	.0068267	.0064920	.0061731	.0058693	.0055799	.0053043	.0050418
4.9	.0047918	.0045538	.0043272	.0041115	.0039061	.0037107	.0035247	.0033476	.0031792	.0030190

注：.0062097 = .0062097, .0023263 = .00023263 の意味である。

付表2 t 分布

$p \backslash m$	.9	.8	.7	.6	.5	.4	.3	.2	.1	.05	.02	.01
1	.158	.325	.510	.727	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	.142	.289	.445	.617	.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	.137	.277	.424	.584	.765	.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	.134	.271	.414	.569	.741	.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	.132	.267	.408	.559	.727	.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	.131	.265	.404	.553	.718	.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	.130	.263	.402	.549	.711	.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	.130	.262	.399	.546	.706	.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	.129	.261	.398	.543	.703	.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	.129	.260	.397	.542	.700	.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	.129	.260	.396	.540	.697	.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	.128	.259	.395	.539	.695	.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	.128	.259	.394	.538	.694	.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	.128	.258	.393	.537	.692	.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	.128	.258	.393	.536	.691	.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	.128	.258	.392	.535	.690	.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	.128	.257	.392	.534	.689	.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	.127	.257	.392	.534	.688	.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	.127	.257	.391	.533	.688	.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	.127	.257	.391	.533	.687	.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
21	.127	.257	.391	.532	.686	.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831
22	.127	.256	.390	.532	.686	.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
23	.127	.256	.390	.532	.685	.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807
24	.127	.256	.390	.531	.685	.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
25	.127	.256	.390	.531	.684	.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787
26	.127	.256	.390	.531	.684	.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
27	.127	.256	.389	.531	.684	.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771
28	.127	.256	.389	.530	.683	.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
29	.127	.256	.389	.530	.683	.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
30	.127	.256	.389	.530	.683	.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750
∞	.12566	.25335	.38532	.52440	.67449	.84162	1.03643	1.2815	1.64485	1.95996	2.32634	2.57582

注： $m > 30$ のときは $N(0, 1)$ と考えてよい。

※5 農産物の化学的組成の計測法

農産物や食品を構成する成分は多様であり、表 4.3 には記載されていないが、多

様な成分を定量するための化学アッセイが開発されている。例えば、総ポリフェノール量を測定するフォーリン・チオカルト法（Folin-Ciocalteu method）などがこれにあたり、ポリフェノール類がフォーリン・チオカルト試薬を還元することで呈色が観察できることを利用している。

※6 パンの比容積

最後にできあがったパンの品質を評価する指標の一つである比容積（specific volume）について紹介する。比容積は体積を重量で割った、いわゆる密度の逆数である。パンの体積を測る古典的な方法は菜種法（rapeseed displacement method）とよばれる。パンが完全に入る大きさの容器を用意し、菜種で満たす。次に菜種の中にパンを埋め、容器から溢れ出した菜種の容積をメスシリンダー等で測るとパンの体積が求められる（図）。

菜種法に代わる計測法がレーザー式の体積計で、暗室内にパンを置き、レーザーを照射し、レーザーの形状を解析することでパンの体積を求めることができる。この方法は迅速であるが、パンの底面に穴が空いている場合など、レーザーが照射されない箇所の形状は反映されないため、不正確であることもある。



図 パンの体積を測る際に使用される菜種

※7 近赤外分光技術

本技術は1970年代にUSDAで研究され、1990年代に日本で普及した手法である。まず、図のようにハロゲンランプ等の照明で可視から近赤外領域までの光を農産物に照射し、農産物で吸収される吸光度や透過光を波長ごとに分光する。主とし

て2つの方式があり、透過タイプは温州ミカンのような小果実にも、半透過タイプは比較的大きなリンゴ、ナシ、モモ、メロン等に使われる。メロンやスイカ等の大果実ではランプを左右5個ずつ用いる。

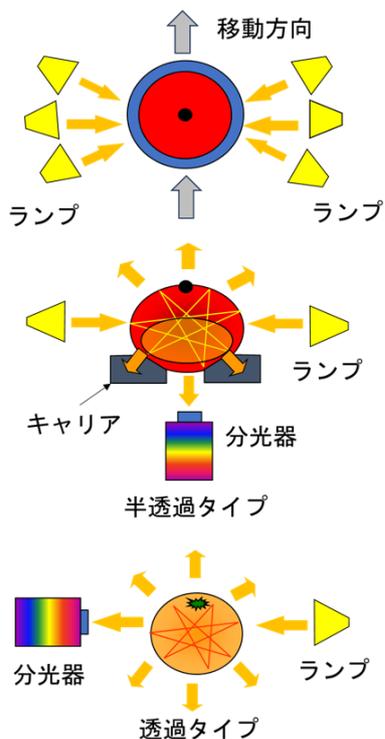


図 近赤外分光の2つのタイプ（上：半透過，下：透過）

得られた分光データを基にして、内部品質を目的変数に、各波長の吸光度を説明変数として多変量解析を行って検量線を作成し、得られる農産物の糖度、熟度等の内部品質から等級選別を行う。特に青果物やコメ等の糖度や食味検査に利用されており、俗に「光センサ」とも呼ばれる。このように高速処理が可能な**非破壊検査（nondestructive inspection）**の行える装置は農産物の商品価値を低下させることなく全数検査できるため、今後共に農畜水産物の選別、土壌等の検査装置への導入が期待される。

5章 安全・衛生

※1 食品安全基本法

関係者の責務・役割も明記されている。国の責務は、食品の安全性確保に関する施策を総合的に策定・実施すること、地方公共団体の責務は国との適切な役割分担を踏まえ、施策を策定・実施することとされている。食品関連事業者の責務は、食品の安全性確保について第一義的な責任を有することを認識し、必要な措置を適切に講ずるとともに、正確かつ適切な情報の提供に努め、国などが実施する施策に協力することとされ、消費者の役割は、食品の安全性確保に関し知識と理解を深めるとともに、施策について意見を表明するように努めることによって、食品の安全性確保に積極的な役割を果たすとされている。

※2 国際水準 GAP

国際水準の GAP は、食品関連のグローバル企業で構成される組織である CGF (The Consumer Goods Forum) 傘下の GFSI (Global Food Safety Initiative : 世界食品安全イニシアティブ) が、共通する基本的な構成要素を満たしたプログラム (ベンチマーク規格) として、令和 7 年時点で 7 つ規格が認められている。世界的にはドイツのフードプラスが運営主体である GLOBALG.A.P. が 120 か国以上に普及しており、事実上の世界基準となっている。我が国では、2018 年に一般財団法人日本 GAP 協会が運営する ASIAGAP が GFSI にベンチマーク規格として承認されている。

農林水産省は、食品安全、環境保全、労働安全、人権保護、農場経営管理の 5 分野を満たした国際水準 GAP に関して、共通の取り組み基準を設けている。そのガイドラインには、作物分類ごとに、青果物、穀物、茶、飼料作物、その他非食用の 5 種類があり、農場管理の工程順に取り組み事項を整理している。表 1 にはガイドラインの概要を示している。作物の違いによって、個別に専門的な取組事項があるが、大きく、経営体制、生産体制、リスク管理、人的資源、経営資源、栽培管理、の 6 区分された内容に取り組むことが示されている。都道府県に対しては、ガイドラインに基づく国際水準 GAP の指導の実施とともに、各自治体が運営する都道府県 GAP を存続させる場合には、ガイドラインに則して国際水準に引き上げることを求めている。

- 基本情報の管理：GAP では、農場の管理状態の「見える化」が求められる。GAP での適用範囲を明確化するため、商品（農産品）とその仕様、生産工程、圃場、施設・設備・機械の他、経営方針を含んだ農場紹介や会社案内といった基本情報を整理する。
- 農場内の整理・整頓：農場内を整理・整頓・清掃・清潔といった基本的な取り組みを継続的に実施する。これにより、農場内のリスクが明確となり、日々の作業・管理が効率的となる。
- 日常の農作業の記録：農場管理に必要な作業を記録する。これにより、顧客からのクレームやルール違反発生時の原因調査、農場内の弱点の把握に活用できる。また、作業記録、入出荷記録によってトレーサビリティを確保することができる。

- リスク管理：潜在的に起こり得る問題・事故を洗い出し，発生可能性や発生時の重大性を評価し，必要に応じて対策を立てる．立てた対策の実施とその記録から，対策内容の検証と見直しを行う．
- 農場ルール決定：経営者を含む従業員全員が従うべきルールを定める．決定したルールは従業員全員に周知し，ルールに基づく農場経営を行う．農場運営状況を定期的に確認・検証し，必要に応じてルールや農場運営の方針や組織体制の見直しを行う．
- その他：農場から出る廃棄物，使用する水の飲用・非飲用といった水質，使用する機械や設備，器具，包装容器の保管や使用状態，農薬・肥料とその使用計画，といった，農場内のあらゆる内容について状況を把握し，適切に管理する．
- これらの取り組みの実践においては，国際水準 GAP に限らず都道府県 GAP でも同様である．計画作成（Plan），作業の実施・記録・保存（Do），点検（Check），改善と見直し（Action）で構成される PDCA サイクルの繰り返しが重要である．

※3 HACCP の 7 原則 12 手順

HACCP は，①食品の製造工程を良く見直し，②その食品において発生する危害要因（Hazard）を特定し，③その危害の起こる頻度と重篤度を考慮・分析（Analysis）し，④問題となる工程（Point）を重点的（Critical）に管理（Control）する管理手法のことを言う．最終製品の抜き取り検査ではなく，各工程で発生しうる危害要因とそのリスク（食中毒原因菌の生残や増殖，化学物質の残留，アレルギーの交差接触，硬質異物等）を科学的な根拠に基づいて排除あるいは許容できるレベルまで低下させることが重要である．HACCP を適切に導入・運用できれば，より効果的に食品事故の未然防止が可能となる．HACCP は，米国航空宇宙局（NASA），米国陸軍と，ケーキやビスケットを製造していた Phillsbury 社によって，アポロ計画における宇宙食の安全性確保のために開発された衛生管理手法である．HACCP を導入するためには，7 原則 12 手順（表 5.2）に基づいて実施することとなるが，HACCP の効果的な運用のためには，その前段である GMP（good manufacturing practice：適正製造規範）あるいは GHP（good hygiene

practice：適正衛生規範），SSOP（standard sanitation operation procedure：衛生標準作業手順書）といった前提条件プログラム（PRP: pre-requisite program，一般衛生管理ともいう）を適切に実施することが重要である。CodexのGPFHには「食品の性質，食品の加工および健康への悪影響の可能性に応じて危害要因を管理するために，それらが食品安全に一層大きな影響を与えらるゝとして，他よりも注意を必要とするものを含めて，適切にGHPを適用することで十分である場合がある。GHPのみの適用で十分でない時には，GHPとCCPにおける更なる管理措置の組み合わせを適用すべきである」と述べられているように，あくまでも前提条件プログラム構築の延長線上にHACCPは位置していると理解しなければならない。そして，GHPを下支えする活動として，日々の整理・整頓や清掃，清潔といった5Sや7S活動が根幹として重要な役割を担っている。食品の安全性確保のためには，従業員一人ひとりの意識向上もさることながら，経営陣も一体となって取り組まなければならない。

※4 食品安全文化

GPFHでは，2020年の改訂で食品安全文化（food safety culture）について言及しており，GFSIのベンチマーク規格は呼応する形で関連する規格要求事項を盛り込んでいる。食品安全管理システムが有効に機能するためには，安全で適切な食品を提供するための「人の行動」が重要であるとの理解に基づいた，積極的な食品安全文化の確立と維持が肝要である。GFSIでは食品安全文化を「組織全体にわたって食品安全に対する考え方と行動に影響を与える価値観，信念，規範を共有すること」と定義している。非常に理解し難い内容であるが，経営陣を含む従業員全体が，安全な食品を製造するために不断の努力を惜しまず，そのために必要な資源を投入し，かつ十分なコミュニケーションや教育を実施すること，また，科学技術や他社（者）の成功例，いわゆるベストプラクティスを踏まえた生産活動が重要であると考えられるだろう。

※5 金属異物検出器の仕組み

金属検出機は一つの発信コイルと二つの受信コイル，受信コイル間の電圧（voltage）を比較する電圧計によって構成される。通常は発信コイルへ電流

(electric current) を流すことで磁界を発生させると2つの受信コイルは同量の磁束をそれぞれ受けた状態となり、2つの受信コイルで生じる電圧は等しくなる。同量の磁束をそれぞれ受けた状態では、受信コイル間で電流が流れないが、金属によりコイル間の磁束のバランスが崩れた際にはバランスを保とうとするために誘導電流 (induced current) が生じ、電圧に変化が生じる。このときの微小な変化を電気的に検出することで金属異物の検出を可能とする。また、磁性金属 (magnetic metal) と非磁性金属とでは磁束のバランスの崩れ方が異なることが知られている。鉄、ニッケル、コバルトなどの磁性金属異物では、磁化した異物が磁束を引き付けるため、受信コイルのうち、金属に近い位置にある受信コイルへ磁束が集中し、もう一つの受信コイルよりも電圧が増加した形となる。一方、ステンレスや銅などの非磁性金属異物では、発信コイルからの磁束で異物自体に渦電流 (eddy current) が生じ、渦電流からの磁束は発信コイルへと戻る形となる。その結果、非磁性金属異物では金属に近い位置にある受信コイルへの磁束が減じ、もう一つの受信コイルよりも電圧が減少した形となる。一方、食品中のミネラル成分を含む水分は導電性 (conductivity) があるため、金属異物を含まない状態でも渦電流が生じる。そのため、食品の種類はもとより、同一種の食品でも食品中成分が僅かに異なることで金属異物が含まれていると金属検出器により誤検出される場合があることに留意する必要がある。また、物体の導電性は温度によって変化することが知られているが、食品も同様で、同一の食品でも検査温度により誤検出の割合が変わることにも注意する必要がある。

※6 自然由来毒素の例：ヒスタミンとカビ毒

ヒスタミンは主に魚類に含まれるアミノ酸 (amino acid) の一種であるヒスチジン (histidine) から *Morganella morganii* などのヒスタミン産生菌由来の酵素により合成される。そのため、常温で保存している場合、酵素が不活化されていない食品中ではヒスタミンの合成が急激に進む。また、10℃以下でも酵素の活性があるため、冷蔵でも長期間の保存を行った食品ではヒスタミン合成・蓄積の危険性がある。日本国内の法令ではヒスタミン含有量の基準値は定められていないが、食品衛生法に基づき、食中毒が発生した飲食店などへの指導が行われる。許容量以上のヒスタミンを含む食品を喫食した場合、食後数十分で、口の周りや耳たぶが紅潮し、

頭痛，蕁麻疹，発熱などのような急性症状が呈される。ヒスタミン食中毒の原因食品の多くが魚やその加工食品となるものの，チーズ，味噌，醤油，納豆などの発酵食品からもヒスタミンが検出されたと報告される事例もある。ヒスタミン含有量と外観・腐敗臭などは相関がないとされるため，食品のヒスタミン食中毒発生を防ぐためには食品事業者・消費者による食品の適切な管理が重要であるとされる。

カビ毒は，カビの代謝産物のなかでヒトまたは家畜の健康を損なう有害物質を指し，マイコトキシン（mycotoxin）とも呼ばれる。表1に示されるように，菌種ごとに産生される毒素が異なり，主として，小麦や米，トウモロコシなどの穀物類・豆類，リンゴにおいて注意が必要な自然由来毒素である。カビ毒では，急性症状が生じることは稀で，慢性的な摂取による発ガン率上昇が問題視され，なかでもアフラトキシン（aflatoxin；AFT）B₁は天然物で最も強力な発ガン性物質として知られている。多湿環境下での長期保存など収穫後の農産物の取り扱いが不適切な場合，カビ毒蓄積の危険性が高まる。そのため，農林水産省ではカビを生育させないための農産物の取り扱いに関する管理点をまとめたガイドラインの配布を行っている。一方，カビは環境中に存在する常在菌であるため，農産物の栽培段階におけるカビの汚染やカビ毒の蓄積は避けることが難しいとされる。例えば，小麦では生育後期に降雨が続いた場合にフザリウム属菌による赤かび病（Fusarium head bright）が発症しやすくなり，デオキシニバレノール（deoxynivalenol；DON）やニバレノール（nivalenol；NIV）の汚染・蓄積が発生する可能性が高まるとされる。したがって，カビ毒の混入程度は，収穫後の取り扱いのみならず，栽培地域の自然条件や年ごとの気候変動による差が大きくなるため，食品中のカビ毒汚染に対しては継続的に実態調査を行った上で，食品ごとに適切に対応していくことが重要であるとされる。なお，デオキシニバレノールやニバレノールの毒性は消化系・免疫系への障害や嘔吐などの急性症状が主であり，アフラトキシンなどに比べると危険度は低いとされる。日本国内では，デオキシニバレノールについては小麦中で1.0 mg/kg以下とする規格基準が制定され，ニバレノールでは規格基準が制定されていない。

※7 重金属の製造機器から加工食品への移動

製造機器から加工食品への移動については，製造機器や調理器具表面にメッキされた重金属が食品中に溶出することで引き起こされることが多く，亜鉛，カドミウ

ム、スズなどでの報告事例がある。また、亜鉛や銅を含む食品添加物もあるため、これらの過剰な添加にも注意する必要がある。

※8 食品添加物の目的

食品添加物は様々な目的で用いられ、乳化剤、膨張剤、調味料、酸味料、苦味料、光沢剤、ガムベース、栄養強化剤、製造用剤、香料で用いる場合は物質名の表記が義務付けられている。一方、甘味料、着色料、保存料、増粘剤、安定剤、ゲル化剤、糊料、酸化防止剤、発色剤、漂白剤、防かび剤の用途で使用される場合は物質名に加えて、その用途名の表記も必要となる。

※9 食中毒菌の分類

食中毒菌は大きく分けて、感染性食中毒菌と毒素性食中毒菌に分類される。

感染性食中毒菌：食品中で増殖した食中毒菌が食品とともに摂取され、腸管内で増殖し、毒素を産生することで食中毒が発症する。発症までに要する期間（潜伏期間）は、多くの場合では 12-24 時間であるが、発症菌数の少ない腸管出血性大腸菌やカンピロバクターでは数日間となる。

毒素性食中毒菌：食品中で食中毒菌が増殖した際に産生された毒素を食品とともに摂取することで食中毒が発症する。そのため、感染型に比べ、潜伏期間は短い傾向にあり、数時間で発症する。また、一部の毒素性食中毒菌の産生する毒素は耐熱性がある。

※10 食中毒菌の対策（熱処理）

ほとんどの食中毒菌は 60～80 °C の熱処理で死滅させることが可能であるため、食品製造における最終工程で熱殺菌を適切に実施することでほとんどの食中毒事故の危険性を排除することができる。一方、ボツリヌス菌のように耐熱性芽胞 (thermal tolerance spore) を形成する食中毒菌の場合、死滅させるためには 120 °C で 4 分間以上の熱処理による滅菌 (sterilization) が必要となる。また、食品の滅菌を達成している場合、細菌による変敗・腐敗 (microbial spoilage) が生じる可能性がないため、常温での長期保存を行うことができるという利点もある。一方、60～80 °C の低温殺菌 (pasteurization) では、食品の冷蔵保存や pH 調整を行わない限り、生残した耐

熱性芽胞形成菌が増殖するため、長期間の保存は難しい。

※11 食中毒菌の細菌検査

食品衛生法に定められた細菌検査においては、培養法による生菌数の測定が一般的に行われている。生菌数測定では、寒天培地へ食品破砕物を含む液体試料を接種し、培養することで行われる。このとき、寒天培地に存在する1個体の細菌細胞が増殖し、肉眼で観察できる1つのコロニーを形成する特性を利用して、寒天培地で増殖能力を有する細菌数の計数を行うことが可能となる。なお、細菌数の単位は colony forming unit (CFU) /g として表示する。また、特定の菌種のコロニー数を計数できるように成分を調製した寒天培地も一般的に普及している。食品の細菌検査における検査対象の菌種や基準値は食品の種類に応じて異なる。

6章 輸送・流通

※1 パレット

木製パレットは海外への輸出入の際、検疫を通らないことがあり注意を要する。近年では、軽量化に特化した紙製のものや、振動を吸収するためのショックアブソーバー機能を付加したものなども利用されている。

※2 温湿度センサーとエッジ端末

図 6.5 に示したセンサーはオフラインの分散型であるため、事後にデータを収集するための労力がかかる。オンライン接続し、自動でクラウド上にデータが送信されるシステムも構築されているが、データ送信量が莫大となるため、サーバーに負荷がかかることが懸念されている。このため、近年ではセンサーを取り付けたエッジ端末に AI 処理機能（エッジ AI）などを組み込み、データの特徴量のみを抽出してクラウドシステムに必要なデータだけを送信することで送信電力を削減するとともに、サーバー負担の軽減を進めることが推奨されている。

※3 振動周波数

振動による損傷の要因としては衝撃加速度以外にも、振動周波数およびその方向

が強く影響することなどが知られており、振動自体の特性を評価するためのパワースペクトル密度 (PSD) 分析や、どのような振動が青果物に伝わりやすいのかを知るための加速度伝達率の評価も重要である (中村ら, 2007)。これら衝撃や振動による破壊や擦れを防止するために様々な梱包材の開発が行われているが、同時に、環境負荷低減型の材料の使用も検討も進められている。また、近年では、トラックや航空機、船舶輸送時における振動に関するデータ収集も進み、輸送手段の選択や路面状況の把握による経路の提案なども行われるようになってきている。

※4 リスクマップ

さらに、輸送・流通環境予測だけでなく、これらの環境情報から青果物などの品質変化・劣化を予測するための数々の品質予測モデルが提案されている。例えば、輸送・流通中の呼吸は温度の関数として次式で求められる。

$$R(T) = R_0 \exp\{-E_a / (RT)\}$$

ここで、 $R(T)$: 温度 T に対する呼吸速度、 R_0 : 基準温度での呼吸速度、 E_a : 活性化エネルギー (J/mol)、 R : 気体定数 (J/(mol·K))、 T : 絶対温度 (K)、環境温度は時空間変数に依存するため、 $T(x,y,z;t)$ として表現することとなり、観測温度データや計算によって得られた温度データから呼吸速度を予測できることとなる。また、呼吸量は呼吸速度を時間で積分することによって求められることとなる。この他にも、微生物増殖予測や蒸散による目減り予測など様々なモデルが提案されており、リスクマップの強力な科学的根拠となっている。

※5 IoT の四つの層

IoT はデバイス層・ネットワーク層・データ処理層・アプリケーション層の4つで構成される。①デバイス層はセンサーでデータを取得し、アクチュエーターで機器を制御、②ネットワーク層は Wi-Fi や 5G などを使いデータを送信、③データ処理層はクラウドや AI でデータを分析し、異常検知や最適化を行う。また、④アプリケーション層はスマホや PC に通知し、遠隔操作や自動制御を実行する流れとなっている。この4つが連携し、IoT システムが機能することとなる。

※6 AI・データサイエンスの基礎理論

AI やデータサイエンスでよく使用される代表的な解析方法をいくつか挙げ、その概要と簡単な数式を説明する。

回帰分析 (Regression Analysis)

回帰分析は、変数間の関係をモデル化し、予測を行う方法であり、特に線形回帰が基本的な手法となる。線形回帰では、目的変数 y と説明変数 x との関係を直線で近似する。数式は次のようになる。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon$$

ここで、 y は目的変数 (予測対象)、 x は説明変数 (入力変数)、 β_0 は切片、 β_1 は回帰係数、 ϵ は誤差項となる。回帰分析の目的は、最小二乗法などを用いて β_0 と β_1 を推定することにある。

分類 (Classification)

分類問題では、データを特定のクラスに分けることを目的とする。代表的な手法として、ロジスティック回帰やサポートベクターマシン (SVM) などがある。

ロジスティック回帰

ロジスティック回帰は、出力が確率として解釈される分類手法である。二項分類の場合、次の式でモデル化される。

$$P(y=1|x) = 1 / \{1 + \exp^{-(\beta_0 + \beta_1 x)}\}$$

ここで、 $P(y=1|x)$ は入力 x が与えられたとき、出力 y が 1 である確率、 β_0, β_1 は回帰係数、ロジスティック回帰では確率をしきい値で区切ってクラスに分類する。

クラスタリング (Clustering)

クラスタリングは、データをグループ (クラスタ) に分ける教師なし学習の手法である。最も一般的な手法は K -means クラスタリングである。 K -means は、データを K 個のクラスタに分けるアルゴリズムで、各クラスタの中心 (重心) を計算し、データ点を最も近いクラスタ中心に割り当てる。目的は、クラスタ内の分散を最小化することにある。

$$J = \sum_{i=1}^K \sum_{x_j \in C_i} \|x_j - \mu_i\|_2$$

ここで、 J はクラスタ内誤差の合計 (目的関数)、 C_i は i 番目のクラスタ、 μ_i はクラスタ i の重心、 x_j はクラスタ C_i のデータ点、 $\|x_j - \mu_i\|_2$ はデータ点と重心のユークリッド距離の 2 乗を示す。

主成分分析 (PCA: principal component analysis)

主成分分析は、データの次元を削減するための手法で、分散が最大となる軸を見つけ出す。データが高次元の場合でも、少ない次元でデータの特徴を捉えることができる。つまり、データセットの分散を最大限に説明し得る成分を見つけ出すことができる。PCAでは、データ行列 \mathbf{X} に対して共分散行列 Σ を計算し、その固有値と固有ベクトルを求める。

$$\Sigma = \frac{1}{n} \mathbf{X}^T \mathbf{X}$$

固有値分解を行い、最も大きい固有値に対応する固有ベクトルが主成分となる。これにより、次元削減が行われ、固有値と寄与率を見ることで、各主成分がデータ全体をどれくらい説明できているかを知ることが可能となる。

決定木 (Decision Tree)

決定木は、データを階層的に分割する分類および回帰の手法であり、木の各ノードは、特徴量を基にデータを分割し、葉ノードでは最終的な予測結果を出力する。決定木の分割基準として、情報利得 (ID3 アルゴリズム) やジニ不純度 (CART アルゴリズム) などが使用される。ジニ不純度は次の式で計算される。

$$G_{ini}(t) = 1 - \sum_{i=1}^C p_i^2$$

ここで、 p_i はクラス i の割合、 C はクラスの数とし、ジニ不純度が最小になるようにデータを分割する。

ニューラルネットワーク (Neural Networks)

ニューラルネットワークは、人間の脳の仕組みを模倣した学習モデルで、特に深層学習 (ディープラーニング) は高次元のデータに有用である。パーセプトロンは最も基本的なニューラルネットワークで、入力 x に対して重み w とバイアス b を使って線形結合を行い、活性化関数などで変換する。

$$y = f(w \cdot x + b)$$

ここで、 f は活性化関数 (例: シグモイド関数 $f(z) = \frac{1}{1+e^{-x}}$)、 w は重み、 x は入力ベクトル、 b はバイアス項となる。

これらの手法は、AI やデータサイエンスの中で広く使用されており、それぞれが特定の問題に対して強力なツールとなる。