

2. 青果物選別システムの最新技術と展望

相良 泰行* Yasuyuki SAGARA

1. 共選施設と選別技術の現状

青果物共同選別包装施設（共選施設）の機能は、産地において生産者から集荷した農産物を一定の規格・基準に従って選別・格付け・包装し、商品としての荷姿に整えて流通の場に乘せる役割を果たすことにある。このような施設は、その導入の当初、生産農家の出荷労力を軽減することが主な目的であったが、現在ではさらに産地における農産物流通・販売の戦略拠点としての多様な機能を果たすようになってきた。このため、新施設の建設に当たっては、地域農産物の一元集出荷を目的とする統合共選施設が計画され、その規模はますます巨大化する傾向にある。また、これらの施設内に設置される機械設備も先端技術を駆使した高度にメカトロニクス化された選別包装システムとなり、その技術レベルはある面で選別機の先進国である欧米を追い越し、世界的な工業技術レベルからみても農業分野で開発された画期的な技術として高く評価されるに至っている。

2. 選別システムの開発の経緯¹⁻⁴⁾

選別の機械化は、まず球形果実を対象として、機械的な篩いを用いて果実のサイズにより選別する「形状選別機」に始まり、次に果実の重量を機械的秤で計って選別する「重量選別機」が開発された。この段階で共選施設では、これらの階級選別機のみが用いられ、等級選別は人間の「視覚」による主観的判断に委ねられ、階級選別工程の前後で多大の労力を費やして行われた。次の段階では、重量選別機の計測部にロードセルやフォースコイルを用いる「電子秤重量選別機」が開発され、現在では技術的にも信頼性が高く、安定・定着した装置となっている。

一方、形状選別にはカーテンビームを用いて光学的に果実のサイズを計測する方式が導入され、次にモノクロームカメラで撮影した撮像を画像処理して果実の形状を抽出する「画像処理式形状選別機」が開発された。これにより、複雑な形状を有するキュウリなどの長物青果物

の選別も可能となった。ここに至って等級選別要因の一部が機械的に判別可能となり、等階級同時選別への道が開かれた。さらに、撮像センサーをカラーカメラに変えることにより、果実表面色の着色度・傷などに関する詳細な外観の等級判別情報と階級判別要因とを総合的に解析・判定して選別する機能を持つ「カラーグレーダー」が開発され、主に落葉果実の選別ラインに導入されてきた。

等級選別要因の中でも、青果物内部の品質を判別する計測技術の出現は、選別機の開発当初からの長年の夢であったが、現在では「内部構造」に関してスイカの打音・密度計測による判別が可能となり、また、電磁波、特に近赤外線の反射または透過スペクトル分析による「糖度・酸度・熟度センサー」が開発され、選別ラインへ実装されるに至っている。これら内部品質の測定システムについては一部に性能に関する客観的評価に疑問は残るものの、選別システム全体としては世界的なレベルからみても、画期的な技術として注目を集めている。現

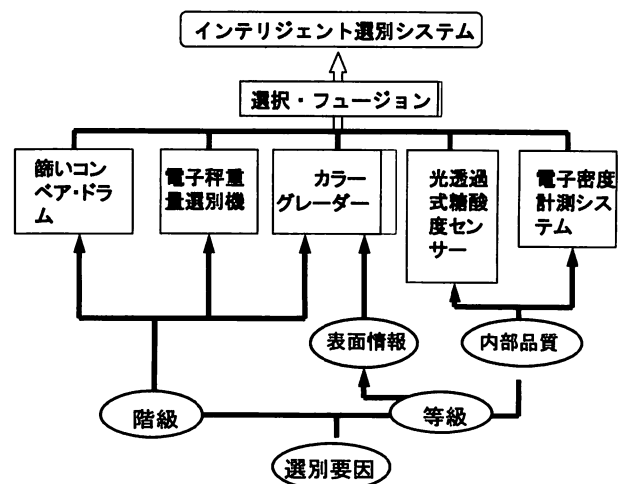


図1 青果物のインテリジェント選別システム

* 東京大学
The University of Tokyo
原稿受理 2003年2月17日

在では、図1に示すように、対象青果物の「重量」「形状」「外観」「内部品質」などの判別要因を品目の特性と重要度に応じて選択し、それらの判別要因を自由に組み合わせて自動的かつ総合的に判断する選別システム、すなわち「インテリジェント選別システム」の利用が可能となっている。

ここでは、選別能力・精度・汎用性の面からみて信頼性が高く、技術的にも確立されたと考えられている階級選別機の代表として「電子秤重量選別機」を、また、最新の選別システムとして注目を集めている「画像処理選別システム」、さらに、内部品質計測システムとして「電子密度空洞果選別システム」および「糖度・酸度・熟度センサー」を取り上げて、主にこれらのシステムに関する研究開発の経緯や動向を計測技術の観点から概説する。

3. 電子秤重量選別機

3.1 計測部の機構

重量選別機は青果物の重量を基準にして選別する機能

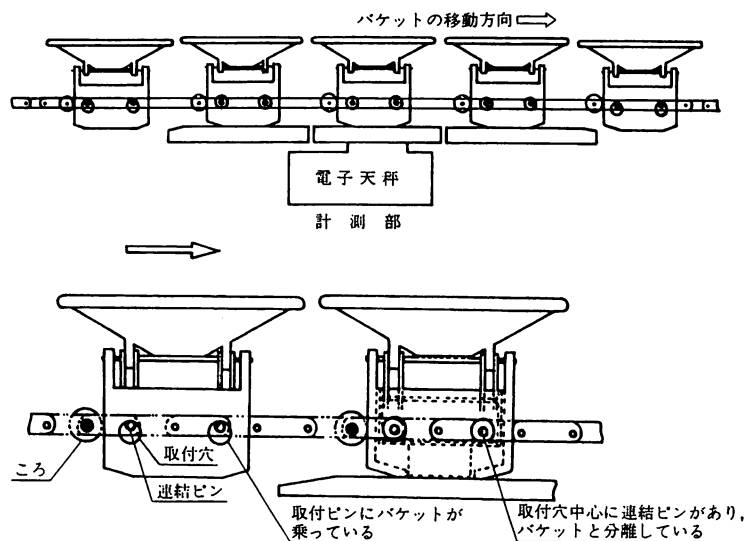


図2 電子秤重量選別機の計測方法 (前田, 1991)

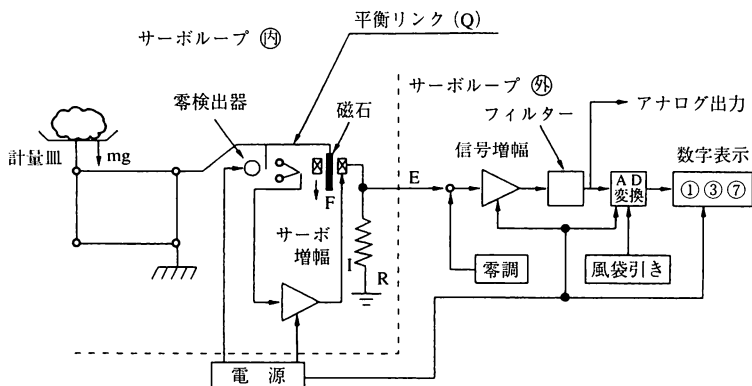


図3 フォースバランスの計測原理

を有し、リンゴ、ナシ、モモ、カキなどの落葉果樹、ピーマン、トマトなどの果菜、バレイショなどの選別に広く利用されている。計測方式はフォースコイルやロードセルなどの重量センサーを計測の心臓部として用いる、いわゆる電子秤重量選別機に主流が移ってきた。図2に示すように、この方式では電子秤を選別ラインの一箇所を設置して計測部とし、電子式天秤の秤量台上にバケットを滑走させて重量を瞬時に計測し、電子式コンパレータにより階級を判定する方式をとっている。すなわちバケットは図2の下図に示すように、2条のチェーン間に装着された2本の連結ピンに支持された状態で青果物を搬送している。このバケットが計測部に至ると、振動防止のために秤量台前に設けた案内レールによりわずかに持ち上げられて連結ピンと切り放され、チェーンにとりつけられたコロに押されて秤量台上を滑走し、最適測定点で重量の計測が行われる。計測時のバケットはチェーンの拘束から開放され、コロとバケット側面の一点のみで接触する状態となる。このため搬送チェーンの重量計測精度への影響を極力避けることが可能となり、測定精度に格段の進歩がもたらされた。バケットの最大選別速度は毎時10,000個程度で、この時200g程度の青果物を選別して±0.5g程度の精度が容易に得られている。

3.2 フォースバランスの測定原理

図3はバケットコンベア下部に設置される電子秤部分に内蔵されているフォースバランス(電磁力平衡式)の基本原則を示す概略図である。図の点線部分から左側はサーボループを構成している部分で、ロードセルに変換可能な部分でもある。右側は両者に共通し、また一般の電子秤に共通して用いられている測定・制御コンポーネントを示している。すなわち、ロードセルを検出端として用いる場合には点線部分の右側、すなわちサーボループの外側はライン外にセット可能となる。

計量皿に荷重がかかると、その重量により平衡リンク(Q)が傾こうとするが、零点検出器により検出された不平衡信号がサーボ増幅器を介して電流(I)を電磁コイルに供給する。これにより磁石は平衡リンクを平衡させる方向に力(F)を発生し、平衡リンクは常に水平状態に保持される。発生した力(F)とコイル電流(I)は正比例するので、安定度の高い抵抗(R)を介して電流(I)を電圧(E)としてサーボループ外に出力させる。すなわち、電源を投入すると平衡リンクの一端に取り付けられた電気的零点検出器と平衡力(復元力)を発生するフォースコイルの磁石が同時に作動し、平衡リンクを水平(零位置)に保つ機構と

なっている。出力された電圧をアンプ（増幅器）・フィルタで信号処理を行うことによりアナログ出力を得る。さらにAD変換器でアナログ出力をデジタル信号に変換すると、荷重をデジタル表示することも、また、マイクロコンピュータで多様な計算処理を行うことも可能である。従来の機械秤重量選別機では、果実の投入による計量部の振動が安定するのに数秒間が必要であったが、この方式では平衡動作が0.1～0.2秒以内に完了するため、極めて精度の高い測定が可能であり、さらに秤量棚の変位量も0.1mm以下であるため安定性・耐久性にも優れている。

4. 画像処理選別システム

4.1 モノクローム選別システム

1986年にキュウリを対象にした白黒CCDカメラによる画像処理選別機が実用化され、等階級同時選別方式の先駆けとなった。図4に我が国で初めて学会で発表された画像処理選別機の構成図を示す⁵⁾。現在利用されている装置もハード面では基本的にこの構成と変わらない

が、ソフトウェアの面では対象青果物の種類によって等階級判別要因が異なるため、これに対応する各種の解析アルゴリズムが開発されている。

図中の光学センサーとして用いられるカメラは撮像素子の材料と構造によって撮像管型と固体撮像素子に分類されるが、現在ではリニア型CCD固体撮像素子を内蔵したカメラが多く用いられている。搬送コンベヤ上のキュウリは白熱電球などで均一に照明され、背景（コンベヤ）から抽出したキュウリの2値画像データは画像位置の調整、画像強調、孤立ノイズ除去などの前処理の後、パターンメモリに2次元配列で書き込まれる。パターンメモリは複数用いられ、データの書き込みと呼び出しが計測回路からのメモリ切り替え信号により制御される。計測回路はマイクロプロセッサのコマンドを解釈し、パターンメモリを走査して画像外縁の座標を求めて中間パラメーターとし、これをマイクロプロセッサに送る。さらに、計測システム各部の動作も制御する。マイクロプロセッサでは中間パラメーターを解析することにより、等階級判定データを算出し、このデータは果実排出機構の駆動や精算事務に利用される。現在のところ、画像処理選別機の1時間当たり処理速度は約1万個であり、これは電子秤重量選別機の処理能力に相当する。

キュウリの階級は長さで判別され、等級は他の5つのパラメーターで決められる。その解析アルゴリズムの一例を図5に示した⁶⁾。実際の等級判定は、まず、長さにより階級を決定し、次に、それぞれの階級ごとに設定した等級判定基準値と実測されたパラメーターの値とを比較することにより「秀」「優」「良」の等級判定が行われる。その方法として、たとえば、5つのパラメーターすべてが秀と判定された物だけが最終的に「秀」と判定され、また、4つのパラメーターが秀と判定されても、残り一つのパラメーターが良と判定されれば、最終判定結果を「良」とする判定する、いわゆる論理演算法でAND方式と呼ばれる方法などが用いられている。

4.2 カラーグレーダー⁷⁾

近年、白黒カメラの代わりにR.G.B.カラーカメラを光センサーとして用い、青果物の形状に関する情報に表面色の情報を加味して画像処理を行い、等階級同時判別を行う「カラーグレーダー」が開発され、リンゴ、モモ、トマトなどの共選施設に導入されてきた。その計測処理部の概念図を図6に示す。計測処理部はカメラ、照明装置と反射ミラー、中央処理装置、制御処理

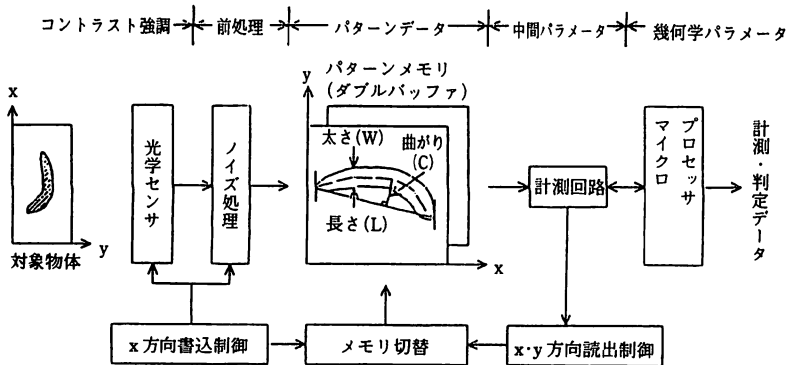


図4 画像処理選別機の計測・制御システム

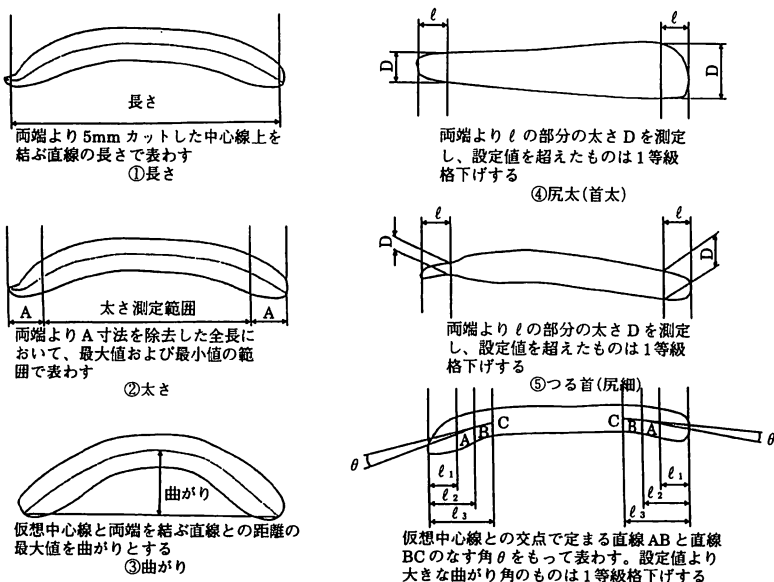


図5 キュウリの選別アルゴリズム

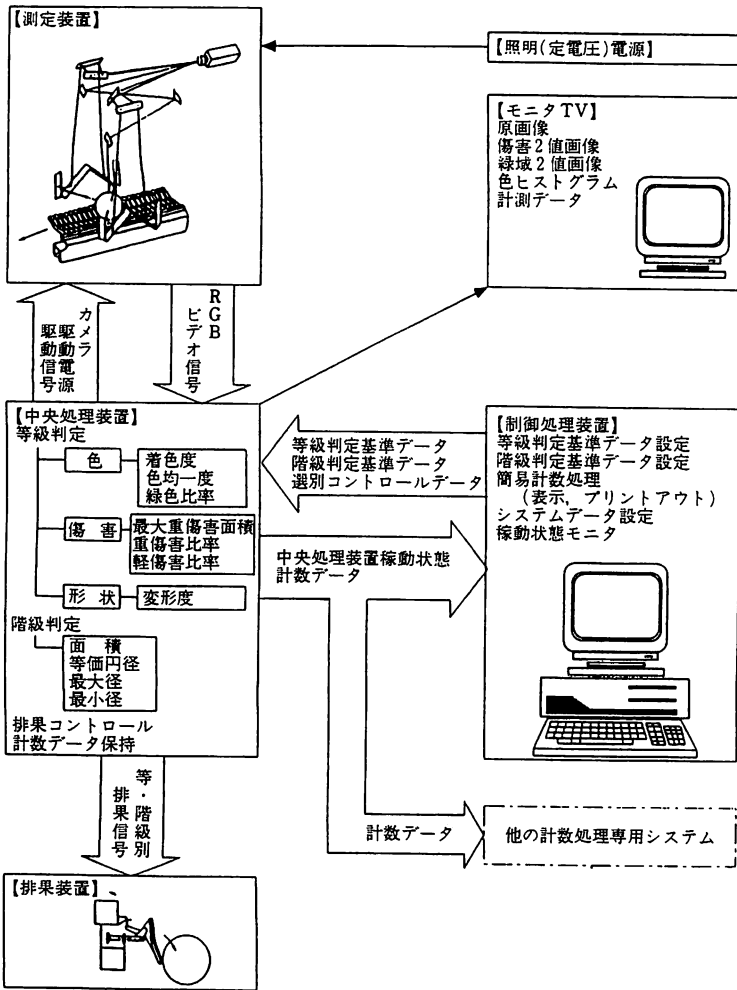


図6 カラーグレーダーの画像計測制御システム

実表面のカラー画像を検出する。この装置の開発の段階では、果実表面の全表面情報を画像として検出するために、複数のカメラを多方向に設置したり、果実を回転させて機械的スキャンを行うなど、いろいろな工夫が試みられた。実用的にはカメラの直接撮像による果実上面画像と2枚のミラーによる2つの側面画像の合計3画像を画像処理に供する簡略化された方式が採用されている。最も単純な方式ではミラーを設けず、移動している果実上面のみを撮像し、大きさと着色を判別している。

カメラのR.G.B.出力信号は中央演算装置に送られ、等級の判定要因として表面色(着色度, 均一性, 緑色比率), 障害(最大重障害面積, 重障害比率, 軽障害比率), 形状(変形度)に関する情報に加工される。これらの等級判定要因のパラメーターはすべての撮像画について1画素ごとに色値を求め、色値とその画素数から作成したヒストグラムに基づいて計算される。その一例として、図7に128階調で求めた色値ヒストグラムに基づく色・障害・形状に関するアルゴリズムを図示し、その内容を表1に示す^{7, 8)}。階級の判定要因として表面積, 等価円径, 最大および最小径などが計算される。これらの情報は制御処理装置から送られる等階級判定基準データと比較され、最終的に等階級が判定される。判定結果は等階級別排果信号として排果装置に送られ、その排出ソレノイドを駆動する。中央処理装置の計数データは制御処理装置や他の計数処理専用システムに送られ、精算事務処理などに利用される。

最近、柑橘類およびスイカのカラーグレーダーでは複数のカメラを果実搬送コンベア周囲に設置し、果実を機

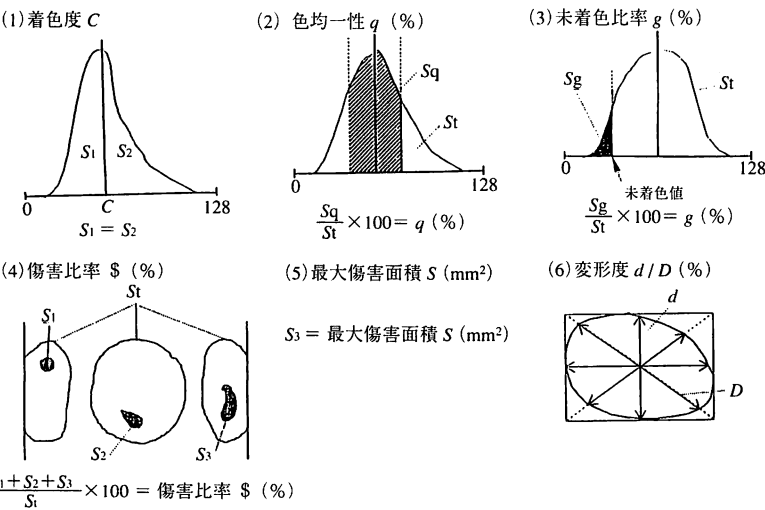


図7 カラーグレーダーの選別アルゴリズム⁷⁾

表1 カラーグレーダーによる等階級判定のアルゴリズム (図7参照)

選別パラメータ	記号	アルゴリズムの説明
1) 着色度	c	128階調で求めた色値ヒストグラムの中心値
2) 色均一性	q	色値(c)を中心にして指定した色幅内にある画素数の総画素数に対する割合
3) 未着色比率	g	指定した色値より緑側にある画素数の総画素数に対する割合
4) 障害比率	\$	抽出した障害画素数の総画素数に対する割合
5) 最大障害面積	s	連続した傷で構成される最大集合画素の面積
6) 変形度	d/D	最大径Dに対する最小径dの比率(柑橘を除く)

械的に反転させながら果実の全表面画像を撮像するシステムが導入され、その処理速度は柑橘類で毎秒約7個に達している。また、このようなシステムは甘藷などの複雑な形状を有する農産物や花卉にも適用され、それぞれ複雑な等級選別アルゴリズムが用いられている。

5. 内部品質判定システム

等級選別要因のなかでも、青果物内部の品質を判別する自動計測技術の出現は、選別機の開発当初からの長年の夢であったが、現在では「内部構造」に関して、果実の打音・密度・軟X線画像などの計測により、判別が可能となっている。また、近赤外分光法を原理とする「光糖酸度・熟度計測システム」が実用化され「味」に関する評価が可能となっている。ここでは、「密度の計測による空洞果選別システム」と「光糖酸度・熟度計測システム」について以下に概説する。

5.1 電子密度空洞果選別システム

スイカの空洞果選別に果実の密度を電氣的に計測して空洞果を判別する方式が開発され、実用装置として導入が進展している現状にある。一般に果実の密度は成熟に伴って変化することが知られている。そこで、適熟正常果の密度範囲を選び、これを基準として選別を行えば空洞果などの異常果を判別して、除くことが可能となる。

空洞果の判別には密度0.005～0.006 g/mlの測定精度が必要とされ、これの測定法として、果実の重量を電子秤で、また、体積を微小静電容量計で測定し、密度を求める計測システムが開発された。果実の重量測定は電子秤選別機で果実重量の0.005%程度の測定精度が得られており、このシステムの開発の力点は体積測定に必要な精度を技術的に達成することにあった。その測定原理を説明するために、図8に同心二重導体球の内径と静電容量の関係を示す計算式と、半径150～∞ mmの中空外球

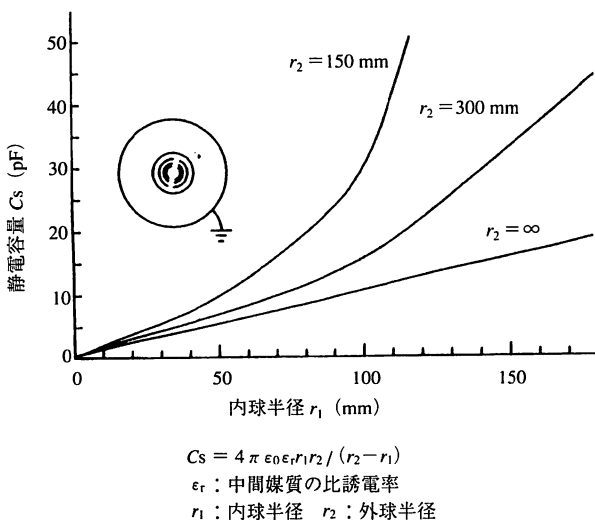


図8 同心二重導体球の静電容量 (加藤, 1992)

内に半径0～150 mmの内球を入れた場合、すなわち、同心二重球間の静電容量試算結果を示す。この図からわかるように、外球の半径が極めて大きい場合には、両者は線形関係となり、静電容量は内球半径に比例する。本装置はこのような測定原理に基づいて開発されたものであり、以下に実用装置の概略について述べる。

実用装置は図9に示すようにトンネル型電磁波シールド、導電ゴム製吸盤電極と静電容量変換器より構成されている。また、吸盤電極と静電容量変換器が一体化された設計となっている。底部開口型トレーにより搬送されるスイカが電磁波シールド内に入ると、トレーの開口部の中を吸盤電極がシリンダにより押し上げられてスイカを底部から支える。このとき通電して容積が計測され、この値と別途ロードセルなどで計測される果実重量の値から密度が演算される。

スイカの場合、空洞果の判別には密度0.005 g/mlの精度が要求される。現在、果実の重量測定は電子秤選別機でも果実重量の0.005%程度の精度が得られている。したがって、この装置の開発に寄与した最大の要因は容積測定に必要な精度を技術的に達成することにあったと考えられる。このため周波数1 Mzの高周波で最小0.001 pFまで計測可能な微小静電容量計が開発されている。なお、図10に示すようにスイカでは密度0.95～0.96 g/mlのものが内部品質上もっとも優れていると判定され、これよ

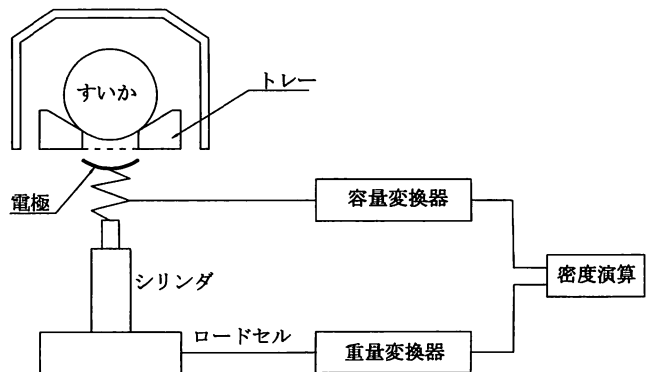


図9 スイカの密度計測システム

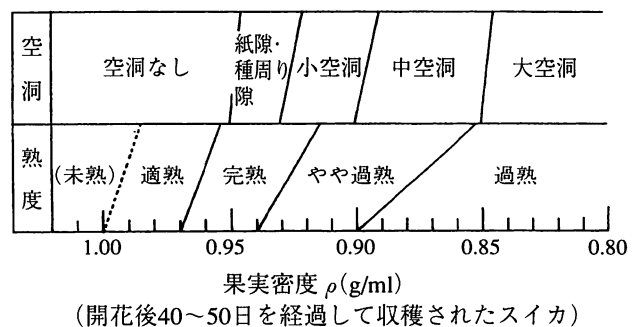


図10 スイカの果実密度と空洞・熟度との関係 (加藤, 1992)

り低い値の範囲では未熟果，また，高い値になるほど空洞の程度が大きくなると判定される．このシステムはマスクメロンの熟度判定にも利用され始めている．

5.2 光糖度・酸度・熟度センサー^{9,10)}

落葉果実を対象とする共選施設では，1990年頃からカラーグレーダーの計測部に「光糖度センサー」を設置し，果実の糖度を検出して等級判別要因に加えるシステムが導入され始めた．この原理は，果実の近赤外吸収スペクトルもしくはこれの2次微分スペクトルの中から，果実の糖度ともっとも相関の高い波長を選び，その波長の吸光度と糖度の検量線を作成して果実の糖度を予測する方法，すなわち「近赤外分光法」に基づいている．

図11にその計測原理を説明するためのブロックダイアグラムを示す．まず，コンベア上の果実に光を照射して果実表面からの反射光をレンズで集光し，これを分光器にかけて所望の波長の近赤外線のみをとりだす．次に受光素子で電気信号に変換し，それぞれの波長の反射強度を求め，最後に別途実験から求めた数値モデルを用いて果実の糖度を算出する．この方式では果実の反射光を分光するので「後分光」方式と呼ばれ，あらかじめ分光した波長帯の光を照射する「前分光」方式と区別されている．近年，図12に示すように，柑橘類に照射した光の透過光強度を測定して，果実の糖酸度を計測する「透過光式糖酸度センサー」が開発され，糖度と酸度を同時に計測可能なシステムとして利用されている．また，糖度・酸度センサーと同様に「熟度センサー」が一部の施設で導入され始めている．ここでは，果実の熟度を表わす物理的指標として表皮のクロロフィル含量と果実の硬度を電磁波の吸収度と相関させて検出し，これらを組み合わせて1つの熟度指標としている方式について述べる．

図13は西洋ナシ（品種：ル・レクチェ）の貯蔵中における電磁波の反射特性の経日変化を示す．波長帯400

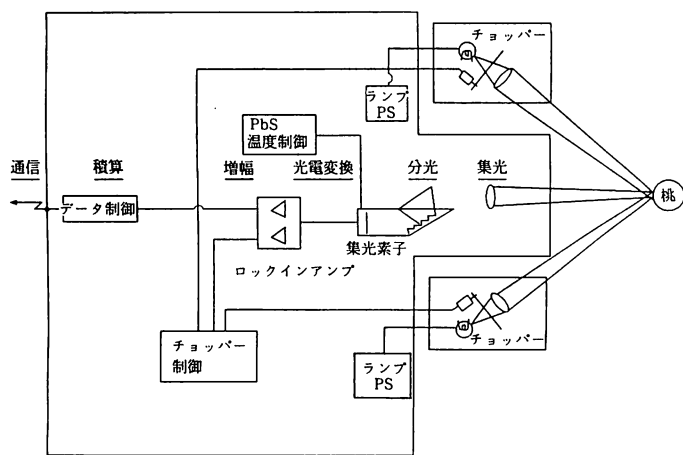


図11 光糖度センサーの計測方式

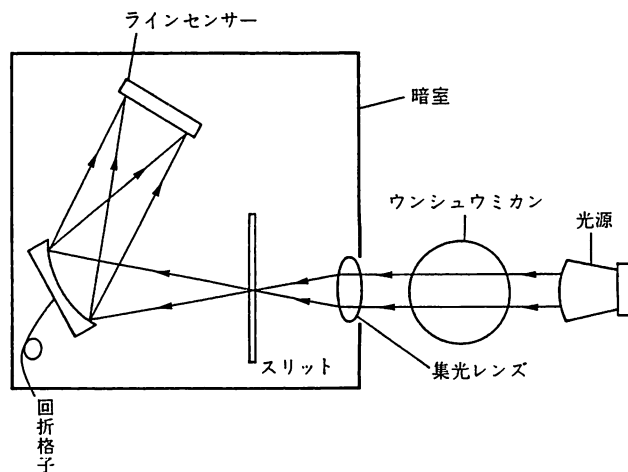


図12 透過光式糖酸度センサー¹⁰⁾

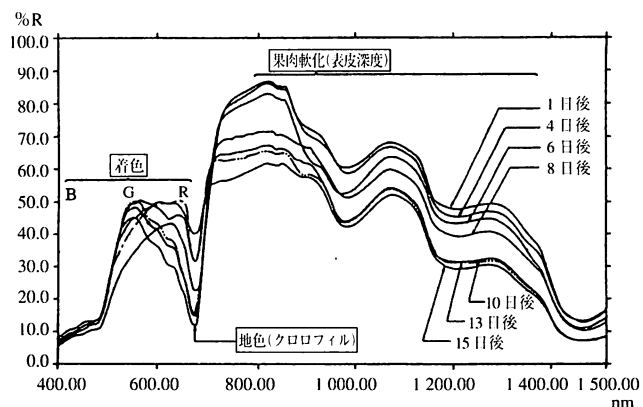


図13 西洋ナシ（ル・レクチェ）の熟度変化と光反射スペクトル

～700 nmの範囲からは果実表面色の情報が得られ，特に680 nm付近はクロロフィルの吸収波長であり，果実表面の着色度を表わす情報として利用される．果実硬度の変化は800 nm近傍の波長を採用することにより検出可能と考えられる．電磁波の反射特性は果実の種類・品種により変化するので，実際にはそれぞれの果実・品種を対象として，ここに示したような反射特性を計測し，検出しようとする熟度パラメーターの検出が可能な波長を選択してパラメーターを数量化し，これを演算処理することにより熟度指標を算出する方法が採られている．

6. 選別機の技術革新に伴う周辺技術への影響

選別システムの進歩は選別ラインの工程編成・機械設備・配置・精算方式・施設運営などにも影響を及ぼしている．たとえば，カラーグレーダーや糖度・熟度センサーを装備した選別ラインでは，人力による等級選別作業の内容が簡略化もしくは機械選別の補助作業的なものとなっている．その典型例を示すと，投入工程で等級選別を行う「エリア方式」が考案され，選果機条数と等級選

別人数の大幅な削減が達成されている。また、果実の搬送に「フリートレイ」を用いる方式が開発され、実用に供されている。この方式は、選果包装工程間の落差衝撃による果実の傷つきをほぼ完全になくし、また、バーコードによる等級仕分けなど青果物の集荷から出荷・精算に至るコンピューター管理を実現させ、さらに真空吸引式による自動箱詰装置の導入などを可能にした画期的なものであり、リンゴ、ナシ、スイカなどの産地を中心に普及している。このような選別システムの急速な技術革新が進むことによって、施設運営の面でも、高度にメカトロニクス化された選別システムにマッチした、合理的な運営方式への変革が続けられている現状にある。

7. 今後の課題 ～食感性工学の提唱～¹¹⁻¹⁴⁾

これまで述べたように、共選施設には最先端の光センシング技術やメカトロ技術を駆使した「インテリジェント選別システム」が導入され、これにより、従来から人間の労力と主観的判定に頼ってきた等級選別工程の自動化が急速に進展してきた。しかし、これらのシステムの中には技術の評価があいまいな状態であっても、共選施設の技術先取り競争によって、導入が先行してしまい、導入後に性能上の問題点が浮上している場合もある。このため、センシング技術やシステムの客観的評価法の確立とその基準化が緊急の課題となっている。

一方、これらのセンサー出力を「人の感性のスケール」に変換するための手法の開発が熱望され、これらの問題を解決するための新しい研究の領域として「食感性工学」の発展が期待されている。食感性工学の主な目的は、人が感じる「おいしさ」や「嗜好」を工学的な方法で計測・評価し、食品の物質的要因と人の心理的要因を抽出して、これらの相互関連性を明らかにし、究極的には「特定の食べ物に対する感情の動態」を定量化すること

にある。その結果は生産・加工工程に反映され、いわゆる「消費者牽引生産 (Consumer-driven Production) 方式」やプロダクトマネージメントの実現が可能となる。欧米では「消費者起点工学 (Consumer-oriented Engineering)」の創造が21世紀の産業に技術革新をもたらすと予測している。また、食感性工学は「食」の分野でこの新しい工学の構築に貢献する日本のオリジナルな科学技術分野として注目され、その発展が期待されている。

文 献

- 1) 相良泰行：農流技研会報，187（月刊フレッシュフードシステム 24（4）），50（1995）。
- 2) 相良泰行：農流技研会報，188（月刊フレッシュフードシステム 24，（5）），54（1995）。
- 3) 「共選施設の手引き」（JA全農施設資材部編），p.173，JA全農，東京（1994）。
- 4) 相良泰行：食品流通技術，23，（11），4（1994）。
- 5) 前田章，村上篤道：「農業機械学会第37回総会講演要旨」，p.146，（1978）。
- 6) 松田郁生：「長物青果物の画像処理による形状選別に関する基礎研究」，東京大学博士論文，（1990）。
- 7) 前田弘：「青果物の選別包装施設におけるメカトロニクス化に関する研究」，東京大学博士論文，（1991）。
- 8) 前田弘：「青果物の非破壊選別技術について」，（株）マキ製作所，浜松（1991）。
- 9) 岡部政之：アグリビジネス，4（14），65（1989）。
- 10) 木村美紀夫：「近赤外線分析法による果実の非破壊品質評価について」，全農施設資材部，東京（1993）。
- 11) 相良泰行：日食科工誌，41，456（1994）。
- 12) 相良泰行：日食科工誌，43，215（1994）。
- 13) 相良泰行：「食の先端科学」，朝倉書店，東京（1999）。
- 14) 相良泰行：「食品感性工学」，朝倉書店，東京（1999）。