

総 説

光センシングによる青果物選別システムの開発動向

相 良 泰 行*

Recent Developments of Sorting and Grading Systems for
Fruits and Vegetables by Optical Sensing

Yasuyuki SAGARA

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture,
The University of Tokyo 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113

1. 共選施設の現状

共選施設とは産地において生産者から集荷した農産物を一定の基準に従って選別・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機能を有する施設のことである。本稿では特に「共選施設」が青果物共同選別包装施設を指すものとする。

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青果物流通・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、新施設の建設や旧施設の更新に当たっては、地域青果物の一元集出荷を目的とする統合選別施設が計画され、その規模は益々巨大化する傾向にある¹⁾²⁾。また、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システムとなり、その技術レベルは農業分野で開発された画期的技術として、工業分野でも、世界的にも高く評価されている。

本稿ではこのような現状にある共選施設に設置される選別包装プラントの選別工程を構成する「選別機」の導入状況を概観すると共に、近年、急速に実用化されてきた光センシングに基づく選別システムの研究・開発の動向とその技術的評価について述べる。

2. 選別システム導入の概要

(1) 階級選別と等級選別

青果物を選別する意義は、所定の基準により対象品目

の等階級を揃え、その基準に基づく等階級レベルの品質を保証する事にある。したがって、選別システムの基本的な機能は「人為的に定めた基準に従って、非破壊で全数を検査し、その基準を越える青果物と基準以下のものに仕分ける」ことにある。しかし、「基準」は青果物の種類、品質を評価する指標のマーケティング面での重要度などにより多様であり、選別のための測定項目も当然品目別に異なる。その選別方法を大別すると、規格の大小基準に相当する重さや大きさに基づいて選別する「階級選別」と、品質基準に相当する外観、損傷、味等に基づいて選別する「等級選別」に分けられるが、いずれにせよ共選施設における選別方式に特に要望される条件は、非破壊・遠隔・高速度の3条件である。

(2) 光センシング技術の導入

選別工程の機械化は、まず、柑橘類を対象とした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、次にリング等の落葉果実の重量を機械秤または電子秤で計って選別する「重量選別機」が開発された¹⁾²⁾。一方、先に述べた選別方式の3条件を満足する情報伝達媒体としては電磁波が最も適しており、1970年代前半からいわゆる光センシング技術を利用した選別機の開発・利用が進展してきた。その先駆けとして、まず、光のビームを用いて光学的に果実のサイズを計測する形状選別方式が導入され、次に白黒カメラで撮影した画像を処理して果実の形態を抽出する「画像処理選別機」が開発された。これにより複雑な形状を有するキュウリ等の長物青果物の選別も可能となった。さらに、撮

* 東京大学農学部 (〒113 東京都文京区弥生 1-1-1)

像センサをカラーカメラに変えることにより、果実表面の着色度・傷等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」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。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。

(3) 内部品質判定選別機の出現

等級選別要因のなかでも、果実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」に関してスイカの打音・密度計測による内部空洞果の判別が可能となり⁴⁾、また、光センシングの分野では近赤外線の反射または透過スペクトルの分析による糖度・酸度・熟度センサ等が開発され、選別ラインへ実装されるに至っている。

現在では、対象青果物の「重量」「形状」「外観」「内部品質」等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を構築し、等階級の同時選別を行う方式、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。

3. 光センシング選別システム

(1) 光線式選別機

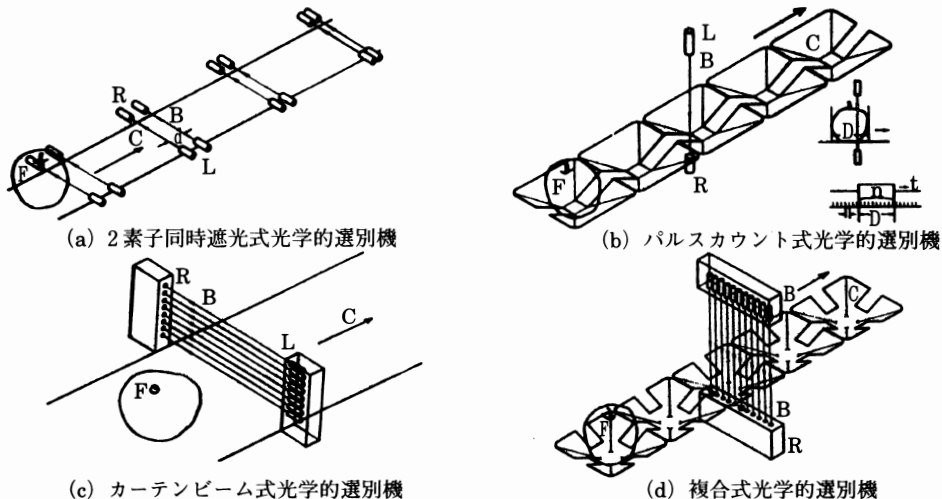
機械式形状選別機による果実の損傷問題を解決するた

めに、1976年にフォトセルを用いた光線式選別機が開発され、その後、カーテンビーム式へと発達した。図1にその発達過程を示す³⁾。

図の(a)は2素子同時遮光方式と呼ばれる日本で最初の光線式のもので、分級基準の果径dに相当する間隔で、1階級2組の投光機Lと受光機Rをセットし、コンベア上を搬送される果実が2組の投・受光機を同時に遮光した時、果実は押し板または空気の噴流により排出される。コンベアの下流に行くほど投・受光機のセット間隔を狭くすることにより形状選別が可能となる。

(b)は上に述べた方式の直後に開発されたパルスカウント式のもので、バケットに果実の進行方向に平行した矩形の穴を空けて、果実の外周が垂直方向の光束を横切るようにし、この時に、発生する影の長さをパルスとして検出する。すなわち、影の時間的長さの範囲でバケットの動きに同期して発生するロータリエンコーダからのパルス数をカウントすることにより、果径を計測するパルスカウントと呼ばれる方式である。

(c)はカーテンビーム式と呼ばれるもので果実が光束のカーテンを通過した時に遮られた光束数から果高と果径を計測する方式である。(d)はカーテンビームの真中の検出器でパルスカウント式によりコンベア進行方向の果径を計り、他のビームにより横幅を計って、両者より平均果径を算出して分級基準と比較・選別する「十字測定」とも呼ばれる複合式である。これらの方式の中で、カーテンビームを用いる(c)と(d)の方式が柑橘類や



F: 果物 C: コンベア L: 投光器 R: 受光器

図1 光線式選別機の発達過程³⁾

落葉果実の選別に普及し、現在でも使用されている。

(2) 画像処理選別機

1986年には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2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型に分類されるが、前者は後者に比べてカメラのサイズが大きく、さらに残像現象が生じ、寿命の面でも劣ることから、現在では後者のリニア型 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等で均一に照明され、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、孤立ノイズ除去等の前処理の後、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つのパラメータで決められる。その解析アルゴリズムの一例⁶⁾を図3に示した。実際の等級判定は、先ず、長さにより階級を決定し、次に、それぞれの階級毎に設定した等級判定基準値と実測されたパラメータ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、例えば、5つのパラメータ全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つのパラメータが秀と判定されても、残り一つのパラメータが良と判定されれば、最終判定結果を「良」と判定する、いわゆる論理演算法で AND 方式と呼ばれる方法等が用いられている。

(3) カラーグレーダ

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」が開発され、リンゴ、モモ、トマト等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4に示す⁷⁾⁸⁾。図に示すように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、制御処理装置、モニタ TV で構成される。

整列供給装置によって計測部に供給された果実の表面をハロゲンランプで均一に照明し、数枚の反射ミラーと1台の新しく開発された「高分解能 R.G.B. リニアイメージセンサカラーカメラ」を組合せることにより、果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

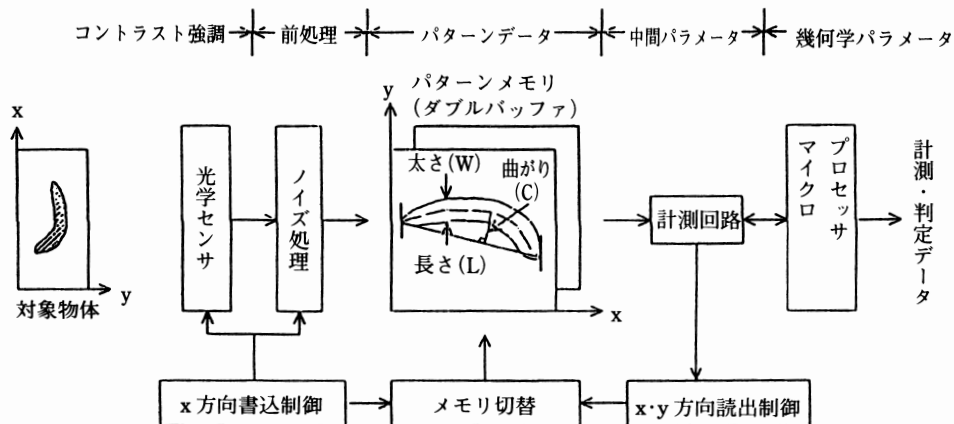
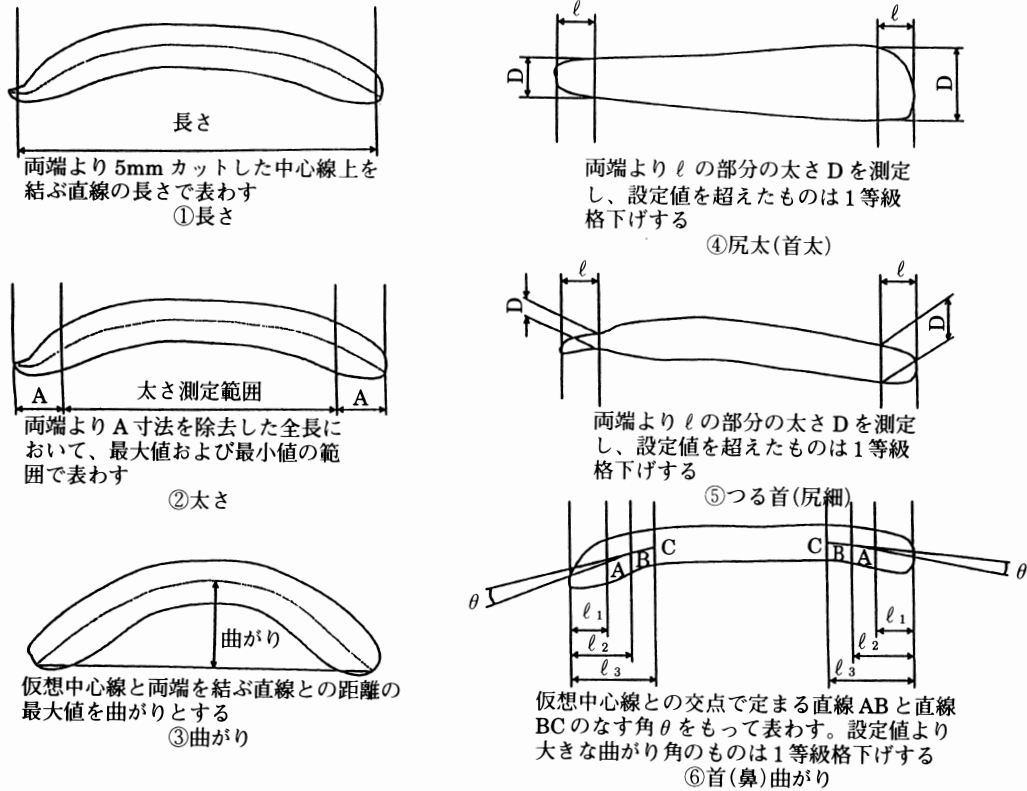


図2 画像処理選別機の計測・制御システム⁵⁾

図3 キュウリの選別アルゴリズム⁶⁾

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色々工夫が試みられた。実用的には図5の例に示されるように、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。この方式が選択されたのは、ミラーの占有面積が少なく、ハロゲンランプの設置スペースを確保する事ができるなどの技術的利点とミラーを主体にして計測部を構成できることから、装置コストが安価になるためである。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⁹⁾。

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は全ての撮像画について1画素毎に色値を求め、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6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⁹⁾。また、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、精算事務処理等に利用される。

(4) 光糖度・酸度センサ

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の計測部に「光糖度センサ」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。これの原理は、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、果実の糖度と最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利用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。

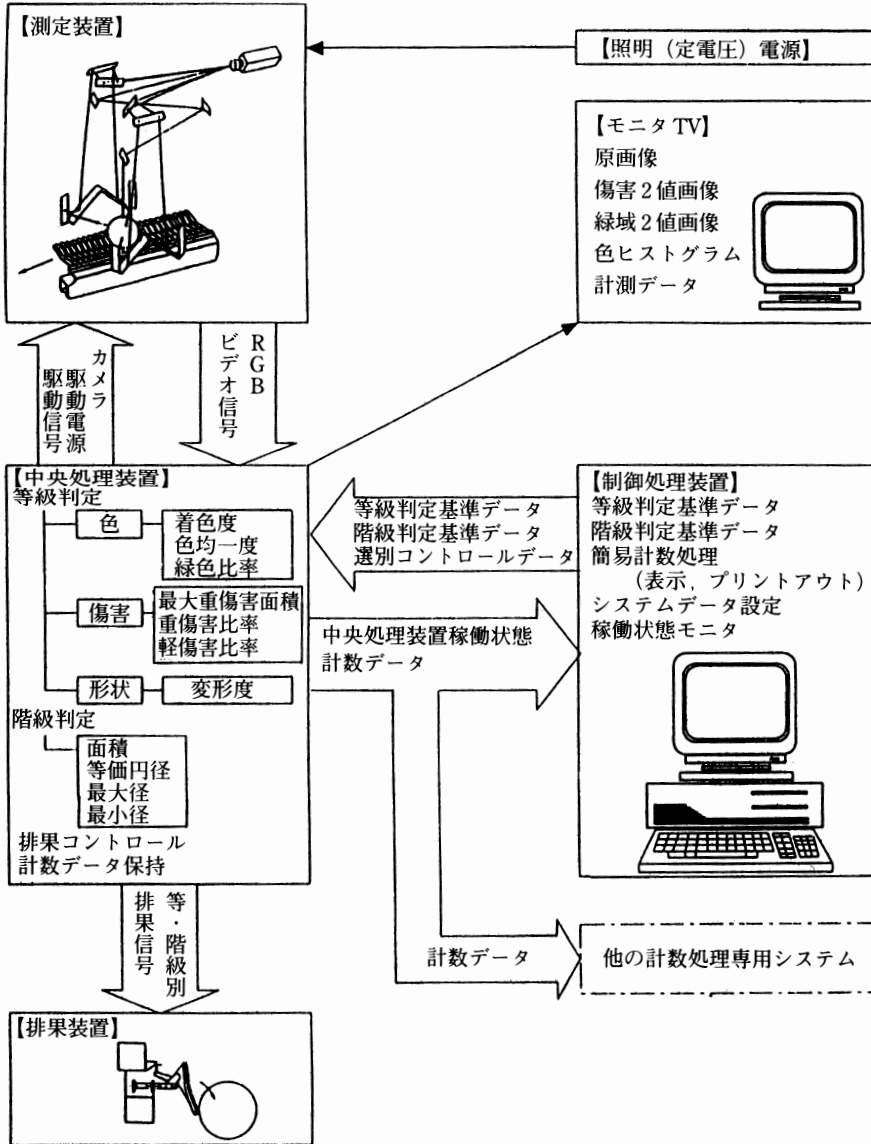


図4 カラーグレーダの計測システム⁷⁾

図7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¹⁰⁾。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理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。光の反射強度から糖度を算出するための検量線は対象とする果実の種類・熟度のばらつき程度、さらに、等級の設定等によって異なる。現在のところ、各選果場で異なる検量線が用いられ、これが販売戦略のデータとなって公表されていないために、このセンサの実用的精度を客観的に評価するのは困難である。しかし、すでに導入した施設では生産農家との格付けに関するトラブル

の解消に役立ち、また、「糖度センサ」が商品差別化の手段として市場で認知されることを期待しているようである。

最近、温州ミカン等に照射した光の透過光強度を測定して、果実の酸度を計測する「酸度センサ」が開発されて注目を集めている。果実の酸度は近赤外領域の 2 次微分スペクトルを採ることにより、計測可能と考えられてきたが、現在、実用装置の導入が検討されている段階にあり、計測方法の詳細は不明である。

(5) 熟度センサ

現在、糖度センサと同様に「熟度センサ」が一部の施設で導入され始めている。しかし、果実の熟度を定義する要因はメーカーによって異なり、それが公表されていないために、このセンサの実態は必ずしも明らかにされていない。ここでは、果実の熟度を表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。

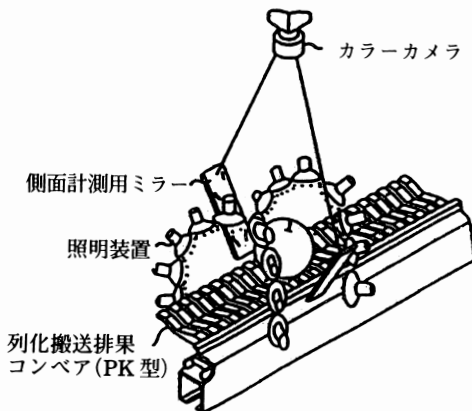


図 5 実用カラーグレーダの計測部⁸⁾

図 8 は西洋ナシ (品種:ル・レクチュ) の貯蔵中における電磁波の反射特性の経日変化を表す¹¹⁾。波長帯 400 ~ 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の検出が可能な波長を選択してパラメータを数量化し、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。計測システムは図 7 に示した糖度センサの場合と基本的に同様と考えられる。

4. 糖度センサの性能評価

(1) 新技術評価の課題

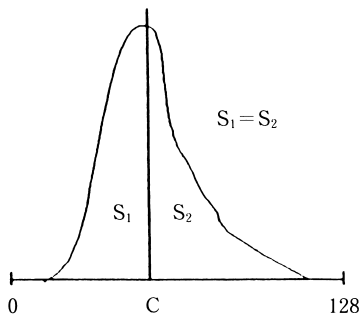
これまでに述べたように青果物を対象とした光センシング技術の進歩は急速であり、メーカー間の新技術開発競争は激化の一途をたどっている。一方、共選施設では産地間競争に打ち勝つための「差別化商品」を販売ルートに乗せるために、新技術を先取りする形での導入が進められている状況にある。しかし、これらの新技術、特に味や熟度に関するセンサの計測・判別方式は必ずしも明らかにされておらず、また測定精度に関する客観的な評価も確立されていない現状にある。さらに、これらのセンサを導入した施設の中には、判別結果に対する生産農家からのクレームのために、このセンサの利用を見合わせているところもある。このため、これらセンサの実用面における客観的評価が緊急な課題となってきた。

(2) 糖度センサの性能評価

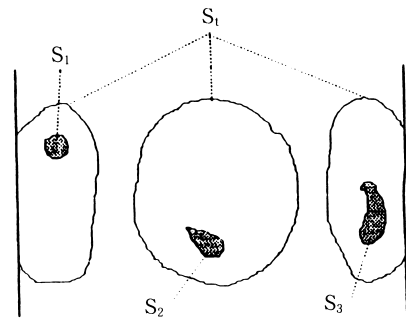
筆者らは糖度センサの性能評価に関する研究の一環と

表 1 カラーグレーダによる等階級判定のアルゴリズム (図 6 参照)⁸⁾

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)



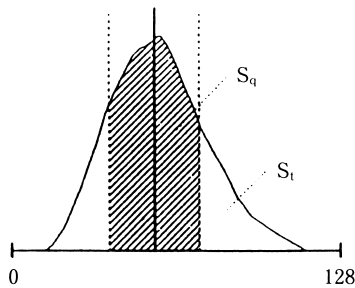
(1) 着色度 C



$$\frac{S_1 + S_2 + S_3}{S_t} \times 100 = \text{傷害比率 } \$ (\%)$$

(4) 傷害比率 \$ < % >

$$\frac{S_q}{S_t} \times 100 = q (\%)$$

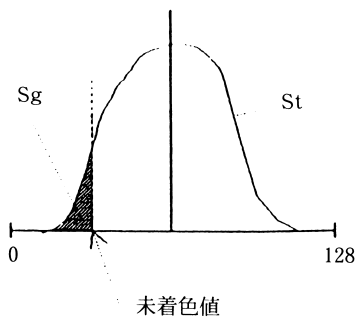


(2) 色均一性 q < % >

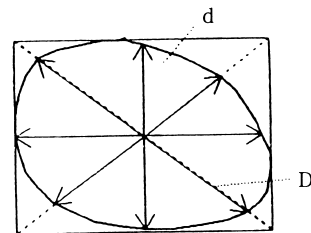
S₃ = 最大傷害面積 S_m (mm²)

(5) 最大傷害面積 S_m < mm² >

$$\frac{S_g}{S_t} \times 100 = g (\%)$$



(3) 未着色比率 g < % >



(6) 変形度 d/D < % >

図 6 カラーグレーダの選別アルゴリズム⁸⁾

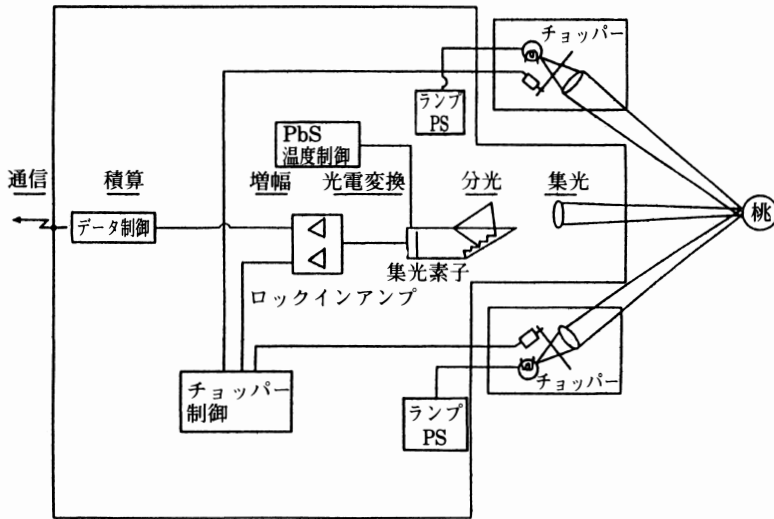


図 7 光糖度センサの計測方式¹⁰⁾

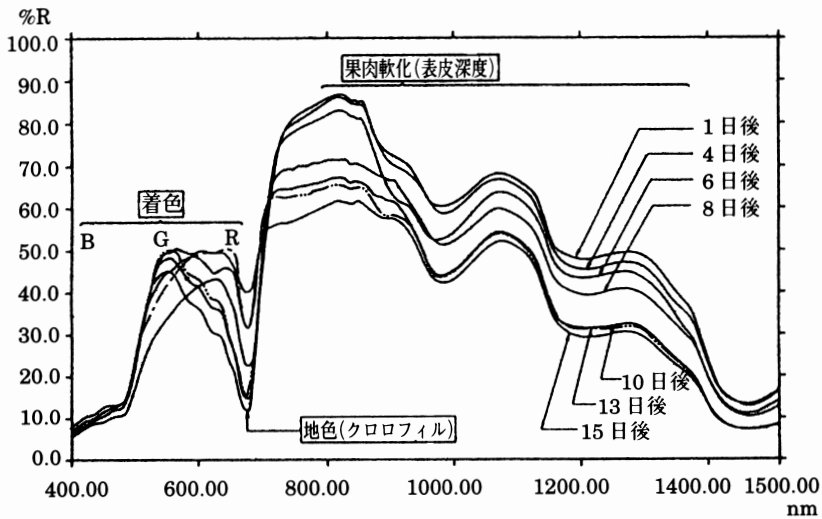


図 8 西洋ナシ (ル・レクチェ) の熟度変化と光反射スペクトル¹¹⁾

して、リンゴ(品種:サンふじ)を対象として、リンゴの長期貯蔵施設に付設されている光糖度判別ラインを利用して、貯蔵前後のリンゴの糖度を実測し、その結果を屈折糖度計で測定した結果と比較することにより、光糖度センサの測定精度を評価した。

図9に光糖度センサの照射部位と果汁採取のための果実分割法を示す。すなわち、この図に示すように、果実の赤道4ヶ所の部位に光を照射し、それぞれの部位の糖度データを求めた。図10に両者の相関を、また図11

には屈折糖度計で測定した糖度の平均値に対して光センサで測定した4ヶ所の実測データをプロットして示した。図10に示されるように、光糖度センサと屈折糖度計の実測値には高い相関が示され、光センサは実用的な範囲で高い精度を有していることが分かった。この精度はメーカーの違いや後分光・前分光の方式差によらずほぼ一定であることも判明している。一方、図11に示されるように一個の果実内部に1%以上の糖度分布が検出される場合もあり、果実内部の糖度分布が著しく大きい果実

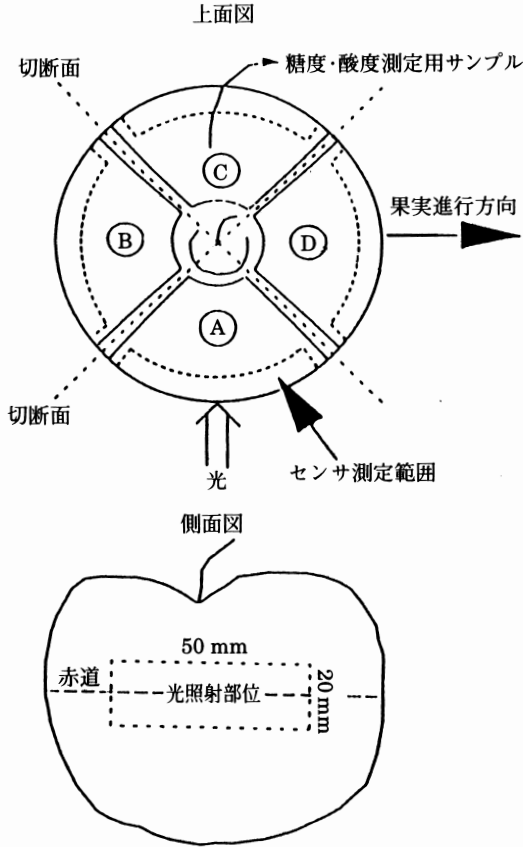


図 9 糖度センサの光照射部位と果実分割法

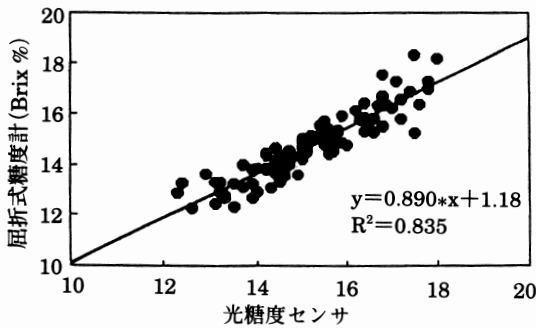


図 10 光糖度センサと屈折式糖度計による実測値の相関

を対象とする場合には、果実の平均糖度をどのように検出するかが問題となることが予測された。このため、糖度分布が大きいモモなどでは光を照射する果実表面の位置を特定したり、複数箇所の測定データの平均値を採用

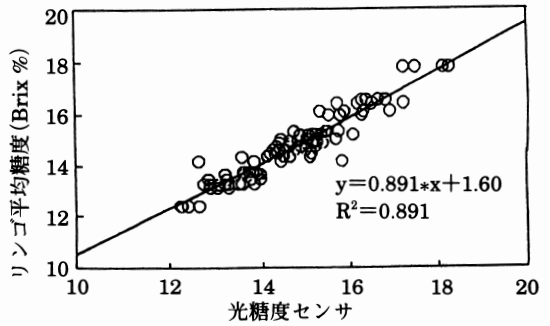


図 11 果実平均糖度に対する光センサの測定値変動

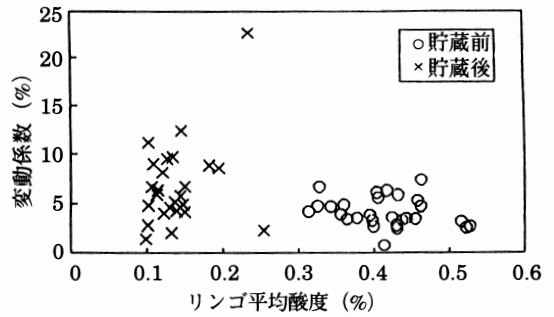


図 12 果実平均酸度に対する変動係数のプロット

するなど、両者の相関を高めるための計測手法を開発する必要があると考えられた。

図 12 は果実を約 3 ヶ月冷蔵した前後における果実平均酸度に対する実測値との偏差を変動係数としてプロットして示したものである。酸度は貯蔵後に約 0.3% 低下し、また果実内部に酸度の分布も存在し、貯蔵後にその分布幅が拡大することが分かった。ここには示していないが、貯蔵前後の糖度の変動は顕著でなく、むしろ均一化する傾向を示した。

(3) 利用上の留意点

聞き取り調査によると、リンゴ生産農家の光糖度センサに対するクレームは貯蔵後の測定結果に対してなされたことが判明した。前項に述べた測定結果を考慮すると、貯蔵後の果実の糖度測定値は高いものの、酸度が低下することにより、実際の味は「ボケ」たように感じられ、また、貯蔵後の果実内酸度分布の拡大により、食味した部位による味の差が混乱を招き、光糖度センサによる選別結果にクレームがついたものと推察された。

一般に、「人の感覚量」と「呈味物質の濃度の対数」は

比例関係にあり¹²⁾, また, 果実の食味は酸度に対する糖度の比, すなわち, 甘味比によって比較的良好に表されることが知られている. 従って, 「食味」に基づいてなされた光糖度センサのクレームに対しては「光糖度センサはヒトが感じる味を測定するのではなく, 単に果実の糖度のみを保障する」センサであることを明確に説明する必要があると考えられる. さらに, リンゴや柑橘類のような甘味比が評価の要因となる果実類の選別には, 糖度センサと最近開発された酸度センサの併用が望ましいと考えられた.

5. お わ り に

近年, 共選施設には最先端の光センシング技術を駆使した選別プラントが導入されるようになった. これにより, 従来から人間の感覚と労力に頼ってきた等級選別工程の自動化が急速に進展し, さらにインテリジェント選別システムの構築により等階級同時選別が可能となってきた. しかし, 光センシング技術の中には「糖度・熟度センサ」の導入状況に見られるように, 技術の評価があまりない状態であっても, 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, 光センシング技術の客観的評価が緊急の課題となっている.

筆者は食品の多様な属性の工学的センシング技術とヒトの嗜好の数量化, さらには食品のプロダクトマネージメント等を有機的に統合した新しい研究領域を「食品感性工学」として提唱している¹³⁾. 青果物を対象とした

光センシング技術の開発・評価手法も, ヒトの感性の数量化によりさらに発展するものと考えられ, 今後の研究指針として重要であることを指摘しておきたい.

文 献

- 1) 相良泰行: 農流技研会報, No. 187 (月刊フレッシュフードシステム 24 (4)), (1995).
- 2) 相良泰行: 農流技研会報, No. 188 (月刊フレッシュフードシステム 24 (5)), (1995).
- 3) 共選施設の手引き (JA 全農施設資材部), p. 173 (1994).
- 4) 相良泰行: 月刊食品流通技術, 23 (11) (流通システム研究センター), (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 (株式会社マキ製作所), (1991).
- 9) 伊庭慶昭: '94 年版農産物流通技術年報 (流通システム研究センター), (1994).
- 10) 岡部政之: アグリビジネス, 4 (14) (システム農業, 東京), (1989).
- 11) 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), (1993).
- 12) 都 甲潔: 味覚センサ (朝倉書店), p. 155 (1993).
- 13) 相良泰行: 日食工誌, 41, 456 (1994).

(平成 7 年 8 月 30 日受理)