

非破壊検査による農産物の品質管理技術の開発

京都大学 池田 善郎

1. はじめに

農産物とくに果実や野菜の味・傷等を、農産部の原形を保ったまま機器によって客観的に再現性よく検査し、品質の揃ったものにするを非破壊検査という。

農産物の品質を客観的に判定しようとする要求は、外国産農産物に対する品質の優位性の保持や、国内産地間競争の勝ち残りをかけて、高級・高品位な商品を安定して供給しようとする生産者の意欲を背景としている。また確実な品質判定技術の確立は、消費者の側の均質かつ高品位農産物の需要に対する答えの一つでもある。

エレクトロニクスの発展・普及により、農産物の栽培・収穫・流通段階における品質の非破壊判定技術の可能性が、ハードウェア・ソフトウェア両面で大きく開けてきた。ここでは、農産物の品質を非破壊に判定する技術について、基礎的な研究成果の紹介と、実用化された装置・機器の概要を述べて、近代農業にハイテクノロジーを導入する際の一つの具体的方法についてのケーススタディとしてみたい。

2. 農産物品質の非破壊検査の基盤技術

農産物の品質は、おおよそ次のように大別できる。

- 1)形や色彩など外観に左右されるもの。
- 2)重さ・硬さや手触りなど、手に持ったときの感触によるもの。
- 3)鮮度・熟度や内部傷害の有無等、内部の組織に依存するもの。

現在のところ、機器による非破壊検査の対象は、食用農産物に限定されており、食味が最終的に最も重要な品質とみなされている。上記1)及び2)項の測定は、あくまで食味を間接的に推定するものとして経験的に知られていたものであり、3)項についても味覚そのものを示しているわけではない。

さらに、近い将来の問題として、基本的品質の内容が味覚から、視覚を本質とするものに対象が拡大することが考えられる。例えば、観用植物の栽培及び流通過程における品質管理は、味覚以上に人間の感性に依存する面が多く、ハイテクノロジーを駆使しなければならないのは当然であるが、人間の情緒的なものまで機器化できるかどうか、極めて興味深い問題ではある。

一方、農産物品質の決定因子には、極めて多種多様なものが提案されているが、単独に決定因子となることは少なく、複合的に絡まることが多く、その様相もかなり複雑であると予想され、相互作用の量的質的解明も検査技術の確立には、必要な研究課題となるであろう。

このように、農産物の非破壊検査技術は、医用や工業用とは根本的に異なった問題を内包しているが、まとめると表1のようになる。

農産物の機器による非破壊検査では、重さ・大きさ・色・硬さ・打音・香り等、人間の感

覚的な判定技術を物理学的に模倣することを基本としているが、物理学各分野との対応付けには粗密があり、また人間がカバーできない領域へは物理学的方法でしか対応不可能であるという面もある。すなわち、幾何学、力学、光学、電磁気学、熱力学、化学、バイオテクノロジー等既存の学問及び技術に依拠するところが多いが、基本的には、農産物に何らかの刺激を与え、その反応と、別の方法(化学的方法等破壊

表1 農産物品質検査の特徴

事項	特徴
検査項目	感覚的で数量化が困難
	多種多様
検査対象物	個体差が大きい→全数検査 →高速処理
機器及び装置	価格に制約

検査が多い)で測定した品質を表すと考えられるパラメータとの対応関係を校正し、対象農産物の品質を間接的に推定しようとするものであり、図1のような概念図で示すことができる。

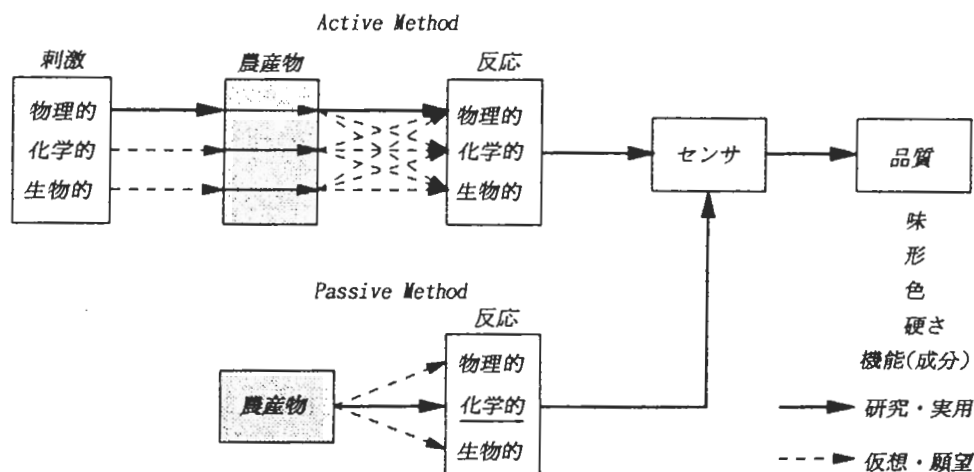


図1 農産物品質の非破壊検査の基本構造

この図で、上半分が上述の従来の能動型品質検査技術の主流であるが、下半分に示したような受動型は検査対象物になんら外的刺激を加えることなく品質を検査するので、より理想に近い非破壊検査といえる。また、実線矢印で示した流れが、現在のところ研究段階にいたり、実用化された体系であり、刺激型のものでは物理的なものがほとんど全てであるが、例えば、物理的刺激と生物的応答の系統は、成長過程の農産物の品質管理に使われているようである。点線矢印で示した化学的もしくは生物学的な非破壊検査技術は現在のところ全くと言っていいほど手つかずであるが、センサ等の開発が進めば未来型の技術として期待できる。

農産物の品質検査に使用される基礎的物理量を表1に、現在研究中または実用化された非破壊検査技術の概要を表2に示す。

表1 農産物品質の非破壊検査技術の物理量

A.基礎的物理量	質量	比重
	体積	
	寸法	
	形状	
B.力学的特徴量	静的	ヤング率・せん断弾性係数
	動的(粘弾性)・振動	緩和弾性率、緩和時間、遅延時間、周波数応答
	超音波	周波数応答、減衰係数
C.光学的特徴量	可視光線	色彩・光沢・反射及び透過率、表面粗さ
	紫外・赤外	反射及び透過率
E.電気的特徴量	直流・高周波	電気抵抗・インピーダンス
	静電気	

表2 農産物の非破壊品質判定技術の概要(1)

	対象品質	検査の方式と状況				到達度
		対象	検査品質	検出物質	手段	
基 本 品 質	栄養・カロリー源	野菜	栄養源	ビタミン	NMR	●
	正常な食味	早生柿	渋柿	果肉色	可視光	○
		柑橘類	スあがり	果胞組織の変化	"	●
		青果物	スあがり	"	X線CT,NMR-CT	●
	変質のないこと	タマネギ	異常萌芽	"	"	●
		"	芯腐れ	褐変物質	近赤外	●
		バレイショ	空洞	組織の変化	X線-CT	●
		玄米	胴割れ	"	軟X線	●
		"	"	"	可視光	○
		繭	不良繭	"	軟X線	○
		畜産加工品	異物	"	"	○
		スイカ	空洞果	空洞	"	○
		スイカ	"	"	打音の解析	○
		スイカ	"	密度	インピーダンス	○
		メロン	発酵果	発生ガス	ガス検知	○
ダイコン		内部欠陥(黒芯,赤芯)	組織の変化	可視光	○	
卵	血卵	色の変化	"	○		
白米	変色	表面色	"	○		
玄米	胴割れ	組織の変化	可視光	○		

○実用段階 ●研究段階

(秋元浩一、鮮度・熟度・味の測定とセンサー、化学工学、54巻、11号、808-810より抜粋・追加)

表2 農産物の非破壊品質判定技術の概要(2)

対象品質	検査の方式と状況					
	対象	検査品質	検出物質	手段	到達度	
嗜好的品質	鮮度	野菜 "	鮮度 "	生体電位差 光子	電位差 光子計数型カメラ	● ●
	熟度	果実 "	熟度 "	果皮色・果肉色	可視光	○
				表面温度	赤外線	●
				表面・内部温度	マイクロ波CT	●
				肉質	打音・共振点・超音波	●
				香気成分	ガスクロ	●
				インピーダンス	インピーダンス	●
				誘電率	誘電率	●
				電気伝導度	電気伝導度	●
	パイナップル果実	熟度・傷害果	肉質	可視光(透過光)	●	
		熟度・硬さ	肉質	静荷重	○	
	味	農産物 "	酸度 "	肉質	超音波	●
水分				NMR,近赤外	●	
				マイクロ波	●	
				電気抵抗	●	
桃		糖度	肉質	高周波抵抗	●	
			肉質	高周波抵抗	●	
			肉質	近赤外	○	
生体牛		肉質	超音波-CT	○		
リンゴ	みつ入り	組織の変化	赤外線	○		
見栄え	農産物	品位	外観	可視光(CCD)	○	
	レタス	結球度	組織の変化	静電容量	●	
大きさ	農産物		長さ、質量	CCD,電子天秤	○	

○実用段階 ●研究段階

(秋元浩一、鮮度・熟度・味の測定とセンサー、化学工学、54巻、11号、808-810より抜粋・追加)

3. 非破壊品質管理技術の現状

これまで述べたように、農産物の品質を非破壊で判定する技術は、実にさまざまな方法があり、実用化に至るまでにクリアすべき問題は数多く存在する。しかし、実用化を考える以前に、生体の示す力学的挙動は、一般の工業材料にはみられない特異なものがあり、新しい構造化材料の開発にも役立つところが多々あるものと考えられ、物理的現象に限定しても興味ある観測結果が報告されている。以下では、その内のいくつかについて、基礎的研究やそれを実用化したシステムについて、簡単に紹介する。

3. 1. 基礎的物性特性と実用化システム

1)機械力学的特性の利用 簡単にいえば、農産物に力を加えた時の変形量から硬さを計り鮮度や熟度を推定したり、特に動的な力の場合には内部の伝わりかたで内部の硬さや組織の変化を推定しようとする技術であり、指先で果実を押さえ、品質を推定することはよく行われる。図2に示すように、直径 d の剛体球で半径 R の果実を、力 F で圧縮したときの変形量を D とし、果実をヤング率 E の弾性体と考えれば次式が成立する(Arnold and Mohsenin,1971)。

$$E = \frac{0.338k^{3/2}F(1-\mu)}{D^{3/2}} [2/R+4/d]^{1/2} \quad (1)$$

従って、変形量 D を測定すれば、果実の硬さを表すヤング率 E がわかる。この原理を利用した、硬さ判定用の可搬型の測定器が製作されている。

スイカの果肉に存在する空洞を検出するのに、経験的に手の打撃音によることはよく知られているが、これを利用した選別システムが開発され実用されている。果実を線形粘弾性システムと考えると、打撃を与え発生音を計測することは、線形システムのインパルス応答を求めることに相当し、これはまたシステム論的に解釈すると、打撃音のFourier解

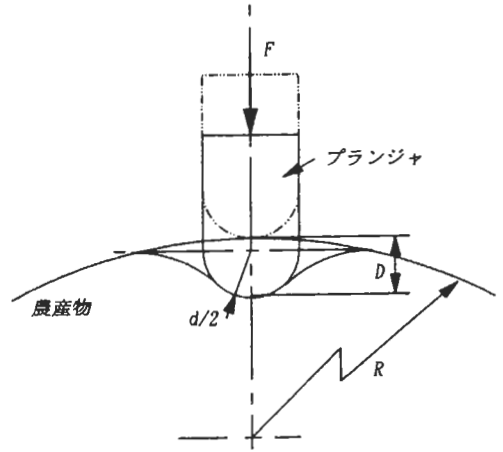


図2 プランジャーによる弾性球体の圧縮

析はそのシステムの周波数応答関数を求めることに相当し、従って応答関数から果実の組織変化が推定できることになる。図3に示すような装置でスイカ赤道部の1点に打撃を与え、赤道

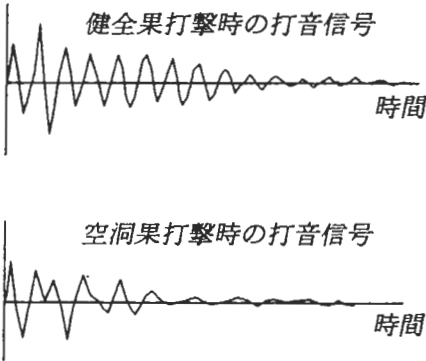


図4 スイカ打音信号

で使用されている。

果実内部の空洞の有無が、内部を伝播する波形に影響を及ぼすことを実験と数値解析で確認した結果、図6のようになった(池田 他, 1993)。リンゴの芯部を空洞とみなした時の伝播波形は、計算結果の2であり、実測結果とよく一致しているが、空洞を無視して計算すると、計算結果1のようになり、実測結果とは一致せず衝撃波の伝播は、空洞の影響を受けることがわかった。

上を3等分する点で打音を検出すると、図4に示すような波形が得られる。明らかに、空洞の有無により打音の波形が異なり、損傷の検出が可能であるが、このような差を定量化する方法の一つとして、打音のスペクトルピーク周波数のバラツキと空洞率(空洞体積/果肉部体積)の関係を図5のように得ており、相関が高いことがわかる。すなわち、空洞が多くなると、ピーク周波数の変動が大きくなり、打音の周波数分析で内部空洞の定量的な評価が可能と考えらる。このシステムは実用化されスイカ選果システムとし

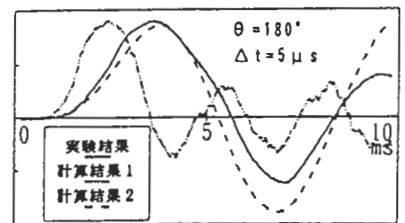


図6 リンゴ内部の衝撃波の伝播

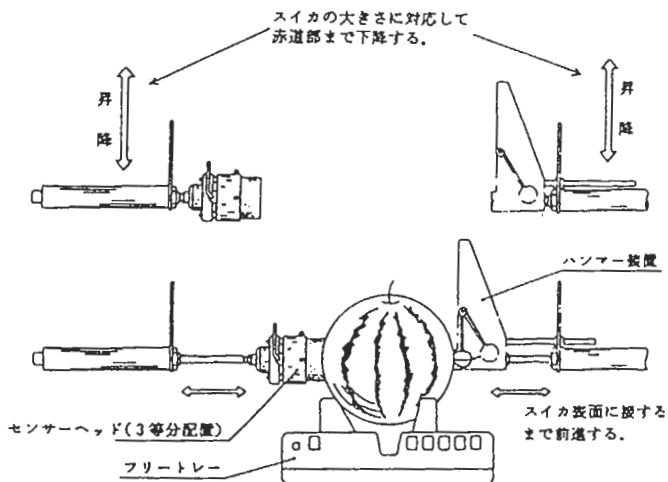


図3 スイカの打撃装置と打音検出器

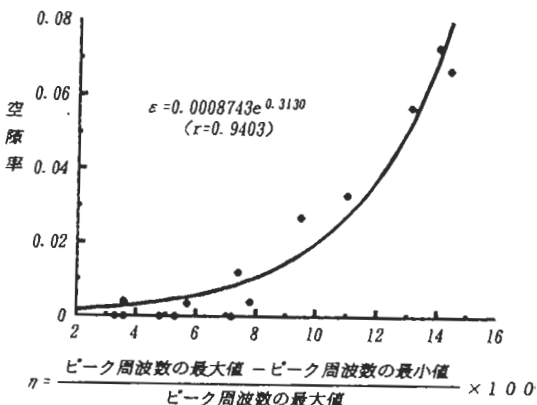


図5 スイカ空洞率とピーク周波数の変動

2) 光学的性質を利用する非破壊品質検査 農産物の色彩は、

味覚の間接的な指標として経験的に利用されていることは、よく知られている。物体の色の定量的な表示方法として、波長別の光量の割合を用いる分光特性と、色の3属性を立体的の表した色座標による表示があり、農産物の色彩情報もこれらの表示方法で表現されている。図7は桃の地色の分光反射特性であり、成熟が進展するにつれて、赤色の成分が増加するので、650nm付近の反射光の強度で熟度の判定が可能と考えられる(Delwiche et al, 1987)。

桃の地色判定に使用されている、標準色の色座標上での移動は図8のようになっており、色彩変化の定量化が可能である(Miller et al, 1989)。

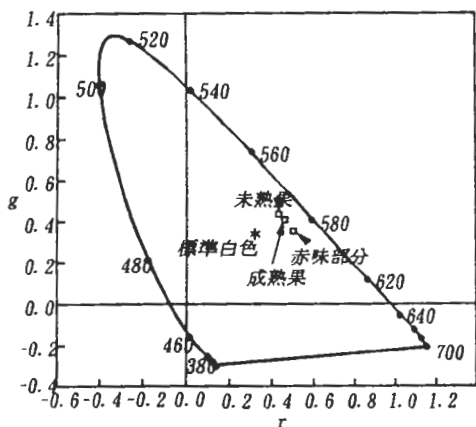


図8 桃の標準表皮色の熟度による変化(NTSC色度図上の移動)

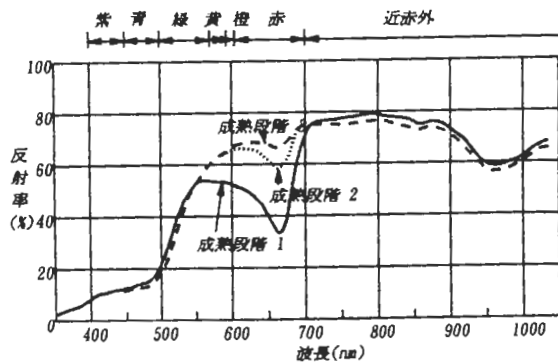


図7 桃の表皮(地色部分)の分光反射特性

これらの例は、表面色についてであるが、サトウキビの糖分を近赤外分光反射法で推定した結果については、図9のようになる(Sverzut et al, 1987)。回帰分析に使用した波長は、2272, 1746, 1660, 1842 nmであり、検量線の相関係数は0.99、標準誤差0.540を得ており、近赤外線分光分析によりかなり高い精度で糖分濃度の推定

が可能である。

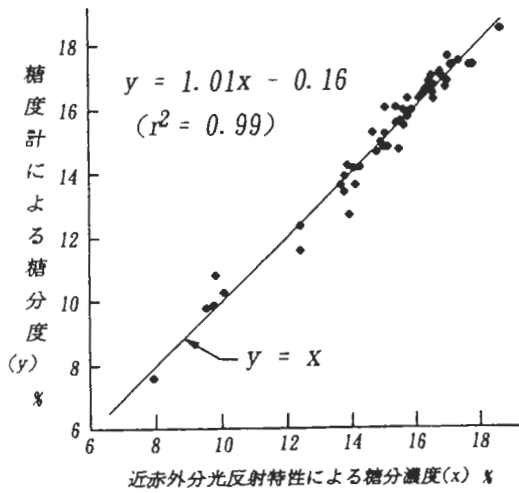


図9 NIR法によるサトウキビ糖分の推定

桃の糖分を近赤外分光法で推定し、実用化された例についてのべる。図10は同じ生産者の3年間の桃全数の糖度ヒストグラムであり、生産年度により製品の糖度の変動の様子が異なっており、糖度によって品質を判定し、糖度の揃った桃を出荷する意味は大きい。

また、桃の内部においても、図11に示すように糖度は9度未満から11度以上の幅で変動する(三井金属, 1991)。測定代表点としては、現場では「赤道上で縫合線より90°離れた点」としている。

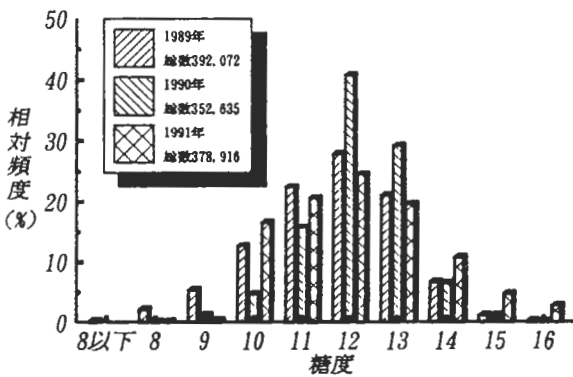


図10 桃の糖度の個体間分布

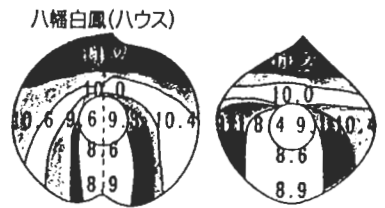


図11 桃の糖度の個体内分布

このシステムは、実用的に桃の選別に使用されており、従来慣行の外観検査による等級選別と光学選別の結果を比較すると、図12のようになり、(a)のように外観検査による等級が糖度を反映しているわけではないことがわかる。

農産物の形状は、複雑であるが品質を左右する重要な因子であり、比較的簡単な形状の農産物形状判定システムが画像処理を利用して実用化されている。ピーマンのように形状が複雑で定量的記述の困難な農産物に対して、人間の簡単な頭脳のシミュレーションであるニューラルネットワークにより、形状と寸法を判定しようとする試みがある(池田 他,1993)。図13に示す、3層ニューラルネットワークに写真1に示す教示データで誤差逆伝播(Back-propagation)で学習させ、写真2に示すピーマンの形状と大小を判定させた。また、同じことを非熟練者の被験者に行わせ、判定結果を人工ニューロのものと比較した結果、ネットワークへの入力の種類

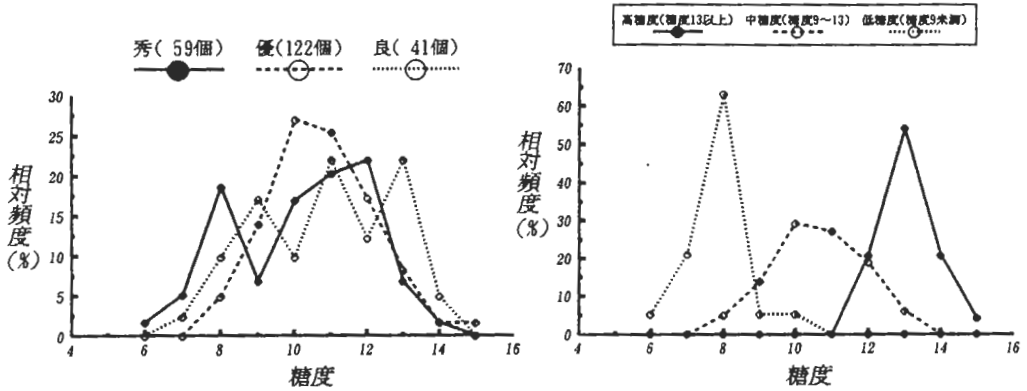


図12 外観及び糖度による桃(品種;山根白桃)の選別結果

によっても異なるが、形状については42～68%、大きさについては47～79%の一致をみた。人間の判定結果とはあまり良く一致していないが、人間が判定する場合、手にとって、

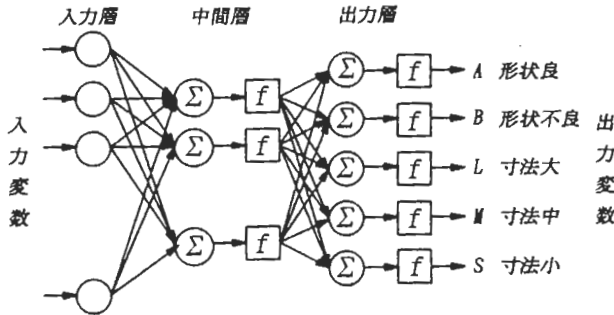


図13 3層ニューラルネットワーク

質量を推定したり、3次元的な形状も観察しているので、入力量が圧倒的に異なったためと考えられる。



写真1 教師信号として使用したピーマン
(宮崎県経済連自主検査標準規格表)



写真2 形状判定に使用したピーマン

4. 将来への展望

ファジー理論やニューラルネットワークによる品質の曖昧さ・定量化の困難さの吸収をはかるとともに、最近流行のフラクタル解析による形状・表面状態の定量化の試み行われている(Liao et al,1990, 池田 他,1993)。また、非破壊検査技術の今後の展開を考えた場合、対象の捉え方

もマクロレベルからマイクロレベルへと拡大することも必要と考えられる。植物の細胞レベルでの構造は、図14のようになっており決して等方等質とはいえず、従来の工学的解析手法の延長では、限界がある(Akyurt et al, 1972)。

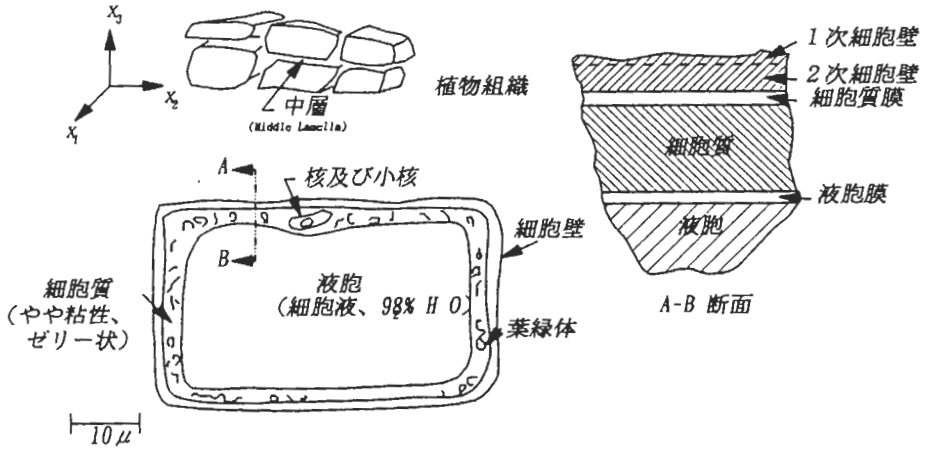


図14 植物細胞

例えば植物体の組織の細胞レベルの変形と全体の変形を論ずる場合、図15の様な細胞のモデルを考えている(Gao et al, 1991)。

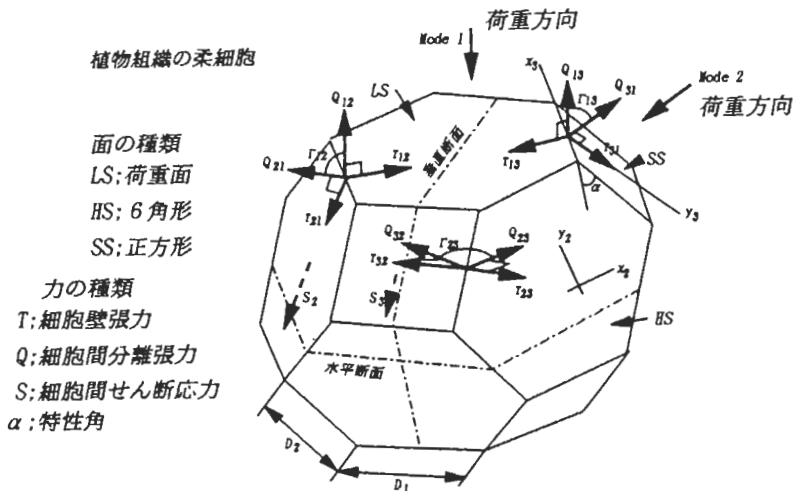


図15 細胞壁にはたらく張力

たとえ、マクロレベルで考えても生体材料の非線形性も考慮しなければならないとしている(Clark et al, 1971)。

5. 結言

農産物の非破壊品質検査技術の一端について、簡単に現状と将来の問題点について述べてきたが、今後の考えなければならない点を要約すると以下ようになる。

1. 農産物に要求される条件が多様化
食用→観用→機能性
2. 品質評価対象農産物の拡大
食用→観用→機能性
3. 品質評価の対象と技術の拡大
味覚の評価技術→対農産物視覚の評価→機能性農産物の機能評価



人工鑑賞能力；感性工学

農産物に対する要求項目の拡大；量から質

4. 物質観の新展開；非工業的生体材料の記述方法の確立
非線形性・非等質性(細胞構造)・非等方性(繊維構造)・非定常(成長等による構造・パラメータの変化)

つまるところ、新たに生体システム論ともいえるものを構築しなければならないと考えるが、生命現象は当面对象としないとしても、その道のりは遠大であり、さらには生体の構造的機能を模倣した材料の開発にも結びつき、生命現象を模倣するニューラルネットや遺伝的アルゴリズムに対置されるべきテクノロジーにも発展が期待できる。

参考文献

- Akyurt, M., Zachariah, G.L., Haugh, C.G., 1972; Constitutive Relations for Plant Materials, Trans ASAE, 766-769
- Arnold, P.C. & Mohsenin, N.N., 1971; Proposed Technique for Axial Compression Tests on Intact Agricultural Products of Convex Shape, Trans. ASAE, 78-84
- Clark, R.L., Fox, W.R., Welch, G.B., 1971; Representation of Mechanical Properties of Nonlinear Viscoelastic Materials by Constitutive Equations, Trans ASAE, 411-515
- Delwiche, M.J., Tang, S., Rumsey, J.E., 1987; Color and Optical Properties of Clingstone Peaches Related to Maturity, Trans ASAE, Vol. 30(6), 1873-1879
- Gao, Q., Pitt, R.E., 1991; Mechanics of Parenchyma Tissue Based on Cell Orientation and Microstructure, Trans ASAE, Vol. 34(1), 232-238
- 池田善郎、澤田 健、長谷川 明, 1993; フラクタル次元による農産物の外観判定、農機学会関西支部報、第74号、104-104
- 池田善郎、平澤 太, 1993; 農産物内部を伝わる波動のシミュレーション、農機学会関西支部報、第74号、165-166
- 三井金属 E I 推進事業部; 光センサ&フルーツ、Vol. 4, Feb. 1991
- Liao, K., Cavalier, R.P., Pitts, M.J. 1990; Hausdorff Dimensional Analysis and Digital Imaging Based Quality Inspection, Trans. ASAE, Vol. 33(1), 298-304
- Sverzut, C.B., Verma, L.R., French, A.D., 1987; Sugarcane Analysis Using Near Infrared Spectroscopy, Trans. ASAE, Vol. 30(1), 255-258
- Miller, B.K., Delwiche, M.J., 1989; A Color Vision System for Peach Grading, Trans. ASAE, 1484-1490
- 西村 功、川村恒夫、李 玉紅、出口喜啓、1990; 果菜類の物性—スイカの内部品質—、農機学会関西支部報、第68号、99-100