

光学的手法を用いた根菜類品質検査技術の開発

澤山 一博, 本間 稔規, 青山 達仁*

Development of Quality Inspection Method for Root Crops Using Optics

Kazuhiro SAWAYAMA, Toshinori HONMA, Tatsuji AOYAMA*

キーワード：根菜類, 品質検査, 光学, 分光計測, 多変量解析

1. はじめに

近年、農産物の加工・製造工程においては、製品の高付加価値化ばかりではなく高品質化と高い安全性が求められており、品質検査が重要な作業と位置付けられている。特に最近では、熟度、鮮度、空洞の有無等の内部性状に関する検査の必要性が増大してきている。

しかし、大半の集荷・選別作業においては、目視で発見できる損傷や障害を有するものだけを人手により除去している。すなわち、内部で発生しているものについては目視での発見が困難なため、変色などの変化が外部に現れた段階、あるいは加工処理段階で初めて人手により除去されている。

このようなことから、本研究では当該作業の自動化・省力化の一環として、農産物の内部性状までを検査可能な品質検査技術の開発を行った。計測方法としては、非接触・非破壊な方法である「光学的手法」を用いた。また、対象とする農産物として、根菜類の一つである馬鈴薯を選定した。

ここで、内部性状を計測するための基本的な考え方は、被計測物（馬鈴薯）に光を照射し、内部で散乱しながら外部へ透過してきた拡散光、あるいは拡散反射光を計測することである。本研究においても、光を照射して得られた光学情報を解析することにより、当該馬鈴薯の品質情報の抽出を試みた。

なお、精度の高い品質検査を実現するためには、計測する品質項目に対応した適切な計測方法を選定する必要がある。たとえば、空洞や褐変などについては、透過した光の強度変

化に着目することで計測が可能と思われるが、腐れ、鮮度などの材質的な性状を的確に計測するには、光スペクトルの計測（分光計測）までを視野に入れた検討が不可欠と思われる。

そこで本研究では、品質を便宜的に空洞等の「形状的品质」と腐れ等の「材質的品质」の2つに分類し、それぞれの計測方法について検討を行った。

2. 馬鈴薯の品質について

馬鈴薯ばかりではなく一般の農産物において、損傷や品質の劣化は多くの弊害をもたらす。たとえば、生産者にとっては収益の低下、手間の増大、信頼の低下となる。さらに食品加工業者においては、原価の上昇、収益の低下、作業効率の低下などの大きな要因となる。特に、料理に使われる馬鈴薯に損傷がある場合のイメージダウンは非常に大きい。

表1に馬鈴薯の損傷等の品質に関する分類を示す。また、図1に表面が損傷している馬鈴薯と内部損傷を有する馬鈴薯

表1 馬鈴薯の損傷等の品質に関する分類

種類	状態	部位, 要因等
病 気	黒 斑	周皮, 皮層部, 髓部
	褐 斑	周皮, 皮層部, 髓部
	褐 変	維管束
害 虫	食 害	周皮, 皮層部, 髓部
	褐 変	維管束
生理障害	緑 化	周皮, 皮層部
	空 洞	髓部
	擦 傷	トラクタ等の作業車輪の擦過により発生
損 傷	ツメアト傷	傾斜面に落下衝突したときに発生
	裂 傷	落下等の衝撃による
	打 撲	丸棒等に接触衝突した場合に発生
	圧 傷	部分的な圧迫により発生
	疑似傷	表皮に異常はなく、周皮に褐変が生じる

*東洋農機株式会社

*Toyo Agricultural Machinery M.F.G Co., Ltd.

事業名：経常試験

課題名：光学的手法を用いた農産物の品質検査技術に関する研究

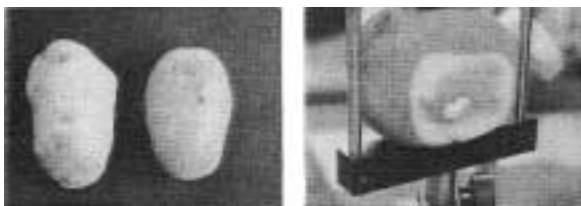


図1 外部損傷，内部損傷を有する馬鈴薯

の例を示す。馬鈴薯塊茎は機械的な衝撃に起因する損傷ばかりではなく、他の要因による障害によっても変質・変色する。これらの変質・変色の過程では、細胞の壊死が進行している。

ここで、品質を低下させる要因として、①病気による変質・変色（褐変，黒変），②害虫による食害，③生理障害による変色・緑化，④機械的な衝撃による損傷等が挙げられる。

これらには、生育中に発生するものや収穫作業中に発生するものなどがあり、さらには貯蔵期間中に損傷・障害が進行する場合も数多くある。なお、損傷・障害の発生メカニズムが複雑なことから、発生後の挙動を予測することは非常に難しいのが現状である。

3. 形状的品質の計測

3.1 計測光学系

空洞や褐変部位は周囲の正常な部位に比べ、光を遮断・吸収し易いことが想定される。そこで、照射光強度に対する透過光強度の減衰の度合いから、これらの損傷を検出する方法について検討を行った。

具体的には、図2に示すように馬鈴薯表面にレーザ光を照射し、透過光を高感度光検出器（以下、センサ）で計測する方法を採用した。光源としては、半導体レーザ（波長633nm）を使用し、センサ前部には空間フィルター（φ8mm）を設けた。一方、供試馬鈴薯（T57×W68×L86mm）には中央部に貫通孔（φ12mm）を設け疑似空洞とした。また、計測試験においては、レーザスポットを50mmの範囲で直線状に移動させ、1mm間隔でセンサ出力を調査した。

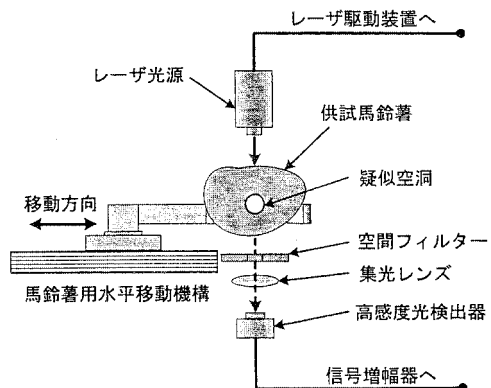


図2 形状的品質計測用光学系

3.2 計測試験結果および考察

図3に正常な馬鈴薯と当該馬鈴薯に疑似空洞を設けた場合の計測結果を示す。両者の計測部位が異なるためレベルの相違はあるものの、センサ出力は馬鈴薯中央部に近づくに従って低下し、空洞がある場合はその両端部において出力が急激に低下している。ただし、空洞中心部において出力が増加しているが、これは透過散乱光が空洞の裏側に回り込むことが大きな要因と思われる。

図4は計測データの1次微分処理結果であるが、空洞を有する馬鈴薯の微分曲線は、正常な馬鈴薯のそれに比べ空洞部近傍において大きく変動している。このようなことから、計測データの1次微分処理結果に対し一定の「しきい値」を設けることにより、馬鈴薯の透過厚さによるセンサ出力レベルの影響を受けず、空洞の有無を判定できる可能性があることが分かった。

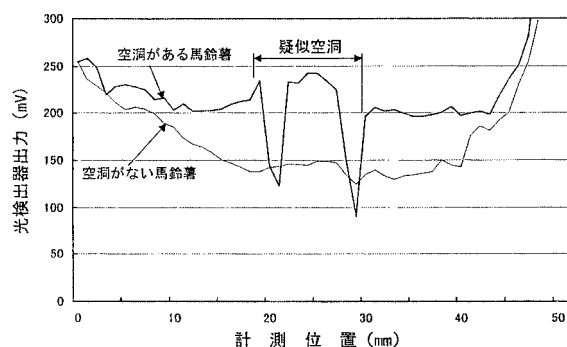


図3 疑似空洞計測結果

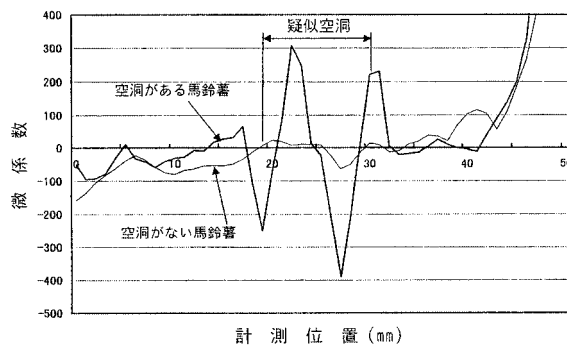


図4 1次微分処理結果

なお、両者の1次微分曲線の端部において大きな立ち上がりが見られる。これは、馬鈴薯端部の透過厚さが小さいために、透過光強度が大きくなることによるものである。そこで今後、両端部におけるデータ処理方法についてさらに検討を行っていく必要がある。

4. 材質的品質の計測

4.1 分光計測光学系

白色光を照射し、その透過光および反射光を分光計測する

方法を採用した。白色光としてキセノン光を使用し、馬鈴薯からの光を大口径光ファイバを介して光スペクトラムアナライザ（安藤電気製AQ-6310B）に導き計測を行った。図5に計測光学系の外観を示す。

4.2 分光計測結果

計測対象として、正常な馬鈴薯と腐れのある馬鈴薯を用意した。後者については打撲痕を与えて1週間程度放置したものを使用した。また、本試験においては透過光の計測感度を確保するため、厚さ数mm程度の薄片サンプルを用いた。

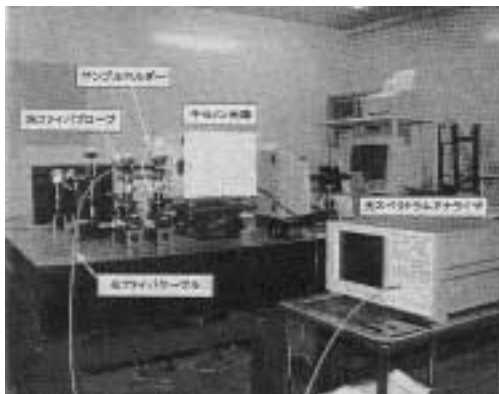


図5 分光計測用光学系

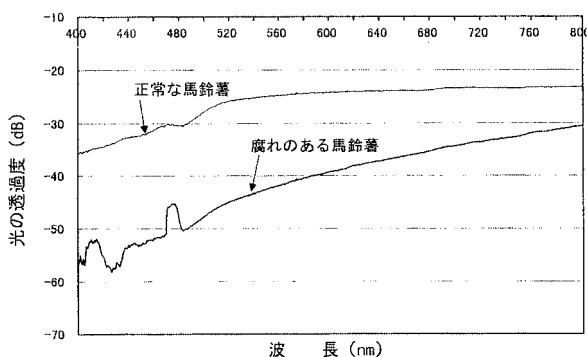


図6 分光計測結果

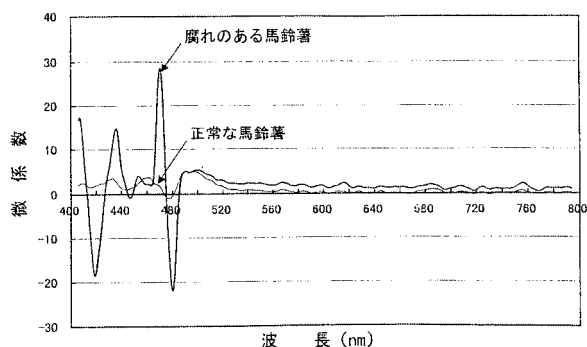


図7 1次微分処理結果

図6に正常な馬鈴薯と腐れのある馬鈴薯サンプルの透過光スペクトルの計測結果を示す。本グラフでは、縦軸の値を光の透過度で表す。図のように総体的なレベルの差はあるが、両者とも波長が長くなるに従い光透過度は増大の傾向を示し、その度合い（傾き）は後者の方が大きい。また、後者については短波長域（400～500nm）においてスペクトルの変動が見られ、特に470～480nmでは幅の狭い大きなピークが生じており、注目すべき現象である。

図7に透過光スペクトルの1次微分処理結果を示す。前者の場合は全波長域で平坦な値を示しているが、後者については短波長域において大きな変化を示している。このことから、当該短波長域（400～500nm）の透過光スペクトルに対し微分処理¹⁾を行うことにより、両者を判別できる可能性があると思われる。

そこで今後、本調査・検討結果を基に実用レベルの装置を具体化していく場合には、次のような方法について検討を進めていくことが考えられる。

- 1) 分光計測データに対して微分処理等の解析を行う方法
- 2) 複数の特徴的な波長の透過光強度を比較する方法²⁾

なお、前述のように470～480nmにおいて幅の狭い大きなピークが見受けられたが、この要因について馬鈴薯自体の特性を中心に調査を行ってきた。しかし、現在のところ、明確な要因を見出すには至っていないことから、今後も継続して調査・検討を進めていく予定である。

4.3 多変量解析による評価

分光計測により得られた透過光スペクトルの有効性の検証と品質評価方法の検討のため、多数の馬鈴薯サンプルに対し分光計測を行った。さらに、これらの計測データに対し、多変量解析法の一つである主成分分析法³⁾による評価を試みた。今回は、馬鈴薯サンプル173個を計測対象とした。

主成分分析における変量としては、1次微分による微係数の中から、特徴的な傾向を示す波長の微係数を選定した。具体的には、波長440nm、480nm、640nm、670nmの微係数と、500～600nmにおける微係数の平均値を採用した。波長640nm、670nmについては、緑化がある馬鈴薯の場合、この波長域においてクロロフィルによる吸収が見受けられるため選定した。

分光計測に先立ち、供試サンプルを目視判定により①正常なもの（34個）、②腐れがあるもの（121個）、③緑化があるもの（18個）に分類した。

図8に主成分分析による第1、第2主成分の得点を図示する。○印は正常な馬鈴薯、●印は腐れのある馬鈴薯、▲印は緑化がある馬鈴薯を示している。図において、それぞれの印の分布にある程度まとまりが見受けられることから、これらを便宜的に楕円で囲んでみた。

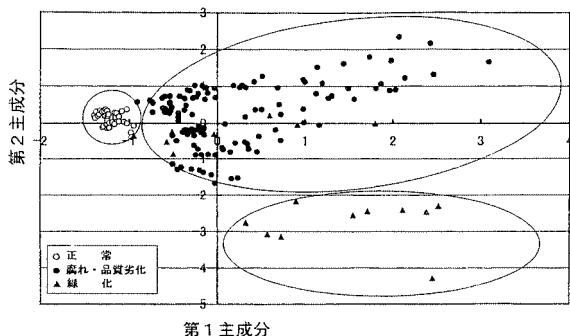


図8 第1, 第2主成分の計算結果

表2 固有値および寄与率

	固有値	寄与率	累積寄与率
第1主成分	2.9829	0.5966	0.5966
第2主成分	1.6625	0.3325	0.9291

図から、特に○印が第1主成分の左側の狭い範囲に集中しており、▲印についても第1主成分の右側、且つ、第2主成分の下側に分布していることが分かる。このことから、第1主成分は腐れの程度を、そして第2主成分は緑化の程度を表していると解釈できる。

表2に第1, 第2主成分の固有値と寄与率を示す。表において累積寄与率が0.9291であることから、第1, 第2主成分により全体の約93%を説明できることになる。このことは、今回選定した1次微分の微係数を変量とした主成分分析により、馬鈴薯を「正常な馬鈴薯」、「腐れのある馬鈴薯」、および「緑化がある馬鈴薯」の3種類に分類できることを示している。

以上のように、173個の馬鈴薯サンプルの透過光スペクトルに対し主成分分析を行った結果は、目視による判定結果とほぼ一致することが確認できた。このことから、品質を判定する方法として、腐れ等の品質との相関が想定される波長を同定し、これらの光スペクトルを計測・評価する方法が有効であることが分かった。

しかし、実体の馬鈴薯塊茎については透過厚さが大きいことから、透過光強度が非常に小さくなる。そこで今後は、微弱な透過光を的確に計測する方法について、さらに検討を進めていく必要がある。併せて、反射光スペクトルの分光計測情報から内部品質情報を抽出する方法についても検討が必要と思われる。

5. まとめ

根菜類の一つである馬鈴薯を対象とした品質検査装置の実現へ向け、非破壊・非接触な計測方法である「光学的手法」

を用いた品質検査技術の開発を行った。馬鈴薯では、空洞および腐れの有無が品質に関する主要な検査項目である。そこで本研究では、品質項目を便宜的に空洞等の「形状的品質」と腐れ等の「材質的品質」に分け、それぞれの計測方法について検討を行った。

この結果、次のように両者の計測方法は異なるが、得られた光学情報を解析することによりこれらを検出し、品質を評価できる可能性があることが分かった。

- 1) 形状的品質(空洞等) : レーザ光を照射し、透過光強度を計測
- 2) 材質的品質(腐れ等) : 白色光を照射し、透過光スペクトルを計測(分光計測)

今後は、実用レベルの検査装置を実現するため、本研究により得られた知見を基にさらに調査・検討を進めていく予定である。また一方では、他の農産物への応用についても検討を進めていきたい。

引用文献

- 1) 岩元睦夫・河野澄夫・魚住純 : 近赤外分光法入門, 幸書房, 168PP., (1994)
- 2) 河野澄夫, 青果物の非破壊品質評価技術の現状, 日本食品保蔵科学会誌, Vol.24 No.3, PP.194-195, (1998)
- 3) 田中豊・脇本和昌 : 多変量統計解析法, 現代数学社, 296 PP., (1983)