

馬鈴薯品質検査技術の開発

澤山 一博, 本間 稔規, 新井 浩也, 馬場 直志*
宮下 行雄**, 青山 達仁**

Development of Quality Inspection Method for Potatoes

Kazuhiro SAWAYAMA, Toshinori HONMA, Hironari ARAI
Naoshi BABA *, Yukio MIYASHITA **, Tatsuji AOYAMA **

抄 録

近年、農産物の高品質化が求められていることから、品質検査が重要な作業と位置付けられている。馬鈴薯についても同様であり、中心空洞や芯腐れに代表される内部損傷（欠陥）の検査の必要性が増大してきている。そこで本研究では、馬鈴薯品質検査作業の自動化・省力化の一環として、馬鈴薯の内部損傷（欠陥）を検出する方法について検討を行った。

計測方法として、分光計測技術に基づく「2波長計測法」と「レーザー透過光計測法」という2種類の計測方法を選定して検討を進めた結果、これらの方法の有効性を確認することができた。また、得られた知見を基に、2つの機能を有する「馬鈴薯品質計測システム」を開発した。

キーワード：品質検査，馬鈴薯，内部損傷，分光計測，レーザー

Abstract

Recently, it has become important to do quality inspection of agricultural products, because consumer needs them of good quality. And so, in case of potatoes, automatic inspection of internal damages, such as porous damage and spoiled damage, is required at the stage of harvesting or food processing.

We investigated the method, especially using optics, for detecting these internal damages, and found two kinds of measuring method, “Measuring Method using 2 Wave-lengths” based on spectroscopic method and “Measuring Method using Laser Transmission”. After feasibility study on these measuring methods, we have come to the conclusion that these are available for practical use, and finally developed “Quality Inspection System for Potatoes” on which these measuring equipments are mounted.

KEY-WORDS : quality inspection, potatoes, internal damage, spectroscopic method, laser

* 北海道大学
** 東洋農機株式会社
* Hokkaido University
** Toyo Agricultural Machinery M.F.G Co., Ltd.
事業名：重点領域特別研究
課題名：農作物品質の光学的非破壊計測技術の開発
(平成13～14年度)

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。馬鈴薯についても同様であり、中心空洞や芯腐れに代表される内部損

傷（欠陥）の検査の必要性が増大してきている。

しかし、集荷・選別作業においては、目視で見発見できる損傷や障害のあるものだけを人手により除去しており、内部で発生しているものについては目視での見発見が困難なため、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。図1に内部に芯腐れが生じている馬鈴薯の断面を示す。

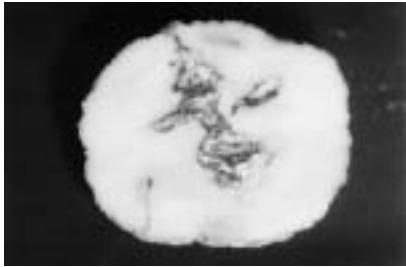


図1 芯腐れのある馬鈴薯

このようなことから、本研究では馬鈴薯品質検査作業の自動化・省力化の一環として、馬鈴薯の内部損傷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。

内部を計測するための基本的な考え方は、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から得られる光学情報を解析することにより、馬鈴薯の品質情報を抽出することである。

そこで本研究では、馬鈴薯の中心空洞や芯腐れなどの変質・変色による内部損傷を品質に関する計測対象として位置付け、その計測方法について検討を行った。具体的には、分光計測技術に基づいた「2波長計測法」、およびレーザの透過光を計測する「レーザ透過光計測法」という2つの方法を絞って検討を進めた。

この結果、2波長計測法では白色光（キセノン光源）を馬鈴薯表面に照射し、その透過光における特徴的な波長と参照波長の光強度の比を求めることにより、品質劣化を評価する方法を見出した。また、レーザ透過光計測法ではレーザを一定間隔で馬鈴薯表面に照射し、透過光強度分布およびその1次微分処理結果などを説明変数として多変量解析することにより、芯腐れ、中心空洞などの内部損傷を検出する方法を見出した。

さらに、これらの成果を踏まえ、2波長計測機能とレーザ透過光計測機能を有する馬鈴薯品質計測システムの開発を行い性能評価を行った。

以下に、本研究について報告する。

2. 2波長計測技術の開発

本研究では内部損傷を計測する方法の一つとして、分光計

測技術に基づく2波長計測法を選定し、分光スペクトルから品質を評価する方法について検討を行った。

2.1 馬鈴薯の分光透過特性調査

著者らは、以前から芯腐れや緑化などの変色・変質を計測する有効な方法として分光計測技術に着目し基礎試験¹⁾を行ってきた。

この一環として、馬鈴薯の分光透過特性を調査するため薄片サンプルに白色光（キセノン光源）を照射し、透過光を光スペクトラムアナライザにより分光計測した。サンプルの厚さは約3mmとし、正常な馬鈴薯、表面に緑化のある馬鈴薯、そして腐れのある馬鈴薯を計測対象とした。

計測の結果、全体として波長が長くなるに従い光の透過性が高くなる傾向を示しており、特に、短波長域における吸収が長波長域に比べて顕著であることが分かった。

また、正常な馬鈴薯では短波長域において単調な増加傾向を示しているのに対し、腐れのある馬鈴薯では波長470nm近傍において幅の狭いピークの発生が認められた。そこで、このピークに着目して主成分分析²⁾を試みた。この結果、正常な馬鈴薯、緑化のある馬鈴薯、そして腐れのある馬鈴薯が明確に分類されることが判明し、波長470nmのピークと腐れとの関連性が明らかになった。

一方、波長470nmのピークは蛍光の一つと想定されるため、図1に示す馬鈴薯断面に紫外光を照射してみた。この結果、明らかに蛍光を発している様子を確認することができた。このことから、蛍光現象と腐れ等の品質の劣化には何らかの相関があり、波長470nmは蛍光波長の一つである可能性が高いことが分かった。

ここで、参考までに馬鈴薯の損傷のプロセスについて説明を加える。まず、外部からの衝撃などにより細胞が破壊されて細胞内のフェノール類（チロシン、カテキン、クロロゲン酸など）が、酸素の存在下で酵素ポリフェノールオキシダーゼによりキノン類に変化する。

さらに、酸化重合して重合体を生成する過程を経て黒色のメラニン色素に変化し、これが黒色芯腐れなどの内部損傷として現れるものと考えられている。

著者らは、酸化重合の過程で生成する重合体が蛍光を発するのではないかと推察している。すなわち、細胞の破壊により品質の劣化（腐れ）が進行するが、これに伴い重合体の生成が進み蛍光強度が増大することが考えられ、この現象を利用することにより、蛍光の度合いから品質劣化を評価することも十分に可能性がある。

2.2 2波長計測技術に関する基礎試験

本研究では馬鈴薯の蛍光現象に着目し、簡便な計測評価方法として波長470nmの透過光を信号光と位置付け、さらには品質の劣化に大きな影響を受けないと思われる近傍波長を参

照光に選定し、信号光との強度比（以下、2波長比と言う）から品質劣化を評価する方法について検討を行った。

なお、これに先立ち、馬鈴薯の蛍光現象について基礎調査を行った結果、波長470nmをピークとする蛍光は波長390nmの励起光によることを確認した。

2.2.1 計測試験方法

まず、信号光の波長を470nmと設定し、参照光として腐れによる大きな影響を受けないと想定される数種類の波長について検討を行った。

図2に2波長計測光学系の構成を示す。光源としてパルス発光型キセノンランプ（浜松ホトニクス製）を用い、IRフィルターを介して光を馬鈴薯に照射した。馬鈴薯からの透過光をハーフミラーにより2分割し、一方は波長470nm用狭帯域干渉フィルターを介して光電子増倍管（浜松ホトニクス製、以下、PMTと言う）に、他方は参照光用狭帯域干渉フィルターを介してPMTに入射するようにした。

図3にPMTからの出力信号波形の例を示す。PMT出力は光源が発光してから十数μs後にピークを示す。計測試験では、オシロスコープのディスプレイに表示された波形からピーク値を読みとり記録した。

2.2.2 参照光波長の選定

参照光波長を選定するための計測試験では、正常な状態の馬鈴薯（男爵）10個、そして打痕を与えて1カ月経過したもの（以下、腐れのある馬鈴薯と言う）10個を対象とした。また、大きさとしては透過厚さ45mm～55mmのものを採用し

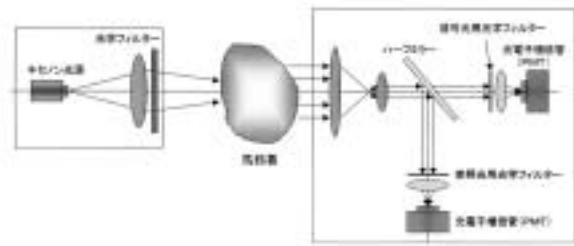


図2 2波長計測光学系の構成

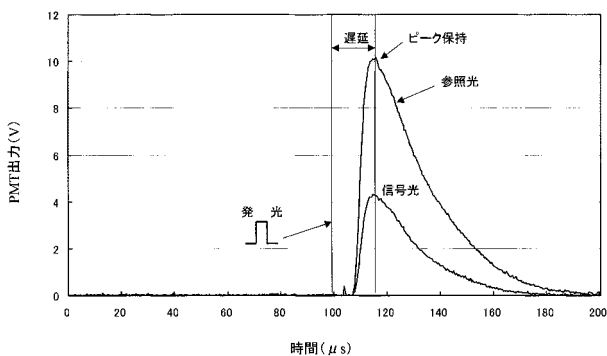


図3 PMTからの出力信号波形

た。

図4に参照光の波長を510nmとした場合の計測試験結果を示す。また、比較のために参照光の波長を490nmとした場合の計測試験結果を図5に示す。

図4から、参照光の波長を510nmとした場合には、腐れのある馬鈴薯の方が参照光出力が小さく、且つ、2波長比が大きくなるのが分かる。これに対し、波長490nmを参照光とした場合（図5）には、腐れのある馬鈴薯の参照光出力は同様に小さくなるが、2波長比には図4のような明確な変化は認められない。

このことから、2波長計測法により腐れの評価を行う場合には、参照光出力の低下に伴い2波長比が増大するという明確な傾向（変化）が認められる波長510nmが参照光として適当であることが分かった。

そこで、これ以降の計測試験では参照光の波長を510nmと設定し、両者の光強度から2波長比を求め評価することにした。以下、波長470nmの光を信号光、波長510nmの光を参照光と言う。

2.2.3 計測試験

新たに50個の馬鈴薯（北あかり）を用いて2波長計測法による計測試験を行った。なお、試験は正常な状態と打痕後1カ月経過した状態（腐れのある状態）に対して行った。

この結果、図4に示される計測試験結果と同様に参照光強

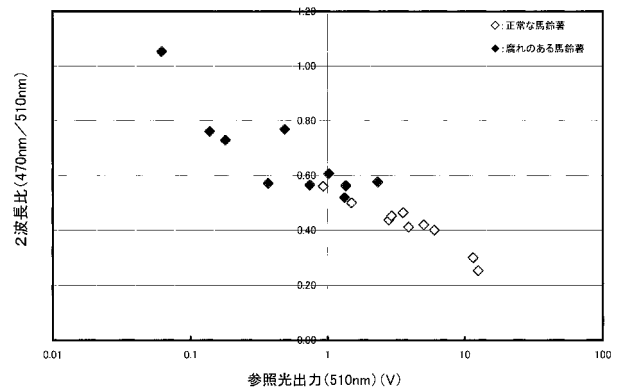


図4 参照光（510nm）の場合の計測結果

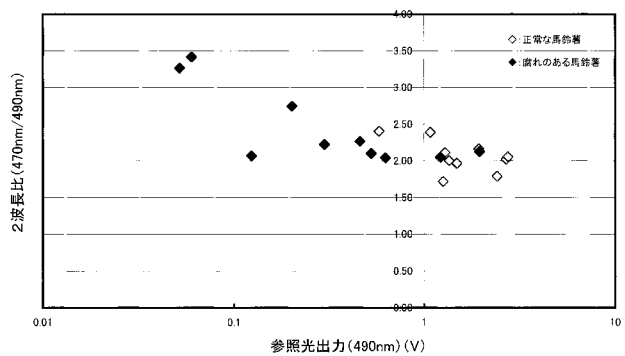


図5 参照光（490nm）の場合の計測結果

度の低下とともに2波長比が増大し、全体として腐れのある馬鈴薯の方が参照光強度が小さく、且つ、2波長比が大きい範囲に存在していることが確認できた。

次に、個々の馬鈴薯における2波長比の変化を調査するため、正常な状態の2波長比を基準(1.0)として腐れのある状態のそれをレーダーチャートで表してみた(図6)。図において半径方向の軸は2波長比の増加率、円周方向の軸はそれぞれの馬鈴薯サンプルの番号を示す。図6から、ほとんどの馬鈴薯において腐れのある状態の2波長比が、平均で数十パーセント増大していることが分かる。

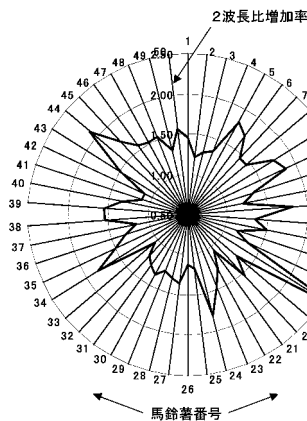


図6 2波長比の増加率

2.3 考察

これまでの計測試験から、腐れのある馬鈴薯の方が参照光出力および信号光出力が小さくなることが分かった。これは、馬鈴薯内部に入射した内部散乱光が腐れ部位で吸収、拡散反射され、透過光の強度が低下することに起因していると考えられる。

次に、参照光の出力低下とともに2波長比が増大する傾向があり、参照光出力と2波長比の間には、ある程度の相関性が認められた。前述のように、これは腐れなどの品質の劣化によって生成する重合体が蛍光を発生することに起因すると考えられる。

すなわち、腐れ部位において波長470nmを中心とする蛍光が生じ、これが透過光と重畳された形で検出されることにより、信号光出力が若干大きくなるのではないかと推察している。現在のところ、この推論を証明するには至っていないが、今後、さらに検討を進めていく中で明らかにできるものと思われる。

しかし一方では、この現象が馬鈴薯の品質劣化によるものではなく、たとえばアンプの直線性の低下などのハードウェアの特性に起因することも否定できない。そこで確認のために、正常な馬鈴薯に対する照射光の強度を変化させて2波長比がどのように変化するか調査した。

調査の結果を図7に示す。この図から、照射光の強度を小

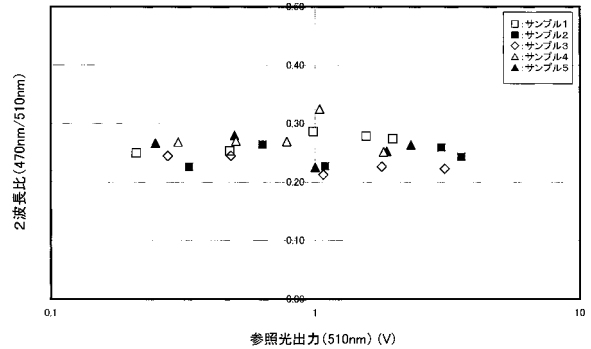


図7 ハードウェア等の影響調査結果

さくすることにより参照光出力も低下するが、2波長比はほとんど変化しないことが分かる。すなわちこの調査から、図4に示される2波長比の挙動はハードウェアによるものではなく、蛍光現象に起因する可能性が大きいことが分かった。

このように、これまでの一連の計測試験の結果から、参照光出力および2波長比を求めることにより、腐れ等の馬鈴薯の品質劣化の評価、ひいては内部損傷を検出できる可能性があることが確認できた。

たとえば、実際に2波長比測定法により腐れのある馬鈴薯と正常な馬鈴薯を判別するには、まず、参照光出力に対し一定の閾値を設け、参照光出力が閾値より小さい場合は腐れのある馬鈴薯であり、大きい場合は正常な馬鈴薯と判別できる。

また、2波長比についても一定の閾値を設け、これより大きい値の場合は腐れのある馬鈴薯と判別することが考えられ、さらにこれらの「論理積(AND)」を採用することにより判別精度が向上することが期待できる。

3. レーザ透過光計測技術の開発

2波長比測定法と並行して、レーザ透過光計測法についても検討を行った。本計測法は、中心空洞や芯腐れのような光を遮断(吸収、反射)する効果が大きい内部損傷の検出に有効と思われる。

3.1 レーザ透過光計測技術に関する基礎試験

3.1.1 計測試験方法

図8にレーザ透過光計測光学系の構成を示す。また、図9に計測システムの制御ブロック図を示す。本計測法では、レーザ(半導体レーザ、波長633nm、出力20mW)を馬鈴薯表面に照射し、その透過光強度を計測・解析することによって内部損傷を検出する。

図には示されていないが、計測試験においては馬鈴薯を載せたサンプル台を1軸スライドテーブルにより移動させ、等間隔で計測できるようにした。計測システム全体の制御にはパソコンを使用した。また、パソコンからRS-232Cを介して専用コントローラへ制御コマンドを送出することにより、