

図8 レーザ透過光計測光学系の構成

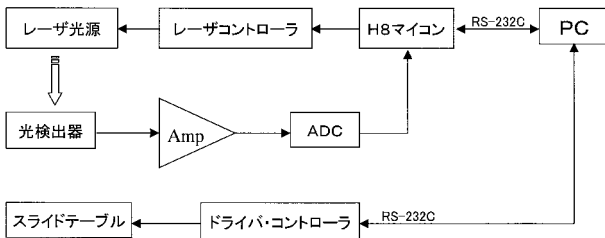


図9 計測システムの制御ブロック図

スライドテーブルを駆動した。

一方、透過光検出器（松下電工製）からのアナログ信号はAD変換を行った後、H8マイコン（日立電気製）において前処理を行った。さらに、本データをRS-232Cを介してパソコンへ取り込み、解析を行った。計測システム全体の制御および信号解析用のプログラミングには、Microsoft社のVisual Basic Ver.6を使用した。

なお、計測光学系においてはSN比を向上させるため、光源側にピンホール状の空間フィルター、そして光検出器側に光路抑制用スリットを設置した。

### 3.1.2 計測試験および結果

馬鈴薯（男爵）を10個用意し、それぞれ疑似欠陥がある場合とない場合について計測試験を行った。疑似欠陥としては直径15mm、長さ20mmの黒色円筒を使用し、馬鈴薯のほぼ中央部に設置した。なお、馬鈴薯の大きさとしては、透過厚さが45mm～55mmのものを採用した。また、計測速度を毎秒15mmとし約1mm間隔で連続的に計測を行った。

図10に馬鈴薯内に疑似欠陥がある場合とない場合の計測結果の例を示す。図のように、光検出器出力は両端の出力が非常に大きく中央部近傍が小さいという、いわば「お椀型（凹型）」の形状を呈している。

また、疑似欠陥がある場合は内部散乱光の遮断（吸収、反射）により透過光強度が低下するため、全体として疑似欠陥

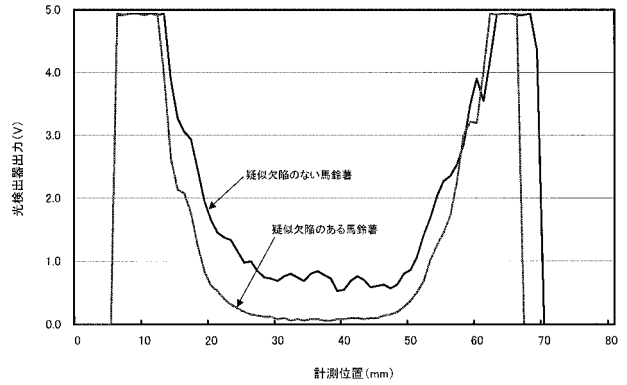


図10 疑似欠陥（φ15）の計測結果

がない場合に比べ出力が小さくなり、中央部近傍における光検出器出力のばらつきも小さくなるのが分かる。

### 3.2 考察

一連の計測試験の結果から、個々の馬鈴薯については疑似欠陥の有無により中央部近傍の光検出器出力の最小値に差が生じることが分かった。このことから、最小値に対し一定の閾値を設定することにより、疑似欠陥の有無を判定できる可能性があることが容易に理解できる。しかし、複数の馬鈴薯については、馬鈴薯の大きさ（透過厚さ）の違いによる光検出器出力の加算的ベース変動があるため、画一的な閾値により判定することは難しい。

そこで、まず光検出器出力の加算的ベース変動の影響を回避するため、計測データの1次微分を行った。図11に計測データの平滑化微分の結果を示す。図から、疑似欠陥がある場合はない場合に比べ、中央部近傍の微係数の変動が小さくなっているのが分かる。

このことから、微係数の変動の度合いを数値化し、これに対し一定の閾値を設けることにより、加算的ベース変動の影響を受けることなく疑似欠陥の有無を判定できる可能性がある。

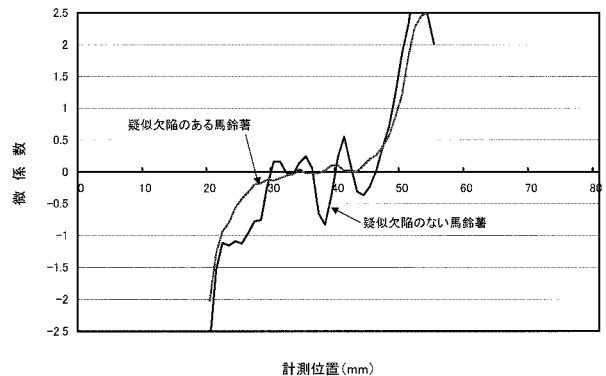


図11 1次微分の結果（疑似欠陥：φ15）

## 4. 馬鈴薯品質計測システムの開発

### 4.1 計測システムの構成

これまでに得られた知見を基に、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った。図12に本計測システムの構成を示す。また、表1に本計測システムのおもな仕様を示す。

本計測システムでは、直径600mmの円周上に複数の孔(φ50)を有するアクリル製回転円盤(外径700mm)を設置し、速度可変型誘導電動機で回転させることにした。回転円盤は2波長計測用とレーザ透過光計測用の2種類を用意し、前者のものは外乱光の影響を極力低減するため黒色板とした。また、後者のものは透明板とした。

計測時には回転円盤の孔部に馬鈴薯を載せ、レーザ透過光計測の場合は図の右側、2波長計測の場合は左側の計測光学

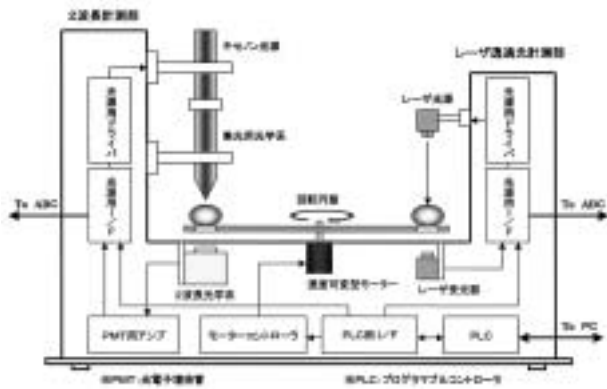


図12 馬鈴薯品質計測システムの構成

表1 馬鈴薯品質計測システムのおもな仕様

項目	諸元
計測機能	レーザ透過光計測機能 2波長計測機能
サンプル搬送方式	回転円盤方式
円盤直径	外径700mm (孔部: 600mm)
サンプル孔直径	50mm
円盤駆動源	速度可変型誘導電動機
回転速度	1.0rpm (2波長計測時) 3.2rpm (レーザ透過光計測時)
制御装置	プログラマブルコントローラ (PLC)
信号解析装置	パーソナルコンピュータ (PC)
レーザ透過光計測機能部	
光源	半導体レーザ (波長: 633nm, 20mW)
光検出器	フォトダイオード (PD)
信号出力	0V ~ 5V
2波長計測機能部	
光源	キセノンランプ (パルス発光型)
光検出器	光電子増倍管 (PMT)
信号出力	0V ~ 10V
検出波長	470nm (信号光) 510nm (参照光)

系を用いて計測を行う。それぞれの計測データはアナログ信号のため、PCカード型AD変換器(キーエンス製)を介してノートパソコンに取り込む。なお、両者ともプログラミング言語としてMicrosoft社のVisual Basic Ver.6を用い信号解析等のプログラムを作成した。

次に、それぞれの計測系について説明を加える。

#### 4.1.1 2波長計測系

2波長計測系の構成は基本的に図2と同じである。今回は計測データの収集が大きな目的であることから、円盤の回転速度を1.0rpm(孔部周速度約30mm/s)と低速に設定した。なお、AD変換器等の処理能力にも余裕があることから、実用的な回転速度にすることは十分可能である。図13に本計測系の外観を示す。また、図14に本計測系の制御ブロック図を示す。

本計測系およびレーザ透過光計測系を含めたシステム全体の制御は、プログラマブルコントローラ(PLC:松下電工製)によって行う。まず、馬鈴薯が光軸にさしかかると、これを光電センサが検知する。このとき、発光用トリガー信号が光源用ドライバへ出力され、キセノン光源からパルス光が馬鈴薯表面に照射される。



図13 2波長計測系の外観

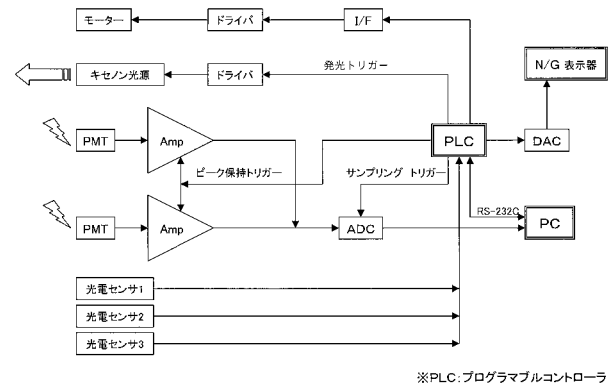


図14 計測システムの制御ブロック図

馬鈴薯からの透過光は計測光学系を介してPMTで検出される。PMTからの出力信号はアンプにより増幅されるとともに、遅延タイマーからのトリガー信号により最大値が保持される。その後、PLCからAD変換器へトリガー信号が出力されることによりPMT出力信号はAD変換され、パソコンに取り込まれる。

#### 4.1.2 レーザ透過光計測系

レーザ透過光計測系では、図8に示すように馬鈴薯表面にレーザ光を照射し、その透過光を下側に設置された光検出器により検出する。光検出器の前方にはSN比を向上させるために3mm×30mmのスリットを設けてある。図15に本計測系の外観を示す。

本計測系では、円盤の回転速度を3.2rpm(孔部周速度約100mm/s)とした。また、AD変換器のサンプリング速度を500Hzとすることにより、0.2mmピッチで480ポイントの計測(全長約96mm)を行うことにした。

図16に本計測系の制御ブロック図を示す。まず、馬鈴薯が計測範囲に入ると光電センサが検知し、このトリガー信号により計測を開始する。光検出器からの信号は0V～+5Vのアナログ電圧として出力されるため、レベル変換用アンプにより-10V～+10Vに変換される。さらに、PLCからのトリガー信号によりAD変換され、パソコンに取り込まれる。

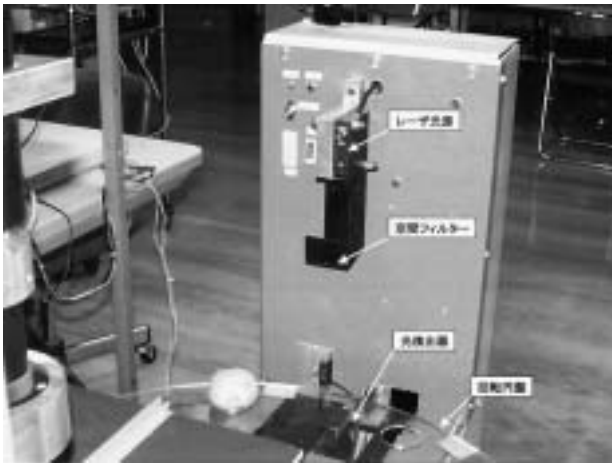


図15 レーザ透過光計測系の外観

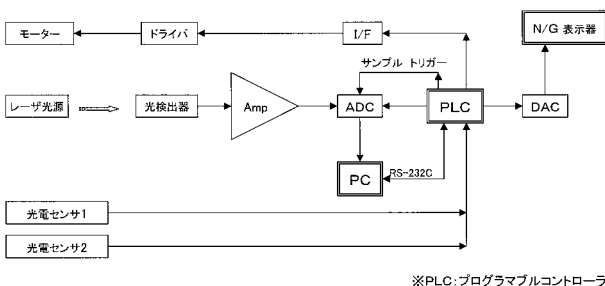


図16 計測システムの制御ブロック図

#### 4.2 計測試験

開発した計測システムの性能評価を目的として、2波長計測機能およびレーザ透過光計測機能を用いて馬鈴薯サンプルに対する計測試験を行った。

2波長計測機能については、馬鈴薯(男爵)50個に対して計測試験を行った。この結果、打痕後1カ月経過した状態の馬鈴薯の場合、信号光(波長470nm)の透過光強度が小さく、十分なSN比で計測することができないことが分かった。

この原因は、本計測システムの構造上の制約から、馬鈴薯裏面からPMTまでの光路長が基礎試験用計測系のそれより長くなったことに起因していると思われる。このように、本計測系については改良の必要性が生じたため、現在、改良作業を進めている。このことから、本報ではレーザ透過光計測機能についてのみ、以下に報告する。

##### 4.2.1 レーザ透過光計測法による計測試験と結果

馬鈴薯(男爵)30個に対し、それぞれ疑似欠陥がある場合とない場合について計測試験を行った。疑似欠陥として、直径10mm、長さ15mmの黒色円筒を使用し、馬鈴薯のほぼ中央部に設置した。馬鈴薯の大きさとしては、透過厚さが45mm～60mmのものを採用した。

図17に馬鈴薯内に疑似欠陥がある場合とない場合の計測結果の例を示す。図から、計測データの傾向としては、基礎試験の場合と同様に馬鈴薯中心部において光検出器出力が最小値を示すようなお椀型(凹型)の形状を呈することが分かる。また、疑似欠陥がある場合はない場合に比べ、中央部近傍の光検出器出力も小さく、且つ、ばらつきも小さくなっている。このように、本システムによる計測試験では、基礎試験の場合とほぼ同様な傾向を確認することができた。

##### 4.2.2 疑似欠陥有無の判定

馬鈴薯内部の疑似欠陥の有無を判定することを目的に、計測データ(光検出器出力)から特徴的なデータを抽出し、これらを説明変数として多変量解析の一つの手法である「判別分析」を行った。さらに、分析結果から判別式を求め、疑似欠陥有無の判定を試みた。

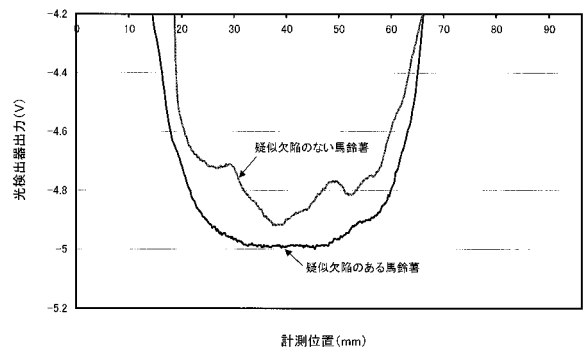


図17 疑似欠陥の計測結果

これまでの検討結果から、判別分析の説明変数として計測データの最小値、中央部近傍の変動、微係数の変動等を選定した。さらに、精度を高めるため図18に示すように疑似欠陥がない馬鈴薯の計測データの最小値から透過厚さ毎の基準値(閾値)を設定し、この基準値と実際に計測したデータの最小値との偏差も説明変数とすることにした。

次に、馬鈴薯(男爵)110個を対象として判定を行った。馬鈴薯の内訳は、疑似欠陥のない馬鈴薯が55個、ある馬鈴薯が55個である。判定の結果、判定率が約95%となり、ほぼ実用レベルの精度を実現することができた。

ただし、馬鈴薯の透過厚さが判定に大きな影響を与えることが判明し、開発した計測システムにも新たに透過厚さを計測する機能を付加する必要性が確認された。このことについては、市販のレーザ式変位センサ2台を対向して設置することにより可能であることから、今後、本機能を追加することを検討したい。

また、高い判定精度を確保するには透過厚さに対応した基準値を設定する必要性も確認された。このためには、前もって10~20個程度の馬鈴薯を用いて計測データを収集し、最小値から基準値を設定するという作業が必要である。

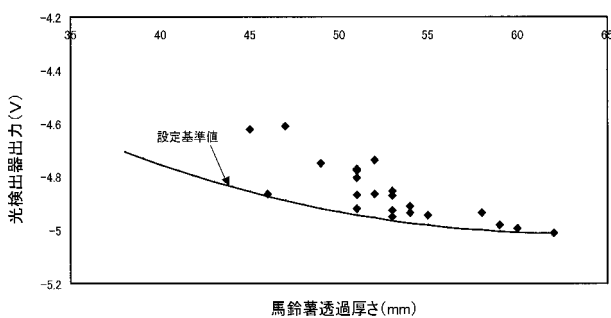


図18 透過厚さ毎の基準値の設定

## 5. まとめ

本研究では、根菜類の一つである馬鈴薯の芯腐れや中心空洞などの内部損傷(欠陥)を計測対象として設定し、光学的手法を用いた品質検査技術の開発を行った。具体的な計測方法として、分光計測技術に基づく2波長計測法とレーザ透過光計測法という2種類の方法を選定し、これらの検討を並行して進めた。

まず最初に、2つの計測方法に関する基礎試験を行うことにより内部損傷の検出の可能性について検討を行った。2波長計測法については、これまでの分光計測試験の結果を基に特徴的な波長の光(信号光:470nm)と参照光(510nm)を選定し、これらの波長だけを検出して強度比(2波長比)を求めた。この結果、参照光出力の低下と2波長比の増大傾向から、本計測法が腐れなど品質の劣化の計測に使用できる可能性があることが分かった。

また、レーザ透過光計測法については、レーザの透過光強度分布から最小値、データの変動、微係数の変動などを求めることにより、疑似欠陥の検出の可能性があることが分かった。

さらに、これまでに得られた知見を基に、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」を開発した。本計測システムを用いて計測試験を行った結果、2波長計測法については基礎試験時の計測光学系に比べ馬鈴薯裏面からPMTまでの光路長が長いこと、信号光を十分な感度で検出することが難しく改良する必要性が確認された。

一方、レーザ透過光計測法においては新たに馬鈴薯の大きさ(透過厚さ)毎の基準値と実測最小値との偏差を説明変数として加え判別分析による判定を行った結果、概ね95%という高い精度で判定できることが分かった。

このようなことから、今後は2波長計測系の改良を行うとともに、2つの計測機能を組み合わせることにより実用レベルの高精度な計測システムの実現を目指したい。

## 引用文献

- 1) 澤山一博・本間稔規・青山達仁：光学的手法による農産物品質検査技術の開発、北海道立工業試験場報告、No.300, pp155~158 (2001)
- 2) 田中 豊・脇本和昌：多変量統計解析法、現代数学社、pp121~128