高性能色彩選別機の開発¹⁾

米は我が国の主食であり、また清酒や味噌をはじめとする醸造物の重要な原料でもある。その品質確保には細心の注意が払われ、米に混入する不良米や石などの異物は分光特性を利用した色彩選別機で除去される。一方、従来の選別機は性能の点で問題があり所定の除去率や製品歩留を確保するためには複数の選別機を必要としていた。今般その問題点が大幅に改善された高性能色彩選別機が開発された。高速かつ大量に流れる米の中から不良米や異物を正確に見つけ出して、それをピンポイントで吹き飛ばす技術は大変興味深いところであり、開発者に詳しく解説していただいた。

佐竹 寛・福森 武

1. はじめに

米は、我が国の主要食糧であり、年間消費量は1,000万トン以上に達し、農産物検査法および食糧法に基づいて、検査、流通が行われている。

この米に混入している不良米、異種穀粒および異物を検出・除去する米の分光選別機は、1979年頃から、日本の精米分野に普及し始めた。最初は、大型精米工場に始まり、その後、中小の精米施設にも導入された。

近年、新食糧管理法およびPL法が施行されたことによって、精米工場は、白米の品質管理のうち、特に、不良米や異物の混入に対して、消費者から厳格な対応が求められている²⁾。

このような社会的背景と市場ニーズを基に、白米中に混入する $\phi 0.5\text{mm}$ 程度の微小着色部のある不良米と $\phi 2\text{mm}$ 程度の小さい異物等を、その反射率と透過率を複合した分光特性の比を利用して、識別・除去す

る高性能色彩選別機（第1図）を開発したので、この技術内容について報告する。

2. 選別材料の選別区分

米の色彩選別には、玄米または白米中の不良米選別、及び不良米と異物の同時選別がある。色彩選別機では、選別するもの（選別材料）を、良品と不良品の2つに選別区分する。

第2図に示すように、玄米の良米には整粒と青未熟粒とがあり、不良米には青死米や着色粒などがある。また、白米の良米には完全粒と粉状質粒とがあり、不良米には表面に着色部のある被害粒や着色粒などがあ

第1図 高性能色彩選別機

第2図 米の良米と代表的な不良米

第3図 米に混入する代表的な異物

Development of High Performance Color Sorter
Satoru SATAKE, Takeshi FUKUMORI (Satake Corporation)

る。そのほか玄米や白米への混入物として、第3図に示すような石、ガラス、樹脂、陶磁器などの異物や麦などの異種穀粒がある。

色彩選別機は、良米と不良米や異物等との色彩の違いを光学的に識別して除去する装置である。従って、良米と不良米や異物等とを光学的に識別する方法を開発して、それに基づき色彩選別機を設計することになる。

3. 色彩選別機の機能と課題

3-1 色彩選別機の構成と機能

第4図に、色彩選別機の各部の構成を示す。色彩選別機は、原料供給部、分光検出部、信号処理部および選別部で構成され、その構成と機能は以下の通りである。

原料供給部は、電磁フィーダとシュートから構成される。米は電磁フィーダによりタンクから連続的に取り出され、シュート上を所定の速度で均等に流下し、分光検出部に供給される。

分光検出部は、光源、光センサ、光学フィルタ、光学レンズ、背景板で構成され、流下する米の中から不良米や異物等を識別し、その検出信号を信号処理部に送る。光源には、可視域から近赤外域までの光を米に照射するために蛍光灯とハロゲンランプが使用される。光センサは、米からの反射光と透過光を複合した光を光学フィルタと光学レンズを通して受光し、その受光

量の差に基づき不良米や異物等を検出する。背景板は、光センサの対向位置に設置され、光センサが不良品を検出するための基準の明るさを与える背景となる。

信号処理部は、光センサからの出力信号を処理して、不良米や異物等を識別・除去するための出力信号を電磁バルブ駆動回路に送る。

選別部は、噴射ノズルと電磁バルブから構成され、信号処理部からの出力信号により電磁バルブを駆動し、噴射ノズルから高圧空気を噴射して不良米や異物等を除去する。

3-2 色彩選別機の課題

従来の色彩選別機では、分光検出器の分解能が低いため、シュート上を流下する白米の微小着色部を識別できず、不良米や異物等を1粒単位で除去することができない。そのため、選別率（除去すべきものの除去率）と不良品濃度（除去したものに含まれる不良米や異物等の割合）が低く、良米歩留が低いという問題がある。実際、その選別率は、第5図に示す着色部がφ1.5mm以上の不良米bと大きさがφ5.0mm程度の異物では95%以上であるが、φ0.5mmの微小着色部のある不良米aやφ2.0mm程度の小さい異物では30%以下である。また、その不良品濃度は約10%と低い。

この不良品中の良米を回収して製品歩留を向上するために、1次選別後の不良品を再選別（2次選別）する操作を行っている。このように、2回の選別を行う

第4図 色彩選別機の構成

完全粒 着色粒 a 着色粒 b

第5図 完全粒と着色部の大きさが異なる不良粒

必要があるため、1台当たりの処理能力が低下し、所定の処理能力を確保するためには、多数の機械を必要とするので、設備投資および設置面積が増大する³⁾。

米の色彩選別機には、選別率と不良品濃度、特に、後者を高くするという課題があり、そのため、分光検出器の分解能を高くし、 $\phi 0.5\text{ mm}$ 程度の微小着色部のある不良米や $\phi 2.0\text{ mm}$ 程度の異物を1粒単位で識別・除去できるように全体構成を見直す必要がある。

4. 分光特性による不良品の識別

4-1 複合分光特性比

色彩選別機は、良米と色彩の異なる不良米、異種穀粒および異物は可視域で、また、良米と色差のない異物は、成分や含水率の違いに着目して近赤外域で、分光特性の差により識別する。これらの識別に最適な波長域を選定するため、第6図に示すNIR Systems社製の分光分析器（型式：6500）を使用し、サンプルを透明なセルに充填して粒集合体の状態で分光特性を測

定した。

実際の色彩選別機では、不良米の着色部が、光センサに対し米粒の裏面に位置する場合が多くあることと、分光検出部の構造の両面から考察し、反射光と透過光を複合する必要がある。

このことから、分光反射率と分光透過率を加算した特性（複合分光特性）を式(1)で、定義する。

$$\text{複合分光特性} = (\text{分光反射率}) + (\text{分光透過率}) \quad (1)$$

また、識別波長域の選定のために、良米（完全粒）に対する任意の米の複合分光特性比、すなわち、複合分光特性比（D）を式(2)で定義した。

$$\text{複合分光特性比 (D)} = \frac{\text{任意の米の複合分光特性}}{\text{良米(完全粒)の複合分光特性}} \quad (2)$$

複合分光特性比が波長に対してどのような値を示すのか、良米の粉状質粒と不良米の被害粒及び着色粒について、400～800 nmの可視域で測定した結果を第7図に示す。なお、第7図には完全粒の複合分光特性比（必ず1.0になる）の値も示している。

複合分光特性比は良米と不良米では異なるパターンを示し、400～500 nmの範囲において適当なしきい（閾）値を設定すれば両者が光学的に識別可能と考えられる。

最適識別波長を求めるには、良米（完全粒）の複合

第6図 NIR Systems社製 分光分析器（型式：6500）の測定原理

第7図 白米の複合分光特性比

分光特性比 1.0 と、2 種類の不良米の複合分光特性比のうち 1.0 に近い方の不良米の値を比較し、これらの差（第7図の①）が最も大きくなる波長を選択すればよい。一方、良米（完全粒）の複合分光特性比が常に 1.0 であることを考えれば、第7図の②の値が最も小さくなる波長を選択してもよい。

実際の色彩選別に当たっては、単一波長の光ではなく光学フィルタで半値幅を 40 nm とした分光を用いる。第7図は単一波長の光によるものであり、この図からは半値幅 40 nm の分光を用いた場合の最適識別波長域は正しく求められない。正しく求めるためには、第7図の不良米の複合分光特性比を波長幅 40 nm で平均した平均複合分光特性比（ D_a ）を求める必要がある。平均は次の(3)式を用いて行った。

$$\text{平均複合分光特性比}(D_a) = \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_0 + \Delta\lambda} D(\lambda) d\lambda}{\Delta\lambda} \quad \dots(3)$$

ここで、 $\Delta\lambda$ は分光の半値幅 40 nm、 λ_0 は分光の短波長側の波長 nm、 $D(\lambda)$ は不良米の複合分光特性比であり、第7図において 400～460 nm 間は青色粒の

第8図 白米の平均複合分光特性比(D_a) (半値幅 40 nm)

値を、470 nm～は被害粒の値である。

可視域 400～800 nm の範囲で計算した結果を第8図に示した。

この図から、白米中に含まれる不良米識別に最適な波長域 ($\lambda_0 \sim \lambda_0 + \Delta\lambda$) は、432～472 nm (中心波長 452 nm) であることが判明した。

同様に、可視域と近赤外域における、白米の完全粒と黒い石以外の各種異物を識別する最適波長域は、 $\Delta\lambda = 100$ nm としたとき、1,546～1,646 nm (中心波長 1,596 nm) であることがわかった。

4-2 複合出力信号比

粒集合体による分光特性の測定結果より、白米の良米と不良米の識別は、可視域の 430～470 nm で、また、良米と異物の識別は、近赤外域の 1,550～1,650 nm で可能であると考えた。

このことを、1 粒単位で検証するため、可視域と近赤外域の 1 粒ごとの出力特性が測定できる第9図に示す実験装置を試作し、反射光と透過光を測定して反射と透過の複合を求めた。

この信号での選別性能を評価するため、複合分光特

第9図 実験装置

第 10 図 良米と不良米の複合出力信号と複合出力信号比

第 11 図 完全粒に対する各種異物の複合出力信号比

性比と同様に、選別材料 1 粒の反射による分光出力信号と透過による分光出力信号を加算した複合出力信号を式(4)で定義した。

複合出力信号 = (反射の出力信号) + (透過の出力信号) (4)

また、識別波長域を選定するために、複合出力信号比を式(5)で定義した

複合出力信号比 = $\frac{\text{任意の米の複合出力信号}}{\text{良米(完全粒)の複合出力信号}}$ (5)

白米の良米と不良米を 1 粒単位で反射光と透過光を同時検出し、それぞれの出力から、式(4)と式(5)を用いて複合出力信号と複合出力信号比を求めた。第 10 図(a)に複合出力信号を、第 10 図(b)に複合出力信号比を示す。良米である粉状質粒は、基準値 1.0 (完全粒の値で基準値とする)と同じであり、その他の不良米である被害粒と着色粒は、1.0 より小さい。青の波長域で 1.0 より少し小さい閾値を設定することによりこれらの不良米を識別できる。複合出力信号比による不良米の最適な識別波長域は、複合分光特性比より求

めた識別波長域 430～470 nm と同様であった。

第 11 図(a), (b)に、可視域と近赤外域における完全粒と各種異物の複合出力信号と複合出力信号比を示す。

第 11 図(a)より、黒い石は、青の波長域で識別できる。第 11 図(b)より、黒い石以外の全ての異物は、波長域 1,600 nm 付近において高い確率で完全粒と識別できる。これは、粒集合体の複合分光特性比で求めた波長域と同様である。

5. 色彩選別機の高性能化

色彩選別機の性能は、1 次選別の選別率と不良品濃度で評価される。この選別率と不良品濃度を限りなく 100 % に近づけることが高性能化である。高性能化を実現するために、白米の良米に混入する不良米や異物を 1 粒単位で識別・除去するという新たな視点を基本として、色彩選別機の各構成部に要求される新たな技術を系統的に開発した。

5-1 原料供給部

原料供給部については、第 12 図に示す原料供給部の

第 12 図 原料供給部の実験装置

実験装置を用いて白米に混入する不良米，異種穀粒や異物を，1粒単位で全数検査し，1粒単位での選別を行う最適条件を検討した。

電磁フィーダとシュートで構成される原料供給部の要点は，米の重なりと米粒速度のバラツキを，できるだけ少なくすることである。電磁フィーダに，MR素子を使用して電磁フィーダの振幅検出とフィードバック制御をすることにより，米の供給量を安定させることができた。また，シュートの形状を平型，長さを1,200mm，傾斜角度を60度にするこゝで，米粒速度4.2m/sのとき米の重なり割合が，従来機の1/4の8%まで低減させられることがわかった。

5-2 分光検出部

分光検出部の課題は，4.2m/sの高速で流れる米粒を1粒単位で検査し，混入する不良米，異物を検出できる検出系を設計することである。そのため，適当な光源の選択とその安定化を図るとともに，解像度の良い光学レンズを使用し，選別材料の分光特性から適性波長域の光学フィルタを選定することが必要である。

これら検出系の検討を行った結果，分光検出部における光源は，色彩選別に必要な波長域を得るため，可視域には蛍光灯を，近赤外域にはハロゲンランプを使用することが適当であることが明らかとなった。蛍光灯とハロゲンランプの輝度の安定化を図り，さらに第13図に示すように背景板の明るさの自動調整方式を確立した。

また，光学フィルタは，前述した複合出力信号比による識別の最適波長域から，白米中の不良米には青の可視域，白米中の異物には1,400~1,600nmの近赤外域のものを使用した。

光センサの選定要素は，素子数と走査速度である。

第 13 図 背景板の自動調整

可視光センサには，入射光量に対する出力が，ほぼ正比例する CCD Si センサを採用し⁴⁾， $\phi 0.5\text{mm}$ の微小着色部を検出する性能を持たせるため，走査速度が9.1KLPSの2,048素子のものを選定した。近赤外センサには， $\phi 2\text{mm}$ の異物を検出する性能を持たせるため，Ge，PbSよりも応答性が良く，比較的周囲温度の影響を受けにくい InGaAs リニアセンサで，走査速度が3.0KLPSの256素子のものを選んだ⁵⁾。その結果，不良米や異物等の検出と識別が高速化でき，また白米からの反射光と透過光を複合することにより高識別率を実現できた。

5-3 信号処理部

信号処理部は，比較回路，噴射時間設定回路および遅延時間調整回路で構成される。比較回路は，白米中の不良米の判定を行い，噴射時間設定回路では，検出した不良米の着色部の大きさと位置により噴射時間の長さを設定する。遅延時間調整回路では，センサが不良米の着色部を検出してから，電磁バルブが作動を開始するまでの時間を設定する。

信号処理部での課題は，不良米1粒を確実に識別・除去するために，不良米の着色部の位置にかかわらず，不良米1粒の中心位置を求めることである。新たに開

(a) 背景板を良米の明るさに調整 (b) 背景板を良米より明るく調整

第 14 図 背景板の明るさ設定による米粒画像

第15図 画像処理のフロー

第16図 メモリ内のイメージ図

発した信号処理部では、不良米1粒の外形とその中心位置を求めるための画像処理法を組み込んでいる。第14図に示すように、背景板の輝度を良品のそれより明るく調整して米の外形が検出できるようにした。

第15図に、画像処理のフローを示し、その処理フローの主要部分について説明する。

(1) 2値化処理⁶⁾

輪郭検出用の閾値と、着色部検出用閾値を設定して2値化処理を行う。閾値の設定は、背景板の明るさを100%とした場合、外形検出用の閾値を84%に、着色部検出用の閾値を64%に設定した。こうして、不良米の外形と着色部を区別して、検出できる方法を確立した。

(2) 1粒への分離

2値化した不良米の画像中には、他の米粒と重なっている部分や接触して連結している部分がある。各米粒を1粒ずつ分離して取り出す必要があるため、外形の縮小処理を行うことで、ほぼ1粒ずつ独立して検出することができた。次に、不良米の外形を抽出するため、着色部の2値化データと外形の縮小データから、着色部のある不良米を特定し、縮小された外形を元に戻し、不良米のみ1粒全体を塗りつぶす処理を行う。塗りつぶし処理を行うことで、着色部のある粒の外形

第17図 噴射ノズルの構造と寸法

を決定でき、中心位置検出につなげることができた。

(3) 不良米の中心位置検出処理

可視光センサの出力を2値化し、塗りつぶし処理後、第16図に示すように、スキャン方向をX、流れ方向をYとして、2,048素子×26lineのデータをRAMに格納する。不良米の中心位置を検出するために、メモリに格納してある不良米データに対する中心位置のパターンと不良米検出データとのパターンマッチングを行った⁷⁾。

5-4 選別部

選別部の役割は、分光検出部で不良品と識別された不良米、異物を1粒ずつ確実に電磁パルスと噴射ノズルで噴射・除去することである。

この実現には、複数の不良米が4.2 m/sの移動速度で連続して流れている状態で、寸法が最も小さい不良米の幅3 mmに対しても確実に応答できる電磁パルスが必要となる。この要求を満たすため、パルス応答時間0.7 ms、パルス作動時間0.4 msの高速電磁パルスを開発した。

さらに、従来の噴射ノズルでは、第17図に示すように、ノズル幅9.5 mmに対し、米粒が平均3列で流れている。そのため、1回の噴射で不良米の近傍にある良品を同時に吹き飛ばすので、不良品濃度が低下することという問題を抱えていた。

中心位置を検出した不良米1粒のみを噴射・除去するため図に示したように、最適のノズル寸法と噴射時間を設計した。これに基づき、ノズル寸法が横1.5 mm×縦1.0 mm、ピッチ2.0 mm、ノズル噴射時間0.5 msの小型噴射ノズルを新たに開発した。

6. ま と め

各研究成果を総合した色彩選別機で性能試験を行った結果、シュート幅10 mm当たり、100 kg/hの条件において、1次選別のみで、選別率97.3%となり、不良品濃度は、従来の10%に対して、75.4%とな

った。

この開発によって不良品口への良品の混入量が大幅に減少し、製品歩留を0.15%向上することができた。これによる経済効果は、我国の大型精米工場で不良米や異物等と共に捨てられる良米を約5,000トン回収できることで、年間ほぼ21億円に上る。また、不良品濃度を高めることによって、2次選別が不要となり、その経済効果として、設備コストを約30%低減でき、消費動力を約50%削減できる。

文 献

- 1) 佐竹寛：米の高性能分光選別機に関する開発研究，東京大学博士論文（2000）
- 2) 河野澄夫：穀類の非破壊品質評価法 米を中心

にして，農業技術 52(6)，241-245(1997)

- 3) 佐竹利彦：特許第1482242号，第1627543号，第1627546号，色彩選別装置，(1984)，(1985)
- 4) 古閑二郎ら：CCDイメージセンサーを用いた粒子形状測定，解析システム，化学工学論文集10(1)，119-121(1984)
- 5) 藤村貞夫：新センシング技術をめざして 第9回 センシングシステムの動向，計測と制御37(5)，354-361(1998)
- 6) 目瀬道弘ら：複雑パターンを対象とした傷抽出装置方式，電気学会論文誌(C)94-C(5)，89-96(1974)
- 7) 長尾真ら：構造的パターン認識 [I]，計測と制御20(4)，33-42(1981)

執筆者紹介（順不同・敬称略）

故 佐竹 寛<Satoru SATAKE>

大正14年1月29日生れ，平成12年11月13日逝去<勤務先とその所在地>株式会社サタケ，〒739-8602 東広島市西条西本町2-30<略歴>大阪に生まれ，商社にいた父と共に3歳で渡米，教育は全て米国で受けた。昭和32年米国南カリフォルニア大学大学院修士課程化学工学修了，35年株式会社サタケ入社，平成2年代表取締役社長，8年英国マンチェスター工科大学名誉工学博士，12年東京大学工学博士<抱負>米・麦加工技術の先進的研究を行い，サタケを米麦加工機械のトップメーカーにすることを目指していた。<趣味>音楽を愛し，ハイスクール時代はオーボエを演奏していた。スポーツはゴルフを好み，14才でプロについてレッスン，華麗なフォームでハンディキャップ8の腕前であった。

福森 武<Takeshi FUKUMORI>

昭和21年9月22日生れ<勤務先とその所在地>株式会社サタケ，〒739-8602 東広島市西条西本町2-30<略歴>昭和44年近畿大学工学部機械工学科卒業，44年株式会社サタケ入社，7年技術本部副本部長，11年取締役副社長，13年岡山大学農学博士<抱負>米・麦の基礎研究を推進し，穀物加工機械メーカーとしての基盤を強くするとともに，農産物から食品までの全般にわたる総合機械メーカーを目指している。<趣味>植物を愛し，特にサボテンを多数栽培している。また，音楽鑑賞を好み，スポーツ全般を行う。