

# マルチスペクトル画像を用いた食品品質計測技術の開発

宮崎 俊之

## Development of Quality Measurement Technology for Foods Using Multi-Spectrum Image Processing.

Toshiyuki MIYAZAKI

### 抄 録

食品の成分分析に基づく評価は、商材の品質安定化やブランド化にとって重要である。特に品質や成分を面情報として計測することは、例えば水産物フィレの身色分布計測や、牛肉の霜降り具合（脂肪交雑）の評価など、幅広い分野での応用が期待できる。この様な計測目的に対しては、任意の波長帯で撮像された複数画像から成分量を推定するマルチスペクトル分光計測法が有効であるが、使用するカメラ等の価格が高く、特に中小の加工工場等向けのシステム開発にあたっては、使用デバイスの低コスト化が実用化への大きな課題となっていた。本開発では、低価格カメラを用いた安価な撮像系を構築し、これを用いたマルチスペクトル分光計測の可能性検討を行うとともに、アキサケの身色を対象とした評価試験を行った。

**キーワード**：マルチスペクトル画像処理，分光計測，食品品質計測

### Abstract

In order to stabilize food quality, and create new Hokkaido food brand, it is important to develop food quality and quantity measurement and evaluate methods for liquid, fat, meet color, etc. For these purposes, it is available to use multi-wavelength images processing technique. Hyper-Spectrum camera or Liquid tunable filters with cooling CCD camera are high-power multi-wavelength imaging devices, but are very high-cost, so we can not use these devices to develop measurement system using in medium or small size factories.

In this research, we developed food measurement and evaluate method using Low-cost High-gain CCD camera with Low cost light source and some calibration techniques, and verified effectiveness of this method.

**KEY-WORDS** : Multi-Spectrum Image Processing, Spectrometry, Food Quality Measurement

## 1. はじめに

任意の中心波長（可視光～近赤外光）において、狭い波長帯域（5～20nm程度）の画像を複数枚取得し、分光分析技術の手法を取り入れて、画像上の各画素毎に特徴抽出（成分分析）を行う手法を、マルチスペクトル分光計測と呼ぶ。マルチスペクトル分光計測の歴史は古く、従来は人工衛星に搭載

した専用のカメラを使用し、地表の植生状態や農業における生育状態の把握、生産量の推定等、主にリモートセンシング分野において利用されてきた。

マルチスペクトル分光計測法は、リモートセンシング分野以外でも注目されてきており、工業計測応用（自動車のITS等）や医療等への有効性が提唱されている。食品分野においては、測定波長の制御により、脂肪含量や糖度、カロテノイ

事業名：一般試験研究：19～20年度

課題名：マルチスペクトル画像を用いた食品品質計測技術の開発

ドなどの食品成分を「面情報」として評価する事が可能であり、近年急速に高まってきた「客観的な計測に基づく、食品の高付加価値化、ブランド化」を進める上でも、非常に有効な計測手法と見なされている。

しかし、北海道内の食品産業向け計測システム開発を考えた場合、コストの低減と計測アルゴリズムの確立が大きな課題となっていた。

本開発では、汎用カメラを用いた低価格なマルチスペクトル分光計測システムを開発し、実際の応用例としてアキサケフィレの身色計測への適用可能性を検討した。

## 2. 低価格カメラを用いたマルチスペクトル撮像系の開発

### 2.1 低価格撮像系の必要性

マルチスペクトル分光計測を行うためには撮像画像の波長制御が必要となるため、これまでハイパースペクトルカメラや、液晶チューナブルフィルタ、冷却CCDカメラなど的高額な（300～600万円程度）デバイスが使用されていた。このためシステム製造価格が非常に高くなり、実用化事例がほとんど無いのが現状である。特に商品単価が低い北海道の一次産品への適用を考えた場合、システム価格の多くを占める撮像系を如何に安価に構築できるかが、システム実用化に向けた大きな課題となっていた。

### 2.2 マルチスペクトル撮像系

本開発では、低価格なマルチスペクトル撮像系として、低価格カメラとバンドパスフィルタの組み合わせを検討した（図1）。使用したカメラの仕様を表1に示す。本カメラはセキュリティや天体撮影ホビー用途向けに開発されたもので、一般的なマルチスペクトル撮影用カメラと比較すると、冷却系を持たないためSN比的に不利であるが、非常に小型軽量で、また安価に入手する事ができる（2010年4月現在、1.5万円程度）。なお画像処理用PCへの取込はアナログキャプチャカード（カノープス社製MTVX2006USB）を用い、画像処理は自作ソフトウェア、およびAdobe社製PhotoshopCS2により行った。



図1 低価格カメラとバンドパスフィルタ

表1 使用したカメラの仕様

撮像素子	1/3 型インターライン転送 CCD
総画素数	537×505 pixel
有効画素数	510×492 pixel
同期方式	内部同期
走査方式	2:1 インターレス
映像出力	コンポジットビデオ信号
解像度	400TV 本
最低被写体照度	0.003lx (F1.4)
S/N	50dB 以上 (AGC=5dB, $\gamma=1.0$ )
レンズマウント	CS マウント
サイズ	30mm (W) × 30mm (H) × 46mm (D)
重量	65g

### 2.3 マルチスペクトル撮像用照明系の検討

色情報を用いた可視光域における画像処理では、演色性やランプ寿命、照射範囲、光量の安定性、発熱性、コスト等に優れた蛍光灯光源を使用するが多い。しかしマルチスペクトル撮像用として考えた場合、①近赤外領域での光量が弱い、②狭帯域画像では輝線の影響が非常に大きくなる、という問題が考えられる。近赤外領域には、食品の重要成分である脂肪、水分、タンパク質等の吸収が存在し、マルチスペクトル計測システムの活用先を広げる上でも、この波長領域におけるSN比の高い画像が取得できることが望ましい。

図1の低価格カメラは、可視域最低照度値が0.003lxと、通常のCCDカメラ（F2.0で0.1lx～数10lx程度）よりも高い感度特性を持つが、可視光画像処理系で使用される様な昼白色型蛍光灯光源（図2(a)）の照明環境（照度1000lx前後）下では、近赤外域における光強度が弱いため取得画像（マルチスペクトル画像）は低SN比となり、画像処理は不可能であった。

光ファイバを用いた分光計測法では、近赤外線光源としてハロゲン光源を使用する事が多い。フィラメントの白熱により光を生成するハロゲン光源は原理的に輝線が発生せず、近赤外線領域において波長の連続した大光量を得ることができるが（図2(b)）、点光源であるため均一照射に不向きであり、画像処理用としては殆ど使用されていなかった。

本開発では、リングライトガイドを使用することで、照射不均一性の問題解決を試みた。使用したリングライトガイドを図3に、本ガイドを使用した撮像系を図4に示す。また本撮像系を用いた近赤外領域（880nm, 940nm）における撮像画像を図5に示す。後処理に十分使用可能な、高SNかつ照明むらの無い近赤外マルチスペクトル画像が得られている事が解る。

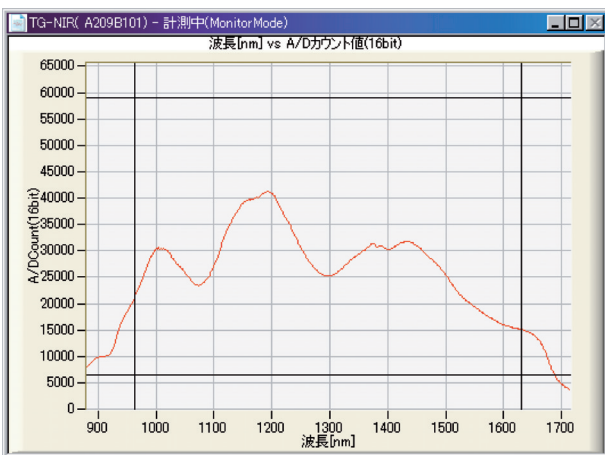
なお今回はフィルタをその都度、手動で切り替えて試験を行った。産業向けシステム開発時には、フィルタ切替ターレットの使用、あるいは複数カメラの使用等が必要である。



(a) D50昼白色蛍光灯

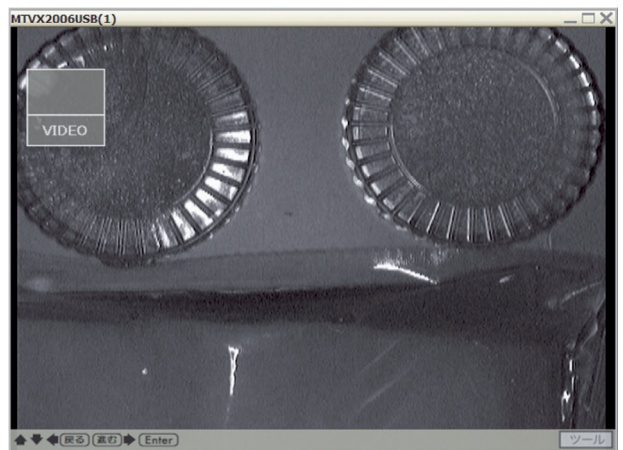


図4 ハロゲンリングライトを用いた撮像系



(b) ハロゲン光源

図2 各光源の近赤外線領域スペクトル



(a) 中心波長880nm



(b) 中心波長940nm

図5 開発した撮像系による近赤外線領域撮像画像



図3 ハロゲン光源用リングライトガイド

### 3. マルチスペクトル分光計測向け成分推定方法の開発

本章では、マルチスペクトル分光計測向けに開発した2種類の成分推定方法について説明する。



### 3.1 画素濃度校正手法による成分推定方法

低価格なカメラは、一般的に感度特性とダイナミックレンジ特性が波長依存性を持っている。また光源の照度も、図2のように波長毎に異なる強度を持つ。さらに狭帯域フィルタは薄膜界面で発生する反射光の干渉現象に基づく干渉フィルタ構造となっており、波長毎に透過率が異なる。画像の濃度から目的とする成分量の推定を行うには、全波長帯のマルチスペクトル画像において、同一の反射率を持つ物体が同一の画素濃度になっている事が望ましい。

本開発では、簡易で、かつ実装が容易な「白、黒の標準サンプルの写し込み」により、波長毎に異なるマルチスペクトル画像の濃度を校正する手法を検討した。本校正で使用した可視～近赤外領域における標準反射板を図6に示す。この反射板はポリテトラフルオロエチレン (PTFE) を焼き固めて作られており、250～2500nmにおける高反射率 (96%以上) が保証されると共に、疎水性、耐熱性、耐久性に優れているなど、食品加工工場等の環境下での使用に適している。

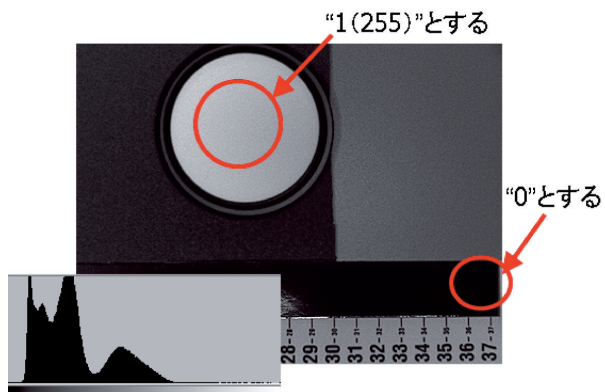


図6 可視～近赤外標準反射板

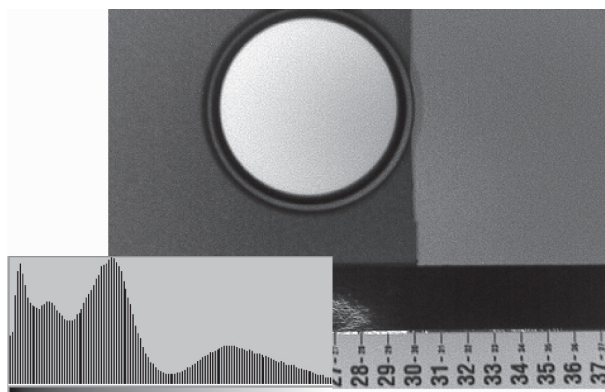
画素濃度校正の手順を、以下に説明する。

- (1) 撮像画面内に標準反射板、およびダーク (植毛紙等) を写しこむ (図7 (a))。なお、照明環境が変わらない場合 (光量変動などが無視できる場合) は事前取得していても良い。
- (2) 標準反射板は、ほぼ反射率100%と見なせるため、これを“1” (8bit画像処理では“255”) とし、同様にダークは反射率がほぼ0%と見なせるため、これを“0”とし、この範囲内の画素濃度を等間隔で引き延ばす「正規化」を行う (図7 (b))。

この「引き延ばし」処理 (正規化処理) のため、ヒストグラムは図7 (b) の様に不連続となる。なお本校正は「照明系が撮像対象を一樣に照射している」事を仮定して行っている。照明の不均一さが問題となる場合は、例えば画面内の各地点における校正板の撮像を行い、これを用いた各画素毎の補正係数を予め求めておく必要がある<sup>1)</sup>。



(a) 校正前



(b) 校正後

図7 白色校正板とダークを用いた画素濃度校正の概念

画素濃度校正を行ったマルチスペクトル画像では、測定対象の表面反射率と、正規化された画素濃度との間に「相関がある」とみなせる。特に撮像素子のガンマが正確に設定されている場合には、両者は比例関係となる。計測する物質の含有量が、ある波長において表面反射率と比例する事が解っている場合、単一の画素濃度校正された画像のみで、物質含有量を推定することが可能である。

### 3.2 Raw画像の画素比による成分推定方法

3.1節では、各画像の濃度を均一に揃える校正を実施した後、正規化した画素濃度から成分量 (身色) の推定する手法を説明した。この手法は、対象が平面形状で凹凸による輝度差が少なく、また校正が撮像時毎に確実に実施できる場合や、照明の照度、色の変動が十分に小さい場合には、非常に有効な手法である。一方、一次産品や加工食品は表面に凹凸がある場合が多く、また水を使用する工場内での使用を考えると、汚れに弱い白色校正板を毎回使用するの望ましくない場合も多い。本節では、同一照明下で凹凸のある対象について、白色およびダーク校正を毎回行わずに成分推定をする手法を検討する。なお使用する画像は、撮像波長以外の条件 (撮像エリア、対象の位置、被写界深度等) は全て同一と仮定する。

いま、中心波長 $\lambda$ のマルチスペクトル画像中の画素 $(x, y)$ における校正後の画素濃度 $d_\lambda(x, y)$ は、照明むらやレンズの周辺減光が波長によらず一定と仮定すると、下式で表す事ができる。

$$d_\lambda(x, y) = LG \left( \frac{r_\lambda - D_\lambda}{W_\lambda - D_\lambda} \right) \quad \dots(1)$$

ここで $L$ はその画素地点における照明むら、 $G$ はレンズの周辺減光率である（いずれも位置のみに依存）。 $r_\lambda(x, y)$ 対象の成分や凹凸により変動する物体反射強度（CCDカメラから得られる生値）、 $W_\lambda$ は白色校正板の画素濃度、 $D_\lambda$ はダーク値の画素濃度を表す（これらは位置、波長に依存する）。なお、(1)式で校正前の生（raw）画像の画素値 $Raw_\lambda(x, y)$ は下式となる。

$$Raw_\lambda(x, y) = LGr_\lambda(x, y) \quad \dots(2)$$

いま、注目する成分の反射率（≒吸光度）が高い波長 $\lambda_1$ 、反射率が無い（吸光度が無視できる）波長 $\lambda_0$ が、他の計測手段（光ファイバプローブを用いた反射率計測等）により既知とする。 $\lambda_1, \lambda_0$ における、画素濃度校正後の画像における、各地点 $(x, y)$ の正規化された画素濃度は式(3a)、(3b)で与えられる。

$$d_{\lambda_1}(x, y) = LG \left( \frac{r_{\lambda_1} - D_{\lambda_1}}{W_{\lambda_1} - D_{\lambda_1}} \right) \quad \dots(3a)$$

$$d_{\lambda_0}(x, y) = LG \left( \frac{r_{\lambda_0} - D_{\lambda_0}}{W_{\lambda_0} - D_{\lambda_0}} \right) \quad \dots(3b)$$

式(3a)、(3b)中の $L, G$ は波長依存性は無視できるので、両者の比 $ref(x, y)$ は式(4)の様に物体反射強度とダーク値のみの関数として表現できる。

$$\begin{aligned} ref(x, y) &= \frac{d_{\lambda_1}(x, y)}{d_{\lambda_0}(x, y)} = \frac{LG \left( \frac{r_{\lambda_1} - D_{\lambda_1}}{W_{\lambda_1} - D_{\lambda_1}} \right)}{LG \left( \frac{r_{\lambda_0} - D_{\lambda_0}}{W_{\lambda_0} - D_{\lambda_0}} \right)} \\ &= K \frac{r_{\lambda_1} - D_{\lambda_1}}{r_{\lambda_0} - D_{\lambda_0}} \quad \dots(4) \end{aligned}$$

式(4)中の $K$ は、2枚の画像のダイナミックレンジ比に相当し、測定対象や画像内の位置によらない定数として、下式で表現される。

$$K = \frac{W_{\lambda_0} - D_{\lambda_0}}{W_{\lambda_1} - D_{\lambda_1}}$$

いまダーク値が被写体照度と比べて十分に小さいと仮定すると、式(4)は、その地点における物体反射強度 $r_\lambda(x, y)$ 、すなわちraw画像の画素値 $Raw_\lambda(x, y)$ の比として、式(5)に近似できる。

$$ref(x, y) = K \frac{r_{\lambda_1}}{r_{\lambda_0}} = K \frac{Raw_{\lambda_1}(x, y)}{Raw_{\lambda_0}(x, y)} \quad \dots(5)$$

物体反射強度 $r_\lambda(x, y)$ には、物体固有の反射率に照明や撮像系・光源・反射面の幾何学的な配置の影響 $C(x, y)$ が含まれる。物体固有の反射率を $R_\lambda(x, y)$ とおくと、 $r_\lambda(x, y)$ は式(6)で表現できる。

$$r_\lambda(x, y) = C(x, y)R_\lambda(x, y) \quad \dots(6)$$

このうち $C(x, y)$ はその地点における物体表面の法線ベクトル、照明、レンズとの幾何的な位置のみに依存し、波長に依存しない係数と見なせることから、式(6)を用いることで、式(5)は下式に書き直すことができる。

$$ref(x, y) \cong K \frac{R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_0}} \quad \dots(7)$$

すなわち、上式より $ref(x, y)$ 値は、物体表面形状や照明環境、レンズ特性等の影響が排除された、物体表面における反射率比を表している事が解る。

式(4)、(5)、(7)をまとめると、ダーク値が十分に小さいとみなせ、また2枚の画像の撮像条件が変わらない場合には、画素濃度校正後の画素 $d_\lambda(x, y)$ 比、raw画像の画素 $Raw_\lambda(x, y)$ 比、物体固有の反射率 $R_\lambda(x, y)$ 比の間には、式(8)の関係が成立する。

$$\frac{R_{\lambda_1}(x, y)}{R_{\lambda_0}(x, y)} \cong \frac{d_{\lambda_1}(x, y)}{d_{\lambda_0}(x, y)} \cong \frac{Raw_{\lambda_1}(x, y)}{Raw_{\lambda_0}(x, y)} \quad \dots(8)$$

分光分析的にみると、特定成分の吸収波長域、被吸収波長域の比（=式(8)左辺の物体固有の反射率比）は、その成分の吸光率と相関を持つことが知られており、 $\lambda_1, \lambda_0$ を適切に選択することで、2枚のraw画像から物質推定ができることが解る。

本手法では、使用するraw画像の画素濃度校正を行う必要がなく、また物体表面の凹凸や照明むらがあっても式(8)は成立するため、特に複雑形状を有する一次製品の計測方法として、本方式は有効であると考えられる。

#### 4. 実サンプルの計測試験

開発した2種類の成分推定方法の有効性を確認するために、北海道の代表的な一次産品であるアキサケの身色計測試験を行った。

##### 4.1 アキサケの身色

測定対象となるアキサケのポーション（切り身）の写真を図8に示す。



図8 アキサケポーション

アキサケは体内に、機能的物質として注目されるカロテノイド（アスタキサンチン）を含んでいる。市場では商材が赤い（＝アスタキサンチンの量が多い身質）ほど高値で取引されており、フィレやポーシヨンの「赤さ」を非接触で計測する意義は大きい。図9の吸光度特性に示すように、アスタキサンチン色素は、波長480～500nm付近に吸光度のピークを持つ。また多数のアキサケの分光反射特性を計測し、グラフを重ね合わせると、図10の様に波長480～500nm付近に色による差違を見ることができる。アキサケ身色のマルチスペクトル分光計測試験では、このアスタキサンチンの吸収波長帯に注目した計測、解析を行った。なおアスタキサンチン含有量とCIE-L\*a\*b\*のa\*値（CIE-a\*値）は強い相関があるため、本開発ではa\*値の推定、および評価を行った。

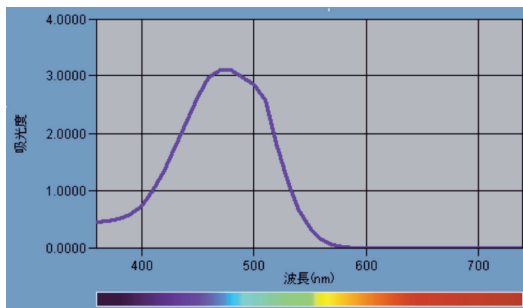


図9 アスタキサンチン色素吸光度

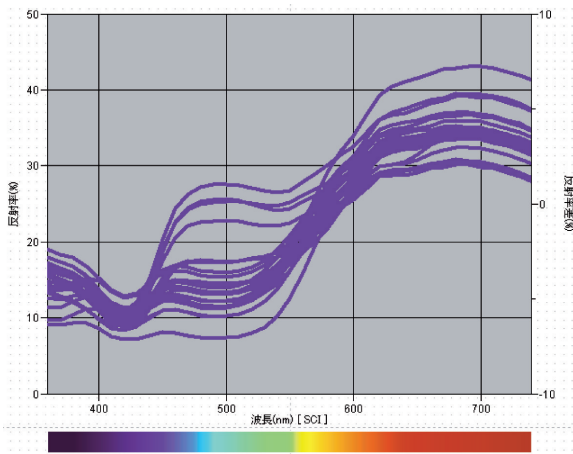
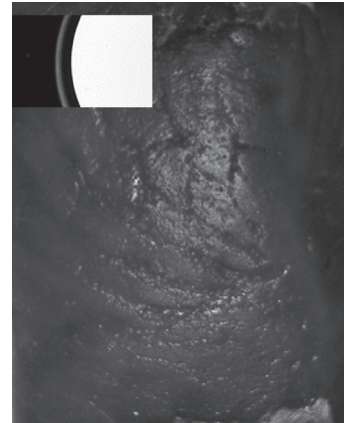


図10 アキサケポーシヨン分光反射特性

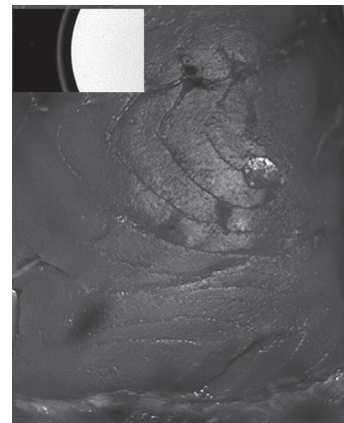
#### 4.2 画素濃度校正手法による身色推定

分光測色計で身色計測（CIE-a\*値）したアキサケポーシヨンを、マルチスペクトル撮像系にて画像を取得した。アスタキサンチン吸光度ピーク付近（500nm）における取得画像を図11に示す。各画像は3.1節で述べた画素濃度校正手法により、画像濃度と対象の物体反射率が比例するように校正している。(a)はa\*=19.24の「赤い」、(b)はa\*=1.64の「白い」サンプルである。両者で各画素濃度が明らかに違う事が解る。複数サンプルに対して同様にマルチスペクトル画像を取得

し画素濃度校正手法を適用した結果と、分光測色計で計測した身色値（CIE-a\*値）との同一計測箇所における相関を取った物が図12である。決定係数  $R^2 = 0.94$  と、本手法により、極めて高い身色の推定が出来ることが解る。



(a) a\*=19.24のサンプル



(b) a\*=1.64のサンプル

図11 アキサケ 画像データ(500nm, 校正後)

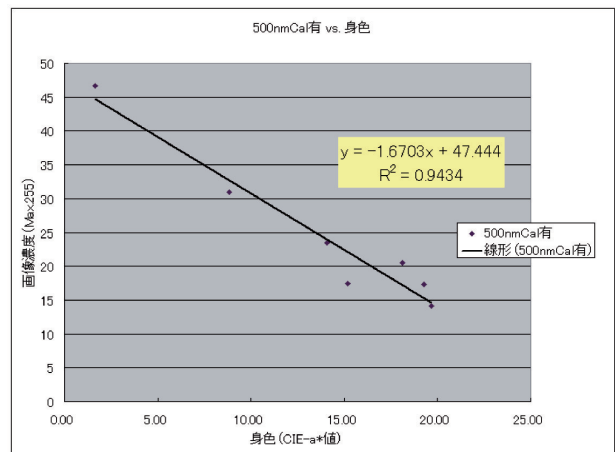


図12 実際の身色と、画像濃度の相関 (画素濃度校正済画像による推定)

#### 4.3 Raw画像の画素比を用いた身色推定

図10のアキサケフィレの分光反射率特性を見ると、アスタ



キサンチンの吸光が強い420~550nm付近に対し、400nm付近は身色にかかわらず、ほぼ一定の反射率となっている事が解る。式(8)の $\lambda_1$ を500nm、 $\lambda_0$ を400nmに設定し、raw画像画素比を用いて、身色推定を行った。

図13に中心波長400nmで取得したraw画像を、図14に中心波長500nmで取得したraw画像を示す。両者の比を取った画像(400nm画像で正規化した、500nm画像)は図15となり、この画像に写された被写体サンプルの画素濃度と、同一箇所を分光測色計で計測したCIE-a\*値の相関は図16となる。決定係数 $R^2$ は0.89と、図12の「各画像毎に画素濃度校正を行った」場合と比較し、やや推定精度は低下するが、実用上十分な身色推定精度が得られる事が解る。

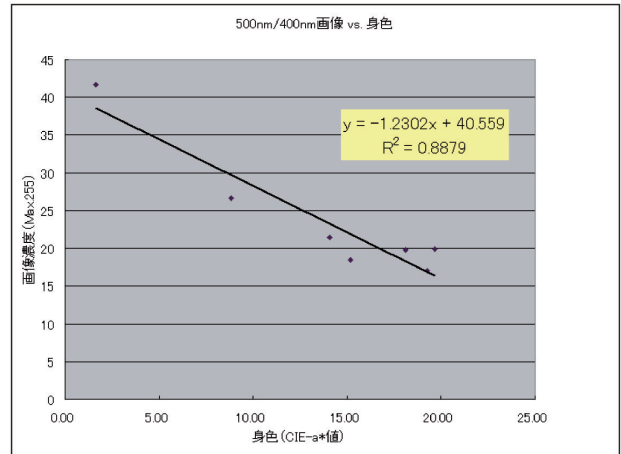


図16 実際の身色と画像濃度の相関  
(2枚のraw画像の画素比を用いた推定)

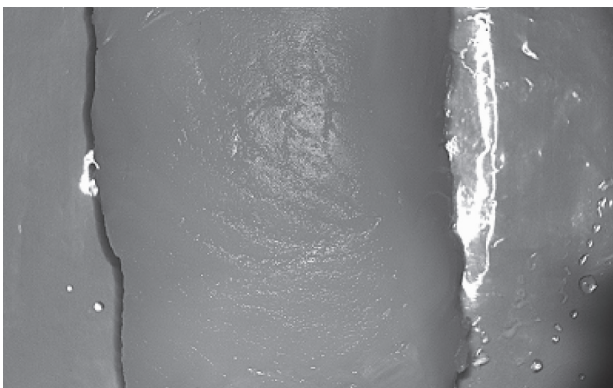


図13 中心波長400nmのraw画像

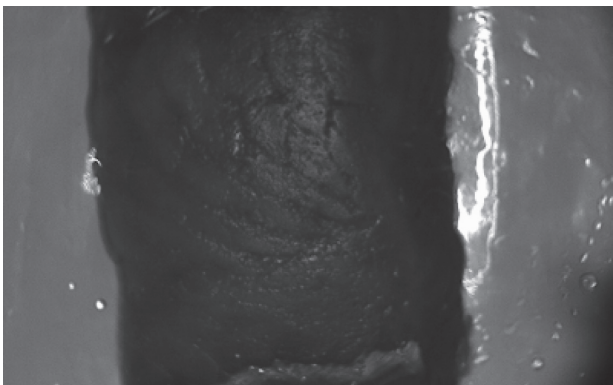


図14 中心波長500nmのraw画像

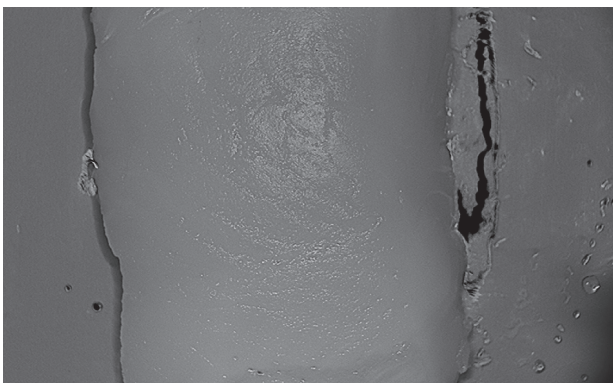


図15 400nm画像で正規化した、500nm画像

## 5. 考察

今回提案した、安価な高感度カメラ+ハロゲン光源を用いた「白色校正板による画素濃度校正を用いた成分推定手法」、および「2枚のraw画像の比を用いた推定手法」は、両者とも実用に十分な成分推定精度が得られる事が解った。表2に、各手法の実現に必要なデバイス、特徴を示す。

表2 開発した2つの推定方式の特徴

	画素濃度校正による推定法	raw画像比による推定法
使用カメラ	低価格・高感度カメラ	低価格・高感度カメラ
必要なカメラ台数	1台	2台 (またはフィルタ切替機構)
照明環境	ハロゲン光源 +リングライトガイド	ハロゲン光源 +リングライトガイド
白色校正	必要	不要
対象の凹凸の測定精度への影響	中	小
照明ムラの影響	大 (別途、事前校正を行うことで極小化が可能)	小
ダークノイズの影響	小	中 (別途、ダーク校正を行うことで極小化が可能)
処理速度	高速(1ショット)	低速(2ショット) 2台カメラ使用時には1ショット

いずれの方式でも低価格なデバイスが使用可能であり、従来方式と比べてシステムの製造コストを大幅に抑える事が可能である。一例として、冷却CCDカメラ+液晶チューナブルフィルタを用いた従来型システムでは300~600万円程度のコストがかかる計測対象に対して、本研究で提案した手法では、画素濃度校正方式では数10万円程度、raw画像比による推定手法では数10~100万円程度でシステム構築することが

可能と思われる。

また本開発を進める中で、実際のシステムに適用する際に注意すべき点が解った。以下、システム開発時の参考のために、判明した注意点と対策を示す。

- (1) 干渉フィルタは、波長毎に屈折率が異なるため、レンズ焦点距離や画角、被写界深度によっては、フィルタ交換後のピント調整作業や、取得画像の位置合わせが必要になる場合がある。事前に全ての波長帯で被写界深度を確認すること、また必要に応じて各波長毎の画素シフト量を計算しておくことが必要である。
- (2) 低価格CCDカメラはアナログ出力方式の物が多く、画像伝送時やキャプチャ時に画像劣化が発生する場合がある。周囲に電磁ノイズ源が存在する場合や、より厳密な測定へ応用する場合には、画像伝送用シールドケーブルの使用や、デジタル伝送が可能なカメラを選択することが望ましい(これに伴うコスト上昇は前者で数千円程度、後者で10~30万円程度である)。なお、本報告で適用したアキサケ身色計測においては、低価格カメラでも十分な計測精度が得られていた。
- (3) 特に長い波長帯(1000nm付近)における撮像が必要な場合、通常の可視光用レンズでは十分な画像濃度が得られなかったり、可視域と近赤外域で焦点位置が大きくずれる場合がある。近赤外領域用レンズの使用で本問題は解決できるが、比較的高価であり、また任意の画角を選択できない場合がある。システムのコスト低減を行うためには、取得したい波長と必要な画角に応じた、適切なレンズを選択する(あるいは安価に入手できる焦点距離のレンズに対応した撮像系の設計をする)事が重要である。

## 6. おわりに

本開発では、一次産品や加工食品などの「食品」の付加価値向上、品質安定化にとって有効な、画像による成分計測手法の一つであるマルチスペクトル分光計測について、低価格撮像系向けの成分推定手法を開発し、その有効性を確認した。この結果、従来の高価なカメラ、フィルタ等を使用しなくとも、対象や要求仕様によっては十分な計測性能が出せることが解った。

本研究の成果により、安価なマルチスペクトル計測システムの開発に目処が付いた。今後は食品を始めとした各種分野への展開を進める予定である。

## 謝辞

本研究で使用した分光測色計は、競輪補助事業により整備されました。記して感謝いたします。

## 引用文献

- 1) 宮崎俊之・吉川毅・堀武司・波通隆：撮像素子型センサを用いた複雑色判別技術の開発，北海道立工業試験場報告，No.303, pp.15-22, (2004)