

## 果樹生産への色彩情報の応用例

亀岡 孝治

### Application of Color Information to the Fruit Cultivation

Takaharu KAMEOKA

We established a method to modify and correct the wrong color of the fruit cluster taken in the field by digital camera to the true one, so that we can easily get the information on its tree growth. In this method, firstly, the color of the grape in the field, newly developed color chart and RGB color chart were taken altogether in the same image by digital camera. Then this picture was correctly transformed by comparing RGB color chart part to that with true color in the similar standard image stored in the computer. The standard deviation of the hue value for the sample picture became small after this transaction, which confirmed that the influence of the light condition was eliminated. Furthermore, it also became clear that this method could make the non-destructive and continuous verification of the coloring behavior of the fruit.

**Key words:** color image analysis, hue, HSL (hue, saturation, lightness) color space, tomato, grape

多くの農産物で、色や形を用いた選別工程の自動化が実用化され、光学的方法、力学的方法や電磁気学的方法などの非破壊手法を用いた試みも行われている<sup>1,2)</sup>。近年、画像はさまざまな形で利用されているものの、栽培管理で有効性が期待される野外での撮影画像からの色彩計測は、外光条件のダイナミックな変化など色彩への影響要因などのため、インパクトある研究は数少ない<sup>3-5)</sup>。

筆者らは実験室レベルで確立した「トマト果実表面色の計測手法」<sup>6,7)</sup>の応用として、赤系ブドウ品種のカラーチャートをコンピューターベースで実現し<sup>8,9)</sup>、続いて圃場レベルでのブドウ果実の品質診断に取り組んだ<sup>10,11)</sup>。本稿では、この色彩利用について解説する。

#### 1. 追熟過程におけるトマトの表面色変化の解析

農産物は収穫後も一次代謝として呼吸が維持され、軟化・色素発現などの二次代謝も行われるため、その色彩は農産物の熟度などの品質指標となる<sup>12)</sup>。そこでトマトを用

い、HSL (hue, saturation, lightness) 色座標系の表面色計測システムで表面色変化を経時的に計測・解析し<sup>6)</sup>、併せて色素生成による色発現を表面色指標として半定量的に解析した。

##### 1.1 HSL 色座標系<sup>13,14)</sup>

一般に、表面色計測には  $L^*a^*b^*$  表色系<sup>14)</sup> が用いられる。しかしこの表色系の場合、面情報の取得が困難などの問題があり、農産物表面全体の色彩分布も含めての連続色彩計測には HSL 色座標系が有効であると考えられる。

HSL 色座標系は、人間の知覚ベースで RGB 色座標系から変換されたもので、半径 1、高さ 1、中心軸方向成分の明度  $L$ 、半径方向成分の飽和度  $S$ 、円周方向成分の色相  $H$  とする円筒座標系である<sup>13)</sup>。 $H$  の原点は赤色で、 $L=0$ 、 $L=1$  の円周面はそれぞれ黒色、白色を表す。

##### 1.2 実験試料および色彩計測方法

トマトは周年供給が可能で、追熟生理回路をもち、クロロフィル・カロテン・リコペンによる表面色変化が生じる

ことなどから試料として採用した<sup>15)</sup>。未熟な緑色トマトを25度で保存し、一定時間間隔で色彩を計測した。また、リコペン生成が抑制され、カロテンが支配的になる35°Cでの追熟実験も行った<sup>15)</sup>。

表面色計測は、撮像方向は鉛直方向、CCDカメラのレンズ絞りF2.8、測定面照度800lx相当、背景は黒色のフェルトの条件で行った。照明・撮像状態が安定する約1時間の予熟期間の後、CCDカメラのホワイトバランスと画像取り込みボード(ImageQuest-V50、浜松ホトニクス社製)のオフセット調整とゲイン調整を行った。続いてトマトの表面色画像を取得し、背景除去処理、HSL色座標系への変換の後、表面色計測と解析を行った。

### 1.3 色相によるトマト表面色変化の解析<sup>7)</sup>

HSL色座標系の色相(H)、彩度(S)は照明むらや表面の凹凸による影響がほとんどないので、照明分布の影響が含まれるトマト表面画像でも、色彩解析は可能である。H値が0~255の間で色相解析を行うために、トマトではオリジナルな色相環を+10シフトさせて用いた。

正常な表面色変化を生じる25°C貯蔵実験で得られた解析用トマト画像の中心から同心円上に、図1(a)に示すように12点(点A~点L)の計測点を設定し、色相の経時変化を計測した。計測結果を図1(b)に示す。色相変化傾向はすべて逆成長曲線的に変化し、実験終了時の165時間後では同じ色相値に収束した。そこで、これらの傾向から、各点での色相の経時変化をロジスティック曲線であてた。ただし、 $H_{ini}$ は初期色相値、 $H_{fin}$ は最終色相値、 $w$ は変化速度とし、 $t_0$ は変曲時間と定義した。

$$H(t) = \frac{H_{ini} - H_{fin}}{1 + \exp\{(t - t_0)/w\}} + H_{fin} \quad (1)$$

式(1)の一次微分式は、式(2)で示される反応速度式になる。

$$\frac{dH}{dt} = k(H - H_{ini})(H - H_{fin}) \quad (2)$$

ただし、

$$k = \frac{1}{w(H_{ini} - H_{fin})} \quad (3)$$

式(2)中の $k$ は反応定数である。点Aの色相経時変化に式(1)をあてはめた結果を図2に示す。相関係数は0.9997、標準誤差は0.203であり、初期色相値( $H_{ini}$ )63.1、最終色相値( $H_{fin}$ )15.3、変化速度( $w$ )13.8、変曲時間( $t_0$ )100.0となった。他の11点においても同様の高い相関が示されたため、トマト表面の色彩分布解析にこのロジスティック曲線を用いることとした。

解析結果として得られた速度定数 $k$ の等高線図を図3(a)に示す。図中の9点は、島状部分での色変化の起点す

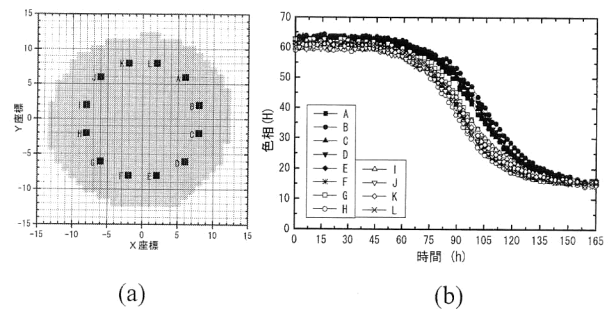


図1 12計測点の位置 (a) と色相経時変化 (b)。

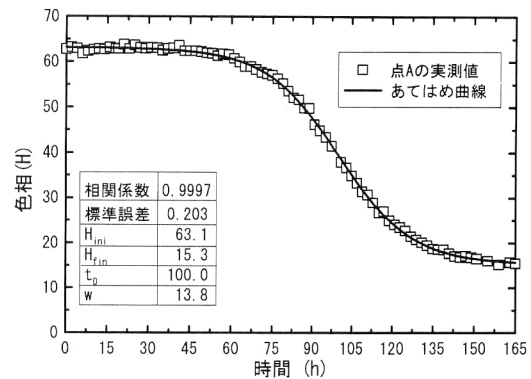


図2 点Aでの色相経時変化のあてはめ結果。

なわち発色点である。図より速度定数の大きな部分は中心から発色点に向かい放射状に分布している。さらに、実験終了後のトマトを切断し調べた結果、図3(b)のように発色点はすべて隔壁上に存在し、色分布の変化は内部構造と深く関係することが明らかになった。

### 1.4 表面色変化と色素生成<sup>7)</sup>

クロロフィル、カロテン、リコペンのそれぞれの支配的な表面色<sup>16)</sup>からトマト表面色の変化を混色理論<sup>17)</sup>に基づき計算し、含量割合の解析を行った。まず、25°C貯蔵実験で未熟期の表面色はクロロフィルの支配色( $H_{ini}$ の平均値61)、完熟期の表面色はリコペンの支配色( $H_{fin}$ の平均値16)とした。次に、リコペンの生成が抑制されカロテンの含有量が支配的となる35°C貯蔵を行い、カロテンの支配色を求めた。この色相経時変化(■)を25°C貯蔵実験結果(○)とともに図4に示す。35°C貯蔵区間では、実験開始から色相は緩やかに減少しカロテンの支配色( $H=35$ )に収束する。その後、貯蔵温度を25°Cにするとリコペンの支配色( $H=15$ )に収束する。これは、色素の色相値を基に、色素含量の推定が可能であることを示唆している<sup>17)</sup>。また、表面色の色相は色素生成を含むトマトの代謝の指標として有用であることも再確認された。

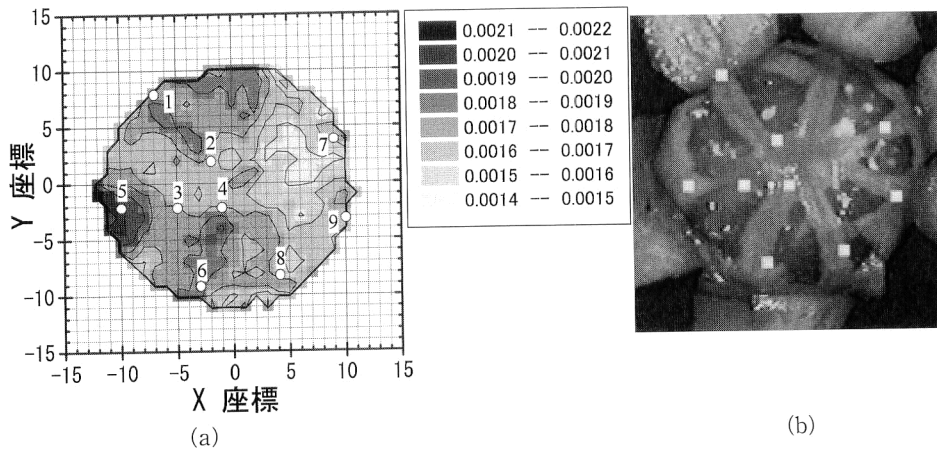


図3 実験開始 91 時間後の速度定数  $k$  の等高線図 (a), およびトマト切断面での発色点の位置 (b).

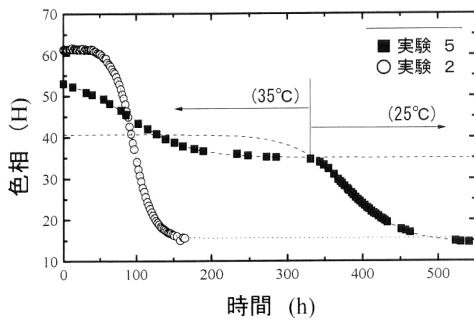


図4 25°C 貯蔵トマト (○) と 35°C 貯蔵トマト (■) の色相経時変化.

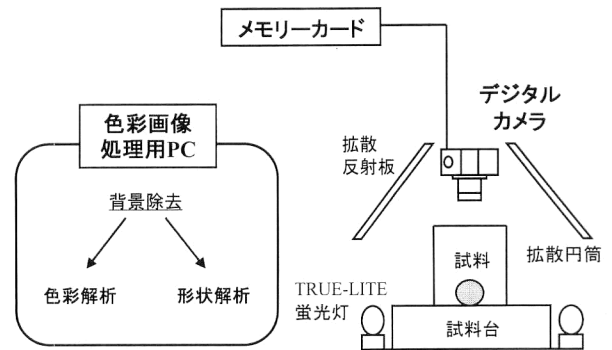


図5 外観解析システム.

## 2. 赤系ブドウ (安芸クイーン) の色彩計測

### 2.1 試料

試料には、果形が倒卵形の赤系大粒品種の安芸クイーン果実 (ブドウ) を使用した。外観解析のために、ハウス内で栽培された果房を 1~2 週間間隔で採取し、その果房から着色段階の異なる果粒を 116 個サンプリングした。また、果粒表面の果粉の色彩情報への影響を調べるために、露地栽培された果房から果粉が均一に付着している 21 個の果粒をサンプリングした。

### 2.2 解析方法

赤系のブドウカラーチャートは存在しないため<sup>18)</sup>、HSL 座標系を用いた色彩解析、 $r\theta\phi$  座標系を用いた形状解析<sup>9,19)</sup>を行い、カラーチャートの作成を試みた。

ブドウ果粒の外観解析システムを図 5 に示した。画像取得部は 130 万画素のデジタルカメラ DS-300 (富士写真フイルム社製)、色温度 5500 K の TRUE-LITE 蛍光灯 (DURO-TEST 社製) および拡散反射板などから構成される。光源の光は、拡散反射板と試料を囲む拡散円筒から反射される拡散光として試料に照射される。撮像された試料

画像は、デジタルカメラ内のメモリーカードに保存され、その後色彩画像処理用 PC に転送され、背景除去処理を施した後色彩解析と形状解析が行われる。

### 2.3 カラーチャートの作成<sup>8)</sup>

安芸クイーンの定量的な形状評価のために、 $r\theta\phi$  座標系 ( $r$ : 動径,  $\theta$ : 動径のなす角度,  $\phi$ : 動径との接線角) を用い  $\theta$ - $\phi$  情報から統計的に安芸クイーン果粒の標準形状を算出した。 $r\theta\phi$  座標系で形状を表す微分方程式は、

$$\frac{dr}{d\theta} = \tan\phi + r = 0 \quad (4)$$

となる<sup>9,19)</sup>。相似性図形では  $\theta$ - $\phi$  の関係性は等しいため、この関係から形状解析が行える。サンプリングした 116 個の果粒から無作為に 31 個を選出し、二値画像を用い、原点を果粒の重心として  $r$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  値を求め、果粒の  $\theta$ - $\phi$  値の平均を求めた。続いて、この平均  $\theta$ - $\phi$  値から逆変換 ( $r\theta\phi$ - $xy$  座標変換) により果粒の平均形状を求めた。

色彩解析では、まず背景除去処理の画像を RGB-HSL 座標変換した。安芸クイーンの果色は黄緑色 ( $H=64$ ) からゼロを通り赤紫色 ( $H=235$ ) へ変化するため、+50 シフト

した  $H$  の色相環を用いた。また、 $H$ 、 $S$  の平均値を用いて果粒の着色推移を考察した。成熟ステージごとの着色度合いは、未着色を 0、適着色を 4、過着色を 5 とした 6 段階とし、熟練栽培者の目視選別により決定した。

成熟過程では果粒の赤みが増し ( $H$  は低下)、鮮やかになった ( $S$  は増加)。また、過熟過程では色がくすみ  $S$  が低下した。適熟付近での  $S$  値のばらつきは果粒表面の果粉 (白粉状のろう質物) の影響と考えられる。解析の結果、果粒表面の  $S$  分布は、目視で確認できる果粉分布とほぼ等しいため、 $S$  画像による果粉の付着状態の推定が可能であることが示された<sup>8)</sup>。

作成された安芸クイーンカラーチャートを図 6 に示す。この果色区分は無着色から適着色までを 0~4 の 5 段階で表し、収穫適期を過ぎてやや黒みがかかった果実を過着色の 5 で表している。果色 4 では果汁の糖度は 18% 以上、酸度は 0.4% 以下となり内成分的にも収穫適期である。従来のブドウ果実カラーチャートと異なるのは、各果色区分が果粒形状で表現され、それぞれの果色区分で着色進行過程で果皮に現れる色むら、筋状の模様および果粉が表現されている点である。

### 3. 野外でのブドウ果色の数量的評価<sup>10,11)</sup>

#### 3.1 デジタルカメラによるブドウ画像の取得

果樹栽培では、果皮色の着色程度は収穫期の判定や収穫後の品質評価での重要な指標であり、主要な樹種ではその判定果実カラーチャートが生産現場で実用化されている<sup>18)</sup>。果実カラーチャートは誰でも手軽に大まかな評価が可能という利点をもつ有効なツールであるが、人間の目による目視検査、すなわち天候や太陽の位置など環境的要因などにより変化する官能的検査であるため、客観性に乏しく再現性が低くなることは否めない。そこで、ブドウ果房を用い、近年高性能化・低価格化が著しいデジタルカメラを利用し、撮影画像に環境的要因を除去する色補正処理を施すことで、野外条件下の圃場でもブドウ果色の数量的評価が可能手法を検討した (図 7)。

#### 3.2 サンプル画像の色彩変換<sup>10,11)</sup>

野外でデジタルカメラにより撮影した被写体画像は、撮影ごとに光環境が異なるため、異なる条件下での画像データの直接比較はできない。そこで、野外で撮影した画像の色空間の相対変換により光環境の影響を取り除く手法を確立した。手順は以下の通りである。まず、被写体の背景に赤、緑、青のカラーチャートを配置して画像データを撮影する。次に、これらの画像から撮影状態のよい画像を 1 枚「基準画像」として選び、他はサンプル画像とする。基

準画像と「サンプル画像」内の赤、緑、青の値を表すそれぞれの  $3 \times 3$  行列を  $C$  と  $C'$  とすると、色彩修正のための色彩変換行列  $A$  は、

$$A = C' \cdot C^{-1}$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} R_r & G_r & B_r \\ R_g & G_g & B_g \\ R_b & G_b & B_b \end{pmatrix},$$

$$C' = \begin{pmatrix} R'_r & G'_r & B'_r \\ R'_g & G'_g & B'_g \\ R'_b & G'_b & B'_b \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここに、たとえば  $R_g$  は赤チャートの  $G$  値を表す。

$$\begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここに、 $r, g, b$  はサンプル画像の  $R, G, B$  値、 $r', g', b'$  は色彩修正後の画像での  $R, G, B$  値である。

画像を用いて色補正のための変換式を求め、その式に基づく変換を「サンプル画像」に施すことで、光環境の影響を除去した「キャリブレーション画像」が作成できる (図 8)。この結果、各キャリブレーション画像に含まれる 3 色のカラーチャートは、理論的には基準画像のカラーチャートとほぼ同色になり、同時にこの 3 色が作る立方体の色空間に存在する色も補正されるわけである。次に 60 枚のサンプル画像を用いて、変換の前後でのサンプル間における各カラーチャートの色のばらつき具合を検証した。その結果、3 色すべてに対して補正処理後は色相値のばらつきが非常に小さく、高精度で色補正が行われていることが確認できた (図 9)。

#### 3.3 変換画像による栽培管理

この手法では、客観性と再現性のある果色の数量化および経時変化の評価が可能となる (図 10)。またこの手法はブドウに限らず、他作物にも適用可能である。ただし、現時点では撮影画像の加工、前処理は手作業のため、今後は処理の自動化が必要である。また、デジタルカメラでの留意点としては、画素数は 100 万画素程度で十分であるが、ホワイトバランスのマニュアル調節機能が必要である。撮影時の注意点としては、被写体へ直射日光が当たると正確な色情報が取得できないため、直射太陽光をカットする工夫が必要である。

本稿では、実験室レベルでのトマト表面色の計測を起点として、デジタルカメラと色彩変換による圃場でのブドウ果実の果色評価がブドウ栽培の指標として有用であることを示した。しかし、熟練栽培者は生育初期における生育



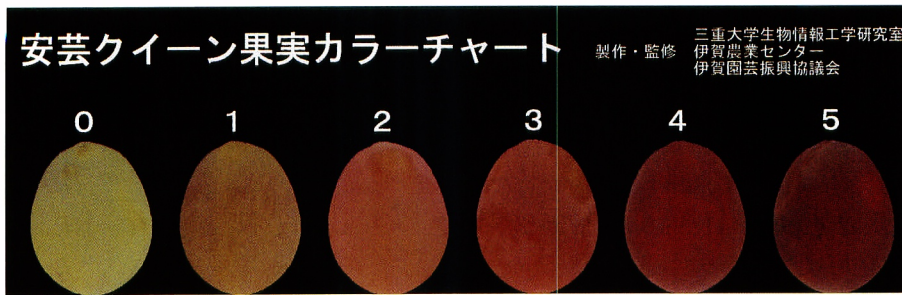


図6 安芸クイーンカラーチャート. カメラ⇔CRT⇔プリンター: カラーマッチング, 伊賀国営パイロットのブドウ農園で実用化.

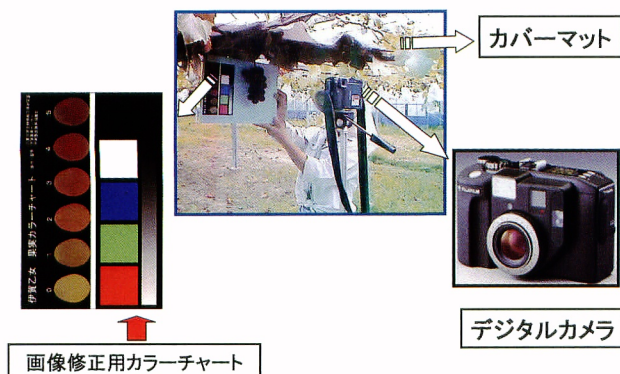


図7 野外の圃場での画像取得方法.

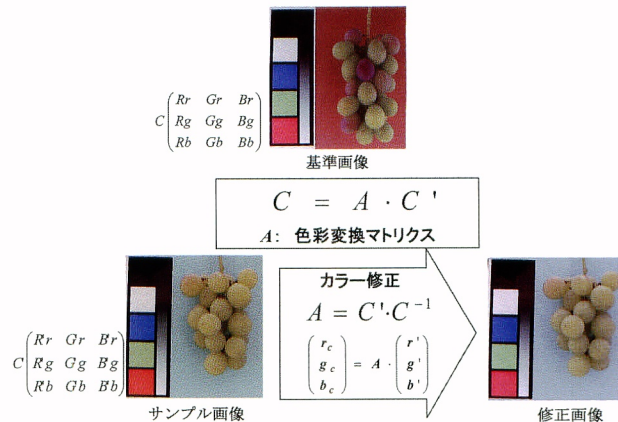


図8 ソフトウェアによる画像修正手法.

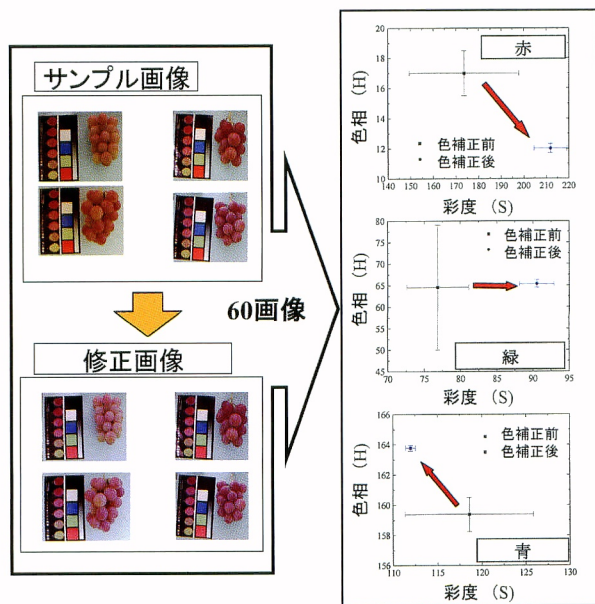


図9 画像修正の効果.

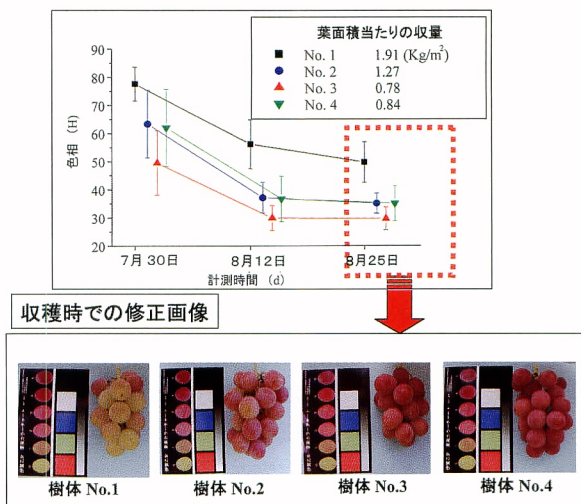


図10 圃場での色づき評価.

状態の判断基準として葉を用いており、ブドウ樹体の総合的な診断には葉の色彩・形状評価が不可欠である<sup>11)</sup>。ブドウでは樹勢の強さが葉柄裂刻の広さや葉身裂刻の深さなど葉形に表れることや、必須栄養素の摂取状態が葉色に表れるなど葉身の形態や色が樹体の生育状態を反映することが報告されている<sup>20)</sup>。そこで、現在Java アプレットによる色

彩・形態・分光スペクトル解析ツールの作成とともに、ブドウ葉身の画像データを解析し、形態情報の定量化を進めている<sup>11,21)</sup>。しかし、日々増殖するデータに対するデータベース化の問題、色彩・形状はもちろん各種分光画像を含む総合的な樹体情報のセンシングの問題など解決すべき問題は数多く残されている。その一方法として、筆者らはセン

シング手法と情報技術を組み合わせた新規な農産物データハンドリングシステム (BIX: BioInformation eXchange) を提案している<sup>22)</sup>。

## 文 献

- 1) 川路憲一：“選果施設への画像解析技術の利用”，*ジャパンプードサイエンス*, **37**, No. 3 (1998) 53-57.
- 2) 前田 弘：“非破壊内部品質評価”，*ジャパンプードサイエンス*, **37**, No. 11 (1998) 74-85.
- 3) P. W. Sites and M. J. Delwiche: “Computer vision to locate fruit on a tree,” *Trans. ASAE*, **31** (1988) 257-263.
- 4) D. C. Slaughter and R. C. Harrell: “Discriminating fruit for robotic harvesting using color in natural outdoor scenes,” *Trans. ASAE*, **32** (1989) 757-763.
- 5) R. D. Tillett: “Image analysis for agricultural processes: A review of potential opportunities,” *J. Agric. Eng. Res.*, **50** (1991) 247-258.
- 6) 元永佳孝, 亀岡孝治, 橋本 篤：“農産物表面の色彩画像処理システムの構築”，*農業機械学会誌*, **59**, No. 3 (1997) 13-21.
- 7) 元永佳孝, 亀岡孝治, 橋本 篤：“貯蔵農産物の二次代謝としての色発現”，*農業機械学会誌*, **59**, No. 4 (1997) 21-28.
- 8) H. Kondou, H. Itou, H. Ishikawa, Y. Motonaga, A. Hashimoto and T. Kameoka: “Color chart for fruits of grape (Aki Queen) by digital image processing,” *Agricultural Information Technology in Asia and Oceania* (Wakayama, 1988) pp. 197-202.
- 9) Y. Motonaga, H. Kondou, A. Hashimoto and T. Kameoka: “Determination of the standard shape and color of agricultural products,” *QCAV '98* (Takamatsu, 1998) pp. 29-34.
- 10) H. Kondou, Y. Motonaga, H. Kitamura, R. Wada, K. Nakanishi, A. Hashimoto and T. Kameoka: “Color evaluation by digital camera for fruits in natural outdoor scenes,” *Proceedings of the Second Asian Conference for Information Technology in Agriculture* (Suwon, 2000) pp. 432-441.
- 11) A. Hashimoto, H. Kondou, Y. Motonaga, H. Kitamura, K. Nakanishi and T. Kameoka: “Evaluation of tree vigor by digital camera based on fruit color and leaf shape,” *Proceedings of the 1st World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources* (Iguaçu Falls, 2002) pp. 70-77.
- 12) 石倉成行：植物代謝生理学(森北出版, 1993) pp. 154-232.
- 13) S.ハリントン：コンピュータ・グラフィックス[II](マグロウヒル出版, 1984) pp. 488-499.
- 14) 日本色彩学会編：新編色彩科学ハンドブック (東京大学出版会, 1985) pp. 140-143.
- 15) 齊藤 隆：“収穫果の生理, 生態”, 農業技術体系野菜編第2巻 トマト, 農文協編 (農山漁村文化協会, 1988) pp. 143-160.
- 16) 飛田満彦：色彩科学 (丸善, 1998) pp. 15-63.
- 17) 大田 登：色再現工学の基礎 (コロナ社, 1997) pp. 66-96.
- 18) 山崎利彦, 鈴木勝征：“果実の成熟度判定のためのカラーチャートの作成とその利用に関する研究 (第1報)”, 果樹試報A, **7** (1980) 19-44.
- 19) 秦野彰二, 松岡 信, 橋本 篤, 亀岡孝治：“タバコ葉の形の成長解析”, 物性研究, **68** (1997) 698-700.
- 20) 望月 太, 塚田岩根, 森谷 修, 中村幸雄, 小西陽一, 本田量一, 窪田友幸, 柴 寿, 大野俊雄, 矢野一男, 高橋国昭, 青木幹雄, 平田克明, 小豆沢斉, 武田吉弘, 吉田賢児：“生育過程と技術”, 農業技術体系果樹編第2巻ブドウ, 農文協編 (農山漁村文化協会, 2000) pp. 185-299.
- 21) 元永佳孝, 近藤宏哉, 亀岡孝治, 橋本 篤：“インターネット対応型果実外観解析システムの構築”, 農業情報研究, **8** (1999) 69-80.
- 22) T. Kameoka, M. Harada, A. Hashimoto, N. Iguchi, H. Ishizawa, H. Kondou, Y. Motonaga, A. Nomura, S. Ninomiya, K. Nakanishi, M. Oka, Y. Saito, H. Shono, S. Takamiya, H. Taki and F. Uchio: “Accurate sensing of bioinformation by optical method with multiband spectra and its structured data handling,” *Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering, Proceedings of the 6th International Symposium* (Potsdam, 2001) pp. 549-554.

(2002年6月7日受理)