

画像解析を用いたヤマトイモの形状評価手法の開発と4年間の形状発現事例 —栄養繁殖性作物における形状発現の経年追跡—

赤石拓也¹・中川孝之¹・鈴木健司²・岩佐博邦^{2a}・陳文西^{1b}・小林登史夫^{1*c}

¹創価大学大学院工学研究科 192-8577 東京都八王子市丹木町

²千葉県農業総合研究センター 299-4335 千葉県長生郡長生村

Development of a Shape Evaluation Method and its Application for 4 Years in Chinese Yam using Image Analyses, —Shape Succession in Vegetative Reproduction—

Takuya Akaishi¹, Takayuki Nakagawa¹, Kenji Suzuki², Hirokuni Iwasa^{2a},
Wenxi Chen^{1b} and Toshio Kobayashi^{1*c}

¹Faculty of Engineering, Soka University, Tangi-cho, Hachioji-shi, Tokyo, 192-8577

²Chiba Prefectural Agriculture Research Center, Cyousei-mura, Chiba-ken, 299-4335

Abstract

Chinese Yam is produced by vegetative reproduction and the tubers inherit the genetic shape-traits of the seed tubers. Shape is an important factor affecting commercial classification and price, and is thus the target of breeding and culture selection. Since market prices are vigorously dependent on shape, easy and accurate analyzing systems have been developed using 3-D image analyses and the image analysis software, HALCON. A modified method of obtaining image data using the known cube model was carried out, and the accuracy of the values was calibrated. Consequently, simple and quantitative shape classification and evaluation methods using 4 different techniques were applied, and satisfactory results were obtained after comparison with the logistic regression analyses.

Key Words : logistic regression analysis, genetic shape-traits, shape evaluation, shape factor, 3-D photograph

キーワード : 形状係数, 形状遺伝特性, ロジスティック回帰分析, 三次元写真

緒 言

ヤマトイモは栄養繁殖性作物であり、収穫した芋の形状は種芋の遺伝的な素質がそのまま引き継がれる。種芋の形状は各品種・系統等の内的要因、土質・土壌水分・地温等の外的要因により同じ気象環境下でも個体ごとに大きく異なることが知られている。また、形状と重量によって、市場における等級や価格が大きく左右されるため、育種時や栽培管理技術の改良時の形状評価は重要であるものの、その分類と評価手法は従来選別者の視覚に頼ってきた。形状の分類手法としては、二次元画像の解析によるイチゴ形状の分類において統計的な手法が有効とされ（木下・永田, 1999a）、有効な形状指標の選択にはステップワイズ法が有用であった（木下・永田, 1999b）。また、レーザービーム

による光切断法を用いた三次元的な画像解析でのイチゴ形状の分類も報告されている（片山ら, 2003）。本研究では、ヤマトイモの形状を簡便で省力的に三次元画像を取得し、画像解析を用いて諸寸法を定量的に計測した。そして、ヤマトイモにおける形状分類・評価手法の開発を行うと共に、2000～2003年の4年間にわたる栄養繁殖性作物の形状特性を明らかにすることを目的とした。

材料および方法

1. 供試品種

品種は千葉県産の‘多古棒系’と‘ふさおうぎ’の2品種を供試した。収穫した芋は、生産者の判断により親芋の形状に基づき棒形と扇形（ぼち形を含む）に選別した。収穫重量が100g以下、形状が乱形の芋を省き、対象とした芋は‘多古棒系’は2000年94個、2001年83個、2002年103個、2003年94個、‘ふさおうぎ’は2000年93個、2001年92個、2002年89個、2003年115個であり、総個体数763個となり、年次を越えて形状の追跡を行った個体数は計578個であった。

2005年3月23日 受付。2006年2月10日 受理。

本報告の一部は、園芸学会の平成13, 15, 16年度秋季大会で発表した。

* Corresponding author. E-mail: kobayast@myu.ac.jp

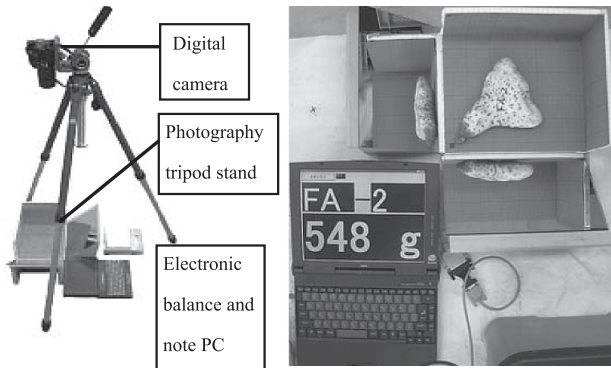
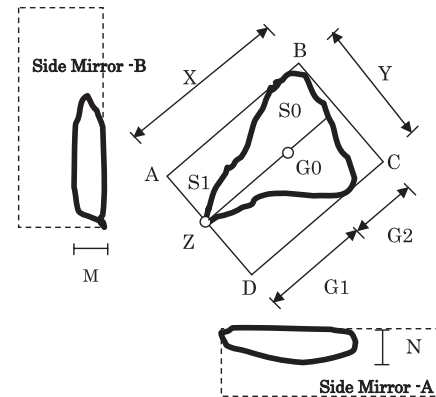
^a現在：千葉県海匠農林振興センター

^b現在：会津大学コンピュータ理工学部

^c現在：宮城大学食産業学部 982-0215 仙台市太白区旗立

Table 1 Environmental and weather conditions during cultivation over four years.

Year, Cultivation place	Cultivation period	Soil characteristics	Precipitation (mm)	Daylight hours (h)	Between ribs (cm)	Between roots (cm)
2000, Daizenno-cho, Chiba-shi	5/15~11/13	Trass	905	681	80	30
2001, Cyousei-mura, Chiba	4/26~1/30	Heavy soil that includes clay	807	647	70	25
2002, Cyousei-mura, Chiba	5/14~11/10	Heavy soil that includes clay	1112	720	70	25
2003, Cyousei-mura, Chiba	6/4~1/27	Heavy soil that includes clay	857	539	70	25

**Fig. 1** Photography system and a photography image.**Fig. 2** Dimensions of Chinese Yam.

2. 耕種概要

ヤマトイモの栽培は、千葉県野菜栽培標準技術体系(1985)に準じて行った。4年間における耕種概要を第1表に示した。降水量と日照時間は気象庁が公開する気象データ検索の電子閲覧室を参照し、6~10月までの4か月間の積算値を示してある。2001年から千葉県農業総合試験センターの組織の変更により、栽培場所が千葉県長生村に移転し、栽培条件が変更された。2002年は雨が多い年で台風による塩害を受けた。2003年は比較的日照時間が少なかった。

3. 撮影装置

対象物の撮影には三脚で固定したデジタルカメラ、電子天秤、ノートパソコン、自作の撮影台を用いた(第1図)。

- 1) デジタルカメラ デジタルカメラ(CAMEDIA E-20, オリンパス, 東京)を用いた。撮影時には、リモートケーブルRM-CB1を使用することにより、2名でヤマトイモ1個体につき約6秒での撮影を可能とした。
- 2) ノートパソコンによる重量表示 ノートパソコンと電子天秤をRS・232Cを用いて接続し、ノートパソコン上で重量表示を行えるように、Visual Basic 6.0 (Microsoft, シアトル, 米国)で作成したアプリケーションを用いた。またヤマトイモの個体ごとに番号を振り分けられるように入力欄を設けた。対象物の画像と共に重量、個体番号を同じ画面に記録できることにより、後続するデータ解析の正確性と迅速化が図られた。
- 3) 撮影台 ヤマトイモの大きさに合わせて撮影台(25 cm × 30 cm)を作成した。撮影台には2枚の鏡を45°に設置し、三次元的な画像を同じ画面に収集した。

4. 画像解析

撮影された画像は、画像解析用ソフトHALCON(MVTec, ミュンヘン, ドイツ)により、作成した自動プログラムを用いて諸寸法を計測した。また同時に、ノートパソコンに表示された重量をOCRにより読み取った。

5. 形状指標

芋の大きさに依存しない値をとるため、諸寸法を組み合わせ以下4種の無次元化した形状指標を導入した。諸寸法は第2図に示した。平面重心度はヤマトイモの芽(Z)から面積の重心(G0)までの距離(G1)を全長($X = G1 + G2$)で割った値。長短度はG1に平行なヤマトイモに外接する最小矩形を求め、その長径(X)を短径(Y)で割った値。TN係数は対象物の面積(S0)を最小の矩形面積(S1)で割った値。断面扁平度(以下扁平度とする)は短径(Y)を鏡像による芋の厚さ(MとN)の平均値で割った値。

- 1) 平面重心度 = $G1 / (G1 + G2)$
- 2) 長短度 = X / Y
- 3) TN係数 = $S0/S1$
- 4) 扁平度 = $Y / \{(M + N) / 2\}$

6. 画像の歪み補正

撮影された画像はレンズによる歪みの影響を受けるため、5 cm角のモデル立方体を用いて撮影台上の16か所において撮影を行い、撮影台の位置による歪みに対して長さや面積を補正した。また側面画像においては、対象物が鏡から離れると芋の厚さが小さくなる傾向があるため、側面画像の歪みも補正した。

7. ロジスティック回帰分析による形状分類手法

ロジスティック回帰分析は、従属変数 y が 2 値のデータについて各事象の起こる確率の対数オッズを、 p 個の説明変数 x_i で回帰する。 y が 1 と 0 の値をとるとして、 $y=1$ が起こる確率を $p_{y=1}$ 、 $y=0$ が起こる確率を $P_{y=0}$ 、ロジスティック回帰係数を β_i とすると次式 (1) となる。

$$\ln \frac{p_{y=1}}{P_{y=0}} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p \quad (1)$$

また、 $y=1$ が起こる確率 $p_{y=1}$ は次式 (2) となる。

$$P_{y=1} = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p)}} \quad (2)$$

分類を行う時は、形状指標から算出した予測確率が 0.5 以下の場合には棒形、0.5 以上の場合には扇形とした。分析には統計解析ソフト SPSS・Clementine を用いた。

結果および考察

1. 4 年間の重量累積分布

品種別の 4 年間に於ける重量の累積分布を第 3 図に示した。収穫芋の重量を品種別に比較すると、4 年間に於いて‘多古棒系’よりも‘ふさおうぎ’の方が収穫重量は多かった。両品種とも 2001～2003 年は 2000 年と比較して、収穫芋の平均重量が減少した。その要因として、2001 年から栽培圃場を変更し、2000 年とは異なる環境で栽培したことが影響していると考えられた。2002 年の‘多古棒系’では、塩害の影響が大きく表れている。2003 年は障害を受けた 2002 年の種芋を用いたことによる影響に加え、栽培期間中の日照時間が他年もより少なかった。2002 年と 2003 年の‘多古棒系’は‘ふさおうぎ’と比較すると収穫重量が大幅に減少していることから、環境要因の変動に影響を受けやすい品種であると考えられた。

2. 形状分類指標毎の分布

第 4 図に生産者による選別結果を 4 種の形状分類指標毎にその統計的分布をヒストグラムで示した。長短度は形状

の細長さを表しており、棒形は広域に分布し、扇形は比較的小さい値にまとまりのある分布を示した。平面重心度は値が 0.5 の場合、面積の重心が領域の中心に位置していることを示しており、値が 1.0 に近づくと芋の底部に重心が位置することを示している。棒形は、芋の中央付近に分布し、扇形は底部が肥大しているため、比較的大きい値に分布した。また、形状間での分布の差が大きかった。TN 係数は、芋の形状が矩形に近いと値が 1.0 に近づき、形状が“いびつ”になる程値が小さくなって、棒形は 0.7 付近、扇形は 0.6 付近に分布した。両形とも集中傾向が見られ、数

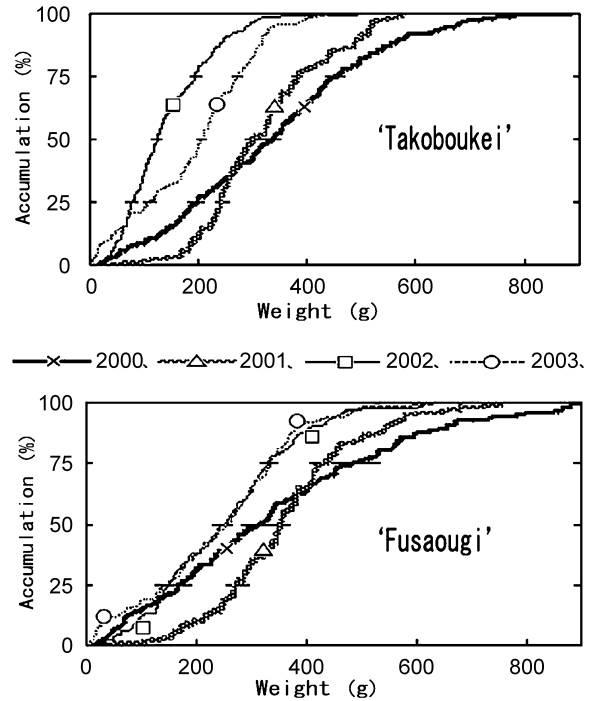


Fig. 3 Weight accumulation distribution of ‘Takoboukei’ and ‘Fusaougi’ over four Years.

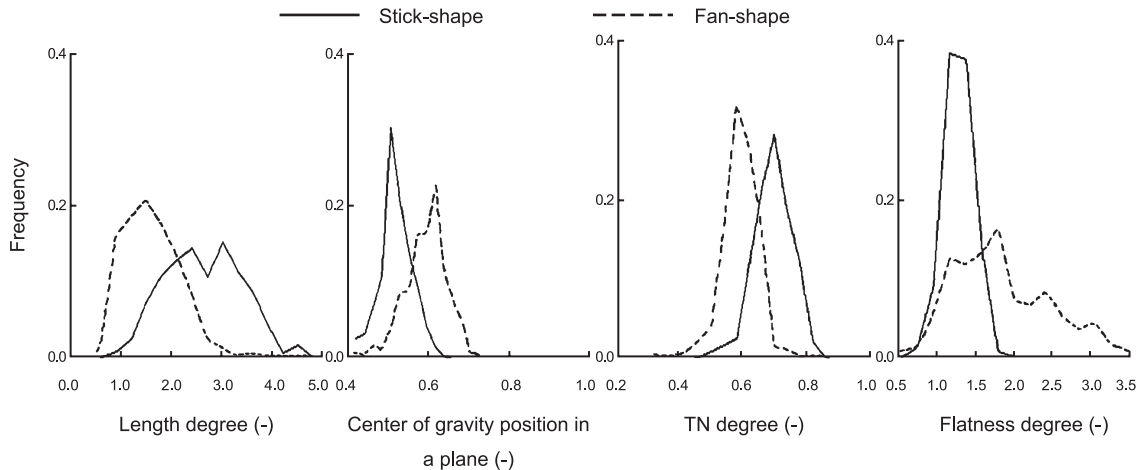


Fig. 4 Histogram of each index value of shape.

値が比較的近似していた。一方、扁平度は値が1.0の時に、芋の短径と厚みが等しいことを表しており、厚みよりも短径（幅）が長くなると値が大きくなる。棒形の大部分は1.0付近に分布する特徴があり、当然ながら、扇形は広域に分布した。

3. ロジスティック回帰分析による形状分類指標の比較

4種の形状指標を相互に比較するため、ロジスティック回帰分析を用いた。比較結果の判定は、生産者の判断した分類にどの程度一致しているかで表し、第2表に示した。4種の指標をそれぞれ単独で用いた場合には、棒形の一致率は扁平度が、扇形の一致率は長短度と平面重心度が高くなり、棒形と扇形の両者を合わせた一致率では平面重心度が最も高かった。したがって、視覚による形状分類の際には、平面重心度的な形状判別が経験的に最も重要視されていると示唆された。1指標単独では最低でも19.4%の平均不一致率が生じているため、複数の形状指標を組み合わせて棒形・扇形の分類手法を構成する必要がある。有効な形状指標を選択するため、ステップワイズ法を用いた。選択された形状指標は長短度、平面重心度と扁平度であった。選択された3種の形状指標を用いて、分析を行った結果、平均一致率が91.7%と最も高い一致率が得られた。不一致率8.3%の要因としては、棒形と扇形の間形状である“ば

ち形”の分類に精度が低かったことが挙げられる。

4. ロジスティック回帰分析による形状発現率

形状分類指標を用いて、種芋が棒形と扇形のどちらの形状に発現するのかを4年間において追跡した結果を品種・親芋別に第3表に示した。栄養繁殖性であるために品種内では遺伝的に均一であると考えられるが、選抜を行っても‘多古棒系’の本来の形状である棒形は年々発現率が減少し、形状が不安定であった。一方‘ふさおうぎ’の本来の形状である扇形は、2001年を除き比較的発現率が安定していたものの、一定の割合で棒形が発現した。毎年形状選抜を行っていても、棒形と扇形に分離して行き、それらの形状発現率は同じ栽培環境下でも品種ごとに異なることを確認した。2002年の‘ふさおうぎ’本来の形状における発現率は前年と比較して変化がなかったが、‘多古棒系’で本来の形状における発現率は減少していた。2003年においては前年度と比較して2品種とも本来の形状における発現率が減少したことから、形状発現率は、1) 塩害を受けた親芋は本来の形状を十分に発現していなかった可能性があり、2) 2002年の重量累積分布において‘多古棒系’だけが大幅に重量が減少したことを考慮すると、気象環境に対するストレス耐性が品種によって異なり、それが発現率に影響する可能性が高い。3) また、供試した2品種のヤマトイモは遺

Table 2 Rate of agreement on shape classification by the logistic regression analysis and by a producer.

One index	Length degree		Center of gravity position in a plane		TN degree		Flatness degree		Three indices ^y	Length degree • Center of gravity position in a plane • Flatness degree	
	Stick	Fan	Stick	Fan	Stick	Fan	Stick	Fan		Shape	Stick
Shape									Shape		
Shape agreement rate (%)	72.5	79.0	82.2	79.0	72.5	61.9	84.5	69.6	Shape agreement rate (%)	92.2	91.1
Average shape agreement rate (%)	75.7 ^z		80.6		67.2		77.1		Average shape agreement rate (%)	91.7	

^z Average value of stick-shape and fan-shape.

^y Three indices were chosen by step-wise method.

Table 3 Shape expression rate of the stick-shape and fan-shape in two species. The classification technique of shape was quantitative evaluated by the logistic regression analysis.

Species	Year							
	2000		2001		2002		2003	
Takoboukei	Stick-shape (N=49) ^z	90% 59%	Stick-shape (N=67)	70% 39%	Stick-shape (N=53)	53% 53%	Stick-shape	
	Fan-shape (N=34)	10% 41%	Fan-shape (N=36)	30% 61%	Fan-shape (N=40)	47% 50%	Fan-shape	
Fusaougi	Stick-shape (N=29)	7% 14%	Stick-shape (N=15)	7% 12%	Stick-shape (N=26)	35% 26%	Stick-shape	
	Fan-shape (N=63)	93% 86%	Fan-shape (N=74)	93% 88%	Fan-shape (N=92)	65% 74%	Fan-shape	

^z Number of seed tuber.

伝的な固定度が低い可能性がある。

さらに、2000年に収穫した芋をカットして得た種芋を、親芋の首部、胴部、底部の位置別に分けて、部位による形状発現率を2003年までの3栽培年において比較・検討するために、品種・親芋の形状別にFriedman検定を行った結果、部位による発現率に有意差(5%)は認められなかった。

5. 簡便な立体形状評価手法の確立

レーザー光(片山ら, 2003)による精緻な計測手法に比べ、本研究において農産物の三次元形状を安価かつ短時間に効率良く収集できる手法を開発し、むしろ対象物の特性やニーズに即応できる柔軟な形状指標や統計評価を活用できる解析・評価技術を確立した。画像から対象物の形状(長さ、面積等)を計測するには、専用のソフトを利用する必要はあるものの、それらは年々改良が進み安価になってきている。

これらの結果は、単にヤマトイモやイチゴに留まらず、撮影台を工夫するだけで三次元形状が重要視される多くの園芸作物(果実類、花卉類など)に適用可能である。

摘 要

- 1) 2枚の鏡を用いたデジタル画像の解析により、ヤマトイモの立体的形状を簡易かつ定量的に分類・評価する手法を開発した。
- 2) 4種の形状分類指標を導入し、従来からの生産者の視覚による形状分類との一致率をロジスティック回帰分析により検討した。

2-1) 形状分類指標をそれぞれ単独で用いた場合には、平面重心度が4種の形状指標の中で棒形と扇形の平均一致率が80.6%と最も高い値を示した。

2-2) ステップワイズ法を用いて有効な形状分類指標を比較・検討した結果、長短度、平面重心度と扁平度が選択され、この3種を組み合わせて分析を行うと棒形と扇形の平均一致率は91.3%と最も高い値を示した。

- 3) その形状分類指標を用いて、連続した4年間における形状発現状況を追跡した。

3-1) ‘多古棒系’は年々棒形の発現率が減少し、形状が不安定であった。‘ふさおうぎ’は一定の割合で棒形が発現し、比較的形状が安定しており、それらの形状発現率は同じ栽培環境の下でも品種により異なることを確認した。

- 4) 三次元形状が重要視される広い園芸作物を対象にして、簡便で省力的な形状記録収集手法と多様な形状評価指標を比較評価した原型(1事例)が確立された。

引用文献

- 片山哲生・芋生憲司・岡本嗣男・海津 裕・塚野航介. 2003. イチゴの三次元形状判別. 農業機械. 65: 71-76.
- 木下 統・永田雅輝. 1999a. 画像解析によるイチゴの形状判別(第2報)特徴量の提案. 農業機械. 61: 43-49.
- 木下 統・永田雅輝. 1999b. 画像解析によるイチゴの形状判別(第3報)特徴量の選択. 農業機械. 61: 51-56.