



Title	ヤマイモ交雑実生の優良株判別への画像解析の利用
Author(s)	渋沢, 栄; SHIBUSAWA, Sakae; 寺尾, 日出男 他
Citation	北海道大学農学部邦文紀要, 17(1), 94-106
Issue Date	1990-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/12120
Type	departmental bulletin paper
File Information	17(1)_p94-106.pdf



ヤマイモ交雑実生の優良株判別への画像解析の利用

波 沢 栄・寺尾日出男

(北海道大学農学部農業原動機学講座)

荒 木 肇・八 畝 利 郎

(北海道大学農学部果樹蔬菜園芸学講座)

(平成元年 11 月 25 日受理)

Discriminant Method with Image Data to Select the plant with Superior Characteristics from Interspecific Hybrids of *Discorea* Species

Sakae SHIBUSAWA and Hideo TERAO

(Laboratory of Prime Mover, Faculty of Agriculture,
Hokkaido University, Sapporo 060, Japan)

Hajime ARAKI and Toshiro YAKUWA

(Laboratory of Horticulture, Faculty of Agriculture,
Hokkaido University, Sapporo 060, Japan)

I. 結 言

本研究は、植物生産過程を数理工学的方法論で解析しようというファイトテクノロジー研究構想¹⁾²⁾の一環として行ったものである。特に本報では、画像解析を利用したヤマイモのいも部形態の記述方法およびその品質判別への応用に関して考察した。

荒木らは³⁾、優良なジネンジョ×ナガイモ交雑種の育成実験を進めている。この育成実験は、固形分やデンプンなどの含有量が多くて高粘性のジネンジョと、肥大性のあるナガイモの両種の形質を合わせ持つ、優良品種を得ることにある。これまでのところ、有望な交雑種の選抜に成功しつつあるが、さらに系統的な育成実験を進めるためには、非破壊的で定量的に優良株を判別する手法の開発が重要な課題の一つとなっている。肥大性に関しては、質量や形状から判別可能であるが、内部情報としての品質を表面情報などから非破壊的に推定することが特に重要である。交雑種のサンプルの中には、視覚的にも部の形状と品質の相関をある程度認めることができる系統も存在するが、それらであっても従来園

芸分野で簡便に利用されている長さや胴径の寸法のみでは明瞭な判別ができない。そこで、交雑実生において品質の異なる2系統を供試し、工学的手法の一つである画像解析とフーリエ解析を利用したいも部の形状解析による供試系統の判別を実施してみることとした。形状判別は非破壊選別のうちの簡便な方法の一つで、実用的技術への応用が比較的簡単でもある。

ナガイモやキュウリなどの細長い農産物を形状によって評価する場合には、主として

- 1) 細長さ(長さと同径の比など)の評価
- 2) 湾曲の程度の評価
- 3) 表面の凹凸の程度の評価

が考えられる。これ以外に表面情報としては色などもあるが、本報では1)と2)に注目した解析を実施した。

尚、本研究の一部に文部省科学研究費(総合A課題番号 01304022)の援助をいただいた。記して謝意を表す。

II. 供試した材料

Fig. 1 に、本解析に供試したヤマイモのサンプルを示す。収穫後3カ月間貯蔵した後に撮影したものである。これらは、ジネンジョ(雌)とナガイモ(雄)の42の交雑種子から得た実生のうち、成株まで成長したものの代表的な2系統である³⁾。Table 1 には、両系統の品質調査結果を示した。A 系統は、ジネンジョに匹敵する固形物やデンプンの含量および粘性を示している。しかもジネンジョより高い肥大性もある³⁾。B 系統は、ナガイモに近い品質を示した。

A 系統は高品質を示す株の1つの形状である

ので、低品質の B 系統と区別して A 系統に近い形状の個体を選抜することは、高品質化の育種につな

Table 1. Characteristics on quality of tuber in *D. japonica*, *D. opposita* and two hybrids between *D. japonica* and *D. opposita*.

Spices and Lines	Dry mass content (%)	Starch (g/100 g)	Viscosity (Pa. s)
<i>D. japonica</i>	31.6	19.3	30.8
<i>D. opposita</i>	15.8	9.8	5.4
Hybrids between <i>D. japonica</i> and <i>D. opposita</i>			
A-line	30.2	22.7	24.5
B-line	19.3	11.8	7.5

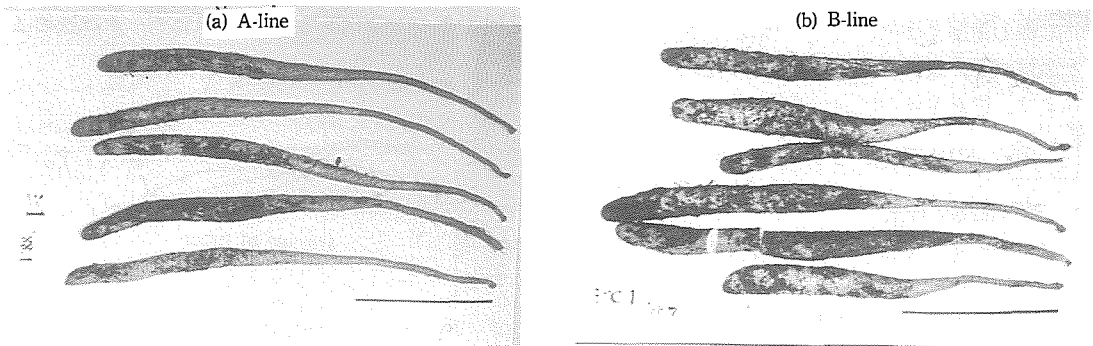


Fig. 1. Tuber samples in the hybrids between *D. japonica* and *D. opposita* used for the shape discriminant analysis. The scale bar indicates 30 cm.

Table 2. Correlation among the characteristics on tuber quality of seedlings of hybrids between *D. japonica* and *D. opposita*²⁾.

	Water content	Starch	Grude Mucin	Viscosity
Dry mass content	-0.999	0.617	0.748	0.820
Water content		-0.616	-0.746	-0.824
Starch			0.533	0.468
Grude Mucin				0.760

²⁾: Twelve hybrids were used in this investigation.

Table 3. Correlation between the characteristics on quality and shape of seedlings of hybrids between *D. japonica* and *D. opposita*.

	Wet mass	Length	Max. width	Max. width /Length	Max. width /Neck width
Dry mass content	-0.105	0.203	-0.204	-0.143	-0.316
Water content	0.095	-0.201	0.241	0.140	0.314
Starch	-0.126	0.188	0.035	-0.180	-0.153
Grude Mucin	-0.127	0.160	-0.210	0.098	-0.373
Viscosity	-0.058	0.107	-0.168	-0.022	-0.237

がるものと思われる。交雑実生の品質について、乾物率が高まればデンプン含量や粗粘物質含量も高まり、高い粘性を示して高品質化することが確認されている (Table 2)。しかしこれらの品質パラメータは、サンプルを破壊しなければ得ることができない。Table 3 には、交雑実生におけるこれらの品質パラメータと非破壊で観測できるいも部形状パラメータの相関係数を示した。形状パラメータとしては、最大長さ、最大胴径、最大長さに対する最大胴径の比、首部胴径に対する最大胴径の比の4種で、ほかにいも質量も加えた。荒木らは、これらの計算結果より、品質パラメータと上述の形状パラメータには相関を認めることができず、形状による判別は困難であると結論づけている。

しかし Fig. 1 より、視覚的にはA系統とB系統を識別でき、新たな形状パラメータを導入することにより、供試系統の判別が可能であると思われる。

III. 形状パラメータの導出法

1. 輪郭曲線の抽出

ヤマイモのいも部形状を記述するために、まず供試サンプルのモノクロ写真プリントから画像処理装置 (NEXUS 6400) で2値画像データを得た。さらにマスキング処理とエッジ検出処理を実施してスケールリングを行えば、Fig. 2 のような輪郭曲線が得

られる。この処理操作は、すでに土塊の輪郭曲線の抽出法として開発されている⁴⁾。

形状パラメータを計算するためには、いも部輪郭曲線を次のような基準化した座標系 $O'-xy$ の上で表現すると便利である。まずCRT座標系を $O-XY$ とし、首部付け根の先端より X 軸に沿って2 cm 部分の面積中心 $O'(X_0, Y_0)$ を求める。いも部先端の5 cm 部分の面積中心を $P(X_1, Y_1)$ とおけば、両点を結ぶ直線が次式で計算できる。

$$Y - Y_0 = \frac{Y_0 - Y_1}{X_0 - X_1} (X - X_0) \quad (1)$$

$$\tan \theta = (Y_0 - Y_1) / (X_0 - X_1) \quad (2)$$

θ は、時計回りを正にとる。(1)式で表される直線を x 軸にし、新しい座標系 $O'-xy$ で輪郭曲線を表現すると、 $O-XY$ 座標系の輪郭データは次のよう

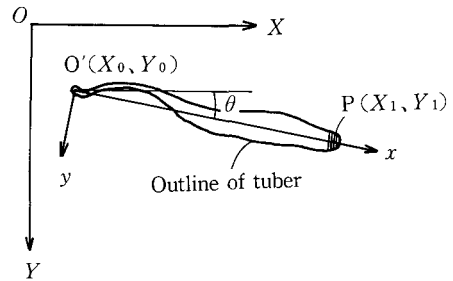


Fig. 2. Rotation method of the image data of tuber sample on CRT coordinate system.

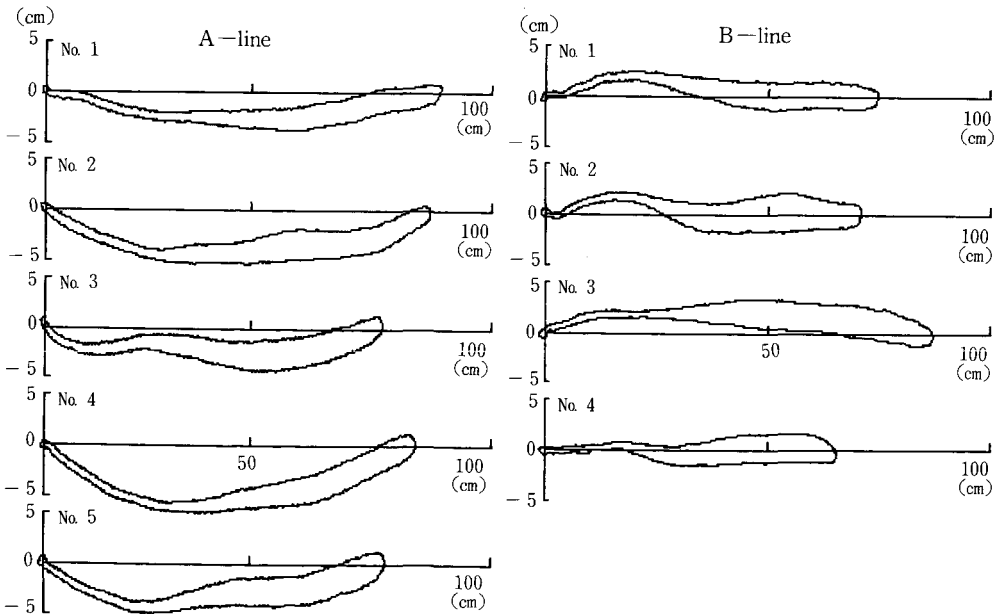


Fig. 3. Tuber outlines obtained from the image data.

に変換される。

$$\begin{aligned} x &= (X - X_0)\cos\theta + (Y - Y_0)\sin\theta \\ y &= -(X - X_0)\sin\theta + (Y - Y_0)\cos\theta \end{aligned} \quad (3)$$

x 軸および y 軸方向へのスケーリングの座標変換も同様に行えば、CRT 上の画像データは供試サンプルの輪郭を表すことができる。Fig. 3 には、基準化した座標系における供試サンプル輪郭曲線の CRT 画像のハードコピーを示した。本解析で得られている画像データは一つの輪郭曲線当たり約 800 個であり、全長約 80 cm に対して 1 ステップ約 2 mm の精度を持っている。

2. 胴径比

荒木らの実施した形状パラメータの計測³⁾の精度を高めるために、Fig. 4 に示すような胴径の計測を

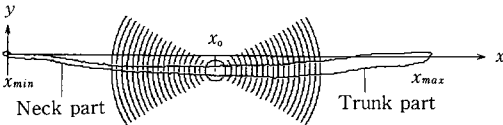


Fig. 4. Calculation method of the normalized distance and the width of tuber.

実施した。ここでは、慣例にしたがって y 座標の正方向を上向きに表示した。いも部輪郭両端の x 軸座標 x_{min} , x_{max} の中央の座標 $x_0 = (x_{max} + x_{min})/2$ における y 軸方向に沿って計った胴径を d_0 とおく。次に直線 $x = x_0$ と輪郭曲線との二つの交点の中央座標 y_0 を求め、 (x_0, y_0) を中心に持つ半径 r_n の計測円を描いていく。半径は次式の通り、 x 軸写影最大長の $1/80$ を離散化測度の単位にした。

$$r_n = \frac{1}{40} r_{max} \cdot n \quad (4)$$

ここで $r_{max} = (x_{max} - x_{min})/2$ である。 y 軸方向から時計回りに計測円を描いていくとして、輪郭曲線との交点を順次 $\{x_1(n), y_1(n)\}$, $\{x_2(n), y_2(n)\}$, $\{x_3(n), y_3(n)\}$, $\{x_4(n), y_4(n)\}$ と求めていく。計測円の中心よりいも部先端側の胴径を d_1 、首部側の胴径を d_2 とおけば、

$$\begin{aligned} d_1(n) &= \sqrt{\{x_1(n) - x_2(n)\}^2 + \{y_1(n) - y_2(n)\}^2} \\ d_2(n) &= \sqrt{\{x_3(n) - x_4(n)\}^2 + \{y_3(n) - y_4(n)\}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

で近似的に胴径が表現できる。Fig. 5 は、正規化した距離と 3 種の胴径比の関係を示したものである。ただし距離は $z_n = 40(r_n/r_{max}) = n$ である。3 種の胴径比とも、距離 15 程度までは急激な勾配を示し、

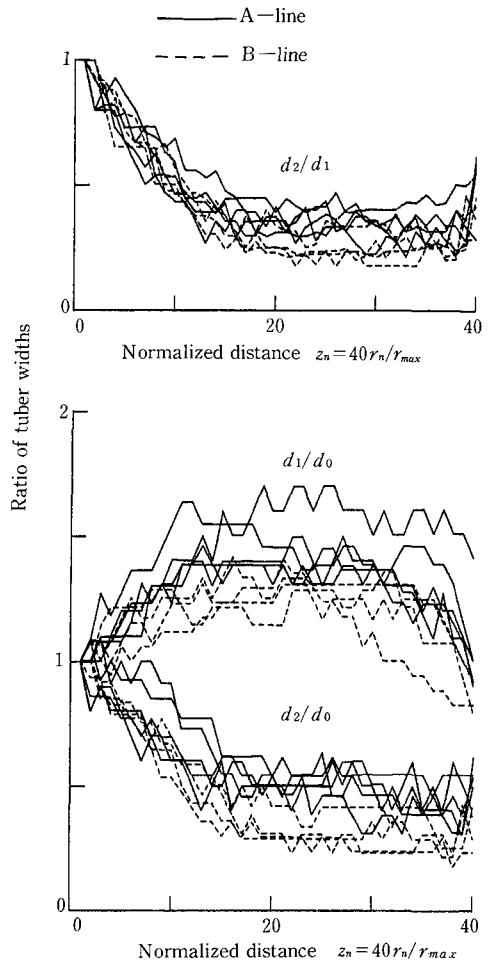


Fig. 5. Calculation results of the ratios of tuber widths. d_0 : a width at the middle point $x = x_0$; d_1 : a width at the trunk part; d_2 : a width at the neck part.

距離 20 以上ではほぼ一定の値を示す曲線群になっている。

3 種の胴径比曲線の特徴を表すパラメータとして、距離 15 までの平均勾配と距離 20 から 30 までの平均値を選んだ (Fig. 6)。勾配は最小自乗法によって求めた。さらに距離 25 までの胴径比の増減を連続曲線で近似するため、べき曲線 z_n^a と指数曲線 $e^{b \cdot z_n}$ を選び、それらの指数値も形状パラメータの一つと考えた (Fig. 7)。

Table 4 には、形状パラメータの計算結果を示す。両系統の平均値と分散を見ると、各々のパラメータにつき差が現れており、平均的な形状の差を抽出していることが判る。例えば、A 系統では \tan

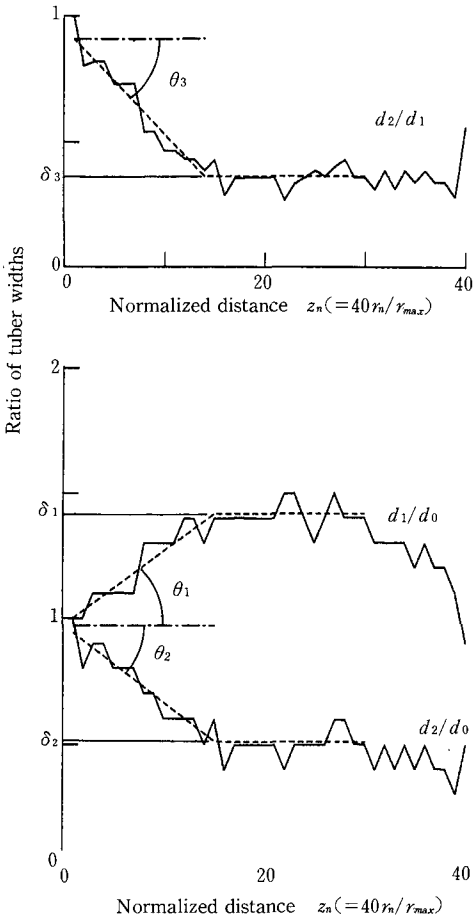


Fig. 6. Definition of shape parameters obtained from the ratios of tuber widths.

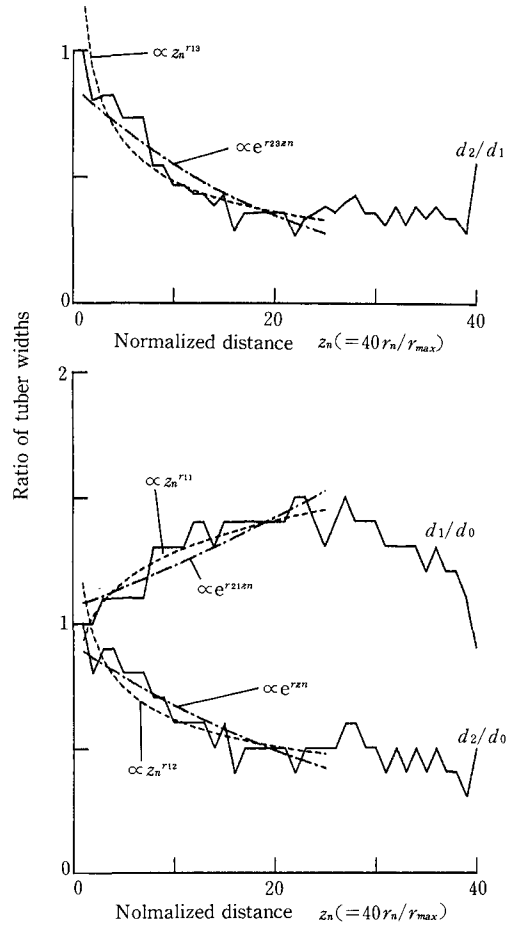


Fig. 7. Example of curve fitting analysis used by the expressions of power and exponential laws.

Table 4. Shape parameter values calculated from the ratios of tuber widths.

Line	Gradient ($\times 10^{-2}$)			Flatten tail value			Power & exp. index ^z	
	$\tan \theta_1$	$\tan \theta_2$	$\tan \theta_3$	δ_1	δ_2	δ_3	γ_1	γ_2
A-line								
No. 1	3.03	-3.00	-4.11	1.42	0.51	0.36	-0.414	-0.0460
No. 2	4.03	-3.16	-4.32	1.40	0.53	0.38	-0.407	-0.0448
No. 3	2.92	-2.47	-3.80	1.35	0.54	0.40	-0.358	-0.0415
No. 4	4.07	-3.51	-4.71	1.63	0.53	0.33	-0.446	-0.0478
No. 5	2.94	-2.87	-3.87	1.39	0.42	0.31	-0.378	-0.0418
Average	3.40	-3.00	-4.16	1.43	0.51	0.35	-0.401	-0.0444
Variance	0.0036	0.0015	0.0014	0.0127	0.0023	0.0014	0.0011	7×10^{-6}
B-line								
No. 1	2.12	-3.80	-4.46	1.25	0.40	0.32	-0.467	-0.0534
No. 2	1.69	-5.28	-5.80	1.24	0.27	0.22	-0.644	-0.0750
No. 3	0.97	-4.55	-4.59	1.26	0.29	0.23	-0.566	-0.0656
No. 4	2.03	-3.76	-4.50	1.31	0.28	0.21	-0.584	-0.0706
Average	1.70	-4.35	-4.84	1.27	0.31	0.25	-0.565	-0.0661
Variance	0.0028	0.0052	0.0042	0.0008	0.0037	0.0024	0.0054	8×10^{-5}

^z: γ_1 and γ_2 respectively show the indexes of power and exponential laws obtained by the regression analysis on d_2/d_1 -curve.

Table 5. Determination coefficients of the regression models for the relation between the normalized axial distance and the ratio of widths of tuber.

Line	Linear regression			Power law regression			Exp. law regression		
	d_1/d_0	d_2/d_0	d_2/d_1	d_1/d_0	d_2/d_0	d_2/d_1	d_1/d_0	d_2/d_0	d_2/d_1
A-line									
No. 1	0.868	0.873	0.913	0.844	0.809	0.863	0.737	0.811	0.827
No. 2	0.846	0.771	0.949	0.638	0.667	0.803	0.322	0.770	0.757
No. 3	0.812	0.878	0.947	0.767	0.789	0.894	0.564	0.946	0.931
No. 4	0.940	0.873	0.907	0.921	0.799	0.901	0.898	0.666	0.807
No. 5	0.934	0.882	0.894	0.845	0.837	0.896	0.617	0.880	0.853
B-line									
No. 1	0.801	0.980	0.958	0.682	0.850	0.884	0.472	0.941	0.903
No. 2	0.858	0.987	0.985	0.760	0.880	0.874	0.878	0.910	0.923
No. 3	0.240	0.963	0.925	0.351	0.847	0.910	0.182	0.933	0.949
No. 4	0.825	0.936	0.938	0.844	0.787	0.831	0.784	0.932	0.947
Average	0.792	0.941	0.935	0.739	0.807	0.879	0.606	0.865	0.877

θ_1 と $\tan \theta_2$ の絶対値の差が少なく、両パラメータの絶対値のうちの最大はB系統にある。A系統では δ_1 が δ_2 の値の約3倍だがB系統では約4倍であり、両パラメータともA系統の方が大きい。これらより、A系統では計測円中心（すなわちいも部の中央）が胴径の線形増加部分の中にあり、しかも全体として細長いイメージを数量化していることが判る。

Table 5 は、胴径比曲線の初期勾配を求める回帰直線およびべきと指数の回帰曲線の決定係数を示した。直線回帰については、B系統No.3の d_1/d_0 で特に低い値を示している以外は、かなり高い決定係数を示した。従ってこれらの直線回帰で得られた勾配は、いも部形状の特徴をよく抽出しているといえ、判別分析に利用できる。B系統No.3では、計測円の中心がいも部偏平部の近くに設定されたため、距離5程度で胴径比 d_1/d_0 が一定になり、直線回帰区間が不適當になった。これはべき曲線や指数曲線の回帰にもいえる。べき曲線と指数曲線の回帰では、 d_2/d_1 の胴径比で最も高い決定係数を示しているので、この場合の指数値を判別分析に利用した。

3. 湾曲度

細長い農産物の湾曲の程度を評価するには、その中心線がどの程度の曲率を持っているかを計算すれば良い。計測円と輪郭線の交点座標より、中心線 (x_c, y_c) は次式で表現できる。

$$\left. \begin{aligned} n \leq N : x_c(n) &= \{x_3(N-n) + x_4(N-n)\}/2 \\ & y_c(n) = \{y_3(N-n) + y_4(N-n)\}/2 \\ n > N : x_c(N+n) &= \{x_1(n) + x_2(n)\}/2 \\ & y_c(N+n) = \{y_1(n) + y_2(n)\}/2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで N は計測円の数で、 $N=40$ である。この離散データから直接曲率を計算するアルゴリズムはできるが、2階の微分計算と除算を含むため、計算解の発散する可能性がある。そこで簡便法として2種の湾曲度パラメータを定義することにした。

まず、測地距離に比べて実距離がどれほど伸びているかを表すパラメータで、次式で定義する。

$$\lambda_1 = (l_s - l_{ox}) / l_{ox} \quad (7)$$

ここで測地距離 l_{ox} は、中心線の x 軸への写影距離 $x_{\max} - x_{\min}$ であり、実距離 l_s は、次式で計算できる中心線長さである。

$$l_s = \sum_n \{ [x_c(n) - x_c(n-1)]^2 + [y_c(n) - y_c(n-1)]^2 \}^{1/2} \quad (8)$$

中心線が直線ならば $\lambda_1 = 0$ であり、直線からずれるほど値が大きくなる。しかし λ_1 では、同じ中心線長さを持つ場合、滑らかで大きな湾曲と周期の短くて小さな湾曲の差を表現できない。そこで、次の湾曲度パラメータも導入した。

$$\lambda_2 = [\sum_n \{y_c(n) - \bar{y}\}^2 / (2 \cdot N)] / l_{ox} \quad (9)$$

\bar{y} は中心線の y 座標の平均値であり、 λ_2 は中心線の y 座標に関する分散を x 軸への写影距離で割ったものである。すなわち単位長さ当りの分散で、 $y = \bar{y}$ と中心線によって囲まれる面積が大きいほど値が

Table 6. Curvature degrees on the center line of tuber.

Line	Curvature $\lambda_1 (\times 10^{-2})$	degree $\lambda_2 (\times 10^{-2})$
A-line		
No. 1	1.768	1.223
No. 2	3.282	1.669
No. 3	4.071	1.128
No. 4	5.429	2.692
No. 5	4.705	1.918
Average	3.851	1.726
Variance	1.983	0.396
B-line		
No. 1	1.927	1.152
No. 2	2.723	1.133
No. 3	1.342	0.854
No. 4	0.698	0.478
Average	1.560	0.904
Variance	0.478	0.099

大きくなる。

Table 6 に、2種の湾曲度パラメータの計算結果を示す。両パラメータとも、平均値ではB系統の方が小さくなっており、B系統の方が湾曲の程度の小さいことが判る。

4. 中心線と輪郭線のフーリエ級数近似

Fig. 3 に示されたいも部輪郭曲線を二次元閉曲線と考える。すでに穀粒形状の記述⁵⁾や果実形状の記述⁶⁾にフーリエ級数を利用した例もあるが、近似精度を向上するためにはデータ点数の大幅な増大が必要であることが指摘されていた。本解析で得られている画像データへのフーリエ級数の適用は、その分解能やデータ点数からみても十分な精度が期待できる。

まず任意の x 軸上の地点における y 軸に平行な直線と輪郭線との交点の y 座標を $y_a(x)$, $y_b(x)$ とおき、次の点列で近似される曲線をそれぞれ中心線および厚み曲線とする。

$$\text{中心線 } f_1(x) : [x, \{y_a(x) + y_b(x)\}/2] \quad (10)$$

$$\text{厚み曲線 } f_2(x) : [x, \{y_a(x) - y_b(x)\}/2] \quad (11)$$

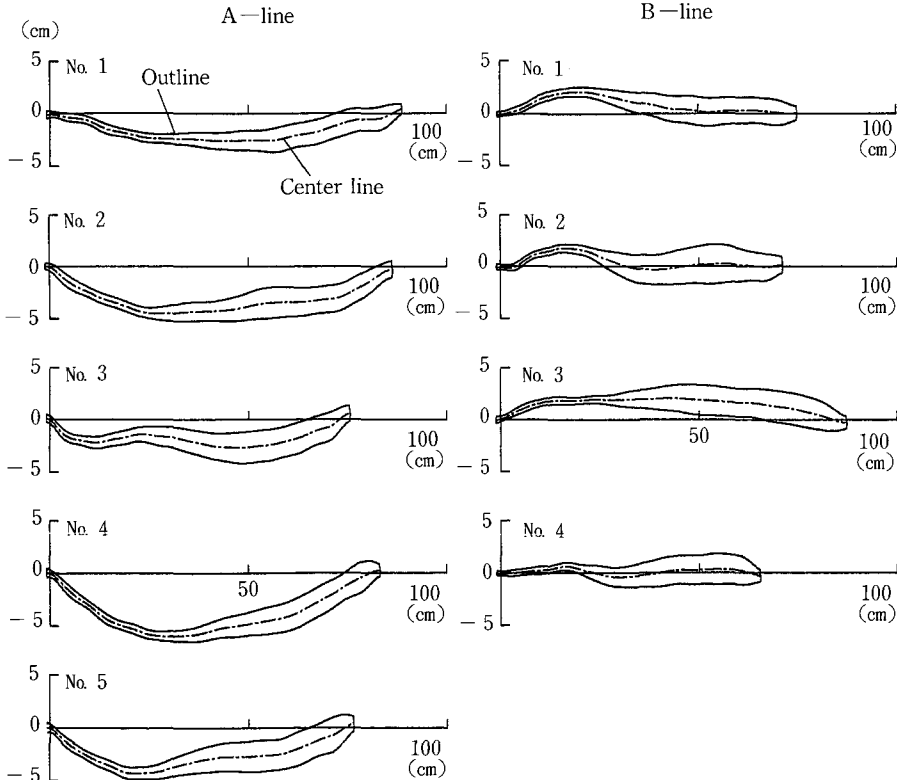


Fig. 8. Outlines and center lines of tuber samples simulated by the inverse Fourier transformation for the first ten harmonic progressions.

続いてこれらの点列を次のフーリエ級数で連続曲線近似する。

$$f_i(x) = a_i + \beta_i x + a_{0i} + \sum_n a_{in} \cos \eta_n x + b_{in} \sin \eta_n x \quad (12)$$

ただし $i=1, 2$ であり, L は x 軸方向のいも長さ, $\eta_1 = 2\pi/L$ および $\eta_n = n\eta_1$ は波数, $a_i + \beta_i x$ は形式的に始点と終点を零にして周期性を与えるための補正項である。(12)式より, いも部の輪郭は次式で表現できる。

$$y = f(x) = f_1(x) \pm f_2(x) \quad (13)$$

Fig. 8 は, (13)式を用いて描きたいも部の輪郭曲線である。調和数 10 までのフーリエ級数を用いている。Fig. 3 と比べてみると, 極めて再現性の高いことが判る。Table 7 に中心線の定数項と調和数 1 のフーリエ係数を示した。これらのフーリエ係数の値は, 平均値で A 系統と B 系統にかなりの差のあることが判る。

5. フーリエ級数を利用した胴径と形状パラメータの計算法

いも部の胴径は, 中心線の法線が輪郭曲線を切断



Fig. 9. Calculation method of tuber width using the normal to the center line.

Table 7. Fourier coefficients on the center line of tuber.

Line	Fourier coefficient (cm)		
	Constant term a_0	Harmonic term of number 1 a_1 of cos-term	b_1 of sin-term
A-line			
No. 1	4.24	-2.51	-0.15
No. 2	6.73	-3.04	0.85
No. 3	4.93	-1.39	-0.66
No. 4	7.44	-4.82	1.58
No. 5	5.51	-2.55	1.45
Average	5.77	-2.86	0.61
Variance	1.71	1.56	0.97
B-line			
No. 1	2.07	-0.67	1.83
No. 2	0.40	0.17	1.53
No. 3	3.33	-1.47	0.37
No. 4	0.06	0.31	-0.18
Average	1.46	-0.42	0.89
Variance	2.32	0.68	0.90

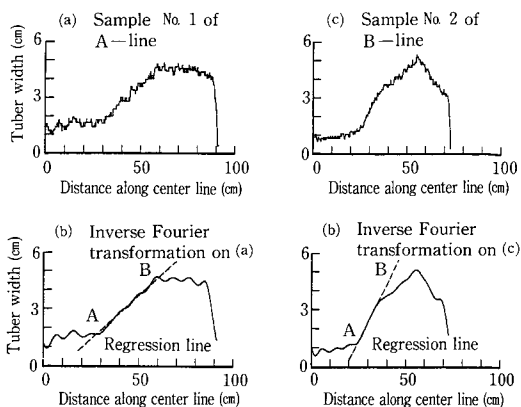


Fig. 10. Examples of calculated tuber width and their inverse fourier transformation for the first ten harmonic progressions. Shape parameters are obtained from the curve simulated by the inverse Fourier transformation.

するときの切片の長さ AB と定義する (Fig. 9)。Fig. 9 において, 中心線上の点 $P(x_p, y_p)$ における接線の勾配は次式で得られる。

$$\frac{df_1(x_p)}{dx} = \beta_1 + \sum_n [(-a_{1n}\eta_n)\sin \eta_n x_p + (b_{1n}\eta_n)\cos \eta_n x_p] \quad (14)$$

従って点 P を通る法線の方程式は

$$y - y_p = -\{df_1(x_p)/dx\}^{-1}(x - x_p) \quad (15)$$

で与えられる。実際に胴径を求めるときは, CRT 上で輪郭画像の上に(15)式で与えられた直線を描き, その交点座標間の距離 ξ を計算した。この場合, 胴径は中心線に沿った長さ ξ をパラメータとして $\xi(\xi)$ と表すことができる。ただし

$$\xi(s) = \int_0^s ds'$$

$$ds^2 = dx^2 + df_1^2$$

である。

得られた胴径曲線 $\xi(\xi)$ は, Fig. 10(a) および (c) に示すようになり変動の激しいものであり, フーリエ級数によるフィルター処理を施して, Fig. 10(b) および (d) の滑らかな曲線にした。

Fig. 10(b) および (d) に示す通り, 胴径の線形増加部分を直線回帰し, 胴径曲線が回帰直線からずれる点 A および B を求め, 次の形状パラメータを計算した。

首部長さ(LNP) = 点 A の ξ 座標

胴径増加勾配(GWI) = 回帰直線の勾配

Table 8. Fourier coefficients on the width curve of tuber.

Line	Fourier coefficient (cm)		
	Constant term a_0	Harmonic term of number 1 a_1 of cos-term b_1 of sin-term	
A-line			
No. 1	3.04	-0.38	-1.68
No. 2	3.64	-0.79	-1.83
No. 3	4.00	-0.90	-1.88
No. 4	3.24	-0.18	-2.03
No. 5	3.90	-0.58	-2.26
Average	3.56	-0.57	-1.94
Variance	0.17	0.09	0.05
B-line			
No. 1	3.42	-0.73	-1.99
No. 2	4.17	-1.09	-2.95
No. 3	3.72	-0.88	-2.38
No. 4	3.52	-0.69	-2.28
Average	3.71	-0.85	-2.40
Variance	0.11	0.03	0.16

線形増加距離(LID)=点AとBの距離

これらは、視覚的に細長いというイメージを評価するための定量的なパラメータである。Table 8には、胴径曲線のフーリエ係数を示した。Table 9には、形状パラメータの計算結果を示した。

Table 9. Shape parameter values calculated with the curve of tuber width approximated by the Fourier series for the first ten harmonic progressions.

Line	Length of neck part (cm)	Gradient of width increment ($\times 10^{-2}$)	Linear incremental distance of width (cm)
A-line			
No. 1	26.0	9.90	34.0
No. 2	28.0	6.30	31.0
No. 3	18.0	11.80	34.0
No. 4	26.0	12.50	43.0
No. 5	24.0	15.90	36.0
Average	24.4	11.28	35.6
Variance	14.8	12.45	20.3
B-line			
No. 1	22.0	16.10	20.0
No. 2	20.0	23.60	20.0
No. 3	24.0	18.50	25.0
No. 4	14.0	16.60	28.0
Average	19.8	18.70	23.3
Variance	16.3	11.74	15.6

IV. 形状パラメータの判別分析への利用

1. マハラノビスの汎距離による判別法

前項までに計算した各種の形状パラメータを変量として、本報の目標であるA系統とB系統の判別を行う。A系統をA群およびB系統をB群とおく。本解析の場合、あらかじめ両群の統計的性質が判っているので、その統計量を用いて各サンプルが何れの群に判別されるのかという多変量判別分析の問題を解くことになる。判別基準には以下のようにマハラノビスの汎距離を用いるのが一般的である⁷⁾。

まず1変量の場合、A群とB群の平均値をそれぞれ $\mu^{(A)}$ および $\mu^{(B)}$ 、分散を $\sigma_{(A)}^2$ および $\sigma_{(B)}^2$ とみると、あるサンプルの変量 x についての平均からの平方距離は次式で与えられる。

$$D_A^2 = \frac{(x - \mu^{(A)})^2}{\sigma_{(A)}^2}, \quad D_B^2 = \frac{(x - \mu^{(B)})^2}{\sigma_{(B)}^2} \quad (16)$$

D_A と D_B をマハラノビスの汎距離といい、両群の平均(重心)からのユークリッド距離をばらつきの基準である標準偏差を単位としてその何倍という形で計ったものである。判別方法は

$$\begin{aligned} D_A^2 < D_B^2 : x \in A \\ D_A^2 > D_B^2 : x \in B \end{aligned} \quad (17)$$

で行う。

多変量の判別分析では、変数の数を p として両群の平均値ベクトルを次式で表す。

$$\begin{aligned} \mu^{(A)} &= [\mu^{(A)1}, \mu^{(A)2}, \dots, \mu^{(A)p}]^T \\ \mu^{(B)} &= [\mu^{(B)1}, \mu^{(B)2}, \dots, \mu^{(B)p}]^T \end{aligned} \quad (18)$$

続いて変数 i の分散 σ_i^2 および変数 i と j の共分散 σ_{ij} から構成される分散共分散行列を次のように表す。

$$\Sigma_{(A)} = \begin{bmatrix} \sigma_{1(A)^2} & \sigma_{12(A)} & \dots & \sigma_{1p(A)} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \sigma_{p1(A)} & \cdot & \dots & \sigma_{p(A)^2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\Sigma_{(B)} = \begin{bmatrix} \sigma_{1(B)^2} & \sigma_{12(B)} & \dots & \sigma_{1p(B)} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \sigma_{p1(B)} & \cdot & \dots & \sigma_{p(B)^2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

一つのサンプルの変数ベクトルを

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_p]^T$$

とおけば、次の平方距離が計算できる。

$$\begin{aligned} D_A^2 &= (\mathbf{x} - \mu^{(A)})^T \Sigma_{(A)}^{-1} (\mathbf{x} - \mu^{(A)}) \\ D_B^2 &= (\mathbf{x} - \mu^{(B)})^T \Sigma_{(B)}^{-1} (\mathbf{x} - \mu^{(B)}) \end{aligned} \quad (21)$$

判別方式は(17)式と同じである。

分散共分散行列の正則性を保障するためには、サンプル数を n_i とおくと、 $n_i > p$ が条件となり⁸⁾、本解析の場合は最大3変数が限界となる。

2. 胴径比と湾曲度による判別結果

Table 10 に、胴径比と湾曲度から得られる10個の形状パラメータを用いた1変数判別分析の結果を示す。表中のAおよびBは、各サンプルのマハラノビス汎距離によって判別された結果を示している。一つの形状パラメータでA系統とB系統を判別する場合、 $\tan \theta_1$ のみが正確な判別結果を与えており、その他の形状パラメータは誤判別が含まれて

Table 10. Discriminant analysis with one shape parameter obtained from the width ratios and curvature degree of tuber.

Line	Parameters of width ratio curves						Power & exp. indexes ²		Curvature	
	$\tan \theta_1$	$\tan \theta_2$	$\tan \theta_3$	δ_1	δ_2	δ_3	γ_1	γ_2	λ_1	λ_2
A-line										
No. 1	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A
No. 2	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
No. 3	A	B	B	A	A	A	A	B	A	A
No. 4	A	B	B	A	A	A	B	B	A	A
No. 5	A	A	A	A	A	B	A	B	A	A
B-line										
No. 1	B	B	B	B	B	A	B	B	B	A
No. 2	B	B	B	A	B	B	B	B	A	A
No. 3	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
No. 4	B	B	B	A	B	B	B	B	A	A

²: γ_1 and γ_2 respectively show the indexes of power and exponential laws obtained by the regression analysis on d_2/d_1 -curve.

Table 11. Discriminant analysis with two shape parameters obtained from the width ration and curvature degree of tuber.

Line	Parameters of width ratio curves			Curvature degree $\lambda_1 - \lambda_2$
	$\tan \theta_1 - \delta_1$	$\tan \theta_1 - \delta_1$	$\tan \theta_1 - \delta_1$	
A-line				
No. 1		A	A	A
No. 2		A	A	A
No. 3		A	A	A
No. 4		A	A	A
No. 5		A	A	B
B-line				
No. 1	B		B	A
No. 2	B		B	B
No. 3	B		B	B
No. 4	B		B	B

Table 12. Discriminant analysis with three shape parameters obtained from the width ratios and curvature degree of tuber.

Line	Parameters of width ratio curves		Curvature degree & index ²	
	$\tan \theta_1$ - $\tan \theta_2$ - $\tan \theta_3$	δ_1 - δ_2 - δ_3	γ_1 - λ_1 - λ_2	γ_2 - λ_1 - λ_2
A-line				
No. 1	A	A	A	A
No. 2	A	A	A	A
No. 3	A	A	A	A
No. 4	A	A	A	A
No. 5	A	A	A	A
B-line				
No. 1	B	B	B	B
No. 2	B	B	B	B
No. 3	B	B	B	B
No. 4	B	B	B	B

²: γ_1 and γ_2 respectively show the indexes of power and exponential laws obtained by the regression analysis on d_2/d_1 -curve.

いる。 $\tan \theta_1$ は、いも部の中央より先端方向への胴径増加勾配を意味しており、この部分に両系統の形状の明瞭な差があるといえる。

Table 11には、2変量による判別分析の結果を示す。正確な判別結果を与えているのは $\tan \theta_1$ と δ_1 および $\tan \theta_2$ と δ_2 の組合せである。 $\tan \theta_1$ と δ_1 は、いも部中央から先端側の胴径勾配と4等分点付近の平均胴径比であり、 $\tan \theta_2$ と δ_2 はいも部中央から首部側のそれらである。いも部を中央で半分に切断しても、これらの形状パラメータの組合せで

A系統とB系統の判別ができることを示している。

Table 12は、3変量による判別分析の結果を示している。表中の形状パラメータの組合せでは、いずれの場合も正確な判別を与えている。すなわちいも部中央に着目した場合は、首部方向および先端方向の胴径増加勾配を計測すれば有効な判別が得られること、またいも部の4等分点の胴径を計測しても有効な判別が得られることを意味している。中心線の湾曲度と胴径比のべき曲線および指数曲線近似で得

Table 13. Discriminant analysis with one shape parameter of tuber obtained from the Fourier series transformation.

Line	Fourier coeff. of center line			Fourier coeff. of width curve			Shape parameters ²		
	a_0	a_1	b_1	a_0	a_1	b_1	LNP	GW	LID
A-line									
No. 1	A	A	A	A	A	B	A	A	A
No. 2	A	A	B	A	B	A	A	A	A
No. 3	A	A	A	A	B	A	B	A	A
No. 4	A	A	B	A	A	A	A	A	A
No. 5	A	A	B	B	A	B	A	B	A
B-line									
No. 1	B	B	B	A	A	A	B	B	B
No. 2	B	B	B	A	A	B	B	B	B
No. 3	B	A	A	B	B	B	A	B	B
No. 4	B	B	A	A	A	B	B	B	B

²: LNP=length of neck part, GW=gradient of width increment between the neck and the trunk parts, LID=linear incremental distance of width curve between the neck and the trunk parts.

Table 14. Discriminant analysis of three shape parameters of tuber obtained from the Fourier series transformation.

Line	Fourier coeff. of center line $a_0-a_1-b_1$	Fourier coeff. of width curve $a_0-a_1-b_1$	Shape parameters ^z LNP-GWI-LID
A-line			
No. 1	A	A	A
No. 2	A	A	A
No. 3	A	A	A
No. 4	A	A	A
No. 5	A	A	A
B-line			
No. 1	B	B	B
No. 2	B	B	B
No. 3	B	B	B
No. 4	B	B	B

^z: LNP=length of neck part, GWI=gradient of width increment between the neck and the trunk parts, LID=linear incremental distance of width curve between the neck and the trunk parts.

られる指数値の組合せでも、正確な判別結果が得られている。しかし本解析に供試したサンプルは収穫後3カ月経過しており、特に首部付近の湾曲は貯蔵期間中に増大した可能性もあるので、実用的な判別方法としては検討を要する。

3. フーリエ係数による判別結果

Table 13 に、中心線と胴径曲線のフーリエ係数および胴径曲線のフーリエ級数近似より計算した形状パラメータによる1変量判別分析の結果を示す。正確な判別を与えるのは中心線のフーリエ係数の定数項と形状パラメータの胴径線形増分距離である。中心線による判別は、前項でも考察した通り貯蔵中の変形も考慮にいれなくてはならないため、実用的判別方法としては検討が必要である。胴径の線形増分距離は、胴径が徐々に増大するのか急速に増大してしまうのかを判定する指標の一つであり、視覚的に細長いのがA系統に属するというイメージの定量的判別基準といえる。

Table 14 には、3変量の判別分析結果を示す。いずれの場合も正確な判別を与えている。表中の3個の形状パラメータは胴径曲線のフーリエ級数近似から得られるものであり、実用的にはフーリエ係数による判別の方が短時間で済むことになる。

前項の胴径比および湾曲度による判別は、ノギス等で寸法計量してきた従来法の精度をより高めるという方法論であるのに対して、フーリエ級数を利用

した判別では、ある程度精細な画像データの収集システムとコンピュータ解析が前提にされた方法論であるといえる。フーリエ係数それ自体は、細長いなどの視覚的直観と直接対応させにくいのが、本解析でも示した通りの幾何学的対応関係を証明することができる。しかもフーリエ級数は連続関数なので、本解析以外に形態上の様々な特徴を数理解的に導き出すことが可能である。ここに植物生産に対するファイトテクノロジー的アプローチの一つの特徴がある。

V. 結 言

ジネンジョ×ナガイモ交雑種における優良株選抜のためのいも部形状による判別方法として、画像解析を応用した新しい手法を開発した。一つの手法は、無次元化した胴径比を用いる方法である。CRT上のいも部輪郭画像を利用し、いも部中央に中心を持つ円を描くことによって80個の胴径を求めた。もう一つは、フーリエ級数による方法である。フーリエ級数を利用すると、ヤマイモの細長い形態を任意の精度で近似することが可能である。

胴径比から得られる形状パラメータでは、次の組合せが実用的で有効な判別を与えた。

- ① いも部中央から先端側の胴径勾配
- ② いも部中央から首部側の胴径勾配および中央と首部側いも部4等分点の胴径比

- ③ いも部4等分点の3個の胴径比
胴径曲線のフーリエ係数を利用した場合は、
④ 定数項および調和数1の正弦・余弦の係数によ
る3変量判別分析
が正解を与えた。

引用文献

1. 渋沢 栄： ファイトテクノロジー研究構想とその展望. 農業および園芸 **63**(5): 587-592. 1988
2. 渋沢 栄： ファイトテクノロジー研究における植物との対話. 農業および園芸 **64**(4): 475-482. 1989
3. 荒木 肇, 浅野裕治, 八楯利郎： ヤマイモ交雑実生からの優良株の選抜. 園芸学会雑誌 **58**(別1): 196-197. 1989
4. 片岡 崇： ロータリ耕うんにおける土塊の形成過程. 北海道大学農学研究科修士論文. 1989
5. グエン・ハオ, 山下律也, 後藤清和, 吉富 均： 農産物(穀粒)形状の解析について. 農業機械学会誌 **41**(2): 305-308. 1979
6. 山下律也, 池田善郎, 田中準人： 人工触覚に関する研究(第6報). 農業機械学会関西支部報 **60**: 119-121. 1986
7. 田中 豊, 脇本和昌： 多変量統計解析法. 現代数学社. 1983
8. R. ニヤンデシカン(丘本 正, 磯貝恭史訳)： 統計的多変量データの解析. 日科技連. 1979

Summary

The analysis of tuber shape with digital image data was applied to the selection of lines with supe-

rior characteristics from hybrids between *D. opposita* and *D. japonica*. The interested lines with superior characteristics seemed to be slenderer in the hybrids, then the shape parameters to evaluate the slenderness were calculated and used for the discriminant analysis.

The ratios of tuber widths were used for the one of the discriminant methods. The tuber width was obtained from the intersections of the tuber outline and a circle with its center at the middle point of tuber. The tuber widths of 80 were sampled on the CRT image data along the tuber axis. The other method was the application of Fourier series to the representation of tuber outline. The Fourier series description gave a good approximation of the slender tuber shape.

Next combinations in the shape parameters obtained from the ratios of tuber widths gave the accurate solution by the discriminant analysis:

- 1) The initial gradient of tuber width from the middle point toward the trunk part.
- 2) The initial gradient of tuber width from the middle point toward the neck part and the ratio of tuber width at the points of one-fourth and middle of tuber.
- 3) Three kinds of ratios of tuber widths at the points to divide the tuber into four equal parts.

In the case of Fourier coefficients of the width curve, next variables gave the accurate solution by the discriminant analysis:

- 4) The constant term and the coefficients of first harmonic number.