

速報

楕円フーリエ記述子を用いたハゼノキ葉形変異の評価方法の検討*1

平岡裕一郎*2 · 佐々木峰子*2 · 倉本哲嗣*2 · 岡村政則*2

キーワード：ハゼノキ (*Rhus succedanea*)，葉形，楕円フーリエ記述子，主成分分析

I. はじめに

ハゼノキは果皮から木蠟を採取する特用樹であり，古くから在来品種が多数存在する。これら品種は葉，果実等の形状の特徴を手がかりとして識別されてきた。しかし従来は対象物の長さ，幅を指標としており，形状の特徴を詳細に表現するには不十分であった。

輪郭の形状を定量的に評価する際，フーリエ記述子を用いたいくつかの方法がある。これらの方法では対象物の輪郭の直接的な表現が可能である。特に楕円フーリエ記述子は輪郭形状の解析に適しており (8, 11)，葉をはじめとする植物器官の形状解析に利用されている (3, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 13)。またイメージスキャナーでパーソナルコンピュータに取り込み，画像解析ソフトを用いて数値の算出をするという手順を踏むことで，測定にかかる労力が軽減されるという利点もある。

そこで，楕円フーリエ記述子を用いてハゼノキの葉や果実の形状を定量的にとらえ，在来品種の識別を行う方法を確立する目的で研究を進めることにした。今回は複葉の評価方法を検討したので報告する。

II. 材料と方法

1. 材料

供試材料は福岡県森林林業技術センターに植栽されたハゼノキ 10 在来品種から複葉を採取した。供試品種と複葉のサンプル数を表-1に示す。なお，1品種につき1個体からサンプリングを行った。

2. 画像処理及び解析方法

採取した複葉を押して平らにし，スキャナー (EPSON GT-8700) でパソコン (Apple Macintosh G4) に取り込んだ。ハゼノキの葉は奇数羽状複葉であるが，小葉毎に楕円フーリエ記述子の係数を算出するため，Adobe Photoshop™ 3.0Jを用いて，取り込んだ複葉画像の葉柄を消し，複葉を小葉1枚ずつに分離した。その後，デジタル画像を2値化し，小葉の輪郭を検出した。この輪郭の形状を chain-code (2) で表し，解析に用いた。なお複葉の先端の小葉を頂小葉と呼び，それに続く側小葉は先端から基部に向かって順に1, 2, 3対目と数えることとした。

楕円フーリエ記述子の係数は Kuhl and Giardina (8) の提案した手順に従い chain-code で表した形状の離散フーリエ変換により算出した。概略は以下の通りである。

chain-code で表した輪郭を x, y 平面に投影する。2つの隣接した点の間は直線的に結び， $(i-1)$ 番目と i 番目の線分長を Δt_i ，始点から p 番目の点までの長さとして輪郭の周囲長をそれぞれ

$$t_p = \sum_{i=1}^p \Delta t_i$$

$$T = t_K$$

とする。ここで K は輪郭状の点の全数であり K 番目の点は始点に等しい。 p 番目の x 座標は

$$x_p = \sum_{i=1}^p \Delta x_i$$

となる。ここで Δx_i は $(i-1)$ 番目と i 番目の点の間の x 軸方向の

表-1. 供試品種名とサンプル複葉数

| 品種名 | サンプル複葉数 |
|-----|---------|
| 葡萄 | 9 |
| 平迫 | 7 |
| 伊吉 | 7 |
| 松山 | 11 |
| ヌメラ | 8 |
| 王 | 9 |
| 利太治 | 6 |
| 昭和福 | 7 |
| 太公望 | 9 |
| 上 | 8 |

*1 Hiraoka, Y., Sasaki, M., Kuramoto, N. and Okamura, M. : Consideration of valuation method for leaf shape variations of *Rhus succedanea* using elliptic Fourier descriptors

*2 林木育種センター九州育種場 Kyushu Regional Breed. Office, Forest Tree Breed. Center, Nishigoshi, Kumamoto 861-1102

変位である。そして、 x 座標の数値の楕円フーリエ展開は

$$x_p = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2n\pi t_p}{T} + b_n \sin \frac{2n\pi t_p}{T} \right)$$

である。ここで A_0 は中心点の座標、 a_n 、 b_n はそれぞれ

$$a_n = \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p} \left(\cos \frac{2n\pi t_p}{T} - \cos \frac{2n\pi t_{p-1}}{T} \right)$$

$$b_n = \frac{T}{2n^2\pi^2} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p} \left(\sin \frac{2n\pi t_p}{T} - \sin \frac{2n\pi t_{p-1}}{T} \right)$$

である。ここで n は係数 a_n 、 b_n の調和順序である。 y 座標についての係数 c_n 、 d_n は同様にして求める。楕円フーリエ記述子の係数は対象物のサイズ、向き、輪郭をたどるときの始点に関して不変となるように数学的に標準化する。 n 番目の調和の標準化された係数を a_n^* 、 b_n^* 、 c_n^* 、 d_n^* とすると

$$\begin{bmatrix} a_n^* & b_n^* \\ c_n^* & d_n^* \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

ここで

$$E^* = (a_1^{*2} + c_1^{*2})^{1/2}$$

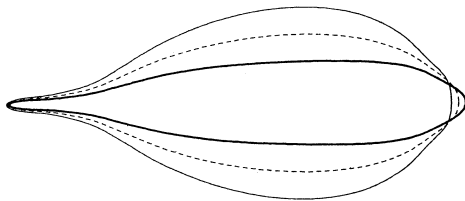
$$\begin{bmatrix} a_1^* \\ c_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix}$$

$$\psi = \arctan \left[\frac{c_1^*}{a_1^*} \right] \quad (0 \leq \psi < 2\pi)$$

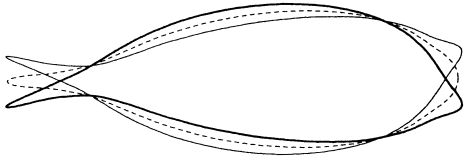
$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2(a_1 b_1 + c_1 d_1)}{(a_1^2 + c_1^2 - b_1^2 - d_1^2)} \right] \quad (0 \leq \theta < \pi)$$

である。この標準化では第1調和の楕円を基に行っている。この標準化により、3係数が一定 ($a_1 = 1$ 、 $b_1 = 0$ 、 $c_1 = 0$) となり、これらは無視できる。

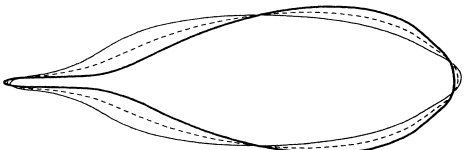
PC1



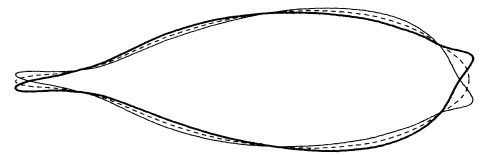
PC2



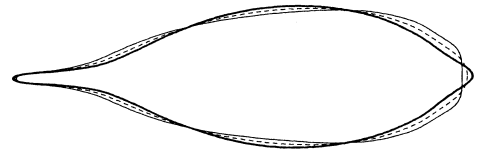
PC3



PC4



PC5



PC6

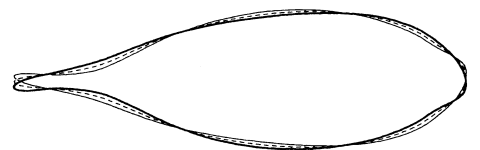


図-1. 各主成分値で説明される形状の変化
点線, 細線, 太線はそれぞれ主成分値が0, -2 S.D., +2 S.D.を示す。

本研究では始めの20調和により形状の近似をした。そのため、1枚の小葉から77 (= 4×20 - 3) の標準化された楕円フーリエ記述子の係数が得られた。更に、得られた係数に主成分分析を行い、数学的に独立な形状特徴を抽出した。

なお、画像の2値化から主成分分析までの計算はIwata (5) の作成した解析ソフト SHAPE Ver. 1.2を用いた。

また葉形の特徴の反復率 r を推定した。その式は次の通りである。

$$r = \frac{V_G + V_{Eg}}{V_p}$$

ここで V_G は遺伝型分散、 V_{Eg} は一般的環境分散 (両者併せて個体間分散)、 V_p は全分散である (1)。

III. 結果と考察

主成分分析結果を表-2に示す。第1主成分、第2主成分の寄与率はそれぞれ59%、19%であり、第6主成分までで全変動の95%を説明できた。その他の主成分の寄与率は1%以下であった。

主成分値から再構成した輪郭形状を図-1に示す。第1主成分から第6主成分まで順に、長幅比、曲がりの度合い、小葉の長軸に沿った重心位置、基部の膨らみの長軸に関する左右のぶれ、先端と基部の鋭さ、中央部の膨らみの左右のぶれを表していると解釈できた。またこれらの変動は、小葉の長軸に関して左右対称性を保つ変動 (第1, 3, 5主成分, 以下A群とする) と、左右対称

表-2. 主成分の固有値と寄与率

| 成分 | 固有値 ¹⁾ | 寄与率 (%) | 累積寄与率 (%) |
|-----|-------------------|---------|-----------|
| PC1 | 3.924 | 58.7 | 58.7 |
| PC2 | 1.234 | 18.5 | 77.2 |
| PC3 | 0.707 | 10.6 | 87.7 |
| PC4 | 0.244 | 3.7 | 91.4 |
| PC5 | 0.136 | 2.0 | 93.4 |
| PC6 | 0.098 | 1.5 | 94.9 |

1) 実際の固有値は10⁻³倍である。

性が崩れる変動（第2, 4, 6主成分, 以下B群）の, 大きく2種類に分けることができた。

対になった小葉の複葉内での左右対称性を検討するために主成分分析で得られた値を, A群については直線 $y = x$ に, B群については $y = -x$ に当てはめ, 回帰の寄与率を見た(表-3)。ここで x, y はそれぞれ右側, 左側の小葉についての主成分値を表す。このとき回帰の寄与率が高ければ, 複葉の左右で小葉の形状が対称であることを示す。寄与率は第1, 第3主成分ではそれぞれ0.95, 0.86と高い値を示したほか, 第2, 第5主成分でも0.5以上となった。これらの結果から, 複葉内の小葉対は左右対称と見なして良いと考えられる。

これを踏まえて, 以下の解析では各小葉の主成分値を複葉の左右で区別せず扱った。その際, B群の主成分値は絶対値に変換した上で解析に用いた。

複葉内の小葉の形状変化に傾向があるか否かを検討した。図-2に小葉の複葉内での位置(頂小葉あるいは対目)による主成分値の変化を示す。品種によって小葉対の数が異なるため, 5対目までの値を用いた。主成分値の変化には一定の傾向が見られるも

のの品種毎に若干の差異が認められた。特にB群の主成分値の変化のパターンには品種毎の違いが目立っていた。

各形状特徴を表す主成分値の反復率を算出し, 一時的に働く環境効果に対する形状の安定性を見た(表-4)。反復率の主成分毎での平均値で最も大きいものは第1主成分で0.47であった。このことから, 一時的な環境効果に対しては, 第1主成分で表される形状特徴が最も安定的であると解釈できる。その他, 値の大きいものから順に第3, 第5, 第2, 第4, 第6主成分となり, A, B両群を比較すると, A群の反復率が高くなった。

- 以上の結果, 考察をまとめると, 次のようになる。
- (1) 小葉の形状変動は, 主成分分析により長軸に対して対称性を保ったままの変動(A群)と, 長軸に対して非対称になるもの(B群)に分離できた。
 - (2) 複葉は左右対称であると見なされた。
 - (3) 複葉内の小葉の形状変化のパターンは品種間に差異が認められた。
 - (4) 小葉の形状特徴を表す主成分値の反復率は, B群よりA群が高くなった。

表-3. 対になった小葉の左右の主成分値の直線回帰寄与率

| 成分 | 回帰式 ¹⁾ | R ² |
|-----|-------------------|----------------|
| PC1 | $y = x$ | 0.95 |
| PC2 | $y = -x$ | 0.60 |
| PC3 | $y = x$ | 0.86 |
| PC4 | $y = -x$ | 0.36 |
| PC5 | $y = x$ | 0.59 |
| PC6 | $y = -x$ | 0.44 |

1) x は複葉の右側, y は左側の主成分値を表す。

表-4. 小葉毎の各主成分値の反復率

| | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 | PC6 |
|-----|------|------|------|-------|------|-------|
| 頂小葉 | 0.49 | 0.05 | 0.09 | -0.01 | 0.22 | 0.01 |
| 1対目 | 0.59 | 0.03 | 0.37 | 0.03 | 0.21 | 0.06 |
| 2対目 | 0.55 | 0.06 | 0.44 | 0.04 | 0.30 | -0.01 |
| 3対目 | 0.50 | 0.07 | 0.40 | 0.02 | 0.22 | 0.00 |
| 4対目 | 0.40 | 0.11 | 0.29 | 0.02 | 0.22 | -0.01 |
| 5対目 | 0.31 | 0.01 | 0.21 | 0.02 | 0.10 | 0.08 |
| 平均 | 0.47 | 0.06 | 0.30 | 0.02 | 0.21 | 0.02 |

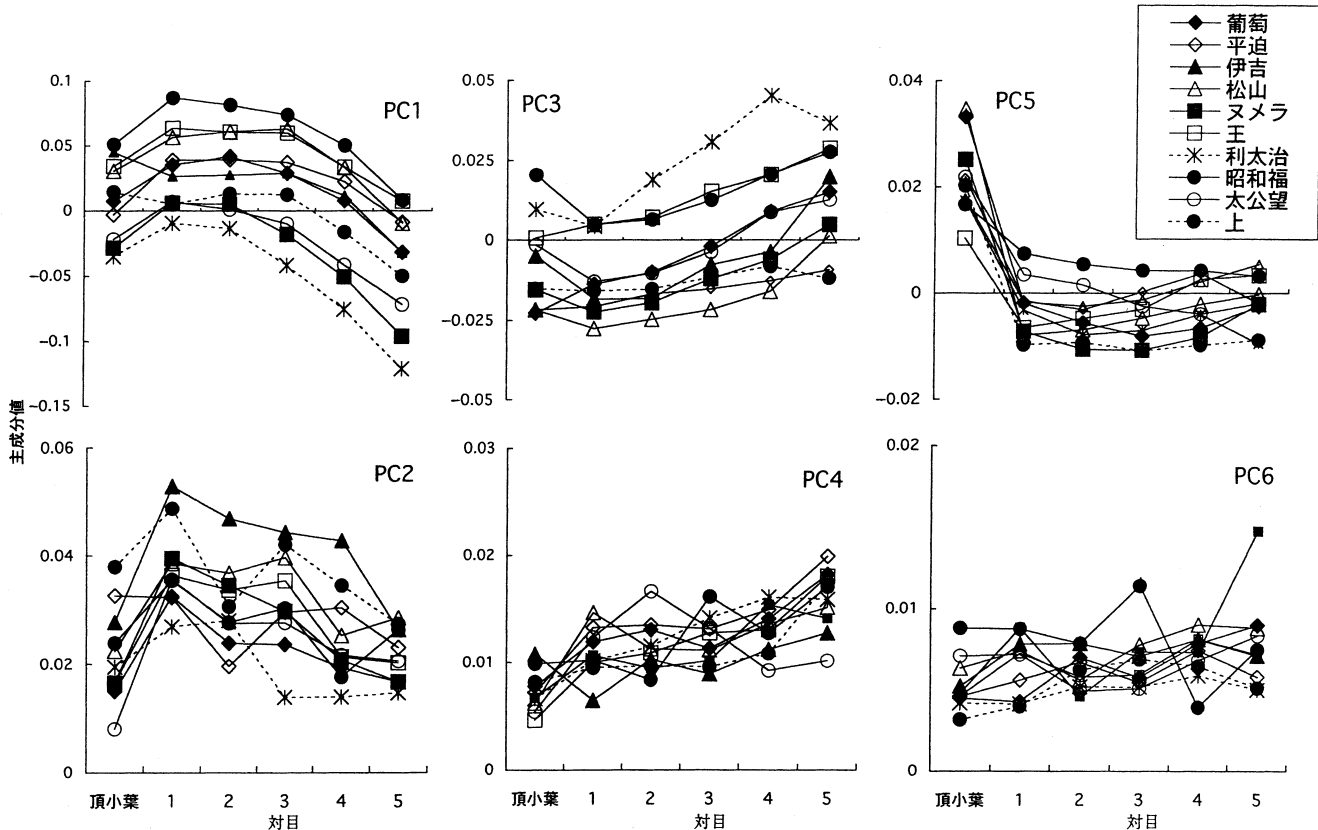


図-2. 小葉の位置による主成分値変化

これらの知見から、ハゼノキの品種識別をする際には以下の3項目を念頭に置いてすべきであると考えられる。

- (1) 複葉の左右をまとめて扱う, または片方のみ扱う。
- (2) 複葉内の小葉対を複数用いて解析する。
- (3) A群の変動に注目して解析する。

今回の試験でハゼノキの品種識別を行うにはサンプル数, 個体数が不十分であり, 更にこれらを増やすことが必要であろう。また, 果実の形状も同様の方法で解析が可能であると考えられる。以上のことは, 確実な品種識別を行うため今後取り組むべき課題であると考えられる。

引用文献

- (1) ファルコナー, D. S. (田中嘉成・野村哲郎 訳) (1993) 量的遺伝学入門 原書第3版, p.181, 蒼樹書房, 東京.
- (2) Freeman, H. (1975) *Comp. Surv.* 6 : 57-97.
- (3) Furuta, N. *et al.* (1995) *Breed. Sci.* 45 : 315-320.
- (4) Hadipoentyanti, E. *et al.* (1996) *SABRAO J* 28 (2) : 25-34.
- (5) Iwata, H. (2001) SHAPE Ver. 1.2. A Software Package for Quantitative Evaluation of Biological Shapes Based on elliptic Fourier descriptors. Free program distributed by the author over the internet from the Home Page at <http://cse.naro.affrc.go.jp/iwatah/shape/index.html>.
- (6) Iwata, H. *et al.* (1998) *Euphytica* 102 : 143-149.
- (7) Iwata, H. *et al.* (2002) *Breed. Sci.* 52 : 89-94.
- (8) Kuhl, F. P. and Giardina, C. R. (1982) *Comp. Graph. Image Proc.* 18 : 236-258.
- (9) McLellan, T. (1993) *Am. J. Bot.* 80 : 796-804.
- (10) Ohsawa, R. *et al.* (1998) *Euphytica* 101 : 175-183.
- (11) Rohlf, F. J. and Archie, J. W. (1984) *Syst. Zool.* 33 : 302-317.
- (12) White, R. J. *et al.* (1988) *Can. J. Bot.* 66 : 450-459.
- (13) Yamamoto, C. *et al.* (1994) *Proc. 7th Intern. Cong. SABRAO & WSAA.* 53-59.

(2002年12月24日 受理)