

葉の基部形の数量化によるイタドリ属2種の葉形比較

荒瀬輝夫¹・岡野哲郎¹・内田泰三²

¹信州大学農学部, ²九州産業大学工学部

Comparison of the Leaf Shape in 2 *Reynoutria* Species by Quantification of Leaf-base Shape

Teruo ARASE¹, Tetsuo OKANO¹ & Taizo UCHIDA²

¹Faculty of Agriculture, Shinshu University

²Faculty of Engineering, Kyushu Sangyo University

Summary: The purpose of this report is to quantify leaf-base shapes for the field survey of plants. We analyzed the property of cardioid (limaçon) curve, $r = (1 - k) + k \cos \theta$, and confirmed that the coefficient k was able to express the leaf-base shapes: rotundate, obtuse, truncate, reniform, and cordate. In the leaf-shape analysis of two closely-related species, *Reynoutria japonica* and *R. sachalinensis*, only an interspecies difference was detected in the leaf size and other leaf-shape indices. Coefficient k revealed both interspecies and sexual differences clearly; $k = 0.33-0.34$ (almost truncate) in male and female in *R. japonica*, whereas $k = 0.41$ (reniform) in female and 0.54 (cordate) in male in *R. sachalinensis*. This method will facilitate the statistical analysis and ordination of leaf shape, without the use of image processing techniques.

キーワード: イタドリ属, 分類, 葉形, 数量化, カージオイド(リマソン)

Key words: *Reynoutria*, Taxonomy, Leaf Shape, Quantification, Cardioid (Limaçon)

1. はじめに

イタドリ (*Reynoutria japonica* Houtt.) はわが国に広く分布する雌雄異株の多年生植物であり, 高山帯, 海岸など, さまざまな環境に適応した変種や品種が記載され⁶⁾, 倍数性の差異¹⁾も報告されている。同じイタドリでも高標高地では葉形が円形化することが知られており⁶⁾, 他のイタドリ属植物と分布が重なる地域では, 一見して種の判別が紛らわしい場合が生じる。著者らは, 伊豆諸島や中央アルプスでの植生調査において, イタドリとオオイタドリ (*R. sachalinensis* (Fr. Shum.) Nakai) の現地での判別に難儀した経験から, これら2種の分類基準の1つである葉形について, 簡便で定量的な記述法の必要性を感じてきた。

葉形はさまざまな植物の分類の基準となる外

部形態の1つである。イタドリとオオイタドリの葉形については, 葉身の基部形が前者で切形, 後者で心形というのが典型的である^{7, 8)}。葉形は, 図鑑類においては形の名称というカテゴリーの記載である。画像解析による葉形の分析法が開発され, 画像から求められる葉長や葉幅, 面積, 輪郭の特性などを用いた幾つかの指数が提案されているものの, 非対称形や凹形に弱いという弱点もあり²⁾, 葉形間の関係や序列も分かりにくい。単一のパラメータの変化によって連続的かつ数量的に葉形を表現ができれば, 平均や標準偏差の算出, 微細な差異や類似性の分析を行うことができ, フィールドにおける迅速な計測も可能となる。

そこで本報では, イタドリとオオイタドリを例として, 葉形(葉の基部形)を単一のパラメータによる関数で数量化することを試みた。これによ

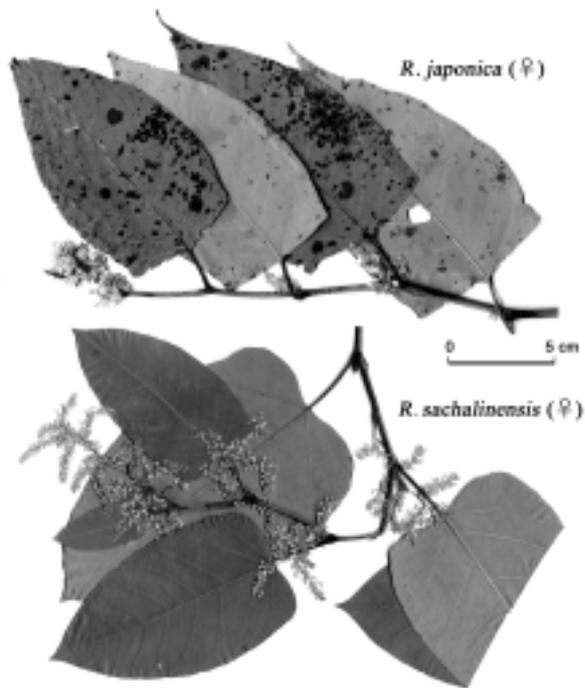


図-1 イタドリとオオイタドリの葉形の例
長野県伊那市権兵衛峠, 2009年9月28日採集.

って, 葉形の種間差や雌雄差を表すことができるかを検証することとした。

2. カーゴイドによる葉の基部形の数量化

イタドリとオオイタドリの葉の基部形は, 予備調査において, 植物形態学用語で言うところの鈍形, 切形, 腎形, 心形~浅心形で概ね表現できた(図-1)。そこで, これらを単一のパラメータで表現できる関数として, 外サイクロイド曲線の1つであるカーゴイド(リマソン)を用いることにした。

カーゴイド(リマソン)は, 一般には極座標表現で $r = a + b \cos \theta$ のように表される ($a = b$ のときが狭義のカーゴイド) ⁹⁾。ここでは, k を定数として,

$$r = (1 - k) + k \cos \theta \quad (0 \leq k \leq 1)$$

と表現してみる(図-2)。このとき葉の基部形は, 円弧が原点に向かって湾入する第3および第4象限側の部分にあたる。すると, $x - y$ 座標上では,

$$x = (1 - k) \cos \theta + k \cos^2 \theta$$

$$y = (1 - k) \sin \theta + k \sin \theta \cos \theta$$

となる。 θ についての1次導関数を, それぞれ x'

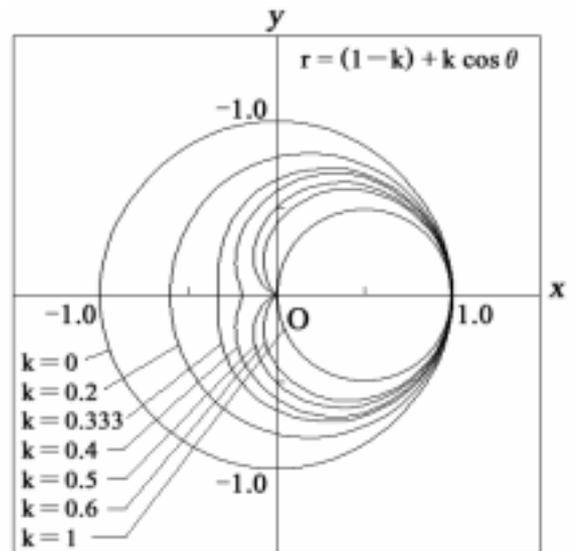


図-2 カーゴイド(リマソン)による葉の基部形の表現

$= dx/d\theta, y' = dy/d\theta$ とおくと,

$$x' = -(1 - k) \sin \theta - 2k \sin \theta \cos \theta$$

$$= -(1 - k) \sin \theta - k \sin 2\theta$$

$$y' = (1 - k) \cos \theta + k (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

$$= (1 - k) \cos \theta + k \cos 2\theta$$

となり, さらに2次導関数を $x'' = d^2x/d\theta^2, y'' = d^2y/d\theta^2$ とおけば,

$$x'' = -(1 - k) \cos \theta - 2k \cos 2\theta$$

$$y'' = -(1 - k) \sin \theta - 2k \sin 2\theta$$

となる。これらを用いると,

$$dx/dy = x'/y'$$

となり, 曲率を κ とおくと,

$$\kappa^2 = (x' \cdot y'' - x'' \cdot y')^2 / \{(x')^2 + (y')^2\}^3$$

と計算できる。

基部形において最も外側に突出する点と内側に湾入する点は, x が極値, すなわち $dx/dy = 0$ のときである。よって分子: $x' = 0$ を解くと, $\sin \theta = 0$ または $\cos \theta = -(1 - k)/(2k)$ となり,

最も湾入する点 P: $(2k - 1, 0)$

最も突出する点 Q:

$$\left(-\frac{(1-k)^2}{4k}, \pm \frac{(1-k)\sqrt{(3k-1)(k+1)}}{4k} \right)$$

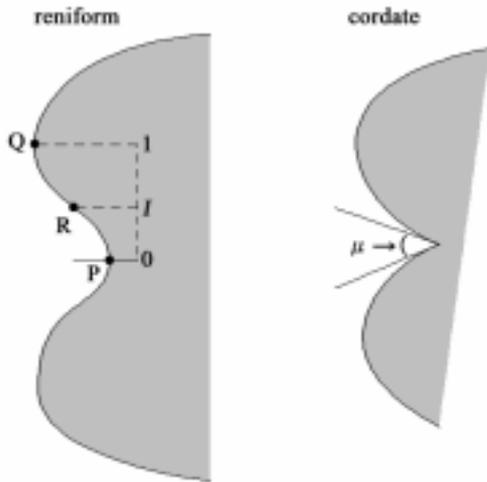


図-3 変曲点の相対位置 I (腎形するとき) と 夾角 μ (心形するとき)

となる。突出点と湾入点の間にある変曲点 R では $r = 0$ となるので、 r^2 の計算式の (分子) $= 0$ から座標が得られる。すなわち、

$$\{3k^2 - 2k + 1 + 3k(1 - k) \cos \theta\}^2 = 0$$

$$\therefore \cos \theta = -\frac{3k^2 - 2k + 1}{3k(1 - k)}$$

より、変曲点 R:

$$\left(-\frac{2(1 - 2k)(3k^2 - 2k + 1)}{9k(1 - k)^2}, \pm \frac{2\sqrt{(k + 1)(1 - 2k)^3(3k - 1)}}{9k(1 - k)^2} \right)$$

となる。R は 2 点 P, Q を結ぶ直線上にはないが、 y 座標上での P - Q 間における変曲点 R の相対的な位置を I (図-3) とすると、Q の y 座標値で R の y 座標値を割って整理すれば、

$$I = \frac{8\sqrt{(1 - 2k)^3}}{9(1 - k)^2}$$

となる。

また、 $1/2 < k < 1$ のときには、 θ が 180° に達する前に、 r (原点からの距離) が負値となってしまう。このとき、 $(1 - k) + k \cos \theta = 0$ より、 $\cos \theta = -(1 - k)/k$ である。この条件で dx/dy を求めれば、切れ込み部に生じた夾角 μ (図-3) を計算できて、

$$\tan \mu = \frac{2\sqrt{2k - 1}}{1 - k}$$

となる。

表-1 係数 k とカージオイド(リマソン)の形状との関係

k	I	μ ($^\circ$)	Leaf-base form
0.000	-	-	rotundate - obtuse
0.333	-	-	truncate
0.361	0.5	-	
0.391	0.4	-	
0.418	0.3	-	reniform
0.443	0.2	-	
0.467	0.1	-	
0.500	-	0	cordate
0.509	-	30	
0.536	-	60	shallowly cordate
0.586	-	90	
0.667	-	120	
0.794	-	150	
1.000	-	-	rotundate

なお、突出点が存在するのは、Q の座標が実数となる条件を解けば、 $1/3 < k < 1$ のときである。また、変曲点が存在するのは、Q が存在し、かつ R の座標が実数となる条件から、 $1/3 < k < 1/2$ のときである。

以上の計算をもとに、係数 k を 0 ~ 1 の間で変化させた場合の状況を表-1 に示す。図-2 と見比べながら読み解くと、係数 k が 0 ~ 1/3 のときには円形 ~ 鈍形、1/3 付近で切形、0.4 付近で腎形、0.5 で完全な心形、0.5 以上になると浅心形になることが伺える。なお $k = 1$ のときは $r = \cos \theta$ となり、形状は原点 ~ (1, 0) 間を直径とする小円になる。

3. 調査方法

葉形の調査地として、長野県伊那市権兵衛峠 (標高 1523 m) を選定した。本調査地は中央アルプス北縁と経ヶ岳の間に位置し、イタドリとオオイタドリが権兵衛街道 (国道 361 号、伊那市 ~ 旧・榎川村) 沿いにそれぞれ群生している。

現地調査およびサンプリングは、花および果実があることで雌雄判別が容易で、かつ、完全に展葉している秋季が望ましいという理由から、2009 年 9 月 28 日とした。

イタドリとオオイタドリは、雄株と雌株別に、平均的な生育状態のもの 1 株をサンプリングし、それぞれ 6 枚ずつの葉について表-1 に従って係数 k の値を判読した。基礎データとして葉長 (L)、葉幅 (W) を実測した。また、従来用いられている葉形の指標と比較するため、スキャン画像をも

表-2 イタドリ属 2種の葉のサイズと葉形

Species	Sexuality	Leaf length (L) cm	Leaf width (W) cm	Leaf area (S) cm ²	Leaf perimeter (M) cm
<i>R. japonica</i>	male	11.4 ± 0.76	5.2 ± 0.50 b	40.5 ± 7.1	30.3 ± 2.7
	female	12.5 ± 2.22	6.7 ± 1.67 ab	59.5 ± 23.2	34.4 ± 6.9
<i>R. sachalinensis</i>	male	14.8 ± 6.10	9.5 ± 4.06 a	142.2 ± 104.4	48.7 ± 21.9
	female	16.0 ± 3.35	10.5 ± 3.09 a	127.6 ± 79.3	44.9 ± 15.2

Species	Sexuality	Oblateness (L/W)	Intricateness (M ² /S)	Coefficient of cardioid (k)
<i>R. japonica</i>	male	2.22 ± 0.28 a	22.8 ± 1.35 a	0.34 ± 0.01 c
	female	1.90 ± 0.24 a	20.9 ± 1.88 ab	0.33 ± 0.00 c
<i>R. sachalinensis</i>	male	1.56 ± 0.12 b	19.1 ± 1.02 bc	0.54 ± 0.04 a
	female	1.56 ± 0.14 b	17.3 ± 1.81 c	0.41 ± 0.03 b

Mean ± standard deviation (n=6).

Defferent letters within a column donate significantly different means as determined by Tukey's HSD (p<0.05).

とに画像解析ソフト (Motic Images Plus 2.1S) を用いて葉面積 (S) と周囲長 (M) を計測し、扁平率 (L/W), 複雑度 (M²/S) を算出した。なお複雑度は、円の時最小値(4 = 12.57)となる。

4. 結果

葉形の調査結果は、表-2 のとおりである。種 (イタドリ, オオイタドリ) および雌雄 (雄株, 雌株) を要因とする 6 反復の 2 元配置実験と見なして分散分析を行なうと、葉のサイズ (葉長, 葉幅, 葉面積および周囲長) については種の効果のみがいずれも有意 (F 検定, $p < 0.05$) であった。ただし、とくにオオイタドリにおいてサンプル間のばらつきが大きかったため、平均値間に有意差 (Tukey の HSD, $p < 0.05$) が認められたのは葉幅のみであった。

葉形 (扁平率, 複雑度, およびカージオイドの係数 k) については、扁平率では種 ($p < 0.002$) と雌雄 ($p < 0.02$) の効果が有意であり、複雑度も種 ($p < 0.00002$) と雌雄 ($p < 0.01$) の効果が有意であった。一方、カージオイドの係数 k については、種 ($p < 0.0000005$), 雌雄 ($p < 0.00005$), およびその交互作用 ($p < 0.0001$) がいずれも有意となった。平均値の多重比較では、扁平度ではイタドリ (1.90 ~ 2.22) とオオイタドリ (1.56) との種間差のみが顕著で、複雑度ではオオイタドリ雌株 (17.3) ~ イタドリ雄株 (22.8) まで値が連続的に変化していた。一方、k では、イタドリは雄雌とも 0.33 ~ 0.34 (ほぼ切形), オオイタドリ雌株 0.41 (腎形), オオイタドリ雌株 0.54 (心形) と

のように、種間差だけでなく雌雄差も明確に検出することができた。

5. 考察

本研究では、カージオイド: $r = (1 - k) + k \cos \theta$ の係数 k による葉の基部形の数量化を用いることで、イタドリとオオイタドリの葉形の種間差および雌雄差を表現することができた。従来用いられている扁平率と複雑度は、種間差の表現にとどまっていた。扁平率と複雑度は、様々な形状のものが同じ値を取りうるもので、葉形と値とが 1:1 対応している点でも係数 k は優れている。これは、葉形を具現的な数値に置き換えることで、分散分析や回帰分析等の統計処理を適用でき、もっと単純には、葉形を順序尺度化してノンパラメトリック手法を適用することができることを意味している。

なお、葉形の順序尺度化については、表-1 から、k が 0 ~ 1 と変化するにつれ、円形 鈍形 切形 腎形 心形 浅心形 円形となる。円形が最初と最後に出てくることには注意が必要である。事前に調査対象種の葉を多く観察し、葉形が概ねどの範囲に分布しているかを確認した上で、円形を鈍形 ~ 切形につながる形か、浅心形につながる形と見做すかを定めるべきであろう。

本報では、1 自生地、サンプル数 6 ずつという小規模な調査であったため、表-2 の傾向がイタドリとオオイタドリの葉の形態を網羅したものとはいがたい。しかし、イタドリとオオイタドリで報告されている葉形の変異^{3, 6)}について、

様々な地域や標高帯で調査を行なうことで、係数 k の有効性が実証されていくものと期待される。

なお、カージオイドは人間の顔の年齢変化^{5, 10)}といった生物の成長現象や、単一指向性のアンテナやマイクロホンの受信特性⁴⁾のような物理現象に適用される曲線でもある。植物の葉の基部形の表現にも適用できることは、葉芽の成長や細胞分裂といった生理学的な背景が想起されるので興味深い。ただし、カージオイドでは表現できない葉の基部形(くさび形, 耳形など)もあることや、葉先側は何らかの表現を別途行なわなければならないことは、今後の検討課題である。

6. まとめ

本報では、植物のフィールド調査のための葉の基部形の数量化を目的とした。

(1) カージオイド(リマソン): $r = (1 - k) + k \cos \theta$ の特性を調べ、係数 k によって円形, 鈍形, 切形, 腎形, 心形までの基部形を表現できることを確認した。

(2) 係数 k をイタドリとオオイタドリの葉形解析に適用したところ、イタドリは雄雌とも 0.33 ~ 0.34(ほぼ切形), オオイタドリ雌株 0.41(腎形), オオイタドリ雌株 0.54(心形)というように、種間差と雌雄差が顕著であった。一方、葉のサイズと他の指標(扁平率, 複雑度)は、種間差を検出するにとどまった。

(3) カージオイドの係数 k は、画像解析を行なわなくとも葉形の統計処理や序列化を可能にする方法として期待される。

引用文献

- 1) Iwatsubo, Y., Kodate, G. and Naruhashi, N. (2004) Poliploidy of *Reynoutria japonica* var. *japonica* (Polygonaceae) in Japan. *Journal of Phytogeography and Taxonomy* 52: 137 - 142
- 2) 金井弘夫・八田洋章 (1993) 葉形の数値表現の基となる標本計測の必要数. 筑波実験植物園研究報告 12: 83 - 89
- 3) 加藤信重 (1980) オオイタドリ (*Polygonum sachalinense* Fr. Schum.) の葉形の変異について. 獨協大学教養諸学研究 15: 1 - 9
- 4) マグローヒル科学技術用語大辞典編集委員会編 (1996) マグローヒル化学技術用語大辞典 第3版. 日刊工業新聞社, 東京. pp. 280 - 281
- 5) Mark, L. and Todd, J. T. (1983) The perception of growth in three dimensions. *Perception & Psychophysics* 33: 193 - 196
- 6) 名取俊樹・清水 明 (1997) 画像解析法を用いた植物葉の形状分析手法: 生育高度の上昇に伴うイタドリ葉の円形化を例として. *日本生態学会誌* 47: 159 - 162
- 7) 大井次三郎 (1965) 改訂新版日本植物誌 顕花篇. 至文堂, 東京. 1560 pp.
- 8) 佐竹義輔・大井次三郎・北村四郎・巨理俊次・富成忠夫 (1999) 新装版日本の野生植物 草本 離弁花類. 平凡社, 東京. 318 pp.
- 9) 佃 勉 (1998) やさしい解説 趣味の数学 カーブズ. 現代工学社, 東京. 216 pp.
- 10) 山口真美・尾田政臣 (1997) 正面顔画像のカージオイド変換が年齢認知に及ぼす影響について. *電子情報通信学会論文誌 J80-A*: 1250 - 1259

(原稿受付 2010.2.26)