

植物の葉や花に見られる展開構造



研究ノート

小林 秀敏*

Deployable Structure Observed in Plant Leaves and Flowers

Key Words : mechanics, folding, unfolding, leaves, flowers

1. はじめに

春になり気温が上昇し始めると、木々の小枝に付いた硬い蕾がほころび、中から小さく折畳まれた葉が顔を出し、初夏には十数倍の大きさの葉（成葉）に成長する。葉は、蕾内部の狭隘さ故に、蕾内部では成葉とは異なった姿勢で収納されており、様々な折畳み様式が観察できる。例えば、図1(a)に示すイヌシデの葉^[1]は規則正しく波板状に折畳まれているし、盛夏の朝を彩るアサガオの花^[2]は、美しい旋構造の中に薄い5枚の花弁が巻込まれており（図1(b)）、また春から秋の長い開花時期を持つペチュニアの花^[3]は、和綴じの本のように折畳まれている（図1(c)）。このような自然界の折り畳み構造に秘められた工夫や特徴について植物生理学的視点ばかりでなく工学的・力学的視点から研究することは、人工衛星の太陽電池パネルなどの宇宙展開構造物^[4]の設計や、テントや衣服の効率的な収納様式の研究に、有益なヒントを与えるものと考えられる。ここでは、これまでに行った植物の葉や花の展開構造に関する研究の一部を紹介する。



図1 植物に見られる収納・展開様式の例：
(a)イヌシデの葉、(b)アサガオの花の蕾、
(c)ペチュニアの花の蕾

2. 波板状に折畳まれた葉の展開

ブナやイヌシデの葉^[1]は、単葉で羽状脈系を持ち、

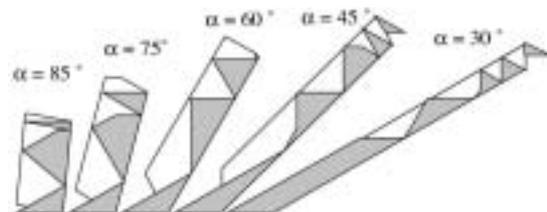
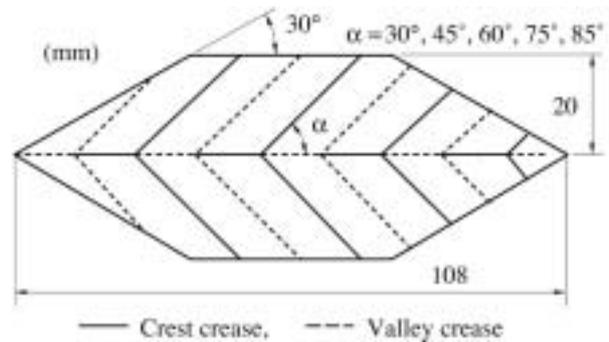


図2 波板状の展開様式を示す葉のペーパーモデル：
(a)形状と折線位置、
(b)折畳み時の葉身モデルの形状



*Hidetoshi KOBAYASHI

1954年7月生
京都大学大学院工学研究科航空工学専攻
修士課程修了(1980年修了)
現在、大阪大学・大学院基礎工学研究科
機能創成専攻、教授、PhD(英国Reading
大学)、材料力学(衝撃問題、植物のバイ
オミメティックス)
TEL: 06-6850-6200
FAX: 06-6850-6204
E-mail: hkoba@me.es.osaka-u.ac.jp

比較的規則正しくコルゲート状(波板状)に折り畳まれている。このような葉について、図2に示すような山折線・谷折線を交互に配したペーパーモデルを用いて、二次脈の中央脈に対する角度(葉脈角)と折り畳み・展開様式の関係について考察した。 $\alpha = 30^\circ \sim 85^\circ$ の範囲の5つの異なる葉脈角を持つ同一形状の葉身モデルについて、それらの折り畳み時の形状を図2(b)に示す。この図から、 α が小さいモデルは、折り畳み時に細長い形状となるが、 α が大きくなるにつれてよりコンパクトに折り畳め、 α が大きい方が折り畳み構造としては優れていると考えられる。

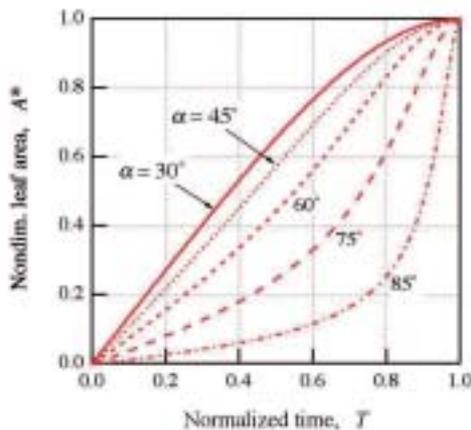


図3 展開時の葉身面積の変化

この葉身モデルの谷折線、山折線に沿う空間ベクトルを考え、葉身が完全に折り畳まれた状態から完全に展開し平面になるまでの各折線位置をベクトル解析により求めた。図3は、解析結果から計算した展開時の投影葉身面積の折り畳み時($T=0$)から完全展開時($T=1$)までの時間的变化を示している。この図から、 $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ の α が小さいモデルの葉身面積は、展開するにつれてほぼ直線的に増加するのに対し、 $\alpha = 75^\circ, 85^\circ$ の α が大きいモデルの葉身面積は、展開初期にはほとんど増加せず後半に急激に増加することがわかる。植物は光合成により養分を生産しているから、植物にとっては、比較的早くから広い葉身面積を確保できる α が小さいモデルの方が有利である。実際、ブナやイヌシデの葉に採用されている葉脈角は概ね $30^\circ \sim 50^\circ$ であり、植物には、生長というサイズ拡大の方法があることから、展開構造という側面から考えると、小さく収納することよりも早期に葉身面積を確保することを重視した選択をしていると考えられる。

図4は、ブナやイヌシデと同様の波板状の折り畳み様式を持つウダイカンバの葉^[5]の、吸水成長による中央脈の長さの変化を示している。サンプルAの葉に見られるように初期の成長速度は極めて遅いが、ある時期を超えるとほぼ直線的に成長している。このような中央脈の成長様式に関して、同様の葉身モデルを用いた数値解析から、展開時のエネルギー消費を一定に保ちながら成長するとき、展開に要する総エネルギーが最小になることが分かった。そして、図4に示されたウダイカンバの葉の成長様式は、まさにエネルギー消費をほぼ一定で成長する場合に相当し、植物が効率的にエネルギーを消費しながら葉身を展開していることが明らかになった。

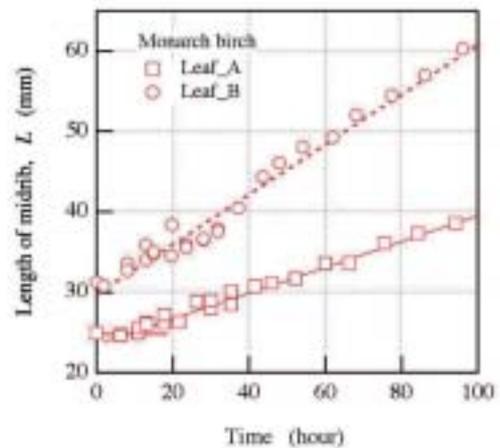


図4 ウダイカンバの葉の中央脈の生長

3. 合弁花の展開

花(花冠)の展開構造の一例として、アサガオの花弁の展開^[2]について述べる。アサガオの花の蕾は、図1(b)のように紡錘型で、周囲の白い螺旋模様(花弁軸)が緩んだ後、その隙間から花弁が滑り出てきて、概ね4~6時間でラッパ状の花になる。図5は、展開時のアサガオの花の展開半径(花を正面から見た時の外接円の無次元半径)の変化を示している。この図から、展開初期はゆっくりした展開で、次第に加速して中期が最も速く、後期になると再び遅くなるS字カーブを描くことがわかる。このような曲線はロジスティック曲線と呼ばれ、植物細胞の生長^[6]の表記に用いられている。

アサガオの花弁は図6に示すように通常5枚で、蕾の中では、花弁軸間の扇形の花弁部が2つ折にさ

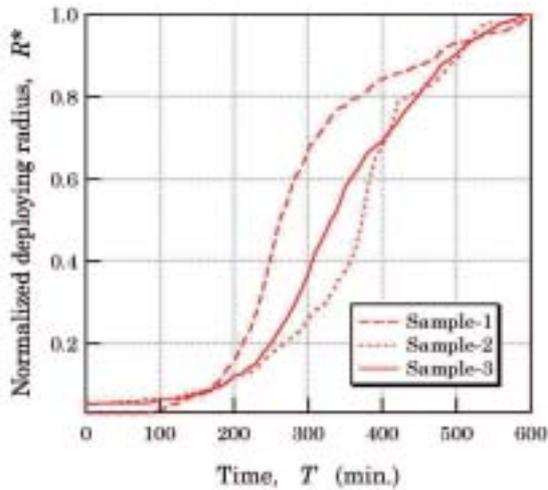


図5 アサガオの花冠の展開半径の変化

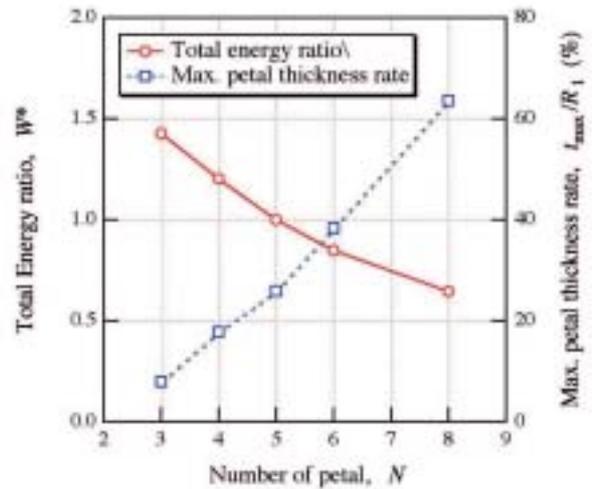


図7 アサガオの花冠の総展開エネルギーと最大花弁巻込み厚さ

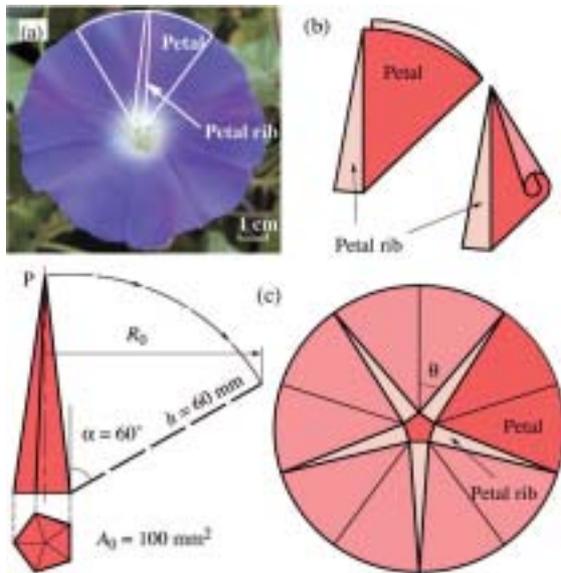


図6 アサガオの花冠と展開モデル：
(a)花冠，(b)花弁の巻込み様式，
(c)花弁展開モデル

れ、花弁軸の先端を頂点とする円錐を形作るように蕾の中に巻き込まれている。そこで、図6(c)に示すように、蕾の上部円錐部(展開する部分)を正多角錐でモデル化し、多角錐の底辺の辺数、すなわち花弁数 N が $N=3, 4, 5, 6, 8$ の花弁展開モデルを作成し、花弁の巻込み面積に着目して、花弁数の異なる場合の花弁の折畳み・展開特性を調べた。図7に、総展開エネルギー W と、蕾時の重なりながら巻き込まれた収納状態での最大花弁厚さ t_{max} を、花弁数 N に対して示す。この図から、花弁数が大きいモデルは、展開時、花弁の巻込み収納からの開放が早く、それだけ展開に要するエネルギーが少なくなるが、

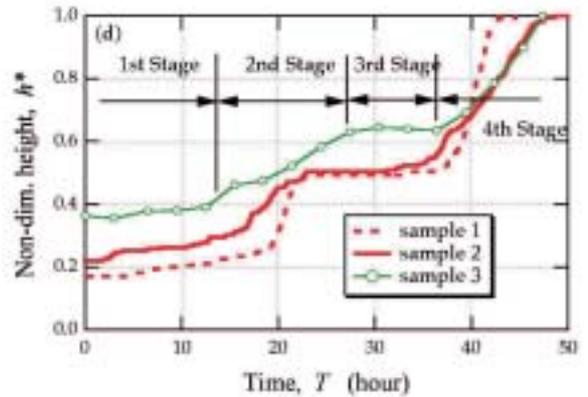


図8 ペチュニアの花冠の展開と花冠高さの変化

最大巻込み花弁厚さは、花弁数 N の増大とともに急激に大きくなり、 $N=8$ では、蕾内の花弁の重なり厚さが蕾断面の最大半径の半分以上に達し、蕾先端では紡錘型を維持できなくなることがわかる。このことから、狭い蕾の中に収納できて、なるべく展開エネルギーが少なくなる5枚の花弁数は、実際のアサガオの蕾・花冠形状から考察する限り、至極妥当な選択であると思われる。

最後に、ペチュニアの花冠の特異な展開様式^[3]について述べる。ペチュニアは、図8に示すようにアサガオ同様、5枚の花弁を持つ合弁花であるが、アサガオのように蕾内部に花弁を巻込む収納様式を

採用していない。ペチュニアの花弁は、図1(c)に示すように和綴じの本のように巧みに折畳まれており、その展開は、まずページを開く様に展開した後、一気に外側に向かって進行する(図8(a)~(c))。展開を表わすパラメーターとして花冠の高さ h (図8(c))を採用し、図8(d)に h の展開時の変化を示す。この図から明らかなように、ペチュニアの花冠は、アサガオのように連続的に一気に展開せず、ステージ2,4の間に約10時間の展開休止期間が存在する。この展開休止期間は、季節によって多少異なるが概ね日の当たらない夜間に対応しており、2日間かけて展開することがわかる。初日のステージ1,2は和綴じ折からの花弁の解放段階であり、2日目のステージ4では、日出とともに細胞の吸水成長により花弁サイズの拡大と花弁の展開が一気に行われる。花冠の形態や花弁数が同じであっても、種によって採用している花弁の収納・展開戦略が異なっていることは、大変興味深い。

4. おわりに

植物の折畳み・展開構造に隠された自然が織りなす巧妙な工夫は無限にあり、この分野の研究はまだ

始まったばかりである。これから、それら一つ一つが解明され、新しい折畳み・展開構造の創造に繋げる試みがなされていけばと期待している。

参考文献

- [1] H. Kobayashi, et al. : "The geometry of unfolding tree leaves", Proc. Roy. Soc. Lond. B, 265 (1998) 147-154.
- [2] H. Kobayashi, et al. : "Unfolding of morning glory flower as a deployable structure", Solid Mech. and Its Appl., 106 (2003) 207-216.
- [3] H. Kobayashi, et al. : "Unfolding of Petunia Flower from Mechanical Viewpoint", Abstract of 5th World Congress of Biomechanics, 29 July - 4 August, Munich, Germany, (2006) pp.63.
- [4] K. Miura and M. Natori : "2-D Array Experiment on Board a Space Flyer Unit", Space Solar Power Review, 5, (1985) 345-356.
- [5] 小林ほか2名 : 波板上に折畳まれた樹の葉の展開様式と成長・展開速度, 日本機械学会論文集 A, 68, (2002) 1607-1613.
- [6] 山本良一 : 植物細胞の生長, 培風館, (1999), 17.

