

# 植物の回転角の規則性

4年B組 山田 莉彩  
指導教諭 櫻井 昭

## 1. 要約

これまで、私は植物の形態にみられる数学的な規則性について研究してきた。前回の研究から、セイタカアワダチソウの葉序の回転角は黄金角ではなくフィボナッチ数列に関する葉序の回転角であると結論付けた。しかし本研究の計測によって、黄金角ともフィボナッチ数列に関する葉序とも近似していないことが判明した。また、顕微鏡を使い維管束の配列を観察することによって葉序の回転角を導き出した結果、フィボナッチ数列の葉序になり、これは角度の計測で予想されていたものより黄金角に近似した値となった。さらに、文献調査により発見された葉序の回転角についての仮説を考察した。

キーワード 黄金角、セイタカアワダチソウ、葉序、維管束

## 2. 研究の背景と目的

私は、共同研究者とともに黄金比やフィボナッチ数列などの数学的な規則性が、植物の形態に見ることができるということを本で知り、興味を抱いた。そこで、植物に対して実際にどのように利用されているのか、自分の手で確認することとした。

「セイタカアワダチソウの葉の付き方（葉序）の回転角に黄金角がみられるのではないか」ということを検証するため、3年間で4回にわたり計測を続けてきた。その結果、以下の考察を得ることができた。

セイタカアワダチソウの葉序は、葉の原基が発生した瞬間はもともと黄金角だった。しかし、黄金角からずれ、セイタカアワダチソウの葉序の配列は、5/13葉序（13枚の葉が茎を中心として5回転すると、14枚目が1枚目の葉に重なる葉のつき方）に近似した。

この考察を踏まえ、セイタカアワダチソウの葉序の回転角を、より精密に調べるため ImageJ という画像処理ソフトを用いて再度計測を行い、新たなアプローチで規則性を発見できないか試みることにした。また、葉の原基が発生する原理に関する先行研究を調査し、本研究の考察を深めていこうと考えた。

## 3. 研究内容

### 3.1 基本事項

#### ●黄金比・黄金角

黄金比  $1:\phi$  は、人類が最も美しいと感じる比率であるとされている。例として、パルテノン神殿や、さまざまな絵画などの長方形の縦横の比率に使われている。この黄金比は、自然界によく見られる値である。その比は

$$1:\phi = 1:\frac{1+\sqrt{5}}{2}$$

で表すことができる。

黄金角とは、円周  $360^\circ$  を  $1:\phi$  に分けた角度の 1 に当たる部分のことで、約  $137.5^\circ$  になる (図 1)。

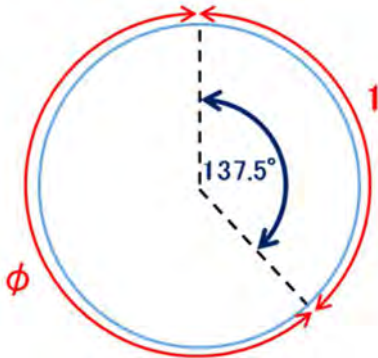


図 1 黄金比と黄金角の関係

### ●フィボナッチ数列に関する葉序

葉序の配列には、フィボナッチ数列に出現する数によって成り立っているパターンが存在する。例として、 $1/2$  葉序、 $1/3$  葉序、 $2/5$  葉序、 $3/8$  葉序、 $5/13$  葉序などがあげられる。本研究では以前、セイタカアワダチソウの葉と葉の間の角度は 13 枚の葉が 5 回転すると 14 枚目が 1 枚目の葉に重なるという  $5/13$  葉序 (図 2) に近似していると結論付けた。このときの回転角は  $138.5^\circ$  であった。

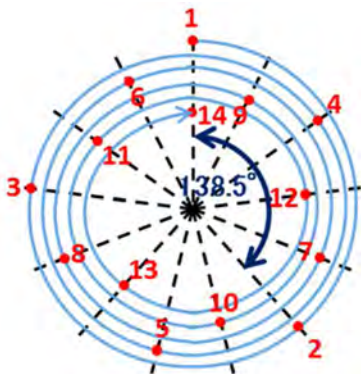


図 2  $5/13$  葉序の回転の周期

## 3. 2 実験 1 : 葉と葉の間の角度の計測

### 3.2.1 目的

基本事項を踏まえ、葉の回転角には黄金比が適していると考えたため、それを画像処理ソフト ImageJ によってより正確に計測を行い検証する。

### 3.2.2 仮説

セイタカアワダチソウの茎に対する葉のつき方は、黄金角に従っている。

### 3.2.3 材料・方法

<標本>

平城宮跡のセイタカアワダチソウを採集  
時期：2015 年 5 月～9 月 31 本

<方法>

セイタカアワダチソウを採取し、葉の付け根を残して葉を切る。その後、1 つ目と 2 つ目の付け根に、針を葉の中心に沿うように刺す。次に、茎の真上から写真撮影を行う。以上の操作を、全ての葉の付け根に対して繰り返す (図 3)。撮影した写真を使って、葉と葉の間の角を計測する。以前は分度器で計測していたが、今回は正確性と速度を重視し ImageJ という画像処理ソフトを使用した。

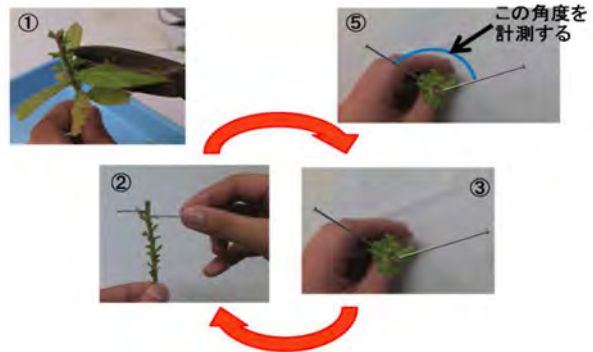
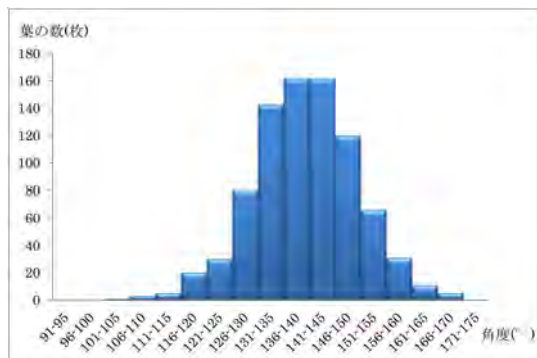


図 3 実験手順

### 3.2.4 実験結果

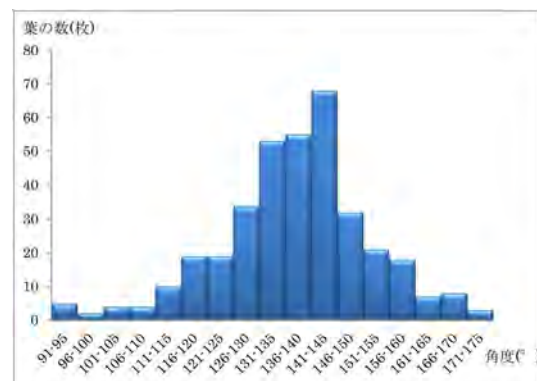
以下のグラフは、縦軸は調べた葉と葉の間の数、横軸は角度を表している。



平均値 139.227° 中央値 139.212°  
標準偏差 9.934

### 3.2.5 考察

前回の計測結果



平均値 138.1° 中央値 140°

前回と比較して、今回は散らばりが少なくなった。また、131° ~ 135°、136° ~ 140° と 141° ~ 145° の3つが特に葉と葉の間の角度として多いことがわかる。平均値・中央値ともに黄金角 137.5° や 5/13 葉序の 138.5° に正確に近似しているとは言えない結果であった。しかし、平均値と中央値は近い値となった。1 個体あたりの平均値・中央値を計測すると、どれも黄金角 137.5° や、フィボナッチ数列に関する葉序

の回転角（黄金角に収束していく）が含まれる 135° ~ 141° の範囲に収まった。そのため、セイタカアワダチソウの葉の回転角は、その範囲内（135° ~ 141°）の回転角をもってついていくと考えられる。黄金角とは、植物体を茎頂から見たときに葉ができるだけ重ならないように配置できる角度である。よって計測結果から、セイタカアワダチソウの葉のつき方は、黄金角やフィボナッチ数列に関する葉序の回転角に近い回転角をとることで、葉が意図的に重なりにくく配置されていると考えられる。

## 3.3 実験2：維管束の観察

### 3.3.1 目的

実験1において、葉の位置は風や日光といった環境要因に大きく左右されるため、葉の間の角度を測る際に誤差が生じやすいという問題が発生した。この問題を解決するため、私は維管束という組織に着目した。セイタカアワダチソウのような双子葉類の植物には、道管と師管がまとめられた維管束という組織が茎の中に分布している。この維管束はどの葉にも1本ずつつながり、水分や養分を植物の体全体へ運んでいる。維管束の位置は外部環境によって左右されにくいと思われる。ゆえに、維管束の間の角を測ることで、葉の間の角度を直接計測するより正確に葉序の回転角を測定することができると考えた。そこで、セイタカアワダチソウの茎の断面を観察し、連続する葉に対応する維管束2つと全体の維管束の数から大まかな回転角を算出する。

### 3.3.2 仮定

この実験における維管束の数から回転角

を算出するにあたって、セイタカアワダチソウの維管束は以下の 5 つを満たしていると仮定した。

- ①維管束は茎の付け根から茎の頂上まで必ず同じ本数になっている。
- ②1 枚の葉につながる維管束の本数はどの葉でも一定で、3 本である。
- ③連続する葉に対応する維管束の、3 つある維管束のうち中央に位置する 1 本を、その葉に対応する維管束とする。
- ④1 つの維管束を点とみなし、点が円周上全体に等間隔に並んでいると考える。
- ⑤連続する葉に対応する維管束（点）の距離の比を間の維管束の個数から算出し、回転角とみなす。

今回の観察により、②の仮定は図 5 および図 6 で実証された。図 5 は図 4 における A で切った断面であり、図 6 は B で切った断面である。図 6 では、赤で囲まれた維管束が同心円状に並ぶ他の維管束と離れた位置にあるため、これは直前の葉に繋がっていた維管束であったということがわかる。図 5, 6 から、葉には始めは 3 本の維管束が分布しているということがわかる。

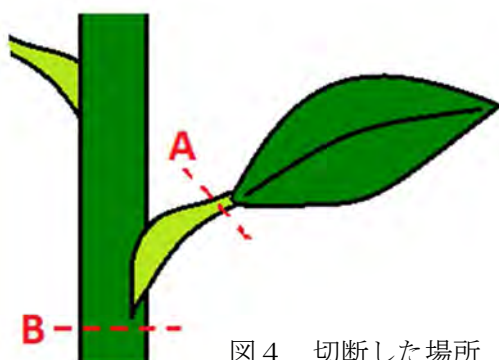


図 4 切断した場所



図 5 断面 A における切片

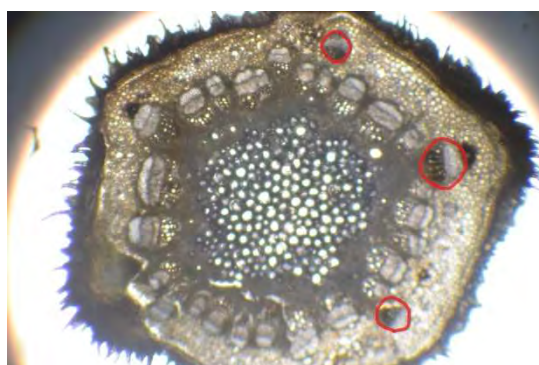


図 6 断面 B における切片

### 3.3.3 仮説

連続する 2 枚の葉に対応する維管束の間の角の理論値は黄金角に近似する。

### 3.3.4 材料・方法

<標本>

平城宮跡のセイタカアワダチソウ

<方法>

茎に対して横方向にカミソリで薄くスライスする。このように作成した横断切片を水で封入し、プレパラートを作製する。このプレパラートを光学顕微鏡に取り付けたカメラで撮影し、切片画像を得る。その後、切片画像から全体の維管束の数を数え、連続するにそれぞれつながる維管束同士の間を維管束を数える。



### 3.3.5 実験結果

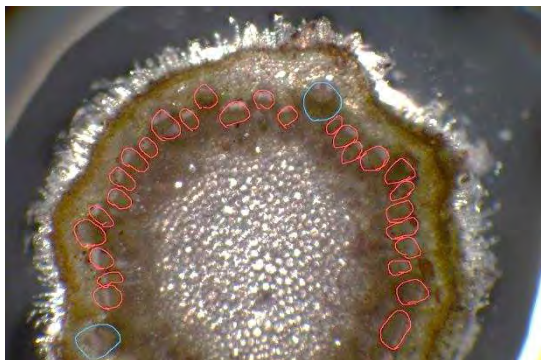


図7 切片(1)

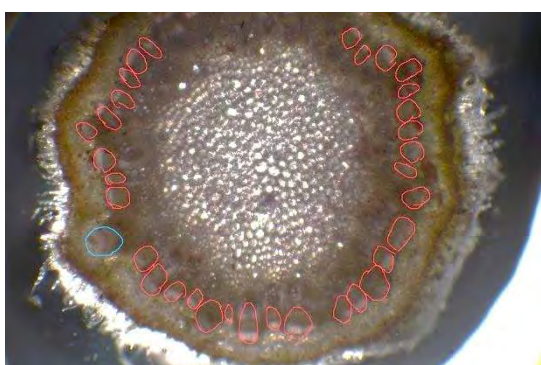


図8 切片(2)

図7, 8は同じ切片を撮影した写真である。赤い丸で囲まれたものが維管束で、青い丸で囲まれたものが葉につながっていた維管束である(葉につながっていた維管束は隣り合う葉の間を何枚かに分けてスライスし、導き出したものであるため、撮影された切片は直接葉とつながっている場所ではない)。この写真から、全体の維管束の数は42個、劣弧上にある維管束の数は15個、優弧上にある維管束の数は25個なので、距離の比は16:26=8:13となる(図9)。

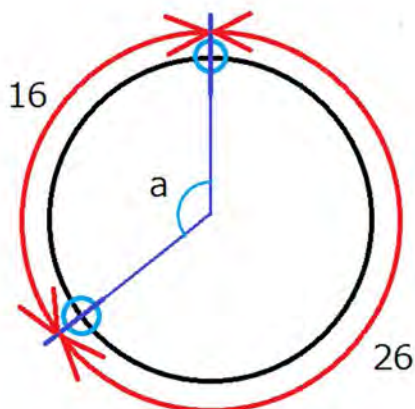


図9 連続する維管束の間の角

以上より回転角は、

$$\angle a = 360^\circ \times \frac{16}{42} = 137.143\dots^\circ$$

と算出された。

### 3.3.6 考察

実験結果より求められた回転角は黄金比に近似する。また、それだけでなく、劣弧と優弧の比が8:13であり、この回転角がフィボナッチ数列に関する葉序である8/21葉序のものであることもわかった。しかし維管束の総数や連続する葉同士間の維管束の数は個体や取り出す葉と葉の間によっても異なるため、一概に8/21葉序と決定することはできない。今後は標本数を増やし、他の双子葉類も観察してこの仮説が正しいか引き続き検証を続けていきたい。

## 4. 考察

研究の成果として、セイタカアワダチソウの葉序の回転角は黄金角に近い値をとることがわかったが、黄金角に一致するという結果は得ることができなかった。現在、葉序の回転角が決定される仕組みと

して、近藤滋が植物の成長ホルモンに着目した説を唱えている。彼の仮説では、シートでの葉の原基の形成は植物ホルモンの濃度勾配によることを根幹としている。彼は、植物の回転の角度は常に一定であり、植物ホルモンによる原基発生の阻害効果は発生源（葉の原基）からの距離に反比例すると仮定した。その上で、彼はその植物ホルモンの濃度勾配が葉の原基を黄金角にして発生させていると唱えている。この仮説から、植物は葉の発生の段階では黄金角の構造を取っていると考えられる。

一方、実験1（直接葉と葉の間の角の計測）の結果から、葉と葉の間の角度は黄金比に近似しないという結論が出た。植物が日光をできるだけたくさん受け、効率よく光合成をおこなうために黄金角を回転角に設定しているとすれば、葉が発生する瞬間ではなく葉が日光を実際に受けるときの形態から計測した方がより目的に適していると考えたため、この方法を選んだ。ゆえに近藤滋の仮説と実験1から、発生の段階では黄金角にプログラムされていた葉序が、環境によって影響を受けることで葉序の回転角は黄金角からずれていったのではないかと考えられる。

実験2では、植物の維管束に着目した。維管束という組織は、シダ植物および種子植物のみに見られる構造である。フィボナッチ数列に関する葉序をもつ植物は、すべてこの植物に該当し、維管束の構造がみられる。植物は、茎頂分裂組織、根端分裂組織、側部分裂組織という3種類の分裂組織が分裂していくことで生長する。茎頂分裂組織は、葉の原基が発生する場所で、根端分裂組織は、根の伸長する場所である。ま

た側部分裂組織とは、維管束植物のいわゆる形成層のことを指す。維管束は（特にセイタカアワダチソウを含む被子植物において）一次成長で茎頂分裂組織の細胞分裂によって発生し、二次成長で側部分裂組織の細胞分裂によって成長する。そして、近藤滋の仮説は茎頂分裂組織において葉序の角が黄金角になっているというものであった。これらを踏まえ、維管束は茎頂分裂組織から発生するから、実験2において維管束から導き出した葉序の回転角は黄金角に近似したため、本研究は彼の仮説を裏付けていると考えられる。

ただし、二次成長での側部分裂組織の細胞分裂によって、一次成長で形成された維管束の数から維管束の数が増えたということも考えられる。事実、今回の実験2において、写真から維管束は茎の上から下まで常にすべて同じ本数でないことがわかっている。また、個体によって維管束の数が違い、茎が太い個体ほど維管束の数が多かったことから、おそらく二次成長での側部分裂組織で維管束が増えるような何らかの現象が起きていると思われる。今後は実験2をさらに発展させることで、この疑問を解決していきたい。また、実験1と実験2での結果の整合性についてもさらに考察を深めたいと考えている。

維管束植物について調べていると、化石植物の中には維管束が1本しかないものがあるということがわかった。維管束の構造は進化によって獲得していったものであるから、仮に維管束の数が進化の過程で増えると考えれば、維管束が増えることでその分だけ葉序の回転角のバリエーションも増えることになる。もしこれが正しいとすれ

ば、維管束の数という側面からみても、日光の効率的な傍受に最適な角度である黄金角に進化の過程で近づいていっているといえるかもしれない。

## 5. 今後の展望

今後も、維管束による回転角の算出を続けていきたい。また、維管束による回転角測定法は、維管束が同心円状にならんでいる双子葉類の植物ならば同様に算出できるため、ハウセンカなど維管束が観察しやすい他の植物の回転角についても調べていきたいと思う。

維管束を顕微鏡観察する方法は植物の断面の切片をできるだけ薄くスライスしなければならない。加えて隣り合う葉の回転角を求めるには、葉と葉の間の茎を等間隔に20枚以上切片を切る。そして隣り合う葉につながっている維管束が最終的にどれなのか追わなければならない。この作業は非常に時間と労力を要し、データを大量に集めるには効率が悪い。ゆえに、この実験方法の簡素化・効率化を目指したいと思っている。

またそもそも、維管束からの回転角測定には3節で述べたように、

- ①維管束は茎の付け根から茎の頂上まで必ず同じ本数になっている。
- ②1枚の葉につながる維管束の本数はどの葉でも一定で、3本である。
- ③連続する葉に対応する維管束の、3つある維管束のうち中央に位置する1本を、その葉に対応する維管束とする。
- ④1つの維管束を点とみなし、点が円周上全体に等間隔に並んでいると考える。
- ⑤連続する葉に対応する維管束（点）の

距離の比を間の維管束の個数から算出し、回転角とみなす。

の5つの仮定を満たしているという前提で議論および実験を進めている。

特に仮定①は、1本の維管束が2本に分岐したり、2本の維管束が1本に統合されたりすることもあり、すべての個体に当てはまるわけではない。ゆえに、この仮定が妥当であるか精査しなければならない。これを調べた上で、維管束の本数が何の要素によって決まるのか研究していきたい。

さらに、考察で説明した近藤滋氏の説についても引き続き研究し考察を続けたい。この仮説が正しいか証明するには、まずシュートのメリステムから発生している物質が原基の出現を促進する物質であるのか、阻害する物質であるのか、また具体的にどのような物質であるのかを解明しなくてはならない。また、実際に植物のシュートでの原基の発生の状態を疑似的に再現できれば、この学説が正しいことが証明できるだろう。

まとめると、

- 維管束による回転角の算出
- 実験方法の簡素化・効率化
- 実験の仮定の妥当性の確認
- 学説への数学的・生物学的考察

の4点が今後の主な課題である。

## 6. 参考文献

- [1] ImageJ - RSB Home Page  
<http://imagej.nih.gov/ij/>
- [2] S.Douady, Y.Couder, Phyllotaxis as a Physical Self-Organized Growth Process (1991)

- [3] 「波紋と螺旋とフィボナッチ： 数理の眼鏡でみえてくる生命の形の神秘」、近藤滋、学研メディカル秀潤社(2013)
- [4] こんどうしげるの生命科学の明日はどっちだ 第14回:全ての植物をフィボナッチの呪いから救い出す
- <http://www.fbs.osaka-u.ac.jp/labs/skondo/saibokogaku/fibonacchi.html>

## 7. 謝辞

これまで私を指導してくださった櫻井先生、また同じ研究班で私の研究に協力してくださった出水明日香さんに、深く感謝の意を表します。