

A Figurative Study on Multiplex Spirals in a Pine Cone : Biomimicry Practice for Architectural Design

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2016-12-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 伊藤, 泰彦 メールアドレス: 所属:
URL	https://mu.repo.nii.ac.jp/records/330

松かさにみる多重螺旋の平面構成に関する考察

—空間デザインのバイオ・ミミクリ的試行—

A Figurative Study on Multiplex Spirals in a Pine Cone
—Biomimicry Practice for Architectural Design—

伊 藤 泰 彦*
Yasuhiko Ito

1 はじめに

人類は、自然界の事物を観察し、古くから自らの創造物の模範としてきた。人間の身体と空間の寸法を例にすると、マルクス・ウィトルウィウス・ポリオの「建築十書」、レオナルド・ダ・ヴィンチの「ウィトルウィウスの人体比例図」、レオン・バッティスタ・アルベルティの「建築論」、ル・コルビュジェの「モデュロール」のように、古代から近世そして近代へと続く象徴的な軌跡があり、今なお大きなテーマである。自然と芸術の形の関連性について、フランスの美術史家ルネ・ユイグによる著書「かたちと力ー原子からレンブラントへ」(1988, 潮出版社、原著「Formes et Forces」1971)は特筆すべきものである。ユイグは、自然と芸術作品の領域に橋を架け、類似する形態のパターンを論述した。

近年、工学・産業界で注目される「バイオ・ミミクリ (Biomimicry)」という言葉がある。バイオ (Bio) すなわち生物、ミミクリ (Mimicry) すなわち模倣という2つの単語を組み合わせた造語であり、1997年に生物学者ジャンニ・ベニウスが著書「Biomimicry: Innovation Inspired by Nature」で提唱した。ここでの模倣は、単なる擬態ではない。生物が有する機能から、デザインプロセスとゴールの糸口を得ることが特徴である。産業界では、自浄能力のある蓮の葉を応用した建物外壁の開発、オウム貝の螺旋を用いた扇風機の羽根のデザイン、アワビの貝殻の合成プロセスに基づく高硬度セラミックス (バイオミネラル化) の研究など、技術的な開発に成果がある。建築家・菊竹清訓の「か・かた・かたち」理論の言葉を借りると、機能に着目した技術開発は「か」から「かた」そして「かたち」へと至るデザインの過程である。その前段として生物の「かたち」の中に「かた」を読み取る過程を据える点に、バイオ・ミミクリの特徴がある。

本稿筆者は、2009年度より武蔵野大学環境学部環境学科住環境専攻・都市環境専攻の授業「環境プロジェクト特別演習 “さんぽ de HÜTTE”」および「環境プロジェクト成果報告」で、自然の造形を題材とした空間デザインに取り組んでいる。本稿では、松かさ鱗片の構成を幾何学的に読み解き、固有の空間造形を生みだそうという試みを紹介する。松かさの「かたち」の中の「かた」を考察し、「か」から「かたち」をつくり出す、1つの活動報告である。

* 准教授

2 松かさの鱗片構成の特徴

本節では、松かさの鱗片の構成を幾何学的に考察する。松かさとは、鱗片の隙間に種子を包み込む松の毬果、いわゆる松ぼっくりのことである。なお、筆者自身は生物学が専門領域ではない。先に述べた演習授業のカリキュラムの目的の1つに観察力の育成を掲げており、知識に縛られないよう極力専門書などの資料から情報を得ることを避け、本授業を進行した。

重ねて記すと本稿は活動報告である。本節では、「かたち」から「かた」を読み取るプロセスを扱うため、時系列で記す。

2.1 松かさの中の多重螺旋

2009年4月、1人の学生が松かさを持ってきた。鱗片の構成に、5重螺旋と8重螺旋が読み取った。下図は、アカマツの松かさである。図1は、軸から放射状に広がる5重の螺旋の1つにマーキングしたものである。また、図2は8重螺旋の1つを示している。このように、5重と8重の螺旋を、1つの松かさから読み取ることができ、この2つの螺旋は逆方向の回転となることを確認した。

2010年度の授業・環境プロジェクト特別演習(1・2・3年、履修者計26名)では、学生をクモの網班と松かさ班の2つのグループに分け、形の法則性を考察することとした。後者のグループは、様々な樹種の松かさを集め、採寸したり分解したり鱗片の構成を記録した。全ての松かさに5重の螺旋、その多くに8重の螺旋が存在すると学生たちは気づく。また、カラマツの小さな松かさの中に3重螺旋、ダイオウショウの大きな松かさの中に13重螺旋を指摘する者もいた。

この時期、松同様に裸子植物の毬果についても鱗片の構成を見るようになる。ある毬果は、2つの鱗片が十字を成す対生の構成であった。植物学者・三木茂の研究を知り、この毬果はメタセコイヤのものと推察している。なお筆者は、現時点で対生の構成をもつ松かさには出会っていない。

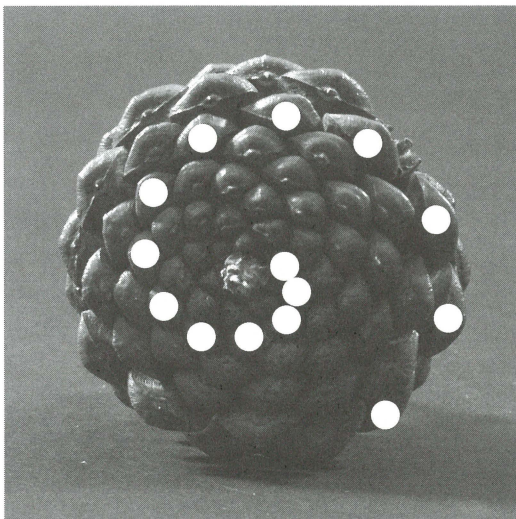


図1 アカマツ毬果の5重螺旋

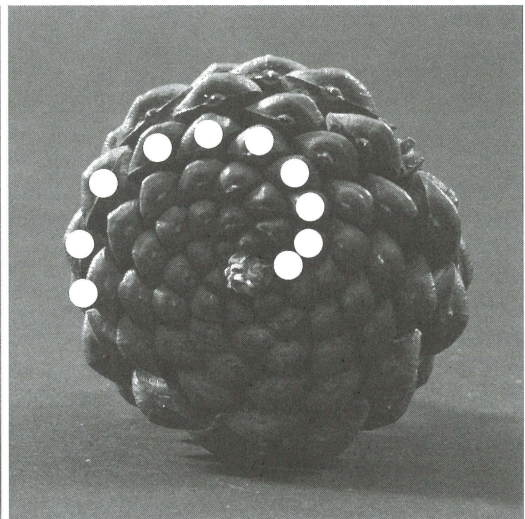


図2 アカマツ毬果の8重螺旋

2.2 多重螺旋の平面構成作図法

前述の螺旋の数を並べると3, 5, 8, 13となり、 $3+5=8$ 、 $5+8=13$ の式が成り立つ。これを数列の一部とみなすと、 $A_{n-2}+A_{n-1}=A_n$ で表される。すなわち、フィボナッチ数列である。ここで、松かさの鱗片を点に置き換え、構成パターンの作図に取り組む。まずは、平面上に作図することとした。作業を進める中で、2つの仮説を立てた。1つは「1種類の螺旋の構成が、5重と8重の螺旋を形づくる」という仮説、もう1つは「松かさの鱗片の構成には、フィボナッチ数すべての多重螺旋が内在する」という仮説である。なお、植物の形にフィボナッチ数の多重螺旋が読み取れることは、高等学校の教科書（「高等学校新数学B」出版社：啓林館）にも掲載があると、のちに知る。

便宜上、平面に同一ピッチの同心円を描き、中央部から外側へと点をプロットすることとした。手順を詳述すると、内側の円周状に点を記す。次に、円の中心からその点までの線を引き、それと固有の回転角度を成す点を、一回り外側の円に記す。この作業を順次繰り返す。これらの点を結ぶと、1重のアルキメデスの螺旋となる。

ここでは、回転角度の設定が課題となる。試行錯誤の後、円すなわち 360° をフィボナッチ数で分割することとした。図3は、フィボナッチ数列 A_n （ $n = 5, 8, 13, 21$ ）を用いて、回転角度 $(A_{n-2} / A_n) \times 360^\circ$ とした点の平面構成を示している。

作図の手順から、これら点の構成は先に記した通り、1重のアルキメデス螺旋である。また図3下欄に示す通り、2/5回転の点の構成は2重3重の螺旋、3/8回転の点の構成は2重3重5重の螺旋、5/13回転の点の構成は2重3重5重8重の螺旋、8/21回転の点の構成は2重3重5重8重13重の螺旋を形成する。また、これら1重2重3重5重8重13重の螺旋は、フィボナッチ数列という隣り合う項どうし、逆回転となった。

ここで、回転角度 $(A_{n-2} / A_n) \times 360^\circ$ の A_n すなわちフィボナッチ数列の項を大きくするほど、構成する多重螺旋の種類が増え、またその多重螺旋はフィボナッチ数を示すことが予想される。そこで、円を分割するフィボナッチ数列の項を増やした場合の、回転角度 $(A_{n-2} / A_n) \times 360^\circ$ について、表1の回転角度の試算を行った。その結果、 137.507764° （有効桁数：小数点以下6桁）という回転角度に収束することが分かった。

表1 フィボナッチ数を用いた回転角度の試算

A_{n-2}	A_n 分割数	円周率 ($^\circ$)	回転角度($^\circ$) $360 \times (A_{n-2} / A_n)$
	0	360	
	1	360	
0	1	360	
1	2	360	180.000000
1	3	360	120.000000
2	5	360	144.000000
3	8	360	135.000000
5	13	360	138.461538
8	21	360	137.142857
13	34	360	137.647059
21	55	360	137.454545
34	89	360	137.528090
55	144	360	137.500000
89	233	360	137.510730
144	377	360	137.506631
233	610	360	137.508197
377	987	360	137.507599
610	1,597	360	137.507827
987	2,584	360	137.507740
1,597	4,181	360	137.507773
2,584	6,765	360	137.507761
4,181	10,946	360	137.507765
6,765	17,711	360	137.507764
10,946	28,657	360	137.507764
17,711	46,368	360	137.507764
28,657	75,025	360	137.507764
46,368	121,393	360	137.507764
75,025	196,418	360	137.507764
121,393	317,811	360	137.507764
196,418	514,229	360	137.507764
317,811	832,040	360	137.507764

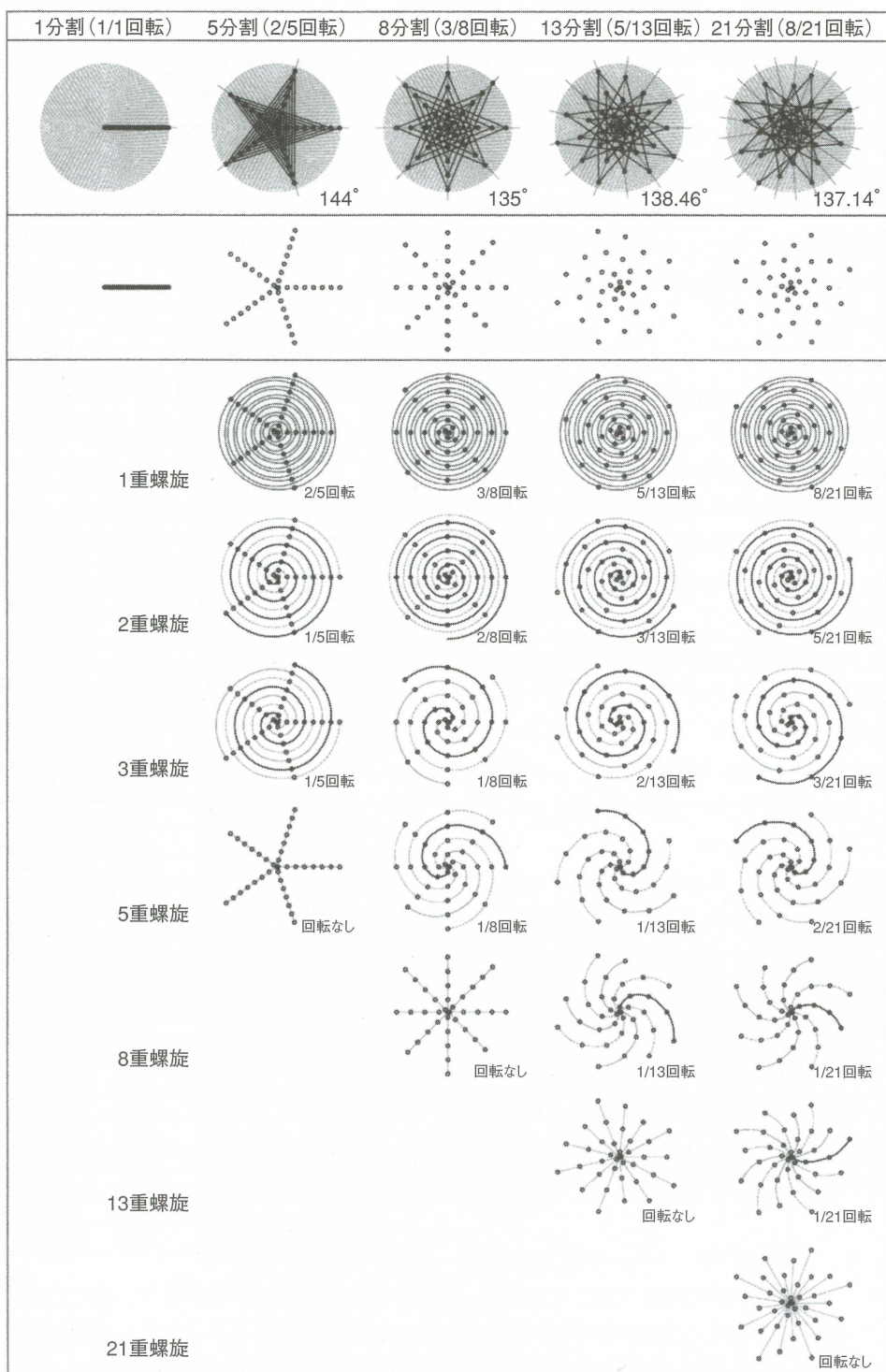


図3 フィボナッチ数を用いたアルキメデスの螺旋

なお、表1の左欄を A_{n-1} , A_{n-3} , A_{n-4} …に置き換えた場合の、回転角度の収束値も試算している。 A_{n-1} の場合は A_{n-2} の逆回転となる。また、 A_{n-3} , A_{n-3} , A_{n-4} , A_{n-5} , A_{n-6} , A_{n-7} , A_{n-8} , A_{n-9} とした場合（以下、小数点以下4桁で表記）、 137.5078° , 84.9845° , 52.5233° , 32.412° , 20.0621° , 12.3991° , 7.6630° , 4.7360° にそれぞれ収束した。この収束角度の常用対数を求めると、2.1383, 1.9293, 1.7204, 1.5114, 1.3024, 0.8844, 0.6754となり、0.2090ずつ低減している。

表1左欄を A_{n-3} , A_{n-4} , A_{n-5} , A_{n-6} …と回転角度の分母と分子の差を大きくするほど、回転角度は小さくなる。つまり、作図で用いる1重の螺旋が視認しやすくなると想像した。そこで、回転角度 $(A_{n-2} / A_n) \times 360^\circ$ に焦点をあてた。前述した通り、この回転角度は 137.507764° に収束する。図1と同じ手順で回転角度 137.507764° の作図を試み、円に 137.507764° の角度の線を書き込んだ際、ふと内角と外角の比を算定した。すると、 $1:1.618034$ という数値となった。つまり、円を黄金比で内分する角度である。このあまりにきれいな結果は、生物学では既知のことかもしれない。しかし、「なぜ、固有のフィボナッチ数の多重螺旋を認識しやすいか」は明らかでなく、また「フィボナッチ数以外の多重螺旋が内在するか」どうかは次の課題となった。

2.3 フィボナッチ数以外の多重螺旋

図4は、円を黄金比で内分する角度（ 137.507764° ）でアルキメデスの螺旋を描いた点の構成である。上段左には同心円と回転角度を示し、作図の手順を表わしている。上段中央は1重のアルキメデスの螺旋、上段右はフィボナッチ数の多重螺旋の構成を示している。なお、下段は点の大きさによる視覚的印象の差異を確認するために作図したものである。

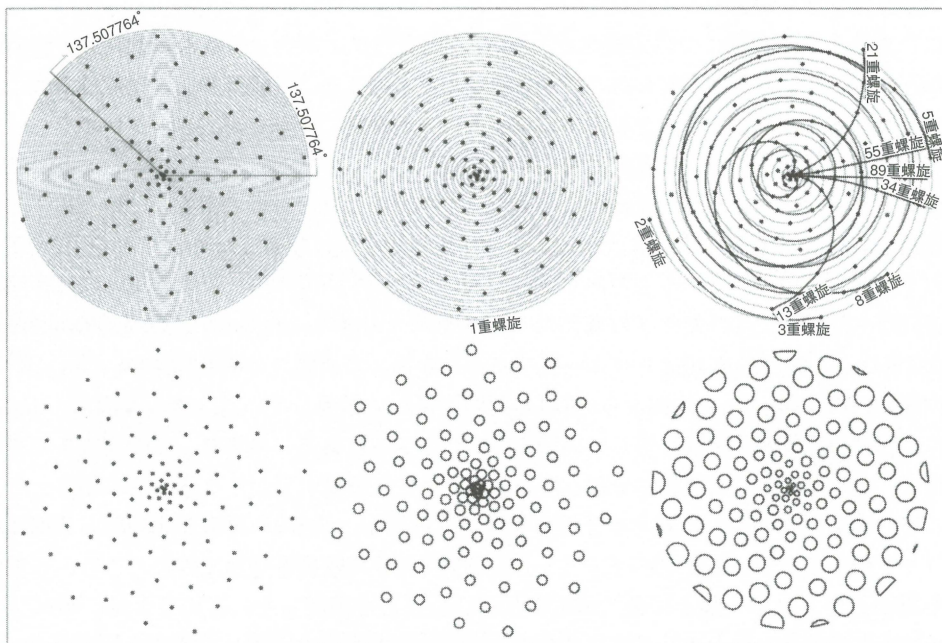


図4 円を黄金比で内分する角度によるアルキメデスの螺旋、多重螺旋の構成

ここで、前述の課題の1つ「フィボナッチ数以外の多重螺旋が内在するか」について、触れておく。作図で用いた同心円を、内側から4個とばし、6個とばし、7個とばしで点を結ぶ。すると、図5に示す4重6重7重の螺旋が作図される。

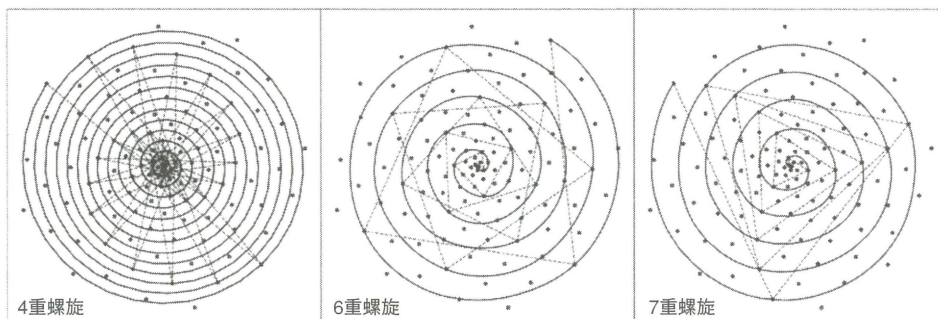


図5 フィボナッチ数以外の多重螺旋（4，6，7重螺旋）

つまり、フィボナッチ数ではない4重6重7重の多重螺旋も、この点の構成に内在するのである。また、点を無限に配置した場合には、同様の手順を踏むと自然数全ての多重螺旋を描くことが可能となる。すなわち、「松かさの鱗片の構成には、フィボナッチ数すべての多重螺旋が内在する」という前項冒頭で立てた仮説を超えたことになる。また図5では、螺旋上で隣り合う点の間に他の点が多いことが、これらの螺旋を認識しにくい理由と推察した。

2.4 認識しやすい螺旋

次に、もう1つの課題について述べる。「なぜ、固有のフィボナッチ数の多重螺旋を認識しやすいか」についてである。学生たちの松かさ観察に立ち返ると、5重螺旋、8重螺旋の順に読み取りやすい結果となり、松かさが小さいカラマツに3重螺旋、松かさが大きいダイオウショウに13重螺旋を指摘した学生がいた理由も明らかでない。

授業はデザイン演習であり、最終的に空間に立ち上げることが目標である。そのため、参考となる資料を時折提示する。図6は、2010年6月に作図し学生に配布したものである。（以下、図6中の上段から下段へ、そのうち左から右への順に、dig6-1～dig6-10と記す。）dig6-1は作図の手順、dig6-2～dig6-4は点の大きさの変えたイメージ図、dig6-5～dig6-8は1重2重3重5重の螺旋、dig6-9はポロノイ図、dig6-10はドロネー図である。なお、この図では同心円を $R_n = \sqrt{n} \times R$ （ R ：最も内側の円の半径、 R_n ：内側から n 番目の円の半径）で作図している。その意図は、dig6-9のように、任意の点周囲の領域を等しい面積に近づけることにある。つまり、この構成を構造物として捉え、点を基準とした部材に分割した場合、大きさ・重量が等しくなるように配慮した。

ここで、本項冒頭の問いに対する分析の手掛かりを得る。dig6-2を見ると比較的5重螺旋を読み取りやすい。そこで、dig6-10のドロネー図にdig6-8の5重螺旋を重ねてみたところ、5重螺旋の点の繋がりがドロネー図上に全て表記されていることを確認した。このことは、単にフィボナッチ数の多重螺旋ということだけではなく、固有の多重螺旋の認識しやすいの分析にドロネー図が手掛かりとなることを示唆している。

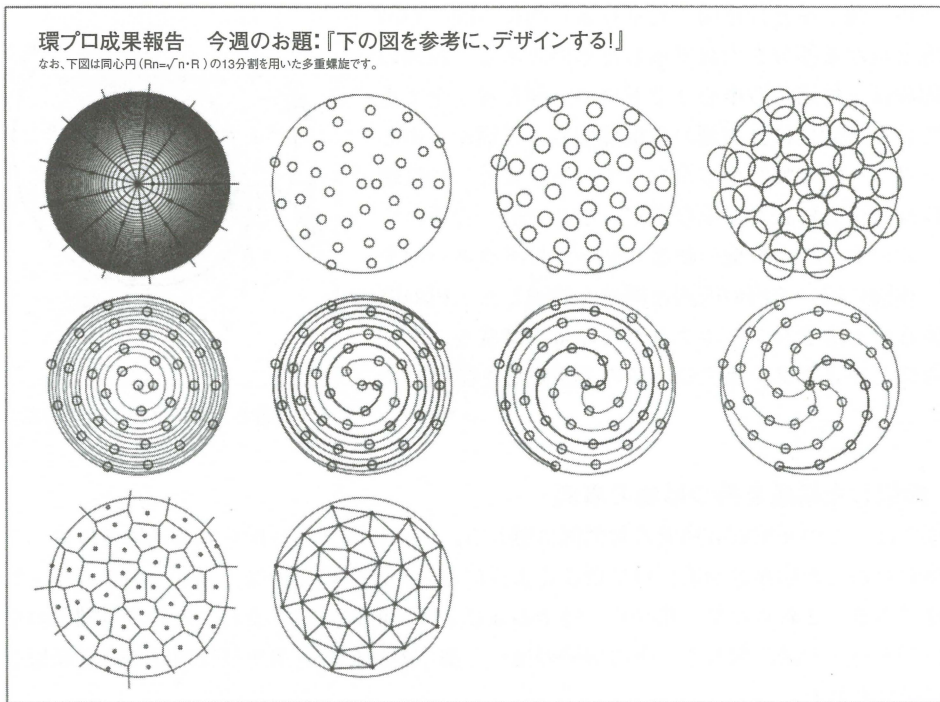


図6 授業配布資料：同心円 ($R_n = \sqrt{n} \cdot R$) 上に配置した点の構成

2010年夏からの取り組みは、図4の点の構成を、立体として立ち上げることである。立体構成については本稿では記述を控えるが、その過程で、円の間隔を密にしたものと疎にしたもの比較をすると、認識しやすい螺旋に違いが出るとの意見が出た。そこで平面に立ち返り、図7を作図した。図4を応用し、外側の円の中心を少しずつ右にずらして作図した118個の点である。円の間隔が密な箇所（図左側）では、21重螺旋が浮き立つ。一方、円の間隔が疎な箇所（図右側）では、8重螺旋が浮き立って見える。ここでは、まず円の間隔と多重螺旋の数の認識しやすさとの関連性を確認した。

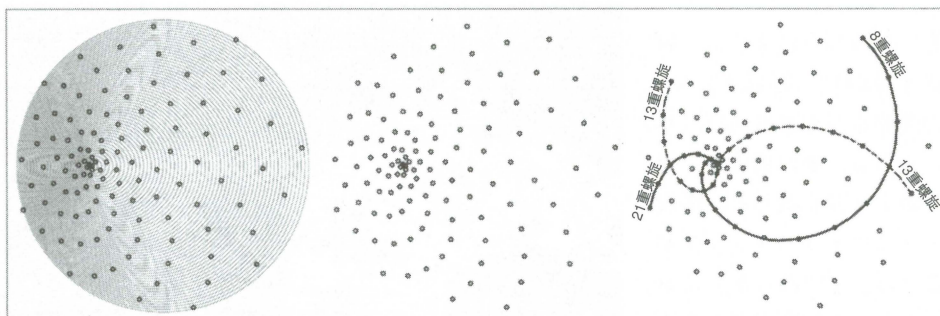


図7 偏芯した円による点の構成の作図

図8は、図7を元に作図したドロネー図に、図7右図の螺旋と重なる部分を太線で示したものである。左側の21重螺旋は、外周から中心までドロネー図と線が全て重なっている。同様に、右側の8重螺旋も、外周から中心までドロネー図と線が全て重なっている。また、13重螺旋は螺旋の中心付近まで重なるが、中心付近で途切れている。このように、螺旋の認識しやすさにドロネー図を用い、作図に用いる円の間隔と関連を確認した。円の間隔が密なほど大きなフィボナッチ数の多重螺旋を、間隔が疎なほど小さなフィボナッチ数の多重螺旋を認識しやすい。

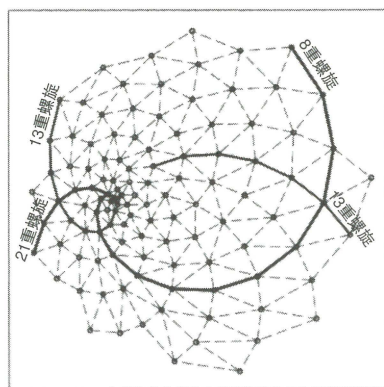


図8 ドロネー図での分析

2.4 類似した構成を持つ植物の事例

本項では、この多重螺旋構成の類似例に触れる。先の作図法と分析を考え始めて以来、これまで意識しなかった植物の形態に目に留まるようになった。下の写真は、灌木・バラの花・ヒマワリの花である。これらの葉・花びら・種子の並びを平面的に観察すると、先の多重螺旋の構成と同様のパターンが読み取れる。下の事例のほか、樹木の枝や、青菜や草花の葉にも、類似した構成が見受けられた。

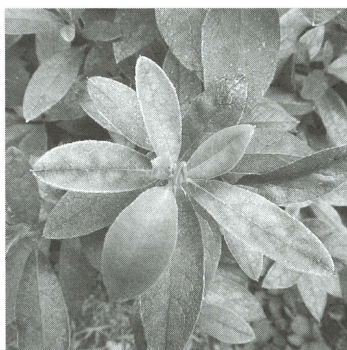


写真1 木の葉



写真2 バラの花びら



写真3 ヒマワリの種

一方、右の写真のように、対生を成す草の葉（写真4）や、異種の曲線を描く葉の並び（写真5）もある。葉の構成は、光合成の効率と深く関わる。構成パターンにヴァリエーションがあることは、1つの「か」に対する「かた」が複数存在することを示唆している。



写真4 対生構成の葉



写真5 緩やかな曲線状の葉の構成

3 多重螺旋の構成を用いた空間デザインの試行

2010年度前期、4年生を中心に、図4の構成モデルを用いた提案に取り組んだ（図9）。



図9 提案作品：PENTATONIC IN FOREST

この提案は、森の自然と行き交う人の音を拾い変換する、音の装置である。多重螺旋を形づくる点の構成を平面に配置し、5つの螺旋状空間を計画した。5つの螺旋は、それぞれ5重8重13重21重34重の異種の多重螺旋の一部である。なお、計画の補足を以下に記す。

先の構成を、構造体を支える礎石の配置とした。切土・造成をせず、自然の地形そのままに礎石を置く。その上に木質構造の床・壁パネルを据え、チューブ状の螺旋空間を立ち上げる。木材は、再生可能で環境負荷の少ない生物材料とされ、その活用は二酸化炭素のストックに有効である。また、間伐材活用による森の再生も意図している。木質構造のパネルは小径木無垢材で構成し、木材のめり込みにより強度を保つ。直線の本材を並べ、短材の横継材で連結して形づくるHPシェルのパネルは、相欠ぎとホゾの簡易な仕口で組み立てる。

4 まとめ

本稿ではまず、松かさの鱗片の観察から、多重の螺旋を内在する点の構成を幾何学的に分析した。すなわち、松かさを対象にした「かたち」から「かた」の考察である。ここでは、アルキメデスの螺旋を用いて平面的な作図法を確認し、形成しうる多重螺旋の種類はフィボナッチ数の多重螺旋に限らないことを指摘した。「101の点が、100通りの多重螺旋を生む点の平面構成」といえよう。また、固有の多重螺旋が認識されやすいことに着目し、認識しやすさの分析にドロネー図を用いて説明を試みた。

次に、この多重螺旋構成を用いた空間のデザインの試みを紹介した。この点の構成を平面的に配置し、異種の螺旋の重なりを空間として立ち上げたものである。

ここに記した活動は、今後も発展させる予定である。本稿2節の考察の多くあるいは全ては、生物学的には既知のことかもしれない。しかし、それ自体は重要でない。「空間デザインのバイオ・ミミクリ的試行」と副題に称した通り、固有の空間に至るデザインプロセスがテーマであり、生物の造形に向ける目を空間デザインに組み入れる実験なのである。

さて、今後の課題を付記する。「か・かた・かたち」理論に序論で触れたが、松かさをはじめとした植物の機能に目を向ける必要がある。本稿では、多重螺旋構成に関する生物学的機能、すなわち「か」について述べていない。松かさは、効率的な撒種がその目的にあり、湿度に応じて鱗片が開閉する特性がある。類似の事例として挙げた、草木の葉・花卉・種子も、受光・受粉の効率が関係している。光・熱・湿度という環境に呼応した造形といえる。そこで、現在「か」と「かた・かたち」のつながりのあるデザインプロセスを模索している。また、本稿では平面構成に限定して論じたが、3次元に立ち上げた形態考察と空間のデザインに取り組む予定である。

本稿で紹介した空間デザインの試行的取り組みに貴重なご示唆を戴いた、東京大学農学部木質材料学研究室稲山正弘准教授に深く感謝する。また、活動に関わる武蔵野大学環境学科住環境専攻・都市環境専攻の学生諸君、卒業生ならびに小松和希君に感謝する。