

## (4) トピックス (PEN より)

寄稿

## 鳥類における色彩と機能

公益財団法人山階鳥類研究所 森本 元

まわりを見渡せば世界は色で溢れています。日々、私たちは「色」から様々な刺激を受けています。若葉の緑色の芽吹きに春を感じたり、色鮮やかな料理を美味しそうだと思ったり、薄暗く陰った空模様に憂鬱になったり、色はさまざまな効果をもたらします。生物学的な視点で見れば、いわば、「色」が信号として機能しているといえます。これは人間に限った事ではなく、この地球上に暮らす他の生物たちも同じです。

少しばかり自己紹介をさせていただきたいと思います。私はもともと野外で鳥類を中心に観察型の研究を行ってきた生態学者です。そんな私が今回、本稿を執筆させていただいたきっかけは、現在私も参加させていただいている生物規範工学 (biomimetics) のプロジェクト「生物多様性を規範とする革新的材料技術」です。さらにはそれ以前から、研究対象としている鳥種の発色への疑問をきっかけとして、工学系の研究者の方々へ鳥の羽色についてご相談させていただいたことが、今、わたしがこの原稿を執筆させていただいた根になっていると思います。そこで今回は鳥類における色彩信号の機能についてご紹介したいと思います。

私が研究材料としている鳥は「ルリビタキ」という青い鳥です。この鳥は全身を包む美しい青色ゆえか、バードウォッチャーの皆さんにはとても人気があります。最近では幸せの青い鳥などと呼ばれることもあるようです。メーテルリンクのおとぎ話「青い鳥」における主人公の兄妹チルチルとミチルのごとく、長年に渡りこの鳥を追いかけて研究を続けています。そのきっかけは、この鳥の不思議な色発現パターンに興味を持ったことでした。

日本の青い鳥には、ルリビタキをはじめオオルリ、コルリ、イソヒヨドリ、カワセミなど多くがいますが、いずれも異なる色味を持つだけでなく、生態も異なります。そこでまず本種の生態をご紹介します。私が初めてルリビタキに出会ったのは子供のころです。野鳥少年だった私は、一年中、近所の林へ野鳥観察に出かけていました。冬のある日、林道を歩いていると目の前の茂みから飛び出てきた茶色っぽい小鳥。その鳥がこちらを向くと、鮮やかな青色の尾羽が目飛び込んできました。「ルリビタキだ」と興奮し、その美しさに驚いたことを今でもよく覚えています。この尾羽が青で全身はオリーブ褐色の外観。これは実は雌なのです(図 1a)。以下、簡便に表記するために褐色とします)。



図1 a: ルリビタキの雌、b: 高齢な雄。c: 雌に極似した姿をもつ若い雄。(a、c: 著者撮影、b: 阿多誠文氏提供)

他方、雄は全身が美しい青色です(図1b)。人間とは勝手なもので、褐色のルリビタキを見たあとは、図鑑に載っているのと同じ全身が青色の雄を見てみたいと思うのは当然の欲求でした。そして私は冬の間中おなじ場所に通いました。しかし出会えたのは、なぜか青くないルリビタキばかりでした。青い雄を求めて、自分のフィールドをずいぶん歩き回ったのですが、結局、残念なことにその年は一冬を費やしたにもかかわらず、青いルリビタキに出会えなかったのです。しかも、春になると褐色のルリビタキさえもいなくなっていました。青い鳥を追いかけるチルチルミチルは、いつもその鳥を手に入れることができませんが、私も同じようなことになったのです。実は、これは今にして思えば当然の結果でした。本種はなわばり性の鳥で、冬は半径数百メートルの範囲を1個体が一つ保持して、同じ場所で暮らすのです。同じ場所に通い詰めるということは、つねに同一個体を見続けるだけですから、青い雄を見られ

ないのは当然の結果だったのです。他の場所へ探しに行くべきだったのです。そして春になれば、鳥達は繁殖地へと渡っていきます。これが褐色のルリビタキが春先にいなくなった理由です。

ルリビタキがどんな鳥なのかをご理解いただくために、鳥類の色彩の一般的な話をしたいと思います。同種内の雌雄で外観が違う事を「性的二型」と呼びます。たとえば男性ならば子供の頃に夢中になったであろうカブトムシ。雄は立派な角があり、雌にはありません。おなじように、青い鳥のオオルリは、雌が茶褐色で雄が青色をしています。このように、雌雄の外観が違うのが性的二型です。そして、その違いには機能が存在します。カブトムシの雄は餌場をめぐる雄同士が争うときに、その角を使って戦います。角が大きな雄の方が勝ちやすいという研究例があります。また、性的二型があるコクホウジャクなどの鳥では、雄の

中で派手な個体の方が雌にモテるということが知られています。雌はより派手な雄をつがい相手として選ぶというわけです。これは鮮やかな個体の方が、栄養状態がよかったり多くの餌を雛へ運べたりと、雌にとって婚姻相手としてメリットがあるからという研究成果があります。

このように性的二型が明瞭な鳥では、雄は派手、雌は地味というのが一般的です。雄の個体間で派手さに差があるといっても、それは同性内での小さな違いに過ぎません。雌雄の違いの方はそれ以上に明瞭であり、ぱっとみですぐに雌雄を見分けられる種が一般的です。たとえば、ニワトリの雄には赤く大きな鶏冠がありますが、雌にはありません。オオルリでは雄は青色で雌が茶色。雌雄が明瞭に違うのです。しかしルリビタキはそうではありません。ややこしいことに、ルリビタキの場合、若い雄は雌にそっくりな褐色をしており(図1c)、後年、年をとると全身が青色に大きく変化します(図1)。このように年齢によって外観が変化する現象は遅延羽色成熟(Delayed Plumage Maturation: DPM)と呼ばれています。虫や魚などでは、性的に成熟していない幼体(繁殖年齢に達していない)が、成魚・成虫とは全く異なる外観をしていることがありますが、ルリビタキでは褐色の雄も青色の雄も繁殖している点が異なります。

このため、繁殖期になると、青い雄も褐色の雄も、各雄が1羽一つのなわばりを所有することになります。冬には関東以西の平地の公園などで見る事ができたルリビタキが、夏になると姿をみなくなります。これは彼らが繁殖地である山の上へ移動したからなのです。子供だった私が通い詰めて観察したルリビタキが、春にいなくなったこともこれが理由です。本種は高山・亜高山で繁殖する、いわゆる高山鳥です。本州中域では標高約1,500m以上の森林で繁殖しています(地域によって標高は上下します)。その環境はシラビソやコメツガ・ダケカンバといった樹種を中心とした針葉樹林・針広混交林です。まだ雪の残る春先の山の中で、なわばりを宣言して盛んにさえずる様子は、春の山の風物詩といえるでしょう。繁殖様式は一夫一妻です。つがいを形成しおえると、雌は地面の木の根や岩のくぼみを利用して、穴の中にお椀型の巣をつくります。抱卵は雌のみで行い、雄は手伝いません。雛の孵化後は、雌雄が共同で給餌などの育雛を行います。雛たちは約2週間で巣立ちを迎えます。その繁殖の初期、なわばり形成を行う際に、雄同士の争いが起こるのです。私はこの点に着目して研究を進めました。

ルリビタキの生態の面白さ、それは前述した通り、雄における褐色と青色という二型の存在でしょう(図1)。この「な

ぜ雄は年齢によって色が違うのか」は、ルリビタキならではの大きな謎といえます。研究の結果、この雄の外観の違いは、雄間闘争に関係があることがわかってきました。

具体的には、なわばり争いの方法に影響していたのです。ルリビタキの雄同士が争う際は、まず脇羽をふくらませ、お互いを威嚇するディスプレイから始まります。さらに争いが激しくなると、素早く飛び回り相手を「追いかけ」回す行動へと発展します。さらに激しさを増すと、ついにはお互いを脚でつかみあったり、つつきあったりする身体的な接触を伴う「けんか(直接闘争)」に至ります(図2参照)。つつきあいなどによる激しい闘争は、鳥にとって怪我に結びつく危険性が高い行動であり、できれば避けたい行為です。実際、多くの動物の雄同士の争いは、危険な直接闘争ではなく儀式化されたディスプレイのみで行われることも多く、直接闘争を避けるように進化していると考えられています。また、より鮮やかな雄や高齢な雄の方が、雄同士の関係においてより優位な雄(強い雄)である傾向が、多くの動物で知られています。こうした状況下では、劣位で地味な若い雄が、わざわざ派手な強い雄と直接闘争を行うことは、リスクが大きいのかもしれません。実際、ルリビタキでは、雄と雄が争う際に、争っている雄同士の色の組み合わせの違い(青 vs 青、青 vs オリーブ褐色、オリーブ褐色 vs オリーブ褐色: 図2)によって、闘争方法の激しさが異なっていました。同じ色同士の闘争では、最も激しい闘争方法である「つつきあい」まで発展することが多かったのですが、異なる色同士の争いでは、そこまで激しくならず「追いかけ」あう段階で勝敗が決する事がほとんどでした(図2)。これは、ルリビタキが互いの色を雄間闘争における信号として利用しており、互いの地位が外観から予想できる際にはリスクの高い「直接闘争」に至る前に、勝敗を決している可能性を示唆しています。

もう一步踏み込んで考えてみますと、これは青色の有無が個体間の地位を伝達する信号として機能した例です。さらに踏み込んで考えると、この青色は構造色ですので、構造色の有無が信号として機能したといえます。鳥類の色彩は主に、カロチノイド、メラニン、構造色によって発色されています。前者2つは色素による発色です。鳥類の色彩研究においては、性的二型などの研究が先行し、派手なことに機能があることが多数の研究よりわかってきました。その後、研究が進むにつれて、発色のメカニズムによって機能が異なるらしいこともわかってきました。たとえば、赤色を生じるカロチノイドの例をご紹介します。カロチノイドは体内で生産できないので、食物として体外から得る必要があります。このため、厳しい自然環境下で生きる

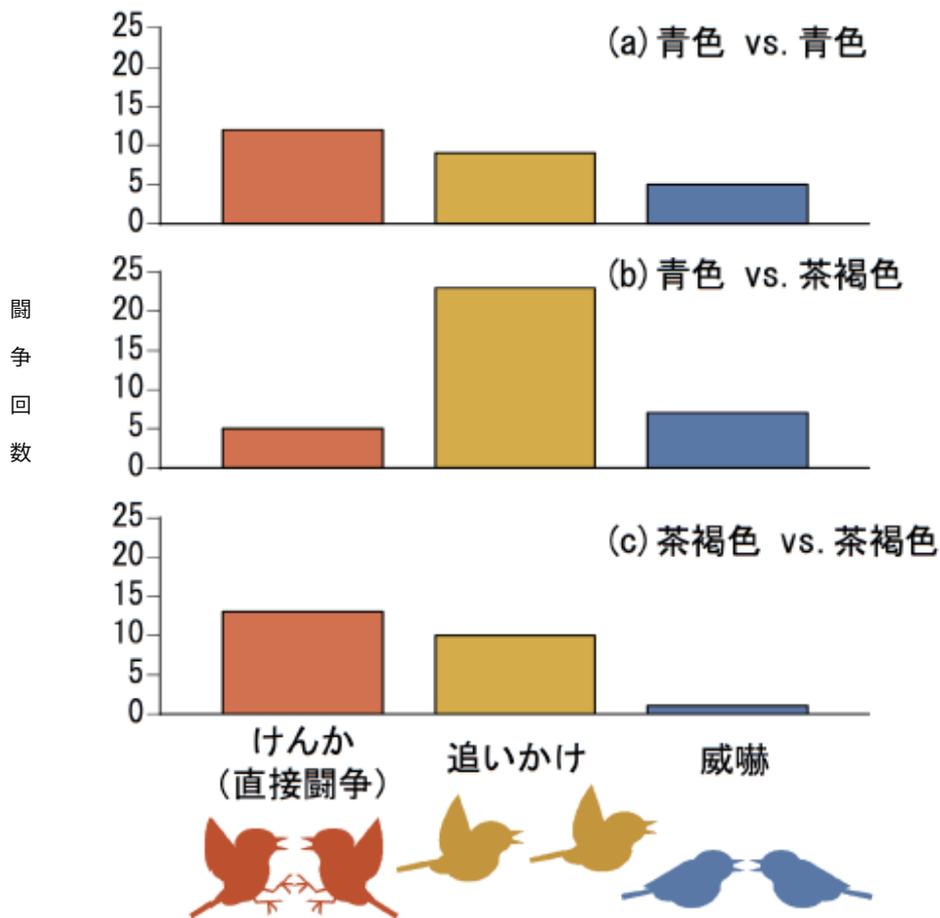


図2 雄同士の闘争時の体色の組み合わせと、闘争パターンの違い。雄間闘争は、威嚇→追いかけ→直接闘争の順でより激しい。同色同士では、もっとも激しい直接闘争まで発展することが多いが（上図・下図）、異色同士の争いでは激しくならない傾向がある（中図）。

たり、質の良い餌を捕ったり、効率良く採食する等）の方が鮮やかになり、その結果、個体間でカロチノイド量に差が生じて鮮やかさの個体差につながります。この鮮やかさの個体差が、雄間闘争や雌による選択の際に、視覚信号として機能するのは。他方、メラニン色素は体内で生産されるのでストレスなどが影響することが知られています。このように色素系の発色機構はその機能に関する知見が多数蓄積されており、発色メカニズムによって機能が異なることが分かりつつあります。しかし、構造色は近年になってようやく研究が進展してきた分野なのです。羽の内部の微細構造が作り出す構造色は、その発色機構と相まって機能の解明が求められています。

は一般化し、近年では学際的な様相を呈しています。野生鳥類学において工学的研究分野との連携は少なめですが、構造色研究や羽毛の保温・撥水機能など多くの研究テーマで連携が可能なことでしょう。自然界は不思議な生物で溢れており、身近な生物が、あっと驚くような能力を秘めていることは多々あります。「生物」や「自然」をキーワードとして、異分野の研究者同士が「気付き」を共有する事で、互いの理解を深めるとともに連携するきっかけになると信じています。

一昔前、双眼鏡一つあれば研究ができることは野生鳥類学の利点の一つでした。これは今も変わりません。その一方で、生理学的・遺伝学的研究分野との連携はこの数十年で劇的に増加し、野生鳥類学者がDNAやホルモンを扱う事

寄稿

## モミジの葉の展開特性

大阪大学基礎工学部 小林 秀敏、新潟大学工学部 山内 健

### 1. はじめに

多くの樹木は、厳しい冬を前に生命活動を下げ、落葉することにより激しい風雪に耐える。落葉した痕には、越冬用の厚い皮で覆われた冬芽が秋のうちに準備され、春の訪れとともに、新しい葉が一齐に冬芽から発芽する。この発芽の様子を観察してみると、春先には10mmにも満たない冬芽から、初夏には100～150mmにも及ぶ葉が、幾つもついていることが容易に確認できる。サイズ拡大の主役は植物自体の成長にあるが、多くの植物は、葉を小さいツボミ内部に効率的に格納するために、様々な方法で折畳まれている。例えば、柳の葉などは細長く巻いているし、ポプラの葉は両端から中央脈に向かって巻き込んでいるし、シデの葉等は規則正しく波板状に [1] 折り畳まれ、モミジ

の葉は葉柄の先端を要とする扇のように蛇腹状に折畳まれている [2] (図1)。また黄金虫やバッタ等の昆虫の翅 [3-5] にも折畳み構造が観察できる。もちろん、植物の葉や花は、折畳み・展開様式を最適化するためだけに進化し、現在の形状を造り上げたのではなく、ありとあらゆる生活環境への適合の掛け合わせにより、現在の形状を造り上げたと考えられる。そして、多くの植物にとってそれらは、生命活動を営む際に非常に重要な光合成器官であり生殖器官であるから、それらの展開過程の中に、新たな折畳み・展開様式の創成に有益な示唆やヒントが隠されていることは容易に想像できる。植物の葉や花の展開構造に関して、生物学的立場からの研究は比較的多くなされているが、力学的側面に焦点を当てた研究は少ない。それゆえ、植物の葉や花の折畳み・展開様式(構造)に関する力学的考察は、宇宙



図1 様々な葉の折畳みと展開：(a) ポプラの葉、(b) シデの葉、(c) モミジの葉

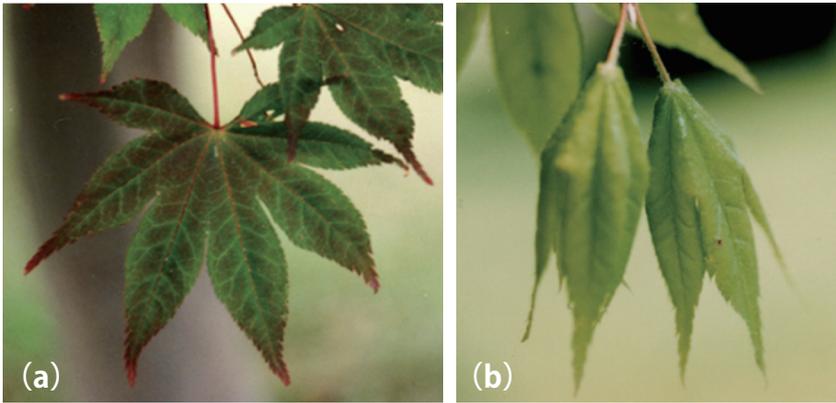


図2 イロハモミジの葉：(a) 完全展開時の葉、(b) 展開途中の葉

空間において、重量や大きさに極度の制限をうける人工衛星の太陽電池パネル [6] やアンテナ [7] などの宇宙構造物をはじめ、大型会場施設の開閉式天井構造、非常用としてコンパクトに格納されなければならないテントやゴムボートの他、傘等の一般日用品に至るまで適用される可能性があり、工学的に非常に重要な構造形式の一つと考えられる。ここでは、モミジの葉が有する折畳み・展開様式に着目して、ツボミから展開する様子の観察や、植物の葉の近似モデルを用いた展開数値シミュレーション等から得られた、興味深い結果について概説する。

## 2. モミジの葉の展開様式

イロハモミジの葉は、図2に示すように、葉柄の先端から放射状に伸びた掌状脈に沿って谷折線が、また脈間の葉身の切れ込みに向かって山折線が配されており、蛇腹状に比較的規則正しく折り畳まれている。ここで、ある折線を挟む二つの葉身要素面間の開き角を、その折線に関する展開角と呼ぶことにする。実際にモミジの葉の展開の様子を観察すると、図2(b)から分かるように、葉脈を含む谷折

線に関する、葉の表側から見た展開角  $\theta_v$  と、葉身が折り曲げられた山折線における、葉の裏側から見た展開角  $\theta_c$  は必ずしも等しくない。もし両者が等しければ、扇のように全ての谷折線が一つの平面上を移動し、最終的に葉が平面になるという二次元的な展開様式を示すはずである。このように、モミジの葉はまず角錐体のような三次元的な形状に展開後、ゆっくりと時間をかけて図2(a)のような平面の葉に展開している。展開時の各部の動線は短い方がエネルギー的には有利であるとすると、二次元的な展開様式の方が有利と考えられるにもかかわらず、である。なぜ、イロハモミジはこのような展開様式を採用しているのだろうか？この2段階展開とも言うべき展開様式に、はたして合理性はあるのだろうか？

## 3. 葉の形状計測

モミジの葉の展開様式と、展開に要するエネルギーとの関係を知るために、まず葉の形状計測を行い、モデル葉の製作を試みた。葉の外形は、一番長い中央脈に対してほぼ対称なので、ここでは、図3(a)に示すように中央脈を含む

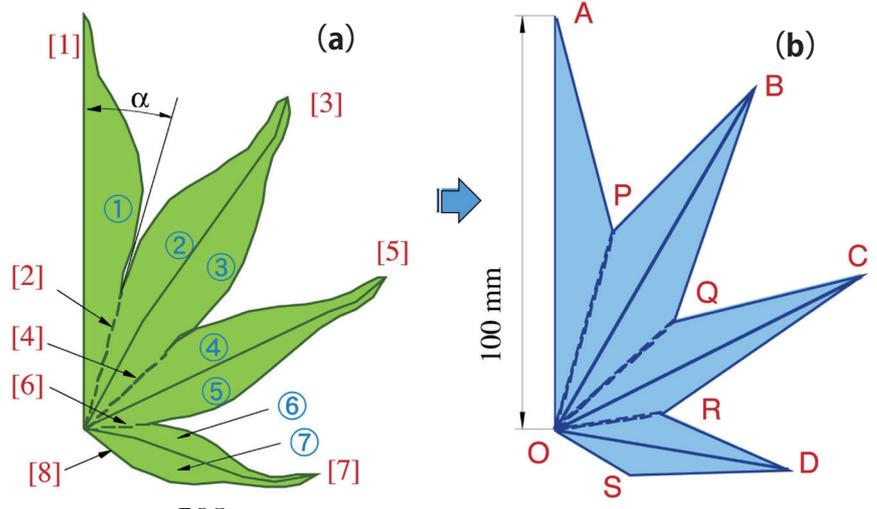


図3 イロハモミジの半葉部位とモデル：(a) 半葉内の各部位、(b) 測定結果を基にした半葉モデル

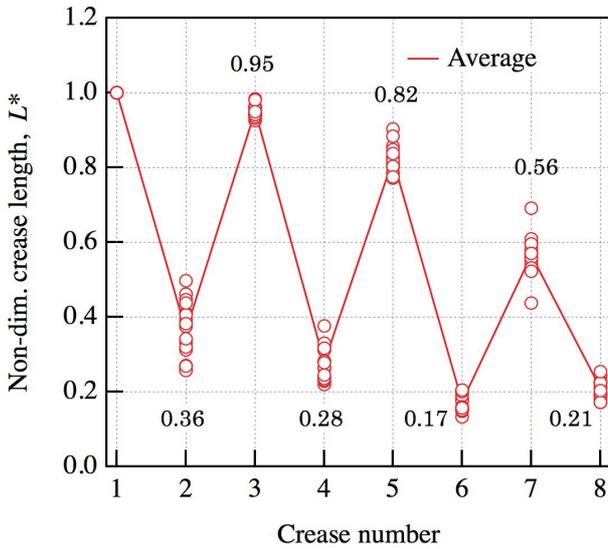


図4 葉の葉脈とその間の折線長さの分布

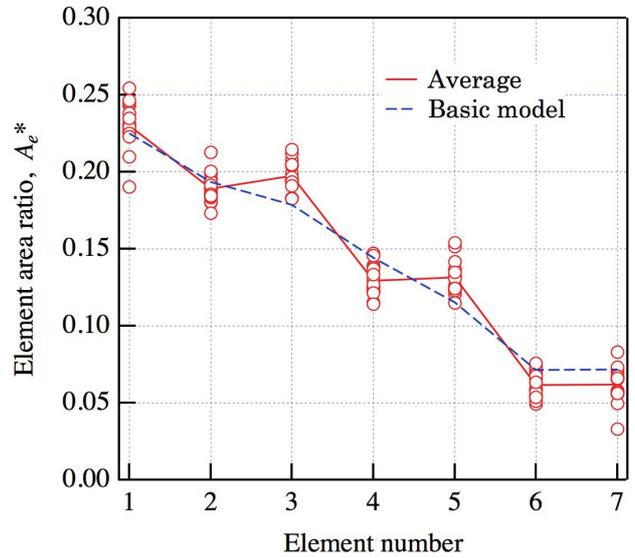


図5 各要素の面積割合

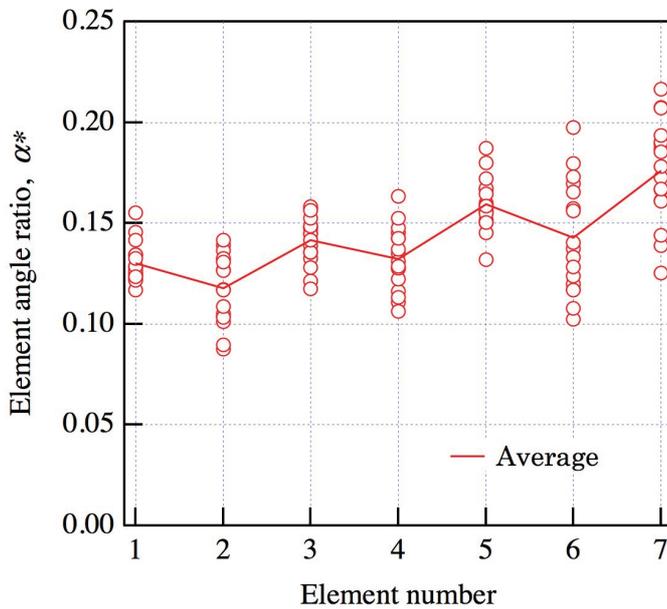


図6 各要素の要素角の分布

半分の葉を計測対象とした。この半分の葉は、7本の折線と外形線で区切られた①～⑦の7つの葉身要素から構成されており、ここでは、葉の中心から伸びる中央脈上の折線を [1] 番とし、折線ではないが便宜上第7葉身要素の外形線を [8] 番とした。また、各要素の山折線と谷折線の間を要素角  $\alpha$  と呼ぶことにする。17枚の半分の葉について、各葉身要素の面積、折線の長さ、要素角を計測した。図4に、[1]～[8]番の折線の長さ  $L$  の測定結果を示す。全てのデータは、葉のサイズの影響を除くために [1] 番の折線の長さ  $L_0$  で除して無次元化している。実線は、各測定値の平均値を結んだ線で、奇数番の谷折線に沿う葉脈の長さは、概ね 1:0.95:0.82:0.56 の比で小さくなっている。一方、偶数番目の山折線は、図2(a)からも明らかのように、葉身の深い切れ込みのため、谷折線に比べ極端に短

くなっている。図5に、各要素の面積を、半分の葉の面積  $A_1$  で除して無次元化した  $A_e^*$  ( $=A_e/A_1$ ) を示す。実線は、測定した17枚の葉の測定値の平均値を結んだ線で、谷折線を挟む第2、第3要素や、第4、第5要素などの面積はほぼ等しく、中央脈から離れるにしたがって、階段状に減少していくことがわかる。図6は、各要素の要素角の分布、即ち、各要素角  $\alpha$  をそれらの合計  $\alpha_0$  で除して無次元化した  $\alpha^*$  を示している。実線は、測定データの平均値を結んだ線である。要素角は図5で示した葉身要素の面積分布と反対に、中央脈から離れるにしたがって、ジグザグになりながらも大きくなる傾向にある。なお、測定した17枚の葉の  $\alpha_0$  の平均値は約  $121^\circ$  であり、このことから、イロハモミジの葉は、概ね全周の  $2/3$  程度の中心角を持っていることがわかる。

#### 4. 展開シミュレーション

葉の展開時の消費エネルギーを直接見積もることは困難なので、ここでは、展開時の葉の各部位の展開運動エネルギー  $w$  が、植物の成長展界エネルギーの指標となっていると考えて、この  $w$  の展開時における変化を求めることにする。そのために、モミジの葉の各部位の測定値に基づいて、図3 (b) に示す数値半葉モデルを作製した。即ち、各葉身要素を三角形で近似し、各要素の面積比や要素角の測定値、図4で示した谷折線の比を用いた。また、[1]番の折線の長さを  $L_0 = 100 \text{ mm}$ 、半葉の全面積  $A_0 = 3000 \text{ mm}^2$ 、要素角の総和  $\alpha_0 = 121^\circ$  とした。この半葉モデルの面積分布は、図5の破線で示すように、必ずしも測定値のジグザグ分布に等しくないが、ほぼそのジグザグ分布の中心を通っており、また、モデル葉の形状は、スキャナーで取り込んだ実際の葉の形状 (図3 (a)) をよく表しており、このモデルでイロハモミジの葉の展開様式を概ね表現できると考えられる。この半葉モデルを用いて、ベクトル解析により、展開時における各葉身要素や折線の位置を求めた。その解析の数学的な式の導出等はここでは省略したが、三角関数と空間図形の知識を駆使すれば、比較的容易に計算式を導くことができる。以下、それらを用いて展開シミュレーションを行った結果である。

さて、図2 (b) から明らかなように、モミジは必ずしも平面的には展開せず、モミジの葉は角錐体のような三次元的な展開様式を示している。このとき、谷折線に関する展開角  $\theta_v (\leq 180^\circ)$  と山折線における展開角  $\theta_c (\leq 180^\circ)$  は、 $\theta_c > \theta_v$  であるから、まず両者の比である展開角比を  $\beta = \theta_c / \theta_v$  と定義し、 $\beta$  を一定に保ちながら等速度で展開する場合を考え、各葉身要素をその重心位置にある

質点とみなした場合の展開時の運動エネルギー  $w$  を求めた。図7は、 $\beta = 1.0$  の平面的な展開と  $\beta = 0.8$  の場合に得られた  $w$  を  $\beta = 1.0$  の場合の初期値  $w_0$  で除して無次元化して示している。横軸は、無次元時間  $T$  で、 $T = 1.0$  で葉身モデルは完全展開平面となる。当然、 $T = 1.0$  までの時間はどちらの場合も同じにしてある。この図から、 $\beta = 0.8$  の場合は、全体に渡って大きなエネルギーが必要であり、特に  $T = 0.8 = \beta = T_1$  以降にかなり大きなエネルギーを必要とすることがわかる。これは、 $T = 0.8$  で、谷折線部の展開角  $\theta_v$  が山折線部の  $\theta_c$  より先に  $180^\circ$  に達し、これ以後、山折線部のみが展開し、葉身が角錐体形状から平面へ展開するためと考えられる。

次に、展開時の葉身面積を考える。葉の最大の機能は光合成であり、一日を通して考えれば、太陽光はあらゆる方向から照射される。したがって、葉の形状が一つの平面でなく立体的であっても葉の表面に凹型の窪みがなければ、照射面積は葉身の全面積  $A_0$  に等しいと考えることも不自然ではない。このことを考慮して、ここでは、展開葉身面積  $A$  として、一つの谷折線を挟む2つの葉身要素の中央面 (折線を含む  $\theta_v/2$  の面) に垂直な平面への、葉身要素の投影面積の総和を採用し、展開葉身面積比  $A^* (= A/A_0)$  の時間的変化を図8に示す。 $\beta = 0.8$  の場合に、 $T = 0.8 = T_1$  で  $A^* = 1.0$  となっているのは、この時点で、葉は、完全な平面になっていないけれども、凹型の窪みのない三次元立体的形状となっていることを示している。このことから、 $\beta = 0.8$  の場合は、 $\beta = 1.0$  の場合に比べて、展開面積に関しては、約20%短い時間で展開できると考える。

そこで、完全に平面になるまでの  $T = 1.0$  までに必要な総エネルギー  $W$  と、 $\theta_v = 180^\circ$  ( $T = T_1$ ) までの展開エネルギー

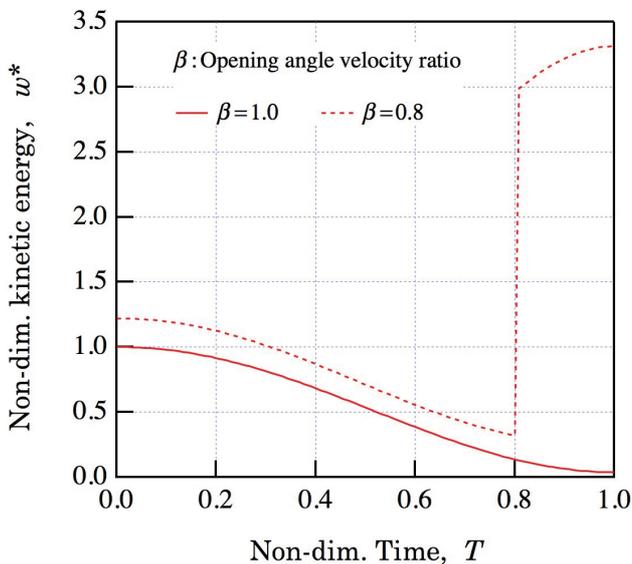
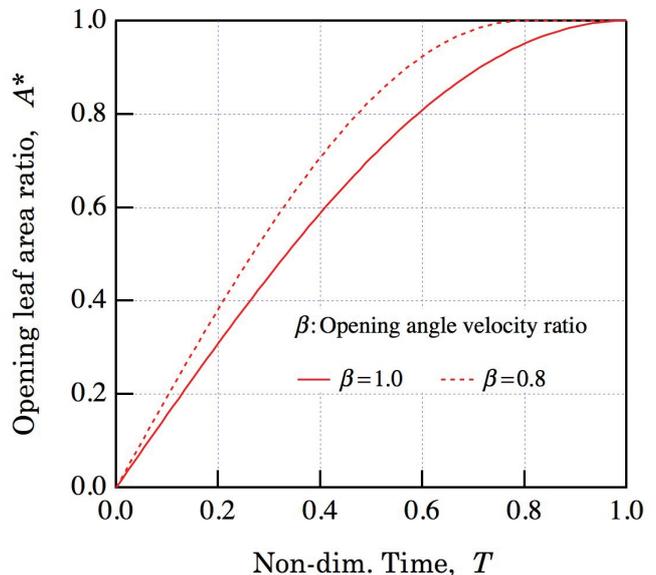


図7 展開時の運動エネルギーの変化



105 図8 展開時の投影面積の変化

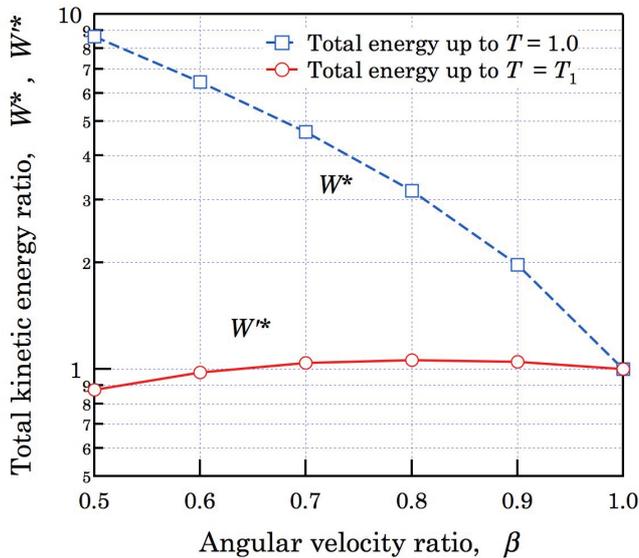


図9 総展開エネルギーへの角速度比の影響

の総和  $W$  を各  $\beta$  の値について求め、 $\beta = 1.0$  の場合の値  $W_0$  で除して無次元化した値、 $W^*$ 、 $W^*$  を図9に示す。これから、 $T = 1.0$  までの総エネルギーは、圧倒的に  $\beta = 1.0$  の場合が小さく最適であることを示している。さらに、たとえば、 $T = 1.0$  までではなく  $T = T_1$  までの展開エネルギーを考えたとしても、 $\beta \geq 0.7$  の  $W^*$  は1.0よりやや大きく、 $\beta = 1.0$  の二次元的な展開に対して、 $\beta < 1.0$  の三次元的な展開が特に有利であるとは考えられない。また、 $T = T_1$  での展開状況としては、⑦の葉身同士が重ならないことが暗黙の条件となっており、 $\theta_v = 180^\circ$  のときに、 $\theta_c$  はおおざっぱに言って  $180^\circ - 360^\circ/7 = 128.6^\circ$  以下であってはならないから、 $\beta \geq 128.6^\circ/180^\circ \approx 0.7$  である。それゆえ、 $\beta < 0.7$  で  $W^*$  が  $W^* < 1.0$  となっているが、この部分は、現実的には意味の無い領域である。では、なぜモミジは先に  $\theta_v = 180^\circ$  となるような展開様式を採用しているのであろうか？

### 5. 展開遅れ角のある展開様式

展開の様子を確実にとらえるために、少し開きかけたモミジの葉を採取し、水分と糖분을補給しながら室内でモミジの葉の展開中の様子をビデオ撮影した。得られた画像と動体解析ソフト (Move-Tr32) を用いて、展開時の葉の各点の位置を求め、このデータから、谷折線 (葉脈) に関する展開角  $\theta_v$  と、切れ込み部にある山折線に関する展開角  $\theta_c$  の時間的変化を求め、図10に示す。この図から、ある時間における  $\theta_v$ 、 $\theta_c$  の値は異なるが、展開角の速度はほぼ等しく、 $\theta_v$  と  $\theta_c$  の差は約  $55^\circ$  であることがわかる。

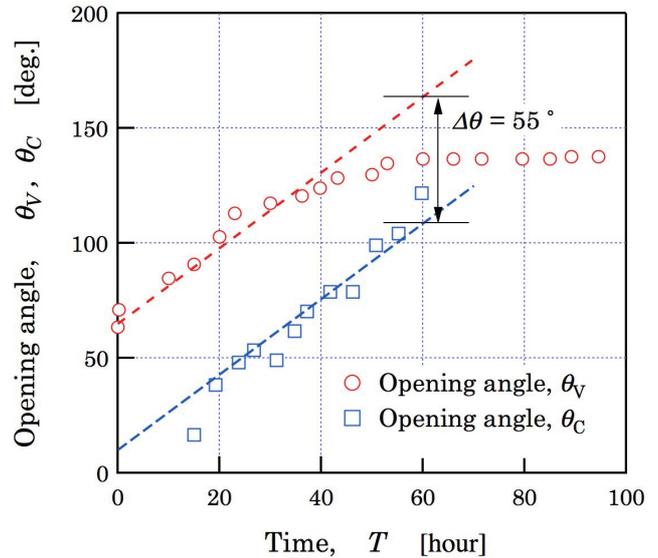


図10 展開中の展開角の遅れ変化

即ち、モミジの葉は、始めに葉脈を含む谷折線を挟む面だけが開き始め、その展開角が  $\theta_v \geq 55^\circ$  になった時に山折線を挟む面が展開を開始し、そこから同じ角速度で展開する。そして谷折線を挟む面が先に展開を終え、次に山折線を挟む面が展開を終えて完全な平面となる。この展開角の差を遅れ角  $\Delta\theta = \theta_v - \theta_c$  と定義し、展開エネルギー  $W^*$  や展開面積  $A^*$  に及ぼすこの遅れ角  $\Delta\theta$  の影響について解析的検討を行った。

これらの測定結果を基に、葉の展開時の運動エネルギーと展開様式の間関係を明らかにするために、 $\Delta\theta = 0^\circ$  と  $\Delta\theta = 55^\circ$  の場合について、展開過程における葉身要素の運動エネルギー  $w$  の履歴を求めた。図7と同様に、それらを  $\Delta\theta = 0^\circ$  の場合の初期値  $w_0$  で無次元化して、無次元時間  $T$  を横軸にとって図11に示す。 $\Delta\theta = 55^\circ$  の場合、点Aの  $T \approx 0.23$  と点Bの  $T \approx 0.77$  の2カ所で、 $w^*$  の値が急激に大きくなっている。葉は折り畳まれた状態から、最初、葉脈を含む谷折線を挟む面だけが開き始め、点Aから山折線も展開を始めるため最初の  $w^*$  の増加が生じ、続いて点Bの  $T = T_1 \approx 0.77$  で、谷折線部が展開を終え  $\theta_v = 180^\circ$  となる。このとき、山折線部の  $\theta_c$  はまだ  $180^\circ$  に達しておらず、これ以後、山折線部の展開により葉身が角錐状から平面状へ変化するため、点Bで  $w^*$  の急増が生じたと考えられる。

そこで、折り畳まれた葉の凹部がなくなる時刻の  $T_1$  と、 $T = T_1$  までの総エネルギー  $W$  を  $\Delta\theta = 0^\circ$  の場合の総エネルギー  $W_0$  で除して無次元化した  $W^*$  を併せて図12に示す。この図から、 $\Delta\theta$  の値が大きくなるにつれて、 $T = T_1$  までの総エネルギー  $W$  もまた展開時間  $T_1$  も一様に小さくなってお

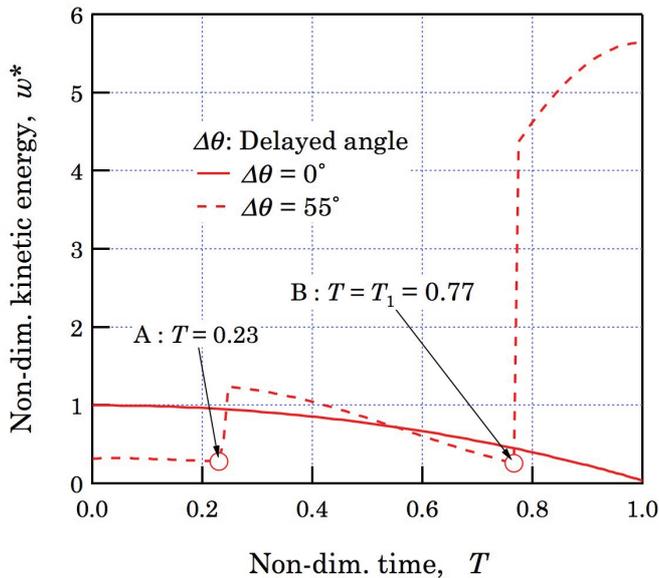


図 11 遅れ角がある場合の展開時の運動エネルギーの変化

り、 $\Delta\theta = 55^\circ$  の場合は、 $\Delta\theta = 0^\circ$  の場合に比べ、約 25% 少ないエネルギーで展開でき、展開時間  $T_1$  も約 22% 減少すると考えられる。しかしながら  $\Delta\theta$  は無限に大きくできなくて、その最大値は、葉の端が重ならず、どこも同じ遅れ角であると考え、 $360^\circ/7 \approx 51^\circ$  であるから、図 10 の測定値である  $55^\circ$  は  $\Delta\theta$  の限界値と考えられる。

以上のことから、光合成を最大の機能とする葉においては、出来るだけ早期に、しかも小さなエネルギーで受光面積を大きく出来ることが最良と考え、モミジの葉の展開角  $\theta_v$  と  $\theta_c$  の関係は、展開時間と展開エネルギーを最小にする最適な関係を採用していると言える。

## 6. まとめ

日頃の観察から、イロハモミジの葉は、必ずしも一気に平面的には展開せず、一旦、角錐体のような三次元的な形状に展開した後、平面的な葉に展開する二段式展開様式を示すことがわかり、その不思議さを理解するために、展開時間や展開エネルギーの観点から考察した。その結果、自然の中では、四方八方のあらゆる方向から太陽光が当たるため、光合成の観点だけから考えれば、葉身は、凹みの無い角錐体状に展開すれば、必ずしも平面になる必要は無いことが判明。その考え方に立つと、モミジの葉は、最初に葉脈を挟む凹み部が展開し、約  $50^\circ$  程度遅れて山折部が展開する展開様式を採用し、この展開様式が、展開エネルギーや展開時間の観点から考えて、最良の方法であることが明らかになった。大自然の中の極々小さな事象である、モミジの葉

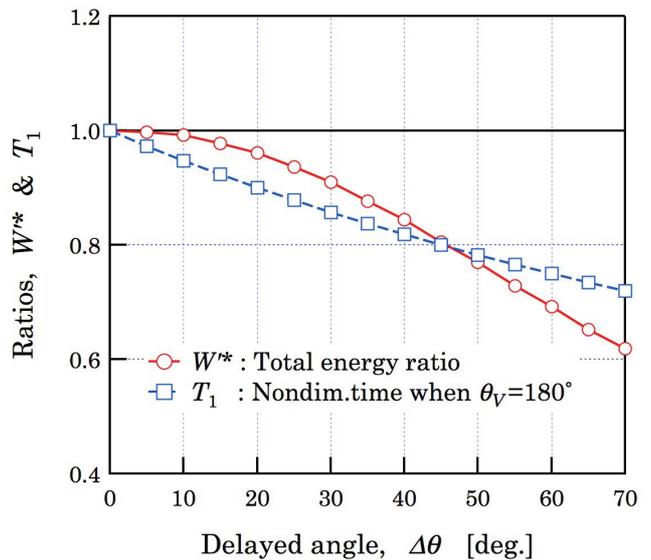


図 12 総展開エネルギーと展開時間の遅れ角による影響

の展開にも、エネルギー最小の大原則が脈々と貫かれていることがわかり、自然の営みの素晴らしさに、改めて感動させられた。

## References :

- [1] Kobayashi H, Kresling B. & Vincent J.F.V. , The Geometry of Unfolding Tree Leaves, Proc. Roy. Soc. Lond. B, 256 (1998), 147-154.
- [2] 小林秀敏、臺丸谷政志、機構論、No.982-1、(1998-9)、p.129-130.
- [3] Wootton R.J., Support and deformability in insect wings, J. Zool. Lond., 193 (1981), 447-468.
- [4] Brackenbury J.H. "Wing folding and free-flight kinematics in Coleoptera (Insecta): a comparative study", J. Zool. Lond., 232 (1994), 253-283.
- [5] Hass F., "Geometry and mechanics of hind-wing folding in Dermaptera and Coleoptera", M.Phil thesis, Exeter Univ., (1994).
- [6] Miura K. and Natori M., 2-D Array Experiment on Board a Space Flyer Unit, Space Solar Power Review, 5 (1985), 345-356.
- [7] You Z. and Pellegrino, Dynamic Deployment of the CRTS Reflector, Proc. 35th Structures, Structural Dynamics and Mater. Conf., Part 3, (1994), 1497-1505.

寄稿

## カブトムシにやどる「匠」

国立科学博物館動物研究部 野村周平

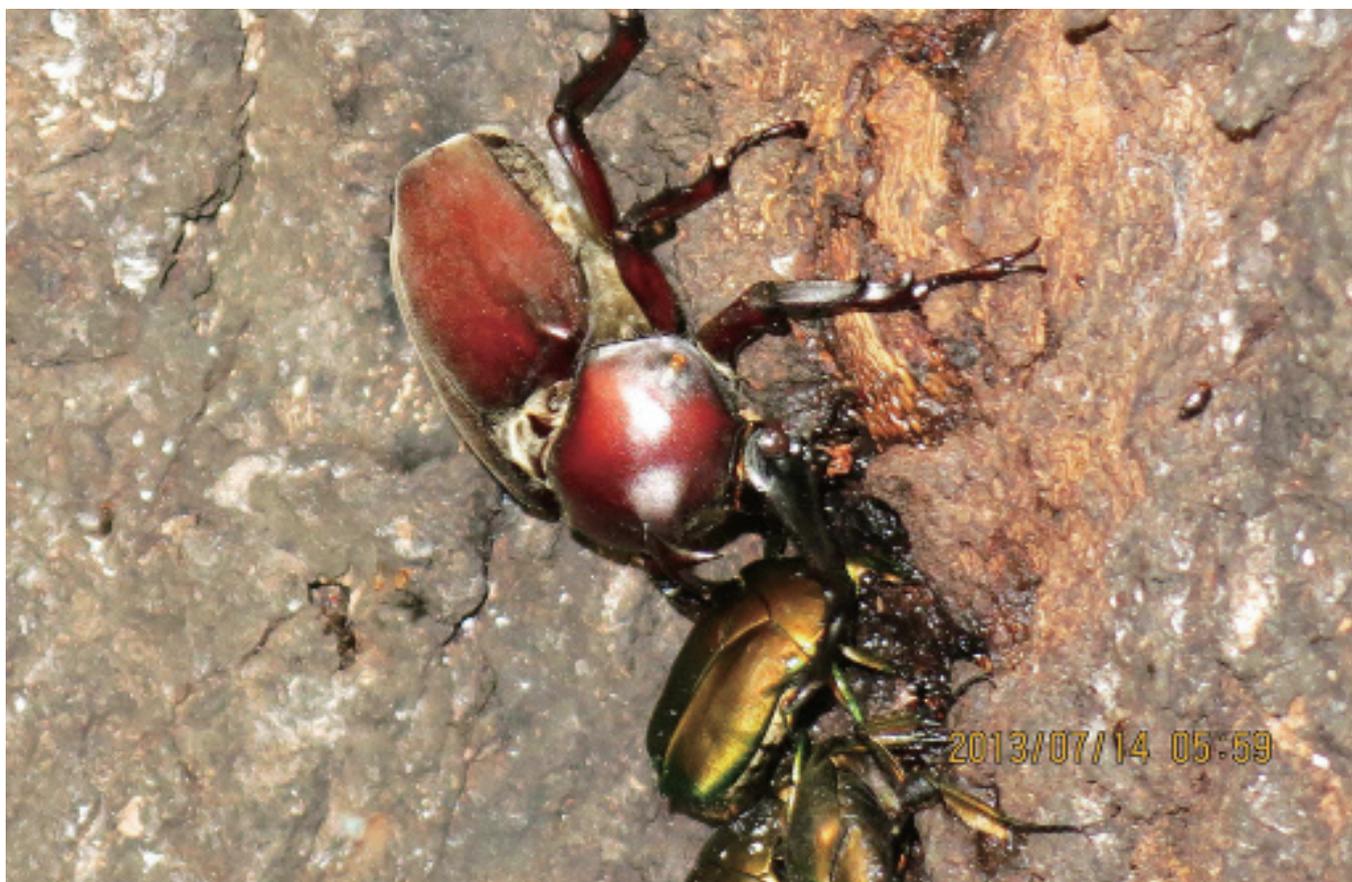


図1 クヌギの樹液に来たカブトムシ (東京都品川区)

### 1. カブトムシはどんな虫か？

連載「生物規範工学」に引き続き、本誌に寄稿させていただけることになった。大変光栄なことである。とはいっても難しい物理や工学の話は書けないので、当方が専門の昆虫の話をさせていただきたい。

カブトムシ(図1)というのは、日本でもっとも有名な甲虫であるといっても過言ではない。日本人であれば、子供からお年寄りまで実によく知っている。子供の時につかまえて遊んだだけではなく、大人になっても外国のカブトムシを熱心に集めたり、飼育している人たちも少なくない。カブトムシについてはもう研究しつくされていて、これ



図2 カブトムシの頭と胸のツノ（茨城県つくば市）

以上一体何を研究することがあるのか？と訝っておられる方々も多いのではないだろうか。多分それはそうでもない。

1999年頃から、それまで植物防疫法で一律に禁止されていた、外国産カブトムシの輸入が緩和され、外国産の生きたカブトムシ、特に中南米産の大型のヘラクレスオオカブトムシや、熱帯アジア産のアトラスオオカブトムシが輸入され、日本全国のペットショップなどで売られるようになった。このできごとについて賛否両論激しく対立していることは言うまでもない。しかし、我々のように生物多様性を研究する立場からすれば、大変怪しからんことで、地域固有の生物多様性を破壊する恐れが多分にあると考えている。同じ時期に規制が緩和され、全国に生き虫が流通するようになった外国産のクワガタは、時に生体が野外で発見され、日本古来のオオクワガタやヒラタクワガタとの遺伝子交流がすでに起こっているのではないかと大変心配されている。

それはそれとして、日本古来のカブトムシは、ボディサイズが外国産よりはずっと小さいので、注目度はかなり後退していると言わざるを得ない。がしかし、今でも子供たちのよき遊び相手であることには間違いない。ペット動物と



図3 つくば実験植物園で行われた「昆虫の飛翔に関する109ワークショップ」実習風景

してのカブトムシの特性には注目すべき点がいくつもある。まず、カブトムシは針で刺したりきばでかみついたりしない。きれい好きなので、ばい菌をまきちらすこともなく、安全この上ない子供たちの友達である。

そしてカブトムシのオスには立派ないかめしいツノがある(図2)。カブトムシの体は子供がいじくったくらいでは容易にこわれないほど頑丈にできている。セミやスズメシのようにうるさく鳴いたりしない。どんなにひどいことをしても泣き声一つあげない。こんなすばらしい友達が他にいるだろうか。カブトムシがすごいのは、そのように人間に何一つ悪さをしない、おとなしい友達なのに、それでいて私たちと同じ日本の野山にらす野生動物であるということだ。ペットというのはしばしば人間が手を加えて、犬や猫は何百年も人が飼いならした結果、今のように従順になっているのだが、カブトムシにはそのような家畜のような部分は1%もなく、100%野生動物である。親の代から家の中で育てたカブトムシであっても、野に放てば<sup>註1</sup>、次の瞬間から野生動物として暮らし始める。これはすごいことではないだろうか。

このように私たちが日ごろからよく見知っているはずのカブトムシには、実はこれまであまり調べられたことのない、驚くような秘密が隠されている。2013年8月に当館つくばキャンパスで、実際にカブトムシを捕まえ、さまざまな特性を調べる実習を行った(図3)が、実習を指導しなければいけない立場の私の方が驚きの連続だった。カブトムシの体と機能はあまりにも精巧にできている。そこには一流の工芸家や技術者の仕事を目の当たりにするような感動がある。その一端をぜひここで読者諸兄にご紹介させていただきたい。

## 2. カブトムシの角はなぜ硬い?

カブトムシの角は非常に硬い。上にも書いたが、乱暴な子供が少々いたずらをしたくらいでは、傷もつかないほど硬い。そもそもカブトムシの角の構造はどのようになっているのだろうか?そのことを調べるためにまずは角の破断面

---

註1: 飼育個体を野外に放すことを奨励しているわけではない。上に述べている通り、飼育個体はたとえ在来種であっても、自然の生態系に悪影響を及ぼす可能性があるため、野外に放すことは厳に慎むべきである。

を作って調べてみることにした。カブトムシの角は確かに非常に硬いが、どんな道具を使ってもまったく壊れない、というほどではない。それで、大型のペンチで挟んでぼきつとやる、原始的な方法でやってみた。

そうするとぼきつと見事に折れた(図4)が、その断面はどうなっているか、想像がつかだろうか?金属棒を破断した時のように、中身は無垢でまったく空洞はないだろうか?それとも中は空洞で、パイプ状になっているだろうか?空洞になっているとしたらその空間には何が入っているのだろうか?

破断面をSEMで観察してみる。すると外側は厚い体壁になっているが、中心部は空洞で、よく見ると粗い蜂の巣状に薄い膜が張り巡らされたような構造、すなわちハニカム構造になっている(図5, 6)。サンプルはよく乾燥させたものだが、もともとは体液があつてそれが乾ききつたというような様子ではなく、初めから空気が入っているものようである。

ここで生きているときのカブトムシの振る舞いについて思い起こしてみよう。♂は頭に大きなツノ、胸(前胸背)に小さなツノを備えている。他のオスと戦って交尾相手を勝ち取るため、あるいは樹液のレストランで、群がるカナブンやハエなどの小者を追い払うためにツノは必要だ。しかしそうであっても、頭の上にこんな大げさなものが乗っかっているのはいかにも邪魔くさそうである。しかもカブトムシはこれをたたんだり、しまうこともせず、前方へ掲げたまま空中を飛び回らなければならない。カブトムシにはしかし、それを気にするような気配はない。頭の角は意外に軽量なのではないだろうか?外側の体壁さえがっちり硬いものであれば、中は空洞で、全体に軽量化したほうが都合がよかつたのではないだろうか?

## 3. カブトムシ外皮の強化構造

カブトムシ♂頭角の外壁破断面をSEM観察してみると、繊維のようなものが同じ方向に並んだ薄い層が見える。この層は一重ではなく、何重にも重なっている。そして、繊維の方向がおおよそ90°位ずつ入れ替わりながら重なっているようなのである(図7)。つまり、グラスファイバーの釣竿や、炭素繊維による航空機の外壁など同様の構造を、カブトムシは何万年も前から保持していたことになる。自然物と人工物のこの見事な一致は、単なる偶然によるものではなく、薄い構造を丈夫にするという共通の必然性に

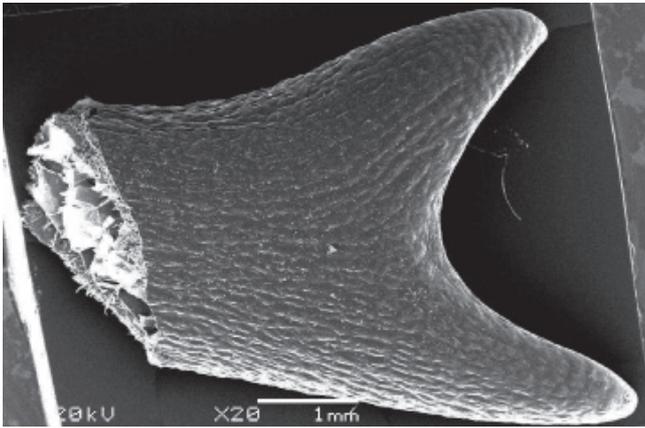


図4 カブトムシの頭角破断面の観察部位

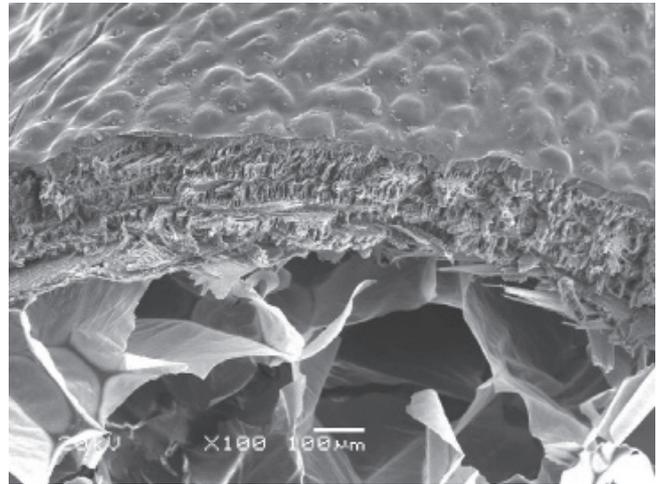


図6 カブトムシの頭角破断面のSEM写真(100倍)

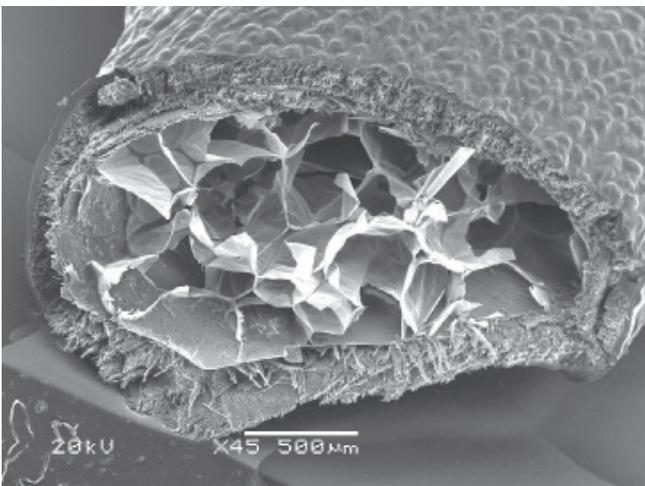


図5 カブトムシの頭角破断面のSEM写真(45倍)

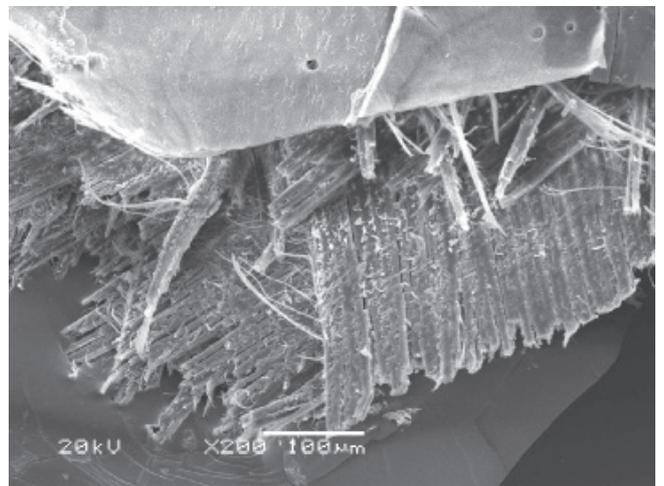


図7 カブトムシの頭角破断面のSEM写真(200倍)

実はこの構造は以前からよく知られていて、昆虫の体壁構造の基本的な概念である。カブトムシについても実はすでに調べられているのだが、その論文を見て、私は自然の叡智に感激した。その論文はツノではなく、カブトムシの前翅についてのものであったが、ほぼ同様であると思っていただけで間違いはない。カブトムシの前翅では、ツノと同様、同じ方向に並んだ繊維の薄膜がある角度をもって重ねあわされている。それによって、クワガタに挟みつけられても容易に穴があいたり破れたりしない、丈夫な外皮を構成している。その互い違いの角度が90°ではないというのである。一定ではないが、毎回約10°ほどずつズレながら、10~20枚ほどの薄層が重ねあわされているという [1]。

ご存知のとおり、ベニヤ板のような人工物は、このような場合には0°と90°の繰り返しに決まっている。そうすることが最も経済的だからだ。しかしそれはあくまでも人間

側の都合に過ぎない。0°と90°の繰り返しだけでは、0°と90°に対してしか、十分な強度を保ちえない。斜め45°からの攻撃に対する強度は保障されていない。

ところがカブトムシの外皮は、薄層の重ね合わせが10°ほどずつ、ずれることによって、だんだんとそれがずれてゆき、結果的にはより多くの方向への強度を支えている。これは見方によっては、自然現象の中の誤差であって、たまたまそうなったと考える向きもあるかもしれない。しかし結果的によりすぐれた結果を生んでいるならば、それは自然選択に勝ち残り、自然の生きものとしての遺伝子に引き継がれていくだろう。ここに私は、単なる「結果オーライ」というのではなく、何かむしろ「神業」と呼ぶにふさわしい匠の技を見るような気がするのである。

#### 4. ツノの断面を撮影

以上説明したようなカブトムシ♂の頭角構造が一目でわかるようなわかりやすいイメージはないだろうか？端的に言えば上で示したようなツノの断面のもっときれいな写真は撮れないだろうか？実はカブトムシのツノは外壁があまりにも硬い点と、中にあまりにも柔らかいこわれやすい構造が同居しているために、その断面切片を作るのがきわめて難しい。これまでの技術ではそれは全く不可能だった。

しかし、国立科学博物館の棘皮動物の研究室や地学研究部で非常勤職員をしている田尻理恵さんが編み出した方法によって、それはほぼ可能になった。田尻さんは、岩石の薄片を作る技術を応用して、カブトムシのような硬い動物構造の断面を写真撮影することに成功した（図8）。それはかいつまんで言えば次のような方法である [2]。

アルコール液浸のカブトムシのツノを、まずはアセトン上昇系列に浸漬して脱水を行う。次に減圧により樹脂を含浸させアセトンと置換する。樹脂を加熱重合させ、硬化させる。樹脂に包埋されたサンプルの見たい部分を挟むようにして、両側を岩石カッターで切り落とし、まずは分厚い資料片を作る。このままだと光を透過しないので、観察や写真撮影は難しい。そこで岩石薄片の技術を用いて、カーボン研磨剤とグラインダーで削っていった、光を透過する厚さまで薄くする（カブトムシの角で0.2 mm程度、技術的には0.01 mmまで可能）。

そのようにして作った薄片は、1枚作るのに、大変な手間がかかるのは事実だが、硬いカブトムシの頭角を一刀両断したような見事な断面写真を撮影することができた（図9）。これを見ると、カブトムシの♂頭角の外壁が、意外に幅の薄いものであることが見て取れる。さらにその一部を拡大して、やはり岩石の切片を観察するための偏光顕微鏡を用いて写真撮影すると、繊維の方向の異なる薄膜が15枚以上重なった様子をはっきりと観察することができた（図10）。

#### 5. カブトムシのツノ表面には何がある？

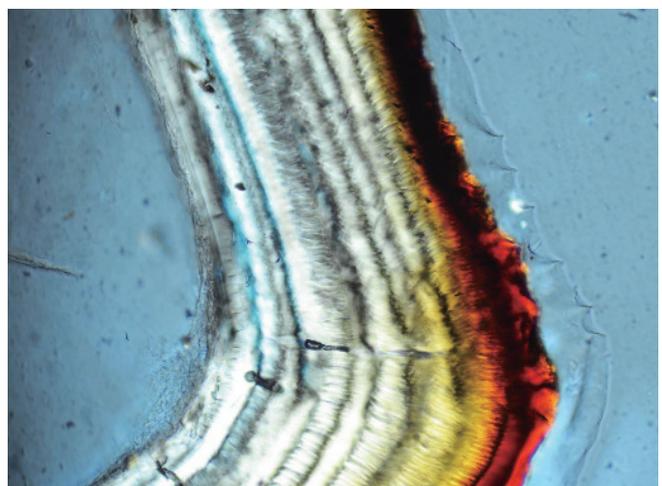
以上のように、カブトムシの頭角は、これまであまり調べられてこなかった内部構造によって、丈夫な、そして軽量の器官として成立していることが分かった。カブトムシのツノは先にも述べたように、♂同士のけんか（競争）や、競合他種との競争に勝つための「武器」である。そうすると人間の悪い癖として、人間の持っている道具に例えてし



図8 カブトムシ♂頭角断面写真の切断面を示す



図9 カブトムシ♂頭角断面写真（光学顕微鏡）



112 図10 カブトムシ♂頭角断面拡大（偏光顕微鏡）

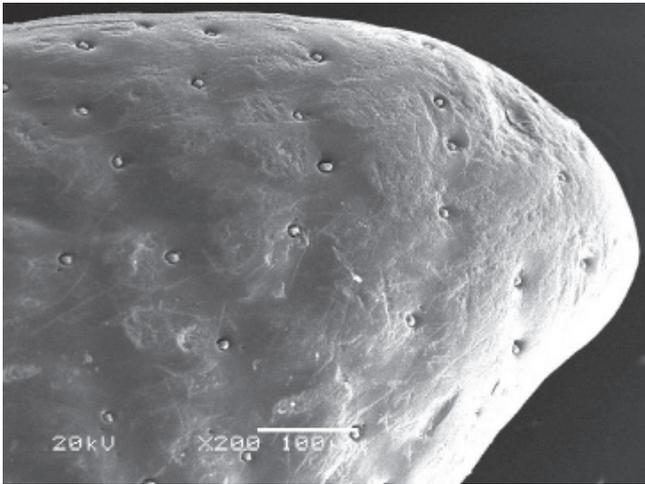


図 11 カブトムシの頭角先端部表面 SEM 写真 (200 倍)

まって、あたかも生物の持っているそれが、人間の道具と同様のものだと思い込んでしまう。つまり、カブトムシのツノは、あたかも人間の武器と同様であると思い込んでしまっているのではないか？はたしてそうだろうか？

カブトムシのツノはカブトムシの身体の一器官であって、取り替え可能な人間の武器とは大いに異なる。そのことを忘れてはいけない。確かにカブトムシは時として、ツノを突き合わせて互いに戦い、時に深く傷つく。ツノ自体は何も感じない、刀や槍のようなものかという、どうもそうではないらしいのである。

カブトムシの頭角を SEM 観察してみると、その表面は多少の起伏があって、ごつごつした感じである。観察した部位について言えば、おおよそ無毛である。がしかし、毛先が根元で欠けたような微小器官が、まばらに、ほぼ等間隔に並んでいる (図 11)。しかも、それに付随して、小さな孔が表面に一つずつあいている (図 12)。私の経験から言えばこれは、感覚器官 (受容器) である。どのような機能をもつか、具体的には分からないが、ツノ表面の環境条件や状態変化を感知する器官であると推定される。

昆虫は外骨格の生物なので、カブトムシの頭角のような、きわめて硬い外殻であっても、その表面には微妙な環境変化を感知する機構を備えている。同様な器官は、セミ♀の硬い産卵管の表面にもあり、極めて微小な丸い感覚子が、まばらに等間隔で並んでいる。想像するに、昆虫の硬い外殻表面といえども、人間が手探りでものを探す程度には何か外界の情報をそこから得ているのではないだろうか。少なくともそれくらいのことができる道具は備わっているようである。

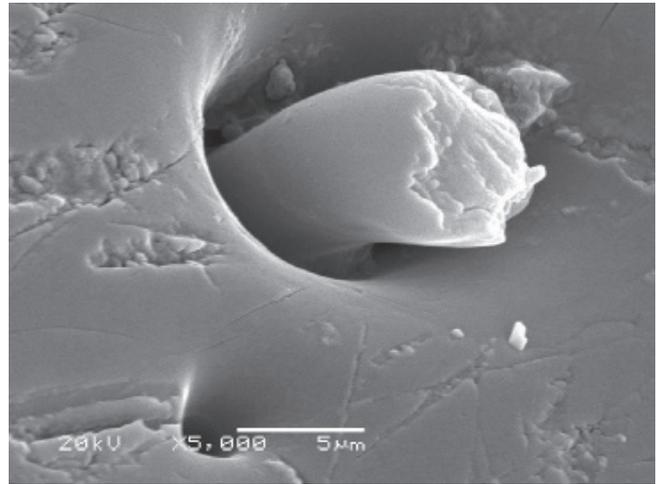


図 12 カブトムシの頭角先端部表面感覚子 SEM 写真 (5,000 倍)

あるいは、と想像をたくましくする。古の剣豪や拳法の達人は、仕合う時、1、2回、剣を、あるいは拳を交えるだけで相手の力量がわかるという。その感覚は剣豪または達人本人しか知りえないことなので、凡人たる我々には知り得べくもないが、そういうことはあるかもしれないと想像することはできる。カブトムシのツノ先の感覚はそういうものであるかもしれない。カブトムシは♂同士戦う際に、どちらかが倒れるまでやりあうのではなく、力量の差が明らか場合には、無駄な争いを避け、1、2度ツノつき合わせただけで戦いをやめてしまう場合も多いからである。ツノつき合わせた時に、相手が何であるかを知り、相手の力量を量ることができる、それを感知するセンサーとして、このような感覚子が備わっていると何もおかしくはない。

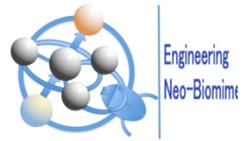
## 6. カブトムシの知られざる世界

実は本稿のお話をいただいたときに、カブトムシの♂の頭角の他にもある、あまり知られていない驚くべき性質についても言及するつもりだった。例えばカブトムシが鳴くことであるとか、成虫だけではなく幼虫も、蛹も鳴くことであるとか、日本甲虫学会誌に投稿中の、前翅の開閉メカニズムとかである。しかしそれらをここで解説しても、いたずらに冗長になってしまうだけなので、それらは別の機会に譲りたい。いずれにしても、カブトムシという、あまりにもよく知られた虫であっても、いまだに広くは知られていない、あるいは未解明の部分でさえ多くあることがお分かりいただけたことと思う。

総研の阿多誠文様、関谷瑞木様、日頃よりバイオミメティクスについて多大なご指導をいただいている、東北大学の 下村政嗣先生、札幌の下澤楯夫先生、浜松医大の針山孝彦先生に厚く感謝の意を申し上げる次第である。カプトムシ頭角の薄片作成について懇切にご教示いただいた、国立科学博物館の田尻理恵氏にも深謝したい。また今回特に、工学研究者のためのテキスト執筆を通じて、多くの示唆を与えて下さった、ワシントン大学(シアトル)の田谷稔教授に、この場を借りて厚く御礼申し上げたい。本研究の一部は、文部科学省科学研究費新学術領域の計画研究「バイオミメティクス・データベース構築」(課題番号:24120002; 代表者:野村周平)およびJST 受託研究費「階層的に構造化されたバイオミメティック・ナノ表面創製技術の開発」の助成を受けている。

#### References:

- [1] 倪慶清・陳錦祥, 2011. カプトムシから学ぶ構造材料. バイオミメティクス研究会編 次世代バイオミメティクス研究の最前線—生物多様性に学ぶ—. シーエムシー出版, 東京, pp. 252-259.
- [2] 田尻理恵・藤田敏彦, 2013. 樹脂包埋と研磨による動物組織観察資料作成法—硬組織と軟組織の同時観察—. タクサ (日本動物分類学会誌), 35: 24-34.



## (5) 国内研究動向紹介

## 15-1 バイオミメティクス研究会

「生態系バイオミメティクス-持続可能性に向けた新しいトレンド-」に参加して

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 ナノチューブ実用化研究センター  
関谷瑞木<mizuki-sekiya@aist.go.jp>

2015年7月7日、産業技術総合研究所臨海副都心センター別館で、バイオミメティクス研究会「生態系バイオミメティクス-持続可能性に向けた新しいトレンド-」が開催された。今回の研究会は、「生態系バイオミメティクス」をテーマに、バイオミメティクスの持続可能性への寄与について、トランス・サイエンスの視点から議論する機会を提供するものであった。本研究会は、高分子学会バイオミメティクス研究会とISO/TC 266 Biomimetics 国内審議委員会の主催で行われた。

研究会はバイオミメティクス研究会運営委員長であり、科学研究費新学術領域「生物規範工学」の領域代表も務める下村政嗣氏の挨拶に始まり、8名の講演者が登壇した。前半ではバイオミメティクス研究開発と社会をつなぐ様々な仕組みや動きを紹介する講演が、後半は様々な生物の不思議を紐解く最先端の研究開発動向を紹介する講演が行われた。

富士通研究所の渦巻拓也氏から、「環境省の自然模倣技術動向調査と企業から見た同技術への期待」とのテーマで、環境省の委託を受けて実施されたバイオミメティクス研究開発の動向調査の結果とその結果を分析して作成された提言を紹介するとともに、民間事業者からバイオミメティクスへどのようなことが期待されているのかが述べられた。また、あらゆるものがインターネットでつながった世界に富士通研究所が描く、新しいイノベーションのアプローチが紹介された。

筆者から「バイオミメティクスの国際標準化と持続可能性 ナノテクノロジーの事例から学ぶこと」と題して、現在国際標準化機構（ISO）で進んでいるバイオミメティクスの国際標準化の動向や標準作成の課題について、今後の戦略を練る際に参考となる同じ新興の科学技術であるナノテクノロジーの国際標準化の事例を交えつつ、紹介した。

2015年4月に、日本のナノテクノロジー関連企業の団体であるナノテクノロジービジネス推進協議会（NBCI）内に、バイオミメティクス分科会が立ち上げられた。NBCI バイオミメティクス分科会主査でもある日立製作所の宮内昭浩氏より、分科会の構成や活動内容について紹介された。現在、分科会にはバイオミメティクスの研究開発や応用に対して様々なスタンスの16社が参画している。宮内氏によると、参画企業それぞれのバイオミメティクスへの期待には多少の温度差はあるものの、企業の抱える技術的な課題をバイオミメティクスの活用によって解決したいと考えていることに違いはなく、両者を結び付ける仕組みが重要だと考えているという。

国立科学博物館の田中法生氏より「生物の水草の生態と適応進化」とのタイトルで、水草の分類学上の位置づけの解説、さらには水草の不思議な受粉のための仕組みが紹介された。また、一部の水草で観察することができる水を媒介とする受粉のための「水媒送粉機構」の獲得に至る水草の進化について紹介がなされた。

広島大学の植木龍也氏より「ホヤ類の被囊の微細構造および化学的性質-新規接着・防汚染物質の開発を目指して」と題して、接着・付着防止という2種類の相反する機構が同一の個体に存在するメカニズムを解明する研究が紹介された。ホヤ類はセルロースを体内で合成することができ、そのセルロースを主成分とする被囊で体表を保護し、体表面に他の動植物を付着させないという特徴がある。

海洋研究開発機構の椿玲未氏より、「スポンジボブだけでない、海綿のバイオミメティクス」と題して、海綿の特異な水循環機構についての研究が紹介された。海綿は、体内に網の目ようになった水路状の空隙をもち、その水路に海水を循環させて、海水中の有機物を濾しとって食べている。海綿は海水の循環を鞭毛の非対称な運動によって行っているという。

東北学院大学の松尾行雄氏が、「音響学におけるバイオミメティクス」とのテーマで、生物のエコーロケーションに関する最新の研究動向を交えつつ、その仕組みの解説を行った。コウモリとイルカを取り上げ、それぞれどのような仕組みでエコーロケーションを行っているのかについての詳しい解説と、生物のエコーロケーションの産業への具体的な応用の可能性についても言及された。

最後に、技術情報協会から出版されている『生態模倣技術と新材料・新製品開発への応用』に執筆されている京都工芸繊維大学の萩原良道氏から、話題提供が行われた。「不凍タンパク質による氷結晶抑制とその応用の可能性」と題して、これまでよりも高いエネルギー効率を実現するための新規材料として注目されている生物が低温環境で生きるために獲得した耐凍性に着目した研究の最新の成果が発表された。

研究会では、環境に優しくかつ高機能な新規材料の開発のヒントと期待される研究成果に対して、特に質疑が活発であった。国内外の環境規制が今後も継続的に強化されると見込まれる状況にあって、出席者のかなりを占めた企業からの参加者は本分野に対して、生物の仕組みに学んで様々な技術的課題の解決を図りたいと期待していると、鮮明に感じられた。

所属班：公募班

所属機関：浜松医科大学 医学部 生物学

氏名：高久 康春



## 科学研究費「生物規範工学」画像検討会（1日目 7/16）について

初日の画像検討会では、野村周平先生（A班科博）、椿玲未先生（JAMSTEC）、森直樹先生（京都大学）、村上麻季先生（北大博物館）による新データの紹介がありました。本稿では、浜松医大研究チームについての報告を行います。



図1. 発表の順番を待つ竹原さん  
（緊張しています！）

浜松医大では、NanoSuit®法による各種「生きたままの生物」の観察・解析が試みられています。NanoSuit®法は、生物が生来持つ「対・真空」能力を利用し、電子顕微鏡（FE-SEM）により超高解像度で観察することが可能です。しかし、生命は多様であり、高真空下で生命維持するという新しい概念の基では、まだまだ分からないことがたくさんあります。本画像検討会では、本学・医学科2年の竹原さゆりさん（図1・図2）が代表になって、生きた植物のFE-SEMによる超微細構造を中心に研究発表を行いました。研究チームにとって、植物の詳細な報告はこれが初めての機会でした。

NanoSuit®法の基本原理は、生物が体表に持っている細胞外物質（ECS）に、プラズマもしくは電子線を照射し、ナノスケールの薄膜を形成させることによって脱水・脱気を防ぎます。NanoSuit®で保護した桜やバラ、タンポポなどの生きた花卉のFE-SEM像と、これまでの方法による（化学固定・脱水・乾燥させた）試料とを比べると、NanoSuit®試料は瑞々しく立体的な構造を維持していました。このことから、植物においてもNanoSuit®が効果を発揮することが明らかになりました。さらに、植物により花卉のサブセルラー・サイズ構造はユニークに異なっており、新たなバイオミメクス材料としての可能性が示唆されました（図3）。



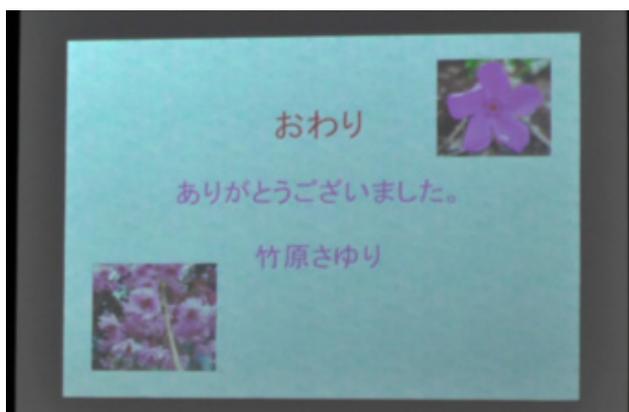
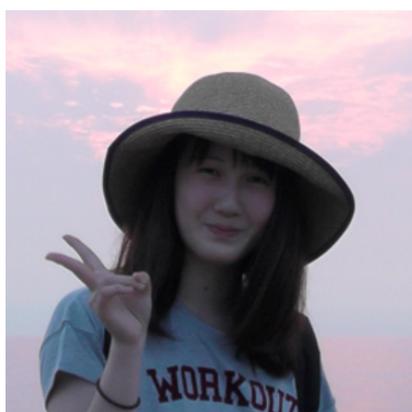
図2. マシントラブルには、針山先生が優しく対応！



これまで NanoSuit<sup>®</sup>チームは、医学・生物学・化学・物理学、および電子顕微鏡のエキスパートからなる「異分野連携の研究ネットワーク」によって支えられてきました。今回発表を担当してくれた竹原さゆりさんをはじめ、現在、幾人かの若い医学生さんが精力的に実験に参加してくれるようになり、新しい展開をみせています。

図3. 新規・植物画像の説明をする竹原さん。発表の後には、下村先生（左から2番目）に、新規サブセルラー・サイズ構造について熱烈的な質問をいただきました。

また、画像検討会の後には、画像検索システム演示会が開催されました。出席者それぞれが質問画像数点を持ち寄り、各自プロジェクターで画像システムを演示しながら、類似画像の検索を行いました。出席者からのコメントを基にした”双方向”の議論が成されました。



所属班：公募班

所属機関：大阪工業大学 工学部 応用化学科

氏名：藤井秀司



## 科学研究費「生物規範工学」全体会議（2日目 7/17） に参加して

2015年7月15日(水)～17日(金)に北海道大学（札幌市）にて、全体会議および画像検討会が開催された。本稿では、全体会議2日目（7/17開催）について報告を行う。

・「生物規範階層ダイナミクス ～異分野連携による新たな学術領域の研究開発展開～」  
国立研究開発法人 物質・材料研究機構 細田 奈麻絵

「生物に学ぶ接着機構の開発」をテーマとし、異分野を融合した組織化による研究が推進され「異分野連携の研究ネットワーク」が構築されていることが報告された。異分野連携の中で、大学院生に複数の異なる分野の専門家に直接指導を受ける機会が与えられ、「若手研究者の育成」が良好に推進していることが述べられた。

・「ロバストな表面機能を持つバイオミメティクス材料の開発」  
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 穂積 篤

生物の多くは、様々な物質を体表に分泌することで表面機能を維持している。生物の分泌による自己修復メカニズムに学び、機能性分子を何らかの刺激により徐放し、機能を維持するようなこれまでにないロバストなバイオミメティクス材料について最近の研究の進捗が報告された。

・「応力応答性粉末状粘着剤の創出」  
大阪工業大学 工学部 応用化学科 藤井秀司

高粘度液体である蜜を内部液にしてリキッドマーブルを作製するアブラムシの技術に倣い、高粘度液体である粘着剤を内部液として含んだリキッドマーブルを作製することで、粘着剤の粉末化を行う研究について報告された。また、粉末状粘着剤の構造・粘着力の応力応答性について述べられた。

・「生物における「サブセルラー・サイズ構造」の機能解析」  
京都大学農学研究科応用生命科学専攻 森 直樹

ガ類昆虫におけるフェロモンブレンドの受容機構の解明と数理モデルの構築を目指し、2～4成分でそれぞれ異なる構成比率から成るフェロモンブレンドを利用する

ガ類から性フェロモン受容体の同定を試みる研究について紹介された。また、昆虫の振動受容について、コオロギの鼓膜器官の機能発現の解明に向けた研究についても報告があった。

・「培養細胞の常温保存への挑戦: ネムリユスリカの乾燥耐性機構から学ぶ」

独立行政法人農業生物資源研究所 奥田 隆

極限的な乾燥耐性のある生物を模倣しての「簡便な自然乾燥法による培養細胞の常温保存法」について報告があった。具体的には、ネムリユスリカ由来培養細胞(Pv11)を用い、その常温保存技術の確立と共にその仕組みを模倣して、乾燥耐性を持たない培養細胞の乾燥耐性の付与を試みる取り組みについて紹介があった。

・「生物規範飛行メカニクス・システム—スケーリング法則, バイオメカニクス及びバイオミメティクス—」

千葉大学工学研究科 劉 浩

生物羽ばたき飛行における流動性と波動性に関する運動、力学およびエネルギーに対してスケーリング法則を導入することで得られた普遍的な生物運動原理、フクロウ翼表面セレーション構造のバイオメカニクス、そして鳥翼を規範とした風車翼のバイオミメティクス・デザインについて紹介された。

・「分化フラストレート幹細胞のメカノシグナルの計測と制御」

九州大学先導物質化学研究所 木戸秋 悟

幹細胞の品質保持のための培養技術には、生体内においてどのように幹細胞性の保持がなされ得るかを探求し、その原理を生かした培養材料を開発することが重要である。幹細胞の未分化維持・増殖の原理として、『幹細胞分化フラストレーション』仮説に基づき、その誘導のための基材設計と現象の実証への取り組みについて報告された。

・「生物規範工学での学域での研究・活動 今年度計画と来年度の計画」

金沢大学 人間社会研究域 香坂 玲

実装に向けたエンジニア/科学者の再架橋・特許の動向とデータベースの連動、ISO等の企業・行政による規格・標準化の効果の評価、社会に科学的な概念と機能を伝え広く普及させるデルファイ、バックキャスト、参加型シナリオ構築等 複数の手法の評価について、今後の研究活動計画が述べられた。

最後に、総括班内部評価委員から講評を頂き、参加者一同、改めて身を引き締めた。また、外部評価意見への対応について話があった。

所属班：公募班  
所属機関：旭川医科大学医学部化学教室  
氏名：室崎 喬之  
開催場所：北海道大学  
日時：2015/ 7/ 16 - 17



## 生物規範工学全体会議に参加して

7月の爽やかな天候の中、北海道大学にて全体会議が開催された。全体会議初日は、北海道大学工学部フロンティア応用科学研究棟 鈴木章ホールにて開かれ、研究棟入口では鈴木章先生の銅像が我々を出迎えてくれた。本会議にて行われた講演に関し以下に紹介する。

初日は、下村領域代表より開会の挨拶後、中間評価に対する対応についてのコメントがあり、本会の開催と同時にサイトビジットが行われる件についてのアナウンスがあった。その後、各計画班、公募班からの講演が行われた。

A01 班：野村班長より、バイオミメティクスデータベースの講演が行われ、マイクロ CT による昆虫の 3D 画像データの紹介があった。続いて同じく A01 班の長谷山先生より最新のバイオミメティクス画像検索の紹介があり、また使用方法に関する質疑応答等が行われた。

公募班：山階鳥類研究所の森本先生より鳥類の色彩・構造色に関する発表が行われ、鳥の色の発生メカニズムや鳥の構造色に関する研究が紹介された。

公募班：浜松医科大学の高久先生より、ナノスーツ法の様々な応用例（猫の毛、花卉など）が紹介された。また本講演では浜松医科大学の学生による発表も行われた。

C01 班：石田先生より持続可能な社会に求められるライフスタイルに関する研究発表があり、今後の厳しい環境資源制約のある中で豊かである為にはどうすればいいのかという事に関し講演が行われた。

C01 班：山内先生よりバイオミメティクス製品支援の研究について講演され、バイオ TRIZ に関する研究発表が行われた。

公募班：旭川医科大学の室崎より、自己組織化表面微細構造による海洋付着生物の付着阻害材料に関する研究発表が行われた。

B01-1 班：小林先生より、海洋生物の表面を模倣したポリマーブラシを用いた親水性防汚材料研究、流体抵抗低減に関する研究発表が行われた。レオメーターを用いた流体抵抗試験結果などが示された。

B01-1 班：黒川先生より、魚の吸盤を模倣したゲル材料の研究発表があった。水中で強い接着性を示す脱着可能な材料として期待される。

B01-2 班：木村先生は、昆虫の複眼レンズ表面のニップル構造形成メカニズムについて発表され、ショウジョウバエをモデルに用い発生過程におけるニップル構造の TEM 像などについて説明がされた。

B01-2 班：針山先生より昆虫のモスアイ構造の表面構造と乱れについての発表があり、モスアイ構造の構造乱れの定量化などについて議論が行われた。

公募班：海洋研究開発機構の椿先生より、海綿の水輸送機構に関する研究発表があり、カイメン内水路の 3D 像や襟細胞の鞭毛運動による水輸送メカニズムなどについて説明があった。その後、内部評価委員の先生達より講評を頂いた。

2 日目は、場所を創成研究機構大会議室に移し、講演が行われた。

B01-3 班：細田先生より、異分野連携による研究ネットワークの構築、若手研究者の育成、生物規範工学の国際標準化に関する研究発表が行われた。

B01-3 班：穂積先生からは、蓮の葉とは別のアプローチによる、自己修復機能を兼ね備えた撥液表面に関する研究発表がなされ、離漿現象を利用した材料表面にてマヨネーズやケチャップが滑落する様子が紹介された。

公募班：大阪工業大学の藤井先生からは、アブラムシにヒントを得たリキッドマーブ

ルの研究について講演され、リキッドマールによるハンドリングが簡便な、粉末状接着剤の研究が紹介された。

B01-4 班：森先生からは、昆虫と昆虫間、植物間に見られる相互作用についての講演が行われ、蛾におけるフェロモンブレンドの紹介や、昆虫に食害を受ける植物の葉に見られる毛茸（トライコーム）の紹介があり、トライコームによって食害する昆虫が消化不良を起こしている様子等が示された。

B01-4 班：奥田先生からはネムリユスリカの乾燥耐性に関する講演があり、ネムリユスリカがトレハロースや LEA タンパク質を生産する事によって組織を保護した状態でガラス化する様子などが示された。

B01-5 班：劉先生から、羽ばたき飛行ロボットに関する講演があり、超低速風洞での実験やフクロウの羽のセレーション機構と PIV 流体計測、また鳥規範型のマイクロ風車の研究について説明があった。

B01-5 班：木戸秋先生から幹細胞の分化制御に関する講演があり、幹細胞に弾性率の異なる基材によってメカノシグナルの振動を入力する事により、未分化保持する事が示された。

公募班：金沢大学の香坂先生からは、生物規範工学に関する特許の動向などについて講演があり、生物多様性条約に比べバイオミメティクス標準化は発展途上国の参加が少ない事などが説明された。

最後に、内部評価委員の諸先生より講評を頂いた後、下村代表より今後の画像検討会、全体会議などのスケジュールについてアナウンスがあり、閉会した。

新たな公募班の先生方を迎え、よりこの領域の多様性が増したという事と、残りの2年間で本当の意味での生物規範工学を発展させていく研究者育成を行うという決意が感じられた 会議であった。

## (6) 新聞・報道

## 【新聞・報道】

### 総括班

- (1) 化学工業日報 (2015年4月21日)

「東京で文化勲章受賞記念シンポ」

平成27年4月17日に東京コンベンションホールで開催された、國武豊喜先生文化勲章受賞記念シンポジウム－分子組織化学ならびにナノ高分子科学の創成と発展－が報道されました。

- (2) 日刊工業新聞 (2015年7月10日)

モノづくり日本会議「ネイチャー・テクノロジー研究会」が主催した、第3回「2030年の『心豊かなライフスタイル』コンテスト」の表彰式が行われ、審査委員長の石田秀輝先生 (C01班、総括班) の総合講評と領域代表の審査講評が掲載されました。

### B01-5班

- (1) TBS TV (2015年9月19日)

EARTH Lab ー次の100年を考えるーにおいて、劉先生が開発したホバリング能力を有するハチドリ型ロボットが災害現場で活躍する可能性が紹介されました。

[http://www.tbs.co.jp/tv/20150919\\_D33F.html](http://www.tbs.co.jp/tv/20150919_D33F.html)

### C01班

- (1) 日刊工業新聞 (2015年7月10日)

モノづくり日本会議「ネイチャー・テクノロジー研究会」が主催した、第3回「2030年の『心豊かなライフスタイル』コンテスト」の表彰式が行われ、審査委員長の石田秀輝先生 (C01班、総括班) の総合講評と領域代表の審査講評が掲載されました。

### 公募班

- (1) 接着剤新聞 (2015年10月1日)

「アブラムシの習性に注目：粘着剤の粉末化に成功」

## (7) アウトリーチ活動

## 【アウトリーチ活動報告】

- (1) 2015年9月12日-23日、名古屋市科学館にて企画展「バイオなものづくり～生物の多様性から学ぶ」が開催されました。  
14,909人の来場者があり、盛況な企画展となった。愛知県はものづくりの地域でもあり、ここに暮らす人々にとっても、バイオメティクスは新鮮な視点であったようで、熱心に見学される方が多く見受けられた。  
[http://www.ncsm.city.nagoya.jp/visit/attraction/special\\_exhibition/post\\_30.html](http://www.ncsm.city.nagoya.jp/visit/attraction/special_exhibition/post_30.html)  
※NHKの取材は下記の通り。  
<http://www3.nhk.or.jp/tokai-news/20150921/4952422.html>
- (2) 2015年7月8日-10日、第60回高分子夏季大学(新潟観光コンベンションセンター(朱鷺メッセ))において、分科会「バイオメティクス」が開催され、下村政嗣先生(千歳科学技術大・総括班)、針山孝彦先生(浜松医科大・B01-2班)、椿玲未先生(海洋研究開発機構・公募班)らが講演を行いました。  
<http://main.spsj.or.jp/kaki/program.html>
- (3) 2015年5月27日-29日、第64回高分子学会年次大会(札幌コンベンションセンター)にて「バイオメティクスが拓く技術革新」特別セッションが開催され、井須紀文先生(株)LIXIL・産学連携G)、長谷山美紀先生(北大・A01班)、亀井信一先生(株三菱総合研究所・評価G)らが講演を行いました。  
[http://main.spsj.or.jp/nenkai/64nenkai/jp/64im\\_p.pdf](http://main.spsj.or.jp/nenkai/64nenkai/jp/64im_p.pdf)
- (4) 進進研ゼミ小学講座(ベネッセコーポレーション)チャレンジ5年生「未来!発見BOOK」の特集「モノ×生き物でパワーアップ!!」でバイオメティクスが紹介され、LIXILの建材や石田秀輝先生が監修した「ヤモリの指から不思議なテープ」などが紹介されました。またこの特集は領域代表が監修しました。  
関連者名 : 石田秀輝(C01班)、井須紀文(B01-3班)、下村政嗣(B01-2班、総括班)

## (8) 各種案内

# BIO Mimetics

バイオミメティクス・市民セミナー

長谷川 誠 (株式会社富士通総研 第一コンサルティング本部公共事業部 シニアコンサルタント)

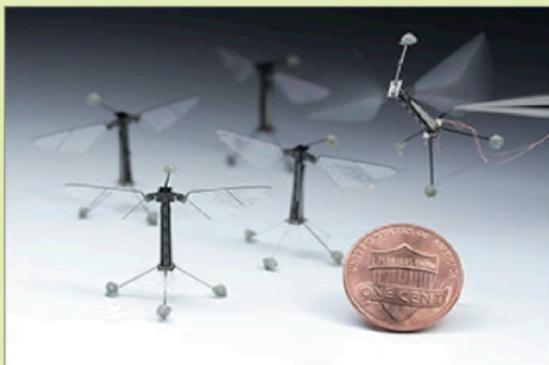
## 「特許からみる バイオミメティクス」

2015年9月5日 (土)

会場：北海道大学クラーク会館 / 大集会室  
札幌市北区北8条西8丁目

時間：午後1時30分から午後3時30分

38億年もの間、生き続けてきた生物に学ぶバイオミメティクスは、持続可能な社会の実現に貢献する技術として期待されています。また、従来の技術の延長線上では限界に達していた分野で、新たなブレークスルーを実現する手段として、世界的な期待の高まりとともに、研究開発の競争が激化しつつあります。カタツムリの殻に学んだ汚れにくい住宅の外壁材、蛾の眼に学んだ無反射フィルムなど、実用化されている例はいくつかあるものの、その産業応用はまさにこれからといえるでしょう。今回のセミナーでは、特許や論文の調査結果をもとに、バイオミメティクスの研究開発動向を紹介し、その産業応用の可能性を議論したいと思います。



写真出典：ハーバード大学ワイス応用生物学エンジニアリング研究所ホームページ



主催：北海道大学総合博物館 北海道大学総合博物館  
共催：科学研究費 新学術領域「生物規範工学」 060-0810 札幌市北区北10条西8丁目  
高分子学会北海道支部 問合せ先：TEL. 011-706-2658 FAX. 011-706-4029  
協賛：千歳科学技術大学バイオミメティクス研究センター E-mail: museum-jimu@museum.hokudai.ac.jp

# BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

赤澤敏之 (北海道立総合研究機構 工業試験場 材料技術部 研究主幹)

## 「生物と材料のシンフォニー： バイオマテリアルと境界科学」

2015年10月3日 (土)

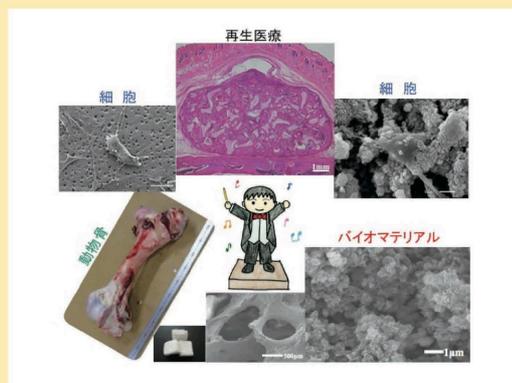
会場：北海道大学人文・社会科学総合教育研究棟 / W102  
札幌市北区北9条西7丁目

時間：午後1時30分から 午後3時30分



骨をつくる医療分野（整形外科・口腔外科）では、超高齢社会に伴い、健康寿命を延ばすためのQOL（生活の質）が重視されてきています。また感染症のリスクが少なく、生体の代謝システムへ早期に組み込まれる組織再生材料の開発と医用技術の普及も切望されています。骨を焼いて部分的に溶かしナノ結晶をつくる焼成・部分溶解析出の方法により、道産動物資源（骨の物理的構造と化学的性質）を利活用した「傾斜機能アパタイト材料」を開発しました。この材料は、体液や血液の浸透性、骨成長因子の吸着徐放性、崩壊吸収性に優れた生体模倣性バイオマテリアルです。

本セミナーでは、異分野横断的学問融合を目的とした境界科学の発想から、材料界面の機能設計を応用し、生体環境に順応・調和しながら、細胞と相互作用する材料を紹介します。この新たな材料をとりまく、生物と材料のシンフォニーを楽しくお話したいと思います。

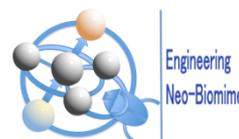


主催：北海道大学総合博物館  
共催：科学研究費新学術領域「生物規範工学」  
協賛：高分子学会北海道支部  
千歳科学技術大学バイオミメティクス研究センター

北海道大学総合博物館  
060-0810 札幌市北区北10条西8丁目  
問合せ先：TEL. 011-706-2658 FAX. 011-706-4029  
E-mail: museum-jimu@museum.hokudai.ac.jp

# 生物多様性を規範とする革新的材料技術

*Innovative Materials Engineering Based on Biological Diversity*



「生物多様性を規範とする革新的材料技術」ニュースレター Vol. 4 No. 2

発行日 2015年10月13日

発行責任者 下村政嗣 (千歳科学技術大学)

編集責任者 穂積 篤 (国立研究開発法人 産業技術総合研究所)

制作 「生物規範工学」領域事務局

北海道大学電子科学研究所内

〒001-0021 札幌市北区北21条西10丁目

電話 011-706-9360 FAX 011-706-9361

URL <http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/index.html>