

(4) トピックス (PEN より)

生物規範飛行の学理とバイオミメティクス

千葉大学大学院工学研究科 劉浩

要約

昆虫や小鳥のような生物の飛行は、バイオミメティクスの重要な分野の一つとして注目されている。近年生物規範飛行を一つの複雑なシステムとして捉え、生物の羽ばたき飛行における空力性能、安定性及び制御原理を統合的に研究し、生物を規範した超小型羽ばたき飛行ロボットの設計指針の創出及び開発が進められている。本稿では、生物規範飛行のバイオメカニズム(学理)とバイオミメティクス(生物模倣)について解説する。

1. はじめに

地球上のおよそ1万3千種類の鳥や哺乳類のような温血脊椎動物のうち、約1万種の鳥(約9千種類)やコウモリ(約1千種類)が大空を舞うと言われている。昆虫は更に種の数が多く、100万種とも1000万種を超えとも言われる。生態学的影響や生物資源の総量を考えると、昆虫はこの地球上でもっとも繁栄しているグループで、支配的な地位を占めていると言っても過言ではなかろう。飛翔生物、ことに昆虫がこれほど異例な繁栄をもたらした数多くの理由の一つに、まずその優れた飛翔能力があげられる。今から4億万年も前、デボン紀時代の地球上に最初に出現した昆虫は、水中を泳いだり地上を走り抜けたりすることよりも、ずっと省エネの飛行行為を選択することにより、行動範囲を格段に広げることができた。昆虫の多くは、空中で静止飛行や前進飛行、急旋回や急上昇及び急降下など

の曲技飛行をごく自然にこなしている。長い間の自然淘汰によって、飛翔の習性は精巧で効率的になり、飛行に使う器官は極限まで進化してきた。その結果、昆虫は人工物の飛行機よりずっと優れた飛翔能力を有する。

飛翔生物は人工物の飛行機よりずっと優れた飛翔能力を有する。人間は最高速のスプリンターでもせいぜいその速さは3~4身長/秒であるが、地上をもっとも速く走り抜ける動物であるチータでもそのトップ速度は約18体長/秒となる。人工飛行体の傑作である超音速戦闘機では、最高速度がマッハ3(~3200km/h)、およそ32機長/秒に達する。一方普通の鳩でも、通常90km/hの速度で悠々と大空を飛び、これは秒速75体長以上になる。ジェット機は、時速1000km/hでおおよそ5機長/秒に達するが、体長1cmぐらいのミツバチは、通常50km/hの速度で飛んでいて、925体長/秒にも達する。さらに飛行体胴体の回転(ロール)運動を見てみよう。高度な曲技飛行(aerobatics)能力を有する、例えば旋回性能のよい飛行機のロール率は毎秒約720度と言われるが[6, 7]、ツバメは何と5000度以上のロール率をこなせる。普通、航空機の最大許容の正の重力加速度は、4~5Gであり軍用機の場合で8~10Gであるのに対して、多くの鳥は毎日100回以上の10~14Gの加速度を繰り返し受けていると言われる[6, 7]。

近年災害時における空撮、農業散布や沿岸監視、テロ現場での情報収集等を目的として、長さ・幅・高さ共に15cm以下、質量と荷重合計が50g以下の小型飛行体(Micro Air Vehicle, MAV)の研究開発が盛んに行われている。そ

ここで、生物学や力学、計算工学や生物模擬工学等を専攻とする多くの研究者が昆虫と鳥のような飛翔生物からその設計指針を見出そうと、昆虫や鳥の羽ばたき飛行の原理解明を急いでいる。我々の身の周りには、翼長 1m 程度の鳥から 1mm 程度の昆虫までさまざまな飛翔生物が存在しているが、それらは長い自然淘汰の結果、それぞれの環境下で力学的に洗練されたものであるため、その中に MAV 設計の指針となる優れた設計図が無数に存在すると思われる。昆虫と鳥のような飛翔生物は、羽ばたき飛行を駆使し、ホバリング、前進及び急旋回のような曲技飛行を簡単にこなすことができ、人工飛行体よりはるかに優れた飛翔能力を有する。近年スーパーコンピュータを使って、実際昆虫を対象に、厳密な幾何学、運動学及び力学のモデルに基づき、静止飛行、前進飛行及び急旋回のような自由飛行を計算機の中に再現できる力学シミュレーション研究が行われて [1-5]、生物飛行に潜んでいる新しい力学現象や生物の自由飛行メカニズムを明らかにすると同時に、鳥や昆虫サイズの小型飛翔体のためのブレークスルーとなる設計指針の創出が期待されている。

2. 昆虫と鳥の飛翔

昆虫や鳥のような生物の飛翔は、滑空飛行 (gliding and soaring)、すなわち羽ばたき運動がなく固定翼によるエネルギー消費最小の受動的飛行 (passive flight)、または無パワー飛行 (unpowered flight) と羽ばたき飛行 (flapping)、つまり能動的飛行 (active flight)、またはパワー飛行

(powered flight) とに分かれる。羽ばたき飛行は、飛翔生物が重力に逆らいながら空気抵抗を克服して推進する際に使われる。昆虫や鳥は、自分の体重を支えながら前進飛行や後退飛行、そして急旋回や方向転換などのための推進力を同時に発生させなければならない。それ故に、羽ばたき飛行の流体力学の基本原理は、羽ばたき翼とまわりの空気の流れとの相互作用によるものであり、つまり羽ばたき翼の形状や運動がどれだけ有効に揚力 (lift) と推力 (thrust) を同時に発生させることができるのかということになるのである。

2.1 パワー飛行：羽ばたき

鳥、コウモリ及び昆虫は、静止飛行や前進飛行の際に様々な羽ばたき運動を使って揚力と推力を発生させている。図 1 に示すように、大型鳥は、比較的簡単な翼端の軌跡を残す。例えば、アホウドリの羽ばたき翼は楕円のような軌跡を描くが、バッタやショウジョウバエのような小さな昆虫は、相当複雑な羽ばたき様式を見せる。またハトやハチは 8 の字のパターンを、カブトムシやホホアカクロバエはもっと複雑な軌跡を示す。

静止飛行 (Hovering Flight)：静止飛行は、前進速度がない故に最もエネルギーを消費する羽ばたき飛行である。ある飛翔生物が静止飛行をこなせるかどうかは、その生物のサイズや翼の慣性モーメント、翼運動の自由度や翼形状などの諸要素に依存する。静止飛行には、対称ホバリング

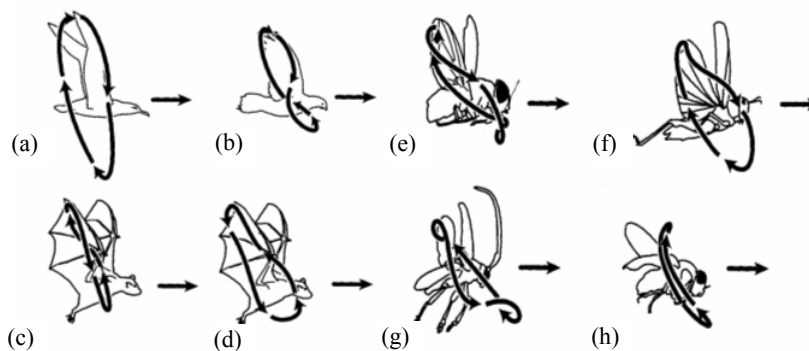


図 1 Wing tip paths relative to the body for a variety of flyers, as indicated by the arrows. (a) albatross, fast gait; (b) pigeon, slow gait; (c) horseshoe bat, fast flight; (d) horseshoe bat, slow gait; (e) blow fly; (f) locust; (g) June beetle; (h) fruit fly. Adopted from Alexander, (Alexander, 2002).

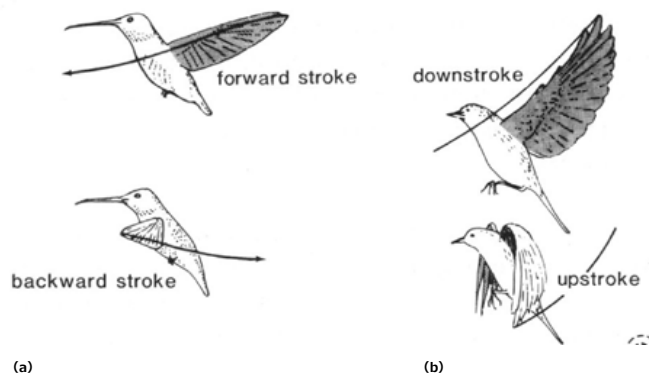


図 2 Schematic of hovering flapping wing kinematics: a symmetric hovering and b asymmetric hovering (Norberg, 1990).

(symmetric hovering) と非対称ホバリング (asymmetric hovering) との 2 種類のモードがある。対称ホバリングは、ハチドリや昆虫がよく利用するもので、通常胴体が立っており翼が水平面内を大きな角度で羽ばたきする (図 2a)。この場合は、羽ばたき翼が打ち下しと打ち上げの時にほとんど対称な運動を行うため、翼の反転する時以外ほとんど揚力が発生している。非対称ホバリング (図 2b) は、主にコウモリや鳥の飛行に観察されており、羽ばたき面 (stroke plane) が通常傾斜しており、翼が低速前進飛行のような羽ばたき運動を行う。こういう飛翔生物は、打ち下しと打ち上げの間では翼を反転させることができないため、主に打ち下ろす際に揚力を発生し、打ち上げ時に翼を後方へ曲げるにより抵抗を低減させる。

前進飛行 (Forward Flight): 図 1 に示すように、昆虫や鳥は、通常高速前進飛行の際に垂直面内において大きな振幅で翼を上下羽ばたかせるが、前進速度を減少する時に、ヘリコプターがローター角度を変えるようにその羽ばたき面をより水平に傾斜させるようにする。前進飛行の流体力学性能は、式 (1) のような羽ばたき速度と前進飛行速度の比を表す、ある無次元周波数で評価することができる。

$$k = \frac{\omega c}{2U_{ref}} \quad (1)$$

ここでは、 ω 、 c 及び U_{ref} はそれぞれ羽ばたき翼の角速度、翼の代表翼弦長及び前進速度である。図 3 に示すように、羽ばたき翼の非定常流体力学効果が無次元周波数に依存するため、飛翔生物の揚力と推力への定性的な評価がその質量と無次元周波数の相関を調べるにより行うことができる。全体的に、無次元周波数は生物の大きさと質量が増大するにつれ減少する傾向にあり、小さな飛翔生物が大きなものより非定常な流体力学を利用すること示唆する。

2.2 無パワー飛行：滑空飛行

飛翔生物は、滑空の際に通常翼を一杯伸ばしながら空気の流れ方向に対して運動方向をやや下向きにすることにより、降下する際に重力によって推力を得る、と同時に揚力も発生する。結果として運動方向と水平方向より滑空角度が得られ、揚抗比 (揚力と抗力の比) で定義される。この揚抗比は、生物のサイズ及び飛行速度に関係しており、通

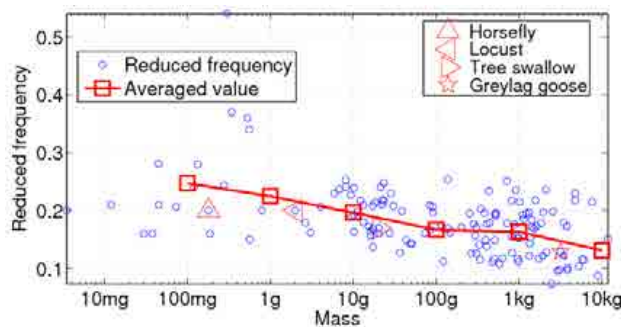


図 3 Mass versus reduced frequency for birds and insects (Shyy et al. 2007).

ように代表長さ l により表せる。

$$S \sim l^2, \quad W = L = mg \sim l^3 \quad (2)$$

次元解析に基づいた生物飛行スケールリング (scaling) は、諸パラメータによる飛行特性の空気力学効果を評価するには非常に有効である。Tennekes[9] は、図 4 の The Great Flight Diagram に示されるように、昆虫や鳥から飛行機に至ってそれらの巡航速度、重量及び翼荷重の関係を考慮して興味深いスケールリング則にまとめた。この図 4 から、飛行体のサイズの相違から、簡単に異なる種間の比較や関係づけを行うことができる。つまり、このスケールリング解析によると、飛行体のあるパラメータ、例えば、翼長さがどれだけ他のパラメータ、例えばその胴体質量に関係するかを推測することができる。

2.3 幾何学相似則とスケーリング

幾何学相似則 (Geometric similarity) は、慣性力、重力、粘性力及びダイナミック力のオーダーを測る尺度として、次元解析を通じて異なる物理量間を関係付けることができる。もし昆虫や鳥は幾何学的に相似であると仮定するならば、一定速度の飛行に関してその重量 W などは、式 2 の

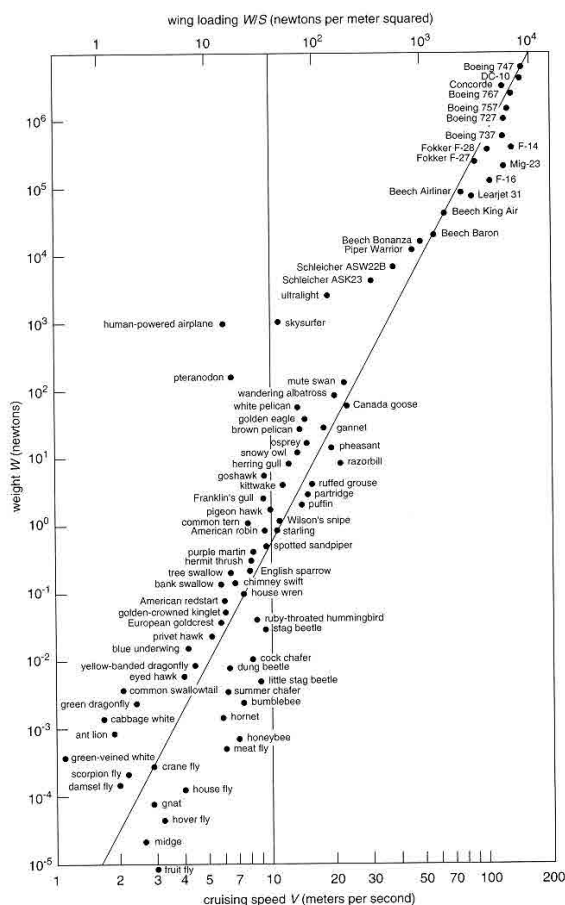


Fig. 4 Relationship between wing loading, weight and cruising speed. The shaded region indicates the expanded parametric range surrounding the projected size, speed and weight for MAV. Adopted from Tennekkes (Tennekes, 1996).

翼長さ (Wingspan, b) : 飛翔生物の翼長さは、通常次元解析を行う際にその質量に関係づけられる。

翼面積 (Wing Area, S) : 昆虫や鳥の翼面積はそれらの翼長さより比較的に大きな変化を示す (Norberg, 1990) [10]。例えば、ハチドリは一般に同程度の他の鳥よりも大きな翼面積を有すると知られている。

アスペクト比 (Aspect Ratio, AR) : アスペクト比は、翼長さと翼面積の関係を表し、羽ばたき飛行生物の飛行特性の指標として式 (3) のように定義される。

$$AR = \frac{b^2}{S} \quad (3)$$

一般に小さいアスペクト比は高い機動性や操縦性をもたらすが、高いアスペクト比は揚力に由来する誘導抵抗を低減させる効果がある。同様に高アスペクト比を有する揚抗比 L/D 、すなわち滑空比 (glide ratio) はアスペクト比とともに増加する。最大なアスペクト比を有する鳥は、実際滑空時間の大半を羽ばたきではなく滑空飛行に使っている種に属すると観測されている。

翼荷重 (Wing Loading, W/S) : 定常飛行における揚力と重量の釣り合いを考えると式 (4) が成り立つ。

$$L = W = 1/2 \rho U^2 S C_L \rightarrow W/S = 1/2 \rho U^2 C_L \quad (4)$$

ここでは、 U は空気速度、 ρ は空気密度である。これにより、翼荷重と巡航速度は一般に重量とともに増加していることが明らかであり、つまり翼荷重が大きいくほどその生物が早くて飛べねばならぬということになる。

羽ばたき周波数 (Wing-beat frequency) : 翼の骨格の主要機能は飛行中に周囲に力を伝達することである。しかしながら、この伝達される力は大きくなりすぎると骨格や筋肉の損傷につながる。こういう制限は、飛行筋肉に依存するパワーとともに、羽ばたき飛行生物の羽ばたき周波数の上限と下限をきめることになる (Pennycuick, 1996) [11]。

2.4 羽ばたき翼のパワー制限

大きい飛翔生物は小さい飛翔生物より低い周波数で羽ばたきする。Pennycuick [11] は、飛翔生物にある固有周波数 (natural frequency) が存在し、しかもそれがその翼の物理特性と克服すべく力に依存することを仮定することに基づき、式 (5) のような羽ばたき周波数の相関を導出した。

$$f = (mg)^{1/2} b^{-17/24} S^{-1/3} I^{-1/8} \rho^{3/8} \quad (5)$$

これはある飛翔生物の羽ばたき周波数を推定するに使えるという。ただし、その生物の質量 (m)、翼長さ (b)、翼面積 (S)、翼の慣性モーメント (I)、そして空気密度 (ρ) は既知量とする。

上限と下限 (Upper and Lower Limits) : スケーリング解析は、羽ばたき周波数 f がパワーと構造の制限を影響するため、鳥のサイズや羽ばたき生物の運動限界に対して有用な情報を提供することができる。これまでは、パワー出力及び羽ばたき周波数レベルの推定と筋肉の占める割合に関しては多くの研究は行われてきた [10, 11]。Pennycuick [11] は、パワー飛行時の最も大型鳥のサイズに基づき、羽ばたき飛行できる飛翔生物の質量の上限が 12 ~ 15 kg になると結論づけた。大型鳥は水平飛行 (すなわち静止飛行) を維持するだけの揚力を発生できない。小型鳥は色んな羽ばたき周波数を利用する能力が備えている。しかしながら体重 1 g 前後の飛翔生物は筋肉が収縮後にその収縮メカニズムをリセットするのに時間がかかるというもうひとつの上限が存在する [10]。これにより静止飛行できる鳥とコウモリの最小質量はそれぞれ 1.5 g と 1.9 g と推定される。

抵抗とパワー (Drag and power) : 飛行機のように飛翔生物は、飛行のために十分なパワーを生産して揚力を発生しながら抵抗を克服しなければならない。羽ばたき無しの滑空飛行のとき、必要とされる大半のパワーはポテンシャルエネルギーから運動エネルギーへの変換により生み出している。羽ばたき飛行の場合は、パワーは飛行筋肉のなす仕事率となる。この際に飛行体に働く全空気力学抵抗 (D_{aero}) は、揚力に由来する誘導抵抗 (induced drag, D_{ind})、翼形状及び摩擦抵抗に依存する形状抵抗 (profile drag, D_{pro})、そして胴体だけに依存する有害抵抗 (parasite drag, D_{par}) という3つの成分からなり、つまり $D = D_{ind} + D_{pro} + D_{par}$ となる。また前進飛行は、これらの3つ抵抗性分に対応する3つのパワー成分: その反力が揚力と推力を生み出す渦伴流の発生に必要な仕事率である誘導パワー (induced power, P_{ind})、形状抵抗を克服するのに必要な仕事率である形状パワー (profile power, P_{pro})、そして胴体の有害抵抗を克服するのに必要な仕事率である有害パワー (parasite power, P_{par}) がある。他に翼だけを動かすのに必要なパワー、すなわち慣性パワー (inertial power, P_{iner}) がある。従って、飛行に必要な全パワー (P_{tot}) はこれらの和、 $P_{to} = P_{aero} + P_{iner} = P_{ind} + P_{pro} + P_{par} + P_{iner}$ なる。ただし、このパワーは、単なる飛行に必要なパワーであるが、パワー入力には等しくない。これは、飛行筋肉がその機械的効率 $\eta < 1$ により制限され、なおかつあらゆる生物がかねらの自分自身の新陳代謝に調整されるため、パワー入力は通常必要な全パワーを上回ることになる。また最も共通のパワー飛行の速

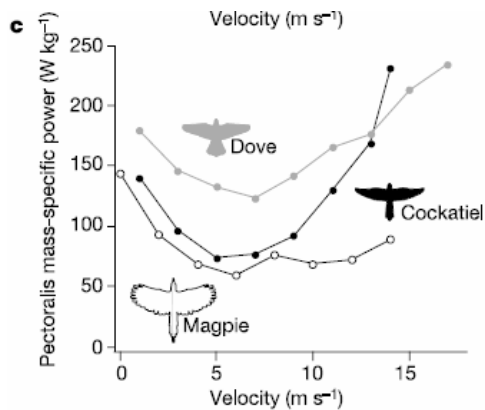


図5 Pectoralis power as a function of flight velocity. Comparative mass-specific pectoralis power as a function of flight velocity in cockatiels, doves and magpies. Bird silhouettes are shown to scale, digitized from video (Tobalske et al., 2003) .

度カーブは、図5のようにU字型となり、多くの飛翔生物の飛行で観測されている。

3. 生物規範飛行の力学シミュレーション

自分の縄張りを守るために正確な位置にぴったりと停留ホバリングしているハナアブ (*Syrphidae*) の飛行安定性や、他の昆虫を餌として捕まえるときのトンボの並はずれた機動性など、昆虫は極めて鋭敏な飛行制御を見せる。昆虫が如何にして、羽ばたき飛行の安定性と機動性を実現しているかを解明することは、その飛行性能を模倣し、同程度サイズの MAV の開発にとって非常に興味深い研究テーマである。昆虫の驚くべき飛行性能は、豊かな感覚フィードバックや羽ばたきのための複雑な筋肉系、運動の幅広い変化や非定常空気力学メカニズムの多様性など、数多くの要素の総合的な結果である。その中、羽ばたき飛行の空気力学は非常に重要である。

飛翔生物まわりの流れは、いくら複雑でもその流体を支配するナビエ・ストークス方程式 (Navier-Stokes equation) によって記述できるため、羽ばたき飛行の流体力学は実際昆虫や鳥のような飛行体に対して翼の動的羽ばたき運動及び翼・翼と翼・胴体の相互作用を考慮した多物体系まわりの非定常流れの解を求めることになる。以下では、著者が最近開発した、生物の羽ばたき飛行を厳密な幾何学、運動学及び力学のモデルに基づき、静止飛行、前進飛行及び急旋回のような自由飛行を計算機の中に再現できる力学シミュレータについて、生物飛行の幾何学モデリング、生物飛行の運動学モデリング、そして生物飛行の流体力学モデリングといった3つの項目について簡単に説明す

る。またその昆虫羽ばたき飛行の流体力学メカニズム解明への応用、とくに昆虫飛行のサイズ効果について紹介する。

3.1 生物羽ばたき飛行モデリングの座標系

図6に示すように、生物羽ばたき飛行モデリングにおいては3つの座標系が導入される。1) 翼固定座標系 (xw , yw , zw)、原点が右翼の回転軸にあり、その周りを羽ばたきする。2) 胴体固定座標系 (xb , yb , zb)、原点が質点中心にあり、胴体と一緒に動く。3) グローバル座標系 (X , Y , Z)、すなわち慣性座標系となる。胴体姿勢は、水平方向に対してなす羽ばたき面角度 (stroke plane angle η) と胴体角度 (body angle χ) で表し、3つの回転角度を胴体固定座標系においてはそれぞれ pitch 角 β 、roll 角 ψ 及び yaw 角 γ と定義する。また翼位置パラメータは羽ばたき面において、打ち下しと打ち上げの時の翼端軌跡をそれぞれ実線と点線で表し、また羽ばたき角 (positional angle ϕ) を y_{sp} 軸と yw 軸の羽ばたき面に射影した yw' 軸のなす角と、面内運動角 (elevation angle θ) を翼軸 yw と羽ばたき面内軸 yw' の間の zw 軸まわりの回転と、迎え角 (angle of attack α) を翼 yw まわりの回転 (feathering) とそれぞれ定義する。

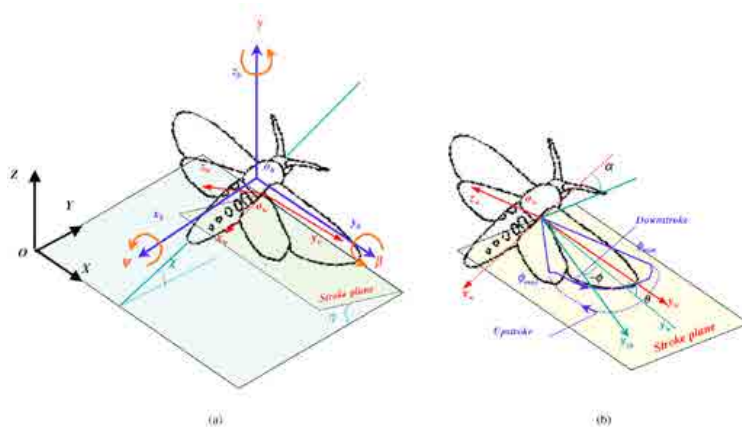


図6 Definitions (a) of the wing-fixed system (x_w, y_w, z_w), the body-fixed system (x_b, y_b, z_b), and the global system (X, Y, Z); the stroke plane angle η and the body angle χ ; the angles of pitch β , roll ψ , and yaw γ with respect to the body-fixed system. (b) Wing position parameters within the stroke plane: the wingtip path, the positional angle ϕ , the elevation angle θ , and the angle of attack α . (Liu, 2009)

3.2 幾何学モデリング (Morphological modeling)

昆虫は羽ばたきで自重を支える上向きの揚力と前向きの推進力を同時に発生する。その羽は通常体重の数パーセントしかない超軽量構造にもかかわらず、毎秒数百回もの往復運動をこなす超高強度を有するものである。図7の中の体長5cmぐらいの大型昆虫、スズメガ (Hawkmoth) の羽形態や内部構造、羽ばたき飛行の3つの運動を示す。表面の鱗粉を落とした昆虫の羽が羽の付け根から放射線状に伸びる内部が空洞となる20数ミクロンの翅脈と、それらの間を覆う2ミクロンぐらいの薄膜からなっていることがわかる。更に生きている昆虫の羽の翅脈の中を液体 (血液) が流れていて、それは高周波数で羽ばたく羽の強度を補強する重要な役割を果たしていると推測される。

生物の自由飛行を再現するため、羽・胴体の3次元形状だけでなく、慣性力や慣性モーメントの計算に必要な羽の厚みや翅脈分布などをも正確に計測できる手法を開発した [3]。実際の昆虫の羽・胴体のリアリスティックな3次元幾何学形状モデリングや計算力学格子生成等の諸手法や技術を開発した。本方法では、幾何学モデリングは、昆虫や鳥の翼・胴体の3次元幾何形状を楕円近似とした微分幾何学手法と構造格子生成法と複雑な形状と羽ばたき運動を有する多物体システムに対応できる重複格子法を導入した [4, 5]。図7にリアリスティックな翼胴体形状をもつスズメガ (hawkmoth, *Agrius convolvuli*)、ミツバチ (honeybee, *Apis mellifera*) 及びショウジョウバエ (fruitfly,

Drosophila melanogaster) の幾何学モデル及び計算格子を示す。

3.3 運動学モデリング (Kinematic modeling)

飛翔昆虫は、主に翅の羽ばたき運動で飛んでいる。多くの昆虫はハチやハエのように1対の翅をもっているが、なかにはトンボやチョウのような4枚の翅を有するものも多々ある。昆虫の羽ばたき周波数は大抵20から最大1000Hzを超えるともいわれている。鳥類と異なって、昆虫の羽ばたきを引き起こす筋肉及び制御系統は、全て固い外骨格の中に収められている。アホウドリのような大型の鳥は、羽の付け根と中ほどにそれぞれ間接を持つ2関節型の羽ばたき機構を持ち、打下ろしと打上げて羽の面積を変えることができる。一方、ハチドリなどのような小さい鳥類と昆虫の羽ばたきに使われる筋肉や骨格の構造は、羽の付け根にのみ関節を有する1関節の機構をもち、ガのような大型昆虫の直接飛翔筋駆動タイプと、ハエのような小型昆虫の間接飛翔筋駆動タイプの2種類に大別できる。生物の筋肉は、機械と異なって収縮する際にのみ力を発生し、伸張する際にはエネルギーを蓄えることができない。大型昆虫は羽ばたき周波数が低いため、飛翔筋の収縮が神経パルスに同期して行われるが (同期筋)、小型昆虫では神経パルスがなくても、自動的に繰り返されるようになる (非同期筋)。両者の境界は約80Hzと見られている。

運動学モデリングは、胴体角度や羽ばたき面角及び翼運動の3つ角度の時間的変化と羽ばたき運動に伴って移動・変形する動的格子生成を統合させて、羽ばたきによる自由飛行を再現可能なものである [4]。図8はスズメガ、ミツバチ及びショウジョウバエの翼運動の3つ角度の時間的変化、表1はそれらの羽ばたき振幅、羽ばたき周波数、羽ばたき面角、胴体角及びアスペクト比、そしてそれらにより計算されたレイノルズ数と無次元周波数を示す (表1)。ただし、空気の動粘性係数を $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$ とする。

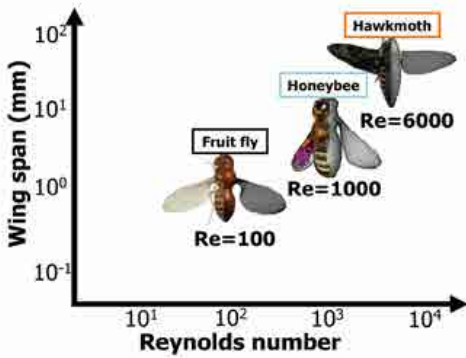
生物羽ばたき飛行の力学シミュレーションを行う際に、力学相似性を考慮して無次元パラメータのレイノルズ数と無次元周波数 (Reynolds number and reduced frequency)

はよく使用される。通常静止飛行に対してレイノルズ数は式 (6) のように定義することができる。

$$Re = \frac{U_{ref} L_{ref}}{\nu} = \frac{2\Phi f R c_m}{\nu} = \frac{\Phi f R^2}{\nu} \left(\frac{4}{AR} \right) \quad (6)$$

ここでは、代表長さ L_{ref} を平均翼弦長 c_m と、代表速度 U_{ref} を $U_{ref} = \omega R$ (ただし、 R は翼長さ、 ω は翼平均角速度、 $\omega = 2\Phi f$ 、 Φ は羽ばたき振幅、 f は羽ばたき周波数) とそれぞれする。また静止飛行時の無次元周波数は式 (7) のように定義される。

$$k = \frac{\pi f c_m}{U} = \frac{\pi c_m}{2\Phi R} = \frac{\pi}{\Phi AR} \quad (7)$$



(a)



(b)

図7 Morphological models and computational grids: a) hawkmoth, *Agrius convolvuli*, honeybee, *Apis mellifera*, and fruitfly, *Drosophila melanogaster* (Liu and Aono, 2009); (b) A hawkmoth and its wings without scales.

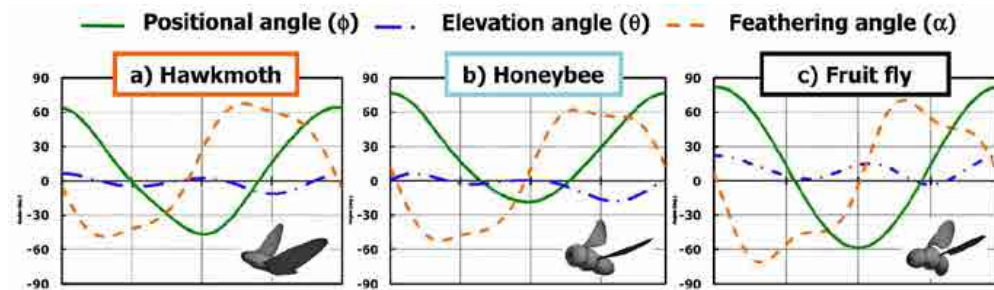


図8 Hovering wing kinematics: a) hawkmoth, *Agrius convolvuli*, b) honeybee, *Apis mellifera*, and c) fruitfly, *Drosophila melanogaster* (Liu and Aono, 2009)

表 1 A summary of stroke plane angles, aspect ratio, Reynolds numbers, and reduced frequencies for three insects (hawkmoth, honeybee, and fruitfly) (Liu and Aono, 2009).

	Stroke plane angle (β)	Aspect ratio ($AR=2R/c_m$)	Reynolds number ($Re=U_{ref}c_m/\nu$)	Reduced frequency ($k=\pi f c_m/U_{ref}$)
Hawkmoth	39.8°	5.28	6300	0.298
Honeybee	0°	8.12	1123	0.244
Fruitfly	0°	6.13	134	0.212

4. 昆虫規範飛行の学理

昆虫や鳥の羽ばたき飛行の流体力学は、大抵 $O(10^1)$ から $O(10^5)$ に至るまでの低レイノルズ数領域において高い非定常性を有し、通常複雑な羽ばたき運動や柔軟構造をもつ翼の変形などによる大規模な渦流れといった特徴を示す [4, 12]。それ故に従来の高いレイノルズ数領域における飛行機の流体力学理論に比べて、まだ多くの疑問が残る理路整然と説明できる理論がないと言われている。この生物羽ばたき飛行における流体力学メカニズムを解明するのに一つチャレンジングな問題としては、つまり羽ばたき翼まわりの大規模な渦流れや伴流構造がどのように発生しているのか、さらにそれらがどのように揚力や推力の発生と関係づけているのかといった本質的な質問に解を出すことになるのである。最近の研究では、昆虫や鳥及びモウモリの羽ばたき飛行における非定常空気力学原理の多様性と重要性が明らかになっている。それらは、殆ど非定常的な揚力を向上させるメカニズムであり、いわゆる、両翅が大きな角度で羽ばたきし反転の際に互いにぶつかり、かつ迅速に反転するような羽ばたき運動であり、小さい昆虫の羽ばたき飛行によく見られる clap-and-fling、翼の急速な回転により迎え角を増大させる pitch-up rotation、反転前の翼が通過した後にできた後流を捕獲する wake-capture、そして打ち下しと打ち上げの際に翼前縁に見られる強い前縁渦が大きな力をもたらす leading-edge vortices などがあ

4.1. 力学シミュレーションが解き明かす昆虫規範飛行のバイオメカニズム

静止飛行はあらゆる昆虫に観測されている昆虫の特技である。昆虫静止飛行の流体力学のサイズ効果はレイノルズ数によって特徴づけられる。図 9 は上述の 3 種類の昆虫近傍の渦構造 (a) hawkmoth, $Re=6300$; b) honeybee, $Re=1000$, c) fruitfly, $Re=134$ 、図 10 は後流構造及び下向きのジェット流れ (downwash) をそれぞれ示す。3 種

類の昆虫のサイズ及びレイノルズ数や羽ばたき運動が異なるにもかかわらず、ある共通している特性が見られる。つまり、羽ばたき翼が並進運動を開始する間もなく、一対の馬蹄渦 (a pair of horseshoe vortices) が形成され、それが前縁渦、後縁渦及び翼端渦からなり、尚かつ次第に一つ翼全体を包むような強い渦リング (vortex ring) に発展していくことと、その渦リングの中心 (core) を下向きの強いジェットが流れていくことが 3 種類の昆虫の静止飛行に共通に見受けられる。この渦リングは打ち下しと打ち上げの終わりに翼から剥がれ、後流に大きな格子状の渦構造を残す。しかしながら、レイノルズ数の違いによって渦ダイナミクスや後流構造及び揚力などの発生 (図 11) との相関には、定量的に顕著な相違も見受けられる。

さらに図 11 に示される時系列の垂直力より周期平均垂直力を計算することにより、打ち下し時と打ち上げ時に発生する力がサイズまたはレイノルズ数に依存することが分かる。つまり、スズメガは 6:4 ~ 7:3、ミツバチでは 5:5、そしてショウジョウバエでは 4:6 となっており、その比率はサイズやレイノルズ数とともに減少するという。一方、鳥の場合は Warrik ら [13] は PIV 計測に基づいた解析によりハチドリ

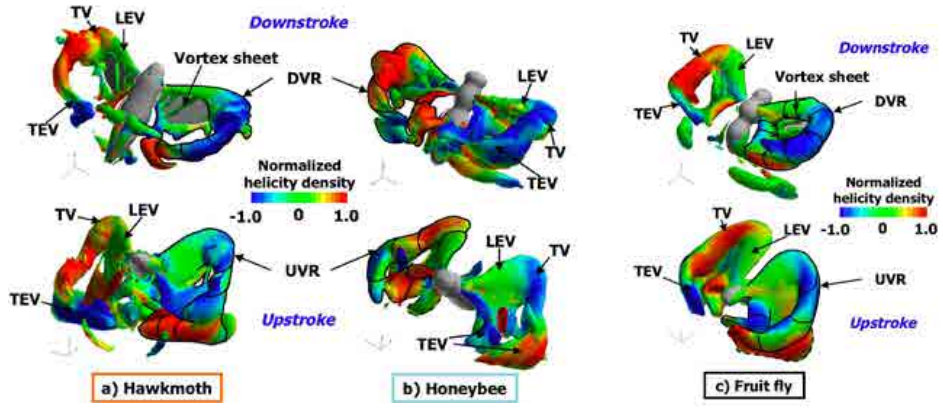


Figure 9 Vortex structures in terms of leading-edge vortex (LEV), trailing-edge vortex (TEV), wing tip vortex (TV), downstroke vortex ring (DVR), and upstroke vortex ring (UVR) about a hovering insect: a) hawkmoth, *Agrius convolvuli*, b) honeybee, *Apis mellifera*, and c) fruitfly, *Drosophila melanogaster*. Note that magnitude of iso-vorticity surfaces is 0.6 and color of iso-vorticity surfaces is normalized by helicity density. (Liu and Aono, 2009)

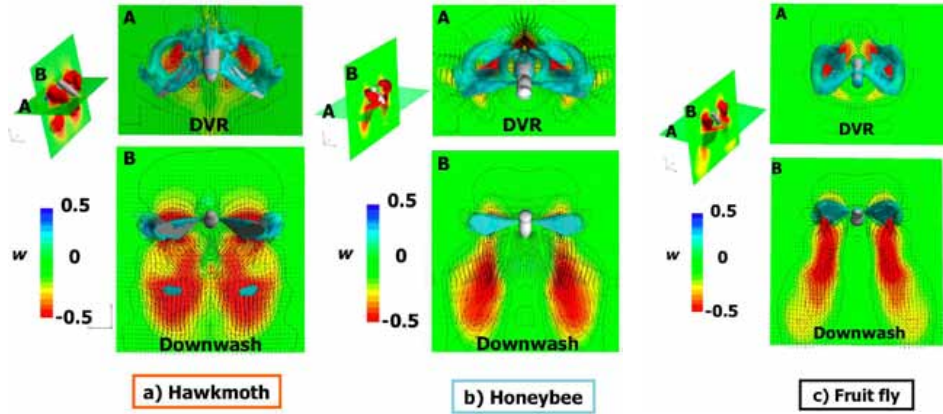


Figure 10 Downwash wake topologies about a hovering insect: a) hawkmoth, *Agrius convolvuli*, b) honeybee, *Apis mellifera*, and c) fruitfly, *Drosophila melanogaster* (Liu and Aono, 2009)

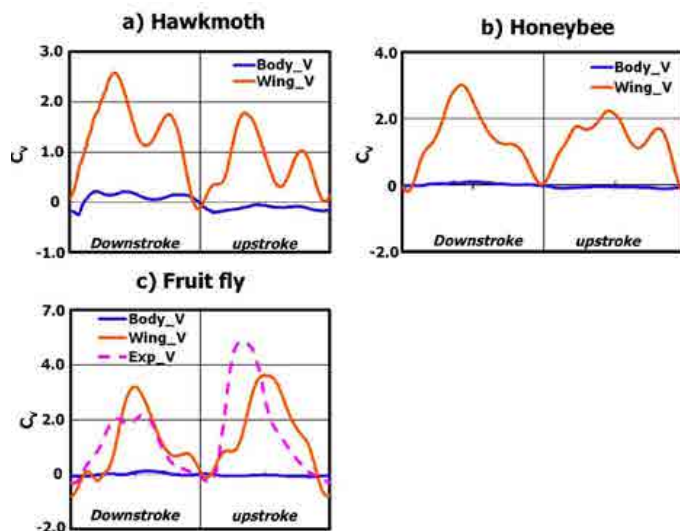


図 11 Time courses of vertical force coefficient over a flapping cycle: a) hawkmoth, *Agrius convolvuli*, b) honeybee, *Apis mellifera*, and c) fruitfly, *Drosophila melanogaster*. Orange and blue lines indicate vertical force acting on two wings and body, respectively (Liu and Aono, 2009).

4.2. 生物規範メカニクス・システム

生物規範飛行からさらに視野を広げて生物の動き（運動）における生物規範メカニクス・システムを整理すると、図 12 のようにナノサイズの分子やタンパク質から、ミクロンサイズの細胞やバクテリア、ミリサイズの昆虫や魚類、そしてメートルサイズのイルカやクジラまで、実に 11 桁もの広大なスケールにわたり、生物の運動は、これだけ多様性に富んだ生物の形態や運動には共通している性質があり、つまり生物運動と生物運動における力学現象に周期的変化が空間方向に伝播する現象、ミクロスケールのブラ

ウン運動、ミリスケールの屈曲運動や羽ばたき、メータスケールの乱流など、いわゆる波動性が存在することがわかる。生物の動きは、各スケールにおいて船や飛行機の人工物のような“直線的な推進”ではなく、横の運動、いわゆる波動によるものが殆どであり、これらの“最適化された”運動機構が非定常性と波動性の調和によるものと考えられる。筆者は、この現象を「生物流動波 (Biofluid-wave)」と称したい。今後はこの生物流動波というコンセプトを導入し、新しい視点に立って、生物規範メカニクス・システムにおける非定常性と波動性を考察し、統一的に取り扱う学理を創出することを期待している。

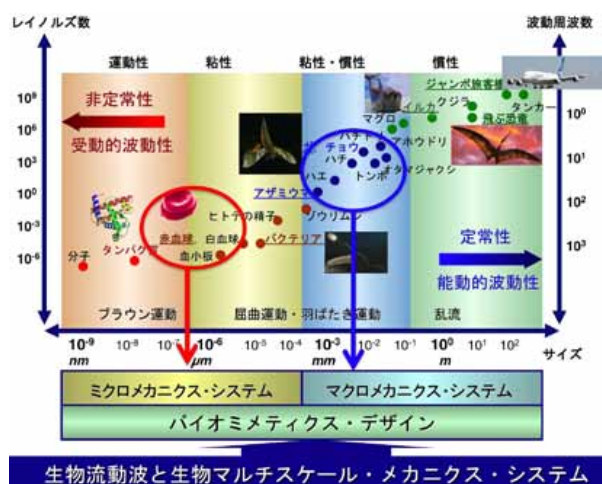


図 12 Toward multi-scaled mechanics system: a biofluid-wave theory

例えば、細胞のミクロメカニクスは、その周囲における種々の静的ないし動的な機械力学的環境（力学場）を感知して自らの機能（細胞の力覚特性）を調節する。細胞を医療用資源として最大限に活用しその機能を十二分に制御して用いるためには、細胞外環境の生物学的条件のみならず力学場条件の両要因の適切な設計に基づく細胞操作材料～メカノバイオミメティック材料～の確立が極めて重要である。一方、昆虫飛行のマクロメカニクスは、複雑な神経・筋・運動・力学などからなる生物飛行システムであると同時に、時空的に動的変化（飛行行為の維持や修復、環境変化への適応・進化）を行うことから、一つの開放型システムとなる。昆虫飛行の形態・機能の最適現象と環境変化に対する適応機構の統合的な解明が自律飛行可能な昆虫規範型飛行ロボットの開発と、生物飛行の多様性や進化への理解にとって極めて重要である。

5. 生物規範飛行のバイオミメティクス

生物規範飛行のバイオミメティクスの研究、ことに昆虫サイズの MAV の研究開発が近年急速に発展を遂げているが、昆虫レベルまでのダウンサイジングの過程における理論体系や設計指針などが確立されていない [4, 5, 12]。現在自律飛行可能な MAV 機体が殆ど固定翼や回転翼を有するものであり、静止飛行可能な者が室内無風状態で 5~10 分間しか飛べない回転翼型に限って昆虫の羽ばたき飛行性能には遠く及ばない。一方長い自然淘汰により洗練された昆虫飛行メカニズムを解明し究極な設計指針を見出そうという研究が 90 年後半から世界的に急増し一流科学誌 Nature と Science に 20 編もの論文が掲載され、熾烈な競争となっている [1, 2, 14]。昆虫や MAV のようなミリサイズの飛行マイクロマシンになると、例えば翼のような翅脈を有する弾性膜構造が多機能を同時発揮する可能性が極めて大きい故に、昆虫飛行の最適現象の解明と自然環境において自律飛行可能な昆虫サイズ MAV の開発には、羽ばたき飛行における構造・流体・ダイナミクスといった多物理的現象を統合的に解明することが不可欠である。これまでは最も成功している生物規範型羽ばたき飛行ロボットとしては、AeroVironment 社が開発したサイズ約 15cm、重さ約 20g のナノハミングバード (<http://www.avinc.com/nano>) が挙げられる。この羽ばたき MAV は、鳥を規範した胴体と翅を持ち、8 分間程度のホバリング飛行を実現して尚かつ静止飛行から時速 18 km/s ぐらいの前進飛行への遷移を可能である。ただし、飛行時の制御システムはほぼ従来のヘリと同じものを使用し、飛行モードに関係なく飛行体の姿勢は常にほぼ垂直に保つ必要がある。

近年筆者のグループでは厳密な幾何学・運動学・力学モデルに基づき生物羽ばたき飛行を再現できる、「生物型飛行の力学シミュレータ」[3-6]を開発し、多様な生物羽ばたき飛行における非定常流体力発生メカニズムの解明を行い、生物飛行と生物規範型小型飛行体への応用を進めている。これにより昆虫や小鳥の羽ばたき飛行時の非定常力発生メカニズムの統合的な解明 [3 - 6, 12]、線形と非線形の動的安定性解析により羽ばたき飛行安定性解析及び制御モデリング、さらに昆虫膜翼の構造・流体連成解析や自由飛行における空気力学・飛行力学の連成解析などの統合的な研究を実施している。一方、これらの研究成果に基づき、重さ 2.6 g 前後の昆虫やハチドリのサイズのような超小型生物規範型羽ばたき飛行ロボット（図 13）を開発した。4 枚の翼をもち、ハチドリと同程度の大きさで、重さ 2.6 g、超小型モーターによって 1 秒間に 30 回以上の高速で羽根を動かし、空中で数分間羽ばたくことができる。搭載している赤外線センサーによって上下左右に向きを変えたり、8 の字飛行も可能である。ただし、ホバリングや外乱時の安定飛行を実現するには、さらに例えば、昆虫が利用している optic flow などのような生物独特な制御原理を解明し、超小型羽ばたき飛行ロボットに適用することが不可欠である。



図 13 A hummingbird-inspired, flapping robot (千葉大学、劉浩研究室).

一方、生物規範飛行のバイオミメティクスのもう一つの応用は、最近昆虫や鳥の優れた空気力学性能を有する翅（翼）を規範して、高性能の風力発電風車や扇風機のような回転型流体機械の研究開発が盛んに行われている。自然に学ぶものづくりとして、超低環境負荷で高機能の生物のメカニズムやシステムを学び、それらをテクノロジーとしてデザインしなおす研究開発は、今、注目され、世界中で活発に進められています。これは、単なる生物のある特定の翅形

状や機能を真似るのではなく、生物多様性に富んだ生物規範システムのソフトデザイン思想を工業製品のデザインに取り込むことが重要であり、つまり「環境・人間・機械の調和」と目指す生物規範工学の創出が持続発展可能な社会の一つの切り札になることを示唆し、今後大いに期待されている。

6. おわりに

生物飛行は、数ミリのハエから数センチのチョウやガまでの昆虫、数センチのハチドリから1mの白鳥、太古の数メートルと言われる空飛ぶ翼恐竜に亘り、多様なサイズや形態、運動性能や機能を見せる。とりわけ、最近注目されている昆虫は、毎秒数十回から数百回も羽ばたきする翅の運動が数多くの飛翔筋によって制御され、その結果自重（揚力）を支えながら、静止飛行や急旋回、急速なターンや突風などに対しても姿勢を保って飛行を継続できる。この飛行制御は、神経・飛翔筋・羽ばたき運動・空気力の発生にいたる内部・外部間の双方向の制御機構が同時に働いて初めて自律飛行を実現できる。この外部の空気力の発生機構だけでも、実に翅の非線形な羽ばたき運動、非線形な翅の材料力学的変形、非線形な低レイノルズ数流体力学現象、そして非線形な安定性・制御系に総合的に支配されて、非常に複雑で非線形なダイナミクス・システムである。

この生物の「飛行システム」を構成する各サブシステム（神経—筋—羽ばたき運動—力学・多物理現象）に対して、羽ばたき飛行における構造・運動・流体・制御の力学モデルと神経・飛翔筋モデルからなる基本要素解析を行い、さらにそれらの要素モデルを統合して、生物飛行の統合力学・神経制御シミュレータを構築することにより、複雑なシステムとしての生物飛行への統合的な解析と基本原理の解明の研究が大きな課題である。これにより、生物飛行における多様なサイズ、形態、運動特性、機能の機構を明らかにするとともに、次世代3次元空間を自由自在に飛行可能な昆虫型バイオロボットのイノベーションにつながることが期待される。さらに、複雑な生物システムにおける「開放型システム機構」の解明が生物飛行バイオミメティクスという領域に止まらず、他の学問分野や領域にもインパクトや波及効果を与える可能性も潜んでおり、今後機械工学や航空工学、材料工学や計算工学、生物学やデザイン工学等の異分野間の横断的な学際融合が重要になってくる。

References :

- [1] Ellington, C.P., Van Den berg, C., Willmott, A.P., and Thomas, A.L.R., Leading-edge vortices in insect flight, *Nature* 384(1998), 626.
- [2] Dickinson, M.H., Lehmann, F.O., and Sane, S.P., Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight, *Science* 284(1999), 1954-1960.
- [3] <http://www.simulation.jst.go.jp>
- [4] Liu H. Integrated modelling of insect flight: from morphology, kinematics to aerodynamics. *J. Comput. Phys.* 2009; 228: 439-459.
- [5] Aono H, Liang F and Liu H. Near- and far-field aerodynamics in insect hovering flight: an integrated computational study. *J. Exp. Biol.* 2008; 211: 239-257.
- [6] Liu H and Aono H. Size effects on insect hovering aerodynamics: an integrated computational study. *Bioinspiration & Biomimetics*. 2009.
- [7] 劉浩、力学シミュレーションが拓く昆虫の飛翔メカニズム「遺伝」、Vol. 61, No. 1, 50-56, 2007.
- [8] Alexander, DE. *Nature's flyers*. Johns Hopkins University Press, 2002.
- [9] Tennekes, H. *The simple Science of Flight (From Insects to Jumbo Jets)*. MIT Press, 1996.
- [10] Norberg, UM. *Vertebrate Flight: Mechanics, Physiology, Morphology, Ecology and Evolution*. Springer-Verlag, 1990.
- [11] Pennycuik, CJ. Wingbeat frequency of birds in steady cruising flight: New data and improved predictions. *J. Exp. Biol.* 1996; 199: 1613-1618.
- [12] Shyy W, Liang Y, Tang J, Viiiru D and Liu H. *Aerodynamics of low Reynolds number flyers*. Cambridge University Press, 2007b.
- [13] Warrick DR, Tobalske BW and Powers DR. Aerodynamics of the hovering hummingbird. *Nature*, 2005; 435: 1094-1097.
- [14] Hedenström A, Johansson LC, Wolf W, von Busse R, Winter Y and Spedding GR. Bat flight generates complex aerodynamic tracks. *Science*, 2007; 316: 894-897.

昆虫における音・振動情報の機能解明と害虫防除への応用

独立行政法人森林総合研究所 森林昆虫研究領域 高梨琢磨

1. はじめに

「へあれ松蟲が鳴いてゐる ... あゝおもしろい蟲のこゑ。」
秋の夜長に鳴く虫は日本人に古くから親しまれている。多くの昆虫は固体を伝わる振動や空気中を伝わる音に敏感であり、様々な場面でこの能力を利用している [1]。例えば、異性の発する音を手がかりに配偶相手を認識するコオロギ [1]、捕食者であるコウモリの発する音をいち早く感知し逃避するガ [2] などがある。このように音や振動は、情報として様々な機能を持つことが明らかにされつつあるが、害虫における知見は、未だ充分に蓄積されていない。

近年、環境や健康への配慮から、害虫防除のための殺虫剤が使用できなくなる例がでてきている。殺虫剤の代替となる捕食者（天敵）やフェロモン剤等を用いた防除法も存在するが、対象害虫種は限られているため、広範囲の害虫に適用できる新しい防除法の開発が望まれている。また、振動や音を用いた防除法の実験はなされているが、成功例は少ない [3]。

本稿では、著者らの研究グループによる森林害虫であるマツノマダラカミキリの行動・生理学的知見と防除試験の成果を中心に、カブトムシなど他の甲虫類における振動情報を用いた行動、ガ類の超音波情報、そして音・振動を用いた害虫防除について解説する。

2. マツノマダラカミキリの振動情報：回避行動・生殖行動と振動受容器

マツノマダラカミキリは、マツ材線虫病（マツノザイセンチュウによるマツ枯れ病）を媒介し、我が国のマツ類（クロマツ、アカマツ、リュウキュウマツ）に壊滅的な被害を与えている重要害虫である。安全性が高い害虫防除法の開発の必要性が高まってきているなか、著者らは振動を用いた害虫防除技術の開発を目指して、マツノマダラカミキリの振動情報の機能解明と応用研究を進めている [3-6]。以下、これらの成果について解説する。

最初に、マツノマダラカミキリの振動に対する行動反応を観察した。振動刺激は、周波数（25Hz-10kHz）と振幅を変化させたサイン波（パルス長 0.1 秒、パルス間隔 0.9 秒）として加振器に出力し、静止中の個体に与えられた。行動観察の結果、本種は広い周波数帯の振動刺激に対して驚愕反応（脚・触角の自発運動）や発音（胸部摩擦器の運動）等の回避行動を示した。特に、1kHz 以下の低周波成分に対し、高い反応度が見られた（図 1A）[4]。

次に、振動受容器を組織学的手法により検索した。まず塩化ニッケルを用いた逆行性染色により、マツノマダラカミキリの脚、触角、胸部の神経と感覚受容器を観察した。その結果、脚の腿節中に発達した弦音器官（腿節内弦音器官）

を持つことを、甲虫類で初めて発見した。腿節内弦音器官は多数の神経細胞が細長い内突起（クチクラ）に付着する構造をとっており（図 1B）、脚の接地面から振動を鋭敏に受容する機能を持つことが強く示唆された [4]。

続いて、腿節内弦音器官の振動受容器としての機能を行動実験より検証した。まず 6 本全ての脚について腿節内の内突起（図 1B）を外科手術により抜き取ることで、弦音器官を完全に除去した。弦音器官を除去した個体は、振動刺激を与えたところ、歩行中にフリーズ反応を示さなかった。一方、無処理個体は振動刺激に対してフリーズ反応を示し、100Hz の振動刺激に対してはほとんどの個体が反応した。以上の結果から、本種は腿節内弦音器によって 1kHz 以下の低周波振動を受容することが明らかになった [4]。

マツノマダラカミキリは振動を回避行動だけでなく、生殖行動においても利用する。また、視覚刺激に対して触角を大きく動かす反応は振動刺激によって強化された [5]。これらの結果より、振動は視覚による認識を補完し、配偶者の存在を示す情報として作用すると考えられる。マツノマ

ダラカミキリは同種だけでなく異種の昆虫や鳥類等の捕食者の接近も、寄主木に発生する振動によって認識することが可能と推測される [3]。このようにマツノマダラカミキリは、情報の発信者が捕食者であるのか配偶者であるのか振動の特性から識別し、前者であれば回避行動を示し、後者であれば触角を動かして配偶者を探索すると考えられる。また、この触角の振動による反応は腿節内弦音器官を除去するとほとんど見られなくなる [5]。このことから、回避行動と同様、腿節内弦音器官が触角の反応にかかわる振動を受容していると考えられる。

マツノマダラカミキリは同種個体や異種の動物の動きにより寄主木に生じる振動を感知するだけではなく、それとは全く別の原因で生じる寄主木の振動を感知できると想定される。本種の産卵対象である衰弱したマツは、通水障害（水ストレス）が原因となって、周囲長のひずみの変化や微小な高周波振動（アコースティック・エミッション）を多発する。著者らはマツが衰弱する過程において、マツ自体が特異的な振動（以下、自発振動）を発することを測定した [3]。このマツの自発振動は低周波成分からなり、マツの

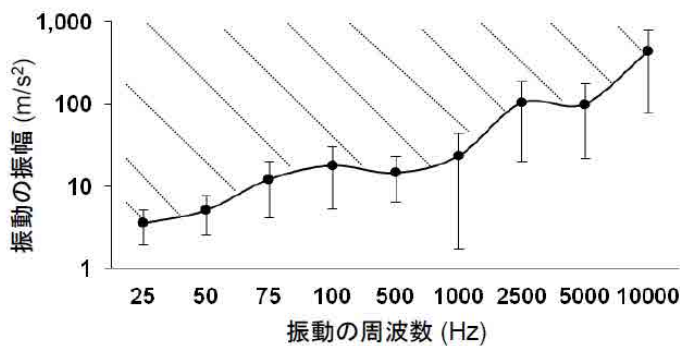


図 1 A 回避行動の反応域

マツノマダラカミキリの回避行動の反応域（斜線部）。曲線は反応をおこす最小の振動の振幅値（閾値）（平均値±標準偏差）。

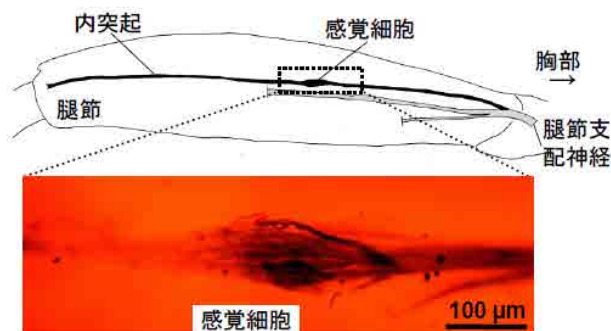


図 1 B 振動受容器

マツノマダラカミキリの腿節内弦音器官。上図：感覚細胞は腿節支配神経から分岐し、細長い内突起に付着する。下図：塩化ニッケルにより染色した点線枠部の感覚細胞の拡大図。

衰弱過程での水分生理状態が大きく変化する特定の時期に多発した。次に、マツの自発振動を再現してマツノマダラカミキリに与えたところ、産卵数の増減は見られなかったが、マツ上の定着率は増加し、産卵行動の時間が短縮された [3]。このことから、マツノマダラカミキリはマツの自発振動を寄主木の情報として認識することが示唆された。本種はマツの揮発性成分に誘引されて産卵をおこなうが、この揮発性成分に加えて振動を産卵に利用していると考えられる [3]。

3. カブトムシの振動交信

カブトムシは、誰でも知っている昆虫である。カブトムシの蛹が動いて振動を発することは、飼育愛好家の間では知られていたが、その役割については分かっていなかった。カブトムシの幼虫は、腐葉土中に集団で生活し、糞と腐葉土の混合物を用いて蛹室とよばれる部屋を作り、その中で蛹になる。しかし、蛹室の壁はもろく、わずかな衝撃でも簡単に崩れてしまう。野外において地中の蛹室と幼虫の分布を調べたところ、両者は平均約 6 cm という近距離にみられた [7]。幼虫は土中を活発に動き回るため、蛹室は周りの幼虫に壊される危険性が高いように思われる。しかし、野外と同程度の高密度で幼虫を飼育しても、蛹室が幼虫に破壊されることはほとんどない。これらのことから、蛹の発する振動が、幼虫から蛹室をまもる機能を持つのではないかと考え、検証実験をおこなった。

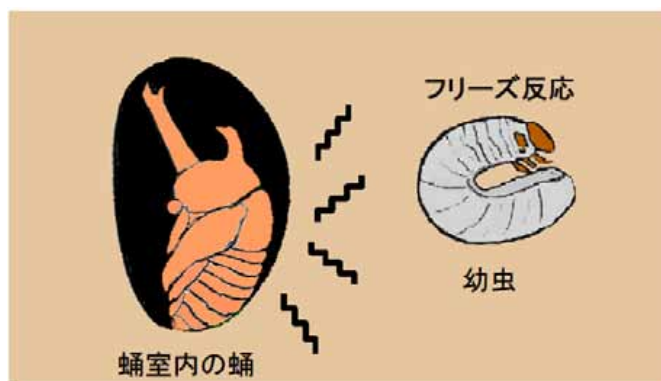
蛹の振動を加速度計により記録・解析したところ、100 Hz 以下の低周波成分を多く含み、規則的な 3～7 個のパルスにより構成されていることがわかった。高速度カメラによる観察と振動測定を同時におこなったところ、このパ

ルスは、蛹が蛹室内で腹部を回転させるときに、蛹室の壁に背面を打ち付けることで生じることも明らかとなった [7]。

次に、カブトムシの蛹が発する振動の機能を明らかにするための実験をおこなった。蛹の回転運動が幼虫からの防衛に役立っているならば、蛹室内の蛹の生死、つまり回転運動の有無は幼虫による蛹室の破壊に大きく影響するはずである。蛹室と幼虫を同一容器内に入れ、蛹室が幼虫に壊されるかどうかを調べた。その結果、蛹が生存している蛹室は、ほとんど壊されることがなかったが、蛹をあらかじめ凍結により死亡させると、多くの場合、蛹室は幼虫によって壊された。次に、空の蛹室のそばで蛹の振動を再生したときに、同一容器内にいる幼虫が蛹室を壊すか検証した。その結果、振動パルスのないバックグラウンドノイズを対照実験として再生したときに比べ、蛹の振動を再生したときは、壊される蛹室の割合が著しく減少した。一連の実験から、蛹は、近付いてきた幼虫に対し振動を発し、蛹室が壊されるのを防いでいることが示された (図 2) [7]。

幼虫は蛹の振動を感知したとき、土中でどのような行動をとるのだろうか。土中の幼虫を観察するのは困難だが、幼虫が動くことで生じる微弱な振動によって幼虫の行動を評価することができる。この振動を加速度計で測定し、蛹の振動を再生する前後で、幼虫の発する振動の頻度がどのように変化するか調べた。幼虫の発する振動は、蛹の振動を再生する直前まで継続的に記録されたが、蛹の振動を再生後の約 10 分間ではまったく計測されなくなった [8]。このことから、蛹の振動を感知した幼虫がフリーズ反応をおこしたことがわかる。フリーズ反応は、昆虫が捕食者を察知したときに行動を停止するという普遍的な反応である。カブトムシの幼虫は、蛹の振動だけでなく、幼虫の有力な

図2 カブトムシの振動交信
蛹室内の蛹は、幼虫が近づくと振動を発し、幼虫にフリーズ反応（行動の停止）をひきおこすことで蛹室の破壊を防ぐ。



捕食者であるモグラの発する振動に対しても、忌避的な反応を示すことがわかっている（図 2）。また、蛹の振動はモグラの振動と類似していることも確認した [9]。その上、蛹が振動を発しない他のコガネムシ科（ハナムグリ亜科・スジコガネ亜科）の幼虫も、カブトムシの振動によってフリーズ反応を示すことが見出された [8]。したがって、振動を感じて動きを止めるフリーズ反応は、捕食者を避けるうえで有利になるという理由から、コガネムシ科の幼虫にもともと備わっていた習性といえよう。カブトムシの蛹はこの性質を逆手にとって、捕食者を模倣した振動で他の幼虫を欺き近づかないようにしていると考えられる [8]。

4. 甲虫類の振動情報

振動により誘発される行動は、上述のマツノマダラカミキリやカブトムシをはじめ、様々な昆虫分類群で確認されている。甲虫類において、摩擦器官による音発生は相当数知られているが、これに対して振動による行動に関する報告例は 6 科と少ない（表 1）[6]。これらの振動情報は、1) 捕食—被食関係、2) 性的関係、3) 社会・共生関係の 3 タイプにわけられる。1) 捕食—被食関係の例は本稿で紹介したマツノマダラカミキリのほか、オウシュウイエカミキリやコロラドハムシにおける振動受容による擬死・フリーズ反応等の回避行動が含まれる。また、砂漠の地表面下に生息するキリアツメゴミムシダマシの近縁種は、風により生じる振動を感知して風に吹き寄せられた餌を得ることができる。2) 性的関係において、シバンムシの一種やカシノナガキクイムシ、ゴミムシダマシ科における振動による配偶行動などがあげられる。オウシュウイエカミキリでは、オスが発する摩擦音が振動としてメスに伝わり、メスの配偶行動に影響する。3) 社会・共生関係の例は甲虫類においてこれまで報告されていなかったが、本稿で紹介

したカブトムシの蛹と幼虫間の交信 [7] が相当する。

5. ガルの超音波交信

アワノメイガ（トウモロコシの害虫）は音圧（音量）の小さい超音波を異性間の交信（性的関係）に用いる [2,10]。オスは、メスが放出する性フェロモンに誘引されてメスに近づくと、翅を垂直に立てて細かくはばたかせる。この時、オスは微弱な超音波の求愛歌（計測距離 1 cm で 46 dB SPL）を発する（図 3）。超高速カメラを用いた発音行動と超音波の解析などから、オスは前翅と胸部にある特殊化した鱗粉を摩擦させ、超音波を発生させていることが明らかになった（図 3A）[10]。この超音波は種特異的であり、近縁種のアズキノメイガ（豆類の害虫）やヨーロッパアワノメイガ（トウモロコシの重要害虫）の発する超音波とは、周波数・時間構造の特性が大きく異なっている（図 3B）[11]。メスの鼓膜器官はオスが発する超音波（ピーク周波数 40 kHz）を感知するが、超音波の音圧が小さいために雌雄間の距離が 3 cm を超えると聞き取ることができない（図 3C）[10]。

アワノメイガの超音波を再現して交尾行動を観察したところ、オスの求愛超音波はメスの逃避を防ぐことが分かった [10]。オスは、発音によってメスを留まらせ、繰り返し交尾を試みることで、交尾の成功率を上げる。鼓膜器官をもつガは、コウモリの超音波を感知してフリーズ反応（飛翔・歩行の停止）を示し、コウモリの捕食を回避する [2,12]。本来、捕食者によって誘発されるこのフリーズ反応を、アワノメイガは交尾のために利用していると考えられる [10]。

音圧の低い求愛超音波は、ごく近距離でのみ有効である

表 1 日本産・外国産甲虫類における振動の利用

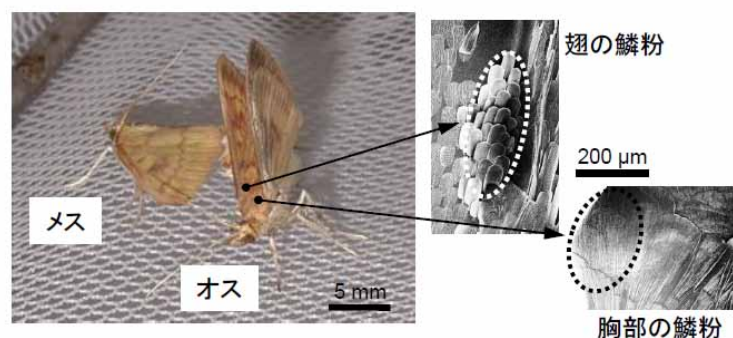
科名	捕食—被食関係	性的関係	社会・共生関係
カミキリムシ	+	+	?
シバンムシ	?	+	?
ゴミムシダマシ	+	+	?
コガネムシ	+	?	+
ハムシ	+	?	?
ナガキクイムシ	?	+	?

[10]。一方、誘引と防衛に用いられる超音波の音圧は大きく、有効範囲は広い。ガの求愛超音波による近距離交信は、複数の分類群において広く存在するため、普遍的なものであると考えられる [13]。微弱な求愛超音波は捕食者や競争相手による盗聴を避けることが可能である [10]。交尾相手のメスだけにささやくラブソングは、コウモリとの攻防戦の結果生じたガ類の巧みな戦略と言える。

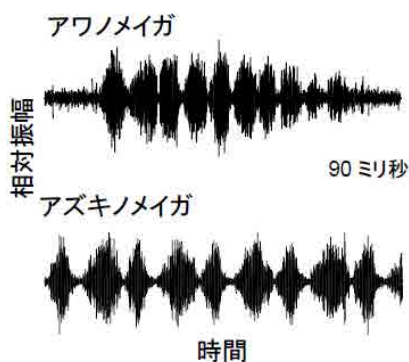
最も多く、捕食者に対する防衛（表 1 では捕食—被食関係に相当）をおこなう種もあった [2,10,13]。これらの音の周波数は、5kHz 未満の低周波から 125kHz の超音波までと様々で、30-90kHz の超音波が最も多かった。また、発音器官も多様であり、胸部の振動膜が最も多くみられ、次いで胸部や翅、腹部の摩擦器官、咽頭の気流による発音も含まれた [2]。

表 2 に、日本産ガ類 24 種の発音の機能を示した。ヤガ科 3 種、ヒトリガ科 3 種、コブガ科 2 種、メイガ科 4 種、アワノメイガを含むツトガ科 7 種、シャクガ科 2 種、スズメガ科 3 種において発音が報告されており、その機能は交尾（表 1 では性的関係に相当）のために用いられることが

A アワノメイガの発音器官



B 超音波



C 超音波と聴覚

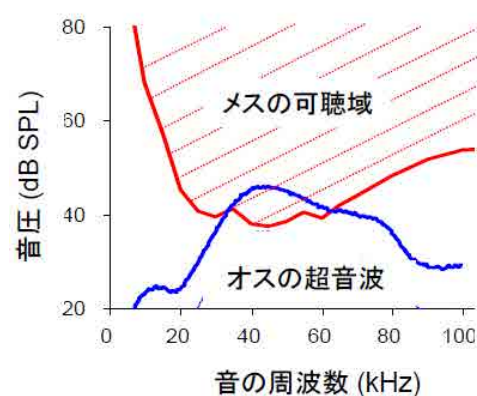


図 3 アワノメイガの超音波交信

A) アワノメイガの発音器官である翅と胸部の特殊化した鱗粉（写真：中野亮博士）。B) アワノメイガと近縁種アズキノメイガの超音波の 90 ミリ秒あたりの波形。C) アワノメイガにおけるオスの超音波とメスの聴覚。

表2 日本産ガ類における音の利用

種名	科名	交尾	防衛
ハスモンヨトウ	ヤガ	+	—
カブラヤガ	ヤガ	+	—
トビシジアツバ	ヤガ	+	—
ヒトリガ	ヒトリガ	—	+
アカハラゴマダラヒトリ	ヒトリガ	+	+
キマエホソバ	ヒトリガ	+	+
アオスジアオリンガ	コブガ	+?	+?
サラサリンガ	コブガ	+?	+?
コハチノスツブリガ	メイガ	+	—
ガイマイツツリガ	メイガ	+	—
ハチノスツブリガ	メイガ	+	—
ノシメマダラメイガ	メイガ	+	—
モモノゴマダラノメイガ	ツトガ	+	—
ニカメイガ	ツトガ	+	—
マエアカスカシノメイガ	ツトガ	+	—
クワノメイガ	ツトガ	+	—
アワノメイガ	ツトガ	+	—
アズキノメイガ	ツトガ	+	—
シロオビノメイガ	ツトガ	+	—
ヨモギエダシヤク	シヤクガ	+	—
ウコンエダシヤク	シヤクガ	+?	—
シモフリスズメ	スズメガ	—	+?
メンガタスズメ	スズメガ	—	+?
オオシモフリスズメ	スズメガ	—	+?

6. 音・振動を用いた害虫防除への応用

害虫の音・振動情報を活用することで、害虫の行動制御、つまり忌避や摂食・産卵阻害をひきおこすことが可能となる [3,12]。そして、これらの行動制御を利用した新たな防除技術の開発につながる。

ガ類において、超音波情報による行動制御とそれによる害虫防除技術の開発は欧米を中心におこなわれてきた [12]。一方、近年国内においても、果樹（モモ）の害虫を対象として特筆すべき成果が報告されている。小池（2008）は、コウモリの超音波を模倣した超音波パルスで果樹園周辺において発生させて超音波の「バリア」をつくることで、アケビコノハやアカエグリバ（ヤガ科）等の侵入を防止させる画期的な技術を開発した [14]。この他、果樹研究所の中野亮研究員らは、モモノゴマダラノメイガ（ツトガ科）のオスが発する超音波は、同種のメスとの交尾に必須である

上、オスがメスに接近するのを阻害することを示した [15]。この超音波情報を模倣することで、新たな行動制御による防除技術の開発が期待される。

振動を用いた行動制御による防除技術の開発は、マツノマダラカミキリを対象に可能である。実験室内において、振動によってマツノマダラカミキリの産卵を完全に抑制できた。また、マツの食害も減少し、振動により忌避がおこることも示された [3]。

以上のマツノマダラカミキリに関する結果から、微弱な振動を樹木等の媒体に発生させて害虫の行動を制御し、産卵や摂食の阻害、忌避等によって防除するための手法を考案、国際特許を出願した。振動を発生させる装置としては、小型で周波数可変域が広い超磁歪素子という材料が有用と考える。例えば、景勝地・公園等のマツ名木毎に高出力の振動発生装置を取り付けてマツを守ることが可能であり、また生態系への影響を最小限にした被害防止が可能となるだろう。また、音・振動を用いた害虫防除は、音・振動に感受性のある害虫種に広く適用でき、環境に配慮した防除技術として需要が高まるだろう。今後、音・振動情報に関する基礎的知見がさらに蓄積し、実用化がすすむことで、本防除法が広く用いられることが期待される [3]。

7. おわりに 生物音響学とバイオミメティクス

生物音響学は、生物の音・振動情報と交信、知覚、さらに物理と工学などを含んだ研究領域である。著者は、これまで紹介した昆虫の音・振動情報の機能や応用に関する研究から、さらに一歩進み生物音響学とバイオミメティクスの統合へと研究領域を広げ、応用につなげたいと考えている。例えば、寄生バエ（発音するコオロギに定位する）の鼓膜器官に模倣した小型音源定位センサー [16] や、昆虫の定位・識別のためのコウモリの超音波ソナー [17] の応用は、音・振動に着目したバイオミメティクスであるといえる。音・振動に関する昆虫の卓越した能力は、動物体の定位・識別システムや害虫防除などの技術開発に寄与し、昆虫に限定されない新しい応用分野を発展させると期待できる。

謝辞

本稿で紹介した一連の研究成果は、中野亮研究員（農研機構果樹研究所）、西野浩史助教（北海道大学）、小池卓二教授（電気通信大学）、小島渉氏・深谷緑博士・石川幸男教授（東京大学）らとの共同研究によるものである。本稿執筆をご

推薦してくださった下村政嗣教授（東北大学）、森直樹准教授（京都大学）、バイオミメティクス研究会の先生方に感謝申し上げる。

References:

- [1] Greenfield, M. D. Signalers and receivers. Oxford University Press, Oxford (2002)
- [2] 高梨琢磨, 中野亮 ガルの多様な超音波発音機構とその機能. 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 -, バイオミメティクス研究会編, シーエムシー出版 133-137 (2011)
- [3] 高梨琢磨 マツノマダラカミキリにおける振動情報の機能解明と応用. 植物防疫 66: 297-299 (2012)
- [4] 高梨琢磨, 深谷緑, 西野浩史 カミキリムシにける振動反応性と感覚受容器. 日本音響学会聴覚研究会資料 40, 293-296 (2010)
- [5] 深谷緑, 高梨琢磨 カミキリムシの多種感覚情報利用システムー振動という「曖昧」情報の重要性. 日本音響学会聴覚研究会資料 40, 297-302 (2010)
- [6] 高梨琢磨, 深谷緑 カミキリムシは振動を感知し, 回避行動や配偶行動を行う. 昆虫の発音によるコミュニケーション, 宮武頼夫編, 北隆館 52-64. (2011)
- [7] Kojima, W., Takanashi, T. and Ishikawa, Y. Vibratory communication in the soil: pupal signals deter larval intrusion in a group-living beetle *Trypoxylus dichotoma*. Behavioral Ecology and Sociobiology 66, 171-179 (2012)
- [8] Kojima, W, Ishikawa, Y. and Takanashi, T. Deceptive vibratory communication: pupae of a beetle exploit the freeze response of larvae to protect themselves. Biology Letters 8: 717-720 (2012)
- [9] Kojima, W, Ishikawa, Y. and Takanashi, T. Pupal vibratory signals of a group-living beetle that deter larvae: are they mimics of predator cue? Communicative and Integrative Biology 5: 262-264 (2012)
- [10] Nakano, R., Skals, N., Takanashi, T., Surlykke, A., Koike, T., Yoshida, K., Maruyama, H., Tatsuki, S. and Ishikawa, Y. Moths produce extremely quiet ultrasonic courtship songs by rubbing specialized scales. Proceedings of National Academy of Sciences USA 105: 11812-11817 (2008)
- [11] Takanashi, T., Nakano, R., Surlykke, A., Tatsuta, H., Tabata, J., Ishikawa, Y. and Skals, N. Variation in courtship ultrasounds of three *Ostrinia* moths with different sex pheromones. PLoS One 5: e13144 (2010)
- [12] 中野亮 チョウ目害虫における超音波を用いた行動制御技術. 植物防疫 66: 300-303 (2012)
- [13] Nakano, R., Takanashi, T., Fujii, T., Skals, N., Surlykke, A. and Ishikawa, Y. Moths are not silent, but whisper ultrasonic courtship songs. Journal of Experimental Biology 212: 4072-4078 (2009)
- [14] 小池明 超音波を利用した果樹のヤガ類被害防止技術の開発. 植物防疫 62: 549-552 (2008)
- [15] Nakano, R., Takanashi, T., Ihara, F., Mishiro, K., Toyama, M. and Ishikawa, Y. Ultrasonic courtship song in the yellow peach moth, *Conogethes punctiferalis* (Lepidoptera: Crambidae). Applied Entomology and Zoology 47:87-93 (2012)
- [16] Ono, N., Saito, A. and Ando, S. Bio-mimicry sound source localization with gimbal diaphragm. IEEE Transactions on Sensors and Micromachines 123: 92-97 (2003)
- [17] 松尾行雄, 高梨琢磨 エコーロケーションに基づいた昆虫の空間定位. 日本機械学会第 24 回バイオエンジニアリング講演会論文集, 8H26 (2012)

構造色が変化する生物と スマート材料設計へのヒント

(独) 物質・材料研究機構
先端フォトニクス材料ユニット 不動寺浩

1. はじめに

様々な生物において構造色と呼ばれる色素に因らない発色現象が観察される [1]。代表例としてモルフォ蝶の青いメタリックな金属光沢が構造色であることは広く知られている。メラミン色素を含む黒い素地の上にクチクラと呼ばれる棚状の多層膜構造が形成され、白色光のうち青色のみが選択的に反射される。

硬い外皮をもつ甲虫類、たとえばタマムシ、クワガタ、カブトムシ、カナブンなどでも構造色は観察される。ニホンタマムシは2種類のクチクラが積層した多層膜干渉により構造色が発色する。正倉院の玉虫厨子に代表されるように、古くより装飾素材として利用されてきた。鳥類では虹色の羽が美しいクジャク、濃紺のカワセミ、あるいは青色～緑色のハチドリなどの羽毛など、多様な色彩の構造色が人々を魅了している。

水中生物に目を向けると、魚類の表皮（虹色素胞）の中に屈折率の高いグアニンと呼ばれる板状結晶（無色透明）が積層しており、薄膜干渉あるいは多層膜干渉により可視光を反射する。この現象はタチウオ、サンマ、カツオなどが銀白色に輝く原因でもある。さらに、一部の生物では構造色が変わることが50年以上前より知られていた。たとえば、英国の M. F. Land は1966年にホタテ貝の目の構造色に関する報告を行っている [2]。その中で塩濃度を変化させることで、浸透圧変化によって構造色が可逆的に変化することと、この現象がグアニンの板状結晶の配列間隔が変化するためだと報告している。

近年、ナノテクノロジーの進展にともないこのような生物の構造色変化に関する学理研究やその仕組みを模倣し、環

境応答型の高機能材料開発に応用しようという研究が盛んになりつつある。

2. 構造色が変わる生物

ルリスズメダイ（コバルトブルー）は代表的な熱帯魚として知られており、青色が選択反射されることで構造色が発色している（図1）。さらに、このコバルトブルーは外部から刺激を与えると、体表が変化する。東邦大学の藤井・大島らの研究により、運動性虹色素胞と呼ばれる組織と

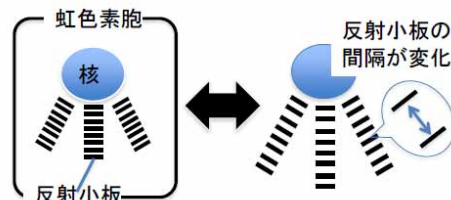


図1 ルリスズメダイ（コバルトブルー）と虹色素胞の構造色変化の仕組み

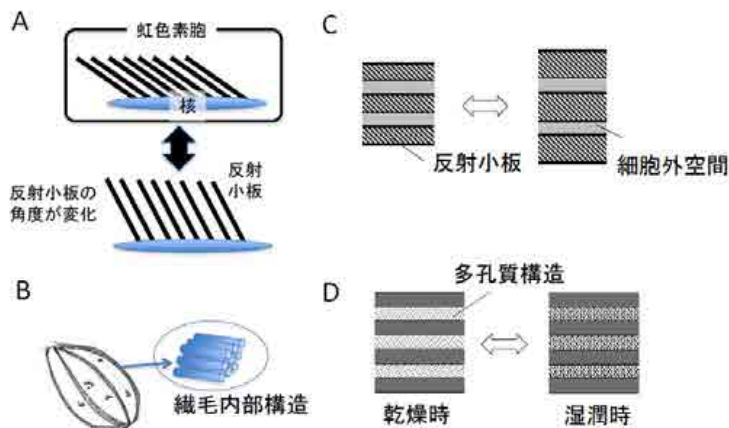


図2 様々な構造色が変化する生物とその仕組み
 A: ネオンテトラ (ベネチアン・ブラインド)
 B: クシクラゲ (ビート運動)
 C: 頭足類 (イカ・タコ類)
 D: 甲虫類

その内部で構造色に変化する仕組みが明らかとなった [3]。図1の写真下のイラストにあるよう、反射小板 (グアニン結晶板) の面間隔が変化するため、回折波長が長波長側へシフトするため体表が青から緑へと短時間で変色する。

図2に様々な生物における構造色に変化する仕組みを紹介する。運動性虹色素胞の一つとして、熱帯魚のネオンテトラではベネチアン・ブラインドのような仕組みで構造色に変化する。図2Aに示す積層した反射小板の傾きの角度変化によって、反射小板から回折する波長が変化するためである [4]。

また、内部構造の角度変化に依存した構造色に変化する生物として、ある種のクシクラゲにおいて、あたかも、虹色のネオンサインが点滅するような発色現象が報告されている [5]。図2Bのような繊毛内部に円筒が積層した周期構造によって入射した白色光が選択的に反射されるため構造色が生じる。海中で漂っているクシクラゲの繊毛が脈動によって、構造色に変化する美しい動画がインターネット上に公開されている。

イカやタコなどの頭足類の構造色変化の模式図を図2Cに示す。これらの構造色変化は、反射小板の多層膜干渉に起因する [6]。反射小板の厚みが変化することで、構造色に変化する。体色変化で、捕食者への警戒・擬態 (カモフラージュ) そして仲間との間におけるコミュニケーションの手段として利用されていると考えられている。

水中と異なり、地上の生物では屈折率変化を利用する構造色変化が多数報告されている [7]。例えば、モルフォ蝶の羽は撥水性で通常は水をはじくので構造色は変化しない。しかし、有機溶媒に漬すと、鮮明な青色が黄色あるいは緑

色へと構造色に変色する。クチクラの周囲の屈折率が変化することがその原因である。また、一部の甲虫類では、クチクラの3次元の多孔質構造を有している。多孔質の隙間を体液で充満させる、あるいは大気中の水分が吸着することで構造色の発色を制御する (図2D)。クチクラが空気と大きな屈折率差があるのが、湿潤することで屈折率差が小さくなるあるいは消失することが原因である。代表的な研究例として、カリドテラ・エグレギガとよばれるハムシの1種は、刺激を与えると1~2分で体表を金色から赤色へ変色する。このハムシでは外皮の色を構成する構造色と赤色素のうち構造色が消失し赤色のみが残る。

ここまで見てきたよう、グアニンの反射小板の間隔が変化、反射小板の角度変化、そしてクチクラの周囲の屈折率変化が生物の構造色を動的に変化させる。

3. 構造色に変化する材料設計

虹色素胞における反射小板の間隔制御する仕組みを模倣して高機能の光学材料を設計する方法として、図3に示す2つの原理が試みられている [8]。一つは屈折率の異なる薄膜を積層した多層干渉である。もう一つは粒子径の揃ったコロイド粒子を自己集積によって形成した3次元周期構造体 (オパールコロイド結晶) におけるブラッグ回折である。多層膜はスピンコーターやディブコーターを利用し、異なる薄膜を1層ずつ繰り返し積層することで形成することができる。また、ブロック共重合体と呼ばれる高分子がミクロ相分離により、自己組織化により屈折率の異なる領域に別ラメラ構造と呼ばれる多層膜を形成する [9]。また、屈折率の異なる2層膜をロールアップあるいは多重に重ねあわせる簡便な方法も提案されている [10]。

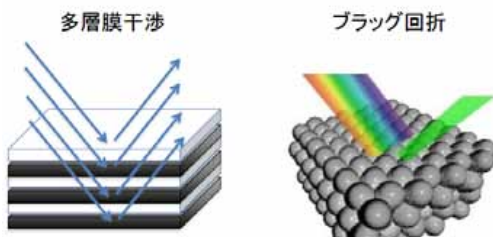


図3 屈折率の周期変化による構造色：2種類の薄膜が積層した多層膜による干渉現象、粒子径の揃ったコロイド粒子が最密充填した規則配列によって生じる可視光のブラッグ回折

一方、オパールコロイド結晶は、溶液中で分散したコロイド粒子が基板上に自己集積により規則的に堆積することで形成される。代表的な成膜法は移流集積プロセスであり、親水化した基板をコロイドサスペンションのビーカーに漬け、オープンで蒸発する方法と基板をビーカーより低速で引き上げる方法である。溶媒の蒸発による溶液のキャピラリーの流れによってコロイド粒子が蒸発界面まで移動し、適切な条件で配列面が揃った3次元周期構造を形成することができる。移流集積プロセスでは面心立方最密充填で(111)面に配向した結晶成長が起るため、構造色は主にこの(111)面の面間隔からブラッグ回折に依存する。なお、この回折波長 λ は(111)面の面間隔 d_{111} 、平均屈折率 n 、白色光の入射角 θ によって

$$\lambda = 2d_{111}\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}$$

として表すことができる。

図3のいずれのナノ構造体も配列周期や屈折率を変えると構造色に変色する。現在、様々なセンサー素子や構造色を利用した表示素子など、新材料の機能開発とその応用が進められている。次節ではオパールコロイド結晶の構造色に変化する研究例として、膨潤現象と応力変形を紹介する。

4. オパールコロイド結晶の構造色

4.1 オパールコンポジット材料

コロイド粒子が最密充填したオパールコロイド結晶の隙間をエラストマー（弾性体）で充填することで粒子間隔を可変になったコンポジット材料を作製することができる。ここでは著者らの開発したコンポジット材料を図4に示す[11]。ポリスチレン粒子（PS、ポリサイエンス社、粒子径202nm）が規則配列したオパールコロイド結晶の隙間

をシリコンエラストマー（PDMS、ダウコーニング社、Sylgard184）で充填している。走査電子顕微鏡を用いオパール薄膜の表面と断面の微細構造を観察した。断面部よりコロイド粒子が積層方向に規則配列していることが分かる。この配列状態を図4左上に図示する。立方最密充填構造CCPで(111)面の面間隔 d_{111} によって構造色を決定する。なお、ポリスチレン粒子及びシリコンエラストマーの屈折率はそれぞれ1.59及び1.40であり、その差は0.2程度にすぎない。

4.2 膨潤現象による構造色変化

図5ではPDMSエラストマーの膨潤により面間隔を拡大する。写真にあるように、オパールコンポジット材料を溶媒に浸すとPDMSエラストマーが溶媒を吸収する。イラストに示すようにエラストマーの体積が膨張する結果、粒子配列面の面間隔も d_1 から d_2 へと拡大する。この写真では乾燥部の紫（青）色と湿潤部では赤色へ変色していることが観察される。揮発性の有機溶媒（オクタン）を用いておりオパールフォトリソニック結晶をビーカーより引き上げ乾燥させると元の赤色の状態に回復する。この構造色変化は有機溶媒の種類に影響を受ける。すなわち、シリコンエラストマーが吸収する溶媒量に応じて、膨潤状態も変化するため構造色も変化する。著者らは分子量の異なるシリコンオイルを用い、紫色から赤色の可視光域全体にわたって任意のカラー選択が可能であることを報告している。さらに、回折光の反射ピークのシフト量を利用することで、簡

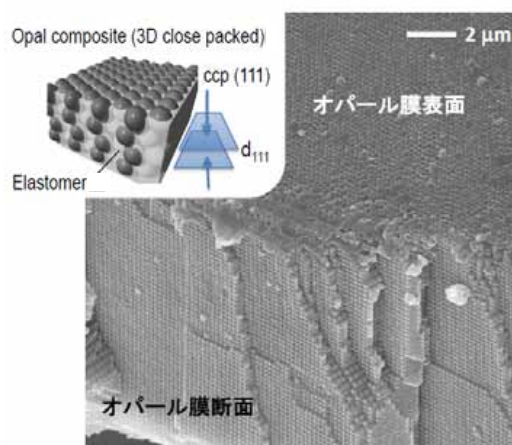


図4 オパール薄膜のポリスチレン粒子間をシリコンエラストマーで充填した微構造の電子顕微鏡写真と模式図(ccp(111)面配向)

易型の検査法としての応用も期待される。

4.3 応力変形による構造色変化

図6ではエラストマーの変形により面間隔を圧縮させる。オパールコンポジット材料の初期状態は赤色の構造色を呈している。この試験片を1軸方向に伸張するとボアソン比の関係から試験片の厚さ方向は圧縮する。この関係は水平方向に働く引っ張り応力と歪みの関係は

$$\sigma_x = E \varepsilon_x = E(\Delta L / L_0)$$

ここではヤング弾性率 E 、初期長 L_0 、伸張量 $\Delta L = L - L_0$ である。また、ボアソン比 ν を使って

$$\varepsilon_z = -\nu(\sigma_x / E) = -\nu(\Delta L / L_0)$$

となるので厚み方向の歪み ε_z は縮小する。従って、イラストに示すよう粒子配列面の面間隔は d_1 から d_2 へと縮小することになる。ブラッグ回折ピークが630nmから580nmまで短波長方向へシフトし、構造色もそのシフト量に応じ赤色から黄色、緑色へと変色する。変形によって構造色が変わることが分かる。試験片を元の状態に戻す

と構造色も元の赤色へ回復する。構造色が応力変形に応じて変色する新材料であり、歪みや応力センサーへの応用を検討している。

5. オパールコロイド結晶の構成粒子と成膜プロセス

最後にオパールコロイド結晶についてその原料や作製プロセスの視点より考察してみる。まず、図4に示したオパール薄膜は単分散ポリスチレン製のコロイド粒子が基本構成要素である。図7にその合成プロセスを示す。主要な構成要素であるポリスチレン粒子は、基礎化学品の一つであるスチレンモノマーの重合により合成する。スチレンモノマーを純水（溶媒）中で攪拌しながら微量のラジカル重合開始剤（この実験では水溶性アゾ系試薬を使用）を添加し、ソープフリー乳化重合反応による1ステップで合成する。ここではポリスチレン粒子合成は加熱温度70℃の窒素ガス雰囲気数時間経過すると、写真Aのように乳白色のコロイドサスペンションが生成する。溶媒は水系でかつ合成

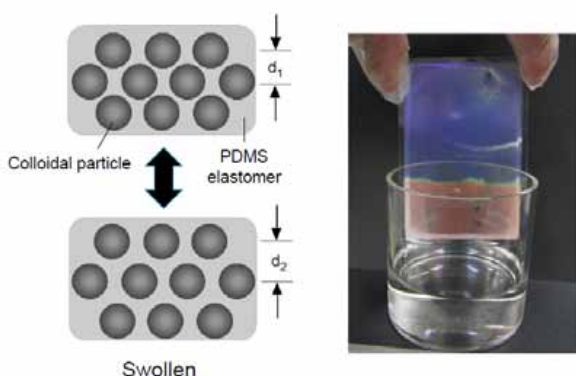


図5 膨潤による構造色変化、シリコンエラストマーが溶媒を吸収することで配列周期が拡大 ($d_1 \rightarrow d_2$)

文献8のFig.6より転載、© 2011 National Institute for Materials Research and IOP Publishing Ltd.

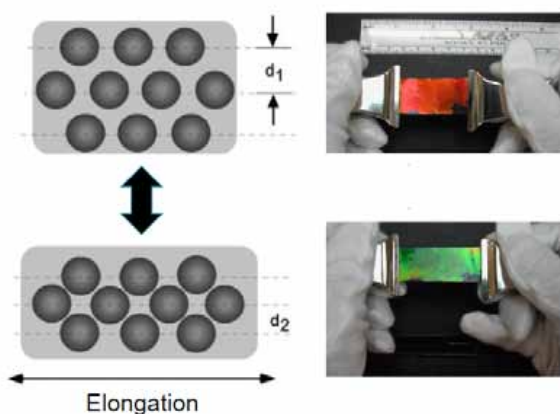


図6 応力による構造色変化、シリコンエラストマーが伸びること垂直方向の配列周期が縮小 ($d_1 \rightarrow d_2$)

文献8のFig.7より転載、© 2011 National Institute for Materials Research and IOP Publishing Ltd.



図7 ソープフリー乳化重合によるコロイド粒子の調整：
スチレンモノマーが純水中にてラジカル重合反応
A：ポリスチレン懸濁液（90% 以上の高い収率）
B：高い単分散性（粒子径：232nm）

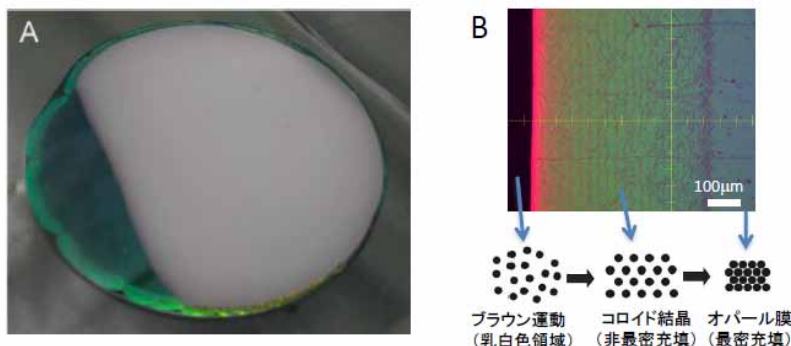


図8 オイル被覆法による人工オパール薄膜の結晶成長
A：シリコンウエハ上への成膜
B：界面付近の顕微鏡観察

に必要な加熱温度も比較的小さい。また、写真Bに示すように、単分散性が極めて高く、かつ、合成収率も90%以上と歩留まりが高い（廃棄ロスが低い）ことがこの合成プロセスの特長の一つである。なお、ポリスチレン粒子の粒径（写真Bでは ϕ 232nm）は合成温度及びモノマー濃度で制御可能である。粒子径が揃っている原因はラジカル重合の初期段階の核生成とその後の粒成長が最適な条件になっているためである。比較的少ないエネルギー消費で低コストの工業原料であるスチレンモノマーから、純水中で合成できるため環境負荷の少ない合成プロセスであると言える。

コロイドサスペンションに分散したコロイド粒子を適切な条件で蒸発させると、自己集積現象によりオパールコロイド結晶を形成することができる。このような成膜プロセスは、3次元規則構造を形成するボトムアップ型のナノテクノロジーの一つと言える。成膜方法は数多く提案されているが、ここでは著者の開発した成膜法を図8に示す[12]。図8写真Aは3インチのシリコンウエハ上で202nmのポリスチレン粒子が成膜している途中である。親水処理した

基板表面をコロイドサスペンション（乳白色）で被覆し、さらにその上面をシリコンオイルでカバーする。このシリコンオイル層が、サスペンションからの水の蒸発をコントロールする。図8の写真Aの左部分は緑色に変色しており、この部分はオパールコロイド結晶が形成している領域である。乳白色と緑色の界面付近を顕微鏡で観察したのが図8写真Bで、顕微分光スペクトルの解析を踏まえ、写真下部に示すような過程を経由して結晶化が進行していると考えている。すなわち、ブラウン運動でランダム運動しているコロイド粒子が界面にて非最密型のコロイド結晶を形成し、さらに粒子間隔が縮小し最終的に最密充填することでオパール膜を形成する。このように室温にて自己集積現象を利用した成膜プロセスなので、少ないエネルギー消費で簡単に3次元規則構造を形成できるため、環境負荷の小さい作製プロセスと言える。

6. おわりに

生物の構造色は古くより物理学者や生物学者の知的探求心

を魅了し、学理的な視点から研究が進められてきた。また、最近の研究の新潮流として生物の構造色の仕組みから、新規光学材料の設計へ反映させる生体模倣材料の研究も盛んになってきている [13]。本稿では構造色の変化に焦点を絞って、構造色に変化する生物とそれにヒントを得た構造色に変化する新材料として著者らの人工オパール薄膜の研究例を紹介した。また、この人工オパールは低コストの工業素材を用い、室温に近いマイルドな条件で自己集積現象によって3次元規則構造が形成できる。生物の構造色の発色の仕組みと比べ、単純であるものの新しい発色原理に基づくスマート材料あるいはインテリジェント材料と呼べる新材料を設計することができた。生物の多種多様で複雑な構造の足下にも及んでいないが、その仕組みを理解することは非常に重要であると考えている。

References :

- [1] S. Kinoshita and S. Yoshioka (eds.) "Structural Colors in Biological Systems: Principles and Applications" Osaka University Press (2005); Serge Berthier "Iridescences: The Physical Colors of Insects" Springer-Verlag (2006); 木下修一「生物ナノフォトンクスー構造色入門」朝倉書店 (2010)
- [2] M. F. Land, J. Exp. Biol., 45, 433 (1966).
- [3] R. Fujii and M. Oshima, Zool. Sci., 2, 885 (1985).
- [4] S. Yoshioka, B. Matsuhana, S. Tanaka, Y. Inouye, Y. N. Oshima and S. Kinoshita, J. R. Soc. Interface, 8, 56 (2011).
- [5] V. Welch, J. P. Vigneron, V. Lousse and A. Parker, Phys. Rev. E, 73 041916(2006).
- [6] A. R. Tao, D. G. DeMartini, M. Izumi, A. M. Sweeney, A. L. Holt A and D. E. Morse, Biomaterials, 31, 793 (2010).
- [7] L. P. Biro and J. P. Vigneron, Laser Photonics Rev., 5, 27(2010).
- [8] H. Fudouzi, Sci. Technol. Adv. Mater., 12, 064704 (2011); Open Journal doi:10.1088/1468-6996/12/6/064704
- [9] J. J. Walsh, Y. Kang, R. A. Mickiewicz and E. L. Thomas, Adv. Mater., 21, 3078(2009).
- [10] M. Kolle, "Photonic Structures Inspired by Nature" Springer, Berlin (2001).
- [11] H. Fudouzi, Adv. Powder Technol., 20, 502(2009).
- [12] H. Fudouzi, J. Colloid Interface Sci., 275, 277(2004).
- [13] L. P. Lee and R. Szema, Science, 310, 1148(2005); C. Sanchez, H. Arribart and M. M. G. Guille, Nat. Mater., 4, 277(2005); A. R. Parker, Phil. Trans. R. Soc. A, 367, 1759(2009); O. Sato, S. Kubo and Z. Z. Gu, Acc. Chem. Res., 42, 1(2009); J. Wang, Y. Zhang, S. Wang, Y. Song and

(5) 国内外研究動向紹介

B01-1班：産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門 大園 拓哉

生物規範工学全体会議・海洋研究開発機構合同講演会に参加して

開催場所：クラウンプラザホテル沖縄ハーバービュー

日時：2013 年 7 月 1 日～2 日

外気は気温摂氏 30 度超、高湿度に対して、7/1 からの全国的節電要請が唯一出ていない沖縄のためか、冷房がかなり効いた会場での開催となった。8:30 より、午前は各班 25 分程度、午後は公募班から核 15 分程度、その後、合同講演会として、(1) 北海道大学 長谷山美紀先生、(2) 海洋研究開発機構 白山義久理事 (3) 美ら海水族館 佐藤圭一先生からの先生のお話を聴講した。その内容について掻い摘んで紹介したい。

冒頭、領域代表から 1 年目評価コメントについての領域としての対応に言及された。総花的な研究のまとめ、産学連携推進について、C 班の重要性の主張など、3 つについてポイントに言及があった。以下講演順にコメントする。

阿多氏、C 班の取組：バイオトリツの活用方法についての説明やテクノロジーガバナンスの実践（国際標準化はナノテクより、テクノロジーハイク挙動において速いタイミングで進んでいる、PEN による 2 次情報発信とサイエンスコミュニケーション活動）についての説明があった。関谷氏：国際標準化についての進捗と今後について詳細な状況報告があった。ドイツの認証ビジネス（検査協会）の推進の動き、韓国の表面微細構造濡れ性評価の WG の立ち上げの動きなどの報告があった。下村代表のコメントとして、当日の NHK クローズアップ現代（評価委員の赤池学氏出演）へ取り上げられる報道の盛り上がりや、政府の成長戦略における標準化の重要性に言及があった。

劉先生、B-5 班の取組：シミュレーターによる可変構造体の飛行安定性に及ぼす影響を調べた結果など説明、弾性可変飛行体が何故よいのかへの機構の観点からの質問もあり活発な議論が行われた。木戸秋先生：細胞のメカノタクシスとその制御についての成果（エレクトロスピニングによる光架橋高分子を用いた 3D での細胞運動制御への拡張等）を説明された。下村代表のコメントとして、領域一般に班内、班間の連携への意識向上を目指すべきという点があった。

森先生、B-4 班の取組：蛾の性フェロモンの導入説明から、特定のフェロモンの組み合わせ（ブレンド）による応答性、認識性の研究について言及された。また、寄生ハエの音響応答性について、ネムリユスリカ研究における研究進展の説明。室蘭工大（岩佐先生代理、埴田（タダ）氏）電子鼻センサー＝匂い分別センサーを FET 集積および SAW センサ

ーで構成に向けた匂い感受タンパクの調査研究を説明。下村代表のコメント、化学センサについてのセンシングの受容体レベルでの（脳機能よりも原始的なレベル）一般的なアルゴリズムは存在するのか、あればそこから設計が可能なのではないか？との一般性への発展性に関する質問などあり活発なやりとりがなされた。

細田先生、B-3 班の取組：バイオミメティクスか否か、を意識すべきとの指摘や、“バイオロジーブッシュとテクニカルブル”どちらも生物と工学の組み合わせが重要であることなどに言及された。また個別研究成果として昆虫の足の接触関連の成果を中心に説明があった。重藤先生：大気圧低温混載接合に関する詳細な説明があった。

針山先生、B-2 班の取組：玉虫の構造の生理学的研究や、人工系の構築について言及された。吉岡先生：シジミ蝶の翅の選択反射の実験とモデルについての研究について説明があった。

大園、B-1 班の取組：可変微細構造とトライボロジーに関する取組と成果を説明。室崎先生：フジツボ付着界面、ハニカム構造ピラー構造の影響等の研究の説明し、活発な質疑応答がなされた。

野村先生、A-1 班の取組：生物からのデータを収集提供を目的。昆虫、鳥類、魚類からデータの提出から、データベースの構築まで概説された。また個別成果としてカブトムシの角の断面図やマンボウの体表の微細構造などは特に新規に分かった構造がみられることに触れた。SEM 以外にも有用な画像データの収集に努めることにも言及された。山崎先生：山科鳥類研究所のコレクションからの鳥類体色の電子顕微鏡撮影、反射スペクトルのデータ収集などからトキの化粧行動についての報告があった。頭部から黒い分泌物を出して羽毛に色を付ける非常に珍しい着色方法である点や、凹凸溝構造とそこへの黒色物質がトラップの影響について触れた。我孫子市鳥の博物館でのアウトリーチ活動の広告にも触れた。下澤先生から、一般的なメッセージを工学側に伝えるために、データを収集する際に機能を意識した収集方法を工夫するとデータの価値が上がるのではとのコメントがあった。

公募班：有村先生：バイオミメティクス・データベースのオープンイノベーションプラットフォームへの展開と題して、それに必要な具体的情報、機能、運営手法について概説された。

公募班：浅川先生：生体におけるノイズの利用を模倣し、エネルギー効率を高めた素子を狙う。電気回路や計算では確立共鳴素子はできているが、それを材料そのもので実装することを狙うことに言及。P3HT という有機分子を用いて、その構造（相転移）のゆらぎを利用することに言及された。薄いエネルギーを効率よく利用する 1 つの方法としての可能性に言及した。

公募班：田中先生：変形に着目した翼の設計と効果を調査する研究について説明があった。シワ構造を利用したプロセス技術と、評価の計画について紹介した。

公募班：植木先生：ホヤ類による各種金属の濃縮能についての研究、特にバナジウムの濃縮還元機構（分子機構、遺伝子機構）、腸内細菌、接着機構—防止機構（公募研究内容）。研究方針の説明。幼生の付着挙動の解明（フジツボとの関連性、差異にも言及）などへも言及された。

公募班：山口先生：ヤモリ模擬構造の研究について、特にヤモリのひげ状構造（ピラー）構造の曲り梁構造の重要性について指摘され、材料変形に着目した摩擦制御表面の研究計画に言及した。

公募班：カートハウス先生：花粉のバイオミメティクスの研究についての公募研究提案の紹介があった。表面構造を持つ機能微粒子の合成を狙い、花粉の生成機構の紹介とそこからの学びについて言及された。ウイーン植物園のデータベースについても言及した。

公募班、藤井先生：微粒子由来凹凸構造、リキッドマーブルの研究の紹介。低環境負荷型のキャリア媒体としての可能性に言及された。

公募班：出口先生：材料科学からのアプローチ、バイオクレプティクス（バイオ由来の酵素を持ってきて使う）、深海微生物が持っているセルロース分解機構解明（マリンスノウとして深海に沈殿した結晶性のセルロースを分解して生活）、地上との差異は何かなどの問題意識について研究計画に言及された。

評価委員：藤崎先生からの講評とコメント：究極目標は生物の技術体系の構築を通じて持続性社会を実現することにどう答えていけるのかを意識すべきである、社会にアピールする目玉研究を領域から選択すべき、工学と生物学者の相利共生関係の構築。ダウンサイジングによるエネルギー消費抑制への意識の重要性、を指摘された。

合同講演会（１）北海道大学 長谷山美紀先生：ISO/TC266 Biomimetics 第１回総会日本国内審議会における発表概要についての説明があった。WG４の立ち上がりの経緯についても説明した。望む情報に到達するためのDB検索システムについて実際の検索操作を示して紹介下さった。それに対して、画像検索を利用した関連情報への到達手法を解決法として紹介された。

合同講演会（２）海洋研究開発機構 白山義久理事：生物規範工学と海洋生物学、JAMSTECの紹介があった。また線虫（Nematoda）の多様性に代表されるように、フィールドワークで採集されるのは新種の場合のほうが多いぐらいという指摘があり興味深い。また例えば、音響的な効果は海では重要であるが、その観点から工学につながらないかなどの問題提起のご指摘も頂いた。線虫とゴカイの運動なども同様に興味深いことに言及された。海洋酸性化による多様性の減少への危惧。サンゴへの影響、例えば構造維持のた

めの力学などは工学、理学の知識が必要かというコメントも印象深かった。

合同講演会（３）美ら海水族館 佐藤圭一先生：サメ類の多様性について紹介いただいた。５３３種あることや、大きく分けて２グループであることなど、また非常に多様な形、大きさ、性質の写真をオーバービュー頂いた。プランクトンを捕食するもの、ここ１０年で１００種新種が発見されていたり、深海で光るものもいることを教えていただいた。またサメは２５％が肝臓であり、油分により浮力を調整するためと説明されていた。サメは軟骨魚類であり、すべての骨が軟骨でできていることも強調されていた。特に、ご研究内容である、サメの繁殖について興味深い内容紹介を頂いた（交尾の方法、卵生、胎生、両方あるなど、また、胎盤のあるサメもいる（かなり珍しい）ことなど）。また水族館のジンベイザメ１８年でやっと成熟し、これから繁殖行動について調査していくことにも言及されていた。

B01-1 班：千歳科学技術大学 総合光科学部 バイオマテリアル学科 平井 悠司

国際海洋環境情報センター（GODAC）および美ら海水族館総合研究センター見学会に参加して

7月1日に開催された科学研究費「生物規範工学」全体会議・海洋研究開発機構合同講演会に引き続き、2日には名護市にある国際海洋環境情報センター（GODAC）と美ら海水族館総合研究センターの見学会に、晴天に恵まれた中、汗をかきつつ33名が参加した。

まずは那覇市内を抜け、高速道路をって一路名護市の国際海洋環境情報センター（GODAC）を目指した。バスからは本州とは違う植生の沖縄の自然を見ることができ、前日の懇親会の疲れも感じることも無く快適に1時間程度の旅程を過ごした。GODACに到着後は海洋研究開発機構(JAMSTEC)の鈴木様からご挨拶を頂き、その後萩堂様より施設の概要と、JAMSTECが運営しているデータベースについてご紹介頂いた。その中でもJ-EDIというデータベースは、これまでの深海探索で得られた膨大な情報や動画を公開しており、これまで知らなかったことがもったいないと言わざるを得ない、非常に有用なデータベースが有ることを知ることができた。そして実際にデータベースへ入力する様子もご説明頂き、その後は館内の展示を自由に見学した。館内には深海調査に関するデータや調査船の模型などもあり非常に興味深い展示であった。

GODAC 見学会の後は、美ら海水族館へと向かった。その途次、昼食は本部町にあるハワイ食堂と言う食事どころで、事前に注文をしておいた沖縄名物の料理を堪能させて頂いた。ハワイ食堂の窓からはきれいな海を眺めることができ、食事後にバス出発まで若干の余裕があったので、食堂の裏手に広がる美しい海に行き、その景色を眺めることが出来た。(今回は天候に恵まれた出張でしたが、残念ながら私が海に近づけたのはこの間の5分程度でした)

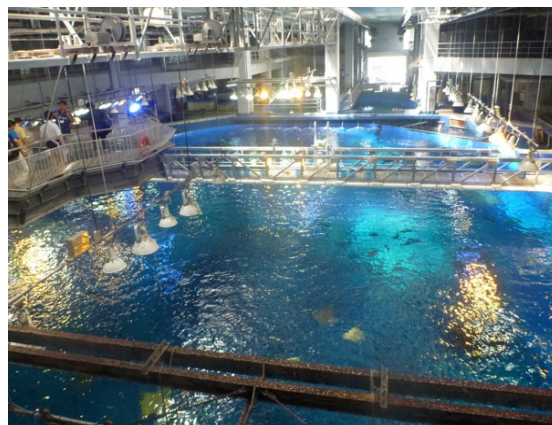


晴天に恵まれた中、バスに乗り込む様子(左図)、GODACでの萩堂様のご紹介の様子(右図)

美ら海水族館ではまずは水族館内の見学を行った。圧巻だったのはやはり大水槽における、ジンベイザメやマンタを始めとする様々な魚が回遊している様子であった。その他にも実際にヒトデやナマコに触れたり、大きくてカラフルな伊勢エビが多数生息している水槽があったり、色々な種類のサメ肌を実際に触れたり、興味深い展示の数々であった。ざっと水族館内を見学した後は、美ら海水族館の佐藤様に大水槽のバックヤードに連れて行って頂き、ジンベイザメとマンタの食事方法の違い(吸い込む&流れ込む)などの説明を受けるとともに、実際にその様子を観察させて頂いた。また美ら海水族館の水は水族館としては世界一きれいだということをお聞きした。それは美ら海水族館では沖合の海水を常時取り込み濾過して使用しているからだそうで、近隣の海できれいな海水が大量に得られる沖縄だからこそその理由であった。美ら海水族館が多くの人を引きつける理由として、様々な魚がいるだけでなく普段はあまり気がつかないところにも他の水族館とは大きく違う魅力が隠れていることを実感することができた。

そして水族館見学後はバスで那覇市のホテルまで戻ったのだが、参加者は県外からの参加者が主であり、バスでの長距離移動や興味深い施設見学、慣れない沖縄の高温多湿に疲れきり、ほとんどの方が眠りにつかれての帰路でした。その後は急遽、JAMSTEC の鈴木様を迎えての懇親会が開かれ、沖縄最後の夜を堪能させて頂きました。

また、個人的に佐藤様には B01-1 班で研究を進めているサメ肌についての研究を行うために、サメ肌サンプルの提供をお願いし、快諾して頂けるなど実り多い見学会となった。



ハワイ食堂からの眺め(左図)と大水槽バックヤードでの餌やりの見学(右図)

産学連携グループ：産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門 ナノテクノロジー戦略室 関谷 瑞木

「第 58 回高分子夏季大学 –未来を拓く高分子–」に参加して

2013 年 7 月 17 日水曜日から 19 日金曜日の 3 日間にわたって、(公社) 高分子学会主催の第 58 回高分子夏季大学が、広島県広島市内にある広島国際会議場を会場に行われた。2013 年の夏季大学のテーマは「未来を拓く高分子」で、筆者は最終日 19 日に開催されたバイオミメティクス分科会でバイオミメティクス国際標準化に関する最新動向を報告する機会を得た。

夏季大学 2 日目の 18 日の夜、夏季大学の講師を囲む会が行われた。広い会場には大きな円卓が分科会ごとに配置され、各テーブルの周りを飲み物片手に講師と参加者が囲むカジュアルな会である。バイオミメティクス分科会のテーブルの周りは、学生、大学院生、若手研究者によって隙間なく埋められており、会場への到着が遅れた筆者は場所を確保するのが難しいほどであった。1 時間ほどの会では、どのような研究がバイオミメティクスの研究といえるのか、どのような応用が考えられるのか、メディアのなかのバイオミメティクスなど、議論が盛り上がった。

19 日のバイオミメティクス分科会講演は、新学術領域研究「生物多様性を規範とする革新的材料技術」(生物規範工学) 領域代表の下村政嗣氏の問題提起「今なぜ、生物模倣(バイオミメティクス)なのか?」を皮切りに計 5 名の講師が話題を提供した。筆者は「バイオミメティクス研究開発の国際動向」とのタイトルで、昨年 10 月から国際標準化機関(ISO)で議論が始まったバイオミメティクスの国際標準化活動、ISO/TC266 Biomimetics の現在の進捗、今後の議論の行方などを紹介し、各国のバイオミメティクスの研究開発動向について簡潔に報告した。日本工業標準調査会(JISC)のバイオミメティクスの国内審議委員会は、高分子学会のなかに昨年発足したバイオミメティクス研究会がその役割を担い、高分子学会が国内審議委員会の事務局を引き受けている。

日頃研究に没頭されておられる皆さんは、バイオミメティクスの国際標準化活動は自分の研究からずいぶんと距離があるように感じておられるのではないかと思います。しかし、今 ISO/TC266 で進められている産業化のためのルール作りの議論は、近い将来の研究開発、さらにはその先の産業化の行方を左右するということを認識していただけたらと思う。バイオミメティクスの国際標準化は、研究開発の本格化とほぼ時期を同じく始まり、バイオミメティクスへの将来インパクトへの期待や関心の高まりと共に注目されるようになってきた。このような状況のなかで、昨年来日本がバイオミメティクスの国際標準化活動に関し

て、事前に提案国であるドイツと議論を重ね、ISO/TC266 第 1 回総会の後は日本提案をワーキングアイテムにするために参加国の標準化機関との折衝を進めるなど、積極的に国際標準化に対応してきたことを紹介した。

下村氏は分科会の口火を切る講演で、バイオメティクスを、「様々な分野の融合によって全く新しい学問を創出しようとする試み」と表現した。このような新興の科学技術には様々な不確実性がつきものであり、しかもその不確実性を克服するためのツールに欠けている。この不足を埋めるものがテクノロジーガバナンスであり、ISO/TC266 への積極的な取組みはその一環である。バイオメティクスの国際標準化活動では、ナノテクノロジーの国際標準化の取り組みを様々な点で参考としている。ナノテクノロジーは、バイオメティクス同様に学際として展開してきた新興の科学技術であり、その研究開発の道のは、新興の科学ならではの科学的な不確実性を乗り越え、社会との合意を形成しようとしているバイオメティクスの研究開発にとって、多くの教訓を示している。今後もこのような視点で、バイオメティクスの研究開発とその産業化を支援していこうと考えている。

第 58 回高分子夏季大学の会場となった広島国際会議場は、広島市内を流れる太田川の中州にある平和記念公園に位置している。今夏の容赦ない暑さが作り出す陽炎の向こうに原爆ドーム揺らいでいるのを多くの参加者が見たことと思う。より良い未来を科学技術によって切り拓いてゆくために今何をすべきか、を全国から集まった参加者と議論するのに相応しい場であったと思う。