バイオミメティクスのすゝめ

下 澤 橋 夫*

生物の生きる仕組みの動作原理をヒトの技術へ転化するバイオミメティクスを紹介する。生物の機能の全ては、特定の構造に裏付けられている。生きる仕組みの理解を目指す生理学では、「構造の無い機能は幽霊、機能の無い構造は死体」である。生物は全ての機能的（適応的）構造を、極ありふれた元素のみから作る。コガネムシが金の原子を1個も使わずに常温常圧で金色の鞘翅を作り上げる能力は、技術と呼ぶにふさわしい。ガルバーニが、金属との接触でカエルの筋肉が攣縮する仕組みを追い求めたことが、電池の発明を惹き起こして世界を一変させた。パソコンでクリックした際に動作するシュミットトリガー回路は、イカの巨大神経軸索のパルス発生機構に由来し、現実の世界経済を支えている。サカナの眼のレンズは単に球形ではなく、中心部の屈折率が高い屈折率分布レンズで、球面収差が補正されている。生理学ではマーティセン比として知られるこの結像原理の二次元版が光ファイバであり、現在の光通信を支えている。物理学が人間の英知で解き明かし制定したかのように言い触らしている法則の多くは、生物が既に十分に使いこなして物作り技術にまで高めていた自然の性質の1億年遅れの再発見に過ぎない。

1. はじめに

バイオミメティクス (Biomimetics) という言葉は「生物模倣技術」と訳されている。しかし単に生物を真似たモノを作り出す技術ではなく、生物の生きる仕組みを解明し、その原理をヒトの技術へ転化する科学分野のことである。筆者は、もう少し広くとらえて、数学・物理・化学のみに基礎を置いた旧来の工学から、生物学にも規範 (Discipline) を置く「生物規範工学」への脱皮を提唱してきた。

18世紀は数学の時代、19世紀は化学の時代、20世紀は物理学の時代、そして21世紀は生物学の時代と言われている。初めの3つは「この世界は、どんな物で出来ていて、どんな力が支配しているかを教えてくれた科学」で、現在の工学と産業技術の基盤を成している。しかし、生物学を欠いた技術の結末は、1960年代の公害、持続可能性を脅かす地球規模の温暖化、そして原発事故だった。では、生物学は何を教えてくれるのか？それは「この世界にはどんな設計（仕組み）があり得るのか？」である。工学と産業技術は「人工物を作り出して自然と相互作用する人間活動」なのだから、それは自然のモノ作り技術すなわち「生きる仕組み」からも学ばざるを得ない。現実の世界には生物が満ち溢れており、我々自身も生物なのだから、世界の半分以上を占める生命現象に目をつぶり続けられれば、工学も産業技術

も自然科学を名乗る資格を失う。

かつての数学も物理学も化学も、複雑怪奇に見える生物現象を考察の対象から外して脇に置く（見て見ぬ振りをすること）で身軽になり、大きく発展して今日の工学技術の基盤としての地位を獲得した。これらの科学の歴史上の発展の順は、単純さの順の証明でもある。最も複雑な科学である生物学は、数学・化学・物理学の発達の後でなければ開花できなかったし、数学・化学・物理学なしには生物現象を深く理解出来ないことも事実である。しかし裏を返せば、これまでの工学技術は単純な科学にしか頼ってこなかったのだ。複雑な現実に対処すべき技術を単純な科学のみから作り上げ得る、というのは不思議な信仰と言わざるを得ない。

筆者は2008年に、本学会の多くの方々との協力の下に針山孝彦会員との共同監修で「昆虫ミメティクス」²⁶⁾を編纂し、生物の生きる仕組みに学ぶことが科学・技術 (Science and Technology) の革新に不可欠であることを、工学サイドへ紹介した。また平成24～28年度には、文科省科研費の新学術領域「生物規範工学」(領域代表 下村政嗣 千歳科学技術大学教授) が採択され、本会からも尾崎まみ会会長を初め、多くの方々の参画を戴いている。

様々な生物の「生きる仕組み」の解明を目指している比較生理生化学は、バイオミメティクスに非常に近い。バイオミメティクスのヒントの宝庫と言っても良い。生物学的な機能の全ては特定の構造に裏付けられており、「構造の無い機能は幽霊、機能の無い構造は死体」である。生物は全ての構造を、極ありふれた元素 (CHOPINS: 炭素, 水素, 酸素, 燐, 窒素, 硫黄とわずかの無機元素) のみで作る。コガネムシは金の原子を一個も使うことなしに金色の鞘翅を常温常圧で作る。この能力は「技術」と呼ぶのにふさわしい。一方、我々ヒトが道具を作り出す技術の殆どは高温高压での加工に頼っており、地球規模での熱収支の平衡点さえ押し上げている。機能的な構造を常温常圧で作る生物の技術の一部分でも我々の技術に転化出来れば、この社会の持続可能性は格段に増す。バイオミメティクスは、ヒト社会の技術体系の根本的な健全化を目指しており、生物学はその指導原理である。生物学者ぬきのバイオミメティクスは偽物である。会員諸氏が積極的にバイオミメティクスへ参画されるよう期待して、生物学が如何に工学技術の革新に寄与して来たかの事例を幾つか紹介する。短期間での現世ご利益のみに価値を見出す世の人々へ「今の技術世界は地道な生物学の上に存在しており、生物学抜きにはその存続もあり得ない」ことの喧伝に役立てて戴きたい。

* Tateo SHIMOZAWA, 北海道大学名誉教授 (〒004-0002 札幌市厚別区厚別東2条4丁目14-25)

Received 6 May 2016, Accepted 12 July 2016

2. 史上最大のバイオミメティクス：電池

1786年9月の、ある嵐模様の日、Galvaniは皮を剥いだカエルの肢を、銅の鉤にかけて庭の鉄柵に吊るした。強い風に吹かれたカエルの肢が鉄柵に触れる度に、筋肉がピクピクと動いた。これを見てGalvaniは不思議に思い、更なる観察を重ねて、5年後(1791)に「動物は電気を出しており、金属で外に道を作ると、電気が流れて筋肉が動く」という「動物電気説」として発表した。翌1792年にGalvaniの論文を見たVoltaは非常に驚いて、Galvaniの観察を一つ一つ確かめて行った。その結果、動物が電気を出すのではなく、2種類の金属の接触が(カエルの肢の収縮の)原因であるとの「金属電気説」に到達した。この後の1793-1800年にわたる「ガルバーニとボルタの論争」は、ボルタの電池の発明で決着がついた(ということになっている)。この辺りの経緯については酒井正樹会員による優れた解説があるので、是非参照されたい¹⁶⁾¹⁹⁾。

ボルタの電池は、銀と亜鉛を張り合わせた板を塩水で湿した布で挟んで積み重ねたものであった。ボルタは物理学者とされているが、張り合わせる二つの金属の最良の組み合わせのみを問題にし、塩水(電解質、イオン化)の役割には最後まで気付いていない。Galvaniも金属の組み合わせの重要性には最初から気付いており、膨大な組み合わせの結果を記録している。しかし、「鉄」同士の組み合わせでも、カエルの肢が収縮することがあり、生きているカエルの肢が電気を出しているとの結論に至ってしまった。純度の高い鉄を作ることは現在でも難しく、普通の鉄は合金で、ロット毎に仕事関数が異なる。

では、Galvaniはなぜ嵐模様の日、なぜ皮を剥いだカエルを、なぜ銅の鉤で、なぜ庭の鉄柵に吊るしたのか? どれ一つが欠けても「発見」には至らないではないか? 実は、Galvaniは天気予報を試みたのである。Galvaniは、皮を剥いだカエル(イタリアでは食材、銅の鉤に吊るす)が、摩擦起電機で作った電気にひどく敏感なことを知っていた。雷の正体が電気であるというFranklinの電気流体説(1752年)も知っていた。雷の正体が電気なら、嵐の前には空中の電気が増えるに違いない。ならば、高感度の電気検出器である皮を剥いだカエルで、空中電気が増えたことが分かったと予想したのである。しかし期待通りにはならず、全く予期せぬ「鉄柵に触れるたびの収縮」を見ることになった。

このようにして電池が発明され、Voltaは名声を得、電圧の単位はボルトとなった。しかし、全ては生物学者Galvaniの生きる仕組みの解明から始まったのである。一方Voltaは、探検家Humboldtがアマゾンで出会った電気ウナギ(馬をも殺す生物発電)を無視し続けた。動物が電気を出していることは、Galvaniの弟子Matteucci(マトイッチ)が50年後(1838)に証明した。今日では当たり前の、選択的イオン透過性、濃淡電池、ネルンストの式、イオン化傾向、金属の仕事関数、と物理用語で統一的に説明される電気の世界への扉を開けたのは、生物学者Galvaniであった。

その後、電池から得られる直流電流のお陰で、「電流の磁気作用(電気が動くと磁場ができる)」が発見され(Oersted 1820年)、すぐさまそれを応用して電流計が発明された。生物から出るわずかな電流をも検出できる高感度の電流計はガルバノメータ(検流計)と呼ばれ、今では共焦点顕微鏡のレーザスキャナー部にその名を残している。1831年、

Faradayは逆に「磁石が動けば電気が出るのではないか?」と思い付いて、苦心惨たんのもとに電磁誘導の法則(発電機やアンテナの原理)を確認し、その証明としてダイナモ発電機を作って我々を電気の時代へと送り込んだ。Voltaの電池以前は、摩擦起電機による静電気しかない。静電気はLeiden瓶に蓄えても電荷量は少なく、放電時間も極めて短いので、有用な技術にも科学にも成り得なかった。洋の東西を問わず、静電気と摩擦起電機は所詮見世物に過ぎず、科学には寄与しなかった。平賀源内のエレキテル(1776)も肩こり治療器としての見世物であった。電池が出来て初めて、電気現象の物理学が進歩し、蓄電池、無線通信など多様な応用技術への道が拓け、イオンなどの電気化学の理解も進んだのである。今のケータイ電話もインターネットも、全て「カエルのお陰」である。全てはカエルの持っていた技術(生きる仕組み)の解明から始まった。電池は、人類史上最大のバイオミメティクスであり、産業技術はカエルの恩恵に感謝すべきである。1998年には、Galvani没後200年を記念した研究集会がボローニア市で開かれている²⁰⁾。

3. シュミットトリガー回路

バイオミメティクス(Biomimetics)という言葉と概念を提唱したのは、Otto Schmittである(図1A)⁸⁾。彼は、アメリカ合衆国の中西部ミズーリ州セントルイス市のワシントン大学生物学部でイカ巨大神経軸索の活動電位発生機構を調べる神経生理学者であった。我々の日常は、彼がイカの軸索膜に学んで発明したシュミットトリガー回路に支えられている(図1B)²²⁾。我々がパソコンのキーを押したとき、マウスでクリックしたとき、またタッチパネルに触れたとき、パルスを一発だけ出してコンピュータ本体に割り込み要求を掛ける電子回路である。パソコン1台には、少なく見積もっても数十個のシュミットトリガー回路が使われている。もし世界中のシュミットトリガー回路の百万分の一でも動作不良を起こせば、全世界の経済産業活動は崩壊する。我々の技術に生物の技術(生きる仕組み)を取り込むことが、社会に如何に大きな変革をもたらすかの好例である。

我々が指先でクリックボタンを押すと、マウスの中ではマイクロスイッチの接点が閉じ、検出側接点の電位がゼロから変わる。この電圧あるいは電流変化を閾値と比較してクリックを検出する。しかし、接点には非常に厄介な問題が潜んでいる。スイッチが閉じるとき接点の金属塊同士が衝突する。衝突面の損傷を軽減するためにも、弾性バネ材で機械的に緩衝せざるを得ない。しかしバネで支えられた

図1 オットー・シュミット (A) とシュミットトリガー回路 (B)

接点同士は、衝突後に跳ね返り、バネに引き戻されて再び衝突するという動作を繰り返す「チャタリング」という現象を起こす(図2 A, 実線)。接点のオン・オフをそのまま見れば、パルスをもつ出しながら、オン状態に落ち着いて行く。機械的接点である限り、このチャタリングは避けられない。

接点の後ろにコンデンサを入れて急激な電圧変化を抑えても、もともとカオス性の強いチャタリング振動に対しては、確実な効果はない。図2 Aの点線波形は実線で示したチャタリング波形をコンデンサで電気的に緩衝した模式図である。単純な電圧比較回路で閾値 Th_1 と比べれば、複数のパルスが出てしまう(図2 B)。これに対してシュミットトリガー回路では、入力(実線波形)が閾値 Th_1 を越えると閾値自体を Th_2 に押し下げる正帰還が掛っている。このため、入力が新しい閾値 Th_2 以下になるまで出力は変化せず、パルスは一発しか出ない(図2 C)。

神経生理学者 Otto Schmitt は、ヤリイカの巨大神経軸索における神経パルスの発生機構を調べるうちに、その動作の本質を正帰還(自己増強性)と負帰還(安定性)の両方を兼ね備えた電圧比較回路で表現できること、を見抜いたのである。1937年のことであった。彼は当時ロンドンに留学中で、既にノーベル医学生理学賞を受けた Archibald Hill や後に受ける Bernhard Katz、イカやタコなど頭足類の神経系に詳しい John Young らと共著論文を出している^{10, 14)}。すなわち、軸索膜は刺激がある強さ(閾値)を越えるまでは興奮しないが、刺激が閾値を越えれば反応は自己増強的に進み、「全か無」型の興奮を示す。さらに、一旦興奮が始まればその後の刺激が如何に強くても暫く興奮が起らない「不応期」、すなわち安定性も持ち合わせている。生物の情報系である神経の動作原理に学んだシュミットトリガー回路は、安定したチャタリング耐性を発揮した。生物由来のこの電子回路には、今日のデジタル情報通信技術での思いもよらぬ広大な前途が待っていたのである。

勿論、現在の情報通信技術の大部分は、ブール代数を基盤とするデジタル数学に支えられた論理処理回路の設計技術である。しかし、我々人間の意志表出をインターフェイスするシュミットトリガー回路が無ければ、コンピュータはかくも有用な機械とはなり得なかったのも確かなのである。

図2 A: 接点のチャタリング(実線)と平滑化波形(点線), B: 平滑化波形を閾値 Th_1 と単純比較した出力, C: 平滑化波形を入力したシュミットトリガー回路の出力。

シュミットトリガー回路は、電子工学系の学生にとって極めて基本的で有用な非線形回路で、その動作原理は Van der Pol 方程式との関係も含めて、学部3年次までには必ず習得しなければならない。しかし、それがヤリイカの神経の仕組みに由来することを教える電子工学科は、恐らく皆無であろう。

現在では、シュミットトリガー回路は演算増幅器で表現される(図3 A)。入力信号電圧 V_{in} が深い負側にあるときには、出力 V_{out} がどこにあらうと演算増幅器の+入力点の電位は-入力点の電位(ゼロ)よりも低いので、出力 V_{out} も負側の下限飽和点 V_L にある(図3 Bの左下端両矢印部)。入力電圧 V_{in} が上昇して $Th_1 = -V_L \cdot R_f/R_i$ をわずかも超えると、演算増幅器の+入力点の電位は-入力点の電位(ゼロ)より高くなり、その差が大きく増幅されて出力 V_{out} は上限飽和点 V_H に向かって動く(図3 Bの上向き矢印)。 V_{out} が大きく正の V_H に振れると、増幅器の+入力点には R_f を通して正のフィードバックが掛かっているの、 R_f/R_i に分割された V_{out} が加わってその電位は更に上がる。このため、たとえ最初の閾値越えが入力信号 V_{in} に重畳した雑音成分による偶発的なものであったとしても、増幅器の+入力点の電位がゼロ以下に戻ることは無く、その後に入力信号 V_{in} が多少増減しても出力 V_{out} は正の上限飽和点 V_H に留まる(図3 Bの右上端両矢印部)。出力 V_{out} が変化するのは、入力電圧 V_{in} が新しい閾値 $Th_2 = -V_H \cdot R_f/R_i$ を下向きに切る時、増幅器の+入力点の電位が-入力点の電位(ゼロ)よりも負になるので、出力 V_{out} は下限飽和点 V_L に急激に切り替わる(図3 Bの下向き矢印)。すなわちシュミットトリガー回路とは、出力が V_L の時には閾値 Th_1 を持つ比較器として動作し、入力信号(図3 Bの横軸)が閾値を上向きに越えると出力を V_H に切り替えると同時に、閾値を負側の Th_2 に設定し直す、入力と出力の間にヒステリシス(一種の記憶)を持つ電子回路である。このヒステリシス特性こそがシュミットトリガー回路のチャタリング耐性の本質なので、コンピュータの回路図上ではシュミットトリガーをヒステリシス素子記号で表す(図3 C)。

電気接点の機械的チャタリングに限らず、タッチパネルなどのユーザインターフェイスでも、チャタリング同様の問題が起こる。我々が一定の強さでタッチパネルに指を触れることなど出来るはずもなく、タッチセンサーの信号も多かれ少なかれ図2 Aの実線の様な不規則な振動を伴う。そのまま、ある閾値と単純比較すれば図2 Bのような複数パルスになってしまうから、シュミットトリガー回路のヒステリシス特性で信号を処理して単一パルスとしている。

頭足類の巨大神経軸索は、活動電位の伝導速度が大きい

図3 A: シュミットトリガー回路の演算増幅器表現, B: 入出力のヒステリシス特性, C: コンピュータ回路図でのヒステリシス素子表現。

こと、逃避行動を駆動する運動神経であることから捕食者からの緊急逃避時間短縮の淘汰圧への適応と思われる。しかし、それは勘違いである。いわゆる巨大神経軸索は第3次の巨大神経で、その前に中枢から1次、2次と二つの巨大神経を介して星状神経節でシナプスを受けている。そのいずれもが化学伝達シナプスで、シナプス伝達だけで合計1.5ミリ秒もの遅れを伴う。したがって巨大であることは、逃避発現までの時間短縮とは関係せず、水力学的な運動様式への適応と考えざるを得ない。水ジェットを作り出すポンプでは、外套膜筋肉の全てを筋張力の立ち上がり時間内に一斉に収縮させなければならない。外套膜の何処かで張力発生が遅れば、そこは水圧に負けて膨らむ。(膨らんで)曲率半径が大きくなると、たとえ同じ張力で水を押し返す力は小さくなり、(曲率半径のより小さな部分を作り出す)水圧に負けてますます膨らみ、ポンプとはならない。水力学的なポンプ系を構成する筋肉は、時間的に同期して張力を発生しなければ、我々の心臓における心室細胞と同様に使い物にならない。多数の筋細胞を同時に駆動するには大量の伝達物質を一時に放出しなければならない。ヤリイカの第3次巨大神経軸索は、多数の運動神経が融合したシンシチウムで、多数の筋肉への伝達物質の同時大量放出への適応であることが分かる。他の動物の巨大神経軸索も水力学系と関係したものが多く、ザリガニの巨大神経も、腹部屈筋全体を同期収縮させて水を前方に押し出す水力学的ハードウェアで、後方への急速逃避を引き起こす²³⁾。ザリガニ外側巨大神経から各体節の腹部屈筋運動神経への接続が電気的シナプスなのは、全体節での張力発生の同期性への適応である。

シュミットトリガー回路は、2個の三極真空管を陰極結合した回路である(図1B)。抵抗Rを共有する陰極結合が強い負帰還(安定性)をもたらしている一方で、 R_3 による反対側への結合は強い正帰還(自己増強性)も与えている、一見奇妙な回路である。三極管は1906年に発明され、増幅作用の有用性から1914年には電話回線の中継増幅器として汎用化されている。世界中の工学技術者が三極管回路の開発にシノギを削っていた筈なのである。しかし、工学サイドからヒステリシス回路が提案されることはなく、三極管の発明から31年も経った1937年になって初めて、生物の仕組みを調べていた生理学者によって生み出されたのである。Otto Schmittのような生理学者がいなければ、情報通信技術がヒステリシス回路を手にするのは更に遅れていたのである。

酒井正樹会員と高畑雅一会員の訳書「神経インパルス物語」²¹⁾によれば、1920~30年代のセントルイスは神経生理学のメッカであったという。Otto Schmittはそのような環境の中で、イカの巨大神経軸索のパルス発生の仕組みの解明に挑み、その原理をシュミットトリガー回路としてヒトの技術に転化したのである。因みに、1960~80年代の米国神経科学界のリーダーFrancis SchmittはOtto Schmittの実兄で、同じセントルイスのワシントン大学医学部で生理学を修めた。

4. ゴアテックス®

ゴアテックス®という布地は、高い防水性能を持ちながらも通気性が良くムレない防水透湿性素材として有名で、登

山や湿潤な野外環境での作業着として高い評価を得ている。その機能の核心部分は、幾層かの保護膜に挟まれたGore-Tex membraneにある。この膜は撥水性の素材で出来ており、 $1\mu\text{m}$ 程度の間隔の網目になっている。このように小さな撥水性の孔と接触した液相の水は、その表面張力(表面エネルギー密度)によって素材表面と90度以上の接触角を保つので、孔から気相へ向けて凸に飛びだした球面を形成する。表面張力の掛った球面は、曲率に比例して球の内側へ向かう圧力を与えるので、液相からその圧力以上で押されるまで、空気-水界面を維持できる(図4)。ゴアテックス®は、3気圧に耐えられるという。もちろん、バルクの液相無しの水蒸気に対してはスカスカの孔である。これがGore-Tex membraneの防水透湿性の原理である²⁵⁾。

しかし、表面張力(毛細管現象)は1700年代初めから知られており、1800年代初頭にはYoungとLaplaceによって物理法則としての定式化も完了している。そんな物理法則そのものを利用した機能材料を作り出すのに、なぜ我々は200年近くも要したのであろうか?

自然界には、バルク素材としての撥水性はソコソコだが、ミクロンオーダーの凹凸構造を作って高い撥水性とガス交換機能を作り出す技術を持った生き物がいる。その代表はアメンボである。アメンボは水面に立ち、水面を蹴って滑走できる。その肢に格別に高い撥水性を持たせている仕組みは、脚に生える撥水性の剛毛がその表面に幅100nm程度の微細な切れ込み溝を持つことである⁴⁾。液相の水は、こんなに小さな曲率半径の界面を形成することは出来ない。一方、少しでもアメンボの生態を考えれば、肢先だけでなく、その体表の撥水性もまた高いはずである。もし脚の撥水性だけが高く体表の撥水性が低くければ、水面が乱れて水滴で体表が濡れたとき、脚は水面上に出るが体は表面張力のため水面上に引きずり込まれて、溺れ死ぬ。

アメンボの翅や胸部、腹部などの体表は、基部径500nm、長さ2-3 μm のナノパイルで覆われている(図5)。ナノパイルは約 $1\mu\text{m}$ 間隔、すなわち $10^6\text{本}/\text{mm}^2$ という高密度で生えている。このような高密度のナノパイルが並んだ構造は、生物学者には1940年代から広く知られており、Plastron(プラストロン:物理鰓)と呼ばれている²⁵⁾。昆虫体表のクチクラは接触角が105度程度の弱い撥水性しか持たない素材であるが、直径500nmの円柱状のナノパイルが $1\mu\text{m}$ 間隔で並んでいれば、残った500nmの隙間には気相に向かって凸の気液界面が形成され、2.5気圧の水圧に耐え

図4 濡れない素材の隙間から突き出た空気-水界面の表面張力は、水が空気中へ流れ出すのを引き止める膜の様に働く。文献25より引用。

図5 アメンボ体表の高密度ナノパイルのSEM像（撮影は筆者：JST 下村 CREST）。A：前翅の断面（おもて面と裏面）。普段は水に触れる筈のない裏面にもナノパイルが密生しており、水を撥かなければならない強い理由のあることが分かる。B：前翅のおもて面を30度傾けて見た像。スケールバーはいずれも1 μm。

られる（図4）²⁵⁾。つまり水深15mまで潜っても、ナノパイル列に接した気液界面が破れることはなく、体の表面に数ミクロンの空気層が維持される。この空気層と液相の界面は屈折率境界でもあるので光の全反射を起こし、プラストロンに空気層を作って潜水している昆虫の体表面は「銀色の膜」に覆われて見える。プラストロンを持った昆虫は、水にもぐったまま活動し続けることが出来る。アメンボは、水面に突き出した水草の茎に掴まって水中に歩き込んで、産卵する。高密度のナノパイル外面と体表との間に形成された空気層は、小さな曲率半径で気相に凸な気液界面に働く表面張力のお陰で水相よりも圧力が低い（ラプラスの法則）²⁵⁾。従って、空気層の酸素分圧は大気と平衡状態にある水相のそれよりも低くなる。この圧力勾配に沿って、水に溶けた酸素分子が気液界面から空気層へ拡散して来るので、潜水時間は無制限に長くできる。

Gore-Tex membraneの発明は1969年である⁹⁾。表面張力の物理法則の制定からゴアテックス[®]までに200年近くも要した原因は、この世界はバルクの物性で決まっていると思ひ込み、微細な凹凸で撥水性を飛躍的に高めた技術が既に自然界にあるとは思ひもしなかったことにある。1億年以上も前に確立されたアメンボの撥水技術に注目していれば、もっと早く表面張力の物理法則を我々の技術に転化できた筈である。ただし、Gore-Tex membraneがバイオミメティクスであるとは、ゴア社は一言もいっていない。

5. 原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope)

図6はルリハムシ (A) と、その肢先の附節 (Aの丸) の走査電子顕微鏡像 (B) である。ハムシは、葉の表面が垂直でも、裏返しでも歩きまわることが出来る。水平なガラス面の下側を逆さになって歩くことも難なくこなす。もちろん、「歩く」ということは接着・脱着が可逆で、制御可能だということである。電子顕微鏡像 (B) は、葉に接着する附節の部分を葉の方からみた像である。附節の下面から、直径2 μm、長さ100 μmにもおよぶ細長い棒が何百本も付き出ている。この微小な棒は先端近くで90度曲がって、幅5 μm程のヘラのように平たく広がる。このヘラの（写真Bで左斜め下へ向いた）面が、葉やガラス面に接近すると互いに引き合うファンデルワールス力が働くと考えられており、これらの微小な突起は「接着毛」と呼ばれている。接着部位の数の多さは、体重を支えるのに十分な接着力の確保

図6 ルリハムシ (A) とルリハムシ附節の接着毛 (B)、Bのスケールバーは5 μm。撮影はJST 下村 CRESTの堀繁久 (A) と筆者 (B)。

につながることは理解できる。しかし、100 μmにもおよぶ極端に細長い棒状の腕の存在は何を意味しているのだろうか？

図6 Bに見えるような5 μmサイズの接着毛先端のヘラに、少なくともピコニュートン (pN) 程度のファンデルワールス力が働くためには、相手が平板の場合、100 nm程度まで接近している必要がある【補註1】。また、ファンデルワールス力を検出し利用するためには、これらの接着毛先端は十分にしなやかなバネに支えられている必要がある。pN程度の力に引かれて変位しなければ、さらに接近してより強いファンデルワールス力を受けて接着が確立しないからである。相手表面の不規則な凹凸に追従して接近を確保するためには、接着毛先端は十分にしなやかなバネ（すなわち非常に細長い毛）で支えられていなければならない。

最近、そのような目的の「非常にしなやかなバネ」が開発されて、ナノテク計測技術として広く使われている。原子間力顕微鏡 (AFM) のプローブ (カンチレバー) である。AFMは、プローブ先端が対象物体から受けるpN程度のファンデルワールス力（原子間力の積分和）をnm程度の変位に変換して、その変位を光学的に検出する装置である。AFMプローブのカタログを見ると、最もしなやかなカンチレバーのバネ定数 k は0.06 [N/m] 程度である。このAFMカンチレバーは、厚み0.52 μm × 幅30 μmの矩形断面で長さ200 μmの片持ち梁である。材料力学の教科書を繰って、この寸法とシリコン単結晶のヤング率180ギガパスカル (GPa) から矩形断面の片持ち梁先端でのバネ定数（復元力/変位）を計算してみると、カタログ値とはほぼ一致する。バネ定数 $k=0.06$ [N/m] の単位をピコとナノに換えると、60 [pN/nm] に相当する。すなわち、60 pNの力で1 nm変位するバネ感度である。これが、こんにち我々の手に入る「最もしなやかな人工のバネ」である。ハムシ附節の接着毛の長い棒状腕を、直径 $2a$ 長さ l の円柱片持ち梁とみなせば、その先端でのバネ定数は素材のヤング率を E として、 $k=E \cdot \pi a^4 / (2l^3)$ [N/m] で与えられる。昆虫クチクラは水分含量によってヤング率が8桁も変わる優れた素材で、甲虫の体表クチクラではおよそ6~10 GPa (6~10 × 10⁹ [N/m²]) と測定されている²⁸⁾。このヤング率と $a=1 \mu\text{m}$ (1 × 10⁶ [m]) および $l=100 \mu\text{m}$ (100 × 10⁶ [m]) を代入すれば、ルリハムシ接着毛の先端を支える棒のバネ定数 k の推定値として0.01 [N/m] (= 10 [pN/nm]) が得られる。

すなわち、ハムシ附節の接着毛は市販のコンタクトモードAFMプローブ（約10万円/本）よりも「充分にしなやかなバネ」になっている。ファンデルワールス力に引かれ、あるいは斥けられて変位し、対象の不規則な凹凸面にも接

着できる。多くの昆虫はこのようなファンデルワールス力を利用する技術を、我々のAFMより一億年以上前に、すでに実用化していたのである。昆虫の肢先のこのような微細な構造は、1800年代半ばから知られており、1970年代には多くの生物学者の知るところであった⁵⁾。ビーニツヒらによるAFMの発明は1985年である¹⁾。もし技術者や工学者が、「自然の性質」の表出としての昆虫の生き方とそれを支える構造に注意を払っていれば、我々はもっと早くにAFMを手中に出来たのではないだろうか？

6. サカナの球形レンズと光ファイバ

サカナの眼のレンズは、(我々陸棲生物の薄いレンズとは異なり)球形である。これは、棲んでいる媒体の屈折率の高さに拘束されて、サカナがレンズ設計の限界まで追い詰められていることを示している。レンズの焦点距離は、開口径が同じなら、レンズが球形の時に最短(従って最高に明るい結像)になるからである²⁴⁾。

しかし球形レンズには大きな欠点がある。光軸から遠いところに入った光線は、レンズ面への入射角が大きくなるので、その焦点は近軸光線より近いところに来る。すなわち球形レンズには、像の中心部に焦点を合わせると周辺部がボケ、周辺部に焦点を合わせると中心部がボケる「球面収差」が付き纏う(図7上)。

現実のサカナは、球面収差を回避するトリックを進化させている。サカナのレンズを作っている物質の屈折率は、球形レンズ中心部では1.52だが、周辺部では1.34まで下がる。屈折率がこの様に分布していると、周辺部でレンズに入った光は、光軸近くで入った光に比べて、少ししか屈折しない。これで周辺光線の焦点距離が短くなる傾向を打ち消して、球形レンズに付き纏う球面収差を補正している(図7下)。この屈折率分布レンズでは、厳密に光軸を通る光以外は全て、レンズ内を進むにつれて連続的に屈折する。例えば光軸の右側に入った光は、直ぐに左側に屈折し始める。すると、屈折率がより高い部分に入り込むので更に曲がり、結果的に焦点距離が短くなる。多くのサカナの球形レンズの焦点距離は半径のおよそ2.55倍に等しい。この焦点距離と曲率半径の比2.55は「マーティセン比」と呼ばれている²⁴⁾。マーティセン比をカメラのレンズの明るさを表すF値(焦点距離/レンズ開口直径)に換算すれば約1.28で、かなり明るい結像系であることが分かる。

サカナが進化を通して作り上げた球形屈折率分布レンズを作る技術を、我々はまだ実現できない。しかし、その二次元版は既に実用化されていて、情報通信を支えている。光ファイバである。現在のデジタル情報通信の根幹を支えている光ファイバは、非常に細長いガラス円柱で、屈折率の高い中心部(コア)を屈折率の低い周辺部(クラッド)で覆ってある。ある臨界角以下の浅い角度で、屈折率の高い媒体から低い媒体へ進む光は、全反射を起こす。現在実用に供されている光ファイバのコアとクラッドの屈折率差は、僅か0.3%に過ぎない。こんな僅かの屈折率差でも、4.4度以内の近軸光線はコアとクラッドの境界で全反射されるので、コア内に閉じ込めて長い距離を送ることが出来るのである。

サカナの球形レンズでは、光軸から離れた場所に入射した光は、屈折率の高い中心部に向かって曲がる。中心からの距離に従って屈折率が低くなる同心円柱(サカナの球形

一様球形レンズ

サカナの非一様球形レンズ

図7 球形レンズの球面収差とサカナの屈折率分布レンズ。文献24より引用。

レンズの2次元版)に、中心軸から外れた光が入射すると、中心軸に向かって曲がった後、中心軸を通り越して反対側で再び中心軸に向かって曲がる正弦波状の光路をとる。このような屈折率分布円柱を正弦波状光路の半周期の長さで切ると入射像の倒立像が得られ、1周期の長さで切れば正立像が得られる。これはロッドレンズと呼ばれる。ロッドレンズをプラスチックで非常に細く作り、直線状に並べたものはロッドレンズアレイと呼ばれ、殆どの複写機やFAX、スキャナーなどの画像読み取り部に使われている²⁷⁾。

生物は、光を周りをより屈折率の高い経路に閉じ込める光導波路の原理を、屈折率分布球形レンズの開発よりもっと前から使いこなしていたらしい。脊椎動物視細胞の光受容部位には、視物質を載せた膜が高密度で積み重なっている。哺乳類の桿体外節では、1 μm 当り約35枚の円板が積み重なっている。各円板は、脂質2分子層からなる細胞膜が閉じて扁平になったもので、上下2枚の膜から成る。細胞膜の厚みは約5 nmであるから、光受容部位の脂質/細胞質の体積比率は $5 \times 70 / (1000 - 5 \times 70) \approx 0.5$ 、つまり桿体外節の半分は脂質である。従って、脂質の屈折率を1.45と低めに見積もっても、桿体の光受容部位の平均屈折率は $(1.45 + 1.34) / 2 \approx 1.395$ と周りの細胞質(1.34)より、4%以上も高いことが分る。ここへ入射した光は、光ファイバと同じように、屈折率の高い外節光受容部位と外側の細胞質および細胞外液との屈折率境界で全反射を起こし、1/4波長

(100nm) ほど滲み出しながら (エバネセントモード)、光導波路としての光受容部に閉じ込められながら進む [補注2]。

節足動物視細胞の光受容部位 (ラブドーム) は、半径 20nm 程度の微絨毛 (細長い円筒状の細胞膜突起が密に詰まった構造) から成る。各微絨毛が厚み 5 nm の脂質 2 分子層だとすれば、ラブドームの脂質 / 細胞質の体積比率は $2\pi \times 20 \times 5 / (\pi \times 20^2) \approx 0.5$ で、平均屈折率の見積もりは桿体外節と同程度になる。すなわち両者とも、入射した光が光受容分子が詰まった光導波路内を全反射しながら進む光ファイバだったのである。

光ファイバは、人間の叡智が作り上げた純然たる物理学の成果の様に言い触らされているが、生物はその原理 (屈折率分布光学) を 1 億年以上も前に使いこなしており、サカナの球面収差補正済みの球形レンズや光導波路として使いこなしていたのである。「自然界には如何なる設計があり得るのか?」について、工学者と生物学者に共通の知識基盤 (規範: Discipline) があつたなら、光ファイバはもっと早くに実現していたに違いない。

ミツバチやサバクアリが、レイリー散乱された天空光の偏光対称軸を探し出して帰巢方向を決定する能力は、光の波長以下の円筒脂質膜を並べたラブドーム構造に支えられている¹¹⁾。最近、このラブドーム構造が意外な光学素子として使われていたことが分かった。シャコは、我々には非常に奇妙な色合いに見える動物である。彼らは、右回り円偏光と左回り円偏光を弁別できるという¹⁵⁾。円偏光の回転方向を弁別するためには、偏光面によって屈折率が異なる方解石の様な複屈折性素材から成る 1/4 (シブノイチ) 波長板という光学素子が必要である。1/4 波長板は光量子を用いた量子計算機にも必須の素子で、光物理学の分野でも波長依存性の少ない良質の素子の探索が続いている。波長依存性のない 1/4 波長板の原理としては、SWG (Sub-Wavelength Grating: ゼロ次回折格子) が有力視されているが実現に至っていない。それが、直径 40nm の円筒形脂質膜から成るシャコ複眼の第 8 視細胞のラブドームが、波長依存性のない理想的な SWG 型 1/4 波長板として振る舞っていることが判明したのである¹⁵⁾。進化は万能とはいえないが、こんな機能構造を作る技術すら持てるのである。これも「1 億年遅れの再発見」と言わざるを得ない。

7. 振動ジャイロ

この数年で、子供向けのオモチャも含めて、安定した飛行の出来るドローンが出回ってきた。その理由の一つは、ジャイロの小型化と高性能化である。ジャイロ (Gyro) とは本来、回転軸にトルクが働かない回転体 (独楽) の回転軸を一定に保つ性質 (角運動量保存則) を利用して、それを積んだ物体の姿勢や方位を知る装置を指す言葉であった。しかし、振動ジャイロの普及に伴って、コリオリ力 (Coriolis force) を検出する装置を指すようになって来た。安定した飛行姿勢を維持できるドローン、GPS の利かない状況で U ターンしても正しく現在地を表示できる自立航行カーナビ、デジカメの手ブレ防止装置などは全て、小型で時間応答の速い振動ジャイロが実用化されたお蔭である。旧来型の回転ジャイロ全盛の時代に、ハエやガガンボなど双翅目昆虫の平均棍 (Haltere) が、コリオリ力を検出する振動ジャイロであると見抜いたのは生物学者 Pringle であった¹³⁾。平

均棍を切除されたハエは飛べなくなる。昆虫の基本形は四枚翅で、双翅目昆虫の平均棍は後翅が退化した痕跡器官と見なされていた時代もあった。

ハエのオスは、視覚で捉えたメスを空中 3 次元チェイスできる。平均棍のコリオリ力センサーからは、前翅の飛翔制御筋に強い負帰還が掛かっており、安定したサーボ追従系になっている。一方、視覚情報は平均棍の載っている台座を遠心性に制御していて、いわばニセの姿勢信号を作り出して、サーボ追従系を間接的に操っていることが分ってきた³⁾。この制御方式は、安定性と操縦性を兼ね備えたロバストネス (頑健性) を系に与えている。運動系の出力をモニターする自己受容器を遠心性にいじってニセの誤差信号を作り出し、パワーのあるサーボ系をそれに追従させる制御方式は、我々陸棲哺乳類の γ (ガンマ) 制御系にも採用されている。 γ 運動神経で筋紡錘のか弱い錘内筋を縮めると、筋紡錘が引き伸ばされる。筋紡錘が伸ばされた (ニセの) 信号は脊髄内で α 運動神経を興奮させてサーボ追従系を駆動し、運動指令が外部に実現される。

お手本としての双翅目昆虫がいなければ、我々が振動ジャイロを手にするのは更に遅れていたであろう。双翅目は遅くともジュラ紀 (1.3 億年前) には確立されていたと言う。

8. 構造が持つ機能の多重性と前適応

エゾハルゼミの翅表面には、直径 50~100nm、高さ 250nm 程のナノパイルがびっしりと立ち並んでいる (図 8 A)。この構造はガの複眼表面の無反射構造に良く似ている。確かに可視域での反射率は 1 % 以下で、透明で無反射のエゾハルゼミの翅を生態写真に撮るのは難しいという。しかし同様のナノパイルは翅面が着色して不透明なアブラゼミなどにもあって、この構造が透明性や無反射性以外の特徴を持つことを暗示している。アメンボの処でも述べた様に、このような激しい凹凸のあるクチクラは撥水性を示すことが知られているので、水との接触角を測定してみると 160 度以上の超撥水性を示した。

セミやカメムシなどの半翅目昆虫は後胸の飛翔筋が退化し、飛翔に際しては後翅の前縁を前翅の後縁に引っ掛けて駆動するヒッチ装置を持っている (図 9)。エゾハルゼミの前翅と後翅の関節は 5 mm 程度離れているから、飛翔中のヒッチ部は翅の縁に沿って摺り動く。エゾハルゼミ前翅腹面後縁のヒッチ溝の内面を見ると、直径と高さが 100 nm 程のナノ突起で覆われていた (図 8 B)。この部分は着色した後縁翅脈の内面であるから、透明性も無反射性も適応度に影響するとは思えない。摺動部のナノ突起の機能としては、実効接触面積の低減による摩擦低減か耐摩耗性の向上であろう。針山孝彦は、垂直な平滑ガラス面やアクリル面を歩き廻れるアリが、アブラゼミ翅面を歩き廻れずに滑落してしまうことを見出した。セミのナノパイル面が低摩擦性を持つのなら、無反射性を持たせるために人工的に作ったプラスチック表面も低摩擦性を持つことを予想し、三菱レイヨン (株) の魚津吉弘と協力して、無反射フィルム「モスマイト®」上での接着歩行能を多くの昆虫で調べた。その結果、20 目 35 種の昆虫に対して、表面に接着できない「滑落フィルム」として有効であることを確かめ、害虫防除のための発生予察灯の捕捉効率を向上させた⁷⁾。

上で述べたように、セミ翅面の構造は、無反射性、超撥

図8 エゾハルゼミ前翅表面のナノパイル(A)と前翅後縁ヒッチ溝内面のナノ突起(B), SEM像は筆者撮影(JST 下村CREST)。

図9 セミの前後翅ヒッチ部の摺動。右前翅が前方へ開いて行く(回転矢印)と、A点で後縁下面のヒッチ溝が後翅前縁上面のフック(楕円)を引っ掛ける。前翅が更に開いて後縁がB点に来るまでには、後翅前縁のフックは前翅後縁のヒッチ溝の中を翅の付け根の方へ摺り動く(矢印)。飛翔(翅の前方への打ち下しと翅面を切り返した後方への打ち上げ)では、この摺動が繰り返し起こる。

水性、低摩擦性、と多重の機能を示す。生物の構造の機能は単一ではない。遺伝子DNAに書かれているのは設計図(出来上がり指示書)ではなく、レシピ(加工手順書)である²⁾。進化の途上で環境(淘汰圧)が変わっても、当面は同じレシピを使い続けるしかない。それまでの淘汰圧に対抗

してくれた構造の機能が多重で、新しい淘汰圧のどれかを少しでも和らげてくれるのなら、その用途に転用して凌ぐしかない。この様に、祖先種から受け継いだ構造の特徴を新しい淘汰圧への対抗に活かした場合を、生物学では「前適応」と呼んでいる。しかし「前適応」という言葉は、淘汰圧の変遷がハッキリしない限り、単に構造の多重機能性を意味しているに過ぎない。セミ翅面の無反射性、超撥水性、低摩擦性のどれが祖先種においては前適応的な形質(副次的特徴)で、どれが次の子孫種への前適応になるのかは、全く分らない。機能とは相互作用の別名だから、相手が代れば機能も代る。多くの生物学的構造には、我々がまだ気付いていない機能が多重に隠れているであろう。セミの翅面のナノパイル凹凸構造には、極端な表面積増大効果による(化学物質を使わない)純粋に機械的な殺菌効果さえ報告されている¹²⁾。

構造の持つ機能(適応性)が多重であることは、工学との異分野連携は、生物学自体に大きなメリットとなることを示している。工学との異分野連携は、生物学が単にヒントを与えるだけではなく、工学の持つ測定技術やモノ作り技術との相互作用によって、生物学そのものを深化できる。少なくとも、自分が対象としている生物学的構造に如何なる機能が付随し得るのかの多重性を考察できなければ、生物学としての生態学的理解や前適応などの進化的議論は出来ない。生物学の深化には、工学も含めた他の分野との異分野連携が必然なのである。

9. おわりに

ハムシ附節の接着性やアメンボ体表の撥水性の仕組みは、ファンデルワールス力や表面張力(物理的にはファンデルワールス力と同じ起源)で説明できる。しかし逆に考えれば、我々のAFMの原理(ファンデルワールス力の物理)はハムシの接着毛の原理の「一億年遅れの再発見」に過ぎず、ゴアテックス®の防水透湿性の原理(表面張力の物理)も昆虫のPlastronの原理の「再発見」に他ならない。電池の原理(仕事関数の物理)も、我々(生物)自身の神経細胞のイオン濃淡電池の原理の「再発見」である。我々の近代科学が「発見し、制定した」と思い込んでいる物理法則は、昆虫やカエルがすでに発見し、生きる技術にまで纏め上げた自然の「性質」の再発見に過ぎなかったのだ。

生物は神が指先を握ね繰り回して創り出したのではない。その確たる証拠は生物の多様性にある。生物自身が、変異と淘汰を繰り返すことで、適応性(淘汰圧をかわして生き延びる仕組みと機能)を獲得してきた。この世界で機能を作り上げる道は、これしかないことを生物学は教えているのである。現代進化論の旗手Richard Dawkinsによれば、進化は「論」ではなく事実である²⁾。自然界には進化の証拠が満ち溢れており、多様な機能を持った多様な生物の存在自体が、この地球上で進化(変異と淘汰による適応的構造の組み上げ)が起こったことを証明している。

生物の進化は構造と機能の転用の歴史である。多くの工学者はそれすらも知らないし、知ろうともしない。アメンボやハムシの処で述べたように、物理法則や数学からは「どうやれば機能が組み上がるか」は出てこない。数学や物理法則は、分析の道具であって、機能を組み上げる道具とはならない。工学に真の合成理論は存在しない。上手くいっ

た場合を分析して逆向きに辿ることを、「合成」と呼んでいるに過ぎない。機能（生物学用語では適応性）への組み上げには、試作と市場評価（生物学用語では変異と淘汰）の繰り返し作業が必要なことは、工学技術者なら誰でも知っている。にも拘わらず、工学や物理学では、法則で自然の全てを説明できると思い込ませる教育が蔓延している。大学の初年次の哲学や科学概論では、自然法則は現実世界で起こる現象から帰納的（Bottom-Up）に推論され、抽出されて、制定されると教えている。従って、数学や物理法則は（我々の脳みそを含む）自然から抽出されたものであって、自然の一部分に過ぎない。法則からの演繹（Top-Down）で自然の全てを説明できたなら、「部分と全体が等しい」ということになる。部分と全体が等しいのは神学であって、科学ではない。科学では、部分は部分であって、全体ではない。

自然界から抽出された法則や理論からの演繹で現実を説明できても、技術が組み上がってくる訳ではない。生物も含めた現実の世界の事象から技術を見つけ出し、帰納的に作り上げる作業が必要である。生物学をも工学技術の基盤にして初めて、一体化した自然科学という健全な背骨を持った科学・技術（Science and Technology）になる。自然界には何億年にも亘る試作と評価を終えた技術が、生物の生きる仕組みとして使われ続けているのである。しかもそれは、我々の技術の多くが「高温高压」という力まかせの製造工程に頼っているのとは大きく異なり、「常温常圧」で全ての道具を作り出している²⁸⁾。生物の技術は、我々の社会の持続可能な在り方をも教えてくれる。

生物学者ぬきのバイオミメティクスは偽物である。生物学者の参入なしには、まともな生物規範工学は育たない。我が国の工学系研究者や技術者の殆どは、大学レベルの生物学教育を受けておらず、生物の技術（生きる仕組み）の理解が、革新的な技術を作り出してきたこと自体を理解できない。現状の我が国の自然科学教育には、（文系・理系といった欧米語では表現できない高等教育の社会的偏りに加えて）更にこのような生物系・数物系といった縦割りがまかり通っており、我が国の国際的な技術競争力を大きく削いでいる。工学者の多くはニーズを持っているだけで、シーズ（ヒント）を持っていない。シーズのない技術開発は、結局はモノ真似、後追い、小手先の改変に終わる。生物学を、将来の全ての科学の規範として据えるためにも、生命現象を物理・化学・数学で説明するのではなく、生物現象から物理・化学・数学を再構築する作業が必要である。

我が国の生物学者の多くが、物理や数学が嫌いだから生物学者になったのも事実である。多様な生物の生きる仕組みに詳しい比較生理生化学会の皆さんなら、磨けば光る宝物を一つや二つは持っている。その宝物を生物学だけに閉じ込めて置かず、工学という異分野にも分け与えて、次世代へ渡して欲しい。生物学を質的に深化するためにも、好き嫌いを乗り越えて、工学者と連携する必要があることを述べた。工学との連携はシーズを提供するだけではない。より頑健な生物学を次の世代に手渡すこと自体が、生物学の大きな社会的役割の一つである。

補註 1：中性物質で出来た半径 R_1 と R_2 の 2 つの球体に働く Van der Waals 力は、その間隙距離を r として、 $r \ll R_1, R_2$ のとき、

$$F_{vw}(r) = \frac{AR_1R_2}{(R_1+R_2)6r^2}$$

である⁶⁾。ここで A は、 $10^{19} \sim 10^{20}$ [J] 程度の変数である。 R_1 を基質平板、 R_2 を接着毛先端の大きさとして $R_1 \gg R_2$ の場合を考えると、

$$F_{vw}(r) = \frac{AR_2}{6r^2}$$

である。Van der Waals 力が、（分子間凝集力に由来する表面張力と同じく）物体の長さ次元 R_2 （周辺長）に比例することが分る。重力や粘性力は長さ次元 R_2 の 3 乗や 2 乗に比例するから、物体のサイズが小さくなると相対的に Van der Waals 力が効いてくることが分る（小さなゴミが大きなゴミの表面にくっついて離れない）。ここで接着毛先端のサイズとして、 $R_2 = 5 \mu\text{m}$ (5×10^{-6} [m]) とおけば、 $A = 10^{20}$ として、 $F_{vw}(r) = 5 \times 10^{26}/r^2$ [N] である。これが 1 [pN] になる間隙 r を求めると、 10^7 [m] (100 [nm]) である。すなわち接着毛が平板基質に 100 nm 程度まで近づくと、1 [pN] 程度の引力を受けることが分る。

補註 2：屈折率が周りより 4 % 高い媒質が光を全反射する臨界角 θ_c は、 $\theta_c = \cos^{-1}(1/1.04) \approx 16^\circ$ で、これより浅い角度で入射した光は全反射される。一方ヒトの瞳孔半径は最大でも 3 mm で、瞳孔－網膜間距離は 20 mm 程度である。従って、瞳孔から入って網膜面で結像する光の最大入射角度 θ_i は、 $\theta_i = \tan^{-1}(3/20) \approx 8.5^\circ$ で臨界角の約 1/2 しかない。すなわち、瞳孔を通過して網膜面に結像する光の入射角は桿体外節での臨界角条件を満たしており、桿体外節の内部を全反射しながら進むことが分る。

参考文献

- 1) Binnig G. et al.: Phys. Rev. Lett. 56, 930-933 (1986)
- 2) Dawkins R.: 進化の存在証明, 早川書房 (2009)
- 3) Dickinson M.: 昆虫ミメティックス, pp.514-521, エヌ・ティー・エス (2008)
- 4) Gao X and Lei J.: 昆虫ミメティックス, pp.382-384, エヌ・ティー・エス (2008)
- 5) Gorb S.: 昆虫ミメティックス, pp.372-381, エヌ・ティー・エス (2008)
- 6) Hamaker H.: Physica 4(10), 1058-1072 (1937)
- 7) 針山孝彦他: 応動昆, 58, 79-91 (2014)
- 8) <http://www.ee.umn.edu/users/schmitt/index.html>
- 9) http://www.gore.com/ja_jp/aboutus/timeline/1276632533918.html
- 10) Katz B., O. Schmitt: J. Physiol. 97, 471-488 (1940)
- 11) 水波 誠: 昆虫－驚異の微小脳, pp.244-266, 中公新書 (2006)
- 12) Pogodin S. et al.: Biophysical Journal 104, 835-840 (2013)
- 13) Pringle JWS: Phil. Trans., B, 233, 347-385 (1948)
- 14) Pumphrey R., O. Schmitt, J. Young: J. Physiol. 98, 47-72

- (1940)
- 15) Roberts N. et al. : Nature photonics, 3, 641-644 (2009)
 - 16) 酒井正樹：比較生理生化学, Vol.13, No.3, 281-289 (1996)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/hikakuseiriseika1990/13/3/13_3_281/_pdf
 - 17) 酒井正樹：比較生理生化学, Vol.13, No.4, 407-415 (1996)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/hikakuseiriseika1990/13/4/13_4_407/_pdf
 - 18) 酒井正樹：比較生理生化学, Vol.14, No.1, 64-77 (1997)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/hikakuseiriseika1990/14/1/14_1_64/_pdf
 - 19) 酒井正樹：比較生理生化学, Vol.14, No.2, 151-168 (1997)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/hikakuseiriseika1990/14/2/14_2_151/_pdf
 - 20) 酒井正樹：比較生理生化学, Vol.16, No.2, 123-133 (1999)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/hikakuseiriseika1990/16/2/16_2_123/_pdf
 - 21) 酒井正樹, 高畑雅一：神経インパルス物語 (A. J. McComas 著), pp.81-105, 共立出版 (2014)
 - 22) Schmitt O: J. Sci. Instrum. 15, 24-26 (1938)
<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/publications/FamousPapers/Schmitt1937.pdf>
 - 23) 下澤楯夫：現代動物学の課題8 行動, pp.103-150, 学会出版センター (1991)
 - 24) 下澤楯夫：生物学のための水と空気の物理 (Mark Denny 著), pp.263-302, エヌ・ティー・エス (2016)
 - 25) 下澤楯夫：生物学のための水と空気の物理 (Mark Denny 著), pp.303-324, エヌ・ティー・エス (2016)
 - 26) 下澤楯夫, 針山孝彦：昆虫ミメティックス (監修), pp.949, エヌ・ティー・エス (2008)
 - 27) 魚津吉弘：<https://www.mrc.co.jp/rd/research/images/rodlens.pdf>
 - 28) Vincent JFV：昆虫ミメティックス, pp. 631-640, エヌ・ティー・エス (2008)

Abstract

Invitation to Biomimetics

Tateo SHIMOZAWA

Professor Emeritus, Hokkaido University

Biomimetics, an engineering activity which aims to convert principles of biological function into human technology, is introduced. All of biological function is substantiated by certain structure. In physiology, the function without structure is a ghost and the structure without function is a dead body. Living creatures make up all functional structures only from ubiquitous elements, CHOPINS. Production of gold shining elytra by scarabaeid beetle without using any single atom of Au is worthy of naming a technology.

Pursuing the question why copper-hooked skinned frog twitches if contact with iron grill by Galvani, results in the invention of battery which totally changes the world thereafter. Schmitt-trigger circuit which operates to generate a pulse when you click your mouse is derived from neurophysiology of nerve action potential in squid giant fiber. Now the circuit is indispensable for everyday world economics. Spherical lens of fish eye is not the simple sphere but a distributed refractive index lens; 1.52 around the center of sphere and 1.34 in peripheral region, the spherical aberration is compensated. The 2D version of the spherical distributed refractive index lens in fish is the optical fiber which is fundamental to the world wide Information and Communication Technology.

Many of the laws of nature in physics which is said to be found and enacted by human intelligence are simply re-discovery of natural traits, after more than 100 million years of delay. Living organisms had learnt how to use the natural traits and had established production technology on the way of evolution, long before the emergence of human intelligence.

Keywords: Biomimetics, Structure and function, Ubiquitous elements, Schmitt-trigger circuit, Spherical lens of fish, Re-discovery of law of nature, 100 million years of delay