エントモミメティクスと害虫制御

針山 孝彦^{1,11,*}・魚津 吉弘²・向井 裕美³・山濱 由美¹・弘中 満太郎¹
高久 康春^{1,11}・石井 大佑^{4,11}・大原 昌宏^{5,11}・野村 周平^{6,11}
長谷山 美紀^{7,11}・原 滋郎⁸・下澤 楯夫^{9,11}・下村 政嗣^{10,11}

¹ 浜松医科大学医学部

² 三菱レイヨン(株)

³ 鹿児島大学連合大学院農学研究科

⁴ 名古屋工業大学

⁵ 北海道大学総合博物館

⁶ 国立科学博物館

⁷ 北海道大学大学院情報科学研究科

⁸ 浜松ホトニクス(株)

⁹ 北海道大学電子科学研究所

¹⁰ 東北大学 WPI

¹¹ JST-CREST

Entomomimetics and Pest Management. Takahiko HARIYAMA,^{1,11,*} Yoshihiro UOZU,² Hiromi MUKAI,³ Yumi YAMAHAMA,¹ Mantaro HIRONAKA,¹ Yasuharu TAKAKU,^{1,11} Daisuke ISHII,^{4,11} Masahiro ÔHARA,^{5,11} Shûhei NOMURA,^{6,11} Miki HASEYAMA,^{7,11} Shigeo HARA,⁸ Tateo SHIMOZAWA^{9,11} and Masatsugu SHIMOMURA^{10,11} ¹Department of Biology, Hamamatsu University School of Medicine; 1–20–1 Handayama, Higashi-ku, Hamamatsu 431–3192, Japan. ²Yokohama Corporate Research Laboratories, Mitsubishi Rayon Co., Ltd.; 10–1 Daikokucho, Tsurumi-ku, Yokohama 230–0053, Japan. ³The United Graduate School of Agricultural Sciences, Kagoshima University; 1 Honjo-cho, Saga 840–8502, Japan. ⁴Fostering Young and Innovative Researchers, Nagoya Institute of Technology; Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466–8555, Japan. ⁵The Hokkaido University Museum, Hokkaido University; Kita 10 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060–0810, Japan. ⁶National Museum of Nature and Science; 4–1–1 Amakubo, Tsukuba 305–0005, Japan. ⁷Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University; Kita 14 Nishi 9, Kita-ku, Sapporo 060–0814, Japan. ⁸Hamamatsu Photonics K.K.; 5000 Hirakuchi, Hamakita-ku, Hamamatsu 434–8601, Japan. ⁹Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University; Kita 21 Nishi 10, Kita-ku, Sapporo 001–0021, Japan. ¹⁰WPI Advanced Institute for Materials Research, Tohoku University; 2–1–1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980–8577, Japan. ¹¹JST-CREST, Japan Science and Technology Agency; 4–1–8 Hon-cho, Kawaguchi 332–0012, Japan. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 58: 79–91 (2014)

Key words: Biomimetics; entomomimetics; moth eye; structural color; NanoSuit

はじめに

38 億年の歴史を誇る生命は、進化と絶滅を繰り返しながら多様化を進めてきた。長い歴史の中でしばしば大量の絶滅が起こったとはいえ、短い時間単位の中では自然均衡系ともいえるバランスが維持されて安定した種間の関係が成立していた。

ところが、およそ 20 万年前に出現したとされるヒトが、

1 万年ほど前に植物栽培をコントロールし、ウシやウマなどの動物を家畜化するという農耕牧畜を展開するようになった。地球の歴史から考えるとほんの一瞬のような、つい最近の出来事である。食料生産革命ともいえる組織化された農耕牧畜業の発展という出来事によって食料資源の安定供給が達成されるようになり、人口の急増が引き起こされた。その後、数々の文化・文明が誕生し、多くの人々のすばらしい知的活動がなされるようになった。と同時

*E-mail: hariyama@hama-med.ac.jp

2014 年 1 月 28 日受領 (Received 28 January 2014)

2014 年 2 月 24 日登載決定 (Accepted 24 February 2014)

DOI: 10.1303/jjaez.2014.79

に、いたる所で大きな地球環境改変を引き起こした。ヒトの活動による砂漠化 (Geist, 2005) は、大規模改変の代表といえる。ところが、改変されたのは環境だけではなく、ヒトは、ヒト自身を改変し自然の中では生きることができなくなっていったのである。自身を塙の中だけで生活する「家畜」へと改変したのだ。すべての動物の中で、自分で自分自身を家畜化した動物はヒトだけである (針山, 2011)。自身を家畜化した結果、地球環境をより広く改変せざるを得なくなり、ヒトという家畜が住むことができる塙の長さを次々に延ばしていくことになった。もともとの自然とは大きく異なった空間を構築し、その中で大きな発展を遂げることに成功したのである。

18 世紀後半に産業革命を迎えると、食料生産革命とは比較にならないほどの地球史にとっての急変を作り出すことになった。生産活動の機械化に伴って工場が出現し、工業都市が成立し、資本家と工場労働者の階層の分離が生じ、農村社会から資本主義的工業社会への急速な大転換が起こった。衛生環境が改善されたことも手伝い、未曾有で劇的な人口増加が起こり、先進国はより早い自国の成長を求めるために帝国主義を誕生させ、世界戦争をも引き起こした。急激な人口増加は地球環境の悪化を引き起こすことになったが、それよりもこの新時代の環境悪化の要因は巨大エネルギーの大量使用であった。産業革命以前は、多くの地球改変をしていたとはいえ、地球は自然均衡系をそれなりに保っていた。しかし、巨大エネルギーを使った産業構造の成長は新たな人工的なエネルギーの流れを地球上に作り上げることになり、残念なことに自然がもっていたバランスを崩してしまった (第1図)。人間がよかれと思っで行う経済活動によって、地球環境のバランスは崩れ、破壊されるのである。経済活動は限りなく成長を続けなければ経済バランスを維持することができない構図になり、ヒ

トという家畜を養う塙は限りなく延び、結果として地球のほとんどの地域が塙で包み込まれることになった。産業革命以降の経済成長および人口増加のパラダイムの小手先の改変では、サステナブルな世界像を描くことはできない。一方、経済活動は、ヒトがヒトとコミュニケーションを保つという人間の基本的な行動様式であるがために、ヒトがヒトである限り捨て去ることはできない。また、自己家畜化前の生活様式に戻ることもできず、生活維持のために人口増加を求めてしまうことになる。パラダイムを変えて、人工均衡系とでも呼ぶべき人間活動が地球上でバランスを保つことができる世界を作り上げるか、少しでも均衡系に近いものを作り延命を図るしか、持続可能性 (サステナビリティ) を人間の手中に納めることはできない。

本稿の執筆にあたり、霜田政美氏 ((独) 農業生物資源研究所) には絶え間ない励ましをいただき、氏のご努力なしには本稿は完成しなかった。また、農林水産省委託研究プロジェクト「生物の光応答メカニズムの解明と省エネルギー、コスト削減技術の開発」のうち、「害虫の光応答メカニズムの解明と高度利用技術の開発」の多くの皆様とご議論をいただいた。本研究の一部は、JST-CREST「ナノ科学を基盤とした革新的製造技術の創成」「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」、JSPS 科研費 25292198 の予算で実施された。

今なぜエントモミメティクスか

1. バイオミメティクスとは

バイオテクノロジーという単語は、高校の生物の教科書にも見られ「農業、工業、医学の進歩を通して、人間の生活向上に貢献している」などと記載されるほどポピュラーなものになっている。教科書の中では、バイオテクノロジーの関連事項として、遺伝子操作、トランスジェニック生物、細胞融合、組織培養、核移植、再生医学、バイオリクターなどの、遺伝子や細胞の操作について述べられている。これらの語句からも、バイオテクノロジーとは、生命の仕組みを学び生物がもつ能力を、人間が利用しやすい形に改変して用いているとはいえ、生命の力を直接利用するものであることがわかる。一方バイオミメティクスは、生物の構造や機能そして生産プロセスなどを規範として、新しい技術の開発や“ものづくり”に活かす科学技術である。自然から利益を得るという点では共通で、両者ともに人間の叡智が必要なものも一緒である。しかし、生命そのものに機能物質を作り出させることを目的とするバイオテクノロジーとは明確に一線を画している。利用する側にとっては、バイオテクノロジーだろうが、バイオミメティクスであろうが、良い製品が手軽に安く作製でき、そのプロセスが低環境負荷であればよい。しかし、技術革新も含めて、自然を理解した上で設計する責任のある科学者や、

第1図 地球がもつ食物連鎖を代表とする自然均衡系 (右側) と、ヒトが農耕を開始し文明を発展させた人工の系 (左側)。

“ものづくり”に落とし込んでいかななくてはならない工業生産者側にとっては、両者は大きく異なる。前者は既存の生物を改変することによって技術に仕上げるができるものであるのに対して、後者のバイオミメティクスは生物の本質を明らかにし、原理を“抽象化”した後に人工系で自然のもつ仕組みを“再現”するというもので、前者に比べてより複雑な過程を含む。つまり、バイオミメティクスでは、技術を獲得する作業の中に、必ず生物を規範として“抽象化”するという新たな学問創成の作業を常に必要とする。

この面倒な作業を遂行する上で、大きな心の支えとなる点は生命がもつ長い歴史である。38億年の歴史を誇る生命は、命を賭して性能試験を繰り返してきているのだ。生存し子孫を残すことができたものだけが現存の生物の先祖であるのだから、そして現代の環境の中で生きているのだから、生物が獲得している仕組みや構造は、自然環境の中での生存に最適な状態に近いものがほとんどである。ヒト自身も他の生物と同じ素材で作られた生物の一つの種にすぎないことを考えると、すでに環境適応している多様な生物の仕組みや構造を規範とする意義は深い。

持続可能な社会を小手先の改変で実現することはできず、ましてや巨大エネルギー問題を、エネルギーを獲得するという方針で解決することで人間が繁栄を続けることは不可能である。第二次産業革命ともいべきパラダイムシフトを含む産業構造改変の大革命を起こさなければ、人間本来の同士のコミュニケーションを支える産業の発展はできない。パラダイムシフトを模索し次世代の人々の手の中に入れる作業をするのは、今を除いて別の機会はない。バイオミメティクスが目指すものは、小手先のサステナビリティだけではなく、生物がもつ仕組みに学び、その製法に学び、新たな産業を興そうというものである(下村, 2010)。

2. エントモミメティクス

昆虫を規範としてバイオミメティクス研究を展開する分野を、特にエントモミメティクスと呼称することが藤崎憲治氏らによって近年提唱された(藤崎ら, 2009)。節足動物の中でも、爆発的に多様化し陸上環境に適応している昆虫は、陸上というニッチを比較的共にしている人間にとって規範とできる部分が多い。その規範モデルとして昆虫を観察すれば、そのデザインや機能そして行動から、新規産業への製品化に寄与できるだけでなく、環境と人間との関係も学ぶこともできる。昭和40年にはカロリーベースの食料自給率が70%を超えていたが、その後50年の間に40%を下回るようになった日本の現状(農林水産省, 2013)を考えると、このエントモミメティクスを理解し実施することはわれわれの喫緊の課題だろう。特に、実学としての農学分野にエントモミメティクスを適用させたい。

第2図 発想支援型画像検索システム。SEMで観察した画像データをすべてコンピュータ内に情報として蓄えておく。新たな注目点(例えばヤマイモハムシ *Lema honorata* (Baly) の棘(seta))のデータを入れると、それに近似した画像クラスターを抽出することができ、ここではジョウカイボン *Athermus suturellus suturellus* (Motschulsky) やトサカシバンムシ *Trichodesma fasciculare* (Reitter) の seta が研究者への“気づき”として提案される。この画像処理は、生物学上の研究にも工学的な情報抽出にもすぐに役に立つ技術だといえる。各昆虫種写真左のスケールは mm。

観察と解析は、すべての科学の基本となるものであるが、昆虫の科学においてミリからメートルという大きなスケールの観察と、分子レベルの解析は盛んに行われてきたが、細胞の大きさ前後のサブセルラーサイズの世界にはほとんど注目されてこなかった(下村, 2010)。実は、このサイズの世界には生命維持につながる物理現象を説明するヒントがたくさん隠されている。昆虫などの生物のサブセルラーサイズの微細構造を観察するには、走査型電子顕微鏡(scanning electron microscope: SEM)が適している。特に昆虫の表面構造の観察にはSEMを欠かすことはできないが、これまでは一部の分類学者や生理学者の使用にとどまり、昆虫の表面構造を広範に観察したものはない。バイオミメティクスの発展のために、北海道大学総合博物館では、2011年11月から大原昌宏らを中心とした画像検討会が立ち上げられ、異分野の研究者からなる老若男女が一堂に会して定期的に開催してきた。多数の昆虫の表面構造を観察した結果として、新しい発見が重ねられ、多くの昆虫の多様な機能との関係も明らかになってきた。「見れば見るほど昆虫の微細構造の精緻さに畏敬の念を抱かざるをえない」というのが多くの参加者の弁である。その一方、多数の昆虫の表面構造の観察による大量のデータが蓄積されることになった。北海道大学大学院情報科学研究科の長谷山美紀らを中心に、それらの画像の特徴の共通性や普遍性を情報処理によって関連づけ、観察者に「気づき」

を与える取り組みもなされている。コンピュータ画面に向かって画像をクリックするだけで、画像としての項目が関連づけられ、特徴の抽出が起こる様は圧巻であり(第2図)、その生物構造をもとにした「気づき」の力と可能性の大きさから「長谷山エンジン」とも呼ばれている(長谷山, 2010; Haseyama et al., 2013)。この「発想支援型画像検索システム」では、画像検討会でのデータに加えて、国立科学博物館の野村周平らが精力的にSEM観察している昆虫表面のデータも融合され、下村政嗣を代表とする新学術領域研究「生物多様性を規範とする革新的材料技術」の研究プロジェクトの支援のもと、昆虫画像データのビッグデータ処理の本格的運用に近づいている。生物学的に容易に想像される生息環境や生物の系統発生との関連性だけでなく、これらの関連とは関係ない類似性が見られることもわかってきた。これまでなしえなかった莫大な量の昆虫の形態学的情報を用いた生物学的解析も夢ではない。そして、それらの手軽に引き出せる電子情報を規範として、多様な昆虫の形態から「気づき」が誘発され、機能解析を通して原理を解明し、農業現場に落とし込める技術開発に進むことができるようになる日も近いだろう。

3. エントモミメティクスの進め方

昆虫を中心にしたエントモミメティクス研究も、対象範囲が生物全般に広いバイオミメティクス研究もどちらも広範な研究対象と知識を必要とされることはあらためて述べる必要はないだろう。少なくとも、生物学はもとより数学・物理学・工学の知識がなければ、自然を観察して理解することも、ものづくりに落とし込むこともできない。この研究を推進できる学問横断的な人材を教育することは不可欠であるが、学問横断的な教育の機会が減られ、似非専門教育が推進され続けてきた現状の下で、今すぐできることは共同研究体制の構築である。生物の本質を明らかにするためには、対象となる生物を詳細に観察しなければならない。当然、ここでは生物観察法の基礎教育を受けた生物学者・農学者が中心になるべきであると同時に、別の視点から原理の理解を進めることのできる物理・化学・工学などの専門家の目による観察も必要である。その目を生物学的な視点から開かせるために、生物学者・農学者の解説が有用である。また、原理を“抽象化”し、現象を一般化するためには、物理・化学・数学・工学などのその道の専門家が中心となり、生物学者・農学者らと共に議論を進める必要がある。この“抽象化”した概念を、低環境負荷の人工系で“再現”するためには、“抽象化”された生物現象を十分に理解し“ものづくり”に活かすことのできる工学者や企業人が必要になる。そして、これまで多くの工業現場で失敗してきた環境への高い負荷や健康被害、そして生活様式の悪変などを防ぐために、開発した技術や製品が社会に対して好適なものかどうかをチェックすることのでき

る文化的なグループの視点による判断も必要となる。注意しなければならないのは、ここでいう異分野連携とは他分野の思想をお互いに理解しつつ共同研究を進めるという点である。異分野の部分は異分野の研究者に任せきりで、それぞれの研究者が理解することに努めなければ、お互いをもつ情報は十分に伝わらず研究は発展しない。まさに、学問横断的な体制を作り上げない限り、我が国のエントモミメティクス研究は成功しないだろう。

以下に、学問横断的な共同研究として、われわれの研究室とその仲間によるエントモミメティクスとしてのサブセラーサイズに関連する共同研究を推進した数例を述べる。

4. エントモミメティクスの開発例

(1) 昆虫の表面構造に学んだ害虫制御—モスアイフィロムの低反射性、撥水性、滑落性

1) モスアイ構造

昆虫の複眼は、多数の個眼から形成されている。多くの夜行性の昆虫では、1つの個眼の角膜表面にナノパイル構造が集積している。この構造を初めて報告したのはBernhard and Miller (1962)で、初めは「角膜上のニップル状のたくさんの微小突起 corneal nipples」と呼んでいたが、蛾の眼に特有と思われたことで後にモスアイ構造と呼ばれるようになった。Bernhard et al. (1970)はその役割を調べ、ナノパイル構造が表面に集積していると光の反射を防ぐ機能があることを報告した。突起は一般に釣鐘状をしていて、高さ200–250nm(ナノメートル、ナノは10億分の1m)で間隔は200nmくらいになっているものが多い(Stavenga et al., 2005)。このモスアイ構造は昆虫の眼だけではなく、オオスカシバ *Cephenodes hylas* (Linnaeus) (Yoshida et al., 1997) やセミ科の透明な翅でも発見され(Stoddart et al., 2006; Sun et al., 2011)、この翅の反射を防いでいると考えられている。このようにナノパイル構造は、波長や光の入射角度の変化に対して優れた反射低減効果があるため、太陽光パネルなどへの応用が期待されている(Dewan et al., 2011)。

オオタバコガ *Helicoverpa armigera* (Hübner) の複眼を正面から観察すると多数の個眼の集積であることがわかり(第3図A)、その1個眼の角膜表面をSEMで強拡大すると多数のナノパイル構造が並んでいることが観察される(第3図B)。前述のように、エゾハルゼミ *Terpnosia nigricosta* (Motschulsky) の翅の透明な翅膜をSEMで観察すると、蛾の角膜表面に似たナノパイル構造があり(第3図C)、そのナノパイル構造は蛾の眼の角膜表面にあるモスアイ構造(第3図B)に酷似している。一つのナノパイルの大きさは、直径50nm、高さ200nm程度で、頭部が丸まった円錐状の構造をしている。その翅膜部分の透過率をスペクトル測定すると紫外部(300–400nm)でやや吸

収があるものの、可視部帯域では 100% に近い高い光透過性があることがわかる (第 3 図 D)。このようにモスアイ構造と呼ばれるナノパイル構造が高い反射軽減効果をもつことが確認できる (Clapham and Hutley, 1973)。

2) 反射低減効果をもつモスアイ構造の超撥水性

一方、モスアイ構造をもつ蚊の複眼などで、超撥水性を示すことが、比較的近年になってカ科の複眼を用いた研究

で報告されている (Gao et al., 2007)。蚊は水辺で生活するだけでなく、蛹であるオニボウフラから羽化するのも水中であることを考えると、体中に高い超撥水性があることは理解しやすい。エゾハルゼミの翅の翅膜にもナノパイル構造があることから、微小液滴を翅に滴下する実験により撥水性の検討を行ったところ、接触角が翅膜で $161.7 \pm 2.5^\circ$ 、翅脈で $149.5 \pm 1.3^\circ$ という高い超撥水性を示すことがわかった。先に述べた画像検討会で議論したところ、超撥水性は夏の早朝の朝露の多い時間帯に脱皮するセミにとって生存にかかわっているのではないかという意見がでた。この超撥水性が、セミの生存にかかわっているとしたら、翅に色素が含まれていて光透過性をほとんど示さないアブラゼミ *Graptopsaltria nigrofuscata* (Motschulsky) などにもナノパイル構造が存在していることが想像された。そこで、アブラゼミの翅の表面微細構造を電界放射型走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) を用いて観察したところ、透明なセミの翅の表面構造と同様のナノパイル構造で覆われていることがわかった (第 4 図 B、第 5 図 B)。透明なセミの翅も不透明なセミの翅もほぼ同じナノパイル構造をもつことから、アブラゼミの翅に同様の実験を行ったところ、反射低減効果に加えて、超撥水性と撥水性に基づく自浄作用の機能が備わっていることがわかった。そこで、反射低減効果と超撥水性がナノパイルという構造によるものか否かを確かめるために、アブラゼミの前翅を切り出したままの試料と、ゴムなどで表面をラビングし (すり) ナノパイル構造を破壊した試料を用意した。図からわかるように、ラビング処理したものは表面が輝くようになった (第 4 図 A)。

第 3 図 オオタバコガのモスアイ構造 (A, B) とエゾハルゼミ翅膜の構造 (C)。A は両複眼を蛾の正面から撮影した像で、A の複眼を拡大すると A と B の間の挿入図の個眼を観察できる。B はその 1 つの個眼の一部を強拡大したものである。C の挿入図はエゾハルゼミの前翅で翅膜 (矢印) の部分を強拡大すると、B と同じようなナノパイル構造が観察される。この翅膜部分の透過率 (D) は、両矢印で示した紫外部 (UV) を除く可視域では 100% 近い値を示す。

第 4 図 アブラゼミ前翅のナノパイル構造と、反射と撥水性の関連。ラビング処理前後の翅を観察する (A) と、処理後のものでは明らかに反射が増えている。そのナノパイルの形態は処理後に乱れ (B 右上)、微小液滴を翅膜に置くと処理後のものでは、撥水性が減少した。d の水滴の側の線は、水滴の接触角を示す。これはナノパイル構造がラビング処理によって破壊されたためと考えられる。翅の反射スペクトルは、ラビング処理によって全体的に高くなる傾向が見られた (C)。

ング処理を施さなかった微細構造と処理後のものを比較すると、第4図Bの最上段のSEM像のように、ラビング処理後のものではナノパイル構造が潰れ乱れていた。固体表面上に液体が接している状態で、液体の縁の表面に引いた接線と固体表面が成す角度を接触角というが、固体表面の素材が一緒であるときに固体表面上のナノパイル構造に規則性がある方が接触角は大きくなる。ラビング処理前の前翅の翅膜のa~cに対応する処理後のa'~c'に微小液滴を落とすと、処理前のものの接触角は146°前後の超撥水性を示すが、処理後では103°と大きく減少することがわかった(第4図B d, d')。第4図Bのa~cと同量の水滴を落として上から観察したa'~c'では、水滴が横に広がって大きな水滴のように見える。アブラゼミの翅にラビング処理をしてナノパイル構造を破壊したものでは、紫外部から可視域全体で反射率が倍以上に上がることがわかった(第4図C)。有色の翅であっても、ナノパイル構造はつや消の役割をしていて、恐らく天敵などに対して視覚情報量の減少を実現しているものと考えられる。

3) モスアイ (ナノパイル) 構造の滑落性

既存の報告と同じ構造と機能がアブラゼミの翅にも存在していることを確認している実験中、このナノパイル構造が他種の昆虫の攻撃を避ける効果をもつことを野外観察によって発見した。つまり、アリなどの外敵がセミを襲う際に、翅にあるナノパイル構造の上を歩けないためにセミの上にあがるができないのである。そこで、アブラゼミの前翅と後翅を集めてシート状にして(第5図A)、歩行実験をしたところ、捕食者として実験に用いたアミメアリ *Pristomyrex punctatus* (Smith) は滑落した(第5図C)。しかし、ナノパイル構造をもたない種々のフラットな材料の

上を虫は自由に移動することができる(第5図D)。アブラゼミの翅がもつナノパイル構造(第5図B)と同様の構造体は、無反射を目的としたモスアイシートとして、Uozu (2012) によって自己組織的なテンプレート作製技術と共に開発され大量に生産可能にされていたことから、このモスアイシートを用いてアブラゼミシートと同様の実験をした。すると、実験に用いた20目100種近い害虫のうち、すべてが滑落した。この発見によって、モスアイフィルムの滑落性能は、害虫と関係する農業現場や工場などですぐに利用できることがわかった。利用が検討され始めたものの例を挙げると、予察灯、害虫駆除用トラップ、夜間室内の照明を落とさない商店の窓の工夫などである。

本研究の始まりは、多様な昆虫の翅や体部、そして脚先の微細構造が基本構造として同様の仕組みをもっていることを、先に述べた長谷山エンジンのデータベースから知ることができたことであった。つまり、蛾の眼やエゾハルゼミの翅にあるナノパイル構造(第3図C)が昆虫一般にあることが示唆されたことから、ナノパイル構造が一般的であるならば透過性のないアブラゼミの翅にも同様の構造がある可能性を考えることができて観察することになったのである。一方、昆虫の脚先には、微細な毛状やへら状のクチクラの突起構造(剛毛)の集合体、あるいは袋状の構造が見られ、この2つが褥板(pulvillus)と呼ばれる高い摩擦性あるいは接着性を生み出す基本構造であることもデータベースから確認された。

すでに、ヤモリなどの脚の建物外壁への付着は、昆虫の脚先と同様の構造によるファンデルワールス力であることが知られていた(Autumn et al., 2000)ことから、実効接触面積を下げればその力が減少するだろうという単純な物理学的現象を予想することができたので、アブラゼミとその天敵の行動の野外観察において虫の表面が他の昆虫に対して滑落性があることに気づいたのである。生物の様に膨大な情報がある場合、その構造と機能の関連、あるいは種を超えた構造の相関などに関して、最先端の情報処理を利用して“気づき”を得ることは、バイオミメティクス研究などの複合領域の研究推進に有力なツールとなる。

これらの結果から、生物表面がもつナノパイル構造は、低反射材、超撥水性に加えて、滑落性の機能をもつことがわかり、農業資材としてすぐに利用可能である。生物がもつ構造は、マルチファンクションであることを再認識する必要があることを、この研究を通して感じた。

(2) 構造色と農業応用

1) タマムシ鞘翅の構造色

生物表面に入射した光は、物質との相互作用により修飾を受け独自のスペクトル光が反射される。便宜上、色素などの物質の吸収によるスペクトル修飾を「化学的な色」、表面の構造によるスペクトルの修飾を「物理的な色」

第5図 アブラゼミの翅で作ったシート(A)とその微細構造(B)。アブラゼミシートにアリを載せると垂直方向に滑落する(C)が、垂直のガラス面表面などでは自由に移動できる(D)。大きめのガラスシャーレの内側に人工的に作ったナノパイル構造(モスアイ構造)フィルムを貼るとアリは垂直移動できない。そこにラビング処理したアブラゼミの翅を入れると、その表面をアリは登ることができる(E矢印)。

第6図 ヤマトタマムシの鞘翅の背側から腹側の軸の切片の光学顕微鏡写真(左)とその模式図(中央)。A～Dは、タマムシのそれぞれの部位のTEM像で、その表角皮の各層の厚みが顕著に違う。模式図であるように、表角皮に入射した光は、多層膜干渉によって一部の色が強調されて反射する。

ということもある。物理的な色は、その色の創出が構造によるために「構造色」ともいう。薄膜干渉、多層膜干渉、回折格子、フォトニック結晶、光散乱などの光学的現象のどれか、あるいは組み合わせによって色が創出される(Kinoshita, 2005)。先に述べたモスアイ構造も、ナノパイル構造の集積による反射軽減効果があり、透明感を出していることから構造色として考えられている。

昆虫では、真皮細胞(epidermis)が体表面に原クチクラ(procutele)を分泌し、その後にクチクラの一部が硬くなり外骨格の中核を形成している。クチクラは真皮細胞の分泌物で、生きている細胞ではなく、細胞から分泌された物質が自律的に規則性をもって自己組織化したものである。このクチクラは外側の表角皮(epicuticle)と、外角皮(exocuticle)および内角皮(endocuticle)に分けられる。この外角皮と内角皮のもとである原クチクラ(procutele)は、タンパク質とキチンからなる糖タンパクであり、原クチクラの外側が硬化して外角皮となり、硬化が完全でない部分が内角皮となる。鞘翅を面に対して垂直に切断して透過型電子顕微鏡(transmission electron microscope: TEM)で観察すると(第6図)、表角皮では薄層が重層していることが観察される。一方、外角皮の方は、螺旋の単位構造が密に並びコレステリック液晶様構造をしていることがわかる。コガネムシ科の仲間は外角皮の層によって(Watanabe and Takezoe, 2005)、タマムシ科では表角皮の層によって(Hariyama et al., 2005)色が表出されている。光は電磁波であり、一般に電場(および磁場)の振動方向が一定のもの(直線偏光)と振動が伝播に従って円を描く(円偏光)成分に分けることができる。特定の構造に入射した光は、その構造によって偏光成分が強調されることがある。鞘翅の構造によって、カナブンの表面からは右回り円偏光が、タマムシでは直線偏光が反射されるという特徴がある(Berthier, 2007)。このように構造で色が創出されている昆虫では、それらが命を失った後も長い年月の間、輝きを失うことはない。

第7図 鞘翅の表角皮付近の縦切りのTEM像(A)。番号で示した部分の濃度を測定できる機器である光学密度計測(densitometry)で測定した結果がBの曲線である。この波状の振動は濃度の違いを表しており、波のそれぞれの山と谷は層の明暗に対応している。それらの屈折率の平均をおよそ1.8付近に設定して多層膜干渉のシミュレーションをしたものがCのグラフの破線で示した曲線である。ヤマトタマムシの鞘翅からの測定値を実線(☆)で示しているが、TEMで示された濃度差を屈折率としたシミュレーション結果と実際の測定値と、よく一致する。

一方、「化学的な色」を創出する生物の色素は、カロチノイド、フラボノイド、プテリジン系色素、メラニン、インドール系色素、キノン系色素、オモクローム、パピリオクローム、テトラピロール系色素など多岐にわたる。植物がもつ色素に比べて、動物がもつ色素の方が多様であるが、それは動物には、動物自身が体内で合成するものと、餌としての植物の色素を由来とするものの両者があるためである(Fox, 1976)。一般に、化学的な色素による発色は、昆虫の死後数日で変色するものが多く、比較的色彩落ちしないものでも経年劣化する。また、構造による色の表出に比べて、反射率が低くまたスペクトル分布が幅広いことが多い。

ヤマトタマムシ *Chrysochroa fulgidissima* (Schonherr) では表角皮に20層前後の多層構造があり、多層膜干渉によって特定波長が反射され、ヒトにとって緑色に感じられる部分は570nm付近にピークをもつ強い反射を示す。

ヤマトタマムシの最外層(表角皮)を形成するクチクラをTEMで観察すると、体の各所によって層の厚みと数が異なることがわかる。ヒトにとって赤く見える長波長側のストライプの部分の各層は厚く、緑に見える短波長の部分は赤く見える部分に比べて薄い(第6図A~D)。

表角皮を電子顕微鏡で観察した層状構造の明暗は、電子染色したタンパク質などの濃度の違いを示しているが、この濃度の違いは屈折率の違いを示している可能性が高い。この表角皮の層の濃度の違いが屈折率に相関すると仮定して、それぞれの層(第7図Aの1~4)の濃度を測定し(第7図B)、多層膜による反射スペクトルをシミュレーションすると第7図Cの4種の破線になる。実線で示した実際の反射スペクトルとよく一致することがわかる。しかし、このシミュレーションでは屈折率をおよそ1.8と仮定する(第7図B)必要があり、この屈折率は生物素材がもつ物質として異常に高い値である。どのような仕組みでこのような高い値にできているかなどの解明を進めることによって、エントモミメティクスとしての研究推進に寄与できることになろう。

2) 種内信号としてのタマムシ鞘翅の構造色

「信号に基づく行動の変化」を観察する場合、交尾行動は比較的理解しやすい指標となる。羽化したヤマトタマムシは、7月中旬から8月中旬にかけて繁殖シーズンを迎え、およそ1カ月の間、エノキ *Celtis sinensis* (Pers.) やケヤキ *Zelkova serrata* (Makino) などの寄主木の葉を食べ、寄主木の樹上を飛翔する。葉上で異性を見つけて交尾し、雌は枯枝の中に産卵する。午後1時ごろから午後5時ごろにかけて飛翔個体が多く観察され、午後3時ごろにピークが見られる。飛翔個体のほとんどが雄で、雌は木の葉の表側に鞘翅を閉じた形で静止している。探索飛翔していた雄が葉上のタマムシを発見すると、周辺に降り立って(着地して)樹上を歩いて雌に接近するか、雌個体に直接着地し、交尾する。雄は何らかのキュー(手がかり)によって樹上にいる同種他個体を弁別し、飛翔接近しなければならない。雄の雌探索行動がどのようなキューによって行われているかを調べるため、鞘翅のみあるいは他の材料を用いて鞘翅に似せたモデルを作製し、雄が多く飛来する寄主木の樹上に提示し、飛翔している雄がどのような行動をとるかを観察した。竿の先に、タマムシの鞘翅で作ったモデルあるいはそれに似せた素材のモデルを取り付け、エノキの樹冠の横から飛翔してくるヤマトタマムシの行動を観察すると、竿の先に飛翔接近した多くは鞘翅で作ったモデルに気づくとその周囲で数秒間回り込むようにホバリングし、その後モ

第8図 雄の鞘翅(a)、雌の鞘翅(b)、雌の鞘翅の赤いストライプを鞘翅の緑の部分を取り取って覆ったもの(c)、寄主木の葉(d)、ラッピングペーパー(e)、発光ダイオード(f~h)で作ったモデルに対して飛翔接近した個体と、着地した個体の頻度。f~hはそれぞれ520nm, 555nm, 590nmにピークをもつ。それぞれのモデルのサイズは実際の鞘翅とほぼ同じである。

デルあるいはその近くに着地してモデルに接近する行動を示した。モデルを発見することで、飛翔行動そのものが変化したのである。

仮想的な半径50cmの空間をモデルの周囲に想定し、そこに飛翔侵入したものを飛翔接近した個体とし、そのうちモデルの周辺あるいはモデルに直接着地したものの個体数を数えた。雄と雌の鞘翅で作ったモデルに対しては、雄雌の区別なく高い頻度でモデルに飛翔接近する行動を示し、ほとんどの個体が着地した後、モデルに近づく行動を開始した(第8図)。また、赤く見えるストライプの部分を見える鞘翅を切り出したもので覆い隠したもののでも同様の結果であった。寄主木の葉で作ったモデル、ラッピングペーパーで作ったモデル、および鞘翅と同じ帯域の反射スペクトルを発光するLED(発光ダイオード)で作ったモデルなどに対しては、誘引された個体がまったく観察されなかった。飛翔接近する個体は、十分に遠くからモデルを認識した行動を示していること、また風の向きなどに影響を受けないことなどから、接近にはフェロモンなどの匂いではなく、視覚に基づくなんらかのキューが使われていると考えられた。

鞘翅で作ったモデルがもつ視覚のキューに飛翔中のヤマトタマムシが誘引されることは確かであるが、さてどのような視覚のキューに誘引されているのであろうか。同じ波長を発光するLEDへの誘引は見られないことから、もしかしたらスペクトル分布だけではキューとして機能しないのかもしれない。タマムシの形や大きさ視覚のキューとして使っているのかもしれないと考えて、タマムシの外形をレーザー計測し、粉体を重層していく技術(現在でいう立

体プリント技術)を用いてモデルを作製した。そのモデルにメタル系の塗装を施し、先の行動実験と同様にエノキの樹上に設置した。ヒトの目にはタマムシそっくりに写るモデルに、タマムシは全く見向きもしなかった。

その後、タマムシの多層膜を模した多層膜フィルムを原滋郎が作製し(原, 2011; Yamanaka et al., 2011), タマムシモデルの上にフィルムを貼り付け行動実験を行った。このフィルムは、およそ1,000層のポリマーを重層したもので、反射スペクトルおよび強度はほとんどタマムシの鞘翅と一致させ、タマムシサイズのモデルを提示した。このモデルには、飛翔接近およびモデル周辺でのホバリングが観察され、この多層膜フィルムが誘引性をもつことがわかった。しかし、着地しモデルに近づくという最終段階の行動まで観察するには至らなかった。タマムシの翅の光の属性について、あらためて測定したところ、鞘翅の体軸方向とその垂直方向において反射の比率に違いがあることがわかった。そこで改めてその翅の反射の比率の違いを再現し、平面のフィルムをモデルとして提示したところ、飛翔接近および着地することに成功した。これらの結果から、タマムシは飛翔接近にも着地にも視覚のキューを用いていることがわかり、かつ飛翔接近した個体がホバリングして最終的に着地するためには、タマムシの反射スペクトルおよび強度を一致させるだけでなく、体軸に対する反射の異方性(角度によって変化するスペクトル光の変化率の違い)という視覚のキューも用いていることがわかった。

「探索飛翔」していたタマムシは、視覚のキューによって「接近飛翔」という行動に変化することから、タマムシの鞘翅は同種間のコミュニケーションに用いられているといえる。雌雄の鞘翅のモデルで誘引率の違いはないが、寄主木の上で雄の一斉飛翔が観察されることから、飛翔していない個体のほとんどが雌である。そのために雌雄の鞘翅の反射が同様の光特性をもっている交尾頻度を低減させることにはならないのだろうと考えている。

動物の表面を覆う色の中で、構造色は色素色に比べて一般に半値幅(反射スペクトルのピークを中心としたスペクトルの広がり)の程度を表す指標)が狭く単色光に近く、多層膜が数多く重なったものでは、反射光量も多く、背景とのコントラストが付きやすい。この素材は、日中において有益な役割を果たす。これまでに、色素素材を用いた黄色や青色のトラップに粘着材が塗られたものが用いられてきているが、反射率は低くまた反射スペクトルも経験的に決められてきた。昆虫は光に対して反応し、害虫コントロールに光を用いた技術が適していることも研究が進んでいる(Shimoda and Honda, 2013)。また、昆虫種によっては特定波長を嗜好することも知られており、今後タマムシの飛翔接近行動の研究から開発された構造色フィルムの利点を活かし、構造色フィルムを農業現場でトラップなどに利用す

ることを検討している。

(3) 昆虫の電子顕微鏡観察技術の開発

1) サブセルラーサイズの昆虫の観察

先に述べたように、観察と解析は科学の基本となるものであり、昆虫の科学においても同様である。これまでほとんど注目されてこなかった細胞の大きさ前後のサブセルラーサイズの世界の中に、生命維持につながる物理現象を説明するヒントが実はたくさん隠されている。この世界を観察するためには、電子顕微鏡を利用することが不可欠であるが、この技術には大きな問題があった。電子線が空气中を通過できないために、高分解能な電子顕微鏡観察には電子線の透過しやすい高真空環境が必須であり、体重の80%近くを水が占める生物をそのまま高真空下に曝すと体内のガスや液体が奪われ体積収縮し、その微細構造は大きく変形してしまうのだ。そのため、可能な限り生きた状態に類似した微細構造を観察するために、生きた生物試料に変形を少なくするための化学的処理を施し、生命を奪い、続いてアルコールなどで脱水する。その後、SEMでは臨界点乾燥器や凍結乾燥機などで変形をできるだけ避けるように乾燥処理を施した標本に、金属蒸着をして導電性を確保する。またTEMでは脱水処理した試料をプラスチックなどに包埋した後に、ウルトラミクロトームなどで100nm程度に薄切して観察する。この処理は煩雑であり、観察までに数日間を要することさえある。どちらも、死んでしまった生物を観察しているのが現状だった。

できるだけ生命活動に近い状態のものを観察したいという要求のもと、SEMでは、生に近い試料を観察する工夫として、ガスや液体の離脱を押さえるために低真空下での電子顕微鏡観察装置(低真空SEM)や、試料周辺だけの真空度を落とす電子顕微鏡観察装置(環境SEM)が開発されていたが、真空度の低下により微細構造の細部まで観察することは現状では難しい。

2) ナノスーツ—電子顕微鏡内で生きたままの生物を観察する方法

1930年代に発明された電子顕微鏡は、1950年代から多くの研究分野で使用されるようになった。生命科学の分野ではウイルスが発見され、細胞小器官が観察されるようになり、科学的概念のたくさんの変革につながった。1600年代に発明された光学顕微鏡が細胞説を導いたように、道具の発明は科学的概念の変革を生み出す。広い分野における科学的貢献のため電子顕微鏡の開発を現実のものにしたエルンスト・ルスカ(Ernst A. F. Ruska)は、1986年にノーベル物理学賞を受賞した。そして、現在も高分解能観察を実現できる顕微鏡の開発が促進されている。

しかし、生物規範工学を推進するためには、できる限り生きたままの標本に近いサブセルラーサイズの観察が不可欠であり、できれば生きたまま電子顕微鏡内で超微細構造

を観察したい。それができれば生命科学の分野に大きく貢献でき、科学的概念を変えることにつながるかもしれない。われわれは数年前に、昔 Science 誌などで生きた昆虫 (Pease et al., 1966) や植物 (Heslop-Harrison, 1970) をそのまま観察したという報告があったことを思い出し、過去に立ち返って実験し直してみようと思った。当時の電子顕微鏡の真空度は現在の低真空 SEM 以下の 10^{-2} Pa だったが、私たちは真空度 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ Pa の高分解能の FE-SEM を用いて、さまざまな生物を網羅的に高真空下でそのまま観察した。その結果、ほとんどの生物は真空環境におかれると押しつぶされたような姿で死に至り、その表面構造は体積収縮により変形してしまった。しかし、粘性をもつ細胞外物質 (ECS) を個体の最外層にもつ一部の生物 (ショウジョウバエ *Drosophila melanogaster* (Meigen) やニホンミツバチ *Apis cerana japonica* (Red) などの幼虫) では、体積収縮のない微細構造表面を観察できるだけでなく、電子顕微鏡の中で活発に動いていた (第9図 A)。そして、その生物を電子顕微鏡から取りだして飼育を続けると少なくとも外見的には全く正常な成虫になった。

ところが、同じ FE-SEM 内で電子線照射なしで 30 分から 1 時間ほど放置した後に、電子顕微鏡観察するとショウジョウバエの幼虫は体積収縮により変形し死亡していた (第9図 B)。この結果から、電子線による ECS の重合 (Yasuda, 1981) を予想できる。生命維持されているショウジョウバエの幼虫表面の構造的な特徴を観察するため、FE-SEM 観察前後の幼虫の最外層の超薄切断面を作製し TEM で観察すると、電子線照射による観察後の幼虫では

50~100 nm の薄膜が形成されていた。しかし、電子線照射なしで 1 時間放置した個体の超薄切断面の TEM 観察では、最外層の薄膜は観察されなかった。この結果から、FE-SEM 観察時の電子線照射により、幼虫の最外層に 50~100 nm の薄膜が形成され、それが高真空下での気体や液体の放出を抑制しているという、ECS の電子線重合とその重合膜が生命維持に関わっているであろうことが強く示唆されたのである。そこで、電子線照射と同じように高分子重合を促進することが知られている、物質のエネルギー状態を変えることができるプラズマ (Friedrich, 2011) を用いて、重合膜が生命維持をするか否かを検討した。FE-SEM 観察前にショウジョウバエの幼虫にプラズマ照射して同様の実験操作を行うと電子線照射の場合と同じように FE-SEM 内で動いている様子が観察され、また電子線を用いた観察をしないで同じ高真空下の FE-SEM の試料室内に曝しただけの個体も 1 時間近く形態が維持されたまま生存しているという結果が得られた。TEM 観察したところ、生存できたプラズマ処理個体の表面には薄膜が形成されていたことが確認できた。以上の結果から、幼虫の最外層にある粘性の高い ECS に電子線またはプラズマ照射すると、体内の物質の放出を抑制できる 50~100 nm の薄膜が形成され、高真空下での FE-SEM 観察が実現できることがわかった。われわれは、この膜が FE-SEM が必要とする $10^{-5} \sim 10^{-7}$ Pa の高真空中でも生命を守っているの、ほぼ同じ真空度の世界でもヒトの命を守る宇宙服をイメージして、その薄さから「ナノスーツ NanoSuit」と名付けた (Takaku et al., 2013)。

第9図 種々の生物を直接 FE-SEM に入れて観察すると、ほとんどの種で急速に変形するが、キイロショウジョウバエ幼虫はそのまま観察できるだけでなく、電子顕微鏡内で 30 分以上動いている (A)。しかし、同じ真空度の電子顕微鏡内で電子線を当てないで (観察しないで) 60 分ほど放置すると外形は変形し、平に押しつぶされた形になる。

第10図 ヒトスジシマカなどのボウフラをそのまま電子顕微鏡の中に入れると A のように数分間で脱気脱水されて変形する。そこに Tween20 などの希釈溶液を薄く塗布してから電子線処理かプラズマ処理をすると電子顕微鏡内で変形せずに動いていることが観察される。B の腹部のプレ (*) は動いているために生じたものである。

次に、幼虫の ECS を規範として、類似した化学官能基をもつ溶剤を選定し、ECS をもたない生物に対して同等の機能の発現を試みた。成分分析の結果や生体適合性という観点から、食品添加物にも指定されている界面活性剤 (Tween20) を選択した。ヒトスジシマカ *Aedes albopictus* (Skuse) の幼虫 (ボウフラ) を直接 FE-SEM 観察するとショウジョウバエの幼虫とは異なり、体積収縮による変形が起こり数分の間に扁平になってしまう (第 10 図 A)。このボウフラを用い、1% Tween20 をごく薄く塗布し、プラズマ処理してナノスーツを装着させた。その試料を FE-SEM 観察すると、高真空下でも体積収縮がなく (第 10 図 B)、微細構造も観察できる。また、ボウフラは微細構造観察時にも活発に活動しており、観察後に飼育水に戻すと、オニボウフラを経て蚊に成長した。観察後のボウフラの断面の TEM 観察を行うと、ナノスーツで被覆した試料からはショウジョウバエの幼虫の ECS の場合と同様に最外層に 50~100nm の薄膜が形成されていることがわかった。つまり、幼虫の ECS を模倣した Tween20 でも、ショウジョウバエの幼虫の ECS が果たした役割と同様に、電子線またはプラズマ照射により物質の放出を抑制できる薄膜が形成され、FE-SEM 観察により生きた状態の微細構造を観察できることがわかったのである。

生物試料を化学固定した後、形をできるだけ維持する乾燥法により試料内部の液体成分を除去したのち、試料表面に金やオスミウムなどでコーティングをして観察していたものが、従来法と呼ばれる実験方法である。この方法で注意深く作業を行っても、体内に水分が多い材料では変形をなかなか防ぐことができず、高倍で観察すると未処理に比べて変形が少ないものの、多くのしわが観察される。ナノスーツ処理をして変形が観察されない生きたままのボウフラを、倍率を上げて観察すると整然とならんだ蛇腹構造が観察された (Takaku et al., 2013)。長い歴史の中で工夫が重ねられてきた従来法だが、その処理に時間がかかるだけでなく、処理によって変形したものを観察している可能性が大きい。ナノスーツ法で観察すれば、数分の処理で変形のほとんどない生きたままの姿を観察することができる。これまで用いてきた動物の種だけでなく、別種にも本技術が適用できるかどうか調べるために、種々の生物にナノスーツ法を適用してみた。昆虫に限らず、電子顕微鏡に入れることのできたサイズのほとんどの動物種で、生命を維持し動的な観察を続けることができ、汎用性があることが確認できた (針山ら, 2012)。このナノスーツ法の発見は、われわれの長年の夢の始まりであるが、本報告を読まれて本ナノスーツ法を実施される方は、予備排気を行ってみるなど、真空度を低下させる際に十二分に安全を確かめて運用していただきたい。本技術を発展させるとともに、多様な観察技術と組み合わせて基礎科学および応用科学に貢献で

きるものにしていきたい。

おわりに

「バイオミメティクス」という語をはじめて提唱したのは、イカの巨大神経の研究を元に、シュミット・トリガーという電気回路を発明した神経生理学者の Otto Schmitt とされる。1950 年代後半にこの造語が生まれる前から人々は生物を規範とした製品開発を始めており、日本でマジックテープと呼ばれる面ファスナー (Velcro) が開発されていた。スイスの George de Mestral がアルプスの登山中に自分の服や犬に張り付いた野草の実を規範としたものであり、1951 年には特許出願がなされた。シュミット・トリガー回路はコンピュータキーボードの重要な仕組みであり、面ファスナーは各所で使われており、両者とも現代のわれわれの生活に欠かせないものとなっている。

今世紀になって、世界的なナノテクノロジーの展開と相まって、ロータス効果やゲッコテープなどの新しい材料が開発され、生物学・博物学と材料科学や工学の緊密な学際融合に基づいた新しい学問体系がヨーロッパを中心に生み出されている (下村, 2010)。たとえば、蓮の葉の超撥水性を規範とした自浄作用をもつペンキ、ヤモリや昆虫の足の接着性に基づく強い接着性をもつがすぐに剥がせて跡が残らないテープ、先に述べた蛾の眼のナノパイル構造がもつ無反射性を工業化したフィルム、モルフォチョウ属の鱗粉が放つ構造色の仕組みを利用した繊維などなど枚挙に暇がない。サメ肌の流体抵抗低減化や撥水構造などを利用した水着が記録更新に一役買ったことも記憶に新しい。日本のバイオミメティクス研究はヨーロッパに比べて周回遅れの感を免れないが、本稿のわれわれの研究は産業化を目指しているものであり、近々に商品化されていく物もあると自負している。バイオミメティクスの国際標準化の動きもあり、日本がこの動きに乗り遅れると産業界としても身動きがとれなくなる危険もある。

このようにバイオミメティクスが注目を浴びている背景には、人々が持続可能な社会を目指す必要があるということによりやく気づいたところにある。産業革命以来、人々が行ってきた技術体系は、石炭や石油の化石資源や原子力をエネルギー源として、鉄やアルミまた希少元素などを原料として、高エネルギーを必要とする高温高压条件やリソグラフィによって製品を作るという産業構造であった。ところが、生物は、自然のエネルギーと素材を使って常温常圧条件で自己組織化によって個体を作るのである。炭素、水素、酸素、リン、窒素、イオウ (CHOPINS) といった汎用元素を材料として、省エネルギー環境下でものづくりをしているのである。低環境負荷である「生物の技術体系」を学び、新たな「人間の技術体系」を構築して、本当の持続可能性のある社会の構築を目指すところにバイオミメ

ティクス研究の価値がある。

「バイオ bio-」という接頭辞は、バイオテクノロジーをはじめバイOMETリクス、バイオスフェア、バイオハザード、バイオセラピー、バイオサイエンス、バイオエネルギー、バイオエタノールなどなど、そのイメージの良さから多用されているので、それぞれの単語がもつ本当の意味に注意する必要があるであろう。現代において、バイオミメティクスの意義は、生物の進化適応の歴史とそれに基づく多様性をもつ生物から、その具体的な生存戦略と自然環境との調和(折り合いのつけ方)の仕方を学び、現代の人間の技術がもつ問題と照らし合わせて解決するための“時代の思考を決める大きな枠組みとしてのパラダイム”自身を変えることを目指すところにある。バイオミメティクスという単語は、その語幹がもつ良いイメージのままである。ただし、ヒトという家畜が住むことができる塀の長さを短く、そして塀に囲まれる面積をいかに狭くできるか、その塀の中での作業が塀の外にいかに関与を与えないようにできるかを、その“抽象化”の作業において注意を払うことが不可欠でもある。電気代の安いクーラーを作ると必要以上に使用する時間を延ばしてしまうエコジレンマといわれる人の行動のように、低環境負荷の産業を興すとエネルギーを浪費して人類が一層のさばってしまうことのないように注意しなくてはならない。

昆虫に注目したバイオミメティクスとしてのエントモミメティクスの理念を具現化するためには、産業革命以来の方法と技術を見直し、持続可能な人工均衡系構築に向けた技術革新をすることにある。今ほど総合的な学問の創出が期待されている時代はないと思う。

引用文献

- Autumn, K., Y. A. Liang, S. T. Hsieh, W. Zesch, W. P. Chan, T. W. Kenny, R. Fearing and R. J. Full (2000) Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature* 405: 681–685.
- Bernhard, C. G. and W. H. A. Miller (1962) A corneal nipple pattern in insect compound eyes. *Acta Physiol. Scand.* 56: 385–386.
- Bernhard, C. G., G. Gemne and J. Saelstroem (1970) Comparative ultrastructure of corneal surface topography in insects with aspects on phylogeneis and function. *Z. Vergl. Physiol.* 67: 1–25.
- Berthier, S. (2007) *Iridescences, The Physical Colors of Insects*. Springer, New York. 160 pp.
- Clapham, P. B. and M. C. Hutley (1973) Reduction of lens reflection by the “Moth Eye” principle. *Nature* 244: 281–282.
- Dewan, R., S. Fischer, V. B. Meyer-Rochow, Y. Oezdemir, S. Hamrazl and D. Knipp (2011) Studying nanostructured nipple arrays of moth eye facets helps to design better thin film solar cells. *Bioinspir. Biomim.* 7: 016003.
- Fox, D. L. (1976) *Animal Biochromes and Structural Colours: Physical, Chemical, Distributional and Physiological Features of Coloured Bodies in the Animal World*. University of California Press, Berkeley. 433 pp.
- Friedrich, J. (2011) Mechanisms of plasma polymerization—Reviewed from a chemical point of view. *Plasma Process. Polym.* 8: 783–802.
- 藤崎憲治・西田律夫・佐久間正幸 (2009) 昆虫科学が拓く未来. 京都大学学術出版会, 京都. 580 pp. [Fujisaki, K., R. Nishida and M. Sakuma (2009) *Entomomimetic Science and Its Perspective*. Kyoto Univ. Press, Kyoto. 580 pp.]
- Gao, X., X. Yan, X. Yao, L. Xu, K. Zhang, J. Zhang, B. Yang and L. Jiang (2007) The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography. *Adv. Mater.* 19: 2213–2217.
- Geist, H. (2005) *The Causes and Progression of Desertification*. Ashgate Publishing Ltd., Aldershot. 258 pp.
- 原 滋郎 (2011) ブロック共重合体を用いた構造色材料とフォトニック結晶. *高分子* 60: 317–318. [Hara, S. (2011) Structural color material and photonic crystal of block copolymer. *Polymers* 60: 317–318.]
- 針山孝彦 (2011) *Homo domesticus*—家畜化したヒト. *PEN* 2(7): 9–14. [Hariyama, T. (2011) *Homo domesticus*—“domestic man” the only species domesticated by itself. *PEN* 2(7): 9–14.]
- Hariyama, T., M. Hironaka, Y. Takaku, H. Horiguchi and D. Stavenga (2005) The leaf beetle, the jewel beetle, and the damselfly; Insects with a multilayered show case. In *Structural Colors in Biological Systems—Principles and Applications* (S. Kinoshita and S. Yoshioka, eds.). Osaka Univ. Press, Osaka, pp. 153–176.
- 針山孝彦・鈴木浩司・高久康春・下村政嗣・石井大佑・太田 勲・村中祥悟 (2012) 生物試料をそのままの姿で観察するための電子顕微鏡による観察方法とそれに用いられる真空下での蒸発抑制用組成物, 走査型電子顕微鏡および透過型電子顕微鏡. 国際出願番号 PCT/JP2012/7298. 平成 24 年 9 月 7 日. [Hariyama, T., K. Suzuki, Y. Takaku, M. Shimomura, D. Ishii, I. Ohta and S. Muranaka (2012) Electron microscopic observation method for observing biological sample in shape as it is and composition for evaporation suppression under vacuum, scanning electron microscope, and transmission electron microscope used in the method. PCT/JP2012/7298]
- 長谷山美紀 (2010) 画像・映像意味理解の現状と検索インタフェース. *電子情報通信学会誌* 93: 764–769. [Haseyama, M. (2010) Recent trends of image and video semantic analysis and retrieval interfaces. *J. IEICE* 93: 764–769.]
- Haseyama, M., T. Ogawa and N. Yagi (2013) A review of video retrieval based on image and video semantic understanding. *ITE Trans. MTA* 1: 2–9.
- Heslop-Harrison, Y. (1970) Scanning electron microscopy of fresh leaves of pinguicula. *Science* 167: 172–174.
- Kinoshita, S. (2005) *Structural Colors in the Realm of Nature*. World Scientific, New Jersey. 352 pp.
- 農林水産省 (2013) 第 2 節我が国の食料自給率の動向. 平成 24 年度食糧・農業・農村白書. http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h24/pdf/z_1_2_2.pdf [Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries Japan (2013) Chapter 2: Efforts for securing stable food supply. In *FY2012 Annual Report on Food Agriculture and Rural Areas in Japan*. http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/

h24/pdf/e_all.pdf]

- Pease, R. F., T. L. Hayes, A. S. Camp and N. M. Amer (1966) Electron microscopy of living insects. *Science* 154: 1185–1186.
- Shimoda, M. and K. Honda (2013) Insect reactions to light and its applications to pest management. *Appl. Entomol. Zool.* 48: 413–421.
- 下村政嗣 (2010) 生物の多様性に学ぶ新世代バイオミメティック材料技術の新潮流. 科学技術動向 110: 9–28. [Shimomura, M. (2010) A new trends in the biomimetic material technology based the understanding the organisms which achieved the biodivesification. *Science and Technology Trends* 110: 9–28.]
- Stavenga, D. G., S. Foletti, G. Palasantzas and K. Arikawa (2005) Light on the moth-eye corneal nipple array of butterflies. *Proc. R. Soc. B* 273: 661–667.
- Stoddart, P. R., P. J. Cadusch, T. M. Boyce, R. M. Erasmus and J. D. Comins (2006) Optical properties of chitin: Surface-enhanced Raman scattering substrates based on antireflection structures on cicada wings. *Nanotechnology* 17: 680–686.
- Sun, M., A. Liang, Y. Zheng, G. S. Watson and J. A. Watson (2011) A study of the anti-reflection efficiency of natural nano-arrays of varying sizes. *Bioinspir. Biomim.* 6: 026003.
- Takaku, Y., H. Suzuki, I. Ohta, D. Ishii, Y. Muranaka, M. Shimomura and T. Hariyama (2013) A thin polymer membrane, nano-suit, enhancing survival across the continuum between air and high vacuum. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 110: 7631–7635.
- Uozu, Y. (2012) Continuous roll imprinting of moth eye antireflection surface using anodic porous alumina. In *Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society* (M. Matsumoto, Y. Umeda, K. Masui and S. Fukushima, eds.). Springer, Dordrecht, pp. 915–917.
- Watanabe, J. and H. Takezoe (2005) Successful preparation of monodomain polymer cholesteric films with beautiful colors like scarab beetle and lasing from its dye-doped films. In *Structural Colors in Biological Systems—Principles and Applications* (S. Kinoshita and S. Yoshioka, eds.). Osaka Univ. Press, Osaka, pp. 329–337.
- Yamanaka, T., S. Hara and T. Hirohata (2011) A narrow band-rejection filter based on block copolymers. *Opt. Express* 19: 24583–24588.
- Yasuda, H. (1981) Glow discharge polymerization. *J. Membr. Sci.* 16: 199–293.
- Yoshida, A., M. Motoyama, A. Kosaku and K. Miyamoto (1997) Antireflective nanoprotruberance array in the transparent wing of a hawkmoth, *Cephanodes hylas*. *Zool. Sci.* 14: 737–741.