

農業へのバイオミメティクス応用

森 直 樹

京都大学大学院農学研究科応用生命科学専攻

1. はじめに

生物は進化と適応の過程において、「人間の技術」とは異なる「生物の技術」とも言うべき技術体系を構築し、さまざまな機能を獲得してきた。例えば、ハスの葉はテフロンを使うことなく超撥水性を実現し、モルフォチョウは金属を用いることなく鮮やかな青色の金属光沢を放つ。いずれも、細胞表面に構築された微細構造（数百 nm から数 mm）の繰り出す機能である。この微細構造は炭素・水素・酸素・窒素等を中心とする有機化合物により構成されており、希少元素はもちろん、シリコン、アルミニウム、鉄などのユビキタス元素も使用されてない。地球資源の有限性が認識される現在、これらの「生物の技術」の重要性が世界的に認識され、「生物模倣」あるいは「バイオミメティクス」の研究が欧米を中心に広がっている。我が国においても、平成 24 年度（2012 年度）から 28 年度（2016 年度）まで新学術領域研究（研究領域提案型）「生物多様性を規範とする革新的技術材料」（代表 下村政嗣 千歳科学技術大学）が展開されてきた。本発表は、この研究グループ内での異分野連携の研究成果、特に細胞表面に構築された微細構造が持つ機能を、新しい植物保護技術へ応用することを目標にした研究成果である。

今まで、安定した食料生産を担う農業の研究領域では、細胞表面に構築された微細構造は注目されてこなかった。その大きな理由は、従来の電子顕微鏡観察では、その微細構造を生きたままの形で観察できなかつたからである。ところが、我々のグループの針山（浜松医科大学）は、生きたままの個体や細胞などを走査型電子顕微鏡（SEM）で観察する方法（ナノスーツ法）を世界で初めて開発した。これを受けて、本研究では、他の生物との関わり合いを最前線で対峙する界面、また生物間の情報伝達を司る化学物質や振動を受容する界面に注目し、その細胞表面に形成される微細構造を解析することが可能となった。これにより、生物間相互作用において微細構造が特異的に示す機能を解析し、農業分野に応用できる植物保護技術を確立することが未来の農学の一つのポイントになると期待される。本研究では、「昆虫が登れないナノパイル構造の活用」、「昆虫が嫌う振動を利用した害虫制御」、「昆虫の食害により毛茸に蓄積する植物二次代謝物質」そして「異なる香りの成分比を区別する昆虫のセンシング機構」を取り上げ、害虫に対する新規な植物保護法の確立と生物機能の工学への応用を目指している。

2. 昆虫が登れないナノパイル構造の活用

昆虫の微細な表面構造として、ナノパイル構造（直径 50 nm、高さ 200-250 nm の釣鐘状の微小突起がおよそ 200 nm の間隔で集積する構造）が知られている。昆虫のナノパイル構造としてはガの複眼がよく知られていることから、モスアイ構造とも呼ばれている。後に、この構造は昆虫の眼だけでなく、オオスカシバやセミの透明な翅から

も報告された。そして、ナノパイル構造には、高い反射軽減効果や高い撥水性があることが報告されている。

今回、エゾハルゼミやアブラゼミの翅表面のナノパイル構造を確認し、その生物学的な機能を解明するとともに、このナノパイル構造が他種の昆虫の攻撃を避ける機能も有することを新たに見出した。

エゾハルゼミの透明な翅の透過率をスペクトル解析すると、300-400 nm の紫外部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確認された。さらにエゾハルゼミの翅に微小液滴を滴下する実験により撥水性の検討を行ったところ、翅膜でその接触角が $161.7 \pm 1.3^\circ$ 、翅脈で $129.5 \pm 1.3^\circ$ という高い撥水性を示した。このナノパイル構造は、透明な翅をもつエゾハルゼミだけでなく、アブラゼミの翅にも確認された。透明な翅は勿論、有色の翅であっても、ナノパイル構造はつや消しの役割を担っており、恐らく天敵などに対して視覚情報量を減少していると推察される。超撥水性に関しては、その自浄作用機能に関与していると推察される。

昆虫の脚先は微細な突起構造や袋状の構造が見られ（図1）、この構造が高い接触性を示す。ナノパイル構造のシート上ではこの構造の実効接触面積が下がり、ファンデルワールス力が低下した結果、昆虫は滑落すると予想された。野外観察では、アブラゼミを攻撃しようとするアミメアリが、アブラゼミの翅によって体上への接近を阻まれることが確認された。そこで、ナノパイル構造を持つシートを作成し、農業害虫種を含む 19 目 34 種以上の節足動物を、角度をつけたシート上で歩かせたところ、ほぼ全てが滑落した（針山ら、2014）。本素材は“構造的な害虫の行動制御基材”と位置付けられ、農業だけでなく害虫の行動制御が必要な幅広い分野での応用が期待される。

2. 昆虫が嫌う振動を利用した害虫制御

昆虫では、捕食者や配偶者の接近を感知するために固体を伝わる振動が用いられる。そこで、草本植物であるカラムシ上に生息するラミーカミキリが生物由来の振動を識別できるかを明らかにするために以下の研究を行った。まず、カラムシの振動特性を解析した。その結果、風による振動は 30Hz 程度の周波数成分が卓越していたが、ラミーカミキリの着地や歩行によって生じる振動は 30Hz 以上の周波数成分も強く、風による振動とは特性が大きく異なっていた（図2）。次に、ラミーカミキリに周波数や振幅の異なる振動を与え、生物由来の振動に対して、フリーズ反応（歩行の停止）や驚愕反応といった特異的な反応をするかどうか検証した。その結果、ラミーカミキリは、他個体の着地や歩行に由来する振動の周波数成分に対して、敏感に反応を示すことが明らかになった（Tsubaki ら、2014）。これらの振動情報の機能を応用することで、害

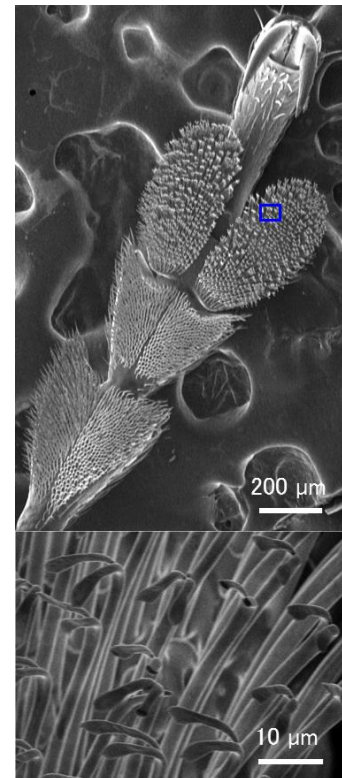


図1 ユリクビナガハムシ前附節の SEM 画像（ナノスーツ法）

虫の行動を制御し、防除につなげることができる。実際に、マツの害虫であるマツノマダラカミキリにおいて、振動によって産卵等の行動が阻害されることを示している。

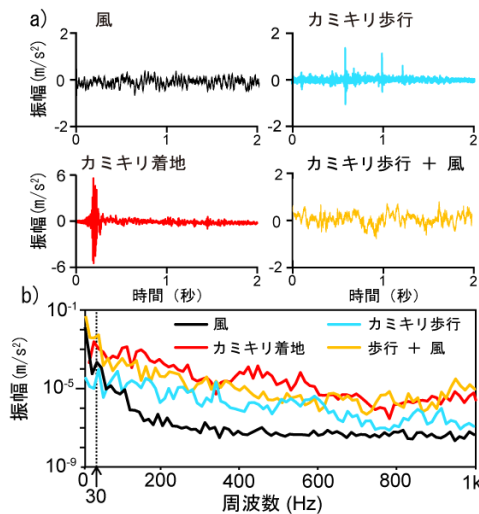


図2 風、ラミーカミキリの着地、ラミーカミキリムシの歩行、およびその風・歩行によってカラムシの葉に生じる振動

3. 昆虫の食害により毛茸に蓄積する植物二次代謝物質

鱗翅目幼虫に食害されたダイズ葉には、daidzein や formononetin 等のイソフラボン類が蓄積することを我々は見出した⁽¹⁾。Daidzein にはハスモンヨトウの成長阻害活性が報告されており⁽²⁾、イソフラボン類の蓄積は適応的と思われる。次に食害部位における両物質の分布を観察するため、iMScope (Shimadzu)による MS イメージングを行ったところ、両化合物は表面の毛茸(トライコム)に誘導されていた(図3)。また、興味深いことに、傷付けた葉に幼虫の吐き出し液を塗布しても、daidzein や formononetin は蓄積された(Nakataら、2016)。本結果は、幼虫の食害を幼虫の吐き出し液でミミックできたことになる。

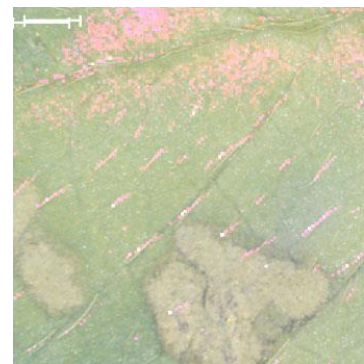


図3 ハスモンヨトウの食害によりダイズ葉の毛茸に蓄積した daidzein のイメージング質量顕微鏡画像

ハスモンヨトウに対して強い抵抗性を示すダイズ(品種 IAC100)の葉の表面には特徴的な毛茸が生えている。IAC100 をハスモンヨトウ幼虫の吐き出し液で処理すると毛茸に Kaempferol 3-O-(2G-glucosylrutinoside)(KGR)が蓄積した。また、毛茸の長さ、生えている角度を 3D 測定レーザー顕微鏡 OLS4100(Shimadzu)で、毛茸の固さを走査型プローブ顕微鏡 SPM-9700(Shimadzu)で測定し、それぞれの値を感受性品種(タマホマレ)と比較した。その結果、IAC100 の毛茸は葉に立って生えていることが顕著な違いであった。毛茸に誘導される化学成分や毛茸の物理性がハスモンヨトウに対する抵抗性とどのような関連があるか、今後も検討をすすめる。

4. 異なる香りの成分比を区別する昆虫のセンシング機構

2成分系フェロモンブレンドを利用するヒメアトスカシバ (*Nokona pernix*) から性フェロモン受容体 (PR) 遺伝子を単離し、アフリカツメガエル卵母細胞を用いて成分選択性を解析した。NpOR1、NpOR3 はそれぞれ EZ 体、ZZ 体に特異的に応答することが

分かった。また、*in situ* ハイブリダイゼーションを用いて、触角における局在様式を明らかにし（図4）、PR の選択性と局在様式（嗅覚受容細胞の割合）に基づき検出モデルを構築した（光野ら、2018）。

4 成分系フェロモンブレンドを利用するキマエホソバ（*Eilema japonica*）から、RNAseqによりオス優勢的に発現するPR候補遺伝子を単離した。RNAseqによる遺伝子発現量解析の結果、触角において各候補遺伝子が異なる割合で発現していることが分かった。現在、卵母細胞を用いた機能解析を進めている。

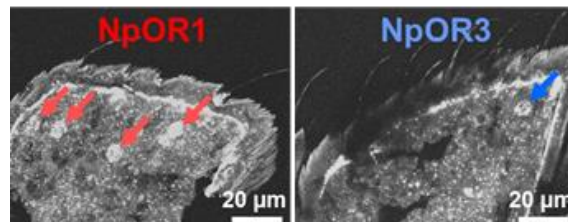


図4 ヒメアトスカシバにおけるPR遺伝子の局在様式

5. おわりに

バイオミメティクスはヨーロッパが発祥である。このバイオミメティクス・ルネッサンスとも呼ばれる新しい研究潮流は、ヨーロッパを中心にナノテクノロジー、材料科学、機械工学、建築学、情報学、環境学、経済学などの多数の分野に普及しつつある。そして、各国において異分野連携のための産官学連携コンソーシアムが組織され、産業化における指針となる国際標準化が近年発効された。

農業現場における微細構造に注目した研究は国内外でも皆無であったが、新学術領域研究「生物多様性を規範とする革新的技術材料」によって、農学におけるバイオミメティクス、特に生物間相互作用に関する成果が多数輩出され。得られた成果をさらに一歩進め、他の生物との関わり合いを最前線で対峙している界面、また生物間の情報伝達を司る化学物質や振動を受容する界面に注目し、その細胞表面に形成される微細構造の解析を進めている。これにより、生物間相互作用において微細構造が特異的に示す機能を理解し、持続的な農業技術、次世代の革新的農業技術として社会実装することが目的である。農業の未来を考えるに当たって、バイオミメティクス技術は大きな可能性を持つと確信している。

引用文献

1. 針山ら “エントモミメティクスと害虫制御”、日本応用動物昆虫学会誌 58: 79-91 (2014)
2. Tsubaki ら “Substrate-borne vibrations induce behavioral responses of a leaf-dwelling cerambycid *Paraglenea fortunei*”, Zool. Sci., 31: 789-794 (2014)
3. Nakata ら “Inducible *de novo* biosynthesis of isoflavonoids in soybean leaves by *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) derived elicitors: tracer techniques aided by high resolution LCMS”, J. Chem. Ecol., 42: 1226-1236 (2016)
4. 光野ら “10章 化学センシング”、CSJ カレントレビュー28 持続可能性社会を拓くバイオミメティクス pp.111-117 (2018)