

アブラムシが持つ表面加工技術 ～植物をあやつり巣内を撥水コーティング～

1. 発表者

植松 圭吾（東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系 助教）

2. 発表のポイント

- ◆植物上で生活するアブラムシが植物由来の微小毛を表面に誘導することで撥水性を持った巣を作り、排泄物を掃除しやすくすることを明らかにした。
- ◆生物が他の生物の表面構造をマイクロなレベルで改変することにより、自らにとって快適な環境を作りあげることが初めて実証した。
- ◆昆虫の環境改変能力の高さを示すとともに、生物が持つ性質を模倣した材料開発にも新たな視点を与える。

3. 発表概要

東京大学大学院総合文化研究科の植松助教と産業技術総合研究所生物プロセス研究部門の深津武馬首席研究員らの研究グループは、昆虫が植物を操作して撥水性を持つ巣を作ることを見つめました。植物上に虫こぶ（注1）と呼ばれる巣を作り、その内部で生活するアブラムシは、自らの排泄物である液状の甘露を虫こぶの外に捨てる必要があります。本研究グループは、ケヤキの葉上に作られたアブラムシの虫こぶの内部を詳細に観察したところ、一部の種は、自らの排泄物である液状の甘露を虫こぶの外に捨てる必要があります。本研究グループは、ケヤキの葉上に作られたアブラムシの虫こぶの内部を詳細に観察したところ、一部の種の虫こぶ表面が、植物由来の微小な毛で覆われていることを発見しました。さらに、虫こぶ表面の撥水効果を調べた結果、この微小な毛とアブラムシが分泌するワックスとが組み合わせることで、きわめて高い撥水性を示すことがわかりました。複数種の虫こぶを比較した結果、この撥水表面構造はアブラムシが誘導することで形成されており、甘露を巣外へ捨てやすくする撥水構造の形成能力が自然選択により進化したことを示唆しています。本研究は、生物が他の生物の表面微細構造を操作し、撥水性をもたらすことを実証した初の例であり、適応進化によって生じた昆虫の環境改変能力の高さを示すだけでなく、生物が持つ性質を模倣した材料の開発についても新たな視点を与えることが期待されます。

4. 発表内容

生物の体表面は、環境への進化的適応の結果として、さまざまな微細構造を示します。中でも、濡れ・汚れを防ぐ撥水構造はバイオミメティクス（注2）の分野で特に注目され、例えば水滴が玉のように転がるハスの葉の表面は微小な細胞突起が作る凹凸構造を持つことで、高い撥水効果をもたらします。この撥水効果は「ロータス効果」として知られており、水をはじく傘や撥水塗料、ヨーグルトの蓋などに応用されています。昆虫においても、アメンボの脚に生えた微小な毛が同様の撥水効果を示します。しかし、これまで研究されてきた撥水構造の例は、生物が自分自身の体表面を改変することで生じるものでした。

今回本研究グループは、昆虫が植物上に作る虫こぶに着目し、昆虫が植物の表面微細構造を操作して、撥水性を誘導することを発見しました。ケヤキの葉裏に虫こぶを形成する社会性アブラムシであるボタンヅルワタムシは、直径約1センチメートルの球状の虫こぶを作り、中には100個体ほどの虫が暮らしています。虫こぶは外敵から身を守るのに適した環境ですが、一方で自らの排泄物である、液状の甘露が中に蓄積してしまうと、アブラムシが溺れてしまったり、病原菌の感染につながる可能性があります。このような悪影響を防ぐため、社会性アブラムシでは甘露を虫こぶ外へ押し出して捨てる掃除行動が知られていました。本研究グループの観察によって、ボタンヅルワタムシにおいても虫こぶにできたスリット状の穴から若い1齢・2齢幼虫が甘露を押し出して捨てる掃除行動を行うことを確認しました。

興味深いことに、虫こぶの内壁表面は、長さ約0.1ミリメートルの植物由来の微小な毛（トライコーム）で覆われていました。そこで、走査型電子顕微鏡でより詳細な観察を行ったところ、内壁表面には1平方ミリメートルあたり約200本、通常の約30倍の微小毛が高密度で生えていることがわかりました。加えて、アブラムシは体表から粉状のワックスを分泌します。このワックスが微小毛を覆うことで、凹凸を持った構造を虫こぶ内壁表面に作り出していました。さらに、虫こぶを持つケヤキの葉の約半分には、微小毛が密集した領域が虫こぶ外にも分布しており、アブラムシによってもたらされる植物の生理的変化が虫こぶ外部まで影響していると考えられます。

本研究グループは、微小毛とワックスが作り出す階層的な凹凸構造が虫こぶ内壁に高い撥水性をもたらすのではと考え、虫こぶ内壁、虫こぶ外にある微小毛密集領域、通常の葉裏という3つの領域の撥水性を、水滴と表面との接触角（注3）を測定することで評価しました。その結果、撥水効果は通常のケヤキ葉裏<微小毛密集領域<虫こぶ内壁という順番となり、虫こぶ内壁の接触角は平均149.5°と、ほぼ超撥水性に近い撥水効果を持つことから、(図2)植物由来の微小毛とアブラムシ由来のワックスが組み合わせることで、より高い撥水効果を示すことがわかりました。

一体どの程度、アブラムシが虫こぶ内の表面構造をコントロールしているのでしょうか？ケヤキの葉に形成される複数種の虫こぶを調べた結果、同じケヤキに作る虫こぶでも種によって表面構造は大きく変わっていました。甘露が蓄積しやすい開放型の虫こぶでは微小毛が高密度で分布し、高い撥水性を示す一方で、完全閉鎖型の虫こぶ内壁は、微小毛が生えておらず、水滴が虫こぶの内部に吸収されました。すなわち、完全閉鎖型の虫こぶからは甘露を外に捨てることが出来ませんが、その代わりに水分を吸収することで排泄物処理を行っていました。これらの結果は、アブラムシがその生活様式に合わせて植物の表面構造を巧みに操作し、快適な巣を構築していることを示しています。

以上の結果から、アブラムシが植物組織を改変させ、自らの排泄物処理に適した巣を作り上げることがわかりました。生物が他の生物の表面微細構造を操作し、高い撥水性をもたらすというのは初の検証例です。微細な構造まで操作された虫こぶはアブラムシが体外に作る“延長された表現型”の顕著な例と言えるでしょう。ヒトがハスの葉をまねることで開発した撥水加工技術を、昆虫であるアブラムシが、生得的に自らの分泌物と植物という既存のものを利用し、同様の効果を得ているということは驚きです。

今後は、調査対象を広げてケヤキ以外の樹木にアブラムシが作る虫こぶも同様の表面微細構造が存在しているのか検証するとともに、植物上で微小毛を誘導する生理メカニズムの解明も大きな課題です。

本研究は、日本学術振興会科学研究費・日本科学協会笹川科学研究助成の支援を受けて行われました。

5. 発表雑誌

雑誌名：英国王立協会「Biology Letters」誌 オンライン版 10月17日掲載

論文タイトル：“Water-repellent plant surface structure induced by gall-forming insects for waste management”（日本語タイトル：虫こぶ形成昆虫によって排泄物処理のために誘導される植物上の表面撥水構造）

著者：Keigo Uematsu*, Mayako Kutsukake, Takema Fukatsu*

DOI 番号：10.1098/rsbl.2018.0470

アブストラクト URL：<http://rsbl.royalsocietypublishing.org/content/14/10/20180470>

6. 問い合わせ先

東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系

助教 植松 圭吾（うえまつ けいご）

Tel: 03-5454-6794

E-mail: cuematsu@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

7. 用語解説

（注1）虫こぶ：昆虫類などの寄生の影響により、植物の芽や葉などの一部がふくれて変形したもので、内部が空洞になっており、そこに暮らす昆虫に食物と住みかを提供する。虫癭（ちゅうえい）やゴール（Gall）と呼ばれることもある。アブラムシにおいては、摂食時に口針から注入される唾液成分によって虫こぶ形成が誘導されると考えられているが、その機構は不明である。

（注2）バイオミメティクス：生物が環境に適応した結果生じた多様な形質を規範として、人間社会における様々な問題の解決に応用すること。

（注3）接触角：表面の濡れ性および撥水性を表す指標。液滴を置いた際、液体表面の接線と固体表面がなす角のうち、液体を含む側の角度で示される。接触角が90°以下だと親水性、90°以上だと撥水性と区分され、150°以上になると超撥水性と呼ぶこともある。

8. 添付資料

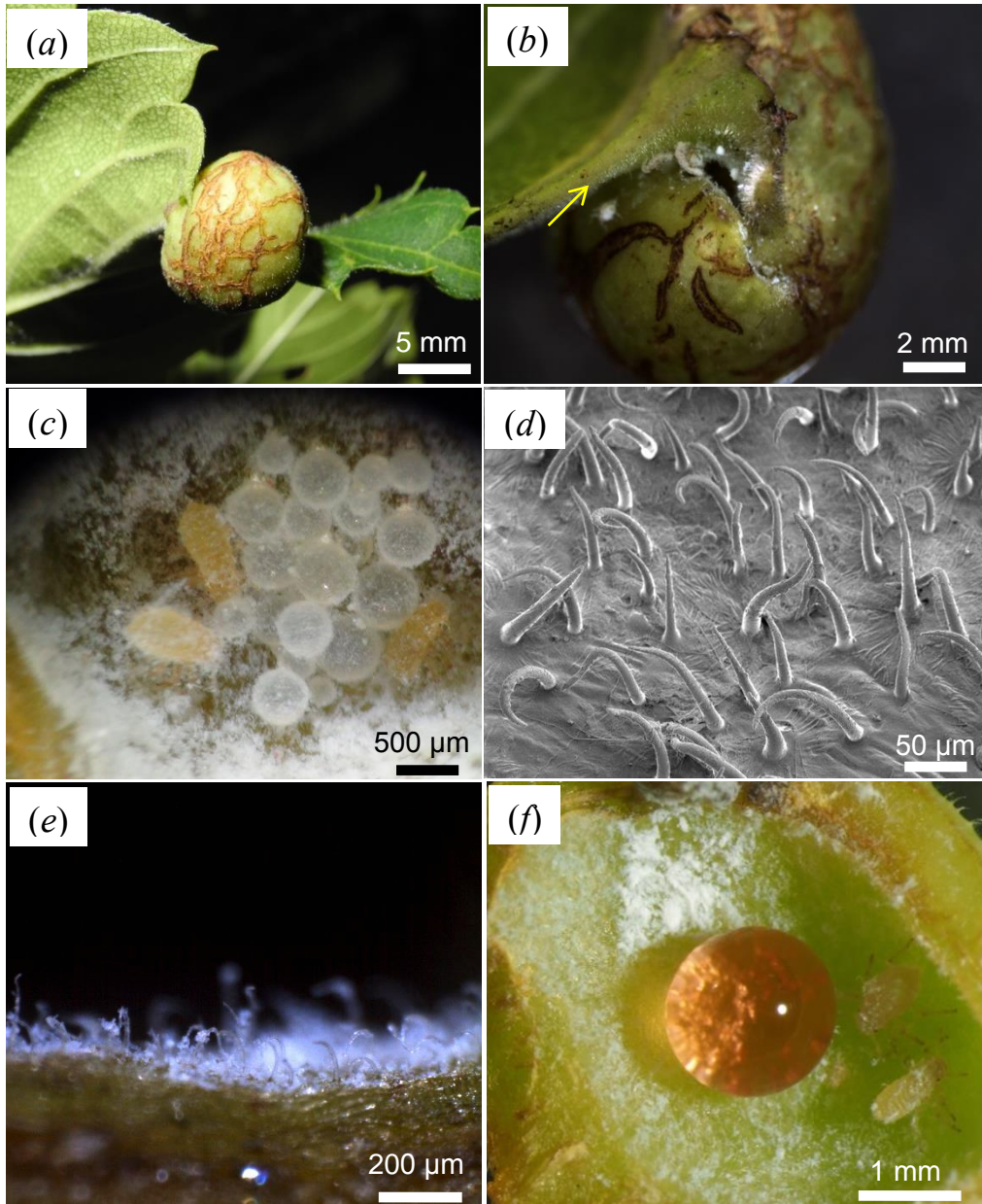


図 1. (a) ボタンヅルワタムシの虫こぶ。直径は約 1 センチメートル。
 (b) 内部のアブラムシは、虫こぶに開いたスリット状の穴（矢印）から甘露を捨てる。
 (c) 甘露を巢外へ押し出すボタンヅルワタムシの幼虫。
 (d) 虫こぶ内壁表面上に生えた植物由来の微小毛。長さ約 0.1 ミリメートル。
 (e) 内壁表面の微小毛にはアブラムシが分泌した白色ワックスが覆いかぶさる。
 (f) 内壁表面は高い撥水性を持つため、水滴を落とすと球状になる。

ケヤキ葉上の表面における 接触角の比較

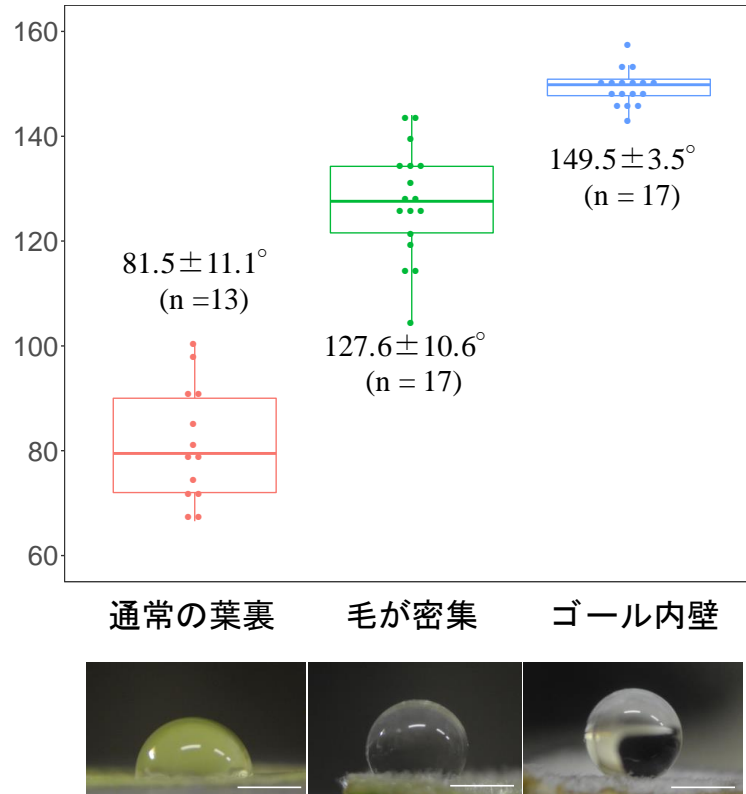


図 2. ケヤキ葉上の異なる表面における撥水効果の比較。グラフ下の写真は、それぞれの表面に水滴を置いた際の代表的なものを示す。虫こぶ内壁は非常に高い撥水性を持つことがわかる。