

日本学術会議 公開シンポジウム

「インセクトワールド-多様な昆虫の世界 II-」

令和3年6月26日（土）

ウェビナー（オンライン）

主催：日本学術会議農学委員会応用昆虫学分科会

日本昆虫科学連合



第11回 日本昆虫科学連合・日本学術会議 公開シンポジウム

「インセクトワールド —多様な昆虫の世界—」

参加費無料

要事前登録

定員500名

今年はオンライン開催です！

2021年6月26日(土)

13:00~16:45

●活動報告

13:00~13:20

日本学術会議農学委員会応用昆虫学分会活動報告 小野 正人 (日本学術会議連携会員、玉川大学 農学部 教授)

13:20~13:30

日本昆虫科学連合活動報告 志賀 向子 (日本昆虫科学連合代表、大阪大学 大学院理学研究科 教授)

●講演

座長：池田 素子 (日本学術会議第二部会員、名古屋大学 大学院生命農学研究科 教授)

13:35~14:05

1) 矢代 敏久 (国立研究開発法人 農研機構植物防疫研究部門 研究員)

「シロアリにおけるオスのいない社会の進化」

14:05~14:35

2) 亀田 恒徳 (国立研究開発法人 農研機構生物機能利用研究部門 ユニット長)

「ミノムシの生態と糸の特徴」

14:35~15:05

3) 上田 昇平 (大阪府立大学 大学院生命環境科学研究科 准教授)

「アリをめぐる生物の種間関係と共進化」

15:05~15:20 休憩

15:20~15:50

4) 杓掛 磨也子 (国立研究開発法人 産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門 研究グループ長)

「社会性アブラムシにおける利他行動の分子基盤と進化」

15:50~16:20

5) 小野 正人 (日本学術会議連携会員、玉川大学 農学部 教授)

「社会性ハチ類と私たちとの関係」

●総合討論

16:20~16:45

座長：池田 素子

詳細・登録は
こちら

ここをクリック

6月1日より
登録受付開始

クリックでジャンプできない場合

ブラウザにURLをご入力ください

[http://www.insect-sciences.jp/
conferences/domestic-conferences/9.html](http://www.insect-sciences.jp/conferences/domestic-conferences/9.html)

問い合わせ先：日本昆虫科学連合事務局 後藤慎介 (大阪市立大学 大学院理学研究科) E-mail: contact@insect-sciences2.sakura.ne.jp

主催

日本学術会議 公開シンポジウム「インセクトワールドー多様な昆虫の世界 IIー」

主催：日本学術会議農学委員会応用昆虫学分科会・日本昆虫科学連合

日時：令和3年6月26日（土）13：00～16：45

開催方法：ウェビナー（オンライン）

- 13：00 応用昆虫学分科会活動報告 2
小野 正人（日本学術会議連携会員、玉川大学大学院農学研究科）
- 13：20 日本昆虫科学連合活動報告 3
志賀 向子（日本昆虫科学連合代表、大阪大学大学院理学研究科）
- 講演
（座長）池田 素子（日本学術会議第二部会員、名古屋大学大学院生命農学研究科）
- 13：35 「シロアリにおけるオスのいない社会の進化」 4
矢代 敏久（国立研究開発法人 農研機構植物防疫研究部門）
- 14：05 「ミノムシの生態と糸の特徴」 5
亀田 恒徳（国立研究開発法人 農研機構生物機能利用研究部門）
- 14：35 「アリをめぐる生物の種間関係と共進化」 7
上田 昇平（大阪府立大学大学院生命環境科学研究科）
- 15：05－15：20 （ 休憩 ）
- 15：20 「社会性アブラムシにおける利他行動の分子基盤と進化」 8
沓掛 磨也子（国立研究開発法人 産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門）
- 15：50 「社会性ハチ類と私たちとの関係」 10
小野 正人（日本学術会議連携会員、玉川大学大学院農学研究科）
- 16：20 総合討論
- 16：45 閉会

日本学術会議 農学委員会 応用昆虫学分科会の活動報告

小野 正人（日本学術会議連携会員、玉川大学農学部）

日本学術会議は、科学が文化国家の基礎であるという確信の下、行政、産業及び国民生活に科学を反映、浸透させることを目的として設立された機関とされている。職務としては、「科学に関する重要事項を審議し、その実現を図ること。」「科学に関する研究の連絡を図り、その能率を向上させること。」の2つが挙げられている。それらの職務を担う日本学術会議は、日本の人文・社会科学（第1部）、生命科学（第2部）、理学・工学（第3部）に属する約87万人の科学者を内外に代表する機関であり、210名（定員）の会員と約2000名の連携会員で構成されている。それらのメンバーは30の「分野別委員会」に分かれて活動しているが、応用昆虫学・昆虫科学に関する審議は、農学委員会の常設分科会の1つである「応用昆虫学分科会」においてなされている。第25期における分科会の構成メンバーは、若手中堅の研究者を中心に男女7名ずつの計14名となっている。

本分科会は、第24期に提言として「衛生害虫による被害の抑制をめざす衛生動物学の教育研究の強化」を食料科学委員会の獣医学分科会および基礎医学委員会の病原体学分科会と共同で発出した。近年、日本国内でもCOVID-19パンデミックの対策が火急の課題となっているが、グローバル化・ボーダーレス化の中で人と物資が地球上を短時間で大量に行き来し、さらに地球温暖化の進行の中で、デング熱の感染、マダニで媒介される重症熱性血小板減少症候群（SFTS）、スズメバチなどの刺症の多発、ジカ熱、マラリアなど種々の昆虫媒介感染症の流行も続いており、昆虫学関連で取り扱われる感染症のリスクも格段に高まっている。その一方で、専門家は極端に減少している現状があり、これらの問題点を踏まえて、次なる取り組みとしてわが国における専門家養成の基盤の現状を把握するために「高等教育機関における昆虫学教育のあり方」について提言あるいは報告などの形での発出の検討を具体的に進める計画である。

分科会の活動もCOVID-19禍の中で大きな制限を受けたのは否めない。その中でも第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン2020）が公表され（2020年1月30日付）、当分科会とも直接・間接的に関連する「重点大型研究計画」と「学術大型研究計画」として、以下に記すそれぞれ2題ずつが選ばれたのは、明るいニュースとなった。

1. 重点大型研究計画

- (1) カイコをモデルとした昆虫デザイン解析拠点と新産業創生ネットワーク形成
- (2) 国立沖縄自然史博物館の設立 - 東・東南アジアの自然の解明とビッグデータ自然史科学の実現による人類の持続可能性への貢献 -

2. 学術大型研究計画

- (1) わが国の産業・社会の基盤資源としての昆虫類の生物情報データベースおよび大規模標本の整備
- (2) 百寿社会を支える植物とアグリイノベーションの創出

もう一点特筆できる事として、当分科会が設立に深く関わった日本昆虫科学連合の基に置かれた国際昆虫学会議（International Congress of Entomology: ICE）の第27回大会日本招致委員会（委員長：沼田英治 分科会委員）の活動により、2024年8月に京都開催（ICE2024, KYOTO）が決定、連合の中に組織委員会（委員長：小野正人 分科会委員長）が設置され活動が開始されたことが挙げられる。日本学術会議の当分科会は、昆虫学関連の17の学協会が加盟する連合とともに「ICE2024, KYOTO」開催に向けての協力体制を組むことになった。

以上の諸活動は、昆虫という地球上でもっとも多様化・繁栄し、人類とも密接な関係を持ち続けてきた生物を通じた、国際的な協力連携の強化、衛生環境と健康の維持、食料生産の安定化、男女が等しく参画した研究・教育活動の推進などに対して、わが国が責任を果たすことにつながるものと期待される。2050年問題の課題を鑑みた際に、少子高齢化が急速に進む日本で想い描くSociety 5.0は、知識基盤社会の上形成されると思われる。昆虫学関連の諸活動は、国連の掲げる「持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals: SDGs）」にも寄り添うものと思料され、当分科会からの情報発出は意義あるものと考えられる。

日本昆虫科学連合活動報告

志賀 向子（日本昆虫科学連合代表、大阪大学大学院理学研究科）

日本昆虫科学連合は2010年7月に発足した昆虫科学関連の学協会の連合体で、現在、17団体が加盟しています。本連合は日本学術会議応用昆虫学分科会との連携を図りつつ、日本における昆虫科学の発展と社会的貢献を目的に活動しています。連合の発足以来、その活動の幅を徐々に広げて参りました。

本連合がこれまで継続的に実施してきた活動として、年一回の公開シンポジウムの開催と一般の方への広報活動などがあります。これらは、昆虫科学関連の様々な研究を多様な切り口で紹介することで、加盟学協会間の相互理解と交流を深めるとともに、一般の方々に昆虫科学への理解を深めていただくことを目的として実施しているものです。ここでは、これらと国際対応の活動を中心に報告させていただきます。

1) 公開シンポジウムにつきましては、連続シリーズとして2017、2018年に昆虫がヒトに与える恵みに焦点をあてた「昆虫の恵み -その多面性-」、そして2019年は昆虫の多様な視点に焦点をあてた「インセクトワールド」というタイトルで皆様に昆虫の世界を紹介し、好評をいただきました。昨年計画していたインセクトワールド第2回はコロナ禍のため、本年に持ち越された次第です。今年は、講演者の皆様にご快諾いただき、オンラインとして開催いたします。学術会議・連合主催の公開シンポジウムの初のオンライン開催となりますが、これより全国の皆様からご参加いただける機会となりました。ぜひお楽しみください。また、来年のシンポジウムは現在計画中でありますが、これまでに引き続き、一般の皆様にいっそう昆虫科学の大切さ、おもしろさを身近に感じていただけるようなシンポジウムを開催したいと考えています。

2) 次に昆虫科学の普及活動についてです。これまで本連合はシンポジウムにおける講演内容をわかりやすくとりまとめた本の出版を進めて参りました。しかしながら、近年は紙媒体での出版がこれまで以上難しい状況です。これからは、冊子体での発信についても可能性は探りつつも、シンポジウムの内容等、本連合からの情報発信にウェブサイトを最大限活用したいと考えています。今期、連合ウェブサイトを更新いたしました。これをプラットフォームとし、本連合並びに17学協会の活動をより見える形にするとともに、加盟学協会間の連携、情報の共有と発信の強化に努めて参ります。

3) 最後に国際対応について報告させていただきます。昆虫科学の最大規模の学会として国際昆虫学会議が4年に1度開催されてきました。その第27回（2024年）を日本で開催すべく、これまで連合の元「第27回国際昆虫学会議（ICE2024）招致委員会」において招致活動を行ってきました。そして、嬉しいことに昨年8月のオンラインでの招致プレゼンを経て、ICE2024を京都で開催することが正式に決定いたしました。これを受け、連合に第27回国際昆虫学会議組織委員会（小野正人委員長）を11月に設置し、招致活動から準備活動に移行いたしました。国際昆虫学会議は、日本では1980年京都で開催されました。以来、2024年は二度目の開催となります。当時、世界の昆虫科学の進展を目の当たりにした日本の若き研究者たちが、この40年の昆虫学を躍進させました。ICE2024においても多くの学生、若き研究者を惹きつけ、そして子供たちをも巻き込み、未来の昆虫科学へつながる会議にしたいと考えます。そのために本連合は各学協会と力を合わせ、第27回国際昆虫学会議の成功に向けて準備を進めて参ります。

最後になりましたが、本連合は、昆虫科学に関連するそれぞれの学協会の活動のもとに成り立っています。本連合と昆虫科学に関する各学協会の連携、相互作用により、日本の昆虫科学の一層の発展に努めて参ります。今後ともどうかご指導、ご支援をよろしくお願いいたします。

シロアリにおけるオスのいない社会の進化

矢代 敏久（農研機構）

人間を含めた多くの動物の社会は、オスとメスの両性によって営まれている。昆虫などの様々な生物では、メスが単独で子を作る単為生殖の能力を進化させることが可能である。では、両性で社会を営む生物のメスが単為生殖能力を獲得できる場合でも、オスは社会が存続するために不可欠な存在なのだろうか？

シロアリは、コロニーと呼ばれる社会を形成し、女王、王、働きアリ、兵アリといった役割分担をして共同生活を行う昆虫である。シロアリのコロニーは典型的な両性共存社会であり、女王や王だけでなく、働きアリや兵アリにもオスの個体とメスの個体が存在する。これまで、シロアリの社会では両性が共存することが絶対的なルールだと考えられてきたが、講演者らは、日本固有のシロアリであるナカジマシロアリについて、日本各地の個体群からコロニーを採集し、構成メンバーの性別や女王の受精囊（王アリから受け取った精子を蓄えておく器官）内の精子の保有状況などを調べたところ、四国と九州から採集されたコロニーにはメスしかおらず、メスだけで社会が営まれていることが判明した。一方で、本州、奄美大島、沖縄本島、小笠原諸島から採集されたコロニーは通常のシロアリと同様にオスとメスを含んでおり、両性で社会が営まれていることが明らかになった。分子系統解析の結果、本来は両性で社会を営んでいたナカジマシロアリにおいて、オスの喪失というイベントが生じ、現在までメスだけで社会が維持されていることが示された。シロアリの社会において、これまでの研究からは有性生殖やオスの存在は重要だと考えられるものの、今回の発見によって、有性生殖やオスの存在はシロアリの社会にとって必ずしも必要ではないことが明らかになった。

また、昆虫の単為生殖は細胞内共生細菌による宿主操作の結果として、宿主側の都合とは関係なく引き起こされることが知られているが、ナカジマシロアリの単為生殖個体群が感染している細菌のDNAメタバーコーディング解析を行った結果、単為生殖を引き起こすことが報告されている細胞内共生細菌は検出されなかった。したがって、シロアリ側の都合として、メスだけの単為生殖個体群が進化したと考えられる。さらに、ゲノム全体を網羅するSNP（一塩基多型）解析を行ったところ、ナカジマシロアリが個体群レベルでオスを失った進化的背景が解明されつつあるので、紹介したい。

ナカジマシロアリの“オスのいない社会”の発見は、両性共存社会からオスが完全に喪失した後も社会が存続している初めての例であり、社会におけるオスの存在意義について考える上で重要な意味を持つ。



図 メスしかいない単為生殖個体群のナカジマシロアリのコロニー内の様子。

参考文献

1. Toshihisa Yashiro, Nathan Lo, Kazuya Kobayashi, Tomonari Nozaki, Taro Fuchikawa, Nobuaki Mizumoto, Yusuke Namba, Kenji Matsuura (2018) Loss of males from mixed -sex societies in termites. *BMC Biology*, 16: 96.
2. Toshihisa Yashiro, Nathan Lo (2019) Comparative screening of endosymbiotic bacteria associated with the asexual and sexual lineages of the termite *Glyptotermes nakajimai*. *Communicative & Interactive Biology*, 12(1): 55–58.

ミノムシの糸の特徴と産業素材としての利用

亀田恒徳（農研機構）

バイオエコノミーの重要性が増す中、昆虫科学に携わる我々は、今、何をすべきなのだろうか。バイオエコノミーとは、生物が作り出す資源やバイオテクノロジーを活用して、長期的に持続可能な成長ができる社会を目指す概念である。成長を持続可能にするには、環境破壊、気候変動、食糧問題といった地球規模の課題が解決済みの社会にする必要がある。そのためには、化石燃料をはじめとする天然資源に大きく依存する経済から脱却して、バイオを基盤とした経済への転換が求められる。バイオテクノロジーを駆使して、生物に資源を作らせ、その資源だけを使っていけば、資源の限界を心配することも、自然破壊を心配することもなくなる。

バイオテクノロジーの進化に伴い、バイオエコノミーにおける、バイオの適用可能領域が、量と質の両面で広がっている。以前は、バイオ→自然→健康ということで、健康分野がバイオ市場の大半を占めていたようだが、近年では、工業分野にまでも及ぶようになってきた。OECD 推計による 2030 年のバイオエコノミーの市場規模は 180 兆円に達し、その約 40%を工業分野が占めるとも言われている。石油由来のプラスチックを生物が作るバイオプラスチック。さらには、バイオでないと作れないような、これまでにない性質の素材を作る方向へと広がっている。

こうした状況の中で、21 世紀最大の未利用資源とも言われている「昆虫」も、バイオエコノミーの中で果たす役割が、今後ますます大きくなっていくだろう。すでに、カイコは、ずっと前からバイオエコノミーに貢献してきた。数千年前に人間がカイコのシルクを利用しようと思いついて以来、それぞれの時代のバイオテクノロジーを駆使して、生活に必要な繊維素材を生産してきた。これまでは、光沢感や風合いを備えた高級感ある繊維として重宝されてきたシルクが、今後は、生物の営みによる巧みな繊維化プロセスで作られる繊維、または、使い終わった後に分解されて土に戻る繊維として、環境低負荷な繊維素材として、シルクはさらに注目を浴びながら、持続可能な社会に向けたバイオエコノミーで貢献していくだろう。さらに、生物でないと作れないような、これまでにない繊維も、カイコが作るシルクに期待されている。遺伝子組換え技術、ゲノム編集技術といった、新たなバイオテクノロジーとの融合が、カイコでないと作れない、これまでにない繊維の実現を可能にしつつある。

ところで、シルクを作りバイオエコノミーに貢献できるのはカイコだけなのか？地球上の動物群で圧倒的に種類が多いのが昆虫であり、その多様な昆虫の中には、カイコのように繭を作ったり、巣を作ったり、移動手段に使ったりと、目的は異なっても、カイコのシルクと同様に、タンパク質から成る糸を吐糸するものも多数いる。シルクは、かつては、“カイコが繭を作るために吐く絹”という意味で使われていたが、その後、ヤママユガ、ギョウレツムシ、カレハガなどの幼虫が作る、実用的な糸は、カイコに限らずシルクと呼ばれるようになった。一方で、人間にとって実用的でないという理由だけから、シルクと認識されていない昆虫の糸が地球上には沢山存在する。実用的でないとは、素性がわからなかったり（未知）、素性はわかっているが使い方がわからなかったり（未利用）といった場合がほとんどであろう。しかし、これまで「実用的ではない」と考えられたシルクの中に、従来のシルクにはない素晴らしい機能や物性を持つものがあるかもしれない。

こうした背景のもと、我々は、ミノムシ（鱗翅目に属するミノガ科の蛾の幼虫）に注目している。ミノムシを知らない日本人はいないだろう。また、ミノムシが糸を出す昆虫であることも、多くの方はご存じだろう。しかし、ミノムシの糸が、どんな性質の糸であるかは、ほとんど解明されていなく（未知）、また、どんな利用ができるのかも、ほとんど検討されていない（未利用）。このような未知・未利用シルクのミノムシの糸に対して、未知を既知に変え、未利用を有用に変え、そして、ミノムシを家畜化する、そんな試みを 5 年ほど前から始めている。本講演では、これまでに明らかになったミノムシの糸の特徴と実用素材としての利用の可能性について紹介する。

ミノムシはシルクの糸を操ることでぶら下がったり、蓑を作ったりするがそれだけではない。ミノムシは移動の際に絶えず糸を吐いており、はしご状に吐糸した足場に胸脚を引っ掛けながら移動する。たとえ水平面であっても糸がないと移動できない。腹脚と尾脚は蓑を支えるために蓑内に納めてしまうため、残る胸脚のみで移動する必要から糸を足場にする。このミノムシの習性に我々はミノムシシルクの産業利用実現の可能性を感じた。ミノムシは移動の際に絶えず糸を吐糸し、しかも一連の移動において作られる糸は連続的な一本の糸から成る（図 1）。このミノムシならではの習性を制御することで百メ

ートルを超える長い糸を安定的に採糸できる。カイコの場合には一生に一度だけ作る繭から1 kmを超える1本の長い糸を採るのに対して、ミノムシの場合には幼虫の間に何度も歩かせて糸を採る。しかもミノムシの幼虫期間は数ヶ月におよび比較的長い。ミノムシの糸を大量に生産するには継代飼育が必要だ。ミノムシは草食性で共食いしないので集団飼育が可能であり、餌葉を限定しない広食性、さらに一匹のメスが1000~3000個もの大量の卵を産む。こうした特性は継代飼育にとっては追い風になる。採糸と量産の技術を整えても糸に素材としての魅力がなければ実用されない。ミノムシのシルクは糸として優れた力学物性と、その物性を引き出すための整然とした階層構造を備えていることがわかった。ミノムシシルクは次世代構造材料の候補となり得る高いポテンシャルを有している。

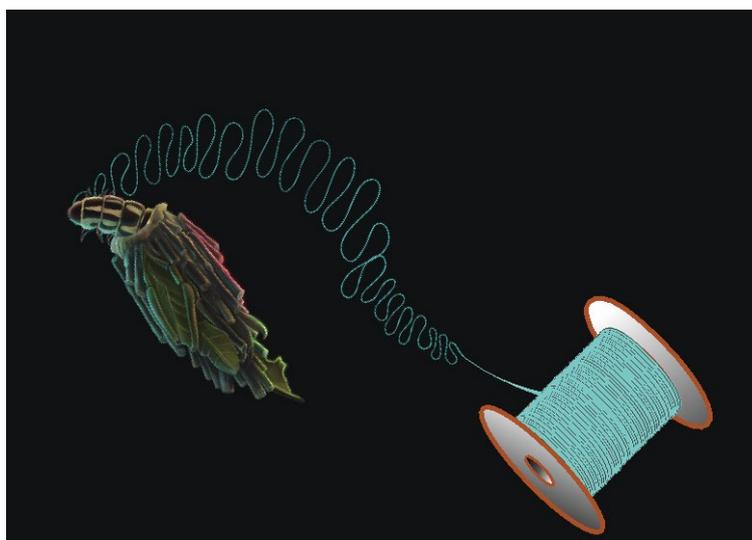


図1 ミノムシシルクの糸の生産イメージ

ミノムシを歩かせるほど1本の糸を長く採れる

アリをめぐる生物の種間関係と共進化

上田 昇平 (大阪府立大学大学院・生命環境科学研究科)

生物多様性の創出機構を考えるうえで、共進化を介した相互多様化は重要な課題である。しかし、一般に生物間の種間関係は多対多であり、寄主転換が起りやすく、個々の関係が形成されてきた過程を検証することは容易ではない。演者は、この課題へのアプローチとして、一対一の種間関係が成立し、共進化のモデル系として世界が注目する「アリ植物をめぐる絶対共生系」と「ゴマシジミとクシケアリの絶対寄生系」を材料として、種特異性の進化に関する研究をおこない、生物多様性の創出機構としての相互多様化の実態を明らかにした。

植物体内を巣場所としてアリ類に提供する植物をアリ植物と呼ぶ。アリ植物は世界中の熱帯地域に分布しており、中南米のセクロピア属やアカシア属、東南アジアのオオバギ属やアリノスシダ属など、さまざまな分類群で合計 500 種程度が知られている。アリ植物には、巣場所を提供する代わりに、アリをボディガードとして雇って、外敵を撃退させているものがある。

熱帯アジアに分布するアリ植物オオバギ属は、シリアゲアリ属の特定の種群に中空の幹内を巣場所として提供しており (図 1)、その巣内にはヒラタカタカイガラムシ属が共生している。植物は、生息場所だけではなく、托葉や新葉から次々に分泌される栄養体や、カイガラムシが分泌する甘露などの餌資源もアリに与える。それらの見返りとして、アリは食葉昆虫を撃退し、時には植物に絡み付くつる植物をかじり切ることもある。アリ植物は食葉昆虫からの防衛をアリに完全に依存しており、両者の関係は「絶対共生」といえる。

演者らは、アリ植物オオバギ属とその幹内に共生するアリとカイガラムシ 3 者の分子系統樹を比較し、東南アジア熱帯雨林が形成された中生代以降、3 者が種特異的な関係を維持し、相互に多様化してきたことを明らかにした。

シジミチョウ科では、クロシジミ、ゴマシジミ、キマダラルリツバメなど、幼虫期をアリの巣内で、アリの資源を搾取しながら発育するという性質が独立に進化している。アジア・ヨーロッパに分布するゴマシジミ属の若齢幼虫は特定の寄主植物の花序を食べるが、終齢幼虫になると寄主植物を降りて、寄主であるクシケアリ属の特定の種群を化学擬態で騙し、巣内に侵入する。アリの巣内に侵入した終齢幼虫は肉食に変化し、アリの幼虫や蛹を食べはじめる (図 2)。チョウ幼虫が蛹になるまでに、アリは巣内の幼虫を殆ど食べ尽くされるという深刻な被害を受けるが、この凶悪な寄生者を巣中に運び込んでしまう。

従来の形態分類を用いた研究において、日本産ゴマシジミの寄主アリはシワクシケアリとされてきたが、演者らは、単一種とされるシワクシケアリが形態的な差異が見いだせない 5 種に分かれること、および、ゴマシジミがそれらの 5 種の中でもハラクシケアリの巣内のみから発見されることを明らかにした。そして、絶滅が最も危惧されるゴマシジミ発生地では、寄主アリ種の減少がゴマシジミ個体群の絶滅要因となる可能性を示した。



図 1. オオバギ属の幹内に共生するシリアゲアリ属のコロニー (Ueda et al. 2015).



図 2. クシケアリ属の幼虫を捕食するゴマシジミ属の幼虫 (Ueda et al. 2016).

社会性アブラムシにおける利他行動の分子基盤と進化

沓掛 磨也子（産業技術総合研究所）

社会性をもつアブラムシは、青木重幸博士がボタンヅルワタムシにおいて初めて真社会性を発見した1977年以来、これまでにアジア地域を中心に80種以上で報告されている。アブラムシは地球上に約5,000種存在することから、社会性種は全体のわずか2%弱に過ぎないが、日本には多くの社会性アブラムシが生息しており、様々な調査や研究が行われてきた。社会性アブラムシの大きな特徴は「兵隊」という利他的階級の存在である。兵隊は、自分の繁殖や生存を犠牲にしてコロニー防衛を担う個体であり、その名の通り、外敵に対して激しく攻撃して仲間を守るほか、一部の種においては、巣の清掃や修復といった労働にも従事することが知られている。

私はこれまで20年以上にわたり、この社会性アブラムシを対象として、兵隊の階級分化や社会行動に関わる分子機構およびその進化に関する研究に取り組んできた。アブラムシは一年のほとんどを単為生殖と呼ばれる繁殖様式で増殖するため、兵隊も普通個体も同じ母虫の単為生殖により生まれる遺伝的同一クローンである。それにもかかわらず、両者の形態、妊性、行動は大きく異なっている。このような形質の違いは、同一ゲノムから生じる遺伝子発現パターン（遺伝子の使われ方）の違いによって生じることは明らかだが、そのしくみについては、あまり多くの知見は得られていない。本講演では、これまでの研究から明らかになった兵隊の社会行動に関わる分子基盤について、2つの話題を紹介したい。

ハクウンボクハナフシアブラムシ *Tuberaphis styraci* は、2齢幼虫で兵隊が出現する真社会性アブラムシである。本種の兵隊分化に関わる遺伝子を同定するため、cDNA サブトラクション法を用いて、兵隊特異的に発現する遺伝子を網羅的に探索した。その結果、カテプシンBというプロテアーゼ（タンパク質分解酵素）遺伝子が、兵隊特異的かつ大量に発現していることを発見した。このカテプシンBプロテアーゼは、兵隊の消化管で発現し、攻撃時に口器から吐き出されて敵の体内に注入されることがわかった。カテプシンBプロテアーゼの組換えタンパク質を合成し、ガ幼虫に人為的に注射したところ、幼虫は死亡した。これらの結果から、このカテプシンBプロテアーゼは、外敵に対する攻撃毒の主要成分であり、兵隊の社会行動において重要な役割を果たす実行部隊分子として機能していることが明らかになった。

次に、虫こぶ修復という兵隊の社会行動について紹介する。虫こぶとは、植物上にできた特殊な構造物で、虫こぶ形成者の巣であり食物供給源である。モンゼンイスアブラムシ *Nipponaphis monzeni* は、イスノキという常緑樹に完全閉鎖型の虫こぶを形成する社会性アブラムシである。本種の兵隊は、外敵昆虫が虫こぶを攻撃して破壊すると、きわめて興味深い方法で自分たちの巣を修復する。虫こぶに穴があくと、兵隊はまずその周辺にすばやく集合し、体の尾端部から大量の体液を放出する。そしてすぐさま分泌体液を脚でかき混ぜ、左官職人のごとく器用に穴を埋めていく。すると、分泌体液は次第に粘性を増し、固まっていくのである。では、なぜ分泌体液は混ざると固まるのだろうか？さまざまな分子生物学的解析の結果から、兵隊の分泌体液には、昆虫の傷修復機構に関わる酵素や基質が大量に蓄積されていることが明らかになった。兵隊は、本来自分たちの体表にできた傷を修復するためのしくみを増強し、これを社会行動に転用することにより、巣にできた穴を塞いでいたのである。つまり、兵隊の分泌体液は、凝固性を高めた「血液」であり、巣に「かさぶた」を形成することで応急的に修復していることが明らかになった。虫こぶの傷を兵隊の分泌体液で修復するという巧妙かつ高度な社会行動が、アブラムシにおいてどのように進化してきたのかという点についてもお話する。



- (左) 外敵昆虫を攻撃するハクウンボクハナフシアブラムシの兵隊。敵の体に口針を突き刺し、カテプシンBプロテアーゼを攻撃毒として注入する。
- (中央) 虫こぶを修復するモンゼンイスアブラムシの兵隊。虫こぶに穴があくと体の尾部から白い体液を大量に分泌する。分泌体液は次第に凝固して、虫こぶの傷は完全に修復される。
- (右) モンゼンイスアブラムシの虫こぶ。虫こぶ中央に分泌体液で修復された跡と、虫こぶの外に取り残された兵隊たちが見える。

社会性ハチ類と私たちとの関係

小野 正人（日本学術会議連携会員、玉川大学農学部）

時は紀元前約 6000 年、場所はスペインのバレンシア地方の洞窟でミツバチの巣からハチミツを収穫している人の様子を壁画にした人がいた。その人が何を意図して未来人にハニーハンティングの様子を遺したのか知る術はない。しかし、人類にとって手足を使って活動するだけではなく、巨大な脳を駆使してじっくり思考する際にも相当のエネルギー消費は必須であり、甘い糖分への要求は極めて高かったのではないかと容易に想像できる。現代では様々な食品から糖分の補給が叶うが、当時はチョコレートも金平糖もなかったのである。ハチミツはミツバチによって集められた植物の花蜜が、働き蜂の分泌する酵素による化学的作用や濃縮行動による物理的作用により、抗菌性が高く、貯食性の優れた栄養資源に変換されたものである。花蜜中に含まれる糖分は光合成産物であり、植物が二酸化炭素（分子量：44）と水（分子量：18）という低分子の物質からブドウ糖（分子量：180）という高分子化合物に太陽の光エネルギーを分子の結合エネルギーに転換して貯蔵したものである。温帯産に生息するセイヨウミツバチの群は、長い冬が来る前に 20 kg 以上のハチミツを巣に貯めると言われているが、それはその巣のワーカーが数えきれないほどの花々から零細資源として花蜜を集めた結果である。その過程で花粉が運ばれ授粉されるのであるから、結実の指標でもある。植物の実は農作物を栽培する人類にとっては、かけがえのない収穫物であり、森に生活する野生の鳥類や哺乳類などにとっては生存に不可欠な食料生産の担い手である。このようにベジタリアンの彼らの働きはハチミツの生産だけではなく、ポリネーターとして送粉を通じて生態系そのものを支えるキーストーンとして機能している。社会性ハチ類には肉食性のスズメバチ属やアシナガバチ属も含まれる。彼らは、毎年夏から秋にかけて人を刺す衛生害虫として「悪名」が高い。しかし、彼らが巣の中で育てられている多数の幼虫の餌として日々ハンティングしている膨大な量の昆虫類の多くは、森林や農作物に加害する害虫であり、捕食者としてやはり生態系のバランスを保持する重要な役割を演じているのである。

本講演では、以上のように私たちと密接な関係にあり、大きなコロニーと呼ばれる家族を生存の単位として生活している社会性ハチ類にみられる興味深い生態について紹介したい。

1. 社会性ハチ類の特徴

社会性ハチ類を含むハチ目は、昆虫綱の中でも 13 万種以上を有する大きなグループである。しかし、その中で高度な社会生活を営むものは、ごく一握りである。彼らは、一般的に女王とその娘である多数のワーカーからなる血縁集団（コロニー）を生活の基本的な単位としている。女王とワーカーはともに雌性で、遺伝的には全く同一な受精卵から発生し、孵化後の栄養条件などの環境要因で分化する表現型多形の良例である。ハチ類のコロニー内には、この 2 種類の雌性カーストの他に、繁殖期に無精卵から発生する雄も含まれる（図1）つまり、雌性（女王とワーカー）が受精卵（2 倍体 $2n$ ）から発生するため父親がおらず母方由来の 1 組のゲノムをもつ 1 倍体という性決定様式をもつ。各々の役割として、女王は主に産卵を、ワーカーは巣造り、餌集め、防衛など多様な仕事をする。一方、雄の仕事は、新女王との交尾のみと言ってよく、巣の運営自体には、ほとんど関わりをもたないという顕著な特徴がある。



図1. セイヨウミツバチのコロニー構成

上段：女王（左）とワーカー（右）

受精卵（2 倍体： $2n$ ）から発生する遺伝的には同一の雌性カーストである。

下段：雄

無精卵（1 倍体： n ）から発生する。

じつはこの半倍数性という性決定様式が、雌であるにも関わらず利他的な労働に専念し原則的に繁殖に関わらないワーカーの進化に深く関わったと考えられている。一言で説明すると、母と娘間の遺伝子の共有率は 0.5 なのに対し、1 倍体の父親からの遺伝子を必ず共有する姉妹間では平均 0.75 となるので、あるワーカーにとって巣を離れて仔を生むより、とどまって妹の世話をした方が自らの遺伝子のコピーを 0.25 多く残すことになり、利他行動への自然選択の力が掛かりやすい状況にあるというものである。この説明は、単女王制でその女王が 1 頭の雄と交尾しているというシンプルな状況で成り立つ。一方、自然界には多女王制や複数の雄と女王が交尾する例も多く報告されているが、女王の圧倒的な繁殖力の他、天敵の強い捕食圧、予測不能の天災など自然環境へのしなやかな適応として、与えられた制限要因の中において、安定的に少しでも多くの遺伝子が残りうる代替戦略も選択されているようである。

次に社会性ハチ類の多様な生存戦略の中から、2つのトピックスを選んで紹介する。

2. ニホンミツバチの対スズメバチ熱殺蜂球

ニホンミツバチは、野山で樹洞の中などに営巣している。毎年秋になると同所性の天敵オオスズメバチの強い捕食圧にさらされている。オオスズメバチは「集団攻撃」という採餌戦略もち、巣から数 km も離れたミツバチや他のスズメバチの巣に、20~30 頭、時に 50 頭を越える同じ巣のワーカーで襲いかかり、成虫を殺戮し、幼虫と蛹を根こそぎ略奪するのである。日本には養蜂の目的のために約 140 年前に輸入されたセイヨウミツバチも飼育されているが、オオスズメバチの分布していない欧州から移入されたこのミツバチは、集団攻撃の前に成す術も無く餌食になってしまう。しかし、この集団攻撃に対して、長い年月を同じ生息地で暮らしてきた体長 10 mm 弱のニホンミツバチが、体長にして約 4 倍、体重ではなんと 20 倍以上ものオオスズメバチの攻撃を「ハチミツをエネルギー源とする発熱」により防衛する戦略は見事である。

秋になり巣内に多数の蜂児を育てているオオスズメバチのコロニーは、幼虫に与える相応のタンパク質が必要であり、ワーカーは獲物を求めて盛んに狩りを行っている。標的は一度に多量の食物を確保できる他の社会性ハチ類の巣である。オオスズメバチの偵察蜂は、標的と定めた獲物の巣の周りに腹部をこすりつけ「餌場マークフェロモン」を塗り、周囲で採餌行動をしている仲間を集める。ニホンミツバチは、捕食者の分泌したその情報物質を傍受でき、また単独では向かっていかずに、巣の中に引きこもってしまうのである。捕食者が巣内に深追いすると周囲を取り巻いていたミツバチの 1 頭が突然飛び掛かるが、大きな大顎で簡単にかみ殺されてしまう。しかし、そのかみ殺された個体から発散される匂いの源へ瞬間に 500 頭にも上る蜂達が一斉に飛び掛り、あっという間に大きな蜂の球「蜂球」が形成される。真っ暗な巣の中で集合位置を知らせる情報は、蜂球から立ち昇る 3-メチルブチル アセテート（酢酸イソアミル）をはじめとする揮発成分と考えられている。このエステルは、刺針行動を誘起するミツバチの警報フェロモンとして知られていたものである。しかし、蜂球を形成するミツバチをよく観察すると、刺針行動は一切認められない。演者はこの現象を目の当たりに見たとき、蜂球を掌に乗せてみた。蜂は固くスクラムを組んでおり、刺されることはなかったが、その代わりに「熱い！」という感覚を得た。蜂球内の中心温度を計測したところ、最高で 48°C まで達する場合もあることがわかった。さらに、温度を可視化するサーモグラフィーで解析すると、蜂球は線香花火の火の塊のように見えた（図 2）まったく同じ酢酸イソアミルの嗅覚信号でも、オオスズメバチのフェロモンの刺激を受けた後に受信すると「刺針を使うな！発熱せよ！」という意味の化学の言葉になるとは、驚くべき可塑性である。このように天敵の属性に応じた適応的な行動を、同じ化合物で制御できるシステムを進化させていることは、大変興味深く化学、生物学、生態学、進化学といった学問分野を統合した学際的な研究の展開によって真のメカニズムが浮き彫りにされてくるのであろう。実験室内でニホンミツバチとオオスズメバチのそれぞれの上限致死温度を比較すると、オオスズメバチは約 46°C であるのに対して、ニホンミツバチは 50°C 近くであることも分かった。このニホンミツバチが対オオスズメバチ防衛戦略として進化させた護身術は「昆虫は変温動物である」という常識を覆すセンセーショナルなものであった。ニホンミツバチは集団攻撃の端緒となる最初の 1 頭の偵察蜂を巣内に誘いこんで、後続を断つ戦術を身に付けているのである。天敵のフェロモン成分を逆探知して、危険に備えるカイロモンとして読み換えてしまう被食者側の究極の情報戦術とも言えよう。対照的にセイヨウミツバチは異物に対して蜂球をつくるという基本的な性質はもっているものの、捕食者の餌場マークフェロモンを傍受できないどころか、単独で反撃し次々に噛み

殺されてしまい、僅かな時間に全滅に追い込まれてしまうため、オオスズメバチの分布地域では養蜂家による保護管理下におかれないと生存していくことはできない。



図2. オオスズメバチの集団攻撃に先立つ偵察バチを熱殺蜂球に捕らえたニホンミツバチ (右の写真は、サーモグラフィーで中心温度が 47℃に達しているのが可視化されている)

3. オオスズメバチの複数成分系警報フェロモン

生態系においては、どのような生物にも天敵はある。オオスズメバチの巣が逆に天敵に攻められることももちろんある。8 月も半ばを過ぎれば、オオスズメバチの巣内にぎっしり詰まった大きな幼虫や蛹は、飢えた哺乳類にとっては格好の栄養源である。それを守るためにオオスズメバチは、タンパク質を破壊する酵素や激しい痛みをもたらすセロトニンなど多様な物質がカクテルのように配合された毒液を身につけ、それを黒くて光る所に集中的に打ち込む対哺乳類防衛戦略を進化させてきた。さらに、我々の免疫作用を逆手に取った蜂毒アレルギーによる「アナフィラキシー・ショック」は、多くの人命を奪ってきた。彼らの黒と黄色の縞模様は警告色としても、我々の脳裏に深く刻まれており、蜂に刺されたことが無い人でさえ本能的に危険を感じてしまう色彩パターンである。二重三重にも亘る防衛術を身に付けていると思われる彼らが、毒液に含まれる複数の揮発性化合物のブレンドからなる警報フェロモンにより敵の襲来を仲間に伝達する手段をもっていたことが明らかにされた。

オオスズメバチのワーカー3 頭分の蜂毒から揮発する成分を固相マイクロ抽出法を適用して捕集し、ガスクロマトグラフ質量分析装置で分析すると 20 以上のピークが検出された。それらのうちの主要な 3 成分は、各々2-ペンタノール、3-メチル-1-ブタノール (イソアミルアルコール)、1-メチルブチル 3-メチルブタノエート (イソ吉草酸 1-メチルブチル) と同定された。各々の物質をジエチルエーテルで約一頭当量分の化合物に希釈してろ紙に塗布し、野生のオオスズメバチの巣門に近づけ、巣内から噴出してくるワーカー数を比較する生物検定を行った結果、2-ペンタノールを活性の主体とするものの 3 種類の物質が混合された時に、1 頭分の毒液に対するものと同程度の強い警報フェロモン活性が示されることが確認された (図3)

日本産スズメバチ属に含まれる他種の警報フェロモン成分の分析結果をみても「単独の化合物ではなく、複数成分系と考えられる点」、「巣の近くでのみ警報フェロモンとしての活性を示す点」は共通と考えられた。これらの知見を基に適切な対応を講ずれば、刺害リスクに過剰に神経質になる必要は無いものといえよう。もちろん、類縁化合物との構造活性相関の可能性も考えあわせて、研究結果は、スズメバチの巣に近づく可能性のある際には、多様な香気成分を含むものを身につけることに対して、十分用心した方が無難であることを強く示唆していると思われる。



図3. オオスズメバチの蜂毒中に含まれる警報フェロモン成分の生物検定

3 種類の成分を塗布したろ紙を巣門に近づける (左) と地中の巣内から多数のワーカーが噴出して攻撃を開始した (右)

4. おわりに

生物の生活史において、採餌戦略、防衛戦略、生殖戦略には、それらに強い自然淘汰圧が作用するという点で、大変ユニークな特徴が認められることが多い。血縁集団での社会生活を営むミツバチやスズメバチでは、その各々の局面で情報化学物質による制御が認められている。それらの化合物の中には、例えば、同じ化合物であっても、他の化合物との組み合わせの内容、巣の近くか離れた場所かなどによって、警戒信号になったり、餌場を仲間に知らせる機能をもったりと、全く異なる意味をもってくる場合もある。その様子は、文字の組み合わせで意味が変わってくる我々の言葉とよく似ている。それらの基礎研究の成果は、我々が香りに満ちた豊かで文化的な生活を営んでいく中で、いかにして生物多様性の一翼を担う益虫としての側面ももつ社会性ハチ類と共存を図るかという応用面でのヒントを与える可能性が高いと考えられる。

地球上のすべての生物が、生物多様性のネットワークでつながっているおり、今日その保全が叫ばれている。私たち人類の運命は 21 世紀をどのように過ごすかにかかっているとも言われている。私たちがこれからの文明社会の中で自然と調和しながら持続可能な生活していく上で、「もう一つの社会」をもち、生態系の中でキーストーン的な存在となっている彼らと生活をともにしていることを意識したいものである。

参考文献

Crane, E. (1983) *The Archaeology of Beekeeping*. Duckworth, London. 360pp.

小野正人 (1997) *スズメバチの科学*. 海游舎, 東京 175pp.

Ono, M., T. Igarashi, E. Ohno and M. Sasaki (1995) Unusual thermal defence by a honeybee against mass attack by hornets. *Nature* 377(6547):334-336.

Ono, M., H. Terabe, H. Hori and M. Sasaki (2003) Components of giant hornet alarmpheromone. *Nature* 424(6949):637-638.