



殺虫剤研究班のしおり

第93号

事務局：(一財)日本環境衛生センター環境生物・住環境部内；
〒210-0828 川崎市川崎区四谷上町 10-6；TEL 044-288-4878; FAX 044-288-5016
郵便振替：口座番号 01710-6-0126034, 口座名称：日本衛生動物学会殺虫剤研究班

目次

2022 年度殺虫剤研究班集会報告	2
2022 年度 シンポジウム 講演報告	
害虫防除におけるベイト剤の効果の現状と可能性	3
I チャバネゴキブリ駆除におけるベイト剤とグルコース忌避	
勝又 綾子(ノースカロライナ大学)	4
II 吸血ダニ類に対する動物経口剤の駆除効果	
八田 岳士(北里大学)	11
III 外来アリに対するハイドロジェルベイト剤の効果	
寺山守(東京都立大学)・砂村栄力(森林総研/東京都立大学)・	
江口克之(東京都立大学)	15
IV 蚊に対する attractive toxic sugar bait (ATSB) の可能性	
星 友矩(長崎大・熱研)	38

2022 年度殺虫剤研究班集会報告

日 時： 2023 年 4 月 14 日（金） 14:00-16:15

場 所： 国立感染症研究所共用第一会議室（現地参加のみ）

参加者： 講師 4 名、団体会員 12 名、個人会員 16 名、非会員 27 名

2022 年度総会では、下記の事項が報告・審議され、承認された。

1. 会員動向(2022. 3. 31.) 団体会員 9(+1) 個人会員 35(-3)

2. 2022 年度決算：

期間：2022.4.1～2023.3.31

収入		支出	
2020年度繰越金	1,857,210	印刷費	0
大会参加費	0	通信運搬費	825
団体会員年会費		会議費・旅費	41,194
（2022年度分）	40,000	講師謝金・交通費	40,000
個人会員年会費		雑費	0
（2022年度分）	46,000	アルバイト代	0
雑収入	0		
合計	1,943,210		82,019
差引残高(2022年度繰越金)			1,861,191

3. 役員

委員長：橋本知幸

委員：足立雅也、葛西真治、川田 均、木村悟朗、千保 聡、富田隆史

任期：2021 年 4 月 1 日～2024 年 3 月 31 日

4. 会費：¥5,000（団体会員）、¥2,000（個人会員）

5. 事務局

所在地：〒210-0828 川崎市川崎区四谷上町 10-6

（一財）日本環境衛生センター環境生物・住環境部内

電話：044-288-4878 Fax：044-288-5016

E-mail: seibutsu@jesc.or.jp

2022 年度 シンポジウム 害虫防除におけるベイト剤の効果の現状と可能性

害虫防除におけるベイト剤は、衛生害虫以外にも農業害虫や木材害虫にも適用され、近年も新しい成分や手法が開発されている。その一方で、いくつかの課題も顕在化し、防除が困難となる事例も知られるようになってきた。

2022 年度のシンポジウムでは、対象害虫別に、現在用いられている、あるいは適用が期待されるベイト剤を取り上げ、作用機序、処理方法、有効性、抵抗性や課題などについて、各識者より最新の情報をご講演頂いた。



I チャバネゴキブリ駆除におけるベイト剤とグルコース忌避

勝又 綾子（ノースカロライナ州立大学 昆虫植物病理学部）

1. チャバネゴキブリ駆除とベイト剤の効果

チャバネゴキブリは約 4500 種のゴキブリグループの中で最も人間環境に適応した害虫の一種である。雑食性、集合性、強い繁殖力、夜行性、高い分散能力を示し、屋内の暖かく多少湿った場所ならば、戸建てから集合住宅、病院、料理店、畜舎、食品工場、電車や飛行機など幅広い環境に住む。カヤトコジラミを含む吸血害虫のように直接人体を加害しないが、大きな群れを作って、でんぷん質の食材、砂糖、肉、油脂、果物、家畜やペットの飼料を食害し、その採餌の過程で病原菌や抗生物質耐性菌を広く伝搬する。また糞に含まれるアレルゲンが喘息や皮膚炎を引き起こすことが知られている[1]。

本種の駆除では、駆除対象場所が広く個体群が大きい場合に駆除業者に依頼する。しかし個人や小さなコミュニティレベルでは市販の殺虫剤が使われることが多く、そうした日本とアメリカのゴキブリ駆除の市場は、それぞれ年間約 250 億円、1000 億円と見積もられている。個体群管理のために様々なモニタリング法と駆除法があり、そのための市販品は粘着トラップ、スプレー剤、燻煙剤、ベイト剤（毒餌）が主流である。粘着トラップは駆除目的だけでなく、個体群のモニタリングによく使われる。スプレー剤は冷蔵庫裏など局所的に殺虫成分を噴霧して使用し、燻煙剤は室内の広範囲に殺虫成分を含むガスをいきわたらせる。チャバネゴキブリは拡散された殺虫成分に偶発的に接触し、それを体表から体内へ取り込んで死に至る仕組みである。一方、1980 年代から主に使われているのはベイト剤である。これは殺虫成分と摂食刺激物質を混ぜた構成で、ゴキブリの出現が心配される場所に設置する。スプレーや燻煙剤のように殺虫成分が直接人体に触れる心配がなく、設置が簡単であるため消費者に受け入れられやすい。燻煙剤とベイト剤の効果の比較では、明らかにベイト剤が個体群サイズを大幅に減らす結果が得られている[2]。また本種には、餌を見つけた個体のフェロモンで仲間が餌場に誘引される行動、集合場所では仲間の死骸や糞を食べる行動が見られる。そのためベイト剤は他の駆除法よりも多くの個体が殺虫成分を直接摂取し、かつその死骸を他の個体が食べることで二次的殺虫効果をもたらす[3]。更に、ベイト剤に蛍光物質を混ぜることで糞の量や分散様式を紫外線ライトで観測できるので、個体群のモニタリングにも適している。

2. ベイト剤抵抗性

他の害虫種で見られると同様、殺虫成分の多用と乱用は本種の抵抗性を急激に発達させてきた。1950 年代半ばから有機塩素系の chlordane と DDT がゴキブリ駆除に積極的に用いられたが、十年内にこれらに耐性を示す個体群が現れた。60-70 年代は malathion などの有機リン系、カーバメート系、合成ピレスロイド系駆除剤が用いられたが、これらにも十年内で抵抗性個体群の発達が確認された。現在は fipronil（フェニルピラゾール系）、Hydramethylnon（有機フッ素系）、Boric acid（ほう素系）、indoxacarb（有機リン酸系）、dinotefuran（ネオニコチノイド系）、

abamectin (マクロサイクリックラク トン系) などが使われているが、やはり抵抗性を示す個体群は野外でよく観察される。

殺虫成分の生理的抵抗性のメカニズムはよく研究されており、標的部位であるナトリウムチャンネルの変異 (kdr) , GABA 受容体の変異 (cyclodiene resistance) , アセチルコリンエステラーゼの変異などが挙げられる。この他、クチクラ層が厚くなる変異のために、薬剤が体表から体内へ浸透しづらくなる例や、解毒代謝能力 (p450) が高い場合に殺虫成分が迅速に解毒されてしまう例がある。腸内微生物が殺虫成分を解毒・無効化するという近年は増えている。一方、この他に、ベイトを摂食しない行動的抵抗性も 1990 年初頭から報告されている。ベイト摂食拒否の一般的な原因は、消費者による長時間放置、他の薬剤との無計画な混和、多数の昆虫や微生物との接触を通じた汚染によって、ベイトの品質が劣化することにある。また新鮮なベイト剤であっても、殺虫成分や摂食刺激物質そのものを拒否する例があり、これは本種が触角や口器の化学感覚器を用いて、これらの成分を忌避物質として検出するためと考えられている[4]。

3. グルコース忌避性

摂食刺激物質を忌避する行動抵抗性、特に「グルコース忌避性」を以下に解説する[5]。一般的な栄養素であるタンパク質、脂質、糖質は動物の摂食刺激物質であるが、チャバネゴキブリでは発達段階や性別、生理状態によって嗜好性の度合いが異なる。本種は内部共生菌 *Blattabacterium* による窒素循環機構を持つので、他の昆虫に比べてタンパク質の要求量が低い。発達段階や性別によっても要求量が違うので、タンパク質をむやみにベイトに投入しても駆除効率が悪くなる可能性がある。脂質と糖質は発達段階や性別を問わず好まれるが、脂質は酸化して劣化が早いので長期間設置するベイト剤の摂食刺激物質に不適切と思われる。一方でグルコース、フラクトース、マルトース、スクロースなどの糖質は比較的安定した大変強力な摂食刺激物質として、積極的にベイト剤に用いられる。

しかし 1993 年にグルコースを含んだベイト剤を摂食しない野外個体群がフロリダで発見された。本種のグルコース忌避性 (Glucose-averse, GA と表記する) は、野生型 (研究室飼育の Wild-type, WT とする) のグルコース嗜好性が、個体の生理変化や学習によって GA に変更されたものではなく、親から子へ遺伝的に受け継がれて生涯保持される優性遺伝形質である。性差はなく、WT ホモ型を aa, GA ホモ型を AA としてかけ合わせると、F1 世代の Aa は GA ヘテロ型になる。F1 同士を掛け合わせると WT と GA は 1:3 の割合で出現する。このため、恐らく単一遺伝子の変異がメンデルの遺伝法則に則って、GA に寄与していると考えられている。また GA と WT ゴキブリを用いて WT 個体数が優勢な個体群を人工的に作り、グルコースベイト剤を数日投入後に通常飼育に使うラット用飼料に切り替えると、たった 1 世代を経た三ヵ月後の個体群では GA 個体数が優勢になる (図 1)。このことは、WT 個体がベイトで一掃される条件下で GA 個体が生き

残り, 新しい個体群を発達させることを示している. メンバー置換後の個体群にラット用飼料のみを与え続けると, WT (ホモ型) と GA (ヘテロ型, ホモ型) の混ざった個体群が GA 個体数優勢で16世代以上は維持される. ラット用飼料とグルコースベイトを併用し続けると, メンバー置換後の個体群は GA ホモ型へ収束してゆく. いずれの個体群でもグルコースベイトの有効性は大幅に低くなる.

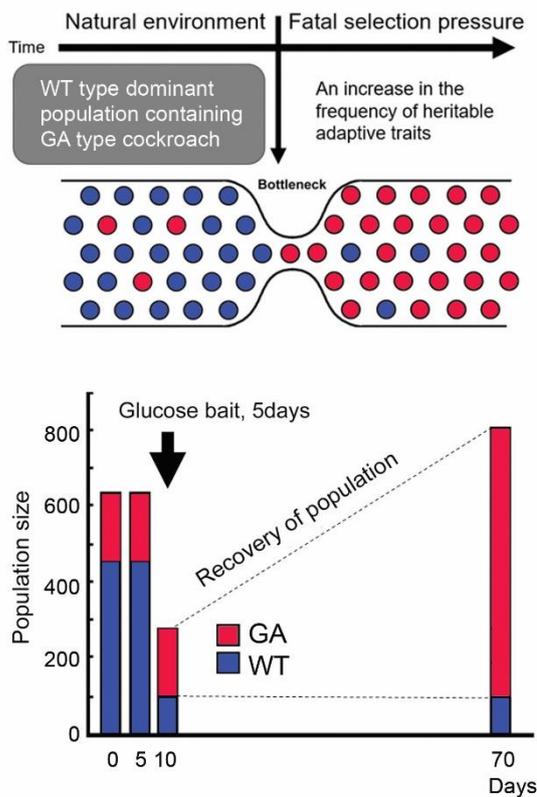


図 1. グルコース忌避性 (GA) ゴキブリ個体群の発達メカニズム. 自然状態を想定して人工的に GA と WT (研究室飼育の野生型, グルコース嗜好性を示す) を混ぜた個体群を用意し, そこにグルコースベイト剤を投入すると, 急激で強い淘汰圧により (ボトルネック効果), わずか 1 世代で GA ゴキブリ優勢の個体群が発達する.

4. グルコース忌避性の味覚感覚メカニズム

昆虫は毒などの不要な物質と安全で有用な食物を区別するために, 環境中の化学物質を検出する味覚感覚神経を主に口器に持っている. 口器上には毛状のクチクラ構造を持つ味覚感覚毛があり, それぞれ機能特化した味覚感覚神経が 2-4 個のユニットで収まっている. これらのうち, 糖

やアミノ酸などの栄養物質を感知するのは甘味感覚神経、毒などの摂食忌避物質を感知するのは苦味感覚神経と呼ばれる。他に低濃度の塩や浸透圧を感知する神経も報告されている。環境中の化学物質は味覚感覚毛の先端にある単一孔から感覚毛内に入り、内部を満たしている感覚器リンパ液を通して味覚感覚神経の樹状突起へ到達する。味覚感覚神経のモダリティは樹状突起上の受容体の発現様式に寄っている。例えば甘味感覚神経と苦味感覚神経の受容体はオーバーラップして発現しないので、二つの神経は摂食刺激物質、摂食忌避物質を特異的に検出できる。化合物が受容体と結合すると、神経は興奮して活動電位が発生する。味覚モダリティの異なる神経の軸索は中枢神経（脳）の異なる領域へそれぞれ直接投射するので、甘味感覚神経と苦味感覚神経の応答特異性は、摂食行動と摂食忌避行動の解発に強く影響すると考えられている[6]。

チャバネゴキブリの味覚感覚の研究はほとんどないが、電気生理学的な試験を通して、本種が他の昆虫と同様、口器上の化学感覚毛の中に少なくとも4種の味覚感覚神経を含むことが報告されている[5]。WTゴキブリの甘味感覚神経はグルコース、フラクトース、スクロースなどの様々なオリゴ糖に応答して摂食行動を導き、苦味感覚神経はカフェインを含む有害物質に応答して摂食忌避を導く。他二つの味覚神経は基質特異性がなく、水分や浸透圧などに応答する。これらを理解した上で、グルコースを含む数種の糖や毒物質に対するGA個体の味覚感覚神経の応答を調べ、WTゴキブリのそれと比較すると、GAゴキブリではグルコースに対してのみ、味覚感覚神経の応答様式が異なることが分かった。すなわちWTゴキブリでは甘味感覚神経のみがグルコースに応答するが、GAゴキブリでは苦味感覚神経がグルコースによく応答し、甘味感覚神経の応答は観測できはするが、非常に弱い（図2）。そのため、GAゴキブリでは、脳での味覚情報処理において、グルコースは苦味物質として認知され、その結果摂食忌避が起きると考えられる。GAゴキブリの苦味感覚神経のグルコース感受性の獲得は、本来甘味感覚神経にしか発現しないグルコース受容体が誤発現している可能性、もしくは、苦味感覚神経に発現している苦味受容体に変異してグルコースと結合する可能性が考えられている。また甘味感覚神経のグルコースに対する神経応答の低下については、苦味感覚神経の神経活動が甘味感覚神経の神経活動を抑制するため、甘味感覚神経はグルコースを受容しても、十分に応答できないと考えられている。

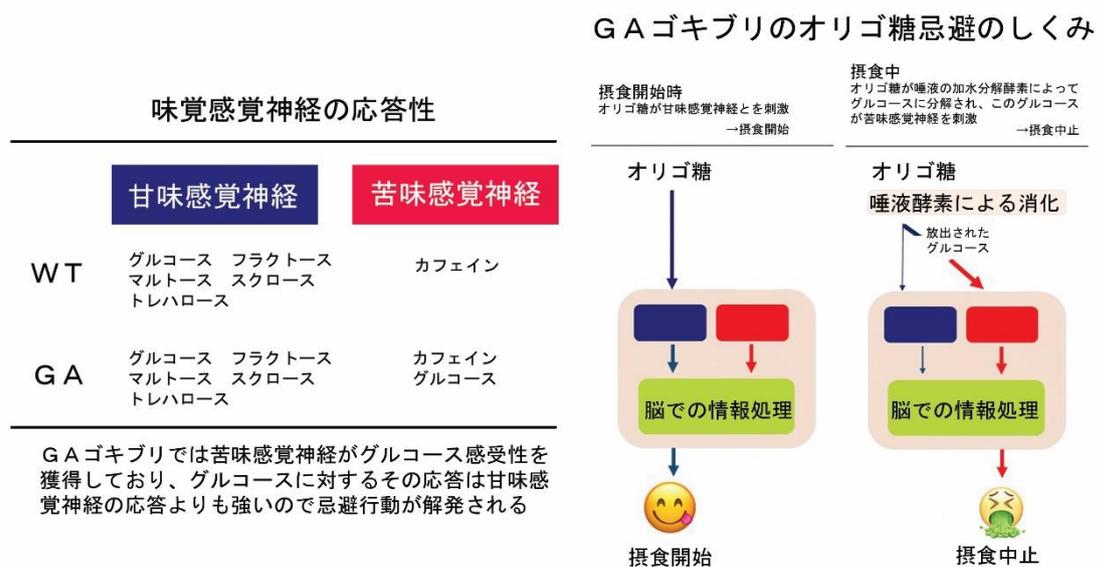


図 2. 味覚感覚神経の応答性と GA ゴキブリによるオリゴ糖忌避のしくみ. チャバネゴキブリは口器に甘味感覚神経(栄養素などを甘味として感知するための化学感覚神経)と苦味感覚神経(毒物質などを苦味として感知するための化学感覚神経)を持つ. グルコースを含む様々な栄養糖は WT ゴキブリの甘味感覚神経を刺激し, 苦味感覚神経を刺激しない. しかし GA ゴキブリでは甘味感覚神経と苦味感覚神経の両方でグルコースを受容し, 苦味感覚神経の応答が甘味感覚神経のそれよりも強いため, 脳はグルコースを苦味物質として処理し, 忌避行動が解発される (左図). また GA ゴキブリはオリゴ糖を摂食するが, 他の多くの動物と同様, 摂食開始後に唾液を分泌する. 唾液の加水分解酵素はオリゴ糖を分解しグルコースを放出させるため, GA ゴキブリは苦味感覚神経でグルコースを感知して摂食をすぐに中止する. そのため GA ゴキブリのオリゴ糖の総摂食量は WT ゴキブリのそれよりも非常に少ない (右図).

5. グルコース忌避性と他の糖への忌避性

グルコース忌避性のメカニズムが明らかになったことで, それではグルコース以外の糖を摂食刺激物質としてベイト剤に含めれば良いと思いつかぶ. しかし近年, グルコース忌避性はマルトースやスクロース, トレハロースなど, グルコース分子を含むオリゴ糖に対して摂食抑制を招くことが明らかになった[7]. オリゴ糖は WT と GA ゴキブリ双方で, 甘味感覚神経のみを刺激して苦味感覚神経には受容されない. しかし実際に摂食行動を観察すると, GA ゴキブリはオリゴ糖の摂食は開始するものの, すぐに忌避に転じる. このため WT ゴキブリに比べてオリゴ糖の摂食量が極端に少ない.

この秘密は唾液酵素にある。動物の唾液は口内環境を清潔に保つほか、食物を摂食する際に積極的に分泌され、固形物の嚥下を助ける。また唾液に含まれる消化酵素は嚥下前の食物成分を分解する。ヒトの唾液アミラーゼが無味のデンプンを甘味を呈するマルトースに分解することはよく知られている。チャバネゴキブリも同様に、摂食中に分泌された唾液の加水分解酵素がマルトースやスクロース、トレハロースを分解してグルコースを放出させる。この時 WT ゴキブリはグルコースを甘味物質として受け入れて摂食を継続するが、GA ゴキブリではオリゴ糖の甘味が摂食中にグルコースの苦味に転じる。そのため摂食が中止される（図 2）。このことは GA 個体群にグルコースベイト剤を用いる時よりも深刻な弊害をもたらす可能性がある。すなわち、GA ゴキブリにオリゴ糖ベイト剤を用いた時、殺虫成分が少量しか摂取されないため、殺虫成分に対する生理的抵抗性の発達が進み、行動的抵抗性と生理的抵抗性の両方を備えた複雑な抵抗性を持つ個体群となる可能性がある。

6. 行動抵抗性とどのように付き合うか

ベイト剤はゴキブリ個体群の管理に有効だが、使用法によっては生理的抵抗性だけでなく、化学感覚変異に基づいた行動抵抗性を発達させる。本稿では行動抵抗性のうち、特に、本来は摂食刺激物質として働くグルコースに対する忌避性を解説した。野外調査ではこれまでフラクトース忌避性個体群や、グルコース忌避性とフラクトース忌避性の両方を備えた個体群も確認されている。フラクトース忌避性のゴキブリは GA ゴキブリと同様に苦味感覚神経がフラクトースに応答するため、糖に対する味覚変異が忌避性の原因であると思われる（未発表）。

糖忌避を導く味覚変異遺伝子の起源は不明である。多くの昆虫種にとって糖質は重要な栄養素であり、自然界で糖忌避性を持つ個体は淘汰されると考えられる。しかし雑食性のチャバネゴキブリは人間環境に適応し豊富な食物源を持つため、採餌適度の低い様々な味覚変異個体でも個体群内で生き残れるのかもしれない。そうした個体群では特定の糖質だけでなく、脂質やアミノ酸を忌避する味覚変異個体も存在するかもしれない。摂食嗜好性が異なる個体が個体群内に保持されると、メンバー間の食物資源の競合を避けることができ、ベイト剤の強力な淘汰圧にも耐えて種を存続させる頑強性も発揮できるのだろう。

本種が多様な味覚変異を持つとすれば、ベイト剤を用いた駆除において、行動抵抗性の発達メカニズムの詳細を知ることは非常に重要である。ベイト剤に含める摂食刺激物質をいくら交換してもイタチごっこになり、味覚変異に基づく行動抵抗性の発達を根本的に防ぐことは難しいと考えられる。

現在のところ、行動抵抗性管理の特別な方法は確立されておらず、生理抵抗性の発達を抑制するために用いられる薬剤抵抗性管理プランが用いられている[8]。すなわち、個体群のモニタリングを継続しながら、薬剤のローテーション、高薬量、IPM（生物的物理的防除法）を組み合わせ

た手法を用いること、および管理者の教育が有効である。将来的に、本種の味覚変異のバリエーションと行動様式、個体群内・個体群間でのジーンフローが明らかになれば、より良いベイト剤の開発ができ、特別な行動抵抗性管理法が確立できるかもしれない。

引用文献

1. Schal C, DeVries ZC. 2021. Public health and veterinary importance. In *Biology and management of the German cockroach* (eds Wang C, Lee C-Y, Rust MK), pp. 17-52. Clayton South, Australia: CSIRO Publishing.
2. DeVries ZC, Santangelo RG, Crissman J, Mick R, Schal C. 2019. Exposure risks and ineffectiveness of total release foggers (TRFs) used for cockroach control in residential settings. *BMC Public Health*. 19:96. doi: 10.1186/s12889-018-6371-z.
3. Hamilton JA, Wada-Katsumata A, Schal C. 2023. Cockroaches as Trojan horses for control of cockroach aggregations with baits. *J Econ Entomol*. 116:529-537. doi: 10.1093/jee/toad018.
4. Appel G, Rust MK. 2021. Management using baits. In *Biology and management of the German cockroach* (eds Wang C, Lee C-Y, Rust MK), pp. 17-52. Clayton South, Australia: CSIRO Publishing.
5. Wada-Katsumata A, Robertson HM, Silverman J, Schal C. 2018. Changes in the peripheral chemosensory system drive adaptive shifts in food preferences in insects. *Front. Cell. Neurosci*. 12: 281. doi: 10.3389/fncel.2018.00281.
6. Benton R, Dahanukar A. 2023. Chemosensory coding in *Drosophila* single sensilla. *Cold Spring Harb Protoc*. 2023:107803-pdb.top. doi: 10.1101/pdb.top107803.
7. Wada-Katsumata A, Schal C. 2021. Salivary digestion extends the range of sugar-aversions in the German cockroach. *Insects*. 12:263. doi: 10.3390/insects12030263.
8. Schalf ME, Gondhalekar AD. 2021. Insecticides resistance: perspectives on evolution, monitoring, mechanisms and management. In *Biology and management of the German cockroach* (eds Wang C, Lee C-Y, Rust MK), pp. 17-52. Clayton South, Australia: CSIRO Publishing.

II 吸血ダニ類に対する動物経口剤の駆除効果

八田 岳士（北里大学医学部 寄生虫学・熱帯医学）

1. イントロダクション～吸血ダニ類（マダニとワクモ）

ダニは、最近の研究の進展に伴い高次分類体系の見直しが図られている節足動物で、蛛形綱に属する生物群である。わが国においては、コンパニオンアニマル（イヌ・ネコ）や産業動物（ウシ・ニワトリ）だけでなく、ヒトにも寄生することでも問題となっているダニとして、胸穴類に属するマダニ亜目マダニ科のマダニ（固い背板をもち、外皮が硬い Hard tick）やトゲダニ亜目に属するワクモ（主に鳥類を吸血）などがある。背板をもたず、外皮も柔らかい比較的大型の Soft tick と呼ばれるマダニ亜目ヒメダニ科のマダニは、経口殺ダニ剤の開発に寄与したマダニである。

経口殺ダニ剤とは、動物に経口摂取・投与される型の薬剤である。投与後動物体内の血中に取り込まれた薬効成分は、投与された動物を寄生・吸血したダニに取り込まれることで致死的效果を及ぼすことができる。持続性に優れていることからペットオーナー等の利便性の向上が図られたものとなっている。現在経口殺ダニ剤の主な駆除対象ダニは、コンパニオンアニマルに寄生するマダニ（Hard tick）であり、鶏に寄生する小型のダニであるワクモにも適用されているものもある。

マダニ（図1）は、ヒトを含む哺乳動物や爬虫類、鳥類も寄生することが可能である。4 発育期（卵、幼ダニ、若ダニ、成ダニ）で構成されており、実験室内などの好適環境下では数か月で世代交代が行われる。一方、自然環境中では、マダニの種



図1：フタトゲチマダニ雌成ダニ（吸血に伴うサイズの変化）

により多少の違いはあるが、その世代時間はおよそ1年と考えられる。卵以外の発育期全てで宿主動物の血液を吸血する偏性寄生性の動物であり、吸血中に病原体を媒介することからも、効果的かつ適切なマダニ駆除法の存否は医学・獣医学上重要な問題といえる。マダニが宿主動物に寄生し吸血する期間は、発育期や種により差を認めるが、概ね4～7日間程度である。病原体の媒介を阻止する上でも、経口殺ダニ剤は、マダニが吸血を開始し、唾液を介して病原体を媒介するまでの間に駆除効果を示さなければならないため、即効性が極めて重要である。

ワクモ（図2）は、専ら鳥類に寄生する微小なダニ（成虫体長約1mm）であるが、養鶏農場従事者や愛玩鳥飼育者が偶発的に寄生され、アレルギー性皮膚炎を発症する事例が報告されている。ワクモの発育期は、5 発育期（卵、幼ダニ、第1若ダニ、第2若ダニ、成ダニ）で構成され、マダニと異



図2：吸血したワクモ
（成ダニ、第1若ダニと卵）

なり幼ダニは吸血することなく脱皮し第1若ダニとなる。好適な環境では8~9日間で世代交代することから、対策が遅れると鶏舎全体にワクモが大発生する。また世代時間の短さは、殺ダニ剤に対する抵抗性形質の獲得にも寄与することとなるため、要領用法に基づかない同系統薬剤の長期連用は望ましくない。

2. 経口殺ダニ剤~イソキサゾリン含有化合物とその標的分子

現在上市されている経口殺ダニ剤は4種類（ネクサガード®（Afoxolaner, Merial, 2013）、ブラベクト®（Fluralaner, MSD, 2014）、シンパリカ®（Sarolaner, Zoetis, 2015）、クレデリオ®（Lotilaner, Elanco, 2017））あり、いずれもイソキサゾリン系化合物である。サイファインダーの調べによれば、2016年以降、イソキサゾリン環を有する化合物は20,000を超えているとされており、最近注目されている殺虫剤である。

イソキサゾリン系殺虫剤は、節足動物の神経伝達物質であるγアミノ酪酸（GABA）の受容体 GABA 作動性塩素イオンチャネルを標的とし、非競合的に阻害することで塩素イオンの神経細胞内への流入を阻害する。そのため神経細胞が過興奮状態となり、節足動物に対する致死効果を示すとされている。フィプロニルなどのフェニルピラゾール系化合物も同様に GABA 受容体に結合して致死効果を示すことで知られているが、イソキサゾリン系殺ダニ剤は結合部位が異なる。そこで、マダニとワクモの GABA 受容体とイソキサゾリン系殺ダニ剤の一つであるフルララネルがどのような結合様式をとるか、計算化学的に分子シミュレーションしたところ、マダニ GABA 受容体（図は M2 ドメインのみ表示）は、ショウジョウバエとよく似た結合様式を示したが、一方でワクモ GABA 受容体では、M2 ドメインと M1 ドメインの間に潜り込むような形で結合する様子が予測された（図3）。ワクモとマダニでは有効性濃度に違いがあるのかなど、興味深い考察が得られた。

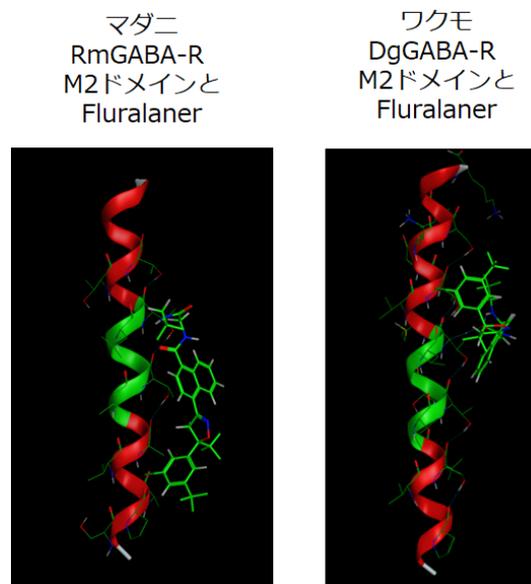


図3：GABA 受容体 M2 ドメインと Fluralaner との結合シミュレーション

3. イヌにおける薬物動態~マダニに対する有効濃度の観点から

表1は、文献値よりイソキサゾリン系殺ダニ剤のイヌにおける薬物動態をまとめたものである。また、表2には各剤の取扱説明書より処方についてまとめた。これらの情報をもとに血中動態を比較したところ、ロチラネルが最も持続性が高いと考えられる。

クリイロコイタマダニに対する治験データ（表3）を示す。薬剤処方後のある経過時間または日数において、マダニをイヌに放虫し、放虫後の時間ごとに殺虫効果を数値で示したものである。この結果より、アフォキサラネルは、投与後2か月間は有効であること、さらに投与後

2 か月以上経過しても、マダニが放虫後 24 時間でほぼ 100%死滅していることが示されている。フルララネルは、経皮と経口処方があり、経皮処方では約 3 ヶ月間、経口処方では約 2 か月間は有効と考えられる。サロラネルは、処方後 24 時間以内の殺ダニ活性が示されており、投与後わずか 12 時間で殺ダニ活性が 100%となっていることから速効性の高い薬剤であるといえる。ロチラネルは、処方後 37 日目においても、放虫後 2 日目の殺ダニ活性が 100%を示しており持続性に優れていることを示している。

Table 1 : Pharmacokinetic profile in dog (Goncalves et al., 2021,doi:10.1016/j.bmc.2020.115934)

Compound	Dose	Administration	Tmax (h)	Cmax (ng/ml)	t1/2 (days)	F (%)	Ref.
Afoxolaner	2.5 mg/kg	oral	2-6 h	1655	15.5	73.9	Letendre et al., 2014
Fluralaner	50.0 mg/kg	oral	24 h	5419	14	20	Kilp et al., 2014
Fluralaner	50.0 mg/kg	topical	600 h	1698	17	25	Kilp et al., 2016
Sarolaner	2.17~3.79 mg/kg	oral	<24 h	1100	11~12	85	McTier et al., 2016
Lotilaner	20 mg/kg	oral	2 h	1454	38.8	24.3*	Toutain et al., 2017

Cmax: maximum of serum concentration; Tmax: time to achieve Cmax; t1/2: time of half-life; F: bioavailability

* data obtained in fasting dogs. The food ingestion improved the bioavailability to almost 80%.

Table 2: 取扱説明書（経口投与に限定）

	商品名	販売	投与方法	処方間隔	処方濃度
Afoxolaner	NexGard®	Boehringer ingelheim	経口	1ヵ月	2.5 mg/kg
Fluralaner	Bravecto®	MSD	経口	3ヵ月	25 mg/kg
Sarolaner	Simparica®	Zoetis	経口	1ヵ月	2 mg/kg
Lotilaner	Credelio®	Elanco	経口	1ヵ月	20~43 mg/kg

Table 3: Efficacy of *Rhipicephalus sanguineus* after treatment with isoxazolines (Zhou et al., 2020. doi: 10.1111/jvp.12959)

Tick species	Animal	Compounds	Administration	Frequency	Dose	0-24h	Day 2-4	Day 28-30	Other	Tick counts	Reference
<i>R. sanguineus</i> Dog		Afoxolaner	oral	monthly	2.5 mg/kg				Day56: 98% Day84: 86%	24 hrs PI*	Beugnet et al., 2015
		Fluralaner	topical	single	25 mg/kg		91-100%	100%	Day58: 99-100% Day 86: 97-100%	2 DPI**	J. Taenzler et al., 2016
		Fluralaner	oral	single	25 mg/kg			100%	Day56: 92% Day84: 72%	24 hrs PI	Neugnet et al., 2015
		Sarolaner	oral	single	2-4 mg/kg	8 h: 94% 12 h: 100% 24 h: 100%		8 h: 20% 12 h: 29% 24 h: 98%	Day35: 92%	24 hrs PI if not specified	Six et al., 2016
		Lotilaner	oral	single	20 mg/kg		100%	Day30: 100%	Day37: 100%	2 DPI	Murphy et al., 2017

*PI: post infestation; **DPI: Days post-infestation

4. 駆除実験（ワクモ）～エグゾルト®（MSD）のワクモ増殖箱への適用

ワクモ駆除剤としては、唯一鶏に対する飲水投与剤として、エグゾルト®（フルララネル、MSD）が上市されている。そこで本薬剤を用い、ワクモに対する効果を、我々が独自に開発したワクモ継代維持システムである増殖箱を使用して検討した（図4）。実験群は3群用意し、対照群は通常飲水、蔓延防止群は、ワクモ攻撃試験前より用法に従い飲水投与した。駆除群では、増殖箱内にワクモが増加していることを確認してから、用法に従い飲水投与した。増殖箱内にワクモ導入後、2, 4, 6 週目に増殖箱内にトラップを 24 時間設置し、トラップ内のワクモ総重量を未処置群と比較した。なお、ケージ容積の都合上、鶏は 1 週齢で導入して 3 週目に安楽殺し、未感染 1 週齢鶏と交代させた。この結果、対照群では暴露期間が経過するにつれて回収

されたワクモの総重量が増加した。蔓延防止群では、暴露開始後 2 週目にはワクモがトラップに回収されておらず、6 週目においても有意に増殖が確認されなかった。駆除群では、暴露開始後 4 週目まで増殖が確認されたが、4 週目に殺ダニ剤を投与した結果、6 週目ではほぼ回収されなかった。以上の成績は、鶏舎を利用した治験のデータと類似した結果であったが、実験システムとして有効性を検討した報告はなく、今後も本増殖箱を利用することで経口殺ダニ剤の評価が簡便に行えるものと期待される。

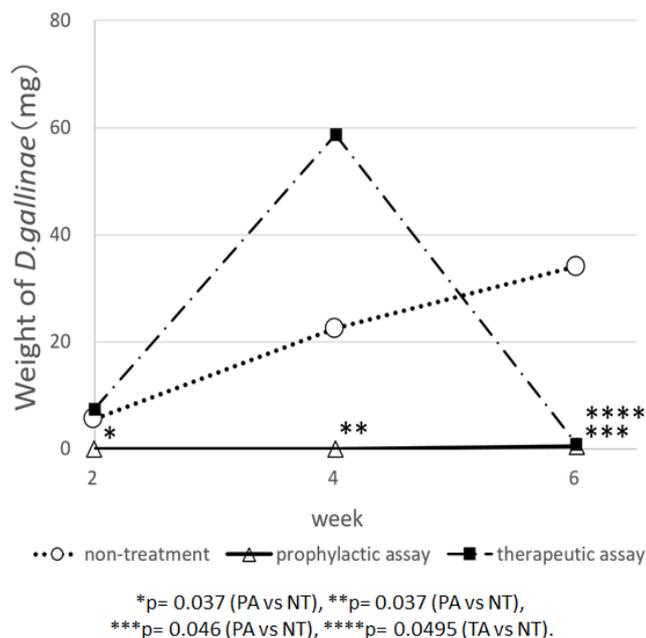


図 4：ワクモ増殖箱を用いたエグゾルト®の効果試験

5. まとめ

今般、経口殺ダニ剤は、4つのイソキサゾリン系殺虫剤（ネクスガード® (Afoxolaner, Merial, 2013)、ブラベクト® (Fluralaner, MSD, 2014)、シンパリカ® (Sarolaner, Zoetis, 2015)、クレデリオ® (Lotilaner, Elanco, 2017)) が市販されている。これらの殺ダニ剤は、経口的に動物に投与し、その後薬効成分を含む血液を吸血したダニやノミが殺虫されることで効果を発揮するものである。対象となるダニはマダニであり、Fluralaner は鶏に寄生する小型のダニであるワクモに対しても適用される。

イソキサゾリン系殺ダニ剤は、γアミノ酪酸 (GABA) 受容体を標的としている。フルラネルについて、マダニとワクモの GABA 受容体の膜貫通領域 M2 ドメインとの結合様式について計算化学的にシミュレーションしたところ、若干の結合部位のズレを認めたことから、有効性に違いがあるのかなど学術的に興味深い。

既報を基にイヌにおける薬物動態を比較したところ、Lotilaner が最も持続性が高いと考えられた。同様にマダニ駆除治験データを比較したところ、各経口殺ダニ剤の速効性と持続性に優れた高い殺ダニ効果が示されており、最長で 4 カ月間もの効果持続性が示されている。

ワクモに対するエグゾルト® (Fluralaner, MSD) の効果については、実際に当研究室にて開発したワクモ継代維持システムで検討した。蔓延防止群ではワクモ暴露後試験期間 (6 週間) 中のワクモ発生を認めなかった。駆除群では、増殖箱内に増殖したワクモが投与後 2 週目には認められなくなった。

利便性と安全性を指向して開発されたイソキサゾリン系経口殺ダニ剤は、高い持続性と有効性を示す新しい殺ダニ剤である。しかし、マダニに対する経クチクラ外皮生物活性が悪いことを鑑みると、感受性試験の方法については予め検討しておくべき課題であろう。

Ⅲ 侵略的外来アリに対するハイドロジェルベイト剤の効果

寺山 守（東京都立大学大学院理学研究科）

砂村栄力（森林総合研究所/東京都立大学大学院理学研究科）

江口克之（東京都立大学大学院理学研究科）

1. 緒言

地球規模での生物多様性の危機が叫ばれて久しい。生物種絶滅の最大の要因は、何と言っても生息地の破壊にある。熱帯林の破壊や海洋汚染、さまざまな開発行為等により環境が攪乱され生物多様性が危機に陥っている。さらに、外来種問題がここ十数年来クローズアップされてきた。これまで動物の分布を規定していた地理的障壁が、現在の高速かつ大量輸送と言う人間活動の前では機能しなくなり、世界規模で多くの生物の人為的移入が見られるようになってきている。貿易の自由化、輸送手段の規模拡大と高速化、さらに人口増加による攪乱環境の増大により、外来動物がますます増大して行く事が危惧されている。そして、生物多様性を損なう最大の要因として、今世紀では外来生物による攪乱（在来種の捕食、在来種との競争、遺伝子汚染、感染症媒介など）が生息環境破壊に代わって重要化するであろうとまで言われるようになってきた。これらの生物の侵入は世界的な生物相の均質化と多くの在来種の絶滅による多様性の貧困化を引き起こすことが予測されている。従来、侵入害虫による農作物や森林資源に対する経済的被害のみが注目されていたが、侵入害虫の生物多様性への負の影響も甚大であり、大いに憂慮すべき問題である。

日本においても、北海道から鹿児島、そして小笠原諸島にまで分布を広げて被害を与えているアメリカシロヒトリや、農業経済に莫大な被害を与えた果実害虫のウリミバエやミカンコミバエなど、日本への侵入種の著しい被害例も少なくない。明治期以降（1868—）、日本に入った外来昆虫は400種以上もが挙げられている（自然環境研究センター、2008）。近年になっても、外来種の侵入、定着が止まらず、タイワンタケクマバチ *Xylocopa tranquebarorum*、ツマアカスズメバチ *Vespa velutina*、クビアカツヤカミキリ *Aromia bungii*、ムネアカハラビロカマキリ *Hierodula chinensis*、タケオオツツク *Platylomia pieli* と枚挙にいとまがない。

外来昆虫の中で、現在最も恐れられているのは何と言ってもアカヒアリ（ヒアリ）*Solenopsis invicta* であろう。アカヒアリが国内に定着し、分布を広げた場合、莫大な被害が予想されるからである。アカヒアリの侵入は、大きな社会問題として頻繁にマスメディアに取り上げられている。しかし、それ以外にも定着を許してはならないアリが存在することに留意するべきである。これらのアリ類では、我々の生活や経済、環境に影響をもたらす侵略性の高い種が多く存在するが、日本ではすでにネッタイヒアリ（アカカミアリ）*Solenopsis geminata* やアルゼンチンアリ *Linepithema humile*、ハヤトゲフシアリ *Lepisiota frauenfeldi* といった攪乱環境を好む外来アリが港湾や市街地へ侵入ないしは定着している。これらの侵略的外来アリはいずれも、防除が著しく困難な難防除害虫に位置づけられる。真社会性という生態的特性を持つため、一般的な害虫で用いられている防除方法や戦略が通用しないからである。

近年著者らは、近年海外で研究開発が進められているハイドロジェルベイト剤を、日本で初めて外来アリのアシジロヒラフシアリ *Technomyrmex brunneus* に用いて防除実験を行った。本

報で、ハイドロジェルベイト剤を紹介しつつ、本ベイト剤を用いての防除実験結果について紹介する。

2. 侵略的外来アリ

アリ類では、物資の移動や交通機関に便乗して人為的環境を中心に、新しい環境に侵入し、分布を拡大させた種が多く見られる。その数は全世界で 520 種にも登る (Wong *et al.*, 2023)。このような頻繁なアリ類の地球レベルでの移動は、船舶を中心とした長距離交通手段が発達し、移動・輸送網が全球的に構築されてきたここ 400 年間のことと言われている。

人為的移入種の中で、侵入先で個体群密度を著しく増加させ、広域に拡がり、生態系を含めて我々の社会に大きな影響を与える種のことを特に侵略的外来種 (invasive species あるいは invasive alien species) と呼ぶ。侵略的外来種は、農作物害虫、衛生害虫であり、さらには生態系攪乱者として世界的に警戒されている。これらのアリは、原産地では侵略性を示さず、しばしば目立たない存在であるが、移入地では爆発的に増殖し、侵略性を発揮する。アカヒアリ等の侵略性の高い外来種は、我々の社会生活の基盤を大規模に攪乱・破壊することさえあるため、徹底した対処が必要である。

アリ類が深刻度の高い侵略的外来生物となるのは、アリ類の生態的な特性に起因する。女王アリが高い繁殖能力を持ち、コロニーから生産された無数の働きアリが地上表や植生上を徘徊し、昆虫などの陸上無脊椎動物から脊椎動物、さらには景観を構成する主要な植物に至るまで陸上で暮らす殆ど全てのグループの生物へ大きな影響を及ぼす。農薬などにより働きアリの数を減らすことができても、女王アリが生き延びればすぐにコロニーが回復する。そのため、防除が困難な難防除害虫と目されるものが多い。

アリが与える被害は、(1) 家屋に侵入し、さまざまな被害を及ぼす (家屋・生活害虫)、(2) 刺咬被害を与える、あるいは病原微生物の運搬者となる (衛生害虫)、(3) 農作物を食害する、家畜を刺咬する (農畜産害虫)、(4) 在来生物を捕食する、資源をめぐり競合する (生態系攪乱者)、(5) 電化製品や信号等を作動不良にする (社会インフラ攪乱者) など多岐にわたる。

国際自然保護連合 (IUCN) による「世界の侵略的外来種ワースト 100 (100 of the World's Worst Invasive Alien Species)」にはアカヒアリ *Solenopsis invicta*, アルゼンチンアリ *Linepithema humile*, アシナガキアリ *Anoplolepis gracilipes*, ツヤオオズアリ *Pheidole megacephala*, コカミアリ *Wasmannia auropunctata* の 5 種のアリが掲載されている (Lowe *et al.*, 2000; Luque *et al.*, 2014; Cuthbert *et al.*, 2021)。本リストには昆虫類が 14 種掲載されていることから、深刻度の高い侵略的外来昆虫類のおよそ 1/3 がアリということになる。なお、ネッタヒアリ *Solenopsis geminata* の名前が掲載されていない。このリストは掲載可能な種数を 100 種と限っている中で、できるだけ多様な分類群の生物を載せる方針が採られ、そのために 1 つの属から選定される種は 1 種のみと決めて選定されたことによる。Holway *et al.* (2002) による「世界の侵略的外来アリワースト 6」では、前 5 種にネッタヒアリを加えた 6 種がとりわけ侵略性が高いアリとされている。これら 6 種の内、アカヒアリとコカミアリを除いた 4 種は日本にすでに定着している。現在、ネッタヒアリの巣が港湾部で頻繁に発見されると同時に、巣からの有翅女王の飛出も確認されていることから、緊迫した状態にある。ネッタヒアリは、ヒ

トに刺咬被害を与える種で、火山列島の硫黄島と南鳥島、琉球列島の沖縄島、伊江島（現在は確認できず）に侵入している。アルゼンチンアリは本州に侵入、定着した後、非常に大きな速度で、日本に広まりつつある（寺山，2023）。他にも「世界の侵略的外来種ワースト 100」に指定されており、世界的規模で環境攪乱を引き起こしているアシナガキアリとツヤオオズアリも琉球列島を中心に定着しており、特に、島嶼部に定着した場合、大きな生態系攪乱が危惧されている。この 2 種は近年、本土でも報告されるようになってきた（寺山，2023）。

IUCN が編集している「世界の侵略的外来種データベース（Global Invasive Species Database）」には 19 種類の侵略的外来アリが掲載されている（ISSG, 2023）。それらの内、日本に定着しているものは、アカヒアリ並びに表では隠蔽種群とみなされる *Technomyrmex albipes* を加えて 11 種となる。また、リストには Asian needle ant と呼ばれるオオハリアリ *Brachyponera chinensis* (= *Pachycondyla chinensis*) も含まれている。オオハリアリやトビイロシワアリ *Tetramorium tsushimae* は国内では侵略性はないが、海外へ侵入し、定着すると習

表 1. 世界の侵略的外来アリ。和名が太字の種は日本国内に侵入あるいは生息するもの（在来のオオハリアリを除く）。

IUCN (国際自然保護連合) の世界の侵略的外来種ワースト 100

アカヒアリ *Solenopsis invicta*; アルゼンチンアリ *Linepithema humile*; コカミアリ *Wasmannia auropunctata*; ツヤオオズアリ *Pheidole megacephala*; アシナガキアリ *Anoplolepis gracilipes*

Holway et al. (2002) による侵略的外来アリワースト 6

アカヒアリ *Solenopsis invicta*; ネットアイヒアリ *Solenopsis geminata*; アルゼンチンアリ *Linepithema humile*; コカミアリ *Wasmannia auropunctata*; ツヤオオズアリ *Pheidole megacephala*; アシナガキアリ *Anoplolepis gracilipes*

IUCN の世界の侵略的外来種データベース (19 種)

オクトスピノーストガリハキリアリ *Acromyrmex octospinosus*; アシナガキアリ *Anoplolepis gracilipes*; ネグレクツスケアリ *Lasius neglectus*; アルゼンチンアリ *Linepithema humile*; フタイロヒメアリ *Monomorium floricola*; イエヒメアリ *Monomorium pharaonis*; ルブラクシケアリ *Myrmica rubra*; プベンスアメイロアリ *Nylanderia pubens*; オオハリアリ *Brachyponera chinensis*; ヒゲナガアメイロアリ *Paratrechina longicornis*; ツヤオオズアリ *Pheidole megacephala*; ネットアイヒアリ *Solenopsis geminata*; アカヒアリ *Solenopsis invicta*; クロヒアリ *Solenopsis richteri*; パプアナトフシアリ *Solenopsis papuana*; アワテコヌカアリ *Tapinoma melanocephalum*; アシジロヒラフシアリ種群 *Technomyrmex albipes* (*T. albipes* complex)*; ミゾヒメアリ *Trichomyrmex destructor* (= *Monomorium destructor*); コカミアリ *Wasmannia auropunctata*

*: 本種は形態的に類似した *T. albipes*, *T. brunneus*, *T. difficilis*, *T. vitiensis* の 4 種を含むものと考えられる (Bolton, 2007; 寺山ら, 2021)。

性が変わり侵略性を発揮する。原産地では生態系の一員であるが、他地域へ運ばれると爆発的に個体群密度を高め、侵略性を発揮することは、動物でも植物でも侵略的外来種の一般的特徴である。

国内の特定外来生物被害防止法「特定外来生物による生態系に係る被害の防止に関する法律（通称：特定外来生物防止法あるいは外来生物法）」には、コカミアリ、アルゼンチンアリ、ハヤトゲフシアリの3種とアカヒアリ、ネツタイヒアリなど23種を含むヒアリ類が「特定外来生物」に政令指定されている。さらに、環境省と農水省は生態系被害防止外来種を2015年に制定しているが、その中でネツタイヒアリとアルゼンチンアリを緊急対策外来種に指定している（環境省, 2023）。

表2. 特定外来生物被害防止法により特定外来生物に指定されたアリ並びに生態系被害防止外来種リストに掲載されたアリ。

特定外来生物指定種

アカヒアリ(ヒアリ) *Solenopsis invicta*, ネツタイヒアリ(アカカミアリ) *Solenopsis geminata* を含むヒアリ類 23種及び各種間の交雑種*、**；アルゼンチンアリ *Linepithema humile*; コカミアリ *Wasmannia auropunctata*; ハヤトゲフシアリ *Lepisiota frauenfeldi**

生態系被害防止外来種

1) 総合対策外来種

ネツタイヒアリ *Solenopsis geminata*; アルゼンチンアリ *Linepithema humile*

2) 侵入予防外来種

アカヒアリ *Solenopsis invicta*; コカミアリ *Wasmannia auropunctata*

その他侵略性が高いと考えられる種

ツヤオオズアリ *Pheidole megacephala*; アシナガキアリ *Anoplolepis gracilipes*; アシジロヒラフシアリ *Technomyrmex brunneus*

*: 2020年9月11日指定, 同11月2日施行. **: 2022年, 新カテゴリーである要緊急対処特定外来生物に指定.

3. ハイドロジェルベイト剤

日本国内で行われているアリ類の駆除は、主にアリ専用のベイト剤を使うか殺虫剤散布によって行われている。アリ用ベイト剤は基本的に(1)餌成分, (2)有効成分(殺虫成分), (3)基

材（餌成分、有効成分を除く基質部分+容器）からなる。アリ専用のベイト剤が開発される理由は、アリの防除には社会性昆虫であるアリの独特の生活様式に対応させる必要があることによる。採餌に出かけた働きアリは固形物を見つけると、齧って、あるいは引きずって巣に持ち帰る。一方で、花や花外蜜腺から分泌される蜜、アブラムシ・カイガラムシなどが分泌する甘露、動物の遺体から滲み出る体液などの様々な液状のエサは「そ嚢」と呼ばれる器官に貯めて巣に持ち帰る。巣に戻った働きアリは、他の働きアリや幼虫、女王に齧った固形物を与える、あるいは液体状のエサを吐き戻して、口移しで渡す。これがアリ類に見られる一般的な「栄養交換」の方法である。従って、アリ類の防除では、この習性を利用して、遅効性の殺虫成分を混ぜた「ベイト剤（毒エサ）」を採餌に出かけた働きアリに持ち帰らせるか食べさせ、殺虫成分をコロニー内で拡散させることで、コロニー全体を殺虫するという戦略を採る（Rust & Su, 2012; Hoffmann *et al.*, 2016; 寺山ら, 2021）。

ア리를駆除するためには、働きア리를減らしても効果は上がらない。巣から外に出て来ず、もっぱら産卵の役割を担っている女王を最大の標的にしなければ、実質駆除はできないからである。取り分け「侵略的外来アリ」は恐ろしく高い増殖能力を持っていて、殺虫剤散布で働きア리를減らしても、防除のレベルを弱めると直ちに個体群密度をもとの状態に回復させる。

現在、アリ専用ベイト剤に対して一般社会では、大きな誤解が生じていることを懸念する。ベイト剤ならば、どのアリに用いても同じだろうと言う思い込みである。後述するアシジロヒラフシアリやハヤトゲフシアリでは、市販のベイト剤は非常に集まりが悪い。殺虫成分に対しても、種によって感受性は異なる。極端な例を挙げれば、アワテコヌカアリ *Tapinoma melanocephalum* にヒドラメチルノンはほとんど効かない（Klotz *et al.*, 1996）。侵略的外来アリの中でさえ、餌の嗜好性や女王の数などの生態的な違いがあり、そのため、個々のアリの種に合わせた(1)や(2)、(3)を調整しなければベイト剤として十分な効果は得られない。

近年、海外では液状の餌を好むアルゼンチンアリに対して、ハイドロジェルベイト剤が開発され、効果を上げている（Buczowski *et al.*, 2014; Tay *et al.*, 2020）。ハイドロジェルベイト剤は、殺虫成分および餌成分の水溶液を高吸水性ポリマーに担持させたベイト剤で、非常に保水性の高いゼリー状の製剤である（Rust *et al.*, 2015）。本ベイト剤は、地面に直接散布（ばら撒く）しても水分がすぐに土壌に吸収されてしまうことがないので、液体状ベイト剤の欠点を回避できる。ハイドロジェルベイト剤に用いる高吸収性ポリマーは自重の数百倍の水を吸収し、保水する。気象条件や設置場所にもよるが、野外へ散布後 1 から 2 週間は状態を維持できるものが多い。大容量を作成できることから、散布する際の分量の采配も自在で、アリの生息場所にくまなく散布することが可能である。吸水したポリマーによってさまざまな性状を採るが、餌物資や有効成分は内部に均一に入る。また、ポリマーの分量は微々たるものなので、水分を失ったハイドロジェルベイト剤は自然に消失するため、市販ベイト剤と異なり容器回収の手間が不要である。以上の特性から、ハイドロジェルベイト剤は蜜食性の強いアリ種に対し高い動員性を示し、かつ処理しやすい剤形といえる。さらに、通常のアリ用ベイト剤よりも圧倒的な量の処理が可能であり、液剤散布よりもはるかに低薬量を実現できる。また、後述の通り廉価で容易に作成が可能となる。

合衆国のチャネル諸島のサンタクルス島では、ハイドロジェルベイト剤を用いて 73.5ha ものアルゼンチンアリをほぼ根絶させており (Boser *et al.*, 2017) , 同諸島のサンクレメンテ島でも根絶事業の経過が報告されている (Merrill *et al.*, 2018) . 一般に侵略的外来アリの防除では、分布範囲が 10ha 以下であれば根絶成功率が高まり、20ha を超えると根絶は困難とされていることから (Hoffmann, 2011; Hoffmann *et al.*, 2011, 2016) , サンタクルス島での根絶事業は本ベイト剤が非常に有効であることを示している. さらに、合衆国や南アフリカの果樹園での防除や (Buczowski *et al.*, 2014; McCalla *et al.*, 2020) , 合衆国の市街地でのアルゼンチンアリの低密度管理 (Choe *et al.*, 2021) に用いられている.



図 1. ハイドロジェルベイト剤.

4. アシジロヒラフシアリへの適用

4-1. アシジロヒラフシアリ

本種は特定外来生物に指定されていないが、アカヒアリやネッタヒアリ、アルゼンチンアリ、ハヤトゲフシアリと並んで明らかに侵略性の高い外来アリである。本種は、インド、スリランカからインドシナ半島、東南アジアが原産地と推定され、ニューギニア、朝鮮半島、日本の記録は人為的移入によるものと考えられている。国内では本種が近年、九州本土、本州、小笠原諸島、伊豆諸島八丈島に侵入・定着し、増殖していることが判明した。九州では、宮崎県青島から古くから記録され、定着が確認されているが、鹿児島県薩摩半島では 2003 年ごろから分布の北進が見られ、低地を中心に分布が拡大している。本州では、和歌山県東牟婁郡串本町で野外コロニーが 2017 年に発見されており、その後も生息していることが確認されている (木野村, 2021)。小笠原諸島では父島で分布を拡大させており、現在ほぼ島の全域に分布を広めている。近年、弟島からも発見された (寺山ら, 2022)。

伊豆諸島八丈島では、2017年に初めて生息が発表されたが、2016年段階で島の北東岸から南西岸にかけて広域に分布が拡大しており、5集落の内の4集落で高密度に分布することが明らかになった (Ogura *et al.*, 2017; 寺山ら, 2022)。八丈島の個体群は一つの巨大なコロニー (スーパーコロニー) の可能性が高く (Ogura *et al.*, 2017), 少なくとも数千万個体は存在しているものと思われる。八丈島で本種の発生、被害が目立ち始めたのは2011年頃からとされている。集落地周辺の密度が高い場所では、頻繁に家屋侵入を受ける被害が出ている (図 2)。家屋への頻繁な侵入により、食材の被害, 不快感, 防除の手間や費用がかさんでいる。中には頻繁な侵入によりノイローゼ気味と訴える住民もいる。各家庭での殺虫剤や忌避剤の購入費用は大きく, スプレー式殺虫剤を1日1本の割合で消費する家庭もあり, ひと夏に数千円から数万円にもなる。巣は家屋に接して見られる場合も多く, 家屋内に巣を造ることも多い。置物の下や箆笥の中, 壁の隙間等に幼虫やサナギを運び込み, 容易に室内にも巣を形成する。さらに本種は, 電気ブレーカーや配線部分, エアコンディショナーの室外機に入り込み, 不具合が各地域で多発しているほか, 本種による火災報知器やタイマー付きのスプリンクラーの誤作動も生じている。

小笠原群島においても, ツヤオオズアリやヒゲナガアメイロアリと並んで, 本種が島民生活に被害を与える不快害虫として上げられており, 家屋に行列を作って侵入し食糧に群がる。他に,

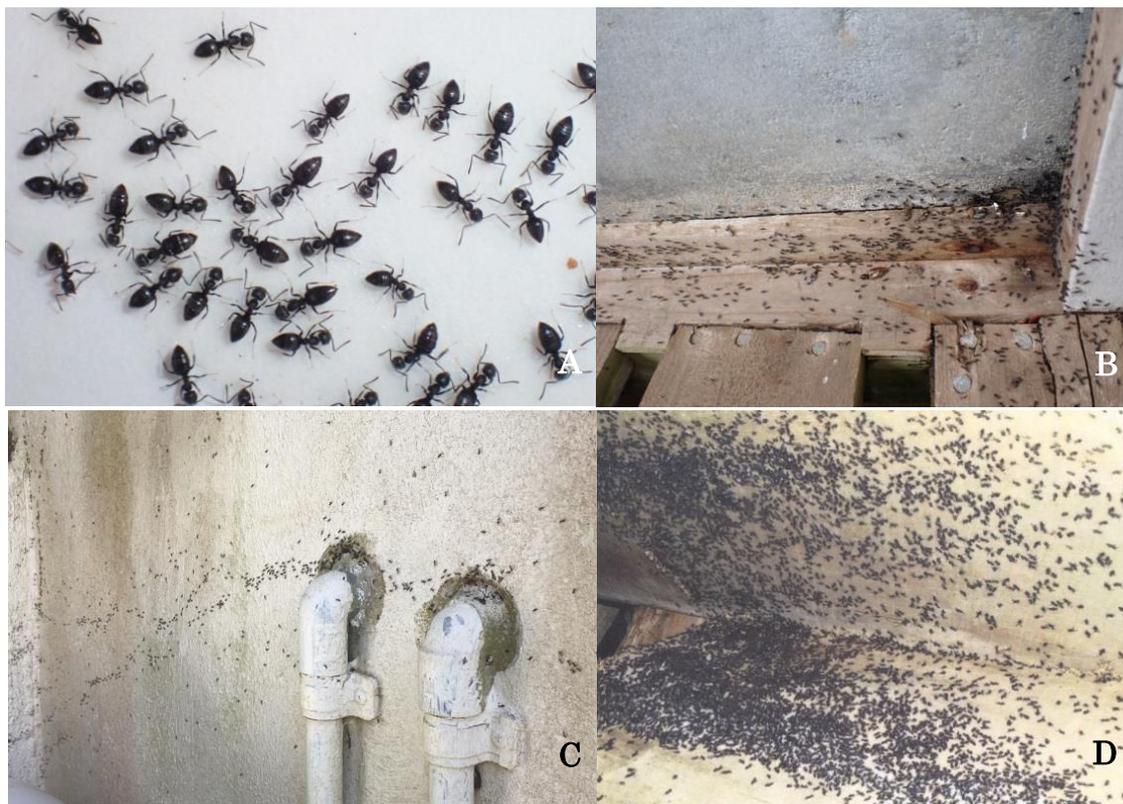


図 2. アシジロヒラフシアリ *Technomyrmex brunneus*. A, 働きアリ. B, 縁台に行列を作るアシジロヒラフシアリ. C, 外壁に複数の行列を作るアシジロヒラフシアリ. D, 家屋付近のアシジロヒラフシアリの巣. 物資の下や間, 壁の隙間, 空調や電気設備等の機器の中等いたる所にサナギや幼虫を運び込み巣とする。

本種による家屋への侵入被害は屋久島や奄美諸島、沖縄島においても確認している。八丈島では、アシジロヒラフシアリが住民生活に深刻な被害をもたらしていることについて、八丈町議会で取り上げられるに到り、八丈町は2020年度から本種の防除事業の実施を開始した(寺山ら, 2021; 砂村, 2022; 江口ら, 2023)。

本種が甘露排出半翅昆虫類(アブラムシやカイガラムシ等)と食的共生関係を結び、外敵から守ることでこれらが増殖し、二次的に作物が被害を受けている。沖縄島では、パイナップルの害虫パイナップルコナカイガラムシ *Dysmicoccus brevipes* (= *Pseudococcus brevipes*) を保護することで、作物の被害を増大させることが報告されている。小笠原群島の父島では、本種が最も頻繁に甘露排出半翅類に随伴し、本種が多く見られる場所では、カイガラムシがより多くの甘露を排出し、排出された甘露が大量に樹木の葉に落ち、これによってスス病が発生している状況も見られる。庭先の樹木や園芸植物でも同様で、ガーデニングや公園、商業施設やリゾート施設の緑地管理にも影響をきたす可能性がある(寺山ら, 2021, 2022)。

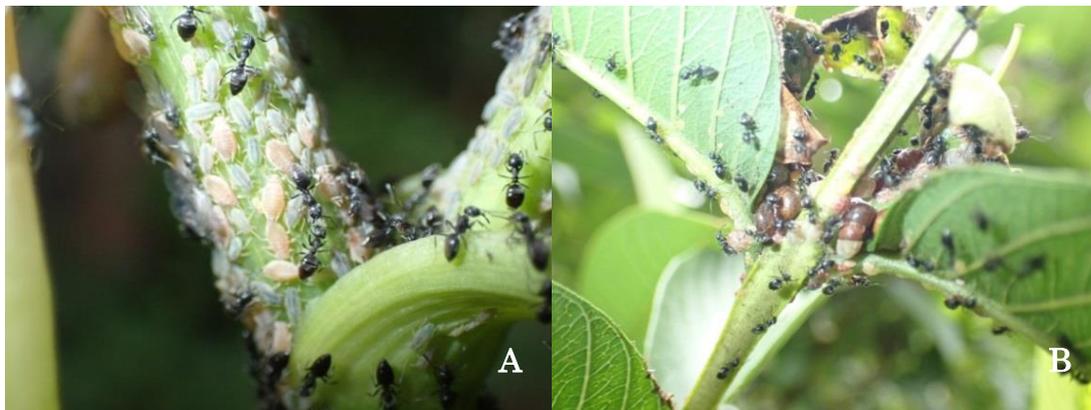


図3. 甘露排出半翅類に集まるアシジロヒラフシアリ. A, アブラムシに集まる状況. B, タマカイガラムシに集まる状況.

本種は、口移しによる栄養交換を行わない。その代わりに「栄養卵」という特殊な卵を介して栄養が受け渡されることが知られている(Yamauchi *et al.*, 1991) (図4)。つまり、口移しによるコロニー内での薬剤の拡散が期待できない。前述の通り、一般的なアリ種は口移しによる栄養交換を行うことから、ベイト剤に含まれる遅効性の有効成分が女王や幼虫を含めたコロニー全体に行きわたるため、ベイト剤によりコロニーを効率的に駆除できると考えられている。しかし、口移しによる栄養交換を行わない本種では、ベイト剤の口移しによる殺虫成分の伝搬が期待できず、防除効果は限定的なものにとどまってしまう懸念がある。筆者らは室内実験を行い、実際にアシジロヒラフシアリでベイト剤の伝搬効果が非常に弱いことを確認している(Sunamura *et al.* 2022)。さらに、コロニー内にインターカーストと呼ばれる非常に多くの無翅型の女王が存在し、巣が樹上から地表部にあることなど、他の侵略性種のヒアリ類やアルゼンチンアリ等とは生態が非常に異なっている。そのため、本種のこのような特殊な生態から、幾つもの検討すべき課題が存在する。その他、アシジロヒラフシアリに使えるベイト剤選びをする上で、市販ベイト剤の誘引力の低さ、本種の殺虫剤感受性の低さが加わり(後述)、外来アリ類の中でも防除難易

度最高ランクに位置づけられると考えられる（砂村, 2022; 江口ら, 2023）。この防除最高難度の外來アリを防除できれば、大方の侵略的外來アリの防除も可能であろう。



図4. アシジロヒラフシアリの栄養卵. A, 巣内で食糧として用いられる栄養卵. B, 働きアリによる栄養卵の産卵（矢印）.（和歌山県東牟婁郡串本町産；写真提供 木野村恭一）

4-2. 最適なベイト剤の開発

口移しによる栄養交換を行わないため、アシジロヒラフシアリでは、口移しによるコロニー内での薬剤の拡散が期待できない。そこで本種に対して、非常に多くの働きアリを効果的に動員・摂食させて殺虫することで、コロニー全体を飢えさせるという「兵糧攻め」戦略が現実的と考えられた。

兵糧攻めを成功させるためには、動員力と殺虫力の両面で、アシジロヒラフシアリに最適なベイト剤が不可欠である。本種に有効なアリ用ベイト剤を特定する目的で、市販のベイト剤 8 種類を用い、さらにショ糖水、蜂蜜水やピーナツクリームを加えて野外実験を実施した（図 5）。その結果、本種が固形やペースト状のアリ専用ベイト剤を全く好まないこと、その一方で液状の餌、特にショ糖水に非常によく集まることが分かった。アリ専用ベイト剤の中で唯一強い動員を示したのは、糖蜜を喫食成分、ホウ酸を殺虫成分とした液体状ベイト剤（図 5 の液体 1）であった（Terayama *et al.*, 2021）。良く集まった液体状のベイト剤は、殺虫成分が本種の防除に最適なものではなく、さらに液体状ベイト剤は土壤に容易に吸収されてしまうことから、長期の野外設置が出来ず、アリに対する一斉防除には不適な形状となっている。また、ホウ酸は残留性による環境攪乱の問題があり、野外での大量使用はできない。筆者らは苦肉の策として、市販のペースト状ベイト剤に砂糖水をかけて設置するという方法をとってみた。その結果、多少はベイト剤の消費を確認できたものの、アシジロヒラフシアリの個体数を減らすことはできなかった。以上、本種には既存のアリベイト製品が適用できないという結果から、本種に適したベイト剤を独自に開発する必要があると判断した。そのため、市販のベイト剤に集まらなかったアシジロヒラフシアリにハイドロジェルベイトを試してみた結果、非常に良い結果が得られた。アシジロヒラフシアリはショ糖溶液よりも、それらの成分を含ませたハイドロジェルベイト剤に集まった（図 6）。

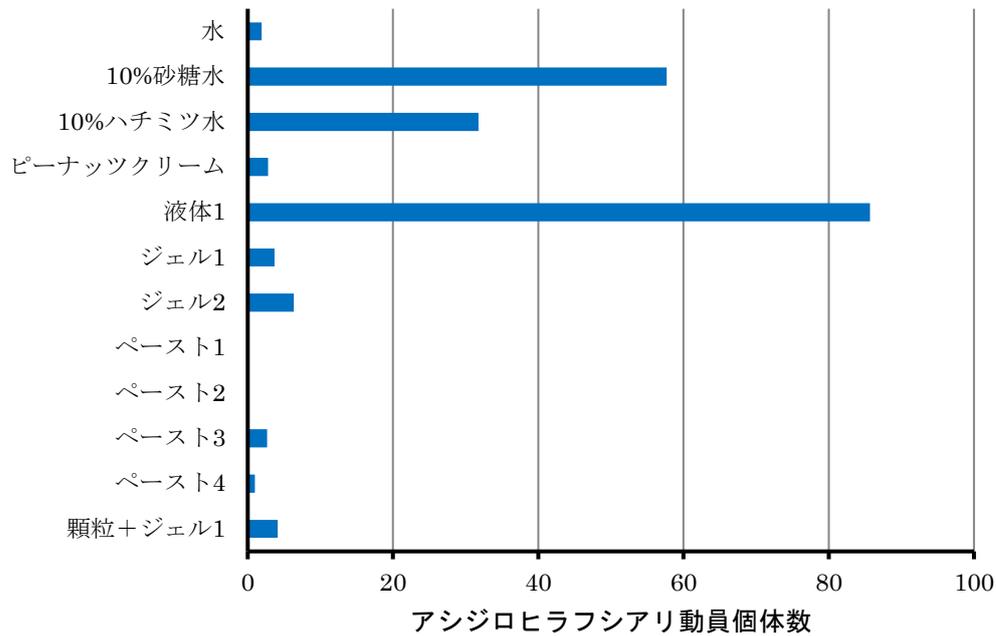


図5. アシジロヒラフシアリに実施した動員試験結果 (Terayama *et al.*, 2021 を改変). 「液体1」から「顆粒+ジェル1」までの8項目が市販のアリ用ベイト剤. 「液体1」は誘引成分を糖分55.4%とするもの. 設置後1時間後に集まった個体数. バーは9回の繰り返し実験の平均値を示す.

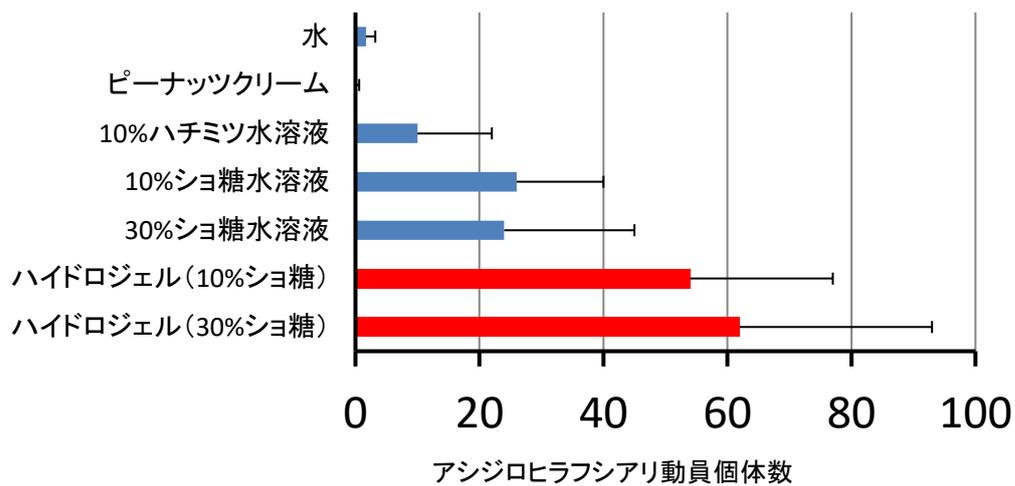


図6. ハイドロジェルベイトを加えた動員試験結果 (Sunamura *et al.*, 2022 を改変). 設置後1時間後に集まった個体数 (N=6).

アシジロヒラフシアリ用のベイト剤を作成するための有効成分の選定を行うため、飼育しているアシジロヒラフシアリを用いて、5種類の薬剤を喫食させる経口実験を室内で行った(図7)。実験は、20頭のアシジロヒラフシアリを直径10cmのプラスチックカップに入れ、水分補充のためにハイドロジェル1.5gを置き24時間そのままの状態で落ち着かせた。その後、各有効成分を含めたハイドロジェルベイトを1.5gを与え、1日から7日までの死亡率を調べた。その結果、ネオニコチノイド系のチアメトキサムがアシジロヒラフシアリに対し効果的であることを見出した。チアメトキサムを0.001%以上配合したハイドロジェルベイト剤は7日間で90%以上の殺虫率を示した(Sunamura *et al.*, 2022)。その他、フィプロニルやホウ酸など4種類の殺虫成分を試験したが、試験した濃度においては、殺虫率が低い、アリのベイト剤持ち帰り行動に異常をきたしてしまうなどの理由で性能が不十分であった。本種の薬剤感受性を調べてみると、本種は標準的なアリ種やアルゼンチンアリ等に比べ薬剤感受性が低く、フィプロニルやホウ酸といったアリ用ベイト剤によく利用されている有効成分について、市販製品と同程度の濃度で投与しても殺虫効果が不十分であった(Sunamura *et al.*, 2022)。

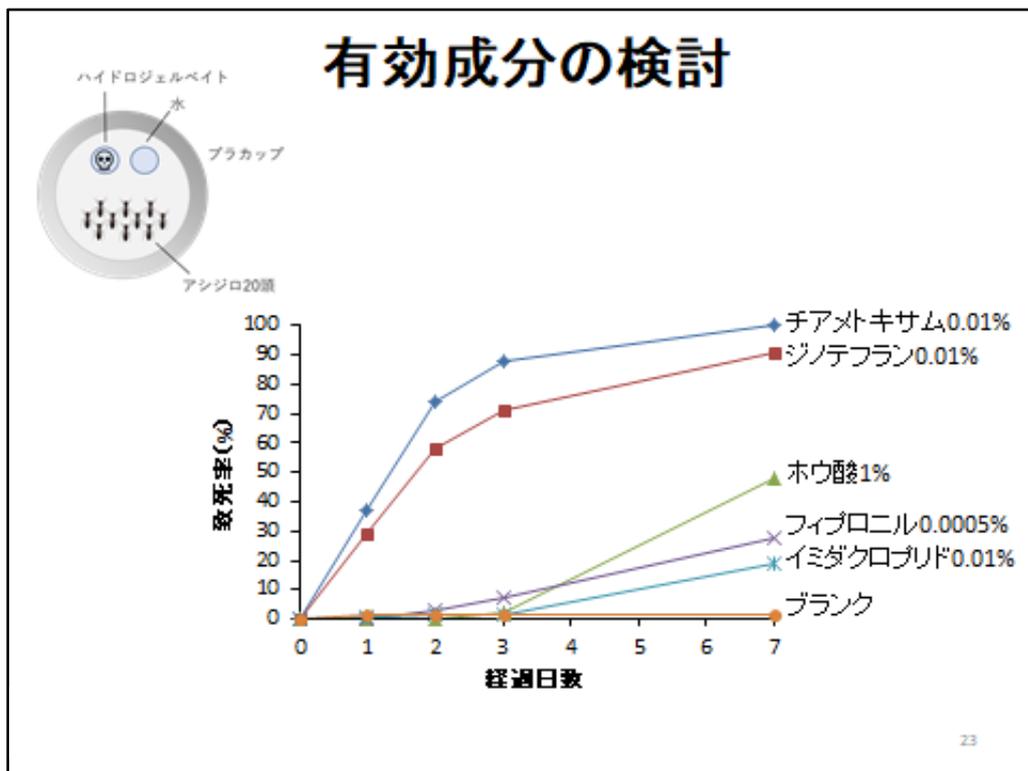


図7. 有効成分の効果実験結果(Sunamura *et al.*, 2022 を改変).

4-3. 住民参加型防除プログラム

アカヒアリやアルゼンチンアリの被害は今のところ、港湾、大都市やその周辺なので、行政と害虫駆除専門企業との連携で対応できている。一方、島嶼や農村部では資金も労力も不足しており、地域住民の協力、さらには地域住民が主体となった防除の展開が不可欠である。近年、外来種問題や害虫対策への一般市民の積極的な関わり(citizen science)の重要性が説かれ(Thomas *et al.*, 2017; Sheard *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019; Encarnação *et al.*, 2021)、行政と研究機

関の共同のみならず，一般市民とのネットワーク化の重要性が指摘されて来ている (Omondigbe *et al.*, 2017; Caeter *et al.*, 2021) .

八丈島レシピ

組成	使用した材料	含有率
① 有効成分	チアメトキサム20%液剤	0.001
② ショ糖	グラニュー糖	30
③ 水	水道水	70
④ 高吸水性ポリマー	Newsorb (ポリアクリル酸塩: Newstone社)	0.5
合計		約100



島には害虫駆除業者がいないため
「非専門家でも調達・作成できるベイト剤」
を志向

23

図 8. ハイドロジェルベイト剤作成のレシピ。

コスト

八丈島レシピのハイドロジェルベイト剤を、サンタクルーズ島のアルゼンチンアリ根絶事業 (Boser *et al.* 2017) と同等量 (148 L/ha \approx 1.8 kg/家屋) で1回処理する場合

組成	含有率	およその重量	単価	材料費
チアメトキサム液剤	0.001%AI	0.018 g	¥300 / g	¥5.4
ショ糖(※)	30%	0.54 kg	¥300 / kg	¥162
水	70%	1.26 kg	—	—
高吸水性ポリマー	0.5%	9 g	¥1.3 / g	¥12
合計	100%	1.8 kg	—	¥179.4

※ショ糖濃度はより低減しても十分アリを動員可能

安価に大容量を準備でき、アリのいるところにくまなく処理できる

24

図 9. ハイドロジェルベイト剤作成コスト。

ハイドロジェルベイト剤は、レシピをもとに簡単に作成可能で、水に砂糖を加え、殺虫成分を加え、攪拌、さらに高吸水性ポリマーを加えて攪拌すれば完成する（図 10）。図 8 は、アシジロヒラフシアリ用に準備したハイドロジェルベイト剤作成のレシピである。ポリマーとして、ポリアクリルアミド（Polyacrylamide ; PAA）を使用するもので、材料は全て容易に入手でき、通信販売で一般消費者でも購入可能なものばかりである。レシピでは、ショ糖の含有量を 30%としてあるが、20%にしても問題ない。非専門家が作成する場合、毒性の高い薬剤（毒物、劇物）は避け、より安全な不快害虫用製剤（普通物）を用いる点は注意したい。完成したハイドロジェルベイト剤は、小分けにして各地区へ配布する。蓋をして日陰に保管すれば、薬剤や菌の混入具合によるが、数週間は保存が可能である。

また、ハイドロジェルベイト剤の利点の一つとして、非常に安価である点が挙げられる。1 家屋当たりの外来アリの防除に、市販のベイト剤を使うとするなら、一般的に 1 回 2000 円（8 個）程度のコストがかかる。ただし 8 個では、土地面積の広い八丈島の標準的な 1 世帯（家屋＋庭）を処理するには足りない。しかし、ハイドロジェルベイト剤では 200 円以下で 1 世帯を一回処理するのに十分な量を作成できる（図 9）。したがって、ベイト剤にかかる費用は 1/10 をはるかに下回る。行政機関が広域な外来アリ防除を行う際には大きな予算が必要となることから、予算の壁に当たって十分な防除が実施できないケースがある。しかし、ハイドロジェルベイト剤を用いた場合、購入費用は一桁少ないことから、低予算で防除が実施できる場合も増えよう。また、害虫防除事業者が、散布用液剤を希釈して砂糖、高吸水性ポリマーと混合してハイドロジェルベイト剤を調製することも容易である。液剤を散布するよりもはるかに低薬量、低コストでありつつ、業務用ベイト剤よりも圧倒的な量を処理できるのが長所である。ハイドロジェルベイト剤の散布には、B & G エクステンダーバンやコーキングガンが使える、短時間の大量散布も可能である。

2021 年 5 月末に、日本初のハイドロジェルベイト剤による一斉防除実験を八丈島の檜立地区で実施した。住区域で密度を低減させる目的のための防除プログラムで、事前の検討結果に基づいて、チアメトキサム 0.001%、砂糖 30%を配合したハイドロジェルベイトを確定処方として、八丈島の檜立地区にて住民参加型の一斉防除試験を行った。処方および防除プログラムは、現地に対応可能な害虫防除事業者がないことから、「非専門家でも容易に調達・作成・処理可能」をコンセプトとした。砂糖濃度は低くしても良かったかもしれないが、野外のアブラムシ甘露等と比較してできるだけアシジロヒラフシアリにとって魅力的となるように砂糖濃度を高く設定した。

調達した材料を使って、役場職員や現地スタッフと協働して約 500 kg のハイドロジェルベイト剤を作成した（図 11）。これをタッパーに小分けして住民家屋 272 世帯、18 公共施設、2 社（神社）に対し 1 世帯・施設あたり 1.8 kg 配布し、指定した散布日に住民自らがスプーンで自宅敷地内に散布した。このようにして地区全体の一斉防除を行った。

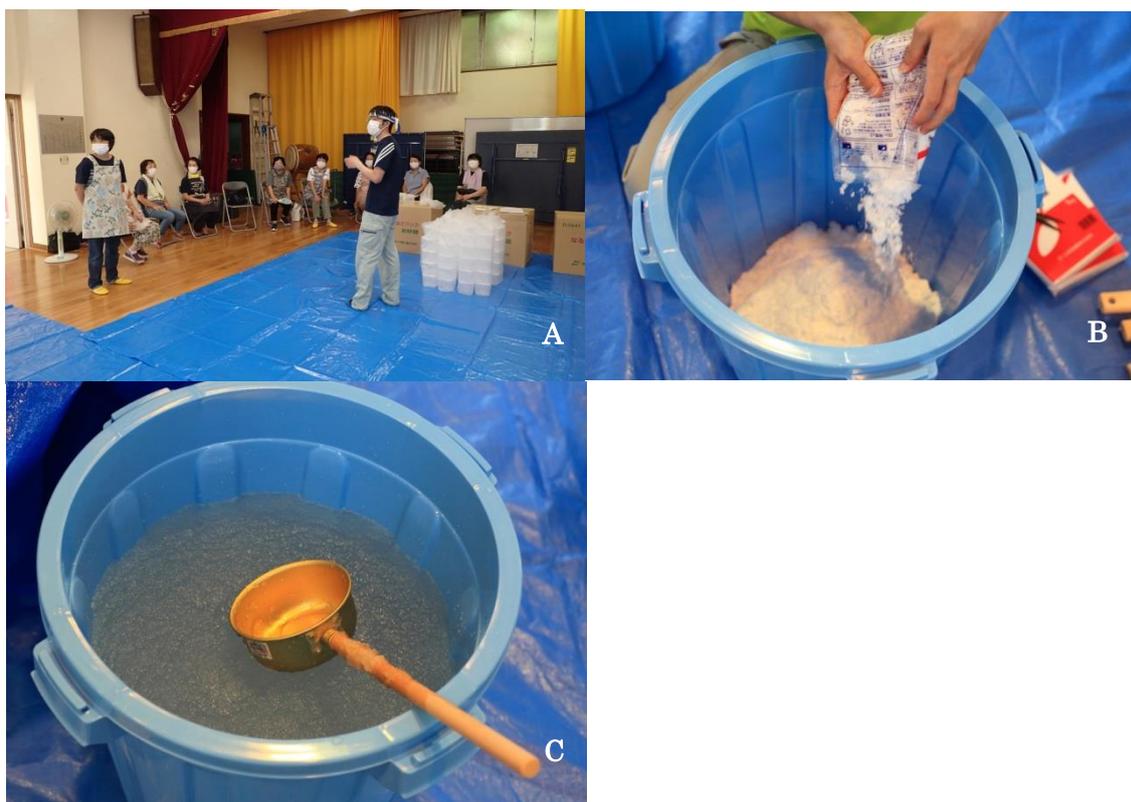


図 10. ハイドロジェルベイト剤の作成. A: 公民館や体育館等の作業場所の確保, B: 砂糖と薬剤を容器内で溶かす, C: 高吸水性ポリマーを加えて完成. 特別な機材は不要.

その結果、一斉防除実施 4 日前に比べて処理の 9 日後には 87%のアシジロヒラフシアリ個体数の減少が確認できた(図 12)。ただし、散布の 37 日後のモニタリングでは散布前の 68%にまでアリ数の回復が見られた。八丈島の試験地は里山環境にあり、住宅はまばらで周囲に林や藪が多い。そのため、住宅の周囲の巣を駆除しても、ハイドロジェルベイト剤を散布していない緑地や農地の防風林、植林地など周辺環境からアシジロヒラフシアリが再侵入してくるために回復が速かったのだと考えられた。手薄になりがちな「集落外周域」での防除をどのように効率的に進めていくかが今後の課題であろう。

一斉防除試験に参加した住民に事後アンケートを行ったところ、ハイドロジェルベイト剤の取り扱いの簡便さ、アシジロヒラフシアリへの誘引・殺虫効果について非常に好評であった(Sunamura *et al.*, 2022)。



図 11. 八丈島におけるハイドロジェルベイト剤作成の様子. A: 大型ゴミバケツ内でハイドロジェルベイト剤を作成しているところ. 攪拌機があると楽に作成できる. B: ハイドロジェルベイト剤をタッパーに小分けしているところ. C: 小分けしたハイドロジェルベイト剤を各家庭に配達する準備. D: 散布したハイドロジェルベイト剤に群がるアシジロヒラフシアリ. (砂村, 2022).

以上、ハイドロジェルベイト剤は低コストで作成でき、作成に必要な材料や道具はネットショッピングなどで簡単・安価に購入できるし、簡単なガイダンスを受けることで住民自らベイト剤の作成や散布もできるため、地元自治体の限られた予算内で、住民自らの手で自律的に行える防除プログラムと言える。そして、住民参加型の防除プログラムは、人的資源の乏しい離島や都市から離れた周辺地域における外来アリ類の防除に大きな可能性を与えるものである（砂村, 2022）。今後の外来アリ防除の基本戦略として、国や都道府県行政＋薬剤メーカーによる広域的なアプローチと、市町村行政＋害虫駆除専門業者＋地域コミュニティによるきめ細やかなアプローチを、適時適所で重層的に展開できるように、体制を整えておく必要がある（江口ら, 2023）。

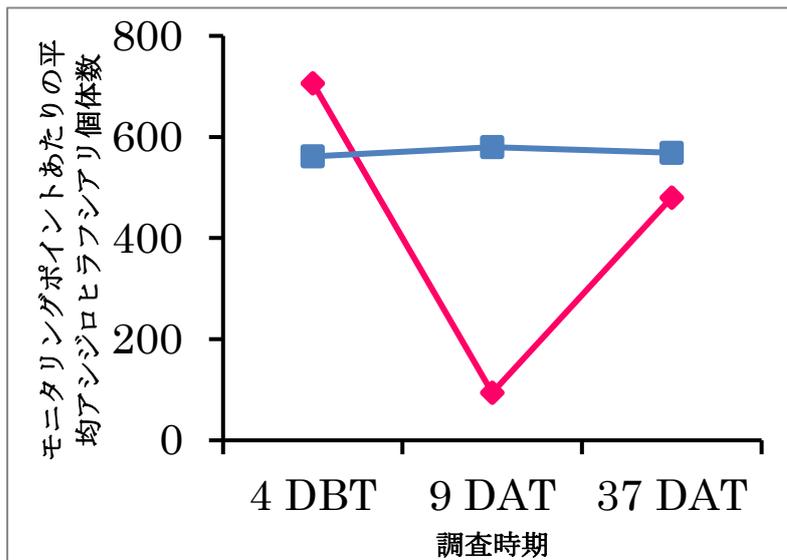


図 12. 八丈島樫立地区での一斉防除試験の結果(Sunamura *et al.*, 2022 を改変). 赤: ベイト剤処理区(n=10), 青: 非処理区(n=5). データは処理区と非処理区の平均値を示す. 4 DBT: 一斉処理の 4 日前, 9 DAT: 一斉処理 9 日後, 37 DAT: 一斉処理 37 日後.

5. アルゼンチンアリ等の他種アリ類への適用

本来、ハイドロジェルベイト剤はアルゼンチンアリを対象として海外で優れた実績をあげている製剤である。日本での使用は筆者らのアシジロヒラフシアリへの適用が初事例であるが、国内ですでに問題になっているアルゼンチンアリなどに対しても展開が期待される。2022 年段階で、アルゼンチンアリを標的とした防除実験が神奈川県で実施され、良好な結果が得られた（富岡ら, 2023）。

アルゼンチンアリは 1993 年 7 月に広島県廿日市市で生息が確認されたのち、2021 年段階で本種の侵入地域は 13 都府県（1 都 2 府 10 県）となっている。その後、徳島県で従来の 2 カ所の生息地に加えて、さらに 3 カ所の新たな生息地が 2021 年に公表された。2022 年には北海道札幌市からの記録が発表され、奈良県奈良市内での定着が公表された。また埼玉県からの記録が 2023 年に公表され、これらを含めると現在沖縄から北海道までの 16 都道府県（根絶させた静岡県を含む）から発見されていることになる（寺山, 2021, 2023）。アルゼンチンアリは雑



図 13. ハイドロジェルベイト剤に集まるアルゼンチンアリ（奈良県奈良市）。

食性ではあるが、餌の 92%は花蜜，甘露等の液状成分で（Markin, 1970; Abril *et al.*, 2007），ハイドロジェルベイト剤による防除が好適と思われる（Rust *et al.*, 2015）。

樹上から地上部にかけて営巣し，森林にも入り込むアシジロヒラフシアリの防除法を確立することは，将来，日本への侵入が懸念される森林・樹上性の侵略種コカミアリ *Wasmannia auropunctata*（2021 年に台湾で，2022 年に中国山東省で定着が確認されている；Lee *et al.*, 2021; Hsu *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022）やフタコブカタアリ *Dolichoderus thoracicus*（台湾で害虫化し問題になっている；Lin *et al.*, 2017; Lai, 2019; Hsu *et al.*, 2022）への準備・対策として非常に重要であると考えている。

6. 更なる改良を目指す

ハイドロジェルベイト剤は，オプションな改良を行い使用できる便宜性を多く持つ。有効成分については，標的とする種によって調整可能で，種によって最適な有効成分を含ませて使用することが可能である。餌成分では，ショ糖濃度の自在な調整が可能であると同時に，誘引性の高い成分の添加，例えばヒアリ用にラード+サクラエビ粉を添加する，アルゼンチンアリ用にココロギ粉を添加するなどの工夫が可能である。さらに，アリが用いる道標フェロモン成分（種によって異なる）の同定・化学合成ができれば，それをベイトに加えて使用することもできるかもしれない。ハイドロジェルの作成に用いるポリマーは微々たる量であり，時間経過とともに自然に消失するため，野外に散布しても回収する必要がないという点でも優れていることを説明した。一般のアリ用ベイト剤では広域処理を考えた場合，容器の準備はコスト面でも労力面でも簡便とは言いがたい。また，生分解性の容器を使用しない限り，容器自体がゴミとして処理地域に残されてしまうし，回収する場合それに費やす労力は大きい。近年，自然分解されないマイクロプラスチックの問題など，環境保全への社会の注目度は大きい。ハイドロジェルベイト剤では生分解性ポリマーの開発研究が海外で行われており，褐藻由来のポリマー（アルギン酸）を用いた研究例が発表されている（Tay *et al.*, 2017）。今後国内でも，セルロースナノファイバー（CNF）

などを用いた生分解性ポリマーの研究開発が期待される。これらが実用化されることにより、環境への負荷の少ないアリ用ベイト剤が開発可能となる。

八丈島では、アシジロヒラフシアリが森林部のかなり奥まで侵入していることが判明し（江口ら、2023）、八丈島における本種の森林への拡大は着実に進行していることが推定された。富士箱根伊豆国立公園に含まれる八丈島の在来森林には、さまざまな固有種・亜種が分布している。その典型的な例が、固有種のアシジロヒラフシアリ *Prosopocoilus hachijoensis* である。本種は個体数が減少傾向にあるとされている。また本種は飛翔せず、地上を徘徊する性質があり、森林に隣接する世帯の庭に散布されたハイドロジェルベイト剤を誤食して、死んでしまうという事例も報告された（江口ら、2023）。そのことから、「ハイドロジェルベイト剤が在来種・固有種に与える悪影響」と「アシジロを放置することによる森林生態系への悪影響」という対立が生じており、在来種・固有種への影響をできるだけ少なくする方法を検討・開発する必要もある。現在八丈島では、森林に隣接する世帯には、ハイドロジェルベイト剤をプリンやゼリーなどのカップに入れて、水切りネットなどで蓋をしてから設置する、クワガタ類が集まりやすい外灯の近くには設置しないなどの誤食防止策を講じるようお願いをしている。ハイドロジェルベイト剤は容器なしに散布できることが大きな利点であるが、森林内など生物多様性の保全に特に注意を払うべき環境で使用するには、非標的生物に対する影響を考慮するべきで、アリ以外は入れられないような構造の生分解性プラスチック製容器を開発・使用するなどの工夫も必要であろう。

ハイドロジェルベイト剤が、作成に特殊な技術は不要で、非専門家でも容易に作成できることが優れている点である。そうであっても、広域防除を行う上では、大量のベイト剤の材料を入手し、作成し、定期的に世帯に配布するという作業に莫大な労力と時間を要する。事業母体である自治体の担当者や、地域との橋渡しをする集落・自治会の方々の負担を軽減するため、作業工程のさまざまなステップで省力化を進める必要がある。

労力は掛かるが安く実施できる現在の方法に加え、省力化のために多少予算を割くことができる場合の商品化（大口注文向けの材料パッケージ化や小口・個人注文向けのキット）は有効であろう。また、ハイドロジェルベイトは薬品に関する専門的知識がなくても取り扱うことができるので、島嶼・遠隔地では、地元の建設会社、造園業者などが「材料パッケージ」を利用して、ハイドロジェルベイト剤散布を副業として実施することができるかも知れない。シルバー人材活用の可能性もある。アシジロヒラフシアリのモニタリングのための自動アリ同定カウントプログラム「DXANTS」開発者である東京都立大学の大学院生の沓掛さんは、『アシジロヒラフシアリの防除（ベイト剤散布）と島の自然・文化体験を組み合わせた、大学生向けの「旅行支援付き・町おこしイベント」をやってみたらどうか』と言った、我々にはなかなか思い付かない「若者らしい」アイデアを出してくれた。八丈島民ではない私たちがまだ知らない、そして島民さえも気づいていない「島の底力」が眠っているかも知れない。今後とも自治体関係者や住民と膝を突き合わせて話す機会を大事にして、島の底力を活かした防除を展開していきたいと思う。

要約

- ✓ 液体状の餌を好むアルゼンチンアリなどに対し、ハイドロジェルベイト剤は嗜好性が高く殺虫効果に優れる。
- ✓ 液剤を散布するよりもはるかに低薬量，低コストでありつつ，市販ベイト剤よりも大容量を処理できる。ケース遺棄の問題や回収の手間が生じないのもメリット。
- ✓ 作成に特殊な技術は不要。
- ✓ 種によって殺虫成分や餌成分を変えることができ，汎用性がある。
- ✓ 海外では多くの実績が挙がってきており，生分解性のもの等も開発が進んでいる。

謝辞

ハイドロジェルベイト剤の開発者である Grzegorz Buczkowski (Purdue University, USA) , 外来アリ防除の世界的権威 Ben Hoffmann (CSIRO, Australia) には，ハイドロジェルベイト及び外来アリについての多くの貴重なアドバイスを頂いた。木野村恭一氏 (岐阜市) からはアシジロヒラフシアリの貴重な写真を御提供いただいた。また，アシジロヒラフシアリの防除研究にご協力下さった以下の方々に御礼を申し上げる：小野高志，藤巻良太，関村優子，河野周平，沖山優太，高須英之，大類由里子，河田 元，木下恵美，島田 努，橋口彩加，篠崎里江，所 雅彦，向井裕美，滝久 智，小林陽允，松本和也，池上穂乃香，荻原雪乃，黒岩康輔，佐藤守倫。さらに，ハイドロジェルベイト剤による広域防除試験にご協力いただいている八丈町の住民の方々に感謝の意を表す。本研究は，東京都立大学学長裁量枠社会連携支援 (2021・2022・2023 年度；代表：江口克之) および東京都立大学戦略的研究プロジェクト (2020-2022 年度；代表：村上哲明) の支援を受けて行われている。

引用文献

- Abril, S., J. Oliveras & C. Cómez, 2007. Foraging activity and dietary spectrum of the Argentine ant (Hymenoptera: Formicidae) in invaded natural areas of the northeast Iberian Peninsula. *Environmental Entomology*, **36**: 1166-1173.
- Bolton, B., 2007. Taxonomy of the dolichoderine ant genus *Technomyrmex* Mayr (Hymenoptera: Formicidae) based on the worker caste. *Contributions of the American Entomological Institute*, **35**: 1-149.
- Boser, C. L., C. Hanna, D. A. Holway, K. R. Faulkner, I. Naughton, K. Merrill, J. M. Randall1, C. Cory, D.-H. Choe & S. A. Morrison, 2017. Protocols for Argentine ant eradication in conservation areas. *Journal of Applied Entomology*, **141**: 540-550.
- Buczkowski, G., 2020. Hydrogel baits pose minimal risk to non-target insects and beneficial species. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, **168**: 948-955.
- Buczkowski, G., E. Roper, & D. Chin, 2014. Polyacrylamide hydrogels: an effective tool for

- delivering liquid baits to pest ants (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, **107**: 748-757.
- Buczowski G., E. Roper, D. Chin, N. Mothapo & T. Wossler, 2014b. Hydrogel baits with low-dose thiamethoxam for sustainable Argentine ant management in commercial orchards. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, **153**: 183-190.
- Carter, L., A. Mankad, A. Zhang, M. I. Curnock & C. R. J. Pollard, 2021. A multidimensional framework to inform stakeholder engagement in the science and management of invasive and pest animal species. *Biological Invasions*, **23**: 625-640.
- Chen, C.-q., Y. Zhao, Y.-y. Lu, H. Ran & Y.-j. Xu, 2022. First record of the little fire ant, *Wasmannia auropunctata* (Hymenoptera: Formicidae), in Chinese mainland. *Journal of Integrative Agriculture*, **21**: 2-6.
- Choe, D.-H., J.-W. Tay, K. Campbell, H. Park, L. Greenberg & M. K. Rust, 2021. Development and demonstration of low-impact IPM strategy to control Argentine ants (Hymenoptera: Formicidae) in urban residential settings. *Journal of Economic Entomology*, **114**: 1752-1757.
- Cuthbert, R. N., C. Diagne, P. J. Haubrock, A. J. Turbelin & F. Courchamp, 2021. Are the “100 of the world’s worst” invasive species also the costliest?. *Biological Invasions*, <https://doi.org/10.1007/s10530-021-02568-7>
- 江口克之・寺山 守・砂村栄力・高須英之, 2023. 住民の力を結集して「スーパー難防除外来アリ」アシジロヒラフシアリを叩け! -八丈島での挑戦. ペストコントロール, **201**: 19-24.
- Encarnação, J., M. A. Teodósio & P. Morais, 2021. Citizen Science and Biological Invasions: A Review. *Frontiers in Environmental Science*, **8**:602980. doi: 10.3389/fenvs.2020.602980
- Hester, S. M. & O. J. Cacho, 2017. The contribution of passive surveillance to invasive species management. *Biological Invasions*, **19**: 737-748.
- Hoffmann, B. D., 2011. Eradication of populations of an invasive ant in northern Australia: successes, failures and lessons for management. *Biodiversity and Conservation*, **20**: 3267-3278.
- Hoffmann, B., D. Davis, K. Got, C. Jennings, S. Joe, P. Krushelnycky, R. Miller, G. Webb & M. Widmer, 2011. Improving ant eradications: details of more successes, a global synthesis and recommendations. *Aliens: The Invasive Species Bulletin*, **31**: 16-22.
- Hoffmann, B. D., G. M. Luque, C. Bellard, N. D. Holmes & C. J. Donlan, 2016. Improving invasive ant eradication as a conservation tool: A review. *Biological Conservation*, **198**: 37-49.
- Holway, D. A., L. Lach, A. V. Suarez, N. D. Tsutsui & T. J. Case, 2002. The causes and consequences of ant invasions. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **33**: 181-233.
- ISSG: Global Invasive Species Database (GISD). Invasive species specialist group of the IUCN species survival commission. <http://www.issg.org/database> (2023.4.25 確認)

- Hsu, P.-W., C.-C. Lee, F.-C. Hsu, S.-P. Tseng, C.-H. Shih, J. W. Tay, Y.-C. Hsiao, C.-C. Scotty Yang & C.-C. Lin, 2022. Invasion of the little fire ant *Wasmannia auropunctata* (Roger, 1863) (Hymenoptera: Formicidae) in Taiwan. *BioInvasions Records*, **11**: 864-875.
- Hsu, F.-C., S.-P. Tseng, P.-W. Hsu, C.-W. Lu, C.-C. Scotty Yang & C.-C. Lin, 2022. Introduction of a non-native lineage is linked to the recent black cocoa ant, *Dolichoderus thoracicus* (Smith, 1860), outbreaks in Taiwan. *Taiwania*, **67**: 271-279.
- Johnson, B. A., A. D. Mader, R. Dasgupta & P. Kumar, 2020. Citizen science and invasive alien species: An analysis of citizen science initiatives using information and communications technology (ICT) to collect invasive alien species observations. *Global Ecology and Conservation*, **21**: e00812. <https://doi.org/10.1016/J.gecco.2019.e00812>
- 環境省：特定外来生物等一覧. <https://www.env.go.jp/intro/2outline/list.html> (2023.4.25 確認)
- 木野村恭一，2021. アシジロヒラフシアリ. (<https://kinomari-formica.amebaword.com/posts/7263486/>)(2023.5.23 確認)
- Klotz, J. H., D. H. Oi, K. M. Vail & D. F. Williams, 1996. Laboratory evaluation of a boric acid liquid bait on colonies of *Tapinoma melanocephalus*, Argentine ants and Pharaoh ants (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, **89**: 673-677.
- Lai, C.-J., 2019. The black cocoa ants invading orchards and representing an emerging nuisance in Xihu Toenship; the Council of Agriculture offering help in preventing ant invasion. *Bulletin of Miaoli District Agricultural Research Extension Station*, **260**: 4. (In Chinese)
- Lee, C.-C., P. W. Hsu, F.-C. Hsu, C.-H. Shih, Y.-C. Hsiao, C. C. Scotty Yang & C. C. Lin, 2021. First record of the invasive little fire ant (*Wasmannia auropunctata*) (Hymenoptera: Formicidae) in Taiwan: invasion status, colony structure, and potential threats. *Formosan Entomology*, **41**: 172-181. (In Chinese with English abstract)
- Lin, C.-C., T.-W. Chang, H. W. Chen, C.-H. Shih & P.-C. Hsu, 2017. Development of liquid bait with unique bait station for control of *Dolichoderus thoracicus* (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, **110**: 1685-1692.
- Lowe, L., M. Browne, S. Boudjelas & M. De Poorter, 2000. 100 of the World's worst invasive alien species a selection from the global invasive database. The Invasive Species Specialist Group (ISSG), Auckland.
- Luque, G. M., C. Bellard, C. Bertelsmeire, E. Bonnaud, P. Genovesi, D. Simberloff & F. Courchamp, 2014. The 100th of the world's worst invasive alien species. *Biological Invasions*, **16**: 981-985.
- Markin, G. P., 1970. Foraging behavior of the Argentine ant in a California citrus grove. *Journal of Economic Entomology*, **63**: 740-744.
- McCalla, K. A., J. W. Tay, A. Mulchandani, D. H. Choe & M. S. Hoddle, 2020. Biodegradable alginate hydrogel bait delivery system effectively controls high-density populations of Argentine ant in commercial citrus. *Journal of Pest Science*, **93**: 1-12.

- McGlynn, T. P., 1999. The worldwide transfer of ants: geographical distribution and ecological invasions. *Journal of Biogeography*, **26**: 535-548.
- Merrill, K. C., C. L. Boser, C. Hanna, D. A. Holway, I. Naughton, D.-H. Cho & E. E. Wilson Rankin, 2018. Argentine Ant (*Linepithema humile*, Mayr) eradication efforts on San Clemente Island, CA, USA. *Monographs of the Western North American Naturalist*, **78**: 829-836.
- Ogura, Y., A. Yamamoto, H. Kobayashi, A. L. Cronin & K. Eguchi, 2017. New discovery of an exotic Ant *Technomyrmex brunneus* (Formicidae: Dolichoderinae) on Hachijo-jima, Izu islands, an oceanic island of Tokyo prefecture, Japan. *ARI –Journal of Myrmecological Society of Japan*, **38**: 45-52.
- Omondiagbe, H. A., D. R. Towns, J. K. Wood & B. Bollard-Breen, 2017. Stakeholders and social networks identify potential roles of communities in sustainable management of invasive species. *Biological Invasions*, **19**: 3037-3049.
- Rust, M. K., A. Soepronon, S. Wright, L. Greenberg, D.-H. Choe & C. L. Boser, 2015. Laboratory and field evaluations of polyacrylamide hydrogel baits against Argentine ants (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, **108**: 1228-1236.
- Rust, M. K. & N.-Y. Su, 2012. Managing social insects of urban importance. *Annual Review of Entomology*, **57**: 355–375.
- Sheard, J. K., N. J. Sanders, C. Gundlach, S. Schär & R. S. Larsen, 2020. Monitoring the influx of new species through citizen science: the first introduced ant in Denmark. *PeerJ*, DOI 10.7717/peerj.8850
- 自然環境研究センター(編著), 2008. 日本の外来生物. 平凡社, 479 pp.
- Sunamura, E., M. Terayama, R. Fujimaki, T. Ono, G. Buczkowski & K. Eguchi. 2022. Development of an effective hydrogel bait and an assessment of community-wide management targeting the invasive white-footed ant, *Technomyrmex brunneus*. *Pest Management Science*, **78**: 4083-4091.
- 砂村栄力. 2022. ハイドロジェルベイト剤による八丈島の樹上生外来アリの防除. 林業と薬剤, **241**: 26-31.
- Tay, J. W., D. H. Choe, A. Mulchandani & M. K. Rust, 2020. Hydrogels: Form controlled release to a new bait delivery for insect pest management. *Journal of Economic Entomology*, **113**: 2061-2068.
- Tay, J. W., M. S. Hoddle, A. Mulchandani & D. H. Choes, 2017. Development of an alginate to deliver aqueous bait for pest ant management. *Pest Management Science*, **73**: 2028-2038.
- Terayama, M., E. Sunamura, R. Fujimaki, T. Ono & K. Eguchi, 2021. A surprisingly non-attractiveness of commercial poison baits to newly established population of white-footed ant, *Technomyrmex brunneus* (Hymenoptera: Formicidae), in a remote island of Japan. *Sociobiology*, **68**: e5898.

- 寺山 守, 2021. 緊迫する侵略的外来アリの侵入. *ペストコントロール*, **196**: 11-16.
- 寺山 守, 2023. 侵略的外来アリ 4 種の国内分布記録. *蟻 (日本蟻類研究会会誌)*, **44**: 78-91.
- 寺山守, 砂村栄力, 藤巻良太, 小野高志, 江口克之. 2022. 八丈島における侵略的外来種アシジロヒラフシアリ *Technomyrmex brunneus* (膜翅目: アリ科)の分布の拡大. *昆虫 (ニューシリーズ)*, **25**: 55-59.
- 寺山守, 砂村栄力, 藤巻良太, 小野高志, 森英章, 戸田光彦, 江口克之. 2021. 侵略的外来種アシジロヒラフシアリ *Technomyrmex brunneus* (膜翅目: アリ科)の防除実施上の諸問題. *蟻 (日本蟻類研究会会誌)*, **42**: 34-53.
- Thomas, M. L., N. Gunawardene, K. Horton, A. Williams, S. O'Connor, S. McKirdy & J. van der Merwe, 2017. Many eyes on the ground: citizen science is an effective early detection tool for biosecurity. *Biological Invasions*, DOI 10.1007/s10530-017-1481-6
- 富岡康浩・田中和之・木村悟朗・寺山 守, 2023. ハイドロジェル剤を用いた特定外来生物アルゼンチンアリの防除事例. *Medical Entomology and Zoology (Supplement)*, **74**: 52.
- Wong, M. K. L., E. P. Economo & B. Guenard, 2023. The global spread and invasion capacities of alien ants. *Current Biology*, **33**: 1-6.
- Yamauchi, K., T. Furukawa, K. Kinomura, H. Takamine & K. Tsuji, 1991. Secondary polygyny by inbred wingless sexuals in the dolichoderine ant *Technomyrmex albipes*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, **29**: 313-319.
- Zhang, Y. M., T. R. Vitone, C. G. Storer, A. C. Payton, R. R. Dunn, J. Hulcr, S. F. McDaniel & A. Lucky, 2019. From pavement to population genomics: characterizing a long-established non-native ant in North America through citizen science and ddRADseq. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **7**: 453. doi: 10.3389/fevo.2019.00453

IV 蚊に対する Attractive Toxic Sugar Bait (ATSB)の可能性

星 友矩 (長崎大学熱帯医学研究所・生態疫学分野)

ATSB の概要

ATSB は、蚊の成虫 (オス・メス) を対象としたベイト剤であり、感染症媒介蚊に対する新たな対策手法の 1 つとして注目されている。これまで蚊媒介性感染症の流行地では、成虫蚊の対策方法として長期残効型殺虫剤含浸蚊帳 (LLINs) および屋内残留噴霧 (IRS) が広く用いられてきた (図 1・青および茶矢印)。これらの既存手法は、屋内に侵入し、人間の吸血に密接に関わるメスの蚊を対象としている。しかし屋外で吸血する蚊やオスの蚊については対策が難しく、広範にわたる蚊のライフステージをターゲットにできる手法の開発は常に課題であった。そこで誕生したのが ATSB である。

ATSB は、蚊のオスとメスに共通の機構である植物の花や葉などの蜜源からのエネルギー摂取に着目し、蜜源 (デザートシロップやグアバジュースなど) に殺虫剤を混ぜることで、屋内外のオスとメスの成虫蚊を対策の対象としている (図 1・ピンク矢印)。

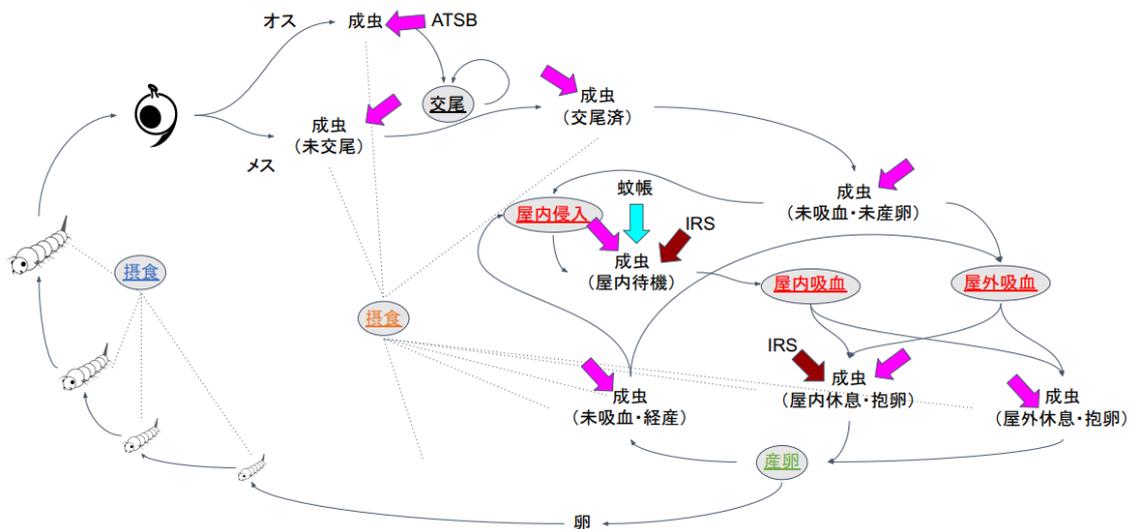


図 1. 蚊のライフサイクルと各対策手法の作用するステージ

後述に重要な研究を選出し ATSB の歴史を示すが、既に複数の国で実施されたトライアルにおいて良好な結果が示されており、世界保健機関からも期待されている。ATSB への期待の理由として、これまで使われてきた LLINs や IRS の対策手法と併用可能である点も大きい。さらに殺虫剤抵抗性の問題の解決策となり得る可能性を有している点も関係している。先行研究によると ATSB では殺虫剤が蚊の胃から摂取されるため、LLINs や IRS などのクチクラ層を透過する能力が求められる殺虫剤とは異なる種類の殺虫剤が利用でき、さらに低濃度でも殺虫効果が期待できるとの主張がある (Stewart et al., 2013)。

ATSB の歴史

2006年、イスラエル国の乾燥気候において ATSB の幕開けとなる研究報告がなされた (Müller & Yosef, 2006)。研究では、2つのオアシス環境において対照実験が行われた。実験では処理区に約 20 リットルの殺虫剤混合液 (ATSB) を、対照区には殺虫成分を除いた混合液 (ASB) を、開花した植物に噴霧し、蚊の個体群動態を時系列で確認をしている。なお殺虫成分としてスピノサドが用いられた。報告では ATSB の噴霧後、2種の蚊 (*Anopheles sergentii*, *Aedes caspius*) のモニタリングが行われたが、そのモニタリング期間である約 1 か月の間、処理区では蚊の個体数は低いままであった。

上述の初期の研究で良好な成果が得られたものの、開花した植物に ATSB を噴霧する手法では、蚊以外の節足動物に対する悪影響が懸念された。この懸念点に対して、2008年にマラリア流行地である西アフリカ・マリ共和国にて行われたフィールド研究以降は、未開花の緑色植物に対する ATSB 噴霧へと手法が変更された。結果、*Anopheles gambiae* s.l. のコントロールに成功し、ATSB を用いた安全なマラリア対策の可能性を示す大きな一歩となった (Müller et al., 2010)。後の 2013年、モロッコ王国での研究では、ATSB の標的外節足動物への影響についてデータに基づいた議論がなされた (Khallaayoune et al., 2013)。この研究では、色素のみ含有する混合液 (ASB) を、未開花の緑色植物に散布した後、7目 (膜翅目、鱗翅目、甲虫目、双翅目、半翅目、直翅目、脈翅目) に対する影響を評価した。捕獲された節足動物の 0.9% から色素が検出され、中でも双翅目のカ科およびユスリカ科から統計的に有意に色素が検出された。一方で送粉者となる節足動物は、影響を受けなかったとされる。さらに、ATSB を摂取した蚊をクモやオサムシに 3日間飼しても死亡が観察されることは無かった。総じて、ATSB を緑色植物に噴霧した場合、送粉者や益虫などの標的外節足動物への影響は小さく、効率的に蚊の個体群をコントロールできることが示された。なお、この研究では ATSB の殺虫成分としてジノテフランが用いられ、噴霧後 3週間で 70% の蚊の個体群を低下させることに成功した。この論文によって、ATSB の商用利用を視野に入れた開発の大きな弾みとなったことが伺える。

上記の研究の後、2016~2017年のマリ共和国における大規模フィールドトライアルへと続く (Traore et al., 2020)。このトライアルでは、14の村を無作為に処理群とコントロール群の 2群に振り分け、4指標 (蚊の密度や人を刺す率、3回以上の経産蚊の割合、スポロゾイト感染率、エントモロジカル・イノキュレーション・レート (EIR)) を用いて ATSB の効果を測定している。具体的には、ジノテフランを殺虫剤として含有したデバイス (Westham Innovations 社の BaitStab™) を処理群に、ジノテフランの代わりに色素を含んだデバイスをコントロール群に設置し、経時的に 4手法 (CDC UV light traps, malaise traps, Pyrethrum Spray Catches (PSCs), Human Landing Catches (HLCs)) で *Anopheles gambiae* s.l. の捕獲を行っている。研究手法として、植物への噴霧ではなく、Westham Innovations 社のプロトタイプ ATSB が使われた点が重要な転換点である。この論文は情報に富んでおり、ATSB により蚊の個体群の減少のみならず、マラリアを媒介する可能性の高い経産蚊が減少していることや、EIR の低下までも明らかにしている。つまり、ATSB が蚊の個体群を減らすだけでなく、マラリア感染リスクの低減に結びついている明確な根拠を示した重要な報告である。現在は、マリ共和国、ケニア共和国、ザンビア共和国といった複数の国を跨いだ非常に大規模なフィールドトライアル

が行われている (Attractive Targeted Sugar Bait Phase III Trial Group, 2022)。各国の調査結果が出揃うのが 2024 年末であり、今後の報告に注視したい。なお ATSB は Attractive “Toxic” Sugar Bait と略されてきたが、現在は Attractive “Targeted” Sugar Bait となりつつある。おおよそ Toxic という表現が今後、一般消費者にとっての受け入れの妨げとなるとの配慮から Targeted へと変更されたと推測できる。そのため今後文献を探す際などは注意が必要であり、また ATSB を記す際は、後者の表現が今後の主流となるだろう。

ATSB の可能性

現在、ATSB の開発を最も推し進めているのは、2006 年創業のイスラエル国にある Westham Innovations 社である。2006 年は ATSB の幕開けとなる報告がなされた年でもあり (Müller & Yosef, 2006)、この頃から事業化を視野に入れていたことになる。Westham Innovations 社の現在のプロトタイプ ATSB は、開発当初に見られた物に比べ、デバイスの形状や含有物に関して飛躍的な進歩を遂げている。創業後のわずか 10 年目にあたる 2016 年から既に大規模フィールド研究で用いられており、彼らの進捗の速さと努力には頭が下がる。

Westham Innovations 社のプロトタイプ ATSB では、入手性が良い材料を選定し、さらに既存の食品工場の生産ラインを活用した大量生産を見据えた開発をしている。また含有物を工夫することで長期保存が可能であり、シート状の形状から省スペースであり保管や輸送にも好都合である。屋外において比較的長期間 (3~6 か月) 使用できるとされており、これらは紫外線や砂埃などの屋外で懸念される過酷な状況にも耐える設計となっている。また白と黒のコントラストがあることで、長距離からでも視覚的に蚊が誘引可能のようだ。加えて、子供が誤食しないように苦味成分を加えるなど、製品としての成熟度を伺い知れる。他にも多くの利点があるが、詳細は Westham Innovations 社ホームページで知ることができる。

ATSB のような新しい蚊媒介性疾病対策が生まれることは大いに歓迎である。しかし、標的外節足動物に対する影響を考えると、ATSB の利用は慎重になる必要がある。確かに先行研究では、モロッコ王国において標的外節足動物への ATSB の影響は少ないとされたが (Khallaayoune et al., 2013)、果たして日本や東南アジアなどの生態系が豊富な環境で用いる場合、どのような影響が生態系全体に及ぶのかは計り知れない。しかしながら、敢えて困難に挑戦するからこそ、新しい対策のブレイクスルーが起こるのも事実であり、果敢に挑戦を行う日本の研究者や企業に期待をしたい。

参考文献

- Stewart Z P, et al. (2013) Indoor application of attractive toxic sugar bait (ATSB) in combination with mosquito nets for control of pyrethroid-resistant mosquitoes. *PLoS One* 8: e84168. doi:10.1371/journal.pone.0084168.
- Müller G, Schlein Y. (2006) Sugar questing mosquitoes in arid areas gather on scarce blossoms that can be used for control. *International Journal for Parasitology* 36): 1077-80. doi:10.1016/j.ijpara.2006.06.008.

- Traore M M, et al. (2020) Large-scale field trial of attractive toxic sugar baits (ATSB) for the control of malaria vector mosquitoes in Mali, West Africa. *Malaria Journal* 19: 72. doi:10.1186/s12936-020-3132-0.
- Müller G C, et al. (2010) Successful field trial of attractive toxic sugar bait (ATSB) plant-spraying methods against malaria vectors in the *Anopheles gambiae* complex in Mali, West Africa. *Malaria Journal* 9: 210. doi:10.1186/1475-2875-9-210.
- Khallaayoune K, et al. (2013) Attractive toxic sugar baits: control of mosquitoes with the low-risk active ingredient dinotefuran and potential impacts on nontarget organisms in Morocco." *Environmental Entomology* 42: 1040-5. doi:10.1603/EN13119.
- Attractive Targeted Sugar Bait Phase III Trial Group (2022) Attractive targeted sugar bait phase III trials in Kenya, Mali, and Zambia. *Trials* 23: