

将来の「手乗り家畜」はどの昆虫種か ～食利用にむけた有望な養殖種の検討～

What is the Future “Mini Livestock”?:
Investigation of Promising Farmed Insect Species for Food And Feed

水野 壮

麻布大学教育推進センター NPO 法人食用昆虫科学研究会

Hiroshi MIZUNO

Azabu University Center for the Promotion of Education,
Japan Edible Insect Science Laboratory (Jeis-Lab),
1-17-71 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5201, Japan

1. はじめに

これまで人類はカイコやミツバチを古くから飼育してきた。カイコの吐く糸から絹糸をとり、ミツバチの巣からは蜂蜜が採取できる。とりわけカイコはクワコという野生の蛾から、人類の手で品種改良した明らかな「家畜化昆虫」である(写真1)。絹糸に利用される大きな繭を作るだけでなく、餌を探索する運動性と、遠くのメスを探索する飛翔能力を失わせ、管理を容易にさせた。

養蜂、養蚕は、ともに紀元前から始まっている。エジプトでは紀元前2500年頃には養蜂が営まれていたと考えられる(Crane, 1983)。ミツバチの飼育は蜂蜜の採取だけでなく、果樹や野菜といった農作物の受粉を担う重要な働きを担う。現在も養蜂は世界で盛んに営まれている。養蚕の記録は今から4500年以上前の中国伝説上の君主黄帝がその妃に養蚕を行わせたといわれている(渡部, 2003)。殷の時代に養蚕は確実に普及し、カイコから得た絹布はシルクロードを通りヨーロッパへと輸送された。養蚕業は、かつ

て世界の経済成長を支えた重要な産業であった。その後、ナイロンをはじめ絹糸に代わる繊維が次々と開発され、養蚕業は急速に衰退していった。

現在は、新たな昆虫の家畜化が進もうとしている時代といえる。ここ20年で食用・飼料用の昆虫を養殖するベンチャー企業が次々と誕生しはじめた。すでに食用昆虫の大規模養殖も始まっている。今後、養殖昆虫は品種改良され、家畜化された昆虫—“手乗り家畜 mini livestock”—が作出されていくことが予想される。

本論では、新しい昆虫の家畜化が進むと予想される背景を明らかにし、今後どのような昆虫が家畜化されていくか、現在有望とされる昆虫種について考察を進める。

2. 家畜化に至る背景

2-1. 勃興する昆虫養殖ベンチャー

2010年前後では養殖・販売の事業者数は数えるほどしか存在していなかった。しかし、2014年以降急増し、毎年数十の事業者が昆虫養殖業界に新規参入している。ネット上で活動を確認できる企業数その



写真1 クワコ (左) とカイコ (右)

表1 昆虫のタンパク質量 (乾燥重量%)

イナゴ成虫	67.80
サバクトビバッタ成虫	61.40
トノサマバッタ成虫	61.10
カイコガ蛹	14.20
セイヨウミツバチ老熟幼虫	68.30
ヤシオオオサゾウムシ幼虫	25.90
ヘビトンボ幼虫	74.40
シロアリ成虫	52.50
コガネムシ幼虫	60.00
イエバエ幼虫	75.20

三橋淳著『昆虫学大事典』より抜粋

ものは増加傾向にある。2016年以降から現在まで継続している66の事業者のうち、検索でわかる事業経営者の出身並びに事業の拠点を調査すると、改めて欧米が昆虫食業界をけん引している現状が浮き彫りになっている。どちらも北米またはヨーロッパが大多数を占めており、残りはほぼアジア（中国、韓国、タイ）であった。インターネット上で確認できる事業者の業態については、現在の昆虫食関連業者は国内外どちらも消費者向け小売業が主体である。日本の昆虫販売業者も、以前はほとんど見られなかったが、2018年以降増加し、確認できる限りで10社以上存在する。

食用昆虫の市場が将来どれほどまで成長するかは市場調査会社でも予測がまちまちであるが、近い将来大きく成長していくことが予想されている。Global

Market Insights による調査によれば、2019年の市場規模は約1.2億ドルと推定され、少なくとも2026年まで年平均47%以上の成長を続けると予測している。Meticulous Research社では、食用昆虫市場の価値は2027年までに46億ドルの価値に達すると予想している。

2-2. なぜ今昆虫養殖なのか

昆虫養殖企業各社が昆虫養殖を進める背景には、昆虫の高い栄養価と、環境低負荷な養殖が可能であると注目されているためである。さらに、世界人口の増加と共に、動物性タンパク質の需要増が懸念されている。農畜産業の生産過程で利用される水や土地面積の増加、飼料、温室効果ガスの排出量の増加は地球環境に大きな負荷を与えることとなる。2000年を基準とすると、2050年には牛肉、豚肉、鶏肉の価格が30%以上上昇するという(Nelson et al., 2009)。

2013年、国連食糧農業機関 (FAO) は「Edible Insects-Future prospects for food and feed security (食用昆虫—食料および飼料の安全保障にむけた展望—)」という報告書 (Huis et al., 2013) を発表し、持続可能な社会を構築していく上での昆虫の食料への利用価値を体系的に取り上げた。この報告書を機に、昆虫の食利用への関心が高まってきたといえる。以下に昆虫を食利用するメリットを挙げておく。

(1) 良質なタンパク源

現在、世界では20億人以上が昆虫を食し、食用昆虫の種類は報告されているものだけでも約2,100種にのぼる (Jongema, 2017)。一般に昆虫のタンパク質含量は乾燥重量あたり25～75%程度である (表1)。多くの昆虫のタンパク質含量は60%程度と高く、これは牛肉や豚肉に匹敵する、あるいはそれ以上の動物性タンパク源といえる。

JAXAでは宇宙食としての献立に昆虫を入れることを検討している (片山ら, 2006)。米、大豆、サツマイモ、小松菜を組み合わせた基本植物食に、手軽に管理ができる動物タンパク源であるカイコの蛹やシロアリを加えることで、アミノ酸のバランスが整う。限られた資源や生活空間において持続可能な農業を行う上でも、昆虫は貴重な動物タンパク源となることが期待される。

表2 食用昆虫および家畜の温室効果ガス排出量の試算

	1日体重増加あたりの 温室効果ガス排出量 (g/体重kg・day)	出生～出荷 までの 日数	出荷までの 温室効果ガス 排出量 (g/kg)	牛との比較
メンガタハナムグリ	4	150	304.00	0.09
ミルワーム	0.45	100	24.00	0.01
アルゼンチンモリゴキブリ	2.12	150	161.12	0.05
ヨーロッパイエコオロギ	0.05	40	1.02	<0.01
トノサマバッタ	2.37	40	47.87	0.01
ブタ	5.76	180	524.88	0.15
ウシ	6.53	1,000	3,404.93	-

出荷時は各昆虫種に応じて成虫あるいは幼虫。Oonincxら(2010)、水野(2021)より。

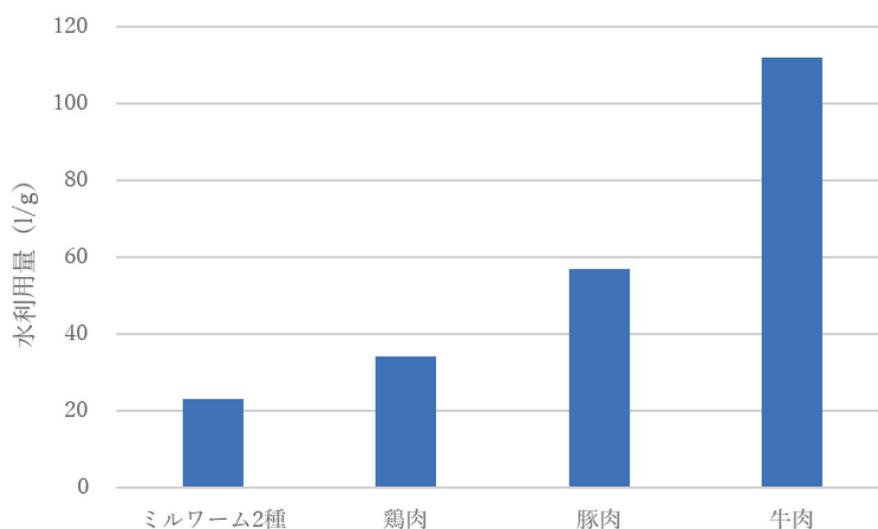


図1 ミルワーム2種および他の主要家畜肉のタンパク質1gあたりの水利用量 (Migliettaら(2015)をもとに作成)

(2) 温室効果ガス排出量が低い

食料生産により排出される温室効果ガス量は、世界全体の24%を占める。なかでも家畜から排出される温室効果ガスの量は無視できない。とりわけ牛の温室効果ガス排出量は大きな地球環境への負荷を与えている (Fiala, 2008; Huis, 2013)。昆虫は牛や豚と比較して温室効果ガス排出量は非常に低い。牛と比較して数百～数千分の1程度しか温室効果ガスを排出していないことになる(表2)。この理由は、昆虫はメタンガスをほとんど生成しないことや、変温動物であるがゆえに代謝量が低いことが挙げられる。さらにもう一つの理由は、昆虫のサイズの小ささとライフサイクルの短さである(水野, 2021)。温室効果ガス排出量は体重の増加に合わせて急増していくため、

昆虫の場合は大型の牛や豚と比較して温室効果ガス排出量が少ないうちに出荷可能となる。

(3) 水の消費量が少ない

2025年には18億人が水不足のある国や地域に住み、世界人口の3分の2が水不足のリスクを抱えることになることが懸念されている。多くの昆虫種は飼料の水分のみで飼育することができる。ミルワームとジャイアントミルワーム2種(以下ミルワーム2種)のタンパク質1g生産に係る直接的・間接的に必要な水の総量(ウォーターフットプリント)を換算すると、牛肉と比較して約5分の1、豚肉、鶏肉と比較してそれぞれ2分の1、3分の2程度で済むことが示されている(図1、Migliettaら, 2015)。

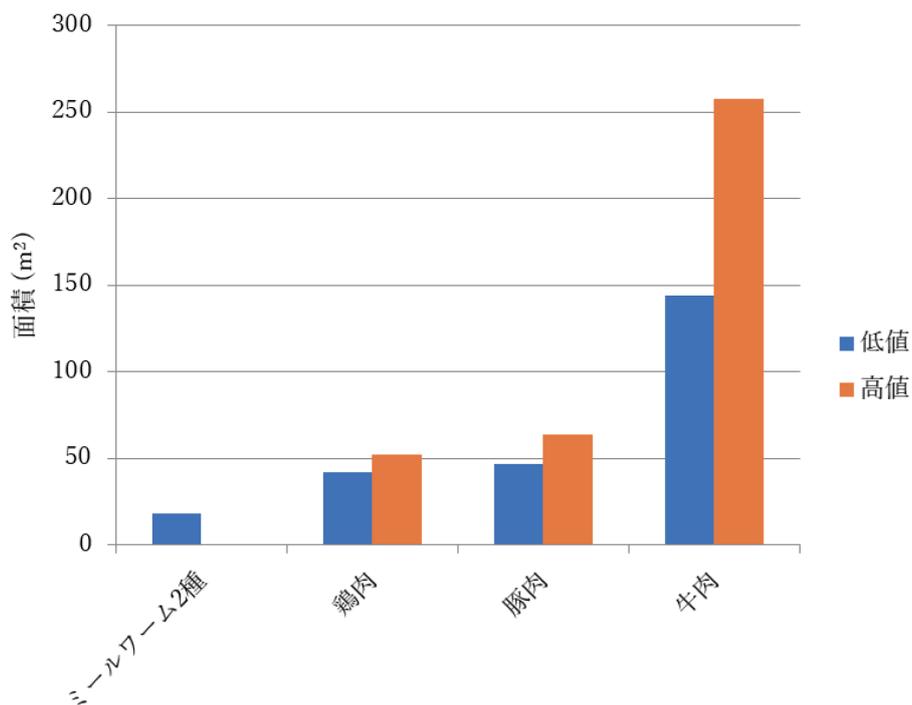


図2 ミールワーム2種および家畜における体重1kg増加に必要な面積 (Oonincxら(2012)より)

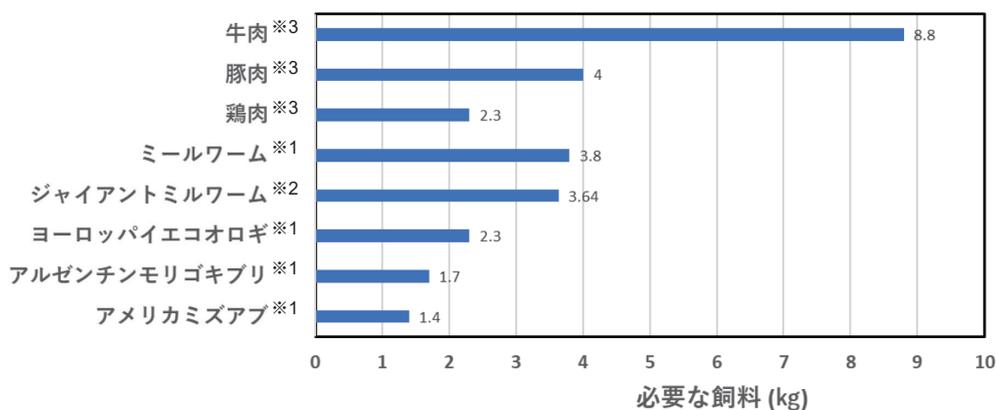


図3 体重1kg増加に必要な飼料 (※1 Oonincxら(2015)、※2 Broekhovenら(2015)、※3 Wilkinson(2011)より作成)

(4) 土地利用面積が少ない

昆虫は小型でかつ高密度で飼育が可能な種も多い。積層してモジュール化させ、ちょっとしたスペースで飼育が可能である。ミールワーム2種のタンパク質1kgあたりの土地利用面積は、鶏、豚、牛いずれの家畜よりも使用面積が少ない(図2)。ミールワーム2種の使用面積と比較して、鶏肉は2.30～2.85倍、豚肉は2.57～3.49倍、牛肉は7.89～14.12倍高い。

(5) 飼料要求率が低い

一般に昆虫は牛肉より効率よく生育し、環境低負荷である鶏にも匹敵することが示されている(図3)。

3. 養殖がすすむ昆虫種

現在養殖昆虫として注目を浴びている昆虫種はいくつもあり、それぞれが個性的な特徴を持っている。

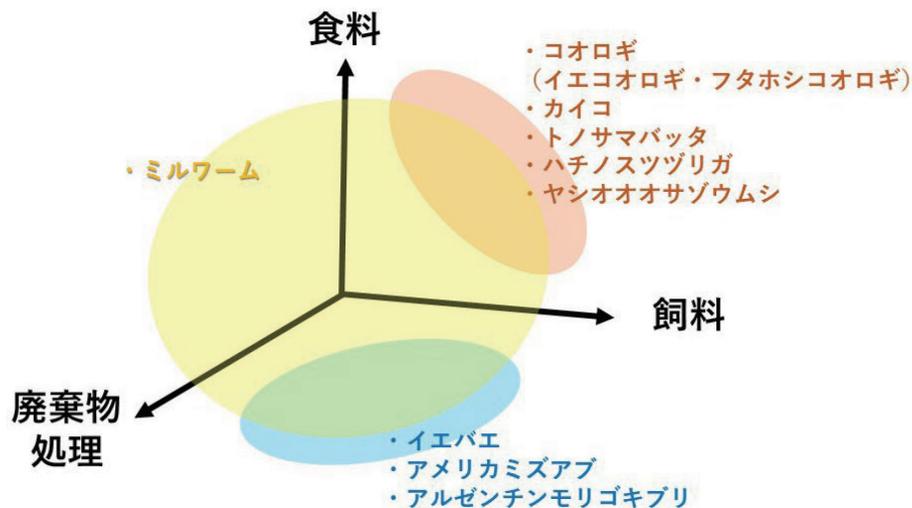


図4 主な有望昆虫種の期待される用途

食用および飼料としての活用が期待される主な昆虫種について、以下に説明を加え、将来期待される主な用途を図4に示した。ここで挙げた昆虫種はいずれも高密度で飼育ができ、比較的小となし鈍重で、管理が容易であるという点で共通している。

カイコ (*Bombyx mori*)

カイコは前述のとおり、人類が絹糸を効率よく生産させるために作り出した究極の家畜昆虫である。野生種のクワコと比較して大幅な形質の変化がみられる。幼虫は自ら餌を探索する能力を欠き、ほとんど移動することがない。成虫は飛翔力を欠き、時間帯も気にせずすぐに交尾させ、2、3日程度で採卵することが可能である。品種改良も進み、かつては1,000を超える品種が作出され、現在も日本では500種を超える品種が保存維持されている。養殖上の欠点となりそうな点は、幼虫期に湿度の管理がある程度必要であることや、桑の葉しか食さないことが挙げられる。ただし、桑の葉の代わりに人工飼料での代替も可能である。以前より蛹は食用の他、魚およびニワトリの飼料として活用されてきた。

ヨーロッパイエコオロギ (*Acheta domestica*)

コオロギの仲間世界各地で900種以上が存在し、そのうち278種のコオロギが食用として消費されている (Dossey et al., 2016)。なかでも最も一般的な食用種として、ヨーロッパイエコオロギ (以下イエコ

オロギ) とフタホシコオロギ (*Gryllus bimaculatus*) が挙げられる。2種ともアジア原産と言われているが、現在では世界中で飼育されている。共食いは少ないが、タンパク質や水分の供給コントロールがある程度必要である。どちらも味は淡泊で食べやすい。イエコオロギは特にくせがなく万人向けの味をしており、フタホシコオロギは独特の風味があり大振りで食べ甲斐がある。世界で広くコオロギの加工品が出回っており、日本でも身近なスーパーマーケットやドラッグストアでコオロギのお菓子が販売され始めた (写真2)。2020年にFAOではこれら2種の養殖方法のガイドラインを発表している (Hanboonsong and Durst, 2020)。

コオロギの大規模養殖は、1940年代ごろから米国において記録が残されている。用途はペットや魚の餌だ。現在、米国では主要な生産業者だけで年間20億頭、重量換算でおよそ年間1,200トンに上るコオロギを生産している (Dossey et al., 2016)。もともと餌用にはじまったコオロギ養殖が、2013年のFAO報告書の発表以降、その飼育ノウハウが食用コオロギ養殖へ応用されていったと思われる。

食用コオロギは1990年代からタイ、ベトナム、ラオスなど広く飼育されるようになった。東南アジアの国々は本来コオロギを食用とする文化があったため、最初から食用として養殖事業が始まった。特に養殖が盛んなのはタイで、食用コオロギ養殖を営む農家が現在は2万戸以上あるという。そのほとんどは



写真2 ヨーロッパイエコオロギのせんべい
(スーパーマルエツにて)



写真3 コオロギ養殖の風景
(タイ、写真提供：高松裕希)

兼業農家で、農作物の残渣を活用して育てている(写真3、高松, 2013; Hanboonsong et al., 2013)。45日間で平均750 kgのコオロギが収穫され、米ドル換算で年間468～1,093ドルの収入を生み出すことができるといわれている。

アメリカミズアブ (*Hermetia illucens*)

飼料用の養殖昆虫として、アメリカミズアブが挙げられる。食品廃棄物をアメリカミズアブの餌とし、その蛹や幼虫を家畜や魚の飼料として活用する。また、飼育時に生じる糞もたい肥に活用できる。同様の利用は、イエバエ (*Musca domestica*) においても試みられている。

アメリカミズアブは、家庭のコンポストに発生する不快害虫として知られていた。しかし成虫はヒトや家畜を吸血することも、刺すこともしない。腐食性であるため衛生管理が難しく、食用としての利用は現実的ではないものの、持続可能な社会のために注目されている昆虫である。

アメリカミズアブの世界生産は急速に成長しており、オランダの大手投資銀行ABNアムロ銀行による

と、生産量は2015年に8,000トンだったものが2016年には14,000トンと約2倍に増加している。イギリス、スペイン、オランダをはじめとするヨーロッパ各国のほかカナダやベトナム、マレーシアなど世界各国がアメリカミズアブの大規模養殖を進めている。

ミルワーム (*Tenebrio molitor*)

中国では、年間200トンの乾燥ミルワームが世界各国へ輸出されている。ミルワームは省スペースで繁殖も容易であり、野菜くずなどで育つため各所で生産されている昆虫である。ミルワームもコオロギ同様以前からペットの餌としての利用が盛んであった(写真4)。幼虫も成虫も移動性は低い。成虫はプラスチックケース壁をよじ登ることができず、飛翔することもない。また、雑食で非常に飼育しやすく、飼料用、食用どちらも利用可能といえる。生育期間は卵から成虫までに4か月程度かかり、他の養殖昆虫より幼虫期間が長い。

トノサマバッタ (*Locusta migratoria*)

トノサマバッタ(写真5)は、本論で挙げた養殖昆



写真4 ペットショップのシルクワームやカイコ蛹 (シルクワーム)

虫の中で最も大型の昆虫である。同じバッタ目のイナゴ (*Oxya yezoensis*) 同様、味わいがよくイナゴより大振りで筋肉がしっかり詰まっている。高密度で飼育することも可能であり、ある程度の養殖技術が確立されてきており、オランダや日本でも食用の養殖が期待されている。飛翔力があるほか、発達した後脚のトゲを保持している点、イネ科のみを食する点は大規模養殖の際のネックになりうる。

ヤシオオオサゾウムシ (*Rhychophorus ferrugineus*)

オセアニアや東南アジアに生息するヤシオオオサゾウムシ (写真6) は、東南アジアで養殖が進められている。ゾウムシの成虫ペアから、1～2 kgほどの収量が得られる。1 kgの幼虫 (約200個体) の生産コストは0.5～2ドル程度で、繁殖サイクルは35～45日程度、25～30日後に収穫時の幼虫400～600 kgになる。各収穫サイクルから得られる純利益は2,625～3,937米ドルとされている。ヤシオオオサゾウムシもシルクワーム同様脂質含量が高いが、現地の人々では美味と言われる人気の昆虫である。成虫は頻繁ではないが飛翔するため、脱走しないよう管理をする必要がある。また、水分を十分に含んだペースト状の飼料を発酵させながら飼育するので、養殖の際は臭いや湿度・温度管理が一つのネックになる。

アルゼンチンモリゴキブリ (*Blattica dubia*)

世界では多くのゴキブリ類が養殖され、爬虫類



写真5 トノサマバッタ



写真6 ヤシオオオサゾウムシ

などの小動物の餌として販売されている。なかでも、アルゼンチンモリゴキブリとトルキスタンゴキブリは飼育のしやすさからペットショップでよく見かける昆虫である。特にアルゼンチンモリゴキブリは鈍重で、よじ登る能力、飛翔能力をそれぞれ欠いており、ゴキブリ特有の匂いも強くない点で養殖に適している。食用・飼料両方としての活用が可能といえる。雑食であり、アメリカミズアブのように食品廃棄物処理にも活用できる。水分をほとんど要しないことと、飛翔しないという点でアメリカミズアブと違った食品廃棄物処理の活用方法がある。生育は時間がかかり、卵から成虫になるまで5～6か月程度を要する。さらに、ゴキブリというイメージの悪さも食用への活用に大きなネックとなる。

ハチノスツブリガ (*Galleria mellonella*)

ハチノスツブリガ (写真7) はミツバチの巣を食害する養蜂家泣かせの大害虫である。ミツバチの巣で



写真7 ハチノスツツリガ

生育するが、糖入りの餌であれば幅広く食する。幼虫はハチノコのような甘味と旨味があり、食用として十分活用できる。成虫は普段はほとんど動かないが、動き出すと歩行スピードがやや速く、時々飛翔もするため、脱走に気を付ける必要がある。成虫はカイコ同様餌はいらす、産卵して数日程度で死亡する。

4. 有望な家畜昆虫種とその用途

世界の主要な昆虫養殖事業者が扱う養殖昆虫種は、ヨーロッパエコオロギ、フタホシコオロギ、ミルワーム、アメリカミズアブの4種にほぼ絞られる。食用に限ると、コオロギを扱う事業者が大半である。食用コオロギ養殖がここまで広がった理由として、下記のように考えられる。

1. 以前より爬虫類、小動物の餌としてペットショップで販売されており、既存の大量飼育技術が確立されていること
2. 他の昆虫より淡泊で食べやすいこと
3. 昆虫種の中でも高タンパク低脂肪であることなどが挙げられる。

1. に関しては同じく飼料用昆虫としてメジャーなミルワームも歴史が長く、養殖技術が確立されている。ミルワームがあまり食用とされない理由は、脂肪分が高めなため敬遠されているのではないと思われる。2. に関しては、コオロギやバッタ類は、サクサク、パリパリ感のある食感に加工しやすく、一般に受け入れやすい(吉村, 内山, 2014; 水野, 未発表)。一方、カイコのような水分が豊富な鱗翅目幼虫類のようなフォームは敬遠されがちである(水野, 2021)。

3. に関しては、高タンパク低脂肪、ヘルシーな食

材として昆虫が注目されている経緯があり、それに見合う昆虫種、ということになる。

1. を満たす昆虫はコオロギ以外にもミルワーム、カイコ、アルゼンチンモリゴキブリやレッドローチ等のゴキブリ類が挙げられる。しかし、これらは脂肪含量が比較的高いことで知られ、3. を満たさない。脂肪含量の低い昆虫種はトノサマバッタも挙げられる。また、トノサマバッタはコオロギ同様、サクサク、パリパリの食感を体現しやすい昆虫種といえるが、大量養殖を行ってきた歴史がなかった。トノサマバッタの飛翔性の高さ、食性の狭さが養殖の際のネックとなっている面も否めない。このような3点が、コオロギの食用養殖が世界で好まれている理由と考えられる。

家畜や魚、ペットの飼料として幅広い活用が期待されている昆虫は、ミルワームとアメリカミズアブである。ミルワームは、食用利用としても有望だが、脂肪含量の高さ以外に、鱗翅目昆虫のようなワーム型のフォームが敬遠されやすい点がネックとなっているように思われる(水野, 2021)。アメリカミズアブは、近年養殖がさかんに行われるようになってきた昆虫種である。繁殖力も高く、飼育も容易であるが、湿度の高い環境を好み、腐食性のエサを好む。このため食用としての利用は難しい。家畜排せつ物を堆肥へ変換するほか、食品廃棄物を良質な飼料タンパク質へ変換する昆虫として期待されている。

ジャレド・ダイヤモンド(2000)は、家畜化の条件を6つ挙げている。彼の条件は、哺乳類の家畜化を想定しているが、家畜化全般に通じる点が多い。このため、これを元に昆虫の家畜化の条件を以下のように想定した。

1. 高い飼料効率
2. 速い成長速度
3. 飼育環境下で容易な繁殖
4. 穏やかな気性
5. 集団生活に慣れた性質
6. 飛翔能力が低く、鈍重な性質

特に1, 2. は家畜と比較しても多くの昆虫種に通じる優れた特性といえる。3~6. は昆虫種によって満たさない条件となる。3. はトンボ類など広いスペースで繁殖活動を行う種は適さない。4. はスズメバチ類やカマキリ類など積極的に人を毒針で刺した

り、噛みついたりする昆虫種は除外される。トノサマバッタはスズメバチやカマキリほどの気性の激しさはないが、つかむとトゲのある脚で蹴り飛ばそうとする性質がある。5. は高密度で飼育可能な昆虫種があてはまる。図4で挙げた有望な昆虫種のほか、社会性昆虫であるアリ類やシロアリ類、ハチ類などもこれに当てはまるだろう。

最後の6. はダイヤモンドの条件(パニックをおこしにくい、神経質でない)を昆虫の特性寄りに修正した条件である。ダイヤモンドは飼育下ストレスで容易に死ぬほか、パニックに陥って暴れまわることのない動物、つまり制御の難しくない動物が適していると指摘している。昆虫の場合は警戒して餌を食べないことはあるが、適切な環境下であれば数日暗室に置けるほか、安静にしておくだけで本来の行動パターンをとり始めることも可能である。また、大型哺乳類のように暴れたら収拾がつかないということはない。低温下に置いたり、炭酸ガスを空間に充填したりすることで一時的に麻酔することが容易である。小型であるがゆえのメリットといえるが、逆に素早く動き回り、管理下から離れて脱走するといった問題点がある。したがって6. は昆虫ならではの条件を加味し、「飛翔能力が低く、鈍重な性質」とした。昆虫は基本的に4枚の羽根をもち、3次元の移動が可能である。この特性は管理・制御を難しくする要因になり得る。素早く飛翔・動き回る昆虫は、ハエ類やトンボ類などが挙げられる。トノサマバッタ、アメリカミズアブ、ヤシオオサゾウムシ、ハチノスツヅリガは成虫が飛翔する。これらの昆虫種は飛翔がそこまで素早いものではない上に、頻繁に飛び回る昆虫ではない。そのため、6. の条件は満たすと捉えることができる。一方、アメリカミズアブと共に食品廃棄物処理に貢献すると期待されるイエバエは、飛翔能力が高く、この条件からは外れそうだ。国内の養殖企業MUSCAは、イエバエの大規模養殖を進めているが、その他でイエバエの大規模養殖を進める企業は少ない。こういった背景は上記の理由が挙げられるだろう。

飛翔する以外にも、トノサマバッタやコオロギは後ろ脚を使って飛び跳ねる。特にトノサマバッタはジャンプ力が強く、成虫は高い飛翔力を持つ。また、後ろ足のトゲも収集の際はネックだろう。トノサマ

バッタは中国で養殖がなされているほか、ヨーロッパでも関心を集めているものの、大規模養殖を進める企業が現在のところ少ないのはこういった理由が挙げられる。

一方、飛翔しない上に動きも遅い昆虫は、ミルワームとカイコ、アルゼンチンモリゴキブリである。ミルワームの幼虫は移動性が低く、重力に逆らった移動は難しい。成虫は飛翔したり壁を這い上ったりすることがない。カイコは幼虫・成虫においても移動性を欠く。最も条件6. を満たす昆虫と言える。アルゼンチンモリゴキブリは幼虫・成虫とも歩行能力はあるが、飛翔能力は非常に低い(メスは翅が退化)上に移動速度は遅く、壁を這い上ったりすることがない。

ダイヤモンドは、例えば飼いが慣らされたチーターや有望な草食動物カバなどが広く家畜化されなかったのは、それぞれ条件3(繁殖を管理しにくい)と4(気性が激しい)を満たさなかったためであると述べている。一方、私が昆虫で設定した上記6つの条件は、1つ外れるからといって家畜化できない、というわけではない。哺乳類よりもずっと小型で、手のひらに乗るくらいのサイズというメリットは大きい。前述のように、麻酔や炭酸ガス等で容易に個体の動きを一時的に止め、集めることができる。小さな閉鎖空間を用意すれば、三次元空間を移動する昆虫種でも養殖が可能だろう。アメリカミズアブやコオロギはカイコより移動性が高いが、幅広く養殖されているのはこういった理由があるといえる。

さらに、将来はゲノム編集技術を活用して飛翔能力を欠いた品種を作り出す、ということも可能になってくるだろう。昆虫は哺乳動物と比較してライフサイクルが短く、小型で数を増やしやすいため、品種改良を進める時間とコストが低いと考えることができる。2021年より、食用コオロギの養殖を進める企業グリラスは、ゲノム編集を活用したフタホシコオロギの品種改良を進めている。まさに、昆虫家畜化は、テクノロジーを活用した新しい家畜化といえる。

引用文献

- Crane, E. (1983) The archaeology of beekeeping. G. Duckworth & Co., Ltd., London, p.360.
- Dossey, A. T., Morales-Ramos, J. A., & Rojas, M. G. (eds.). (2016). "Insects as sustainable food ingredients:

- production, processing and food applications” Academic Press.
- Fiala, N. (2008). Meeting the demand: An estimation of potential future greenhouse gas emissions from meat production. *Ecological Economics*, 67(3), 412–419.
- Hanboonsong, A., & Durst, P. (2020). “Guidance on sustainable cricket farming—a practical manual for farmers and inspectors” Food & Agriculture Org.
- Hanboonsong, Y., Jamjanya, T., Durst, P.B., 2013. “Six-Legged Livestock: Edible Insect Farming, Collection and Marketing in Thailand” Food and Agriculture Organization, Regional Office for Asia and the Pacific, RAP publication 2013/03, Bangkok, Thailand.
- Huis, A. V., Itterbeeck, J. V., Klunder, H., Mertens, E., Halloran, A., Muir, G., & Vantomme, P. (2013). “Edible Insects: Future prospects for food and feed security” FAO Forestry Paper, (171).
- Jongema, Y. (2017). “Worldwide list of recorded edible insects” In Wageningen University (pp.1–100). Department of Entomology, Wageningen University & Research.
- Miglietta, P. P., De Leo, F., Ruberti, M., & Massari, S. 2015. Mealworms for food: a water footprint perspective. *Water*, 7(11), 6190–6203.
- Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Ringler, C., Msangi, S., Palazzo, A., Batka, M., Magalhaes, M., Valmonte-Santos, R., Ewing M., and Lee, D. R. (2009). “Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation” 21, Intl Food Policy Res Inst.
- Oonincx, D. G., Van Itterbeeck, J., Heetkamp, M. J., Van Den Brand, H., Van Loon, J. J., & Van Huis, A. (2010). “An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption” *PloS One*, 5(12), e14445.
- Oonincx, D. G., & De Boer, I. J. (2012). “Environmental impact of the production of mealworms as a protein source for humans—a life cycle assessment” *PloS One*, 7(12), e51145.
- Oonincx, D. G., Van Broekhoven, S., Van Huis, A., & van Loon, J. J. (2015). “Feed conversion, survival and development, and composition of four insect species on diets composed of food by-products” *PloS One*, 10(12), e0144601.
- Van Broekhoven, S., Oonincx, D. G., Van Huis, A., & Van Loon, J. J. (2015). “Growth performance and feed conversion efficiency of three edible mealworm species (Coleoptera: Tenebrionidae) on diets composed of organic by-products” *J Insect Physiol*, 73, 1–10.
- Wilkinson, J. M. (2011). “Re-defining efficiency of feed use by livestock” *Animal*, 5(7), 1014–1022.
- 片山直美, 山下雅道, 和田秀徳, 三橋淳. 2006. 「火星居住のための昆虫を考慮した宇宙食の構想」 *Biological Sciences in Space*, 20(2), 48–56.
- 水野壮. 2021. 「食料・飼料としての昆虫の価値と未来：持続可能な食糧生産に向けて」 *食品と容器* 62(2), 118–124.
- 高松裕希. 2013. 「昆虫食文化と生物多様性の保全に関する研究—タイ国の食料安全保障のための昆虫養殖を事例として—」 *東洋大学修士論文*.
- ダイヤモンド J. 2000. 「銃・病原菌・鉄〈上巻〉—1万3000年にわたる人類史の謎」 *草思社*.
- 吉村浩一, 内山昭一. 2014. 「12種類の昆虫食の食感と味：クラスター分析による検討」 *法政大学文学部紀要* (70), 71-87.
- 渡部仁, 三橋淳 (編) 2003. 「昆虫学大事典」 *朝倉書店* p.940.