

[研究論文]

動物性タンパク質源である昆虫食のエネルギー的可能性

その量産を目指すデザイン手法

The Energy Merits of Insect as Animal Protein

Designing towards Its Mass-production

オオニシ タクヤ

慶應義塾大学環境情報学部准教授

Takuya Onishi

Associate Professor, Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

Abstract: 2070年に到達する100億人社会において、深刻な食糧危機が予想されている。特に動物性タンパク質の供給は今日のその170%以上だと試算されており、環境負荷の大きな既存の畜産業や漁業だけでこれらを賄うことは困難だと言われている。そこで注目されているのが昆虫食だ。本論文では、昆虫食の中でも特にコオロギに注目し、その量産性のメリットや、飼育システムの設計過程を紹介する。ここで実践を通して紹介されるロードマップは、今後の深刻な食糧危機の備えとして有益なものであると思われる。

When global population figures reach 10 billion in 2070, a serious food crisis is expected to impact the planet. In particular, the demand for animal protein has been estimated at over 170% of today's figure and meeting this request through the 'livestock' and 'fishery' industries will create a large environmental burden. At this point, the idea of insects as food source attracts attention. In this thesis, we focus on crickets as food source. We introduce the merits of its mass-production, a design-process for a possible breeding system and a roadmap for its practice in preparation for the anticipated food crisis in the future.

Keywords: 昆虫食、エネルギー、環境負荷、動物性タンパク質、食糧危機
entomophagy, energy, environment, animal protein, food crisis

1 はじめに

現在を生きる我々の責務は、次世代に健全な地球環境を引き継ぐことである。しかし今日の地球環境は爆発的な人口増加に圧迫され、かつてのような美しい環境を維持することが難しく、悪化の一途をたどっている。ホモサピエンスの誕生から30万年が経つ^{[1][2]}。18世紀後半にようやく人口は10億人

に到達するが、産業革命を皮切りに急激な増加を始め、20 世紀末には 60 億人に到達した^[3]。その勢いは衰えることなく、2017 年現在、70 億人を突破し^{注1}、そして 2070 年頃には 100 億人に到達すると言われている^[5]。この 100 億人社会の到来により、様々な問題が懸念されており、「食糧問題」がその中でも最も深刻な課題の一つとして挙げられている。今現在、世界ではおよそ 10 億人が飢餓に苦しんでいる^[6]。今後さらに増加する人口や、新興国による食糧消費量の増大などで、さらなる苛烈な食糧争奪戦が引き起こされることは間違いない。そのような 100 億人社会での食糧総消費量は今現在のおよそ 170% 以上と言われている^[7]、特に動物性タンパク質の不足が懸念されている。食糧総消費量が 170% 以上になるということは単純計算ではあるが、動物性タンパク質の総消費量も 170% を上回ると考えられる。そこで残されたわずかな時間のなかで、我々はこの難題を解決しなくてはならない。また現在の畜産業は、多くのエネルギーを必要とし、環境に多大な負荷をかける行為であり、増産はおろか持続可能ですら無いと指摘されている^[8]。

そのような状況のなかで注目されているのが昆虫食である。本論では、その昆虫食がなぜ 100 億人社会の食糧危機において期待されているのか、環境、エネルギー的な側面からの昆虫食のメリットを明らかにし、その昆虫食の安定供給可能な飼育システムのデザイン、試作の実践を紹介する。

2 昆虫食分野におけるデザインの解決の可能性

100 億人社会の食糧危機問題においてなぜ「昆虫食」という文化的に馴染みの少ない食習慣を視野に入れなければならないのか、そしてそのメリットとは何かを明らかにする。またデザインの領域でこの問題の解決の糸口がどのようにあるのかを述べる。

2.1 飢餓問題に向けての取り組み

100 億人社会食糧危機問題に向けて、今我々に課されている問題は、膨

注1 2017 年 2 月 26 日 17 時 20 分現在、世界人口は 7,487,031,070 人を示している^[4]。

大な量の農作物増産の実現である。2010年に世界の食肉（牛肉、羊肉、豚肉、鳥肉）消費量が268,700,000tであるのに対し、2050年の消費量予測は463,800,000tとなっており^[9]、およそ170%の試算がなされている。この数字はまだ100億人に到達していないとされる2050年^{注2}であることから、100億人社会の消費量はこれよりも大きな数字になっていることが予想される。

「農業」という営みは、実は地球環境に多大な負荷をかけており、農地は森林を拓いて作られ、灌漑設備等インフラの存在や、使用される薬品や温室効果ガス等の排出が周辺環境を歪めている。このように農業とは静的に環境への負荷と引き換えに我々の食物を生産する工場だといえる。今現在、世界の農作物土地利用総面積は、46,644,897 km²^[11]と言われており、地球上の陸地のほぼ31.7%^{注3}がそれに覆われていることになる。世界の都市総面積が0.5%^[12]、乾燥地帯が33%^[13]、森林地帯が30%^[14]であることから、これらを除いたほぼ全てのエリアが人類の拓いた農業用地に埋め尽くされているのである。農地拡大の臨界点に達した今、残された道は都市部への進出か、乾燥地での灌漑か、森林を伐採しての開墾などであるが、いずれも簡単ではないことは容易に想像できる。

2.2 事例1：乾燥地帯での大規模農場

広大な砂漠地帯を有するサウジアラビアでは、その巨大な乾燥地帯での農地開発が盛んに行われていた。これは、乾燥地拡大の抑制と緑地化、そして同国内での需要の高い小麦生産力の向上を目指す、国家プロジェクトであった。それは平坦な土地と地下水を利用しての大型ピボットサークル農場で、過酷に乾燥した広大な土地に、数百に及ぶ規則的なパターンを描く緑色のサークル農場は、未来への希望を予感させた。しかし1992年をピークに、地下水の枯渇問題、またその保全のため、規模の縮小を迫られ、2016年ですべての小麦が輸入に切り替えられた（図1）。これは砂漠地帯での農地拡大の困難

注2 2050年では97億人と推測されている^[10]。

注3 地球の陸地総面積は147,244,000 km²であるところから試算。

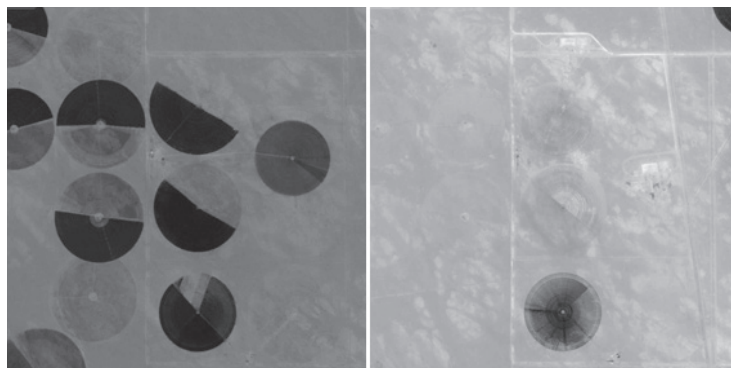


図1 地下水の枯渇により消えゆくセンターピボットファーム（サウジアラビア、Google Earth より）左：2004年6月20日、右：2013年8月10日

さが浮き彫りになった事例として知られている^[15]。

まさにFAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) が「従来型の農地拡大による作物増産は避けなければならない。また農地に充てべき土地も乏しく、そもそも農地を拡張することは、現実性が薄くサステイナブルではない。」^[6]と唱えるとおりである。

2.3 事例2：植物工場などの可能性

このような状況で、食糧増産を実現させるための取り組みが様々な方面で行われている。農作物の場合は、品種改良や遺伝子組み換え、先端技術の導入や、植物工場のような機械設備等の開発、また効率的な農地の利用方法や、食塩水を真水還元して利用する灌漑システム、乾燥地帯の農地化などの開発が進められている。特に植物工場の取り組みは盛んで、これは都市部や気候、環境の合わない地域でも安定的に供給可能で、生産量や成長スピードの予測、それらの制御も容易なため、流通をも含めた現代の社会経済システムに導入しやすく、多くの研究機関が開発を進めている。研究機関としては、大阪府立大学のPFC 植物工場研究センター^[16]やMIT メディアラボのOpen Agriculture^[17]などがあり、民間では、ダイワハウスの「agri-cube」^[18]や、鹿島建設の「みらい」^[19]などが知られている。また「Sundrop」は海水を太陽

熱エネルギーで淡水化するシステムを導入することによって、世界で不足しがちな淡水の消費を抑えながら、より質の高い野菜を育てることに成功している^[20]。以上のように、農作物に関しては、様々な取り組みがみられ、成果が期待される分野であることから、投資や研究費の投入も盛んになされている。これとは対照的に将来を不安視されているのが、動物性タンパク質の供給である。

2.4 事例3：水産養殖における可能性

動物性タンパク質の供給は「畜産業」と「漁業」が主に担っているが、昨今両産業ともに問題が多く指摘されている。「漁業」においては近年アジア諸国の成長や欧米でのアジアブームによる魚食文化の拡大に伴い、魚の漁獲量が爆発的に増えた。そこで、乱獲による環境問題や、大衆魚の資源枯渇への対策の一端として、水産養殖が成長し、2012年では漁獲量全体の42%が養殖で賄われるようになった^[21]。Aqua-SparkのMike Velings氏によって語られる養殖産業の環境的メリットは大きく^[22]、このような急速な成長がみられる水産養殖産業は、農作物分野と同じく期待の持てる領域産業だ。しかし、その水産養殖産業も、沿岸地域では有効であるが、遠い内陸部への供給は、輸送やエネルギーの面で効率ロスが生じる。ここで内陸部における動物性タンパク質の供給がまだ大きな課題として残されていることになる。

2.5 事例4：既存畜産業における不可能性

世界人口の動物性タンパク質摂取量のおよそ83%^{注4}を担う、陸上動物由来の肉は、世界の食卓の主役である一方、将来への増産が不安視されている。現在の畜産業は巨大で地球環境への負荷が大きくなり過ぎたと言われている。牧草地は地球の陸地総面積の23%^[9]という広大なエリアを既に覆っており、これ以上の拡大はおよそ考えられない。また既存の畜産業は、膨大なインフラ設備と広大な土地利用に依存している。その限られた土地の中で飼育密度

注4 これは動物性タンパク質の摂取量比の数値であり、肉と魚そのものの量的比較の数値ではない^[23]。

を上げての効率化は、大規模な疫病の発症や、倫理的な問題、遺伝子等先端技術や抗生物質等の導入などによる安全性や健康面への懸念がある。このように、様々な問題に阻まれ、畜産業は効率的かつ革新的な増産方法の開発が進んでいないという状況にある。

また、畜産は多大なエネルギーを消費するため、多くの畜産業者は太陽エネルギーの変換効率の高い作物や穀物の生産へと移行してきた経緯もある^[24]。また同時に穀物の単位面積あたりの収穫量も伸び^[25]たことも重なり、これら穀物農業のメリット増大が、畜産業の拡大の足枷にもなっていた。しかし、欧米をはじめとする先進国では食肉の消費量は変わらず、むしろ途上国の成長により、その需要は大きく伸び続けるという、矛盾や困難を抱えている産業でもある。このように将来における動物性タンパク質の安定供給には、環境的、倫理的、エネルギー的、経済的な多くのハードルが存在しており、今後の畜産業において、新しい発想のソリューションが求められる時代へと突入した。こういった状況の中で、新たな動物性タンパク質の供給源としてFAOが発表したのが「昆虫食」である^[6]。

2.6 昆虫食の優れた機能性

昆虫は歴史的に見ても、人類と近いものであった。特に内陸部や山岳地域にとっては重要なタンパク源であり、日本でもイナゴや蜂の子が有名であるが、そのほか世界ではバッタ目（イナゴ、バッタ、コオロギ等）、蝶目（カイコ、幼虫等）、コウチョウ目（ゲンゴロウ、カミキリムシ等）、カメムシ目（カメムシ、セミ等）などが食されている。それらの国々は、FAOの示す通り^[26]で、先進国の我々が思っている以上にポピュラーな食材だと言える。

従来型畜産の避けられない宿命は、骨皮内臓など、食することのできない部位にも多大なエネルギーを投入していることである。牛の可食部位は全体のわずか40%にとどまり、60%もの不可食部位を廃棄している^{注5}。それに比べ昆虫の可食部位は平均80%で、捨てる部位のほとんどない優れた食材である^[27]。また特筆すべき点は、飼料交換率の高さである。昆虫は、炭水化物（餌）を、

注5 皮などは製品として利用されるが、食物としては除かれる。

動物性タンパク質（肉）に変換するのに、50%の飼料変換効率（1kgの収穫に対し2kgの飼料が必要）であるのに対し、牛は膨大な量の糞尿を排出し、体温、体重や姿勢の維持、運動、ゲップなどによるエネルギーのロスが多く、飼料交換率がわずか0.04%（1kgの収穫に対し25kgの飼料が必要）である^[28]。また畜産は貴重な淡水の大量消費や大規模インフラ設備などの問題があげられる。牛肉1kgを生産するのに20,000リットルの水が使われるのに対し、昆虫はわずか8リットルの水量（牛の0.0004%）で同量の収穫が見込める^[28]。また本論の主題でもある「動物性タンパク質」の含有量も、昆虫は80%（製粉調理後は約68%）とほとんどタンパク質のカタマリであるのに対し、牛肉に含まれるタンパク質量は17%にとどまっている。昆虫は牛肉のおよそ4.7倍もタンパク質を多く含んでいることになる^{[29][30]}。また先に牧草地の面積問題を指摘したが、昆虫の単位面積あたりの収穫量は、牛の13.2倍であり^{注6}、温室効果ガスの排出量も、牛のそれと比べて0.01%に過ぎない^{注7}。

2.7 昆虫食の可能性

昆虫を食してまで、摂らなくてはならない動物性タンパク質に関して、その必要性は色々と議論されている。例えば植物性タンパク質による代替案である。そこでは主に、体内で作ることのできない必須アミノ酸含有量の議論が中心となっており、動物性タンパク質の方が植物性のそれよりも優位だとする論が多く見られる^[32]。9種類の必須アミノ酸のうち、イソロイシン、スレオニン、リジンの3種が動物性タンパク質に多く含まれ、成長促進や新陳代謝、肝機能や免疫力の向上に役立つ重要なものである。そのため動物性タンパク質の摂取は様々なところで積極的に推奨されている。

また動物性タンパク質の有用性を裏付けるため、ベジタリアンが健康か不健康かの議論も広くなされている。しかし個人差による報告や、感情的なものも多く、どちらが優位であるかの客観的な判断は難しい。今のベジタリアンの世界人口は4億人と言われており^[33]、全体のおよそ5.7%である。今後

注6 単位面積あたりの牛肉生産量が5g/sqmに対し、昆虫生産量は66g/sqm^[31]。

注7 牛と昆虫との温室効果ガス排出量比は、85.5:1。

若干増える傾向にあるようだが、動物性タンパク質の需要を凌駕するほどに増加することはないとすれば、動物性タンパク質の需要は、ベジタリアンの存在と共存しつつ、増え続けるとみてよい。

さらに、世界では食物の不均一な分配が問題になっており^[34]、先進国は肥満に、そして途上国は飢餓に苦しむという事態が起きている。途上国における飢餓環境において、未熟なインフラでも生産が可能で、安価に提供できる可能性を秘めている昆虫食は、特に有効だろう。そして何よりも昆虫は高タンパク、低脂肪、高カロリーで、アミノ酸を多く含んでおり、バランスの良い優秀な食材^[35]であるため、コストパフォーマンスの優れた次世代のスーパーフードとして大きな期待が寄せられている。

このように、100 億人社会に十分な食糧を供給するために昆虫食が担う期待と可能性は大きい。環境、エネルギー的観点において、従来の畜産動物を圧倒する昆虫は、これからの食のあり方を問う食材であることは間違いない。地球史上初めて農地面積の臨界点に到達してしまった今、我々が「エネルギー効率」「環境負荷軽減」といった機能主義的なアプローチで、食の問題を解決しなければならない時代において、昆虫食はどのようにデザインされ、広められなければならないのだろうか？ そこで、次項では昆虫食のデザインの解決の可能性について話を進めたい。

2.8 昆虫食のデザインの解決の可能性

かつて「虫を食べること」は我々にとって特別なことではなかった。しかし近代化が進み、より美味しく見た目の良い食材が増え、そして「昆虫採集」という非経済性が効率的な生産・流通システムに駆逐された。特にそれは先進国で顕著に表れ、「イナゴ 100g を確保するためには 200 ～ 250 個体が必要であり、手づかみによる採集の場合、熟練者においても 1 時間でせいぜい 200 個体程度しか採取できない。」^[36]といった事からも、時代が拓いた華やかな食卓への潮流に取り残された食文化として昆虫食を捉えることができる。この昆虫を今、新たな次世代タンパク質源としての価値を見直し、社会に広げていくために、デザインというツールは有効である^[37]。

デザインの役割はいつの時代も新たな産業と利用者をつなぐ役割を担って

きた。この昆虫食においても、環境設備工学、生物学、食文化、健康社会、心理、生態系等の新デザイン領域や、昆虫の飼育から食卓までの流れ（生産者、加工業者、運搬者、販売者、そして消費者へ）のデザインや、その安定的に接続可能なシステム、その社会・経済学、エンジニアリング、都市構造など、さらに昆虫を食する抵抗感を低減するための工夫、昆虫食文化の再構築、ブランディングなどまでも、デザインの対象として考えられる。

現在、動物性タンパク質の増産に向けた研究は多岐にわたっている。食肉培養の研究や、遺伝子組み換え技術など物議を醸しつつも、積極的に取り組まれており、分子レベルでのサイエンスアプローチの新しい畜産のあり方が注目され始めている。と同時に従来型の安全で安心な自然アプローチの養殖による増産も考えられており、その中核をなすのがこの昆虫食である。そこで本研究では昆虫のエネルギー的、環境的メリットを最大限に生かし、動物性タンパク質の大量供給可能な飼育システムを実装し、食材の選択肢が豊富な健全・健康社会の実現を目指す。

3 昆虫食の大量安定供給を目指すデザイン

今現在、昆虫食関連のデザインに多く見られるものは、興味本位や問題意識のある個人に対するものである。姿のままの昆虫料理を口に頬張る笑顔や^{注8}、キッチン家電のように美しくデザインを施された飼育器、有名シェフがアレンジを加えたレシピなどがそうである。観葉植物やガーデニングのような世界観で、家庭用アクアリウムのようなお洒落なプロダクトが散見される。またワークショップ活動など巧みなブランディングが施され、興味の扉さえ開けばいつでもアクセスが可能な戦略が見られる。

対して、本研究はこれらの昆虫食デザインの傾向とは違うアプローチ、つまり大衆食材としての大量生産を最終ゴールに据え、これの実現可能性を考察する。そして極めて機能主義的に良質な動物性タンパク質の量産の為のデザイン手法を探る。

昆虫飼育での大量生産を考える場合、昆虫のための集合住宅、もしくは小

注8 Google Search “eating insect” の画像検索結果が示す通りである。

都市を設計し居住させるという考え方があるとすれば、「建築的」なデザイン思考が有効だといえる。建築は人、モノ、移動、交通、インフラ、領域、都市などを総合的に整備し、快適な環境空間を提案する責務がある。これは「人」を対象とすることがほとんどだが、今回のように「昆虫」を対象とする場合も同様である。特定の「種」にたいして、居住者の習性や空間感覚、領域、縄張り、住まい、行動パターンなどの観察を通して空間的精査を重ね、温度、湿度、光量、食物・水分補給、清掃などインフラ設備の設計が可能なのではないか^[38]。本論の領域において、建築やプロダクトの設計ノウハウは応用できるものとして、実践を進めていく。

この量産可能な昆虫飼育システムの設計手法を明らかにすることが、本論の狙いである。この回答を導くにあたり、幾つかの事例、考察、視察、試作、観察を通して見えてきたデザイン手法を本論の結論として記述したい。

3.1 昆虫食のための昆虫飼育器のデザイン事例

FARM432 (図 2, A) はアメリカミズアブの飼育、収穫を目的としたプロダクトで、成虫の飛行空間、産卵孵化のスペース、幼虫の収穫トレイなどが配置されており、完結した環境が設計されている。収穫に関しては、幼虫の動きの特性を上手に利用したデザインになっており、幼虫が自ら移動することによって収穫トレイの中に落ちる仕組みになっている。ただ収穫量に課題が残されているようだが、同チームは飼育効率をさらに上げた開発を進めている^[39]。

LEPSIS (図 2, B) は、既出のプロダクトと同様、キッチンに存在するアクアリウムのような美しいデザインが施されている。バッタを眺める暮らし、そしてそれを食べる「勇気」や「冒険心」を誘発するような、ポジティブで積極的な強度のあるデザインである。しかし、産卵孵化のプロセスは含まれておらず、飼育空間は「生け簀」として提案されている。そのため世代の持続可能性の実現が次の課題である^[40]。

NY のテラフォーム・ワンの発表した、クリケットシェルター (図 2, C) は、量産を目的とした明快なプロトタイプで、22,000 匹のコオロギを飼育可能である。産卵孵化用のユニットは居住ユニットと分けて整備されており、全て



図2

A (左上) :
FARM432 (c) Katharina Unger /
Livin Studio^[39]

B (右上) :
LEPSIS (c) Mansour Ourasanah^[40]

C (左下) :
Cricket Farm (c) Terraform one^[41]

のユニットはモジュール化され、ホースで繋がれて往来行動の自由が実現されている。これにより、より「都市的」な環境がつくられており、さながら集合住宅に居住する人類のように振る舞うコオロギの姿が見られる^[41]。

3.2 量産を目指す昆虫の選定

昆虫食と言っても様々で、およそ 1,400 種類の昆虫が世界中で食されていると言われている^[42]。それらの中から本研究の量産可能な昆虫飼育システムの設計に適切な飼育対象の昆虫を選定することが必要で、その際飼育器の中で整える環境はより簡単であることが望ましい。例えば、水陸両生の場合、整備する環境が複雑になる。逆に単一環境での温度管理だけでたくましく育

つ昆虫があるのであれば、それは「簡単に効率的に飼育」できる最適な昆虫だと言える。

飼育対象の昆虫選定条件は以下の通りとする。

(1) 世代交代が簡単であること

昆虫には変態（メタモルフォーゼ）「卵＞幼虫＞蛹＞成虫」のプロセスを経る種が多く、このすべてのプロセスを完成させなければ次世代が産まれないので複雑なシステムになる。

(2) 居住環境が単一であること

トンボ（ヤゴ）や蚊（ボウフラ）のように、変態ステージで生息している環境が違う場合なども飼育環境が複雑化する。その点バッタ類などは単一環境である。

(3) 行動範囲が広すぎないこと

蝶、蛾のように飛ぶ昆虫は多いが、飼育器の中でストレス状態などにならない、つまり行動範囲が狭い昆虫が理想である。

(4) 飼育情報の入手が簡単であること

学校の飼育教材やペットの餌などに扱われる昆虫などは、飼育情報が豊富にある^[43]。

(5) 外環境と断絶しやすい

養蜂など外環境と関係を持つ昆虫だと、外の整備なども条件に入ってくるため、システム制御が困難になる。

(6) ポピュラーに食されている昆虫である

いかに効率的で簡単に飼育が可能と言っても、親しまれる食材でなくては、食べ物として受け入れてもらえない^[44]。

表1より、理想値に近いコオロギを選定することとする。コオロギは養蜂と違い、外環境に依存しない閉鎖環境での飼育が可能である。またその飼育環境も単一な乾燥環境で良い。幼虫、蛹などの変態プロセスが無い単純な成長モデルであるため、飼育設備の簡易化を目指しやすい。そして何よりも爬虫類ペットの生餌や教育教材としてコオロギは普及しており、その飼育情報

表 1 可食昆虫における飼育環境の整備条件比較チャート（筆者作成）

	閉鎖環境の 作りやすさ	飼育設備の 簡易性	メタモル フォーゼの管理	飼育情報の 入手
コオロギ	○	○ 単一環境	◎ 不完全変態 (孵化・脱皮のみ)	◎
カイコ	○	△ 仕切り (族まぶし)	× 完全変態	◎ 養蚕情報
タガメ	△	× 両生環境	○ 不完全変態	○
カミキリムシ	△	△ 森林環境	× 完全変態	△
蜂 (ハチノコ)	×	× 花粉・蜜環境	× 完全変態	◎ 養蜂情報
トンボ	△	× 水中から陸上環境	× 完全変態	×

が豊富にある。

またコオロギは東南アジア特にタイなどで広く親しまれている食材であり、また同国ではコオロギの飼育ファームが存在しているため知見が期待できる。

3.3 コオロギの飼育環境（タイ、コオロギファーム視察）

タイ中部にて個人で経営するコオロギファームの視察を行った。そこで育てられているコオロギは、鳥や爬虫類等のペットのえさや、人間用の食材として生産されており、生きたまま袋に詰められ、ほぼ毎日出荷されている。そのコオロギファームの大きな特徴として、従来の畜産施設にみられる「周辺への臭気問題」が全くないことが挙げられる。原因としては、コオロギの糞の量が圧倒的に少ないこと、飼育環境が比較的乾燥している為、水を媒介した余計な有機物の繁殖がなく、清潔が保ちやすいこと、またコオロギには動物臭が無いことなどが挙げられる。

施設の建物は屋根と柱だけの半屋外空間で、その中にコンクリートブロックを3段積み上げた、長方形のプール状の囲い（約1.6m × 4m × 60cm）が10室設置されており、その中でコオロギの世代を段階的に区分し、安定的に毎日出荷できる工夫がなされていた（図3）。それらのプールの内側上部の周縁には、プラスチック素材の板（幅約8cm）が貼られており、コオロギはその



図3 タイ中部にあるコオロギファームにて視察（2015年8月に筆者撮影）

滑りやすいプラスチック板の縁のお陰で逃げ出すことなく、おとなしく飼育プールの中に留まる習性があった。

飼育プールの中は、1：居住区域、2：餌場、3：産卵場の3つで構成されていた。それらは清潔を保つため、竹で組まれた足場（高さ15cm程度）の上に置かれており、不潔になりがちな地面との接触部分に水分が溜まらないように工夫されており、掃除の際にも箒を足場の下にくぐらせるだけで綺麗に取り除けるようになっていた。

「1：居住区域」は再生紙で生成された卵トレイを縦に敷き詰めて、コオロギの狭小生息の習性を上手に保護していた。卵状の半球体凹凸形状は、効率的飼育に適した、表面積の拡大に役立ち、かつコオロギの成虫にとっては快適な個室となっていた。また重なることによって生まれるランダムな隙間空間も、彼らにとって恰好の隠れ家となっていた。そしてこの卵トレイは収穫の際、手に取り振り落とすことで、そこに張り付いているコオロギを簡単に収穫ができるようになっていた。しかもタイにおいてこの素材は、安価に交換可能な製品である。

「2：餌場」はプラスチックの小さな皿で、与えられている餌は穀物由来の

ドライで扱いやすいパウダー状のものを使用している。沢山のコオロギが群がり、食い散らかしてしまうので、ほとんどの場合は床に沢山落ちてしまうようだが、床もドライな環境で清潔に保たれているのでカビにくく、落ちた床の餌も、綺麗に食べてしまっていた。

「3：産卵場」は、土とココナッツの皮繊維と水の混合で作られたトレイであった。これは、産卵の時期になると導入され、雌コオロギはそこに産卵管を突き刺し卵を産み落とす。産卵場は毎日の霧吹きにより、湿度が保たれ、飼育空間では一番湿度のあるエリアであり、また同時に飲料水の貯蔵の役割も果たしていた。

産卵を終えたトレイは一度大きなバケツに集められる。その産卵混合土は、白くて小さな卵をふんだんに含んだものである。それをゆっくりと手で攪拌しながら水分調整を行い、均一な卵密度に整えられ、また産卵用のトレイに均一に戻される。そのトレイは温度が一定に保たれるよう、上からシートをかけられ孵化が始まる数週間後までその状態で保たれ、自然に孵化を迎える。

3.4 コオロギ飼育器デザインに求められる諸条件

「量産可能な昆虫飼育システムの設計」のためのデザイン手法の明確化のため、コオロギの飼育器に求められる条件を下に整理した。

- (1) 最適温度：およそ 30-34 度が最適と言われており、この環境だとシーズン関係なく産卵と孵化、成長を繰り返すことが可能である^[45]。
- (2) 快適性（空間）：縄張りのストレスや共喰いの回避により、味や収穫率の向上が期待できる。
- (3) 快適性（設備）：温度、湿度、光量等の環境管理
- (4) 餌、水等供給：餌、居住空間を清潔に保つため、与えすぎない、汚さない工夫が必要である^[46]。
- (5) 収穫の簡便化：隠れ家的な居住ユニットからどのように簡単に効率よく収穫できるかの工夫が必要。
- (6) 産卵期の対応：産卵用ベッドの工夫^[46]。
- (7) 孵化の補助：成虫とは切り分けての温度管理が必要^[41]。

- (8) 成長過程：孵化直後の幼虫（１ミリ程度）から成虫（約３センチ）までの成長過程をサポートできる空間の提案。
- (9) 飼育環境・設備：場所に合わせたパッシブなシステム又は密閉してコントロールするアクティブな案の双方の検討。
- (10) 収穫量：既存家畜と比べて、圧倒的に高効率な数値を目指す。

3.5 コオロギ飼育器のデザイン

3.5.1 形状、空間コンセプト

従来の畜産と比較して昆虫の単位面積あたりの収穫量の高さを最大に活かした大量生産工程を実現させる。飼育空間の高層化によるさらなる生産効率化を目指す。この高層化とはすなわち積層による立体的な飼育環境で、コオロギにとって上下左右の空間移動と快適な居住性が両立した空間のことである。自然界のコオロギは、地面に落ちている枯葉や石などの隙間に居住し、時には樹皮などの隙間を伝って上部へと行動範囲を広げている。既出のコオロギファームで見られたようにも壁や卵トレイの隙間などの垂直登坂への抵抗は見られず、「実験」によっても垂直高密度飼育の可能性が試されている^[45]。この実験によると、コオロギの居住性に関して、入り組んだ内部構造であれば、快適に居住してくれる可能性は高いが、メンテナンスや収穫、清掃、目視での環境管理などをふまえると、入れ子状や袋小路のような構造は避けた方が好ましい。また素材も、経済的で使い捨て可能な卵トレイは有効だが、大量生産を考慮すると、洗って継続利用可能な素材の検討が必要である。

飼育空間をデザインする際、まずは全体の立体空間のイメージを具現化する必要があった。隠れ家的な居住、移動、登坂に必要な隙間空間の確保、などを考え、まずはジャングルジムのような空間充填可能な立体グリッドフレームを検討した。

現段階では、切頂八面体 (tetraikaidecahedron/truncated octahedron) のグリッドを充填したフレーム構造を採用している^[47]。この根拠は、キューブ（正六面体）積層型のグリッドと違い、一つのセルからより多方向への移動が可能で、キューブタイプの６方向に対し、切頂八面体の８方向は、コオロギの行動方向の選択肢を増やし、縄張り争いやストレス軽減等の回避に役立つこと

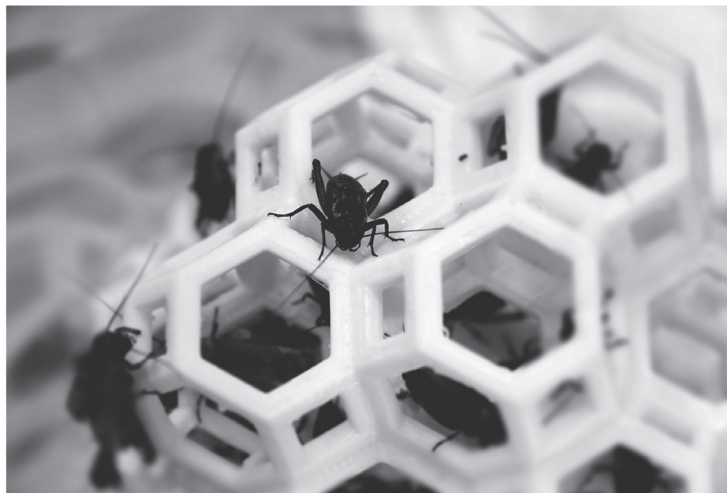


図4 切頂八面体のグリッドを充填したフレーム構造（2016年11月現在）

を期待している（図4）。セルの大きさに関しては、成虫コオロギの後ろ足の可動域などを考慮し、一辺が12ミリのものから18ミリまで1ミリずつ大きさの違うものを制作し飼育観察を始めている。今のところ16ミリのモジュールに好んで集まるケースが多くみられるが、個体サイズがまちまちであるため、今後、より詳しく飼育観察を継続し、改良を重ねる必要がある。

3.5.2 設備インフラのデザイン

ある程度網羅的にそれぞれのセル（居住空間）に資源（水分や餌など）が行きわたるようにするため、今のところ、所々のセルをカップ状にして「餌場」とし、綿を湿らせて「水飲み場」として割り当てている。ただこの場合、定期的に飼育器を開け、手を入れて交換しなくてはならない。この工程をいかに手を入れずに、循環管理できるインフラ設備を整えるかが今後の大きな課題である。

4 量産可能な昆虫飼育システムの設計デザイン手法

以上幾つかの試作や飼育観察などの実践を通して獲得したデザインの工程

を、フローチャート (図 5) に整理した。

この飼育システムは、コオロギの快適性と生産効率性を両立させなければならない。過度な高密度飼育は縄張り争いによる共喰いの発生につながり、個体のストレス、環境の悪化や清潔空間の保持が困難になる。それらの適正空間と適正密度を見極めるためにステップ 04～06 の「空間デザイン」が重

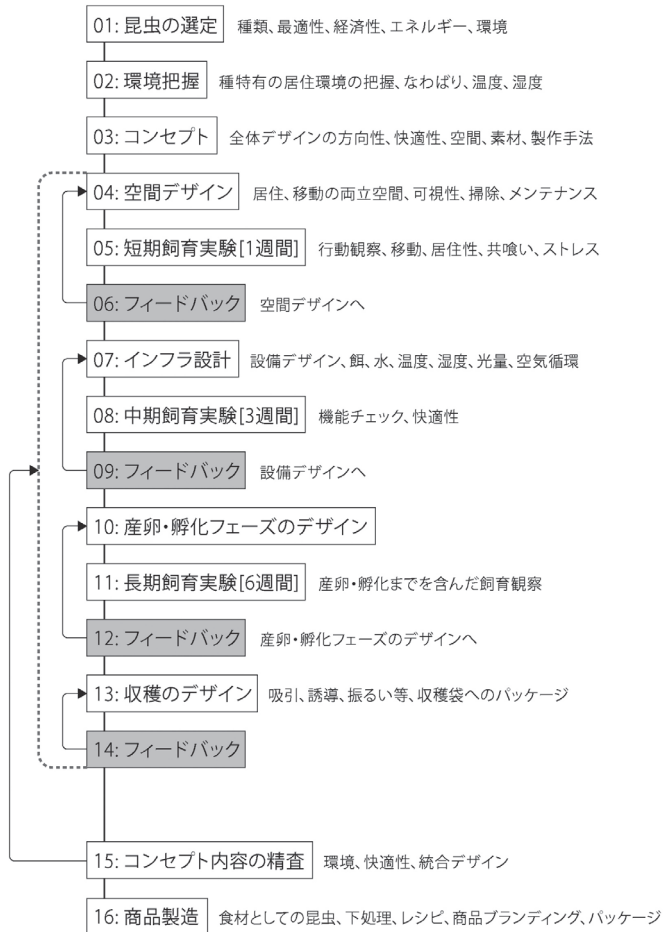


図 5 コオロギの量産飼育を目指すシステムデザインの工程ロードマップ

要となる。この飼育観察期間は行動観察に限られるので、比較的短期間でも見極めが可能である。

次にステップ 07 ～ 09 の「インフラ設計」だが、これはある程度の飼育期間(3 週間)を予定している。餌や水、温度などの快適性を見極めるには、同じ年齢のコオロギを沢山飼育し、生き残り状態などで、快適な環境を担保するだけのインフラ設備が整っているのかが見極められると期待している。

次に「産卵、孵化フェーズのデザイン」だが、これはツガイのコオロギがどのように振舞うのか、また安心して産卵する環境とはどのような空間なのかの見極めが必要である。コオロギは産卵管を土の中に挿して行うため、柔らかく深さのある産卵用ベッドをユニット内に設置する必要がある。同時に世代交代の時間的スパンを考慮し、6 週間を基準とした長期的な飼育観察が必要となるだろう。

最後に「収穫のデザイン」は、産卵を継続させる個体、収穫する個体を分別するプロセスも含まれており、継続的な生産すなわち繁殖を実現するための個体数の管理やその分離方法が大きな課題となるだろう。

これら全てのステップをクリアーし、システム設計に反映させ、機能を満たすプロダクトを完成させるのが本プロジェクトのゴールである。

5 おわりに

第 2 章において昆虫の食材としての機能性は充分であり、数百万トン単位での人類への動物性タンパク質の大量供給源として、可能性は大きいと確認された。第 3 章では、その為の飼育、大量生産の工程を明確にするべく、実践を通してそのデザイン手法を考察した。第 4 章においては、それらのデザイン手法の手続きを今後のデザイン工程のロードマップとして利用できるように整理した。ここに次世代の良質な動物性タンパク質供給の重要な役割を担う「量産可能な昆虫飼育システムの設計」デザイン手法が明確化した。今後はこの手順に則り、飼育実験とシステムの改良を繰り返し、量産可能な飼育環境を整えてゆくことを目指す。

また我々は、本研究と同時に昆虫食の試食会も何度か開催しており、それらを通して様々な意見をいただいていた。大量生産を目指す以上、多くの人々

にとって抵抗感の無い昆虫食の提供を改善してきた。そこでコオロギをミルクに漬け置くことで、独特の臭みを抜き、そして加熱（炒る）粉碎、乾燥によるパウダー化に成功している。このパウダーを使ったビスケットの評判が良く、こんがり焼きあがったそれはココアの香りと間違われるほど香ばしく美味しい仕上がりとなった。このように「飼育システム」だけでなく「食べ物」としてのアウトプットの重要性も理解している。今後は、ユーグレナのようなブランディング・アプローチも必須だと感じており、消費者にネガティブな先入観をもたらない工夫をデザインアプローチで考えている。

我々は今後の人口の増加に歯止めをかけることに対しては、残念だが無力である。そして 50 年後に迫る 100 億人社会では、世界の至るところで食糧危機が確実に訪れるであろう。本論が、その問題を全て解決する特効薬だとは思っていない。しかし食糧難が発生した地域や、環境負荷の少ない食事に関心のある人々に、昆虫食は安全な動物性タンパク質を安定供給するための極めて有効な手段のひとつであることは確かであろう。豊かな健康社会作りへのロードマップはいくつあっても困ることではない。最も大切なことは、今、対策を練ることだと思う。

引用文献

- [1] Richter D., Grün R., Joannes-Boyau R., Steele T. E., Amani F, Rué M., Fernandes P., Rynal J. P., Geraads D., Ben-Ncer A., Hublin J. J., McPherron S. P., “The age of the hominin fossils from Jebel Irhoud, Morocco, and the origins of the Middle Stone Age,” *Nature*, 546(7657), 7 Jun 2017, pp. 293-296, doi: 10.1038/nature22335.
- [2] Hublin J. J., Ben-Ncer A., Bailey S. E., Freidline S. E., Neubauer S., Skinner M. M., Bergmann I., Le Cabec A., Benazzi S., Harvati K, Gunz P., “New fossils from Jebel Irhoud, Morocco, and the pan-African origin of *Homo sapiens*,” *Nature*, 7 Jun 2017, 546(7657), pp. 293-296, doi: 10.1038/nature22335.
- [3] 国連人口基金東京事務所「世界人口の推移グラフ」<<http://www.unfpa.or.jp/publications/index.php?eid=00033>>.
- [4] Worldometer, “Current World Population,” <<http://www.worldometers.info/world-population/>>.
- [5] United Nation, Department of Economy and Social Affairs, Population Division, “World Population Prospects, the 2015 Revision,” <<https://esa.un.org/unpd/wpp/Graphs/Probabilistic/POP/TOT/>>.
- [6] FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations, “Edible Insects future prospects for food and feed security,” Rome 2013 p. ix.

- [7] Fedoroff N. V., “Food in a future of 10 billion, More with Less,” *Agriculture & Food Security*, 4(11), 21 August 2015, doi: 10.1186/s40066-015-0031-7, <<https://agricultureandfoodsecurity.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40066-015-0031-7>>.
- [8] Mark Notaras, “Agriculture And Food System Unsustainable,” *Our World - Brought to you by United Nations University*, 30 June 2010, <<https://ourworld.unu.edu/en/agriculture-and-food-systems-unsustainable>>.
- [9] JAICAF「世界の農林水産」(表3: 食品・酪農品の消費量予測) 2012 年, p. 08.
- [10] United Nations, Department of Economics and Social Affairs, <<http://www.un.org/en/development/desa/news/population/2015-report.html>>.
- [11] 内閣府経済社会研究所「国際貿易に影響を勘案した持続可能性指標の在り方に関する調査研究」(表: 世界の農作物別の土地利用面積と、総土地利用面積に占める割合)『研究会報告書等』No. 69、平成 27 年、p. 55.
- [12] Directorate-General for Environment, “Science for Environment Policy,” 2010.
- [13] Fraser Cain, “What Percentage of the earth’s land surface is desert?,” <<http://www.universetoday.com/65639/what-percentage-of-the-earths-land-surface-is-desert/>>.
- [14] The World Bank, “Forest Area (% of land area),” <<http://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.FRST.ZS>>.
- [15] 日本貿易振興機構「平成 21 年度 サウジアラビアにおける食品市場調査」JETRO 調査レポート、2010 年 3 月、pp. 12-14.
- [16] PFC 植物工場研究センター <<https://www.plant-factory.osakafu-u.ac.jp/>>.
- [17] Open Agriculture, <<https://www.media.mit.edu/groups/open-agriculture-openag/overview/>>.
- [18] Agri-Cube, <<http://www.daiwahouse.co.jp/business/agricube/index.html>>.
- [19] 鹿島建設 <<http://www.kajima.co.jp/news/press/201407/2e1-j.htm>>.
- [20] SunDrop, <<http://www.sundropfarms.com/>>.
- [21] Food and Agriculture Organization of The United Nation “The state of World Fisheries and Aquaculture 2014,” pp. 3-4.
- [22] The case for fish farming, by Mike Velings at TED, <http://www.ted.com/talks/mike_velings_the_case_for_fish_farming/transcript?language=en>.
- [23] Marine Stewardship Council, certified sustainable seafood, “Fish as food” (In 2013, fish accounted for about 17% of the global population’s intake of animal protein), <<https://www.msc.org/healthy-oceans/the-oceans-today/fish-as-food>>.
- [24] 久米 新一「第 7 回日本の畜産 8.2 世界の畜産」(資源生物化学概論 II) 農学部 Kyoto-U Open Courseware, PDF, p. 4.
- [25] FoodWatchJapan「世界各国と日本の農産物単位面積当たりの収穫量の比較」<http://www.foodwatch.jp/primary_inds/whatisgood/31918>.
- [26] FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations “Edible Insects future prospects for food and feed security” Rome 2013 p. 9
- [27] Efficiencies of production of conventional meat and crickets FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations “Edible Insects future prospects for food and feed security” Rome 2013 p. 60.
- [28] INSECT LIVESTOCK, <<https://mirelapaciurea.wordpress.com/2016/04/17/insects-consumption-between-acceptance-and-the-yuck-factor/>>.
- [29] United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, “National Nutrient Database for Standard Reference” Release 28, <<https://ndb.nal.usda.gov/ndb/beef/show>>.
- [30] Bugsolutely, Protein by weight, <<http://www.bugsolutely.com/company/>>.
- [31] The Ethics Centre, INSECT TO FEED THE WORLD, <<http://www.ethics.org.au/on-ethics/>>

- blog/august-2015-(1)/insects-to-feed-the-world>.
- [32] 日本理化学薬品株式会社「必須アミノ酸」解説 <<http://www.nipponrika.co.jp/amino/detail01/>>.
- [33] Heinrich Böll Stiftung, *MEAT ATLAS facts and figures about the animals we eat*, The Green Political Foundation, 07 Jan. 2014, p. 56.
- [34] Hunger Free World 「世界の食糧事情」 <http://www.hungerfree.net/hunger/food_world/>.
- [35] Nutritional value of insects for human consumption, FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations, “Edible Insects future prospects for food and feed security,” Rome, 2013 p. 67.
- [36] 水野 壮「現代の昆虫食の価値—ヨーロッパおよび日本を事例に一」『国際交流研究：国際交流学部紀要』No. 20、2016 年、p. 11。
- [37] エレン・ラプトン、カーラ・マカーティ、マチルダ・マケイド、シンシア・スミス、アンドレア・リップス、北村 陽子（訳）『なぜデザインが必要なのか』英治出版、2012 年、p. 12。
- [38] Carol Aiello, Paul Aldridge, Noemie Deville, Rami Sarabi, Anna Solt, Jung Su Lee, *eVolo Skyscrapers*. 3, 655, 2016, pp. 106, 380, 466 and 490.
- [39] FARM432, <<http://www.livinstudio.com/farm432/>>.
- [40] LEPSIS, <<https://vimeo.com/55695909>>.
- [41] Modular Insect Farm by Terraform one, <<http://www.terreform.org/index.html>>.
- [42] Alison Small, FAO Newsroom, 19 February 2008, Chiang Mai, Thailand, <<http://www.fao.org/newsroom/en/news/2008/1000791/index.html>>.
- [43] 渡辺 克己「教材生物飼育法の改良について」『神奈川県立教育センター研究集録』11(29-32)、1992 年、pp. 29-32。
- [44] 山内 正一『昆虫食入門』平凡社新書、2012 年、p. 246。
- [45] 楠元 守・木下 鉄雄「フタホシコオロギの高密度飼育法について」『神奈川県立教育センター研究集録』11(59-64)、1984 年、p. 1。
- [46] 「フタホシコオロギの飼育法」<<http://www.center.gsn.ed.jp/curriculum/seibutsu/shiikuhou/koorogi.PDF>>。
- [47] フィリップ・ボール『かたち』早川書房、2011 年、p. 110。

{受付日 2017. 2. 27}
{採録日 2017. 7. 7 }