

未来プロジェクト TSUNAGU21 IV

〈グループB〉

食糧問題解決に向けた食用昆虫の品種改良

—— 屋久島ブランドを世界へ ——

伊藤 健太¹⁾, 岡本 和樹²⁾, 柴森 咲紀³⁾名取 義之⁴⁾, 宮田 俊介⁵⁾

¹⁾ (株)日立製作所 研究開発グループ サービスシステムイノベーションセンター 社会インフラアーキテクチャ研究部
(〒244-0817 神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番 E-mail: kenta.ito.tq@hitachi.com)

²⁾ (株)堀場アドバンスドテクノ 営業本部 環境ソリューションズ営業部 東日本リージョンチーム
(〒101-0063 東京都千代田区神田淡路町2丁目6番 E-mail: kazuki.okamoto@horiba.com)

³⁾ メタウォーター(株) プラントエンジニアリング事業本部 電機技術第一部第一グループ
(〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1-25 E-mail: shibamori-saki@metawater.co.jp)

⁴⁾ 東芝インフラシステムズ(株) 水・環境システム技術第二部 水・環境システム技術第五担当
(〒212-8585 神奈川県川崎市幸区堀川町72番地34 E-mail: yoshiyukil.natori@toshiba.co.jp)

⁵⁾ (株)明電舎 水インフラ営業・技術本部 技術部 技術第二部 技術課
(〒141-6029 東京都品川区大崎2-1-1 E-mail: miyata-sh@mb.meidensha.co.jp)

概要

世界的な食糧問題の解決策として昆虫食が注目されている。しかしながら、昆虫食に対する嫌悪感や高価格といった課題により、昆虫食の普及は進んでいない。本論文では、屋久島を食用昆虫の研究開発拠点とし、世界へと昆虫食を流通させていくフードシステムについて考察を行った。屋久島の自然豊かなイメージを生かしたブランディングや屋久島の環境を生かした研究開発を行うことで、昆虫食の定着と世界の食糧問題解決に繋げていくことを提案する。

キーワード：食糧問題, 昆虫食, 屋久島, 品種改良, ビオトープ

原稿受付 2023.12.25

EICA: 28(4) 23-27

1. 背景と目的

紛争や経済危機、地球温暖化による気候変動、肥料高騰等といった原因により、世界的な食糧問題が生じている。国連の5つの専門機関が共同で公開した世界の食料安全保障と栄養の現状2023¹⁾によると、2022年の時点で約7億3500万人が飢餓に直面しているという。このような状況にもかかわらず、世界の人口は増え続ける一方であり、今後も食糧問題の深刻化が懸念されている。また、食糧問題を引き起こす原因の一つに地球温暖化による気候変動を挙げたが、私たちの食糧供給過程もまた地球温暖化の一因となっている。例えば、牛の糞尿やげっぷから発生するメタンガスは、二酸化炭素の約28倍の温室効果を持つという。また、畜産業から排出される温室効果ガスは、世界の温室効果ガスの約14%を占めているとの報告²⁾もあり、持続可能な社会の実現には私たちの食の在り方を見直していく必要がある。

そこで近年、食糧問題の解決策として注目されてい

るのが昆虫食である³⁾。昆虫は動物性たんぱく質が豊富で、牛肉や豚肉の代わる食品と期待されている。また、たんぱく質以外にもビタミンやミネラル等も含まれており、栄養価の高い食べ物として優れている。さらには、豚や牛に比べて環境負荷が低いという利点もあり、これからの持続可能な社会の実現に大きく貢献すると考えられている。しかしながら、多くの人の昆虫食に対する嫌悪感は大きく、食品としての流通は少ない状況にある。また、食用昆虫は流通量が少ないことや製造者が少ないことで価格が高く、手に入りにくい状況とも言える。このような状況を打破し、持続可能な社会を実現するためには、昆虫食のイメージアップ化や親しみやすい食用昆虫の研究開発、製造方法の確立等が必要であると考えた。

2. 構築するフードシステム

2.1 屋久島を起点としたフードシステム

今回提案する食用昆虫のフードシステムにおいては、



Fig. 1 Conceptual diagram of food system for edible insects

屋久島を主に研究開発拠点と位置づける。増産や加工、供給を世界各地の拠点で需要地に応じて行うことで、食用昆虫の課題となるコスト低減をめざしていく。研究開発は、昆虫の品種改良によって生育期間を短縮し、飼料効率を向上させることを目的として行う。増産拠点は世界各地で行うことを想定して、屋久島では気候や温度など地域特有の環境が再現可能な研究施設の建築が必要だと考えられる (Fig. 1)。

2.2 世界の食用昆虫の需要

近年、昆虫食は欧米を中心に注目を集めている。その理由の一つに生産時の環境負荷が少ないことが挙げられる。EUでは2018年に食用昆虫が食品として承認を受け、市場の拡大が予想されている。またタイでは1998年からコオロギの養殖が普及している。これは稲作の傍らでできる副業として、国がノウハウを持たない農家へ指導することにより、参入しやすい市場へと展開させた結果となる。現在では既に2万箇所以上の農家でコオロギの養殖が進み、今後も拡大傾向と予想される。また伝統的な食用昆虫に加え、昆虫の原型をとどめず消費者の抵抗感が少ない新商品の開発、販売をする企業が増加している。昆虫食普及の障壁となっている価格についても参入する企業が増えることで低下できると考えられる。

先に述べた通り、昆虫食はたんぱく質などの栄養素を豊富に含むことから、現在も深刻なアフリカの栄養不足の問題を解決できる手段の一つだと考えられる。アフリカはかねてより世界の中でも昆虫食が一般的な地域の一つとなっている。食用と認められている昆虫は約2100種あり、400種以上が消費されている。特

にコンゴ、中央アフリカ共和国、カメルーン、ウガンダなど一部の国では、昆虫食は古くから一般的な食事として親しまれている。しかしながら現在ではその入手ルートは野生の昆虫を採集してくることが割合の多くを占めている。アフリカで品種改良された食用昆虫を量産させ、普及することができると栄養へのアクセス向上、さらには雇用創出も期待できると考える。

2.3 屋久島に研究所を設立するメリット

屋久島は鹿児島県の南部に位置し、急峻な地形と降雨の多さを特徴とする島である。

年間平均降水量は平地では約4,500 mm、山間部では8,000~10,000 mmであり、日本の平均1,718 mmと比べても非常に降水量が多いことが分かる。また、平均気温も里地では約20℃と比較的高く温暖な島である。

そのため、昆虫の生育に適した気候であり、研究開発拠点における暖房費削減など、省エネ化が図れると考えている。さらに屋久島では水力発電によるエネルギー自給率を99.6%も占めており、クリーンエネルギーの活用により環境負荷低減にも繋げることが可能となる。

また、島の一部が世界自然遺産に登録されている屋久島から連想される「自然豊かなイメージ」と近辺にある宇宙産業が盛んな種子島との協力で食用昆虫を「宇宙食」として開発を行うことで、食用昆虫を「未来食」としてブランディングしていく。近未来の食品と印象付けることで少しでも抵抗感の緩和を図ることができると考える。

3. 屋久島の研究所について

3.1 研究所の目的

研究所の目的は、国内外での昆虫食普及をめざし、食用昆虫の品種改良を中心に収集から成虫までの育成を行うことである。Fig. 2に昆虫の育成プロセスを示す。前述の通り、本研究所では食用に適する品種の開発及び育成を重点的に行うため、課題は以下の2点である。

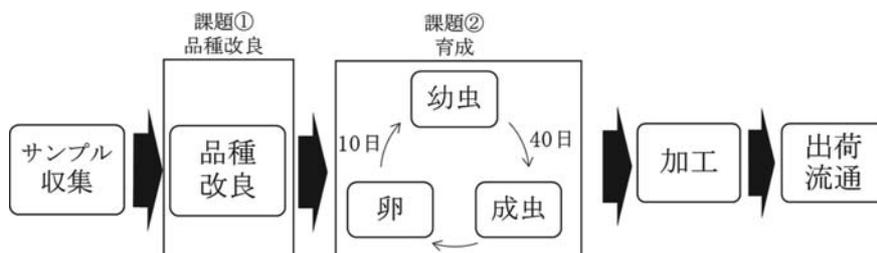


Fig. 2 Process of breeding edible insect

課題① 品種改良フェーズの最適化

後工程まで考慮した食用昆虫の最適化をめざす。具体的には、生産期間の短縮、飼料効率の向上、味の向上を行う。

課題② 育成フェーズの最適化

品種改良した昆虫の飼育環境を確立すると同時に、人的リソースの削減をめざして飼育の自動化・最適化を行う。

3.2 研究所内の設備概要

Table 1 に研究所の施設概要を示す。本研究所は生産拠点ではなく、研究開発拠点であり、電力はクリーンな水力発電にて賄う想定のため、小規模施設とする。1階をオフィス、2階を食用昆虫の飼育、3階を研究開発用スペースとする。

Table 1 Facility overview

研究所	内容
住所	鹿児島県熊毛郡屋久島宮之浦付近
階数	地上3階建て
敷地面積	敷地 80 m ² , 延床 240 m ²
従業員数	20人

3.2.1 品種改良に用いる設備

本研究所での食用昆虫の効率的な品種改良を行うため、所内にはAIによる設計支援・データ管理システムを活用したゲノム編集設備を設ける。ゲノム編集とは、生物が持つゲノムの中の特定の場所を切断し、修復時の塩基変化を利用して生物の特性を操作する品種改良手法⁴⁾である。従来のゲノム編集手法である胚マイクロインジェクションに代わって、市販のCas9リボ核たんぱく質を成体へ注射するCRISPR (クリスパー)/Cas9と呼ばれる手法が近年注目されており、熟練した実験担当者を必要とせず、安価・容易な品種改良が可能⁵⁾となっている。

本研究所では、CRISPR/Cas9とAIを活用した管理システムを融合させ、高効率な品種改良の実施をめざす。想定している品種改良のプロセスは下記の通りである。

- ①食用昆虫の特性を向上させるため、データベース化した過去の実験結果からAIが高精度なゲノム設計を行う。
- ②CRISPR/Cas9により食用昆虫のゲノム編集を行う。
- ③新品種の生態実験を実施し、目的特性が得られたかを評価する。
- ④研究結果をAIに学習・データベース化する。
- ⑤①～④のサイクルで開発した新品種を増産・加工拠点に送り、製品として出荷する。

上述した手法により、本研究所にて国内外の様々な

Table 2 Comparison of calorie and protein contained in edible insects and chicken

	コオロギ ⁹⁾ (パウダー加工時)	イナゴ ¹⁰⁾	セミ ⁹⁾ (幼虫)	鶏肉 ⁹⁾ (参考値)
カロリー (100gあたり)	501 kcal	405 kcal	159 kcal	244 kcal
たんぱく質 (100gあたり)	61.8 g	76.0 g	67.5 g	52.1 g

昆虫食ニーズに合わせた多品種の改良を進め、高品質かつ安価に増産可能な「ヤクシマブランド」として新品種を確立し、国内外への展開・普及を図る。品種改良のターゲットとなる昆虫の例として、**Table 2**に記載する。

コオロギやイナゴについては高カロリー・高たんぱく質な栄養価となっており、発展途上国向けの主食用品種として品種改良・展開を図る。特にコオロギについては生育期間が短いというのに飼料効率が高く、省スペース・短サイクルでの増産に適していることから宇宙食の食材として注目されており、先進国でも将来的な需要増加が見込まれる。セミについては低カロリーながらたんぱく質を多く含む栄養価であり、先進国向けのダイエット・健康食材のベース品種として期待できる。

3.2.2 育成に用いる設備

昆虫育成を行うにあたって、適切な温度管理が非常に重要である。代表としてタンボコオロギを例に挙げると約25~30℃付近の温度を維持しなければ卵の孵化を促すことができない。また、既往研究⁶⁾によると幼虫の発育（孵化した幼虫が成虫になるまで）は、経験した日長によって50日~120日程度と大きく変化するという結果があるため、温度と共に光量を計測し、最適な生育環境を自動制御するためのシステムを導入する。

給餌・給水については適切なタイミングで適切な量を供給する必要がある。供給不足は昆虫の死滅や栄養分の低下につながり、供給過多では残渣への病原菌繁殖等が懸念される。

そのため、映像にて24時間遠隔監視できる監視設備を導入したうえで、AI画像解析技術を用いることで昆虫の成長率、繁殖数に合わせた最適な給餌・給水を実現する。

また、将来的な宇宙食利用をめざして無重力環境を疑似的に再現する設備の導入も検討する。

3.2.3 ヤクシマビオトープの設立

先に昆虫の品種改良・育成手段について検討したが、国によってはゲノム編集による品種改良を厳しく規制しているケース⁷⁾もあり、新品種を世界へ普及させるためには、自然界に流出した際の生態システムへの影響を可能な限り詳細に評価し安全性を担保する必要がある。そこで本研究所に隣接する形で、新品種を疑似

自然環境に放生する研究・観光施設「ヤクシマビオトープ」を設立する。この施設では、屋久島の自然環境をベースとした模擬的な自然環境に新品種を他生物と共に放ち、研究室レベルでは評価できない生態システムへ及ぼす影響の調査を可能としている。また本設備を自然共存型の観光施設として一般客も入場可能とし、地元の観光事業促進及びヤクシマブランドの認知度向上による民間へのPRを図る。

Table 3 に研究所内の技術一覧を示す。

Table 3 Technologies within the laboratory

品種改良技術	育成関連技術
・注射によるゲノム編集 「CRISPR (クリスパー)/Cas9」 ・ヤクシマビオトープ	・IoT センシングによる温湿度、 空気、照明管理の生育環境管理 システム ・AI 画像解析技術を用いた自動 給餌/給水設備 ・宇宙環境を再現する無重力設備

4. 想定される障壁と解決策案

本章では本研究を推進する上で想定される障壁三点と、それぞれに対する解決策案を示す。

一点目は開発に対する国内法規制（自然公園法）である。屋久島をはじめとする国立公園では、一部地区で建築物の新改増築等に規制が存在する。ただし、屋久島全面積のうち自然遺産地域として登録されている割合は約 20% であり、「普通地域」に該当するエリアであれば、事前届出によって施設を建築可能である。宮之浦港、安房港の近隣エリアにも建築物の新築は可能であると考えている。

二点目はカルタヘナ議定書である。カルタヘナ議定書とは、地球上の生物多様性保全と持続可能な利用などを目的とした「生物多様性条約」のもと、遺伝子組換え生物の国境を超える移動に関するルールを定めたものである⁸⁾。カルタヘナ議定書では、遺伝子改変された生物を輸入する国が、生物多様性への影響評価を実施し、輸入の可否を決定するよう定められている。

屋久島での研究開発活動は、新品種の開発を含むため、生物多様性への影響を評価していない段階の新品種が外部に流出し、自然環境に害を及ぼす危険性が考えられ、適切な拡散防止措置を取る必要がある。ヤクシマビオトープを含む研究施設全体として、昆虫を閉鎖環境にて管理する設計とし流出リスクを低減しているものの、IoT を活用した拡散防止システムの構築等、セキュリティ面の更なる対策検討が必要である。

一方で、新品種を世界各地で量産するフェーズにおいては、開放系で飼育が行われることが想定されるため、研究開発段階で生物多様性への影響を評価することが望ましい。ヤクシマビオトープにおいて新品種の生物多様性への影響を調査し、問題なしと評価された

品種のみを世界各国へ展開することで、環境への影響を最小限にとどめたい考えである。カルタヘナ議定書にもとづき、輸出先各国にて新品種の生物多様性への影響評価をするに先立ち、ビオトープにおいて事前調査を行うことで、各国に新品種を受け入れられると考えている。

三点目は住民各位との合意形成である。昭和 40 年代の原生林保護運動により、屋久島の一部地域が世界自然遺産登録につながった歴史的経緯から、屋久島住民の皆様が持つ開発に対する抵抗感は強いことが想定される。ヤクシマビオトープを自然共生型の施設として建設し、観光的魅力を持たせることで、島の経済に貢献することをアピールし、住民各位との合意形成につなげたい考えである。

5. ま と め

本論文では、世界の食糧問題解決を目的とした、昆虫食フードシステムを提案する。このフードシステムでは、屋久島を食用昆虫の研究開発拠点として中心に据え、世界中での増産につなげることをめざす。屋久島では、食用昆虫の生産性や品質向上を目的とした研究開発を行う。屋久島には新品種の生物多様性への影響を調査するヤクシマビオトープを併設、自然共存型の観光施設とすることで観光資源として島自体にも貢献する。自然イメージの強い屋久島発のブランドとして新品種を展開するなどのマーケティング活動を通して、世界中での昆虫食文化の普及へつなげる。本フードシステムによって、世界中に昆虫食文化を定着させ、ひいては世界の食糧問題解決をめざしていく。

謝 辞

EICA 未来プロジェクトを通して、多くの貴重なご経験・知見をご講演いただいた味埜俊様、福永真弓様、また、世話人の中村様をはじめとする世話人の皆様、事務局の皆様には厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO: The State of Food Security and Nutrition in the World 2023, FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO, p. 16, (2023)
- 2) AGA: Livestock solutions for climate change, FAO, p. 3 (2017)
- 3) A. van Huis, J. Van Itterbeeck, H. Klunder, E. Mertens, A. Halloran, G. Muir and P. Vantomme: Edible insects Future prospects for food and feed security, FAO, p. 171 (2013)
- 4) 農林水産技術会議：ゲノム編集～新しい育種技術～
https://www.affrc.maff.go.jp/docs/anzenka/genome_editing_leaflet/genome_editing_leaflet.html
- 5) Yu Shirai, Maria-Dolors Piulachs, Xavier Belles and Takaaki

- Daimon: DIPA-CRISPR is a simple and accessible method for insect gene editing, *Cell Reports Methods*, Vol. 2, No. 5: 100215 (2022)
- 6) 篠原従道, 富岡憲治: タンボコオロギにおける光周期と温度による幼虫発育の制御機構 今後の環境を考える, *比較生理生化学* 38 (1), 38-44 (2021)
 - 7) 河本夏雄: ゲノム編集昆虫の安全性評価と規制の可能性, *蚕糸・昆虫バイオテック*, Vol. 86, No. 2, pp. 125-133 (2017)
 - 8) 環境省: 生物の多様性を確保するための“国際ルール” カルタヘナ議定書とは 閲覧日 2023年12月18日
https://www.biodic.go.jp/bch/cartagena/s_02.html
 - 9) 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, *国際交流研究: 国際交流学部紀要*, Vol. 18, pp. 159-178 (2016)
 - 10) 西岡ゆかり, 高山昌子, 新野弘美, 横山 誠: 昆虫の栄養価と嗜好性の検討, *国際研究論叢: 大阪国際大学紀要*, Vol. 34, No. 2, pp. 1-12 (2021)