

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

論題 Title	第2章 「生産」分野のフードテック
他言語論題 Title in other language	Chapter 2 Food tech in the production sector
著者 / 所属 Author(s)	石川 伸一 (ISHIKAWA Shin-ichi) / 宮城大学食産業学群教授
書名 Title of Book	フードテックー「食」を変える先端技術の課題と可能性ー 科学技術に関する調査プロジェクト報告書
シリーズ Series	調査資料 2024-6 (Research Materials 2024-6)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2025-3-28
ページ Pages	31-68
ISBN	978-4-87582-939-3
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	代替タンパク質食品の生産を中心に、植物性代替肉、培養肉、菌糸体食品、藻類食品、昆虫食、ゲノム編集食品及び精密発酵について、特徴、技術、市場、可能性、課題等を示す。

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

第2章 「生産」分野のフードテック

【要 旨】

タンパク質危機の回避に向けて、国内外の食品企業やスタートアップ企業によってし烈な開発競争が繰り広げられている。動物性食品に取って代わるタンパク質源として、植物性代替肉や培養肉（細胞性食品）がその代表格である。ほかにも菌糸体食品（マイコプロテイン）、藻類食品、昆虫由来のタンパク質を使った新規食品が作られている。また、ゲノム編集によって目的の遺伝子を正確に改変できる新しい育種技術が生み出され、ゲノム編集食品が上市されている。さらに、微生物が特定の最終製品を作製するように設計した精密発酵によって、乳タンパク質等も生産されている。植物性代替肉や培養肉、昆虫食といった食品ごとにその法制度や消費者の受容性等も異なるため、それらを比較しながら関係する情報を整理し、それぞれの課題や可能性を考えることが重要である。

はじめに

現在、最も注目されているフードテックの分野の一つが、「代替タンパク質食品」の生産である。肉を作るための現在の畜産は、広大な土地を必要とし、大量の水・飼料等を消費することや、温室効果ガスを排出することから、長い目で見れば畜産業が持続的とはいえない。そのため、従来の肉に代わるタンパク質源として、代替肉が注目されている。

代替肉とは、主に牛肉や豚肉、鶏肉といった家畜の食肉の代替として作られた食品のことである。大豆等の植物性原料を使用した代替魚介類、代替乳、代替卵も含めて「代替食品」と総称されることもある。

代替肉には大きく分けて2種類ある。大豆やエンドウ豆等の豆類、小麦や米等の穀類といった植物性原料を使い、肉の食感に近づけた「植物性代替肉」と、ウシ等の動物の細胞を培養して作る「培養肉」（細胞性食品）である。植物性原料を使用した代替食品を総称として「プラントベースフード」（plant-based food）という言葉が使われる頻度も増えてきているが、本調査では主に「植物性代替肉」という表記を使用する。

ほかにも菌糸体食品（マイコプロテイン）、藻類食品、昆虫由来のタンパク質を使った「新規食品」（novel food）が作られている。それらの代替タンパク質食品の分類とその内容を表1に示す。この章では、代表的な代替タンパク質食品（植物性代替肉、培養肉、マイコプロテイン、藻類食品、昆虫食）、さらにゲノム編集食品、精密発酵についてそれぞれ説明する。

表1 代替タンパク質食品の分類とその内容

タイプ		内容
代替肉・代替魚介類	植物由来	主に大豆、エンドウ豆、緑豆といった豆類の植物性原料等を使い、畜肉や魚介類の風味や食感を再現した加工食品
	培養細胞由来	牛、豚、鶏、サーモン、ブリ、マグロ、エビ等から採取した細胞を大量培養し、立体状に成形したもの
代替乳・代替卵	植物由来	基本的に植物性原料のみを使い、乳製品や卵製品の代替品として作られた加工食品（豆乳、植物性卵等）
	培養細胞由来	ウシやヒトの乳腺細胞を培養し、乳成分を生産させたもの

* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は2025（令和7）年2月28日である。

菌糸体食品（マイコプロテイン）	菌類（カビ）であるフザリウム菌や麹（こうじ）菌等の微生物を増殖させ成形し、肉様の代替タンパク質源としたもの
藻類食品	海藻類に加え、クロレラ、ユーグレナ、スピルリナ等の微細藻類を大量培養し、タンパク質源としたもの
昆虫食	コオロギ、ミールワーム、バッタ等の昆虫を原料として作られた食品

（出典）筆者作成。

I 植物性代替肉

ここ数年、日本において、主に植物性原料を使った肉の代替品を小売店や外食等の場面で見かけるようになった。このような傾向は世界各国で見られ、代替肉の市場は拡大しつつある。近年の代替肉ブームは、様々なニーズがその背景にある。ビーガン・ベジタリアン食を望む人、健康志向が高い人、環境意識が高い人らがその消費を支えている。

1 植物性代替肉の歴史

前章で述べたとおり、植物性代替肉はこれまで、ベジタリアンやビーガン、宗教的な理由や健康的な食事を求める人々によって、貴重なタンパク質源として消費されてきた。しかし、持続可能な食に対する世界的な需要の高まりや、アニマルウェルフェアの観点から、ベジタリアンでない人やフレキシタリアン（基本的には植物性の食事をするが、ときには肉や魚も食べる柔軟なベジタリアン）の間でも人気が高まっている。

元来、植物性の肉の代替品には長い歴史がある。その代表ともいえる豆腐は、紀元前 200 年頃には中国で発明されていたという説がある。日本においては、豆腐だけでなく、がんもどきが肉を食べることができない僧侶のための精進料理として誕生したといわれており、正に代替肉と言える食品である。

2010 年代以降になると、米国の Impossible Foods 社や Beyond Meat 社等のスタートアップ企業が、植物由来のひき肉、パティ、チキンナゲットを販売し、普及させた。2016 年 7 月、Impossible Foods 社は、肉に似た見た目、味、調理特性を有する牛肉代替品「Impossible Burger」を発売した⁽¹⁾。2019 年 4 月にハンバーガーチェーン店のバーガーキング（Burger King）社は、Impossible Foods 社と提携して植物由来の「Impossible Whopper」を全米で発売し、バーガーキング史上最も成功した製品の一つとなった⁽²⁾。それ以降、ファストフード各社も追随した。日本でも 2021 年春頃から、大手小売の精肉売り場にハンバーガーの生パティとしての植物性代替肉が登場したことが話題となった。

2 植物性代替肉の市場

2020 年の世界の肉及び代替品市場において、植物性代替肉は約 11% を占めており⁽³⁾、今後とも増加することが予想されている。代替肉を求める動機は消費者によって様々である。肉の代

(1) Michael Reilly, “If the World Gives Up Meat, We Can Still Have Burgers,” *MIT Technology Review*, 2016.6.22. <<https://www.technologyreview.com/2016/06/22/159146/if-the-world-gives-up-meat-we-can-still-have-burgers/>>

(2) Nathaniel Popper, “Behold the Beefless ‘Impossible Whopper,’” *New York Times*, April 1, 2019.

(3) RBC Capital Markets, *Uprooting tradition: What plant-based alternatives mean for the future of protein*, May 12, 2021, pp.13-14.

替品の市場は、主に健康意識と体重管理を動機とする「肉を食べない人」に大きく依存している。ベジタリアンやビーガンの消費者は、アニマルウェルフェアや環境保護を主な動機として支持する傾向がある。さらに、ヒンズー教、ユダヤ教、イスラム教、キリスト教、ジャイナ教、仏教等、一部の文化的信念や宗教・宗派によっては、一部又は全ての動物性食品の摂取を禁止していることも背景にある。

海外の植物性代替肉は、レストラン、食料品店、パン屋、学校給食、家庭等で広く消費されている。2018年から2019年にかけて、米国での植物性代替肉の売上高は8億9500万ドルで、代替肉全体の世界市場は2029年までに年間1400億ドルに達すると予測されていたが⁽⁴⁾、その後植物性代替肉の売上は、新型コロナのパンデミック中に増加した。植物性代替肉の製造工場は、サプライチェーンがシンプルな点等において、従来の食肉加工工場よりもパンデミック等の流行の影響を受けにくいのではないかと考えられている⁽⁵⁾。

日本では植物性代替肉は、スーパーマーケットに売り場が設けられていることもあり、認知度が徐々に高まってきている。カフェやレストランでも植物性代替肉のメニューが普通に見られるようになった。日本の場合、大豆加工品のラインナップの一つという認識である。

2023年時点で、グローバル市場における植物性の肉・魚・乳製品代替品の売上は290億ドルであり、そのうち米国市場が81億ドル、約3割を占めると報告されている⁽⁶⁾。米国では食品スーパーにBeyond Meat社やImpossible Foods社、Eat Just社等の代替肉が並んでいるほか、カフェでもBeyond Meat社の製品を使った植物性のメニューが提供されている。

グローバルなシンクタンクとして活動している非営利組織Good Food Instituteによると、植物性代替食品企業に対しての投資は、2022年には13億ドルであり、初期投資が落ち着いた2023年にも9億ドルに達していると報告されている⁽⁷⁾。世界の消費者向けパッケージ商品（Consumer Packaged Goods: CPG）企業及び肉製品メーカーは、植物性代替食品に関して研究開発（Research and Development: R&D）に着手しており、出資や買収、パートナーシップの形でスタートアップを活用しながらこの領域の更なる開拓を進めている。

この植物性代替肉の領域において、食品R&Dに特化したスタートアップ企業が米国を中心に台頭している。AIを活用し、何万種類もの植物からフレーバーや食感を構成して圧倒的な早さでプロトタイプを開発することや、生活者の嗜好や反応をデータベース化してプロダクト開発へのインプットとすること等、食品に関するデータ化が急速に進行している。

3 植物性代替肉の製造技術

植物性代替肉の基本材料として、通常、分離大豆タンパク質（Soy Protein Isolate: SPI）、大豆粉、グルテン等が使用されている⁽⁸⁾。特に分離大豆タンパク質は、90%以上のタンパク質含有

(4) Thomas Franck, “Alternative meat to become \$140 billion industry in a decade, Barclays predicts,” 2019.5.23. CNBC Website <<https://www.cnbc.com/2019/05/23/alternative-meat-to-become-140-billion-industry-barclays-says.html>>

(5) 「パンデミックの影響で“本物の肉”が品薄になり、米国では「代替肉」の普及が加速している」2020.6.1, WIRED ウェブサイト <<https://wired.jp/2020/06/01/covid-faux-meat/>>

(6) “State of the Industry Report: Plant-based meat, seafood, eggs, and dairy.” Good Food Institute Website <<https://gfi.org/resource/plant-based-meat-eggs-and-dairy-state-of-the-industry-report/>>

(7) Good Food Institute, “Plant-based meat, seafood, eggs, and dairy: 2023 State of the Industry Report,” 2024. <https://gfi.org/wp-content/uploads/2024/04/2023_State-of-the-Industry-Report-Plant-based-meat-seafood-eggs-and-dairy.pdf>

(8) 中野康行「大豆ミートの製品開発と市場展開」『生物工学会誌』102巻8号, 2024, pp.394-397. <https://doi.org/10.34565/seibutsukogaku.102.8_394>

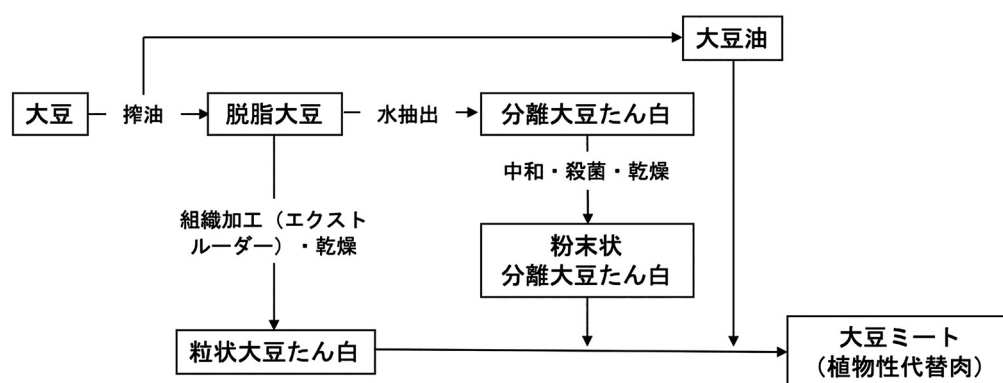
量を有する高純度的大豆タンパク質である。なお、大豆と同じ豆類であるエンドウ豆も、米国等ではよく利用されている。これは大豆が動物用の飼料といったイメージが強く、食品としてはイメージが悪いことが関係している。

大豆から分離大豆タンパク質を抽出するプロセスは次のとおりである。まず大豆種子をヘキササン等の有機溶剤で処理して、油を抽出する。次に、脱脂大豆を水に懸濁し、アルカリで処理してタンパク質を溶解し、溶解しない炭水化物と分離する。アルカリ溶液を酸性物質で処理し、タンパク質を沈殿させ、洗浄して乾燥させて分離大豆タンパク質を得る。脂肪と炭水化物を除去すると、比較的クセのない風味になる⁽⁹⁾。

分離大豆タンパク質は、乾燥すると通常粉末であり、肉のような食感を生み出すには、別の加工技術が必要である。その鍵となるのが、「エクストルーダー」である。エクストルーダーは、スクリーンを使って粉やペースト状の原料を混ぜながら押し出す機械であり、原料の混練・加熱・加圧等の工程を一度に行うことができる。食品分野では古くから利用されており、1869年にソーセージの連続製造に用いられた記録がある。現在では、シリアル、スナック、パスタや、植物性代替肉の主要原料となる「粒状大豆タンパク質」の製造等に用いられる。特に食品では、原料を膨張させ、食材の物性を変えることができるという点が特徴であり、近年では、目的に合わせて押出圧や水の量等を調整し、さらに色等を調整すれば様々な肉の代わりになること等で注目されている。日本では1968年から不二製油株式会社によって粒状大豆タンパク質が製造・販売されている。

組織加工された粒状大豆タンパク質は、カット・乾燥・ふるい・包装工程を経て製品となる。2024年の国内生産量は3万5千トンであり、2010年と比べると約1.5倍となっている⁽¹⁰⁾。粒状大豆タンパク質は、ミンチタイプ、ミートタイプ、パフタイプ（大豆の特長成分をいかしたシリアル用素材）等、用途に応じて様々な形状や食感のものが開発されている。大豆から大豆ミート（植物性代替肉）までの製造プロセスを図1に示す。

図1 大豆から大豆ミート（植物性代替肉）までの製造プロセス



（出典）中野康行「大豆ミートの製品開発と市場展開」『生物工学会誌』102巻8号, 2024, pp.394-397 <https://doi.org/10.34565/seibutsukogaku.102.8_394>を基に筆者作成。

(9) 「植物性たん白について」一般社団法人日本植物蛋白食品協会ウェブサイト <<https://www.protein.or.jp/protein/>>

(10) 「植物性たん白の生産、出荷・自社使用量」2025.1.14. 一般社団法人日本植物蛋白食品協会ウェブサイト <<https://www.protein.or.jp/wp-content/themes/protein.or.jp/pdf/seisan.pdf>>

4 植物性代替肉の特徴

(1) 環境面

肉の世界的な需要が増加すると予測されており、植物性代替肉は、健康面だけでなく、従来の肉の生産による環境への影響を軽減する可能性がある点で重要である。2023年に報告された研究⁽¹¹⁾によると、世界の人々が消費する牛肉、鶏肉、乳製品、豚肉製品の半分を植物性代替食品に置き換えるだけで、農業に使用される土地の面積を1/3近く削減し、農業のための森林破壊をほぼ停止させ、土地の再野生化を通じて生物多様性を回復するとされている。さらに、2050年までに農業からの温室効果ガス排出量を31%削減し、気候と生物多様性の両方の目標を達成するための明確な道筋を切り開くことができることが示されている。

(2) 栄養面

植物性代替肉の栄養的な特徴として、肉製品に比べて飽和脂肪酸、ビタミンB₁₂、亜鉛が少なく、炭水化物、食物繊維、ナトリウム、鉄分、カルシウムが多く含まれていることが挙げられる⁽¹²⁾。中でも、ナトリウム（食塩）含有量についての指摘は多い⁽¹³⁾。植物性代替肉の健康への影響について様々な研究が行われているが、動物由来の食品と比べるとより健康的である可能性は高いと考えられている⁽¹⁴⁾。

5 植物性代替肉の課題

(1) 環境意識の低さ

植物性代替肉は、一般消費者が飲食店やスーパーマーケット等で目にする機会も増え、2021年における日本での認知度は8割近くと高くなっているが⁽¹⁵⁾、喫食経験がある人は2割程度にとどまっている。植物性代替肉の喫食理由は、「身体に良い／身体に良さそうだから」、「カロリーが低い／低そうだから」という健康面を意識した理由が約40%なのに対し、「環境に良い／環境に良さそうだから」、「畜産が与える地球環境への負荷を少なくできるから」という環境面の理由は約10～15%となっている。日本においても、SDGsをきっかけとして、環境負荷等の社会課題への意識の高まりは見られるが、社会課題の解決と植物性代替肉の選択が関連するものとして意識されていないと言える。

(2) 食文化の違い

海外と日本の食文化の違いも大きい。日本よりもはるかに多くの肉を食べる米国や他の先進国と日本では食の状況が異なる。ハンバーガーが国民食とも言える米国では、食べる肉の一部

(11) Marta Kozicka et al., “Feeding climate and biodiversity goals with novel plant-based meat and milk alternatives,” *Nature Communications*, Volume 14: 5316, 2023.9. <<https://doi.org/10.1038/s41467-023-40899-2>>

(12) Leona Lindberg et al., “The environmental impact, ingredient composition, nutritional and health impact of meat alternatives: a systematic review,” *Trends in Food Science & Technology*, Volume 149: 104483, 2024.7. <<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104483>>

(13) 例えば、Lisa Drayer, “They might be better for the planet, but are plant-based burgers good for you?” 2019.8.14. CNN Health Website <<https://edition.cnn.com/2019/08/09/health/plant-fake-meat-burgers-good-for-you-or-not/index.html>>

(14) Sarah Nájera Espinosa, “Mapping the evidence of novel plant-based foods: a systematic review of nutritional, health, and environmental impacts in high-income countries,” *Nutrition Reviews*, nuac031, 25 April 2024. <<https://doi.org/10.1093/nutrit/nuac031>>

(15) 「代替肉・代替たんぱく質に関する調査」2021.5.26. 株式会社クロス・マーケティングウェブサイト <<https://www.cross-m.co.jp/report/life/20210526fakemeet/>>

を植物性代替肉に変えることは健康を意識した行為であるが、そもそも肉を食する機会が米国よりも少ない日本では、家畜の肉を植物性に変えるよりも、魚や豆腐、納豆を食べることの方が、抵抗感がなく現実的に行うことができる。そのため、日本人にとって植物性代替肉を食べる動機付けに乏しいということが、日本において植物性代替肉が普及しにくい最大の理由であろう。

(3) 代替品としてのイメージ

また、植物性代替肉が、肉の代替品というイメージを脱することができるかどうか、市場拡大する上では鍵であると思われる。代替肉メーカーの Impossible Foods 社と Beyond Meat 社が、肉食者にアピールしようとしてきたことに対して、オレゴン大学のステファン・ヤーン (Steffen Jahn) 教授は、これが人間の心理に反していると述べている⁽¹⁶⁾。すなわち、本物の肉を模倣することで、本物との比較が生じ、植物由来の肉を従来の肉と一緒に販売することは、多くの消費者が好まない「人工性」につながるものと主張している。

現在、「カニカマ」が必ずしもカニの代替品とみなされていないように⁽¹⁷⁾、日本においては、植物性代替肉は肉の代替ではなく、豆腐やがんもどきといった既存の植物由来食品のラインナップに新しい商品が加わったと捉える方が受容促進のためには有効であると思われる。

加えて、植物性代替肉の需要が増えたとしても、日本における大豆の自給率が7%ほどである⁽¹⁸⁾ため、自国で賄うことができないという食料安全保障の課題が大きく横たわっている。

6 植物性代替肉の可能性

日本のスーパーマーケットや外食チェーンで植物性代替肉を見かける機会も増え、目新しさで実際に食し、その従来の肉に近い食感・風味でその完成度に驚いた人も多いであろう。今後、食品メーカー各社の研究開発によって、更なる商品開発や品質向上が進められていくと思われる。価格にもよるが、消費者が植物性代替肉に対し動物の肉とは違うものとしてのおいしさや魅力を感じれば、豆腐やがんもどきのように市場に定着すると予想される。世界的に見れば、植物性代替肉は、供給量・価格・品質・成分・食文化等を考慮すると、他の代替タンパク質食品と比べても、社会課題を解決する上で最有力候補であるのは間違いないであろう。

次ページ以降の「フードテック関連企業紹介」におけるスタートアップステージの段階について、本報告書では、シード⇒アーリーステージ⇒シリーズ A⇒成長ステージ（シリーズ B⇒シリーズ C）⇒IPO 又は M&A の順として整理している。

(16) Shannon Osaka, “The big problem with plant-based meat: The ‘meat’ part,” *Washington Post*, 2023.1.19.

(17) 石川伸一 「「肉を食べる／食べない」のこれまでとこれから—“新しい肉”の受容とおいしさ—」『現代思想』50(7), 2022.6, pp.64-72.

(18) 農林水産省「大豆をめぐる事情」2025.1, p.4. <<https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/attach/pdf/index-153.pdf>>

フードテック関連企業紹介 #01

Beyond Meat, Inc.	
本社所在地：El Segundo, CA, US	設立年：2009
CEO：Ethan Brown	従業員数：887
スタートアップステージ：IPO（Initial Public Offering. 株式を証券取引所に上場して資金調達を行う段階）	資金調達総額：158.1 百万 US ドル
企業概要 植物性代替肉について、従来に比べ圧倒的に「肉」に近づけたものを商品化した最初のスタートアップ。この業界として初めて IPO を果たし、量産及び海外市場展開もしている。日本でもユナイテッド・スーパーマーケット・ホールディングス株式会社（U.S.M.H.）が 2023 年から取扱いを開始している。米国における同社商品の取扱事例としてマクドナルドが BLT（ベーコン、レタス、トマト）ならぬ PLT（Plant-based）を販売しているほか、全米の数多くの食品スーパーで販売されている。売上高は、2021 年に 465 百万 US ドル、2022 年に 418 百万 US ドル、2023 年に 343 百万 US ドルと減少傾向であり、主戦場である米国市場における物価高の影響もあり、市場のキャズム（技術革新や新製品が、市場に浸透する過程で直面する重要な障壁のこと。）を越えきれない状態にある。 設立のきっかけ 創設者の Ethan Brown 氏はクリーンエネルギー業界出身で環境問題の解決に取り組んでいた。水素燃料電池企業でキャリアを積んだ後に Beyond Meat 社を創設。創設時には、ミズーリ大学から植物を動物の肉に似せる技術を買収している。 事業内容 植物由来の代替肉の開発・製造・販売を行う。同社の製品は、エンドウ豆やレンズ豆等の豆類から抽出したタンパク質を主成分とし、ココナッツオイルやアボカドオイルを組み合わせることで、肉らしい風味と食感を再現している。ピーツを用いて赤みを出すなど、見た目にもこだわり、本物の肉の代わりとなる商品を提供している。 Beyond Meat 社の製品のラインナップは様々あり、バーガーパティ、チキンナゲット、ソーセージ等、従来の動物性肉製品に似た商品が揃っている。近年では、アボカドオイルを使った「Sun Sausage」を発売。食品の加工を可能な限り抑えた商品の提供により健康志向の高い消費者を中心に注目を集めている。2024 年 4 月には新製品「Beyond Meat IV Beef and Burger」が発売された。従来の「Beyond Burger」（ハンバーガー用パティ）との違いは、より肉らしく、よりニュートラルな風味で、アボカドオイルを使用し、飽和脂肪を 60% 減らして 1 食当たり 2g とし、ナトリウムを 20% 減らし、タンパク質は 21g とした点である。原材料のタンパク質源として、エンドウ豆、玄米、赤レンズ豆、ファバ豆等が用いられている。 バリュープロポジション（価値提案） Beyond Meat 社の製品は、環境問題、健康意識の高まり、そして食の多様化といった現代社会のニーズに応えることで、持続可能な未来の創出を追求している。Beyond Burger と従来の牛肉使用のハンバーガー用パティでその生産にかかる環境コストを比較すると、Beyond Burger の方が水を 99%、土地面積を 93%、排出する温室効果ガスを 90%、エネルギーを 46% 削減できるとしている。ビーガン向けだけではなく、肉食層を取り込むことを狙っている。 ビジネスモデル 基本的には肉加工食品の小売店を通じた販売と、食サービス事業者（外食や給食など）への卸売である。2023 年 9 月時点で、Beyond Meat 社の製品は米国だけで約 3 万 3000 の小売店で取り扱われており、米国以外では約 3 万 6000 の小売店に展開されているほか、世界のマクドナルド、KFC、サブウェイ、ダンキンといった大手ファストフード・クイックサービスレストラン（QSR）チェーンにも採用されている。 今後の展開 9 年連続の売上高の減少傾向により、コストを削減し、価格を引き上げた。売上を復活させるため、マーケティングに力を入れ、米国がん協会等の組織とのパートナーシップや、大学アスリートとのインフルエンサー契約を通じて、植物ベースの食事の健康上の利点に焦点を当てている。「健康」というコンセプトは常に Beyond Meat の消費者に訴える要素だが、改めて健康と環境に重点を置き直している。 日本では 2022 年から U.S.M.H との独占販売契約を締結した。Beyond Beef やデリカ商品、直近ではカレーやボロネーゼといった、国内で U.S.M.H が開発したレトルト食品をマルエツ、カスミ、マックスバリュ関東において展開している。パッケージを見ると、このレトルト食品の製造元はニチレイフーズである。日本で植物性代替肉市場はまだそれほど大きくはなく、生活者の関心も高くないが、レトルト食品という気軽に食べられる商品と組み合わせることによって、市場拡大を狙っている。	

（情報は UnlocX 社の調査による）（2024 年 10 月時点）

フードテック関連企業紹介 #02

Shiru, Inc.	
本社所在地：Alameda, CA, USA	設立年：2019
CEO：Jasmin Hume	従業員数：26
スタートアップステージ：シリーズ A（本格的な事業拡大のための資金調達段階）	資金調達総額：40.5 百万 US ドル

企業概要

合成生物学を活用した植物性プロテインの原材料開発データベースを、主に食品メーカーの R&D 支援として提供している。数万単位の植物性プロテインから、狙う食感・味の原料の組合せを、AI を用いて解析し提案する。

設立のきっかけ

CEO の Jasmin Hume 氏はタンパク質の専門家であり、世界的なスタートアップインキュベーターである Y Combinator の卒業生であり、米国の代替卵のスタートアップである Eat Just 社で Food Chemist（食品化学者）として活躍していた。動物性食品に頼らない新しい食料システムの開発に長年携わる中で、最先端の技術を活用することで、世界の食料産業における動物への依存度を劇的に低減できる可能性に気づき Shiru 社を設立した。

事業内容

Shiru 社は、2019 年に B2B（企業間取引）の合成生物学企業として創業した。AI と機械学習を活用したプラットフォーム「Flourish」を開発し、数億の植物情報を搭載したデータベースから高機能で商用化が可能な天然のタンパク質を迅速に特定できるというものである。2023 年に Flourish に関して特許を取得し、Flourish を用いて初の食品原料の商品化に成功した。最初の製品は「OleoPro」という代替脂肪であり、一般的に使用されている脂肪と比較して、飽和脂肪酸を最大 90% 削減した。室温で形状を保持でき、加熱調理すると焼き色が付くような製品となっている。

2024 年には、世界初のタンパク質向けマーケットプレイスを立ち上げた。「ProteinDiscovery.ai」と呼ばれるこのプラットフォームは、誰もがタンパク質を検索、発見、試用、そして購入できる場を提供している。食品、農業、パーソナルケア、先端素材等、幅広い産業に応用可能な分子を扱うことができる。Shiru 社のマーケットプレイスと発見モデルは業界初のものであり、3300 万以上の分子が登録されている。アミノ酸配列、メタデータ、パフォーマンス、機能用途で検索できる。

使用ケースとしては食品メーカーの研究者が、ある商品のために自然由来のタンパク質を探している場合、Shiru のマーケットプレイスを利用することで、効率的に見つけ出すことができる。この時点で特定のプロテインが分からなくても、例えば「酸性条件下でも安定な天然乳化剤」や「動物性タンパク質に似た植物性タンパク質」といった具体的なニーズがある場合、Shiru 社のデータベースは、最適な候補を絞り込むことができる。目的のタンパク質のサンプルを用いて自社の製品への適用可能性の検証が可能である。有効であると判断した場合、研究者は Shiru 社に対してそのタンパク質の知的財産権（IP）のライセンスを申請することができる。Shiru は基本的に非独占的なライセンスの提供をするが、場合によって独占的なライセンスも交渉可能である。

ビジネスモデル

タンパク質に関する R&D 支援である。データベースの提供やプロトタイプ制作支援、それに関わる Shiru 社のプロダクト販売も行う。データベースでは、ユーザーは特定のタンパク質の配列をダウンロードする。Shiru 社はそのタンパク質のサンプルを提供。配列をダウンロードした場合、ユーザーは非独占的なライセンスを取得してそのタンパク質を使用することができる。Shiru 社が扱うタンパク質は自然界に存在するものだが、これらのタンパク質の応用に関する知的財産権を保有することを強みとしている。

バリュープロポジション（価値提案）

初めは内部的に活用していた AI ベースのプラットフォームでは、様々な機能性タンパク質をカタログ化し、知的財産権をライセンス供与した。しかし、技術の進歩は商業化よりもはるかに速いため、新しいビジネスモデルの重要性に着目した。以前から消費財企業や原料企業から多くの問合せを受けていたため、ユーザーインターフェースを構築すれば Shiru 社のデータベースを公開できることに気づき「ProteinDiscovery.ai」を立ち上げた。このプラットフォームを提供することにより、新しいタンパク質の特定プロセスを大幅にスピードアップし、研究者や企業の時間とリソースを節約している。

今後の展望

CEO の Jasmin 氏は今後の食品開発について、生活者の嗜好や物価等の生活環境が急速に変化する中で、既存商品について原料から見直す動きが出てきており、原料探索等に AI をどれほど活用することができるかが鍵を握るとしている。そしてこれは多くの食品メーカーの R&D にとって新しい能力開発であり、開発のスピードやプロセスのアップデートが必要となる。Shiru 社はこうした企業にとっていち早く最新の AI ス

キルを身につける手段となり得る。

2024年8月、Shiru社は米国味の素ヘルス & ニュートリション（AHN）とAIを活用して甘味タンパク質を開発するためのパートナーシップを発表した。甘味タンパク質は、砂糖よりも最大5000倍甘い味を呈し、糖尿病や心血管疾患等の長期的な健康問題に関連する血糖値を上昇させることなく、食品や飲料中の砂糖やその他の甘味料に代わることができるとしている。

（情報はUnlocX社の調査による）（2024年10月時点）

Ⅱ 培養肉（細胞性食品）

「培養肉」は、動物細胞を人工的に培養して肉を生産するという「細胞農業」の一種である。細胞農業は、細胞を体外で培養・増殖させることにより、本来の生産方法で作られる肉や乳製品等と同じものを作り出すことができる新しい食料生産方法のことである。培養肉は、再生医療で開拓された組織工学技術が応用され、実際の動物細胞を大量に増殖させるため、「本物の肉」として注目されている。培養肉は、植物性代替肉とともに将来のタンパク質源として、従来の肉の生産による環境への影響を軽減し、アニマルウェルフェアや食料安全保障等に関する問題にも対処することが期待されている。

1 培養肉という名称

「培養肉」という名前は、動物由来の細胞を培養して作られる肉、英語の「cultured meat」や「cultivated meat」の日本語訳である。培養肉というネーミングは、消費者に必ずしもポジティブな印象を与えず、新技術に対する不安を想起してしまうことから、2023年頃から「細胞性食品」（cell-based food）へのネーミング変更が日本で進められているが、まだ十分浸透しているとは言い難い。世界保健機関（WHO）とFAOは、2023年に公表した報告書「細胞性食品の食品安全面」（原題“Food safety aspects of cell-based food”）⁽¹⁹⁾でも、「cell-based food」という表記を採用している。

培養肉以外にも、「healthy meat」（ヘルシーミート）、「in vitro meat」（インヴィトロミート、試験管肉）、「clean meat」（クリーンミート）、「synthetic meat」（合成肉）等の用語が、培養肉を説明するために使われてきた⁽²⁰⁾。

Good Food Institute は、2016年にクリーンミートという言葉を使い、2018年後半には、クリーンという言葉を使う方が生産プロセスと利点をより良く反映していると主張する研究を発表した。また、2018年にはクリーンミートの現状と将来像を示した書籍が出版され⁽²¹⁾、一時期、メディアでよく使われるようになった。しかし、一部の業界関係者から、クリーンミートという用語が中立的な表現ではなく、従来の畜産業者を不必要に傷つけているという指摘もなさ

(19) FAO and WHO, “Food Safety Aspects of Cell-Based Food,” 2023. <<https://doi.org/10.4060/cc4855en>>

(20) Sghaier Chriki and Jean-François Hocquette, “The Myth of Cultured Meat: A Review,” *Frontiers in Nutrition*, Volume 7, 2020.2, pp.1-9. <<https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00007>>

(21) ポール・シャピロ（鈴木素子訳）『クリーンミート—培養肉が世界を変える—』日経 BP, 2020.（原書名：Paul Shapiro, *Clean meat*, New York: Gallery Books, 2018.）

れていた⁽²²⁾。Good Food Institute は、2019 年 9 月に新たな調査を発表し、「培養肉」(cultivated meat) という用語は十分に説明的で中立性が高く、消費者への訴求度も高いことを示した⁽²³⁾。また、2021 年 9 月の世論調査では、培養肉業界の CEO の大多数が「培養肉」という表現を好んでいることが示された⁽²⁴⁾。本調査では主に培養肉という言葉を使用する。

2 培養肉の歴史

人工的な環境で肉を育てる理論的な可能性は長い間関心を集めてきた。イギリスの政治家ウィンストン・チャーチル (Winston Churchill) は、1931 年に出版されたエッセイの中で、「胸肉や手羽肉を食べるために鶏を丸ごと育てるという不合理から逃れるために、これらの部位を適切な培地で別々に育てるだろう」と書いている⁽²⁵⁾。その後も、培養肉のアイデア自体は、組織工学の文脈の延長として語られてきた。

培養肉のエポックメイキングな出来事は、2013 年にオランダのマーストリヒト大学のマーク・ポスト (Mark Post) 教授によって最初の培養牛肉ハンバーガーのパティが作られたことであった⁽²⁶⁾。このパティは、2 万本以上の細い筋肉組織の繊維から人工的に作られた。32 万 5000 ドル以上の費用をかけ、製造には 2 年を要した。このハンバーガーは 2013 年 8 月 5 日にロンドンで TV の生放送中に試食され、世界各国のメディアに大々的に取り上げられた⁽²⁷⁾。

2011 年から 2017 年までの間に、数多くの培養肉スタートアップ企業が実際に立ち上がった。現在 Upside Foods 社として知られる米国の Memphis Meats 社は、「肉の未来」を標榜 (ほう) し、2016 年に培養ミートボールの開発を開始した⁽²⁸⁾。2022 年 11 月、米国食品医薬品局 (FDA) は Upside Foods 社の販売前協議を完了し、同社の製品は食べても安全であると結論付けた。これは米国の培養肉企業としては初めてのことであった。米国農務省 (USDA) からの生産の承認は、2023 年 6 月に Upside Foods 社と Good Meat 社 (どちらも培養鶏肉) が取得した⁽²⁹⁾。

2018 年 3 月、米国 Eat Just 社は、2018 年末までに培養肉から消費者向け製品を提供できると公表した。同社は約 130 人の従業員と 55 人の科学者から成る研究部門を擁し、鶏肉、豚肉、牛肉からの培養肉を研究し、多額の投資を受けた。2020 年 12 月 2 日にシンガポール食品庁は、同社が製造したチキンナゲットの商業販売を承認し、シンガポールのレストランにおいて

(22) Elaine Watson, “Cultured meat cos agree to replace term ‘clean meat’ with ‘cell-based meat’ and form trade association,” 2018.9.10. FoodNavigator-USA Website <<https://www.foodnavigator-usa.com/Article/2018/09/10/Cultured-meat-cos-agree-to-replace-term-clean-meat-with-cell-based-meat-and-form-trade-association/>>

(23) “Watch Bruce Friedrich’s TED Talk on plant-based and cultivated meat,” May 21, 2019. Good Food Institute Website <<https://gfi.org/blog/bruce-friedrich-ted-talk/>>; Good Food Institute, “2020 State of the Industry Report: Cultivated Meat,” 2021, p.22. <<https://gfi.org/wp-content/uploads/2021/04/COR-SOTIR-Cultivated-Meat-2021-0429.pdf>>

(24) Bruce Friedrich, “Cultivated meat: A growing nomenclature consensus,” 2021.9.29. The Good Food Institute Website <<https://gfi.org/blog/cultivated-meat-a-growing-nomenclature-consensus/>>

(25) Winston Churchill, “Fifty Years Hence,” *Strand Magazine*, Vol.82 No.492, December 1931, pp.549-558, quoted in National Churchill Museum Website <<https://www.nationalchurchillmuseum.org/fifty-years-hence.html>>

(26) “World’s first lab-grown burger is eaten in London,” 2013.8.5. BBC News Website <<https://www.bbc.com/news/science-environment-23576143>>

(27) Melissa Hogenboom, “What does a stem cell burger taste like?” 2013.8.5. BBC News Website <<https://www.bbc.com/news/science-environment-23529841>>

(28) Susan Gelman, “Meat Without Misery,” *Common Reader*, 2016.2.29. <<https://commonreader.wustl.edu/memphis-meats/>>

(29) Kelly McCarthy, “USDA approves 1st ever ‘cell-cultivated meat’ for 2 American manufacturers,” 2023.6.23. ABC News Website <<https://abcnews.go.com/GMA/Food/fda-approves-1st-cell-cultivated-meat-upside-foods/story?id=100278334>>

2020年12月19日に世界初の細胞培養肉の商業販売を行った⁽³⁰⁾。これは培養肉が、食品規制当局の安全性審査に合格し、一般向けに販売された世界で初めてのケースであり、業界にとって画期的な出来事とされている。

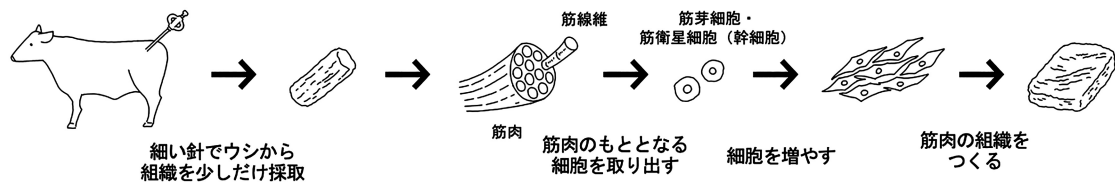
2020年、イスラエルの SuperMeat 社は、イスラエル中部の都市ネス・ツィオナに培養鶏肉の試験的なレストランをオープンした。パイロットプラントのすぐ隣にあり、ジャーナリストや専門家、消費者が予約して、その場で新商品を試食し、ガラス窓越しに生産施設を覗く（のぞく）ことができた。イスラエル保健省は、シンガポールと同様の規制を行い、承認に向けて取り組む姿勢を示し、2024年1月には、同国の培養肉スタートアップ企業 Aleph Farms 社に世界初の培養牛肉の販売認可を与えた⁽³¹⁾。

日本の培養肉製造のリーディングカンパニーであるインテグリカルチャー株式会社は、2015年に創立された。2019年には培養フォアグラの製造に成功しているが⁽³²⁾、販売はされていない。

3 培養肉の製造技術

培養肉の製造プロセスは、細胞採取、細胞培養、成形の大きく3段階に分けられる。まず、ウシやニワトリ等の動物から、少量の組織を採取し、組織片から筋肉のもととなる細胞を分離する。次に細胞を培地に入れて増殖させてから、培地の組成を変える等して培養を続け、増やした細胞を筋肉等に分化させる。その後、増えた細胞を集めて、必要に応じて脂肪等を添加し、ハンバーガー用のパティ等の製品に成形・加工するという流れである（図2）。

図2 培養肉の製造プロセス



（出典）竹内昌治・日比野愛子『培養肉とは何か？』（岩波ブックレット No.1072）岩波書店、2022を基に筆者作成。

製造プロセスで最も難しいのが、培養方法の確立である。培地（培養液）の組成や、培養時に細胞を固定する足場の検討が進められている。特に培地に不可欠な細胞の成長因子の調達は、培養肉の製造の最も困難なプロセスの一つである。

培養培地に添加する成長因子には、ウシ胎児から抽出した血液製品であるウシ胎児血清（FBS）が使用されている。FBSの生産は非倫理的であるという議論に加えて、培養肉は動物（や動物の成分）の使用とは無関係に生産されるという概念にも反するという意見もある。また、FBSは、培養肉の生産において最も高価な培地の成分でもあり、価格は1リットル当たり約10万円である。さらに、FBSの組成は動物個体によって大きく異なるため、具体的な成分を把握できないことも課題となっている。

(30) Jade Scipioni, “This restaurant will be the first ever to serve lab-grown chicken (for \$23),” 2020.12.18. CNBC Website <<https://www.cnbc.com/2020/12/18/singapore-restaurant-first-ever-to-serve-eat-just-lab-grown-chicken.html>>

(31) Anay Mridul, “Aleph Farms: Israel Awards the World’s First Regulatory Approval for Cultivated Beef,” 17 January 2024. Green Queen Website <<https://www.greenqueen.com.hk/aleph-farms-israel-cultured-meat-regulatory-approval-beef/>>

(32) 「世界初となる「食べられる培養フォアグラ」の生産に成功」2019.8.29. インテグリカルチャー株式会社ウェブサイト <<https://www.integriculture.com/news/research/161/>>

現在の代替手段として、遺伝子組換えタンパク質生産技術を使用し、各成長因子を個別に生成することが考えられている。この方法では、特定の因子を合成する基となる遺伝子を微生物に組み込み、精製するプロセスを経るため、操作が複雑になり、またコストもかかるというデメリットがある。

理想的な培地は、成分の定量が可能で、入手しやすく、生産が簡単で、安価で、動物に依存しないものである。そのため、培地は植物由来のものとすることが望ましいと考えられている。植物性の培地は、従来の培地よりも原料を安定的に調達でき、製造コストを大幅に抑えられ、商用化の可能性が高まると予想され、開発が進められている。

また、インテグリカルチャー株式会社では、外部から成長因子を添加せずに、様々な細胞を大規模に培養できる汎用大規模細胞培養システムを開発し、特許を取得している⁽³³⁾。元来、動物の体内には、ある臓器が出す有用因子が血管を通して他の臓器に作用することで、細胞の成長を促す仕組みがあり、同システムではこれを人工的に再現することで大幅なコストダウンを図るというものである。

2022年10月に、日本ハム株式会社は、培養肉を作るために必要な培養液の主成分を動物の血清から食品成分に置き換えることに成功したと発表した⁽³⁴⁾。ほかにも動物血清を使わずに済む方法を開発した会社は存在する。

細胞が成長するための足場の研究に関しては、東京大学大学院情報理工学系研究科の竹内昌治教授と日清食品株式会社が共同で、培養ステーキ肉の研究を行っている⁽³⁵⁾。通常の培養では、培養された組織はランダムな方向を向くため、肉の食感を再現することが困難で、ミンチ状の肉として使用するのが一般的であった。竹内教授らは、培養した細胞の上にシートを置いて細胞を整列させ、それを何層も重ねて筋肉の束を作ることで、ステーキ肉の食感を再現しようとしている。

また、大阪大学大学院工学研究科の松崎典弥教授らのグループは、和牛肉の組織構造を設計図に、3D プリント技術で筋、脂肪、血管の線維組織ファイバーを作製し、束ねることで、複雑な和牛肉の構造を作製できる技術を開発した。今後技術の改善により、和牛のサシ等、更に複雑な肉の構造の再現や、脂肪や筋成分量の制御による味、食感の調節も可能になると期待されている⁽³⁶⁾。2023年3月には、松崎教授と参画企業4社が、「培養肉未来創造コンソーシアム」を設立した⁽³⁷⁾。

4 培養肉の特徴

(1) 環境への配慮

培養肉が期待されているのは、まず環境への配慮であろう。環境面では、水や飼料の利用を

(33) 「低コスト細胞培養システム“CulNet System”の商用事業化ソリューションを5月7日(木)より提供開始」2020.5.7. インテグリカルチャー株式会社ウェブサイト <<https://www.integriculture.com/news/business/153/>>

(34) 日本ハム株式会社「培養液の主成分である動物血清を食品で代替することに成功—培養肉の商用化実現に向けて前進—」2022.10.4. <<https://www.nipponham.co.jp/news/2022/20221004/>>

(35) 「培養肉・培養ステーキ肉の実現」東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 東京大学生産技術研究所 バイオハイブリッドシステム研究室ウェブサイト <<https://www.hybrid.t.u-tokyo.ac.jp/culturedmeat/>>

(36) 「3Dプリントで和牛の“サシ”まで再現可能に！」2021.8.24. 大阪大学 ResOU ウェブサイト <https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2021/20210824_4>

(37) 「松崎典弥教授らが「培養肉未来創造コンソーシアム」を設立！」大阪大学工学部応用自然科学科応用化学科目 大阪大学大学院工学研究科応用化学専攻ウェブサイト <<https://www.applchem.eng.osaka-u.ac.jp/blog/230403/>>

抑えられることや、飼料栽培のための大量の土地を必要としないこと、家畜からの温室効果ガスや排せつ物が発生しないこと等が挙げられる。しかし、環境負荷は、培養施設での電気利用との兼ね合いであり、再生可能エネルギー等を使用せず、化石燃料を用いれば、むしろ地球温暖化を促進する可能性も指摘されている。

ある研究では、培養肉は、潜在的に環境に優しい可能性が示唆されている。調査会社 CE Delft 社による 2021 年の研究では、従来の牛肉と比較して、生産プロセスで再生可能エネルギーが使用された場合、培養肉は温室効果ガス排出量を最大 92%、大気汚染を 94%、土地使用量を最大 90%、それぞれ削減する可能性があるとしている⁽³⁸⁾。

(2) アニマルウェルフェア

培養肉が期待されているもう一つは、アニマルウェルフェアへの配慮である。培養肉による生産は、多くの動物を高密度で飼育する必要がなくなるため、今後、世界的な肉の需要拡大の際に、動物の飼育環境の悪化等を防ぐことが期待されている。

オーストラリアの生命倫理学者ジュリアン・サブレスク (Julian Savulescu) は、培養肉に対して「人工肉は動物への残虐行為を止め、環境にも優しく、より安全で効率的、そしてより健康的である可能性がある。」と述べている⁽³⁹⁾。また、動物愛護団体の中には、培養プロセスに神経系が含まれず、痛みや権利侵害を伴わないため、培養肉を支持するとしているところもある⁽⁴⁰⁾。一方で、培養肉に対するベジタリアンの反応は様々である。培地にウシ胎児血清が使用された培養肉は、ベジタリアン向けではないと感じる人も存在する。

(3) 抗生物質の不使用・健康に関わる成分の増加

培養肉は無菌環境で培養されるため、基本的に抗生物質は必要ない。今日、従来の畜産における抗生物質の広範な使用は、人間の抗生物質耐性の主な要因となっているといわれている。WHO は、抗生物質耐性が動植物の健康に影響を与え、農業の生産性を低下させ、食料安全保障を脅かすとし⁽⁴¹⁾、また国連は、2050 年までに年間最大 1000 万人の死亡を予測している⁽⁴²⁾。培養肉は、人間の健康に対する抗生物質耐性のリスクを軽減するのに役立つ可能性がある。

また、培養肉はより健康的な肉となるようにカスタマイズできる可能性も示唆されている。培養肉に、生活習慣を起因とする症状の予防に効果があることが示唆されるオメガ 3 (n=3) 脂肪酸を増やすことが考えられている⁽⁴³⁾。

(38) “Environmental impacts of alternative proteins.” The Good Future Institute Website <<https://gfi.org/resource/environmental-impacts-of-alternative-proteins/>>

(39) Alok Jha, “Synthetic meat: how the world’s costliest burger made it on to the plate,” *Guardian*, 2013.8.5. <<https://www.theguardian.com/science/2013/aug/05/synthetic-meat-burger-stem-cells>>

(40) Ketzler Levine, “Lab-Grown Meat a Reality, But Who Will Eat It?” 2008.5.20. NPR Website <<https://www.npr.org/2008/05/20/90235492/lab-grown-meat-a-reality-but-who-will-eat-it>>

(41) “Antimicrobial resistance,” 2023.11.21. World Health Organization Website <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>>

(42) “UN, global health agencies sound alarm on drug-resistant infections; new recommendations to reduce ‘staggering number’ of future deaths,” 2019.4.29. United Nations Website <<https://news.un.org/en/story/2019/04/1037471>>

(43) Ben Macintyre, “Test-tube meat science’s next leap,” *Australian*, 2007.1.20.

5 培養肉の課題

(1) コスト面の課題

現状、培養肉は従来の肉に比べて大幅にコストがかかる。2019年、Eat Just社は培養チキンナゲット1個の生産コストが約50ドルであると述べている⁽⁴⁴⁾。シンガポールのレストランで提供された同社の培養チキンナゲットは、一皿23シンガポールドル（当時約1,800円）で販売されたが⁽⁴⁵⁾、この小売価格は生産コストを大幅に下回っている。2021年時点で、ほとんどの培養肉企業は、1回の食事に相当する量の培養肉の生産コストが100ドル以上であると報告している⁽⁴⁶⁾。コストの主な要因は、成長培地（19.7ドル/kg）、労働力（17.7ドル/kg）、バイオリクター（生成を行う装置）の管理・修理（5.47ドル/kg）等であり、現在の市場の牛肉（6ドル/kg）と競争するには、これら三つのコストを全て軽減する必要があると考えられている⁽⁴⁷⁾。

(2) 法規制面の課題

培養肉の実用化には法規制も整理する必要がある。EU、オーストラリア、ニュージーランド、英国、カナダでは、培養肉が販売される前には、新規食品の申請が承認される必要がある。さらに、EUは、培養動物製品の生産は、承認された会社の申請によって安全性を証明することを要求している⁽⁴⁸⁾。EUではない英国のように培養肉開発技術へ積極的に投資する国がある一方、EU加盟国であるイタリアとハンガリーは培養肉を禁ずる法案を可決している。培養肉がEUで承認されれば、加盟国全てで販売できるため、培養肉禁止令は欧州委員会（EC）からEU全体の方針に反するとして異議を申し立てられる可能性がある⁽⁴⁹⁾。

シンガポールは、2020年12月に培養肉の販売を承認した世界初の国になった。シンガポール食品庁は、培養肉製品の承認のために提出する情報に関する具体的な要件を含む、新規食品の安全性評価の要件に関するガイダンスを発表している⁽⁵⁰⁾。

米国では、2020年9月に、食品医薬品局（FDA）と米国農務省（USDA）が、培養肉を共同で規制することに合意した⁽⁵¹⁾。ただし、ミズーリ州、サウスカロライナ州、テキサス州、ワシントン州など幾つかの州は、培養肉のパッケージングにおいて「meat」という用語の使用を制限する法律を可決し⁽⁵²⁾、フロリダ州とアラバマ州では、培養肉の開発、製造と販売を禁止し

(44) Oliver Morrison, “A major milestone for lab-grown meat: Could Eat Just’s approval in Asia hurry the market in Europe?” 2020.12.4. FoodNavigator-USA Website <<https://www.foodnavigator.com/Article/2020/12/04/A-major-milestone-for-lab-grown-meat-Could-Eat-Just-s-approval-in-Asia-hurry-the-market-in-Europe/>>

(45) 西村宏治「培養肉のチキンナゲット、初の販売開始 「安全で健康」」『朝日新聞デジタル』2021.1.19.

(46) “Eat Just is racing to put ‘no-kill meat’ on your plate. Is it too good to be true?” *Guardian*, 16 June 2021.

(47) Greg L. Garrison et al., “How much will large-scale production of cell-cultured meat cost?” *Journal of Agriculture and Food Research*, Volume 10: 100358, 2022.12. <<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100358>>

(48) Neil Stephens et al., “Bringing cultured meat to market: Technical, socio-political, and regulatory challenges in cellular agriculture,” *Trends in Food Science & Technology*, Volume 78, 2018.8, pp.155-166. <<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.04.010>>

(49) 「欧州の培養肉開発 イタリアに続き、ハンガリーでも禁止?!」2024.11.14. 一般社団法人細胞農業研究機構ウェブサイト <<https://jaca.jp/2024/11/6241/>>

(50) “Guidelines on Novel Food.” Singapore Food Agency Website <<https://www.sfa.gov.sg/regulatory-standards-frameworks-guidelines/novel-food-framework/guidelines-on-novel-food>>

(51) “Human Food Made with Cultured Animal Cells.” Food Safety and Inspection Service Website <<https://www.fsis.usda.gov/inspection/compliance-guidance/labeling/labeling-policies/human-food-made-cultured-animal-cells>>

(52) Alexandra Spring and Cydnee Bence, “What’s the Beef? Debates over Cell-Cultured Meat,” Labels Unwrapped Website <<https://labelsunwrapped.org/wp-content/uploads/2022/10/Labels-Unwrapped-Cultured-Meat.pdf>>

た⁽⁵³⁾。

培養肉の販売を許可した国は、2020年のシンガポール、2023年の米国、2024年のイスラエルの3カ国であり、今後も増える可能性がある。しかし、上記のように地域によって培養肉に対するスタンスはまちまちである。

日本では、厚生労働省が、2022（令和4）年度に厚生労働科学研究「フードテックを応用した細胞培養食品の先駆的な調査検討による食品衛生上のハザードやリスクに係る研究—リスクプロファイルの作成とモデル細胞実験系による検証・還元—」を通じ⁽⁵⁴⁾、細胞培養食品の安全性確保のための知見について、情報収集と研究を行っている。また、同省の薬事・食品衛生審議会（新開発食品調査部会）⁽⁵⁵⁾では、培養肉について専門家による議論を行っている。培養肉が既存の法令等においてどのように位置付けられるのかはまだ明らかとなっていない。既存の法令等の適用や運用に関する議論を含め、培養肉を念頭に置いた具体的なルール整備に関する議論が今行われている段階である。

（3）消費者受容の課題

培養肉に対する消費者の受容は重要である。世界でも人口の多い中国、インド、米国での培養肉の受入れを検討した研究では、国ごとに受容性が異なることが示されている。培養肉の消費者受容の幾つかの潜在的な要因が解析され、健康、安全性、栄養特性、持続可能性、味、価格は全て、受容の要因であることが明らかとなっている⁽⁵⁶⁾。

また、弘前大学人文社会科学部の日比野愛子教授が2024年8月に報告した培養肉に関する意識の国際調査によると⁽⁵⁷⁾、「培養肉は世界の食料危機を解決する可能性がある」という意見には日本では46%の回答者が賛成を示しており、培養肉を積極的に推進しているシンガポールと同程度の割合が示された。一方で、「培養肉を試しに食べてみたい」と考える回答者は日本では3割強であるのに対して、シンガポールで6割、イタリアでも5割強となっており、海外での受容性と日本の受容性との間に関きがあることが分かった。不安視されている理由には、安全性の問題が挙げられ、安全性が確保された場合に食べてみたいと答える回答者は日本で5割に上ることも明らかとなっている。

6 培養肉の可能性

フードテックの新規食品の中でも培養肉は、世界中にスタートアップ企業が乱立している。培養肉の生産方法は、細胞を増やして食品を形作るというシンプルなプロセスであるが、培地成分の種類の検討、立体的に肉を形成する方法等を組み合わせる必要があり、自動車等の製造

(53) 小林大祐「アラバマ州が培養肉などの細胞性食品の製造・販売を禁止、米国で2州目（米国）」2024.5.16. 農畜産業振興機構ウェブサイト <https://www.alic.go.jp/chosa-c/joho01_003806.html>

(54) 「フードテックを応用した細胞培養食品の先駆的な調査検討による食品衛生上のハザードやリスクに係る研究—リスクプロファイルの作成とモデル細胞実験系による検証・還元—」厚生労働科学研究成果データベース <<https://mhlw-grants.niph.go.jp/project/165295>>

(55) 「薬事・食品衛生審議会（食品衛生分科会新開発食品調査部会）」厚生労働省ウェブサイト <https://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/shingi-yakuji_127893.html>

(56) Christopher Bryant et al., “A Survey of Consumer Perceptions of Plant-Based and Clean Meat in the USA, India, and China,” *Frontiers in Sustainable Food Systems*, Volume 3, 2019. <<https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00011>>

(57) 「「培養肉」に関する意識の国際調査を実施—「培養肉」への関心に各国の意識の差—」2024.8.28. 弘前大学ウェブサイト <<https://www.hirosaki-u.ac.jp/topics/97133/>>

業と同じようにそれぞれの技術を更に研ぎ澄ます必要がある。すでにシンガポールでは培養肉の販売が開始され、その動きは他国にも広がるのか不透明な状況ではあるが、長期的な視点で考えれば、画期的な食料生産となる可能性を有していると言える。

フードテック関連企業紹介 #03

Eat Just, Inc.	
本社所在地：San Francisco, CA, USA	設立年：2011
CEO：Josh Tetrick	従業員数：142
スタートアップステージ：不明	資金調達総額 465 百万 US ドル

企業概要

Eat Just 社は米国では代替卵におけるリーディングスタートアップ企業である。代替卵（Just Egg）については、米国、カナダ、シンガポール、韓国、南アフリカ、香港と中国の小売店とオンラインストア、レストランや学校での給食でも提供されている。2023 年時点で、Eat Just 社は米国の植物性代替卵市場における売上の 99% を占めている。培養肉についても研究開発を重ね、「Good Meat」として 2020 年からシンガポールで販売を開始。2023 年 5 月には小売での販売も始まり、世界初の培養肉販売事業者となった。

設立のきっかけ

Eat Just 社の創業者 Josh Tetrick 氏は、大学時代から環境問題に関心があった。アフリカなどで環境問題のイニシアティブ等に参加した後、特に畜産業が環境に与える負担に危機感を覚えるようになり、代替卵領域での起業に至った。畜産におけるエネルギー消費量や食の安全保障問題を解決することをミッションにしているため、代替卵事業にとどまらず培養技術にも着手することとなった。

事業内容（培養肉事業について）

2016 年に培養肉に特化した Good Meat 社を子会社として設立した。米国での許認可が遅れる中、培養肉の提供がいち早く許可されたシンガポールで 2020 年世界初となる培養肉の販売を開始した。最初に提供したのは培養鶏肉を使ったナゲットであった。最初は高級レストランにおいて週 1 回数量限定で提供する形でスタートし、その後 2023 年には小売店での店頭販売を開始した。ただし、この肉は 97% が植物性タンパク質で、動物性細胞は 3% となっており、植物性代替肉の味を動物肉に近づける役割としての培養技術という意味合いが強い。

今後の展望

Good Meat 社は、細胞培養、収穫、加工といった各工程における技術の改善、そして細胞密度を高めて資源の効率的な利用を図ることで、より低コストの生産を目指している。今後、米国市場の展開が可能になるかが鍵を握るが、CEO の Josh Tetrick 氏の見立てでは、Mass Production レベルが実現するのに数年、その先の従来の動物肉や植物性代替肉とのコスト競争力を確保できるまでには、更に数年かかるとしている。

(情報は UnlocX 社の調査による) (2024 年 10 月時点)

Ⅲ 菌糸体食品（マイコプロテイン）

キノコやカビは、菌類の仲間であり、光合成機能を持たない生物である。キノコから放出された胞子は適切な条件下で発芽し菌糸となる。菌糸は、周囲にある有機物などを栄養分として取り込み生長し、それが束になったものが「菌糸体」である。近年、この菌糸体を工業的に大量に培養し、食品、アパレル、包装材料等の幅広い様々なアプリケーションに用いることが検討されている。その中で、菌類を利用した食用の菌糸体は、「Mycoprotein」（マイコプロテイン）と呼ばれる。「Myco-」は、「菌」や「キノコ」を意味する。

菌類は、生物学の分類上、植物や動物とは別の生き物である。また、キノコを使った食品とマイコプロテインも同一ではない。マイコプロテインの菌糸体は成長過程のものであるため、植物の木に例えるなら、キノコは果実、菌糸体は木の根といった関係である。マイコプロテインは、日本での利用や認知はほぼないが、欧米ではすでに様々な食品に 30 年以上利用されて

きたという実績のある食材である。

1 マイコプロテインの歴史

マイコプロテインの発端は、1960年代に「緑の革命」（農業技術革新の取組）に触発された世界の科学者たちが、人口増加、温室効果ガス等によって引き起こされた世界的な食料危機を克服できる持続可能な代替タンパク質を探したことであった。農業廃棄物や石油系副産物を培地栄養として使用し、細菌、酵母、カビ、藻類等を大量培養して、飼料や食用タンパク質の供給を目指した。しかし、安全性の懸念が払拭できないことや、予想ほどタンパク質需要がひっ迫しなかったことから、開発熱は下火となり、産業として花開くことはなかった。

そのような状況下でも、英国の Marlow Foods 社は 1985 年に「Quorn」（クォーン）というブランド名で糸状菌による菌糸体食品の製造販売を開始した。同社は世界中で 3,000 種以上の土壌生物を収集して探索した結果、デンプンを繊維質で肉のようなタンパク質豊富な成分に効率的に変換する *Fusarium venenatum*（フザリウム・ベネナタム）という菌種を選抜し、培養して得た菌糸体を「マイコプロテイン」と名づけ、ベジタリアン向けの代替肉製品に使用した。同社はマイコプロテインベースの製品を市場に投入した最初の企業となったが、これに続く企業は現れず、マイコプロテインによる代替肉は大きなムーブメントにはならなかった。

2010 年代になると、SDGs の策定もあり、持続可能性への意識の高まりとともに、人口増加に伴うタンパク質不足への危機感も再燃した。フードテックによる代替タンパク質が注目される流れを受け、欧米ではマイコプロテインによる代替肉開発に多数のスタートアップ企業が参入し、現在までに世界で 20 社以上が現れている⁽⁵⁸⁾。中には、巨額の出資を得て大規模工場を開設し、菌糸体の大量生産を可能にした企業も存在する。

2022 年には、Marlow Foods 社の子会社である Quorn 社のほか、米国の Meati Foods 社や Nature's Fynd 社をはじめとする主要なマイコプロテイン企業によって「The Fungi Protein Association」（菌類タンパク質協会）という国際的な業界団体が結成された。植物性代替肉や培養肉に続く、新たな代替肉の素材としてマイコプロテインに注目が集まっている。

2 マイコプロテインの製造技術

マイコプロテインの生産は、ビール製造と同様にタンクで行われる。菌類は好気条件（酸素がある条件）下で生育し、菌類の栄養源となる窒素、炭素、必須ビタミンやミネラル等が必要である。フザリウム・ベネナタム菌の場合、炭素源としてグルコース、窒素源としてアンモニアが供給される。最適な成長には、攪拌（かくはん）、pH、温度等の条件調整も不可欠である⁽⁵⁹⁾。

増やした菌類を集めた後、洗浄し、熱処理してプリン体含量を減らしてから、更なる加工プロセスに進める。糸状菌タンパク質に様々な風味を加えることで、商品の多様性を高めることができる。

(58) 野崎駿介「2023 年に注目すべき技術 (1) 菌糸体—多岐にわたるアプリケーション—」2023.1.17. 三井物産戦略研究所ウェブサイト <https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2023/03/14/2301report_1.pdf>

(59) Tim JA Finnigan et al., "Mycoprotein: The Future of Nutritious Nonmeat Protein, a Symposium Review," *Current Developments in Nutrition*, 3(6): nzz021, 2019.6. <<https://doi.org/10.1093/cdn/nzz021>>

3 マイコプロテインの特徴

Quorn が誕生して 40 年近くが経ち、継続的な研究により、マイコプロテインの代替食材としての特徴が明らかにされている。例えば、環境への影響については、マイコプロテイン 1kg の生産にかかるカーボンフットプリントは、牛肉生産に比べて約 1/25 である⁽⁶⁰⁾。また、地球上の牛肉生産量の 20% をマイコプロテインで置き換えた場合、生産にかかるカーボンフットプリントが 56% に減るというデータも報告されている⁽⁶¹⁾。このような報告から、環境負荷の抑制は、菌類の生育が畜産動物に比べて圧倒的に早く、生産過程における廃棄物が少ないことによるものと推察されている。また、菌類を工場で生産することで、天候不順等の不確定な環境要因から解放され、限られた土地において効率的で安定的な食料生産が可能というメリットも有している。

食品としての特徴は、タンパク質を乾燥重量当たり 40 ～ 60% も含んでおり、必須アミノ酸やビタミン、ミネラルも含んだ栄養学的に優れた成分組成を示す。コレステロールを含まないことや食物繊維を多く含むことも、畜産肉との違いとして特記すべき点であると言える。

4 マイコプロテインの課題

マイコプロテインは、次世代のサステナブルな食材として期待されるが、利用拡大に向けて安全性の課題も残る。ほとんどの人にとって、マイコプロテインは安全に食べることができるものであるが、マイコプロテインの摂取による過敏症反応が非常にまれに、カビやその他の真菌にアレルギーのある人に発生した事例がある⁽⁶²⁾。カビの胞子を吸入した場合の腹痛、吐き気、おう吐から重度の喘息反応まで、アレルギー反応の懸念については継続的な検査が行われている。

また、マイコプロテイン生産に関与する菌株の全てではないが、ごく少数の菌株は、カビ毒であるマイコトキシンを非常に低濃度ではあるが産生することが知られている。その中には、フザリウム・ベネナタム菌の幾つかの菌株があり、Quorn 社の場合、生産 6 時間ごとに検査を行っている⁽⁶³⁾。

また、Quorn 社では、フザリウム・ベネナタム菌が使用菌種として開示されているが、スタートアップ企業の中には、「edible mushroom」（食用キノコ）や「mushroom mycelium」（キノコ菌糸体）といった表記を使用し、菌種を公表していない場合も多い。さらに、使用培地についても情報が少なく、一部のスタートアップ企業が農産副産物（コーン、小麦、ジャガイモ）や食品加工時に排出される食品製造副産物を利用していると公表しているのみである。コストを抑制し安定的な大量培養を実現するには、培地の様々な工夫が必要になることから、培地成分の情報は企業秘密として公表されないことが今後も予想される。消費者の不安を取り除くためには、製造工程の透明化を進めることが重要であると思われる。

(60) “Future of Fungi: Mycoprotein’s Role as an Alternative Protein.” Protein Directory Website <<https://proteindirectory.com/blog/mycoprotein/>>

(61) Florian Humpenöder et al., “Projected environmental benefits of replacing beef with microbial protein,” *Nature*, Volume 605, 2022.5, pp.90-96. <<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04629-w>>

(62) Michael Hoff et al., “Immediate-type hypersensitivity reaction to ingestion of mycoprotein (Quorn) in a patient allergic to molds caused by acidic ribosomal protein P2,” *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 111(5), 2003.5, pp.1106-1110. <<https://doi.org/10.1067/mai.2003.1339>>

(63) Finnigan et al., *op.cit.*(59)

5 麹菌によるマイコプロテイン開発

国内でマイコプロテイン開発に取り組む事例は複数確認されている。筑波大学の萩原大祐准教授は、大量培養した「麹菌」を使って肉様の食品の開発を行っている⁽⁶⁴⁾。

日本の代表的な発酵微生物である麹菌は、古くから醤油や味噌、酒を製造するために用いられている。麹菌は、麹を作るための糸状菌の総称でカビの一種である。長年にわたり食品に利用されてきた歴史から、麹菌は安全性が担保されていると解釈されている。このような背景を持つ菌類は世界にも稀有（けう）であり、前記したマイコプロテインの安全性の課題を解決する上でも非常に大きなアドバンテージになると考えられている。

萩原准教授は、マイコプロテイン開発における麹菌のもう一つの利点が、充実した菌株リソースの存在であると指摘している。麹菌の場合、醸造メーカーに対して種麹という形態で麹菌を販売する種麹メーカーが、膨大な数の菌株を保有している。このような菌株リソースが日本に存在することで、優良な麹菌菌株の選抜が可能になり、限られた菌株の中で開発せざるを得ない他の菌種と比較すると、より優れた菌株を得やすい状況にあると思われる。

また、萩原准教授の研究の結果、麹菌の肉様食品を試作し試食すると、うま味が比較的強く感じられたことが分かった。実際に、麹菌の菌体に含まれるうま味成分のグルタミン酸、イノシン酸、グアニル酸の含有量を測定したところ、乾燥菌体 100g 当たりそれぞれ 723mg、4mg、13mg 含まれており、味の評価を裏付ける形となった。アミノ酸系のうま味成分グルタミン酸に加えて、核酸系のうま味成分（グアニル酸、イノシン酸）も一定量存在し、麹菌菌体中で、うま味の相乗効果が起こっていることが示唆された。麹菌マイコプロテインを代替食材として利用する際に、うま味の増強が可能であることは大きな特徴であると言える。

6 マイコプロテインの可能性

菌類を培養して得られる菌糸体を利用した Quorn 社の「Meat Free」のナゲット等は、欧米等で普通にスーパーマーケットに並んでいる。一方日本では、菌種を問わずマイコプロテイン製品は流通していない。菌類の中でも麹菌は、日本醸造学会が日本の国菌に認定した菌である⁽⁶⁵⁾。日本人は、麹菌を使って、穀類や豆類を発酵させることは長年行ってきたが、麹菌そのものを食べるという発想はこれまでなかったと言える。麹菌を使用したマイコプロテインは、安全性や消費者の受容性、リソースの充実度、嗜好性の面等で、他の菌種を利用したマイコプロテインとは異なる特長を有する。日本でのマイコプロテインの可能性を考える上で、日本でこれまで培われてきた麹菌に関する知見や技術、菌株リソースの蓄積は、その普及にとっては大きな力になるであろう。

IV 藻類食品

藻類は、ワカメやコンブ等の海藻をはじめとする、陸上植物以外で光合成を行う生物である。以前は植物に分類されていたが、現在では植物とは区別されている。一般的に、光合成を行う

(64) 萩原大祐「麹菌による代替肉・代替プロテイン開発」『生物工学会誌』102 巻 8 号, 2024, pp.402-405. <https://doi.org/10.34565/seibutsukogaku.102.8_402>

(65) 日本醸造学会「麹菌をわが国の「国菌」に認定する一宣言」2013.11.28. 公益財団法人日本醸造協会ウェブサイト <<https://www.jozo.or.jp/gakkai/wp-content/uploads/sites/4/2020/02/koujikinnituite2.pdf>>

生物のうち、コケ植物、シダ植物、種子植物を除いたものが藻類に分類される。私たちは藻類と聞くとコンブやワカメといった普通の海藻である「大型藻類」を思い浮かべるであろうが、藻類の大半は小さいサイズの「微細藻類」である。微細藻類は目に見えない大きさながら様々な特徴を有しており、近年、代替タンパク質源として期待されている。

1 大型藻類の特徴

海に生息する藻類であるワカメやコンブ等の海藻は、日本ではなじみ深い食材であるが、アジア諸国以外の多くの国ではこれまで食材とみなされておらず、海岸に漂うゴミと捉える地域もあった。しかし近年では、海藻類は持続可能な食材への関心の高まりとともに、フードテック分野に関わる食品素材として、環境や海洋保全の観点からも世界的に注目を浴びている。2009年、海藻類は二酸化炭素を吸収する海洋植物として、国連環境計画（UNEP）の報告書で「ブルーカーボン」と命名された⁽⁶⁶⁾。実際、2021年に米国ニューヨーク州で、それまで違法だったコンブの養殖が合法となった⁽⁶⁷⁾。サステナブルな食材としての海藻に注目が集まっており、様々なスタートアップ企業が海藻を使った食材の開発を推進している。

世界の大型藻類生産の大部分は養殖であり、その生産量は湿重量で1990年代の550万トンから2019年の3470万トンへと大幅に増加した。中国、インドネシアでの生産が全体の8～9割と圧倒的に多く、続いて韓国、フィリピン、日本の順である（日本のシェアは全体の1%程度）⁽⁶⁸⁾。世界で養殖される藻類の種類としては、マコンブが最も多く、次いでキリンサイ、オゴノリ、ワカメ、アマノリの順となっている。

海藻の利用は、時代とともに変化している。従来日本、韓国周辺では食用として用いられていたが、やがて増粘剤としての用途が広がり、近年では欧米を中心とする先進国で健康的な食材や環境に優しい素材との認識が広がっている。また、日本食の世界的な拡大と合わせて、東アジア以外でも世界的な海藻の需要が高まっている。

一方で、海藻の供給は現状潤沢とはいえない。日本やフィリピンでは、気候変動による海水温上昇により、藻場の消失、養殖に適した期間が短くなることや生産の急激な減少といった事例が頻発し、安定した藻類養殖が困難になりつつある。このような供給側の課題は、藻類に対する旺盛な需要を供給側で取り込むことを困難にしている。

このような世界的な海藻の供給不足を背景に、養殖環境をコントロールすることで安定生産が見込めるため、海面・陸上における新たな海藻養殖事業への参入が増えている。さらに、ゲノム編集等の育種技術が活用され、海藻類が持つ機能を高めて地球温暖化対策やエネルギー利用等に役立てる可能性も検討されている⁽⁶⁹⁾。

(66) United Nations Environment Programme, “Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon,” 2009. <<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7772>>

(67) “Governor Hochul Signs Legislation to Promote Aquaculture,” 2021.12.7. New York State Website <<https://www.governor.ny.gov/news/governor-hochul-signs-legislation-promote-aquaculture>>

(68) FAO, “Global seaweeds and microalgae production,” 2021. <<https://openknowledge.fao.org/items/5f24c0c2-3a0d-44f9-8b85-fbb775a86735>>

(69) 北海道大学「海藻類でのゲノム編集による遺伝子導入に世界で初めて成功」2024.7.12. <https://www.hokudai.ac.jp/news/pdf/240712_pr2.pdf>

2 微細藻類の特徴

微細藻類は、別名「植物プランクトン」とも呼ばれる。一個体が数 μm ～数百 μm の小さな生物である。微細藻類の中には、浮遊しているものだけでなく、海底の岩や陸上のコンクリート壁等に付着して生きているものもある。微細藻類は、地球の表面積の7割を占める海洋では食物連鎖の出発点となる生産者である。オキアミからクジラまで大小にわたる海洋生物と、それを食料とする鳥類や哺乳類（人間を含む。）は全て、微細藻類を出発点とする食物連鎖の中で生きている。また、二酸化炭素を酸素に変換する光合成生物として、地球の環境に大きな影響を及ぼしている。

現在、商業化されている微細藻類には、スピルリナ、クロレラ、ドナリエラ、ヘマトコッカス、ユーグレナ等がある。本調査では特にスピルリナについて説明する。

スピルリナは、汽水域に生息する藍藻で、幅6～10 μm 、長さ300～500 μm ほどのらせん形の構造をもつ（スピルリナとはラテン語で「らせん」を意味する。）。古くはアフリカ中央部にあるチャド湖に自生するスピルリナを付近の住民が天日乾燥し、ダイエと称し食用としていたとされる。乾燥したスピルリナ粉末には、タンパク質が50～70%も含まれる。タンパク質をはじめビタミンやミネラル等の栄養素を豊富に含有していることから、クロレラと並んでいわゆる健康食品として市販されている。

スピルリナについては、多くの企業が販売している。例えば、株式会社タベルモ（川崎市）は、スピルリナの生産を大規模化し、スピルリナ製品の生産と販売を行っている⁽⁷⁰⁾。同社によると、スピルリナの単位面積当たりのタンパク質生産性は、大豆やトウモロコシと比較して15倍以上と効率的であるとしている⁽⁷¹⁾。また、同社工場がある赤道に近いブルネイでは、日本と比べて年間を通じて温暖で日照量も多いことから、日本の5倍近いスピルリナの生産性が見込めるとしている⁽⁷²⁾。この豆類や穀物との差は、植物体の一部である豆部分だけを食するダイズと比較して、藻体はその全体を活用できる点や、スピルリナの増殖速度の速さ、さらに毎回増殖分を間引くように収穫することで連続生産ができることによるものである。

生産に使う水の利用量に関しても、既存農業では水が土に染み込んだり、蒸発蒸散したりするものの、スピルリナ生産では蒸発のみであるため、使用する水は大豆生産の1/4程度とされる。また、蒸発自体を減らせる閉鎖型の栽培方法であれば、更に水の使用量は少なくなる。

光合成では大気中の二酸化炭素を吸収して固定しているため、光合成農作物が増えるほど、大気中の二酸化炭素は減ると言える。穀物に比べて成長能力が高いスピルリナは、二酸化炭素を有機物に炭素固定する能力が高い。しかし、実際の微細藻類の生産において、光合成により空気中の二酸化炭素を用いるのではなく、穀物由来の炭素源を用いて培養している例は少なく、どのように生産するかも重要である。また、太陽光でなく、屋内の電球で栽培する場合は、化石燃料由来の電気であれば二酸化炭素の削減には結び付くものではない。

スピルリナの栽培では土を必要としないため、砂漠といった農業に向かない土地が実際に活用されている。既存の農業と競合せずに共存できるという特徴を有している。既存の農作物の収率が上がらない中で収量を増やすには、農地を増やす戦略が考えられるが、地球上の農地は

(70) 株式会社タベルモウェブサイト <<https://www.taberumo.jp>>

(71) 佐々木俊弥「第12章 藻類スピルリナの食品用途開発」『フードテックの最新動向』シーエムシー出版, 2021, pp.118-127.

(72) 「栽培技術」株式会社タベルモウェブサイト <<https://www.taberumo.jp/technology/cultivation/>>

すでに限られており、増やす場合は森林破壊等の環境の変化を伴う。異常気象による被害や、地球温暖化によりその土地で育つ農作物が対応できない速度で変化していることも、既存農作物の収穫量増加を難しくしている。スピルリナ等の微細藻類は、そのような環境要因に対応した柔軟な生産が可能であると考えられる。

一方で、スピルリナ生産の課題として、規模とコストの問題がある。市場で大豆由来のタンパク質と同等に扱われる価格にするためには、大規模化が必要であると試算されている。藻類生産の規模拡大を阻む課題として、高額な初期投資及び運用コストといった経済的課題、安定的な長期大規模生産に伴う技術的課題、藻類生産技術や品質管理の標準化の遅れといった社会的課題等が考えられている⁽⁷³⁾。

3 微細藻類食品の現状

海外で数多くの藻類関係のスタートアップ企業が立ち上がっている。すでに特徴的な商品化を進めているところも多く存在する。

2017年設立のイスラエルの Brevel 社は、色も風味もニュートラルな、機能性を有する微細藻類由来のタンパク質を開発している⁽⁷⁴⁾。同社が独自技術で成長させた微細藻類を使用することで、エンドウ豆や大豆等の代表的な植物性タンパク質に匹敵するコストで製造できるとしている。

また、同じイスラエルの SimpliiGood 社はスピルリナを使用した代替スモークサーモンや代替鶏肉を開発している⁽⁷⁵⁾。同社は現在、年間 250 トンの生産能力に向けて事業を拡大している段階にある。

微細藻類タンパク質の研究と製品開発の最前線にいる 2 社である、Sophie's Bionutrients 社と NewFish 社（現 Nutrition from Water 社）は、2022 年 9 月に提携することを発表した⁽⁷⁶⁾。Sophie's Bionutrients 社は、シンガポールとオランダで事業展開するスタートアップである。同社は、2021 年に微細藻類を主原料とした代替タンパク質パウダーを開発した。この代替タンパク質パウダーは、乳製品やその他の新しい食品の原材料として活用でき、微細藻類のほかにはビール醸造所から出る穀物のかすと豆腐メーカーから出るおから、製糖工場から出る糖蜜を原材料としてアップサイクル（不要になったものを廃棄せず、新たな価値を与えて再利用する手法）して作られている。同社は代替タンパク質パウダーをもとに、2021 年 5 月には世界初の微細藻類由来の代替ミルクを開発し、同年 11 月には微細藻類由来の代替チェダーチーズの開発も行っている。ニュージーランドの NewFish 社は、スポーツ栄養、ウェルネス、ベーカリー、乳製品フリースイーツ等のカテゴリー向けに、微細藻類ベースのホエイ（乳清）タンパク質を開発している⁽⁷⁷⁾。

前述した日本のタベルモ社は、瞬間冷凍した生スピルリナを B2B（企業間取引）、B2C（消費

(73) 野澤伊織「微細藻類産業の構築について」『オレオサイエンス』24(8), 2024, pp.359-365. <<https://doi.org/10.5650/oleoscience.24.359>>

(74) 「微細藻類で代替タンパク質を開発する Brevel が約 25 億円を調達 色も風味もニュートラルなタンパク質」2023.7.28. Foovo ウェブサイト <<https://foodtech-japan.com/2023/07/28/brevel/>>

(75) 「イスラエルの SimpliiGood、スピルリナ由来のスモークサーモンを来年欧州で発売へ」2024.9.4. Framtiden ウェブサイト <<https://framtiden.earth/2024/09/04/simpliigood/>>

(76) 「海藻由来の代替食品の開発を推進。微細藻類タンパク質市場を牽引する 2 社が提携を発表」2022.11.4. table source ウェブサイト <<https://www.table-source.jp/news/seaweed-alternative-foods/>>

(77) 「ニュージーランドの Nutrition from Water が微細藻類ベースのホエイを開発、米国・日本市場への投入に向け準備中」2024.8.12. Framtiden ウェブサイト <<https://framtiden.earth/2024/08/12/nutrition-from-water/>>

者向けの製品販売)で展開しており、2023年2月には卵の代わりにスピルリナを使用したマヨネーズ風ドレッシングソース「エコマヨ」を販売している⁽⁷⁸⁾。

4 藻類食品の可能性

世界的に大型藻類である海藻が注目されている中で、海洋国家である日本では、昔から海藻を食べてきたという食文化を有している。さらに海藻の養殖技術を有していることや、そのアプリケーションである料理が数多くあるという点で、日本は海藻の普及に対して世界的な優位性を有していると言える。また、その一方で、日本人にもあまりなじみのなかったスピルリナ等の微細藻類が代替タンパク質の分野で台頭しており、スタートアップ企業間での競争は激化している。微細藻類は、単位面積当たりの収穫量が多いこと、既存の農業と比較して水の利用量が抑えられること、土を必要としないため農業に向いていない土地が活用できること等の多数のメリットを有し、これらの性質はSDGsの文脈にも沿っている。消費者の受容性の高い安価な製品や料理等が開発されれば、微細藻類の利用が今後増える可能性は考えられる。

V 昆虫食

昆虫食は、古来より世界各地で行われてきたが、2013年にFAOが昆虫食に関するレポート“Edible Insects: Future prospects for food and feed security”(食用昆虫：食料と飼料の安全保障のための将来展望)を発表したのを機に、世界的に改めて注目されるようになった⁽⁷⁹⁾。人の食用としての昆虫食だけでなく、家畜・家禽(きん)や養殖魚の昆虫飼料の可能性についても説明する。

1 昆虫食の特徴

タンパク質危機の引き金が、穀物等の「飼料」のひっ迫であると言われている⁽⁸⁰⁾。従来型の家畜肉生産は、大量の飼料を必要とする。大量の飼料作物を栽培するには広大な農地が必要となるが、農地面積と森林面積はトレードオフの関係にある。また、森林の消失は二酸化炭素の吸収量の減少につながり、気候変動を今よりも深刻化させてしまう可能性がある。地球で生産できる飼料作物の量には限界があるため、家畜に与えるエサの確保が大きな課題となっている。

その中で、食用昆虫は生産に関わる環境負荷が小さく、持続可能な社会の実現を目指す時流に適した家畜を代替するタンパク質として、注目されるようになった。環境負荷が小さい最大の理由は、食用昆虫が生産のための飼料が少なくて済むことである。例えば、牛肉の場合、可食部1kgを生産するのに25kgの飼料を必要とするが、コオロギの場合、可食部1kgを生産するのに2.1kgで済む⁽⁸¹⁾。それは昆虫が、体温を維持する恒温動物の家畜と異なり変温動物であり、体温の維持にエネルギーを使うことなく、体を大きくするのにエネルギーをより使えるか

(78) 「【新商品】「エコマヨ」の販売を開始しました」2023.2.1. 株式会社タベルモウェブサイト <<https://www.taberumo.jp/2023/02/01/ecomayo/>>

(79) Arnold van Huis et al., “Edible insects: Future prospects for food and feed security (FAO FORESTRY PAPER 171),” Rome: FAO, 2013. <<https://www.fao.org/4/i3253e/i3253e.pdf>> 2021年に後続版も公開されている。

(80) 飯島明宏「昆虫由来食品の社会実装に向けた課題」『アグリバイオ』8(3), 2024.3, pp.210-211.

(81) Arnold van Huis, “Potential insects and food and feed in assuring food security,” *Annual Review of Entomology*, Volume 58, 2013, pp.563-583. <<https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120811-153704>>

らである。また、家畜は、骨等の食用に向かない部分を多く含む。ニワトリやブタは可食部が約 55%、ウシは約 40% であるのに対し、昆虫はほぼ全体が可食部である。さらに、昆虫の可食部のみで飼料量当たりの成長効率を見ると、ニワトリの約 2 倍、ブタの約 4 倍、ウシの約 12 倍であり、効率良く成長する生物であることが分かる⁽⁸²⁾。

一般に昆虫のタンパク質含量は、乾燥重量当たり 40 ～ 75% 程度であり、牛肉や豚肉に匹敵するかそれ以上である⁽⁸³⁾。タンパク質中の必須アミノ酸組成も問題なく、良質なタンパク質源である。タンパク質以外の栄養素としては、昆虫の種類にもよるが、ビタミン B 群を多く含む種が多い。ミネラルも、昆虫は一般に豚肉や牛肉よりも豊富である。特にリン、カリウム、カルシウムの含量が多い。発展途上国では、ビタミンやミネラル（微量元素）の欠乏による疾患がしばしば見られており、昆虫は貴重な栄養源となる。

家畜の大規模生産には、広い土地と大量の水が必要であるが、昆虫の生産は、土地と水の節約にもつながる特性を有している。また、ウシのような反芻（すう）動物の場合は、消化器内で発生するメタンが温室効果ガスであるため、気候変動に悪影響を及ぼすが、例えば、コオロギは温室効果ガスの発生も極めて少ない⁽⁸⁴⁾。

さらに昆虫種によっては、廃棄された食品を昆虫のエサとし、食品ロスを削減できるため、アップサイクル型の食料生産システムを構築することにも貢献できると期待されている。世界の食品廃棄量で最も多い食品は、キャッサバ等のイモ類及びヤシやゴマ等の搾油作物であり、果物や野菜がそれに続いている⁽⁸⁵⁾。このような農作物の廃棄物を昆虫は食し、タンパク質へと効率的に変換することが可能である。この分野で最も注目されている昆虫は、アメリカミズアブの仲間とイエバエである。実際、世界各国の企業がこれらの昆虫の大規模養殖を進めている。

2 昆虫食・昆虫飼料の現状

昆虫食の企業として日本の株式会社グリラスはよく知られていた。同社は、徳島県徳島市にあった、コオロギの養殖から加工販売まで行う徳島大学発のスタートアップ企業で、2019 年に設立された。コオロギ研究をベースに、昆虫養殖のエサの開発、食品加工の企画開発、化粧品等開発研究、飼料原料の提供等の事業を手掛けていた。2022 年 2 月時点での累計資金調達額が、昆虫食関連企業では日本最高額の約 5.2 億円に到達した⁽⁸⁶⁾。

グリラス社の強みとされたのは、品種改良を目的とした系統育種を徳島大学と共同で行っていること、コオロギ養殖から加工まで一貫して行っているため厳重な衛生管理体制がとれることであった。同社の加工の処理能力は、400kg／日（パウダーベースで 80kg）程とされた。

グリラス社は、フタホシコオロギを、休眠性（成長に不適な季節をやり過ごし、かつ効率的な生殖のために発育ステージを揃える性質のこと。）がなく、成長が早いという理由で飼育対象に選んでいた。採卵工程と飼育工程に分かれており、30 日ほどで成虫となった個体の 2% が繁殖のため採卵にまわり、1 週間ほどで幼虫がふ化する。白い目をしたアルビノ種を使用し、

(82) 水野壮『昆虫食スタディーズーハエやゴキブリが世界を変えるー』（DOJIN 選書）化学同人, 2022, pp.32-33.

(83) 同上, pp.17-21.

(84) Dennis G. A. B. Oonincx et al., “An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption,” *PLoS One*, 5(12): e14445, 2010.12. <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014445>>

(85) 水野 前掲注(82), pp.37-39.

(86) 株式会社グリラス「食用コオロギ国内生産量 No.1 のグリラスが約 2.9 億円の資金調達を実施！累計調達額は業界最高額の約 5.2 億円に到達」2022.2.28. <<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000025.000070046.html>>

野生種の混合の発見を容易にしている。アメリカミズアブと異なり、コオロギの飼育はエサの飼料が乾燥しているため、腐敗が起こりにくく、クリーンな飼育環境を維持できるという優位性がある。

また、給水や収集方法についても、グリラス社は2023年に東日本電信電話株式会社（NTT 東日本）との食用コオロギのスマート飼育実証事業でセンシング技術やICT等の活用に取り組んでいた⁽⁸⁷⁾。飼育管理がより厳密になり、飼育効率や作業効率の向上等が期待されていた。

しかし、2022年末から風評被害の影響を受けた。購入層との関連は不明であるが、取引先が炎上リスクを回避する姿勢を強めたことがネガティブに影響し、2024年11月にグリラス社は事業を停止し、徳島地裁に自己破産を申請した⁽⁸⁸⁾。

人に向けた食用昆虫の企業経営が厳しい一方で、養殖における飼料として昆虫飼料は、養殖魚の生産の増加、そのエサである魚粉（カタクチイワシ等が原料）や大豆かす等の価格の高騰を受けて、その市場拡大が見込まれている。消費者受容の面からも、人が直接食べる昆虫食よりも、養殖向けの昆虫飼料の需要は拡大する可能性を有している。魚粉価格は、2023年9月時点で、260円/kgなのに対し、昆虫飼料（ミールワーム）の販売価格は、500円台/kgと約2倍の価格差がある⁽⁸⁹⁾。今後、魚粉の更なる価格高騰や、昆虫の生産規模拡大等によって価格競争性が高まることや、昆虫飼料の優位性（魚の食いつきがよい、耐病性等）が示せれば、代替飼料としての昆虫市場は拡大すると予想される。

3 各国の昆虫食への取組

2021年5月、EUは、ミールワームを昆虫では初めて新規食品として承認し、その後、トノサマバッタやコオロギが続いた。承認した欧州食品安全機関（EFSA）は、「なぜ私たちは昆虫を食べなくてはいけないのか？」との問いに「昆虫を食べるかどうかは消費者次第だ。タンパク質供給源としての昆虫の食利用は、新しいものではなく、昆虫は世界の多くの地域で日常的に食べられている。」と答えている⁽⁹⁰⁾。オランダ・ワゲニンゲン大学が公開する世界の食用昆虫リストでは、世界中の各地域で2,111種類の昆虫が食べられており、その地域に住む人の合計は20億人に上ることが紹介されている⁽⁹¹⁾。

2017年にタイ政府は、世界初の昆虫養殖ガイドラインであるコオロギGAP（Good Agricultural Practice）を公表した⁽⁹²⁾。タイでは古くから昆虫食の文化が根付いており、1998年からローカルフードとして、昆虫を養殖している。2011年の調査ではコオロギ農家が2万件、2005年から

(87) 株式会社グリラス・東日本電信電話株式会社「NTT 東日本とグリラスによる食料問題の解決に向けた「食用コオロギのスマート飼育」の確立をめざす実証実験の開始」2023.1.19. 東日本電信電話株式会社ウェブサイト <https://www.ntt-east.co.jp/release/detail/20230119_01.html>

(88) 「食用コオロギのグリラス、自己破産申請 ネット風評響く」『日本経済新聞』（電子版）2024.11.21. <<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOCC2126A0R21C24A1000000/>>

(89) 信太克哉「東北圏における食ビジネスの新展開—フードテックの世界で今何が起きているのか—」『東北活性研』55, 2024.春季, pp.59-60.

(90) “Approval of another insect/insect-derived food as a Novel Food.” European Commission Website <https://food.ec.europa.eu/food-safety/novel-food/authorisations/approval-insect-novel-food_en>

(91) “List of edible insects of the world (April 1, 2017).” Wageningen University & Research Website <<https://www.wur.nl/en/Research-Results/Chair-groups/Plant-Sciences/Laboratory-of-Entomology/Edible-insects/Worldwide-species-list.htm>>

(92) National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards Ministry of Agriculture and Cooperatives, “GOOD AGRICULTURAL PRACTICES FOR CRICKET FARM,” 2017.

2011年までに年平均7,500トンが生産され、糞（ふん）は肥料として販売されている⁽⁹³⁾。2015年のタイ国内の昆虫食全体の市場は5万から7万5000人に拡大し、2億ドルの収入をもたらしたと推計されている⁽⁹⁴⁾。また、ライフサイクルアセスメント（製品のライフサイクル全体の環境負荷を分析・評価するための手法）による比較では、タイ北東部の養鶏場とコオロギ農家の環境負荷は同程度と指摘されている⁽⁹⁵⁾。

また、NPO法人食用昆虫研究会の理事長である佐伯真二郎氏は、ラオス農村部における栄養不良と養殖昆虫のマッチングを行っていることを報告している⁽⁹⁶⁾。現地で入手しやすく食べ慣れたゾウムシを選び、キャッサバをエサに養殖を行っている。ゾウムシは2kgのキャッサバから5週間で1kgの幼虫が収穫でき、1kgの市場価格は1,400円と、高付加価値である。また、ゾウムシは乾燥重量当たり約66%の脂質が含まれるため、自家消費し、現地の人の栄養改善が行えることも明らかになっている。昆虫を食べ慣れている国での昆虫の養殖方法やその利用の目的は、昆虫を新規食材として扱う国とは大きく異なるものであるといえる。

4 昆虫食の課題

昆虫食は、タンパク質不足や環境問題等、他の新しいタンパク質源と同じように人間が抱える課題を解決するために近年注目されてきた。しかし、日本における消費者の昆虫食の受容の割合は依然として低いままであり、受容を推進したい側から見れば、昆虫食の受容をいかに高めるかが需要促進の大きな課題になっている。特に、昆虫食受容という問題には昆虫に対する嫌悪感等の心理的な要因が深く関わっている。そのため、昆虫食受容に対する理解のためには心理学的アプローチが不可欠であるといえる。昆虫食受容に関わる心理的因子はいろいろ考えられており、これまでの研究から「嫌悪感」、「食物新奇性恐怖」（food neophobia）及び「好奇心」が重要であると示唆されている⁽⁹⁷⁾。

昆虫食受容と嫌悪感との関連は、多くの実証研究から調べられている。例えば、日本におけるオンライン調査において、昆虫食の画像は通常の食事画像と比べて、病原体との意味的関連性が強いことを示されている⁽⁹⁸⁾。また、多くの研究で、一般的に嫌悪感を覚えやすい人ほど、昆虫食を受容しにくいという結果が出ている。

食物新奇性恐怖も、昆虫食受容を阻害する心理的要因として大きい。食物新奇性恐怖とは、食べ慣れていない新奇な食べ物に対して、その摂取を躊躇（ちゅうちょ）・拒否することを指す。実際に食物新奇性恐怖を調べるための尺度には、「これまでに経験したことのない食品を食べるのが怖い」「新しい食べ物を信用していない」等の項目が含まれている。多くの研究で、

(93) Yupa Hanboonsong et al., “Six-legged livestock: Edible insect farming, collection and marketing in Thailand,” Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations Regional Office for Asia and the Pacific, 2013, p.57. <<https://www.fao.org/publications/card/en/c/76e0a383-3ca0-5a7c-8d5a-b3a4262b857f/>>

(94) P.B. Durst and Y. Hanboonsong, “Small-scale production of edible insects for enhanced food security and rural livelihoods: Experience from Thailand and Lao People’s Democratic Republic,” *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(1), 2025.1, pp.25-31.

(95) Afton Marina Szasz Halloran et al., “Life cycle assessment of cricket farming in north-eastern Thailand,” *Journal of Cleaner Production*, Vol.156, 2017.7, pp.83-94. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.017>>

(96) 佐伯真二郎「植物タンパク質の活用」『アグリバイオ』6(10), 2022.9, pp.892-896.

(97) 元木康介ほか「昆虫食受容に関する心理学的研究の動向と展望」『心理学研究』92(1), 2021.4, pp.52-67. <<https://doi.org/10.4992/jjpsy.92.20402>>

(98) Kun Qian and Yuki Yamada, “Exploring the Role of the Behavioral Immune System in Acceptability of Entomophagy Using Semantic Associations and Food-Related Attitudes,” *Frontiers in Nutrition*, Volume 7, 2020. <<https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00066>>

食物新奇性恐怖が高い人ほど昆虫食を受け入れないという結果が報告されている。例えば、中国とドイツにおける調査では、食物新奇性恐怖が高い人ほど、昆虫食の喫食意向が下がることが報告されている⁽⁹⁹⁾。

一方で、好奇心は、新奇若しくは複雑な、又は葛藤等を引き起こす対象への探索を動機付けるものである。好奇心には知的好奇心等の様々な分類があるが、昆虫食受容を促進する好奇心は知覚的好奇心であると考えられる。知覚的好奇心は新奇な感覚刺激への動機付けであり、昆虫食という新奇な視覚・味覚・テクスチャーを持つ刺激は、感覚刺激であると考えられる。

また、知覚的好奇心は、刺激希求とも共通性があるとみなされている⁽¹⁰⁰⁾。刺激希求は、新しい経験やスリリングな活動を好む人ほど高い個人特性である。これまでの研究によれば、新しい刺激や経験を求めがちな人、好奇心が強い人は、昆虫食を受容する傾向にあるようである。

料理の種類も昆虫食受容を促進する効果があると考えられる。例えば、ミールワームを用いた料理では、ミールワーム肉団子の方がミールワーム乳飲料よりも、購買意向や嗜好特性の評価が高かったことから、肉団子の方が乳飲料よりも受容促進に適切であるとされた⁽¹⁰¹⁾。このように、昆虫食を社会で普及させる場合には、それぞれの昆虫食の特性に合わせた適切な調理法や料理を選択することが重要であると言える。

5 昆虫食の可能性

昆虫食を「普通の食材」として見ている人と、「絶対に食べたくない」という人がはっきりしている。前述した佐伯氏は「食の価値観を他人のペースで決められることの孤独感や、居心地の悪さ。それを多くの人が今感じていることが、コオロギ騒動〔グリラス社等に対する風評被害〕⁽¹⁰²⁾が広まった理由のひとつではないか」と語っている⁽¹⁰³⁾。昆虫食は他の代替タンパクと比べても特有の事情があると言える。フードテックの議論において置き去りになりがちなのが、SDGsの最大の課題とも言える「貧困の撲滅」である。その撲滅には、昆虫食が普通の国とそうでない国の事情を踏まえ、地域ごとの複雑な事情に向き合うことが大切である。将来、昆虫食を含めた多様性のある食の選択肢を提供できるようにすることが、SDGsの理念である「誰一人取り残さない」世界を達成する上で重要であると思われる。

VI ゲノム編集食品

遺伝子組換えではない「ゲノム編集」という技術によって目的の遺伝子を正確に改良できる新しい育種技術が生み出されている。2012年に開発され、2020年のノーベル化学賞の受賞理由となったCRISPR/Cas9という技術が、様々な食品に適用される強力な遺伝子編集ツールと

(99) Christina Hartmann et al., “The psychology of eating insects: A cross-cultural comparison between Germany and China,” *Food Quality and Preference*, Volume 44, 2015.11, pp.148-156. <<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2015.04.013>>

(100) T. B. Kashdan et al., “Curiosity,” Christopher Peterson and Martin Seligman, eds., *Character strengths and virtues: A handbook and classification*, New York: Oxford University Press, 2004, pp.125-141.

(101) Hui Shan Grace Tan et al., “How will better products improve the sensory-liking and willingness to buy insect-based foods?” *Food Research International*, Volume 92, 2017.2, pp.95-105. <<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.12.021>>

(102) 『日本経済新聞』（電子版）前掲注(88)

(103) ムシモアゼルギリコ「《なぜ炎上？》昆虫食の専門家が語った「反コオロギ騒動」の背景にある誤解と圧」2023.3.26. 文春オンラインウェブサイト <<https://bunshun.jp/articles/-/61542>>

なっている。ゲノム編集した食品は、すでに日本では市場に投入されており、フードテックにおいて日本が世界に先駆けている分野である。

1 ゲノム編集食品の特徴

多くの作物や家畜は、人間の手によって育種（品種改良）されてきたものである。交配や突然変異といった従来の方法に加えてバイオテクノロジーによる方法も使われてきた。その新しい育種の方法であるゲノム編集を用いて作られたのが「ゲノム編集食品」である。

従来の品種改良で利用されている育種交配という技術では、望む性質を持つ品種が出来上がるまでに、何度も交配を重ねる必要があり、長い年月と費用がかかるものであった。一般的な品種改良は、販売できる品種になるまで短くて数年、長いと数十年かかることもある。

一方でゲノム編集は、1～4年ほどで商用利用ができると言われており、品種改良にかかるコストを大幅にダウンさせることが可能である。さらに、新しい優良品種を生み出すことができるだけでなく、農林水産物の収量・生産性の向上、病虫害や疫病への対応、環境変化（地球温暖化等）への対応、食を通じた健康増進、天然毒素の低減等による食の安全等、持続可能な社会に向けた地球規模の様々な課題において、解決につながる有用な技術であると考えられている⁽¹⁰⁴⁾。

2 ゲノム編集食品の現状

(1) 日本のゲノム編集食品

日本においてゲノム編集食品は、2019（令和元）年10月から厚生労働省への届出制度が開始された。これにより流通が可能となり、2024（令和6）年11月段階で7品目が届出され、うち4品目が上市されている（表2）⁽¹⁰⁵⁾。すでに市場に出ているものは、サナテックライフサイエンス株式会社（旧サナテックシード株式会社）の「グルタミン酸脱炭酸酵素遺伝子の一部を改変しGABA含有量を高めたトマト（87-17系統）」と、リージョナルフィッシュ株式会社の「可食部増量マダイ」、「高成長トラフグ」、「高成長ヒラメ」である。GABAはストレス緩和効果がある成分として知られている。

そのほか国内での開発状況は、有毒成分のソラニンやチャコニンが減少したジャガイモ、穂発芽耐性小麦、高オレイン酸大豆、攻撃性低減のサバやマグロ、アレルゲンの少ない卵等の多くのゲノム編集食品の開発が進められている⁽¹⁰⁶⁾。

⁽¹⁰⁴⁾ 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）企画戦略本部新技術対策課「ゲノム編集—新しい育種技術—」2024.11. <https://www.affrc.maff.go.jp/docs/anzenka/attach/pdf/genom_editing-5.pdf>

⁽¹⁰⁵⁾ 「ゲノム編集技術応用食品及び添加物の食品衛生上の取扱要領に基づき届出された食品及び添加物一覧」2024.10.16. 消費者庁ウェブサイト <https://www.caa.go.jp/policies/policy/standards_evaluation/bio/genome_edited_food/list>

⁽¹⁰⁶⁾ 高原学「ゲノム編集技術をめぐる国内外の情勢」（令和3年度北海道食の安全・安心委員会 遺伝子組換え作物交雑等防止部会 資料2-1）2021.12.24. 北海道ウェブサイト <https://www.pref.hokkaido.lg.jp/fs/5/2/5/7/4/3/3/_/>（修正版資料2-1）ゲノム編集技術をめぐる国内外の情勢.pdf>

表2 日本で届けられたゲノム編集食品の一覧

No.	品目名	届出年月日	開発者等	届出者	上市年月
1	グルタミン酸脱炭酸酵素遺伝子の一部を改変しGABA含有量を高めたトマト（87-17系統）	2020年12月11日	サナテックライフサイエンス株式会社（旧サナテックシード株式会社）	サナテックライフサイエンス株式会社（旧サナテックシード株式会社）	2021年9月
2	可食部増量マダイ	2021年9月17日（2022年12月5日、届出系統の追加系統）	リージョナルフィッシュ株式会社	リージョナルフィッシュ株式会社	2021年10月（追加系統、2023年1月）
3	高成長トラフグ	2021年10月29日（2022年12月5日、届出系統の追加系統）	リージョナルフィッシュ株式会社	リージョナルフィッシュ株式会社	2021年11月（追加系統、2023年1月）
4	PH1V69 CRISPR-Cas9ワキシートウモロコシ	2023年3月20日	バイオニア・ハイブレッド・インターナショナル社	コルテバ・アグリサイエンス日本株式会社	上市未定
5	グルタミン酸脱炭酸酵素遺伝子の一部を改変しGABA含有量を高めたトマト（206-4系統）	2023年7月27日	サナテックライフサイエンス株式会社（旧サナテックシード株式会社）	サナテックライフサイエンス株式会社（旧サナテックシード株式会社）	上市未定
6	高成長ヒラメ	2023年10月24日	リージョナルフィッシュ株式会社	リージョナルフィッシュ株式会社	2024年9月
7	高小型塊茎数ジャガイモ	2024年10月23日	J.R. Simplot Company	J.R. Simplot Company	上市未定

（出典）「ゲノム編集技術応用食品及び添加物の食品衛生上の取扱要領に基づき届出された食品及び添加物一覧」2024.10.16. 消費者庁ウェブサイト <https://www.caa.go.jp/policies/policy/standards_evaluation/bio/genome_edited_food/list> から一部筆者改変。

日本における食品衛生上の取扱となるゲノム編集食品の定義は、ゲノム編集技術によって得られた生物全部やその一部、微生物を利用して製造されたもの等とされ、届出の対象となるものは、生物や微生物の遺伝子の状況が外来の遺伝子やその一部が残存せず、かつ、酵素による切断等に伴う塩基の欠失、数塩基の置換、挿入がある場合等とされている⁽¹⁰⁷⁾。

日本のゲノム編集食品による環境影響への対策は、2019年に環境省から出された、「ゲノム編集技術の利用により得られた生物であってカルタヘナ法に規定された「遺伝子組換え生物等」に該当しない生物の取扱いについて」⁽¹⁰⁸⁾においても、最終的に外来遺伝子が残っていないければ遺伝子組換え生物等に該当せず、カルタヘナ法（第1章 IV-3 (3)）上の規制対象にはなっていない。

（2）海外のゲノム編集食品

FAOによると、ゲノム編集がもたらす効果として、脂肪酸合成量が増加するといった機能性向上と、耐病性といった生産性向上がある⁽¹⁰⁹⁾。機能性向上では、油糧種子であるセイヨウアブ

⁽¹⁰⁷⁾ 「ゲノム編集技術応用食品及び添加物の食品衛生上の取扱要領」（令和元年9月19日大臣官房生活衛生・食品安全審議官決定）消費者庁ウェブサイト <https://www.caa.go.jp/policies/policy/standards_evaluation/bio/genome_edited_food/assets/000709708.pdf>

⁽¹⁰⁸⁾ 「ゲノム編集技術の利用により得られた生物であってカルタヘナ法に規定された「遺伝子組換え生物等」に該当しない生物の取扱いについて」2019.2.8. 環境省ウェブサイト <<https://www.env.go.jp/press/106439.html>>

⁽¹⁰⁹⁾ FAO, “Gene editing and agrifood systems,” 2022. <<https://openknowledge.fao.org/items/cfa28e26-4878-4d6b-93f3-7e45692c6414>>

ラナや大豆において、脂肪酸含有量を増加した品種の開発に米国や中国が取り組んでいる。生産性向上については、ソルガム（アフリカ原産のイネ科モロコシ属の穀物）において、寄生植物への耐性がある品種の開発がケニアで進んでいる。同様に畜産でも、アレルゲンフリーの牛乳や鶏卵の開発といった機能性向上と、耐病性等を持つサーモンの開発といった生産性向上が取り組まれている。

また、海外でのゲノム編集食品に対する取扱いは、国により様々である⁽¹¹⁰⁾。ニュージーランドは、ゲノム編集食品も新たな遺伝子改変技術を用いた遺伝子組換え食品と同じとしている。EUはニュージーランドと同様であったが、2024年2月に、ゲノム編集生物を従来の遺伝子組換え生物と同様に規制する必要があるという欧州裁判所の採決を覆して、安全審査抜きの流通を認めるという案を承認した。英国は、2023年3月にゲノム編集食品の商用生産を認める法律を成立させた⁽¹¹¹⁾。米国は、従来から植物病害虫・雑草性（人間による攪（かく）乱のある土地で生育する植物の性質）がなければ規制対象外としている。カナダは、作出技術にかかわらず、開発された作物の形質に新規性があれば規制対象となる。アルゼンチン、ブラジル、チリ、イスラエル、ナイジェリア、ケニア、フィリピン、オーストラリアでは、外来遺伝子がないことが確認されれば規制対象外である。その他、東南アジア各国では取扱いを検討中であり、中国では2022年1月からゲノム編集植物の安全評価指針が試行されている。

以上のように、ゲノム編集食品に対して各国での対応が分かれており、解釈や対応に国際的なコンセンサスは得られていない現状がある。しかしながら、ゲノム編集食品の開発は国内外で進められており、日本では市場にも登場しているという状況である⁽¹¹²⁾。

3 ゲノム編集食品の課題

ゲノム編集食品の課題として挙げられるのは、消費者の受容である。例えば、日本消費者連盟は、ゲノム編集トマトやその加工品を販売している首都圏のスーパーマーケットに取扱いの検討を申し入れる活動を行っており、国に全てのゲノム編集生物の環境影響評価、食品安全審査、表示の義務付けを要求している⁽¹¹³⁾。その背景には「遺伝子进行操作するのは危険」という不安や懸念がある。

消費者庁は、ゲノム編集食品に安全性評価が義務付けられてない理由として、ゲノム編集でDNAに起こる変化は自然界や従来の品種改良でも起こり得る変化であるため、安全性も同程度あると考えられることから、安全性評価は必要ないと判断したとしている。しかし一方で、新たな技術であることから消費者への配慮も必要なため、届出と一定の情報公開を求めている⁽¹¹⁴⁾。また、日本では届出制としながらも事前相談の中で厚生労働省や専門家による確認もされてい

(110) 高原学「ゲノム編集技術をめぐる動向とコミュニケーション活動」（フードテック官民協議会第4回提案・報告会資料）2022.3.11, p.9. 農林水産省ウェブサイト <<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/sosyutu/attach/pdf/foodtech-36.pdf>>

(111) Genetic Technology (Precision Breeding) Act 2023

(112) 高原 前掲注(110)

(113) 「【回答】ゲノム編集トマト及びその加工品の販売についての要請・質問状に対する回答」2024.7.24. 日本消費者連盟ウェブサイト <<https://nishoren.net/new-information/19960>>; 「【署名活動】すべてのゲノム編集食品の規制と表示を求めます」2019.5.8. 同上 <<https://nishoren.net/flash/11263>>

(114) 厚生労働省医薬・生活衛生局食品基準審査課「新しいバイオテクノロジーで作られた食品について」2020.3, p.11. 消費者庁ウェブサイト <https://www.caa.go.jp/policies/policy/standards_evaluation/bio/genome_edited_food/assets/000657810.pdf>

ることから事実上の審査がある⁽¹¹⁵⁾。

標的外の遺伝子を切断する「オフターゲット変異」への不安も存在する。実際には、オフターゲット変異が起りにくいようにしたり、起きていない個体を選んだり、交配等の過程で取り除いたりするため、ゲノム編集生物にオフターゲット変異が残る可能性は低い。また、万が一残っても、同じような変異は自然界や従来の品種改良の過程でも起こっており、食品安全上のリスクは、従来の品種や食品と変わらないと言える。

ゲノム編集食品が消費者に受容されるためには、遺伝子組換え食品でのコミュニケーションの反省をいかにすることが大事であると思われる。遺伝子組換えの第1世代は、除草剤耐性や害虫抵抗性等、主に生産者にメリットの大きい品種が開発された。第2世代は、機能性成分を多く含む食品や、アレルゲンが少ない品種など、消費者にメリットの大きい品種であった。そして第3世代は、干ばつ耐性、砂漠緑化、地球温暖化防止等の環境問題の解決に寄与できる品種とされている⁽¹¹⁶⁾。

この第1世代は、消費者にメリットがなかったため、遺伝子組換え食品が受け入れられなかったとされ、また、第2世代は、多くの消費者に十分にメリットを伝えられなかったこと等が指摘されている。本来、第2世代だけでなく、第1世代の除草剤耐性や害虫抵抗性等で作物の収量が上がり、食料が安定供給されれば、消費者にも有益である。さらに、現在、注目されているのは第3世代の遺伝子組換え食品や、新しい技術で作られたゲノム編集食品であり、持続可能な社会に大きく貢献できるものであると言える。

ゲノム編集食品の受容についても、目先の自分のことだけでなく、他国や未来の人々の食料をどうするかという視点で消費者自身が考える必要に迫られていると言える。そのためにも、科学リテラシーを育てることや、国や研究機関は、市民に分かりやすくゲノム編集の情報を説明し、一方的な説明とならないように丁寧なコミュニケーションを図る姿勢が求められる。また、ゲノム編集食品を食べたくないという意見を尊重した上で、関係者全員が解決策を模索することも大切であろう。

4 ゲノム編集食品の可能性

ゲノム編集食品は、フードテックの生産の分野において、農業を変革し、作物の収穫量と家畜や養殖魚の生産性を向上させることで、増加する世界人口に対応した食料安全保障の達成にも役立つものと考えられている。また、ゲノム編集は、食品のビタミン、ミネラル、その他の栄養素を強化することや、色、味、風味、食感等の官能的な食品特性を改善すること、消費を最適化すること等も可能にする技術である。日本では遺伝子組換え食品が消費者受容に苦勞してきた歴史があり、ゲノム編集食品の普及を目指すのであれば、消費者への適切な情報提供と理解を深めてもらうための丁寧な対応が重要であると言える。

(115) 厚生労働省「ゲノム編集技術応用食品を適切に理解するための6つのポイント」消費者庁ウェブサイト <https://www.caa.go.jp/policies/policy/standards_evaluation/bio/genome_edited_food/assets/000659592.pdf>

(116) 松永和紀『ゲノム編集食品が変える食の未来』ウェッジ, 2020, p.211.

フードテック関連企業紹介 #04

リージョナルフィッシュ株式会社	
本社所在地：京都府京都市	設立年：2019
CEO：梅川忠典	従業員数：不明
スタートアップステージ：シリーズ B（初期の成長段階を超えた企業が、更なる成長や市場拡大のために資金調達を行う段階）	資金調達総額：26.4 億円
企業概要 リージョナルフィッシュ社はゲノム編集を用いた魚の品種改良、IoT や AI を活用したスマート養殖システムの開発、ゲノム編集魚の販売を行っているスタートアップ企業である。 設立のきっかけ 世界的なタンパク質不足と日本の水産業の衰退が、立ち上げの最大の動機である。水産業・養殖業には漁業権が必要であり、基本的に漁業権は個人に付与され、水産業に従事する者のほとんどが個人事業主又は中小企業である。新しい養殖の技術を生み出すような研究開発に投資することはこれまでほとんどなかった。京都大学のゲノム編集技術と近畿大学の養殖技術の共同研究をコアにして生まれた大学発のスタートアップである。 事業内容 リージョナルフィッシュ社はゲノム編集技術を用いて短期間で魚種の開発・育種を行っている。これまで魚種の改良には 30 年かかっていたが、ゲノム編集技術により 2 年に短縮した。これまでの水産業は、養殖技術の発展に注力し、品種改良技術への注力は遅れていた背景がある。 リージョナルフィッシュ社では陸上養殖を導入しており、IoT や AI を活用したシステムを開発し、養殖の生産性を高めている。魚類の養殖は海の一角に生け簀(す)を設置して飼育する「海面養殖」が一般的である。テクノロジーを活用して給餌や清掃を自動又は遠隔操作し、飼育環境を最適化できるシステムを開発した。また、陸上養殖は場所を選ばず様々な魚種を飼育できるほか、海面養殖よりも環境負荷が小さく、かつトレサビリティの確保も容易なことから世界的に注目されている。他方、設備投資やエネルギーコストが費用の約 7 割と負担が大きいことが普及に向けた課題として存在する。 養殖環境の効率化と組み合わせで高成長・可食部増量特性を持ったゲノム編集魚を導入することにより、単位面積当たりの収益性を引き上げ、養殖業を高収益事業へと進化させることを目指している。 上記のシステムを活用した「スマート養殖」のプロジェクトは様々な企業と共同で実施している。例えば、エビ養殖を奥村組、NTT ドコモ、岩谷産業の 3 社と行っている。 また、2023 年 7 月には NTT グループと魚介類の生産・販売を目的に合弁会社 NTT グリーン＆フード株式会社を資本金 92 億円で設立した。NTT グループが有する情報通信技術とリージョナルフィッシュが有する品種改良技術を結集し、魚介類の生産・販売から行う予定。生産した魚介類はブランド魚とし、地元スーパーや飲食店等へ販売するほか、大手小売・流通企業を通じた販売も行う予定である。 具体的に育種・販売している魚種は以下のとおり。いずれもオンラインショップで購入が可能である。 ○ 22 世紀鯛 ■ ミオスタチン遺伝子を欠失させることで、マダイの可食部が約 1.2 倍（最大で 1.6 倍）になるほか、飼料利用効率が約 14% 改善。 ■ 国の手続を経て上市した世界で初めてのゲノム編集動物食品。 ○ 22 世紀ふぐ ■ ゲノム編集技術により一般的な品種の 1.9 倍の速さで成長するよう品種改良されたトラフグ。 ■ 成長が早い結果、飼料効率も 40% 改善。 ■ 京都府宮津市はこのトラフグをふるさと納税の返礼品に採用。 ○ 22 世紀ひらめ ■ ゲノム編集技術により従来のヒラメに比べて飼料の利用効率と成長性が改善した高成長なヒラメ。 ■ 食欲抑制ホルモン「レプチン」の受容体である「レプチン受容体遺伝子」の働きをゲノム編集により機能欠損させることで、食欲が増進し高成長を促す。 バリュープロポジション（価値提案） 高速の成長を促す品種改良とスマート養殖を組み合わせた次世代水産養殖システムにより、採算性の高い養殖業を実現している。飼料利用効率と成長性が高い品種や可食部の多い品種への改良により、魚種自体の生産性が向上する。陸上養殖のため天候や環境変化に左右されず安定した生産が可能である。 ビジネスモデル NTT グリーン＆フード社では、「藻類の生産・販売」、「魚介類の生産・販売」、「サステナブル陸上養殖システムの開発・提供」の三つを事業の柱に据えており、まずは、リージョナルフィッシュ社が品種改良した	

魚介類の生産・販売事業から先行してスタートした。九州のほか、「数拠点」の設置を検討しており、拠点ごとに適した魚介類を生産し、地元のブランド魚等としての販売を進めていく。10年後には20拠点ほどの規模になる計画している。生産した魚介類はブランド魚とし、地元スーパーや飲食店等へ販売するほか、大手小売・流通企業を通じた販売や、ふるさと納税返礼品としての活用も行う予定である。

将来の展望

魚種の品種改良においても、水産物の高付加価値化を通じた日本水産業の再生を目指している。おいしさや栄養価等の消費者のニーズに応える品種開発だけでなく、気候変動による水温上昇による環境変化にも耐性のある品種の開発も検討している。

(情報は UnlocX 社の調査による) (2024 年 10 月時点)

VII 精密発酵

発酵とは、食品に微生物が増えることによって起こるヒトにとって有益な変化のことである。それに対し精密発酵は、より高度な発酵のことであり、精密発酵と発酵の主な違いは、精密発酵で使用される微生物が特定の最終製品を作製するように設計されていることである。精密発酵の市場は急速に拡大しており、この拡大は、再生可能エネルギーや環境に優しい食品や飲料品への取組に対する消費者の需要の高まりや、乳製品や乳タンパク質の摂取を減らしたいビーガンの活動等、様々な要因が関係している。

1 三つの「発酵」

発酵には、大きく分けて、伝統的発酵、バイオマス（生物資源）発酵、精密発酵があると言われている⁽¹¹⁷⁾。

伝統的な発酵は、食品を保存し、食品の栄養価を高める手段として何世紀にもわたって使用されてきた。魚、肉、牛乳、野菜、豆類、穀類、果物等は、食品を保存する目的で発酵の原料として使用されている。発酵食品は、微生物の増殖と、微生物酵素の作用による食品成分の変換によって生産される。よく知られている発酵食品には、ヨーグルト、キムチ、チーズ、ワイン、ビール、納豆等がある。

バイオマス発酵は、微生物を用いて効率的に大量生産する手法のことである。食用微生物（酵母、細菌、糸状菌等）が、従来の農業で生産される従来の食材の代替品として使用され、食料資源と機能性成分（多糖類、タンパク質、脂質／オメガ3脂肪酸、ビタミン、ミネラル、食物繊維）の両方の供給源として注目されている。前述したマイコプロテインが、バイオマス発酵の産物に当たる。

精密発酵は、AI やビッグデータを活用した第4次産業革命における新たな食品生産システムの発酵として考えられている。精密生物学の急速な進歩により、微生物を遺伝子組換えして、複雑な有機物を生産することが可能になった。食品の主要成分、特にタンパク質の生産に精密発酵を利用することは、食料生産システムの変革に向けた選択肢として浮上している。この傾向は、より持続可能な方法で食料を生産したいという世界的なニーズによって推進されている。

精密発酵は、“precision fermentation” の日本語訳であるが、この良否については現在議論が

⁽¹¹⁷⁾ Mary Ann Augustin et al., “Innovation in precision fermentation for food ingredients,” *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, Volume 64 Issue 18, 2023, pp.6218-6238. <<https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2166014>>

あり⁽¹¹⁸⁾、本調査では暫定的に「精密発酵」という表現を使用する。

2 精密発酵の特徴

精密発酵の定義は、2023年に精密発酵を推進する米国を中心とするスタートアップ企業9社（当初）が参画して作られた「Precision Fermentation Alliance」（精密発酵組合）と、欧州を中心とする精密発酵企業の業界団体である「Food Fermentation Europe」（食品発酵欧州）が、2024年に共同で発表している⁽¹¹⁹⁾。その定義は、「精密発酵は、従来の発酵プロセスとバイオテクノロジーの最新の進歩を組み合わせ、タンパク質、フレーバー分子、ビタミン、色素、脂肪等の目的の化合物を効率的に生産すること」としている。

「precision」という英単語には、「精密」、「正確」、「的確」等の意味があり、従来の発酵技術と異なり、特定の物質を生産し、目的物質のみ単離する手法であり、その点が精密という意味合いを含んでいる。具体的には、精密発酵は、細菌、酵母、真菌等の微生物を利用し、制御された生産システムや遺伝子組換えの技術等を通じて、特定の目的の成分（特にタンパク質）を生産するプロセスを指すことが多い。

精密発酵は、最近登場したフードテックではなく、すでに何十年もの間、医療分野や食品分野で利用されてきた。例として、医薬品分野では1982年に大腸菌によるヒトインシュリンが開発され、大量生産が可能になった。また、食品分野では、20世紀終わり頃から、遺伝子組換え技術を用い、微生物菌体内にチーズの凝乳酵素であるキモシンを生成させる方法が実用化されている。

近年、海外ではスタートアップ企業である米国の Perfect Day 社が、ネスレ社やユニリーバ社と提携し、微生物が産生した牛乳のホエイのタンパク質を使用したプロテインバーやアイスクリームを販売したことで注目されている。精密発酵は、主にビーガン向け食品での活用が進んでいる。

3 精密発酵の技術

精密発酵に関する技術及び製造の知見は、従来の発酵技術だけでなく、バイオマス発酵やその他の微生物の産業利用分野と相互に関連している。例えば、精密発酵の製造受託機関はバイオマス発酵にも対応する組織が多い。

精密発酵の全てではないが、遺伝子組換え技術を用いて、特定の遺伝子を挿入した微生物の発酵を利用し、タンパク質や脂質といった目的とする食品成分を産生する技術がある。特に、微生物を使って動物由来成分を生産するバイオエンジニアリングは、何十年も前からある技術である。

異なる微生物種や製品に合わせてプロセスを最適化するためには、多くの作業が必要となる⁽¹²⁰⁾。例えば、卵や乳製品等の伝統的な製品の成分を生成するために、その製品の特性（風味、

(118) 坂元雄二「Precision fermentation による代替食品製造技術の現在（いま）」『生物工学会誌』102 巻 8 号, 2024, pp. 387-390. <https://doi.org/10.34565/seibutsukogaku.102.8_387>

(119) Precision Fermentation Alliance, “Precision Fermentation Alliance and Food Fermentation Europe Finalize a Refined Definition of Precision Fermentation,” Feb 26, 2024. PR Newswire Website <<https://www.prnewswire.com/news-releases/precision-fermentation-alliance-and-food-fermentation-europe-finalize-a-refined-definition-of-precision-fermentation-302070553.html>>

(120) 「精密発酵」特定非営利活動法人日本細胞農業協会ウェブサイト <<https://cellagri.org/pathway-into-cell/issues/精密発酵>>

口当たり、栄養、調理や冷凍の特徴等)を調べ、どの分子を目的とするか決定する必要がある。さらに、最終製品に最適な微生物宿主を選択する必要や、その宿主に最適な培地や原料を決定する必要もある。加えて、目的の分子を微生物宿主から効率的に分離する方法を見いだすことも重要な課題である。この課題は精製された分子をどのように処理し、他の成分と混合して加工し、最終製品を製造するか等も含む。

4 精密発酵の現状

精密発酵による代替タンパク質の生産としては、 β -ラクトグロブリン、ラクトフェリン、カゼイン等の乳タンパク質、卵白タンパク質のオボアルブミン、食肉の色素成分であるヘム含有タンパク質(レグヘモグロビン、ミオグロビン等)、甘味タンパク質(ブラゼイン等)、筋肉タンパク質(コラーゲン、エラスチン等)が報告されている。このうち、乳タンパク質の生産に取り組む企業だけでも100社を超える。

代替乳タンパク質の普及を目指すスタートアップとして、 β -ラクトグロブリンに生産を特化した米国の Perfect Day 社、イスラエルの Remilk 社や Imagin Dairy 社、オランダの Vivici 社、ラクトフェリンを生産するシンガポールの Turtle Tree 社、カゼインを生産する米国の New Culture 社等がある。これらの企業は、米国食品医薬品局(FDA)から食品添加物に与えられる安全基準合格証の GRAS (Generally Recognized As Safe. 「一般に安全と認められる」の意)等、販売に必要な認可や認証を1か国以上で得ている。

各国の政府や大手食品企業がスタートアップの開発やアカデミアの基礎研究を支援している。中でも、酪農が盛んなオーストラリアやニュージーランドの政府や農協が、精密発酵等による代替乳タンパク質の生産技術の確立を目指すスタートアップを積極的に支援している。例えば、オーストラリア政府は、オーストラリアの Eden Brew 社や米国の Change Foods 社(創業はオーストラリア)を、ニュージーランド政府はニュージーランドの Daisy Lab 社を、オーストラリアの酪農協同組合 Norco は Eden Brew 社をそれぞれ支援し、ニュージーランドで約1万戸の酪農家を抱える協同組合 Fonterra は、オランダの DSM 社と共にスタートアップ Vivici 社を設立した。

「Farm to Fork」の戦略を掲げ、持続可能な農業への移行を目指す EU が支援するプロジェクトとして、二酸化炭素から微生物タンパク質を製造するフィンランドの Solar Foods 社も注目されている。乳業部門を持つ大手食品企業はこれらのスタートアップやプロジェクトの動向を注視しており、マース社、ネスレ社、ゼネラルミルズ社、ユニリーバ社、ベル社等の大手食品企業は自社のニッチ/カスタムブランドで、精密発酵による β -ラクトグロブリン等を用いた製品を先行販売しつつ、市場での受容性を探ろうとしている。

精密発酵による代替卵タンパク質の開発を目指すスタートアップ企業としては、オボアルブミンを開発する米国の The Every Company 社やフィンランドの Onego Bio 社等がある。

ヘム含有タンパク質は、植物性代替肉の風味向上に効果があり、すでに米国の Impossible Foods 社が、精密発酵で製造した大豆の根粒菌由来のレグヘモグロビンで実用化している。類似のヘム含有タンパク質として、米国の Motif Foodworks 社やベルギーの Paleo 社等の複数の会社がミオグロビンの生産を目指している。

甘味タンパク質であるブラゼインの精密発酵による生産も実用化段階にあり、米国の Sweegen 社や Oobl 社は米国内で GRAS を取得し、アラブ首長国連邦の Novel Foods Group 社は5億ド

ル規模の工場建設を発表した。また、米国の Geltor 社のようにコラーゲンやエラスチン等の筋肉関連のタンパク質の製造に取り組む会社もある。

米国での精密発酵によるタンパク質の認可事例は増える一方で、欧州ではまだ認可事例はなく、審査が進んでいない。シンガポールでは許可されており、各国の精密発酵に対する考え方の違いが見られる⁽¹²¹⁾。

日本にはアミノ酸、核酸、ビタミン、有機酸等の発酵生産技術を有する企業が複数あるものの、これらの企業の中で精密発酵という言葉を自社製品の説明に積極的に採用している企業は非常に少ない。一方、精密発酵の範疇（ちゅう）とされているキモシンについては、1994年に遺伝子組換えキモシンを用いたチーズが日本に初めて上陸した⁽¹²²⁾。2020（令和2）年には食品安全委員会にて、遺伝子組換え食品等評価書⁽¹²³⁾の内容が確定し、日本で遺伝子組換え微生物由来のグレープフルーツの香気成分であるバレンセン香料の実用化が可能となった。

現時点では、事業目標に精密発酵を設定しているスタートアップ企業は確認されていない。精密発酵は規制側の対応として、国によって寛容・慎重・保守に分かれている一方、日本はどれに転ぶのかが分からないという状況にあり、市場参入の障壁の一つとなっている⁽¹²⁴⁾。

5 精密発酵の課題

(1) コスト／製造能力の課題

海外ではスケールアップやコストダウンのための大規模発酵設備や連続培養等への関心が高く、さらに日本では、持続可能で安価な炭素源（糖質源）の確保も重要な課題である。すなわち、微生物の成長のために必要となる栄養素としての安全で安価な糖質が必要である。同時に窒素源を含む培地成分や、目的となる成分を精製等した後の工程の効率化・低環境負荷策も検討すべき課題である。

(2) 消費者の受容の課題

消費者が、遺伝子組換え技術で作られているかどうか認識しているか否かにかかわらず、遺伝子組換え技術で製造され高度に精製された一部の食品添加物等はすでに市場で受け入れられている。精密発酵は、持続可能な社会に貢献できる点でその普及を望む消費者が存在する一方、遺伝子組換え食品や新規食品の受容と同じように、精密発酵に慎重な消費者が一定数存在する。

2024年に特定非営利活動法人日本細胞農業協会が行ったオンラインアンケート⁽¹²⁵⁾によると、「精密発酵」という単語の知名度は15%に過ぎなかった。「精密発酵で作られたミルク」の試飲意欲は36.6%であり、「精密発酵で作られたミルク」を試してみたい理由の上位3つは、「健

(121) 「欧州における精密発酵たんぱく質の新規食品申請状況、ほか」『GNG グローバルニュース』2024年5月10日号。株式会社グローバルニュートリショングループウェブサイト <<https://global-nutrition.co.jp/gnggn/globalnews-20240510/>>

(122) 中島春繁「遺伝子組換え食品と安全性審査」（薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会新開発食品調査部会遺伝子組換え食品等調査会第1回 資料2）2013.8.20. 厚生労働省ウェブサイト <<https://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-11121000-Iyakushokuhinkyoku-Soumuka/0000022123.pdf>>

(123) 食品安全委員会遺伝子組換え食品等専門調査会「遺伝子組換え食品等評価書 *Rhodobacter sphaeroides* 168 株を利用して製造された香料バレンセン」2020.3. <https://www.fsc.go.jp/iken-bosyu/iken-kekka/kekka.data/pc1_idensi_valencene_020401.pdf>

(124) 澤野健史「次世代の食料生産技術「精密発酵」とは一業界団結で加速する市場開発—」2024.2.13, pp.7-8. 三井物産戦略研究所ウェブサイト <https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2024/02/15/2402t_sawano.pdf>

(125) 西川優嗣「精密発酵に関わる認知度、試食意欲および最適な呼称の調査」2024.10.1. 特定非営利活動法人日本細胞農業協会ウェブサイト <https://cellagri.org/articles/2024-10-01-15-35_精密発酵受容調査_%E3%80%80結果>

康的そう」、「新しい技術が用いられた食品を試してみたい」、「環境負荷が低い」であり、反対に試してみたくない理由の上位3つは、「安全性について心配」、「人工的だと思う」、「味が美味しくなさそう」であった。また、「培養ミルク」、「培養牛乳」、「精密発酵ミルク」、「精密発酵牛乳」は「人工」と連想されやすい、「培養牛乳」、「培養ミルク」、「クリーンミルク」は「気持ち悪い」イメージを持たれやすいことが明らかとなった。そのため、精密発酵という名称も含め、ネーミングはその受容に大きな影響を及ぼすと考えられる。

6 精密発酵の可能性

微生物に欲しい食品成分だけを効率的に生産させる精密発酵は、フードテックの食料生産分野において、最も先駆的で合理的な手法であると言える。精密発酵も培養肉の製造と同じように、各ターゲット成分に最適な微生物宿主の選択、培地の種類と成分の選択、目的の分子を宿主から効率的に分離する方法等の各要因をそれぞれ最適化することが求められる。すでに海外では精密発酵によって作られた製品が社会実装されていることもあり、日本でも今後普及する素地はあるといえる。

フードテック関連企業紹介 #05

Solar Foods (Solar Foods Oy)	
本社所在地：フィンランド	設立年：2017
CEO：Pasi Vainikka	従業員数：48
スタートアップステージ：シリーズ B	資金調達総額：66.2 百万 US ドル
企業概要 Solar Foods 社は「世界の食料生産に革命を起こす」をミッションとして掲げ、二酸化炭素、水素、酸素、少量の栄養素を微生物に供給する独自のバイオプロセスによって、微生物タンパク質「Solein」を開発した。この新規食材の販売許可が出ているシンガポール市場で展開している。2023 年 5 月には味の素社と戦略的提携を発表した。2024 年にはシンガポール市場で味の素と商品開発を行い、市場販売まで実現している。 設立のきっかけ フィンランドの VTT 技術研究センターと Lappeenranta University of Technology の化学研究プログラムから生まれた。 事業内容 二酸化炭素を栄養源とした微生物タンパク質「Solein」の製造・販売をしている。微生物は糖質等を栄養源にタンパク質を作り出すのが一般的だが、Solein は空気中の CO₂ を主な栄養源として利用している。具体的な製造プロセスは次のとおりである。まず、自然界から特定の微生物を探し出し、バイオリアクターで培養する。このバイオリアクターの中では、微生物に空気中の二酸化炭素と水素と酸素、そしてアンモニア等の少量の栄養素が供給される。この過程で微生物は「スラッシュ」と呼ばれるドロドロとした状態になる。最後に、スラッシュから水分を飛ばし、乾燥させると粉末状の Solein ができ上がる。 天候や土地の有無に左右されず、天然資源にも依存せず、再生可能エネルギーを使用し製造するため、持続可能で環境負担の低い食材であると評価されている。 これまで Solein は少量生産にとどまり、市場への供給が限られていた。しかし、2021 年にフィンランドで世界初の大規模の Solein 生産施設である Factory 01 の建設が開始し、2024 年春より商業規模での生産が開始した。この新たな生産体制の確立により、Solein はより安定的に市場へ供給されることが期待される。 バリュープロポジション（価値提案） Solein は、生産時の重量あたりの水使用量が、植物に比べて 100 分の 1、牛肉に比べて 600 分の 1 と非常に効率的である。また、生産時の土地使用量は植物の 20 分の 1、牛肉の 200 分の 1 と、極めて省スペースである。さらに、Solein は植物生産の 5 分の 1、牛肉生産の 200 分の 1 という大幅な環境負担の削減を実現している。Solein の成分は 65%～70% がタンパク質、10%～15% が食物繊維、5～8% が脂質、3～5% がミネラルで、必須アミノ酸を全て含む栄養価の高さが特長である。こうした特徴から、Solein の活用法は多岐にわたる。食品を滑らかでクリーミーな状態にする乳化剤として用いることも、肉のような繊維状の構造を作り出すことで、植物性代替肉にリアルな食感を付与することもできる。非常に細かい粒子サイズのため、ミルク	

のような滑らかな口当たりを実現することも可能であり、酸を加えるとゲル状になる性質があるため、ミルク、ヨーグルトやチーズのような乳製品に似た食感の食品も作ることができる。乳アレルギーを持つ人や、乳製品を摂取しない人向けの代替品としても注目されている。

今後の展望

Solein は新規食品成分であり、市場ごとに規制承認が必要である。現在はシンガポールのみで新規食品規制承認を取得しており、2024 年 8 月から一般消費者向けに販売が開始された。味の素は、この Solein を使用したスイーツ（月餅）をシンガポールにて発売した。

地元フィンランドでは Factory 01 の稼働に続き、Factory 02 の建設も検討中である。今後も、各地域で販売認可申請を進め、欧米等の各国のパートナー企業との連携を強化することで、グローバルな展開を加速させていく予定にも言及している。

（情報は UnlocX 社の調査による）（2024 年 10 月時点）

おわりに

フードテックにおける各代替タンパク質食品の研究開発動向を見ると、植物性代替肉や培養肉、昆虫食といった食品ごとにその法制度や消費者の受容性等も異なる。そのため、それらの課題や可能性を比較しながら総合的に考えることが、タンパク質源を将来にわたって確保する上で重要であると思われる。植物性代替肉の原料の大豆タンパク質や、マイコプロテインの Quorn 等は、40 年ほど前から研究開発を行っており、その地道な活動が現在の動物性タンパク質の代替品としての社会的な注目につながっている。そのため、現在の価値観で新しい代替タンパク質食品を考えるのではなく、未来の社会を想像しながら代替タンパク質食品の今後を見通すことが求められるであろう。また、「代替」である食品は元の食品と比較される運命にあるが、カニの代替品としてカニカマがどのように社会に受容されていったのか等を知ることが、現在の代替タンパク質食品の今後を考える上で重要であると言える。代替食品は代替であることをいずれ超える必要があるが、新しい食品が消費者に受容されるには長い時間がかかる。早急に結論を求めるのではなく、長期的な視点が求められる。

（石川 伸一）