

代替肉ってナンだ？

—現状・基盤技術と展望—

尼子 克己

仁愛大学人間生活学部健康栄養学科

What are Plant-Based Meat Alternatives?

Their Current Status, Basic Technology and Future Outlook

Katsumi AMAKO

Department of Health and Nutrition, Faculty of Human Life, Jin-ai University

食肉は主要なタンパク質給源であるが、従来の畜産手法は環境負荷が高く、また十年以内に人口増加と生活水準向上による需要増に応えられなくなると予想されている。これに呼応するように、近年再現性の高い代替肉が開発され、急速に普及しつつある。畜産による食肉生産の、地球環境問題に対する問題点と、それを植物性素材に置き換えることで期待されるインパクトについて説明した。さらに代替肉の開発状況をその黎明期から示し、またここ数年に上市された代替肉の特徴と、今後発売が予想される培養肉の開発状況について詳述した。また、再現性向上に大きく寄与したふたつの食品添加物（トランスグルタミナーゼ、メチルセルロース）の機能的特徴と加工食品全般における応用例を記した。さらに、消費者の代替肉の受容・普及の見通しを、急増する柔らかい菜食主義者：フレキシタリアンの登場と併せて論じた。代替肉は様々な環境要因が軌を一にしたことで、今後爆発的に普及し、食肉を徹底的に置き換える可能性を秘めている。

キーワード：代替肉，エクストルーダー，トランスグルタミナーゼ，メチルセルロース，持続可能性

現在のわれわれ日本人の生活の中で、「肉を食べる」という行為は極めてありふれたものになっている。しかしながら、例えば実質供給タンパク質量で肉が魚を上回ったのは1988年と比較的最近のことであり、また「焼肉」や「ステーキ」といった食事が、外食において「お寿司」などと並ぶ「ごちそう」の代表格であることにはほぼ異論はないであろう。人類における肉食は約260～250万年前にはじまったとされ、その定着はヒトの栄養状態の改善、身体的成長、社会・文化の形成に大きな影響を及ぼしてきた¹⁾。日本においても、欧米食の特徴のひとつである肉食は、戦後の国民の栄養状態、特にタンパク質摂取量の改善に大きく寄与した一方、逆に脂質摂取量の増加による動脈硬化

等の生活習慣病発症の増加にも影響を与えている。

ところがここ数年、畜産によらない畜肉の代替食品が、食品産業への新規参入を含めた数多くの企業から発売され、その市場を急激に拡大させつつある。現時点で我々が目にする代替肉は、大豆などの植物性素材を原料として各種のミンチ肉を再現した植物性代替肉であるが、これ以外に畜産生物の細胞を培養し組織化することによって作製する、「培養肉」と呼ばれるものがある。KindEarth Tech社のまとめ²⁾によると、植物素材による代替肉を扱う企業は世界で既に150社以上、代替魚介物や代替卵、代替乳など広く動物性タンパク質の代替品まで含めると300社近くが参入する大きな企業群となっている。米国では昨年、多く

の食肉加工工場で労働者の新型コロナウイルスへの感染が拡大したため、食肉の供給が滞る事態となり、代替肉はそれを補う形で当該期間は前年比 264% の市場成長を遂げた³⁾。日本でも昨年、ハンバーガーチェーン店や焼肉チェーン店で代替肉を用いたメニューの提供が相次ぎ⁴⁾、コンビニエンスストアでも定番商品としての販売が始まった。今年に入り、スーパーマーケットで焼肉用代替肉の販売が始まる⁵⁾ など、代替肉を目にする機会は急激に増加している。

本稿では、最近まとめられたいくつかの優れた調査報告書⁶⁻⁸⁾ およびニュース記事を参照しながら、代替肉が注目される背景、および開発を牽引する主要技術について述べる。また今後の普及の可能性についても言及する。なお、代替肉に相当する語句は現在様々な呼称（代替肉、フェイクミート、大豆ミート、植物肉、クリーンミート、等々）があり、その意味するところも完全に一致するわけではないが、本稿では最も汎用的な呼称と思われる「代替肉」を用いることとする。また、古来より食されてきた豆腐やテンペ、がんもどきなども広い意味で肉を代替したものと考えられるが、これらは論考の対象からは除外する。

1. 代替肉が注目される背景

そもそも代替肉の供給が期待されるのは、将来にわたっての食肉供給が懸念されることにその理由がある。世界の人口は 2000 年で 63 億 2400 万人、2020 年で 79 億 5500 万人と増加傾向に変わりはなく、2050 年には 97 億人に達するとの推計がなされている⁹⁾。しかし、食肉需要は人口に比例して増加するわけではない。新興国の経済発展に伴う食嗜好の変化により、かつての日本がそうであったように肉類の消費は高まる。世界の食肉需要は、2000～2030 年の間に 1.7 倍、2050 年にはさらにその 1.2 倍、つまり 50 年でほぼ 2 倍に拡大すると考えられている¹⁰⁾。食肉は主要なタンパク質供給源であるが、現在の農業・畜産業のあり方のままであれば、早ければ 2025 年～2030 年を境にタンパク質需要がタンパク質供給量を追い抜く (Global Protein Crisis) との悲観的予測もある¹¹⁾。ところがこうした需要増に対し、それに見合った供給は困難であろうと予測されている。その理

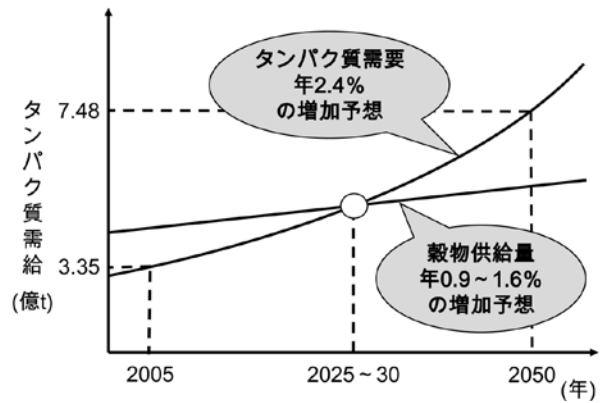


図1 タンパク質の需要・供給予測。「人口は制限されなければ幾何級数的に増加するが生活資源は算術級数的にしか増加しない」というマルサスの人口論に準拠し、タンパク質需要変化を指数関数で、穀物供給量変化を直線で記述した。

由は以下の通りである。第一は、食肉を得るために必要な穀物の供給の問題である。実際、畜産は多くの穀物を消費する。畜肉 1 kg の生産に必要な穀物の量は、牛肉で約 11 kg、豚肉で約 6 kg、鶏肉で約 4 kg と見積もられており (図 2)¹²⁾、タンパク質成分の調達という観点では非常に効率が悪い (世界的に食されているタンパク質源の転換効率という点では、コオロギなどの昆虫が極めて優れている。FAO はこれに注目して昆虫食の普及を 2013 年に提言しており¹³⁾、本稿では詳述しないが将来の食糧供給問題を解決する一つの有力な手段と考えられている。またタンパク質飼料として、昆虫類や魚類の乾燥粉末の利用が進んでいる)。世界のトウモロコシ消費量の約 6 割、小麦消費量の約 2 割が飼料用に使われており、耕作不適地 (都市面積、乾燥地帯、森林地帯) を除く土地の 90% が農地として開墾済みである¹⁴⁾。単位面積あたりの穀物生産性はこれまで、栽培法の改善、品種改良および化学肥料の大量投入 (いわゆる緑の革命)、遺伝子組換えなど

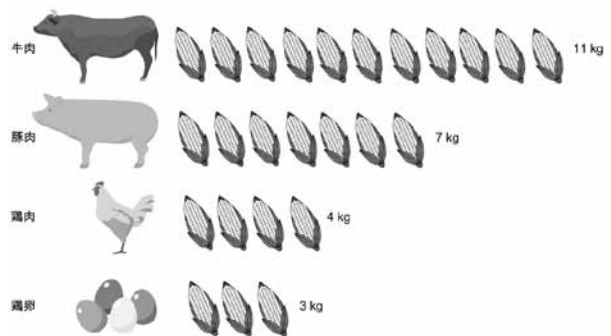


図2 畜産物 1 kg の生産に必要な穀物量。文献¹²⁾を改変

で飛躍的に増大してきたが、地球温暖化の影響などから、今後は単収を増やせなくなる可能性が高いと考えられている¹⁵⁾。こうしたことから、現在の飼育方法を前提にする限り、穀物の供給増を以て食肉の増産に対応することは極めて難しい。

第二は、環境に対する負荷の問題である。つい最近、人為的な温室効果ガスの排出が近年の地球温暖化の原因であることが確定的であるとの報告 (AR6) が気候変動に関する政府間パネルからなされた¹⁶⁾。この地球温暖化の原因とされる二酸化炭素 (CO₂) などの温室効果ガスは、発電や自動車といった工業分野での大量排出をイメージしやすいが、例えば豚肉精肉 1 kg の供給に対し、餌の生産 (飼料用の農地確保に伴う森林伐採を含む)、飼育 (糞尿処理)、食肉処理などの過程によって約 7.8 kg、流通過程によってさらに約 3.3 kg の CO₂ が排出されるという¹⁷⁾。牛の腸内で発生するメタンガス (CH₄) や亜酸化窒素 (N₂O) はゲップとして大気中に放出されるが、これらもまた強力な温室効果ガスであり、N₂O はまた、フロンガスに比肩するオゾン層破壊の原因物質でもある¹⁸⁾。N₂O は肥料の製造または使用においても排出される。これらの過程による温室効果ガスの排出量は、人為的な温室効果ガス総排出量の約七分の一を占めている¹⁹⁾。畜産の拡大は、水消費の大幅な増加にもつながる。トウモロコシ 1 kg の生産には灌漑用水として 1800 L もの水が必要であり、それを飼料として家畜を飼育することを前提にするバーチャルウォーターの考えを導入すると、牛肉 1 kg の生産にはその 20000 倍以上にあたる 20.7 t もの水が必要になると計算される²⁰⁾。後述する、代替肉販売の先行企業であるインポッシブルミート社では、原料である大豆の根を肉の代わりに使用することで、96% の耕作地、87% の水、および 89% の温室効果ガスを削減できると主張している²¹⁾。

第三は、動物福祉 (Animal welfare) に関する問題である。食肉を安価に提供するため、畜産業では常に生産効率の向上が求められてきた。生産性向上のため、肥育しやすい種の育種、時には本来野生種では口にしないトウモロコシなどの穀類やその廃材類材料を配合し、成長に最適化された飼料を与える、檻 (おり) やケージなど狭いスペースで飼育するといった飼育方法

が執られた^{22,23)}。しかし近年、「人間が動物を所有や利用することを認めたいうえで、その動物が受ける痛みや苦しみを最小限にする」²⁴⁾ という動物福祉の概念が普及するにつれ、こうした効率化が家畜にとっての福祉を低下させているとの批判が高まった。動物衛生や人獣共通感染症に関する国際基準の策定等を行う国際獣疫事務局 (OIE) は 2004 年以降、家畜の飼育環境や食肉処理に関する条項を含む動物福祉規約の整備を進めており、日本を含む OIE 加盟各国もこれに沿った対応を始めている。家畜の福祉向上は世界的な潮流となっており、従来の飼育方法の見直しと、それに伴う食肉生産効率の抑制は避けることの出来ない事項となっている。

新型コロナウイルスの流行に伴って、感染症蔓延における畜産のリスクも注目を集めることとなった。SARS-CoV2 ウイルスは人獣共通感染症であり、市場で売買されたコウモリに感染していたウイルスに由来する可能性が極めて高いことが報告されている²⁵⁾。感染と伝搬を繰り返すことでウイルスは変異を繰り返し、ワクチンや治療薬の効果を減弱させるリスクが高まる。これを防ぐにはホスト間の接触を制限することが肝要だが、ウイルスが種を越えて、特に家畜類に伝播可能となると、その制限が困難になり、多大なコストを払わなければならなくなる。高病原性鳥インフルエンザウイルス (H5N1) に感染したことで死亡に至った例は、鳥からヒトへの感染が確認された 2003 年以降、456 人を数える²⁶⁾。

2. 代替肉の開発・普及状況

代替肉の開発の歴史は意外に古く、その最初はいまから 100 年以上を遡る。遠藤の報告⁶⁾によると、コーン・フレークの発明者として知られる米国の Kellogg は、小麦に含まれるグルテンと牛乳に含まれるカゼインから、畜肉に似た硬さと香りを持つとされる食品を製造する方法を考案し、1907 年に特許²⁷⁾を取得した²⁸⁾ (ケロッグ社は 2019 年に新ブランドを立ち上げ、代替肉市場に参入している)。

さらに代替肉の製造技術が大きく進展する契機となったのは、これも米国の化学者 Boyer の研究成果²⁹⁾である。大豆から抽出した植物性タンパク質溶液を高

温高压下で均一混合し、半熔融状態で均一相（相1）を形成させる。これを小さな穴から常圧に、封入された水蒸気（相2）とともに押し出すと、連続的に水蒸気爆発を起こして大豆タンパク質が連続的に膨潤するとともに、タンパク質は押し出される方向と平行に配列され、変形・分離・合体を重ねながら構造化され、最後に析出・凝固する³⁰⁾。この結果、筋繊維の構造に似た厚さ 20 μ m 程度の延伸フィラメントが形成される（図3）。実際、これによって噛み応えなどの食感が畜

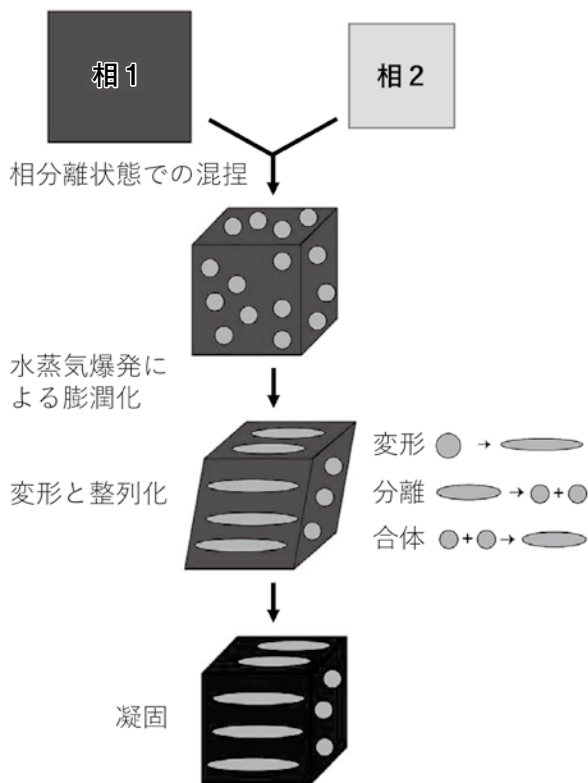


図3 エクストルーダーによる繊維状ポリマー形成の原理。文献²⁹⁾を改変

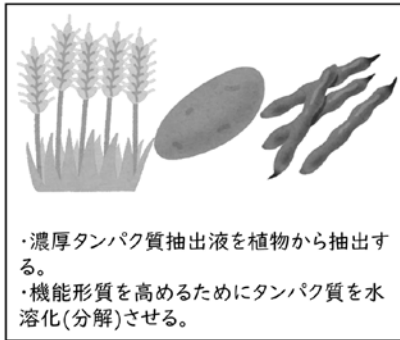
肉に近づくとされ、Boyerはこの技術で1954年に特許³¹⁾を取得した。その後、アメリカの食品メーカーはBoyerの製法を基に植物肉の製品化を進めた。形成される構造の種類は、固化のメカニズムに依存する。分散相が固化し、連続相が洗い流せる場合には繊維が得られ、連続相が固化し、分散相が液体のままの場合には毛細管充填ゲルが得られ、分散相と連続相の両方が固化した場合には繊維充填ゲルが得られる³²⁾。この加熱押出混練装置：エクストルーダーによる湿式紡糸形成は、改良を重ねて現在の代替肉製造の主要技術となっているが、食品だけでなく繊維の製造に用いられ、

工業的な分離を目的とした膜の製造における標準的な技術のひとつとなっている³³⁾。ただし、食感が畜肉に近づいたとはいえ、外観、風味なども含め当時の代替肉は畜肉との差はまだかなりあったようである³⁴⁾。日本でも不二製油株式会社が1956年に大豆ミートの開発に着手し、1969年には食感を肉に近づけた肉状組織タンパク製品「フジニック」を発売した³⁵⁾。現在も有力なBtoBメーカーとして代替肉素材を製造・提供している。また当時の日本政府も、食料自給率の維持向上を図る方策として、新たなタンパク質源としてダイズタンパク質に注目し、農林省農政審議会が1975年にダイズ等植物タンパク質の高度加工による食用への利用の拡大を掲げる報告書を取りまとめている³⁶⁾。

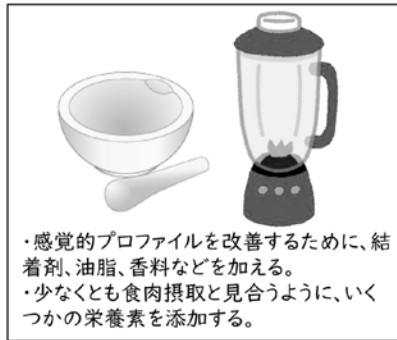
暫く低調であった代替肉開発は近年、加工技術や新たな食品添加物を駆使して、食感、風味、外観などを畜肉に更に近づけた製品を提供できるようになった。先行したのは、米国のスタートアップ企業であるBeyond Meat社とImpossible Foods社である。Beyond Meat社は2009年に設立され、エンドウマメのタンパク質やビーツ色素を使って、食感や風味に加えて、血合いなどの見た目や焼き色、肉汁が滴る様子まで再現することに挑戦した。2013年に大手スーパーマーケットでの販売が始まり、2016年には同社のハンバーガー用パテが精肉売り場に置かれたことが話題になった³⁷⁾。Impossible Foods社は、オープンアクセスジャーナルのPLoS Biologyの発刊にも関わったStanford UniversityのPatrick O'Reilly Brown博士が設立し、ダイズタンパク質を使った代替肉を開発している。筋タンパク質であるミオグロビンの代わりに、遺伝子組み換え酵母(*P. pastoris*)に生産させたダイズレグヘモグロビンを使って赤味とヘムタンパク質の風味を再現させているのが特徴である。2016年には同社の代替肉を使った「インポッシブル・バーガー」が商品化されている。同社は自ら米国食品医薬品局(FDA)に対してこの色素タンパク質の安全性に関する追加申請を「この食品が人間の消費活動に適切すると考える」と記載して行い、2019年にFDAは「懸念事項はない」として、色素添加物証明書免除リストにダイズレグヘモグロビンを追加した³⁸⁾。これら二社に続く形で、既存の食品メーカーも続々と代替肉市

植物性代替肉の製造過程

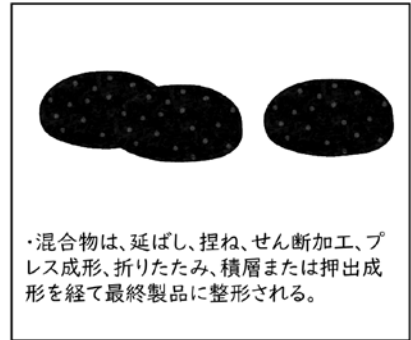
1. 単離と機能化



2. 処理

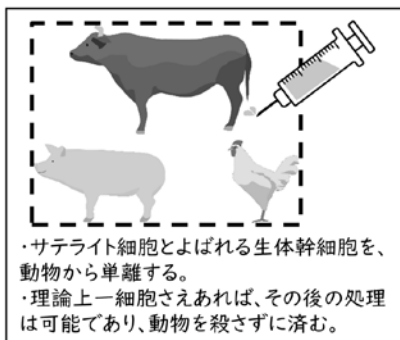


3. 加工



培養肉の製造過程

1. 細胞単離



2. 細胞増殖



3. 組織灌流

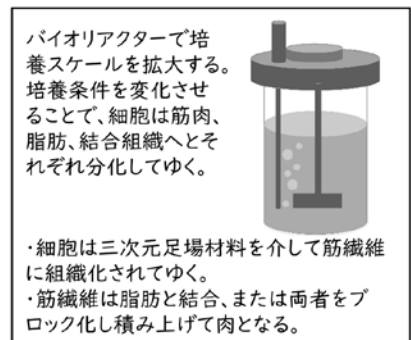


図4 植物性代替肉と培養代替肉の製造プロセス。文献⁸⁾を改変

場に参入している。すでに数多くの製品が上市され、植物性代替肉が消費者に身近なものへとなりつつあることは、冒頭に述べたとおりである。

現在の一般的な、植物素材を用いた代替肉の製造方法を図4上段に示した⁸⁾。従来から原料としてはタンパク質に富むダイズが広く使われているが、前述の Beyond Meat 社ではエンドウマメ、日本の DAIZ 社では発芽させた大豆および雑豆を用いる³⁹⁾ことで、似せる畜肉の呈味・食感プロファイルに合った原材料の組合せの幅を広げるなど、各社独自のノウハウが投入されている。またダイズには特有の青臭さがあるが、これはリポキシゲナーゼが生成する多価不飽和脂肪酸の過酸化物質(ヒドロペルオキシド)が、ヒドロペルオキシドリナーゼなどの酵素により分解されて生じるヘキサナールやシス-3-ヘキサナールなどの中鎖アルデヒド類であると考えられており⁴⁰⁾、リポキシゲナーゼ欠損株を用いたり、中鎖アルデヒド類の分解酵素で処理するなど、特有の風味を消す努力も行われている。

さらに、ミンチ肉に見られる粒状感や、加熱調理に伴うタンパク質の変性で肉が固くなる様子の再現度を、後述する食品添加物によって高めている。

一方、もう一つの方向性の代替肉として将来的な普及が期待されているのが、家畜の細胞を培養し組織化することによって、食肉を再現しようとする、いわゆる培養型代替肉(培養肉)である⁴¹⁾。植物性素材によって作られた代替肉が「フェイクミート」と皮肉交じりに呼ばれることがあるのに対し、培養肉は「クリーンミート」(無菌状態のクリーンルームで育てられるから、という意味であろう)などと、どちらかというところ肯定的なニュアンスで呼ばれることが多い。遠藤の報告⁶⁾によると、培養肉のコンセプトは1930年に英国の政治家 Frederick Edwin Smith が「牛肉や鶏肉などは、いずれ培養によって作られるようになり、家畜の飼育は不要になる」と発言した⁴²⁾頃からのものであるらしい。当時はいくつかの組織細胞の培養法が確立されたものの、まだ不死化細胞は発見されておら

ず、この予言は極めて概念的なものであったが、それから約70年を経て、培養型代替肉の実現に向けた研究が本格化した。オランダのWillem Frederik van Eelenが工業的規模で培養肉を生産する基礎的手法で1999年に特許を取得した^{43,44)}ことが端緒となり、オランダ政府は2005年から培養肉への研究を支援していたが、2013年、Maastricht UniversityのMark Post (Mosa Meat社の創立者)が、牛の骨格筋幹細胞から作った培養肉を世界で初めて発表し、これが培養肉を世間に広く認知させるきっかけとなった⁴⁵⁾。このときロンドンで開催された、世界初の培養肉バーガーの試食会では、「肉のジューシーさは無いが、食感は完璧だ」、「脂肪分がなく赤身の肉という感じだが、普通のハンバーガーを食べているようだ」といった評判を得たものの、140gの培養肉パテの製造原価は1個3500万円と見積もられた⁴⁶⁾。このコストの多くは、細胞を培養する際の培地に含まれる牛胎児血清 (Fetal Bovine Serum : FBS) であった。血清にはホルモンの供給源、培地の緩衝作用増強、各種プロテアーゼからの保護などの作用があり、また細胞の増殖に必要な未知成分が多く含まれているために、当時はこれを使わざるを得なかった。製造コスト削減のため、培養代替肉開発企業は血清を必要としない培地の開発に取り組んでおり、Mosa Meat社、Eat Just社、Future Meat Technologic社、インテグリカルチャー社などが無血清培養法 serum-free culture を独自開発したと発表しており⁴⁷⁾、またMerck社など大手薬品企業も培養肉作成用の培地を販売している⁴⁸⁾。こうした技術革新により、各社は培養肉パテの商品価格を1000～2000円程度まで下げられる見通しが立ったと主張しており、2021～2022年中の商業化を目指すとしている。2021年1月には、米国のスタートアップ企業Eat Just社製の培養鶏肉「GOOD Meat」を用いたナゲットの販売がシンガポールで承認されたが、販売予定価格は一皿23シンガポールドル(約1800円)で、高級鶏肉料理並だという⁴⁹⁾。培養肉は環境負荷の観点でも、畜肉に比べて温室効果ガス排出量で78～96%、土地利用面積で99%、水消費量で82～96%の削減が期待できるとの試算がなされている⁵⁰⁾。またウシ以外の細胞にも技術転用が比較的容易であるこ

とから、Memphis Meats社では鶏の培養肉、インテグリカルチャー社では培養フォアグラ、Shiok Meats社では培養エビ・カニ細胞などの開発に成功しており、いずれもここ1～2年での商用化を目指している。

植物性代替肉ではハンバーグなどのミンチ状組織は十分に再現できているが、ステーキ肉のような肉塊を作ることは未だ成功していない。これについてもTakeuchiらは、足場構造を用いて牛の筋肉細胞を立体的に培養し、分厚いステーキ肉のような食感を持たせる研究に取り組み、2019年に世界で初めてサイコロステーキ状(1.0cm×0.8cm×0.7cm)の培養肉を作製した⁵¹⁾。

このような開発状況を基に、いくつかのシンクタンクが代替肉および畜産(従来肉)市場の将来予測を行っている。ここではAT Kearneyによるそれ⁸⁾を示す(図5)。この報告によると、培養肉に関しては現時点で上市されたものがなくその判断が難しい部分はあるものの、

- ①食肉市場は年平均成長率3%で成長する(ただしインド、アフリカの経済発展による肉食化は前提としない)。
- ②植物性代替肉は2035年までは培養肉よりも競争力が高いが、培養肉のほうが肉の再現度が高く、潜在的商品力が高いため、コストダウンが進むと植物性代替肉の需要を上回るようになる。
- ③培養肉は全世界的に消費者に受容されるようになる。
- ④2030年頃には、タンパク質需要の約1/3近くを代替肉が満たすようになる。
- ⑤従来の畜産による食肉は年平均成長率がマイナス3%で漸減する。植物性代替肉市場は2035年に成熟し、成長が鈍化する。培養肉は年平均成長率40%で伸長し続ける。
- ⑥代替卵、代替乳、代替魚肉等も先行して需要拡大が進みつつあり、市場で成功するために早期の投資が必要である。

といった予測がなされている。すなわち、従来の畜産業が今後数十年のうちに原料や流通などの裾野を巻き込んだ大きな構造変化を起こし、ニッチな産業に変貌するというドラスティックな予測であり、こうした報告に畜産業界は危機感を抱くとともに、代替肉の受容動向を注視している^{52,53)}。

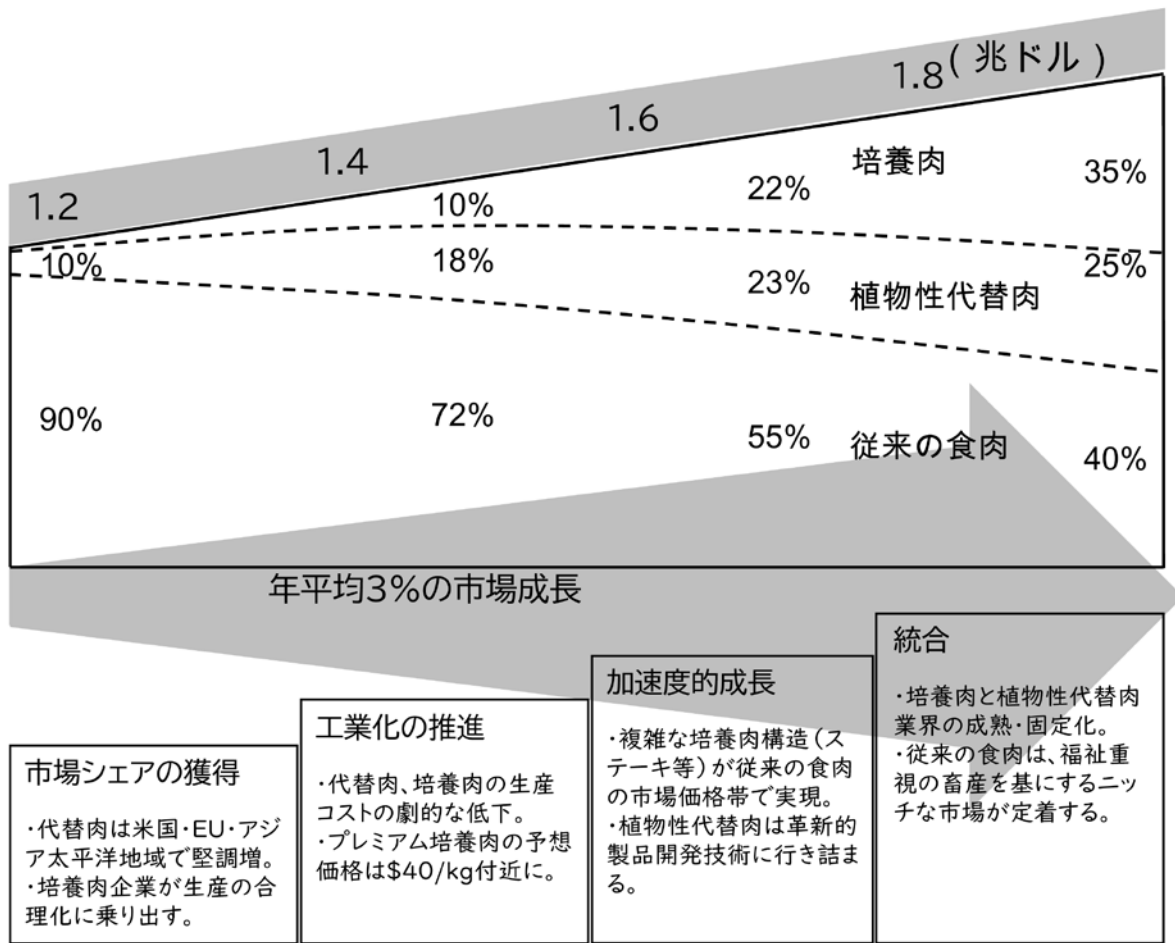


図5 世界の食肉市場予測 文献⁸⁾を改変

3. 肉感を再現するための基盤技術

前節でも述べたように、植物素材から繊維状構造を複製し、弾力のある食感を得る技術としてエクストルーダーによる押出混練は大きな役割を果たしている。しかしながら、食肉の食感や味を決定するのは、当然ながら繊維状構造だけではない。中に含まれる栄養成分、香り成分などは勿論、強弱のある網目構造や、それによって起こる油分の保持といった、複雑な物性も肉感の再現には重要である。これらに関しては、近年加工食品に頻用されるようになった、ふたつの食品添加物とその改善に大きく寄与している。

ひとつは、トランスグルタミナーゼ (TGase, EC2.3.2.13) である。TGaseはタンパク質中の、グルタミン側鎖のγ-カルボキシアミド基に作用する転移酵素(図6)であり⁵⁴⁾、特にリジン側鎖のε-アミノ基を交換することでイソペプチド結合を形成する。これにより安定な供給結合によってタンパク質どうし

を重合させ、網目状構造を形成させる。アンモニアの脱離が起こるため、基本的に不可逆反応であるが、イソペプチド結合を生じた食品タンパク質は、胃腸消化酵素で(γ-ε)グルタミルリジンジペプチドにまで分解されたあと吸収され、腎臓に存在するγ-グルタミルアミノシクロトランスフェラーゼ、および小腸刷子縁膜と血液中に存在するγ-グルタミルトランスフェラーゼによってグルタミン酸誘導体とリジンに代謝されるため、イソペプチドは栄養学的に利用可能である⁵⁵⁾。

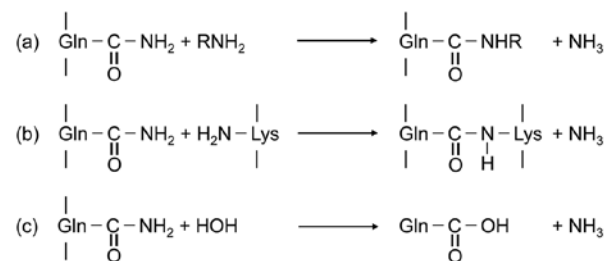


図6 TGaseによるタンパク質の修飾。(a) 一級アミンの導入, (b) タンパク質重合, (c) 脱アミノ反応

TGaseは動物における血液凝固，傷修復，外皮ケラチン化，赤血球膜硬化⁵⁶⁾，植物における集光性クロロフィルタンパク質の重合を介した光合成活性の制御⁵⁷⁾などに機能する，生理的にも重要な，生物界に広く存在する転移酵素である．モルモット肝臓から抽出したTGaseをダイズタンパク質溶液に作用させるとゼリー状に凝固する現象が発見された⁵⁸⁾こと，および，分泌型TGaseを生産する微生物が発見された⁵⁹⁾ことなどがきっかけとなり，食品加工へのTGaseの利用が一気に進んだ．現在では，単一の酵素としては世界で最も利用されているもののひとつである⁶⁰⁾．TGaseとその産業利用におけるサクセスストーリーについては，角田⁶¹⁾の総説に詳しい．

TGaseによる処理が，我々がそれを口にするまでの時間に最も近い食品は，端肉を結着させた安価なビーフステーキであろう．TGaseにカゼイン，pH調整剤などを配合した酵素製剤(味の素社製の製品名は「アクティバ」)は，Meat Glue(肉の接着剤)とも呼ばれ，端肉表面にその粉末をふりかけ，表面を貼り合わせて冷蔵庫に一晩置くだけで，繋ぎ目のほとんど解らない結着肉が作られる．TGaseは無味無臭であり，加熱処理により酵素活性は完全に失活する．これにより，食材の有効利用と省コスト化が図られている．その他，冷凍麺類のコシの維持，フリーズドライしたエビなどの弾力保持，かまぼこの弾力強化など，幅広い食品素材の物性改善に応用されている．代替肉においても，ミンチ状の代替肉における食感改善にTGaseが利用されている．今後想定される，小さいブロック状の培養肉を積み上げてステーキ状の大きさにまでする際にも，TGaseが用いられるのではないかと予想する．

もうひとつの食品添加物は，メチルセルロースである．メチルセルロースは増粘剤の一種であり，セルロースを構成するグルコースの水酸基の一部を α -メチル化してメトキシ基に置換した化合物である(図7)．メチル化されていないセルロースは水に不要であるが，ヒドロキシ基を減らすことでヒドロキシ基間の水素結合を弱めると，水溶性が高まる．最大の特徴は，一般的なゲル化剤と異なり，メチルセルロースの溶液は加熱すると固まり，冷えるとゲルが溶けるという性質を持つ点である⁶²⁾．加熱によるゲル化機構の詳細は明ら

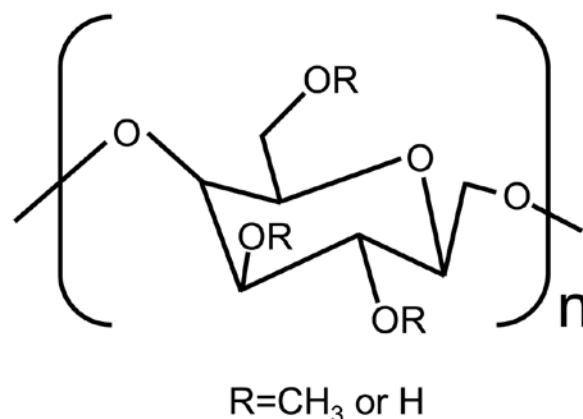


図7 メチルセルロースの構造

かではないが，加熱に伴ってメトキシ基どうしが疎水結合することでゲル化すると予想されている⁶³⁾．この性質を用いて，従来，コロッケを揚げ，パンを焼成する際の，中のクリームのパック防止，トッピングしたマヨネーズの油の保持，パン生地のボリュームアップなどに用いられてきた．代替肉においては，ミンチ部分の結着性を向上させ，卵白の代替として用いられている⁶⁴⁾．メチルセルロースの供給元のひとつであるユニテックフーズ社の Mintel GNPD(世界新商品情報)を用いた調査では，調査対象であった9社の代替肉製品の全てでメチルセルロースが使用されていた⁶⁵⁾．

もうひとつ，植物素材を用いて味や風味を食肉に近づけるために近年適用されているのは，フードメタボロミクスの技術である．生命科学の分野においては，遺伝子・タンパク質だけでなく代謝物をも網羅的に解析することによって生体分子の挙動を捉え，生命活動を理解しようとするメタボロミクス解析が導入されるようになった．食品も元をたどれば動植物や微生物などの生物に由来するものであり，様々な調理加工に伴ってさらにそのプロファイルを複雑化させることから，フードメタボロミクスは極めて多次元の分析手法となる．特に，単一成分ではなく複数の成分の組合せによって美味しさを，また時には甘さなどの基本的な味覚ですら，単なる甘味成分量では決まらず，履き古した靴下の臭い(イソ吉草酸)の追加で増強される⁶⁶⁾といった現象も見られる．このため全体の傾向を多変量解析の手法で捉え，複数の植物素材原料から，目標とする種類の肉にマッチする配合比率を求める，といった手法が採られている³⁹⁾．

4. 普及・受容にかかる問題

肉食が普及していない途上国でなくても、また先進国においても以前から肉を食べない人というのは一定数存在する。主に肉食を避けるベジタリアンや、さらに徹底して鶏卵や乳製品も含む動物性食品全般を避けるヴィーガンといった、自身の主義主張や思想信条に基づいて菜食主義のスタンスをとる人たちである⁶⁷⁾。彼らは以前から豆腐やテンペなどを、大豆チーズなどと同様に、「代替肉」としてではなく、主に「肉の代わりとなる別の食品」としてそれを食してきた。しかしここまで紹介してきた植物性代替肉は、見た目も食感も本物の肉とさほど変わらぬ味わいを持った食品へと変貌を遂げている。菜食主義者だけでなく肉を食べる一般の消費者にとって、従来のこれら代替肉を「ほぼ同等のもの」として従来の食肉から置き換えるという行為は、それまでと比べ確実に障壁が低くなっている。普及・受容を考える上でこの外形的側面は非常に大きい。少なくともあといくつかのハードルを乗り越えれば、代替肉の浸透は比較的容易に進むように思われる。

代替肉を製造・販売する会社を見ると、それを世に出すことの目的を明確に打ち出し、単なる食品というよりも、それを消費することに特別な意義を見出すようなキャッチフレーズを並べたものが少なくない。例えば、

- ・ Feed a Better Future (Beyond Meat)
- ・ Eat Meat. Save the Planet (Impossible Foods)
- ・ Traditional Butcher, New Belief (Vegetarian Butcher)
- ・ Crave Change (Mosa Meat)
- ・ 地球を終わらせない (ネクストミーツ)
- ・ カラダも地球もよろこぶ、休肉日 (Omni Meat)
- ・ イノベーション／環境保全／健康／サービス (ベジミート)

などである。これら以外にも、ホームページ上で自らの活動をSDGs(持続可能な開発目標)に照らし合わせるといった傾向が見られる。こうした、第1項で述べた持続可能性、地球環境、動物福祉、食の安全といった諸問題の解決に資する手段として代替肉(植物性代替肉)を押し出している。そしてまた、代替肉の普

及が先行する欧米では、消費者の側も味や価格といった従来のハードルを越えて、植物由来の製品を購入することを正当化するようになり、より持続可能な環境に「貢献している」という自己イメージを強化しているようである。これは代替肉以外でも、スターバックスでダイズ、ココナッツなどをミルクの代替として提供したり、プラスチックストローを廃止するなどを率先して行い、それが消費者に支持されるといった現象に見られる傾向である。Good Food Instituteによる調査では、米国では植物性乳製品の売上高は2020年に44億ドルの規模に達し、オーツミルクなどの植物性ミルクは牛乳売上高全体の15%を占めている⁶⁸⁾。日本では日清食品と弘前大学が培養肉の受容に関するアンケートを実施しており、食肉の培養肉への置き換えが地球環境維持に寄与するという説明を行うと、培養肉を食べたいと思う者の割合が高まることを報告している⁶⁹⁾。

2008年にIPCC18の議長が、「地球温暖化対策に貢献したいなら週に1度、畜肉を食べない日を設けるべきである」と発言した⁷⁰⁾(IPCCは2019年のAR6土地関係特別報告書の中でも、肉食を減らすことの問題に対するインパクトの大きさに言及している⁷¹⁾)後、James Paul McCartneyが提唱するMeat Free Monday(MFM:畜肉を食べない月曜日)運動が欧米で広がった。ニューヨーク市は、2019年から市内の全公立学校で給食にMFMを導入している⁶⁾。McCartneyの日本公演をきっかけとして、月曜の東京都庁でベジ定食が提供され、マルコメ株式会社がMFMのためのベジメニューを提案するなど、日本でもその活動は少しずつ、カジュアルに広がりを見せている⁷²⁾。MFMへの賛同者のように、食生活の一部で金銭的理由以外の理由により畜肉を避ける消費者をフレキシタリアンというが、その数は米国では既に菜食主義者を上回り、更に増加傾向にある。米国の代替肉のハンバーガー購入者の殆どが、牛肉のハンバーガーも購入するフレキシタリアンであった⁷³⁾。欧州においてもフレキシタリアンの増加は顕著であり、2020年5月における調査では、アンケートに回答したドイツ国民の実に55%がフレキシタリアンを自認していた⁷⁴⁾。またその割合はミレニアル世代、あるいはZ

世代とよばれる若年層でより高く、その傾向は日本においても同様である⁷⁵⁾。この世代的傾向は、環境問題や格差問題に対する意識と似ており、食品としての流行やファッションというよりも、全世界的な諸問題に対する企業姿勢をブランドイメージとして捉え、それを選択するスタンスに近いようである。速水⁷⁶⁾は、食の生産現場と消費者が離れすぎてしまったことで、食べ物の選択に、その成り立ちや製造者の印象から伺われる、ある種の政治性が伴うようになったと指摘している。

肉食は歴史的にみてヒトの栄養状態を改善してきたが、現代の食生活において、肉食がもたらす健康上のリスクも無視できない。世界保健機関（WHO）の専門組織である国際がん研究機関（IARC）は、牛肉や豚肉等（鶏肉は除く）の赤肉やハム・ソーセージなどの加工肉の摂取が、大腸がんのリスクを高めるとの調査結果を報告している⁷⁷⁾。日本人を対象とした調査でも、赤肉・加工肉の摂取はある種の大腸がんの発症リスクを高めることが示されている⁷⁸⁾。IPCCの主張^{70,71)}に従い、肉食を減らし、それを植物食に置き換えるという食習慣の変化によって、気候変動と健康面の両方でベネフィットをもたらす、という試算が示されている⁷⁹⁾。また一般には、消費者が食品を購入する基本的な動機は、「風味」、「価格」、「利便性」であり、これら3つが満たされた上で次に重視される付加価値が「健康」といわれる。では、代替肉は本当に肉より健康的な食事であり、消費者はそれを根拠に代替肉を選択するのだろうか。

市販されている代替肉と、grass-fed な牛肉に含まれる成分をメタボロミクス解析（網羅的な代謝物分析）すると、食品に添付される栄養成分リストにあるような大まかな成分は類似するものの、どちらか片方にしか見いだされない成分が数多く見いだされる⁸⁰⁾。植物特有、あるいは動物特有の代謝物が数多存在することから、この結果自体は至極当然である（逆に成分に違いがなければ、健康上のベネフィットも期待できない）が、代替肉は植物そのものでもない。代替肉のハンバーグパテ（Beyond Meat, Impossible Meat）は、牛挽肉（赤身85%、脂15%）と比べてコレステロールは含まないものの、タンパク質や飽和脂肪酸を同程度含み、

食塩は牛挽肉（80 mg）と比べ数倍高い⁶⁾。パンズや他の具を含めたハンバーガー全体で見ても、同じ会社の挽肉を使ったハンバーガーと代替肉で作ったハンバーガーの間で同様の差異が見られる⁸¹⁾。食塩の過剰摂取は高血圧などの発症リスクを高めることから、少なくともある側面では代替肉は健康的な食事とはいえない。勿論、代替肉にすることによって十分に健康面のベネフィットが期待できる、つまりより植物食に近い栄養摂取となるメニューを提示する企業（ベジミート社等）もあるが、少なくともハンバーガーの形態で提供される代替肉は如何に肉と変わらぬ味を実感できるかに力点が置かれている。前項で挙げた食品添加物も、安全性は確認されているものの、添加物に対する抵抗感の強い消費者にとっては、ネガティブな要素となるであろう。そしてその層は、一定数、ベジタリアンやヴィーガンのそれと重なる。

したがって、代替肉が広く受け容れられ、従来の食肉から置き換えられて普及するには、植物性代替肉については食肉と比較しての栄養学的なデメリットを排除することが必要であろう。従来の食肉には含まれない植物性成分が健康増進に寄与することを、実際に代替肉を食することによって示すことも有効であろう。日本ではもともと大豆の食文化があるため、海外ほど代替肉は普及しないという予測もある⁸²⁾が、我々が豆腐や枝豆を肉だと思って食べていない以上、代替肉が肉の置き換えだと思われるのであれば、海外と変わらないぐらいに定着していくであろうという印象を筆者は持っている。培養肉においては何よりも提供できるポーションの大きさ、および低価格での提供が急務である、ヴィーガンが培養肉を、家畜生物からの搾取の産物と見做すのか、またこれをいのちをいただく対象と見做すのか、興味深い。

一方で代替肉の利用が、経済成長やエネルギー使用への影響を小さく押さえられ、生活の質を損なわない気候変動対策として世界的に認知されるようであれば、その普及は速いと考える。COP26において経済成長を犠牲にする可能性を嫌って温室効果ガスの削減目標のコンセンサスを得ることにすら四苦八苦している世界情勢⁸³⁾を見れば、代替肉への置き換えを定量的な温室効果ガス削減に対して定量的に算入されるよ

うになれば、政策的にその普及が推し進められる可能性すらある。いずれにせよ、ATKearney のレポート⁶⁸⁾にもあるメッセージの通り、「現在は始まりの終わりであって、終わりの始まりではない」のであろう。

謝辞

本稿は、2021年2月にオンラインで実施した仁愛大学公開講座「代替肉ってナンだ？」における講演を基に、その内容を加筆修正しまとめたものである。公開講座実施にご尽力いただいた本学地域共創センター、ならびに試食やビデオ編集など、様々な準備にご助力いただいた健康栄養学科 内田千聖助手に感謝いたします。

引用文献および参考資料

- 1) 農林水産省大臣官房政策課食料安全保障室 (2019) 2050年における世界の食料需給見通し～世界の超長期食料需給予測システムによる予測結果～。
https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_zyukyu_mitosi/attach/pdf/index-12.pdf (2021年9月30日閲覧)
- 2) The New Protein Landscape V3.0. (KET : KindEarth Tech.)
<https://newprotein.org/maps> (2021年9月30日閲覧)
- 3) Coronavirus Meat Shortages Have Plant-Based Food Makers' Mouths Watering (The Wall Street Journal)
<https://www.wsj.com/articles/coronavirus-meat-shortages-have-plant-based-food-makers-mouths-watering-11589371206> (2021年9月30日閲覧)
- 4) 代替肉の市場拡大”植物性チーズ”も登場 (日テレNews24)
<https://www.news24.jp/articles/2021/09/06/06935657.html> (2021年9月6日閲覧)
- 5) ネクストミーツの代替肉商品、全国のイトーヨーカドー店舗で販売へ (PRTimes)
<https://prt-times.jp/main/html/rd/p/000000048.000062184.html> (2021年6月24日閲覧)
- 6) 遠藤真弘 (2020) 代替肉の開発と今後の展開—植物肉と培養肉を中心に—。 *調査と情報-ISSUE Brief-* **1113**: 1-11.
- 7) 川島啓, 五十嵐美香 (2019) 代替肉と培養肉に関する調査研究. *日経研月報* 2019年10月号, 68-75.
- 8) Gerhardt et al. (2020) How will cultured meat and meat alternatives disrupt the agricultural and food industry? (ATKearney Industry Report). *Indust. Biotech.* **16**: 262-270.
<http://doi.org/10.1089/ind.2020.29227.cge>
- 9) 総務省統計局 (2021) 世界の統計2021. <https://www.stat.go.jp/data/sekai/pdf/2021a1.pdf> (2021年9月30日閲覧)

- 10) The Protein Puzzle (FAO) Food Systems Summit 2021 (2021) 23 Sep. 2021 at New York, USA. <https://www.un.org/en/food-systems-summit> (2021年9月30日閲覧)
- 11) Dijk et al. (2021) A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010-2050. *Nature Food* **2**: 494-501.
- 12) 農林水産省 (2019) 「知ってる? 日本の食料事情」p.2. https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/attach/pdf/panfu1-38.pdf (2021年9月30日閲覧)
- 13) FAO (2013) Edible insects: Future prospects for food and feed security. FAO forestry paper 171 ISSN 0258-6150 <http://www.fao.org/docrep/018/i3253e/i3253e.pdf> (2021年9月30日閲覧)
- 14) オオニシタクヤ (2017) 動物性タンパク質源である昆虫食のエネルギーの可能性～その量産を目指すデザイン手法～. *KEIO SFC J.* **17**: 186-207.
- 15) Izumi et al. (2017) Responses of crop yield growth to global temperature and socioeconomic changes. *Sci. Rep.* **7**: 7800.
- 16) IPCC Sixth Assessment Report (AR6) <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/> (2021年9月30日閲覧)
- 17) Hishinuma et al. (2017) Potential for Greenhouse Gas Mitigation at a Typical Roughage Production System in the Japanese Dairy System. *In Sustainability through Innovation in Product Life Cycle Design*. Eds. Matsumoto, Springer Singapore, pp.981-995.
- 18) Ravishankara et al. (2009) Nitrous Oxide (N₂O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. *Science* **326**: 123-125.
- 19) FAO (2017) Livestock Solutions for Climate Change, <http://www.fao.org/3/i8098en/i8098en.pdf> (2021年9月30日閲覧)
- 20) Oki et al. (2003) Virtual water trade to Japan and in the world, *In Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*, Ed. Hoekstra, IHE Delft, pp.225.
- 21) Eat meat. Save the planet. (インポッシブルフーズ社ホームページ) <https://impossiblefoods.com/sustainable-food> (2020年9月30日閲覧)
- 22) 佐藤衆介 (2018) 「生きているウシ・ブタ・ニワトリについて思いを馳せてみませんか」。打越編『人と動物の関係を考える—仕切られた動物観を超えて—』ナカニシヤ出版, pp.48-50, 69-70.
- 23) Aaron Woolf (Directed) (2007) King Corn -You are what you eat-. (邦題: キング・コーン～世界を変える魔法の一粒～) Starring Ian Cheney and Curtis Ellis. 紀伊國屋書店

- (DVD)
- 24) 石川創 (2010) 動物福祉とは何か. *日本野生動物医学雑誌* 15: 1-3.
- 25) Peker et al. (2021) Timing the SARS-CoV-2 index case in Hubei province. *Science* 372: 412-417.
- 26) 厚生労働省 鳥インフルエンザ A (H5N1) について. <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000144523.html> (2021年9月30日閲覧)
- 27) Kellogg (1907) U.S. Patent 869,371,
- 28) Pearson (1976) Meat Extenders and Substitutes, *BioScience* 26: 249-256.
- 29) Dekkers et al. (2018) Structuring processes for meat analogues. *Trends Food Sci. Tech.* 81: 25-36.
- 30) Motoki and Kumazawa (2000) Recent Research Trends in Transglutaminase Technology for Food Processing. *Food Sci. Technol. Res.*, 6: 151-160.
- 31) Boyer (1954) U.S. Patent 2,682,466,
- 32) Tolstoguzov (1988) Creation of fibrous structures by spinnerless spinning *In* Food structure: Its creation and evaluation, Eds. Blankshard and Mitchell, Elsevier, pp. 181-196
- 33) Ho and Sirkaz (2012) Membrane handbook, Springer Science-Business Media, LLC.
- 34) 田村鶴央 (1967) 人造肉の現状と将来—人造肉雑感—. *食品と科学* 9: 37-39.
- 35) 大豆で世界が変わる! 急拡大する「大豆ミート」市場 不二製油ホームページ <https://www.fujioil.co.jp/soymeat/articles202102/> (2021年9月30日閲覧)
- 36) 農林省 (1975) 食糧問題の展望と食糧政策の方向
- 37) Thomas Heath, “One of these burgers is not like the others,” *Washington Post*, 2016.10.27. <https://www.washingtonpost.com/news/business/wp/2016/10/26/whole-foods-has-made-a-big-change-in-the-meat-department/> (2021年9月30日閲覧)
- 38) 食品安全委員会食品安全性情報システム資料管理 IDsyu05200020105 (2019) <https://www.fsc.go.jp/fsciiis/foodSafetyMaterial/show/syu05200020105> (2021年9月30日閲覧)
- 39) 植物肉 DAIZ ホームページ <https://www.daiz.inc/meet/> (2021年9月30日閲覧)
- 40) 脂質の酸化 (4章2節) 中村ら編 (2018) エッセンシャル食品化学 講談社
- 41) ポール・シャピロ (鈴木素子訳) (2020) 『クリーンミート—培養肉が世界を変える—』日経BP.
- 42) パークンヘッド (佐藤荘一郎訳) (1930) 『二〇三〇年の世界』先進社, pp.48-49.
- 43) van Eelen et al., (1999) “Industrial Scale Production of Meat from in vitro Cell Cultures,” WO 99/31222,
- 44) van Eelen et al., (1999) “Industrial Production of Meat from in vitro Cell Cultures,” WO 99/31223.
- 45) “Our Story.” (mosa meat Website) <https://www.mosameat.com/our-story> 2021年9月30日閲覧
- 46) 田中大貴 (2014) ヤバすぎる! 「培養肉ハンバーグ」の衝撃～肉の生産も消費も、根本から変わる～ 東洋経済オンライン <https://toyokeizai.net/articles/-/56802> (2021年9月30日閲覧)
- 47) Xin et al. (2021) Trends and ideas in technology, regulation and public acceptance of cultured meat. *Future Foods* 3: 100032.
- 48) Merck: Optimizing media for cultured meat products. <https://www.merckgroup.com/en/research/innovation-center/highlights/mediaforculturedmeat.html> (2021年9月30日閲覧)
- 49) 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) <https://www.asahi.com/articles/ASPIL4F83NDRUHBI022.html> (2021年11月23日閲覧)
- 50) Tuomisto and de Mattos, (2011) Environmental Impacts of Cultured Meat Production. *Env. Sci. Tech.* 45: 6117-6123.
- 51) Furuhashi et al. (2021) Formation of contractile 3D bovine muscle tissue for construction of millimetre-thick cultured steak. *NPJ Sci. Food* 5: 6.
- 52) Paarlberg (2020) 代替肉の需要増に畜産業界が危機感, 敵対する“自然派食品”の支持者たちと手を組んだ理由 (WIRED Website) <https://wired.jp/2020/12/25/foodies-and-factory-farmers-have-formed-an-unholy-alliance/> (2021年9月30日閲覧)
- 53) 独立行政法人農畜産業振興機構 (2019) 米国における食肉代替食品市場の現状 海外情報畜産の情報2019年10月. https://www.alic.go.jp/joho-c/joho05_000777.html?print=true&css= (2021年9月30日閲覧)
- 54) Motoki and Seguro (1998) Transglutaminase and its use for food processing. *Trends Food Sci. Technol.* 9: 204-210.
- 55) 岑 (2007) トランスグルタミナーゼ (技術用語解説) *日本食品化学工学会誌* 54: 568.
- 56) 伊倉と佐々木 (1991) 組織型トランスグルタミナーゼの構造と生理機能. *化学と生物* 29: 81-89.
- 57) Ioannidis (2012) Role of plastid transglutaminase in LHCII polyamination and thylakoid electron and proton flow. *PLoS ONE* 7: e41979.
- 58) Motoki et al. (1985) Immobilization of enzymes in protein films prepared using transglutaminase. *Agric. Biol. Chem.*

- 51: 997-1002.
- 59) Ando et al. (1989) Purification and characteristics of a novel transglutaminase derived from microorganisms. *Agric. Biol. Chem.* **53**: 2613-2617.
- 60) 山口 (2016) 産業酵素の微生物からの探索 *化学と生物* **54**: 61-64.
- 61) 角田 (2016) 世界初の酵素による食品改質技術—トランスグルタミナーゼによる食品イノベーション—. *研究 技術計画* **31**: 277-282.
- 62) Kobayashi et al. (1999) Thermoreversible gelation of aqueous methylcellulose solutions. *Macromolecules* **32**: 7070-7077.
- 63) Nasatto et al. (2015) Methylcellulose, a cellulose derivative with original physical properties and extended applications. *Polymers* **7**: 777-803.
- 64) メチルセルローズ・HPMC (ユニテックフーズ) <http://www.unitecfoods.co.jp/product/methylcellulose.html> (2021年9月30日閲覧)
- 65) ユニテックフーズ株式会社 (2020) 高まる需要にどう対応する? フェイクミート/代替肉/植物肉/大豆ミート 市場動向と商品設計
- 66) Tieman et al. (2012) The chemical interactions underlying tomato flavor preferences. *Curr. Biol.* **22**: 1035-1039.
- 67) 観光庁 (2020) 飲食事業者等におけるベジタリアン・ヴィーガン対応ガイド. <https://www.mlit.go.jp/kankochou/content/001335459.pdf> (2020年1月10日閲覧)
- 68) AT Kearney (2021) This Earth Day plant-based foods are exploding, for unexpected reasons. <https://www. Kearney.com/consumer-retail/article/?/a/this-earth-day-plant-based-foods-are-exploding-for-unexpected-reasons> (2021年9月30日閲覧)
- 69) 日比野愛子 (2021) 第3章: 培養肉に関する消費者意識調査. 代替プロテインによる食品素材開発—植物肉・昆虫食・藻類利用食・培養肉が導く食のイノベーション, 竹内編, エヌ・ティー・エス, pp.22-33.
- 70) Jowit (2008) "UN says eat less meat to curb global warming," *The Observer*, 2008.9.7.
- 71) Schiermeier (2019) Eat less meat: UN climate-change report calls for change to human diet. *Nature* **572**: 291-292.
- 72) ミートフリーマンデーオールジャパン <https://www.meatfreemondayjapan.com/> (2021年10月1日閲覧)
- 73) "Quick Service Burger Buyers Mix It Up Between Plant-Based and Beef," 2019.7.17. NPD Group Website <https://www.npd.com/wps/portal/npd/us/news/press-releases/2019/quick-service-burger-buyers-mix-it-up-between-plant-based-and-beef/> (2021年10月1日閲覧)
- 74) 農畜産産業振興機構 海外調査部 (2021) 欧州における食肉および乳製品代替食品市場の現状. 畜産の情報, 79-91.
- 75) 日本貿易振興機構 (ジェトロ) (2021) ベジタリアン・ヴィーガン市場に関する調査 (英国, フランス, ドイツ) https://www.jetro.go.jp/ext_images/_Reports/02/2021/3e2ee518305df3f0/rp202103vege.pdf (2021年10月1日閲覧)
- 76) 速水 (2013) フード左翼とフード右翼 食で分断される日本人. 朝日新書 ISBN4022735392.
- 77) IARC website <https://www.iarc.who.int/>
- 78) Takachi et al. (2011) Red meat intake may increase the risk of colon cancer in Japanese, a population with relatively low red meat consumption. *Asia Pac J Clin Nutr* **20**: 603-612.
- 79) Springmann et al. (2016) Analysis and valuation of the health and climate change cobenefits of dietary change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **113**: 4146-4151.
- 80) Van Vilet et al. (2021) A metabolomics comparison of plant-based meat and grass-fed meat indicates large nutritional differences despite comparable Nutrition Facts panels. *Sci. Rep.* **11**:13828.
- 81) バーガーキング・ジャパン 商品の栄養成分及びアレルギー情報 (<https://di7x3yh836phz.cloudfront.net/images/notice/7e17f14b-f6db-45c2-a8dd-fa20188ba97b.pdf>) 2021年10月1日閲覧)
- 82) 一般社団法人日本能率協会 (2020) 令和元年度新たな種類のJAS規格調査委託事業調査報告書 <https://www.maff.go.jp/j/jas/attach/pdf/yosan-25.pdf> (2021年11月26日閲覧)
- 83) 石炭火力「廃止ではなく削減」COP26文書トーンダウンさせたインドの内情 (AFPBB News) <https://www.afpbb.com/articles/-/3376453> (2021年11月19日閲覧)

SUMMARY

Meat is a major source of protein, but conventional livestock production methods have a high environmental impact and are expected to be unable to meet increasing demand due to population growth and higher living standards within a decade. However, conventional livestock production methods have a high environmental impact and are expected to be unable to meet the increasing demand due to population growth and higher living standards within a decade. In response, reproducible meat alternatives have been developed in recent years and are rapidly becoming popular. The problems of meat production

by livestock in relation to global environmental issues and the expected impact of replacing them with plant-based materials are explained. In addition, the status of development of meat substitutes is presented from the early days, and the characteristics of meat substitutes launched in the past few years and the development status of cultured meat expected to be launched in the future are described in detail. In addition, the functional characteristics of two food additives (transglutaminase and methylcellulose) that have greatly contributed to the improvement of reproducibility and their applications in processed foods are described. In addition, the prospects for consumer acceptance and diffusion of meat alternatives are discussed by comparing them to the emergence of flexitarianism, a rapidly increasing soft vegetarianism. This paper discusses the prospects for consumer acceptance and diffusion of meat alternatives, comparing them to the emergence of flexitarianism, a rapidly growing soft vegetarian diet.

KEYWORDS: Plant-based meat alternatives, Extruder, Transglutaminase, Methylcellulose, Sustainability