

未来のストーリー

2050年の今、農業も食卓も20、30年前には想像できなかったほど変わった。2020年代を振り返ると、ニュースでは「食料危機」とか「持続可能な農業」という言葉が飛び交い、フードロスの問題がよく取り上げられていた。実際に危機感を覚えたのは2030年代になってからだった。地球の人口は増え続け、異常気象や天災が頻発し、伝統的な農業では食料供給が追いつかなくなったのだ。

今、私たちの食卓に並び食品の多くは、細胞培養技術によって生み出されている。たとえば、昨日の夕食に食べたステーキは、牛から直接取ったものではなく、細胞を培養して作られたものだ。味も食感も昔の肉と変わらないばかりか、栄養価も調整されていて、まさに私たちが求めた理想的な食品だ。これにより、大規模な家畜農業はほぼ消え、温室効果ガスの排出も激減した。

私が暮らす都市には高層ビルが立ち並び、その中には植物工場もある。外見は普通のビルだが、その内部では、野菜や果物が土を使わずに栽培されている。LEDライトの下、精密に管理された水と栄養が植物に供給されている。この植物工場が都市の中心にあるおかげで、私たちはいつでも新鮮で栄養豊富な野菜を手に入れることができる。

それだけじゃない。陸上で養殖されている魚も、今では私たちの食卓に欠かせない存在だ。水産資源が枯渇していく中、海を汚染せず、持続可能な方法で育てられた魚は、安心して食べることができる。水質や成分が24時間モニタリングされ、最適な環境が維持されているため、病気のリスクも極めて少ない。

ゲノム編集も大きな進展を遂げた技術の一つだ。栄養価の高い野菜や、肉厚の魚、病害に強く生育の早い穀物などが次々と開発され、収穫量が飛躍的に向上した。さらにバイオ農薬や土壌改良技術を活用して、自然に優しい農業を実現している。微生物の力で土壌の質が向上し、化学肥料に頼らずとも豊かな作物が育つようになった。

農村地帯の伝統的な農業の光景も変わった。この30年で農業は極めて精密かつ自動化された。ドローンが畑を監視し、無人トラクターが作業し、収穫ロボットが人に代わって収穫する。施肥や収穫の量とタイミングはAIが指示する。農家の仕事は「畑で汗を流す」というよりも、むしろ管理とデータ分析になった。

一方で、私たちの「畑」はもはや地球に留まらない。月面コロニーでは、限られた資源で作物が栽培されている。地球外で生産された食料は宇宙探査や移住計画にも欠かせない。最近では宇宙土産用に月産クッキーまで製造されている。

かつて夢物語だったテクノロジが、今では私たちの食卓を支えている。技術革新によって100億人分を賄うだけの増産も可能になった。ただ食料の分配には今も偏りがあり、食料不足の地域が残っている。先進国における食品廃棄は減った一方、経済的に豊かになったかつての中・低所得国で新たなフードロス問題が発生している。将来、火星旅行が実現する頃には、この問題は解決しているだろうか、月旅行から帰ってきた同僚からもらった月産クッキーを食べ、培養ミルクで作ったカフェラテを飲みながら、ふとそんなことを考えた。

第5章 食と農

1. 食と農の持続可能性

世界的な人口増加と経済発展による中間層の拡大、さらには地球温暖化や水資源の枯渇といったメガトレンドは、食と農の未来にも影響を及ぼす。人口増加と中間層の拡大により食料需要は確実に増えていく一方、異常気象や土地・水の不足などで供給がそれに追いつかずに、需要に対して供給が逼迫する懸念が高まっている。他方、従来の農業のやり方は「持続可能性」の観点から限界が近づいている。

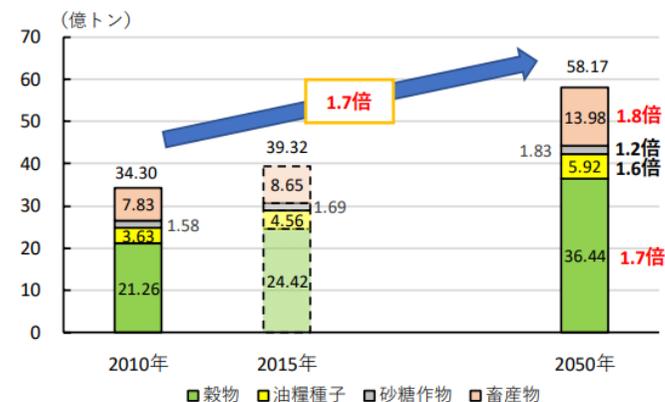
◆人口増加と中間層の拡大が食料需要を押し上げる

国際連合の推計によると、世界の人口は2050年には97億人に達する。人口増加に伴い食料需要が増大することが予想されており、国連食糧農業機関（FAO）は、すべての人に十分に食料が行き渡るようにするためには、2050年までに食料生産全体を1.7倍に引き上げる必要がある、と指摘している¹。

農林水産省の見通しによれば、2050年の穀物需要量は2010年比で1.7倍、畜産物（肉類・乳製品）の需要量は同じく1.8倍に増える<図表 5-1>²。特に中低所得国においてこの傾向が顕著になるとされている。これは人口増加だけが要因ではなく、経済成長による所得の向上が食生活の変化をもたらし、肉類や乳製品の消費が増えることも一因である。畜産物の需要の増加は、家畜の飼料となる穀物や油糧種子の需要をさらに押し上げる要素となる。

では、この圧倒的な需要の増大に対して、食料の供給は追いつくのだろうか。留意すべきは、食料を増産するだけでは食料不足の問題は解決しないという点である。なぜなら、食料問題とは食の分配問題でもあるからだ。食料不足が叫ばれて久しいが、真の問題は食料を十分に確保できる国と、そうで

図表 5-1 世界全体の品目別食料需要量の見通し



(出典) 農林水産省大臣官房政策課食料安全保障室「2050年における世界の食料需給見通し」(2019年9月)

ない国との経済格差にある。

ただそうは言っても、世界中に無駄なく食料を行き渡らせるのは容易ではない。また、分配の課題が残るにせよ、2050年に向けて1.7倍の食料増産が必要であることに変わりはなく、それは人類が直面する大きな課題であるのは間違いない。

◆食肉の消費量が増大し、タンパク質不足が深刻化する

食料不足の懸念の中でもとりわけ深刻なのが「タンパク質不足」だ。食肉の消費量はこの半世紀の間に急速に増加し、現在も増え続けている。世界人口は過去50年間で2倍となったが、中間層の拡大による食の嗜好の変化も要因となって肉の消費量は3倍に増加した³。

ただし、国や地域によって消費量の伸びには違いがある。<図表 5-2>

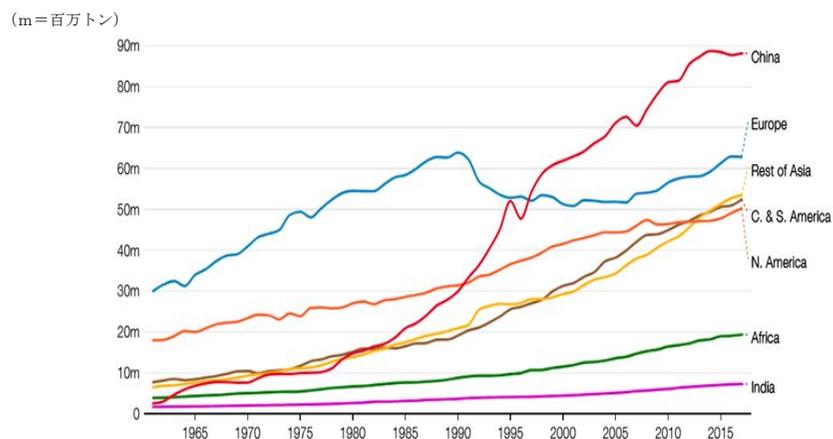
¹ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), “How to Feed the World 2050”, Jun., 2009.

² 農林水産省大臣官房政策課食料安全保障室「2050年における世界の食料需給見通し」(2019年9月)

³ The World Economic Forum (WEF), “This is how many animals we eat each year”, Feb.8,2019.

世界の地域別の食肉消費量の推移を見ると、中国の伸びが著しいことがわかる。世界でこれほど食料が必要になったのも、中国が急速に経済成長して牛肉を食べるようになり、それに比例して家畜の餌となる大豆やトウモロコシの需要が世界中で膨らんだことが背景にある。欧州、中南米、北米は消費量こそ多いが、消費の伸びは比較的安定している。

図表 5-2 世界の地域別食肉消費量の推移



(出典) The World Economic Forum (WEF), “This is how many animals we eat each year”, Feb.8,2019.

興味深いのがインドだ。インドの人口は中国を追い抜き、中間層も拡大しているが、消費量はそれほど増えていない。もともと宗教上の理由から牛を食べない国であり、所得が上がってもこの食生活はなかなか変わらないだろう。

以上のように国や地域によってトレンドの違いはあるものの、世界全体の食肉の消費量は、今後も着実に増加すると見込まれている。FAO は世界の食

肉消費量は 2000～2030 年の間におよそ 70%、2030～2050 年の間にさらに 20%拡大すると予測している⁴。

◆従来型の農業は環境負荷が高く、持続可能性が低い

食料が不足するなら開墾と灌漑によってそれを賄う量を増産すればよい—と言いたところだが、もはやそのような時代ではなくなってきている。従来の農業や畜産の手法が「持続可能性」の観点から問題視されているからだ。

現代の食生活と食料生産が地球温暖化を加速させていることは、かねてより指摘されてきた。FAO によると、2019 年の世界の温室効果ガス総排出量の 31%が食料生産システムに由来し、そのうち 4 割超(全体の排出量の 13%)が農場内の生産活動に起因している⁵。特に温室効果の高いメタンや一酸化二窒素 (N₂O) は、排出の半分以上が農作物や家畜から生じている。

農業が引き起こす土地の荒廃も問題だ。農業には土地が必要だが、世界中で農業に適した土地は限られている。その上、浸食や地質の低下、土地の砂漠化など、農業に適していた土地でも何らかの荒廃が進んでいる。

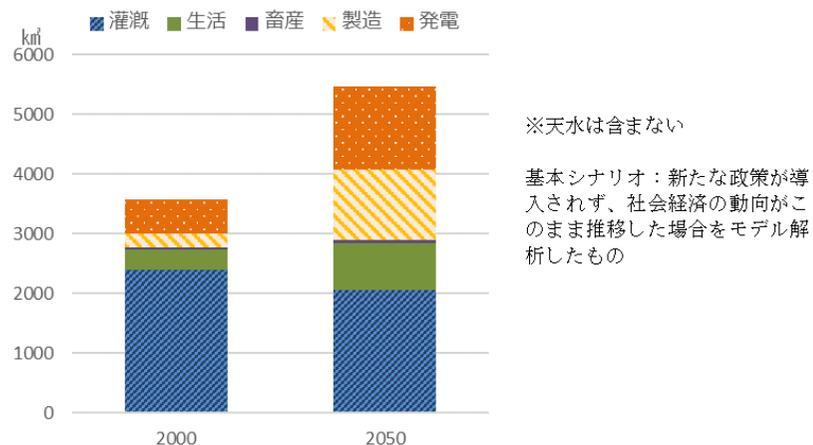
水資源も枯渇すると言われている。経済協力開発機構 (OECD) によると、2000 年時点で世界の水需要の約 3 分の 2 は灌漑用水が占めていた。水需要は、人口増加に比例して生活用水が増加するのはもちろん、発電や工業用水の需要が拡大するため、2000～2050 年の間に全体で約 55%増加すると予測されている<図表 5-3>⁶。2050 年には世界人口の 4 割に当たる 39 億人が深刻な水不足に見舞われる可能性があるという。OECD の予測では、農業技術の進展により灌漑用水の需要量自体は減少が見込まれているが、他の用途

⁴ FAO, “World agriculture: towards 2030/2050”, Jun.,2006.

⁵ FAO, “FAOSTAT Analytical Brief 31”, 2021.ほかに森林伐採や泥炭地の劣化など土地利用の変化の過程で発生するものが 7%、農作物の生産前および後の工程で発生するものが 11%となっている。

⁶ The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), “Environmental Outlook to 2050”, Mar.15, 2012.

図表 5-3 世界の水需要予測：2000 - 2050 年



(出典) The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), “Environmental Outlook to 2050”, Mar.15, 2012.

との水の奪い合いになることも考えられる。しかし、だからと言って、海水から真水を作り出すような力技を新たな水源として採用するのはコスト効率が悪く、その手法は持続可能性が低いものとなるだろう。

以上のとおり、増大する食料需要を賄うだけの食料の増産と、食料生産における環境負荷の軽減は、将来に向かって世界の重大な課題となっている。次項では、食料の増産と持続可能性の両立の実現する可能性があるテクノロジーに焦点を当てる。

◀BOX▶ 深刻さを増すフードロス⁷、温室効果ガスの排出要因にも

食料不足を解決するためには、フードロス（食品ロス）の削減も求められる。フードロスの特徴の一つとして、先進国では消費段階でのロスが多いのに対して、途上国では生産・保管・加工の段階で多くのロスが発生していることが挙げられる⁸。途上国では保管技術の低さや交通インフラが整っていないばかりに収穫しても腐ったり傷んだりするケースが多い。一方、先進国では、食品の外観品質基準の厳しさや賞味期限に対する過度な懸念、買いすぎを理由として、卸小売、外食サービス、家庭で廃棄される量が多い。

2021年に発表された、世界自然保護基金（WWF）と英国の小売り大手テスコの報告書「Driven to Waste」では、全世界で25億トンものロスが発生していることが示された⁹。これはFAOが2011年に発表した13億トンの約2倍の量に相当する。また、世界で生産される食品の40%が廃棄されていることも判明した。従来はロスの割合は3分の1程度（約33%）とされていたので、こちらも従来の推計値を上回っている。WWFによれば、これまでは農場で発生するロスが低く見積もられてきた。報告書ではさらに、経済発展に伴って、将来食品ロスが増える可能性も指摘されている。

フードロスはごみとして焼却されるためCO₂を排出する。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、2010～2016年に排出された温室効果ガスの最大の排出源のひとつとして食品ロス（8～10%）を挙げている¹⁰。フードロスは地球温暖化の一因にもなっている。

⁷ 日本でいう「フードロス」は英語の「Food Loss and Food Waste」を指している。FAOは食品の生産から流通で生じたロスを「Food Loss」、小売や外食から家庭間のロスを「Food Waste」と定義している。本来食べられるのに捨てられてしまう食品を指す「食品ロス」という用語があるが、本稿ではフードロスを食品ロスと同義で使う。

⁸ FAO, “Global food losses and food waste”, 2011.によれば、途上国ではロスの40%以上が収穫後や加工段階で発生しており、他方、工業化された国々では40%以上が小売りや消費者レベルでロスが発生している。

⁹ World Wildlife Fund (WWF), “Driven to Waste”, Aug.19, 2021.

¹⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change and Land”, 2019.

2. 食と農を変える技術革新

世界の食料需要は増大するが、その生産は持続可能性とのバランスを図りながら進めていく必要があり、農業は手法の転換を迫られている。この課題を解決するために、様々な先端技術の開発と活用が期待されている。

(1) 農業 DX、ゲノム編集、微生物研究

◆ロボットや ICT、AI の導入で急速に自動化・精密化が進む

2050 年の農業について一つだけはっきり言えることがある。それは、今よりもはるかに機械化と自動化が進んでいるということだ。農業分野においても近年、デジタルの活用が進んでいる。ドローンや衛星を利用した作物の生育状況の監視、収穫ロボットによる農作物の自動収穫、AI 解析による収穫高の予測などはもはや目新しいものではなくなっている。

ロボットトラクターは有人監視下での無人自動走行（レベル 2）が既に実現している。遠隔監視下の完全自動走行（レベル 3）も 2030 年頃には実用化されているだろう。ただ普及にはやや時間がかかるかもしれない。広く行き渡るには製品の技術面よりもむしろ、凸凹が多い農道の整備だったり、高速通信の普及だったりといったインフラ整備のほうが課題になりそうだ。それでも 2050 年には無人トラクターや無人コンバインが田んぼや畑を縦横無尽に走り回っているだろう。

自動化と並行して、農業は精密農業の時代に入る。VRT（Variable Rate Technology：可変作業技術）による施肥や農薬散布も今後は当たり前になっていく。VRT とは、畑に水や肥料・農薬を均一に散布するのではなく、小さく区切った圃場をエリアごとに管理し、その状態にあわせて投入物を調整する技術である。これにより環境への負荷を低減させるとともに、肥料・農薬の使用量を抑えてコスト低減にもつなげることができる。

◆ゲノム編集によってデカフェのコーヒー豆を栽培可能になる

デジタル以外ではゲノム編集が食と農に大きなインパクトを与えるだろう。本来、その個体が持っていない遺伝子を外部から導入する遺伝子組み換えとは異なり、もとの個体のゲノムに変異を誘導することで細胞の特性を変える技術である。ゲノム編集にはいくつかの手法があり、そのうち最もよく使われているのが「CRISPER-Cas9」と呼ばれる手法である。

2020 年にノーベル化学賞を受賞したことで知られる CRISPER-Cas9 は、狙った配列の遺伝子を切断して機能しなくさせることができる。これを応用すれば、例えばカフェインを作る遺伝子をノックアウトして、カフェイン抜きのコffeeを生産することが理論的には可能になる。また、遺伝子には特性を出す遺伝子と抑える遺伝子の両方があるので、特性を抑える遺伝子を潰すことで、より特性を強調した食料を生産することもできる。その例として栄養価の高いトマト、高収量のイネ、筋肉量を増やした肉厚の真鯛などが挙げられる¹¹。

ほかにも病原菌に耐性を持つ作物、温度変化に強い作物、水をあまり必要としない作物など、いろいろな可能性が考えられる。ゲノム編集で光合成を加速させ作物の成長を早める研究も行われている。今後 20～30 年の間に収穫量を改良するためのイノベーションが開花するだろう。

◆微生物の謎が解明され土壌づくりが変わる

2050 年には、土壌内の微生物についての知識が深まり、土壌作りも大きく進化しているだろう。近年、ほとんどの植物が土壌内細菌と共生関係にあることがわかってきた。

ヒトが食べたものの一部が腸内の微生物によって分解され吸収されるのと同じように、植物が吸収する養分もまた土壌中の微生物が土壌有機物を分解

¹¹ サナテックライフサイエンスの「GABA 高含有トマト」、農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）の「高収量イネ」、近畿大学の「マッスル・マダイ」など。

することによって作られる。これを応用し、有用な菌を土壌に加えることで、植物の成長スピードを早められる可能性がある。また、腸内細菌の改善が病気の治療や予防につながるように、微生物を制御することで病害に強い作物の生産が期待される。

現時点では細菌と作物の味、色艶、栄養価との相関は未解明の部分が多いが、今後、土壌中の微生物の解析が進むにつれて、微生物を利用した新たな土壌改良の手法が次々と生まれるだろう。それによって化学肥料の使用量を減らし、環境負荷の低減につながることも期待されている¹²。

(2) 培養細胞から作る肉

2050年には細胞培養によって多くの食品が工場で製造される。動物をいっさい使わない培養肉が食卓に並び、卵や牛乳もアニマルフリー製品が主流になる。

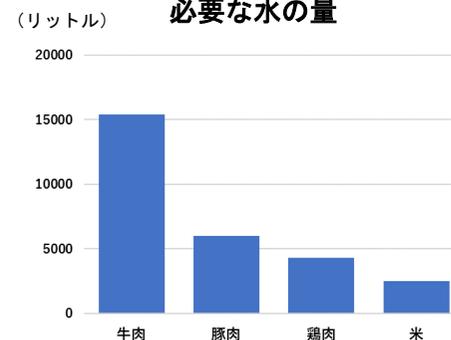
◆畜産業の限界

培養肉の話をする前に畜産業の不都合な事実に触れなければならない。人口増加による食料不足の懸念は取りも直さずタンパク質不足の懸念であるということは既に述べた。食肉需要が増大しても畜産物を増産して供給が追い付くなら問題はない。しかし、現行の畜産業は持続可能性の低さが問題となっている。

食肉の生産には大量の水と飼料を必要とし、中でも牛肉の生産は環境に与える負荷が大きい。牛肉の生産に必要な水の量は、豚肉の約2.5倍、鶏肉の

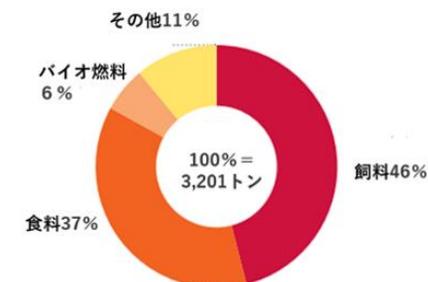
約3.5倍にのぼり<図表5-4>、牛肉1kgを生産するには11kgの穀物が必要である¹³。世界の農作物の収穫量のおよそ半分(46%)が飼料用作物であり、これは人間が直接食する量(37%)を上回っている<図表5-5>。

図表 5-4 肉1kgの生産に必要な水の量



(出典) Water Footprint Network ホームページ <<https://waterfootprint.org/product-gallery/>>

図表 5-5 農作物の用途 (2018年)



(出典) AT Kearney, “How will Cultured Meat and Meat Alternatives Disrupt the Agricultural and Food Industry?”, 2019.

大量の穀物を生産するためには広大な土地も必要だ。地球上の土地の27%が畜産業に使用され、全ての農業用地の77%が放牧と穀物の栽培に使われている¹⁴。

畜産業が排出する温室効果ガスも問題となっている。FAOの試算によれば、人類が排出する温室効果ガスの14.5%が畜産業に由来し、そのうち65%を牛が占めている¹⁵。

以上の不都合な事実を踏まえれば、今のやり方のまま肉類や乳製品を増産し続けるのは、地球環境にさらなる負荷を与えることが明白である。

¹² 化学肥料は食料生産に欠かせないものである一方、脱炭素と窒素循環の観点で課題がある。例えば窒素肥料の生産および使用において排出されるガスは、温室効果ガス排出量全体の2.1%を占める。また窒素は作物の栄養として吸収されるのは半分程度であり、残りは大気や河川に流出して温室効果ガスや河川の富栄養化の原因となる。

¹³ 農林水産省「知ってる？日本の食糧事情～日本の食料自給率・食料自給力と食料安全保障～」(2015年8月)

¹⁴ Our World in Data, “Half of the world’s habitable land is used for agriculture”, Feb.16, 2024. 元データはFAO。

¹⁵ FAO, “Tackling Climate Change through Livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities”, 2013.

◆培養肉が食卓に並ぶ日

予測されるタンパク質不足に対応するには、従来のタンパク源の増産に取り組むだけではなく、家畜に頼らないタンパク源を作り出すことが不可欠だ。「代替タンパク質」と呼ばれるジャンルであり、植物由来の代替肉、動物細胞を使った培養肉、微生物を使った培養牛乳や培養卵、昆虫食などが挙げられる。中でも革新的なのが培養肉だ。

培養肉は動物の細胞を組織培養して人工的に作られた肉である。動物を屠殺する必要がなく、畜産業に付随する倫理、環境、衛生面での問題を多く解決できることから、別名「クリーンミート」と呼ばれている。

牛や豚、鶏などから採取した筋幹細胞を培養液に浸し、栄養素、成長因子を入れたバイオリクター（培養装置）で増殖、筋繊維を組成し、その筋繊維を積み重ねて筋組織を形成するのが、一般的な製造方法である。肉牛であれば生育に2、3年かかるところ、培養ビーフは数週間で製造できる。

培養肉が世間に広く認知されたきっかけは、2013年にオランダのマーストリヒト大学のマルク・ポスト教授がロンドンで開催した世界初の培養肉バーガーの試食会である。このバーガーパテは1個製造するのに33万ドル（約3,500万円）かかったという。その後、米 Memphis Meats が生産コストの削減にいち早く成功し、2016年に培養ミートボール、2017年に培養チキンを世界で初めて開発した。2020年にはシンガポールで米 Eat Just の培養鶏肉の販売が世界で初めて認可された。イスラエルの Aleph Farms は、2019年にそれまで難しいとされていた厚みのあるステーキ肉を開発。その後、動物血清（胎児牛の血から抽出する成分）を使わずに培養牛肉の製造に成功し、2024年にイスラエルで販売認可を得た¹⁶。

培養肉の目下の課題は生産コストの低減と量産化である。将来的に培養肉は巨大な装置産業になっていくことが予想される。一方、畜産による環境負

荷はなくとも培養施設におけるエネルギー効率やCO₂の排出など、畜産とは違った側面で環境への配慮が求められる。

◆培養肉は消費者に受け入れられるのか

培養肉が注目される背景には、環境問題のほかに動物の福祉（動物愛護）の観点がある。特に最近では、欧米の消費者は環境問題以上に動物の福祉に高い関心を持つ傾向がある。一方で、人工的に製造された培養肉には嫌悪感を抱く人々も少なくない。特に欧米は食肉の大量消費国でもあるため、培養肉反対派と動物愛護派との間で激しい対立が見られる。培養肉については、環境面のメリットや倫理的な側面を訴えるだけでは、特定の層にしか受け入れられない可能性が高い。なぜなら多くの消費者にとっての関心事は、CO₂の排出量でも倫理でもなく、味、価格、安全性、便利さ、手軽さなどだからだ。反対にこれらがクリアされれば、多くの消費者に受け入れられる可能性が高まり、今は嫌悪感を持っている人も、案外あっさり受け入れるかもしれない。そうなれば結果として動物愛護派の主張が実現する形になるだろう。

◆動物を使わない乳製品・卵

代替タンパク質の分野では、動物を使わない乳製品や卵の製造に挑戦している企業も増えている。これらの企業は動物から採取した細胞を使うのではなく、微生物と発酵技術を活用している。米 Perfect Day は、牛のDNA配列を組み込んだ遺伝子組み換え酵母を作り、その酵母の働きを利用して砂糖を発酵させ、乳タンパク質を生成することに成功した。生産過程では牛は使われていないが、得られたタンパク質は牛乳と同じ栄養価を持っている¹⁷。遺伝子組み換え酵母は最終的に除去されるので、完成品はGMOフリー（遺伝子組み換えをしていない）食品となる¹⁸。

¹⁶ Foovo「アレフ・ファームズがイスラエルで培養牛肉の承認を取得 | 牛肉では世界初」（2024年1月18日）

¹⁷ Perfect Day ホームページ<<https://perfectdayfoods.com/>>

¹⁸ ポール・シャピロ「クリーンミート 培養肉が世界を変える」（2020年）

米 The EVERY Company (旧 Clara Foods) はアニマルフリーな卵白タンパク質粉末の開発に成功している。この卵タンパクを使って 2021 年には溶解性の高い粉末プロテイン「EVERY ClearEgg (現 EVERY Protein)」を商品化。さらに 2023 年には世界初の液卵「EVERY Egg」を発表した。

微生物(酵母)と発酵技術によるタンパク質の生成は、環境・倫理の観点に加え、動物の飼育過程で生じる細菌汚染のリスクが低いことや、賞味期限の長期化が期待できる点でもメリットが大きい。アニマルフリーのミルクや卵白は、2050 年には代替食品として広く流通していると予想される。

(3) ビル内で野菜を栽培

地球上で農業が可能な土地は限られている。加えて土地を確保するために森林伐採が進み、地球温暖化や生物多様性に影響を与えているという指摘もある。2021 年の国連気候変動枠組条約第 26 回締約国会議(COP26)では世界 140 カ国余りが、2030 年までに森林破壊・荒廃を止め、反転させると宣言した。欧州連合(EU)では、森林破壊防止のためのデューディリジェンス義務化に関する規則が 2023 年 6 月に発効された。こうした動きを見れば、2040 年頃には、森林伐採による農地の拡大は地球温暖化を加速させる元凶だとして、国際ルールにより制限されるようになっていても不思議ではない。

将来、農地不足となる懸念が強まる中、持続可能な農業を目指して、土壌を用いない農法や、ビルやコンテナの中で作物を生産する完全制御型の植物工場といった、従来の農業のイメージを覆す代替手法が登場している。

◆土壌の代わりにフィルムを使う

自然の土壌を使わず、フィルムを利用して作物を育てる方法を開発したの

は早稲田大学発ベンチャーのメビオールだ。「アイメック」と命名されたその手法は、土の代わりに hidroゲル製の薄いフィルムを使用する¹⁹。フィルムには水と養分だけを通すナノサイズの穴が無数にあり、作物はフィルムの表面に根を張り、そこから必要な水分と養分を吸収する。特殊なシートが水と肥料が漏出を防ぐので、従来の農法に比べて水と肥料の使用量が大幅に少なくてすみ、砂漠やコンクリートの上での栽培も可能だという。同社はこれまでに高糖度のトマトの栽培で実績をあげている。トマト以外にもメロン、イチゴ、パプリカ、レタスの栽培に応用されており、将来、農業の環境面での課題を解決する手法として期待されている。

◆農地を垂直に積み重ね、都市やビル内で栽培

植物工場は次世代の農場として期待されている。土地がないなら建物の中で作物を育てようという発想だ。植物工場では、農地を垂直方向に何層にも積み重ねる「垂直農法」が採用される。垂直農法の利点は、農地を 20 段、30 段と積み重ねるので、都市部の限られた土地やビル内でも栽培可能なことだ。植物工場は、光、水、温度、湿度、CO₂濃度などを人工的に管理して植物を計画的に生育するシステムであり、年間を通じて安定した収穫が期待できる。また水の循環システムを導入することにより、従来型の農法よりも水の使用を最大 98%削減できるという報告もある²⁰。地球全体で水不足が深刻化する中でこれは大きな意味を持つ。さらに都市部に植物工場を建てれば、輸送距離を短縮できる。

世界最大規模の垂直型農園を運営している米 Aerofarms は、敷地面積 6,500 m²の古い工場を改装し、太陽も土も使わずに年間約 90 万 kg の薬物野菜を生産している²¹。AI 制御の LED 照明がさまざまな品種の生育に最適な

¹⁹ 日本政府広報室「どこでも、誰にでもできる農業を可能にするフィルム農法」(2022 年 4 月)

²⁰ WEF, “How vertical farming can save water and support food security”, Jun.20, 2023.

²¹ Aerofarms ホームページ<<https://www.aerofarms.com/>>

波長の光を当て、また肥料は直接作物に噴霧されるため土壌は必要ない。栽培プロセス全体はセンサー、カメラ、機械学習によって管理されている。

建物の中ではなく、コンテナ内で栽培する事例も出てきている。米ボストンを拠点とする **Freight Farms** はコンテナ型の植物工場を都市に設置し、近隣のレストランに届けるビジネスを展開している。「アーバンファーミング」と称し、消費地の側で生産することで輸送コストの低減などに取り組んでいる。同社によれば、1つのコンテナで毎週900個のレタス栽培が可能であり、また伝統的な農業手法に比べて水の使用量を99.8%減らすことができるという。

◆植物工場は持続可能か

水不足、土地不足問題を解決する切り札にも思える植物工場だが、ビジネスとしてはまだ課題が多い。最大の課題は莫大なエネルギー消費である。土地や水の消費量が減ってもエネルギー消費量が多くては環境負荷が低いとは言えない。電力価格の変動に弱いことも浮き彫りになってきている。これまでのところ成功しているのは一握りの企業である。欧州最大の垂直農法企業 **Infarm** は2023年に複数の国で破産を宣言した。

このように現状では苦戦している植物工場だが、2050年には栽培エリアを検討する際に実用的な選択肢になっているだろう。特にエネルギーコストが低く、人々に購買力があり、かつ野菜の露地栽培が難しい中東では、都市型植物工場が発展していくと思われる。さらなる普及には再生可能エネルギーや余剰エネルギーを使用して自給自足できるシステムを構築していくことが課題だろう。

◆現実味を増す陸上養殖

海で育つ魚介類を陸地の設備で育てる陸上養殖（閉鎖循環式、以下同じ）も次世代ファームとして期待されている。植物工場の魚バージョンである。陸上養殖は建物内に閉鎖循環システムを作り、完全人工管理下で養殖する。水槽やポンプ、ろ過槽などを用いて人工海水を循環させ、水質、水温、エサは完全に管理され、受精卵から成魚を育てる²²。

現在主流の沿岸養殖は餌などで海が汚れるほか飼育場所が限られることが難点だが、陸上養殖は環境負荷が小さいうえ設置場所の自由度が比較的高いのが利点である。ノルウェーなど漁業先進国で先行し、国内でも水産大手や新興企業が事業化に向けて動き始めた。

ニッスイは鳥取県でマサバの陸上養殖を事業化した。鹿児島県ではバナマイエビの陸上養殖も手掛ける。屋内飼育のため外部から病原体が侵入するリスクが低く、抗生物質を投与せず育てるため生食できる。

陸上養殖は飼育難易度が高く、まだ実証段階の取り組みも多いが、異分野からの参入者が多いのも特徴だ。巨大な水槽の温度管理・水質管理が肝となるためIoT（モノのインターネット）技術が不可欠であり、自動化、遠隔操作も極めなくてはならない。そのため水産会社だけでなく、電力・鉄道などのインフラ企業、メーカー、通信会社など異業種の参入が多くみられる²³。

飼育難易度に加えて、初期費用と運営コストの高さが現時点では課題だが、水温の上昇といった環境変化も重なって海上での養殖に限界がみえてきたこともあり、代替として需要を高めている。今後の技術進展で陸上養殖が定着すれば、2050年には魚が動物性タンパク質の主要な供給源となっていることも考えられる。

²² 陸上養殖には、閉鎖循環式のほかに、取水ポンプで海水を取り入れて汚れた水を排出する「かけ流し式」や、一部を排水・取水して残りを循環させる「半循環式」などがあるが、ここでは「閉鎖循環式」の陸上養殖のみを次世代ファームとする。

²³ 例えば、関西電力、JR西日本、NTT、ソフトバンク、カナデビア（旧日立造船）などが参入している。

(4) 海や宇宙で農業も

2050年には海の上で酪農を営み、海中で野菜を栽培している。宇宙ステーションや月面基地など地球外での農業も可能になっている。

◆海に浮かぶ酪農場、海底菜園、土地不足に対する試み

現在、世界の陸地の11%が農作物の生産に使用されている。これは地球全体の表面積のわずか3%にすぎない。もし地球の表面積の70%を占める海洋で農業が可能になれば土地不足の問題をクリアできるかもしれない。その試みはもう始まっている。

オランダのロッテルダム港には酪農場が浮かんでいる。2019年に竣工された「Floating Farm」と呼ばれるこの施設は、はしけとしても機能する下層フロア、乳製品の加工・販売などを行う中層フロア、40頭の牛が生育する上層フロアの3層で構成されている<図表 5-6>²⁴。水中にある下層フロアには雨水のリサイクル設備などがあり、中層フロアには給餌システムや糞尿処理施設がある。ソーラーパネルが併設され、海水を利用するための淡水化技術も備えている。また、循環経済の実現を目指し、地元の公園の草や地域から出た食品廃棄物を牛の餌とし、生産した乳製品は市内のスーパーに卸している²⁵。

図表 5-6 海に浮かぶ酪農場



(出典) Freethink, “Floating Farm Takes Sustainable Agriculture to the Next Level”, <<https://youtu.be/eIBu3sQa8j8>>

²⁴ Floating Farm ホームページ<<https://floatingfarm.nl/>>

²⁵ earth sustainability 「オランダ・世界初の水上ファーム！気候変動と食料危機に適応できる？」(2024年7月23日更新)

²⁶ nemo's garden ホームページ<<https://www.nemosgarden.com/>>

イタリア沿岸では海中で植物を栽培する実験が行われている。海中栽培に挑むのはダイビング会社のオーシャンリーフグループで、実験施設は「ニモのガーデン」と呼ばれる。プラスチック製の球体構造物であるバイオスフィアには水耕栽培装置と空気循環用のファンを設置

図表 5-7 海底のバイオスフィア



(出典) nemo's garden ホームページ
<<https://www.nemosgarden.com/>>

し、植物を種から育てている<図表 5-7>。海面下約10~12mに設置されたバイオスフィアは、スキューバダイバーたちによって管理され²⁶、アロエ、オクラ、カカオ、バジル、マンダリンなどの水耕栽培が行われている。

水上農場や海底農場の当面の課題はコスト面である。技術面では厳しい海洋環境に耐えるだけの浮体構造の耐久性や水耕栽培システムの安定性の確保が求められる。また、土地不足を解決しても新たな環境問題を引き起こしては意味がないので、環境に与える影響を最小限に抑え、海洋生態系への影響を評価することも重要となってくるだろう。

◆宇宙で農業を行う時代

宇宙資源探査や開発はまだ実験段階にあるが、2030年代には月面基地が建設される²⁷。2040年代には月面に1,000人程度が居住し、数カ月間にわたって滞在するようになる²⁸。2050年代以降には火星にも人が滞在する可能性がある。宇宙開発が本格化したとき、その先にあるのが食料調達の問題だ。地球からすべて持っていくのは膨大なコストがかかるため、宇宙ステーショ

²⁷ 米航空宇宙局(NASA)は人類の宇宙進出の足がかりとして月を探査する「アルテミス計画」を打ち出し、2030年代までに月面基地の建設を目指している。日本の宇宙航空研究開発機構(JAXA)も同計画に参加している。

²⁸ 月面産業ビジョン協議会「月面産業ビジョン-Planet6.0時代に向けて-」(2021年7月)

ンや月、火星など地球外で作物を育てる宇宙農業の研究が進んでいる。

宇宙農業は人工的な培地やLEDなど用いた人工環境下で植物を栽培する。微小重力や無重力環境への対応から、栄養循環や廃棄物処理を含む閉鎖生態系を構築する必要がある。米航空宇宙局 (NASA) が主導する国際宇宙ステーション (ISS) での野菜栽培プロジェクト「Veggie」では、これまでにレタスなどの葉物野菜の栽培に成功している。現在の VEG-05 ではトマトの栽培が試みられている<図表 5-8 >。

図表 5-8 ISS で栽培されているトマト



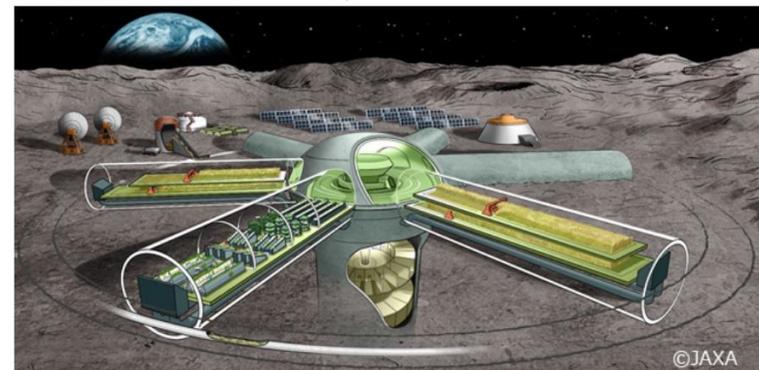
(出典) 米航空宇宙局 (NASA)

月面での長期滞在が現実味を帯びる中、「月面農業」の研究も進んでいる。日本では宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が人類活動に必要な食料の「月産月消」を目指し、「月面農場」の実現に向けたプロジェクトを進めている<図表 5-9 >^{29 30}。

月面農業においては、無重力の完全閉鎖空間である ISS で行う農業とは違ったアプローチが求められる。地球の約 6 分の 1 である重力への対応をはじめ、昼は 127℃、夜はマイナス 173℃という極端な温度変化への対応、大気や磁場に守られていないため、宇宙放射線から植物を保護するためのシールド技術や耐放射線性の高い品種の開発が課題となる。水資源の確保も大きな課題だ。月の極地域には氷が存在する可能性があり、これを利用する研究が

図表 5-9 月面農場のイメージ

イネや野菜を栽培する植物工場のような施設に 100 人規模が生活することを想定した居住空間が設けられている。



(出典) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

進められている。さらに、月の土壌 (レゴリス) には有機物がほとんど含まれていないため土壌改良が必須である。JAXA の月面プロジェクトには民間企業も参入している。「高機能ソイル³¹」を活用した次世代の作物栽培システム「宙農 (そらのう)」を開発しているスタートアップの TOWING は、この高機能ソイルの技術を活用した宇宙農業の実現に取り組んでいる³²。

月面農業は、2030 年代後半から 2040 年代にかけて、半地下ドーム型月面農場が創成され、同時に動物細胞を用いた月面牧場のチャレンジが始まる。太陽光と月の水を活用し、人工光合成で水素を作り、燃料電池で電力を得て、宇宙農業が行われる。月面で植物栽培、農業技術を習得できれば、2060 年代以降の火星上の農業による食料生産の道も開けるだろう。

²⁹ JAXA 「月面農場ワーキンググループ検討報告書」(2019 年 6 月)

³⁰ UchuBiz 「月面農業とは-レゴリスに植えた作物は正常に育つか、宇宙農業との違いは」(2023 年 11 月 14 日)

³¹ 植物の炭等の多孔体に微生物を付加し、有機質肥料を混ぜ合わせて作られた人工の土壌。土壌づくりには通常 3~5 年くらいかかるが、高機能ソイルは約 1 カ月で良質な土壌となるという。(TOWING 「地球上における循環型農業の発展と宇宙農業の実現を目指す TOWING、プレシリーズ A で約 1.4 億円を資金調達」(2021 年 12 月 20 日))

³² 日本政府広報 「世界の農業を変え、宇宙農業を実現する『高機能ソイル』」(2023 年 1 月)