

1. はじめに（著者まえがき）

本稿では、「垂直型の食品製造」という、昨今話題の「垂直農場」と類似する概念に着目する。まず、「垂直農場」とは、高いビルで植物を温室栽培（または人工光栽培）する植物工場に代表されるような生鮮品製造現場を指し、近年では、内水面養殖、昆虫生産などの動物資源の製造現場も含むことがある。

それに対して、「垂直型の食品製造」という概念は、バイオエコノミー先進国であるフィンランドの国立技術研究センター（VTT）で作成された報告書「Food economy 4.0」（2017年1月、<https://www.vtt.fi/inf/pdf/visions/2017/V10.pdf>）に記載されている。本書では、Mass Productionの時代からSmart Consumer-Centric Productionの時代への変革に加えて、土地利用型のHorizontalな食品製造から工場型で高付加価値化するVerticalな食品製造への変革を訴え、バイオテクノロジーの高度化が鍵となる点を強調している。この概念は垂直農場と一部重複するが、敢えて別の語を使っているところに、従来型の発酵産業を巻き込んだ新展開への意志を感じる。

そこで、本稿では、「垂直農場」の現状及び「垂直型の食品製造」について紹介するとともに、地域と「垂直型の食品製造」との関係のあり方を考える際に、バイオプロセスが果たすべき役割を整理することとした。

2. 垂直農場

土地利用型（水平型）の農産物生産に対する、広大な土地を使わずに縦型の設備で農産物を製造する「垂直農場」という概念が注目されており、すでに植物工場での野菜製造プラントが国内外で稼働している。例えば、MIRAI株式会社では、植物工場の革新性として、「従来農業と比較した際に、土地面積あたりの生産性が50–100倍」、「農薬不使用」、「水使用量が従来農業の50分の1」等の利点を挙げている（<http://mirai-group.jp/#plantfactory>）。また、垂直農場の多様な形態の一つとして、魚や海藻の養殖ユニット、昆虫養殖などを水耕栽培に組み込んだ水・資源循環システム（「アクアポニックス」）にも期待が集まりつつある。

垂直農場が注目される背景には、人口増大に対応する食料供給力拡大の限界、世界の気候変動幅の増大による農産物供給リスクへの懸念、農地拡大による生態系破壊への懸念等に加えて、食料・資源管理のスマート化に係る国家戦略などが存在するものと思われる。また、垂直農場は、都市型農業のためのツールとしての役割が強く期待されている。その際には、水平型農業生産による競合品に対して、その価格差を埋めるため、都市消費者への通年供給、品質管理の高度化とロス低減、輸送コスト低減と流通安定化をアピールするものと考えられる。その一方で、高度な品質保証を実現するためには、品目、品種、設備詳細や運転条件が厳密に決められた条件でハード・ソフトをパッケージ化する必要がある。

Benke & Tomkins (2017) は、過去に、垂直農場技術における最大の問題と指摘されてきた、太陽光受光の不均質化及び高いエネルギー消費量の問題は、回転型栽培による受光平準化、LED 照明の使用、太陽光発電、バッテリー能力の向上等の技術革新によって解決されつつあるとしている。それらに代わる課題として、高い都市地価を含めた初期投資、品目拡大、大量生産、熟練技術者の確保、潜在的な地域農業への脅威、そして環境保全技術としての役割を果たすための技術上の課題を挙げている。また、人工的な製品という印象を持ち込まないような配慮が重要とのコメントも記されている (Sustainability: Science, Practice and Policy, 13, 13-26 (2017))。

3. 垂直型の食品製造

「Food economy 4.0」には、垂直型食品製造に関する以下の文章が記載されている (仮訳、要約): 「フィンランド国内で肉の摂取量が増す一方で、世界規模では野菜ベースの栄養摂取を促す取組が増え続けており、同時に、持続可能で倫理的に生産された食品に対する消費者の関心も高まっている。植物性タンパク質の需要と使用量が増す中で、野菜ベースの食品代替品に加えて、新たな食品製造技術、昆虫供給技術や、バイオテクノロジーによる食品原材料の製造が重要と考える。これらの技術によって、栄養成分使用が水平型の生産技術よりも効率的な、工場型の垂直方向の食品製造への移行が可能となる。この移行は、狭いスペースでのフードチェーンの原料の効率的で工場風の生産と、クローズドバリューネットワークでの無駄のない食料生産と生産を実現するものである。」。

この「垂直型の食品製造」の中には、水耕栽培に加えて、「昆虫養殖に基づく食品およびタンパク質の生産、そして栄養素に加えて食品製造に利用される添加物またはミネラルを生産することができるような、バイオリクターでの細胞培養の生産が含まれる。」としており、「微生物と細胞培養に基づくバイオテクノロジー食品生産は、将来的には、持続可能な Food economy 4.0 の重要な部分と見なされる。」と強調している。また、本書では、「バイオテクノロジー食品生産用の基質の開発は、食品の大量製造の際に極めて重要となる。 Food economy 4.0 では、栄養価の高いサイドストリームと持続可能な方法で製造された原材料を、有価物生産のための微生物の飼料 (基質) として使用する。」と記している。

このように、「Food economy 4.0」における垂直型の食品製造産業では、垂直農場の考え方を拡大し、発酵産業の役割を拡大・強化した形で組み込むことも想定している。我が国のバイオ産業を強化するためには、このような新たな概念を基にして、伝統的発酵食品製造の強みを活かし、独自の地域産業技術として組み立てることが重要と考える。

4. 地域産業の個性化・多様化のチャンス

これらの垂直方向の技術は、未来型の都市農業スタイルとして説明されているよう

に、高品質で持続性をもつ食品を都市部の富裕層に安定供給し、サイバー空間で需給管理することをビジネスモデルとして想定している。その一方で、これらにおける具体的な宣伝戦略をみると、必ずしも地域農林水産業との相乗効果が期待できるものばかりでないことに気づく。垂直農場における生産物を水平型農産物と差別化するため、「農薬不使用」、「害虫汚染なし」、「規格外品が少ない」、「生態系破壊が少ない」等のようにアピールする例が少なくない。著者の私見となるが、購入した果物や野菜の内側に虫が隠れていたりすると、調理時には少なからぬストレスを招く。また、低品質な食品素材の混入は、中食・外食産業では、原料コストや作業効率、そして消費者からのクレーム数やリコール数にも直結するリスク要因となるものと推察する。直感的には、垂直型の食品製造業が供給する素材・製品は、合理的な価格となった時点で、消費者や事業者から選択される機会が増し、持続的社会に貢献しているという達成感が手伝い、普及が加速する可能性があると考ええる。さらに、細胞培養により製造する人工肉（培養肉）は、畜肉物に対する代替物として開発されており、もしも同等の食味・食感や栄養が確保されたものが完成すれば、その畜肉との主たる相違点は、生命の形、新技術への受容性や環境負荷となろう。

このような中で、この垂直化への動きを踏まえつつ、地域で食品製造技術を開発する際には、1)「地域が対抗・棲み分け」、2)「両者が相補・連携」、そして3)「地域でも製造」という整理を行うことになるものと考えられる。

4-1 「地域が対抗・棲み分け」のための技術開発

先の説明とは逆に、垂直型のプロセスで製造した食品に対して、地域農林水産業が製造する水平型の食品が価値をアピールする場合には、価格面、そしてその他のメリットを強調しつつ、垂直型製造物に対抗できるよう品質向上、供給安定、エネルギー消費低減等に関して高度化を図る必要がある。高度な虫害防除技術、病害予察、非破壊検査・管理技術などが重要となろう。また、水平型食品製造の果たす役割の例として、畜産業は、大量の有機資源を高度利用・循環するための重要な工程となっている。具体的には、日々食品製造現場で産出する食品製造副産物、食品残渣などが、飼料用途に供されることで家畜の成長に役立ち、その糞尿はバイオガスや堆肥に変換される。堆肥は、農地の地力維持及び土質改善の役割を果たす。食品製造現場としては、毎日発生する有機物を産業廃棄物として貯蔵・処分する手間とコストを省き、毎日、家畜の口に運ぶことで販売益を得る。また、農産廃棄物である稲わらを飼料用途に供することで、農家も販売益を得ることができる。

水平型農業が資源循環に果たす役割は、畜産業以外の場所でも存在する。根粒菌の空中窒素固定能力、菌根菌（菌根により植物と共生する菌）によるリン吸収促進なども、水平型農業がもたらす資源循環の姿である。このような広い地域、長い時間軸での資源循環の役割をアピールすることで、垂直型の食品製造とは別の価値を提供できることを示し、両立への理解を促すことができる。その他にも、水平型の農林水産業は、水涵養、景観維持、里山保全等を通じて、農山漁村の存続に不可欠な役割を担う。

垂直型の農場で得られたレタスとの差別化を図るため、“水平農場レタス”と強調表示して棲み分けることも可能となろう。

水平型の食品製造については、我が国、そして世界の食料安全保障に貢献するような、良質な食料の安価・安定（大量）生産基盤としての役割が強く期待される。それに対して、垂直型の食品製造では、現在のところ、食料安全保障上の貢献度はあまり高くないと考えられる。しかしながら、太陽光・風力、バイオガス発電等のオフグリッド電源（広域電力供給網から独立した電源）の導入によって災害時における自動的な安定生産ができるようになれば、局所的災害時における都市への野菜の供給、特に冬季の供給や孤立地域における供給にメリットを示すものと考えられる。そして、垂直型食品の大量製造の可能性についても、「もしも、ニューヨークの超高層ビル三分のスペースで垂直的に小麦を栽培すれば、860万人のニューヨーク市民による消費分を賄える」との試算がなされている（<https://www.fcrn.org.uk/fcrn-blogs/michaelwhamm/feeding-cities-indoor-vertical-farms>）。大量製造のための障壁は、経済性を除けば、さほど高くないのかも知れない。宇宙ステーション、ロケット内、移住後の異星での食料供給などを夢想すると、そこでは垂直型食品の大量製造技術が完成していなければならない。今後、垂直型食品製造の規模拡大に関するニーズは、穀物需給の不安定化や慢性的供給不足などの資源問題に対応して拡大するものと考えられる。

4-2 「両者が連携・相補」のための技術開発

ここでは、都市部に存在する垂直型食品製造工場と、地域資源利用への取組をリンクさせることで、都市・地域双方の発展に繋げるための取組を考える。垂直農場を考えてみると、究極のシステムを考えた場合でも、アウトプットとなる野菜等の化学組成に対応する成分を継続的に工場内に運び込む必要がある。例えば、レタスならば、有機物の基となる二酸化炭素、ミネラル及び水となる。魚類、昆虫や人工肉など、動物性の食品を製造したり、組織培養によって幼苗を大量製造したりする場合には、餌料、培養時の有機性基質、ホルモンなども必要となる。それに加えて、特定の垂直農場での生産物を個性化・付加価値化する際には、高度不飽和脂肪酸、必須アミノ酸、抗酸化成分などの添加により、価値をアピールすることが可能となる。これらの添加成分は、地価の高い都市部ではなく、地域での製造に適しており、地域から複数の都市型垂直農場に提供できる。植物栽培、組織培養または微生物培養により有用物質を製造・抽出するような工程を地域に導入することで、都市部における垂直農場を支えるための地域バイオ新産業を創出できる。

地域の水平農場で生産された特産品としての農畜水産物を、垂直型の食品と組み合わせたメニューとすることで、双方の食品への需要を喚起するという外食産業上の戦略も存在する。その際の横串としては、国産品であることに加えて、環境負荷が低い、低農薬・高品質などを考える必要があるだろう。加工・調理段階で両者の素材特性を活かし、味質、風味やその他の食感を最適化することで個性を印象づけることも大切と考

える。地域農林水産業に携わる側は、垂直型の食品に対する新規需要の潮流を理解し、都市消費・地域消費の両方を見据えて共存共栄を図るための検討が大切となる。実は、このような水平－垂直連携は、ブドウ畑に隣接する日本ワイン醸造所のような形で既に成立している。さらに、このような連携を基盤として資源循環を高度化し、価値を拡大するための取組が重要となるものと思われる。

このような組み合わせについては、食品－食品間のみでなく、食品－食器・包装資材間に関しても新たなチャンスを提供できる可能性がある。天然素材を用いた食器、生分解性の包装資材については、生鮮品の流通・消費時間が短いこと、環境意識が高い富裕消費者層が購入することなどを考慮すると、より大胆な設計やオンデマンド・小規模製造が可能となる。地域資源の小規模・高度利用のチャンスはここにもあると期待する。

垂直型の食品製造時にも、規格外品、作物根部、一次加工残渣等の副産物の発生は避けられない。また、多様な場面でフードロスが発生する。これらの有機性資源をメタン発酵に供してバイオガス発電に供する場合には、都市部での周辺住民に対する配慮や汚泥管理などが必要となる。その際に、もしも液肥利用しやすい組成のメタン発酵消化液が得られれば、近隣地域の水平型農地での利用を通じて資源循環を高度化できる可能性がある。さらに、幼苗生産現場を含めて、トレー、緩衝材、フィルター、トラップ等の消耗性資材についても廃棄処理が必要となろう。焼却・リサイクル可能な有機性素材が地域資源から製造できれば、コンスタントな需要が生じるものと期待される。

4－3 「地域でも製造」のための技術開発

都市部での垂直型食品製造プラントが普及する中で、地域にも垂直型プラントを導入する際には、(1)都市部でのケースと同様のビジネスモデルで地産地消する、(2)都市部を消費地として競争力の付与と個性化を図る、(3)地域資源特性を活かしたユニークな垂直型加工食品の製造・広域展開を図るなどの戦略を模索することになる。

(1)は、コンビニエンス・ストアのフランチャイズ新規店舗を建てるような、都市部で導入されたものと同じ垂直型プラントの設置をイメージすることになる。地域内での消費者、外食産業等に対して、輸送距離が短く鮮度が高い垂直型の産物である生鮮品等を提供することとなる。その一方で、地域ブランド化を見据える場合には、地域産業基盤となってきた水平型農場と競争すべきか、それとも協調すべきか、という立ち位置が重要となるものと考えられる。

(2)は、都市部での垂直型食品製造に対抗して、都市部に市場を求めるものである。剛直性の高い製造プロセスパッケージを少し改良し、類似製品に対するメリットを付与するための多様な取組が期待される。『4－2「両者が連携・相補」のための技術開発』の部分に記載した内容を、全て地域完結型で行うようなイメージとなる。例えば、地域の地下水を原水として用いた個性的製品を提供するなどの工夫が重要となる。

(3) では、通常の発酵タンクでの有価物製造を含めた、垂直型の食品製造技術を活かすことで、地域での個性的な新食品を製造する。加工食品の製造を想定した場合、地域から収穫される生鮮品を原料とした製造により特産化できる。また、上述したような高度不飽和脂肪酸、必須アミノ酸、抗酸化成分などを製造・添加したり、消化吸収速度の異なる炭水化物を使い分けたりすることで、栄養価、生体調節機能や適する用途を強調することが可能となる。その際には、オンデマンド製造に耐える製造原料のストック確保に加えて、フレキシブルな製造・成分調合技術の開発が重要となる。また、高機能化の手段に関しては、すでに消費者からの受容性が高い発酵微生物について、その可能性をさらに発掘し、拡大することが重要となる。

上述した「Food economy 4.0」では、可食性資源の高度利用を意識した食品製造工程の改良の重要性を訴えている。ここで、フスマに含まれる良質の可食性成分を食品製造プロセスに戻すため、コムギの粉碎技術を改良したケースを紹介している。現行の粉碎・加工プロセスを改良して、新たな素材を製造するための検討によって、思わぬ利益をもたらす可能性が期待できる。このような、非可食有機資源を高付加価値化するバイオプロセスについては、草食性家畜・キノコが非可食性資源を摂食・資化したり、昆虫が食品残渣を摂食したりすることで、可食物にアップグレードできることにも注目したい。バイオテクノロジーを活用して、発酵微生物が非可食性資源を代謝して可食性資源に変換できれば、地域有機資源利用の高度化の実現とともに、垂直型技術による国産食品製造範囲の拡大に貢献するものと期待される。

5. おわりに（著者感想）

今回の特集は、「地域に培養タンクを建てて、そこで新食品を製造すべき」という唐突な話であるため、現実感・緊迫感に欠けるように感じる人もいると思う。「今、動いている地域産業を維持するだけでも大変なのに。」と感じても仕方がない。

しかしながら、本当は、我々が正しい危機感を持っていないだけで、荒療治が必要なくらいに深刻な状況となりつつあるのではないかと感じる。大きい被害を予測し警告する科学者がいるにも拘わらず、人間社会は、鉄橋が錆びるような速度での、緩やかな劣化・破綻への認識・対応能力に弱点があると感じる。「石油が枯渇する」と子供の頃から焦り疲れた後、大人になったら無感覚に近い状態で日々を過ごすという状況と似ている。このような中で、研究者としては、産学官の別に関係なく、科学的分析に基づいて、「習慣を改善すべし」と提言・行動することが責務となる。無感覚化は、社会的動物である人間がもつ優れた脳機能かも知れないが、問題解決の敵でもある。

農林水産省「今後の我が国食産業の海外展開方策に関する検討」（成果品）
http://www.maff.go.jp/j/kokusai/kokkyo/food_value_chain/attach/pdf/haifu_chousa_29-21.pdf (2018年3月16日、デロイトトーマツコンサルティング合同会社)では、現在のメガトレンドが進展した場合、20~30年後に起こりうる変化を、政治、経済、

社会、技術及び環境の側から考察した予測として資料中に挙げている。これを抜粋・改変整理したものを記す。詳しくは資料全体をご覧ください。

1) 政治面：サイバー戦争の一般化／政府の役割低下／世界経済の接続性向上・規制緩和圧力の増大等。（これらの変化により、農薬・化学肥料・遺伝子組換え作物等に関する企業の調達基準が厳格化されて、新たな生産技術を握る企業が競争力を得る。）

2) 経済面：保護主義の台頭／先進国の停滞・新興国の成長／プラットフォームビジネスの拡大／シェアリングエコノミーの拡大／世界的な貧国の現象・中流階級の増加等。（これらの変化により、新興国の人口爆発と所得増に伴う食事の高カロリー化による食料需要が急増する。また、開発途上国の流通インフラ改善と技術向上により、生鮮食品の輸出機会が増大する。さらに、売り手市場化が進行し、各市場への確実な進出・浸透策がカギになる。そして、生鮮食品の地産地消が崩壊し、穀物だけでなく生鮮食品のメジャーが新たに誕生する。）

3) 社会面：人口 100 億人到達／ポスト成熟社会の到来／先進国内の格差拡大／メガシティ増加／慢性疾患増加・健康意識の先鋭化等。（これらの変化により、フードロスがグローバルに増加する結果、国際的フードロス規制が進み、先進国に社会的責任が一気に集中する。また、機関投資家やファンドも SDGs 的価値観に不適合な企業には投資をしなくなる結果、市場・投資家の論理から乖離した農家の生産品は大企業から避けられる。さらに、健康寿命の伸長への欲求が高まり、関連する食品や機器の需要が増進することから、食×ヘルスケアのスタンダードを握った国・企業が一大市場を獲得する。そして、宇宙観光人口が激増し、宇宙での食事が新たな市場を形成することから、食の工場生産に関する支配的技術を獲得した企業は、宇宙農業でも覇権を握ることになる。）

4) 技術面：多くの産業による無人化・自動化の進展／ウェアラブルデバイスの一般化・身体への埋め込みの進展／3D プリンタの普及／新素材の登場／スマート○○の一般化／完全自動運転車・ドローンの普及／消費者ごとにカスタマイズされたサービスの一般化等。（これらの変化により、認証やトレーサビリティ技術が一般化し、食品の産地や品質が可視化する結果、IoT 企業（電気・通信）が急成長アプリケーションとして食産業に進出強化する。また、農業の生産性向上に関する技術が大きく進展し、技術のない国が競争力を失う状況になる。さらに、農産品の工場生産技術が確立・進化し、世界中に普及・浸透する結果、農業・漁業が製造業化し、世界の食産業は多国籍企業による寡占状態になる。そして、漁獲資源の枯渇と技術の進化により、消費される水産物の大部分が養殖由来になる結果、複数の海洋・漁業国家が連携した需給調整メカニズム（+その中での覇権）が発生する。それに加えて、食料不足への懸念と技術の進展を背景に、代替食品の消費が一般化する結果、あらゆる農畜水産物が「工場」で生産可能になり、工場誘致の巧拙が地域の課題になる。）

5) 環境面：乾湿の差の拡大・平均気温の上昇／再生可能エネルギーへの移行／食

料需要の急増／水不足の深刻化／食料製造の効率化・多様化等。（これらの変化により、気候変動や資源の枯渇、土壌劣化等によって食料の供給能力が抑制される結果、新食材（無機・昆虫等を含む）市場と関連ルール形成の必要性が増大する。）

このように、様々な角度から、食産業の“激動の未来”が予測されているが、我々は、これらの予測を踏まえて変化の可能性を分析し、現れるべき兆候を見逃さず、逆算しながら遅れずに対応策を考えて行くことになる。そのためには、まず、目的を明確化した上で技術シーズを創り出す作業が必要となる。シーズ創出からスケールアップ完了までの期間、特許権の存続期間などを考慮して、20年後のための技術開発を考えた場合には、今、直ちに研究を始めるべきであろう。Food economy 4.0も、実感しにくい未来を予測しつつ、同様の意図で纏められたメッセージである。国内での衣食住の供給拠点であり生活基盤である地域を維持・発展させ続けるためには、叡智を結集し、「緩やかな破綻」に立ち向かうための「ものづくり」革新技術を創り出す必要がある。垂直型の食品製造については、国内・海外展開等を踏まえた論点整理、プロジェクト化による協調的開発研究の推進、本目的に沿う地域型バイオテクノロジーシーズの充実などが重要となるものと考えている。