日本における植物工場の現状と今後の展望*

Current Trends and Future Prospects for the Plantfactory in Japan

藤本真狩**

Makaru FUJIMOTO

Key words plantfactory, indoorfarming, Building Integrated Agriculture, vertical farming

1. 国内における植物工場の現状について

1.1 植物工場の定義・分類

植物工場とは、「高度な環境制御（温度・湿度、CO₂濃度、光量など）を行うことにより、野菜等の周年・計画生産が可能な施設園芸農業の一形態」である。さらに、植物工場は（1）温室等で太陽光の利用を基本とし、人工光による補光や夏季の高温抑制技術等を用いて栽培する「太陽光利用型（補光も含む）」、（2）閉鎖環境で太陽光を用いずに栽培する「完全人工光型」の2つのタイプに大きく分類され、完全人工光型の中でも、クリーンルームによる生産にて水洗いが不要な「無洗浄野菜」と、洗浄を必要とする野菜が存在する。ただし、植物工場に関する数値的な基準・明確な規格がないことから、各企業が生産・販売する商品の品質（栄養価や付着菌数など）には大きな差がある。

完全人工光型においても、クリーンルーム化された閉鎖環境内で生産する場合もあれば、一般的な工場・オフィスの一角にて簡易的に生産された商品も、植物工場野菜として同じように店頭にて販売されていることから、消費者に誤解や混乱を与えている懸念もある。

栽培作物については、太陽光利用型の場合は葉物野菜からトマト、イチゴ、キュウリといった果菜類、さらには花卉類まで、幅広く栽培されているものの、完全人工光型の場合は採算性の理由から、主に葉物野菜の生産が中心となっている。

完全人工光型の場合でも、各社がイチゴの商業的な生産をスタートしており、研究レベルでは薬用植物の甘草などの栽培も行われているが、人工光栽培については丈の長い植物や強い光量を必要とする植物については、多段式が困難となり、必要とする照明の本数も多くなることから、栽培は可能であっても採算性を考えると商業生産できる品目は限定されてしまう。

一部の特殊な栽培方式を除き、基本的には太陽光利用型・完全人工光型ともに、水に肥料を溶かした液状肥料（培養液）を利用する養液栽培を採用しており、作物の生育に最適な養分を必要な時期に供給できることから、屋外の露地栽培と比較すると生育が早く、土がない都市近郊エリア、さらには土壌病害や塩類集積などによる連作障害を回避して、安定的な生産が実現できるといったメリットがある。

植物工場では、屋外の露地栽培では必要となる耕起、畝づくり、肥料・農薬散布、除草、土寄せといった重労働作業を省略でき、養液や室内環境をモニタリング・自動制御することで、栽培ノウハウが科学的にデータとして蓄積され、分析・改善を効率的に実施することができる。

さらに完全人工光型の場合、室内温度も一定であり、日照量や気温などの天候変化による日々の植物管理の微調整が不要となり、作業工程を分解・標準化することで高齢者や障害者でも作業が可能となり、近年は社会福祉法人による植物工場の参入も増えている。

植物工場野菜に関する栄養価については、全てが解明されているわけではないが、高度な栽培技術を保有する生産企業では、無農薬だけでなく、主要な栄養成分（ビタミン・ミネラル・ポリフェノール類など）を増加、あるいは摂取制限のある疾病患者向けに特定成分を減少することが可能である。特定成分の減少における代表的な例が、慢性腎不全により人工透析治療を受けている患者（あるいは、自覚症状が出る前の潜在的な患者と、その予備軍）向けの低カリウム野菜である。

植物は自身の生存と種の保存を実現するために、さまざまな化学物質を合成している。化学作用の中で、有名なものは光合成による糖の生産だが、その他にも植物はさまざまなフィトケミカル（二次代謝産物）を作り出している。

フィトケミカルの中でも有名なものでは、ポリフェノールに分類されるアントシアニン、大豆に含まれる同類のイソフラボンなどがある。また、普段飲んでいるコーヒーの木の種子にはカフェインやタンニンを含み、神経興奮作用や胃液・胆汁分泌促進作用があることが知られている。

*原稿受付 平成 27 年 6 月 21 日

**一般社団法人イノブレックス（東京都中央区東日本橋 2-28-4 日本橋 CET ビル 2F）

表1 国内における稼働施設数の推移¹⁾

	完全人工光型	太陽光利用型 (補光あり)	太陽光利用型 (補光なし)	合計
H21 年度末	34 カ所	16 カ所	—	50 カ所
H23 年度末	64 カ所	16 カ所	13 カ所	93 カ所
H24 年度末	106 カ所	21 カ所	83 カ所	210 カ所
H25 年度末	125 カ所	28 カ所	151 カ所	304 カ所
H26 年度末	165 カ所	33 カ所	185 カ所	383 カ所

2009 年には農水省・経産省より植物工場への大きな補助金が投入され急速に拡大した。その後は、完全人工光型は主に民間企業による企業投資のケースが多く、太陽光利用型は自治体の誘致や農水省による補助制度による農業生産法人による参入が多い。

こうした植物のフィトケミカルは、外的ストレス（温度・湿度、水分量、紫外線、土壤中のバクテリア、害虫・動物による捕食など）により産出される場合が多く、微量な成分も含めると1つの植物には数百種類が含まれているといわれており、全てのフィトケミカルを同定・検出することは難しい。

よって、植物工場野菜の栄養価についても検出可能な主要成分については科学的な分析を行っており、一般的な露地野菜より優れた栄養価をもつ植物工場野菜を生産しているケースもあるが、総合的な全ての栄養価が検証されているわけではない点には注意が必要であるだろう。

1.2 全国の施設稼働数と植物工場野菜の普及率

2014 年 3 月末時点における全国の植物工場施設は完全人工光型 165 カ所、太陽光利用型 218 カ所（補光あり 33 カ所、補光なし 185 カ所）と推計されている。2009 年に農林水産省と経済産業省が、農商工連携研究会「植物工場ワーキンググループ」を設立し、3 年間で3倍（全国に150 カ所）の施設数と生産コスト3割削減という目標を設定したが、現状では達成しているといえる。

人工光型植物工場の場合、各企業によってさまざまな種類のレタスを生産しているが、生産品目としてはリーフレタスとして大きく分類される。著者による簡易調査では、2009 年における国内レタス生産量の0.6%が植物工場（簡易調査のため太陽光利用型も含む）による生産であったが、2013 年にはすでに市場に流通している量として稼働実績ベースで約0.6%、生産能力としては約1.3%のシェアを植物工場（完全人工光型のみ）が占めている。

レタスは結球レタスと非結球レタスに大きく分類されるが、国内生産量の8割以上を結球レタスが占めており、植物工場によるリーフレタスの生産増大によって大きくシェアが変動する可能性は少ない。今後は、小売ルートによる一般消費者の購入は伸び悩む中、食品・外食分野といった企業が植物工場野菜を積極的に採用し、レタス全体の生産量に占める植物工場のシェアが現在の約1.3%（生産能力ベース）から2025 年までには10% 前後まで拡大することが予測されるが、国内市場においては、これ以上の伸びは期待できないと推測される。

日本の地理的条件では、北から南までの産地リレーを行うことで、レタスの周年栽培が可能である。しかし、近年

の気候変動や異常気象によって露地栽培を中心としたレタスの供給体制が崩れ、追加的な費用負担を行い、海外から食材輸入を余儀なくされるケースも見受けられることから、食品・外食企業ではリスク分散も兼ねて植物工場レタスの調達を10% 前後まで引き上げる考えをもつ企業も多い。

試験的な量だが、すでに自社にて植物工場を建設・生産をスタートさせている企業も増えている。例えば、外食チェーン店を展開する企業では、加工食材の製造・販売を行う子会社にて、LED 型植物工場施設（完全人工光型）を導入し、リーフレタスの他、バジルなどのハーブ野菜の生産を行っている。

導入施設は2012 年6 月に稼働し、約2 億円をかけて5 段の多段式にてリーフレタス換算^{*1}にて日産2000 株の生産規模をもつ設備を整備した。加工施設の2 階部分に植物工場が設置され、生産されたバジルは1 階の加工場にて、ジェノベーゼソースやバジルドレッシングとなり全国の店舗へ供給されている。

その他にも、多くの外食チェーン店が植物工場（人工光）にて生産をスタートさせており、サラダ用の水菜を生産し、関東エリアの一部店舗へ提供している事例やレストランの駐車場スペースにて、コンテナ型植物工場（人工光型）による栽培を行う事例などがある。

太陽光利用型植物工場まで対象を広げると、ハンバーガーショップやファミリーレストランなど、さまざまな外食企業が自社での生産を開始しており、薬物野菜の他にトマトなどの果菜類の生産も行っている。このように今後は食品・外食企業が中心となって市場を牽引し、また、レタスだけでも現状の10 倍近くの市場拡大余地が残されているだろう。

2. 太陽光利用型植物工場における現状分析

1 ヘクタール以上の大規模な太陽光利用型施設内に、温度・湿度、二酸化炭素や光量などの複合的な環境制御システムを導入する場合（特にトマトやパプリカなどの果菜類を生産する場合）、国内の主流はオランダ製となっている。

ただし、リーフレタスなどの葉野菜については、ドーム型の回転式・水耕栽培にて生産を行う日本独自の技術開発も進められている。また、利益自体は大きな額ではないものの、主にリーフレタスの生産にて黒字化を達成する事例も徐々に増えている。

オランダのシステム導入事例の多い果菜類の環境制御システムでは、世界のトップシェアを誇るオランダのプリバ社のものが採用され、一部の国内施設では、オランダの温室ハウスメーカーであるファンデルフーフェン社の大型ガラス温室が利用されている。

その他にも近年、環境制御システム分野ではシェアを拡

^{*1} 人工光型植物工場の場合、リーフレタス1 株について80~90 g として計算を行っている。以下の場合も同様に計算を行っている。

大しつあるオランダ・ホーヘンドールン社のものを日本企業が採用し、10 アール（1000 平方メートル）あたり 50 トンの高収量を目指したトマトの施設栽培と日本独自のシステム開発に関する可能性を検討している。

オランダとは栽培品種、気候条件などが異なり一概には比較できない部分もあるが、トマトの収量（10 アールあたり）のみで比較した場合、日本の施設が 20～40 トン前後、オランダの平均施設が 60～70 トン、最も多い施設では 100 トンを超えるケースもあり、太陽光利用型における日本の生産技術は発展途上といえるだろう。

こうした収量の差には大規模・自動化といった要因も挙げられるが、日本の夏場の平均気温が 33～34 度（東京）まで上昇する一方で、オランダの場合は 22～23 度（アムステルダム）前後である。日本の場合は温度が上昇する梅雨の時期には日照量不足に悩まされ、夏場は高温多湿を回避する必要があるが、オランダの場合は日照量が確保できる夏場に向けて収量が増加する傾向にある。よって、オランダ式の生産システムや栽培方法を日本でそのまま利用することは難しいといえる。

海外市場も含めた日本の研究開発の方向性としては、同じ高温多湿エリアの東南アジア（モンスーン気候・アジア式熱帯温室）に大きなビジネスチャンスがあるといえる。このような地域には、独自の冷却ノウハウが必要であり、日本の生産者も技術ノウハウを生かせる分野も多い。

ただし、インフラ面で不安のある東南アジアでは、現状において高度な植物工場を稼働させることが難しいケースも多い。そこで海外進出の最初のステップとしては、最低限の環境制御システムを導入した現地調達型の簡易式ハウスを稼働させ、事業を運営しながら、市場開拓や生産管理者の人材育成などを同時に行っていく必要がある。

また最新情報では、一部のオランダ企業がアジアへの進出を本格化させている。オランダではトマト、パプリカ、キュウリなどの果菜類、花卉などが生産の中心であり、葉物野菜やイチゴの生産事例は少ない。世界のトップ企業と正面から競争するのではなく、海外でも市場規模が大きな作物でありながら競合が少ないものを選択することも、一つの戦略だといえるだろう。

3. 完全人工光型植物工場における現状分析

日本は大規模な量産技術では世界ナンバーワンの技術力を保有している。10 段以上の多段式栽培にて、1 日で 1 万株以上のレタス類を毎日安定的に生産・販売する施設は世界でも日本しか存在しない。2013 年ごろから米国のファームドヒア社（主にベビーリーフを生産）や台湾の野菜工房社（リーフレタスを生産）でも 1 日 1 万株以上の植物工場の建設事例が出現しているが、現状は試験稼働段階やフル生産でないことから、量産技術ノウハウの確立には相当の時間が必要となることが予想される。

完全人工光型植物工場の施設稼働数は、2014 年時点では日本が 165 カ所、著者の調査によると米国が約 50 カ所^{※2}、

台湾が約 40 カ所、韓国と中国が 10～20 カ所前後となっている。

米国の場合は、冬の時期に農業が難しい東海岸の都市周辺に集中しており、ニューヨークやシカゴといった都市住民は環境意識も高く、大部分の農作物をカリフォルニアやフロリダといった遠方地域から調達している現状を解決するため、地産地消モデルの一環として周年栽培が可能な植物工場の稼働事例が増えている。

人工光型では世界のトップリーダーである日本において、近年では日本企業による海外進出も加速している。例えば、アイスプラントを独自のツブリナ・ブランドとして生産・販売する日本企業では、韓国のテヨン E & A 社に自社開発した植物工場設備を販売し、2011 年 9 月より韓国でもアイスプラントの生産を行っている。

その他にも、国内にて 1 日 1 万株以上の施設を 2 カ所にて運営する企業では、2013 年 3 月に中国現地法人を設立し、中国市場向けの植物工場設備の販売を開始するとともに、モンゴルでも植物工場設備の販売実績をもつ。

同社では 2013 年、モンゴル・ウランバートルに現地法人を設立し、現地の大手外食チェーンに約 450 m²（日産 3000 株のリーフレタスが生産可能）の植物工場設備 2 棟を販売、すでに 1 棟は稼働をスタートしている。

また中東エリアにおいては、コンテナ型植物工場をカタールと UAE のドバイに販売実績をもつ。どちらの事例とも、設備販売のみであり、稼働後のメンテナンスや現地にて運営する工場管理者の人材育成が課題であり、その後は大きな展開をみせていない。

植物工場の海外進出では、寒冷地や砂漠地帯などの過酷環境エリアとともに、露地レタスとの品質差が生かせる海外市場にも大きなビジネスチャンスがある。

日本の生産者が栽培する露地レタスの品質は世界でもトップレベルであるが、中国をはじめとするアジア諸国では生産野菜の品質が悪く、安全性にも問題のある商品が多く販売されていることは、地元住民の間でも周知の事実である。

よって、高品質で安全な露地レタスを当然のように受け入れている日本の消費者よりも、海外市場の方が、安全性について追加的なコストを支払う消費者が多く、近年では富裕層だけでなく中間層も安全性にお金を支払う意識の高い消費者が増えている。

また、アジア諸国はインフラや流通面での不安はあるものの、電気代は日本の半分～3 分の 1 程度、人件費も非常に安いことから、生産コストが大幅に削減できるメリットもある。例えば、日本企業の上海法人が中国国内にて植物工場を建設・販売した際には、現地の高級スーパーにて、人工光型レタス（約 80 g）を 22 円で販売する一方で、同店舗における一般的な露地栽培の玉レタス（466 g）が

※2 米国の稼働施設数は人工光による生鮮野菜を対象としており、医療用も含む大麻生産施設は除外している。

6~7.4 元にて販売されていた。

商品パッケージには、「農薬を一切使用せず、洗わずに食べられる。無菌室栽培により日持ちが良い。日本式の栽培技術・安全管理体制を徹底」といった説明が中国語と日本語にて表記されており、日本国内の小売店舗にて販売される人工光型レタス（約 80~90 g）の平均小売価格が 200 円であることから、海外市場では日本国内より高値で販売可能な市場が一定数存在するといえる。よって、文化・風習や現地の商習慣、独自の販売方法・流通システムなど超えるべき課題はあるものの大きなビジネスチャンスにつながることは確実である。

4. 海外市場におけるタワー型・都市型植物工場

近年、海外にて拡大しているのがタワー型植物工場（都市型植物工場）といわれるものである。例えば、韓国の農村振興庁（RDA）では、完全人工光型と太陽光を利用したタワー型・植物工場を 2010 年 12 月に建設、翌年の 3 月に施設が稼働している。

施設の事業費は 15 億ウォン（約 1.5 億円）、敷地面積 182 平方メートルである。建物の室内に設置された完全人工光型の生産ルームが 132 m²、建物側面に設置された太陽光利用型の垂直式（タワー型）の生産ルームが 50 m² となっており、地上 3 階、地下 1 階の施設となっている。

その他にも、シンガポールのスカイ・グリーンズ社では太陽光を利用した垂直多段式の土耕栽培システムを稼働させている。天井高 9 メートルの簡易的な温室ハウスに覆われた施設内に、高さ 6 メートルのアルミフレーム製の栽培システムを設置し、最大で 16 段の栽培ラックを積み上げて、ミニ・チンゲン菜やホウレン草など中国菜を中心に 6 種類の葉野菜を土耕栽培にて生産している。

施設の高さが 9 メートルの多段式栽培であっても、人工光による補光設備は一切導入しておらず、全て自然の太陽光にて栽培している。そのため、栽培ユニット自体が回転しながら、均等に太陽光が植物に照射されるように設計されており、回転動力は風車のように水の力（主に雨水を活用）を利用しながら、1 日 16 時間をかけてゆっくり回転し続けている。

アルミフレーム製のユニット自体の軽量化や設計段階での工夫により省エネルギー化をはかり、同社によると、1 ユニットの回転させるために必要となるエネルギーは 60 ワット電球 1 個と同等であるという。

このようなタワー型植物工場（都市型植物工場）の先進モデルは米国にて実証されている。例えば、2008 年に設立したゴーサム・グリーンズ社は現在、未活用の建物屋上スペースを借り受け、約 1400 平方メートルのオランダ製の複合環境制御が可能な太陽光利用型植物工場（同施設はタワー型ではない）にて、バターヘッドレタス、バジル、グリーンリーフレタスなどを生産している。

同社が目指すべき都市型農業は、究極の地産地消と環境負荷をかけないサステナブルな生産方式である。同社が手掛けた最新施設では、小売スーパーのホール・フーズの建物屋上に太陽光利用型植物工場を稼働させている。

施設には太陽光発電や雨水収集システム、温室内では生物農薬を実践しており、収穫後すぐにスーパーの店頭にて販売され、究極の地産地消を目指すとともに、駐車場には電気自動車（EV）向けの充電スタンド、生産から販売工程にて廃棄される食品残さをバイオマス燃料として活用していくことも計画されている。

米国を中心に近年では、環境志向型アグリビルディング（Building Integrated Agriculture）という新しい分野に注目が集まっており、ゴーサム・グリーンズ社が提案する小売スーパーと屋上ファーム（太陽光利用型植物工場）の一体型モデルも、BIA モデルの一つである。

BIA とは、商業施設・オフィス・住宅などの建物に対して、低炭素・省エネ実現に向けたエコビルディングの設計に農業分野を融合していくという考え方である。分かりやすい例では屋上緑化・壁面緑化も、BIA を実現するための最初のステップとなる。

その他、商業施設の南側に壁面緑化ではなく、タワー型の植物工場を設置するアイデアも提案されており、米国のバーティカル・ハーベスト社では、建物の南側に 3 階建てのタワー型植物工場の建設を進めており、1~2 階部分で葉野菜、3 階部分でトマトなどの果菜類の栽培を計画している。

このように米国では、太陽光利用型・タワー型施設・人工光型の植物工場など設置場所の環境条件や利用シーンに合わせながら選択し、単なる食料生産施設という枠組みを超え、教育・エネルギー・グリーンビルディングなどの街づくりといった分野に植物工場技術が応用されている。高度な生産技術シーズが豊富にある日本国内においても、異なる複数の技術を組み合わせ、新しい事業モデルとして植物工場を普及・展開していくことで、新たなビジネスチャンスの拡大につなげていけるだろう。

参 考 文 献

- 1) 一般社団法人日本施設園芸協会、平成 25 年度次世代型通年安定供給モデル構築支援・環境整備事業報告書、全国実態調査（植物工場一覧）。

藤本真狩

神戸大学経済学部を卒業後、京都大学医学研究科在籍中の 2008 年に NPO 法人イノブレックスを設立、2015 年に一般社団法人化。メディカル・バイオ分野の技術調査・技術経営戦略のコンサルタントとして、技術の事業化やベンチャー企業の経営支援に携わっている。