# 植物工場における栽培技術および品種開発

千葉大学　大学院園芸学研究科　教授　丸尾　達

【要約】

人工光型植物工場だけでなく太陽光型植物工場でも、直近10年間で栽培施設・設備の性能は大きく向上し、低コスト化が進んだ。また、制御機器・技術も大幅に進化したので、栽培環境は革新的に改善された。しかし、栽培環境・栽培技術に対して栽培品種には目立った進化は見られていないので、現状では品種性能が生産性の最大の律速要因になっている。従って、今後は、植物工場専用品種の開発速度を高めることが重要になっている。

## はじめに

私も含めて多くの植物工場に関わる研究者、技術者、生産者をはじめ関係者共通の目標は、植物工場の導入による、安定生産・生産性増大、コスト縮減・効率化を図ることであった。直近の10年間で太陽光型植物工場では10アール当たり50トンを超えるトマトの収量を達成しており、人工光型植物工場でも日産３万株を超える超大型のLED光源を活用した自動化施設が近年急増している(注1)。

しかしながら、これまでの成果は主として環境制御技術の進展やLED光源、自動化設備の導入などによるものであったと考えている。

植物工場の拠点事業が始動してから約10年が経過したが、その間、施設・設備の性能の向上は著しく、人工光型植物工場では、蛍光灯から、よりエネルギー効率の良好なLED照明に置き換わり、低コスト化も大きく進んだので、生産費に占める電力コストが20%以下の施設が増加している（図１～３）。太陽光型植物工場

図１　2011年に設置された千葉大拠点の人工光型植物工場（蛍光灯光源）

図２　その後、同施設はLED光源に改修され、エネルギーコストは大きく低減した。

図３　同施設では施設内光合成速度も含め種々の速度関数が計測・表示が可能である。

でも、二酸化炭素（$CO_2$）制御や飽差制御（注２）も兼ねた細霧冷房システムの導入が進んだため、収量の大幅向上はある程度実現したが、これ以上の収量・品質の向上は容易でない。

その理由は、耐病性などについてはある程度進んだが、この10～20年間、植物工場で栽培する品種について、品種改良の面で特段大きな進展は見られていないことにある。

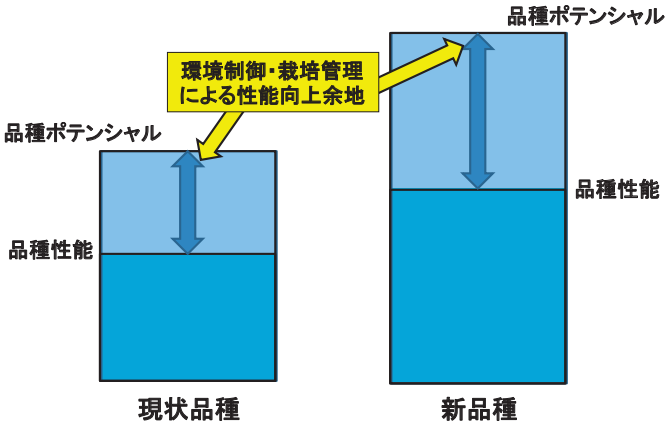
つまり、われわれは近年既存の栽培品種の性能を可能な限り当該品種のポテンシャルまで近づけることができる栽培環境を、安定的に創出することに注力してきたのである。

図４にその概念を示したが、現状の品種、品種群を使用する限り、収量増、品質向上には、おのずと限界があり、栽培環境の最適化による伸び代はますます少なくなってきており、新品種への期待が高まっている。

注１：植物工場の「太陽光型」「人工光型」の定義については本誌３頁右欄の注を参照。

注２：湿度制御ともいうが栽培環境の飽差の制御。

図４　専用品種育成の必要性が増加している




品種改良による生産性・品質の革新的向上の可能性拡大

## １　植物工場専用品種の重要性

施設園芸創成期には、各種苗会社は率先して当時最先端の施設・設備を積極的に導入し、施設園芸専用品種の育成を進めており、それが施設園芸の発展に重要な役割を果たしてきた。

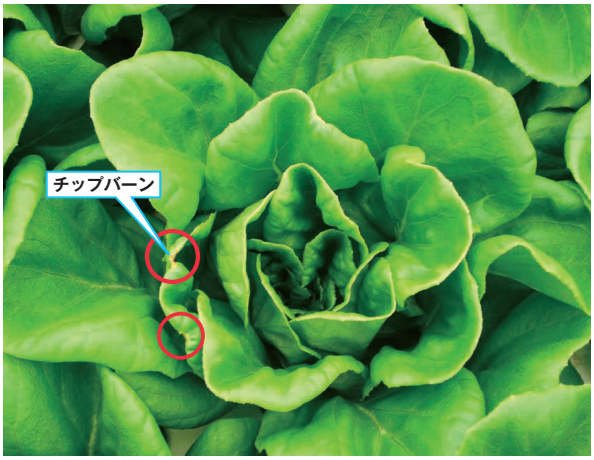
しかし、現在の日本の種苗会社の施設・設備を見ると、現場の先進的施設を導入している生産者に比べても大きく見劣りしている。環境制御システムだけでなく、かん水設備や養液栽培装置などについて

も、20 ～ 30年前のものとほとんど変わらない環境下で、依然として従来型の選抜や育種が行われているのが事実である。一部の企業では、多大な投資を遺伝子関係の施設・設備や解析に行っているが、その一方で現場の栽培・選抜に用いる施設・設備に対する投資が犠牲になったと思われる。

施設内環境が、大きく改善された現状では、栽培環境と育種環境が大きく乖離していることが、施設園芸・植物工場では問題になっているのである。もちろん、露地や雨よけなどの簡易施設では栽培環境はほとんど変わっていないので、大きな問題はないが、将来的なことを考えると、育種手法自体の見直しも必要不可欠であると思われる。

特に、分かり易い事例として、人工光型植物工場におけるレタス生産を考えてみよう。人工光型植物工場では、光・温度・湿度・$CO_2$・培養液環境などの大半の栽培環境の最適化・安定化が進み、レタスの成長速度は露地や太陽光型植物工場（養液栽培）とは比べものにならない程早い。10グラム程度の苗を最終ラインに定植すると10日前後で120グラム程度に成長させることができる。経営的なことを考えると、成長速度をさらに高くすることが有利であることは間違いないが、人工光型植物工場におけるレタスの成長速度自体は10年間ほとんど向上していない。では、なぜ成長速度が向上していないかと言えば、レタスの場合、栽培環境が問題ではなく、生理障害のチップバーン（注3）の発生が成長速度を律速（注4）しているからである（図５）。

**図５　レタスのチップバーン**
**（赤丸印がチップバーンの発生部位）**




レタスは１日当たりの照明時間を長くすればするほど、また光強度を強くするほど、１日当たりの光合成速度は高くなるので、原理的にはそのような環境にすれば、成長速度をさらに高めることは容易であるが、チップバーンが発生するので、あえて成長速度を高めないのである。

チップバーンの発生自体が成長速度の低下につながるだけでなく、トリミングなどの調整コスト（人件費）、製品歩留まりに大きく影響するため、栽培環境の向上は十分可能であるのにもかかわらず、あえて光合成速度にブレーキをかけて、成長を抑制している状況を甘受している。具体的には、明期時間（照明時間）を抑えて対応しているのである。

現状の人工光型植物工場で栽培されているレタス品種は、海外の種苗会社のものが多いが、いずれの品種も露地栽培、施設土耕栽培をターゲットにして育成された品種である。そのため、人工光型植物工場のような極めて速い成長速度は『想定外』で、チップバーンの発生も仕方ないと考えられてきた。

太陽光型植物工場でも、多くの大型施設では国内品種ではなく、海外品種を栽培することが多い。図６、図７の施設はいずれも海外の品種を栽培し、高い収量と安定した品質を得ている。

人工光型植物工場では蛍光灯光源でも露地や一般のハウスとは大きく光環境（光質や光強度）が異なるが、蛍光灯の場合比較的同じような光源環境であった。しかし、特にLED光源の工場では、工場ごとに光質や光強度が異なると考えてよいので、極端なことを言えば、工場ごとに最適品種が異なるはずである。そのような観点からみると、露地や簡易な施設では、同じような地域であれば、光も含めてほぼ同じような環境になるので適合品種も同じで、汎用品種が活用できたが、高度な環境制御を行っている植物工場では、それぞれの環境に合わせた専用品種が必要になる。

**図６　太陽光型植物工場でも生産性が向上した**

**図７　トマトでは10アール当たり50トンの収量の達成も実現**

注３：カルシウム不足により、葉の先端が壊死して、褐変する生理障害。

注４：抑制するまたはブレーキになること。

## ２　植物工場を活用した育種の可能性

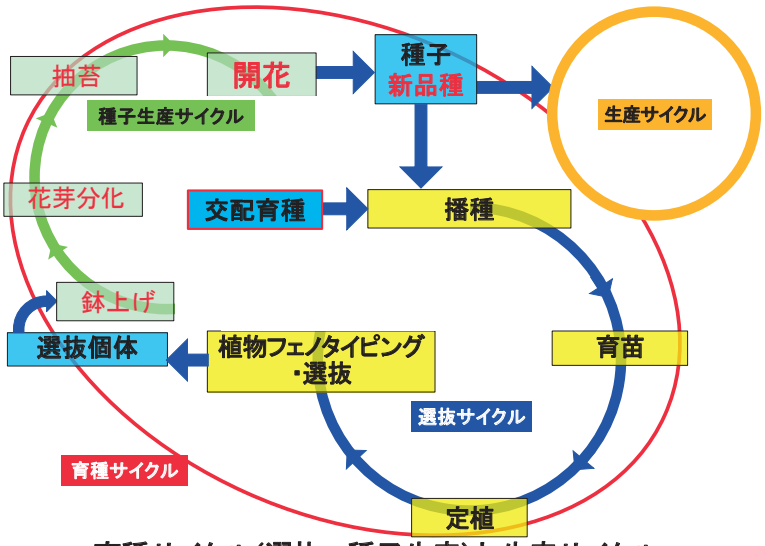
現在、千葉大学では人工型植物工場とＡＩ技術などを活用して、効率的な高速育種を行うための基礎研究を行っている。

人工光型植物工場や高度に環境制御を行う太陽光型植物工場を積極的に育種に活用するのであるが、その概要は以下のとおりである。

用いる植物工場システムは、これまでの生産用に設計・施工された人工光型植物工場とは、全く異なる新たなコンセプトと性能を有した選抜サイクル専用の人工光型植物工場と、世代促進を積極的に進めるために専用に設計された種子生産サイクル専用施設（人工光／太陽光型植物工場）で構成される。現段階では、レタスで、年間４世代以上のサイクルの高速育種を実現することが当面の目標である（図８）。

本システムは、ただ単に革新的な世代促進を実現し、高速育種を可能にするだけでなく、任意の値で高い精度の選抜圧(注５)を極めて容易に付与することが可能なシステムとしても期待される。

図８　育種サイクルと生産サイクルの概要




育種サイクル（選抜＋種子生産）と生産サイクル

人工光型植物工場の、高度な環境制御性をさらに進化させ、より均質で極めて再現性の高い任意の環境をいつでも再現することができる施設を設計し、選抜の効率と再現性を最大限まで高める。一カ所で世界中の環境を再現できるため、その効果は計り知れない。

このような、動きは既に海外でも始まっている。図９はオランダのベジョー社の人工光型植物工場を活用した初期型の育種施設であるが、同社のシステムはフィリップス社の光源とその制御システムを導入し、主として露地作物の育種を行っている。

図９　Bejo Zaden B.V.（オランダ）の人工光型育種施設（フィリップス社HPより）

一方、われわれは人工光型植物工場専用品種の育成を念頭に、高い環境制御性能を前提として、意図的にチップバーンの発生圧力を高めるような環境下で効率的な選抜を行うことを想定している。それにより、高速育種の特性を最大限生かすことが可能になり、将来的には「オーダーメイド育種」、「テーラーメイド育種」が可能になるような新たな育種システムを構築し、植物工場の発注と同時に当該工場の環境（LEDの種類なども含めた）に適合した品種を育成することで、次世代型の人工光型植物工場産業の醸成を目指す。

また、過去数年にわたって研究してきた、植物フェノタイピング（注6）の技術を育種システムに活用することも検討している。

図10　成田空港で導入された顔認証システム
（朝日新聞デジタルより）

他分野では、ごく一般的になっており、既に空港などの出入国管理にも積極的に活用されている『顔認証システム』（図10）によく似た、『株認証システム』とフェノタイピングシステムを有機的に結合することにより、極めて効率的な育種・選抜システムを構築することが可能になるだろう。

当面、本高速育種システムでは、レタス専用品種（太陽光／人工光型植物工場専用品種）の育成を行うが、今後は果菜類も含めたより広範の作物の高速育種に取り組む予定である。

注５：育種選抜を行うための環境圧力。例えば、高温抵抗性選抜を行う際には、定めた「高温」環境を高い精度で付与して選抜することが重要。

注６：作物の表現型をカメラなどを用いて自動計測・記録する手法。表現型はある生物のもつ遺伝子型がある環境下で、実際の形質として表現されたものであるが、育種ではこの評価が重要になる。

## おわりに

このように、人工光型植物工場やＡＩ技術を活用した育種により短時間で専用品種が作出されることで、植物工場産業のさらなる拡大・発展を期待している。そのためには、ＡＩ技術のエキスパートなど異分野の優秀な人材の協力が必要不可欠である。

参考文献
丸尾　達　「植物工場向け品種開発の現在」農耕と園芸，2019.9秋号　pp.30－34.　誠文堂新光社