

植物工場生産の高効率化と高付加価値化のための生物学的およびシステム工学的アプローチ

秋田 求¹, 鈴木 高広¹

要旨

植物工場では、高度に調節された環境下で植物を生産することができる。一方、高額な設備投資とともに運転にコストを要するため、生産の高効率化と生産物の高付加価値化が不可欠である。この総論では、植物工場生産の高効率化と高付加価値化をめざすうえで重要な2つのアプローチ、生物学的アプローチとシステム工学的アプローチ、の各々に関する現状と著者らの取り組みについて報告する。

生物学的アプローチについては、最初に、植物工場内の環境を様々に変化させることによって植物を質的に変化させる試みに関する研究動向をまとめた。野菜中の機能性成分の含量は種々の環境条件下で変化するため、それを利用して機能性成分を多く含み、高付加価値化した野菜を生産できる。次いで、遺伝子組換え技術を利用して他生物由来の物質を植物工場で得る、あるいは、植物の質を遺伝子レベルから改変するための試みについて紹介した。

一方、植物工場のシステム工学的アプローチとしては、実用化の最大の課題である収益性とシステムの設計方針について現況を解析し、今後の課題について考察した。国内の園芸作物の統計値から算出した、種々の作物の生産性と収益性を参照し、植物工場の収益性を推定するモデル式を用いて解析した。その結果、植物工場では垂直方向に栽培棚を重ねて生産性を高めることが不可欠であり、現在実用化されている植物工場野菜が、レタスなどのように成長丈が低く、栽培期間が短期であるものに限られていることが明らかとなった。将来的に、成長丈が高く栽培期間が長期におよぶ作物にも栽培対象を拡張するには、施設内における高密度栽培を実現するための、低コストシステムを開発することが必要であり、多層棚の採光システムや、草丈の過剰な伸長を抑えるための光の波長制御技術の開発が望まれる。このようなシステムの開発を目的とした、人工照明栽培に関する著者らの研究開発を併せて報告した。

1. はじめに

1.1 植物工場システムの現状と課題

植物工場の話は、最近のテレビや新聞のニュースで目にしない日がほとんどないほど、世間の注目や関心を集めている。大手建設企業やスーパーマーケット、外食産業などが、発光ダイオード(LED)照明を備えた植物工場に栽培したレタスやサラダナを販売する事業を紹介するニュースは、特別に設計した清潔で安全な人工的栽培システムであるという印象を与える。産業技術としての植物工場が持続的に発展するためには、なんらかの価値を生み出す経済性が必要である。つまり、従来の農業生産よりも高い収益性と、品質などの付加価値を生み出すことが要望される。特別な人工栽培システムには高額な設備投資が必要であるため、一般的な野菜を生産する場合は、設備コストと運転コストを回収しつつ短期間で高い利益を生み出さなければならない。温室やハウス栽培といった園芸野菜の生産販売が確立されている市場において、野菜そのものに付加価値を持たせることは可能である。たとえば、完全に外部環境と隔離した室内で、光と水と栄養素の供給を制御することで、雑菌汚染や病害虫、雑草被害を完璧に防ぎ、無農薬で安心安全な

原稿受付 2010年6月18日

1. 近畿大学生物理工学部 生物工学科, 〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930

野菜を、いつの季節でも採れたての新鮮なまま提供することができる。しかし、市場価格1本100円のダイコンに対して、植物工場で種から半年間、完全に無菌培地と除菌ガスと殺菌水により栽培し、その製造コストを上乗せした高価なダイコンを市場に提供しても、購入する消費者はおそらくいないであろう。植物工場の産業技術としての歴史は浅く、効率的な設備システムや安価な制御装置の研究開発とともに、市場の経済性とのバランスの中で、製造コストに見合う市場の開拓を模索している段階にある。

最近の植物工場システムが目指す市場分野は、主に三つある。一つ目は、従来の施設栽培の自動制御システムの開発である。これには、各種環境因子や生育状態を自動計測するセンサーや分析装置、自動計測したデータや監視作業員の情報に基づく、栽培作物の状態診断や異常診断と最適操作の支援、そして、栽培計画や事業経営をサポートするための、情報技術やユビキタスシステムの援用技術などの開発も含まれる。このようなシステムは、従来のハウスなどの栽培施設を用い、自然採光や外気と土壌、外部温湿度環境を利用するため、半閉鎖型植物工場と呼ばれる。

二つ目は、建物やコンテナなどの密閉空間内で、人工光源を利用し栽培を行う閉鎖型植物工場である。ハウス栽培では夏季に日射が強すぎ、冬季はガラス壁からの放射熱損失により非効率的であるなどの問題があるが、室内閉鎖型植物工場では、壁や屋根に断熱材を使用することができるので保温性を高くたもつことができる。そのため、温度制御時のエネルギー損失を抑えることができ、また、栽培環境を最適条件に維持することが容易となり、栽培サイクルを短縮化することにより生産性を高めることも容易となる⁽¹⁾。

三つ目は、大気や水蒸気、熱の出入りを管理することができる完全閉鎖型植物工場である。培養空間と外部環境の間の物質とエネルギーの移動を完全に遮断するか、あるいは、すべての物質とエネルギーの出入りを管理することで、熱や光エネルギー、水や栄養素の利用効率を極限まで高められるため、生産コストを抑え収益性を高められるとみられている⁽¹⁾。このような完全閉鎖型システムは、砂漠や宇宙空間での野菜の栽培技術としての展開も可能であり、また、遺伝子組換え体の栽培など、外部環境への影響が危惧される場合にも適した栽培空間を提供する。

このように、植物工場はそれぞれの用途と市場に対応した技術開発が、世間の注目とともに活発化しており、また、人工光源としてのLED技術など⁽²⁾、省エネルギーシステムやコストの削減に関するさまざまな周辺新技術を取り込みながら、その市場を拡大化する方向にある。

1. 2 植物工場作物の適性

未来型の植物工場は、高い省資源性と低い環境負荷の両者を実現すると予想され、事実、そのための技術開発が進められているが、そこで栽培される植物もまた種々に改良・改変されるであろう。また、目的物質を抽出精製して利用する場合など、必ずしも食用可能な植物を生産するのではない事例も多くなると予想される。では、植物工場に適した作物とはどのようなものであろうか。NEDO 調査「植物機能を活用した次世代製造プロセス基盤技術に関する調査事業」(H17)に「わが国の閉鎖系完全制御型植物生産施設は世界に類のない優れた制御技術である」と記されていることからわかるとおり、植物工場技術を用いた植物生産に関しては日本における研究開発が世界をリードしている。そこに採用されている作物の品種とその生産性が、そのまま現実に選抜されてきた植物工場向きの作物であり、かつ、世界的にみて最先端の生産性を示しているということができよう。すなわち、完全制御型植物工場では回転率の高い葉菜類や付加価値の高いハーブ類、代表的にはレタス、ホウレンソウ、サラダナ、イチゴ、チンゲンサイなどが中心に生産され、トマトやキュウリといった果菜類は光飽和点が高いので太陽光利用型(補光併用型も含む)植物工場で生産されるのが妥当と思われる。ただし、苗は一般に光飽和点が低いため、さらに多様な作物が対象になるはずである。一部の企業からは、培養苗の植物工場的な大量生産システム(種苗工場)も発売されている(例えば、MKV ドリーム株式会社「苗テラス」など)。緑化用コケを生産する植物工場の例も

あるが、この例では生産物の単価が高いので、別のカテゴリーとして(例えば遺伝子組換え植物のように)扱われるべきであろう。

とはいえ、どんな植物をどう植物工場で栽培すべきかという問題には、様々な答えがあると思われる。唐突であるが、2005年のWired News (<http://www.wired.com/news/medtech>, 2005年4月22日)は、Purdue大学の研究グループが地下の廃坑を利用した閉鎖系で組換えトウモロコシを栽培した結果、予想外の高収量が得られたことを報じた。当時のアメリカの研究者の驚きがうかがえる報道であった。トウモロコシは回転率が低く、通常、植物工場で栽培される対象作物ではないので、これはあくまでも遺伝子組換え産物の生産を目的とした場合に成立する事例ということができる。しかし、見方を変えると、この報道は、「予想外の高収量」と我々が感じる半面で、実際に植物を栽培すると「最大限で」どれだけの収量が期待できるのか、または、収量をどれだけ増大させることができそうか、という問いには、実はそう簡単には答えられないということを象徴しているようにも感じられる。我々が感じているよりも植物の潜在的な生産性はずっと高いかも知れないのである。しかも、完全閉鎖系植物工場では、理論的には、光質、光量、日長、温度、湿度、二酸化炭素濃度、養液中の無機塩濃度などあらゆる環境条件を設定できるので、植物の様々な(または潜在的な)能力を引き出すことができると期待される。これに遺伝子組換え植物を利用すれば、さらに可能性や選択肢が広がるはずである。現在、植物工場での遺伝子組換え植物の栽培は、生理活性物質の生産を目的とするもののみと言ってよいが、植物工場の生産環境に適した品種(生育が早い、生育促進のために連続光照射しても障害や抽苔がおこりにくい、製品の均一性が高い、チップバーンが発生しにくい、栄養価が高い、など)の開発に従来の育種法だけでなく遺伝子工学的手法も取り入れられる可能性があると思われる。そこで、次項では、植物工場で生産される植物を質的に変化させ、生産性および付加価値を高めようとする試みを「生物学的アプローチ」として述べてみたい。

2. 生物学的アプローチ

植物の状態をセンサ等により正確に把握し評価することができ、かつ、それに応じて植物の物質生産に最適化された環境制御を行うことが可能であるならば、現状よりもっと高収率な植物生産が実現できるはずである。そのようなアプローチは Speaking Plant Approach (SPA) と呼ばれ、橋本ら⁽³⁾により提唱されてきたものである。その成果は膨大であってここに記しうるものではないが、特に植物工場では狭い空間に植物を並べてセンシングでき、その結果を環境制御にすばやくフィードバックできる可能性が高いために、SPAは植物工場に非常に有用な考え方として盛んに取り入れられてきた。別の言い方をすると、植物工場技術は、主としてセンシング技術、環境調節技術とその装置、栽培管理プログラム等を中心に開発されてきた。その成果が現在の高い生産性を可能にしている。とはいえ、植物工場では露地栽培に比べて生産にコスト(設備投資分も含めて)がかかるため、生産性を高くしてそれをペイしようとするのは容易でない。そこで、現実的には、安全で高品質、食味がよい、栄養価が高い、廃棄部分が少ないなどといった付加価値をつけて、露地もの野菜よりも比較的高い価格で生産物が販売されることになる。また、なんらかの付加価値をつけることができれば、事業としてより大きな成功をおさめられる。いかに生産物の付加価値を高めるかが植物工場事業における基本的な課題といえる。そこで、植物の質的变化、例えばポリフェノールやアスコルビン酸といった成分量の増大、あるいは、硝酸イオンのような健康上の問題が指摘されているような成分量の減少などをめざして活発な検討がなされてきた。本項では、まず主要な環境条件を変動させた場合の植物工場野菜の質的な変化についてまとめたい。次いで、遺伝子組換え技術を用いて植物を基本的に変化させ、より生産性を高めたり、より付加価値の高い生産物を得ようとする試みについて述べてみたい。

2. 1 環境調節による質的な変化

従来の植物工場施設は標準化されているとはいいがたかったため、栽培に適している既存品種を選ぶ、あるいは、育種するという取り組みは行われてきたものの、育種上の目標設定があいまいであった点は否定できない。結果、より望ましい状態の植物を得るための検討が各々の施設で行われ、それが現在の環境調節の基盤となっている。以下には、主要な環境条件を変動させた場合の植物工場作物の質的な変化を利用する試みについてまとめたい。

植物工場では一般に養液栽培、ないし、養液を固相に供給しつつ栽培が行われるので、養液の組成や供給量を変化させることによって植物にストレスを与えることができる。北野ら⁽⁴⁾はその総説で、「植物に致命的な障害や著しい生育抑制が生じない程度の浸透圧ストレスと酸化ストレス」を誘導することによって、「有用物質が高濃度に集積した付加価値の高い野菜の生産が可能であること」が実証されつつあると指摘している。例えば、トマトの糖度を高めるために適度な浸透圧ストレスを与えるといった操作は実際に行われている。浸透圧ストレスの影響に関して、例えば、圖師ら⁽⁵⁾は、水ストレスと塩ストレスとでトマトの成分に異なる影響がみられることを報告している。彼らは、機能性成分含量の高い、あるいは、食味に優れた、といった商品価値の高いトマトを生産するためには、水ストレスと塩ストレスを適度に調整した生育環境とすることが求められるとした。松本ら⁽⁶⁾は、カイワレダイコンの示す抗酸化性が、給水量を制限して栽培することで高まることを報告している。カイワレダイコンの抗酸化活性はそのポリフェノール類の蓄積と関係しており、水分ストレスによってフェニルプロパノイドの生合成系が活性化されたと考えることができる。ただし、それが水分ストレスに対する直接的な応答によるものかどうかは明らかではない。松本ら⁽⁷⁾はまた、カイワレダイコンの生育および抗酸化活性に対する気温の影響を観察し、低温下においてポリフェノール類が蓄積すること、それによって、カイワレダイコンの抗酸化能が増大することを報告している。温度の影響について、例えば松添ら⁽⁸⁾は、夜温がイチゴの果実成分（糖、有機酸、アミノ酸、アントシアニン類、エラグ酸）の含量に影響をおよぼすことを明らかにし、イチゴの果実中の機能性成分の含量増と食味とを両立させることは困難と結論づけたうえで、昼夜温の総合的な管理の重要性を指摘している。

光も植物に質的に大きな変化をもたらす。例えばホウレンソウの場合、長日条件で生育が促進されるため、夜間の短時間補光などによる成長促進法が検討されているが、一方で、長日で抽苔するという問題がある。この問題に対して浜本ら⁽⁹⁾は、数日間隔での日長延長を週2回行うと抽苔を防止しつつ生育を促進できるとしている。多くの植物では生育に最適な日長時間が存在し、例えばそれはトマト苗で16時間といわれている。なお、回転率の高い葉菜として代表的なレタスは、夜間（暗期）が短くても、あるいは無くても育つことができる野菜の一つである。このような成長に対する影響とともに、光条件は二次代謝物生合成に影響を与えることがよく調べられている。例えば、村上ら⁽¹⁰⁾は、暗期挿入および暗期の温度条件によりシントウの辛味を低減しうることを報告している。松本ら⁽¹¹⁾は、強光によるカイワレダイコンの総ポリフェノール含量の増加を報告している。海老澤ら⁽¹²⁾はUV-B、UV-Aおよび青色光で夜間補光した場合のサニーレタスの成長と着色について観察し、UV-Bと青色光を併用すると成長とアントシアニン含量が著しく増加することを報告している。この実験は、水耕栽培でサニーレタスの着色が不足する問題を解決するために行われた。前田ら⁽¹³⁾は、ブラックライト（UV-A）と白色蛍光管または赤色蛍光管を組み合わせることで、ブロッコリーのスプラウトの総ポリフェノール含量を増加させることができた。また、岩井ら⁽¹⁴⁾は、アカジソへの青色LEDや近紫外光と昼白色蛍光灯の同時照射効果について、太陽光のみ、昼白色蛍光灯のみを用いた場合と比較し、青色LEDと昼白色蛍光灯の同時照射で総アントシアニン含量が増大すると同時に生育も促進され、近紫外光と昼白色蛍光灯の同時照射で還元型アスコルビン酸含量が増大することを報告している。庄子ら⁽¹⁵⁾は、赤色光と青色光を照射したレッドリーフレタス

のアントシアニン蓄積と、その生合成遺伝子の発現について詳細に調べ、アントシアニン生合成や蓄積に赤色光と青色光の割合が密接に関係していること、カルコンシンターゼなどが青色光の光量に敏感に応答して発現量が増大することなどを報告している。これら、光の調節により植物の質を変化させる試みについて考える際、忘れてならない点は、近年、様々な光源（LED、冷陰極管、陽陰極管、有機 EL）が開発され、それらが量産化されることによって安価となり、植物工場にも利用できる状態になってきた、ないし、利用する可能性が高まってきたことである。また、植物工場の数自体が増える傾向にあるため、市場規模の予測を受けるかたちで、植物工場用に開発されたと呼んでよいような（植物の形態形成や光合成有効波長を意識した）光源も現れてきた。従来は照明に蛍光灯がよく用いられ、発熱量が多いこと、波長が必ずしも植物にとって効率よいものでないこと、寿命がLEDなどと比較して短いこと、水銀が使われているので廃棄物処理に注意が必要なこと、などが問題視されていたが、それらの問題を解決し、さらに、より高密度に栽培棚を配置した植物工場が実現可能になってきたといえる。光による植物の質的改良の可能性とともに、これら新しい光源とその利用技術の開発には今後とも目が離せない。

二酸化炭素の施用（施肥）は、一般的な温室等を用いた研究において、成長を促進させることが知られている。二酸化炭素施肥下では無機窒素要求性が高くなるが、通常は養液中に窒素が十分量含まれる。高二酸化炭素濃度下では気孔が閉鎖気味になるので、水利用効率の向上につながるともいわれている⁽¹⁶⁾。ただし、開放系で行われた実験では、暗期呼吸量が著しく増加するなどの現象がみられ全体として必ずしも二酸化炭素施肥効果はないという報告⁽¹⁷⁾もある。また、二酸化炭素を高濃度にしても光合成が促進されなくなったり、長時間ではむしろ抑制されるという現象がよく知られている。高二酸化炭素濃度下に置かれた植物では光合成産物の生成量が転流速度をうわまわり、葉緑体内に過剰にデンプン粒が蓄積して膜系に障害を与える例もあるという。Rubisco 含量も低下する。一方、二次代謝物含量などの積極的な改変をめざして植物工場で二酸化炭素施肥を行った例は知る範囲では文献上見あたらなかった。しかし、二酸化炭素濃度の増加が気温の変化と関係してアントシアニン合成を誘導するといった報告⁽¹⁸⁾や、屋外栽培のイチゴでアスコルビン酸など抗酸化性成分量が二酸化炭素施肥で高まったとする報告⁽¹⁹⁾から、二酸化炭素も植物工場作物の質的変化に利用される可能性があると思われる。

このほか、植物に影響する様々な要因や化学物質（気圧、エチレンガス、生物的／非生物のエリシターなど）が植物の二次代謝物含量を変化させると期待できる。上記の二酸化炭素の例と同様に、現状では、質的改変の目的で植物工場内でこれらの処理を行った例は限られていると思われるが、今後、植物工場作物に期待されるもの（味、機能性など）を実現するために、各環境調節や処理が組み合わせられて実施されることになるであろう。

2. 2 遺伝子組換えによる質的な変化

既存の品種を植物工場で栽培した場合に期待される質的な変化について述べてきたが、当然のことながら、その知見は遺伝子組換え植物の生産にも生かされるであろう。後述するように、植物工場による遺伝子組換え植物の栽培は、主に有用物質生産を目的として計画され、現在開発途上といえる。その成果が期待されるが、さらに、遺伝子組換えによって植物工場内における環境調節の効果を相乗的に発揮させられるようになるかも知れない。つまり、植物の性質自体（有用物質を生産するための媒体として）の改変によって特定の物質の生産性が増したり、より多くの有用物質を含むような植物工場用の植物が開発される可能性は十分にある。現状ではそれを検証できるほどの事例はないが、以下には、日本における植物工場用遺伝子組換え植物の開発の動きを紹介したい。次いで、有用物質生産媒体としての植物の改変にむけての一つの試みを紹介する。

2. 2. 1 遺伝子組換え植物により有用物質を生産する試み

植物を改変して他生物起源の有用物質を生産させることは早くから試みられ⁽²⁰⁻²⁵⁾、すでに一部で商業化されている。それは分子農業 (Molecular Farming) とも呼ばれ、特にアメリカの農業生産者の間で関心が高いと聞く。目的生産物は、主として単価の高い医薬品である。一例をあげれば、遺伝子組換えタバコで産生させた組換え体ヒトコラーゲンが、動物感染性ウイルス、病原菌、プリオン等の心配がない低エンドトキシンの製品として市販されている (フナコシ社) し、アビジンがトウモロコシで、Tissue Factor Proteinase Inhibitor-II がタバコで、各々生産され販売されている (いずれも Sigma 社)。植物を用いると、動物に対して病原性のあるウイルスなどの混入がない (ヒトと植物に共通に感染する病原性生物は知られていない)、植物そのものを食べることでその成分を摂取させるといった従来にない薬物投与が可能になる、などの利点がある。日本では、遺伝子組換え植物を直接口にするに対する消費者意識に配慮するかたちで、糖尿病や花粉症など病気の治療の目的ないしそれに準じた使用を意識した開発が先行して続けられてきているが、社会情勢も変わりつつある。例えば毎日新聞平成 22 年 5 月 25 日付は、遺伝子組換えマンゴーの輸入承認の可能性があると報じた。直接口にする遺伝子組換え植物としては納豆で早くに例があるが、遺伝子組換えマンゴー輸入が実現すれば、生食目的に遺伝子組換え植物が輸入販売される初めての例になるという。そのような例が多くなると、遺伝子組換えによって特定の生理活性物質濃度を格段に高めた、あるいは、新しく生理活性物質を含有するようになった野菜が、いわば「健康増進野菜」として普通に我々の口に入るようになるかもしれない。

ところで、生理活性物質は人体に対して影響を及ぼすものであるから、それを高含量で含むようになった作物を栽培する場合には、遺伝子の意図しない拡散に注意しなければならない。アメリカのように農場間に十分な距離を確保できる場合はよいかも知れないが、日本の耕地事情ではそれが難しく、また、風評被害を受ける恐れもあって、条例等で栽培を厳しく制限ないし禁止している自治体が多い。したがって、開放系で遺伝子組換え作物を生産することは現実的にきわめて困難と予想される。とはいえ、生理活性成分に対する需要は今後も高まり続けると思われ、それに対処し、より環境にやさしく省資源的に生理活性成分を入手する経路として植物工場、特に完全閉鎖系植物工場の果たす役割は大きくなると予想される。その意味で、経済産業省が主導する大規模プロジェクトである「植物機能を利用した高度モノ作り基盤技術開発/植物利用高付加価値物質製造基盤技術開発プロジェクト」の動向は注目される。表 1 にはその中間報告に示された課題名と実施者をまとめた。このプロジェクトは、「モデル植物種ではなく各実施者が事業化を狙うワクチンや機能性成分等の目的物質を発見・生産・製品化させるのに現在最適な植物種を選定」し「完全閉鎖系の栽培システム (遺伝子封じ込めから水耕栽培技術まで一貫して含む) を開発すること」を第一として開始されたものであるため、近未来において植物工場で生産される可能性の高い遺伝子組換え植物の姿を推定させるものでもある。ジャガイモ、ダイズのように現状では植物工場生産に向かない植物が含まれているのは、生産物に期待される付加価値の高さによるものであろう。加えて、種子など貯蔵器官に生産物を集積させると保存性が高まるといった効果も期待されている。

2. 2. 2 基礎的代謝能の改変による植物の開発の可能性

上述の経済産業省のプロジェクト研究にも取り入れられていたテーマがあることからうかがえるように、基本的な代謝経路に遺伝子工学的改変をくわえ、目的物質の生産性はもちろん、植物工場における植物の生産性自体を高める可能性が考えられる。そのことに成功すれば、植物工場内の環境自体を劇的に変え、環境調和型植物工場の実現に近づくと期待される。

表1 経済産業省による「植物機能を活用した高度モノ作り基盤技術開発／植物利用高付加価値物質製造基盤技術開発」プロジェクトにおける課題と実施者名

課題名	実施者
閉鎖系植物工場用組換えイネ作成技術の開発	日本製紙(株)
組換えイネを用いる米型経ロワクチンの研究開発	ロート製薬(株)
組換えイネによる有用物質生産のための閉鎖型栽培システムの構築の研究	(株)朝日工業社
組換えジャガイモを利用した家畜用経ロワクチン素材の開発	(社)北里研究所
組換えダイズによる機能性ペプチド生産技術の研究開発	北興化学工業(株)
組換えダイズによる有用物質生産システムの研究開発	新菱冷熱工業(株)
組換えレタスによる家畜用経ロワクチンタンパク質生産の研究開発	出光興産(株)
組換えレタスによる家畜用経ロワクチンタンパク質生産システムの研究	日本植生(株)
医・農・工融合によるヒトチオレドキシシン1産生レタスの生産技術の開発	(国)奈良先端科学技術大学院大学
組換えイチゴによる高機能性物質複合生産技術の開発	北海三共(株)
高機能性物質発現イチゴの高効率栽培システムの構築	鹿島建設(株)
組換えレンギョウ等による高機能性成分生産及び閉鎖系での栽培システム構築の開発	(財)サントリー生物有機科学研究所
組換えトマトでのミラクリン生産をさらに改良・高度化するための基盤技術	(国)筑波大学 生命環境科学研究所
組換えトマトを利用したミラクリン製造の実用化を目指す研究開発	(株)インプラントイノベーションズ
プレニルトランスフェラーゼ遺伝子を利用した植物代謝工学技術の開発	(国)京都大学 生存圏研究所
基質特異性や反応産物特異性、反応効率を改変した植物導入のための放線菌由来プレニルトランスフェラーゼ	(国)東京大学 生物生産工学研究センター
閉鎖型植物生産施設に適した有用物質生産基盤植物の開発研究	(独)産業技術総合研究所
植物型糖鎖修飾を抑制した植物作出技術開発	(国)九州大学 農学研究院
ウイルスベクターを用いた高効率発現システムの開発	ホクレン農業協同組合連合会 グリーンバイオ研究所
高効率物質生産に寄与する多重遺伝子発現と転写翻訳系改変に関する研究開発	(国)横浜国立大学 環境情報研究院

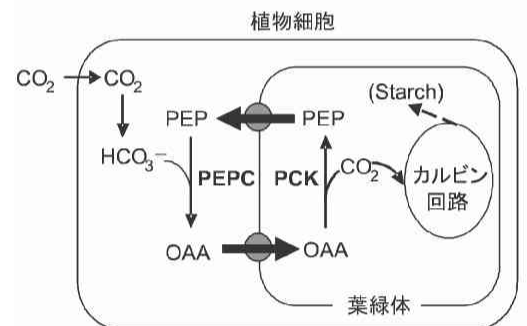
経済産業省のHP(http://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/e00/03/h20/312.pdf)より抜粋

植物生産にとって最も基本的な代謝は光合成である。前述のとおり、植物工場内では二酸化炭素濃度を高めることができ、水分や無機栄養の供給も適切に管理できるうえ、光エネルギーの供給条件（強度、波長組成、日長など）もプログラムすることができる。したがって植物工場では、その植物のもつ潜在的な光合成能を十分に発揮させる条件を実現できるように思われる。ここに、代謝工学的手法を取り入れればさらに物質生産性の高い植物を開発できると期待される。あるいは、植物の基本的な成分を改変することができるかも知れない。

例えば Chan ら⁽²⁶⁾ は、C4 型光合成に関連する基本的な酵素であるホスホエノールピルビン酸カルボキ

シラーゼ (PEPC) を改変して植物の栄養要求性を変化させた。この研究では、*Synechococcus vulcanus* 由来の PEPC がリンゴ酸などによるフィードバック阻害をほとんど受けないことに着目し、C3 型植物であるシロイヌナズナでこれを高発現させて影響を解析している。結果、フェニルアラニンやチロシンなど芳香族アミノ酸に対する要求性が見られるようになり、その原因は PEPC の基質であるホスホエノールピルビン酸 (PEP) の相対的存在量が減少したためと推定された。この研究は、植物の解糖系から TCA サイクルに関連する酵素 (少なくとも PEP の関連する経路について) を改変することによって植物の性質を変更できることを示唆している。PEP はシキミ酸経路の起点となる重要な化合物であり、この経路は植物の固定する炭素の 5 分の 1 に関与するとも言われているので、葉緑体内 PEP 濃度の変化は、フェニルプロパノイドなどその代謝物の量に大きく影響すると予想される。

では、PEP を増加させた植物では、これらシキミ酸経路由来の代謝物が増大し、例えば、クマリン類、タンニン、リグニン、フラボノイド、スチルベン、フェニルプロパノイド系アルカロイドなどの含量が高まるであろうか。この観点から、現在、我々はホスホエノールピルビン酸カルボキシキナーゼ (PCK) の導入効果に注目している。PCK は、オキサロ酢酸 (OAA) を PEP に変換する反応を触媒する酵素である。変換の過程で OAA は炭素を二酸化炭素として失う。同時に ATP が 1 分子失われるので、エネルギー収支的には不利な反応のように見えるが、C4 型光合成を行う植物では、この酵素の触媒する反応により維管束鞘細胞内の葉緑体内に二酸化炭素を濃縮し、これによって Rubisco 周辺の二酸化炭素を増やして炭酸固定能を向上させることに成功している。一方、フェニルアラニンやチロシンなどは、PEP を出発物質として葉緑体で生合成される。したがって、葉緑体内で PCK を高発現させると、シキミ酸経路由来の代謝物含量の高い植物が得られる可能性があるのではないかと考えている。ところで、PCK 導入により OAA を消費する反応が新たに行われると、細胞内 OAA が相対的に不足する恐れがある。つまり、葉緑体内に運び込まれた OAA がそこで活発に消費されると、例えば TCA サイクルやアスパラギン酸等の合成に影響する可能性がある。そこで、我々は、この OAA 減少の問題を解決する方法として、図 1 に示すサイクルを形成させることを考えている。すなわち、葉緑体で 3 つ (PCK と、OAA および PEP のトランスポーター)、細胞質で 1 つ (PEPC) の遺伝子を発現させることによってサイクルを形成させる。ただし、各トランスポーターの導入は必要ないかもしれない。これによって、物質の回転を早め、相対的に利用可能な葉緑体内 PEP の量を増やすと同時に、細胞内の OAA の枯渇を防ぐことができるのではないかと考えている。これは、一つの細胞内で C4 光合成に似たサイクルを形成させることになるため、「C4 ミニサイクル」として泉井らのグループによって提案されたもの⁽²⁷⁾と同じであるが、フェニルプロパノイド含量の高い植物の開発にもつながるかも知れない。



PEP;ホスホエノールピルビン酸
PEPC;ホスホエノールピルビン酸カルボキシラーゼ
OAA;オキサロ酢酸
PCK;ホスホエノールピルビン酸カルボキシキナーゼ

図1 OAA減少防止とPCKによるPEP生産を行うための「C4ミニサイクル」模式図

(Endo⁽²⁷⁾を改変)

3. システム工学的アプローチ

3. 1 植物工場の生産性予測モデル

植物工場が、産業的な製造システムとして社会的に普及するための必須要件は、計測機器や制御装置を備えた高価な設備コストと、人工光源や温度などの環境条件の制御に要するシステムの、運転コストに対する生産物収益の優位性である。植物栽培による医薬品原料や健康食品原料を製造する工程は、生物の複雑で特異性の高い触媒機能により高価な商品を効率的に製造し、市場に提供する手段として有効であると

期待される。また、日照条件や風雨、病害虫、伝染病、雑草などの自然環境の影響を受けることなく、閉鎖型植物工場において生育状態を完全に制御することが可能となる。遺伝子操作を利用した目的生産物の高速大量製造法の優位性は、微生物や細胞を用いた反応系では広く認められており、バイオリクター内部の細胞密度を上限まで高めたのち、目的の生産反応を誘導することで大量製造する技術が確立されている⁽²⁸⁾。また、このような微生物バイオリクターシステムと製造工程の自動制御手法は、ファインケミカル分野だけではなく、バイオアルコール燃料⁽²⁹⁾や生分解性プラスチック原料^(30, 31)など、燃料や産業用素材の連続大量製造法としても実用化されている。植物を用いた反応系の場合も微生物培養プロセスと同様に、今後はバイオリクターシステムを応用した工場化が、反応工程の効率化と大量製造の手段として有用であると期待される。植物栽培プロセスが微生物培養プロセスと大きく異なる点は生物個体のサイズであり、サイズに依存して反応工程時間が長期化することである。さらに問題なのは、生産期と生産物の回収フェーズに達するまでに要する時間が長く、途中の段階における消費エネルギーと原料や燃料のコストが膨大であるにもかかわらず、最終段階に至る前になんらかのトラブルが発生し、生産物が予定通りに回収できなくなった場合には、多大な損害を被るリスクが大きいことである。微生物の場合は、培養開始後生産物の回収までの全工程を数日間で終わることができるため、たとえ雑菌汚染や装置の異常により工程を中断する状況があった場合でも、年間を通した事業計画に対する損失額は僅かであるか、または、その後の製造計画を変更することで回復可能である。一方、種子や苗を植えてから収穫までに半年を要する栽培工程では、センサーの故障やシステムトラブルによる環境条件の異常などにより、収穫前に目的生産物が回収できなくなった場合には甚大な被害が発生し、事業基盤そのものを揺るがしかねないことにもなる。このような潜在的な工程リスクとともに、人工環境による長期栽培では、設備の日々の運転コストも積み上がるため、最終的に生産物により利益を生み出すことは容易ではない。このため、現在稼働中の閉鎖型植物工場の生産物は、レタスなどの葉ものに限定されているのが実情である。これらの植物工場作物は、栽培期間が比較的短期であり、栽培フェーズを数ステップに分けて多段階シーケンス反応工程として、連続的に一定の時間差で異なるフェーズの製造工程を並行して進められるという共通点がある。そして、もう一つの重要な要因が、植物個体の草丈が低いことである。これは、工場の立地面積が生産性に対する固定条件であるため、単位面積と単位時間あたりの生産性に依存する製造工程の収益性を高めるには、短時間で栽培できることと、草丈の低い作物を、垂直方向にできるかぎり多くの棚を重ねて多層栽培することが必須要件となるからである。

表2は、国内の主な園芸作物のおおよその単価と栽培期間をまとめたものである。市場単価と面積あたりの生産性は、農林水産省による園芸作物の出荷額と出荷量および栽培面積の2007年統計値を用いて、計算により求めた⁽³²⁾。また、各作物の栽培期間は、市販の園芸作物の参考図書⁽³³⁾に記載のある平均的な期間を引用した。人工照明を備えた各棚の天盤（上段の栽培層の床盤）の厚さは、薄いことが望ましいため、設定目標値として20 cmとした。表2に記載の数値を次式の実算モデルに代入することで、植物工場における年間あたりの生産性を、出荷額の予測概算値として求めることができる。

$$P_{\text{plantfactory}} = (H_{\text{room}} H_{\text{mono}}^{-1})(M_{\text{product}} A_{\text{culture}}^{-1})(365 t_{\text{generation}}^{-1}) @_{\text{plant}}$$

ここで、

$P_{\text{plantfactory}}$	植物工場の年間の単位面積あたりの出荷額の予測値 [¥ m ⁻² year ⁻¹]
H_{room}	栽培室の床から天井までの高さ [m]
H_{mono}	照明器具と天井床を含む距離 (20 cm) と生体の根の下端部から葉の最上部までの垂直距離の和を満たすのに必要な、単層分の栽培棚の厚さ [m]

M_{product}	植物単個体あたりの生産物の収穫量 [kg unit ⁻¹]
A_{culture}	単個体が占有する栽培面積 [m ² unit ⁻¹]
$t_{\text{generation}}$	栽培開始から収穫までの1サイクルにおいて栽培面積を占有する期間 [day]
@plant	生産物の市場単価 [¥ kg ⁻¹]

すなわち上式は次のように表記できる。

$$\text{年間出荷額生産性} = \text{栽培棚層数} \times \text{収穫密度} \times \text{収穫回数} \times \text{単価}$$

このモデルを用いて計算した、各作物の出荷額の予測概算値を表2にまとめた。実際の工程では、育苗期と栽培後期とでは占有面積も単層棚の必要高さも大きく変動するため、 H_{mono}^{-1} と A_{culture}^{-1} は栽培時間関数として常に最小化することが望まれるが、ここでは基礎となる統計値が平面単層栽培の全国平均値であるため、上記の計算では一定と仮定した。また、各作物の収益性を市場経済性で評価するために、地表に供給される太陽光を原料とした市場商品の競合例として、平成21年11月に政府主導の下でスタートした、電力会社による太陽光発電余剰電力の買取制度を参照した。現在、事業用の場合の余剰電力の買取価格は24円/kWhと設定されており、これを、植物工場の代わりに農地に太陽電池を敷き詰め電力販売事業を行った場合の価値生産性の比較値とした。太陽電池の常用発電能力の実績値としては、Newton ムック「太陽光発電のすべて」(2010年1月)に記載の、東京の南向きの屋根に設置した場合の139 kWh m⁻²year⁻¹を引用した⁽³⁴⁾。この生産能力を用いて太陽光から製造した電気を、24円/kWhで販売した場合、面積あたりの出荷額生産性は3,339 ¥ m²year⁻¹に相当する。

この数値と園芸作物の生産性を比較すると、表2に示すように、単層栽培で太陽光発電の生産性を超える作物は、イチゴのみである。統計値に基づくイチゴの生産性の実績値は2,693 ¥ m²year⁻¹であるが、栽培平面を占有する期間は8か月と与えられるため、年間を通して工場内で平面栽培した場合は、その1.5倍の生産性を見込むことができる。しかし、他の作物は年間を通し環境条件を最適に制御した条件下で栽培しても、単層栽培では太陽電池の収益性に劣る。したがって、栽培棚を垂直方向に積み重ねることが必要となる。一方、太陽電池は垂直方向に積み重ねることができない。それゆえ、太陽電池との比較においては、垂直方向に多層栽培する技術を植物工場に導入することが、面積あたりの収益性を高める主な手段となる。

多層栽培の課題は、採光方法である。植物の太陽光の利用効率は太陽電池よりもきわめて低い。太陽電池は、電磁波のエネルギーを無機物が常時受け取り、発電に利用することができるが、植物の生体分子は、光のエネルギーを受容するごとに生化学反応に変換する時間を要するため、全照射光に十分対応できないためである。トウモロコシやサトウキビなどC4型光合成を行う植物でも、太陽光のエネルギーの数%程度しか利用できないとみられており、また、栽培初期から中期までは、光が照射される耕地面における光の吸収体である作物密度が低いため、年間を通した利用率は1%にも満たないようである。光強度をさほど必要としない園芸作物では、さらに太陽光の利用効率は低いと見られる。したがって、植物工場の屋上や外壁で吸収した太陽光エネルギーを栽培室内に転送し、各段の栽培棚に分散照射するシステムが実用化されれば、多層栽培に必要な光源量は、太陽光のみで十分まかなうことができると予想される。実際には、このような太陽光の分配採光技術は、実用化されていない。植物工場の多段栽培システムの収益性予測においては、採光システムの運転コストを考慮することが不可欠であるが、自然採光システムが最小コストとして比較されるため、太陽光発電による生産性を比較値とすることは妥当な考え方であると思われる。

上記を背景として、各作物を多層栽培する場合に、太陽電池相当の収益性である3,339円に必要な棚層数、および、天井高さが5mの室内を想定した場合の生産性を表2に記載した。イチゴは、単層でも日標値を上回るため、5m室生産性は42千円を超え、太陽電池の発電事業の13倍の生産性を期待できる。また、サラダ野菜の生産システ

ムとして実用化されているレタスとセルリーは、それぞれ14千円と13千円と、草丈の低さと栽培周期の短さが高い生産性をもたらすことがわかる。実際には、イチゴは高い収益性にも関わらず、植物工場の栽培対象としてあまり見られない。これは、8か月にわたる栽培周期の長さ、20度以下に生育適温があるために、冷却設備の設置と運転コストの負担が大きくなることが背景にある。さらに、現在のハウス栽培の製法でも十分に収益性が高いため、農家にとってリスクのある新規の栽培システムを導入する必要性が乏しいからでもある。

イチゴと同様にハウス園芸の高収益性作物であるトマトは、5m室における出荷額生産性が5千円弱にすぎない。これは単層栽培に2.7m程度の高さが必要なため、多層栽培には巨大空間が必要となるためである。草丈や根茎が長いスイートコーン、ゴボウ、サトイモなども、製品単価が安いいため、5m室生産性は1千円に達せず、ダイコンも土壌層の厚みが必要となるため1.6千円に留まる。

表2 単層栽培による園芸作物の生産性の実績と、植物工場（高さ5m室）で多層栽培した場合の生産性の推算値（単価と出荷額は、農林水産省統計情報部局編（平成19年実績）に基づき計算した全国平均値を示す）

品目*	市場単価	面積あたり出荷額	栽培期間	単年換算生産性	草高	生体長*	照明床厚	単層高	3340¥/m ² 相当層	5m高室生産性
	¥/kg	¥/m ²	月数	¥/(年 m ²)	m	m	m	m	層	¥/(年 m ²)
トマト	291	1,521	7	2,607	1.8	2.5	0.2	2.7	1.3	4,793
いちご	1,022	2,693	8	4,040	0.2	0.3	0.2	0.5	0.8	42,082
きゅうり	264	1,113	5	2,672	1.5	2.1	0.2	2.3	1.2	5,809
だいこん	72	243	7	417	0.3	1.1	0.2	1.3	8.0	1,605
ほうれんそう	409	432	4	1,296	0.4	0.6	0.2	0.8	2.6	8,527
メロン	412	869	7	1,490	1.2	1.7	0.2	1.9	2.2	3,964
レタス	180	439	3	1,756	0.3	0.4	0.2	0.6	1.9	14,161
なす	277	713	7	1,223	0.8	1.1	0.2	1.3	2.7	4,632
ねぎ	303	520	5	1,247	0.6	0.8	0.2	1.0	2.7	5,996
キャベツ	76	275	4	825	0.4	0.6	0.2	0.8	4.0	5,427
すいか	157	450	4	1,349	0.7	1.0	0.2	1.2	2.5	5,718
たまねぎ	75	345	8	518	0.5	0.7	0.2	0.9	6.5	2,876
にんじん	95	291	6	582	0.4	0.8	0.2	1.0	5.7	2,909
やまのいも	255	478	9	637	0.5	1.5	0.2	1.7	5.2	1,873
はくさい	54	203	4	610	0.6	0.8	0.2	1.0	5.5	2,935
ピーマン	389	1,426	7	2,445	0.8	1.1	0.2	1.3	1.4	9,259
スイートコーン	197	153	4	458	2.0	2.8	0.2	3.0	7.3	763
さといも	235	174	8	261	1.0	1.5	0.2	1.7	12.8	767
ごぼう	181	280	10	336	0.5	1.5	0.2	1.7	9.9	989
さやいんげん	701	306	4	917	1.0	1.4	0.2	1.6	3.6	2,866
かぼちゃ	146	147	5	354	1.5	2.1	0.2	2.3	9.4	769
れんこん	442	513	4	1,538	0.4	1.4	0.2	1.6	2.2	4,807
ブロッコリー	310	286	5	687	0.4	0.6	0.2	0.8	4.9	4,520
かぶ	114	273	4	820	0.5	0.7	0.2	0.9	4.1	4,555
にんにく	485	294	4	882	0.8	1.1	0.2	1.3	3.8	3,339
さやえんどう	879	347	8	521	1.0	1.4	0.2	1.6	6.4	1,627
セルリー	237	1,183	6	2,366	0.5	0.7	0.2	0.9	1.4	13,147
カリフラワー	167	242	5	580	0.4	0.6	0.2	0.8	5.8	3,815
平均	301	544	6	1,194	0.8	1.2	0.2	1.4	4.5	5,876

品目* 農林水産省による統計表に記載の品目名を使用

生体長* = 草高 + 栽培に必要な根圏の長さ

3. 2 植物の生育制御による生産性の向上

このように単価とともに個体の草丈は、植物工場の栽培作物を選択する上で、きわめて重要な要因である。一方、果実栽培系では草丈が長くなると枝から伸展した葉の密集部の下には、なにも無い空間を形成する。この植物個体がつくる空隙層体積も植物工場の生産性を低下させる一因となる。したがって、空隙層率を低く抑えた栽培条件下で、果実を十分量生産する生育環境をつくるのが、植物工場の生産性を高める上でのもう一つの重要な技術となる。植物は一般に光に向かって茎を伸長する特性をもつ。また、光刺激による細胞の分化と生育には照射光の波長依存性があるとみられる。そこで、植物工場では特定の波長の光により照射条件を制御することで、草丈を抑えたまま着花や果実の生産を誘導することが可能であると考えられる。このような目的の下、著者らは人工光源栽培システムにより、果実作物の効率的な空間利用栽培方法を検討している。

最近の実験では、省電力型の赤色蛍光灯と青色蛍光灯を組み合わせた光照射による小型栽培ケース内で、トマト（2種）、パプリカ、メロン、ナスの5種類の作物の生育挙動を観察した。国内大手太陽電池メーカー4社（シャープ、三洋電機、三菱電機、京セラ）による家庭用太陽電池の公称最大出力の平均値が約 140 W/m^2 と見積もられるため⁽³⁴⁾、栽培ケースの光源用蛍光灯の消費電力も、栽培面積あたり 140 W/m^2 となるように調整した。この光源による照度は、光源から 10 cm 直下で約 $5,500 \text{ lx}$ となったが、光源から離れると急減し、 50 cm 下での照度は約 $3,000 \text{ lx}$ 程度となった。一方、比較のために居室の北向き窓付近で、室内天井の常用蛍光灯と、窓ガラスを通して得られる屋外の自然光を光源とした栽培も並行して行った。日中の窓際の照度は、主に屋外の散乱光に依存するため垂直方向の照度差は小さく、天気と時刻に大きく依存し、晴天の日は $3,000 \text{ lx}$ から $10,000 \text{ lx}$ 近く得られたが、雨天の日は $1,000 \text{ lx}$ から $6,000 \text{ lx}$ 程度であった。その結果、人工光源による栽培ケース内では、5品種いずれも窓際採光の場合よりも、草丈が $24\% \sim 56\%$ 低くなり（図2）、ナスとパプリカ、メロンは着花前後に生長が停止した。一方、ミニトマト（フルティカ）は、栽培ケース内と窓際とでは、草丈が大きく異なったにも関わらず、どちらの場合でも同様に果実の成長が認められた。これらの結果は、比較的弱い照度でも生育できる品種では、光の波長と近接照射条件などを制御することで、草丈の過剰な伸長を防ぎながら、果実を栽培できることを示唆している。また、草丈を低く抑えることで施設内における栽培棚数を増し、生産性を高められることが考えられる。



図2 北向きの蛍光灯照明部屋の窓採光と、赤青蛍光灯栽培ケース内で苗から3週間栽培した後の果実作物の形態比較（写真左：ナス‘千両二号’、写真中：ミニトマト‘フルティカ’、写真右：青肉メロン）

以上のように、従来は栽培期間が短いことと草丈が低いことが、植物工場生産の主要条件とされてきたのが実情であるが、今後は、採光システムや照射光の波長制御、栽培フェーズごとの生体占有空間率の最適化などにより、比

較的草丈が高い果実の栽培においても生産性を高める目的のために、多層栽培技術の実用化が進められると考えられる。すなわち、環境条件を最適制御し反応空間内の生体触媒密度を高めることで、生産性は現在の単層栽培よりも飛躍的に高まると期待される。

4. おわりに

本稿では、植物工場における生産を高効率化・高付加価値化するための2つの重要なアプローチ、すなわち、生物学的アプローチとシステム工学的アプローチから植物工場における生産の現状と将来の可能性について考えた。

植物工場の考え方は上述したような閉鎖型空間における完全人工環境型と、園芸施設として広く利用されているハウス栽培など半閉鎖型空間の自動化システムがある。いずれの場合も、従来の園芸施設よりも高額な設備投資を必要とするが、設備投資と運転コストに対する収益性の比率を、従来の農業機械化の水準並にすることは可能である。単位面積あたりの生産性を高めるためには、植物の生物学的な環境応答のしくみを解明してそれを有効に利用する技術を開発するとともに、植物自体の価値を遺伝子レベルから高めるとともに、物質生産プロセスを最適に設計制御することが不可欠である。また、太陽光エネルギーの効率的な利用技術の開発は、自然エネルギーの利用による温暖化ガスの削減や環境問題の克服にも役立つと期待される。このように、高い省資源性と低い環境負荷の両者を実現するために、未来型の植物工場の技術開発が広い見地から進められている。

5. 参考文献

- (1) 古在豊樹 (2009) 太陽光型植物工場, オーム社
- (2) 田口常正 (2009) 白色LED照明のすべて, 工業調査会
- (3) Hashimoto, Y. (1989) Recent strategies of optimal growth regulation by the speaking plant concept. *Acta Hort.*, 260, 115-121
- (4) 北野雅治、日高功太、 圖師一文、 荒木卓哉 (2008) 養液栽培における根への環境ストレスの応用による野菜の高付加価値化. *植物環境工学*, 20, 210-218
- (5) 圖師一文、松添直隆、吉田敏、筑紫二郎 (2005) 水ストレス下および塩ストレス下で栽培したトマトにおける果実内成分の比較. *植物環境工学*, 17, 128-136
- (6) 松本恵子、多田雄一、清水浩、澁澤栄 (2009) カイワレダイコン (*Raphanus sativus* L. 'Kaiwaredaikon (Japanese radish sprout)') の生育および抗酸化活性に与える給水量の影響. *植物環境工学*, 21, 79-85
- (7) 松本恵子、多田雄一、清水浩、澁澤栄 (2009) カイワレダイコン (*Raphanus sativus* L. 'Kaiwaredaikon (Japanese radish sprout)') の生育および抗酸化活性に与える気温の影響. *植物環境工学*, 21, 29-34
- (8) 松添直隆、川信修治、松本幸子、木村宏和、圖師一文 (2006) 夜温がイチゴ果実の糖、有機酸、アミノ酸、アスコルビン酸、アントシアニンおよびエラグ酸濃度に及ぼす影響. *植物環境工学*, 18, 115-122
- (9) 浜本浩、池田敬、嶋津光鑑 (2004) 人工気象室における数日間隔での日長延長処理がハウレンソウの生育に及ぼす影響. *植物工場学会誌*, 16, 80-84
- (10) 村上賢治、井戸睦己、榊田正治 (2006) 蛍光灯連続光下における暗期挿入および暗期の温度がシシトウ果実の辛味発現に及ぼす影響. *植物環境工学*, 18, 284-289
- (11) 松本恵子、多田雄一、清水浩、澁澤栄 (2009) カイワレダイコン (*Raphanus sativus* L. 'Kaiwaredaikon') の生育および抗酸化活性に与える光強度の影響. *植物環境工学*, 21, 117-122
- (12) 海老澤聖宗、庄子和博、加藤美恵子、下村講一郎、後藤文之、吉原利一 (2008) UV-B, UV-A およ

び青色光の夜間補光がサニーレタスの成長と着色に及ぼす影響. 植物環境工学, 20, 158-164

(13) 前田智雄、角田英男、大島千周、前川健二郎、鈴木卓、大澤勝次 (2006) 補光装置によるアブラナ科スプラウトのポリフェノール含量および抗酸化能の増大. 植物環境工学, 18, 35-41

(14) 岩井万祐子、太田 万理、土屋 広司、鈴木 鐵也 (2009) 幼植物期のアカジソにおけるアントシアニン生成向上への青色 LED と蛍光灯の同時照射効果. 植物環境工学, 21, 51-58

(15) 庄子和博、後藤英司、橋田慎之介、後藤文之、吉原 利 (2010) 赤色光と青色光がレッドリーフレタスのアントシアニン蓄積と生合成遺伝子の発現に及ぼす影響. 植物環境工学, 22, 107-113

(16) 今田勝 (2004) 高CO₂ In: 新農業環境工学-21世紀のパースペクティブ (日本生物環境調節学会編) pp.110-111, 養賢堂

(17) Leakey, A. D. B., Ainsworth, E. A., Bernacchi, C. J., Rogers, A., Long, S. P., Ort, D. R. (2009) Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. J. Exp. Bot., 60, 2859-2876.

(18) Tallis, M. J., Lin, Y., Rogers, A., Zhang, J., Street, N. R., Miglietta, F., Karnosky, D. F., De Angelis, P., Calfapietra, C., Taylor, G. (2010) The transcriptome of *Populus* in elevated CO₂ reveals increased anthocyanin biosynthesis during delayed autumnal senescence. New Phytologist, 186, 415-428

(19) Wang, S. Y., Bunce, J. A., Maas, J. L. (2003) Elevated carbon dioxide increases contents of antioxidant compounds in field-grown strawberries. J. Agric. Food Chem., 51, 4315-4320

(20) Daniell, H., Streatfield, S. J., Wycoff, K. (2001) Medical molecular farming: production of antibodies, biopharmaceuticals and edible vaccines in plants. Trends in Plant Science, 6, 219-226

(21) Giddings, G., Allison, G., Brooks, D., Carter, A. (2000) Transgenic plants as factories for biopharmaceuticals. Nature Biotechnology, 18, 1151-1155

(22) Tacket, C. O. (2004) Plant-derived vaccines against diarrhoeal diseases. Expert Opinion on Biological Therapy, 4, 719-728

(23) Walmsley, A. M., Arntzen, C. J. (2003) Plant cell factories and mucosal vaccines. Current Opinion in Biotechnology, 14, 145-150

(24) Streatfield, S. J., Howard, J.A. (2003) Plant-based vaccines. International Journal for Parasitology, 33, 479-493

(25) Horn, M. E., Woodard, S. L., Howard, J. A. (2004) Plant molecular farming: systems and products. Plant Cell Reports, 22, 711-720

(26) Chen, L.M., Li, K. Z., Miwa, T., Izui, K. (2004) Overexpression of a cyanobacterial phosphoenolpyruvate carboxylase with diminished sensitivity to feedback inhibition in *Arabidopsis* changes amino acid metabolism. Planta, 219, 440-449

(27) Endo, T., Mihara, Y., Furumoto, T., Matsumura, H., Kai, Y., Izui, K. (2008) Maize C4-form phosphoenolpyruvate carboxylase engineered to be functional in C3 plants: mutations for diminished sensitivity to feedback inhibitors and for increased substrate affinity. J. Exp. Bot., 59, 1811-1818

(28) Ohashi, R., Mochizuki E., Suzuki, T. (1999) A mini-scale mass production and separation system for secretory heterologous protein by perfusion culture of recombinant *Pichia pastoris* using a shaken ceramic membrane flask. J. Biosci. Bioengi., 87, 655-660

(29) Ohashi, R., Kamoshita, Y., Kishimoto, M., Suzuki, T. (1998) Continuous production and

separation of ethanol without effluence of wastewater using a distiller integrated SCM-reactor system. J. Biosci. Bioengi., 86, 220-225

(30) Ohashi, R., Yamamoto, T., Suzuki, T. (1999) Continuous production of lactic acid from molasses by perfusion culture of *Lactococcus lactis* using a stirred ceramic membrane reactor. J. Biosci. Bioengi., 87, 647-654

(31) Suzuki, T., Yamane T., Shimizu, S., (1986) Mass production of poly- β -hydroxybutyric acid by fed-batch culture with controlled carbon/nitrogen feedings. Appl. Microbiol. Biotechnol., 24, 370-374

(32) 農林水産省統計情報部 (2007) 農業経営統計調査品目別経営統計報告書 平成 19 年産品目別経営統計

(33) 栃木利隆 (2006) 家庭菜園大百科, 家の光協会

(34) 水谷 仁 (2010) 太陽光発電のすべて, Newton, pp.82-88

英文抄録

Biological and Systems Engineered Approach for Highly Efficient and High-value-added Production in Plant Factory System

Motomu Akita¹ and Takahiro Suzuki¹

Plant factories are closed plant production facilities of which the environment is highly controlled. The highly efficient and high-value-added production is required in plant factories because of the significant equipment investment and cost for maintaining the systems. Here we reviewed recent studies to improve the productivity and/or quality of vegetables produced in plant factories based on two important points of view, biological approach and systems engineered approach.

In biological approach, plants' response against artificial environmental factors has been studied to improve quality and/or enhance the level of valuable metabolites. The results strongly indicate that environmental control techniques are expected to be used to provide high-value-added vegetables. Genetic engineering has also been applied to develop new sources of valuable compounds that are mainly originating from other organisms. Genetic engineering is also expected to be applicable for development of suitable plant materials (varieties) for closed production system.

In application of plant factory process, productivity of biomass and its profit depend on the growth profiles and market values of the products. Estimation model of the productivity for various vegetables and crops is introduced by quoting the recent market values of agricultural industry in Japan. The estimation model also evaluates the productivity of vegetables cultured by a multiple-beds system. The economic analysis elucidated that the smaller size and shorter period of cultivation are significant factors for enhancement of the productivity and profit of the system and thereby lettuce has been chosen as the product. Thus, high density cultivation of vegetables in shorter time is essential for developing sustainable novel systems. Consequently, advanced technology for operating multiple-beds culture systems in the limited space with low cost and low energy consumption to maintain optimal environmental condition is required. Current study by the authors for controlling growth cycle by matching photon wavelength with plants cultured in a small bioreactor system is also cited in this report.

1. Department of Biotechnological Science, Kinki University, Wakayama 649-6493, Japan