

植物工場における省エネルギー栽培とワサビ苗生産

Energy-Saving Cultivation and Wasabi Transplant Production in Plant Factory

野 末 雅 之・野 末 はつみ

1. はじめに

食の安全性、食料自給率の低下、農家の高齢化と後継者不足による耕作放棄地の拡大、低迷を続ける農業総生産額、世界では深刻な飢餓と貧栄養人口の増大など、近年、食料生産や食品に対する関心が益々高まっている。一方、温暖化や水不足など食料生産を取巻く自然環境の悪化は年々深刻化し、持続可能な新たな農業生産システムの構築が早急に求められている。

植物工場は多くの基盤技術に支えられた多様なシステムから構成され、従来の農業生産システムにはない多くの利点を有している。国内外の植物工場への期待が増大する一方で、植物工場の稼働に向けての現実的課題がより明確化され、活発な議論が行われている。そのような状況下で、植物工場の課題解決に向けての基盤技術研究拠点の一つとして、先進植物工場研究教育センター(SU-PLAF)が信州大学上田キャンパスに開設された。本稿では、植物工場の課題とSU-PLAFによる取組みについて紹介し、SU-PLAFの研究課題の一つとして、植物工場生産システムの特徴を生かしたワサビ苗生産について紹介する。

2. 植物工場の要素と課題

植物工場の要素として、施設設備、野菜栽培・生産技術および販路・流通の3つがあげられる。各要素にはそれぞれ異なる業種分野が含まれ、互いに連携して植物工場が成立っている。現在、植物工場は従来の農業とは異なる新たな食料生産システムの一つとして期待されている。人工光型植物工場の生産システムの特徴として、省資源(省肥料・節水)栽培、無・低農薬栽培、低生菌数野菜栽培(無洗浄・長期保存)、有害物質の混入回避、安定・計画生産(自然災害、異常気象、鳥獣被害の回避)などがあげられる(表1)。しかし、各要素には様々な課題が山積し(表2)、採算の取れる植物工場の稼働は容易でないのが現状である。植物工

場が新たな食料生産システムの一つとして定着するためには、これらの課題を着実に解決していく必要がある。設置コストや生産のためのエネルギーコストが多額であり、それらが起因して植物工場産野菜の価格が露地ものに比べ高く販路開拓の大きな支障になっている。一方、高品質な食品に対する関心や需要が高まっている。植物工場が新たな産業として社会に定着するためには、単なる露地野菜の代替でなく植物工場でなければ生産できない高品質野菜としての用途の拡大が必要である。

3. SU-PLAF の開設とコンテナ植物工場

SU-PLAFは2011年6月に経済産業省平成21年度先進植物工場施設整備費補助金事業の支援を受けて開設された(図1)^{1,2,3)}。SU-PLAF開所の直前に、東日本大震災および福島第一原子力発電所事故が発生し、日本中に深刻な電力不足の懸念が沸きあがった。もともと植物工場の生産システムの稼働には多大な電力消費を伴い、生産コストの削減は重要課題の一つでもあった。大震災以降、改めて植物工

表1 人工光型植物工場生産システムの特徴

特 徴	内 容
1. 省資源栽培	水、肥料などの資源を節約した栽培
2. 無・低農薬栽培	病害虫フリーの閉鎖環境で栽培、無・低農薬栽培が可能
3. 汚染・異物混入回避	閉鎖環境で栽培、放射性物質や異物の混入を回避
4. 低生菌数野菜栽培	クリーンな栽培環境を維持することで付着する生菌数が減少、野菜の無洗浄、長期保存が可能
5. 周年・安定栽培	自然災害、異常気象、鳥獣被害などを回避、周年・安定生産が可能
6. 機能性野菜(植物)	栽培環境の制御によりビタミン類、ミネラル、植物栄養素など機能性成分含量を安定化、増強が可能
7. 省エネルギー栽培	光エネルギーの効率化、単位面積当たりの生産量増大、歩留まりの向上、栽培作業の軽労化

MASAYUKI NOZUE

信州大学繊維学部 生物機能科学課程
教授、SU-PLAF センター長 農学博士
〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1
信州大学繊維学部

Tel: 0268-21-5353 Fax: 0268-21-5352

E-mail: msnozue@shinshu-u.ac.jp

〈専門〉植物細胞生理学

〈趣味〉DVD鑑賞

HATSUMI NOZUE

信州大学繊維学部 先進植物工場研究教育センター(SU-PLAF) 特任准教授
医学博士

〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1

信州大学繊維学部

Tel: 0268-21-5055 Fax: 0268-21-5384

E-mail: htni-kj@shinshu-u.ac.jp

〈専門〉植物環境生理学

〈趣味〉音楽鑑賞

表2 人工光型植物工場の要素と課題

要素	内 容	課 題
設備	●栽培装置 ●作業自動化 ●環境制御	1. 設置コスト(初期投資)が大きい 2. 規格化が進んでいない 3. LEDの課題(設置コスト、仕様未確定)
		4. 省エネルギー設備の開発 5. 自然エネルギーの利用拡大
生産	●栽培技術 ●高機能野菜の育成	1. 電気代の高騰(エネルギーコスト削減) 2. 省エネルギー栽培法の開発 3. 安全・安心な栽培システムの開発 4. 機能性成分増強のための栽培方法の開発
		1. 植物工場産野菜は露地野菜に比べて高い(高級品) 2. 認知度向上、購買意欲の向上 3. 安全性、機能性における差別化 4. カット野菜など加工品としての販路拡大
販売	●独自の販路 ●露地野菜との非競合	

場の省エネルギー対策は最重要課題として取り上げられた。人工光型植物工場では生産コストの大半を照明エネルギーが占めていることから、省エネルギー化のターゲットは消費電力の低い光源の開発および空調を含めた照明からの発熱対策であった。大震災以降、LED光源への関心が一気に加速した。

SU-PLAFでは、東日本大震災以前から、断熱性・気密性に優れた海上輸送用の冷凍コンテナを植物工場に利用することで高いコストパフォーマンスが得られることに着目し、コンテナ植物工場の研究開発に取り組んできた。その開発目標は、高断熱・高気密を最大限に生かしたコンテナ植物工場における省エネルギー野菜生産の実現である。コンテナ植物工場での実証試験から、コンテナを用いることで節水およびCO₂施肥に高い効果が期待できることがわかった⁴⁾。一方、実用化には栽培用照明エネルギーの削減が必須であるが、これはコンテナ植物工場に限らず、人工光型植物工場すべてに共通する課題でもある。

また、自立的完全制御型植物工場を目指した太陽光利用コンテナ植物工場の開発に取り組んでいる。コンテナ屋根に太陽光集光装置を設置し、光ファイバでコンテナ内部の栽培棚に太陽光を導光し、野菜栽培用の光源として用いた。導光した太陽光の光合成光量子束密度(PPFD)を逐次モニターし、予め設定された光量の不足分をLED照明で補光する太陽光/LEDハイブリッド照明システムを考案した(図2)^{5,6,7)}。晴天時は導光された太陽光のみで十分な光量が得られるためLED補光は作動しないが、太陽光がほとんど導光されない曇・雨天時でもLED補光により栽培に必要なPPFDを確保することができる。1例として、曇天日と晴天日の1日の導光した太陽光と補光を行った場合のPPFDおよびLED補光に要した消費電力量の日変動を図3に示した。このシステムを用いると、導光された太陽光で栽培期間中に要した全光量の40~60%を賄うことができ、照明エネルギーが大幅に削減されることが実証された。



図1 信州大学 先進植物工場研究教育センター(SU-PLAF)とコンテナ植物工場

2011年6月、国立大学法人 信州大学上田キャンパス(長野県上田市)に開設され、植物工場基盤技術の研究開発、植物工場関連企業との交流会、人材育成が行われている。

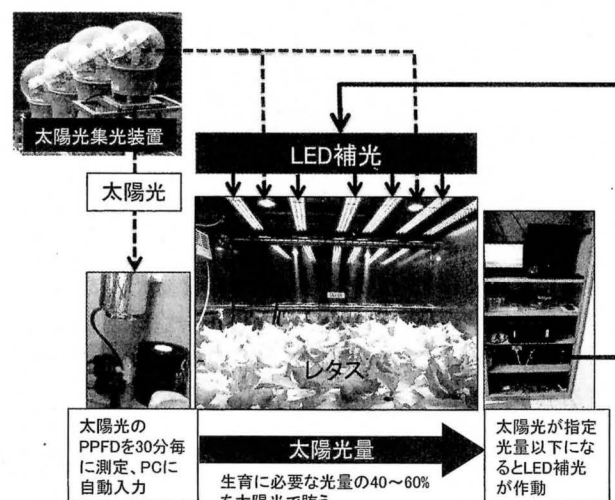


図2 太陽光利用コンテナ植物工場における太陽光/LEDハイブリッド照明システム

太陽光を集光し光ファイバでコンテナ内の栽培棚へ導光、逐次太陽光の光合成光量子密度(PPFD)を計測、不足光量をLEDで補光する。写真はレタス栽培。

4. SU-PLAFの研究課題

SU-PLAFでは、LED光源を用いた省エネルギー栽培に関する研究開発を進めている。植物工場の特徴を活かすことが出来る種々の栽培品目を対象として、生育に必要な光量、光質、日長などの光環境の最適化を目指した研究を行っている。

光は植物にとって唯一のエネルギー源であり、植物は光合成で固定したCO₂量以上に成長することは出来ない。植物は、絶えず変化する太陽光に対して、常により最適な光合成環境を構築するために幾つもの調節機構を備えている⁸⁾。光合成に利用される以上の光エネルギーが植物に照射されると、吸収される光エネルギーが過剰となる。植物は様々な方法を駆使して過剰な光エネルギーが生じないように対処するが、対処できない場合は熱として放散される。これらの強光に対する植物の応答は、植物にとってすべてエネルギー消費を伴う反応である。種々の調節機構を

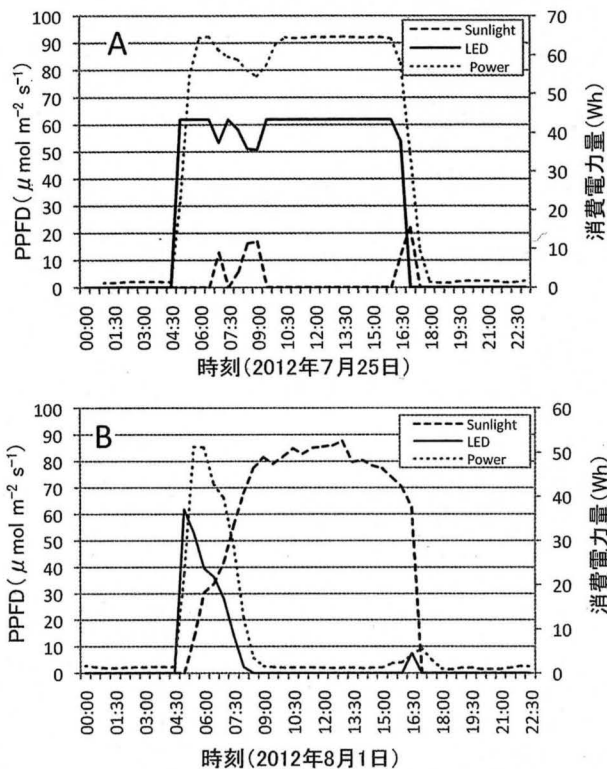


図3 太陽光/LEDハイブリッド照明における導光した太陽光およびLED補光時のPPFDと補光に要した消費電力量の日変動
A: 曇天時、B: 晴天時

駆使しても、それでも過剰な光エネルギーに対処できない場合は光合成活性が低下し、これを光阻害という。人工光型植物工場では、光阻害を引き起こすような光環境を避けることが省エネルギー化につながると考えられる。

人工光型植物工場での最適な光強度は、葉緑体における光エネルギーを吸収して起こる反応(光化学反応)と大気中のCO₂が固定される反応(炭酸固定反応)のバランスとで決まる。前者の光化学反応ではクロロフィル含量や光化学系を構成するタンパク質の量に関与し、後者ではCO₂固定の鍵酵素であるリブローズ 1,5-ビスリン酸カルボキシラーゼ/オキシゲナーゼ(ルビスコ)の量やCO₂濃度が関与している。これらは植物の種類によっても大きく異なり、栽培品目により最適な光環境が異なることを意味している。

また、光合成有効放射における光量子当りのエネルギーが最小の赤色光を用いて植物を栽培した場合、理論的に最大の光合成効率率は約33%である。しかし、実際の栽培現場での光合成効率率は通常、それよりも遥かに低い値となる。人工光型植物工場での野菜栽培において、光合成効率を低下させる要因を改善し、少しでも効率を高めることが省エネルギー栽培には重要である。

5. 植物工場におけるワサビ苗生産

SU-PLAFでは栽培品目として陰生植物であるワサビを取り上げ、植物工場におけるワサビ実生苗生育過程の光環境の最適化に関する研究を行っている。

(1) ワサビ生産の現状と課題

ワサビ(*Wasabia japonica*)は日本原産のアブラナ科多年生の香辛植物である。日本食ブームやグルコシノレートなどの機能性成分が注目され、その需要が国内外で増加している。しかし、ここ数年、わが国のワサビ生産量は連続して減少しており、わが国の今後のワサビ生産の維持が危ぶまれている(図4)。

ワサビ栽培には畑ワサビ栽培と水ワサビ栽培の2つがあり、ワサビ生産量の減少は水ワサビ栽培でより顕著である。ワサビ生産の多くは、加工用原料を目的として栽培され、ワサビ植物体の葉、葉柄および根茎部などすべての部分が用いられる。生食用には、主に水ワサビ栽培の根茎部だけが用いられる。生食用ワサビ生産量は、総生産量の1割程度と推定され、わが国で生産されているワサビのほとんどは加工用である。したがって、ワサビ生産量の減少は加工用ワサビの深刻な原料不足を招いている。国内生産量の減少とは対照的に、海外での加工用ワサビ(畑ワサビ)の生産量は増大している。

ワサビ栽培は、育苗に4から5ヶ月間を要し、畑ワサビ、水ワサビ栽培ともに苗を定植後1~2年間栽培され、収穫される。多年生植物であるワサビ栽培には、基本的に定植期と収穫期に季節的制約がなく、年間を通じていつでも収穫することができ、いつでも定植することができる。したがって、ワサビ栽培では年間を通して苗需要がある。特に、秋苗は全国的に需要が多く、例年、需要が集中するこの時期の苗不足が深刻化している。

ワサビ生産量の減少には複数の要因が関与している。生産農家の高齢化と後継者不足によりワサビ田の荒廃が進み、放棄ワサビ田が増加している。地球温暖化、特に昨今の夏季の異常高温がワサビ栽培だけでなく苗生産にも深刻な影響を与えている。ワサビ生産農家にとって苗生産は場所、時間、育苗作業などに負担が大きく、定植用の苗の多くは

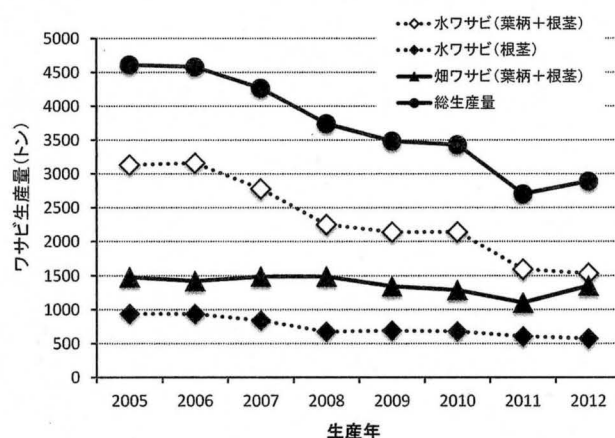


図4 わが国のワサビ生産量の推移

2005年以降、連続して水ワサビ生産量が減少している。2012年の総生産量の増加は畑ワサビ生産量の増加による。水ワサビ根茎の一部が生食用に用いられ、ワサビ生産の大半は加工用ワサビを目的として栽培されている。(農林水産省 特用林産物生産統計調査 特用林産基礎資料をもとに作成)

ワサビ苗生産専門業者(農家)によって供給されている。しかし、年間を通じてワサビ苗を生産することができないため、良質苗を需要に応じて周年・計画的に農家が入手することは困難な状況にある。

今後、わが国のワサビ生産を安定的に維持していくためには、いくつかの課題があげられる。その一つに、需要に応じて良質ワサビ苗を供給する体制の確保がある。そのためにも、ワサビ苗周年生産システムを開発する必要がある。

(2) ワサビ苗生産

定植用ワサビ苗には栄養繁殖苗と実生繁殖苗とがある。加工用ワサビ栽培用には健全な苗を安価で大量育苗できる実生繁殖苗が多く用いられている。ワサビ育苗には通常4~5ヶ月の長期間を要し、昨今の夏季の異常高温により猛暑期を挟む育苗が困難になりつつあり、苗不足が慢性化している。また、ワサビ苗生産後の苗の保存が適切でないと活着率が著しく低下するので、定植日に合わせた苗の計画生産が望ましい。ワサビ苗生産の技術的課題を表3に示した。

わが国のワサビ主要生産地は静岡県、長野県および岩手県で、この3県で全国生産量のほぼ80%を占めている(図5)。長野県では安曇野市を中心とした北アルプスの湧水を利用した水ワサビ栽培が広く行われている。しかし、長野県のワサビ生産量も減少しており、加工用ワサビ原料の不足が深刻化している。SU-PLAFでは、長野県の地元企業と連携し、植物工場施設によるワサビ苗周年生産技術の研究、開発を行ってきた^{9,10,11)}。

(3) ワサビ苗の育苗特性

人工環境下で効率的にワサビ苗を生産するために、ワサビ育苗過程における光合成特性について調べた。光合成に必要な光環境の最適化は、育苗期間の短縮と省エネルギー化にとって重要である。

発芽後間もないワサビ幼苗は陽生植物としての性質を備えているが、播種後1ヶ月以上経過した成熟苗では幼苗と比べて適正光量が顕著に低下し、陰生植物的な光合成特性

表3 ワサビ実生繁殖苗生産の技術的課題

1. 育苗期間の短縮	従来の育苗では4~5ヶ月を要する。長期間の育苗では、夏季高温、病害虫被害、土地の長期使用などの問題を抱えている。育苗期間を短縮する必要がある。
2. 育苗作業の軽労化	播種、仮植などワサビの育苗作業は、高齢化や後継者が不足しているワサビ栽培農家にとって重労働である。育苗作業の手間をできる限り省くことができる育苗法を確立する。
3. 土地利用効率の向上	後継者不足によるワサビ田の荒廃と放棄田が増大し、育苗に必要なワサビ田のスペース拡大は望めない。苗生産のために育苗スペースの効率化を実現する。
4. 周年・計画生産	ワサビ苗の定植時期および収穫時期に季節的制約がない。生産農家の年間栽培計画に合わせて、収穫、定植が繰り返される。したがって、年間を通じた苗需要があり、苗が必要となる時期と量が予め予測、ワサビ苗を周年・計画生産できる育苗技術が必要となる。
5. 高活着率・健全苗	定植後の活着の有無は生産農家にとって死活問題である。特に夏季と冬季の定植は活着率が低下する。常に高活着率健全苗を生産する必要がある。
6. 低価格化	高品質のワサビ培養苗や栄養繁殖苗は高価である。実生繁殖苗の利点は大量生産が可能で低価格化が実現できることである。

へと変化する。育苗後期のワサビ成熟苗では、陽生植物の特徴の一つである避陰反応がみられなくなる。避陰反応とは、植物が他の植物の葉の陰になり光合成が邪魔されると、より良い光環境を求めて茎や葉柄を伸長させ、緑陰から逃避する反応をいう。緑陰下では遠赤色光に対する赤色光の量比が低下し、それを光受容体のフィトクロムが感知し避陰反応が起こるが、生育に強光を必要としない陰生植物ではこの応答性が低下する。また、この陰生植物化へ移行する過程で、ワサビ成熟苗のルビスコ含量が顕著に低下する。ルビスコは、カルビン回路でCO₂とCO₂受容基質であるリブローズ 1,5 ビスリン酸から3-ホスホグリセリン酸が生成されるカルボキシラーゼ反応を触媒するCO₂固定の初発酵素である。ルビスコ含量が低下することで炭酸固定反応が光合成全体の反応の律速となり、光化学反応に必要な光量が低下すると考えられる(図6)。

播種後1ヶ月以内の幼苗に比べて、育苗後期の成熟苗で



図5 全国主要ワサビ生産地におけるワサビ栽培

静岡県、長野県および岩手県の3県で全国ワサビ生産量の約80%を占める。

A: 静岡県伊豆市湯ヶ島(筏場)の水ワサビ栽培(畳石式)

B: 長野県安曇野市穂高の水ワサビ栽培(平地式)

C: 岩手県岩泉町の畑ワサビ栽培

テムの一つとして社会に定着し、新たな産業形態としての発展が期待される。

7. おわりに

2008 年秋以降の経済不況の中で、農工商連携の一環として植物工場の第 3 次ブームが到来した。既に 5 年が経過したが、植物工場への関心は今も衰えることなく、海外では新たなブームも起きている。2009 年および 2012 年に行われた植物工場全国実態調査(三菱総研)¹³⁾以降も、太陽光利用型植物工場と完全制御型植物工場を含めて、その稼動数は着実に増加している。植物工場の要素を支える基盤技術の進展、食に対する認識、地球環境、エネルギー・資源問題など、植物工場を取巻く背景が過去 2 回のブームと大きく異なっている。逆に、これは食を取巻く世界の現状が益々深刻化していることを物語っているのかもしれない。新たな産業としての高品質野菜生産システムの定着と新たな販路の開発に向けた数々の課題に真摯に取り組む、それを着実に乗り越える努力の継続が必要と思われる。

参考文献

- 1) 宇佐美久尚、高橋伸英、野末はつみ、塚田益裕、野末雅之：植物工場の可能性を拓く「信州大学先進植物工場研究教育センター(SU-PLAF)」の発足、WEB Journal, 121, 12(2011).
- 2) 野末雅之：4-5 植物工場の現状と可能性、感度繊維の独創から共創へ、繊維学会夏季セミナー実行委員会、株式会社 ITSC 静岡学術出版事業部、pp.220-228 (2011).
- 3) 野末雅之、野末はつみ、宇佐美久尚、高橋伸英、田口悟朗、梶浦善太：植物工場技術の研究・開発および実証・展示・教育拠点(9)信州大学、植物環境工学、第 25 巻、第 2 号、65(2013).
- 4) 野末はつみ、伊藤隆、小山田慎吾、小林敦、茅野誠司、高橋伸英、野末雅之：コンテナ植物工場における省エネルギー型野菜生産ー水・CO₂・エネルギー収支についてー、日本生物環境工学会 2011 年札幌大会講演要旨集、P32、270(2011).
- 5) 野末はつみ、柳沢真弥、野末雅之：太陽光を利用した閉鎖型植物工場の開発ー省エネ型コンテナ植物工場、信州大学 SU-PLAFー、施設と園芸、157,16(2012).
- 6) 野末はつみ、柳沢真弥、岡本千晶、野末雅之：閉鎖型植物工場における太陽光を利用した照明システム、日本生物環境工学会 2012 年東京大会講演要旨集、A83、140(2012).
- 7) 野末雅之：植物工場の新展開と課題、オレオサイエンス、第 13 巻、第 6 号、19(2013).
- 8) 園池公毅：光合成の光環境応答、蛋白質核酸酵素 53, 1180(2008).
- 9) 野末雅之、野末はつみ、小西さゆり、平井裕貴、中俣孝一、吉田澄司、本木正行：人工環境下における定植用ワサビ苗周年生産・供給システムの開発、日本生物環境工学会 2012 年東京大会講演要旨集、C63、114 (2012).
- 10) 平井裕貴、中俣孝一、野末はつみ、野末雅之：ワサビ幼植物の生育過程における避陰反応および光化学系タンパク質の変化、第 54 回日本植物生理学会年会要旨集(岡山)PL029(0765)、308(2013).
- 11) 野末雅之、野末はつみ、平井裕貴、佐藤翔、岡本千晶：ワサビ育苗過程における遠赤色光応答性と光合成特性の変化、日本生物環境工学会 2013 年高松大会講演要旨集、B23、134(2013).
- 12) 古在豊樹、板木利隆、岡部勝美、大山克己：最新の苗生産実用技術、閉鎖型苗生産システムの実用化が始まった、社団法人 農業電化協会、pp.150(2006).
- 13) ㈱三菱総合研究所、全国実態調査・優良事例調査報告書、スーパーホルトプロジェクト協議会、平成 23 年度高度環境制御施設普及・拡大事業(環境整備・人材育成事業)報告書、③全国実態調査(植物工場一覧表)、pp.1-10(2012).

は適正光量が低下するが、幼苗の適正光量と同じ光量を成熟葉に照射すると、展開葉に傷害が生じる。光合成の適正光量は、光合成光化学反応装置(光化学系Ⅱおよび光化学系Ⅰ)のサイズ、ルビスコ含量、CO₂濃度などによっても変化するので、栽培品目や栽培環境に応じて検討する必要がある。現在、LED光源を用いて光環境を適正化することにより、閉鎖環境下約2ヶ月間の育苗期間で定植可能なワサビ苗を育成することができる。

このように育成したワサビ苗を安曇野地域周辺のワサビ田へ定植し、活着率を調べた。苗を閉鎖環境から取り出した(出荷)後、2週間以内の定植作業により、夏季でも90%以上の高い活着率が確認された⁹⁾。また、通常苗と人工環境下で育成した苗とをワサビ田に定植し、約11ヶ月間栽培後に収穫し、両者のワサビ丈とワサビ植物体全体の新鮮重量とを調査した。その結果、人工環境下で育苗した苗は、草丈、重量ともに通常苗と同等、あるいはそれ以上の収穫量が得られた⁹⁾。これらの結果から、人工環境下での約2ヶ月間の育苗で、活着率の高い健全な良質苗を生産できることが示された。

(4) 植物工場とワサビ苗生産

高度な環境制御が可能な植物工場での生産システムは露地栽培とは大きく異なる。人工光型植物工場は、閉鎖環境下で自然光を用いず蛍光灯やLEDなどの人工光源により栽培環境が完全制御され、高い食品価値を生み出すことができる生産システムである(表1)。これら植物工場の特徴は食用を目的とした野菜栽培だけでなく、苗生産施設としても有益である。閉鎖型システムの苗生産における数々の

有効性が指摘され、既に実用化されている¹²⁾。

ワサビ苗生産では人工光閉鎖型苗生産施設が特に有効であると思われる。その理由として、①周年・計画生産が前提であり、通年を通して常に稼働が必要なこと、②ワサビ苗は陰生植物的な光合成を行うことから育苗に必要な光強度(PPFD)が一般の苗生産の1/2~1/3と低く、消費電力量を低く抑えることができる、③ワサビ苗の販売価格は1株当たり数十円から百数十円と高価であること、④常に大きな苗需要があり、計画生産によりさらに付加価値があがること、⑤従来の育苗法では育苗期間が4~5ヶ月を要し、通常、年に1回しか苗生産ができないが、閉鎖型苗生産施設では年6サイクル以上の苗生産が可能、⑥高い土地利用効率を得られる、⑦コンテナ植物工場が利用できればワサビ田に隣接して設置することでき、苗出荷後直ちに定植することで高い活着率を確保できる、などがあげられる。

6. 植物工場生産システムの展望

植物工場生産システムの第1の特徴は、高品質の植物(野菜)を生産できることである。植物工場産野菜であれば安全・安心・高い食品価値を、苗生産であれば健全で良質な高活着率の苗を提供することができる。これらの特徴は露地栽培など従来の方法では達成しがたい特徴である。第2の特徴として、異常気象を含めた自然災害、季節、天候に左右されることなく周年安定生産が可能なことである。食の安心・安全、野菜の生産履歴、外食・中食を中心にした野菜加工食品の需要増など、食を取巻く社会の形態が変化している。高品質な植物工場産野菜を前提とした新たな需要がさまざまな分野で開拓され、植物工場が野菜生産シス

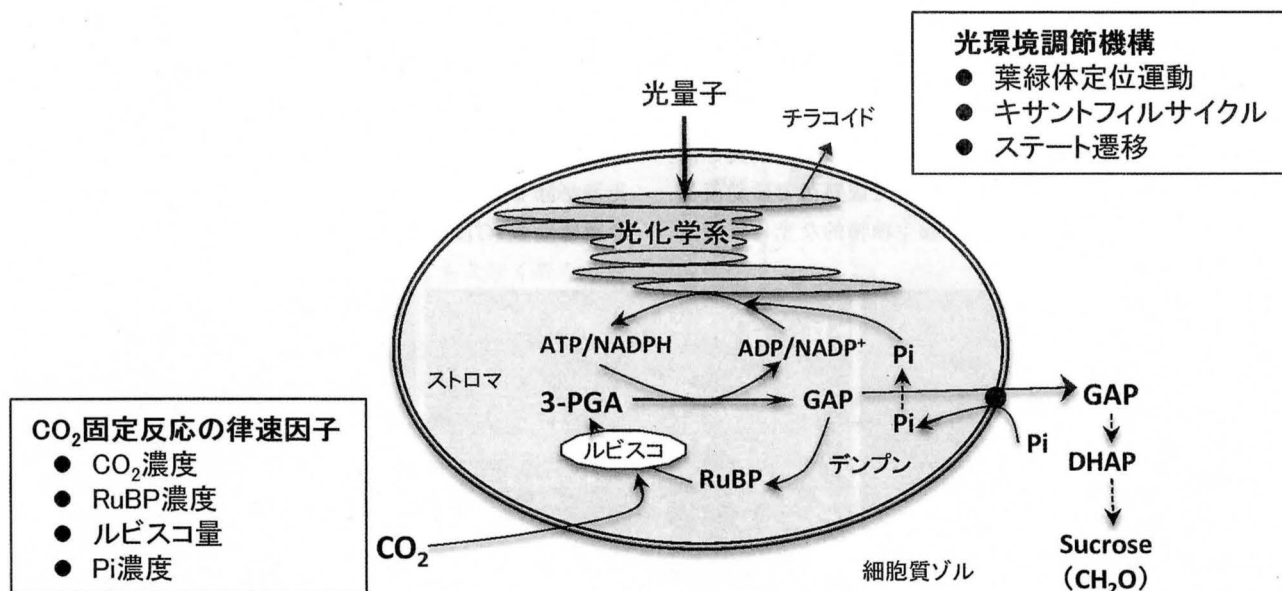


図6 葉緑体における光合成反応と律速因子

光合成反応は植物の細胞内の葉緑体で行われる。光合成反応は光エネルギーを吸収して進行する光化学反応(チラコイド反応)とCO₂を固定(ストロマ反応)する2つの反応から成立っている。これらの2つの反応のバランスが崩れると光合成反応の効率が低下する。光化学反応には光環境に対する様々な調節機構があり、一方、CO₂固定反応にはその速度を調節する種々の律速因子が関与している。