

BRAIN

Bio-oriented Technology Research Advancement Institution

平成 24 年 1 月 15 日 (隔月 1 回 15 日発行)
ISSN 1345-5958

TECHNO NEWS
No. 149

15 JANUARY, 2012

ブレインテクノニュース

特集 「植物工場の研究開発」



太陽光利用型植物工場(トマト低段密植栽培)



完全人工光型植物工場(レタス10段栽培)

植物工場にかかわる諸問題と研究開発 ～太陽光利用型植物工場と完全人工光型植物工場～

千葉大学大学院園芸学研究科
丸尾 達

目 次

特 集

「植物工場の研究開発」

(総説) 植物工場にかかわる諸問題と研究開発

～太陽光利用型植物工場と完全人工光型植物工場～	1
丸尾 達 (千葉大学大学院園芸学研究科)	
人工光下の植物の光合成と有用物質合成	8
後藤英司・彦坂晶子・石神靖弘 (千葉大学大学院園芸学研究科)	
農研機構における植物工場生産技術の開発	13
高市益行 ((独) 農業・食品産業技術総合研究機構 野菜茶業研究所)	
植物工場での甘草生産に適したウラルカンゾウの選抜と育成	20
吉松嘉代・河野徳昭・乾 貴幸 ((独) 医薬基盤研究所薬用植物資源研究センター 筑波研究部)	
医薬品原材料を生産する植物工場の開発	29
松村 健 ¹ ・高砂裕之 ² (1 (独) 産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門 植物分子 工学研究グループ, ² 鹿島建設株式会社 技術研究所 地球環境・バイオグループ)	

国内情報

高齢・女性農業者における農業機械の運転・操作に関連する身体機能の調査	34
富田宗樹・杉浦泰郎・土師 健・塚本茂善・皆川啓子・原田一郎 ((独) 農業・食品 産業技術総合研究機構 生物系特定産業技術研究支援センター)	

文献情報

ウシ卵核胞期卵子への季節の影響は、発生能の低下した胚における転写レベルの変化と して発現する	39
Mirit Gendelman et al. (<i>Biology of Reproduction</i> , 86(1):8, 1-9, 2012)	
抄訳：下司雅也	
UVR8による中波長紫外線受容の構造基盤	40
D. Wu et al. (<i>Nature</i> , doi:10.1038, 2012) 抄訳：高田美信	

表紙の説明

植物工場は、今後の急速な農業人口の高齢化・減少、気象環境の温暖化・不安定化等を考えると必要不可欠な技術である。本稿では、植物工場にかかわる諸問題と研究開発の現状と新たな展開について、太陽光利用型植物工場と完全人工光型植物工場に分けて概観した。表紙は、太陽光利用型植物工場と完全人工光型植物工場の写真である。詳細については1頁をご覧ください。

◀ 特集 総説 ▶

植物工場にかかわる諸問題と研究開発

～太陽光利用型植物工場と完全人工光型植物工場～

千葉大学大学院園芸学研究所

丸尾 達

植物工場には太陽光利用型植物工場と完全人工光型植物工場があるが、今後農業人口の急速な高齢化・減少、気象環境の温暖化・不安定化等を考えると必要不可欠な技術である。しかしながら、専用品種の開発も含め、研究開発を必要とする分野は多岐にわたっており、日本国内に限定したマーケットサイズでは十分でない。そのため、将来的には、中国、韓国などアジア地域を中心とした世界マーケットを前提とした研究開発が求められている。

1. はじめに

現在「植物工場」という言葉はほぼ一般化したものと思われるが、定義が明確でないため、使用場面や個人により「植物工場」のとらえ方が異なることも多い。

比較的最近まで、植物工場といえば、主として、人工光のみを光源にして閉鎖空間で作物を効率的かつ安全・計画的に栽培する植物生産システムを意味していた。それが、若干異なる意味で使われるようになった。狭義の植物工場(完

全人工光型植物工場)に太陽光利用型植物工場(太陽光・人工光併用型植物工場も含む)を加えるようになったのである。

それに伴い、植物工場の定義が若干広くなり、「高度に環境制御した条件下で栽培することにより、栽培環境や生育のモニタリングと生育予測を実施して、計画的・安定的に作物を生産する施設」となった。ほぼ周期的に計画生産・計画出荷できる栽培施設ということになる。

太陽光利用型植物工場は、従来型の施設園芸との区別が困難な場合があるが、施設をほぼ周期的に利用すること、高度な環境制御技術により生育予測等を行うと同時に安定生産、計画生産を実現できることが前提条件になっている。



図1 太陽光利用型植物工場
(トマト低段密植栽培)



図2 完全人工光型植物工場
(レタス10段栽培)

MARUO Toru

〒271-8510 千葉県松戸市松戸 648

他方の完全人工光型植物工場の特徴は、蛍光灯や LED などの人工光光源のみを用い、完全閉鎖型栽培システムで、極めて限定的な換気条件のもとで栽培されることである。外乱が少ないため環境制御性が高いことと、換気率が極めて小さく、病害虫リスクが低いので完全無農薬栽培が可能なことや、CO₂ や水の利用効率が極めて高いこと等の特徴がある。しかし、今のところ、栽培作物は比較的草丈が小さいレタスなどの葉菜類や、野菜などの苗に限定されている。

完全人工光型植物工場も、その概念はそれほど新しいものではなく、既に 1985 年に開催された科学万博（つくば'85）には、1 株に 1 万個以上の実をつけた水気耕栽培（商品名ハイポニカ）のトマトと同様に、はじめて植物工場が話題になっている。この完全人工光型植物工場は、民間主導で研究開発が進み、極めて応用的側面から発展している。つまり、光源や HP 等の効率化が、産業化の前提条件であり、エネルギー価格や人件費などと密接に関連し、経済的・経営的側面が大きい分野でもある。

本稿では、植物工場にかかわる諸問題と研究開発の現状と新たな展開について、太陽光利用型植物工場と完全人工光型植物工場に分けて概観する。

2. 植物工場発展の背景

これまでも農業生産者は、安定生産・計画生産をめざして来たと思われるが、数年周期で価格の暴落がある一方で、数年に一度の高騰があり、それで帳尻を合わせていたところがある。しかしながら、近年は安値安定の基調にある。

これには種々の原因があろうかと思うが、流通や消費構造が大きく変化し、街の八百屋さんが巨大な量販店チェーンに置き換わると同時に、個食が増加し、外食・中食の比率が極めて高まったこと。また、加工・生鮮品が海外から輸入されるようになったこと。野菜の消費自体が低迷していることなどが挙げられるだろう。

外食・中食向けの野菜は、「食品工場」で加工

されることが多いが、それらの「食品工場」では、質・量の安定確保が極めて重要な要素になると同時に、菌密度や異物混入に対しても高い品質が求められる。これらの解決策として、産業界が「植物工場」に期待するところが多い。既に、一部の実需者は、農業人口の急速な高齢化・減少に伴う危機感から 5~10 年先の需給を考え、植物工場も含めた野菜生産に自ら関わるようになってきている。この動きはますます加速するものと思われ、生産側も真剣に考えていくことが必要不可欠である。

これまで、「植物工場」産の野菜は、高品質ではあるが、生産コストが高く、高価格で、一部のデパートや高級スーパーでの販売に限定されていた。しかしながら、そのマーケットサイズは限定され、植物工場の数が増加して、生産量が増えれば、価格が低迷する。生産コストの縮減程度に依存するが、業務・加工仕向けの野菜の一部が、植物工場産のものに置き換われば、生産・流通・加工のそれぞれの分野で極めて大きな変革が起こるはずである。

3. 植物工場共通要素の研究開発

1) 養液栽培技術

植物工場での栽培技術は、基本的に養液栽培である。これは、地下部環境の制御性や病害や連作障害の回避、作替えの容易さ等の特性によるものである。我が国の養液栽培技術は世界的にも極めて高く、多数の作物に対して種々の研究実績がある。

我が国の養液栽培技術の発展に大きな影響を与えたのが、昭和 21 年に設置されたハイドロポニックファームである。同施設は、駐留米軍に「清浄野菜」を供給するために、調布市（東京都：22ha、2ha のガラス温室も含む）と大津市（滋賀県）に建設された「礫耕野菜生産施設」である。ここでは、サラダ野菜の「安全・安心」生産を目的に、レタス（結球レタス・サラダナ）の他、セルリー、キュウリなどが栽培され、世界に先駆けて養液栽培野菜生産を行ったが、こ

のプロジェクトに関わった多くの研究者、技術者が我が国の養液栽培の発展に大きく寄与した。



図3 ハイドロポニックファーム
(昭和21年調布市)

我が国には、良質の水が豊富にあり、このことも養液栽培の発展に好都合であった。

しかしながら、より栽培環境が好適になり、生育速度が速く、規模も大きい植物工場では、従来以上に高いレベルの養液栽培技術が求められるようになってきている。具体的には、安定栽培や生育制御に強く関係する栽培システムの開発や培養液制御技術、培養液殺菌システムなどについて、より高い精度の管理により、良品率や生産量の向上が期待されている。

2) 専用品種育成、種子精選・種子処理技術

現状の植物工場では、植物工場専用品種を用いていないことが多い。最も栽培面積が多いレタス類については、主としてリーフタイプのレタス品種が栽培されているが、大半は外国の種苗会社で育成された土耕栽培用品種の中で養液栽培や植物工場の栽培に向くものが選定されている。

一方、太陽光利用型植物工場ではオランダ等で育成された高収量タイプの品種を栽培することも多いが、我が国の気象条件に適合し、我が国のマーケットに求められる品質を有する国産品種の育成が強く望まれている。また、トマト低段密植等独自の栽培システムに適合する品種/品種群の育成が求められている。低段密植栽



図4 育成中のリーフレタス品種
(ライクズワーン社)

培では、1作当たりの栽培期間が3ヶ月程度であるので、年1作型のハイワイヤー栽培とは異なり季節に応じて品種を変更することが可能なので、外観品質が同じで環境反応が異なる夏用品種、冬用品種等の専用品種群の育成が可能であれば、生産が容易になり、高収量生産が期待できる。また、単位面積当たりの作付け本数が多いので、ある程度の普及があれば、種苗会社にとっても育成の可能性が出てくると思われる。

いずれの作物でも、安定した栽培には、必要とする抵抗性等を有する植物工場/養液栽培専用品種の戦略的な開発が重要になる。また、加工用など特定の用途に対応した新たな品種開発・販売戦略が経営的には重要になる。

しかしながら、養液栽培、特に完全人工光型植物工場はその施設数、栽培面積が少なく、種子のマーケットサイズ自体も小さいので、専用品種を育種する種苗会社はほとんどみられない。現状では品種の選択肢も限定され、面積の拡大の足かせになっているが、「栽培面積が少ないので育種が進まない」し、「栽培が容易で生育速度が高く、生理障害のリスクが少ない品種がないので、面積を拡大しにくい」というジレンマを何とかして解消する必要がある。

3) 環境制御技術

植物工場は、上述のように「高度に環境制御

した条件下で栽培する」ことが前提条件である。しかしながら、積極的に植物工場用の高度環境制御システムの開発・製造・販売を行っている国内企業は殆どないのが現状である。施設園芸／植物工場のマーケットサイズが大きいにもかかわらず、1ha以上の大型太陽光利用型植物工場ではオランダのシステム（PRIVA社等）の導入が基本になっている。オランダのシステムは北緯50度地域用に開発したものであるため、我が国など東アジア地域用システムの開発が望まれるところである。オランダの環境制御システムは、複合環境制御から統合環境制御のレベルに進化している。統合環境制御とは、作物生理に適合することを前提に、温度・湿度・光・CO₂濃度を経済的に最適化する技術である。例えば、多くの作物では生育は積算気温に依存しており、夜温は毎日一定である必要はなく、5～7日程度の平均気温がより重要になる。また、外気温は数日単位で変動するのが一般的である。そこで、統合環境制御システムでは、低温の日には設定夜温を若干低くし、その代わりに温暖な日に高めることで平均気温を一定にするとともに、投入エネルギーを減少させてコスト削減を達成している。

このように、今後は、天気予報システムや市況とも連動させた、よりダイナミックな統合環境制御システムをアジア地域向けに研究・開発することが求められている。

4) 各種自動化・省力化技術

植物工場では、コストを削減し、生産性を向上することが重要な要素となるため、各種自動化機器や装置の開発も重要であり、オランダの大規模施設ではこの種の自動化機器の導入が進んでいる。しかしながら、植物工場には新たな雇用の創出も期待されていることから、直ちに完全自動化の方向を探るだけでなく、重労働を軽減するアシスト系の自動化機器および作業補助機器の研究・開発も求められている。



図5 収穫物を搬送する自動搬送ロボット
(オランダ)

一般に完全人工光型植物工場は、太陽光利用型植物工場に比べて規模が小さく、栽培数も少ないことから、比較的小型の自動化機器の開発を行うことで、同タイプの植物工場におけるコストを大幅に削減することが可能である。

5) エネルギー関連技術

いずれのタイプの植物工場も植物工場にはエネルギーの投入が不可欠である。エネルギーは人工光、温度制御（暖房・冷房）、湿度制御（除湿・加湿）や各種機器の運転に使用するとともに、場合によってはCO₂の投入にも強く関係する。それらのエネルギーを個別に制御するのではなく統合的に制御することが、エネルギー使用量の低減とコスト削減に大きく寄与する。

オランダでは、天然ガスの利用が広く進み、CHP（Combined Heat and Power）システムなどコジェネやトリジェネシステムが普及し、補光システムの電力供給をサポートしている。さらに、地下帯水層を利用した長期的蓄放熱システムを活用した反閉鎖型温室（Semi Closed Type Greenhouse）の研究開発も急速に進んでいる。これは、エネルギーの効率的利用や高濃度CO₂の積極的活用が主たる目的である。

当然、システム全体を合理的に管理する統合環境制御システムの研究開発が前提にある。



図6 CHPシステム (Combined Heat and Power)



図7 CHPシステムと連動させて用いる温湯タンク

6) 栽培管理技術

オランダでは、作物生理に基づく環境制御、栽培管理が重要視され、基礎研究と応用的な栽培技術の研究の連携が良好である。

これには、環境制御技術の向上と各種データの記録・蓄積が重要になる。つまり、勘と経験に基づく旧来の栽培管理技術から、科学的データ、過去の栽培データに基づく合理的栽培管理へ移行することが重要である。例えば、トマトハイワイヤー栽培では、光強度に応じた LAI 管理体系が確立しており、時期別に摘葉や側枝の積極的活用技術が一般化し、高収量の達成に大きく貢献した。

4. 太陽光利用型植物工場に関する研究開発

1) 対象作物、求められる品種特性等

基本的に太陽光利用型植物工場では、全ての作物が栽培対象になるが、比較的草丈が大きい作物や果菜類、無農薬や異物混入により付加価値が高まらない作物がその対象になりやすい。環境制御のレベルが完全人工光型植物工場と比べると不十分であるのと病害虫リスクが相対的に高くなるので、栽培品種には、環境適応性、病害虫抵抗性が求められる。

また、栽培システムによっても求められる品種は異なるが、植物工場では安定生産、多収生産が重要であることから、それらにつながる品種が求められる。例えば、長期多段栽培のハイワイヤーシステムには、春夏秋冬全ての季節で十分なパフォーマンスが発揮できるオールマイティ品種が必要である。

2) 施設・設備・栽培システム

太陽光利用型植物工場では、光が制限要因になることが多いので、光が周年的に好適レベルになるような施設構造やフィルム、カーテン設備がまず重要になる。そのため、基本的に骨材等の陰が少ない施設設計が重要であるが、設置場所によっては補光システムや遮光システムが必要になることがある。

また、施設の隙間換気が低い施設を目指すことも重要である。新設した施設の天窗や側窓、カーテン装置を全て閉じた状態でも 1.0 (回/時) 程度の隙間換気が計測されることがある。この隙間換気速度は、CO₂ 利用効率や暖冷房効率に直接的に影響することから、隙間換気が十分低い施設設計や施工管理技術の研究開発が重要になる。

我が国の暖房システムは、A 重油を用いた温風暖房機が 90%以上であるが、今後は LP ガスの利用や高効率ヒートポンプ (LP) の利用も積極的に検討し、研究開発を進めるべきである。

また、高断熱性の被覆資材の開発も省エネや

施設の周年利用のためには重要である。

3) 環境制御技術

上述した統合環境制御の早期研究開発が重要である。また、計測データの効率的記録・蓄積・参照システムの開発が効率的安定栽培には必要不可欠である。

特にこれまで我が国の環境制御は温度環境中心に行われてきたが、CO₂濃度制御や湿度制御、気流速度の制御にも十分な配慮が必要である。また、施設の周年利用を考えるのであれば、潜熱を利用した細霧冷房システムやHP利用についても積極的に研究開発を進める必要がある。

4) 多収化技術

太陽光利用型植物工場では、多収化して生産性を向上させ、単位収量当たりの生産コストを低減させることが、周年的な安定生産と同時に重要になる。そのためには、環境制御技術の高度化により栽培環境を好適化して多収化することが重要であるが、多収品種の育成や合理的な栽培管理技術の確立が必要不可欠である。

多収品種の育成は、一朝一夕の実現は困難であることから、低段密植栽培を活用した栽培システムに、複数の品種群を組み合わせて栽培する方法の方が時間的には有利であるかもしれない。さらには、病虫害リスクを合理的に管理するIPM技術の研究開発も重要である。そのためには、欧米並みの天敵利用システムの早期確立が望まれるところである。

5. 完全人工光型植物工場に関する研究開発

1) 対象作物、求められる品種特性等

完全人工光型植物工場では、これまでリーフレタスなど生食用の葉菜類が栽培されることが多かった。求められるのは、生育速度が高く栽培期間が短いこと、光合成器官が収穫対象でそのまま販売対象であること、無農薬や異物混入リスクの低いことが販売上大きな利点になるこ

となどが挙げられる。また、生育速度を高めてもチップバーン等の生理障害のリスクを低く制御すること可能で、歩止まりが高いことも極めて重要である。チップバーン等の発生リスクは種々のストレスが少ない完全人工光型植物工場では一段と高くなりやすいため、生理障害抑制の研究開発が極めて重要になる。そのためには、好適品種の選抜・育成、培養液管理技術、光環境制御技術、CO₂濃度管理技術、湿度管理技術、気流速度管理技術など多様な技術が必要である。

そのためにも専用品種の育成は極めて重要であるが、現状では種苗会社の反応は良くない。しかしながら、レタスに限っては、固定種であること、自殖性が極めて高いことなどを考えると、専用品種の育成はそれほど困難ではないと思われる。

また、最近では生食用の生鮮野菜の生産だけでなく、カットレタス生産を前提とした結球レタス生産や国産の完全無農薬の野菜ペーストの生産、医薬品材料（遺伝子組み替えによる医薬品材料）の生産などの事例も見られ、完全人工光型植物工場の用途が広がっており、それに伴って品種要件、適地条件も若干変化している。

2) 完全人工光型植物工場産野菜に求められる要素

完全人工光型植物工場で生産される野菜に求められるのは、4定（定時・定量・定価格・定品質）と、安定生産、周年生産、高い鮮度、完全無農薬、異物混入リスクの制御などである。

3.11 以降は塩害や放射性物質による汚染を気にすることなく生産が可能なシステムとして、また、雇用を創出し生活の場を提供する施設としての植物工場も注目されている。

3) 施設・設備・栽培システム

完全人工光型植物工場は、十分断熱した光を通さない壁に覆われた施設内に照明システムや空調システム、養液栽培システムを設置して栽培する。それぞれの機能や効率も重要であるが、最も重要なことはバランスのよい施設・設備の

設計配置である。既存の施設を見ると、過剰なヒートポンプ HP など設計が不十分であるものが多い。

また、完全人工光型植物工場は無農薬を前提にすることが多いことから、害虫の侵入を完全に防止するシステムが重要になる。この場合の害虫とは農業害虫だけでなく、衛生害虫や不快害虫など異物となるものは全て該当することから厳重な管理が必要である。単純なエアシャワー等だけでは不十分であることも少なくないが、ある程度以上の規模の施設では、万が一害虫が侵入することも想定した農薬等によらない害虫駆除システム・施設設計に関する研究開発も重要になる。

4) 人工光照明装置、空調設計技術

完全人工光型植物工場植物工場では、効率的な光源が極めて重要であるが、現状ではまだ蛍光灯が最も経済的に有望な光源であろう。しかしながら、各種 LED などの光源や反射装置の研究開発が国内外で多面的に実施されている。光源により大きく生産効率が変ることから、積極的な研究開発が期待されているが、生産費に占める光熱料費の比率は25%程度であることが多いことから、光源開発の投資効率はかならずしも高くないのが現状である。

一方空調負荷は主として光源から発生する熱に依存するため HP の効率により適正な出力の計算は容易であるが、立体的な空調設計には高度な設計技術・施工技術が必要である。

6. 今後の展望

植物工場は、今後の我が国には必要不可欠な技術であることは間違いないが、我が国だけではマーケットサイズが小さい問題がある。そこで中国等近隣の国々への栽培システム、生産物の積極的輸出や海外生産も考慮した研究開発が重要である。

当然ながら、中国や韓国、台湾島の国々も積極的な研究開発に対する投資を行っているため、それらの国々との協調、競争をしていく必要があるが、植物工場に関係する分野は極めて広いので、国を挙げたプロジェクトを効率的に進めていく必要がある。求められる研究開発分野は上述したとおりであるが、再度まとめると下記のようになる。

- ① 専用品種の育成
- ② シートテクノロジー（種子精選・種子処理）技術
- ③ 人工光源（補光用も含めた）技術
- ④ 高断熱性被覆資材（太陽光利用型植物工場では高光透過率資材）
- ⑤ 高機能型カーテン、反射資材（ランプ）
- ⑥ ヒートポンプ（冷・暖・除湿用）技術
- ⑦ 安定育苗技術
- ⑧ 移動ベンチシステム
- ⑨ 自動定植・移植システム
- ⑩ 統合（総合）環境制御システム（特に太陽光利用型植物工場用）
- ⑪ 高度培養液管理システム

◀ 特集 ▶

人工光下の植物の光合成と有用物質合成

千葉大学大学院園芸学研究科

後藤 英司・彦坂 晶子・石神 靖弘

施設園芸とくに植物工場におけるキーテクノロジーは環境制御である。環境制御とは、成長を促進してかつ高品質の作物を生産するために、植物生育に必要な環境要因である光、温度、湿度、ガス濃度、気流を生育に適する値に制御する技術である。人工光型の植物工場では植物の環境応答をふまえた環境制御により、植物の光合成能力を最大限引き出すことができる。また有用物質の含有量を高めるための技術開発が進んでいる。

1. はじめに

施設園芸は温室（ガラス室とプラスチックハウスの総称）や簡易被覆（べたがけなど）を用いる農業であり、野菜、花き、果樹を生産している。温室のうち、複合環境制御と養液栽培等を導入して周年生産を目指す先進的な施設を太陽光利用型植物工場とよぶ。また人工光だけを用いて野菜や苗を生産する施設を人工光型植物工場とよぶ。太陽光利用型、人工光型いずれにおいてもキーテクノロジーは環境制御である。栽培施設における環境制御とは、成長を促進してかつ高品質の作物を生産するために、植物生育に必要な環境要因である光、温度、湿度、ガス濃度、気流を生育に適する値に制御する技術である。

植物工場は、本特集の別の記事で紹介されているように、遺伝子組換え作物の生産や薬用植物の生産にも利用できる点で、従来の園芸施設とは異なる高機能な植物生産システムと考えるのがよい。

人工光型の植物工場では光源に蛍光灯やLEDなどの人工光源を用いる。太陽光利用型の植物工場には、日射量の少ない季節に人工光源で補光をするタイプもある。農作物の生産は光

GOTO Eiji, HIKOSAKA Shoko, ISHIGAMI Yasuhiro

〒271-8510 千葉県松戸市松戸 648

合成で得られる資源をベースにするため、生育制御の基本は光合成に適する環境を作ることである。ところで、人工光下の植物の反応は自然光下のそれとはかなり異なる点があり興味深い。そこで本稿では、人工光型植物工場に焦点を当てて、人工光下の植物の光合成と有用物質（機能性成分や薬用成分）の合成に関する研究トピックスを紹介する。

2. 人工光下の光合成

筆者らの研究グループは、植物ごとの最適な生育環境条件を見出すために、各種の光源を利用できる実験室を設けて様々な植物種（表1）についての研究を行ってきた。植物によって好適な光強度は異なり、一般的に葉菜類や薬用植物は光要求量が低く、穀類やマメ類は光要求量が高い。葉菜類は蛍光ランプまたはLED、果菜類は蛍光ランプまたはメタルハライドランプ、穀類やマメ類はメタルハライドランプまたは高圧ナトリウムランプを用いることが多い¹⁾。筆者らは、ランプの種類は異なっても各作物の高収量を得るために適する光環境条件で栽培する場合、投入光当たりの光合成量（以下、光合成の効率と表記）は植物種間にあまり差がないことを明らかにした²⁾（表2）。

その理由はいくつか考えられるが、重要なことは光環境と温度環境の最適化である。自然光

表1 過去数年間、人工光型植物工場で栽培試験した植物

葉菜類	レタス類（リーフレタス、サラダナ）、コマツナ、 チンゲンサイ、ホウレンソウ、ルッコラ、モロヘイヤ、 ラファノブラシカ
果菜類	イチゴ、トマト、キュウリ
その他野菜	ブロッコリスプラウト、ハツカダイコン
穀類、マメ類	イネ、ダイズ
葉草	カンゾウ、シソ、ハッカ、セントジョーンズワート
花き	コチョウラン、トルコキキョウ
その他	シロイヌナズナ、タバコ

表2 人工光型下での作物ごとの投入光当たりの光合成量

		イネ	イチゴ	レタス	トマト
栽培期間（栽培室内）	日	100	90	30	90
栽培サイクル	回/年	3.6	4	12	4
生産する総乾物重	gDW m ² /年	4,896	2,560	1,667	3,600
栽培時の光強度（PPF）	μmol m ² s ⁻¹	800	300	200	600
栽培時の明期	h/d	12	16	16	12
年積算 PPF	mol m ² /年	12,440	6,220	4,150	9,330
投入光当たりの光合成量	g/mol	0.39	0.41	0.40	0.39

下では日射量は日の出から日の入りまで変化しており、気温の変化も大きい。そのため、朝や夕方方の光合成の効率は低い。また、晴天日や降雨日があり、光合成の最適条件が続くことはない。一方、人工光を用いる栽培では、光の利用効率を上げるため、終日最適な光強度を維持し、その光強度で最大の光合成を行うための気温に制御できる。つまり植物工場における環境制御は、植物の光合成能力を最大限引き出しているといえる。

3. 人工光下の光合成のコスト

1) 照明コスト

ここでは、光要求量の低い葉菜類のレタスと、高温強光を好むイネを比較する。レタスは PPF（光合成有効光量子束、光強度の指標）が 200 μmol m⁻² s⁻¹ 程度で効率よく光合成を行い成長する。イネは 800 μmol m⁻² s⁻¹ 程度で効率よく光合成を行い成長する。前述のように、植物種

間に光合成の効率に差がないと仮定すると、イネはレタスの4倍の光合成を行う。栽培面積あたりの光合成速度はイネで4倍になる（図1）。ここで照明コストは、同一栽培面積であれば、光強度に比例する。つまり、イネでは照明コストも4倍になる。結果として、同一光合成産物を生産するための照明コストは、植物種によらずに一定である。

2) 空調コスト

つぎに栽培室内の熱収支を考える。栽培室内の気温を一定に維持するためには、室内で発生する熱を冷凍機で除去する必要がある。冷凍機の成績

係数（投入エネルギーあたりの除去できる熱エネルギー）を4とすると、たとえば800Wの光源から発生する熱を除去するのに必要な冷凍機の電力は200Wである（図1）。つまり、空調コストは照明コストに比例する。

3) ランニングコスト

照明と空調のランニングコストを考える。前述の理由から、同一光合成産物を生産するためのランニングコストは植物種によらずに一定である。

このように光合成に好適な条件で育成できれば、光合成に必要な照明と空調のランニングコストは植物種間や生育ステージによらない。「植物工場はレタスは作れるが、イネ、ダイズやトマトは作れない」と言う人の中には、光要求性の低いレタスは光合成の効率が低いとか、同一光合成産物ためのランニングコストが少ないと考えている場合がある。しかしレタス生産が経

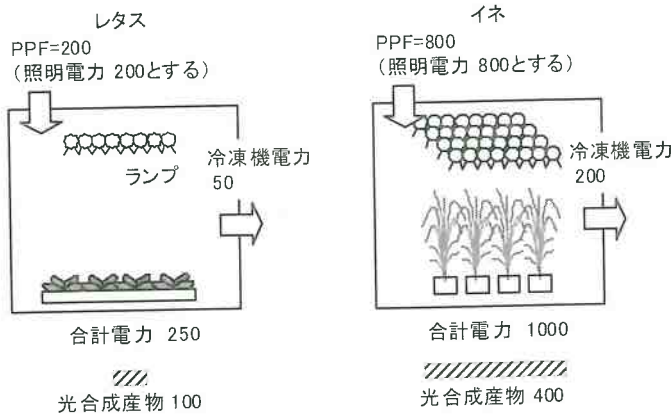


図1 光合成産物あたりの照明コストと空調コスト

済的に成立するのは農業上の理由であり、植物の光合成に起因する理由ではない。そのため、遺伝子組換え作物を用いて可食部で医療用原材料を生産する分野では、イネ、トマト、レタスなどの様々な作物が用いられている。

4) 資源 (CO₂ ガスと水) のコスト

詳細は紙面の都合上省略するが、同じ考え方で整理すると、光合成に必要な CO₂ 施用のコストと水のコストは光合成産物にほぼ比例するため、同一光合成産物を生産するための両コストは植物種によらずにほぼ一定である。

4. 人工光下の有用成分の高含有量化

植物の成長に影響を及ぼす光波長域は約 300nm から 800nm である³⁾。そのうち植物が光合成に利用できる光合成有効放射域は 400~700 nm である。紫外線 (UV) は、植物に影響を及ぼすのは UV-A (315~400 nm) と UV-B (280~315nm) であり、色素合成などの光形態形成反応を引き起こすことが知られている (図2)。ここでは、光波長の違い (光

質) を活用してヒトに有用な成分の合成・蓄積を促進させる生育制御技術を紹介する。

1) 野菜等の機能性成分

現在は、生産物の価格の観点から、人工光型植物工場で採算の合う作物は、貯蔵性が低くて周年需要の多い葉菜類・ハーブ類などに限られている。しかし植物工場は、植物の光合成および形態形成に好適な環境条件を与えることのできる施設であり、そのメリットを最大限活かすことが

ポイントであり、各種の研究開発が行われている。今後、露地農業や施設農業では栽培が難しい高付加価値野菜などの需要が増えると、植物工場のニーズが高まると期待される。

植物由来の化学物質 (ファイトケミカル) として身体の調節機能に関して抗菌作用、解毒作用、抗酸化作用、抗腫瘍活性、代謝改善などの効果、および生活習慣病の予防効果を持つ成分がある。たとえば緑黄色野菜が有するファイトケミカルには、ポリフェノール (フラボノイド類: アントシアニン, ロズマリン酸など), 有機硫黄化合物 (メチオニン類: グルコシノレート, イソチオシアネート類: スルフォラファンなど), テルペノイド (カロテノイド類: β-カロチン, ルテインなど, 精油: ペリラルデヒド, リモネン, シネオールなど) などがある。これらは

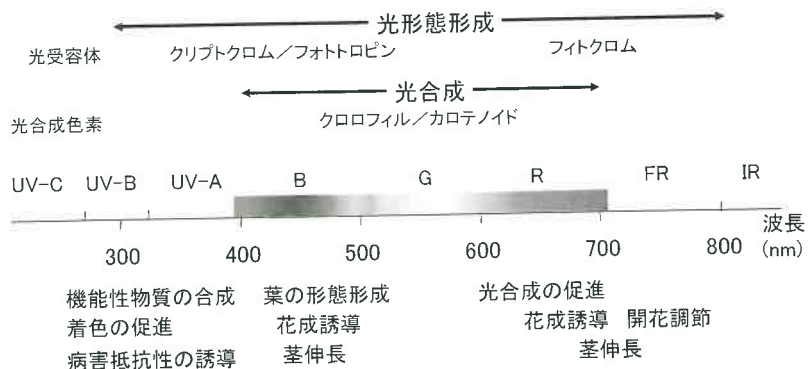


図2 植物の成長に影響を及ぼす光波長域

ほとんどが二次代謝物質であり、その多くは植物工場において制御が容易な環境ストレス付与により高濃度化、高含有量化が期待できる。そのため、機能性成分含有量を高める生育制御法の開発が進められている。

たとえば、青色光の割合を高めたり、紫外線を適度に照射すると、レタスの主要な機能性成分であるアントシアニンの合成・蓄積が促進される⁴⁾ (図3)。この理由としてアントシアニンの生合成に関わる酵素タンパクの遺伝子発現が光環境の影響をうけることが示唆されている。成熟葉への青色光処理は2~3日間で十分なことがわかっているため、生育期間中は赤色光の割合の高い光質で育成し、収穫前に青色光や紫外線を照射するというような、生育ステージごとに目的に合う光質条件で育成するのがよい。また温度環境も物質合成に影響を及ぼすため、光環境制御を気温や根圏温度の制御と組み合わせることも有効である。

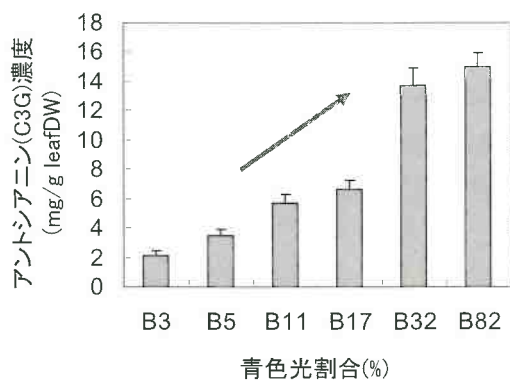


図3 異なる青色光割合で育てた赤系リーフレタスのアントシアニン濃度
(数値は光合成有効光量子束に対する青色光量子束の割合)

2) 薬用植物の薬用成分

薬用植物の薬用成分の多くは二次代謝物質である。植物が二次代謝経路で生合成する成分という意味では同じであり、前述の機能性成分と変わらないが、漢方薬草の場合は該当部位が日本薬局方で生薬として規定されて医薬品として用いられる。

薬用成分の増加には、作物の機能性成分増加のための光や温度のストレス処理の考え方を適用できる場合がある。たとえば、漢方薬草のニホンハッカの葉に紫外線処理をすると1-メントールを主成分とする複数の有効成分の蓄積量が増加する⁵⁾。適度な紫外線処理を施すと、多くの場合、葉の抗酸化能も増加する(図4)。ただし、二次代謝物質の生合成があまり行われない下位および中位の成熟葉では効果が少ないことから、実用化にあたっては効率的な照射法を開発することが必要になる。

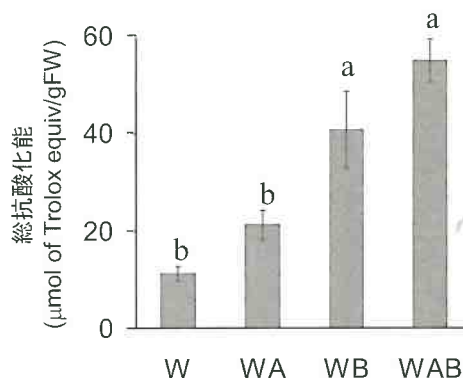


図4 異なる紫外線(UV-A, UV-B)の組み合わせで育てたニホンハッカ(ミント)の抗酸化能

(W: 白色蛍光灯のみ。WA: 白色蛍光灯にUV-A付加。WB: 白色蛍光灯にUV-B付加。WAB: 白色蛍光灯にUV-AとUV-Bを付加)

5. まとめ

このように、人工環境下では光、温度などの物理環境を制御することにより「植物の能力を活かす生育環境制御」を行うことができる。現在、我が国を中心として各国で実用植物に関する生育環境制御の研究が行われている。そこでは、分子生理学的アプローチ、生態生理学的アプローチ、栽培学的アプローチ、またその好適環境を構築する植物環境工学アプローチがあり、幅広い分野の研究者が取り組める研究といえる。今後さらに研究が進展して、多数の成果が植物生産業の現場で活用されることを期待したい。

引用文献

- 1) 後藤英司編著 (2010), 人工光源の農林水産分野への応用, 農業電化協会, 東京
- 2) 後藤英司 (2006), 人工環境下の植物の光合成と物質生産, *TechnoInnovation*, 61, 18-22
- 3) 後藤英司 (2011), 植物生産における人工光利用, 照明学会誌, 95, 200-204
- 4) 後藤英司 (2009) 人工環境下の植物の遺伝子発現と有用物質生産, *TechnoInnovation*, 70, 20-25
- 5) Hikosaka, S. et al. (2011), Effects of ultraviolet light on growth, essential oil concentration, and total antioxidant capacity of Japanese mint. *Environ. Control Biol.*, 48, 185-190

◀ 特集 ▶

農研機構における植物工場生産技術の開発

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 野菜茶業研究所

高市 益行

農研機構(NARO)では、農林水産省モデルハウス型植物工場実証・展示・研修事業を、つくば拠点および九州拠点の2箇所で開催している。つくば拠点では太陽光利用型施設によりトマト・パプリカ・キュウリの低炭素型多収生産を実証している。九州実証拠点では太陽光利用型施設によりイチゴの多収生産を実証し、人工光型施設によりレタスやスプラウト類の周年生産を実証している。この事業を通じて将来性のあるいろいろな新技術について、実用化研究を推進している。

1. はじめに

近年、経済産業省と農林水産省は、農商工連携促進の一環として、植物工場の普及と拡大を積極的に推進している。2009年に農商工連携研究会植物工場ワーキンググループを立ちあげた。そこでは植物工場を「環境および生育のモニタリング基礎として、高度な環境制御を行うことにより、野菜等の植物の周年・計画生産が可能で栽培施設」と表現している。植物工場は太陽光利用型と完全人工光型に大別され、施設園芸生産が高度化した姿ととらえることができる。

このワーキンググループでは、その後3年間に国内の植物工場施設を3倍に増加させ、生産コストを3割削減することを目標としている。経済産業省と農林水産省は植物工場の普及・拡大に向けて、2009年度の補正予算により、両省あわせて百数十億円という大きな事業が実施されることとなった。植物工場関係の技術は未確立なところが多いことから、研究・技術開発を促進するために、経済産業省では植物工場研究施設の整備事業を実施し、全国から応募された中で8つの大学等が採択された。農林水産省ではモデルハウス型植物工場実証・展示・研修事業として、全国で6つの試験研究機関・大学が

採択された。

農業・食品産業技術総合研究機構(農研機構、NARO)では、農林水産省の事業により、つくば実証拠点および九州実証拠点の2拠点が整備され、平成23年度から本格的な生産実証を開始した。以下に、両実証拠点の生産技術の開発の取り組みを紹介する。

2. 植物工場の普及のために重要な課題

植物工場では、高度な環境制御や高度なシステムを導入することが必須であるため、施設・設備の設置コストおよびランニングコストの低減が最も重要な課題である。このため、モデルハウス型植物工場実証・展示・研修事業では、生産物の重量あたりの生産コストを3割低減することを目標として、各拠点において企業等とコンソーシアムを結成して、それぞれの方法を競い合って、この目標に向かって実証栽培を実施することになっている。

生産物の重量あたりの生産コストを低減するためには、①低コスト施設・装備、②多収生産技術、③エネルギー・資材費の削減、④省力化などについて、総合的に取り組む必要がある。

3. 農研機構(NARO)植物工場つくば実証拠点の概要

TAKAICHI Masuyuki

〒470-2351 愛知県知多郡武豊町字南中根 40-1

(運営：野菜茶業研究所)

太陽光利用型植物工場として、床面積2,551m²の1棟を整備した。数棟の栽培ハウスを建設する場合と比較して、これらを一体型として建設することで、ハウスの施工費削減と作業動線の合理化、病虫害管理の一元化を図るのがねらいである。施設内は中央通路といくつかの栽培区画に分かれている。これらを利用して、トマト、パプリカ、キュウリの周年多収生産について栽培展示・実証を行っている(図1)。付帯施設として、品質検査室(98 m²)、太陽蓄熱水槽(72 m²)を設置した。

環境制御システムとして、ユビキタス環境制御システム(UECS)を導入した。このシステムは、個々の環境制御機器にそれぞれマイコン基板を装備して、ネットワーク通信により、個々の動作機器(ノードと呼ぶ)が自律して動作する。規格が公開されているので、UECS対応製品ならどのメーカーのノードも同一のソフトで動作する。現段階では、市販されているノードの種

類やメーカーが少なく、まだ競争原理が働いているとは言えず、製品の安定性や低コスト化も十分ではないが、さらなる低コスト化と将来の高機能化の発展が期待できるシステムである。つくば実証拠点の環境制御システムはすべてUECSで動作させている。

自然エネルギー・省エネルギー面については、効率的な暖房装置としてヒートポンプがある。空気熱源式ヒートポンプは低コストで、熱出力の投入電力に対する比(成績係数(C.O.P))が高いが、低温時に除霜運転のために運転効率が低下する。このため、蓄熱水槽を利用した水熱源式ヒートポンプシステムを設置している。昼間の太陽熱を水槽に蓄熱して夜間の暖房に利用できる太陽熱集熱蓄熱システムの稼働運転の特性試験を実施中である。これにより、日射のある時も冷房運転により窓を閉鎖して作物の好適環境を長く維持する「半閉鎖型管理」の効果実証に取り組む。

中央通路には、自動走行が可能な自動運搬台車を装備する。育苗室にはセラミックメタハラ

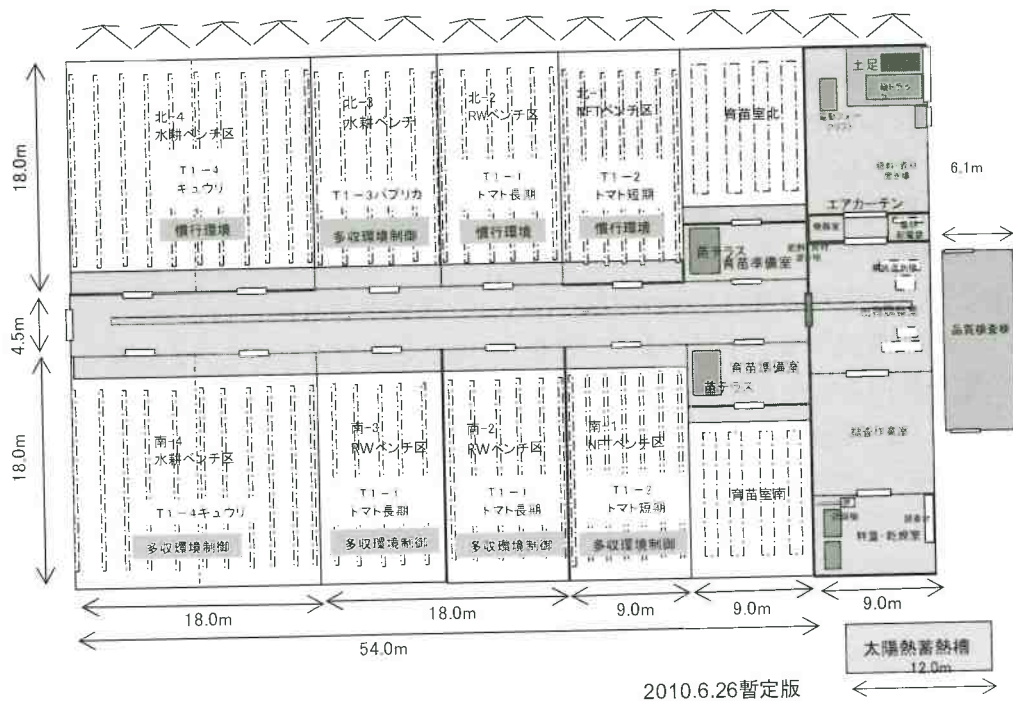


図1 農研機構植物工場つくば実証拠点(太陽光利用型施設)の概要
(平成23年5月竣工)

およびLEDの補光システムを導入する。

極蛍光ランプ)が利用されている。

4. 農研機構(NARO)植物工場九州実証拠点の概要

(運営：九州沖縄農業研究センター)

技術実証・展示施設は太陽光利用型植物工場(1,000 m² 棟)、および完全人工光型植物工場(100 m²)で、付帯施設として、育苗施設と調査室が設置された。太陽光利用型施設では、イチゴの多収生産を、人工光型施設では、レタスおよびスプラウト類を生産実証する。

太陽光利用型施設では、高温対策として、外部遮光装置やパッドアンドファン簡易冷房装置を装備している。外部遮光は、わが国では小型の花き温室以外の大型施設ではほとんど実施されておらず、とくに、フェンロータイプの連棟型の外部遮光(水平張り)については、非常に少ない。イチゴの多収生産のためのクラウン部局所温度管理システム、密植が可能なり下げ式移動ベンチシステムが装備されている。これらの栽培システムにより従来の約1.5倍の密植が可能で、現在、年間の目標収量である10t/10aの達成に向けて順調な生育と初期収量が得られている。

人工光型施設では、新光源として、発熱が少なく近接照明が可能なHEFL(ハイブリッド電

5. 各コンソーシアムで実証・展示予定の技術内容

〇つくば実証拠点で実施中のコンソーシアム

高品質多収生産のために(湿度、CO₂濃度、気流)を高度に環境制御した区画と、従来型の簡易な環境管理区画を同時に展示することによって、統合環境管理技術の効果をはっきり実証できるように運用することを特徴としている。

①養液栽培適応品種によるトマト中長期栽培(図2)

高度統合環境制御(湿度、CO₂濃度、気流)下におけるトマト各品種の生産性実証、太陽蓄熱槽とヒートポンプによる太陽エネルギーの有効利用システム、ユビキタス環境制御システム(U ECS)による統合環境制御と高度情報利用(図3)

②極早生品種を利用したトマト低段密植周年多回転栽培

統合環境制御下におけるトマト低段多回転周年栽培の生産性実証、物理的病虫害防除法(静電場利用)による減農薬生産、運搬作業の自動化システム実証

③パプリカの減化学肥料・減農薬生産(図4)

商品価値の高いパプリカ品種の実証展示、

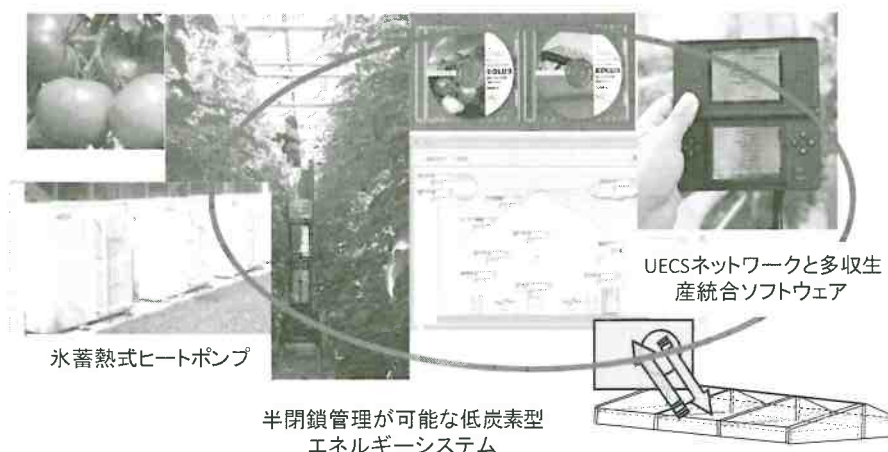


図2 農研機構植物工場つくば実証拠点における実施予定コンソーシアム

①【養液栽培適応品種によるトマト中長期栽培】



図3 農研機構植物工場つくば実証拠点における実施予定コンソーシアム
②極早生品種を利用したトマト低段密植周年多回転栽培

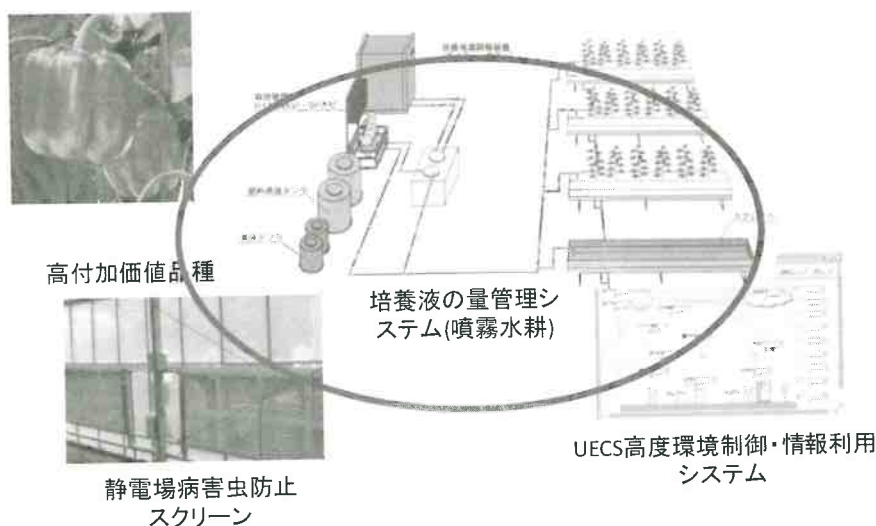


図4 農研機構植物工場つくば実証拠点における実施予定コンソーシアム
③【パプリカの減化学肥料・減農薬生産】

培地を使用しない湛液循環型水耕における肥料成分の量管理法による草勢制御・減肥料生産の実証

④キュウリ短期多回転栽培における環境に優しい低コスト多収生産(図5)

循環式養液栽培による短期省力生産，キュウリ多収のための統合環境制御（湿度，CO₂濃度，気流等）の実証，省力的誘引具，加工適性の高いキュウリとげなし新系統の展示

○九州実証拠点で実施中のコンソーシアム

太陽光利用型施設では，外部遮光やパッドアンドファン簡易冷房などの西南暖地における高温対策技術に重点を置き，クラウン部の局所加温・冷却技術による周年生産が特徴である。

【太陽光利用型施設】(図6)

①固定式高設栽培によるイチゴの周年安定生産技術

短日処理による花芽分化促進，クラウン部局所温度管理による各品種の生産性評価

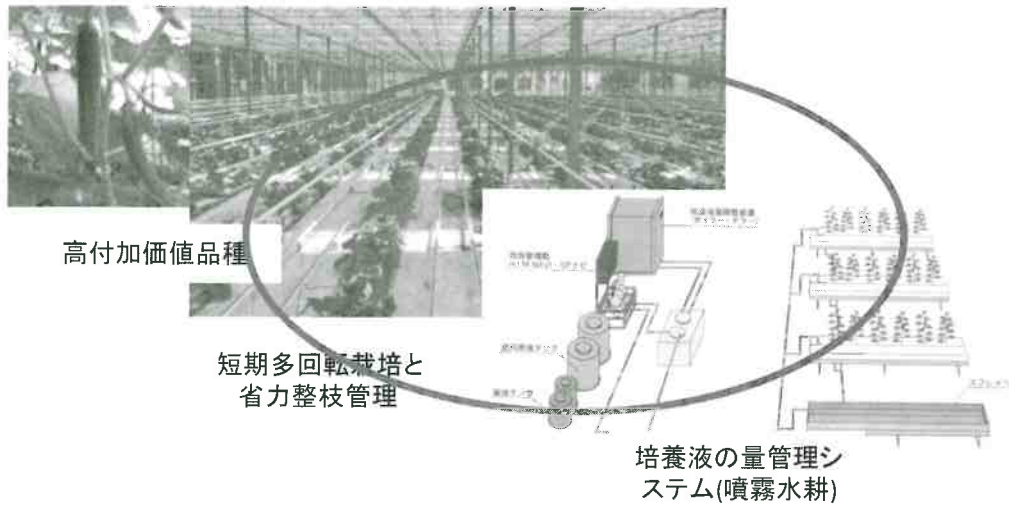


図5 農研機構植物工場つくば実証拠点における実施予定コンソーシアム
④【キュウリ多回転栽培と環境に優しい低コスト多収生産】

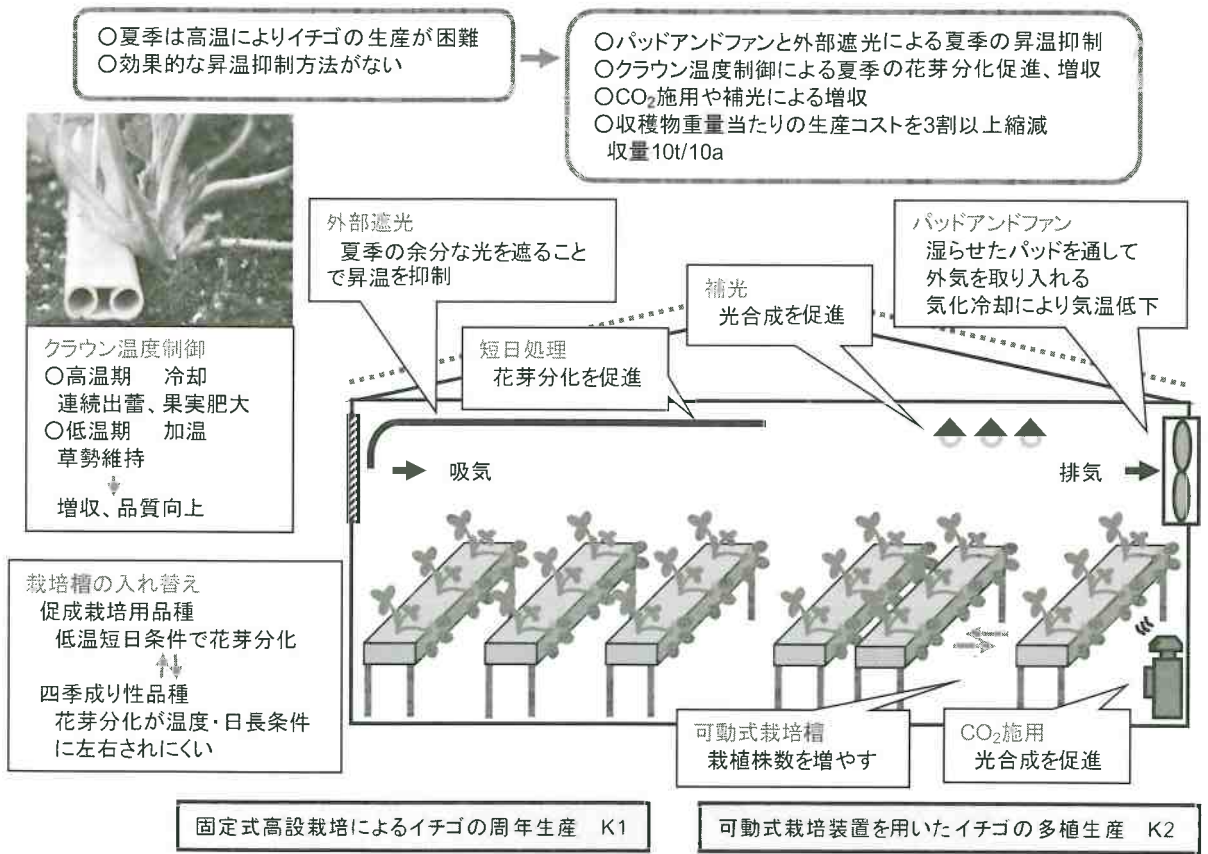


図6 農研機構植物工場九州実証拠点における実施予定技術
【太陽光利用型施設】

②可動式栽培装置を用いたイチゴの多植生産技術

多植，補光，クラウン部局所温度管理による各品種の生産性・適性品種の評価

【完全人工光型】(図7)

①レタスの高付加価値化生産技術

HEFL光源利用によるコスト縮減・高付加価値生産など。

②スプラウト類の高付加価値化生産技術

スプラウト類の高機能成分品種の実証，光質制御などによるコスト縮減・高付加価値生産，マイクロバブル等の生育促進技術の評価

6. 今後の課題

太陽光利用型植物工場については，果菜類ではトマトでは研究例も多く産地でもいろいろな取り組みが進んでいる。しかし，パプリカは国内生産が少なく技術情報が不足している。また，キュウリについては，大型施設での養液栽培による生産は非常に少ない。また，人工光型植物工場では，レタス以外に，高収益が期待できる品目への拡大を図る必要がある。

わが国における栽培管理では，高度な環境制御システムの重要性の認識が弱く，良品多収のための環境制御手法が十分に確立されていない。作物の光合成，蒸散，転流などの基本的な生理特性に合わせて，温度，湿度，CO₂濃度，気流の日変化を合理的に統合してコントロールすること(統合環境制御)によって，養水分状態，生育・果実肥大速度などを適性に保つことで，さらなる良品多収化をめざす。

これらについては，主につくば拠点で研究を実施する。統合環境制御を行った場合に，日本で利用されている各品種の収量がどこまで増加させることができるかについては，ほとんど不明の状態にある。植物工場生産技術を導入すると，従来に比べて大幅に超える良品多収生産を達成できることが見込まれるが，この場合には一般的な収量を採る栽培方法とは養水分管理も大きく異なることが想定される。

九州実証拠点では，高軒高ハウスを利用した太陽光利用型施設により，イチゴの大規模多収生産技術の実証を行っている。クラウン部局所温度管理等の新技术により，収量目標の10t/10aは達成できる見込みであることから，

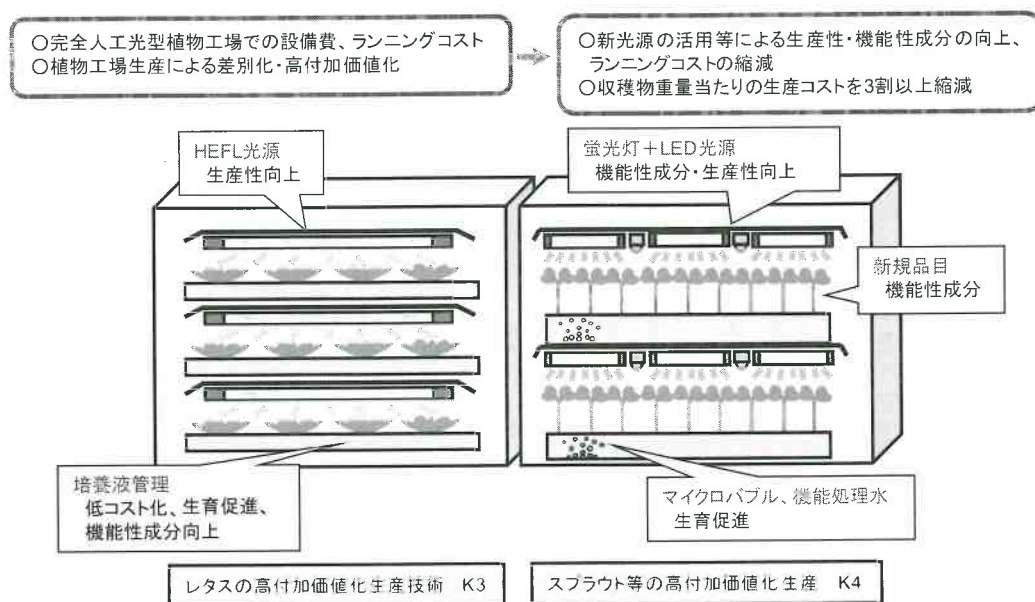


図7 農研機構植物工場九州実証拠点における実施予定技術【人工光型施設】

今後は、外部遮光ハウス、移動ベンチシステムなどの施設、装備の低コスト化が課題となる。

7. 研修事業および他拠点との連携

農研機構の植物工場両拠点は、三重県実証拠点(運営：三重県農業技術センター)と連携して第1グループとして諸事業を行っている。野菜茶業研究所では、これまでにトマトの低段栽培で房採り自動収穫システム(図8)の開発を行ってきた。自動着果処理機や自動収穫・運搬システムの動作実証は、主として三重外連拠点内で連携して実施している。

植物工場・高度施設園芸に関するテーマ別の公開セミナーを年間に数回実施するとともに、農研機構の農業者大学の長期実習(つくば拠点)、養成研修生(九州拠点)、公立試験研究・普及機関からの依頼研究員、JAや生産法人等の長期技術講習を随時受け付けている。これらのいろいろな活動については、両拠点のホームページで掲載されている。

また、本事業の農研機構以外の拠点(千葉大学拠点、三重県拠点、大阪府立大学拠点、愛媛大

学拠点)との情報連携については、まだ実際の運用は進んでいないが、環境制御や生育等のデータのリアルタイムの共有・利用について取り組もうとして検討が進められている。

文 献

- 1) 農林水産省、植物工場のホームページ
<http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/plantfactory/index.html>
- 2) 農林水産省・経済産業省(2009)、植物工場の事例集、49PP
<http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/plantfactory/pdf/zirei.pdf>
- 3) 高市益行(2009.9)、第5節 農研機構における植物工場技術の開発と課題、植物工場ビジネス戦略と最新栽培技術、技術情報協会、299-307.
- 4) 高市益行(2009.9)、3.低コスト植物工場の構成要素、5.品目別モデルと経営収支(試算例)、低コスト植物工場マニュアル、17-25、107-110、日本施設園芸協会



図8 トマト低段栽培における房採り自動収穫システムの動作試験
(野菜茶研 2008)

◀ 特集 ▶

植物工場での甘草生産に適した
ウラルカンゾウの選抜と育成

独立行政法人医薬基盤研究所薬用植物資源研究センター筑波研究部

吉松 嘉代・河野 徳昭・乾 貴幸

生薬「甘草」は、国内で使用される漢方製剤の7割以上に配合され、医薬品、化粧品、甘味料原料として重要である。しかしその供給の100%は中国からの輸入品であるため、中国内の物価・人件費上昇、需要増加、採取・輸出規制に伴い、供給価格が高騰し、持続的安定供給が危ぶまれている。本稿では産学官共同研究「甘草の人工水耕栽培システムの開発」において、筆者らが担当した「植物工場での甘草生産に適したウラルカンゾウの選抜と育成」について紹介する。

1. はじめに

日本の医薬品の規格基準書である日本薬局方(第十六改正)¹⁾において、生薬の「甘草」は、「本品は *Glycyrrhiza uralensis* Fischer 又は *Glycyrrhiza glabra* Linné (*Leguminosae*) の根及びストロンで、ときには周皮を除いたもの(皮去りカンゾウ)である。本品は定量するとき、換算した生薬の乾燥物に対し、グリチルリチン酸(C₄₂H₆₂O₁₆: 822.93) 2.5%以上を含む。」と記載され、基原植物としてウラルカンゾウ(*Glycyrrhiza uralensis* Fisher)及びスペインカンゾウ(*Glycyrrhiza glabra* Linné)の2種が規定されている。どちらも主成分はグリチルリチン酸(グリチルリチンとも呼ばれている)であるが、主成分以外の成分には違いがあり、実際に漢方製剤等の原料として利用されているのはウラルカンゾウより製造された甘草である。

ウラルカンゾウは、中国東北部、中北部、西北部あるいはモンゴルに自生するマメ科カンゾウ属(*Glycyrrhiza* 属)の多年生草本である。生薬「甘草」は、医師の指示に従って処方される医療用漢方製剤 148 処方中 109 処方(73.6%)

YOSHIMATSU Kayo, KAWANO Noriaki,

INUI Takayuki

〒305-0843 茨城県つくば市八幡台1-2

に、また、薬局で販売されている一般用漢方製剤 236 処方中 168 処方(71.2%)に配合されている^{2,3)}。甘草の主成分であるグリチルリチン酸は、抗炎症作用、肝臓保護作用、抗アレルギー作用等の薬理活性を有し、また、砂糖の200倍とされる強い甘み⁴⁾を有することから、甘草より抽出・精製されたグリチルリチン酸も医薬品、化粧品、甘味料として広く利用されている⁴⁾。しかし、甘草の供給の100%は中国からの輸入品であり、そのほとんどが野生植物の採取に依存しているため、乱獲による環境破壊や資源の枯渇化が顕在化し、中国では資源保護のための政策(採取制限、輸出規制など)が強化されている⁵⁾。さらに、中国国内や外国でも甘草の需要が増加し、また、最近の中国の著しい経済成長に伴う物価・人件費上昇も相まって供給価格が高騰し、甘草資源の持続的確保が年々困難になっている。

甘草の安定確保あるいは国内商業生産をめざし、これまでに多くの圃場栽培研究が行われてきた⁶⁻⁹⁾。例えば、優良系統の選抜と、筒栽培法(径10cm、長さ50cmの塩化ビニール製のパイプに培養土を充填して植物を栽培)を用いた1年間の野外での栽培により、グリチルリチン酸含量5%以上の甘草の生産が報告されている^{7,9)}。しかし報告例の多くでは、甘草の栽培品

は概して野生品よりもグリチルリチン酸含量が低く、日本薬局方の規定値 2.5%以上⁹⁾を満たすためには、少なくとも3年以上の栽培期間が必要とされている^{5,8)}。また、野外圃場栽培は異常気象や今回の大地震のような自然災害及び人為的な環境かく乱等の影響を受けやすい。

一方、植物工場における薬用植物の生産は、表1のような優れた点を持ち、薬用植物の安心・安全な安定供給に有効であると考えられる。

表1 植物工場における薬用植物生産の利点

- ・ 自然環境（気温、日照量、降水量、湿度、土質等）の影響を受けず安定的に生産可能
- ・ 植物種が明確で品質が安定した薬用植物の供給が可能
- ・ 農薬、土壌汚染や人為的環境攪乱を回避できる
- ・ 連作障害がなく、計画栽培・多角栽培が可能
- ・ 人手がかからない（耕うん、土壌改良、除草等が不要で収穫が容易）
- ・ 短期間で収穫可能

2. 植物工場におけるウラルカンゾウの養液栽培

植物工場における薬用植物の生産に関する研究は、これまでも水耕法を中心に行われてきたが、地上部（葉、茎、花など）を使用部位とする薬用植物に関する報告が多い。

一般に水耕法で栽培した植物の根は分枝根が多くなり、根部が肥大しないことから、特に肥大した根を使用する薬用植物の生産において、水耕栽培の実用化は困難であるとされてきた。根を使用する薬用植物の水耕・養液栽培研究は、ミシマサイコ¹⁰⁾やスペインカンゾウ^{11, 12)}の例があるが、根の収量や薬用成分含量の点で満足出来る成果は得られていない。筆者らの研究室でも1990年頃より、循環型湛液水耕法による薬用植物の生産に関する研究を実施し、地上部を使用部位とする薬用植物（ケシ、キダチコミ

カンゾウ、ジギタリス、ハッカ、クソニンジンなど）については、生育期間、薬用成分含量と収量において良好な結果が得られた。しかし、地下部（根、根茎など）を使用部位とする薬用植物では、地上部は良好に生育するものの肥大した根が得られず、地下部を使用部位とする生薬の生産には不向きであった。

そこで、植物工場内での甘草の養液栽培のため、根が養液中に浸されない養液栽培装置、すなわち通気性・保水性が高い支持体が充填された植木鉢に植物体の地下部を植付け、底面給水により鉢の下部から養液が供給される養液栽培装置¹³⁾を考案し、閉鎖温室内（温度 20-25℃、相対湿度 50-60%、明期 14-16 時間/日）でウラルカンゾウの養液栽培を行った（図1）。材料植物は、当研究室の薬用植物の組織培養物コレクションの中のウラルカンゾウ 2 系統（Gu, GuH）のうち、予備的に実施した閉鎖温室内での土耕栽培で、根の収量及びグリチルリチン酸含量がより高かった Gu 系統を選択し、さらに、本系統の培養シュートより、ストロン様組織¹⁴⁾を誘導して植物組織培養での増殖効率の高いサブクローン Gu2-3-2 を得、養液栽培装置への植付け材料とした。閉鎖温室内において、前述の Gu の土耕栽培では、根のグリチルリチン酸含量が 2.5%以上になるまでに 1000 日以上を要した。一方、養液栽培した Gu2-3-2 の根のグリチルリチン酸含量は、約 1 年後に 2.95%、約 2 年後に 5.22% となり、同生育環境の土耕栽培に比べてグリチルリチン酸の生産効率が高いことが判明した。前述の野外で筒栽培され、グリチルリチン酸含量 2.5%以上を満たすウラルカンゾウ 2 年生根は、市場品の甘草に比べて、フラボノイドであるリキリチン含量が低いことが報告されている⁹⁾。リキリチンは、ウラルカンゾウの主要成分の一つで、抗うつ作用、抗酸化作用や神経栄養作用（アルツハイマー型認知症やパーキンソン病等の神経変性の疾患の治療に効果的とされている）が報告されており¹⁵⁾、甘草が有する多様な薬理活性の一端を担っていると思われる成分の一つである。約 2 年間養液栽培し

た Gu2-3-2 の根は 1.0%以上のリキリチン含有していたことから、植物工場での養液栽培は甘草が含有するフラボノイド類の生産方法としても優れていると思われる。



図 1. 養液栽培 4 ヶ月後のウラルカンゾウ

3. 植物工場での養液栽培に適したウラルカンゾウ優良株の選抜と育成

筆者らが所属する独立行政法人医薬基盤研究所薬用植物資源研究センターは、北海道、筑波及び種子島の 3 研究部より構成され、それぞれの環境に適応した国内外の薬用植物が野外圃場で保存栽培されている。ウラルカンゾウは、北海道及び筑波研究部の野外圃場で保存栽培されているが、筑波研究部では開花・結実が認められないため、種子の生産は北海道研究部で行っている。

植物工場内での甘草生産効率をより高めるため、北海道研究部圃場で採取した 3 系統のウラルカンゾウの種子 (GuTS291-04, GuTS71-08, GuTS321-08) を材料に、植物工場での生産に適した優良系統の選抜を行った。3 系統のうち、GuTS291-04 は、前述の Gu と同系統の植物体から得られた種子である。まず、3 系統の種子より育成した植物体を前述の養液栽培装置に植付けて閉鎖温室内で半年及び 1 年間養液栽培し、収量と二次代謝物含量を調査した。いずれの系統も 1 年後の根のグリチルリチン酸含量は 2.5%に満たなかった。生育及び二次代謝物含量は系統間で大きく異なっており、いずれの形質も GuTS71-08 系統が最高値 (株あたりの根の収量: 10.8g, グリチルリチン酸含量: 1.5%) を示した (図 2)。

次に、優良株選抜のため、グロースチャンパー室内 (温度 25℃, 相対湿度 60%, 明期 18 時間/日) で GuTS71-08 系統種子より育成した植物体を 4 ヶ月間養液栽培し、収量と二次代謝物含量を調査した。その結果、グリチルリチン酸含量が高く根の収量が良好な優良株 2 クローンが得られた (図 3 左表)。本株は、前述の Gu2-3-2 に比べて植物組織培養での増殖効率が低いものの、養液栽培で得たストロンを挿し穂とする増殖が可能であった。得られた GuTS71-08IV2 挿木苗を、同様にグロースチャンパー室内で養液栽培したところ、良好に生育

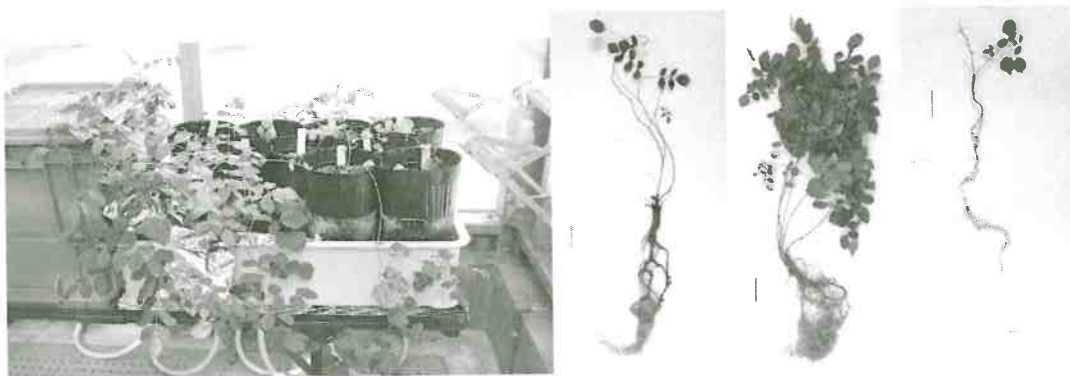


図 2. 養液栽培 1 年後のウラルカンゾウ GuTS291-04 GuTS71-08 GuTS321-08
写真中のスケールは 5cm

し(図3右), 栽培198日後の根のグリチルリチン酸含量は2.5%, リキリチン含量は0.7%, グリシクマリン含量は0.3%であり, 二次代謝物高生産性を維持していることを確認した。グリシクマリンもウラルカンゾウの主要成分の一つで, 抗けいれん作用を有することが報告されている¹⁶⁾。本成分は, こむら返りに対し著効を示す漢方製剤「芍薬甘草湯」の薬理活性の一端を担うと考えられている。これらの優良株及び増殖法については特許を出願した¹⁷⁾。

4. 遺伝子情報を用いたウラルカンゾウ優良株の識別

遺伝子情報を利用した植物の優良品種や系統の識別は, コメの品種鑑定に代表されるように, 外部形態等で判断が困難な検体間の客観的な識別が, 簡便かつ迅速に可能な一般的ツールとして認知されており, キットとして販売されるまでになっている。本手法は有用物質の多産系統や, 植物工場での栽培・増殖に適した系統であるといった, 外部形態の差異では識別, 特定が困難な薬用植物の優良系統の識別にとくに適していると考えられる。

薬用植物資源に関しては, 植物そのものの資源保護の問題もさることながら, 偽ブランド米の問題のように, 今後, 品種や系統といったレベルの知的財産権の主張並びに保護が, 国内のみならず, 国家間においても重要な課題となると考えられ, 遺伝子情報を活用した品種識別の

手法は, 優良系統の選抜・育種と共にその開発が求められている。

これまでにコメなどを対象に実用化されている品種鑑定法の多くは, AFLP法やPCR-RFLP法をはじめとするSNPs等の変異を検知する手法により, 識別対象とする遺伝子領域を限定せずに, 目的とする植物を他の植物群と識別できれば可とするものであった。また, 植物の分子遺伝学または進化生物学的な識別においては, 植物に普遍的に存在する葉緑体DNAやミトコンドリアDNA, またはリボソームDNA等の植物種間の多型を利用することが一般的であり, 近年では植物種識別のための上記遺伝子領域の網羅的な情報集積, いわゆるバーコード化も国際的なコンソーシアムによって進められている。しかしながら筆者らは, 薬用植物の優良系統・優良株の遺伝子識別においては, 薬用植物の生産する有用物質の二次代謝経路の酵素遺伝子の多型に着目することとした。

二次代謝経路は, その多くが薬理活性を示すテルペノイド, ポリケタイド, アルカロイド等の天然物の生産に関わる生合成経路であり, 本経路の酵素遺伝子の多型は, 薬用植物の生理活性の本体である二次代謝物の生産能に直接的に影響すると考えられ, とくに有用物質の生産性等を直接議論できるマーカーとしての利用が期待される。

筆者らは, ウラルカンゾウの生産するトリテルペン配糖体であるグリチルリチン酸の生合成経路(図4)上の, 骨格形成段階に関わるスク

クローン	根の収量 (乾燥重 g)	グリチルリチン酸 含量(%)	グリチルリチン酸 収量(mg)
GuTS71-08 IV1	7.8	2.1	161.7
GuTS71-08 IV2	16.1	1.6	258.3



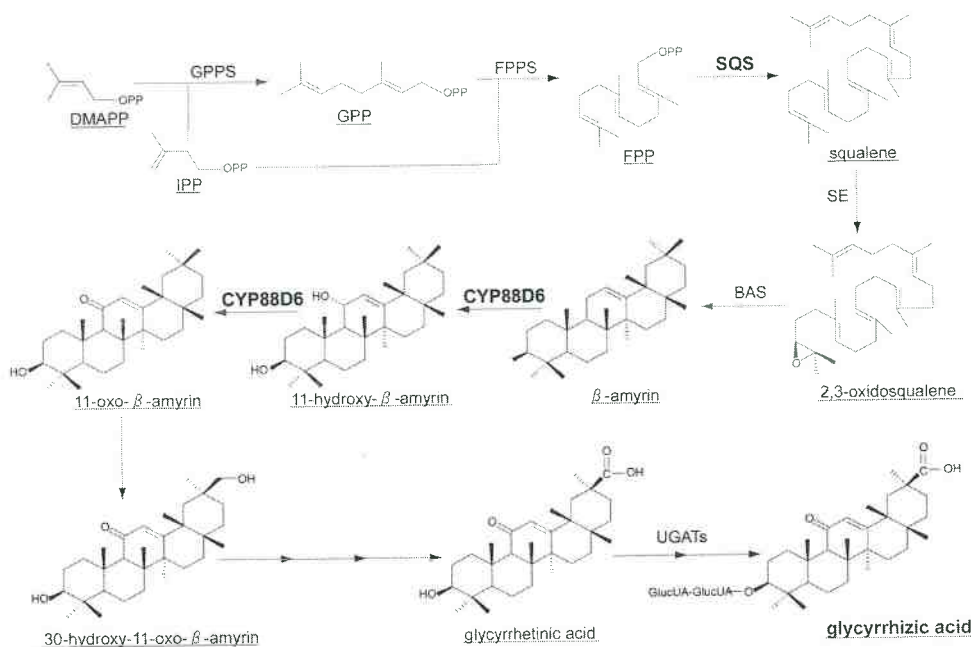
図3. 養液栽培4ヶ月後の優良クローンの形質(左表)及びGuTS71-08IV2挿木苗(右)

アレン合成酵素(squalene synthase, SQS)及び生合成経路下流の修飾過程の P450 酵素である β アミリン 11 位酸化酵素 (β -amyrin 11-oxidase, CYP88D6)の 2 遺伝子を解析対象とし、とくに、ゲノム DNA 上のコーディング領域のうち、タンパク質に翻訳されないため変異が蓄積しやすいと考えられるイントロン領域の多型情報による優良株の識別について検討した。

5. SQS イントロン領域を用いたウラルカンゾウ優良株の遺伝子識別

我々が最初に着目したのは、トリテルペンであるグリチルリチン酸の炭素数 30 のユニット形成の鍵酵素であるスクアレン合成酵素(SQS)である。本酵素は 2 分子のファルネシル 2 リン酸より炭素数 30 の直鎖状のスクアレンを合成するものであり、植物ステロールの生合成においても重要である。モデル植物であるシロイヌ

ナズナにおいては、AtSQS1 (GenBank accession No. AF004560) 及び AtSQS2 (AF004396)の 2 種ホモログが見出されており、両者のエキソン・イントロン構造においてはイントロンの挿入箇所がよく保存されている。このエキソン・イントロン構造は他の植物種でも保存されている傾向にあり、カンゾウ属植物の SQS においてもその構造は保存されていると推定された。そこで、既にデータベースに登録されているカンゾウ属植物由来の SQS の cDNA 配列から、エキソン 1-3 領域の増幅用プライマーを設計し、PCR により増幅した同領域のイントロン領域の多型情報を収集し、株間の遺伝子識別が可能か否かを検討した。ウラルカンゾウ優良株 2 種, GuTS71-08IV2 及び Gu2-3-2 より調製したゲノム DNA を鋳型に PCR を行い、増幅産物の塩基配列を解析した結果、各株よりそれぞれ SQS 相同遺伝子, GuSQS1 及び GuSQS2 のエキソン 1-3 領域の塩基配列が得られた。



DMAPP, dimethylallyl diphosphate; IPP, isopentenyl diphosphate; GPP, geranyl pyrophosphate; FPP, farnesyl diphosphate; GPPS, GPP synthase; FPPS, FPP synthase; SQS, squalene synthase; SE, squalene epoxidase; BAS, β -amyrin synthase; UGATs, UDP-glucuronosyltransferases.

図 4. カンゾウ属植物におけるグリチルリチン酸生合成経路 (太字: 解析対象)

取得した塩基配列について、多重整列解析、両株間の変異点の抽出を行い、両株間の識別が可能と期待されるプライマーを2セット設計した。本プライマーセットを使用し、GuTS71-08 IV2 及び Gu2-3-2 各植物試料由来ゲノム DNA を鋳型として PCR を行った。GuSQS2 を標的としたプライマーセットの場合、GuTS71-08 IV2 では約 250 bp の増幅産物が得られたのに対し、Gu2-3-2 では増幅産物が検出されなかった(図 5 右)。また、GuSQS1 を標的としたプライマーセットの場合、GuTS71-08 IV2 の方が増幅産物のサイズが Gu2-3-2 よりも大きく、そのサイズの差異で識別が可能であった(図 5 左)。以上の結果は、これらのプライマーを用いた PCR により両者の識別が可能であることを示している。

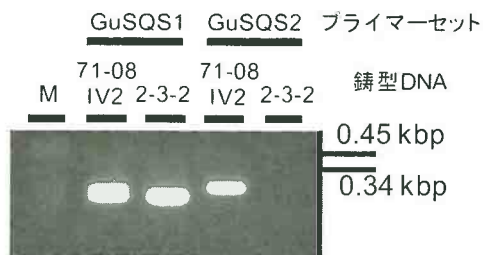


図 5. GuSQS1 及び GuSQS2 特異的プライマーによる GuTS71-08IV2 と Gu2-3-2 の識別

71-08IV2 : GuTS71-08IV2, 2-3-2 :
Gu2-3-2, M : DNA サイズマーカー

6. CYP88D6 イントロン領域を用いたカンゾウ属植物の遺伝子識別

次に筆者らは、グリチルリチン酸生合成経路の修飾段階に関わるβアミリン 11 位酸化酵素 CYP88D6¹⁸⁾に着目した。P450 酵素の一種である CYP88D6 はマメ科植物に特異的に見出される遺伝子群である CYP88D サブファミリーに属し、マメ科で特異的に進化し、トリテルペン配糖体の代謝に関与すると考えられている。非グリチルリチン生産性のカンゾウ属植物では、本酵素のホモログの酵素活性がかなり低いこ

とが報告されており¹⁹⁾、グリチルリチン酸生合成において CYP88D6 が重要な機能を担っていることが示唆されている。

ゲノム情報が公開されているタルウマゴヤシ、ミヤコグサの CYP88D 遺伝子では、エキソン・イントロン構造がよく保存されており、これらのゲノム DNA 情報より、カンゾウ属植物の CYP88D6 遺伝子のエキソン・イントロン構造を予測した。

データベース上の CYP88D6 遺伝子のコーディング配列 (AB433179.1) をもとに、イントロン 6 及び 7 を含む領域を増幅するプライマーを設計し、ウラルカンゾウ優良株、GuTS71-08 IV2 及び Gu2-3-2 について、CYP88D6 のイントロン 6 及び 7 を含む領域を PCR 増幅し、塩基配列解析を行った結果、イントロン 6 に関しては変異に富む配列が得られたが、株特異的ではなく、本領域による識別は困難と考えられた。

一方、イントロン 7 では、大きく分けて 2 タイプの配列情報が得られた。このうち、一方は、GuTS71-08IV2 に特異的であり、もう一方との共通配列には認められない *HincII* サイトを含んでいた。そこで、PCR 増幅産物の *HincII* 処理を行ったところ、GuTS71-08IV2 由来の PCR 増幅産物を *HincII* で処理した場合のみに、約 600 bp 及び 500 bp の制限酵素断片が得られ(図 6)、PCR-RFLP 法により、簡便に GuTS71-08 IV2 と Gu2-3-2 を識別できることが示された。さらに、イントロン 7 の配列情報を精査した結果、GuTS71-08IV2 と他のウラルカンゾウ株及びスペインカンゾウ等の他のカンゾウ属植物とも識別可能であることが判明した。以上述べたように、グリチルリチン酸生合成遺伝子の多型情報は、ウラルカンゾウ優良株の遺伝子識別に有用と考えられる。

筆者らは、厚生労働科学研究費補助金創薬基盤推進研究事業「漢方薬に使用される薬用植物の総合情報データベース構築のための基盤整備に関する研究」の一環として、薬用植物資源の安定供給を指向し、生薬情報の多様性の範囲確認を目的として、国内に流通する生薬の遺伝子

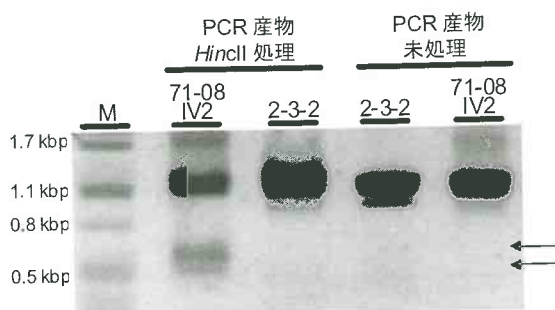


図6. PCR-RFLPによるGuTS71-08IV2とGu2-3-2の識別

71-08IV2 : GuTS71-08IV2, 2-3-2 : Gu2-3-2,
M: DNA サイズマーカー, 矢印: 制限酵素 *HincII* 処理による PCR 産物の断片

情報の解析及び収集を進めているが、本研究において収集した市場流通甘草について、CYP88D6 のゲノム DNA イントロン領域の多型を精査した結果、グリチルリチン酸を高蓄積するウラルカンゾウに高頻度で認められる配列タイプが、グリチルリチン酸含有量の高い甘草試料に有意に高い頻度で存在することが明らかになってきている。これは、本領域が、グリチルリチン酸の高含有量を目標とした育種において、植物体が成長し、根が肥大し、グリチルリチン酸含有量が測定可能となるまで待つことなく、葉や種子等から調製したゲノム DNA について高グリチルリチン酸含有量タイプの配列の存否を調べることにより、グリチルリチン酸含有量の「予測」が可能なマーカーとして利用できることを示唆するものであり、さらなるデータの集積を進めているところである。

7. 甘草の人工水耕栽培システムの開発

植物工場でのウラルカンゾウの養液栽培に関する研究は、「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植物質製造基盤技術開発」(経済産業省)及び「薬用植物資源の安定確保と有効活用のための基盤的技術の研究」(厚生労働省科学研究費補助金)の一環として2006年頃より開始し、2008年下半期からは、3者共同研究(医薬基盤研究所, 鹿島建設, 千

葉大学)「甘草の人工水耕栽培システムの開発」として実施している(但し、2009年は豊田通商を加えた4者)。

3者共同研究「甘草の人工水耕栽培システムの開発」において、筆者らの医薬基盤研究所は、養液栽培に適した優良株の選抜・育成と増殖法の開発及び人工水耕栽培で生産された甘草の品質評価を担当し、鹿島建設は新規の人工水耕栽培装置の設計と当該装置での栽培を、千葉大学は人工栽培環境制御を担当した。その成果として、短期間の水耕栽培で肥大した根が生産可能な人工水耕栽培装置及び生産システムの開発に成功し、2010年10月28日にプレスリリースを行うとともに特許を出願した²⁰⁾。また、本成果は、医薬基盤研究所, 鹿島建設, 千葉大学が、それぞれの知見, ノウハウ, 技術を高次元で連携させ、高品質の甘草を安定的かつ継続的に生産可能とした画期的な成果の好例として高い評価を受け、2011年9月22日、第9回産学官連携功労者表彰において、厚生労働大臣賞を受賞した(図7)。

8. おわりに

本稿で紹介した支持体を用いた底面給水式の養液栽培装置は、1株当りの根の収量が低い(1年間の栽培で1株あたり乾燥重量10~20g)ため、現時点では植物工場での養液栽培による甘草の商業生産に適した栽培システムとはいえない。しかし、短期間の栽培で優良株の選抜が可能(ウラルカンゾウの場合は4ヶ月間)、クローン増殖のための植物材料(ウラルカンゾウの場合はストロン挿し穂)の生産が2-3ヶ月で可能、除草等の手間がかからず、植物工場内で多種・多数の植物体を栽培可能、二次代謝物高含量の地下部(根, 根茎など)を生産可能などの優れた面を持つ。筆者らの研究室では、他の薬用植物, 生薬「黄連」の基原植物であるセリバオウレン(*Coptis japonica* Makino var. *dissecta* Nakai)や生薬「ベラドンナ根」の基原植物であるベラドンナ(*Atropa belladonna*

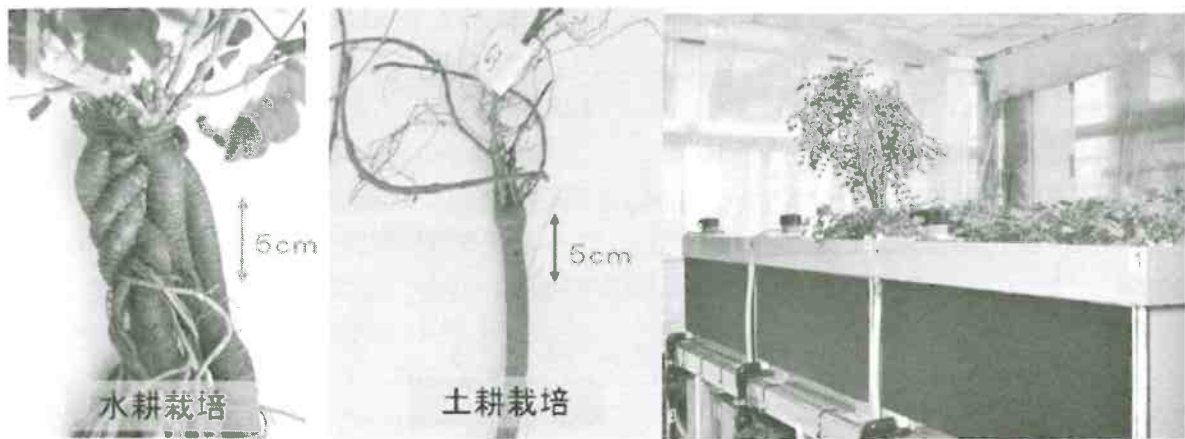


図7. 栽培300日後のウラルカンゾウ根（左：水耕栽培、中：圃場栽培）及び鹿島技術研究所内の新規人工水耕栽培装置（右：写真はウラルカンゾウ植物体を引き上げたところ）

Linné) に本養液栽培法を適用し、わずか半年間で日本薬局方規格値以上の薬用成分（セリバオウレン根茎：ベルベリン塩化物として4.2%以上、ペラドンナ根：ヒヨスチアミン0.4%以上）が得られることを確認している。とくに、養液栽培したセリバオウレン根茎のベルベリン含量は、圃場栽培5年間に匹敵する。

一方、3者共同研究で開発した新規の人工水耕栽培装置は、支持体を使用しておらず、また、図7に示したように短期間で高収量の根が生産可能である。従って、甘草の商業生産を指向した植物工場の施設及びシステム設計により適していると思われる。このような装置や施設の設計・開発やシステム構築は、筆者らが所属する独立行政法人の研究所や大学単独ではなし得なかったことである。

植物工場で生産された生薬が医薬品として製品化された事例は未だなく、また、生薬・漢方製剤業界内では、野生品を栽培品より良品とする傾向が強く、従来の圃場栽培品であってもすぐには野生品と同等であるとは見なされない。しかしながら、生薬の持続的安定供給のための手段として、また、生薬資源及び自然環境の保全のため、さらには天災や人災による生薬資源枯渇防止のためにも、植物工場での生薬の生産は不可欠な技術である。

植物工場は、生育環境を人工的に制御する特殊な施設であるため、施設の建設は畑の整地よりもはるかに費用がかかり、また、栽培にかかる光熱水費等も畑での栽培よりも割高である。したがって、植物工場における生薬の実生産を具現化していくためには、生産された生薬が従来品と同等あるいはより高品質であることを検証するとともに、生産コストの削減やコストに見合う製品開発など、経済性を考慮した戦略が必須であると思われる。

文 献

- 1) 第十六改正日本薬局方(2011), 厚生労働省, 1474-1475
- 2) 厚生労働省医薬食品局, 一般用漢方製剤承認基準, 厚生労働省医薬食品局審査管理課長通知(2010), 1-51
- 3) 日本医薬品集(2007), 医療薬, 2007年版, じほう, 2651-2733
- 4) Hayashi, H. et al. (2009), *Plant Biotechnology*, 26, 101-104
- 5) Yamamoto, Y. et al. (2005), *J. Trad. Med.*, 22 (Suppl. 1), 86-97
- 6) 尾崎和男ら(2007), 生薬学雑誌, 61(2), 89-92

- 7) 尾崎和男ら(2010), 生薬学雑誌, 64(2), 76-82
- 8) Kojoma, M. et al. (2011), *Biol. Pharm. Bull.*, 34(8), 1334-1337
- 9) 芝野真喜雄ら(2011), *Bulletin of Osaka University of Pharmaceutical Sciences*, 5, 59-68
- 10) 南基泰ら(1995), 薬学雑誌, 115, 832-842
- 11) 角谷晃司ら(1997), *Natural Medicines*, 51, 447-451
- 12) 角谷晃司(2003), *Bull. Pharm. Res. Technol. Inst.*, 12, 133-138
- 13) 吉松嘉代(2009), 特願 2009-131442 「栽培装置, 及び, 栽培方法」
- 14) 高上馬希重ら(2005), 特開 2005-137291, 「カンゾウ属植物の組織培養方法」
- 15) Chen, Z. et al.(2009), *Cytotechnology*, 60, 125-132
- 16) Sato, Y. et al.(2006), *Journal of Ethnopharmacology*, 105(3), 409-414
- 17) 吉松嘉代ら(2010), 特願 2010-250700, 「カンゾウ属植物株及びカンゾウ属植物増殖方法」
- 18) Seki, H. et al.(2008), *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 105, 14204-14209
- 19) 澤井学ら(2009), 第 27 回日本植物細胞分子生物学会講演要旨集, p.167
- 20) 澤田裕樹ら(2010), 特願 2010-250701, 「養液栽培システム及び養液栽培方法」

◀ 特集 ▶

医薬品原材料を生産する植物工場の開発

¹ 独立行政法人 産業技術総合研究所 生物プロセス研究部門
植物分子工学研究グループ

² 鹿島建設株式会社 技術研究所 地球環境・バイオグループ

松村 健¹・高砂 裕之²

植物工場の産業利用形態は、これまでの食用作物、花卉生産に加え、高度な環境制御と周年・計画生産が可能な植物工場の特性をさらに技術的に展開することで、新たに植物体を利用した物質生産を行う施設・設備としての活用も期待できる。我々は、遺伝子組換え植物の栽培技術、および多種多様な作物種の栽培に対応可能な環境構築能力を備えた高性能型遺伝子組換え植物工場を開発し、特に医薬品原材料生産の技術開発を行っている。

1. はじめに

これまで植物工場は、太陽光併用型、完全制御型を問わず、食用用途の野菜類の栽培を主として展開してきた。この場合、品質、生産量、生産コスト等々に関して、圃場やハウスなどで生産される作物との競争を余儀なくされる。特に植物工場の建設、運転コストなどが生産コストに反映されるため、現在、植物工場での生産が実用化されている作物種は、葉菜類と一部の果菜類に留まる。

一方、植物は生薬植物に代表されるように、その成分が機能性素材、および医薬品の原材料としても利用されてきた。また、近年、植物の遺伝子組換え技術の展開により、従来植物が生産し得なかった微生物や哺乳類由来の抗原や免疫・生体防御関連物質を生産させる技術、いわゆる Plant made pharmaceuticals:PMPs の開発が盛んに行われてきている。植物で医薬品原材料を生産することの特性は、製剤工程において哺乳類等の感染症原因物質や感染症由来毒性物質の混入リスクが低いことが挙げられ、また、植物の物質生産能の高さから、大幅な生産コス

MATSUMURA Takeshi¹, TAKASUNA Hiroyuki²

¹〒062-8517 札幌市豊平区月寒東 2-17

²〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1

トの削減を期待する見方もある。

しかし、医薬品原材料を生産する遺伝子組換え植物を、実際にどこで、どのように栽培・生産するかは技術的体系化は未だ確定しているとは言い難い。特に、医薬品原材料の場合、健全なヒトや動物に対する影響を考慮し、通常の食糧・飼料作物との交雑・混入を防ぐ措置を講じなければならない。植物工場は、高度に管理可能な施設を用いるため、上記のような医薬品原材料生産植物の徹底した管理栽培の実現が可能であると推察される。

また、医薬品原材料生産においては、作業の計画性、安定性・再現性、および品質管理・記録、清浄度維持などが重要と考えられる。我々は、これらに関しても植物工場は対応しうる可能性を有していると考え、遺伝子組換え植物の拡散防止措置、医薬品原材料生産に利用される種々の作物種の至適栽培環境の構築、および栽培環境の安定性・再現性、清浄度を追求した密閉型遺伝子組換え植物工場（以後、産総研植物工場）を開発し、医薬品原材料を生産する遺伝子組換え植物の人工環境下における水耕栽培技術の確立と並行して、その生産性、経済性を検討している。

2. 医薬品原材料生産のための遺伝子組換え植物工場の開発

平成18年に「遺伝子組換え生物等の第二種使用等のうち産業上の使用等に当たって執るべき拡散防止措置等を定める省令」の一部改正が行われ(省令第二号)、遺伝子組換え植物の拡散防止を施した施設内で産業利用することが、所轄省庁の大臣認可を受けることにより可能になった。第二種産業利用は、使用する施設・設備と遺伝子組換え植物(宿主・ベクター系・挿入DNA)の組み合わせにおいて、安全性評価ができ、拡散防止措置が執れるものについて審査・承認されるものであり、また、拡散防止措置は、その運転、管理対応に依るところでもあるため、施設・設備単独で推し量るものではない。しかし、施設・設備が物理的に十分に拡散防止措置に対応する仕様である場合、日常の運転管理作業の負担が軽減され、人為的ミスリスクも少なくなる。

産総研植物工場は、既存の研究棟の中に設置され、当該エリアは管理区域、植物工場本体を作業区域としてそれぞれ電子式施錠管理を行っている。産総研植物工場内部からの組換え体拡散防止のために、空調システムは循環型を基本とし、換気の際は、最終的には花粉を排出させない仕様のフィルターを設置してある。また、工場内部での交差汚染防止のため、各栽培室は独立した空気循環経路としてある。植物工場内では水耕栽培を行うが、養液排水、洗浄排水等の経路は全て高温高圧滅菌(故障時対応のため2系統設置)処理後に排水されるシステムを採用した。これには空調システムから排出されるドレン水も含まれる。入退室においては、エアシャワー、更衣・脱衣の徹底、使用済み作業着等の高圧滅菌処理がなされている。加えて、医薬品原材料生産目的であることを考慮し、入退室記録装置、温度・湿度から風量、養液 pH、電気伝導度等に至るまでの各測定記録装置、異常警報システム及び警報記録装置等が設置されている。

また、この工場では様々な遺伝子組換え植物種の栽培が想定されるため、これまでの植物工場より遙かに高照度かつ、高精度な環境制御性能が必要と考えられる。産総研植物工場では、床面の照度において最大 10 万 lux(実測値)を実現しながら、照明器具からの膨大な発熱負荷を見込んだ空調制御システムを導入することにより、光要求性の高い作物種の栽培環境構築も可能とした。上記のように、我々が開発してきた産総研植物工場は、拡散防止措置、高性能栽培環境構築、医薬品原材料生産の3つの視点から考慮した設備・性能の導入を試みたものである¹⁾。

3. 医薬品原材料生産遺伝子組換えイチゴの開発と工場内栽培

これまで国内外において、植物の遺伝子組換え技術を利用して、ワクチンや抗体、生体防御関連の物質を植物で生産させた例は、多数報告されている。我々も、複数の植物種において、人や動物のワクチン素材や抗体、サイトカイン類を植物で生産する研究開発をこれまで行ってきた。例えば、高病原性鳥インフルエンザ抗原を発現するジャガイモや鶏の原虫抗原を発現するイネやジャガイモ²⁾、人抗体を発現するタバコ等々などを始め、多数の組換え植物の開発を手がけてきている。上述の産総研植物工場では、これまでワクチン素材組換えジャガイモやイネ、近年では組換えレタスの栽培も行っているが、中でも先行して試験を実施しているのは、イヌのインターフェロン(CaIFN)を発現する遺伝子組換えイチゴの研究開発である。我々の研究グループは、CaIFNの低容量投与がイヌの歯周病症状を改善する効果を見いだしている。そこで、CaIFNを発現する遺伝子組換えイチゴを作出、イチゴ果実内でインターフェロン活性を有するCaIFNが発現していることを確認、動物試験においても歯周病改善効果を確認するに至っている(写真1)。そこで、CaIFN発現イチゴの実用化を目的に、産総研植物工場内でのイチ

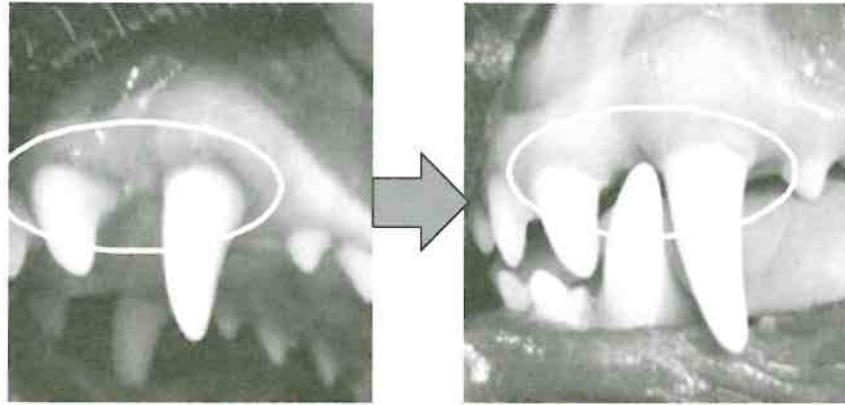


写真1：左：軽度の歯肉炎を発症しているイチゴの歯肉。腫れと歯周に炎症が確認される。
右：CaIFN 発現イチゴを投与した同じイチゴの歯肉。明らかに炎症が治まり腫れが
無くなっている。

ゴの栽培，CaIFN 生産の実証試験を行っている。

イチゴの栽培技術に関する研究の多くはハウス栽培を前提としており，人工光源を利用した閉鎖型人工環境下における試験研究は非常に少なく，特に果実収穫まで人工環境下で実施された報告は見出せなかった。そこで，我々は，閉鎖型人工環境下におけるイチゴ栽培技術の確立，栽培環境条件とイチゴの果実収量及び目的物質の発現・蓄積との関係を明らかにするための栽培試験を行った（写真2）。試験にはCaIFN 遺伝子組換えイチゴの開発で使用した四季成り性品種「エッチェスー138」を使用した。

イチゴの人工環境下栽培における光強度と明期の最適な組み合わせを探索した結果，明期の違いには依らず，日積算光量（明期×光強度）



写真2：植物工場内でのイチゴの水耕栽培

が高いほどイチゴの果実収量は高くなる傾向が確認された³⁾。また，暗期がなくても本品種のイチゴの生育と果実生産には問題がないことが明らかとなった。また，栽培室内のCO₂濃度を1000ppmまで高めることで，400ppmの場合よりも果実収量が20%以上増加する効果が認められた。気温条件については，明期（16hr）の気温を21℃，24℃，27℃の3段階に設定し，暗期（8hr）は全ての試験区で20℃一定とした栽培試験の結果，最初の収穫から9週後の時点で，果実の積算収穫量が最も多かったのは24℃の試験区であった。また，気温が高いと1果重が有意に小さくなる傾向も確認された。さらに，果実に含まれる総タンパク質濃度を分析した結果では，明期気温が高いほど総タンパク質濃度が高くなる傾向も確認された（図1）。

現在，これらの知見に加え，育苗期から環境調節を行なうことで収穫開始から35日間で約550g/株の果実収量が得られている⁴⁾。このデータを基に，栽植密度を5株/m²，年3作とした場合の年間果実収量は約8kg/m²で，これは同品種のハウス栽培における収量の約2倍に相当する。植物工場内で多段式栽培を行うことにより，工場面積あたりさらに高い生産量が期待できる。また，この栽培条件において遺伝子組換えイチゴを栽培した場合，イチゴの完熟果で目的物質が安定的に発現蓄積されることも確認

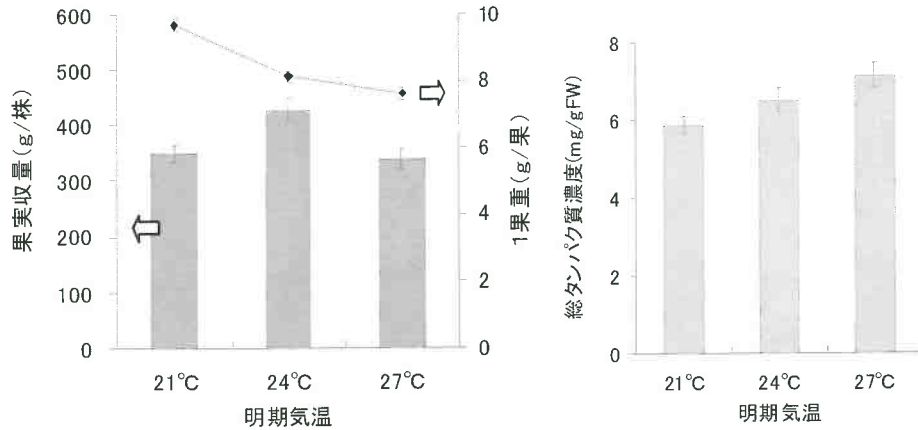


図1 明期気温と果実収量、1果重(右)および総タンパク質濃度(左)の関係

されている³⁾。

4. 閉鎖型植物工場による栽培環境構築の検討

閉鎖型植物工場では、イチゴやレタスなど草丈が低い植物については各段に照明と栽培ベッドを備えた多段式栽培が可能で、栽培空間あたりの栽培面積が増加可能なため、高い生産性が期待できる。この多段式栽培は、生産量を拡大することが可能である一方、各段の照明器具からの発熱の影響などにより室内の温度環境差が生じやすく、通常の植物工場でも課題となっている。栽培環境の不均一性は植物の生育、すなわち、目的物質の生産性に影響を及ぼす。前述の気温に関する栽培試験結果によれば、最適気温を24°Cとすると、これより3°Cの気温差で果実収量に約20%の差が生じることとなる。このように、閉鎖型植物工場の設計においては、栽培室内の環境の均一性に対する配慮が重要な課題の一つである。栽培室内の環境の不均一性には、照明からの発熱のほか、空調条件や栽培室の形状、栽培棚の配置等が複合的に関係する。しかし、どのような条件でどのような環境の不均一性が生じるのか、これまであまり詳細な調査研究はなかった。

我々は、産総研植物工場の栽培室Aにおいて、様々な空調設定条件下での栽培室内の多点環境計測（温度206点、湿度14点、風速26点、

CO₂点濃度4点、光量子量4点、測定間隔1分毎）を行い、空調条件と栽培室内の気温や風速などの環境分布との関係を調査した⁵⁾。栽培室Aは幅3m、奥行き9m、高さ2.4mとなっている。幅3mで向かい合った壁面の片側から給気し、もう一方の壁面で排気する水平一方向流方式とすることで、給排気面積を出来るだけ広く取り、室内の風速を抑えるとともに気温分布の生じにくい設計としている。この栽培室には、蛍光灯を光源とし、上下2段でイチゴの水耕栽培を行うことができる可動式の栽培棚を4列導入した（図2）。

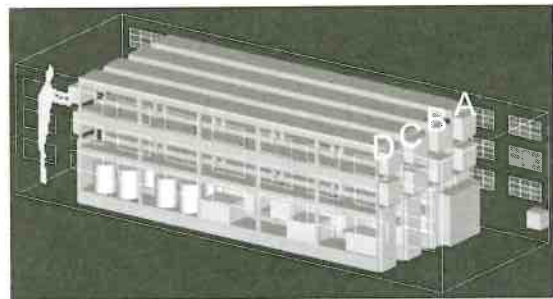


図2 栽培室内における栽培棚の配置 (A,B,C,Dは棚番号)

図3は栽培棚の気温分布の測定結果の一例を栽培室の断面図で示したものである。これによると給気側と比較して排気側の上段で気温がやや高くなる傾向にあることが認められ、その差は定格風量100%の場合で最大で約3°Cであった。これは栽培棚下段の照明発熱の影響が風速

の低下する排気側の栽培棚上部で顕在化したものと考えられる。ただし、植物体に近い測定ポイントでの気温について栽培棚毎の平均値を比較するとその差は最大約 1.7℃であり、この栽培室で行なわれた栽培試験の結果でも栽培棚間で果実収量の顕著な差異は認められなかった⁶⁾。一方、図 3 に示されたように、風量を 6 割程度に削減すると栽培室内の気温差は顕著に大きくなり、その差は最大約 6℃まで拡大した。また、照明の光強度を高くすると照明発熱の影響により、室内の気温差が拡大することも確認された。一方、湿度や CO₂ 濃度については場所による差異が小さかった。

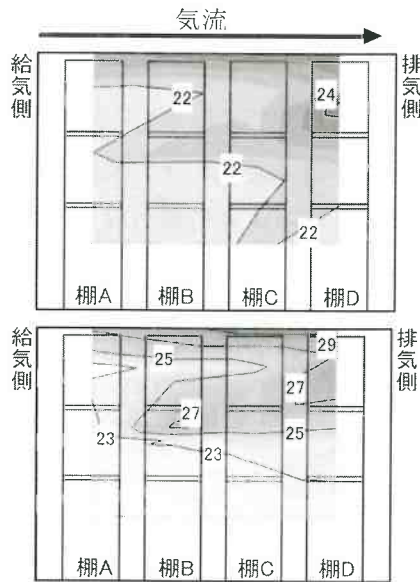


図 3 栽培室内の気温分布
(上:風量 100%,下:風量 60%)

5. まとめ

医薬品原材料を生産する植物工場の研究開発は未だ例が無く、緒に就いたばかりである。完全人工環境下で、医薬品原材料を生産する植物種の水耕栽培技術、医薬品原材料生産に適合するような環境構築技術、また、計画的生産に不可欠な安定性、再現性に関する栽培・生産実証試験等々、これから解決していかなければならない課題は多い。加えて、当該研究開発が、実際に産業へと展開可能か、生産性、コストなどの側面からの検討と実証研究も必要である。その点においては、今後、栽培環境調節と植物による目的物質生産に関する研究成果に、栽培環境と空調・照明に関する調査研究から得られる知見を加えることで、より省エネルギーで合理的な植物工場の設計が可能になると期待している。

文 献

- 1) 安野理恵ら (2007), バイオインダストリー, 24, 92-99
- 2) 松村 健 (2005), ブレインテクノニュース, 107, 16-20
- 3) 彦坂晶子 (2012), SHITA REPORT, No.29, 17-24
- 4) 吉田英生ら (2011), 日本生物環境工学会 2011 年北海道大会講演要旨, 134-135
- 5) 権藤 尚ら (2008), 平成 20 年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 993-996
- 6) 高砂裕之ら (2009), 日本生物環境工学会 2009 年福岡大会講演要旨, 290-291

謝辞：本研究の一部は経済産業省の委託研究事業「植物利用高付加価値物質製造基盤技術開発」により行った。

◀ 国内情報 ▶

高齢・女性農業者における農業機械の 運転・操作に関連する身体機能の調査

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
 生物系特定産業技術研究支援センター

富田宗樹・杉浦泰郎・土師 健・塚本茂善・皆川啓子・原田一郎

生研センターは、農業機械事故の減少をねらいとして、安全鑑定等を通じた各種の安全装備の装着を推進してきた。これをさらに進めるためには、現状を踏まえた安全鑑定基準の見直しが必要である。今日の日本農業では、従事者に占める高齢者・女性の割合が高いが、これら農業者の身体機能の特徴は、安全鑑定基準制定時においては十分に考慮されていなかった。そこで、今後の見直しへの反映を目的に、農業機械操作に関連した高齢・女性農業者の身体機能の現状を調査した。

1. はじめに

農林水産省生産局の報告によると、農作業による死亡事故（以下、農作業事故）は年間約400件発生しており、その約70%が農業機械作業中の事故である¹⁾。年齢階層別割合をみると、65歳以上が70~80%を占め、高齢者での多発傾向がある。また、今日の日本農業において、女性は重要な役割を果たしており、これに伴って、農作業事故の約15%を占める等、事故の被害者となる危険性も生じている²⁾。従って、事故減少を図る上では、高齢・女性農業者への対策が不可欠である。

ところで、高齢・女性農業者の農作業事故の一因として、これら農業者の体格および筋力等の身体機能が、成人男性に比較して低いことが挙げられる。既存の調査では、70歳男性は50歳男性に比較して、平均で身長が約7cm、握力が約100N低く、50歳女性においても同様に、身長が約13cm、握力が約150N低いことが示

TOMITA Muneki, SUGIURA Yasuro, HAJI Takeshi, TSUKAMOTO Shigeyoshi, MINAGAWA Keiko, HARADA Ichiro

〒331-8537 さいたま市北区日進町1-40-2

されている³⁾。

一方、現状の農業機械の代表的な安全基準である安全鑑定基準および内規（以下、安鑑基準等）は、必ずしも高齢者・女性を包含した基準とはなっていないと考えられる。これは、制定時点においては、今日ほどの高齢・女性農業者の増加は予期できず、また、これら農業者に関するデータ蓄積もなかったためである。従って、今後、安鑑基準等をこれら農業者に整合したものへと見直していくことが必要であるが、そのためにはまず、その実態に関する検討資料を得なければならない。

しかし、現状では、上述のような高齢者または女性全般を対象とした基礎的な身体機能に関するデータこそ存在するものの、これらと農業者が行う農業機械の運転・操作との整合性は検証されていない。

このような現状を踏まえ、本研究では、安全鑑定等の見直しにおける検討資料として用いることを目的に、農業機械の運転・操作装置の認知や操作に係る農業者の身体機能の実態を調査した。さらに、その結果を分析し、安鑑基準等において見直しが求められる点を明らかにし、今後の方向性についての提言を行った。

2. 方法

1) 対象とした部位

農業機械においては、歩行型・乗用型の差異等、作業姿勢・方法が多様であり、必要とされる身体機能も幅広い。そのため、調査対象を、現行の安鑑基準等と高齢・女性農業者の身体機能の間に隔たりがあると考えられる事項に絞り込む必要がある。そこで、過去に実施した農業者調査および検査・鑑定での知見を参考に、調査対象候補を抽出した。さらに、その中から、農業者を被験者とした調査が物理的および時間的要因に照らして効果的と考えられるものを選定し、調査の対象とした。

2) 最下段ステップおよび手すり

乗用型農業機械においては、ほ場での沈下や畦畔等に対応するため運転席の床が高く、直接乗降することが困難なものが多い。その対策として、安鑑基準等では、乗降を補助するステップと、握り又は手掛かり（以下、手すり）を設置することを求めている⁴⁾。このうち、最下段ステップの高さは、550mm以下と定められているが、本研究での検討過程では、高齢・女性農業者が足を上げることができる高さと比較して、過大ではないかという意見があった。また、手すりに関しては、「安全かつ容易に乗降できるよう」設置することを求めているが、高さに関する数値基準は設けられておらず、高齢・女性農業者が握ることができる範囲に配置されているかについて懸念が示された。

そこで、手すりを利用した乗降動作に関連する身体機能の調査項目として、手すりを保持した状態で足を上げることができる高さ、ステップを昇降の際の手すりの把持高さを設定した。

調査方法は、以下の通りとした。まず、右手でポールを保持した状態で、右足を楽に上がるころまで上げてもらい、その際の靴底の地上高（以下、足上げ高さ）を測定した（図1）。次に、乗用型機械のステップを模した、高さの異

なる踏み台とこれに立てたポールを用い、踏み台を昇降する際に手すりを把持した位置の地上高（以下、握り高さ）を測定した。踏み台高さは300,400および500mmとし、把持位置の基準は人差し指とした。

調査の被験者は、全国14県の農業者のべ179名（女性54名、65歳以上男性（以下、対象男性）48名、65歳未満男性（以下、非対象男性）77名）とした。なお、調査地域および被験者の選定は、（社）日本農業機械化協会、全国農業機械士協議会および各県の機械士協議会に依頼した。



図1 足上げ高さおよび握り高さの測定方法

3) ペダル操作力

乗用型農業機械の運転・操作において、クラッチおよびブレーキペダルの操作は不可欠である。安鑑基準等において、ペダル操作力の上限は490Nとされており、また、ISO15077:2008における上限値は450Nである⁵⁾。しかし、農業者からは、操作力が過大であるとの意見があった。そこで、乗用型農業機械のペダル操作において農業者が発揮可能な踏力を調査することとした。なお、被験者は上記2)と同じであった。

調査方法は、トラクタを模したモデルに着席した状態において、ペダルを模して設置した踏力計（日計電測LP-100KC105）を右足または左足で踏み、その際の踏力を測定することとした（図2）。踏力計の設置位置は、中心線から座席の中心線までが、左右いずれも250mmとなるようにした。座席の前後方向の位置は無段階、座

面高さおよびペダルの傾きは3段階で調整可能とした。なお、本調査では、2つの異なった状況での踏力を測定した。第1に、「無理なく踏み続けられるような力で踏む」よう指示した際に継続的に発揮される力（以下、持続踏力）を、全被験者を対象に測定した。第2に、「最も強い力で踏む」よう指示した際に発揮される力の最大値（以下、最大踏力）を、被験者のうち128名（対象男性31名、女性38名を含む）を対象に測定した。



図2 踏力の調査方法

4) 操作表示および安全標識の文字サイズ

農業機械においては、運転・操作装置として多くのレバー、スイッチ類が配置されているが、それらの機能や配置、形状は機種や型式によって大きく異なっている。そのため、安鑑基準等では、運転・操作装置の機能および操作方法を明確に表示することを求めている。さらに、その要件については、「作業者が容易に理解できる言葉、文字等を使用する」とされているが、文字サイズは規定されていない。

一方、農業機械においては、作物や土壌を作業対象とするという機能の特殊性等から、防護が不可能な作用部や、取り扱いに注意を要する装置が数多く存在する。安全鑑定等では、これらに対して適切な安全標識により注意を喚起することを求めている。その要件に関して、様式および耐久性等の規定はあるが、文字サイズの数値基準は設けられていない（ただし、安鑑基準等が参照している JISB9100 では「16 ポイント程度以上が望ましい」とされている⁶⁾）。

これらに対しては、農業者から、文字が小さ

すぎるとの意見があった。そこで、高齢・女性農業者が農業機械の操作状態において識別できる文字の大きさを調査した。被験者は、全国15県の農業者のべ255名（内、対象男性84名、女性83名）とし、選定方法は上記2）と同様とした。

調査には、歩行型機械を模したモデル（以下、歩行型モデル）を用いた（図3）。この歩行型モデルは、生研センターが所有する歩行型トラクタの構造調査に基づき、車輪とハンドルとの位置関係および作業状態におけるハンドル保持力が実機とほぼ同じとなるようにしたものである。調査方法は以下の通りとした。まず、被験者に、最も作業しやすいとした保持位置で静止するよう指示し、その際のハンドルの中心高さ、立ち位置などを測定した。その後、操作部を模した板上に異なるサイズの文字を配置し、容認可能な最小サイズを選択するよう指示した。文字サイズの選択肢は、10、12、16、24および36ポイントとした。



図3 歩行型モデルによる調査方法

4. 結果および考察

1) 最下段ステップおよび手すり

足上げ高さの平均値は、女性、非対象男性、対象男性の順に大きくなった（表1）。また、女性と後者2群とは有意水準5%で差が認められた。握り高さは、女性、対象男性および非対象男性のいずれにおいても、踏み台が高くなるほど大きくなった。被験者の群間では、女性、対

象男性，非対象男性の順に握り高さは大きくなっており，踏み台高さ 500mm においては有意水準 5% で差が認められた。

これらの結果より，足上げ高さおよび握り高さにおいて，女性農業者は成人男性に比較して低いことが明らかになった。特に，足上げ高さでは，女性の平均値は安全鑑定等の基準値 (550mm) より大幅に低く，現状のステップは高すぎることで裏付けられた。しかし，農業機械においては，多くの場合ステップ高さの低減には限度がある。その際は，乗降を補助する手段として手すりが重要となるが，女性農業者の握り高さは男性に比較して低いため，設置高さに特に配慮する必要がある。

従って，高齢・女性農業者の身体機能を考慮した場合，以上の結果より，ステップ最下段高さおよび手すり高さについては，安鑑基準等の見直しおよび新設が必要と考えられる。

表 1 被験者足上げ高さおよび握り高さの平均値

	女性	対象男性	非対象男性
足上げ高さ	292ab (77)	374a (98)	340b (96)
300mm	1308ab (125)	1345a (141)	1357b (121)
握り高さ	1370ab (122)	1407a (123)	1431b (122)
400mm	1420ab (122)	1468ac (137)	1514bc (134)
500mm			

()内は標準偏差 単位 mm
 a,b,c : 同文字間は 5% 水準で有意差あり

2) ブレーキペダル位置および操作力

最大踏力の平均値は，女性，対象男性，非対象男性の順に大きく，女性と対象男性の間には有意水準 5% で差があった (表 2)。また，持続踏力は，それぞれ最大踏力の 48%，60% および 50% であった。女性農業者における最大踏力の平均値は安全鑑定等の基準値 (490N) の約半分であり，基準値が過大であることが明らかになった。従って，高齢・女性農業者を考慮した場合，基準値の大幅な低減が必要であり，さらに，

持続的な操作が必要である装置については，より低い基準値を設ける必要があることが示された。

表 2 被験者のペダル最大踏力

	女性	対象男性	非対象男性
最大踏力	248ab (85)	316a (100)	433b (168)
持続踏力	119ab (39)	191ac (84)	216bc (96)

()内は標準偏差 単位 N
 a,b,c : 同文字間は 5% 水準で有意差あり

3) 操作表示および安全標識の文字サイズ

12 ポイント以上で全回答者の 38%，16 ポイント以上で 78% が許容しうると回答した (図 4)。従って，16 ポイント以上であれば，概ね許容されるものと判断できた。なお，非対象男性，女性，対象男性の間で有意差は認められなかった。従って，操作表示および安全標識においては，JIS の推奨通り，文字の大きさを 16 ポイント以上とすることが妥当と考えられた。しかし，農業機械における現状を鑑みると，特に，文字数の多い安全標識について，文字を 16 ポイントまで拡大した場合，機械の構造上貼付可能な寸法を超えることが予想された。従って，安全標識については，様式 (JISB9100 準拠) を含む，内容および記述方法の変更を検討する必要があると考えられた。この点については，本研究の成果を踏まえ，現在さらに研究を進めているところである。

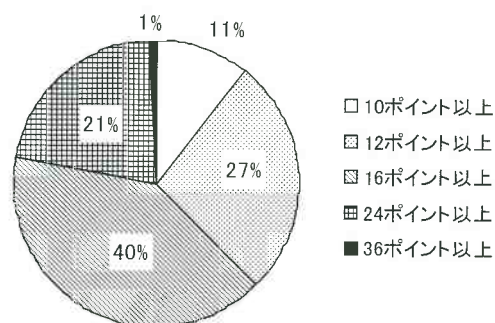


図 4 被験者が許容した文字のサイズ

5. 結論

以上の結果から、農業機械安全装備の高年齢・女性農業者への適応性を改善する方策として、ステップ最下段高さおよびペダル踏力の基準値低減、並びに手すり高さおよび文字サイズの基準値制定が必要であることが示された。ただし、その実現にあたっては、作業性、構造上の制約および受容可能なコスト等について、さらに検討を進める必要がある。

おわりに

本研究により、農業機械を高年齢・女性農業者にとってより安全なものとするためのいくつかの方策を示すことができた。今後は、この成果を農業機械の検査・鑑定において参照するとともに、安全基準等の見直しにおける資料として活用していく。

なお、今回の調査にあたっては、ご協力いただいた全国の農業者の皆様をはじめとして、社団法人日本農業機械化協会、全国農業機械士協議会並びに各道府県の農業機械士協議会の各位に多大なご指導、ご協力を賜った。この紙面を借りて深謝申し上げる。

文献

- 1) 農林水産省生産局 (2010) : 平成20年に発生した農作業死亡事故について, 平成22年4月8日プレスリリース, 1-7
- 2) 農林水産省 (2009) : 平成21年農業構造動態調査報告書, 50
- 3) 首都大学東京体力標準値研究会 (2007) : 新・日本人の体力標準値II, 22-25, 162-165, 不昧堂出版, 東京
- 4) 生研センター (2011) : 平成23年度 安全装備の確認項目と安全鑑定基準及び解説, 1-22, 生研センター, 埼玉
- 5) ISO(2008) : Tractors and self-propelled machinery for agriculture – Operator controls – Actuating forces, displacement, location and method of operation, 7, ISO, Switzerland
- 6) 日本工業標準調査会(1994) : 農業機械 – 表示に関する通則, 1, 日本規格協会, 東京

◀ 文献情報 ▶

ウシ卵核胞期卵子への季節の影響は、発生能の低下した胚における転写レベルの変化として発現する

Seasonal Effect on Germinal Vesicle-Stage Bovine Oocytes Is Further Expressed by Alterations in Transcript Levels in the Developing Embryos Associated with Reduced Developmental Competence.

Mirit Gendelman and Zvi Roth

Department of Animal Sciences, Robert H. Smith Faculty of Agriculture, Food and Environment, the Hebrew University, Rehovot, Israel

Biology of Reproduction, 86(1):8, 1-9 (2012)

ウシ卵子は卵胞発育の種々のステージにおいて暑熱ストレスに対する感受性を持つことが知られている。また、ウシにおいては、夏季の暑熱ストレスの影響は、暑熱の影響のない秋季にまで引き続き、2～3周期は回復に必要であることも知られている。このことは、排卵卵子だけではなく、卵巣中の未成熟卵子も暑熱の影響を受けていることを示すものである。しかしながら、暑熱ストレスが卵子に対してどのような影響を与えているのは、いまだ不明な部分が多い。そこで、本論文では、ウシ卵子を寒冷期（12月～4月）あるいは暑熱期（5月～11月）に採取して、体外成熟・体外受精および体外培養をおこない、発生成績や遺伝子発現等の調査が行われた。その結果、寒冷期における2～4細胞期への卵割率は暑熱期に比べて有意に高く（89.0% vs 75%, $P < 0.05$ ）、胚盤胞期への発生率も寒冷期が暑熱期よりも有意に高かった

（26.6% vs 10.1%, $P < 0.05$ ）。卵子および発生胚における総 RNA およびポリアデニル酸を抽出し、半定量あるいはリアルタイム PCR により *MOS*, *GDF9* および *POU5F1* の遺伝子発現量を測定した結果、卵核胞期の卵子においては季節による違いは認められなかった。しかしながら、成熟後の卵子においては、寒冷期に採取した卵子の mRNA 発現量は、暑熱期に比べて有意に高かった（ $P < 0.05$ ）。4細胞期胚においては、寒冷期に比べて暑熱期に *GDF9* 発現量が有意に高く、*POU5F1* 発現量は有意に低かった。8細胞期胚および胚盤胞期胚においては、寒冷期に比べて暑熱期の *POU5F1* 発現量は有意に低かった。

長期間にわたる卵胞発育中にウシ卵胞内卵子がうける生理的影響は、卵子の発生能の低下として現れる。これは、卵核胞期の卵子への暑熱ストレスの影響が、卵子の成熟や胚発生時の遺伝子の転写レベルの変化の結果として現れたものかもしれない。すなわち、卵巣中の卵子は、環境ストレスにさらされることにより卵子の mRNA 量や転写機構を損ない、胚ゲノムの活性化前後の胚の遺伝子発現に影響を及ぼすように思われる。このような障害機構により、乳牛の受胎率に対する夏季の暑熱ストレスの影響を部分的に説明は可能である。暑熱ストレスによる繁殖性低下は大きな問題であり、様々な要因が考えられることから、その解決のためにも、多方面にわたる研究が今後とも必要である。

（抄訳：下司雅也，GESHI Masaya，独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 畜産草地研究所）

◀ 文献情報 ▶

UVR8による中波長紫外線受容の構造基盤

Structural basis of ultraviolet-B perception by UVR8

D. Wu¹, Q. Hu¹, Z. Yan¹, W. Chen², C. Yan³, X. Huang^{2, 4}, J. Zhang¹, P. Yang^{2, 4}, H. Deng¹, J. Wang³, X. W. Deng^{2, 4} and Y. Shi¹

¹ Tsinghua-Peking Center for Life Sciences, School of Life Sciences and School of Medicine, Tsinghua University, Beijing, China, ² College of Life Sciences, Peking University, Beijing, China, ³ State Key Laboratory of Bio-membrane and Membrane Biotechnology, School of Life Sciences and Medicine, Tsinghua University, Beijing, China, ⁴ Peking-Yale Joint Center of Plant Molecular Genetics and Agrobiotechnology, State Key Laboratory of Protein and Gene Research, Peking University, Beijing, China.

Nature, doi:10.1038, (2012)

光の受容は言うまでもなく生物にとって非常に重要であり、光応答反応は、受容体による光の吸収から始まる。植物においては、広範囲の波長の光に対してそれぞれ特異的な光受容体を用いて応答している。赤色光に対するフィトクロム、青色光とUV-Aに対するクリプトクローム、そしてUV-B (280-315nm)に対するUVR8 (UV RESISTANCE LOCUS 8)がそれぞれ単離されている。これらの中で、UVR8以外の光受容体は、タンパク質自体では光を吸収することができないため、発色団と呼ばれる補助因子と結合した状態で機能することが知られている。しかし、UVR8ではこの発色団が明らかになっていない。UVR8はUV-B応答制御因子として単離され、その後、UV-B受容体であることが示された。*uvr8*突然変異体は、UV抵抗性に関わる遺伝子の発現増加がみられず、結果としてUV-B感受性を示す。これまでの研究により、UV-BはUVR8の2量体構造を壊し、単量体に変換することが知られていた。単量体と

なったUVR8はCOP1 (CONSTITUTIVELY PHOTOMORPHOGENIC 1)と結合し、UV応答遺伝子群の転写を促進する。タンパク質中の285番目のトリプトファン(W285)がUVR8を介したUV-B応答に必須であることが明らかとなっている。このような知見が報告されてきているものの、UVR8がどのようにしてUV-Bを感受し、単量体化が引き起こされるかについては不明であった。

本論文では、UVR8の結晶構造解析からUVR8は外的な発色団を必要とせず、それ自身で2量体を形成し、さらにはUVR8タンパク質自体がUV-Bを感知していることを明らかにした。この結果から、UV-B受容の発色団はUVR8自身のアミノ酸であることが推察された。また、結晶化されたUVR8の2量体にはUV-Bの照射により亀裂が生じた。2量体結合領域に存在するアルギニン(R286, R338)が近くにあるいくつかの芳香族アミノ酸トリプトファンとカチオン- π 相互作用することでこの2量体は安定化していると考えられた。天然アミノ酸のうち、280nm付近に吸収波長があるのはチロシンとトリプトファンのみであることから、2量体結合領域に存在するチロシンとトリプトファンを異なるアミノ酸に置換した変異型UVR8を作成し解析を行ったところ、W285とW233に変異を入れたUVR8はUV-Bを感受することができなくなった。これらの結果からW285, W233がUVR8のUV-B感受を行う発色団として機能することを明らかにした。UV-B照射によって、トリプトファンのインドール環上の π 結合が変化することで、分子間カチオン- π 相互作用が崩れ、その結果R286, R338側鎖の構造変化が引き起こされ、2量体を安定化することができなくなるものと推察している。

本論文とほぼ同時にScience誌に同様の結果がChristie et al.によって報告されていることを追記しておく(Christie et al. 2012, *Science*, 335, 1492-1496)。

(抄訳：高田美信, TAKADA Yoshinobu, 東北大学大学院 生命科学研究所)

編集後記

149号をお届けします。本号では特集として「植物工場の研究開発」を取り上げました。

総説で丸尾 達氏(千葉大学)に植物工場にかかわる諸問題と研究開発についてご執筆戴くとともに、後藤英司氏(千葉大学)らに人工光下の植物の光合成と有用物質合成、高市益行氏(野菜茶業研究所)に農研機構における植物工場生産技術の開発、吉松嘉代氏(医薬基盤研究所)らに植物工場での甘草生産に適したウラルカンゾウの選抜と育成、松村 健氏(産業技術総合研究所)らに医薬品原材料を生産する植物工場の開発について、それぞれご執筆戴きました。

その他の研究情報としては、富田宗樹氏(生研センター)らに高齢・女性農業者における農業機械の運転・操作に関連する身体機能の調査についてご執筆戴きました。

また、本号の文献情報は、下司雅也氏(畜産草地研究所)、高田美信氏(東北大学)にご執筆戴きました。

ご多忙な中玉稿をお寄せ戴きました執筆者各位に深甚の謝意を申し上げます。(佐々木記)

本誌著作物の複写利用等について

本誌掲載の論文・記事の複写・転載等を希望される方は、執筆者ならびに生物系特定産業技術研究支援センター(生研センター)の許諾を得て行って下さい。

生研センター 業務のご案内

～研究開発を強力に支援いたします～

提案公募型の委託研究制度

- 民間企業の実用化段階の研究支援なら **民間実用化研究促進事業**
- 技術シーズ開発のための基礎研究や
応用・発展研究及びベンチャー創業を目指すなら **イノベーション創出基礎的研究推進事業**

その他の支援制度

- 「共同研究先のあっせん」、「遺伝資源配布先のあっせん」などもお気軽にご相談下さい。
詳細は、生研センター企画部企画第1課までお問い合わせください。

ブレインテクノニュース 第149号

平成24年1月15日発行

発行人 前川 泰一郎

編集人 浅野 将人

発行所 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構

©生物系特定産業技術研究支援センター(生研センター)

〒331-8537 埼玉県さいたま市北区日進町1-40-2

TEL 048-669-9170 FAX 048-666-9266

e-mail brainki1@ml.affrc.go.jp URL <http://www.naro.affrc.go.jp/brain/shien/>