

光波長の特性を応用した農業用照明

Plant Growth Lighting Fixture Utilizing Wavelength Characteristics

石渡 正紀* ・ 山田 真* ・ 内田 達清* ・ 大市 明伸**
Masaki Ishiwata Makoto Yamada Tatsukiyo Uchida Akinobu Oichi

農業用システムへの光エネルギー利用技術において、植物や昆虫が本来備えている光の波長・強度・周期などに対する生理的な応答特性を見極め、これらを応用することによって、農薬の使用が低減できる照明器具等を開発してきた。室内において人工光を用いた基礎実験を行い、植物病害防除メカニズム、害虫防除メカニズム、および植物育成に必要な光照射要件を明らかにするとともに、この光照射要件を満たす器具を実際の農業現場に設置してその有効性を検証した。

In the area of applying photo-energy to farming facilities, the physiological response characteristics against wavelength, intensity, cycle etc of light possessed by plants and insects was identified, and therefore lighting systems have been developed for enabling reduced use of agricultural chemicals by applying the acquired knowledge. The basic experiments using artificial lighting in an indoor environment clarified plant disease prevention mechanisms, pest prevention mechanisms, and light irradiation conditions required for plant growth. A lighting system meeting the identified light irradiation requirements has been installed in actual farming facilities and proved its effectiveness.

1. ま え が き

現在、我々は地球温暖化や有害物質による環境汚染、少子高齢化に伴う農業就労者の減少等による食料自給率低下など、農業分野に関連した多くの問題を抱えている。なかでも、農薬による自然環境汚染やその残留による人体への悪影響、農業生産者への健康被害、天候不順による農作物の収量の変動は消費者および生産者ともに大きな問題であり、食の安全性と農作物の安定した供給への要求はますます高まっているのが現状である。このような市場ニーズに応えるため、減農薬や無農薬栽培に取り組む農業生産者が増えている。

日照の不足がちな北欧で昔から盛んであったビニルハウスやガラス温室を主体とした施設栽培が、近年は日本の農業現場でも増えてきており、トマト、きゅうり、いちごなどの果菜類やほうれん草、小松菜などの葉菜類が多く生産されている。施設栽培は露地栽培に比べて環境制御がしやすく、栽培に適した環境を常時保つことが可能である。

その反面、施設内の環境は病害虫にとっても繁殖に適したものとなっているため、一度、病害虫が発生してしまうと急速に被害が拡大するとともに、発生のサイクルも早く

なる。とくに果菜類は葉菜類に比べて栽培期間が長いので、さまざまな病害虫の被害を受けやすく、殺虫剤や殺菌剤の散布回数も多くなる傾向にある。植物病害を例に挙げると、露地栽培では比較的発生量の少ないうどんこ病、灰色かび病、すすかび病などの空気伝染性の病害が発生しやすくなる。このことが薬剤の多用をもたらし、その結果、耐性菌の発生による難防除病害の多発を助長している。

最近これらの問題に対し、化学農薬の使用量を意図的に減らす防除法、栽培環境の管理や抵抗性植物を利用する耕種的防除法、防虫ネット、色粘着トラップ、防蛾灯等を利用する物理的防除法などが試みられている。さらに、科学的根拠に基づき農作物に対する病害虫のリスクを適切に管理して食の安定供給を確保する方法として、化学農薬の使用を最小限に抑えるとともに適切な防除手段を総合的に講じて、人体の健康に対するリスクと環境への負荷を軽減する総合的害虫防除・雑草管理（Integrated Pest Management：以下、IPMと記す）という考え方も広まってきている。

本稿では、IPMや植物育成の考えに基づいて当社がこれまでに開発してきた人工の光の特性を活用する以下の農業関連の技術について紹介する。

* 照明事業本部 照明R&Dセンター Research & Development Center, Lighting Manufacturing Business Unit

** 照明事業本部 施設・屋外照明事業部 Industrial & Exterior Lighting Division, Lighting Manufacturing Business Unit

- (1) 植物が有害微生物（菌類）や害虫からの危害や環境変化などの外的要因（ストレス）を受けたときの防衛反応を積極的に起こさせて植物病害を抑制する技術¹⁾。
- (2) 害虫の光に対する特異的な特性と植物の光応答特性を正確に把握することで害虫による被害を軽減しながら光に影響されやすい植物への悪影響を抑える害虫防除技術²⁾。
- (3) 季節や地域的な問題から不足しがちな日射量を補うことによって植物育成のサイクルを早めて生産性を高める植物育成技術³⁾。

2. 紫外線を応用した植物病害防除¹⁾

2.1 植物の病害抵抗性誘導現象

植物の感染症の80%以上は糸状菌（かび・菌類）によって引き起こされ、残りは細菌、ウイルス、ウイロイド、ファイトプラズマ、線虫、原虫が原因とされている。地球上には十数万種の糸状菌が存在しており、そのほとんどは腐生菌で、そのうち約8千種が植物病原菌である。植物は本来大多数の病原菌に対して抵抗性を示すが、一部のわずかな病原菌によって被害を受ける。植物は、動物にみられるような抗体反応や食作用などの免疫システムによる生体防御機構はもっていないが、それとは異なる仕組みで病原体の攻撃から身を守っている。

その一つとして病原菌に対する誘導抵抗発現、いわゆる植物免疫システムが知られている。このシステムは、植物の一部の組織が病原菌等による感染などの外的要因（ストレス）を受けた場合、その感染部位からシグナル物質が放出され、それが植物体内を巡ってまだ感染を受けていない部位まで到達し、そこで抵抗性に関与する遺伝子の発現を誘導するというものである。

筆者らは、外的要因として波長280～320 nmの紫外域に発光のピークを有する光を取り上げ、これをいちごに照射した場合の病害抵抗性に関与する遺伝子が適切に発現する条件を実験室内の試験により明らかにするとともに、実際の施設栽培環境でその検証を行う。その他の外的要因として水やりや施肥の抑制、急激な温度変化など幾つかあるが、広い栽培エリアに均等に適切な刺激を与えるには光が適しているといえる。

2.2 実験室内における病害抵抗性誘導

いちごの病害抵抗性に関与する遺伝子として、PR-たんぱく質の一つであるキチナーゼに着目して検討を行う。いちご（品種：とよのか）の苗を照射試験装置（図1）内に設置し、上方向から生育のための白色蛍光灯による照射と外的要因としての紫外光照射を行う。この紫外光の積算光量は約 $10 \text{ kJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ とする。

紫外光を一定期間照射した後、いちごの葉からRNAを採取してRT-PCR（Reverse Transcriptase-Polymerase

Chain Reaction：逆転写酵素-ポリメラーゼ連鎖反応法）でDNAを増幅し、電気泳動^{*1)}により遺伝子の発現を確認する。その結果、いちごに紫外光を照射すると、いちごキチナーゼFaChi2-1の発現（図2）が認められることから、病害抵抗性が誘導されることが推測できる。

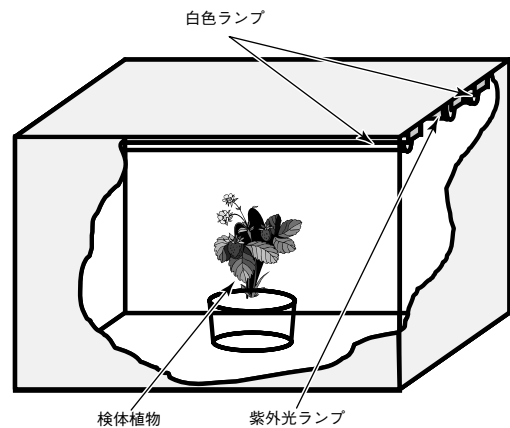


図1 照射試験装置



図2 紫外光照射によるいちごキチナーゼ遺伝子発現誘導

2.3 実際の施設栽培環境での防除効果

いちごの重大な病害であるいちごうどんこ病に注目して、実際の施設栽培環境で紫外光照射試験を実施し、病害防除の有効性を検証する。

2.3.1 試験概要

試験条件は以下に示すとおりである。

- (1) 場所：兵庫県加西市
「兵庫県立農林水産技術総合センター」内ビニルハウス
- (2) 品種：さちのか
- (3) 定植：2006年10月
- (4) 紫外光照射期間：2006年11月～2007年3月
- (5) 紫外光照射量： $4 \sim 8 \text{ kJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
- (6) 調査期間：2007年1月11日～2月14日

試験ハウスの中央部分にビニルシートを設置し、試験区（紫外光照射あり）と対照区（紫外光照射なし）を仕切って試験を行う（図3）。

評価は、調査期間中に収穫された果実を対象に、いちごうどんこ病の発病果率の測定によって行う。

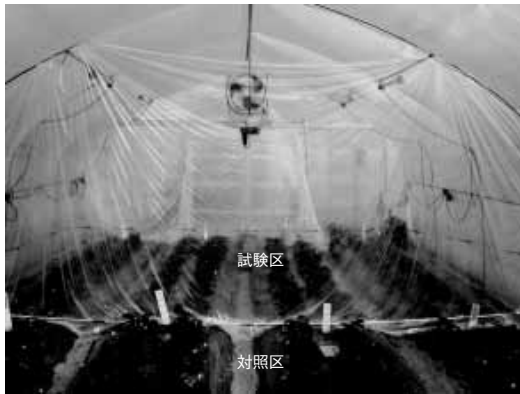


図3 紫外光照射試験ハウスの状態

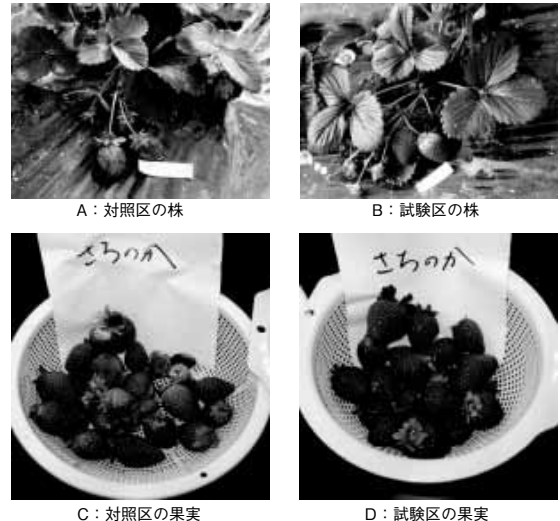


図5 収穫された果実の状況

2.3.2 検討結果

図4に発病果率の結果を、図5に収穫された果実を示す。対照区の発病果率が16.9～52.9%の間で推移したのに対し、試験区は0～4.5%となり、いちごうどんこ病の発生が大幅に抑制されている。この結果から、紫外光照射はいちごうどんこ病に対して防除効果があることがわかる。また、他のいちご品種であるとよのか、章姫、紅ほっぺにおける検証でも、同様にいちごうどんこ病の発生が大幅に抑制できることを確認している。

実際の栽培においては、年間に約10～20回の農薬散布を行うが、それでもいちごうどんこ病の発病果率は20%程度に達することもある。本検討においては、対照区および試験区ともいちごうどんこ病に対する農薬を使用していないことを考えると、紫外光照射には防除効果が十分に認められる。このことから紫外光照射は化学農薬の使用を大幅に削減でき、環境負荷を低減できる可能性を示唆している。

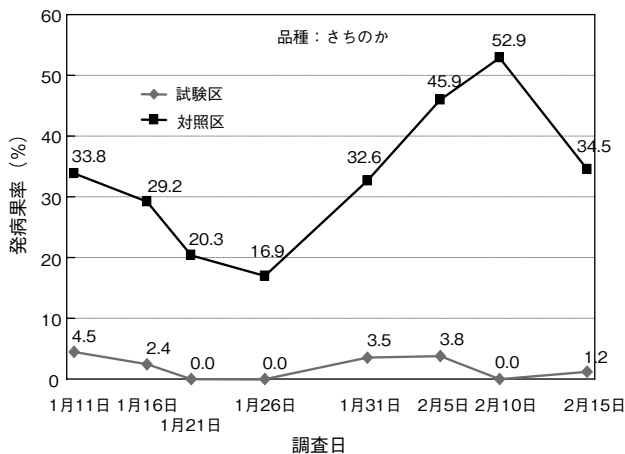


図4 フィールド試験でのいちごうどんこ病の発病果率

3. 日長反応する植物への悪影響を軽減する照明²⁾

3.1 黄色防蛾灯の終夜点灯による植物生育への影響

黄色防蛾灯の終夜点灯は、農作物にとっては日長延長となり、一部の農作物に対しては悪影響（花成促進や開花遅延など）を及ぼす。とくに影響を受けやすい農作物には、ほうれん草、いちご、菊などがある。たとえば短日植物であるいちごは、黄色防蛾灯の終夜点灯を行うと、長日条件と勘違いして花芽分化が抑制され、収量の減少や収穫時期の遅延といった問題が生じる。

3.2 黄色防蛾灯の終夜点灯が花芽分化を促進する理由

一般に植物の花芽形成は、植物のフィトクロム^{*2)}の光吸収量が大きく関係し、とくにフィトクロムの吸収が大きい600nm以上の長波長成分が影響を及ぼす。図6に黄色蛍光灯（FL20S・Y-F）の分光特性と大麦の一種であるアベナのフィトクロムの吸収曲線⁴⁾を示す。

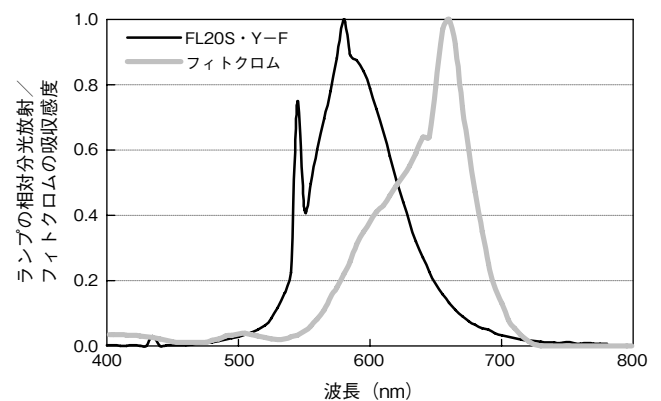


図6 黄色蛍光ランプの分光特性とアベナのフィトクロム吸収

フィトクロムの光吸収は波長550～720nm付近にあり、660nm前後に最大吸収域がある。一方、黄色蛍光ランプ

の発光スペクトルはとくに 550 nm 以上の波長成分を多く含むことから、植物の花芽形成に対して影響を与えやすいことがわかる。したがって、植物の花芽形成に影響を及ぼさないようにするためには、できる限りフィトクロムの吸収曲線と重ならない光波長が望ましい。

3.3 夜蛾の視覚特性と行動抑制波長の解明

夜蛾の視覚特性を解明するため、さまざまな波長域をもつ光を夜蛾の複眼に照射したときの網膜電図 (Electroretinogram: 以下, ERG と記す) を測定し、夜蛾の複眼の分光感度特性を明らかにする (図 7)。その特徴を以下に示す。

- (1) 波長 360 ~ 380 nm 付近 (紫外域) と 520 ~ 540 nm 付近 (緑色領域) に感度のピークをもつ。
- (2) 640 nm 以上の波長に対してはほとんど感度がない。

また、夜蛾の行動抑制波長を解明するにあたり、試験ブース内に夜蛾を放ち、人工光によって明期と暗期を作り出すとともに、暗期の時間帯に LED によって 1.42 Wm^{-2} (黄色防蛾灯では 1 lx に相当) のさまざまな波長の光照射を行う。その結果、波長 540 ~ 545 nm 付近 (緑色領域) の光を照射することで夜蛾の活動量がもっとも低下する傾向があることを確認している。

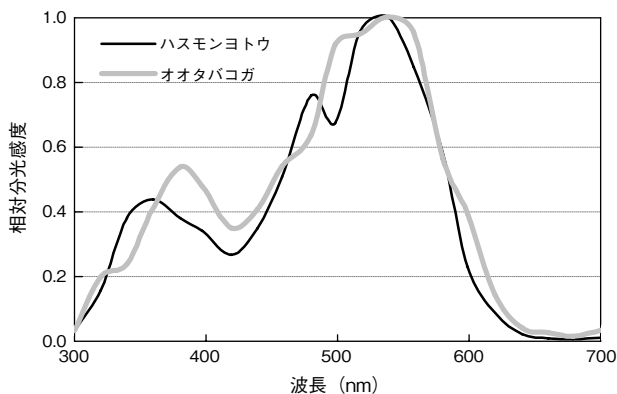


図 7 夜蛾の分光感度特性

3.4 フィールド試験による検証

実際のフィールドにおいて、黄色防蛾灯および緑色防蛾灯の夜蛾に対する防除効果と光による植物への影響を確認するための試験を行う。

3.4.1 試験条件

試験条件は以下に示すとおりである。また、試験に用いた 2 種類の蛍光灯の分光特性を図 8 に示す。

- (1) 場所: 兵庫県加西市
「兵庫県立農林水産技術総合センター」内ガラス温室
- (2) 品種: いちご (さちのか)
- (3) 定植日: 2003 年 9 月 22 日
- (4) 点灯期間: 2003 年 9 月 22 日 ~ 11 月 14 日

(17 時点灯, 翌朝 6 時消灯)

(5) ランプ: 黄色蛍光灯 (FL20S・Y-F), 緑色蛍光灯 (FL20S・G)

(6) 照度: 黄色区, 緑色区ともに約 15 lx

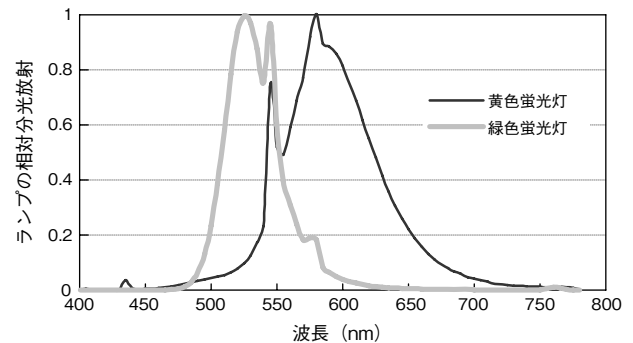


図 8 試験に用いた蛍光灯の分光特性

3.4.2 評価結果

評価は、えき花房 (二番果) の花芽分化が始まる 10 月 15 日時点で、試験区ごとにその発生の程度をランダムに調査し、その平均値を比較して行う。また、夜蛾による被害葉率の測定を行う。

いちごの花芽分化に関する評価結果を図 9 に示す。黄色区の花芽分化の程度は、緑色区に比べて、ほぼ 1 段階の遅れがみられ、緑色区のほうが影響の少ないことがわかる。また、ほうれん草でも同様の試験を行った結果、黄色区では約 3 割が抽台して出荷できない状態であったのに対し、緑色区ではほとんどが出荷できる状態であり、ほうれん草においても緑色光は黄色光に比べて抽台させないことを確認している。

また、夜蛾による被害葉率は、光照射を行わなかった対照区が約 56 % であるのに対し、緑色区と黄色区ともに 1 % 未満であることを確認している。

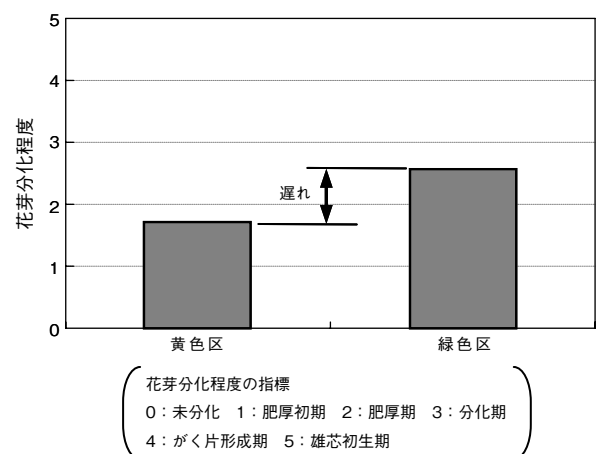


図 9 いちごの花芽分化の程度

4. 太陽光併用型の植物生長促進照明³⁾

冬季に曇天の多い日本海側のような日射量の少ない地域において積極的に生育を促進させる、園芸生産用の太陽光併用型照明方法を提案する。

4.1 課題

植物生長促進照明には、対象植物全体で光合成が効果的に促進されるよう、光合成感度に適した波長特性を有し、光合成と呼吸による植物からの二酸化炭素の吸収と排出のつり合いが取れる光量より十分に多い光を均一に照射することが求められる（その光量は農作物ごとに異なる）。

4.2 植物生長促進照明器具

この課題を考慮して次の三つの特徴がある植物生長促進照明器具を開発した（図10）。

- (1) 高効率で大出力の高圧ナトリウムランプを採用
- (2) 約95%の反射率をもつ軽量反射板を採用
- (3) 植物を栽培するベンチ形状に合わせた照射が可能

栽培ベンチ上に照明器具を間隔1400mm、照射距離1000mmで設置した場合に植物苗へ照射される光合成有効光量子束密度（PPFD：Photosynthetic Photon Flux Density）の値を測定する。その結果、葉上の平均PPFDは約 $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ （照度換算では約20100lx）、均斉度（最小値／平均値）は約0.8である。

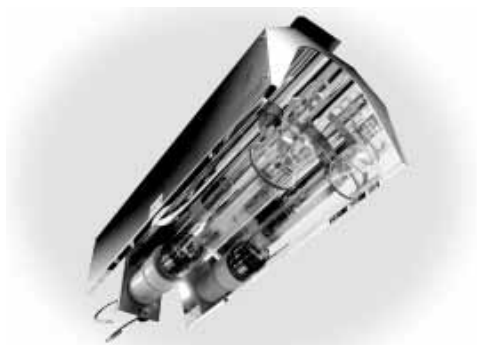


図10 植物生長促進照明器具の外観

4.3 実証試験

花壇苗として流通量の多いペチュニアを用いて、芽が出た段階から前記条件で光照射を行ったものを行わなかったものとを比較した結果、光照射後21日目では図11のような大きな差がみられる。その後、開花までこれを続け、経過観察を行ったところ、光照射を行ったものは最大で29日開花が早まることを確認している。

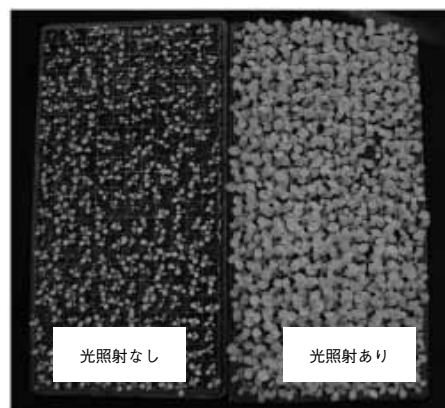


図11 光照射後21日目のペチュニア苗の様子

5. ハウス栽培用環境監視制御システム

インターネットを利用してネットワークカメラ、環境監視用温度・湿度センサ、および植物生長促進用照明などを接続し、どこからでも、PCや携帯電話を介して簡単に農業現場の様子の監視や機器の制御ができる技術およびシステム（図12）を開発する。

温度や湿度などの環境データ、機器の制御状況および定点観測画像はサーバに蓄積され、必要なデータのダウンロードや、またそれらを活用して照明や空調などの制御が行える。重要な機能はサーバ側に保持し、機器本体の機能をスリム化している。本体は簡単なネットワーク接続機能と栽培環境の制御およびメモリー機能に絞り込み、大幅な低コスト化を実現している。

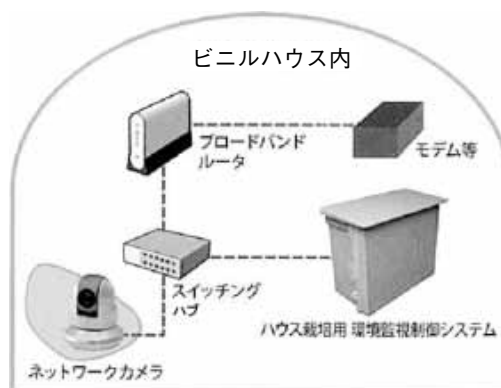


図12 ハウス栽培用環境監視制御システムのイメージ

6. 閉鎖型苗生産用照明⁵⁾

閉鎖型苗生産用照明は（図13）、植物の光合成に有効な400～700nmの波長を多く含み、イニシャルコストとランニングコストが低く抑えられる3波長域発光形白色蛍光灯を主光源とし、各苗の大きさや生育ステージをそろえるため、すべての苗に対して均一な光照射ができるよう、各ランプが任意に調光可能となっている。



図13 閉鎖型苗生産用照明の外観

最近では、発光ダイオード（以下、LEDと記す）のチップベースでの発光効率が白色蛍光灯と同等レベルにまで近づいており、これを植物栽培用の光源として採用する動きも現れている。

しかしLEDを組み込んだ照明器具の実用化には、放熱性の改善や電源回路部におけるエネルギー損失の低減などによる効率向上やコスト等、解決すべき課題がある。

LED照明推進協議会のデータを基にした図14を参照すると、生産装置としての品質、寿命、安全性、コストなどの問題をすべて解決するには、器具に組み込んだLEDの発光効率が白色蛍光灯同等となる2015年以降になると考えられる。

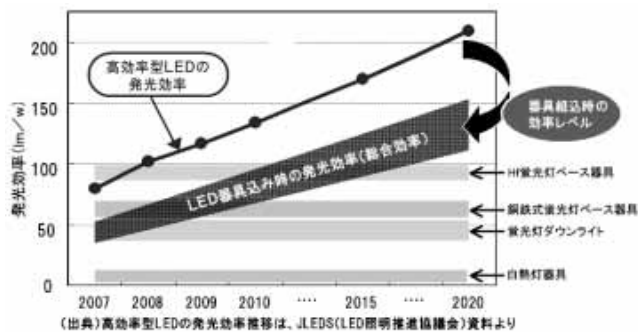


図14 器具組み込みタイプのLED発光効率の推移

7. あとがき

農業用システムへの光エネルギー利用技術において、植物や昆虫が本来備えている光の波長・強度・周期などに対する生理的な応答特性を見極め、これらを応用することによって、農薬の使用が低減できる照明器具等を開発してきた。室内において人工光を用いた基礎実験を行い、植物病害防除メカニズム、害虫防除メカニズム、および植物育成に必要な光照射要件を明らかにするとともに、この光照射要件を満たす器具を実際の農業現場に設置してその有効性を検証した。

当社では2008年から「光の効果で最上級の農作物をご

提供」のスローガンを掲げ、光の特性を高度に活用した農水産分野の光応用事業を進めている。将来的には、LEDや有機ELなど地球温暖化防止にも寄与する光源の利用も検討していく予定である。

●注

- * 1) 電気泳動：荷電粒子あるいは分子が電場（電界）中を移動する現象で、とくに分子生物学においてはDNAやたんぱく質を分離する方法として利用
- * 2) フィトクロム：光周性花成誘導における光受容体（光受容たんぱく質）
- * 3) 抽台：通常の栽培では茎が伸びない植物において、花芽ができるとともに茎が伸びること

*参考文献

- 1) 山田 真, 石渡 正紀, 神頭 武嗣, 松浦 克成, 宇佐見 俊行, 雨宮 良幹：減農薬栽培に向けた植物病害防除システム, 松下電工技報, Vol. 56, No. 2, p. 26-30 (2008)
- 2) 山田 真, 内田 達清, 倉光 修, 向阪 信一, 西村 唯史, 蟻川 謙太郎：減農薬・無農薬に向けた害虫防除照明, 松下電工技報, Vol. 54, No. 1, p. 30-35 (2007)
- 3) 石渡 正紀, 安部 慎一, 工藤 章英, 渡辺 均, 石井 義久, 新藤 聡：太陽光併用型の植物生長促進照明システム, 松下電工技報, Vol. 55, No. 3, p. 67-72 (2006)
- 4) 和田 正三, 徳富 哲, 長谷 あきら, 長谷部 光泰：細胞工学別冊 植物細胞工学シリーズ 16, 植物の光センシング, 秀潤社, p. 10-55 (2001)
- 5) 工藤 章英, 宮丸 正人, 箕島 雅志, 深谷 正行, 石渡 正紀, 安部 慎一：閉鎖型苗生産施設向け照明システム, 松下電工技報, Vol. 54, No. 1, p. 36-42 (2007)

◆執筆者紹介



石渡 正紀
照明 R & D センター



山田 真
照明 R & D センター



内田 達清
照明 R & D センター



大市 明伸
施設・屋外照明事業部