

## 第5章 総合考察

### 5-1 植物育成のための人工光源の特性評価

植物にとって光とは、光合成のためのエネルギーであると同時に、周囲の環境条件を知るための重要な情報である。植物は、動物のように移動手段を持たないことから、環境の変化に対応する際、生存戦略上形態的变化による対応手段をとるようになったと考えられる（篠崎，1991）が、特に光は重要な情報源であり、植物は、光強度、光周性ならびに光スペクトル（光質）から周囲の環境条件を判断していると考えられる。しかし、自然環境の場合、光強度や日長について季節による変動や日変化はあるものの、光質の極端な偏りや変化は存在しない。ところが、人工光源の場合は、光源によって自然環境下では得られない光質を得ることができる。ただし、人工光源は、人間のための照明として設計されている場合が多く、植物の育成に人工光源を利用する場合は、その波長分布特性が目的に合ったものであるか判断する必要がある。

**人工光源の光質と生育：**第2章において、光合成有効光量子束の波長域の光が数種蔬菜の生育に及ぼす影響について検討を重ねた。その結果、赤や黄色など比較的長い波長域の光が多い光源の方が、いずれの作物とも生育が良好であることが示された。第2章第1節において、トマト、インゲンマメ、レタスならびにハウレンソウの生育に対する人工光源の光質評価を行ったが、いずれの作物とも対照区である陽光ランプに対して、赤、黄がほぼ同程度の生体重を示した一方、青、緑は平均で20%減少した。植物の量的な生育は、光合成によって大きく左右されるものと考えられる。Sager et al.

（1982）は、植物の光合成にとっての光源の評価を、光合成のための色素であるクロロフィルの量子収率に基づく波長別エネルギー効率を基準とすることを提案すると同時に赤の波長域で光合成量子収率が最も高くなることを示しており、このことは本研究における赤色光や黄色光の生育が良好であった結果と一致した。しかし、Sager et al.

（1982）の考え方は、あくまでも光を照射した時点での量子収率のみを基準としており、それ以外の気孔の開閉や葉の構造の変化といった形態的要因について全く検討していない。Sager et al.（1982）の解釈に従えば、青色光を多く含む光源は光合成的評価では低くなる。しかし、第2章第2節で示されたように、青色光下において植物は白と

同程度かあるいは白よりも高い光合成速度を示した。ところが、第2章第1節で示したように、青色光下での数種蔬菜の量的生育は赤や黄に劣る結果であった。この現象は、青色光下では単位葉面積当たりの光合成能力が高かったものの、受光器官である葉の面積が小さく受光効率が低下したためと思われる。また、この現象は、光強度が強いほど明瞭であった。Eskins (1992) が示したように、青色光が葉面積に及ぼす影響は、青色光の絶対量に比例する。今回示された、強光強度の青色光が葉面積を抑制し、結果的に生育が抑制されたという事実は、Eskins (1992) の結果と一致する。一方、赤、黄色光の場合、単位葉面積当たりの光合成能力は、白と同程度かむしろ低い値を示したものの、葉の展開伸長が旺盛であり、受光効率が高いことから結果的に高い生育を示したものと思われる。以上のように、本研究の結果から、光質と植物の生育については、形態形成に対する光質の作用が大きいことが示された。村上ら

(1992) は、分光エネルギー組成が極端に異ならなければ、異なる人工光源下で同じPPFで栽培を行った場合、乾物生産量に差異はないとした。そのことから、光合成の観点から考えると、植物栽培用人工光源の第一の評価は電力入力当たりのPPF発光効率であると結論した(村上ら, 1992)。しかし、本試験で比較したように、各波長帯に偏った光源下では同じPPFでも光合成速度が異なる場合があること、また、光源の光質が葉などの形態形成に影響し、しいては光合成能力にも影響することを考えると、植物生育に対する人工光源の評価を行う場合には、PPFだけでなく光源の光質が形態形成に及ぼす影響を検討しておく必要がある。

このように、人工光源の光質は光合成に対する直接的な影響とともに、葉の発達など形態的な間接的影響が植物体の生育を左右していることが明らかになった。特に、青、赤の波長域の光が植物の生育に影響すると考えられる。したがって、完全制御型植物工場において植物を十分な生育をさせるためには、光合成の効率を最大限発揮することができる形態となるように赤と青の光のバランスをとる必要があるものと思われる。このような研究は蛍光灯では既に始まっており、池田(1994)は、青、緑、赤の光をそれぞれ含む3波長蛍光ランプについて、波長別のエネルギー比率がレタスの生育に及ぼす影響について検討し、通常の白色蛍光灯よりも生育が良好なエネルギー比率を発見した。一方、高輝度放電灯タイプの光源については研究が遅れていたが、本研究で示したように、高圧ナトリウムランプのような比較的波長の長い赤、黄を多く含む光源の場合、形態形成に大きな作用を持つ青の光を強調した改善型光源を使用す

るのが望ましいと考えられる。また、青色光源については、第2章または第3章の深夜補光のところでも示されたように、特に強光強度では葉面積の減少をまねき結果的に生育不良となる。しかし、青色光は、比較的弱い光でも蒸散作用や光合成を活発にさせることから、成ら（1997）が示したような、植物の光合成のためのスターター光源として利用することが可能かもしれない。

## 5-2 深夜補光を利用した太陽光併用型植物工場における蔬菜生産の可能性

本研究では、人工光源を利用した栽培技術として深夜電力利用型の補光栽培を提案してきた。我が国は、ヨーロッパに比べると比較的低い緯度に位置していることから、明期中の補光についてはあまり効果がないとされてきた。しかし、本研究の結果、明期延長を伴う深夜補光によって数種蔬菜の生育が著しく促進されることが示された。

異なる人工光源を使った深夜補光が数種蔬菜の生育に及ぼす影響：第2章の研究から、完全制御型植物工場の場合は、赤、黄を主体とする光源が、生育に望ましいという結論が得られたが、人工光源による光の照射が補助的に用いられる太陽光併用型植物工場の場合において、単に光合成促進のために人工光源を使用するのであれば、同化速度の点で比較的高い値を示した青色光源も利用することが可能であると思われた。そこで深夜補光による蔬菜の生育促進を目指した本研究において、メタルハライドランプ（MH）、高圧ナトリウムランプ（HPS）ならびに青色光ランプ（BL）の3種類の光源が深夜補光栽培での蔬菜の生育に及ぼす影響について評価した。その結果、BL以外のMHおよびHPSについてはほぼ同程度の生育促進効果を得られた。第2章でも指摘したように、青色光は植物の葉の展開伸長を抑制し結果とし葉面積を減少させた。深夜補光においても、BL下では葉数、あるいは葉の展開伸長が抑制され葉面積が小さくなり、結果として生育促進の程度がMHやHPSよりも小さかったと考えられる。一方、MHとHPSの場合、補光中の光合成速度や、葉数・葉面積でも対照区と比較した場合同程度の効果が得られた。MHの方が若干大きい生育促進効果が得られたのは、MH下での蒸散速度がHPSの場合よりも大きく、無機栄養素の吸収などで多少差があったことによるものであると推察された。Grimstad（1981）のように、MHのほうが補光に際してHPSよりも効率がよいとする報告がある。しかし、本試験の結果、MHとHPS

の生育促進効果の差は大きくても10%程度であり、深夜補光の生育促進効果に関してこの2種類の光源の差はほとんどないと考えられる。また、ハウレンソウの場合、深夜補光に伴う長日をもたらす抽だいについて光源の光質が影響し、HPSのほうがMHよりも最大で4日程度抽だい始まりが遅延した。MHからの光がR/FR比が1.53と低いことが、長日効果をもたらした結果として長日植物であるハウレンソウの抽だいを早めたものと推察される。

以上の結果から深夜補光の光源に求められる光質は、補光中の光合成に有効であり、第2章でも指摘したように葉の伸長・展開を促進する赤色光を主に含み、かつ、葉からの蒸散促進と葉の正常な形態形成に必要な青の波長域をある程度含んだ光源といえる。しかし、遠赤色の波長域をほとんど含まないLEDによるハウレンソウの深夜補光栽培を行ったところ、生育はMHやHPSと同程度に対照区よりも促進されたものの、抽だいは逆に促進されてしまった。このような純粋な光の場合、赤色光では開花が促進される報告がある（小菅ら、1980）。したがって、ある程度の青色光や遠赤色光を含みR/FR比が5～6程度であるのが望ましい。以上のことから今回の試験の結果は、深夜補光用の光源としてHPSが適していることを示している。通常、HPSは、低消費電力や長寿命といった実用上の要因から使用されることが多いが（Grimstad, 1981, Cathey and Campbell, 1979）、本試験結果、その光質が深夜補光に向いていることが示唆された。

**深夜補光栽培による数種蔬菜の生育促進：**第3章の結果から、深夜補光は、生育初期よりもある程度植物体の生育が進んだ段階で行った方が補光の効率が高いことが示された。深夜補光は、光源直下における強光による補光中の光合成と同時に、深夜補光による長日をもたらす形態的变化が植物の光合成能力を向上させていると考えられる。第3章第2節で示したように、 $14.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度の弱光でも深夜補光によって蔬菜の生育が促進された。この様な弱光下では、補光中の光合成速度は補償点以下であり、生育促進に補光のエネルギーが直接関与したとは考えにくい。Turcotte and Gosselin (1989) は、キュウリの光合成能力が長日条件下でわずかではあるものの増加したことを報告している。第3章第1節で報告したが、深夜補光0mならびに1m区では明期中の最大葉の単位葉面積当たりの光合成速度が対照区よりも増加した。ただし、明期中の光合成速度について、深夜補光処理開始後同一の葉の経時的調査を行ったところ、処理開始後10日目までは、葉の伸長が対照区よりも速く、光合成速度も大きかつ

た。その後、葉の生長が最大に達した後は、葉コンダクタンスの低下から光合成速度が対照区よりも小さくなった。また、クロロフィル濃度も、葉が展開可能な最大葉になった時点では対照区よりも高かったが、補光開始後の日数経過に伴って減少し、Hennessey et al. (1993) が指摘する連続明期中での植物の光合成速度低下を裏付けた。これらの結果から深夜補光開始後以下のようなことが植物内部で起こっていると推察できる。

- 1) 深夜補光開始後、補光光源直下では補光中の光合成により同化産物量が増加し、生育が促進される。生育促進は、葉の展開ならびに伸長の促進として現れる。
- 2) 葉の伸長促進は、その葉が最大葉に達するまで高いクロロフィル濃度と光合成能力を示す。このことが更にその後の生育を促進する。
- 3) 最大葉に達した葉については、時間の経過とともにクロロフィル濃度の減少と光合成能力の減退が始まるが、新たに展開した葉によって植物体全体としての光合成能力は維持される。また、外観上も、新しい上部の葉が濃緑色であり、植物体全体としては葉色が濃くなる。

一方、ハウレンソウは、弱光での深夜補光による生育促進効果が顕著であった。ハウレンソウの場合、レタスやチンゲンサイと異なり、光源から水平距離で2m程度離れ、 $0.7 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ という弱光での深夜補光によっても地上部生体重が対照区の2~3倍となった。ハウレンソウの場合もレタスやチンゲンサイと同様に弱光による深夜補光により葉の生育が促進されており、また、データには示さなかったが明期中の光合成速度も深夜補光区が対照区よりも高かった。また、ハウレンソウの場合、特に葉柄の著しい伸長が観察された(第4章第1節)。成松(1996)も指摘しているように、この葉柄の著しい伸長がハウレンソウの葉の受光効率を向上させ、結果的に弱光による深夜補光栽培でも生育促進されたものと考えられる。

**深夜補光栽培の実際栽培上の収量評価：**本研究の結果をもとに、深夜補光に関する実際栽培上での収量評価を、深夜補光が地上部生体重及ぼした効果が最も大きかったハウレンソウについて検討する。ハウレンソウの収穫時期は、その草丈によって決定される。土耕の場合、草丈20cm程度のものから収穫を開始し、草丈が40cm以上になる前に収穫を終える。しかし、水耕栽培の場合、株の生育に土耕ほどのばらつきはないため、収穫可能な大きさに達した段階でほとんどすべての株を収穫することも可能で

ある。そこで、標準的な規格の草丈25cmから35cmの株を一斉に収穫することを前提に、播種から収穫までの日数をシュミレートした。シュミレーションのデータは、第4章第1節のデータから、秋から冬の作付けでは早生系品種‘トライ’，‘オーライ’の、また、春から夏の作付けについては晩生品種‘サマーライダー’の草丈の経時変化データを使用した。シュミレーションモデルは最も単純な生長方程式であるブラックマンの生長モデル（高辻，1993）を使用した。その結果、秋から冬の作付けについてはいずれの品種とも光源に近いほど収穫開始までの日数が短く，‘トライ’の場合対照区で40日必要であったのが光源直下では約20日に，また‘オーライ’では，対照区で33日かかっていたのが光源直下では20日間に短縮された。そのため，育苗に必要な日数を25日とした場合，全体として収穫に必要な日数は，対照区と比べて44%短縮することが可能であった（第5.2.1図）。一方，春から夏の作付けについては，対照区でも比較的伸長速度が大きいことから，秋から冬の作付けほど深夜補光の効果は顕著ではなかった。しかし，光源直下では対照区よりも約10日程度収穫までの期間を短縮することができた（第5.2.2図）。いずれの作付けの場合も，光源から1mあるいは2m離れた場所でも収穫までの期間が深夜補光により短縮されたが，これらの処理区の光強度では抽だいまでの日数が短く収穫が始まる前に抽だいしてしまった。また，同様のシュミレーションをメタルハライドランプで行ったところ，第4章の結果からも判るように高圧ナトリウムランプよりも抽だいが4から5日程度早く，強光強度の場合でも収穫前に抽だいが始まってしまうことが明らかになった（データは示さず）。以上のことから，ハウレンソウの実用的な深夜補光栽培を目指した場合は，高圧ナトリウムランプによる強光強度条件での補光が現実的な選択肢となるものと考えられる。この結果をもとに，年間の作付け回数に関するシュミレーションを行ったところ，予想年間作付け回数が，補光を行わない対照区では10回であったのに対して，光源直下では約16回と大幅に増加した。このように，育苗を他施設において行い，深夜補光によって本圃における栽培期間を短縮することによって，年間収量を60%程度増加させることが可能であることを示すことができた。

本研究の結果をもとに，深夜補光に関する経済的評価をハウレンソウを例として行った。算定の基礎要素は以下の通りであった。ハウレンソウのKg当たり平均単価を500円とした。また，ランプの設置密度は，光源直下の光強度を設定した場合ランプ1灯当たり0.79m<sup>2</sup>となった。ランプの寿命は高圧ナトリウムランプで12000時間となる。1日

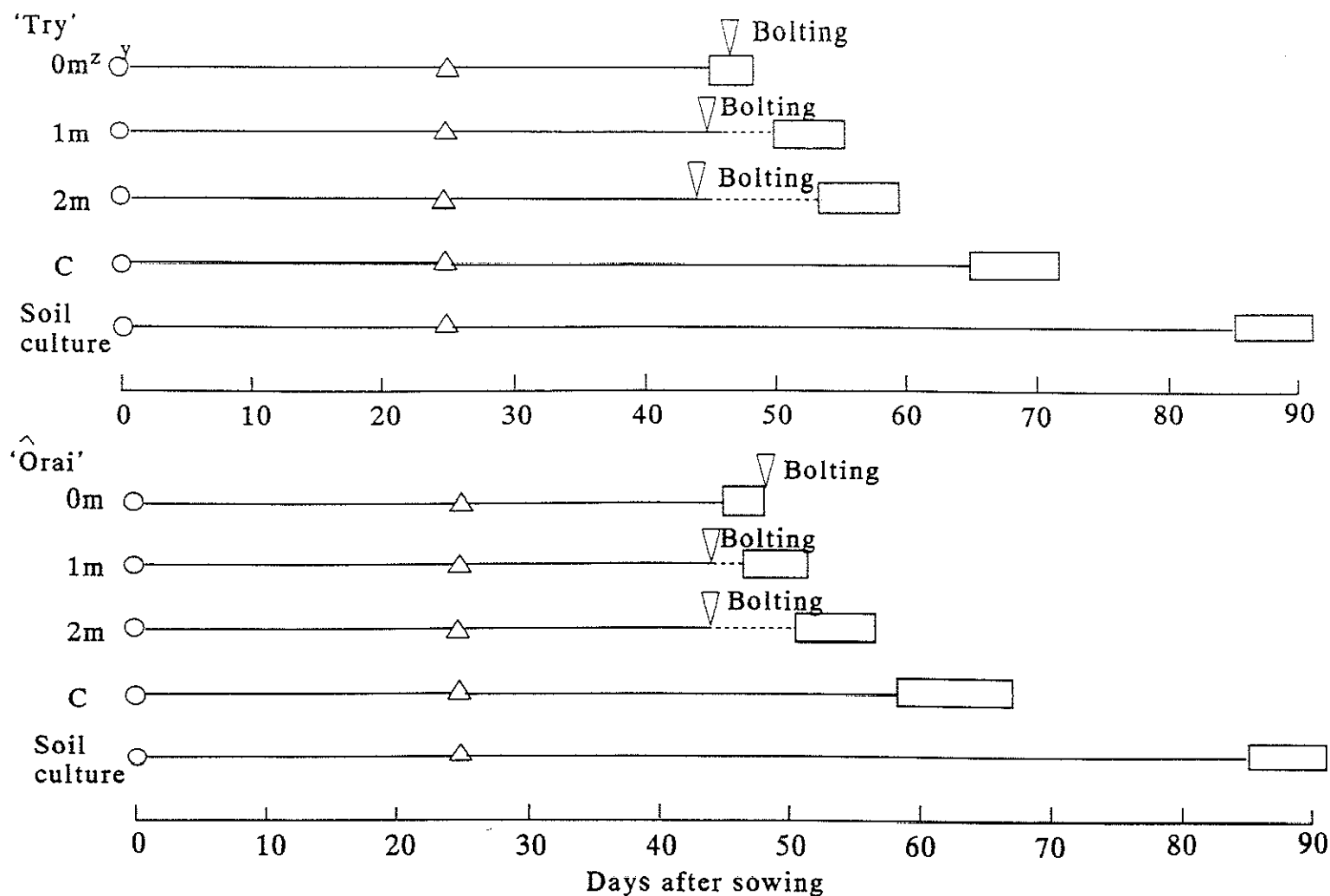


Fig. 5.2.1 Effects of supplemental lighting with HPS lamp during mid-night to morning on the days until harvesting from sowing of spinach 'Try' and 'Orai' during fall to winter season.

z : See Fig.4.1.1.

y : Symbols show ; ○-sowing, △-transplanting, □-harvesting, ▽-bolting day of the first plant, respectively.

x : Harvesting was started when the maximum leaf length became 25 cm.

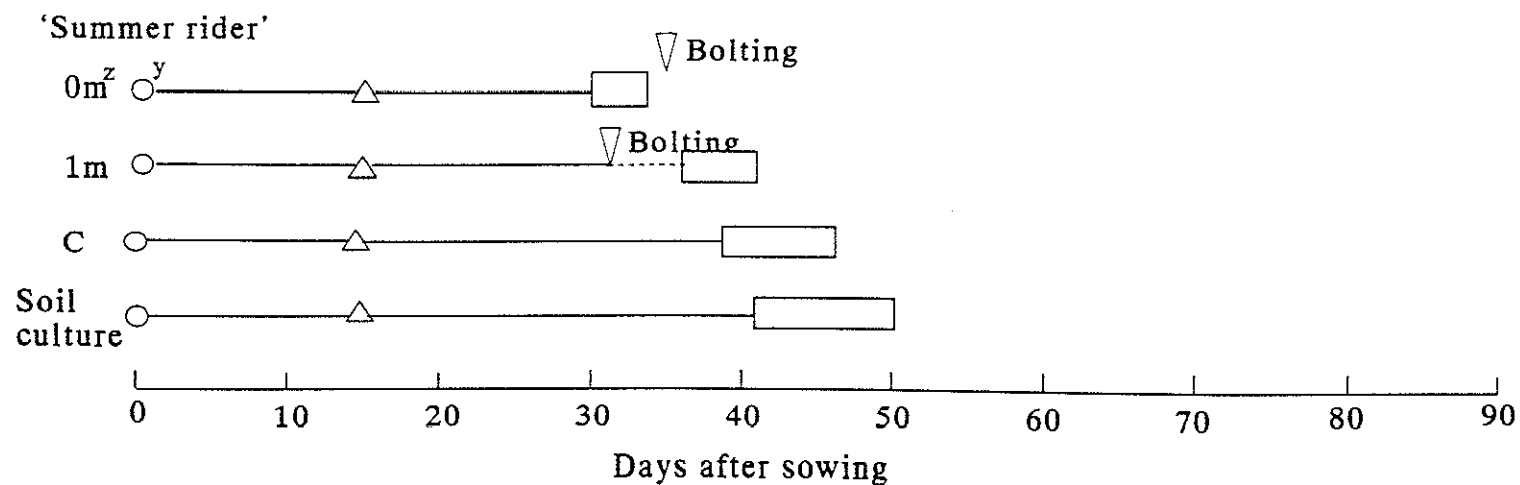


Fig. 5.2.2 Effects of supplemental lighting with HPS lamp during mid-night to morning on the days until harvesting from sowing of spinach 'Summer rider' during summer season.

z : See Fig.4.1.1.

y : Symbols show ; ○-sowing, △-transplanting, □-harvesting, ▽-bolting day of the first plant, respectively.

x : Harvesting was started when the maximum leaf length became 25 cm.



当たり8時間の使用の場合は、1500日間使用可能であり、したがってランプの金額25500円の減価償却費は1日当たり17円となる。また、ランプを点灯するのに必要な安定器などの器具はランプ1灯当たり10000円であり、10年を耐用年数とすると、1日当たりの減価償却費は2.7円である。これらの減価償却費を総合し1m<sup>2</sup>あたりに換算すると、約20円であった。電力消費量は、ランプ1灯当たり1日1.76kwhである。通常契約の電力料金25円/kwhを算定基準とするとランプ1灯当たり1日約44円必要になる。一方、深夜電力料金9円/kwhを基準とすると電力料金はランプ1灯当たり1日15.8円となる。したがって、深夜補光の1日当たりのコストは約36円・m<sup>2</sup>であった。この数値をもとに、前述の年間栽培シュミレーションを行ったハウレンソウを例として深夜補光栽培の収益を計算した。

### 収量

対照区  $90\text{g}/\text{穴} \times 42\text{穴} \cdot \text{m}^2 \times \text{年間収穫10回} = 37.8\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{年}^{-1}$

深夜補光区  $90\text{g}/\text{穴} \times 42\text{穴} \cdot \text{m}^2 \times \text{年間収穫16回} = 60.5\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{年}^{-1}$

### 粗収益

対照区  $18900\text{円} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{年}^{-1}$

深夜補光区  $30250\text{円} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{年}^{-1}$

深夜補光による売上増  $11350\text{円} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{年}^{-1}$

### 深夜補光コスト

1回の平均補光日数18日×年間栽培16回×1日当たりの補光コスト36円・m<sup>2</sup>=10368円

### 深夜補光による増収

$982\text{円} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{年}^{-1}$

以上のようにハウレンソウについて、深夜補光栽培の経済的効果を試算したが、深夜補光のコストを上回る生育促進効果が得られたことになった。また、環境条件や栽培法によっては深夜補光の利用で品質を改善することもできることから、付加価値をつけた商品としてより収益をあげることも考えられる。しかし、損益分岐のハウレンソウ単価は450円程度であり、年間の価格変動によっては深夜補光コストが深夜補光による増収分を上回る可能性もある。

深夜補光は生育促進とともに施設の利用効率を著しく高めることができる可能性がある。しかし、前述のように深夜補光に必要なコストは高く、作物の単価の年次変動の結果によっては、コストが深夜補光による増収分を上回る危険性がある。また、HPSを使った強光強度による補光の場合でも、無補光と比べて明らかに早く抽だいする。

したがって、抽だい始まり以前に収穫を完了する必要がある、生産計画の柔軟性が減少する。そのため、出荷先の都合などにより出荷調整を余儀なくされた場合、抽だいにより生産物を破棄せざるを得ない状況になることも考えられる。この点については、抽だいはしなかったものの、ハウレンソウ以外の作物についても、深夜補光によって生育が過剰に進み、商品価値が失われる可能性がある。このように、深夜補光は生産性を向上させるメリットがある反面、生産計画の自由度を低くしてしまうことから、契約栽培により安定した出荷先を確保するなどの運営上の工夫が必要であると思われる。

本研究で筆者は、蔬菜生産への人工光源の利用について、人工光源の特性の比較から、人工光源を利用した栽培技術の応用へと研究を進めてきた。人工光源による植物の生長制御の利点は、生長調節剤などを使用せずに、広い範囲に均一な効果を及ぼすことが可能な点にある。本研究では、人工光源による植物の生長調節についていくつかの可能性を示すことができたと考えている。本研究で示唆した技術を実用化させるためには、大規模施設での実証栽培試験が必要となるが、基礎的かつ理論的な土台は完成したと考えられる。今後は、人工光源を利用した植物高度生産システムの実用に向けた試験を行い、技術としての完成を目指したい。