

序

植物は、基本的に光エネルギーを化学エネルギーに変換し、生長と繁殖にそのエネルギーを利用している。植物による光エネルギーから化学エネルギーへのエネルギー変換を光合成と呼んでいる。光合成という言葉は、文字通り光による合成または組立てを意味し、植物が光エネルギーを利用して無機素材から有機化合物を合成する過程のことをさす（Hall and Rao, 1977）。有史以来、人類は農業生産を行うにあたり、作物の光合成に必要な光を太陽光から得てきた。太陽光とは、太陽放射のことであり、大気層を通過して地表に入射する太陽放射は $0.3\sim 3.0\ \mu\text{m}$ の短波長域である（稲田, 1984a）（第1図）。放射の内、 $400\sim 700\text{nm}$ の波長域を光合成有効放射（Photosynthetically active radiation : PAR）と呼んでおり（McCree, 1972）、高等植物の光合成に主に利用されている放射であるとされている。太陽放射は、PARを含んでおり、かつ強力な放射であることから、高等植物の光合成にとっては理想的な光源であるといえる。しかし、太陽光は、気象条件や季節・時間帯によってその“強度”、“長さ”、“質（波長分布）”が変化する不安定な光源でもある（稲田, 1984a）。作物生産は、季節間の温度、光、水など環境条件の変動にあわせて行われているが、年によっては、そのリズムが変化することもあり、絶えず不安定な状態におかれている。温度、水などは保温技術や灌漑技術の発達によって、作物の生産現場でも対応することは可能である。しかし、光については、被覆資材などで調節することができるものの、あくまでも自然条件下で与えられた太陽放射を植物生産の場となるべく効率よく利用するためのものでしかない。積極的に光環境を変え、作物を安定的に生産するためには人工光源の利用が不可欠である。

人工光源は、人間の活動場面における照明を中心として開発され発達してきたものである（稲田, 1984b）。種類、出力、波長分布特性などさまざまな人工光源が存在するが、基本的に化学エネルギー、電気エネルギーを光エネルギーに変換する装置を人工光源と呼んでいる。太陽光と異なり、自由に光環境を制御することができる人工光源を、太陽光の代わりにあるいは太陽光を補う形で使用することは、農業の可能性を広げることになると考えられる。

植物生産に人工光源が利用された例としては、我が国のキクの電照栽培が挙げられ

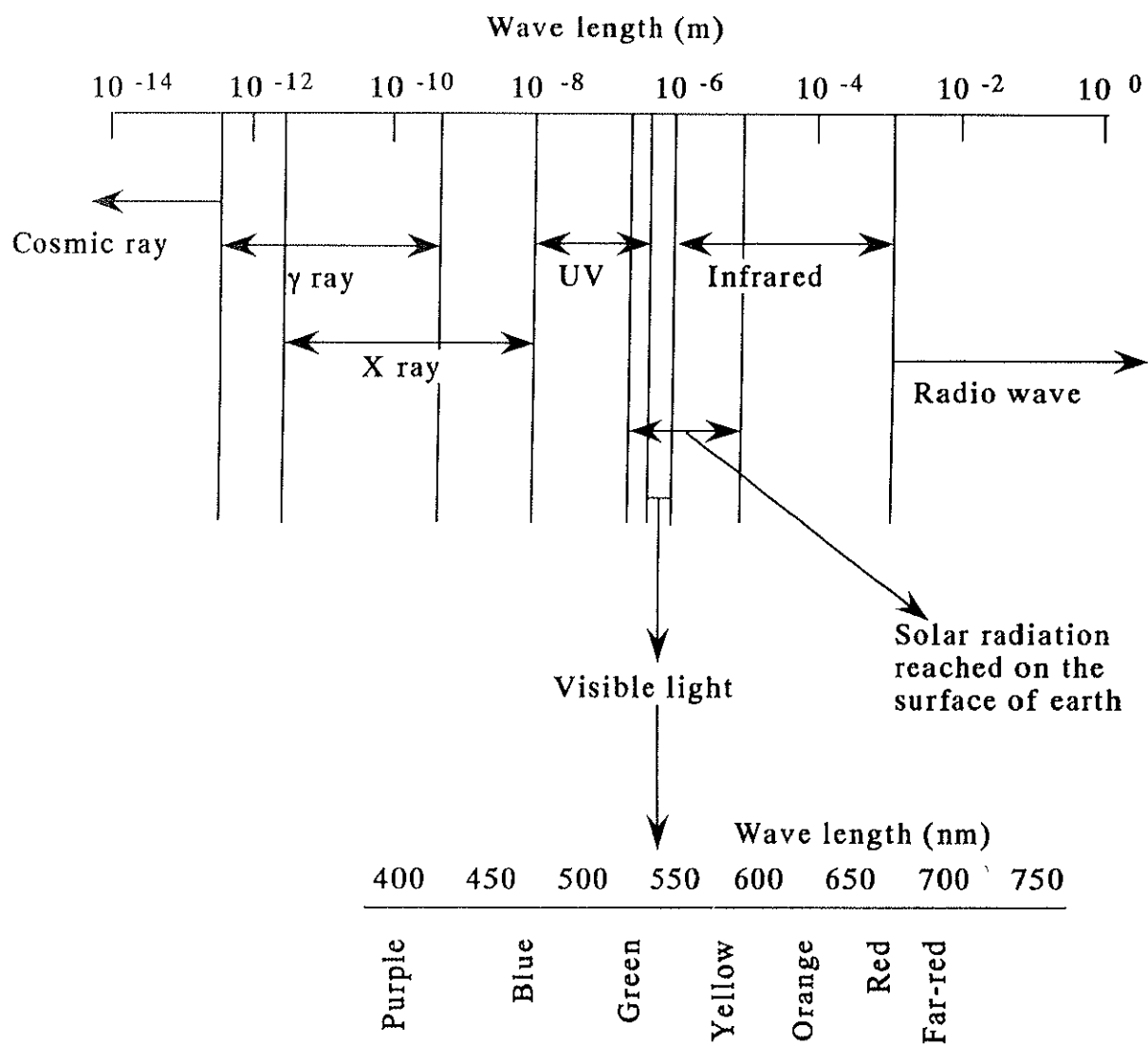


Fig 1. Classification of electromagnetic wave (Hall and Rao, 1977).

る。キクの開花習性を利用し、人工光源によって日長調節を行い開花時期を調節するこの技術は、今日一般的に普及しており、キクの作付け面積の41%を占めている（川田, 1996）。また、シソでは開花抑制に、穂じそでは開花促進のために電照栽培により開花制御を行っている（望月, 1996）。人工光源を利用した最も高度な栽培技術としては、温室または屋内において水耕栽培と人工光源を組み合わせた生産システムである植物工場が挙げられる。

冬季の日射量が少ない欧米では、植物栽培における人工光源の有効性が検討されている。Helson (1964) や、Deutch and Rasmussen (1974), Grimstad (1981) は、植物栽培に適した光源について検討し、また、McAvoy and James (1988) のように、温室内での栽培で人工光源による補光の効果を評価したものもある。しかし、冬季でも比較的日射量が多い我が国の場合、人工光源を利用した栽培技術は日長調節のための電照栽培だけであり、また、欧米に比べて電力料金が低い我が国では、人工光源を光合成促進に積極的に利用し植物を安定的に生産する「植物工場」技術は未だ実用化には至っていない。

人工光源による植物生産の課題と可能性

植物の光反応特性は、人間の目とは著しく異なっている（稲田, 1984a）。また、植物の光反応特性は対象とする形質によって大きく異なっている。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し、光合成有効放射ならびに光合成収量光量子束（Yielded photon flux : YPF）とした。しかし、同じ光合成有効放射量で栽培した場合でも、トマトでは、高圧ナトリウムランプの場合は、蛍光灯や水銀灯に比べて生育が劣ったのに対して（Grimstad, 1981）、レタスの場合、高圧ナトリウムランプでも他の光源と同程度に生育し（Sase et al., 1988）、作物によって光源に対する反応が異なることが示唆されている。このように、作物によって光源に対する反応が異なることは、福田ら（1993a,c）によっても報告されている。このことは、光合成の波長別エネルギー効率が作物別に異なることに起因していると考えられ、一つの尺度で光源を評価することが難しいことを示している。

人工光源の光質は、植物の光合成に対して影響するだけでなく、光形態形成反応に作用し、生育に影響している可能性がある。渡辺ら（1996）は、発光ダイオードを使

ったレタスの栽培試験において、光合成有効放射内の光であり、かつ波長別エネルギー効率が最も高い赤色光のみによる栽培を行った。しかし、赤色発光ダイオードによる栽培で、レタスは葉の形態形成に異常を示し、十分生育することができず、かならずしも光合成有効放射を多く含んだ光が正常な形態形成をもたらすとは限らないことが示された。したがって、植物栽培に理想的な人工光源とは、光合成有効放射を十分放射することが可能であり、同時に、正常な形態形成に必要な放射を一定の割合で含んでいるものとなる。Sager et al. (1988) は、形態形成に作用する光について、光形態形成色素であるフィトクロムの光吸収特性をもとに人工光源を評価する方法を提唱し、クロロフィルとフィトクロムの波長別吸収特性が大きく異なっていることを示した(第2図)。しかし、光形態形成反応は、植物の種類によって異なる場合が多く、現時点では、植物の光合成と形態形成に関する光質の影響を統一的に説明する理論は未だに得られていない。今後、植物生産のための理想的な人工光源を追求する場合、光合成に対する評価だけでなく、形態形成も視野に入れた総合的評価が必要であると考えられる。村上ら(1992)は、植物育成用蛍光灯について光合成と形態形成の両面から、青色、緑色、赤色ならびに遠赤色の波長域を照射する4波長型蛍光灯の可能性を検討した。蛍光灯は、植物育成のための改良が進んでおり、波長分布特性も多くの種類が開発されている。

実際栽培の現場における人工光源の利用については、先に述べたように、主として開花調節のための電照栽培にとどまっているのが現状である。完全制御型ならびに太陽光併用型植物工場において、作物の生育促進を目的とした人工光源の利用がなされているが、その規模は小さく、全国の作物生産に占める割合もごくわずかでしかない(小倉, 1998)。その原因としては、設備投資が大きいことと、電力料金が欧米と比べて割高であることが挙げられる(小倉, 1998)。電力料金については、深夜間の余剰電力を昼間の1/3程度で利用できる夜間電力料金制度がある。完全制御型植物工場の場合、人工光源の点灯時間帯を夜間にずらすことによって、電力料金の問題はある程度解決される。一方、太陽光併用型植物工場の場合、太陽光の不足分を補う補光は経営上の問題から困難であるとされている(鈴木, 1984)。また、石井ら(1993)のように、補光栽培において照明電力の大幅な削減を目指して、生育に必要な最低限の不足光量を補うように照明量を調節する補光を行う試みもあるが、冬季の日射量が比較的多い我が国の太平洋側地域については、生育に必要な光量が不足する状態は少な

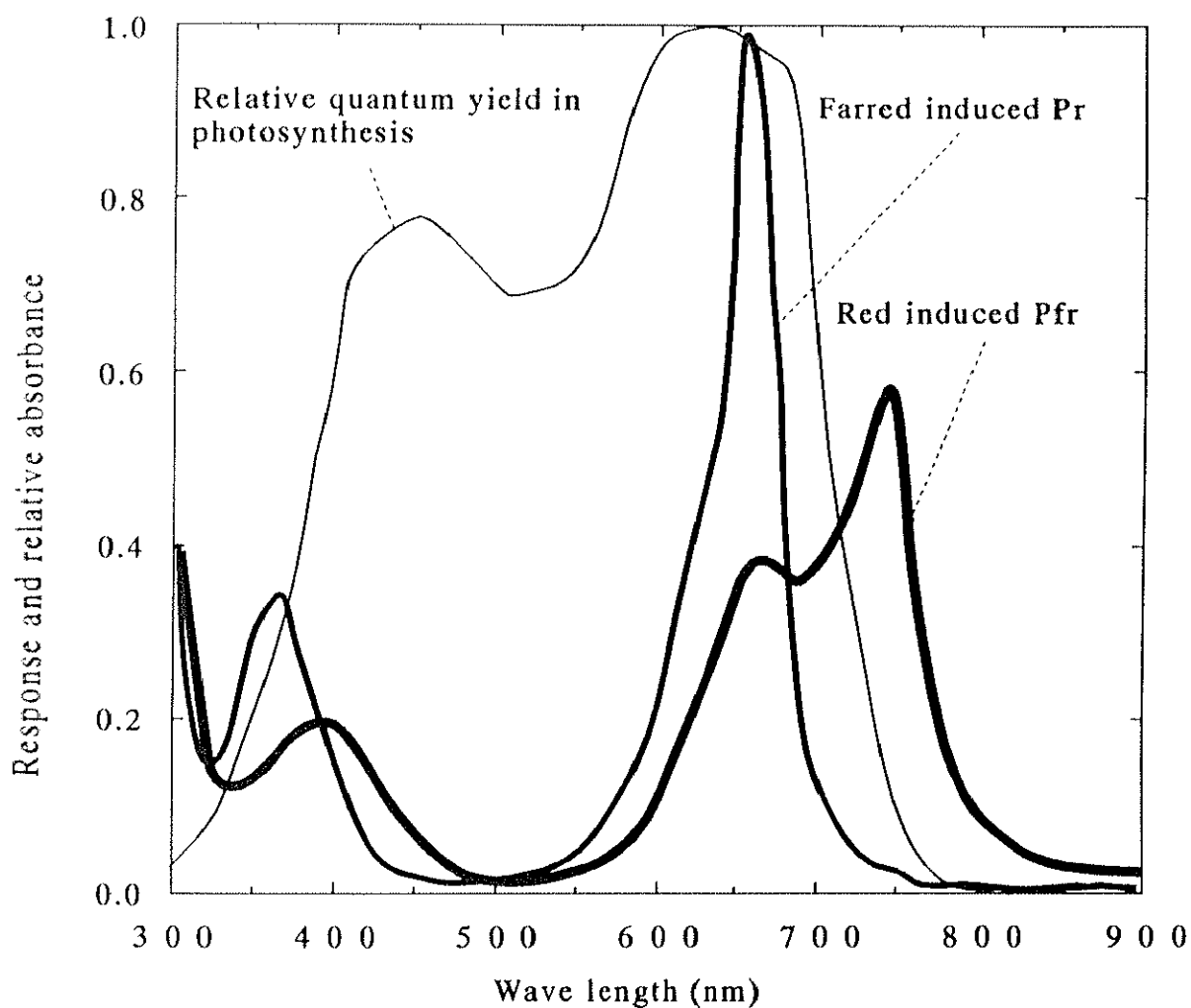


Fig. 2. Normalized relative photosynthetic response as a function of wave length and relative absorbances of phytochrome (McCree, 1972 ; Sager et al., 1988) .

く、また、夏季についてはほとんど照明装置が使われない事態になることも考えられる。しかし、生育促進に夜間補光の効果が得られる場合があるという指摘がある（関山ら、1987）。また、Turcotte and Gosselin（1989）が指摘するように、明期に引き続き補光を行った場合と、深夜に補光を行った場合のキュウリの光合成速度について比較し、補光中の光合成速度はいずれも同程度であるという事例がある。これらの報告から、単なる光の不足解消のための補光ではなく、光合成可能な時間帯を延長することによって、積極的に無補光の場合よりも生育促進させることが可能ではないかと思われる。また、このような夜間の補光を深夜電力料金の対象時間帯に行うことにより、低コストで作物の生育促進をはかる可能性もある。一方、成・高野（1997）や、成ら（1997）が報告したように、日の出前の青色光補光が、気孔開度を増大させ、結果的にエゴマやキュウリが生育促進されるという事例がある。このように直接光合成を促進しないものの、日の出前に行う深夜間補光が形態形成作用によって間接的に植物の生育を促進させる可能性もある。太陽光併用型植物工場は、いずれも補光のための照明施設を備えている。通常、補光は、石井ら（1996）のように太陽光が不足する場合に行うが、照明時間帯を深夜にずらすことによって十分な生育促進を達成することができれば、太陽光併用型植物工場の実用的な新しい運用形態となりうるものと思われる。

本研究の目的

本研究は、人工光源を利用した蔬菜の工場的生産の可能性を探ることを目的とし、深夜電力を利用した補光について検討した。深夜補光栽培については、Turcotte and Gosselin（1989）がすでに試みているが、あくまでも夜間に行った照明がキュウリの光合成速度に及ぼす生理学的影響について評価したのにとどまっており、光源の種類や作物ごとの反応について実用的に利用することを視野に入れた研究については未だに行われていない。そこで、本研究では、光合成促進のための人工光源に関する考察を行った上で、深夜補光が数種蔬菜の生育に及ぼす影響を評価した。

- 1) 人工光源の光質が植物の生育に及ぼす影響について、数種蔬菜を材料として検討した。人工光源の光質は光合成速度に影響するが、生育は、光合成速度と受光器官の構造によって左右される。人工光源の光質と植物との関係について、生育・形態形成および光合成の3点から調査研究を行い、人工光源の光質が植物の生育に及ぼす影

響を総合的に評価し、光合成促進光源としてはどのような光源が望ましいか検討した。

- 2) 人工光源を利用した植物高度生産システムの一つとして、明期延長型補光が蔬菜に及ぼす影響を検討した。ここでは葉菜類を主な材料として、補光光源の光質が生育に及ぼす影響について調査し、その上で作物種ごとに（1）補光する生育段階、（2）補光強度、（3）補光時期について検討し、深夜補光によって引き起こされる生育促進の機構を解明した。また、ビタミンCやクロロフィルなどの含有量は受光量によって変化する（森村ら、1982；斉藤、1985）ことから、人工光源による夜間補光（深夜補光）によって蔬菜の場合、品質が変化することも予想された。そこで、深夜補光の効果を品質についても評価した。
- 3) 明期延長型深夜補光を検討する際、日長感受性が高く、栽培中に抽だいするおそれのあるホウレンソウの栽培は困難であることが予想された。しかし、ホウレンソウは、植物工場にとって重要な作物である（小倉、1998）。そこで、ホウレンソウの（1）日長感応性の品種間差、（2）補光条件について検討し、明期延長型深夜補光栽培の可能性を検討した。また、ホウレンソウの品質として問題となっている硝酸イオンの集積について、補光を利用した新しい解決法を補光栽培の新しい可能性の一つとして提案した。