

第3章 深夜電力を利用した人工光源による明期延長型補光（深夜補光）が数種蔬菜の生育に及ぼす影響

川田（1996）によれば、補光とは、植物の光合成を増大させることを目的として行う照明のことである。海外での補光栽培に関する研究例は多く、補光によるトマトの高密度栽培（McAvoy and Janes, 1988），補光によるキュウリの収量増加（Blain et al., 1987），液肥中の窒素濃度を高めて補光を行うことによるトマトやレタスの生育促進（Masson et al., 1990），日射が少ない厳冬期における、高圧ナトリウムランプの補光によるトマトの収量維持（Vezina et al., 1991）など、様々な事例が示されている。一方、収量に関する効果だけでなく、補光によってイチゴの収穫期が早まる（Ceulemans et al., 1986）といった効果も報告されている。

ヨーロッパ諸国と比べて、日本は比較的低緯度に位置することから冬季の日射量も多く、人工光源による補光は光合成促進よりもキクやシソなどの開花制御のための日長調節の手段として利用してきた。しかし、ここ数年の間に、日長調節以外にも、イチゴの育苗や果樹の着色不良対策など、人工光源による補光の利用が広く検討されるようになった（望月, 1996；遠藤, 1996）。また、太陽光併用型植物工場（岡部, 1988）といった、高度生産システムにおける人工光源の利用も検討されている。しかし現時点では、電力料金などコストの問題から、人工光源による光合成促進のための補光は広く普及するには至っていない。

Turcotte and Gosselin（1989）は、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ことを報告した。このように深夜間に十分な光強度で補光を行うことにより1日当たりの同化量が増大し、結果として作物の生育を促進させることは可能であると考えられる。また、電力使用量が低い夜間には余剰電力が発生し、この余剰電力は契約によっては非常に安価に利用することができる。この深夜間電力を利用した補光によって、栄養生長がそのまま収量増加に結びつく葉菜類の栽培や果菜類の育苗などの場合、比較的低コストで収量を増加させることができるかもしれない。このような深夜補光については関山ら（1987）がホウレンソウについて検討し、太陽光だけの

栽培に対して2~4倍の増収効果が得られることを報告している。しかし、その他の作物や深夜補光の光質や強度などの要因についてはまだ検討されていない。

本章では、数種蔬菜について、料金の安い深夜電力を利用した補光による生育促進の可能性を検討することとし、補光光源の光質、光強度の違いが生育ならびに品質に及ぼす影響を調査した。

3-1 深夜補光の光質と光強度が数種蔬菜の生育ならびに光合成に及ぼす影響

Turcotte and Gosselin (1989) は、自然日長を延長する方法での補光を行った場合と、自然日長の前後に暗期をはさんで補光を行った場合のキュウリの光合成速度について調査し、いずれの場合も補光中の光合成速度は同じであることを報告した。そこで著者は、葉菜類や、果菜類の育苗などでキュウリの場合と同様に補光の効果が得られるのであれば、いずれの時間帯に補光を行っても十分光合成を行わせることが可能であると考え、予備的に深夜補光栽培試験を行った。その結果、深夜補光によって数種蔬菜の生育が大きく促進された（池田ら、1992）。

Chow et al. (1990) は、Far-redを多く含む光の下では、エンドウマメの単位葉面積当たりの光合成能力が増大することを報告した。反対に、Barreiro et al. (1992) は、インゲンマメの場合Far-redは光合成能力を低下させるとした。また、Dorais et al. (1995) は、日長延長によって、トマトは光合成能力が低下し、反対にピーマンの場合光合成能力が増加するとした。このように、植物の炭酸同化能力は、生育する光質や日長など光環境で大きく変化する (Chow et al. 1990)。一方、植物の種類によって光環境に対する反応が大きく異なると考えられる。深夜補光による生育促進の要因としては、夜間に行われる光合成が考えられるが、その一方で、生育促進に伴う植物の構造的変化や生理的変化が植物の光合成能力に影響した可能性が考えられる。

本節では、明期延長型深夜補光（深夜補光）が引き起こす数種蔬菜の生育促進について、補光光源の光質と光強度が数種蔬菜の光合成能力に及ぼす影響からその要因を検討する。

3.1.1 材料および方法

実験1. 深夜補光光源の光質がレタスの生育ならびに光合成に及ぼす影響：

供試材料は、レタス‘岡山サラダナ’（タキイ種苗）である。4月11日に、水で十分湿らせたウレタンマットに直接播種した。発芽後、大塚ハウス肥料A処方（EC 1.3 dS/m, pH 6.0）を培養液として育苗し、本葉6枚程度が展開した5月2日に温室内のNFT装置に定植した。栽培には、園試処方培養液（EC 2.2dS/m, pH 6.5）を使用した。栽培中の温室内温度環境は、天窓ならびに側窓の開閉による調節を行い、試験期間中の最高気温は34°C、最低気温は22°Cであった。

定植直後から深夜補光を開始した。深夜補光は3種類の光源で行い、それぞれ、第2章で用いた400W陽光ランプ（D400、東芝ライテック、文中および図中記号MH）、第2章の黄色光源であった高圧ナトリウムランプの波長分布のうち、赤の波長域を強調した反射型220W演色改善型高圧ナトリウムランプ（NH360 FD・L、同、同記号HPS）および第2章の青色光ランプから紫外線の放射を減少させた試作HID系400W青色光ランプ（同、同記号BL）をそれぞれ個別に設置した各補光処理区と、また、補光時間帯はカーテンで補光の光を遮断した対照区の合計4区を設けた。植物は、各区に10個体ずつ定植した。補光区については、光源を3.3m²当たり1灯の密度で、栽培パネルから70cmの高さに設置して行った。深夜補光時の栽培パネル面での光強度は、光合成有効光量子束（PPF）で100 μmol・m⁻²・s⁻¹であった。また、深夜補光時間は、深夜電力料金の対照時間帯である23:00から7:00までの8時間とした。試験期間中の栽培面におけるPPF換算の日射量と深夜補光区での受光量を第3.1.1表に示す。

補光開始後栽培は15日間行い、実験終了日の午前1:00と午前4:00の補光中に、最大葉の光合成速度と蒸散速度を携帯式光合成蒸散測定装置（SPB-H4、島津）によって測定し、実験終了後地上部生体重、葉数を計測した。また、地上部のサンプルについては、粉碎後、あらかじめ乾燥させてあった秤量缶に入れ、60°Cで48時間乾燥後、乾物重を調査した。

実験2. 深夜補光の光質と光強度がレタスならびにチンゲンサイの光合成に及ぼす影響：供試材料は、レタス‘岡山サラダナ’（タキイ種苗）、チンゲンサイ‘青帝’（サカタのタネ）とした。9月12日に、1粒ずつ水で十分湿らせたウレタンマットに直接播種し、実験1と同様に水耕育苗した。その後、レタスは本葉5枚程度、チンゲンサイは本葉6枚程度展開した10月3日にNFT装置に定植した。定植直後に深夜補光処理を開始し15日間栽培した。栽培中の温室内では、温度設定を18°Cとして温風暖房機による暖房を行い、試験期間中の最高気温28°C、最低気温14°Cであった。

Table 3.1.1 Average PPF received per day during the experiment 1, 2 and 3.

Year Month	Natural (Cont.) ^z (mol · m ⁻² · day ⁻¹)	0m ^y (mol · m ⁻² · day ⁻¹)	1m (mol · m ⁻² · day ⁻¹)
<u>Exp. 1</u>			
1996			
Apr	24.04	26.92	
May	23.08	25.96	
Jun	19.04	21.92	
<u>Exp. 2</u>			
1997			
Oct	13.53	16.41	13.95
Nov	16.57	19.45	16.99
Dec	10.13	13.01	10.55
<u>Exp. 3</u>			
1998			
Mar	15.48	18.36	
April	20.80	23.68	
May	16.10	18.98	

z : Natural shows the PPF received from sun.

y : 0m and 1m show the total received PPF, natural and supplemental light.

0m : just under the supplemental lighting lamp.

1m : 1m apart horizontally from the lamp.

深夜補光は、MHとHPSをそれぞれ個別に設置した補光区で行った。また、ここでは深夜補光強度が植物の生育に及ぼす影響について検討するために、光源直下ならびに光源からの水平距離が1mの処理区を設け、別に、補光時間帯には遮光カーテンで区切って光を与えない対照区を設けた。補光時の光強度は、光源直下で $76 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度であり、1m区では $16 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。いずれの処理区とも1区につき植物体を10個体定植した。

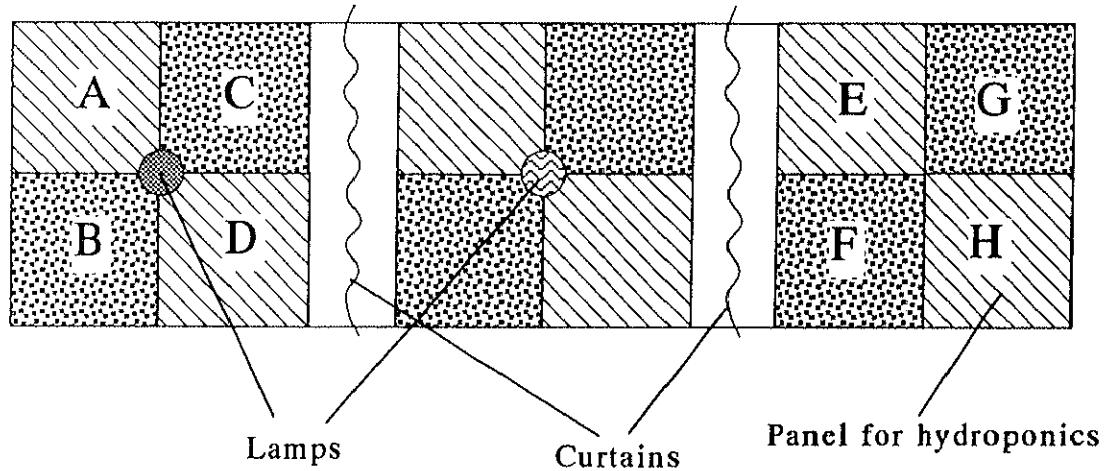
処理開始後、5、10、15日目に携帯式光合成蒸散測定装置（Li-6400、ライカ社）によって、レタスは本葉第5葉、チンゲンサイは本葉第3葉の光合成速度、気孔コンダクタンス、葉内CO₂濃度、蒸散速度を測定した。測定は、同装置の内蔵冷色光源によって $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の光強度で行った。また、実験終了後地上部生体重ならびに葉数を調査した。

実験3. 深夜補光の光質と光強度がレタスならびにチンゲンサイのクロロフィルに及ぼす影響：供試材料は、レタス‘岡山サラダナ’（タキイ種苗）、チンゲンサイ‘青帝’（サカタのタネ）である。3月27日に、1粒ずつ水で十分湿らせたウレタンマットに直接播種し、実験1と同様に水耕育苗した。その後、レタスは本葉5枚程度、チンゲンサイは本葉6枚程度展開した5月1日にNFT装置に定植した。定植直後に深夜補光処理を開始し20日間栽培した。栽培中の温室内温度環境は、天窓ならびに側窓の開閉による調節を行い、試験期間中の最高気温32°C、最低気温21°Cであった。

深夜補光は、MHとHPSを実験2と同様にそれぞれ個別に設置した補光区で行った。また、別に、補光時間帯には遮光カーテンで区切って光を与えない対照区を設けた。各区ごとに50cm×50cmの大きさの定植パネルを縦2枚横2枚の合計4枚設置し、対角上にある2枚ずつのパネルに各植物を10個体ずつ定植した。処理開始後10日目に、HPSの処理区について、パネルの植物ごとに1枚ずつ、対照区のパネルと交換し、それぞれ、前期補光区ならびに後期補光区とし、移動をしなかったパネルは、全期補光区と対照区とした（第3.1.1図）。

処理終了後植物体地上部を採取し、地上部生体重、葉数、最大葉長、最大葉幅について計測した後、相対葉緑素濃度を、葉緑素計（SPAD-502、ミノルタ）によりSPAD値として計測した。また、クロロフィルa蛍光の測定を携帯型クロロフィル蛍光計測器（PEA、HANSATECH社）によって行った。レタスならびにチンゲンサイについて最大葉を選択し、葉の葉脈を避けた部分を30分間暗黒処理した。暗処理終了後、赤色発

 Lettuce  Pakchoi



A, B : supplemental lighting during whole 20 days
C, D : supplemental lighting during first 10 days
E, F : supplemental lighting during second 10 days
G, H : no supplemental lighting (control)

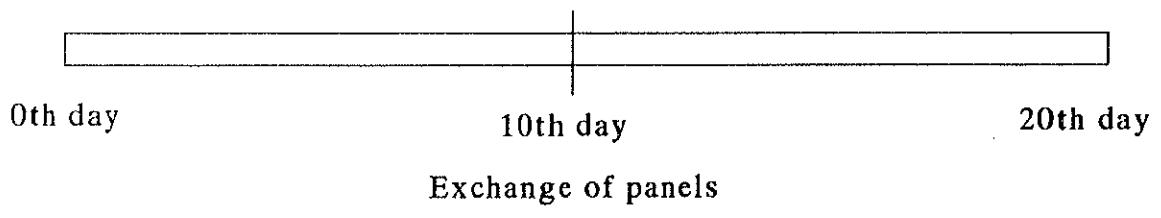


Fig. 3.1.1. Schematic diagram of experiment 3.

光ダイオード ($\text{max}=650\text{nm}$, 光強度 = $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) による光の照射を30秒間行い、引き続き葉の表面から放射される蛍光を計測した。得られた蛍光の値については、最小蛍光吸量 (F_0)、最大蛍光吸量 (F_{MAX}) ならびに変動蛍光吸量 (F_v) として計算した。変動蛍光吸量は、最大蛍光吸量と最小蛍光吸量の差として計算した (Richard, 1991)。その後、直徑14.5mmのリーフディスクを生体重で0.2g相当分採取し、20mlの80%アセトン中において、4°Cで48時間クロロフィルを抽出した。抽出液は、分光光度計 (DU-640, Beckman) によって645および663nmの吸光度を測定し、粗クロロフィル含有量を算出した。

3.1.2 結 果

実験1. 実験終了時の地上部生体重は、深夜補光の光質によって異なった (第3.1.2表)。対照区の地上部生体重が55gであったのに対して、MHとHPSによる深夜補光を行った場合、地上部生体重がそれぞれ81, 75gとなり、40~45%対照区よりも増加した。一方、BLでは、地上部生体重が60gと対照区よりも増加する傾向を示したもののその差は少なく統計的に有意ではなかった。また、地上部乾物重も生体重と同様の傾向を示し、MH, HPSでは40%程度対照区よりも増加したのに対して、BLでは対照区とほぼ同程度であった (データは示さず)。葉数も、MHとHPSは対照区よりも20%程度増加したが、BLの葉数は増加しなかった。また、葉長、葉幅ともMH, HPSが大きく、BLは対照区と差がなかった。

補光時間帯中の光合成速度には (第3.1.2図)、光源による違いはなかった。午前1:00ならびに4:00ともに、いずれの補光区も光合成速度は、7から $8 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度であり光補償点を超えていたが、MH, HPS, BLの各補光区間では統計的に有意な差は得られなかった。一方、補光時間帯中の蒸散速度は、光源によって異なった。処理区全体では、午前1:00の方が午前4:00よりも蒸散速度が大きかった。処理区別に蒸散速度を比較すると、いずれの時間帯ともHMとBLが対照区よりも高くなかった。HPSの場合、補光開始後2時間経過した午前1:00では、蒸散速度は対照区と同じ程度であり、その後午前4:00時点でも対照区よりも7%高い程度にとどまった。

実験2. MHとHPSの2種類の光源により、光源からの水平距離を変化させた場合の補光の生育に対する効果を光質の影響も含めて評価した (第3.1.3表)。レタスの場合、地上部生体重では深夜補光による生育促進効果が確認されたが、生育に対する光質の影

Table 3.1.2 Effects of supplemental lighting on the top fresh weight, number of leaves and lengths and widths of maximum leaves of lettuce grown by NFT. (Exp. 1)

Treatment	Top f.w. (g)	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)
Cont. ^z	55.0 a ^y	20.2 a	12.3 a	23.8 a
MH	80.7 b	24.4 b	15.2 ab	26.8 b
HPS	74.8 b	24.4 b	16.4 b	27.2 b
BL	60.2 ab	21.3 a	13.4 ab	24.3 a

z : Cont. ; control, MH ; metal halide lamp, HPS ; high pressure sodium lamp, BL ; blue lamp

y : Different letters in same column indicate the significant difference at

5% level according to Duncan's multiple range test.

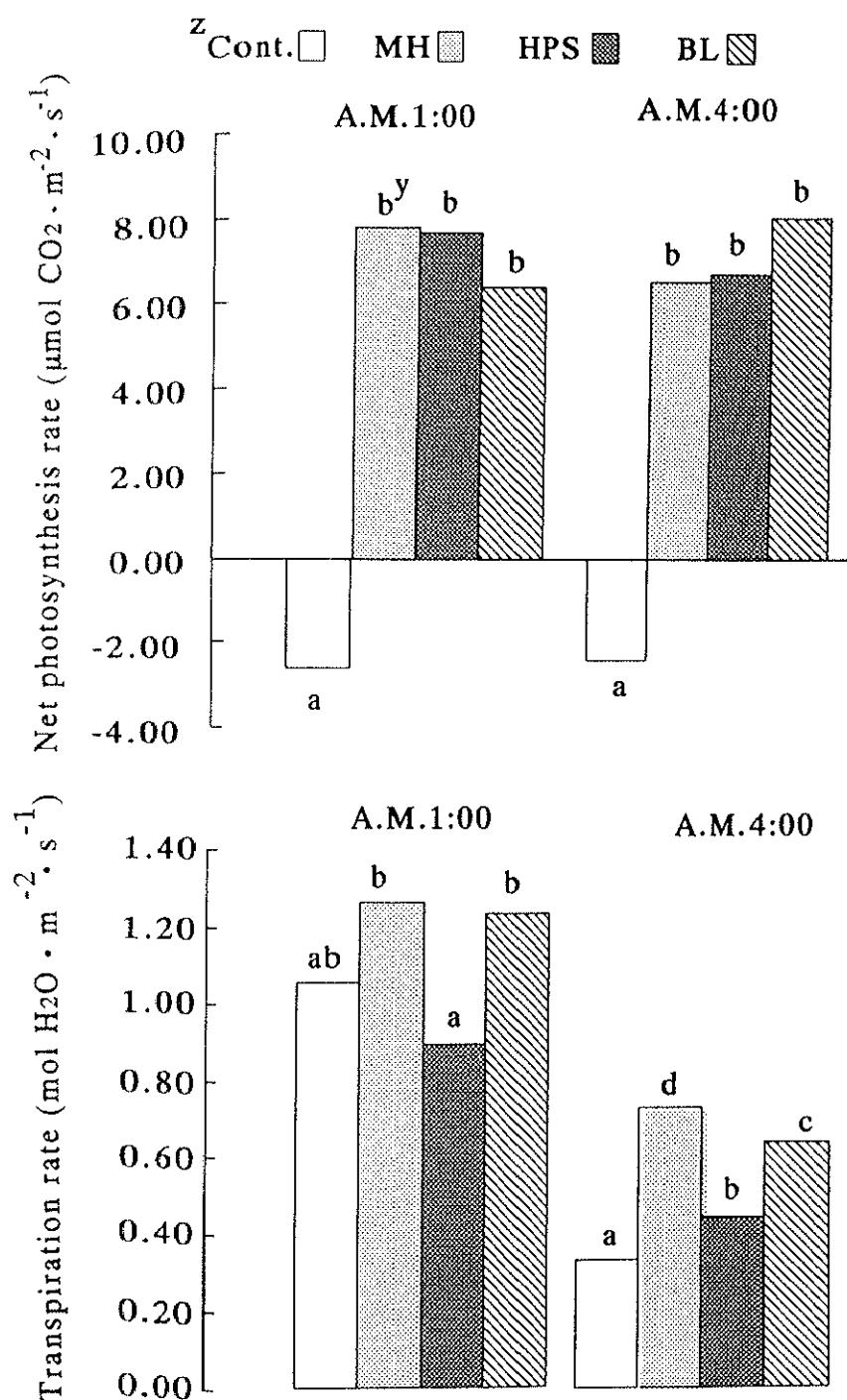


Fig. 3.1.2. Net photosynthetic rate and transpiration rate in night time of lettuce grown under supplemental lighting during mid-night to morning. (Exp. 1)
z : See Table 3.1.2
y : See Table 3.1.2

Table 3.1.3 Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on top fresh weight of lettuce and pakchoi grown by NFT. (Exp.2)

	Light source ^z	Distance ^y	Top fresh weight (g)
Lettuce	MH	0m	87.9 ± 1.5
	MH	1m	65.4 ± 3.8
	HPS	0m	94.0 ± 2.0
	HPS	1m	75.7 ± 4.8
	Cont.		59.6 ± 4.5
Supplemental lighting			** ^x
Light source			NS
Distance			**
Pakchoi	MH	0m	169.1 ± 6.1
	MH	1m	111.8 ± 6.5
	HPS	0m	169.8 ± 18.4
	HPS	1m	160.6 ± 9.9
	Cont.		123.7 ± 6.3
Supplemental lighting			**
Light source			NS
Distance			*

^z : See Table 3.1.2

^y : Horizontal distances from lamps

^x : NS and *, ** show nonsignificant or significant differences at P=0.05 or 0.01, respectively.

響は認められなかった。また、MH、HPSともに、光源からの水平距離が1mの場合、対照区よりも生育は促進されるものの、その効果は光源直下よりも少なくなることが確認された。チンゲンサイの場合、地上部生体重は補光によっていずれの光源でも光源直下では36%増加したが、レタスの場合と同様に、光源間で地上部生体重の違いはほとんどなかった。

光合成速度、気孔コンダクタンス、葉内CO₂濃度、蒸散速度を第3.1.3図、第3.1.4、3.1.5表に示す。レタスの光合成速度は（第3.1.3図、第3.1.4表）、処理開始後5日目では、統計的に有意ではなかったものの補光区全体でいずれも対照区よりも10～20%多くなる傾向を示した。その後、全補光区とも日数経過とともに光合成速度は減少したが、その程度は光源からの距離によって異なり、処理開始後5日目から処理開始後15日目までの期間でもっとも減少の程度が大きかったのはHPSの0m区であった。

また、気孔コンダクタンスも純光合成速度と同様の傾向を示し、処理開始後15日目の時点で最も低い値を示したのはHPS、0m区であり、次いでMHの0m区であった。葉内CO₂濃度については、処理区間で一定の傾向がなかった。蒸散速度は気孔コンダクタンスと同様の傾向を示し、処理開始後5日目の時点では、補光区全体が対照区よりも高くなる傾向を示したが、いずれの光源でも0m区の蒸散速度は処理開始後15日目に処理開始後よりも70%減少し、結果的に対照区より15%程度低くなった。

チンゲンサイの光合成速度（第3.1.3図、第3.1.5表）は、処理開始後10日目までは、MH1m区を除いていずれの処理区とも同程度の値を示した。しかし、処理開始後15日には、補光区の光合成速度は処理開始後5日日の時点よりも30～40%低下し、低下率は0m区で最も大きかった。気孔コンダクタンスは、処理開始後5日目で補光区が低く、光源別に観察すると0m区の方が1m区よりも低くなかった。この傾向は処理開始後10、15日目でも同様であった。また、葉内CO₂濃度、蒸散速度のいずれも気孔コンダクタンスと同じ傾向を示し、いずれの光源についても処理開始後15日目では0m区で1m区よりも低くなかった。

実験3：レタスの地上部生体重は全期間補光が最も大きく対照区の約2倍に、また、補光処理別に見ると、20日間の試験期間の内、前半10日間の補光よりも後半の10日間に補光した方が地上部生体重が大きくなった（第3.1.6表）。葉数は、MHおよびHPSの全期間補光で対照区よりも20%程度増加した。最大葉のSPAD値は、レタスでは補光による影響は少なく、MH・全期補光区ならびに後半補光区で対照区よりも10%増加した程

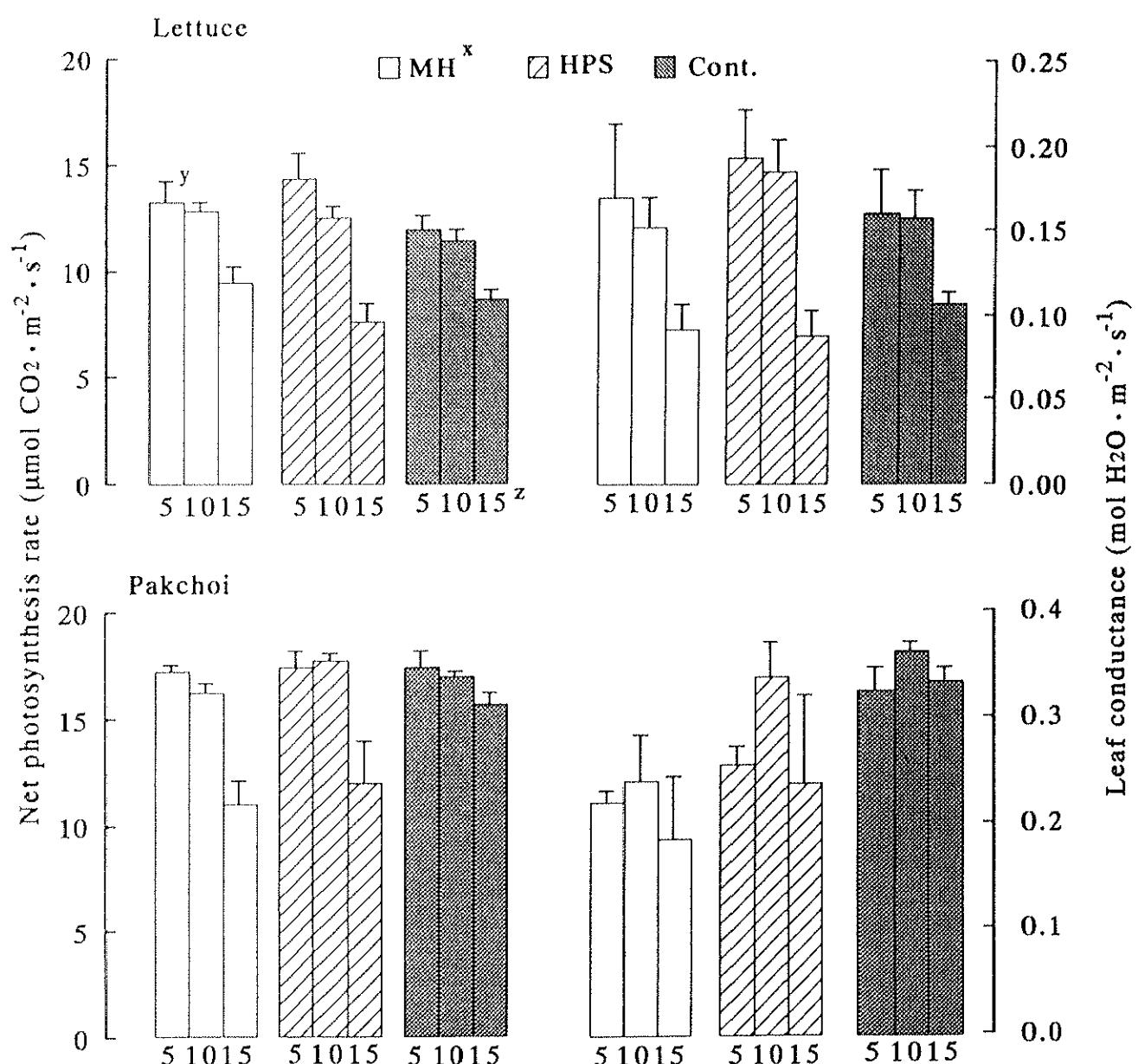


Fig. 3.1.3. Net photosynthetic rate and leaf conductance in day time of lettuce and pakchoi just under supplemental lighting during mid-night to morning. (Exp. 2)

z : Days after planting.

y : Standard error. n=6

x : MH, HPS and Cont. mean that supplemental lighting with metal halide lamp or high pressure sodium lamp, and without supplemental lighting, respectively.

Table 3.1.4 Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on net photosynthetic rate (photosynthesis), leaf conductance, CO₂ concentration in the leaves (leaf CO₂) and transpiration rate (transpiration) of lettuce grown by NFT. (Exp.2)

Light source ^y	Distance ^x	Photosynthesis μmol · m ⁻² · s ⁻¹	Leaf conductance mol H ₂ O · m ⁻² · s ⁻¹	Leaf CO ₂ μmol CO ₂ · mol ⁻¹ air	Transpiration mol H ₂ O · m ⁻² · s ⁻¹
5 days^z					
MH	0m	13.3 ± 1.0	0.170 ± 0.043	166.7 ± 36.3	3.83 ± 0.73
	1m	13.6 ± 2.5	0.214 ± 0.062	193.5 ± 9.7	4.48 ± 0.98
HPS	0m	14.3 ± 1.3	0.193 ± 0.028	185.5 ± 11.3	3.97 ± 0.41
	1m	13.8 ± 0.5	0.175 ± 0.012	183.0 ± 13.0	3.79 ± 0.19
Cont.		12.0 ± 0.6	0.160 ± 0.016	183.5 ± 11.6	3.61 ± 0.25
A:Light source		NS ^w	NS	NS	NS
B:Distance		NS	NS	NS	NS
A×B		NS	NS	NS	NS
10 days					
MH	0m	12.9 ± 0.3	0.151 ± 0.019	177.5 ± 15.1	3.39 ± 0.24
	1m	10.5 ± 0.6	0.118 ± 0.036	137.6 ± 51.7	2.62 ± 0.62
HPS	0m	12.5 ± 0.5	0.185 ± 0.019	209.5 ± 10.1	3.54 ± 0.26
	1m	12.1 ± 0.3	0.177 ± 0.019	209.3 ± 8.9	3.64 ± 0.24
Cont.		11.5 ± 0.5	0.157 ± 0.016	201.1 ± 9.1	3.30 ± 0.24
A:Light source		NS	NS	NS	NS
B:Distance		*	NS	NS	NS
A×B		NS	NS	NS	NS
15 days					
MH	0m	9.5 ± 0.7	0.091 ± 0.015	166.3 ± 26.7	1.33 ± 0.26
	1m	9.4 ± 0.7	0.108 ± 0.017	199.0 ± 12.9	1.43 ± 0.28
HPS	0m	7.6 ± 0.9	0.088 ± 0.015	196.3 ± 9.8	1.32 ± 0.21
	1m	10.0 ± 0.4	0.163 ± 0.023	227.3 ± 11.6	2.41 ± 0.33
Cont.		8.7 ± 0.5	0.107 ± 0.007	201.9 ± 12.7	1.56 ± 0.11
A:Light source		NS	NS	NS	NS
B:Distance		NS	*	NS	NS
A×B		NS	NS	NS	NS

z : Days after treatment

y : See Table 3.1.2

x : Horizontal distances from lamps

w : NS and * show nonsignificant and significant differences at P=0.05, respectively.

Table 3.1.5 Effects of supplemental lighting during mid-night to morning synthetic rate (photosynthesis), leaf conductance, CO₂ concentration in (leaf CO₂) and transpiration rate (transpiration) of pakchoi grown by N

Light source ^y	Distance ^x	Photosynthesis	Leaf conductance	Leaf CO ₂
		μmol · m ⁻² · s ⁻¹	mol H ₂ O · m ⁻² · s ⁻¹	μmol CO ₂ · mol ⁻¹ air
<u>5 days^z</u>				
MH	0m	17.1±0.3	0.222±0.010	177.8± 7.1
	1m	14.1±2.0	0.244±0.074	204.0±23.0
HPS	0m	17.4±0.7	0.256±0.018	194.3± 5.7
	1m	18.3±0.2	0.320±0.016	208.0± 1.9
Cont.		17.3±0.7	0.327±0.020	216.1± 4.0
A:Light source		* ^w	NS	NS
B:Distance		NS	*	*
A×B		NS	NS	NS
<u>10 days</u>				
MH	0m	16.1±0.3	0.241±0.044	205.8±17.0
	1m	17.2±0.4	0.333±0.026	230.5± 9.0
HPS	0m	17.6±0.4	0.340±0.032	228.8± 6.1
	1m	17.7±0.2	0.357±0.017	232.0± 3.5
Cont.		16.8±0.3	0.362±0.010	239.5± 3.3
A:Light source		*	NS	NS
B:Distance		NS	*	NS
A×B		NS	NS	NS
<u>15 days</u>				
MH	0m	10.9±1.0	0.187±0.058	206.6±27.4
	1m	13.8±1.5	0.271±0.052	243.5±14.6
HPS	0m	11.9±1.9	0.239±0.082	225.3±24.6
	1m	13.9±0.5	0.279±0.042	237.8±11.4
Cont.		15.6±0.5	0.334±0.013	250.9± 2.2
A:Light source		NS	NS	NS
B:Distance		*	NS	NS
A×B		NS	NS	NS

z : See Table 3.1.3

y : See Table 3.1.2

x : See Table 3.1.3

w : NS and *, ** show nonsignificant and significant differences
at P=0.05 or 0.01, respectively.

Table 3.1.6. Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on top fresh weight, number of leaves, SPAD value, leaf length and leaf width of lettuce and pakchoi grown by NFT. (Exp.3)

	Supplemental ^z lighting	Light ^y source	Period of ^x lighting	Top f.w. (g)	No. of leaves	SPAD ^w value	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)
Lettuce	-			62.3±3.7 a	34.4±1.7 a	20.4±0.8 a	20.0±0.8 a	17.0±1.9 ab
	+	MH	T	126.9±4.6 c	42.5±0.9 c	21.6±0.4 ab	25.4±0.5 b	17.5±0.6 b
	+	HPS	T	113.0±5.5 b	41.4±1.3 bc	20.3±0.6 a	23.6±1.5 b	17.0±0.4 ab
	+	HPS	E	93.1±5.9 ab	37.9±1.3 ab	20.8±0.5 a	25.9±0.8 b	15.3±0.4 a
	+	HPS	L	106.0±6.8 bc	36.7±1.2 a	22.4±0.3 b	24.2±0.4 b	16.2±0.3 ab
Supplemental lighting				** ^v	*	*	**	NS
Light source				*	NS	NS	NS	NS
Period of lighting				*	**	*	NS	*
Pakchoi	-			132.5± 6.5 a	19.2±0.4 a	29.5±1.1 a	26.8±0.5 b	13.6±0.4 a
	+	MH	T	173.4± 7.4 b	22.1±0.6 b	33.4±0.5 b	25.8±0.4 a	14.3±0.4 b
	+	HPS	T	152.8± 9.9 b	21.9±0.6 b	33.2±0.7 b	25.3±0.3 a	14.0±0.4 ab
	+	HPS	E	125.4± 7.9 a	19.6±0.4 a	32.6±0.9 b	25.1±0.5 a	13.5±0.4 a
	+	HPS	L	136.5±12.4 a	20.6±0.4 a	31.9±0.5 b	25.9±0.6 a	13.0±0.5 a
Supplemental lighting				*	*	*	*	NS
Light source				NS	NS	NS	NS	NS
Period of lighting				*	**	NS	NS	*

z : + and - mean with or without supplemental lighting, respectively.

y : See Table 3.1.2

x : T means supplemental lighting during 20 days, E and L mean supplemental lighting in the first or second 10 days of 20 days, respectively.

w : Values show data from Minolta chlorophyll meter (SPAD-502).

v : See table 3.1.3

度であった。最大葉長は補光区全体で対照区よりも大きく10%程度長くなった。しかし、葉幅については対照区ならびに補光区ともほぼ同程度の値を示した。チンゲンサイの地上部生体重は、MH、全期間補光区で最も大きく対照区よりも30%大きかったが、前半後半それぞれ10日間補光した場合には補光による生育促進効果は観察されなかった。葉数は、全期間補光区で増加したものその程度はレタスの場合よりも小さく、15%程度にとどまった。最大葉のSPAD値は、補光区すべてで対照区よりも高い値を示し、最も高かったMH、全期間補光区で13%対照区よりも増加した。一方、葉幅については、補光による伸長促進効果はなかった。

レタスのクロロフィル含有量は（第3.1.7表）、補光光源によって異なった。MHでは、単位生体重当たりならびに単位葉面積当たりのクロロフィル含有量は対照区と同程度であり、増加することはなかった。一方、HPSの場合、光源直下でクロロフィルの増加が最も著しく、単位生体重当たりのクロロフィルa, b含有量が対照区よりも13%多かった。また、前半ならびに後半補光区でも対照区よりもクロロフィル含有量が増加する傾向を示したが、その程度は単位生体重当たりおよび単位葉面積当たりでも10%程度であった。チンゲンサイのクロロフィル含有量は、HPSによる補光によって増加したが、その程度は単位生体重当たりの場合と単位葉面積当たりの場合で大きく異なった。単位生体重当たりのクロロフィル含有量は、HPSの光源直下で最も増大し、クロロフィルaは8%、クロロフィルbで11%，総クロロフィル含有量で6%対照区よりも高くなかった。一方、単位葉面積当たりのクロロフィル含有量は、補光区全体で増加した。補光区の中で最も単位葉面積当たりのクロロフィル含有量が増加したのはHPSの光源直下であり、クロロフィルaで21%，クロロフィルbは23%，総クロロフィル含有量は19%と、明らかに単位生体重当たりのクロロフィル含有量の場合よりも補光による増加の程度が大きかった。また、単位生体重当たりのクロロフィル含有量では対照区と同程度であったMH補光区も、クロロフィルaならびに総クロロフィル含有量で10%程度対照区よりも増加した。また、前半補光と後半補光では、単位生体重当たりならびに単位葉面積当たりのクロロフィル含有量とともに、後半補光の方が多くなった。

実験終了時のレタスならびにチンゲンサイのクロロフィルa蛍光値について第3.1.8表に示す。レタスの場合、クロロフィルa蛍光の初期値である F_0 値で補光区と対照区の間で有意な差は観察されなかった。一方、クロロフィルa蛍光の最大値である F_{max} 値は、HPS補光区の全期補光区と後期補光区で対照区よりも増加した。また、光合成の光量子子

Table 3.1.7. Effects of supplemental lighting mid-night to morning on chlorophyll concentration of lettuce and pakchoi grown by NFT. (Exp.3)

Supplemental ^z	Light source ^y	Period of ^x lighting	chl a (mg/g leaf f.w.)	chl b (mg/g leaf f.w.)	chl total (mg/g leaf f.w.)	chl a ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$ leaf area)	chl b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$ leaf area)	chl total ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$ leaf area)
Lettuce	-		0.820 \pm 0.021	ab	0.234 \pm 0.005 ab	1.050 \pm 0.024 ab	8.136 \pm 0.294 ab	2.324 \pm 0.087 a
	+	MH	T	0.792 \pm 0.051	a	0.233 \pm 0.013 a	1.025 \pm 0.064 a	8.104 \pm 0.392 a
	+	HPS	T	0.928 \pm 0.050	b	0.264 \pm 0.014 b	1.190 \pm 0.065 b	9.361 \pm 0.573 b
	+	HPS	E	0.903 \pm 0.028	b	0.262 \pm 0.008 b	1.167 \pm 0.034 b	9.144 \pm 0.228 b
	+	HPS	L	0.899 \pm 0.028	b	0.249 \pm 0.009 ab	1.145 \pm 0.037 ab	9.103 \pm 0.248 b
Supplemental lighting			NS ^w	NS	NS	NS	NS	NS
Light source			**	*	*	*	NS	*
Period of lighting			NS	NS	NS	NS	NS	NS
Pakchoi	-		0.662 \pm 0.032	ab	0.180 \pm 0.007 ab	0.844 \pm 0.040 ab	12.03 \pm 0.59 a	3.283 \pm 0.146 a
	+	MH	T	0.614 \pm 0.015	a	0.168 \pm 0.007 a	0.782 \pm 0.019 a	13.27 \pm 0.24 b
	+	HPS	T	0.718 \pm 0.042	b	0.200 \pm 0.009 b	0.898 \pm 0.054 b	14.61 \pm 0.67 c
	+	HPS	E	0.634 \pm 0.016	a	0.177 \pm 0.004 ab	0.812 \pm 0.019 a	12.88 \pm 0.29 a
	+	HPS	L	0.703 \pm 0.021	b	0.184 \pm 0.004 b	0.886 \pm 0.054 b	13.72 \pm 0.25 bc
Supplemental lighting			NS	NS	NS	**	*	**
Light source			**	*	*	NS	NS	NS
Timing			*	NS	*	*	*	*

z : See Table 3.1.5

y : See Table 3.1.3

x : See Table 3.1.5

w : See Table 3.1.5.

Table 3.1.8. Effects of supplemental lighting mid-night to morning on chlorophyll a fluorescence of lettuce and pakchoi grown by NFT. (Exp.3)

	Supplemental ^z lighting	Light source ^y	Period of ^x lighting	F0	Fmax	Fv/Fmax
Lettuce	-			0.523±0.052	a	0.338±0.004 ab
	+	MH	T	0.452±0.009	a	0.320±0.008 a
	+	HPS	T	0.499±0.032	a	0.356±0.011 b
	+	HPS	E	0.465±0.021	a	0.345±0.011 ab
	+	HPS	L	0.437±0.011	a	0.348±0.008 b
Pakchoi	Supplemental lighting			NS ^w	NS	NS
	Light source			NS	*	NS
	Period of lighting			NS	NS	*
	-			0.441±0.024	b	0.308±0.012 b
	+	MH	T	0.399±0.007	a	0.265±0.004 a
	+	HPS	T	0.428±0.004	ab	0.275±0.004 a
	+	HPS	E	0.417±0.003	a	0.306±0.005 b
	+	HPS	L	0.428±0.012	b	0.271±0.008 a
	Supplemental lighting			NS	*	NS
	Light source			NS	NS	NS
	Period of lighting			*	**	**

z : See Table 3.1.5

y : See Table 3.1.2

x : See Table 3.1.5

w : See Table 3.1.5

収率の目安となる F_v/F_{max} 値についても、統計的に有意ではなかったものの F_{max} 値と同様にHPSの全期補光区と後期補光区で対照区よりも高くなる傾向を示した。

チンゲンサイのクロロフィルa蛍光は、 F_v 値がMHとHPSの前期補光で対照区よりも低い値を示した。 F_{max} 値は、HPSの前期補光区以外の補光区の値が対照区よりも低くなり、結果的にMHならびにHPS・前期補光区、後期補光区で F_v/F_{max} 値が対照区よりも減少した。

3.1.3 考 察

実験において、使用したいずれの光源でも、光源直下では補光によって地上部生体重が対照区よりも増大した。しかし、その程度はBLよりもMHならびにHPSの方が大きかった。第2章で示したように、青色光下では、植物の葉の蒸散速度が大きくかつ単位葉面積当たりの光合成速度も比較的大きい。したがって、光合成促進のための光源として青色光が適しているのではないかと考えられた。実際、深夜補光中の蒸散速度は、BLはMHと同程度であり、むしろHPSが低い値を示し、環境制御室で行った第2章の結果と一致する。また、光合成速度については、MH、HPS、BLともにほぼ同程度の値を示している。しかし、BLによる深夜補光は、MHやHPSよりも生育促進効果が低かった。第2章でも示したように、青色光下では、数種蔬菜で葉面積が減少し葉面積比(LAR)が低下した。Britz and Sager (1990) もまた、青色光を多く含む光の下で生育させた場合、青色光の少ないLPSで生育させた場合よりもLARが減少することを報告している。また、Eskins (1992) によると、シロイスナズナの場合、葉面積ならびに葉柄長が青色光／赤色光(B/R)の比率によって変化し、青色光の比率が高まるにつれてそれぞれ小さくまた短くなっている。本実験では、葉数増加や葉の伸長の程度がMHやHPSでは対照区よりも著しく大きい一方、BLではその程度は小さく対照区と同程度でしかなかった。第2章やあるいはBritz and Sager (1990) の試験は、環境制御室において光質の影響を比較したものである。したがって、本試験のような深夜補光と条件は同じではないため直接比較をすることはできないが、深夜に行った8時間の補光の光質が形態形成に影響した可能性はある。明期終了時(EOD)の光のR/Fr比がトマトの草丈や葉長を変化させるという報告がある(Decoteau and Friend, 1991)。本実験の場合、暗期終了時(EON)であるが、EONとEODはよく似た反応を示すことが一般的に知られている。BLとMHはR/Fr比が同程度であることから(第2.1.2表)、BLによる深夜補光

はEONとして青色光の波長域が作用したものと推察された。その結果、第2章の環境制御室での実験結果と同様の反応を示し、葉面積が低下したものと考えられる。単位葉面積当たりの光合成速度が同程度である一方で、LARが減少すれば生育速度は低下する。BLによる補光が、十分な生育促進に結びつかなかったのは、葉の伸長展開がMHやHPSよりも遅く、受光効率が低かったことが原因であると考えられる。

第2節において後述するが、深夜補光区では補光を行っていない明期中の光合成速度も増加した。本節の実験2では、補光開始後の明期中の光合成速度の変化を調査したところ、レタスの場合、処理開始後10日目までは対照区よりも高い光合成速度を示した。しかし、15日目には気孔コンダクタンスが急激に減少し、光合成速度も低下し、対照区よりも低くなった。一方、チンゲンサイでは、明期中の光合成速度は対照区を上回ることはなく、また、レタスと同様に補光開始後15日目には急激に光合成速度が減少した。Krapp et al. (1991) は、ホウレンソウの葉にグルコースを与えたところ、気孔コンダクタンスが減少し光合成速度が低下したことを報告した。また、Hennessey et al. (1993) は、通常の環境条件から強光条件の連続明期に植物を移動させた場合、気孔コンダクタンスと純光合成速度が概日リズムを刻みながら減少していくことを示した。本研究の場合、深夜11:00から8時間の日長延長を行い極端な長日条件としており、Dorais et al. (1995) がトマトを使った実験で示したように、日長延長に適応できず過剰な光によって光合成が抑制される現象が本研究でも起こった可能性がある。その一方で、レタスの場合、処理開始後10日目までは補光区の純光合成速度が高かった。データには示さなかったが、補光区の葉の伸長は早く、最大長に到達する期間も短かった。レタスにおいて、補光区の明期中純光合成速度が一時的に高くなかったのは、葉の成熟が補光によって促進されたことが要因の一つではないかと推察される。

Fitter and Hay (1985) が指摘するように、生育時の光強度が大きいほど葉緑素の絶対量が増大する。筆者は、深夜補光によって1日当たりの受光量が増大した結果クロロフィル量が増加し、結果としてSPAD値で示される葉色の増加が起こることを予想した。しかし、レタスならびにチンゲンサイにおいて、最大葉の単位生体重当たりのクロロフィル含有量は、補光によって増加する傾向は示したものとの程度は少なかった。一方、単位葉面積当たりのクロロフィル含有量は、レタスならびにチンゲンサイとともに、単位生体重当たりのクロロフィル含有量の場合と比べて補光による増加の程度が大きかった。SPAD値の測定原理は、波長645nmの光を葉に透過させ光の吸光度を測定

し、クロロフィル濃度に比例するデータを得るというものである。深夜補光による単位生体重当たりのクロロフィル含有量の増加の程度が小さいことから考えて、単位葉面積当たりのクロロフィル含有量を反映するSPAD値の深夜補光による増加は、葉の厚みの増加による要因も大きいと推察される。また、レタスよりもチンゲンサイのほうが深夜補光によるSPAD値の増加が著しく、単位葉面積当たりのクロロフィル含有量の増大も顕著であった。結果としては示さなかったが、葉の厚みの指標となる葉の生体重1g当たりの葉面積は、レタスでは、深夜補光によって増加したもの、その程度は小さく統計的に有意ではなかった。一方、チンゲンサイの場合、深夜補光区全体の平均で対照区よりも13%増加し、その差は1%未満の確率で有意であった。このことから、チンゲンサイでは、深夜補光による葉の厚みの増加がレタスよりも顕著であり、結果としてSPAD値の増加につながったと考えられる。一方、個々の葉の生育段階別にSPAD値を測定したところ、深夜補光開始から10日目までは、明らかに対照区よりも高いSPAD値を示していたものの、その後は減少に転じ最終的には対照区よりも低くなってしまった（データは示さず）。Krapp et al. (1991) は、ホウレンソウの葉に外生グルコースを与えた結果、処理開始後2日目から単位葉面積当たりのクロロフィル含有量が減少したことを示した。深夜補光によって光合成を行う時間を延長した場合、葉内のグルコース濃度は上昇しているはずである。一度形成された葉の厚さは大きく変化しないと考えれば、連続的に長時間の明期に曝された結果、葉のクロロフィル含有量が減少したものと考えられる。第3章第2節において後述するが、SPAD値は、深夜補光の有無によって8日間という短期間で増減を繰り返した。この時の深夜補光区は葉の展開伸長が良好であり、補光を行っている8日間に新たに展開した最大葉の葉の厚みが増大し結果としてSPAD値が増加し、反対に、深夜補光停止後に展開した最大葉では補光の影響がなかったことからSPAD値は対照区と同程度であることから、SPAD値が減少したように観察されたのである。

光源の種類別に補光のクロロフィル含有量への影響を比較すると、HPSのほうがMHよりも単位生体重当たりのクロロフィル含有量が多くなる傾向を示した。Casal and Aphalo (1989) は、ペチュニアのクロロフィル含有量が明期終了時に与えた光の光質によって変化し、Frであれば減少しRであれば増加するという可逆的な反応であることを報告した。また、Casal et al. (1990) は、タバコの葉について、クロロフィルの合成にフィトクロームが関与し、Pr型のフィトクロムの増加がクロロフィル合成を阻害す

ることを示唆した。本実験で比較したHPSとMHは、第2章で使用した黄と白のランプに相当する。その光質は、HPSのR/Fr比が5.26、MHの場合R/Fr比が1.56である。本実験における補光は、明期開始前に行うものであるが、HPSとMHの光質の違いが深夜補光によるクロロフィル含有量増加の程度に影響したのではないかと考えられる。

第2章第2節でも示したように、クロロフィルa蛍光は植物体の光合成能力に関係する。実験2のように、レタスの場合、一時的ではあるものの、明期中の光合成速度が対照区よりも増大し、光合成能力が増加したことが示された。Dorais et al. (1995) は、日長延長に対する適応性についてトマトとピーマンを比較し、ピーマンは電子伝達系の能力増大によって日長延長に適応していることを示唆した。レタスの場合、光合成電子伝達系IIの量子収率の指標となるFv/Fmax値は、MH、HPS全期補光区ならびに後半補光区において、対照区よりも増加する傾向を示した。このことから、レタスでは、気孔コンダクタンスの低下によって純光合成速度が低下する前までは、日長延長に光合成電子伝達系が適応し、光合成能力が増大したと考えられる。Dorais et al. (1995) は、トマトは日長延長に適応できず、過剰な光によって引き起こされる光合成の光抑制 (Barcenyi and Krause, 1985; Powles, 1984) によって光合成能力が減少し、植物種によって日長延長に対する適応が異なることを指摘した。チンゲンサイの場合、純光合成速度は対照区よりも減少しなかったものの、光合成電子伝達系能力は対照区と同程度であったことから、日長延長に対する適応性はレタスよりも少なかったものと推察される。

生物は、外界の環境変化にあわせたあるリズムをもっているとされている。そのリズムの中でも24時間の周期にあわせたものを概日リズムと呼んでいる。本研究で行った深夜補光という処理は、育苗終了後、急激に日長時間を長日条件に切り替えるという操作を行い、このことが生理学的混乱を植物にもたらすおそれはある。石井ら (1995) は、完全制御型植物工場において、光周期を8, 16, 24時間の3種類設定し、生育の比較を行った。その結果、24時間日長下で最も生育が良好であるという結果となった。石井ら (1995) は、光周期を短くした結果、明期が始まってから光合成速度が最大に達するまでのタイムラグが大きく、ランプを点灯してからの光強度が設定値に達するまでのタイムラグと合わさって生育が遅延したものと推察した。また、光合成や気孔抵抗、一部の酵素活性なども概日リズムをもっており (Kerr et al. 1985; Hennessy et al. 1993)、連続明期あるいは暗期において概日リズムが観察される。加え

て、連続明期中では徐々に光合成の概日リズムは減衰する一方、蓄積される炭水化物量の増大に伴い光合成速度が低下する (Hennessey et al. 1993)。本研究の深夜補光は、光周期は24時間であり、石井ら (1995) のような光周期の変更は伴わずに明期の延長のみであることから、概日リズムそのものには影響しないと思われる。石井ら (1995) は、播種時から光周期を変更する場合と、育苗終了後から光周期を変更する場合で、生育に対する光周期の影響についても検討しているが、いずれの場合も短い光周期ではレタスの生育は抑制され、光周期が植物の生育に及ぼす影響は発芽後に獲得した内的リズムに無関係であるとしている。加えて、中島 (1991) は、光周期ならびに温度周期の外的リズムの変動により受ける内的リズムのかく乱は、植物の場合1日程度で収まり、新しいリズムに順応するとしている。したがって、本研究の深夜補光の場合、深夜補光開始時に一時的に概日リズムのかく乱があったとしても、その後の生育への影響はほとんどなかったものと考えられる。

以上の結果から、人工光源による深夜補光は、レタスならびにチンゲンサイに深夜間の光合成を行わせ、その結果得られたエネルギーにより生育が促進されていることが示された (第3.1.4図)。また、レタスについては、深夜補光を受けた葉の明期中の光合成速度も増加したことでも生育促進の要因の一つとなったと考えられる。一方では、深夜補光を受けた葉は、補光処理開始後の日数経過に伴い気孔コンダクタンスが減少し、純光合成速度の低下を招いた。しかし、深夜補光を行った場合は、葉の展開伸長が早く、先に展開した葉の光合成が低下する前に新しい葉が展開し、結果として十分生育させることができたのではないかと思われる。また、若干ではあるものの、弱光での深夜補光もある程度の生育促進効果が得られることが示された。弱光による深夜補光は、自然日射に対するエネルギー増加割合は4%程度と小さかったものの、葉の伸長及び展開が対照区よりも促進されており、結果としてこのような形態的変化による受光効率の向上が生育促進に結びついたものと思われる。しかし、BLによる補光では、葉の展開や伸長が不十分であり深夜補光の効果が十分得られなかつたのであろう。したがって、深夜補光によって十分な生育促進を得るためにには、正常かつ十分な形態形成に必要な広い放射波長域を持つMHランプか、あるいはHPSランプが望ましい。また、葉色などが重要な指標となる作物では、単位葉面積当たりのクロロフィル增加に効果の高かったHPSランプが適していると考えられる。

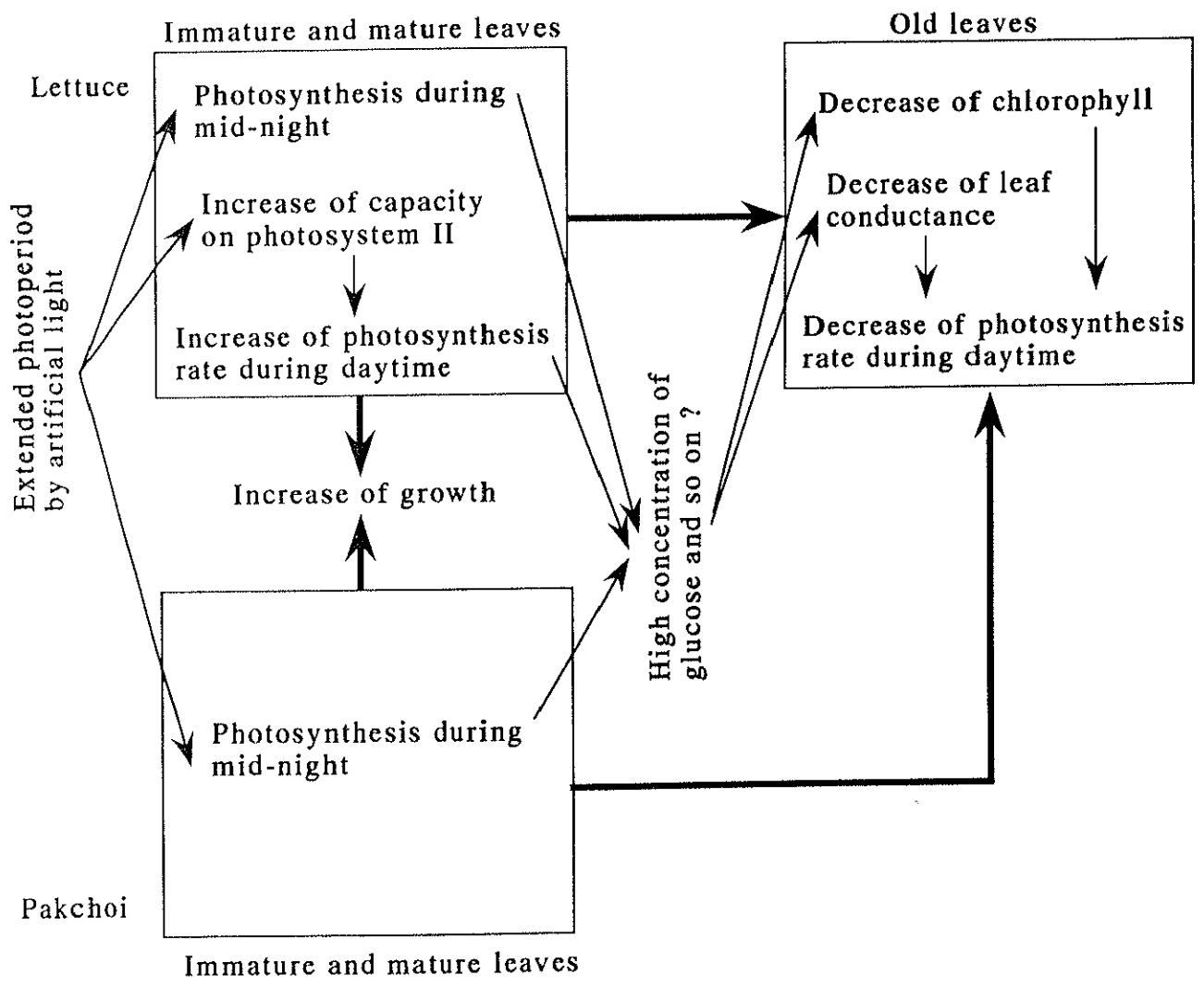


Fig. 3.1.4. Schematic diagram of mechanism on the increase of lettuce and pakchoi's growth by supplemental lighting.

3-2 深夜補光が数種蔬菜の生育に及ぼす影響

第3章第1節の結果から、数種蔬菜の生育を深夜補光によって促進することが可能であることが示された。深夜補光の試験は関山ら（1987）によても試みられ、深夜補光によってホウレンソウの生育が促進されたことが報告されている。しかし、実用的な深夜補光を検討するためには、どの生育段階の植物に、どの程度の光強度で照射することによって補光の効果が得られるか検討する必要がある。

本節では、数種蔬菜について生育段階別に深夜補光を行い補光時期が生育に及ぼす影響について検討した。また、光源からの水平距離を変化させた処理区を設け、深夜補光の光強度が数種蔬菜の生育に及ぼす影響についても評価した。

3.2.1 材料および方法

実験1. 定植後の異なる生育段階の深夜補光が数種葉菜類の生育に及ぼす影響：
供試材料は、レタス‘岡山サラダナ’（タキイ種苗）、チンゲンサイ‘青帝’（サカタのタネ）、ツケナ‘ベンリナ’（タキイ種苗）である。いずれの作物も11月11日に、水で十分湿らせたウレタンマットに直接播種した。発芽後、いずれの作物も大塚ハウス肥料A処方（EC: 1.3 dS/m, pH: 6.0）を培養液として育苗し、本葉1枚が展開した11月28日に温室内のNFT装置に定植した。そして、定植から12月22日までの24日間を8日間ごとの3期に分け、第1, 2, 3期および全期補光の4処理区を設けた。また別に、この他に補光時間帯中は遮光カーテンで覆い全期間深夜補光を行わない対照区を設けた。各処理区にはそれぞれ20個体ずつ定植し、定植後の栽培には園試処方培養液（EC: 1.8 dS/m, pH: 6.0）を使用した。温室内は、温風暖房機により設定温度18°Cとして定植直後から暖房を行い、試験期間中の最高気温は26°C、最低気温は12°Cであった。

深夜補光は、第3章第1節で使用した反射型220W演色改善型高圧ナトリウムランプ（NH360 FD・L、東芝ライテック）を3.3m²当たり1灯の密度で、栽培パネルから95cmの高さに設置して行った。深夜補光時の栽培パネル面での光強度は、光合成有効光量子束（PPF）で平均32.6 μ mol · m⁻² · s⁻¹であった。また、深夜補光時間は、深夜電力料金の対象時間帯である23:00から7:00までの8時間とした。

定植後8日おきに各処理区の全個体について生育調査を行った。調査時の最大葉については、葉緑素計（SPAD-502、ミノルタカメラ）を使用して相対葉緑素濃度を示す

SPAD値を測定した。また、第3期補光の終了時に植物体を採取し、地上部生体重を測定した。

実験2. 補光強度がレタス、シュンギクならびにトマトの生育に及ぼす影響：供試材料は、レタス‘岡山サラダナ’（タキイ種苗）、シュンギク‘きわめ中葉’（同）、トマト‘TVR-2’（同）である。4月12日に、レタスは1粒ずつ、シュンギクは20粒ずつ、水で十分湿らせたウレタンマットに直接播種した。また、トマトは、水で湿らせたバーミキュライトに播種し、発芽後ウレタンブロックに移植して温室内で育苗した。その後、いずれの作物も、実験(1)と同様に育苗し、5月8日にNFT装置に定植した。定植直後に深夜補光処理を開始し、6月8日まで栽培した。栽培中の温室内温度環境は、天窓ならびに側窓の開閉による調節を行い、試験期間中の最高気温は33°C、最低気温は21°Cであった。

深夜補光は、実験(1)と同じランプで同じ時間帯に行った。ここでは、深夜補光強度が蔬菜の生育に及ぼす影響について検討するために、光源直下ならびに光源直下からの水平距離が1m、2m、3mの処理区を設けた(第3.2.1図)。別に、補光時間帯には遮光カーテンで区切って光を与えない対照区を設けた。

栽培終了後、植物体を採取し、葉、茎、根に分けて乾物重を測定した。また、収穫2日前の正午ならびに深夜補光時に、携帯式光合成蒸散測定装置（SPB-H4、島津製作所）で光合成速度を測定した。

3.2.2 結 果

実験1. レタスの生育は栽培全期間の補光によって促進され、地上部生体重が対照区の2.6倍となった(第3.2.1表)。各補光期の中では第2期補光区でのみ生育促進効果がみられ、地上部生体重は対照区より3割増加した。対照区と比べ、葉長は全期補光区と第2期補光区で長くなったものの、葉幅は全期補光区のみ有意に広くなり、比較的丸い形の葉となった。チンゲンサイは、全期補光区の地上部生体重が対照区の約3倍になった。また、各補光期別では、植物体が大きくなった実験後半に深夜補光した第2期および第3期補光区の地上部生体重が、植物体が小さい実験前半に補光した第1期補光区よりも30%程度大きくなった。葉長および葉幅は、地上部生体重が大きくなった全期補光区、ならびに第2、第3期補光区において大きくなったが、葉形比は対照区と同程度であった。ツケナ地上部生体重は、対照区と比べ、全期補光区で90%程度増加した。

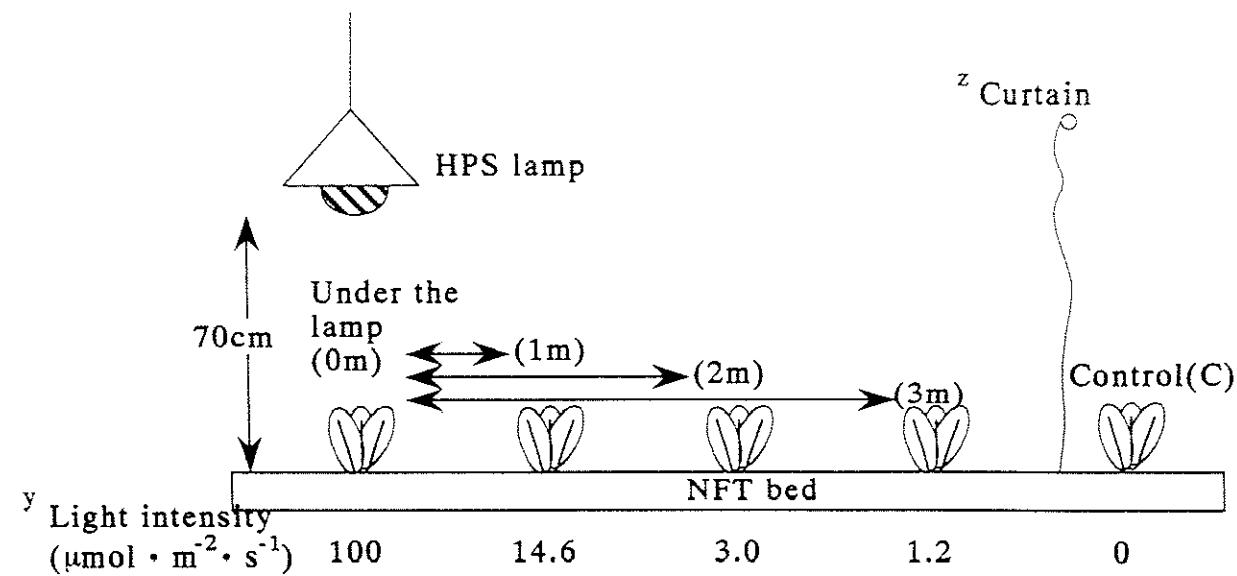


Fig. 3.2.1. Schematic diagram of equipment used in the Experiment 2.

z : The curtain was shut while lamps were lighting.

y : Light intensity was measured above the surface of NFT bed at midnight.

Table 3.2.1. Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on top fresh weight, plant height, leaf length and leaf width of lettuce, pakchoi and tsukena grown by NFT. (Exp.1)

	^z Period of lighting	Top f.w. (g)	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	ratio of leaf length/width
Lettuce	All	11.5 c		14.2 d	8.6 b	1.65 a
	1st	5.0 ab ^y		11.5 b	6.3 a	1.83 b
	2nd	5.8 b	n.d. ^x	12.4 c	6.6 a	1.88 b
	3rd	5.3 ab		10.7 a	6.5 a	1.65 a
	control	4.4 a		11.1 ab	6.1 a	1.82 b
Pakchoi	All	38.7 c	22.4 b	14.1 c	9.6 c	1.47 ab
	1st	17.9 ab	17.3 a	11.0 a	7.7 ab	1.43 a
	2nd	23.6 b	19.3 a	12.6 b	8.0 b	1.58 b
	3rd	21.1 b	19.3 a	11.8 ab	8.1 b	1.46 ab
	control	13.2 a	17.4 a	10.6 a	6.9 a	1.54 ab
Tsukena	All	26.6 b	27.5 b	14.8 b	8.7 b	1.70 a
	1st	19.0 a	26.4 b	13.3 ab	8.0 ab	1.66 a
	2nd	15.7 a	24.0 a	12.4 a	7.2 a	1.72 a
	3rd	18.1 a	24.0 a	13.3 ab	7.7 a	1.73 a
	control	14.1 a	22.4 a	11.6 a	7.2 a	1.61 a

z : This column shows the lighting period, All:days 0-24, 1st:days 0-8, 2nd:days 8-16,
3rd:days 16-24, control:without lighting. See Fig. 3.2.1.

y : Values followed by the same letter within same tests and crops are not significantly different at 5% level, according to Duncan's multiple range test.

x : Not determined.

第1から第3期の各補光区では、対照区よりも地上部生体重が増加したもの、その差は有意ではなかった。

いずれの作物も、葉数は処理開始後常に全期補光区で対照区よりも多くなった（第3.2.2図）。レタスでは第2および第3期補光区で、チンゲンサイでは第2期補光区で、処理開始後16日から24日にかけての葉数増加が著しく両作物ともに24日目には葉数が対照区よりも多くなる傾向を示した。一方、ツケナの場合、全期補光区、第1ならびに第3期補光区の葉数が多くなる傾向を示したもの、対照区との差は明確ではなかった。

SPAD値は、いずれの作物も全期補光区で対照区よりも10%程度高い値を維持した（第3.2.3図）。しかし、その他の深夜補光区では、補光をしている間は全期補光区と同程度の高いSPAD値を維持したものの、補光中断後は対照区と同程度の低さに戻ってしまった。

実験2 第3.2.1図に示すように、深夜補光中の栽培面における水平光強度は、光源直下で $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であったのに対して、光源直下から1m離れた区では $14.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、また、2m離れた区では $3.0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と著しく減少した。このような状況下で栽培したレタス、シュンギクは、光源直下に近づくにつれて、全体的に徒長した外観となった。一方、トマトの場合、光源直下に近づくにつれ、植物体地上部は大きくなつたものの徒長的ではなかった。

地際から生長点までの長さを計測した茎長は、いずれの作物とも深夜補光の光強度に比例して長くなり、レタスでは対照区で1.2cmであったのが光源直下では1.68cmへと、シュンギクの場合25cmが37.3cmに、また、トマトは21.3cmが32cmになり、結果的に0m区では対照区よりも1.4から1.5倍の長さとなった（第3.2.4図）。

地上部乾物重（第3.2.2表）は、いずれの作物とも、0m区が対照区よりも有意に大きくなつた。レタスおよびシュンギクの場合、補光強度の弱い1m区ならびに2m区では、対照区よりも乾物重が大きくなる傾向を示したものその程度は小さかった。一方トマトでは、2、3m区でも対照区より5割程度地上部乾物重が大きくなつた。SPAD値は、全作物とも0m区で対照区よりも有意に増加した。

栽培終了2日前の晴天時に、全作物について日中と深夜補光時に光合成速度を測定した（第3.2.2表）。その結果、日中の光合成速度は、レタスおよびシュンギクでは0mおよび1m区で高くなる傾向が示された。トマトでは、いずれの深夜補光区も対照区よりも有意に高い光合成速度が得られた。一方深夜補光中の光合成速度は、全作物とともに

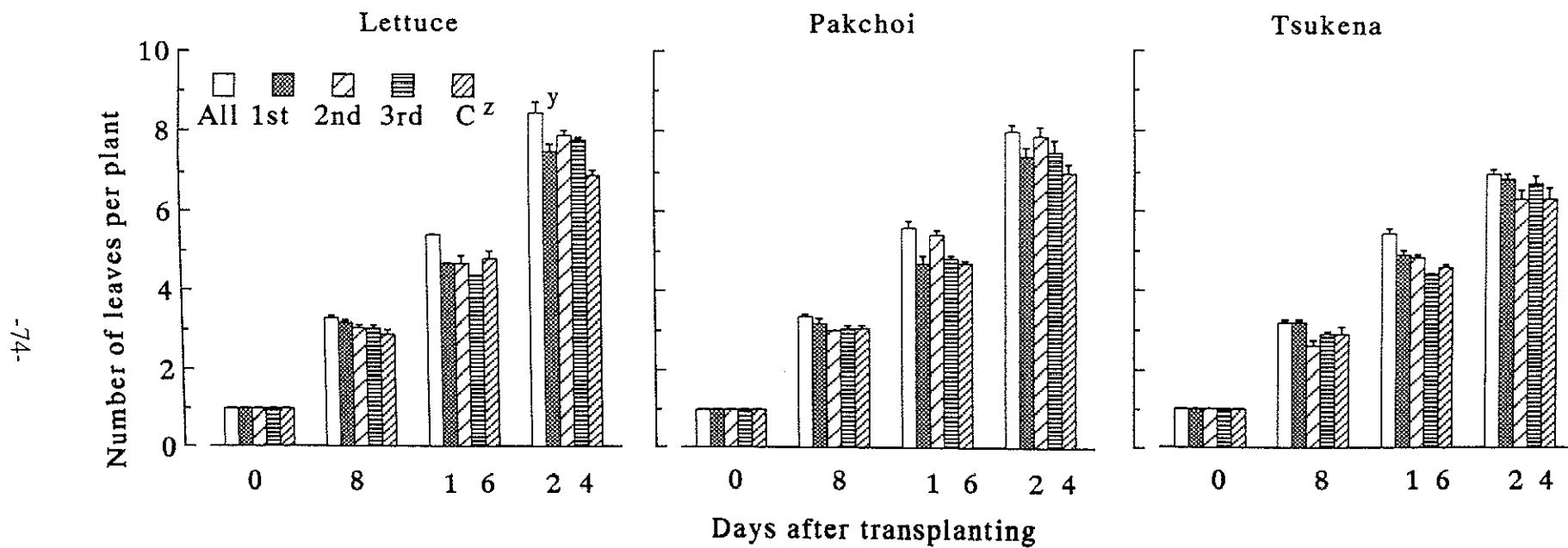


Fig. 3.2.2. Number of leaves of lettuce, pakchoi and tsukena grown under supplemental lighting during mid-night to morning.(Exp. 1)^X

^z : Each column shows the lighting period, All : day 0-24, 1st : day 0-8, 2nd : day 8-16,
3rd : day 16-24, C : without lighting.

^y : Vertical bars show the standard errors (n=8).

^X : Exp. 1 ; November to December.

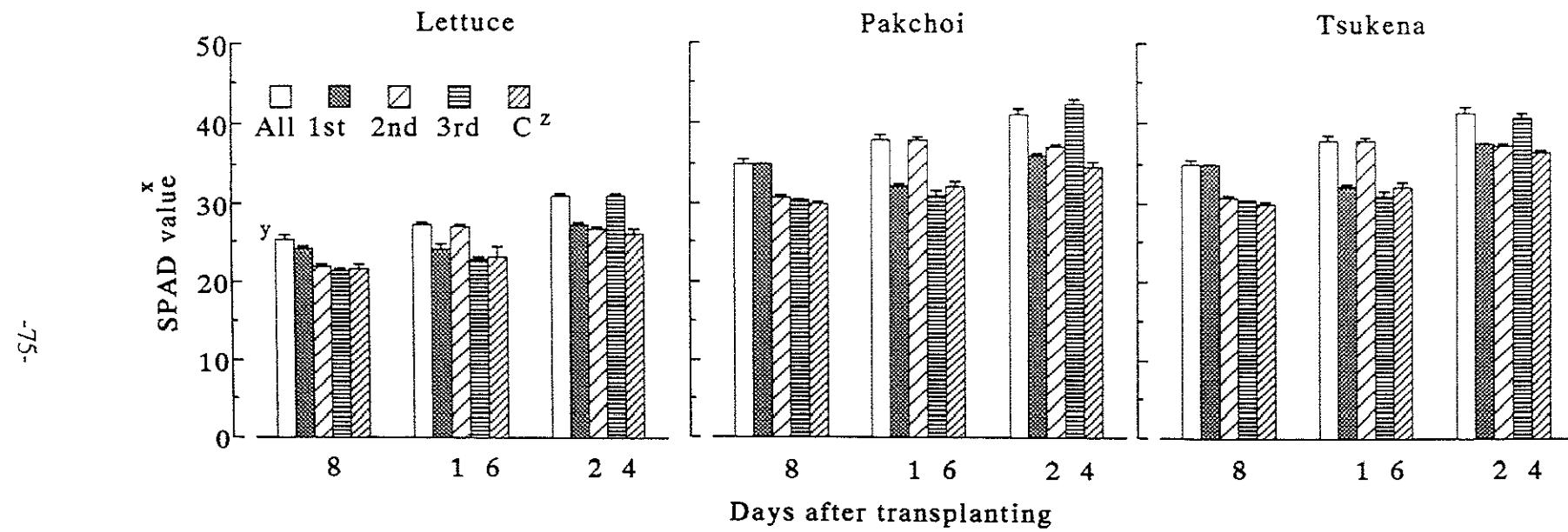


Fig. 3.2.3. SPAD values of lettuce, pakchoi and tsukena grown under supplemental lighting during mid-night to morning .(Exp.1)^x

^z : See Fig. 3.2.2

^y : See Fig. 3.2.2

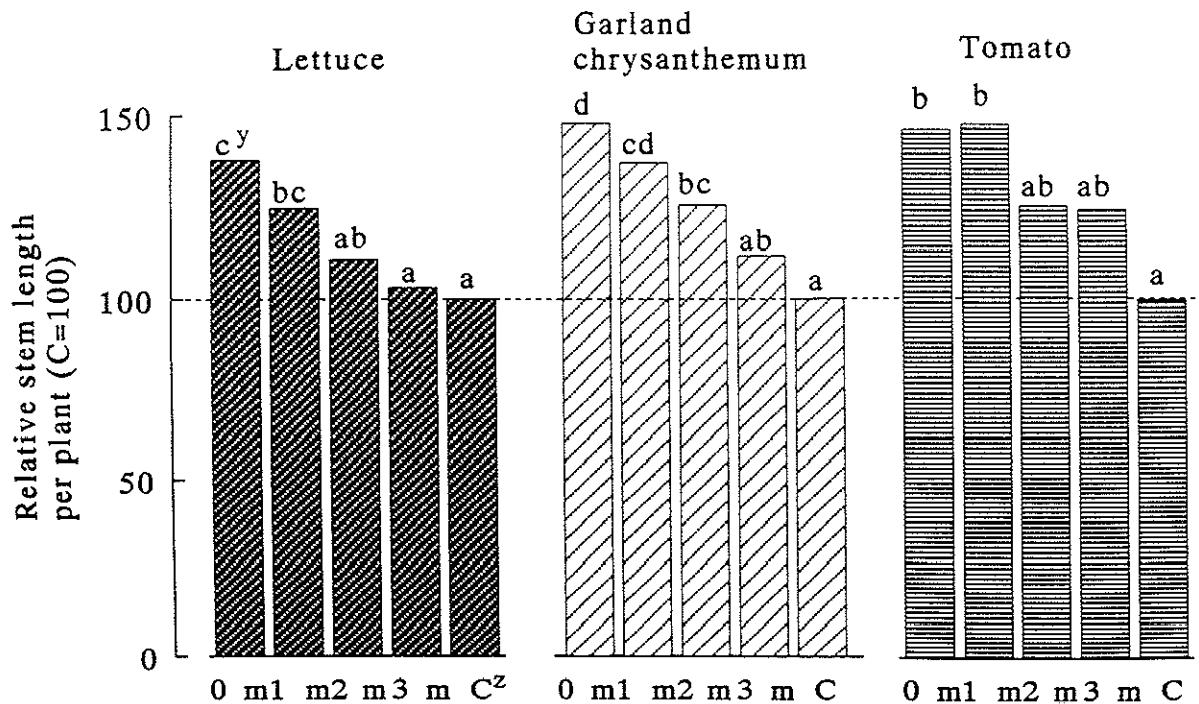


Fig. 3.2.4. Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on stem length of lettuce, garland chrysanthemum and tomato grown by NFT. (Exp. 2)^x

^z : Columns from 0m to 3m show the distance from the just under the lamp, and C means without lighting. See Fig. 3.2.1.

^y : Values followed by the same letter within same tests and crops are not significantly different at 5% level, according to Duncan's multiple range test.

^x : Exp. 2 ; May to June.

Table 3.2.2. Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on dry matter weight, SPAD value and net photosynthetic rate of lettuce, garland chrysanthemum and tomato grown by NFT. (Exp.2)

treatment	Top dw (g)	Root dw (g)	Total dw (g)	SPAD value ^y	PN-day ^x	PN-night	
Lettuce	0m ^z	10.42 b	1.32 a	11.74 b	32.0 b	11.7 b	1.7 c
	1m	9.94 ab	1.17 a	11.11 ab	28.2 a	11.8 b	-2.2 b
	2m	8.98 a	1.09 a	10.07 a	27.7 a	9.8 ab	-2.1 b
	3m	9.45 ab	1.17 a	10.62 ab	27.4 a	8.4 a	-3.5 b
	control	8.86 a	1.06 a	9.92 a	27.5 a	10.3 ab	-7.4 a
Garland chrysanthemum	0m	11.08 b	1.56 a	12.64 b	37.7 b	19.9 a	3.2 c
	1m	10.08 ab	1.63 a	11.71 ab	34.6 ab	18.6 a	-2.6 bc
	2m	9.54 ab	1.44 a	10.98 ab	33.6 a	16.0 a	-4.3 b
	3m	8.75 a	1.44 a	10.19 ab	33.8 a	16.3 a	-8.4 ab
	control	8.17 a	1.34 a	9.51 a	30.9 a	17.8 a	-13.7 a
Tomato	0m	25.09 c	4.36 b	29.45 c	54.9 b	11.2 cd	3.7 d
	1m	17.73 bc	2.86 ab	20.59 bc	52.3 ab	13.1 d	0.0 c
	2m	11.75 ab	2.35 a	14.10 ab	50.6 a	8.9 bc	-2.1 bc
	3m	12.27 ab	3.03 ab	15.30 ab	50.8 ab	7.8 ab	-4.9 a
	control	8.18 a	1.73 a	9.91 a	48.3 a	5.6 a	-4.4 ab

z : See Fig. 3.2.4.

y : See Fig. 3.2.3.

x : PN : net photosynthetic rate ($\text{CO}_2 \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)

-day : in the day time (11:00-12:00)

-night: in the night time with or without mid-night lighting (2:00-3:00)

光源に近い処理区ほど高くなつたが、補償点を超えたのは最も光強度の強かつた0m区のみであった。

各器官への乾物分配は、作物によって異なるものの、深夜補光の強度によって大きく変化し（第3.2.5図）、レタスならびにシュンギクでは、補光強度が強くなるほど茎への乾物分配率が高くなり、対照区および0m区でそれぞれ、レタスは7%、10%，シュンギクでは27%、37%となった。一方、トマトの場合、茎への乾物分配はいずれの補光強度下も対照区と同程度であったものの、側枝への分配が3m区<2m区<1m区<0m区の順で大きくなつた。

3.2.3 考 察

Gislerod et al. (1989) は、数種花卉類の生育と日長との関係を調査し、日長延長に伴って乾物重が増加したと報告している。本実験の場合、いずれの作物の地上部生体重も8時間程度の日長延長を伴う深夜補光によって、これを行わない対照区より大きくなつた。実験1の場合、全期補光区の葉数は、いずれの作物でも、深夜補光開始後8日目の時点で対照区よりも多くなつており、また、その時点での最大葉の葉長ならびに葉幅も対照区よりも大きかった（データ未掲載）。深夜補光は、葉の展開・伸長を促進し、結果として植物体の地上部生体重が増大した。Ceulemans et al. (1986) は、早朝と夕方の2回補光を行つた場合、イチゴの総葉面積が増加したことを報告しており、本実験の結果は彼らの報告とよく一致する。

栽培全期にわたる深夜補光によって蔬菜の生育は促進されるものの、8日間のみの補光では、いずれの作物も生育促進の程度は比較的小さいことが判明した。ただし、どの作物についても、同じ8日間の補光では栽培後半に深夜補光をした方が生育促進の効果は大きかった。今回の結果は、葉の伸長速度が遅い生育初期よりも、生育速度が速い栽培後期のほうが深夜補光の効果が大きいことを示している。

深夜補光が生育に及ぼす影響は、光源からの距離すなわち光強度によって大きく左右された。Gislerod et al. (1989) は、日長の延長と同時に光強度を増大させた場合、乾物重がより増加したとしている。本実験において、もっとも生育が促進されたのは、光強度が強い光源直下であった。Turcotte and Gosselin (1989) は、キュウリに中期延長補光を行つた場合、補光中に気孔コンダクタンスが増加し1日のうち光合成可能な時間を延長させることができたと報告している。本研究では、いずれの作物についても光

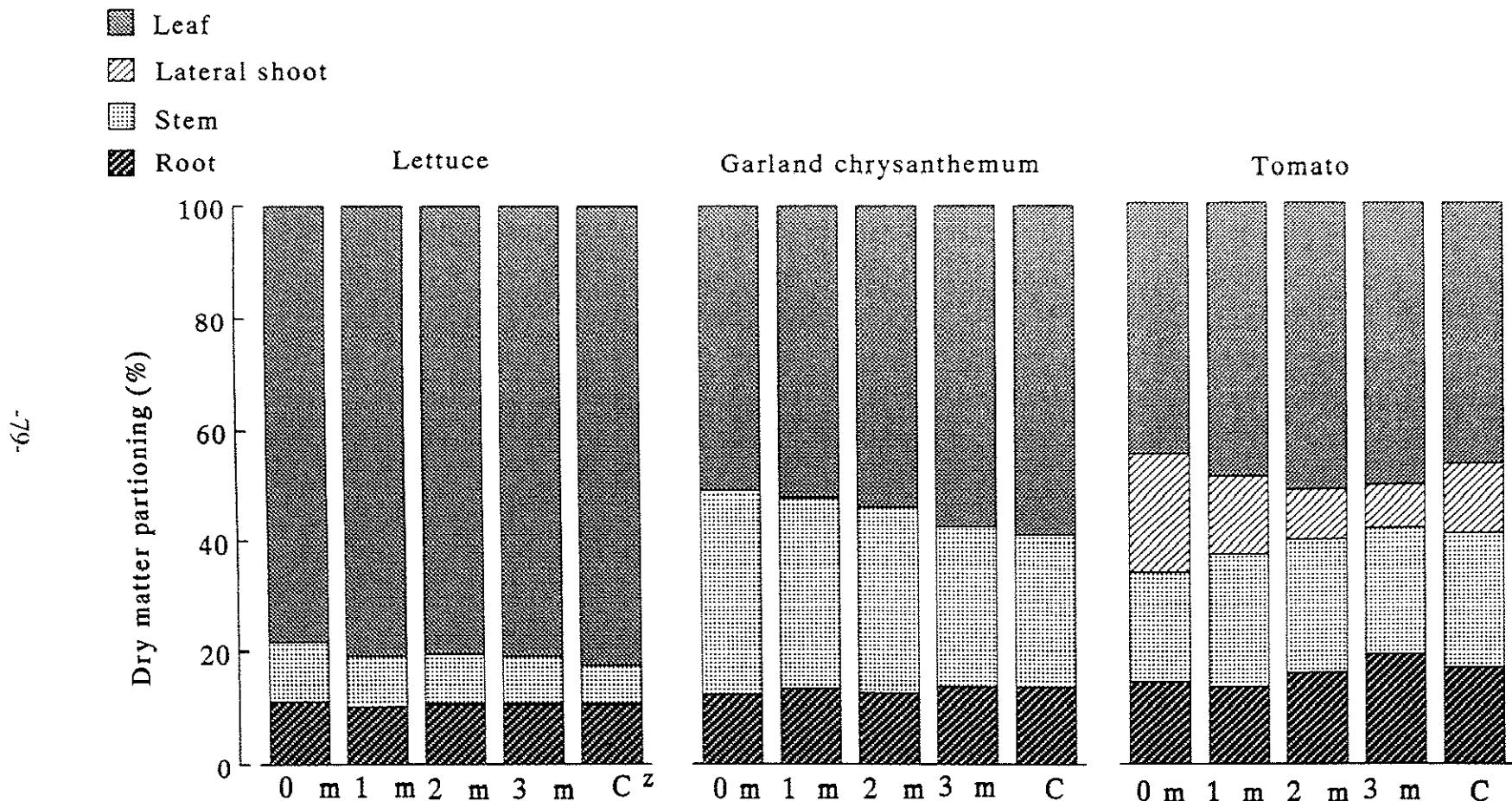


Fig. 3.2.5. Effects of supplemental lighting during mid-night to morning and light intensity on the dry matter partitioning of lettuce and garland chrysanthemum grown by NFT. (Exp.2)
z : See Fig. 3.2.4.

源直下で深夜補光中の光合成速度が補償点を超えていた。したがって、光源直下の強光による補光が、光合成を行う時間を延長し生育が促進されたと考えられる。一方、 $14.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度の光強度であった1m区でもある程度生育が促進された。1m区の場合、補光中の光合成速度は補償点以下であり、この場合、補光が光合成のためのエネルギーとして影響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。また、第3章第1節でも示したように、光源より1m離れた区についても、日中の光合成速度は無補光区よりも高い。本節の場合も、いずれの作物でも1m区の日中の光合成速度が対照区よりも増加する傾向を示しており、最大葉の同化能力が深夜補光によって増加している可能性が示された。したがって、比較的弱い光で補光した区でも生育促進された要因は、深夜補光による同化能力の増加が原因ではないかと考えられる。しかし、レタスならびにシュンギクの場合、2, 3m光源から離れるとほとんど深夜補光による生育促進効果がなくなることも示唆された。

レタスやチンゲンサイなどの葉菜類では、葉色が品質の重要な要因となっている。高等植物における葉緑素合成には光の存在が重要な働きをしており、生育時の光強度が大きいほど葉緑素の絶対量が増大する (Fitter and Hay, 1985)。SPAD値は、660nmの波長の光が葉を通過する際の吸光度を計測し、単位面積当たりのクロロフィル濃度に比例する数値である。本研究の場合、第3章第1節で示したように、日長延長を伴う比較的強い補光によっていずれの作物もSPAD値が増加し、葉が濃緑色となった。また、深夜補光下で葉が濃緑色になったのは、クロロフィルの増加と、葉の厚みの増加によるものであることが示唆された。本節の試験により、深夜補光による最大葉のSPAD値の増加は、深夜補光開始後8日間程度と非常に短期間で現れる一方、深夜補光中断後は対照区と同じレベルに戻ってしまう一時的な現象であることが示された。第3章第1節で前述したが、このSPAD値の変化は最大葉の観察におけるものであり、測定時点での最大葉が深夜補光の影響を受けることによってSPAD値が増加し、深夜補光停止後は、深夜補光の影響を受けていない新しい最大葉が展開することによりSPAD値が減少したように観察されたものと思われる。

光周期が開花などの形態形成に重要な要素となることは一般的に知られている。Gislerod et al. (1989) は、数種花卉類について、明期を延長させることによって草丈や葉数などの形態的特徴が変化することを報告している。また、Weller and Reid (1993)

は、インゲンマメの茎が長日下で伸長することには、フィトクロームが関与していることを示している。本実験では、明期延長を伴う深夜補光が葉菜類では抽だいを引き起こし、結果的に葉の形や草姿が変化することによって商品価値を下げることが予想された。葉については、いずれの作物ともその形状に大きな影響はなかった。しかし、レタスおよびシュンギクの場合、茎の重量増加の割合が大きくなってしまった。この現象は、深夜補光下のレタスやシュンギクの地上部が徒長的な外観となる原因の一つであると考えられる。一方、トマトの場合、深夜補光による地上部の重量増加が起ったものの、茎への乾物分配率は深夜補光下でも大きく変化せず、外観も徒長的ではなかった。日長に関して中性のトマトで徒長が起らなかったことから、レタスやシュンギクなど長日植物でみられる深夜補光下における徒長的外観は、抽だいによって引き起こされている可能性がある。Grimstad (1987) は、グロキシニアの生育ならびに形態が補光の光質によって変化することを報告した。補光光源の光質や補光強度、あるいは補光時間などについて検討することによって、補光がもたらす形態的な影響を最小限にすることができるかもしれない。

本試験の結果から、深夜電力利用型の補光は数種蔬菜の地上部生体重の増加を促進することが判明した。加えて、生育初期よりも生育後半に、また、光合成光補償点付近以上の光強度で深夜補光を行うと、生育促進効果があることも明らかとなった。この光強度を達成するためには、今回のように演色改善型220W高圧ナトリウムランプを栽培面から70cmの距離で設置した場合、約3m²当たりに1個ランプが必要な計算になる。しかし、深夜補光は収量の増加とともに葉色の改善など品質を高める効果もあることが示されていることから、深夜補光による年間の增收分が深夜補光を行うランニングコストを上回る可能性があるのであれば栽培現場に導入する価値は十分あるものと思われる。

3-3 深夜補光が異なる季節に栽培された数種水耕蔬菜の生育ならびに品質に及ぼす影響

補光とは、植物の光合成を増大させることを目的として行う照明のことである。通常、ヨーロッパ諸国と比べて比較的低緯度に位置する日本では補光栽培はあまり行われていない。しかし、筆者らは、料金の安い深夜電力を利用した補光と水耕栽培を組み合わせることによって生産性の高いシステムを組み立てることができるのでないかと考え、本論文第3章では深夜補光による数種蔬菜の生育促進を試みてきた。

森村ら（1982）は、コマツナのビタミンCの含有量が、生育時の光強度の増大に伴い増加するという報告をしており、斎藤（1985）も野菜の生育時の光環境とビタミンC含有量の間には密接な関係があることを示唆している。植物体中のビタミンC合成の初発物質は、グルコースであるとされており（Loewus, 1988），ビタミンC含有量と光合成との間には関係があると考えられる。第3章第1節では、数種蔬菜について深夜補光中の光合成速度が無補光の場合よりも高くなることを報告した。光合成速度の増加は、糖含有量の増加に結びつくと考えられ、その結果、ビタミンCの含有量が深夜補光によって増加する可能性がある。また、数種植物のアスコルビン酸分解過程で、シュウ酸が生成されることが知られており（Loewus, 1988），アスコルビン酸の代謝が深夜補光によって変化することに伴い、野菜のアクの成分であるシュウ酸含有量も変化することが考えられる。Tremblay et al. (1990) や福田ら（1993c）は、光質の違いにより蒸散速度や吸液速度が変化し、結果的に無機要素の吸収量が変化したことを報告している。今回の試験のように、深夜に補光することによって1日当たりの根からの吸液量が増大し、無機要素含有量も変化する可能性がある。そこで本節では、深夜補光とその光強度が、数種蔬菜の生育と葉菜類の品質として重要なアスコルビン酸含有量、シュウ酸含有量ならびに各種無機要素含有量に及ぼす影響について時期別に調査した。

3.3.1 材料および方法

試験は、春期(4～6月)と秋冬期(10月～12月)の2回行い、レタス‘岡山サラダナ’（タキイ種苗）シュンギク‘きわめ中葉’（同）、チンゲンサイ‘青帝’（サカタのタネ）を供試した。いずれの作物も水耕育苗し、温室内のNFT装置に定植した。栽培

中の温室内温度環境は、春期は天窓ならびに側窓の開閉による調節を行い、試験期間中の最高気温は35°C、最低気温は22°Cであった。冬季は、温度設定を18°Cとして温風暖房機による暖房を行い、試験期間中の最高気温27°C、最低気温13°Cであった。

深夜補光は、第2節と同じ反射型220W演色改善型高圧ナトリウムランプ（NH360 FD・L、東芝ライテック）で行い、第2節の実験（2）と同様に、光源からの距離を変えた試験区を設置し、別に補光時間帯に遮光カーテンで区切る対照区を設けた。深夜補光は、深夜電力料金の対照時間帯を含む23:00から7:00まで8時間行った。各処理区には、レタスとチンゲンサイは8個体ずつ、シュンギクは、10個体までに間引きされたウレタンブロック8個をそれぞれ定植した。各作物とも栽培は、対照区の作物が商品として収穫するのに十分な大きさとして、サラダナは地上部生体重70g程度に、シュンギクは、ウレタンブロック当たり150g、チンゲンサイは120g程度になるまで行った。このとき栽培面での月別1日当たりの平均光合成有効光量子束量を第3.3.1表に示す。

栽培終了後、植物体地上部を採取し生体重を計測した。また、同時にグリーンメータ（SPAD-502、ミノルタ）で相対葉緑素濃度（SPAD値）を計測した。その後、地上部から5gのサンプルを採取し、5%塩酸とともに磨碎・遠心分離し抽出液を得た（福田ら、1999）。抽出液については、ショウ酸、NO₃、P、K、Ca、Mgの各イオン濃度をイオンクロマトグラフィー（IC200、（株）横河ヒューレットパッカード）と原子吸光光度計（AA-250、日立製作所）により分析した。また、地上部から10gのサンプルを別途採取し、5%メタリン酸で抽出後、アスコルビン酸含有量をヒドラジン法で定量した。

3.3.2 結 果

いずれの作物についても、光源からの距離が近いほど地上部生体重は大きくなる傾向が認められた（第3.3.1図）。レタスの場合、春作では50%、秋作では60%程度、光源直下において対照区よりも地上部生体重が増加した。しかし、2ないし3m区では深夜補光の効果は認められなかった。シュンギクの場合、春作では光源直下の地上部生体重増加が対照区の30%程度にとどまった一方、秋作では、光源直下で対照区の2倍程度の生体重となり、2、3m区でも深夜補光による生育促進効果があった。チンゲンサイの場合、春作では光源直下で対照区よりも50%以上生体重が増加した。また、秋作では、光源直下では対照区の2倍以上の生体重となり、1m区でも対照区の2倍近い地上部生体重が得られた。

Table 3.3.1 Averaged PPF received per day during the 2 experiments.

Month	Natural (Cont.) ^z (mol · m ⁻² · day ⁻¹)	0m ^y (mol · m ⁻² · day ⁻¹)	1m (mol · m ⁻² · day ⁻¹)	2m (mol · m ⁻² · day ⁻¹)	3m (mol · m ⁻² · day ⁻¹)
<u>Exp. 1</u>					
Apr	19.45	22.33	19.87	19.54	19.49
May	22.00	24.88	22.42	22.09	22.03
Jun	17.04	19.92	17.46	17.13	17.07
<u>Exp. 2</u>					
Oct	11.57	14.45	11.99	11.66	11.61
Nov	8.53	11.41	8.96	8.62	8.57
Dec	8.04	10.92	8.46	8.13	8.08

z : Natural shows the PPF received from sun.

y : 0m, 1m, 2m and 3m show the total received PPF, natural and supplemental light.

0m : just under the supplemental lighting lamp.

1-3m: distance (m) apart horizontally from the lamp.

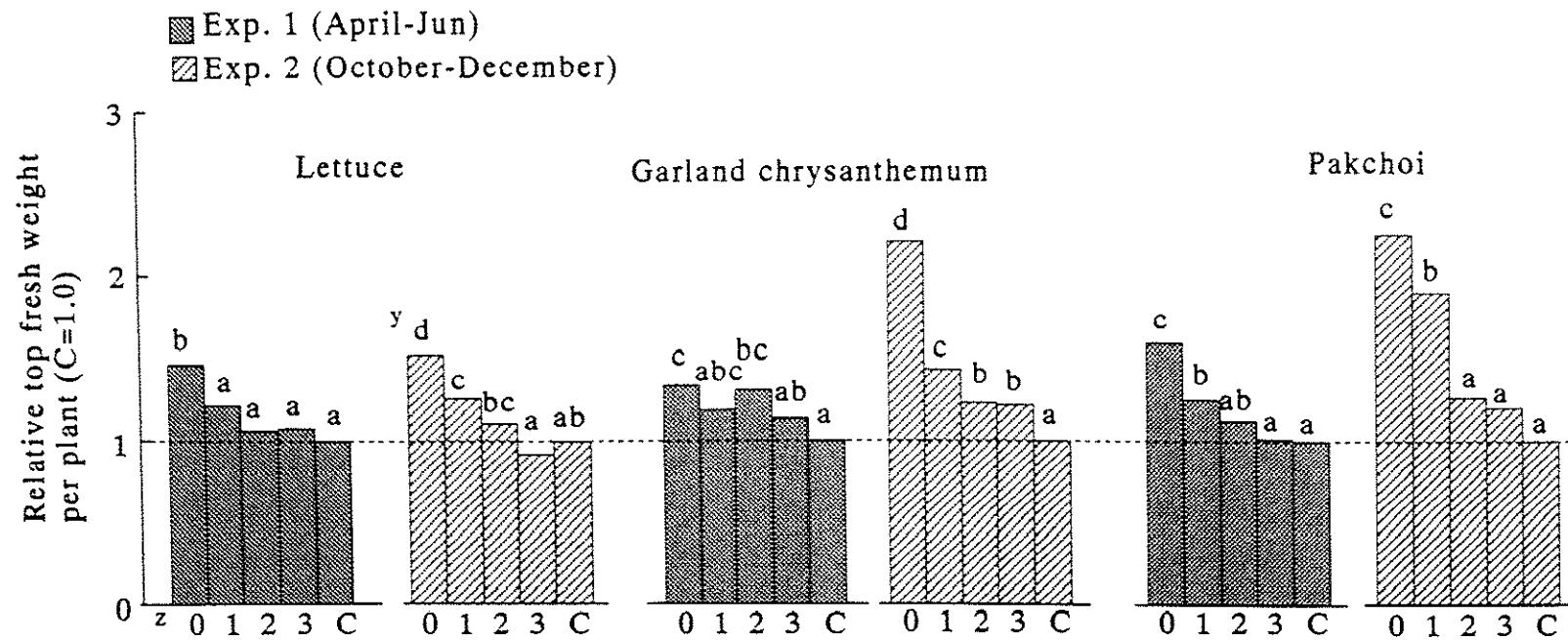


Fig. 3.3.1. Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on top fresh weight of lettuce, garland chrysanthemum and pakchoi grown by NFT.

z : 0 to 3 and C mean the horizontal distance (m) from lamps, and Control, respectively.

y : Values followed by the same letter within same test and crop are not significantly different at 5% level, according to Duncan's multiple range test.

第3.3.2表に示したように、いずれの作物についても光源直下でSPAD値が高くなる傾向があった。また、シュンギクは、相対葉緑素濃度に対する深夜補光の効果が最も大きく、春作で20%秋作では統計的に有意ではなかったものの、28%程度相対葉緑素濃度が高くなった。

アスコルビン酸の含有量は、作物ならびに栽培時期毎に深夜補光による影響が異なった（第3.3.2図）。レタスの場合、春作では還元型、酸化型ともに補光による影響は認められなかった。しかし、秋作では還元型アスコルビン酸含有量が補光強度に比例して多くなり、光源直下では38 mg/100g fwとなった。反対に、酸化型アスコルビン酸含有量は光源に近い処理区で減少した。また、総アスコルビン酸含有量は、光源直下で対照区よりも増加した。春作のシュンギクでは、光源直下における還元型アスコルビン酸含有量が著しく低下した。しかし、秋作では対照区と比較して総アスコルビン酸含有量が3m区で26%減少したものの、光源直下ならびに1m区では対照区と同程度の還元型・酸化型アスコルビン酸含有量となつた。チングンサイの場合、春作の2m区で酸化型アスコルビン酸含有量が、また、秋作では同区で還元型アスコルビン酸含有量が対照区より若干低下したがその差は統計的に有意ではなかった。

レタスでは、光源直下と対照区での間で、ショウ酸含有量について差がなかった。しかし、春作、秋作ともに、光源直下のシュンギクは、対照区よりも25～30%程度ショウ酸含有量が増加した（第3.3.3表）。また、チングンサイでも、統計的に有意ではなかったものの、深夜補光区でショウ酸含有量が増加する傾向が示された。

いずれの作物でも、秋作の場合、光源直下でCa含有量が増加する傾向が示された。しかし、その他の無機イオンについては、深夜補光による効果は明らかではなかった。

3.3.3 考 察

作物によってその程度は異なるものの、全体として、深夜補光による生育促進効果は、秋～冬作で大きくなる傾向が認められた。このことは、日射量が少なく、明期が短い時期に深夜補光の生育促進効果が高まることを示している。岡部（1988）は、本試験と同様の深夜補光実験を行い、その中で、日中の日射量を制限した場合の深夜補光の生育促進効果が大きいことを示し、また、Grimstad（1987）は、光透過率の低いアクリルハウスでの補光の効果が大きいことを報告しており、いずれの結果も、日射量

Table 3.3.2. Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on relative chlorophyll concentration (SPAD value)^w of lettuce, garland chrysanthemum and pakchoi grown by NFT.

	Exp. 1 ^y				Exp. 2			
	Lettuce	G. chrysanthemum	Pakchoi		Lettuce	G. chrysanthemum	Pakchoi	
0m ^z	29.66	a ^x	38.60	b	42.28	b	34.42	c
1m	28.46	a	34.82	a	41.72	ab	29.46	bc
2m	28.58	a	30.50	a	38.92	a	28.78	a
3m	27.80	a	32.54	a	38.90	a	29.86	ab
C	28.60	a	31.84	a	39.44	a	28.36	ab

z : See Fig. 3.3.1.

y : See Table 3.3.1

x : See Fig. 3.3.1.

w : Values were measured by Minolta SPAD-502.

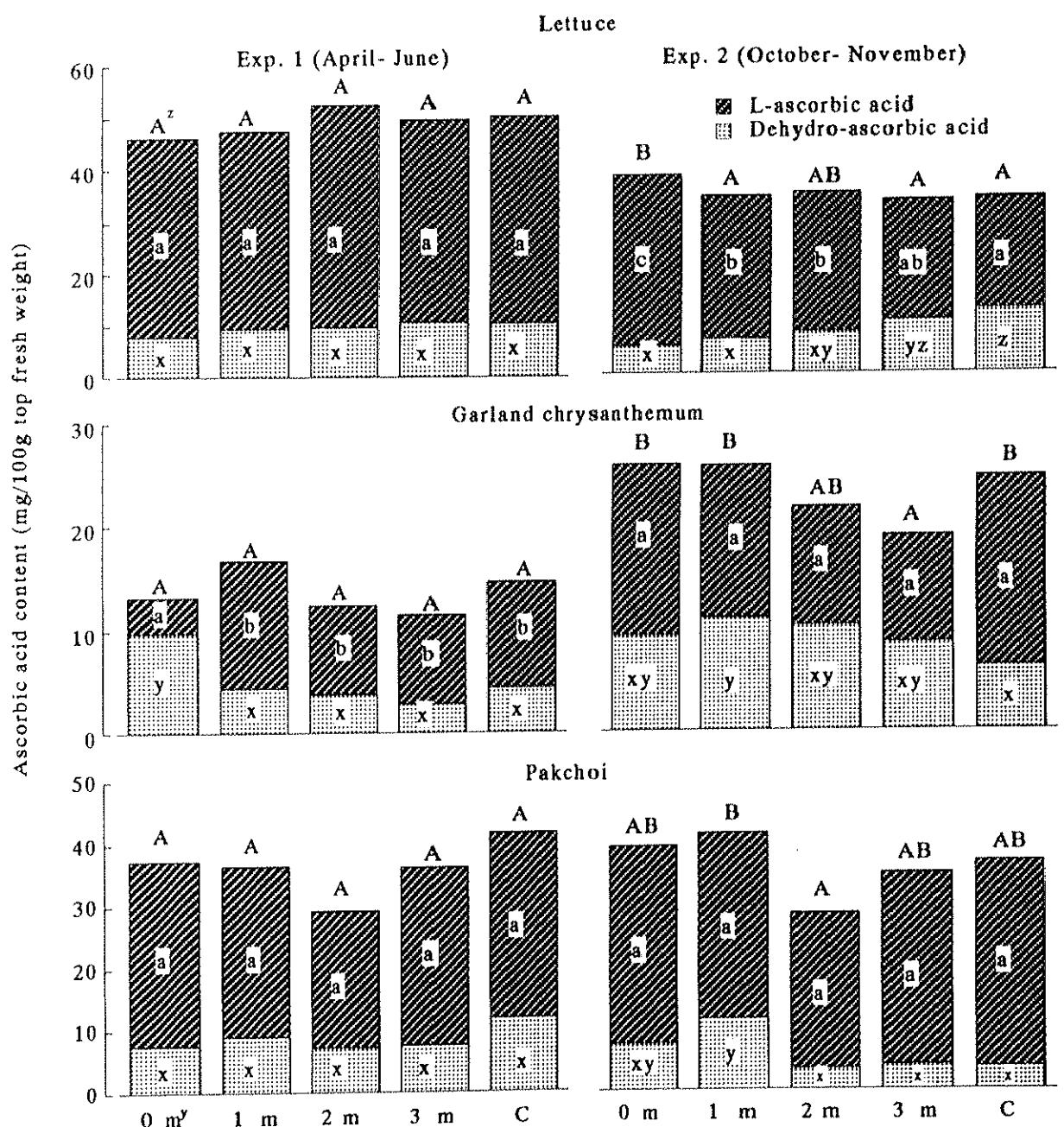


Fig. 3.3.2. Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on ascorbic acid content of lettuce, garland chrysanthemum and pakchoi grown by NFT.

z : Values followed by the same letter within same test and crop are not significantly different at 5% level, according to Duncan's multiple range test.

A-B: Total ascorbic acid, a-c:L-ascorbic acid, x-z:Dehydro-ascorbic acid

y : See Fig. 3.3.1.

Table 3.3.3. Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on the oxalic acid, NO₃, PO₄, K, Ca and Mg content (mg /100 g top fresh weight) of lettuce and garland chrysanthemum grown by NFT.

		Oxalic acid	NO ₃	PO ₄	K	Ca	Mg						
Lettuce													
y Exp. 1	z0m	18.4	a ^x	356	a	67.5	a	360	a	35.8	a	16.0	a
	C	19.2	a	384	a	74.0	a	394	a	43.8	b	21.0	b
Exp. 2	0m	24.0	a	370	a	58.0	a	448	a	61.4	a	19.2	a
	C	20.2	a	358	a	72.0	a	414	a	56.4	a	24.0	b
Garland chrysanthemum													
Exp. 1	0m	63.8	a	530	a	76.0	b	444	a	33.4	a	11.8	a
	C	49.2	a	502	a	58.0	a	444	a	34.0	a	12.4	a
Exp. 2	0m	96.0	b	464	a	30.0	a	564	a	79.6	b	16.0	b
	C	78.0	a	432	a	34.0	a	584	a	61.6	a	12.8	a
Pakchoi													
Exp. 1	0m	252.0	a	520	a	70.0	a	296	a	93.0	a	24.0	a
	C	236.0	a	522	a	60.0	a	364	b	84.4	a	21.6	a
Exp. 2	0m	280.0	a	552	a	68.0	a	318	a	103.0	b	28.0	a
	C	274.0	a	474	a	60.0	a	322	a	89.3	a	30.4	a

z : See Fig. 3.3.1.

y : See Table 3.3.1.

x : See Table 3.3.1.

が少ない場合に補光の効果が大きいことを示している。本実験において、春～夏作の場合、自然日射に対する深夜補光による受光量増加割合は、実験期間平均で15%程度であった（第3.3.1表）。一方、秋～冬作の場合、補光によって受光量が対照区よりも30%程度増加し、春～夏作の約2倍となった。したがって、総受光量の中で深夜補光による光量が占める割合の違いが、春～夏作よりも秋～冬作で深夜補光の効果が大きかったことに結びついたと考えられる。一方、1m区の場合、秋～冬作でも深夜補光による受光量増加割合は4%前後でありエネルギーとしての深夜補光の寄与率は低かった。しかし、作物によっては、特に秋～冬作において1m区でも生育が促進された。データには示さなかったが、サラダナ、ならびにチンゲンサイで、深夜補光は、特に1mの葉長、葉幅を対照区よりも10～20%増加させた。第3章第2節でも示したように、直接光合成に寄与しないエネルギーレベルの補光でも、葉の伸長・展開に対する形態的な効果によって生育促進される可能性もあると考えられる。

SPAD値は、第3章第1、2節と同様に深夜補光により増加した。加えて、深夜補光の光強度が高いほどSPAD値は増大した。また、春作よりも秋作の方が、深夜補光によるSPAD値の増加が大きかった。Fitter and Hay (1985) は、植物は受光量の増大とともにクロロフィル量を増大させるとした。また、第1節で示したように、深夜補光の葉色に対する影響は、葉の厚みという形でも増大したが、葉の厚みは深夜補光強度に比例していたという結果からも、深夜補光による光エネルギーの追加という点で日射量の少ない秋作の方がSPAD値に対する効果が大きかったと考えられる。

還元型アスコルビン酸であるビタミンCは、グルコースを初発物質として、さまざまな中間代謝物を経て植物体内で合成される (Loewus, 1988; Loewus et al., 1990; Saito et al., 1990)。一般的に、葉の受光量の増大にともなって光合成量が増えて葉の糖含有量が増加すると考えられる。本章第1、2節でも述べたように、深夜補光中の光源直下であれば光合成速度は対照区よりも高く補償点を上回っている。コマツナの還元型アスコルビン酸含有量が光強度の増大に伴い増加することが報告されている（森村ら, 1982）ことから、著者は、深夜補光による受光量の増加が葉のグルコースなどの糖含有量を増大させ、初発物質が増えた結果、いずれの作物についてもビタミンC含有量が増加するのではないかと予想した。しかし、ビタミンC含有量に及ぼす深夜補光の影響は、栽培時期ならびに作物によって異なった。春作の場合、どの作物についてもビタミンCである還元型アスコルビン酸含有量が、深夜補光区で増加することはなかった。

森村ら（1982）は、コマツナの栽培時の光量増加に伴う還元型アスコルビン酸含有量増加には飽和点があることを報告している。本試験において、春作でのレタスおよびチンゲンサイの還元型アスコルビン酸含有量が深夜補光によって増加しなかったのは、この時の太陽と深夜補光光源から受ける一日当たり総受光量が、これらの作物の還元型アスコルビン酸含有量飽和点を越えていた可能性を示唆している。また、春作の光源直下のシュンギクは、抽だいに近い状態になっており、植物体の状態が良くなかったことが、還元型アスコルビン酸含有量の低下につながったものと推察される。一方、秋作のレタスの場合、深夜補光の光強度の増加にともなって還元型アスコルビン酸含有量が増加した。秋作時には、太陽からの受光量がレタスの還元型アスコルビン酸含有量飽和点を下回っており、深夜補光による受光量の増加がレタスの還元型アスコルビン酸含有量増加に結びついたと考えられる。また、チンゲンサイならびにシュンギクについては、秋作での太陽からの受光量も春作の場合と同様に還元型アスコルビン酸含有量の飽和点を越えていた可能性が推察される。

植物体内におけるアスコルビン酸分解過程で、ショウ酸が生成されることが知られている（Loewus, 1988）。シュンギクの場合、深夜補光によってアスコルビン酸含有量は増加しなかった一方で、葉中のショウ酸含有量が増加した。この事実は、深夜補光によるシュンギクのショウ酸含有量増加について2つの可能性を示唆している。1つは深夜補光によってアスコルビン酸合成が増加するものの、その増加分が分解された可能性である。もう一つは、グルコースからアスコルビン酸への合成過程の中間物質であるグルコソンからショウ酸へのバイパス回路（Saito and Loewus, 1992）を深夜補光が促進し、深夜補光による光合成が生み出したグルコースを消費した可能性である。深夜補光下でのシュンギクのショウ酸含有量増加は、いずれの理由によるものかは不明である。しかし、程度は小さいもののチンゲンサイでも同様の傾向が示されており、また、データには示さなかったが次章でも見られるように、ホウレンソウの場合では、深夜補光下でのアスコルビン酸の含有量低下と同時に、ショウ酸含有量増加が確認されていることから、作物によっては深夜補光栽培が品質を低下させる場合があることが判明した。

秋作で、深夜補光によりCa含有量が増加する傾向が示された。Caイオンは、導管内を蒸散流とともに移動することから、日射の少ない時期では深夜補光によって深夜の蒸散量の程度が大きく、結果的にCaイオン吸収量が増加したことが考えられる。

以上のように、レタスでは、日射量が少ない時期には収量増加に対する深夜補光の効果は大きく、ビタミンC含有量の増大といった効果も期待できる。一方、シュンギクならびにチンゲンサイの場合、日射量の少ない時期に、ある程度強い光で深夜補光すれば、ビタミンC含有量を低下させることなく生育促進させることが可能であった。しかし、シュンギクの場合、生育が促進される一方でショウ酸イオン含有量が深夜補光によって増加することが示されており、また、データには示さなかったが、ホウレンソウでは補光下で抽だいが引き起こされるなど品質低下を招く場合がある。このような作物で深夜補光栽培を行う場合は、ショウ酸含有量が低い品種や光感受性の低い品種を選ぶ必要があろう。

以上、第3章をまとめると以下のような新しい知見が得られた。

- 1) 深夜補光の光源としては、MH、HPSのいずれの光源もほぼ同程度の生育促進効果が得られたが、BLでは生育不良であった。BLの場合、青色波長域の光がEONの光質の影響として作用し、葉面積が他の2光源よりも劣ったことが低い生育促進につながったと考えられる。青色光のEON効果については今まで報告がない。
- 2) 深夜補光による生育促進を行う場合、初期の育苗段階よりもある程度本葉が展開した段階か、あるいは栽培後期に補光を行った方が効果が大きい。
- 3) 深夜補光により葉の生育は促進され、葉面積や単位葉面積当たりの光合成速度は向上する。その一方で、深夜補光は葉の老化を促進し、葉が最大に展開した後は急速に光合成能力を失う。しかし、深夜補光によって促進される新しい葉の展開・伸長が、老化し光合成能力を失った葉よりも多く、全体としては生育促進される。

一連の試験で示したように、季節によって異なるものの、深夜補光は葉菜類の生育を著しく増加させ、作物によっては品質の向上につながる変化をもたらした。施設費やランニングコストなどの面で問題はあるが、その効果の大きさから考えて、深夜電力を利用した補光栽培は、新しい栽培技術として十分検討に値するものと思われる。

まとめ

筆者は、料金の安い深夜電力による補光が数種水耕そ菜の生育に及ぼす影響について、補光を開始する生育段階、補光の光質ならびに光強度を検討した。

供試材料は、レタス、チンゲンサイ、ツケナ、トマト、シュンギクであった。水耕育苗後温室内のNFT水耕装置に定植し、深夜補光を開始した。深夜補光は、深夜電力料金の時間帯である23:00から7:00までの8時間行った。実験は、高圧ナトリウムランプ(HPS)による深夜補光で、深夜補光開始時期ならびに深夜補光の光強度が数種そ菜の生育に及ぼす影響について評価した。また、深夜補光光源の光質が数種そ菜の生育に及ぼす影響について高圧ナトリウムランプ(HPS)、メタルハライドランプ(MH)ならびに青色光ランプ(BL)を比較した。

1) 地上部生体重は深夜補光の光質によって異なった。レタスの地上部生体重は対照区では55gであったのに対して、MHとHPSによる深夜補光を行った場合、地上部生体重がそれぞれ80、74gとなり、40~45%対照区よりも増加した。一方、BLでは、地上部生体重が対照区よりも増加する傾向を示したもののその差は少なかった。また、補光中の光合成速度はいずれの光源下でも同程度であったが、BLでは葉の展開伸長が他の光源と比べて遅く、このことがBLによる補光の生育促進効果を減少させたものと考えられる。

2) レタスならびにシュンギクについては、24日間の全試験期間深夜補光を行った場合、地上部生体重が対照区の2~3倍程度となった。チンゲンサイも他の2作物と同様に、全試験期間深夜補光を行った処理区での生育が良好であったが、処理開始後8日目あるいは16日目から8日間行った深夜補光も生育促進に効果的であり、対照区の2倍程度の地上部生体重となった。

3) レタス、シュンギクならびにトマトともに、深夜補光の光強度を高めると生育が促進された。しかしその一方で、レタスおよびシュンギクでは茎の伸長も促進された。また、日射量の少ない秋-冬季の方が、春-夏季の場合よりも深夜補光の生育促進効果が大きかった。

4) 深夜補光中の光合成速度は、深夜補光の光強度に比例して大きくなつた。また、作物によって傾向は異なるものの、日中の光合成速度も深夜補光区では高まることが示された。

5) 補光開始後の初期中での純光合成速度は、MHならびにHPSのいずれの光源で

も、レタスの場合、処理開始後10日目までは対照区よりも深夜補光区が高い光合成速度を示した。しかし、15日目には気孔コンダクタンスが急激に減少し、純光合成速度も対照区よりも深夜補光区で低くなつた。一方、チンゲンサイでは、明期中の光合成速度が対照区と上回ることはなく、15日目にはレタスと同様に急激に純光合成速度が減少した。

6) レタスならびにチンゲンサイの最大葉の単位生体重当たりのクロロフィル含有量は、補光によって増加する傾向を示したものその程度は少なかつた。一方、単位葉面積当たりのクロロフィル含有量は、レタスならびにチンゲンサイとともに、単位生体重当たりのクロロフィル含有量の場合と比べて補光による増加の程度が大きかつた。

7) 春作の場合、どの作物についても還元型アスコルビン酸含有量が、深夜補光区で増加することはなかつた。一方、秋作のレタスの場合、深夜補光の光強度の増加にともなつて還元型アスコルビン酸含有量が増加した。しかし、シュンギクならびにチンゲンサイについては、秋作でも還元型アスコルビン酸含有量増加は観察されなかつた。

一連の試験で示したように、季節によって異なるものの、光源としてMHあるいはHPSを使用すれば、深夜補光は葉菜類の生育を著しく増加させ、作物によっては品質の向上につながる変化をもたらした。補光による生育促進は、深夜補光中の光合成と、深夜補光によってもたらされるクロロフィル含有量増加に伴う光合能力の増加によるものであることが示された。人工光源を利用した深夜補光栽培は、施設費やランニングコストなどの面で問題はあるが、その効果の大きさから考えて、新しい栽培技術として十分検討に値するものと思われる。