

第4章 人工光源によるホウレンソウの深夜補光栽培の可能性

第3章では、人工光源を使った深夜補光による葉菜類の生育促進の可能性について検討した。その結果、レタス、チンゲンサイなどの葉菜類の場合、強光で深夜補光することにより、対照区よりも40～100%程度地上部生体重が増加することが確認された。これらの作物について深夜補光は、補光中に行われる直接的な光合成と葉の伸長促進に伴う光合成能力増大により数種蔬菜の生育を促進しているものと考えられた。

深夜補光は、日長の延長を伴うことから、長日効果が作物の生育に影響することが予想される。Dorais et al. (1995) は、トマトは日長延長に適応できずクロロフィルが減少し、過剰な光によって引き起こされる光合成の光抑制 (Barenyi and Krause, 1985; Powles, 1984) によって単位葉面積当たりの光合成速度すなわち光合成能力が低下することを報告した。第3章の結果、作物によっては深夜補光を受け続けた葉の同化能力が低下することを報告したが、深夜補光下では葉の展開伸長が早く、老化し同化能力が低下した葉を十分補うことから生育が低下することはなく、深夜補光による品質低下などの問題はなかった。しかし、その他の問題として、深夜補光に伴う長日は抽だいを引き起こすことが予想される。第3章で試験したレタス、チンゲンサイ、シュンギクについては、日長延長に伴う葉の伸長促進や若干の茎の伸長は起こったものの抽だいすることはなかった。しかし、ホウレンソウについて予備試験を行ったところ、収穫するのに十分な大きさになる前に抽だいしてしまった。

第3章第3節において、深夜補光を行った数種蔬菜の品質に関係する成分の定量を行ったところ、レタス、シュンギク、チンゲンサイでは特に問題となる成分の増大は観察されなかった。しかし、データとして示さなかったが、ホウレンソウは、深夜補光によって葉中 NO_3^- 濃度が増大することが判明しており、第3章で示したような深夜補光による生育促進を検討する際問題になることが予想される。

このように、ホウレンソウの深夜補光栽培を検討する際、抽だいと葉中 NO_3^- 集積の問題を解決する必要がある。本章では、抽だいに関してホウレンソウ品種、光源の光質、光強度といった要因との関連について、また、葉中 NO_3^- 集積については、収穫間際の培養液中硝酸態窒素除去と補光を組み合わせた技術を検討した。

4-1 深夜補光がホウレンソウの生育ならびに抽だいに及ぼす影響

通常のホウレンソウ栽培の場合、収穫可能な大きさまで生育させ、抽だいするまでに収穫を終える。しかし、ホウレンソウについて生育促進を目的とした深夜補光栽培を行う場合、品種によっては長日により抽だいが促進されることが予想される。

関山ら（1987）は、高圧ナトリウムランプとメタルハライドランプを組み合わせた、 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ という強光条件でホウレンソウの深夜補光栽培を行ったところ、収穫段階で抽だいすることはなかったと報告した。また、成松・法月（1992；1993）は、ホウレンソウについて補光を行って日長延長した場合、光源直下の $120 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の光強度では抽だいが抑制されることを示し、ある程度強光強度で日長延長をさせた場合は、抽だいが遅延することを示唆している。しかし、光源の光質についてその抽だいへの影響を検討した事例はない。光質がシロイヌナズナの開花までの日数に影響し、赤色光／遠赤色光比（R/Fr）が1.0の条件では、R/Frが5.8の場合の約半分の日数で開花に至ることが報告された（Baghali, 1993）。また、長日植物であるグロキシニアについても光質が開花時期の重要な要素となっており、遠赤色光や赤外線の比率が高いメタルハライドランプでは開花が促進され、赤色光の比が高い高圧ナトリウムランプや、低圧ナトリウムランプでは開花が遅くなることが示された（Grimstad, 1987）。このような結果から、深夜補光によるホウレンソウの生育促進を行う場合にも、人工光源の光質と光強度の調節によって抽だいを遅延させることは可能ではないかと考えられる。また、高尾（1993）は、ホウレンソウの抽だいについて品種間の比較を行い、光感受性の程度から品種を5段階に分類した。深夜補光する場合、光質、光強度の要因とともに、遺伝的要因も大きいため、品種の選定によって日長延長の影響を最小限に抑制できる可能性がある。

本研究では、ホウレンソウの深夜補光栽培について、光強度、光質、品種という要素から、抽だいを抑制しつつ生育促進を図る可能性を検討する。

4.1.1 材料及び方法

実験には、高尾（1996）の分類で、最も日長感応性の高いI群の品種の内‘オーライ’（タキイ種苗）と‘トライ’（同）を、また、I群より日長感応性の低いII群の品種‘アクティブ’（サカタのタネ）と‘サマーライダー’（タキイ種苗）を供試し

た。各品種の種子は、培地としてロックウール粒状綿を詰めた200穴のプラグトレイに温室で播種した。プラグトレイの1穴につき3粒播種し、発芽後生育の良い2株を残した。育苗期間中は、1/2単位の園試処方培養液を与えた。本葉が4枚展開して根鉢を十分形成した株を、温室内にあるNFT装置に定植した。定植後は、EC 2.4 dS/m, pH 6.0, 昼夜ともに液温20°Cの園試処方培養液で栽培した。栽培中の温室内温度環境は、天窓ならびに側窓の開閉と温風暖房機によって調節し、最高気温と最低気温はそれぞれ、実験1では試験期間中の最高気温26°C, 最低気温15°C, 実験2では最高気温23°C, 最低気温12°C, 実験3では最高気温32°C, 最低気温24°Cであった。

実験1：深夜補光の光質と光強度がホウレンソウ4品種の生育に及ぼす影響

ホウレンソウ4品種を11月5日に定植し、30日間水耕した。定植直後から深夜補光を開始した。深夜補光の光源は、第3章で使用した陽光ランプすなわちメタルハライドランプ（文中および図表中記号：MH）と演色改善型高圧ナトリウムランプ（同：HPS）とした。MHは、第2章で示したようにR/Fr比が1.53と比較的低く、HPSは一般的に施設栽培で補光に使用される光源であるがR/Fr比が5.26と高い。緒言でも示したように、植物の開花と光源のR/Fr比は関係があることが指摘されていることから（Bagnall, 1993; Grimstad, 1987），この2種類の光源について抽だいへの影響を比較した。

深夜補光を行う時間帯は深夜11:00～翌朝7:00とした。また、補光強度の影響についても同時に観察するため、各光源ごとに第3章と同様に光源直下ならびに光源直下からの水平距離が1m, 2mの処理区を、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。深夜補光時の光強度は、光源直下、1m区、2m区でそれぞれ76, 4.8, 0.7 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ （光合成有効光量子束（PPF））となった。

深夜補光下での栽培は30日間行った。いずれの処理区とも、各品種供試株数を8個体とし、栽培終了後、地上部生体重、花茎長、葉数、最大葉長、葉柄長、葉幅について調査した。

実験2：深夜補光の光質と光強度がホウレンソウ4品種の抽だいと葉の伸長に及ぼす影響

2月23日に、実験1と同様にホウレンソウ4品種を温室内のNFT水耕装置に定植した。定植直後からMHまたはHPSによる深夜補光を開始し、実験1と全く同じ条件で深夜補光を行った。

処理開始後、各品種とも観察を続け、花茎の伸長を目視で確認できたときを抽だい

始まりとしその時の最大葉身長、葉幅、葉柄長を計測し、処理開始後32日目に植物体地上部を採取し、地上部生体重、葉数、側枝生体重、茎長、茎生体重を調査した。

4月5日に、品種‘オーライ’と‘アクティブ’の2品種を温室内のNFT水耕装置に定植した。実験1においてMHとHPSで抽だい長に差が観察されたことから、本実験では、この2つの光源に加えて新たに赤色LED(LED-204、東京理科)による深夜補光区を設け、ほぼ純粋な光に近い赤色光が抽だいに及ぼす影響についても評価した。深夜補光は、MHとHPSについては光源直下と1m区、赤色LEDは強光区と弱光区を設けた。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。深夜補光時の光強度は、いずれの光源でも、光源直下ならびに強光区では植物体頂上付近で $60 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 前後、1m区および弱光区では $5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 前後の光強度となつた。

処理開始後、各処理区の抽だいまで日数を観察した。また、実験処理のための処理区に空きがあったMHについては、別に2m区を設けてホウレンソウ4品種を定植し、本葉第7葉の葉身長、葉幅、葉柄長を5日毎に計測し、相対伸長率を求めた。

実験3：深夜補光がホウレンソウの花芽分化と内生オーキシン濃度に及ぼす影響

6月25日に品種‘サマーライダー’をNFT水耕装置に定植し20日間水耕した。定植直後からHPSによる深夜補光を実験1と同様に開始し、光源直下ならびに光源直下からの水平距離が1mの処理区を、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。深夜補光時の光強度は実験1と同程度であった。

深夜補光開始後、4日毎に各処理区の地上部を採取した。採取した地上部については、地上部生体重を計測後、生長点を実体顕微鏡下で観察し、江口・市川(1940)の花芽分化標徴を参考にして、分化初期(前期；1、後期；2)、花房分化期(前期；3、後期；4)、花房形成期(前期；5、後期；6)、抽だい期(花房直径1~3mm；7、花房直径3~6mm；8)の8段階に花芽分化の程度を分類した(Fig. 4.1.1)。また、地上部はディープフリーザーにおいて-80°Cで凍結保存し、内生オーキシン濃度を測定した。

オーキシン分析は、Kusaba et al. (1998) の方法を参考に以下の通り行った。凍結した地上部は、全量を4倍量の80%アセトン(10mg/l BHT)とともに乳鉢で磨碎抽出した。ある程度磨碎した後に、内部標準物質として¹³C₆-IAAを40ng加えてさらに磨碎し、残さをろ過により除去した。抽出液は、エバポレータによって水相だけを取り出し、0.1Mリン酸バッファーを加える。水溶液は、6N H₂SO₄によってpH2.5に調節し、酢酸エ

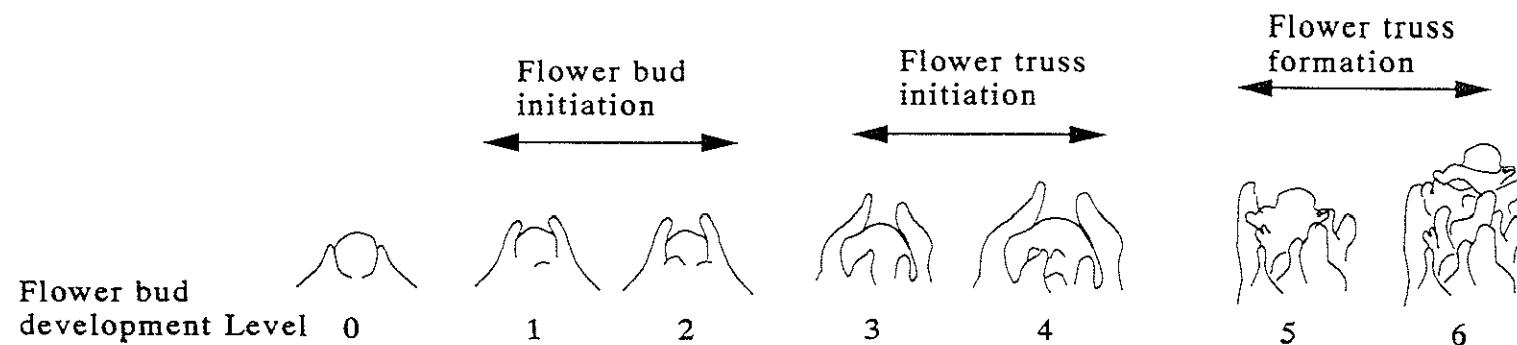


Fig. 4.1.1. Different development stages of spinach flower bud.

チルで3回分配する。酢酸エチル相を合わせて飽和NaHCO₃で3回分配した。水相を合わせて6N H₂SO₄によってpH2.5に調節し、酢酸エチルで3回分配した。酢酸エチル相を合わせて無水硫酸ナトリウムで脱水した後エバポレーターによって乾固した。その後、80%メタノールで溶出し、Sep-pak C18カートリッジで精製し抽出液とした。抽出液は、PEGASIL ODS (0.6φ × 150mm) をカラムとする高速液体クロマトグラフィーにおいて5%アセトニトリルから80%アセトニトリルへと勾配をかけ精製した。精製したサンプルは、ジアゾメタンによってメチル化後、TMS化しGC-MS (JMS DX303, Jeol) で分析した。ガスクロ部の条件は、キャリアガスをヘリウムとしカラムはOV-1 (0.53φ × 15m)、カラム温度は120°C、昇温は毎分16°C、インジェクタ温度は230°C、セパレータ温度は250°C、チャンバー温度は200°Cとした。

4.1.2 結 果

実験1. 4品種のホウレンソウは、いずれも深夜補光によって生育促進された（第4.1.2図、第4.1.1表）。光源直下では、平均で対照区の5倍程度の地上部生体重となり著しく生育が促進された。品種別では、対照区に対して、「オーライ」は0m区では6.7倍、1m、2m区では2倍、「トライ」は0m区では5.6倍、1m、2m区では2~3倍、「アクティブ」は0m区では3倍、1m、2m区では2倍、「サマーライダー」は4.4倍、1m、2m区では2~3倍となった（第4.1.2図）。また、地上部生体重に光源による差は観察されなかった（第4.1.1表）。深夜補光を行った処理区では、いずれの品種も抽だいしており（第4.1.2図）花茎の伸長が観察された。しかし、花茎の伸長程度は、品種ならびに光源、光強度によって異なった。「オーライ」、「トライ」ともMHによる深夜補光を行った場合は、光源に近づくほど花茎が長くなる傾向を示した。一方、HPSによる深夜補光では、MHよりも花茎が短く抑制された。特に、0m区での抑制の程度が大きくHPSの花茎長はMHの約半分となった。「アクティブ」ならびに「サマーライダー」においても、HPSの花茎長はMHよりも短くなる傾向を示したものとの差は小さかった。また、MHもHPSも同様に、深夜補光区の中では、0m区で最も花茎が短くなった。

葉数は、0m区は1m、2m区よりも15%多く、対照区の2倍程度であった（第4.1.1表）。葉の伸長については、葉柄長で深夜補光の効果が最も大きく、0m区では対照区よりも87%長かった。1m、2m区でも葉柄長に対する深夜補光の効果が確認され、それぞれ56、37%対照区よりも長くなった。一方、葉身長と葉幅は、いずれも深夜補光を

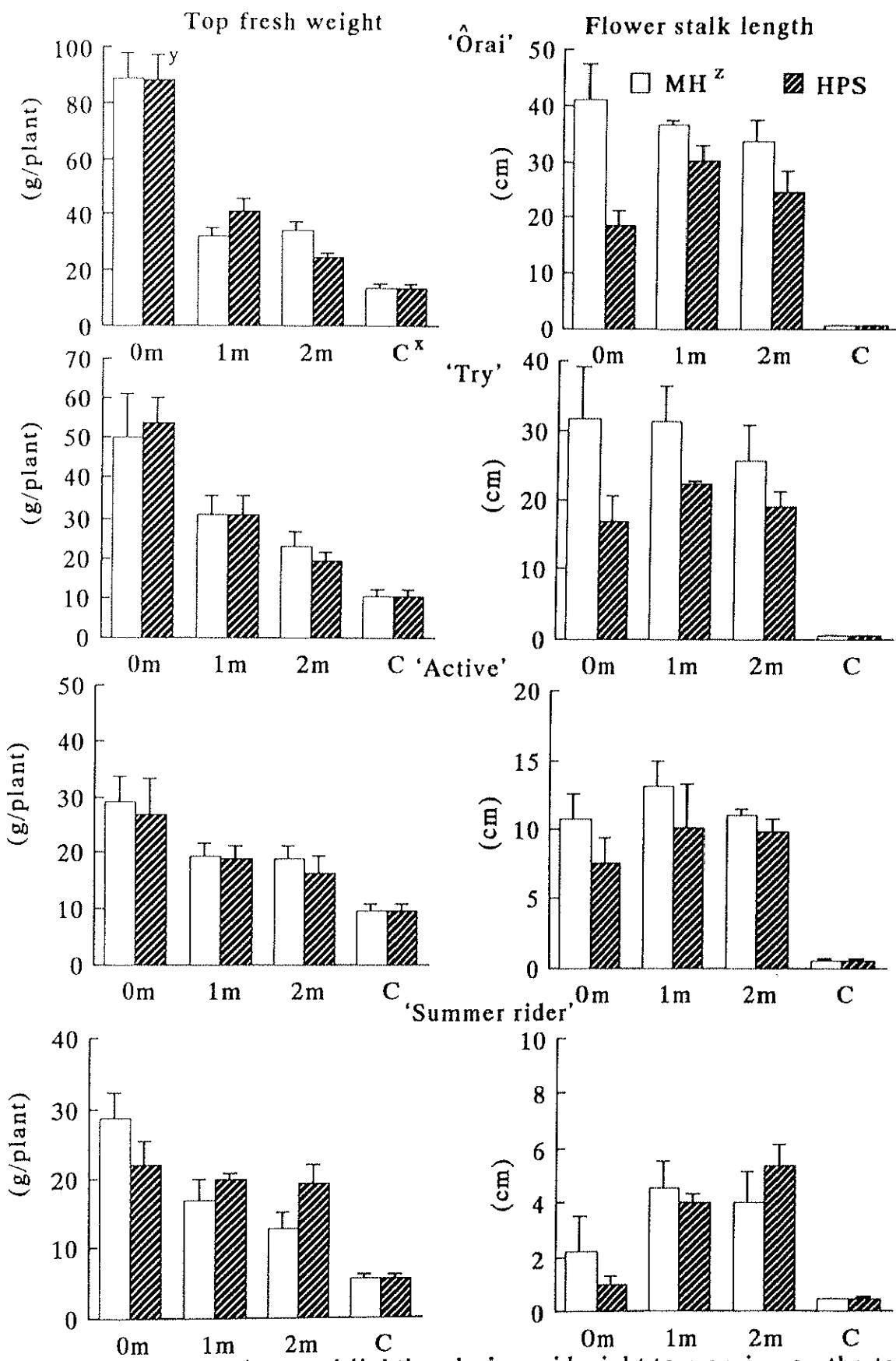


Fig. 4.1.2 Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on the top fresh weight and flower stalk length of spinach grown by NFT after 32 days from planting.
(Exp. 1)^w

z : MH, HPS mean supplemental lighting by metal halide lamp and high pressure sodium lamp, respectively.

y : Standard error ; n=8

x : 0m, 1m and 2m show the horizontal distance from light source and C means control

w : Exp. 1 ; November to December

Table 4.1.1. Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on the top fresh weight, flower stalk length, number of leaves, maximum leaf petiol and leaf blade length and leaf width of spinach grown by NFT.

	Top f.w. (g)	Flower stalk L (cm)	No. of leaves	Petiole length (cm)	Leaf blade length (cm)	Leaf width (cm)
<u>Cultivar (A)</u>						
'Ôrai'	42.8 d ^z	23.2 d	35.4 c	17.5 d	11.3 cd	7.5 c
'Try'	26.7 c	17.7 c	30.8 b	15.2 bc	10.6 bc	6.4 ab
'Active'	18.3 ab	7.4 b	23.3 a	14.5 b	10.4 b	7.0 bc
'Summer rider'	16.4 a	2.4 a	24.0 a	10.2 a	9.1 a	6.3 a
<u>Lamp (B)</u>						
MH ^y	26.1	14.5	28.7	14.3	10.1	6.6
HPS	26.1	10.7	28.9	14.3	10.6	7.1
<u>Distance (C)</u>						
0m ^x	48.6 d	15.0 b	35.5 c	18.5 d	12.8 c	8.6 c
1m	26.2 c	19.2 c	31.4 b	15.4 c	10.6 b	6.8 b
2m	21.2 b	16.7 b	30.4 b	13.6 b	9.9 b	6.5 b
Cont.	9.7 a	0.5 a	16.2 a	9.9 a	8.2 a	5.4 a
A	*** ^w	***	***	***	***	***
B	NS	***	NS	NS	NS	*
C	***	***	***	***	***	***
A × B	NS	***	NS	NS	NS	NS
A × C	***	***	***	*	NS	*
B × C	NS	***	NS	NS	NS	*
A × B × C	NS	NS	*	**	NS	NS

z : Values followed by the same letter within each column are not significantly different at 5% level, according to Fisher's test.

y : See Fig. 4.1.2

x : See Fig. 4.1.2

w : NS and *, **, *** show nonsignificant and significant differences at P=0.05, 0.01 and 0.001, respectively.

行った処理区で増加する傾向を示したが、その程度は最大でも対照区の50%増加にとどまった。

実験2：2月23日から深夜補光栽培を行ったところ、抽だいまでの日数は、全体としては、光源に近い処理区で多く、また、HPSの方が抽だいが遅くなる傾向が示された（第4.1.3図）。光源からの距離の効果は、1m、2m区に対して0m区では、平均で4日ほど抽だいが遅れた。また、品種別に見ると、「オーライ」、「トライ」ではHPSの場合距離の効果が大きく、0m区では1m、2m区よりも平均で4日ほど抽だいが遅かった。一方、「アクティブ」の場合、MHよりもHPSにおいて抽だいが4日ほど遅く、光源からの距離では、0m区では1m区、2m区よりも抽だいが5日程度遅く抽だいまで日数は32日目であった。「サマーライダー」は、4品種中抽だいが最も遅く、実験終了時の処理開始後32日目でもほとんど抽だいが観察されなかった。また、「サマーライダー」では、抽だいまで日数に光源間の差はなかったものの、距離の効果は大きく、1m区が26～27日目で抽だいしたのに対し、0m区では処理終了時でも抽だいしなかった。抽だい時の植物体の大きさは、いずれの品種とも0m区が最も大きく、1、2m区よりも全葉長、葉柄長、葉身長ならびに葉幅とも30%以上大きかった（データは示さず）。また、光源別では、抽だい時の葉は、品種によって異なるもののHPSで大きくなる傾向があり、MHよりも10～30%大きかった。処理開始後32日目の植物体の草姿を第4.1.4図に示す。「サマーライダー」の0m区と「アクティブ」の0m区以外は、ほとんど抽だいしたがその程度は、HPSでは明らかに0mで小さかった。

4月5日に定植し、深夜補光栽培を開始した「アクティブ」と「オーライ」について、MH、HPS、赤色LEDを比較したところ、「オーライ」の場合、MHとHPSとも、深夜補光開始後10日前後で抽だいしてしまい、0m区ならびに1m区との間に差は観察されなかった（データは示さず）。しかし、「アクティブ」では、HPSはMHよりも抽だいが2日ほど遅く、また、0m区は、1m区よりも抽だいが5日遅かった。一方、赤色LEDの場合、「オーライ」では、強光区ならびに弱光区とも深夜補光開始後9日、「アクティブ」では14日ほどで抽だいし、MHならびにHPSよりも抽だいが早かった。

深夜補光中の葉柄ならびに葉身、葉幅の相対伸長率（Relative elongation rate、文中図中記号RER）を第4.1.5図に示す。「オーライ」では、最も深夜補光の伸長率に対する効果が大きかったのは処理開始から5日目までであり、葉柄の相対伸長率は $0.254\text{cm} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ となり対照区よりも36%，葉身では20%，葉幅は24%それぞれ高かった。一

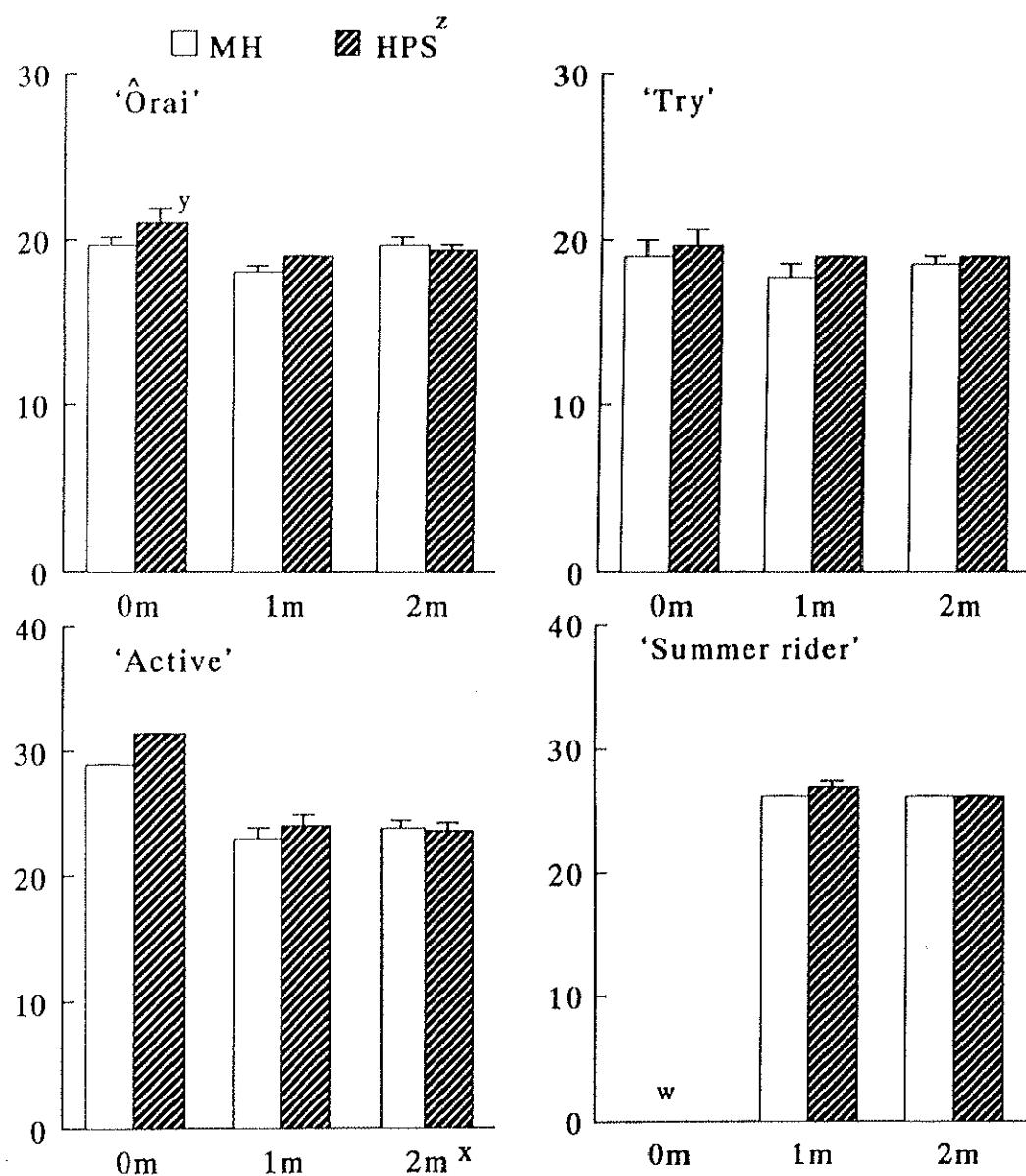


Fig. 4.1.3. Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on the number of days to bolting from planting of spinach grown by NFT. (Exp. 2)^v

^z : See Fig. 4.1.2

^y : See Fig. 4.1.2

^x : See Fig. 4.1.2

w : Plants under the control did not show bolting.

v : Exp. 2 ; February to March, The experiment was carried on during 32 days after planting.

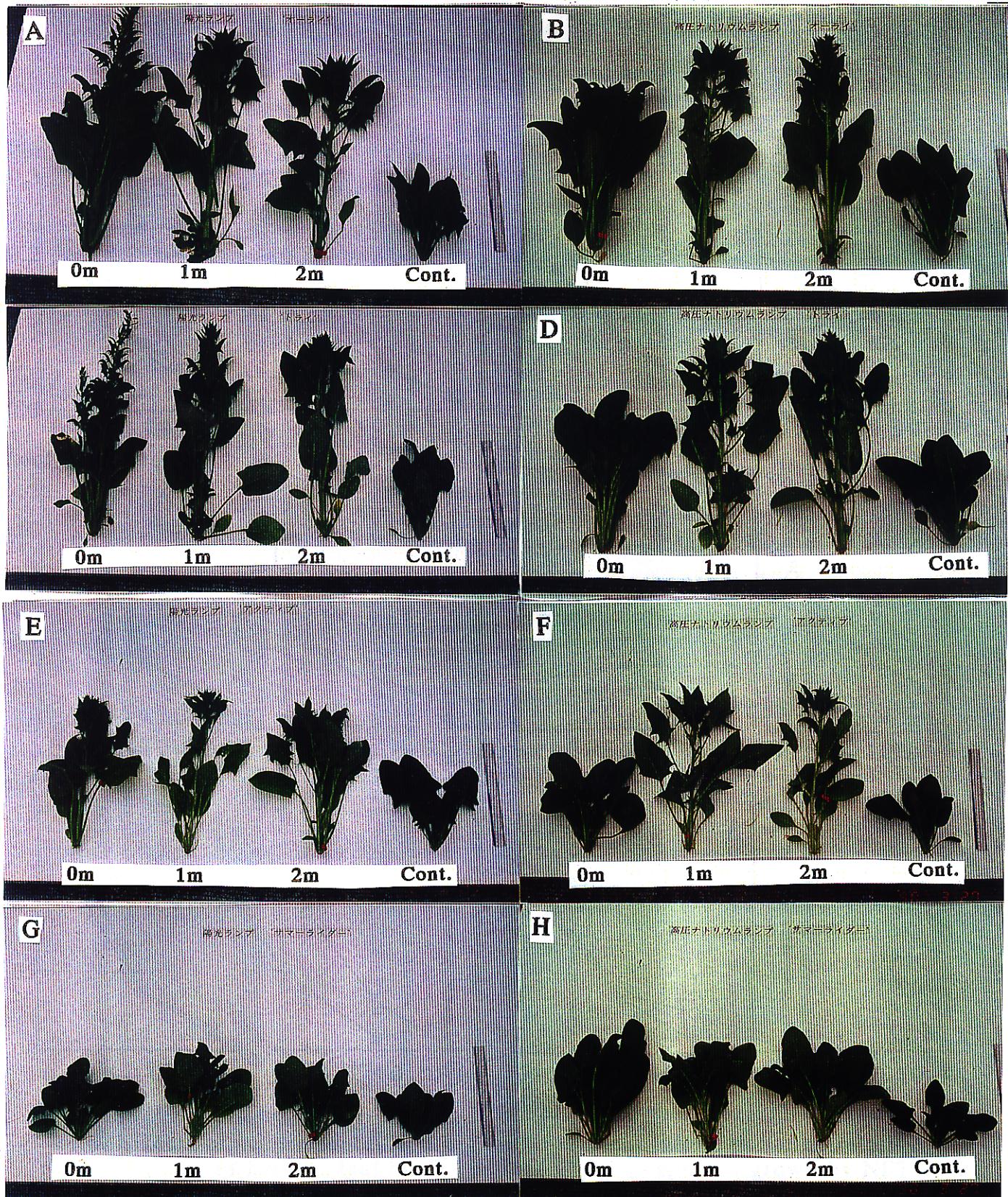


Fig. 4.1.4. Effects of supplemental lighting during mid-night to morning on the plant form of spinach at 32th days after treatment. (Exp. 2)

A and B : cv. Orai under MH and HPS lamp, respectively

C and D : cv. Try under MH and HPS lamp, respectively

E and F : cv. Active under MH and HPS lamp, respectively

G and H : cv. Summer rider under MH and HPS lamp, respectively

Z : See Fig. 4.1.2

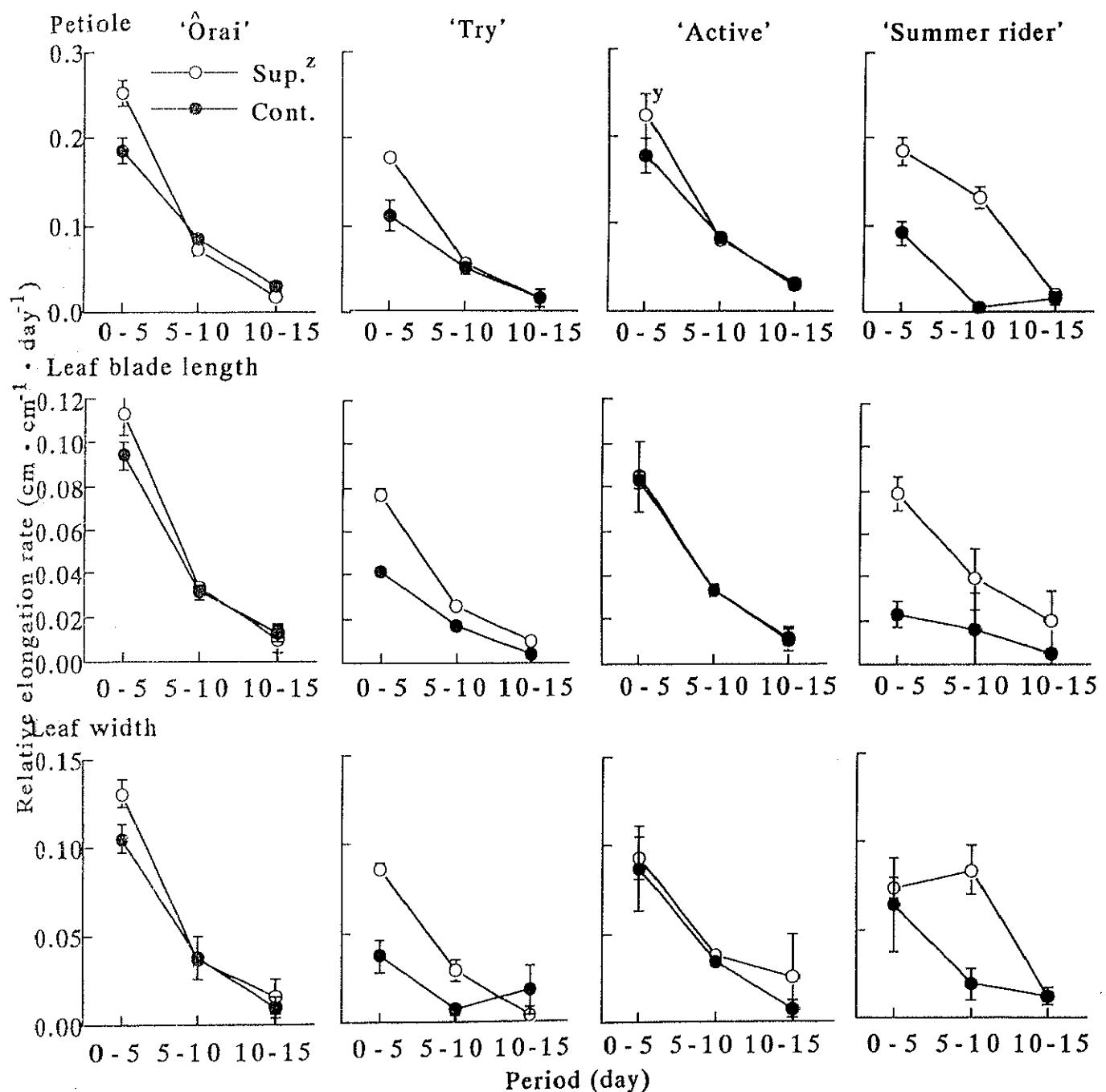


Fig. 4.1.5. Effects of supplemental lighting with low light intensity on the relative elongation rate of petiole, leaf blade and leaf width of spinach grown by NFT.
(Exp.2)^x

z : Sup. ; supplemental lighting, Cont. ; control.

y : See Fig. 4.1.2

x : See Fig. 4.1.3

方、‘トライ’と‘サマーライダー’の場合、深夜補光は葉柄、葉身、葉幅とも著しい促進効果を見せ、特に‘サマーライダー’の葉のRERは、葉柄で対照区の2倍、葉身では約3倍程度高くなった。‘アクティブ’では、処理開始から5日目までの段階で、葉柄については25%対照区よりもRERが高かったものの、葉柄ならびに葉身は対照区と同程度であった。

実験3：この実験において、品種‘サマーライダー’以外の3品種についても深夜補光を行ったが、いずれも深夜補光開始後1週間程度で抽だいしてしまった。そこで、ここでは品種‘サマーライダー’についてのみ結果を報告する。6月26日に定植しHPSによる深夜補光を開始したところ、日数の経過とともに深夜補光区と対照区との生育差が大きくなり、16日目には0m区で地上部生体重が24.6gと収穫するのに十分な大きさとなった（第4.1.6図）。1m区の場合、処理開始後16日目では地上部生体重は17.5gであったが、この時点で既に抽だいしており、その後の茎の大幅な伸長の結果、深夜補光開始後20日目の時点で38.8gと0m区と同程度の値を示した。花芽分化の程度は、深夜補光処理によって大きく変化した。1m区の場合、8日目の時点で既に花房形成期に入っていたり、その後も16日目において既に抽だい期となっていた。一方、0m区は深夜補光開始後8日目では花芽の分化初期であり、その後16日目までは分化期にとどまっており、対照区と同程度であった。しかし、20日目には急速に花芽分化が進行し花房形成期から抽だい期となった。抽だい長は、1m区では処理開始後16日目の時点ですでに9cm程度となっており、20日目では28.8cmであった。0m区の場合、16日目における抽だい長は0.6cmとわずかであったが、その後伸長は進み、20日目では7cmとなった。1m区では、深夜補光開始後8日目で既に最初の抽だい株が観察され、抽だい株は急激に増加し12日目では40%、14日目では80%の株が抽だいし、16日目にはすべての株が抽だいした。しかし、0m区の場合、最初に抽だい株が観察されたのは12日目であり、その後の抽だい株の増加の程度は低く、深夜補光開始後16日目で20%、20日目で50%の抽だい株率となった。

内生オーキシン濃度は、処理開始後4日目0m区で増加した（第4.1.7図）。深夜補光開始後、4日目で0m区のオーキシン濃度は $16.5\text{ng} \cdot \text{top f.w. g}^{-1}$ となり、処理開始時の約2倍、また、対照区の1.7倍の濃度となった。その後、0m区の内生オーキシン濃度は8日の時点でも12.1と対照区よりも20%程度高い値を示した。しかし、深夜補光開始後12日目には、0m区の内生オーキシン濃度は急速に低下した。一方、深夜補光開始後4日目

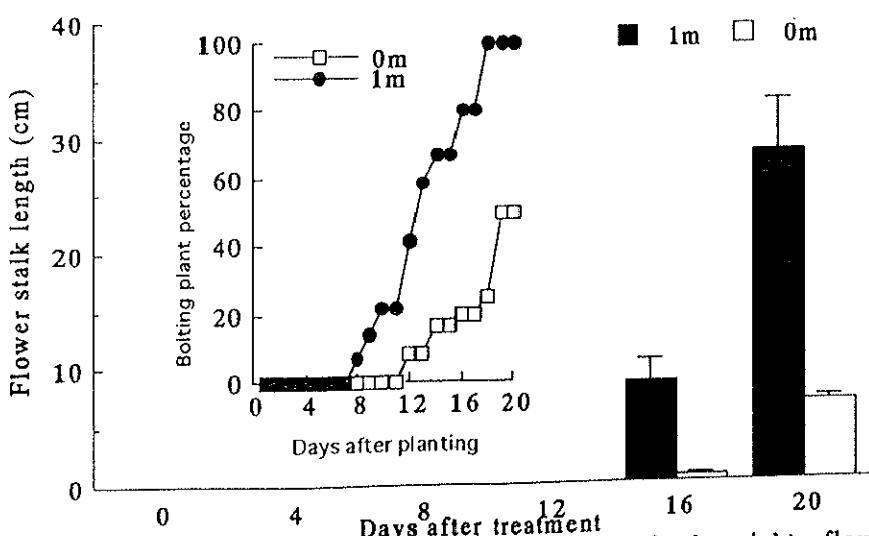
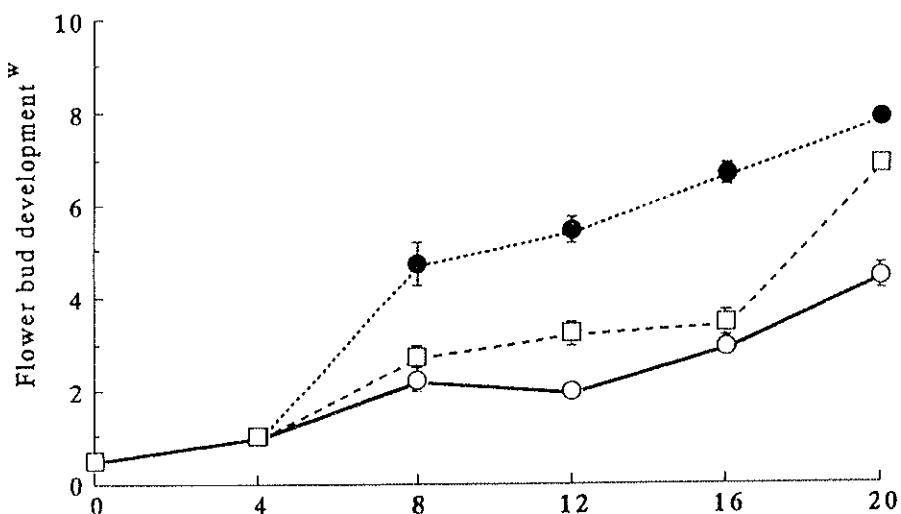
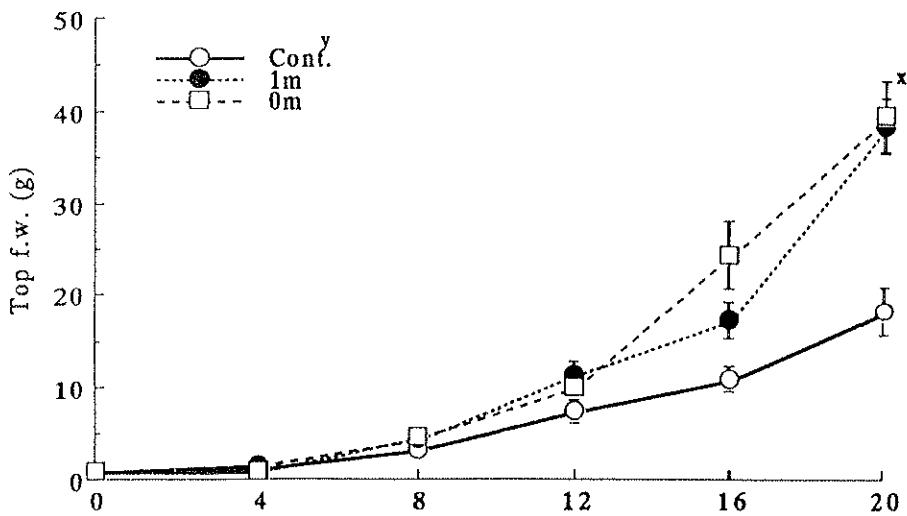


Fig. 4.1.6. Effects of supplemental lighting on the top fresh weights, flower bud development and flower stalk length of spinach grown by NFT. (Exp. 3)
z : Exp. 3 ; June to July, Cultivar ; 'Summer ricer'

y : See Fig.4.1.2

x : Standard error ; n=4

w : Flower bud developments were classified to 8 levels.

Flower bud initiation - 1 or 2 ; Flower truss initiation - 3 or 4

Flower truss formation - 5 or 6 ; Bolting - 8 or 9

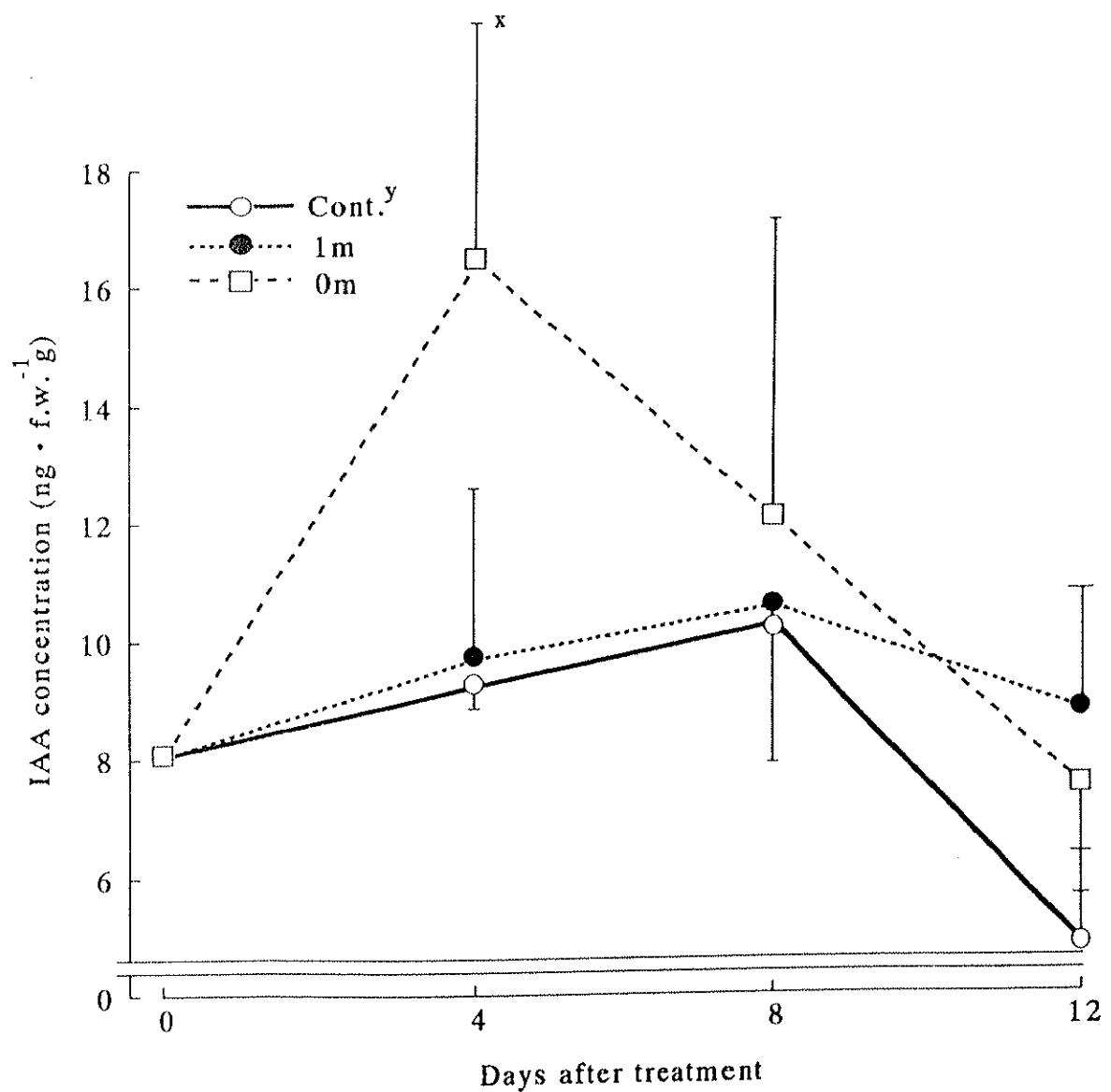


Fig. 4.1.7. Effects of supplemental lighting irradiated with high pressure sodium lamp on the auxin concentration of spinach 'Summer rider' grown by NFT. (Exp. 3)^z

^z : See Fig. 4.1.6

^y : See Fig. 4.1.6

^x : Standard error ; n=4

の1m区の内生オーキシン濃度は9.45ng · top f.w. g⁻¹であり、対照区とほぼ同程度であった。その後、1m区の内生オーキシン濃度に大きな変化はなかった。

4.1.3 考 察

MHならびにHPSのいずれの光源による深夜補光も、ホウレンソウの生育を著しく促進した。最も効果が大きかったのはいずれの品種も光源直下であったが、光源から水平距離で1～2m離れた場所でもホウレンソウは補光による生育促進効果が得られた。成松・法月（1992）は、光強度が8lx程度の弱光で朝と夕方に補光し13時間日長としたところ茎葉重が対照区の2倍になることを報告した。本実験における光強度は、照度では1m区では336lx、2m区では49lxに相当する。成松・法月（1993）の結果と比較すると生育促進には十分な光であると考えられる。しかし、この光強度では、本章第2節で示すことになるが、深夜補光中の光合成速度は光補償点以下であり、光合成に対する直接的な影響はないと考えられる。したがって、このような弱光による日長延長がもたらすホウレンソウの生育促進は、葉柄の伸長などに伴う受光効率の向上といった深夜補光の間接的な作用である可能性が強い。実験1でも示したように、深夜補光によって葉柄ならびに葉身・葉幅が著しく伸長した。特に葉柄については深夜補光の伸長促進効果が大きく、これが結果として受光効率の改善につながったものと考えられる。

Gasper et al. (1985) は、ホウレンソウの葉柄の伸長が、日長延長による葉柄のオーキシン感受性増大の結果促進されたことを報告しており、深夜補光下において葉柄の伸長速度が増大した本実験の結果とも一致する。一方、光源直下においてホウレンソウの生育は、品種によっては対照区の6倍程度に著しく促進された。光源直下では、葉柄、葉身が最もよく伸長した一方、十分な光による補光中の光合成という2つの要素によって著しく生育が促進されたものと推察される。また、品種間で深夜補光の生育促進効果を見てみると、実験1では、明らかに冬用品種の‘オーライ’ならびに‘トライ’で光源直下の生育促進効果が大きかった。この2品種はいずれも早生品種であり低温でも伸長が早いのが特徴である。実験1は冬季に行っており、夏用の晚生品種である‘アクティブ’、‘サマーライダー’は低温により伸長が抑制されたことが、光源直下での深夜補光効果の実験1における品種間差異につながったと思われる。

実験1ならびに実験2の冬季における約30日間の深夜補光栽培の結果、いずれの処理区においても抽だいが発生した。しかし、その程度は、品種、光質、光強度によって

変化し、HPSならびに強光強度で花茎長が抑制された。花茎長の抑制は、抽だいの遅延または花茎の伸長速度の抑制によるいずれかであると考えられるが、実験2の結果から、抽だいの遅延が主な要因であることが示された。光強度と抽だいの関係については、成松（1996）が指摘しているように、強光と20lx以下の微弱光では抽だいが抑制される。また、成松（1996）は、通常使用される光源では光質はホウレンソウの抽だいに影響しないと指摘した。しかし、本試験の結果では、HPSはMHよりも抽だいを遅延させた。Grimstad（1987）は、長日植物のグロキシニアの開花について、24時間連続の補光をMH、HPS、LPSによって行い、筆者の試験結果と同様にMHの方が開花を促進したことを報告し、MHに高い割合で含まれている遠赤色光が長日効果をもたらし開花が促進されたとしている。しかし、実験2の赤色LEDによる補光試験の結果から、ホウレンソウの抽だいは、単純に赤色光の比率が高ければよいという問題ではないことが示された。渡辺（1996）は、赤色または遠赤色LEDによるキクの電照試験を行い、赤色LEDが長日効果をもたらしたことを報告した。赤色LEDの放射する光には、ほとんど遠赤色光が含まれていない。このような純粋な光の場合、赤色光では開花が逆に促進される報告がある（小菅ら、1980）。一方、Esikins（1992）は、アラビドプシスの場合、青色光によって抽だいが遅延されたことを示しており、高尾（1993）は、ホウレンソウの抽だいが青色光で抑制されたとした。本試験において、HPSの方がMHよりも強光条件でも抽だい遅延効果が大きかった要因としては、赤色LEDは、青色光の波長域を含んでおらず、この様な条件ではR/Fr比はほとんどホウレンソウの抽だいに作用しなかった一方、HPSあるいはMHのいずれの光源も、ある程度の青色光波長域の光を含んでおり、この場合R/Fr比が長日効果を左右し、結果としてHPSの方で抽だいが抑制されたと推察される。HPSに含まれている青色光はPPF中3%程度であり、MHの1/3程度であった。この程度の青色光であるが、その抽だいに対する効果は大きいものと思われる。

ホウレンソウの抽だいに対する深夜補光の光質の効果は品種によって異なり、冬用品種‘オーライ’、‘トライ’ではHPSとMHの差が大きく、HPSの方が抽だいが抑制された一方、MHでは、強光下でも抽だいが顕著であった。このことについては、先ほど述べたようにMHの日長効果はHPSよりも強く、強光条件であっても結果的に抽だいを促進してしまったことが考えられる。しかし、成松・法月（1993）が指摘するように、MHで強光によって長日条件とした場合でもホウレンソウの抽だいが抑制されてい

る。この場合、成松・法月（1993）は、朝と夕方2時間づつ補光を行い明期を延長しているが、光強度が $120 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と筆者の実験条件よりも高い。一方、第4.1.2表に示したように実験1ならびに実験2の試験は、冬季の短日条件での深夜補光であるが、深夜補光を行った結果明期は18～20時間となり、明らかにホウレンソウの限界日長12時間を越えている。このような抽だいが促進されやすい環境条件では、MHでは強光による抽だい抑制効果がなくなった可能性もある。一方、夏用品種である‘アクティブ’ならびに‘サマーライダー’ではMH、HPSのいずれの光源とも強光によって抽だいが抑制された。また、実験2の4月からの試験では、‘オーライ’において、強光条件のHPSによる深夜補光下の抽だいまで日数がMHの場合と同程度になった。抽だいの進行が遅い晩抽性品種の場合、MHによる深夜補光でも、抽だいまで日数が光強度によって変化したということと、自然日長が12時間を越えると同時に高温という抽だいしやすい春～夏の条件では、早生品種の場合HPSによる深夜補光でも抽だいまで日数の光強度による変化がなくなったという2つの結果は、品種の違いや自然日長などの環境条件による抽だいの進行しやすさが、ホウレンソウの抽だいに対する深夜補光の光質の影響を左右していることを示唆している。

植物の花芽形成とオーキシンとの関係が指摘されている（Gasper et al., 1985）。これによると、長日植物の抽だいが進行する際、内生オーキシン濃度が一度低下した後、花芽分化が進行し、抽だいによる花茎の伸長とともにオーキシン濃度が上昇するとされている。本試験の結果、内生オーキシン濃度は、HPS・強光条件による深夜補光開始後、4日目に上昇し、8日目では4日目の段階よりも濃度が低下したものの対照区よりも濃度が高かった。Morre et al. (1998) やBellamine et al. (1993) は、内生オーキシン濃度が高いと長日植物の花芽分化が遅くなるとした。また、香川（1996）は、生育初期に外生オーキシン処理を行うことによりホウレンソウの抽だいが抑制されることを示し、花芽分化初期に処理したオーキシンは花芽分化について阻害的に作用するものであると考えた。本試験では、強光によるHPS深夜補光で花芽分化が1m区よりも抑制されたのは、補光開始直後のオーキシン濃度上昇によるものであると推察された。また、1m区と対照区ではオーキシン濃度に差はなかったが、オーキシンは、花芽分化にあくまでも阻害的に作用したと考え、1m区で花芽が促進されたのはオーキシンとはまた別の要因であると推察された。

以上の本試験の結果をまとめると、以下のような知見が得られた。

Table 4.1.2 Total day length during experiment.

	Natural day length	Total day length under supplemental lighting ^z
<u>Exp.1</u>		
Oct	12hr 23min	20hr 23min
Nov	11hr 28min	19hr 28min
Dec	10hr 59min	18hr 59min
<u>Exp.2</u>		
Feb	12hr 00min	20hr 00min
Mar	12hr 59min	20hr 02min
Apr	14hr 07min	20hr 07min
<u>Exp.3</u>		
May	15hr 19min	20hr 19min
Jun	15hr 48min	20hr 48min

^z : Supplemental lighting was irradiated for 8 hours from
23:00 to 7:00.

- 1) 深夜補光による生育促進効果は、晩生品種よりも早生品種で大きくなつた。
- 2) ホウレンソウの抽だい程度は、MHよりもHPSによる補光で抑制されたが、このことは花芽分化の遅延がその要因となつてゐた。
- 3) ホウレンソウの場合、深夜補光のR/FR比と青色光波長域の有無の両方が、ホウレンソウの抽だい程度を決定する要因となつており、特に青色光を含まない光源では、抽だいが著しく促進された。
- 4) HPSの強光強度条件では、深夜補光開始後内生オーキシン濃度が上昇し花芽分化を遅延させた可能性がある。

深夜補光は、ホウレンソウについて、照射中の光合成による影響だけでなく、日長延長による葉の構造変化によって大幅な生育促進をもたらした。しかし、ホウレンソウの場合、長日による生育促進効果が得られても抽だいという問題がある。深夜補光によるホウレンソウの生育促進技術の問題を解決する手段として、本試験の結果から以下の方法を提案する。

- ・晩抽性品種のなかでも‘アクティブ’のように比較的伸長の良い品種を使用する。
- ・HPS系のランプを使用した強光強度による深夜補光を行い迅速な生育を行わせる一方、抽だいを抑制する。

夏季に行うホウレンソウの高冷地雨よけ栽培では、収穫時の調節の際、2cm以上抽だいしたものを除外している(ニツ寺, 1996)。この場合、収穫可能な大きさである草丈20cmになるまで抽だいを抑制する必要がある。深夜補光栽培についても同様に、収穫に十分な大きさである草丈20~30cmになるまで抽だいを抑制することは重要である。本試験の結果、HPSによる深夜補光を少なくとも $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上の光強度で補光することにより、16~20日間は品質に影響しない程度に抽だいを抑制できることが示された。定植後16~20日という期間は、深夜補光による生育促進効果を考えると収穫可能な大きさに生育させるのに十分であると思われる。本研究により、品種の選択と光源の設定によって深夜補光はホウレンソウについても十分実用的な栽培技術になり得ることを示すことができた。

4-2 深夜補光がホウレンソウの葉中硝酸イオン濃度に及ぼす影響

一般に、レタスやホウレンソウなどの野菜には少なからずNO₃塩が含まれている。NO₃塩は唾液と反応してNO₂塩となり、更に体に吸収された後に発ガン性物質であるニトロソアミンを形成することがあるとされている（Craddock, 1983）。このためオランダでは、野菜のNO₃塩濃度が品質の重要な基準となっており（Gaudreau et al., 1995；Van, 1986），レタスでは品質向上のためにNO₃塩濃度の低い品種の選抜が行われている（Reinink and Eenink, 1988）。

養液栽培では、収穫直前に、培養液中に含まれる窒素中のアンモニア態窒素（NH₄-N）の割合を増やすことにより、葉菜類の葉中NO₃塩濃度を低下させることができある（池田・大沢, 1983）。しかし、ホウレンソウの場合、NO₃を優先的に吸収する（Ikeda and Osawa, 1981）ことから、上記の手段では可食部中のNO₃塩濃度を減少させるのは難しい。一方、培養液中の窒素組成を変化させる方法の他に、収穫予定日の1週間程度前に培養液中のNO₃濃度を低下させ、収穫時の葉中NO₃塩濃度を低下させる方法も考えられる。しかし、予備的に試験を行ったところ、Nの供給を停止するために生育が遅れたり、葉の色が薄くなるといった問題があることが判明した。しかし、培養液中のNO₃濃度を低下させた後の短期間で、葉中NO₃塩濃度を低下させることができれば、処理による収量への影響は小さいと考えられる。

NO₃は植物体内でNO₂を経てNH₄⁺へと還元されるが、これらの還元酵素は光で活性化されることが知られている（Lillo, 1994）。著者らは、葉菜類の可食部中のNO₃塩濃度低下を目的とした培養液中NO₃除去処理と同時に、硝酸還元酵素活性を高めるために、人工光源による深夜の光照射を行い、短期間に葉中NO₃塩濃度を低下させることを考えた。そこで本試験では、培養液中のNO₃除去後のホウレンソウの葉中NO₃塩濃度低下を促進させることを目的に人工照明を行い、生育、葉の汁液中NO₃濃度ならびに硝酸還元酵素活性への影響について調査した。

4.2.1 材料および方法

育苗および栽培方法：実験には、品種‘オーライ’（タキイ種苗）を供試した。温室内で、培地としてロックウール粒状綿を詰めた200穴のプラグトレイに播種した。プラ

ゲトレイの1穴につき3粒播種し、発芽後生育の良い2株を残した。育苗期間中は、1/2単位の園試処方培養液を与えた。本葉が4枚展開して根鉢を十分形成した株を、温室内にあるNFT装置に定植した。定植後は、EC 2.4 dS/m, pH 6.0, 液温20°Cの園試処方培養液で栽培した。

定植約4週後草丈の平均が20cm程度になった時点で、NO₃除去培養液に変えると同時に、光質の異なる人工光源による深夜照明を行った。NO₃除去培養液には、KNO₃, Ca(NO₃)₂・4H₂Oの代わりにK₂SO₄とCaCl₂・4H₂Oを用いた。照明は23:00から6:00までの7時間とした。光源には陽光ランプ(D400, 東芝ライテック, 文中および図表中記号MH), 高圧ナトリウムランプ(NH360, 同, 同記号HPS), 東芝ライテック試作のHID系の青色光ランプ(同記号BL)を使用した。

実験1：NO₃除去と深夜照明の光質が生育と汁液中NO₃濃度に及ぼす影響

1995年10月28日に定植した植物体について、11月20日から11月27日まで、NO₃除去とMH, HPS, BLの各人工光源を組み合わせた処理区を設けた。各処理区ごとに20個体植物体を定植した。深夜照明の光強度は、植物体葉面で光合成有効光量子束密度(PPFD)を122 μmol・m⁻²・s⁻¹となるよう設定した。処理開始後0, 2, 4, 7日に植物体地上部を5個体ずつ採取して新鮮重を計測し、葉身と葉柄に分けて凍結保存した。凍結保存した葉身と葉柄のそれから5gずつ採取し、45mlの水とともに磨碎したものを100mlにメスアップした。その後3000rpmで10分間遠心分離し、その上澄みを水で5倍に希釈し45 μmのミリポアフィルターでろ過したものを抽出液とした。抽出液については、NO₃濃度の測定をイオンクロマトグラフィーによって行った。

実験2：NO₃除去と深夜照明の光強度が汁液中NO₃濃度に及ぼす影響

1996年1月5日に定植した植物体について、2月2日から2月6日までの5日間NO₃除去を行った。NO₃除去開始日より、MHを光源としてPPFDで50, 150, 250 μmol・m⁻²・s⁻¹の3段階に光強度を設定した各深夜照明区と無照明区を設けた。各光強度処理区とも供試個体を20とし、処理開始後2, 3, 4日に植物体地上部を5個体ずつ採取し、生育調査を行うと同時に、実験1と同様に葉身、葉柄の汁液中NO₃濃度を測定した。

実験3：NO₃除去と深夜照明が葉身中硝酸還元酵素活性(NRA)に及ぼす影響

1996年2月7日に定植した植物体について、3月7日の18:00からNO₃除去培養液を与えた。処理を行う水耕装置には供試個体として60個体定植した。定植個体の半数につい

では、同日23:00から翌日6:00まで光強度をPPFDで $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ に調節したMHランプによる照明を行い（深夜照明区）、残りはランプの光があたらないようにカーテンで遮光し暗黒条件（無照明区）において。3月7日の18:00、3月8日の2:00および10:00に、深夜照明区ならびに無照明区からそれぞれホウレンソウの地上部を5個体ずつ採取し、葉身中のNO₃還元酵素（NRA）の*in vivo*活性をYoneyama（1981）の手法によって測定した。また、照明中の光合成速度について、携帯式光合成蒸散測定装置（SPB-H4、島津製作所）により測定した。

4.2.2 結 果

実験1：最大葉の葉長、葉幅ならびに葉数のいずれも、NO₃除去区はNO₃施与区の70～90%程度となった。しかし、NO₃施与、除去区とも、葉幅を除くと照明の影響は明確ではなかった（第4.2.1表）。

NO₃除去によって地上部新鮮重の増加が抑制された（第4.2.1図）。地上部新鮮重は、NO₃除去後2日目では、NO₃の有無による差は小さいものの、4日目以降では処理間差が大きくなり、7日目ではNO₃除去区平均でNO₃施与区の57%となった。また、NO₃施与区で照明を行った場合、NO₃施与・無照明区と比較して生育は著しく増大した。一方、NO₃除去区における生育への照明の影響は小さかった。

NO₃除去後、日数経過に伴って葉の汁液中NO₃濃度は低下したが、その程度は無照明区に比べて照明区で大きかった（第4.2.2図）。葉身の場合、無照明区では、汁液中NO₃濃度が処理2日目に1712ppm、4～7日目では約600ppm前後と低下した。一方照明区平均では、2日目の汁液中NO₃濃度が1051ppmとなり、無照明区よりも大幅に低下した。また、葉柄の場合、無照明区の汁液中NO₃濃度が処理2日目で6114ppm、4日目では4504ppm、7日目には3534ppmと低下したのに対して、照明区では光源によって違いはあるものの平均で2日目で5100ppm、4日目では3932ppmと、4日目までは無照明区よりも低く推移した。しかし、汁液中NO₃濃度に対する各光源の影響については、一定の傾向はみられなかった。

実験2：照明区ではいずれの光強度でも同様に生育し、また処理4日目までは照明区と無照明区との間で生育差はほとんど認められなかった（データ未掲載）。

汁液中NO₃濃度は、葉身、葉柄とも、NO₃除去後急速に低下したが、その程度は光の

Table 4.2.1. Effects of NO_3^- removal and mid-night lighting on the growth of spinach plants at 7th day after treatment.

<u>Treatment</u>		Total number of leaves	Maximum leaf	
<u>NO_3^- application^z (N)</u>	<u>Lighting^y (C)</u>		Length (cm)	Width (cm)
+	NL	15.9 (100)	25.5 (100)	8.4 (100) ^w
+	MH	18.5 (116)	25.9 (102)	8.0 (95)
-	NL	13.0 (82)	20.3 (80)	6.7 (80)
-	MH	15.0 (94)	19.2 (75)	6.1 (73)
-	HPS	14.3 (90)	20.8 (82)	6.9 (82)
-	BL	12.9 (81)	22.3 (87)	7.0 (83)
N effects		**	**	** ^x
C effects		NS	NS	*
N × C		NS	*	NS

^z : + and - represent nutrient solution with or without NO_3^- , respectively.

^y : NL means natural day length, and MH, HPS and BL mean supplemental lighting by metal halide lamp, high pressure sodium lamp and blue lamps, respectively.

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

^w : Percentage of values under NO_3^- application + and lighting NL.

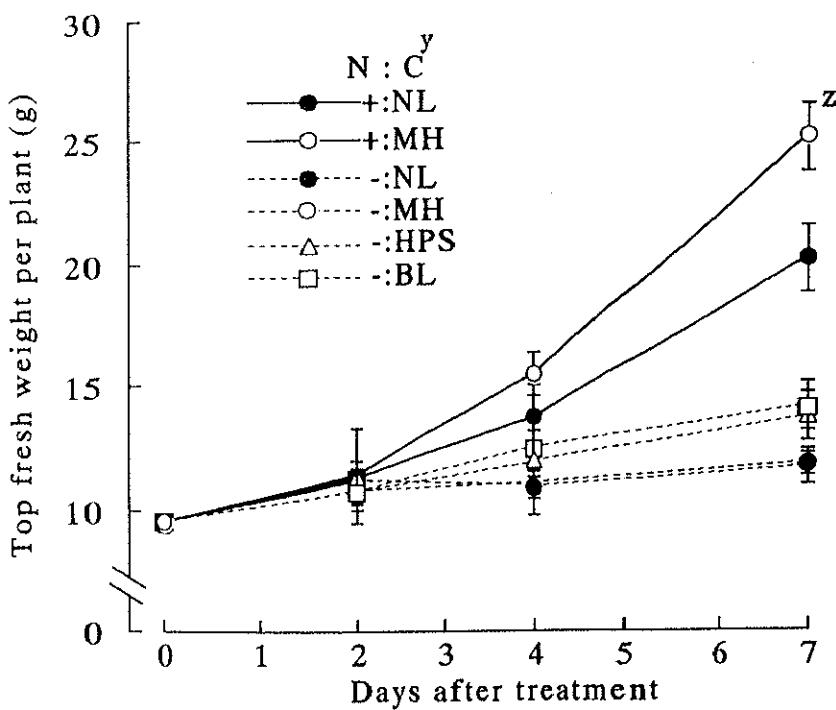


Fig. 4.2.1. Top fresh weights of spinach plants after NO_3^- removal and mid-night lighting starting.

z : Standard error ; n=6.

y : See table 4.2.1.

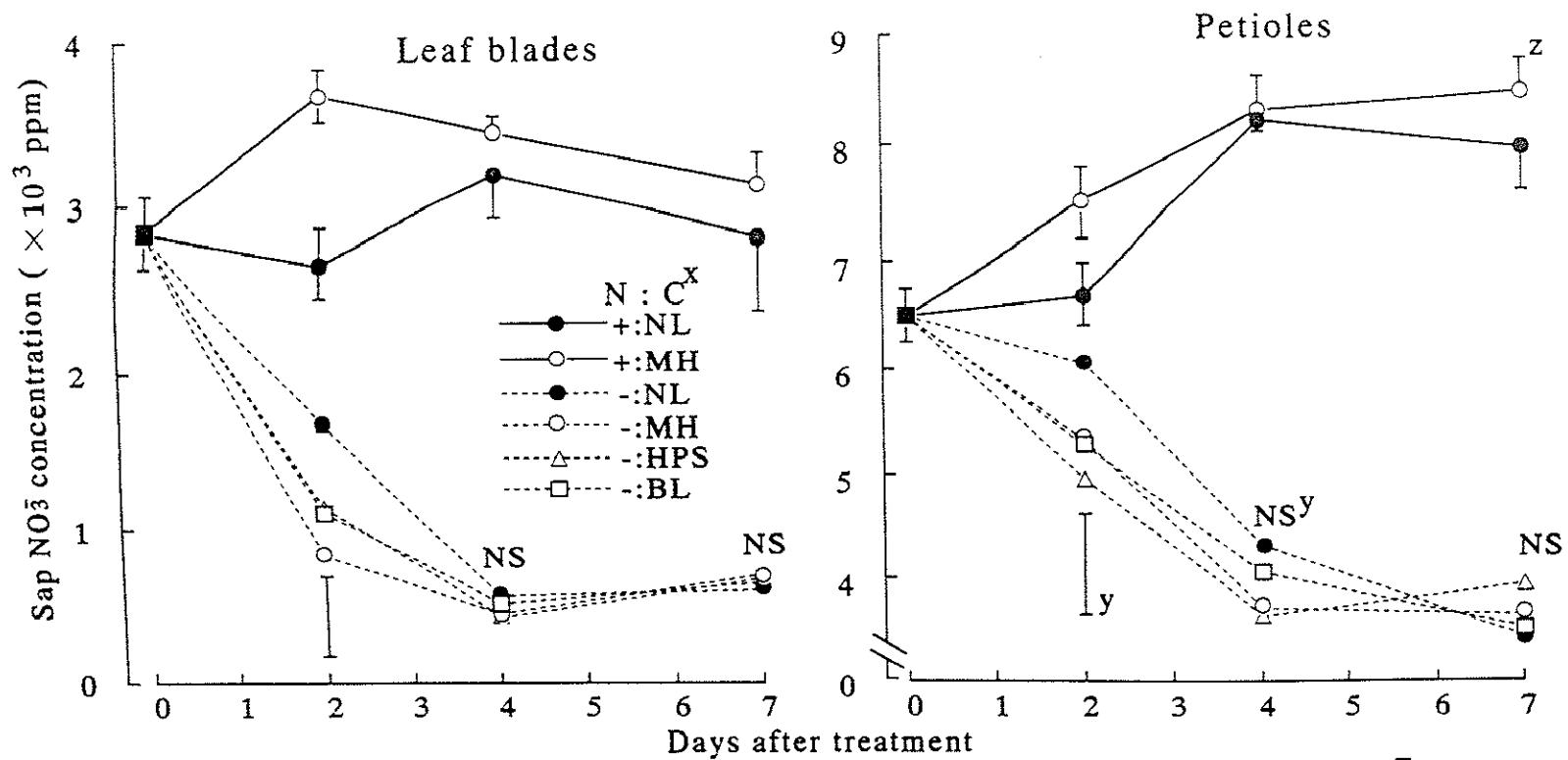


Fig. 4.2.2. Sap NO_3^- concentrations in leaf blades and petioles of spinach plants after NO_3^- removal and mid-night lighting starting.

z : Standard error ; $n=6$.

y : Vertical bar and NS show LSD and non significant difference at 5% levels among NO_3^- depletion treatments, according to Fisher's protected LSD.

x : See table 4.2.1.

有無あるいは光強度によって異なった（第4.2.3図）。葉身の場合、汁液中NO₃濃度は、NO₃除去・照明区の2日目で、照明の光強度の違いにより明確な差が現れ、無照明区で1059ppmであるのに対して、照明区では50 μmol · m² · s⁻¹で799ppm、150 μmol · m² · s⁻¹で612ppm、250 μmol · m² · s⁻¹で491ppmとPPFDが大きくなるほど汁液中NO₃濃度が低下した。葉柄の場合も同様に、処理開始後3日目に光強度による影響が認められ、汁液中NO₃濃度は無照明区が最も高く、続いて、50、150、250 μmol · m² · s⁻¹の順となった。

実験3：NRAは、NO₃除去開始後、時間の経過とともに下する傾向を示したが、その程度は照明の有無で異なった（第4.2.4図）。NO₃除去開始時の18:00でのNRAは1.37 NO₂ μmol · gf.w.⁻¹ · h⁻¹であった。その後、2:00になると、照明区では、1.40 NO₂ μmol · gf.w.⁻¹ · h⁻¹と、NO₃除去開始時の酵素活性を維持したのに対して、無照明区では1.23 NO₂ μmol · gf.w.⁻¹ · h⁻¹に低下した。NRAは、その後照明区でも下したもの、無照明区より高い活性を維持する傾向を示した。

NO₃除去ならびに照明は、葉身汁液中NO₃濃度を変化させた（第4.2.4図）。NO₃濃度は、照明区、無照明区とも、NO₃除去開始後低下したが、2:00では両者の差はほとんど認められなかった。しかし、10:00には、照明区の葉身汁液中NO₃濃度は無照明区のそれよりも低くなる傾向を示した。

照明開始後1日目の深夜照明中の光補償点は20 μmol · m² · s⁻¹付近となった（第4.2.5図）。光合成速度は、光量の増大に伴って200 μmol · m² · s⁻¹付近まで直線的に増加した。

4.2.3 考 察

ホウレンソウの生育は培養液のNO₃除去によって大きく抑制されたが、NO₃除去後2～3日目では、NO₃施用区とNO₃除去区との間で差はほとんどない（第4.2.1図、第4.2.1表）。したがってこの間に、葉中のNO₃濃度を十分低下させることができれば、収量を低下させずにNO₃含量の低いホウレンソウを生産できると考えられる。

Becker et al. (1992) およびBergareche et al. (1994) は、NRAが、フィトクロームによって制御されていることを報告している。一方、フィトクロームによる反応は光質によって左右されるため、本研究で筆者らは、深夜照明の光質がホウレンソウの葉中NO₃濃度に及ぼす影響を比較した。その結果、葉身および葉柄の汁液中NO₃濃度は、供

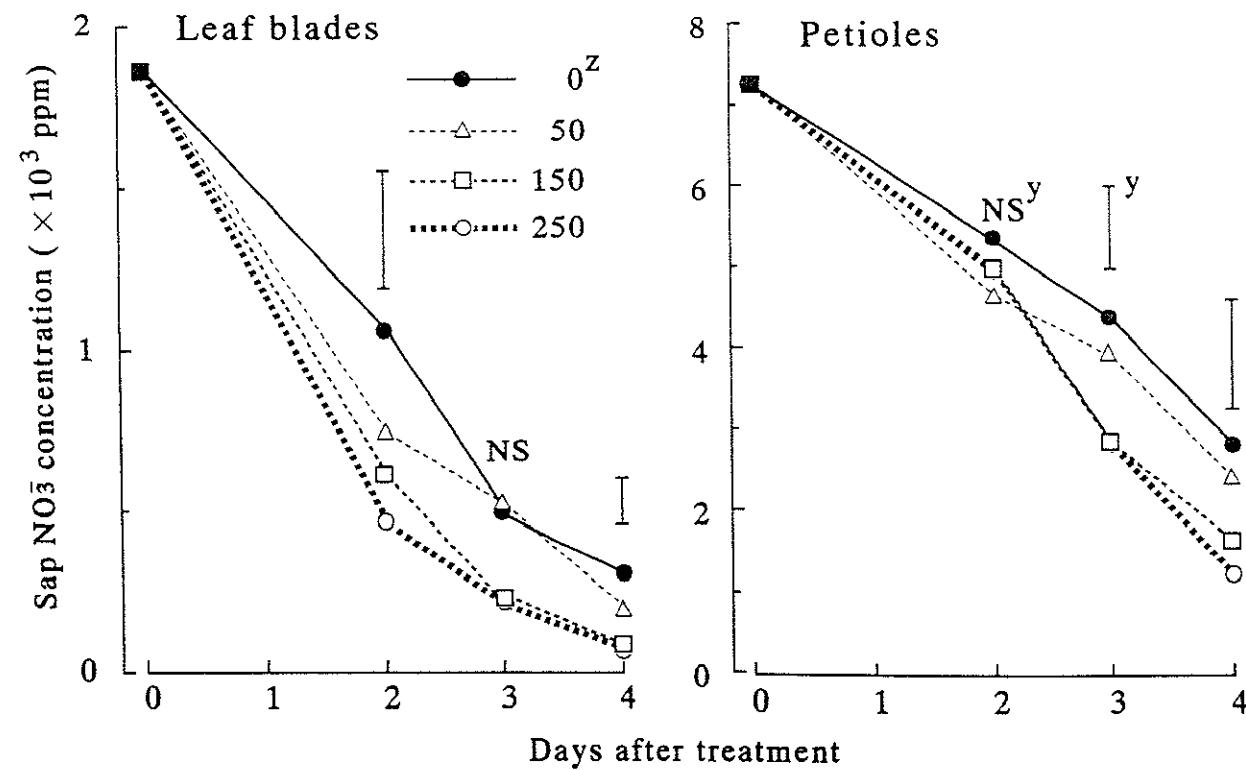


Fig. 4.2.3. Sap NO_3^- concentrations in leaf blades and petioles of spinach plants after NO_3^- removal and mid-night lighting starting by MH lamps.

z : Each value means the light intensity (PPF); $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

y : See Fig 4.2.2.

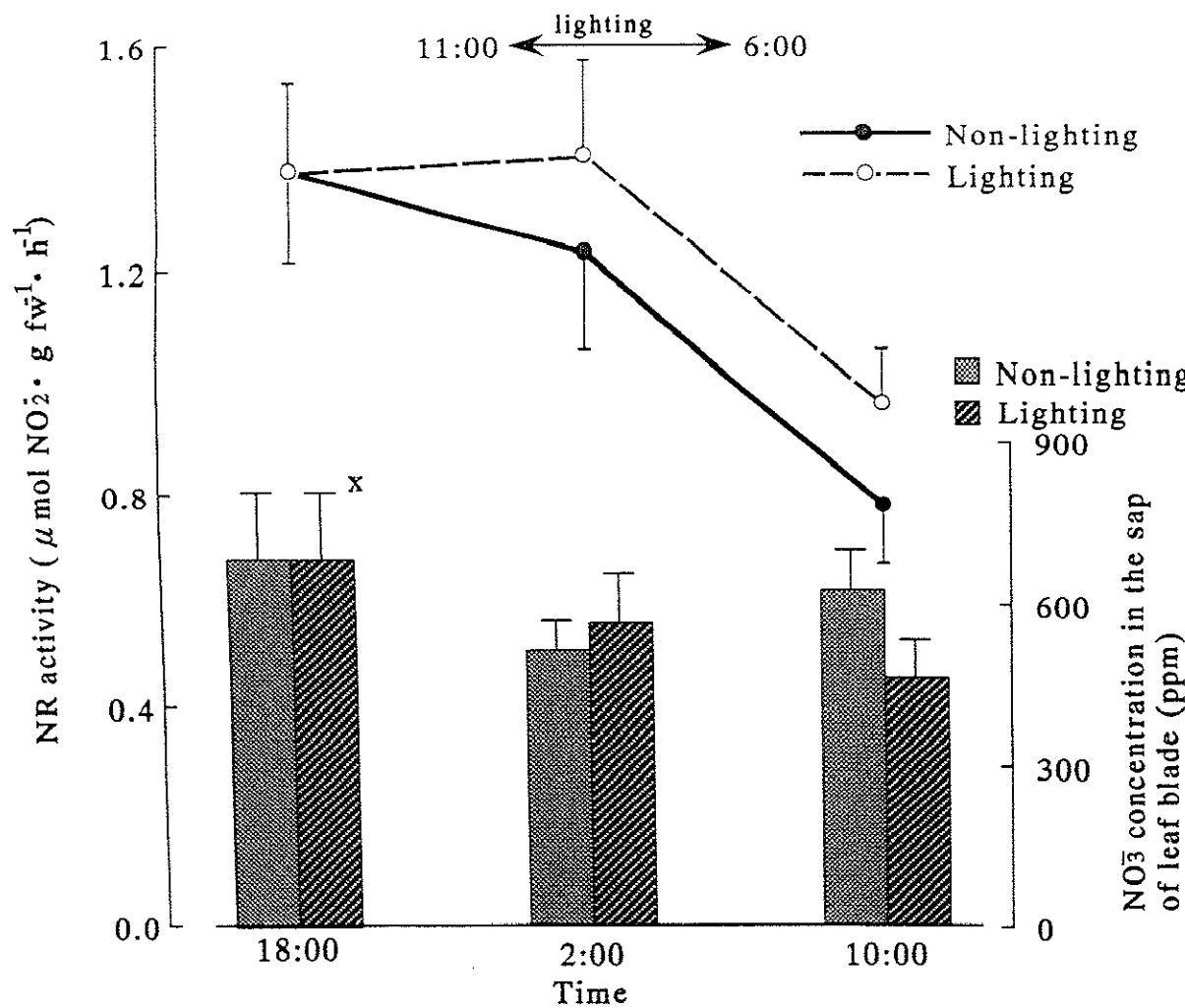


Fig.4.2.4. The *in vivo* NR activity (circles and lines) and sap NO_3^- concentrations (bar) of leaf blade of spinach after NO_3^- depletion and mid-night lighting start.

x:See Fig. 4.2.1. ; n=6

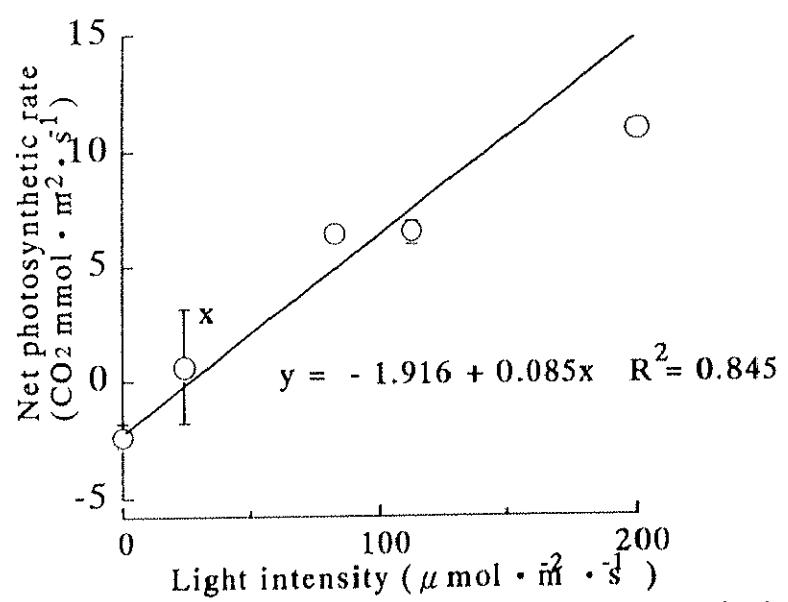


Fig. 4.2.5. The photosynthetic rate of spinach during the lighting (02:00) by MH lamp at the 1st day after NO_3^- removal.

x:See Fig. 4.2.1. ; n=4

試したいずれの光源でも、NO₃除去開始後2日目には無照明区よりも低下する傾向を示し、深夜照明がホウレンソウの葉の汁液中NO₃濃度低下を促進することが示されたものの、光質の影響はほとんど認められなかった（第4.2.2図）。この結果は、今回のような短期間の

処理では、NRAに対する光質の影響は汁液中NO₃濃度にその効果が現れるほど大きくなかったためと推察される。

一方、汁液中NO₃濃度は、葉身、葉柄ともに深夜照明の光強度が高いほど低下した（第4.2.3図）。ただし、深夜照明の光強度が50 μ mol · m⁻² · s⁻¹の場合には、汁液中NO₃濃度低下の割合は無照明区とほとんど差がないことから、深夜照明によってNO₃濃度の低下を促進させるためには50 μ mol · m⁻² · s⁻¹よりも高いPPFDが必要であると思われる。

照明中の0:00～4:00には、照明区では無照明区よりもNRAが高い状態で推移した（第4.2.4図）。その後はNRAの低下が起こったものの、無照明区よりも高い活性を示した。一方、照明終了後、葉身汁液中NO₃濃度が無照明区よりも約2割程度低くなっていたことから、照明によるNRAの増大がこの差を生み出していると言えよう。NRAのエネルギー源は、NADHなどの光合成電子伝達系由来の還元物質であることが判明している（Cires et al., 1993）。第4.2.5図に示すように、深夜照明中のホウレンソウの光合成速度は、光強度の増大に伴って200 μ mol · m⁻² · s⁻¹付近まで直線的に増加している。NO₃除去後の深夜照明による汁液中NO₃濃度の低下促進が、一定以上の光強度で起こったことを考えると、深夜に強い光で行われた光合成によりNRAが高まり、結果的に汁液中NO₃濃度が低下した可能性が推察される。

本試験の結果から、深夜に光合成を行わせるのに十分な光強度が得られれば、培養液からのNO₃除去と深夜照明の組み合わせによって水耕ホウレンソウの葉中NO₃濃度を低下させることが可能であることが示され、以下のような知見が得られた。

- 1) 培養液中NO₃除去後に深夜補光を行うことにより、葉中NO₃濃度を速やかに低減させることができた。
- 2) 培養液中NO₃除去後の葉中NO₃濃度減少速度は、深夜補光の光強度依存性である。
- 3) 深夜間の補光は、光合成の促進とともに硝酸還元酵素活性を高めた。

オランダでは、レタスなどの葉菜類の葉中NO₃濃度について4500ppm以下という基準値が設けられている（Van, 1986）。今回の実験では、葉身の場合、照明区では処理開始後21日で500ppmという低濃度を達成したが、同じ濃度になるのに無照明区では3日かかっている。また、葉柄の場合でも、照明区では2~3日で汁液中NO₃濃度は4500ppm以下となり、無照明区よりも約1日短縮できた。

本章第1節で示したようなホウレンソウの深夜補光栽培を行う場合、収穫開始予定の大さきの約2日前に培養液からのNO₃除去を行うことによって、生育促進に伴う集積した硝酸イオンを低下させ、収量増加とともに品質の改善を行うことができるものと思われる。

まとめ

ホウレンソウの深夜補光栽培に当たり、問題になると考えられる抽だいと硝酸イオン集積の問題について解決手段を検討した。

1) ホウレンソウの深夜補光栽培下で予想される抽だいについて、日長感応性の品種間差ならびに補光光源の光質、光強度などの要素について検討した。ホウレンソウ4品種‘オーライ’、‘トライ’、‘アクティブ’ならびに‘サマーライダー’を供試し、深夜補光の光質と光強度が生育に及ぼす影響について検討した。ホウレンソウは4品種はいずれも水耕し、定植直後から深夜11:00～翌朝7:00まで人工光源による補光を行った。また、光源の光質については、メタルハライドランプ(MH)、高圧ナトリウムランプ(HPS)、赤色LEDの比較を行った。

(1) MHならびにHPSのいずれの光源による深夜補光も、ホウレンソウの生育を著しく促進した。最も効果が大きかったのはいずれの品種も光源直下であったが、光源から水平距離で1～2m離れた場所でもホウレンソウは補光による生育促進効果が得られた。

(2) 冬季における約30日間の深夜補光栽培の結果、抽だいが発生した。しかし、その程度は、品種、光質、光強度によって変化し、HPSならびに強光強度で抽だい長がMHよりも抑制された。抽だい長の抑制は抽だいの遅延が主要因であることが示された。しかし、赤色LEDは抽だいを促進する傾向を示した。

(3) 弱光による深夜補光を行ったホウレンソウの葉は、いずれの品種も葉柄については著しい伸長を示した。また、葉身・葉幅は、‘オーライ’、‘トライ’、‘サマーライダー’では深夜補光によって伸長が促進された。このような葉の著しい伸長促進効果が植物体の構造を受光効率の良いものとし、結果として弱深夜補光でも生育が促進された要因となったと考えられる。

(4) 本試験の結果、ホウレンソウ品種‘サマーライダー’の内生オーキシン濃度は、HPSの強光強度による深夜補光開始後、4日目に上昇し、8日目では4日目の段階よりも濃度が低下したものの対照区よりも濃度が高かった。強光によるHPS深夜補光で花芽分化が弱光による深夜補光よりも抑制されたのは、補光開始直後のオーキシン濃度上昇によるものであると推察された。

2) ホウレンソウの硝酸イオン集積の問題について、培養液中硝酸態窒素中断技術と深夜補光の組み合わせを検討した。ホウレンソウを水耕し取穫可能な大きさになってか

らNO₃⁻を含まない培養液を与えた、同時に行った深夜（23:00～6:00）照明とともに、生育ならびに汁液中NO₃⁻濃度と硝酸還元酵素活性（NRA）に及ぼす影響を調査した。

(1) 地上部新鮮重は、処理後2日目ではNO₃⁻の有無に左右されなかった。しかし、NO₃⁻除去開始後4日目以降は地上部の生育は遅れ、7日目にはNO₃⁻除去区平均でNO₃⁻施与区平均の57%となり、培養液のNO₃⁻除去の影響は明らかであった。一方、生育に対する深夜照明の光質の影響は明確ではなかった。

(2) 葉身、葉柄の汁液中NO₃⁻濃度は、培養液のNO₃⁻除去開始後速やかに低下したが、その程度は照明区では無照明区より大きかった。しかし、照明の光質の影響は明瞭ではなかった。一方、汁液中NO₃⁻濃度は深夜照明の光強度に影響され、葉身の場合、NO₃⁻除去後2日目の無照明区で1059 ppmであったのに対して、50, 150, 250 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (PPFD) の各光強度では、それぞれ、799, 612, 531 ppmになった。

(3) NRAは、無照明ではNO₃⁻除去後時間の経過とともに低下した。しかし、照明区では、深夜照明中のNRAは維持され、無照明区よりも高くなる傾向を示した。