ピーマンの結実肥大に及ぼす蛍光灯連続光と暗期中断の影響

梶田正治¹・荻野知子¹・村上賢治¹・吉田裕一¹・向阪信一²

¹岡山大学農学部 700-8530 岡山市津島中 1-1-1

²松下電工株式会社・照明分社・照明戦略企画室 571-8686 大阪府門真市門真 1048

Fruit Set and the Development of Peppers as Affected by a Daily Dark Break of Continuous Fluorescent Illumination

Masaharu MASUDA¹, Tomoko OGINO¹, Kenji MURAKAMI¹,
Yuichi YOSHIDA¹ and Shinichi KOSAKA²

¹Faculty of Agriculture, Okayama University, 1-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530, Japan

²Matsushita Electric Works, Ltd., 1048 Kadoma, Osaka Prefecture 571-8686, Japan

Abstract

The objective of this experiment was to clarify the effect of a daily 4 h-dark break of continuous light to decrease the input-energy in pepper fruit production, cv. Kyo-midori. Plants were grown in a closed environment for 10 months in half-strength “Otsuka-A” nutrient solution (EC1.4 dS m⁻¹), in which the additional solution pH was adjusted to pH5.6, with a range of continuous light intensity between 150 and 350 μmol m⁻²s⁻¹, 800 ppm CO₂-enrichment, a constant temperature of 27°C and ambient humidity. The continuous light treatment was continued for 2 months from the beginning of first flowering (1st period), and the subsequent treatment of a daily 4h-dark break was carried out for 2 months (2nd period), and alternative treatments of continuous light and a daily 4 h-dark break were continued.

Green pepper fruit was harvested at marketable size about 20 days after flowering. At the end of each 2 month period, the remaining solution was renewed, and all the fruit on the plant was removed.

The number of harvested fruits over 2 months increased with plant growth. The cumulative pattern of harvested fruit in the daily 4h-dark treatments (2nd and 4th periods) did not differ from that obtained before and after the continuous light treatment (1st, 3rd and 5th periods). The electrical conductivity (EC) of the remaining solution fluctuated in the range of 1.2 and 3.5 dS m⁻¹, and pH in the range of 6.0 to 7.8. The plants grew vigorously without any symptoms of physiological disorder.

When compared to greenhouse peppers harvested in late spring, those under artificial light had 2 times higher chlorophyll and carotenoid content in the fruit skin. No difference was found between continuous light and the dark break.

From these results, a daily 4 h-dark break produce no problems in fruit yield and quality, and it contributes in reducing input-energy in pepper fruit production.

Keywords : pepper fruit production, dark break of continuous illumination, chlorophyll, carotenoid

緒 言

2002 年 2 月 27 日受付

2002 年 4 月 24 日受理

ピーマンは連続光下で栽培してもナス^{1,2)}やトマト^{3,4)}

に見られるような生理障害を全く発現せず正常に生育し結実肥大する⁵⁾。ピーマンの連続光下での乾物生産は、炭酸ガス 800 ppm⁶⁾、光強度 $300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 付近で最高となる⁷⁾。また、炭酸ガス濃度や光強度をさらに高めると葉にクロロシスが発現しやすくなる事がわかっている^{6,7)}。光強度を上げて暗期を適当な時間挿入すればピーマンに限らず、ナス、トマトでも正常に生育することは、その条件がより自然な明暗サイクルに近づくことから容易に理解できる。しかし、人工光強度を上げると、室内の冷却に膨大なエネルギーを要することになる。このエネルギーを極力少なくする意味で、われわれの一連の研究⁵⁻⁷⁾では光源に蛍光灯を用い光量は連続光とすることで不足分を補おうと考えてきた。しかるに、蛍光灯の場合でも暗期挿入が結実肥大に積極的な効果をもたらすか、あるいは、暗期挿入が結実肥大にマイナス効果をもたらさなければ、暗期は経済栽培を考える上で意味を持つことになる。

既報⁵⁾において 12 時間の明暗サイクルではピーマンは開花するものの、ほとんど結実しないことが明らかとなっていることから、本論では、24 時間を単位とした時の結実肥大に及ぼす 4 時間暗期挿入の影響を調査した。また、収穫果実のクロロフィル含量とカロチノイド含量を自然光下の同型水耕システムで収穫した果実のそれと比較した。

材料および方法

1. 連続光と 4 時間暗期中断下での生育と果実収量

ピーマン (*Capsicum annum* L.) '京みどり' を、パーミキュライトを入れたプラスチックトレイに播種し、温度 28°C、暗黒条件下で発芽させた。発芽後、温度 28°C、相対湿度 70%、蛍光灯 $150 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ を用いて 24 時間日長(連続光)に設定した人工気象室(日本医理化, NKsystem BIOTORON NC350)に移した。灌水を大塚 A 処方 1/2 濃度培養液 ミリ mol 単位 ($\text{NO}_3\text{-N}$; 8.0, $\text{NH}_4\text{-N}$; 0.85, P; 0.85, K; 3.8, Ca; 2.05, Mg; 0.925, S; 0.925) で 2 日に 1 回行った。子葉展開時にミニロックウール ($2 \times 2 \times 2 \text{ cm}$) へ、第 2 本葉展開時にロックウールキューブ ($7 \times 7 \times 5 \text{ cm}$) に移植した。本葉が 6~7 枚展開した時(播種後 35 日)に温度 28°C、 CO_2 濃度 800 ppm に設定した蛍光灯連続光(定植時草冠の光強度 $150 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、生育するにつれて高まり最終的には $350 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 下の人工気象室 ($2.6 \times 1.7 \times 2.2 \text{ m}$) に定植した。供試本数は 3 株で、2 個のロックウールスラブ ($90 \times 30 \times 10 \text{ cm}$) に植物体を 3 株植え、ロックウールス

ラブの表面をシルバーボリで覆った。貯液タンクには、前報⁸⁾に準じてリン酸により pH を 5.6 に調整した大塚ハウス 1/2 濃度を入れた。還流ポンプを定植時には 1 日に 4 回、定植後 4 か月からは 1 日に 16 回、15 分間稼働させることにより養液を循環させた。貯液タンクの水量が約 1/4 になった頃に当初の培養液を補充した。2~3 日おきに手で植物体を振動させ受粉を促した。

定植後 2 週間毎に残存培養液をサンプリングし、pH と電気伝導度 (EC)、無機成分 ($\text{NO}_3\text{-N}$, P, K, Ca, Mg) を測定した。P はバナドモリブデン酸法、 $\text{NO}_3\text{-N}$, K, Ca, Mg はイオンクロマトグラフにより測定した。また、週に 2 回、開花後約 20 日前後を目安に肥大が止まった果実を収穫し、果実の生体重と尻腐れ果の発生率について調査した。

単一の栽培装置で長期にわたって植物体の生育反応を調べるために、I 期を 2 か月として第 V 期までの 10 か月間栽培を行った。第 1 番花の開花時から 2 か月毎に連続光区間と 4 時間暗期挿入区間を交互に設定し、暗期挿入の影響を推定した。光条件を変えた時点で貯液槽に残っている培養液を捨て、新しい養液を加えて 20 分程度循環させた後に再度捨て、新しい養液を満たした。この時、果実は子房の肥大が認められた幼果も含め、すべて取り除いた。

2. 人工光下と自然光下における果実の色素含量の比較

蛍光灯連続光下で収穫したピーマン果実と自然光下のハウス内で収穫した果実の色素含量を比較すると同時に 4 時間の暗期挿入が果実の色素含量にどのような影響を及ぼすかを調査した。これには、第 I, II, III, IV, V 期に収穫した果実を供試した。クロロフィルの分析にはピーマン果皮 10 g を細かく切り、そこから 5 g を乳鉢にとり 2.5 g の海砂と約 20 ml のアセトンを加えて磨砕ろ過し、残渣の緑色がなくなるまで数回アセトンを加えて抽出を繰り返した。抽出液は 80 ml に定容し分光光度計(島津 UV-160A)により 645 nm と 663 nm の吸光度を測定した⁹⁾。また、カロチノイドの定量は、上述のアセトン抽出液のうち 20 ml をナス型フラスコにとり減圧下でアセトンを蒸発させ、残渣を 10% KOH-EtOH に溶解したあと、ヘキサンで数回分取し、無水硫酸ナトリウムで脱水後、定容し 450 nm の吸光度を測定した。総カロチノイド量は γ -カロチン量として算出したが、その値は、n-ヘキサン溶液 1 l 中に 1 mg の γ -カロチンが存在すると、その溶液の吸光度は 0.25 となるので、この既知の値を用いて換算した。

Fig. 1 Cumulative pattern of harvested fruits as affected by continuous lighting (◇) and a daily 4h-dark break (◆)
×-----× Young fruits at pre-harvesting stage

結果および考察

1. 連続光と4時間暗期中断下での生育と果実収量 果実収量

播種後42日で第1花が開花し、果実は播種後62日で(開花20日)で収穫できるほどの大きさに達した。この10か月間での総収穫果数は株当たり平均990個、総収穫果重量は14kgとなった。なお、幼果も含めると株当たり1340個となった(Fig. 1 累積収穫果実総数)。

ピーマンの2か月毎の累積収穫果数を見ると4時間暗期を挿入した第II期、第IV期ともに収量はそれらの前後に設定した24時間連続光区での収量の増加パターンと比べ大きな変化を示さなかった(Fig. 1)。これは、連続光耐性のピーマンでさえ4時間の暗期は連続光250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 付近で維持された個体の光合成能をわずかに高めていることを意味する。このことと、光強度を120 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、12時間の明暗サイクルではピーマンは開花してもほとんど結実しない³⁾ことを考え合わせると、ピーマンにおける乾物生産の最適光強度は暗期の長さによって決定されると推察される。したがって、暗期

の長さを可変変数(∞)として乾物生産の最適光強度を求めることにより、ピーマンの潜在的生産能力を知ることができる。本システムでは、光強度が制限要因となることから、その範囲内で経済的組み合わせを採用することになろう。

生育様相

茎の伸長は生育後期になるほど抑制され、単位期間当たりの節数も少なくなった。節間は当初から短く平均2.2cmで、III期以降は1.6cmとさらに短縮した。果重は生育後期になるほど小さくなったが、果実の乾物率は高まった。果実の尻腐れ率は連続光区の第I期が25%と高かったが、その後の期ではほとんど発生しなかった(Table 1)。

培養液変動

残存培養液のpHは連続光、4時間暗期挿入に関係なく6.0~7.8の間で推移した(Fig. 2)。残存培養液のECも連続光、4時間暗期挿入に関係なく、生育前期には徐々に低下し、生育後期には上昇した。なお、定植後4か月の時点でECが1.0 dSm^{-1} 前後にまで低下したため、添加培養液を1.8 dSm^{-1} に上げたところ、それ以降にECは急速に上昇した。そこで、ひと半月のちに再び添加培養液を1.4 dSm^{-1} に戻したところ、1.6~2.6

Fig. 2 Changes in electrical conductivity(EC) and pH in remaining nutrient solution

Table 1 Effect of a daily 4h-dark break on vegetative growth, fruit development and incidence of blossom-end rot.

Stage	Light/dark (h)	Growth of main shoot			Fresh weight per fruit (g)	% of dry matter in fruit	blossom-end rot (%)
		Length (cm)	Number of node	Internode length (cm)			
I	24/0	37.5	17.3	2.2	24.6	7.4	24.9
II	20/4	33.8	16.8	2.0	16.7	6.6	0.0
III	24/0	22.4	14.2	1.6	16.3	7.7	0.0
IV	20/4	17.8	11.2	1.6	13.7	8.4	0.1
V	24/0	11.2	6.4	1.6	13.8	8.6	0.1

Fig. 3 Changes in cation and anion concentration in remaining nutrient solution.

dSm⁻¹の範囲内でかなり安定して推移した。

残存培養液の硝酸態窒素濃度はEC値と対応して、生育前期には低下する傾向にあり、生育後期には徐々に上昇した(Fig. 3)。リン濃度は定植直後に添加培養液よりもはるかに高くなったが、これはロックウールスラブからリンが浸出したことによる。その後、リンは生育期間を通して低い濃度で推移した。カリウム、カルシウム、マグネシウムの濃度も生育前期には低く推移し、生育後期には上昇した。しかし、カリウムの濃度だけは常に減少する傾向にあった。なお、アンモニア態窒素は検出されなかった。以上のように、培養液のpHならびに成分濃度の変動には4時間暗期挿入の影響がほとんど認められず、それら変動パターンは管理法が同様である前報⁸⁾とほぼ類似したこと(ただし、EC1.8 dSm⁻¹区間を除く)培養液は大塚A処方1/2濃度、リン酸でpH5.6に調整して栽培を行えばよいと考えられた。

まとめ

連続光に4時間の暗期を挿入しても収穫果数の増減パターンに大きな変動はみられず果実の尻腐れ率にも影響が現れなかったことから、4時間暗期の挿入は投入エネルギーの低減化に貢献できるものといえる。なお尻腐れ率は定植直後だけに多発したが、この原因については今後検討を要する。

2. 人工光下と自然光下における果実の色素含量の比較

果実中のクロロフィル含量、カロチノイド含量ともに人工光下で栽培した果実の方が自然光下で栽培した果実よりも有意に高く約2倍となった(Fig. 4)。しかし、人工光下で栽培した果実においては連続光区と4時間暗期挿入区で差は認められなかった。

自然光下のハウス栽培では温度、湿度、CO₂濃度な

Fig. 4 Chlorophyll and carotenoid contents in pepper fruits harvested in natural and artificial light environments.

どの環境が刻々と変化するのに対し、人工光下の栽培ではそれら環境はほぼ一定に制御されている。このように自然光下の環境はすべてが変化するため、環境の影響を個別に人工光下のそれと比較することは不可能といえる。したがって、自然光空間と人工光空間といった一般概念のもとに比較して次のように言えるであろう。つまり、環境が一定に制御された人工光下のピーマン果実は自然光下の果実よりもクロロフィル含量、カロチノイド含量とも2倍近く高まる。今後は、さらなる収量の増大手法を探りつつ、収穫果実の脂質成分、ポリフェノールさらにはビタミンCやビタミンEなど機能性成分についても比較検討する必要がある。

摘 要

蛍光灯連続光下でのピーマンの長期栽培の最適条件を明らかにする研究の一環として、24時間を単位とした時の着果と肥大に及ぼす4時間暗期挿入の影響を調査した。

ピーマン‘京みどり’を蛍光灯連続光(光強度150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)で育苗し、光強度150~350 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、温度27°C、CO₂濃度800 ppmに設定した人工気象室内のロックウールに定植した。第1番花開花時から約2か月毎に第I期から第V期までに分け、連続光区と4時間暗期挿入区を交互に設定し、10か月栽培を行った。また、

蛍光灯連続光下で育苗した苗をガラス室に設置したロックウールに定植し自然光下の果実品質を人工光下のそれと比較した。

2 か月毎の累積収穫果数は生育が進むにつれて増加した。暗期を挿入した第 II 期、第 IV 期ともに収量はそれらの前後に設定した 24 時間連続光区での収量の増加パターンと比べ大きな変動は示さなかった。果実の尻腐れ率は連続光の第 I 期で 25% と高かったが、その後はほとんど発生しなかった。残存培養液の pH は連続光、暗期挿入に関係なく 6.0~7.8 の間で推移した。EC も連続光、暗期挿入に関係なく、生育前期には低下傾向を示し、生育後期には上昇傾向を示した。この EC に対応して硝酸態窒素、カリウム、カルシウム、マグネシウムの濃度は生育前期には低く推移し生育後期には徐々に上昇した。しかし、カリウム濃度は常に減少した。リン濃度は pH 調整 (pH5.6) に用いた正リン酸にも影響され、生育期間を通して当初の設定値近い濃度で推移した。

人工光下で栽培した果実はクロロフィル含量、カロチノイド含量ともに自然光下で栽培した果実の 2 倍を示した。24 時間連続光で栽培した果実と 4 時間暗期挿入で栽培した果実間に違いはなかった。

以上の結果より、ピーマン‘京みどり’は 4 時間の暗期を挿入しても果実収量の減少をきたさないものと考えられ、果実の色素含量、つやなどにも影響が出なかったことから、4 時間暗期の挿入は投入エネルギーの低減に貢献できるものといえる。

謝 辞

本研究は、文部科学省科学研究費「基盤研究(B)-(2) 課題番号-11556006」によって行われたもので記して感謝の意を表す。

引用文献

- 1) Murage, E. N., Sato, Y. and Masuda, M. : Relationship between dark period and leaf chlorosis, potassium, magnesium and calcium content of young eggplants, *Scientia Hort.*, 66 : 9-19 (1996)
- 2) Murage, E. N., Watashiro, N. and Masuda, M. : Leaf chlorosis and carbon metabolism of eggplant in response to continuous illumination and carbon dioxide, *Scientia Hort.*, 67 : 27-37 (1996)
- 3) Withrow, A. P. and Withrow, R. B. : Photoperiodic chlorosis in tomato, *Plant Physiol.*, 24 : 657-663 (1949)
- 4) Hillman, W. S. : Injury of tomato plants by continuous lighting and unfavorable photoperiodic cycles, *Amer. J. Bot.*, 27 : 87-97 (1956)
- 5) Masuda, M. and Murage, E. N. : Continuous fluorescent illumination enhances growth and fruiting of pepper, *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, 67 : 862-865 (1998)
- 6) 梶田正治, 吉田裕一, 村上賢治, 浜田優子, 向阪信一 : 蛍光灯連続光下でのピーマンの結実肥大に及ぼす炭酸ガス施肥効果, *植物工場学会誌*, 12 (4) : 254-260 (2000)
- 7) 梶田正治, 山口朋之, 村上賢治 : ナスとピーマンの乾物生産および葉の光生理障害と SOD 活性に及ぼす連続光強度の影響, *植物工場学会誌*, 14 (1) : 32-37 (2002)
- 8) 梶田正治, 山口朋之, 尾崎真紀, 村上賢治, 吉田裕一, 向阪信一 : 蛍光灯連続光下でのピーマン栽培における循環培養液の濃度・組成および pH の変化とその管理, *植物工場学会誌*, 13 (3) : 192-198 (2001)
- 9) Arnon, D. I. : Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.*, 24 : 1-15 (1949)