蛍光灯連続光下における暗期挿入および暗期の温度がシシトウ果実の 辛味発現に及ぼす影響

村上賢治・井戸睦己・榊田正治

岡山大学大学院自然科学研究科 700-8530 岡山市津島中 1-1-1

Fruit Pungency of 'Shishito' Pepper as Affected by a Dark Interval in Continuous Fluorescent Illumination with Temperature Alteration

Kenji MURAKAMI, Mutsumi IDO and Masaharu MASUDA

Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, Tsushimanaka 1-1-1, Okayama, 700-8530, Japan

Abstract

The objective of this experiment was to elucidate the effects of a daily 6h-dark interval in continuous fluorescent illumination with temperature alteration to decrease the pungency level in sweet pepper 'Shishito' production. Plants were grown in a closed environment in half-strength "Otsuka-A" nutrient solution ($EC\ 1.4\ dS\ m^{-1}$), whose pH was adjusted to 5.6, with a range of light intensity between 150 and 350 $\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$, 800 ppm CO_2 enrichment and ambient humidity.

In experiment 1, seedlings were grown under a 18/6 hr (light/dark) cycle with corresponding temperatures of 28/20°C for 80 days (1-I period), 28/16°C for 60 days (1-II period) and 28/28°C (1-III period). In experiment 2, seedlings were grown either under continuous fluorescent illumination and a constant temperature of 28°C for 80 days (2-I period) or a 18/6 hr (light/dark) cycle with corresponding temperatures of 28/16°C (2-II period).

Green peppers were harvested at marketable size. Capsaicin was extracted from the fruit placenta with methanol and its concentration was determined with HPLC. Fruits under continuous fluorescent illumination and constant 28°C (2-I period) had fewer seeds and a higher concentration of capsaicin than greenhouse fruits harvested in summer. Capsaicin concentration decreased and the number of seeds increased with a daily 6h-dark interval in continuous fluorescent illumination with temperature alteration. These results suggest that there is a negative correlation between seed formation and capsaicin biosynthesis.

Keywords: capsaicin, closed environment, fruit production, number of seeds, sweet pepper

緒 言

閉鎖空間での人工照明を用いた作物生産は、生育に及ぼす全ての要因を人為的に制御し最適条件とすることが可能で

あり、地下、極地、さらに宇宙ステーションにまで、生産の場を設定することができる。

果菜は一般に、正常な開花・結実のために強光を必要とする。しかし、人工光を用いた閉鎖環境下での作物栽培では、照明装置から発生する熱などの問題から、自然光下より光強度を低くせざるを得ない。その場合、生育促進のため日長を長くし、総光エネルギー量を増やすことが考えられる。しかし、ナス (Murage *et al.*, 1996a; Murage *et al.*, 1996b) や、トマト (Withrow *et al.*, 1949; Hilman *et al.*, 1956) など多く

2006 年 4 月 21 日受付

2006 年 7 月 21 日受理

Corresponding author: Kenji Murakami

(kenmura@cc.okayama-u.ac.jp)

の作物は、日長が一定時間以上になると生育に障害が生じる。一方、同じナス科でもトウガラシ（ピーマン）（*Capsicum annuum* L.）は、連続光下でも障害なく旺盛に生育し、果実生産を行うことができることが明らかにされている（Masuda and Murage, 1998）。

これまでの研究で、ピーマン‘京みどり’の連続光下での乾物生産は、CO₂濃度 800 ppm（Masuda *et al.*, 2000）、光強度 300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 付近で最大となること（Masuda *et al.*, 2001）、ピーマンの室内連続光栽培において、主枝の切り戻しにより少なくとも 1 年間は連続栽培が可能なが明らかにされている（Masuda *et al.*, 2000）。また、4 時間の暗期挿入を行っても果実収量が減少せず、果実品質にも影響がなかったことから、暗期を挿入することにより投入エネルギーの低減が図れることが示されている（Masuda *et al.*, 2002）。

さらに、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やカロテノイド濃度がいずれも 2 倍近くまで高まった（Masuda *et al.*, 2002）。このことは、閉鎖人工光下での栽培により高付加価値の果実生産を行いうることを示唆している。

トウガラシ甘味・小果品種であるシシトウは、果実が小さく株当たりの収穫果数が多く、植物体も比較的小コンパクトであり、閉鎖環境内での栽培に適した特性を持っていると考えられる。また、予備試験において、人工気象器内蛍光灯下の栽培でも、シシトウはピーマンのように節間が詰まることなく管理しやすく、また、長形果実の品種のように果実が曲がらないことが示された。しかし、蛍光灯連続光下で栽培すると、屋外で栽培した場合より、辛味の強い果実の割合が多くなる傾向が認められた。

本研究では、人工気象器内のシシトウ果実の辛味発現に、連続光および暗期の温度条件が影響を及ぼしていると考え、それらを改変した条件で植物体を栽培し、果実の辛味発現を調べた。

材料および方法

材料植物の栽培

高知県農業技術センターより譲渡された‘ししほまれ’（中形系統）を供試した。この品種は、通常の栽培では辛味がほとんど生じない品種として、高知県で育成されたものである。

種子をシャーレ内で催芽させた後、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、28℃に保った育成器で発芽させた。発芽後、温度 28℃、白色蛍光灯による 120 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の光強度で 12 時間照明の育成器内においた。子葉が完全に展開した実生を、縦 7.5 cm × 横 7.5 cm × 高さ 5 cm のロックウールキューブ（ニチアス社製）に移植し、1/2 単位

大塚 A 処方培養液（NO₃-N 8.0, NH₄⁺-N 0.85, P 0.85, K 3.8, Ca 2.05, Mg 0.925, S 0.925, 単位 mM）を 1 日 1 回施与した。播種後 40 日目の本葉 7 ～ 8 枚展開時に、大型インキュベータ（庫内容量；幅 1700 × 奥行き 2600 × 高さ 2170 mm）内に定植した。白色蛍光灯により上から照射し、定植時の草冠での光強度が 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ で、生育するにつれて植物体上部での光強度が強くなり、最終的には 300 ～ 350 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ となった。CO₂濃度は 800 ppm に制御した。湿度は成行きとした。供試本数は 2 株で、シルバーボリで覆ったロックウールスラブ（90 × 30 × 10 cm）に 45 cm 間隔で 2 株植えた。50 dm³ の貯液タンクを用い、Masuda *et al.* (2002) の方法に準じてりん酸により pH を 5.6 に調整した 1/2 単位大塚 A 処方培養液を入れた。還流ポンプを 1 日 16 回、15 分間稼働させることにより培養液を循環させた。貯液タンクの液量が約 1/4 になった頃に新しい培養液を補充した。

植物体は主枝 4 本を伸ばし H 形に配置した。主枝の 10 節目までは、発生する側芽は 1 節の葉と花を残して切り戻した。主枝の 10 節目で摘心し、その後は、過繁茂にならないよう適宜せん定しながら側芽を伸ばした。受粉を促すため、1 から 2 日おきに植物体を手で振動させた。

温度および日長処理

単一の栽培装置で温度と暗期サイクルの影響を調べるため、栽培の途中で暗期の温度と照明時間を変え、その条件の下で着果した果実を分析した。第 1 回目の実験では、明期 18 時間 / 暗期 6 時間のサイクルで明期 28℃ / 暗期 20℃ の条件に定植し（1-I 期）、定植 80 日後に暗期の温度を 16℃ に下げ（1-II 期）、さらにその 60 日後に暗期の温度を 28℃ に上げた（1-III 期）。第 2 回目の実験では、同様に育苗した株を、24 時間連続照明で 28℃ 一定の条件下に定植し（2-I 期）、定植 80 日後に 6 時間の暗期を挿入し暗期の温度を 16℃ とした（2-II 期）。

温度および照明時間のサイクルの変更時には、幼果を含むすべての果実を除去した。約 6 cm の長さになった果実を順次、処理区当たり 30 個収穫し、種子数とカプサイシン含量を測定した。ただし、1-I 期では、種子数の調査は行わなかった。

対照として、無加温ビニルハウス内でポット栽培した同品種の果実を収穫し、種子数とカプサイシン含量を測定した。3 月 29 日に播種し、子葉が展開した苗をロックウールキューブに移植し、1/2 単位大塚 A 処方培養液を与えた。定植までは、明期 16 時間 / 暗期 8 時間、温度 28℃ 一定としたインキュベータ内で育成した。5 月 6 日に市販の培養土を入れた直径 30 cm のポリポットに 1 株ずつ、2 株定植した。1 株は自然日長下（約 14 時間）におき、もう 1 株は夜間白色蛍光灯で約 20 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の補光を行うことによる 24 時間日長下におい

た。栽培期間中は、最高気温約 35℃、最低気温約 10℃で推移した。7月12日に、それぞれの株から、約 6 cm の長さになった果実を 10 個ずつ収穫した。

カプサイシンの定量

個々の果実について、胎座組織に含まれるカプサイシンの濃度を、高速液体クロマトグラフ (HPLC) を用いた Jo *et al.* (1997) の方法に従って測定した。トウガラシ果実の HPLC による分析では、4 種類のカプサイシノイドが検出されるが (Jo *et al.*, 1997)、本実験では、最も明瞭で高いピークが検出されるカプサイシンの濃度について調査した。また、トウガラシではカプサイシンは主として果実の胎座に含まれることから (Jo *et al.*, 1997)、本実験では胎座を分析対象とした。

収穫した果実を切開して種子数を数えた後、胎座を取り出し、55℃で 12～24 時間乾燥させた。十分に乾燥した試料を乳鉢に入れ乳棒で磨砕した。粉末試料 30～80 mg をはかり取って遠沈管に入れ、99% メタノールを加え 5 ml に定容した。超音波洗浄器を用い室温で 1 時間超音波処理し、カプサイシンを抽出した。抽出液は 0.20 μ m 孔径のフィルターを用いてろ過した。抽出液 25 μ l を 4.6 mm $\times$ 150 mm の STR ODS-II カラム (島津) に注入し、流速 1 ml/min、カラム温度 40℃、移動相はアセトニトリル: 純水 (45:55, v/v, 0.05% リン酸を含む) でカプサイシンを分離した。280 nm での吸光度を測定し、精製カプサイシン (フナコシ) の標準溶液を基準として濃度を算出した。

また、果実を食べた際に辛味が感じられる胎座のカプサイシン濃度を調べるため、果実を縦に 2 分割し、果皮と胎座を含む半分を生食して辛味を評価し、残り半分の胎座からカプサイシンを抽出し濃度を測定した。辛味の評価は 3 人で行い、21 個の果実を、辛味が感じられない、少し辛い、かなり辛いのに三つに分類した。

結 果

食味試験の結果、辛味の感じられなかった果実の胎座からは、カプサイシンが検出されないか、されても 50 mg/100 gDW 以下の濃度であった (Fig. 1)。辛味が少し感じられた果実では、いずれもカプサイシンが検出され、濃度は 50 mg/100 gDW 以下であった。強い辛味の感じられた果実のカプサイシン濃度は、0 から 450 mg/100 gDW まで分布した。

ビニルハウス内の自然光・自然日長下で栽培した株では、70% の果実ではカプサイシンが検出されず、最も濃度の高かった果実でも 64 mg/100 gDW であった (Fig. 2)。ビニルハウス内で昼間自然光・夜間電照による連続日長下で栽培した株は、80% の果実でカプサイシンが検出され、最も濃度の高かった果実で 111 mg/100 gDW であった。

Fig. 1 Frequency distribution of capsaicin concentration in the placenta of pepper fruits with various degrees of pungency.

Fig. 2 Frequency distribution of capsaicin concentration in the placenta of fruits harvested from pepper plants grown under various daylength and temperature regimes.

Fig. 3 Number of seeds per fruit harvested from plants grown under various daylength and temperature regimes.

Fig. 4 Correlation between seed number and capsaicin concentration in pepper fruit.

明期 18 時間 / 暗期 6 時間のサイクルで、明期 28℃ / 暗期 20℃ の条件 (1-I 期) で生育させた株から収穫した果実は、ビニルハウス栽培の株の果実よりもカプサイシン濃度が高く、Fig. 2 に示すように 50-100 mg/100gDW にピークがあり、23% の果実は 500 mg/100 gDW 以上の高い値を示した。明暗サイクルはそのまま、暗期の温度を 16℃ に下げると (1-II 期)、カプサイシン濃度が低下し、70% の果実が 0-50 mg/100 gDW の範囲内となり、500 mg/100 gDW 以上の果実は 7% に減少した。同じ明暗サイクルで暗期の温度を 28℃ に上げると (1-III 期)、カプサイシン濃度が再び上昇し、500 mg/100 gDW 以上の果実の割合が 20% に増加した。24 時間連続照明で 28℃ 一定の条件下 (2-I 期) で生育させた株の果実は、カプサイシン濃度が高く、60% の果実が 500 mg/100 gDW 以上の高い値を示した。最も高い果実では、約 6000 mg/100 gDW の濃度でカプサイシンが含まれていた。6 時間の暗期を挿入し暗期の温度を 16℃ とすると (2-II 期)、カプサイシン濃度が低下し、50% の果実が 50 mg/100gDW 以下の値となり、500 mg/100 gDW 以上の果実の割合は 13% にまで減少した。

果実当たりの種子数は、ビニルハウスの自然日長下では平均 43 個で、電照により 24 時間日長とすると平均 35 個と減少した (Fig. 3)。明期 18 時間 / 暗期 6 時間のサイクルで明期 28℃ / 暗期 16℃ の条件では、1-II 期、2-II 期のいずれも、種子数は約 40 個であった。一方、温度を 28℃ 一定とすると、

果実当たり種子数は、明 / 暗サイクルが 18/6 時間では平均 25 個、24/0 時間では平均 23 個と、いずれも少なかった。

各処理区で収穫された果実をすべてあわせて、種子数と胎座のカプサイシン濃度との関係をみた (Fig. 4)。両者の間には弱い負の相関があり、500 mg/100 gDW 以上と非常に高いカプサイシン濃度を示した果実は、いずれも種子数が 40 個以下であった。

考 察

食味試験の結果、辛味が感じられなかった果実および少し辛味が感じられた果実は、いずれも胎座のカプサイシン濃度が 50 mg/100 gDW 以下であった。一方、強い辛味を感じた果実では、78% の果実が 50 mg/100 gDW 以上の値を示した。これらの結果から、強い辛味を感じる胎座のカプサイシン濃度は、およそ 50 mg/100 gDW と考えられた。

ビニルハウス内の自然光・自然日長下で栽培した株では、ほとんどすべて果実の胎座カプサイシン濃度が 50 mg/100 gDW 以下であった。一方、人工気象器内で連続光・28℃ 一定で栽培した株は、カプサイシン濃度が高く、50 mg/100 gDW 以下の果実はほとんどなく、60% の果実が 500 mg/100 gDW 以上であった。この値は、同様の方法で測定したトウガラシ辛味品種の値 (Jo *et al.*, 1997) に匹敵するものであった。6 時間の暗期を挿入し、暗期の温度を 20℃ に下げた条

件(1-II期)では、500 mg/100 gDW以上の果実の割合は23%で、連続光・28℃一定の条件より明らかにカプサイシン濃度が低く、暗期を16℃に下げるとさらに減少し、50%以上の果実が50 mg/100 gDW以下の値を示した。また、定植時から暗期挿入・暗期20℃で栽培した場合(1-I期)も、栽培途中で暗期挿入・暗期16℃に変えた場合(2-II期)も、いずれもカプサイシン濃度が連続光・28℃一定より明らかに低かったことから、株の齢に関係なく、暗期挿入・暗期低温によりカプサイシン濃度が低下することが示された。

温度は28℃一定で、暗期挿入のみ行ってもカプサイシン濃度は減少したが、暗期の温度を下げるとさらに減少したことから、カプサイシン濃度の上昇には、連続光と温度28℃一定という両方の要因が関与していると考えられた。また、ビニルハウス内の栽培でも、電照により連続光とすると、カプサイシン濃度がやや上昇したことから、たとえ弱光でも、連続光とするとカプサイシン濃度が上昇することが考えられた。

本実験では、種子数とカプサイシン濃度の間には負の相関がみられ、種子数が40個以上と多い果実はすべてカプサイシン濃度が低かった。また、温度が28℃一定の条件では、果実の種子数は少なかった。これらの結果から、種子の形成とカプサイシン生成には関連があり、種子が多く形成されるような条件では、カプサイシンの生成が抑えられることが考えられる。トウガラシの甘味品種である‘万願寺’(*Minamiyama et al.*, 1999)や、シシトウ(*Ishikawa et al.*, 2004)において、単為結果させた無種子果実でカプサイシン濃度が高かった結果は、このことを裏付けている。

本実験では、連続光、6時間暗期挿入のいずれも、温度を28℃一定とすると、果実当たりの種子数が同程度まで減少した。このことは、日長に関係なく、温度が一日中28℃で一定であることが、受精を阻害し、種子数減少につながっていると考えられる。*Rylski and Spigelman* (1982)も、夜温を24℃と高くした条件でトウガラシを栽培すると、受精が抑制され落花割合が上昇することを報告している。

温度28℃一定とすると、連続光と6時間暗期挿入の間には果実当たりの種子数には明らかな違いがみられなかったが、果実のカプサイシン濃度は6時間暗期挿入の方が明らかに低下した。このことは、カプサイシン濃度の上昇の原因として、種子形成の抑制以外の要因もあることを示している。

トウガラシの辛味品種においては、乾燥ストレスにより辛味成分の濃度が上昇することが報告されている(*Estrada et al.*, 1999; *Wierenga and Hendrickx*, 1985)。Estrada *et al.* (1998)は、トウガラシの辛味品種において、カプサイシンとリグニンの蓄積は競合関係にあり、peroxidaseがその競合に関与していると述べている。このことから、ストレスにさらされた植物体ではperoxidase活性が変化し、それがカプサイシン濃

度の上昇を引き起こす原因となったとも考えられる。

本研究の結果、蛍光灯連続光下で栽培した際にシシトウ果実に生じる強い辛味は、暗期挿入と暗期低温で大幅に低減されることが示された。しかし、6時間暗期挿入、暗期を16℃に設定しても、強い辛味を生じる果実が低率ながらみられたことから、強い辛味の果実を完全になくすためには、室内人工光栽培に適した、辛味のより少ない系統を育成する必要がある。その際、辛味が強く発現する連続光・28℃一定条件を、スクリーニングの条件として用いることができる考えられる。

摘 要

シシトウの閉鎖人工照明栽培における果実の辛味低減を目的とし、暗期挿入および暗期低温の効果について検討した。

通常の栽培では辛味を生じないシシトウ‘ししほまれ’を試し、植物体上部での光強度が150～350 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ になるように白色蛍光灯を用いて照明し、CO₂濃度を800 ppmに制御した人工気象器内で栽培した。明暗サイクルを連続照明および6時間暗期挿入、暗期の温度を28、20、16℃とした。明期の温度はいずれも28℃とした。収穫果実の胎座組織からカプサイシンをメタノールで抽出し、高速液体クロマトグラフにより測定した。

食味試験の結果、強い辛味が感じられなかった果実における胎座のカプサイシン濃度は、いずれも50 mg/100 gDW以下であった。自然光・自然日長栽培株の果実は、90%がその範囲内にあった。自然光＋電照により24時間日長とすると、果実のカプサイシン濃度はやや上昇した。人工気象器内で連続照明・28℃一定で栽培すると、カプサイシン濃度が著しく上昇し、90%の果実が50 mg/100 gDW以上であり、60%の果実が500 mg/100 gDW以上の高い値を示した。6時間の暗期を挿入すると、カプサイシン濃度が減少し、50 mg/100 gDW以上の果実の割合が約60%、500 mg/100 gDWの果実の割合が20%になった。さらに、暗期の温度を16℃に下げると、カプサイシン濃度がさらに減少し、50%以上の果実が50 mg/100 gDW以下の値を示した。果実当たり種子数とカプサイシン含量の関係を調べた結果、両者には負の相関があり、種子数が40個以上と多い果実はすべてカプサイシン含量が低かった。また、温度が28℃一定の場合、カプサイシンの濃度が高く、果実当たりの種子数が少なかった。これらのことから、種子形成とカプサイシン生成との関係が示唆された。

本研究の結果、人工気象器内で連続光・28℃一定下でシシトウ果実に生じる強い辛味は、暗期挿入と暗期低温で低減しうることが示された。

引用文献

- Estrada, B., Pomar F., Diaz J., Merino, F., Bernal, M. A. 1999. Pungency level in fruits of the Padron pepper with different water supply. *Scientia Hort.* 81 (4): 385–396.
- Hillman, W. S. 1956. Injury of tomato plants by continuous lighting and unfavorable photoperiodic cycles. *Amer. J. Bot.* 27 (1): 87–97.
- Ishikawa, K., Sasaki, S., Matsufuji, H., Nunomura, O. 2004. High β -carotene and capsaicinoid contents in seedless fruits of 'Sisitoh' pepper. *HortScience*. 39 (1): 153–155.
- Jo, M. H., Yamamoto, M., Matsubara, S., Murakami, K. 1997. Fruit yield, and ascorbic acid and capsaicinoid contents in the fruit of intervarietal hybrids of *Capsicum annuum* L. (in Japanese). *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 65 (4): 713–722.
- Masuda, M., Murage, E. N. 1998. Continuous fluorescent illumination enhances growth and fruiting of pepper. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 67 (6): 862–865.
- Masuda, M., Yoshida, Y., Murakami, K., Hamada, Y., Kosaka, S. 2000. Fruit set and its development of pepper as affected by carbon dioxide enriched atmospheres under continuous fluorescent illumination (in Japanese). *J. Soc. High Tech. Agric.* 12 (4): 254–260.
- Masuda, M., Yamaguchi, T., Osaki, M., Murakami, K., Yoshida, Y., Kosaka, S. 2001. Fluctuation and management of mineral concentration and pH in circulating nutrient solution for pepper fruit production under continuous fluorescent illumination (in Japanese). *J. Soc. High Tech. Agric.* 13 (3): 192–198.
- Masuda, M., Yamaguchi, T., Murakami, K., Kosaka, S. 2002. Effects of continuous light intensity on dry mass yield, light-induced leaf injury and superoxide dismutase activity in pepper and eggplant (in Japanese). *J. Soc. High Tech. Agric.* 14 (1): 32–37.
- Murage, E. N., Sato, Y., Masuda, M. 1996a. Relationship between dark period and leaf chlorosis, potassium, magnesium and calcium content of young eggplants. *Scientia Hort.* 66 (1): 9–19.
- Murage, E. N., Watashiro, N., Masuda, M. 1996b. Leaf chlorosis and carbon metabolism of eggplant in response to continuous illumination and carbon dioxide. *Scientia Hort.* 67 (1): 27–37.
- Minamiyama, Y., Nakajima, H., Mizu, O., Yazawa, S. 1999. Pungency induced by stimulative parthenocarpy on sweet pepper 'Manganji' (in Japanese). *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 68 (Supple. 1): 241.
- Rylski, I., Spigelman, M. 1982. Effects of different diurnal temperature combinations on fruit set of sweet pepper. *Scientia Hort.* 17 (2): 101–106.
- Wierenga, P. J., Hendrickx, J. M. H. 1985. Yield and quality of trickle-irrigated chile peppers. *Agricultural Water Management*. 9 (4): 339–356.
- Withrow, A. P., Withrow, R. B. 1949. Photoperiodic chlorosis in tomato. *Plant Physiol.* 24 (4): 657–663.