

閉鎖型植物工場を対象とした野菜の生長と 栄養成分に及ぼす光照射の影響

平野勉央[†]・青木秀敏^{††}

Effect of Light Irradiation on Plant Growth and Nutritional Content of Vegetables Intended for Closed Plant Factory

Katsuteru HIRANO[†] and Hidetoshi AOKI^{††}

ABSTRACT

Solar irradiation affects photosynthesis and the composition of vegetative tissue. Here, the effects of UV-A irradiation on growth, and amino acid and vitamin content were investigated in *Brassica rapa*. *B. rapa* seeds were planted in soil in pots saturated with nutrient solution under four light irradiation regimes: natural light plus red light, blue light, visible light or UV-A light. Experiments were conducted in an air-conditioned room with constant irradiation. Growth rate and dry weight, and nitrate ion (NO_3^-), amino acid, ascorbic acid and chlorophyll concentrations were measured in the dried leaves. In the present research, we examine the effects of UV-A irradiation and the timing of its application on plant growth and the quality of postharvest vegetables. The results show that the stress of UV-A irradiation slowed foliage growth and decreased rate of photosynthesis.

Key Words: *photosynthesis, amino acid, growth rate, nitrate ion, ascorbic acid*

キーワード：光合成，アミノ酸，生長速度，硝酸イオン，アスコルビン酸

1. 植物工場の現状と課題

1.1 太陽光型植物工場と閉鎖型植物工場

欧州では、昔から実用的規模の植物工場が運営されている。日本の農業においては、2006年の残留農薬ポジティブリスト制の施行、自然変動による食の不安定、禁止されている農薬を散布した野菜の輸入、消費者の特に子供達の野菜離れ、七割以上輸入に頼っている野菜価格の不安定、さらに環境変化による収穫量の減少と価

格の高騰等、さまざまな食の危機に直面している。そこで農水省と経産省は、消費者の安全・安心志向を踏まえ、安全な野菜を大量に生産できる植物工場の推進を提唱している。

植物工場は太陽光利用型植物工場と閉鎖型空間で人工光を利用し完全制御する閉鎖型植物工場に大別される。太陽光利用型植物工場はガラスを透過する太陽光を利用し、水耕栽培による循環システムを取り入れ、広域平面積を必要とする半閉鎖型栽培システムである。しかし、温度調整のため外気を入れ替える際に害虫や病気に侵食されやすい欠点を有している。それを防ぐために、外部から孤立し何重となった棚での多面閉鎖型植物栽培システムの制御方法

平成 23 年 1 月 18 日受理

[†] 研究生

^{††} エネルギー環境システム研究所・教授

が取られている¹⁾。

一方閉鎖型(完全人工光型)植物工場は光源として低電力で照射熱が低く、かつ膨大な照射量を誇る LED ランプ等が利用されている。しかし LED 照射は一つの照射角が極めて狭く、棚の大きさで異なるが、閉鎖型での点灯数も一個棚で約 100 個以上必要とされる。それに対して一般家庭で使用されている蛍光灯を使用すれば広範囲の照射ができ、照射器具の数も少なくすることができる。しかし照射熱量に対する温度調整が必要である²⁾。

ガラス温室も太陽光利用型植物工場の一つと言える。ガラス温室は環境に影響されず安定された出荷能力があるのにもかかわらず、建設費や維持管理費などがかかる理由からあまり普及していない。今後、国の支援によって農家などに植物工場を導入することにより故郷離れをしている若い世代を呼び戻し、雇用の場を設けることができれば、地域が活性化され地域交流が深まると考えられ、植物工場における野菜と花卉の栽培方法の開発研究が活発に行われている。

1.2 トルネードブロック方式野菜栽培装置

植物工場の栽培方式には様々な方式が用いられている。著者らは植物工場の一栽培方式を考案したので、その概要と特徴を下記に示す。
1) その方式とは、四方八方に照射が出来る蛍光灯を備え付け、光照射をする蛍光灯を一定の速度で囲みまわるトルネード方式(ドラム式回転型)栽培装置である。回転型栽培装置を用いた植物工場は従来の植物工場よりも単位床面積当たり数倍の栽培面積を確保でき、生産量が増大する。また移動台車で方向変化が可能であり、栽培容器の直径も変更可能である。さらに緑色の半固体ジェル状の溶液の上をゆっくりと撫でるように回することで無駄な循環水が節約できると考えられる。

2) 閉鎖型植物工場をビルや閉店した店など、

スペースを拡張ができない場所にトルネード方式栽培装置を設置する場合は、移動台車で適切な向きへ方向変化をすることにより、スペースを有効に使うことができる。

さらに、トルネードブロック式植物工場は培地容器を透明型にすれば太陽光利用型植物工場としても使用できる。日射が長い夏など培地容器は太陽熱によって初期段階の植物の根を温める効果が期待できる。またドラムを一時間一回転させることで一定の日射量を得ることができる。さらに転落防止弁と二段式階段を取り付けることで収穫量を増やすことが可能であり、根が張りやすいように側面上に凹みを入れることで屈折光が装置内に広がることも期待できる。天辺部分には長さ分だけチューブが延び、装置の表面を常に濡らし、側面に設置された受け皿で下部の半固体ジェル状の培地を浸らせることもできる。半固体化ジェル状の培地は触れる面積を少なくすることで保温性を高め、少ない栄養溶液ですむ。

1.3 ブロック方式栽培植物工場培地容器

このように野菜の大量生産にトルネードブロック式は有効である。しかし一般農家にとって、全てを新たに用意することは負担が大きい。上記 2) に示したように、多くの空き店舗には平面水耕栽培方法が適している。そこで培地容器を十字架の形にした 3 号容器にすれば、水耕栽培で使われていた発泡容器上のスペースを有効に使える。また農家では、追肥・礼肥など肥料方法が可能で、植え着ける順番も自由に作れるので一定の出荷量が見込める。使用済みの土を花などに再利用することで、エコで無駄のない生産が実現すると考えられる。

一方、十字架の形ではなく、一つ一つが 20×20×30 mm のブロックとなったブロック方式単座型も考えられる。単座型方式は十字架方式と違い、ブロック容器で成長させると必ず成長のバラツキが生じる。そこで、単座型を使え

ば大小の場所を交換ができ、綺麗な丈に整うことができ、消費者などのニーズに合わせた丈に揃えることも可能である。

実際には、天候の変化によって両方を使い分けることを視野に入れ、栽培制御を行う必要がある。基準とする露地栽培されたコマツナの出荷までの日数約 40 日に対して、トルネードブロック式では約 30 日に短縮できると考えられる。

また、外気温を受ける外壁や内壁にガイナを塗剤することで、厚い熱源切断外壁を使わずに薄い外壁でも夏冬問わず快適な温度調整が実現できる³⁾。

本提案以外に、収穫後のポストハーベストを運送する際に、室温から冷房温度の条件下で緑色照射か UV-A 照射をすることで、野菜の鮮度を保持できる可能性が高い。特に緑色照射 (555 nm 近辺) は光合成クロロフィル含量の吸収の最も少ない領域であり、抑制力の効果があると言われている²⁾。

2. 野菜の生長と栄養成分に及ぼす光照射の影響

2.1 目的

著者らは農水産物の乾燥時に UV-A 照射してアミノ酸を増加させる UV-A 照射乾燥の開発研究を行ってきた⁴⁾。UV-A 照射により蛋白質が変化しアミノ酸量が増加する現象である。本研究では、収穫前である植物の栽培時にも光照射を行えば、乾燥時のアミノ酸増量効果と同様な効果が表れるのではないかと考え、野菜の生長とアミノ酸含量変化に及ぼす光照射変動の影響を検討した。

2.2 実験方法及び実験装置

図 1 に実験装置の概要を示す。本実験では閉鎖型植物工場を模写した箱型(横 4 m, 縦 1.8

m, 高さ 1.8 m) の中に水耕栽培型の水循環の方法を用いた栽培実験装置を製作した。実験材料の種を植えつけるための培地にはメトロミックスを用い、6号のポットにウォーターポケットが出来る程度まで詰めた。それを10カップ用意し、1/3水に浸かった形とした。ポット上部には蛍光灯を4列平行に配置し、ランプとの

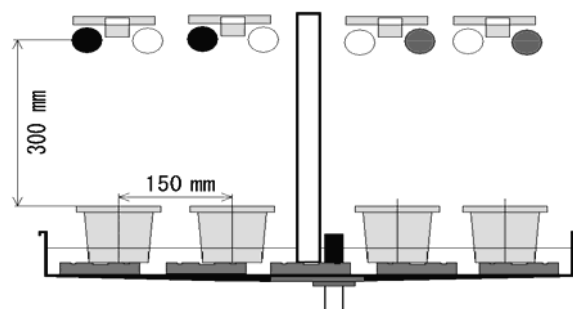


図 1 実験装置概要図

照射距離を330mmにした。部屋を左右に仕切り、異なる条件の実験を同時に行った。

光照射は人工太陽光照射(波長 390~700 nm 近辺)、青色照射(ピーク波長 660 nm 近辺)、赤色照射(ピーク波長 450 nm 近辺)、植物育成照射(波長 390 ~710 nm 近辺)、UV-A 照射(ピーク波長 450 nm 近辺)の5種類の蛍光灯を用いて行った。使用検体は寒さ等に強いと言われ、温度変動を好むコマツナを採用し、小型ファンで送風を行い、室内温度を昼間 25℃前後、夜間は 16℃前後に保った。

培地には、化学肥料(家庭用) $2 \pm 0.040\text{g}$ 、下土全体重さ $60 \pm 0.040\text{g}$ に合わせ 12 個ずつ用意した。冠水は、初期(0~10 日)は朝と昼と 16 時の3回、中期(10~20 日)は朝と 14 時の2回。末期(20~30 日)は、朝の1回それぞれ 15 分間行った。実験は下記の3種類の照射条件下で行った。

第一実験条件

人工太陽光2本に青色、赤色、植物育成、UV-A それぞれ各2本、計4本を用いて照射した。青色

照射光の光強度：光合成光子束（PPFD）は約 $68 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ ，赤色照射は約 $67 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ ，植物育成照射は $71 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ ，UV-A照射は $20 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ の条件で，24時間連続点灯での栽培を行った。

第二実験条件

照射条件は第一実験と同様であるが，12時間間欠点灯下での栽培を行った。一回目は，左部屋に青色照射，右部屋に赤色照射で栽培を開始し，両者の光合成光子束を $71 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ と一定にした。二回目は，左部屋に植物育成照射，右部屋にUV-A照射で栽培を開始し，両者の光合成光子束を $42 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ と一定にした。その際のUV-A照射量は $0.3 \text{ mW}/\text{cm}^2$ である。

第三実験条件

一回目は，左部屋に青色照射，右部屋に赤色照射で栽培を開始し，両者の光合成光子束を約 $69 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ と一定にした。二回目は，左部屋に植物育成照射を，右部屋に人工太陽光照射に UV-A 照射を加えた場合の条件で栽培を開始し，両者の光合成光子束を $58 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ と一定にした。照射距離は約 330 mm である。

それぞれでの実験では，17 日目の収穫の際，コマツナ葉部の乾物重と面積及び密度を求め，さらに成長段階での成分の変動を測定するために，17，22，26，30 日目のコマツナの葉部を採取し，葉部内に含まれている硝酸イオン，アスコルビン酸，クロロフィル含量を計測した。さらに高速液体クロマトグラフで葉部に含まれている 16 種類の遊離アミノ酸成分を分析した。

2.3 実験結果及び考察

(1) 青色照射と赤色照射（第一・二実験）⁵⁾

表 1 に第一実験における各照射条件下での葉の面積，乾物重量および密度の値を，表 2 に第二実験における各照射条件下での葉の面積，乾物重量，密度および糖度の値を示す。

表 1 葉の生長速度の変化（第一実験）

	面積 (m^2)	乾物重量 (g)	密度 (g/m^2)
青	0.153	0.241	1.582
赤	0.178	0.319	1.794
植物育成	0.228	0.369	1.622
UV-A	0.173	0.106	0.614

表 2 葉の生長速度の変化（第二実験）

	面積 (m^2)	乾物重量 (g)	密度 (g/m^2)	糖度 (%)
青	0.311	0.141	0.454	1.325
赤	0.518	0.216	0.418	3.075
植物育成	0.072	0.028	0.383	3.633
UV-A	0.069	0.028	0.883	0.883

図2には第一実験における各照射条件下での栄養成分の値を，図3には第二実験における各照射条件下での栄養成分の値をそれぞれ示す。各栽培実験における青色照射と赤色照射を比べると，青色照射の発芽率は他の照射よりも一日ほど早く，葉の生長促進効果があり，植物の伸びる速度も大きく，葉の数も多い。しかし，12時間照射では，赤色照射は光合成が行なわれずらく，硝酸イオン濃度が高い。しかし，全般的に葉の生長速度，硝酸イオン濃度およびアスコルビン酸濃度に明確な違いはみられなかった。

(2) 植物育成照射とUV-A照射（第一・第二実験）⁵⁾

図4に各照射条件下での硝酸イオンとアスコルビン酸量の変化を，図5にアミノ酸含量変化を示す。二つの実験において，植物育成照射と赤照射の場合がアミノ酸含量は多くなっている。植物育成照射の場合が生長速度が一番大きく，アスコルビン酸含量も高く，硝酸イオン濃度も一番小さい。また，クロロフィル含量も高

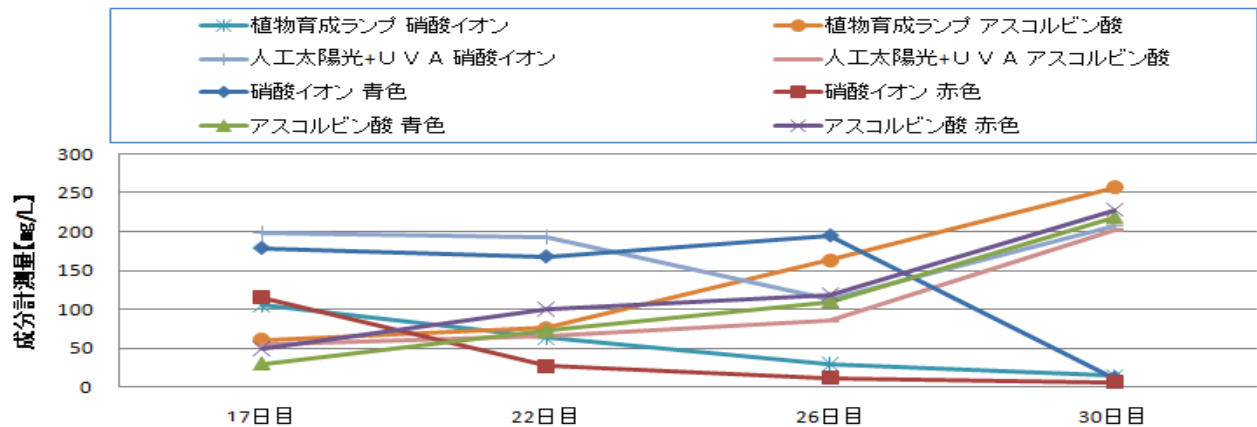


図4 各成分計測量の変化（硝酸イオン・アスコルビン酸）

くて緑色が濃く、4種類の中で最大の葉の生長が見られた。それに対してUV-A照射の場合は、4種類の中で生長速度と葉の大きさが最も小さく、光合成が良く行われていないため硝酸イオン濃度は最も高くなり、葉の色は濃緑色であった。

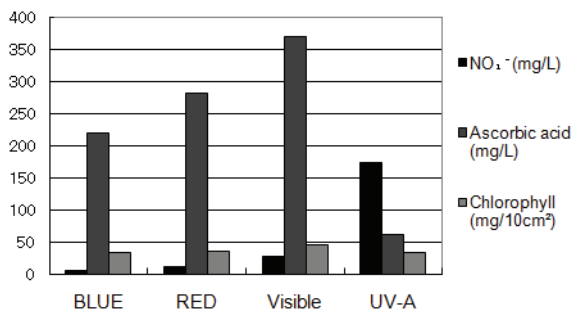


図2 栄養成分に及ぼす光照射の影響（第一実験）

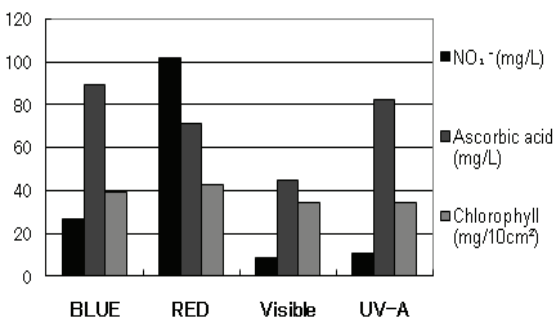


図3 栄養成分に及ぼす光照射の影響（第二実験）

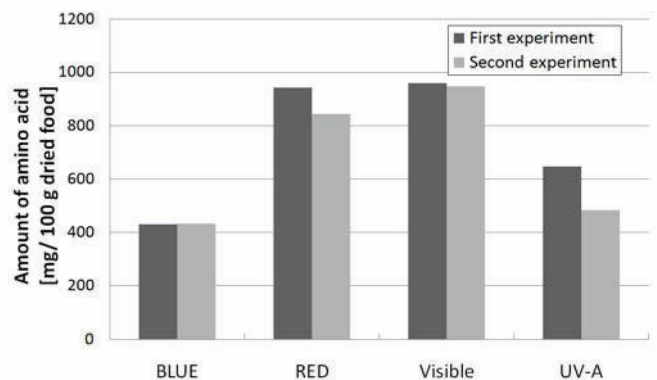


図5 アミノ酸含量変化に及ぼす光照射の影響

このように、いずれの点灯条件でも UV-A 照射は葉の生長に抑制効果として働くことがわかった。

(3) 青色照射と赤色照射（第三実験）⁶⁾

青色点灯下と赤色点灯下での葉部計測値を表 3 に示す。青色は生長の伸びが速いものの、葉の色の濃さでは薄く感じられ、茎部の成長が大きい。それに比べて赤色の生長は遅いものの葉の色が新鮮に見え、葉の大きさも青色に比べて若干であるが大きい。

その結果、青色照射の場合、生長を促進するために光合成を行わないのか、17日から26日

にかけて硝酸イオンが増えていき、30 日目になると急激に失われた。それに比例してアスコルビン酸が 26 日目より約 2 倍増えている。一方、赤色照射の場合、17 日目辺りから光合成を行う際に消費される硝酸イオンが 17 日目から 22 日目にかけて減少し、22 日目から 30 日目の間は緩やかに消費している。それに比例してアスコルビン酸も右肩上がりが増えていく。

17 日目から 30 日目まで測定したクロロフィル含量変化を図 6 に、遊離アミノ酸含量変化を図 7 に示す。青色照射の場合、クロロフィル含量は 22 日目まで増えるが、その後は余り増加しない。それに対して赤色照射場合、両者の値はゆるやかに増加している。

遊離アミノ酸総量については、赤色照射の場合、17 日目から急激に増え 22 日目をピークにアミノ酸量が減少し、30 日目はピーク時の 0.75 倍

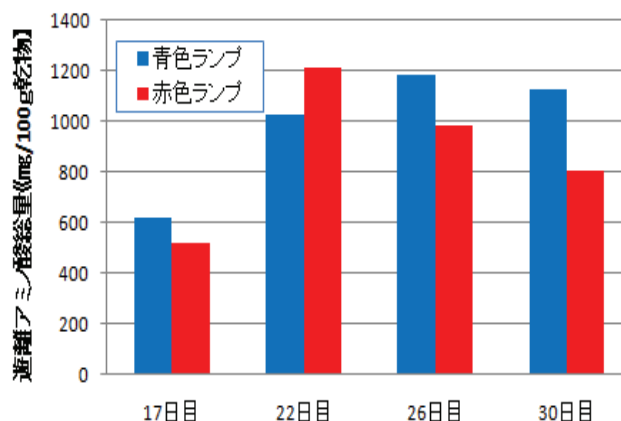


図 7 アミノ酸含量変化に及ぼす光照射の影響

に減少した。青色照射では、26 日目まで増えるが、それをピークに減少に転じた。

(4) 植物育成照射と UV-A 照射（第三実験）⁶⁾

表 1 に示した植物育成照射と（人工太陽光＋UV-A）照射の場合の外葉部の計測結果から、（人工太陽光＋UV-A）照射は、他の照射に比べて葉の大きさも丈もみな小さい。これは、コマツナの頭上に UV-A が照射されると、自分を守ろうとする力が弱り、光合成が充分に行えないことから、硝酸イオンが増えると考えられる。それに対して植物を育成するに適している植物育成ランプでは、光合成が一定に行われることで硝酸イオンと体を守るために多くなるアスコルビン酸の値が 17 日目まで低く保たれている。

しかし 17 日以降アスコルビン酸の上昇がみられると硝酸イオンが減り出し、30 日目には硝酸イオンが 14 mg/L に対してアスコルビン酸 457 mg/L と大きくなり、植物が自分を守ろうとしている動きが見られた。次に、17 日目から 30 日目のアミノ酸含量変化を図 8 に示す。両照射の 17 日目の遊離アミノ酸総量を基準にすると、30 日目で植物育成ランプの場合は 3.9 倍、人工太陽光＋UV-A の場合は 2.8 倍に増加している。

表 3 葉の生長速度の変化

	面積 (m ²)	乾物重量 (g)	密度 (g/m ²)
青	0.043	0.119	0.360
赤	0.063	0.118	0.534
植物育成	0.074	0.151	0.490
UV-A	0.011	0.077	0.144

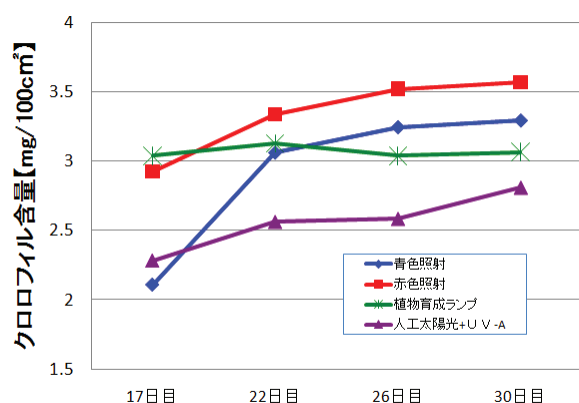


図 6 クロロフィル含量変化に及ぼす光照射の影響

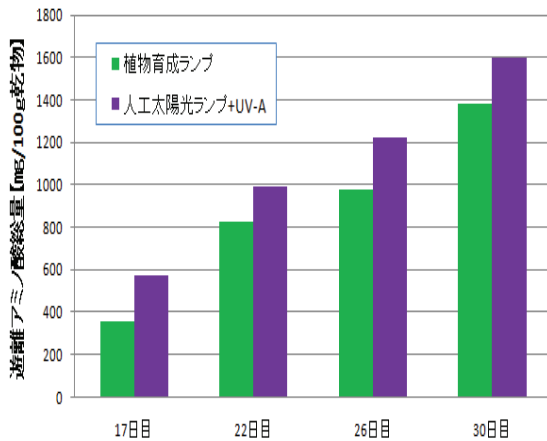


図8 アミノ酸含量変化に及ぼす光照射の影響

これに対して青色照射や赤色照射の場合、倍率は青色 1.7 倍、赤色 2.4 倍と低かった。これらの結果から植物育成ランプを対照に考えると、生長に大きく影響を及ぼしている赤色、青色照射の場合よりも UV-A 照射がアミノ酸を増やす効果が大きいことがわかった。

2.4 結論

青色照射は、生育は早いものの、葉の色合いが悪く、茎などが少しの衝撃で折れやすく貧弱になりがちである。これに対して赤色照射は、生育が遅いが発芽速度は青照射よりも早く、葉の色合いも良く、風などの衝撃にも強い。赤色、青色両者の波長域の光を有する植物育成ランプによる照射は、生長速度も色合いなど基準範囲である。

一方、UV-A 照射は植物にストレスを与えるため、植物生長に抑制効果として働く。しかし、アミノ酸分量は青色照射、赤色照射及び植物の育成に適した植物育成照射よりも一番多い。これらの結果から、生長過程での光照射条件を変えることで、植物のさらなる生長速度の増加と栄養成分の促進が期待されるものと考えられる。

参考文献

- 1) 古在豊樹編著．太陽光型植物工場 ―先進的植物工場のサステナブル・デザイナー―．オーム社，東京．2009.
- 2) 高辻正基．完全制御型植物工場．オーム社，東京．45-62．2007.
- 3) モノの最新テクノロジーがわかる本．成美堂出版，東京．90-91．2010.
- 4) H.Aoki, K.Sukegawa and Y. Daikokuya. Effect of Ultraviolet-A Irradiation on the Quality of Harvested Agricultural Products during the Drying Process. 6th International Symposium on Light in Horticulture, Acta Horticulturae, 2011. in press.
- 5) H.Aoki and K.Hirano . Effect of Ultraviolet-A Irradiation on Plant Growth and Nutritional Content of *Brassica rapa*. 6th International Symposium on Light in Horticulture, Acta Horticulturae, 2011. in press.
- 6) 平野勉央，青木秀敏．野菜の生長とアミノ酸含量変化に及ぼす光照射の影響．日本生物工学会 2010 年京都大会講演要旨．242-243．2010.