

(様式4)

植物工場用光源の研究

植草 新一郎 勝俣 裕
池田 敬 三浦 登

Light Source for Plant Factory

Shin-ichiro Uekusa Hiroshi Katsumata
Takashi Ikeda Noboru Miura

明治大学植物工場基盤技術研究センターの基本コンセプトのひとつが、植物工場の生産コストの低減化と環境・人体に負荷をかけない生産システムの開発である。そこで、生産排液を出さない資源循環型でゼロエミッション型の植物工場を目標としている。そのためには、植物の収量を落とさずに光源の消費電力を抑制することが強く求められており、この課題に取り組む研究を立ち上げた。現在はその取り組みの初期段階であるが、本報告では、その一部を紹介する。

1. はじめに

植物の成長において、光源は必要不可欠である。野路栽培においては太陽光の恩恵を預かれるが、植物工場においては室内で常に一定量の光量が要求される。植物の成長は光量に強く依存し、収量を稼ぐためには一般照明などと比較して強い光源が必要である。トーマス・エジソンの電球発明以来、多くの光源が開発されてきたものの、光量を大きくした明るい光源は消費電力が高くなるため、植物工場においては光源の開発は重要な課題である。

一方、家電製品における省エネに対する要求は、近年非常に強まっている。そんな中、白熱電球は姿を消しつつあり、蛍光管を用いた光源・発光ダイオード(LED)を用いた光源が注目されている。これら光源は、一般照明用の光源としてばかりでなく、薄型ディスプレイ用の光源として開発されてきた経緯もあり、1990年代後半から急激に特性が向上してきた。

薄型ディスプレイ、特に液晶ディスプレイ(LCD)のバックライト光源として開発されてきた蛍光管を用いた光源として、冷陰極管(CCFL)が良く知られている。これは、通常の蛍光灯が管内部に設けたフィラメントを加熱することで得た電子を水銀に衝突させる過程から光を得ているのに対し、高電界で電子を得るためにフィラメントの加熱がなく、熱輻射が低い効率の高い発光が得られる。LCDのバックライトとして用いる光源には、光の3原色成分を持ち、目の視感度に合わせた波長成分毎の強度が

要求される。こういった要求に合わせて開発されてきた光源を植物工場用に用いることは決して無理ではない。確かに太陽光や電球を用いた場合に比べ光源からの熱輻射が極端に小さく、これは、植物栽培に適した温度を維持する上でコストに大きく寄与する。光源の発熱が小さいことは、光源を植物に近づけることが可能であり、植物に照射する光量を稼ぐという観点でもCCFL光源はメリットが大きい。しかし、光源の波長分布がディスプレイ用に開発されてきているために、植物の成長に対して最適化されているわけではない。植物工場にCCFLを用いるためには、植物の成長に適した波長分布を持つ蛍光体を新たに開発する必要がある。

LEDを用いた光源は、懐中電灯のような簡便な光源に使用されるようになり、続いて、携帯電話などの小型液晶ディスプレイのバックライト光源としても用いられるようになった。これら機器は価格競争が激しく、コスト重視の開発が進められたために、LEDと安価な蛍光体を組合せた白色LEDが開発された。最も一般的なものは、青色LEDと黄色成分を主成分とする蛍光体を組合せて擬似白色を得るものである。そんな中、LED自体の効率が向上してきたこともあり、LEDが一般照明用に開発されるようになってきた。一般照明や、大型テレビにおいては色合いが重要であり、擬似白色のLEDでは要求される発光波長分布を満足しない。そこで、近年LED用の蛍光体開発が非常に加速され、波長分布の優れた蛍光体材料や効率の高い材料が開発されてきている。しかし、これらにおいても植物工場用の光源として適しているとは決して言えない。本研究では、植物工場用光源として光量・照射方法・効率(消費電力)・波長分布などのバランスが最適な光源・全てを満足する光源の開発を目指して研究をスタートした。しかし、植物工場用の理想的な光源開発は、そんなに簡単な話ではない。植物工場が満足する光量を低消費電力で得られる光源を開発できれば、一般照明さえもそれで置き換えていくことも可能であると考えられ、これまでの光源開発の歴史を振り返っても直ぐに成果の出る課題とも思えないが、

(様式 4)

現状の問題点と課題を着実に解決していくことが重要であり、本研究では研究の初期段階の状況の一部について報告する。

2. 本研究における開発指針

植物の収量を稼ぎながら光源の消費電力を抑制する「植物工場用エコ光源」の開発を目的にするにあたり、既存のエコ光源を改良・新規光源の開発、植物の成長に適した光源の活用方法、植物に吸収されなかった光や熱をエネルギーとして再利用するシステム・材料および周辺材料について研究を進めている。

2. 1 既存エコ光源の改良

既存のエコ光源であるCCFL、LEDは、それぞれ、電氣的に紫外光・青色光を発光させ、これを励起光として蛍光体を励起して目的の発光色を得ている。従って、蛍光体の波長分布を植物工場用に最適化した高効率蛍光体を開発することが1つの目的になる。

2. 2 新規光源開発

新たな光源の開発指針は、既存のエコ光源が放電や半導体の発光で間接的に蛍光体を発光させているのに対し、蛍光材料に直接電圧を印加して希望する発光を効率よく得ることを考えている。このような光源は、古くからエレクトロルミネッセンスとして知られているが、従来は蛍光体が限られ効率がそれほど高くなかった。そこで、これらの問題を抜本的に解決することを検討している。

2. 3 エネルギー回収

植物工場内の壁などに照射され植物に吸収されずに捨ててしまう光や、光源から放出される熱を還元して再利用することを検討している。光に関しては、塗布できる蛍光材料を用いることで、捨ててしまう光で2次発光を生じさせることや、塗布方の太陽電池についても検討している。排熱の回収として、熱電材料の開発を進めている。

2. 4 効率的な光照射方法

植物の成長を促進させるには、パルス状の光を照射して刺激を与えることが有効であるとの報告も多い。従来の研究は、比較的パルス幅の長い光での結果についての議論であるが、CCFLやLEDでは電圧を印加しているときだけ発光する成分・電圧印加をやめると発光が急激に減少する成分・電圧印加をやめてもしばらく発光が維持する成分が組み合わさっている。この組み合わせり方は、光源の開発目的によって異なる。例えば、ディスプレイ用の光源では光速画像に対応するために電圧パルスに対してレスポンスの高い発光で校正されている。これら発光材料の特徴を理解し、従来よりも短い時間領域にまで注意を払いながら植物にパルス状の光を照射するこ

とで光源の消費電力削減と成長の促進を検討する。

3. 光源に求められる波長特性

図1に、地表面における太陽光の放射スペクトル、葉緑体を構成するChlorophyllの吸収スペクトルと、既存のエコ光源である白色LEDとCCFLの発光スペクトルを示す。太陽光がChlorophyllの吸収域に十分な発光を持っているのが理解できる。一方、CCFLにおいてはChlorophyllの吸収域に青色発光があるものの、赤色発光に関しては吸収域とのずれが生じている。また、Chlorophyllにおいて吸収されない緑色成分が最も強く、波長分布として十分でないことが理解できる。LEDに関しては、青色発光がChlorophyllの吸収域とよく一致しているが、最も一般的な青色LEDと黄色蛍光体を組合せた白色LEDにおいては赤色成分が不足している。最近では、「暖色系のLED照明」として、青色LEDと黄色蛍光体の組合せに赤色蛍光体を添加したものや、青色LEDと緑色および赤色蛍光体を組合せたものが市販されている。これらの暖色系LEDに用いられる赤色蛍光体にはChlorophyllの吸収領域に発光を持つものの、発光がブロードであり、吸収域にかからない短波長成分・超波長成分が存在

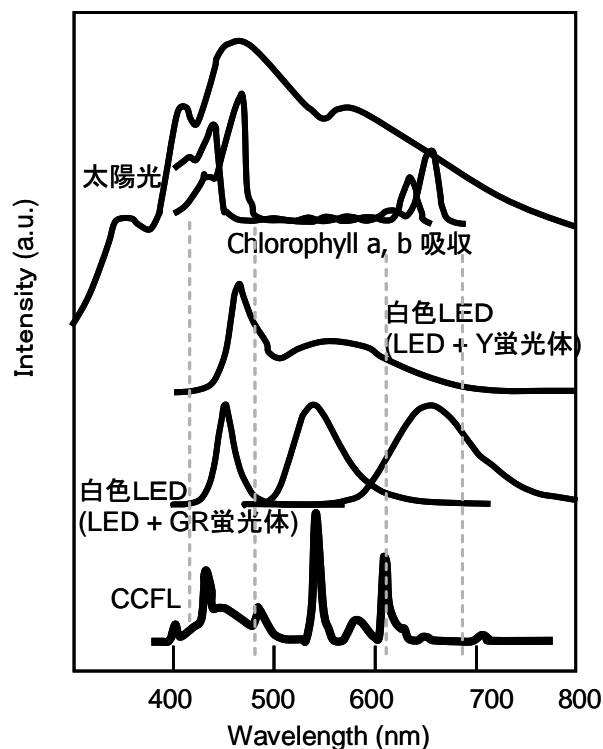


図 1. 太陽光の地表面における分光分布・Chlorophyllの吸収スペクトルおよび、LEDとCCFLの発光スペクトル

(様式 4)

している。植物の成長には Chlorophyll の吸収スペクトルを一致した発光分布を持つ光源が理想的であるかどうかは明確でないが、ある程度合致した発光分布を持つ光源が望ましいと考えられる。

実際に、幾つかの波長分布を有する LED 光源を用いて、植物の成長を観測した実験について、以下に示す。

4. 実験方法

まず、ベビーレタスあるいは岡山サラダ菜の種を、縦 2.5 cm、横 2.5 cm、高さ 3 cm の直方体の中央に 1 cm の十字の切り込みかはいったスポンジに 1 つずつ植えていき、そのスポンジをトレーに 60 個ほど並べた。次に、植物工場で使用されている培養液（大塚ハウス 1 号生第 73261 号および 2 号生第 52359 号）を使用し、図 2、3 に示すような 20 W の蛍光灯 2 [本/色] あるいは LED 灯 2 [本/色] の下で、植物の種を 1 週間ほど育てた。使用した光源の仕様を表 1 に示す。本研究で使用した蛍光灯および LED 灯は、共に一般家庭や商業スペースにおける水槽での熱帯魚等の生物飼育用に市販されている。選定した理由は、一般家庭や企業における省スペース、低消費電力での植物育成を狙ったためである。今後、大気汚染地域や新鮮な取り立て野菜の需要がある都心のレストランや社員食堂などで需要が増すと考えられる。

次に、芽が出たものの中からよく育っている苗を選び、図 4 に示すようにバランスよく配置し、植えた。光の照射時間は 9 時から 21 時までの 12 時間とし、夜間は光の照射を停止した。植物を育てるための培養液は、種を育てていた培養液と同じものを使用し、常にタンクと苗のある場所を循環させた。室温は 20 度、湿度は 60 % に維持した。

苗を植えてから、植物の成長記録として、図 4 に示した各苗の場所での葉の長さや広さをほぼ 4 日毎に、約 3 週間にわたり実測した。なお、苗の高さを測定したが、苗の高さは葉の角度に依存し、ばらつきが大きくなるため、今回は測定項目から除外した。また、苗を植えてから約 2 週間後に植物を収穫し、植物の重量（生体重）を測定した。また、典型的な葉の透過スペクトルを V-670（日本分光）で測定した。

植物の育成具合と光環境の相関を調べるために、各々の苗の位置での放射束照度と光合成光子束密度を照度計（Delta OHM HD2102）で測定した。ここで、照度（lx）は、人間の目の感度に合わせた比視感度曲線を持った明るさの単位であり、植物の光合成とはなんら関係のない単位であるため、測定項目から除外した[1]。

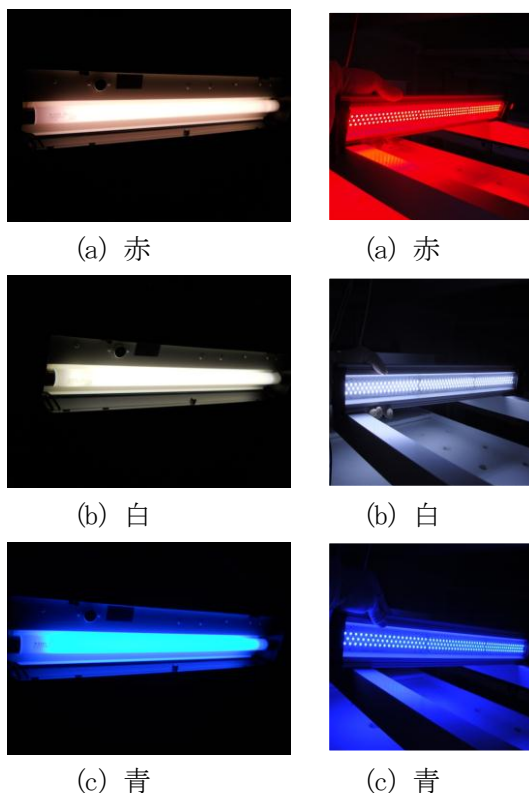


図 2 蛍光灯（各 1 本） 図 3 LED 灯（各 1 本）

表 1 使用した光源の仕様

(1) 蛍光灯（20W、径×長さ=27×600mm、（株）スドー）

色	名称	型式	色温度(K)
赤	トロピカルレッド	S-3920	3500
白	オセアニアホワイト	S-3820	5000
青	カリビアンブルー	S-3420	数万

(2) LED 灯（W×D×H=600×70×16 mm、（株）SENSUI）

色	名称	消費電力(W)	LED 数 (個)
赤	RED	9.5	120
白	WHITE	12.6	120
青	BLUE	12.6	120

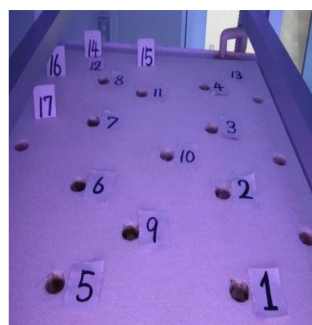


図 4 苗の評価位置とその番号

(様式 4)

5. 実験結果

5. 1 光環境の測定結果

図5,6に使用した蛍光灯およびLED灯の発光スペクトルを示す。測定には、マルチチャンネル分光計(CSM-140CL、コスモシステム)を用いた。蛍光灯の赤と白は、色温度は異なるものの、類似したスペクトルであることが確認できた。LED灯からは、メーカー公表のLEDスペクトルと同様な波形を観測した。青と赤でピークが分離している原因は、測定環境に起因するものと考えられる。図7,8に蛍光灯およびLED灯の放射束密度の苗の位置依存性を示す。放射束密度(W/m^2)は、各波長毎のエネルギー強度を足し合わせたものであり、理論的には波長依存性は無くフラットになるが、図7,8から蛍光灯、LED共に青色で最も強くなる傾向が見られた。これは受光センサーの波長感度依存性に起因することも考えられ、今後、調査が必要である。

図9,10にLED灯の光合成光量子束密度の苗の位置依存性を示す。光合成光量子束密度($\mu mol m^{-2} s^{-1}$)とは、上記のエネルギー強度ではなく、光の粒子である光子の個数で表現した単位である(1molは、 6.02×10^{23} を表す)。光合成は葉緑素に入射する光子の数によって左右される。一般に、1分子の二酸化炭素(炭酸ガス、 CO_2)を光合成で消費するためには、8から10個の光子が必要とされている[1]。エネルギー的には、 $E=h\nu$ (E :エネルギー、 h :定数、 ν :周波数)という関係があるため、波長が短く(周波数が高く)なるほど、エネルギーは比例的に高くなる。図9に示す蛍光灯では、青が最も光合成光量子束密度が高くなる傾向が見られたが、LED灯では、青が最も低くなる傾向が見られた。

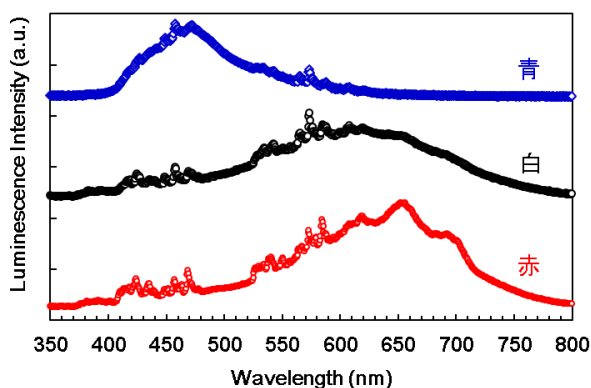


図5 蛍光灯の発光スペクトル

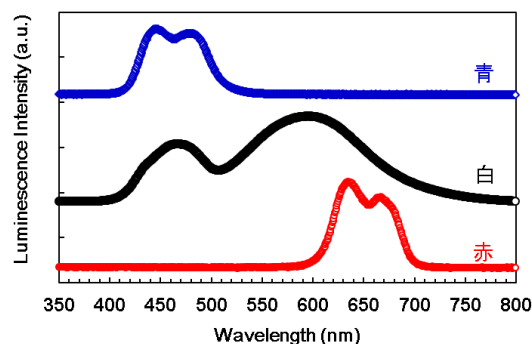


図6 LED灯の発光スペクトル

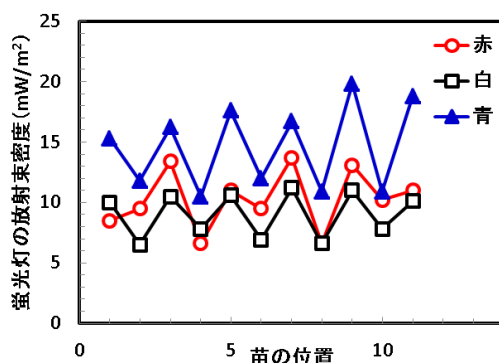


図7 蛍光灯の放射束密度の苗の位置依存性

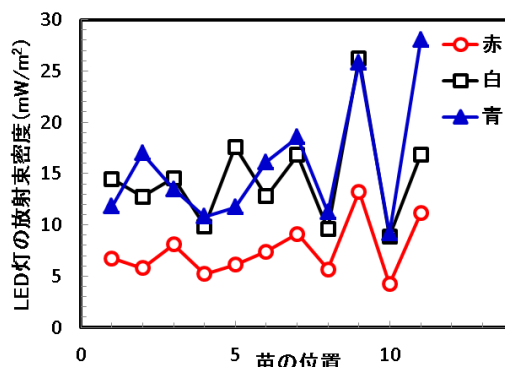


図8 LED灯の放射束密度の苗の位置依存性

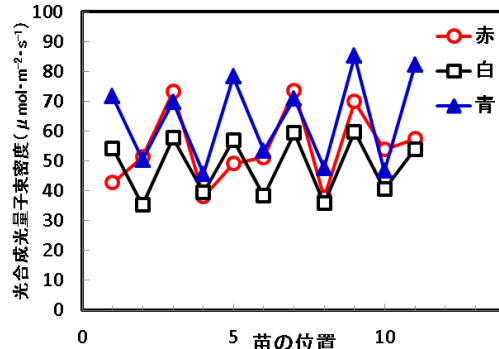


図9 蛍光灯の光合成光量子束密度の苗の位置依存性

(様式 4)

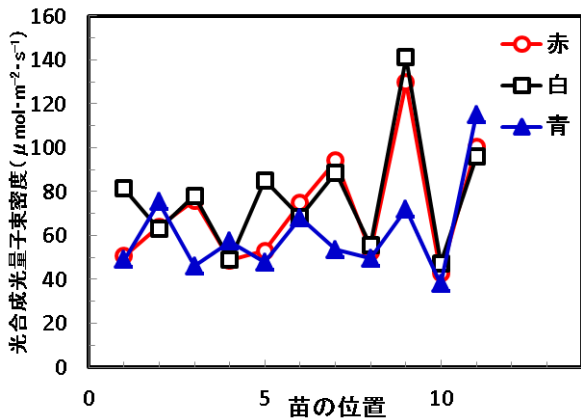


図 10 LED 灯の光合成光子束密度の苗の位置依存性

5. 2 植物育成結果

5. 2. 1 ベビーレタス

図 11 に蛍光灯および LED 灯で育成したベビーレタスの収穫後の各々の光源下での外観写真を示す。また、図 12、図 13 にそれらの光透過スペクトルを示す。蛍光灯の場合、赤/白/青の平均重量は、29.4/30.1/27.5g となり、白と赤で同程度の重量が得られ、青で最も軽量となった。図 11 の外観写真からも、白と赤で同様な外観であるのに対して、青の成長が他に比べて脆弱であることが分かる。白と赤で同様な成長を示した理由は、白と赤の蛍光灯が類似した発光スペクトルを示すためと考えられる。また、図 12 に蛍光灯で育成したベビーレタスの光透過スペクトルから、白>赤>青の順に全可視光領域で吸収が大きくなることが分かった。葉の厚さを測定していないため、この吸収の違いが、葉の性質を反映しているものなのか、厚さによるものなのか今後、切り分けが必要である。

LED 灯で育成した場合は、図 13 に示す透過スペクトルから、全可視光領域にて、白が最も高い吸収を示し、赤と青が同等の吸収を示すことが分かった。図 14 に LED 灯で育成したベビーレタスの一般蛍光灯下での外観写真を示す。各色の特徴は、白で最も葉の色が濃く、青で最も葉の幅が広く、表面が平坦であり、赤で最も葉の色が薄く、表面に皺が多いこと、等が分かる。成長した各葉の性質については、今後、葉の大きさ・厚さ、重量、光学的性質、電子顕微鏡による表面形態観察などを系統的に評価し、考察を進めていく。



(a) 蛍光灯 : 赤



(a) LED 灯 : 赤



(b) 蛍光灯 : 白



(b) LED 灯 : 白



(c) 蛍光灯 : 青



(c) LED 灯 : 青

図 11 ベビーレタス育成結果

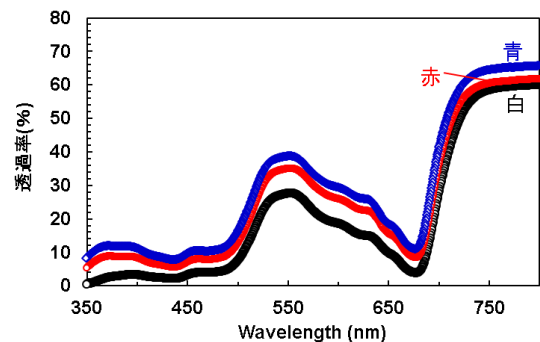


図 12 蛍光灯で育成したベビーレタスの光透過スペクトル

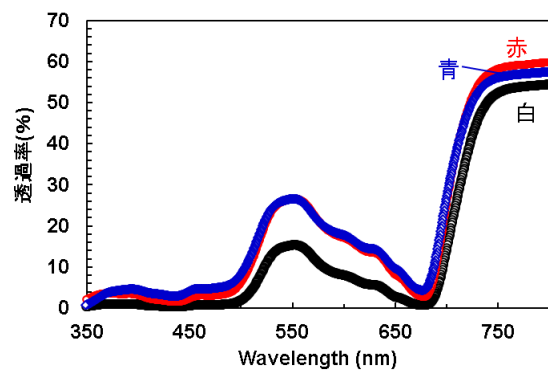


図 13 LED 灯で育成したベビーレタスの光透過スペクトル

(様式 4)



(a) 赤



(b) 白



(c) 青

図 14 LED 灯で育成したベビーレタスの葉
(図 13 で評価した試料)

5. 2. 2 岡山サラダ菜

図 15 に蛍光灯および LED 灯で育成した岡山サラダ菜の収穫後の各々の光源下での外観写真を示す。

図 16、17 に各々、蛍光灯および LED 灯で育成した岡山サラダ菜の収穫後重量の苗の位置依存性を示す。蛍光灯に比べ LED 灯の方が、苗の位置によるばらつきが小さいことが分かる。図 6~9 に示した各々の光源の環境特性では、むしろ LED 灯の方が、ばらつきが大きく見られており、ばらつき要因については今後、検討が必要である。また、表 2 に岡山サラダ菜の収穫後の平均重量を示す。表 2 から、蛍光灯、LED 灯ともに青で最も重量が重いものが得られたことが分かる。これは、図 6、7 に示したように各々の光源の青で放射束密度が最も高い傾向にあったことと関連があると考えられる。また、青色の光は、草姿の



(a) 蛍光灯：赤



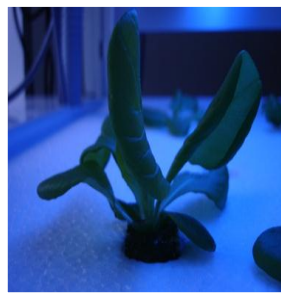
(a) LED 灯：赤



(b) 蛍光灯：白



(b) LED 灯：白



(c) 蛍光灯：青



(c) LED 灯：青

図 15 岡山サラダ菜育成結果

形成、気孔の開閉や乾物重の増加に関わっていることが知られているため[2]、その影響の可能性も考えられる。

また、蛍光灯に比べ LED 灯の方が、全ての色で重量が重くなる結果が得られた。

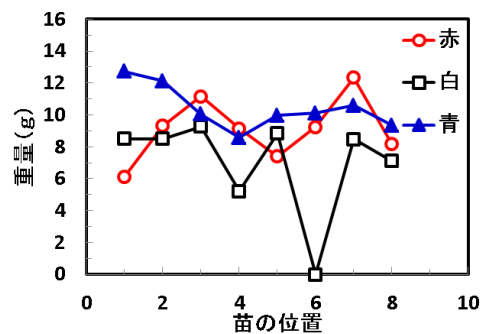


図 16 蛍光灯で育成した岡山サラダ菜の
収穫後重量の苗の位置依存性

(様式 4)

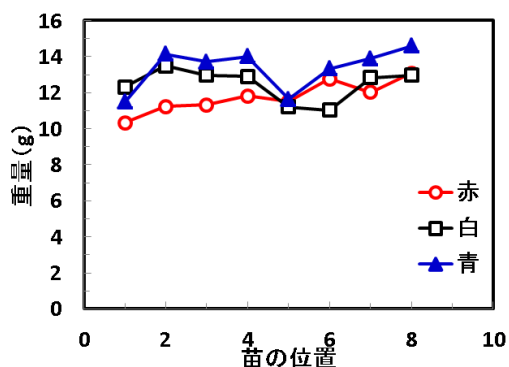


図 17 LED 灯で育成した岡山ササラダ菜の収穫後重量の苗の位置依存性

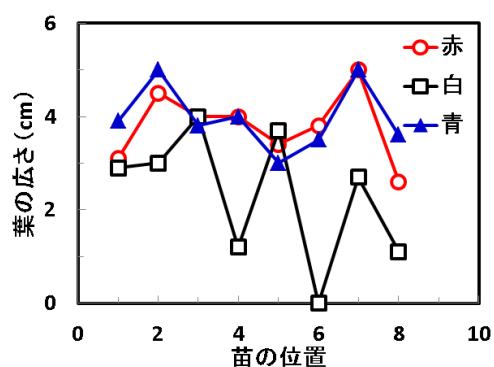


図 19 蛍光灯で育成した岡山ササラダ菜の収穫後の葉の広さの苗の位置依存性

表 2 岡山ササラダ菜の収穫後の平均重量

蛍光灯 (g)			LED (g)		
赤	白	青	赤	白	青
9.1	8.0	10.4	11.8	12.5	13.4

図 18、19 に各々、蛍光灯で育成した岡山ササラダ菜の収穫後の葉の長さおよび葉の広さの苗の位置依存性を示す。また、それら葉の長さおよび葉の広さの成長速度を図 20、21 に各々示す。ここで、成長速度は、苗の植樹から収穫まで約 3 週間に渡り、ほぼ 4 日毎に苗の位置計 8 点の葉の長さ・広さ測定し、その成長日数 vs 寸法のグラフの傾きから算出した平均成長速度とは、8 か所の平均を指す。図 20、21 から蛍光灯の場合、葉の長さの成長速度は、赤と白がほぼ同程度であり、青色が最も遅いのに対して、葉の広さの成長速度は、青が最も高く、白が最も遅いことが分かった。LED 灯で育成した結果を同様に図 21～24 に示す。また、表 3、4 に岡山ササラダ菜の葉の長さおよび葉の広さの平均成長速度 (数値) を示す。

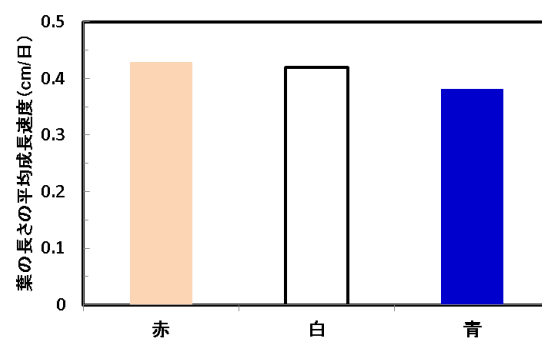


図 20 蛍光灯で育成した岡山ササラダ菜の葉の長さの平均成長速度

岡山ササラダ菜の場合、蛍光灯、LED 共に葉の長さ方向の成長速度は、赤が最も高く、葉の広さは青が最も高い値を示すことが分かった。蛍光灯と LED 灯の平均成長速度を比べると、葉の長さは LED の赤が顕著に高く、葉の広さは蛍光灯と LED の青でほぼ同等値を示し最大となった。

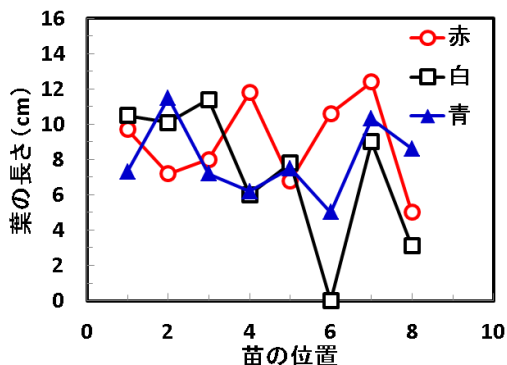


図 18 蛍光灯で育成した岡山ササラダ菜の収穫後の葉の長さの苗の位置依存性

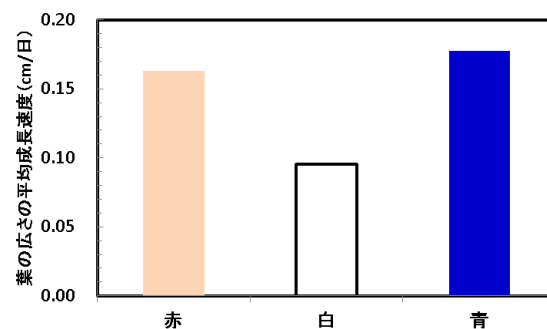


図 21 蛍光灯で育成した岡山ササラダ菜の葉の広さの平均成長速度

(様式 4)

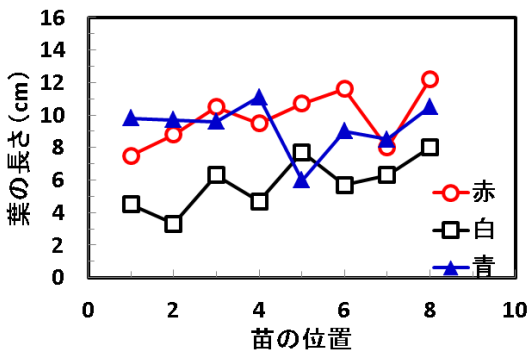


図 22 LED 灯で育成した岡山サラダ菜の収穫後の葉の長さの苗の位置依存性

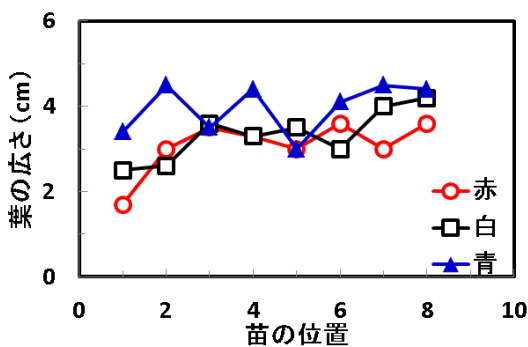


図 23 LED 灯で育成した岡山サラダ菜の収穫後の葉の広さの苗の位置依存性

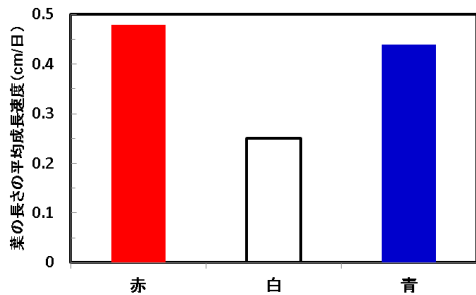


図 24 LED 灯で育成した岡山サラダ菜の葉の長さの平均成長速度

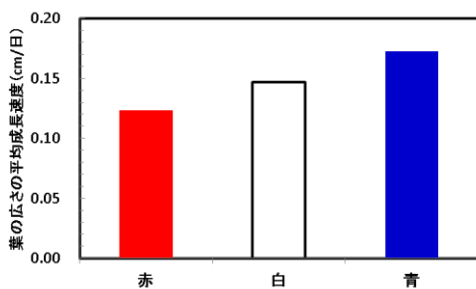


図 25 LED 灯で育成した岡山サラダ菜の葉の広さの平均成長速度

表 3 岡山サラダ菜の葉の長さの平均成長速度

蛍光灯 (cm/日)			LED 灯 (cm/日)		
赤	白	青	赤	白	青
0.43	0.42	0.38	0.48	0.25	0.44

表 4 岡山サラダ菜の葉の広さの平均成長速度

蛍光灯 (cm/日)			LED 灯 (cm/日)		
赤	白	青	赤	白	青
0.16	0.10	0.18	0.12	0.15	0.17

6. まとめ

6. 1 ベビーレタス

(1) 蛍光灯、LED 共に、白色光源で育成した場合、最も高い光吸収を示す葉が得られた。

(3) LED 灯で育成した場合の各色光源が、葉の形態に与える影響は、

- ・白で最も葉の色が濃く、
- ・青で最も葉の幅が広く表面が平坦であり、
- ・赤で最も葉の色が薄く、表面に皺が多いことが分かった。

6. 2 岡山サラダ菜

(1) 蛍光灯に比べ LED 灯の方が、苗の位置による葉の成長ばらつきが小さくなった。

(2) 蛍光灯に比べ LED 灯の方が、全ての光源色で、重量が重くなる (平均 37% 増) 結果が得られた。

(3) 蛍光灯、LED 灯ともに、青で最も重いものが得られた。これは、各々の光源の青で、放射束密度が最も高い傾向にあったこと、および、青色の光は、草姿の形成、気孔の開閉や乾物重の増加に関わっていること、などに起因すると考えられる。

(4) 蛍光灯、LED 共に葉の長さ方向の成長速度は、赤が最も高く、葉の広さは最も青が高いことが分かった。

(5) 蛍光灯と LED 灯の平均成長速度を比べると、葉の長さは LED の赤が顕著に高く、葉の広さは蛍光灯と LED の青でほぼ同等値を示し最大となることが分かった。

以上、蛍光灯を使用した場合、ベビーレタスでは、青色で最も重量が軽いものが得られるものの、岡山サラダ菜では青色で最も重いものが得られるなど、植物の種類によって育成に大きな違いが見られた。また、岡山サラダ菜に関しては、LED 灯の方が蛍光灯に比べて約半分の消費電力にもかかわらず、LED 灯を使用した方が、蛍光灯に比べて、平均 37% 重い重量の植物が得られた。また、岡山サラダ菜の場合、蛍光灯、LED 灯共に、葉の長さ方向の成長速

(様式4)

度は、赤が最も高く、葉の広さは青が最も高いことなど、光質と葉の成長に関する知見が得られた。

今後は、葉の厚さ、葉の光学的性質、電子顕微鏡による表面形態観察、味覚など、系統的に評価・解析を進め、植物育成のメカニズムを明らかにし、より美味しい植物野菜を、低コストかつ短期間で育成するための光源開発を進めていく。また、光源エネルギーから排出されていたエネルギーをリサイクルするためのシステム開発なども検討していく。

7. 参考文献

[1] 星岳彦、「植物生産における光に関連した単位」
<http://www.fb.u-tokai.ac.jp/WWW/hoshi/env/light-j.htm>

[2] 清水裕太ら、「LEDを使用したレタス栽培における赤色光をベースとした光質の影響」植物環境工学, **24**(1), pp. 25-30(2012).