

技術報告

各種LED光源を利用した終夜照明が 茎ブロッコリーの側枝生長に及ぼす影響

伊藤 睦^{1*}・福田直也^{1,2}

¹ 筑波大学農林技術センター技術室
305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1

² 筑波大学生命環境系
305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1

要 旨

茎ブロッコリーに白色、青色、緑色、赤色及び遠赤色のLEDにより、光合成有効放射束密度で $10\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度の弱光による終夜照明を行い、光源の光質が可食部である花蕾の発達に及ぼす影響を調査した。時期の異なる2回の実験の結果、遠赤色光により平均収穫花茎長が、照明をしない対照区に比べて1.5倍以上長く伸長し、また、平均収穫花茎重量も遠赤色光により対照区に比べて17%増加した。しかしながら、株当たり平均収量には夜間照明時の光質間に顕著な違いは観察されなかった。以上の結果より、各種LED光源による夜間照明は、茎ブロッコリーに対して補光としての生育促進効果は大きくはないものの、遠赤色光LEDによる終夜照明が花茎の伸長を促進する効果は確認できた。

キーワード：遠赤色光、LED、花茎伸長、光質、終夜照明

緒 言

光は植物にとって光合成のためのエネルギー源であると同時に、生育を制御する信号としても機能する。生育を制御する信号の事例としては、赤色光と遠赤色光の比率によって、主茎の伸長や側枝の発達が変化することがある(Ubukawa 2006)。また、花成誘導は光の明暗周期によって左右されることは良く知られている。

我が国における秋ギクやシソの生産現場では、夜間に照明をする「電照」と呼ばれる技術を使い開花時期の調整を行っている。例えば、キク、スイートピー、トルコギキョウ、ポインセチアなどさまざまな花卉類の開花調節に電照が用いられている(川田1996)。また、キクやシュコンカスミソウでは、茎が伸びないロゼット化には日長が関係しているとされ、人工照明を

使った日長延長処理によるロゼット打破が検討されており(山田ら2009)、青色光や遠赤色光の夜間照射によって花茎を伸長させ、切り花品質を向上させる技術が開発されている。このような照明を行う場合、茎伸長に効果のある光の波長分布特性を特定することが必要である。

LED (Light Emitting Diodes) は、ほぼ純色に近い光を放射でき、かつ、光合成有効放射域の光を照射する赤色や青色LEDの場合、赤外線領域のエネルギー放射を行わないことから、対象物に近接照明できる等の優れた特徴をもつ(福田2012)。波長分布特性の面でも、LEDには青、赤、遠赤色光はもちろん、緑、黄色光も放射できるものが開発されている。そのため、これらの発光ダイオードを組み合わせることで、光合成有効放射域(400~700nm)の光について、比較的自由に光質を「設計」することが可能

*連絡者：伊藤 睦 筑波大学農林技術センター技術室
305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1
E-mail：mutsumi@nourin.tsukuba.ac.jp

になりつつある。また最近では、青色発光ダイオードをベースに蛍光塗料との組み合わせにより、疑似白色光を放射する白色発光ダイオードも開発されている。このようなLEDの特性を活かし、特定の目的に合わせて光を選択利用することは可能であると言えよう。

中国野菜カイランとブロッコリーとの交配により開発された茎ブロッコリーは、比較的耐寒性のある植物である。一般的に花成誘導後、発達した花蕾を利用する野菜であるが、低温期には可食部である花蕾がある側枝の伸長が抑えられる傾向がある。特に、茎ブロッコリーの場合、花茎の伸長はその商品性に影響し、低温期の伸長遅延は収穫期の遅延につながる。キクでの事例のように、低温期の茎伸長を光処理により効率よく行うことが可能であれば、収穫時期の促進につながることを期待される。

本研究では、茎ブロッコリーの側枝伸長と花芽分化を促進することを目的として、植物の形態形成に影響するとされている夜間の照明処理の効果について、各種光質を持つLEDによる照明の効果を検証した。

材料及び方法

茎ブロッコリー (*Brassica oleracea* var. *italica*) の供試品種は、‘グリーンボイス’ (タキイ種苗(株))とした。試験は、農林技術センター蔬菜F1温室において加温条件で実施した。水耕育苗後、DFT水耕装置(EKポニックス、カネコ種苗(株))により水耕した。温室内の気温は、暖房機の設定下限を8℃とし管理した。また、培養液温度は水中ヒーターよって15℃とした。培養液のECは1.5dS/mで一定とし、光照射処理は主茎摘心後に植物の上部約20cmよりLEDにより行った。LEDによる照射時間は終夜とし、日の入りから日の出までの連続照明を行った。実験は、栽培時期により光質の種類と光強度を変えて2回実施した。実験1：各種光質を持つLEDによる終夜照明が及ぼす影響を確認するため、白色(W区)・青色(B区)・緑色(G区)・赤色(R区)・遠赤色(FR区)LEDによる照明処理を、植物体直上部の光強度を $10\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (光合成光量子束密度、PPFD)に設定し、無処理区(C区)をあわせた6処理区で試験を行った。2010年9月6日に播種、10月13日に定植し、12月24日に摘心処理後LED照射を開始した。収穫を、2011年1月14日～3月11日まで行った。実験2：

実験1の結果、株当たり収量に増加効果が見られた青色(B区、 $7\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、PPFD)、遠赤色光区(FR区、 $10.5\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、PPFD)と、赤色の影響については、その光強度の違いに関して確認するため、RH(赤色強光)区($10\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、PPFD)とRL(赤色弱光)区($6.7\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、PPFD)、加えて無処理区(C区)の5処理区で生育比較を行った。2011年12月1日に播種し、2012年1月6日に定植後、3月23日に摘心及びLED照射を開始し、4月6日～5月2日の間に収穫した。いずれの試験でも1処理区に4株を定植して調査を行った。調査項目としては収穫部位である側枝の長さ(平均収穫花茎長)及び本数(平均収穫花茎本数)、側枝の重量(平均収穫花茎重量)、太さ(平均収穫花茎径)、葉数(平均収穫花茎葉数)及びSPAD値を計測した。SPAD値は葉緑素計(SPAD502、コニカミノルタ)により最上位展開葉について測定した。

結 果

厳冬期に5種類の光質の影響を調査した実験1では、FR区の平均収穫花茎長がC区の平均長に比べて約60%、9cm程度長く伸長した(表1)。この花茎伸長効果については、図1に示したように外観上でもその差は明確であり、夜間の光照射を行わなかったC区と比べて、FR区における平均収穫花茎長が全体的に長くなった。また、平均収穫花茎重量についてもFR区はC区と比べて17%増加した(表1)。平均収穫茎径についてはG区及びW区の茎径はC区の約80%となり細くなる傾向が見られた。平均収穫花茎葉数はW区及びG区はC区より約20%少ないものの、G区については有意差は見られなかった。平均SPAD値は、C区と比較してW区、G区及びFR区で有意に低下した。

春先に照明処理を開始した実験2でも、実験1同様にFR処理により平均側枝長が伸長する傾向が見られ、C区に比べて約20%長かった(表2)。また平均収穫花茎重量は、C区よりFR区において約20%増となったが、有意差は見られなかった。平均収穫茎径、平均収穫花茎葉数及び平均SPAD値については、各処理区ともC区と有意差は見られなかった。

処理区全体での収量調査であったため統計的な処理は実施しなかったものの、株当たり平均収量は、実験1ではR区がC区よりも多くなる傾向があった(表3)。実験2では株当たり平均収

表1 夜間照明の光質の違いが茎ブロッコリーの可食部の生長に及ぼす影響(実験1)

照明処理	平均収穫 花茎長(cm)		平均収穫 花茎重量(g)		平均収穫 花茎径(mm)		平均収穫 花茎葉数(枚)		平均 SPAD値	
C	15.5(100)	ab	26.3(100)	ab	16.7(100)	bc	10.2(100)	b	59.1	c
W	14.8(96)	a	22.2(84)	a	14.1(84)	ab	8.5(83)	a	55.5	b
B	16.6(107)	ab	28.2(107)	ab	16.1(96)	bc	9.8(96)	ab	59.6	c
G	17.7(114)	ab	24.5(93)	ab	13.5(81)	a	8.6(84)	ab	52.5	a
R	15.7(101)	ab	27.0(103)	ab	17.0(102)	c	10.5(102)	b	58.4	c
FR	24.4(157)	b	30.8(117)	b	15.2(91)	abc	9.7(95)	ab	53.5	ab

※ 1) C: 無処理区、W: 白色LED区、B: 青色LED区、G: 緑色LED区、R: 赤色LED区、FR: 遠赤色光LED区。
 2) 同一英文字を付した平均値間にはTukeyのHDS検定における5%レベルでの有意差が見られない。
 3) ()内の数値は無処理区を100とした相対値を示す。

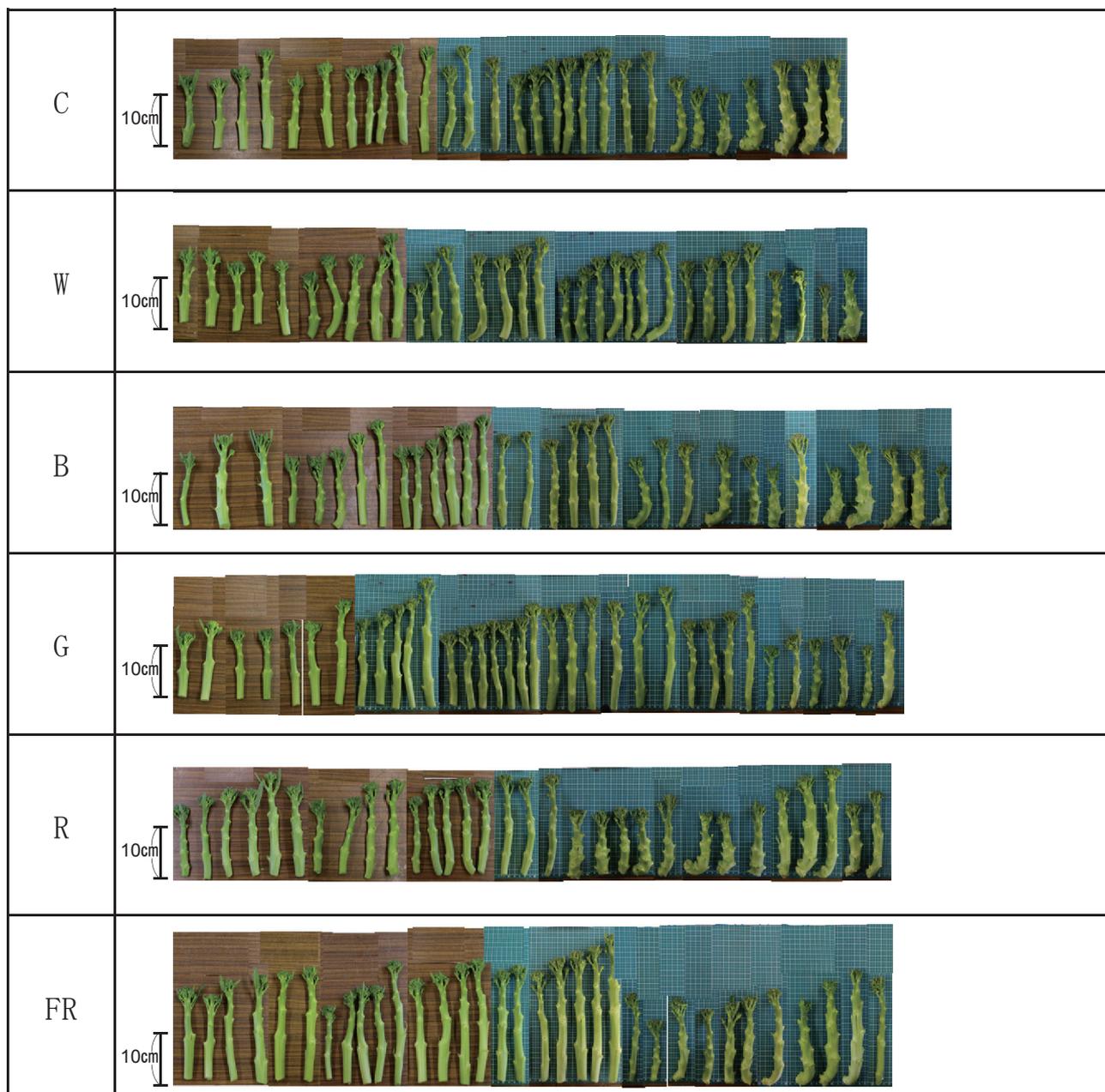


図1 異なる光質による夜間照明を行った茎ブロッコリー収穫部位

図中、C、W、B、G、R、FRの記号は、それぞれ対照区および白色LED、青色LED、緑色LED、赤色LEDならびに遠赤色LEDにより夜間照明を行った処理区を示す。

表2 夜間照明の光質の違いが茎ブロッコリーの可食部の生長に及ぼす影響(実験2)

照明 処理	平均収穫		平均収穫		平均収穫		平均収穫		平均	
	花茎長(cm)		花茎重量(g)		花茎径(mm)		花茎葉数(枚)		SPAD値	
C	15.7(100)	ab	18.0(100)	ab	14.7(100)	ab	8.1(100)	ns	54.4	ns
B	16.0(102)	b	16.9(94)	ab	14.8(101)	ab	8.2(101)	ns	55.8	ns
RH	14.5(92)	a	14.2(79)	a	13.8(94)	a	8.1(100)	ns	53.5	ns
RL	16.1(103)	b	18.4(102)	b	15.2(104)	b	8.3(102)	ns	57.7	ns
FR	19.4(124)	C	21.2(118)	b	15.2(103)	b	8.1(100)	ns	54.5	ns

※ 1) C：無処理区、B：青色LED区、RH：赤色LED区(強光条件)、RL区：赤色LED区(弱光条件)、FR：遠赤色光LED区
 2) 同一英文字を付した平均値間にはTukeyのHDS検定における5%レベルでの有意差がない。
 3) ()内の数値は無処理区を100とした相対値を示す。

表3 実験1および実験2における夜間照明の光質の違いが茎ブロッコリーの可食部収量に及ぼす影響

照明 処理	実験1		実験2		
	株当たり 平均収量(g)	株当たり 収穫本数	照明 処理	株当たり平均 収量(g)	株当たり 収穫本数
C	249.5(100)	38(100)	C	202.5(100)	45(100)
W	183.3(74)	33(87)	B	168.6(83)	40(89)
B	282.0(113)	40(105)	RH	184.8(91)	52(116)
G	214.8(86)	35(92)	RL	211.8(105)	46(102)
R	303.5(122)	45(118)	FR	275.5(136)	52(116)
FR	284.8(114)	37(97)			

※ 1) C：無処理区、W：白色LED区、B：青色LED区、G：緑色LED区、R：赤色LED区、RH：赤色LED区(強光条件)、RL：赤色LED区(弱光条件)、FR：遠赤色光LED区。
 2) ()内の数値は無処理区を100とした相対値を示す。

量はFR区がC区に比べて増える傾向はあったが、RH区ならびにRL区とも株当たり平均収量の増加は確認できなかった。なお、実験1及び2とも株当たり平均収量について、W区、B区、G区の効果は確認できなかった。

考 察

本研究では、低温期にその花茎伸長が遅延する茎ブロッコリーに関して、品質に関連する項目である花茎の伸長を促進するとともに、花成及び花芽発達を安定化させる日長延長処理のための光照射技術開発を、目標に日長延長処理とその際の光質という点に着目した試験を行った。日長延長処理という点に関しては、遠赤色光により花茎伸長が促進される傾向が示されたものの、その他の光質については、応答反応は観察されなかった。なお、遠赤色光照明による花茎伸長効果は、栽培時期の異なる実験1及び実験2のいずれにおいても統計的に有意であったことから再現性はあるものと考えられる。

植物の茎や胚軸、葉柄などの部分の伸長は光に反応し、一般的に強光下より弱光下で伸長が促進される傾向がある。このような光による形態形成反応は、細胞に存在している光信号を受け取る受容体「光受容体」からのシグナルによって制御されていると考えられている(Lin 2000)。代表的な光受容体であるフィトクロムの場合、赤色光/遠赤色光比(R/FR)という光質による影響を受け、この受容体からのシグナルにより、主茎の伸長や主茎と側枝との間の生長バランスが変化することがある。このような茎の伸長反応に対するフィトクロムからのシグナルの影響は、明期中の光質だけでなく、明期終了時に照射する光質の変化でも存在することが、キクなどさまざまな花卉類で確認されている(住友ら 2009)。

Ubukawaら(2006)は、ペチュニアの主茎伸長はその他の波長分布特性の違いに関わらず、赤色/遠赤色光の比率が高くなると抑制されることを示唆した。また、光強度も主茎伸長の制御要因となっており、強光強度下では弱光強度

と比較して主茎伸長が抑制されることも示された。このような草型の変化は主茎の細胞伸長が光環境により制御されることにより発生していると考えられる。ジベレリンは、細胞伸長を制御する代表的な植物ホルモンである。Fletcherら(2005)の報告のように、遠赤色光低減フィルム下においてもジベレリン処理は主茎伸長を促進した。また、Ubukawaら(2006)が示したように、赤色光の比率が高い環境では植物体内での活性型ジベレリンであるGA1量が増加し、その光環境の変化に伴う内生のジベレリン量の変化がペチュニアの草型を調節している可能性が示唆された。今回の試験において明期終了直後からの遠赤色光照明は、EOD (End of Day)照明と同じ効果をもたらし、花芽誘導後の花茎伸長を促進した可能性がある。花芽誘導後のロゼット打破などにはジベレリンが関与していると考えられるが、今回の茎ブロッコリーについても夜間の遠赤色光照明がジベレリン合成を調節し、花茎伸長を促進した可能性がある。

一方、花芽誘導に関して茎生葉の枚数を比較したところ、白色、青色、緑色の条件では葉枚数がやや減少したものの、光質間に顕著な傾向は確認できなかった。キャベツやブロッコリーは緑植物春化型の植物であり、日長の変化による花芽分化誘導効果は相対的に低い。しかしながら、花芽発達などは日長によって促進されることから、夜間の照明により花蕾の発達が促進されることを期待したものの、花蕾数について処理間で大きな差がなく、夜間照明の効果はないと判断した。

海外では電照のような開花の調節だけでなく、特に北欧や北米など冬季の日射が著しく減少する地域では作物の成長に必要な光の不足を補うための「補光」技術が利用されている(福田 2010)。太陽光・人工光併用型植物工場では、周年安定生産と生産性向上のために補光が利用されており、レタスやミツバ、ハウレンソウなどの生産でその効果が評価されている。光合成可能な時間帯を安価な夜間電力を活用した補光により延長し、積極的に生育促進させるという考え方がある。筆者らの研究では、夜間電力を利用することによりエネルギーコストを抑制しつつ、サラダナやチンゲンサイなどの葉菜類について、補光のために照射する光強度によっては二倍の地上部生体重を得ることができた(Fukudaら 2004)。このように一部葉菜類について深夜間の補光が高い生育促進効果を持つ

ことが示されている。今回、実験1では赤色光により株当たり収穫量が対照区と比べて多くなる傾向を示したが、実験2では効果は見られなかった。花蕾はブロッコリーにおけるシンク器官であり、光合成の促進はその成長を左右する重要な要素であると言えよう。しかしながら、夜間の照明については、その茎伸長に伴う重量増加と花蕾数が最終的には株当たりの収量を決定するが、それらの項目について遠赤色光における花茎伸長効果を除けば効果がなかったことから、本実験における $10\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ という光強度レベルでは、茎ブロッコリーの株当たり収量を増大させるには至らなかったものと考えられる。

本研究の結果、ブロッコリーについてもキク等と同様に夜間の遠赤色光照明により形態制御ができる可能性が示唆され、特に低温期における茎ブロッコリーの側枝伸長には遠赤色光による夜間照明は有効であると考えられる。

引用文献

- Fletcher J.M., A. Tatsiopoulou, M. Mpezamihigo, J.G. Carew, R.G.C. Henbest, P. Hadley (2005) Far-red light filtering by plastic film, greenhouse-cladding materials: effects on growth and flowering in Petunia and Impatiens. The Journal of Horticultural Science Biotechnology. 80:303-306.
- Fukuda N., S. Nishimura and Y. Fumiki (2004) Effect of supplemental lighting during the period from middle of night to morning on photosynthesis and leaf thickness of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and tsukena (*Brassica campestris* L.), Acta Horticulturae, 633:237-244.
- 福田直也(2010) 第3章 光源利用の実際、施設園芸における補光(電照と光合成促進). 人工光源農林水産分野への応用. 社団法人農業電化協会、98-104.
- 福田直也(2012) 第9章、温室における補光栽培技術の可能性. アグリフォトニクスII~LEDを中心とした植物工場の最新動向~(後藤英司監修). シーエムシー出版、72-80.
- 川田穰一(1996) 第1章 花きの電照・補光栽培技術. 第6節 補光による花きの成育促進. 電照・補光栽培の実用技術. 箕原善和編、(社)農業電化協会、128-139.
- Lin, C. (2000) Photoreceptors and regulation of flowering time, Plant Physiology. 123:39-50.
- 住友克彦、山形敦子、岸本真幸、久松 完(2009) 数種切り花類の開花及び茎伸長に及ぼす明期終了時の短時間遠赤色光照射(EOD-FR)の影響. 花き研究所研究報告. 9:1-11.
- Ubukawa M., N. Fukuda, N. Oyama-Okubo, M. Koshioka, L. N. Mander, J., S. Sase and S. Nishimura (2004) Effect of light source and quality on endogenous gibberellin level and GA₃

response of petunia (*Petunia × hybrida* Vilm.).
Journal of the Japanese Society for Horticultural
Sciences. 73:441-446.

山田明日香、谷川孝弘、巢山拓郎、松野孝敏、國武利浩
(2009)トルコギキョウの初秋出し栽培における開
花と切り花品質に及ぼす赤色光長日処理の光量と品
種間差. 園芸学研究. 8:309-314.

Effects of Over Night Lighting by Some Types of LED on the Development of Edible Bolting in Stem Type Broccoli

Mutsumi ITO^{1*} and Naoya FUKUDA^{1,2}

¹ Agricultural and Forestry Research Center, University of Tsukuba,
Tennodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8577, Japan

² Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba,
Tennodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8572, Japan

Abstract

The development of edible bolting in stem type broccoli was evaluated when far-red, white, blue, green and red light, provide by light emitting diodes(LED), was irradiated to broccoli plants during over night with the light intensity of $10 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, the photo-synthetically photon flux density. Over-night lighting by far-red LED, increased the averaged length of edible bolting stem, and it could achieve to be approximately 60% longer than that of control treatment. In addition, the averaged fresh weight of edible bolting, tended to be 17% higher in the far-red light treatment than in control. However, there was no significant difference in the total bolting yield per plant among lighting treatments at the end of each experiment. From those results, the over night lighting by LED has no effects on the growth promotion to increase the edible bolting yield as the supplemental lighting during winter season, but the far-red lighting could prolong the extension growth of edible bolting.

Key words: Elongation of stem of bolting, Far-red light, LED, Light quality, Over night lighting

*Corresponding Author: Mutsumi ITO Agricultural and Forestry Research Center, University of Tsukuba
Ten-nodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8572, Japan
E-mail: mutsumi@nourin.tsukuba.ac.jp