

信州大学審査学位論文

エンサイ(*Ipomoea aquatica* Forsk.)
の光制御による栽培管理に関する研究

平成 25 年 3 月

佐々木 大

目 次

第 1 章	緒論	1
第 2 章	日長と光強度に対する花芽形成反応	6
	1. 材料および方法	8
	2. 結果および考察	11
	3. 摘要	15
第 3 章	光質が花芽形成に及ぼす影響	16
	1. 材料および方法	18
	2. 結果および考察	20
	3. 摘要	24
第 4 章	花芽形成に及ぼす青色光の光強度	25
	1. 材料および方法	25
	2. 結果および考察	27
	3. 摘要	32
第 5 章	異なる光質条件下におけるエンサイの成長の差異	33
	1. 材料および方法	33
	2. 結果および考察	36
	3. 摘要	37
第 6 章	<i>B/R</i> 比が茎組織に及ぼす影響	38
	1. 材料および方法	39
	2. 結果	42
	3. 考察	47
	4. 摘要	50
第 7 章	外生ブラシノライドが茎組織に及ぼす影響	51
	1. 材料および方法	52
	2. 結果	54
	3. 考察	56
	4. 摘要	57

第 8 章	茎の食品物性学的特性と光質の関係	58
	1. 材料および方法	59
	2. 結果および考察	63
	3. 摘要	68
第 9 章	被覆資材を用いた栽培管理	69
	1. 材料および方法	69
	2. 結果および考察	71
	3. 摘要	75
第 10 章	総括	76
	謝辞	82
	引用文献	83
	要約	90
	Summary	93

第1章 緒論

エンサイ (*Ipomoea aquatica* Forsk.) は、ヒルガオ科 (*Convolvulaceae*) - サツマイモ属 (*Ipomoea*) の一年生つる性植物である。エンサイの英名は、Water convolvuls, Swamp cabbage, Water spinach(岩佐, 1980; 上村, 1993), 和名は、エンサイ, ヨウサイ, カンコン, アサガオナあるいはクウシンサイ (田中ら, 1997; 由比, 1989; 藤目, 2005), 中国名は、空心菜, 藤菜, 竹葉菜, 壅菜 (森下・王, 1995), 葛菜, 蕨菜, 應菜, 薤菜 (岩佐, 1980) など多くの呼び名を持つ。

エンサイの起源地は、中国南部, 東インド, 熱帯アジアなど文献によりさまざまであり, 特に中国南部が有力とされている。しかしエンサイは, アフリカにも分布しており, 食用として利用されている地域もある (倉内ら, 2005) ことから, 現在のところ起源地は不明のままである。

岩佐 (1980) によれば, エンサイには 2 種あり, 1 つは栽培型の *Ipomoea reptans* Poir., もう 1 つは野生型の *Ipomoea aquatica* Forsk. と呼ばれている。 *Ipomoea reptans* Poir. は, 緑茎白花で, 野菜としての性格が強い。一方 *Ipomoea aquatica* Forsk. は, 赤茎で花卉は桃色で, 花筒の内部濃紅紫色のものはことに湿地を好み, アカバナヨウサイとして区別されることがある。しかし, 東南アジアでは野生型も食用にしている地域が多いことから, 最近では, 栽培型と野生型の種区分はなくなり, *Ipomoea aquatica* Forsk. で同一種として表記されている。図 1 に, 上述したエンサイの栽培系統と野生系統の草姿と花器の様子を示した。

エンサイは, 茎が空洞で柔らかく, 分枝性が強い。茎の頂端から 20~30cm を収穫すると, 下部の葉腋から再び新芽が発生するため, 長期間収穫が可能である。葉は互生で, 葉身は長葉型, 外葉型, 角葉型および丸葉型が確認されている (太田ら, 2002)。葉の成長は栽培条件 (水耕, 土耕)

の影響を受けており、葉の形態は系統間で異なっている（太田ら, 2003）。花は葉腋に1~5個着生し、花冠は直径5cm程度の漏斗状である。短日植物であり、東南アジアなど熱帯地域では自然条件下で容易に開花・結実に至るが、九州以北では開花は10月以降に始まるため、結実期の低温障害により枯死することから採種は困難である。

エンサイの有用な特徴の一つとして、栄養価の高さが挙げられる。食品標準成分表（2009）によると、生の可食部成分は、17kcal/100g、たんぱく質2.2g/100g、脂質0.1g/100g、炭水化物3.1g/100g、ナトリウム26mg/100g、カリウム380mg/100g、カルシウム74mg/100g、マグネシウム28mg/100g、鉄1.5g/100g、カロテンa78μg/100g、ビタミンC19mg/100gおよび食物繊維3.1g/100gである。また、薬用効果として下剤の効果もあるほか、不眠や頭痛を引き起こす神経症などにも効果がある（藤目, 2005）。食味は、少し粘りがあって風味がよく、生食や油で炒めて食べることが多いが、酢漬、ピクルスとして加工される場合もある（田中ら, 1997）。アフリカのブルキナファソでは、野生系統の茎葉がソースの材料として利用されている（倉内ら, 2005）。

エンサイは、東南アジアからアフリカまで広い地域で野菜として利用されており、我が国でも食味が良いこと、栄養価が高いことや機能性などから人気が高まってきている。また、水田転換作物（細井・袖山, 2006）やファイトレメディエーション（Mahmud *et al.*, 2008）、被覆作物（山本, 2003）、さらに栄養サプリメントとしての加工利用（前澤, 2006）など、この野菜の特性を活かした利用方法が注目されており、国内での普及が期待されている。しかし、我が国においてエンサイは特殊な野菜の域を出ていないため、全国の生産状況すらほとんどつかめていない状態である。最近では、一部のスーパーマーケットや産直市場などで販売されているものを見ることがあるが、夏季に限定されておりなかなか市場に定着できないのが現状である。

エンサイを一般的な野菜として市場に普及させるには、生産量の増加は元より周年的な栽培が必要である。エンサイは低温に弱く、栽培は夏季に限定される。また、ハウスのような施設を利用した栽培ではアブラムシ類やハダニ類などの虫害が発生しやすく、天敵利用による虫害の軽減に関する研究報告もあるが、安定生産には解決すべき課題が多い（長坂ら, 2012）。このような状況の中、それを打破して周年栽培を確立するには、植物工場のように施設を利用した栽培は選択肢の1つと考えられる。植物工場への導入について、エンサイは、水耕栽培が容易で生育も旺盛なため、採算性の点からも期待できる。また、エンサイは、養分吸収能力が高いため、培養液養分濃度が低下した廃液の再利用および浄化作用を目的とした研究が進んでおり（阿部ら, 2003；常盤ら, 2003）、養液のコストが低減化できることから植物工場での栽培に適した作物と考えられる。ところが、養液の管理以外の様々な最適な栽培環境条件、例えば光、温度、湿度、二酸化炭素濃度などについて詳細な点は不明のままであり、実用化のための技術的課題が多く残されている。これらのことから、エンサイの植物工場への導入の基礎になる研究情報は重要と考えられる。

また、日本国内での需要の増加に伴い、多収性、ストレス耐性、高養分吸収能力など様々な需要に対応できる系統の育種が期待されている。しかしエンサイの育種はほとんど行なわれておらず、在来品種の利用が多い。育種を行なうには交配が不可欠だが、前記のように、日本国内での自然条件下におけるエンサイの種子生産は困難であり、系統ごとに開花期を合わせることも容易ではない。この問題を解決するためには人工的環境条件下での開花調節技術が重要であると考えられる。

そこで本論文では、エンサイの国内での普及を目指し、効率的な交配育種、栽培および品質管理を目的とした研究を行なった。第2章から第4章では、人工的環境条件下での開花調節技術の確立について、第5章から第

8章では、植物工場へ導入するための栽培管理および品質管理を目的とした研究について、第9章では、一般的な栽培管理に関する情報を得るために、エンサイの光制御による栽培管理に関する研究を行なった。



栽培系統の草姿



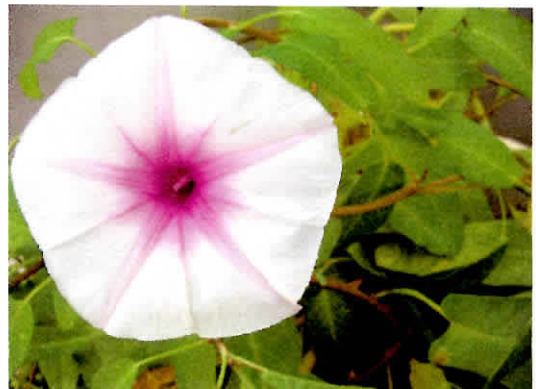
タイにおけるエンサイの栽培風景



栽培系統の花器



タイにおける野生系統の草姿



野生系統の花器

図 1 エンサイの栽培系統と野生系統の草姿と花器

第2章 日長と光強度に対する花芽形成反応

エンサイは、ヒルガオ科サツマイモ属の有用野菜で、中国や東南アジアなどで広く食用として利用されている。また、その分布はアフリカ地域にまで及び、その形態や形質も多様である（倉内ら, 2005; Ogunwenmo and Oyelana, 2009）。エンサイには野生型と栽培型の2つがあり、形態的変異も大きいことから、品種改良のための遺伝子源は豊富である（小山, 1984）。一般に食されていない野生型は、栽培型と比較して総ポリフェノール含量が高く、強い抗酸化能が認められている（Hirai *et al.*, 2011; 江頭ら, 2012）。エンサイの有用系統育成のためには、既存の栽培種と有用な遺伝子を持つ系統との交雑による育種が最も効果的である。一般に野菜の開花調節は、その手段として自然環境を利用する。しかし、我が国ではエンサイの開花は10月以降に始まり、秋冷による低温障害で枯死するため、自然条件下での結実は困難である。また、開花期を異にする系統間での開花時期を合わせることも容易ではない。そこで人為的環境条件下での発育調節技術の確立が必要とされる。

一般的な開花調節技術として、日長処理、光強度・光質変換資材を用いた光照射処理、温度処理、植物成長調整剤処理などが挙げられ、対象作物によって開花調節の方法もさまざまである。エンサイの早期開花数確保には8時間日長処理を30日間行なうことが有効であるという報告（加藤ら, 2005）があるが、人工光を利用した光強度による影響は明らかにされていない。

光強度による花芽形成への影響について、エンサイと同じヒルガオ科のアサガオでは、暗反応は夕方 200lux になった時から暗黒中におけると同様に進行し始め、朝は 0~1lux の光で暗期反応が阻害されるという報告がある（滝本・池田, 1960）。また、イネの花芽分化は 900lux が限界光強度

であるという報告もある (Adachi and Inouye, 1972). このように, 花芽分化を誘導する光強度は作物によって異なり, エンサイの発育調節技術の確立には, 限界光強度を明らかにすることが重要である.

そこで本研究では, エンサイの交雑育種に必須の発育調節技術を確立するため, 人工照明の光強度および照射時間がエンサイの花芽形成に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした.

1. 材料および方法

材料の育成

供試材料には、台湾で流通しているエンサイの在来系統（WC016）を使用した。エンサイを植物育成用蛍光灯（ビオルックス A 40W, NEC）を用いて、光強度 PPF_D（photosynthetic photon flux density） $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ・14 時間明期条件下で栽培し、成長した分枝を試験に用いた。分枝の上位 5 節を切り取り、切り取った植物体の最下節を水に挿し 5 日間根出し処理を行なった。その後 12cm 黒ビニルポットに充填した土中に、各ポット 1 本ずつ挿し植えした。

光照射処理

育成した植物に、植物育成用蛍光灯を用いて、光強度および照射時間の異なる人工光を 30 日間照射した。処理は光強度が植物体の頂端において PPF_D 50, 100 および $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に設定した。光強度は、光合成有効放射光量子計測器（LI-250A, メイワフォーシス）を用いて、随時測定した。3 段階の光強度の異なる処理区における光スペクトルを高速分光ユニット（HSU-100S, 朝日分光株式会社）を用いて測定し、図 2 に示した。照射時間をそれぞれ 1 日当たり 10, 12 および 14 時間とし、各区 20 ポットずつ供試した。試験はすべて人工気象室内に設置した遮光した木箱内で行ない、温度を 25℃ 一定とした。人工気象室の様子を図 3 に示した。週に一回 1000 倍希釈の液体肥料（ハイポネックス 5-10-5 原液, (株)ハイポネックスジャパン）を施肥し、適時灌水した。

処理後の調査

照射処理開始から 30 日目に花芽形成の有無を肉眼で観察した。なお、花芽形成の判断は、花芽の大きさが 2mm 以上になった時点とし、目視によって判定した (図 4)。

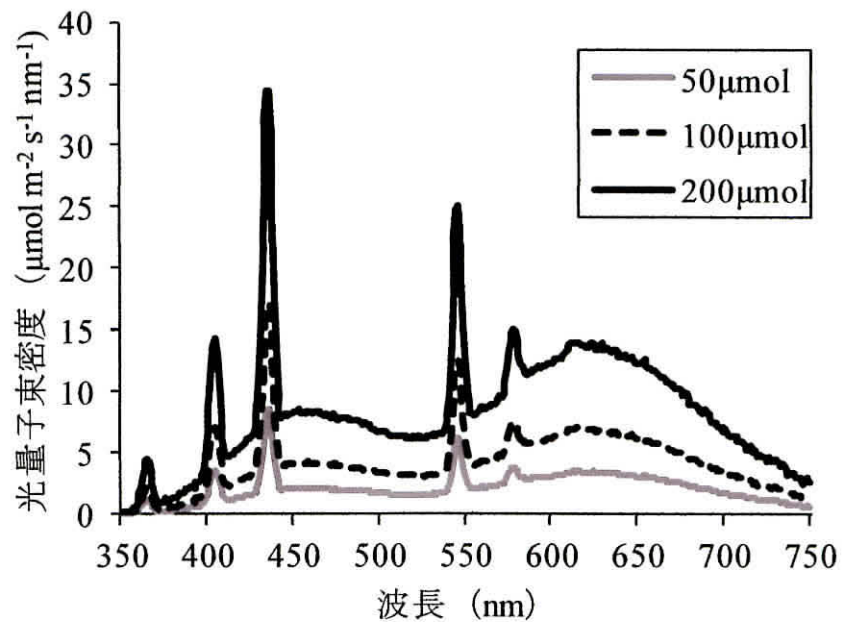
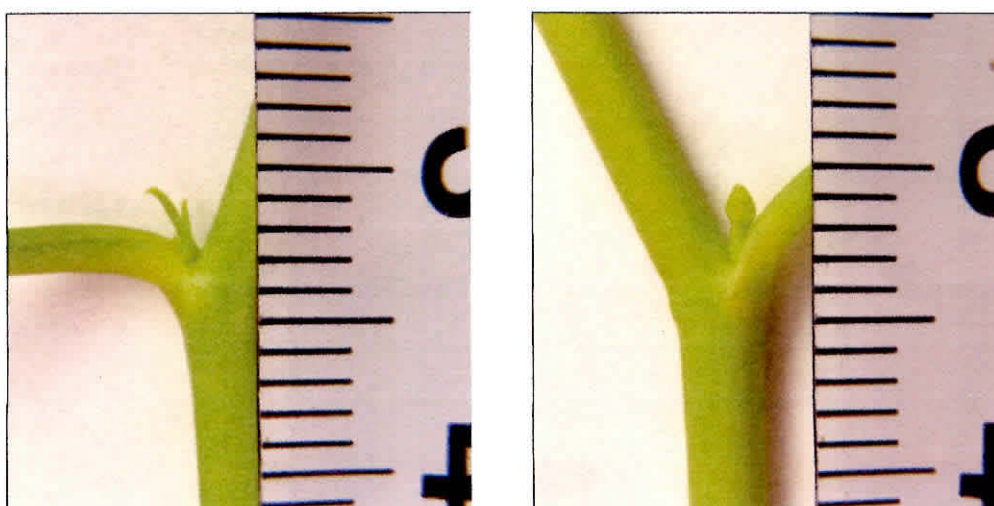


図 2 植物育成用蛍光灯の光スペクトル



図 3 人工気象室



a, 葉芽

b, 花芽

図 4 エンサイにおける花芽形成の判定

2. 結果および考察

処理開始 30 日目の生育調査の結果を図 5 および 6 に示した。草丈は、10 時間照射区で $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 処理区が有意に低く、12 および 14 時間照射区では光強度の減少に伴い有意に低くなった。葉数は、各時間処理区において光強度の減少に伴い有意に低くなった。一方草丈は、生育の最も良好な $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 区では、10 時間処理で約 37cm、12 時間処理で約 72cm、14 時間処理で約 62cm それぞれ伸長した。また、葉数も 10 時間処理で約 7 枚、12 時間処理で約 8 枚、14 時間処理で約 7 枚それぞれ増加した。

照射時間と光強度が花芽形成に及ぼす影響を表 1 に示した。10 および 12 時間照射区において $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 処理区でのみ花芽が形成された。14 時間照射区はどの光強度でも花芽形成は起こらなかった。花芽形成は 10 時間照射区と比べ 12 時間照射区において高節位で生じ、長日条件ほど形成される花芽の数は増加した。10 時間照射区では処理開始 28 日目に開花した (図 7)。合計花芽数は 10 時間照射区で 30 個、12 時間照射区で 39 個となり、12 時間照射区が多かったが、花芽を確認できるまでの日数は 10 時間照射区で 15 日、12 時間照射区で 21 日となり、10 時間照射区が 6 日間短かった。照射処理 30 日間で花芽形成が起こらなかった区では、その後 20 日間同じ照射処理を継続したが、花芽は確認できなかった。

以上のことから、エンサイの生育は、 $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ まで光強度の増加に伴って増大することが明らかとなった。また、光強度 $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 下 30 日間栽培で花芽が形成される節数を十分に確保できることが明らかとなった。エンサイは、 $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の光強度に反応して花芽形成が誘導され、短日条件ほど低節位で着蕾することが明らかとなった。これは、短日条件ほど少ない日数で花芽形成が誘導されるためであると考えられる。また、長日条件ほど花芽形成数が増加したことは、節数を確保した段階で花芽形成が誘導されたためと考えられる。一方、 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

以下の処理区では，エンサイの限界光強度に達していないと推察され，光強度の不足が花芽形成に至らなかった原因であると考えられた．

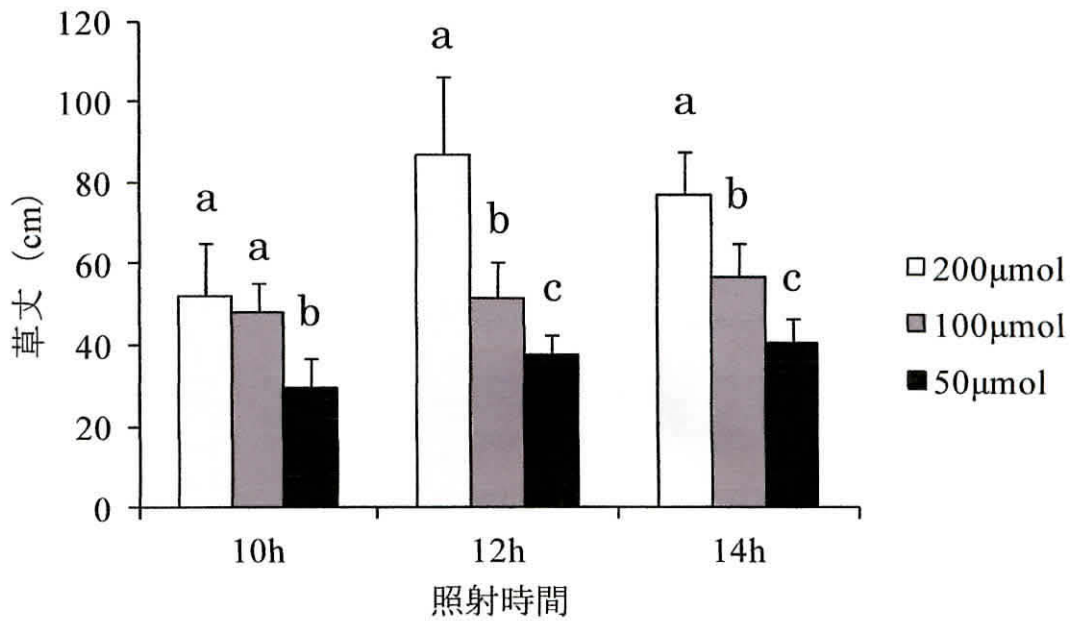


図5 異なる照射時間と光強度条件下における草丈の差異
 ※異なるアルファベット間に1%レベルで有意差あり
 エラーバーは標準偏差を示す

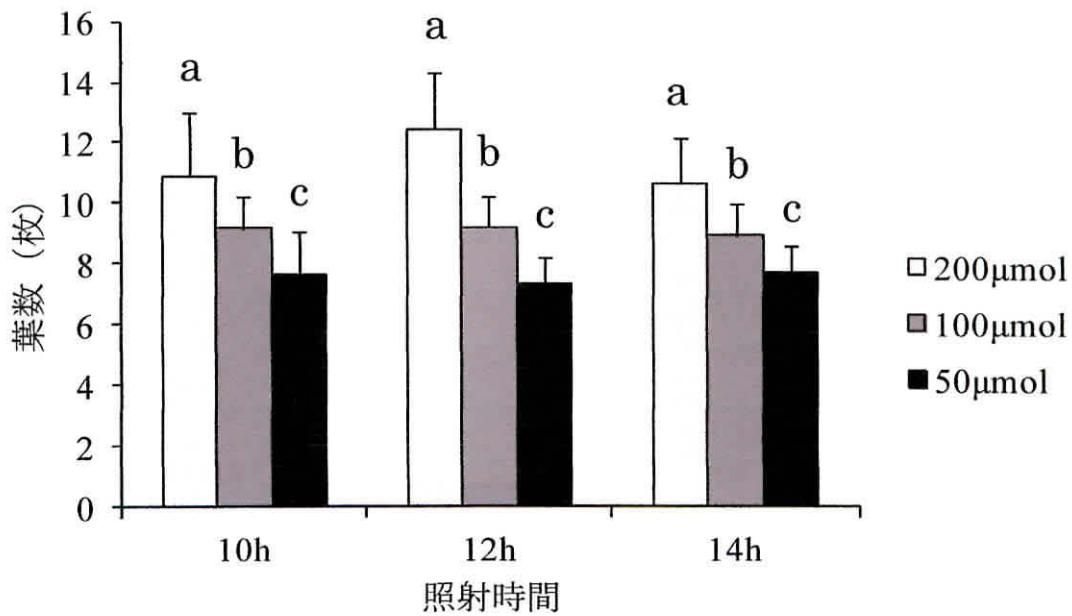


図6 異なる照射時間と光強度条件下における葉数の差異
 ※異なるアルファベット間に1%レベルで有意差あり
 エラーバーは標準偏差を示す

表 1 照射時間と光強度が花芽形成に及ぼす影響

照射時間 (時間/日)	PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	節番号 * ¹													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10	50	— ^{*2}	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	200	—	—	—	—	2	1	8	6	4	6	2	1	—	—
12	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	200	—	—	—	—	—	—	—	1	6	8	8	7	5	4
14	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

*¹: 節番号は下位からの番号

*²: —は花芽形成が無いことを示す。また、花芽数は20ポットの合計値

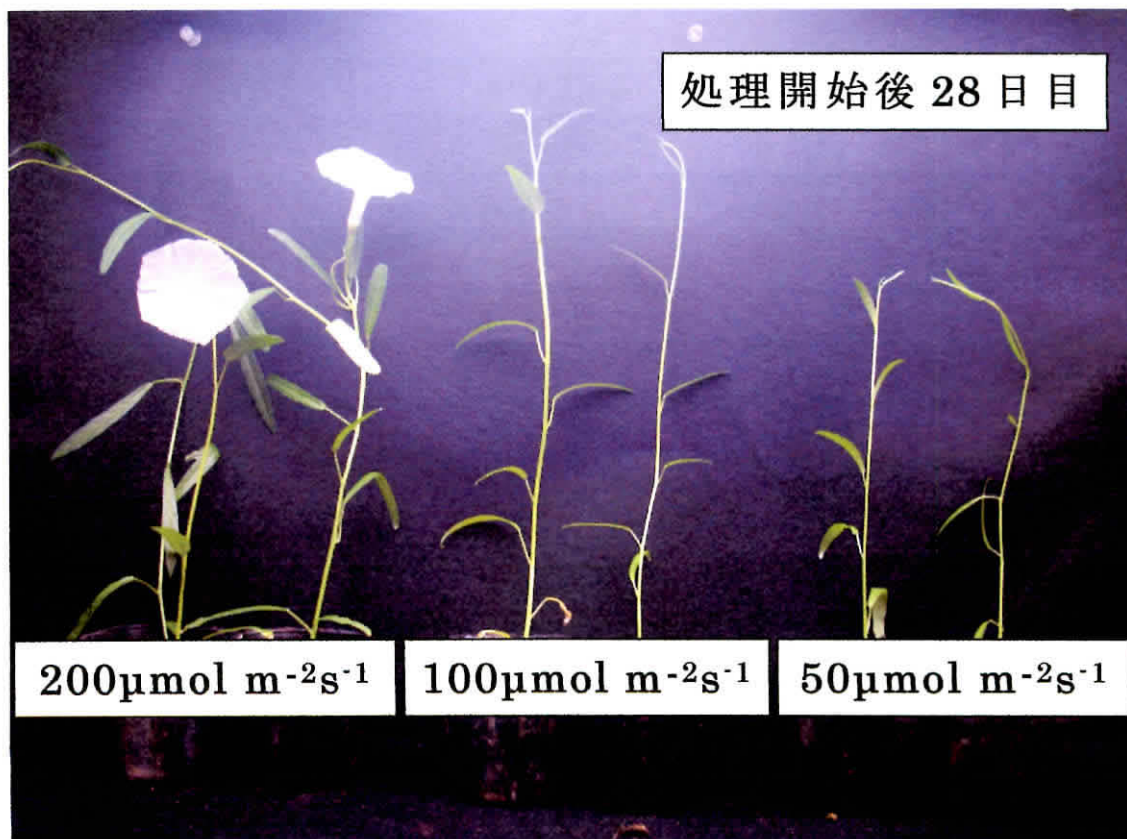


図 7 10 時間照射条件下における異なる光強度区の植物体

3. 摘要

本章では、エンサイの開花調節技術を確立することを目的とし、人工光による光強度が生育と花芽形成に及ぼす影響を明らかにした。エンサイ台湾産栽培系統を供試し、光強度を PPFD 50, 100 および 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の 3 区を設け、照射時間をそれぞれ 1 日 10, 12 および 14 時間照射区とした。草丈、葉数および SPAD 値は PPFD 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ までは光強度の増加に伴って高い数値を示すことが明らかとなった。また、PPFD 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光強度下で栽培することで花芽形成に至る十分な生育量を確保できることが明らかとなった。10 および 12 時間照射区では 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 処理区のみで花芽が形成された。14 時間照射区はどの光強度でも花芽形成は起こらなかった。花芽は 12 時間照射区よりも 10 時間照射区において低節位で着蕾し、10 時間照射区よりも 12 時間照射区で形成される花芽の数は増加した。このことから、PPFD 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の光強度で花芽が誘導され、短日条件ほど速やかに花芽が誘導されることがわかった。

第3章 光質が花芽形成に及ぼす影響

我が国においてエンサイは、夏季の葉物野菜として人気が高まっており、栽培面積も拡大しつつある。さらに高栄養価や高機能性、あるいは水質浄化作物としても注目されており、これらに関しても研究されている（湧田ら, 2004 ; Mahmud *et al.*, 2008）。このような需要の増加に伴い、多収性、ストレス耐性、高養分吸収能力などを持つ多様な品種の育成が期待される一方、広範な普及のためには周年栽培技術の開発も不可欠となっている。

太陽放射の分光組成は、季節によって変化する（Oba and Kobayashi, 1985）。青色光の変動パターンは夏に最大値を示し、冬に最低値を示す。一方、緑色光は冬に最大値を示し、夏に最低値を示す。赤色光は年間を通して変動は小さい。山崎ら（2000）は、こうした季節変動が植物の花芽形成にも影響を及ぼしていると推考し、短日植物であるアサガオがなぜ日長の長い6～7月に花芽を分化させるのかという疑問に対して、明期の青色光がアサガオの花芽形成を促し、限界日長に近い日本の夏季における光合成有効放射に占める青色光の比率の増大が、花芽形成を促している一つの要因と結論付けた。

また近年では、赤・遠赤色光可逆反応の光受光体であるフィトクロムや青色光受光体のクリプトクロム、フォトトロピンの研究が進み、構造や生理機能などが解明されつつある。フィトクロムを介した反応は、照射方法や植物により異なるが、発芽の誘導、光屈性、茎の伸長抑制、アントシアニンの蓄積、花芽形成の促進などが確認されている。青色受光体にも同様に光屈性、開花の抑制、アントシアニン合成の誘導、気孔開口など様々な作用が認められている（飯野, 2001）。

一方で、人工光源を利用して植物を生育させる植物工場のような新しい栽培方法が注目されている。植物工場とは「環境制御や自動化などハイテ

クを利用した植物の周年生産システム」と定義され（高辻, 1996), 連作障害からの脱却や生産性の増大, 作業の省力化, 清潔な栽培環境といった長所がある。そのため, 様々な光環境条件下における植物への影響を解明することは重要となる。光質によって生育および花芽形成が促進されれば, 今後エンサイの品種改良や栽培を効率的に行なうことができる。

第2章において, エンサイは短日条件で PPFD $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の光照射で花芽が形成されることを明らかにしたが（佐々木ら, 2011), どの波長が花芽形成誘導により有効に作用しているかという, 光スペクトルによる効果は明らかにされていない。しかし, エンサイと同じヒルガオ科のアサガオでは, 明期の青色光が花芽形成を促進していることから（山崎ら, 2000), エンサイにおいても光スペクトルが花芽形成に重要な影響を及ぼしていることが推測されよう。また, 人工光で栽培する場合, 使用する光源によって光質は様々であり, 植物に作用する光スペクトルの効果を明らかにすることは, 光源や光強度を選択するにあたり重要となる。

そこで本研究では, エンサイの発育と成長調節技術の確立にむけ, 光スペクトルを含めた光環境がエンサイの形態形成や花芽形成に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。

1. 材料および方法

材料の育成

供試材料および材料の育成方法は第2章と同様とした。

光照射処理

育成した植物体に光スペクトル、照射時間の異なる人工光を30日間照射した。光源にはLED（晶明節能科技有限会社，中華人民共和國）を用いて単色光照射処理を行なった。各々のLEDの中心波長は450 nm（青），530 nm（緑）および620 nm（赤）である。供試LEDの光スペクトルを高速分光ユニット（HSU-100S，朝日分光株式会社）を用いて測定し，図8に示した。処理区は青色（B），緑色（G）および赤色（R）の3区を設け，光強度が植物体の頂端においてPPFD $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となるよう調節し，照射時間をそれぞれ1日10，12および14時間照射区とし，各区20ポットずつ供試した。光強度は光合成有効放射光量子計測器（LI-250A，メイワフォーシス）を用いて随時測定した。試験中の温度は25℃一定とし，すべて遮光した室内で行なった。施肥は週に一回液体肥料（ハイポネックス5-10-5原液，（株）ハイポネックスジャパン）を1000倍に希釈して与え，適時灌水した。

処理後の調査

花芽形成は，花芽の大きさが2 mm以上になった時点とし（図4），目視によって判定した。照射処理開始から30日目に草丈，葉数およびSPAD値を測定した。

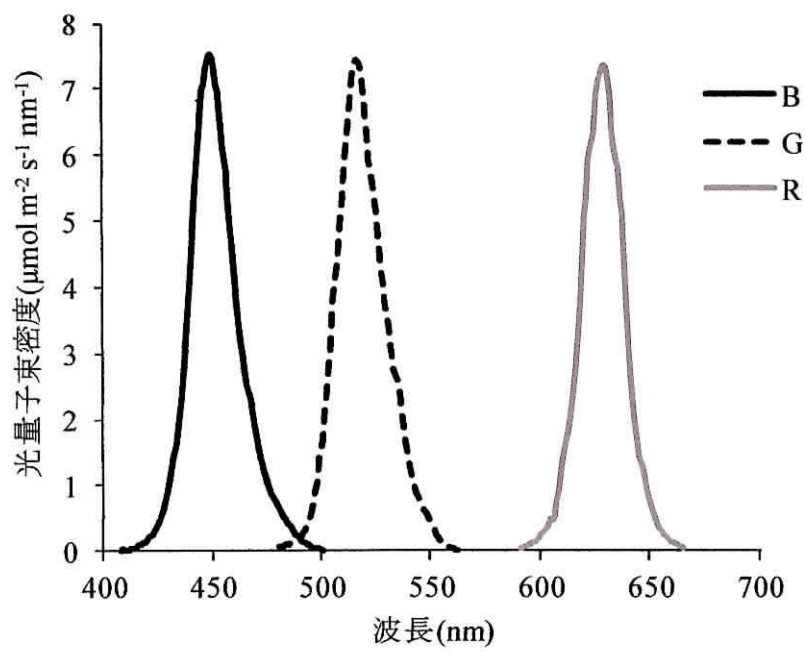


図 8 各色 LED の光スペクトル

2. 結果および考察

処理開始 30 日目の生育調査の結果を図 9, 10 および 11 に示した。草丈は 10 時間日長では B 区（青色光）で有意に高く，12 および 14 時間照射区では $B > R > G$ 区の順となった。葉数は，すべての照射区で $B > R > G$ の順にすべての区間で有意差が認められた。SPAD 値は，すべての照射時間区の B 区で有意に高くなった。緑色光は青色光や赤色光と比べて，クロロフィルによる吸収量が少なく，G 区では光合成量が少なくなったことが生育量の低さの一因と考えられた。

青色光が植物の生育に及ぼす影響について，平井ら（2006）は，ナスとヒマワリにおいて青色光下の莖長が他の単色光と比較して大きくなったが，リーフレタスにおいては小さくなったことから，反応の違いには草型の違いと受光効率を高める方法の違いが関連していると考察している。Fukuda ら（2002）によれば，青色光はペチュニアの草丈の伸長に影響しない。一方，山崎ら（2000）によると，アサガオの草丈の伸長は青色光で抑制される。南沢・橘田（1978）は，クワを用いた実験で，青緑色光（450-550 nm）の波長域に顕著な生長抑制作用があったと指摘している。Hanyu and Shoji（2000）によれば，インゲンマメ（*Phaseolus vulgaris* L.）において青色光の増加が莖の伸長抑制と葉厚の増加を引き起こす。また，普通ソバの胚軸伸長は青色光によって抑制されると報告されている（Kasajima *et al.*, 2008）。このように，青色光による影響は作物によって様々で，特にエンサイと同じ科のアサガオでは莖の伸長を抑制する効果が示されているが，本研究のエンサイでは，逆に青色光下で他の単色光よりも促進する効果が認められた。この点に関しては，今後詳細な要因について検討する必要がある。

各節位の花芽形成の有無を観察した結果を表 2 に示した。B 区の 10 および 12 時間照射区において花芽が形成され，10 時間照射区では 12 時間

照射区と比べて低節位で形成された。花芽形成数は 10 時間照射区で 20 ポットの合計で 65, 12 時間照射区で 47 であった。G 区と R 区では花芽形成が起こらず, 14 時間照射区はいずれの処理区でも認められなかった。照射処理 30 日間で花芽形成が起こらなかった区では, その後 20 日間同じ照射処理を継続したが, 花芽は確認できなかった。

以上のことから, エンサイの花芽形成は青色光によって誘導されることが明らかとなった。また, 緑色光や赤色光単色では花芽形成しないことが明らかとなった。山崎ら (2000) によると, アサガオでは, 明期の青色光によって花芽形成が促進されている。さらにアサガオは限界日長以上の 16 時間明期下で, 光源に青色光を用いた場合に花芽が形成されることが報告されている (Yamazaki *et al.*, 2003)。エンサイにおいては, 14 時間照射区において花芽形成が見られなかったことから, 花芽の誘導には明期の光スペクトルよりも, 暗期の長さが支配的と考えられた。

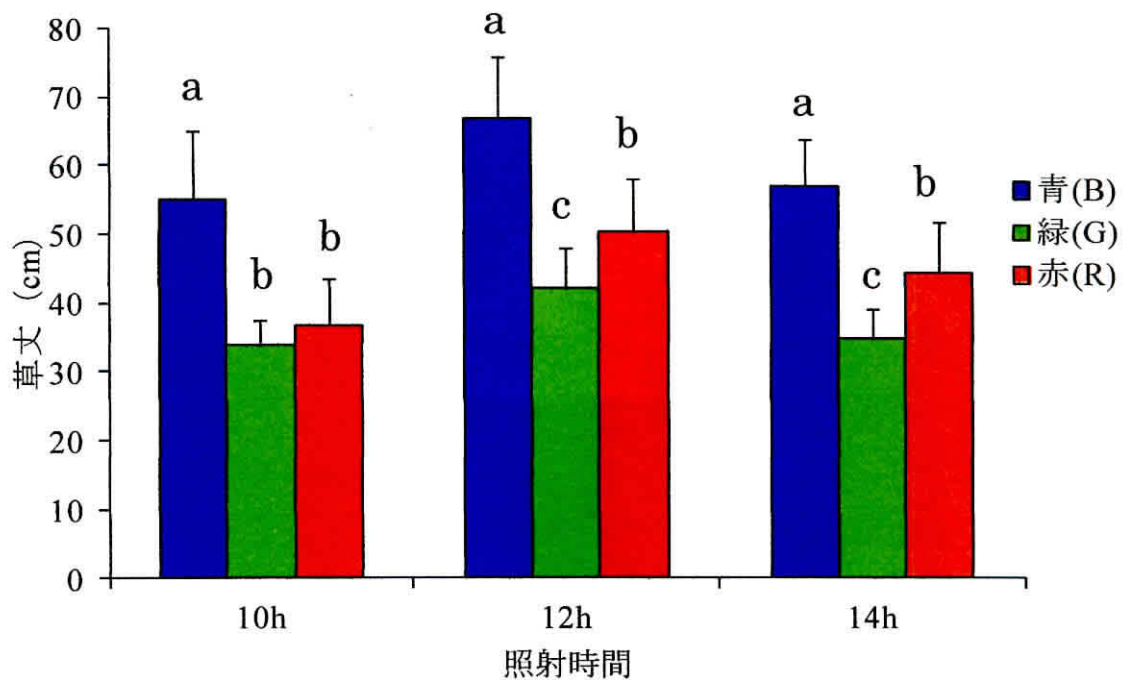


図 9 異なる照射時間と光質条件下における草丈の差異
 ※異なるアルファベット間に 1% レベルで有意差あり
 エラーバーは標準偏差を示す

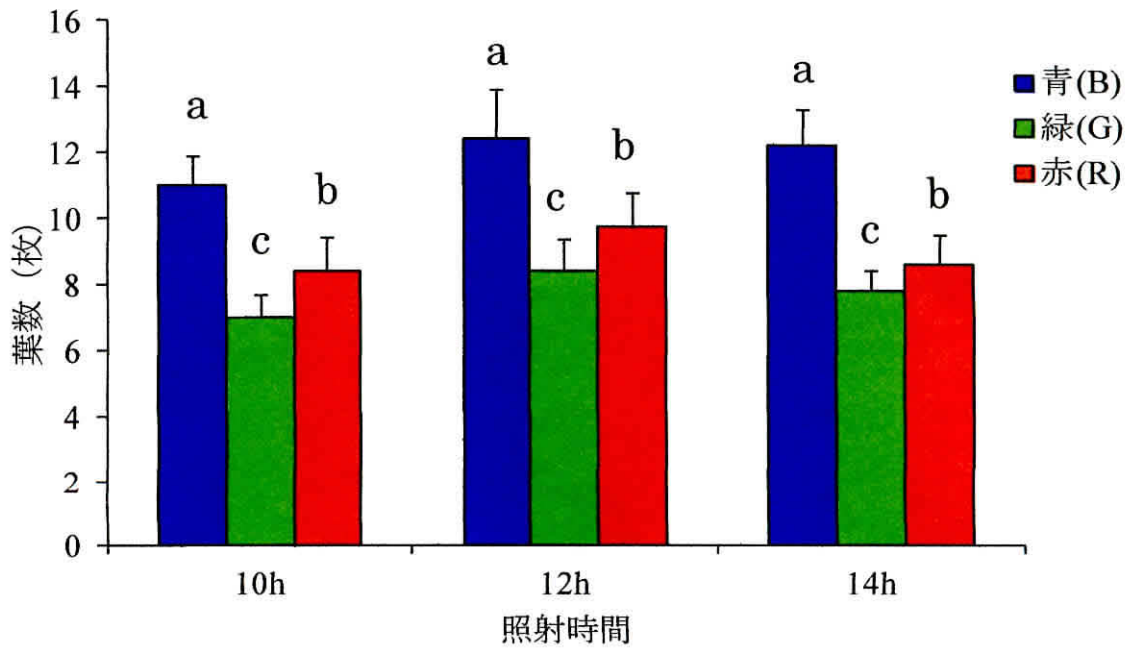


図 10 異なる照射時間と光質条件下における葉数の差異
 ※異なるアルファベット間に 1% レベルで有意差あり
 エラーバーは標準偏差を示す

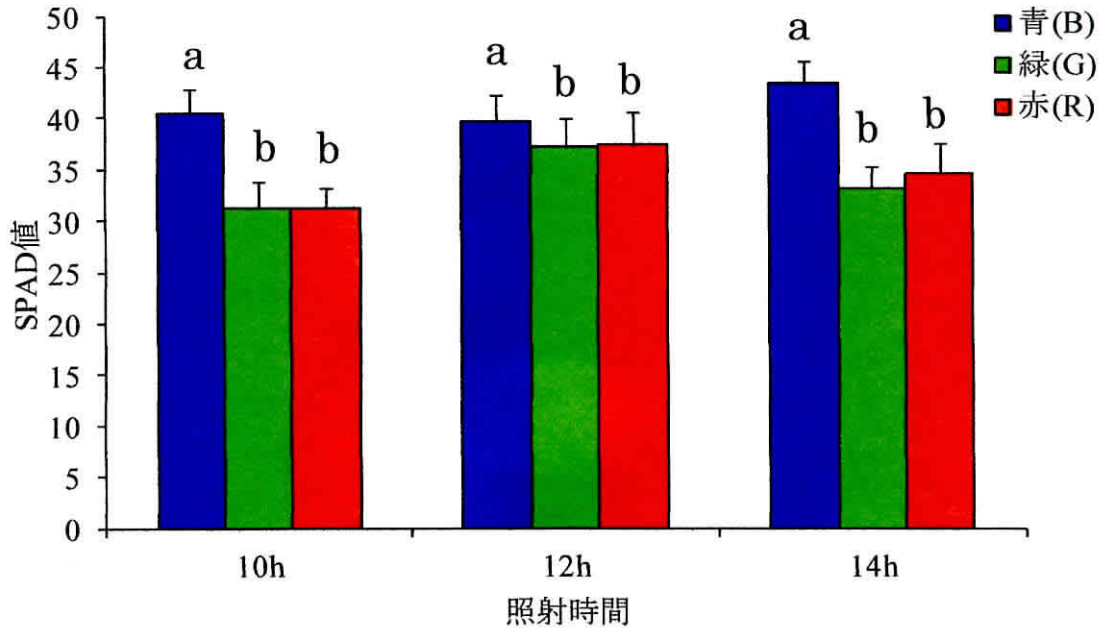


図 11 異なる照射時間と光質条件下における SPAD 値の差異
 ※異なるアルファベット間に 1% レベルで有意差あり
 エラーバーは標準偏差を示す

表 2 照射時間と光質が花芽形成に及ぼす影響

照射時間 (時間/日)	光質	節番号 *1													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10	青 (B)	—*2	—	—	—	—	10	17	18	15	4	1	—	—	
	緑 (G)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	赤 (R)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
12	B	—	—	—	—	—	—	3	10	14	11	6	3	—	
	G	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	R	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
14	B	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	G	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	R	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

*1: 節番号は下位からの番号

*2: —は花芽形成が無いことを示す。また、花芽数は20ポットの合計値

3. 摘要

本章ではエンサイの開花調節技術を確立することを目的とし、人工光による光質が生育と花芽形成に及ぼす影響を明らかにした。エンサイ台湾産栽培系統を供試し、植物体の頂端における光強度を PPF_D 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とした。光源には LED を使用し、波長 450nm (青), 530nm (緑) および 620nm (赤) の 3 区を設け、照射時間をそれぞれ 1 日 10, 12 および 14 時間とした。草丈、葉数および SPAD 値は、青色区において赤色・緑色区に対して有意に高くなった。このことから、エンサイは青色光を受光することで生育を促進していることが明らかとなった。青色区の 10 および 12 時間照射区においてのみ花芽が形成され、短日条件ほど低節位で着蕾した。花芽は 12 時間照射区より 10 時間照射区で多く形成された。以上のことから、エンサイの花芽は青色光によって誘導されることが明らかとなり、緑色光や赤色光単色は花芽形成に関与していないことが明らかとなった。

第4章 花芽形成に及ぼす青色光の光強度

第3章において、花芽形成は青色光によって誘導されることを明らかにした。第2章の結果と比較すると、花芽形成は青色光のさらに弱い光でも誘導されるという仮説がたてられる。花芽形成を誘導する光環境の詳細な解析は重要であり、特に限界光強度を示すことは、人工的環境条件下でエンサイを栽培する上で重要である。

そこで本章では、エンサイの花芽を誘導する青色光の限界光強度を明らかにすることを目的とした。

1. 材料および方法

材料の育成

供試材料および材料の育成方法は第2章および第3章と同様とした。

光照射処理

育成した植物体に光スペクトル、照射時間の異なる人工光を30日間照射した。光源には青色LED (NSPB500AS, 日亜化学工業株式会社) を用いて、光強度を植物体の頂端においてPPFD 50, 100, 150 および 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とする区を設けた。光強度は光合成有効放射光量子計測器 (LI-250A, メイワフォーシス) を用いて随時測定した。それぞれの光強度区において照射時間を1日あたり10時間と12時間に設定し、各区10ポットずつ供試した。処理区ごとの光スペクトルを高速分光ユニット (HSU-100S, 朝日分光株式会社) を用いて測定し、図12に示した。試験中の温度は25℃一定とし、すべて遮光した室内で行なった。施肥は週に一度液体肥料 (ハイポネックス5-10-5原液, (株)ハイポネックスジャパン) を1000倍に希釈して与え、適時灌水した。

処理後の調査

花芽形成の判断は、花芽の大きさが 2 mm 以上になった時点とし（佐々木ら, 2011), 目視によって判定した. 照射処理開始から 30 日間, 花芽形成の有無を目視で観察し, 花芽形成迄の日数と花芽形成数を記録した.

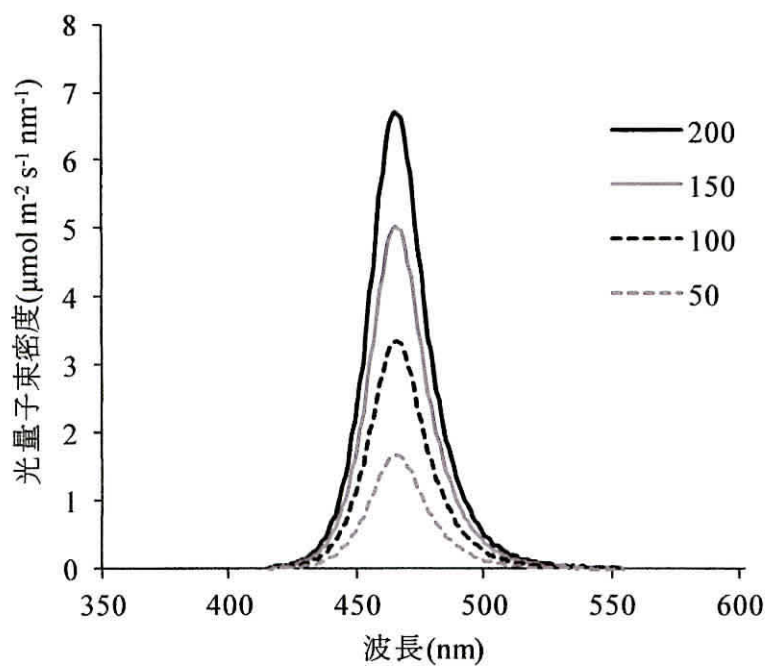


図 12 青色 LED の光スペクトル

2. 結果および考察

表 3 に各節位の花芽形成の有無を観察した結果を示した。花芽形成は 10 時間照射区の 100, 150 および 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 区ならびに, 12 時間照射区の 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 区で起こった。12 時間照射区では, 10 時間照射区と比べて高節位で花芽が形成され, 花芽数は少なくなった。図 13 に 10 時間照射区における光強度と花芽形成までの日数との関係を示した。光強度の増加に伴い花芽形成までの日数は有意に短くなった。また, 図 14 に 10 時間照射区における光強度と花芽形成数との関係を示した。光強度の増加に伴って花芽数は増加し, 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 区で有意に多くなった。

人工光が植物へ及ぼす研究については多くの報告があり, 使用する光源は様々で光強度や光質も異なっている。その中で青色光強度に注目すると, 庄子ら (2010) は蛍光灯を使用した 16 と 56 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の区および LED を用いた 20 - 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の区で, また森・高辻 (1999) は LED と LD を使用して各 50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とした区で実験を行なっている。さらに, Kasajima ら (2008) は, 異なる波長の蛍光灯を用いて青色光強度を 0.2~10.7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に変えた 12 区で, Kim ら (2004) は LED と蛍光灯を組み合わせで 15~29 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に変えた 4 区で実験を行なっている。このように多様な光源での研究報告には, 青色光強度が 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以下の場合が多い。ところが実験 2 において, 光強度を変化させて青色単色光照射処理を行なった結果, エンサイの花芽形成は 10 時間照射区の 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の光強度でなければ確認できなかった。つまり, この結果から考えると, エンサイの花芽形成を人工光を用いて誘導する場合は, 青色光の強い光源を用いて, 青色単色光 PPF 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上に調節することが必須条件であると思われる。本実験では, 処理区の光強度の幅を PPF 50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に設定した為, 詳細な限界光強度は不明であるが, エンサイの限界光強度は PPF 50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ から 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の間であ

ると考えられた。また、青色光強度の増加に伴い花芽数の増加と花芽形成迄の日数の短縮が起こることから、より強い青色光を照射することは早く多くの開花蕾を着生させることができ、エンサイの花粉貯蔵技術が無い現段階では、この知見は交配時期の調節につながり、交配育種の効率向上に役立つと考えられる。

青色光による植物への影響に関する研究は、1990年代以降にシロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) をモデル植物とした分子生物学的解析によって大きく進展した。青色光受光体としてクリプトクロムが発見され (Ahmad and Cashmore, 1993)、特に花芽形成や光形態形成に作用することが明らかとなっている。Guoら (1998) によると、クリプトクロム遺伝子である *CRY2* は、光周性において重要な役割を担っており、Mocklerら (1999) は、青色光連続照射下における *CRY1* と *CRY2* の作用によって開花が促進されたと報告している。アサガオでは、シロイヌナズナのクリプトクロムによる吸収の最大波長である 450 nm 周辺で、最も多くの花芽を形成する (Yamazaki *et al.*, 2007)。実験 1 で使用した青 LED のピーク波長も 450 nm であり、多くの花芽を誘導していることから、エンサイの花芽形成誘導にはクリプトクロムが関与していることが示唆された。また、第 3 章と第 4 章で同じ条件の実験区 (第 3 章の B 区 10 時間照射区と第 4 章の 10 時間照射の $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 区、第 3 章の B 区 12 時間照射区と第 4 章の 12 時間照射の $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 区) において、第 3 章ではより低節位で花芽形成が起こった (表 4)。これは、第 4 章で使用した LED のピーク波長が 470nm であり、第 3 章で使用したピーク波長 450nm の LED がより敏感に花芽形成に作用したことが一因であると推察された。

また、本章と第 2 章および第 3 章では、14 時間明期条件下で育成したエンサイのクローン苗を用いた。エンサイの種子は、硬実性が強いいため発芽の揃いが悪くなるという欠点があった。他方エンサイは、不定根の成長

が活発で、容易にクローン苗を増殖できるという利点を持っている。そこでこの研究では、クローン苗を用いることで、供試材料の生育を揃えることを可能にした。整一なクローン苗を材料に供試したことで、花芽形成に及ぼす光環境に明瞭な差を高い精度で検出できたことから、エンサイの実験には、クローン苗を用いることが有効な手段の一つであることを示した。

本研究は、エンサイの発育調節技術の確立を目指し、エンサイの花芽形成や形態に及ぼす光環境の影響を検討した。その結果、エンサイの花芽形成を誘導する光質と光強度が明らかになった。人為的環境条件下で栽培する場合に、エンサイ以外の植物においても発育や成長に及ぼす光環境を解明することは、植物の光形態形成研究にとって重要であり、今後の研究課題である。

表 3 照射時間と青色光の光強度が花芽形成に及ぼす影響

照射時間 (時間/日)	PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	節番号 ^{*1}													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10	200	— ^{*2}	—	—	—	—	—	—	—	—	10	10	9	7	2
	150	—	—	—	—	—	—	—	—	10	8	4	2	—	
	100	—	—	—	—	—	—	—	—	9	7	4	—	—	
	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
12	200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	7 ^{*3}	—	
	150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

*1: 節番号は下位からの番号.

*2: —は花芽形成が無いことを示す.

*3: 数字は10ポット合計の花芽数.

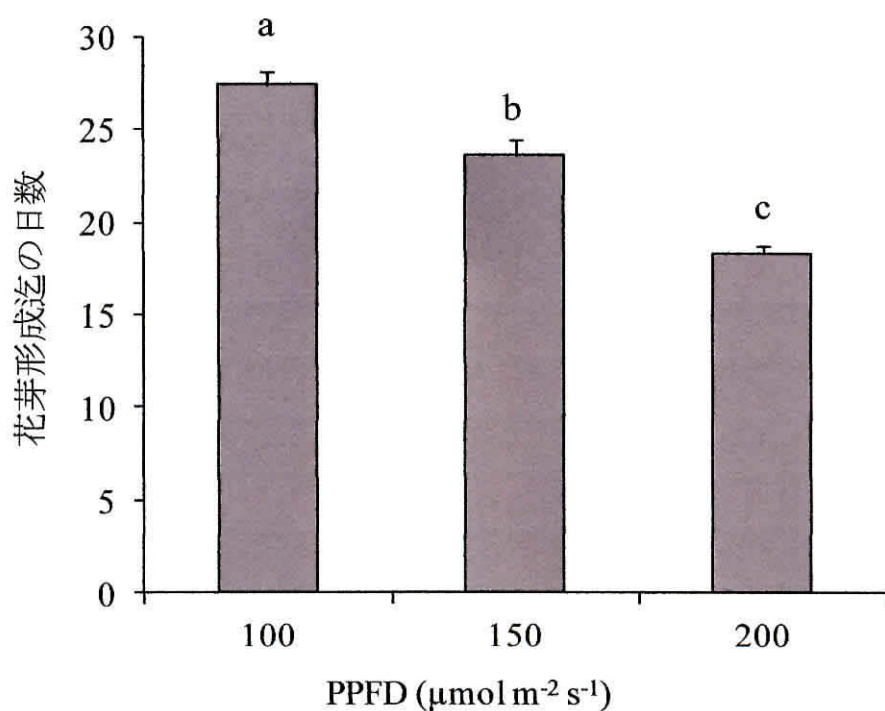


図 13 青色光の光強度が花芽形成迄の日数に及ぼす影響

※異なるアルファベット間に 1% レベルで有意差あり
エラーバーは標準偏差を示す

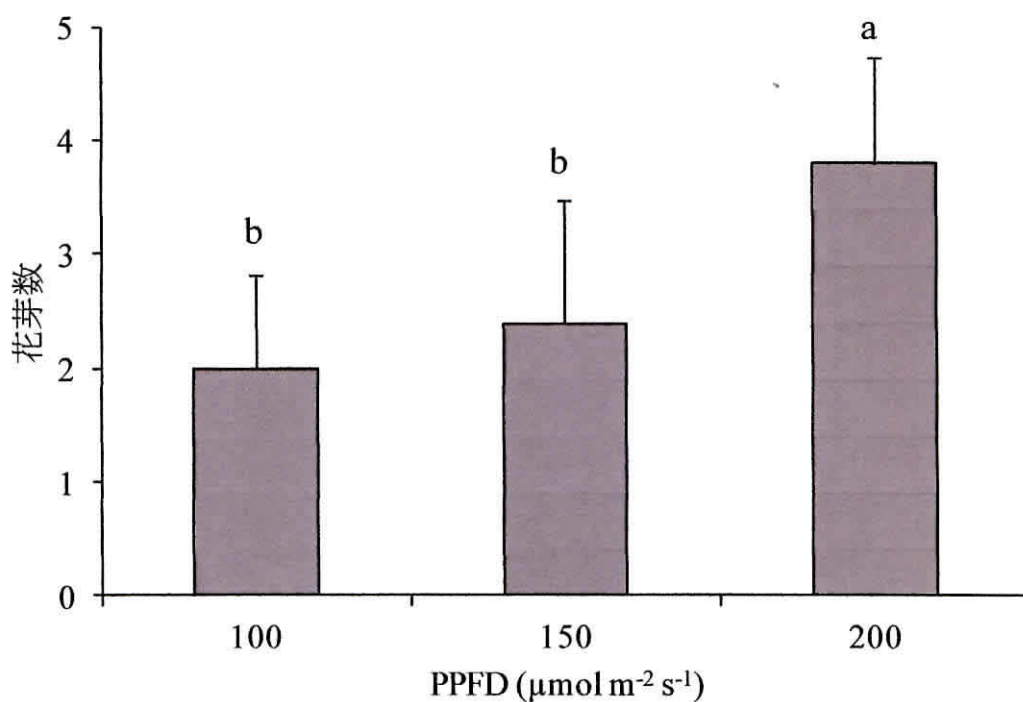


図 14 青色光の光強度が花芽形成数に及ぼす影響

※異なるアルファベット間に 1% レベルで有意差あり
エラーバーは標準偏差を示す

表 4 異なる LED の波長が花芽形成に及ぼす影響

照射時間 (時間/日)	LEDのピーク 波長(nm)	節番号* ¹													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10	470	-* ²	-	-	-	-	-	-	-	-	10	10	9	7	2* ³
	450	-	-	-	-	-	-	10	17	18	15	4	1	-	-
12	470	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	7	-
	450	-	-	-	-	-	-	-	3	10	14	11	6	3	-

*¹: 節番号は下位からの番号.

*²: -は花芽形成が無いことを示す.

*³: 470nmの数字は10ポット, 450nmの数字は20ポット合計の花芽数.

3. 摘要

本章ではエンサイの花芽を誘導する青色光の限界光強度を明らかにすることを目的とし、青色 LED を用いて、光強度を植物体の頂端において PPFD 50, 100, 150 および 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とする区を設け、それぞれの光強度区において照射時間を 1 日あたり 10 時間と 12 時間に設定しエンサイを栽培した。その結果、エンサイの花芽形成を人工光を用いて誘導する場合は、青色光の強い光源を用いて、光強度を青色単色光 PPFD 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上に調節することが必須条件であると考えられた。また、青色光強度の増加に伴い花芽数の増加と花芽形成迄の日数の短縮が起こることから、より強い青色光を照射することは早く多くの開花蕾を着生させることができ、この知見は交配時期の調節につながり、交配育種の効率向上に役立つと考えられた。

第5章 異なる光質条件下におけるエンサイの成長の差異

エンサイを野菜としてさらに広く普及させるためには、周年栽培を行ない市場に定着させることが重要である。しかし、エンサイは低温に弱く、日本での栽培は夏季に限定される。また、ハウスなどの施設を利用した栽培ではアブラムシ類やハダニ類による虫害が発生しやすく、天敵の利用による虫害の軽減についての研究報告はあるが、安定した生産には課題が多い（長坂ら, 2012）。それを克服して周年栽培を確立するには、植物工場のような施設を利用した栽培が選択肢の1つと考えられる。さらに、我が国だけに限らず、熱帯地域の途上国でも都市での需要が大きいため、植物工場が普及する可能性は次第に高まってきている（丸尾, 2011）。これらのことから、エンサイの植物工場への導入のための基礎情報は重要である。植物工場での栽培において大きな課題は、栽培におけるコストの抑制であり、光条件、温度、湿度、二酸化炭素濃度等の最適な栽培環境条件を見出すことである。

そこで本章では、これらの環境因子の中で最も重要な光条件に注目し、光スペクトルがエンサイの成長に及ぼす影響について検討した。

1. 材料および方法

材料の育成

供試品種として、タキイ種苗株式会社のエンサイ（あさがおな）を使用した。発芽をそろえるため、エンサイの種皮に傷を付け、3日間水道水に浸漬した。発芽した種子を、培養土を充填した12cm黒ビニルポットに植え付け、子葉が完全に展開するまで植物育成用蛍光灯下で成長させた。

光照射処理

子葉展開後に、各処理区へポットを移し、10日間照射処理を行なった。光源として、東芝社のメロウホワイト（白色光：W）と FL20SFR74（遠赤色：FR）、スドー社のエキゾティックロゼ（紫赤色光：PR）とカリビアンブルー（青色光：B）の4種類の蛍光灯を用いた（図 15）。照射する光スペクトルを簡便に変化させるために、これらの蛍光灯から3本を組み合わせ、8つの処理区を設定し（表 5）、各区5ポットずつ供試し、3反復行なった。各区の光スペクトル分布は、高速分光ユニット（HSU-100S、朝日分光株式会社）で測定した。照射処理開始後10日後に、草丈および茎径を調査した。処理はすべて暗室内で行ない、室温は27℃恒温で、すべての蛍光灯は連続照射とした。

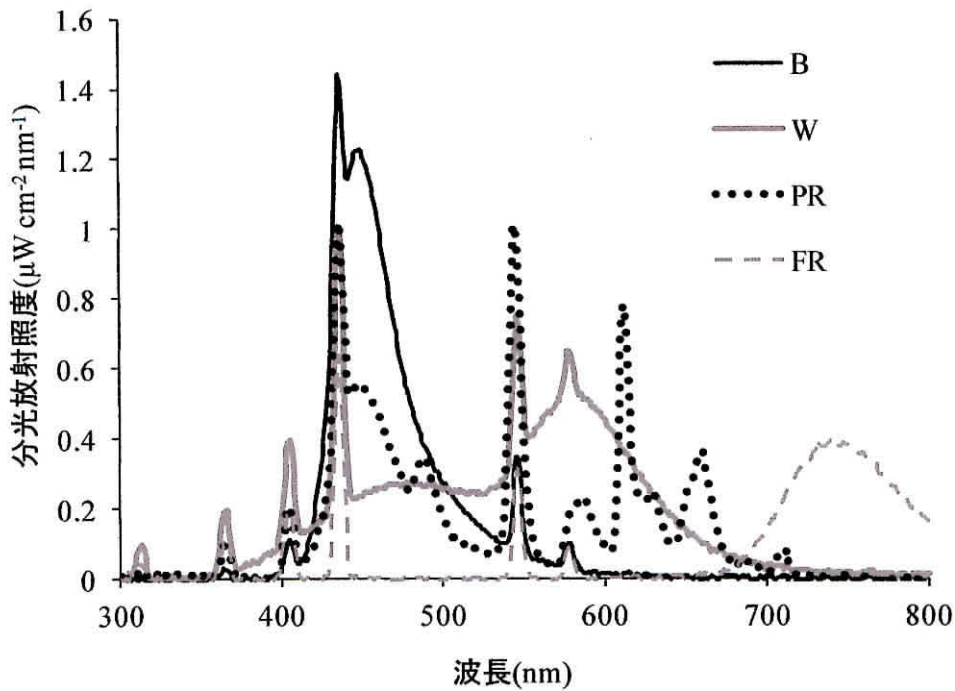


図 15 各蛍光灯の光スペクトル分布

表 5 各処理区の光条件

区	蛍光灯の組み合わせ ¹⁾	各波長域のエネルギー比 ²⁾				
		UVA	B	G	R	FR
L1	W + W + W	0.018	0.314	0.457	0.182	0.020
L2	W + PR + PR	0.007	0.410	0.351	0.220	0.010
L3	W + B + B	0.007	0.697	0.224	0.051	0.004
L4	W + PR + B	0.007	0.523	0.317	0.132	0.011
L5	W + W + FR	0.010	0.263	0.345	0.146	0.188
L6	W + PR + FR	0.005	0.302	0.307	0.155	0.210
L7	W + B + FR	0.010	0.390	0.265	0.090	0.204
L8	PR + B + FR	0.004	0.491	0.183	0.139	0.170

¹⁾ 図15を参照

²⁾ 全波長域(250~1000nm)に対する各波長域のエネルギー比

UVA (紫外320-400 nm), B (青色400~500nm), G (緑色500~600nm), R (赤色600~700nm)

2. 結果および考察

図 16 および図 17 に、全波長域（250～1000nm）に対する幅 50nm の特定波長のエネルギー比と草丈および茎径との間の相関係数を示した。データは、1nm ごとの 50 点の平均値を求めて、20nm 間隔の移動平均を示した。草丈、茎径ともに 400～480nm（青色）で正の相関を示した。また、520～780nm（緑～遠赤）では草丈、茎径ともに負の相関を示した。380～400nm（紫外）では草丈、茎径ともに低い相関係数を示した。これらのことから、エンサイの草丈伸長は青色光で促進され、緑と赤色の波長域では抑制的に働いていることが示された。茎径と波長 480nm および 660nm との相関係数は有意に高く、青色光による成長促進と赤色光による成長抑制のように敏感に反応することが分かった。すなわち、エンサイの成長は青色光で促進されることが明らかとなった。

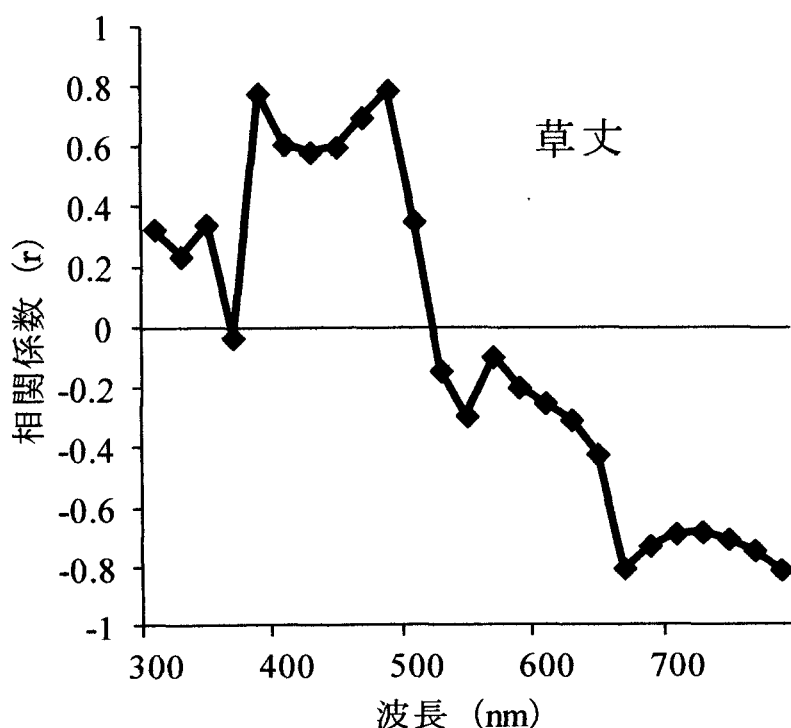


図 16 全波長域（250～1000nm）に対する幅 50nm の特定波長のエネルギー比と草丈の間の相関係数

$r \geq |0.878|$ は 5% 水準で有意

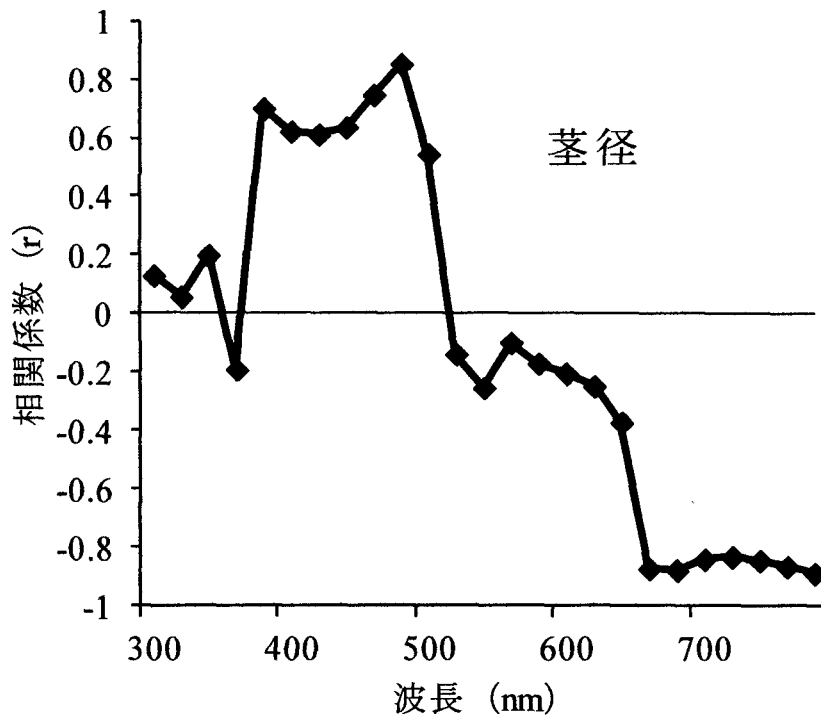


図 17 全波長域 (250~1000nm) に対する巾 50nm の特定波長のエネルギー比と草丈の間の相関係数

$r \geq |0.878|$ は 5% 水準で有意

3. 摘要

本章では、光スペクトルがエンサイの生育に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、4種類の蛍光灯を用いてこれらの蛍光灯から3本を組み合わせ、8つの処理区を設定し、様々な光質条件下でエンサイを栽培した。全波長域 (250~1000nm) に対する巾 50nm の特定波長のエネルギー比と草丈および茎径との間の相関係数を示した結果、エンサイの成長は青色光で促進されることが明らかとなった。

第6章 B/R 比が茎組織に及ぼす影響

これまでの章では，エンサイの成長と発育に及ぼす照射時間や光強度，光質について研究を進めてきた．その中で花芽形成と茎の生長には青色光が関与していることを明らかにした(佐々木ら, 2012)．第5章においては，エンサイの茎径と光質の関係について，全波長域に対する青色光のエネルギー比と茎径は正の相関を，赤色光のエネルギー比と茎径は負の相関を示すことも見出した (Sasaki *et al.*, 2011)．他方，青色光と赤色光の比率が作物に及ぼす影響についての研究は，近年注目を集めており，これらが植物の生育や品質に影響を与えているという報告も多くある(森・高辻, 1999; 富士原ら, 2003)．また，これに関連した高等植物の光受容体としてはフィトクロムやクリプトクロムがよく知られており，これらが形態形成に関与していると考えられている．

そこで本章では，青色光受容体であるクリプトクロムの最大吸収波長域である 450nm 付近と，赤色光受容体であるフィトクロムの最大吸収波長域である 660nm 付近に特に着目した．これらの波長域の比率がエンサイの茎の形態形成に及ぼす影響を組織レベルで調査することにより，人工的な環境条件下で栽培する際の生育に最適な光環境を明らかにすることを目的とした．

1. 材料および方法

材料の育成

供試したエンサイは、台湾で流通している在来系統（WC016）である。発芽をそろえるため、エンサイの種皮に傷を付け、3日間水道水に浸漬した。発芽した種子を、培養土を充填した12cm黒ビニルポットに植え付け、子葉が完全に展開するまで7日間、植物育成用蛍光灯（ビオルックス A40W, NEC）下で生長させた。

光照射処理

子葉展開後に、各処理区へポットを移し、10日間照射処理を行なった。光源には、白色光（メロウホワイト 15W, 東芝）、紫赤色光（エキゾティックロゼ 15W, スドー）と青色光（カリビアンブルー 15W, スドー）の3種類の蛍光灯を用いた。各蛍光灯の光スペクトルは高速分光ユニット

（HSU-100S, 朝日分光）で測定した（図 18）。照射する光スペクトルを簡便に変化させるために、これらの蛍光灯から3本を組み合わせで4つの処理区を設定した。表 6 に各区における光スペクトルの分布を示した。クリプトクロムの最大吸収波長域（青色光： 450 ± 10 nm）と、フィトクロムの最大吸収波長域（赤色光： 660 ± 10 nm）とのエネルギー比を B/R とした。すべての蛍光灯は連続照射とし、光強度は植物体の頂端で $PPFD 200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となるよう調節した。光強度は光合成有効放射光量子計測器

（LI-250A, メイワフォーシス）を用いて随時測定した。試験はすべて暗室内で行ない、室温は 27°C 恒温とした。試験は各区5個体を供試し3反復行なった。

処理後の調査

照射処理開始後 10 日目に第 1 節間の茎径を調査し，茎を FAA 溶液（ホルマリン：80%エタノール：酢酸＝1：8：1）で固定した後，光学顕微鏡を用いて茎切片を観察し，皮層，髄および髄の破生間隙の径（この論文では間隙径と呼ぶ）を調査した（図 19）．さらに，髄の細胞の大きさや数を調査するために，間隙径に近接した 0.2 mm×0.2 mm の範囲にある細胞数と，髄内部の幅 0.2 mm 内にある細胞数を測定した．細胞数の測定は維管束鞘を避けて行なった．なお，図表では皮層厚を Co ，髄厚を Pi ，間隙径を Ca ，茎径を Sd と略す．ここで，茎の組織の厚さ（ここでは茎厚と呼ぶ）は $Co + Pi$ である．

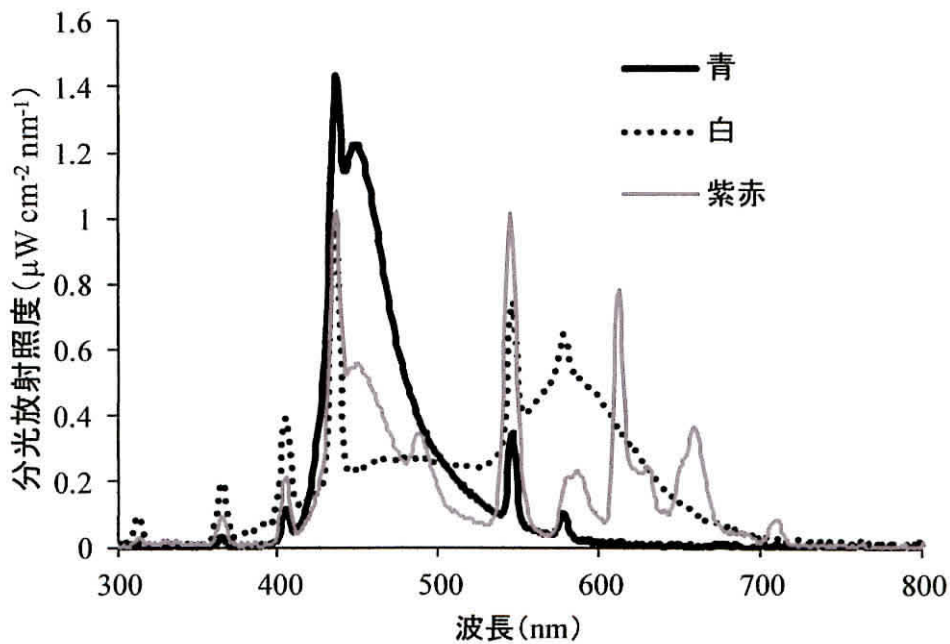


図 18 各蛍光灯の光スペクトル分布

表 6 各処理区の光条件と B/R 比

処理区	蛍光灯の 組み合わせ	各波長域のエネルギー比			B/R 比 ^{*2}
		B/W ^{*1}	G/W	R/W	
L1	白+紫赤+紫赤	0.410	0.351	0.220	2.0
L2	白+白+白	0.314	0.457	0.182	2.5
L3	白+紫赤+青	0.523	0.317	0.132	5.2
L4	白+青+青	0.697	0.224	0.051	23.9

*¹全波長域に対する各波長域のエネルギー比

B (青色400~500nm), G (緑色500~600nm), R (赤色600~700nm),
 W (全波長250~1000nm)とした.

*² B/R 比は B (440-460 nm) と R (650-670 nm)の比率を示す.

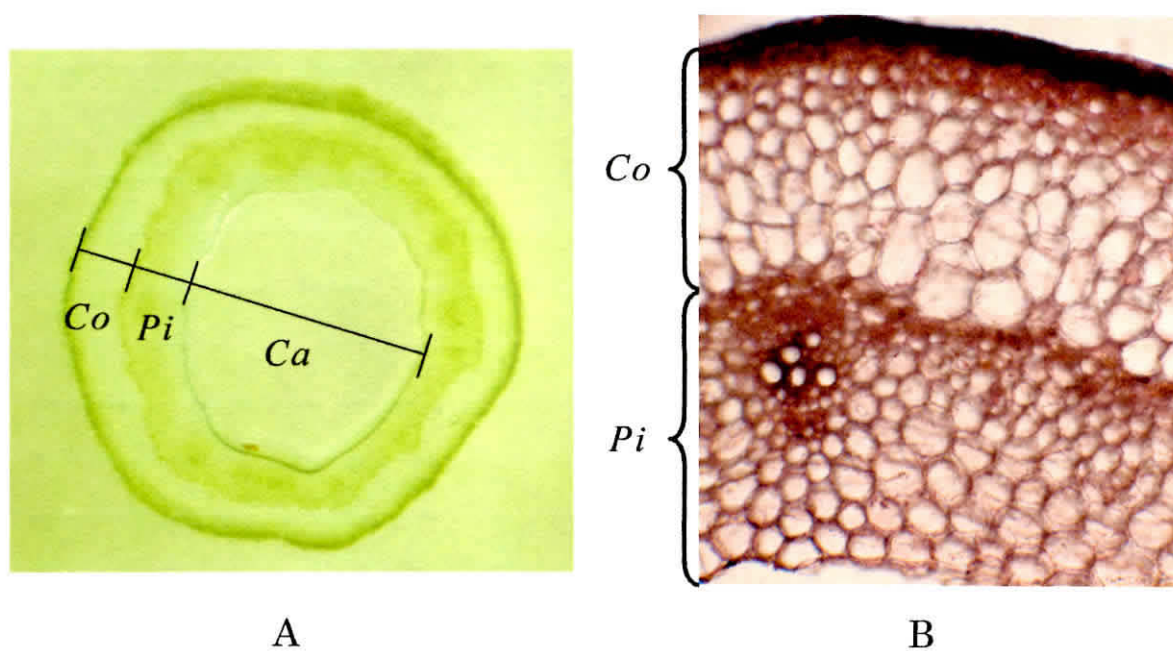


図 19 エンサイにおける茎の切片 (A) と茎組織 (B)

Co :皮層, Pi : 髓, Ca : 間隙径.

2. 結果

茎径，皮層厚，髓厚および間隙径の調査結果を図 20～図 23 に示した。茎径は B/R が増加するにつれて太くなり，L1, L2 と L3, L4 の間に有意な差がみられた。皮層厚は L1 においてやや低い値を示したが，すべての処理区において有意差がみられなかった。髓厚は B/R の増加に伴い有意に肥大した。特に L4 の髓は 0.61 mm で，L1 の髓 0.4 mm と比較すると約 1.5 倍となった。間隙径は B/R の低い L1 において有意に小さくなり，L2 から L4 では同等の値を示した。

各区の髓における細胞密度（細胞数/0.2×0.2mm）および細胞数（0.2mm×髓厚内の細胞数）を表 7 に示した。細胞密度は B/R の最も低い L1 において 15.3 となり，他の処理区よりも 1%水準で有意に高い値を示した。細胞数は B/R が最も高い L4 で多くなり，L1 から L3 では同等であった。

エンサイの茎肥大に及ぼす各茎組織と間隙径の相互関係を明らかにするために，L1 区から L4 区までのすべての個体のデータを用いて，相関行列を求めた（表 8）。茎径と髓厚は高い相関を示し（ $r = 0.808$ ），茎径と間隙径の大きさとの相関はそれより低かった（ $r = 0.663$ ）。間隙径と皮層厚及び髓厚の相関はそれぞれ低い傾向であった。また，茎厚と皮層厚及び髓厚の間の相関を比べると，髓厚との相関が相対的に高かった（ $r = 0.953$ ）。図 24 には各区における茎径と髓厚の散布図を示した。L1 区から L4 区にかけて，髓厚の増加に伴い茎径が増加する明瞭な傾向がみられた。

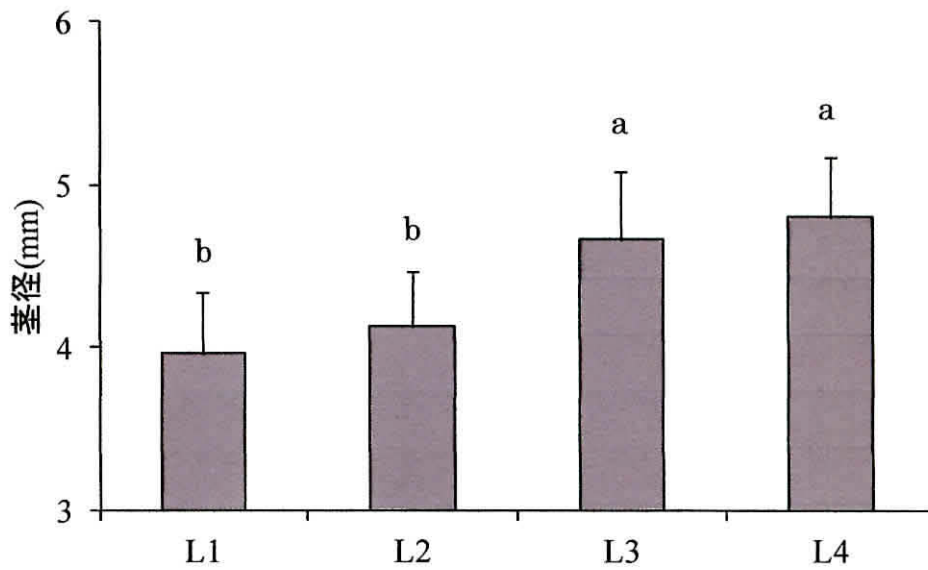


図 20 各処理区における第 1 節間の茎径

※異なるアルファベット間に 1%水準で有意差あり
エラーバーは標準偏差を示す

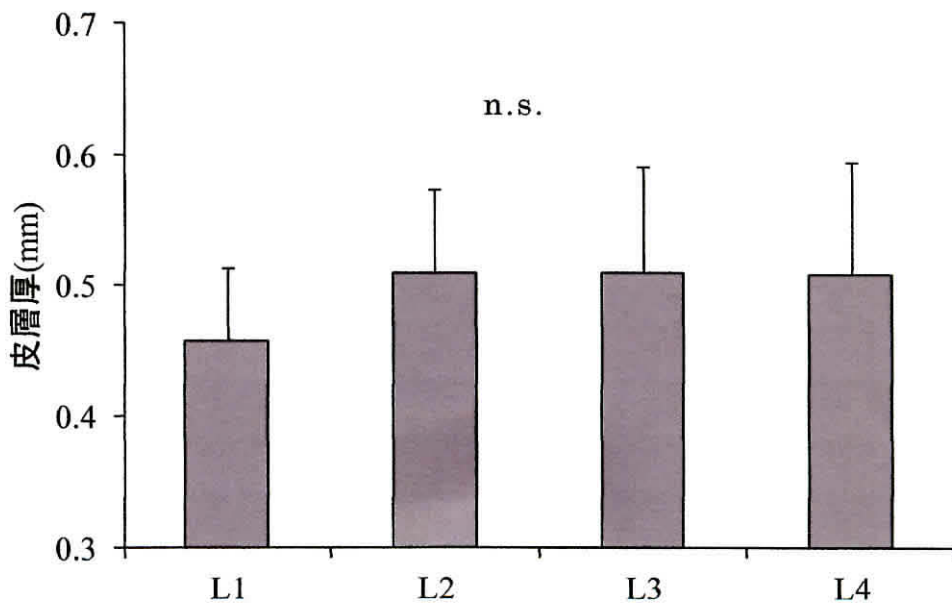


図 21 各処理区における第 1 節間の皮層厚

※有意差無し
エラーバーは標準偏差を示す

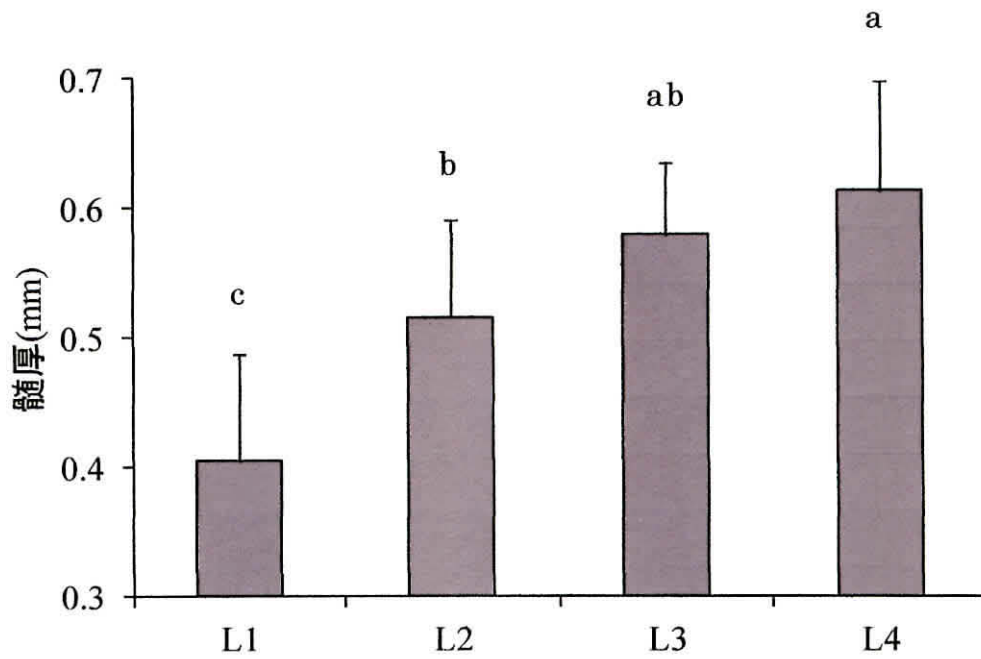


図 22 各処理区における第 1 節間の髄厚

※異なるアルファベット間に 1%水準で有意差あり
エラーバーは標準偏差を示す

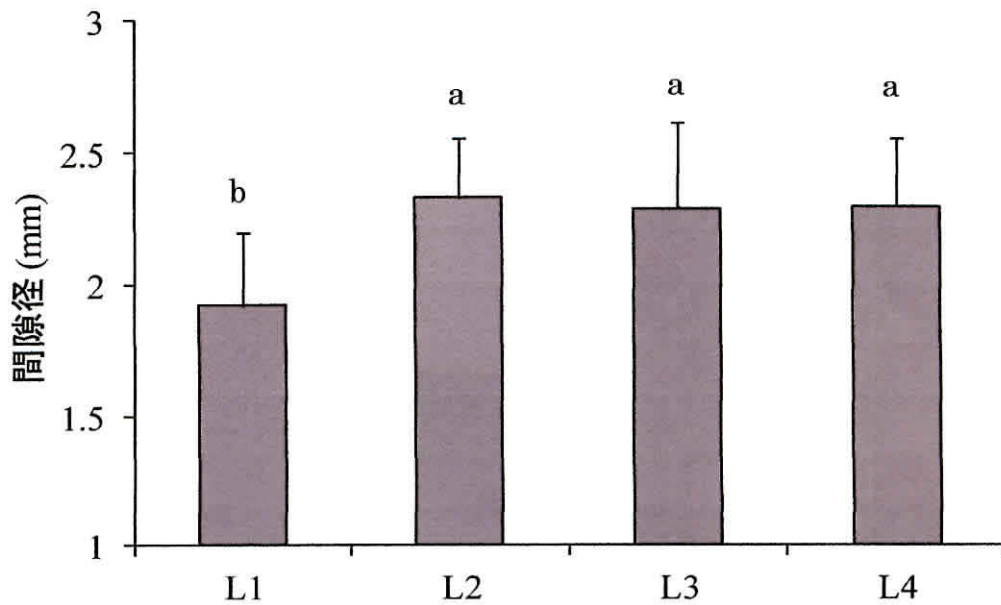


図 23 各処理区における第 1 節間の間隙径

※異なるアルファベット間に 1%水準で有意差あり
エラーバーは標準偏差を示す

表 7 各処理区における髓の細胞の大きさと数

処理区	細胞密度 ^{*1}	細胞数 ^{*2}
L1	15.3 a ^{*3}	38.1 b
L2	11.9 b	37.0 b
L3	11.9 b	37.7 b
L4	12.3 b	43.8 a
<i>P</i>	0.01	0.05

*1: 細胞密度は間隙径に近接した0.2 mm×0.2 mmの範囲にある細胞数

*2: 細胞数は髓内部の幅0.2 mm内にある細胞の数

*3: 異なるアルファベット間に有意差あり

表 8 茎を構成する組織間の相関行列

	<i>Co</i>	<i>Pi</i>	<i>Co + Pi</i>	<i>Ca</i>	<i>Sd</i>
<i>Co</i>	1	0.708	0.889	0.440	0.604
<i>Pi</i>		1	0.953	0.501	0.808
<i>Co + Pi</i>			1	0.514	0.783
<i>Ca</i>				1	0.663
<i>Sd</i>					1

Co : 皮層厚, *Pi* : 髓厚, *Co + Pi* : 茎厚, *Ca* : 間隙径, *Sd* : 茎径.

すべての相関係数は0.1%水準で有意

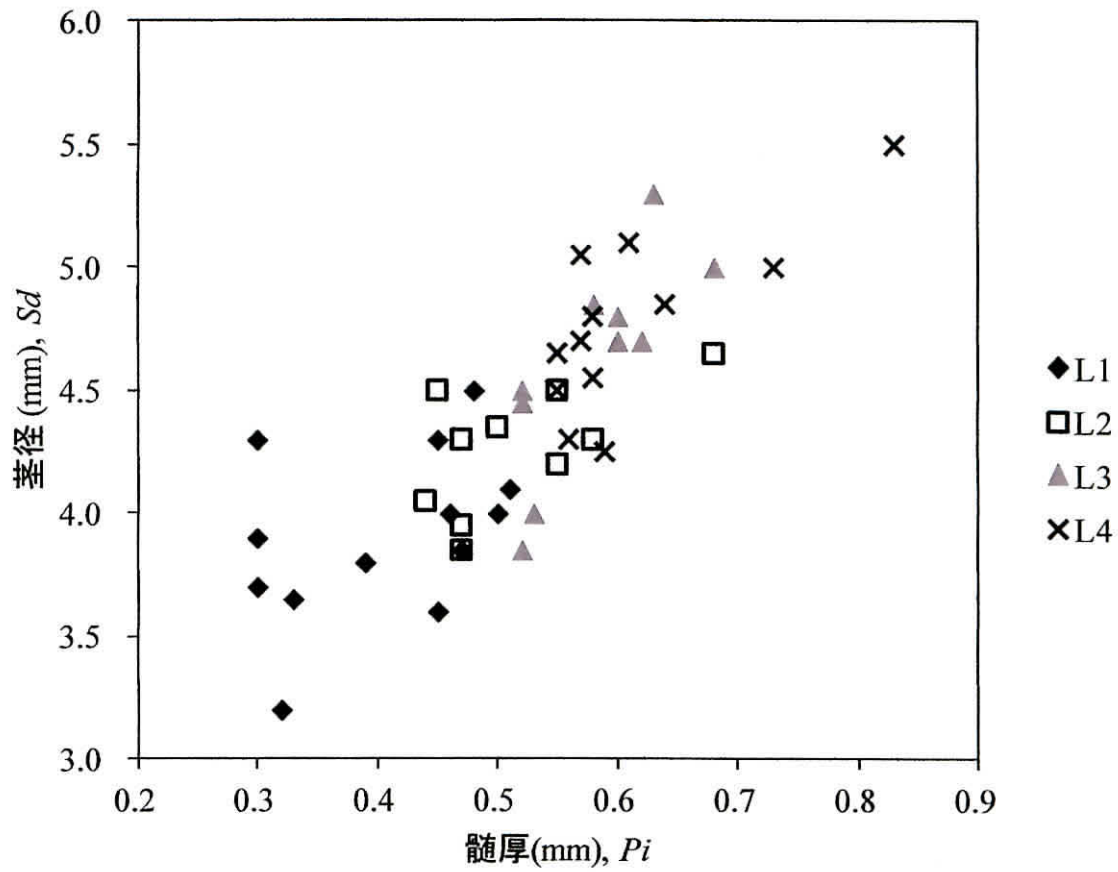


図 24 異なる処理区における茎径と髓厚の散布図

3. 考察

植物の生育に及ぼす光スペクトルの比率に関する研究は、植物工場で作物を栽培するにあたって重要な情報であることから、これまで報告は多い。富士原ら（2003）は、トマト接ぎ木セル成型苗の赤・青色 LED 弱光照射低温貯蔵における青色光と PPF D の比率の影響を調べ、貯蔵中に照射する青色光の比率の増加が苗の外観品質評価値および葉面積を増加させることを報告した。森・高辻（1999）は LED と LD（半導体レーザー）を光源に用いて赤色光と青色光の比率を変化させた区でサラダナを栽培し、光スペクトルの比率の違いが成長率、光合成速度、クロロフィル含有量、気孔コンダクタンスおよび蒸散速度に影響を及ぼすことを示した。また、メタルハライドランプと青色・赤色 LED でサラダナを栽培した場合、メタルハライドランプ区よりも LED で青色光と赤色光を調節した区で量、質ともに優れた生育が得られた（高辻ら、1995）。さらに、Andrew ら（1997）は、トウガラシをメタルハライドランプと蛍光灯、LED を用いて青色光と赤色光の比率を変化させて栽培し、比率の違いで茎と葉の内部組織の大きさが変化することを観察し、これらは青色光の比率に関係が深いことを示した。本研究においても、各種蛍光灯を用いた青色光と赤色光の比率の違いによって各茎組織および茎径に顕著な差がみられた。エンサイの茎径と髓厚は B/R の増加に伴い肥大したことから、 B/R の増加が茎の成長を促進させることが明らかとなった。また、間隙径は L1 において有意に低い値を示したことから、間隙径の大きさに B/R が関与している可能性は否定できないが、髓厚に与えるほどの明らかな効果は無いと推察された。これらのエンサイにおける茎の成長に及ぼす光質の効果は、トウガラシで認められているものと同様と思われた。従って、青色光の比率の増加が髓径の肥大に関与しているという点で、エンサイもトウガラシに類似した生理作用が働いている可能性が示唆された。

各処理区間において、皮層厚にはどの区間にも差がみられなかったことから、皮層の肥大には光質は関与していないものと考えられた。Nishizawa (1992, 1994) は、イチゴの葉柄とランナーにおける表皮細胞長と表皮細胞数は温度と日長条件によって変化していると報告している。ハクサイでは、中肋の柔細胞の長さは高温区 (30~25℃) ほど大きく、葉身の表皮細胞は低温区 (15~10℃) ほど小さく、さらに葉原基の幅および葉原基中の柔細胞の数の増加は高温区ほど大きくなるとされている (大竹, 1982)。これらことから、エンサイの皮層も温度や日長条件など他の栽培環境に影響されることが推察される。

髓の細胞密度について、本研究ではエンサイの空隙に近接している部分を測定した。その結果、L1において高い値を示しL2からL4では同等であった。これは、L1の髓の細胞が他の区と比較して小さいことを示している。すなわちL1は他の区よりも髓厚が薄くなっているが、これは細胞のサイズが他の区よりも小さいことが原因と考えられた。また、髓の中の細胞数はB/Rの最も高いL4が多く、髓厚もL4が大きい値を示した。したがって、細胞数の増加が髓の肥大に大きく関与していると考えられた。これらのことから、エンサイの髓厚、茎径の肥大にはB/Rの増加による細胞サイズの増加と細胞数の増加が大きく関係していることが明らかとなった。

植物工場での栽培には高い品質管理が求められる。エンサイの場合、可食部は茎葉部であり、茎の太さは食感などの品質に重要な影響を及ぼすと考えられる。スイカの果皮の硬さについて杉山ら (1999) は、緑色組織の厚さや単位面積当たりの細胞数、厚壁細胞の厚さなどの組織・細胞構造が影響していると報告している。エンサイにおいてはB/Rの増加により細胞サイズと細胞数が増加し髓の肥大が起きるが、髓の肥大は茎の機械的強度を高めることが期待されるので、光質の調節により茎の品質を向上させ、

輸送時の損傷を軽減できる可能性がある。

エンサイの茎肥大と各茎組織，間隙径の相互関係について，茎厚の幅と間隙径には高い相関がみられず，間隙径の肥大には別の環境要因が関与していると考えられた。さらに，茎径の肥大および茎厚の肥大には皮層の幅よりも髓の幅の肥大が大きく関与していることが明らかになった。また，L1において茎径と髓厚の関係にばらつきが大きかった（図 24）。ばらつきの要因は明確ではないが， B/R の低さが関係しているのであれば， B/R を高めることでより均一な栽培ができる可能性がある。このことから，エンサイに照射する光質，特に B/R を高めることにより，髓径と茎径を太くする計画的な栽培ができると考えられる。この技術を利用することにより，植物工場等で栽培する場合に，品質の向上や安定化が期待できると考えられる。

また，本研究における髓径の肥大は，細胞数の増加および細胞サイズの拡大によって引き起こされた。植物器官の発達と形態形成を制御する細胞分裂と細胞伸長の過程には，植物ホルモンが重要であることはよく知られている。光形態形成と植物ホルモンの関係について，光受容体を介して様々な植物ホルモンの内生量が変わることや，その作用が植物種によって異なることが指摘されている（豊増, 2006）。このことから，光質の変化がこれらの植物ホルモンに関与している可能性が示唆された。

4. 摘要

本章では、クリプトクロムの最大吸収波長域（青色光： $450 \pm 10 \text{ nm}$ ）と、フィトクロムの最大吸収波長域（赤色光： $660 \pm 10 \text{ nm}$ ）とのエネルギー比を B/R 比とし、 B/R 比がエンサイの茎の形態に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、3種類の蛍光灯を用いて B/R の異なる4つの処理区の下でエンサイを栽培した。その結果、 B/R の増加によって髓の細胞サイズと細胞数の増加が起こり、茎径を肥大させていることを明らかにした。また、 B/R を高めることで、髓径と茎径を太くする栽培ができると考えられ、品質の向上や安定化に効果があると考えられた。

第7章 外生ブラシノライドが茎組織に及ぼす影響

第5章と第6章において、エンサイの茎の成長は青色光または B/R 比の増加によって促進されることが明らかとなった（佐々木ら，未発表）。しかし，青色光が茎の成長に及ぼす生理的メカニズムは解明されていない。

青色光が植物に及ぼす生理的要因の1つとして，植物ホルモンの1種であるブラシノステロイド（BR）がよく知られている。例えば，イネにおいて葉身に青色光を照射すると，BR濃度とBR生合成遺伝子発現量が増加するという報告がある（岩崎，2002；福田ら，2006）。また Abe ら（2000）によると，青色光はイネの内生 BR 活性を増加させることが明らかとなっている。BR は茎，葉，花粉，種子など植物のほとんどの部位から検出され，その主な生理作用は発芽促進，伸長成長促進，肥大生長促進，葉展開促進，屈性促進などであることが知られている。これまでに述べてきたエンサイの青色光による生育促進効果においても，青色光の影響で BR の量または活性が増加し，それによって茎の伸長・肥大成長が促進された可能性がある。

そこで本章では，BR がエンサイの茎の成長に及ぼす影響を検討するために，外生 BR がエンサイの茎へ及ぼす作用を調査した。

1. 材料および方法

材料の育成

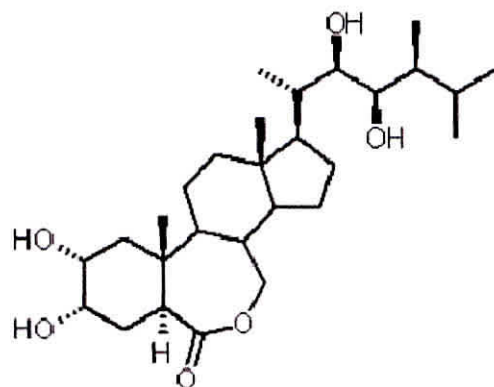
供試材料には、台湾で流通しているエンサイの在来系統（WC016）を用いた。エンサイを植物育成用蛍光灯（BIOLUXA40W, NEC）下で生育させ、クローン苗を実験に使用した。クローン苗の上位 5 葉を残して切り取り、最下節を水に浸けて 7 日間根出しを行なった。

BR 処理

BR の中でも最も活性が高いといわれているブラシノライド（BL）を使用した（Turk *et al.*, 2003）。根出しした植物体を BL 濃度の異なる養液で栽培した。BL は株式会社ブラシノの BL10 液を希釈して用いた。図 25 に BL の化学構造式を示した。BL 濃度を 0, 1, 2.5, 5 および 10 ppb となるように蒸留水で希釈して養液とし、処理区を設定した。試験管に各濃度の養液を 80 ml 入れて、これらに根出ししたクローン苗を挿して 5 日間栽培を行なった。クローン苗はスポンジを使用して試験管内に固定した。処理の様子を図 26 に示した。養液は栽培開始 3 日目に 1 度だけ新しいものと交換した。栽培期間中の光環境は、光源には植物育成用蛍光灯を用いて、クローン苗の頂端の光強度が PPF D $200 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となるように調節し、蛍光灯は 24 時間連続照射とした。室内の温度は 27°C 一定とし、無施肥とした。試験は各区 5 個体を供試し 3 反復行なった。

処理後の調査

処理開始後 5 日目に草丈と最下部の節間の莖径を計測した。さらに、計測部の莖を FAA 溶液（ホルマリン 1：80%エタノール 8：酢酸 1）で固定した後、光学顕微鏡を用いて莖切片を観察し、間隙径と髓厚および皮層厚を調査した（図 19）。



$C_{28}H_{48}O_6$

MW: 480.7 g

図 25 ブラシノライド (BL) の化学構造式

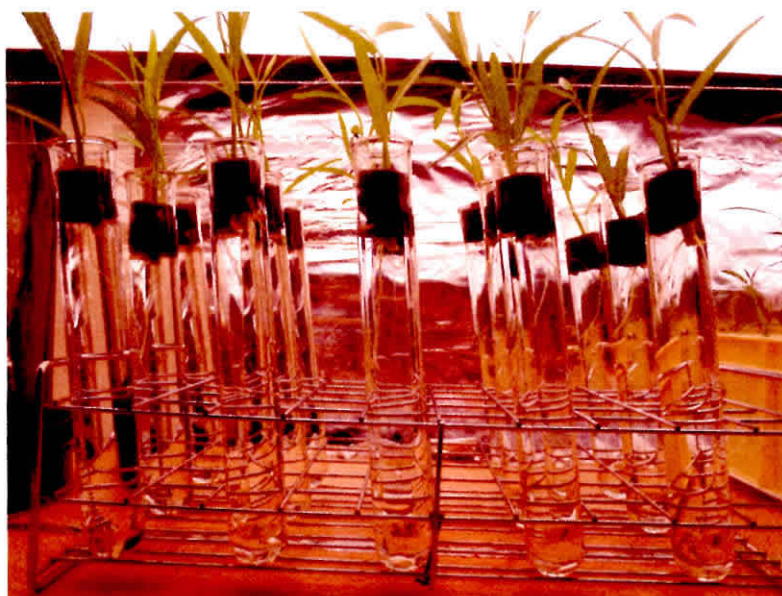


図 26 処理の様子

2. 結果

茎径，間隙径，髓厚および皮層厚を測定した結果を図 27 と図 28 に示した。茎径は BL 濃度の増加に伴い有意に太くなった。間隙径は 5, 10 ppb 区で低濃度区と比較して有意に高い値を示した。髓厚は BL 濃度が高くなると有意に厚くなったが，皮層厚はどの濃度区においても差はみられなかった。草丈においては，処理区による有意な差はみられなかったが，平均値は BL 濃度の上昇に伴い高くなった。

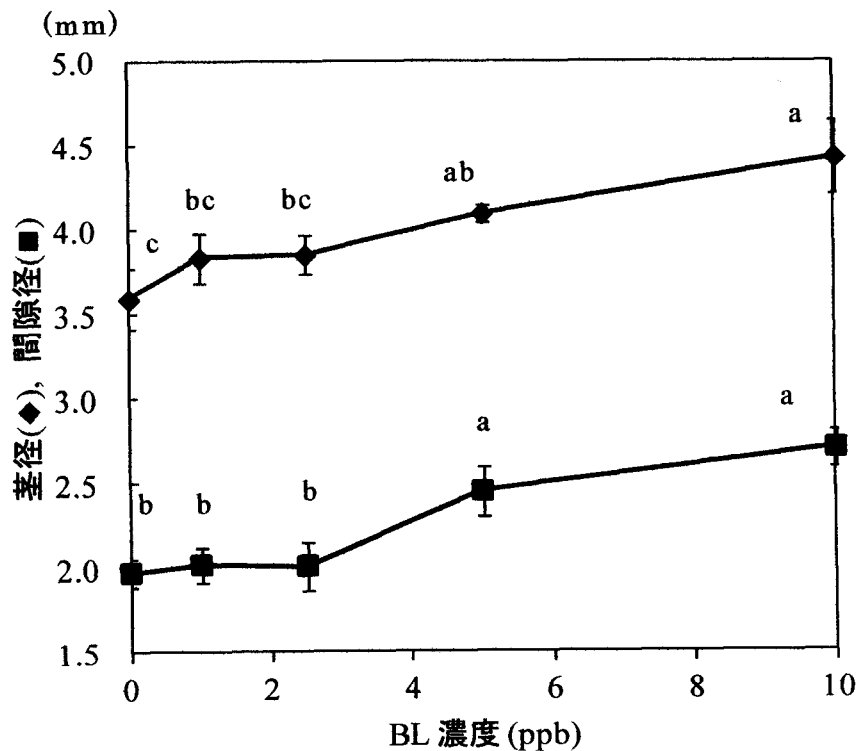


図 27 BL 濃度が茎径と間隙径に及ぼす影響

※異なるアルファベット間に 5%水準で有意差あり
エラーバーは標準偏差を示す

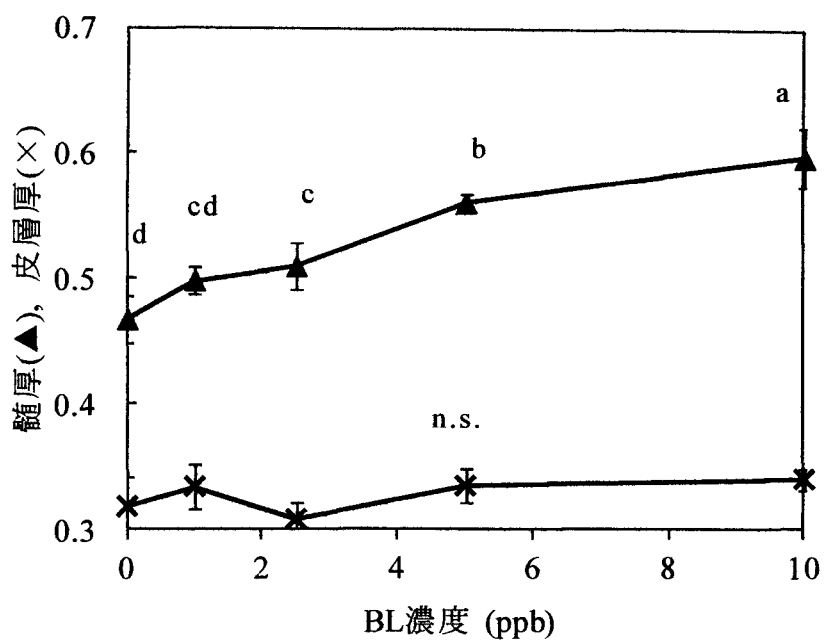


図 28 BL 濃度が髓厚と皮膚厚に及ぼす影響

※異なるアルファベット間に 5%水準で有意差あり

n.s は有意差なし

エラーバーは標準偏差を示す

3. 考察

本章では、外生 BL がエンサイの茎の生長に及ぼす影響を調査した。図 27 および図 28 に示すように、きわめて微量の外生 BL で茎の生長に差異がみられた。Hayat ら (2001) は、BR は他の植物ホルモンよりさらに低濃度で個体、細胞および分子レベルに様々な生理作用を引き起こすと報告している。このことは、外生 BL が植物ホルモンとしてエンサイの茎の生長に作用したことを示している。

また本章の結果から、外生 BL を根から吸収させたことにより、エンサイの茎径、髓厚および間隙径に作用したことを確認することが出来た。Nishikawa ら (1994) によると、外生的 EBR (epibrassinolide) が植物体内に吸収され移行する過程を確認するために、キュウリとコムギの幼植物に ^{14}C -EBR を投与したところ、両植物とも根から EBR をよく吸収して、速やかに葉に移行するのを確認し、外生的 EBR は求頂的に移行することを示した。このことから、エンサイにおいても BL は速やかに根から吸収され、茎に移行したことが示唆された。

前章において、エンサイは B/R 比が増加すると、茎径と髓厚が肥大し、皮層厚は変化しないことを明らかにした。本章では、BL 濃度を増加させた結果、茎径と髓厚を肥大させており、 B/R 比の増加と同じ傾向がみられる (図 27, 図 28)。青色光と BR の関係について、Abe ら (2000) は、イネの幼苗に青色光を照射すると内生 BR 量を著しく増加させ、黄化した葉の展開を促進すると報告している。つまり、エンサイに照射する B/R 比の増加または青色光の増加が茎における内生 BL の濃度を増加させていることが示唆された。

さらに、間隙径は BL 濃度を増加させることで有意に増加した。竹松ら (1986) によると、植物を BR であらかじめ処理しておく、高温、乾燥、塩類、深水、化学物質などのストレスによる成長阻害を回避でき

るという。エンサイは、東南アジアなどの熱帯地域の湖沼、河川などで自生している (Sharma, 1994)。水中では、水深が増すごとに長波長から吸収され、青色光の割合が高くなることがよく知られている。エンサイは青色光に反応し BR を増加させ、間隙径を大きくすることで水面に浮くことができるという生理生態的機構が存在すると考えられる。これについては今後さらに研究を進めたい。

4. 摘要

本章では、エンサイの茎の成長に及ぼす生理的要因を明らかにするために、外生ブラシノライド (BL) がエンサイの茎の生長に及ぼす影響を調査した。BL 濃度を 0, 1, 2.5, 5 および 10 ppb となるように蒸留水で希釈して養液とし、処理区を設定した。その結果、茎径と髄厚は BL 濃度が高くなると有意に肥大し、皮層厚の厚さは変化しなかった。この結果は前章の B/R 比の増加と同様な作用をもたらしており、エンサイに照射する B/R 比の増加が茎における内生 BL の濃度を上昇させていることが示唆された。また、エンサイの生理生態的機構がこれらの作用に関与していると考察した。

第 8 章 茎の食品物性学的特性と光質の関係

第 6 章において、光質の調節によりエンサイの茎の品質を向上させる可能性があることを述べた。野菜の品質やおいしさなどの嗜好特性で強くイメージするのは、生および加熱野菜ともテクスチャーであり、野菜を感覚的に評価する基準である（杉山ら，1993）。エンサイの茎には空隙があり、他の野菜には無い食感がある。特に茎の「シャキシャキ」とした感覚が特異的であり、これが香りや味以外のおいしさの指標と言える。このことから、エンサイの品質にとって食品物性は極めて重要な項目であり、物理特性を評価することは品質管理の点からも育種の指標としても有用な情報である。

野菜の硬さや品質についての研究の中で、森下・鈴木（2003）によれば、キュウリの胎座部面積の割合の大きい品種では食べた時の歯触りが柔らかく感じられたと報告されている。同様に、五十嵐（2004）は、胎座部の小さい品種が食べたときに硬く感じると評価している。エンサイでは、光質を変化させることで茎径および茎組織である髓の幅が変化することが明らかになっているため、キュウリのように食感が変化している可能性がある。ところが、エンサイではこの点についてはこれまで全く研究されていない。

そこで本章では、エンサイの可食部である茎の食品の物理的特性を解析し、光質による物性の変化を明らかにすることを目的とした。

1. 材料および方法

材料の育成

供試材料には、台湾で流通しているエンサイの在来系統（WC016）を使用した。発芽をそろえるため、エンサイの種皮に傷を付け、3日間水に浸漬した。発芽した種子を、培養土を充填した12cm黒ビニルポットに植え付け、子葉が完全に展開するまで7日間、植物育成用蛍光灯（ビオルックス A40W, NEC）下で生長させた。

光照射処理

子葉展開後に、各処理区へポットを移し、15日間光照射処理を行なった。光源には、白色光（メロウホワイト 15W, 東芝）、紫赤色光（エキゾティックロゼ 15W, スドー）と青色光（カリビアンブルー15W, スドー）の3種類の蛍光灯を用いた。各蛍光灯の光スペクトルは高速分光ユニット（HSU-100S, 朝日分光）で測定した（図 29）。照射する光スペクトルを簡便に変化させるために、これら蛍光灯の3本を組み合わせることで4つの処理区を設定し、各区6ポットずつ供試した。表 9 に各区における光スペクトルの分布を示した。すべての蛍光灯は連続照射とし、光強度は植物体の頂端で PPFD $200 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となるよう調節した。光強度は光合成有効放射光量子計測器（LI-250A, メイワフォーシス）を用いて随時測定した。エンサイの栽培はすべて暗室内で行ない、室温は 27°C 恒温とした。

処理後の調査

照射処理開始 15 日後に、テクスチャーアナライザー TA.XTplus（Stable Micro Systems, UK）を用いてエンサイの茎の破断特性を測定した。測定機器の写真を図 30 に示した。測定部位は、最上位の完全展開葉から数えた上位3つの節間であり、上から上位節、中位節、下位節とした。プローブ

は Volodkevitch Bite Jaw HDP/VB を用いた (図 30)。プローブの介入速度は 2mm/sec とした。

テクスチャーアナライザーより得られたエンサイの茎の破断特性及びパラメータを図 31 に示した。ここでは破断のプロセスを数個のパラメータで示すことにした。破壊点である荷重の最大値を H とし、 H までの時間を D_1 、積算面積を A_1 で示し、 H から負荷が 0 になるまでの時間を D_2 、積算面積を A_2 とした。プローブが茎に触れてから離れるまでの時間が D である。 H は「硬さ」、 A_1 は「歯ごたえ」、 A_2 は「脆さ」の程度を表しており、 A_1/D_1 は破断に至るまでの初期過程での「弾性」を示す。ここで得たパラメータの変動を総合的に評価し、総合的な食感を分析するために主成分分析を行なった。統計計算には「Excel で学ぶ多変量解析入門 第 2 版」を用いた。分析には中位節と下位節のデータを用いた。

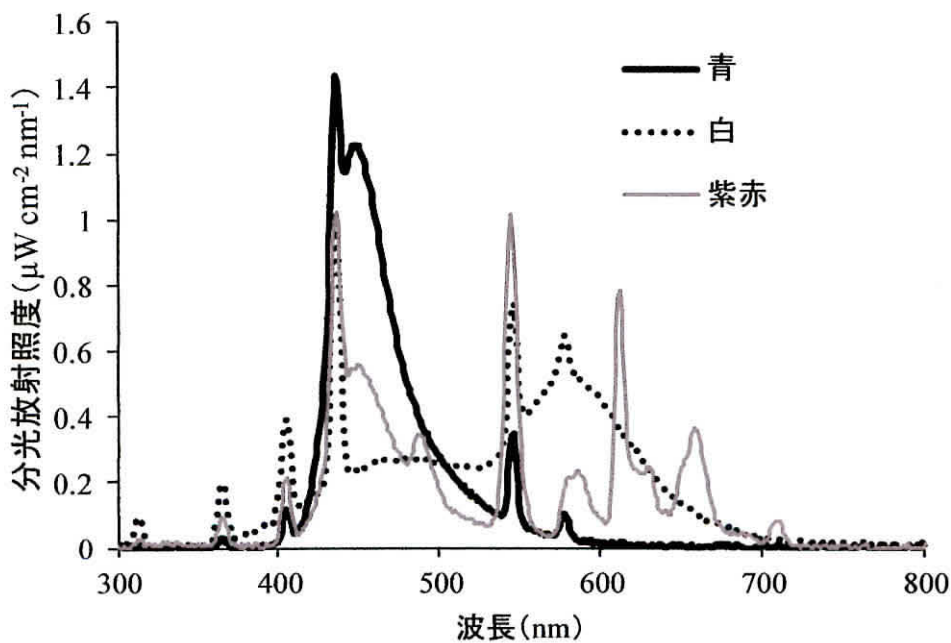


図 29 各蛍光灯の光スペクトル分布

表 9 各処理区の光条件

処理区	蛍光灯の 組み合わせ	各波長域のエネルギー比			B/R 比 ^{*2}
		B/W ^{*1}	G/W	R/W	
L1	白+紫赤+紫赤	0.410	0.351	0.220	2.0
L2	白+白+白	0.314	0.457	0.182	2.5
L3	白+紫赤+青	0.523	0.317	0.132	5.2
L4	白+青+青	0.697	0.224	0.051	23.9

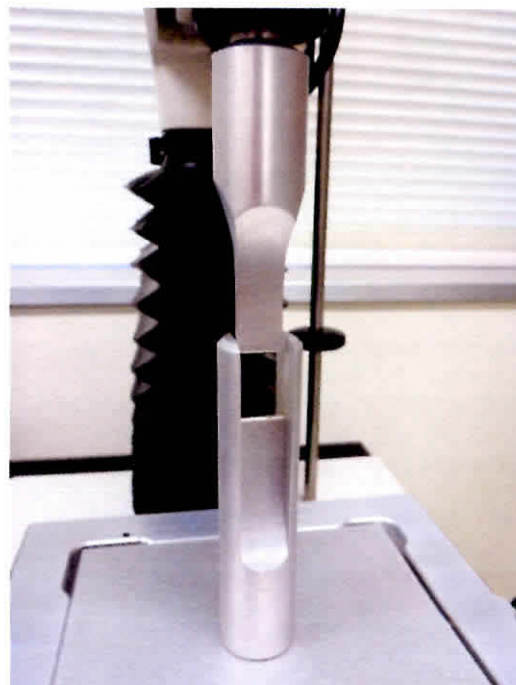
^{*1}全波長域に対する各波長域のエネルギー比

B(青色400~500nm), G(緑色500~600nm), R(赤色600~700nm),
W(全波長250~1000nm)とした。

^{*2}B/R 比は B (440-460 nm) と R (650-670 nm)の比率を示す。



テクスチャーアナライザー



プローブ

図 30 テクスチャーアナライザー (Stable Micro Systems, UK)
と使用したプローブ

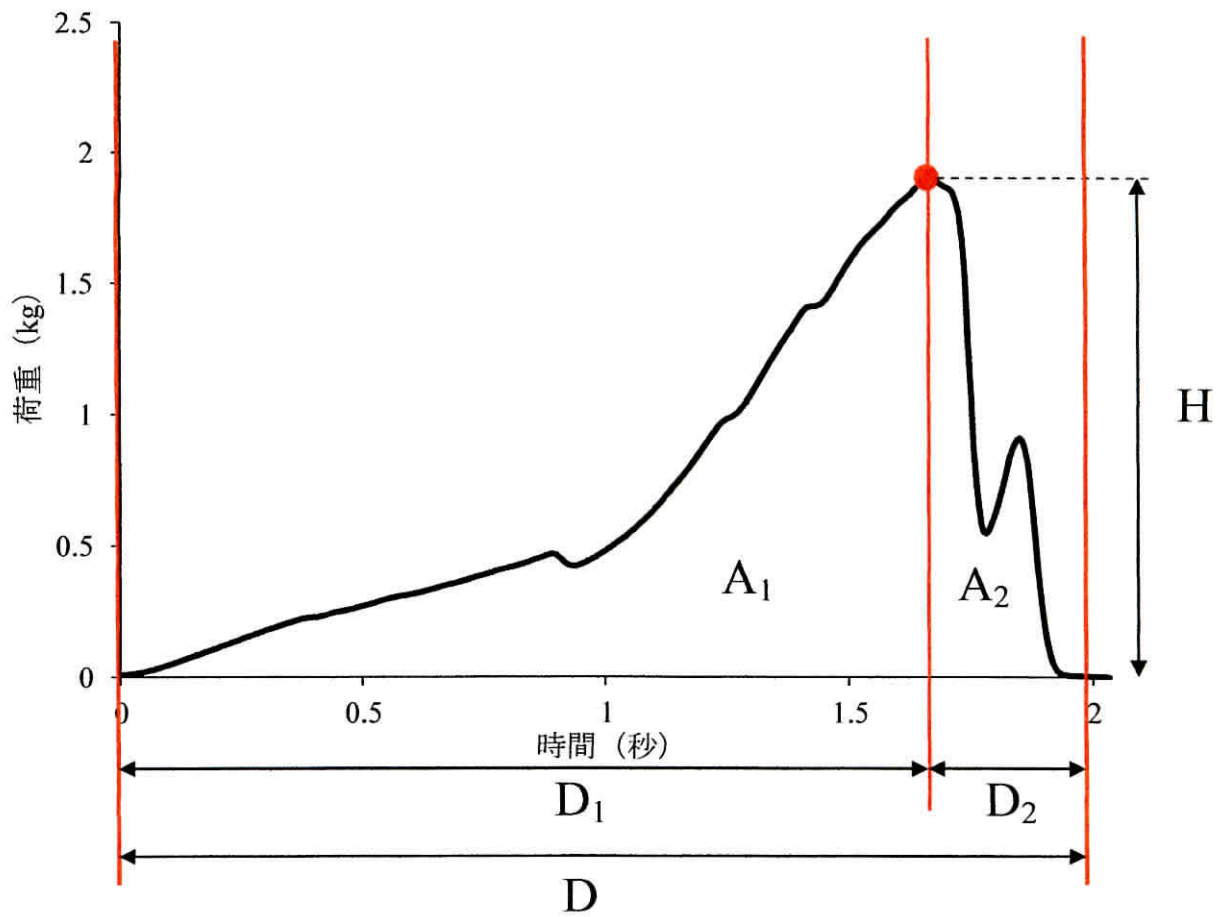


図 31 エンサイの茎の破断特性を評価するためのパラメータ

2. 結果および考察

図 32 に計測したすべての部位についての茎径と最大荷重 (H) の散布図を示した。H は茎径の増加に伴い増加する傾向がみられた。エンサイは茎の上部 30cm 程を切り取って収穫される。茎は下部になるほど太くなり、それに伴い硬さが増加してくる。このことから、品質を高めるためには、収穫する茎の太さを均一にすることが重要である。

中位節と下位節のデータを用いて行なった、主成分分析の結果を、表 10～表 13 に示した。エンサイの茎の食感の変動を総合的に分析するための主成分分析では、主成分 2 までで全変動の 82.91% を説明することができた (表 12)。また、主成分の固有ベクトルをみると、主成分 1 は茎の太さおよび硬さを、主成分 2 は歯切れの良し悪しを反映しているものであることがわかった (表 13)。さらに、主成分 1 および 2 を用いて主成分得点の散布図を図 33 に示し、2 つの主成分から得た食感の評価の概念図を図 34 に示した。図 34 の概念図から、L4 は細くやわらかく歯切れの良い位置に分布し、L1 と L2 は太さと硬さは中間地点で歯切れの悪い位置に分布し、L3 は太く硬く歯切れがやや悪い位置に分布した。このことから、エンサイの品質や美味しさは光質を変化させることで向上できる可能性が示唆された。

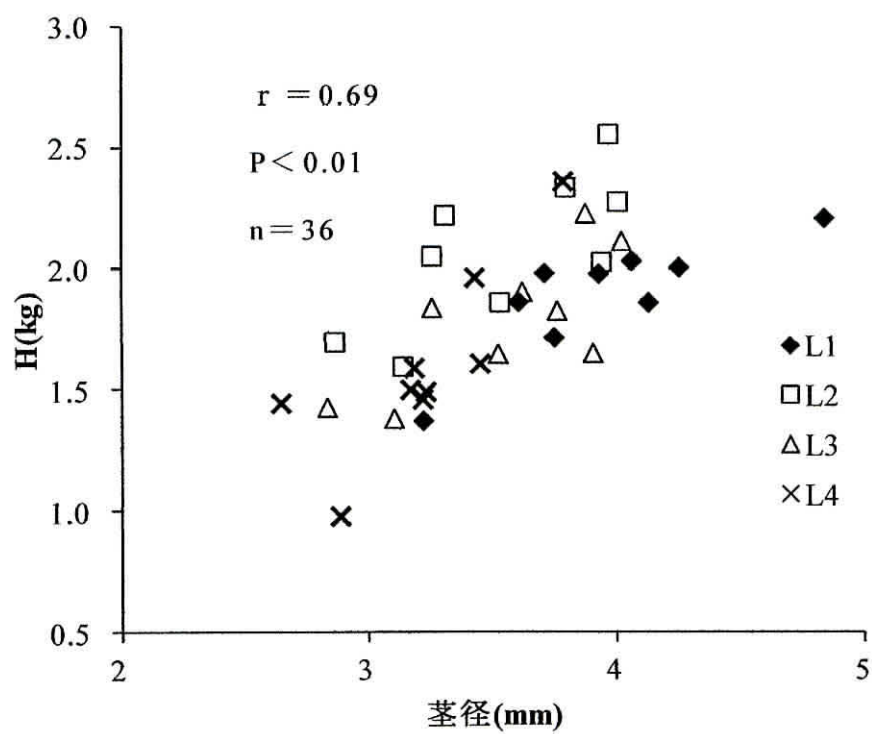


図 32 茎径と最大荷重 (H) との相関

表 10 各パラメータの平均・標準偏差 (n=24)

	平均	標準偏差(n-1)
H	1.94	0.32
A ₁	1.12	0.22
A ₂	0.25	0.09
D ₁	1.75	0.21
D	2.09	0.22
D ₂	0.34	0.10
A ₁ /D ₁	0.64	0.08
茎径	3.73	0.44

表 11 各パラメータの相関行列

	H	A ₁	A ₂	D ₁	D	D ₂	A ₁ /D ₁	茎径
H	1							
A ₁	0.812	1						
A ₂	0.075	0.021	1					
D ₁	0.720	0.799	-0.053	1				
D	0.643	0.718	0.389	0.881	1			
D ₂	-0.110	-0.112	0.915	-0.178	0.310	1		
A ₁ /D ₁	0.619	0.845	0.079	0.363	0.351	0.001	1	
茎径	0.579	0.670	0.425	0.845	0.982	0.345	0.306	1

表 12 主成分における固有値・寄与率

主成分No.	固有値	寄与率(%)	累積(%)
1	4.48	56.03	56.03
2	2.15	26.89	82.91

表 13 主成分の固有ベクトル

	主成分 1	主成分 2
H	0.393	-0.172
A ₁	0.432	-0.200
A ₂	0.130	0.624
D ₁	0.420	-0.170
D	0.438	0.152
D ₂	0.067	0.656
A ₁ /D ₁	0.303	-0.153
茎径	0.423	0.189

主成分得点

主成分 2

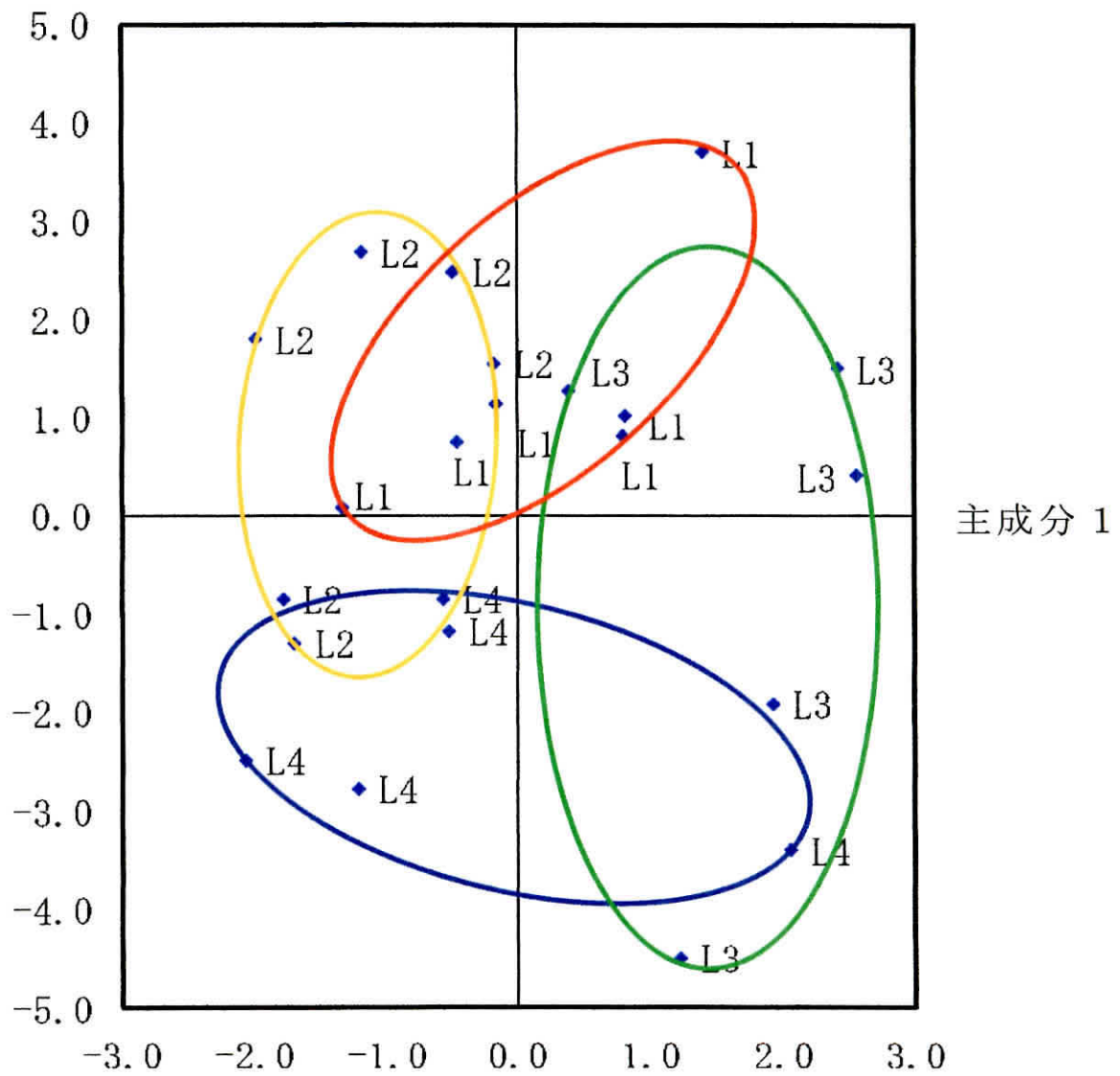


図 33 主成分得点の散布図

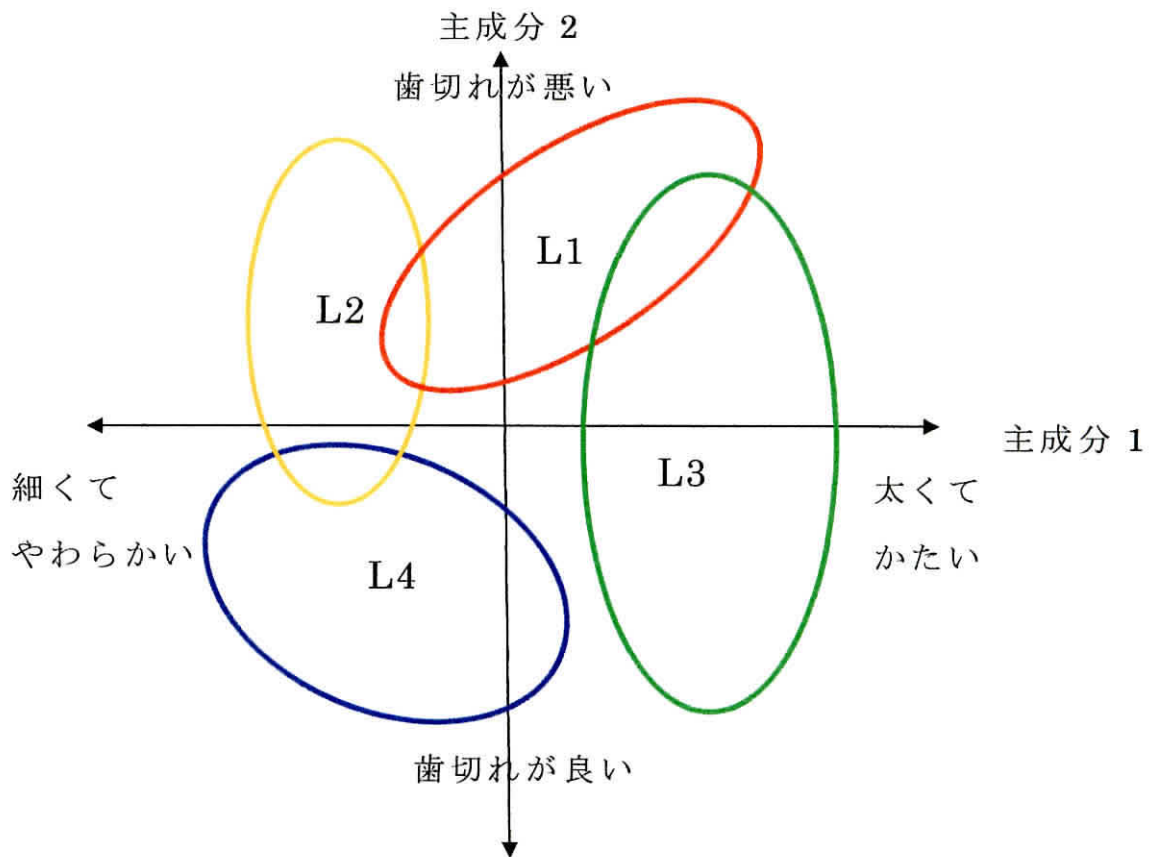


図 34 主成分による食感の評価の概念図

3. 摘要

本章では、エンサイの茎における食品としての物理的特性を解析し、光質による物性の変化を明らかにすることを目的とし、3種類の蛍光灯を用いて B/R の異なる4つの処理区の下でエンサイを栽培した後、テクスチャーアナライザーを用いて茎の破断特性を調査した。その結果、エンサイの品質や美味しさは光質を変化させることで向上できる可能性が示唆された。

第9章 被覆資材を用いた栽培管理

エンサイを野菜として広く普及させるためには、高品質で効率的な栽培方法を確立することが重要である。エンサイは温度と豊富な水分を要求し、乾燥と低温を嫌う。そこで、施設の利用や農業資材を使用することによる保温や保水といった管理が栽培上必要になる。

前章までに、 B/R 比の増加がエンサイの成長を促進させることを示した。この情報を基に、本章では光調整被覆資材を利用することによる B/R 比の増加で、エンサイの茎の成長を促進できるという仮説をたてた。被覆資材を利用すれば保温効果や保水効果も期待できる。エンサイの可食部は茎葉部であり、成長促進は収量や品質にとって重要である。そこで本章では、被覆資材を用いた栽培方法がエンサイの生育に及ぼす影響を明らかにし、栽培時に最適な資材を検討することを目的とした。

1. 材料および方法

試験にはエンサイ（タキイ種苗）を供試した。2012年7月4日に発芽をそろえるためエンサイの種子に傷を付け、3日間水に浸漬した。7月6日に発芽した種子をセルトレイに植え付け、ビニールハウス内で栽培した。本葉4枚が出そろった7月24日に圃場に移植し（畝間40cm，株間50cm），被覆資材を使用して栽培を行なった。被覆資材には白寒冷紗（株式会社クラレ）と青パオパオ（MKV ドリーム株式会社）を用いて処理区とし、被覆資材を使用しない無処理区の合計3区を設定し、各区10個体供試し3反復行なった。図35に試験区の様子を示した。また、図36に高速分光ユニット（HSU-100S，朝日分光）で測定した各区における被覆資材下の光スペクトルを示した。青パオパオを利用することで全体の光強度に対する青色光の比率が増加し、 B/R 比が増加した。施肥は全量元肥として $N, P, K = 10, 10, 10$ g

m²とした。9月12日に草丈，葉数，茎径，分枝数，SPAD値および新鮮重を調査し，80℃の乾燥器で3日間乾燥させた後，乾物重を計測した。ここで，葉乾物重(g)/地上部乾物重(g)を葉乾物分配率とした。



図 35 被覆資材を使用した各処理区の様子

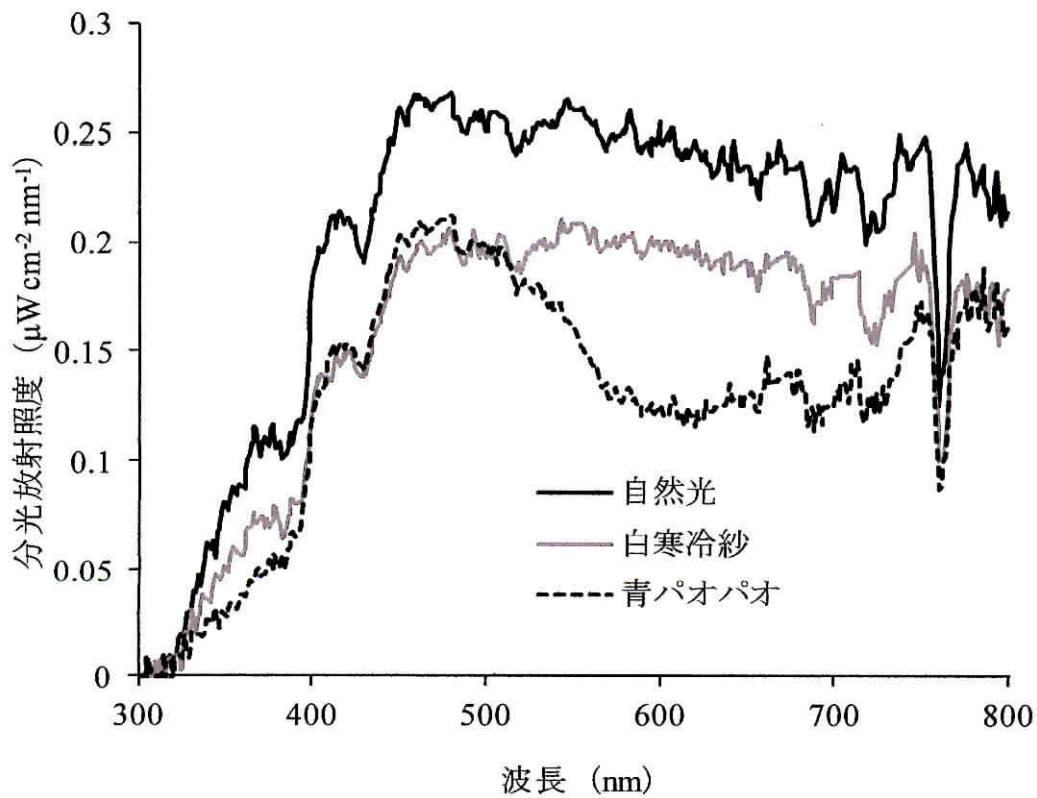


図 36 自然光および被覆資材下の光スペクトル

2. 結果および考察

表 14 に生育調査の結果を示した。分枝数，SPAD 値および比葉面積以外の項目で，無処理区<白寒紗区<青パオパオ区の順に有意に高い値を示した。草丈は無処理区と比較して白寒冷紗区で 25%の増加，青パオパオ区で 44%の増加であった。茎径は青パオパオ区で有意に増加し無処理区よりも 14%太くなった。新鮮重は白寒冷紗区で 60%，青パオパオ区で 115%と極めて高い増加率を示した。葉重，葉面積，茎乾物重および葉乾物重は無処理区と比較して白寒冷紗区でそれぞれ 44%，47%，67%，41%と大きく増加したが，青パオパオ区では 92%，81%，106%，69%とより高い値を示した。

これらの結果から，エンサイの栽培時に被覆資材を利用することは，地上部のバイオマスを大幅に増加させ，収量の増加につながる事が明らかとなった。被覆資材を使用した区において，無処理区より生育が良好であったことは，被覆資材による保温，保水効果さらに強光ストレスの緩和がエンサイの成長を促進したと考えられる。

また，青パオパオ区では白寒冷紗区よりも生育が良好であった。これは，被覆資材による上記の効果に加えて，青パオパオを使用したことによる *B/R* 比の増加がエンサイの成長を促進したと考えられる。これらのことから，エンサイの栽培時に被覆資材を利用すると収量の増加に繋がり，特に青色被覆資材の利用は，エンサイの収量増加に極めて有効であることが明らかとなった。

比葉面積は，処理区間に差はなかったが，葉乾物分配率は，無処理区が有意に高い値を示した（表 14）。一般的に作物は，水ストレス下におかれると，根>茎>葉の順に優先的に分配がなされることがよく知られている（Loomis and Connor, 1992）。もし，無処理区の生育の差が水ストレスによって引き起こされているとすれば，葉乾物分配率は低い値を示すのが当然

と考えることができる。この試験の結果がそのようにならなかったことから、無処理区は被覆資材を使用しなかったことによって水ストレスの影響は大きかったとは言えないと考えられた。さらに、図 37 に各処理区における茎乾物重と葉乾物重の散布図を示した。各区は、それぞれ正の相関関係を示した。各々の回帰を求めると、無処理区は $y = 0.9709x + 2.454$ 、白寒冷紗区は $y = 0.9135x + 2.2681$ 、青パオパオ区は $y = 0.686x + 5.3009$ であった。水ストレスが大きいと、乾物分配の一般的傾向 (Loomis and Connor, 1992) から、傾きは小さく、切片は低下すると予想される。ところが、無処理区の切片は白寒冷紗区とほぼ同じであった。このことから、今回の圃場試験の栽培期間内では、水ストレスの影響は小さいものと推察された。

葉面積は、被覆資材を使用した区において有意に肥大し、特に青パオパオ区では高い値を示した。図 38 に生育調査直前の各区におけるエンサイの様子を示した。これを見ると青パオパオ区では、他の区とは葉の形状が明らかに異なっていた。エンサイの葉の成長は、培地の栄養条件によって大きな影響を受けることが既に知られている (太田ら, 2003)。本研究の結果から、葉の形状や大きさは、光質によっても著しく影響されることが確認された。光質が葉の横幅とサイズに大きく作用していると考えられ、葉の形態に及ぼす成長調整物質の関与について、さらに研究を進めていく予定である。

表 14 被覆資材が成長に及ぼす影響

処理区* ¹	草丈(cm)	茎径(mm)	分枝数	新鮮重(g)	SPAD
無	47.15 c* ²	7.65 b	7.42	119.43 b	54.4
白	58.98 (125) b	7.98 (104) b	8.16 (110)	190.63 (160) ab	52.14 (96)
青	67.84 (144) a	8.75 (114) a	8.66 (117)	256.89 (215) a	51.64 (95)

処理区	主茎葉数(枚)	全葉数(枚)	全葉重(g)	葉面積(cm ²)	比葉面積(cm ² g ⁻¹)
無	15.12 b	143.59 b	54.67 b	1799.3 b	197.13
白	17.94 (119) ab	169.41 (118) ab	78.76 (144) ab	2638.1 (147) ab	200.82 (102)
青	19.19 (127) a	192.04 (134) a	105.22 (192) a	3254.8 (181) a	213.78 (108)

処理区	葉乾物分配率	茎乾物重(g)	葉乾物重(g)
無	0.57 a	6.93 b	9.16 b
白	0.53 (93) b	11.56 (167) ab	12.94 (141) ab
青	0.52 (91) b	14.30 (206) a	15.47 (169) a

*¹ 無:無処理区、 白:白寒冷紗区、 青:青パオパオ区

*² 異なるアルファベット間に5%水準で有意差あり
() 内の数字は無処理区を100としたときの比率

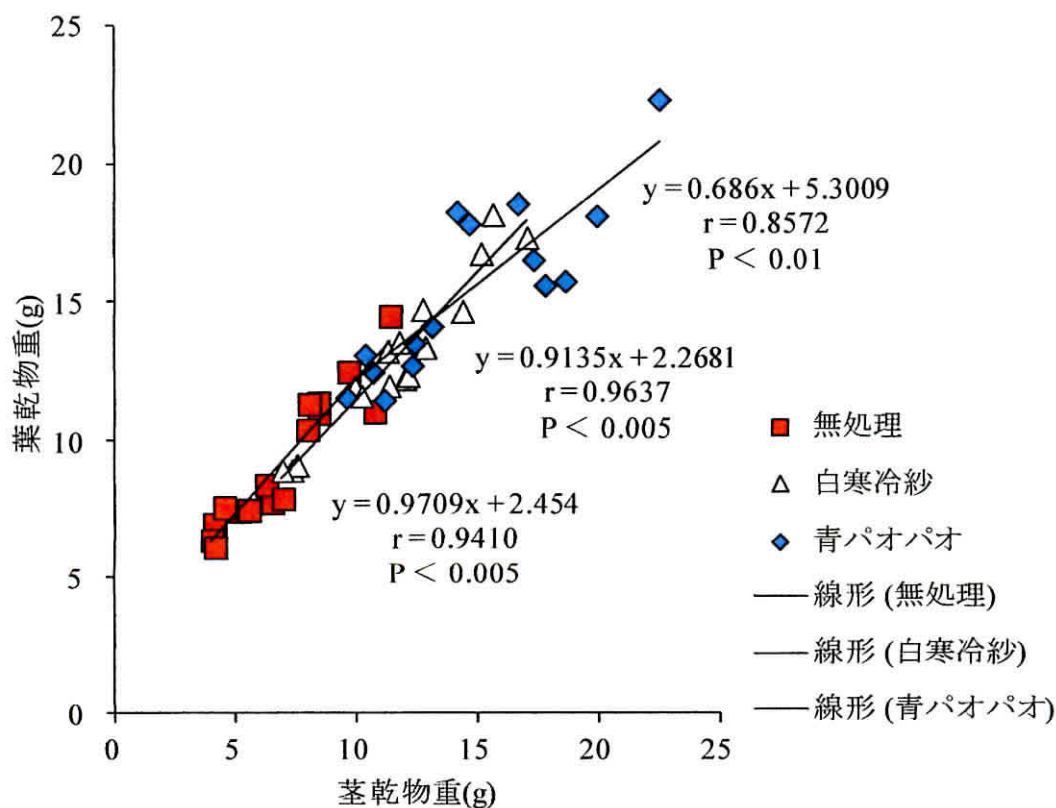


図 37 各処理区の茎乾物重と葉乾物重の散布図



図 38 各処理区でのエンサイの生育の様子
上：無処理区，中：白寒冷紗区，下：青パオパオ区

3. 摘要

本章では、被覆資材を用いた栽培がエンサイの生育に及ぼす影響を明らかにし、栽培時に最適な資材を検討することを目的とし、被覆資材として白寒冷紗と青色被覆資材（青パオパオ）を用いてエンサイの栽培試験を行なった。その結果、エンサイの栽培時に被覆資材を利用すると、地上部のバイオマスを大幅に増加させ、収量の増加につながる事が明らかとなった。特に青色被覆資材の利用は、エンサイの収量増加に極めて有効であった。

第10章 総括

近年、我が国では食の多様化などから熱帯野菜のように今まで見られなかった野菜に対する認知度が高まってきている。エンサイもその一つであり、食味が良いことや栄養価が高いことなどから人気が高まっている。またエンサイは、養分吸収能力が高い、高温多湿に強い、高収量である、機能性成分が含まれる、などの特徴を持っている。これらの多くの有用な点から、国内での普及が期待されている。そこで本研究では、エンサイの普及に向けて、①発育調節技術の確立、②施設を利用した周年栽培技術の確立、③高品質で効率的な栽培方法の確立、を目標にした。

1. 発育調節技術の確立

我が国において、エンサイは自然状況下での種子生産が困難であることから、育種や種子増殖に当っては人工的環境条件下での発育調節技術が重要となる。そこで第2章では、植物育成用蛍光灯下においてエンサイの花芽形成を誘導する限界光強度と日長時間を明らかにした。また第3章では、3色のLED（青、緑、赤）を用いて花芽形成を誘導する光質を調査したところ、花芽形成は青色光によって誘導されることが明らかとなり、緑色光や赤色光は花芽形成に関与していないことが明らかとなった。さらに第4章では、青色光単色の限界光強度を明らかにした。本研究の結果から、人工光を用いてエンサイの花芽形成を誘導する場合、青色光を強く照射させる必要があることが分かった。また、光強度の調節によって花数の確保および開花期を調節することが可能と考えられた。これらの情報は開花調節技術への応用が可能であり、本研究によってエンサイの周年的な種子生産、交配育種を効率的に行なえる光環境条件を明らかにすることができた。

2. 施設を利用した周年栽培技術の確立

エンサイを国内で普及させるためには、安定した生産と年間を通じた供給が重要となる。そのためには、植物工場のような施設を利用した周年栽培技術を確立する必要がある。そこで、最も重要な光条件に注目した結果、エンサイの茎の成長は青色光によって促進され、赤色光では抑制される傾向が認められた。これらには、フィトクロムとクリプトクロムの作用が関与していると考えられた。

また、 B/R 比に注目したところ、エンサイの茎径と髓厚は B/R 比の増加によって肥大することが明らかとなり、これらには細胞サイズと細胞数の両方の増加が関与していることが示された。このことから、光質の調節により茎の成長促進が可能であり、品質の向上や安定化が期待でき、輸送時の損傷を軽減できると考えられた。

さらに、 B/R 比の変化によって引き起こされる生理的要因を検討するため BL に注目した結果、養液中の BL 濃度の上昇による茎の成長は、 B/R 比の増加と同調していた。このことから、 B/R 比の増加がエンサイの茎における内生 BL 濃度を増加させている可能性が示唆された。間隙径が BL 濃度の増加で肥大したことから、エンサイは青色光に反応し BL を増加させ、間隙径を大きくすることで水面に浮くことが出来るという生理生態的機構が存在することが示唆された。

3. 高品質で効率的な栽培方法の確立

エンサイは光質の変化によって内部組織形態が変化し、茎径が肥大することから、光質によって品質が変化する可能性が示された。エンサイの普及には品質の良いものを供給することが重要であり、また野菜の品質にとって最も重要な項目はテクスチャーであることから、食感に関する情報は重要である。そこで、テクスチャーアナライザーを用いてエンサイの食感

と光質の関係を評価したところ、光質の調節により食感を向上させることが可能であり、高品質なエンサイを生産できると考えられた。

また B/R 比が高くなると茎の成長が促進されることから、光調整被覆資材を利用することで品質向上に効果的な栽培ができると考えられた。被覆資材は保温効果や保水効果があり、エンサイの生育促進や収穫期間の延長などが期待できることから、被覆資材を利用した研究情報は重要である。白色と青色被覆資材を用いて栽培したところ、青色被覆資材で極めて良好な生育を示したことから、被覆資材による保温効果や保水効果に加えて B/R 比の増加による茎の生育促進効果が作用したと考えられた。

本結果から、光制御によってエンサイの発育、成長、品質を調節できることが示された。特に B/R 比の増加が成長を促進するという知見は、生産量増加につながり、エンサイの普及において有用であると考えられた。また、植物に与える光質の影響は植物ごとで異なる。本研究のエンサイは青色光によって茎の成長が促進されたが、同じヒルガオ科のアサガオでは草丈の伸長は青色光で抑制されるが、本論文では、この要因が生態的な違いにあることを示唆した。この情報は植物の光形態形成の生理生態的な面からも重要であると考えられた。

4. エンサイの生理生態的機構

本論文から得られた結果を基に、エンサイの生理生態的機構に関して考察した。エンサイの起源地は、中国南部から東南アジアと考えられており、その気候区分は、熱帯モンスーンから熱帯サバンナ気候に分類される。この気候区分は、およそ4月から10月に雨季、11月から3月に乾季となる。本論文の結果から、エンサイは12時間以下の短日条件で花芽形成が誘導されるため、自然条件では9月中旬から下旬に生殖成長へ移行する。これ

によって、本格的な乾季の前の 11 月中に硬実種子を形成することができ、花成に日長情報を利用することで、乾季へ適応していると推察された。

また、本論文では青色光がエンサイの花成に関与していることを示した。太陽放射量の分光組成は季節によって変化し、青は夏に最大値を示し、緑は冬に最大値を示し、赤の季節変動は年間を通して小さい (Oba and Kobayashi, 1985) (図 39)。一方で、図 40 に示すように、緑色から赤色光の反射率は水や植生で大きく変動する。つまり、植物に照射される赤色光は年間を通して一定だが、環境によって赤色光の反射率が大きく変動するため、生育環境によって受光する赤色光は不安定となる。これと比較すると、青色光の反射率の変動は生育環境が変化しても小さいため、受光する青色光は季節変動の指標となると考えられた。このことから、エンサイは花成シグナルとして青色光を利用していると推察された。

さらに、図 41 に熱帯東アジアの季節変化と日長および青色光の季節変動の複合反応の概念図を示した。エンサイの限界日長は 12 時間であるため、日長反応によって 9 月中旬以降に生殖成長へ切り替わる。これに、季節変動する青色光の放射量 (PAR に占める割合) と花芽数の曲線を合わせ、乾季と雨季も同図中に示すと、エンサイの花成から硬実種子の成熟期間は、赤で示す雨季終盤に限られる。この状況に対応するためにエンサイは、日長と青色光の 2 つの環境要因を花成シグナルとして利用することで、つまり、日長と青色光との複合的な反応によって、雨季の終盤に多量の花と硬実種子を生産することで、乾季へ適応するという乾燥に対する戦略的な生理生態的機能を持っていると考えられた。

次に、エンサイの生育地の水環境と光形態形成の関係について考察した。エンサイの生育地は、4 月から 10 月が雨季であり、この時の青色光の放射の比率 (PAR に占める割合) は季節的变化によって高くなっている。エンサイの茎の成長が、青色光強度と B/R 比の増加によって促進されるのは、

青色光の増加によるこの季節的変化を感知していることによるものと推察される。つまり、青色光強度と比率の増加を感知することで、生育を促進させ、雨季での栄養繁殖を促進させていると考えられた。

また、水辺に生息するエンサイは雨季の増水による水没に遭遇すると考えられる。水中では長波長から吸収され、 B/R 比の増加が起こる。 B/R 比の増加を感知することで茎径、髄径および間隙径を肥大させ、水面に浮くことができ、これによって冠水ストレスを回避していると推察された。

以上のことから、エンサイは日長および青色光の強度と比率を感知することで、①硬実生産による乾季への適応と生存戦略、②適期での栄養繁殖促進、③冠水ストレスの回避、という生理生態的機構をもっていると考えられた。

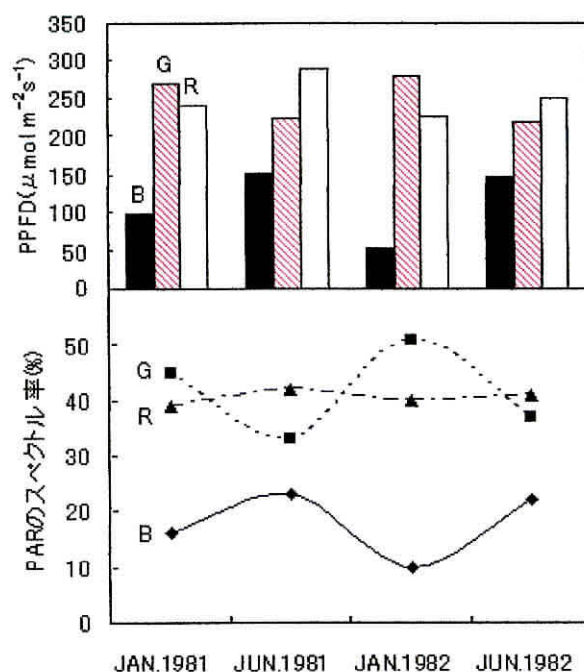


図 39 光合成有効放射 (PAR) の季節変化

B (395-475nm) , G (475-570nm) , R (570-715nm)

(Oba and Kobayashi, 1985)

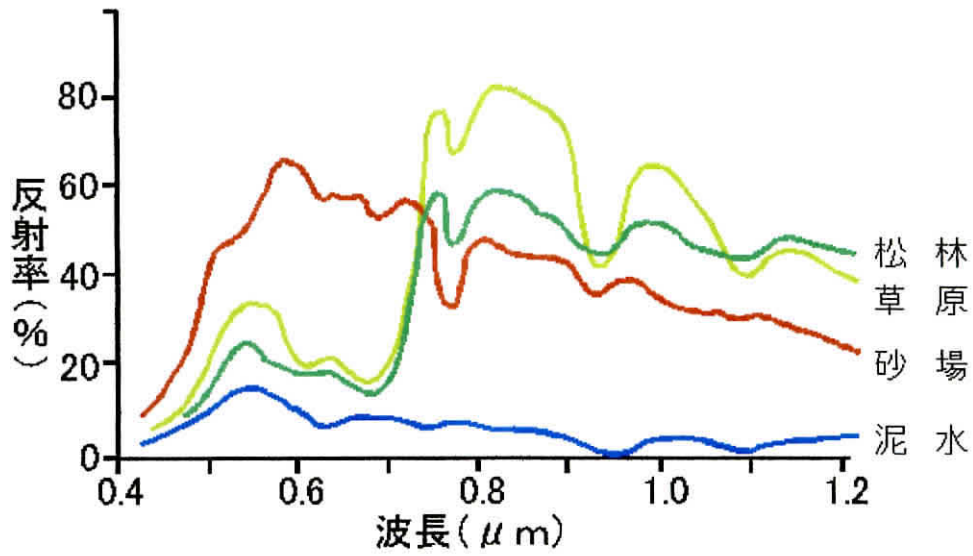


図 40 物質による反射率の変化

引用 : www.sci.osaka-cu.ac.jp/~masumoto/vuniv2000/gis09.html

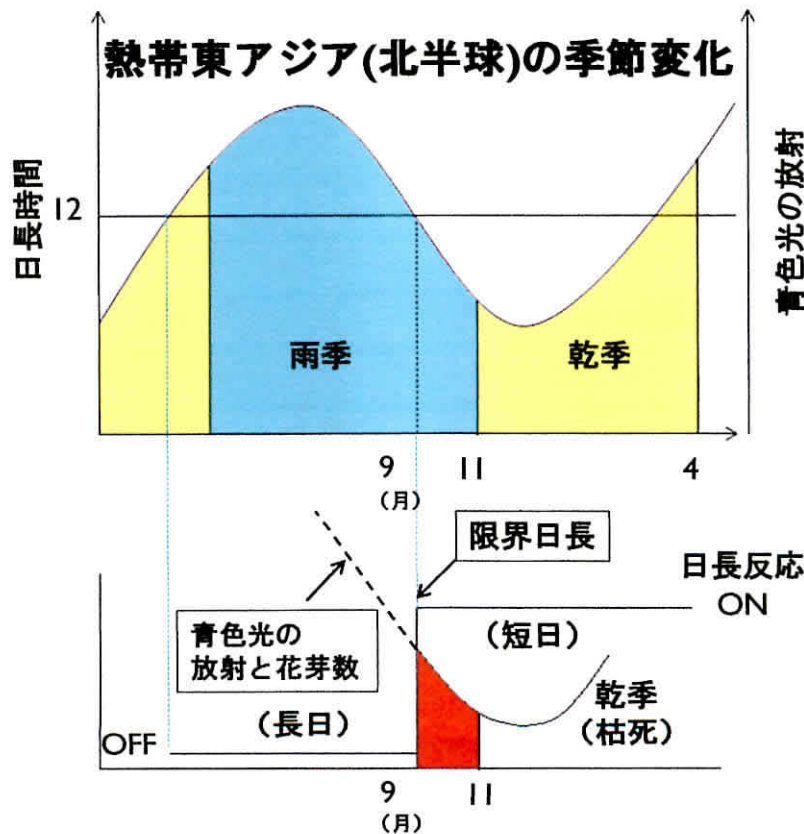


図 41 熱帯東アジアの季節変化と日長および青色光の季節変動の概念図

謝辞

信州大学農学部教授井上直人博士には本研究の遂行並びに、本稿の執筆にあたり、長期に渡り指導教官として懇切なる御指導賜り、ここに深甚なる感謝の意を表するとともに、厚く御礼申し上げる次第であります。また、本論文を取りまとめるにあたり、懇切な御校閲と御教示を賜りました、信州大学農学部教授春日重光博士、萩原素之博士、大井美知男博士並びに東京農業大学大学院農学研究科教授池田良一博士に深く感謝の意を表します。

また、様々な御指導をいただき、さらに本研究に使用した供試材料を快く提供していただきました、日本大学生物資源科学部准教授倉内伸幸博士に厚く御礼申し上げます。また、本研究の遂行と本稿の執筆にあたり、多くの御助言をいただいた信州大学農学部研究員加藤太博士に心から感謝の意を表します。また、千葉大学園芸学部教授高垣美智子博士には、本研究の遂行にあたり貴重な御助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

最後に日常の議論を通じて多くの知識や示唆を戴いた同期の関沼幹夫氏、並びに信州大学農学部植物栄養学研究室の学生諸氏に深く感謝申し上げます。

引用文献

- Abe, H., M. Natsume, S. Asakawa, Y. Okazaki, K. Hirahara, Y. Maeda, T. Asano and S. Marumo 2000. Effect of blue light on endogenous brassinosteroid activity and leaf unrolling in rice seedlings. *ITE. Lett. Batter. New Technol. Med.* 1: 781-785.
- 阿部薫, 平賀昌晃, 常盤秀夫, 尾崎保夫, 末松優 2003. 植物-濾材系水路によるバラ切り花ロックウール栽培排液の再利用及び浄化. *日本土壌肥料学雑誌* 74: 273-279.
- Adachi, K. and J. Inouye 1972. Effects of Photoperiod, light intensity and components of culture medium on flower initiation in highly thermo-sensitive paddy rice plants. *Jpn. J. Crop Sci.* 41: 78-82.
- Ahmad, M. and A. R. Cashmore 1993. *HY4* gene of *A. thaliana* encodes a protein with characteristics of a blue-light photoreceptor. *Nature* 366: 162-166.
- Andrew, C. S., B. S. Christopher and S. C. Elizabeth 1997. Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light. *Annals of Botany* 79: 273-282.
- 江頭祐嘉合, 平井静, 高垣美智子, 渡部慎平, 石淵豊人 2012. 野生種エンサイ (空芯菜) の機能性食品素材としての可能性. *New Food Industry* 54: 20-24.
- 富士原和宏, 木村好克, 蔵田憲次 2003. 赤・青色 LED 弱光照射低温貯蔵における青色光 PPF 比率がトマト接ぎ木セル成型苗の品質に及ぼす影響. *植物環境調節* 41: 361-368.
- 藤目幸擴 2005. エンサイ 農業技術大系野菜編 11: 60.

- Fukuda, N., M. Kobayashi-Yoshinaka and M. Ubukawa 2002. Effects of light quality, intensity and duration from different artificial light sources on the growth of petunia (*Petunia × hybrida* Vilm.). J. Japan. Soc. Hort. Sci. 71: 509-516.
- 福田泰規, 澤田義昭, 岩崎俊介 2006. イネブラシノステロイド生合成遺伝子の発現に対する青色光の影響. 日本植物生理学会講演要旨集 46: 668.
- Guo, H., H. Yang, T. C. Mockler and C. Lin 1998. Regulation of flowering time by *Arabidopsis* photoreceptors. Science 279: 1360-1363.
- Hanyu, H. and K, Shoji 2000. Effects of blue light and red light on kidney bean plants grown under combined radiation from narrow-band light sources. Environ. Cont. Biol. 38: 13-24.
- Hayat S, A. Ahmad, M. Mobin, Q. Fariduddin and Z. M. Azam 2001. Carbonic anhydrase, photosynthesis, and seed yield in mustard plants treated with phytohormones. Photosynthetica 39: 111-114.
- 平井正良, 雨木若慶, 渡邊博之 2006. 発光ダイオード (LED) による単色光照射がナス, リーフレタス, ヒマワリの節間伸長に及ぼす影響. 植物環境工学 18: 160-166.
- Hirai, S., T. Ishibuchi, S. Watanabe, M. Makita, C. Kishida, M. Takagaki, N. Kurauchi and Y. Egashira 2011. Protective effect of red-stemmed type of ipomoea aquatic Forsk against CCl4-induced oxidative damage in mice. J. Nutr. Sci. Vitaminol 57: 306-310.
- 細井淳, 袖山栄次 2006. 長野県における湿田での栽培に適した新規水田転換作物の選定とその栽培法の確立 第1報 エンサイ (*Ipomoea aquatica*) の栽培特性について. 北陸作物学会報 41: 140-143.
- 飯野盛利 2001. 青色光受光体研究のたどってきた道. 植物の光センシン

グ pp.88-98. 株式会社秀潤社

五十嵐勇 2004. キュウリ果実の硬さの評価法. 野菜茶業研究成果情報

岩崎俊介 2002. 青色光によって誘導されるイネの葉身傾斜とブラシノステロイド. 日本作物学会紀事 71 別号 1: 306-307.

岩佐俊吉 1980. ヨウサイ (アサガオナ) 熱帯の野菜 農林水産省熱帯農業研究センター pp.407-409 養賢堂

上村昭二 1993. ヨウサイ 熱帯野菜栽培ハンドブック pp.71-72 国際農林業協力協会

Kasajima, S., N. Inoue, M. Shirai, R. Mahmud and K. Fujita 2008. Effect of various light qualities on hypocotyl elongation in common and tartary buckwheat. *Fagopyrum* 25: 37-43.

加藤弘子, 倉内伸幸, 高垣美智子, 熊谷彩子 2005. *Ipomoea aquatica* Forsk. の日長反応性について. 熱帯農業研究 49 別号 1: 53-54.

Kim, H., G. D. Goins, R. M. Wheeler and J. C. Sager 2004. Stomatal conductance of lettuce grown under or exposed to different light qualities. *Ann. Bot.* 94: 691-697.

小山鐵夫 1984. 資源植物学: 研究方法への手引き pp.208 講談社

倉内伸幸, 加藤弘子, 高垣美智子, 中島皐介 2005. 西アフリカにおける *Ipomoea aquatica* Forsk. の地理的分布. 熱帯農業研究 49 別号 2: 93-94.

Loomis, R. S. and D. J. Connor 1992. Crop ecology - productivity and management in agricultural systems -. pp.303-305 Cambridge University

前澤重禮 2006. 産官学融合センターから消費者が無意識に農業の活性化に関与できる仕組み作りへの挑戦 - 休耕田での空心菜の栽培と加工販売. 経済月報 627: 29-33.

Mahmud, R., N. Inoue, S. Kasajima and R. Shaheen 2008. Assessment of potential indigenous plant species for the phytoremediation of

- arsenic-contaminated areas of Bangladesh. *Int. J. Phytoremediation* 10: 119-132.
- 丸尾達 2011. 熱帯における施設園芸の将来展望 (シンポジウム). *熱帯農業研究* 4-1: 63-65.
- 南沢吉三郎, 橘田文明 1978. 桑の生育に及ぼす光質の影響. *日本蚕糸学雑誌* 47: 9-14.
- Mockler, T. C., H. Guo, H. Yang, H. Duong and C. Lin 1999. Antagonistic actions of *Arabidopsis* cryptochromes and phytochrome B in the regulation of floral induction. *Development* 126: 2073-2082.
- 森下昌三, 王化 1995. エンサイ 中国の野菜—上海編— 農林水産省熱帯農業研究センター pp.99-101.
- 森下正博, 鈴木敏征 2003. テクスチャーによるキュウリの果実品質評価. *近畿中国四国研究成果情報*: 337-338.
- 森康裕, 高辻正基 1999. LED と LD 光がサラダナ生育に及ぼす影響. *植物工場学会誌* 11: 46-49.
- 長坂幸吉, 日本典秀, 奥圭子, 守屋成一 2012. エンサイの有機施設栽培における害虫の発生と天敵の利用. *日本応用動物昆虫学会大会講演要旨* 56: 85.
- Nishikawa, N., S. Toyama, A. Shida and F. Futatsuya 1994. The uptake and the transport of ^{14}C -Labeled epibrassinolide in intact seedlings of cucumber and wheat. *J. Plant Res.* 107: 125-130.
- Nishizawa, T. 1992. The length and number of epidermal cells in petioles of strawberry plants as affected by photoperiod and temperature during vegetative and resting periods. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 61: 559-564.
- Nishizawa, T. 1994. Effects of photoperiods on the length and number of epidermal cells in runners of strawberry plants. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 63:

347-352.

Oba, K., Kobayashi, K. 1985. Spectral characteristics of solar radiation at Miyakonojo. Seasonal and Geographical Changes of Solar Radiant Energy: 168-175.

太田綾子, 倉内伸幸, 高垣美智子 2003. 栽培条件がエンサイの葉の生育に及ぼす影響. 日本熱帯農業学会 熱帯農業研究 47 別号 2: 19-20.

太田綾子, 倉内伸幸, 高垣美智子, 丸尾達, 篠原温 2002. *Ipomoea aquatica* Forsk. 系統の葉形状分析. 日本熱帯農業学会 熱帯農業研究 46 別号 1: 1-2.

大竹良知 1982. ハクサイの葉の内部形態及び発育に及ぼす温度の影響. 園学雑 51: 329-337.

Ogunwenmo, K. O. and O. A. Oyelana 2009. Biotypes of *Ipomoea aquatica* Forssk. (Convolvulaceae) exhibit ecogeographic and cytomorphological variations in Nigeria. Plant Biosyst. 143: 71-80.

佐々木大, 井上直人, 倉内伸幸, 高垣美智子 2011. 光照射量と照射時間がエンサイの花芽形成に及ぼす影響. 北陸作物学会報 46: 96-98.

佐々木大, 井上直人, 倉内伸幸, 高垣美智子 2012. 光質と光強度がエンサイ (*Ipomoea aquatica* Forsk.) の花芽形成と草丈に及ぼす影響. 熱帯農業研究 5: 15-19.

Sasaki, F., M. Sekinuma, F. kato and N. Inoue 2011. Blue light induced the stem growth in vegetable water spinach. The Proceedings of 7th Asian Crop Science Association Conference (in press).

佐々木大, 井上直人, 倉内伸幸 2013. エンサイ (*Ipomoea aquatica* Forsk.) の茎の形態に及ぼす青色光/赤色光比の影響. 熱帯農業研究 6: 印刷中

社団法人全国調理師養成施設協会 2009 食品標準成分表五訂増補版 株

式会社調理栄養教育公社

Sharma, M. 1994. Taxonomic notes on north Indian plants – X. *J. Econ. Tax. Bot.* 18: 387-394.

庄子和博, 後藤英司, 橋田慎之介, 後藤文之, 吉原利一 2010. 赤色光と青色光がレッドリーフレタスのアントシアニン蓄積と生合成遺伝子の発現に及ぼす影響. *植物環境工学* 22: 107-113.

杉山慶太, 菅野紹雄, 森下昌三, 岩永喜裕 1999. スイカにおける果実の硬さと組織・細胞の構造. *園学雑* 68: 108-116.

杉山法子, 鈴野弘子, 三好恵真子, 澤山茂, 川端晶子 1993. 野菜の官能特性の評価. *調理科学* 26: 315-326.

高辻正基 1996. *植物工場の基礎と実際*. 裳華房

高辻正基, 辻貴之, 関喜範, 星岳彦 1995. 可視発光ダイオードによる植物栽培実験. *植物工場学会誌* 7: 163-165.

竹松哲夫, 竹内安智, 崔忠惇 1986. 不良環境下におけるイネの生育障害とブラシノライド類による予防. *日本植物調節剤研究協会* 20: 2-12.

滝本敦, 池田勝彦 1960. アサガオの花芽形成を支配する光条件について. *日本植物生理学会 日本植物生理学会シンポジウム講演要旨*: 23-33.

田中良高, 秋濱友也, Nguyen van Ke 1997. カンコン (ヨウサイ) 東南アジアの野菜—ハーブとスパイス—. pp.36. 農業開発教育基金

常盤秀夫, 尾崎保夫, 阿部薫 2003. ロックウール栽培排液の浄化に適した植物の検索. *日本土壌肥料学雑誌* 74: 207-210.

豊増知伸 2006. *植物ホルモンの分子細胞生物学. 光と植物ホルモン*. pp.223-233. 講談社 (東京)

Turk M. Edward, S. Fujioka, H. Seto, Y. Shimada, S. Takatsuto, S. Yoshida, M. A. Denzel, Q. I. Torres and M. M. Neff 2003. CYP72B1 inactivates brassinosteroid hormones: An intersection between photomorphogenesis

and plant steroid signal transduction. *Plant Physiology* 133: 1643-1653.

湧田裕子, 豊川哲也, 奥平留美子, 市場俊夫, 市村年昭, 丸山進 2004. エンサイの血糖値上昇抑制効果に関する研究. 沖縄県工業技術センター研究報告書 6: 43-50.

山本泰由 2003. カバークロップ (被覆作物) による休耕田の管理. 農業および園芸 78: 29-34.

山崎敬亮, 石井征亜, 禿泰雄, 田中逸夫 2000. 光質および光強度がアサガオの花芽形成に及ぼす影響. 生物環境調節学会 38: 39-46.

Yamazaki, K., Y. Ishii, S. Matsui and I. Tanaka 2003. Effects of light quality, daylength and growing temperature on flowering in morning glory (*Pharbitis nil* Choisy). *Environ. Cont. Biol.* 43: 211-219.

Yamazaki, K., Y. Ishii and I. Tanaka 2007. Spectral sensitivity of the promotion and inhibition of flowering in morning glory (*Pharbitis nil*). *Environ. Cont. Biol.* 45: 75-83.

由比進 1989. エンサイ (アサガオナ) 野菜園芸大百科 14 pp.31-33.

ホームページ

www.sci.osaka-cu.ac.jp/~masumoto/vuniv2000/gis09.html 升本眞二 GRASS

を用いた地理情報システム入門

要約

エンサイ (*Ipomoea aquatica* Forsk.) は東南アジアをはじめとする多くの国で食用野菜として利用されており、わが国では近年有用野菜として需要が高まっている。本論文では、エンサイの国内での普及を目指し、効率的な育種、栽培、品質管理を目標にした研究を行なった。

第 2 章では、植物育成用蛍光灯を用いて光強度と照射時間を変化させ、それらがエンサイの花芽形成に及ぼす影響について検討した。その結果、12 時間以下の短日条件における、PPFD $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光条件で花芽が形成されることが明らかとなった。1 日 10 時間照射、PPFD $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光条件では 28 日目に開花した。

第 3 章では、光源に LED を用いて光質と花芽形成の関係について論じた。処理区に青色 (B)、緑色 (G) および赤色 (R) の 3 区を設け、照射時間をそれぞれ 1 日 10、12 および 14 時間とした。花芽は B 区の 10、12 時間照射区において形成されたが、G と R 区ではいずれの照射時間でも花芽形成は認められなかったことから、エンサイの花芽形成は青色光によって引き起こされていることが明らかになった。

第 4 章では、青色光の光強度が花芽形成に及ぼす影響を論じた。青色 LED を用いて光強度を変化させ、エンサイを栽培した。花芽は青色光単色の PPFD $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上で形成されることが明らかとなり、光強度が増加すると花芽形成までの日数が短くなり、花芽数が増加することが明らかになった。

第 5 章では、エンサイの茎の生長をコントロールする光の波長を調べるために、様々な蛍光灯を用いて異なる波長を照射する区を設け、全波長域 (250~1000nm) に対する巾 50nm の特定波長のエネルギー比と草丈および茎径との相関について検討した。エンサイの草丈、茎径は 400~480nm

(青色) のエネルギー比と正の相関を示し、520～780nm (緑～遠赤) エネルギー比とは草丈、茎径ともに負の相関を示した。このことから、エンサイの草丈および茎径の生育は青色光で促進され、緑と赤色光の波長域では抑制的に働くことが明らかになった。

植物の成長や光形態形成には、青色光と赤色光の比率が関与していることはよく知られている。そこで第6章では、青色光 ($450 \pm 10 \text{ nm}$) と赤色光 ($660 \pm 10 \text{ nm}$) の比 (B/R) が茎組織に与える影響について検討した。茎径と髓厚は B/R 比の増加に伴い大きくなったが、皮層厚には差がなかった。髓厚、茎径の肥大は、髓の細胞サイズの増加と細胞数の増加が関係していた。これらのことから、 B/R 比が高いとエンサイの髓の成長が促進され、品質の向上や安定化に効果があると考えられた。

第7章では、エンサイの茎における肥大生理的要因の解明を目的として、外生 BL がエンサイの茎の生長に及ぼす影響を検討した。BL 濃度を 0, 1, 2.5, 5 および 10 ppb とした処理区を設定した。茎径および髓厚は BL 濃度の増加に伴い有意に大きくなったが、皮層はどの濃度区においても差はみられなかった。間隙径は 5 および 10 ppb 区で低濃度区と比較して有意に高い値を示した。草丈は BL 濃度の増加に伴い高くなった。第6章と第7章の結果から、エンサイに照射する B/R 比の増加または青色光の増加が茎における内生 BL の濃度を増加させていることが示唆された。

野菜の嗜好特性や品質では、テクスチャーが最も重要とされる。そこで第8章では、エンサイの茎のテクスチャー関連形質と光質の関係を明らかにするために、破断特性をテクスチャーアナライザーを用いて検討した。エンサイの茎の硬度は、茎径が太くなるにつれて硬くなる傾向が見られた。光質と食感の関係については、主成分分析の結果から、光質を制御することで品質や美味しさを管理できる可能性が示唆された。

第9章では、 B/R 比の増加によって生育が促進された結果を踏まえて、

光調整被覆資材の利用によるエンサイの茎の生育促進について検討した。被覆資材には白色寒冷紗と青色寒冷紗を用いた。草丈，茎径，新鮮重，葉数，葉面積および乾物重は，無処理区<白色寒冷紗区<青色寒冷紗区の順に高い値を示した。特に新鮮重は，無処理区と比較して白色寒冷紗区では160%，青色寒冷紗区では215%と高い値を示した。このことから，エンサイの栽培には被覆資材が有効であり，特に青色被覆資材の利用は高い収量増加が見込まれた。

本論文の結果から，光質はエンサイの発育と成長に大きく関与しており，光形態形成に極めて重要な役割を持っていることが明らかとなった。さらに，青色光に伴う生理的メカニズムについても考察を加えた。青色光の光強度や比率がエンサイの生育を促進するという知見は，エンサイを栽培する上で有効であり，アジアの実際の農場や植物工場における生産量の増加につながる有用な情報と考えられた。

Summary

Studies on the Cultivation Management by Light Control in Water Spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.)

Futoshi, Sasaki

Water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) is an important vegetable in tropical and temperate zones, and is also a popular vegetable in Japan because of its good texture and high nutrient value. This study was designed to clarify the effective cultivation and quality control of water spinach.

Chapter 2 describes the effects of light irradiation intensity and duration on flower-bud formation, which were investigated using fluorescent lamps with a view to develop a flowering control technique for the breeding of water spinach. Short-day treatment and PPFD $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ promoted flower-bud formation. Flowering was observed 28 days after giving irradiation of PPFD $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for 10 h per day.

Chapter 3 describes the effects of the light spectrum and irradiation duration on flower bud formation and plant height, which were investigated using different LED sources. The experimental plots were exposed to light from blue (B), green (G), or red (R) LEDs, and the irradiation duration was set at 10, 12 and 14 h at $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ of PPFD in each plot. Plants were significantly higher in the B plot than in the G and R plots. Flower buds were observed in the B plot with 10 and 12 h irradiations, but not in the G and R plots and in the B plot with 14 h irradiation.

Chapter 4 describes the effects of blue light irradiance on flower bud formation. Irradiance levels of blue light were set at 50, 100, 150 and $200 \mu\text{mol}$

$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ of PPF. Flower buds were observed in plots with 100, 150, and 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ of PPF for 10 h, and 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ of PPF for 12 h under the blue LED. An increase of the irradiance level shortened the number of days to flower bud formation and increased the number of flower buds.

Chapter 5 clarifies the suitable growth conditions applicable in a plant factory. Water spinach shoots were grown under various artificial light conditions established by combining 3 types of fluorescent light selected from 4 types of light emitted by white, blue, purplish-red and far-red fluorescent lamps. Increases in plant length and stem diameter were positively correlated with the energy of blue light (400-480 nm), but were negatively correlated with the energy of green, red and far-red light (520-780 nm). The results suggest that blue light tended to promote and red light tended to inhibit the stem growth of water spinach.

Chapter 6 describes the effect of the irradiation ratio of blue (B : 450 ± 10 nm) to red (R : $660 \pm 10\text{nm}$) light on the morphological characteristics of a stem tissue in water spinach. Light spectrum was regulated by using a combination of different fluorescent lamps. The stem diameter increased significantly under higher B/R ratio, whereas the cortex thickness did not change. The pith thickness increased significantly under higher B/R ratio. The increase in the pith thickness and stem diameter was associated with an increase in cell density and the number of cells in a pith tissue. The cavity diameter significantly increased with increased B/R ratio. These results indicated that the higher B/R ratio enhanced the increase of the stem diameter, pith thickness, and the density and number of cells in the pith of water spinach.

Chapter 7 describes the effects of exogenous BL on stem tissue growth. Water spinach was cultured under different concentrations of brassinolide (BL)

[0, 1, 2.5, 5 and 10 ppb (w/v)]. The stem diameter and pith thickness increased significantly as BL concentration in the water culture medium increased, whereas the cortex thickness was not affected by BL concentration. The cavity diameters of plants in the 5 and 10 ppb plots were significantly larger than those in the other plots. There was no significant difference in plant height among the treatments, although the plant height tended to be in plots higher with higher BL concentrations. On the basis of the results presented in chapters 6 and 7, it is suggested that the *B/R* ratio or the intensity of blue light irradiation affected endogenous BL concentration in the stem of water spinach.

Chapter 8 elucidates the relationship between light quality and the stem texture of water spinach. The failure property of stem was analyzed by using a texture analyzer. The result of principal component analysis proved that the stem texture of water spinach could be controlled by light spectrum.

Chapter 9 describes the effects of covering materials on the growth of water spinach, investigated using photosensitive covering materials (White- and blue-colored shading sheets) in a field productivity test. Growth of stem and leaf was effectively promoted by blue-colored shading sheets, resulting in increased fresh yield in the field.

On the basis of the findings of this study, it is suggested that light quality and intensity effectively control the growth and development of water spinach. This information will be useful for the cultivation of water spinach on farms in Asia and also in plant factories.