

(千葉大学学位申請論文)

光環境制御による

トマトの高品質苗生産に関する研究

2015年1月提出

千葉大学園芸学研究科
環境園芸学専攻 生物資源科学コース
南谷 健司

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	既往研究	3
1.2.1	トマト苗の光応答メカニズム	3
1.2.2	局所環境制御法	4
1.3	目的	5
第2章	一次育苗における光環境制御が生育に及ぼす影響	7
2.1	緒言	7
2.1.1	閉鎖型苗生産システム	9
2.1.2	Light Emitting Diodes (LEDs)	9
2.2	光質および光強度が生育に及ぼす影響	10
2.2.1	材料および方法	10
2.2.1.1	供試植物	10
2.2.1.2	共通の環境条件	10
2.2.1.3	測定項目および算定項目	10
2.2.1.4	【試験 2-1】青赤色 LED の赤色光量がトマトの生育に及ぼす影響	12
2.2.1.5	【試験 2-2】青赤色 LED の積算青色光量がトマトの生育に及ぼす影響	12
2.2.1.6	【試験 2-3】6 波長制御型 LED の遠赤色光量がトマトの生育に及ぼす影響	13
2.2.1.7	【試験 2-4】6 波長制御型 LED の光強度がトマトの生育に及ぼす影響	13
2.2.2	結果および考察	14
2.2.2.1	【試験 2-1】青赤色 LED の赤色光量がトマトの生育に及ぼす影響	14
2.2.2.2	【試験 2-2】青赤色 LED の積算青色光量がトマトの生育に及ぼす影響	14
2.2.2.3	【試験 2-3】6 波長制御型 LED の遠赤色光量がトマトの生育に及ぼす影響	15
2.2.2.4	【試験 2-4】6 波長制御型 LED の光強度がトマトの生育に及ぼす影響	16
2.3	明期終了時の短時間の光環境が生育に及ぼす影響	17
2.3.1	材料および方法	17
2.3.1.1	【試験 2-5】明期終了時の短時間の異なるピーク波長の LED 光照射が生育に及ぼす影響	17
2.3.1.2	【試験 2-6】明期中の B/R 比および明期終了時の短時間の異なるピーク波長の LED	

光照射が茎伸長に及ぼす影響	17
2.3.2 結果および考察	18
2.3.2.1【試験 2-5】明期終了時の短時間の異なるピーク波長の LED 光照射が生育に及ぼす影響	18
2.3.2.2【試験 2-6】明期中の B/R 比および明期終了時の短時間の異なるピーク波長の LED 光照射が生育に及ぼす影響	18
2.4 結言	20
第3章 二次育苗における局所環境制御が生育および果実収量に及ぼす影響	36
3.1 緒言	36
3.1.1 千葉大ハウス(太陽光利用型植物工場)	37
3.1.2 山元町ハウス(太陽光利用型植物工場)	37
3.1.3 閉鎖型苗生産システム(人工光型植物工場)	38
3.2 冬季の LED 補光が生育および果実収量に及ぼす影響	39
3.2.1 はじめに	39
3.2.2 材料および方法	39
3.2.2.1 供試植物	39
3.2.2.2 一次育苗	39
3.2.2.3 測定項目および算定項目	40
3.2.2.4【試験 3-1】冬季の二次育苗における群落内環境の解析	42
3.2.2.5【試験 3-2】人工気象室における二次育苗期の LED 補光がトマトの茎伸長に及ぼす影響	42
3.2.2.6【試験 3-3】冬季の LED 補光の光強度がトマトの生育および収量に及ぼす影響	42
3.2.3 結果および考察	45
3.2.3.1【試験 3-1】冬季の二次育苗における群落内環境の測定	45
3.2.3.2【試験 3-2】人工気象室における二次育苗期のトマトの LED 補光がトマトの茎伸長に及ぼす影響	46
3.2.3.3【試験 3-3】冬季の LED 補光の光強度がトマトの生育および収量に及ぼす影響	46
3.3 夏季の局所冷房および LED 補光が生育および果実収量に及ぼす影響	49
3.3.1 はじめに	49
3.3.2 材料および方法	49

3.3.2.1 供試植物	49
3.3.2.2 一次育苗	49
3.3.2.3 測定項目および算定項目	49
3.3.2.4【試験 3-4】夏季の二次育苗における群落内環境の解析	50
3.3.2.5【試験 3-5】局所冷房および LED 補光がトマトの生育および収量に及ぼす影響	51
3.3.3 結果および考察	52
3.3.3.1【試験 3-4】夏季の二次育苗における群落内環境の測定	52
3.3.3.2【試験 3-5】局所冷房および LED 補光がトマトの生育および収量に及ぼす影響	53
3.4 結言	57
第 4 章 総括	81
4.1 本論文の摘要	81
4.2 今後の課題および展望	82
引用文献	84
参考文献	88

用語の定義および解説

花成: 花成 (flowering) は栄養成長から生殖成長への成長相の転換と定義する。環境シグナルや内生シグナルが感受され、茎頂分裂組織で栄養成長から生殖成長への転換が起こり、花器官の原基が形成されて花芽ができる。

花芽分化期: 環境要因によって花成刺激物質が生成される花成誘導 (flower induction) 後、茎頂がそれに反応して花芽原基をつくる体制となる花芽誘起 (floral evocation) となり、花芽形成が開始 (flower-bud initiation) される時期を花芽分化期 (flower-bud differentiation phase) と定義する。

花芽発達期: 花芽分化期の後、花芽原基は、花の器官、がく、花弁、雄しべ、雌しべ、それぞれに分化・発達し、花芽分化後から第 1 花開花までに至る時期を花芽発達期 (flower-bud development phase) と定義する。

開花期: 花房の中の第 1 花開花から花房の全花開花までに至る時期を開花期 (anthesis phase) と定義する。

避陰反応: 植物は、赤色光 (600 nm-700 nm) と遠赤色光 (700 nm-800 nm) の比率 (R/FR 比) を感受し、茎を伸ばすなどの応答を示してより良い光環境を得ようとする。これを避陰反応 (SAS: Shade avoidance syndrome) と呼ぶ。

PSS: 避陰反応はフィトクロム不活性型 (P_r) と活性型 (P_{fr}) の平衡状態が重要とされ、 P_r と P_{fr} の吸光度に基づいて算出した値をフィトクロム光平衡 (Phytochrome phytostationary state) と呼び、PSS と略記する。フィトクロムが赤色光を感受すると P_r から P_{fr} に変化し、PSS が大きくなる。他方、遠赤色光を感受すると P_{fr} から P_r に変化し、PSS が小さくなる。PSS が小さいとき、避陰反応が誘導される。

PPF: 光合成に有効な波長域 (400 nm-700 nm) の光量子束を光合成有効光量子束 (Photosynthetic photon flux) と呼び、PPF と略記し、単位は $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ である。

DLI: PPF の一日の積算値を日積算光量 (Daily light integral) と呼び、DLI と略記し、単位は $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ である。

DLI_{blue} : 青色の波長域 (400 nm-500 nm) の光量子束の一日の積算値として、 DLI_{blue} と略記し、単位は $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ である。

DAS: 播種後日数 (Days after sowing) は DAS と略記する。

DAT: 処理後日数 (Days after treatment) は DAT と略記する。

EOD 処理: 明期終了時 (End-of-day) は EOD と略記し、明期終了時の短時間の照射のことを EOD 処理と呼ぶ。

B/R 比: 青色光 (B: 400-500 nm) と赤色光 (R: 600-700 nm) の比率を B/R 比と略記する。

R/FR 比: 赤色光 (R: 600-700 nm) と遠赤色光 (FR: 700-800 nm) の比率を R/FR 比と略記する。

第1章 序論

1.1 背景

トマトは、世界中で栽培されており、野菜において最も生産量が多い。日本国内における消費量は2009年度において一人当たり年間8.3 kgと計上されている (FAOSTAT, <http://faostat.fao.org>)。トマトは、経済的重要価値のある園芸作物のひとつであり、周年生産と安定供給が求められている。

近年、トマトの長段栽培に比べて短い期間 (70~120 日間) で1~4 段果房のみの果実を収穫し、それを繰り返すことで、周年的に生産できる低段栽培が注目されている (渡辺, 2006)。低段栽培では、年間当たりの作付け回数を増加させ、高い栽植密度で栽培する。そのため、多くの苗が必要となり、種苗コストが長段栽培に比べると高くなる。よって、低コストで効率的に苗を生産する必要がある。また、本葉4枚から5枚程度の小苗を定植すると、収穫終了するまでの期間が長くなる。よって、作付け回数を増やすためには、なるべく育苗期間を延長し、第1花開花までの生育ステージが進んだ大苗を定植することが必要である。さらに、苗の品質は、栽培中の作業量ならびに栽培終了時の収量および品質に大きく影響するため、苗質が一連の栽培における大部分を左右するという意味で、「苗半作」といわれ、苗の質は特に重要である。

以上より、低段栽培で安定生産と多収を達成するための苗生産には、以下の項目が挙げられる。

- 1) 低コストで効率的な生産技術を用いること
- 2) 第1花開花まで生育ステージを進ませること
- 3) 高品質な苗を安定的に生産すること

従来、苗生産は自然光を利用したハウスや苗圃で生産されてきた。しかし、ハウス内の環境が不均一なために、苗の成長が揃わない、季節や天候により気象条件が変動するために、成長速度が一定にならない、といった理由でハウス育苗だけでは高品質な苗を安定的に供給することは難しかった。他方、これまで苗生産に人工光を利用しなかった主な理由としては、初期設備のインシヤルコストが高いこと、電気代などのランニングコストが高いこと、および高品質な苗を生産できるエビデンスがなかったことなどが挙げられる。

1990年代後半、苗生産に人工光を利用する閉鎖型苗生産システムが開発された (古在, 1999)。閉鎖型苗生産システムは、空調機や人工光源等を用いることにより、光強度、気温などの生育環境を容易に制御することができ、ハウス育苗よりも育苗期間を短くし、かつ安定的に苗を生産することが可能である。ただし、現在市販されている閉鎖型苗生産システムは本葉4枚から5枚程度の小苗を高い栽植密度で生産するのに適しているが、育苗スペースが狭いため第1花が開花するまで生育ステージの進んだ大苗の生産には不適である。

そこで、低段栽培用の苗生産では多くの場合、育苗前期 (一次育苗) に閉鎖型苗生産システムを、育苗後期 (二次育苗) に自然光下のハウスを用いる方法 (土屋, 2006) がとられている (Fig. 1.1)。一次育苗および二次育苗に共通して、省スペースで効率的な環境制御を行うため、高い栽植密度で

多くの苗を育苗する必要がある。

密植条件のトマト育苗では、苗が徒長し、生育の均一性も悪くなる（田中・島地, 1992）。また、徒長した苗は折れやすく、定植作業に支障をきたし、定植後の草丈や花房着生葉位にも影響する（鈴木ら, 2011）。他方、トマト苗の第1花房着生葉位を低くすると、定植後に果実を早期に収穫できるだけでなく、1年当たりの収量も増大できる可能性がある（古在ら, 2006）。よって、トマトの高品質な苗生産では、草丈と花房着生葉位の調節が重要である。そのため、一次育苗および二次育苗の生育制御技術を確立する必要がある。

生育制御技術の1つに光環境を制御する方法が挙げられる。光環境の中で光質は、光強度と異なり質的な光情報として植物に作用し、さまざまな形態形成反応に影響を及ぼす（後藤, 2004）。光質応答には光受容体が関与している。一般に、青色光/UV-A受容体は、光屈性や気孔の開閉、葉緑体の光定位運動などに関わるフォトトロピンと花芽形成や茎伸長、概日リズムに関わるクリプトクロムなどが知られている。赤色光/遠赤色光受容体のフィトクロムは複数種あり、非常に少ない光量（ $10^{-1} \sim 10^2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）で飽和する超低光量反応と、比較的少ない光量（ $\sim 10^2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）で飽和する低光量反応がさまざまな形態形成反応を引き起こしている。例えば、植物は、赤色光と遠赤色光の比率（R/FR比）を感受し、茎を伸ばすなどの応答を示してより良い光環境を得ようとする。これを避陰反応（SAS: Shade avoidance syndrome）という。シロイヌナズナでは、フィトクロムを介して、避陰反応が起こると、葉の展開を抑制して茎が伸長し、花成が促進される（Franklin and Whitelam, 2005; Wollenberg et al., 2008）。シロイヌナズナではR/FR受容体である5種類のフィトクロムのうちフィトクロムBを介して、遠赤色光を受光することにより避陰反応を誘導する（Hendricks et al., 1962; Bulter et al., 1964）。避陰反応は暗期開始時期のフィトクロム不活性型（ P_r ）と活性型（ P_{fr} ）の平衡状態（PSS: Phytochrome phytostationary state）が重要とされ、フィトクロムが赤色光を感受すると P_r から P_{fr} に変化し、遠赤色光を感受すると P_{fr} から P_r に変化し、さまざまな形態形成に影響を及ぼす。また、 P_r は暗所では長時間安定であるが、 P_{fr} は暗所において P_r へ戻ったり（暗反転）、徐々に光可逆性を失っていったりする（暗失活）（Fig. 1.2）。

日射のR/FR比は、天候や季節によって多少変動するものの、1.0~1.2の範囲である（石井ら, 2004）が、植物群落内のR/FR比は0.1~0.7である（Smith, 1982）。よって、避陰反応を誘導するためには、R/FR比を1.0より低くする必要がある。他方、閉鎖型苗生産システムで用いられている白色蛍光灯のR/FR比は約9.0で、一次育苗期に白色蛍光灯で避陰反応を誘導することはない。

前述したとおり、避陰反応には茎伸長が促進するという高品質苗生産におけるデメリットがあるが、花成を促進するメリットも知られている。トマトでは栄養成長と生殖成長が同時に行われているため、第1花房の開花期に第2花房において花芽分化・発達が進行している。よって、一次育苗では、花成を促進するために第1花房における花芽分化期のみ避陰反応を誘導させるような光環境制御を行い、第1花房における花芽発達期以降では徒長を防止するために逆に避陰反応を誘導させないための光環境制御を行うことで、高品質な苗生産が可能になると考えられる。

他方、二次育苗では、自然光を利用したハウスで行うため、季節や天候に応じてハウス内全体を均一な環境に制御しようとする、空調や補光装置のランニングコストが高くなりやすい。近年、この問題に対して、特定の場所（例えば、群落内部）や部位（例えば、成長点付近）のみの気温や

光などの環境を制御することで少ないエネルギーで効率的な栽培を目指した局所環境制御に関する研究が盛んに行われている。局所環境制御を二次育苗に導入することができれば、低コストで高効率な苗生産が可能になると考えられる。

1.2 既往研究

1.2.1 トマト苗の光応答メカニズム

トマトの光応答に関する知見では、矮性品種の‘Micro-Tom’において赤色光下で栄養成長および生殖成長が促進(平井ら,2005)や栽培品種の‘ハウス桃太郎’において赤色光下で第1花房着生葉位が低下(高木,2005)、青色光受容体であるクリプトクロムの遺伝子を過剰発現させたトマトCry2-OX株において野生株より茎伸長および開花が抑制される(Giliberto et al.,2005)等の報告があり、光環境はトマトの生育を制御できることが示唆される。しかし、トマトの光応答メカニズムの知見は十分に蓄積されていないため、育苗に最適な光環境条件(光質、光強度および明期)は未解明である。

近年、閉鎖型苗生産システムの光源として、これまで用いられてきた白色蛍光灯に代わって消費電力の少ないLEDを用いた研究が始まっている。LEDは特定の波長の単色光を照射できるため、光応答を利用して植物の形態を調節しやすい。

このような背景を踏まえて、LEDを用いた研究として、農林水産省委託研究の「生物の光応答メカニズムの解明と省エネルギー、コスト削減技術の開発」の大課題「野菜等の光応答メカニズムの解明と高度利用技術の開発」が平成21年度から平成25年度の5ヵ年計画として行われた。この研究課題の目標のひとつは、トマト苗の光形態形成、具体的には花房着生葉位および茎・葉に関する光質応答を遺伝子発現解析およびホルモン分析により解析を行い、形態形成と光質との関係を解明することである。

これまでの研究成果を簡単に述べると、石丸(2010)はUV-AまたはUV-Bを照射することで、トマトの生体防御機構関連の遺伝子発現量の増加を発見し、紫外線によってトマト苗の病害抵抗が向上されることを示した。弓削田(2011)は、青色と赤色のLEDを用いてトマト苗を育成する場合、青色LED(ピーク波長;405 nm,450 nm,470 nm)または赤色LED(ピーク波長;640 nm,660 nm,680 nm)の単独照射では白色蛍光灯を用いる場合と比べてトマト苗の茎・葉の生育が悪く、青色LEDと赤色LEDを組み合わせる必要があると報告した。さらに、光強度 $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の場合、葉の巻き込みや徒長を抑制するためには青色光を $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上照射すべきであると提言した。また、青色光と赤色光による茎伸長の調節は茎中の内生ジベレリンの増減が関与しており、いくつかのジベレリン酸化酵素遺伝子の発現に変化が確認された(Matsuo et al.,2011)。博士前期課程の研究では、赤色光 $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上とした青赤色LEDの混合光下では、青色光量が茎伸長を抑制する因子であると示唆した。さらに、赤色光の割合が高くなるほど、光合成速度が増大し、第1花房着生葉位が低下すると考えられた(南谷,2012)。このように、光質がトマト苗の病害抵抗、茎伸長および第1花房着生葉位に及ぼす影響が明らかになりつつあるが、トマトの生産現場において一次育

苗や二次育苗への光応答を利用した光環境制御の実用化は進んでいない。

1.2.2 局所環境制御法

局所環境制御には、局所冷房、局所暖房、局所補光などがある。局所冷房では、コショウランの花茎の発生および開花の促進（小川ら,2007）、トマトのポット育苗における根域冷房による成長促進および増収（木下ら,2012）、など報告されている。局所暖房では、株元または地中加温によるナスの成長促進（森山ら,2012）、クラウン部の加温によるイチゴの成長促進および増収（佐藤ら,2008）、花房および茎頂部近傍の加温によるトマトの花粉発芽率および着果率の向上（森山ら,1999）、などが報告されている。特にトマトでは、成長点付近の加温により、開花に要する日数が短縮されたという報告がある（河崎ら,2010）。局所補光では、トマト個葉への補光により光合成促進および増収の可能性が報告されている（早雲,2011; 伊與木,2012）。しかし、局所環境制御を二次育苗に導入した例は少なく、その実現には課題が残っている。

Suzuki et al. (2011) は、本研究と同様の二次育苗試験を行っており、赤色 LED の光強度が $22 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ または青色 LED の光強度が $33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で 6 時から 8 時と 16 時から 22 時とした明期延長の照射方法で補光した。その結果、草丈は青色 LED 補光で対照区より大となり、赤色 LED 補光で対照区より小となった。Suzuki et al. は R/FR 比の変化がトマト苗の茎伸長を抑制すると考察した。しかし、LED 補光区の乾物重は対照区より低くなっており、徒長の指標である Stem/DW（大であるほど徒長していることを示す）を算出すると対照区が最も低い値だった。この結果から、Suzuki et al. の補光方法において、ハウスに入射した日射が LED 器具に遮られ、群落の受光量が減少し、トマト苗の成長速度が低下し、茎伸長が抑制されたと考えられる。よって、二次育苗における局所補光では、LED 光源の設置による日射の減少を考慮する必要がある。

Hernandez and Kubota (2012) は、トマトのハウス育苗で青赤色 LED 補光の光強度を $55.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 一定で 18h 照射とし、LED の青色光割合を 0-16% に変化させた。さらに、遮光カーテンを用いて、日積算光量（DLI: Daily light integral）を $8.9 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ と $19.4 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ に調節した。補光によって、DLI は $3.6 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 増加したが、トマトの胚軸長は短くならなかった。一方、遮光しない高 DLI 区の胚軸長は遮光した低 DLI 区より短くなった。補光による青色光の DLI（ DLI_{blue} ）の差は最大で $0.6 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ だったのに対し、遮光による DLI_{blue} の差は $2.4 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ だった。よって、二次育苗における局所補光では、茎伸長を抑制する青色光はある程度必要であることが示唆される。

夏季の強光・高温・多湿下では、二次育苗時、遮光は茎伸長を促進するものの、収量の増加はみられず、冷房は第 1 果房の増収効果があると報告されている（鈴木ら,2009）。そのため、夏季は冷房の重要性が高いと考えられる。

トマトのハウス育苗において、根域冷却（ 15°C ）を行った試験で、昼間（7:00~19:00）の冷却によって無処理よりも地上部の生育が促進される一方、夜間（19:00~7:00）の冷却は地上部の生育を抑制するとの報告がある（木下ら,2012）。さらに、木下ら（2012）は育苗期の昼間の冷却によって果実収量が増加すると報告している。

夏季昼間の冷房方法として、ヒートポンプ冷房方式、蒸発冷却法（細霧冷房方式とパッドアンド

ファン方式)、地下水利用による冷房方式、などが挙げられる(古在ら,2006)。ヒートポンプによる冷房は、電力消費が莫大であるが、植物体付近だけを冷房する局所冷房を行うことでランニングコストを軽減できる可能性がある。また、電気ヒートポンプでハウス全体の冷房を行う場合、ハウスの密閉が必要になるのに対して、植物体付近の局所冷房では、ハウスを密閉せずに換気も行うことができる。以上より、夏季の二次育苗では、電気ヒートポンプによる昼間の局所冷房の検討を行う意義があるといえる。

1.3 目的

本研究においては、一次育苗は播種後 20~25 日まで閉鎖型苗生産システムで行われ、第 1 花房の発育ステージは花芽分化期と花芽発達期に分けられる。二次育苗は播種後 35~45 日までハウスで行われ、第 1 花房の発育ステージは花芽発達期と開花期に分けられる。よって、それぞれの生育ステージに応じた環境制御が求められる。

一次育苗では、徒長の防止と第 1 花房着生葉位の低下が重要である。葉と花芽が同時に分化するトマトでは、花芽分化期に早期に栄養成長から生殖成長へ転換して花芽形成が開始され、形成された花芽原基が発達・分化する花芽発達期に光合成により生産された同化産物の分配が葉原基より花芽原基の方で大となることにより、第 1 花房着生葉位が低下する。そこで本研究の一次育苗では、LED を用いて、花芽分化期に花成を促進させること、花芽発達期に徒長抑制しながら第 1 花房着生葉位を低下させることを目的とした(第 2 章)。

二次育苗では、特定の場所(例えば、群落内部)や部位(例えば、成長点付近)のみの気温や光などの環境を制御することで、少ないエネルギーで効率的な栽培を目指した局所環境制御を行う。そこで本研究では、冬季と夏季における二次育苗において、徒長の防止と苗の成長を促進することを目的とし、季節に応じた局所環境制御法を開発し、定植後の収量が最大となるための二次育苗の生育制御技術を確立することとした。さらに、光環境制御に掛かるコストを試算し、本技術を導入する場合の収益性を試算することで実用化の可能性を考察した(第 3 章)。

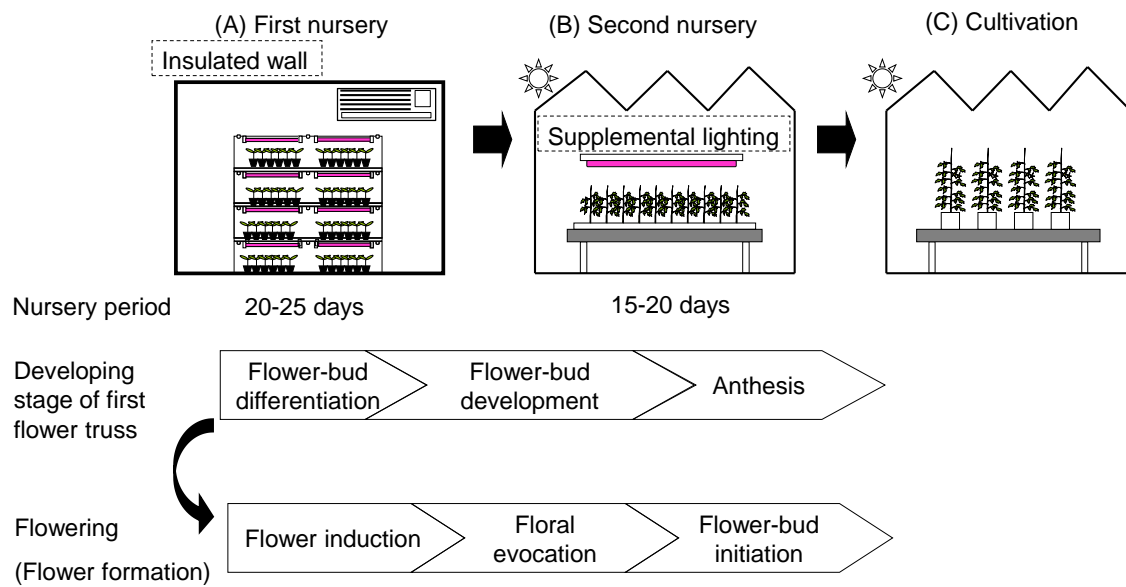


Fig. 1.1 Flow chart of the nursery method of the combined use of a closed seedling production system as the first nursery (A) and the use of a greenhouse as the second nursery (B). Cultivation (C) indicates a tomato cultivation method with a low node-order pinching system and the developing stage of the first flower truss.

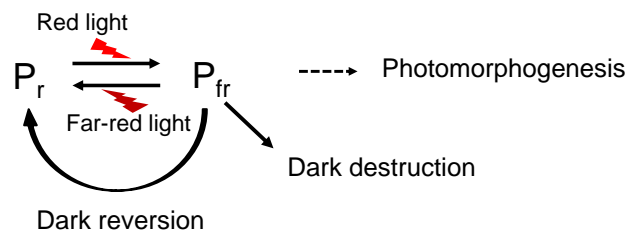


Fig. 1.2 The changing of P_r and P_{fr} forms of phytochrome by red light and far-red light.

第2章 一次育苗における光環境制御が生育に及ぼす影響

2.1 緒言

トマトの光応答メカニズムの知見はあまり蓄積されていないため、LEDを用いて一次育苗する場合、LED光源の最適な波長組成や光強度の条件は未解明である。

既往の研究では、青色光は茎伸長および花成を抑制することが示唆された (Matsuo et al., 2012; 南谷, 2012)。しかし、青色光と赤色光の混合光下における青色光が茎伸長に対して量的に作用するかは明らかではない。また、青色LEDと赤色LED以外の波長域のLEDや複合光が茎伸長および花成に及ぼす影響については未解明である。特に、遠赤色光 (FR: 700-800 nm) は避陰反応を誘導することが知られている。一般的に、避陰反応が誘導されると、茎伸長および花成が促進されることが知られている。

トマトにおいて、EOD-FR (明期終了時の短期間の遠赤色光照射) による茎伸長促進効果、すなわち避陰反応の誘導が認められている (López-Juez et al., 1990; Tuinen et al., 1995; Chia and Kubota, 2010)。EOD-FRは暗期開始時期のPSSを低下させることができるため、一次育苗の人工光下においても容易に避陰反応を誘導できる。しかし、既往の研究では、花成を促進するかどうか明らかとなっていない。よって、明期終了時だけ避陰反応を誘導するような光環境に制御することにより、花成を促進できるかを検証する必要がある。

以上より、本研究では、明期16時間および明期終了時の短時間の光環境制御により、一次育苗のトマトにおける茎伸長の抑制あるいは花成を促進することを目的とした。本章の2-2節では、明期16時間における光質および光強度がトマトの生育に及ぼす影響を調査し、徒長を防止するための最適な光環境を探索した。そこで、【試験2-1】および【試験2-2】では、青赤色LEDを用いて、青色光がトマトの茎伸長に量的な作用を及ぼすのかを探索した。また、【試験2-3】および【試験2-4】では、6波長制御型LEDを用いて、青色LEDと赤色LED以外の波長域のLED光がトマトの生育に及ぼす影響を調査した。2-3節では、EOD処理でトマトの花成を促進させ、第1花房着生葉位を低くすることができるのかを探索した。【試験2-5】では、青色LED、赤色LEDおよび遠赤色LEDを用いて、EOD光照射が花成および茎伸長に及ぼす影響を調査した。【試験2-6】では、明期16時間の光環境条件とEOD処理条件を変えることで、明期中あるいは明期終了時の短時間の光環境が茎伸長にどの程度影響を及ぼすのかを調査した。第2章における試験区内容については下記の通りである。

	試験名	明期中	明期終了時	光源	節
【試験2-1】	青赤色LEDの赤色光量がトマトの生育に及ぼす影響	制御あり	—	青赤色LED	2.2節
【試験2-2】	青赤色LEDの積算青色光量がトマトの生育に及ぼす影響	制御あり	—	青赤色LED	
【試験2-3】	6波長制御型LEDの遠赤色光量がトマトの生育に及ぼす影響	制御あり	—	6波長制御型LED	
【試験2-4】	6波長制御型LEDの光強度がトマトの生育に及ぼす影響	制御あり	—	6波長制御型LED	
【試験2-5】	明期終了時の短時間の異なるピーク波長のLED光照射が茎伸長に及ぼす影響	—	制御あり	青色LED、赤色LED、遠赤色LED	2.3節
【試験2-6】	明期中16時間における異なるB/R比および明期終了時の短時間の異なるピーク波長のLED光照射が茎伸長に及ぼす影響	制御あり	制御あり	青赤色LED、青色LED、赤色LED、遠赤色LED	

2.1.1 閉鎖型苗生産システム

本研究にて使用した閉鎖型苗生産システムは、千葉大学大学院園芸学研究科松戸キャンパス内（北緯 35 度 46 分，東経 139 度 54 分）に建設された閉鎖型植物生産研究施設（Fig. 2.1）とした。系内には、基本モジュールという 7 段式の栽培棚が 1 モジュールまたは 2 モジュール設置され、栽培環境の高度な制御が可能となっている（Fig. 2.2）。2011 年からは 4 段式の棚のモジュールにリニューアルされた（Fig. 2.3）。改修後のモジュールの特徴としては、蛍光灯以外の光源も容易に取付けが可能になっており、各棚の手前に設置されたハンドルを回すことで、光源と栽培棚面との距離を自由に調節できる。また、栽培棚は棚を支えている留め具を取り外すことにより、高さを調節することが可能になっており、生育の進んだ大きな植物体を栽培できる。

2.1.2 Light Emitting Diodes (LEDs)

LED は、電流を流すと発光する半導体であり、開発当初は赤色のみであったが、1990 年代以降、緑色 LED、高輝度の青色 LED および白色 LED が開発・商品化され、液晶バックライト、屋内外の照明や道路の交通信号などその用途はますます広がっている。LED がこのように多くの製品に採用されてきた理由として、以下の特徴が挙げられる。

- 1) 寿命が長い
- 2) 発光部が他の光源に比べて小さい
- 3) 電気-光変換効率が高い
- 4) 発光部からの放射熱が少ないため、近接照射で高い光強度が得られる
- 5) 波長幅の狭い単色光が得られる
- 6) パルス照射ができる
- 7) 破損時の危険が少ない

このように LED は、従来の光源にはない特徴を持っている。現在、一般照明用の LED における低コスト化が進んでおり、農業分野においても、植物工場、組織培養照明など、多くの用途への実用化が期待される光源である。

2.2 光質および光強度が生育に及ぼす影響

2.2.1 材料および方法

2.2.1.1 供試植物

供試植物はトマト品種‘麗容’ (*Solanum lycopersicum* L., ‘Reiyo’, (株) サカタのタネ) とした。72 穴セルトレイを 4 等分に切断し、セル成型苗養土 (ナプラ養土 S タイプ, ヤンマー農機 (株)) を充填し 1 セルに 1 粒ずつ播種した。

2.2.1.2 共通の環境条件

播種後日数 (DAS: Days after sowing) が 3 DAS までインキュベータ (MIR-553, パナソニック (株)) 内で Table 2.1 の条件の暗黒下で発芽処理をし、出芽した植物を前述の閉鎖型苗生産システムに移した。インキュベータ内の CO₂ 濃度は実験開始時で約 850 μmol mol⁻¹、相対湿度は約 50% であった。試験中の環境条件は Table 2.2 とした。3 DAS から 8 DAS までは白色蛍光灯 (FHF32-EX-N-H, パナソニック電工 (株)) 下で子葉を展開させた。

かん水は 3 DAS から子葉が展開した 7 DAS までは水道水とし、8 DAS から試験終了時まで毎日液肥 (大塚ハウス肥料 1/2 A 処方, EC 1.2 dS m⁻¹, pH 6.0) を底面給水法で与えた。かん水量は、播種後 2 週間は 0.5 L/トレイとし、その後 1 週間は 1 L/トレイを与え、それから栽培終了時までには 2 L/トレイとした。

2.2.1.3 測定項目および算定項目

2.2.1.3.1 茎長、胚軸長および節間長

茎長は培土面から成長点付近までの長さ、胚軸長は培土面から子葉基部までの長さ、第 1 節間長は子葉基部から第 1 本葉の葉腋までの長さ、第 2 節間長は第 1 本葉の葉腋から第 2 本葉の葉腋までの長さとして定義した (Fig. 2.4)。測定にはデジタルノギスを用いた。

2.2.1.3.2 部位別生体重、乾物重および乾物率

部位別生体重および部位別乾物重は電子天秤 (AW320, (株) 島津製作所) で測定した。地上部生体重、地上部乾物重、地下部生体重、地下部乾物重、乾物率、茎生体重、茎乾物重、葉生体重および葉乾物重に分けて調査した。葉は葉身と葉柄を合わせたものとし、茎は地上部のシュートから葉を取り除いた残り部位とした。

生体重測定後、個体の各部位の葉および茎に分けて紙袋に入れ、温度 80°C の恒温器内 (MOV-

212F (U) , パナソニック (株)) で 72 h 以上乾燥させた後、乾物重を測定した。

乾物率は以下の式を用いて算定した。

$$\text{乾物率 (\%)} = (\text{地上部乾物重} / \text{地上部生体重}) \times 100$$

2.2.1.3.3 本葉数および SPAD 値

本葉数は、葉身長が 1 cm 以上の本葉数と定義し、目視により測定した。

SPAD 値は、葉緑素計 (SPAD-502Plus, コニカミノルタ (株)) を用いて、下から数えて第 1 葉と第 2 葉を 3 回ずつ測定した平均値をクロロフィル濃度の指標として算定した。

2.2.1.3.4 葉面積および比葉重

葉面積の測定は、最大葉とその他の葉に分けてアルバム台紙に広げた葉をスキャナで取り込み、葉面積測定ソフトウェア (LIA32 for Windows95 ver. 0.373, 山本) にて測定した。

比葉重は以下の式を用いて算定した。

$$\text{比葉重 (mgDW cm}^{-2}\text{)} = (\text{葉乾物重} / \text{葉面積})$$

2.2.1.3.5 Stem/DW

Stem/DW は、莖長を地上部乾物重の値で除すことにより徒長の指標 (田幡, 2006) として算定した。閉鎖型苗生産システムにおいて、トマト苗 '麗容' を白色蛍光灯下で本研究と同一条件で栽培した場合、Stem/DW は 0.23–0.45 mm mg⁻¹ を示した (弓削田, 2011)。本研究では、各試験の試験区間で比較した。

2.2.1.3.6 第 1 花房着生葉位

第 1 花房着生葉位は栽培終了時に測定した。第 1 花房着生葉位とは第 1 花房分化前に分化した最終葉の葉位で、第 1 花房の分化前に分化した本葉数によって決まる (山川, 1982)。本研究では、第 1 花房が分化する時期に成長点付近の花芽をデジタルマイクロスコープ (VH-6300, キーエンス (株)) を用いて観察し、20 DAS 以降であれば花芽分化していることを確認した (Fig. 2.5)。そのため、光質処理後の 20 DAS から一律に白色蛍光灯下に移動し、第 1 花房着生葉位を目視で測定した。

2.2.1.3.7 光環境の測定および算定方法

光合成有効光量子束 (PPF: Photosynthetic photon flux) の測定は、光量子センサ (LI-190, LI-COR Inc.) をライトメータ (LI-250, LI-COR Inc.) に接続し、光量子センサからの出力電圧が PPF へ変換

された数値を読み取った。各試験区のトレイ面上 12 点で計測し、トレイ面上で目標の平均 PPF を設定した。各光源下では栽培面上の光強度のバラツキが大きいため、光源の手前側に反射板を設置すると共に、毎日トレイを時計回りに 90°回転させ、2 日おきに左右のトレイを入れ替えた。

各光源の波長のエネルギー分布 (300-800 nm) は、分光放射計 (USR-45DA, ウシオ電機 (株)) を用いて 1 nm 間隔で測定し、その値から分光光量子束を求めた。

光質変化を表す指標として、青色光と赤色光の割合 (B/R 比)、赤色光と遠赤色光の割合 (R/FR 比) に加えて、フィトクロム光平衡状態 (PSS: Phytochrome photostationary state) を用いた。これらは分光光量子束 (N_{λ}) と Fig. 2.6 に示すフィトクロム光変換断面積 (photochemical cross section: $m^2 \text{ mol}^{-1}$) に基づいて Sager et al. (1988) の式より求めた (式 1)。PSS は全フィトクロム量に占める不活性型フィトクロム量 (P_r) の割合を示し、PSS の値が小さいほど、活性型フィトクロム量 (P_{fr}) が多く、避陰反応が誘導される。

$$PSS = \left(\sum_{\lambda=300}^{800} N_{\lambda} \sigma_{r\lambda} \right) \left(\sum_{\lambda=300}^{800} N_{\lambda} \sigma_{r\lambda} + \sum_{\lambda=300}^{800} N_{\lambda} \sigma_{fr\lambda} \right)^{-1} \quad (\text{式1})$$

σ_r : the photochemical cross section of P_r ($m^2 \text{ mol}^{-1}$)

σ_{fr} : the photochemical cross section of P_{fr} ($m^2 \text{ mol}^{-1}$)

2.2.1.3.8 統計処理

各測定および算定項目を Tukey-Kramer 法を用いて 5% レベルで検定した。検定には統計型表計算ソフト (Excel 統計 ver.4.0, (株) エスミ) を用いた。

2.2.1.4 【試験 2-1】青赤色 LED の赤色光量がトマトの生育に及ぼす影響

光源は、白色蛍光灯 (白色 FL: White fluorescent lamp) と、青色光と赤色光をそれぞれ調光できるウシオライティング (株) 社製の LED パネル (特注, 35 cm×104 cm, ピーク波長; 450 nm, 660 nm, 青赤色 LED) の 3 台用いた (Fig. 2.7)。試験区は青色 (B) と赤色 (R) のそれぞれの PPF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) を表した FL150 (B40R45)、B75R50、B75R75 および B75R100 の PPF が異なる試験区を設け、LED 試験区の B/R 比はそれぞれ 1.5, 1.0 および 0.75 とした (Table 2.3)。今回使用した光源下では栽培面上の光強度のバラツキが大きいため、光源の手前側および左右に反射板を設置すると共に、毎日トレイを時計回りに 90°回転させ、2 日おきに左右のトレイを入れ替えた。試験は 8 DAS から 15 DAS まで異なる光質処理を施した。

2.2.1.5 【試験 2-2】青赤色 LED の積算青色光量がトマトの生育に及ぼす影響

光源は、【試験 2-1】で用いた青赤色 LED を 2 台用いた (Table 2.4)。PPF は $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ になるように設定した。試験区は、光源の B/R 比を 0.1 (B15R135) と 1.0 (B75R75) とし、低 B/R 比→

高 B/R 比または高 B/R 比→低 B/R 比にシフトさせ、それぞれの光条件下に置く時間 (122h、116h、100h、74h、48h、22h、6h および 0h) を変えることで、積算青色光量を調節した 8 水準の試験区を設定した。今回使用した光源下では栽培面上の光強度のバラツキが大きいため、光源の手前側および左右に反射板を設置すると共に、毎日トレイを時計回りに 90°回転させ、2 日おきに左右のトレイを入れ替えた。試験は 8 DAS から 20 DAS まで異なる光質処理を施した。

2.2.1.6 【試験 2-3】 6 波長制御型 LED の遠赤色光量がトマトの生育に及ぼす影響

光源は、ピーク波長が 405 nm、465 nm、530 nm、595 nm、660 nm および 730 nm の 6 波長制御型 LED パネル (40 cm×70 cm, Fujiwara and Yano (2013)) を用いた。本試験は、二次育苗時の群落内光環境を模擬するために、実際の二次育苗時の群落内光環境を参考にした。ハウスでの二次育苗時の群落内光環境測定では、栽植密度 50 株/m² とした 35 DAS のトマト苗群 (葉面積指数 LAI=4) を対象とし、2013 年 9 月 19 日正午の快晴日に、栽培ベンチから高さ 20 cm の群落内の光環境を分光放射計で測定した。その結果を基に人工気象室で、PPF を 150 μmol m⁻² s⁻¹ となるように調節した (Table 2.6 and Fig. 2.8)。試験区は、遠赤色光 (FR) を 4 水準に調節し、FR を全てカットした FR 0 μmol m⁻² s⁻¹ (FR0 区)、群落上の R/FR 比と同程度とした FR 50 μmol m⁻² s⁻¹ (FR50 区)、群落内の R/FR 比を想定した FR 100 μmol m⁻² s⁻¹ (FR100 区) および FR 150 μmol m⁻² s⁻¹ (FR150 区) とした。試験は播種後 8 DAS から 15 DAS まで異なる光質処理を施した。

2.2.1.7 【試験 2-4】 6 波長制御型 LED の光強度がトマトの生育に及ぼす影響

光源は、【試験 2-3】で用いた 6 波長制御型 LED を用いた。試験区は、栽培面上における各 LED の分光光量子束を 50 μmol m⁻² s⁻¹ に設定し、全 LED を点灯した対照区 (ALL 区) と、それぞれの LED を点灯しない処理区 (-470 nm 区、-660 nm 区および -730 nm 区) とした (Table 2.6 and Fig. 2.9)。試験は 8 DAS から 20 DAS まで異なる光質処理を施した。試験区の概要は以下に記す。

試験区	6波長制御型LED						Total photon flux (μmol m ⁻² s ⁻¹)
	405nm	465nm	530nm	595nm	660nm	730nm	
ALL	ON	ON	ON	ON	ON	ON	300
-465nm	ON	—	ON	ON	ON	ON	250
-660nm	ON	ON	ON	ON	—	ON	250
-730nm	ON	ON	ON	ON	ON	—	250

2.2.2 結果および考察

2.2.2.1 【試験 2-1】 青赤色 LED の赤色光量がトマトの生育に及ぼす影響

青色光量が一定の場合、莖長、胚軸長および節間長は B75R50 区、B75R75 区および B75R100 区で有意な差がみられなかった (Table 2.7)。よって、赤色光量は莖伸長に影響を及ぼさないと考えられた。一方、莖長および節間長は B75R100 区 > B75R75 区 > B75R50 区の順となる傾向がみられたが、これは光強度が高いことによる光合成に基づく成長促進の結果であると考えられた。このことは、乾物重、乾物率および徒長の指標である Stem/DW が B75R50 区に比べて B75R100 区で有意に大きくなったことから裏付けられた。

トマトの胚軸長は暗黒、遠赤色光、赤色光、青色光の順に低下することが知られている (Tuinen et al., 1995)。莖伸長は、光受容体であるフィトクロムを介して、赤色光または遠赤色光を受容することにより可逆的に反応することが知られている。つまり、青色光も赤色光もトマトの莖伸長を抑制する効果があるが、赤色光の莖伸長抑制効果は青色光に比べると小さいことを示している。また、青色光と赤色光による莖伸長の調節は莖中の内生ジベレリンの増減が関与しており、いくつかのジベレリン酸化酵素遺伝子の発現に依存し、莖伸長を促進する活性型ジベレリン GA₄ 濃度は赤色光下で青色光下より高いと報告している (Mastuo et al., 2011)。以上より、赤色光による莖伸長抑制は青色光より弱い作用であり、青赤色 LED の混合光の場合、赤色光による莖伸長抑制は無視できると考えられた。

2.2.2.2 【試験 2-2】 青赤色 LED の積算青色光量がトマトの生育に及ぼす影響

莖長は、B15R135 あるいは B75R75 の LED 光下に暴露する時間に関係なく、積算青色光量が大きくなるほど短く、積算青色光量と莖伸長との間に強い負の相関 ($r=-0.89, P=0.003$) がみられた (Table 2.8 and Fig. 2.10)。よって、【試験 2-1】の結果と合わせると、青赤色 LED を用いた場合、青色光の絶対量がトマト苗の莖伸長を制御していることが示された。

地上部の乾物重は、B15R135 の照射時間が長い試験区で大となる傾向を示した (Table 2.8)。トマトにおける光合成の相対量子収率は 450 nm の光波長で 0.72、650 nm の光波長で 0.92 である (McCree, 1972)。よって、赤色光は青色光より吸収光当たりの光合成速度 (光合成効率) が高い光波長である。博士前期課程の研究 (南谷, 2012) では、B15R135 または B75R75 の光条件でトマトの単位培地面積当たりの純光合成速度を測定し、光合成効率 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) を算出した場合、B15R135 で 0.021、B75R75 で 0.018 と算出された。この光合成効率の値を用いて、それぞれの B/R 比の照射時間を乗じて相対光合成量 (B15R135 の照射時間が 122 h の光合成量の結果を 1 とする) を算出した結果、相対光合成量と相対乾物重 (B15R135 の照射時間が 122 h の乾物重の結果を 1 とする) との間に正の相関 ($r=0.70, P=0.05$) がみられた (Fig. 2.11)。よって、B/R 比は形態形成に影響を及ぼすものの、トマト苗の光合成能力は変化させないことが示唆された。本研究における光合成能力は、同じ光環境下においての最大光合成速度で評価したものである。

第1花房着生葉位は、乾物重が87 mgの試験区で9.4、乾物重が66 mgの試験区で10.6となり、これら試験区間に有意差が認められた (Table 2.8)。よって、15 DASにおけるトマト苗の地上部乾物重が20 mg以上大きいと、第1花房着生葉位は1葉位低くなることが明らかとなった。光合成に適した光環境下では、苗の乾物重が大きく、第1花房着生葉位が低くなった (高木, 2005; 南谷, 2012)。この結果は、同化産物の必要量による生長相転換仮説 (Sachs and Hackett, 1969) により説明できる。この仮説によると、花芽分化が開始するには、成長点が感受性を持つ時期に、成長点に一定の同化産物が蓄積されている必要がある。そのため、同化産物の生産が多くなると第1花房の分化までの時間が短くなり、第1花房着生葉位が低くなる。乾物重と第1花房着生葉位には有意な負の相関 ($r=-0.77, P=0.03$) がみられた (Fig. 2.12)。また、第1花房着生葉位の変動係数は全試験区において5~8%の範囲にあり、大きな差はみられなかった (Table 2.8)。

以上より、青赤色 LED の混合光下では、茎伸長は青色光の積算量によって決定され、第1花房着生葉位は乾物重の増加によって低位になることが明らかとなった。よって、明期 16 時間における光環境は、日積算青色光量を高くするように PPF を高くすれば、茎伸長を抑制しながら、第1花房着生葉位を低位にすることが可能となると考えられる。ただし、第1花房着生葉位の変化は小さいため、第1花房着生葉位を低位にするためには多くの光合成量が必要であることが示唆された。

2.2.2.3 【試験 2-3】 6 波長制御型 LED の遠赤色光量がトマトの生育に及ぼす影響

まず、自然光下の二次育苗における群落内光環境を人工光下の一次育苗に応用するために、ハウス育苗を行い、群落内光環境を測定した。その結果、ハウス育苗時のトマト群落は相互遮蔽が多く、栽培ベンチから高さ 20 cm における群落内の R/FR 比は 0.6 以下となった (Table 2.5)。遠赤色光は赤色光より葉の透過率が高いため、群落内の R/FR 比が群落上より低下し、PSS が低下したと考えられた。

人工気象室で二次育苗時 (栽植密度 50 株/m²) の群落内光環境を再現し、遠赤色光量を調節した条件下で一次育苗を行った結果、茎長、胚軸長および節間長は、全ての FR 照射区 (FR50 区、FR100 区および FR150 区) で FR0 区より有意に大となり (Fig. 2.13)、高 R/FR 比の FR150 区のトマト苗は低 R/FR 比の FR0 区と比べて著しく徒長した (Fig. 2.14)。一方、第1花房着生葉位には試験区間で差がみられなかった (データ略)。

インゲンマメにおいて、PSS が 0.77 付近を境として低くなるほど避陰反応による茎伸長の増加率が大きくなった (羽生ら, 1996)。本試験における全ての FR 照射区の PSS は 0.53-0.72 だった (Table 2.5)。よって、明期 (16h) における PSS は 0.72 以下で避陰反応を誘導することが示唆された。以上より、二次育苗で規定される低 R/FR 比 (0.4-1.1) 下では避陰反応を誘導するため、一次育苗でわざわざ遠赤色光を付加する必要はないことが示唆された。

他方、二次育苗のハウスにおいても、省スペースで効率的な環境制御を行うために、高い栽植密度で多くの苗を育苗する必要がある。そのような条件下のトマト育苗では、苗が徒長し、生育の均一性も悪くなる (田中・島地, 1992)。また、徒長した苗は折れやすく、定植作業に支障をきたし、定植後の草丈や花房着生葉位にも影響する (鈴木ら, 2011)。本試験結果から、自然光と同程度の R/FR

比 1.1 (FR50 区) 以下では、自然日長下においても避陰反応は誘導され、トマトは徒長することが推測される。よって、自然光下の高い栽植密度で行う二次育苗では、徒長を防止するために、赤色光を補光し、R/FR 比を 1.1 より高めて、トマト苗の PSS を 0.72 より大きくする必要があると考えられる。

2.2.2.4 【試験 2-4】 6 波長制御型 LED の光強度がトマトの生育に及ぼす影響

葉の生育の指標である SPAD 値および比葉重は、-465 nm 区および-660 nm 区で ALL 区と比べて有意に小さくなった (Table 2.9)。

青赤色 LED の混合光下では、青色光は SPAD 値および比葉重を大きくする効果があることが明らかとなっている (南谷, 2012)。よって、-465 nm 区の葉の生育阻害は青色光の有無による影響と考えられる。他方、葉の成長には成長ホルモンのサイトカイニンが関わっており、低 R/FR 比で避陰反応が誘導され、葉内のサイトカイニンが分解され、葉の成長が抑制される (Carabelli et al., 2007)。共同研究先の野菜茶業研究所の野菜ゲノム研究グループによって、6 波長制御型 LED パネル下に置いたトマトの芽生えをマイクロアレイ解析した結果、サイトカイニン不活性化酵素遺伝子が赤色 LED (-660 nm) の無照射時で多く発現した (松尾ら, 2014)。よって、低 R/FR 比 (0.34) の-660 nm 区では高 R/FR 比 (1.24) の ALL 区に比べて葉の成長が抑制されたと考えられる。さらに、-465 nm 区および-660 nm 区は ALL 区に比べて PPF が $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 低く、低光強度が原因の可能性も考えられる。

茎長および節間長は-465 nm 区 (PSS=0.72、青色光: $41 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) が全試験区の中で最も大となり、-730 nm 区 (PSS=0.83、青色光: $87 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) で最も小さかった (Fig. 2.15)。【試験 2-3】の結果から、PSS が 0.72 以下になる光環境は徒長させると示唆された。本試験区では-730 nm 区以外は全て PSS が 0.72 以下だった。よって、高 R/FR 比 (94.6) の-730 nm 区においては、茎伸長が抑制され、トマト苗は徒長しなかった。一方、-465 nm 区は茎伸長を抑制する青色光無照射区であり、PSS が 0.72 であったことにより、光受容体フィトクロムおよびクリプトクロムの相互作用を受けて、茎伸長が最も促進されたと考えられた。

第 1 花房着生葉位は、試験区間で有意な差はみられなかったが、-660 nm 区で最も高くなる傾向がみられた (Fig. 2.16)。赤色 LED 下ではトマトの花成促進遺伝子 *SFT* の発現が増加した (南谷, 2012)。この結果は、光形態形成による花成の促進を意味する (光質応答による生長相転換仮説)。他方、光合成に適した光環境下では、苗の乾物重が大きく、第 1 花房着生葉位が低くなった (高木, 2005 ; 南谷, 2012)。この結果は、同化産物の必要量による生長相転換仮説 (Sachs and Hackett, 1969) により説明される。本試験では地上部乾物重と第 1 花房着生葉位との負の相関はみられなかった (データ略)。しかし、【試験 2-2】の結果から、第 1 花房着生葉位の違いは、ある程度の乾物重の差異 (閾値) がないとみられないことが示唆されている。よって、本試験の範囲における乾物重の差はその閾値に達していない可能性が示唆される。本試験結果からは、第 1 花房着生葉位に差はみられないため、光の波長組成のみの制御で花成を促進することは難しいと考えられた。

2.3 明期終了時の短時間の光環境が生育に及ぼす影響

2.3.1 材料および方法

供試植物や共通の環境条件、測定方法は2.2節と同様である。

2.3.1.1 【試験 2-5】 明期終了時の短時間の異なるピーク波長の LED 光照射が生育に及ぼす影響

光源は、ピーク波長が 450 nm および 660 nm の LED パネル (2.2 節の【試験 2-1】 および【試験 2-2】と同じ青赤色 LED) およびピーク波長が 730 nm の LED パネル (2.2 節の【試験 2-3】 および【試験 2-4】と同じ 6 波長制御型 LED) を用いた。明期 (16h) 中の光環境条件は PPF 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、B/R 比が 0.1 (青色光: 15 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 赤色光: 135 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) とした。試験区は、EOD 無処理区 (Cont.) と、EOD 処理区としてピーク波長が 450 nm の EOD-B 区、ピーク波長が 660 nm の EOD-R 区およびピーク波長が 730 nm の EOD-FR 区と EOD 無処理区の Cont. の計 4 区を設けた (Fig. 2.17 and Table 2.10)。EOD 光照射の条件は、文献値 (López-Juez et al., 1990; Tuinen et al., 1995; Chia and Kubota, 2010) を参考とし、明期終了時 (明期 16 h 後) の 20 min だけ異なる LED 光 (分光光量子束: 50 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) の光源下に移動した (Fig. 2.18)。試験は 8 DAS から 20 DAS まで異なる光質処理を施した。

2.3.1.2 【試験 2-6】 明期中の B/R 比および明期終了時の短時間の異なるピーク波長の LED 光照射が茎伸長に及ぼす影響

光源は、ピーク波長が 450 nm および 660 nm ウシオライティング (株) 社製 LED (2.2 節の【試験 2-1】 および【試験 2-2】と同じ青赤色 LED) およびピーク波長が 405 nm、470 nm の CCS (株) 社製の青色 LED (ISL-305x302-VVV, ISL-305X302-BBBB)、ピーク波長が 730 nm の LED (2.2 節の【試験 2-3】 および【試験 2-4】と同じ 6 波長制御型 LED) を用いた。明期 (16h) 中の光環境条件は PPF 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、B/R 比が 0.1 (B15R135, 青色光: 15 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 赤色光: 135 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) および 1.0 (B75R75, 青色光 (B) ; 75 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 赤色光 (R) ; 75 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) とした。試験区は、EOD 無処理区 (B15R135 または B75R75)、EOD 処理区としてピーク波長が 405 nm の 405 nm 区、ピーク波長が 470 nm の 470 nm 区、ピーク波長が 660 nm の 660 nm 区およびピーク波長が 730 nm の 730 nm 区の計 8 区を設けた (Fig. 2.19 and Table 2.11)。EOD 光照射の条件は、【試験 2-5】と同様とした。試験は 8 DAS から 14 DAS まで異なる光質処理を施した。

2.3.2 結果および考察

2.3.2.1 【試験 2-5】 明期終了時の短時間の異なるピーク波長の LED 光照射が生育に及ぼす影響

Sager et al. (1988) の光量子分布算定法は、フィトクロムにおける光化学的断面積 (Photochemical cross section) を用い、光量子束から全フィトクロム量に占める活性型フィトクロム量を示すフィトクロム光平衡 (Phytochrome photostationary state, PSS) を算定する方法である。フィトクロムの最大吸収は 750 nm、次いで 450 nm 付近であるため、各処理区の PSS は EOD-FR 区で 0.13、EOD-B 区で 0.56、EOD-R 区で 0.89 となり、ピーク波長 730 nm の遠赤色 LED の PSS は小さかった (Table 10)。

茎長、胚軸長および節間長は、PSS が最も低い EOD-FR 区で最大となり、徒長の指標である Stem/DW は EOD-FR 区で最大となった (Fig. 2.20 and Table 12)。他方、PSS が EOD-FR 区に次いで低い EOD-B 区における茎長、胚軸長および節間長は、Cont. (PSS=0.87) と比べて有意差は認められなかった (Fig. 2.20)。よって、明期の主光源として青色および赤色 LED を用いた場合には、EOD-FR 処理によって茎伸長を促進するが、青色および赤色の LED 光による EOD 処理では茎伸長を促進しないことから、本試験条件の EOD 光照射で避陰反応を誘導させるためには PSS を 0.56 より小さくする必要があると思われた。

第 1 花房着生葉位には試験区間で差がみられなかった (Fig. 2. 21)。よって、EOD 光照射ではトマト苗の花成を促進しないことが示唆された。これまでの報告によると、花卉類では、EOD-FR 処理には開花および茎伸長を促進したもの、茎伸長のみを促進したもの、どちらも促進しなかったものがあり、その応答性が植物種あるいは品種によって異なっていた (住友ら, 2009)。これに対し、本試験のトマト ‘麗容’ では、EOD-FR 処理は茎伸長を促進するものの、花成を促進しないことが示唆された。

博士前期課程の試験結果 (南谷, 2012) では、明期 (16 h) 中の光環境が 本実験の Cont. と同じ B/R 比 0.1 (青色光: $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 赤色光: $135 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 下で、トマト苗の草丈は B/R 比 1.0 (青色光: $75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 赤色光: $75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 下より高く、第 1 花房着生葉位では低かった。すなわち、本試験の Cont. はトマト苗の茎伸長および花成を促進する光環境条件を想定して設定した。仮に、EOD 光照射によって、Cont. に比べて、茎伸長を抑制する、あるいは花成を促進することができれば、主光源の光環境制御に比べて生育制御に対する照明のランニングコストを低減することが可能である。しかし、EOD-FR 処理はトマトの花成を促進しないだけでなく、Cont. より徒長した。よって、トマト育苗における光環境制御では EOD-FR 処理は望ましくないと考えられた。

2.3.2.2 【試験 2-6】 明期中の B/R 比および明期終了時の短時間の異なるピーク波長の LED 光照射が生育に及ぼす影響

各処理区の PSS は 730 nm 区で 0.13、405 nm 区で 0.57、470 nm 区で 0.61、660 nm 区で 0.89 となり、ピーク波長 730 nm の遠赤色 LED の PSS は小さかった (Table 2.11)。

茎長は、明期中の光質 (B15R135 および B75R75) に関係なく、PSS が最も低い 730 nm 区で最も大となった (Fig. 2.22)。よって、本試験条件の EOD-FR 処理 (PSS = 0.13) はフィトクロムを活性型 (P_{fr}) から不活性型 (P_r) に変換し、茎伸長を促進したと考えられた。一方、PSS が 730 nm 区に次いで低い 405 nm 区 (PSS=0.57) および 470 nm 区 (PSS=0.61) における茎長は、EOD 無処理区 (PSS=0.85, 0.87) と比べて有意差は認められなかった (Fig. 2.21)。フィトクロム B が P_{fr} から P_r に変換する場合と P_r から P_{fr} に変換する場合では、超低光量反応と低光量反応で異なることが知られ、フィトクロムにおける光応答には光の量的な依存性がある。しかし、照射時間を 20 min から 30 min に延長し、分光光量子束を $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ から $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に光量子束を高くした EOD 処理結果も同様に、EOD-FR 処理のみが茎伸長を促進し、他の光質による EOD 処理では茎伸長を促進しなかった (データ略)。よって、明期の光源として青色および赤色 LED を用いた場合では、EOD-FR 処理では茎伸長を促進することは可能であるが、EOD-B 処理では茎伸長を促進できず、EOD 処理における避陰反応を示す PSS は 0.56 より小さいことが示唆された。

明期 B15R135 の 730 nm 区における茎伸長速度 (6DAT の茎長と 0DAT の茎長との差を日数で割った 1 日当たりの伸長速度) は $9.2 \pm 0.4 \text{ mm day}^{-1}$ に対し、明期 B75R75 の 730 nm 区における茎伸長速度は $5.8 \pm 0.4 \text{ mm day}^{-1}$ となった。他方、EOD 無処理区に対する茎伸長増加率 (6DAT における EOD 処理区の茎長を EOD 無処理区の茎長で割った茎伸長促進効果を表す指標) は、明期 B15R135 の 730 nm 区が 1.58 ± 0.07 に対し、明期 B75R75 における 730 nm 区は 2.67 ± 0.06 となり、EOD-FR 処理による茎伸長促進効果は、明期の光質条件 B75R75 の方が B15R135 に比べて大であった。今後は、ジベレリン酸化酵素遺伝子の発現解析や茎中の内生ジベレリン濃度などのホルモン分析によってこのメカニズムを解明することができれば、明期あるいは暗期における茎伸長調節機構が明らかになると考えられる。

2.4 結言

本章では、茎伸長および花成における光応答メカニズムを解明するために、青赤色 LED および 6 波長制御型 LED を用いて、明期 16 時間あるいは明期終了時の 20 分間の光環境を制御し、トマトの生育に及ぼす影響を調査した。

博士前期課程の研究結果から、青赤色 LED を用いた場合、青色光の絶対量が茎伸長を決定することが示唆されている。そこで、既存の実験条件にない条件として、青色光 $75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 一定とした場合に赤色光を $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ から $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ まで調節したところ、胚軸の長さは変わらなかった。他方、第 1 節間長は長くなる傾向がみられたが、これは光強度が高くなった時の成長促進によるものだと考えられた。よって、青色光は細胞伸長に関与し、結果的に茎伸長の抑制に働きかけていることが示唆された。

次に、B/R 比を一定とした時の青色光の日積算量を 8 水準で調節したところ、日積算青色光量が大きくなるほど、茎伸長が抑制されることが明らかとなった。

以上のことから、青色光の絶対量は茎伸長を抑制する因子であることが裏付けられた。他方、15 DAS におけるトマト苗の地上部乾物重が 20 mg 以上大きいと、第 1 花房着生葉位は 1 葉位低くなることが明らかとなった。このことから、花芽分化が開始するには、成長点が感受性を持つ時期に、成長点に一定の同化産物が蓄積されると花成が促進されることが考えられた。よって、一次育苗期において、光強度を高くしたり、光合成に適した赤色光の割合を大きくしたり、成長を促進する光環境制御を行うことで、花成を促進できることが示唆された。

また、赤色光/遠赤色光の受容体フィトクロムの応答メカニズムを利用して、花成を促進できるかを調査するために、6 波長制御型の LED を用いて、遠赤色光量の調節あるいは特定の波長の LED 光の有無により R/FR 比を変えたところ、R/FR 比が 1.2 以下で、フィトクロム光平衡値 (PSS) が 0.72 以下となる時、茎伸長が促進され、避陰反応が誘導されることが明らかとなった。しかし、第 1 花房着生葉位は低くならず、花成は促進されなかった。よって、白色蛍光灯や遠赤色光を含まない LED 光源では、R/FR 比は 1.2 より高いため、高い栽植密度であっても、避陰反応を誘導しないことが明らかとなった。また、明期終了時の短時間の遠赤色光照射 (EOD-FR) での試験結果をみても、花成促進効果はみられなかった。以上より、徒長防止を目的としたトマトの一次育苗における閉鎖型苗生産システムでは、遠赤色光を含む人工光源で光環境制御を行うべきではないことが示された。

以上より、博士前期課程の研究と合わせて結論付けると、閉鎖型苗生産システムにおける 16 時間明期の光環境制御では、茎伸長を抑制するための青色光 $75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で花成を促進するための赤色光を加えた青赤色 LED を用いて、PPF $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度が適切である。

Table 2.1 Common environment conditions of germination.

Dark period	24 h d ⁻¹
Air temperature	26 °C
CO ₂ concentration	Not controlled
Relative humidity	Not controlled

Table 2.2 Common environment conditions in a close seedling production system.

Light period	16 h d ⁻¹
Air temperature (Light/dark)	26/19 °C
CO ₂ concentration	1000 μmol mol ⁻¹
Relative humidity	70%

Table 2.3 Treatments in Exp. 2-1.

Treatment	Blue light (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Red light (μmol m ⁻² s ⁻¹)
FL150 (B40R45)	40	45
B75R50	75	50
B75R75	75	75
B75R100	75	100

Table 2.4 The spectral characteristics of the light sources calculated from the spectral energy distributions of each light source in Exp.2-2.

Characteristic	B75R75	B15R135
Wavelength range (nm)	Photon flux (μmol m ⁻² s ⁻¹)	
400-700 (PPF)	150.0	150.0
300-400 (UV)	0.1	0.0
400-500 (B)	75.3	15.0
500-600 (G)	0.8	0.4
600-700 (R)	73.9	134.6
700-800 (FR)	0.7	1.4
B/R	1.02	0.11
R/FR	109.59	98.78
PSS*	0.85	0.87

* Phytochrome photostationary state. PSS derived from phytochrome absorbances and photochemical cross sections of Sager et al. (1988).

Table 2.5 The spectral characteristics of the light sources calculated from the spectral energy distributions of each light source in Exp. 2-3.

Characteristic	Sunlight within the canopy	FR treatments			
		FR0	FR50	FR100	FR150
Wavelength range (nm)		Photon flux ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
400-700 (PPF)	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0
300-400 (UV)	9.4	3.0	3.6	3.6	3.0
400-500 (B)	35.1	35.9	35.9	35.9	35.9
500-600 (G)	59.8	62.0	62.0	62.0	59.8
600-700 (R)	55.1	52.1	53.8	55.7	53.4
700-800 (FR)	134.4	1.2	49.2	98.5	148.8
B/R	0.64	0.69	0.67	0.64	0.67
R/FR	0.41	42.17	1.09	0.57	0.36
PSS*	0.60	0.86	0.72	0.62	0.53

* Phytochrome photostationary state. PSS derived from phytochrome absorbances and photochemical cross sections of Sager et al. (1988).

Table 2.6 The spectral characteristics of light sources calculated from the spectral energy distribution of each light environment in Exp. 2-4.

Characteristic	Treatments			
	ALL	-470 nm	-660 nm	-735 nm
Wavelength range (nm)		Photon flux ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
400-700 (PPF)	233.0	185.0	185.0	230.0
300-400 (UV)	15.2	14.9	14.7	14.9
400-500 (B)	86.5	41.4	86.6	86.8
500-600 (G)	84.5	81.7	82.5	83.0
600-700 (R)	61.8	61.7	15.7	60.2
700-800 (FR)	49.8	49.9	49.8	0.6
B/R	1.40	0.67	5.53	1.44
R/FR	1.24	1.24	0.32	94.63
PSS*	0.72	0.72	0.55	0.83

* Phytochrome photostationary state. PSS derived from phytochrome absorbances and photochemical cross sections of Sager et al. (1988).

Table 2.7 Effects of light quality on the growth and development of tomato seedlings at 15 days after sowing (DAS) in Exp. 2-1.

Treatment	Number of leaves	Stem length (mm)	Hypocotyl length (mm)	Internode length (mm)	Dry weight (mg)	Percent dry weight (%)	Stem/DW (mm mg ⁻¹)
P150 (B40R45)	2.5 a*	53.5 a	36.6 a	12.1 a	56.0 b	9.0 b	0.97 a
B75R50	2.3 a	46.8 b	34.8 a	9.7 a	51.5 b	9.4 b	0.93 a
B75R75	2.5 a	48.4 b	35.2 a	11.1 a	57.3 ab	9.8 ab	0.85 ab
B75R100	3.0 a	49.2 ab	33.3 a	11.7 a	68.5 a	10.3 a	0.72 b

*Different letters indicate significances among the treatments at P<0.05 with Tukey-Kramer's test (n = 6).

Table 2.8 Effects of daily light integral of blue light the growth and development of tomato seedlings at 15 DAS in Exp. 2-2.

B15R135 (h)	B75R75 (h)	DLI _{blue} * (mol m ⁻² d ⁻¹)	Stem length (mm)	Dry weight (mg)	Stem/DW (mm mg ⁻¹)	Node position of first flower truss	
						Mean	Coefficient of variation
122	0	6.6	74.3 a**	87.1 a	0.88	9.4 b	5.6
116	6	7.9	72.0 a	74.9 ab	0.98	9.8 ab	6.8
100	22	11.3	58.2 b	65.1 ab	0.91	9.9 ab	6.1
74	48	17.0	54.2 bc	71.1 ab	0.77	9.7 ab	7.3
48	74	22.6	57.0 bc	67.3 ab	0.87	9.9 ab	5.0
22	100	28.2	50.7 bc	56.9 b	0.90	10.3 ab	7.9
6	116	31.6	50.5 bc	67.0 ab	0.76	9.9 ab	6.8
0	122	32.9	49.0 c	65.6 ab	0.77	10.6 a	7.9

*means daily light integral of blue light . **Different letters indicate significances among the treatments at P<0.05 with Tukey-Kramer's test.(n = 6).

Table 2.9 Effects of light quality on the growth and development of tomato seedlings at 16 DAS in Exp. 2-4.

Treatment	Number of leaves	Leaf area (cm ²)	SPAD value	Dry weight (mg)		Specific leaf weight (gDW m ⁻²)	Percent dry weight (%)	Stem/DW (mm mg ⁻¹)
				Leaf	Stem			
ALL	3.4	33.5	35.8 b ^z	87.1 a	53.8 a	26.0 a	10.1 a	0.77 b
-465nm	3.5	31.1	31.0 c	67.8 a	45.5 ab	21.8 b	8.5 b	1.01 a
-660nm	3.5	35.1	29.1 c	73.8 a	47.6 ab	20.9 b	9.3 ab	0.91 ab
-730nm	3.0	28.0	40.6 a	63.0 b	40.3 b	22.4 ab	8.4 b	0.81 ab

^z different letters indicate significances among the treatments at P<0.05 with Tukey-Kramer's test (n=6-18).

Table 2.10 The spectral characteristics of the light sources calculated from the spectral energy distributions of each light source in Exp. 2-5.

Characteristic	EOD treatments			
	Cont.	B (450)*	R (660)	FR (730)
Wavelength range (nm)	Photon flux ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
400-700 (PPF)	150.0	50.0	50.0	2.0
300-400 (UV)	0.0	0.1	0.0	0.0
400-500 (B)	15.0	48.7	0.1	0.0
500-600 (G)	0.4	0.7	0.1	0.0
600-700 (R)	134.6	0.6	49.9	2.0
700-800 (FR)	1.4	0.2	0.3	48.8
B/R	0.11	81.78	0.00	0.01
R/FR	98.78	3.14	177.14	0.04
PSS**	0.87	0.56	0.89	0.13

* indicates peak wavelength of LEDs (nm).

** Phytochrome photostationary state. PSS derived from phytochrome absorbances and photochemical cross sections of Sager et al. (1988).

Table 2.11 The spectral characteristics of light sources calculated from the spectral energy distribution of each light source.

Characteristic	EOD treatments			
	V (405)	B (470)	R (660)	FR (730)
Wavelength range (nm)	Photon flux ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
400-700 (PPF)	43.0	50.0	50.0	2.0
300-400 (UV)	7.6	0.0	0.0	0.0
400-500 (B)	43.0	46.3	0.1	0.0
500-600 (G)	0.7	3.0	0.1	0.0
600-700 (R)	0.3	0.7	49.9	2.0
700-800 (FR)	0.1	0.3	0.3	48.8
B/R	130.11	69.41	0.00	0.01
R/FR	3.54	2.16	177.14	0.04
PSS**	0.57	0.61	0.89	0.13

* indicates peak wavelength of LEDs (nm).

** Phytochrome photostationary state. PSS derived from phytochrome absorbances and photochemical cross sections of Sager et al. (1988).

Table 2.12 Effects of EOD-light quality on the growth and development of tomato seedlings at 15 DAS in Exp. 2-5.

Treatment	Nuber of leaves	Leaf area (cm^2)	Dry weight (mg)	Specific leaf weight (gDW m^{-2})	Percent dry weight (%)	Stem/DW (mm mg^{-1})
Cont.	3.1	21.4	67.6 b*	19.0 b	8.1 b	1.17 b
EOD-B	3.0	20.7	70.5 b	20.1 ab	8.6 a	1.16 b
EOD-R	3.1	22.2	68.4 b	18.8 b	8.0 b	1.19 b
EOD-FR	3.2	22.6	86.6 a	20.8 a	7.8 b	1.42 a

*Different letters indicate significances among the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test ($n = 18$).



Fig. 2.1 Outside of research unit for closed type plant production system.



Fig. 2.2 Basic module.



Fig. 2.3 New basic module.



Fig. 2.4 Definition of stem and hypocotyl, internode length.



Fig. 2.5 Flower initiation. (1; Flower bud, 2, 3; Leaf primordium)

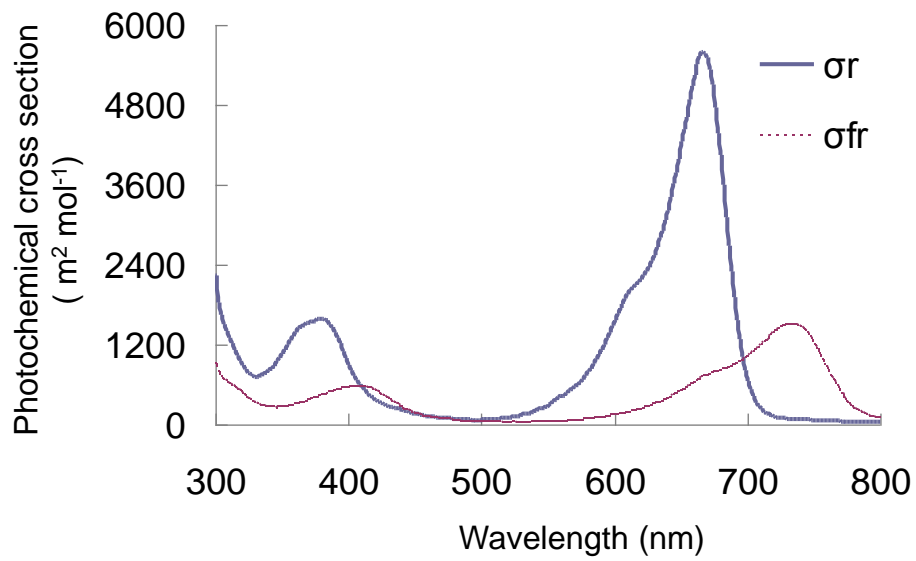


Fig. 2.6 Phytochrome cross-sectional area of Pr and Pfr forms of phytochrome for wavelengths ranging from 300 to 800 nm (Sager et al., 1988).

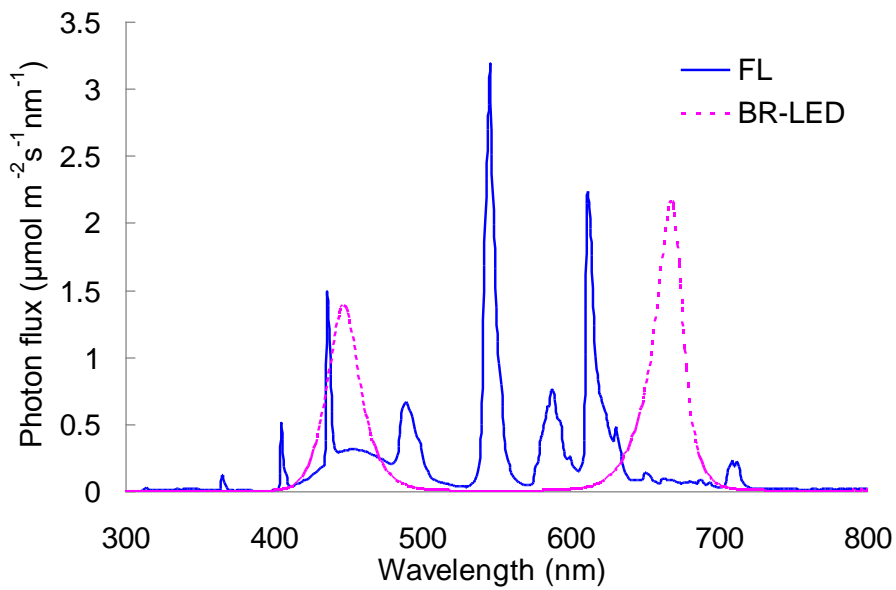


Fig. 2.7 The spectral characteristics of light sources at PPF $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. The photon flux was calculated from the spectral energy distribution of each light source.

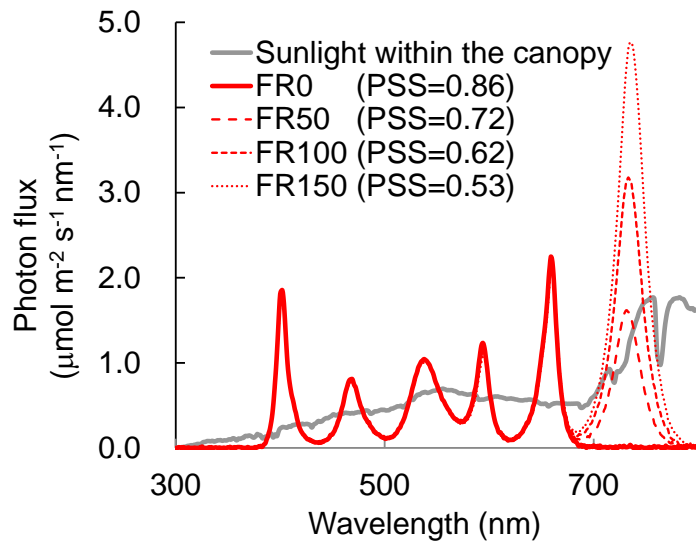


Fig. 2.8 The spectral characteristics of the light sources calculated from the spectral energy distributions of each light source in Exp. 2-3.

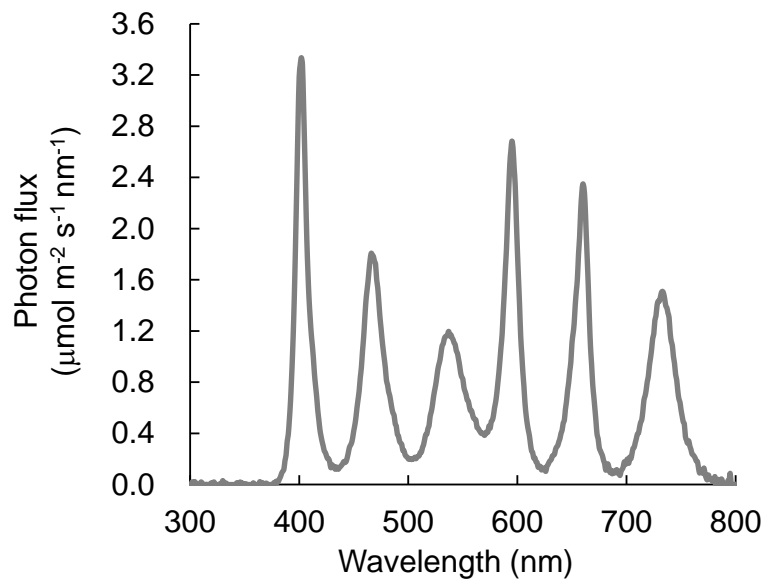


Fig. 2.9 The spectral characteristic of the light source calculated from the spectral energy distributions of each light source in Exp. 2-4.

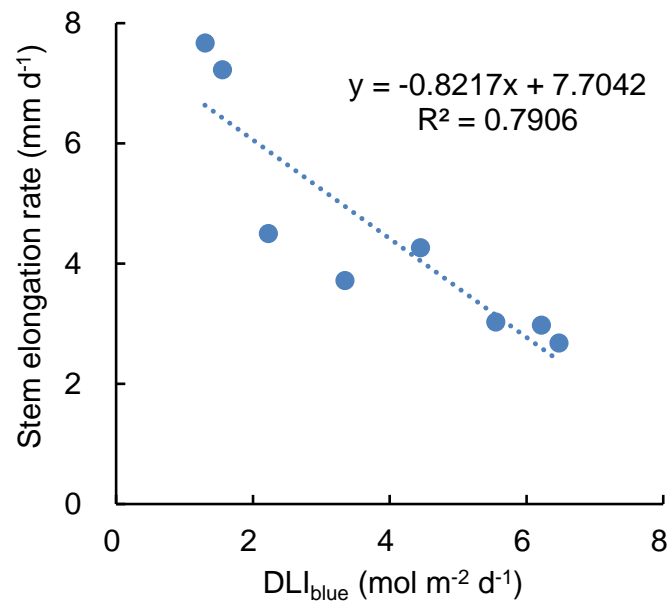


Fig. 2.10 The relationship between blue light integration and stem length of tomato seedlings in Exp. 2-2.

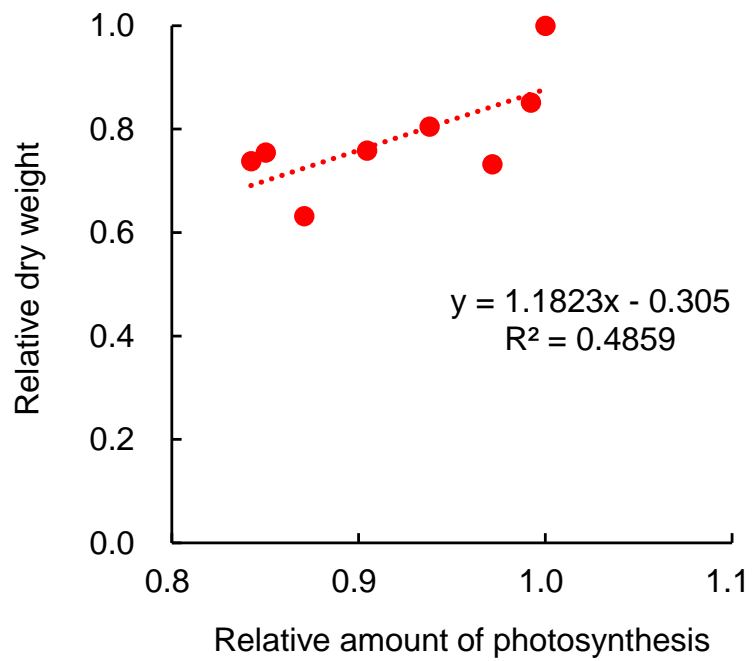


Fig. 2.11 The relationship between relative amount of photosynthesis and relative dry weight of tomato seedlings at 15 days after sowing (DAS) in Exp. 2-2.

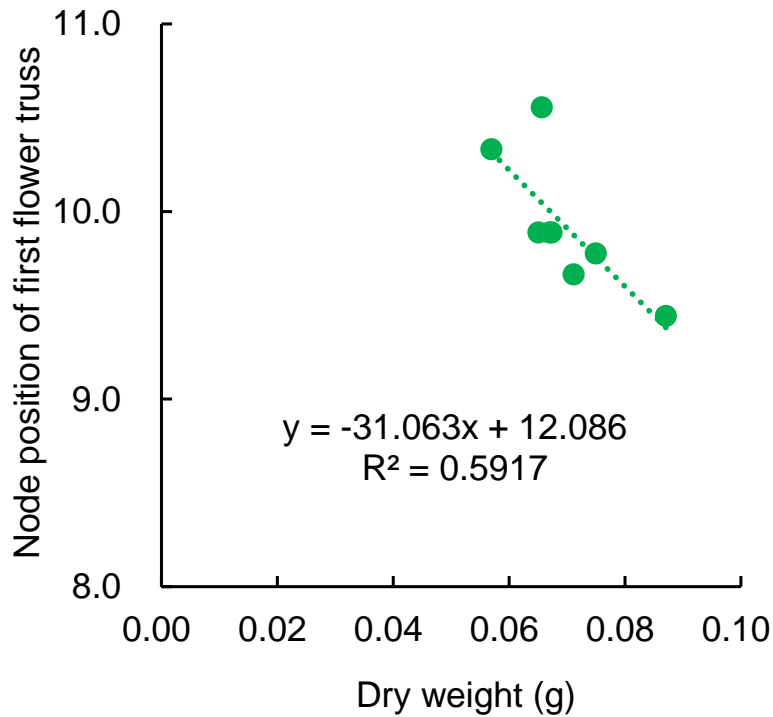


Fig. 2.12 The relationship between dry weight and node position of first flower truss of tomato seedlings at 15 DAS in Exp. 2-2.

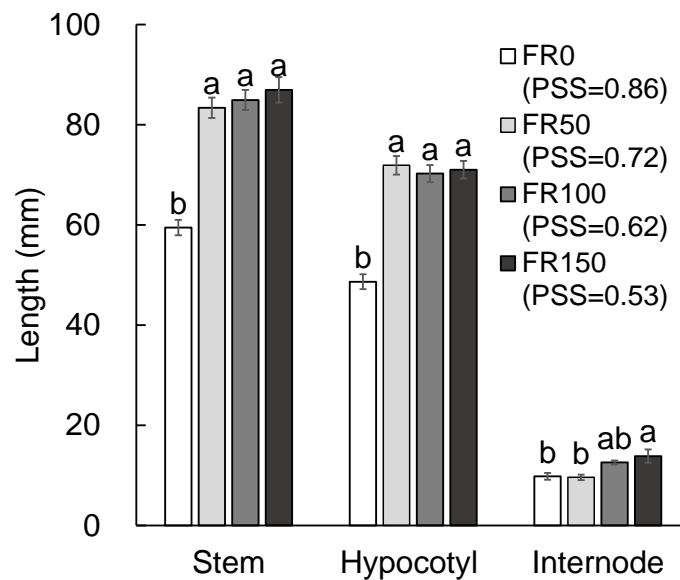


Fig. 2.13 Effects of FR quantity on the stem length, hypocotyl length and internode length of tomato seedlings at 12 DAS in Exp. 2-3. The vertical bars indicates SE (n=6). Different letters indicate significances among the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test.

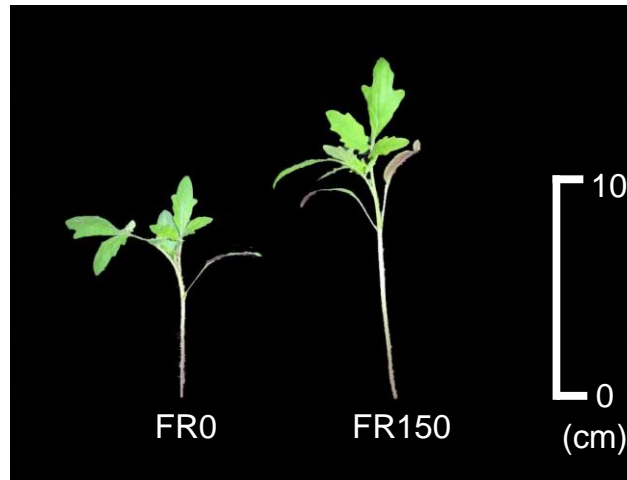


Fig. 2.14 Effect of FR quantity on tomato seedlings at 12 DAS in Exp. 2-3.

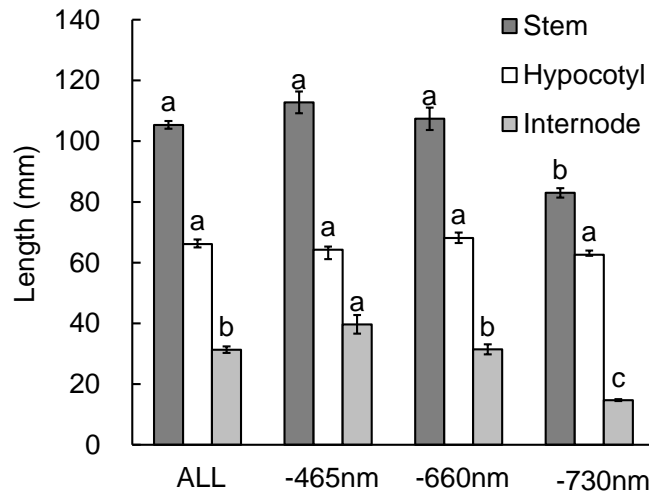


Fig. 2.15 Effect of light quality on stem elongation of tomato seedlings at 16 DAS in Exp. 2-4. The vertical bars indicates SE (n=6-18). Different letters indicate significances among the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test.

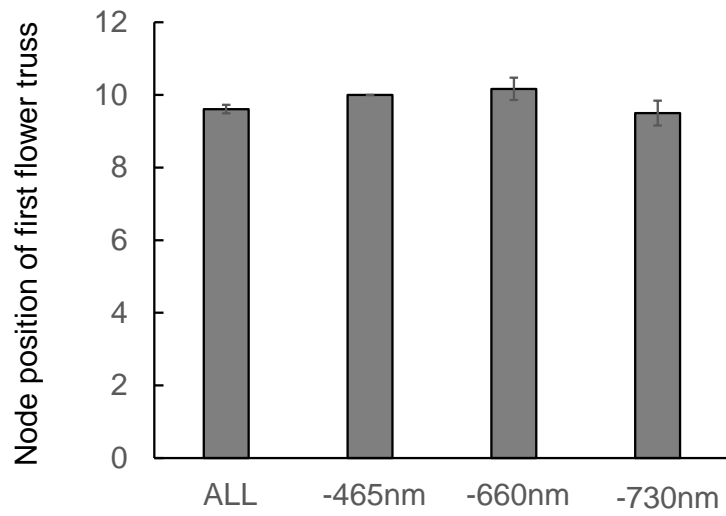


Fig. 2.16 Effect of light quality on flowering of tomato seedlings at 36 DAS in Exp. 2-4. The vertical bars indicates SE (n=8-19).

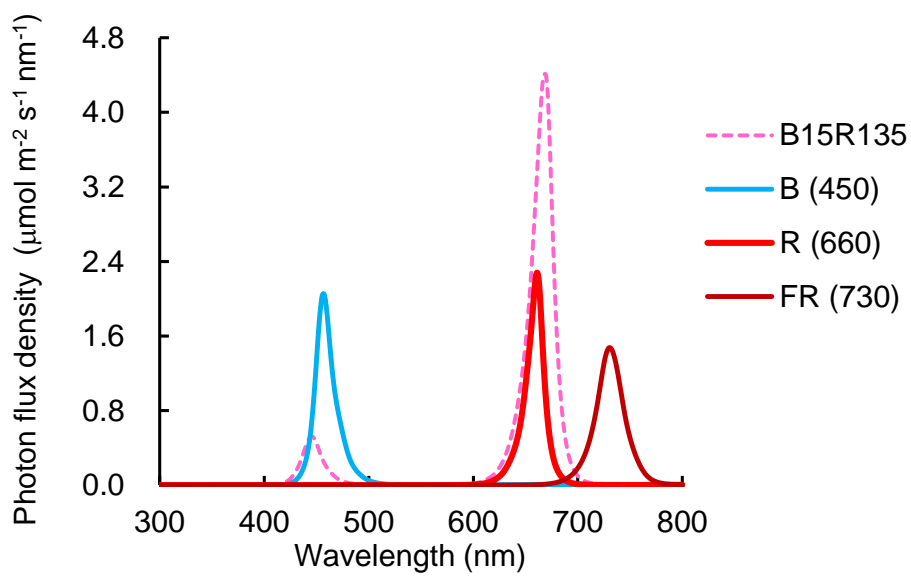


Fig. 2.17 The spectral characteristics of the light sources calculated from the spectral energy distributions of each light source in Exp. 2-5.

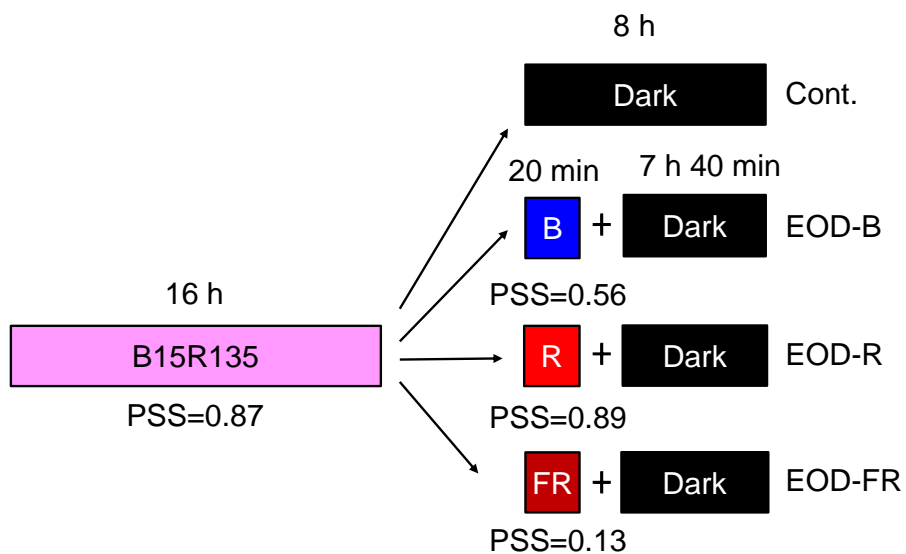


Fig. 2.18 Treatment schedule of Exp.2-5.

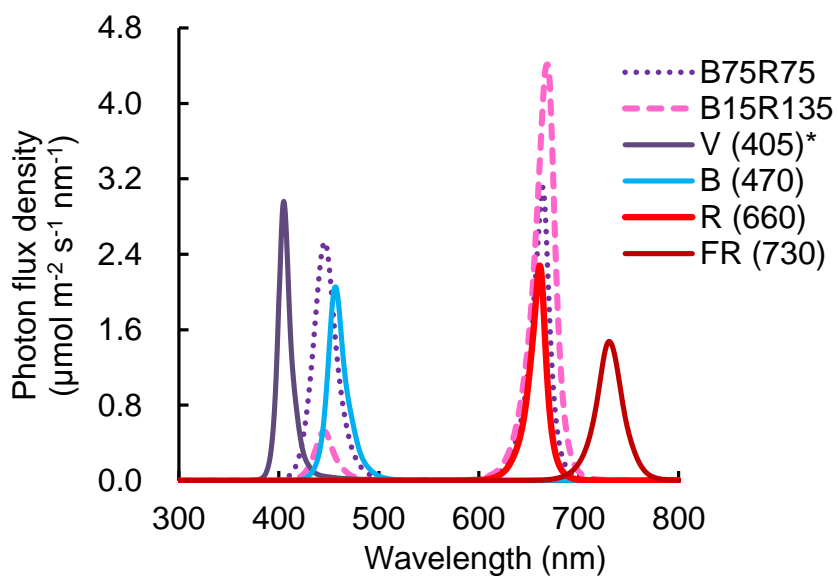


Fig. 2.19 The spectral characteristics of the light sources calculated from the spectral energy distributions of each light source in Exp. 2-6. * indicates peak wavelength of LED (nm).

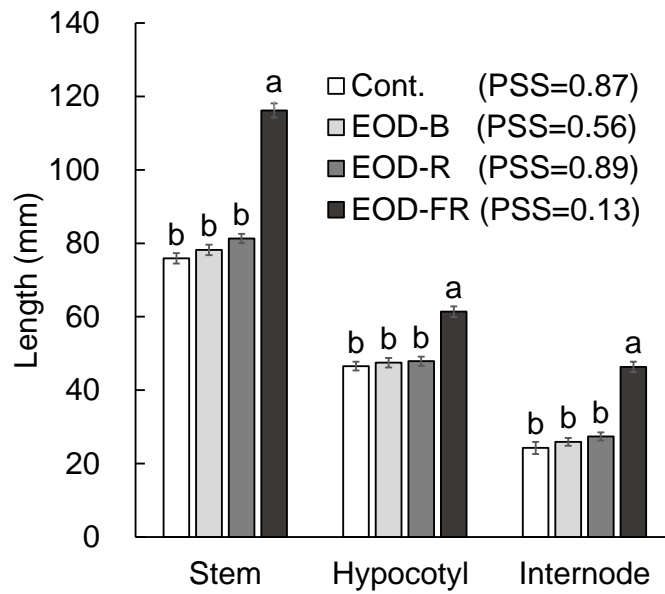


Fig. 2.20 Effects of end-of-day (EOD) blue (B), red (R) and far-red (FR) light on the stem length, hypocotyl length and internode length of tomato seedlings at 15 DAS in Exp. 2-5. The vertical bars indicates SE (n=18). Different letters indicate significances among the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test.

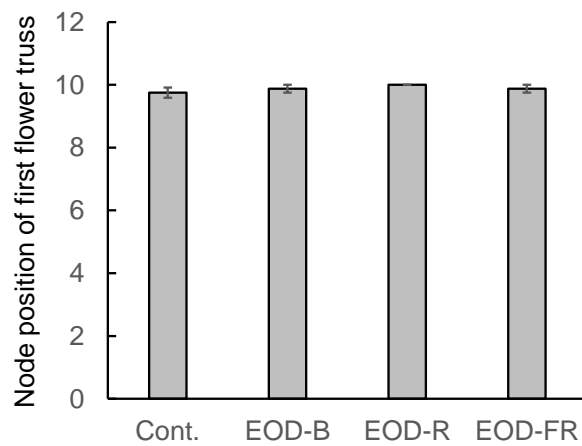


Fig. 2.21 Effects of EOD -B, EOD-R and EOD-FR light on the node position of the first flower truss of tomato seedlings at 36 DAS in Exp 2-5. The vertical bars indicates SE (n=8).

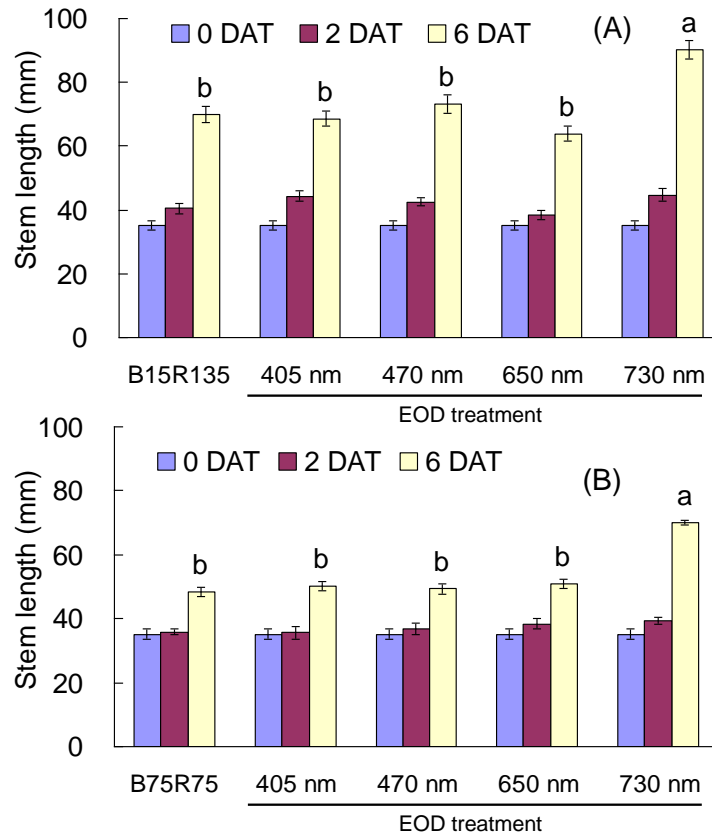


Fig. 2.22 Effects of EOD-light quality on stem length of tomato seedlings at 8-14 DAS in Exp. 2-6. B15R135 (A) and B75R75 (B) were set at 16 h of light period. Vertical bars indicate SE (n=6). Different letters indicate significances among the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test. DAT means days after treatment from 8 DAS.

第3章 二次育苗における局所環境制御が生育および果実収量に及ぼす影響

3.1 緒言

二次育苗では、季節や天候に応じてハウス内全体を均一な環境に制御しようとする、空調や補光装置のランニングコストが高くなりやすい。近年、この問題に対して、特定の場所（例えば、群落内部）や部位（例えば、成長点付近）のみの気温や光などの環境を制御することで少ないエネルギーで効率的な栽培を目指した局所環境制御に関する研究が盛んに行われている。

そこで本章では、温湿度、気流、光、ガスなどの環境要素を対象とした局所環境制御を用いた二次育苗を行った。二次育苗に用いるハウスは千葉大学園芸学研究科の松戸キャンパス（北緯: 35.5° , 東経: 139.5°）と宮城県亘理郡山元町（北緯: 38.0° , 東経: 140.9°）にある太陽光利用型植物工場（以下、千葉大ハウスと山元町ハウス）とした。それぞれのハウスの仕様は3.1.1節および3.1.2節に記述する。また、山元町ハウスは千葉大ハウスに比べて規模が大きく、収穫したトマトの販売も行っており、実証試験としても活用した。

局所環境制御は、局所補光と局所冷房を行った。局所補光では、第2章の試験結果を参考とし、トマト苗の徒長防止および成長促進を目的として、青赤色 LED を用いて補光することとした。局所冷房では、電気ヒートポンプを用いて、ビニールダクトで植物体付近の空間を囲い、ダクトの多数の小穴からその栽培空間に冷風を吹き出した。

本章では、3.2節で冬季のLED補光について、3.3節で夏季の局所冷房およびLED補光について記述した。冬季は、最初に【試験3-1】として、二次育苗時の群落内光環境がトマト苗の生育に及ぼす影響を調査した。次に、【試験3-2】では、人工気象室でLED補光の方法を検討し、【試験3-3】では、ハウスで冬季のLED補光を行った。夏季は、最初に【試験3-4】として、二次育苗時の群落内光環境がトマト苗の生育に及ぼす影響を調査した。次に【試験3-5】では、夏季の局所冷房およびLED補光を行った。さらに、ハウスを用いた二次育苗試験の苗を定植し、果実収量を調査した。また、LED補光に掛かるコストを試算し、本技術を導入する場合の収益性を考察した。第3章における試験内容については下記の通りである。

試験名	一次育苗	二次育苗	収量調査	場所	節
【試験3-1】 冬季の二次育苗における群落内環境の解析	閉鎖型苗生産システム	ハウス	—	宮城県 ²	
【試験3-2】 人工気象室における二次育苗期のLED補光がトマトの茎伸長に及ぼす影響	閉鎖型苗生産システム	閉鎖型苗生産システム	—	千葉県 ³	3.2節
【試験3-3】 冬季のLED補光の光強度がトマトの生育および収量に及ぼす影響	閉鎖型苗生産システム	ハウス	○	宮城県	
【試験3-4】 夏季の二次育苗における群落内環境の解析	閉鎖型苗生産システム	ハウス	—	千葉県	
【試験3-5】 夏季の局所冷房およびLED補光が生育および果実収量に及ぼす影響	閉鎖型苗生産システム	ハウス	○	千葉県	3.3節

²宮城県亘理郡 山元町 ³千葉県松戸市 千葉大学

3.1.1 千葉大ハウス（太陽光利用型植物工場）

千葉大学園芸学研究科の松戸キャンパスには南北棟切妻型ダッチライト型ハウス（千葉大ハウス）があり、栽培面積 144 m²（間口 8 m, 奥行き 18 m, 軒高 3 m）のハウス内の北側に栽培ベンチ（横 120 cm×縦 240 cm×高さ 70 cm）を 2 台設置した（Fig. 3.1 A and Fig. 3.2 A, B）。被覆資材は、屋根面および妻面はフッ素系フィルム（エフクリーン, AGC グリーンテック（株））、側面は農業用ポリオレフィン系フィルムであった。換気窓として片側はね上げ式の日窓と東西に 2 段巻き上げ式の側窓が取り付けられていた。2 軸 2 層の内部遮光カーテン（遮光用資材の遮光率 55%, 保温用資材の遮光率 15%）、内張サイドカーテンが設置され、冬季では保温に、夏季では遮光に使用した。ハウス内には、細霧冷房装置とヒートポンプ式の空調機が設置されており、夏季のみ作動させた。冬季には温風暖房機を作動させた。

千葉大ハウスでの二次育苗は、二次育苗用の培土（育苗培土, タキイ種苗（株））を充填した二次育苗用ポット（直径 9 cm, トヨハシ種苗（株））に 1 株ずつ移植し、24 株用のポットトレイおよびマルチ底面吸水トレイ（トヨハシ種苗（株））に 1 試験区に 6 トレイ（12 株/トレイ）とした（栽植密度 50 株/m²）。育苗ハウスと同じハウス内に、長さ 12 m、幅 0.3 m の栽培ベッドを間隔 1.2 m で 4 列南北方向に配置し、二次育苗後の苗を定植し、低段栽培を行った（栽植密度 4 株/m²）。

3.1.2 山元町ハウス（太陽光利用型植物工場）

宮城県亶理郡山元町には、農林水産省委託の研究プロジェクト「食料生産地域再生のための先端技術展開事業」を実施するため、平成 24 年に 7200 m²の南北棟切妻型ダッチライト型ハウスの大規模生産実証栽培棟が建設された。この研究プロジェクトは、東日本大震災の被災地におけるイチゴおよびトマトの早期生産再開と高度システム化による生産性の向上に向けて、先端的な技術を被災地用に最適化し、その普及を促すための実証研究を行っている。イチゴおよびトマトで育苗室がそれぞれ 1 区画と栽培室がそれぞれ 2 区画に分かれており、トマトは一次育苗に閉鎖型苗生産システムの苗テラス[®]（三菱樹脂アグリドリーム（株））を、二次育苗には育苗室を用いた。育苗室（山元町ハウス）の規模が千葉大ハウスに比べておよそ 2 倍の床面積 288 m²（間口 9 m, 奥行き 32 m, 軒高 4.5 m）で、栽培ベンチ（横 1.9 m×縦 27 m×高さ 0.8 m）を南北にわたって 2 台設置した（Fig. 3.1 B and Fig. 3.2 C）。換気窓として両側はね上げ式の日窓と北側妻面に 2 段巻き上げ式の側窓が取り付けられていた。東西の側窓に換気窓が設置されていなかったため、換気回数は千葉大ハウスに比べて小さかったと推測された。2 層の内部遮光カーテン（遮光用資材の遮光率 55%, 保温用資材の遮光率 15%）、手動式の内張サイドカーテンが設置され、冬季では保温に、夏季では遮光に使用した。温室内には、細霧冷房装置とヒートポンプ式の空調機が設置されていたが、本研究では使用しなかった。冬季では温風暖房機および CO₂ 施用機を使用した。

山元町ハウスでの二次育苗は、二次育苗用の培土（育苗培土, タキイ種苗（株））を充填した二次育苗用ポット（直径 9 cm, トヨハシ種苗（株））に 2 株ずつ移植し、栽培ベンチに 20 cm 間隔にポットを置いて二次育苗を行った（栽植密度 50 株/m²）。育苗室に隣接する栽培室は、同様の仕様で、

床面積が 1728 m² (間口 54 m, 奥行き 32 m, 軒高 4.5 m) であり、二次育苗試験後の苗を定植し、低段栽培を行った (栽植密度 8 株/m²)。

3.1.3 閉鎖型苗生産システム (人工光型植物工場)

千葉大学園芸学研究科の松戸キャンパスにある閉鎖型苗生産システムは詳細を 2.1 節に記述し、環境条件は Table 3.2 に示す。

宮城県亘理郡山元町にある閉鎖型苗生産システムは苗テラス[®] (三菱樹脂アグリドリーム (株)) を用いた。環境条件は Table 3.3 に示す。苗テラスは広く一般的に使用されている閉鎖型苗生産システムである。プレハブ庫に多段式育苗棚、各段の上面に照明装置、底面には灌水装置がある。本研究で用いた苗テラスは 4 段の育苗棚で、1 段当たりセルトレイ 4 枚、1 棚では 16 枚収納可能のものだった。光源は白色蛍光灯 6 灯が各段に組み込まれ、反射板を付けて光環境を均一化させている。灌水は、セルトレイ底面から、液肥を循環供給する方式で 1 回 10 min 程度の灌水を行う。セルトレイ底面に空間をもたせ、根の伸びだしを防止している。空調はファンと家庭用のルームエアコンで、除熱しながら温度制御を行う。CO₂ 施用は液化 CO₂ ボンベより供給し、CO₂ 濃度の制御を行う。

3.2 冬季のLED補光が生育および果実収量に及ぼす影響

3.2.1 はじめに

本節では、冬季の二次育苗でLED補光を行い、トマト苗の徒長を防止させ、定植後の果実収量を増加させることを目的とした。【試験 3-1】として、宮城県亘理郡山元町の実証ハウスにおいて、冬季における二次育苗の群落内環境を解析し、環境改善すべき点を探索した。この結果を参考にし、茎伸長を抑制するための青色光量を決定した。さらに、青色光によるLED補光の方法を検討するために、【試験 3-2】として、人工気象室でトマトの下位葉に補光する方法と上位葉に補光する方法で試験を行った。以上の結果を踏まえた補光方法および環境制御を【試験 3-3】で実施した。また、【試験 3-3】では、青色光に加えて成長を促すための赤色光を付加するため、青色光を一定とした条件で光強度を2水準に設定し、LED補光がトマト苗の生育ならびに果実収量に及ぼす影響を調査した。

3.2.2 材料および方法

3.2.2.1 供試植物

供試植物はトマト品種‘麗夏’‘桃太郎ヨーク’‘りんか409’および‘麗容’(*Solanum lycopersicum* L., ‘Reika’, ‘Linka409’ and ‘Reiyo’, (株)サカタのタネ, ‘Momotaroyoke’, タキイ種苗(株))とした。‘麗夏’は‘麗容’の耐暑性品種である。千葉大学の閉鎖型苗生産システムではセル成型苗養土(ナプラ養土Sタイプ, ヤンマー農機(株))を、山元町の苗テラスではセル成型苗用養土(ナ・テラ™, 三菱樹脂アグリドリーム(株))を充填し、72穴セルトレイの1セルに1粒ずつ播種した。

3.2.2.2 一次育苗

播種後日数(DAS: Days after sowing)が3DASまでインキュベータ(MIR-553, パナソニック(株))内(Table 3.1)で26°Cの暗黒下で発芽処理をし、出芽した植物を前述の閉鎖型苗生産システムに移した。インキュベータ内のCO₂濃度は実験開始時で約850 μmol mol⁻¹、相対湿度は約50%であった。その後、3DASから白色蛍光灯(FHF32-EX-N-H, パナソニック電工(株))下で一次育苗を行った。千葉大学で行った一次育苗の環境条件をTable 3.2、山元町で行った一次育苗の環境条件をTable 3.3に示す。

かん水は3DASから子葉が展開した7DASまでは水道水とし、8DASから試験終了時まで毎日液肥(大塚ハウス肥料1/2A処方, EC 1.2 dS m⁻¹, pH 6.0)を底面給水法で与えた。かん水量は、播種後2週間は0.5L/トレイとし、その後は1L/トレイを与えた。同様の液肥を二次育苗に用いた。

3.2.2.3 測定項目および算定項目

3.2.2.3.1 環境測定

ハウス内の気温、相対湿度、CO₂濃度および光強度は、気象ノードの各センサから収集した。

群落内の温湿度の違いを把握するために、それぞれの群落1点（栽培ベンチから20cm上の群落中心に位置する）に0.1mm T型熱電対および電子式高分子湿度センサユニット（CHS-UPS, TDK（株）, 精度: ±5%RH, 測定範囲: 5-95%）を用いた温湿度計を設置した。

群落上および群落内の光環境は光量子センサによる多点の連続測定を行った。測定箇所は各個体群の群落上部と群落内部とした。西村ら（1994）は、GaAsP フォトダイオードを用いて、イネ群落内の葉面光強度を経時的に精度よく測定可能であると報告した。これを参考にして、GaAsP フォトダイオード（G1118, 浜松フォトニクス（株））を用いた。

フォトダイオードは、半導体素子のPN接合部に光照射により電流が発生すること（光電効果）を利用した光量子センサである。広義として太陽電池が含まれる。GaAsP フォトダイオードは、分光感度が300-680 nm、受光部が約1.66 mm²、重量が約160 mg、単価が600円であり、小型で軽量かつ安価な光量子センサであるため、多点で連続測定ができる。フォトダイオードと電圧ロガーの接続回路に負荷抵抗を設けて出力電圧を記録する。

測定点におけるPPF ($I: \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) は、ハウス内に設置したLI-190 (LI-COR Inc.) のPPFと同測定点でのフォトダイオードの出力電圧 ($V_P: \text{mV}$) の関係を次式から求めた。

$$I = 62.604 * V_P$$

本試験で用いたフォトダイオードにおける温度係数は+0.1~+0.5 (%/°C) であり、温度依存性がある。しかし、フォトダイオードと同程度の温度係数を有した太陽電池型日射計は、温度補正を施さなくても実用的に利用できると報告されているため（杉山ら, 2011）、フォトダイオードの温度依存性を考慮しなかった。

各センサはデータロガー（GL220 or GL820, グラフテック（株））に接続し、測定値は60s間隔で測定した。

群落内および群落外の分光分布は分光放射計（USR-45DA, ウシオ電機（株）; MS-720, 英弘精機（株））を用いて測定した。

【試験3-1】の気流速の測定は、熱線式風速計（MODEL6114, 日本カノマックス（株））を用いて、栽培ベンチから高さ15cmで3点、高さ50cmで3点、10秒間隔で5回の平均気流速を測定した。使用した熱線式風速計は、指向性があるため水平方向と垂直方向で気流速を測定した。

3.2.2.3.2 生育調査と統計処理

生育調査は二次育苗開始時と二次育苗終了時に茎長（根部から成長点まで）、各節の節間長、葉数（10mm以上の本葉数）、第3葉および第5葉のSPAD値（クロロフィル濃度や窒素濃度の指標）、総葉面積、部位別の生体重、部位別乾物重および第1花房着生葉位とした。Stem/DW（大である

ほど徒長していることを示す)、比葉重(葉の厚さ)および乾物率を算定した。具体的な測定および算定方法は第2章に記述した。

各試験区の各測定および算定項目の平均値の差を Tukey-Kramer's test を用いて 5%の有意水準で検定した。

3.2.2.3.3 光合成速度の測定

単位葉面積当たりの光合成速度は、携帯型光合成蒸散測定装置(LI-6400, LI-COR Inc.)を用いて測定した。測定にはLI-6400の自動測定機能の1つであるLight Curveを用いた。Light Curveは光-光合成曲線の作成に用いる機能であり、測定を行う光強度で光を当て始めてから、1)最短待ち時間以上の時間が経過し変動係数が設定値を下回る、2)最長待ち時間が経過する、のどちらかを満たしたときの値を記録し、自動的に次の光強度における光合成速度の測定を開始した。本研究では、最短待ち時間を120s、最長待ち時間を240s、変動係数を1%に設定した。第3葉の先端小葉をLI-6400の測定用のチャンバに挟み、測定開始前にPPF 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ から光強度を徐々に上げ葉を光に慣らした。PPF 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で光合成速度が安定した後、Light Curveを用いてPPF 1500、1000、500、100、50、0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の順で光合成速度を測定し、光-光合成曲線を作成した。また、光-光合成曲線における光飽和点から光合成能力を評価した。すなわち、光飽和点が高い葉ほど光合成能力が高いものとした。測定チャンバに流入する空気のCO₂濃度は500 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ に設定し、気温は20°C、相対湿度は50%前後となるよう調整した。【試験3-1】では‘麗夏’と‘りんか409’、【試験3-3】では‘りんか409’、【試験3-4】では‘麗容’を用いて測定した。【試験3-1】については、‘麗夏’を用いてCO₂濃度を800 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 、気温を15°Cと25°Cに変更して測定した。二次育苗終了時(【試験3-1】35DAS、【試験3-3】40DAS)に各個体(3株ずつ)の第3葉および第5葉を1回ずつ測定した。

3.2.2.3.4 コスト解析および収益分析

【試験3-3】については、二次育苗後に苗を本圃に定植した。定植は、試験区ごとに8株とした。栽培方法として、安価なココピートを使った隔離バッグカルチャーのココバック栽培(トヨハシ種苗(株))を採用した。定植して約50日後に、一斉に第3果房上の2葉を残して摘心した。【試験3-3】の受粉にはマルハナバチを用いられた。その後、赤熟した果実から順に第1から第3果房の収量を調査した。

LEDの消費電力はクランプオンパワーハイテスタ(3168, 日置電機(株))を用いて、調光器(ユニオン電子工業(株), 特注)で光強度を調節し、24時間タイマー(TB31P, パナソニック(株))で11h点灯させた場合の1日の有効電力量を測定した。電気料金およびトマトの販売価格は文献値(迫田, 2008; 浜本ら, 2010)を参照し、電気料金20円/kWh、トマト販売価格230円/kgとした。

3.2.2.4 【試験 3-1】 冬季の二次育苗における群落内環境の解析

試験は山元町ハウスで行った。品種は‘麗夏’、‘りんか409’および‘桃太郎ヨーク’、とした。苗テラスで一次育苗した苗を用いて2013年12月28日(23 DAS)から二次育苗を行った。二次育苗では、温風暖房機の設定値は15°Cとし、CO₂施用機の設定値は600 μmol mol⁻¹とした。

光環境の測定箇所はFig.3.3に示す。光環境は栽培ベンチ面から高さ80 cmにおける3点の平均値を群落上(Top)の光強度とし、栽培ベンチから高さ20 cmにおける3点の平均値を群落内(Under)の光強度として測定および算出した。

二次育苗開始時の2013年12月28日(23 DAS)と二次育苗終了時の2014年1月9日(35 DAS)に各8株の生育調査を行った。

3.2.2.5 【試験 3-2】 人工気象室における二次育苗期のLED補光がトマトの茎伸長に及ぼす影響

試験は千葉大学の閉鎖型苗生産システムを用いた。品種は‘麗容’とした。同じ環境下(Table 3.2)で育苗した苗を用いて25 DASから試験を行った。気温は明期および暗期で25°C一定とした。試験区は、8本の昭和電工社製のピーク波長が660 nmの赤色ラインLED (PPF; 200 μmol m⁻² s⁻¹)を下方に照射した(Cont.)、6本の赤色ラインLED (PPF; 200 μmol m⁻² s⁻¹)と2本のピーク波長が450 nmの青色ラインLED (PPF; 100 μmol m⁻² s⁻¹)を下方に照射し、成長点付近の上位葉を補光対象とした区(上位葉への青色LED補光区; Top区)、Top区と同じ光源の構成で第2葉を補光対象とした区(下位葉への青色LED補光区; Middle区)、4本の赤色ラインLED (PPF; 200 μmol m⁻² s⁻¹)と4本の青色ラインLED (PPF; 100 μmol m⁻² s⁻¹)を下方に照射した区(十分な青色LED補光した区; Top+Middle区)の計4区を設けた。光強度はトマトの成長に合わせて出力を調整した。

試験開始時(25 DAS)から処理日数(DAT: Days after treatment)の0、2、4、6 DATに、茎長(培土面上から成長点付近までの長さ)および各節の長さを各6株調査した。試験の概要は以下に記す。

試験区	青色補光の対象	
	上位葉	下位葉
Cont.	—	—
Top	○	—
Middle	—	○
Top+Middle	○	○

3.2.2.6 【試験 3-3】 冬季のLED補光の光強度がトマトの生育および収量に及ぼす影響

試験は山元町ハウスで行った。品種は‘りんか409’とした。苗テラスで一次育苗した苗を用いて2014年2月12日(23 DAS)から二次育苗を行った。二次育苗では、温風暖房機の設定値は20°C/15°C(明期/暗期)とし、CO₂施用機の設定値は明期800 μmol mol⁻¹とした。尚、明期とはLED照射時間内を意味し、7時から19時とした。

光環境の測定は【試験 3-1】と同様の方法で行った。

LED 補光は、ピーク波長が 450 nm の青色 LED と 660 nm の赤色 LED のチップが 1 : 2 の間隔で並んでいる青赤色の直管形 LED (DPT2RB120Q3340 形, CIVILIGHT Shenzhen Semiconductor Lighting Co., Ltd., 定格消費電力: 33 W, 定格寿命: 40000 h) を各試験区に 4 本設置し、20 cm 間隔においた 24 ポット 48 株を対象に、群落上から下方向に照射した。補光処理は、23 DAS から 40 DAS まで行った。

試験区は、茎伸長抑制に必要な青色光 $75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 一定で赤色 LED の出力を調整し、成長点付近の PPF $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の P100 区および PPF $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の P200 区ならびに消灯した LED の照明器具を設置した P0 区および照明器具を設置しない対照区 (Cont.) とした。群落と LED の照明器具との位置関係は両区ともに 15 cm 離れるように成長に合わせておよそ 6 日ごとに 10 cm ずつ高さを調節した。照射時間は 7 時から 12 時および 13 時から 19 時までの 11 h d^{-1} とした。日中と夜間の補光時の PPF 分布は水平面では 10 cm 間隔で 63 点、高さを光源から 10 cm、15 cm および 25 cm で二次育苗開始時と終了時に光量子センサ (LI-190 and LI-250, LI-COR Inc.) を 2 台用いて測定した。

LED 照明器具設置時における栽培ベンチから 15-30 cm の高さで測定した照明器具上の自然光の平均透過率は、植物を置いていない場合、0.9 程度だった。LED の補光強度では、LED 照明器具から 10 cm 離れた位置における平均 PPF は P100 区で $107 \pm 17 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ならびに P200 区で $211 \pm 60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ だったのに対し、LED 照明器具から 15 cm 離れた位置における平均 PPF は P100 区で $99 \pm 16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ならびに P200 区で $197 \pm 46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、LED 照明器具から 25 cm 離れた位置における平均 PPF は $71 \pm 27 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ならびに P200 区で $107 \pm 35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となった。この結果から、LED 照明器具からの距離 (x : cm) と P100 区の補光強度 (I_{P1} : $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) との関係は次式より求めた。

$$I_{P1} = -0.4133x^2 + 7.5333x + 177$$

同様に LED 照明器具からの距離と P200 区の補光強度 (I_{P2} : $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) との関係も次式より求めた。

$$I_{P2} = -0.08x^2 + 0.4x + 111$$

高さを調節していない期間では、植物体はトマトの生育が進むにつれて光源に近づき、成長点付近の光強度は高かった (Fig. 3.4)。トマトの茎伸長速度から二次育苗期間 (2014 年 2 月 13 日から 2 月 28 日) における時別の光源と植物体との距離を求め、時別の I_{P1} および I_{P2} を算出した。さらに、時別の I_{P1} および I_{P2} に青色光の割合 (P100 区で 0.75, P200 区で 0.38) を乗じて、LED の青色光量を算出した。また、ハウス内日射に含まれる青色光の割合は 25% と仮定し、群落上の PPF に 0.25 と照明器具面上の日射の平均透過率 0.9 を乗じて群落上の自然光の青色光量を算出した。特別に LED の青色光量と自然光の青色光量を加えて積算することで、成長点付近の日積算青色光量 (DLI_{blue} : Daily light integral of blue light) を算定した。

二次育苗開始時の 2014 年 2 月 12 日 (23 DAS) と二次育苗終了時の 2014 年 2 月 28 日 (40 DAS) に各 8 株の生育調査を行った。さらに、定植後における摘心時 (73 DAS) に、茎長 (根部から成長点まで)、葉数 (10 mm 以上の本葉数)、葉面積、部位別の生体重、部位別乾物重、各 8 株を測定した。試験の概要を以下に記す。

試験区	LED設置	補光のPPF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Cont.	—	—
P0	○	0
P100	○	100
P200	○	200

3.2.3 結果および考察

3.2.3.1 【試験 3-1】 冬季の二次育苗における群落内環境の測定

二次育苗終了時の群落内ならびに群落上における水平方向および垂直方向の平均気流速は、暖房が稼動してもしていなくても 0.1 ms^{-1} 以下だった（データ略）。Shibuya et al. (2006) は、19-23 DAS のトマト‘桃太郎’を用い、鉛直方向の上下あるいは水平方向からの気流制御を行った結果、鉛直方向の気流制御下の生育が水平方向の気流制御下より促進され、各生育調査項目の変動係数が下降気流下で小さかったと報告している。また、横井ら (2007) は、閉鎖型苗生産システムで栽植密度を 700 株/m^2 から 1600 株/m^2 に高くしても、気流速 0.3 ms^{-1} から 0.7 ms^{-1} に調節することで、均一で品質の高いトマト苗を育成できたと報告している。よって、今後、群落内の環境要素（例えば、気温や CO_2 濃度）が光合成の律速となっていると判明すれば、気流制御を行うことで気温や CO_2 濃度のバラつきを抑えて均一な苗を生産できると考えられる。

この時期のハウス内の PPF は $162 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と低く（Table 3.4）、DLI は $7.0 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ だった。この光環境は、閉鎖型苗生産システムの苗テラス内の DLI に比べると 2 分の 1 の値となった。群落上の光環境は区間で異なり、‘桃太郎ヨーク’の群落で測定した光強度が最も低かった（Table 3.5）。

‘桃太郎ヨーク’だけがハウスの壁側で育苗していたことから、育苗場所が原因であると考えられる。以上の結果から、本試験期間における LED 補光はおよそ $\text{PPF } 100 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上で照射すると苗テラスで一次育苗する光環境の $\text{PPF } 250 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ レベルに改善できると考えられた。そこで、茎伸長の抑制だけを目的とした場合、【試験 3-2】で補光する方法を検討した。Hernandez and Kubota (2012) の報告から、ハウス育苗（DLI: $8.9 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ）で茎伸長を抑制するためには、 DLI_{blue} を $2.4 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 増やす必要があると考えられる。よって、青色光は $60 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上で補光すると良い。そこで【試験 3-3】では、本試験結果の光強度の範囲内になるように、青色光 $75 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 一定とし、青赤色 LED の補光強度を $\text{PPF } 100 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ あるいは $\text{PPF } 200 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の 2 段階の水準で【試験 3-2】の結果に基づいた LED 補光を行うことにした。

一次育苗終了時の生育では、草丈や節間長が‘りんか 409’で最も短く、生体重および乾物重が‘桃太郎ヨーク’で最も大となり、‘りんか 409’および‘桃太郎ヨーク’の生育が‘麗夏’より優れていた（Fig. 3.5 and Table 3.6）。さらに、‘りんか 409’は‘麗夏’より光合成能力が高かった（Fig. 3.6A）。そこで、育苗期間が短くできるという点で【試験 3-3】では‘りんか 409’を採用することとした。

他方、‘麗夏’における第 3 葉の個葉光合成速度は、気温を 20°C から 25°C に、 CO_2 濃度 $560 \text{ } \mu\text{mol mol}^{-1}$ から $800 \text{ } \mu\text{mol mol}^{-1}$ に向上させると、 $\text{PPF } 250 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ でおよそ 30% 向上することが示唆された（Fig. 3.6B）。そこで、【試験 3-3】のハウスで行う二次育苗試験では気温を明期中 20°C 以上になるように、 CO_2 濃度を明期中 $800 \text{ } \mu\text{mol mol}^{-1}$ 以上になるように制御する。

3.2.3.2 【試験 3-2】人工気象室における二次育苗期のトマトの LED 補光がトマトの茎伸長に及ぼす影響

全葉を補光対象とした Top+Middle 区および成長点付近の上位葉を補光対象とした Top 区の茎長は、Cont. に比べて有意に小さかった (Fig. 3.7)。トマト苗の茎伸長抑制には青色光が有効である (南谷, 2012)。トマトにおける茎伸長は、光受容体のフィトクロムやクリプトクロムを経由したシグナルによって調節されている。具体的には、青色光や赤色光がトマトのジベレリン酸化酵素遺伝子の発現に影響を及ぼし、茎中の活性型ジベレリンを減少させることで、茎伸長を抑制する (Matsuo et al., 2011)。よって、本試験結果から、青色 LED による補光 (Top+Middle 区および Top 区) は二次育苗期のトマト苗の茎伸長を抑制できることが明らかとなった。一方、Middle 区では補光による茎伸長抑制効果は認められなかった。

ところで、下位葉 (成熟葉) の周囲の CO₂ や光などの環境刺激を受け、上位葉 (未熟葉) の光合成機能 (気孔密度や葉の厚さなど) を変化させることがある (Lake et al., 2001; Thomas et al., 2003; Jiang et al., 2011)。近年、何らかのシグナルが植物体内を長距離伝達する生理応答は、システミック調節 (Systemic regulation) と呼ばれている。以上より、トマトの下位節における節間長の伸長抑制を目的として下位葉に LED 補光を行う場合、植物体内におけるシステミック調節により、上位節の節間長の伸長抑制や上位葉の光合成機能向上、花芽の発達、第 2 花房における花成促進などの二次的な補光効果があると考えられた。しかし、各節の長さを調査したところ、第 2 葉付近の下位葉を補光対象とした Middle 区の第 1 節および第 2 節の長さは、Cont. に比べて小さい傾向がみられたが、Middle 区の他の節で Cont. より短い節はみられなかった (Fig. 3.8)。すなわち、下位葉への LED 補光による節間長の伸長抑制効果は全節にみられないことが明らかとなった。したがって、トマトにおける青色光応答では、茎伸長を抑制するホルモンなどのシグナルは長距離輸送されないと示唆された。以上より、成長点付近を補光対象とした Top 区の茎長および節間長は Top+Middle 区と同等であり、青色光で効率的に LED 補光を行う場合、発育ステージが未熟な上位葉を補光対象とすることが望ましいと考えられた。そこで【試験 3-3】では、上位葉に LED 補光する方法で行うこととした。

3.2.3.3 【試験 3-3】冬季の LED 補光の光強度がトマトの生育および収量に及ぼす影響

明期 (7:00-19:00) におけるハウス内の気温と CO₂ 濃度は、設定値の 20°C ならびに 800 μmol mol⁻¹ より高い平均値を示した (Table 3.7)。群落上における PPF は P100 区で最も低く、P200 区で最も高かった (Table 3.8)。P100 区の設置場所は育苗ハウス入り口に最も近く、他試験区に比べて P100 区に入射する自然光が柱や壁側のフッ素フィルムなどによって遮られていた可能性があった。気温と相対湿度は温室内と群落内でほぼ同様の値を示した。

P100 区および P200 区の草丈は Cont. および P0 区より有意に小となり、特に P200 区における第 5 節の節間長は Cont. と比べて有意に小となった (Fig. 3.9)。茎伸長速度は P100 区で 1.7 cm d⁻¹、P200 区で 1.4 cm d⁻¹ となった。成長点付近の DL_{Iblue} は P100 区および P200 区で 6.3 mol m⁻² d⁻¹ および 6.8

mol m⁻² d⁻¹、P0 区で 3.9 mol m⁻² d⁻¹、Cont. で 4.2 mol m⁻² d⁻¹ となり、DLI_{blue} と茎伸長速度との関係には負の相関 ($r=0.96, P=0.04$) がみられた (Fig. 3.10)。この結果から、LED 補光による青色光量増加がトマト苗の茎伸長を抑制したと考えられた。さらに、乾物重は P0 区 < Cont. < P100 区 < P200 区の順で大きく、後 2 者で前 2 者に対して Stem/DW が有意に小となった (Table 3.9)。したがって、本実験の光環境制御は徒長を防止することができた。

P100 区および P200 区の総葉面積は Cont. および P0 区より小となり、比葉重は大となった (Table 3.9)。一般に、弱光順化した植物体では葉を薄く広げることが知られている。よって、補光区においては、群落上の葉で強光順化となったため、葉面積が小さく、葉が厚くなったと考えられた。

葉の SPAD 値は第 3 葉および第 5 葉ともに P100 区および P200 区で対照区より有意に大だった (Table 3.9)。SPAD 値の平均値の変域が小さい場合、SPAD 値とクロロフィル含量との間に明確な相関は認められないことがある (高山ら, 2010)。他方、SPAD 値とクロロフィル a/b 比との間では正の相関が確認され、光合成機能の簡易評価手法として有効であると報告されている (高山ら, 2006)。しかし、第 3 葉の単位葉面積当たりの光合成速度を測定した結果、光合成能力は SPAD 値の最も低い P0 区で大きい傾向がみられた (Fig. 3.11)。青色光受容体のクリプトクロムは葉の色素であるアントシアニンやクロロフィルの生合成を促進することが報告されている (Giliberto et al., 2005)。よって、青色光を補光したことによりクロロフィル含量だけでなく、アントシアニン含量も増大した可能性が示唆された。アントシアニンを多く含む葉では、アントシアニンが赤色光を多く反射し、緑色光域の波長を選択的に吸収するため、クロロフィルの光吸収率が低下し、結果的に葉面積当たりの光合成速度は低下する (Inada, 1977; Goto et al., 2014)。したがって、SPAD 値は一概に光合成との相関がみられるとは限らないため注意が必要である。尚、本圃におけるトマト栽培では、上層、中層および下層に分けて受光量および単位葉面積当たりの光合成速度を測定し、群落光合成を明らかにする研究がある。他方、本研究はトマト苗を対象として短期間の試験を行っているため、群落光合成を求めるより、現状の光合成能力を把握することが重要であると考え、群落光合成を算出しなかった。

地上部乾物重は P0 区 < Cont. < P100 区 < P200 区の順で大きかった (Table 3.9)。成長点付近の DLI は P0 区で 15.5 mol m⁻² d⁻¹、Cont. で 16.8 mol m⁻² d⁻¹、P100 区で 18.3 mol m⁻² d⁻¹ および P200 区で 23.6 mol m⁻² d⁻¹ だった。以上より、本試験の LED 補光において、トマト群落の積算受光量が増加し、トマト苗の成長が促進された。

定植後の摘心時における生育では、草丈や葉数に試験区間で差がみられなかったが、葉面積、乾物重は Cont. < P100 区 < P200 の順で大となる傾向がみられた (Table 3.10)。さらに、乾物増加量 ((乾物増加量) = (定植後の摘心時の地上部乾物重) - (二次育苗終了時の地上部乾物重)) は Cont. で 18.7 g、P100 区で 22.7 g および P200 区で 23.8 g となった。変動係数は Cont. で大きく、P100 区および P200 区で小さかった (Table 3.10)。以上より、二次育苗における LED 補光処理は定植後のトマトの成長を促進させるだけでなく、個体間における成長のバラつきを小さくすると示唆された。また、目視では、P100 区および P200 区における花芽の発育が Cont. より進んでおり、開花および結実した花芽が多数みられ、P100 区および P200 区の果房を含むその他の乾物重は Cont. より大きい傾向がみられた (Table 3.10)。したがって、LED 補光によって花芽の発育が促進されることが示唆された。

収量は Cont.<P100 区<P200 区の順となり、P200 区は Cont.の 1.8 倍の収量だった (Fig. 3.12)。トマトの販売価格 (230 円/kg) を乗じた結果、Cont. が 290 円/株、P100 区が 353 円/株、P200 区が 526 円/株と算出された (Table 3.11)。4 本の LED を点灯した場合の消費電力は、P100 区で 93W、P200 区で 134W だった。11 hd^{-1} の LED 照射時間で 17 日間処理するので、消費電力量は 17.4 kWh と 25.1 kWh となった。よって、1 株当たりの LED のランニングコストは、消費電力量に電気料金 (20 円/kWh) を乗じ、4 本の LED で供試可能な 56 株で割って、P100 区が 6.2 円/株、P200 区が 8.9 円/株と算出された (Table 3.11)。よって、調光することにより 31%のランニングコストを削減できた。本試験に用いた LED の定格寿命は 4 万時間でだった。耐用年数は定格寿命から年間の点灯時間を割ることで算出できるため、この LED を二次育苗のみに使用する場合、年 4 作で 1 日 12 h で 17 日間の補光を行うと、約 49 年使用できることになる。しかし、日本照明工業会では、安定器、ソケットや電線など電気絶縁物の絶縁劣化によって、「一般的には照明器具の寿命の目安を 10 年」としていることや、一般的な光源は住居環境での使用を前提しており、温室のような高温・高湿度な条件であることを考慮すると、耐用年数は 10 年を超えずに見積もることが推奨されている (郡山ら, 2014)。したがって、耐用年数を 10 年として減価償却の定額法を用いて、本試験で掛かる LED のイニシャルコストを算出した結果、17 円/株となった (Table 3.11)。以上より、LED 補光に掛かるコストとトマトの販売価格からの収益を計算すると、Cont.に対して P200 区の増益率は 72.4%となり (Table 3.11)、冬季の LED 補光で高品質な苗を生産できることを証明することができた。

3.3 夏季の局所冷房およびLED補光が生育および果実収量に及ぼす影響

3.3.1 はじめに

本節では、夏季の二次育苗で局所冷房およびLED補光を行い、トマト苗の徒長を防止し、定植後の果実収量を増加させることを目的とした。【試験3-4】として、千葉大学園芸学研究科の松戸キャンパスの千葉大ハウスにおいて、夏季における二次育苗の群落内環境を解析し、環境改善すべき点を探索した。この結果を参考にして、【試験3-5】では、電気ヒートポンプを用いた局所冷房およびLEDを用いた局所補光を行うこととした。ハウスに入射した日射がLED器具に遮られるため、直達日射の多い夏季では、局所補光を群落上から下方に行う方法は効率が悪いと推測される。例えば、明期中のPPF $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とした場合、群落上から補光する場合の光合成量は群落下から補光する場合の光合成量に比べて15%程度低下する（データ略）。そこで、【試験3-5】のLED補光は群落下から上方に補光することにした。

3.3.2 材料および方法

3.3.2.1 供試植物

供試植物はトマト品種‘麗夏’ (*Solanum lycopersicum* L., ‘Reika’, (株)サカタのタネ)とした。72穴セルトレイにセル成型苗養土（ナプラ養土Sタイプ，ヤンマー農機（株））を充填し1セルに1粒ずつ播種した。

3.3.2.2 一次育苗

3.2節と同様の方法とした。

3.3.2.3 測定項目および算定項目

3.3.2.3.1 環境測定

【試験3-4】における環境測定は3.2.2.3.1と同様の方法とした。

【試験3-5】では、光環境の測定には群落上（栽培ベンチ面から高さ100cm）に局所冷房あり区と局所冷房なし区の1点ずつに簡易型日射計（ML-020P, 英弘精機（株））と群落内（栽培ベンチ面から高さ15cm）に全試験区の群落中央に1点ずつにラインPPFセンサ（SQ-311, Apogee Instruments Co., Ltd.）を設置した。

各センサはデータロガー（GL220 or GL820, グラフテック（株））に接続し、測定値は60s間隔で測定した。

群落内および群落外の分光分布は分光放射計 (MS-720, 英弘精機 (株)) を用いて測定した。

気流速の測定は、熱線式風速計 (MODEL6114, 日本カノマックス (株)) を用いて、ダクト吹き出し口の高さ 15 cm で各試験区 7 点、10 秒間隔で 5 回の平均気流速を測定した。使用した熱線式風速計は、指向性があるため水平方向の気流速を測定した。

3.3.2.3.2 生育調査と統計処理

生育調査は二次育苗開始時と二次育苗終了時に、莖長 (根部から成長点まで)、各節の節間長、葉数 (10 mm 以上の本葉数)、第 3 葉および第 5 葉の SPAD 値 (クロロフィル濃度の指標)、総葉面積、部位別の生体重、部位別乾物重および第 1 花房着生葉位とし、各 8 株を測定した。Stem/DW (大であるほど徒長していることを示す)、比葉重 (葉の厚さ) および乾物率を算定した。

各試験区の各測定および算定項目の平均値の差を Tukey-Kramer's test を用いて 5% の有意水準で検定した。

3.3.2.3.3 光合成速度の測定

3.2.2.3.3 と同様の方法とした。測定チャンバに流入する空気の CO₂ 濃度は 500 μmol mol⁻¹ に設定し、気温は 28°C、相対湿度は 50% 前後となるよう調整した。【試験 3-5】では、NN 区 (局所冷房なし、LED 補光なし) と NL 区 (局所冷房なし、LED 補光あり) から 4 株をランダムに選び、第 3 葉の葉の表面と裏面を測定対象とし、二次育苗終了時に測定した。

3.3.2.3.4 コスト解析および収益分析

【試験 3-5】については、2013 年 8 月 13 日に定植した。ハウス内に長さ 12 m、幅 0.3 m の栽培ベッドを畝間 1.2 m で 4 列南北方向に配置した。定植は、1 列ごとに 48 株とし、ハウス内にある 4 列の栽培ベッドのうち、外の 2 列に二次育苗試験を行った苗を定植した。ハウス内には、一流体方式の細霧冷房装置が設置されており、9 月 22 日まで相対湿度が 80% になるように細霧冷房を行った。ハウス内日射量が 0.75 kW m² 以上となった時に、遮光カーテン (遮光率 55% 以上) が 80% に展開されるよう設定した。定植して約 20 日後に、一斉に第 3 果房上の 2 葉を残して摘心した。着果促進剤として、トマトーン (石原産業株式会社) 100 倍希釈液を各花にそれぞれ開花した際に 1 回散布した。

LED の消費電力の測定およびコストの試算は 3.2.2.3.4 と同様の方法とした。

3.3.2.4 【試験 3-4】夏季の二次育苗における群落内環境の解析

試験は千葉大ハウスで行った。千葉大学の閉鎖型苗生産システムで一次育苗した苗を用いて 2013 年 6 月 3 日 (19 DAS) から二次育苗を行った。ハウス内気温が 27.5°C 以上、相対湿度が 70% 以下

になった際に細霧冷房を噴霧時間 30 s で行った。細霧ノズル（細霧粒径 15-20 μm , (株) 霧のいけうち）は栽培ベッド 1 列に 16 個、温室内に 64 個のノズルが均等に設置されているが、栽培ベンチ上に設置されたノズルを遮断した。遮光カーテン（遮光率 55%）は温室内日射量が 0.6 kW/m^2 以上となった時に、80%に展張されるよう設定した。

環境測定する箇所は Fig. 3.13 に示す。

二次育苗開始時の 2013 年 6 月 6 日（19 DAS）と 6 月 13 日（26 DAS）に草丈および葉数とし、西側と東側の群落に分けて各 36 株を調査した。

3.3.2.5 【試験 3-5】 局所冷房および LED 補光がトマトの生育および収量に及ぼす影響

試験は千葉大ハウスで行った。千葉大学の閉鎖型苗生産システムで一次育苗した苗を用いて 2014 年 8 月 4 日（25 DAS）から二次育苗を行った。ハウス内日射量が 0.75 kW/m^2 以上となった時に、遮光カーテン（遮光率 55%以上）が 80%に展張されるよう設定した。

試験区は局所冷房および LED 補光を行わなかった NN 区と、LED 補光のみを行った NL 区、局所冷房のみを行なった CN 区、LED 補光および局所冷房を行った CL 区とした（Fig. 3.14 A）。環境測定する箇所は Fig. 3.14 B に示す。

局所冷房に用いたヒートポンプは冷房能力 11 kW のネポン社製のグリーンパッケージ(NGP54T)とし、25 $^{\circ}\text{C}$ の設定で 24 h 自動制御とした。ヒートポンプは、消費電力がおよそ 3.76 kW で、風量が 41 $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$ だった。ダクトは栽培ベンチ上の周辺に設置し、計 18 箇所から冷風が吹き出すように設計した（Fig. 3.14 C）。

LED 補光は、ピーク波長が 450 nm の青色 LED と 660 nm の赤色 LED のチップが 1 : 2 の間隔で並んでいる青赤色の直管形 LED（DPT2RB120Q3340 形, CIVILIGHT Shenzhen Semiconductor Lighting Co., Ltd., 定格消費電力: 33 W, 定格寿命: 40000 h）を光源とし、各試験区に 4 本設置し、10 cm 間隔においた 24 ポット 32 株を対象に、群落下から上方に補光した（Fig. 3.14 D）。光強度は、茎伸長を抑制に必要な青色光 75 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と赤色光 150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で光源から 4 cm 離れた成長点付近の PPF 225 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ になるように調節した。照射時間は 7 時から 19 時までの 12 h d^{-1} とした。

二次育苗の環境制御は、26 DAS から 35 DAS まで行った。

二次育苗開始時（2014 年 8 月 4 日（26 DAS））と二次育苗終了時（2014 年 8 月 13 日（35 DAS））に各 8 株の生育調査を行った。試験の概要を以下に記す。

試験区	局所冷房	LED補光
NN	—	—
NL	—	○
CN	○	—
CL	○	○

3.3.3 結果および考察

3.3.3.1 【試験 3-4】 夏季の二次育苗における群落内環境の測定

2013年6月12日から6月18日の二次育苗における平均PPFは東側で $124 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、中央で $94 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、西側で $117 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ となり、西側および中央で低い値を示した (Table 3.12)。中央のPPFが最も低い値を示した原因は、ハウスの構造による差異であると考えられる。すなわち、フォトダイオードを設置した中央の上方にはハウスの骨材 (梁または雨どい) があり、自然光を遮っていた可能性がある。特に直達光が多い晴天日では、別の場所で測定した値と中央のフォトダイオードの値との差が大きかった (データ略)。他方、西側には暖房機が設置されていたため、東側に比べて西側のPPFがやや低い傾向がみられた。さらに、日射によって温風暖房機の機器本体に蓄熱した熱が原因で西側の平均気温および最高気温が東側および中央より大となったと考えられた (Table 3.12)。相対湿度では、東側および西側で高い傾向がみられ、しばしば95%以上の値を示した (データ略)。これは、植物体の蒸散やかん水時のトレイあるいは培地面上からの蒸発散による影響と考えられた。一般に高相対湿度は光合成を促進するが、95%以上の高相対湿度下では、根圧 (根細胞の浸透圧) により葉内水分が過剰となり、気孔開度が小さくなり、光合成速度が低下する (矢吹, 1985)。よって、夏季の二次育苗では除湿および気流制御を行う必要がある。そこで、【試験 3-5】では、冷房だけでなく、除湿効果と気流制御が可能な電気ヒートポンプを用いて局所冷房を行うことにした。

6月18日の8時、12時および16時に測定した各測定点における波長組成を Fig. 3.15 および Table 3.13 に示す。群落上のR/FR比は1.0以上だったのに対し、群落内部は0.5以下に低下していた (Table 3.13)。一般に、遠赤色光は赤色光より葉の透過率が高く、群落内部のR/FR比が低下する。フィトクロム光平衡 (PSS) は西側で0.61-0.65、東側で0.50-0.60となり、ともに避陰反応を誘導している可能性が高かった。よって、夏季の二次育苗においても、群落内に赤色光および青色光の補光を行う必要がある。

Fig. 3.16 は Fig. 3.13 に示したトマト群落を西側と東側に分けた場合の36株の草丈の高さ分布を表しており、6月13日の結果では、東側のトマト群落における平均の草丈の高さは西側に比べて4 cm 高かった (Fig. 3.16)。この原因は光強度および気温のわずかな差が影響しているものと考えられる。特に、気温では、DIF (明期気温と暗期気温との差) が正に大きくなると茎伸長を促進することが知られており (高木, 2005)、局所冷房により明期気温を下げることであれば、徒長を防止できる可能性がある。

本試験に用いた光量子センサのフォトダイオードは波長依存性があるものだった。群落上と群落内では波長組成が異なり (Table 3.13)、測定精度に問題が生じる危惧があった。しかし、6月18日の全天日射計の相対光強度 (透過率) の日平均値は0.16に対し、フォトダイオードでは0.15だった (データ略)。よって、フォトダイオードにおける測定精度に問題はないと考えられた。トマト群落の相対光強度は6月12日の日平均で西側が0.33、東側が0.35となり、6月16日の日平均で西側および東側がともに0.17だった (Fig. 3.17)。よって、夏季における強い日射の条件下においても、

群落内の光強度は低く、群落内に補光する必要があることが示唆された。そこで、【試験 3-5】では、群落内から（群落下から上方に光照射する）LED 補光することにした。

3.3.3.2 【試験 3-5】 局所冷房および LED 補光がトマトの生育および収量に及ぼす影響

局所冷房区における群落内（栽培ベンチから高さ 15 cm）の平均気流速は、気流速の測定時におけるハウス外の平均風速が 3.1 m s^{-1} の時、CN 区 $0.54 \pm 0.25 \text{ m s}^{-1}$ および CL 区 $0.56 \pm 0.28 \text{ m s}^{-1}$ となり、NN 区 $0.16 \pm 0.09 \text{ m s}^{-1}$ および NL 区 $0.15 \pm 0.08 \text{ m s}^{-1}$ に比べて高くなった（Table 3.14）。気流速が高まれば、葉面境界層抵抗は小さくなるため、光合成および蒸散速度は高まると考えられる（矢吹, 1985）。トマト苗の個葉の光合成速度は気流速 $0.3\text{--}0.6 \text{ m s}^{-1}$ で最大になり（矢吹・宮川, 1970; Kitaya et al., 2003）、それ以上に気流速を高めると、水蒸気の拡散速度が高まり過ぎて蒸散が過剰となり、葉内水分が低下し、気孔開度が低下することで、 CO_2 および水蒸気の拡散に対する気孔抵抗が高まり、光合成および蒸散速度が低下する。予備試験を行った結果、冷風の吹き出し口の数が 6 箇所の場合、局所的に非常に強い風が吹き込み、平均気流速は $4.94 \pm 5.93 \text{ m s}^{-1}$ だった（データ略）。他方、本試験における冷風の吹き出し口を 18 箇所とした場合の局所冷房は、光合成に適する気流速の範囲にあり、適切な気流制御だったと考えられた。また、空気流動がある場合、トマト苗の根部の乾物重が増加する（伊東, 1972）という報告があることから、ヒートポンプによる冷風で気流を受けていた株の根部の乾物重は増加した可能性が考えられる。

群落内の相対湿度は CN 区で NN 区より高い傾向が見られたが、絶対湿度が低かった（Table 3.15）。他方、CL 区の湿度センサは、同条件で測定した他のセンサと比べて、相対湿度が 5% 程度高くなっていることが明らかとなり、CL 区の相対湿度、絶対湿度、飽差（VPD）に誤差が生じたものと考えられた。群落内の日平均気温は CN 区で NN 区と比べて 1.9°C 低く、CL 区で NL 区に比べて日平均 0.8°C 低かった（Table 3.15 and Fig. 3.18）。以上より、ヒートポンプによる冷房および除湿効果があったと考えられた。しかし、LED 補光区の NL 区および CL 区では、無補光区の NN 区および CN 区に比べて、日平均で $1\text{--}2^\circ\text{C}$ 程度高くなった（Table 3.15 and Fig. 3.18）。これは局所冷房による温度低下幅と同程度の温度上昇だった。予備試験の結果、局所冷房による日平均気温 1°C の違いは栄養成長器官に影響を及ぼさないが、生殖成長器官に影響を及ぼし、局所冷房区の収量は対照区に比べると増加することが明らかとなっていた。したがって、CL 区における局所冷房と LED 補光の効果はそれぞれの影響が拮抗する可能性があった。

本試験では夏季の 8 月中旬にハウスで二次育苗を行ったこともあり、全試験区で気温が非常に高く、VPD が大となった（Table 3.15 and Fig. 3.18）。このような条件下では、気孔コンダクタンスが大きく、蒸散速度も著しく大きくなる（稲田ら, 2010）。蒸散速度は、葉内の飽和水蒸気圧と葉の外側の水蒸気圧との差が大きくなると増加する。一般に、VPD が大きすぎると、葉は薄く、茎は伸長し、カルシウム欠乏に陥ることが知られている。この原因は、根から水分が吸水される以上に蒸散することで、気孔が閉じ、光合成速度および養分吸収速度の低下によると考えられる。本試験における明期の VPD は全試験区で 1.0 kPa 以上だった（Table 3.15）。 1.0 kPa 以上の VPD では植物が乾燥ストレス状態にあるとされ（フューヴェリンク, 2012）、光合成速度および養分吸収速度が低下してい

た可能性が高かった。また、茎伸長速度は NN 区で 3.4 cm d^{-1} 、NL 区で 3.2 cm d^{-1} 、CN 区で 3.4 cm d^{-1} 、CL 区で 2.4 cm d^{-1} となり、 DLI_{blue} が本試験より少ない冬季の二次育苗（【試験 3-3】における茎伸長速度は補光なしの Cont. で 2.1 cm d^{-1} 、補光ありの P200 区で 1.4 cm d^{-1} ）に比べて速い茎伸長速度を示した。よって、夏季の二次育苗では現状の局所環境制御を行ったとしても、冬季の二次育苗に比べると茎伸長抑制効果は小さく、徒長する温湿度の環境であったことが示唆された。ただし、本試験区における気温や VPD と茎伸長速度との間に相関関係はなく（データ略）、全試験区で茎伸長を促進する環境下ではあったものの、その影響力は頭打ちになっていたと推測される。

栽培ベンチ面から 15 cm に位置する群落内の PPF は CN 区および CL 区で NN 区および NC 区より $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度高い傾向があり、栽培ベンチ面から 100 cm に位置する群落上の PPF は CN 区および CL 区で NN 区および NC 区より $7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度高い傾向があり、相対光強度は局所冷房区で大となった（Table 3.15）。局所冷房区には、栽培空間の回りにエアダクトが設置されており、直達光が散乱して群落内に入射した可能性が示唆された。LED 光は光源から真上に 7 cm 離れた箇所で $225 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ になるように調光した。LED は上方に補光しているため、PPF センサが上方の PPF を測定した結果では、LED 補光区の群落内 PPF は無補光区と $3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度の差しかみられなかった。

補光した試験区（NL 区および CL 区）と補光していない試験区（NN 区および CN 区）の間には草丈および節間長において有意な差がみられた（Fig. 3.19）。群落外（成長点付近）ならびに群落内（高さ 20 cm ）の DLI_{blue} と茎伸長との関係は、群落内（ $r=-0.89, P=0.11$ ）より群落外の DLI_{blue} と茎伸長との相関（ $r=-0.97, P=0.03$ ）が高く、成長点付近の DLI_{blue} は、NL 区および CL 区で $4.7 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ および $5.0 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、NN 区で $4.2 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、CN 区で $4.3 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ だった（Fig. 3.20）。この結果から、LED 補光による上位葉への青色光量の増加がトマト苗の茎伸長を抑制したと考えられた。以上より、群落下からの上方補光によって、夏季の二次育苗で問題となる徒長を防止することが可能であることが示されたが、群落上から下方補光によって、上位葉の青色光量を増加させる方が効率的に茎伸長を抑制できると考えられた。

LI-6400 の人工光源を用いて単位葉面積当たりの光合成速度を測定し、無補光区の NN 区および補光区の NL 区における表面と裏面の葉における光-光合成曲線を作成した結果、PPF $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ より大きい時、表面の葉における光合成速度は両区で裏面の葉における光合成速度に比べて高かった（Fig. 3.21）。葉の光-光合成曲線は、葉の表から光を当てた時と、裏から光を当てた時とで異なることが知られている（Terashima and Saeki 1985, Terashima, 1986）。これは、1) 葉の構造上の理由で光の吸収率が変わる、2) クロロフィルの性質あるいは局在性の違いにより光合成能力が変わる、などが原因としてあげられる。吸収された光は光合成に利用されるので、表面と裏面に関係なく同じ光強度なら同じ量の光合成が行われるが、葉の裏に毛が生えているため、表と裏で光の吸収率が変わってしまうので、光合成速度が変わる。また、各組織（柵状組織と海綿状組織）における葉緑体の光環境は均一ではないため、表側から光を当てたときには、表側にある葉緑体が強い光を受ける。表側の葉緑体が多く光を吸収してしまう結果、裏側にある葉緑体が吸収できる光強度は低下する（Terashima and Saeki, 1983）。さらに、各葉緑体の性質は同じではなく、クロロフィルあたりの光合成速度を比較すると、表側にある葉緑体のほうが、強光下での光合成速度が高い（Terashima and Inoue,

1984)。よって、一般的には、光合成の向上を目的とした場合は、葉の表面に補光した方が効率的であるといえる。

以上より、日射の強い夏季ではLEDによる補光量がLED設置による自然光の遮光量より小さくなることも考えられるが、本試験で用いた群落下から上方に補光する方法では、茎伸長抑制効果が低く、光合成効率も低いため、群落上から下方に補光する方法の方が望ましいと考えられた。

トマト苗の栄養成長の調査項目において、全項目で局所冷房あり区（CN区およびCL区）と局所冷房なし区（NN区およびNL区）の間に有意な差は見られなかった（Table 3.16）。LED補光あり区（NL区およびCL区）とLED補光なし区（NN区およびCN区）では、SPAD値および比葉重に有意な差がみられ、LED補光あり区で大となった（Table 3.16）。また、徒長の指標であるStem/DWは、LED補光あり区でLED補光なし区に比べて小さい傾向がみられ、補光による徒長防止効果が認められた。

第1花房および第2花房の開花日は局所冷房ありのCN区およびCL区で局所冷房なしのNN区およびNL区に比べて遅延し、開花が抑制された（Table 3.17）。花芽の分化速度は高温時には早く、1つの花房の分化が早く終わる（斎藤・伊藤, 1962; 高橋ら, 1973）。よって、局所冷房によって花房近傍が低温に暴露され、開花が抑制されたと考えられた。他方、LED補光ありのNL区とCL区はLED補光なしのNN区およびCN区に比べて花芽数が多い傾向がみられた（Table 3.17）。よって、花芽数は光合成生産による影響を受けているものと考えられた。

果房別の収量調査の結果、局所冷房ありのCN区およびCL区の1果当たりの果実生体重は第1果房で局所冷房なしのNN区およびNL区に比べて大となり、特にCN区で最大となった（Fig. 3.22 A）。1株当たりの果実数は、第1果房ではLED補光ありのNL区で、第2果房ではLED補光ありのCL区で最大となった（Fig. 3.22 B）、1株当たりの収量は環境制御を行わなかったNN区に対して、環境制御を行ったNL区、CN区およびCL区で大となる傾向がみられた（Fig. 3.22 C）。以上より、本試験期間における夏季の二次育苗では、局所冷房よりLED補光を行うことで、徒長の防止および収量増加が見込めることが明らかとなった。

収量はNN区<NL区<CL区の順となり、CL区はNN区の1.2倍の収量だった（Fig. 3.22C）。トマトの販売価格（230円/kg）を乗じた結果、NNが245円/株、NL区が288円/株、CL区が293円/株と算出された（Table 3.18）。4本のLEDを点灯した場合の消費電力は134Wだった。12hd⁻¹のLED照射時間で9日間処理するので、LED補光に伴う消費電力量は14.4 kWhとなった。よって、1株当たりのLEDのランニングコストは、消費電力量に電気料金（20円/kWh）を乗じ、4本のLEDで供試した32株で割って、NL区およびCL区のLEDのランニングコストは9円/株と算出された（Table 3.18）。本試験に用いたLEDの定格寿命は4万時間でだった。耐用年数は定格寿命から年間の点灯時間を割ることで算出できるため、このLEDを二次育苗のみに使用する場合、年4作で1日12hで9日間の補光を行うと、約93年使用できることになる。しかし、日本照明工業会では、安定器、ソケットや電線など電気絶縁物の絶縁劣化によって、「一般的には照明器具の寿命の目安を10年」としていることや、一般的な光源は住居環境での使用を前提しており、温室のような高温・高湿度な条件であることを考慮すると、耐用年数は10年を超えずに見積もることが推奨されている（郡山ら, 2014）。したがって、耐用年数を10年として減価償却の定額法を用いて、本試験で

掛かる LED のイニシャルコストを算出した結果、37.5 円/株となった (Table 3.18)。以上より、LED 補光に掛かるコストとトマトの販売価格からの収益を計算すると、NN 区に対して NL 区の増益率は-1.3%となり、NN 区に対して CL 区の増益率は 0.7%となった (Table 3.18)。

本試験では、1 本の LED 当たりには供試した株数が少なかったため、計算上の増益率が小さくなったと考えられる。仮に、4 本の LED で供試可能な株数を 56 株とすれば、増益率は NL 区で 8.0%、CL 区で 9.9%となる。局所冷房におけるコスト計算は行っていないが、補光における費用対効果より小さいと考えられ、本試験期間の高温下では、局所補光が有効だったと考えられた。また、計算上の増益率が小さくなった原因として、本試験期間における明期気温が 35°C の時間帯が多かった影響も考えられた。

植物の光合成速度は気温によって変化し、光合成速度を高く維持する温度域が存在することが知られている。トマトの生育モデル ‘TOMGRO’ (Johnes et al., 1991) では、気温関数を用いて、光合成速度を推定している。気温関数とは、気温が光合成の適温域から外れた際に光合成速度がどの程度減少するかを表した関数である。‘TOMGRO’ では、28°C 以上の気温下では、光合成速度は比例的に減少し、およそ 35°C で光合成速度が 0 になると記述している。よって、35°C 以上の気温下では、トマト苗の成長が停まっている可能性が高く、局所環境制御の効果がみられなかった可能性が高い。すなわち、本研究の局所冷房は日平均気温を 1-3°C 低下させたが、気温が 35°C 以上の時間帯が多かった環境下だったため、本研究で期待される局所環境制御の効果が得られなかったと考えられる。

3.4 結言

本章では、二次育苗において低コストで効率的に高品質な苗を生産するために、冬季あるいは夏季の気象条件に応じて局所環境制御を行い、トマトの生育および果実収量に及ぼす影響を調査した。

最初に、冬季と夏季でそれぞれの群落内外の環境測定および生育調査を行った結果、冬季では光環境の改善が、夏季では温湿度および光環境の改善が必要であることが明らかとなった。また、冬季に比べて夏季に二次育苗を行った苗が著しく徒長した。その原因は飽差が高いことによる蒸散過多および群落内光環境が低 R/FR 比になることによる避陰反応の誘導などが原因と考えられた。

次に、冬季の二次育苗では局所補光を検討した。青色補光が茎伸長抑制に効果的であると仮定し、人工気象室内で部位別に青色 LED 補光を行った結果、成長点付近の上位葉に青色 LED 補光した苗の茎伸長速度が下位葉に補光した場合に比べて遅く、植物全体に補光した場合と同程度の値を示した。よって、徒長防止を目的とした場合、LED 補光は群落上から上位葉に補光すると良いと考えられた。ハウスにおいて、気温と CO₂ 濃度を好適な環境に制御した上で、青色光を 75 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で一定とし、光強度を 2 水準として、群落上から上位葉へ補光した場合、日積算青色光量が多い試験区で茎伸長が抑制され、徒長が防止された。また、光強度が高い試験区ほど、苗の成長ならびに、定植後の成長および収量を増加させ、LED 補光に掛かるコストとトマトの収益から計算した増益率は 72.4% となることが明らかとなった。

夏季の二次育苗では、冷房の重要性が高いと考え、局所冷房の試験を行ったところ、局所冷房はトマトの生殖成長に強く影響を及ぼし、収量が増加することが示唆された。しかし、局所冷房だけでは徒長を防止することができず、冬季より夏季の方が徒長の問題が大きいため、LED 補光と局所冷房を組み合わせる必要があると考えられた。局所冷房と LED 補光を組み合わせた試験結果では、群落内における明期の平均気温が 31.3°C のとき、局所冷房では、開花が遅れることにより 1 果実当たりの重量は増えるものの、収量増加は見込めなかった。他方、群落下からの局所補光は、日射を遮ることなく、補光できるため、効果的に茎伸長を抑制しつつ、トマト苗の成長を促進させた。さらに、LED 補光区では、花芽の数が多くなり、収穫した果実数が増加し、収量が増加した。しかし、夏季における局所環境制御の費用対効果は冬季に比べて小さかった。

植物の光合成速度は気温によって変化し、光合成速度を高く維持する温度域が存在することが知られている。トマトの場合 28°C 以上の高温下では、光合成速度は比例的に減少し、およそ 35°C で光合成速度は 0 となると報告されている。よって、35°C 以上の気温下では、トマト苗の成長が停まっている可能性が高く、局所環境制御の効果が小さくなった可能性が高い。ゆえに、夏季の局所環境制御は、群落内における明期の気温が 35°C より低い場合に効果的であり、必要に応じて細霧冷房や遮光カーテンなどの昇温対策を施す必要があると考えられる。その上で、局所冷房および LED 補光を行えば、低コストで効率的な苗生産が可能となり、局所環境制御による収益の増加が見込めると考えられる。

Table 3.1 Common environment conditions of germination.

Dark period	24 h d ⁻¹
Air temperature	26 °C
CO ₂ concentration	Not controlled
Relative humidity	Not controlled

Table 3.2 Common environment conditions in a close seedling production system in Chiba University.

Light period	16 h d ⁻¹
PPF	250 μmol m ⁻² s ⁻¹
Air temperature (Light/dark)	26/19 °C
CO ₂ concentration	1000 μmol mol ⁻¹
Relative humidity	70%

Table 3.3 Common environment conditions in a close seedling production system in Yamamoto town.

Light period	16 h d ⁻¹
PPF	250 μmol m ⁻² s ⁻¹
Air temperature (Light/dark)	25/20 °C
CO ₂ concentration	800 μmol mol ⁻¹
Relative humidity	Not controlled

Table 3.4 Measured environmental conditions^z of light period (7:00-19:00) and dark period of the greenhouse in Yamamoto town in Exp. 3-1.

	Light period	Dark period
PPF (μmol m ⁻² s ⁻¹)	162.1	0.0
Air temperature (°C)	19.7	16.6
RH (%)	57.7	61.8
CO ₂ concentration (μmol mol ⁻¹)	641.0	515.3

^z were measured by the meteorological node. The measurement period was from December 29, 2013 to January 8, 2014.

Table 3.5 Measured environmental conditions of each canopy in Exp. 3-1.

Cultivar	PPF of light period ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		Relative ^z	Relative humidity (%)		Air temperature (°C)	
	Top	Under		Light	Dark	Light	Dark
	Reika	138.8		59.5	0.43	62.2	62.2
Linka409	157.5	57.1	0.36	58.7	57.5	17.4	15.2
Momotaroyoke	113.9	53.9	0.47	62.0	61.1	17.3	15.4

^z PPF of the Under divided by PPF of Top.

Table 3.6 The growth and development of tomato seedlings of the different cultivars at 23 and 35 DAS in Exp. 3-1.

	Cultivar	Number of leaves	Total leaf area (cm ²)	SPAD value of 3rd leaf	Shoot dry weight (g)	Specific leaf weight (gDW m ⁻²)	Percent dry weight (%)	Stem/DW (mm mg ⁻¹)
Before (23 DAS)	Reika	5.5 b*	139.4 b	41.1	0.52 b		8.4	
	Linka409	6.0 a	160.8 a	40.4	0.55 ab		9.2	
	Momotaro	6.1 a	164.5 a	44.2	0.70 a		9.3	
After (35 DAS)	Reika	7.4 y	436.8	36.5	1.35	18.5	9.6	0.42 x
	Linka409	8.1 xy	454.4	38.0	1.40	18.5	9.1	0.35 y
	Momotaro	8.3 x	397.1	37.0	1.41	19.7	9.3	0.38 xy

* different letters indicate significances among the cultivar at P<0.05 with Tukey-Kramer's test (n = 8)

Table 3.7 Measured environmental conditions^z of light period (7:00-19:00) and dark period of the greenhouse in Exp. 3-3.

	Light period	Dark period
PPF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	239.5	0.0
Air temperature (°C)	21.8	16.0
RH (%)	58.8	61.7
CO ₂ concentration ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	868.3	565.4

^z were measured by the meteorological node. The measurement period was from February 13, 2014 to February 28, 2014.

Table 3.8 Measured environmental conditions of each canopy in Exp. 3-3.

Treatment	PPF of light period		^z Relative	Relative humidity (%)		Air temperature (°C)	
	(μmol m ⁻² s ⁻¹)			Light	Dark	Light	Dark
	Top	Under					
P0	230.8	77.5	0.35	59.0	60.0	21.2	15.0
P100	217.5	127.9	0.54	60.0	59.8	21.0	15.3
P200	241.9	136.5	0.49	53.4	59.8	21.8	14.8

^z PPF of Under divided by PPF of Top at 12:00-13:00.

Table 3.9 Effects of supplemental lighting on the growth and development of tomato seedlings at 40 DAS in Exp. 3-3.

Treatment	Number of leaves	Total leaf area (cm ²)	SPAD value		Shoot dry weight (g)	Specific leaf weight (gDW m ⁻²)	Stem/DW (mm mg ⁻¹)	Number of flower buds
			3rd leaf	5th leaf				
Before (23 DAS)	5.8	232.6	45.2		0.54	14.2	0.31	
Cont. (40 DAS)	9.3	769.7	35.9 ab	34.3 b	3.47 bc	23.6 b	0.12 a	5.7
P0	9.0	698.3	34.1 b	37.0 b	3.17 c	23.4 b	0.13 a	4.8
P100	9.0	666.6	36.7 ab	41.5 a	3.91 ab	31.6 a	0.09 b	5.4
P200	9.1	640.3	37.6 a	43.2 a	4.24 a	36.4 a	0.08 b	6.9

* different letters indicate significances among the treatments at P<0.05 with Tukey-Kramer's test (n = 8).

Table 3.10 Effects of supplemental lighting on the growth and development of tomato plants at 73 DAS after transplanting in Exp.3-3.

Treatment	Stem length (cm)	Number of leaves	Total leaf area (cm ²)	Dry weight (g)			
				Leaf	Stem	Other	Total
Cont.	94.1	17.3	2100	11.6	6.9	3.7	22.2
P100	96.1	17.0	2228	11.8	7.0	7.8	26.6
P200	96.4	17.3	2460	12.9	7.2	7.9	28.0
Coefficient of variation	6.4	15.2	29.2	35.5	29.6	87.0	31.8
	1.7	8.3	14.4	18.3	18.2	49.8	7.3
	4.0	5.6	14.8	10.6	11.5	34.1	12.6

Table 3.11 Effects of supplemental lighting on the cost and yield of one crop in Exp. 3-3.

Treatments	(1) Sales of tomato fruits (yen/plant)	Costs of supplemental lighting			(1) - (2) - (3)	Increase (%)
		(2) Running (yen/plant)	(3) Initial (yen/plant)	(1) - (2) - (3)		
Cont.	290	0		290		
P100	353	6	17	330	14.0	
P200	526	9	17	499	72.4	

Table 3.12 Measured environmental conditions^z of each canopy in the greenhouse of Chiba University in Exp. 3-4.

Treatment	Average PPF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		Average relative humidity within canopy (%)	Air temperature within canopy ($^{\circ}\text{C}$)		
	Top	Under		Max.	Min.	Ave.
East	124	26	86.8	34.1	18.9	23.6
Center	94 (94) ^y		78.5	33.7	18.6	23.5
West	117	22	85.5	37.3	18.8	24.4

^z The measurement period was from June 12, 2013 to June 18, 2013.

^y was measured by the meteorological node.

Table 3.13 The spectral characteristics of light sources were calculated from the spectral energy distribution of each measurement point* on June 18, 2013 in Exp. 3-4.

Characteristic	Top of the canopy			Middle of the canopy (West)			Middle of the canopy (East)		
	8:00	12:00	16:00	8:00	12:00	16:00	8:00	12:00	16:00
Wavelength range (nm)	Photon flux ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)								
400-700 (PPF)	950.0	450.0	100.0	250.0	90.0	10.0	50.0	49.0	10.0
300-400 (UV)	52.4	29.0	7.7	9.9	5.5	0.7	3.3	2.8	0.6
400-500 (B)	229.5	115.6	27.9	50.8	21.0	2.6	11.5	11.0	2.5
500-600 (G)	336.6	159.4	35.2	93.1	35.9	3.9	21.5	20.0	3.9
600-700 (R)	383.9	175.0	37.0	106.1	33.1	3.5	16.9	17.9	3.7
700-800 (FR)	370.3	168.1	34.8	176.6	80.6	8.3	74.4	61.4	9.5
B/R	0.60	0.66	0.75	0.48	0.64	0.75	0.68	0.61	0.67
R/FR	1.04	1.04	1.06	0.60	0.41	0.42	0.23	0.29	0.39
PSS**	0.72	0.72	0.72	0.65	0.60	0.61	0.50	0.55	0.60

*indicates Fig. 3.13.

** Phytochrome photostationary state. PSS derived from phytochrome absorbances and photochemical cross sections of Sager et al. (1988).

Table 3.14 Average air speeds of each canopy were measured from heights above the culture bench of 15 cm at 27 DAS in Exp. 3-5.

Treatment	Average air speed of each measurement point ^z (m s^{-1})							Ave. \pm SD.
	1	2	3	4	5	6	7	
NN	0.25	0.10	0.30	0.14	0.09	0.07	0.15	0.16 \pm 0.09
NL	0.11	0.08	0.08	0.20	0.08	0.23	0.27	0.15 \pm 0.08
CN	0.49	0.36	0.39	0.41	0.34	0.76	1.01	0.54 \pm 0.25
CL	0.64	0.59	0.40	0.27	0.43	0.46	1.14	0.56 \pm 0.28

^z Measurement points indicates Fig. 3.14 (C). Average air speed of outside was 3.1 m s^{-1} when average air speeds of each canopy were measured .

Table 3.15 Measured environmental conditions of each canopy were measured from heights above the culture bench of 20 cm at 27-35 DAS in Exp. 3-5.

Treatment	PPF of light period ^z		Air temperature				Relative humidity (%)				Absolute humidity (g/m ³)				VPD (kPa)	
	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		°C		%		g/m ³		g/m ³		g/m ³		kPa			
	Top	Under	Light	Dark	Light	Dark	Light	Dark	Light	Dark	Light	Dark	Light	Dark	Light	Dark
NN	337.8	51.7	31.3	27.0	63.1	78.4	20.1	20.2	1.8	0.8						
NL		55.0	32.4	26.8	58.9	76.9	19.9	19.6	2.2	0.8						
CN		72.1	29.4	25.7	65.3	78.4	18.9	18.8	1.5	0.7						
CL		344.1	31.6	26.4	54.7	71.4	17.7	17.7	2.2	1.0						

^z Light period indicates 6:00-18:00. ^y PPF of Under divided by PPF of Top. The measurement period was from August 5, to August 13, 2014.

Table 3.16 Effects of local cooling and supplemental lighting on the growth and development of tomato seedlings in the vegetative stage at 35 DAS in Exp. 3-5.

Treatment	Number of leaves	Leaf area (cm ²)		SPAD value			Leaf DW (g)		Specific leaf weight (mm mg ⁻¹)		Stem/DW (mm mg ⁻¹)
		Upper*		5th leaf			Upper		Lower		
		Upper*	Lower	3rd leaf	5th leaf	5th leaf	Upper	Lower	Upper	Lower	
Before (26DAS)	5.1	116.9	52.1	0.31	26.2	1.14					
NN	9.9	338.6	428.0	42.8 b	49.6 b	0.72	0.79	19.6 ab	0.33		
NL	10.0	439.4	459.0	46.2 a	51.4 b	0.93	0.95	20.9 a	0.27		
CN	9.6	374.4	439.8	42.4 b	47.8 b	0.75	0.76	18.3 b	0.36		
CL	10.0	337.3	412.9	47.5 a	56.2 a	0.73	0.89	21.7 a	0.28		

* means from 5th leaf to 10th leaf.

** different letters indicate significances among the treatments at P<0.05 with Tukey-Kramer's test (n = 8).

Table 3.17 Effects of local cooling and supplemental lighting on the flower-bud differentiation and development of tomato plants in Exp. 3-5.

Treatment	First flower truss		Second flower truss	
	Anthesis (DAS)	Number of flower	Anthesis (DAS)	Number of flower
NN	43.6±0.6*	3.9±0.4	51.3±0.4	3.3±0.4
NL	44.1±0.7	4.4±0.3	51.4±0.5	3.7±0.5
CN	45.7±0.6	3.5±0.4	53.1±0.4	3.6±0.4
CL	44.7±0.7	3.5±0.3	52.1±0.6	4.5±0.6

*Average±SE. (n=14-16)

Table 3.18 Effects of supplemental lighting on the cost and yield of one crop in Exp. 3-5.

Treatments	(1) Sales of tomato fruits (yen/plant)	(2) Costs of supplemental lighting			Increase (%)
		(2) Running (yen/plant)	(3) Initial (yen/plant)	(1) - (2) - (3)	
NN	245	0	0	245	
NL	288	9	38	241	-1.3
CL	293	9	38	246	0.7

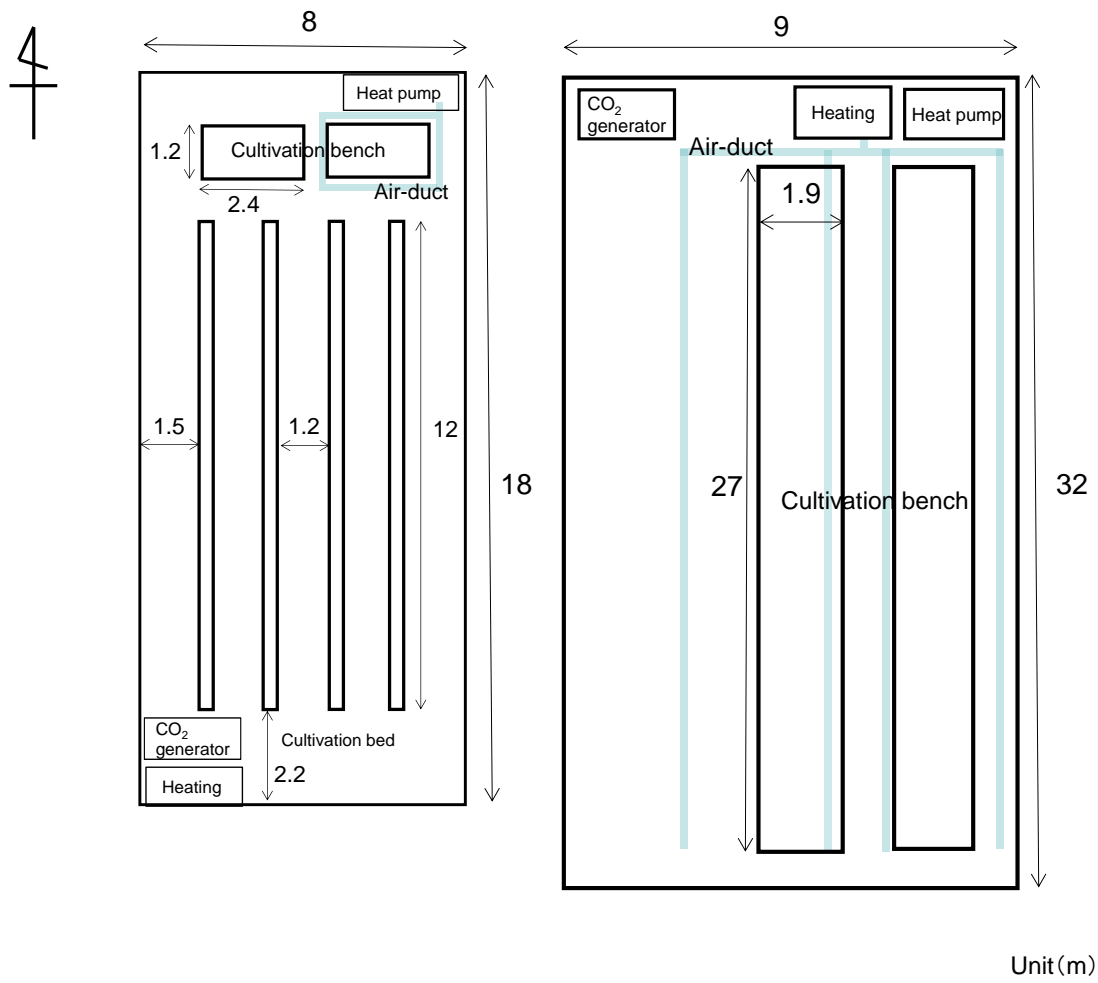


Fig. 3.1 The schematic diagrams of the greenhouses in Chiba University (A) and Yamamoto town (B).



(A)



(B)



(C)

Fig. 3.2. Tomato seedlings (A) in the greenhouse of Chiba University (B) and tomato seedlings (C) in the greenhouse of Yamamoto town.

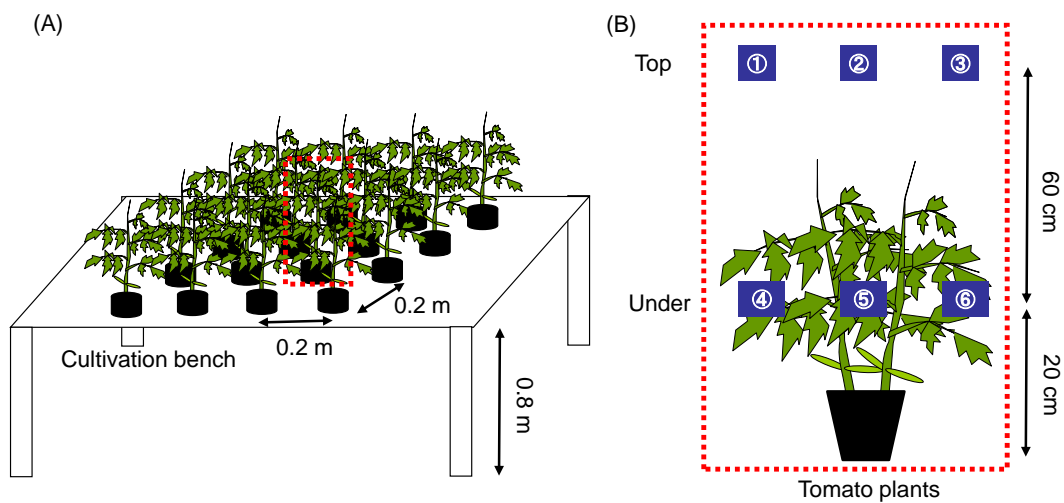


Fig. 3.3 Schematic diagram of the second nursery system (A) with the measurement points (B) in the greenhouse of Yamamoto town in Exp. 3-1. The photo sensors were placed in No.1-6 measurement point, Air temperature sensor and relative humidity sensor were placed in No.5 measurement point.

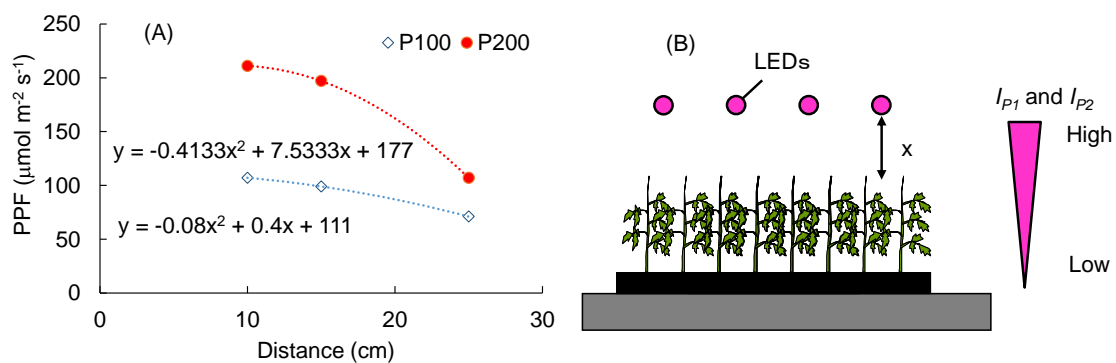


Fig. 3.4 Relationship between the distance (x: cm) between the LEDs and the growing points and light intensity (I_{P1} and I_{P2} : $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) from LEDs light (y) in Exp. 3-3.

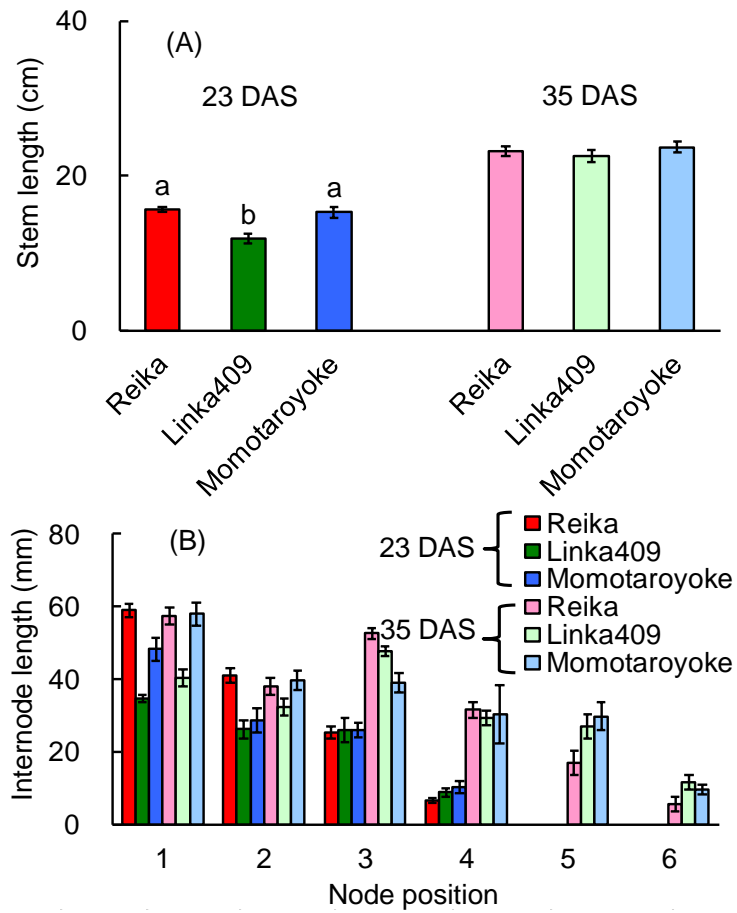


Fig. 3.5 The stem length (A) and internode length (B) of tomato seedlings of 'Reika', 'Linka409' and 'Momotaroyoke' at 23 and 35 DAS in Exp. 3-1. Vertical bars indicate SE (n = 8). Different letters indicate significances among the treatment at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test.

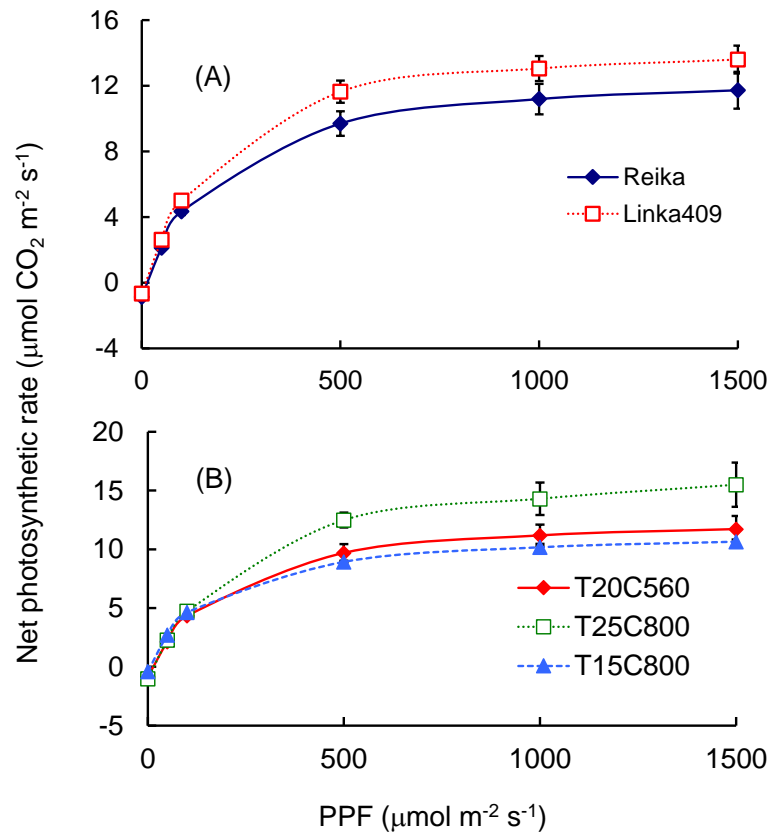


Fig. 3.6 Photosynthetic-light response curves of 3rd leaf of tomato seedlings of 'Reika' (A and B) and 'Linka409' (A) at 35 DAS in Exp. 3-1. They were measured by the portable photosynthesis measurement system (LI-6400, LI-COR Inc). Vertical bars indicate S.E. (n = 3). A: Air temperature was set at 20°C. CO₂ concentration was set at 560 μmol mol⁻¹, B: Air temperature was set at 15 °C, 20 °C and 25 °C. CO₂ concentration was set at 560 μmol mol⁻¹ and 800 μmol mol⁻¹.

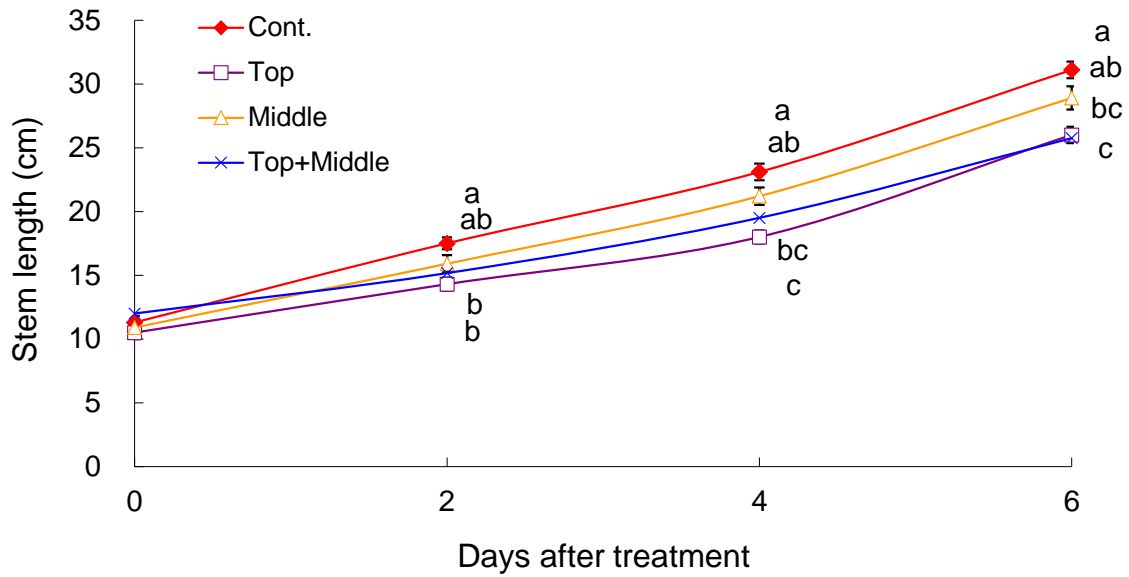


Fig. 3.7 Effects of supplemental lighting on stem length at 22-28 DAS in Exp. 3-2. Vertical bars indicate SE (n = 6). Different letters indicate significances among the treatment at P < 0.05 with Tukey-Kramer's test.

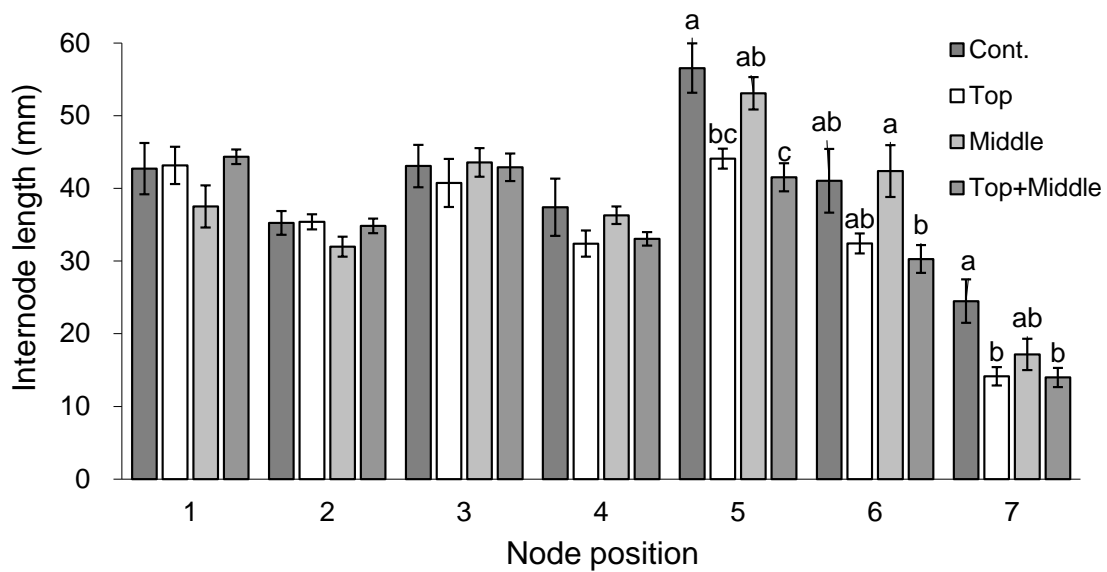


Fig. 3.8 Effects of supplemental lighting on internode length of tomato seedlings at 28 DAS in Exp. 3-2. Vertical bars indicate SE (n = 6). Different letters indicate significances among the treatment at P < 0.05 with Tukey-Kramer's test.

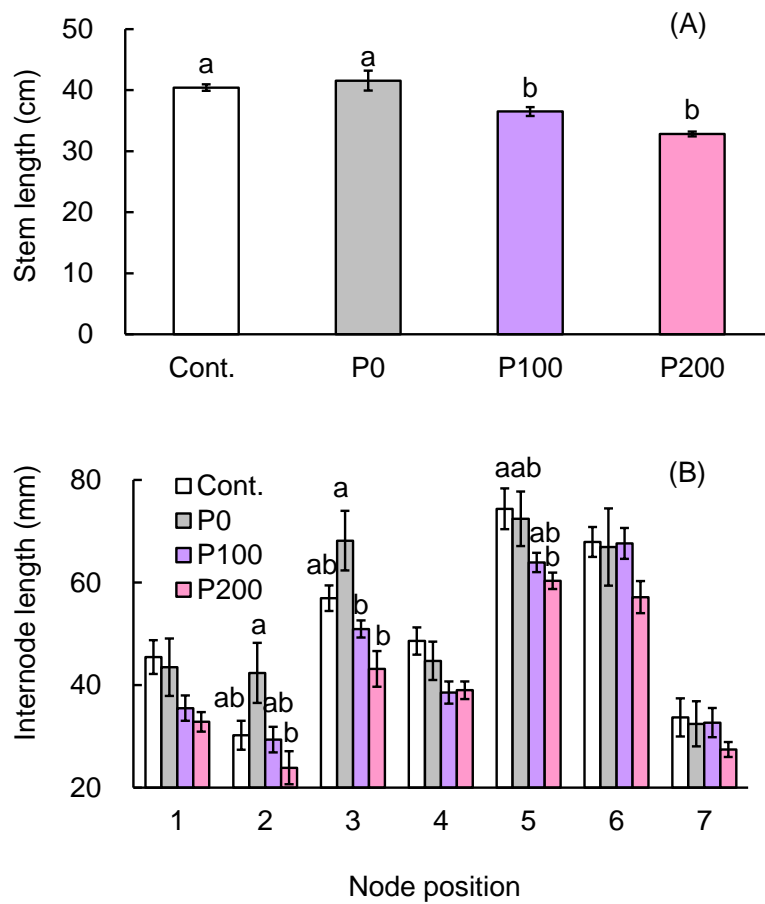


Fig. 3.9 Effects of supplemental lighting on the stem length (A) and internode length (B) of tomato seedlings at 40 DAS in Exp. 3-3. Vertical bars indicate SE (n = 8). Different letters indicate significances among the treatment at P < 0.05 with Tukey-Kramer's test.

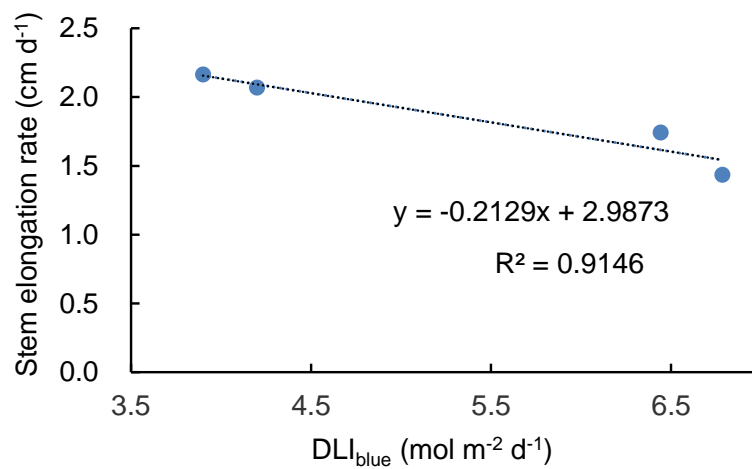


Fig. 3.10 Relationship between daily light integral of blue light of growing point of tomato seedlings and stem elongation of tomato seedlings in Exp. 3-3.

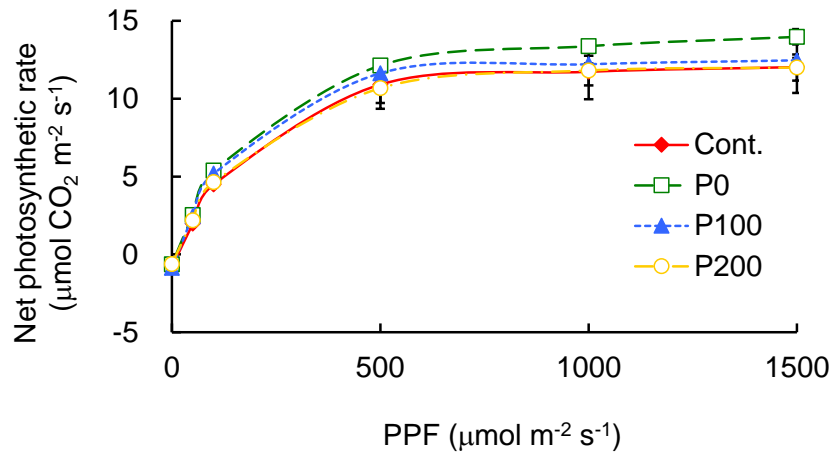


Fig. 3.11 Effects of supplemental lighting on the photosynthetic-light response curves of 3rd leaf of tomato seedlings at 40 DAS in Exp. 3-3. They were measured by the portable photosynthesis measurement system (LI-6400, LI-COR Inc.) with an air temperature of 20°C and a CO₂ concentration of 800 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. Vertical bars indicate S.E. (n = 3).

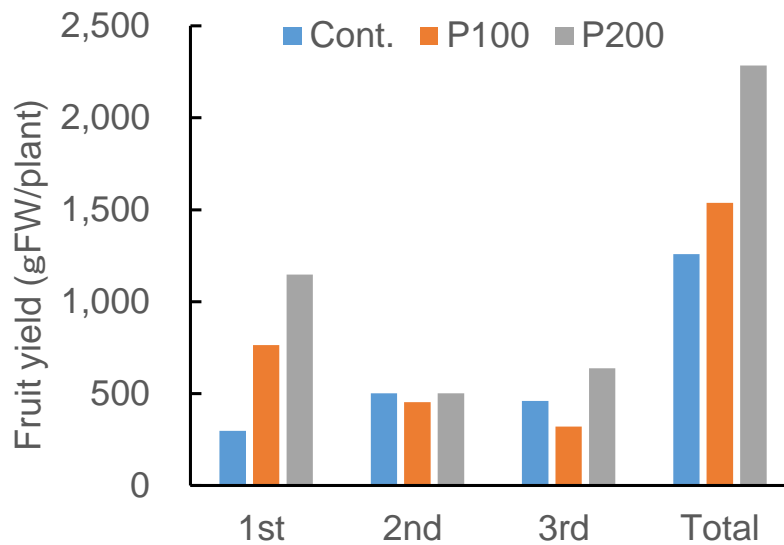


Fig. 3.12 Effects of supplemental lighting on the fruit yield of tomato plants after transplanting in Exp. 3-3.

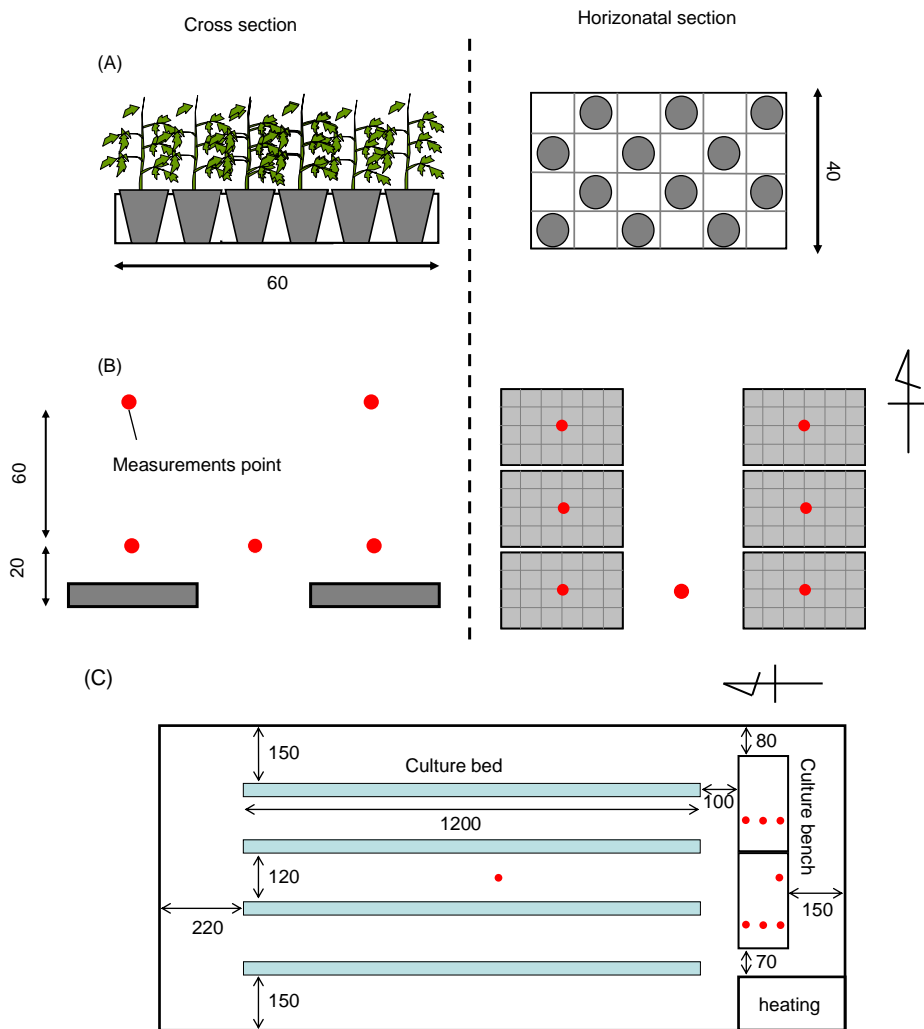


Fig. 3.13 Schematic diagram of the second nursery system (A) with the measurement points (B) in the greenhouse of Chiba University (C) in Exp. 3-4. (Unit: cm)

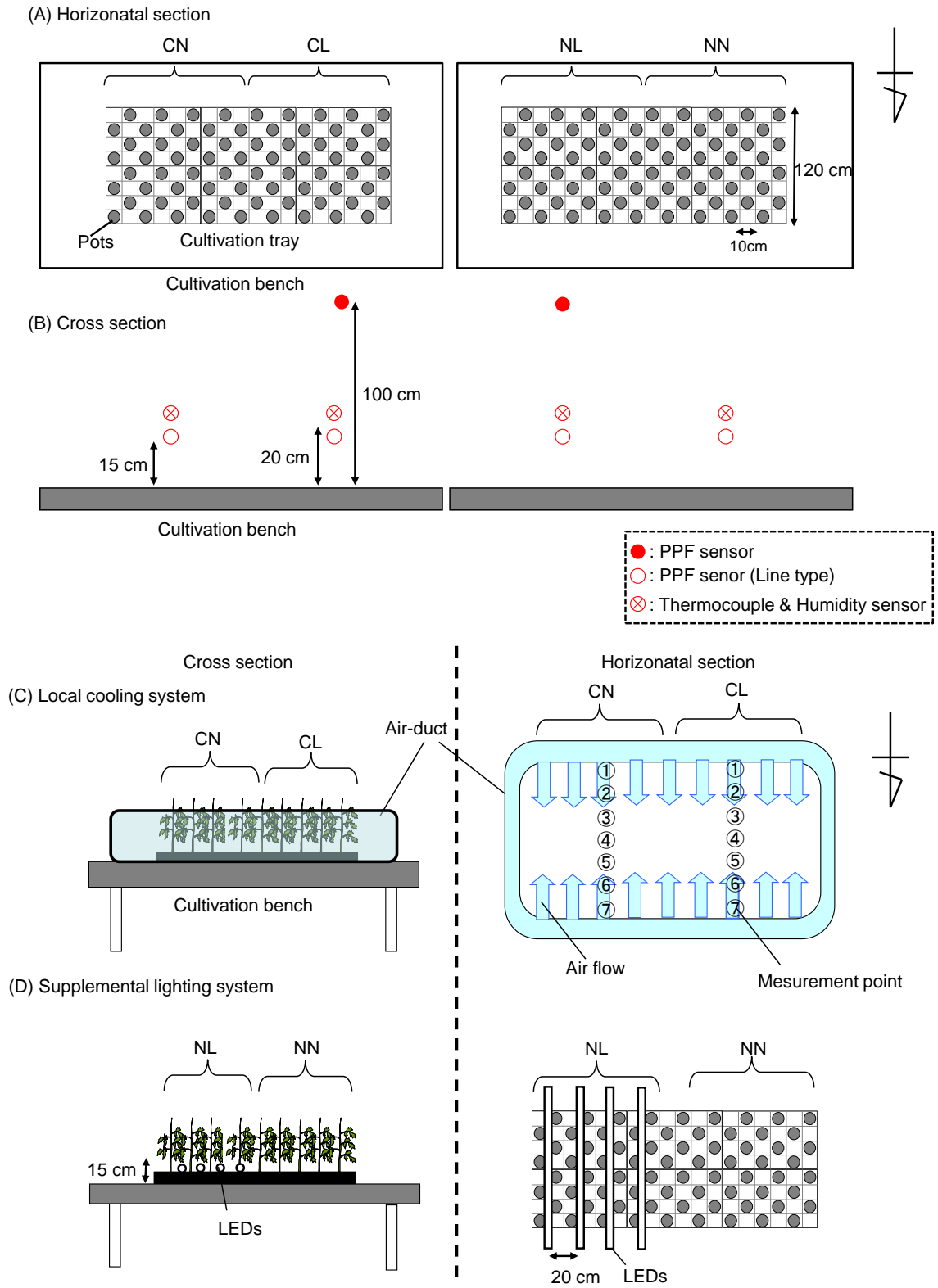


Fig. 3.14 Schematic diagram of the local cooling system and supplemental lighting with the measurement points in the greenhouse of Chiba University in Exp. 3-5.

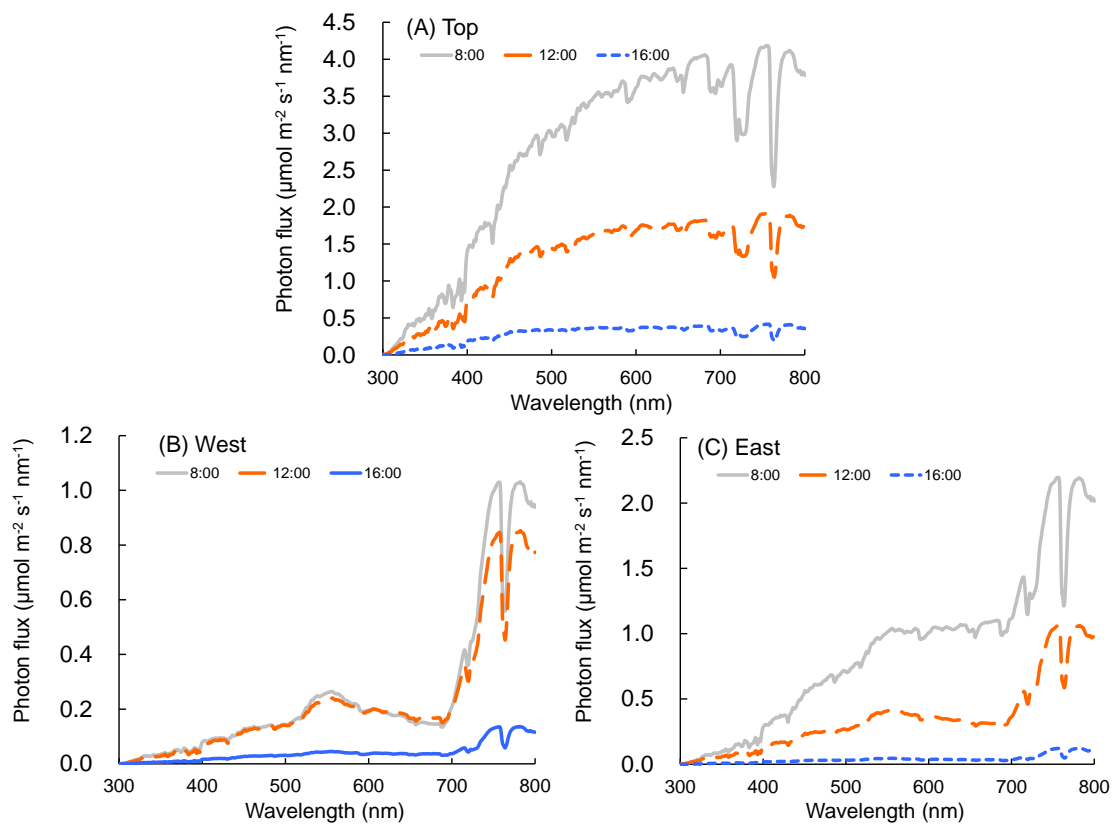


Fig. 3.15 The spectral photon distributions of natural sunlights were calculated from the spectral energy distributions at the measurement points at 8:00, 12:00 and 16:00 on June 18, 2013 in Exp. 3-4. The measurement points indicate Fig. 3.13 (B).

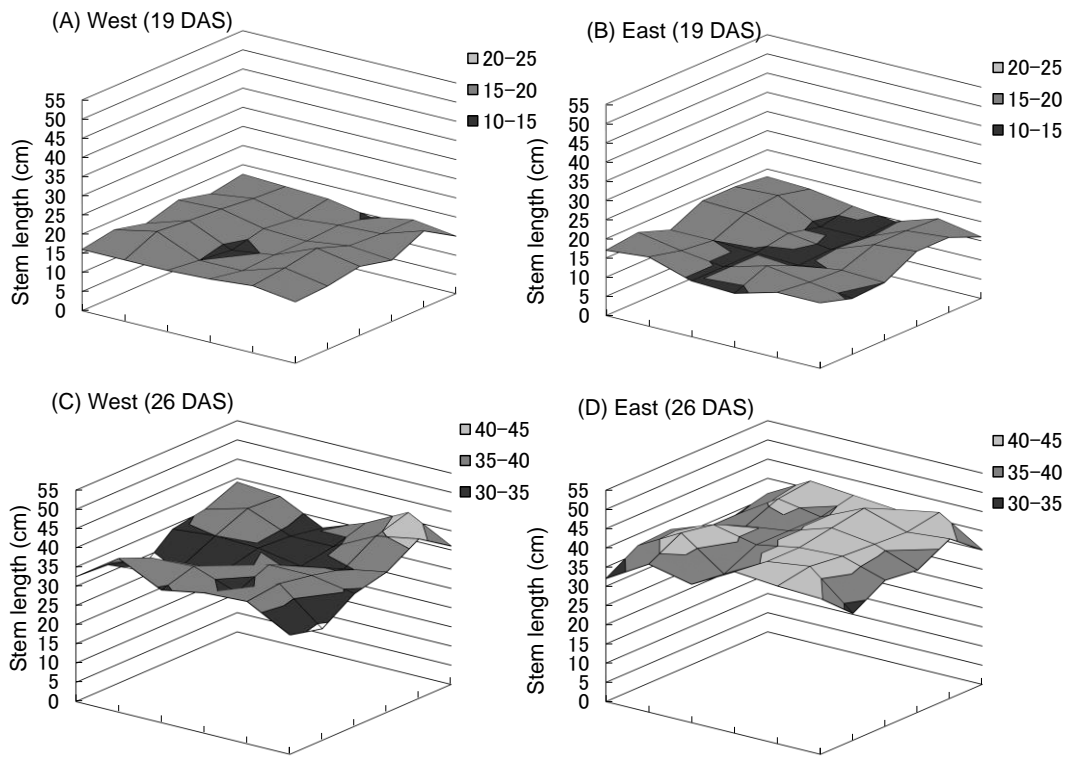


Fig. 3.16 The plant stem length of tomato seedlings grown at different positions of the cultivation bench of west side and east side at 19 DAS and 26 DAS in Exp. 3-4.

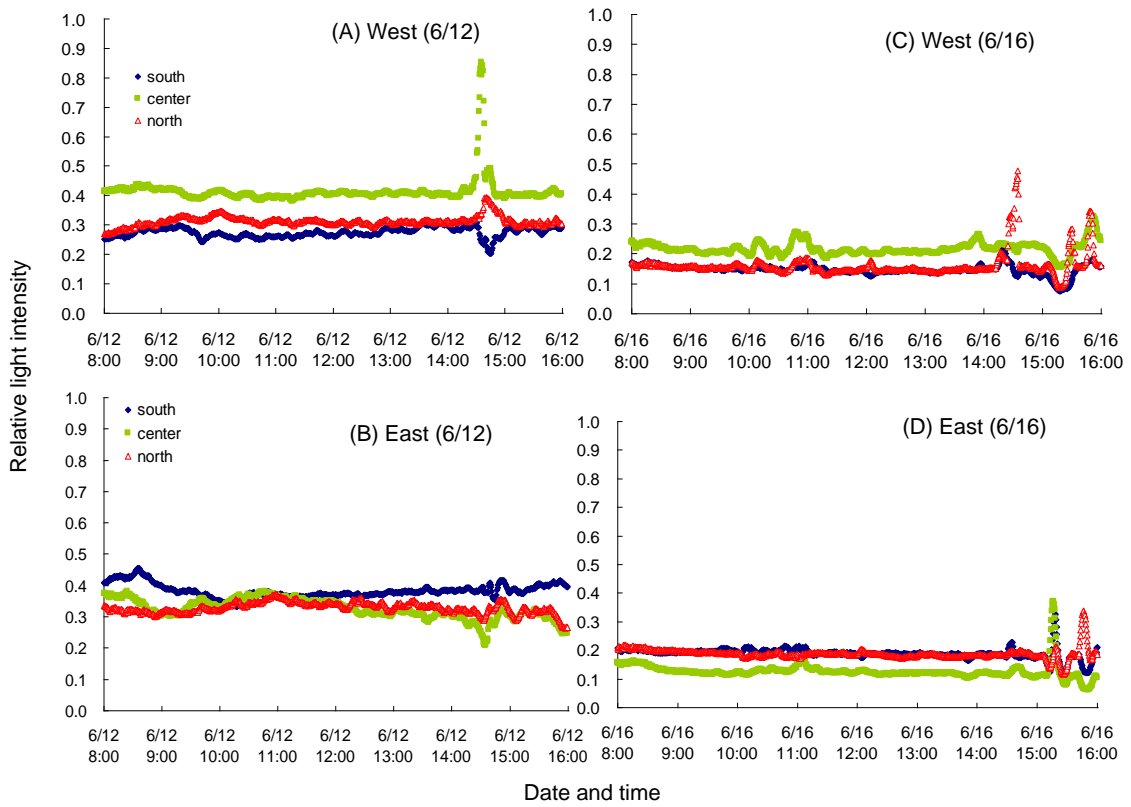


Fig. 3.17 Time courses of relative light intensity measured by the photodiodes at each measurement point on June 12 (A and B), and 16 (C and D), 2013 in Exp. 3-4. The relative light intensity was PPF within the canopy / PPF over the canopy.

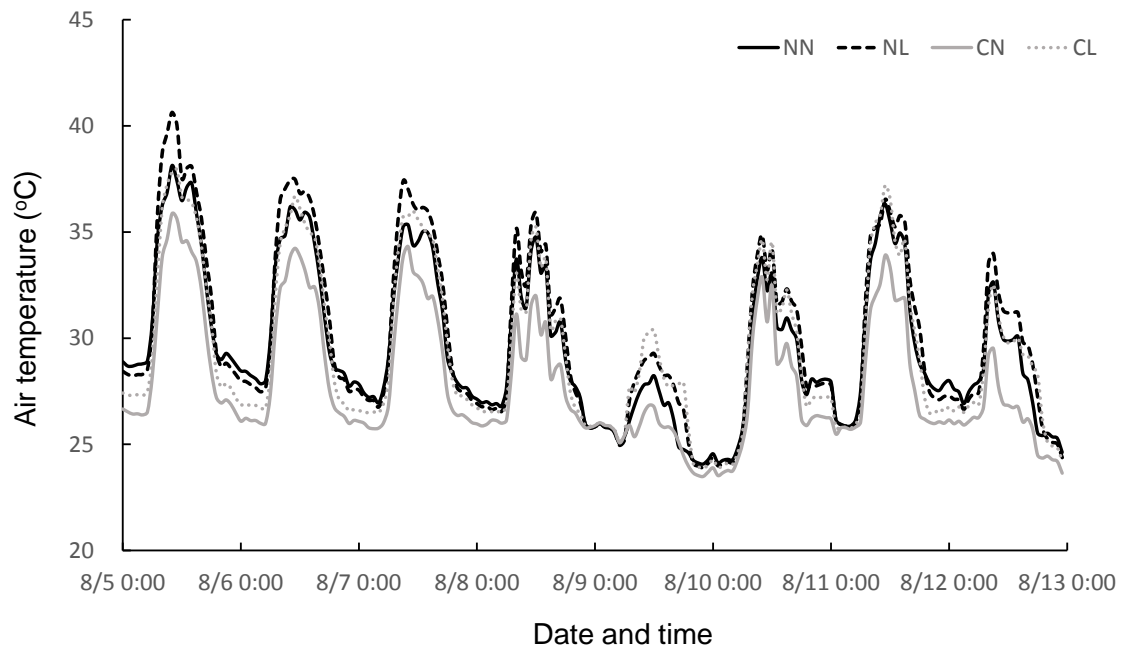


Fig. 3.18 Time courses of air temperature within the canopy measured by the thermocouples at each measurement point on August 5-13, 2014 in Exp. 3-5.

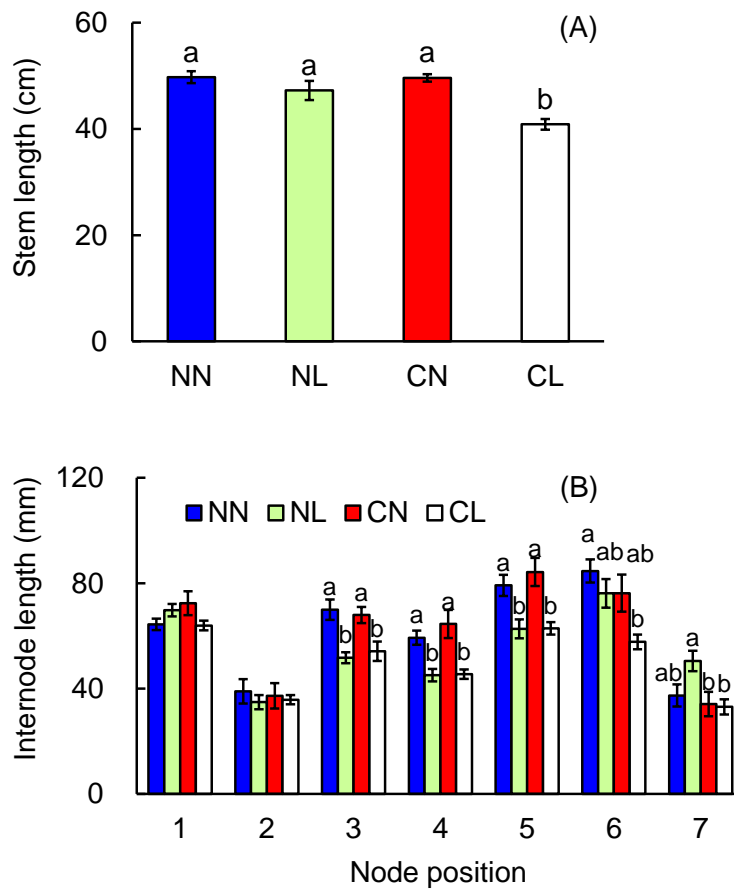


Fig. 3.19 Effect of local cooling and supplemental lighting on the stem length (A) and internode lengths (B) of tomato seedlings at 35 DAS in Exp. 3-5. Vertical bars indicate SE (n = 8). Different letters indicate significances among the treatment at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test.

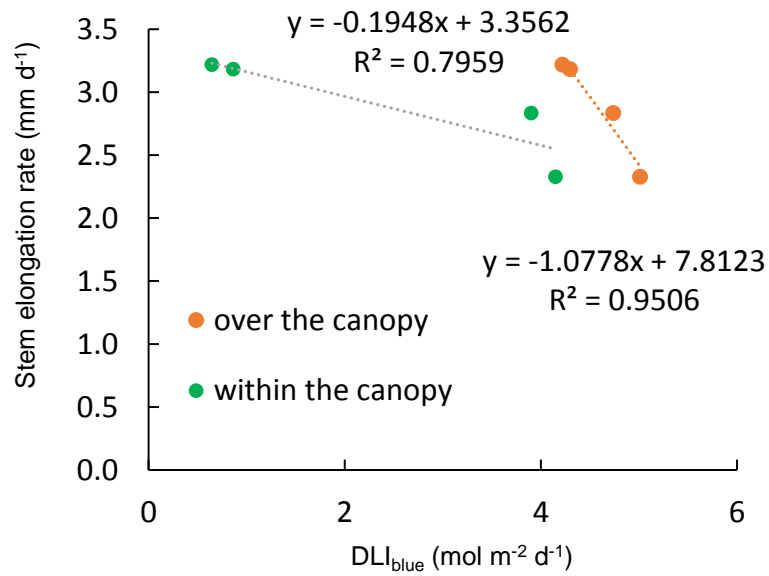


Fig. 3.20 The relationship between daily light integral of blue light and stem elongation of tomato seedlings in Exp. 3-5.

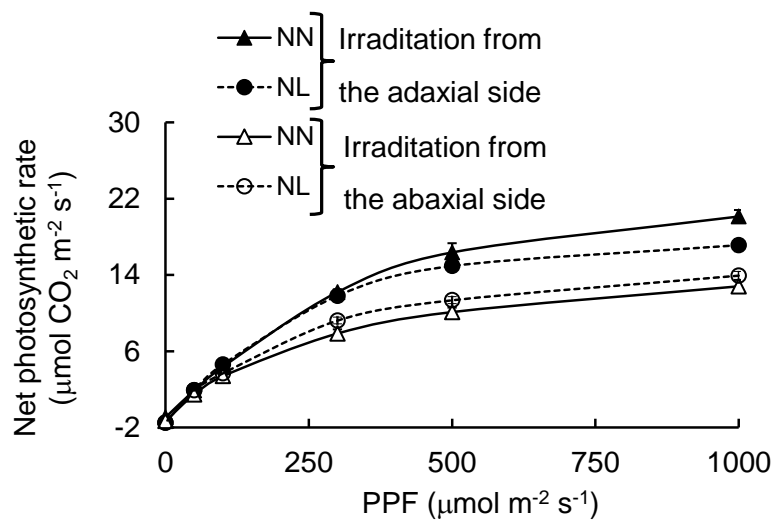


Fig. 3.21 Effects of supplemental lighting on the photosynthetic-light response curves of the 3rd leaf of the adaxial side and abaxial side in Exp. 3-5. They were measured by the portable photosynthesis measurement system (LI-6400, LI-COR Inc.) with an air temperature of 28°C and a CO₂ concentration of 500 μmol mol⁻¹. Vertical bars indicate S.E. (n = 4).

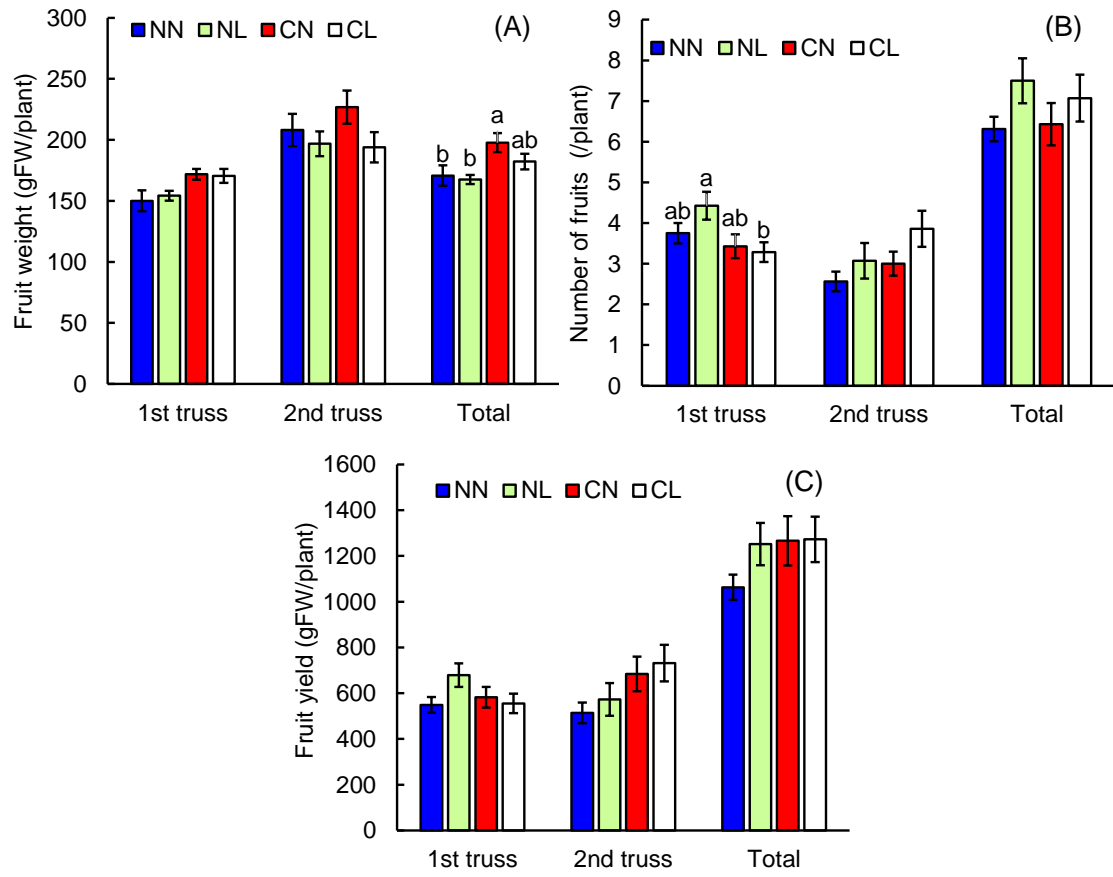


Fig. 3.22 Effects of local cooling and supplemental lighting on the fruit weight (A), No. of fruits (B) and fruit yield (C) of tomato plants after transplanting in Exp. 3-5. Vertical bars indicate SE (n=14-16). Different letters indicate significances among the treatment at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test.

第4章 総括

4.1 本論文の摘要

トマトの施設栽培において、1段から4段までの果房を収穫する低段栽培では、多くの場合、育苗初期（一次育苗）に人工光を利用した閉鎖型苗生産システムを用い、育苗後期（二次育苗）に自然光を利用したハウスを用いることで、本圃での生育期間をできるだけ短くする育苗方法がとられている。本研究では、低段栽培用の高品質なトマト苗を低コストで効率的に生産するため、一次育苗および二次育苗時の環境条件を最適化する生育制御技術を確立することを目的とした。

第2章では、一次育苗で徒長することなく花成を促進させるために、明期中および明期末時の光源の光質制御を行った。その結果、ある程度の赤色光量下では、赤色光は茎伸長を抑制せず、青色光の日積算光量（DLI）がトマト苗の茎伸長の抑制に関与していることが明らかとなった。また、光合成に適した赤色光の割合を大きい光質条件下で育成した苗は、成長が促進され、第1花房着生葉位が低くなった。他方、明期中あるいは明期末時の短時間の遠赤色光照射によって、茎伸長が促進されるが、花成は促進されなかった。以上より、一次育苗の光環境は、ある程度の青色光量を維持しながら、光合成に適する赤色光の割合を大きくすることで、徒長の防止および花成の促進が達成されることが示唆された。

第3章では、二次育苗で徒長することなく定植後の収量を増加させるための局所環境制御を行った。DLIの少ない冬季では、ハウス内の気温やCO₂濃度を最適化した上で、DLIを2倍にするようにLED補光すると、トマト苗の徒長を防止し、定植後の収量が7割以上増加した。DLIの多い夏季においては、ハウス内の昇温対策を施した上で、局所冷房とLED補光を行えば、徒長の防止および収量の増加が見込めることが明らかとなった。

4.2 今後の課題および展望

本研究では、LED を用い、一次育苗と二次育苗の生育ステージに応じて、光環境制御を行った。現在、LED を光源とした植物工場が建設されている。近年、白色 LED を用いる照明器具の低価格化が進み、多くの一般照明として普及している。しかし、白色 LED は、人間が生活するための照明であり、植物に適した光質ではないことがある。他方で、植物に適した光波長の青色 LED と赤色 LED を組み合わせた照明器具を特注すると、価格が高くなる場合がある。よって、植物工場での利用に適した植物育成用の低価格な青赤色 LED の照明器具の普及が必要となる。

本研究の二次育苗の試験結果から、現在市販されている青赤色 LED の照明器具を用いた場合でも、定植後の収益の増加が見込めることが明らかとなった。ただし、二次育苗における LED の照明器具の 1 株当たりの減価償却費は高かった。ハウスなどの施設園芸に用いられる LED の照明器具の耐用年数は 10 年と推奨されている。よって、短期間で年数回だけしか行わない二次育苗で LED 用いると、使用時間は定格寿命の 4 万時間に達しない。そのため、一次育苗で用いる青赤色 LED の照明器具をそのまま二次育苗に使用したり、定植後の栽培でも青赤色 LED の照明器具を使用したりすれば、1 株当たりの減価償却費を軽減できると考えられる。さらに、定植後におけるトマトへの LED 補光の研究は盛んに行われており、群落内補光によって収量が増加できると考えられる。今後、LED は多様な生産現場で利活用されることが望まれる。

本研究で確立された光環境制御法は、一次育苗や二次育苗以外でも、定植後におけるトマトの生育制御技術として応用が可能である。また、人工環境下における植物の最適な光環境の探索には、本研究で用いたアプローチが参考になり、短期間で研究成果が得られると考えられる。

ところで、本研究では、さまざまな条件の光環境下でトマトを育苗し、トマト苗の形態や最終的な収量まで調査したが、そのメカニズムについては未解明な課題が残っている。例えば、共同研究先の野菜茶業研究所の野菜ゲノム研究グループでは、本研究で行われた一次育苗の苗を用いて、網羅的な遺伝子発現（トランスクリプトーム）や代謝産物蓄積（メタボローム）の解析を行い、トマトの光応答メカニズムを解明した。しかしまだ、二次育苗の苗の解析を行っていない。二次育苗のハウスでは、季節や天候により気象条件が変動するため、環境応答メカニズムがより複雑となる。今後も、このような研究が続けられ、変動環境下での光応答メカニズムを解明する必要がある。他方、本研究で用いた局所環境制御は特定の部位（器官）ではなく、特定の場所、すなわちハウス内における栽培ベンチ周辺あるいは群落内のみの環境を制御することを示している。局所環境制御は本来、必要性あるいは感応性の高い特定の器官、すなわち花芽、成長点および根などを対象として環境を制御することに意味がある。よって、植物体における器官別の環境応答メカニズムが解明されれば、環境制御の省エネ化がより進むと考えられる。

これらの得られた知見はトマトの育苗だけでなく、定植後の栽培における光環境条件の探索にも応用できる。しかし、苗の状態と定植後の収量との関係性が明らかとなっていないため、現状では、高品質な苗を評価する際に最終収量まで調査する必要がある、この調査には多大な時間がかかる。よって、収量を最大とするための高品質な苗の評価基準を定める必要がある。

本研究における一次育苗および二次育苗の育苗期間は既往の方法と同様の日数である。また、本研究の一次育苗における栽植密度は既往の方法に比べると低い栽植密度である。しかし、効率良く苗生産を行うために、育苗期間を延長し、栽植密度を高くする必要がある。このような条件で育苗すると徒長するため、高品質な苗を生産することが困難になる。本圃における栽培期間を短くするための最適な育苗期間や生産性向上のための最適な栽植密度の決定には、苗の状態と群落内環境を考慮する必要がある。よって、苗の評価基準の決定と局所環境制御技術の向上が必要となる。今後、これらの課題が解決され、育苗期間の延長と栽植密度の高密化が進み、低コストで効率の良い高品質な苗生産が可能になることを期待したい。

引用文献

- Bulter, W. L., Hendricks, S.B., and Siegelman, H. W. 1964. Action spectra of phytochrome in vitro. *Photochem. Photobiol.* 3: 521-528.
- Carabelli, M., Possenti, M., Sessa, G., Ciolfi, A., Sassi, M., Morelli, G. and Ruberti, I. 2007. Canopy shade causes a rapid and transient arrest in leaf development through auxin-induced cytokinin oxidase activity. *Genes & Development* 21:1863–1868.
- Chia, P.-L. and Kubota, C. 2010. End-of-day far-red light quality and dose requirements for tomato rootstock hypocotyl elongation. *HortScience*. 45: 1501-1506.
- エペ フウヴェリンク. 2012. トマト オランダの多収技術と理論 (中野明正・池田英男訳). p. 288. 農文協. 東京.
- Franklin, K.A., Whitelam G.C. 2005. Phytochromes and shade-avoidance responses in plants. *Ann. Bot.* 96: 169–175.
- Fujiwara, K. and Yano, A. 2013. Prototype development of a plant-response experimental light-source system with LEDs of six peak wavelengths. *Acta Hort* 970: 341-346.
- Giliberto, L., Perrotta, G., Pallara, P., James, L., Weller, P. D., Fraser, P. M., Bramley, F. A., Tavazza, M., and Giuliano, G. 2005. Manipulation of the blue light photoreceptor cryptochrome 2 in tomato affects vegetative development, flowering time, and fruit antioxidant content. *Plant Physiol.* 137: 199-208.
- 後藤英司. 2004. 光質と植物生育. *照明学会誌* 88: 336-340.
- Goto, E., Matsumoto, H., Ishigami, Y. and Hikosaka, S. 2014. Measurements of the photosynthetic rates in vegetables under various qualities of light from light-emitting diodes. *Acta Hort*.1037: 261-268.
- 浜本浩・星岳彦・尾島一史・山崎敬亮. 2010. 3 段取りトマト栽培における群落内補光の時間帯が収量に及ぼす効果と補光の経済性. *植物環境工学*. 22: 95-99.
- 羽生広道・庄子和博・植世宝. 1996. 遠赤色光の付加による光質変化の評価と蔓性および蔓なしインゲンマメの生長変化. *生物環境調節* 34: 267-275.
- 早雲まり子. 2011. 赤色 LED 補光がトマトの光合成と果実成長に及ぼす影響. 千葉大学園芸学研究科修士論文.
- Hendricks, S.B., Butler, W. L., and Siegelman, H. W. 1962. A reversible photoreaction regulating plant growth. *J. Phys. Chem.* 66: 2550–2555.
- Hernandez, R. and Kubota, C. 2012. Tomato seedling growth and morphological responses to supplemental LED lighting red:blue ratios under varied daily solar light integrals. *Acta Hort*. 956: 187-194.
- 平井正良・長井亮輔・雨木若慶・秋間和広・渡邊博之. 2005. 単色光照射下における観賞用トマトの生長ならびに開花・結実. *園学雑別*. 74: 367-367.
- Inada, K. 1977. Effects of leaf color and the light quality applied to leaf-developing period on the photosynthetic response spectra in crop plants. *Japanese Journal of Crop Science*. 46: 37–44.
- 稲田秀俊・水野 (山邊) あずさ・中原正一. 2010. トマトの葉の気孔拡散伝導度および蒸散速度に対する環境要因の影響. 茨城県農業総合センター園芸研究所研究報 17: 17-22.
- 石井征亜・山崎敬亮・大場和彦・長谷川利拡・比屋根真一・田中逸夫. 2004. 札幌, 岐阜および那覇

- における昼光の分光光量子束の季節変化特性. 生物環境調節. 42: 147-154.
- 石丸海渡. 2010. 光質が育苗期のトマトの病害応答および生育に及ぼす影響. 千葉大学園芸学研究科修士論文.
- 伊東正. 1972. そ菜の光合成特性とその栽培的意義 (第 5 報) 育苗中の炭酸ガス贈与, 空気流動がトマト, キュウリの生育, 収量に及ぼす影響. 園芸学会雑誌 41: 42-50.
- 伊與木壮史. 2012. 太陽光利用型植物工場におけるトマトの群落内補光に関する研究. 千葉大学園芸学研究科修士論文.
- Jiang C.D., Wang X., Gao H.Y., Shi L., and Chow W.S. Systemic regulation of leaf anatomical structure, photosynthetic performance, and high-light tolerance in sorghum. *Plant Physiology* 155: 1416-1424
- Jones, J. W., Dayan, E., Allen, L. H., Van Keulen and Challa, H. 1991. A Dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 34: 663-672.
- 河崎靖・鈴木克己・安場健一郎・川嶋浩樹・佐々木英和・高市益行. 2010. トマトの生長点-開花房付近の局部加温が植物体表面温度および収量関連形質に与える影響. 園学研. 9: 345-350.
- 木下貴文・中野善公・川嶋浩樹. 2012. 夏季高温期におけるトマトのポット育苗において根域冷却の時間帯が生育および収量に及ぼす影響. 園学研. 11: 459-465.
- Kitaya, K., Tsuruyama, J., Shibuya, T., Yoshida, M., and Kiyota, M. 2003. Effects of air current speed on gas exchange in plant leaves and plant canopies. *Advances in Space Research* 31: 177-182.
- 郡山啓作・白山竜次・住友克彦・久松完. 2014. キク電照栽培用光源選定・導入のてびき. <http://www.naro.affrc.go.jp/flower/research/files/light_source_guidance_201403.pdf>
- 古在豊樹. 1999. 閉鎖型苗生産システムの開発と利用 - 食料・環境・エネルギー問題の解決を目指して -. p. 2-3. 養賢堂. 東京.
- 古在豊樹・後藤英司・富士原和宏. 最新施設園芸. p. 150-157. 朝倉書店. 東京.
- Lake, J.A., Quick, W.P., Beerling, D. J., and Woodward, F. I. 2001. Signals from mature to new leaves. *Nature* 411: 154.
- López-Juez1, E., Nagatanib, A., Buurmeijerc, W. F., Petersc, J. L., Furuyab, M., Kendrickb, R. E., and Wesseliuss, J. C. 1990. Response of light-grown wild-type and *aurea*-mutant tomato plants to end-of-day far-red light. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 4: 391-405.
- Mastuo, S., Nanya, K., Yugeta, T., Kikuchi, K., Fukuda, M., Goto, E., and Honda, I. 2011. The interaction of light quality with plant hormones in regulating growth of tomato. *Proc. Solanaceae/Cucurbitaceae Genomics Initiatives*. Okayama, Japan 5-6 March, 2011.
- 松尾哲・南谷健司・後藤英司・今西俊介. 2014. 多波長型 LED 照射下で生育したトマトの網羅的遺伝子発現解析. 園学研別. 13: 308.
- 森山友幸・姫野修一・井手治. 1999. トマトの花房への局部加温が着果率に及ぼす影響. 園学雑別. 68: 311.
- 森山友幸・伏原肇・奥幸一郎. 2012. 局所加温の部位および時間帯がナスの形態および生理に及ぼす影響. 園学研. 11: 337-341.
- 南谷健司. 2012. 青色光と赤色光がトマト苗の光合成速度, 生育および花成に及ぼす影響. 千葉大学

- 園芸学研究科修士論文.
- 西村誠一・唐艶鴻・小泉博・佐藤光政. 1994. 日本作物学会紀事 63: 116-117.
- 西村将雄. 2004. 閉鎖型苗生産システムにおける省資源的な高品質苗生産. 千葉大学園芸学研究科博士論文.
- 小川理恵・加藤俊博・酒井広蔵. 2007. 局所冷房によるコショウランの花茎発生及び開花. 園学研別. 76: 229.
- Sachs, R.M. and Hackett, W.P. 1969. Control of vegetative and reproductive development in seed plant. *HortScience*. 4: 103-107.
- 迫田登稔. 2008. 傾斜地形に対応したトマト養液栽培体系の経済性評価. 農業経営研究. 46: 63-68.
- Sager, J. C., Smith, W. O., Edwards, J. L., and Cyr, K. L. 1988. Photosynthetic efficiency and phytochrome photoequilibria determination using spectral data. *Trans. ASAE*. 31: 1882-1889.
- 斎藤隆・伊東秀夫. 1962. トマトの生育ならびに開花結実に関する研究 (第1報) 育苗期の温度が生育ならびに開花・結実に及ぼす影響. 園学雑 31 : 11-22.
- 佐藤公洋・北島伸之・沖村誠. 2008. イチゴ促成栽培におけるクラウン部局部加温が生育・収量に及ぼす影響と燃料節減の効果. 園学研別. 7: 269.
- Shibuya, T., Tsuruyama, J., Kitaya, Y., and Kiyota, M. 2006. Enhancement of photosynthesis and growth of tomato seedlings by forced ventilation within the canopy. *Scientia Horticulturae* 109: 218-222.
- Smith, H. 1982. Light quality, photoperception and plant strategy. *Annual Review of Plant Physiology*. 33: 481-518.
- 杉山智美・Mohd Arif Farizul・田上英人・須田善行・滝川浩史・桶真一郎・川嶋和子. 2011. 温室内向け4 センサ太陽電池アレイ日射計の試作と温度補正の検討. 太陽エネルギー 37: 55-61.
- 住友克彦・山形敦子・島浩二・岸本真幸・久松完. 2009. 数種切り花類の開花およ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. 花き研報. 9: 1-11.
- Suzuki, K., Yasuba, K. and Takaichi M. 2011. Effect of the supplemental lighting on the growth of young plants in second nursery in tomato. *Acta Hort*. 907: 269-276.
- 鈴木克己・安場健一郎・高市益行・土屋和・河崎靖・川嶋浩樹・佐々木英和. 2009. トマト低段密植栽培での2次育苗における夜冷の効果. 日本農業気象学会大会講演要旨: 127.
- 田幡茉莉子. 2006. 明期およびDIFがトマト第一および第二花房着生葉位に及ぼす影響. 千葉大学園芸学部生物生産科学科卒業論文.
- 高木麻貴. 2005. 光質およびDIFがトマト実生苗の第一花房分化葉位および茎長におよぼす影響. 千葉大学園芸学研究科修士論文.
- 高橋文次郎・江口庸雄・米田和夫. 1973. トマトおよびナスの花成に関する研究 (第1報) トマトの花芽分化におよぼす温度ならびに肥料の影響. 園学雑. 42: 147-154.
- 高山弘太郎・石神靖弘・後藤英司・久枝和昇・仁科弘重. 2006. 大規模ガラス温室内のトマト群落におけるクロロフィル蛍光パラメータ (Fv/Fm), SPAD 値およびクロロフィル濃度の垂直分布の解析. 植物環境工学 18: 277-283.
- 高山弘太郎・仁科弘重・久枝和昇・末岐剛・原田聡. 2010. 太陽光利用型植物工場のトマト群落にお

- ける光合成機能の空間分布の解析. 植物環境工学 22: 175-180.
- 田中和夫・島地英夫. 1992. 接触刺激を利用したトマトの高密度苗生産. 生物環境調節 30: 59-64.
- Terashima, I. and Saeki, T. 1983. Light environment within a leaf I. Optical properties of paradermal sections of *Camellia* leaves with special reference to differences in the optical properties of palisade and spongy tissues. *Plant and Cell Physiology* 24: 1493-1501.
- Terashima, I. and Inoue, Y. 1984. Comparative photosynthetic properties of palisade tissue chloroplasts and spongy tissue chloroplasts of *Camellia japonica* L.: Functional adjustment of the photosynthetic apparatus to light environment within a leaf. *Plant and Cell Physiology* 25: 555-563.
- Terashima, I. and Saeki, T. 1985. A new model for leaf photosynthesis incorporating the gradients of light environment and of photosynthetic properties of chloroplasts within a leaf. *Annals of Botany* 56: 489-499.
- Terashima, I. 1986. Dorsiventrality of photosynthetic light response curve of a leaf. *Journal of Experimental Botany* 37: 399-405.
- Thomas, P.W., Woodward, F.I., and Quick, W.P. 2003. Systemic irradiance signalling in tobacco. *New Phytologist* 161: 193-198.
- 土屋和. 2006. 低段密植栽培システムの開発. 農業機械学会誌 69: 13-17. 2007.
- Tuinen, A., Kerckhoffs, L. H., Nagatani, A., Kendrick, R. E., and Koornneef, M. 1995. Far-red light-insensitive, phytochrome A-deficient mutant of tomato. *Mol. Gen. Genet.* 246: 133-141.
- 渡辺慎一. 2006. 低段密植栽培による新たなトマト生産. 野菜茶研集報. 3: 91-98.
- Wollenberg, A.C., Strasser, B., Cerdán, P.D., and Amasino, R.M. 2008. Acceleration of flowering during shade avoidance in *Arabidopsis* alters the balance between FLOWERING LOCUS C-mediated repression and photoperiodic induction of flowering. *Plant Physiol.* 148: 1681-1694.
- 矢吹萬壽. 1985. 植物の動的環境. p. 54-55. 朝倉書店. 東京.
- 矢吹萬壽・宮川秀夫. 1970. 風速と光合成に関する研究 (2) 風速と光合成との関係. 農業気象 26: 21-25.
- 横井真悟・後藤英司・古在豊樹・西村将雄・田口勝教・石神靖弘. 2007. 閉鎖型苗生産システムにおける栽植密度および気流速度がセル成型トマト実生苗の生育およびその均一性に及ぼす影響. 植物環境工学 19: 159-166.
- 弓削田智美. 2011. 光環境が育苗期のトマトの茎葉の生育に及ぼす影響. 千葉大学園芸学研究科修士論文.

参考文献

- 北宣裕. 1987. トマト半促成栽培における生長解析. 神奈川園試研報. 34: 22-26. Nishimura, S., Koizumi, H., and Tang, Y. 1998. Spatial and temporal variation in photon flux density on rice (*Oryza sativa* L.) leaf surface. *Plant production science* 1: 30-36.
- Pearcy, R.W. 1989. In: *Plant physiological ecology. Field methods and instrumentation*. p. 97-113.
- 鈴木克己・安場健一郎・中野有加・高市益行・土屋和. 2008. 根域制限 NFT システムでの 2 次育苗による定植作業の容易なトマト開花苗生産技術. 平成 20 年度野菜茶業研究成果情報. <http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/vegetea/2008/vegetea08-09.html> .
- 斉藤隆. 1970. 中性植物トマトの花成生理. *植物の化学調節* 5: 27-40.
- 高橋拓也・鈴木克己・安場健一郎・高市益行・星岳彦. 2009. トマト低段密植栽培 2 次育苗期において補光が生育に与える影響. *園学研別*. 8: 268.
- 高橋太郎. 2012. 太陽光型植物工場におけるトマトの栽培環境-生育モデルの開発と収量予測. 千葉大学園芸学研究科博士論文.
- 和田光生・池田英男・森本華世. 2001. 育苗時の最低気温が一段栽培トマトの生育ならびに果実の収量と品質に及ぼす影響. *園学雑*. 70: 733-739.

謝辞

本研究を実施、遂行ならびに論文の執筆するに当たり、主指導教員である千葉大学大学院園芸学研究科の教授 後藤英司先生には研究に関する多くのご指導ならびに公私にわたるご助言を受け賜りました。この場をお借りして、心より御礼を申し上げます。本論文の審査をしていただいた主査の千葉大学園芸学研究科の教授 椎名武夫先生、同じく副査の松岡延浩先生、丸尾達先生には貴重なご意見を受け賜りました。謹んで感謝の意を表します。

環境調節工学研究グループの副指導教員である彦坂昌子先生には論文作成における論理性や植物生理学的な観点からの多方面に及ぶご指摘をいただきましたこと、同じく副指導教員である石神靖弘先生には専門的な環境調節技術や制御機器でのご指導を受け賜りましたこと、心より感謝の意を表します。

本研究の第2章は農林水産省委託プロジェクト「生物の光応答メカニズムの解明と省エネルギー、コスト削減技術の開発」の大課題「野菜等の光応答メカニズムの解明及び高度利用技術の開発」の一環として実施しました。共同研究者である農業・食品産業技術総合研究機構の野菜茶業研究所の松尾哲氏には分子生物学的な観点からのご助言をいただきました。本研究の第3章は農林水産省委託プロジェクト「食料生産地域再生のための先端技術展開事業」の大課題「大規模施設園芸研究（宮城県）」の一環として実施しました。農業・食品産業技術総合研究機構の野菜茶業研究所の岩崎泰永氏ならびに本プロジェクトの専属研究員である株式会社 GRA の田中秀幸氏（現在は島根大学助教）、山根弘陽氏および伊藤瑞穂氏には試験のご協力ならびに多くのご支援を受け賜りました。厚く感謝の意を表します。

最後に在籍していた環境調節工学研究グループの皆様、特に博士後期課程の伊與木壮史氏、古山真一氏ならびに小川瑛利子氏にはアドバイスや実験手伝いを受け賜りましたこと、お礼申し上げます。