

## トマト育苗のための LED 光照射条件の検討

渡邊 恭成\*・安田 剛規\*・米田 正\*・中野 明正

(平成 27 年 10 月 23 日受理)

### Examination of Irradiation Conditions Using LED Light for the Growth of Tomato Seedlings

Yasumasa Watanabe, Takaki Yasuda, Tadashi Yoneda and Akimasa Nakano

#### I 緒 言

日本の農家における育苗はハウス（温室）内で行われることが多い。しかし、ハウスといえども内部環境は天候に左右されることや、内部環境が不均一なために苗の成長が揃わない、害虫が一年中発生しやすいなどの問題点も指摘されてきた（古在ら，2005）。これらの問題点だけでなく、近年、農業従事者の高齢化が進む中、手間のかかるハウス内での育苗は敬遠される傾向にあり、苗購入へのシフトが進み始めた。このようなニーズに対応し、育苗の計画生産設備として閉鎖型人工光育苗装置（例えば、苗テラス、三菱樹脂アグリドリーム）が開発され、育苗会社などでの実用化検討が始まっている。苗供給大手であるベルグアース（株）でも閉鎖型苗生産システム（人工光型植物工場）を導入しており、2014 年度は 3,630 万本の苗を生産している（瓦，2015）。トマトでは既に約 5 割が購入苗であるとの調査結果もあり（土屋，2015）、今後さらに扱いやすい、定植後の活着が良いなどの、高品質苗に対するニーズが高まるものと思われる。

一方、現状の人工光型植物工場による育苗では照明に蛍光灯を使用しているため、電気代が高い、蛍光灯の定期的な交換が必要と、コスト面に問題がある。

上記の問題を解決する可能性のある代替照明として LED が注目されている。LED は蛍光灯に比べ消費電力が低く、交換頻度が少ないことが知られている。近年、人

工光型植物工場ではリーフレタスのような葉菜類の栽培に白色 LED 照明や、赤色光や青色光のみの単色 LED 照明が使われ始めた。白色 LED 照明は室内照明用途であり、波長や光強度を植物栽培用に最適化することは通常困難であるが、単色 LED 照明の組み合わせでは、波長ごとに光強度の最適化が可能であるという利点がある。

そこで我々は、蛍光灯に比べ消費電力が低く、かつ照明方法に自由度の高い LED に注目し、各種波長の単色 LED 照明を用い、LED 光の組み合わせ、光量および照射パターンを変えてトマト育苗を行い、蛍光灯を用いた場合との比較から育苗に適した LED 光照射条件の検討を行った。合わせて、苗乾燥重当たりの照明の消費電力量を算出し、各種 LED 光照射条件における生産効率を評価した。

本研究は筆頭著者の渡邊が 2015 年 5 月まで野菜茶業研究所に依頼研究員として在籍した期間に行った研究であり、ご支援を頂いた野菜生産技術研究領域・施設野菜生産プロジェクトの皆さまに深く感謝いたします。

#### II 材料および方法

##### a 育苗方法

育苗は、苗テラス（人工光育苗装置 4 段×6 棚、三菱樹脂アグリドリーム）を用いて行った。実験には‘桃太郎ヨーク’（タキイ種苗）および‘りんか 409’（サカタのタネ）の 2 品種のトマトを使用した。育苗は 72 穴のセルトレイ（セルトレイ AP、東罐興業製）を用い、各セルに培養土（TM-

1, タキイ種苗製)を充填し, 品種ごとに1セル当たり1粒を播種した. 播種後, 催芽器に3日間入れ, 播種後3日目に苗テラスに移動し, 光照射しながら24日目まで育苗を行った. 培養液は, 1L当たりハイテンポ Cu (住友化学製) 2.93mLとハイテンポ Ar (住友化学製) 0.98mLを溶解したものを, EC 1.6dS/m, pH5.9 (N・P・K = 5.9・1.1・2.4)とした. 灌水は1日1回10分間(8時から8時10分まで), セルトレイ底面から30mm程度の高さまで培養液が満たされた状態とした. 栽培温度は暗期18°C, 明期25°Cとした. 苗テラス内のCO<sub>2</sub>濃度は1000ppmとした.

## b 光照射方法

本実験では, 異なる波長のLEDの組み合わせ, 光量, 照射パターンを変えて, 合計4回実験を行った. 各回の実験に使用した照明は次の通りである. 蛍光灯は3波長系昼白色Hf蛍光灯(FHF32EX-N-H, パナソニック製)を用いた. 使用する本数は栽培棚一段当たり6本とした. 各色のLEDは直管型LED照明を使用し, 赤色光と青色光の照明(RRB, 品番: UL0005#01-0R, LEDチップ: 赤160個+青80個, ピーク波長: 赤660nm, 青450nm, 最大消費電力: 赤20W, 青11W, 昭和電工製)および緑色光と遠赤色光の照明(FrFrG, 品番: UL0013#01-0R, LEDチップ: 遠赤色160個+緑80個, ピーク波長: 遠赤色740nm, 緑525nm, 最大消費電力: 遠赤色18W, 緑13W, 昭和電工製)を用いた. LED照明は苗テラスの栽培棚に設置してある蛍光灯を外して, 棚底面からの高さが蛍光灯と同じになるように設置した. 照明の本数は光強度に応じて適宜変更した. これらのLED照明の光強度の調整および照射時間の設定は, タイマー付き調光器によって各色独立して行った. 以下略号として, 赤色光; R, 緑色光; G, 青色光; B, 遠赤色光; Frと表記する.

照射時間は0時から8時までの8時間を暗期とし, 8時から24時までの16時間を明期とした.

各実験の試験区には蛍光灯照射区(蛍光灯区)を対照区として1試験区設定し, 光量は光合成有効光量子束密度(PPFD)503 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , Fr 2.64W $\cdot\text{m}^{-2}$ , 日積算光合成有効光量子量(Daily light integral; DLI)29.0 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ とした.

LED照射区(LED区)は各実験で照射条件が異なる3ないし4試験区を設定した. 各実験のLED区の光照射条件は以下の通りである. ここでいう同時照射とは二色以上のLED光を混合して同時に照射する照射方法のことである. また, 交互照射とは, 単色光または二色以

上の混合光を一定時間照射した後, 別の単色光または二色以上の混合光を一定時間照射し, それを繰り返す照射方法のことである. その場合, 途中で暗期を挟むことも含む. 各実験の試験区の光照射条件を表-1にまとめた.

**実験1.** 赤色光照射区(R区) PPFD 115 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , DLI 6.6 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ , 青色光照射区(B区) PPFD 90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , DLI 5.2  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ , 緑色光照射区(G区) PPFD 190 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , DLI 10.9  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の3試験区とした.

**実験2.** 赤青遠赤色光同時照射区(RBFr区) PPFD R 115, B90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , Fr 17.8 W $\cdot\text{m}^{-2}$ の混合光, DLI 11.8  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ , 赤青/遠赤色光交互照射区(A\_(RB)Fr区) PPFD R230, B180 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の混合光を8時間, Fr 17.8 W $\cdot\text{m}^{-2}$ を8時間, DLI 11.8  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ , 赤青光同時照射区(RB区) PPFD R 115, B90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の混合光, DLI 11.8  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ , 赤青光交互照射区(A\_RB区) PPFD R230 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, B180 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, DLI 11.8  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の4試験区とした.

**実験3.** 赤緑青遠赤色光同時照射区(RGBFr区) PPFD R 168, G33, B168 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , Fr 30 W $\cdot\text{m}^{-2}$ の混合光, DLI 21.3  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ , 赤緑遠赤色/青色光交互照射区(A\_(RGFr)B区) PPFD R230, G33 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , Fr 30 W $\cdot\text{m}^{-2}$ の混合光を8時間, B175 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, DLI 12.6  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ , 赤青光同時照射区(RB区) PPFD R 200, B200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の混合光, DLI 23.0  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ , 赤青光交互照射区(A\_RB区) PPFD R230 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, B200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, DLI 12.4  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の4試験区とした.

**実験4.** 赤緑青色光同時照射区(RGB区) PPFD R 200, G62, B200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の混合光, DLI 26.6  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ , 赤緑色/青色光交互照射区(A\_(RG)B区) PPFD R200, G62 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の混合光を8時間, B200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, DLI 13.3  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ , 赤青光同時照射区(RB区) PPFD R 300, B300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の混合光, DLI 34.6  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ , 赤青光交互照射区(A\_RB区) PPFD R300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, B300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ を8時間, DLI 17.3  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の4試験区とした.

LED区のうち, 交互照射区と記載のあるものは, 明期のうち最初の8時間に前者, 残りの8時間に後者の光照射を行った. その他の試験区は明期の16時間光照射を行った.

光強度の測定は, 光量子センサ(LI-190SA, LI-COR製)を用いてPPFDの測定を行った. 照明は棚底面から26.5cmに設置し, PPFD測定は, 栽培棚の中央, 棚底面より13cm

表-1 光照射条件

照射条件 <sup>a, b</sup>	PPFD ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )			DLI ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ )	放射照度 <sup>c</sup> ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) Fr (遠赤色光)		
	明期 8時間	8時間	暗期 8時間				
① R	R	—	115	6.6			
① B	B	—		5.2			
① G	G	—	190	10.9			
① 蛍光灯	蛍光灯	—	154	217	132	29.0	2.64
② RBFr	RBFr	—	115		90	11.8	17.8
実験 ② <sup>d</sup> A_(RB)Fr	RB → Fr	—	230		180	11.8	17.8
② RB	RB	—	115		90	11.8	
② <sup>d</sup> A_RB	R → B	—	230		180	11.8	
② 蛍光灯	蛍光灯	—	154	217	132	29.0	2.64
③ RGBFr	RGBFr	—	168	33	168	21.3	30.0
実験 ③ <sup>d</sup> A_(RGFr)B	RGFr → B	—	230	33	175	12.6	30.0
③ RB	RB	—	200		200	23.0	
③ <sup>d</sup> A_RB	R → B	—	230		200	12.4	
③ 蛍光灯	蛍光灯	—	154	217	132	29.0	2.64
④ RGB	RGB	—	200	62	200	26.6	
実験 ④ <sup>d</sup> A_(RGB)	RG → B	—	200	62	200	13.3	
④ RB	RB	—	300		300	34.6	
④ <sup>d</sup> A_RB	R → B	—	300		300	17.3	
④ 蛍光灯	蛍光灯	—	154	217	132	29.0	2.64

a: LED照明はR, G, B, Frで表わす。それぞれのピーク波長はR(660nm), G(525nm), B(450nm), Fr(740nm)。

b: 蛍光灯はR:601-700nm, G:501-600nm, B:401-500nm に分けてPPFDを算出。  
蛍光灯の701-780nmは Fr とした。

c: Fr は放射照度 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) を表記した。この値はDLIに含まない。

d: 照明条件の冒頭に 'A' が記載されているものは、8時間毎の交互照射を表わす。

上に測定器を設置し、測定を行った。また、蛍光灯および Fr の光強度測定には、分光放射照度計 (CL-500A, コニカミノルタ製) を用いて分光放射束密度を測定した。蛍光灯の波長 401nm~700nm の測定値を、401~500nm を B, 501~600nm を G, 601~700nm を R として PPFD へ変換した。Fr は 701~780nm の測定値を放射照度とした。

### c 生産効率評価方法

播種後 24 日目に各区 10 株収穫し、葉数、総葉面積、葉、茎の新鮮重および乾燥重を測定した。ただし特異的に生育が著しく不良な株は除去した。乾燥重は、それぞれを 105°C のオーブンで 3 日間乾燥した後に測定した。葉と茎の乾燥重を合計したものを地上部乾燥重とした。

苗の生産効率の評価は以下のように行った。まず蛍光灯および LED 照明の R, B の単色光を各々最大光強度で照射した時の PPFD を測定し、蛍光灯および各単色光照明の PPFD 当たりの消費電力を求めた。G の照明については R の最大光強度照射時 PPFD の値に発光効率比を乗じた値を G の最大光強度照射時 PPFD とし、同様に PPFD 当たりの消費電力を求めた。次に各試験区の PPFD と育苗日数から、育苗に係る期間の照明の消費電力量を算出した。Fr の照明については電力測定器 (ET30D, REVEX 製) を用いて測定した消費電力と育

苗日数から同様に消費電力量を算出した。さらに苗テラスの栽培棚 1 段には 72 穴のセルトレイを 4 枚置くことから、1 段の最大育苗数を 288 株とし、最大数育苗したと仮定した時の 1 株当たりの照明の消費電力量を算出した。これを実際に育苗した各株の乾燥重実測値で除することにより、苗ごとの乾燥重当たりの照明の消費電力量を算出した。なお、蛍光灯の消費電力は、苗テラス仕様書の制御回路図に記載の値 (288W) とした。これにより、照明の種類や光強度によらず、苗乾燥重当たりの照明の消費電力量、すなわち光合成による苗の生産効率を比較した。

得られた測定値および算出値の統計処理にはエクセル統計 2015 ((株) 社会情報サービス) を使用し、Tukey-Kramer 法による多重比較検定を行った。

## III 結 果

### 実験 1. LED 単色光による育苗

赤、青、緑の各単色光での育苗を試みた。播種後 24 日での地上部新鮮重、地上部乾燥重、葉数、総葉面積を図-1 に示す。また、苗の草姿の写真を図-2 に示す。'桃太郎ヨーク' および 'りんか 409' のいずれの場合も、地上部新鮮重および乾燥重は蛍光灯区が最大となった。'桃太郎

ヨーク’では赤色光区(R区)および緑色光区(G区)では新鮮重で蛍光灯区の1/2程度生育したが、青色光区(B区)では1/8程度しか生育しなかった。‘りんか409’ではいずれのLED区でも蛍光灯区の1/5~1/6程度しか生育しなかった。葉数は‘桃太郎ヨーク’では蛍光灯区と各LED区で顕著な差は見られなかったが、‘りんか409’ではLED区で蛍光灯区の1/2程度となった。総葉面積は地上部乾燥重と同様の結果となった。赤色光区および緑色光区では草姿が徒長していることが観察された。次に、地上部乾燥重

をDLIで除したDLI当たりの地上部乾燥重で比較した。図-3に示す。その結果、‘桃太郎ヨーク’では青色光区以外は大きな差がなく、特に赤色光区においては光量当たりの生育は蛍光灯区と同等であることが分かった。一方、‘りんか409’の場合はいずれのLED区に対しても蛍光灯区が大となり、‘りんか409’は‘桃太郎ヨーク’と比較してLED単色光での生育が悪く、品種による違いが認められた。

以上の結果から、LED光を用いる場合、単色光ではな

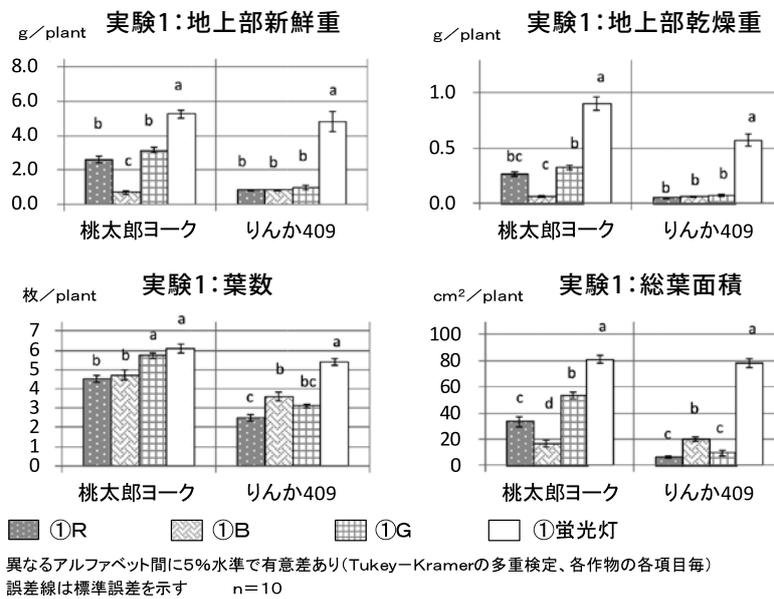


図-1 地上部新鮮重, 乾燥重, 葉数, 総葉面積 (実験1, 播種後24日目)

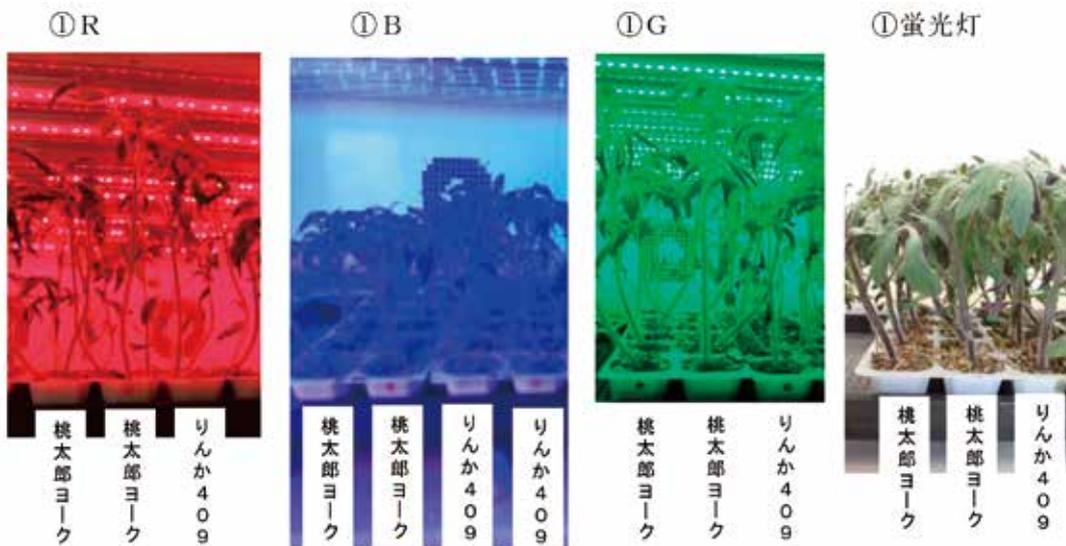


図-2 苗の草姿 (実験1, 播種後24日目)

く、複数の波長の異なる光をより高いDLIで照射することが必要であると考え、以下の実験2~4を行った。

### 実験2. 赤、青、遠赤色の組み合わせ、および同時照射と交互照射

赤青遠赤色の三色混合同時照射 (RBFr区)、赤青二色混合光と遠赤色光の交互照射 (A\_(RB)Fr区)、赤青二色の混合同時照射 (RB区)、赤と青の単色交互照射 (A\_RB区) の4条件で育苗を試みた。結果を図-4に示す。‘桃太郎ヨーク’ および ‘りんか409’ のいずれの場合も、地上部新鮮重および乾燥重では蛍光灯区が最も大きく成長した。葉数および総葉面積では、‘桃太郎ヨーク’ では蛍光灯区と各LED区で顕著な違いは認められなかった。‘りんか409’ では葉数は蛍光灯区が最も多く、RB区が最も少な

かった。総葉面積ではRBFr区とRB区が顕著に小さかった。実験1と同様にDLI当たりの地上部乾燥重で比較した。図-5に示す。その結果、‘桃太郎ヨーク’ ではRB区以外は同等の値となっており、Fr照射および赤青交互照射の効果が認められた。一方、‘りんか409’ の場合はRBとFrの交互照射および赤青交互照射の効果が認められ、ここでも品種による違いが認められた。草姿の観察結果の写真を図-6に示す。A\_(RB)Fr区では徒長が認められた。

### 実験3. 緑色光の追加および光量の増加

赤緑青遠赤色の四色混合同時照射 (RGBFr区)、赤緑遠赤三色混合光と青色光の交互照射 (A\_(RGFr)B区)、赤青二色の混合同時照射 (RB区)、赤と青の単色交互照射 (A\_RB区) の4条件で育苗を試みた。各区とも実験2より光量を増加した。結果を図-7に示す。‘桃太郎ヨーク’ および ‘りんか409’ のいずれの場合も、地上部新鮮重および乾燥重では蛍光灯区とRGBFr区が同等となった。実験2よりもDLIを増加したRB区とA\_RB区は、実験2より重量が増加した。A\_(RGFr)B区はDLIが同等であるA\_RB区と同等の生育を示した。RB区はDLIを約2倍に増加した結果、地上部新鮮重が1.6~2.4倍と顕著に増加した。葉数は‘桃太郎ヨーク’ および ‘りんか409’ のいずれの場合も、各区同様となった。総葉面積は‘りんか409’ のRB区のみ顕著に小さかった。DLI当たりの地上部乾燥重で比較した。図-8に示す。

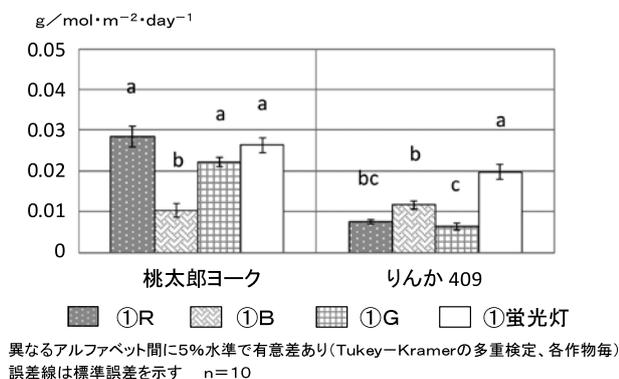


図-3 DLI当たりの地上部乾燥重 (実験1, 播種後24日目)

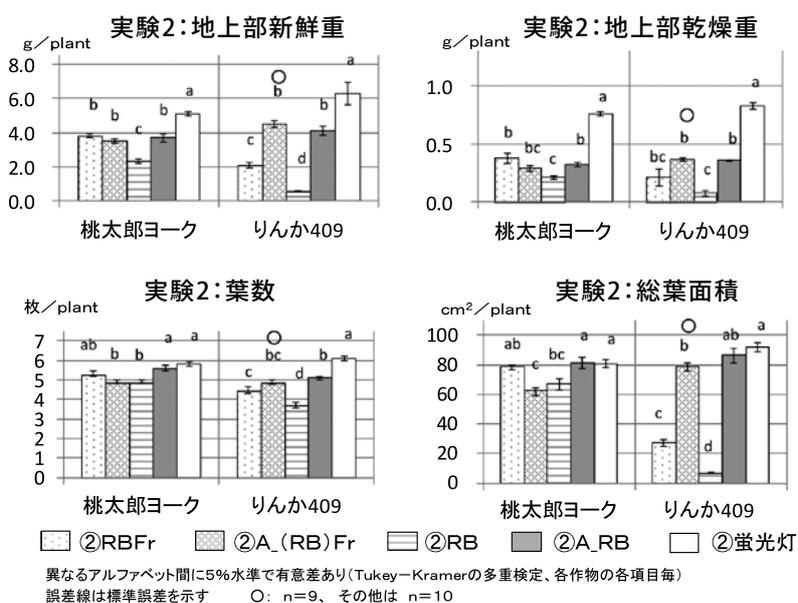


図-4 地上部新鮮重, 乾燥重, 葉数, 総葉面積 (実験2, 播種後24日目)

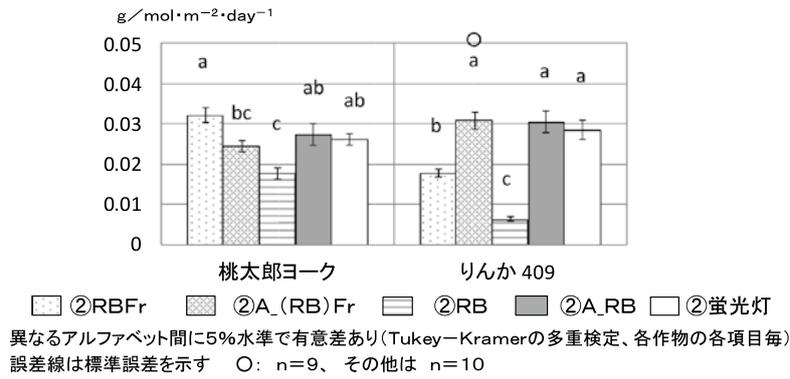


図-5 DLI 当たりの地上部乾燥重 (実験2, 播種後24日目)



図-6 苗の草姿 (実験2 '桃太郎ヨーク', 播種後24日目)

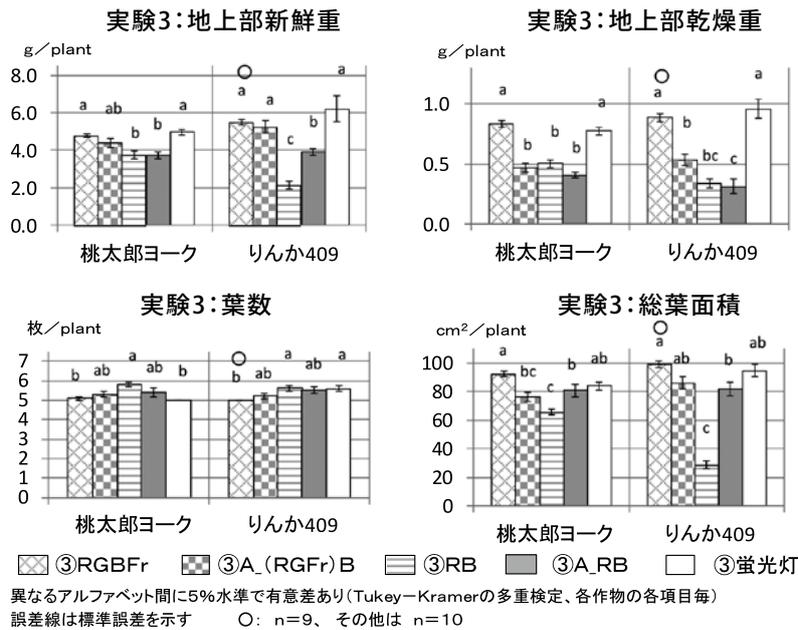


図-7 地上部新鮮重, 乾燥重, 葉数, 総葉面積 (実験3, 播種後24日目)

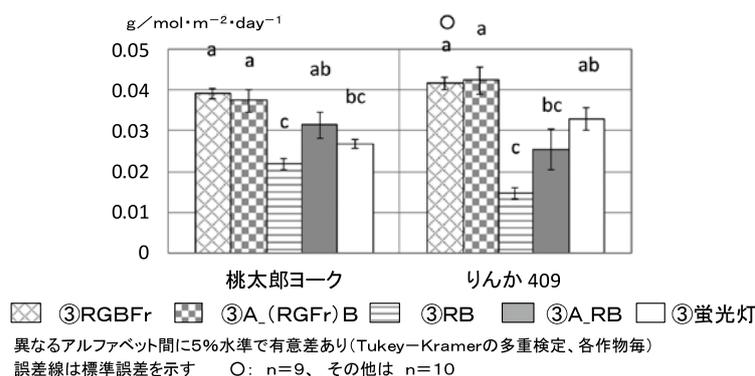


図-8 DLI 当たりの地上部乾燥重 (実験 3, 播種後 24 日目)

その結果, ‘桃太郎ヨーク’では RGBFr 区および A\_(RGFr)B 区が蛍光灯区を上回った。‘りんか409’でも同様の傾向が認められた。‘桃太郎ヨーク’, ‘りんか409’いずれも RB 区は最も値が低く, RB 区に対し, A\_RB 区は DLI 当たりの地上部乾燥重で高い値を示すことから, 交互照射の効果が認められた。

#### 実験 4. 遠赤色光を除いた緑色光の効果および光量の増加

赤緑青色の三色混合同時照射 (RGB 区), 赤緑二色混合光と青色光の交互照射 (A\_(RG)B 区), 赤青二色の混合同時照射 (RB 区), 赤と青の単色交互照射 (A\_RB 区)

の 4 条件で育苗を試みた。各区とも実験 3 より光量を増加した。結果を図-9 に示す。‘桃太郎ヨーク’および‘りんか409’のいずれの場合も, 地上部新鮮重および乾燥重では蛍光灯区が大となった。RGB 区と A\_(RG)B 区とは実験 3 の Fr がある場合と比べて顕著に小さくなった。RB 区と A\_RB 区とは実験 3 よりも大となり, 光量増加の効果が認められた。

葉数は‘桃太郎ヨーク’および‘りんか409’のいずれの場合も, 蛍光灯区が大となったが, 顕著な差はなかった。総葉面積は地上部新鮮重と同様の傾向を示した。DLI 当たりの地上部乾燥重の比較 (図-10) において, ‘桃太郎ヨーク’では A\_RB 区が蛍光灯区を上回った。

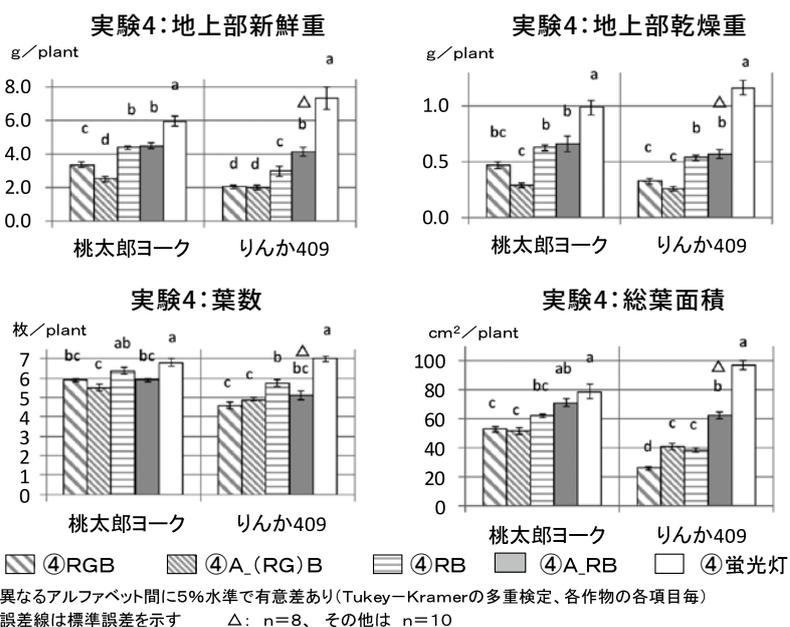


図-9 地上部新鮮重, 乾燥重, 葉数, 総葉面積 (実験 4, 播種後 24 日目)

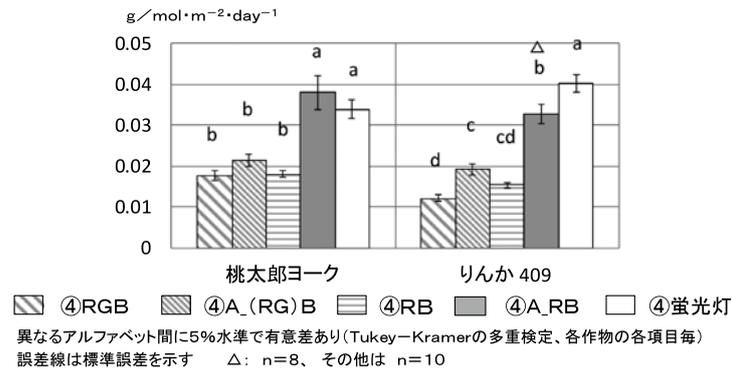


図-10 DLI 当たりの地上部乾燥重 (実験4, 播種後24日目)

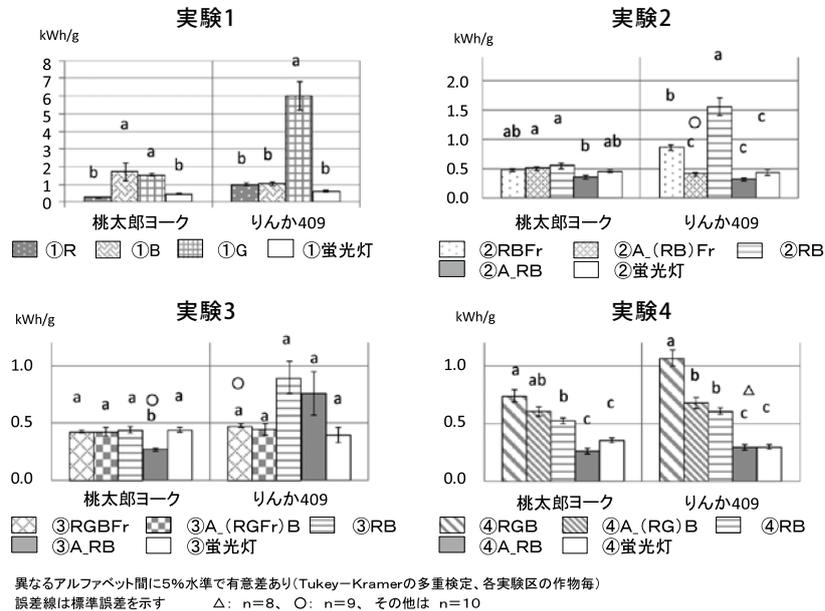


図-11 乾燥重当たりの照明の消費電力量 (播種後24日目)

‘りんか409’では蛍光灯区が大となったが、A\_RB区も高く、他の3条件区が低いという同様の結果となった。Gを加えた区ではFrを除くと顕著に生育が悪くなったことから、Gの効果は認められなかった。RB区に対し、A\_RB区はDLI当たりの地上部乾燥重で高い値を示すことから、交互照射の効果がここでも認められた。

#### 乾燥重当たりの照明の消費電力量の比較

実験1~4における乾燥重当たりの照明に係る消費電力量を算出した。結果を図-11に示す。‘桃太郎ヨーク’の場合、実験1において、蛍光灯区と赤色光区で消費電力量が同等の結果となった。しかし、苗の徒長が認められ、赤色光単独照射は育苗には不適であることが分かった。青

色光区および緑色光区では生育がよくないことに加え、消費電力量の観点からも効率が低いことが分かった。実験2、実験3では蛍光灯とLED区で消費電力量は概ね同等となったが、A\_RB区は他の試験区よりも生産効率が高い傾向が認められた。実験4では、A\_RB区を除くLED区は蛍光灯区より低い生産効率となった。実験3のRGBFr区、A\_(RGFr)B区が蛍光灯区と生産効率が同等であったことと比較すると、Fr照射の効果が認められた。実験4でA\_RB区は他のLED区よりも生産効率が高いことが分かった。

‘りんか409’の場合、実験1においては‘桃太郎ヨーク’と同様にLED単色光区では蛍光灯区と同等以下の生産効率であった。実験2、実験3はバラつきが大きく、

明確な結果が得られなかった。実験4では、‘桃太郎ヨーク’と同様に、A\_RB区を除くLED区は蛍光灯区より低い生産効率となり、A\_RB区は他のLED区よりも高い生産効率であることが分かった。

以上の結果から、‘りんか409’の場合は明瞭な結果が得られなかったが、‘桃太郎ヨーク’では、A\_RB区が良好な生産効率を示し、Frが一定の効果を示すことが分かった。特にA\_RB区は、RB区のDLIを蛍光灯区以上としても蛍光灯区より生育がよくないのに対し、DLI当たりの乾燥重が蛍光灯区と同等となった。

#### IV 考 察

今回の検討において、実験1のLED単色光での育苗で蛍光灯に比較して生育が不良であった。各LED区はDLIが蛍光灯区よりも小さく、光量が少ないためと考えられた。赤色光区、緑色光区では苗の徒長が観察され、草姿も不良であったことから、複数の波長の異なる光をより高いDLIで照射することが必要であると考え、実験2~4を行った。複数種類のLEDを用い、DLIを高くすることにより、蛍光灯での生育に近づく傾向は認められた。しかしながら、実験4のRGB区およびRB区では、蛍光灯区と同等程度のDLIとなる光照射を行っても、蛍光灯区の乾燥重の6割程度以下であったことから、赤色青色混合光では蛍光灯と同様の苗生産は困難であると考えられた。一方、同じ赤色光と青色光であっても、交互照射を行った場合（実験2~4のA\_RB区）は、DLI当たりの乾燥重で蛍光灯区と概ね同等の乾燥重が得られたことから、DLIをより高くすることで、蛍光灯区と同等の育苗を行うことができる可能性が考えられた。このことから、同じLED照明であっても、照射パターンを変えることにより、従来知られていない生育状況を生じさせることができる可能性が示唆された。また、遠赤色光を照射した場合（実験2のRBFr区、A\_(RB)Fr区、実験3のRGBFr区、A\_(RGFr)B区）、‘りんか409’の実験2RBFr区を除きDLI当たりの乾燥重で蛍光灯区と同等以上の乾燥重が得られたことから、遠赤色光照射が育苗期の重量増に好影響を与えることが示唆された。ただしRBFr区を除いては草姿に徒長が観察されることから、赤青色光との組み合わせ方や照射強度を適切に設定する必要があると考えられた。

‘桃太郎ヨーク’と‘りんか409’を比較した場合、各LED光照射条件に対する生育の傾向は概ね同様であったが、‘りんか409’ではRB区の地上部新鮮重が‘桃太郎ヨーク’と比較して低い傾向が認められた。一方で交互

照射であるA\_RB区では‘桃太郎ヨーク’と‘りんか409’とで大きな差は認められなかった。‘りんか409’の生育については、短節間であることなど桃太郎系の品種とは異なる形質を示すことが知られており、光照射条件に対する何らかの反応の違いが影響した可能性が考えられるが、その理由は今回の実験では明らかにできなかった。Nanyaら（2012）は、赤色光と青色光の混合光によるトマト育苗において、‘麗容’（サカタのタネ）を用いて実験を行い、赤色光 $75\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、16時間照射に、青色光 $25, 50, 75\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ をそれぞれ同時に混合照射すると、青色光量の増大に伴って節間長が短くなることから、青色光により徒長抑制効果が得られると報告している。後藤（2010）は育苗時には光強度と日長（明期）の組み合わせが重要な因子となることを指摘しており、畑ら（2011）は人工光の連続照射下において葉に激しい障害が発症することがあると報告している。今後赤色光青色光交互照射における赤青の光量比、光強度、照射時間等を変えて試験を行うことにより優良な苗生産に必要なLED光照射条件を明らかにすることができると考える。

苗生産コストの指標として、乾燥重当たりの照明の消費電力量を試算した。‘桃太郎ヨーク’では上記DLI当たり地上部乾燥重で良好な結果を示したA\_RB区で消費電力量が蛍光灯区と同等以下となるという試算を得た。A\_RB区では、有意差がつかない試験区があるものの、消費電力量が蛍光灯区の62%~79%となり、電力コストの削減に寄与できる可能性が示唆された。適切なDLIで良好な育苗が可能なLED光照射条件を定めることにより、苗生産に係る電力コストを大幅に削減できる可能性が見出された。

#### V 摘 要

トマト苗の生育検討を目的として、各種波長の単色LED照明を用い、LED光の組み合わせ、光量および照射パターンを変えてトマト育苗を行い、蛍光灯を用いた場合との比較から育苗に適したLED光照射条件の検討を行った。合わせて、苗乾燥重当たりの消費電力量を算出し、各種LED光照射条件における生産効率を評価した。実験には‘桃太郎ヨーク’および‘りんか409’の2品種のトマトを使用した。育苗は苗テラスを用いて行った。苗テラスの蛍光灯に変えて赤、青、緑、遠赤色の4色のLED照明を用いて各種照射条件にて育苗を行い、蛍光灯の場合と比較した。その結果、日積算光合成有効光量子量当たりの苗乾燥重の比較で、‘桃太郎ヨーク’では赤色光、青色光に加えて遠赤色光を照射した試験区および赤色光と青色光

の交互照射区で蛍光灯区と同等以上の値となった。赤色光と青色光の交互照射区では乾燥重当たりの照明の消費電力量が蛍光灯区の62%~79%となり、電力コストの削減に寄与できる可能性が示唆された。‘りんか409’でもほぼ同様の結果となったが、一部照射条件で‘桃太郎ヨーク’と異なる結果となり、品種による違いが認められた。

#### 引用文献

- 1) 古在豊樹・板木利隆・岡部勝美・大山克己(2005): 第1章. 閉鎖型苗生産システムの実用化が始まった. 最新の苗生産実用技術, 4. 農業電化協会, 東京.
- 2) 瓦 朋子(2015): ベルグアース(株)の苗供給の現状. ハイドロポニックス, 28(2), 6-7.
- 3) 土屋 和(2015): 育苗技術の進展と養液栽培での展望. ハイドロポニックス, 28(2), 2-3.
- 4) Nanya, K., Y.Ishigami, S.Hikosaka and E.Goto(2012): Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings. *Acta Horticulturae*, 956, 261-266.
- 5) 後藤英司(2010): 3. 葉菜類での生産で考慮すべき波長. 人工光源の農林水産分野への応用, 112-113. 農業電化協会, 東京.
- 6) 畑 直樹・榊田正治・小林昭雄・村中俊哉・岡澤敦司・村上賢治(2011): 閉鎖型植物工場における連続光の利用(第1報) 連続光下におけるナス科・ウリ科作物の生育様相ならびに障害発生. *植物環境工学*, 23(3), 93-100.

## Examination of Irradiation Conditions Using LED Light for the Growth of Tomato Seedlings

Yasumasa Watanabe, Takaki Yasuda, Tadashi Yoneda and Akimasa Nakano

### Summary

To study the growth of tomato seedlings, we used LED light at different wavelengths under various irradiation conditions such as different combinations of LED light, light intensity, and lighting time schedule. For the experiments, we used the ‘Momotaro-York’ and ‘Rinka 409’ cultivars of tomato. We examined LED irradiation conditions suitable for the growth of tomato seedlings, and compared the growth results to those obtained using fluorescent light. In addition, we calculated and evaluated the electricity consumption and efficacy of LED light per dry weight of tomato seedlings produced. To culture the seedlings, we used the “Nae terrace” system, and we changed the light source from fluorescent light to red, blue, green, and far-red LED light. A comparison of the dry weight of the seedlings per daily light integral under each light condition for ‘Momotaro-York’ suggested that irradiating tomatoes with far-red light in addition to red and blue light, or irradiating with blue and red light alternately, yields similar or better results as compared to those obtained using fluorescent light. Moreover, the electricity consumption when using alternating blue and red light irradiation was 62-79% of that when fluorescent light was used. This suggests that alternating blue and red light irradiation could contribute to electrical cost saving in tomato seedling production.

We obtained similar results for ‘Rinka 409’; however, we obtained different results for ‘Momotaro-York’ under some irradiation conditions, which could be attributed to the varietal differences between the two tomato cultivars.

Accepted: October 23, 2015

Vegetable Production Technology Division  
3-1-1 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8666 Japan