（千葉大学学位申請論文）

光環境制御による赤系リーフレタスの
高効率生産に関する研究

2017 年 1 月

千葉大学大学院園芸学研究科
環境園芸学専攻生物資源科学コース
古山　真一

用語の定義・解説

PFD: 単位時間に単位面積を通過する光量子の数のことを光量子束密度（Photon flux density）といい，PFD と略記する．単位は μmol m^{-2} s^{-1} である．

PAR: 光合成に有効な波長域（400 nm-700 nm）の成分のことを光合成有効放射（Photosynthetically active radiation）といい，PAR と略記する．

PPFD: PAR の PFD を光合成有効光量子束密度（Photosynthetic photon flux density）といい，PPFD と略記する．単位は μmol m^{-2} s^{-1} である．

光合成量子収率: 吸収された光量子 1 個に対して，光励起で誘起される特定の過程が何回起こるか，あるいは特定の状態や分子が何個生成するかを示す量を量子収率と呼ぶ．葉の光合成量子収率は，葉にある PPFD の光を照射したときに得られた単位葉面積あたりの光合成速度をその PPFD で除して求める．さらに積分球を使って葉の吸収率を求めれば，吸収光に対する光合成量子収率が求められる．

光合成効率: 光合成効率は文献によって使われ方が異なるが，本研究では，植物体にある PPFD の光を照射したときに得られた単位葉面積あたりの光合成速度をその PPFD で除して求めた値を光合成効率とした．単葉に対して鉛直上方から光を照射した場合は，光合成効率は葉の光合成量子収率と等しくなる．しかし，植物によって葉の角度や自己被陰の割合が異なるため，光合成効率の大小は葉の光合成量子収率の大小と必ずしも等しくならない．

自己被陰: 同じ植物個体内における葉の重なりのことを自己被陰という．

葉の角度: 本研究では，栽培パネル面と葉が交わってできる角度のことを葉の角度とする．すなわち，葉が立性になると葉の角度は大きくなる．

光合成能力: 光合成能力は文献によって使われ方が異なるが，本研究では，光環境以外は生育条件と同条件のもとで，飽和光を当てたときの光合成速度とした．

B/R 比: 青色光（B: 400–500 nm）に対する赤色光（R: 600–700 nm）の PFD の比率を B/R 比と略記する．

T/R 比: 地上部乾物重に対する地下部乾物重の比率を T/R 比と略記する．

成長に応じてスペーシングした場合: 本試験では，植物体を円と仮定して植物の成長に合わせて正方配置で毎日スペーシングをする場合（Fig. 3.2）を，成長に応じてスペーシングした場合とした．

目次

第 1 章 序論 1
1.1 研究の背景 2
1.2 既往の研究および本研究の目的 4
第 2 章 赤青光比および光強度が 赤系リーフレタスの形態および光合成速度に及ぼす影響 8
2.1 緒言 9
2.1.1 はじめに 9
2.1.2 光質が光合成に関わる形態形成に及ぼす影響 11
2.2 材料および方法 14
2.2.1 植物材料 14
2.2.2 育成方法および試験区 16
2.2.3 測定および算定項目 20
2.3 結果および考察 25
2.3.1 植物体の写真 25
2.3.2 PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した場合 30
2.3.3 PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した場合 40
2.3.4 PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した場合 50
2.3.5 総合考察 60
2.4 結論（2 章） 64
第 3 章 異なる赤青光比および光強度下で育成した赤系リーフレタスの照明電力量の推定 65
3.1 緒言 66
3.2 相互遮蔽のないようにスペーシングした場合の照明電力量の推定 68
3.2.1 はじめに 68
3.2.2.1 植物材料 69

3.2.2.2　育成方法および試験区 70
3.2.3　結果および考察 75
3.3　相互遮蔽の起こる栽植密度下での照明電力量の推定 85
3.3.1　はじめに 85
3.3.2　材料および方法 86
3.3.2.1　植物材料 86
3.3.2.2　育成方法および試験区 86
3.3.2.3　測定および算定項目 87
3.3.3　結果および考察 90
3.4　結論（3 章） 106
第 4 章 総括 107
4.1　本論文の摘要 108
4.2　今後の課題および展望 109
引用文献 111

第 1 章

序論

1.1　研究の背景

人工光型植物工場で生産される野菜は，品質の差が少ない，無農薬栽培である，細菌数が極端に少ないため冷蔵庫で長持ちする，天候と場所に依存せず安定供給できるという特徴がある（高辻・森，2011）ことから，内食だけでなく外食・中食産業からも多くの需要がある．しかし，人工光型植物工場はイニシャルコストやランニングコストが高いため，生産された野菜の価格が露地野菜に比べて高いことが多いのが課題である．多くの人工光型植物工場では価格をなるべく低くして商品を販売しているため，黒字経営の施設は少なく，経営を改善するための技術開発が必要である．

人工光型植物工場の経営を栽培によって改善する方法には，1）生産する野菜に高付加価値を付けて単価を高める方法，2）生産コストを低くする方法の 2 点が挙げられる．1）の方法で成功している事例にドクターベジタブルジャパン株式会社が慢性腎臓病患者に向けて販売している低カリウムレタスが挙げられる（ドクターベジタブルジャパン（株），http://www.drvegetable.jp/，2017 年 1 月 5 日参照）．カリウム濃度が低いという付加価値をつけることで，通常の人工光型植物工場で生産されているレタスよりも高い価格でレタスを供給している．葉菜類の高付加価値化に関する研究は当研究グループでも精力的に行っており，例えば，青色光（常川，2006 卒論；庄子，2010），UV（酒井，2010 卒論；林，2016），培養液濃度（山田，2010），高光強度（古山，2011 卒論；藤澤，2012 卒論）によって葉菜類の二次代謝物質の含有量を高める研究開発を行ってきた．ただ，1）の方法であっても，人工光型植物工場での収益を改善するためには，生産コストを低くすることが重要であり，低コスト生産を実現するための技術開発は必要である．

現在の日本の人工光型植物工場では生産コストのうち，電気料金が占める割合は 25–30%であり，そのうち照明費が 60–70%を占める（古在，2014）．

よって，人工光型植物工場での生産コストを抑えるには，照明費を抑えることが有効である．

現在の人工光型植物工場では，主光源に白色蛍光灯を用いる商業施設が多い．LED の発光効率の上昇により，新規に人工光型植物工場を設置する場合には LED を人工光型植物工場の主光源に採用する施設が増えている（庄子，2016）．LED は発熱量が少ないため，冷房費が削減される．また，光源の耐用年数が蛍光灯に比べて長いため，メンテナンスなどの作業負荷が低下するという利点がある．

ところで，光形態形成は植物の光応答の一種であり，赤色光・遠赤色光の光受容体であるフィトクロム（Franklin and Quail, 2010），青色光の光受容体であるクリプトクロム（Yu et al., 2010），フォトトロピン（Christie, 2007）などに光が感受されることによって誘導される．光受容体に光が感受されると，情報伝達系を通して，花成制御，胚軸長制御，気功の開閉，色素合成，葉の扁平化などの光形態形成を引き起こす．LED の大きな特徴は多様な光質の光を照射できることであり，LED を用いて光質を選択して植物体に光を照射することで，低コストでの植物の生産や，目的の形質を持った植物の生産が可能になると考えられる．

人工光型植物工場において低コストで葉菜類を生産するには，成長を促進してなるべく早くに収穫できること，照明電力量あたりの可食部生産コストを低下させることが必要である．そのため，植物体の葉の形態を変化させたり，葉の光合成量子収率を高めることで，光合成効率を高め，単位栽培面積あたりの成長を大とできるような光環境制御法の開発が望まれる．

1.2　既往の研究および本研究の目的

多くの植物において，数時間の測定による同一の光量子を照射した際の，葉面積あたりの光合成速度は，赤色光で最も高く，青色光や緑色光では低くなる（Goto et al., 2014）．しかし，中長期的な栽培においては，赤色光単独光下よりも，赤色光に青色光をある一定量混合させたほうが成長は大となり（Yanagi et al., 1996; Yorio et al., 2001），その場合は B/R 比が 0.1-0.3 程度で成長が最大になるという報告（高辻ら，1995; 森・高辻，1999; Hernández et al., 2016）が多い．

前述のように，光合成速度が最大になる光質と中長期間栽培した時に成長が最大になる光質は一致しないことがある．その理由の 1 つに，ある光質下で植物を長期間育成すると，光合成速度が変化することが挙げられる．

例えば，Schuerger ら（1997）は，赤色光が 98%，遠赤色光が 1%，青色光が 1%の光質下で育成したトウガラシでは，赤色光単独下や赤色光 83%，遠赤色光 17%の光質下で育成されたものよりも葉の柵状細胞あたりの葉緑体数が多かったと報告している．また，松田（2007）は，B/R 比を 0.25 とした赤青 LED 光下で育成したイネは赤色光単独下で育成したものよりも単位葉面積あたりのリブロース 1,5-ビスリン酸カルボキシラーゼ/オキシゲナーゼ，シトクロム *f*，クロロフィル，LHCII 濃度が高かった．また，単位葉面積あたりの N 濃度や光合成速度も赤青 LED 下で育成した方が高かったと報告している．これらの光合成関連タンパク質の濃度や葉厚に差が出れば，葉の光の吸収率や吸収光量あたりの光合成量子収率に差が生じるため，葉の光合成量子収率に差が生じると考えられる．

Li and Kubota（2009）は，白色蛍光灯に青色 LED を付加した光質下で育成した赤系リーフレタスでは白色蛍光灯単独よりも葉のアントシアニン濃度，カロテノイドであるキサントフィルおよび β-カロテンの濃度が高まると報告している．Ohshi-Kaneko ら（2007）は，赤色蛍光灯単独下，赤色蛍光

灯と青色蛍光灯の数を 1:1 とした光源下で育成した赤系リーフレタスでは，青色蛍光灯単独下で育成したものよりも葉のクロロフィル濃度および総カロテノイド濃度が高かったと報告している．葉に含有される色素の濃度や構成比に差が出れば，クロロフィルが受け取ることのできる光の量・割合が変わるので，光合成量子収率に差が生じると考えられる．

また，光合成速度が最大になる光質と中長期間栽培した時に成長が最大になる光質は一致しない理由に，光質は光合成速度だけでなく形態にも影響するため，形態変化のなかには成長に影響を及ぼすものがあることが挙げられる．

例えば，Brown ら（1995）は，赤色光に 1%の青色光を付加した光質下で育成したトウガラシでは，赤色光単独下よりも葉面積が大きくなったと報告している．また，Johkan ら（2010）は，リーフレタスの葉身長，葉幅長は光質によって異なると報告している．形態変化によって葉面積や葉形に差が出れば葉の積算受光量に差が生じると考えられる．

Yanagi ら（1996）は青色光単独下で育成したリーフレタスの葉の角度は，赤色光単独下よりも大きくなったと報告している．また，ある表面の放射照度はランバートの余弦則に従って，表面と入射する放射光線の角度に依存する（Jones and Vanghan, 2013）．つまり，葉角度が大きくなるほど単位葉面積あたりの受光強度は低くなり，光合成効率は高くなる可能性がある．

以上から，光質によって成長に差が生じるのは，葉の光合成量子収率に差が生じること，葉面積，葉角度，葉形などに差が生じることで受光量や受光強度に差が生じること，の大きく 2 つに分けられる．しかし，葉の光合成量子収率が高まったり，葉の角度が大きくなり光合成効率が高まることで成長が大となるのと，葉面積が大きくなり受光量が大きくなることで成長が大となるのとでは，意味合いが異なる．人工光型植物工場では，単位栽培面積あたりの収量を高めたいため，光合成効率の高まる光質下で育成できることが望ましい．したがって，光質が光合成速度に及ぼす影響と形態に及ぼす影響

を分離して評価することが必要であるが，これまでに葉の形態変化と成長の関係に着目した研究例はない．

リーフレタスは人工光型植物工場で最も多く生産されている野菜であり，そのうち，赤系リーフレタスはアントシアニン色素を葉に高含有するのが特徴である．光質が赤系リーフレタスに及ぼす影響に関する研究は多くあり，既往の研究から，赤系リーフレタスのアントシアニン濃度は B/R 比が高いほど大となると報告（常川，2006 卒論；庄子，2010）されている．アントシアニンは PAR では青色および緑色光域の光を多く吸収するため，アントシアニン濃度の大小によって葉の光合成量子収率に差が生じると考えられる．

そこで，本研究の第 2 章では，赤系リーフレタスを異なる B/R 比下で育成し，光質が光合成速度に及ぼす影響と形態に及ぼす影響を分離して評価した．光質が光合成速度に及ぼす影響と形態に及ぼす影響を分離して評価することで，中長期的に栽培をした際に，成長に差が生じる理由を解明することを目的にした．

ところで，人工光型植物工場で生産効率を高めるには，1 株の生産にかかる照明電力量を抑える必要がある．これまでに照明電力量を抑えてレタスを効率的に生産するための研究開発が行われてきた．例えば，後藤・高倉（1987）は，サラダナの光エネルギーあたりの光合成速度を最大にする光強度（最大効率光強度）は生育が進むにつれて高くなること，最大効率光強度を維持しながら栽培する場合には，光強度を一定とする場合に比べて照射コストが 1–15％低減できると報告している．また，斎藤ら（2012）は異なる LED 下で，リーフレタスを栽培し，照明電力量を抑えて生産できる光質を提案した．大竹ら（2015）は赤色光と青色光とを交互連続に繰り返し照射することで，照明電力量を抑えてリーフレタスを生産できる照射パターンを示した．さらに，光源から照射された光のうち植物葉に照射されない光（照明ロス）を少なくする栽植密度の検討（Okamura et al., 2013）や，植物の大きさに合わせて移動する高度な密植栽培装置が開発（Okano et al., 1988; 森ら，1991）さ

れている．

以上から，1 株の生産にかかる照明電力量を抑えるためには，高い成長速度を維持できる光源下で育成し，植物の成長に応じて相互遮蔽と照明ロスができるだけないようにスペーシングして栽培することが有効と考えられる．ただ，前述のように葉が展開し受光量が多くなると成長は大となるが，植物の成長に応じてスペーシングする場合，成長が大となる光質下で 1 株の生産にかかる照明電力量が低くなるとは限らない．例えば，形態変化によって葉が広く展開し，受光量が多くなることで成長が大となる B/R 比であっても，光合成効率が低い場合には，照明電力量が多くなる可能性がある．しかし，これまでに受光面積の違いを考慮したスペーシングの検討をした例はない．

そこで本研究の第 3 章では異なる LED の B/R 比下で赤系リーフレタスを育成し，収穫サイズに達するまでに必要な総受光面積と積算受光量を算定し，植物の成長に応じてスペーシングした場合の照明電力量について比較した．

また，成長に応じてスペーシングした場合よりも，相互遮蔽の起こる栽植密度下で育成した方が照明ロスは少なくなる．しかし，相互遮蔽の起こる栽植密度では隣植物と強く接触し，葉付近の CO_2 濃度が低いため，同一照明電力量での成長は小さい可能性がある．そのため，照明ロスの少ない条件である相互遮蔽の起こる栽植密度下で実際に育成した場合についての検討も行った．

以上の背景より，本論文は，光源に LED を用いる人工光型植物工場における赤系リーフレタスの高効率生産に寄与する光環境制御法の開発を目的とした．

第 2 章

赤青光比および光強度が
赤系リーフレタスの形態および光合成
速度に及ぼす影響

2.1　緒言

2.1.1　はじめに

近年，光質が植物の生育に及ぼす影響に関する研究は多くあり，既往の研究では，赤色光と青色光を一定割合で混合させた方が赤色光または青色光単独よりは成長が大となるという報告が多い．しかし，成長が最大となる B/R 比は報告によって異なり，光質が生育に及ぼす影響について一様な結論が得られていない（Goto, 2003）．この理由に，光強度が影響している可能性がある．例えば，庄子ら（2011）は，ピーク波長の異なる 10 種 LED を用いて，赤系リーフレタスを PPFD 100, 200 および 300 μmol m^{-2} s^{-1} で 7 日間育成した試験を行っている．この試験は単色光の試験ではあったが，この試験では成長が最大になる光質は光強度によって異なる．また，Johkan らの報告（2010）でも，成長が最大になる光質は光強度によって異なる．したがって，成長が最大になる B/R 比は光強度によって異なる可能性がある．また，序論で述べたように，これまでに光質が光合成速度に及ぼす影響と形態に及ぼす影響を分離して評価した研究例はない．そのため単色光を用いた既往の報告においても，光強度によって成長が最大になる光質が異なる理由が，光合成速度によるものか，葉の形態の変化によるものか明らかでない．

以上より，本章の目的は，以下の 2 点とした．

1）光質が光合成速度に及ぼす影響と形態に及ぼす影響を分離して評価し，成長に差が生じる理由が，葉の形態変化によるものか，葉の光合成量子収率の変化によるものか，成長解析によって明らかにすること．

2）成長が大となる B/R 比は光強度によって異なるか調査し，異なるのであればその理由を，同様の手法で示すこと．

既往の研究では，B/R 比が 0.1–0.3 の間で成長は最大になるという報告が多い（後藤，2011）．そのため，本研究では，B/R 比が 0.1–0.3 になるように

特注した赤青 LED を用いて試験を行い，光強度ごとに最適な光質を示すことも目的とした．

2.1.2　光質が光合成に関わる形態形成に及ぼす影響

光質が赤系リーフレタスの光合成に関わるそれぞれの形態形成に及ぼす影響を整理するために，光質が形態形成および光合成に及ぼす影響の図を作成した（Fig. 2.1）.

この作用図では，実線は矢印の前が矢印の後に影響を及ぼすことを示し，長破線は矢印の後が矢印の前からの計算結果であることを示し，点線は矢印の前から後へ同化産物が分配されることを示す.

ここでは長破線の項目に関して説明する.

（1）単位葉面積あたりの葉の光の吸収量（mol m^{-2} s^{-1}）（The amount of light absorbed by leaves per unit leaf area）

まず，PAR の波長域である 400–700 nm の光量子を 100 mol m^{-2} s^{-1} とした際の，光源からの光の 1 nm ごとの光強度と葉の光の吸収スペクトル（%）を 1 nm ごとに乗じ，足し合わせた値を 100 mol m^{-2} s^{-1} で除すことで葉の光源からの光の吸収率（%）が算出される．葉の光源からの光の吸収率（%）に植物体上における単位葉面積あたりの光強度（mol m^{-2} s^{-1}）（Light intensity on the plant per unit leaf area）を乗じ，100 で除すことで，単位葉面積あたりの葉の光の吸収量（mol m^{-2} s^{-1}）が算出される.

（2）植物体あたりの純光合成速度（mol CO_2 $plant^{-1}$ s^{-1}）（Net photosynthetic rate per plant）

植物体あたりの純光合成速度（mol CO_2 $plant^{-1}$ s^{-1}）（Net photosynthetic rate per unit leaf area）に受光面積（m^2）（Irradiated leaf area）を乗ずることで植物体あたりの純光合成速度（mol CO_2 $plant^{-1}$ s^{-1}）が算出される.

（3）光源から植物体の葉面までの距離（m）（Distance from the light source to the plant）

葉の角度（Leaf angle）を θ とすると，葉長（Leaf length）（m）に cos θ を乗ずることで栽培パネル面から植物体の葉面までの距離が算出される. 栽培パネル面から植物体の葉面までの距離を, 既知値である光源から栽培パネル

面までの距離より減ずることで，光源から植物体の葉面までの距離（m）が算出される．

（4）植物体の葉面上における単位葉面積あたりの光強度（mol m^{-2} s^{-1}）（Light intensity on the plant per unit leaf area）

まず，この作用図の光源は平行光を照射し，反射板などによる反射の影響はないと仮定している．また，空気中の分子による光散乱の影響は無視する．その場合，植物体の葉面上における単位投影面積あたりの光強度（mol m^{-2} s^{-1}）は，栽培面上の光強度（mol m^{-2} s^{-1}）と等しい．ここで，葉の角度（Leaf angle）を θ とすると，単位投影面積あたりの光強度（mol m^{-2} s^{-1}）に sin θ を乗ずることで，単位葉面積あたりの光強度（mol m^{-2} s^{-1}）が算出される．

（5）植物体あたりの受光面積（m^2）（Irradiated leaf area）

葉面積（Leaf area）（m^2）から同じ植物個体内における葉が重なっている面積（Overlapping leaves area of a plant）を減ずることで，受光面積（m^2）（Irradiated leaf area）が算出される．

本研究では，この図を参考に第 2 章での測定・算定項目を決定し，解析を行った．

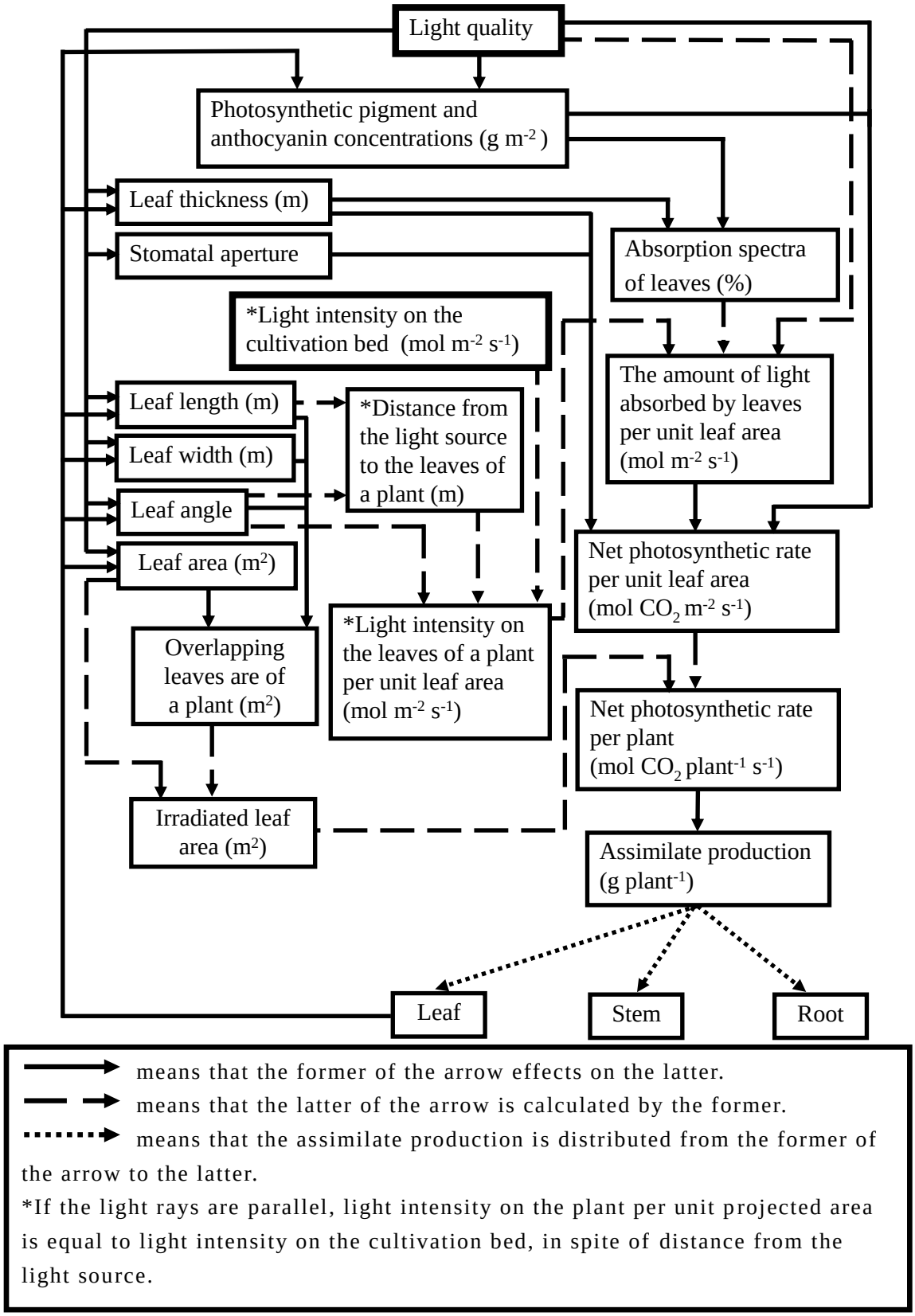

Fig. 2.1 Effects of light quality on each photomorphogenesis related to photosynthesis of lettuce.

2.2　材料および方法

2.2.1　植物材料

供試植物は赤系リーフレタス（*Lactuca sativa* L.,‘レッドファイヤー’，タキイ種苗（株））とした．種子をウレタンスポンジに播種し，千葉大学園芸学部内に建設された閉鎖型植物生産施設のクリーンルーム内栽培室 2（Fig. 2.2）にて播種後 4 日目まで暗黒条件で処理した後，播種後 11 日目まで 3 波長型昼白色蛍光灯（FHF32-EX-N-H，パナソニック（株）．以下，FL）下で，育苗した個体を供試材料とした．供試材料育成中の環境条件を Table 2.1 に示す．なお，供試材料育成時の光強度は後述する試験中の光強度と同一とした．

Fig. 2.2 Cultivation room 2 in the clean room.

Table 2.1 Pretreatment environment.

Light source	White fluorescent lamp
Light period	16 h d^{-1}
Air temperature	23℃/20℃(Light/dark period)
Relative humidity	70%
CO_2 concentration	1000 µmol mol^{-1}
Nutrient solution	Quarter-strength Otsuka A solution

*Photosynthetic photon flux density measured on the cultivation bed.

2.2.2　育成方法および試験区

播種後 11 日目に供試材料を栽培室 2 に設置した湛液水耕栽培装置（内寸: 600 mm（W）×1200 mm（D）×140 mm（H））へ移植した．栽培中はエアポンプを用いて培養液にエアレーションを行い，酸素を常時供給した．明期，気温，CO_2 濃度および培養液濃度は供試材料育成時と同一とした．栽植密度は，播種後 11–17 日目は 229 株/m^2，18–20 日目は 114 株/m^2，21–25 日目は 57 株/m^2 とし，相互遮蔽のないようにした．

光源には B/R 比の異なる直管形 LED ランプ（昭和電工（株），特注．ピーク波長，青：450 nm，赤：660 nm．以下，赤青 LED）および 3 波長型昼白色蛍光灯を用いた．本試験で使用した赤青 LED を Fig. 2.3 に示した．PPFD の測定には光量子センサ（LI-190, Li-COR, Inc.）を用いて行った．また，栽培パネル（588 mm×885 mm）面上 54 点の PPFD を光質処理開始前に測定・調節し，平均値を光質処理開始前の光強度とした．各ランプのスペクトル分布は分光放射計（LI-1800，Li-COR, Inc.）で測定した．PPFD を調節するために，赤青 LED では，交流 100 V 電源から赤青 LED の直流電源の間に変圧器（SK105，東芝（株）または V-130-5，山菱電機（株））を設置し，変圧器の出力電圧を調整することで光強度を調整した．FL では，交流 200 V 電源からランプまでの間に変圧器は繋がず，ランプにアルミホイルを巻くことで光強度を調整した．光強度および光質のばらつきを小さくするために光拡散性フィルム（100 μm エフクリーンナシジ，AGC グリーンテック（株））をランプの下に展張した．

試験区は赤青 LED 下で 3 水準の PPFD（100，200 および 300 μmol m^{-2} s^{-1}）と 3 水準の B/R 比（0.33，0.23 および 0.18）を組み合わせた 9 区および FL 下で 3 水準の PPFD（100，200 および 300 μmol m^{-2} s^{-1}）の 3 区とした．各試験区の，光拡散性フィルムを展張された光源の波長組成を Table 2.2 and Fig. 2.4 に示した．

光質処理は播種後 11–25 日目に行った．本研究で使用した播種後 25 日目の B/R 比 0.23 区（光質処理時の PPFD は 200 μmol m^{-2} s^{-1}）の様子を Fig. 2.5 に示した．試験は 2–3 反復行った．

Fig. 2.3 Blue and red light emitting diodes (LEDs).

Table 2.2 Spectral characteristics of light of each light source at PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1}.

Wave length (nm)	B/R ratio (Mixture of red and blue LEDs) 0.33	0.23	0.18	White fluorescent lamp
300–400	0.07	0.05	0.04	0.97
400–500	24.48	18.76	15.05	26.13
500–600	0.32	0.27	0.28	42.67
600–700	75.2	80.97	84.67	31.19
700–800	0.35	0.31	0.29	2.96
PPFD	100	100	100	100
B/R	0.33	0.23	0.18	0.84
R/FR	214.6	261.2	288.9	10.53

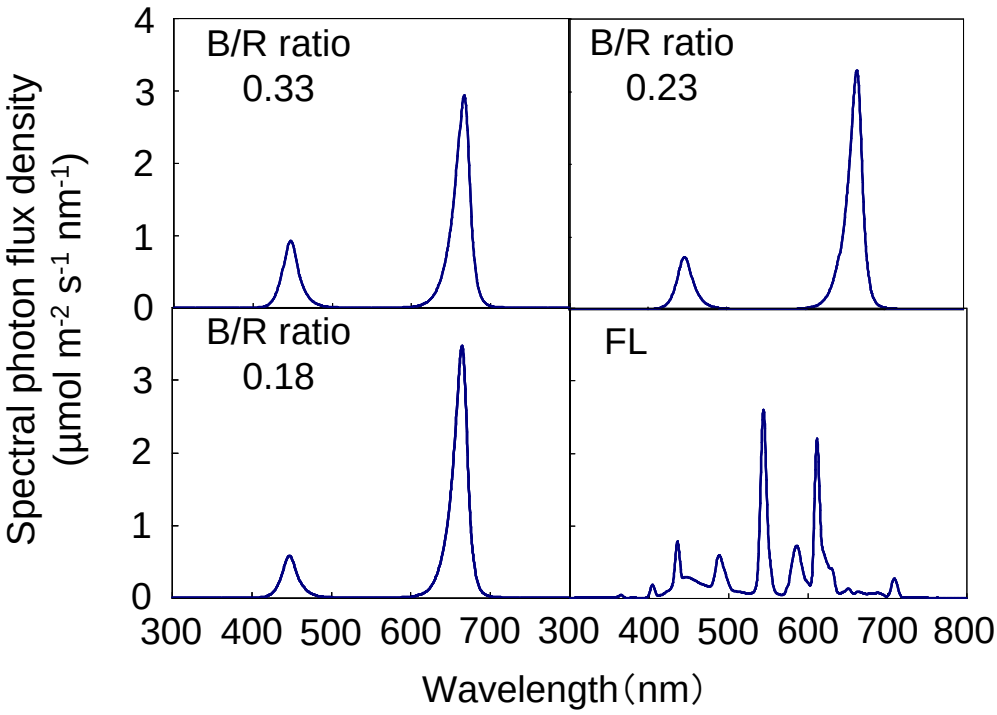

Fig. 2.4 Spectral photon flux density distribution of light source at 100 μmol m^{-2} s^{-1} PPFD was calculated from the spectral energy distribution of light source measured using a spectroradiometer (LI-1800; Li-COR, Inc.).

Fig. 2.5 Red leaf lettuce (cv. Red-fire) plants of B/R ratio 0.23 (PPFD 200 µmol m^{-2} s^{-1}) on 25 days after sowing.

2.2.3　測定および算定項目

播種後 11，14，18，21 および 25 日目に，全乾物重および植物体の成長点付近の光強度（植物体上の光強度）を測定し，投影面積，1 日の植物体あたりの推定受光量（推定受光量），積算受光量および積算受光量あたりの乾物重増加量を算定した．さらに，播種後 25 日目には，総葉面積，投影面積/総葉面積（PA/LA），ならびに最大葉のクロロフィル濃度，クロロフィル a/b 比，アントシアニン濃度（PPFD 100 および 300 μmol m^{-2} s^{-1}），光の吸収スペクトル，光質処理時の光（栽培光）の吸収率および光合成速度を算定した．なお PA/LA は，葉の角度と葉の重なり（自己被陰）の指標であり，値が大きいと葉の角度（葉と水平面とのなす角度）が小である，または自己被陰が小であることを示す．

以下に，（1）乾物重，（2）クロロフィル濃度，（3）アントシアニン濃度，（4）最大葉の光の吸収スペクトル，（5）最大葉の栽培光の吸収率（%），（6）投影面積，（7）推定受光量，（8）積算受光量，（9）積算受光量あたりの乾物重増加量および（10）最大葉の個葉光合成速度の測定および算定方法を示す．

（1）乾物重

80C° に設定した恒温乾燥機（MOV-212F（U），三洋電機（株））に植物体を入れた．恒温乾燥機に植物体を入れてから 72 h 以上経過した後，シリカゲルの入ったデシケーター内で室温になるまで放冷させ，電子天秤（IUW-200D, Sefi, Inc.）を用いて測定した．

（2）クロロフィル濃度

最大葉の葉身部をコルクボーラーで切り取った．切り取った試料に 5 ml の N,N-ジメチルホルムアミド（DMF）を加え，冷蔵庫で 2 日間静置してク

ロロフィル色素を抽出した．分析は紫外可視分光光度計（V-550, 日本分光（株））を用いて，750.0 nm, 663.8 nm および 646.8 nm の吸光度を測定し，Porra ら（1989）の式を用いてクロロフィル a およびクロロフィル b の値を求めた．

（3）アントシアニン濃度

最大葉の葉身部をコルクボーラーで切り取った．切り取った試料重（g FW^{-1}）を測定した後，5 ml の 1%塩酸－メタノールを加え，冷蔵庫で 2 日間静置してアントシアニン色素を抽出した．分析は紫外可視分光光度計（V-550, 日本分光（株））を用いて，530.0 nm の吸光度を測定し，得られた吸光度を試料重で除した．アントシアニン濃度は，FL 区の生体重あたりの吸光度（OD 530 nm gFW^{-1}）を 1 としたときの相対値とした．

（4）最大葉の光の吸収スペクトル

紫外可視分光光度計（V-550, 日本分光（株））に積分球装置（ISV-469, 日本分光（株））を取り付け，最大葉の 400–700 nm の光の透過率（%）および反射率（%）を測定した．また，1 nm ごとの葉の光の吸収率（%）を，波長ごとに 100 から葉の透過率（%）および反射率（%）を減ずることで算定した．それぞれの試験区について 3–4 個体の最大葉を測定し，得られた平均値をその試験区の最大葉の光の吸収スペクトルとした．

（5）最大葉の栽培光の吸収率（%）

積分球装置を取り付けた紫外可視分光光度計を用いて測定･算定した 1 nm ごとの最大葉の葉身の光の透過率・反射率（%）に，栽培光の 400–700 nm の光量子を 100 μmol m^{-2} s^{-1} とした際の 1 nm ごとの光強度（μmol m^{-2} s^{-1} nm^{-1}）を乗じ，足し合わせた値を 100 μmol m^{-2} s^{-1} で除すことで，最大葉の栽培光の透過率・反射率（%）を算定した．100 から最大葉の栽培光の透過率・反

射率（%）を減ずることで，最大葉の栽培光の吸収率（%）とした．

本測定法では，葉身に対して鉛直方向から平行光を照射したときの光の吸収率が得られる．葉角度が変化すれば光路長は変化し，例えば葉角度が大きければ光路長は長くなるので，実際の栽培条件での吸収率は，本測定で得られる吸収率よりも高い可能性がある．そのため，実際の栽培条件での吸収率については，葉角度と本測定で得られる栽培光の吸収率から，推測する必要がある．

（6）投影面積

植物体の鉛直上方 1 m の位置からデジタルカメラで，植物体および定規が 1 枚に収まるようにして，写真を撮影した．得られた写真を市販の画像ソフト（Photoshop 7.0, Adobe Systems Inc.）において，植物体の葉のピクセル数をカウントすることで算定した．

（7）推定受光量

植物体上の光強度と投影面積を乗じることで算定した．なお，実測日以外の日の光強度と投影面積は線形補間により推定した値を用いた．

（8）積算受光量

推定受光量を 1 日ごとに足し合わせることにより算定した．

なお，本算定法は，光源からは平行光のみが照射され，植物体は平行光のみを鉛直上方から受光したとして算定したのと同義である．しかし，実際の人工光型植物工場では，反射板等で多くの光を反射させ，できるだけ多くの光が栽培面に届くように工夫されている．そのため，栽培面には平行光と散乱光が一定割合で混合された光が到達する．散乱光が多い場合，下位葉まで多くの光が到達する（黒岩，1979）．そのため，平行光のみが到達したと仮定して算定した場合では，受光量を過小評価すると考えられる．ただ，赤系

リーフレタスは広葉型のロゼット植物である．ロゼット植物は，短い茎の部分に多数の葉が密集し全体として丸い形状をなす．そのため，散乱光であっても葉身基部まで到達する光の大部分は各個葉での反射と透過によって散乱した光と考えられる．また，下位葉においては，実際に予備試験において B/R 比を 0.23 とした赤青 LED を用いて葉身部の PPFD を測定したところ，直上葉である最大葉の PPFD の 5.4±0.9%（n = 6）だった．予備試験において積分球装置を用いて測定した PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1}，B/R 比 0.23 での，栽培光の透過率は 6.0%（n = 3）だった．そのため，下位葉に到達した光の大部分は直上葉の透過光と考えられた．本章の受光量の評価では，散乱光や透過光は考慮せずに算定した，積算受光量を用いた．

（9）積算受光量あたりの乾物重増加量

播種後 25 日目の全乾物重から播種後 11 日目の全乾物重を減じた値を積算受光量で除すことで算定した．

（10）最大葉の個葉光合成速度

最大葉の個葉光合成速度の測定は播種後 25 日目に携帯型光合成蒸散測定装置（LI-6400, LI-COR, Inc.）を用いて行った．各個体の最大葉を 1 回ずつ測定した．

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する．本試験では，最短待ち時間を 180 秒，最長待ち時間を 300 秒，変動係数を 1 %と設定した．

湛液水耕栽培装置で光質処理中の植物体の最大葉を，葉脈を避けながら

LI-6400 の測定チャンバに挟み，測定開始前に PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} から光強度を徐々に上げ葉を光に慣らした．PPFD 1000 μmol m^{-2} s^{-1} で光合成速度が安定した後，Light Curve を用いて PPFD 1000，800，600，400，300，200，100，50，0 μmol m^{-2} 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．光源には，LED 冷光光源（6400-02B, LI-COR, Inc.）を用いた．測定チャンバに流入する空気の CO_2 濃度は 1000 μmol mol^{-1} に設定し，気温は 23C°，相対湿度は 70 %前後となるよう調整した．

得られたデータは統計分析ソフト（エクセル統計 ver5.0，エスミ（株））を用いて解析した．

2.3　結果および考察

2.3.1　植物体の写真

それぞれの PPFD について播種後日数ごとの写真を示す．なお，PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} については，植物体が小さく差がみられなかったため播種後 25 日目の写真のみ示す．

＜PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した植物体：播種後 25 日目＞

FL 区で植物体の大きさは最大となる傾向がみられた（Fig. 2.6）．赤青 LED 区では外観上の大きさに差はみられなかった．また，アントシアニンによると思われる着色は B/R 比 0.33 区で強かった．

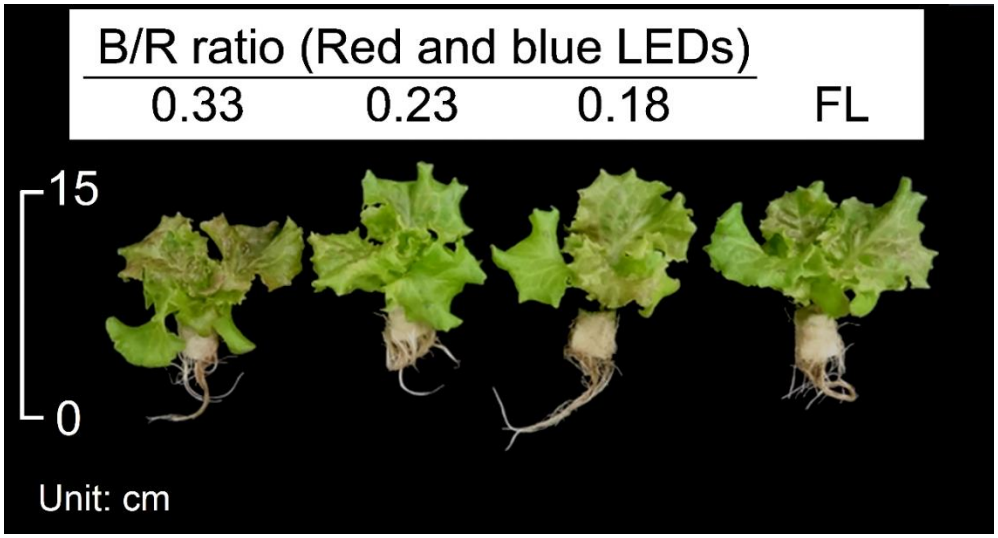

Fig. 2.6 Effect of B/R ratio (PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1}) on plant growth on 25 days after sowing.

＜PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した植物体：播種後 14 日目＞

植物体の大きさに試験区間で差はみられなかった（Fig. 2.7）.

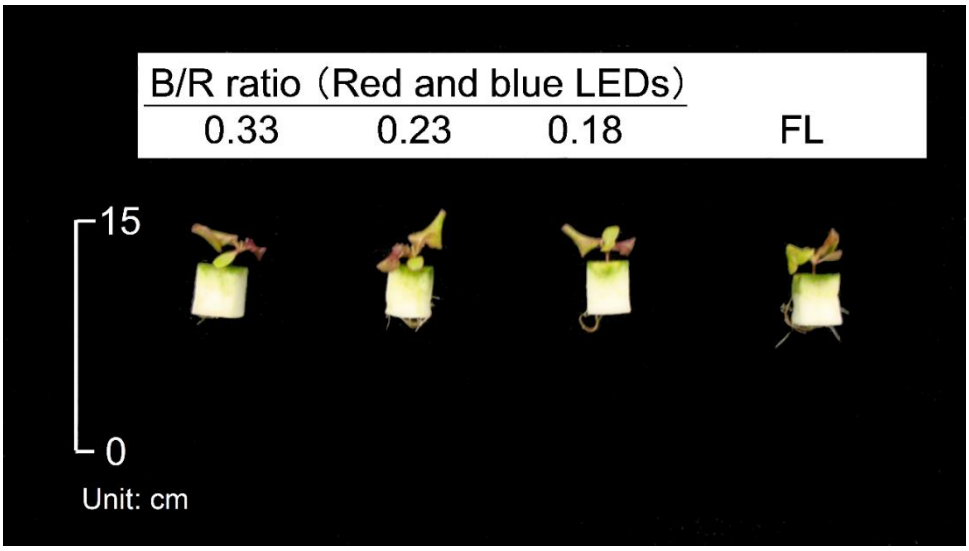

Fig. 2.7 Effect of B/R ratio (PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1}) on plant growth on 14 days after sowing.

＜PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した植物体：播種後 18 日目＞

植物体の大きさに試験区間で差はみられなかった（Fig. 2.8）.

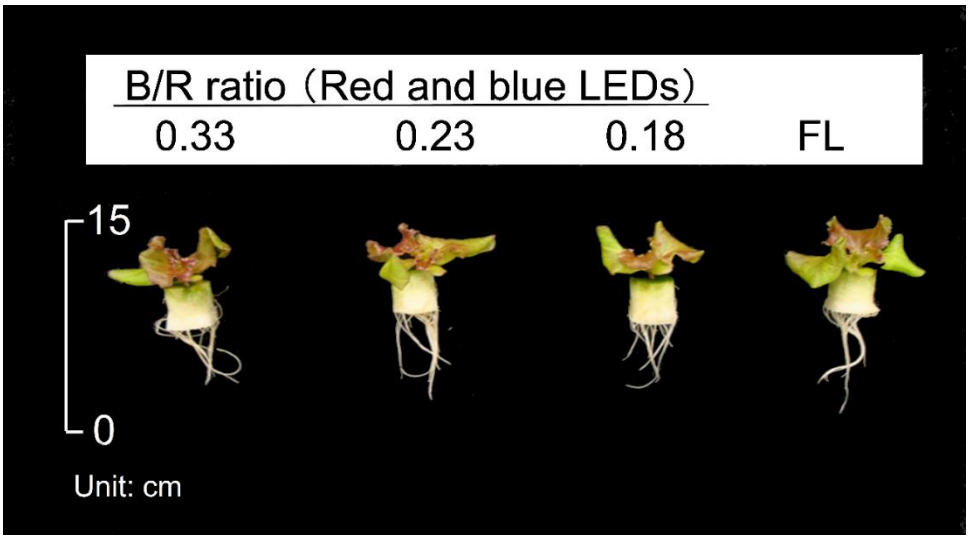

Fig. 2.8 Effect of B/R ratio (PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1}) on plant growth on 18 days after sowing

＜PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した植物体：播種後 21 日目＞

FL 区で植物体の大きさは最大であった（Fig. 2.9）．赤青 LED 区のなかでは B/R 比 0.23 区で最大となった．

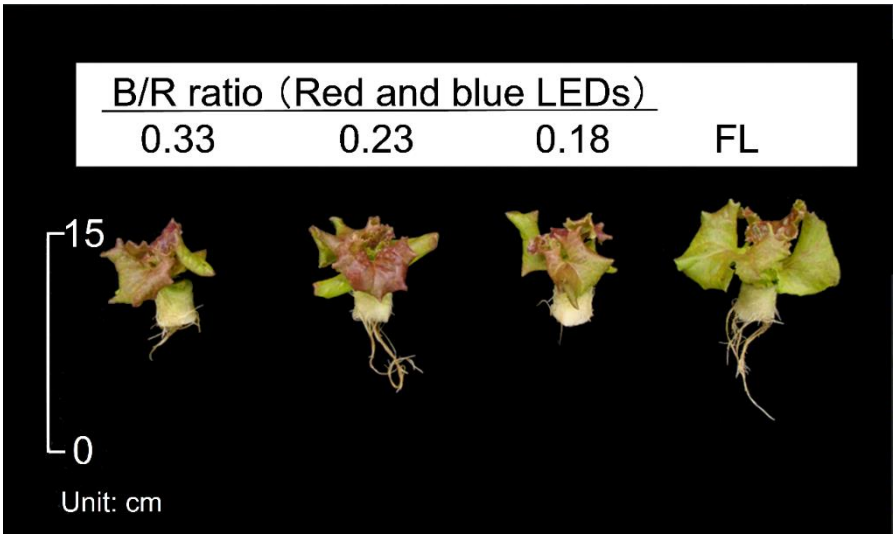

Fig. 2.9 Effect of B/R ratio (PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1}) on plant growth on 21 days after sowing.

＜PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した植物体：播種後 25 日目＞

FL 区で植物体の大きさは最大であった（Fig. 2.10）．赤青 LED 区のなかでは B/R 比 0.23 区で最大であった．また，アントシアニンによると思われる着色は 0.33 区で最も強かった．

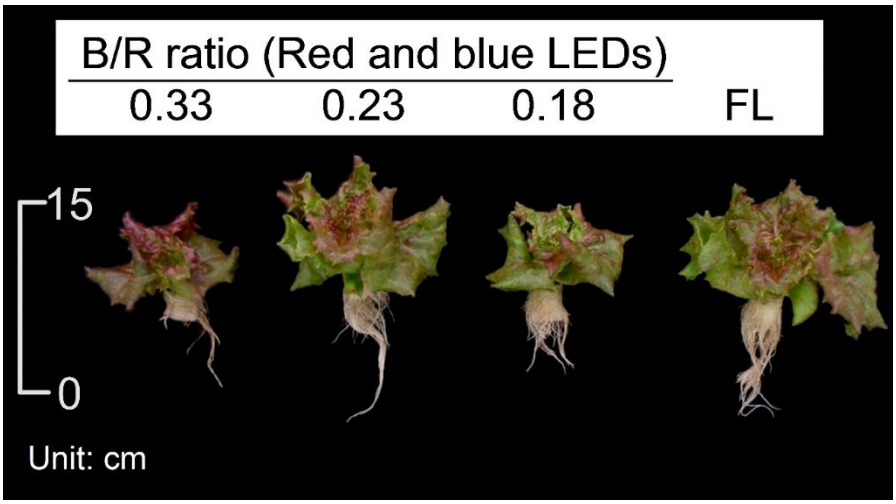

Fig. 2.10 Effect of B/R ratio (PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1}) on plant growth on 25 days after sowing.

＜PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した植物体：播種後 14 日目＞

植物体の大きさに試験区間で差はみられなかった（Fig. 2.11）.

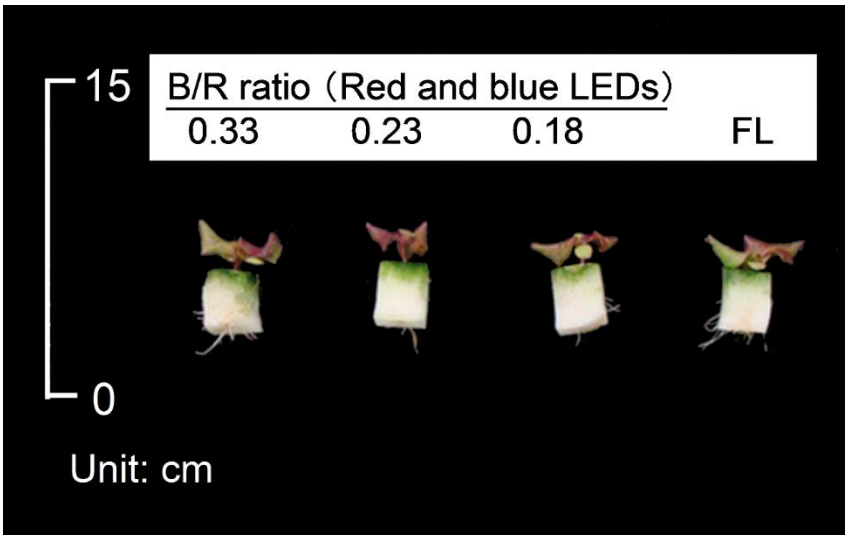

Fig. 2.11 Effect of B/R ratio (PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1}) on plant growth on 14 days after sowing.

＜PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した植物体：播種後 18 日目＞

赤青 LED 区間では B/R 比 0.33 区で植物体の大きさは最大になった（Fig. 2.12）.

Fig. 2.12 Effect of B/R ratio (PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1}) on plant growth on 18 days after sowing.

＜PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した植物体：播種後 21 日目＞

赤青 LED 区間では B/R 比 0.33 区で植物体の大きさは最大になった（Fig. 2.13）．アントシアニンによると思われる着色は FL 区で弱かった．

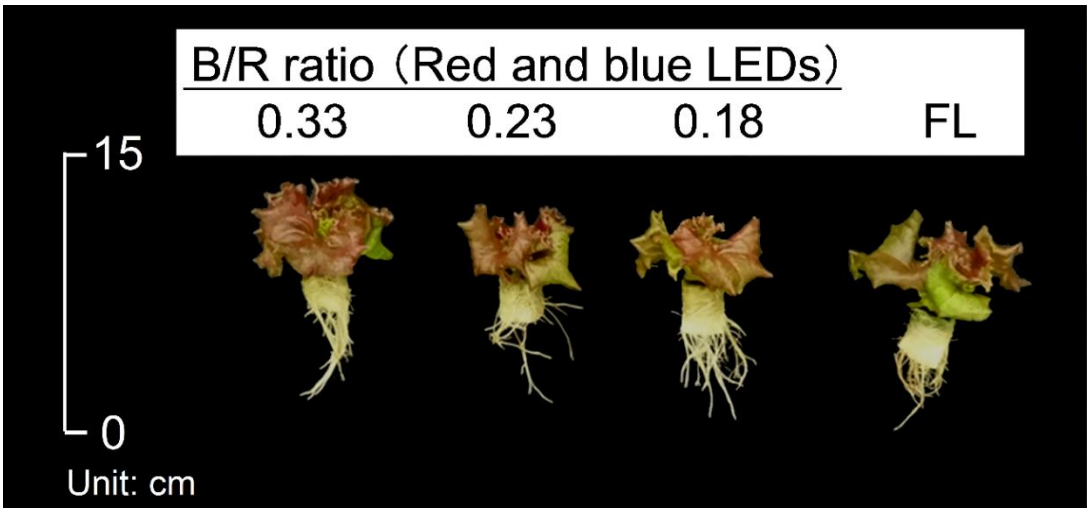

Fig. 2.13 Effect of B/R ratio (PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1}) on plant growth on 21 days after sowing.

＜PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した植物体：播種後 25 日目＞

B/R 比 0.33 区で植物体の大きさは最大になった（Fig. 2.14）．アントシアニンによると思われる着色は FL 区で弱かった．

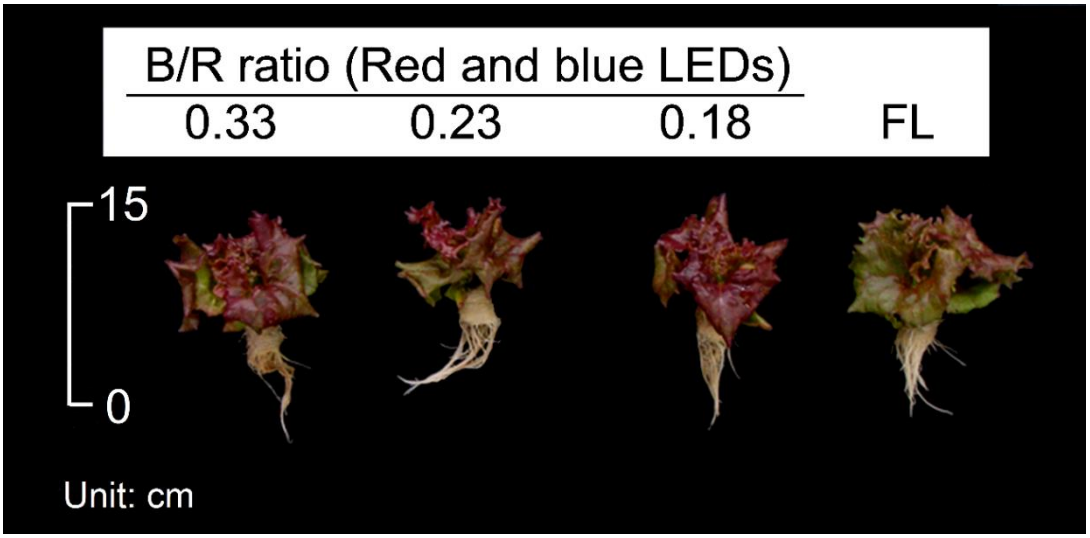

Fig. 2.14 Effect of B/R ratio (PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1}) on plant growth on 25 days after sowing.

2.3.2　PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した場合

＜赤青 LED 区間での比較＞

全乾物重は播種後 21 日目頃から急激に増加した（Fig. 2.15）．また，播種後日数にかかわらず，全乾物重に B/R 比による差はみられなかった．投影面積および推定受光量は播種後 18 日目頃から急激に増加した（Fig. 2.16）．播種後 21 日目まで，投影面積および推定受光量に B/R 比による差はみられなかったが，播種後 25 日目では B/R 比 0.18 区および 0.23 区で 0.33 区より大きかった．播種後 25 日目には推定受光量に B/R 比による差がみられたものの，積算受光量では B/R 比による差はみられなかった（Fig. 2.17）．全乾物重にも B/R 比による差がみられなかった（Fig. 2.15）ことから，積算受光量あたりの乾物重増加量にも差がみられなかった（Fig. 2.18）．

播種後 25 日目の総葉面積は 0.18 区，0.23 区，0.33 区の順で大となり（Fig. 2.19），PA/LA は 0.18 区で最小であった（Fig. 2.20）．よって，播種後 25 日目の推定受光量が 0.18 区および 0.23 区で 0.33 区より大きかったのは，総葉面積が大きかったためであり，0.18 区と 0.23 区で播種後 25 日目の推定受光量に差がみられなかったのは，0.18 区で葉の角度または自己被陰が最大になったためと考えられた．

播種後 25 日目のクロロフィル濃度およびクロロフィル a/b 比に B/R 比による差はみられなかった（Fig. 2.21）．最大葉の青色光（450 nm 付近）と赤色光（660 nm 付近）の吸収スペクトルに差がみられなかったため（Fig. 2.22），栽培光の吸収率に B/R 比による差はみられなかった（Fig. 2.23）．PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} における最大葉の個葉光合成速度に B/R 比による差はみられなかった（Fig. 2.24）．よって，B/R 比によって全乾物重に差がみられなかったのは，積算受光量および光質処理時の光強度下での個葉光合成速度に差がみられなかったためと考えられた．ただし，播種後 25 日目の推定受光量は 0.18 区と 0.23 区で 0.33 区よりも大きい傾向がみられたことから（Fig. 2.16），播

種後 25 日目よりも長い期間育成した場合には全乾物重に差が生じる可能性がある．播種後 25 日目のアントシアニン濃度は，赤青 LED の区のなかでは B/R 比が高くなるほど高まったことから（Fig. 2.25），B/R 比を 0.33 とすることで品質の高い個体が得られると考えられた．

＜FL 区と赤青 LED 区との比較＞

FL 区で積算受光量は最大になったにもかかわらず（Fig. 2.17），播種後 25 日目の全乾物重は，FL 区で赤青 LED の区より小さかった（Fig. 2.15）．以下に，FL 区で全乾物重が最大にならなかった理由を述べる．

クロロフィル濃度に FL 区と赤青 LED 区で差はみられず，クロロフィル a/b 比は FL 区で赤青 LED 区より小となった（Fig. 2.21）．最大葉の PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} における個葉光合成速度に試験区間で差はみられなかった（Fig. 2.24）ことから光合成速度が原因ではないと考えられる．また，PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} における個葉光合成速度の大小関係はクロロフィル濃度の大小関係とは一致するが，クロロフィル a/b 比の大小関係とは一致しなかった．

最大葉の，FL に多く含まれる緑色光の吸収率は青色光（450 nm 付近）と赤色光（660 nm 付近）の吸収率より低かったため（Fig. 2.22），積分球装置を用いて求めた FL 区の栽培光の吸収率は赤青 LED 区の 74–77%であった（Fig. 2.23）．PA/LA は FL 区で最大であった（Fig. 2.20）．PA/LA が大きいことは，葉の角度や自己被陰が小さいことを意味する．観察では，赤青 LED 区で FL 区よりも葉角度が大きいため，実際の栽培での栽培光の吸収率の差は，本測定で得られた栽培光の吸収率の差より大きいと考えられる．また，自己被陰が小さいと上層の葉を透過した光を下層の葉が吸収しづらいため，植物体の葉の光の利用効率が小となると考えられる．

また，赤系リーフレタスの葉には様々な色素が含まれる．そのなかでも，カロテノイド色素のひとつである β-カロテンの濃度は 2,000 μg 100 gFW^{-1}（文部科学省，2010）と高い．カロテノイドから反応中心複合体を形成する

クロロフィルaへのエネルギー移動の効率は40–50%程度である（西村, 1987）ことから, カロテノイドに光が吸収された場合には多くの光エネルギーのロスが生じる．3波長型昼白色蛍光灯はカロテノイドの吸収波長域である青～緑色の波長を多く含むため赤青 LED よりも多くの光がカロテノイドに吸収されると考えられる．

FL 区で積算受光量あたりの乾物重増加量は最小であり（Fig. 2.18），赤青 LED 区の 74–77%であったことから，FL 区で積算受光量が最大であったものの全乾物重が最大とならなかったのは，栽培光の吸収率が低かったこと，自己被陰が小さかったこと，β-カロテンなどの色素に栽培光がより多く吸収された可能性，の 3 点が考えられた．

ところで，赤青 LED 区では FL 区よりも PA/LA が小さかった（Fig. 2.20）ことから，同じ総葉面積の植物体を生産するのに必要な栽植密度を FL 区より高くできる．よって，人工光型植物工場で，栽培空間を効率的に利用するには，B/R 比を 0.18–0.33 とした赤青 LED が FL より生産に適していると考えられた．

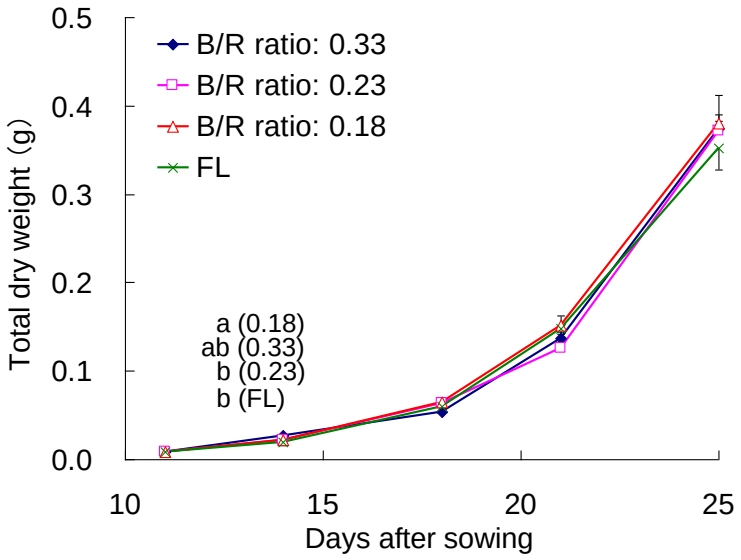

Fig. 2.15 Effect of B/R ratio (PPFD 100 µmol m^{-2} s^{-1}) on total dry weight of red leaf lettuce. Vertical bars represent standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 5–6).

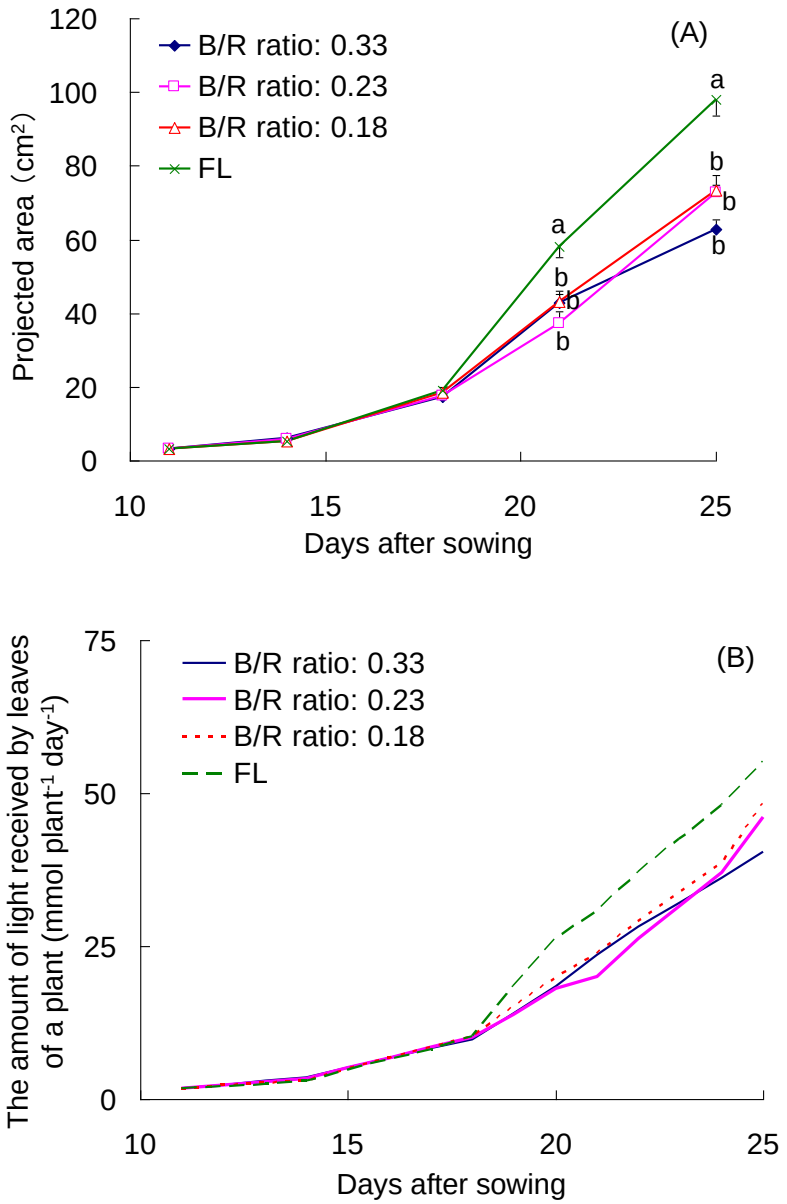

Fig. 2.16 Effects of B/R ratio (PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1}) on projected area (A) and the amount of light received by leaves of a plant (B) of red leaf lettuce. Vertical bars represent standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 5–6).

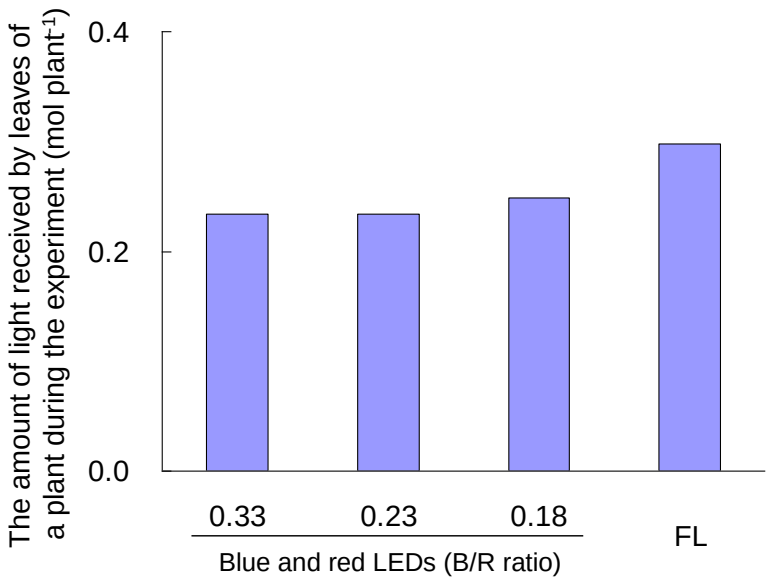

Fig. 2.17 Effect of B/R ratio (PPFD 100 µmol m^{-2} s^{-1}) on the amount of light received by leaves of a plant during the experiment (mol) of red leaf lettuce (n = 5–6).

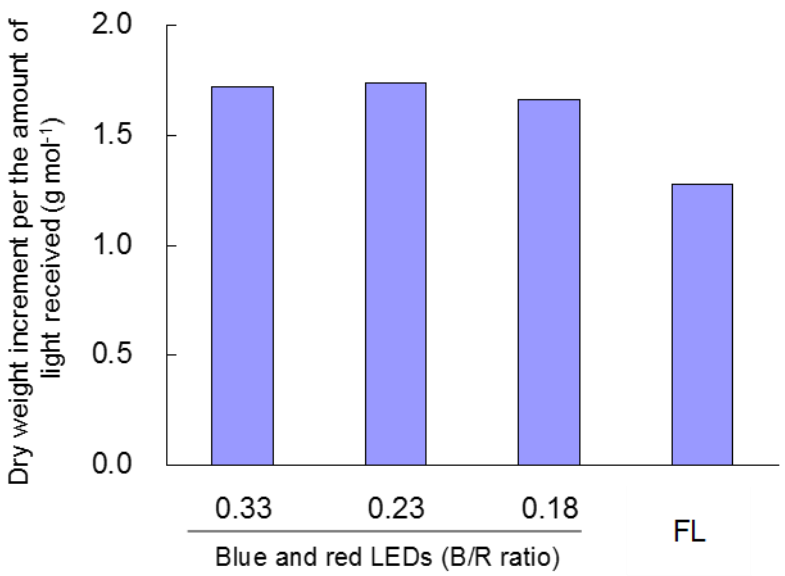

Fig. 2.18 Effect of B/R ratio (PPFD 100 µmol m^{-2} s^{-1}) on dry weight increment per the amount of light received (g mol^{-1}) of red leaf lettuce.

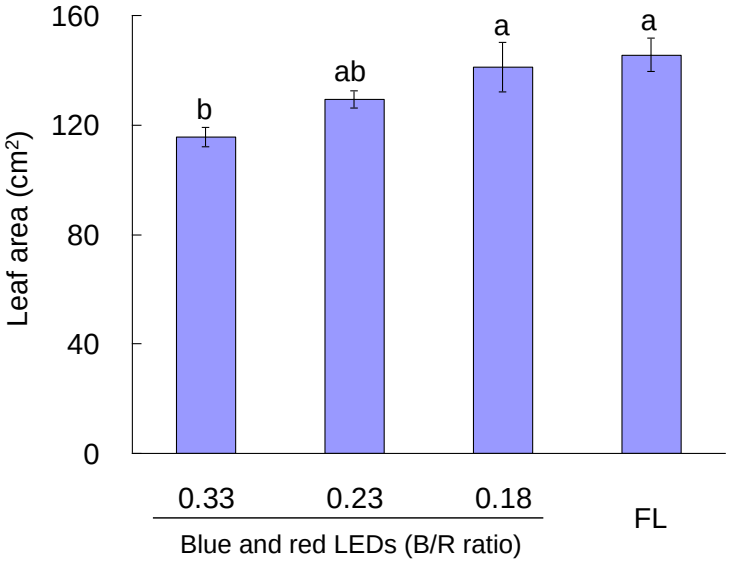

Fig. 2.19 Effect of B/R ratio (PPFD 100 µmol m^{-2} s^{-1}) on leaf area of red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars indicate standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 6).

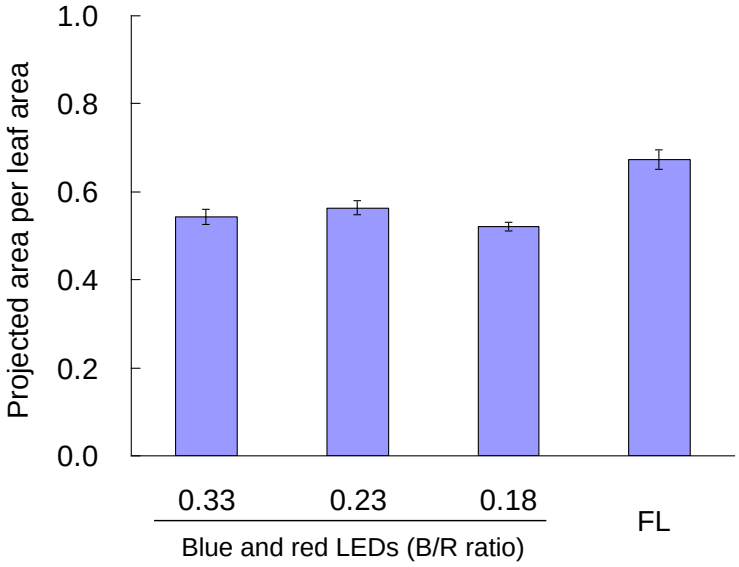

Fig. 2.20 Effect of B/R ratio (PPFD 100 µmol m^{-2} s^{-1}) on projected area per leaf area (PA/LA) of red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars represent standard errors (n = 6).

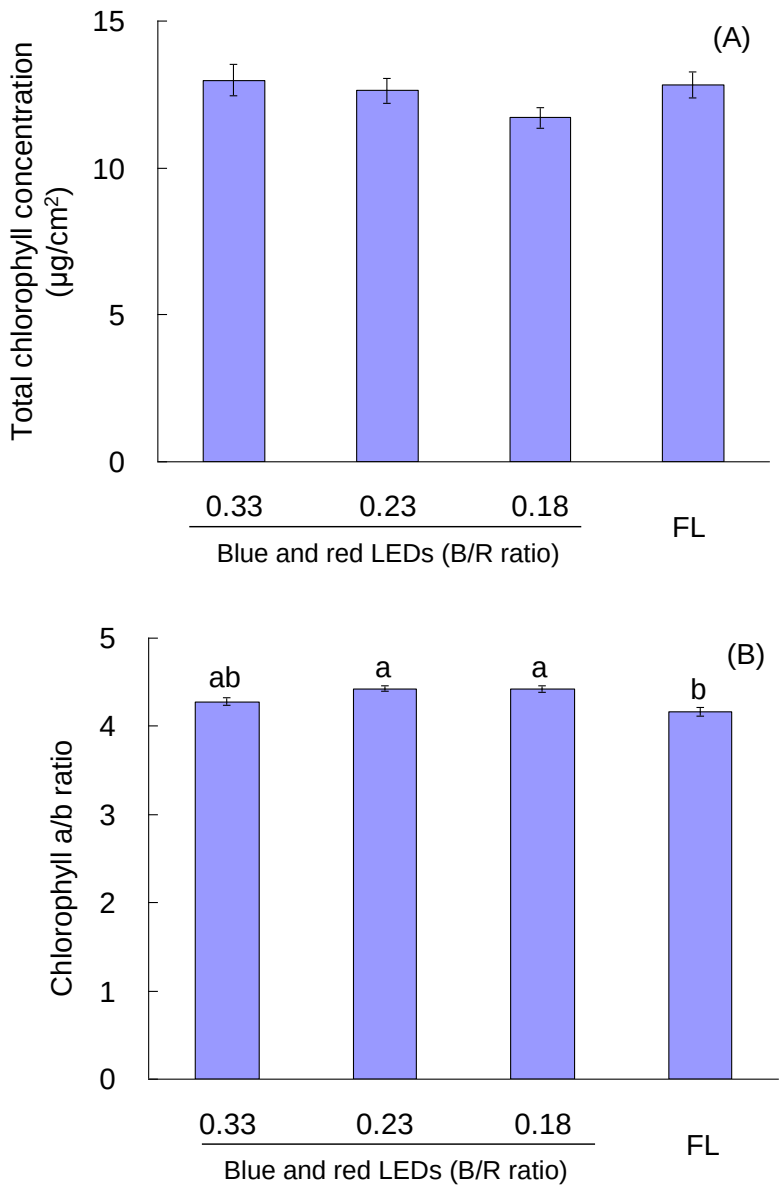

Fig. 2.21 Effects of B/R ratio (PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1}) on total chlorophyll concentration (A) and chlorophyll a/b ratio (B) of the maximum leaf of red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars represent standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 5–6).

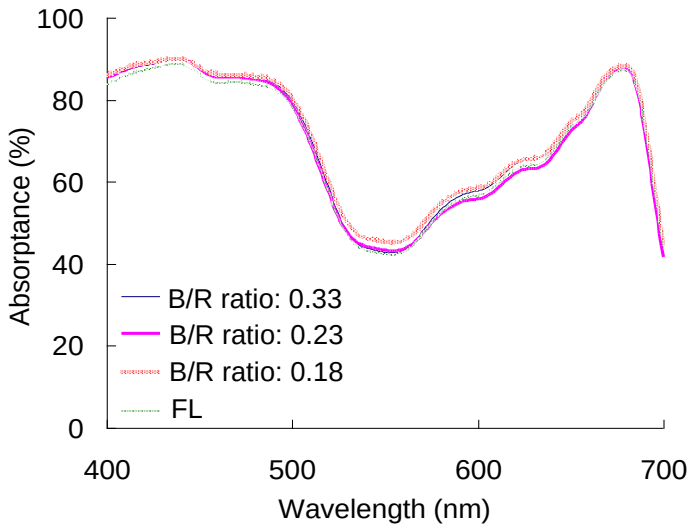

Fig. 2.22 Absorptance of a maximum leaf of red leaf lettuce at 25 days after sowing (n = 3).

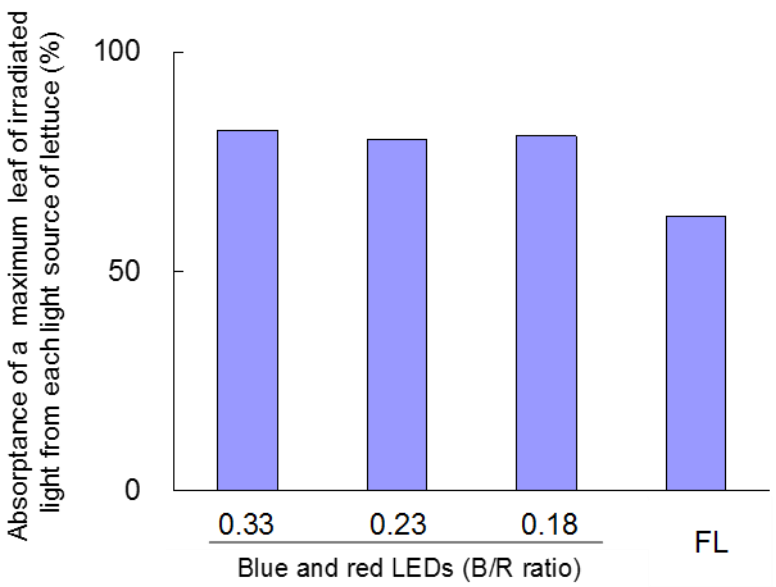

Fig. 2.23 Absorptance of a maximum leaf of irradiation light from each light source of red leaf lettuce at 25 days after sowing (n =3).

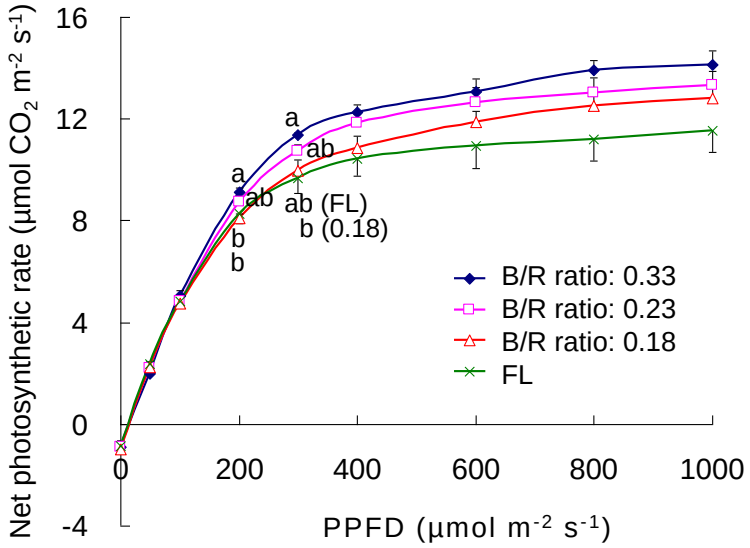

Fig. 2.24 Effect of B/R ratio (PPFD 100 µmol m^{-2} s^{-1}) on photosynthetic-light response curves of the maximum leaf of red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars represent standard errors (n = 4). Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test. They were measured by the portable photosynthesis system (LI-6400; Li-COR, Inc.).

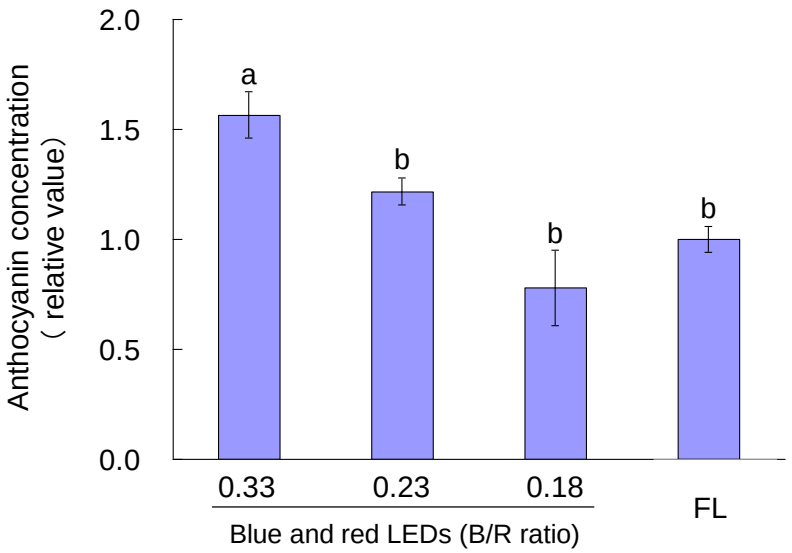

Fig. 2.25 Effect of B/R ratio on anthocyanin concentration of the maximum leaf of red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars represent standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 5–6).

2.3.3　PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した場合

＜赤青 LED 区間での比較＞

全乾物重は播種後 18 日目頃から急激に増加した（Fig. 2.26）．また，播種後 21 日目以降の全乾物重は B/R 比 0.23 区，0.33 区，0.18 区の順で大となった．投影面積および推定受光量は播種後 21 日目までは B/R 比による差はみられなかったが，播種後 25 日目では 0.23 区で最大だった（Fig. 2.27）．積算受光量は 0.23 区で最大だった（Fig. 2.28）．播種後 25 日目の全乾物重も 0.23 区で最大だったことから，積算受光量あたりの乾物重増加量にも差がみられなかった（Fig. 2.29）．

播種後 25 日目の総葉面積に B/R 比による差はみられず（Fig. 2.30），PA/LA は 0.23 区で最大であった（Fig. 2.31）．よって，播種後 25 日目の推定受光量が 0.23 区で最大となったのは，葉の角度または自己被陰が最小だったためと考えられた．

播種後 25 日目のクロロフィル濃度およびクロロフィル a/b 比に B/R 比による差はみられなかった（Fig. 2.32）．最大葉の青色光（450 nm 付近）と赤色光（660 nm 付近）の吸収スペクトルに差がみられなかったため（Fig. 2.33），栽培光の吸収率に B/R 比による差はみられなかった（Fig. 2.34）．PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1} における最大葉の個葉光合成速度は 0.23 区，0.33 区，0.18 区の順で大となった．よって 0.23 区で全乾物重が最大となったのは，積算受光量および光質処理時の光強度下での個葉光合成速度が最大だったためと考えられた．

＜FL 区と赤青 LED 区との比較＞

FL で積算受光量は最大となったにもかかわらず（Fig. 2.28），播種後 25 日目の全乾物重は，最大とはならなかった（Fig. 2.26）．また，FL 区で積算受光量あたりの乾物重増加量は最小であり（Fig. 2.29），赤青 LED 区の 59–65%

であった．以下に，全乾物重が FL 区で最大にならなかった理由を述べる．

クロロフィル濃度に FL 区と赤青 LED 区で差はみられず，FL 区でクロロフィル a/b 比は赤青 LED 区より小さかった（Fig. 2.32）．最大葉の PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1} における個葉光合成速度は 0.23 区，0.33 区，FL 区，0.18 区の順で大となり（Fig. 2.35），FL 区で B/R 比 0.18 区よりも高いことから光合成速度が大きな原因ではないと考えられる．また，PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1} における個葉光合成速度の大小関係はクロロフィル濃度およびクロロフィル a/b 比の大小関係からは推定できないことが示された．

最大葉の，FL に多く含まれる緑色光の吸収率は青色光（450 nm 付近）と赤色光（660 nm 付近）の吸収率より小さいため（Fig. 2.33），積分球装置を用いて求めた FL 区の栽培光の吸収率は赤青 LED 区の 86–87%であった（Fig. 2.34）．PA/LA は FL 区で最大であった（Fig. 2.31）．PA/LA が大きいことは，葉の角度や自己被陰が小さいことを意味する．観察では，赤青 LED 区で FL 区よりも葉角度が大きいため，実際の栽培での栽培光の吸収率の差は，本測定で得られた栽培光の吸収率の差より大きいと考えられる．

また，葉の角度が小さい場合では，葉の角度が大きい場合と比べて単位葉面積あたりの受光強度は高い．光強度が PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} 以下では，光強度と光合成速度の関係はほぼ直線である（彦坂，2004）．しかし，PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} より高い光強度では，光強度が高い方が光強度の増加量に対する光合成速度の増加量は小さくなるため，受光量あたりの光合成速度は低くなると考えられる．

β-カロテンはカロテノイドの 1 つであり，赤系リーフレタスの葉に含有される主要な色素の 1 つである．カロテノイドに光が吸収された場合には多くの光エネルギーは光合成反応に使われずに熱になる．3 波長型昼白色蛍光灯はカロテノイドの吸収波長域である青～緑色の波長を多く含むため赤青 LED よりも多くの光がカロテノイドに吸収されると考えられる．

よって，FL 区で積算受光量が最大であったものの全乾物重が最大となら

なかったのは，栽培光の吸収率が低いこと，葉の角度や自己被陰が小さいために積算受光量あたりの乾物重増加量が小さいこと，カロテノイドに栽培光がより多く吸収された可能性，の 3 点が考えられた．

ところで，赤青 LED 区では FL 区よりも PA/LA が小さかった（Fig. 2.31）ことから，同じ総葉面積の植物体を生産するのに必要な栽植密度を FL 区より小さくできる．よって，人工光型植物工場で，栽培空間を効率的に利用するには，B/R 比を 0.18–0.33 とした赤青 LED が FL より生産に適していると考えられ，本試験の範囲では，B/R 比を 0.23 程度とすれば成長を大とできると考えられた．

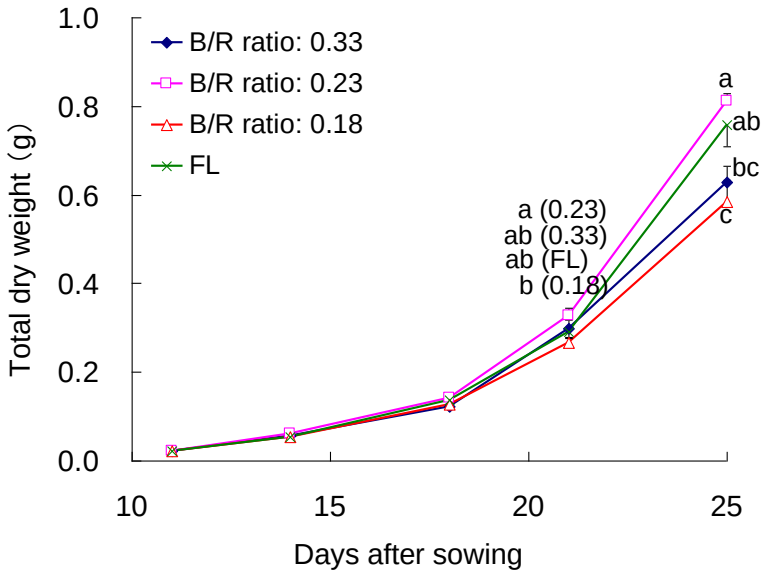

Fig. 2.26 Effect of B/R ratio (PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1}) on total dry weight of red leaf lettuce. Vertical bars represent standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 5–6).

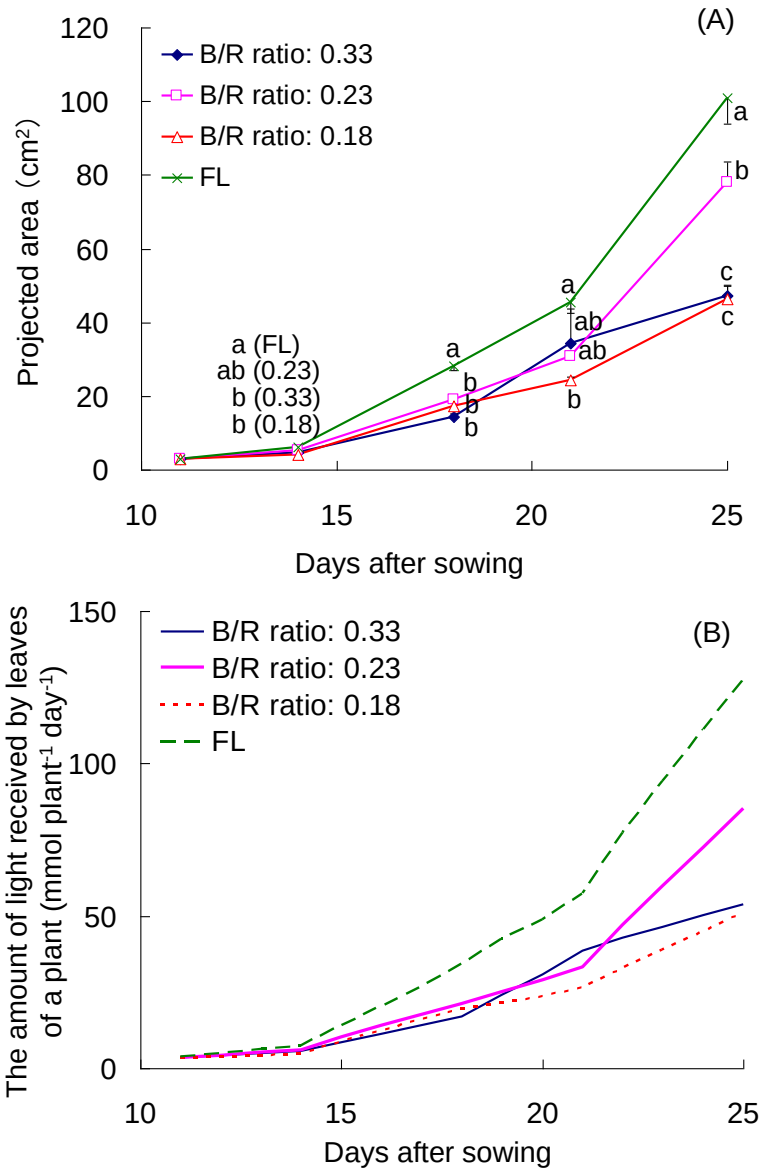

Fig. 2.27 Effects of B/R ratio (PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1}) on projected area (A) and the amount of light received by leaves of a plant (B) of red leaf lettuce. Vertical bars represent standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 5–6).

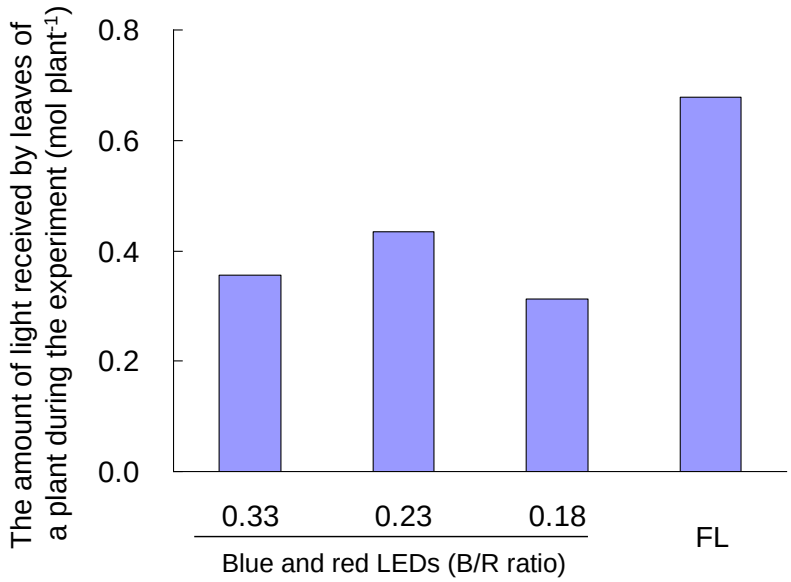

Fig. 2.28 Effect of B/R ratio (PPFD 200 µmol m^{-2} s^{-1}) on the amount of light received by leaves of a plant during the experiment (mol) of red leaf lettuce (n = 5–6).

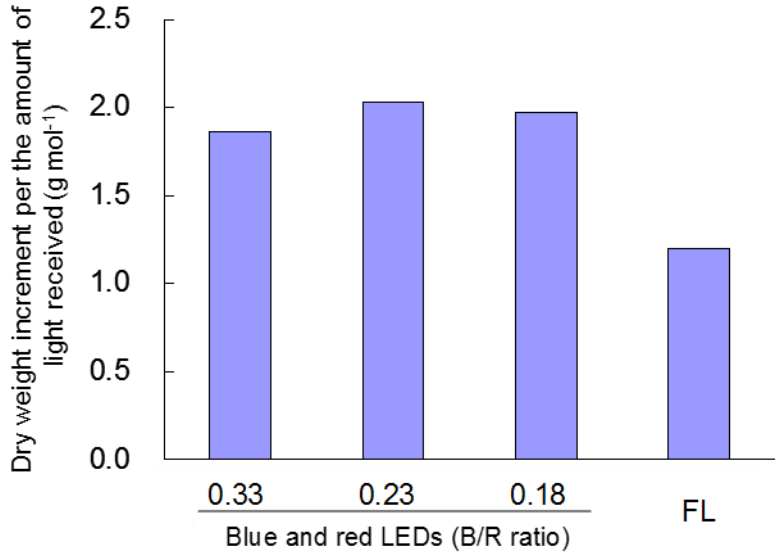

Fig. 2.29 Effect of B/R ratio (PPFD 200 µmol m^{-2} s^{-1}) on dry weight increment per the amount of light received (g mol^{-1}) of red leaf lettuce (n = 5–6).

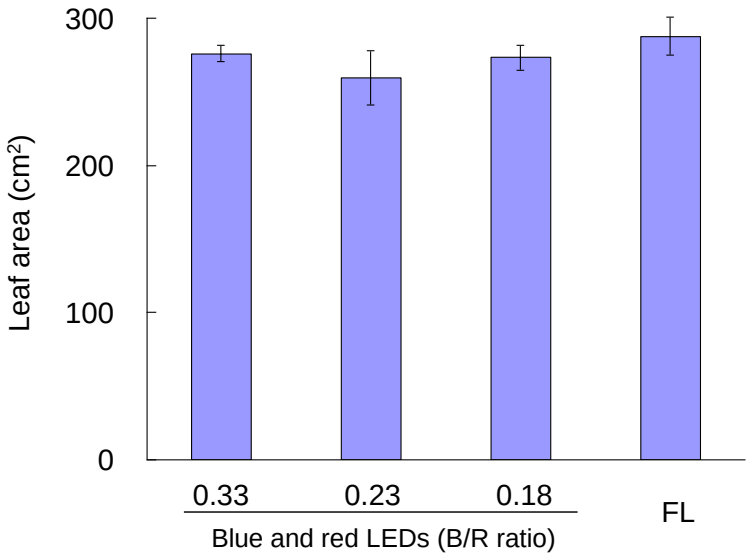

Fig. 2.30 Effect of B/R ratio (PPFD 200 µmol m^{-2} s^{-1}) on leaf area of red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars represent standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 6).

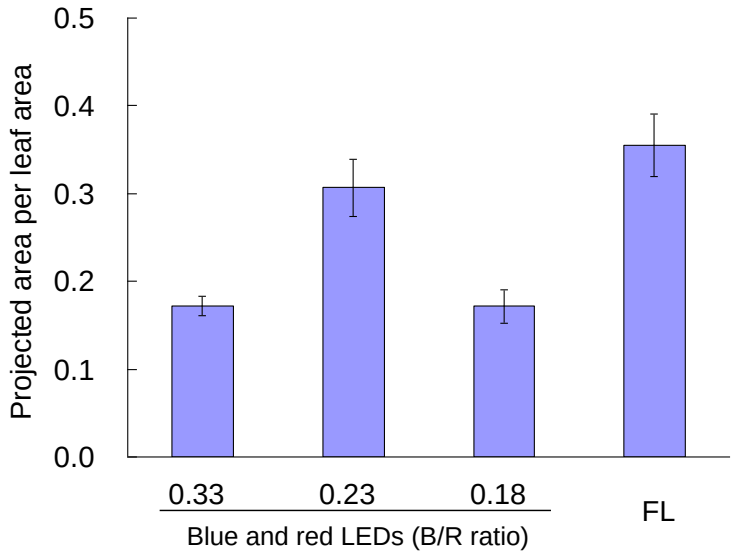

Fig. 2.31 Effect of B/R ratio (PPFD 200 µmol m^{-2} s^{-1}) on projected area per leaf area (PA/LA) of red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars represent standard errors (n = 6).

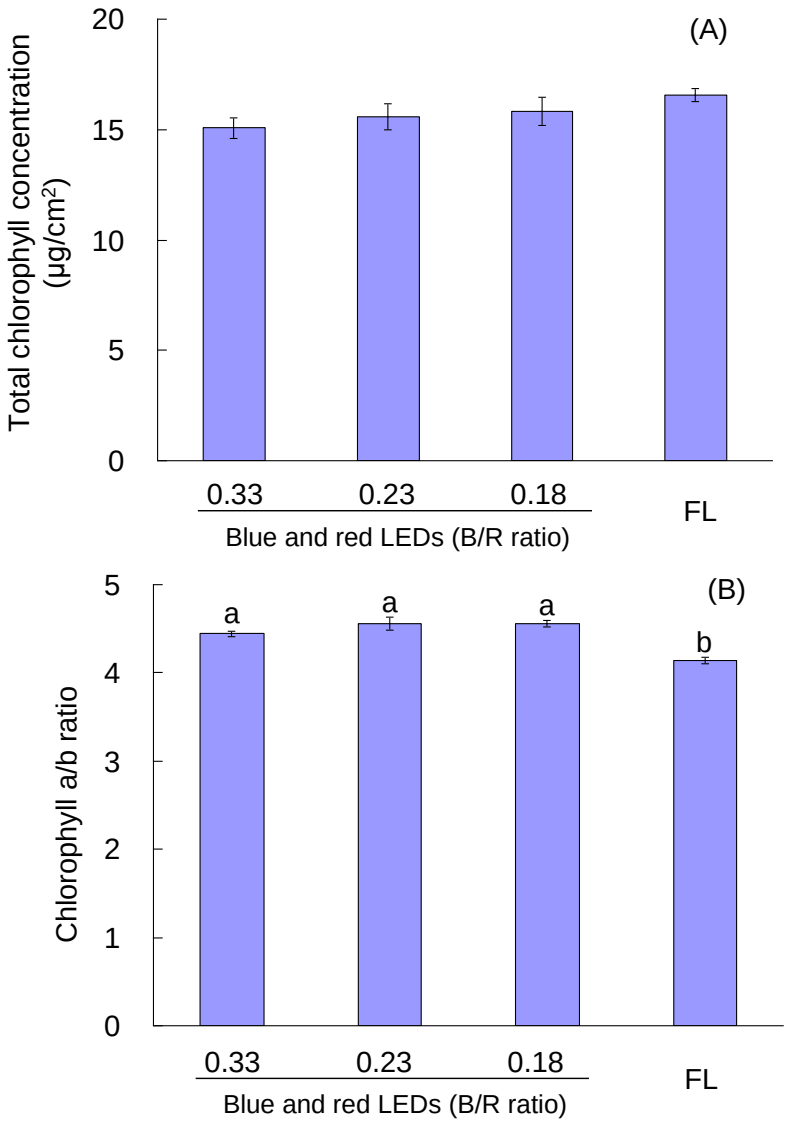

Fig. 2.32 Effects of B/R ratio (PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1}) on total chlorophyll concentration (A) and chlorophyll a/b ratio (B) of the maximum leaf of red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars represent standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 5–6).

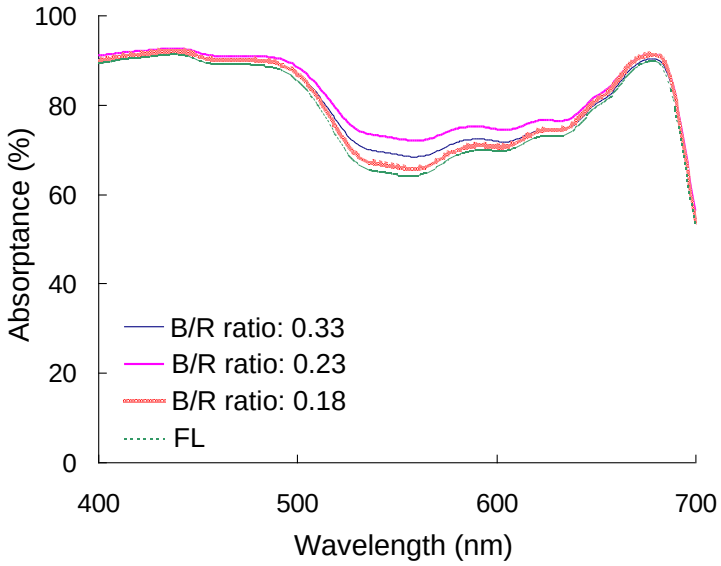

Fig. 2.33 Absorptance of a maximum leaf of red leaf lettuce at 25 days after sowing (n = 4).

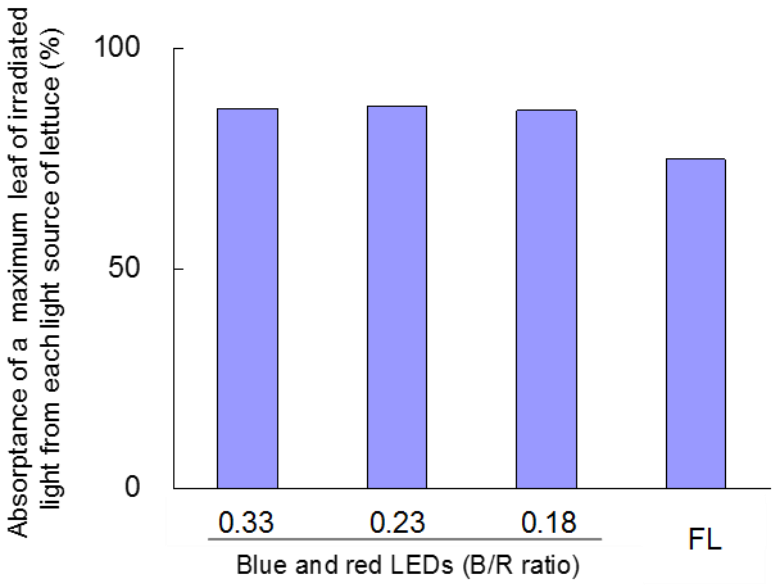

Fig. 2.34 Absorptance of a maximum leaf of irradiation light from each light source of red leaf lettuce at 25 days after sowing (n = 4).

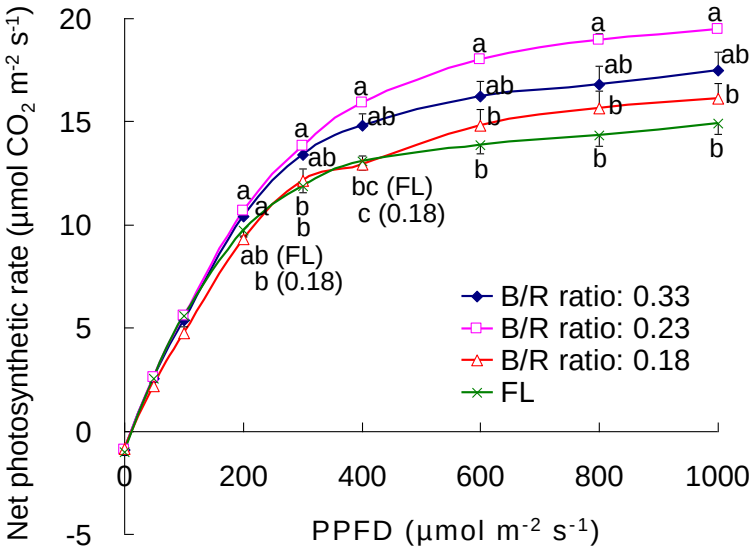

Fig. 2.35 Effect of B/R ratio (PPFD 200 µmol m^{-2} s^{-1}) on photosynthetic-light response curves of the maximum leaf of red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars represent standard errors (n = 4). Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test. They were measured by the portable photosynthesis system (LI-6400; Li-COR, Inc.).

2.3.4　PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した場合

＜赤青 LED 区間での比較＞

全乾物重は播種後 18 日目頃から急激に増加した（Fig. 2.36）．また，播種後 21 日目の全乾物重は B/R 比 0.33 区で最大であり 0.18 区と 0.23 区で差はみられなかったが，播種後 25 日目の全乾物重は 0.33 区，0.18 区，0.23 区の順で大となった．投影面積および推定受光量は播種後 18 および 21 日目では 0.33 区で最大となったが，播種後 25 日目では 0.33 区と 0.18 区で差はみられず，0.23 区で最小となった（Fig. 2.37）．積算受光量は 0.33 区で最大であった（Fig. 2.38）．積算受光量あたりの乾物重増加量は 0.18 区，0.33 区，0.23 区の順で大となった（Fig. 2.39）．

播種後 25 日目の総葉面積は 0.33 区，0.23 区，0.18 区の順で大となった（Fig. 2.40），PA/LA は 0.18 区で最大だった（Fig. 2.41）．よって，播種後 25 日目の推定受光量が 0.33 区で 0.23 区より大きかったのは，総葉面積が大きかったためであり，0.18 区で 0.23 区より大きかったのは，葉の角度または自己被陰が最小となったためと考えられた．

播種後 25 日目のクロロフィル濃度は 0.33 区で最大となり，クロロフィル a/b 比に B/R 比による差はみられなかった（Fig. 2.42）．最大葉の青色光（450 nm 付近）と赤色光（660 nm 付近）の吸収スペクトルに差がみられなかったため（Fig. 2.43），栽培光の吸収率に B/R 比による差はみられなかった（Fig. 2.44）．PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} における最大葉の個葉光合成速度は 0.33 区，0.23 区，0.18 区の順で大となった（Fig. 2.45）．よって 0.33 区で全乾物重が最大だったのは，積算受光量および光質処理時の光強度下での個葉光合成速度が最大だったためと考えられた．ところで，B/R 比を 0.33 とすると機能性成分としても知られるアントシアニンの濃度が最大となったことから（Fig. 2.46），0.33 区では成長速度だけでなく，品質も高い個体が得られることが示された．

＜FL 区と赤青 LED 区との比較＞

FL 区で積算受光量は最大となったにもかかわらず（Fig. 2.38），播種後 25 日目の全乾物重は最小となった（Fig. 2.36）．また，FL 区で積算受光量あたりの乾物重増加量は最小であり（Fig. 2.39），赤青 LED 区の 46–56%であった．以下に，FL 区で全乾物重が最小になった理由を述べる．

クロロフィル濃度は 0.33 区，FL 区，0.18 区，0.23 区の順で大となり，FL 区でクロフィル a/b 比は最小だった（Fig. 2.42）．最大葉の PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1}における個葉光合成速度は 0.33 区，0.23 区，FL 区，0.18 区の順で大となり（Fig. 2.45），FL 区で B/R 比 0.18 区と同程度だったことから光合成速度が大きな原因ではないと考えられる．また，PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1}における個葉光合成速度の大小関係はクロロフィル濃度およびクロロフィル a/b 比の大小関係からは推定できないことが示された．

最大葉の，FL に多く含まれる緑色光の吸収率は青色光（450 nm 付近）と赤色光（660 nm 付近）の吸収率より低いため（Fig. 2.43），積分球装置を用いて求めた FL 区の栽培光の吸収率は赤青 LED 区の 85–89%だった（Fig. 2.44）．

PA/LA は FL 区で最大であった（Fig. 2.41）．PA/LA が大きいことは，葉の角度や自己被陰が小さいことを意味する．観察では，赤青 LED 区で FL 区よりも葉角度が大きいため，実際の栽培での栽培光の吸収率の差は，本測定で得られた栽培光の吸収率の差より大きいと考えられる．

観察では，赤青 LED 区で FL 区よりも葉角度が大きいため，実際の栽培での栽培光の吸収率の差は，本測定で得られた栽培光の吸収率の差より大きいと考えられる．

また，葉の角度が小さい場合では，葉の角度が大きい場合と比べて単位葉面積あたりの受光強度は高い．光強度が PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1}以下では，光強度と光合成速度の関係はほぼ直線である（彦坂，2004）．しかし，PPFD 100

μmol m^{-2} s^{-1} より高い光強度では，光強度が高い方が光強度の増加量に対する光合成速度の増加量は低くなるため，受光量あたりの光合成速度は小さいと考えられる．また，自己被陰が小さいと上層の葉を透過した光を下層の葉が吸収しづらいため，植物体の葉の光の利用効率が小となると考えられる．

β-カロテンはカロテノイド色素のひとつであり，赤系リーフレタスの葉に含有される主要な色素の 1 つである．カロテノイドに光が吸収された場合には多くの光エネルギーは光合成反応に使われずに熱になる．3 波長型昼白色蛍光灯はカロテノイドの吸収波長域である青～緑色の波長を多く含むため赤青 LED よりも多くの光がカロテノイドに吸収されると考えられる．

よって，FL 区で積算受光量が最大だったものの全乾物重が最小だったのは，栽培光の吸収率が低かったこと，葉の角度や自己被陰が小さいために積算受光量あたりの乾物重増加量が小であること，カロテノイドなどの色素に栽培光がより多く吸収された可能性，の 3 点が考えられた．

ところで，赤青 LED 区では FL 区よりも PA/LA が小さかったことから，同じ総葉面積の植物体を生産するのに必要な栽植密度を FL 区より高くできる．よって人工光型植物工場で，栽培空間を効率的に利用するには，B/R 比を 0.18–0.33 とした赤青 LED が FL より生産に適していると考えられた．

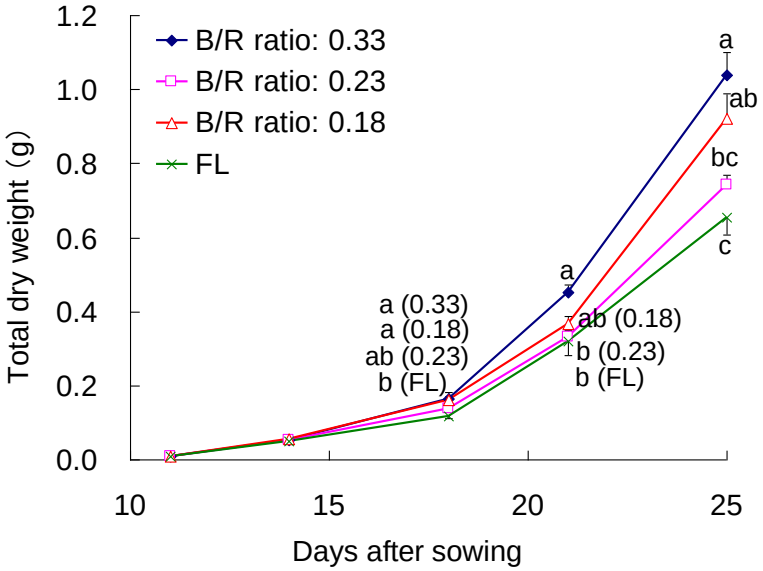

Fig. 2.36 Effect of B/R ratio (PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1}) on total dry weight of red leaf lettuce. Vertical bars represent standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 5–6).

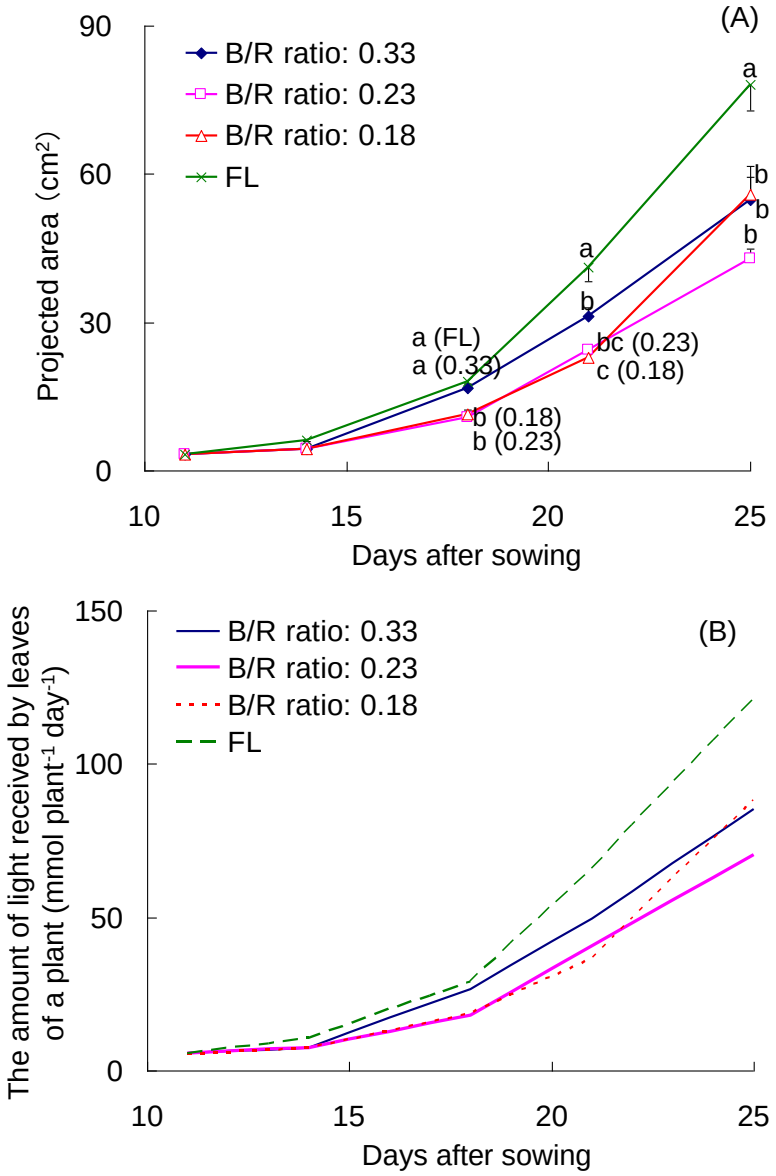

Fig. 2.37 Effects of B/R ratio (PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1}) on projected area (A) and the amount of light received by leaves of a plant (B) of red leaf lettuce. Vertical bars represent standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 5–6).

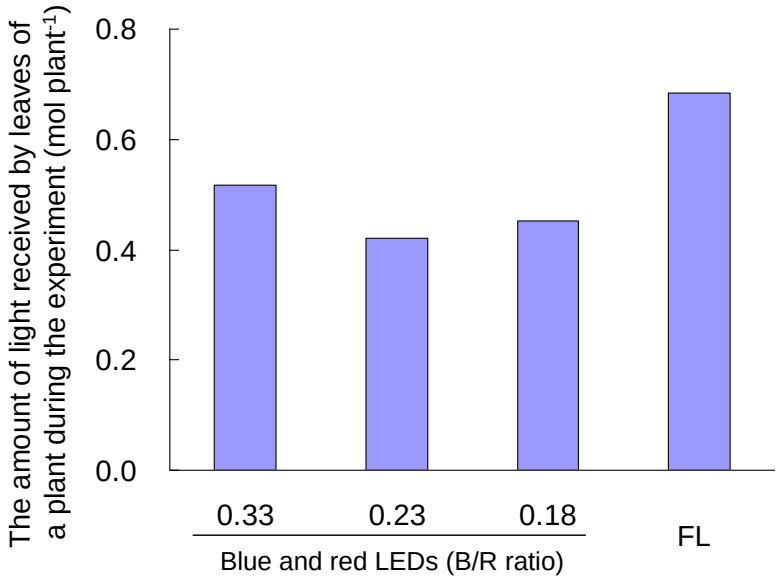

Fig. 2.38 Effect of B/R ratio (PPFD 300 µmol m^{-2} s^{-1}) on the amount of light received by leaves of a plant during the experiment (mol) of red leaf lettuce (n = 5–6).

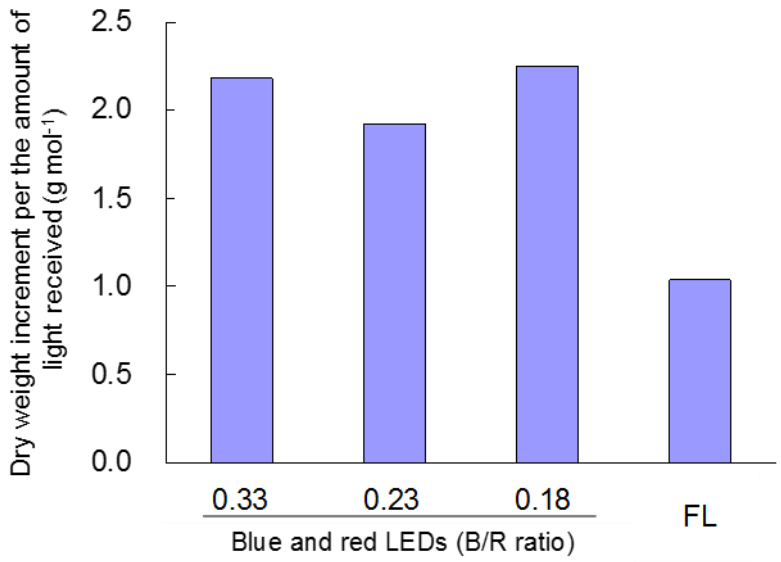

Fig. 2.39 Effect of B/R ratio (PPFD 300 µmol m^{-2} s^{-1}) on dry weight increment per the amount of light received (g mol^{-1}) of red leaf lettuce (n = 5–6).

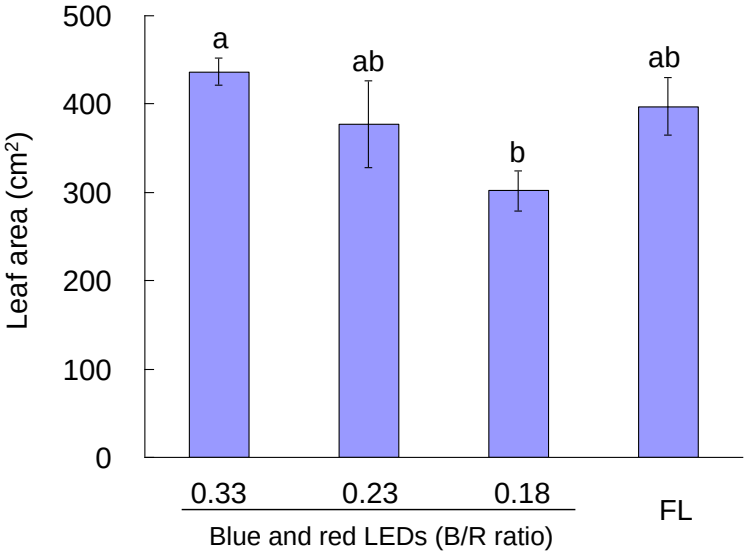

Fig. 2.40 Effect of B/R ratio (PPFD 300 µmol m^{-2} s^{-1}) on leaf area of red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars represent standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 6).

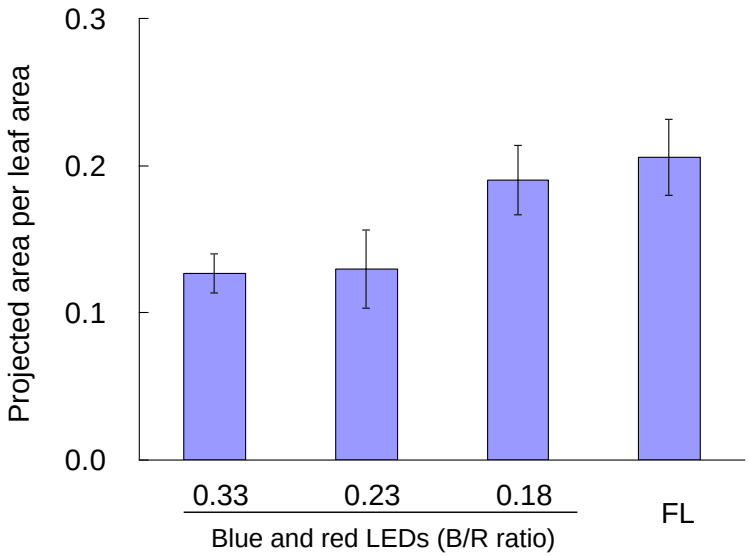

Fig. 2.41 Effect of B/R ratio (PPFD 300 µmol m^{-2} s^{-1}) on projected area per leaf area (PA/LA) of red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars represent standard errors (n = 6).

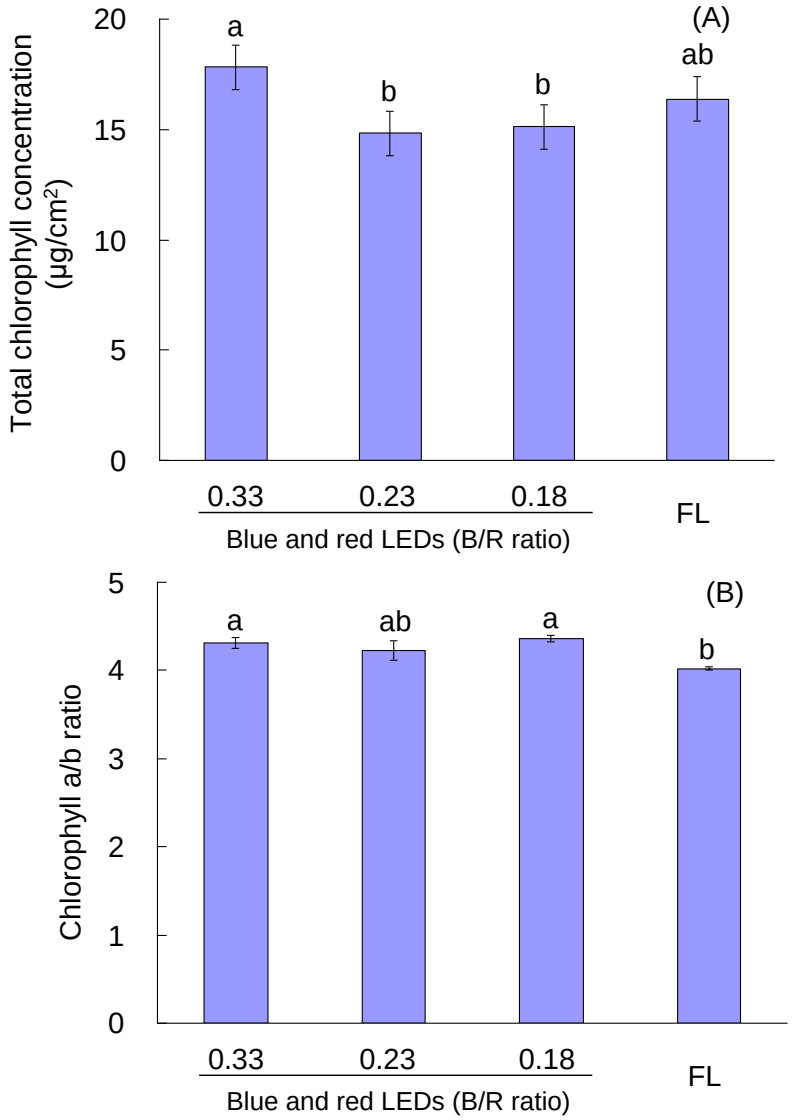

Fig. 2.42 Effects of B/R ratio (PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1}) on total chlorophyll concentration (A) and chlorophyll a/b ratio (B) of the maximum leaf of red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars represent standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 5–6).

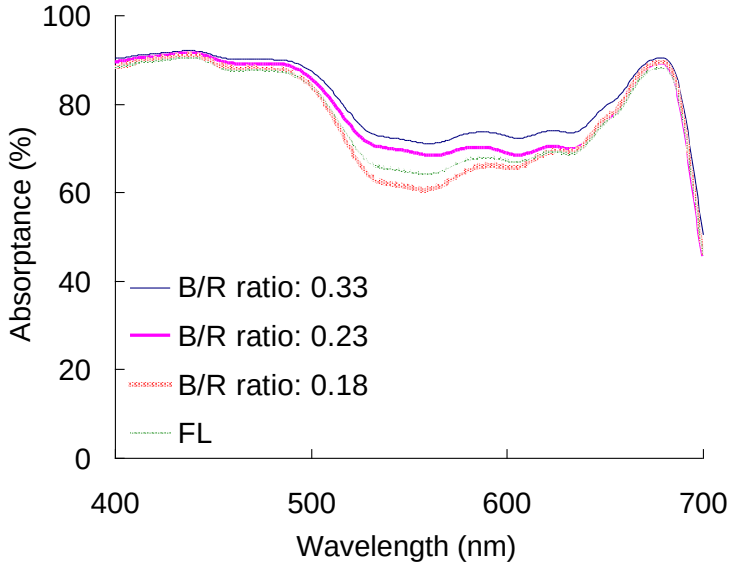

Fig. 2.43 Absorptance of a maximum leaf of red leaf lettuce at 25 days after sowing (n =4).

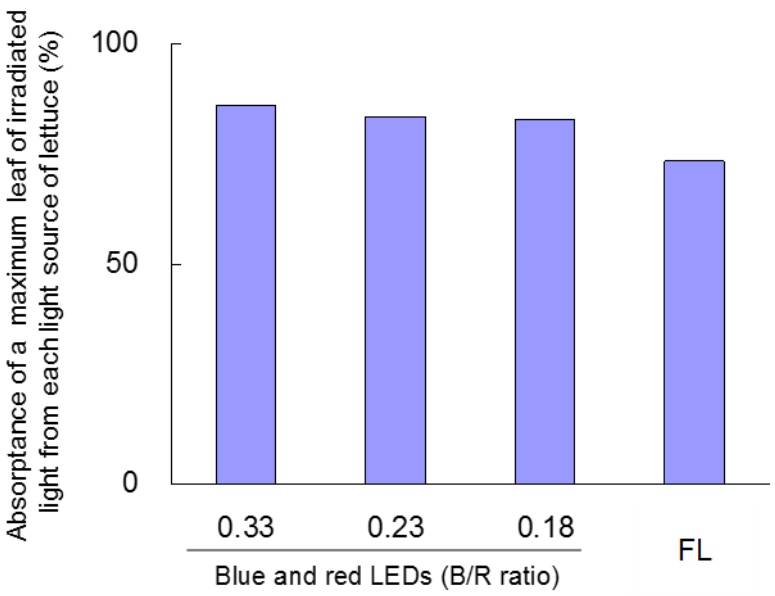

Fig. 2.44 Absorptance of a maximum leaf of irradiation light from each light source of red leaf lettuce at 25 days after sowing (n =4).

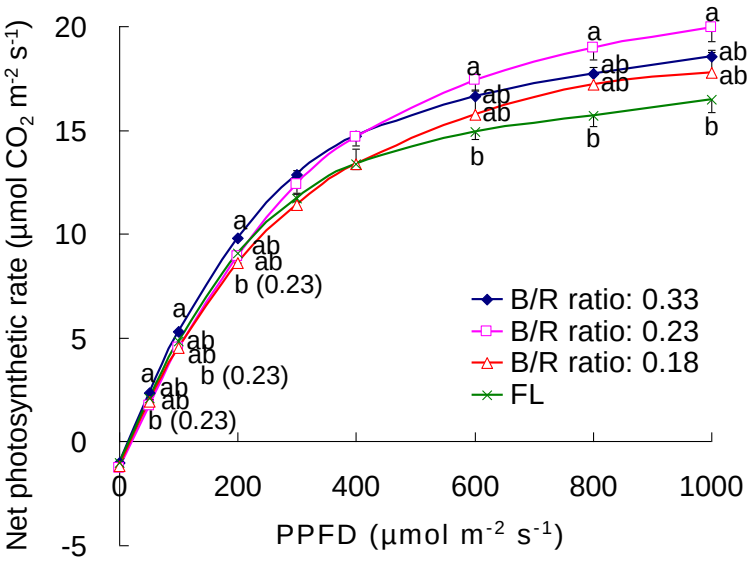

Fig. 2.45 Effect of B/R ratio (PPFD 300 µmol m^{-2} s^{-1}) on photosynthetic-light response curves of the maximum leaf of a red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars represent standard errors (n = 6). Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test. They were measured by the portable photosynthesis system (LI-6400; Li-COR, Inc.).

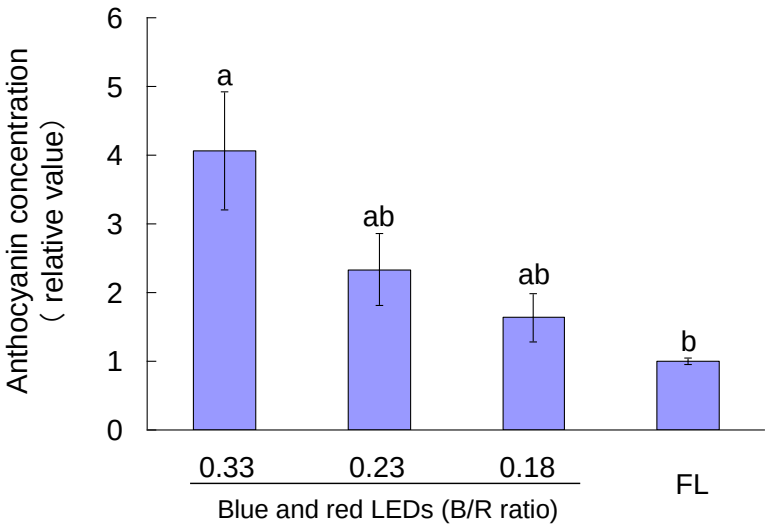

Fig. 2.46 Effect of B/R ratio (PPFD 300 µmol m^{-2} s^{-1}) on anthocyanin concentration of the maximum leaf of red leaf lettuce at 25 days after sowing. Vertical bars represent standard errors. Different letters represent significant differences between the treatments at $P < 0.05$ with Tukey-Kramer's test (n = 6).

2.3.5　総合考察

全乾物重が最大となる B/R 比は光強度により異なった（Figs. 2.15, 2.26 and 2.36）．これは光質処理時の光強度下での個葉光合成速度が高い B/R 比が光強度によって異なった（Figs. 2.24, 2.35 and 2.45）ことや積算受光量が大となる B/R 比が光強度によって異なった（Figs. 2.17, 2.28 and 2.38）ことが理由として考えられた．積算受光量は，総葉面積，葉の角度および葉の自己被陰の影響を受ける．よって B/R 比が光強度によって異なったのは，光強度が高まることによる総葉面積の増加割合（Figs. 2.19, 2.30 and 2.40）や，葉の角度や自己被陰の割合（Figs. 2.20, 2.31 and 2.41）が B/R 比により異なったためと考えられた．

総葉面積は光強度が高まるほど大きくなった（Figs. 2.19, 2.30 and 2.40）．総葉面積は PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} では B/R 比が低い区ほど大きくなった．しかし，B/R 比の高い区の方が，光強度が高まることによる総葉面積の増加量は大きく，PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} では 0.33 区で総葉面積は最大だった．赤色光と青色光が葉面積の拡大に及ぼす影響は光強度によって異なる可能性が考えられた．

光強度が葉の角度や自己被陰へ及ぼす影響は B/R 比により異なった（Figs. 2.20, 2.31 and 2.41）．B/R 比を変えた試験での葉の角度については報告が少なく不明だが，葉の自己被陰が B/R 比により異なったのは，葉の角度や葉面積が変化することによって自己被陰が起こる葉の割合が変わったためと考えられた．

最大葉の個葉光合成速度は B/R 比により異なった（Figs. 2.24, 2.35 and 2.45）．ただ，全乾物重の大小関係は最大葉の個葉光合成速度の大小関係と必ずしも一致せず，積算受光量の大小関係と一致した．よって，B/R 比を 0.18–0.33 とした赤青 LED 下および FL 下では，個葉光合成速度の変化が全乾物重に及ぼす影響よりも，形態変化に起因する積算受光量の変化が全乾物重に

及ぼす影響の方が大きいことが示された．なお，同一 PPFD において積算受光量の大小関係と乾物重の大小関係は一致したため，本章で用いた算定方法で，赤系リーフレタスの積算受光量の大小を推定可能と考えられた．

ところで，光質処理時の光強度における最大葉の個葉光合成速度の大小関係（Figs. 2.24, 2.35 and 2.45）とクロロフィル濃度の大小関係（Figs. 2.21A, 2.32A and 2.42A）は PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した場合には一致し，PPFD 200 および 300 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した場合には，一致しなかった．ただし，光質処理時の光強度に関わらず PPFD 50–100 μmol m^{-2} s^{-1} の個葉光合成速度の大小関係はクロロフィル濃度の大小関係と一致した．

光-光合成曲線において弱光域（PPFD 0 –100 μmol m^{-2} s^{-1} 程度）の直線域の傾き（初期勾配）は光の吸収率と吸収光に対する光合成量子収率の積で表される．初期勾配は暗呼吸の影響を無視すれば，照射光量あたりの光合成量（総光合成量）である（彦坂，2004）．本試験では，暗呼吸速度に光質による差はみられなかったことから，初期勾配の大小関係と PPFD 0 –100 μmol m^{-2} s^{-1} における個葉光合成速度の大小関係は一致すると考えられる．

クロロフィル濃度は葉の光の吸収率に影響する．よって，PPFD 50–100 μmol m^{-2} s^{-1} の個葉光合成速度の大小関係がクロロフィル濃度の大小関係と一致したのは，クロロフィル濃度は葉の光の吸収率に影響するためと考えられた．B/R 比を 0.18–0.33 とした赤青 LED および FL で育成された赤系リーフレタスでは，測定装置の光源を用いた PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} 以下の個葉光合成速度の大小関係は，クロロフィル濃度で推定できる可能性がある．

全乾物重は，ほぼ全ての区で光強度が高まると大きくなった（Figs. 2.15, 2.26 and 2.36）．これは，光強度が高まることで積算受光量が大きくなった（Figs. 2.17, 2.28 and 2.38）ためと考えられる．B/R 比 0.23 区では，PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} で 200 μmol m^{-2} s^{-1} より全乾物重は大きくならなかった（Figs. 2.26 and 2.36）．これは，PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} で 200 μmol m^{-2} s^{-1} より葉の角度や自己被陰が大きかった（Figs. 2.31 and 2.41）ために，積算受光量に差がみら

れなかった（Figs. 2.28 and 2.38）ためと考えられた．

光強度にかかわらず，FL 区で積算受光量あたりの乾物重増加量は最小であり（Figs. 2.18, 2.29 and 2.39），PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} では赤青 LED 区の 74–77%，PPFD 200 μmol m^{-2} s^{-1} では赤青 LED 区の 59–65%，PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} では赤青 LED 区の 46–56%であった．光強度が大きくなるにつれて，FL 区に対する赤青 LED 区の，積算受光量あたりの乾物重増加量の割合は小さくなった．

この理由の 1 つに，PA/LA が FL 区で最大であった（Figs. 2.20, 2.31 and 2.41）ことが挙げられた．PA/LA が大きいことは，葉の自己被陰または葉角度が小さいことを意味し，観察では葉角度は小さかった．前述の通り，暗呼吸の影響を無視すれば，初期勾配の大小関係と PPFD 0 –100 μmol m^{-2} s^{-1} における個葉光合成速度の大小関係は一致する．初期勾配は光の吸収率と吸収光に対する光合成量子収率の積で表されるため，葉角度が小さく，単位葉面積あたりの受光強度が高くても，光合成速度には大きな差がないと考えられる．しかし，光－光合成曲線から明らかなように，PPFD 200 および 300 μmol m^{-2} s^{-1} は，PPFD 0 –100 μmol m^{-2} s^{-1} の光を照射した場合よりも PPFD あたりの総光合成速度は低い（Figs. 2.24, 2.35 and 2.45）．そのため，栽培時の光強度が高まるにつれて，単位葉面積あたりの受光強度が高いと考えられる FL 区で，受光量あたりの光合成速度は低くなったと考えられた．

また，葉の含有色素の濃度が変化した可能性も理由に挙げられる．β-カロテンは赤系リーフレタスの主要な含有色素の 1 つであり，サラダナ，ホウレンソウの β-カロテン濃度は弱光下で減少すると報告（小山ら，1999）されている．したがって，PPFD 100 μmol m^{-2} s^{-1} では β-カロテン濃度が低く影響は限定的だったが，光強度が高まるにつれて β-カロテン濃度が高まり，影響が大きかった可能性がある．

積算受光量あたりの乾物重増加量の光質間の差（Figs. 2.18, 2.29 and 2.39）は，全乾物重の差（Figs. 2.15, 2.26 and 2.36）に比べて小さかった．したがっ

て，相互遮蔽が起こり，受光量の差が光質間で小さくなった場合には，光質間の全乾物重の差も小さくなると考えられる．また，今回の試験では PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} において B/R 比 0.33 区で成長が最大になったが，相互遮蔽が起こる場合では，積算受光量あたりの乾物重増加量が最大である B/R 比 0.18 区で成長が最大となる可能性がある．FL 区では，積算受光量あたりの乾物重増加量が，全光強度において最小であったことから，相互遮蔽が起こる栽培環境で育成する場合にも赤青 LED 下で育成した方が FL 下で育成するよりも成長は大となることが示唆された．ただし，緑色光は赤青光よりも葉の光の透過率が高いため，上層の葉を透過した光を受けることになる中層の葉の光合成速度は，緑色光で赤青光よりも相対的に高い（古在，2012）．相互遮蔽の起こる栽培環境では，上層の葉を透過した光を受ける葉の面積の割合が相対的に多くなる．そのため，相互遮蔽の起こる栽培環境では，赤青 LED 区と FL 区の積算受光量あたりの乾物重増加量の差は小さくなると考えられる．また，積算受光量あたりの乾物重増加量は光強度が高まると多くなる傾向がみられた（Figs. 2.18, 2.29 and 2.39）．光強度が高まると葉の角度や自己被陰が大きくなった（Figs. 2.20, 2.31 and 2.41）ことから，光強度の高い区では，上層の葉を透過した光を下層の葉が吸収して，植物体の葉の光の利用効率が高まったと考えられた．

ところで，PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} では PA/LA が最小であったことから，同じ総葉面積の植物体を生産するのに必要な栽植密度を他の光強度の区より大きくできる．

よって，人工光型植物工場で，栽培空間を効率的に利用するには，光強度は PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} が適していると考えられた．

2.4　結論（2 章）

本章では, 光質が形態に及ぼす影響と光合成速度に及ぼす影響を分離して評価し，異なる光質下での成長に差が生じる理由を解析した.

その結果，成長の指標である全乾物重が最大となる B/R 比は光強度によって異なることを明らかにした．成長が B/R 比によって変化する理由には, 総葉面積や葉の角度の変化に起因する受光量の変化，葉の栽培光の吸収率, クロロフィル濃度およびクロロフィル以外の色素の濃度などの変化に起因する光合成速度の変化, 葉の角度の変化に起因する単位葉面積あたりの光強度の変化などが挙げられた.

全乾物重の大小関係は光合成速度の大小関係と必ずしも一致せず, 積算受光量の大小関係と一致した．よって，B/R 比を 0.18–0.33 とした赤青 LED 下では，積算受光量が成長に大きな影響を及ぼすことを示した．葉の形態が変化すれば積算受光量が変化するため，異なる光質下での成長の差異は葉の形態変化の影響を強く受けることを明らかにした．また，光強度を高めても成長は大きくならない場合があるが，これは高光強度の区で自己被陰の割合や葉角度が大きくなり積算受光量は増えないためと考えられた.

積算受光量が成長に大きな影響を及ぼすことが示されたため, 相互遮蔽が起こり, 受光量の差が光質間で小さい場合には, 相互遮蔽が起こらない条件とは異なった B/R 比下で成長が最大になる可能性があった.

B/R 比を 0.18–0.33 とした赤青 LED で光質を選択して育成することで, FL よりも成長を大きくできた．FL は積算受光量あたりの乾物重増加量が低いので，相互遮蔽が起こる栽培環境で育成する場合にも，赤青 LED 下で育成した方が FL 下よりも成長が大となる可能性がある.

第 3 章

異なる赤青光比および光強度下で育成した赤系リーフレタスの照明電力量の推定

3.1　緒言

人工光型植物工場で生産効率を高めるためには，1 株の生産にかかる照明電力量を抑える必要がある．そのためには，消費電力が少なく光合成効率の高い光源下で育成することが必要である．

これまでに照明電力量を抑えてレタスを効率的に生産するための研究開発が行われてきた．例えば，後藤・高倉（1987）は，サラダナの光エネルギーあたりの光合成速度を最大にする光強度（最大効率光強度）は生育が進むにつれて高くなること，最大効率光強度を維持しながら栽培する場合には，光強度を一定とする場合に比べて照射コストが 1–15%低減できると報告している．また，斎藤ら（2012）は異なる LED 下で，リーフレタスを栽培し，照明電力量を抑えて生産できる光質を提案した．大竹ら（2015）は赤色光と青色光とを交互連続に繰り返し照射することで，照明電力量を抑えてリーフレタスを生産できる照射パターンを示した．

人工光型植物工場において 1 株を収穫するのに必要な照明電力量を低減するには，低照明電力量の光源を用いて植物の成長速度を高めることの他に，照明ロスを少なくすることが必要である．

Okamura ら（2013）は，栽植密度が高まるにつれて遺伝子組換えレタスの 1 株あたりの葉乾物重は減少するが，単位栽培面積あたりの葉乾物重は増加すると報告している．単位栽培面積あたりの葉乾物重が，栽植密度が高まるにつれて増加した理由の 1 つに照明ロスが少ないことが考えられるので，照明ロスを少なくすることは重要である．

よって，1 株の生産にかかる照明電力量を低くするには，消費電力が少なく光合成効率の高い光源下で育成することに加えて，なるべく照明ロスがないように配置して栽培することが必要である．

照明ロスを少なくするには，1）植物の成長に応じてなるべく照明ロスと相互遮蔽のないようにスペーシングして栽培する，2）相互遮蔽の起こる条

件下で植物体を栽培する，という 2 通りの方法が有効である．

そこで本章では，上述の 2 通りの栽培方式について検討した．

3.2　相互遮蔽のないようにスペーシングした場合の照明電力量の推定

3.2.1　はじめに

1 株の生産にかかる照明電力量を抑えるには，高い成長速度を維持できる光源下で育成し，植物の成長に応じて相互遮蔽と照明ロスができるだけないようにスペーシングして栽培することが有効と考えられる．第 2 章で述べたように葉が展開し受光量が多くなると成長は大となるが，植物の成長に応じてスペーシングした場合，成長が大となる光質下で 1 株の生産にかかる照明電力量が低くなるとは限らない．

例えば，形態変化によって葉が広く展開し，受光量が多くなることで成長が大となる B/R 比であっても，光合成効率が低い場合には，照明電力量が多くなる可能性がある．しかし，これまでに形態変化に起因して生じる受光面積の違いを考慮したスペーシングの検討をした例はない．

そこで本研究では異なる LED の B/R 比下で赤系リーフレタスを育成し，収穫サイズに達するまでに必要な総受光面積と積算受光量を算定し，植物の成長に応じてスペーシングした場合の照明電力量について比較した．

3.2.2　材料および方法

3.2.2.1　植物材料

供試植物は赤系リーフレタス（*Lactuca sativa* L.,‘レッドファイヤー’，タキイ種苗（株））とした．水で湿らせた紙（キムタオル，日本製紙クレシア（株））の上に播き，ラップをかぶせた上で，千葉大学大学院園芸学研究科の閉鎖型植物生産研究施設内の栽培室 2 にて発芽させた．播種後 2 日目に発芽した幼苗をウレタンスポンジに移植し，播種後 14 日目まで育苗した個体を供試材料とした．供試材料育成中の環境条件は，光強度以外は試験 2 と同一とした．発芽および育苗の光源には 3 波長形昼白色蛍光灯（FHF32-EX-N-H，パナソニック（株））を用い，PPFD は 150 μmol m^{-2} s^{-1} とした．PPFD の測定には光量子センサ（LI-190, LI-COR）を用いた．

3.2.2.2　育成方法および試験区

播種後 14 日目に植物体を，同室に設置した湛液水耕栽培装置（内寸：600 mm（W）×1200 mm（D）×140 mm（H））に 8 株ずつ移植し，試験を開始した．

光源には，青色および赤色の LED 素子が内装された直管形 LED ランプ（赤青 LED．昭和電工（株））を用いた．試験区は 2 水準の PPFD（栽培パネル面上で，150, 250 μmol m^{-2} s^{-1}）と B/R 比（0.18，0.23）を組み合わせた 4 区とした（Table 1）．PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1} の 2 区では B/R 比が上述の設定値になる特注品を用いた．PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} の 2 区では，青色光と赤色光を独立調光可能な機種（DPT2 RB120T33 40 形）を用いた．両 LED とも，ピーク波長は青色で 450 nm，赤色で 660 nm である．試験に使用した光源の波長組成は第 2 章と同一である．光環境以外の環境条件は，育苗時と同一とした．光質処理期間中の植物体の写真を Fig. 3.1 に示した．

試験期間中の栽植密度は 12.9 株 m^{-2} とした．これは，予備試験で地上部生体重が 100 g 前後になるまで，相互遮蔽が起こらないことを確認した栽植密度である．培養液には大塚ハウス A 処方（OAT アグリオ（株））1/4 単位を用い，播種後 28 および 35 日目に培養液の全量を更新した．チップバーンを軽減させるために，0.5%$CaCl_2$ 溶液を適宜，植物体に散布した．

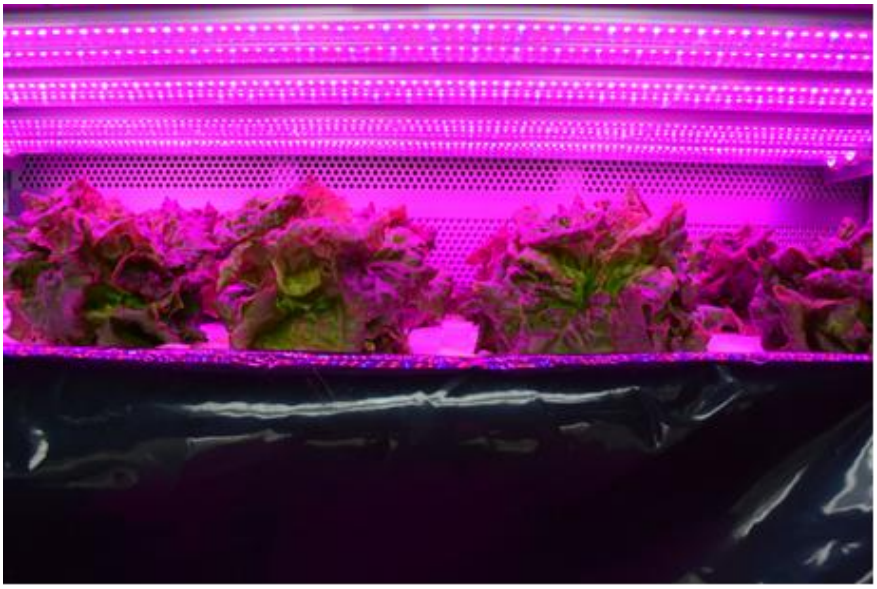

Fig. 3.1 Lettuce plants at 35 days after sowing.

3.2.2.3　測定および算定項目

全試験区で播種後 31 および 33 日目に，PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1} の 2 区では 35 および 37 日目にも，全株の全生体重を測定した．平均地上部生体重が 100 g 前後の個体群を得られた日（栽培最終日）に，全株をサンプリングし，全生体重，地上部生体重，全乾物重，地上部乾物重および総葉面積を測定した．

総葉面積は，デジタルカメラで撮影して得られた画像データを基に，葉面積測定用ソフトウエア（LIA 32 ver.0.378）を用いて測定した．栽培最終日の全生体重と地上部生体重の比から，地上部生体重の経日値を算定した．

本試験では目標とする収穫時の地上部生体重を 100.0g（以下，収穫サイズとよぶ）とした．栽培最終日に得られた地上部生体重は 100.0g ではなかったので，試験期間の地上部生体重の経日値から，線形補間で生体重が 100.0 g になる日（収穫日）を推定し，試験開始からその時点までの日数を算定した．

全株について，播種後 14，18，21，25，28，31，33，35 および 37 日目に，植物体の鉛直上方からデジタルカメラで，植物体 1 株が 1 枚に収まるように写真を撮影し，得られた画像データを基に，LIA32 を用いて株あたりの投影面積を測定した．実測以外の日の投影面積は線形補間により推定した．試験開始日から地上部生体重が 100.0 g になる日までの毎日の投影面積に PPFD を乗じた値を積算して株あたりの積算受光量を求めた．

また，投影面積/総葉面積（PA/LA）を算定した．PA/LA は，葉の角度と葉の重なり（自己被陰）の指標であり，値が大きいと葉の角度（葉と水平面とのなす角度）が小である，または自己被陰が小であることを示す．

照明電力は各試験区で異なるため，栽培パネル上で平均 PPFD が設定値になるよう調整した上で電力計を用いて照明電力を測定し，単位栽培面積あたりの照明電力を求めた．

単位栽培面積あたりの照明電力に，収穫に要する日数を乗じ，栽植密度で

除すことで，本試験の栽培条件である栽植密度 12.9 株 m^{-2} で育成した場合の，収穫に要する照明電力量を算定した．また，植物体を円と仮定して植物の成長に合わせて正方配置で毎日スペーシングをする場合（Fig. 3.2）を，本試験では成長に応じてスペーシングした場合とした．植物体 1 株の投影面積を円周率で除し，その平方根を 2 倍することで，円の直径を算定した．直径を 2 乗することで，正方配置での植物体あたりの栽培面積を求めた．植物体あたりの栽培面積に，単位栽培面積あたりの照明電力を乗じ，収穫日まで足し合わせることで，成長に応じてスペーシングした場合の収穫に要する照明電力量を算定した．

本試験で得られたデータは統計分析ソフト（エクセル統計 ver5.0，エスミ（株））を用いて解析した．同一 PPFD の B/R 比間のみの有意差検定には t 検定を，全試験区の有意差検定には Tukey-Kramer 法を用いた．

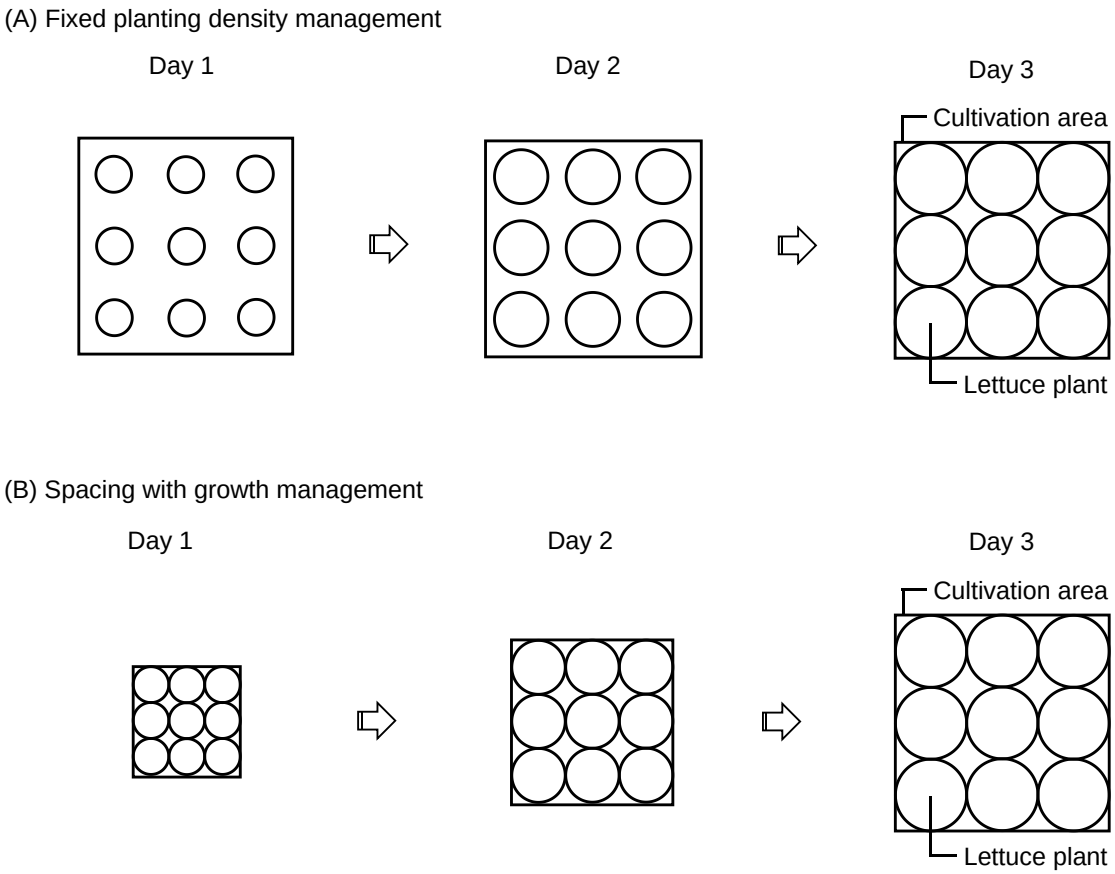

Fig. 3.2 An image of the layout of red leaf lettuce: (A) represents the case of fixed planting density management, for which the cultivation area per plant is not changed from Day 1 to 3; (B) represents the case of spacing with growth management achieved by changing the square arrangement of plants, for which the cultivation area per plant becomes gradually larger with time. At Day 1 and 2, the amount of light that is not captured by plants is lower in case (B) than in case (A).

3.2.3　結果および考察

植物体の写真

サンプリング日における植物体の写真を示す（Fig. 3.3）．なお，サンプリング日は，PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1} の 2 区で播種後 37 日目，PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} の 2 区で，播種後 33 日目であった．

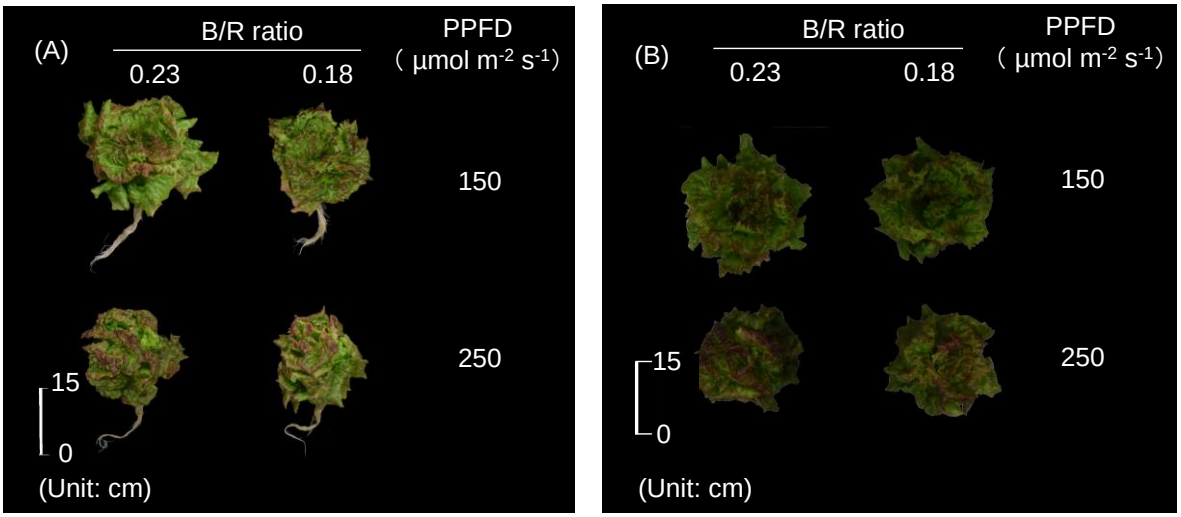

Fig. 3.3 Lettuce plant at harvested day. (PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1}: 37 days after sowing, PPFD: 250 μmol m^{-2} s^{-1}: 33 days after sowing.)

地上部生体重，葉面積，投影面積

最終栽培日は，PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1} の 2 区は播種後 37 日目，250 μmol m^{-2} s^{-1} の 2 区は 33 日目であった．最終栽培日の地上部生体重，地上部乾物重，全乾物重，総葉面積，投影面積および PA/LA を Table 3.1 に示す．

PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1} の 2 区では，B/R 比 0.23 区で 0.18 区よりも地上部生体重，地上部乾物重，全乾物重，は大となる傾向がみられ，総葉面積は有意に大となった．最終栽培日の PA/LA に有意差はないが，観察では，試験開始して数日経過した植物体の葉角度は青色光の多い B/R 比 0.23 区で小さかった．これは青色光の多い光質下で葉が立性でなくて水平に展開したことを意味する．そのため，B/R 比 0.23 区では投影面積が大きくなり（Fig. 3.4），受光量が多くなったため，地上部生体重と総葉面積が増加した（Table 3.1）と考えられる．

PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} の 2 区では，有意差はないものの，0.23 区で 0.18 区よりも総葉面積，投影面積は大きかった．地上部生体重，地上部乾物重，全乾物重に B/R 比間で差はみられなかった．

収穫に要する日数・積算受光量

地上部生体重の経日変化を Fig. 3.5 に示した．試験開始から収穫に要する日数を Table 3.2 に示した．PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1} の 2 区では，B/R 比 0.23 区で 0.18 区よりも，収穫に要する日数は少なかった．これは，B/R 比 0.23 区で 0.18 区より投影面積が大きく（Fig. 3.4），受光量が多いためと考えられた．受光量が多いことで，株あたりの光合成速度が高くなり収穫に要する日数が少なかったと考えられた．

試験開始から収穫に要する積算受光量を Table 3.2 に示した．PPFD にかかわらず，B/R 比 0.18 区で 0.23 区よりも，収穫に要する積算受光量は少なかった．B/R 比 0.18 区では，収穫に要する積算受光量が少ないので，光合成効率は高いと考えられる．

赤系リーフレタスの赤色色素成分であるアントシアニン（シアニジン-3-マロニルグルコシド）（Ferreres ら，1997）は青色光を多く吸収する．アントシアニンに吸収された光は光合成反応には利用されない．葉にアントシアニンを多く含む赤シソにおいて，Goto ら（2014）は，葉面積あたりの光合成速度が B/R 比の低い光質下ほど高まったと報告している．したがって，B/R 比 0.18 区では 0.23 区よりも葉面積あたりの光合成速度が高く，収穫に要する積算受光量は少なかったと考えられた．

収穫に要する日数は，PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1} の 2 区では，B/R 比 0.23 区で少なく，250 μmol m^{-2} s^{-1} の 2 区では差がみられなかった（Table 3.2）ため，収穫に要する積算受光量が少ない条件で，収穫に要する日数が少ないとは限らないことが示された．これは，B/R 比 0.18 区では，葉面積あたりの光合成速度は高いと考えられるものの，植物体の形態変化によって積算受光量は 0.23 区よりも少ない．そのため，株あたりの光合成速度が PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1} では低く，250 μmol m^{-2} s^{-1} では差がなかったためと考えられた．

また，PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} の B/R 比 0.18 区で収穫に要する積算受光量は最小だった．そのため，光合成効率は，PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} の B/R 比 0.18 区で最大であったと考えられた．これは，前述の通り，0.18 区では 0.23 区よりも，葉面積あたりの光合成速度が高いと考えられることが理由の 1 つに挙げられる．また，本研究の第 2 章から，PPFD 300 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した赤系リーフレタスの葉のクロロフィル濃度は 100 μmol m^{-2} s^{-1} で育成したものより高いことが示されている（Figs. 2.21 and 2.42）．クロロフィル濃度が高いと葉の光の吸収率は高まる．また，赤系リーフレタスを高光強度下で育成することで，最大光合成速度は高まった（Figs. 2.24, 2.35 and 2.45）ことも理由に挙げられた．

収穫に要する照明電力量

栽植密度 12.9 株 m^{-2} および成長に応じてスペーシングした場合での，収穫に要する照明電力量を Fig. 3.6 に示した．なお，それぞれの光環境下での照明電力は Table 3.2 に示した値を用いた．

栽植密度 12.9 株 m^{-2} において，PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1} では B/R 比 0.23 区の方が成長は高いので，収穫に要する照明電力量は B/R 比 0.23 区で 0.18 区よりも 5%少なかった．PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} では B/R 比による差はみられなかった．照明電力および収穫に要する積算受光量は B/R 比 0.18 区で 0.23 区よりも少ない．そのため，成長に応じてスペーシングした場合では，B/R 比 0.18 区で 0.23 区よりも，収穫に要する照明電力量が，PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1} では約 2%，PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} では約 8%，それぞれ少なかった．

栽植密度 12.9 株 m^{-2} では，PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1} で 250 μmol m^{-2} s^{-1} よりも，収穫に要する照明電力量は少なかったが，成長に応じてスペーシングした場合では，PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} の方が照明電力量は少なくなる傾向がみられた．照射された光のうち植物葉に照射された割合を，ここでは照射効率とする．同一の照射効率の場合，PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} の方が 150 μmol m^{-2} s^{-1} よりも未利用の照明エネルギー量は多いために照明電力量が多くなったと考えられる．

成長に応じてスペーシングした場合では照射効率はほぼ同じである．PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} の方が 150 μmol m^{-2} s^{-1} よりも照明電力量が少なかったのは，使用した光源の PPFD あたりの照明電力量が PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} で， 150 μmol m^{-2} s^{-1} と比べて 2%程度少ないことが理由の 1 つである．また，B/R 比 0.18 とした場合は PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} で，150 μmol m^{-2} s^{-1} よりも光合成効率は高いことが理由に挙げられた．

照明電力量を抑えて赤系リーフレタスを生産できる B/R 比や PPFD

赤系リーフレタスが収穫に要する照明電力量が少なくなる B/R 比や PPFD は，栽植密度によって異なった．また，本試験の 4 条件の中で，照明電力量

を抑えてレタスを育成するのであれば，照明ロスがないように植物体を配置した上で，PPFD を 250 μmol m^{-2} s^{-1}，B/R 比を 0.18 として育成するのがよいことが示された．また，B/R 比を 0.18 として 1 年間作付けを繰り返す場合，PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1} では年に 15.7 作なのに対し，250 μmol m^{-2} s^{-1} では年 19.9 作できる．

Fig. 3.7 に，成長に応じてスペーシングした場合での栽植密度の経日値を示した．栽植密度は B/R 比 0.18 区で 0.23 区よりも高かった．Fig. 3.8 に，成長に応じてスペーシングした場合に，同面積の人工光型植物工場でレタスを育成した場合，ある日にどれだけのレタスを敷き詰められるかを示した．B/R 比を 0.18 として同面積の人工光型植物工場で作付けする場合，PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} では 150 μmol m^{-2} s^{-1} の 179%の個体数，作付けできる．以上から，PPFD 250 μmol m^{-2} s^{-1} で育成した場合は，150 μmol m^{-2} s^{-1} の場合よりも，単位栽培面積あたりの収量を多くできると考えられた．

第 2 章から，植物が受光するのは鉛直上方からの平行光のみと仮定した場合と同義の算定方法で求めた積算受光量の大小と，全乾物重の大小は一致したため，本節でも同様にして成長に応じてスペーシングした場合での照明電力量を算定した．しかし，実際の人工光型植物工場では，反射板等で多くの光を反射させ，できるだけ多くの光が栽培面に届くように工夫されており，栽培面には平行光と散乱光が一定割合で混合された光が到達する．そのため，成長に応じてスペーシングした場合のように植物体を敷き詰めた場合，散乱して到達していた光が他の植物に吸収されると考えられる．12.9 株 m^{-2} と成長に応じてスペーシングした場合とで，同一の強度で光を照射した場合，成長に応じてスペーシングした場合では 1 植物体あたりの受光量は低くなると考えられる．そのため，本手法で得られた照明電力量では，必要な照明電力量を過小評価している可能性がある．今後，より精度よく，試験回数を最小限に抑えて，成長に応じてスペーシングした場合での照明電力量の推定をするには，栽培装置を全て黒く覆い，PAR の反射を抑制するのがよいと考え

られた．

本試験では，相互遮蔽の起こらない栽培条件で得られた測定値を用いて，成長に応じてスペーシングした場合の照明電力量を推定する手法を提示した．本解析方法は，実際の栽培現場で，試験回数を最小限に抑えて，効率的に最適な光環境条件を探索し，消費電力量を予測することができるため，実用的にも有用と考えられた．

Table 3.1 Effects of B/R ratio on the fresh and dry weight of the above-ground part, total dry weight, total leaf area, projected leaf area and projeced leaf area per total leaf area at sampling day of red leaf lettuce.

PPFD (μmol m^{-2} s^{-1})	B/R ratio	Last culti-vation day[z] (days after sowing)	Fresh weight of the above-ground part (g)	Dry weight of the above-ground part (g)	Total dry weight (g)	Total leaf area (cm^2)	Projected leaf area (cm^2)	PA/LA
150	0.23	37	111.2±5.3	6.07±0.28	6.78±0.31	2276±113*	543±26**	0.239±0.006
	0.18		99.1±4.4	5.43±0.16	6.10±0.16	1902±86	437±13	0.229±0.008
250	0.23	33	106.5±3.1	5.95±0.22	6.77±0.24	1632±52	377±17	0.233±0.009
	0.18		106.4±5.5	5.86±0.22	6.59±0.23	1552±70	360±16	0.231±0.008

[z]The plants were sampled when the fresh weight of their above-ground parts reached approximately 100 g.
± represents standard error (n = 8).
* and ** represent significant differences between the treatments for which the last cultivation day was the same at the P < 0.05 and P < 0.01 levels, respectively, as determined by the t-test.

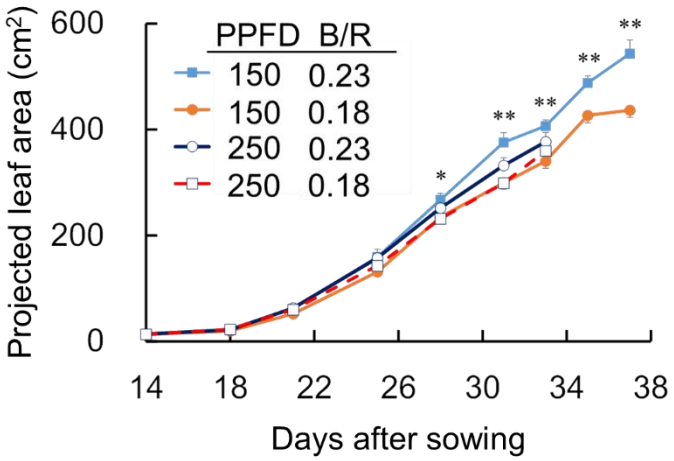

Fig. 3.4 The projected leaf area of red leaf lettuce cultivated under different photosynthetic photon flux densities (PPFDs) and blue/red (B/R) light-emitting diode (LED) ratios.

* and ** represent significant differences at the P < 0.05 and P < 0.01, respectively, for the same day between the treatments with 150 μmol m^{-2} s^{-1} PPFD, as determined by the t-test (n = 8). There were no significant differences on the same day between the treatments with 250 μmol m^{-2} s^{-1} PPFD, as determined by the t-test. Vertical bars represent standard errors.

Table 3.2 The number of days and the amount of light received from the start of treatment until harvest for red leaf lettuce cultivated under the different blue/red (B/R) ratios and photosynthetic photon flux densities (PPFDs), and the electric power of the light source.

PPFD (μmol m^{-2} s^{-1})	B/R ratio	Days to the harvest from starting the treatments (day)	The amount of light received to the harvest (mol $plant^{-1}$)	Lighting electric power of the light source (kW m^{-2})
150	0.23	22	3.76	0.124
	0.18	23	3.71	0.123
250	0.23	18	3.79	0.203
	0.18	18	3.51	0.201

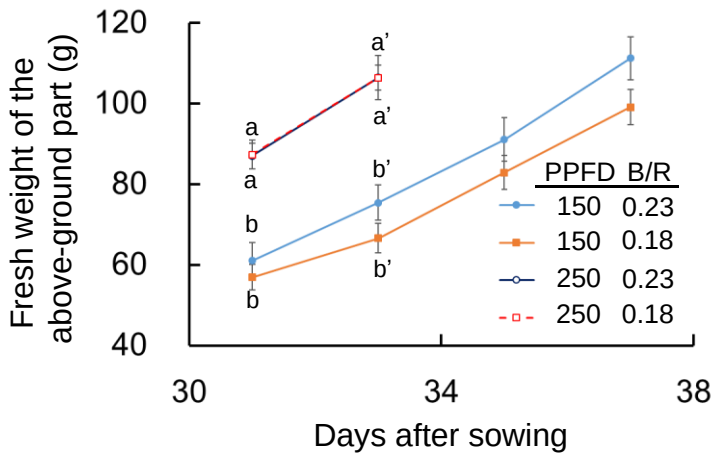

Fig. 3.5 The fresh weight of the above-ground parts of red leaf lettuce cultivated under different photosynthetic photon flux densities (PPFD) and blue/red (B/R) light-emitting diodes (LED) ratios (n = 8). Different letters represent significant differences among the treatments at $P < 0.05$, as determined by the Tukey–Kramer test. Vertical bars represent standard errors.

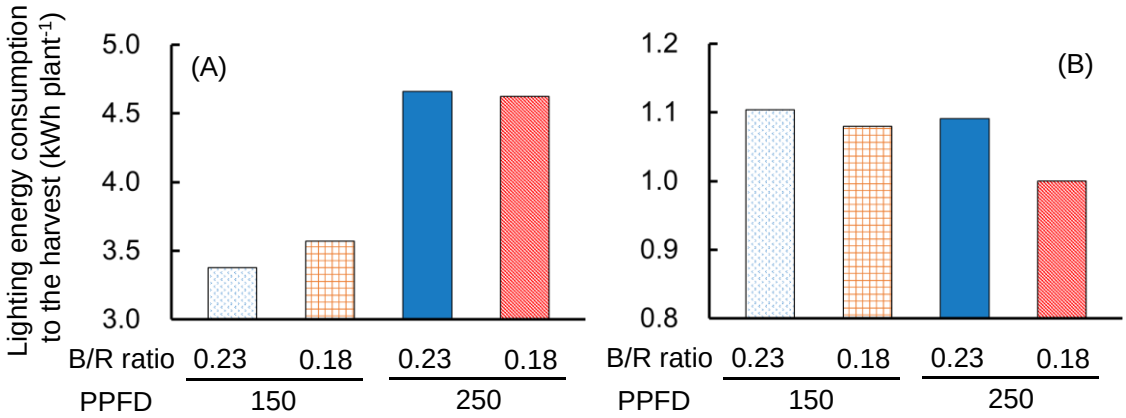

Fig. 3.6 The lighting energy consumption from the start of treatment to harvesting when the fresh weight of red leaf lettuce had reached approximately 100 g under different photosynthetic photon flux densities (PPFD) and blue/red (B/R) light-emitting diode (LED) ratios (n = 8). A: planting density of 12.9 plants m^{-2}. B: spacing with growth management achieved by daily changing the square arrangement of plants.

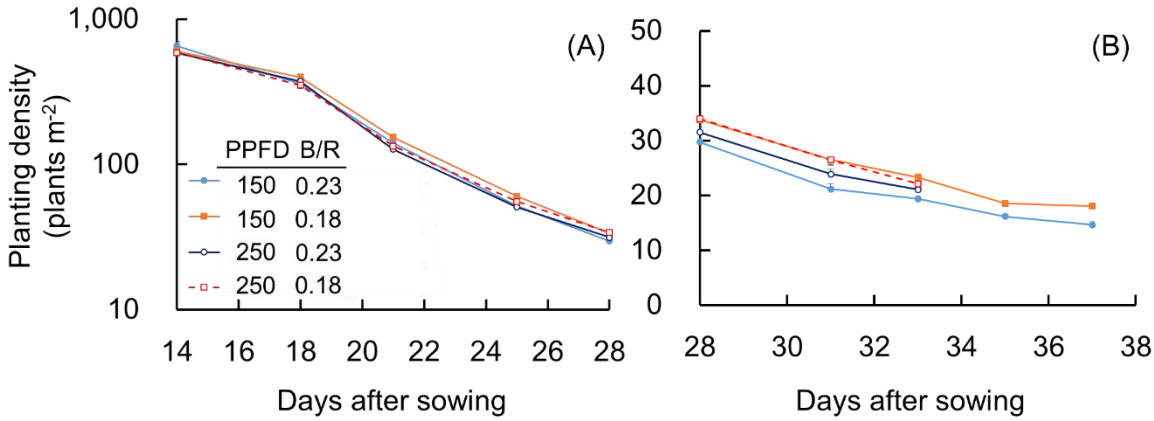

Fig. 3.7 (A) and (B) The planting density of red leaf lettuce in the case of the spacing with growth management by changing square arrangement of plants (n = 8).

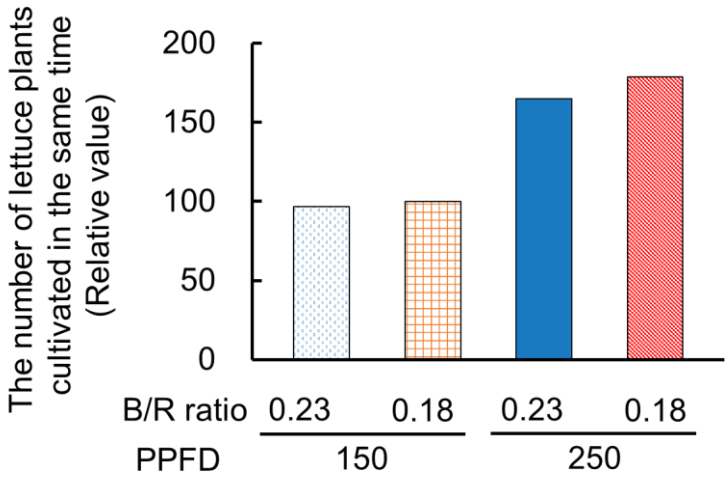

Fig. 3.8 The number of lettuce plants cultivated in a place at the same time (n = 8). The value is relative (PPFD 150, B/R ratio 0.18 = 100).

3.3　相互遮蔽の起こる栽植密度下での照明電力量の推定

3.3.1　はじめに

照明ロスを少なくするには，3.2 節で検討した成長に応じてスペーシングする方法の他に，相互遮蔽を起こしながら栽培する方法が有効である．相互遮蔽を起こしながら栽培すると，成長に応じてスペーシングするよりも照明ロスを少なくできる．

ただ，強い相互遮蔽を起こしながら栽培すると隣植物と強く接触するため，植物体の形態が変わり，成長が大となる B/R 比は異なる可能性がある．また，相互遮蔽のある場合には隣植物と強く接触するため，気流速が低くなる．そのため，葉内の CO_2 濃度は低くなるので，光呼吸の割合が高まり，光合成効率が低くなる可能性がある．

そこで本節では，相互遮蔽の起こる条件と成長に応じてスペーシングした場合では，どちらが効率的に生産できるか明らかにすることを目的にした．

3.3.2　材料および方法

3.3.2.1　植物材料

植物材料は 3.2.2.1 と同一とした.

3.3.2.2　育成方法および試験区

播種後 14 日目に植物体を,前述の栽培室に設置した湛液水耕栽培装置(内寸：600 mm（W）×1200 mm（D）×140 mm（H））に移植し，光質処理を開始した．培養液には大塚ハウス A 処方（OAT アグリオ（株））1/4 単位を用い，播種後 28，35，42，49 および 56 日目に培養液の全量を更新した.

光質処理は PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1} で B/R 比を 0.23，0.18 とした 2 水準とした．光源は 2.2.2 と同一とした．光環境以外の環境条件は，育苗時と同じとした.

栽植密度は，231 株 m^{-2} と 115 株 m^{-2} の 2 水準とした．本試験では 120 穴の栽培パネル（588 mm×885 mm）を使用しており，231 株 m^{-2} は移植から収穫まで 120 穴全てに植物を配置した条件，115 株 m^{-2} はその栽培パネルに千鳥に植物を配置した条件である. 両条件とも強い相互遮蔽が起こる条件である．また，後述する成分の分析のために，B/R 比を 0.18 とした区では栽植密度 12.9 株 m^{-2} でも育成した.

培養液には大塚ハウス A 処方（OAT アグリオ（株））1/4 単位を用い，播種後 28，35 および 42 日目に培養液の全量を更新した．チップバーンを軽減させるために，播種後 21 日目から 3 または 4 日ごとに 0.5%$CaCl_2$ 溶液を植物体に散布した.

3.3.2.3　測定および算定項目

＜栽培＞

生育

栽植密度に関わらず播種後 37 日目に植物体をサンプリングした．なお，播種後 37 日目は，相互遮蔽がないように育成した 3.2 節において植物体の地上部生体重が 100 g 前後になった日である．また，栽培装置の都合により，栽植密度 231 株 m^{-2} の区では播種後 60 日目に，栽植密度 115 株 m^{-2} の区では播種後 49 日目に栽培を終了し，植物体をサンプリングした．

各試験区ともに，最外周に配置した植物体はサンプリング対象外とした．サンプリング日には，地上部生体重，地上部乾物重，地上部乾物率，全乾物重，T/R 比，総葉面積を測定・算定した．さらに，播種後 37 日目以降の植物体では，下位葉で老化に伴う黄化や枯死が認められたため，可食部生体重を測定した．可食部生体重は，地上部生体重から黄化葉および枯死葉重を除いた植物体の重さとした．

分析

栽植密度 12.9 および 231 株 m^{-2} の B/R 比 0.18 区では播種後 37 日目における最大葉のクロロフィル，アントシアニンおよび β-カロテン濃度を測定した．クロロフィルおよびアントシアニン濃度の測定法は 2.2.3 と同一とした．

β-カロテン濃度の定量は，小柳・安藤（2006）を一部改変して行った．

〔抽出〕

最大葉の葉身を，25 ml 容のチューブ（マルチビーズショッカー用チューブ，安井器械（株））に入れ，液体窒素で凍結させた．専用のビーズ（メタルコーン，安井器械（株））を加え，手で激しく振とうして植物葉を完全に

破砕し，分析試料とした．3 ml の 0.5%ピロガロールーエタノール，300 µl の 40%水酸化カリウムーメタノールを入れたチューブに，0.5-1.0 gFW 程度の分析試料を加え，ボルテックスミキサで振とうし，5 min 静置した．これに，2.7 ml の蒸留水と 3 ml の n ヘキサンを加え，ボルテックスミキサで振とうしたものを抽出液とした．

〔精製〕

抽出液を，遠心分離機（himac CT 6D，日立工機（株））を用いて 3354×g（5000 rpm）で 3 min 遠心分離した．ヘキサン層をチューブに取り，ヘキサン飽和アセトニトリルを 3 ml 加え，ボルテックスミキサで振とうし，3354×g（5000 rpm，himac CT 6D，日立工機（株））で 3 min 遠心分離した．この操作は 2 度行った．

〔定量〕

精製した抽出液からヘキサン層を取り出し，分光光度計で吸光度（453 nm）を測定した．

β-カロテンの標準試薬を n ヘキサンに希釈することにより，標準試料：0.00，0.16，0.31，0.63，1.25，2.50，5.00，10.00，20.00 µg ml^{-1} を作成した．標準試料は分光光度計を用いて分析し，得られた吸光度（453 nm）から検量線を作成した．得られた検量線と OD 値（453 nm）から β-カロテン濃度を算定した．

＜植物の成長に応じてスペーシングした場合との照明電力量の比較＞

積算受光量の推定

受光量を算定するのに必要な投影面積の経日値は，Fig. 3.4 を用いた．

栽植密度 231 株 m^{-2} の区では，1 株あたりの最大投影面積は 43.4 cm^2 であり，栽植密度 115 株 m^{-2} の区では，1 株あたりの最大投影面積は 86.7 cm^2 である．そのため，最大投影面積に達するまでは，Fig. 3.4 に示した投影面積

を与え，最大投影面積に達した日時からは，常に前述の最大投影面積を維持するとした．なお，最大投影面積に達するのは，栽植密度 231 株 m^{-2} の区では，B/R 比 0.23 区で播種後 19 日目の明期開始 15 時間 39 分後，B/R 比 0.18 区で播種後 20 日目の明期開始 7 時間 11 分後であり，栽植密度 115 株 m^{-2} の区では，B/R 比 0.23 区で播種後 22 日目の明期開始 3 時間 33 分後，B/R 比 0.18 区で播種後 22 日目の暗期開始 5 時間 22 分後である．

試験開始日からサンプリング日までの毎日の投影面積に光強度を積算して株あたりの積算受光量を求めた．

照明電力量の推定

相互遮蔽のある場合では，両栽植密度とも投影面積が前述の最大投影面積に達するまでは多くの照明ロスがある．そこで，植物体を円と仮定した場合の最大栽植密度が，栽植密度 231 株 m^{-2} の区では 231 株 m^{-2}，115 株 m^{-2} の区では 115 株 m^{-2} よりも，それぞれ大きいときは Fig. 3.7 の栽植密度でスペーシングするとした．前述の栽植密度に達してからは常にその栽植密度で育成するとして照明電力量を算定した．

それぞれの栽植密度下での地上部生体重，地上部乾物重，全乾物重の実測値と照明電力量の推定値から，増加曲線を作成した．なお，それぞれの光環境下での照明電力は，3.2 節で測定した値を用いた．

成長に応じてスペーシングした場合は，3.2 節で測定した地上部生体重が収穫サイズになるのに要する照明電力量から，地上部生体重の増加曲線を作成した． 3.2 節で測定した地上部生体重に対する地上部乾物重および全乾物重の比と，地上部生体重の増加曲線から，地上部乾物重，全乾物重の増加曲線を作成した．得られた値を用いて，地上部乾物率，T/R 比の増加曲線を作成した．

3.3.3　結果および考察

植物体の写真

サンプリング日における植物体の写真を示す（Fig. 3.9）．なお，写真の植物体のサンプリング日は，栽植密度 231 株 m^{-2} の 2 区で播種後 60 日目，栽植密度 115 株 m^{-2} の 2 区で播種後 49 日目である．

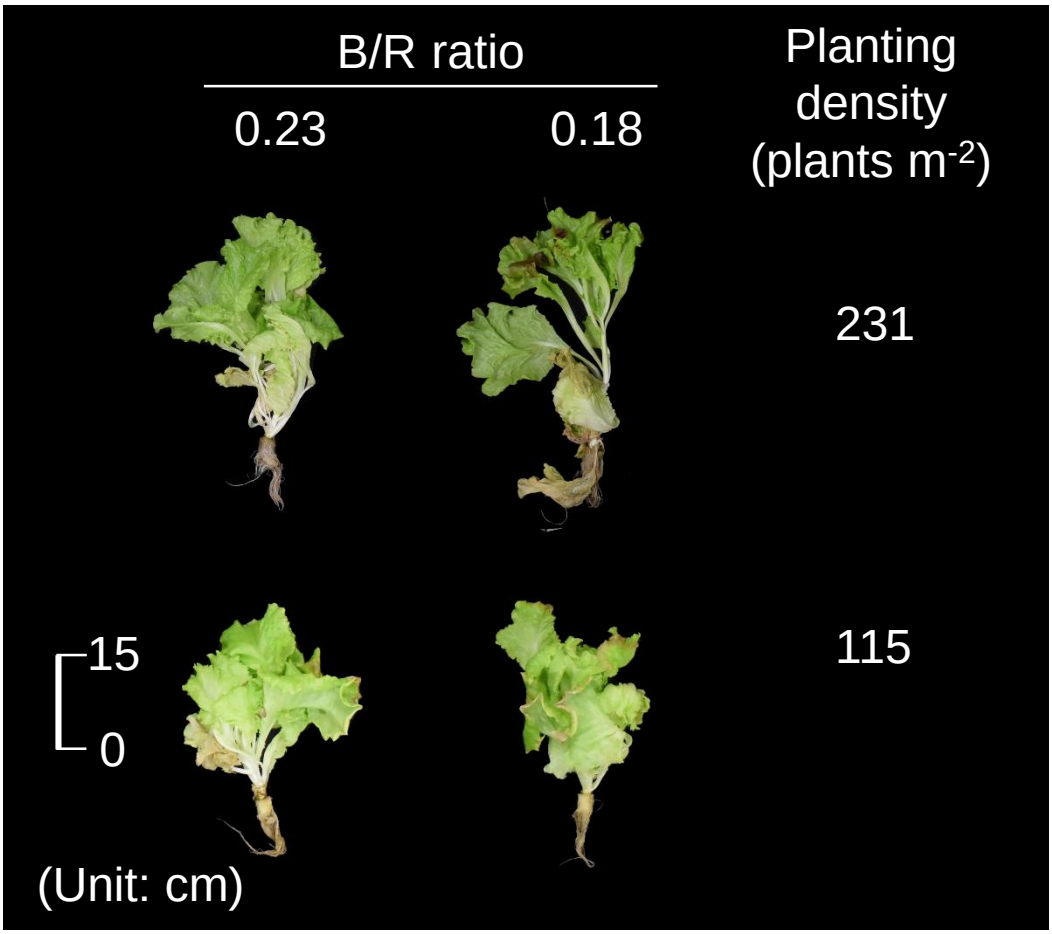

Fig. 3.9 Lettuce plants at harvested day. (PPFD 150 μmol m^{-2} s^{-1}: 60 days after sowing, PPFD: 250 μmol m^{-2} s^{-1}: 49 days after sowing.)

栽植密度 231 株 m^{-2} の場合について

同一照明電力量での全乾物重は栽植密度 231 株 m^{-2} で成長に応じてスペーシングした場合より大きかった（Fig. 3.10）．これは，栽植密度 231 株 m^{-2} の方が照明ロスは少ないためと考えられる．実際の栽培ではありえないが，植物体を正方形と仮定し，照明ロスがゼロになるようにスペーシングした場合の試算をすると，同一照明電力量での全乾物重に，栽植密度 231 株 m^{-2} と成長に応じてスペーシングした場合で差はみられなかった（Fig. 3.11）．これは，両者で光合成効率に差がないことを意味する．

栽植密度 231 株 m^{-2} は，強い相互遮蔽の起こる条件下であり，植物体の葉は隣接株の葉と密着している．植物葉は光合成するため，葉の気孔付近の CO_2 濃度は，成長に応じてスペーシングした場合よりも低いと考えられる．そのため，光呼吸の割合は，栽植密度 231 株 m^{-2} で高いと考えられる．また，葉面積指数は栽植密度 231 株 m^{-2} で成長に応じてスペーシングした場合よりも高い．過繁茂葉群における下層部構成葉の受光強度が著しく低い場合，それ以上葉重が増加しても光合成皆無の葉になる（黒岩，1979）．実際に栽植密度 231 株 m^{-2} では播種後 37 日目における植物体の下層部の CO_2 濃度は，栽培室内の CO_2 濃度よりも 200 $\mu mol\ mol^{-1}$ 程度高かったことから，下層部構成葉では総光合成速度よりも呼吸速度の方が高かったと考えられる．

そのため，栽植密度 231 株 m^{-2} では下層部の呼吸によるロスを回収できるほどに総光合成速度が高かったと考えられた．総光合成速度が高かった理由に，クロロフィル濃度に対する他色素の濃度の割合が低くなり，光合成量子収率が高かった可能性があるので，B/R 比 0.18 区について播種後 37 日目の最大葉の単位葉面積あたりのクロロフィル，アントシアニンおよび β-カロテン濃度を測定した（Fig. 3.12）．成長に応じてスペーシングした場合に対する 231 株 m^{-2} のクロロフィル，アントシアニンおよび β-カロテン濃度は，それぞれ 75%，80%，87%だった．231 株 m^{-2} では成長に応じてスペーシングした場合よりも，クロロフィル濃度に対するアントシアニンおよび β-カロ

テン濃度の割合が高かった．赤系リーフレタスは，今回測定した色素成分の他にも高含有する色素があり，例えばチコリ酸，クロロゲン酸，ケルセチン-3-マロニルグルコシドを多く含有する（澤井ら，2014）．それらの濃度については測定していないため不明だが，本試験からは，含有色素の構成比によって栽植密度 231 株 m^{-2} で成長に応じてスペーシングした場合よりも光合成量子収率が高いとはいえなかった．

ただ，栽植密度 231 株 m^{-2} では隣接株との接触刺激により葉角度が高かった．葉角度が高くなると受光葉における単位葉面積あたりの受光強度は低いので，弱光に順化し，呼吸速度が低かった可能性がある．よって，呼吸速度が低いために，成長に応じてスペーシングした場合よりも光合成量子収率が高まった可能性がある．また，葉角度が大きければ，その分光源に近づくので葉の先端部は高い強度の光を受けていたと考えられる．そのため，栽植密度 231 株 m^{-2} で総光合成速度が高くなり，同一照明電力量での全乾物重に栽植密度間で差がみられなかったと考えられる．

同一照明電力量での地上部生体重は，栽植密度 231 株 m^{-2} で成長に応じてスペーシングした場合よりも大きかった（Fig. 3.13）．例えば，栽植密度 231 株 m^{-2} の播種後 60 日目での照明電力量（B/R 比 0.23 区では 0.384 kW $plant^{-1}$，B/R 比 0.18 区では 0.379 kW $plant^{-1}$）において，成長に応じてスペーシングした場合に対する栽植密度 231 株 m^{-2} の照明電力量あたりの生体重を比較したところ，B/R 比 0.23 区では，栽植密度 231 株 m^{-2} で成長に応じてスペーシングした場合の 196％であり，B/R 比 0.18 区では，160％であった．この割合は全乾物重のときよりも大きかった．

これは，栽植密度 231 株 m^{-2} では，植物体の葉は隣接株の葉と密着することが理由に挙げられた．植物葉は気孔を通して蒸散する．栽植密度 231 株 m^{-2} は隣接株の葉の気孔が密着している条件のため，葉付近の相対湿度が高かったと考えられる．高相対湿度下では空気の水ポテンシャルは高い．例えば，25℃で，相対湿度 100％，80％，50％の空気の場合，水ポテンシャルは 0，-

30.7，-95.3 MPa である．水は，水ポテンシャルの高い方から低い方に移動するため，空気の相対湿度が極端に高い栽植密度 231 株 m^{-2} では，葉から空気中に蒸散できる水の量が少なくなると考えられる．そのため，葉の含水率が高くなり，地上部の乾物率が低くなった（Fig. 3.14）と考えられた．なお，栽植密度 231 株 m^{-2} で地上部乾物率が，0.2 kWh $plant^{-1}$ 以降で高まったのは，下位葉まで光が到達しないことで枯死葉が増加したためと考えられる．また，葉面積あたりの蒸散量が少なければ，葉面積あたりの根からの吸水量は少ない．そのため，栽植密度 231 株 m^{-2} で成長に応じてスペーシングした場合よりも T/R 比が大きかった（Fig. 3.15）と考えられた．

以上から，同一照明電力量での地上部生体重が，栽植密度 231 株 m^{-2} で成長に応じてスペーシングした場合よりも大きかったのは，光合成効率に両者で差がなく，地上部乾物率が低く，T/R 比が高くなったためと考えられた．

なお，前述の通り，栽植密度 231 株 m^{-2} では，枯死葉が多く見られた．地上部生体重から枯死葉を除いた値である可食部生体重は，成長に応じてスペーシングした場合で同一照明電力量での地上部生体重より大きかった（Fig. 3.16）．また，同一照明電力量での総葉面積は栽植密度 231 株 m^{-2} で成長に応じてスペーシングした場合よりも大きかった（Fig. 3.17）．

以上から，栽植密度 231 株 m^{-2} で育成することで成長に応じてスペーシングした場合よりも可食部位を効率的に生産できると考えられた．

栽植密度 115 株 m^{-2} の場合について

同一照明電力量での全乾物重は栽植密度 115 株 m^{-2} で成長に応じてスペーシングした場合よりも大きかった（Fig. 3.18）．この理由は，栽植密度 115 株 m^{-2} の方が照明ロスは少ないためである．実際の栽培ではありえないが，植物体を正方形と仮定し，照明ロスがゼロになるようにスペーシングした場合の試算をしても，同一照明電力量での全乾物重に，栽植密度 115 株 m^{-2} と成長に応じてスペーシングした場合で差はみられなかった（Fig. 3.19）．これ

は，両者で光合成効率に差がないことを意味する．この理由は，栽植密度 231 株 m^{-2} と同じと考えられた．

同一照明電力量での地上部生体重は，栽植密度 115 株 m^{-2} で成長に応じてスペーシングした場合よりも大きかった（Fig. 3.20）．例えば，栽植密度 115 株 m^{-2} の播種後 49 日目での照明電力量（B/R 比 0.23 区では 0.544 kW $plant^{-1}$，B/R 比 0.18 区では 0.532 kW $plant^{-1}$）で，成長に応じてスペーシングした場合に対する栽植密度 115 株 m^{-2} の照明電力量あたりの生体重を比較したところ，B/R 比 0.23 区では，栽植密度 115 株 m^{-2} で成長に応じてスペーシングした場合の 192％であり，B/R 比 0.18 区では，169％であった．この割合は全乾物重のときよりも大きかった．この理由は栽植密度 231 株 m^{-2} と同様に，栽植密度 115 株 m^{-2} で成長に応じてスペーシングした場合よりも地上部乾物率が低く，T/R 比が高かったため（Figs. 3.21 and 3.22）と考えられる．

なお，栽植密度 115 株 m^{-2} でも，231 株 m^{-2} と同様に枯死葉が多く見られた．地上部生体重から枯死葉を除いた値である可食部生体重は，成長に応じてスペーシングした場合で同一照明電力量での地上部生体重より大きかった（Fig. 3.23）．

また，同一照明電力量での総葉面積は栽植密度 115 株 m^{-2} で成長に応じてスペーシングした場合よりも大きかった（Fig. 3.24）．

以上から，栽植密度 115 株 m^{-2} で育成することで成長に応じてスペーシングした場合よりも可食部位を効率的に生産することができると考えられた．

総合考察

本試験の範囲では，栽植密度に関わらず，相互遮蔽の起こる条件下で同一照明電力量での地上部生体重は大きかった．したがって，人工光型植物工場では相互遮蔽の起こる栽植密度下で育成することで，相互遮蔽をなくして育成するよりも，効率的にレタスを生産できると考えられた．

しかし，単純に栽植密度を高くすると，本試験の栽植密度 231 株 m^{-2} の播

種後 60 日目のように，隣接する植物同士で生存競争が起こるために成長速度にムラができて歩留まりが悪くなる．また，栽植密度が高いと，下位葉の多くは老化して枯死するため，その分のロスがある．Zhang ら（2015）は，下方照射（植物体への上から下に向けての LED 照射）に，上方照射（植物体への下から上に向けての LED 照射）を加えることで，下位葉の老化を抑制できると報告している．したがって，下方照射に上方照射を組み合わせたり，植物体同士が接触しないようにしきりを付けた栽培装置を用いて高栽植密度で栽培することで，歩留まりがよく，かつさらに効率的に生産できる可能性がある．

なお，本節における算定でも，3.2 節と同様の方法で積算受光量を算定し，成長に応じてスペーシングした場合と，強い相互遮蔽の起こる条件で比較した．そのため，成長に応じてスペーシングした場合では，3.2 節で述べたように照明電力量を過小評価していると考えられる．比較のため，強い相互遮蔽の起こる条件でも生育初期は成長に応じてスペーシングするとして算定したので，照明電力量を実際よりも過小評価しているが，成長に応じてスペーシングした場合よりもその割合は低い．したがって，実際に本節で算定したように植物体を育成した場合には，強い相互遮蔽の起こる条件で，成長に応じてスペーシングした場合よりも効率的に地上部生体重を増加でき，その差は本節で得られた値以上になると考えられた．

ただ，強い相互遮蔽の起こる，栽植密度 231 株 m^{-2} で育成した植物体の β カロテンおよびアントシアニン濃度は，相互遮蔽のない条件で育成したものよりも小となった（Fig. 3.25）．これは，密植することで単位葉面積あたりの受光強度が低くなったことが理由と考えられる．また，Fig. 3.9 に示したように植物の形にも課題があった．したがって，成長に応じてスペーシングするのがよいか，相互遮蔽を起こしたほうがよいかは，それぞれの商業施設で判断するのがよいと考えられた．

ところで，個体群の乾物増加量は主たる光合成器官である葉の面積に強く

規制されているため，群落形成の初期では葉面積指数の増加に伴って直線的に増加するが，葉面積指数がさらに増加すると頭打ちとなり，ある値を越えたときには低下が起こる．乾物増加量の低下は，葉の相互遮蔽による下位葉の活性低下や呼吸量の増大などに起因すると推定されている（光合成学会，http://photosyn.jp/pwiki/index.php?%E5%85%89%E5%90%88%E6%88%90%E4%BA%8B%E5%85%B8．2017 年 2 月 22 日参照）．したがって，本試験のように密植し，葉面積指数が高い場合は，下位葉に到達する光の強度は低い．そのため，強光にした方が本試験よりも効率的に乾物重を増加させられる可能性がある．また，強光にすれば，葉面積あたりの光強度は増加するので，本試験の場合よりも機能性成分の濃度を高められる可能性がある．以上から，強い相互遮蔽を起こして栽培する場合，本試験よりも強光にして育成した方が，照明電力量あたりの乾物重増加量および機能性成分濃度を高められる可能性がある．

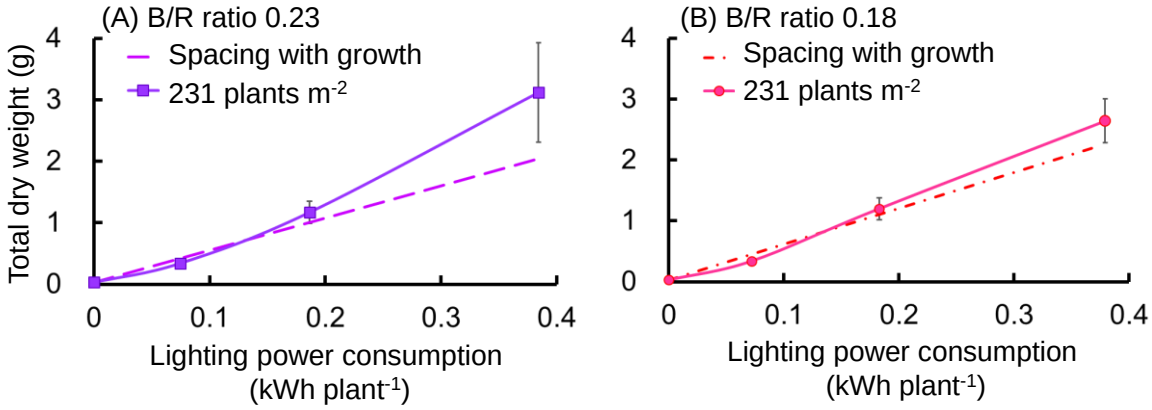

Fig. 3.10 The relation of total dry weight and lighting power consumption. The spacing with growth means the spacing with growth management by changing square arrangement of plants as fig. 3.2. The planting density of 231 plants m^{-2} treatment was as fig. 3.6 when the planting density of the spacing with growth management was higher than 231 plants m^{-2}. After the planting density of the spacing with growth management was less than 231 plants m^{-2}, the planting density of 231 plants m^{-2} treatment was kept at 231 plants m^{-2}. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).

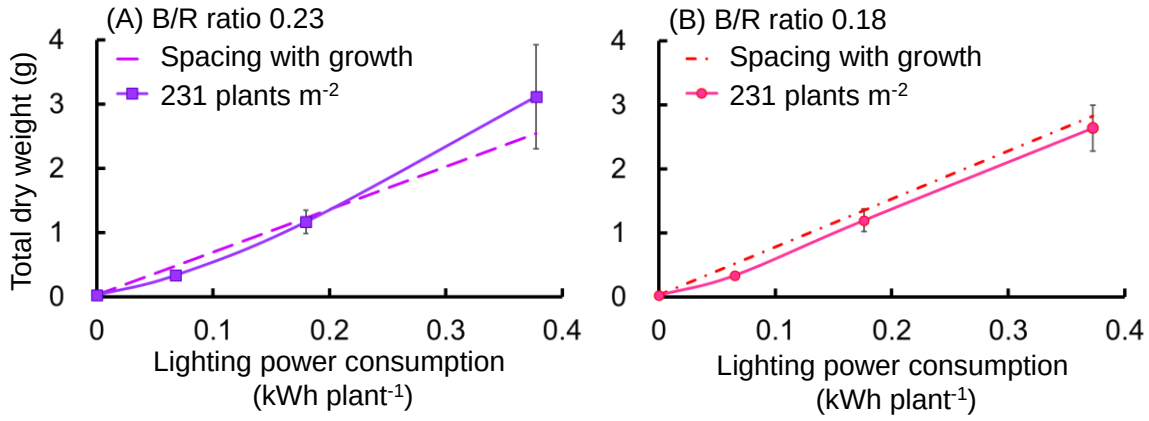

Fig. 3.11 The relation of dry weight of the above-ground part and lighting power consumption in the case of no loss of lighting power consumption. In this case, all light irradiated from LED lamps was received by lettuce plants. The spacing with growth means the spacing with growth management by changing square arrangement of plants as fig. 3.2. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).

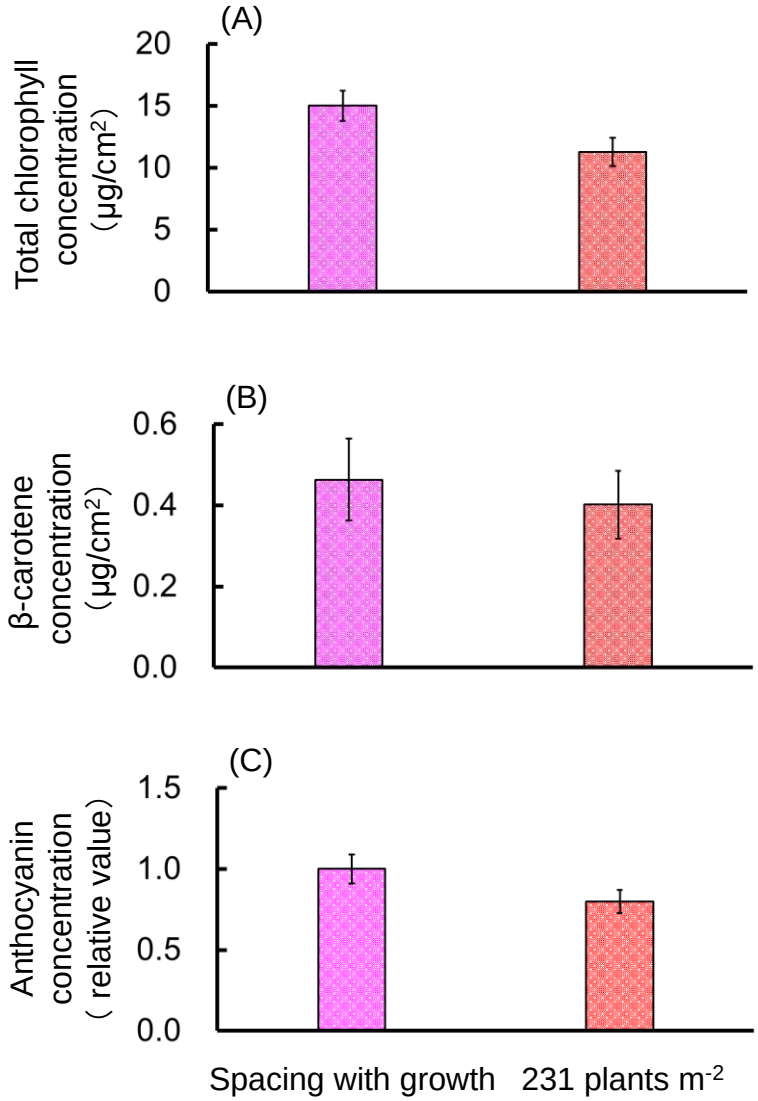

Fig. 3.12 The total chlorophyll (A), carotene (B) and anthocyanin (C, relative value) concentration per unit leaf area of the maximum leaf of the lettuce at 37 days after sowing. Vertical bars represent standard errors (n = 6).

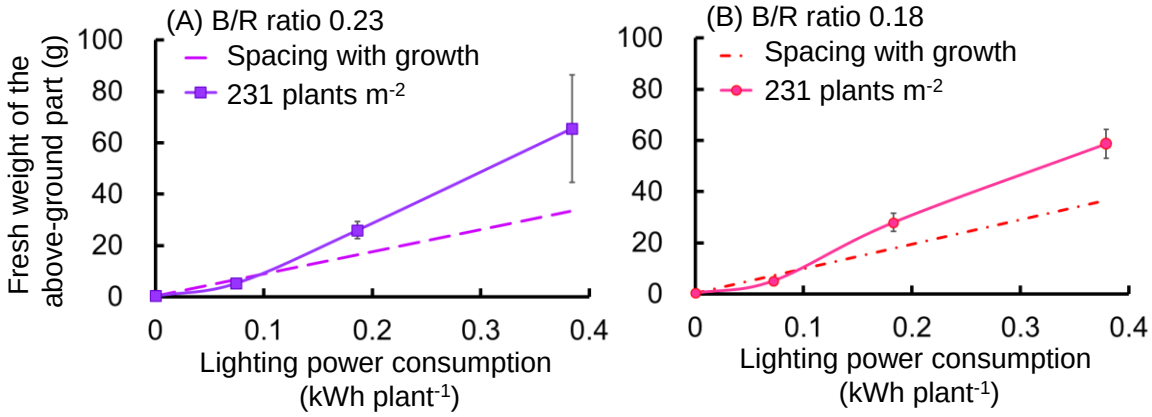

Fig. 3.13 The relation of fresh weight of the above-ground part and lighting power consumption.

The spacing with growth means the spacing with growth management by changing square arrangement of plants as fig. 3.2. The planting density of 231 plants m^{-2} treatment was as fig. 3.6 when the planting density of the spacing with growth management was higher than 231 plants m^{-2}. After the planting density of the spacing with growth management was less than 231 plants m^{-2}, the planting density of 231 plants m^{-2} treatment was kept at 231 plants m^{-2}. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).

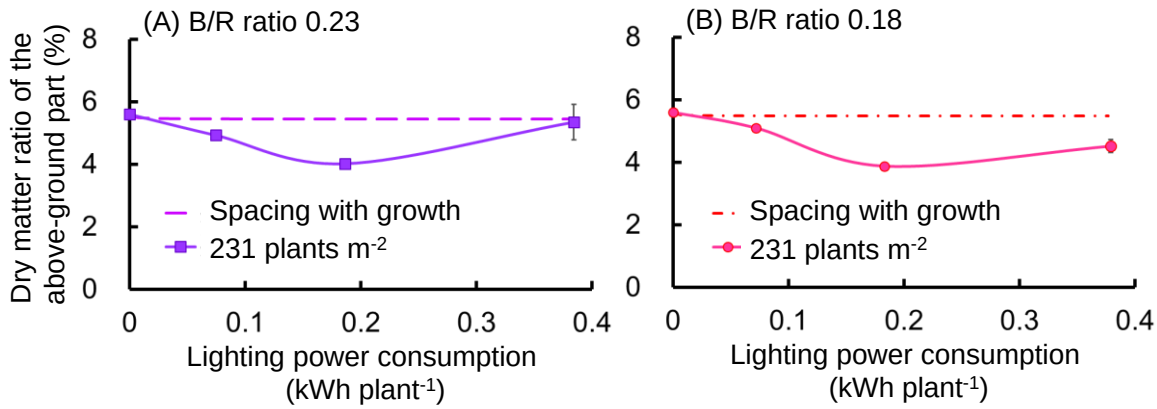

Fig. 3.14 The relation of dry matter ratio of the above-ground part and lighting power consumption.

The spacing with growth means the spacing with growth management by changing square arrangement of plants as fig. 3.2. The planting density of 231 plants m^{-2} treatment was as fig. 3.6 when the planting density of the spacing with growth management was higher than 231 plants m^{-2}. After the planting density of the spacing with growth management was less than 231 plants m^{-2}, the planting density of 231 plants m^{-2} treatment was kept at 231 plants m^{-2}. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).

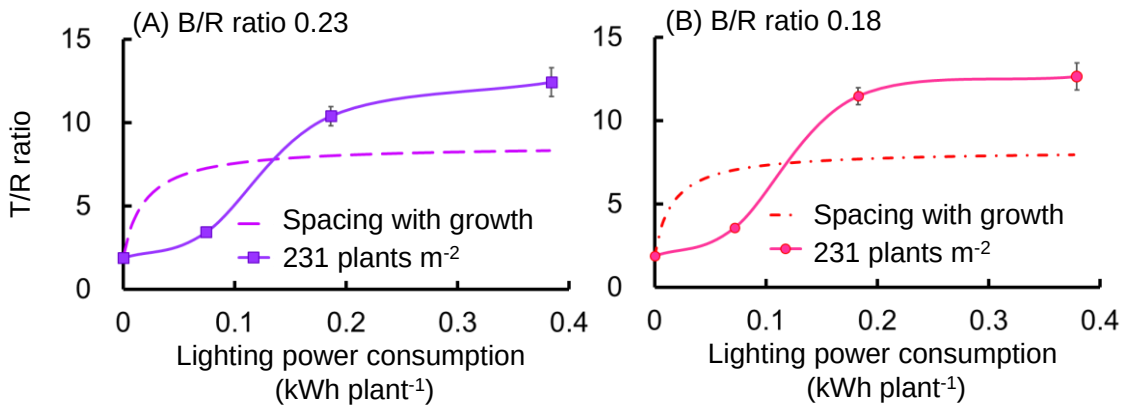

Fig. 3.15 The relation of T/R ratio and lighting power consumption.
The spacing with growth means the spacing with growth management by changing square arrangement of plants as fig. 3.2. The planting density of 231 plants m^{-2} treatment was as fig. 3.6 when the planting density of the spacing with growth management was higher than 231 plants m^{-2}. After the planting density of the spacing with growth management was less than 231 plants m^{-2}, the planting density of 231 plants m^{-2} treatment was kept at 231 plants m^{-2}. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).

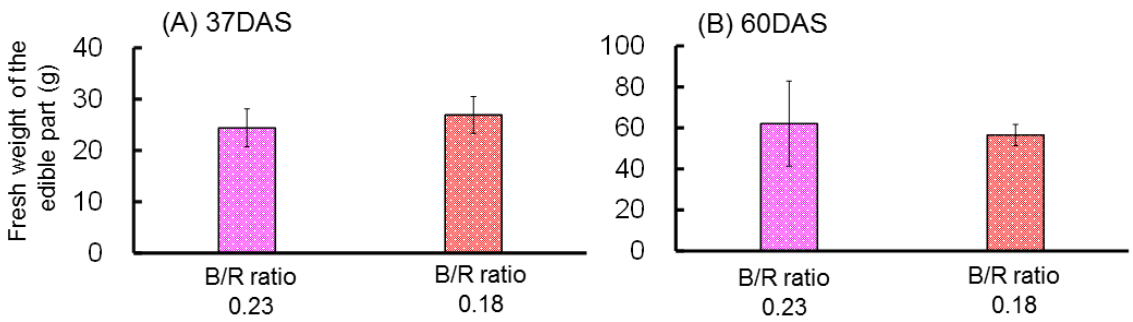

Fig. 3.16 The fresh weight at 37 days after sowing (DAS) and 60DAS. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).
The lighting power consumption at 37 DAS of B/R ratio 0.23 and 0.18 treatments were 0.186 and 0.183 kWh $plant^{-1}$ respectively. That at 60 DAS of B/R ratio 0.23 and 0.18 treatments were 0.384 and 0.379 kWh $plant^{-1}$ respectively.

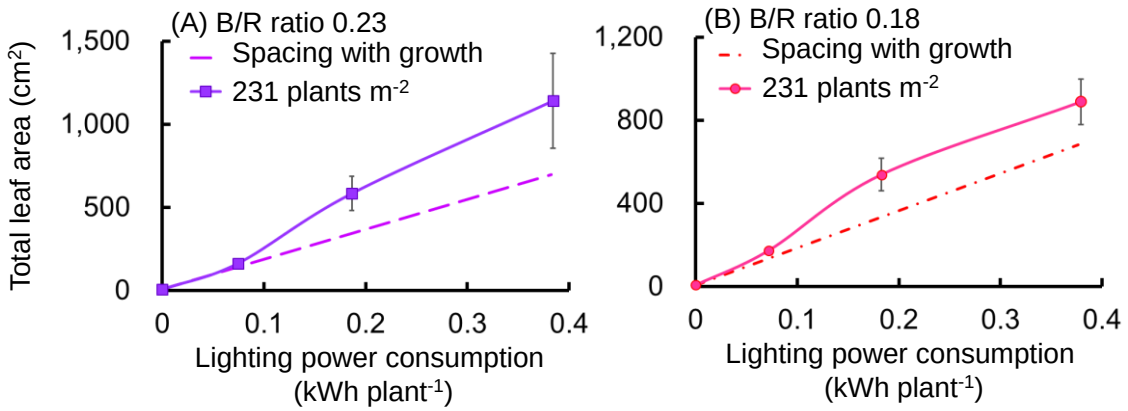

Fig. 3.17 The relation of total leaf area and lighting power consumption. The spacing with growth means the spacing with growth management by changing square arrangement of plants as fig. 3.2. The planting density of 231 plants m^{-2} treatment was as fig. 3.6 when the planting density of the spacing with growth management was higher than 231 plants m^{-2}. After the planting density of the spacing with growth management was less than 231 plants m^{-2}, the planting density of 231 plants m^{-2} treatment was kept at 231 plants m^{-2}. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).

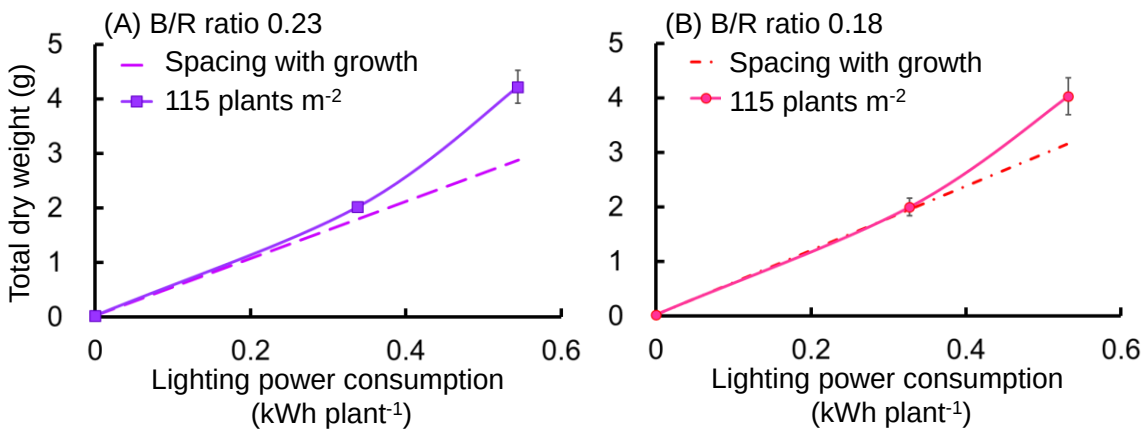

Fig. 3.18 The relation of total dry weight and lighting power consumption. The spacing with growth means the spacing with growth management by changing square arrangement of plants as fig. 3.2. The planting density of 231 plants m^{-2} treatment was as fig. 3.6 when the planting density of the spacing with growth management was higher than 231 plants m^{-2}. After the planting density of the spacing with growth management was less than 231 plants m^{-2}, the planting density of 231 plants m^{-2} treatment was kept at 231 plants m^{-2}. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).

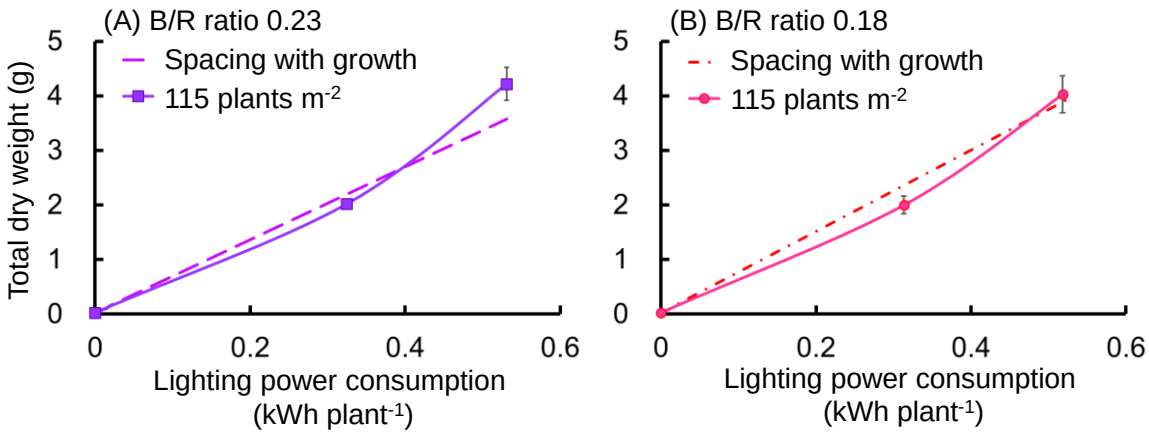

Fig. 3.19 The relation of dry weight of the above-ground part and lighting power consumption in the case of no loss of lighting power consumption. In this case, all light irradiated from LED lamps was received by lettuce plants. The spacing with growth means the spacing with growth management by changing square arrangement of plants as fig. 3.2. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).

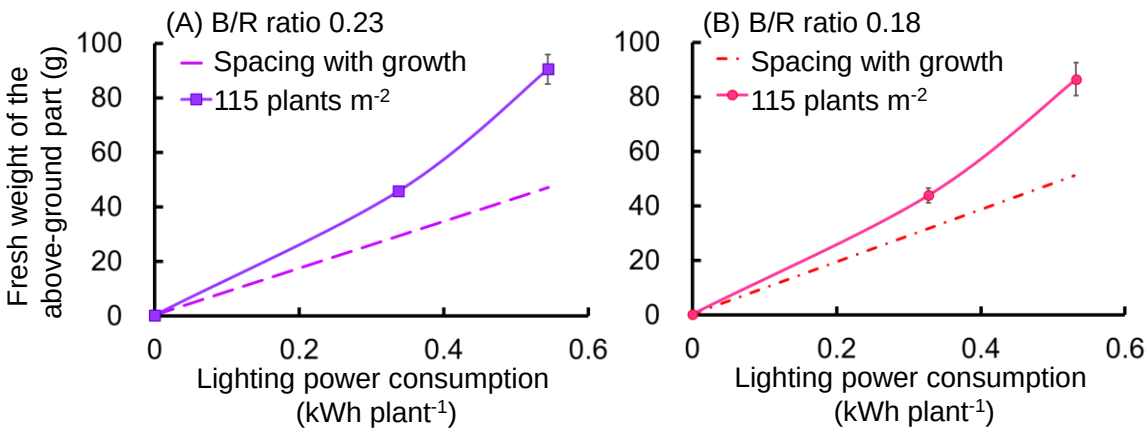

Fig. 3.20 The relation of fresh weight of the above-ground part and lighting power consumption.

The spacing with growth means the spacing with growth management by changing square arrangement of plants as fig. 3.2. The planting density of 231 plants m^{-2} treatment was as fig. 3.6 when the planting density of the spacing with growth management was higher than 231 plants m^{-2}. After the planting density of the spacing with growth management was less than 231 plants m^{-2}, the planting density of 231 plants m^{-2} treatment was kept at 231 plants m^{-2}. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).

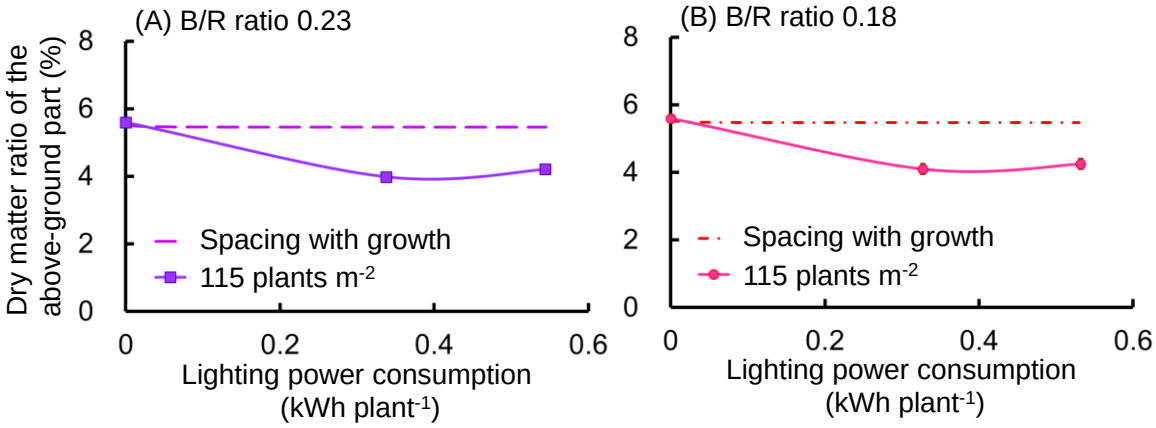

Fig. 3.21 The relation of dry matter ratio of the above-ground part and lighting power consumption.

The spacing with growth means the spacing with growth management by changing square arrangement of plants as fig. 3.2. The planting density of 231 plants m^{-2} treatment was as fig. 3.6 when the planting density of the spacing with growth management was higher than 231 plants m^{-2}. After the planting density of the spacing with growth management was less than 231 plants m^{-2}, the planting density of 231 plants m^{-2} treatment was kept at 231 plants m^{-2}. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).

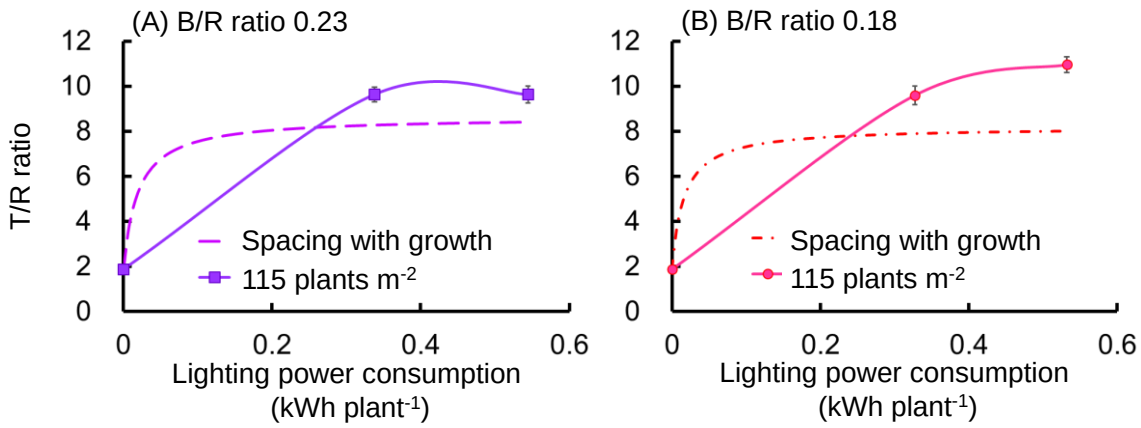

Fig. 3.22 The relation of T/R ratio and lighting power consumption.

The spacing with growth means the spacing with growth management by changing square arrangement of plants as fig. 3.2. The planting density of 231 plants m^{-2} treatment was as fig. 3.6 when the planting density of the spacing with growth management was higher than 231 plants m^{-2}. After the planting density of the spacing with growth management was less than 231 plants m^{-2}, the planting density of 231 plants m^{-2} treatment was kept at 231 plants m^{-2}. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).

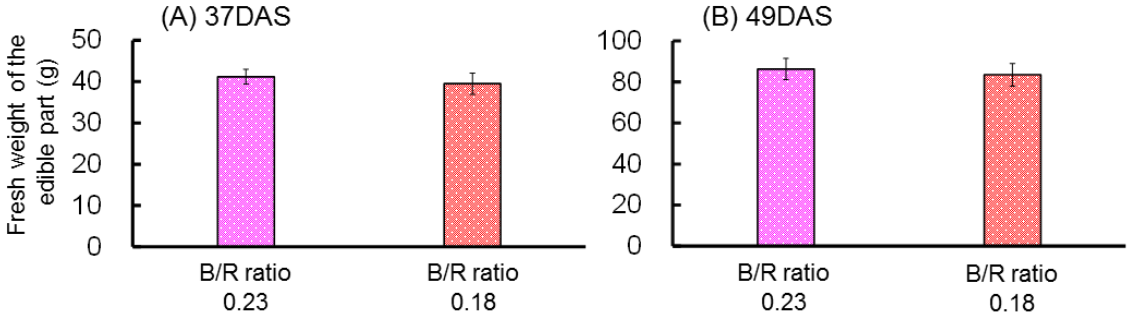

Fig. 3.23 The fresh weight at 37 days after sowing (DAS) and 49DAS. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).

The lighting power consumption at 37 DAS of B/R ratio 0.23 and 0.18 treatments were 0.338 and 0.327 kWh plant^{-1} respectively. That at 49 DAS of B/R ratio 0.23 and 0.18 treatments were 0.544 and 0.532 kWh plant^{-1} respectively.

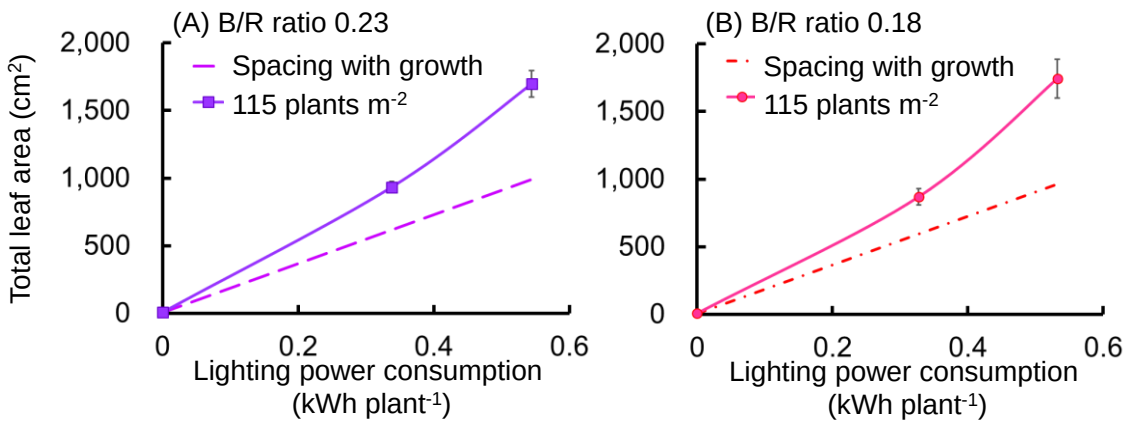

Fig. 3.24 The relation of total leaf area and lighting power consumption.

The spacing with growth means the spacing with growth management by changing square arrangement of plants as fig. 3.2. The planting density of 231 plants m^{-2} treatment was as fig. 3.6 when the planting density of the spacing with growth management was higher than 231 plants m^{-2}. After the planting density of the spacing with growth management was less than 231 plants m^{-2}, the planting density of 231 plants m^{-2} treatment was kept at 231 plants m^{-2}. Vertical bars represent standard errors (n = 6–13).

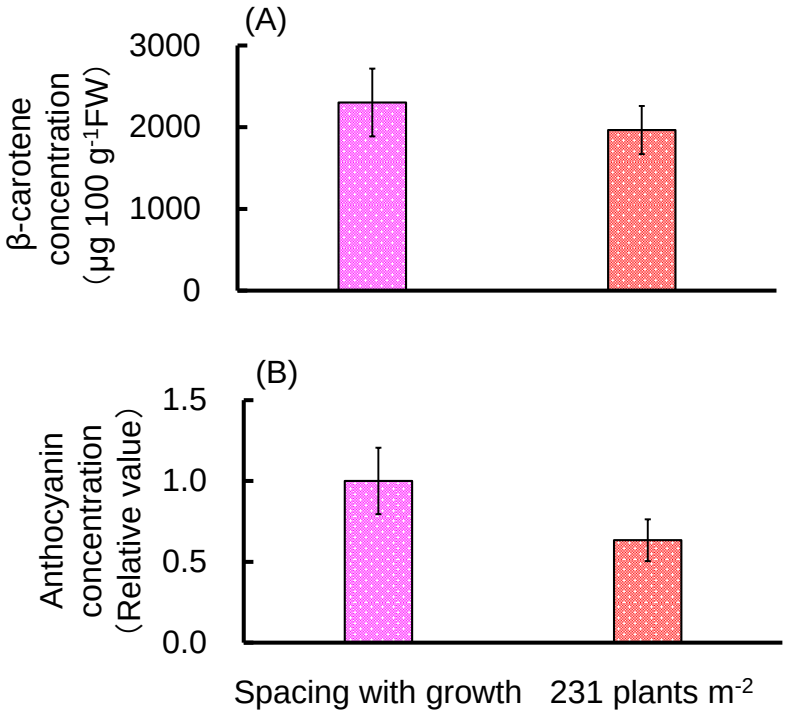

Fig. 3.25 β-carotene (A) and anthocyanin (B, relative value) concentration per 100 gFW of the maximum leaf of the lettuce at 37 days after sowing. Vertical bars represent standard errors (n = 6).

3.4　結論（3 章）

本章では，人工光型植物工場において低コストで効率的にレタスを生産するために，栽植密度によって効率的にレタスを生産できる光質条件が異なるか調査した．

最初に，異なる LED の B/R 比下で赤系リーフレタスを育成し，収穫サイズに達するまでに必要な総受光面積と積算受光量を算定し，成長に応じてスペーシングした場合での照明電力量について比較した．その結果，低照明電力量で赤系リーフレタスを生産できる B/R 比や光強度は栽植密度によって異なることを見出した．本試験の範囲内で，低照明電力量でレタスを育成するのであれば，照明ロスがないように植物体を配置した上で，PPFD を 250 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$，B/R 比を 0.18 として育成するのがよいことが示された．

次に，成長に応じてスペーシングした場合と相互遮蔽の起こる条件の照明電力量を比較した．その結果，成長に応じてスペーシングした場合よりも相互遮蔽の起こる栽植密度下で育成した方が効率的に地上部生体重を増加させられることを明らかにした．

第 4 章

総括

4.1　本論文の摘要

本論文は，光源に LED を用いる人工光型植物工場における赤系リーフレタスの高効率生産に寄与する光環境制御法の開発を目的とした．本研究の特徴として，赤青 LED 下で光質と光強度を変化させる際の葉の形態の変化に着目した．

第 2 章では，光質が植物体の形態に及ぼす影響と光合成速度に及ぼす影響を分離して評価し，異なる光質下での成長に差が生じる理由を解析した．その結果，成長の指標である全乾物重の大小関係は光合成速度の大小関係と必ずしも一致せず，積算受光量の大小関係と一致した．よって，B/R 比を 0.18–0.33 とした赤青 LED 下では，積算受光量が成長に大きな影響を及ぼすことを示した．葉の形態が変化すれば積算受光量が変化するため，異なる光質下での成長の差異は葉の形態変化の影響を強く受けることを明らかにした．また，光強度を高めても成長は大とならない場合があるが，これは高光強度の区で自己被陰の割合や葉角度が大きくなり積算受光量は増えないためと考えられた．

第 3 章では，低照明電力量で育成できる光強度や B/R 比は栽植密度によって異なることを見出した．また植物の成長に応じてスペーシングするよりも相互遮蔽の起こる栽植密度下で育成する方が，効率的に地上部生体重を増やせることを明らかにした．

以上より，人工光型植物工場において赤系リーフレタスの生産効率を高める光環境制御技術を確立した．

4.2　今後の課題および展望

本研究では，赤青 LED と白色蛍光灯を用い，光環境が赤系リーフレタスの生育に及ぼす影響について調査を行い，成長を促進する光環境を明らかにした．また，異なる光質下での成長の差異は葉の形態変化の影響を強く受けることを明らかにした．本研究で調査対象にしたのは赤系リーフレタスのみであり，他の植物種においても本研究と同様の手法での解析と研究が期待される．特に，人工光型植物工場で栽培されているハーブ類にはロゼット植物でないものもある．光質によって主茎長に差が生じるという報告（平井ら，2006; Nanya et al., 2012）は多い．主茎長に差が生じる場合，光源から成長点までの距離にも差が生じるため，光質によって成長点付近の光強度が異なる可能性がある．調光器を用いて成長点付近の光強度を調整したとしても，光源から中・下層葉までの距離は異なるため，中・下層葉の受光強度に差が生ずる．ロゼット植物でない植物種で，受光量を正確に推定し成長評価するには多数の測定が必要と考えられ，今後の研究が期待される．

本研究から葉の形態や光合成能力の変化は成長速度に大きな影響を及ぼすことを明らかにした．しかし，それらが光質によって変化するメカニズムは明らかでなく，現状では各植物種・品種ごとに光質が生育に及ぼす影響を調査することで，模索する必要がある．

本研究から B/R 比の 0.05 の差で成長に差が生じること，光強度によって成長が最大になる B/R 比は異なることを明らかにした．しかし，光質が生育に及ぼす影響は光強度のみならず，気温によっても異なる（松本ら，2010）．また，CO_2 施用時の相対湿度は，葉面積，光合成速度，養分吸収量を通じて，キュウリ幼植物の光合成量に影響を及ぼすという報告（鈴木ら，2014）があることから，相対湿度によって，成長が最大になる光質が異なる可能性もある．本研究のデータを参考にしながら，最終的にはそれぞれの商業施設で栽培プロトコルを開発する必要がある．栽培プロトコルを開発する際に，本研

究で提示した栽培方法と解析方法は有効と考えられる.

本研究で得られた栽培知見は,最適な光質を探索する際にも応用できるものである.本研究で得られた知見が,人工光型植物工場での栽培プロトコル開発の一助となり,日本や世界の人工光型植物工場の更なる発展に寄与することを期待したい.

引用文献

Brown, C. S., A. C. Schuerger and J. C. Sager. 1995. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. Journal of the American Society for Horticultural Science. 120: 808–813.

Christie, J. M. 2007. Phototropin blue-light receptors. Annual Review of Plant Biology. 58: 21-45.

ドクターベジタブルジャパン（株）. http://www.drvegetable.jp/. 2017 年 1 月 5 日参照.

Ferreres F., M. I. Gil, M. Castañer and F. A. Tomás-Barberán. 1997. Phenolic metabolites in red pigmented lettuce (Lactuca sativa). Changes with minimal processing and cold storage. J. Agric. Food Chem. 45: 4249–4254.

Franklin, K. A., and P. H. Quail. 2010. Phytochrome functions in arabidopsis development. Journal of Experimental Botany. 61: 11–24.

藤澤明正. 2012. 光強度および気温がホウレンソウの生育およびルテイン, β-カロテン濃度に及ぼす影響. 千葉大学園芸学部卒業論文.

古山真一. 2011. 光強度および気温がラファノブラシカ‘長・野 48 号’のグルコシノレート含有量および生育に及ぼす影響. 千葉大学園芸学部卒業論文.

Goto, E. 2003. Effects of light quality on growth of crop plants under artificial lighting. Environment Control in Biology. 41: 121–132.

Goto, E. Plant production in a closed plant factory with artificial lighting. 2012. Acta Horticulture. 956: 37–49.

Goto, E., H. Matsumoto, Y. Ishigami, S. Hikosaka, K. Fujiwara and A. Yano. 2014. Measurements of the photosynthetic rates in vegetables under various qualities of light from light-emitting diodes. Acta Horticulturae. 1037: 261–268.

後藤英司, 高倉直. 葉菜類の人工光栽培における光強度と照射コストの関係. 農業気象. 43: 229–232. 1987.

林加奈子. 2016. 紫外線波長および強度と赤系リーフレタスの二次代謝物質の生合成・蓄積の関係解明. 千葉大学大学院園芸学研究科修士論文.

Hernández, R., T. Eguchi and C. Kubota. Growth and morphology of vegetable seedlings under different blue and red photon flux ratios using light-emitting diodes as sole-source lighting. Acta Horticulturae. 1134: 195–200. 2016.

彦坂幸毅. 2004. 光合成過程の生態学. 植物生態学. 朝倉書店. 東京. 42–80. 初版.

平井正良, 雨木若慶, 渡邊博之. 2006. 発光ダイオード（LED）による単色光照射がナス、リーフレタス、ヒマワリの節間伸長に及ぼす影響. 植物環境工学. 18(2): 160–166.

Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hashida and T. Yoshihara. 2010. Blue LED light irradiation when raising seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. HortScience. 45: 1809-1815.

Jones, H. G. and R. A. Vanghan. 2013. 植生のリモートセンシング（久米篤, 大政謙次. 監訳）. 森北出版. 東京. 14–18. 第 1 版.

小柳渉, 安藤義昭. 2006. 粗飼料・葉菜中 β -カロテンの簡易分析法. 北信越畜産学会報. 92: 27–31.

古在豊樹. 2012. 人工光型植物工場. オーム社. 東京. 138–144. 第 1 版.

古在豊樹. 2014. 人工光型植物工場の現状と将来性. 繊維と工業. 70 (3): 94–98.

黒岩澄雄. 1979. 群落光合成. 岩城英夫編著. 植物生態学講座 3　群落の機能と生産. 朝倉書店. 東京. 84–141. 第 1 版.

Li, Q. and C. Kubota. 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. Environmental and Experimental Botany. 67: 59–64.

松田怜. 2007. 青色光がイネおよびホウレンソウの光合成特性と成長に及ぼす影響. 東京大学大学院農学生命研究科博士論文.

松本拓也, 伊藤博通, 白居祐希, 白石斉聖, 宇野雄一. 2010. 光質がレタス成長と野菜中硝酸イオン濃度に及ぼす影響. 植物環境工学. 22: 140–147.

文部科学省. 2010. 日本食品成分表 2010. 全国官報販売協同組合. 東京.

森邦男, 堀部和雄, 堀野善久, 磯村有宏, 米川嘉英, 安藤陽一郎, 松尾幸蔵, 近藤浩市. 1991. 植物移動栽培装置の開発研究 (第 1 報) 試作 1 号機の概要. 農業機械学会誌. 53: 65–72.

森康裕, 高辻正基. LED と LD 光がサラダナ生育に及ぼす影響. 植物工場学会. 11: 46-49. 1999.

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.

西村光雄. 1987. 光合成. 初版第 1 刷. 90–95. 岩波書店. 東京.

Okamura, K., Y. Matsuda, K. Igari, K. Kato, H. Asao, T. Matsui, E. Takita, K. Sawada, H. Fukuda, H. Murase. 2013. Effects of plant cultivation density and light intensity on the production of a vaccine against swine edema disease in transgenic lettuce. Environment Control in Biology. 51: 207–213.

Okano, T., T. Hoshi, T. Sekiyama. 1988. Vegetable growth and energy consumption in a vegetable factory using off-peak electricity. Acta Horticulturae. 229: 353–359.

Ohashi-Kaneko, K., M. Takase, N. Kon, K. Fujiwara and K. Kurata. 2007. Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and komatsuna. Environment Control in Biology. 45: 189–198.

大竹範子, 米田正, 鈴木廣志. 2015. 人工光型植物工場における赤青 LED と蛍光灯使用時の植物成長および消費電力の評価. 植物環境工学. 27: 213-218.

小山初枝，篠原温，伊東正．1999．気温および光強度がホウレンソウならびにサラダナのβ-カロテン濃度におよぼす影響．園学雑．68．414-420.

Porra, R. J., W. A. Thompson and P. E. Kriedemann. 1989. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. Biochimica et Biophysica Acta. 975: 384–394.

斎藤裕太，清水浩，中嶋洋，宮坂寿郎，大土井克明．2012．LED を使用した掻レタス栽培における赤色光をベースとした光質の影響．植物環境工学．24: 25–30.

酒井恭子．2010．UV 照射がモロヘイヤの生育，抗酸化能およびクロロゲン酸濃度に及ぼす影響．千葉大学園芸学部卒業論文.

澤井祐典，沖智之，西場洋一，奥野成倫，須田郁夫，大和陽一．2014．リーフレタスの DPPH ラジカル消去成分．九州沖縄農業研究センター報告．61. 23–34.

Schuerger, A., C. S. Brown, and E. C. Stryjewski. 1997. Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light. Annals of Botany. 79: 273–282.

庄子和博. 2010. 葉菜類の高品質化を目的とした光環境制御法に関する研究．千葉大学大学院園芸学研究科．博士論文.

庄子和博. 植物工場における人工光利用技術. 電気設備学会誌. 36: 732-735. 2016.

庄子和博，北崎一義，淨閑正史，橋田慎之介，後藤文之，吉原利一．2011．サニーレタスの生長,ポリフェノール含量および無機成分含量に及ぼすピーク波長の異なる 10 種 LED 光源の影響．日本生物環境工学会 2011 年札幌大会講演要旨．152–153.

鈴木真実，松尾誠治，梅田大樹，岩崎泰永．2014．CO_2 施用時の高い相対湿

度がキュウリの生育，光合成速度，窒素含量に及ぼす影響．日本冷凍空調学会論文集．31: 331–337.

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

高辻正基，森康裕．2011．LED 植物工場．日刊工業新聞社．東京．1–141．第 1 版.

常川悠子．2006．光源の青色光の割合および暴露量が赤系リーフレタスのアントシアニン含有量に及ぼす影響．千葉大学園芸学部卒業論文.

Yanagi, T., K. Okamoto and S. Takita. 1996. Effects of blue, red, and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. Acta Horticulturae. 440: 117–122.

Yorio, N.C., G. D. Goins, H. R. Kagie, R. M. Wheeler and J. C. Sager. 2001. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. HortScience. 36: 380–383.

Yu, X., H. Liu, J. Klejnot, and C. Lin. 2010. The cryptochrome blue light receptors. Arabidopsis Book. 8: e0135.

山田千晶. 2010. 閉鎖系システムにおける環境条件がラファノブラシカ‘長・野交 44 号’のグルコシノレート含有量および生育に及ぼす影響．千葉大学大学院園芸学研究科修士論文.

Zhang, G., S. Shen, M. Takagaki, T. Kozai, and W. Yamori. 2015. Supplemental upward lighting from underneath to obtain higher marketable lettuce (Lactuca sativa) leaf fresh weight by retarding senescence of outer leaves. Frontiers in Plant Science. 6: 1-9.

謝辞

本研究を実施，遂行ならびに論文の執筆するにあたり，主指導教員である千葉大学大学院園芸学研究科環境調節工学研究グループの後藤英司教授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，心から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大学院園芸学研究科の椎名武夫教授，同じく副査の松岡延浩教授，渡辺均准教授には貴重なご意見をいただきました．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晶子准教授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助教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．環境調節工学研究グループの 3 先生方には，連日にわたって夜遅くまでのご指導をいただきました．研究が思うように進まないときには，励ましの言葉をかけていただきました．先生方のバックアップがなかったら，私は博士号を取得できなかったと思います．ありがとうございました．

環境調節工学研究グループの秘書の重松久美子氏には，特に実験用物品の納入の際にお世話になりました．納期について，かなり無理を言いましたが，対応していただきましてありがとうございました．最後に，在籍していた環境調節工学研究グループの学生の皆様，特に博士後期課程の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．この場をお借りして，御礼を申し上げます．