

博士論文

収穫後の短時間近赤外光照射による農産物の蒸散抑制・品質保持に関する研究

2015年9月

高附 亜矢子

岡山大学大学院
環境生命科学研究科

目次

第 1 章 序論	
1-1 研究の背景	5
1-2 農産物の鮮度保持技術	6
1-3 研究の目的及び構成	10
第 2 章 環境要因および植物ホルモンが幼苗レタスの蒸散に及ぼす影響	
2-1. 緒言	13
2-2. 材料及び方法	14
2-2-1. 材料	14
2-2-2. 水分率低下曲線の算出方法	14
2-2-3. 最大気孔蒸散速度, クチクラ蒸散速度, 気孔閉鎖の急激さの算出方法	15
2-3. 光, 温度, 湿度が蒸散量に及ぼす影響 (実験 1)	15
2-3-1. 照射方法	15
2-4. 植物ホルモンが水分低下曲線に及ぼす影響 (実験 2)	15
2-5. 結果と考察	16
2-5-1. 光, 温度, 湿度が蒸散量に及ぼす影響 (実験 1)	16
2-5-2. 植物ホルモンが蒸散量に及ぼす影響 (実験 2)	19
2-6. 摘要	26
第 3 章 近赤外光短時間照射が幼苗レタスの蒸散に及ぼす影響	
3-1 緒言	29
3-2.材料及び方法	32
3-2-1. 材料	32
3-2-2. 蒸散率の算出方法	32
3-3. 光照射条件の検討	33
3-3-1. LED 光源からの照射波長が幼苗レタスの蒸散率に及ぼす影響	33
3-3-2. 照射強度と照射時間が幼苗レタスの蒸散率に及ぼす影響	33
3-3-3. 半値幅 10nm の狭帯域を使用した近赤外光照射が幼苗レタスの蒸散率に及ぼす影響	34
3-4. 保存条件の違いが幼苗レタスの蒸散率に及ぼす影響	34
3-5. 気孔開度の測定方法	35
3-5-1. 近赤外光照射が幼苗レタスの気孔開度に及ぼす影響(直接法)	35
3-5-2. 保持条件の違いが気孔開度に及ぼす影響(レプリカ法)	35
3-6. 近赤外光照射が活性酸素種 (ROS)に及ぼす影響	36
3-7. 結果と考察	37
3-7-1. 光照射がレタスの蒸散率に及ぼす影響	37
3-7-2. 近赤外光照射が幼苗レタスの気孔開度に及ぼす影響	42
3-7-3. 近赤外光照射が孔辺細胞の ROS 産生と気孔開度に及ぼす影響	46
3-8. 摘要	47
第 4 章 近赤外光短時間照射が成葉葉菜類の蒸散・品質に及ぼす影響	
4-1. 緒言	49

4-2. 材料および方法	50
4-2-1. 材料	50
4-2-2. 収穫後の近赤外光照射が葉菜類の蒸散率と気孔開度に及ぼす影響 (実験 1)	51
4-2-3. 収穫後の近赤外光照射が葉菜類の蒸散率と外観品質, 茎部硬度に及ぼす 影響 (実験 2)	51
4-2-4. 気孔開度測定	52
4-3. 結果および考察	53
4-3-1. 収穫後の近赤外光照射が葉菜類の蒸散と気孔開度に及ぼす影響 (実験 1)	53
4-3-2. 収穫後の近赤外光照射が葉菜類の蒸散と外観品質, 茎部硬度に及ぼす影響 (実験 2)	59
4-4. 収穫後近赤外光短時間照射の鮮度保持技術としての可能性	65
4-5. 摘要	66
第 5 章 近赤外光短時間照射が各種青果物の蒸散・品質に及ぼす影響	
5-1. 緒言	68
5-2. 材料および方法	69
5-2-1. 材料	69
5-2-2. 近赤外光照射方法および蒸散率の算出方法	69
5-3. 葉菜類 (結球春レタス)	69
5-4. 果菜類 (ナス, オクラ, キュウリ, 中玉トマト, ピーマン)	71
5-5. 果実類 (ビワ, ピオーネ, デラウェア, アセロラ, モモ, ミカン)	74
5-6. 根菜 (ニンジン)	76
5-7. 結果	77
5-7-1. 葉菜類 (結球春レタス)	77
5-7-2. 果菜類 (ナス, オクラ, キュウリ, 中玉トマト, ピーマン)	82
5-7-3. 果実類 (ビワ, ピオーネ, デラウェア, アセロラ, モモ, ミカン)	90
5-7-4. 根菜 (ニンジン)	104
5-8. 摘要	105
第 6 章 近赤外光短時間照射が花卉の蒸散に及ぼす影響	
6-1. 緒言	108
6-2. 材料および方法	110
6-2-1. 供試材料	110
6-2-2. 近赤外光照射がバラ ‘サムライ 08’ 切り花の吸水量・相対新鮮重・開花, 花卉の変色および萎れに及ぼす影響 (実験 1)	110
6-2-3. 近赤外光照射および相対湿度がバラ ‘サムライ 08’ 切り花の最大吸水量, 相対新鮮重, 日持ち日数に及ぼす影響 (実験 2)	111
6-2-4. 近赤外光照射部位がバラ ‘サムライ 08’ 切り花の新鮮重, 開花, 花卉の萎れ および変色に及ぼす影響 (実験 3)	111
6-2-5. 近赤外光照射方法がバラ ‘サムライ 08’ 切り花の新鮮重, 開花, 花卉の萎れ および変色に及ぼす影響 (実験 4)	112
6-2-6. 近赤外光照射が ‘サムライ 08’ 切り花の花弁重量と花卉におけるエクスパ ンションとキシログルカンエンドトランスグリコシラーゼ/ ハイドロラーゼの	

発現量に及ぼす影響（実験 5）	112
6-3. 結果	113
6-3-1.近赤外光照射がバラ‘サムライ 08’切り花の吸水量・相対新鮮重・開花、 花弁の変色および萎れに及ぼす影響（実験 1）	113
6-3-2.近赤外光照射および相対湿度がバラ‘サムライ 08’切り花の最大吸水量、 相対新鮮重、日持ち日数に及ぼす影響（実験 2）	116
6-3-3.近赤外光照射部位がバラ‘サムライ 08’切り花の新鮮重、開花、花弁の 萎れおよび変色に及ぼす影響（実験 3）	118
6-3-4.近赤外光照射方法がバラ‘サムライ 08’切り花の新鮮重、開花、花弁の 萎れおよび変色に及ぼす影響（実験 4）	120
6-3-5. 近赤外光照射が‘サムライ 08’切り花の花弁の重量とエクспанシン およびキシログルカンエンドトランスグリコシラーゼ/ ハイドロラーゼの 発現量に及ぼす影響	122
6-4. 考察	124
6-5. 摘要	128
第 7 章 本研究で得られた成果および今後の展開と課題	129
引用文献	133
謝辞	146

第 1 章

序論

1-1 研究の背景

農作物の生産・流通・貯蔵において鮮度保持は極めて重要である (Harvey, 1978, 1981). 農作物の鮮度は例えば, 重量減少量で評価することができる (加藤ら, 1983). 多くの農作物において, 収穫時の重量に対し 5%の減少がおこると, 新鮮さを示す張りがなくなり光沢が消え, しわが現れるなど, 単に水分が失われるだけでなく商品としても品質が損なわれる. 農作物の鮮度を保持する技術として, 植物の呼吸, 蒸散を抑制する方法として冷蔵やフィルム等を用いたガス環境の制御方法が使用されている (Barth and Zhuang, 1996 ; 永井ら, 1997 ; 中野ら, 2001). その他にも, 農作物の鮮度, 老化, 成熟に関する植物ホルモンであるエチレンの生成阻害剤 (アミノエトキシビニルグリシン(AVG)) や作用阻害剤(チオ硫酸銀錯塩, 1-メチルシクロプロペン (1-MCP (Methylcyclopropene))) が使用されている. また光を利用した鮮度保持方法としては可視光の弱光照射によって光合成を行わせ, 消費されたエネルギーを補うという鮮度保持方法がある (藤原, 2008). しかし農作物の流通が多様化する中で更なる鮮度保持技術が求められている. 収穫後から購入までの間に流通過程で廃棄される割合の減耗率は 2012 年の農林水産省の調べによると食品が 3.8%であるのに対し野菜, 果実は 10.3%, 16.6%と非常に高く多くの農作物が収穫から貯蔵・流通を経て店頭に並ぶまでに廃棄されている. よって収穫後から流通中の鮮度を保つことは減耗率の減少にもつながる. 光照射による鮮度保持技術は, 使用方法が簡単で安全であり場所を選ばないためフィルム包装や MA (Modified Atmosphere) 貯蔵, 低温流通施設など既存の技術や施設に追加したり店頭等での使用が可能である. また, 近年, 食に対する関心が高まる中, 消費者の味や鮮度, 安心安全への関心も高い. 農作物の生産や流通には, 鮮度保持方法や出荷時など貯蔵方法が重要であり, 新たな鮮度保持技術の重要性と波及効果は大きいと考えられる.

1-2 農産物の鮮度保持技術

消費者を対象としたアンケートで「野菜は何を基準にして買うか」という質問に対し「鮮度がいいから」という回答が圧倒的に多い（加藤ら，1983）．消費者にとって鮮度の指標は漠然としており色や味といった感覚的なもののようにも感じるが糖度や酸度，大きさといった品質の一部である．生産者にとって農作物の品質は規格という言葉に置き換えられている．生産者はその決められたより高い基準に合う農産物を生産するため土づくり（有機農法，無肥農法）から病害防除まで大変な努力を払っているが，その後の収穫から出荷，輸送，販売を経て消費者に届くまで必ずしも適切な取扱いがされているとは言えない面も見受けられる．

農作物は収穫後も呼吸をして酸素を吸い二酸化炭素を排出して生命を維持している．生きた植物体を扱っているという意識の不足が収穫から流通中の廃棄ロスを増加させているのかもしれない．野菜の品質低下の原因はおもに呼吸（永井ら，1997），蒸散作用（加藤ら，1983），微生物（Ayara-Zavala, et al., 2008）による品質低下である．そのため蒸散抑制を目的とした予冷やガス環境調節を目的とした包装（Barth and Zhuang, 1996；永井ら，1997；中野ら，2001）や CA（Controlled Atmosphere）・MA 貯蔵（Harvey, 1981），エチレンなどの老化を促進する植物ホルモンの生成阻害剤である AVG（Aminomethoxyvinyl glycine），作用阻害剤であるチオ硫酸銀錯塩（STS：Silver thiosulfate），1-MCP，葉の品質劣化予防法を目的として弱光可視光照射など多くの鮮度保持方法が検討されこれまで使用されてきた（樽谷，1963；Church and Parsons, 1995；Shimazu and Ichimura, 2005）．

呼吸作用の強弱は，温度の高低によって左右され一般的には温度が低いほど呼吸作用は低下する．野菜の呼吸型はおもにキャベツ，シュンギクなどの漸減型，トマトなどのクライマクテリック型，イチゴなどの末期上昇型の 3 つに分かれる．中でもクライマクテリック型と末期上昇型は少なくほとんどが漸減型に属する．そこで初期の呼吸による発熱を抑制するため予冷が使用されている．冷却方式には大き

く分けて 3 つあり冷風冷却，真空予冷，冷水冷却である（石井，1984；大久保，1988）。さらに冷風冷却には強制通風式と差圧通風式がある。強制通風冷却は冷気を倉庫内に積み込まれた野菜に満遍なく接触するようにして冷却する方法である。建設費が比較的安い反面，冷却に時間がかかり温度むらができやすい。差圧通式冷却は庫内に冷気を強制的に循環させ孔あき段ボールの中に詰められた野菜の間を抜けていくようにして冷気と野菜の熱交換速度を速めたもので強制通風冷却と比較すると 2~6 倍冷却速度が速いが，収容能力は 60~70 %低い。この方式は差圧の仕方により中央吸込型，壁面吸込型にわかれ，さらに中央吸込型は差圧室型，差圧ファン組込型，移動型，トンネル型などいろいろな型が工夫されている。真空冷却方式は，野菜から強制的に水分を蒸発させその時の野菜の気化熱が奪われるのを利用して冷却する方法で冷却速度は非常に速く冷却ムラも少ない。例えば，25°C のレタスを 3°C まで 20 分程度で冷やすことができる。しかし強制通風冷却方式の 3~4 倍と建設費が高いのが最大の短所である。また，体積の割に表面積が小さいものや植物体の構造としてクチクラ層が発達したトマトなどは水分が飛びにくく冷えにくいいため，果菜類や根菜類には不向きである。さらに，品目や産地によってはしおれが目立つこともあるため同じ品目だからといって同じ真空冷却方式で好結果が得られるとは限らない。この方式は真空ポンプで吸引する方法と，スチームエジェクター型と呼ばれるスチームをノズルから噴出することにより吸引する方法があり前者が多く使用されている。冷水冷却方式は冷水シャワーや氷水浸漬により冷却する方式であり熱伝導率が 0.51kcal/mh°C と高いため冷却速度が早く萎れによる品質劣化が生じない反対象野菜が水でぬれることが最大の短所である。建設費は真空冷却方式に比べると安価であり，収穫後皮を洗浄するニンジンなどに採用されている（高野，1976）。

収穫後ほとんどの農作物が包装される。包装には外装や荷造りなどに使用される段ボールやコンテナなどの輸送包装（岩元ら，1977）と品目ごとにプラスチックフ

フィルム等で包装される販売包装がある（中野ら，2001）．輸送包装は安く丈夫で運搬しやすいなどの点から主に段ボール箱が使用されているが中に詰める野菜や果実の種類，産地，出荷期の差によっても大きさを変えることが多く，現在青果物で使用されている段ボール箱の種類は，3000 種以上にもなる．一方，販売包装の主な目的は蒸散抑制による目減り防止効果による鮮度保持効果であり，野菜の出荷にはポリエチレン袋を使用し個別包装や折込包装される（永井ら，1997；Ayara-Zavala, et al., 2008）．現在，ほとんどの農作物で使用されているのは密封ポリ袋包装ではガス障害により腐敗促進されることも多く品目によっては CA 貯蔵効果は期待できないため有孔ポリ袋包装が使用されてきた（Kubo et al., 2000）．CA 貯蔵はおもにリンゴの長期貯蔵に採用されている．冷蔵庫の中の空気組成を低酸素，高炭酸ガスに変えることにより青果物の呼吸を最小限に抑えることにより鮮度低下による食味が落ちるのを防ぐ方法である．

1-MCP は果実の成熟および老化を促進する植物ホルモンの一種であるエチレンの作用阻害剤でリンゴでは冷蔵と併用することで高い鮮度保持効果が得られている．他にもナシやカキで日持ち性が延長されることが報告されている（Nakano et al., 2003）．切り花の老化には植物ホルモンであるアブシジン酸とエチレンが増加するが，チオ硫酸銀錯塩はエチレン受容体に作用しエチレンの結合を阻害するため作用阻害剤としてカーネーションやデルフィニウム，ユーストマ，ブルースターなど多くの品目で花持ちをよくすると報告されている（平谷ら，2002；Shimazu- Yumoto and Ichimura, 2006；黒島ら，2008）．また，収穫後葉菜類は暗黒下に貯蔵されることが多いが光合成ができないためにクロロフィルの劣化が起これ退色する．そこで低温貯蔵中に弱い可視光を照射することで光合成を維持させクロロフィルの分解を抑制し品質保持する品質保持方法もある（細田ら，1981；細田ら，1983；上田，2003；太田ら，2008）．

これまで収穫後農作物における既存の鮮度保持技術について述べてきた．収穫さ

れた農作物は収穫後も呼吸し生命を維持しているため、上述したように多くの鮮度保持技術が適用されてきた。これまで予冷、包装、薬剤処理、光照射について既存の鮮度保持技術について述べてきたが収穫された農作物は品種が異なることに加え、大きさや形が異なるなど個体差があるため全ての農作物において十分な鮮度保持効果を発揮することは難しい場合も見られる（永井ら，1997；加藤ら，1983）。そこで本研究では品質低下の原因である呼吸，蒸散作用，微生物による品質低下のうち蒸散作用に焦点を当て光を使用した新たな鮮度保持技術の研究を行った。

1-3 研究の目的及び構成

本研究では光合成に利用されない近赤外光（波長：850 nm～940 nm）を用い鮮度保持効果の可能性について検討した。近赤外光は光の中でも透過性が高く赤外線のような熱を放出しない。そのためフィルム包装など既存の技術に加えることができる。また発光ダイオード（LED）は半永久的であるため比較的導入コストも安い。収穫後の青果物は出荷から輸送を経て消費者の口に入るまで呼吸などの生理活動によりエネルギーを消耗するだけでなく輸送中の温度変化などによっても左右される（加藤ら，1983）。農作物は品目が同じでも個体ごとに個体差があり上述した既存の多くの鮮度保持技術でも全ての品目を同じフィルム包装や農作物を一か所に集めて一度に行う予冷処理では十分ではない場合も少なくない（永井ら，1997）。また，店頭では低温貯蔵されるが農作物の移動中におこる温度や湿度などの環境変化すべてを調節できる場合は少ない。そこで比較的安価で半永久的寿命を持つ LED を使用し収穫後農作物への照射による鮮度保持効果の影響を調べた。

まず，モデル農作物として代表的な葉菜類であるレタスを対象に，環境要因および植物ホルモンが幼苗レタスの蒸散に及ぼす影響について調べた。環境要因である温度・湿度・光及び植物ホルモンであるアブシジン酸（ABA），ジャスモン酸メチル（JA-Me），オーキシシン（2,4-ジクロロフェノキシ酢酸；2,4-D），ブラシノライド（BL），エチレン（エスレレ），ジベレリン（GA3），ベンジルアデニン（BA）が幼苗レタスの蒸散に及ぼす影響について水分低下曲線から気孔蒸散速度，クチクラ蒸散速度，気孔閉鎖の急激さを求めた。次に，幼苗レタスの蒸散を抑制する近赤外光照射条件の適正化検討を行った。「しおれ」に伴う鮮度低下の早い幼苗レタスを用い，各種波長（青；470nm，緑；530nm，赤；660nm，遠赤色光；730nm，近赤外光；850nm）の LED 光源等を用いて光照射後に貯蔵し，貯蔵 1 日後における重量減少率（蒸散率）より「しおれ」の低減効果を調べた。植物はフィトクロムやフォトトロピンなどセンサータンパク質を介して種々の光環境に応答しており，これまでに成育中の植物の赤色光や青色

光，遠赤色光の受容や応答，シグナル伝達については，光合成，生育制御などの観点から詳細に検討されてきた（Darwin, 1881 ; Sharkey and Raschke, 1981 ; Briggs, 2002）.

しかし，光合成に利用されない近赤外光領域に対する応答についてはほとんど研究されていない．そこで，近赤外光が特異的に蒸散抑制を引き起こすことを確かめるためキセノンランプと干渉フィルターを組み合わせた単色光を用い近赤外光の蒸散抑制効果を確認した．また最も安定的に鮮度保持効果のある照射条件を照射強度と照射時間を変化させて検討し，近赤外光照射による蒸散率抑制効果のメカニズムの一部は活性酸素種（ROS）を介した気孔閉鎖によるものであることを示した．

次に，近赤外光照射による鮮度保持技術を実用化に近づけるため商品化レベルの葉菜類を対象として輸送中やショーケースでの試験を行った．さらに，幼苗レタスで観察された効果について果菜類，果実類，花卉類でも検討した．評価は水分率減少に伴う蒸散量抑制効果を主体とし，他の指標としてしおれ，硬度，外観評価を用いた．その結果，近赤外光照射による鮮度保持効果は化学的，物理的方法とは異なり植物側の反応を利用した方法であるため対象物や個体によって効果の大小はあるが確実に鮮度保持および品質保持効果を確認した．

第 2 章

環境要因および植物ホルモンが幼苗レタスの蒸散に
及ぼす影響

2-1. 緒言

植物の生活は動くことができないため一か所において一生のサイクルが営まれるので、環境が悪く変化しても動くことができないため環境に適応しなければならない。そのため植物は特有の生理的能力を持つ。環境の変化に対応する反応には比較的短時間に起こる成長反応や膨圧運動などの気孔開閉や屈性、長時間かけて起こる酵素の誘導や花芽、発芽などがある (Darwin, C., 1881 ; Hsiao and Allaway, 1973)。環境要因には光、温度、湿度などがあり植物は常にそれらの変化を感じ取り対応している。植物は特に光には様々な反応をする (He et al., 2006; Hashimoto-Sugimoto et al., 2013)。例えば、光エネルギーを化学エネルギーにして取り込む光合成や、レタス種子の発芽に 660 nm の赤色光が有効であるが、730 nm の近赤外光によって打ち消される。また青色光によって気孔は開口する。さらに、気温が高いと植物の活動も活発になり呼吸や光合成により気孔が開き蒸散量が増える (永井ら, 1997)。蒸散は葉の内部の気相空間の水蒸気濃度と外気の水蒸気濃度の差によって濃度の高い方から低い方へ水分が拡散することによっておこるため、湿度が低いほど蒸散が大きくなる。一方、植物にとって水は生命活動になくてはならない。成長中の植物にとって成重量の約 90%は水であるから炎天が続いて雨が降らないとたちまち水分を失って枯れてしまう。水分不足に対する植物の素早い対抗手段に気孔反応がある。気孔は、葉表皮に存在する小さな穴であり、2つの孔辺細胞が唇側に向かい合った形をしている。この2つの孔辺細胞が開閉することで植物内の水分調整をしている。植物が水不足におかれると ABA の量が急増し気孔が閉鎖することで蒸散が抑制され植物体内から水が逃げるのを防ぐ。植物体内には7種の植物ホルモンが共存しておりそれらの相互作用により環境応答が行われている (Acharya and Assmanm, 2009 ; Yin et al., 2013)。伸長成長、果実の肥大成長に働くオーキシシン (IAA, 2, 4-D), 伸長成長促進作用, 頂芽優勢等に働くジベレリン (GA_3), 細胞分裂促進, 気孔の開閉等に働くサイトカイニン, 種子の発芽, 果実の成熟促進等に働くエチレン, 休眠および種子の発芽, 気孔閉孔作用等に働くアブ

シジン酸 (ABA), 細胞分裂と増殖, 種子の発芽促進等に働くブラシノステロイド, 老化促進や生育阻害, 病傷害応答に関わるジャスモン酸 (Ja-Me) がある. 植物ホルモンは植物にとって植物が正常な生命活動を行うためには不可欠である. しかし生育中の植物について光, 温度, 湿度および植物ホルモンの影響について調べた研究は多いが, 収穫後について調べた例はほとんどない. そこで本研究では環境要因および植物ホルモンが基部より切り離れた幼苗レタスの蒸散に及ぼす影響について調べた. 環境要因は光, 温度, 湿度とし植物ホルモンはアブシジン酸 (ABA), ジャスモン酸メチル (JA-Me), オーキシシン (2,4-ジクロロフェノキシ酢酸; 2,4-D), ブラシノライド (BL), エチレン (エスレール), ジベレリン (GA3), ベンジルアデニン (BA) の 7 つの影響について最大気孔蒸散速度, クチクラ蒸散速度, 気孔閉鎖の急激さに及ぼす影響を水分低下曲線より調べた.

2-2. 材料及び方法

2-2-1. 材料

レタス品種 ‘ノーチップ’ を用い, 乾燥ストレスがかからないようにポリウレタンベッドに種子を播種後, 底面灌水 (大塚処方養液; EC 1.2 ds/m) によって本葉が 2 枚完全に展開するまで生育させた. 栽培条件としては蛍光灯 (FL40SS・W/37, (株) 東芝) を用い照度 $140 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 12 時間日長, 温度 23°C , 相対湿度 70 % に設定したグロースチャンバー (MLR-350H, パナソニック ヘルスケア (株)) で 21 日間育成した. 約 400 mg に生育した時点でレタス幼苗を基部より切り取り試験に供した.

2-2-2. 水分率低下曲線の算出方法

方法は Xu らの方法 (Xu et al., 1994) を参考にした. 幼苗レタスの基部から切断後切り口から水分が蒸散しないようにワセリンを塗りすぐに重量を測定した. その後, プラスチック容器に並べ 15 分後, 30 分後, 60 分, 90 分後, 120 分後, 150 分後, 180 分後に重量を測定し 70°C で幼苗レタスを 12 時間乾燥させ以下の式より相対含水

率を測定した． 相対含水率 (%) = $100 \times [(\text{切断直後の新鮮重}) - (\text{乾燥重})] / [(\text{切断直後の新鮮重}) - (\text{乾燥重})]$

2-2-3. 最大気孔蒸散速度，クチクラ蒸散速度，気孔閉鎖の急激さの算出方法

水分率低下曲線は三木・廣部の重量法（三木・廣部，2009）を用い，横軸に時間，縦軸に相対含水率の値をとることで作成した．水分低下曲線は蒸散初期の傾きが急な直線（L1）と蒸散後期に観察される傾きが緩やかな直線（L2）の2本の直線からなる．主に葉菜類の蒸散は気孔の開閉によっておこるクチクラ蒸散とクチクラ相からおこるクチクラ蒸散からなり直線 L1 の傾きを最大気孔蒸散速度とし直線 L2 の傾きをクチクラ蒸散速度とした．

2-3. 光，温度，湿度が蒸散量に及ぼす影響（実験1）

2-3-1. 照射方法

幼苗レタスを基部より切断後各光条件に保持し光，温度，湿度がレタス幼苗の蒸散量に及ぼす影響について検証した．光環境が幼苗レタスの蒸散量に及ぼす影響では，明環境は，蛍光灯（FL40SS・W/37，（株）東芝）を用い照度 $140 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，温度 10°C とし，暗所は蛍光灯を消灯し行った．温度環境と湿度環境が蒸散量に及ぼす影響について調べた試験では，温度は 10°C と 25°C とし湿度は 60 %RH と 90 %RH とした．すべて幼苗レタス 6~8 個体をプラスチックボックスに入れグロースチャンバー（MLR-350H，パナソニック ヘルスケア（株））に3時間保持した．

2-4. 植物ホルモンが水分低下曲線に及ぼす影響（実験2）

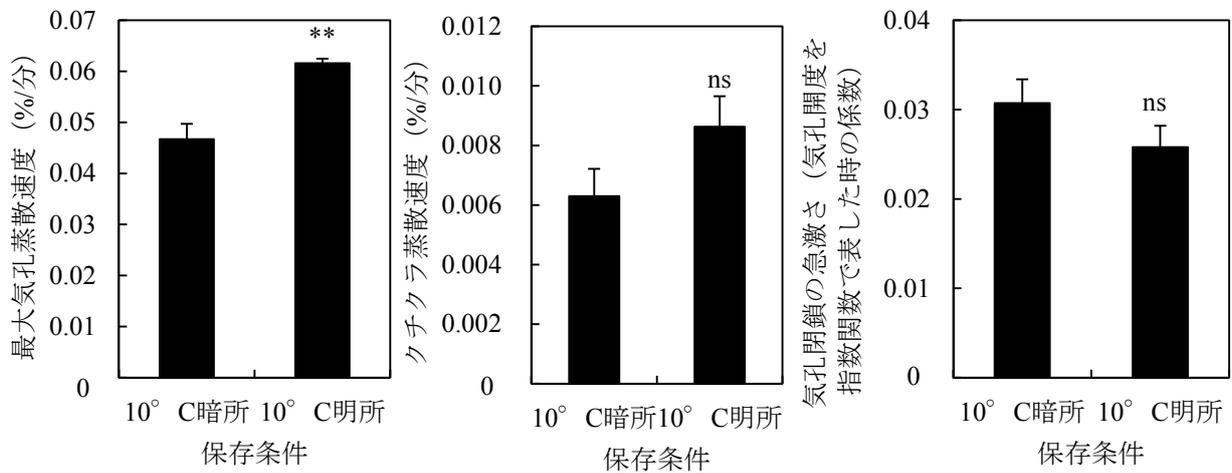
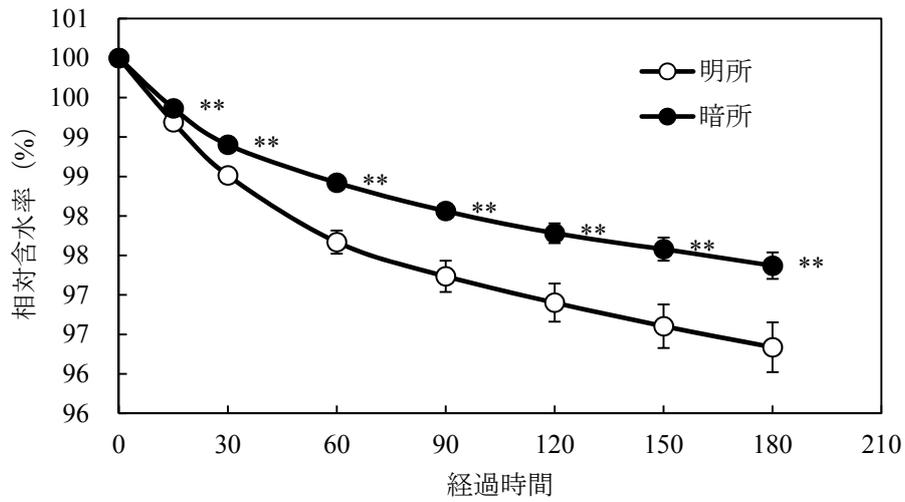
植物ホルモンは，アブシジン酸（ABA），ジャスモン酸メチル（JA-Me），オーキシシン（2,4-ジクロロフェノキシ酢酸；2,4-D），ブラシノライド（BL），エチレン（エスレル），ジベレリン（GA3），ベンジルアデニン（BA）を使用した．各植物ホルモンは 1 ppm ABA，2 ppm JA-Me，2 ppm 2,4-D，0.01 ppm BL，1 ppm BA，10

ppm エスレレ, 1 ppm GA を大塚溶液 (EC 1.2 ds/m) に溶解し各濃度になるように調整した。浸漬環境はすべてレタス幼苗を栽培した条件と同じ 23°C 明所に設定したグローブチャンバー (MLR-350H, パナソニック ヘルスケア (株)) 内で 3 時間浸漬させた。浸漬後幼苗レタスの基部より切り取り, 温度 23°C 明所に設定したグローブチャンバー (MLR-350H, パナソニック ヘルスケア (株)) に 3 時間保持した。レタス幼苗は 6~8 個体をプラスチックボックスに入れ湿度は 98 %以上に保持した。

2-5. 結果と考察

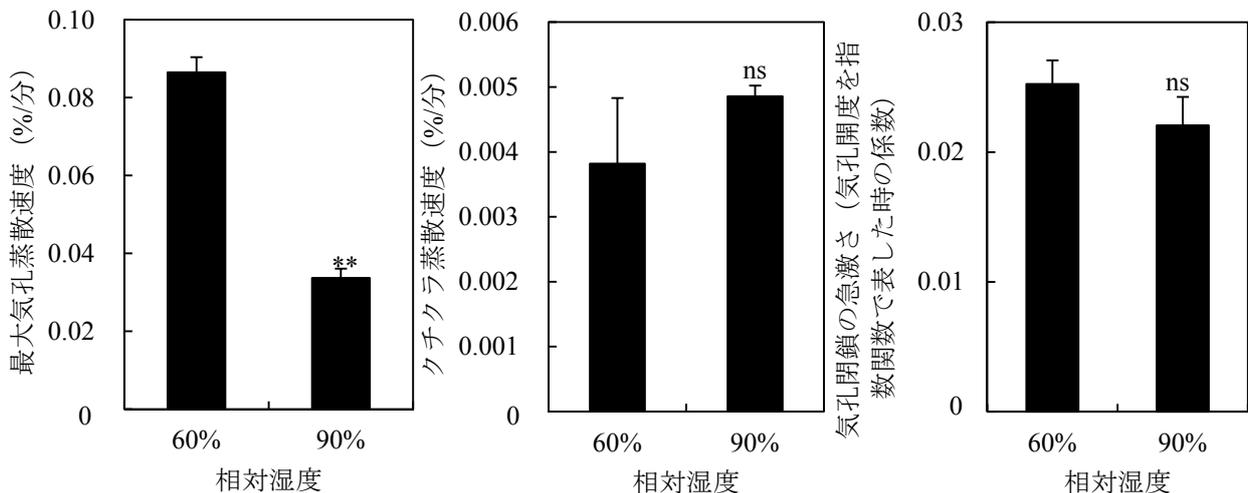
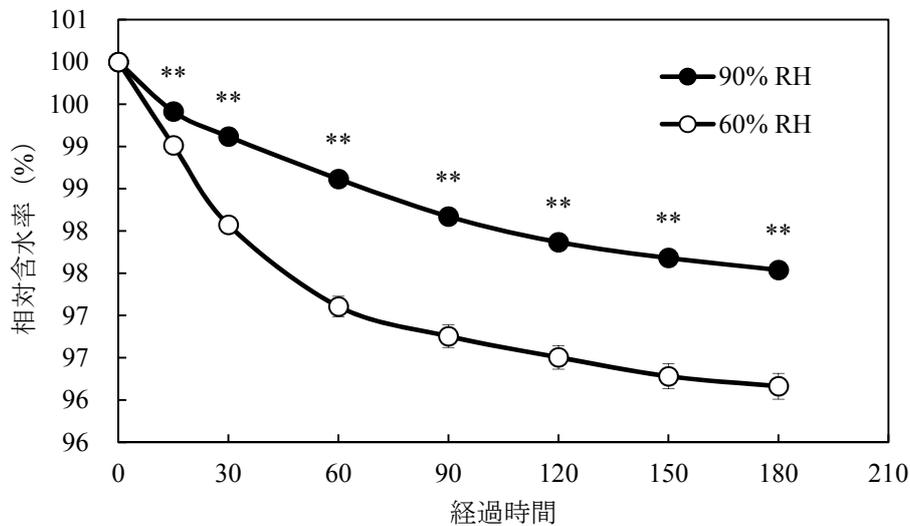
2-5-1. 光, 温度, 湿度が蒸散量に及ぼす影響 (実験 1)

明所と暗所では, 明所の方が相対含水率は急激に低下した。暗所条件と比較すると最大気孔蒸散速度は明所において有意に高く気孔閉鎖の急激さとクチクラ蒸散速度に差は見られなかった (第 1 図)。葉からの蒸散はおもに気孔からの気孔蒸散とクチクラ層からのクチクラ蒸散とからなりほとんどは気孔からの蒸散が占めている。最大気孔蒸散速度が明所条件で有意に高かったことから気孔が光に反応して開き蒸散が上昇し急速に相対含水率が低下したと考えられる。



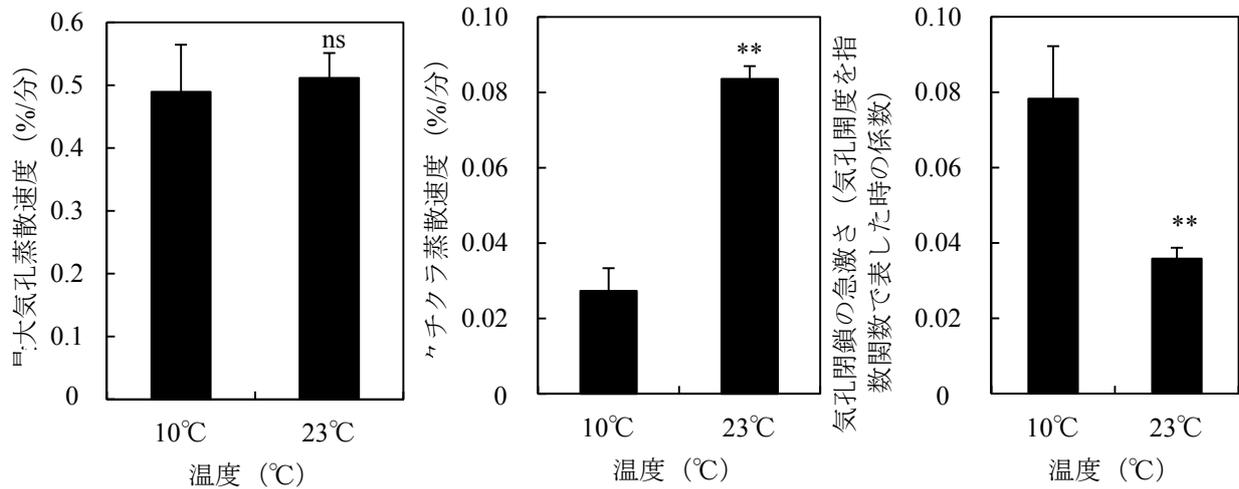
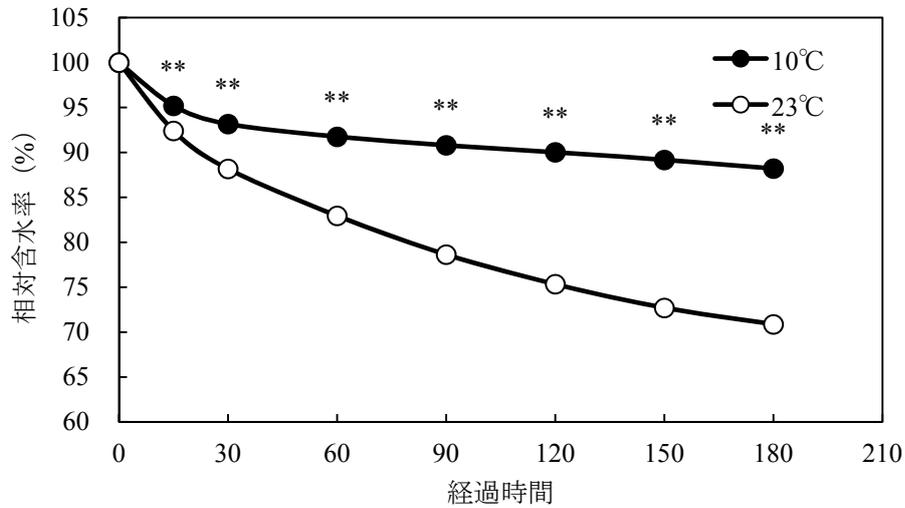
第1図 光環境がレタス幼苗‘ノーチップ’の相対含水率に及ぼす影響
 保存条件； 10°C 暗所， 10°C 明所；光源；蛍光灯（TOSHIBA FL40SS・W/37），照
 度； $140 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ， 3 時間， 図中の縦棒は標準誤差を示す（ $n=6$ ）， ** $P \geq 0.01$ ，
 $*P \geq 0.05$ ， ns は有意差なし（t-検定）

高湿と低湿では， 60 %RH の低湿条件の方が急速に相対含水率が減少した（第2
 図）。 高湿条件と低湿条件を比較すると最大気孔蒸散速度は低湿条件において有意に
 高く気孔閉鎖の急激さとクチクラ蒸散速度に差は見られなかった。 葉の内部の細胞間
 隙の水蒸気濃度と外気の水蒸気濃度の差が大きくなる 60 %RH の方が気孔が開口し
 90 %RH と比較して有意に気孔蒸散速度が高くなったと考えられる。



第2図 湿度環境がレタス幼苗‘ノーチップ’の相対含水率に及ぼす影響
 保存条件；23℃暗所，相対湿度；60%，90%，3時間，図中の縦棒は標準誤差を示す
 (n=6, ** $P \geq 0.01$, * $P \geq 0.05$, ns は有意差なし (t-検定))

高温と低温では23℃高温の方が急激に相対含水率は低下した(第3図)。10℃低温条件と比較すると最大気孔蒸散速度には差は観察されなかったが高温条件の方がクチクラ蒸散速度と気孔閉鎖の急激差に有意な差が観察された。これは23℃の高温により蒸散呼吸が盛んになり10℃低温条件と比較して素早く気孔が閉じたものと考えられる。さらに過度の蒸散によりクチクラ層からの蒸散も促進されたと考えられる。

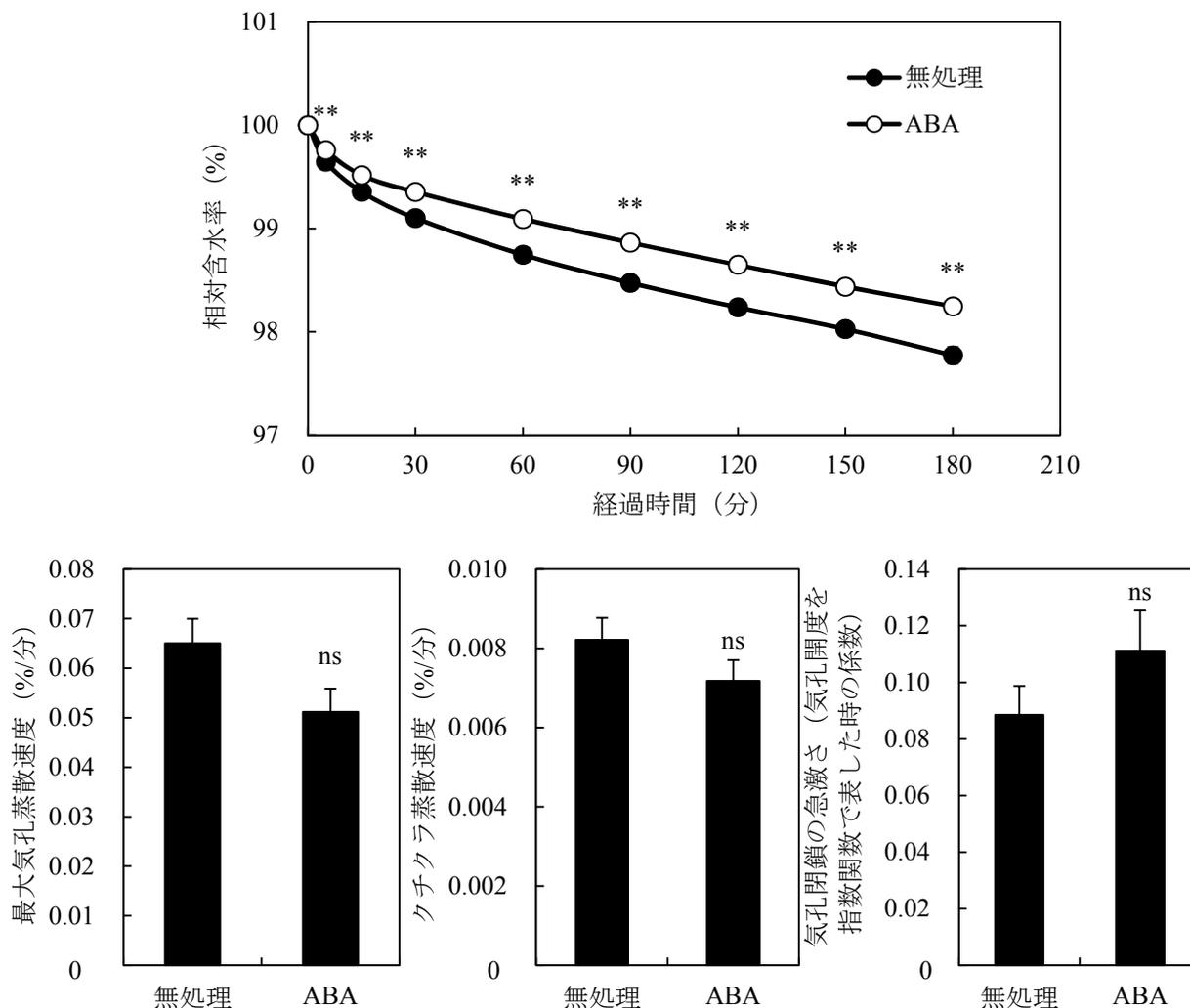


第3図 温度がレタス幼苗‘ノーチップ’の相対含水率に及ぼす影響
 保存条件； 10°C 暗所・66% RH, 23°C 暗所・99% RH, 貯蔵時間； 3 時間. 図中の縦棒は標準誤差を示す (n=6, ** $P \geq 0.01$, * $P \geq 0.05$, ns は有意差なし (t-検定))

2-5-2. 植物ホルモンが蒸散量に及ぼす影響 (実験 2)

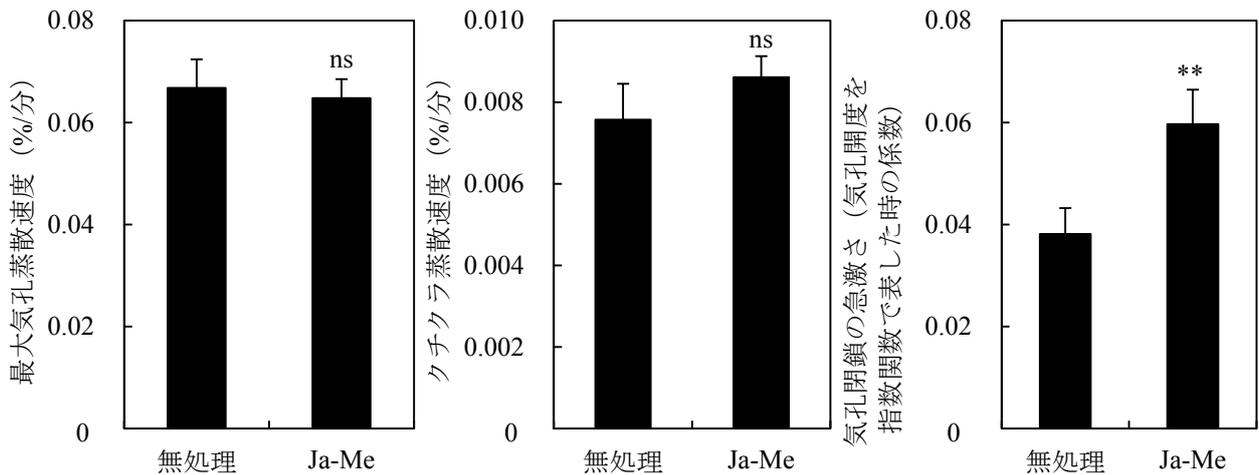
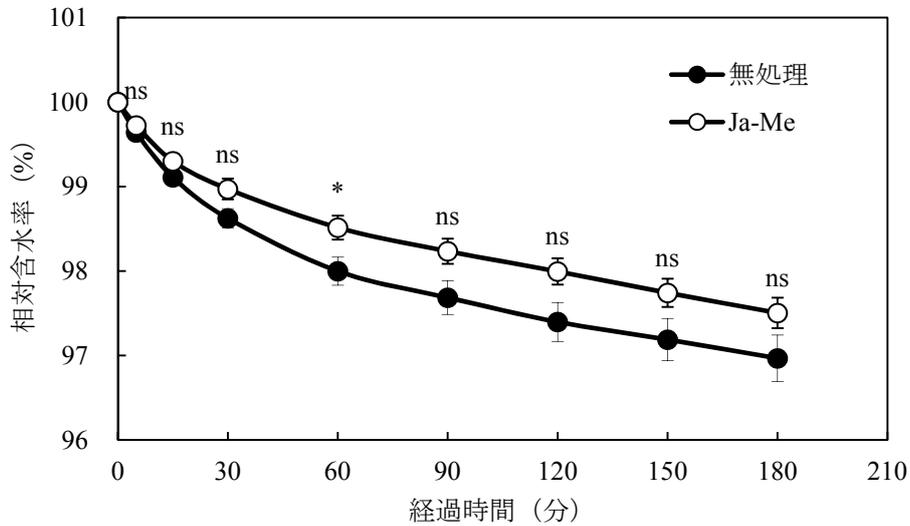
ABA を処理した幼苗レタスの相対含水率は無処理と比較して緩やかに低下した (第4図). 最大気孔蒸散速度, クチクラ蒸散速度, 気孔閉鎖の急激さに ABA 処理区と対照区の有意差はなかった. ABA は植物が乾燥にさらされると合成され孔辺細胞から K^+ の流出が起こり気孔が閉鎖する. 外から ABA を処理した場合も気孔閉鎖は誘導される. 今回の実験でも最大気孔蒸散速度, クチクラ蒸散速度, 気孔閉鎖の急激さ

に有意差はなかったが、ABA を処理した方が最大気孔蒸散速度およびクチクラ蒸散速度は遅く、気孔開度の急激差は高く気孔は早く閉じる傾向が観察された。



第4図 ABA がレタス幼苗 ‘ノーチップ’ の相対含水率に及ぼす影響
 植物ホルモン; 1ppm ABA/大塚 A (EC1.2), 底面灌水; 3時間, 23°C 明所, : 光源; 蛍光灯 (TOSHIBA FL40SS・W/37), 照度; 140 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 保存条件; 23°C 明所: 上記条件と同じ, 3時間, 図中の縦棒は標準誤差を示す (n=6, ** $P \geq 0.01$, * $P \geq 0.05$, ns は有意差なし (t-検定))

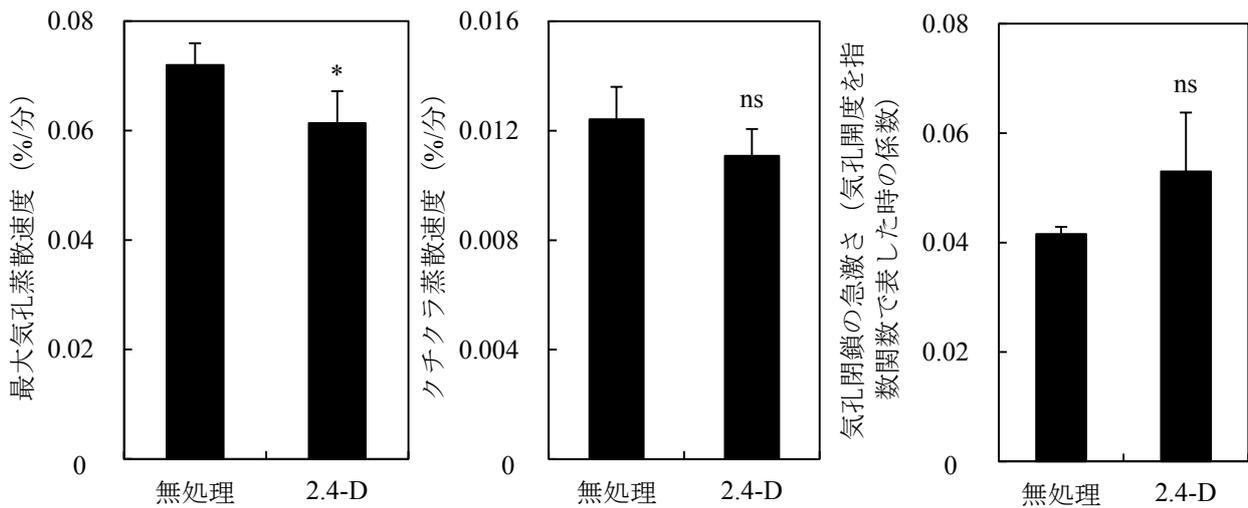
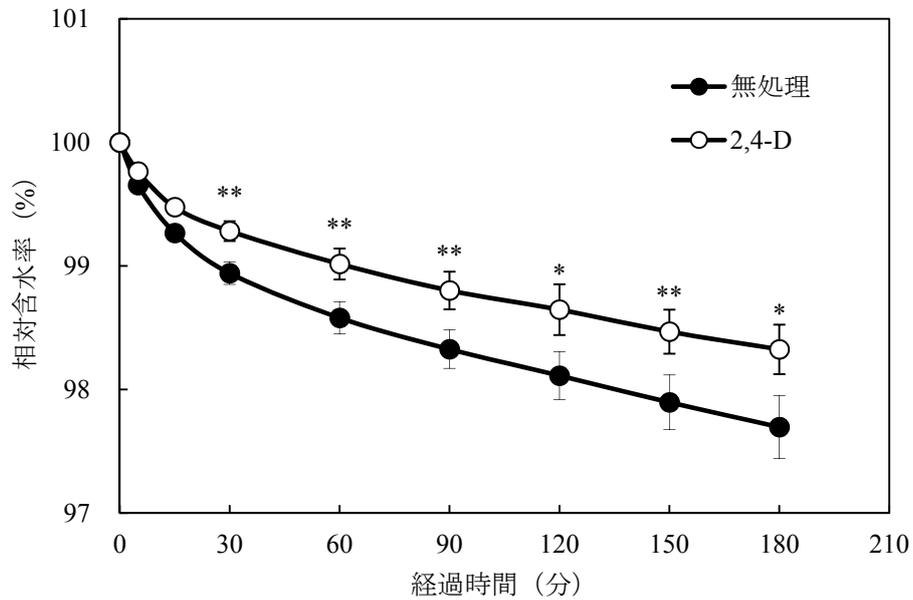
Ja-Me を処理した幼苗レタスの相対含水率は無処理と比較して緩やかに低下した (第5図). 最大気孔蒸散速度, クチクラ蒸散速度に有意な差はなかったが気孔閉鎖の急激さは無照射と比較して Ja-Me を処理した方が有意に高く気孔は早く閉じた。



第5図 Ja-Me がレタス幼苗 ‘ノーチップ’ の相対含水率に及ぼす影響

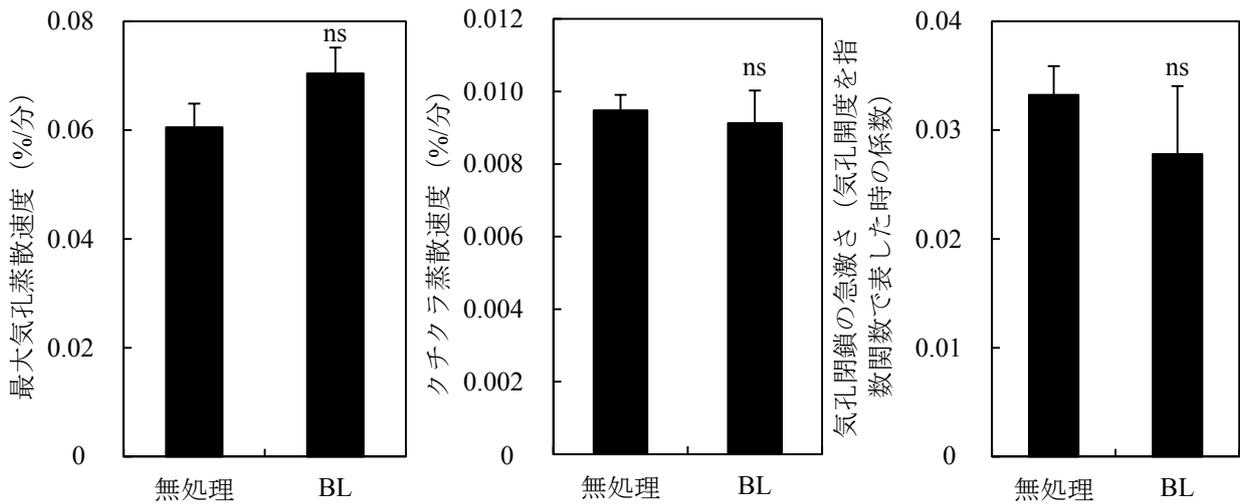
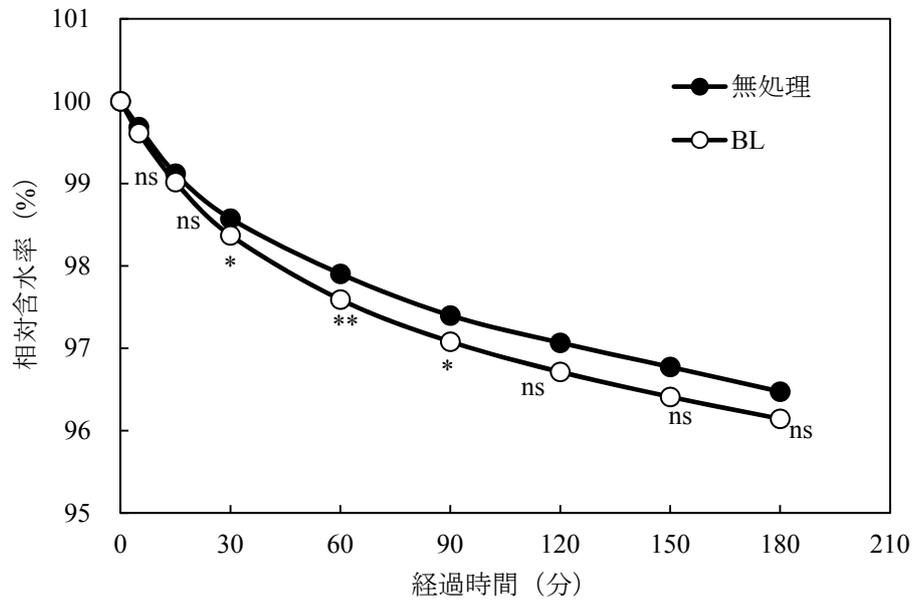
植物ホルモン；2 ppm Ja-Me/大塚 A (EC1.2)，底面灌水および保存条件は第4図脚注参照，図中の縦棒は標準誤差を示す (n=6, ** $P \geq 0.01$ ，* $P \geq 0.05$ ，ns は有意差なし (t-検定))

2.4-D を処理した幼苗レタスの相対含水率は無処理と比較して緩やかに低下した (第6図)。最大気孔蒸散速度は無照射と比較して有意に低くクチクラ蒸散速度と気孔閉鎖の急激さに有意差はなかった。



第6図 2,4-Dがレタス幼苗‘ノーチップ’の相対含水率に及ぼす影響
植物ホルモン；2 ppm 2,4-D /大塚 A (EC1.2)，底面灌水および保存条件は第4図脚注参照，図中の縦棒は標準誤差を示す (n=6)，** $P \geq 0.01$ ，* $P \geq 0.05$ ，nsは有意差なし (t-検定)

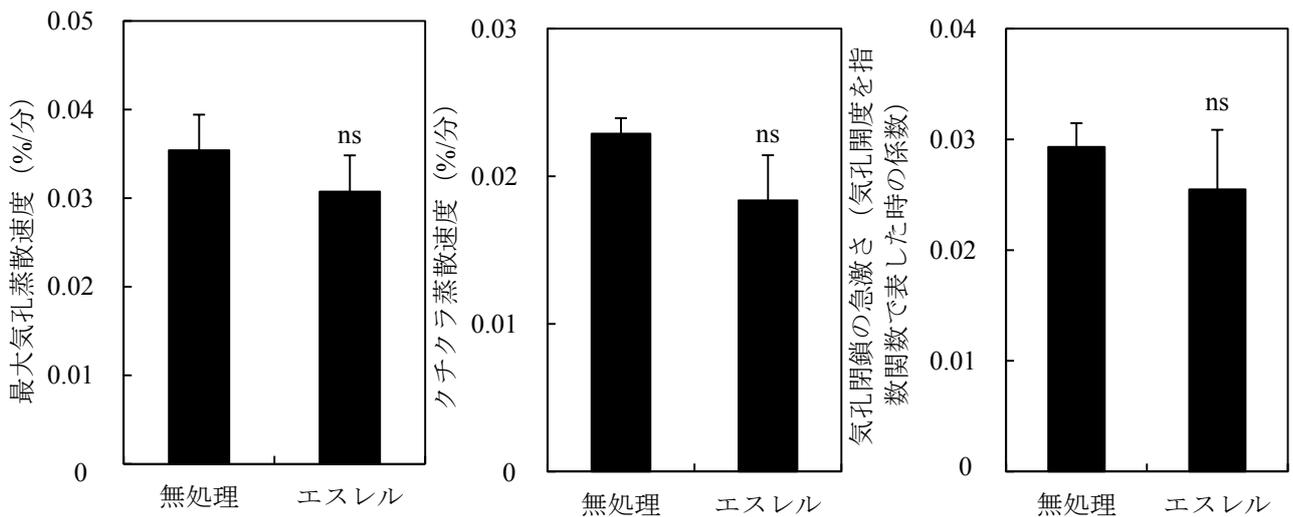
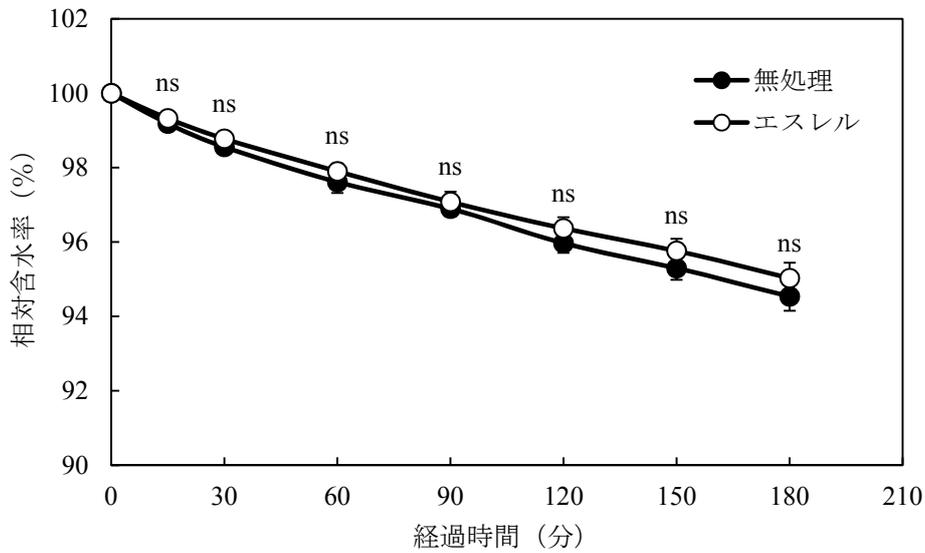
BL を処理した幼苗レタスの相対含水率は無処理と比較して急速に低下した (第7図)。最大気孔蒸散速度，クチクラ蒸散速度，気孔閉鎖の急激さに有意差はなかった。しかし BL を処理した方が最大気孔蒸散速度は早く，気孔開度の急激差は低く気孔は遅く閉じる傾向が観察された。



第7図 BLがレタス幼苗‘ノーチップ’の相対含水率に及ぼす影響
 植物ホルモン；0.01 ppm BL／大塚 A (EC1.2)，底面灌水および保存条件は第4図脚注参照，図中の縦棒は標準誤差を示す (n=6)，** $P \geq 0.01$ ，* $P \geq 0.05$ ，nsは有意差なし (t-検定)

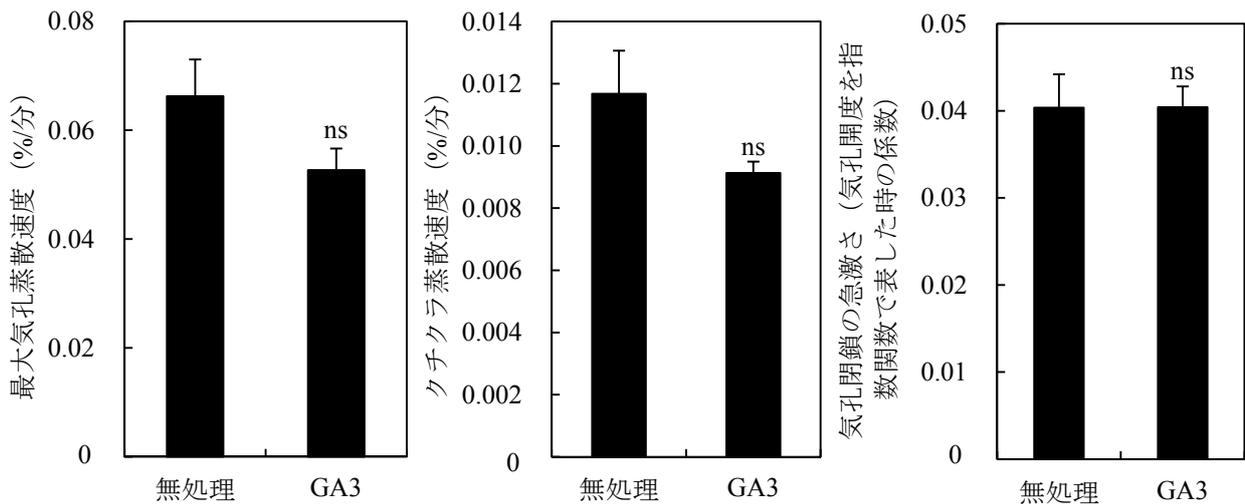
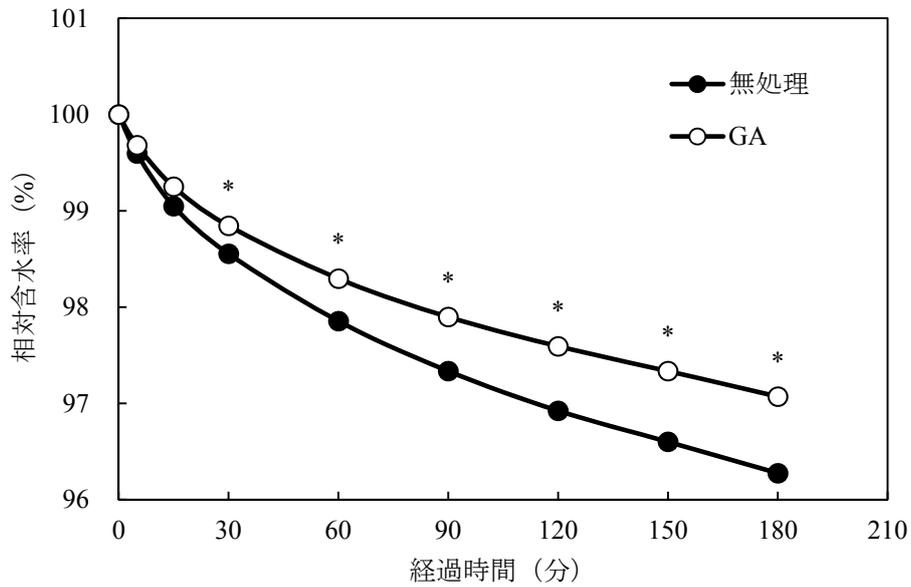
エスレルを処理した幼苗レタスの相対含水率は無照射と変わらなかった (第8図)。

最大気孔蒸散速度，クチクラ蒸散速度，気孔閉鎖の急激さに有意差はなかった。



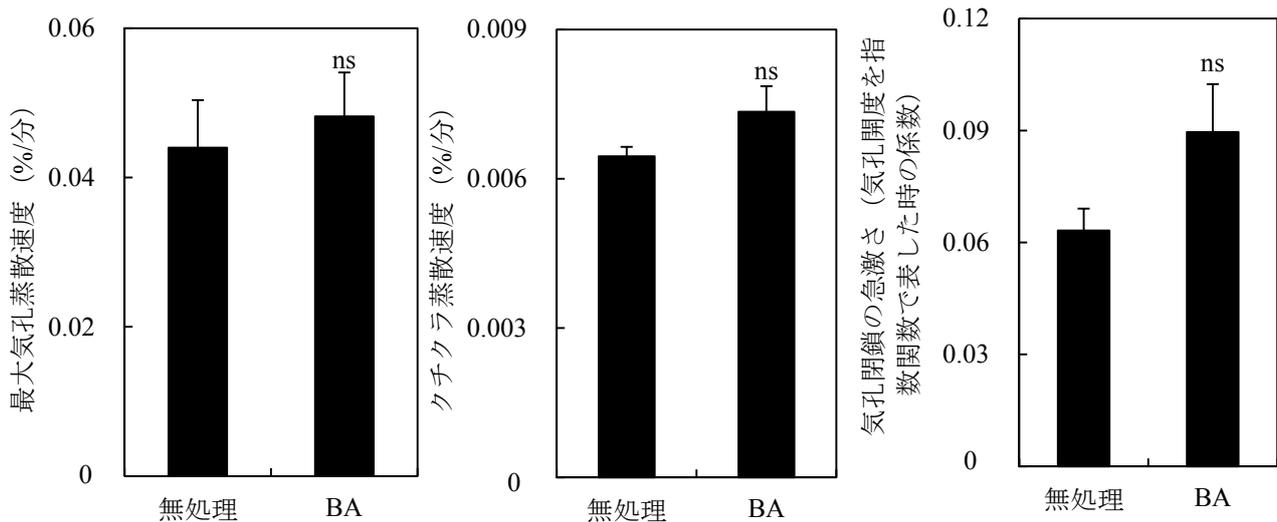
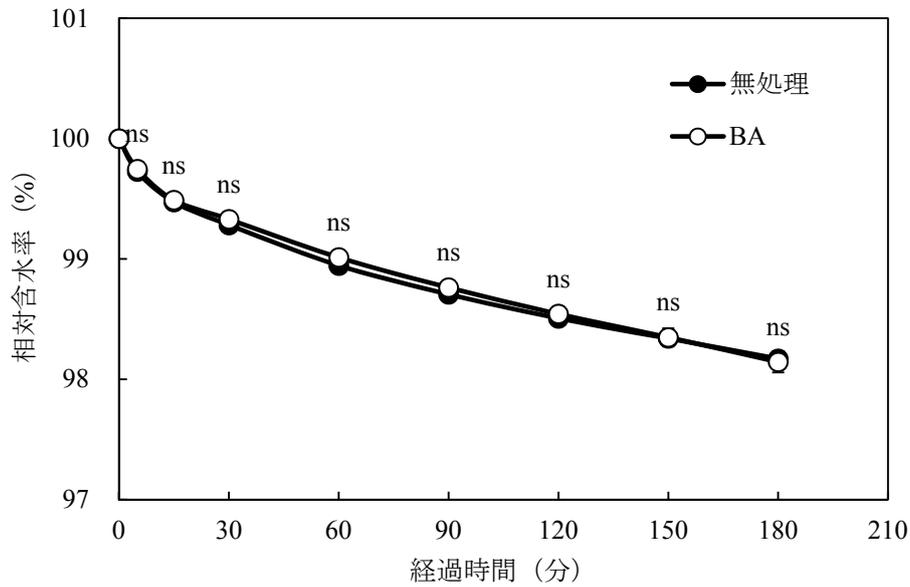
第8図 エスレルがレタス幼苗‘ノーチップ’の相対含水率に及ぼす影響
植物ホルモン；10 ppm エスレル/大塚 A (EC1.2)，底面灌水および保存条件は第4図脚注参照，図中の縦棒は標準誤差を示す (n=6)，ns は有意差なし (t-検定)

GA₃ を処理した幼苗レタスの相対含水率は無処理と比較して緩やかに低下した (第9図)。最大気孔蒸散速度，クチクラ蒸散速度，気孔閉鎖の急激さに有意差はなかった。しかし GA₃ を処理した方が最大気孔蒸散速度およびクチクラ蒸散速度は遅い傾向が観察された。



第9図 GAがレタス幼苗‘ノーチップ’の相対含水率に及ぼす影響
植物ホルモン；1 ppm GA/大塚A (EC1.2)，底面灌水および保存条件は第4図脚注参照，図中の縦棒は標準誤差を示す (n = 6, * $P \geq 0.05$ ，nsは有意差なし (t-検定))

BAを処理したレタス幼苗の相対含水率は無処理と変わらなかった (第10図)。最大気孔蒸散速度，クチクラ蒸散速度，気孔閉鎖の急激さに有意差はなかった。



第10図 BAがレタス幼苗‘ノーチップ’の相対含水率に及ぼす影響
植物ホルモン；1 ppm BA／大塚A (EC1.2)，底面灌水および保存条件は第4図脚注参照，図中の縦棒は標準誤差を示す (n=6)，nsは有意差なし (t-検定)

2-6. 摘要

光，温度，湿度の環境要因と ABA， JA-Me， 2,4-D， BL， エスレル， GA3， BA の 7 つの植物ホルモンには生育中だけでなく基部より切り離れた幼苗レタスでも影響することが明らかになった。植物ホルモンの利用は，例えばジベレリンを巨峰，デラウェアなどのブドウに処理することで種無しにする技術や，オーキシンはトマト

に処理することで受精しなくても実を大きくするため市販されている。サリチル酸はカタラーゼ活性を抑制し、孔辺細胞の過酸化水素濃度を上昇させることで膜酸化を起こす。その結果、 K^+ の膜透過性が増加し K^+ を流入させ気孔は閉じる (Joon-Sang, 1998)。本研究の結果より、植物は生育中のみ環境要因や植物ホルモンの影響を受けるだけでなく収穫後も影響されることが明らかになったため、植物側の反応を利用することで植物の水分を保持し収穫後農作物の水分保持に利用できるかもしれない。今回使用した方法は水分低下曲線から気孔蒸散速度、クチクラ蒸散速度および気孔閉鎖の急激差を三木・廣部モデル (三木・廣部, 2009) から計算上導き出したが、基部から切除した幼苗レタスの水分低下曲線をよく反映した結果となった。従って今後収穫後の水分生理を評価する有効な手段となることが示唆された。

第 3 章

近赤外光短時間照射が幼苗レタスの蒸散に及ぼす影響

3-1 緒言

植物にとって光は、光合成に必要なエネルギーであるだけでなく、生長と生育において多様な形態形成および生理に影響する。青色光は、光屈性、子葉展開、胚軸伸長抑制、気孔開口などに (Reed et al., 1993 ; Blum et al., 1994 ; Lin, 2000, 2002 ; Wang et al., 2010), 赤色光は花芽形成、光発芽、避陰反応などを誘導する作用がある (Fankhauser and Chory, 1997 ; Franklin and Whitelam, 2005)。これらの光波長に対する植物の反応特性に基づいて、発光ダイオード (LED) などの単色性が高い人工光を植物の栽培に用いることで生産性や生産物の品質を高めようとする試みも見られる (Massa, 2008 ; Yano and Fujiwara, 2012 ; Lu, et al., 2012)。収穫後農作物の鮮度は、5 %の水分損失により著しく損なわれるため、収穫後の環境を高湿度に保持することは重要でありフィルム包装が使用されてきた(Kader, 1994; Mahajan et al., 2008)。

青果物は収穫後も活発な生理作用を行っており、できるだけ活性を抑えるためにはほとんどの農作物は暗条件下で貯蔵されるが、緑葉は暗黒条件下におかれると葉緑体の崩壊、クロロフィルの分解などが進行し、鮮度が低下する(Goldthwaite and Laetsch, 1967; Hurng et al., 1986, 1988; Gustavo et al., 2013; Costa et al., 2013)。さらに強光は表皮などからの蒸散を促進し萎れるため品質劣化の原因となる(Kader, 1986)。そこで光波長と光強度の調整によって収穫後の農作物の品質を保持する研究がされてきた (Lu, et al., 2012)。例えば、紫外線ではニンジンとイチゴの灰色カビ病抑制に (Marcier, et al., 2000 ; Marquenie, 2002 ; Turtoi, 2013), リンゴではアオカビ抑制に (Capdeville, et al., 2002), カキやマンゴーでは菌による病気抑制に (González-Aguilar et al., 2001, 2007 ; Khademi et al., 2013) 効果があることが報告されている。さらに、UV-Cは、トマトや植物に抗菌性二次代謝産物であるファイトアレキシンの蓄積を誘導し病原菌に対し細胞壁に穴をあけるなどの病害抵抗性反応を引き起こす (Rodov et al., 1992 ; Charles et al., 2008)。可視光では白色光の連続弱光照射がコマツナやハウレンソウのクロロフィル維持に (細田ら, 1981 ; 細田ら, 1983 ; 上田, 2003), 赤色光と青色光の

弱光低温照射がスイートコーンの品質保持に(太田ら, 2008) , 赤色LED光照射がブロッコリーの老化遅延に (Büchert et al., 2010 ; Ma et al., 2010) 効果が認められている。730nm付近の近赤外光はジャガイモの萌芽抑制に (原田, 2010) 効果が認められているが, コケ植物ではクロロフィルの白化を促進する(Greef and Frederiq, 1972)ことが報告されている。遠赤外線は浸透エネルギーにより上昇した致死熱が菌や食べ物の殺菌に(Krishnamurthy et al., 2008)有効であることが報告されており, 長波長の赤外線照射は水の吸収が大きく品温を上昇させ蒸散を促すため, 収穫後の農作物を対象として照射した研究は少ない。一方, 可視光線と赤外線の間の中波長である近赤外線が生体構成成分によって吸収されにくく, 透過性が高い特徴を生かして, 収穫後の農作物の非破壊分析に使用されている (Bobelyn et al., 2010)。すなわち, 近赤外分析法は糖度や酸度などの含有成分由来の近赤外域の吸収に基づいて非破壊分析に用いられている。ナスでは956nmの水分吸収の変化から光沢ぼけや果皮の張りの評価や (河野, 2008), 糖度に関してはメロン (伊藤, 2007) , ウンシュウミカン (藤原・本庄, 1995 ; Liu et al., 2010), キウイフルーツ (Slaughter and Crisosto, 1998 ; Clark et al., 2004) など果実類で多くの研究事例があり実用化も進んでいる (亀岡・橋本, 2003 ; Nicolai et al., 2007)。一方, 収穫後の農作物について温度, 湿度, ガス濃度など貯蔵環境を制御することで鮮度を保持する研究が多くされてきたが, 短時間の近赤外光照射が貯蔵中の農作物の生理に与える影響について研究した例は少ない。そこで, レタス幼葉を使用し, 可視光線から近赤外線までの各種波長の短時間照射が蒸散に及ぼす影響について調べたところ, 近赤外線を照射した場合に外観上萎れが低減されるという意外な効果が観察された。蒸散は気孔とクチクラから起こるが気孔からの蒸散は失われる水全体の約95 %を閉めていると推定されている (He et al., 2006)。気孔開度の測定方法には植物の表皮を直接観察する方法と表皮のレプリカを写し取る方法が用いられている。ブレンダーにより細断した葉から表皮組織を採取し直接観察する方法は, 生きたまま気孔を観察できる利点があり, 同時に活性酸素の測定も可能である (Murata et al,

2001). この方法は煩雑な操作が不用で、細断後に植物ホルモンや光照射などの効果を観察することもできる。ただし、物理的処理により気孔の表層にある微小管の配列が乱され気孔が開き、正確な開度を測定することができない可能性もある (Higaki et al., 2007). さらに気孔は光に反応して20分以内に開くため、暗所で保存した場合は数分以内の観察が必要であり、時間の制約がある。一方、レプリカ法では気孔開度と測定時間にずれが生じることがなく、さらにレプリカを保存できるため測定時間に制限がない。そのため一度に多くの検体を試験することができるが、操作面である程度の熟練が必要とされる (臼井ら, 1998). また、レプリカ作成時に有機溶媒を使用した場合は気孔開度への影響が懸念される。そこで本研究では村田らの方法を参考としブレンダーで細断する直接法 (Murata et al., 2001) と櫻井らの方法を参考としシリコンラバーで気孔を写し取るレプリカ法 (Sakurai et al., 1986) を使用した。これまでに、光質や光強度などが気孔開度へ及ぼす影響について多くの研究事例があり、気孔開閉には可視光線である赤色光と青色光が有効光として働くことが報告されている。オナモミでは、青色光と赤色光のいずれも気孔を開かせる作用があるが、特に青色光が赤色光の10~20倍程度気孔を開かせる作用が強い (Sharkey and Raschke, 1981). ソラマメ表皮の気孔開口では $13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の弱光照射が青色光のみに有効であるのに対し $63 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の強光照射は赤色光でも効果があると報告されている (Hsiao and Allaway, 1973). さらに青色光による気孔開孔はアブシジン酸 (ABA) によって抑制され、ツクサではサリチル酸 (SA) が気孔の孔辺細胞の過酸化水素を増加させることでカリウムイオンの流出を引き起こし気孔閉鎖を誘導し (Joon-Sang, 1998 ; Miura et al., 2013) , 強光照射により発生した活性酸素種(ROS)がカリウムイオンの流入を阻害し気孔閉鎖を誘導する(Trosethaugen et al., 1999). シロイヌナズナではアブシジン酸 (ABA)による気孔閉鎖は活性酸素種(ROS)産生の上昇を介したものであり(Murata et al., 2001) , MeJAとABAは別々の受容体で感受されるがシグナル伝達は合流しROS産生を誘導することで気孔閉鎖を引き起こすと考えられている(Munemasa et al., 2007). 光,

活性酸素，植物ホルモンは気孔制御において互いにクロストークしていると考えられている (Torsethaugen et al., 1999 ; Desikan et al., 2003 ; Acharya and Assmann, 2009) .

しかし，これらの示す研究は全て生育中の植物を対象とした研究であり，収穫後の農作物において気孔開度を調べた研究は少なく，近赤外光照射の気孔へ及ぼす影響につながる研究事例はまだない。

そこで，青果物のモデル作物として蒸散の激しいレタス幼葉を用いて水分減少を蒸散量で比較したところこれまで光合成や光形態形成には関与しないとされてきた近赤外光照射が蒸散量を抑制するという極めて興味深い現象を見出した．そのメカニズム解明のため，気孔開度と活性酸素種生成に及ぼす影響についても調べた。

3-2. 材料及び方法

3-2-1. 材料

レタス品種 ‘シスコ’ と ‘ノーチップ’ を用い，乾燥ストレスがかからないように底面灌水によって育成したポリウレタンベッドに種子を播種後，大塚処方養液 (EC 1.2 ds/m) を与え，本葉が 2 枚完全に展開するまで生育させた．栽培条件としては蛍光灯 (FL40SS・W/37, (株) 東芝) を用い照度 $140 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，12 時間日長，温度 23°C ，相対湿度 70% に設定したグロースキャビネット (MLR-350H, パナソニックヘルスケア (株)) で 10 日間育成した．約 300-400 mg に生育した時点で幼葉を試験に供した。

3-2-2. 蒸散率の算出方法

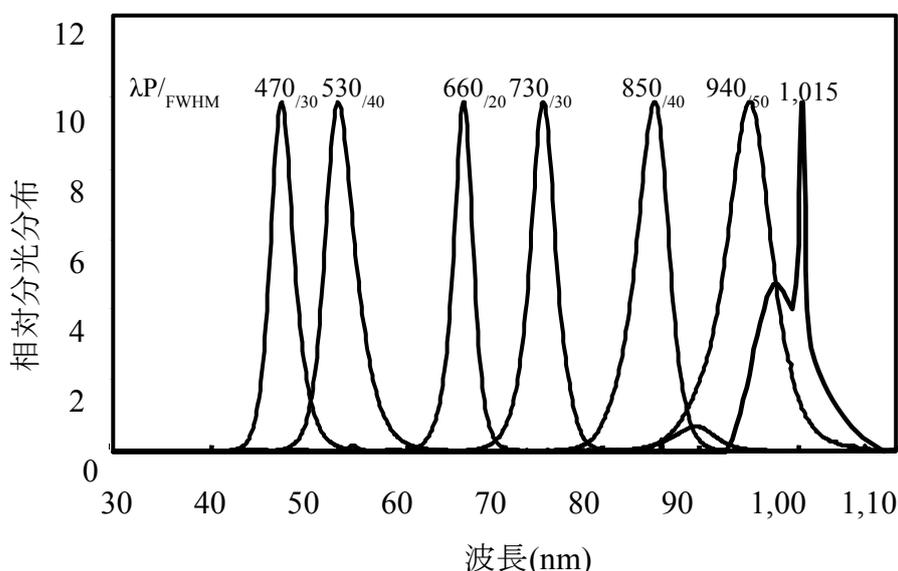
幼苗レタスは，光照射後各温度と光条件に設定したクールインキュベーター (THS020DB, 三菱電機エンジニアリング (株)) 内で一定期間保持後の重量を測定し，以下の式を用いて蒸散率を計算した。

蒸散率(%)=100×[(切断直後の新鮮重)-(貯蔵後の新鮮重)]/[(切断直後の新鮮重)]

3-3. 光照射条件の検討

3-3-1. LED 光源からの照射波長がレタス幼葉の蒸散率に及ぼす影響

光照射区は、青色光 ($\lambda_{P/FWHM} = 470 \text{ nm}/_{30}$) , 緑色光 ($\lambda_{P/FWHM} = 530 \text{ nm}/_{40}$) , 赤色光 ($\lambda_{P/FWHM} = 660 \text{ nm}/_{20}$) , 近赤外光 ($\lambda_{P/FWHM} = 730 \text{ nm}/_{30}$, $\lambda_{P/FWHM} = 850 \text{ nm}/_{40}$, $\lambda_{P/FWHM} = 940 \text{ nm}/_{50}$, $\lambda_P = 1015 \text{ nm}$) の7試験区としLED光源を使用した。ただし、1015nm はLED光源がなかったためハロゲンランプに短波長と長波長カットフィルターを使用したものを用いた (第1図)。照射強度は各波長 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ とし、レタス幼葉に 10°C 下で10分間照射し1日後の蒸散率を無照射のものと比較した。



第1図 LED光源の分光分布図

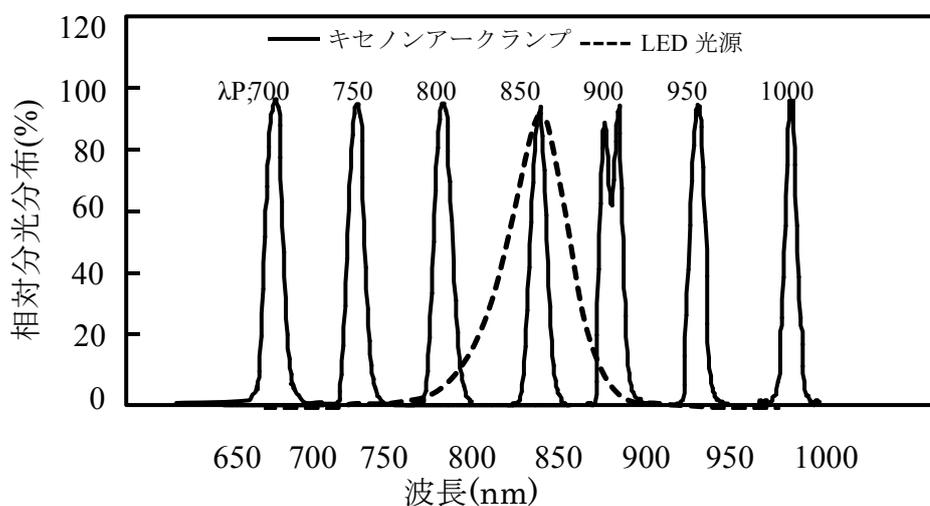
光源; LED, 青色光 ($\lambda_{P/FWHM} = 470 \text{ nm}/_{30}$) , 緑色光 ($\lambda_{P/FWHM} = 530 \text{ nm}/_{40}$) , 赤色光 ($\lambda_{P/FWHM} = 660 \text{ nm}/_{20}$) , 近赤外光 ($\lambda_{P/FWHM} = 730 \text{ nm}/_{30}$, $\lambda_{P/FWHM} = 850 \text{ nm}/_{40}$, $\lambda_{P/FWHM} = 940 \text{ nm}/_{50}$) , 光源;ハロゲンランプ, 近赤外光 ($\lambda_P = 1015 \text{ nm}$) ,
 $\lambda_{P/FWHM} =$ ピーク波長 (nm)/半値幅 (nm)

3-3-2. 照射強度と照射時間が幼苗レタスの蒸散率に及ぼす影響

幼苗レタスにLED光 ($\lambda_{P/FWHM} = 850 \text{ nm}/_{40}$) の照射時間を10分間に固定し、照射強度10, 100, 200, 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の4段階で照射し、1日後の蒸散率を無照射のものと比較した。次に、照射強度を100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に設定し、照射時間を1, 5, 10, 60, 180分の5段階に変化させ1日後の蒸散率を無照射のものと比較した。

3-3-3. 半値幅 10 nm の狭帯域を使用した近赤外光照射が幼苗レタスの蒸散率に及ぼす影響

LED 光源から照射される波長の半値幅は LED の波長特性上 20-50 nm と広帯域であるため近赤外線領域だけを含む純粋な波長を照射することは難しい。そこでキセノンショートアークランプ USHIO Optical Modulex, ウシオ電機(株))と狭帯域の干渉フィルター(Andover 社)を使用した。紫外域から赤外域まで連続した分光スペクトルを持つキセノンショートアークランプから 700 nm-1000 nm までの近赤外線領域の光を特定波長の干渉フィルターと組み合わせて 50 nm 間隔で取り出した(第 2 図)。その取り出した光を, 光強度 $15 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の弱光と光強度 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の強光に遮光フィルターで調整し室温下で各 5 分間照射し 1 日後の蒸散率を無照射のものと比較した。



第 2 図 照射波長の分光分布図 (キセノンアークランプと LED 光源の比較)
実線;光源:キセノンアークランプ, 半値幅;10 nm, λP =ピーク波長 (nm)
点線;光源:LED; 半値幅 40 nm

3-4. 保存条件の違いがレタス幼葉の蒸散率に及ぼす影響

LED 光源 ($\lambda P/FWHM = 850/40$) を照射強度 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で 5 分間照射した後,

十分な空間を考慮した大きさのプラスチック容器に幼苗レタスを供試個体数ずつ並べ 10°C 暗所, 10°C 明所, 25°C 暗所, 25°C 明所に設定したグロースチャンバー (MLR-350H, パナソニックヘルスケア (株)) に保持し 1 日後に蒸散率を無照射区の蒸散率と比較した。この時, 明所条件は蛍光灯 (FL40SS・W/37, (株) 東芝) を使用し光強度 $140 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とした。

3-5. 気孔開度の測定方法

3-5-1. 近赤外光照射が幼苗レタスの気孔開度に及ぼす影響(直接法)

直接法による気孔開度の測定には, 村田らの方法 (Murata et al., 2001) に従いブレンダー法を適用した。LED 光 ($\lambda\text{P}/\text{FWHM} = 850 \text{ nm}/40$) を幼苗レタスに照射強度 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ で 5 分間照射した。10°C, 暗所に 30 分間保持後, ブレンダーで 20 秒間細断し表皮組織を SAS 緩衝液 (5 mM KCl, 50 μM CaCl₂, 10 mM MES-KOH (PH6.15)) に浸し光学顕微鏡 (MICROPHOTO-FXA, (株) ニコン) で気孔開度を測定した。気孔開度は孔辺細胞の内側に焦点を合わせて測定し, それぞれの表皮組織において 1 断片に 5 個以上の気孔があるものを選択し 1 個体あたり 5 断片の気孔を観察した。すなわち, 供試個体 5 個体あたり 25 個の気孔を観察したため試験区ごとに合計 125 個の気孔開度を測定した。

LED 光 ($\lambda\text{P}/\text{FWHM} = 850/40$) を照射強度 10, 50, 100, 200, 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の 5 段階に変化させ 5 分間照射後 10°C 暗所条件に設定したクールインキュベーター (THS020DB, 三菱電機エンジニアリング (株)) 内に保持し, 30 分後の気孔開度を測定した。さらに, 気孔開度を照射強度 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ で 5 分間照射後 30 分後, 1 時間後, 2 時間後, 3 時間後にブレンダーで細断し気孔開度を測定した。

3-5-2. 保持条件の違いが気孔開度に及ぼす影響(レプリカ法)

幼苗レタスを使用し, Sakurai らの印象法 (Sakurai et al., 1986) に従いレプリカ法による気孔開度の測定を行った。葉の表側にペースト比 1:1 で混合したキャタリスト材

とベース材(Provil novo, Pearson Dental Supply 社)を薄く塗り, 固化後, 丁寧に剥がし1次レプリカを作成した. 次にマニキュアで2次レプリカを写し取った. 試験区あたり50個の気孔開度を測定した. LED光 ($\lambda P_{FWHM} = 850 \text{ nm}/40$) 照射強度 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で5分間照射後, 十分な空間を考慮した大きさのプラスチック容器にレタス幼葉を供試個体数ずつ並べ 10°C 暗所, 10°C 明所, 20°C 暗所, 20°C 明所に設定したグロースチャンバー (MLR-350H, パナソニックヘルスケア(株))の4つの条件下で保持し, 15分後, 30分後, 1時間後, 2時間後, 3時間後にレプリカを作成し気孔開度を測定した. この時, 明所条件は蛍光灯 (FL40SS・W/37, (株)東芝)を使用し光強度 $140 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とした.

3-6. 近赤外光照射が活性酸素種 (ROS) に及ぼす影響

活性酸素種 (ROS) 測定には Murata らの方法 (Murata et al., 2001) に従いブレンダー一法を使用した. 幼苗レタスを20秒間ブレンダーで細断するとストレスにより ROS が上昇する. そこでナイロンメッシュで回収した表皮細胞を, SAS 緩衝液に浸し 23°C , $140 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の光条件で3時間置くことでストレス緩和処理を行った. 次に細胞透過性蛍光基質である $\text{H}_2\text{DCF-DA}$ ($\text{H}_2\text{DCF-2DA}$, 2,7-Dichlorodihydrofluorescein Diacetate) を $50\mu\text{M}$ 加え, LED光 ($\lambda P_{FWHM} = 850/40$) を照射強度 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で5分間照射後室温暗所条件下に30分間保持した. その後表皮細胞をナイロンメッシュで回収し洗浄した. $\text{H}_2\text{DCF-DA}$ は細胞膜を透過後細胞内エステラーゼによりアセチル基が除去され H_2DCF となるが, 孔辺細胞でペルオキシダーゼや過酸化水素などにより酸化され緑色蛍光カルセインとなり蛍光を発光するため蛍光顕微鏡 (Biozero BZ-8100, (株)キーエンス) で, 励起光 ($492\text{-}495 \text{ nm}$) 照射により蛍光緑色光 ($517 \text{ nm}\text{-}527 \text{ nm}$) として観察することができる.

各試験区の蛍光強度は酸化反応の強弱に依存するため蛍光強度を比較することで, ROS 産生を無照射と相対的に比較することができる. H_2DCF により導かれた ROS は

色素の光酸化による減光を防ぐため励起光の照度を調整し撮影は 1 プレートにつき 1 回限りとした。その後、画像解析フリーウェア Image J (NIH.National Institutes of Health 開発) を使用し、各試験区あたり 50 個の孔辺細胞から蛍光強度の平均値を計算した。

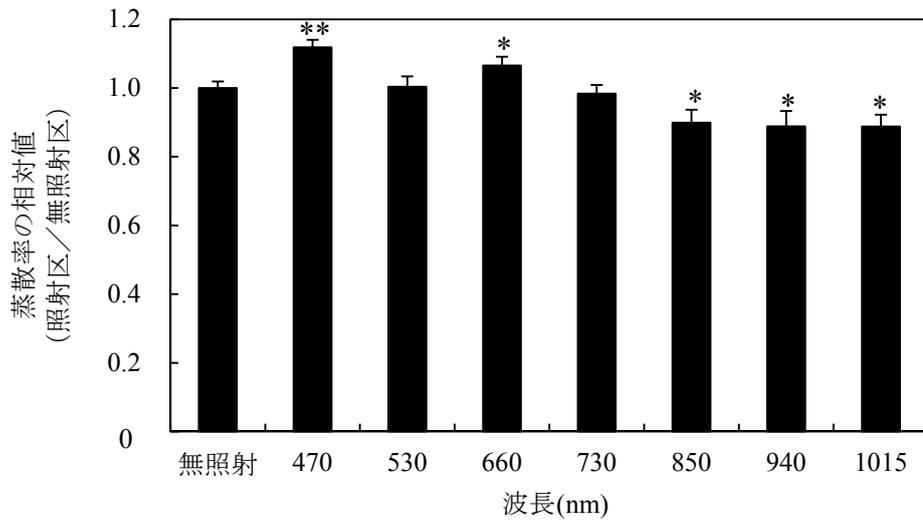
3-7. 結果と考察

3-7-1. 光照射がレタスの蒸散率に及ぼす影響

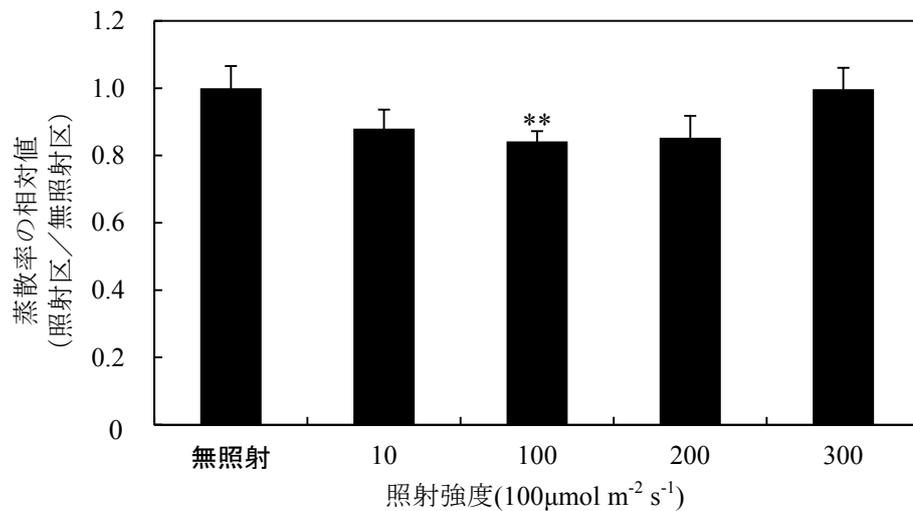
緑色光 ($\lambda_{P/FWHM} = 530 \text{ nm}/_{40}$) 照射は幼苗レタスに影響がなかったが、青色光 ($\lambda_{P/FWHM} = 470 \text{ nm}/_{30}$) と赤色光 ($\lambda_{P/FWHM} = 660 \text{ nm}/_{20}$) 照射は照射 1 日後の蒸散率をわずかに上昇させた。一方、850 nm ($\lambda_{P/FWHM} = 850 \text{ nm}/_{40}$) , 940nm ($\lambda_{P/FWHM} = 940 \text{ nm}/_{50}$) , 1015 nm ($\lambda_P = 1015 \text{ nm}$) の近赤外光照射は有意に蒸散率を減少させた (第 3 図)。これまでに青色光と赤色光は生育中の気孔を開かせるとの研究報告があり、シロイヌナズナとイネでは $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の強光照射により気孔コンダクタンスの値が上昇後 20 分以内に一定値となり、 $5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の弱光照射を重ねることでさらに気孔コンダクタンスが上昇することが報告されている (Shimazaki et al, 2007)。C3, C4 植物では青色光照射による気孔開口が起こるが、CAM 植物では反応しないことが報告されている (Lee and Assmann, 1992)。中心波長 850 nm の近赤外光照射では、10 分間照射では $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の照射強度を中心として V 字型に蒸散抑制効果が強くなった(第 4 図)。次に照射強度 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合には、1 分間、5 分間、10 分間、60 分間の照射時間において有意に蒸散が抑制された (第 5 図)。しかし、3 時間の連続照射では蒸散が有意に高くなった。照射時間が長過ぎると余剰エネルギーが熱となり蒸散を引き起こすと考えられる。そこで、最も安定的に効果の得られた照射強度 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、5 分間の照射条件を以下の試験に適用した。

植物側の反応のメカニズムとしては、蒸散率に影響を及ぼした青色光に対する受容体としてクリプトクロムとフォトトロピン、赤色光と近赤外光の受容体にはフィトク

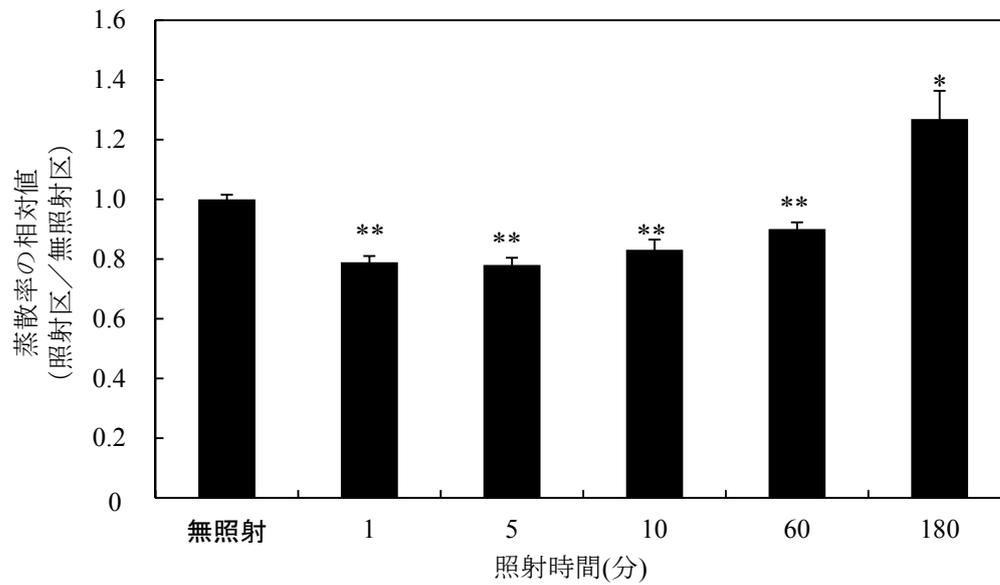
ロムがあることが報告されており (De Greef and Fredericq, 1972), シロイヌナズナでは青色光受容体による屈光性や気孔開口作用 (Briggs and Christiel, 2002) や, クリプトクロム (CRY1, CRY2) とフォトトロピン (PHOT1, PHOT2) による気孔開口が (Wang et al., 2010), トマトでは赤色光と近赤外光の受容体であるフィトクロムによる可逆反応 (Lee et al., 1997) が報告されている. 使用した中心波長 850nm の LED 光源は半値幅が約 40nm であり 850nm 以外の光も含んでいる. そこで, より照射波長の影響を明確にするために, キセノンランプと半値幅 10 nm の狭帯域の干渉フィルターを用いて波長 700 nm-1000 nm の近赤外光照射の作用を検討した. その結果, $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の強光照射では 750 nm-1000 nm の光波長が蒸散を有意に抑制し, $15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の弱光照射でも 850 nm, 900 nm, 950 nm の光照射が蒸散を有意に抑制した(第 6 図). 以上の結果から近赤外光照射による蒸散抑制効果は 730 nm の波長付近に対し吸収があるフィトクロムが関与している可能性は低いと考えられた. 次に保存条件の違いが蒸散率に及ぼす影響について調べた結果, いずれの保存条件において無照射区と比較して蒸散抑制効果が見られたが 10°C 暗所の保存条件が最も明確に蒸散が抑制された (第 7 図). 従って, 近赤外光照射による蒸散抑制効果は温度や光環境に関わらず同じ環境に置かれた無照射に対して保存条件に対応した蒸散抑制効果があることが示された.



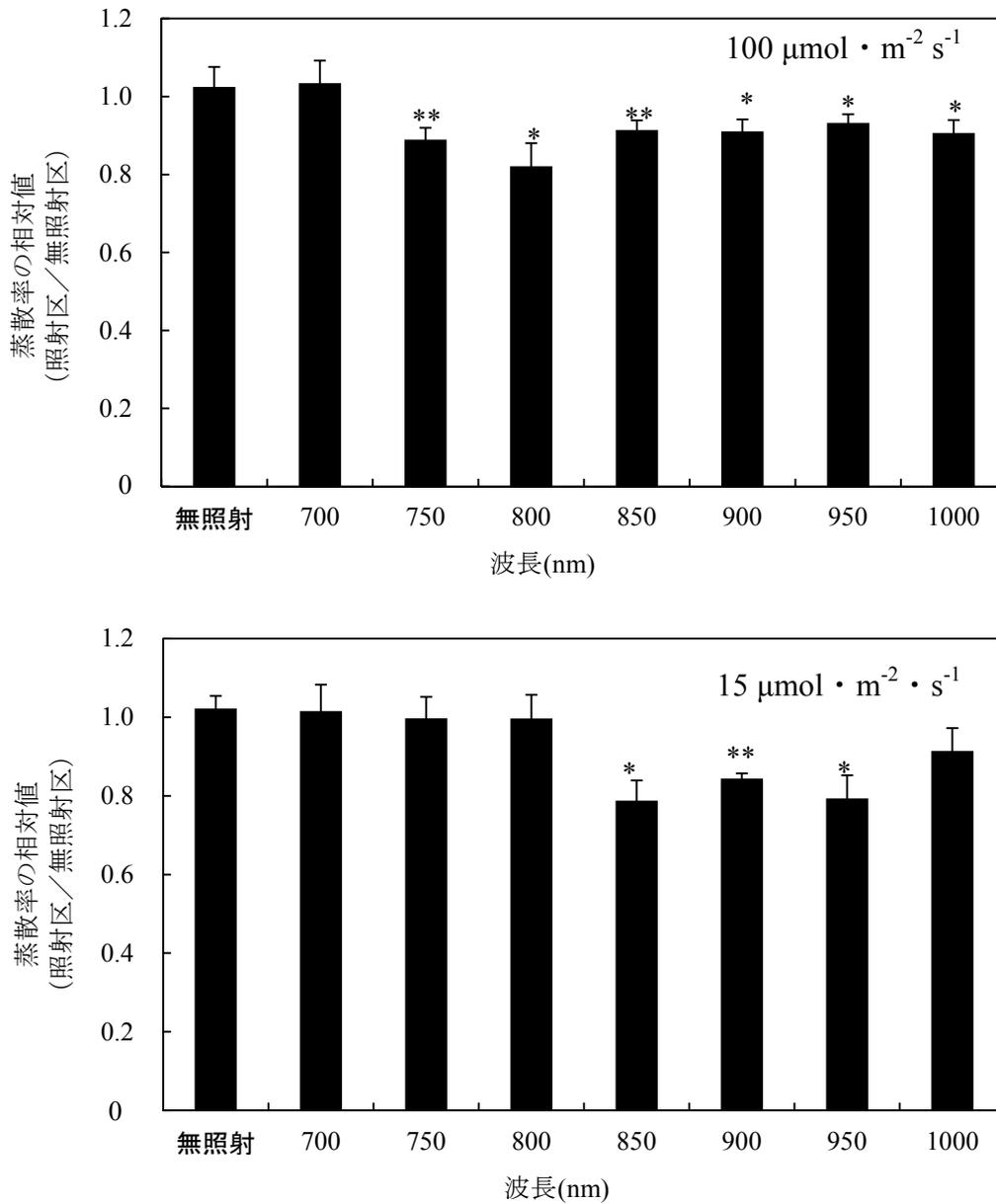
第3図 種々の波長の光照射がレタス幼苗の蒸散率に及ぼす影響
 光源；LED，照射強度； $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，照射時間；10分，照射後条件； 10°C 暗所に保持し1日後に蒸散率測定，品種；シスコ，無照射の蒸散率を1とした，エラーバーは標準誤差 ($n \geq 8$)，** $P < 0.01$ ，* $P < 0.05$ (t-検定)



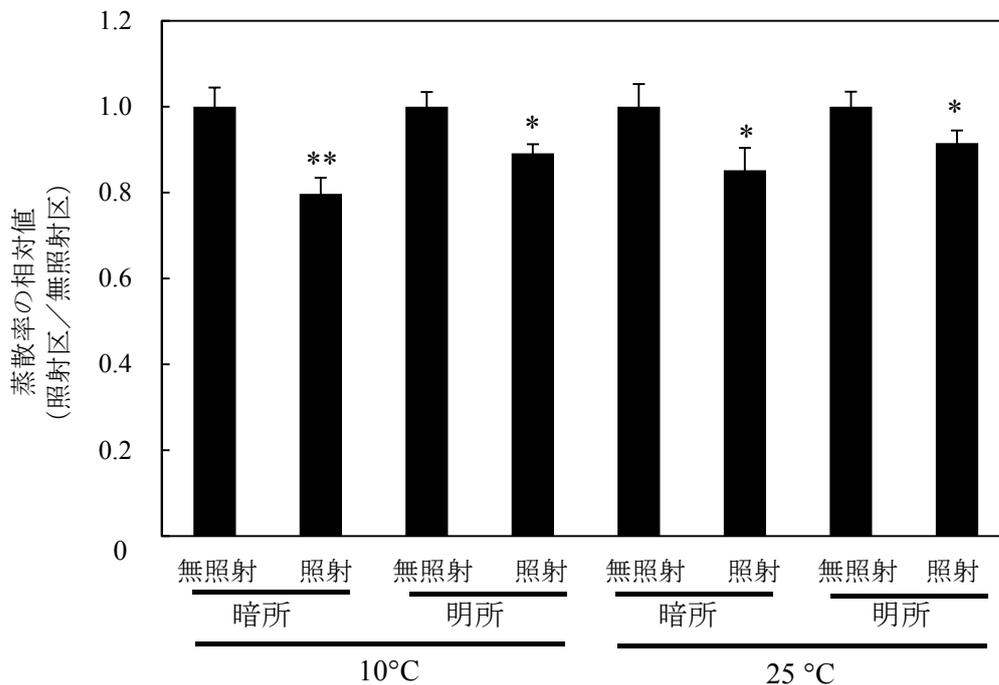
第4図 近赤外光照射の照射強度がレタス幼苗の蒸散率に及ぼす影響
 光源；LED，照射強度； $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，照射時間；10分，照射波長； $\lambda P = 850 \text{ nm}$ ，照射後条件； 10°C 暗所に保持し1日後に蒸散率測定，品種；シスコ，無照射区の蒸散率を1とした，エラーバーは標準誤差 ($n \geq 6$)，* $P < 0.05$ (t-検定)



第5図 近赤外光照射の照射時間がレタス幼苗の蒸散率に及ぼす影響
 光源；LED，照射強度； $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，照射波長；中心波長 850 nm，照射後条件；10 度 $^{\circ}\text{C}$ 暗所に保持し 1 日後に蒸散率測定，品種；シスコ，無照射の蒸散率を 1 とした，エラーバーは標準誤差 ($n \geq 6$)，** $P < 0.01$ ，* $P < 0.05$ (t-検定)



第6図 近赤外光照射(狭帯域)がレタス幼苗の蒸散率に及ぼす影響
 光源；キセノンアークランプ，照射強度； $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，照射波長；中心波長 850 nm (半値幅 = 10nm)，照射時間；5分，照射後条件； 10°C 暗所に保持し1日後に蒸散率測定，品種；シスコ，無照射の蒸散率を1とした．エラーバーは標準誤差 ($n \geq 8$)，** $P < 0.01$ ，* $P < 0.05$ (t-検定)

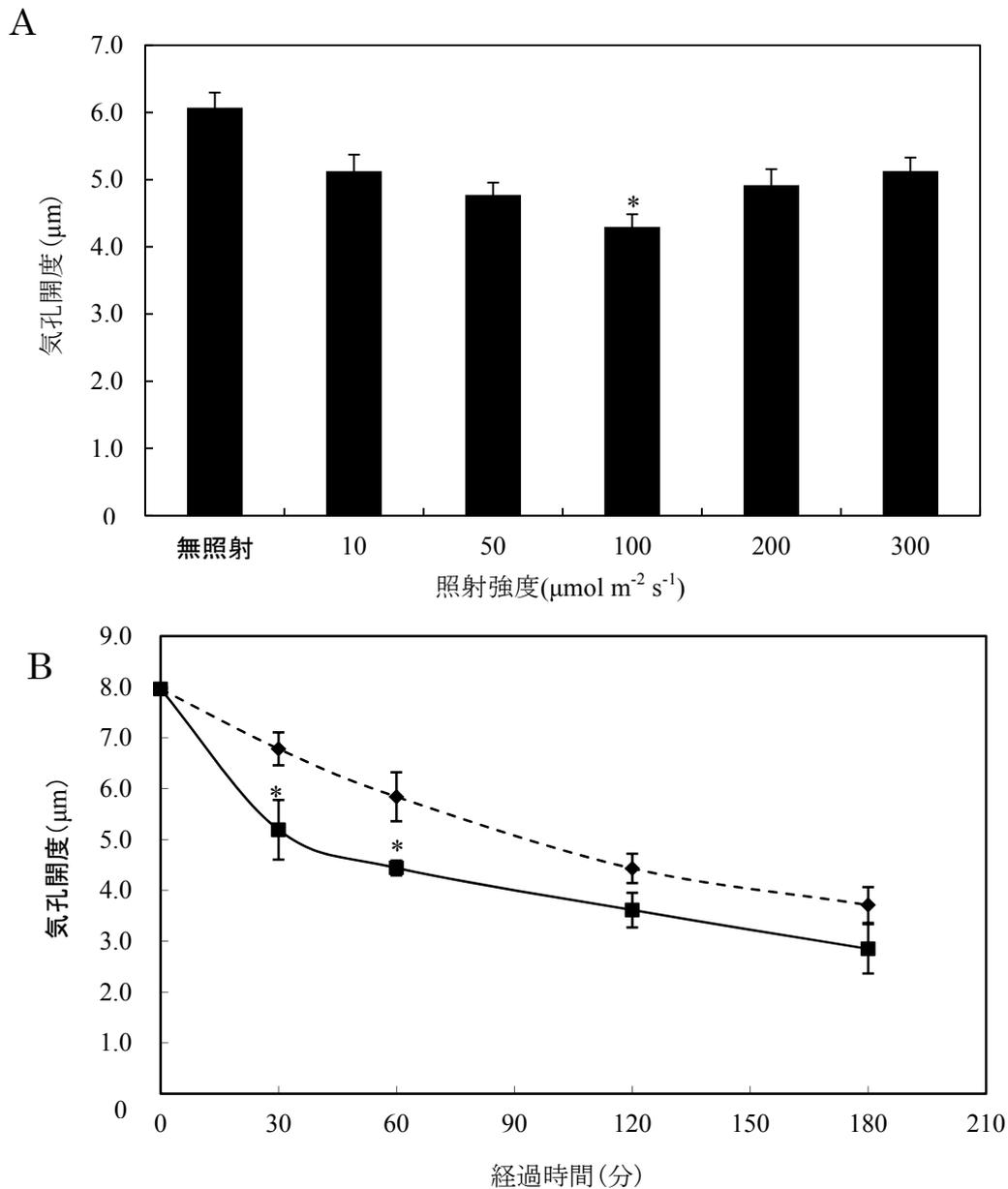


第7図 近赤外光照射後の保存条件がレタス幼苗の蒸散率に与える影響
 光源；LED，照射強度； $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，照射波長；中心波長 850 nm，照射時間；5 分，各保存条件に保持し 1 日後に蒸散率測定，明所の光条件； $140 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，品種；シスコ，無照射の蒸散率を 1 とした，エラーバーは標準誤差 ($n \geq 6$)，** $P < 0.01$ ，* $P < 0.05$ (t-検定)

3-7-2. 近赤外光照射がレタス幼葉の気孔開度に及ぼす影響

植物ホルモンでは， $1 \mu\text{M}$ の ABA や $1 \mu\text{M}$ の MeJA(ジャスモン酸メチル)の施用が ROS 産生を高め，10 分後にはシロイヌナズナの気孔閉鎖を誘導すると報告があり (Munemasa et al., 2007)， $200 \mu\text{M}$ - $1000 \mu\text{M}$ の SA(サリチル酸)は使用 2 時間後に気孔開度を小さくすることが報告されている (Khokon et al, 2011)．光照射による気孔開口作用では，30 秒間の青色光パルス照射の 30 秒後にソラマメの孔辺細胞の水素イオンが遊離することで外液の PH が 10 分間低下するという報告や (Shimazaki et al., 1986) ，青色光パルス照射の 2.5 分後にソラマメの孔辺細胞の ATP 加水分解活性が最大値に到達し 15-20 分後に元の値に戻り，活性の最大値は照射強度が $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の弱光より $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の強光の方が高くなる (Kinoshita and Shimazaki, 1999) という報告がある．孔辺細胞の K^+ の内向きと外向き整流性による気孔開口と閉鎖作用は ROS 産生

の下流側で起こり気孔閉鎖の直前に作用する (Mori et al., 2001). そこで近赤外光照射による蒸散抑制効果のメカニズムを解明するために直接法により照射強度の違いが気孔開度に及ぼす影響について調べた. 中心波長 850 nm の近赤外光を 5 分間照射後, 10°C 暗所で 30 分間保持した場合, 第 4 図で見られた $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の照射強度を中心とした V 字型の気孔閉鎖効果が見られた (第 8 図 A). そこで $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の照射強度について照射後, 経時的に気孔開度を測定しところ, 無照射と比較して 30 分後と 1 時間後に有意に気孔は閉鎖され (第 8 図 B) 3 時間後まで無照射より照射したレタスの気孔開度は継続して小さかった. さらに, 保存条件の違いが気孔開度に及ぼす影響についてレプリカ法を使用して経時的に調べた. その結果, 近赤外光を照射したレタス幼葉の気孔開度は暗所の場合, 10°C と 20°C のいずれの場合も無照射と比較して照射後 15 分後に有意に小さくなった (第 9 図 AC). 近赤外光照射による気孔閉鎖は比較的早く起こり無照射の気孔開度と比較して照射した気孔開度は 3 時間後まで継続して小さかったことから (第 9 図), 気孔は照射後保持条件に関わらず長く影響して小さくなることが分かった.



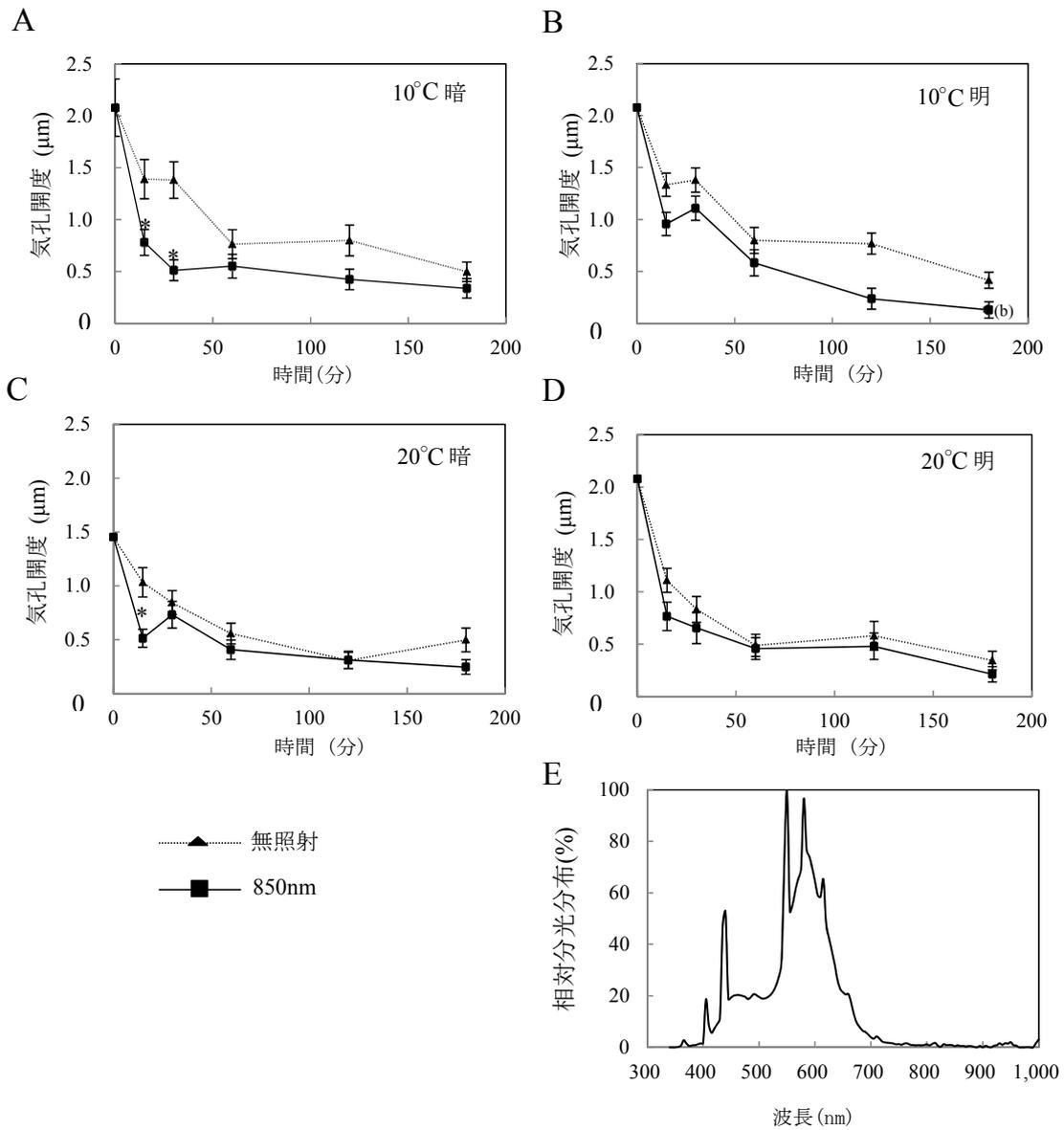
第 8 図 近赤外光照射がレタス幼苗の経時的気孔開度に及ぼす影響（直接法）

A；照射強度が気孔開度に及ぼす影響

光源；LED，照射波長；中心波長 $\lambda_P = 850 \text{ nm}$ ，照射時間；5 分，照射後条件； 10°C 暗所に保持し 30 分後に気孔開度測定，品種；ノーチップ，*ダネット対照処理群比較 ($n = 125$ ，*： $P < 0.05$)

B；近赤外光照射が気孔開度の経時的変化に及ぼす影響，光源；LED，照射強

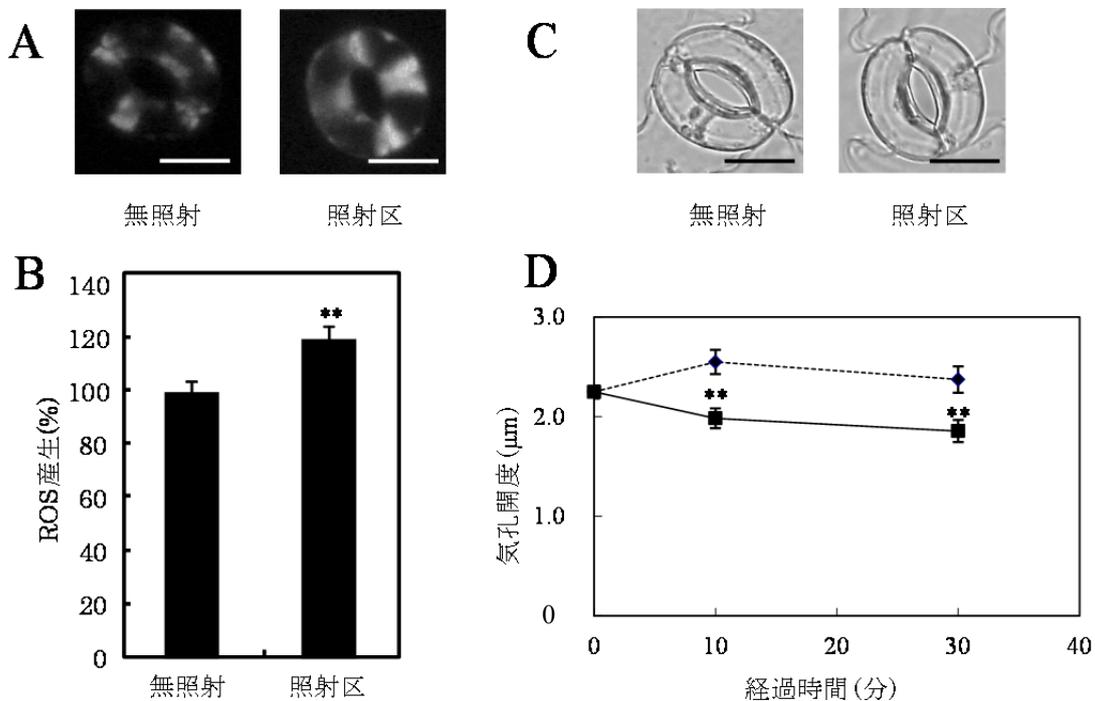
度； $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，照射波長； $\lambda_P = 850 \text{ nm}$ ，照射時間；5 分，照射後条件； 10°C 暗所に保持し 30 分後，1 時間後，2 時間後，3 時間後に気孔開度測定，品種；ノーチップ，*t 検定 ($n = 125$ ，*： $P < 0.05$)



第9図 近赤外光照射後の保存条件がレタス幼苗の気孔開度に及ぼす影響 (レプリカ法) 光源; LED, 照射強度; $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 照射波長; $\lambda P = 850 \text{ nm}$, 照射時間; 5分, 品種; ノーチップ, A; 10°C 暗所, B; 20°C 明所, C; 20°C 暗所, D; 20°C 明所, 明所光条件; $140 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 各保存条件に保持後 15分後, 30分後, 1時間後, 2時間後, 3時間後に気孔開度測定, エラーバーは標準誤差, *t検定 ($n=50$, $^*P<0.05$), E; 蛍光灯の相対分枝分布

3-7-3. 近赤外光照射が孔辺細胞の ROS 産生と気孔開度に及ぼす影響

ソラマメでは外因性過酸化水素 (H_2O_2) によって誘導された孔辺細胞内のカルシウム上昇による気孔閉鎖に ROS 産生が関与することや (Mcainsh et al., 1996), トマトとツユクサではエリシターであるオリゴガラクトツロン酸やキトサンによって誘導された ROS 産生が気孔閉鎖を誘導することが知られている (Lee et al., 1999). シロイヌナズナでは ABA のシグナル反応として ROS 産生と気孔閉鎖が報告されている (Desikan et al., 2003). そこで近赤外光照射により気孔閉鎖が誘導されるメカニズムについて解明するために気孔閉鎖の上流側で作用する ROS 産生を調べた. その結果, 近赤外光照射は無照射区と比較してレタス幼葉の孔辺細胞の ROS 産生を上昇させ, 照射後 10 分後には無照射と比較して気孔開度を有意に閉鎖することが明らかになった (第 10 図). 今回の結果はわずか 5 分間の近赤外光照射が ROS 産生を増加させ, それがトリガーとなって気孔閉鎖を誘導したと考えられる.



第 10 図 近赤外光照射が ROS 産生と気孔開度へ及ぼす影響 (直接法)

光源 ; LED, 照射強度 ; $100\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 照射波長 ; $\lambda\text{P} = 850 \text{ nm}$, 照射時間 ; 5 分, 照射後条件 ; 10°C 暗所, 品種 ; ノーチップ, A ; ROS 蛍光写真 (スケールバー = $25 \mu\text{m}$) ,B, ROS 産生 (30 分後), 無照射の値を 100 とした, エラーバーは標準誤差 ($n = 50$) ,C;光学顕微鏡写真, D ; 気孔開度 (10 分後, 30 分後), エラーバーは標準誤差 ($n = 125$), **: $P < 0.01$ (t-検定)

3-8. 摘要

可視光から近赤外光までの光をレタス苗に 10 分間照射したところ、近赤外光照射に蒸散抑制効果があることが認められた。さらに人工太陽光と干渉フィルターを使用した狭帯域波長の光照射では 100, 15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の強度でも波長 850nm 付近に蒸散抑制効果があることを確認した。近赤外光照射による蒸散抑制効果が最も高かったのは、100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で 5 分間の照射条件と 10°C 暗所の保存条件であった。メカニズムを解明するために、気孔開度を直接法とレプリカ法を使用して測定したところ、近赤外光照射による気孔閉鎖誘導を確認したため、気孔閉鎖の上流側で作用する ROS 産生から検証した。その結果、近赤外光照射による蒸散抑制効果の少なくとも一部は、ROS 産生上昇による迅速な気孔閉鎖誘導によるものであることが示唆された。

第 4 章

近赤外光短時間照射が成葉葉菜類の蒸散・品質に
及ぼす影響

4-1. 緒言

葉菜類は水分率が高く，流通・貯蔵中において水分損失に伴う萎れや緑色の退色などによる品質低下が急速である（上田，2003；名和ら，1987）．葉菜類は90%前後の水分を含んでおり，一般に，5%の水分損失により外観鮮度が落ち，商品価値が大きく減るとされている（大久保，1988；樽谷，1963）．そこで，収穫から貯蔵・流通段階における萎れを防ぐために種々の包装やワックス処理，予措などの蒸散抑制技術開発がなされてきた（樽谷，1963；Church and Parsons，1995；中野ら，2001）．葉菜類の種類は多く，収穫時の熟度や品目により蒸散特性も異なるため品目の特性に応じた鮮度保持技術が必要である（大久保，1988；樽谷・北川，1999）．蒸散は気孔とクチクラから起こるが，気孔蒸散が全体の約95%を占めると推定されている（He et al., 2006）．成育中の植物の気孔制御に関する研究は広範に行われてきたが，収穫後の青果物の気孔の挙動を調査した研究は極めて少ない．

青果物は多くの場合に暗条件下で貯蔵されるが（王ら，2008），緑葉は暗黒条件下におかれると葉緑体の崩壊，クロロフィルの分解などが進行し鮮度が低下する場合がある（Goldthwaite and Laetsch, 1967）．そこで，白色光連続弱光照射によるハウレンソウやコマツナのクロロフィルの維持や（細田ら，1981；細田ら，1983；上田，2003），低温下で弱い赤色光および青色光照射によるスイートコーンの品質保持（太田ら，2008），赤色LED（発光ダイオード）光照射によるブロッコリーの老化遅延（Büchert et al., 2010；Ma et al., 2010）などが検討され，可視光域の弱光照射が鮮度保持に効果があることが報告されている．さらに近赤外光では，730nm 付近の波長がジャガイモの萌芽抑制に効果があることが報告されている（原田，2010）．

近赤外光は通常730 nm から1400 nm の光であり，可視光線と赤外線の中間の波長である．近赤外光は，透過性が高いため，収穫後の農作物の非破壊品質分析に利用されている．ナスでは956 nm の水分吸収の変化から光沢ぼけや果皮の張りの評価（河野，2008），メロン（伊藤，2007），ウンシュウミカン（藤原・本庄，1995），キウイフル

ーツ (Slaughter and Crisosto, 1998), モモ (近藤, 2007) などの糖度推定など, 多くの研究事例があり実用化も進んでいる (亀岡・橋本, 2003; Nicolai et al., 2007; 蔦ら, 2011). しかし, 800 nm 以上の近赤外光の生理作用に関する研究, 特に青果物の鮮度保持効果を検討した報告はほとんどない. 筆者らは, LED 光の植物への生理作用を検討する中で, 近赤外光に植物の蒸散率抑制作用があることに気づいた. これまでに収穫した幼苗レタスにおいて, 700 nm~1000 nm の光を $15\sim 100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の強度で 5~10 分間程度の短期間照射すると 800nm 以上の照射は, その後の蒸散率を抑制することを示し, その蒸散率抑制には, 活性酸素種 (ROS) 生成による気孔閉鎖促進が関与することを示唆した (高附ら, 2012; Kozuki et al., 2015). 本研究では, 実用利用に向けて, 実際流通レベルの葉菜類を対象として近赤外光照射が蒸散率と気孔開度, 外観品質などに及ぼす影響を実際の流通条件に近い環境で検討した.

4-2. 材料および方法

4-2-1. 材料

リーフレタス ‘ノーチップ’ は 2014 年 6 月 2 日と 10 月 14 日および 24 日に植物工場から出荷される直前のもの (商品名; セレブママ, 徳寿工業 (株)) を入手した. ホウレンソウは 2014 年 5 月 28 日 (香川県産), 8 月 18 日 (群馬県産) および 9 月 2 日 (岐阜県産飛騨ほうれんそう) に, コマツナは 2014 年 5 月 28 日 (香川県産), 2015 年 3 月 2 日 (香川県善通寺産) に市場で入手し, 各実験に用いた (図中の脚注参照).

4-2-2. 収穫後の近赤外光照射が葉菜類の蒸散率と気孔開度に及ぼす影響 (実験 1)

照射には直径 5 mm の砲弾型 LED 球 (中心波長= 850 nm, FWHM = 40 nm, (株) エピテックス; L850-04UP) が LED 基盤 (W 360 mm × D 280 mm) に 504 個並んだ LED 光源 ((株) 日本システムグループ (NSG)) を用いた. 照射条件は幼苗レタスで安定的な効果を示した波長 850 nm, 照射強度 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 5 分間照射とした (高

附ら, 2012 ; Kozuki et al., 2015). 近赤外光 1 回照射区と毎日照射区 (合計 3 回処理) および無照射区を設定し, リーフレタス, ホウレンソウ, コマツナに処理した. 毎日照射区は毎朝 9 時から 5 分間照射とした. 供試葉菜類を 1 個体ずつポリエチレン (PE) 袋に入れ横置きで各個体が重ならないように, 10°C, 庫内相対湿度 70%, 暗条件に設定したグロースチャンバー (MLR-350H, パナソニック ヘルスケア (株)) 内に保持した. 近赤外光照射はグロースチャンバー内で行い, 3 日後に蒸散率と気孔開度を測定した. 包装方法としては PE 袋 (高密度ポリエチレン, 厚さ 0.03 mm, 大きさ 300 mm×225 mm, ヘイコーパック (株)) を使用してポリ袋密封包装区と有孔ポリ袋包装区を設定した. 開口部をヒートシーラーで閉じ (鈴木・櫻井, 2014), 有孔ポリ袋包装区にはポリエチレン袋に面積比で開口率が 0.1 %となるようにコルクローラーで穴を開けた. 蒸散率の測定は 1 処理区当たり 3~5 反復 (図脚注参照) とし, 下記の計算式で算出した.

蒸散率率 (%) = $100 \times [(貯蔵前の新鮮重) - (貯蔵後の新鮮重)] / [(貯蔵前の新鮮重)]$

4-2-3. 収穫後の近赤外光照射が葉菜類の蒸散率と外観品質, 莖部硬度に及ぼす影響 (実験 2)

実験 1 と同様に近赤外光 1 回照射区と毎日照射区および無照射区を設定した. すべての照射, 貯蔵実験は 10°C, 相対湿度 60-70 % (庫内) 条件下で行った. 葉菜類を有孔ポリ袋 (開口率 0.1 %) に包装し, 暗所条件は輸送を模擬しグロースチャンバー (MLR-350H, パナソニック ヘルスケア (株), 照明無し) に, 明所条件は店頭陳列を想定しショーケース (SAR-490G, 三洋電機 (株), 蛍光灯照明あり) で保持した. 近赤外光照射は, グロースチャンバー (貯蔵用とは別チャンバー) 内で行った. 1 回照射区は初日のみ, 毎日照射区は, 毎日, 照射用チャンバーに移動させ, 処理を行った. なお, 貯蔵条件の均一性保持のため, 近赤外光処理しない試料も, 毎日 1 回, 貯蔵室から取り出し, 照射用と同機種 of チャンバーに所定時間, 移動させた. 処理後に

は素早く貯蔵用チャンバーまたはショーケースに戻した。明所貯蔵には蛍光灯を用いて、リーフレタスとハウレンソウには光強度 $30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、コマツナでは $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の可視光を連続的に照射した。実験 1 と同様に蒸散率を測定し、外観評価、茎部の硬度測定（リーフレタスとコマツナのみ）を行った。外観評価は 5 段階評点法（5：非常に良い（入手時とほぼ同じ）、4：良い、3：商品限界、2：明らかに鮮度低下、1：食べられない）で行った。茎部の貫入抵抗は、硬度計（果実硬度計 1 kg（KM 型）、（株）藤原製作所）と円柱プランジャー（直径 1 mm）を使用して測定した。硬度の測定箇所はリーフレタスでは 1 個体につき外葉全長の 1/2, 1/4, 基部から 1 cm 上部の 3 か所とした。リーフレタスとハウレンソウでは試験区ごとに 1 処理区 1 測定日当たり、それぞれ 4, 5 個体を用いて調査した。すなわち 8 日間でそれぞれ合計 88, 115 個体を使用した。コマツナでは 1 処理区当たり 9 個体を用い、7 日間同じ個体を経時的に測定した。貯蔵 7 日後に外葉から 5 枚除き順番に水平に重ねて基部より 1 cm 上部を測定した。

4-2-4. 気孔開度測定

LED 光（中心波長、 $\lambda_{P/FWHM} = 850/40$ ）を照射強度 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で 5 分間照射後、ポリエチレン袋に葉菜類を 1 個体ずつ入れ 10°C 暗所に設定したグロースチャンバー（MLR-350H, パナソニックヘルスケア（株））に貯蔵し 3 日後にレプリカを作成し気孔開度を測定した。

気孔開度の測定は Sakurai らの印象法（Sakurai et al., 1986）に従いレプリカ法による気孔開度の測定を行った。近赤外光照射側にある葉の表側中心部に主脈を避けペースト比 1:1 で混合したキャタリスト材とベース材（Provil novo, ヘレウスクルツァー ジャパン（株））を薄く塗り、固化後、丁寧に剥がし一次レプリカを作成した。次にマニキュア（酢酸メチル・酢酸ブチル・イソプロパノール・安息香酸シヨ糖エステル・フタル酸系アルキッド樹脂・DL-カンフル, （株）セントラル・メデック社）で二次レプリカを写し取った。二次レプリカは 1 処理区当たり反復数分作成した。光学顕

微鏡（MICROPHOT-S，日本光学顕微鏡（株））を用いて観察し，気孔開度を均等に測定するために二次レプリカ 1 枚当たり 4 か所写真を撮影した．その後試験区当たり合計 50 個の気孔について気孔開度を測定した．

4-3. 結果および考察

4-3-1. 収穫後の近赤外光照射が葉菜類の蒸散と気孔開度に及ぼす影響（実験 1）

植物は青色光，赤色光，730nm の近赤外光付近に光受容体を持つため生育中の植物に対し光を照射した研究は数多く報告されている（畑ら，2011）．しかし，収穫後の葉菜類に光処理した研究事例は少なく（細田ら，1981；細田ら，1983），特に近赤外光照射が貯蔵中の青果物の生理に与える影響について研究した例はほとんどない．筆者らは，幼苗レタス（ベビーリーフ）における近赤外光の生理作用の調査の中で，800nm 以上の近赤外光・短時間照射に蒸散率抑制作用があることを初めて発見した（高附ら，2012；高附ら，2013；Kozuki et al., 2015）．また，850nm の近赤外光照射は ROS 産生と気孔閉鎖を，促進することも示した．蒸散率抑制作用を示した波長領域はこれまでに知られているフィトクロームなどの光受容体の感知領域ではない（Talbot et al, 2002, 2003；Wang et al., 2010）．従って，近赤外光の生理作用には，これまでに知られていない受容体や作用機構があるのかもしれない．近赤外光短期間照射による蒸散率抑制には，気孔閉鎖促進が関与していると考えられる．

本研究では実際の流通レベルの葉菜類を対象として収穫後の近赤外光照射が葉菜類の蒸散と気孔開度に及ぼす影響について，10°C 暗所下でポリ袋密封包装および有孔ポリ袋包装条件で検討した．第 1 表に品目ごとに「近赤外光照射の有無および照射方法」，「包装方法」，を変動因とした分散分析の結果を示した．いずれの作目でも近赤外光照射は蒸散率と気孔開度に有意な影響を示すことが明らかになった．また，近赤外光照射の蒸散率の作用は，包装方法によって影響を受けることが示された．「包装方法」は蒸散率に有意な影響を及ぼしたが，気孔開度への影響はリーフレタスのみで

有意性が認められた。

第1表 近赤外光照射の有無及び照射方法，包装形態と重量減少率および気孔開度における分散分析表（実験1）

重量減少率					
品目	変動要因	自由度	偏差平方和	不偏分散	F値
リーフレタス	近赤外光照射 (A)	2	8.31	4.12	30.12**
	包装方法 (B)	1	91.89	91.89	666.25**
	A×B	2	1.27	0.64	4.62*
	誤差	24	3.31	0.14	
ハウレンソウ	近赤外光照射 (A)	2	21.35	10.68	12.10**
	包装方法 (B)	1	21.48	21.48	24.36**
	A×B	2	7.95	3.98	4.51*
	誤差	24	21.17	0.89	
コマツナ	近赤外光照射 (A)	2	1.74	0.87	23.20**
	包装方法 (B)	1	2.72	2.73	72.70**
	A×B	2	0.75	0.37	9.94**
	誤差	12	0.45	0.04	
気孔開度					
品目	変動要因	自由度	偏差平方和	不偏分散	F値
リーフレタス	近赤外光照射 (A)	2	4.19	2.07	5.54**
	包装方法 (B)	1	18.60	18.59	49.70**
	A×B	2	0.19	0.09	0.25
	誤差	294	110.03	0.37	
ハウレンソウ	近赤外光照射 (A)	2	7.25	3.62	7.55**
	包装方法 (B)	1	0.88	0.88	1.83
	A×B	2	0.16	0.08	0.16
	誤差	294	141.10	0.48	
コマツナ	近赤外光照射 (A)	2	8.76	4.38	8.60**
	包装方法 (B)	1	0.42	0.42	0.82
	A×B	2	0.27	0.13	0.26
	誤差	294	149.69	0.51	

変動要因；近赤外光照射：有無および照射方法（1回照射，毎日照射），包装方法：有孔ポリ袋包装，ポリ袋密封包装，重量減少率；リーフレタス（n = 5），ハウレンソウ（n = 5），コマツナ（n = 3），気孔開度；n = 50
2元配置の分散分析により各処理間に有意差あり，** $P < 0.01$ ，* $P < 0.05$

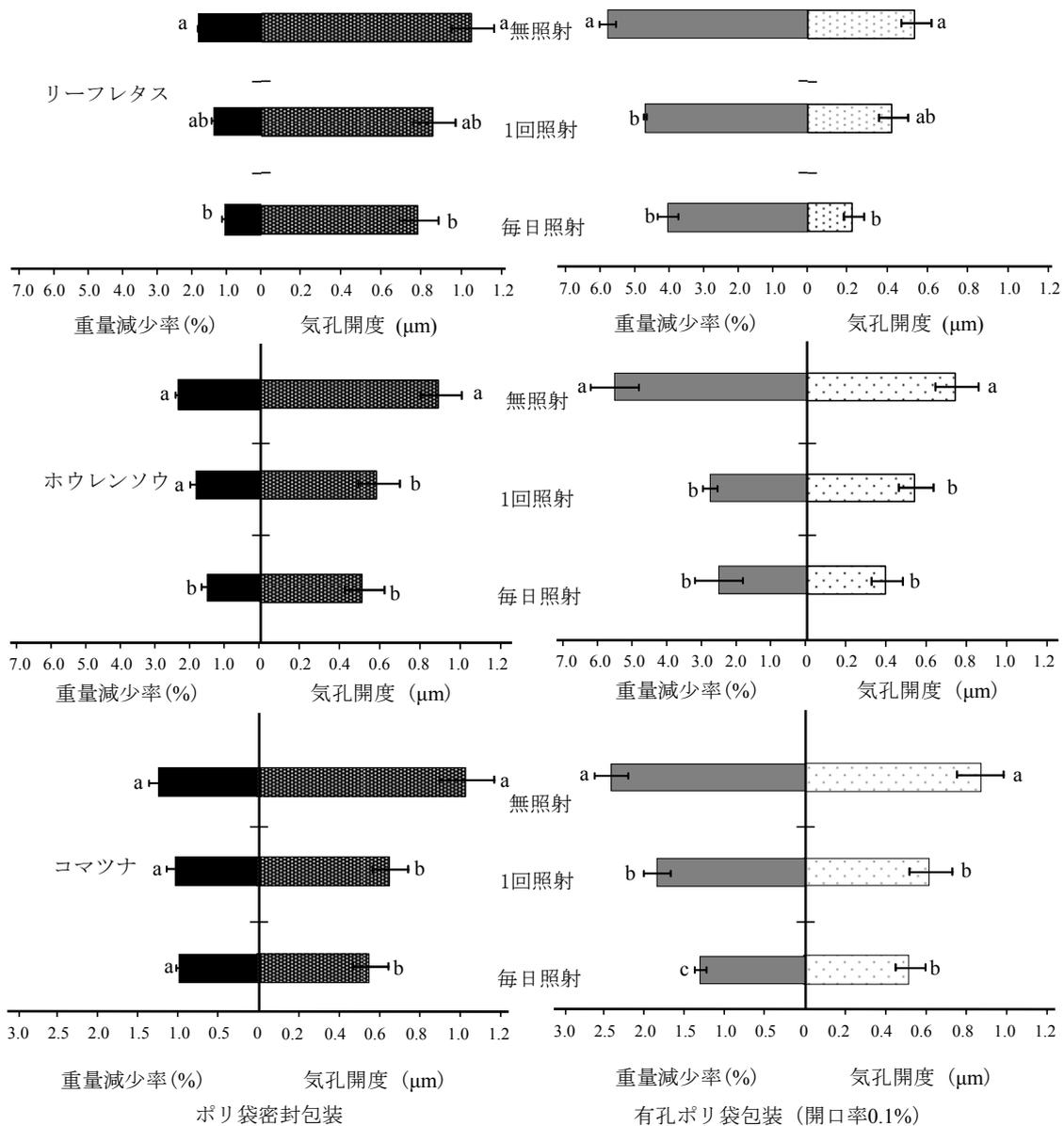
近赤外光照射は3種の葉菜類で、有孔ポリ袋包装とポリ袋密封包装のいずれでも無照射と比較して気孔閉鎖を促進し、蒸散率を抑制した（第1図）。毎日照射区では1回照射区よりも効果が大きくなる傾向を示した。ただし、ポリ袋密封包装したコマツナでの蒸散率に対しては近赤外光照射の効果は小さく、有意差は認められなかった。近赤外光照射の効果は3種の葉菜類の中でハウレンソウにおいて最も顕著であり、有孔ポリ袋包装において3日間の蒸散率は1回照射と毎日照射のいずれでも無照射区の約半分に抑制された。近赤外光照射による蒸散抑制に伴う気孔閉鎖効果も見られ、1回照射区と毎日照射区でそれぞれ気孔開度は無照射区より28%、47%小さくなっていた。これらの結果は、筆者らがレタス幼苗において初めて認めた近赤外光による気孔閉鎖促進、蒸散抑制作用（高附ら、2012, 2013；Kozuki et al., 2015）が、商品レベルの葉菜でも見られることを示している。

品目と光照射条件が同じならば、有孔ポリ袋包装区の蒸散率はポリ袋密封包装区より大きく、逆に気孔開度は小さい傾向を示した。蒸散は周囲の蒸気圧に左右されるため乾燥度が高ければ蒸散は増加する（樽谷・北川，1999）。従って、ポリ袋密封状態よりやや湿度の低い有孔ポリ袋包装区で蒸散率が少ないのは当然ではあるが、さらに植物側は気孔開度の調節で周囲の湿度条件に応答していることが示された。無照射区の蒸散率は、有孔ポリ袋包装したリーフレタスとハウレンソウでは3日間で外観品質低下の基準とされる5%を超えたのに対し、コマツナでは2.4%に留まり、品目間で大きな違いが見られた。これは品目により蒸散特性が異なることを反映していると考えられる（大久保，1988；樽谷・北川，1999）。

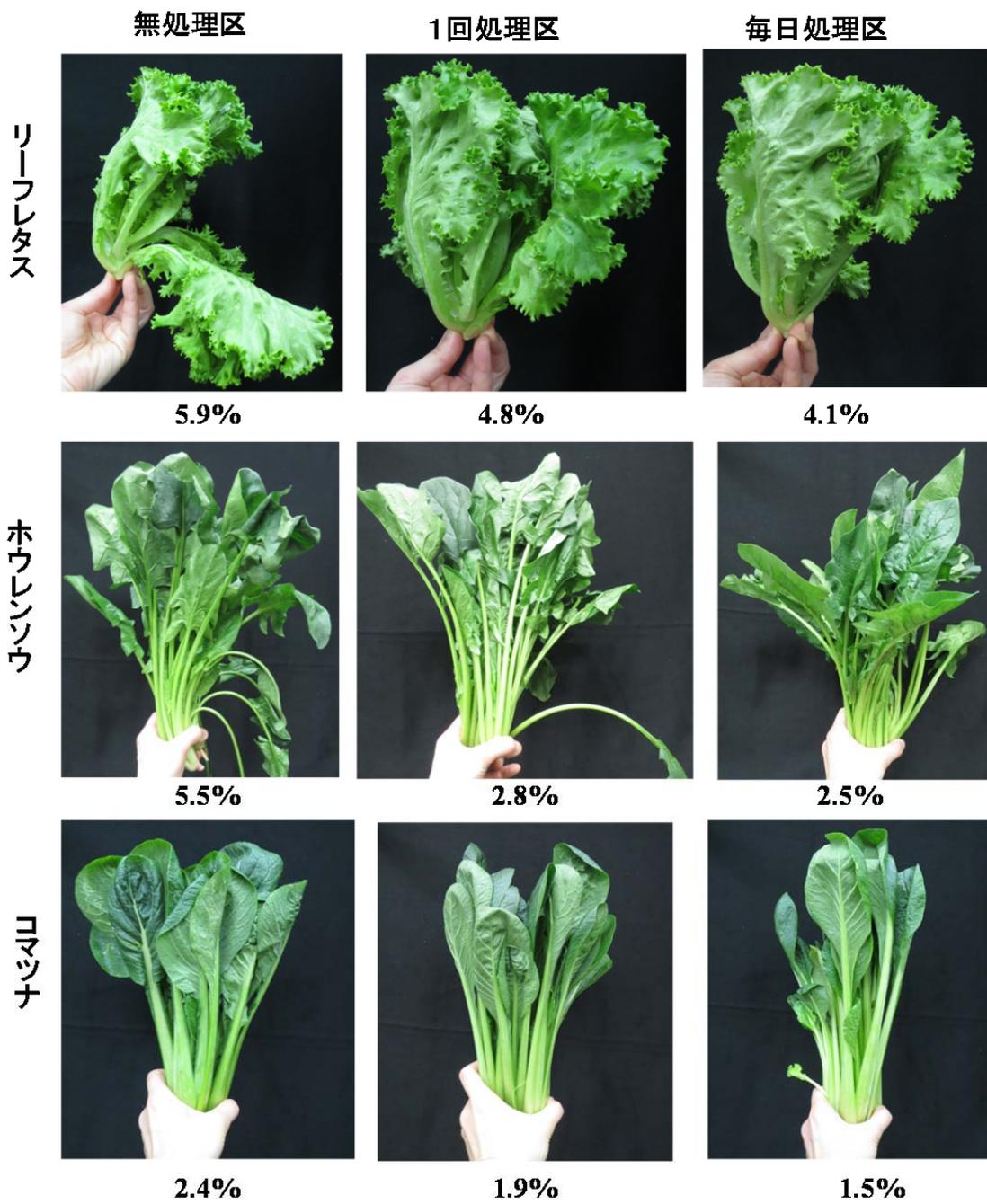
一般に、青果物の外観は新鮮量が5%減少すると萎れが目立ち始め、商品としての価値が減るとされている（樽谷・北川，1999）。今回の実験でも、貯蔵3日後の外観は蒸散率が5%を超えた有孔ポリ袋包装、無照射区のリーフレタスとハウレンソウにおいて萎れが顕著に観察された（第2図）。一方、近赤外光照射区では1回照射区と毎日照射区のどちらも、蒸散率が抑制され、3日目でも萎れは目立たなかった（第

2 図). コマツナでも近赤外光照射による蒸散抑制は見られたが, 外観への影響はほとんど見られなかった (第 2 図). これはコマツナでは無照射区において 3 日後の蒸散率は 2.4%であり, 明らかな萎れは観察されなかったためと考えられた.

以上の結果より, 10°C 暗所貯蔵条件において, 収穫後の商品レベルの葉菜類への近赤外光の短期間照射が, 気孔閉鎖促進・蒸散率抑制効果を示し, 品目によっては外観品質保持につながる事が明らかになった.



第1図 近赤外光照射が葉菜類の重量減少率と気孔開度に及ぼす影響 (実験1) . 光源 ; LED, 照射強度 ; $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 照射波長 ; 中心波長 850 nm, 照射時間 ; 5分, 保存条件 ; 10°C , 庫内 RH70 %, 暗所3日, 品目 ; リーフレタス‘ソーチップ’, 2014年6月2日入手, (n=5), ほうレンソウ, 2014年5月28日入手 (香川県産), (n=5), コマツナ 2014年5月28日入手 (香川県産), (n=3), 気孔開度 (n=50), Tukey の多重比較検定, 異なるアルファベットは5%水準で有意差あり



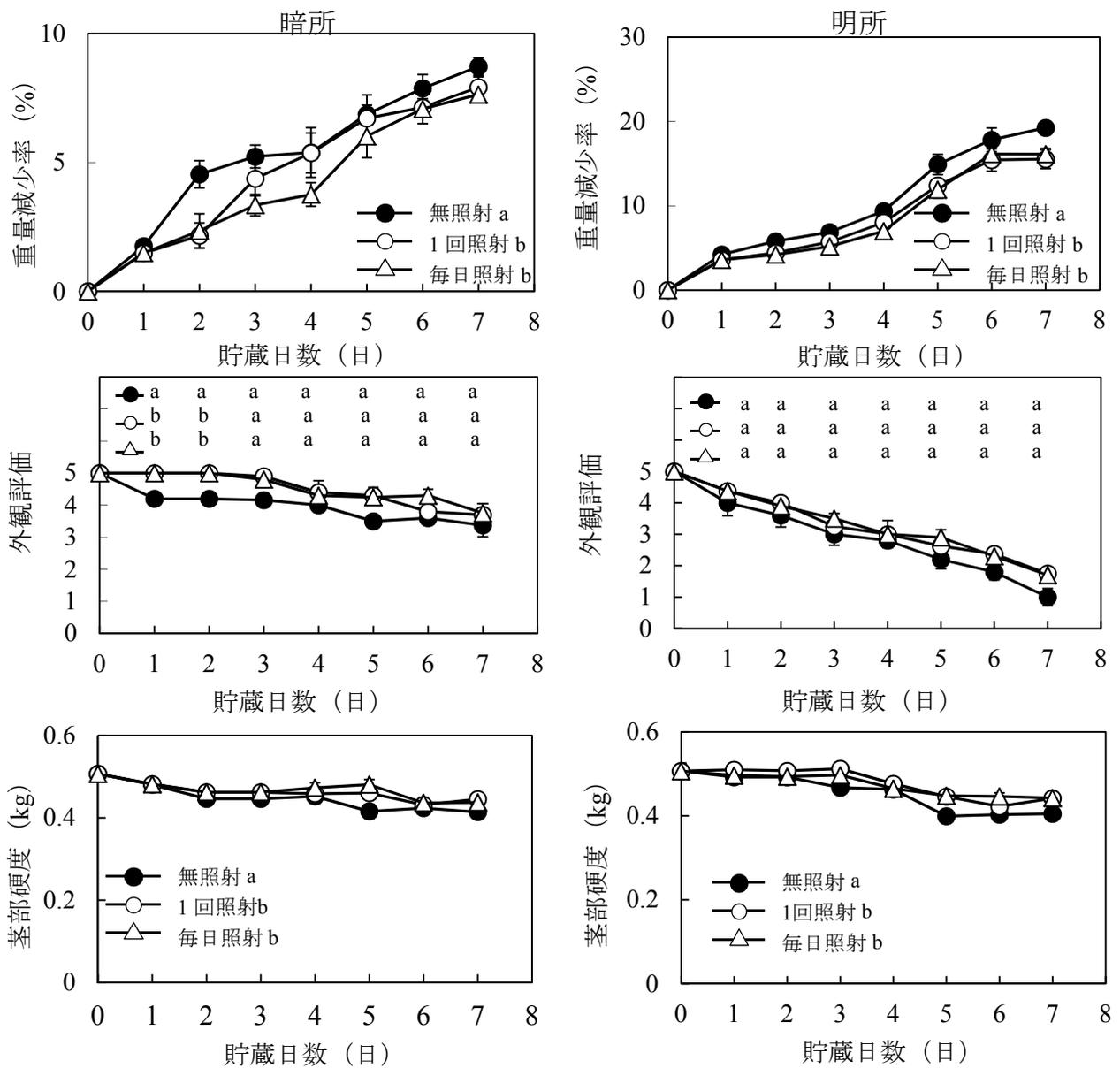
第2図 近赤外光照射回数が葉菜類の重量減少率と外観に及ぼす影響（実験1）
 処理条件などは第1図脚注参照，数値は3日後の重量減少率

4-3-2. 収穫後の近赤外光照射が葉菜類の蒸散と外観品質、茎部硬度に及ぼす影響

(実験 2)

実験 1 では近赤外光照射の効果をポリ袋密封包装と有孔ポリ袋包装条件で検討したが、実際の葉菜類の流通現場ではポリ袋密封包装はほとんど用いられていない。これは生理活性の高い葉菜類ではポリ袋密封包装を用い、期間が長くなったり、温度が高くなったりした場合には、袋内の炭酸ガス濃度が上昇し、ガス障害発生の危険があるためである (Kader, 1986; Kubo, 2015)。そこで、実験 2 では、鮮度保持技術としての近赤外光照射の実用性を検討するために、有孔ポリ袋包装を用い、照射後の保存条件として短期貯蔵を模擬した 10°C 暗所条件とショーケースでの陳列を模擬した 10°C 明所貯蔵条件で鮮度保持効果を貯蔵 7 日後まで経時的に調査した。

リーフレタス、ハウレンソウ、コマツナの 3 品目について「近赤外光照射の有無および照射方法」「貯蔵日数」を変動因とする 2 元配置分散分析を行い、近赤外光照射は蒸散減少率、茎部硬度に有意な影響を示すことが明らかになった (分散分析表は省略)。10°C 暗所条件では、無照射区のリーフレタスは 3 日後には蒸散率が 5%を超えたのに対し、1 回照射区では 4 日後に、毎日照射区では 5 日後に蒸散率が 5%を超え、外観品質もやや良好であった (第 3 図)。無照射区と照射区の蒸散率の差は貯蔵 2 日後において最も大きかった。その後、差は貯蔵 4 日後まで徐々に小さくなったが、毎日照射区の蒸散率は貯蔵 4 日後から 7 日後まで無照射区より 20%程度低く維持された。外観品質は無照射区では貯蔵 1 日後に外観品質 4 に低下したのに対し 1 回照射区と毎日照射区では、数日遅れて外観品質 4 に低下した (第 3 図)。茎部硬度も蒸散率の増加とともに低下し、程度の差は小さいが貯蔵 7 日後まで照射区でやや硬く維持される傾向が観察された (第 3 図)。



第3図 近赤外光照射回数がリーフレタスの重量減少率，外観，茎部硬度に及ぼす影響（実験2）。

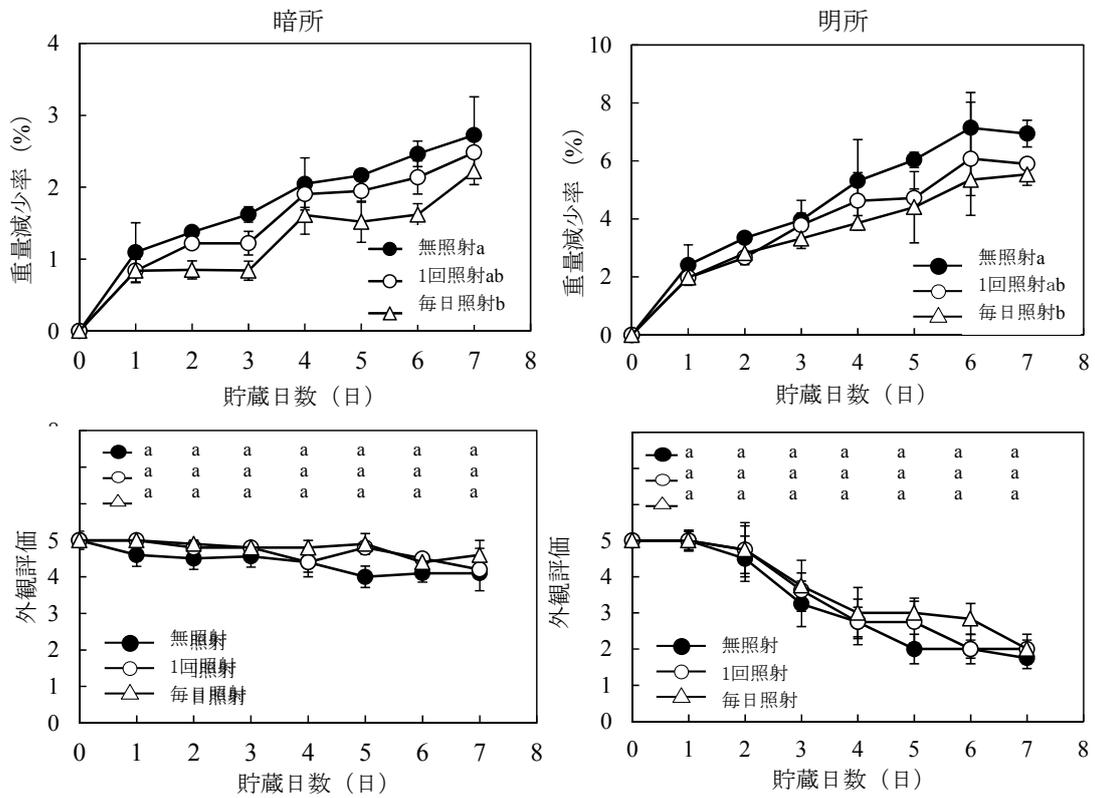
処理条件などは第1図脚注参照，包装方法；有孔ポリ袋包装（開口率0.1%），貯蔵条件；10℃，RH60-70%（庫内），暗所および明所（ $30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ），エラーバーは標準誤差（重量減少率； $n=4$ ，外観； $n=4$ ，硬度； $n=12$ ），入手日；暗所保存用は10月24日，明所保存用は10月14日

重量減少率，茎部硬度；Tukeyの多重比較検定，異なるアルファベットは5%水準で処理区間に有意差あり

外観；各測定日ごとにSteel-Dwassの多重比較検定，異なるアルファベットは5%水準で有意差あり

明条件下でも、近赤外光照射による蒸散率抑制効果は認められた。無照射区のリーフレタスは蒸散率が1日後には5%を超えたのに対し近赤外光1回照射区と毎日照射区では3日後には超え、その後も1回照射区と毎日照射区の差異はほとんどなかった。また、いずれの区においても暗条件下と比較すると蒸散率と外観指数の低下が急速であった。

ハウレンソウでは10°C暗所条件において、2%の蒸散率に達するまでの日数が無照射区では4日間であったのに対し近赤外光1回照射では極わずかに、毎日照射では約3日遅延された(第4図)。近赤外光毎日照射による蒸散率抑制効果は貯蔵7日後まで持続し、わずかではあるが外観鮮度保持効果も見られた。明所条件でも近赤外光照射による蒸散率減少抑制効果が見られ、蒸散率5%に達するまでの日数は無照射区では4日間であったのに対し、近赤外光照射区では約2日遅れ、蒸散率が貯蔵6日後には無照射区と比較して1回照射区では15%、毎日照射区では25%少なかった。商品限界である外観品質3に低下するまでの日数は無照射区では約3日であったのに対し、毎日照射区では約2日遅れた。



第4図 近赤外光照射回数がホウレンソウの重量減少率と外観に及ぼす影響 (実験2)

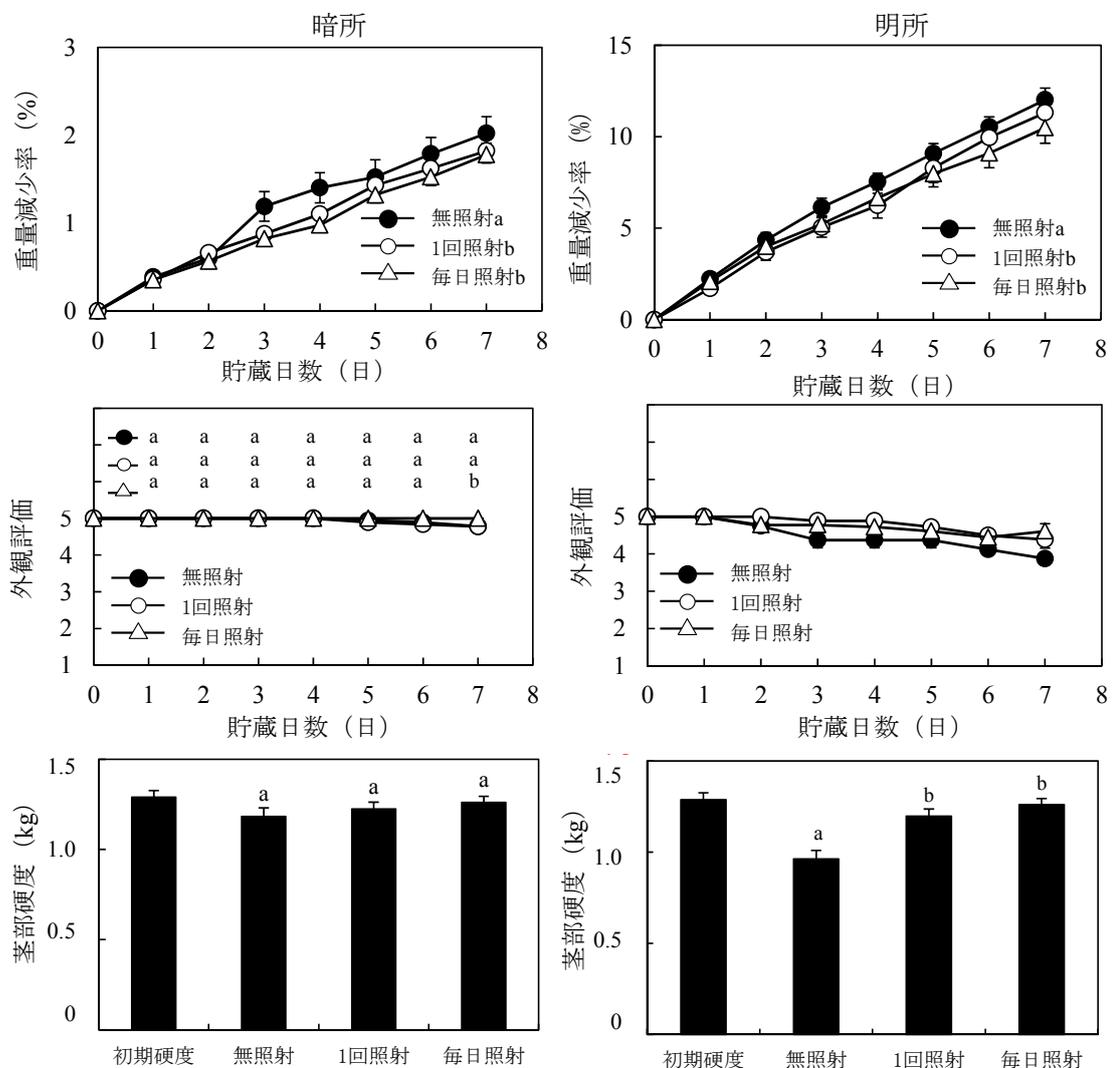
処理条件などは第1図脚注参照, 包装方法; 有孔ポリ袋包装 (開口率 0.1%), 貯蔵条件; 10°C, RH60-70% (庫内), 暗所および明所 ($30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), エラーバーは標準誤差 (重量減少率; $n=5$, 外観; $n=5$), 入手日; 暗所保存用は8月18日 (群馬県産), 明所保存用は9月2日 (岐阜県産)

重量減少率; Tukey の多重比較検定, 異なるアルファベットは5%水準で処理区間に有意差あり

外観; 各測定日ごとに Steel-Dwass の多重比較検定, 異なるアルファベットは5%水準で有意差あり

10°C 暗所条件のコマツナでは、近赤外光照射による蒸散抑制効果が貯蔵後 3, 4 日後で大きく、無照射区と比較して 1 回照射で 26 %, 毎日照射で 31 %抑制された (第 5 図)。その後、蒸散率抑制効果は漸減したが貯蔵 7 日後においても近赤外光照射区では無照射区よりも蒸散率が約 10 %小さかった。いずれの区でも蒸散率が 7 日保存後でも 2%程度であったため、外観品質の違いはほとんど見られなかった (第 5 図)。明所貯蔵でも、わずかではあるが近赤外光照射によって蒸散率が抑制される傾向が見られ、外観品質も照射区でやや優れた (第 5 図)。貯蔵 7 日後の茎部硬度は無照射区では 0.96 kg まで低下したが 1 回照射区では 1.20 kg, 毎日照射区では 1.26 kg と高く維持された (第 5 図)。

貯蔵中における葉菜類への弱光照射が緑色保持に伴う品質保持効果を示す場合もあることが示されている (細田ら, 1981)。しかし本研究では、リーフレタス、ハウレンソウおよびコマツナのいずれでも、暗所貯蔵条件より明所条件の方が総じて蒸散率は急速で外観鮮度低下も早かった (第 3 図~第 5 図)。生育中に植物に可視光を当てると蒸散が進む (樽谷・北川, 1999)。これは、光線により気孔が開くことと光線により植物体温が上昇するという 2 つの作用による (樽谷・北川, 1999)。収穫後でも、気孔は完全に閉じている訳ではないので、明条件では暗条件よりも気孔開度が大きかったと推測される。また、今回の明条件のための光照射には蛍光灯を用いたので、10°C に設定したショーケース内でも照射された表面の温度はわずかに上昇し蒸散率を促したということも考えられるため、今後温度の影響についても詳細に検討したい。



第5図 近赤外光照射回数がコマツナの重量減少率，外観，茎部硬度に及ぼす影響（実験2）

処理条件などは第1図脚注参照，包装方法；有孔ポリ袋包装（開口率0.1%），貯蔵条件；10°C，RH60-70%（庫内），暗所および明所（ $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ），貯蔵7日後の茎部硬度，エラーバーは標準誤差（重量減少率；n=9，外観；n=9，硬度；n=9），入手日；2015年3月2日（香川県産）

重量減少率，茎部硬度；Tukeyの多重比較検定，異なるアルファベットは5%水準で処理区間に有意差あり

外観；各測定日ごとにSteel-Dwassの多重比較検定，異なるアルファベットは5%水準で有意差あり

4-4. 収穫後近赤外光短時間照射の鮮度保持技術としての可能性

本研究では、収穫後の近赤外光短時間照射が商品レベルのリーフレタス、ホウレンソウ、コマツナでも無照射区と比較すると気孔閉鎖を促進し、蒸散率を抑制し、外観品質や茎部硬度維持に効果があることが明らかになった。対象品目や貯蔵条件によって効果の大小に違いはあるが、総じて、近赤外光毎日照射は1回照射よりも効果的に葉菜類の重量減少を抑制した。蛍光灯による白色光は熱線を含み熱により蒸散率が加速されたと考えると赤外線領域を含まないLEDにより試験を行うことで近赤外光照射による鮮度保持効果を最大限に引き出せるかもしれない。近年半導体製造技術を植物工場に応用する企業が増え、栽培中の可視光による生育効果や機能性成分の研究が進められている(福田ら, 1993; 小山ら, 1999; 前田ら, 2006; 田村, 2001)。栽培技術で高品質の葉菜類を収穫できても輸送、出荷、店頭に至るまでの流通中に品質が低下すると損失が大きいため、その鮮度保持技術の確立は重要であり、廃棄量軽減の主要条件とされる(Harvey, 1978, 1981)。青果物の蒸散抑制・鮮度保持技術としては、低温下でのフィルム包装やワックス処理が効果的である(樽谷, 1963; Church and Parsons, 1995; 中野ら, 2001)。中でもポリ袋密封包装は青果物周辺の湿度をほぼ100%に保ち、顕著に蒸散を抑制することができるが、ガス障害の危険が伴うため、実際の流通・貯蔵現場ではごく限られた品目、条件でのみ利用されている。多くの葉菜類では有孔ポリ袋包装での流通・貯蔵が一般的であるが、一定の蒸散による水分損失は避けられない。特に、スーパーマーケットのショーケース内のような明条件では、蒸散による品質低下も早いものと推測される。本研究で示された近赤外光短時間処理による蒸散率抑制、外観品質保持作用は、いずれの品目でも着実に認められた。850 nm 波長の近赤外光は安価なLEDで得られ、5分程度の極短時間の処理で十分なことから、導入の初期投資やランニングコストも極小さい。従って、近赤外光照射は容易に流通・貯蔵における有孔ポリ袋包装や低温技術に付加することができる。本研究の結果は、近赤外光照射による見えない光環境が葉菜類の新しい付加的鮮度保持技術と

なる可能性を示している。今後はより多様な青果物について、近赤外光の照射波長や時期、期間、回数などの処理条件を詳細に検討し、蒸散率抑制効果について調査を進める必要がある。

4-5. 摘要

収穫後の短時間近赤外光照射（中心波長；850 nm, $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 5 分間）が3種の葉菜の蒸散率と気孔開度および外観品質に及ぼす影響を調査した。リーフレタス、ハウレンソウ、コマツナに貯蔵前1回または毎日、近赤外光を5分間照射し、ポリ袋密封包装または有孔ポリ袋包装を行い、 10°C 暗所に保存した。いずれの葉菜でもポリ袋密封包装と有孔ポリ袋包装にかかわらず、貯蔵3日後の近赤外光照射区の蒸散率と気孔開度は無照射区と比較して小さくなり、照射区では外観品質も優れた。その効果は近赤外光1回照射区より毎日照射区の方が大きくなる傾向を示した。有孔ポリ袋に包んだ葉菜類を 10°C 下で暗所および明所に保存し、近赤外光照射の効果を経時的に調べたところ、いずれの条件でも近赤外光照射による蒸散抑制、外観品質保持効果が確認された。その効果は1回照射よりも毎日照射区で優れ、特に、ハウレンソウでその効果が大きかった。本研究の結果は収穫後の短期間近赤外光照射は流通中の葉菜類の付加的な品質保持技術として応用できる可能性を示すものである。

第 5 章

近赤外光短時間照射が各種青果物の蒸散・品質に
及ぼす影響

5-1. 緒言

栽培中の農作物の品質形成に関わる要因として、遺伝的因子（品種，系統など），栽培技術（養水管理，収穫時期など），栽培環境条件（気温，日射量，土壌など）がある（茶珍，2007）．実際にはこれらの要因が複雑に相互作用することで農作物の品質が形成される．そのため，植物工場やハウス栽培等を除けば農作物の栽培は栽培環境の影響を避けることは不可能である．そのため適当な品種や系統を選定し，栽培技術を改善することで現在までに日本で栽培されている野菜の数だけでも 150 種類存在する．さらに，リンゴは現在出荷されているものは数十種類だが名前が付けられたものだけでも世界で 1 万種類以上あり日本でも 2000 種類ほどある．一般に品種や系統が品質に及ぼす影響は大きく，耐病性や収量に影響する．農作物の多くは春播きから冬播きの播種期によって，大部分の果菜類は普通，早熟，半促成，促成および抑制栽培に分類されるため，旬にかかわらず周年供給される．またハウレンソウ等は夏季高温期には呼吸により糖が減少し，冬期においてはゆっくり生育するため糖含量が高まり耐寒性を獲得する．また栽培期に土壌水分は果菜および果実類の成分を変化させる．トマトの高糖度化は果実肥大期に水ストレスにさらされることでおこる（中原・井上，1997）．さらに，近年食の安心安全そしておいしいものを食べたいという考えから栽培土壌や栽培環境の改善を県や市さらには会社や個人の農家単位でも取り組んでいる．そのため，農作物の収穫後の貯蔵性もさまざまである．ほとんどの農作物はタマネギやジャガイモなどのように休眠現象のため貯蔵性が高いものを除いて，水分を豊富に含んでいるため呼吸や光合成などの生理活性が高く収穫後の鮮度低下は著しい．さらに，栽培時期や収穫時の天候，栽培品種等にも影響される．農作物の鮮度保持技術は第 1 章で述べたように多数存在するが，全ての農作物を 1 つの技術で消費者を満足させるような鮮度の良い状態で届けることは非常に難しい．そこで，収穫から集荷，配送を経て店頭に並ぶまで栽培方法や交通手段，販売方法が多様化する中新

たな鮮度保持技術の開発として近赤外光照射による農作物への鮮度保持効果の可能性を葉菜類，果菜類，果実類，根菜において網羅的に調べた．主に，貯蔵後の重量変化より蒸散率を算出し成分分析等も行ったので報告する．

5-2. 材料および方法

5-2-1. 材料

実験材料には葉菜類には結球春レタスを使用し，オクラ‘アーリーファイブ’，ナス‘土佐鷹’，中玉トマト‘カンパリ’，ピーマン等の果菜類，モモ，ピオーネ，デラウェア，アセロラ，ビワ，ミカン等の果実類，根菜であるニンジンを用いた．これらの材料は収穫時期に応じて市場で購入したものや，植物工場や圃場で育成・収穫されたものを用いた．供試材料には品種が明確でないものもあったため産地と品種を極力揃え同じものを用いた．全品目のうちいくつかの品目を用いて以下の実験に供試した．

5-2-2. 近赤外光照射方法および蒸散率の算出方法

試験条件と蒸散率算出方法はすべて同じ方法を以下の試験に適用した．照射条件は日本システムグループ社製の光源を使用して無照射， $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5 \text{ 分}$ ， $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 1 \text{ 分}$ ， $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 1 \text{ 分}$ とし中心波長 850 nm （ピーク波長； $\lambda_{\text{P}/\text{半値幅}}; \text{FWHM} = 850 \text{ nm}/_{40}$ ）の LED を光源として用いた．照射強度と時間は上記試験条件を青果物の種類に応じて選択し用いた．蒸散率の算出方法は初期新鮮重と貯蔵後の新鮮重の重量変化より百分率で算出した．

5-3. 葉菜類

結球春レタス

2013年4月11日と4月15日に採取された愛媛県産結球レタスの茎部切り口を切り戻し供試材料とした．近赤外光照射後（LED： $\lambda_{\text{P}} = 850 \text{ nm}$ ）フィルム包装なしの状態段ボールに詰めた区（以下，NIR14W・5分・包装－，NIR100W・1分・包

装－), 近赤外光照射後フィルム包装後に段ボールに詰めた区 (以下, NIR14W・5分・包装+, NIR100W・1分・包装+, NIR200W・1分・包装+) および無照射はフィルム包装なし (以下, NT・包装－) とフィルム包装あり (以下, NT・包装+) とした (第1表, 第2表). 段ボールには上段7個, 下段8個を切り口を下向けに詰め込み, 段ボールの開口部をガムテープで閉じた後に5°Cの冷蔵庫に静置した (写真1). 評価項目は, 蒸散率, 貯蔵後の切り口の褐変度合いと生菌数および外葉軸部のBrix値, クリープ解析を行った.

第1表 近赤外光照射条件

近赤外光の照射方法	表記
無照射×フィルム包装あり	NT・包装－
無照射×フィルム包装なし	NT・包装+
近赤外光照射 14W・m ² ・5分×フィルム包装なし	NIR14W・5分・包装－
近赤外光照射 100W・m ² ・1分×フィルム包装なし	NIR100W・1分・包装－
近赤外光照射 100W・m ² ・1分×フィルム包装あり	NIR100W・1分・包装+

注1. 4月11日に入手.

第2表 近赤外光照射条件

近赤外光の照射方法	表記
無照射×フィルム包装あり	NT・包装－
無照射×フィルム包装なし	NT・包装+
近赤外光照射 100W・m ² ・1分×フィルム包装なし	NIR100W・1分・包装－
近赤外光照射 100W・m ² ・1分×フィルム包装あり	NIR100W・1分・包装+
近赤外光照射 200W・m ² ・1分×フィルム包装あり	NIR100W・1分・包装+

注1. 4月15日に入手.



写真1 照射と箱づめの様子

5-4. 果菜類

ナス, オクラ, キュウリ.

促成栽培され 2013 年 6 月 26 日に収穫されたナス ‘土佐鷹’, オクラ ‘アーリーフ
 アイブ’ および高知市春野町で栽培され 2013 年 6 月 27 日に収穫されたキュウリを
 供試材料とした. 近赤外光照射は $14 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot 5 \text{ 分}$, $100 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot 1 \text{ 分}$ および無照射
 区とし照射後は, 8L のプラスチック容器に入れ蓋をし, 25°C 暗明所と 25°C 明所に
 保存した. 調査項目は蒸散率と外観変化とした.

中玉トマト

2014 年 1 月 19 日と 1 月 26 日に採取した中玉トマト ‘カンパリ’ (愛知県産) を
 入手し供試材料とした. ‘カンパリ’ はフルーツトマトの一種で肉厚で甘みと酸味の
 バランスが良い品種である. トマトは郵送時に追熟されるため通常中熟状態で収穫さ
 れるが完熟と中熟を試験に用いた. これまでに各種青果物における標準照射条件であ
 る. 波長 850 nm (以下, NIR1) で照射強度 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ で 5 分に加えて $100 \text{ W} \cdot \text{m}^2$
 2 で 1 分および 940 nm (以下, NIR2), 850 nm と 940 nm の併用 (以下, NIRMIX)
 についても検討した (第 1 表). 試験区は, 2 波長の同時照射が可能なタイプの LED
 光源 (照射面積: $30\text{cm} \times 40\text{cm}$, 日本システムグループ社製) を使用し, 照射区 (以

下, NIR1・1分), 近赤外光 ($\lambda P = 850 \text{ nm}$) を照射強度 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 5 分間照射した照射区 (以下, NIR1・5分), 近赤外光 ($\lambda P = 850 \text{ nm}$) を照射強度 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 1 分間照射した照射区 (以下, NIR1H・1分), 近赤外光($\lambda P = 940 \text{ nm}$)を照射強度 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 1 分間照射した照射区 (以下, NIR2・1分), 近赤外光 ($\lambda P = 940 \text{ nm}$) を照射強度 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 5 分間照射した照射区 (以下, NIR2・5分), 近赤外光 2 波長 ($\lambda P = 850 \text{ nm}$, $\lambda P = 940 \text{ nm}$)を照射強度 $7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 5 分間照射した照射区 (以下, NIRMIX・5分), 近赤外光 2 波長 ($\lambda P = 850 \text{ nm}$, $\lambda P = 940 \text{ nm}$)を照射強度 $7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 1 分間照射した照射区 (以下, NIRMIX・1分) および無照射区 (以下, NT) とした (第 1 表). 貯蔵は ‘トマト’ が転がらないようスポンジで固定し, 3.7L 容積のタッパーウェアに入れ過度な湿度による蒸れによる劣化を防ぐため上部は半紙で蓋をした.

評価項目は, 蒸散量, 果実成分 (糖度, 酸度, ビタミン C), 果実の劣化 (へたおよび果実の劣化, 果実硬度) とした. 蒸散量は, 果実をタッパーウェアに入れた状態で温度: $20^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$, 湿度: 60 %Rh, 暗所のインキュベーター (MLR-350H, パナソニックヘルスケア (株)) 中で 3 日間保存した場合の重量変化から求めた. 果実硬度は赤道部 2 か所を (果実硬度計 KM-5 型, (株) 藤原製作所製) を用いて測定した. 果実成分は, 貯蔵 3 日後と 6 日後に糖度, 酸度, ビタミン C を測定した. サンプル液は果実硬度測定後, 重量と等量の水を加えミキサーで粉後 12,000 rpm で 1 分間遠心した後の上清を使用した. 糖度は糖度計 (デジタル糖度計, (株) アタゴ社製) から BRIX を測定し, ビタミン C は RQ フレックス (反射式光度計 (株), 藤原製作所製) より求めた. また酸度は中和滴定法により中和に必要な水酸化ナトリウムからクエン酸換算した.

へた部分の劣化度評価は在来菌の数に依存するものと思われたためルミテスター PD-20 (キッコーマンバイオケミファ (株)) を一般細菌数の簡易検出法として使用し 1 試験区に菌の多いサンプルが片寄らないように注意した. その後プラスチックカ

ップに1試験区あたり3個ずつ並べ小型恒温槽に3日間貯蔵後へた部分の黄化，カビ発生，萎れにより点数評価（非常に悪い：3～非常に良い：0）をおこなった．へたの劣化状態は貯蔵温度は劣化を促進させるため30℃の高温で行ったが到着したトマトの品温が11℃と低く，30℃での貯蔵は果実自体に亀裂が入ってしまった．そこで中熟トマトは貯蔵温度を25℃に下げ外観評価試験を行った．次に流通時のトマトの劣化は亀裂箇所からのカビの発生が多いため表面汚染菌としてトマトから分離したカビを人為的に感染させることにより行った．すなわち，近赤外光を照射したトマト果実の側面にメスで十字に約1cmの切り込みを入れPDA寒天培地で培養した5mm角カビの菌叢（*Fusarium* 属）を塗沫接種した後，インキュベーター内で3日間保存し果実部の劣化状態を点数評価（非常に悪い：3～非常に良い：0）した．

第1表 近赤外光照射条件

近赤外光の照射方法	表記
無照射	NT
波長1・14W・m ⁻² ・1分	NIR1・1分
波長1・14W・m ⁻² ・5分	NIR1・5分
波長1・100W・m ⁻² ・1分	NIR1H・1分
波長2・14W・m ⁻² ・1分	NIR2・1分
波長2・14W・m ⁻² ・5分	NIR2・5分
(波長1・7W・m ⁻²)+(波長2・7W・m ⁻²)・1分	NIRMIX・1分
(波長1・7W・m ⁻²)+(波長2・7W・m ⁻²)・5分	NIRMIX・5分

注1. 波長1はλP=850nm, 波長2はλP=940nm

ピーマン

5月に市場で購入した‘ピーマン’を供試した．試験区は中心波長850nmのLED光源を使用し照射強度14W・m⁻²で5分間照射した区および無照射区とした．貯蔵は照射後室温25℃，60%Rhに14日間貯蔵した．調査項目は蒸散率と外観とし，蒸

散率は重量変化から求めた。

5-5. 果実類

2013年6月7日に採取された‘茂木びわ’（香川県産）と2013年9月2日に収穫された‘ピオーネ’（香川県産）、‘デラウェア’（香川県産）、2013年7月10日と2013年10月15日に採取された‘アセロラ’（香川県産）、市場で入手した‘モモ’（香川県産）‘ミカン’を供試材料とした。

ビワ

2013年6月7日に採取された‘茂木びわ’を供試材料とした。香川県を代表する特産品「茂木びわ」は、明治33年にみかんの防風林として導入され、みかんの補完品目として夏季の収入源にもなることから昭和40年代頃から生産量が増えて今では全国3位となっている。双果を切り離し1個ずつを無照射区と照射区に分けた。試験区はLED光源を使用し、近赤外光（ $\lambda P = 850 \text{ nm}$ ）を照射強度 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ で5分間照射および無照射の2試験区とし貯蔵はバットに入れラップをかけ両面テープで密閉後 25°C 暗所に保存した。評価項目は蒸散率と果実硬度、糖度、酸度とした果実ははく皮後1果実当たり赤道部の3ヶ所の果肉硬度を果実硬度計（1 kg 用、直径 5 mm の円柱）で測定した。果肉は搾汁後糖度（屈折糖度計）および滴定酸度（リンゴ酸換算）を測定した。

ピオーネ

2013年9月2日に収穫されたピオーネを供試材料とした。照射照射は $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5 \text{ 分}$ 、 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 1 \text{ 分}$ および無照射とした。貯蔵はタッパーに入れ半紙で蓋をし 25°C に保存した。次に貯蔵温度を 4°C 、 10°C 、 20°C とし、近赤外光照射の鮮度保持効果を検証した。貯蔵後重量を測定し、重量変化から蒸散率を計算した。果実は1果実当たり赤道部2か所と底部1か所の果肉高度を皮の上から果肉高度計（1 kg 用、直径 10 mm の円柱）で測定した。果肉は搾汁後糖度（屈折糖度計）および滴定酸度

(酒石酸換算) で計算した。ピオーネの軸の褐変は製品価値に影響を及ぼすため、近赤外光照射が軸の褐変を抑制するか調べた。軸は果実をすべて除き、果実を除いた軸からの乾燥を防ぐため切り口にワセリンを塗った。さらに近赤外光照射後 25°C に保存したピオーネの 1 房当たりの脱粒率を測定した。

デラウェア

市場で入手したデラウェア供試材料とした。照射条件は $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ で 5 分間および無照射とした。貯蔵は 4°C, 10°C, 25°C に設定したクールインキュベーター (CN-25C, (株) テックジャム) に暗所保存した。貯蔵後重量を測定し重量変化から蒸散率を計算した。果肉は搾汁後糖度 (屈折糖度計) および滴定酸度 (酒石酸換算) を測定した。

アセロラ

2013 年 7 月 10 日と 2013 年 10 月 15 日の午前中に採取された ‘アセロラ’ (沖縄県産) を供試材料とした。貯蔵温度が ‘アセロラ’ の蒸散に及ぼす影響は 2013 年 7 月 10 日に採取された成熟果実を供試した。プラスチックトレーの上にクッション材を敷き、その上に ‘アセロラ’ を各個体が接触しないように各試験区 9 個並べた。LED 光源を使用し、近赤外光 ($\lambda_P = 850 \text{ nm}$) を照射強度 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 5 分間照射後 5°C, 10°C, 15°C に設定した恒温槽に保存し 1 日後の重量変化から蒸散率を計算した。試験区は近赤外光照射および無照射とした。さらに照射強度が ‘アセロラ’ の蒸散に及ぼす影響について評価した。試験区は、照射強度 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 5 分間、照射強度 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 1 分間照射および無照射とした。貯蔵は 4°C に保存し貯蔵 1 日後と 6 日後に蒸散量を測定した。

2013 年 10 月 15 日の午前中に採取された ‘アセロラ’ は完熟果、中熟果、未熟果に分け、近赤外光照射が果実の傷みに及ぼす影響について調査した。前回の試験で蒸散を抑制した近赤外光照射強度 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 5 分間照射を 25°C で 6 日間貯蔵し無照射と比較した。

モモ

7月に市場で購入したモモを供試した。試験区は照射強度 $14\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ で5分間照射および無照射とした。貯蔵はタッパーにキムテックス（日本製紙クレシア（株））を敷き、その上に各果実が接触しないように並べ 10°C に保存し貯蔵後の蒸散率と貯蔵8日後の外観を評価した。

ミカン

2013年12月に収穫および予措を行った温州ミカン‘大津4号’を用いた。1試験区あたり50個に対して近赤外光照射した。試験区は2013年1月9日に近赤外光 ($\lambda\text{P} = 850\text{nm}$) を照射強度 $14\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ で5分間1回照射した試験区と2013年1月9日と2月7日に2回近赤外光照射を行った試験区および無照射区とした。照射は室内の蛍光灯および自然照明下で温州ミカンのヘタの部分（上方向）から行った。照射後は、プラスチックコンテナの下段には無照射の温州ミカンを1段置き、その上段に近赤外光照射を行った温州ミカンを置いた。その後、温州ミカンを新聞紙で覆い、2013年3月11日まで貯蔵室で貯蔵した。2013年3月11日に約2か月間の貯蔵後、蒸散量、糖度、酸度、ビタミンC、皮の含水率、外観観察を行った。調査個体は、上段45個、下段15個を標準として、腐敗果は除いた。蒸散量は貯蔵前後における重量変化から算出した。糖度は糖度計（デジタル糖度計（株）、アタゴ社製）からBRIXを測定し、ビタミンCはRQフレックス（反射式光度計、（株）藤原製作所製）より求めた。酸度は滴定法によりクエン酸換算として測定した。皮の含水率は果皮を乾燥させた際の重量減少から求めた。

5-6. 根菜

ニンジン

2012年4月12日に市場で入手したニンジン（香川県産）を供試材料とした。照射方法はポリエチレンの袋包装の上から照射し、貯蔵は段ボールに入れ 10°C に設定したグローキャビネット（MLR-350H、パナソニックヘルスケア（株））に保存し

た.

5-7. 結果

5-7-1. 葉菜類

結球春レタス

4月11日に供試した結球レタスにおいて、NIR14W・5分包装－，NIR100W・1分包装－，NIR100W・1分包装＋は上段でそれぞれ15%，14%，6%，下段で14%，14%，6%無照射に対し蒸散量を抑制した（第1表）。4月15日に供試した結球レタスにおいて、NIR100W・1分包装＋，NIR100W・1分包装－，NIR200W・1分包装＋においてそれぞれ6%，1%，4%蒸散を抑制した。

第1表 近赤外光照射が‘結球レタス’の蒸散量へ及ぼす影響

近赤外光照射・包装条件	蒸散量の相対値（無照射を1とした）	
	上段	下段
NIR14W・5分・包装－	0.85	0.86
NIR100W・1分・包装－	0.86	0.86
NIR100W・1分・包装＋	0.94	0.94

注1. 4月11入手

第2表 近赤外光照射が‘結球レタス’の蒸散量へ及ぼす影響

近赤外光照射・包装条件	蒸散量の相対値（無照射を1とした）
NIR100W・1分・包装－	0.94
NIR100W・1分・包装＋	0.99
NIR200W・1分・包装＋	0.96

注1. 4月15入手

切り口の褐変程度の評価として、デジタルカメラで撮影した切り口の写真を画像処理ソフト「Adobe Photoshop」に取り込み L*a*b*表色系での値 (L*a*b*値) を測定した。その結果、フィルム包装区で a 値 (赤さ) がフィルム包装なしより高かった (第 3 表)。a 値は切り口に発生する乳液の褐変により上昇する。包装なしでは切り口が乾燥したことで a 値が下がったと考えられる。a 値は NIR100W・1 分包装+で NT・包装+と比較して低下した (第 3 表)。

第 3 表 近赤外光照射が切り口の褐変 (a 値) に及ぼす影響

包装-		包装+		包装-	
NT	NIR14W・5分	NT	NIR100W・1分	NT	NIR100W・1分
8.82ab	9.62a	13.78b	9.18a	10.71a	9.40a
2.10	2.63	3.93	2.61	1.92	2.98

注 1. 異なる文字間は Tukey の多重比較検定により 1%水準で有意差あり。

切り口の一般生菌数は簡易微生物検出キット「サニ太くん (一般生菌用)」(JNC (株)) を用い、キットのシートを切り口に貼り付けた後に 35°C で 2 日間培養した。形成されたコロニー数とコロニー面積は、シートをスキャナで読み込み画像処理ソフト「Adobe photoshop」で画像を二値化した後、面積解析ソフト「Lia32」で解析した。計測したコロニー数とコロニー面積から近赤外光照射による生菌の抑制率を算定したところ、4 月 11 日に供試した結球レタスでは差が小さかったが、4 月 15 日に供試した結球レタスでは全ての処理区で近赤外光照射区において菌数を抑制し、特に 200 W・m²の強度で照射したものにおいて一般生菌数が顕著に低下した。(第 4 表)

第4表 近赤外光照射が切り口の一般生菌数に及ぼす影響

入手日	照射条件	包装条件	一般生菌数抑制率 (%)	
			コロニー数	コロニー総面積
	NIR100W・1分	+	16.94	0
4月11	NIR100W・1分	-	0	16.16
	NIR14W・5分	-	0	12.03
	NIR100W・1分	+	15.60	13.53
4月15	NIR100W・1分	-	23.81	28.92
	NIR200W・1分	+	40.96	40.02

注1. 数値は無照射に対する一般細菌数の抑制率

4月15日に供試した結球レタスを調査後5°Cの冷蔵庫に1か月保管した結果、NT・包装+はカビや腐敗が顕著であったのに対し100W・1分・包装+は、萎れは認められるものの、健全さを保っていた。(写真1)



写真1 100W・1分・包装+の貯蔵1か月後の様子(4月15日入手)

そこで、全ての個体を縦に切断し、内部について「良：3点」（健全）、「やや不良：2点」（内部がやや褐変しているが可食）、「不良：1点」（中心まで顕著に変色し不可食）とスコア化したところ、無照射と比較して近赤外光照射品はフィルム包装と比較してフィルム包装ありの方が近赤外光照射による鮮度は高かった（第5表）。

第5表 近赤外光照射がレタス内部の健全度合いに及ぼす影響

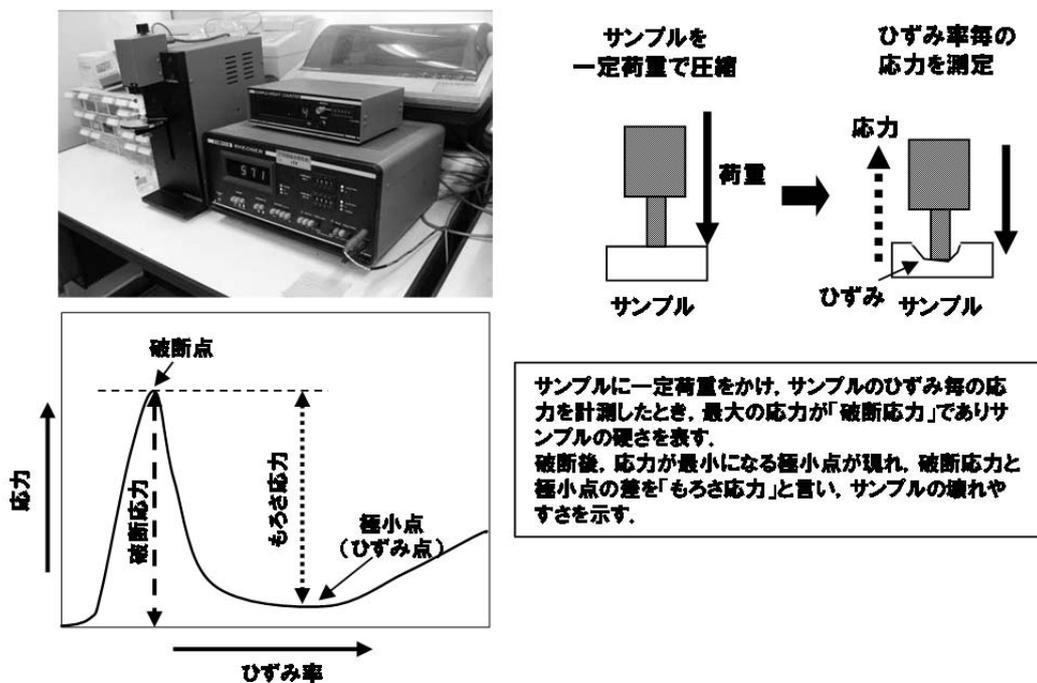
照射条件	包装条件	照射の有無	良 (3点)	やや不良 (2点)	不良 (1点)	総合得点 (点×個数)
NIR100W・1分	+	NT	0	4	11	19
		NIR	5	7	3	32
NIR100W・1分	-	NT	2	7	6	26
		NIR	2	6	7	25
NIR200W・1分	+	NT	1	3	11	20
		NIR	7	4	4	33

貯蔵に伴う呼吸作用によって消耗すると考えられた糖質を、外葉搾汁液中の Brix 値（可溶性固形分）としてアタゴ製デジタル Brix 計により測定したが、照射による効果は認められなかった（第6表）。

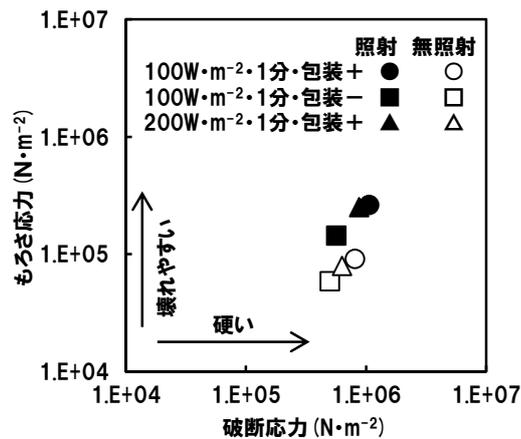
第 6 表 近赤外光照射が BRIX 値に及ぼす影響

入手日	照射条件	包装条件	NT	NIR
	NIR100W・1分	+	3.60	3.60
4月11	NIR100W・1分	-	3.55	3.63
	NIR14W・5分	-	3.35	3.39
	NIR100W・1分	+	3.70	3.60
4月15	NIR100W・1分	-	3.40	3.80
	NIR200W・1分	+	3.60	3.60

食感の定量化として、4月15日入手サンプルの外葉から2枚目の葉の軸部分を切り出し、クリープメーター（RE-3305S, (株)山電）にて破断応力（硬さ）ともろさ応力（壊れやすさ）を測定した（第1図, 第2図）。その結果、破断応力、もろさ応力共に近赤外光の照射によって高くなる傾向が観察された。従って、レタスのシャキシャキした食感が近赤外光照射によって保たれていたと考えられた。



第 1 図 クリープメーターとクリープ解析の概要



第2図 クリープ解析結果

($n \geq 3$, 2 mm × 4 mm のプランジャーを用い, $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ の速度で 2 kgf の荷重を加えた.)

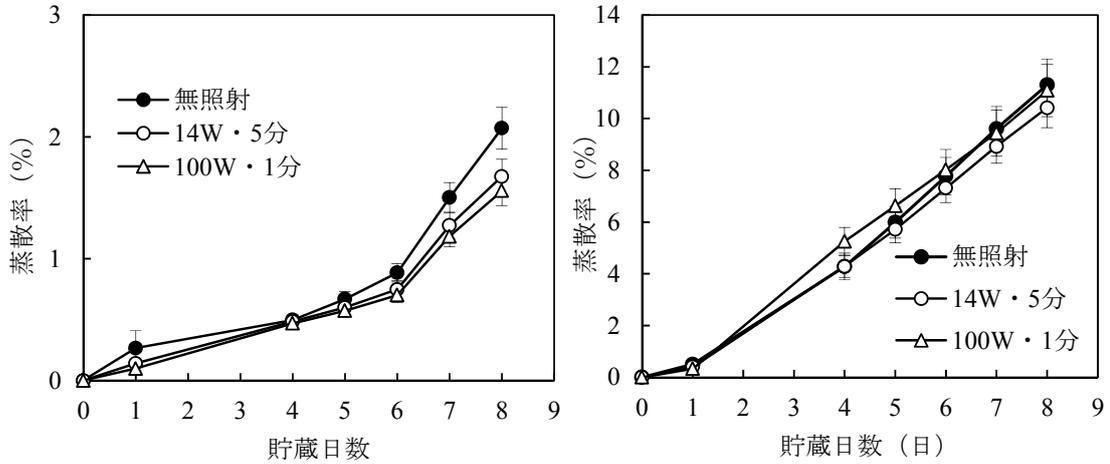
以上のように, 収穫後のレタスに近赤外光を照射することにより, 蒸散量の抑制, 褐変の抑制, 細菌数の抑制並びに食感の向上が認められるなど, 多くの項目で鮮度保持効果が認められた.

5-7-2. 果菜類

ナス, オクラ, キュウリ.

ナスは, 25°C 暗所および明所に 8 日間保存し経時的に重量変化から蒸散率を計算した結果, 25°C 暗所条件では近赤外光 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5 \text{ 分}$, $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 1 \text{ 分}$ 照射共に蒸散抑制効果が観察され, 外観上も顕著な差が見られた (第1図). 25°C 暗所貯蔵したナスの蒸散率は 0.7% を超えたあたりから急速に蒸散が上昇し, 蒸散率 1% に達するのに無照射は約 6 日, 近赤外光 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5 \text{ 分}$, $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 1 \text{ 分}$ 照射は 7 日経過したことから近赤外光照射による品質保持効果は 1 日と考えられる. さらに貯蔵 8 日後のへたの脱落は 6 日後から始まった. 蒸散率の差が 0.5% 生じた 8 日後には無照射のへたは全体数の 80% 脱落したのに対し近赤外光 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5 \text{ 分}$, $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 1 \text{ 分}$ 照射では観察されなかった. 果肉の褐変は近赤外光照射品においてわずかに抑制される傾向が観察された (写真 1). 25°C 明所に保存した場合は, 近赤外光 $14 \text{ W} \cdot$

$m^2 \cdot 5$ 分照射は蒸散を抑制したが、近赤外光 $100 W \cdot m^2 \cdot 1$ 分照射は1日後の蒸散を抑制後4日後には上昇に転じた。



第1図 近赤外光照射がナスの蒸散率に及ぼす影響

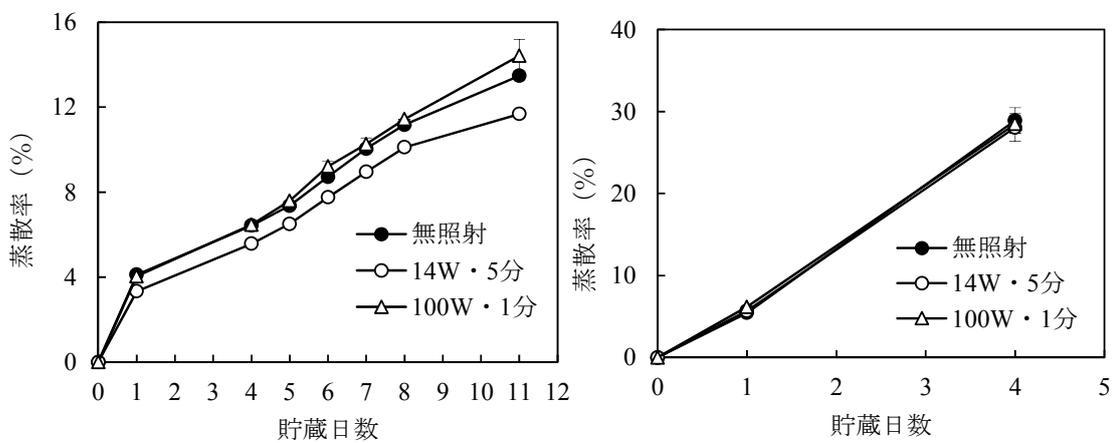
(左：25°C 暗所，右：25°C 明所)



写真1 近赤外光照射がナスの外観と内部褐変に及ぼす影響

オクラは、25°C 暗所では、近赤外光 $14 W \cdot m^2 \cdot 5$ 分照射は無照射と比較して蒸散を抑制したが、近赤外光 $100 W \cdot m^2 \cdot 1$ 分照射は5日後から無照射比較して蒸散が高くなった(第2図)。25°C 暗所では *Rhizoctonia solani* と考えられるカビの発生率は無照射では全体の40%、近赤外光 $14 W \cdot m^2 \cdot 5$ 分照射では0%、近赤外光 $100 W \cdot m^2 \cdot 1$ 分照射では40%であり近赤外光照射はカビの発生を抑制した(写真2)。4%

の蒸散率に達するまでに無照射と近赤外光 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 1 \text{ 分}$ 照射は 1 日経過し、近赤外光 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5 \text{ 分}$ 照射では 4 日経過し近赤外光照射による蒸散抑制効果が観察された。25°C 明所では蒸散が激しく貯蔵 4 日後にはカビが発生したため試験を終了した。25°C 明所条件でも同様に貯蔵 4 日後のカビの発生割合は無照射で全体の 40%，近赤外光 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5 \text{ 分}$ 照射では 0%，赤外光 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 1 \text{ 分}$ 照射では 20%であり近赤外光照射はカビの発生を抑制した（写真 2）。



第 2 図 近赤外光照射がオクラの蒸散率に及ぼす影響

(左：25°C 暗所，右：25°C 明所)

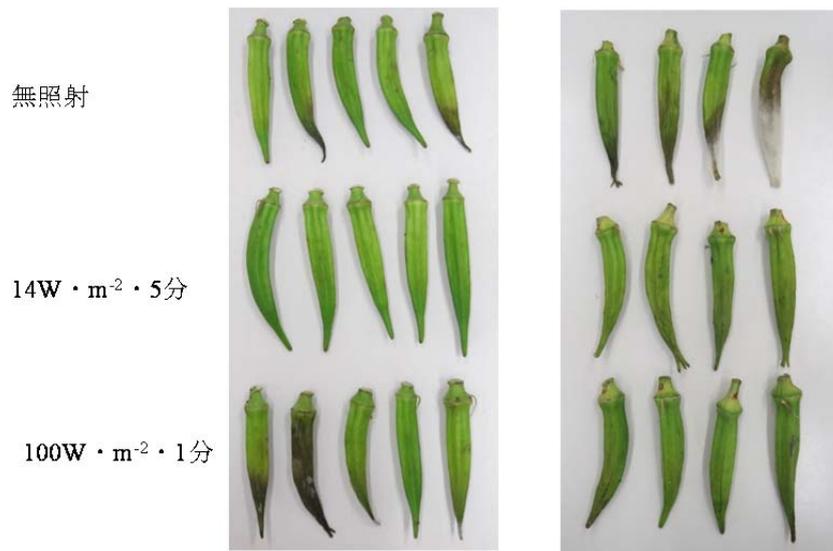
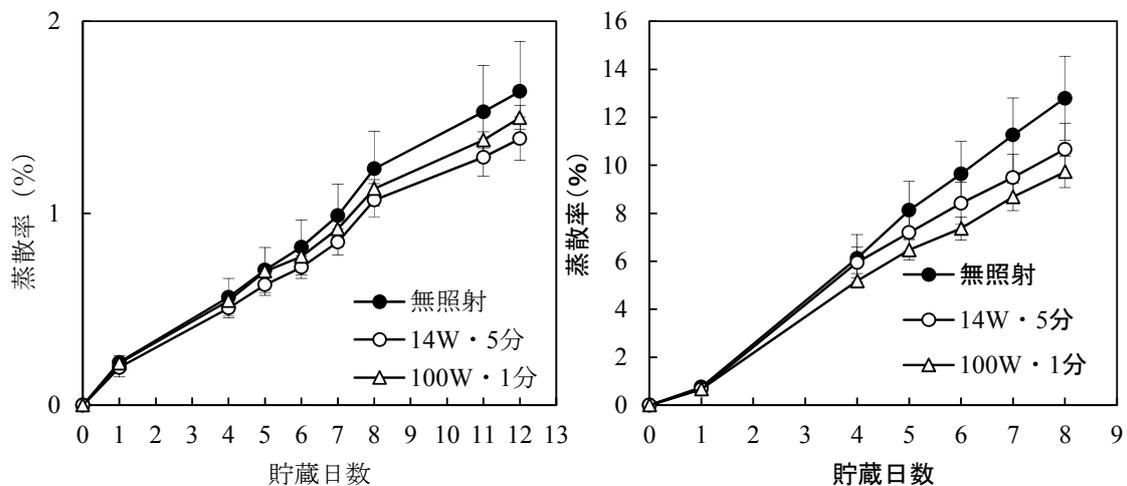


写真 2 近赤外光照射がオクラの外観に及ぼす影響

(左：25°C 暗所 11 日後，右 25°C 明所 4 日後)

キュウリは、25°C 暗所と 25°C 明所に 8 日間保存し経時的に重量変化から蒸散率を計算した結果、近赤外光 14 W・m²・5 分照射、近赤外光 100 W・m²・1 分照射共に蒸散抑制効果が観察された (第 3 図)。25°C 明所条件では、無照射は蒸散率が 5 %を超えた貯蔵 4 日後から黄化し始め 7 日後には顕著に萎凋と黄化した。近赤外光 14 W・m²・5 分照射も黄化したが萎凋は無照射ほど著しくなく、近赤外光 100 W・m²・1 分照射は萎凋と黄化が顕著に抑制された (写真 3)。25°C 明所貯蔵条件では蒸散率が 6%に達するまでに無照射と近赤外光 14 W・m²・5 分照射は 4 日経過し近赤外光 100 W・m²・1 分照射は 5 日経過したことから近赤外光の鮮度保持効果は照射強度 100 W・m²・1 分で 1 日と考えられる。25°C 暗所貯蔵では各試験区とも外観上の変化は観察されなかった。



第 3 図 近赤外光照射がキュウリの蒸散率に及ぼす影響

(左 : 25°C 暗所, 右 : 25°C 明所)

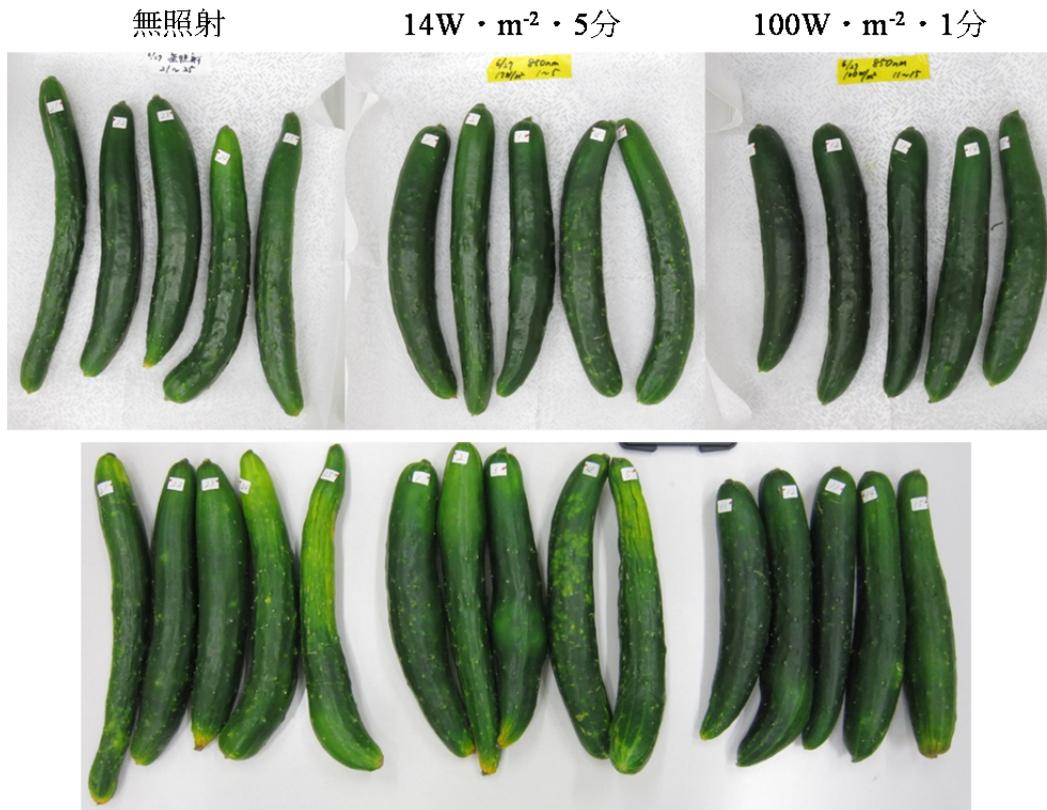


写真3 近赤外光照射がキュウリの外観に及ぼす影響

(上：25°C 暗所 4 日後，下：25°C 明所 7 日後)

以上の結果よりがナス、キュウリ、オクラの3品目のうち、ナスやオクラの様に照射強度 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 1$ 分照射では蒸散率が無照射区と比較して高くなってしまふ品目が観察された。一方、 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5$ 分間照射では比較的安定して蒸散抑制効果が得られた。さらにオクラでは近赤外光照射によるカビの抑制効果も観察された。従って照射強度を強くする場合は対象果菜類に対して照射強度が強すぎる場合があることから照射時間をさらに短くすることで蒸散抑制効果が得られる可能性が考えられた。

中玉トマト

近赤外光照射後3日後における蒸散率を測定した結果、完熟中熟ともすべての照射区において蒸散率は僅かに抑制された(第1表)。3日後と6日後の糖度と酸度を測定した結果無照射品と比較して近赤外光照射品は極端に成分値が低下した試験区はな

かった（第2表，第3表）．貯蔵3日後と6日後のビタミンCの増減率は‘完熟トマト’では近赤外光照射区で無照射品と比較して6.6%から20.9%減少したのに対し，‘中熟トマト’では13.7%から33.5%増加した．貯蔵中のへたの劣化指数は無照射のトマトと比較して‘完熟トマト’では2.6～4.0低く，‘中熟トマト’では1.7～2.7低かった（第4表，第5表）．

貯蔵中の果実の劣化はカビの培養を加速するため塗沫接種した‘完熟トマト’を30℃に静置したが果実自体の品温が11℃と低かったため果実が裂けてしまい評価できなかった．そこで‘中熟トマト’は温度を25℃に下げ果実のカビの発生を評価した．その結果無照射のトマトと比較して照射したトマトはカビ発生指数が1.0～2.7低下した（第5表）．貯蔵3日後と6日後の果実硬度は無照射品と比較すると貯蔵3日後で0.3 kg～0.5 kg高く貯蔵6日後でほとんど差のないものもあったが0.1 Kg照射品が高かった（第5表）．

第1表 近赤外光照射が中玉トマトの蒸散に及ぼす影響

試験区	入手日	
	1月19日	1月26日
NT	2.52±0.09	2.33±0.19
NIR1・1分	2.40±0.11	2.12±0.09
NIR1・5分	2.30±0.14	2.20±0.07
NIR1H・1分	2.31±0.11	2.13±0.08
NIR2・1分	2.37±0.17	2.28±0.10
NIR2・5分	2.46±0.14	2.16±0.12
NIRMIX・1分	2.29±0.08	2.31±0.22
NIRMIX・5分	2.33±0.20	2.03±0.06

（貯蔵温度：20℃，相対湿度：60%，貯蔵期間：3日，n = 4以上，±は標準誤差）

第2表 近赤外光照射が完熟トマトの成分に及ぼす影響

試験区 (完熟)	貯蔵3日後		貯蔵6日後		ビタミンC (VC ; mg%)		VC増減率(%) (A-B)
	糖度(%)	酸度(%)	糖度(%)	酸度(%)	貯蔵3日後 (A)	貯蔵6日後 (B)	
NT	3.0±0.10	0.6±0.12	3.1±0.05	0.6±0.05	36.6±4.8	31.8±3.2	-13.1
NIR1・1分	3.0±0.12	0.6±0.09	2.9±0.08	0.7±0.02	39.0±1.7	26.6±2.0	-31.9
NIR1・5分	2.9±0.20	0.6±0.12	3.1±0.04	0.7±0.04	42.9±1.6	28.7±6.8	-33.2
NIR1H・5分	2.9±0.12	0.7±0.06	2.8±0.03	0.6±0.03	36.9±1.1	29.6±2.1	-19.7
NIR2・1分	3.0±0.06	0.6±0.26	2.9±0.19	0.7±0.10	41.8±0.8	30.5±3.7	-27.0
NIR2・5分	3.0±0.12	0.6±0.23	2.9±0.02	0.6±0.11	43.9±1.2	33.6±0.9	-23.5
NIRMIX・1分	2.9±0.07	0.6±0.03	3.1±0.02	0.6±0.03	40.4±2.5	28.2±4.2	-30.3
NIRMIX・5分	2.8±0.06	0.6±0.15	3.0±0.01	0.6±0.03	41.6±1.7	27.5±2.8	-34.0

(1月19日入手, 貯蔵温度: 20°C, 相対湿度: 60%, n = 3, ±は標準誤差)

第3表 近赤外光照射が中熟トマトの成分に及ぼす影響

試験区 (中熟)	貯蔵3日後		貯蔵6日後		ビタミンC (mg%)		VC増減率 A-B (%)
	糖度(%)	酸度(%)	糖度(%)	酸度(%)	貯蔵3日後 (A)	貯蔵6日後 (B)	
NT	4.8±0.35	0.7±0.05	5.0±0.24	0.6±0.02	30.2±2.6	26.1±3.6	-13.7
NIR1・1分	5.0±0.24	0.7±0.03	5.8±0.29	0.6±0.01	29.3±1.2	31.3±2.5	6.8
NIR1・5分	5.0±0.13	0.7±0.02	5.4±0.29	0.5±0.02	27.4±2.8	29.6±4.1	8.2
NIR1H・5分	4.8±0.07	0.8±0.07	5.0±0.23	0.6±0.02	25.9±2.3	27.1±3.7	4.6
NIR2・1分	5.4±0.31	0.6±0.02	6.0±0.13	0.6±0.02	27.8±1.2	30.1±1.5	8.4
NIR2・5分	5.2±0.23	0.6±0.03	5.4±0.13	0.6±0.04	23.6±3.7	28.3±2.3	19.8
NIRMIX・1分	6.0±0.37	0.8±0.05	5.2±0.18	0.5±0.02	28.4±0.5	29.9±1.3	-5.2
NIRMIX・5分	5.2±0.18	0.7±0.03	4.6±0.77	0.6±0.07	30.2±2.9	23.7±1.8	21.4

(1月26日入手, 貯蔵温度: 20°C, 相対湿度: 60%, n = 3, ±は標準誤差)

第4表 近赤外光照射が完熟トマトのへたの劣化と果実硬度に及ぼす影響

試験区 (完熟)	へた部				果実硬度(Kg)
	カビ (C)	黄化 (D)	乾燥 (E)	劣化指数 (C+D+E)	貯蔵6日後
NT	1.7	1.0	1.7	4.3	1.20±0.07
NIR1・1分	0.3	0.0	1.0	1.3	1.24±0.16
NIR1・5分	0.3	0.3	1.0	1.7	1.14±0.11
NIR1H・5分	0.3	0.0	0.0	0.3	1.26±0.17
NIR2・1分	0.7	0.0	1.0	1.7	1.34±0.09
NIR2・5分	0.0	0.3	0.7	1.0	1.43±0.10
NIRMIX・1分	0.0	0.0	0.7	0.7	1.24±0.14
NIRMIX・5分	0.3	1.3	0.0	1.7	1.18±0.07

(1月19日入手, 貯蔵温度: 25°C, 相対湿度: 99%, n = 3, ±は標準誤差)

第5表 近赤外光照射が中熟トマトのへたの劣化と果実硬度に及ぼす影響

試験区 (中熟)	へた部				果実部	果実硬度(Kg)	
	カビ (C)	黄化 (D)	乾燥 (E)	劣化指数 (C+D+E)	カビ発生指数	貯蔵3日後	貯蔵6日後
NT	1.7	1.0	1.0	3.7	3.0	1.35±0.19	1.06±0.09
NIR1・1分	0.7	0.3	0.0	1.0	2.0	1.65±0.18	1.15±0.15
NIR1・5分	0.3	0.7	0.3	1.3	1.0	1.53±0.05	1.05±0.14
NIR1H・5分	1.3	0.3	0.3	2.0	1.0	1.51±0.13	1.09±0.06
NIR2・1分	0.0	1.0	0.7	1.7	0.7	1.40±0.14	0.93±0.10
NIR2・5分	0.7	0.3	1.0	2.0	0.3	1.45±0.14	1.12±0.09
NIRMIX・1分	1.0	0.3	0.7	2.0	3.0	1.49±0.16	1.13±0.08
NIRMIX・5分	0.3	0.7	0.3	1.3	1.3	1.44±0.11	1.17±0.10

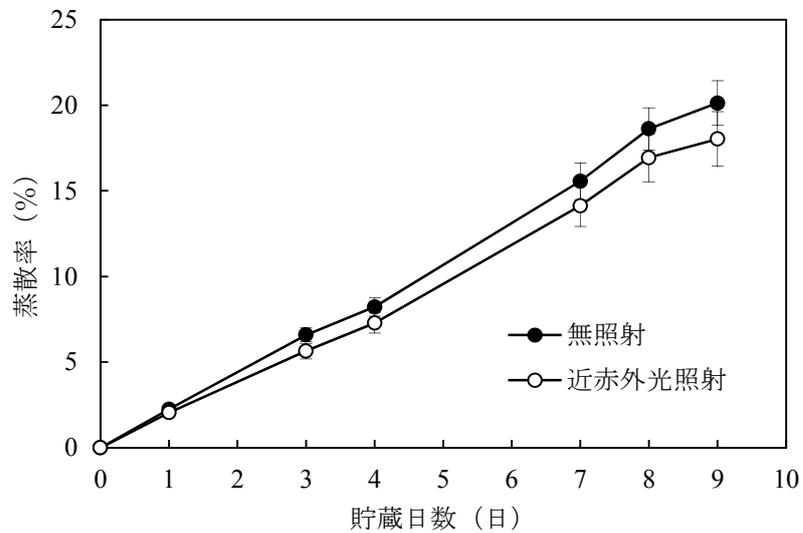
1月26日入手，貯蔵温度：25°C，相対湿度：99%，n=3，±は標準誤差)

近赤外光短時間照射が中玉トマト‘カンパリ’へ及ぼす影響について NIR1 と NIR2 および NIR1 と NIR2 の混合波長を用い照射強度は 14 W・m² と 100 W・m² を検討した。その結果試験区すべてにおいて蒸散量抑制効果が得られた。近赤外光照射による劣化果実発生による腐敗等のリスク低減効果を検証するためへた部のカビ，乾燥，黄化，果実部の軟化，カビ発生について点数評価を行った。その結果へた部の乾燥抑制効果に加えわずかなカビの発生抑制効果が観察され，果実部でも同様にカビの繁殖を抑制する傾向が観察された。しかしビタミン C は‘完熟トマト’で減少する傾向が観察され，中熟トマト’では増加したことから近赤外光照射は中熟期に照射するのが好ましいと考えられる。果実硬度は無照射品と比較して照射品が硬かった。総じて‘カンパリ’トマトでは中熟期を対象とし近赤外光 850 nm の単波長照射が好ましく照射条件は 14 W・m²・5 分間もしくは 100 W・m²・1 分間が適していることが明らかになった。

ピーマン

ピーマンは，蒸散率 7% に達するまでに無照射品は 3 日強経過したのに対し，近赤外光照射品は 4 日弱経過した (第 1 図)。貯蔵 4 日後には無照射品はしなびが顕著に観察され 14 日後には無照射品は赤く着色した個体が観察された (写真 1)。ピーマン

の常温貯蔵における近赤外光照射による鮮度保持効果は1日と考えられる。



第1図 近赤外光照射がピーマンの蒸散に及ぼす影響



写真1 近赤外光照射がピーマンの外観に及ぼす影響

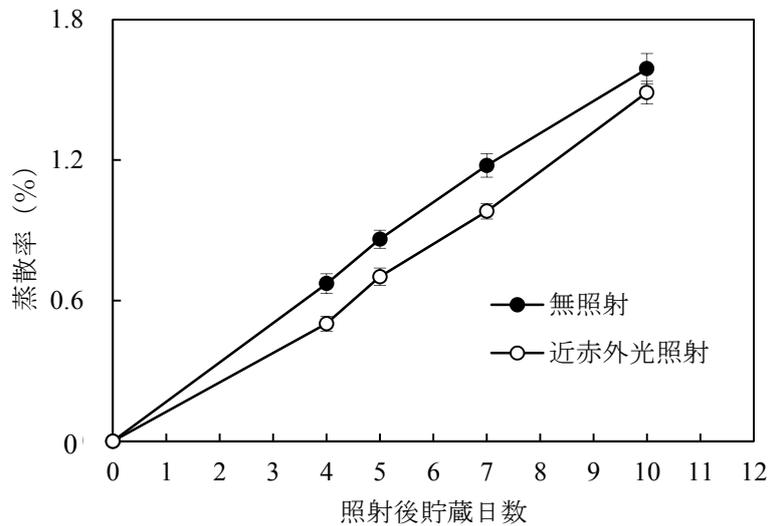
(左：25°C 暗所 4 日後，右 25°C 暗所 14 日後)

5-7-3. 果実類

ビワ

ビワに近赤外光を照射した結果，貯蔵10日後まで無照射のビワと比較して蒸散量

は抑制された（第1図）。10日以降のビワの傷み率を健全，傷みあり，カビありで分類したところ近赤外光照射区のビワは無照射区のビワと比較してカビの発生が抑制された（第2図）。貯蔵日数と蒸散量，硬度，糖度，酸濃度の関係を無照射区のビワと照射区のビワで比較した。蒸散量は近赤外光を照射したビワが7日後，10日後に有意に抑制されたが硬度は変わらなかった。しかし糖度は3日後，14日後で有意に高く，酸度も10日後が有意に高かった（第1表）。10日後の果実の成熟度をa値で比較したが無照射区，近赤外光照射区の差はなかった（第2表）。以上の結果より近赤外光照射はびわの蒸散を抑制し鮮度保持に有効であることが明らかになった。



第1図 近赤外光照射がビワの蒸散率に及ぼす影響

第1表 近赤外光照射がビワの蒸散率, 糖度, 酸度に及ぼす影響

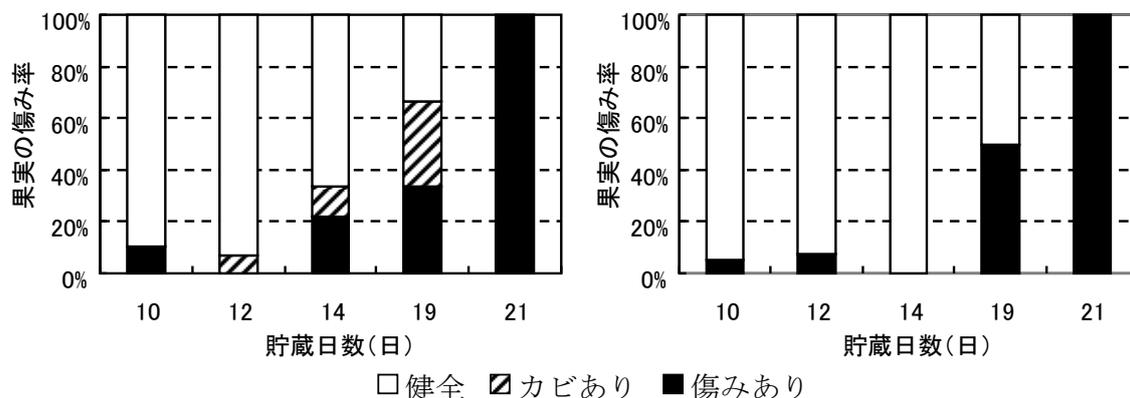
無照射区							
経過日数	日	3	5	7	10	12	14
1果平均重	g	35.03	33.46	36.92	38.36	36.25	37.32
蒸散量	%	0.62	1.10	1.34 **	1.84 *	3.10	3.08
糖度(Brix)	%	10.94	11.32	11.40	10.90	10.97	10.36
リンゴ酸濃度	%	0.39	0.30	0.32	0.27	0.37	0.36
硬度(kg)	kg	0.60	0.51	0.50	0.53	0.63	0.65

照射区 (照射条件: 中心波長; 850nm, 14W・m ⁻² 、5分間)							
経過日数	日	3	5	7	10	12	14
1果平均重	g	35.26	35.88	38.81	32.30	39.92	37.45
蒸散量	%	0.57	0.93	0.89	1.32	2.37	2.81
糖度(Brix)	%	11.78 *	12.12	12.08	11.75	11.60	11.56 **
リンゴ酸濃度	%	0.39	0.33	0.39	0.35 *	0.40	0.36
硬度(kg)	kg	0.64	0.45	0.50	0.51	0.54	0.67

注1. 各測定日ごとにt検定した場合に有意差あり. ** $P<0.01$, * $P<0.05$

第2表 近赤外光照射が果皮色に及ぼす影響 (貯蔵10日後)

	果皮色		
	L値	a値	b値
無照射区	59.00	16.89	56.17
照射区	62.06	16.89	57.50



第2図 貯蔵5日後の痛み率
(左：無照射，右：近赤外光照射)

ピオーネ

ピオーネは熟度と重量がそろったものを房ごと対象とし無照射区と照射区に用いた。その結果 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5$ 分間照射でも、 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 1$ 分間照射でも10日後まで蒸散量が抑制された（第1表）。近赤外光を照射したピオーネの軸は無照射の軸よりも褐変の進行が抑制された（写真1）。脱粒率は 10°C 保存でも 25°C 保存でも抑制され、 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5$ 分間の照射でも $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 1$ 分間の照射でも抑制された（第2表，第3表）。近赤外光を照射し房ごと貯蔵したピオーネについて穂軸の水分率，ビタミンC，Brix，酸度，水分率，硬度を調べた結果，近赤外光を照射した穂軸の水分率は 10°C 貯蔵と 20°C 貯蔵で近赤外光照射した方が高く，果実の水分率も 4°C ， 10°C ， 20°C 貯蔵で高かった。またビタミンCも貯蔵温度に関わらず高かった（第4表）。ピオーネの温度別蒸散量を調べた結果温度が高いほど蒸散量は増加したが， 10°C 保存はほとんど蒸散量に変化がなかった（第5表）。蒸散量に変化のあった 4°C と 20°C 貯蔵したピオーネはどちらも近赤外光照射により蒸散量が抑制された（第6表）。ピオーネの果実を軸から離し果皮からの蒸散を防ぐために切り口にワセリンを塗り温度別蒸散率を調べた結果 4°C に貯蔵したピオーネの果実からの蒸散は $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5$ 分間の照射でも $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 1$ 分間の照射でも抑制された（第7表）。しかし， 10°C

に保存した果実の蒸散量は $14 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot 5$ 分間照射した果実からの蒸散は抑制できたが、 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot 1$ 分間の照射は果実からの蒸散を抑制しなかった（第 7 表）。以上の結果より近赤外照射によるピオーネの蒸散抑制効果が確認でき、軸の褐変も抑制できるため果実の脱粒も抑制されたと考える。また貯蔵温度を変化させた場合、 4°C の冷蔵でも 20°C の常温でも近赤外光を照射したピオーネの蒸散量が抑制され、成分はビタミン C が高く維持された。従って、近赤外光照射はピオーネの鮮度保持に有効であることが明らかになった。

第 1 表 近赤外光照射がピオーネの蒸散率に及ぼす影響

近赤外光照射	貯蔵日数			
	2	6	8	10
$14 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot 5$ 分	0.95	0.97	0.96	0.97
$100 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot 1$ 分	0.99	0.99	0.98	1.00

第 2 表 近赤外光照射がピオーネの脱粒に及ぼす影響（ 10°C 保存 21 日後）

脱粒率 (%)	
無照射	近赤外光照射
100	29.2

第 3 表 近赤外光照射がピオーネの脱粒に及ぼす影響（ 25°C 保存 12 日後）

脱粒率 (%)		
無照射	近赤外光 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot 5$ 分	近赤外光 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot 1$ 分
26.8	0	2.9



写真1 近赤外光照射がピオーネの軸の褐変に及ぼす影響

第4表 温度別成分分析の結果

貯蔵 温度 (°C)	貯蔵 日数 (日)	処理区	穂軸		果実			硬度 (Kg)	
			水分率 (%)	ビタミン C (mg%)	Brix (%)	酸度 (%)	水分率 (%)	底部	赤道部
4°C	28	無処理	64.81	10.33	17.28	0.42	82.64	0.42	0.39
		14W・m ⁻² (5分)	63.92	10.82	17.28	0.44	83.02	0.45	0.42
10°C	21	無処理	63.13	10.72	18.02	0.41	81.88	0.42	0.39
		14W・m ⁻² (5分)	64.58	12.03	17.98	0.42	82.18	0.50	0.45
20°C	10	無処理	60.53	10.85	17.73	0.42	82.25	0.43	0.40
		14W・m ⁻² (5分)	63.48	11.22	17.17	0.42	82.80	0.45	0.42

第5表 温度別蒸散率（無照射）

貯蔵温度 (°C)	貯蔵日数（日）					
	1	2	3	6	8	10
4	0.17	0.18	0.20	0.29	0.28	0.28
10	0.25	0.25	0.21	0.22	0.21	0.17
20	0.21	0.23	0.23	0.29	0.33	0.35

第6表 無照射区に対する温度別蒸散率の相対値（照射区／無照射区）

貯蔵温度 (°C)	貯蔵日数（日）				
	1	2	3	6	8
4	0.69	0.69	0.80	0.99	0.96
20	1.00	0.99	0.98	0.83	0.79

第7表 温度別果実の蒸散率の相対値（照射区／無照射区）

貯蔵温度 (°C)	近赤外光照射	貯蔵日数			
		2	4	6	8
4	近赤外光 14W・m ⁻² ・5分	0.87	0.81	0.81	0.80
	近赤外光 100W・m ⁻² ・1分	0.82	0.83	0.84	0.89
10	近赤外光 14W・m ⁻² ・5分	0.91	0.80	0.97	1.26
	近赤外光 100W・m ⁻² ・1分	0.96	1.02	1.29	1.15

デラウェア

デラウェアに近赤外光を照射した結果、貯蔵14日後まで無照射のデラウェアと比較して蒸散量は抑制された（第1表）。また穂軸の水分量を測定した結果4°C、10°C、20°Cにおいて近赤外光を照射した穂軸の水分が高かった。また果実の水分量も高かった。しかし、糖度、ビタミンC、酸度は同等か近赤外光を照射した果実のほうがわずかに低い値となった。これは果実の水分が維持されたため相対的に高くなったと考える。

以上の結果より、近赤外光照射はデラウェアの蒸散を抑制し鮮度保持に有効であることが明らかになった。

第1表 近赤外光照射がデラウェアの蒸散率の相対値
(照射区/無照射区)に及ぼす影響

貯蔵温度 (°C)	経過日数 (日)				
	1	3	7	10	14
4	0.71	0.63	0.81	0.77	0.62
10	0.66	0.76	0.71	0.69	0.69
20	0.77	0.64	0.68	0.67	0.65

注1. 無照射を1とした。

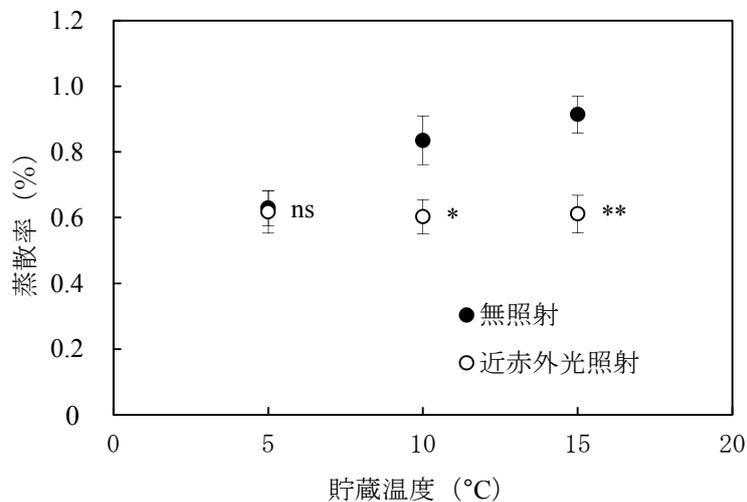
第2表 貯蔵温度の違いによる成分分析の結果

貯蔵温度 (°C)	貯蔵日数 (日)	処理区	穂軸		果実		
			水分 (%)	水分 (%)	ビタミンC (mg%)	Brix (%)	酸度 (%)
4	23	無処理	57.17	80.79	4.45	20.50	0.56
		14W・m ⁻² (5分)	59.22	80.98	4.40	20.10	0.64
10	23	無処理	57.20	79.67	6.15	21.45	0.77
		14W・m ⁻² (5分)	59.13	80.14	5.95	21.05	0.67
20	15	無処理	57.17	80.79	4.45	20.50	0.56
		14W・m ⁻² (5分)	59.22	80.98	4.40	20.10	0.64

アセロラ

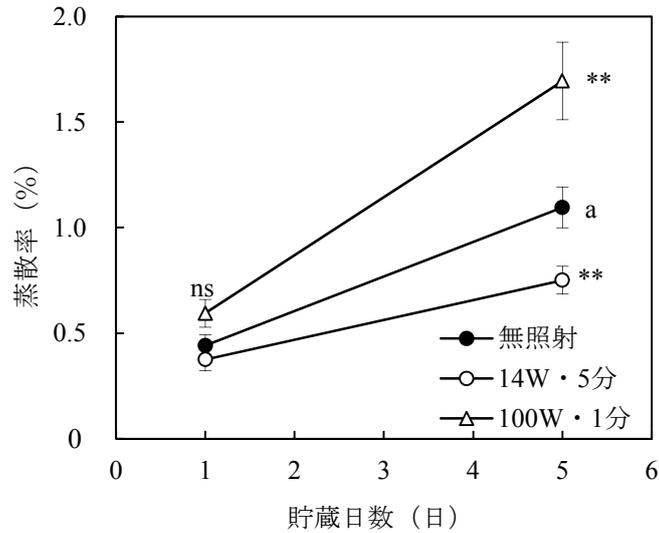
貯蔵温度の違いによる近赤外光照射の蒸散抑制効果について検討するため、14W・m⁻²・5分間照射後暗所5°C、10°C、15°Cに5日間保存し蒸散抑制効果を確認した。貯蔵1日後の蒸散率は無照射区と近赤外光照射区でそれぞれにおいて5°Cで0.63%と0.62%、10°Cで0.84%と0.60%、15°Cで0.91%と0.61%となり無照射のアセロラの蒸散率は温度の上昇とともに蒸散率が増加したのに対し、近赤外光照射した方の蒸散

率は貯蔵温度が変化しても約 0.6 とあまり変化がなく蒸散は抑制されていた（第 1 図）。また無照射で 4°C に保存したアセロラの蒸散率は近赤外光を照射した 10°C および 15°C 貯蔵のアセロラの蒸散率と同等であることが明らかになった。しかし外観上に変化は観察されなかった。そこで 10 月 15 日に採取されたアセロラを使用して常温でのカビの発生を比較した。その結果、無照射区は果実熟度の高いアセロラほどカビの発生率が軸・へた部から果実全体にまで高かったのに対し近赤外光照射区は熟度に関係なく全体的にカビの発生を抑制した（第 3 図）。



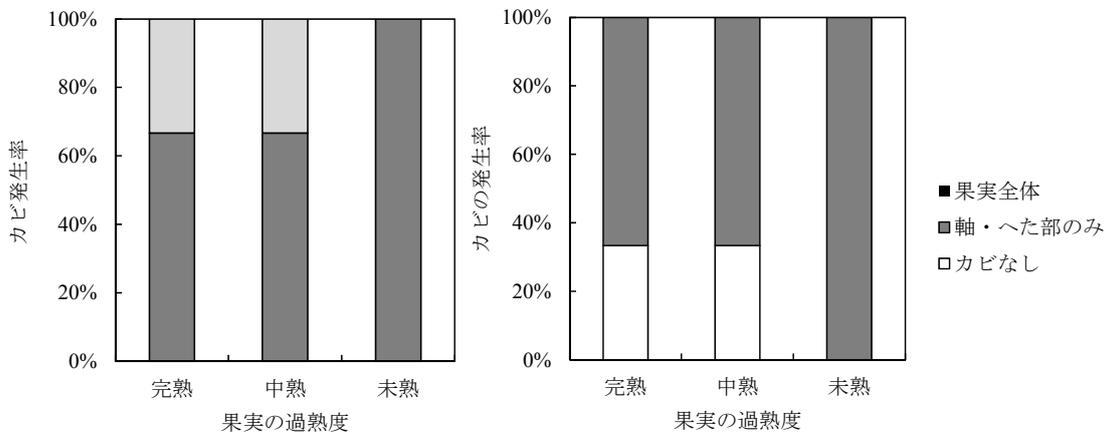
第 1 図 近赤外光照射が貯蔵温度の異なるアセロラの蒸散率に及ぼす影響

光源 ; LED, 中心波長 850 nm, 照射強度 ; $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5 \text{ 分間}$, 貯蔵条件 ; 1 暗所, 1 日, 7 月 10 日入手, エラーバーは標準誤差 ($n=9$, $**P \geq 0.01$, $*P \geq 0.05$, ns は有意差なし. (t-検定))



第2図 近赤外光照射強度がアセロラの蒸散率に及ぼす影響

光源；第1図脚注参照，照射強度； $14\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 5\text{ 分間}$ ， $100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 1\text{ 分間}$ ，貯蔵条件； 4°C 暗所，1日，7月10日入手，図中の縦棒は標準誤差($n=20$ ， $**P\geq 0.01$ ， $**P\geq 0.05$ ，nsは有意差なし．(t-検定))



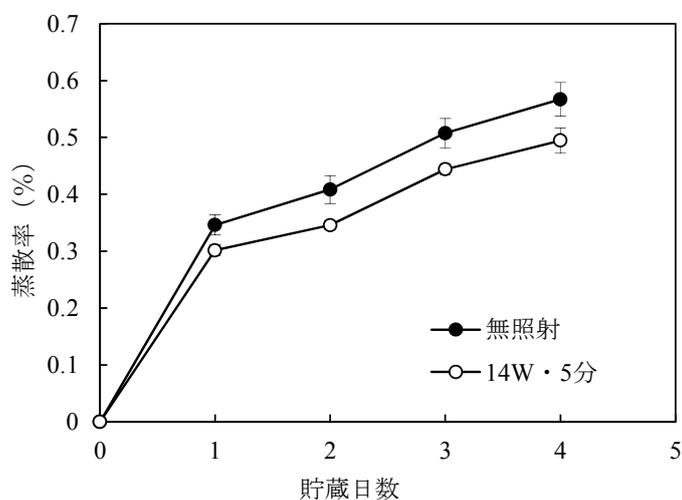
第3図 近赤外光照射がアセロラのカビ発生に及ぼす影響

左：無照射，右：近赤外光照射，光源；第1図脚注参照，照射強度； $14\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 5\text{ 分間}$ ， $100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 1\text{ 分間}$ ，貯蔵条件； 25°C 暗所，6日後，10月15日入手， $n=3$ 。

モモ

蒸散は0.4%に達するのに無照射は2日経過し， $14\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 5\text{ 分間}$ は3日経過し
 近赤外光照射による蒸散抑制効果は貯蔵1日後から観察された．近赤外光照射による

モモの品質保持期間は1日であることが明らかになった。さらに外観を観察したところ近赤外光を照射下モモは全体的に傷みが軽減されていた（写真1）。



第1図 近赤外光照射がモモの蒸散率に及ぼす影響（エラーバーは標準誤差 (n≥5)）

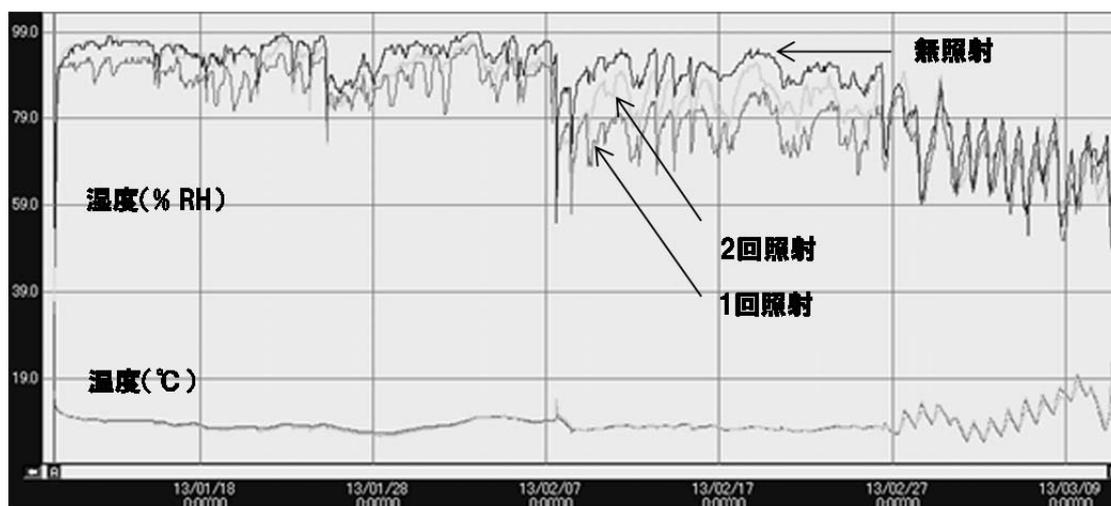


写真1 近赤外光照射がモモの外観と内部に及ぼす影響（貯蔵8日後）
（左；外観，右；内部）

ミカン

貯蔵期間中の温度および湿度の推移を第1図に示す。温度は、試験区ごとの差がほとんどなく、貯蔵期間中は約10℃前後で推移したが、貯蔵場所を変えた2月下旬以降は次第に高くなった。湿度は、貯蔵期間前半には80%から90%であったが後半に

なると次第に低下し、特に貯蔵場所を変えてからは顕著に低下した。試験区間では、期間を通じて無照射に比べて近赤外光照射区が低い湿度で推移する傾向にあった。約 2 か月の貯蔵期間中の蒸散量を比較した（第 1 表）。その結果、近赤外光を照射した場合は、照射回数に関わらず蒸散量の抑制が見られ 1 回照射より 2 回照射の方が高い抑制効果が確認できた。これは近赤外光照射を繰り返すと効果が高まるとも考えられるが、1 回照射の温州ミカン試料が他の試験区より大きかった（重かった）ことから、今回の結果だけで判断することは難しいと考えられる。さらに、近赤外光を照射していない下段でも蒸散量抑制効果が見られた。これは、上段の温州ミカンの蒸散量が抑制されたことから温州ミカンの収縮が抑えられ、その結果として下段の温州ミカンの蒸散量が抑えられたものと考えられる。したがって、上段と下段の全ての温州ミカンに対して近赤外光を照射するか、もしくはコンテナ内で 2 段詰めした状態で上方から近赤外光を照射し下段にも一部の光が到達することにより、より高い蒸散抑制効果が得られる可能性が示唆された。

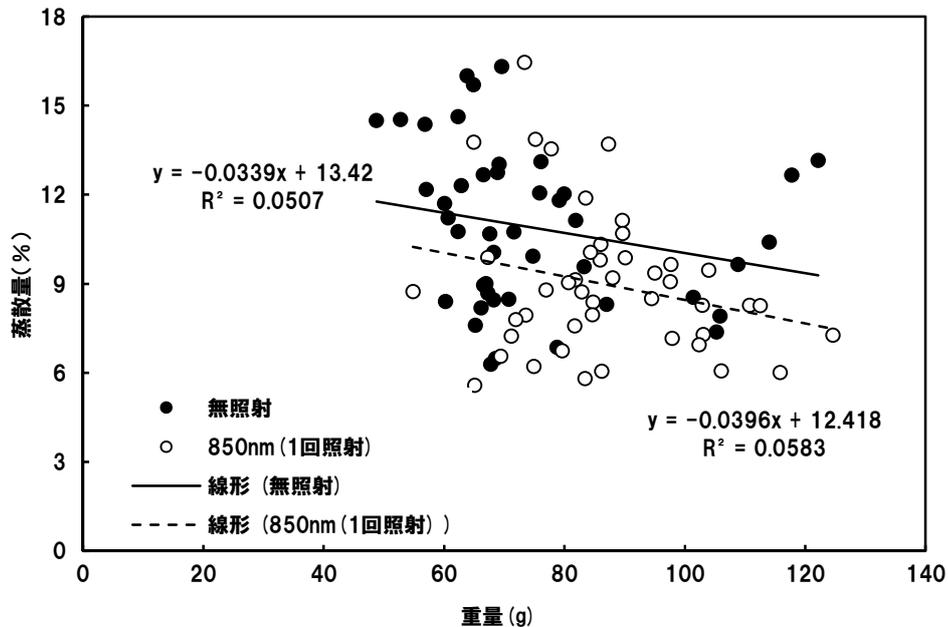


第 1 図 貯蔵期間中の温度および湿度の推移

第 1 表 近赤外光照射が温州ミカンの蒸散率に及ぼす影響

コンテナ内の場所	蒸散率 (%) (無照射を 100 とした値)		
	無照射	近赤外光 1 回照射	近赤外光 2 回照射
上段	10.5(100)	9.95(94.8)	8.96(85.3)
下段	9.98(100)	8.77(87.9)	9.14(91.6)

また、比較的重量分布の類似している無照射区の温州ミカンと近赤外光を 2 回照射した温州ミカンについて、温州ミカン重量と蒸散量の関係を調べた。その結果、温州ミカン重量と蒸散量の間には緩やかな負の相関があった (第 2 図)。



第 2 図 温州ミカンの重量と蒸散率の関係

果皮の含水率は近赤外光を照射した上段の温州ミカンの方が高い値を示し、貯蔵中における果皮の水分が高く保てていることが伺えた (第 2 表)。ただし、下段ではこの傾向は見られなかった。糖度や酸度は近赤外光照射した温州ミカンでわずかに低い傾向にあった。これは無照射区では水分が蒸散した結果、果汁の濃縮が起こった可能性が考えられる。また、ビタミン C については明確な違いは見られなかった。貯

蔵期間内での腐敗果の発生数は全体を通して腐敗果の発生は少なかったが、近赤外光を照射した温州ミカン（上段）では腐敗果が発生しなかった。

第 2 表 温州ミカンの成分等に及ぼす近赤外光照射の影響

コンテナ内の場所	試験区	糖度 (Brix %)	酸度 (%)	糖酸比	ビタミン C (mg/L)	果皮の含水率 (%)
上段	無照射	13.88	0.75	19.1	229.4	69.9
	近赤外光・1回照射	13.61	0.72	19.2	219.7	71.3
	近赤外光・2回照射	13.54	0.69	20.1	233.3	72.0
下段	無照射	13.60	0.67	21.1	220.3	73.2
	近赤外光・1回照射	13.31	0.68	19.3	219.2	72.7
	近赤外光・2回照射	13.78	0.63	21.9	202.0	69.1

注 1. 近赤外光照射区は，上段は照射しているが，下段は照射していない。

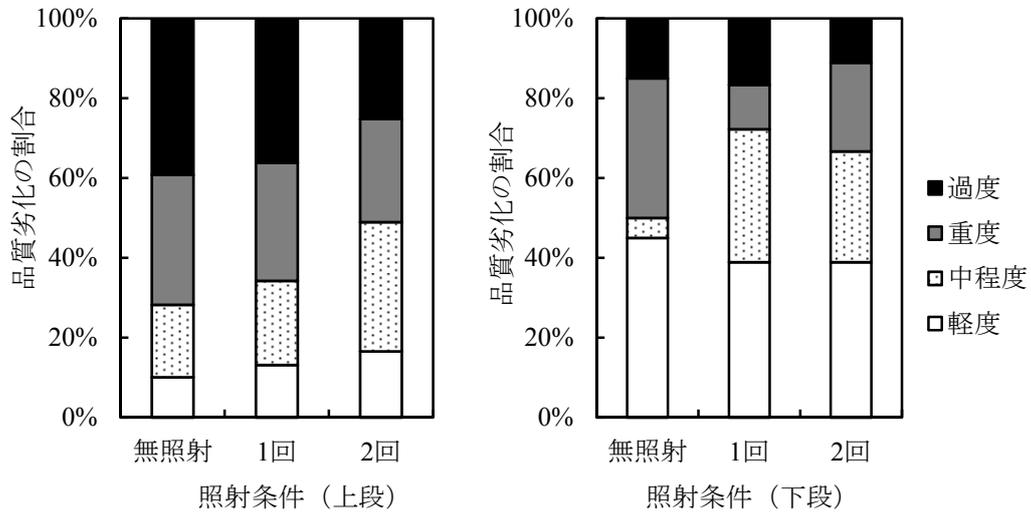
第 3 表 温州ミカンの腐敗果発生に及ぼす近赤外光照射の影響

コンテナ内の場所	腐敗果発生数 (個)		
	無照射	近赤外光・1回照射	近赤外光・2回照射
上段	2	0	0
下段	0	1	2

注 1. 近赤外光照射区は，上段は照射しているが，下段は照射していない

次に，貯蔵後の温州ミカンについて外観に基づく評価を行った。評価は，果皮のしわ，へた部分の黒点，浮皮の状態から，傷みの程度を軽度から過度までの 4 段階に分類し，その構成割合を比較することで行った。その結果，全体的に近赤外光を照射した方が過蒸散による過度のしわや黒点の割合が減少し，外観上比較的健全な温州ミカンの割合が多い傾向にあった（第 3 図）。この傾向は特に上段に顕著であったが，下段でも効果が認められた。仮に傷みの度合いが軽度と中程度のものを商品性の高い健全果とすると，上段における割合は，無照射の 28 %に対して近赤外光・2回照射で

は 49 %に向上した。以上の結果より，近赤外光による温州ミカンの貯蔵性の向上が明らかになった。

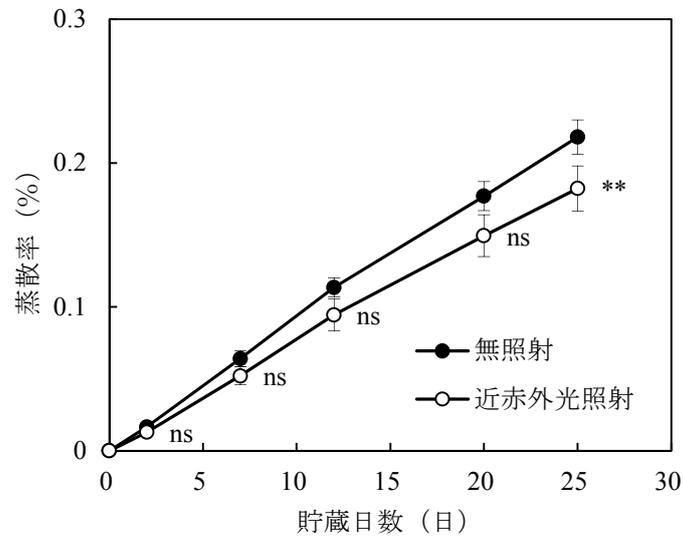


第 3 図 近赤外光照射が温州ミカンの傷みに及ぼす影響

5-7-4. 根菜

ニンジン

無照射のニンジン蒸散率は 12 日後は 0.11 %で，近赤外光照射したニンジンの蒸散率は 0.09 %だった (第 1 図)。さらに近赤外光照射区と無照射区の蒸散率の差は 25 日後には無照射区蒸散率は 0.22 %、近赤外光照射区蒸散率は 0.18 %と有意に抑制されていた。外観の変化は少なかったが貯蔵病害である黒カビの発生が僅かに抑制されていた (写真 1)。



第1図 近赤外光照射がニンジンの蒸散率に及ぼす影響
 図中の縦棒は標準誤差を示す (n = 10, ** $P \geq 0.01$, ns は有意差なし (t-検定))



写真1 近赤外光照射がニンジンの外観に及ぼす影響
 (左：無照射，右：近赤外光照射)

5-8. 摘要

近赤外光照射が葉菜類，果菜類，果実類，根菜に及ぼす影響について貯蔵後の重量変化から算出した蒸散率を主な指標として評価した。その結果全ての農作物において近赤外光照射による蒸散抑制作用が観察されたが照射強度によっては逆に蒸散を上昇させてしまうことが明らかになった。例えば結球レタスへの照射は蒸散を抑制したが，アセロラへの照射は蒸散を上昇させた。またクチクラ層の発達したトマトなどは蒸散抑制効果や外観上の変化は小さかった。照射強度の検証では，照射強度 14 W・5分

間の照射は安定的に蒸散抑制効果が得られることが明らかになったが 100 W・1 分間の照射でも蒸散抑制効果が得られる品目があったことから秒単位の短時間照射にすることで蒸散抑制効果が得られる可能性が示唆された。集荷場などのベルトコンベアで使用する場合には 5 分間の短時間照射でも作業効率の低下につながる。近赤外光照射は各種青果物への蒸散抑制効果があることから照射強度を強めることで数秒単位の照射の可能性が示唆された。

第 6 章

近赤外光照射がバラ ‘サムライ 08’ 切り花における
開花抑制に及ぼす影響

6-1. 諸言

切りバラ“サムライ 08”は、優れた特性により赤バラの代表品種である‘ローテローゼ’を超えた格調高い品種である。花保ちに優れ、家庭でも長く楽しめるため、この優美な大輪系の赤バラは、プレゼントや記念日を演出する品種として、2009年に日本フラワー・オブ・ザ・イヤール切り花部門最優秀賞受賞して以来多くのユーザーから非常に高い評価を得ている。バラは気品のある優雅な色、形、香り、さらに花色や花型の種類の豊富さから‘花の女王’と称され花の中でも最も人気が高い。日本は切花生産が主体であり（茶玲，2007）花卉生産額はアメリカ、オランダに次いで世界第3位である。さらに国民1人当たりの切り花の消費額を見ても、アメリカに次いで12位であり、1人当たりのGDPに占める切り花購入金額の割合は、0.11%と他の先進国と同程度である。（農林水産省，1999a）切り花の購入数が多い一方で、消費者のニーズとして‘日持ちする花’という要望が非常に強いことが確認できる（農林水産省，1999b）。そのため切り花の花持ちは最も重要な品質構成要素の1つである（市村，2010）。これまでバラ、カーネーションなどの品種ごとに多くの品質保持に関する研究が行われてきた（Ichimura and Shimazu-Yumoto, 2007；曾我ら，2012）。例えば、花用鮮度保持剤は主に糖と抗菌剤の混合液であり水揚げを促進し十分な栄養を与え切り花の日持ちを長くするために生花店や輸送用・家庭用として使用されている。バラでは花卉が展開するまでに切り花1本あたり約1gのグルコースを吸収するが（Ichimura et al., 2006）、切り花では花卉・茎・葉に貯蔵されている貯蔵糖質のみでは花卉展開に必要な糖質をまかなうことはできない。そのため糖質の不足により花卉が十分に展開することができず、老化が促進される。（市村，2010）バラをはじめカーネーション、デルフィニウム、トルコギキョウ、スウィートピーなど多くの品種においてスクロースをはじめとする糖質の処理により老化が遅延することが報告されている。（Ichimura and Hiraya, 1999. Ichimura and Hisamatsu, 1999；Shimizu and Ichimura, 2005；Hoerberichts et al., 2007. 黒島ら，2008. 渡邊ら，2013）。さらに、トルコギキョウ切り

花においてはスクロース前処理時の相対湿度が花持ちに関係し、高湿度条件では吸水量の低下によりスクロース吸収量が減少することにより花持ちが悪くなる（湯本・市村, 2007）。また花の老化は葉の蒸散抑制によっても遅延される。たとえば花弁中のアブシジン酸（ABA）含量は、バラ（Brochov et al., 1976）とカーネーション（Eze et al., 1986 ; Hanly and Bramlage, 1989）で老化に伴い増加するが ABA を切り花に処理したとき老化が抑制される（Brochov et al., 1976）。これは蒸散の抑制により花への水揚げが良くなり、結果として老化が抑制されたためと考えられている。さらにバラでは観賞の主体が蕾から開花に至る過程にあることから花弁の展開を制御することが望まれる。細胞は花弁の展開にともない分裂するが花弁の成長は主に細胞肥大によっておこるとされている。（Yamada et al., 2009）

本研究では近赤外光照射がバラ‘サムライ 08’切り花の吸水量、新鮮重、開花、花弁の変色および萎れ、外観に及ぼす影響について調べた。相対湿度は吸水量に影響するため、異なる相対湿度における吸水量、新鮮重、日持ち日数を測定し近赤外光照射区の値と比較した。さらに、近赤外光照射は気孔閉鎖を誘導する（高附ら, 2012, 2013 ; Kozuki et al., 2015）ためバラ切り花の葉の気孔閉鎖に及ぼす影響を調査した。バラ切り花の観賞期間は蕾から開花に至る過程にある。そのためバラの開花に関する遺伝子であるエクспанシン（EXPA）とキシログルカンエンドトランスグリコシラーゼ/ ハイドロラーゼ（XTH）の発現量を調べ開花時恒常的に発現しているグリセルアルデヒド-3-リン酸デヒドロゲナーゼ（GAPDH）と相対発現量を無照射区と比較することで近赤外光照射がバラ切り花の開花抑制に及ぼす影響について調べた。

6-2. 材料および方法

6-2-1. 供試材料

植物材料には、2015年3月13日、4月10日、5月14日、6月12日に市場で購入したバラ‘サムライ08’を各試験に用いた。切り花長が50cmになるように調整した後室温25°C、暗条件下で鮮度保持剤（50倍希釈したクリザールフラワーフード液体タイプ、クリザールジャパン（株））を一晩吸水させた。その後、近赤外光（LED、中心波長； $\lambda_P = 850 \text{ nm}$ ）を照射し200 mlの試験管に50倍希釈したクリザール鮮度保持剤を200 ml入れ、切り花を1本ずつ挿し、室温25°C、9時間明条件（9:00～18:00、蛍光灯下 $15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）に5日から10日間静置した。

6-2-2. 近赤外光照射がバラ‘サムライ08’切り花の吸水量・相対新鮮重・開花、花弁の変色および萎れに及ぼす影響（実験1）

植物材料には、2015年3月13日に市場で購入したバラ‘サムライ08’を用いた。試験区は近赤外光照射区および無照射区とし、近赤外光照射強度は $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、5分間と $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、30秒間とした。照射には直径5 mmの砲弾型LED球（中心波長 $\lambda_P = 850 \text{ nm}$ 、FWHM = 40 nm、（株）エピテックス；L850-04UP）がLED基盤（W 536 mm × D 360 mm）に932個並んだLED光源（（株）日本システムグループ（NSG））を用いた。バラ切り花の吸水量は、メスシリンダーのメモリの差から算出し1日当たりの吸水量をバラ新鮮重1 g当たりで算出した。新鮮重は照射開始時の新鮮重を基準とし、それぞれの調査日における新鮮重の相対値を相対新鮮重として百分率で示した。外観の基準は1；開花始め、2；開花、3；完全開花、4；露芯（観賞価値あり）、5；枯死・落弁の5段階評価とした（日本花普及センター、2014）。開花、花弁の萎れ、花弁の変色は、問題なし 2、やや変化あり 1、明らかに変化あり 1の3段階評価とした。1処理区当たり5反復した。気孔開度の測定はSakuraiらの印象法（Sakurai et al., 1986）に従いレプリカ法による気孔開度の測定を行った。葉の裏側にペースト比

1 : 1 で混合したキャタリスト材とベース材 (Provil novo, Pearson Dental Supply 社) を薄く塗り, 7 分間固化後, 丁寧に剥がし 1 次レプリカを作成した. 次にマニキュアで 2 次レプリカを写し取った. バラ 1 本あたり上から 2 番目の枝についている葉 3 枚より 30 個の気孔開度を測定した. 測定は明期 3 時間後とし, 近赤外光照射前と照射 1 日後, 3 日後, 5 日後にレプリカを作成し気孔開度を測定した. 1 処理区当たり 5 反復行った.

6-2-3. 近赤外光照射および相対湿度がバラ ‘サムライ 08’ 切り花の最大吸水量, 相対新鮮重, 日持ち日数に及ぼす影響 (実験 2)

植物材料には, 2015 年 3~6 月に市場で購入したバラ ‘サムライ 08’ を用いた. 試験区は近赤外光照射区 (照射強度は $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 5 分間) および無照射区とした. 近赤外光照射後室温 25°C , 相対湿度 (RH) 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 9 時間明条件 (9 : 00 ~ 18 : 00, 蛍光灯下 $15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) に 6 日間静置した. 吸水量および相対新鮮重は調査開始後 1~3 日の間に最大になりその後は漸減したため吸水量と相対新鮮重が最大になった時点の値を最大吸水量, 最大相対新鮮重, 日持ち日数とし相対湿度と比較した. 40 % RH は 2015 年 3 月 13 日, 50 % RH は 2015 年 4 月 10 日, 60 % RH は 2015 年 5 月 14 日, 70 % RH は 2015 年 6 月 12 日に市場で購入したバラを用い, 40 % RH と 50 % RH は 4 反復, 60 % RH は 20 反復, 70 % RH は 3 反復行った.

6-2-4. 近赤外光照射部位がバラ ‘サムライ 08’ 切り花の新鮮重, 開花, 花弁の萎れおよび変色に及ぼす影響 (実験 3)

近赤外光を照射する部位の違いがバラ切り花の新鮮重, 開花, 花弁の萎れおよび変色へ及ぼす影響について調べた. 照射強度および時間は $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 5 分間とし, 照射部位は花側, 葉側 (花以外), 枝 1 本 (葉 3 枚付き) とした. 各部位の照射は照射

部位以外の部分をアルミニウム箔（厚さ；12 μm ，マイホイル，住軽アルミ箔（株））で覆うことで光が当たらないようにした．吸水量，新鮮重，開花，花弁の萎れおよび変色，気孔開度の測定は実験 1 と同じ方法で行った．

6-2-5. 近赤外光照射方法がバラ ‘サムライ 08’ 切り花の新鮮重，開花，花弁の萎れおよび変色に及ぼす影響（実験 4）

近赤外光を照射する部位の違いがバラ切り花の新鮮重，開花，花弁の萎れおよび変色へ及ぼす影響について調べた．照射強度および時間は $14\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，5 分間とし，照射方法は，毎朝照射（午前 6 時から 5 分間照射），毎晩照射（午後 9 時から 5 分間照射）および無照射とし新鮮重，開花，花弁の萎れおよび変色と気孔開度を 0，1，3，5 日目に測定した．1 処理区当たり 3~5 反復行った．さらに弱光照射による近赤外光連続照射の影響を調べた．照射強度および時間は $1.4\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，連続とした．照射には直径 5 mm の砲弾型 LED 球（中心波長： $\lambda\text{P} = 850\text{nm}$ ，FWHM = 40 nm，L850-04UP，（株）エピテックス）を直接コイン型リチウム電池（CR2032，FDK（株））に電気絶縁用ビニルテープ（厚さ 0.2 mm，幅 19 mm，長さ 10 m，住友スリーエム（株））で接着し切り花上部より 2 番目の枝の葉の裏側に光が当たるようにメスシリンダーに貼りつけた．1 処理区当たり 5 反復行い，新鮮重，外観，気孔開度への影響について実験 1 と同じ方法で調べた．

6-2-6. 近赤外光照射が ‘サムライ 08’ 切り花の花弁重量と花弁におけるエクспанシンとキシログルカンエンドトランスグリコシラーゼ/ ハイドロラーゼの発現量に及ぼす影響（実験 5）

バラ花弁を外側から 5 枚採取し調査開始日から 0 日目，1 日目，3 日目，4 日目，5 日目に重量を測定し花弁の重量変化を測定した．RNA はバラ花弁を外側から 3 枚採取し抽出した．抽出は Isogen with spin column（株ニッポンジーン）を使用し添付のプ

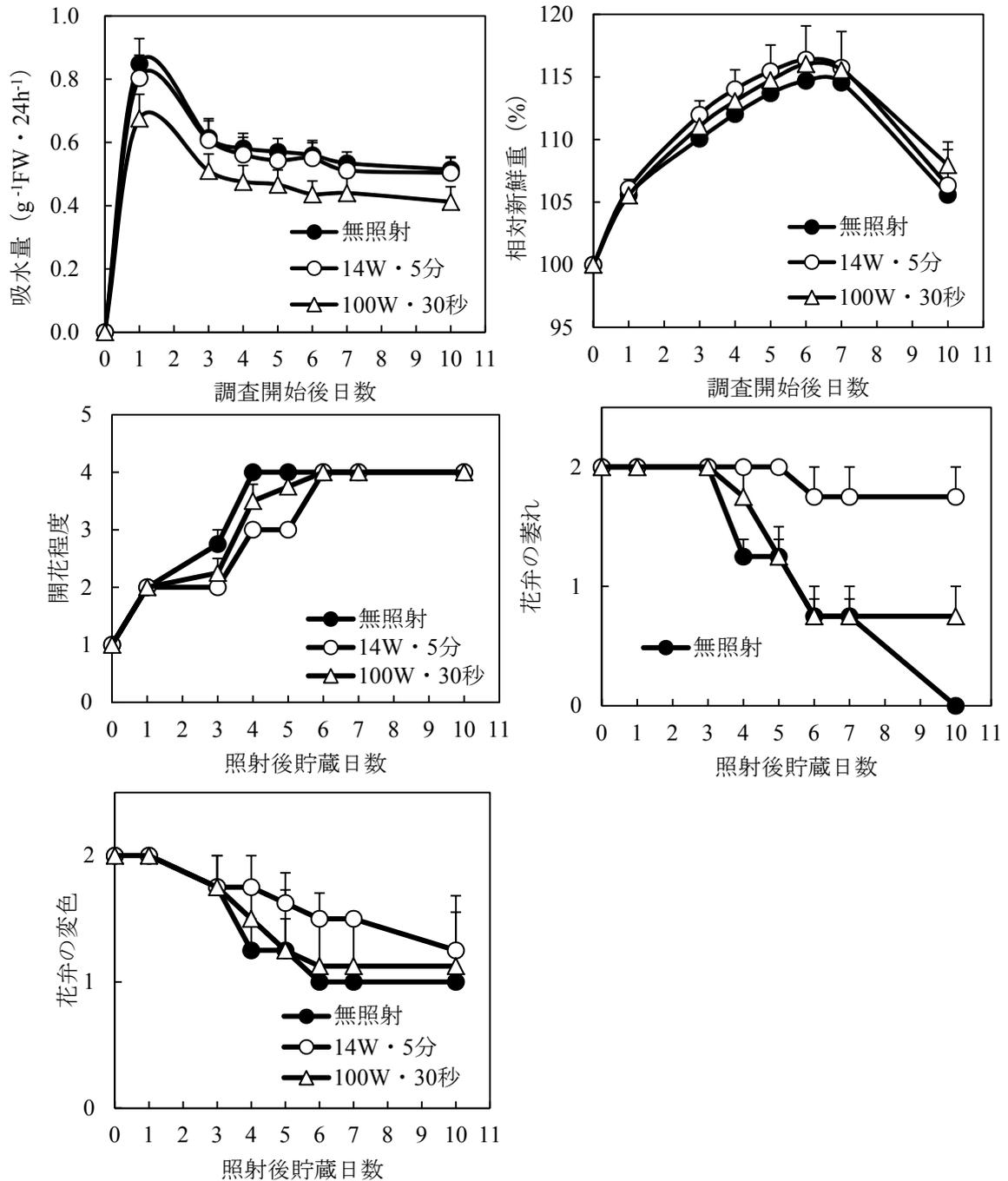
ロトコルに従った。バラ花卉を液体窒素で乳鉢と乳棒を使用しすり潰した。その後 PrimeScript™ RT reagent Kit (Perfect Real Time) (RR037A, タカラバイオ (株)) を使用し cDNA を作成後 GeneAce SYBR® qPCR Mix α (319-07683, (株) ニッポンジーン) の添付プロトコルに準じて ABI prism 7000 Sequence detection system (SDS7000, アプリッドバイオシステムズジャパン社) でリアルタイム PCR を行った。プライマーは Glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase (GAPDH), Expansin (EXP), Xyloglucan endotransglycosylase/hydrolase (XTH) (Yamada et al., 2009) の各プライマーを使用した。EXP (‘AAC CTT GTT CTG ATC ACC AAC GTC’, ‘CCA GTT TTG GCC CCA GTT TC’, XTH (‘TCT TCC TCT GGT TCG ACC C’, ‘CCC AAT CGT CTG CGT TCC’) GAPDH (‘CCA GAA GAC TGT TGA TGG ACC’, ‘GCA GAA CCT TTC CGA CAG C’) GAPDH はバラの開花時恒常的に発現しているためハウスキーピング遺伝子として使用した。

6-3. 結果

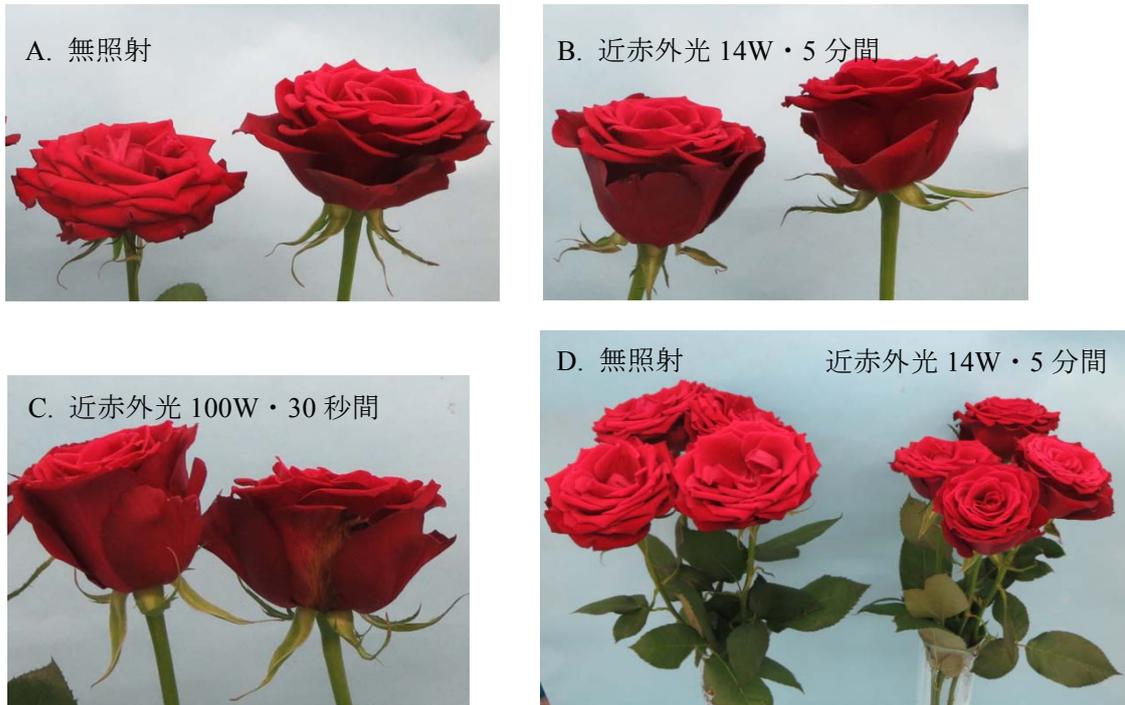
6-3-1. 近赤外光照射がバラ ‘サムライ 08’ 切り花の吸水量・相対新鮮重・開花, 花卉の変色および萎れに及ぼす影響 (実験 1)

近赤外光を切り花全体に照射した結果, 吸水量および相対新鮮重に顕著な差はなかったが, $14\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 5$ 分間照射でも $100\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 30$ 秒間照射でも開花が抑制された (第 1 図)。近赤外光照射による開花抑制作用は外観にも顕著に現れ, 近赤外光 $14\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 5$ 分間照射では花卉の萎れおよび変色も無照射と比較して抑制され, 切り花としての品質は高く維持された (第 2 図)。近赤外光 $100\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 30$ 秒間照射でも $14\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 5$ 分間照射と同様に開花は抑制されたが, わずかに花卉の変色および萎れが観察され品質の低下が観察された。無照射区の気孔開度は調査開始 1 日後には開始時の気孔開度から 33.3%大きくなったのに対し, 近赤外光照射区は 28.6%小さくなった。無照射区の気孔開度は 3 日目以降に急激に閉鎖したのに対し, 近赤外光照射は 1

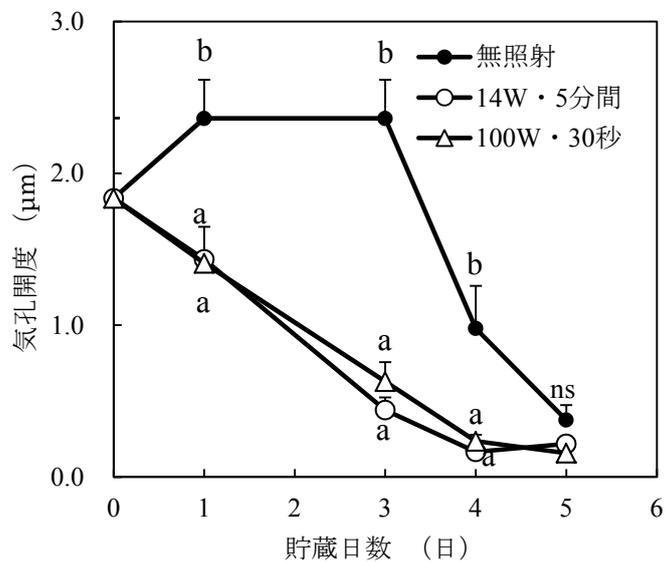
回の照射により $14\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5\text{分}$ 照射でも $100\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 30\text{秒}$ 照射でも照射強度に関わらず4日後まで徐々に閉鎖を誘導した (第3図).



第1図 近赤外光照射がバラ‘サムライ08’切り花の吸水量，相対新鮮重，開花程度，花弁の変色，花弁の萎れに及ぼす影響 (実験1)
 光源；LED，照射強度および時間； $14\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，5分間および $100\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，30秒間，照射波長；中心波長850nm，貯蔵条件；室温 25°C ，RH=40%，2014年3月13日入手，図中の縦棒は標準誤差を示す (n=4)，2014年3月13日入手，図中の縦棒は標準誤差を示す (n=4)



第2図 近赤外光照射がバラ‘サムライ08’切り花の外観に及ぼす影響（実験1）
 処理条件などは第1図脚注参照。貯蔵6日後（A. B. C），貯蔵10日後（D）



第3図 近赤外光照射がバラ‘サムライ08’切り花の気孔開度に及ぼす影響（実験1）
 処理条件などは第1図脚注参照， 図中の縦棒は標準誤差を示す（n=3，90気孔），
 各測定日ごとに Tukey の多重比較検定，異なるアルファベットは5%水準で有意差あり，nsは有意差なし

6-3-2. 近赤外光照射および相対湿度がバラ ‘サムライ 08’ 切り花の最大吸水量, 相対新鮮重, 日持ち日数に及ぼす影響 (実験 2)

最大吸水量は無照射区と近赤外光照射区においてそれぞれ 40 % RH で $0.85 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot 24\text{h}^{-1}$ と $0.80 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot 24\text{h}^{-1}$, 50 % RH で $0.48 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot 24\text{h}^{-1}$ と $0.47 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot 24\text{h}^{-1}$, 60 % RH で $0.35 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot 24\text{h}^{-1}$ と $0.32 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot 24\text{h}^{-1}$, 70 % RH で $0.25 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot 24\text{h}^{-1}$ と $0.31 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot 24\text{h}^{-1}$ と相対湿度が低いほど増加した (第 1 表). 無照射と比較して近赤外光照射はバラ切り花の最大吸収量を最大で 7.73%相対湿度 60%において抑制したが相対湿度 70 %では逆に近赤外光照射によって 22.3 %促進された. 最大相対新鮮重は, 無照射と近赤外光照射においてそれぞれ 40 % RH で 114.7 g と 116.4 g, 50 % RH で 103.5 g と 104.0 g, 60 % RH で 104.2 g と 104.3 g, 70 % RH で 103.0 g と 103.4 g と相対湿度 40 %以外は有意に低かった (第 2 表). 近赤外光照射はバラ切り花の相対新鮮重を無照射区と比較して 40% RH で 1.47 %, 50 % RH で 0.50 %, 60 % RH で 0.15 %, 70 % RH で 0.41 %とわずかに平均値を上回った. 相対湿度と近赤外光照射の有無の 2 要因で最大吸水量と最大相対新鮮重の分散分析を行ったところ, P 値は相対湿度で $P < 0.0001$ となったが近赤外光照射の有無は $P = 0.28$ と $P = 0.33$ となり交互作用は認められなかった. さらに相対湿度と近赤外光照射の有無の 2 要因で日持ち日数の分散分析を行ったところ近赤外光照射の有無は $P = 0.003$ となり近赤外光照射が切り花の日持ち日数に影響することが明らかになったが相互作用は認められなかった (第 3 表).

第1表 相対湿度がバラ切り花の最大吸水量に及ぼす影響

相対湿度 (%)	最大吸水量 (mg·g ⁻¹ FW·24 hr ⁻¹)		
	無照射	近赤外光照射	抑制率 (%)
40c	0.85	0.80	5.34
50b	0.48	0.47	3.50
60a	0.35	0.32	7.73
70a	0.25	0.31	-22.25

^x有意性

RH	P < 0.0001
近赤外光照射の有無	P = 0.72
RH×近赤外光照射の有無	P = 0.28

光源；LED，照射強度および時間；14 W·m⁻²，5分間，照射波長；中心波長850 nm，貯蔵条件；室温25℃。入手日；40%RH:2015年3月13日(n=4)，50%RH:2015年4月10日(n=4)，60%RH:2015年5月14日(n=20)，70%RH:2015年6月12日(n=3)。

Tukeyの多重比較検定，異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

^x2元配置の分散分析より得られた値。

第2表 相対湿度がバラ切り花の最大相対新鮮重に及ぼす影響

相対湿度 (%)	最大相対新鮮重 (g)		
	無照射	近赤外光照射	増加率 (%)
40b	114.7	116.4	1.47
50a	103.5	104.0	0.50
60a	104.2	104.3	0.15
70a	103.0	103.4	0.41

^x有意性

RH	P < 0.0001
近赤外光照射の有無	P = 0.33
RH×近赤外光照射の有無	P = 0.48

処理条件などは第1表脚注参照。

Tukeyの多重比較検定，異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

^x2元配置の分散分析より得られた値。

第3表 相対湿度がバラ切り花の日持ち日数に及ぼす影響

相対湿度 (%)	日持ち日数		
	無照射	近赤外光照射	延長日数
40b	6.00±0.00	6.25±0.25	0.25
50a	3.25±0.25	4.00±0.00	0.75
60a	4.00±0.00	4.30±0.15	0.30
70a	3.25±0.75	4.00±0.00	0.75
x 有意性			
RH	P < 0.0001		
近赤外光照射の有無	P = 0.003		
RH×近赤外光照射の有無	P = 1.00		

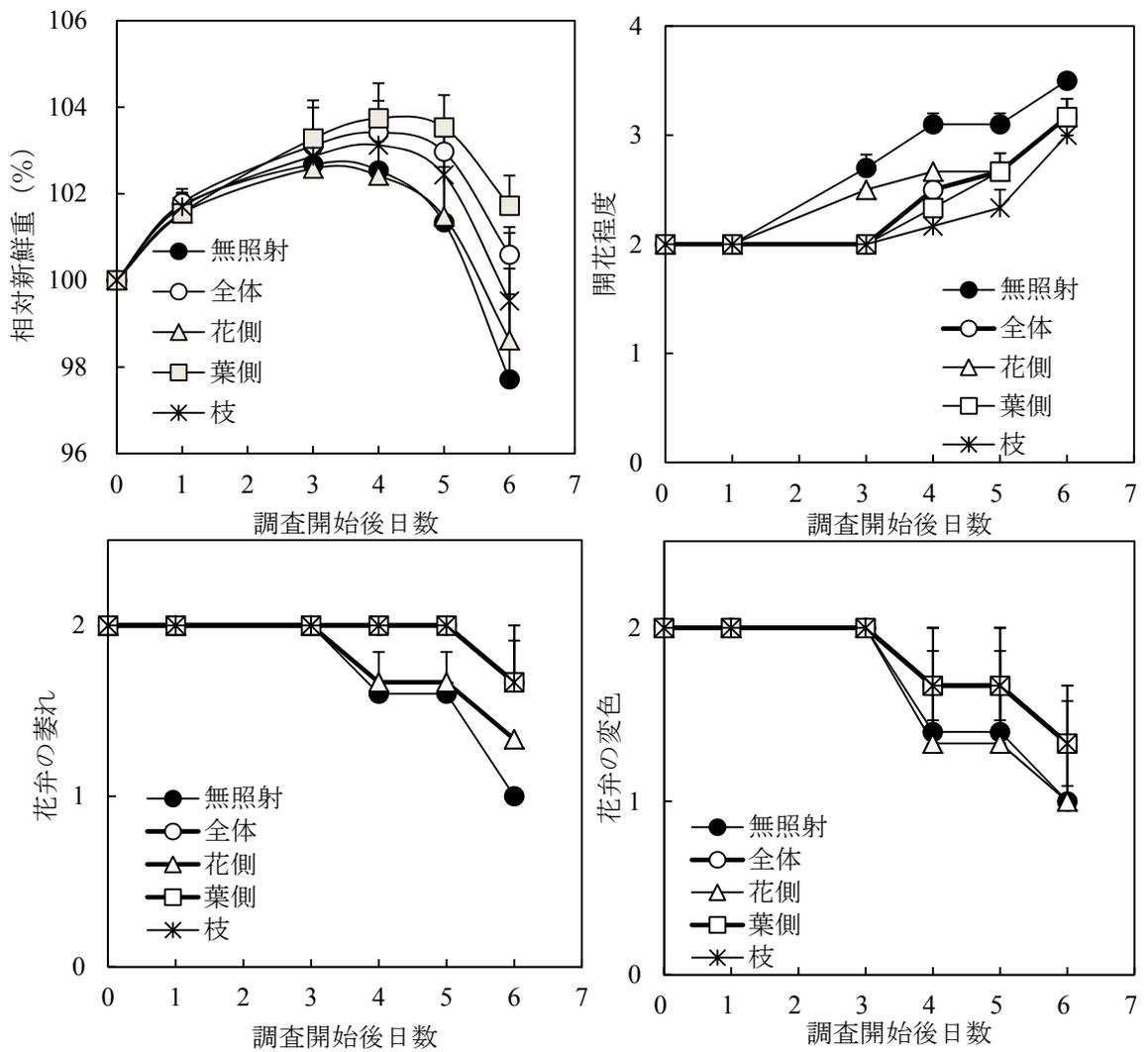
処理条件などは第1表脚注参照。±は標準誤差。40%RH(n=4), 50%RH(n=4), 60%RH(n=20), 70%RH(n=3)。

Tukeyの多重比較検定, 異なるアルファベットは5%水準で有意差あり。

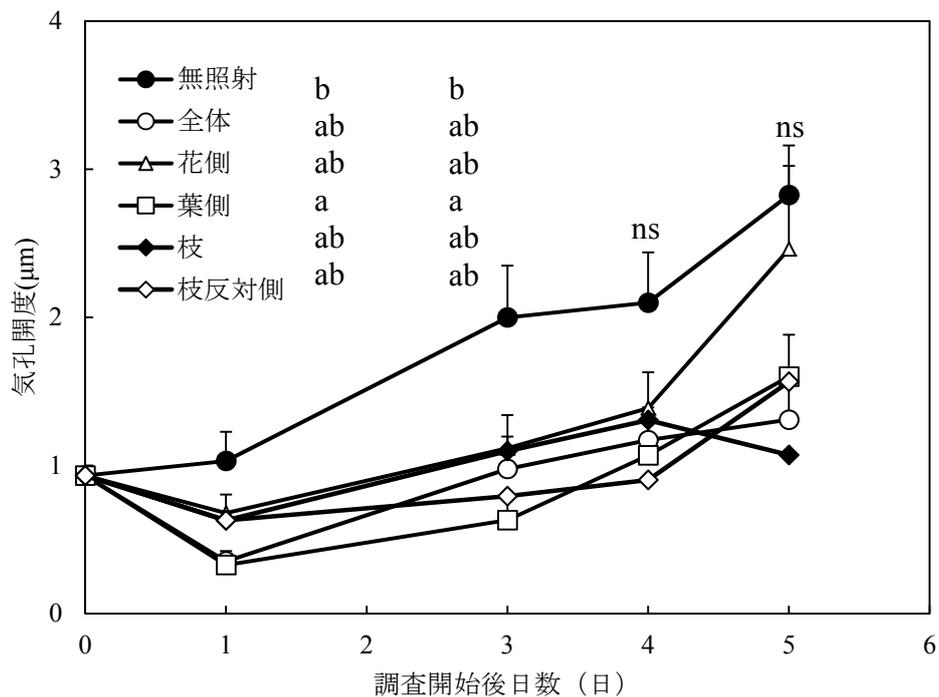
*2元配置の分散分析より得られた値。

6-3-3. 近赤外光照射部位がバラ‘サムライ08’切り花の新鮮重, 開花, 花弁の萎れおよび変色に及ぼす影響(実験3)

近赤外光照射部位の違いがバラ切り花の吸水量に及ぼす影響では, 無照射区と比較して全体照射と葉側, 枝に赤外光照射した場合に相対新鮮重がわずかに高くなったのに対し花側に照射した場合は無照射とほとんど変わらなかった(第4図)。また開花と花弁の萎れおよび変色においても同様に花側に照射した場合は無照射と同じか僅かに低くなった。気孔開度は無照射と比較して照射部位に関わらず全てにおいて小さくなった(第5図)。貯蔵1日後から近赤外光照射した葉の気孔は閉鎖誘導され特に葉側への照射において顕著に閉鎖され徐々に開口した。近赤外光照射による気孔閉鎖効果は切り花の枝1本に照射した場合にも観察され, 照射していない側の葉の気孔も閉鎖誘導された。



第4図 近赤外光照射がバラ‘サムライ08’切り花の相対新鮮重、開花程度、花弁の萎れおよび変色に及ぼす影響(実験3)
 処理条件などは第1図脚注参照、無照射；照射なし、全体；近赤外光全体照射，花側；花のみ近赤外光照射，葉側；葉のみ近赤外光照射，枝；枝1本(葉3枚)のみ近赤外光照射，貯蔵条件；室温25℃，RH=60%，2014年6月12日入手，図中の縦棒は標準誤差を示す(n=3)

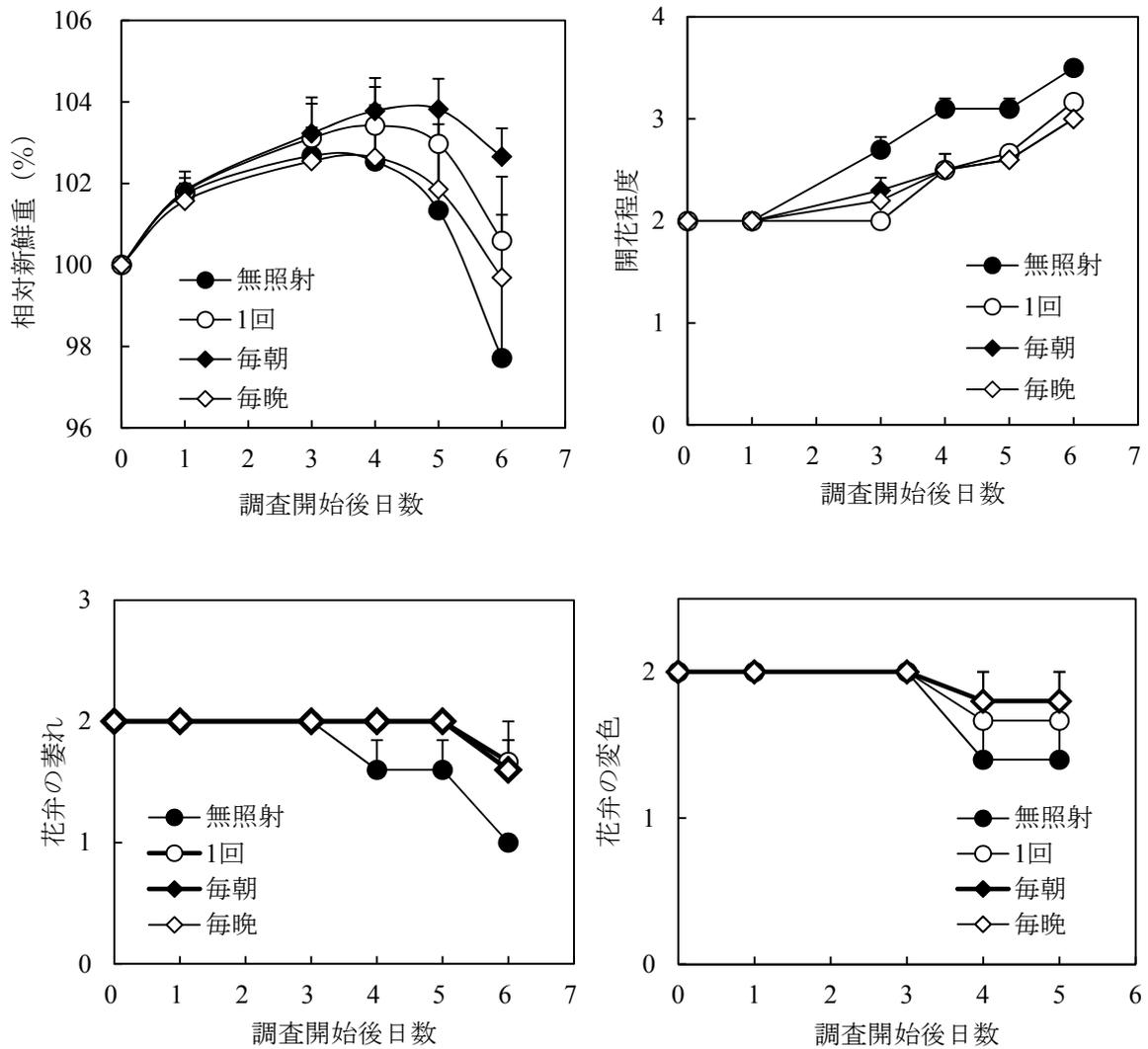


第5図 近赤外光照射がバラ‘サムライ08’切り花の気孔開度に及ぼす影響(実験3)

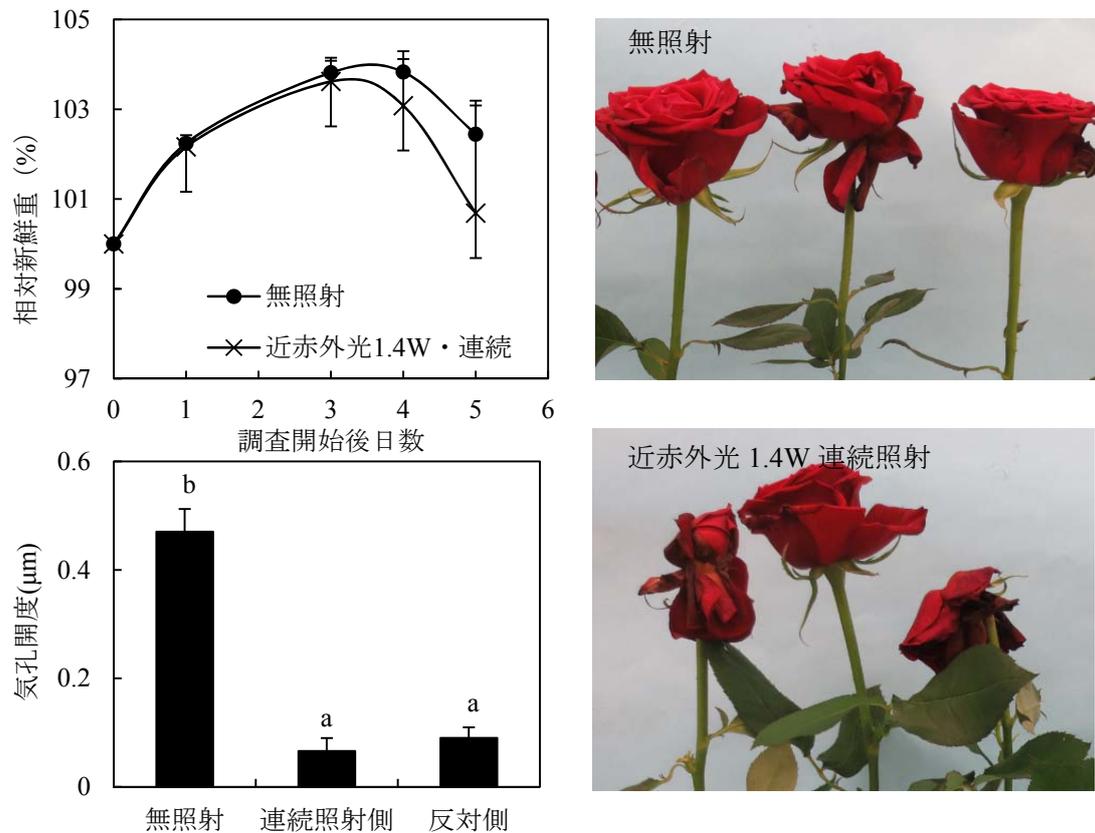
処理条件などは第1図脚注参照，無照射；照射なし，全体；近赤外光全体照射，花側；花のみ近赤外光照射，葉側；葉のみ近赤外光照射，枝；枝1本(葉3枚)のみ近赤外光照射，枝反対側；照射した枝の反対側の枝，図中の縦棒は標準誤差を示す(n=3, 90気孔)，Tukeyの多重比較検定，異なるアルファベットは5%水準で有意差あり．nsは有意差なし

6-3-4. 近赤外光照射方法がバラ‘サムライ08’切り花の新鮮重，開花，花卉の萎れおよび変色に及ぼす影響(実験4)

近赤外光照射回数および照射時間が相対新鮮重および開花，花卉の萎れおよび変色に及ぼす影響では無照射と比較して相対新鮮重の平均値は貯蔵6日後まで高く維持された(第6図)．開花，花卉の萎れおよび変色も抑制され品質も高く維持された．近赤外光弱光連続照射では近赤外光照射した切り花の相対新鮮重の平均値は無照射と比較して低く貯蔵3日後には急激に減少した(第7図)．貯蔵6日後の気孔開度は無照射と比較すると連続照射側の気孔で85.1%，反対側の気孔で80.9%小さく外観は無照射と比較すると花卉の萎れおよびベントネックも観察され品質の低下が観察された．



第6図 近赤外光照射がバラ‘サムライ08’切り花の相対新鮮重，開花程度，花弁の萎れおよび変色に及ぼす影響（実験4）
 処理条件などは第1図脚注参照，無照射；照射なし，1回；近赤外光1回照射，毎朝；近赤外光毎朝照射，毎晩；近赤外光毎晩照射，貯蔵条件；室温25°C，RH=60%，2014年6月12日入手，図中の縦棒は標準誤差を示す（n=3）

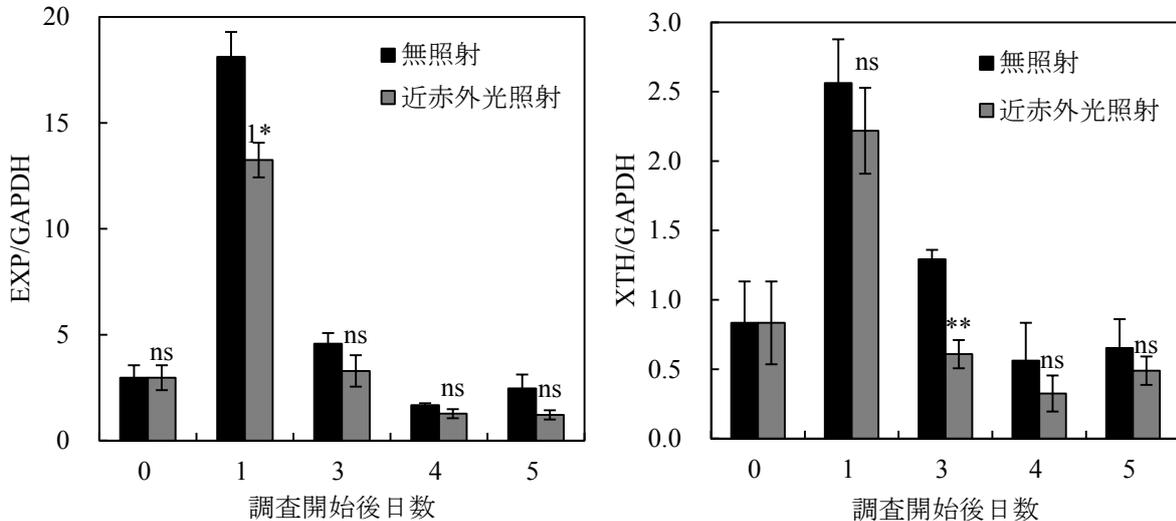
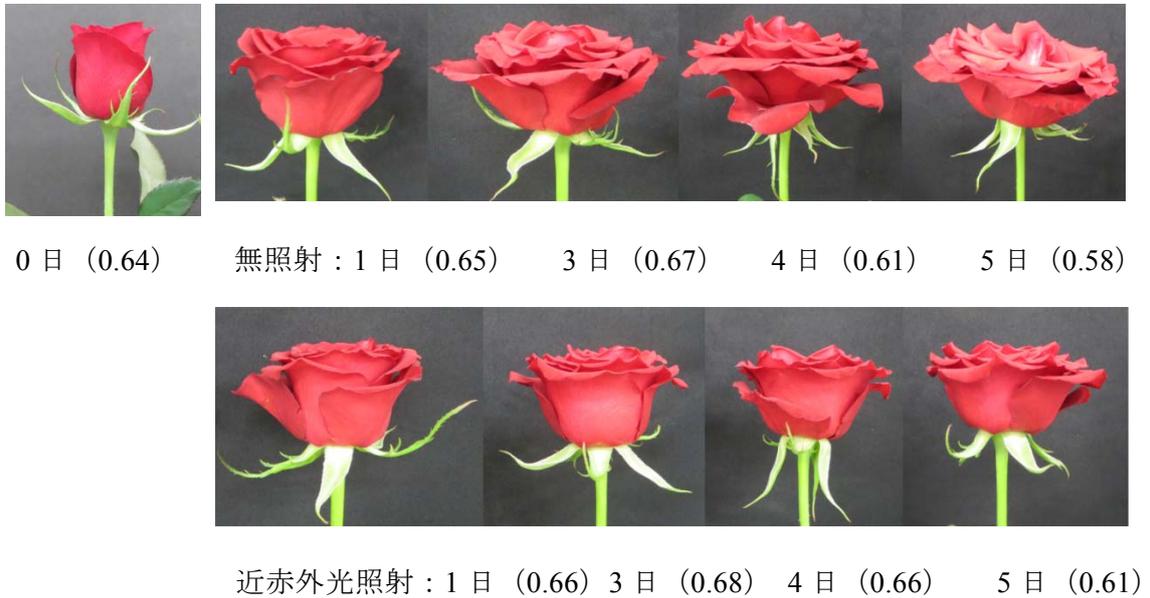


第7図 近赤外光照射がバラ‘サムライ08’切り花の相対新鮮重と外観および気孔開度に及ぼす影響（実験4）
 光源；LED，照射強度および時間； $14\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，5分間および $100\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，1分間，照射波長；中心波長850nm，貯蔵条件；室温 25°C ，RH=50%，2014年4月10日入手．外観：貯蔵7日後．相対新鮮重；図中の縦棒は標準誤差を示す（ $n=5$ ），気孔開度：貯蔵7日後（ $n=3$ ，90気孔），Tukeyの多重比較検定，異なるアルファベットは5%水準で有意差あり

6-3-5. 近赤外光照射が‘サムライ08’切り花の花弁の重量とエクспанシンおよびキシログルカンエンドトランスグリコシラーゼ/ハイドロラーゼの発現量に及ぼす影響

バラ切り花の花弁の重量は開花後露心とともに減少し，無照射区の花弁の重量と比較すると近赤外光照射した切り花の花弁の重量は遅れて減少した．バラ切り花の花弁における転写レベルでのEXPとXTHのGAPDHに対する発現量をリアルタイムPCRによって調べた．吸水直後はEXPとXTH共にわずかに高かったが調査開始1日後にはEXPとXTH共に増加した．その後値は急激に減少した．無照射の切りバラと比較

すると近赤外光を照射した切り花の花弁の EXP の発現量は 1 日後に XTH の発現量は 3 日後に有意に抑制された (第 8 図).



第 8 図 近赤外光照射がバラ ‘サムライ 08’ 切り花の EXP および XTH に及ぼす影響 (実験 5)
 光源 ; LED, 照射強度および時間 ; $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 5 分間, 照射波長 ; 中心波長 850 nm, 貯蔵条件 ; 室温 25°C , $\text{RH} = 70\%$, 2014 年 6 月 12 日入手. 図中の縦棒は標準誤差を示す ($n \geq 3$), 花弁上の数値は花弁 1 枚あたりの g 重量を示す. $**P \geq 0.01$, $*P \geq 0.05$ (t-検定). ns は有意差なし

6-4. 考察

近赤外光照射したバラ‘サムライ 08’における切り花の吸水量の平均値は $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 5 \text{ 分間}$ 及び $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 30 \text{ 秒間}$ 照射において貯蔵期間中無照射区より低く推移した。相対湿度は吸水量に影響するため、相対湿度と最大吸水量および最大相対新鮮重の関係について調べたところ、相対湿度が低いほど吸水量は高くなった（第1表）。これは、湯本・市村（2007）の報告と一致する。近赤外光照射したバラの最大吸水量の平均値は 40 %RH から 60 %RH まで無照射より低く抑えられた。一方、近赤外光照射したバラの気孔開度は無照射と比較すると有意に小さく、気孔が閉じたために吸水量が僅かに減少したと考えられた（第3図）。しかし、70 %RH では反対に近赤外光照射したバラの吸水量の方が無照射より高くなった。次に、異なる相対湿度におけるバラ切り花の最大相対新鮮重を測定し無照射区と比較した。最大相対新鮮重は 40 %RH で有意に高くなった（第2表）。無照射区と比較すると近赤外光照射区の最大相対新鮮重の平均値は、相対湿度に関わらず僅かに高く 40 %RH で 1.47 % と最も高くなった。切り花の水分状態は吸水量が多ければ良いということではなく蒸散量と吸水量の差により決まる。例えば蒸散量が吸水量より多ければ水揚げが悪くなる。近赤外光を照射したバラの吸水量の平均値は 40~60 %RH まで無照射と比較して低いのに対し最大相対新鮮重の平均値は近赤外光照射した方が一貫して僅かに高かった。また、70% RH においては無照射区と比較して最大吸水量は 22.3 % 増加し、最大相対新鮮重も 0.41 % 増加した。近赤外光照射が日持ち日数に及ぼす影響では相対湿度と相互作用はなく近赤外光照射に延長効果があることが確認された（第3表）。近赤外光照射による日持ち延長効果は 50 %RH と 70 %RH で高かった。湯本・市村（2007）はトルコギキョウ切り花においてスクロース前処理時の相対湿度およびスクロース濃度が花持ちに及ぼす影響について調べており 53 %RH で他の相対湿度に比べてスクロース処理した方の花持ち日数の差が小さかったと報告している。従って、近赤外光照射にも日持ち延長効果が最も高くなる最適な湿度条件があるのかもしれない。近赤外光照射

による外観への影響では $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 5$ 分間及び $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 30$ 秒間の照射が開花を抑制した (第 1 図). 特に $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 5$ 分間の照射は外観の品質保持効果も高く無照射の花弁は露心後観賞価値が低下したのに対し, 近赤外光照射した花弁は開花後貯蔵 10 日後まで花弁の萎れが観察されなかった (第 2 図). 一方, これまで $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 5$ 分間の条件で効果が高いとされてきたが (高附ら, 2012, 2013 ; Kozuki et al., 2015) $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 30$ 秒間の照射でも開花抑制効果が観察されたことから花束加工機器なベルトコンベア上で取り扱う際の時間の短縮効果が期待できる. しかし $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 5$ 分間の照射と比較すると花弁の萎れおよび変色が観察された (第 1 図, 第 2 図 C). 特に ‘サムライ 08’ は深紅の花色が特徴的に美しいため花弁の変色による品質の低下が懸念される. そこで, 近赤外光照射部位がバラの相対新鮮重, 開花, 花弁の萎れおよび変色に及ぼす影響について調査した.

近赤外光照射部位の違いによる相対新鮮重の平均値の増加は葉側照射で高く, 花のみの照射では無照射と変わらなかった. 近赤外光を $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ の照射強度で 5 分間全体, 葉側, 枝に照射した場合は開花が抑制され花弁の萎れおよび変色も抑制された. しかし花に照射した場合は近赤外光を $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 30 秒間照射した場合と同じように花以外に照射した場合と比較して花弁の萎れおよび変色が観察された (第 4 図). 近赤外光照射のように花と葉に処理した場合には悪影響や好影響を及ぼすものは他にもある. 例えば植物ホルモンである ABA は葉に処理すると気孔閉鎖により蒸散が抑制され切り花の水揚げが良くなるが花に処理すると老化を促進する (Brochov et al., 1976). 近赤外光を花側に照射した場合, 葉側に照射した場合と比較すると花弁の変色や開花が促進されたことから照射部位によって ABA のように品質保持に悪影響や好影響を及ぼすことが示唆された. 一方, 近赤外光は照射部位に関係なく気孔を閉鎖した (第 5 図). ABA を葉に処理すると気孔閉鎖により蒸散が抑制され水揚げが良くなる (Shimazu-Yumoto and Ichimura, 2009). 近赤外光照射による気孔閉鎖効果は ABA 処理のように強力な作用ではないが気孔閉鎖によりわずかに切り花の水揚げが良くな

ったと考えられる。

実際の花弁市場や店頭では様々な近赤外光照射方法が考えられる。そこで花弁に変色等を比較的起こさなかった $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 5 分間の照射を毎朝および毎晩と $1.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ の弱光で連続照射した場合に相対新鮮重、開花、花弁の萎れおよび変色に及ぼす影響を検討した。相対新鮮重の平均値は無照射と比較して毎朝、1 回、毎晩の順に高く開花は近赤外光を毎朝および毎晩照射した場合も 1 回照射した場合と同様に無照射と比較して抑制された。花弁の水ポテンシャルは光の影響により主に気孔の開閉を通じて蒸散速度が吸水速度を上回ることによって昼間の時間帯に低下し夜間回復する（土井ら、1999）。毎朝照射の方が毎晩照射と比較して相対新鮮重が高かったのは朝気孔が開く前に近赤外光照射することによって気孔開度が小さくなり蒸散が抑制されたと考えられる。近赤外光弱光照射では $1.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で連続照射したバラの新鮮重は無照射と比較すると 3 日後から急速に減少し 7 日後にはベントネックをおこし壊死した（第 7 図）。気孔無照射と比べて照射側の葉で 85.1 % と照射されていない反対側の葉でも 80.9 % と高かったことから気孔が閉まりすぎ生命活動に必要な吸水量を確保することができなかつたためにベントネックを起こし壊死したと考えられる。

次に、近赤外光照射したバラの開花には、無照射と比較すると開花始めから露芯までの期間が長く花弁が外側に反り返らないという特徴が観察された。そこで無照射と近赤外光照射したバラの花弁より花弁展開に関わる酵素タンパク質である EXP と XTH について遺伝子発現を調べた。細胞壁が緩むことで花弁が展開するため細胞の緩みには EXP と XTH が関係している。これらのタンパク質は花弁成長に伴って増大することから細胞肥大に重要な役割を果たしていると考えられている（Yamada et al., 2009）。バラの花弁から RNA を抽出し EXP と XTH の発現量について GAPDH の発現量を基準として相対比較した。その結果、近赤外光照射したバラの EXP は光照射後 1 日目に無照射区より有意に抑制された。発現量は調査開始後 1 日目に高くなりその後は急激に減少したが 5 日後まで無照射区よりも近赤外光照射区の方が低く抑えられて

いた（第8図）。XTHの値はEXPと比較して低かったが、EXPと同様に無照射区と比較して照射後1日目に最も高く無照射区より低い発現値を維持しながら徐々に減少した。外観上も無照射区と近赤外光照射区では開花に差が観察され、特に照射後3日後に差が観察された。その後は無照射区の花弁は外側へ反り返り露芯したが近赤外光照射区のバラの花弁はあまり展開しなかった。

切り花の気孔は光に反応し開き開花は暗所下より明所下の方が早く進行するため輸送中は暗所に置かれる（土井ら，1999，2000）。輸送方法は乾式輸送と湿式輸送があり湿式輸送の場合は生理活動に必要な水があるため開花は乾式輸送より進む。さらに、バラの観賞価値は蕾から開花までなので輸送期間や店頭販売期間の開花を抑えることが花持ちの延長につながる。消費者ニーズ調査でも‘日持ちする花’が要求されるため輸送・店頭での開花を極力抑え、購入後観賞できる期間を1日でも長くできることが切り花販売の課題と言える。近赤外光照射による日持ち延長効果は糖を摂取させたり（宮前ら，2009）、抗菌剤や電気分解陽極水（太田・原田，2000）など使用することで細菌数を減らし水揚げを良くし、花持ちを延長する直接的な方法ではなく、短時間の光照射により気孔閉鎖することで蒸散を抑制し良好な水揚げと開花抑制する植物反応を利用した間接的な方法である。そのため近赤外光照射による日持ち延長効果は0.25~0.75と非常に小さく、必ずしも高いとは言えないが確実に日持ち延長効果があることが明らかになった。さらにこれまでの鮮度保持剤は開花不良を防ぐことで観賞期間を延ばす方法が主であり開花後抑制する鮮度保持剤はない。近赤外光照射したバラ花弁のEXPとXTHの発現量は無照射より低く外観上も花弁が全開しないため観賞期間が長かった（第2図，第8図）。取扱いの面では、光を5分間照射するという簡単な操作であるためベルトコンベアへの付加や店頭で照明の前に5分間1回または毎日照射することも可能である。店頭では数十本がバケットに生けられていて葉が重なっているが近赤外光照射は枝1本の葉に照射するだけでも開花抑制効果があるため非常に使用が簡便である。さらに本研究で鮮度保持剤を使用したように既存の鮮

度保持剤へ付加的使用が可能である。ただし花のみに光が照射されることや過剰な光は逆効果となり品質を低下させるため最適な条件で使用することで消費者ニーズを満足させるような‘日持ちのする花’が提供できるようになるかもしれない。本研究ではバラ‘サムライ 08’を用いたが他の花卉でも日持ち延長効果が期待されるため今後の研究課題である。

6-5. 摘要

近赤外光照射がバラ‘サムライ 08’の開花抑制に及ぼす効果について調べた。近赤外光照射 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 5 分間および $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 30$ 秒間の照射は開花を抑制した。 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ で 5 分間の照射はバラの花弁の萎れおよび変色を抑制し、開花関連遺伝子の EXP と XTH の発現量を抑制した。 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 30$ 秒間の照射では花弁の変色が観察された。バラの吸水量は相対湿度が低いほど増加したが近赤外光照射は相対湿度に相関はなくバラの日持ち日数を延長した。近赤外光照射は切り花全体、葉側、枝 1 本に照射した場合に開花抑制、花弁の萎れおよび変色を抑制したが花に照射した場合は僅かに花弁の変色が観察された。近赤外光照射方法の検討では毎晩照射よりも毎朝照射の方が開花抑制の効果は高く $1.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot$ で連続照射ではペントネックが観察され葉の気孔開度閉鎖率も無照射より 80%以上閉鎖されていた。以上の結果より近赤外光照射は植物反応を利用した品質保持方法であり、切り花において照射方法により悪影響も好影響も及ぼすことが明らかになった。過剰な光は過度の気孔閉鎖を誘導し生命活動に必要な吸水量を確保できなくすることで壊死させるが適度な照射は気孔閉鎖することで蒸散と吸水のバランスを上手く調節し観賞期間を延長させる。本研究結果より近赤外光照射による切り花への新たな付加的鮮度保持技術としての可能性が示唆された。

第7章

本研究で得られた成果および今後の展開と課題

農作物の生産・流通・貯蔵において鮮度保持は、極めて重要である。農作物の鮮度保持技術としては、冷蔵やフィルム包装、エチレンの生成阻害剤や作用阻害剤が使用されている。また光を利用した方法としては可視光の弱光照射によるクロロフィルの維持がある。ただし、消費者の品質に対する要求度が高まり、農作物の流通が多様化する現代で更なる鮮度保持技術が求められている。そこで、本研究では光合成に利用されない近赤外光（波長：850 nm～940 nm）を用い鮮度保持効果の可能性について検討し、以下のことを明らかにした。

農作物は、収穫時の重量に対し 5%の減少がおこると、単に水分が失われるだけでなく萎れなど商品としても品質が著しく損なわれる。そこで「しおれ」に伴う鮮度低下の早い幼苗レタスを用い、各種波長（青；470 nm，緑；530 nm，赤；660 nm，遠赤色光；730 nm，近赤外光；850 nm）の LED 光源等を用いて光照射後に貯蔵し、貯蔵 1 日後における重量減少量（蒸散量）より「しおれ」の低減効果を調べた。その結果、中心波長 850 nm の近赤外光照射に特異的に蒸散抑制効果があることを明らかにした。最適照射条件の検討では照射強度は $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ で照射時間は 5 分間の条件が最も安定的に蒸散抑制効果を得られることを明らかにした。さらに蒸散抑制効果のメカニズムの一部は活性酸素種を介した気孔閉鎖効果によるものであることを示した。

次に、レタス幼苗で観察された蒸散抑制効果が商業レベルの葉菜類でも観察されるかについて 3 種の葉菜の蒸散率と気孔開度および外観品質に及ぼす影響を調査した。リーフレタス、ハウレンソウ、コマツナに貯蔵前 1 回または毎日、近赤外光を 5 分間照射し、ポリ袋密封包装または有孔ポリ袋包装を行い、 10°C 暗所に保存した、いずれの葉菜でもポリ袋密封包装と有孔ポリ袋包装にかかわらず、貯蔵 3 日後の近赤外光照射区の蒸散率と気孔開度は無照射区と比較して小さくなり、照射区では外観品質も優れた。その効果は近赤外光 1 回照射区より毎日照射区の方が大きくなる傾向を示した。有孔ポリ袋に包んだ葉菜類を短期輸送を模擬し 10°C 下で暗所および冷蔵ショーケースを模擬時明所に保存し、近赤外光照射の効果を経時的に調べたところ、いずれの条件

でも近赤外光照射による蒸散抑制，外観品質保持効果が確認された．その効果は1回照射よりも毎日照射区で優れ，特に，ハウレンソウでその効果が大きかった．さらに，近赤外光照射に蒸散抑制効果は葉菜類以外に果菜類，果実類，根菜類でも観察された．従って，収穫後の短期間近赤外光照射は流通中の農作物の付加的な品質保持技術として応用できる可能性を示した．

近赤外光照射が切り花‘サムライ 08’の開花に及ぼす影響について詳細に調べた結果，照射強度 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5$ 分間の照射で切り花の相対含水率をわずかに上昇させ照射は日持ちをわずかに延長する効果があることが明らかになった．近赤外光照射による切り花の日持ち延長効果は照射強度 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ でも観察されたが一部花卉が褐変し品質の低下が懸念された．そこで近赤外光照射部位別に相対含水率，開花，花卉の萎れおよび変色に及ぼす影響について調べた結果，花への照射は僅かに花卉を萎れさせ変色させることが示唆された．さらに，近赤外光照射方法の検討では，每晚 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 5$ 分間の照射より毎朝照射の方が相対含水率を上昇させ開花を遅らせることが明らかになった．しかし， $1.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ の連続照射は無照射よりもベントネックがおこり品質の低下が観察された．連続照射した切り花の葉の気孔は無照射と比較すると 80% 以上も閉鎖していたことから連続照射により気孔が過度に閉鎖し生命活動に必要な水を確保できず壊死したと考えられる．近赤外光照射は切り花において照射部位や照射強度の的確な照射方法を適用することで消費者のニーズである‘日持ちする花’を可能にするかもしれない．

本研究では近赤外光照射が農産物の蒸散抑制・品質保持に及ぼす影響について調べた．蒸散抑制効果は葉菜類以外に果菜類，果実類，根菜類，花卉類でも観察されたため既存の技術に加えた新しい鮮度保持技術としての可能性が示唆された．収穫後から購入までの間に流通過程で廃棄される割合の減耗率は非常に高く多くの農作物が収穫から貯蔵・流通を経て店頭に並ぶまでに廃棄されている．よって収穫後から流通中の鮮度を保つことは減耗率の減少にもつながる．またアセロラなどの実の日持ちが悪く

傷みが早いため遠隔地へ輸送できない果物類も輸送できる可能性が示唆された。近年アベノミクスの輸出拡大の影響もあり、航空会社の輸出事業では「高鮮度の日本食材を世界へ届ける」とする方針から港やマカオ、シンガポール、マレーシアなどへ果物、野菜などの生鮮食品を輸出している。しかし、実際の生鮮農作物の数は輸出は少なくほとんどは味噌、醤油、お菓子などの加工品が占めている。生鮮食品は輸送が難しく国内だけでも輸送できない果物類も多い。「日持ちの短い農作物をどのように輸送するか」は課題として残っている。本研究において近赤外光照射は葉菜類だけでなく果菜類や果実類でも蒸散抑制効果が確認できた。近赤外光照射による鮮度保持効果はクチクラ層が発達したリンゴやブドウなどでは蒸散率が抑制されても外観上の差は少なく、個体差によっても効果の大小はさまざまであった。従って、近赤外光照射による鮮度保持効果は既存のフィルム包装や冷蔵に代わるものではないが付加的に使用することでより長く品質を保持できるかもしれない。また今年の夏は台風が多く、店頭で並ぶ葉菜類の値段は倍以上に増額した。葉菜類は日持ちが悪く保存することができないため毎年天候に左右される。そのため、近年は植物工場が普及したがまだまだ生産性とコストの面で課題が残っている。近赤外光照射による葉菜類への鮮度保持効果は半日～3日と短いが確実に確認できた。従って、悪天候の前に多めに収穫し数日間貯蔵したものを店頭で小分けに分けて提供することで収穫が少ない時期も通常通り消費者に農作物を提供できるかもしれない。一方、ショーケースなどの照明事業に取り組む企業がある。ショーケース内の商品に光を当てる際商品の特性に合った光を放つこと果物等の特徴を引出しおいしく演出する方法であるが、近赤外光照射による鮮度保持技術は、見えない光であるため店頭の照明に加えても演出効果を阻害しない。近年食に対する関心が高まる中、消費者の味や鮮度、安心安全への関心も高い。農作物の生産や流通には、鮮度保持方法や出荷時など貯蔵方法が非常に重要であり、近赤外光を使用した新たな鮮度保持技術の重要性と波及効果は大きいと考えている。

引用文献

- Acharya, B., Assmann, S. M., 2009. Hormone interactions in stomatal function. *Plant Mol Biol.* 69, 451-462.
- Alander, J., Bochko, V., Martinkauppi, B., Saranwong, S., Mantere, T., 2013. A review of optical nondestructive visual and near-infrared methods for food quality and safety. *Int'l J. Spectroscopy*, 1-36.
- Ayara-Zavala, J. F., Del-Toro-Sánchez, L., Alvarez-Parrilla, E., González-Aguilar, G. A., 2008. High relative humidity in-package of fresh-cut fruits and vegetables: Advantage or disadvantage considering microbiological problems and antimicrobial delivering systems?. *J. Food Science.* 73, 41-47.
- Barth, M. M., Zhuang, H., 1996. Packaging design affects antioxidant vitamin retention and quality of broccoli florets during postharvest storage. *Postharvest Biol. Technol.*, 9, 141-150.
- Blum, D. E., Neff, M. M., Van Volkenburgh, E., 1994. Light-stimulated cotyledon expansion in the *blu3* and *hy4* mutants of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiol.* 105, 1433-1436.
- Bobelyn, E., Serban, A. S., Nicu, M., Lammertyn, J., 2010. Postharvest quality of apple predicted by NIR-spectroscopy: Study of the effect of biological variability on spectra and model performance. *Postharvest Biol. Technol.* 55, 133-143.
- Briggs, W. R., Christie, J. M., 2002 Phototropins 1 and 2: versatile plant blue-light receptors. *Trends in Plant Science.* 7, 204-210.
- Brochov, A., S. Mayak, A. H. Halevy, 1976. Combined effects of abscisic acid and sucrose on growth and senescence of rose flowers. *Physiol. Plant.* 36, 221-224.
- Büchert, A. M., Gómez Lobato, M. E., Villarreal, N. M., Civello, P. M., Martínez, G. A., 2010. Effect of visible light treatments on postharvest senescence of broccoli (*Brassica oleracea* L.). *J. Sci. Food Agric.* 91, 355-361.
- Capdeville, G. D., Willson, C. L., Beer, S. V., Aist, J. R., 2002. Alternative disease control agents induce resistance to blue mold in harvest 'Red delicious' apple fruit. *Phytopathology.*

- 92, 900-908.
- Costa, L., Montano, Y. M., Carrión, C., Rolny, N., José, G., 2013. Application of low intensity light pulses to delay postharvest senescence of *Ocimum basilicum leaves*. Postharvest Biol. Technol. 86, 181-191.
- Charles, M. T., Mercier, J., Makhlouf, J., Arui, J., 2008. Physiological basis of UV-C-induced resistance to *Botrytis cinerea* in tomato fruit: 1. Role of pre- and post-challenge accumulation of the phytoalexin-rishitin. Postharvest Biol. Technol. 47, 10-20.
- Church, I. J., Parsons . A. L., 1995. Modified atmosphere packaging technology: A review. J. Sci. Food Agric. 67, 143-152.
- 茶 珎和雄. 2007. 園芸作物保存論—収穫後生理と品質保全—. P. 12-15.
- Clark, C. J., McGlone, V. A., De Silva, H. M. Manning, M. A., Burdon, J. Mowat, A. D., 2004. Prediction of storage disorders of kiwifruit (*Actinidia chinensis*) based on visible-NIR spectral characteristics at harvest. Postharvest Biol. Technol. 32, 147-158.
- Darwin, C., 1881. The power of movement in plants. D. Appleton and Company, New York.
- Desikan, R., Cheung, M. K., Bright, J., Henson, D., Hancock, J. T., Neill, S. J., 2003. ABA, hydrogen peroxide and nitric oxide signaling in stomatal guard cells. J. Exp. Bot. 55, 205-212.
- De Greef , J. A., Fredericq, H., 1972. Enhancement of senescence by Far-Red light. Planta. 104, 272-274.
- 土井 元章・胡欲暁・今西英雄, 2000. 異なる水蒸気圧で保持したバラ切り花の水関係に影響する要因. 園学雑. 69, 517-519.
- 土井 元章・宮川 昌子・稲本 勝彦・今西 英雄. 1999. バラ切り花の吸水, 蒸散および水ポテンシャルの変化に及ぼす光周期の影響. 園学雑. 68. 861-867.
- Eze, J. M. O., Mayak, S., Thompson, J. E., Dumbroff, E. B., 1986. Senescence in cut carnation flowers : Temporal and physiological relationships among water status, ethylene, abscisic acid and membrane permeability. Physiologia Plantarum. 2, 323-328.
- Fankhauser, C., Chory, J., 1997. Light control of plant development. Cell Develop. Biol. 13, 203-

- Franklin, K. A., Whitelam, G. C., 2005. Phytochromes and shade-avoidance responses in plants. *Annals Bot.*, 96, 169-175.
- 福田直也・池田英男・奈良 誠, 1993. 光質が人工環境下で栽培したレタスならびにホウレンソウの生育に及ぼす影響. *農業施設*. 9, 77-84.
- 富士原 和宏, 2008. 低温貯蔵中の緑色植物品質維持のための LED 弱光照射. *植物環境工学*. 20, 136-142.
- 藤原孝之・本庄達之助, 1995. 近赤外分光法によるウンシュウミカン果汁の糖および酸含量の測定. *日本食品科学工学会誌*. 42. 109-117.
- Goldthwaite, J. J., Laetsch, W. M., 1967. Regulation of senescence in bean leaf discs by light and chemical growth regulators. *Plant Physiol.* 42, 1757-1762.
- González-Aguilar, G. A., Wang, C. Y., Buta, J. G., Krizek, D. T., 2001. Use of UV-C irradiation to prevent decay and maintain postharvest quality of ripe 'Tommy Atkins' mangoes. *JFST*. 36, 767-773.
- González-Aguilar, G. A., Zavaleta-Gatica, R., Tinznado-Hernandez, M. E., 2007. Improving postharvest quality of mango 'Haden' UV-C treatment. *Postharvest Biol. Technol.* 45, 108-116.
- Greef, J. A. De., Fredericq, H., 1972. Enhancement of senescence by far-red light. *Planta*, 104, 272-274.
- Gustavo, E., Grozeffa, G., Chavesb, A. R., Bartolia, C G., 2013. Low irradiance pulses improve postharvest quality of spinach leaves (*Spinacia oleraceae L. cv Bison*). *Postharvest Biol. Technol.* 77, 35-42.
- Hashimoto-Sugimoto, M., Higaki, T., Yaeno, T., Nagami, A., Irie, M., Fujimi, M., Miyamoto, M., Akita, K., Negi, J., Shirasu, K., Hasezawa, S., Iba, K., 2013. A munk13-like protein in *Arabidopsis* mediates H⁺-ATPase translocation that is essential for responses. *Nature commun.* 1-9.
- He, Liwen・網代大輔・土屋英範・木下誠一・牧野義雄・川越義則, 2006. 葉菜類の蒸散

抑制に関する基礎研究. 農環工関連学会要旨.

原田和夫, 2010. 緑化防止方法. 特許公開. 2010-187598.

Harvey, J. M., 1978. Reduction of losses in fresh market fruits and vegetables. *Ann. Rev. Phytopathol.* 16, 321-341.

Harvey, J. M., 1981. Optimum environments for the transport of fresh fruits and vegetables. *Int'l J. Refrigeration.* 293-297.

Higaki, T., Sano, T., Hasegawa, A., 2007. Actin microfilament dynamics and actin side-binding proteins in plants. *Current Opinion in Plant Biol.* 10, 549-556.

平谷敏彦・清水弘子・市村一雄, 2002. ブルースター (*Oxypetalum caeruleum*) 切り花の品質保持に及ぼす STS, 1-MCP およびスクロース処理の影響. *園学雑.* 1, 67-70.

Hoerberichts, F. A., Van Doon. W. G., Vorst, O., Hall, R. D., Van Wordragen, M. F. Sucrose prevents up-regulation of senescence-associated genes in carnation. *J. Exp. Bot.* 58, 2873-2885.

細田浩・名和義彦・黒木柁吉, 1981. 野菜の収穫後における品質に及ぼす光の影響 (第1報). *食総研報.* 38, 33-39.

細田 浩・名和義彦・黒木柁吉・高橋信典, 1983. 野菜の収穫後における品質に及ぼす光の影響 (第3報). *食総研報.* 42, 45-50.

Hsiao, T. C., Allaway, W. G., 1973. Action spectra for guard cell Rb^{+} uptake and stomatal opening in *Vicia faba*. *Plant Physiol.* 51, 82-88.

Hurng, W-P., Su, L-Y., Kao, C-H., 1986. Senescence of rice leaves. XVI. Regulation by light. *Bot. Bull.* 27, 163-174.

Hurng, W. P., Kao, C. H., 1988. Senescence of rice leaves. XVII. Effects of variation inhibitors. *Bot. Bull.* 29, 7-13.

Hurng, W. P., Su, L. Y., Kao, C. H., 1986. Senescence of rice leaves. XVI. Regulation by light. *Bot. Bull.* 27, 163-174.

- 伊藤秀和, 2007. 近赤外分光法によるメロン品質の非破壊計測法の開発. 野菜茶業研
研報 6, 85-113.
- 市村一雄, 2010. 切り花における収穫後の生理機構に関する研究の現状と展望. 花き
研報. 10, 11-53.
- Ichimura, K., Hiraya, T., 1999. Effects of silver thiosulfate complex(STS) in combinatio
n with sucrose on the vase life of cut sweet pea flowers. J. Japan. Soc. Hort. Sci.
68, 23-27.
- Ichimura, K. Hisamatsu T., 1999. Effects of the time of sucrose treatment on vase life,
soluble carbohydrate concentrations and ethylene production in cut sweet pea flow
ers. J. Jan. Soc. Hort. Sci. 68, 61-66.
- Ichimura, K., Shimazu-Yumoto, H., 2007. Extension of the vase life of cut roses by tre
atment with sucrose before and during simulated transport. Bull. Natl. Inst. Flor. S
ci. 7, 17-27.
- Ichimura, K., Taguchi, M., Norikoshi, R., 2006. Extension of the vase life in cut roses
by treatment with glucose, isothiazolinonic germicide, citric acid and aluminium s
ulphate solution. JARQ. 40, 263-269.
- 石井勝, 1984. わが国における青果物の予冷出荷の現状と研究の動向. 日食工学会誌.
31, 470-476.
- 岩元睦夫・河野澄夫・早川昭, 1977. 青果物輸送の等価再現化に関する研究. 農機学会
誌. 3. 343-349.
- Joon-Sang, L., 1998. The mechanism of stomatal closing by salicylic acid in *Commelina communis*
L. J. Plant Biol. 41, 97-102.
- Kader, A. A., 1986. Potential applications of ionizing radiation in postharvest handling of fresh
fruits and vegetables. Food Technol. 40, 117-121.
- Kader, A. A., 1994. Modified and controlled atmosphere storage of tropical fruits. ACIAR. 239-249.

- 亀岡考治・橋本篤, 2003. 農産物・食品の近赤外光分析とその応用. 農業情報研究. 12, 167-188.
- 加藤千明・石山玲子・北村利夫・福島忠昭, 1983. 青果物の収穫後の蒸散作用に関する研究 第I報 数種のお菜の蒸散量. 山形大紀要. 9, 235-248.
- 河野俊夫, 2008. 近赤外光分光法による冷蔵野菜の迅速鮮度分析法に関する研究. 食に関する助成研究調査報告書. 21, 85-94.
- Khademi, O., Zamani, Z., Poor Ahmadi, E., Kalantari, S., 2013. Effect of UV-C radiation on postharvest physiology of persimmon fruit (*Diospyros kaki Thunb.*) cv. 'Karaj' during storage at cold temperature. Int. Food Res. J. 20, 247-253.
- Khokon, MD. A. R., Okura, E., Hossain, H. A., Munemasa, S., Uraji, M., Nakamura, Y., Mori, I. C., Murata, Y., 2011. Involvement of extracellular oxidative burst in salicylic acid- induced stomatal closure in *Arabidopsis*. Plant, Cell Environ. 34, 43-443.
- Kinoshita, T., Shimazaki, K., 1999. Blue light activates the plasma membrane H⁺-ATPase by phosphorylation of the C-terminus in stomatal guard cells. The EMBO j. 18, 5548-5558.
- 近藤みゆき, 2007. 近赤外光分光法による食品の化学的分析. 名文理大紀要. 7, 23-28.
- 高野利康, 1975. 野菜産地予冷施設の現状と問題点. 長野園試. 52-62.
- 高附亜矢子・石田 豊・垣渕和正・三島敏裕・村田芳行・中野龍平・久保康隆, 2012. 近赤外光照射が収穫後のレタスの蒸散に及ぼす影響. 園学研. 11, 305.
- 高附亜矢子・石田 豊・垣渕和正・村田芳行・中野龍平・久保康隆, 2013. 収穫後の近赤外光照射が数種野菜の蒸散, 気孔開閉および活性酸素生成に及ぼす影響. 園学研. 12, 257.
- 小山初枝・藤原 温・伊藤 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カロテン濃度に及ぼす影響. 園学誌. 68, 414-420.

- Kozuki, A., Ishida, Y., Kakibuchi, K., Mishima, T., Sakurai, N., Murata, Y., Nakano, R., Ushijima, K., Kubo, Y., 2015. Effect of postharvest short-term radiation of near infrared light on transpiration of lettuce leaf. *Postharvest Biol. Technol.* 108, 78-85.
- Krishnamurthy, K., Khurana, H. K., Jun, S., Irudayaraj, J., Demirci, A., 2008. Infrared heating in food processing: An overview. *Comp. Rev. Food sci. Food safety.* 7, 2-13.
- Kubo, Y., Xue, Y., Nakatsuka, A., Mathooko, F. M., Inaba, A., Nakamura, R., 2000. Expression of water stress- induced polygalacturonase gene in harvested cucumber fruit. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 69, 273-279.
- Kubo, Y., 2015. Ethylene, oxygen, carbon dioxide, and temperature in postharvest physiology. *Abiotic Stress Biol. In Hort. Plants.* 17-33.
- 黒島 学・市村 一雄・生方 雅男, 2008. STS とスクロースの組み合わせ前処理がデルフィニウム切り花の品質と花持ちに及ぼす影響. *園学雑.* 7, 305-308.
- Lee, D. M., Assman, S. M., 1992. Stomatal responses to light in the facultative crassulacean acid metabolism species, *Potulacaria afra*. *Physiol. Plant.* 85, 35-42.
- Lee, G. H., Bunn, J. M. Han, Y. J., Christenbury, G. D., 1997. Ripening characteristics of light irradiated tomatoes. *Food Science.* 62, 138-159.
- Lee S., Choi, H., Suh, S., Doo, I. S., Oh, K. Y., Choi, E. J., Schroeder, A. T., Low, P. S., Lee, Y., 1999. Oligogalacturonic acid and chitosan reduce stomatal aperture by inducing the evolution of reactive oxygen species from guard cells of tomato and *commeliacommunis*. *Plant Physiol.* 121, 147-152.
- Lin, C., 2000. Plant blue-light receptors. *Trends Plant Sci.* 5, 337-342.
- Lin, C., 2002. Blue light receptors and signal transduction. *Plant Cell,* 14, 207-225.
- Liu, Y., Sun, X., Zhang, H., Aiguo, O., 2010. Nondestructive measurement of internal quality of Nanfeg mandarin fruit by charge coupled device near infrared spectroscopy. *Comput. Electron. Agric.* 71, 10-14

- Lu, N., Maruo, T., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ito, Y., Ichimura, T., Shinohara, Y., 2012. Effects of supplemental lighting with light-emitting diodes (LED) on tomato plants grown at high planting density. *Environ. Control Biol.* 50, 63-74.
- Ma, G., Zhang, L. C., Kato, M., Yamawaki, K., Asai, T., Nishikawa, F., Matsumoto, H., Ikoma, Y., 2010. Effects of light irradiation with LED on the senescence in postharvest broccoli. *J. Japan. Soc. Hort. Si.* 9, 600.
- 前田智雄・角田英男・大島千周・前田健二郎・鈴木 卓・大沢勝次, 2006. 補光装置によるアブラナ科スプラウトのポリフェノール含量および抗酸化能の増大. *植物環境工学.* 18, 35-41.
- Marcier, J., Roussel, D., Charles, Marie-Thérèse, Arul J., 2000. Systemic and local responses associated with UV-and Pathogen-induced resistance to *Botrytis cinerea* in stored carrot. *Phytopathology.* 90, 981-986.
- Massa, G. D., Kim, H. H., Wheeler, R. M., Mitchell, C. A., 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *Hortscience.* 43, 1954-1956.
- Mahajan, P. V., Oliveira, F. A. R., Macedo, I., 2008. Effect of temperature and humidity on the transpiration rate of the whole mushrooms. *J. Food Eng.* 84, 281-288.
- Marquenie, D., Michiels, C. W., Geeraerd, A. H., Schenk, A., Soontjens, C., Van Impe, J. F., Nicolai, B. M., 2002. Using survival analysis to investigate the effect of UV-C and heat treatment on storage rot of strawberry and sweet cherry. *Int'l J. Food Microbiol.*,73, 187-196.
- Mcaish, M. R., Clayton, H., Mansfield, T. A., Hetherington, M., 1996. Changes in stomatal behavior and guard cell cytosolic free calcium in response to oxidative stress. *Plant Physiol.* 111,1031-1042.
- 三木直子・廣部宗, 2009. 重量法による蒸散特性の評価. *低温科学.* 67, 139-142.
- Miura K., Okamoto H., Okuma E., Shiba H., Kamada H., Hasegawa P. M., Murata Y., 2013. *SIZ1* deficiency causes reduced stomatal aperture and enhanced drought tolerance via

- controlling salicylic acid-induced accumulation of reactive oxygen species in *Arabidopsis*.
Plant J. 73, 91-104.
- 宮前 治加・神藤 宏・紺谷 均, 2009. 湿式輸送時の糖処理によるシュッコンカス
ミソウ切り花の花持ち延長効果. 園学研. 8, 509-515.
- Mori, I. C., Pinontoan, R., Kawano, T., Muto, S., 2001. Involvement of superoxide generation
in salicylic acid-induced stomatal closure in *Vicia faba*. *Plant Cell Physiol.* 42, 1383-1388.
- Munemasa, S., Oda, K., Watanabe-Sugimoto, M., Nakamura, Y., Shimoishi, Y., Murata, Y., 2007.
The *coronatine-insensitive 1* mutation reveals the hormonal signaling interaction between
abscisic acid and methyl jasmonate in *Arabidopsis* guard cells. Specific impairment of ion
channel activation and second messenger production. *Plant Physiol.* 143, 1398-1407.
- Murata, Y., Pei, Z. M., Mori, I.C., Schroeder, J., 2001. Abscisic acid activation of plasma
membrane Ca^{2+} channels in guard cells requires cytosolic NAD(P)H and is differentially
disrupted upstream and downstream of reactive oxygen species production in *abi1-1* and *abi2-1*
I protein phosphatase 2C mutants. *Plant Cell.* 13, 2513-2523.
- 永井耕介・小河拓也・中川勝也, 1997. レタスの収穫後の呼吸特性と各種機能性フィ
ルムによる鮮度保持. 兵庫農技研報 (農業). 46, 45-50.
- 中原正一・井上吉雄, 1997. 赤外線放射測温によるトマトの水分ストレス反応の検出
高糖度トマト栽培における低土壌水分管理への応用. 農業気象. 53, 191-199.
- 中野龍平・播磨 真志・久保康隆・稲葉昭次, 2001. 有孔ポリエチレン包装によるカ
キ ‘刀根早生’ ハウス促成栽培果実の軟化抑制. 園学雑. 70, 385-392.
- Nakano, R., Ogura, E., Kubo, Y., Inaba, A., 2003. Ethylene biosynthesis in detached young
persimmon fruits is initiated in calyx and modulated by water loss from the fruit. *Plant*
Physiol. 131, 276-286.
- Nicolai, B. M., K. Beullens, E. Bobelyn, A. Peirs, W. Saeys, K. I. Theron and J. Lammertyn.
2007. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR

- spectroscopy: A review. *Postharvest Biol. Technol.* 46, 99-118.
- 日本花普及センター. 2014. 日持ち評価レファレンステストマニュアル Ver2014. 3.
(http://www.jfpc.or.jp/reference_test/hyoka.html)
- 農林水産省, 1999a. 花きをめぐる情勢. 第 1 回花き産業振興方針検討会. 2, 1-19.
(http://www.maff.go.jp/j/study/kaki_sangyo/01/pdf/data2.pdf)
- 農林水産省, 1999b. 花きニーズへの対応. 第 2 回花き産業振興方針検討会. 3, 1-24.
(http://www.maff.go.jp/j/study/kaki_sangyo/02/pdf/data3.pdf)
- 大久保増太郎, 1988. 野菜の鮮度保持. 29. 養賢堂. 東京.
- 太田浩一・太田万理・鈴木鐵也, 2008. 収穫後包皮付スイートコーンの弱光 LED 低温照射による品質保持および旨み成分増強効果. *植物環境工学*. 20, 31-36.
- 太田敬子・原田和夫, 2000. 電気分解陽極水がバラ切り花の花持ち延長に及ぼす効果. *園学雑*. 69, 520-522.
- 王 紅梅・齋藤高弘・志賀 徹, 2008. 光制御による貯蔵ホウレンソウの品質保持に関する研究. *農業施設*. 6, 25-32.
- Rodov, V., Ben-Yehoshua, S., Kim, J. J., Shapiro, B., Ittah, Y., 1992. Ultraviolet illumination induces scoparone production in kumquat and orange fruit and improves decay resistance. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117, 788-792.
- Reed, J. W., Nagpal, P., Poole, D. S., Furuya, M., Chory, J., 1993. Mutations in the gene for the red/far-red light receptor phytochrome B alter cell elongation and physiological responses throughout arabidopsis development. *Plant Cell*. 5, 147-157.
- Sakurai, N., Akiyama, M., Kuraishi, S., 1986. Irreversible effects of water stress on growth and stomatal development in cotyledons of etiolated squash seedlings. *Plant Cell Physiol.* 27, 1177-1185.
- Shimazaki, K., Ino, M., Zeiger, E., 1986. Blue light-dependent proton extrusion by guard-cell protoplasts of *Vicia faba*. *Nature*. 31, 324-319.
- Shimazaki, K., Doi, M., Assamann, S. M., Kinoshita, T., 2007. Light regulation of stomatal

- movement. *Ann. Rev. Plant Biol.* 58, 219-247.
- Shimazu, H., Ichimura, K., 2005. Effects of silver thiosulfate complex (STS), sucrose and their combination on the quality and vase life of cut *Eustoma* flowers. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 74, 381-385.
- Shimazu-Yumoto, H., Ichimura, K. 2006. Senescence of *Eustoma* flowers as affected by pollinated area of the stigmatic surface. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 75, 66-71.
- Shimazu-Yumoto, H., Ichimura, K. 2009. Abscisic acid, in combination with sucrose, is effective as a pulse treatment to suppress leaf damage and extend foliage vase-life in cut *Eustoma* flowers. *J. Hort. Sci. Biotech.* 87, 107-111.
- Slaughter, D. C., Crisosto, C. H., 1998. Nondestructive internal quality assessment of kiwifruit using near-infrared spectroscopy. *Semin. Food Anal.* 3, 131-140.
- Sharkey, T. D., Raschke, K., 1981. Effect of light quality on stomatal opening in leaves of *Xanthium strumarium* L. *Plant Physiol.* 68, 1170-1174.
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., Eliceiri, K. W., 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat. Methods.* 9, 671-675.
- 曾我 綾香・原 康明・吉田 誠, 2012. 光触媒を利用した切り花の品質保持. 神奈川県農技センター. 155, 17-24.
- 鈴木哲也・新猛・櫻井直樹, 2014. 1-MCP 処理およびポリエチレン包装による‘太秋’の食感保持技術の開発. 園学研. 13, 275-282.
- Talbott, L. D., Shmayevich, I. J., Chung, Y., Hammad, J. W., Zeiger, E., 2003. Blue light and phytochrome-mediated stomatal opening in the npq1 and phot1 phot2 mutants of *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 133, 1522-1529.
- Talbott, L. D., Zhu, J., Han, S. W., Zeiger, E., 2002. Phytochrome and blue light-mediated stomatal opening in the orchid, *Paphiopedilum*. *Plant Cell Physiol.* 43, 639-646.
- 田村良文, 2001. ハーブ・ヘラオオバコ (*Plantago lanceolata* L.) の機能成分蓄積に及ぼす気温, 光強度, 窒素施肥の影響. 日作紀. 70, 548-553.

- 樽谷孝之, 1963. 果実・そ菜の貯蔵. 日食工誌. 10, 186-202.
- 樽谷孝之・北川博敏, 1999. 園芸食品の流通・貯蔵・加工. 38-42. 養賢堂. 東京.
- Torsethaugen, G., Pell, E. J., Assmann, S. M., 1999. Ozon inhibits guard cell K⁺ channels implicated in stomatal opening. PNAS. 98. 13577-13582.
- Trosethaugen, G., Pell, E. J., Assman, S. M., 1999. Ozone inhibits gurd cell K⁺ channels implicated in stomatal opening. PNAS. 96, 23, 13577-13582.
- Turtoi, M., 2013. Ultraviolet light treatment of fresh fruits and vegetables surface: A review. JAP and T. 19, 325-337.
- 蔦瑞樹・杉山純一・相良泰行, 2011. 近赤外光イメージング法による食品品質計測法の開発—青果物糖度分布可視化と選別への応用—. 日本食品科学工学会誌. 58, 73-80.
- 上田悦範, 2003. 野菜の高品質を目指した光を併用する冷蔵法 (光冷蔵法). 浦上財団研究報告書. 11, 9-17.
- 臼井英夫・服部元和, 1998. 簡易レプリカ法による気孔開閉の観察: (1) 気温と光の効果. 三重大教育研紀要. 49, 11-17.
- Wang, F. F, Lian, H. L., Kang, C. Y., Yang, H. Q., 2010. Phytochrome B is involved in mediating red light-induced stomatal opening in *Arabidopsis thaliana*. Mol. Plant. 3, 246-259.
- Xu, H. L., Shida. A., Futatsuya, F., Kumura, A., 1994. Effects of epibrassinolide and Abscisic acid on Sorghum plants growing under soil water deficit. J. Crop Sci. 63, 676-681.
- 渡邊祐輔・宮島利功・野水利和・中野優・市村一雄. 2013. チューリップの切り花における糖質処理が品質保持に及ぼす影響. 園学研. 12 : 201-207.
- Yano, A., Fujiwara, K., 2012. Plant lighting system with five wavelength-band light-emitting diodes providing photon flux density and mixing ratio control. Plant Methods. 8, 46.
- Yin, Y., Adachi, Y., Ye, W., Hayashi, M., Nakamura, Y., Kinoshita, T., Mori, I. C., Murata, Y.,

2013. Difference in abscisic acid perception mechanisms between closure induction and opening inhibition of stomata. *Plant Physiol.* 163, 600-610.

湯本弘子・市村一雄, 2007. トルコギキョウ切り花においてスクロース前処理時の相対湿度およびスクロース濃度が葉の障害発生および花持ちに及ぼす影響. *園学研.* 6. 301-305.

Yamada, K., Takahashi, R., Fujitani, C., Mishima, K., Yoshida, M., Joyce, Dary C., Yamki, S., 2009. Cell wall extensibility and effect of cell-wall-loosening proteins during rose flower opening. *J. Iapan. Soc. Hort. Sci.* 78, 242-251.

謝辞

本研究を遂行するにあたり，多大なるご指導と深い御理解を賜った，岡山大学大学院環境生命科学研究科 農作物生理学研究室 久保康隆教授，牛島幸一郎助教，農産物利用学研究室 中野龍平准教授，生物情報化学研究室 村田芳行教授，宗正晋太郎助教，植物遺伝育種学研究室 加藤鎌司教授，広島大学 生物圏科学研究科 櫻井直樹教授に感謝の意を表します。

また，実験の遂行にあたり多大なご協力とご指導をいただきました農作物生理学研究室，農産物利用学研究室，生物情報化学研究室内の諸氏および卒業生，照射器具等をご提供いただいた四国総合研究所の二宮秀樹博士，また研究にあたりご協力いただいた化学バイオ技術部の皆様に心より深く感謝いたします。