

## LED 等光技術を応用した第一次産業支援技術の開発

## ～果実発色促進装置の開発～

吉村 和正<sup>\*</sup>、品川 吉延<sup>\*2</sup>、長山 憲範<sup>\*3</sup>Research and Development of Support Systems for Primary Industry using LED Lighting  
～Development of Equipment for Promoting Coloring of Apple～  
Kazumasa Yoshimura, Yoshinobu Shinagawa and Kazunori Nagayama

発光ダイオードは一般照明をはじめ、植物栽培用光源や集魚灯など幅広い分野に応用されつつある。さらに従来光源と比較して優れた特徴が多いことから、これまでは実現が難しかった照射装置の開発が行われている。本研究では、収穫後のリンゴ果実の発色を促進する装置の開発を目的に、光学シミュレーションによる装置構造の検討を行った。また、その結果に基づき装置を試作し、試作装置を用いた照射試験において有効性を確認した。

## 1. 緒 言

省エネ性の高さや寿命の長さなどの特徴から一般照明に広く普及しつつある発光ダイオード (LED: Light Emitting Diode) を、農業<sup>1-5)</sup>や漁業<sup>6-8)</sup>の第一次産業に活用する研究が精力的に行われている<sup>9)</sup>。LEDは他の光源と比較して、発光波長帯を狭くすることが可能であり、また波長の選択性も高いことから、動植物の対光反応に合わせた特徴ある光源の開発が進められている。

植物は光に対して様々な反応を示すことが知られており、その一つとして、光照射によって果実の果皮に着色物質が生成される果皮着色が挙げられる。リンゴは樹上で全方向からの太陽光を浴びることでアントシアニン色素が生成され<sup>10-11)</sup>、球体全体に着色が生じる。被照射量は着果位置で異なり、さらに、葉や枝の影にある果実は太陽光が遮蔽されるため、果実全体では着色ムラが発生する。果皮の着色の程度は価格に大きく影響するため、生産者は日当たりをよくするための葉摘み・玉回し作業や樹の下に反射シートを敷く等の着色管理を行っている。また、果皮着色を利用し、リンゴの付加価値を高めるための方法として、樹上栽培時に不透光性シールを果皮に貼り付け、その部分への日射を妨げることで着色を抑制し、着色部とのコントラストで絵や文字を描くメッセージフルーツが作製されている。しかしながら、従来の樹上作製では歩留まりの低さや作製可能期間が短いことが課題となっている。

そこで、遮光袋を掛けたまま収穫した果実を対象に、果皮の着色を制御することでメッセージフルーツを作製する果実発色促進装置の開発を行った。

## 2. 実験方法

リンゴ果皮の着色度 (a\*値) および反射板の分光反射率の測定は、ユニカミノルタセンシング(株)製分光測色計 (CM-2500d) を用いた。発色促進装置の光学シミュレーシ

ョンは、ZEMAX LCC. 製光学系設計ソフトウェア Zemax を用いて行った。

## 3. 実験結果

## 3・1 光照射条件検討

まず、リンゴ果皮の着色に最も効果的な光照射条件を明らかにするために、発光波長帯が異なる LED を用いて、光照射試験を行った。試験に用いた LED は、紫色 (サンオプト製 SL405ADUE, Wp: 405[nm])、青色 (Avago 製 HLMP-CB3B, Wp: 460[nm])、赤色 (Avago 製 HLMP-EG37, Wp: 625[nm])、および白色 (日亜化学製 NSPW500CS) の 4 種類である。有袋栽培され、被袋したまま収穫した山口県産のふじ (着色系) を供試体に、20[°C]のインキュベータ内において、各 LED で構成された照射モジュールを用いて 0~100[W/m<sup>2</sup>]の放射照度の光照射を行った (Fig.1)。照射部と非照射部の違いをわかりやすくするために、中央部に φ15 [mm]の穴を空けた黒色テープでマスキングし、着色の状況を観察した。

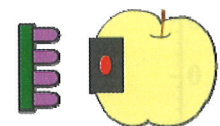
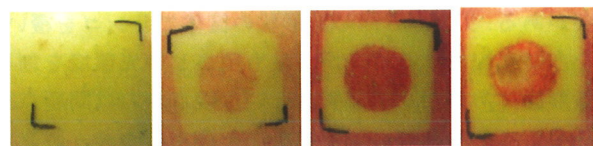


Fig.1 照射試験概要

Fig.2 に放射照度が 0, 3.7, 19.5 および 84.3[W/m<sup>2</sup>]の青色光をそれぞれ 10 日間照射した場合の果皮着色の違いを示す。放射照度に比例して果皮の着色が濃くなることが確認されたが、放射照度が強すぎる場合は、84.3[W/m<sup>2</sup>]のように焼けが発生した。焼けが発生する放射照度は発光色やサンプルで若干のバラツキがみられたが、40[W/m<sup>2</sup>]を越え



0 3.7 19.5 84.3

Fig.2 果皮着色の放射照度による違い  
(青色光, [W/m<sup>2</sup>])

\* 企業支援部光応用チーム

\* 2 山口県農林総合技術センター

\* 3 長山電機産業株式会社

た場合に焼けが発生する割合が大きく上昇した。紫色光および白色光照射の場合も同様の果皮着色がみられたが、赤色光では着色されなかった。

着色がみられた紫色光 (■405nm)、青色光 (●460nm)、および白色光 (▲White) をそれぞれ[20W/m<sup>2</sup>]の放射照度で照射したときの果皮着色の10日間の経時変化をFig. 3に示す。それぞれの発光色に対して3果の果実を供試し、1果につき左右側面の2か所に照射を行った。

Fig. 3はn=6の平均値を示している。なお、a\*値はL\*a\*b\*表色系において色相と彩度を示す数値であり、正の値が赤味方向を示している。

いずれの発光色においても、二日目以降から着色が急速に進み、五日目以降から着色量の増加が緩やかになることがわかった。視覚的に十分に赤いと感じられるためには25以上のa\*値が必要であり、紫色光照射では不十分という結果となった。本試験で使用した白色光は、半導体チップからの青色光と蛍光体からの黄色光の混色により作られているため、青色と同様の着色変化になったと考えられる。最終的に青色光と比較して着色量が低かったのは、着色への寄与が低い波長帯および着色に寄与しない波長帯の光が含まれているためと考えられる。

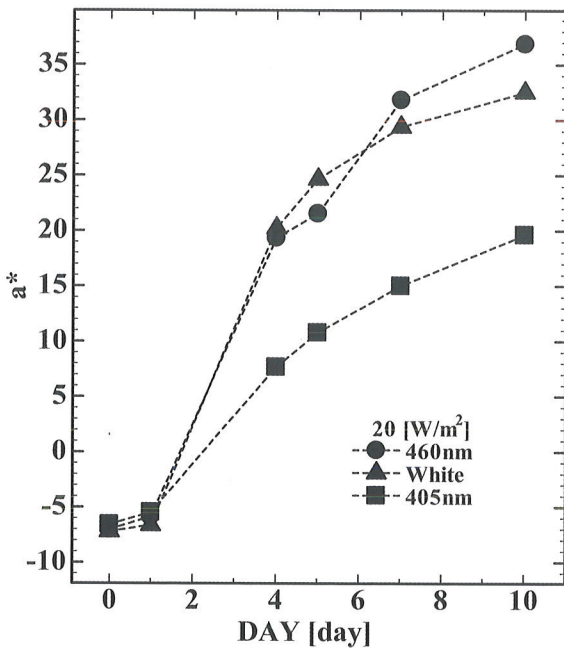


Fig. 3 果皮着色度の照射光色による変化

### 3・2 光学シミュレーションによる構造検討

本研究で開発を行う果実発色促進装置は、果皮に絵や文字を描いたメッセージフルーツの作製を行うことを目的としているため、リンゴ果実全体に均一性の高い光照射を行う必要がある。リンゴと同じ球形状の筐体でリンゴを覆い、LEDを内壁に配置する構造が、最も望ましい光環境を創り出せる形態であるが、工業製品という観点からは問題点が多い。そこで、着色に必要な光条件を満たしつつ、製造が容易で使用者の操作性が高い装置の仕様を光学シミュレーションによって検討した。

まず、装置の反射体の検討を行った。反射板として用い

られる最も一般的で安価なものはアルミニウム板（あるいは薄膜）である。しかしながら光学的に平坦な金属面は入射光を正反射するため、指向性が低いLEDを用いた場合でも、リンゴ果皮表面において光強度にムラが生じると予想される。

一般照明（蛍光灯）の反射板に用いられているアルミニウム反射板の分光反射特性を評価したところ、正反射成分を含んだ分光反射特性 (SCI) と正反射成分を含まない分光反射特性 (SCE) に大きな違いがみられた。そのため、拡散反射成分を増加させることを目的に表面に凹凸加工が施された市販反射板の評価を行った。凹凸形状が細かいほど、また、加工構造数が多いほど、拡散反射成分の増加が確認されたが、SCI と SCE の差は20~30%程度生じることが分かった。

そこで、市販されている白色拡散反射板で、反射率と成型加工性が優れる4種類の製品 (①PP (ポリプロピレン) 発泡シート, ②発泡スチロール, ③白色アクリル, ④Duffure 製 Diffure) の分光反射特性を評価した。測定結果をFig. 4に示す。図中、実線および破線は、正反射成分を含む分光反射率 (SCI) および正反射成分を含まない分光反射率 (SCE) を示している。また、比較のために、青色LEDの発光スペクトルも示す。

いずれの白色拡散反射板も、青色LEDの発光波長帯においてほぼ一定の反射率を有し、またSCIおよびSCEの差が小さい良好な反射特性を有することがわかった。青色LEDのピーク波長での反射率は、PP発泡シート、発泡スチロール、白色アクリルおよびDiffureそれぞれにおいて、約70%、約78%、約90%および約96%であった。Diffureが最も反射率が高く、成型加工性に優れた反射板であるが、1m<sup>2</sup>あたりの価格が他の反射板と比較して2倍以上高価であるため、2番目に反射率が高い白色アクリルを果実発色促進装置の反射体として用いることとした。

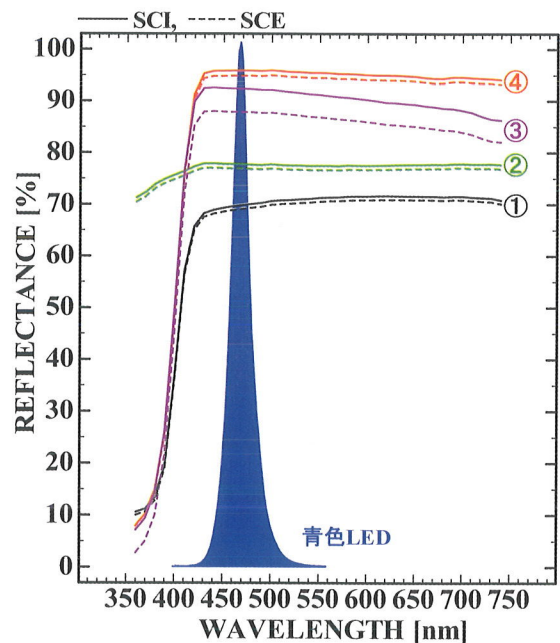


Fig. 4 各白色拡散反射板の分光反射特性

(①PP 発泡シート、②発泡スチロール、③白色アクリル、④Diffure)

次に、LED の検討を行った。LED は、砲弾型、ピラニア型、および SMD 型 (Surface Mount Device) が一般的な形状として市販されており (Fig. 5)、それぞれに一長一短の特徴がある。果実発色促進装置は果実全体に均一な



Fig. 5 LED のタイプ  
(左から、砲弾型、ピラニア型、SMD 型)

光照射を行う必要があると同時に、7~10 日間の連続照射が必要となることから高効率 (低消費電力) であることが望ましく、またリンゴという食品を対象としていることから低発熱であることが望ましい。そこで、3 種の中で発熱対策が不要で高出力な光を得ることが可能なピラニア型を用いることとした。シミュレーションでは、日亜化学製ピラニア型青色 LED NSPBR70BS ( $2\theta_{1/2} = 120 [^\circ]$ ) を用い、 $3 \cdot 1$  の結果から必要光量を算出し、上下面それぞれに 24 個を配置した。

すでに述べたように、果実発色促進装置の形状は、光強度の均一性だけを考えた場合は球体が最適な構造であるが、配置効率が低下し、また装置の製造が難しくなる。そこで、多角柱構造において、上下面の多角形の形状と LED の配置を変化させることで、装置仕様の検討を行った。

Fig. 6 および Fig. 7 に、シミュレーションモデルおよび LED の配置を示す。筐体は、リンゴ生産農家が使用している収穫コンテナに取り付けられるように、高さおよび上下面の多角形の対角線長を 200 [mm] とし、多角形の形状は四角形、六角形、および八角形とした。中心にリンゴ果皮の着色前の分光吸収・反射特性をもつ  $\phi 100$  [mm] の被照射体を配置し、その球体の北半球部分に検出面を設定した。LED は上下面の対角線上に配置し、間隔は『均等』および『外側に密に配置 (淡・濃の 2 条件)』の 3 条件とした。

Fig. 8 に上下面の形状が四角形の場合の光強度分布を示す。LED の配置は、中心と対角線を結んだ直線上で x 座標が、(i)  $\pm 10.1, \pm 20.2, \pm 30.3, \pm 40.41, \pm 50.51, \pm 60.61$ , (ii)  $\pm 10, \pm 20, \pm 35, \pm 47.5, \pm 57.5, \pm 65$  および (iii)  $\pm 12.5, \pm 27.5, \pm 42.5, \pm 52.5, \pm 60, \pm 65$  の位置とした。Fig. 8 左上図にみられるように、LED を均等配置した場合は、リンゴの北極部分の光強度が強く、赤道部分に向かって光強度が徐々に弱くなり、光強度の均一性が低いことがわかった。また、LED を配置した対角線直下の光強度が強くなった。LED を外側に密に配置すると、同右上図および左下図のように、北極部の強度が低くなるとともに赤道付近の強度が増加し、均一性が向上することがわかった。しかしながら、北極部分が最も強度が強く、上に凸な強度分布は改善されなかった。

上下面の形状が六角形 ((iv)~(vi)) および八角形 ((vii)~(ix)) の場合、LED の配置が中心部に近い 2 条件では上に凸な強度分布となったが、最も外側に密に配置した場合 ((vi), (ix)) に、均一性の大幅な改善がみられた。

Fig. 9 に、各形状で最も均一性が高かった (iii), (vi) お

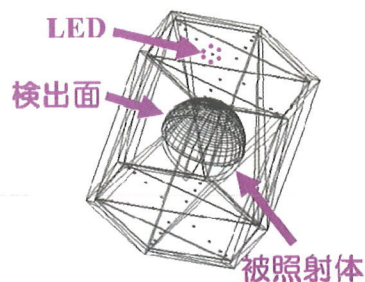


Fig. 6 シミュレーションモデル

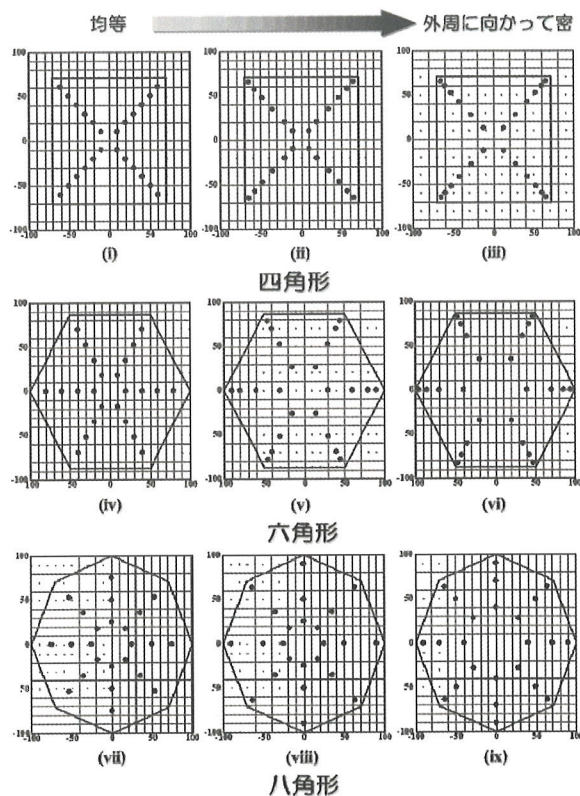


Fig. 7 LED の配置

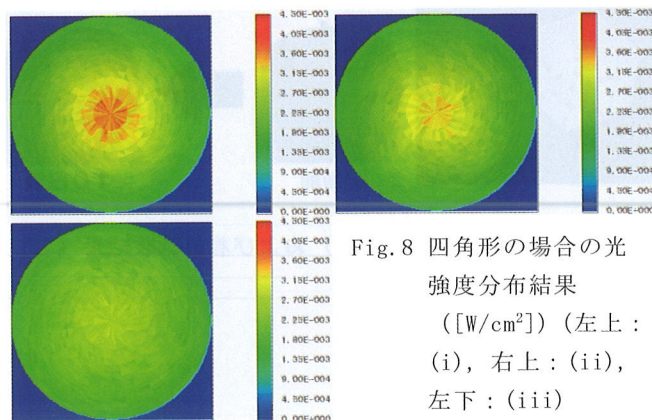


Fig. 8 四角形の場合の光強度分布結果  
([W/cm<sup>2</sup>]) (左上 : (i), 右上 : (ii), 左下 : (iii))

および (ix) の 3 条件における、西 (Fig. 7 の (-100, 0)) → 北 (同 (0, 0)) → 東 (同 (100, 0)) 断面の放射照度を示す。六角形 (vi) および八角形 (ix) の結果を比較すると、赤道近辺の強度は同程度であるが、北極近辺の強度は、六角形の方が低くなった。これは、赤道近辺および北極近辺

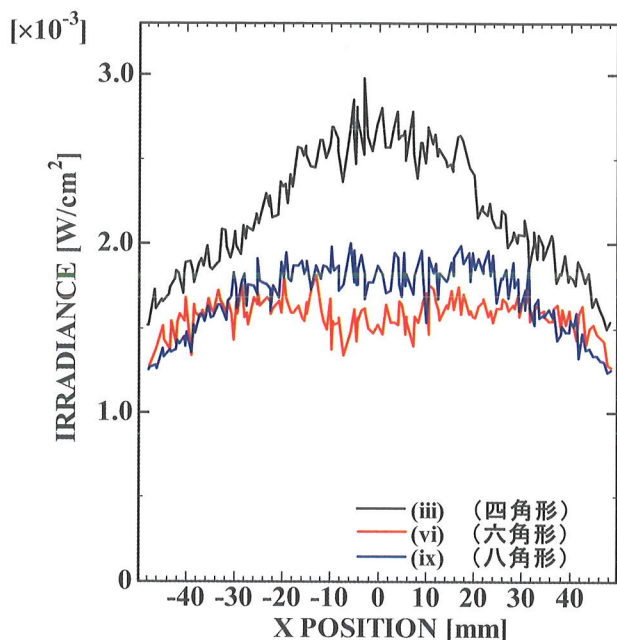


Fig. 9 上下面形状による光強度分布の変化

のLEDの数の違いに起因していると考えられる。しかしながら、断面全体での均一性は六角形の方が高く、また、実際のリンゴは球体ではなく頂上部に凹みと果梗があるため着色が不十分でも問題がないと考えられる。そこで、果実発色促進装置の形状は六角柱、また、LEDの配置は(vi)とした。

### 3・3 試作装置による着色試験

3・2の検討結果に基づき、果実発色促進装置を試作し(長山電機産業(株)),リンゴ果実を用いて着色試験を実施した。試作装置の写真および試験前後のリンゴの写真を Fig. 10 に示す。赤道部分にマスキングテープを貼り、10日間の照射を行った結果、十分な着色をさせることに成功した。

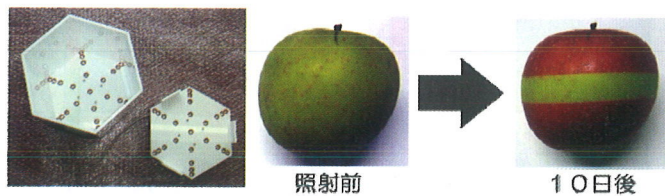


Fig. 10 試作装置写真(左)および着色試験結果(右)

## 4. 結言

収穫後のリンゴ果皮の着色を制御し、メッセージフルーツを作製する装置を開発するために、着色に適した光照射条件の検討を行い、その条件を実現するための照射装置を光学シミュレーションにより検討した。シミュレーション結果に基づいて試作した果実発色促進装置を用いた照射試験において、リンゴ果皮の着色を実現した。

本研究の一部は、平成21~25年度文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラム(グローバル型)の研究助成により行われた。

## 参考文献

- 1) 後藤英司：アグリフォトニクス，シーエムシー出版(2008)。
- 2) 工藤りか：緑色光照射による農作物の病害防除技術，農業，**1534**，pp.37-42(2010)。
- 3) 荊木康臣，得能彩歩，伊藤真一，荒木英樹，吉村和正：405nmLEDを用いた病害防除に関する研究，中国四国の農業気象，**24**，88(2011)。
- 4) A. Tokuno, Y. Ibaraki, S. Ito, H. Araki, K. Yoshimura, K. Osaki：Disease suppression in greenhouse tomato by supplementary lighting with 405nm LED, *Environ. Control Biol.*, **50**，pp.19-29(2012)。
- 5) K. Imada, S. Tanaka, Y. Ibaraki, K. Yoshimura, S. Ito：Antifungal effect of 405-nm light on *Botrytis cinerea*, *Lett. Appl. Microbiol.*, **59**，pp.670-676(2014)。
- 6) 稲田博史，有元貴文，長島徳雄，飯田浩二：魚灯を活かす技術・制度の再構築へ，恒星社厚生閣(2010)。
- 7) 梶川和武，伊藤貴史，毛利雅彦，渡邊俊輝：山口県日本海沿岸域のウルメイワシ棒受網漁業のハロゲン水中集魚灯とLED水中集魚灯の配光特性，*J. National Fisheries University*, **59**(4)，pp.273-279(2011)。
- 8) 梶川和武，毛利雅彦，中村武史，濱野明：棒受網のためのLED水中灯による海中の光環境のカタクチイワシ視感度に基づく評価，*数理水産科学*，**11**，pp.44-53(2014)。
- 9) 吉村和正：LEDの第一次産業への応用，*照明学会*，**96**(7)，pp.399-400(2012)。
- 10) 荒川修：リンゴ果実のアントシアニン生成(1)，農業及び園芸，養賢堂，**65**(2)，pp.246-250(1990)。
- 11) 荒川修：リンゴ果実のアントシアニン生成(2)，農業及び園芸，養賢堂，**65**(3)，pp.363-366(1990)。