

近赤外光照射による青果物鮮度保持技術「iR フレッシュ」の開発

(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 石田 豊
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 秦 亜矢子
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 垣湊 和正

キーワード : 青果物
鮮度保持
近赤外光
照射

Key Words : Vegetables
Fruit
Freshness retention
Near infrared light
Irradiation

The development of the fruit and vegetables fresh-keeping technology "iR fresh" by the near infrared light irradiation

Shikoku Research Institute, Inc., Department of Chemical and Biological Technologies
Yutaka Ishida, Ayako Hada and Kazumasa Kakibuchi

Abstract

As new postharvest freshness holding method of fruits and vegetables, we have developed a technology for the short-term irradiation of near infrared light, it was named the technology as "iR fresh". We have developed the practical-type irradiation apparatus using an light-emitting diode (LED) or laser as a light source can be used for this technology. It examined the freshness holding effects by using this irradiation device. In experiments with these devices, various freshness retention effects, for example, suppression of shriveled in spinach, maintenance of gloss of the pericarp in eggplant, and suppression of mold occurrence in the strawberry has been confirmed. By using these irradiation devices for near infrared light, it is possible continuous treatment with conveyor and short time batch processing. These results suggest that postharvest short-term near infrared radiation has a promising as a new quality control technique during the storage and transportation of fruits and vegetables.

1. はじめに

野菜や果物など青果物の生産や流通において、収穫後の鮮度保持は、商品価値に大きく影響するため非常に重要である。青果物の鮮度保持の手段としては従来から冷蔵やフィルム包装の手段が主に用いられてきた^{1,2)}。前者においては、対象とする青果物の品温をより短時間に下げるために真空予冷や差圧通風予冷などの方法が開発されるとともに、冷蔵輸送や冷蔵ショーケースなどによるコールドチェーンの整備が進められている。また後者では、ガス透過性に特徴を持たせたフィルム包装が盛んに利用されている。その一方で、青果物の遠距離輸送やカット野菜の普及など青果物の流通や加工は多様化しており、新たな鮮度保持技術が求められている^{3,4)}。

一方で、植物に対する各種波長の光の影響については、菊の電照栽培や完全人工光植物工場での葉菜類栽培を中心に数多くの研究事例があるが^{5,6)}、これに対して収穫後の光照射についての研究は比較的少ない。これまでに、白色光連続弱光照射によるホウレンソウやコマツナのクロロフィル維持や⁷⁾、低温下で弱い赤色光および青色光を照射することによるスイートコーンの品質保持⁸⁾、赤色光照射によるブロッコリーの老化遅延⁹⁾などが検討され、可視光の弱光照射が青果物の鮮度保持に効果があることが報告されている。可視光より波長の長い近赤外光については、730nm付近の光照射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¹⁰⁾。

こうした中で、筆者らは、各種波長の光が植物に及ぼす影響を調べる中で、発光ダイオード(LED)から発する700nm~1,000nmの光を14W/m²の強度で5~10分間程度の短期間照射することにより、蒸散量が抑制されることを初めて見出し、その効果は活性酸素種(ROS)生成による気孔閉鎖促進が関与することを示した¹¹⁾。さらに、この効果は流通レベルの葉菜類(リーフレタス、ホウレンソウ、コマツナ)でも発揮され、外観での品質保持効果も確認され、青果物流通における新規な鮮度保持技術として利用できる可能性を示した¹²⁾。

本技術は「iR フレッシュ」という名称での商標や特許の出願を行い登録に至っている。しかしながら上記の鮮度保持効果は14W/m²の光強度

で5分間程度の照射によるものであり、実用化を図るには照射時間を1分以下に短縮する必要があると考えられた。収穫後の青果物に及ぼす近赤外光照射のメカニズムについてはまだ明らかになっていないが、ROSの生成を伴うことから一種のストレス刺激であると推察される。そのため照射時の光強度を上げることで照射時間が短縮できると考え、光源としてLEDおよびレーザーを用いた実用型照射装置を試作した。これらの照射装置のうちより実用性が高いと考えられるレーザータイプの照射装置を主に使用して流通レベルの数種青果物の鮮度保持効果を検証した。

2. 照射装置の開発

2.1 LEDタイプ

近赤外LEDを用いた照射装置を、(株)日本システムグループ(愛媛県西条市)と共同で開発した(写真1)。この照射装置は、614mm×414mmのパネルに中心波長850nmの砲弾型LEDを3,290個実装した面発光タイプであり、照射面で300W/m²以上の光出力が可能である。LEDを実



写真1 LEDタイプの照射装置
上：照射部、下：電源部

装した照射部の下約 15cm～30cm に照射したい青果物を置き、タイマー制御により 0.1 秒以上の任意の照射時間を設定することが出来る。照射時間は対象とする青果物により若干変わるものの 1 秒程度であり、収穫コンテナ単位で迅速なバッチ処理が可能であることから、手作業での出荷調整を行っている比較的小規模な生産現場に適している。また、大学や公設試験場での試験研究用とかレーザータイプでの試験に先立つ予備検討などにも適している。

2.2 レーザータイプ

レボックス(株) (神奈川県相模原市) が開発した中心波長 830nm の近赤外光を発する面発光型レーザー光源『フォトンラップ』を内蔵した実用型の照射装置を三井金属計測機工(株) (愛知県小牧市) が試作した (写真 2)。この装置では、レーザー光を光ファイバーからライトガイドを通して線状に照射することができ、照射面で 800W/m² 以上の光出力が可能である。照射装置の外部に近赤外光が漏れないように遮蔽を行うとともに稼働状況をパイロットランプで表示するなど安全面での配慮も行っている。本装置はベルトコンベアと連動させての連続処理が可能なインライン型であるため、青果物の共同選果場や集出荷場など比較的大規模な施設に適している。



写真 2 レーザータイプの照射装置

3. 鮮度保持効果の検証

3.1 材料および方法

(1) 供試材料

ホウレンソウ (岐阜県産、品種不明)、ナス (高知県産、品種‘土佐鷹なす’)、イチゴ (香川県産、品種‘さぬきひめ’) を用いた。いずれも市販品を購入し、傷があるものやサイズが大きく異なる個体を除いて試験に供した。

(2) 近赤外光の照射と貯蔵

LED タイプの照射装置では、パネル型の照射装置の下に供試材料を置き、供試材料の上面での光強度が 300W/m² になるように調整した。照射時間は電源部に内蔵されたタイマー機能により設定した。

レーザータイプの照射装置では、レーザー光源の出力を最大に設定し、ベルトコンベアの手速を低速 (125mm/秒)、中速 (250mm/秒)、高速 (500mm/秒) に変えて照射した。近赤外光を照射するライトガイドはベルトコンベアの上方 350mm の位置に固定し、ライトガイドから下向きに照射した。この条件での光強度は 800W/m² であり、ベルトコンベアの移動方向に対して幅 8cm の範囲で 500W/m² 以上の光強度であった。

LED タイプ、レーザータイプともに、照射は実験室内の白色蛍光灯照明下で行った。

近赤外光照射後は、各試験区間での環境条件を同一にして 10℃ の保冷庫内で貯蔵した。

(3) 鮮度保持効果の評価

蒸散率は、個々の青果物の重量に基づき、下記の計算式で算出した。

$$\text{蒸散率(\%)} = 100 \times \frac{[(\text{貯蔵前の新鮮重}) - (\text{貯蔵後の新鮮重})]}{[(\text{貯蔵前の新鮮重})]}$$

茎や葉、果実の硬度は、果実硬度計 (藤原製作所製、ホウレンソウとイチゴでは 1kg 計、ナスでは 5kg 計、円錐プランジャー) を用いて測定した。ホウレンソウの外観評価は、北海道立総合研究機構・農業研究本部の方法¹³⁾ に準じて行った。すなわち、茎と葉の萎れの程度を観察し、5 段階評価 (5: 試験開始時の状態、4: ごく僅かに萎れ、3: 明らかな萎れ、2: 萎れが進行、1: 完全に萎れ) で行った。ナスについてもこれに準じて、数字が大きいほど試験開始時の健全な状態で

あるとして5段階評価を行った。色彩分析は、色彩色差計（ミノルタ製 CR-200）を用い、L*a*b*表色系で測定した。

3.2 結果および考察

(1) ホウレンソウへの効果

ホウレンソウへの近赤外光の照射はレーザータイプの照射装置で行った。照射条件（試験区）は、①無照射（対照）、②コンベア高速×1回照射、③コンベア中速×1回照射、④コンベア低速×1回照射、⑤コンベア低速×3回照射、⑥コンベア低速×6回照射という6通りとし、各4株のホウレンソウを用いた。ホウレンソウはプラスチックトレイ（20cm×30cm）に置いた状態で照射を行い、照射後はトレイごとポリエチレン袋（30cm×45cm、厚さ0.03mm）に収納した後、袋の口を二重折りにし口をテープでとめ、10℃の冷蔵庫内で6日間貯蔵した。鮮度の評価は、蒸散率（重量変化）、株元付近の茎硬度、茎と葉の外観観察により行い、蒸散率は2日後と6日後に、他の項目は6日後に行った。

蒸散率については、低速6回では逆に2日後の蒸散率が無照射よりも大きくなったものの、これ以外では近赤外光照射により低減し、中速1回から低速3回までが効果は大きかった（表1）。茎硬度についても近赤外光照射は無照射を上回っていたが、特に中速1回と低速1回で高い値を示した（表2）。外観評価でも近赤外光照射は無照射を上回っていたが、低速1回と低速3回が特に優れていた（表2、写真3）。

表1 ホウレンソウの蒸散率に及ぼす近赤外光照射の効果（6日後）

試験区	蒸散率(%) ^a (無照射を100とした相対値)	
	2日後	6日後
無照射	2.84±0.72 (100)	5.43±1.45 (100)
高速1回	2.47±0.67 (87)	4.89±1.04 (90)
中速1回	2.43±0.65 (86)	3.79±0.89 (70)
低速1回	2.09±0.30 (74)	4.10±0.99 (76)
低速3回	2.05±0.15 (72)	4.06±0.68 (75)
低速6回	3.25±1.48 (114)	4.78±1.61 (88)

a, 平均±標準偏差

以上の結果から、ホウレンソウに対する最適な照射条件は中速1回から低速3回であると考えられた。無照射では貯蔵6日後には蒸散率が5%を超え外観的にも商品性を失っていたが、近赤外光照射により蒸散率は4%程度にとどまっていたことや外観的にも商品性を保っていたことから、付加的な鮮度保持方法となり得るものと考えられた。

表2 ホウレンソウの茎硬度や外観に及ぼす近赤外光照射の効果（6日後）

試験区	茎硬(kgf) ^a (無照射を100とした相対値)	外観評価 ^a	
		茎部	葉部
無照射	0.69±0.08 (100)	2.5±0.6	2.0±0
高速1回	0.75±0.04 (109)	3.0±0.0	2.5±0.6
中速1回	0.75±0.05 (109)	4.0±0.0	2.5±0.6
低速1回	0.78±0.06 (113)	4.0±0.0	3.3±0.5
低速3回	0.79±0.06 (114)	4.0±0.0	4.0±0.0
低速6回	0.74±0.04 (107)	3.8±0.5	3.3±0.5

a, 平均±標準偏差



写真3 ホウレンソウの萎れ具合の比較（6日後）

(2)ナスへの効果

ナスへの近赤外光の照射はレーザータイプの照射装置で行った。照射条件（試験区）は、①無照射（対照）、②コンベア中速×1回照射、③コンベア低速×1回照射という3通りとし、各9本のナスを用いた。ナスはプラスチックトレイ（20cm×30cm）に置いた状態で照射を行い、照射後は市販時に使用されていた小孔のある高密度ポリエチレン製フィルムに3本ずつ収納し、10℃の冷蔵庫内で9日間貯蔵した。鮮度の評価は、蒸散率（重量変化）、果実硬度、外観観察（果皮光沢）、果実切断面の観察により行った。

蒸散率については、近赤外光照射による低減は、見られなかったが、果実硬度は中速1回で僅かに上昇した（表3）。外観観察では、近赤外光照射により果皮光沢が維持されており、さらに果実を切断して種子変色の状態を観察すると無照射ではかなり褐変が進んでいたのに対して近赤外光照射により褐変が大幅に抑制されていた（表4、写真4）。

以上の結果から、ナスに対する最適な照射条件は中速1回であり、品質面では果皮の光沢維持や低温障害や果実老化によって発生する種子変色の抑制に効果があることが分かり、ナスについても鮮度保持の手段となり得ると考えられた。

表3 ナスの蒸散率と果実硬度に及ぼす近赤外光照射の効果（9日後）

試験区	蒸散率(%) ^a (無照射を100とした相対値)	果実硬度(kgf) ^a (無照射を100とした相対値)
無照射	1.38±0.55 (100)	2.17±0.21 (100)
中速1回	1.32±0.56 (96)	2.24±0.19 (103)
低速1回	1.38±0.34 (100)	2.17±0.11 (100)

a, 平均±標準偏差

表4 ナスの果皮光沢と種子変色に及ぼす近赤外光照射の効果（9日後）

試験区	果皮光沢 ^a	種子変色 ^a
無照射	3.78±0.67	2.22±1.09
中速1回	4.22±0.44	4.44±0.53
低速1回	3.89±0.60	4.33±0.50

a, 平均±標準偏差

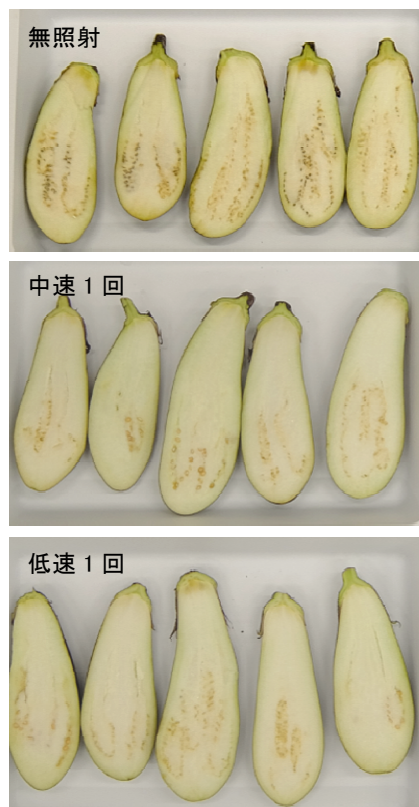


写真4 ナスの種子変色の比較（9日後）

(3)イチゴへの効果

イチゴへの近赤外光の照射はLEDタイプおよびレーザータイプの照射装置で行った。照射条件（試験区）は、①無照射（対照）、②LEDタイプ（300W/m²×1秒照射）、③レーザータイプ（コンベア低速×1回照射）という3通りとし、各12個のイチゴを用いた。イチゴは市販時のプラスチックトレイ内に1段積みとし透明フィルムで覆われている状態で上方から照射を行った。照射後は10℃の冷蔵庫内で14日間貯蔵した。鮮度の評価は、かび発生率、果実硬度、へた部の色調の分析により行った。

かびの発生については、無照射では12個中3個にカビが発生したが、LEDタイプおよびレーザータイプの照射装置で近赤外光を照射したものには発生が見られなかった（写真5）。果実硬度については、僅かではあるものの近赤外光を照射したイチゴが大きい値を示した（表5）。へた部については、近赤外光を照射したイチゴは無照射に比べても目視において緑色を保っていたが、これは色彩分析に結果によりb*値が小さい傾向にあることから裏付けられた（表6）。

以上の結果から、イチゴに近赤外光を照射することにより、流通時や加工時に問題となっているかびの発生を抑制できるとともに、果実硬度が維持されることから流通時の傷みも低減できる可能性があることが分かった。この効果はLEDタイプの照射装置でも発揮されることから、イチゴ生産者が出荷調整を行う際にも利用可能であると考えられる。

今回報告したハウレンソウ、ナス、イチゴ以外にも、リーフレタス、青ネギ、トマト、キュウリなど幅広い対象で同様の効果が発揮できることが明らかになりつつある。最適照射条件としては、LEDタイプの照射装置では100W/m²の光強度で10秒程度または300W/m²の光強度で1秒程度であり、レーザータイプの照射装置ではベルトコンベア速度として低速(125mm/秒)または中速(250mm/秒)で1回照射であることが明らかになっている。今後はこれらの照射条件で実証試験等を重ね、これまでにない全く新規な鮮度保持方法として普及拡大を進めることとしている。あわせてメカニズムの解明も進めている。

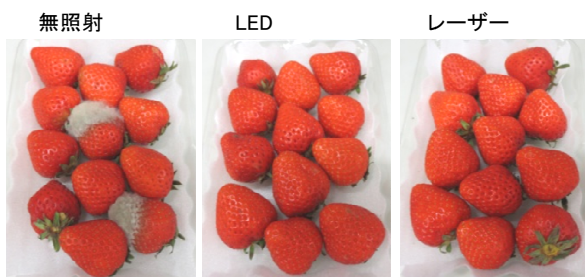


写真5 イチゴのかび発生状況の比較 (14日後)

表5 イチゴの果実硬度に及ぼす近赤外光照射の効果 (14日後)

試験区	果実硬度(kgf) ^a (無照射を100とした相対値)
無照射	0.31±0.06 (100)
LED 300W/m ² 1秒	0.37±0.05 (119)
レーザー 低速1回	0.36±0.05 (116)

a, 平均±標準偏差

表6 イチゴへのたの色調に及ぼす近赤外光照射の効果 (14日後)

試験区	色調		
	L*	a*	b*
無照射	67.66 ±0.99	-0.18 ±0.69	6.87 ±1.20
LED 300W/m ² 1秒	67.10 ±1.12	-0.76 ±0.93	6.16 ±1.56
レーザー 低速1回	67.05 ±0.66	-0.23 ±0.98	6.25 ±0.88

a, 平均±標準偏差

4. まとめ

近赤外光照射による青果物鮮度保持に使用できる光源としてLEDおよびレーザーを用いた実用型照射装置を試作した。これらの照射装置のうちより実用性が高いと考えられるレーザータイプの照射装置を主に使用してハウレンソウ、ナス、イチゴに対する鮮度保持効果を検証した。その結果、ハウレンソウでは萎び抑制、ナスでは果皮の艶維持や果実内部の種子変色の抑制、イチゴではかび抑制や果実硬度の維持などの効果が確認できた。今回試作した照射装置を用いることでコンベアによる連続処理や1秒程度の短時間処理が可能となり実用性もあると考えられた。

【謝辞】

近赤外光照射装置の試作および効果の検証にご協力いただいた、(株)日本システムグループ、レボックス(株)、三井金属計測機工(株)など関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 樽谷隆之, 北川博敏 : 園芸食品の流通・貯蔵・加工, 養賢堂 (1982)
- 岩本睦夫ら : 青果物・花き鮮度管理ハンドブック, サイエンスフォーラム (1991)
- 中村怜之輔 : 園芸生産物の流通環境条件に関する生理学的考察, 岡山大学農学部学術報告, 87, 251-264 (1998)
- 農林水産省生産局農産部園芸作物課資料 : 今後の野菜の生産と流通をめぐる課題, http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/yasai_zyukyu/y_h29_mitosi/pdf/yasai_seisan_meguru_kadai.pdf (2012)

- 5) 石倉聡ら：キクの電照抑制栽培に用いる白熱電球代替光源としての電球型蛍光灯およびLEDの光エネルギー特性と開花抑制効果，広島県立総合技術研究所農業技術センター研究期報，84，1-6（2009）
- 6) 庄子和博ら：育苗段階における青色LED照射がサニーレタス苗の品質と定植後の生育に及ぼす影響，電力中央研究所報告，V10032（2011）
- 7) 上田悦範：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（2003）
- 8) 太田浩一，太田万理，鈴木鐵也：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（2008）
- 9) Ma, G. L. et al.：Effect of red and blue LED light irradiation on ascorbate content and expression of genes related to ascorbate metabolism in postharvest broccoli, Postharvest Biol. Technol., 94, 97-103（2014）
- 10) 原田和夫：緑化防止方法，特許公開2010-187598（2010）
- 11) Kozuki, A. et al.：Effect of postharvest short-term radiation of near infrared light on transpiration of lettuce leaf, Postharvest Biol. Technol., 108, 78-85（2015）
- 12) 高附亜矢子ら：収穫後の近赤外光照射が数種葉菜類の蒸散、気孔開度および外観品質に及ぼす影響，園芸学研究，15，197-206（2016）
- 13) 鮮度保持に関する試験方法・項目，北海道立総合研究機構・農業研究本部資料，https://www.hro.or.jp/list/agricultural/research/hanayasai/04hana_yasai_info/02youryou/fresh/veg/yasai.pdf

