

光環境制御による高品質化技術

東 尾 久 雄

独立行政法人 農業・生物系特定産業技術研究機構野菜茶業研究所

Technology to Enhance Vegetable Quality by the Light Environment Control

Hisao HIGASHIO

National Agriculture and Bio-oriented Research Organization

National Institute of Vegetable and Tea Science

Summary

Recent research information about the physiological function of the ultraviolet (UV) rays on plants, and in particular the technology to enhance vegetable quality with UV which we are studying at present are introduced.

1. UV rays have various physiological effects on plants, and the effect differs depending on wavelength. Flavonoid is thought to be one of the materials protecting against the UV rays. Some inductive mechanisms of flavonoid production in plant upon exposure to the UV rays are revealed, but optical receptors have not been found yet.
2. The UV rays influence the production of vitamins and flavonoid compounds such as anthocyanin and quercetin. UV rays irradiation technology is being developed as one of the means to increase levels of these compounds and so produce high quality vegetables.

キーワード：紫外線，機能性成分，ビタミン，フラボノイド

1 はじめに

光環境条件は光合成あるいはフィトクロームを介した光形態形成などを通じて、植物、即ち野菜の発育・成長過程に深く関わっている。野菜の品質との関係においては、光量とアスコルビン酸・硝酸含量の関係が広く認められており、遮光するとアスコルビン酸含量が減少し、硝酸含量が増加する。また、紫外線を遮断するとイチゴやナスなどの果色発現が悪くなることから、野菜においても紫外線とアントシアニン合成との密接な関係が明らかにされている。そして、生産現場においては、青果物の品質を高める方法の一つとして整枝剪定による受光態勢の改善や反射マルチ利用技術などが導入されている。しかし、光環境条件を品質向上に利活用する技術はそれほど進んでいない。その要因の一つとして、光環境条件が容易に変更し得ない栽培条件であるためと考えられる。

一方、最近における農産物の国際化、産地間競争の激化に伴い、野菜の高品質化が一段と求められるようになり、そのための技術開発が急務となっている。また、昨

今の国民の健康への強い関心を背景に、高品質化のターゲットとして野菜に含まれる機能成分が注目を集めるようになった。

現在、私たちは光環境条件の一つである紫外線の生理作用に着目し、紫外線に対して野菜が示す生理反応を積極的に利用するため、紫外線ランプ処理技術の開発を進めている。そこで、本稿では、光環境条件の中でも、紫外線に関連する研究成果を整理するとともに、私たちの取り組みを紹介したい。

2 紫外線の植物に対する生理作用

2.1 紫外線とは？

紫外線が関心を集めるようになったのは、フロンガスによるオゾン破壊により地上に届く紫外線量が増加し、人を含む生物への悪影響が懸念される事態が生じたことが端緒となっている。1990年ごろには、紫外線、特にUV-Bの植物に対する生理的な悪影響を中心に精力的に研究が展開された。

紫外線放射は可視放射よりも短い光放射で、一般的に波長別に細区分（UV-A：315～400nm，UV-B：280～315nm，UV-C：100～280nm）されて呼称されている。大気中のオゾン濃度が減少すると、生物への影響が大きいUV-Bが増加する。人がUV-AやUV-Bなどの紫外線を浴びると、軽いメラニン色素の合成が誘導され、日焼け状態となり、適度な日焼けにより皮膚が紫外線に対して抵抗性を持つようになる。しかし、過度の紫外線は皮膚に炎症を起し、ひどい場合には組織が壊死する。特にUV-Bが増加すると、DNAが損傷を受け、皮膚がんが増加すると言われている¹⁾。他方、UV-Cは、オゾンが破壊されても地上に到達しないため、問題視されることはない。むしろ殺菌効果があり、食品などの殺菌に利用されている（図1）。

2.2 植物に対する生理作用

植物においても、適度の紫外線を受けると、フラボノイドなどの色素の合成が誘導され、紫外線に対して抵抗性を保つようになる。しかし、過度の紫外線を受けると、DNAの損傷、光合成や成長などの障害が生じる²⁾。一般に、DNAの損傷や成長阻害は、320nm以下の波長で急激に影響が増大する。

UV-Bは生体内で補酵素や色素に吸収されると、それらを励起状態にし、励起エネルギーは最終的に水分子に伝達され、活性酸素が生成される。実験系での研究から、UV-Bにより生成された活性酸素がDNAを損傷したり、転写因子の一種であるAP-1が活性化する可能性が示されている。

一方、多くの植物では光合成速度が低下することが知

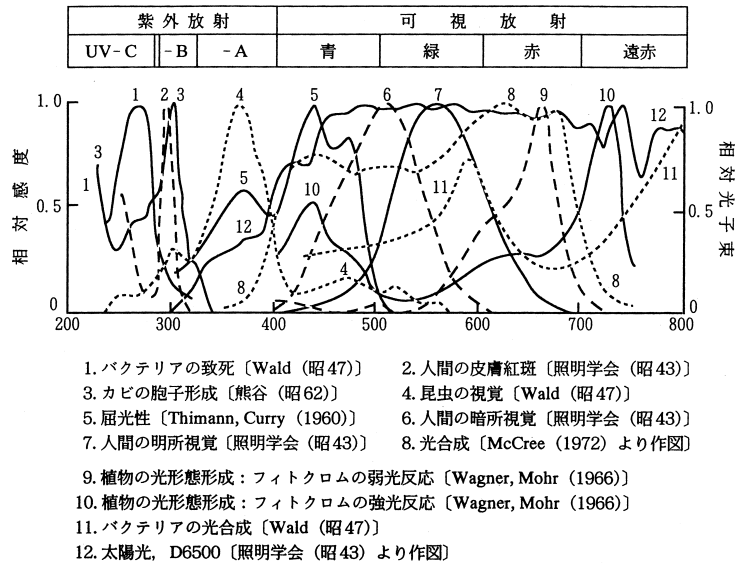


図1 光放射に対する生物反応の分光感度特性と太陽放射の分光光子束分布（照明学会，1992）

表1 陸上植物のUV-B放射量増大の影響（Runeckles & Krupa, 1994）

植物の反応	影響
光合成	多くのC ₃ とC ₄ 植物種で減少（弱い可視光量下で）。
葉コンダクタンス	減少（弱い可視光量下で）、すなわち、気孔の閉鎖。
水利用効率	ほとんどの種で減少。
葉面積	ほとんどの種で減少。
葉重比（SLW、葉の厚み）	ほとんどの種で増加。
作物の成熟速度	影響なし。
開花	阻害あるいは促進。
乾物生産と収量	多くの種で減少。
植物種間の感受性差異	種間でUV-Bに対する感受性に大きな差異がある。
品種間の感受性	品種の間で異なった反応を示す。
乾燥ストレス感受性	UV-Bに対しては植物は感受性が低くなる。しかし、水不足に対する感受性が高まる。
養分ストレス感受性	ある種ではUV-Bに対して感受性が低くなるが、他の種ではより感受性になる。

これらは温室内のUV-B照射実験に基づいた結論である。

C₃植物：イネ、ムギ、ダイズなどの大部分の草本植物、樹木、藻類など。

C₄植物：トウモロコシ、サトウキビなど少数の草本植物で、光呼吸が働かないためC₃植物に比べ光合成速度が約2倍も高い。

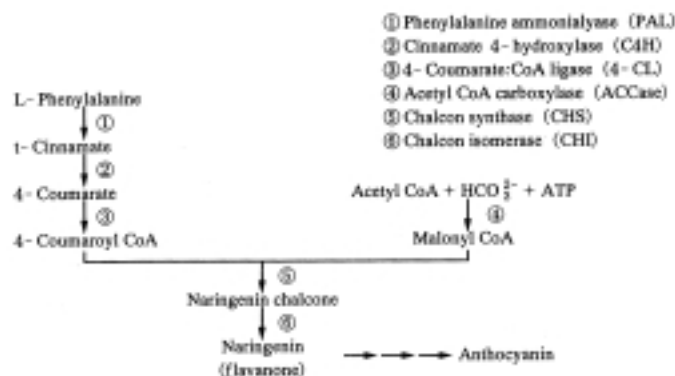


図2 フラボノイドの生合成経路

られているが、光合成への影響については、電子伝達系への影響以外にも、炭素固定酵素活性の影響や葉緑体の膜構造の損傷などが指摘されている。その他、葉の色素の生成阻害、光合成産物の器官分配比の変化など多くの酵素反応や生体物質の変化について報告がある（表1）。

UV-Bによるフラボノイド合成の促進作用は、クチクラ層を透過したUV-Bが表皮細胞に作用して起こる。フラボノイドには紫外線領域に吸収を保つものが多く、紫外線を吸収することで葉肉細胞におけるDNAや光合成などの主要な機能を保護していると考えられている。UV-Bはフラボノイド合成経路（図2）のPAL、4CL、CHSをコードする遺伝子の発現を活性化したり、ACCaseの酵素タンパク量を増加することが示されている。このフラボノイドの合成誘導過程において、光受容体の存在が想定されているが、残念ながら、未だその物質は特定されていない³⁾。

3 紫外線の野菜品質との関わりと利用技術の開発

須田氏は収穫後のダイズ品質劣化要因の解析に紫外線ランプを照射し、脂質の過酸化反応に対する光の影響を調べている。東尾らは機能性成分としてβ-カロテンとトコフェロールに注目し、生鮮野菜でも積極的に紫外線を照射すると細胞膜中に含まれる脂質の過酸化反応を防止するため、防衛反応として内生抗酸化物質の合成が誘導され、その結果としてβ-カロテン、トコフェロールの含量を高めることができるのではないかと考えた。

3.1 ビタミン類の含量増加

植物細胞やクロロプラストは活性酸素種の形成を妨げたり、捕捉する抗酸化系が発達している。これらの抗酸化系にはスーパーオキシド・ディスムターゼ、パーオキシダーゼ、カタラーゼなどの酵素、アスコルビン酸、グルタチオン、トコフェロール、ポリフェノールなどの内生抗酸化物質が関与していると考えられている。

即ち、水溶性のビタミンCは一般的な細胞成分であり、アスコルビン酸の生理的役割の一つは光合成で発生

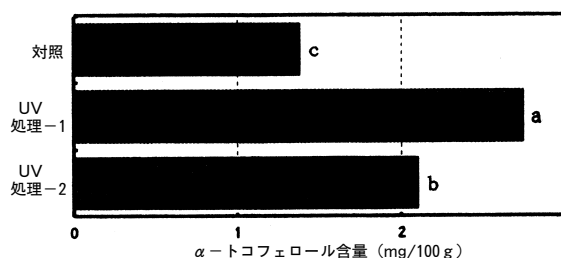


図3 ハウス栽培ホウレンソウ葉中のα-トコフェロール含量に及ぼす紫外線処理（1日5分間）の影響（東尾ら、1999）

処理-1：全期間 処理-2：生育後期のみ

した活性酸素を直接あるいはNADPH/グルタチオン/アスコルビン酸サイクルで酵素的に減少・消去させたり、α-トコフェロールを再生することである。また、トコフェロールは脂溶性のビタミンであり、主としてクロロプラスト中に局在し、チラコイド膜や外皮中に存在し、脂質過酸化反応で形成されるラジカルを捕捉したり、活性酸素を減少・消去させる⁴⁾。

他方、多くの緑黄色野菜はビタミンCに加え、β-カロテンやトコフェロール（ビタミンE）を豊富に含有している。私たちのホウレンソウの一連の試験では、これらの成分の内、トコフェロールが紫外線を照射することで含量が増加することを見出した。即ち、ホウレンソウに短時間（5分程度）の健康線用蛍光ランプ（主波長310nm）を照射することでα-トコフェロールの含量を高めることができた（図3）。紫外線の照射を受けると、照射後およそ24時間後に葉中の含量が増加し、紫外線の照射を繰り返すことで、さらに含量が高まった。また、この現象は、秋まきハウス栽培の圃場試験でも効果を確認している⁵⁾。この増加機構の解明は進んでおらず、他の紫外線領域での同様な効果も確認していないが、構造的に組み込まれたβ-カロテンとは異なり、紫外線に対する防御反応としてα-トコフェロールの合成が誘導され、合成と分解の収支の結果として含量が高まると考えている。

なお、紫外線を照射することで含量が増加するビタミン

ン類としては、トコフェロールの他に、ハウレンソウ（中波長紫外線ランプ）⁶⁾、カイワレ（健康線用蛍光ランプ）⁷⁾やモヤシ（ブラックライト）⁸⁾のビタミンCやシイタケのビタミンD₂（殺菌蛍光ランプ）⁹⁾がある。

3.2 フラボノイド化合物の含量増加

フラボノイドは2個のベンゼン環を3つの炭素鎖で結びつけた共通のジフェニルプロパノイド（C6-C3-C6）骨格を持つ一群の化合物である。その中にはフラボン（アピゲニン、イソフラボン、カルコンなど）、フラボノール（ケンフェロール、ケルセチン、ミリセチンなど）、カテキン類などがあり、広義にはアントシアニンも含まれる。これらは、通常、糖と結合した配糖体として組織中に存在している。表2は野菜中に含まれる狭義のフラボノイド含量の一覧¹⁰⁾である。フラボノイドは植物界に広く分布する色素成分であるが、抗酸化作用、抗変異原・抗腫瘍作用、血小板凝集抑制作用、紫外線防護作用、視機能改善作用などの多くの生理作用を有することが知られ、現在、機能性成分として注目されている化合物の一つである¹¹⁾。

3.2.1 ケルセチン

ケルセチンはフラボノイドの一種で、タマネギ鱗茎に特異的に多く含まれている。タマネギの主要なフラボノール配糖体はケルセチン-3, 4'-ジグルコシド、ケルセチン-4'-グルコシドであり、赤色タマネギは黄色タマネギ

より多いが、白色タマネギでは検出されていない¹²⁾（表3）。そして、外皮から第1葉と第2葉に多くのケルセチンが含有され¹²⁾、しかも表皮細胞に局在していることが確認されている¹³⁾。ケルセチンの人体内への吸収移行については、野茶研の東¹⁴⁾も精力的に動物実験を進め、実際の食生活の中で吸収移行を促進する食材の組み合わせを明らかにしつつある。このこともあり、紫外線を照射することで含量を高める試験を開始した。

3.2.2 アントシアニン

アントシアニンのアグリコンはアントシアニンジンと呼ばれているが、糖や有機酸を組み合わせた多様な化学構造を取るため、現在までに400種類ほど発見されている。野菜では、イチゴ、ナス、シソ、赤キャベツ、赤タマネギ、赤ダイコン、有色ジャガイモに含まれている¹⁵⁾。このアントシアニンについては、紫外線との関係について多くの研究蓄積がある。わが国では、松丸らのナスについての研究¹⁶⁾が最初と考えられる。彼らは、紫外部の分光透過率の異なるフィルムを使って、ナスの着色に370nm付近の光線が影響することを見出した（図4）。その後、イチゴ果実の着色に対する紫外線の作用も、紫外線カットフィルムを使うことで明らかにされている^{17, 18, 19)}。また、松丸らも近紫外線ランプの照射でナスのアントシアニンの着色が促進されることを認めているが、実用的に問題があることから紫外線ランプの利用は実用化されていない。イチゴ果実についても、実用場面

表2 野菜中のフラボノイド含量（Hertog ら, 1992）

	(mg/kg)			
	ケルセチン	ケンフェロール	ルテオリン	ミリセチン
赤キャベツ	5	<2		
緑キャベツ	<1	<2		
白キャベツ	<1	<2		
芽キャベツ	<1	7		
ケール	110	211		
カリフラワー	<1	<2		
ブロッコリー	30	72		
エンダイブ	<1	46		
チコリ	<1	<2		
レタス	14	<2		
ハウレンソウ	<1	<2		
キュウリ	<1	<2		
赤ピーマン			11	<1
トマト	8	6		
イチゴ	9	12		
エンドウ	<1			
ソラマメ	20	<2	<1	26
タマネギ	347	<2		
リーキ	<1	30		
ダイコン	<1	<2		
スーデンカブ	<1	<2		
赤ビート	<1	<2		
ニンジン			<1	<1

表3 各種タマネギ中のフラボノール配糖体含量 (津志田ら, 1996)
(mg%)

品種名	Q-3, 4G*	Q-3G*	Q-4'G*	IR-4'G*	合計
黄色系					
札幌黄	15.0	0.4	14.9	2.1	32.4
空知黄	14.8	0.7	15.2	1.9	32.6
北見黄	20.6	1.5	17.5	3.4	43.0
せきほく	19.3	0.6	18.2	3.3	41.4
北もみじ	16.3	0.5	19.8	1.9	39.3
フラヌイ	18.6	1.0	23.5	3.6	46.9
つきひかり	13.0	0.9	19.8	3.8	37.5
赤色系					
SRG	64.6	3.6	64.6	6.0	138.8
白色系					
BGS	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.
SWG	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.
SWG HiS	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.

*Q-3, 4G:quercetin-4, 4'-di-O- β -glucoside Q-3G:quercetin-3-O- β -glucoside
Q-4'G:quercetin-4'-O- β -glucoside IR-4'G:isorhamnetin-4'-O- β -glucoside

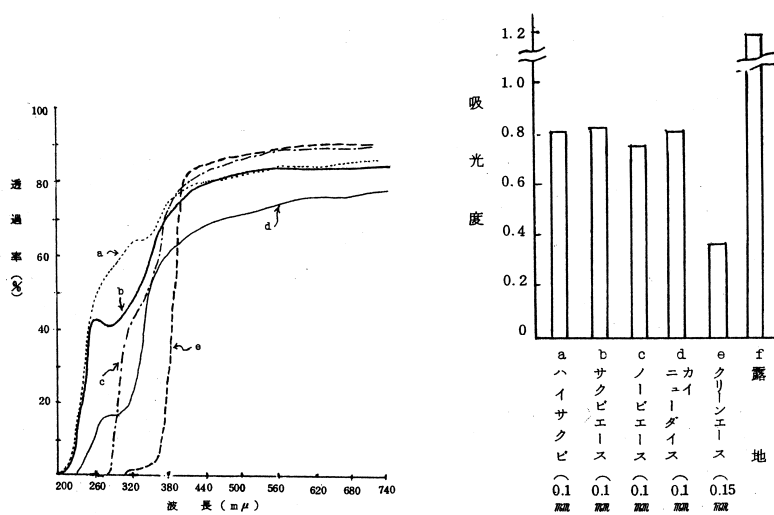


図4 展張時のハウスフィルムの分光透過率とナス果皮のアントシアニン (松丸ら, 1971)

を想定した果実の着色促進方法として、反転時期やマルチフィルムとエアーマットの組み合わせで着色を促進する技術開発が行われている¹⁷⁾。現在、私たちは収穫後のイチゴ果実について紫外線蛍光ランプを照射することで、着色促進したり、同一個体内の着色むらをなくすことを検討している。アントシアニンの紫外線による合成促進作用には、赤色光が相乗的に作用することが認められており¹⁾、その効果確認と食味への影響評価にも、今後、取り組む予定である。

4 おわりに

これまでの紫外線に関する研究の流れを辿ると、紫外線の有害性が強調され過ぎて来たきらいがある。健康線用蛍光ランプは照射量が多いとヒトの皮膚に紅斑を起こさせ有害であることから、現在は製造されなくなっているようである。また、野菜生産の分野においては、病害

虫の防止あるいは減農薬の視点から紫外線カットフィルムの利用が増えている。しかし、紫外線は植物細胞への働きを通じて色彩豊かな食生活を演出し、健康に有用な機能性成分の合成にも深く関わっている。紫外線が植物に対して持つ生理作用の功罪を見極め、自然の恵みでもある紫外線の有効利用を進めてゆきたいと考えている。

摘要

植物に対する紫外線の生理作用に関する最近の研究情報を整理するとともに、現在、私たちが取り組んでいる野菜の高品質化に向けた紫外線利用技術を紹介する。

1. 紫外線の植物に対する生理作用は波長域で異なり、様々な生理作用を有している。フラボノイドは紫外線からの防御物質と考えられ、紫外線によるフラボノイド合成誘導機構が解明されつつある。しかし、光受容体は見出されていない。
2. 紫外線はビタミン類、アントシアニンやケルセチン

などのフラボノイド化合物の含量の変動に影響を及ぼす。このため、野菜の高品質化を目指し、これらの成分含量を増加させる手段の一つとして紫外線照射技術の開発が進められている。

引用文献

- 1) 菅沼浩敏・村上克介. 1998. 4. UV の生物の生理・生態への影響. UV と生物産業 (照明学会編). 養賢堂: 51-62
- 2) Runeckles, V. C. and Krupa, S. V.. 1994. The impact of UV-B radiation and ozone on terrestrial vegetation. *Environ. Pollut.*, 83: 191-213
- 3) 大政謙次・中嶋信美・近藤矩朗. 1998. 3. UV と地球環境, UV と生物産業 (照明学会編). 養賢堂: 35-40
- 4) Wise, R. R. and Naylor, A. W.. 1987. Chilling-enhanced photooxidation, *Plant Physiol.* 83: 278-28
- 5) 東尾久雄・一法師克成・伊藤秀和・東 敬子. 1999. 紫外線照射によるハウレンソウの α -トコフェロール含量の増加. 平成10年度野菜・茶業研究成果情報: 9-10
- 6) 香川 彰・太田和子. 1994. 野菜の品質に関する研究 (Ⅲ) ハウレンソウの生育・成分に及ぼすUV-B照射の影響について. 岐阜女子大学紀要. 23: 1-10
- 7) 山本秀穂・山内直樹・小玉英里・執行正義・岡村憲一. 2002. ダイコン子葉の抗酸化成分に及ぼす紫外線照射の影響. 園学雑. 71 別 1: 330
- 8) 田尻尚士. 1981. 豆類もやしの栽培における人工光線照射が胚軸の生長とビタミンC含有量に及ぼす影響. 日食工誌. 28: 430-436
- 9) 桐瀬壽子. 1990. キノコ中のエルゴステロールおよびビタミンD₂の定量. 家政誌. 41: 395-40
- 10) Hertog, M. G. L., Hollman, P. C. H, and Katan M. B.. 1992. Content of potentially anticarcinogenic flavonoids of 28 vegetables and 9 fruits commonly consumed in the netherland. *J. Agric. Food chem.* 40: 2379-2383
- 11) 津志田藤二郎. 1999. 野菜が持つ生理機能. 農業および園芸. 74: 95-101
- 12) 津志田藤二郎・鈴木雅弘. 1996. タマネギのフラボノール配糖体含量およびそれらの代謝に関与する酵素の性質. 日食科工誌. 43: 642-648
- 13) 岡本大作・野口裕司・室 崇人・伊藤喜三男・森下昌三. 2002. タマネギのりん茎内におけるフラボノイドの分布. 園学雑. 71 別 2: 393
- 14) 東敬子・一法師克成・伊藤秀和・東尾久雄. 2003. 脂質および乳化剤によるケルセチンの腸管吸収改善効果. 平成14年度野菜茶業研究成果情報: 105
- 15) 大庭理一郎・五十嵐喜治・津久井亜紀夫 編. 2000. アントシアニン. 建帛社
- 16) 松丸好次・上浜龍雄. 1971. 光質および光の強度がナスの果色におよぼす影響. 埼玉園試研報. 2: 1-11
- 17) 前川寛之. 1992. イチゴ品種“とよのか”の着色に関する研究 (第2報) 果実日裏面の受光程度および受光波長分布と着色の関係. 奈良農試研報. 23: 21-26
- 18) 吉村昭信. 1993. 施設被覆資材の紫外線透過特性とイチゴの着色. 奈良農試研. 24: 70-71
- 19) 吉村昭信. 1995. イチゴ‘とよのか’の着色に及ぼす環境の影響 (第1報) 被覆資材の紫外線透過特性と果実の着色との関係. 奈良農試研報. 26: 31-38