

植物工場環境条件下における液肥への糖および塩添加が赤色系リーフレタスの発色に及ぼす影響

誌名	植物環境工学
ISSN	18802028
著者名	高田,千奈美 池田,敬
発行元	日本植物工場学会
巻/号	27巻1号
巻号補足	
掲載ページ	p. 33-40
発行年月	2015年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



植物工場環境条件下における液肥への糖および塩添加が赤色系リーフレタスの発色に及ぼす影響

高田 千奈美・池田 敬*

明治大学農学部 214-8571 川崎市多摩区東三田 1-1-1

The Effect of Adding Sugar and Salt to Hydroponic Solution for Coloring of Red Leaf Lettuce under Plant Factory Condition

Chinami TAKATA and Takashi IKEDA*

Faculty of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama, Kawasaki, 214-8571

Abstract

We investigated the effect of sugar and salt application to hydroponic culture solution for coloring red-leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. 'Prunai' and 'Rouxai') under controlled culture conditions. In plant factories condition, red-leaf lettuce varieties frequently do not turn red. In order to solve this, we tested various stress conditions. Stresses were induced by addition of polyethylene glycol, sugar and salt to hydroponic culture solution, and using concentrated nutrient solution. The result showed that the combination of adding sugar and salt (5 and 0.02 % respectively in the nutrient solution at EC 0.6 dS m⁻¹) accelerated coloring of red-leaf lettuce varieties. This technique might be efficient for growing red-leaf lettuce cultivation in plant factories.

Keywords: anthocyanin, hydroponic culture, osmotic stress, salinity, SPAD

緒 言

近年、植物工場が実用化されており、葉菜類を中心に普及が進んでいる。植物工場における生産では露地栽培に比べてコストがかかるため、秋田・鈴木¹⁾は植物工場における課題として、効率化とともに高付加価値化が不可欠であると述べている。また、農林水産省より発表された「平成 25 年度行政政策推進上課題解決を早急に図る必要性の高い課題（行政課題）について」では、植物工場の高度利用による高品質・高機能野菜等の生産技術の開発および食の多様化・簡便化や健康志向に対応した国産野菜の需要開拓の

ための技術開発が課題、として挙げられている。完全人工光型植物工場における生産物の高付加価値化についていくつかの研究が行われており、庄子²⁾は白色蛍光灯および青色 LED、赤色 LED、青赤 (1:1) 色 LED を用いて、サニーレタス苗の形状変化、抗酸化物質蓄積への影響や定植後の収量などを検討した結果、青色 LED を含む光源を利用することで葉が厚い苗を育成でき、青色 LED と青赤色 LED において収穫時の増収効果や、苗の含有フェノール、カロテノイドおよび抗酸化活性が増加するという結果を得た。また、宮下³⁾は LED 光、人工太陽光、自然光の三種の試験区でミズナ (*Brassica rapa* L.) の成長と品質の違いを検討した結果、LED 照射により糖度、ポリフェノール含有量増加促進の可能性を示唆した。

ここで高機能化という点において、葉菜類のアントシアニン含量の増加が候補としてあげられる。しかしながら、露地や施設栽培ではアントシアニンが発現する赤色系のレタスを、完全人工光型植物工場において栽培した場合、光源に青色や

2014 年 7 月 27 日受付

2014 年 11 月 18 日受理

Corresponding author: Takashi Ikeda

(agrisys@isc.meiji.ac.jp)

紫外の波長が不足しているなどの栽培環境により、成長しても葉色が安定せず、赤くならないという事態が生じており^{4,5)}、アントシアニン不足による色味の問題から、商品価値が下がるという問題が起きている⁶⁾。

これまで人工環境における発色に関する研究は、紫外線照射や照明等により、アントシアニンを増加させることが試みられているが^{7,8)}、露地や太陽光利用型における地上部光環境を補うものが主であり、新たな照明装置設置によるコスト増大や、紫外線による装置などの劣化が懸念される。そこで、本研究では地上部の環境要因の工夫ではなく、地下部へ養分・浸透・糖・塩などのストレス条件を与えることによって赤色系のレタス‘プルナイ’および‘ロウサイ’の発色を促進させることを目的とした。

これまで根圏へのストレスによる色素増加の研究はいくつか行われているが⁹⁻¹¹⁾、それらは土壤中への施肥や組織培養によるもので、実際の液肥に混入させるような研究はあまり行われていないが、根圏へのストレスにより誘導される可能性が示唆されている。

本実験において、完全人工光型植物工場栽培における赤色系リーフレタスが、将来的に高付加価値を有し、採算性の高い作物とするための栽培技術を築くことを期待し調査した。

材料および方法

本研究は明治大学植物工場基盤技術研究センター内クリーンルーム（気温 20℃設定）にて行った。クリーンルーム内に設置した栽培棚（920×620×70 mm の栽培ベッド 4 段を備える）に、栽培ボード（875×590×30 mm: 発泡スチロール）を 1 つの栽培ベッドにつき 2 枚使用した。栽培ボードには 45×90 mm 間隔で定植穴を開けた（栽培ベッド 1 段あたり 128 穴）。ベッド 1 段につき 1 つの液肥タンクからポンプ（Rio+

1700; (株) 神畑養魚）により液肥を循環させるようになっており、栽培棚 1 台で 4 区の液肥処理実験が可能である。光源として冷陰極管 ((株) 日本アドバンストアグリ, 型式 N12-1N25, ピーク波長 545 nm) を使用し、以下の全ての処理区で、日長時間（明期 16/ 暗期 8 時間）、光合成有効光量子束密度 200~250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に統一した。

植物材料としてリーフレタス品種 (*Lactuca sativa* L.) ‘プルナイ’ (Prunai) および ‘ロウサイ’ (Rouxai) (ともにライク・ズワーン, オランダ) を用いた。クリーンルーム内にて 25×25×30 (mm) のウレタンに種子を 1 粒ずつ播種、5 mm 程度発芽したものを栽培ベッドに移植した。後述する、本研究における各液肥処理区の処理前、および対照区は大塚ハウス 1 号, 2 号 ((株) 大塚アグリテクノ) を用い、EC 1.2 dS m^{-1} , pH 6.0 ± 0.5 に調整した。対照区は以下の実験毎に行った。本研究に先立ち、データは示さないが、‘プルナイ’ ‘ロウサイ’ 両品種の育成特性を調査した結果、本実験条件下において播種後 49 日で前日との成長差（成長率）が落ち始めることが分かったことから、本研究の収穫日を播種後 49 日目と設定した。

本研究では主に物質を液肥に添加してストレスを与える検討を行い、赤色化にどのような影響をもたらすか調査した。Table 1 にその処理区をまとめている。予備実験の結果から、播種後 35 日前後でストレス処理を行った。実験 1 においては浸透ストレスの効果を確認するため、Polyethylene Glycol 6000 ((株) 和光純薬工業) (以下 PEG) を用いた実験を行った。実験 2 以降では、実用化のための利便さなどを考え、市販の食塩（食塩: (財) 塩事業センター）、砂糖（ばら印の白砂糖: (株) 大日本明治製糖）を使用した。実験 1~4 における PEG および砂糖を添加する実験では EC 値を 1.2 dS m^{-1} と設定した。食塩は EC 値に影響を与えるため、実験 2, 3 においては、液肥と合わせて EC 3.6 dS m^{-1} になるように食塩濃度を調節した (0.12%)。実験 4 では糖処理の

Table 1 Experimental design for this study.

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5
Experimental term (Days after sawing)	49	49	49	42	38
Starting treatment (Days after sawing)	35	35	35	35	28
	EC 1.2 dS m^{-1} (Control)	EC 1.2 dS m^{-1}	EC 1.2 dS m^{-1}	EC 1.2 dS m^{-1}	EC 1.2 dS m^{-1}
	EC 2.4 dS m^{-1}	EC 3.6 dS m^{-1}	NaCl 0.12 %	Sucrose 5 %	NaCl 0.02 % +Sucrose 5 %
Treatment	PEG 5 %	NaCl 0.12 %	Sucrose 3 % +PEG 5 %	Sucrose 10 %	NaCl 0.09 % +Sucrose 5 %
	PEG 10 %	Sucrose 10 %	Sucrose 5 % +PEG 5 %	Sucrose 15 %	NaCl 0.16 % +Sucrose 5 %
	—	—	—	—	NaCl 0.23 % +Sucrose 5 %

濃度を検討した。処理開始時期は実験 1~3 と同様だが、収穫を播種後 42 日とし、7 日早めることで処理期間の短縮を図った。実験 5 ではこれまでの結果を検討するため、実験 1~4 と条件を変え、さらに栽培日数を短縮し（播種後 38 日、処理日数 10 日）、液肥濃度を EC 0.6 dS m⁻¹ とし、食塩濃度を変更した。そのため EC 値はそれぞれ、EC 1.2 dS m⁻¹（食塩 0.02 % 添加処理）、2.4 dS m⁻¹ (0.09 %), 3.6 dS m⁻¹ (0.16 %), 4.8 dS m⁻¹ (0.23 %) となった。

収穫した植物は個体ごとに草丈 (cm)、地上部新鮮重 (g)、SPAD 値、アントシアニン量を測定した。SPAD 値は、葉緑素計 (SPAD 502-plus; (株) コニカミノルタ) を用いて、各個体から無作為に 10 枚の葉を選び、その平均値を求めた (10 枚未満の個体は、すべての葉の平均を求めた)。アントシアニン量は各個体につき無作為に選んだ葉から 1.0×1.0 (cm)、計 0.5 g 採取し測定した (処理区により小さいものは葉全体を用いている)。採取したサンプルを乳鉢で摩砕、50 % 酢酸 5 mL で抽出・ろ過した後、分光光度計 (U-5100; (株) 日立製作所) で、530 nm における吸光度により判断した^{9,12)}。

結 果

実験 1~3 における対照区で、条件は同じであるが実験間で成長にやや差が出る結果が見られた。草丈は「プルナイ」、「ロウサイ」ともに実験 1~3 で実施したストレス処理間で一部有意差があったものの、規則性を見いだすことはできなかった (Table 2)。地上部新鮮重でみると、「ロウサイ」に関しては実験 1 における PEG 添加を行った処理区、実験 2 における食塩 0.12 % 処理区で増加がみられたが (Table 2)、その他の処理区では「プルナイ」、「ロウサイ」ともに実験 1~3 まで、各実験において大きな差は確認できなかった。SPAD 値は対照区とくらべてストレスを与えると高くなる傾向が見られた (Table 2)。アントシアニン量は、「プルナイ」に関しては実験 1, 2 において液肥の EC が上がるにつれ増加がみられたが、「ロウサイ」では実験 1 の全処理区で有意差はみられなかった (Table 2)。実験 2 では「プルナイ」、「ロウサイ」ともに食塩 0.12 % 処理区でアントシアニン量に増加がみられた (Table 2)。これは実験 3 で行った反復実験でも同様の結果となった (Table 2)。収穫直前にしおれてデータは取れなかったが、実験 2 で砂糖 10 % を添加した実験区では明確な発色がみられた。しかし実験 3 で行った砂糖と PEG の両方を添加した処理区では対照区との差はみられなかった。

Fig. 1, 2 に外観を示した。分光光度計によるアントシアニン

Table 2 Plant height, fresh weight, SPAD value and absorbance of anthocyanin (ABS%) in experiment 1, 2, 3. Growth period was 49 days. Treatments were started at 35 days after sowing. Mean ± SE. Note that the data for the sucrose 10 % treatment in Exp. 2 was not collected because plants had died before harvest time. Values within columns followed by the same letter are not significantly different at $P < 0.05$ by Student's t -test.

Exp. 1	Plant height (cm)		Fresh weight (g)		SPAD		ABS%	
Treatment	Prunai	Rouxai	Prunai	Rouxai	Prunai	Rouxai	Prunai	Rouxai
Control (EC 1.2 d S m ⁻¹)	16.7±0.3a	14.5±0.4a	127.7±12.3a	78.0±8.5a	18.2±1.1a	22.5±0.7a	1.4±0.2a	2.1±0.3a
EC 2.4 d S m ⁻¹	16.6±0.5a	15.3±0.2ab	130.6±15.6a	104.3±15.3ab	18.9±1.1a	22.8±1.1a	2.6±0.2b	2.2±0.1a
PEG 5 %	17.0±0.4ab	16.1±0.3b	135.0±12.9a	110.3±6.4b	18.9±0.5a	22.1±0.7ab	2.7±0.2b	2.1±0.2a
PEG 10 %	15.4±1.0ac	16.0±0.4b	111.7±15.9a	99.0±3.9ab	20.3±0.7a	24.3±0.4ac	3.1±0.3b	2.3±0.2a
Exp. 2								
Control	13.5±0.3a	12.9±0.2a	105.1±8.0a	77.8±6.0a	18.8±0.5a	23.9±0.2a	1.7±0.2a	2.9±0.4a
EC 3.6 d S m ⁻¹	13.5±0.2a	12.8±0.2a	103.5±8.4a	80.3±5.1a	21.5±0.4b	26.0±0.5b	3.2±0.3b	3.6±0.3a
NaCl 0.12 %	13.8±0.3a	13.6±0.2a	129.5±10.6a	98.7±5.2b	26.7±0.5c	27.0±0.5b	4.9±0.1c	5.1±0.5b
Sucrose 10 %	—	—	—	—	—	—	—	—
Exp. 3								
Control	12.4±0.2a	11.3±0.5a	124.6±12.8a	79.5±10.8a	20.1±0.7a	23.3±1.2a	1.9±0.3a	2.1±0.3a
NaCl 0.12 %	13.1±0.5a	11.8±0.6a	145.5±9.3a	103.4±19.7a	21.2±1.7a	26.9±0.3b	5.1±0.1b	5.3±0.4b
Sucrose 3 % and PEG 5 %	17.5±0.5b	13.4±0.3b	127.5±6.1a	88.4±10.6a	17.2±0.6b	19.9±0.7c	1.9±0.1a	2.0±0.2a
Sucrose 5 % and PEG 5 %	16.6±0.8b	12.1±0.6ab	133.3±10.7a	80.2±8.2a	17.3±0.5b	22.5±0.8a	2.1±0.1a	2.2±0.3a



Fig. 1 Coloring effect on Prunai plants.
 Treatments. a: control ($\text{EC } 1.2 \text{ dS m}^{-1}$), b: $\text{EC } 2.4 \text{ dS m}^{-1}$, c: $\text{EC } 3.6 \text{ dS m}^{-1}$, d: $\text{NaCl } 0.12 \%$, e: $\text{PEG } 5 \%$, f: $\text{PEG } 10 \%$, g: $\text{sucrose } 3 \%$ and $\text{PEG } 5 \%$, h: $\text{sucrose } 5 \%$ and $\text{PEG } 5 \%$, i: $\text{sucrose } 10 \%$, j: $\text{sucrose } 5 \%$, k: $\text{sucrose } 15 \%$, l: $\text{sucrose } 5 \%$ and $\text{NaCl } 0.02 \%$, m: $\text{sucrose } 5 \%$ and $\text{NaCl } 0.09 \%$, n: $\text{sucrose } 5 \%$ and $\text{NaCl } 0.016 \%$, o: $\text{sucrose } 5 \%$ and $\text{NaCl } 0.23 \%$.

量の分析では食塩添加区では実験 2, 3 の結果では有意に増加していたが、外観的には影響が明らかでない (Fig. 1d, 2d) ことから、さらに研究を続行した。

Table 3 には糖のみを与える実験を行った結果を示した。上述のように液肥に砂糖を加えると発色が促進されたが途中でしおれたことから、実験 4 では処理期間を短くした。結果、対照区に比べて処理後、草丈の低下がみられた (Table 3)。

15 % 処理区では途中しおれが発生した。新鮮重に関して、実験 4 では「プルナイ」、「ロウサイ」ともに対照区に比べ砂糖 5 % 処理区では有意差はみられなかったが、砂糖 10 % および 15 % 処理区では新鮮重の著しい減少がみられた (Table 3)。SPAD 値には明確な傾向がなかった (Table 3)。アントシアニン量に関して、実験 4 では「プルナイ」、「ロウサイ」ともに、砂糖 5 および 10 % 処理区で対照区に比して増加がみられ



Fig. 2 Coloring effect on Rouxai plants.

Treatments. a: control ($\text{EC } 1.2 \text{ dS m}^{-1}$), b: $\text{EC } 2.4 \text{ dS m}^{-1}$, c: $\text{EC } 3.6 \text{ dS m}^{-1}$, d: $\text{NaCl } 0.12 \%$, e: PEG 5 %, f: PEG 10 %, g: sucrose 3 % and PEG 5 %, h: sucrose 5 % and PEG 5 %, i: sucrose 10 %, j: sucrose 5 %, k: sucrose 15 %, l: sucrose 5 % and $\text{NaCl } 0.02 \%$, m: sucrose 5 % and $\text{NaCl } 0.09 \%$, n: sucrose 5 % and $\text{NaCl } 0.16 \%$, o: sucrose 5 % and $\text{NaCl } 0.23 \%$.

た (Table 3).

外観を見ると, Fig. 1i, j および 2i, j で示したように, ‘rouxai’ の砂糖 10 % 処理区で発色がみられたが, ‘ブルナイ’ では効果が不十分と考え, さらに実験を続行した.

実験 5 では, 実験 4 の糖のみ添加する実験に付加して, 実験 2, 3 で発色の効果がみられた食塩添加を同時に行うことを試みた. これは砂糖よりも食塩の方が安価であることも念

頭に入れている. 実験 5 では栽培期間をさらに短縮して 38 日間 (処理期間は 10 日) とした. 結果として全処理区で対照区に比べ草丈, 地上部新鮮重の著しい減少がみられた (Table 4). SPAD 値には明確な傾向がなかった (Table 4). アントシアニン量は対照区に比べ全処理区で増加がみられたが, 処理区間での差はみられなかった (Table 4).

外観を検討すると, Fig. 1l, m, n, o および 2l, m, n, o で示

Table 3 Plant height, fresh weight, SPAD value and absorbance of anthocyanin (ABS%) in experiment 4. Growth period was 42 days. Treatments were started at 35 days after sowing. Mean $\pm$ SE. Values within columns followed by the same letter are not significantly different at $P < 0.05$ by Student's t -test.

Exp. 4	Plant height (cm)		Fresh weight (g)		SPAD		ABS%	
Treatment	Prunai	Rouxai	Prunai	Rouxai	Prunai	Rouxai	Prunai	Rouxai
Control (EC 1.2 d S m ⁻¹)	13.4 $\pm$ 0.4a	10.8 $\pm$ 0.4a	110.2 $\pm$ 6.3a	55.4 $\pm$ 2.0a	21.6 $\pm$ 0.6a	24.5 $\pm$ 0.7a	1.5 $\pm$ 0.1a	2.6 $\pm$ 0.2a
Sucrose 5 %	10.6 $\pm$ 0.6b	9.2 $\pm$ 0.3b	93.4 $\pm$ 9.8ab	48.8 $\pm$ 3.4ab	22.1 $\pm$ 0.4a	25.3 $\pm$ 1.2a	2.8 $\pm$ 0.2b	4.0 $\pm$ 0.2b
Sucrose 10 %	7.6 $\pm$ 0.2c	7.0 $\pm$ 0.4c	55.0 $\pm$ 0.9c	37.3 $\pm$ 3.9bc	18.9 $\pm$ 0.5b	20.8 $\pm$ 0.4b	4.0 $\pm$ 0.1c	4.8 $\pm$ 0.1c
Sucrose 15 %	8.0 $\pm$ 0.4c	6.0 $\pm$ 0.4c	70.8 $\pm$ 4.8b	28.2 $\pm$ 3.1c	20.7 $\pm$ 0.5ab	25.3 $\pm$ 0.5a	1.9 $\pm$ 0.2a	2.5 $\pm$ 0.3a

Table 4 Plant height and fresh weight, SPAD value and absorbance of anthocyanin (ABS%) in experiment 5. Growth period was 38 days. Treatments were started at 28 days after sowing. Mean $\pm$ SE. Values within columns followed by the same letter are not significantly different at $P < 0.05$ by Student's t -test.

Exp. 5	Plant height (cm)		Fresh weight (g)		SPAD		ABS%	
Treatment	Prunai	Rouxai	Prunai	Rouxai	Prunai	Rouxai	Prunai	Rouxai
Control (EC 1.2 d S m ⁻¹)	10.6 $\pm$ 0.8a	10.0 $\pm$ 0.4a	60.2 $\pm$ 7.4a	42.6 $\pm$ 3.4a	18.8 $\pm$ 0.6a	23.9 $\pm$ 0.8a	1.4 $\pm$ 0.1a	2.2 $\pm$ 0.2a
Sucrose 5 % and NaCl 0.02 %	5.1 $\pm$ 0.1b	4.6 $\pm$ 0.2b	30.9 $\pm$ 3.3b	21.8 $\pm$ 2.5b	18.9 $\pm$ 0.3a	21.7 $\pm$ 0.5ab	4.1 $\pm$ 0.2b	4.0 $\pm$ 0.2b
Sucrose 5 % and NaCl 0.09 %	5.3 $\pm$ 0.5b	3.8 $\pm$ 0.3c	15.0 $\pm$ 1.3c	12.2 $\pm$ 1.3c	19.1 $\pm$ 0.4a	23.4 $\pm$ 0.5a	3.5 $\pm$ 0.2b	3.8 $\pm$ 0.3b
Sucrose 5 % and NaCl 0.16 %	5.5 $\pm$ 0.4b	4.6 $\pm$ 0.2b	18.0 $\pm$ 4.4bc	16.2 $\pm$ 2.3bc	18.5 $\pm$ 1.0a	19.8 $\pm$ 0.8b	3.7 $\pm$ 0.2b	4.2 $\pm$ 0.2b
Sucrose 5 % and NaCl 0.23 %	6.0 $\pm$ 0.4b	4.9 $\pm$ 0.1b	33.2 $\pm$ 4.3b	15.1 $\pm$ 2.0b	20.0 $\pm$ 0.4a	23.3 $\pm$ 0.5a	4.0 $\pm$ 0.3b	4.3 $\pm$ 0.2b

したように、‘ロウサイ’ 全処理区で十分な発色効果が確認された。‘プルナイ’ ではばらつきがみられるもののこれまでの処理区に比して十分な発色効果が得られることが確認できた。

この実験 5 は再度反復し、同様の結果が得られ発色したことを確認した（データは示さない）。

考 察

本研究では植物工場における高品質化栽培の一つの方法として、赤色系葉菜類を赤色にする方法の研究を実施した。農林水産省が 2012 年に発表した「機能性成分表示による消費者購買行動分析ならびに表示法の検証」によると、商品を取り扱う小売業者などの流通視点からは 8 割、消費者視点からはその 5 割が購入時の外観を重視しており、特に、20 代から 40 代の比較的若い世代で外観が重視される傾向にある、とある。また、外観は消費者の購買行動に影響するという報告がされている¹³⁾。これまで完全人工光型植物工場における生産物には緑色系野菜が大多数を占めており、彩りに欠ける部分があったが、本研究による植物工場における赤色系リーフレタスの発色の促進技術は、植物工場生産物に赤

色野菜を加えることが可能であることを示し、消費者の商品購入動機に有効である可能性があると考えられる。植物工場において栽培される作物は主にレタスなどの葉菜類であり、中でも赤色系リーフレタスは、外観の面でもすぐれ、食卓が彩りも鮮やかになるため需要が多いとされる⁴⁾。赤色系レタスを完全人工光型植物工場で生産できることは作物の選択肢を多くし、生産の幅を広げる意味でも大きな価値があると考えられる。

本研究に使用した‘プルナイ’および‘ロウサイ’の赤色を司るものはアントシアニンと考えられた (Table. 2, 3, 4)。アントシアニンは、機能性食品因子として、生体内ストレスを防止することや、抗酸化性や酵素阻害作用が元となる血糖値上昇抑制、視力改善、抗変異原性、抗腫瘍性、抗ウイルス性、抗血圧上昇、抗炎症、肝臓機能改善、血中コレステロール低下など、生体調節を行う多くの第 3 次機能性が明らかにされている¹⁴⁾。植物がアントシアニンを生成し、赤く発色するのは主に紫外線から身を守るためであることが知られている¹⁵⁾。植物工場において紫外線を用いた照射や異なる波長域光の光源を用いるなど赤色系リーフレタスの発色を改善するための研究が多くなされている^{4,6,16-18)}。しかしこれらの方法は新たな照明装置の設置や栽培装置の劣化とそれに伴う頻繁な装置の

交換、改修が必要になると懸念される。それにより設備・運営費も通常に比べ大きくなると考えられる。

本研究では、前述した地上部環境に注目して研究した例と異なり、液肥の条件を変更することによって赤色化を進めることができることを証明するため、アントシアニン量を増加させる方法として、液肥濃度を上げるもしくは食塩を添加する塩ストレス、PEGを利用した浸透ストレス^{19,20)}、糖を添加した糖ストレスを検討した。

塩分ストレスの葉へ及ぼす影響は多く知られている²¹⁾。しかし、植物の栽培について、塩ストレスの緩和、回避に関する報告は多くされているが、塩ストレスにより植物にどのような影響が現れるのかを観察し、栽培に塩ストレスを利用することは葉菜類では事例が少ない²²⁾。例えば食味に関して、コマツナの養液栽培において、NaClを培養液に添加すると、葉色、日持ち性、内容成分、食味などの品質が向上した²³⁾。それによると、NaClを添加した培養液で栽培することにより、葉身および葉柄中の硝酸含量を慣行栽培の5%から25%に低減させることができることが示されている。また、塩ストレスによりバイオマスが増加することが知られている²⁴⁾。アントシアニンは配糖体の形で植物体内に存在していることから、糖ストレスがアントシアニンに影響があることが想像でき、事実ハナキリン^{25,26)}やブドウ²⁷⁾、ニンジン²⁸⁾など多くの植物でアントシアニン生産や、発色改善に栄養ストレスや浸透物質などが影響することが知られている^{28,29)}。組織培養ではあるが、培地に糖を添加するとアントシアニン量が増えることが知られており^{10,11)}、液肥への糖添加によりアントシアニン量が増加する効果が植物工場内養液栽培においても実証された。

実験2, 3では食塩のみを添加した区でアントシアニン量が増加したが (Table 2)、外観的には不十分であった。この理由は明確ではないが、分析のためのサンプリング部位の影響、また処理区間における葉の厚みの違いによる影響があったかもしれない。実験5では食塩の濃度にかかわらず、全処理区でアントシアニンの増加がみられ (Table 4)、発色は‘ブルナイ’‘ロウサイ’ともに全体的にみられた (Fig. 11, m, n, o, Fig. 21, m, n, o) ことから、塩ストレスと糖ストレスの相乗効果により赤色化が促進されたのではないかと考えられる。発色には個体の大きさ、処理を行う時期、品種間差も関わると考えられるが、本研究結果から発色促進処理は、外観への効果と処理にかかるコストを考慮し、EC 0.6 dS m⁻¹の液肥に砂糖を5%、食塩を0.02%の濃度で添加し、処理期間を収穫前の約10日間とすることが適当であると考えられる (Table 4, Fig. 1, 2)。本研究の目的は赤色系レタスの赤色化であり、それは提案できたと考えられる。しかし実験5における新鮮重では対照区に比べ著しい低下がみられた (Table 4)。今後は新鮮重を維持しながら赤色化を促進できる条件の探索に移

行する予定である。また本研究の実験系では、液肥への砂糖添加による菌混濁の危険が想像できる。従来の殺菌の主流である次亜塩素酸では健康阻害物質の発生などの危険性が危惧される³⁰⁾。そこで、本研究における糖処理による菌繁殖リスクだけでなく、液肥の再利用・再循環などの際に発生するリスクなどを防ぐため、明治大学では「CO₂ マイクロ・ナノバブルによる無菌化養液栽培システム」を併せて研究している^{30,31)}。CO₂ マイクロ・ナノバブル殺菌装置は比較的人体に害のない二酸化炭素を利用し、低エネルギー・低コストであることから、従来の培養液滅菌法に比べて安心・安価な滅菌法となることが期待されている³¹⁾。この技術を複合することで安定した赤色系葉菜類の生産に寄与できるものと考えており、今後も研究を継続していくことが求められる。

摘 要

本研究では、植物工場条件下で赤色を発しにくい赤色系レタスを有色化することを検討した。光環境を制御する方法と異なり、根圏環境に注目し、水耕液肥の条件を変更することで、発色が促せないかを検討した結果、砂糖と食塩を栽培後期に液肥に添加することにより、赤色化を導くことができた。これにより植物工場から生産される農作物に新たな選択肢を作ることができると考えられる。

謝 辞

研究施設の使用について、平成21年度先端的植物工場施設整備費補助金事業（経済産業省）を受け建てられた植物工場基盤技術センターに感謝します。

本研究を遂行するにあたりご協力頂いた、明治大学斎藤岳士氏、早田千代美氏、味岡成美氏、山森正久氏、芝野智彦氏に謹んで感謝申し上げます。また英文を御校閲頂いた同イアンマクタガート氏に御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 秋田求, 鈴木高広. 植物工場生産の高効率化と高付加価値化のための生物学的およびシステム工学的アプローチ. Mem. Faculty B. O. S. T. Kinki University 26: 23–37. 2010.
- 2) 庄子和博. LED光源を用いた野菜苗の高品質化技術の開発. 月刊ビジネスアイエネコ. 44: 58–59. 2011.
- 3) 宮下渉, 中野和弘, 大橋慎太郎, 知野秀次. LED光源を用いたミズナの栽培制御に関する基礎的研究. 新潟大学農学部研究報告. 63: 115–118. 2011.
- 4) 坂本勝, 藤寛, 太田敏博, 宮内俊輔, 古川一. 色素蓄

- 積促進システム, イオン発生装置及び色素蓄積促進方法. 特許公開 2012-135288. 2010.
- 5) 高辻正基, 森康裕. LED 植物工場. 日刊工業新聞社, 東京, 1-141. 2011.
 - 6) 庄子和博, 羽生広道, 清水英人. サニーレタスの栽培方法および装置. 特許公開 2003-204718. 2002.
 - 7) Arakawa O. Effect of ultraviolet light on anthocyanin synthesis in light-colored sweet cherry, cv. Sato Nishiki. 園芸学会誌. 62: 543-546. 1993.
 - 8) Samuoliene G, Ausra B, Ramunas S, Akvile V, Jurga S, Sandra S, Pavelas D. LED illumination affects bioactive compounds in romaine baby leaf lettuce. J. Sci. Food Agric. 93: 3286-3291. 2013.
 - 9) 清水良泰, 浅見佳子, 桜井公江, 植村勇美, 田部井昭. 促成栽培におけるピンク系アジサイの栽培管理が花色に及ぼす影響. 群馬県園芸試験場研究報告. 6: 39-46. 2001.
 - 10) Cormier F, Crevier HA, Do CB. Effects of sucrose concentration on the accumulation of anthocyanins in grape (*Vitis vinifera*) cell suspension. Can. J. Bot. 68: 1822-1825. 1990.
 - 11) Ozeki Y, Komamine A. Effects of inoculum density, zeatin and sucrose on anthocyanin accumulation in a carrot suspension culture. Plant Cell Tiss. Organ Cul. 5: 45-53. 1985.
 - 12) Ikeda T, Yamazaki K, Kumakura H, Hamamoto H. Effect of high temperature on fruit quality of pot-grown strawberry plants. Acta Horti. 842: 679-682. 2009.
 - 13) 西澤千恵子, 江崎一子. 10代と20代の若者を対象としたこねぎに関する意識調査. 別府大学紀要. 48: 129-135. 2007.
 - 14) 津田孝範, 須田郁夫, 津志田藤二郎. アントシアニンの科学-生理機能・製品開発への新展開. 建帛社, 東京, 1-296. 2009.
 - 15) Harborne JB, Williams CA. Advances in flavonoid research since 1992. Phytochem. 55: 481-504. 2000.
 - 16) 小林誠, 岡咲洋三, 福島敦史, 中林亮, 鈴木実, 西澤具子, 淨閑正史, 庄子和博, 斉藤和季, 後藤英司, 草野都. 狭波長LEDを用いて生育したサニーレタスの形態変化と代謝物変動調査. In: 日本植物生理学会年會要旨集. 52: 358. 2010.
 - 17) 庄子和博, 後藤英司, 橋田慎之介, 後藤文之, 吉原利一. 赤色光と青色光がレッドリーフレタスのアントシアニン蓄積と生合成遺伝子の発現に及ぼす影響. 植物環境工学. 22: 107-113. 2010.
 - 18) 海老澤聖宗, 庄子和博, 加藤美恵子, 下村講一郎, 五島文之, 吉原利一. UV-B, UV-A および青色高の夜間補講はサニーレタスの生長と着色に及ぼす影響. 植物環境工学. 20: 158-164. 2008.
 - 19) Blum A. Osmotic adjustment and growth of barley genotypes under drought stress. Crop Sci. 29: 230-233. 1989.
 - 20) Merrill RK, Eckard AN. Evaluation of water stress control with polyethylene glycols by analysis of guttation. Plant Physiol. 47: 453-456. 1971.
 - 21) Francisco PA, Larher F. Sucrose and proline accumulation and sugar efflux in tomato leaf disc affected by NaCl and polyethylene glycol 6000 iso-osmotic stresses. Plant Sci. 107: 9-15. 1995.
 - 22) 大場伸也, 嶋津光鑑, 村上芳哉. 赤色アマランサスおよびその栽培方法. 特許公開 2011-217656. 2010.
 - 23) 高取由佳, 田川愛, 大塚紀夫, 畑瀬房次, 田中政信. コマツナの養液栽培における硝酸の低減. 九州沖縄農業研究成果情報. 19: 355-356. 2004.
 - 24) Blasco B, Rocio L, Lois R, Manuel JR. Iodine effects on phenolic metabolism in lettuce plants under salt stress. J. Agric. Food Chem. 61: 2591-2596. 2013.
 - 25) Misawa M. Plant tissue culture: an alternative for production of useful metabolic. FAO. Agr. Services. Bull. 108: 1-87. 1994.
 - 26) Yamamoto Y, Kinoshita Y, Watanabe S. Anthocyanin production in suspension cultures of high-producing cells of *Euphorbia millii*. Agr. Biol. Chem. 53: 417-423. 1989.
 - 27) Do CB, Cormier F. Accumulation of anthocyanins enhanced by a high osmotic potential in grape (*Vitis vinifera* L.) cell suspensions. Plant Cell Rep. 9: 143-146. 1990.
 - 28) Rajendran L, Ravishankar GA, Venkataraman LV, Prathiba KR. Anthocyanin production in callus cultures of daugus garota as influenced by nutrient stress and osmoticum. Biotechnol. Lett. 14: 707-712. 1992.
 - 29) Stevenson CC, Harrington GN. The impact of supplemental carbon sources on *Arabidopsis thaliana* growth, chlorophyll content and anthocyanin accumulation. Plant Growth Regul. 59: 255-271. 2009.
 - 30) 池田敬, 早田保義. ハイブリッド型照明や新殺菌法で低コスト化と品目拡大を狙う. 植物工場大全. 3: 68-76. 日経 BP 社. 2010.
 - 31) 斎藤岳士, 池田敬. 植物工場技術の研究・開発及び実証・展示・教育拠点 (6). 植物環境工学. 25: 3-7. 2013.