

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21346

研究課題名（和文）植物の環境記憶を活用した高付加価値作物の栽培法の開発

研究課題名（英文）Development of cultivation method for high value crops utilizing environmental memory in plants

研究代表者

矢守 航（Yamori, Wataru）

東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・准教授

研究者番号：90638363

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：近年、日本では植物工場の普及が急速に進められており、作物の高効率生産・高付加価値を実現する栽培法の確立が喫緊の課題となっている。本研究課題では、植物に機能性成分を効率よく蓄積させる処理法の開発を目的とした。本研究成果として、可視光領域の変動光照射や栽培途中の根圏温度の変化によって、機能性成分を向上させることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、可視光領域の変動光照射や栽培途中の根圏温度の変化によって機能性成分を向上させることに成功した。これまでも、申請者は、植物工場における葉菜類の栽培において、植物体への下から上に向けてのLED照射（上方照射）によって、外葉の老化を抑制する新たな栽培法を提案してきた。将来的に、上方照射法によって高い作物生産性を維持したまま、収穫前の数時間～数日間だけ、可視光領域の変動光照射や根圏温度を制御することによって機能性成分を増大することができれば、他に類をみない高機能性野菜の高効率生産を実現できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In recent years, plant factories have been spreading rapidly in Japan, and the establishment of cultivation methods that realize highly efficient production and high added value of crops has become an urgent issue. The objective of this research project was to develop a novel treatment method to efficiently accumulate functional components in plants. We succeeded in improving functional components by variable light irradiation in the visible light range and by changing the root zone temperature during cultivation.

研究分野：植物生理生態学

キーワード：高付加価値 アントシアニン 養液栽培 植物工場 光合成

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、日本では植物工場の普及が急速に進められており、作物の高効率生産・高付加価値を実現する栽培法の確立が喫緊の課題となっている。植物工場とは、植物生育に必要な要素を自動制御して、高品質のまま収穫量を増大することができる未来型の農業である。近年、健康志向の高まり、特に生活習慣病予防の観点から、野菜に含まれる栄養成分や機能性成分に注目が集まっている。健康に良い機能性成分を多く含む高付加価値作物の生産には、これまで UV 照射法が提案されてきた。人工光型植物工場では多段式での栽培となり、1 段あたりの栽培棚の高さが限定されるため、LED が栽培光源として優先的に使用されている。しかし、UV LED は高価であり、寿命が短い上に発光強度が低いほか、UV 光は労働者の DNA 損傷を引き起こす危険性を伴うため、それらの植物工場への導入は現実的ではない。そこで、UV 照射以外の方法で、植物に機能性成分を効率よく蓄積させる処理法の開発が求められている。

2. 研究の目的

UV 照射法に代わる新たな高付加価値作物の生産法を模索していたところ、可視光領域の変動光照射が植物の機能性成分であるアントシアニン蓄積を促進する可能性が出てきた。これまでに申請者らは、シロイヌナズナやイネを用いた実験で、可視光領域の変動光照射によって、光合成系の電子伝達系が過還元状態になり、細胞内に活性酸素が蓄積する結果、光合成反応に必須な光化学系の光阻害を招くことを示してきた (Yamori et al. 2015 Scientific Reports; Kono et al. 2017, 2019 Plant & Cell Physiology)。変動光環境における光阻害の緩和のために、植物は葉にアントシアニンを蓄積する可能性がある。

そこで、本研究課題では、可視光領域の変動光照射が植物のアントシアニン蓄積と植物成長に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。また、申請者らの先行研究によって、栽培環境が温かな環境であっても、栽培途中に根圏環境のみを劇的に変化することによって、機能性成分の蓄積が誘導することを見出した。そこで、光処理ではなく、根圏温度の変化が植物のアントシアニン蓄積と植物成長に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。これらの研究結果から、UV 照射以外の方法で高付加価値作物の栽培法の開発を目指す。

3. 研究の方法

シロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana* (L.)) と赤系リーフレタス (レッドファイヤー) を供試材料とした。100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の白色 LED 下で、シロイヌナズナを 15 日間、レタスを 25 日間育苗し、プログラムで厳密に制御した光環境に移し、2 週間以上の栽培試験を行った。光強度の期間と頻度を制御するために、光源となる LED と直流安定化電源、およびコンピュータを用いたセットアップを構築し、Excel マクロのプログラムにより異なる光条件を再現した。各光条件の光強度の日変化は、120 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で一定の光強度の照射を行う栽培区、強光 (500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 120 分間) を正午頃に 1 回だけ照射する栽培区、弱光/強光を 50/500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光強度で 30 分毎に切り替えて照射する栽培区、弱光/強光を 50/500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光強度で 10 分毎に切り替えて照

射する栽培区、弱光/強光を $50/500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光強度で 1 分毎に切り替えて照射する栽培区とした。すべての光条件で積算光量は一定とし、各日 6:00 ~ 18:00 の 12 時間照射を行った。

また、根圏温度が植物成長に及ぼす影響を解析する際には、 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の白色 LED 下で、15 日間リーフレタス(レッドファイヤー)を育苗した後、3 つの異なる根圏温度(15、25、35)の栽培システムに定植し、播種後 30 日目に解析した。

最上位展開葉の葉身部から、クロロフィルおよびカロテノイドを抽出し、吸光度から含有量を算出した。また、アントシアニン含有量は ACM-200plus(アイネクス株式会社)を用いて、また、アスコルビン酸は RQ Flex plus(Merck Darmstadt)を用いて定量した。代謝産物の含有量の定量には Agilent 6890N gas chromatograph(Agilent Technologies)を用いた。植物の光合成応答を解析するため、植物の最上位展開葉におけるクロロフィル蛍光を測定した。光合成活性を示すパラメータとして、光化学系 II の量子収率 $Y(II) = (F_m - F) / F_m$ 、光化学消光 $[qP = (F_m - F) / (F_m - F_0)]$ 、非光化学消光 $[NPQ = (F_m - F_m) / F_m]$ を算出した。さらに電子輸送率(ETR)を $ETR = 0.5 \times \text{abs I} \times Y(II)$ として計算した。ここで、0.5 は PSI または PSII に到達した吸収光の割合、abs I は吸収光強度を入射光強度の 0.84 としたときの吸収光強度である。

4. 研究成果

白色 LED の定常光と変動光環境を複数設け、シロイヌナズナと赤系リーフレタス(レッドファイヤー)を栽培したところ、 $120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で一定の光強度の照射を行う栽培区において、植物成長が最も高かったが、アントシアニンの蓄積は検出できなかった。一方で、強光($500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 120 分間)を正午頃に 1 回だけ照射する栽培区と、弱光/強光を $50/500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光強度で 30 分毎に切り替えて照射する栽培区においては、栽培区に比べて植物成長は抑制されていたが葉のアントシアニンは蓄積していた。また、弱光/強光 10 分の変動光栽培区、弱光/強光 1 分の変動光栽培区においては、アントシアニンの蓄積は検出できず、かつ、葉のクロロフィル量が低下し、植物成長は大きく低下していた。クロロフィル蛍光解析の結果から、強光と弱光の間隔が短い変動光処理では、光化学系 II の最大量子収率(F_v/F_m)が低下し、その結果として、光合成電子伝達速度(ETR)の低下を招いたと考えられる。このように、1 日の積算光量は一定にもかかわらず、光の照射パターンによって、植物成長や機能性成分に及ぼす影響が大きく異なることを明らかにした。

次に、栽培光以外の環境要因に着目して、植物のアントシアニンを効率よく蓄積する方法を検討した。気温は植物の成長と収量に大きな影響を与える環境要因の一つである。根圏温度もまた植物の生育に強く影響すると考えられるが、根圏温度が植物の生育や機能性成分に与える影響についてはあまり知られていない。そこで、根域温度が養液栽培のレタスの成長や機能性成分に与える影響を解析した。温和な光条件と気温のもとで植物を栽培し、生育途中から根圏温度のみを変更し(15、25、35°C)植物を栽培した。その結果、根圏温度が 25°C において植物成長は最も促進する一方で、根圏温度が 35°C においてアントシアニン蓄積が最も促進することを明らかにした。また、収穫 8 日前に根圏温度 25°C から 35°C に変化することで、植物の成長と機能性成分の両方を高めることができることを示した。これは栽培環境の制御によって、生育初期には生育を促進させ、また、生育後期には機能性成分を増強させることが可能であることを示す。こ

のように、光条件や気温は温和な条件のままでも、根圏温度のみを変化させることで、植物の成長、機能性成分、代謝物、元素の濃度を大きく変化させることを明らかにした。

本研究によって、可視光を用いた光照射のタイミングや強度を調整すること、また、光照射時の根圏温度を制御することによって、できる限り生産性を維持したまま機能性成分を高めることが可能であることを示すことができた。高齢化が進む現在、「食べて運動して健康を維持し、また、病気を予防して医療費を削減する」というテーマの重要性は日本国民の多くが理解している。気候変動下の作物生産や世界規模の感染症増加等に対応するためにも植物の力はさらに必要とされている。利用目的に合わせて植物を高機能化したり、能力を最大限に発揮させたりする研究は、今後ますます重要性が高まると考えられる。本研究課題では、可視光領域の変動光照射や栽培途中の根圏温度の変化によって機能性成分を向上させることに成功した。これまでも、申請者は、植物工場における葉菜類の栽培において、植物体への下から上に向けてのLED照射(上方照射)によって、外葉の老化を抑制する新たな栽培法を提案し(Zhang et al. 2016 *Frontiers in Plant Science*、Joshi et al. 2017 *HortScience*、Saengtharatip et al. 2021 *Environmental Control in Biology*) NHK テレビや日本経済新聞など、メディアでも大々的に紹介された。将来的に、上方照射法によって高い作物生産性を維持したまま、収穫前の数時間~数日間だけ、可視光領域の変動光照射や根圏温度を制御することによって機能性成分を増大することができれば、他に類をみない高機能性野菜の高効率生産を実現できると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 OHTAKE Noriko, JU Yao, ISHIKURA Masaharu, SUZUKI Hiroshi, ADACHI Shunsuke, YAMORI Wataru	4. 巻 59
2. 論文標題 Alternating Red/Blue Light Increases Leaf Thickness and Mesophyll Cell Density in the Early Growth Stage, Improving Photosynthesis and Plant Growth in Lettuce	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environment Control in Biology	6. 最初と最後の頁 59～67
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2525/ecb.59.59	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 SAENGTHARATIP Suthisak, JOSHI Jyotsna, ZHANG Geng, TAKAGAKI Michiko, KOZAI Toyoki, YAMORI Wataru	4. 巻 59
2. 論文標題 Optimal Light Wavelength for a Novel Cultivation System with a Supplemental Upward Lighting in Plant Factory with Artificial Lighting	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environment Control in Biology	6. 最初と最後の頁 21～27
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2525/ecb.59.21	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Inoue Takayasu, Sunaga Motoo, Ito Mutsuhiro, Yuchen Qu, Matsushima Yoriko, Sakoda Kazuma, Yamori Wataru	4. 巻 12
2. 論文標題 Minimizing VPD Fluctuations Maintains Higher Stomatal Conductance and Photosynthesis, Resulting in Improvement of Plant Growth in Lettuce	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 646144
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpls.2021.646144	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yamori Namiko, Matsushima Yoriko, Yamori Wataru	4. 巻 56
2. 論文標題 Upward LED Lighting from the Base Suppresses Senescence of Lower Leaves and Promotes Flowering in Indoor Rose Management	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 HortScience	6. 最初と最後の頁 716～721
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21273/HORTSCI115795-21	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Chen Ying, Yamori Wataru, Tanaka Ayumi, Tanaka Ryouichi, Ito Hisashi	4. 巻 307
2. 論文標題 Degradation of the photosystem II core complex is independent of chlorophyll degradation mediated by Stay-Green Mg ²⁺ dechelataase in Arabidopsis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plant Science	6. 最初と最後の頁 110902 ~ 110902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.plantsci.2021.110902	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Monda Keina, Mabuchi Atsushi, Takahashi Sho, Negi Juntaro, Tohmori Ryoma, Terashima Ichiro, Yamori Wataru, Iba Koh	4. 巻 184
2. 論文標題 Increased Cuticle Permeability Caused by a New Allele of ACETYL-COA CARBOXYLASE1 Enhances CO ₂ Uptake	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant Physiology	6. 最初と最後の頁 1917 ~ 1926
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1104/pp.20.00978	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Basso Leonardo, Yamori Wataru, Szabo Ildiko, Shikanai Toshiharu	4. 巻 184
2. 論文標題 Collaboration between NDH and KEA3 Allows Maximally Efficient Photosynthesis after a Long Dark Adaptation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant Physiology	6. 最初と最後の頁 2078 ~ 2090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1104/pp.20.01069	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakoda Kazuma, Yamori Wataru, Shimada Tomoo, Sugano Shigeo S., Hara-Nishimura Ikuko, Tanaka Yu	4. 巻 11
2. 論文標題 Higher Stomatal Density Improves Photosynthetic Induction and Biomass Production in Arabidopsis Under Fluctuating Light	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 1609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpls.2020.589603	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ohkubo Satoshi, Tanaka Yu, Yamori Wataru, Adachi Shunsuke	4. 巻 11
2. 論文標題 Rice Cultivar Takanari Has Higher Photosynthetic Performance Under Fluctuating Light Than Koshihikari, Especially Under Limited Nitrogen Supply and Elevated CO ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 1308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpls.2020.01308	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kang Hui-Xing, Zhu Xin-Guang, Yamori Wataru, Tang Yan-Hong	4. 巻 11
2. 論文標題 Concurrent Increases in Leaf Temperature With Light Accelerate Photosynthetic Induction in Tropical Tree Seedlings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 1216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpls.2020.01216	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Wataru Yamori	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer-Nature	5. 総ページ数 498
3. 書名 Rice Improvement: Physiological, Molecular Breeding and Genetic Perspectives	

1. 著者名 Sakoda K, Tanaka Y, Yamori W	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Taylor & Francis	5. 総ページ数 1200
3. 書名 Handbook of Plant and Crop Physiology	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------