白色 LED 照明の暗期照射がイネ品種「コシヒカリ」の 開花誘導遺伝子 *Hd3a* 発現に及ぼす影響

学生会員 金子 奈々恵 (山口大学大学院) 正会員 山本 晴彦 (山口大学)
正会員 岩谷 潔 (山口大学) 正会員 原田 陽子 (鳥取大学大学院) 正会員 園山 芳充 (山口大学)

Effect of White LED Illumination in Dark Period on Floral Activator *Hd3a* expression in *Oryza sativa* L. cv. Koshihikari

Student Member Nanae Kaneko (Graduate School of Yamaguchi University),
Member Haruhiko Yamamoto (Yamaguchi University), Member Kiyoshi Iwaya (Yamaguchi University),
Member Yoko Harada (Graduate School of Tottori University) and Member Yoshimitsu Sonoyama (Yamaguchi University)

ABSTRACT

“Light pollution” due to outdoor lighting results in delayed heading time and reduced yield in rice. The purpose of this study is to assess the effect of light pollution by using a method whereby rice grows in a climate chamber and white LEDs (light emitting diodes) were used to simulate as outdoor lighting. We estimated heading time by quantitative determination of floral activator *Hd3a* in rice when five LEDs irradiated *Oryza sativa* L. cv Koshihikari in a dark period. As a result, three commercially supplied lights (light sources 1-3) and a customized light (light source 5) noticeably suppressed *Hd3a* expression and the estimated heading was delayed more than four days, indicating the occurrence of light pollution under 5lx irradiation. However, another customized light (light source 4) did not suppress *Hd3a* expression and estimated heading delay was within three days, indicating a reduction in light pollution. This stemmed from the difference in photon flux density with which each light source irradiated the rice. This suggests that illumination, in which light pollution is reduced (light source 4), of illuminance up to 10 lx does not suppress *Hd3a* expression, whereas over 15 lx does suppress *Hd3a* expression.

KEYWORDS : heading delays, light pollution, outdoor lighting, photon flux density, rice, quantitative PCR

1. はじめに

近年、農地の宅地転用や道路の新設などによる農村地帯の土地利用開発に伴い、農地に隣接した道路に屋外照明を設置するケースが増加している。しかし、屋外照明の点灯による人工的な長日条件は、「光害（ひかりがい）」として感光性の農作物に悪影響を与える。環境省は、平成 18 年 12 月に改訂した「光害対策ガイドライン」において、屋外照明により影響を受ける農作物として「イネ」を取り上げている。感光性の農作物であるイネは、ある一定の日長より長い場合、花芽形成が起こらない。しかし、屋外照明の点灯は、人工的な長日条件を発生させるため、イネの出穂（開花）・成熟が遅延し、収量・品質が低下するという光害が発生する。また、品種により影響程度には差があるものの、2 lx の光でさえも出穂遅延を発生させ、照度の増加に伴い出穂遅延日数も増加する²⁾。

光害の発生は、2 つの原因が考えられる。1 つは、出穂（開花）がイネの光受容体であるフィトクロム B (吸収波長域: 約 540~690 nm) の作用を受けるためである³⁾。もう 1 つは、短日植物の開花誘導に一定の連続した暗期が必要なためである⁴⁾。屋外照明として、フィトクロム B の吸収波長域を含む水銀灯や白熱電球、および電球型蛍光白色ランプなどを夜間に使用し、イネ品種「コシヒカリ」に 5 lx 以上の光が照射された場合、出穂遅延が顕著となったことが報告されている^{5)~7)}。さらに、「コシヒカリ」は、他のイネ品種に比

べ屋外照明の影響を強く受ける、感光性の高い品種である⁶⁾⁷⁾。

しかし、原田ら (2012) は、単色光において、光源の選択的波長域の照射と発光制御が光害対策として有効であることを示した⁸⁾⁹⁾。実際に屋外照明としてフィトクロム B の吸収波長域を含まない単色光の LED 照明を使用し、イネへ照射した際、光害を回避可能であったが¹⁰⁾、視認性が低く防犯灯として使用するためには改善の必要があった¹¹⁾。白色 LED 照明は、照射波長域が広域であり、フィトクロム B の吸収波長域を含むが、視認性は高い。また、東日本大震災以降、節電目的で屋外照明に白色 LED 照明を使用するケースが増加している。しかし、屋外照明として白色 LED 照明を使用した際のイネ光害への影響を調査した例は少ない¹⁰⁾。そこで、本研究では、屋外照明として白色 LED 照明の使用を想定し、人工気象器内で暗期にイネへ照射した際のイネの出穂（開花）に及ぼす影響を評価した。

2. 材料および方法

2.1 実験材料

2.1.1 イネの栽培

イネ品種「コシヒカリ」(*Oryza sativa* L. cv. Koshihikari) を供試体とし、人工気象器 (株式会社日本医化器械製作所製 LPH-220SP) 内で栽培した。浸種・催芽させた種籾を、縦 4.0 cm、横 4.0 cm、高さ 4.5 cm の穴が 2 行 6 列連結した育苗ポット (昭和

精機工業株式会社製 SS-POT41) を 2 行 3 列になるよう切断し、切断した 1 ポットに 1 穴 2 粒ずつ、8 ポット分として全 96 粒播種した。出芽後、明期 8 時間・25℃、暗期 16 時間・20℃、終日湿度 70 % の短日条件下で生育させた。明期は、3 波長昼白色蛍光ランプ（日本電気株式会社製 FL40SEX-N-HG, FL20SEX-N-HG, FL15EX-N-X）を使用し、徐々に照度を増加させ、出芽後 7 日からイネの地際の高さにおける平均水平面照度が約 30,000 lx となるよう照射した。出芽後 12 日から明期 8 時間・30℃、暗期 16 時間・20℃、終日湿度 70 % の短日条件下で生育させた。写真 1 左に出芽後 33 日のイネ栽培の様子を示す。

写真 1 イネ栽培の様子（左：出芽後 33 日、右：LED 照射）
Photo 1 Situation of growing rice (left: 33 days from budding time, right: irradiate LED illumination).

2.1.2 白色 LED 照明

白色 LED 照明は、市販されている光源を 3 種とフィトクロム B の吸収波長域を抑えた特注品の光源を 2 種使用した。各 LED 照明の詳細を表 1 に、発光スペクトルを図 1 に示す。LED 照明は、人工気象器（株式会社日本医化器械製作所製 LH-100S 以下、「人工気象器 小」）内でイネの上部に設置し、照明 1、照明 4、および照明 5 は、電源装置（宇部興機株式会社製、特注品）を用いて発光させた。照明 2 と照明 3 は、直流安定化電源（株式会社エー・アンド・デイ製、AD-8724D）を用いて発光させた。

2.2 実験方法

原田ら（2012）の実験方法⁹⁾に基づき、栽培したイネ個体へ暗期に LED 照明を照射した。イネの出穂（開花）には、開花誘導遺伝子 *Hd3a* (Heading date 3a) が関与しており、短日条件下の葉身で発現した *Hd3a* は、茎頂分裂組織に運ばれ、他のタンパク質と相互作用し開花を誘導する¹²⁾。そこで、本研究では、イネの葉身を採取し、*Hd3a* 発現を定量して出穂（開花）の評価を行った。さらに、*Hd3a* 発現と LED 照明の照射波長との関係を調査した。また、*Hd3a* 発現の定量により、光害軽減効果が示唆された照明に関して、長期間イネへ照射し出穂期を調査した。

2.2.1 サンプルの採取および LED 照明の照射方法

イネの草丈が 50 cm 程度、主茎の葉齢が 5.0 以上に達した出芽後 35 日にサンプルの採取を行った。明期が始まる直前に、2 行 3 列のポットの内、1 行分の各主茎（3 穴×2 本）において、主茎の第 5 葉を暗黒条件下で採取し、液体窒素で凍結させ、「対照区」とした。

その後、ポットを明期 8 時間・30℃、暗期 16 時間・20℃に設定した人工気象器 小に移した。そして、株上の平均水平面照度が 5 lx、10 lx、15 lx となるようにデジタル照度計（横川メータ & インスツルメンツ株式会社製、510-02）を用いて LED 照明を設置し、出芽後 35 日の暗期中のみ照射した。本研究では、LED 照明を屋外照明として使用することを想定しており、これまでの夜間照明によるイネ光害の調査において、一般的に使用されてきた照度 (lx) を光設定の単位とした。写真 1 右に暗期にイネへ LED 照明を照射の様子を示す。ここで、平均水平面照度 5 lx とは、公益社団法人日本防犯設備協会が定める防犯灯の照度基準¹³⁾において、クラス A を満たす照度である。そして、出芽後 36 日の明期が始まる直前に対照区と同様、ポットの残り 1 行分のサンプルを採取し、「照射区」とした。

表 1 各 LED 照明の詳細
Table 1 Details of each LED illuminations.

名称	社名	型番
照明1	日垂化学工業株式会社	NSPW510DS
照明2	株式会社ミスミ	LZ13-135-W
照明3	株式会社ミスミ	LZ14-397-W
照明4	—	特注品
照明5	—	特注品

図 1 各 LED 照明の発光スペクトル
Fig. 1 Emission spectra of each LED illuminations.

2.2.2 *Hd3a* 発現の定量方法

凍結したサンプルを凍結破碎装置（株式会社トクケン製、TK-AM5）にて破碎した。RNA抽出には、RNeasy Plant Mini Kit（株式会社QIAGEN社製）を用い、QIAcube（株式会社QIAGEN社製）を使用した。cDNAの合成には、QuantiTect Rev. Transcription Kit（株式会社QIAGEN社製）を用いた。発現対

象とした遺伝子は、Ishikawaら⁴⁾を参考にした*Hd3a*遺伝子特異プライマーセットであった。ハウスキープ遺伝子は、ubiquitin 遺伝子 (*ubq*) とした。*Hd3a*遺伝子と*ubq*遺伝子のプライマー配列を表2に示す。合成したcDNA、各遺伝子特異プライマーセット、およびRotor-Gene SYBR Green (株式会社QIAGEN社製)は、QIAgility (株式会社QIAGEN社製)を用いて自動分注した。PCR反応、蛍光検出、および定量解析には、Rotor-Gene Q (株式会社QIAGEN社製)を用いた。定量解析では、各試験区の*Hd3a*発現を*Hd3a*遺伝子と*ubq*遺伝子との存在比で算出し、照明による*Hd3a*発現への影響は、対照区との存在比を1.00とした場合の照射区との存在比により表した(式1)。

照明による *Hd3a* 発現への影響

$$= \text{照射区 } Hd3a/ubq \div \text{対照区 } Hd3a/ubq \quad (1)$$

表2 本研究で用いたプライマー配列
 Table 2 Primer sequences used in this study.

プライマー	配列
<i>Hd3a</i> (FT-L2)-F	GCTCACTATCATCATCCAGCATG
<i>Hd3a</i> (FT-L2)-R	CCTTGCTCAGCTATTTAATTGCATAA
<i>ubq</i> -F	AACCAGCTGAGGCCCAAGA
<i>ubq</i> -R	ACGATTGATTTAACCAGTCCATGA

2.2.3 解析方法

LED 照明の光量子束密度 (PFD : Photon Flux Density) と照明による *Hd3a* 発現への影響との関係、および照明の波長とその影響に対する関与を調査するため、Leverage Correction による予備検定を踏まえて PLS (Partial Least Squares) 回帰分析を行った¹⁴⁾。PLS 回帰分析は、データをそのまま使用せず、潜在因子を計算し抽出する。サンプルサイズに比べて説明変数が多い場合や説明変数間の多重共線性が高い場合に有用とされる。

各 LED 照明を 2.2.1 に示した照射方法で設置し、分光放射計 (株式会社相馬光学製 ひだまり duo, 特注品) を用いて分光放射照度 (波長幅 : 1 nm, 測定波長域 : 300~1700 nm) を測定した。得られたデータ (300~1700 nm) より、植物の生理的有効放射に当たる 300~800 nm のデータを抽出して使用し、光量子束密度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) に変換した (式 2)¹⁵⁾。

$$\text{PFD} = N \times h \times c \times \lambda^{-1} \times I \quad (2)$$

ここで、 N はアボガドロ数、 h はプランク定数、 c は光速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、 λ は波長 (nm)、 I は放射照度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) である。目的変数に各 LED 照明を照射した際の *Hd3a* 発現、説明変数に 300~800 nm の光量子束密度で表した波長とし、多変量解析ソフト (株式会社 CAMO 製 The Unscrambler Ver9.2) を使用し解析した。

2.2.4 出穂試験

暗期にイネへ LED 照明を照射した際の *Hd3a* 発現を定量した結果、光害軽減が認められた照明に関して、イネへ長期間照射した際の出穂期への影響を調査した。

2.1.1 と同様の方法でイネを生育させ、出芽後 20 日に直径 10 cm、高さ 15 cm の育苗ポットへ 3 本ずつ移植した。その後、2 台の人工気象器 (株式会社日本医工器械製作所製 LPH-350SP) にそれぞれ 4 ポットを栽植密度 $19.6 \text{ 株}/\text{m}^2$ となるよう配置し栽培した。人工気象器は、山口県の日長・気温条件を再現し、移植期の出芽後 20 日が山口県における田植期の平年値である 5 月 30 日¹⁶⁾となるよう設定した。日長データは、山口県山口市の日の出・日の入り時刻をそれぞれ 5 日ごとに平均したデータを用い、日の出時刻が人工気

象器の明期の始まり、日の入り時刻が暗期の始まりとなるよう設定した。気温データは、気象庁の地域気象観測システム (アメダス) の観測データより、山口測候所における毎正時の気温データを 1976 年から 2005 年まで抽出し、時間ごとに平均した後、3 時間ごと、5 日ごとに平均したデータを用いた。図 2 に本研究にて再現した日長・気温条件の推移を示す。さらに、人工気象器内での設定値と平年値の日変化を図 3 に示す。

人工気象器の内 1 台は、「照射区」とし、移植期より連日暗期に LED 照明の照射を行った。LED 照明は、*Hd3a* 発現を定量した結果、光害軽減が認められた照明をその照度に設定した。もう 1 台の人工気象器は、暗期に LED 照明の照射を行わず、連日暗期が暗黒の「対照区」とした。

出穂は、両区的全ポットの有効茎を対象とし、目視で出穂状況を調査した。出穂率は、両区において全有効茎の内、出穂した有効茎の割合を算出した。また、出穂率が 50 % に達した日を出穂期とし、両区が出穂期を迎えるまで連日出穂調査を行った。そして、対照区と照射区の出穂期の差より出穂遅延日数を算出した。

図2 再現した日長・気温条件の推移
 Fig. 2 The transition of replicated day length and temperature condition.

図3 人工気象器の設定値 (出芽後 20 日) と平年値 (5 月 30 日) の日変化
 Fig. 3 The daily variation of set value in a growth chamber (20days from budding time) and normal value (May 30).

3. 結果および考察

3.1 LED 照明を 5 lx で照射した際の *Hd3a* 発現への影響

LED 照明を防犯灯として使用することを想定し、暗期に各 LED 照明を防犯灯の照度基準におけるクラス A を満たす平均水平面照度 5 lx でイネへ照射した。対照区の *Hd3a* 発現と各照明による *Hd3a* 発現への影響を図 4 に示す。対照区の *Hd3a* 発現は、平均値が 1.01、標準偏差が 0.16 であった (以下、 1.01 ± 0.16 と

示す)。各照明による *Hd3a* 発現への影響は、LED 照明の種類により大きく異なる結果が得られた。原田ら⁸⁾は、LED 照明の暗期照射により収量へ影響を及ぼさない出穂遅延・促進日数 3 日以内となる *Hd3a* 発現が 0.85 以上 1.10 以下であると報告している。本研究は、原田らと同様の実験方法でイネの栽培および *Hd3a* 発現の定量を行ったため、考察にこの範囲を適用する。本研究では、特注の光源である照明 4 の照射による *Hd3a* 発現への影響は、 0.95 ± 0.02 となった。つまり、防犯灯として照明 4 を使用し、イネに平均水平面照度 5 lx の光が照射された際、*Hd3a* 発現を著しく抑制することではなく、出穂遅延・促進日数が 3 日以内になることが推定された。従って、照明 4 は、光害軽減効果が示唆された。一方、市販の光源である照明 1~照明 3 の照射による *Hd3a* 発現への影響は、 0.74 ± 0.02 、 0.33 ± 0.02 、 0.25 ± 0.01 であり、特注の光源である照明 5 の照射による影響は、 0.36 ± 0.02 であった。つまり、防犯灯として照明 1~3、および照明 5 を使用し、イネに平均水平面照度 5 lx の光が照射された際、*Hd3a* 発現が著しく抑制され、出穂遅延日数が 4 日以上となることが推定された。従って、照明 1~3、および照明 5 は、水銀灯や白熱電球を屋外照明として使用した報告^{9)~11)}と同様に、農地に隣接して設置すると出穂（開花）が遅延し、ひいては収量の低下などの光害発生が示唆された。

図4 対照区の *Hd3a* 発現と各照明による *Hd3a* 発現への影響 (n=6)

Fig. 4 *Hd3a* expression of the control and the effect on *Hd3a* expression by each LED illuminations (n=6).

3.2 *Hd3a* 発現と LED 照明の光量子束密度との関係

本研究で LED 照明をイネに同条件で照射した際、LED 照明の種類により *Hd3a* 発現への影響が大きく異なった原因として、各 LED 照明がイネへ照射された際の光量子束密度の違いが考えられる。

イネに単色光を暗期照射した際の出穂（開花）に及ぼす影響は、近紫外光、青色光、緑色光、黄緑色光、黄色光および赤色光の LED 照明をイネへ照射し *Hd3a* の発現を比較すると、青色光と緑色光では *Hd3a* の発現に及ぼす抑制への影響は小さく、近紫外光、黄緑色光、黄色光および赤色光では *Hd3a* の発現に及ぼす抑制の影響が大きくなることが報告されている⁸⁾。また、分子遺伝学的研究においても *Hd3a* の発現は、未知の青色光受容体の作用を受けて誘導され、赤色光受容体であるフィトクロム B の作用を受けて抑制されることが報告されている^{11)~17)}。しかし、照射波長域の広域な白色 LED 照明を照射した際のイネの出穂（開花）への作用は不明である。ここで、照明の照射波長のような多くの説明変数から、目的変数に關係のある説明変数を抽出する解析手法である PLS 回帰分析を試みた。目的変数は照明による *Hd3a* 発現への影響、説明変数は各照明を光量子束密度で表した波長とし、LED 照明の違いによる *Hd3a* 発現へ

の影響を解析した。図 5 に分光放射照度より算出した LED 照明の各波長における光量子束密度を示す。以上のデータから PLS 回帰分析を行った結果、サンプル数 (n) は 5、重相関係数 (R) は 1.00、平均平方二乗誤差 (Root Mean Square Error of Calibration: RMSEC) は 0.01 となった。各照明による *Hd3a* 発現への影響の値と PLS 回帰分析によって得られた推定値との間に高い相関が認められた。つまり、各 LED 照明を同条件で照射した際、照明の波長とその影響との間に相関関係があることが示された。本解析結果より得られた各波長における標準化偏回帰係数を図 6 に示す。標準化偏回帰係数は、目的変数である照明による *Hd3a* 発現への影響に対して、説明変数である各照明の波長の関与を示す。本解析結果では、標準化偏回帰係数が *Hd3a* の発現に関与する赤色光受容体フィトクロム B の吸収波長域 (約 540~690nm) を含む、380~800nm における幅広い範囲があった。また、現在は同定されていないが、*Hd3a* の発現に関与することが指摘される青色光受容体の吸収波長域と推定される青色光領域の波長も含まれていた。従って、白色 LED 照明の照射による *Hd3a* の発現の違いは、これらの波長域の光質と光量のバランスの違いが影響していると考えられた。

図5 各 LED 照明の光量子束密度

Fig. 5 Photon flux density of each LED illuminations.

図6 各主成分の標準化偏回帰係数

Fig. 6 The standardized partial regression coefficient of each principal component.

3.3 LED 照明を異なる照度で照射した際の *Hd3a* 発現への影響

LED 照明は、防犯灯として使用されるだけでなく、蛍光水灯の代替や高輝度道路照明としても使用されるケースが増加し

ている。そのため、LED 照明を防犯灯の照度基準である平均水平面照度 5 lx より高い照度の 10 lx, 15 lx に設定して、暗期にイネへ照射した際の *Hd3a* 発現への影響を調査した。各 LED 照明を平均水平面照度 10 lx, 15 lx にて照射した際の *Hd3a* 発現への影響を 5 lx 照射時の結果と併記して図 7 に示した。5 lx 照射時に光害軽減効果が示唆された照明 4 は、10 lx 照射時に 0.94 ± 0.07 であったが、15 lx 照射時に 0.71 ± 0.22 へ低下した。従って、10 lx 照射までは出穂遅延・促進日数 3 日以内となることが推定され、光害軽減効果が示唆された。しかし、15 lx 以上では、出穂遅延・促進日数が 4 日以上となることが推定され、光害発生が示唆された。一方、5 lx 照射時に光害発生が示唆された他の LED 照明では、照明 1 と照明 2 において、照度の増加に伴い照明による *Hd3a* 発現への影響が抑制傾向を示した。また、照明 3 と照明 5 は、照度の増加に伴い照明による *Hd3a* 発現への影響が若干増加傾向を示した。しかし、いずれの条件でも照明による *Hd3a* 発現への影響が 0.85 を下回るため、照明 1 ～3 および照明 5 は、出穂遅延・促進日数が 3 日以内となる範囲には及ばないことが推定され、光害発生が示唆された。

図 7 異なる照度で LED 照明を照射した際の *Hd3a* 発現への影響 (n=6)

Fig. 7 The effect of *Hd3a* expression when using LED illuminations with different illuminance (n=6).

3. 4 光害軽減効果を示す照明を用いた出穂試験

出穂試験では、光害軽減が示唆された照明 4 を平均水平面照度 10 lx でイネへ連日照射した。山口県山口市の日長・気温条件を人工気象器で再現してイネを栽培し、暗期が暗黒の対照区と暗期にイネへ照明 4 を連日照射した照射区の出穂率の推移を図 8 に示す。出穂期は、対照区で 99 日、照射区で 101 日となり、出穂遅延日数は 2 日となった。つまり、屋外照明として照明 4 を使用し、イネに平均水平面照度 10 lx の光が照射された際、出穂遅延日数が 3 日以内

図 8 出穂率の推移 (n=4)

Fig. 8 The transition of heading date rate (n=4).

となり、*Hd3a* 発現を定量して評価した結果と同様に光害軽減効果が認められた。

4. まとめ

本研究では、屋外照明として白色 LED 照明の使用することを想定し、人工気象器内でイネ光害への影響の評価を試みた。暗期に 5 種の LED 照明をイネ品種「コシヒカリ」へ平均水平面照度 5 lx で照射し、イネの開花誘導遺伝子 *Hd3a* 発現を定量して出穂期を推定した。その結果、市販されている光源 3 種および特注品の光源 1 種 (照明 5) において *Hd3a* 発現が著しく抑制され、出穂遅延・促進日数 4 日以上となることが推定され、光害発生が示唆された。しかし、特注品の光源 1 種 (照明 4) では、*Hd3a* 発現が抑制されず、出穂遅延・促進日数が 3 日以内となることが推定され、光害軽減効果が示唆された。同条件で LED 照明を照射した際の *Hd3a* 発現への影響は、各照明がイネに照射された際の光子束密度で表した波長により変化することが示された。そして、LED 照明の照射波長域のすべてが *Hd3a* 発現への影響に関与しており、フィトクロム B や青色光受容体の作用に起因することが考えられた。さらに、5 lx 照射時に光害軽減効果が示唆された照明は、照度の増加に伴い、10 lx 照射時においても *Hd3a* 発現が抑制されず、イネへ暗期に連続照射した結果、出穂遅延日数が 2 日となったため、光害軽減効果が保たれることが確認された。一方、5 lx 照射時に光害発生が示唆された照明は、照度の増加に伴い *Hd3a* 発現が抑制されたものや若干増加したものがあつたが、いずれも光害を発生することが示唆された。

現在、光害軽減効果が示唆された LED 照明を実際に圃場に設置し、イネの出穂や収量・品質などへの影響の調査を行っている^{18) 19)}ので、その結果を後報において報告する。本研究では、LED 照明の波長と *Hd3a* 発現との関係を PLS 回帰分析にて解析したが、この結果には、白色 LED 照明特有の因子を抽出している可能性がある。また、青色光受容体が発見されておらず、その吸収波長も不明であるため、現時点では、*Hd3a* 発現への作用波長域を断定することは難しい。今後、イネにおける青色光受容体が発見され、その吸収波長域が判明し、さらに、開花誘導遺伝子 *Hd3a* 発現と青色光および赤色光の相互作用のメカニズムが明らかになることで、より効果的に光害を抑制できる照明の開発が期待される。

最後に、本研究は (独) 科学技術振興機構 (JST) 独創的シーズ展開事業大学発ベンチャー創出推進「短日性農作物の光害を回避する LED 屋外照明装置の開発 (平成 20～22 年度、研究代表者: 山本晴彦)」および社会技術研究開発事業研究開発成果実装支援プログラム「農作物の光害を防止できる通学路照明の社会実装 (平成 22～25 年度、実装責任者: 山本晴彦)」として実施した。ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- (1) 伊藤博紀・井澤毅: 光応答と開花制御 日の長さの変化を認識して花を咲かせるメカニズム, 細胞工学, 30 (2), pp.161-166 (2011).
- (2) 山本晴彦・岩谷潔・井上名月: 街路灯の夜間照明がイネの生育と収量に及ぼす影響, 平成18年度 (第39回) 照明学会講演論文集, pp.282-283 (2006).
- (3) 雨木若慶, 平井正良: 第3章 単色光下における園芸植物の形態形成反応, アグリフォトニクス—LEDを利用した植物工

場を目指して一、後藤英司、株式会社シーエムシー出版、pp.31 (2008)。

- (4) Ishikawa, R., Tamaki, S., Yokoi, S., Inagaki, N., Shinomura T., Takano, M. and Shimamoto, K.: Suppression of the Floral Activator *Hd3a* Is the Principal Cause of the Night Break Effect in Rice, *The Plant Cell*, 17, pp.3326-3336 (2005)。
- (5) 笹村静夫・皿嶋正雄・仲林寛明・菅原友太・岩澤正美: 水稻に対する低照度夜間照明の影響: 第4報 (i) 光源の種類による影響の差異 (ii) 夜間照明の影響と水稻生育時期の関係 (iii) 夜間の短時間照明の影響, *日本作物学会紀事*, 39 (別号 1), pp.141-142 (1970)。
- (6) 川村和史: 水銀灯による夜間照明が水稻の生育, 収量に及ぼす影響, 和歌山県農林水産総合技術センター研究報告, 1, pp.103-109 (2000)。
- (7) 吉岡秀樹・初山聡・川越博・菊川憲明: 夜間照明が早期水稻品種の出穂および収量並びに収量構成要素に及ぼす影響, *日本作物学会紀事*, 70 (3) pp.387-392 (2001)。
- (8) 原田陽子・山本晴彦・岩谷潔・金子奈々恵・園山芳充: LEDの波長・発光制御を変化させた夜間照射がイネ開花誘導遺伝子 *Hd3a* に及ぼす影響, *照学誌*, 96-11, pp.733-738 (2012)。
- (9) 原田陽子・山本晴彦・岩谷潔・金子奈々恵・園山芳充: イネ光害を軽減する波長選択および発光制御を行った混合 LED 照明, *照明学会年会* (2012)。
- (10) 山北敦子・岩谷潔・山本晴彦・原田陽子・高山成: 屋外照明の光質がイネの出穂遅延および収量に及ぼす影響, *日本農業気象学会中国四国支部会*, pp.48-51 (2008)。
- (11) 原田陽子・山本晴彦・岩谷潔・山北敦子・森博隆・山崎俊成: 光害回避型照明の視認性評価, *カラーフォーラム JAPAN 論文集*, pp.41-44 (2009)。
- (12) 玉置祥二郎・島本功: 花成ホルモンの同定, *化学と生物*, 46 (2), pp.123-127 (2008)。
- (13) 公益社団法人 日本防犯設備協会: SES E1901-3 防犯灯の照度基準, p.1 (2012年改正)。
- (14) 宮本久美: 近赤外分光法 III. 近赤外スペクトルの定量法, *分光研究*, 53 (3), pp.192-203 (2004)。
- (15) 菊地眞: 放射線と生体・医療, *照学誌*, 72-12, pp.4-9 (1988)。
- (16) 農林水産省: 平成 23 年産主要農作物の作付面積及び収穫量 (山口県版) 中国四国農政局山口地域センター, p.4 (2012)。
- (17) Tsuji, H., Taoka, K. and Shimamoto, K.: Regulation of flowering in rice: two florigen genes, a complex gene network, and natural variation, *Current Opinion in Plant Biology*, Vol.14, pp.45-52 (2011)。
- (18) 金子奈々恵・山本晴彦・岩谷潔・原田陽子・園山芳充: イネ光害を軽減する白色 LED 照明の探索, *照明学会年会* (2012)。
- (19) 金子奈々恵・山本晴彦・岩谷潔・原田陽子・園山芳充: LED 照明の夜間照射がイネ品種「ヒノヒカリ」の出穂および収量に及ぼす影響, *照学全大* (2012)。

(受付 2012 年 7 月 2 日 / 採録日 2013 年 3 月 7 日)

金子 奈々恵 (学生会員)

山口大学大学院農学研究科

〒753-8515 山口市大字吉田 1677-1

1988 年生まれ。2011 年 3 月山口大学農学部卒業。

山本 晴彦 (正会員)

山口大学農学部

〒753-8515 山口市大字吉田 1677-1

1957 年生まれ。1985 年 3 月山口大学農学部卒業, 同年 4 月農林水産省研究員, 2002 年 12 月より山口大学農学部教授。日本農業気象学会,

(社) 農業農村工学会, 日本作物学会, 日本自然災害学会 他。博士 (農学)。

岩谷 潔 (正会員)

山口大学農学部

〒753-8515 山口市大字吉田 1677-1

1970 年生まれ。2004 年 3 月鳥取大学大学院連合農学研究科博士課程修了, 2005 年 4 月より山口大学農学部学術研究員。日本農業気象学会, 2011 年 12 月より(株)アグリライト研究所研究取締役を兼務。

(社) 農業農村工学会, 日本作物学会, 園芸学会 他。博士 (農学)。

原田 陽子 (正会員)

鳥取大学大学院連合農学研究科 (山口大学配置)

〒753-8515 山口市大字吉田 1677-1

1980 年生まれ。2006 年 3 月九州工業大学情報工学部卒業, 2008 年 3 月山口大学大学院農学研究科修了。

園山 芳充 (正会員)

山口大学農学部

〒753-8515 山口市大字吉田 1677-1

1975 年生まれ。1998 年 3 月立命館大学文学部卒業, 2010 年 9 月より山口大学農学部学術研究員, 2011 年 12 月より(株)アグリライト研究所代表取締役を兼任。