

分光特性を用いた植物制御と診断

**Plant Control and Diagnosis
Using the Spectral Characteristic**

原田 陽子

2013

分光特性を用いた植物制御と診断

**Plant Control and Diagnosis
Using the Spectral Characteristic**

原田 陽子

Yoko Harada

2013

鳥取大学大学院連合農学研究科

United Department of Agricultural Science,
Graduate School of Tottori University

目次

第 1 章 緒言

- 1.1 緒言
- 1.2 目的・論文構成
- 1.3 引用文献

第 2 章 夜間照明によるイネ光害回避のための照明開発

- 2.1 背景
 - 2.1.1 目的
 - 2.1.2 引用文献
- 2.2 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
 - 2.2.1 材料および方法
 - 2.2.1.1 *Hd3a*の発現と出穂期の関係について
 - 2.2.1.2 *Hd3a*の発現への波長域および発光制御の影響
 - 2.2.1.3 探索結果から導かれた混合照明について
 - 2.2.2 結果および考察
 - 2.2.2.1 *Hd3a*の発現と出穂期の関係について
 - 2.2.2.2 *Hd3a*の発現への波長域および発光制御の影響
 - 2.2.2.3 探索結果から導かれた混合照明について
 - 2.2.3 総合考察
 - 2.2.4 引用文献
- 2.3 発光制御を行った混合LED夜間照射が
イネ開花および収量に及ぼす影響
 - 2.3.1 材料および方法
 - 2.3.1.1 人工気象器栽培下での収量および品質への影響
 - 2.3.1.2 圃場栽培下での出穂期および収量への影響
 - 2.3.1.3 品種の違いによる混合LED照明の影響変化
 - 2.3.2 結果および考察
 - 2.3.2.1 人工気象器栽培下での収量および品質への影響
 - 2.3.2.2 圃場栽培下での出穂期および収量への影響
 - 2.3.2.3 品種の違いによる混合LED照明の影響変化

- 2.3.3 総合考察
- 2.3.4 引用文献
- 2.4 イネ光害回避型照明の視認性評価
 - 2.4.1 実験概要
 - 2.4.1.1 実験場所・日時および被験者
 - 2.4.1.2 実験に用いた照明器具と実験構成
 - 2.4.1.3 評価項目
 - 2.4.1.4 実験手順
 - 2.4.1.5 評価方法
 - 2.4.2 結果および考察
 - 2.4.2.1 挙動・姿勢および顔の特徴
 - 2.4.2.2 色の認識
 - 2.4.2.3 箱の個数
 - 2.4.2.4 照明の印象
 - 2.4.3 総合考察
 - 2.4.4 引用文献
- 2.5 結論

第3章 近赤外分光法を用いたウンシュウミカンの 葉内水分ポテンシャルの非破壊推定

- 3.1 背景および目的
- 3.2 材料および方法
 - 3.2.1 実験圃場の概要
 - 3.2.2 測定方法
 - 3.2.3 解析方法
- 3.3 結果および考察
 - 3.3.1 葉内水分ポテンシャルの推移
 - 3.3.2 葉内水分ポテンシャルの診断
- 3.4 結論
- 3.5 引用文献

第4章 総括

摘要

Abstract

謝辞

学会誌公表論文一覧

第 1 章 緒言

1.1 緒言

近年，分光技術の発展は目まぐるしく，その技術を応用した農業生産が求められている．特に，農業において期待される光放射応用は，「環境制御としての光応用」と「診断技術としての光応用」に大別される（関根，2011）．

「環境制御としての光応用」は，光に対する植物の反応を元に，人工的に制御した光周性，光強度，光質（波長分布特性・分光特性）等を指す．わが国では，古くは，電照菊から確立されてきた技術であり（川田ら，1996），短日植物であるキクに対し，夜間に白熱電球を照射する暗期中断，すなわち光周性を制御することで，開花抑制が生じる技術である．開花抑制を示す光強度は，品種により異なるが，3 lxから最大で90 lx以上を確保する必要がある，「白熱電球で50 lx」が1つの基準とされてきた（米村，1993）．さらに，近年では，光質に関わる技術開発が進み，LED（Light Emitting Diode，発光ダイオード）照明の開発により，それまでの100 nm程度の特定波長域のみを透過させた蛍光灯等の照射（波長分布）から，30～50 nmの特定光色域（分光）が照射可能となった．そこで，キクに対し赤色LEDで暗期中断を行った場合，白熱電球の1/3の約60 mWm⁻²（約5～6 lx相当，著者換算）で開花抑制を示した（石倉ら，2009）．このように，光周期の制御に合わせ，光質の制御を行うことで，より低エネルギーの照射であっても開花制御が可能となっている．また，長日植物であるストックに対して青色LEDで暗期中断した場合，自然日長下よりも早期に開花する，開花促進効果が報告されている（鈴木ら，2008）．

これらに対して，農地に隣接する街路灯などの照明の漏れ光が夜間に農作物に対して照射され，結果，花成反応に攪乱が発生することは，光害（ひかりがい）と定義されている（詳細は，第2章に記述）．しかし，街路灯などは，人々が安全に通行可能な夜間の光環境の形成のために必要とする光である．ここで，その農作物の分光特性を利用することで，つまり，照射を受けない場合と同じ花成反応を示す光質の漏れ光であれば，光害が発生し

ない可能性がある。

次に、「診断技術としての光応用」は、特に可視・赤外放射を利用した植物体の光センシングを指す。消費者のニーズに応えるべく、より高品質で安全・安定供給が望まれる生産現場において、継続的な非破壊調査をケミカル・フリーで迅速に行う手法として、注目されている。農業生産の場では、果実の収穫後に行う選果システムの一部に、近赤外分光法を用いた糖度検査を組込むことが一般的になっており、主に成分分析に利用されることが多かった。これは、光源、分光検出、解析システムが大規模となるため、実験室レベルでの使用を余儀なくされていたからである。しかし、近年、近赤外分光法については、光源・分光装置の小型化、光ファイバケーブルによる測定部の延長、さらにモバイル型パソコンでの作動が可能となり、試料の側に装置を近づける携帯型装置が開発されている。また、検出器の性能向上により、測定時間の短縮、高い波長再現性でスペクトル取得が可能となり、合わせて複雑なケモメトリックスを使用した検量作成が可能な、市販の解析ソフトも普及している。よって、近赤外分光法は、フィールド調査における光センシングとして十分にその利点を生かすことが可能となり、栽培期間中に必要に応じて測定し、栽培管理へとフィードバックが可能となった。以上の状況から、これまでは、水分量（山本ら、1994）や窒素含有量（塚本、2007）といった特定成分を診断するのみであった近赤外分光法で、水分ストレスといった栽培期間中に連続的な診断が必要な生理反応を、葉のスペクトルから診断する技術へと進化している（D. Suhandyら、2006）。

水分ストレスの制御が必要な農作物は、高糖度な果実を収穫する作物に多く、特に隔年結果が生じず安定生産を可能とすることが求められているカンキツ栽培においても重要な課題となっている（詳細は、第3章に記述）。現在の樹体管理方法は、葉のしおれ、巻き、色といった観察が主であり、科学的に測定・分析し、後継者や新規就農者でも現地診断が可能な技術の開発が望まれている。よって、カンキツ栽培では近赤外分光法による水分ストレスの診断技術が確立されれば、より安定生産が可能となる。

このように、植物において重要な因子となる光質、つまり、分

光特性の概念を含んだ光との関係は，分光技術の発展に従い，日々解明が進められるべきテーマであり，農業の技術革新において重要である．そして，「制御」が可能となるにつれて，より正確で多岐にわたった「診断」が求められ，双方が欠くことなく，ともに発展すべき技術だと考える．

1.2 目的・論文構成

本研究では、近年発展している分光技術を用い、その応用として「分光特性を用いた植物制御と診断」を試みた。

分光特性を用いた「植物制御」では、第2章「夜間照明によるイネ光害回避のための照明開発」として、光に起因し発生する農作物の光害に注目し、街路灯などの農地に隣接する照明からの漏れ光による被害が発生しているイネの出穂遅延の事例を対象とした。人々が安全に通行可能な夜間の光環境を形成しつつ光害を回避するため、水田に漏れ光が照射された場合でも光害が発生しない光質、光周期等の光条件の探索を試みた。2.2 「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」では、夜間に照射されたLED光源の波長域と、その発光制御に伴うイネの光害程度への影響を調査した。ここでは、夜間照射以外の影響をできるだけ排除するため、イネは人工気象器を使用し栽培し、開花誘導遺伝子 *Hd3a* の発現定量から開花時期の推定を試みた。2.3は、2.2を受け、「発光制御を行った混合LED夜間照射がイネ開花および収量に及ぼす影響」とし、イネ光害に対する分光特性の結果から、イネ光害回避型LED照明を作成し、その夜間照射下で生育したイネの収量および品質への影響を調査した。ここでは、人工気象器内栽培と合わせ、複数圃場での検証、また複数品種への影響も調査した。2.4「イネ光害回避型照明の視認性評価」では、イネ光害回避型LED照明に対して、一般的な防犯灯として普及しつつある白色LED照明と、単色LED光源の中でも視認性が比較的高い緑色LED照明と比較し、防犯灯としての視認性評価を行った。

分光特性を用いた「植物診断」では、第3章「近赤外分光法を用いたウンシュウミカンの葉内水分ポテンシャルの非破壊推定」として、高糖度な果実を、隔年結果が生じず安定生産を可能とすることが求められているカンキツ栽培において、課題となっている水分ストレス制御を対象とした。そこで本研究では、水分ストレスの診断について、葉内水分ポテンシャル (Leaf Water Potential, LWP) を指標とし、近赤外分光法による非破壊・簡易で迅速な診断を試みた。

1.3 引用文献

D. Suhandy, N. Khuriyati and T. Matsuoka : Determination of leaf water potential in tomato plants using NIR spectroscopy for water stress management, *Environ. Control. Biol.* , 44-4, pp. 279-284(2006).

石倉聡・梶原真二・原田秀人・福島啓吾：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報告，第84号，pp.1-6（2009）

川田穰一・遠藤久・望月龍也・関山哲雄：新しい花き・野菜・果樹づくり 電照・補光栽培の実用技術，社団法人農業電化協会，pp.18-19（1996）.

鈴木誠一・吉村正久・佐々木厚：アグリフォトニクス 第10章，シーエムシー出版，pp.136-142（2008）.

関根征士：光放射応用学の動向と展望，*照学誌*，95-12 pp. 768-773（2011）.

塚本 心一郎：近赤外分光法による水稻葉身中窒素の診断，茨城県農業総合センタ-農業研究所研究報告，9，pp.39-43（2007）.

山本晴彦・鈴木義則・小島孝之・早川誠而・井上康・田中宗浩：近赤外域の分光反射特性による植物の葉内水分量の推定，*日本リモートセンシング学会誌*，14-4，pp. 9-17(1994).

米村浩次：農業技術大系 花卉編1，農山漁村文化協会，pp.149（1993）

第2章 夜間照明によるイネ光害回避のための照明開発

2.1 背景

屋外照明は、夜間の社会・経済活動において、安心・安全を確保する基本的なインフラの一つであるが、その一方で、障害も生じており、一部が「光害」として取り扱われている。平成10年3月に制定され、平成18年12月に改訂された「光害対策ガイドライン」（環境省，2006）では、

光害（ひかりがい）とは、良好な「光環境」の形成が、人工光の不適切あるいは配慮に欠けた使用や運用、漏れ光によって阻害されている状況、又はそれによる悪影響と定義する。

としており、屋外照明が周辺環境へおよぼす影響として、

(1) 動植物への影響

(a) 生態系

(b) 家畜および野生動物

(c) 農作物および野生植物

(2) 人間への諸活動への影響 ・ ・ ・ 以下省略

上記を上げている。なお、「農作物」が項目として指定されたのは改訂後であり、その関連法規も、未だ整備されていないのが現状である。実際、宅地と農地が隣接した地域、主要道路や交差点と接した農地では、以前より夜間照明による農作物への光害が報告されている（照明学会，1985）。とくに、わが国の主要穀物であるイネ（水稻）の光害については、その報告も多く、また長年研究されてきた（山根ら，1967；近藤ら，1972；川村，2000；吉岡ら，2001）。この他、光害による農作物への被害については、近郊農業とされるハウレンソウ、シュンギク等の野菜類（高尾，2004）においても報告されている。農作物の光害として大きな問題点は、花芽・結実の乱れを発生させる点である。日の入から日の出までの夜間に屋外照明が点灯し、農作物にその漏れ光が照射されると、暗黒が阻害されて日長環境に変化がもたらされる。初夏から秋にかけての短日条件に感応して花芽（穂）を形成させる短日性農作物は、花芽形成の遅延・阻害が

発生する。子実を収穫する短日性農作物（イネ，ダイズ等）では，屋外照明による開花遅延や子実の生育阻害は，収量低下や品質低下といった被害へと発展する。対して，春から初夏にかけて長日条件に感応して花芽を形成させる長日性農作物は，花茎の伸長や早期開花が発生する。葉を収穫する長日性農作物（ホウレンソウ，タカナ等）では，屋外照明による花茎の伸長や開花（抽だい）は，商品性を著しく低下させ，出荷不可能な状態となる。また，短日性植物より長日性植物の方が，より低照度で被害へと繋がる。

屋外照明に関しては，「光害対策ガイドライン」が改訂された翌年の平成19年9月に，「道路照明施設設置基準」の改訂により，歩道照明及び交差点照明の基準・解説の追加が行われ，明るさの推奨値が示された（国土技術政策総合研究所，2007）。さらに，この基準に則り平成23年9月には，「LED道路・トンネル照明導入ガイドライン（案）」が発表された（国土交通省，2011）。しかし，光害についての現状の対策は，偏光や遮光といった夜間の安全を優先するものであり，農家にとっての最善な解決法ではない。また，光害を懸念し，照明の設置見送りや撤去・消灯を行う場合もあり，道路の安全面も万全ではない。特に，国内の耕地面積の54.3%（約247万ha）を占める水田では，平成15年から10年間で毎年平均1.5万haが減少しているが，その内の約4分の1にあたる約4千haが宅地へと転換されており，年々水田と宅地が混在した状態へと変化していることが考えられる（農林水産省，2012）。つまり，光害の発生しやすい状態が拡大しているとも考えられ，人々が安全に通行可能な夜間の光環境を形成しつつ光害を回避する必要があるとされている。

そのためには，イネにおける光害発生のメカニズムを，屋外照明と開花機構の関係から分析することが重要になる。イネは，長日性植物のシロイロナズナと並び，遺伝子研究において短日性植物のモデル植物であり，開花に関する遺伝子が多数検出され，それらの生理学的作用の解明がなされている。夜間に屋外照明が照射され，開花が遅延・阻害される過程を説明すると，まず，開花に関与する光は，光受容体であるフィトクロムBにて

伝達される (Ishikawa et al., 2005). フィトクロムBの吸収波長域は, 緑色光から赤色光 (540~690nm) とされており, 既存の屋外照明にも含まれる波長域である. その後, 光刺激は, 概日時計の位相変化を含む開花機構へと伝達される. 開花機構では, とくに開花誘導として働く遺伝子, イネ開花誘導遺伝子 *Hd3a* の発現に影響を及ぼす (Ishikawa et al., 2005). *Hd3a* は, 短日条件下でのみ, 葉身内で発現し, 暗期開始時から徐々にその発現を増し, 暗期終了時に最大となる. そして, 光刺激は, 発現抑制へと働くことが明らかになっているが, 1回の明期の後 (翌晩) に再度暗期が確保されれば, その影響は消えるとされる. 光刺激が開花抑制となる経路は, 複雑であり, 判明している遺伝子経路 (Tsuji et al., 2011) から推定するに, 大きく2つのパターンに分けられる. 1つ目は, 光刺激が, 日長変化をもたらし, 長日条件下とした場合である. 概日時計の制御下にある *Hd1* からの *Hd3a* 制御を, 発現抑制へと変化させる. *Hd1* は, 長日・短日条件に関係なく, ほぼ同リズムで明期開始約12時間後にピークを持ち発現しているが, 限界日長より短い日長条件下では開花促進, 長い日長条件下では開花抑制へと働くことされており, これにはフィトクロムCの関与も推定されている (Ishikawa et al., 2011). しかし, 光刺激を受け, 遅延したとしても開花する理由として, *EHD1* からの *RFT1* の発現促進の存在が考えられる (Komiya et al., 2009). *EHD1* は *Hd1* とは独立でありながら, 同じく *Hd3a* とは独立に開花誘導をする *RFT1* の発現を促進する. しかし, その開花への影響は *Hd3a* 発現下でほとんどなく, *Hd3a* の発現抑制下でのみ, 遅延するものの開花を促進する. また2つ目として, 光刺激が日長変化をもたらすほどでなくとも, その照射波長域の違いにより開花への影響が変化する場合がある. 赤色光を受けた場合は, *Hd1* 自身が発現抑制され, ひいては *Hd3a* の発現抑制をもたらす. 対して青色光を受けた場合は, *Hd3a* の発現も促進する *EHD1* が発現促進される. どちらのパターンも, イネにおいて明確にその影響を分けることは不可能であり, すべての影響の総合的な結果として, 開花遅延・阻害が発生すると考えられる.

よって、屋外照明側からイネ光害の発生原因を考察すると、照射するエネルギーはもちろん、照射波長域も大いに影響することが考えられる。光受容体の吸収波長域の緑色～赤色光、とくに *Hd3a* の発現抑制を起こす赤色光の照射は光害の発生を、対して、青色光であれば *Hd3a* の発現促進を起こし、光害の回避が考えられる。しかし、既存の屋外照明は、波長域が広範囲であり、そのままでは光害の発生を避けられない。ここで、屋外照明として急速に普及している LED 照明の特性である、選択的な波長域の照射に有効性が考えられる。照明として普及している LED 照明は、一般的に白色 LED と呼ばれるが、青色 LED 素子と黄色蛍光体を組み合わせて補色の関係を利用し、擬似的に白色であると認識させている。この LED 素子は、青色以外にも近紫外域から赤色光まで多数存在し、特定の波長域（スペクトル半値幅 Δd 数十 nm）のみを発光可能であり、さらにそのスペクトルは、1 点を中心としたピーク波長となる。

また、LED は、電圧を加えた際に、直接そのエネルギーを発光エネルギーに変換する半導体素子であるため、スイッチを高速に ON/OFF と切り替えても、そのタイミングで発光を ON/OFF と切り替え可能である。つまり、光周期として発光制御、パルス発光周波数とデューティ比の設定が可能である。パルス発光周波数とは、1 秒間あたりの発光周期 (Hz) で表し、数が大きいほど速く点滅する。デューティ比は、パルス発光周波数で設定された 1 周期中の点滅の「点 (灯)」の割合を百分率 (%) で表し、数が小さいほど暗黒時間が長くなるものの、1 度の点灯のエネルギーはその分大きくなる。LED 照明は、消費電力削減の観点から、発光制御を行うことが多いが、ヒトの視覚が連続光だと認識する最低の周波数（臨界融合周波数）の約 50 Hz より、高周波数に設定し連続光のように認識させている。しかし、植物の反応可能な周波数は、それとは異なり、より高周波数の光の点滅に反応すると報告されている。植物工場で栽培が盛んなサラダナを供試作物とし、明期に発光周期 400 μ s (= 2500 Hz)、デューティ比 50 % と設定した白色 LED を照射した場合は、成長率、光合成速度ともに連続光と比較して 23 % 増加した (森ら, 2002)。この

理由として、光化学系IIの反応中心クロロフィルP680の還元時間が $200 \mu\text{s}$ であり、それが律速条件となりパルス幅 $200 \mu\text{s}$ (明暗周期 $400 \mu\text{s}$)の間欠照明によって単位光量当たりの光合成速度が大きくなったとしている。また、発光制御の結果、連続光照射時よりも光合成速度が減速した設定も存在した。つまり、発光制御を行ったLED照明は、植物内で起こる反応系の速度に影響を及ぼすと考えられる。

このように、光害は、屋外照明の環境整備が進むのに反し、まさに影の存在として、今なお明確な解決をされずに問題であり続けているが、発生原因解明の手法として遺伝子解析という新たなツールが見つかり、さらにLED照明の普及で、その解決に向けた環境は整ったと言えよう。

2.1.1 目的

イネを供試作物とし、人々が安全に通行可能な夜間の光環境を形成しつつ光害を回避するため、水田に漏れ光が照射された場合でも光害が発生しない光質、発光制御の光条件の探索を行った。照明については、2.1で述べた理由から、LED照明を使用し、その光質（波長域）・発光制御（パルス発光周波数・デューティ比）と光害の発生程度を調査し、その結果から、光害回避が予想された照明を実際に防犯灯として設置し、実証試験を行った。なお、本研究では、屋外照明の開発を目的としたため、その設置基準として一般的に使用される照度（lx）を光環境の単位として用いた。

2.2では、「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」とし、夜間に照射されたLED光源の波長域と、その発光制御に伴うイネの光害程度、特に出穂（開花）への影響を調査した。また、合わせて、イネ光害の調査について、開花誘導遺伝子 *Hd3a* の発現定量から、実際の出穂より早期に開花時期を推定することを試みた。環境変化に呼応する *Hd3a* の発現は、播種後約35日に比較的顕著となるため、その時期に定量することで、従来の圃場試験より早期に、ひいては多数の試験設定を調査することが可能となる。また、夜間照射以外の影響をできるだけ排除するため、イネは人工気象器を使用し栽培した。

2.3は、2.2を受け、「発光制御を行った混合LED夜間照射がイネ開花および収量に及ぼす影響」とし、探索結果からイネ光害回避が予測されたLED照明を用い、その夜間照射下で生育したイネの収量および品質への影響を調査するとともに、防犯灯として実際に水田圃場に設置した場合の同影響を調査した。イネの栽培に関しては、人工気象器内栽培と合わせ、複数圃場での検証、また複数品種への影響も調査した。

2.4は、「イネ光害回避型照明の視認性評価」とし、一般的な防犯灯として普及しつつある白色LED照明と、単色LED光源の中でも視認性が比較的高い緑色LED照明と比較し、防犯灯としての視認性評価を行った。

2.1.2 引用文献

- 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).
- Ishikawa Ryo, Aoki Mayumi, Kurotani Ken-ichi, Yokoi Shuji, Shinomura Tomoko, Takano Makoto, Shimamoto Ko : Phytochrome B regulates Heading date 1 (Hd1)-mediated expression of rice florigen *Hd3a* and critical day length in rice, *Mol Genet Genomics*, 285, pp. 461-470 (2011).
- Komiya R, Ikegami A, Tamaki S, Yokoi S, Shimamoto K: *Hd3a* and *RFT1* are essential for flowering in rice, *Development*, 135, pp. 767-774 (2008).
- Tsuji Hiroyuki, Taoka Ken-ichiro, Shimamoto Ko: Regulation of flowering in rice: two florigen genes, a complex gene network, and natural variation, *Current Opinion in Plant Biology*, 14, pp. 45-52 (2011).
- 川村和史：水銀灯による夜間照明が水稲の生育，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).
- 環境省：光害対策ガイドライン（平成18年12月改訂版），
http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=9158&hou_id=8023 (2006)
- 国土技術政策総合研究所：国総研アニュアルレポート2008，pp. 31，
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoku/2008annual/annual018a.pdf> (2008)
- 国土交通省：LED道路・トンネル照明導入ガイドライン（案），
<http://www.mlit.go.jp/common/000186683.pdf> (2011)
- 近藤晃，太刀川洋一：水稲に対する終夜照明の影響，群馬県農業試験場報告，13，pp. 75-85 (1972).
- 照明学会：「農作物に対する夜間照明の影響」研究調査委員会報告書，p58 (1985).
- 高尾保之：夜間照明による野菜への影響，照学誌，88-6，pp.

330-335 (2004).

農林水産省：平成24年耕地面積（7月15日現在）， http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/pdf/menseki_kouti_12.pdf (2012).

森康裕，高辻正基，安岡高志：白色LEDパルス光がサラダナ生育に及ぼす影響，植物工場学会誌，14-3，pp. 136-140 (2002).

山根国男，小谷倫三，野村正：夜間照明による水稻生育の被害，農業技術，22，pp. 451-455 (1967).

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(品種・遺伝資源)，日本作物學會紀事，70-3，pp. 387-392 (2001).

2.2 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

2.2.1 材料および方法

2.2.1.1 *Hd3a*の発現と出穂期の関係について

供試作物は、イネ（品種コシヒカリ，*Oryza sativa* L. cv. Koshihikari）を用いた。コシヒカリは、川村の報告（2000）で5 lx以上の照度で出穂遅延が顕著であるとされ、夜間照明の影響を受ける水田での栽培を避けるよう提案されている。またイネは、遺伝子研究におけるモデル植物であり、開花に関する遺伝子が多数検出され、それらの生理学的作用等の解明がなされている。特に、イネの開花には開花誘導遺伝子 *Hd3a* により作り出されたタンパク質が関与していることが判明した（Ishikawa et al., 2005）。これらの研究成果より、イネの開花は、開花誘導遺伝子 *Hd3a* の発現で定量され、実際よりも早期に開花時期を判断することが可能となった。

そこで始めに、イネにおける *Hd3a* の発現と出穂期の関係を解明するため、人工気象器を用い短日条件、かつ暗期照射を行い生育させ、*Hd3a* 発現の定量および出穂期の確認を行った。育苗は浸種（写真2-2-1a）、催芽を経た後（写真2-2-1b）、人工気象器（㈱日本医化器械製作所製 LPH-220SP, 以下220型）を用い、明期8時間・25℃／暗期16時間・20℃、相対湿度70%の短日条件下で生育させた。明期とは、人工気象器の蛍光灯をすべて点灯した状態とした。草丈が35 cm程度になった出芽後日数16日に、直径10 cm×高さ15 cmのポットに3本ずつ移植させ、4台の人工気象器（㈱日本医化器械製作所製 LPH-350SP, 以下350型）に分配し、明期8時間・30℃／暗期16時間・20℃、相対湿度70%で生育させた。4台の人工気象器の内3台は、白色LED光源（日亜化学工業㈱製、NSPW510DS）を20個連結させた照明装置を、電源装置（宇部興機㈱製、特注）にてパルス発光周波数100 Hz、デューティ比10%に設定し、暗期に株上の水平面照度が5 lx（以下5 lx区）、10 lx（以下10 lx区）、20 lx（以下20 lx区）で照射させた。残る1台は、対照区として暗期に照射を行わない区（暗黒）を設けた。



a



b



c



d

写真2-2-1 育苗の様子

*Hd3a*発現の定量は、Ishikawaら（2005）を参考にし、*Hd3a*の発現への影響が大きくなる暗期照射の時期が、播種後4～5週目（主茎の葉令が6に達した時）であることから、すべての区で主茎の葉令が6に達し、草丈が60 cm程度の時（出芽後日数51日目・照射後日数16日目）に行った。また、*Hd3a*の発現への暗期照射の影響は、明期の中に消え、*Hd3a*の発現が最大となる時間が暗期終了直前であることから、明期始め（明期の照明が点灯）間際に、各主茎の第5葉を採取し液体窒素で凍結させた。その後、凍結破碎装置（株式会社トクケン製、TK-AM5）で凍結破碎し、RNAの抽出を行った {RNeasy Plant Mini Kit（株式会社QIAGEN社製）を用い、QIAcube（株式会社QIAGEN社製）にて自動処理した}。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、*Hd3a*遺伝子特異プライマーセットを用いた。ハウスキーピング遺伝子は、ubiquitin

遺伝子 (*Ubq*) とした。合成したcDNA, 遺伝子特異プライマーセットおよびQuantiTect SYBR Green (株QIAGEN社製) もしくはRotor-Gene SYBR Green (株QIAGEN社製) を用い, QIAgility (株QIAGEN社製) にて自動分注した。PCR反応, 蛍光検出および定量解析は, Rotor-Gene Q (株QIAGEN社製) を用いた。定量解析は, *Hd3a*遺伝子と*Ubq*遺伝子との存在比で求め, 対照区の存在比を「1」とした場合の各照射区の存在比を表した (式1)。

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

なお, 正確な*Hd3a*発現を確認するため, 平均値の標準偏差が0.25以上となった場合は, 植物体の育成から実験を繰り返し, 外れ値を平均から除外し結果とした。また, PCR反応に使用した両試薬については, 同サンプルにて比較を行い, 同様の結果を示すことが確認されたため併用した。

出穂期の確認は, 各区の*Hd3a*発現の定量に使用しなかったポット全て (4ポット) の有効茎を対象とし, 穂を目視で確認できた割合が50%に達した日を出穂期とした。また, 対照区の出穂期を0日とし, そこから照射区の出穂遅延日数を求めた (式2)。

$$\text{出穂遅延日数} = \text{照射区の出穂期} - \text{対照区の出穂期} \quad (2)$$

2.2.1.2 *Hd3a*の発現への波長域および発光制御の影響

次に, 光源の波長域および発光制御がイネ出穂へ及ぼす影響を解明するため, 1回の暗期のみ任意の光源を照射し, *Hd3a*発現を定量した。浸種, 催芽を経た後, 直径3 cm×高さ4 cmの穴が2行3列連結したポット (以下連結ポット) を用い, 1穴に2粒ずつ播種した (写真2-2-1c)。育苗は, 人工気象器 (220型) を用い, 明期8時間・25℃/暗期16時間・20℃, 相対湿度70%の短日条件下で生育させた (写真2-2-1d)。出芽後日数6日目からは, 明期8時間・30℃/暗期16時間・20℃, 相対湿度70%で生育させた。

*Hd3a*発現の定量は, 2.1.1と合わせ, 主茎の葉令が6に達し, 草丈が50 cm程度の時 (出芽後日数35日程度) に行った。まず,

出芽後日数35日もしくは36日の暗期終了間際に，連結ポットの1行の各主茎（3穴×2本）の第5葉を採取し液体窒素で凍結させ，これを対照区とし*Hd3a*発現の定量を行った．その後，連結ポットの残り1行を照射区として，明期8時間・30℃／暗期16時間・20℃に設定した人工気象器（㈱日本医化器械製作所製LH-100S）に移植した（写真2-2-2）．移植当日の1回の暗期のみ，表2-2-1および図2-2-1に詳細を示した近紫外色LED光源（以下，近紫外），青色LED光源（青），緑色LED光源（緑），黄緑色LED光源（黄緑），黄色LED光源（黄），赤色LED光源（赤）（すべてトリコン㈱製）を各々20個連結させた照明装置（写真2-2-3）を用いて，電源装置にて任意にパルス発光周波数およびデューティ比を設定し，株上の水平面照度を5 lxで暗期照射させた．5 lxとは，(公社)日本防犯設備協会が定める防犯灯の照度基準(2005)において，クラスAにあたる一般的な防犯灯の照度であり，本実験では，このクラスの防犯灯により夜間照射を受けたことを想定した．次に，対照区の採取の翌日である，出芽後日数36日もしくは37日（照射後日数1日目）の暗期終了間際に，各主茎の第5葉を採取し液体窒素で凍結させ，これを照射区とし*Hd3a*発現の定量を行った．

以後の遺伝子解析の方法は，2.2.1.1と同様であった．



写真2-2-2 対照区サンプリング後の様子

表 2-2-1 各LEDの詳細

色光	タイプ	主波長 (nm)
近紫外	HNV2-5S60-F1	403
青	ZBL3-5S60-F1	465
緑	HGR2-5A60-F1	523
黄緑	TGS-A500A-F01	576
黄	SYL5-5A60-E1	598
赤	NRK4-5A30-F1	652

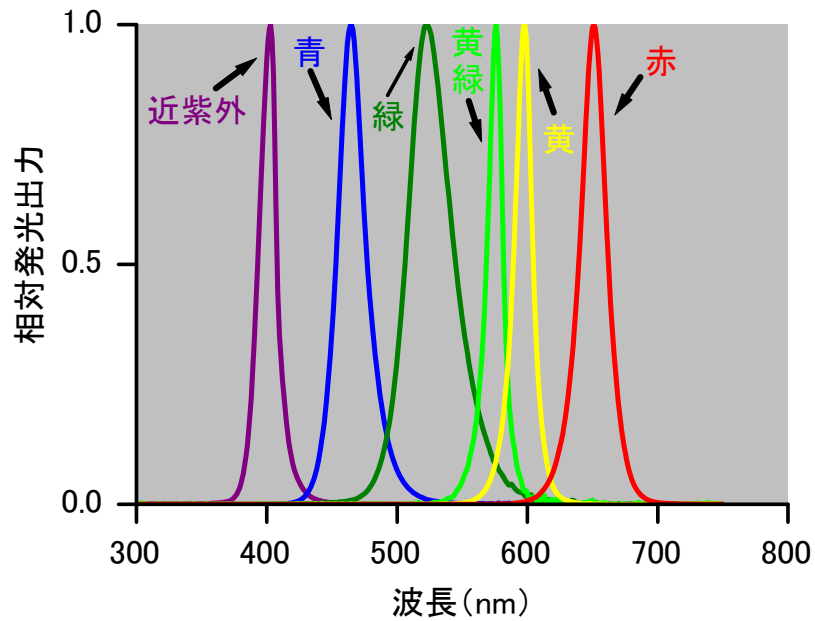


図 2-2-1 各LEDの波長域

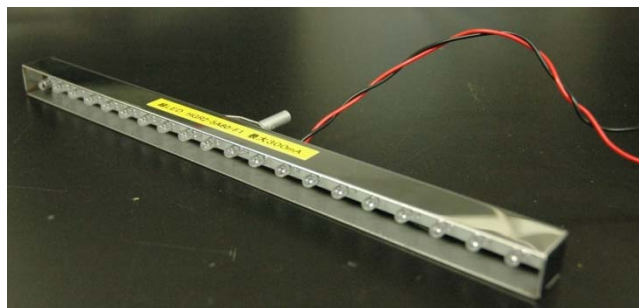


写真 2-3 LED光源

2.2.1.3 探索結果から導かれた混合照明について

実験方法2.2.1.2の結果から，青，緑，黄緑色光の*Hd3a*発現が最大となる各発光制御を用いた混合照明の暗期照射が，出穂に及ぼす影響を解明するため，生育時から暗期照射を行い栽培し，*Hd3a*発現および出穂期を確認した．

育苗は，2.2.1.2と同様の設定で行い，連結ポット3個を同時に生育させ，主茎の葉令が6に達し，草丈が50cm程度の時（出芽後日数35日）に対照区として，1つの連結ポットから1行の各主茎（3穴×3本）の第5葉を採取し液体窒素で凍結させ，*Hd3a*発現の定量を行った．残りの2ポットは，人工気象器（220型）2台それぞれに1ポットずつ分配し，照射区と対照区を設定した．照射区では，暗期に青，緑，黄緑のLED光源を任意の発光制御で混合し，株上の水平面照度を5 lxで照射した．また，照射区には合わせて，対照区として*Hd3a*発現の定量に使用した連結ポットの残り1行も移植し，1回のみ暗期照射を行った後（照射後日数1日目）2.2.1.2と同様に照射区の*Hd3a*発現を定量した．移植後は，明期8時間・30℃／暗期16時間・20℃，相対湿度70%で生育させた．ただし，分けつをすべて切除し，主茎のみを生育させた．出穂期の確認は，各区の全ての主茎を対象とし，2.2.1.1と同様に目視で確認し，出穂期および出穂遅延日数を求めた．

2.2.2 結果および考察

2.2.2.1 *Hd3a*の発現と出穂期の関係について

暗期の照度と *Hd3a*発現および出穂遅延日数の関係を図2-2-2に示した。*Hd3a*発現(●, 黒線)は, 対照区を1とした場合, 5 lx区では0.40, 標準誤差0.04(以下 0.40 ± 0.04), 10 lx区では 0.03 ± 0.00 , 20 lx区では 0.03 ± 0.01 であった。*Hd3a*発現は, 照度の増加とともに減少する傾向を示した。

出穂遅延日数(□, 緑線)については, 5 lx区で12.8日, 標準誤差0.9日(以下 12.8 ± 0.9 日), 10 lx区では 24.3 ± 1.5 日, 20 lx区では 21.0 ± 0.4 日の遅延であった。コシヒカリは, 照度の増加とともに出穂が遅延すると吉岡ら(2001)が報告しており, 同様の傾向を示した。

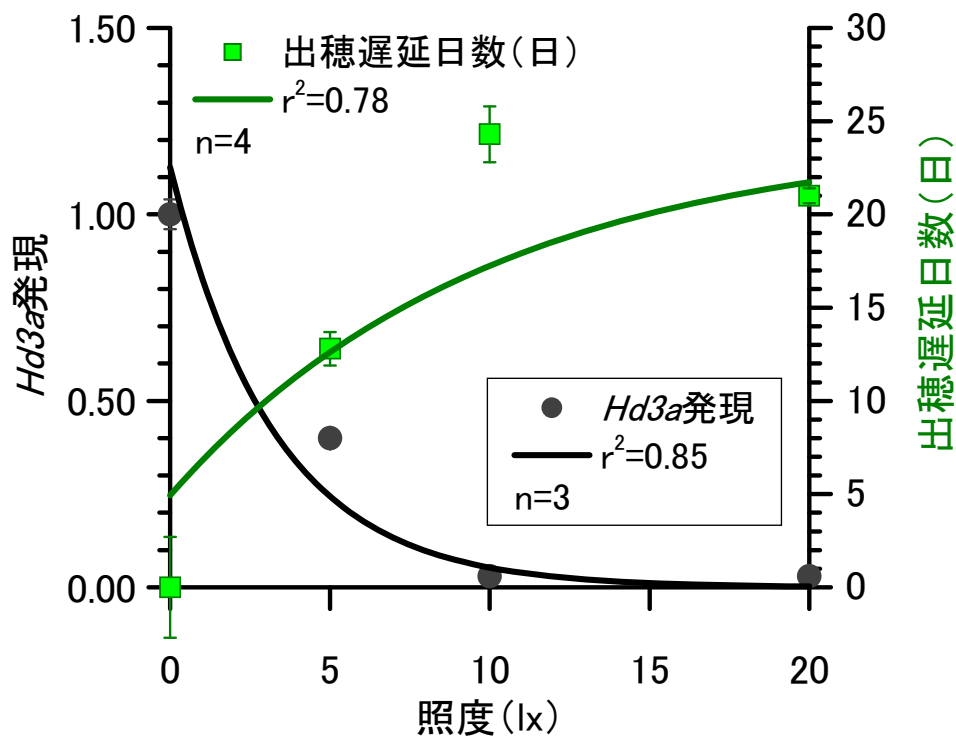


図2-2-2 各照度における *Hd3a*発現および出穂遅延日数

以上の結果から、*Hd3a*発現と出穂遅延日数の関係を図2-2-3に示した。*Hd3a*発現の減少とともに出穂遅延日数は増加し、相関係数 $r = -0.99$ 、標準偏差 $SD = 0.08$ となった。また原田（1997）の報告から、ヒノヒカリの場合は、出穂遅延（促進）3日以内であれば収量に影響はないと考えられ、コシヒカリでも同様の傾向であると考えられる。よって、収量に影響を及ぼさない出穂遅延（促進）日数3日以内となる*Hd3a*発現の範囲は、対照区の発現を1とした場合、0.85以上1.10以下の発現であると推定された。

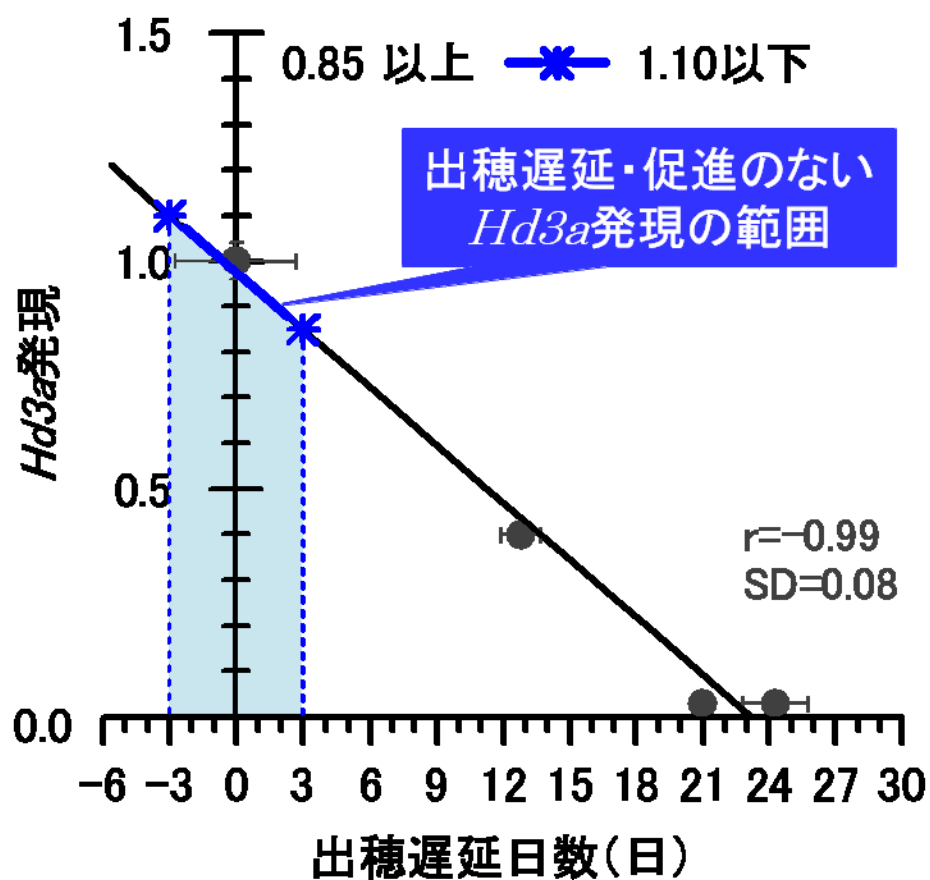


図2-2-3 各照度における*Hd3a*発現および出穂遅延日数

2.2.2.2 Hd3aの発現と出穂期の関係について

Hd3a発現と、デューティ比100%で暗期照射した光源の波長域との関係について図2-2-4に示した。近紫外，黄緑，黄，赤色光ではHd3a発現が低く，図2-2-3の関係から推定すると，3日以上の出穂遅延が予測された。それに対し，青色光は，Hd3a発現が 1.01 ± 0.03 であり対照区と同程度に高く，緑色光は， 0.86 ± 0.03 と対照区から約14%減少したが，出穂遅延日数3日以内に予測されるHd3a発現であった。阪部らの報告（2006）では，460 nmを主波長とする青色光は，ヒノヒカリの出穂への影響がほとんどないとしており，コシヒカリを対象とした本研究でも同様の結果となった。また，山田らの報告（2006）では，520～540 nmを主波長とする緑色ランプを用いた害虫防除照明は，ハウレンソウの抽台（花芽分化）への影響が少なく1割程度としており，コシヒカリを対象とした本研究でも同様の結果となった。

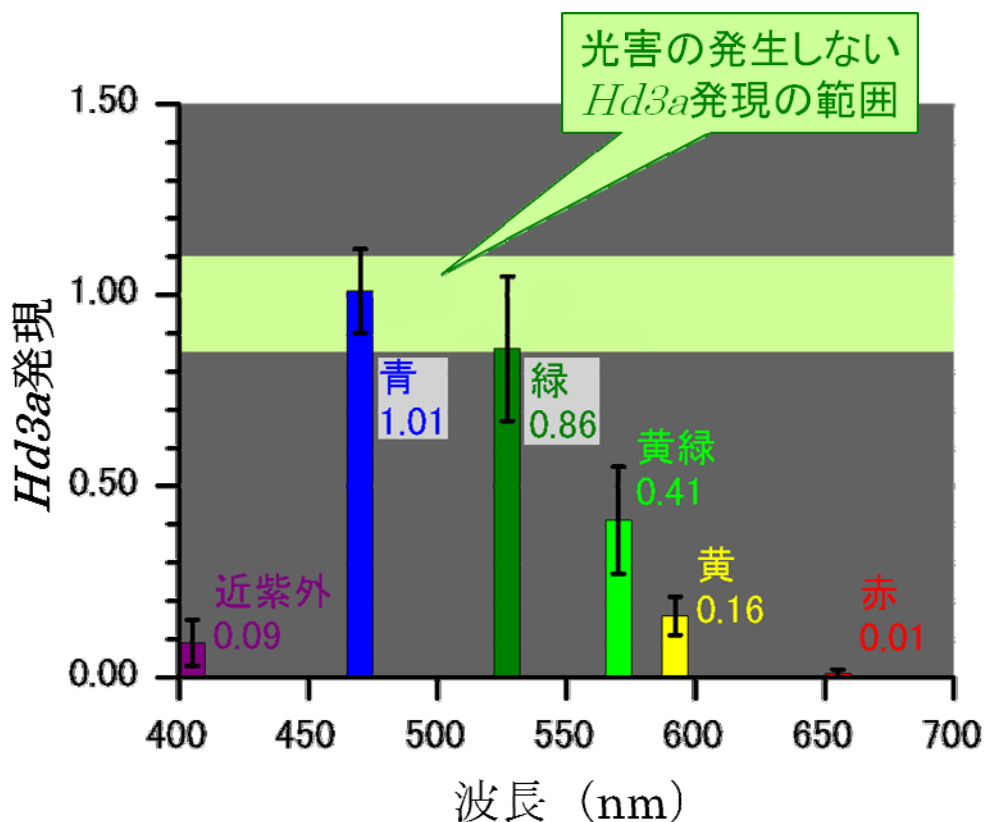


図2-2-4 各波長域の光源下でのHd3a発現

次に、青色光について *Hd3a* 発現と暗期照射した光源のパルス発光周波数およびデューティ比との関係について 図 2-2-5 に示した。ポイントの大きさは、*Hd3a* 発現を表し、色は出穂遅延（促進）の程度を示しており、青色が出穂促進、水色が出穂遅延・促進なし、白色が出穂遅延である。パルス発光周波数が 500～1000 Hz の範囲の *Hd3a* 発現は比較的高く、最大値がパルス発光周波数 700 Hz、デューティ比 60 % の場合であり *Hd3a* 発現は 1.21 ± 0.05 (n=6) であった。この *Hd3a* 発現は、発光制御を行わないデューティ比 100 % 照射の場合よりも、約 1.2 倍と増加しており、出穂遅延日数の予測も -3 日以下となり、出穂促進の影響が予測された。出穂遅延日数 3 日以内と予測されるパルス発光周波数・デューティ比の設定は、300～500 Hz・60% 付近、2700 Hz・60% 付近、2500 Hz・10% 付近であった。それに対し、パルス発光周波数が、250 Hz 以下やデューティ比 70 % 以上など、発光制御を行わない場合よりも *Hd3a* 発現が低下する発光制御の設定値があることも示された。

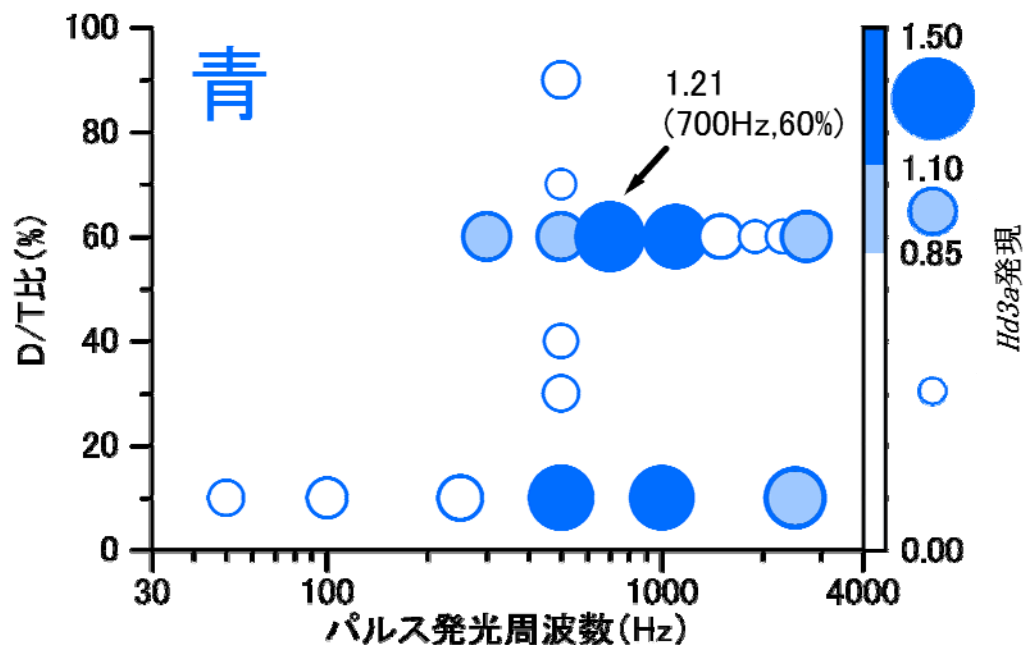


図 2-2-5 発光制御と *Hd3a* 発現との関係（青色光）

同様に、緑色光についての結果を図2-2-6に示した。パルス発光周波数が1000 Hz以下かつデューティ比30～60 %の範囲の *Hd3a*発現は比較的高く、最大値は、発光制御がパルス発光周波数50 Hz、デューティ比60 %の場合であり、*Hd3a*発現は 1.35 ± 0.06 (n=6)であった。この*Hd3a*発現は発光制御を行わない場合よりも、約1.6倍と増加しており、青色光と同様に促進の影響が予測された。出穂遅延日数3日以内と予測されるパルス発光周波数・デューティ比の設定は、50 Hz・90 %付近、1000 Hz・60 %付近、2500 Hz・10 %付近であった。それに対し、パルス発光周波数が2500 Hz、デューティ比20 %以下など、発光制御を行わない場合よりも*Hd3a*発現が低下する発光制御の設定値があることも示された。

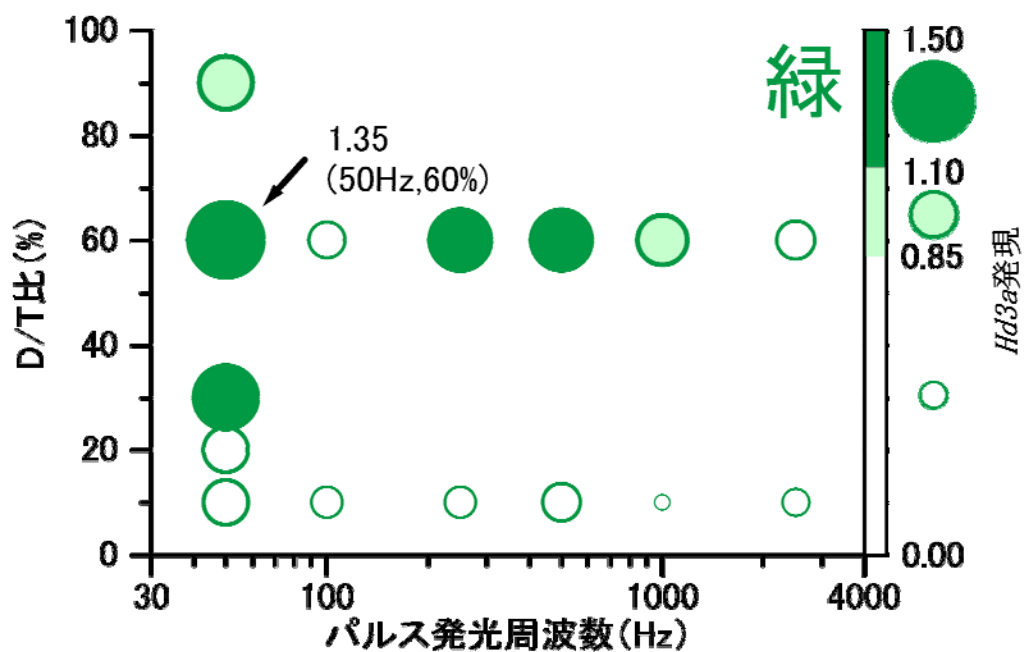


図2-2-6 発光制御と *Hd3a*発現との関係 (緑色光)

同様に，黄緑色光についての結果を図2-2-7に示した．パルス発光周波数が700～1100 Hzの範囲かつデューティ比70 %の範囲の*Hd3a*発現は比較的高く，最大値は，発光制御がパルス発光周波数700 Hz，デューティ比70 %の場合であり，*Hd3a*発現は 1.02 ± 0.03 (n=9)であった．この*Hd3a*発現は発光制御を行わない場合よりも，約2.5倍と増加しており，出穂遅延日数の予測が3日以内であった．同様に，パルス発光周波数・デューティ比の設定が，700～1900 Hz・70 %付近の場合も3日以内であった．しかし，青，緑色光と比較すると全体的に*Hd3a*発現が低かった．

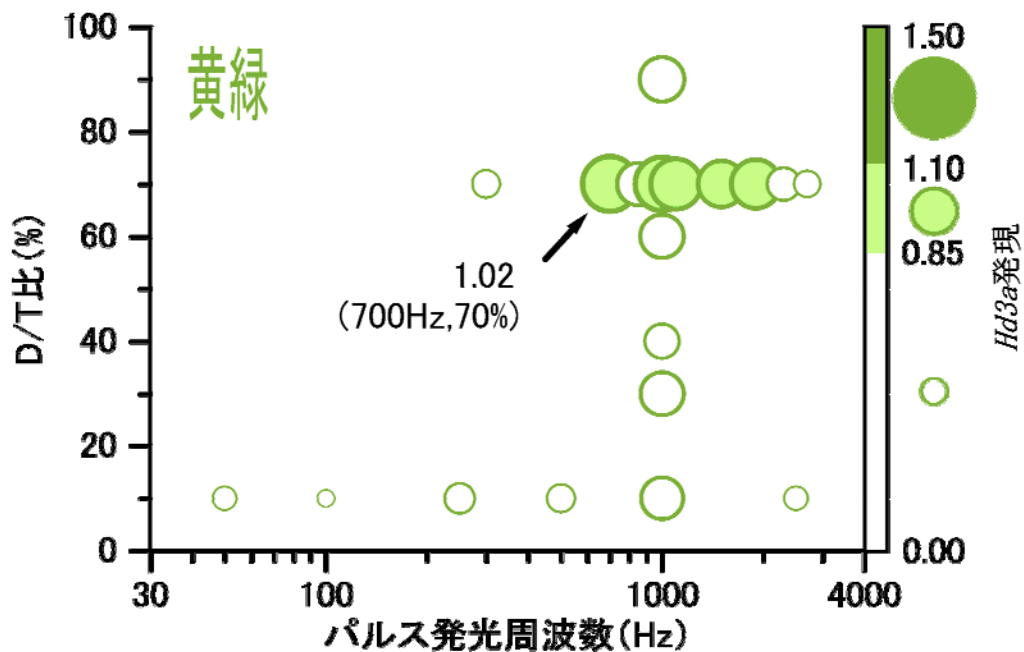


図2-2-7 発光制御と*Hd3a*発現との関係（黄緑色光）

2.2.2.3 探索結果から導かれた混合照明について

青，緑，黄緑の単色光で暗期照射した場合は，それぞれに出穂遅延日数3日以内となる発光制御の設定が存在したが，一般的な防犯灯と比較すると，演色性や視認性評価の点で劣る．著者らは，白色LEDを光源とする照明と，緑色LED単色を光源とする照明の視認性を比較したが，緑色LEDの視認性評価は低かった(2009)．そこで，青，緑，黄緑色光の3色を図2-2-8のような波長分布で混合し，平均演色評価数Ra=66となるように設定した．パルス発光周波数・デューティ比の設定値は，青を700 Hz・60%，緑を50 Hz・60%，黄緑を700 Hz・70%とした．

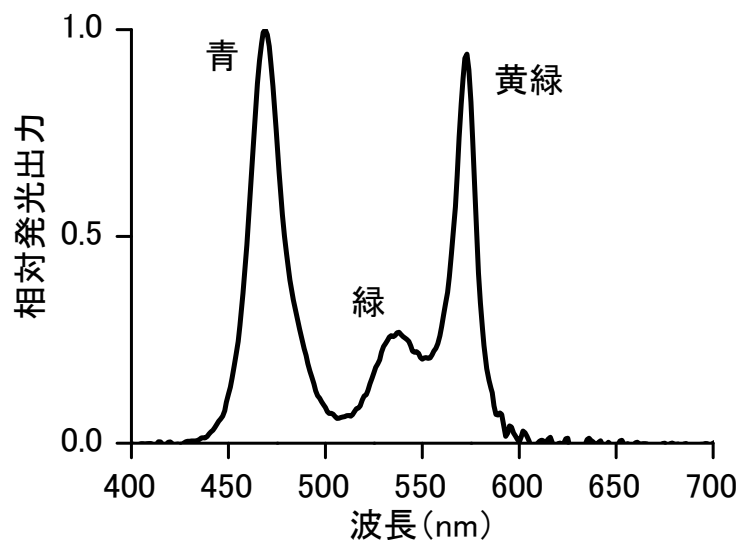


図2-2-8 混合照明の照射波長域

この混合照明を照射した場合の *Hd3a* 発現は、 0.88 ± 0.05 ($n=6$) であった。それぞれ単色を照射した場合より、*Hd3a* 発現が減少したが、出穂遅延日数の予測は2.2日であり収量に影響のないとされる3日以内であった。

Hd3a 発現の調査後に、継続して混合照明を照射し、出穂期を調査した結果を図2-2-9に示した。出穂開始は、対照区の方が比較的早く、出穂率が50%以上に達した日である出穂期では、対照区が出芽後日数78日、照射区が79日であり、出穂遅延日数は1日であった。出穂完了となる出穂率100%は、対照区、照射区ともに出芽後日数84日であった。

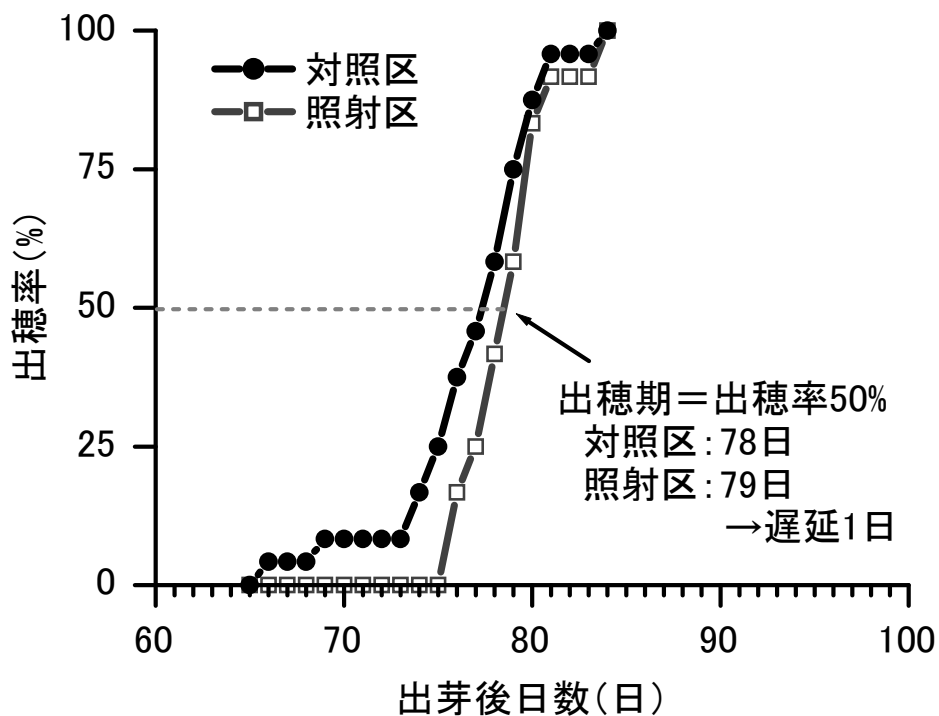


図2-2-9 混合照明照射時の出穂期

2.2.3 総合考察

イネ開花誘導遺伝子 *Hd3a* の発現の定量から、光害の発生程度の推定を行い、暗期に照射された光源の波長域、パルス発光周波数およびデューティ比にともなうイネの出穂への影響を調査した。その結果、*Hd3a* 発現と出穂遅延日数に負の相関関係が認められた。この関係から、収量に影響を及ぼさない出穂遅延（促進）日数3日以内となる *Hd3a* 発現の範囲は、対照区の発現を1とした場合、0.85以上1.10以下であると推定された。この関係を元に評価すると、発光制御を行わない場合、青・緑色LED光源は、出穂遅延への影響が小さく、近紫外・黄・赤色LED光源は影響が大きく出穂遅延を起こすことが示唆された。黄緑色LED光源は、発光制御を行わない場合の *Hd3a* 発現が 0.41 ± 0.05 であり出穂遅延の発生が予測されたが、パルス発光周波数を700 Hz、デューティ比を70%とした場合では、*Hd3a* 発現が 1.02 ± 0.03 となり出穂遅延への影響が小さくなった。さらに青、緑色LED光源では、パルス発光周波数・デューティ比をそれぞれ、700 Hz・60%、50 Hz・60%と設定した場合は、出穂促進への影響が予測された。また、青、緑、黄緑LED光源において最大の *Hd3a* 発現となった発光制御を用いた混合照明を照射した場合は、*Hd3a* 発現は、 0.88 ± 0.05 となり出穂遅延日数の実測値は1日であった。

以上のことから、夜間に照射する光源の波長域の選択および発光制御により、対照区（暗黒）での出穂期に近づける（遅延3日～促進3日以内）ことが可能であると示唆された。

2.2.4 引用文献

- 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).
- 川村和史：水銀灯による夜間照明が水稲の生育，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).
- 公益社団法人日本防犯設備協会：SES E1901-1 防犯灯の照度基準，p. 5 (2005).
- 阪部俊也，笹岡元信，杉山高世，中野智彦：植物の生育に悪影響を与えない照明灯の開発研究，研究紀要，42，pp. 15-20 (2006).
- 原田皓二：水稲に対する終夜照明被害の品種間差と照明中断による回避，九州農業研究成果情報，12(上)，pp. 39-40 (1997).
- 原田陽子，山本晴彦，岩谷潔，森博隆，山北敦子：光害回避型照明の視認性評価，カラーフォーラムJAPAN2009論文集，pp. 41-44 (2009).
- 山田真，内田達清，倉光修，向阪信一，西村唯史，蟻川謙太郎：減農薬・無農薬に向けた害虫防除照明，松下電工技報，54-1，pp. 30-35 (2006).
- 吉岡秀樹，初山聡，川越博，菊川 憲明：夜間照明が早期水稲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(品種・遺伝資源)，日本作物學會紀事，70-3，pp. 387-392 (2001).

2.3 発光制御を行った混合LED夜間照射が

イネ開花および収量に及ぼす影響

2.3.1 材料および方法

2.3.1.1 人工気象器栽培下での収量および品質への影響

供試作物は、イネ（品種コシヒカリ）を用いた。2.2で述べたように、コシヒカリは、青・緑・黄緑色LEDを用いて発光制御を行った混合LED照明（以下、混合LED照明）は、5 lx照射下で出穂遅延がほぼ発生しないことが確認されている。そこで、より高照度の10 lx照射下での出穂期および収量、品質の調査を行った。

人工気象器（350型）を用いて栽培し、栽培環境のうち、日長および気温設定は、県内の水稻うるち米生産の72.9%がコシヒカリである石川県の主要ステージ（以下、石川）、同じく53.8%がコシヒカリである京都県の主要ステージ（以下、京都）を参考にした（農林水産省，2010）。

石川設定では、石川県金沢市の天文日長をモデルとし、人工気象器の明期・暗期切り替えを行った。明期とは、人工気象器の蛍光灯（Hf型32 W×16灯，3波長形昼白色20 W×4灯）をすべて点灯した状態（約23,000 lx）とした。気温は、石川県加賀市アメダス栢野の気温データをモデルとし、人工気象器の温度設定を行った。1979年から2006年の24時間別気温データを「気象データベース地上観測version2.20」（財団法人 気象業務支援センター）から抽出し、時間毎の平年値を作成し、さらに3時間毎、5日毎に平均した。京都設定では、京都府京丹後市の天文日長、京都府京丹後市アメダス間人の1977年から2006年の24時間別気温データをモデルとし、人工気象器の明期・暗期切り替え、温度設定を行った。図2-3-1には、モデルとしたアメダス栢野、間人の24時間別気温のうち、日最高および日最低気温の推移を示した。イネ栽培期間となる5月1日から9月30日において、両モデル地域の日最高気温に差はないものの、日最低気温には平均2.5℃の差があり、期間を通して栢野が低かった。

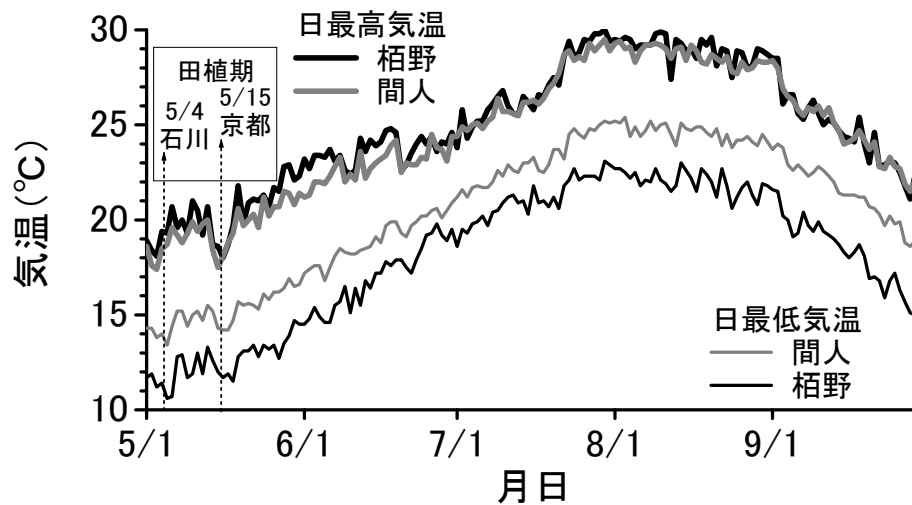


図2-3-1 モデルとした地域の気温の推移

図2-3-2には、人工気象器の温度設定値のうち日最高および日最低温度、および明期の推移を示した。石川設定（a石川）では、石川県加賀地方の田植期（移植期）の平年が5月4日（農林水産省北陸農政局，2009）であることから、移植を行う出芽後日数20日（二十日苗）が5月4日となるように、出芽後日数0日を4月14日と設定した。浸種、催芽を経た後、育苗として出芽後16日までは、明期25℃・暗期20℃の温度設定下で栽培した。出芽後日数17日以降は、石川設定にて温度設定を行った。図2-3-3には、例として石川設定の出芽後日数20日の一日の詳細な設定を示した。京都設定（b京都）では、京都府北部地方の田植期の平年が5月15日（農林水産省近畿農政局，2009）であることから、出芽後日数0日を4月25日と設定した。石川設定と同様に、出芽後13日までは、明期25℃・暗期20℃の温度設定下で栽培し、出芽後日数14日以降は、京都設定とした。

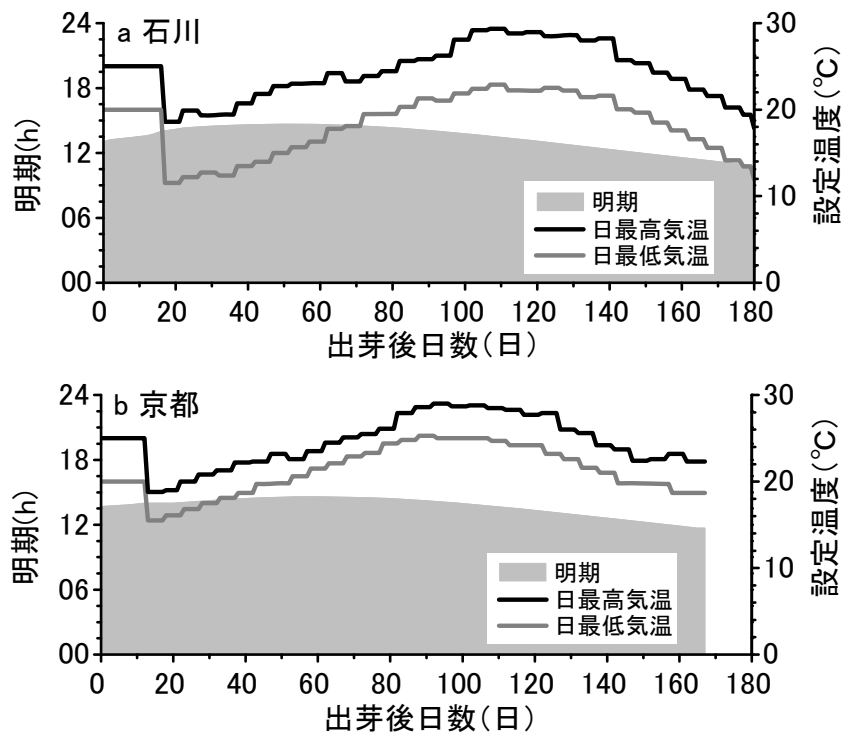


図 2-3-2 明期および温度設定

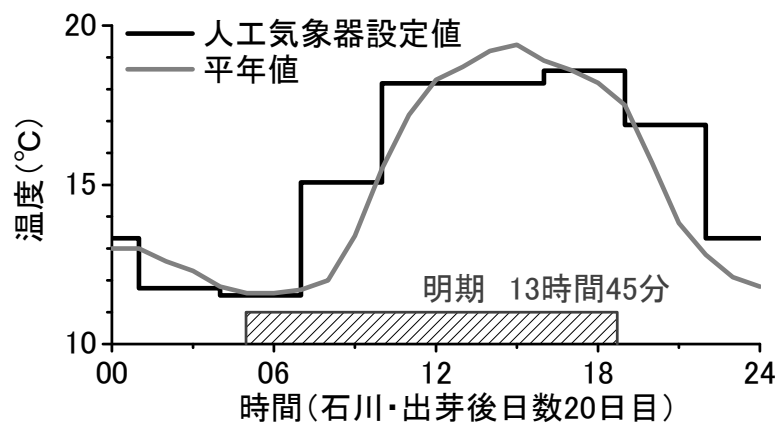


図 2-3-3 1日の温度変化（出芽後日数 20 日目）

両設定ともに、出芽後日数20日に、直径10 cm×高さ15 cmのポットに3本ずつ移植させ、2台の人工気象器内でそれぞれ4ポットを栽植密度19.6株/m²となるように配置させ、水耕栽培を行った。人工気象器2台のうち1台を照射区とし、石川設定では、出芽後日数26日から、京都設定では出芽後日数21日から暗期照射を開始した。照射区では、表2-3-1に示した各LED光源（すべてトリコン(株)製）を連結させた混合LED照明を電源装置（宇部興機(株)製，特注）にてパルス発光周波数およびデューティ比を設定し、株上の平均水平面照度（横河メータ&インスツルメンツ(株)製，51002）が10 lxで終夜照射させた（図2-3-4）。なお、照度設定は、イネの草高が5 cm高くなる毎に行い、草高が70 cmを越えるまで続けた。残り1台の人工気象器は、対照区として暗期照射を行わず暗黒とした。

表2-3-1 混合LED照明の詳細（屋内試験）

色光	タイプ	主波長 (nm)	デューティ比 (%)	パルス発光 周波数(Hz)
青	ZBL3-5S60-F1	465	60	700
緑	HGR2-5A60-F1	535	60	50
黄緑	TGS-A500A-F01	576	70	700

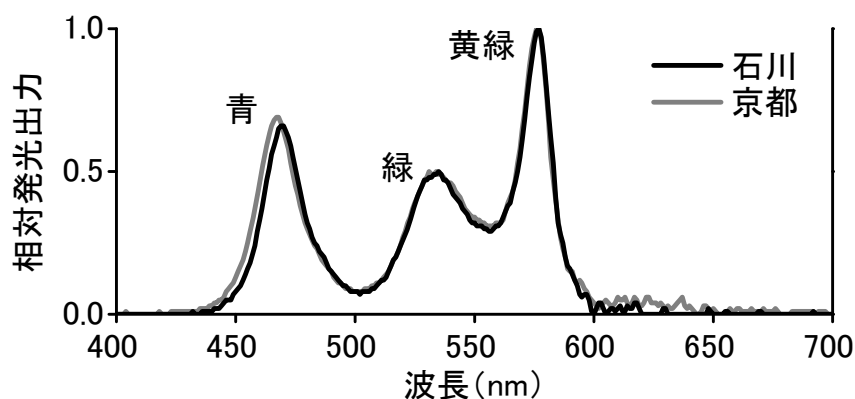


図2-3-4 混合LED照明の照射波長域（屋内試験）

出穂期の確認は，各区の4ポット全ての有効茎を対象とし，2.2.1.1と同様に目視で確認し，出穂期および出穂遅延日数を求めた．刈取・収穫は，対照区の出穂期から日平均気温の積算が1000℃となる日に行い，石川設定で出芽後日数181日に，京都設定で168日に行った（写真2-3-1）．各区の4株すべてを対象とし，株毎に個別に調査を行った後，各区で平均した．一株あたりの穂数を数えた後，1株当たりの穂数（穂/株）を算出した．その後脱穀を行い，一穂籾数（粒/穂）を数えた．籾は，比重1.06の塩水で比重選を行い，登熟米とくず米に分け，それぞれの1株あたりの籾数（粒/株）を数え，登熟籾数を全籾数で除しその百分率から登熟歩合を算出した．登熟米は，籾すり後に玄米重を計測し，千粒重（g）を算出した．さらに玄米は，穀粒判別機（株式会社サタケ製，RGQ I 10B）で等級判別を行った．また，収量（g/株）算出には，式3を用いた．

$$\text{収量} = \text{千粒重} / 1000 \times \text{一穂籾数} \times \text{登熟歩合} / 100 \times \text{穂数} \quad (3)$$



対照区



照射区

写真2-3-1 収穫時のコシヒカリの様子（京都設定）

3.1.2 圃場栽培下での出穂期および収量への影響

実際に混合LED照明が防犯灯として道路に設置された場合の出穂期および収量への影響を確認するため、山口大学農学部附属農場の実習水田(約3840 m²)にて調査を行った。供試作物は、イネ(品種コシヒカリ)を用いた。2010年5月27日に栽植密度を19.6株/m²で田植え(移植)を行い、慣行法で栽培した。また、**図2-3-5**に示したように、同水田内に、混合LED照明下で栽培(以下、L区)、光害が発生することが報告(山本ら、2006)されている蛍光水銀灯下で栽培(M区)、そして対照区として夜間照射なしで栽培(C区)の3区を設けた。

混合LED照明は、圃場に隣接した道路上に地上約4.5 mの高さで設置した。広範囲な照度分布を確保し、その影響を確認するため、照明灯具は圃場側に向けた(**写真2-3-2**)。照明装置の光源の詳細は、**表2-3-2**および**図2-3-6**に示しており、2.3.1.1で使用した光源とは、緑色LED光源は主波長に12 nmの差があった。照射は、移植後日数15日である6月11日から、日没後30分以内から日出前30分以内までタイマーで点灯させた。照射を受ける株の内、照明装置前方の3条目から7条目までの左右10株(計100株)をL区とした。

蛍光水銀灯(Panasonic製, YA34401)は、道路灯として圃場から約6 mの高さに設置されており、日没から日の出まで自動点灯し、灯具背面に漏れ光が生じている。照射を受ける株の内、3, 6, 9, 12, 15条目の20株/条(計100株)をM区とした。また、蛍光水銀灯から十分に距離があり、圃場内の照明下でない株の内、混合LED照明から前方へ約7 m離れた21条と24条の各10株(計20株)をC区とした。対象とした株の水平面照度は、イネの出穂期の草高とほぼ同じ地上1 mの高さで刈取後に測定した。L区では、光源に近い所で最高の12.6 lxであり、最低は0.3 lxであった(**図2-3-7**)。M区では、最高18.3 lx、最低0.9 lxであり、C区では全て0.1 lx以下であった。

出穂期の確認は、対照区で穂ばらみが確認された7月26日からすべての株で出穂期が確認された8月5日までの毎日、2.2.1.1と同様に目視で確認した。刈取は、9月1日に行い、収量等の調査

については、L区とC区のみ2.3.1.1と同様に行った（等級調査は除外）。なお、穂数は単位当たりの穂数（穂/m²）とし、収量（g/m²）を求め、各収量構成要素はC区を基準とし、増減を百分率で表した。

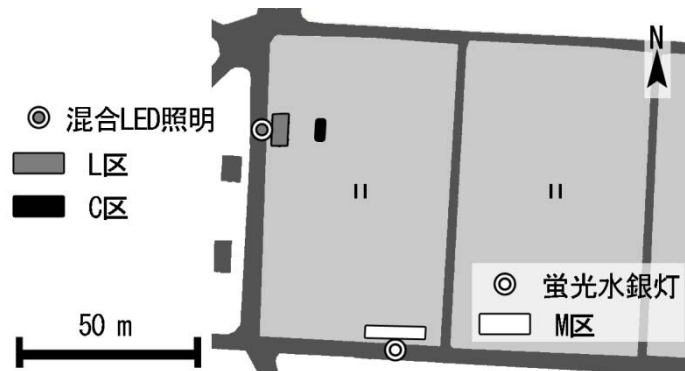
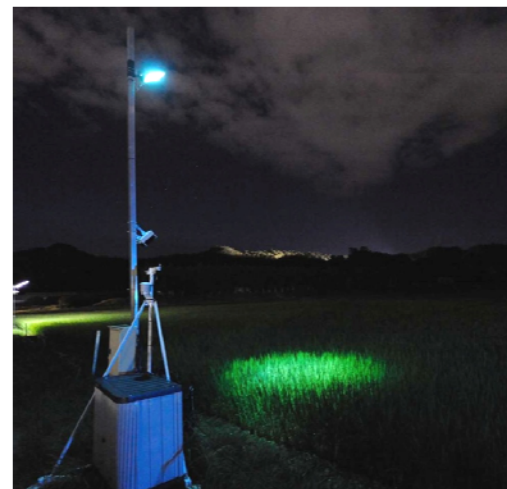


図2-3-5 圃場の配置図

（L：混合LED照明 C：対照 M：蛍光水銀灯）（屋外試験）



日中



夜間

写真2-3-2 混合LED照明の様子（屋外試験）

表 2-3-2 混合LED照明の詳細（屋外試験）

色光	タイプ	主波長 (nm)	デューティ比 (%)	パルス発光 周波数(Hz)
青	ZBL6-5S15-F1	465	60	700
緑	HGR6-5A15-F1	523	60	50
黄緑	NGY1-5A15-F1	577	70	700

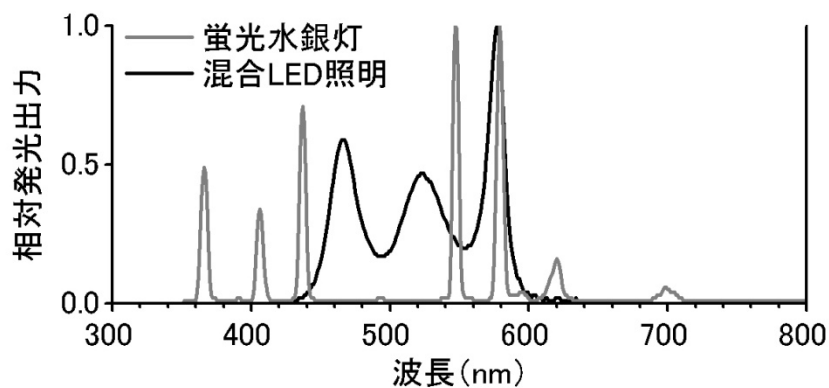


図 2-3-6 各照明の照射波長域（屋外試験）

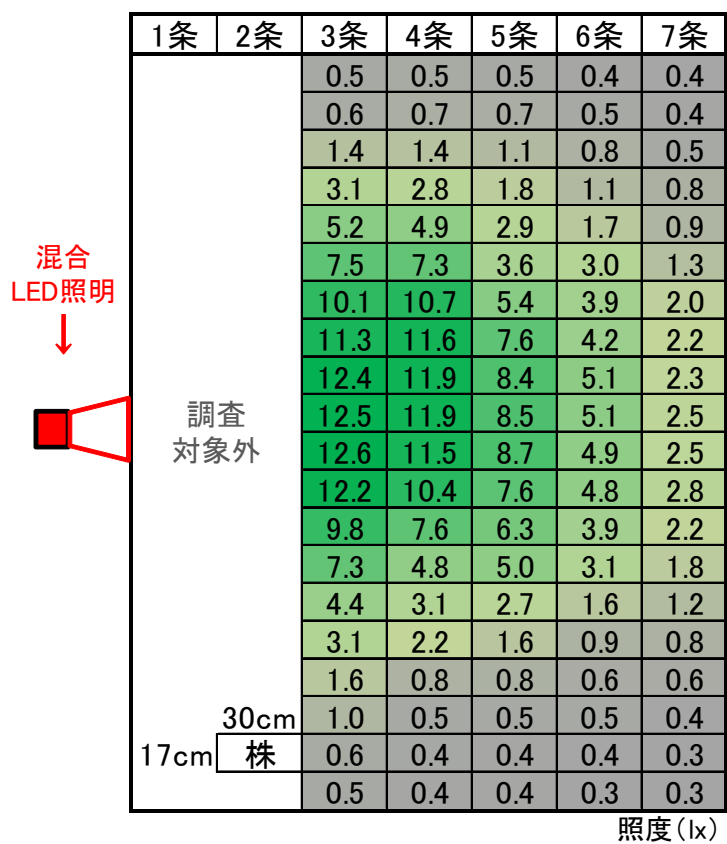


図 2-3-7 混合LED照明の照度分布（屋外試験）

2.3.1.3 品種の違いによる混合LED照明の影響変化

2.3.1.2のコシヒカリに対する混合LED照明の出穂期への影響と合わせ、イネ品種「ヒノヒカリ *Oryza sativa* L. cv. Hinohikari」および「にこまる *Oryza sativa* L. cv. Nikomaru」に対する影響の調査を行い比較した。大分県農林水産研究指導センター宇佐場内の圃場に、2010年6月29日に移植し、慣行法で栽培した。混合LED照明は、移植前の6月25日に、圃場に隣接した畦上に地上約4.5 mの高さで設置した。広範囲な照度分布を確保し、その影響を確認するため、照明灯具は圃場側に向けた。照明装置の光源の詳細は、2.3.1.2と同様である。照射は、日没後30分以内から日出前30分以内までタイマーで点灯させた。照射を受ける株の内、照明装置前方の10条10株（計100株）を照射区とした。また、混合LED照明から十分に距離があり、圃場内の照明下にはない株の内10条10株（計100株）を対照区とした。対象とした株の水平面照度は、イネの出穂期の草高とほぼ同じ地上1 mの高さで刈取後に測定した。最高照度は約16 lxであり、最低は約0.3 lxであり、対照区では全て0.1 lx以下であった。出穂期の確認は、対照区で穂ばらみが確認された8月29日からすべての株で出穂期が確認された日までの毎日、2.2.1.1と同様に目視で確認した。

2.3.2 結果および考察

2.3.2.1 人工気象器栽培下での収量および品質への影響

実際にコシヒカリが栽培されている地域をモデルとした日長・温度設定を行った人工気象器栽培で、混合LED照明の暗期照射がコシヒカリの出穂期におよぼす影響を調査した。照射区と対照区の出穂率の変化を図2-3-8に示した。京都設定では、照射区（灰線・□）の方が比較的早く出穂を開始し、出穂率が50%に達した出穂期は、照射区で出芽後日数123日誤差0.6日（以下、 123 ± 0.6 日）、対照区（黒線・■）で 125 ± 0 日と5%信頼区間のt検定で有意な差であった。よって、照射区では出穂遅延は発生せず、出穂促進2日となった。石川設定の出穂では、照射区（灰線・○）の方が比較的遅く進んだが、対照区（黒線・●）の出穂期である出芽後日数 134 ± 0.3 日には、照射区との間に有意な差がなく、照射区の出穂遅延日数1日は誤差の範囲であった。

よって、人工気象器栽培にて暗期に混合LED照明を10 lxで照射した場合の影響は、光害の特徴である出穂遅延が発生しないものの出穂促進が確認された。

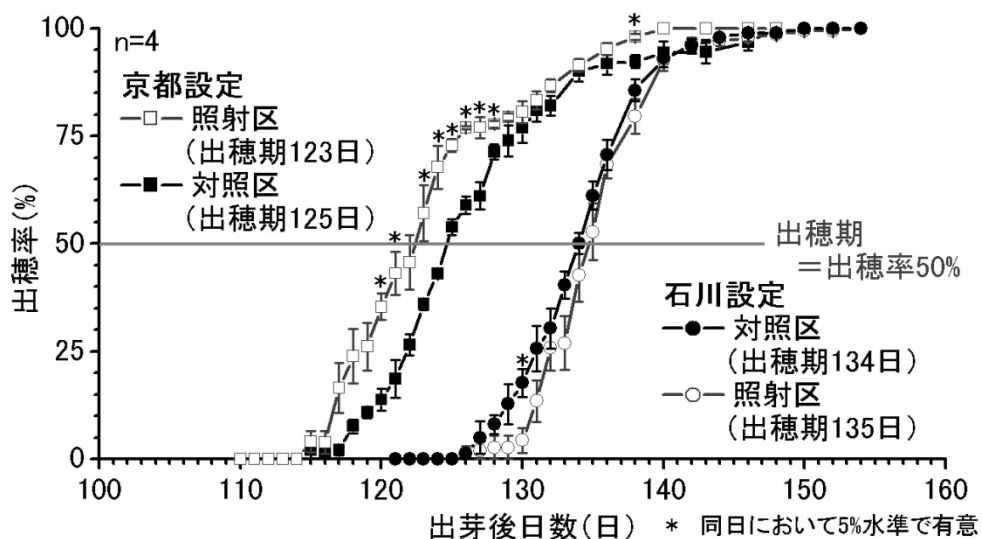


図2-3-8 混合LED照明のコシヒカリ出穂期への影響（屋内試験）

次に，収量への影響について表2-3-3に示した．石川設定（表2-3-3a）では，対照区と比較して，わずか1%であるが登熟歩合が有意に低かった．しかし，収量には有意な差がなく，等級も全ての株で1等であった．これは，対照区と比較して有意ではないが，出穂遅延1日であった事が起因したと考えられた．

京都設定（表2-3-3b）では，対照区と比較して，千粒重が有意に高かく，等級も2等高くなった．これは，対照区と比較して有意に出穂促進2日であった事が起因したと考えられた．

表2-3-3 人工気象器栽培下での収量（屋内試験）

a	石川設定	対照区	混合LED照明	影響
	穂数 (穂/株)	46 ± 2	49 ± 2	7%
	一穂粒数 (粒/穂)	41 ± 3	34 ± 2	-17%
	粒数 登熟米(粒/株)	1,845 ± 108	1,641 ± 96	-11%
	くず米(粒/株)	51 ± 6	66 ± 7	29%
	登熟歩合	97 ± 0.2	96 ± 0.3	-1% *
	千粒重 (g)	19 ± 0.1	19 ± 0.1	0%
	収量 (g/株)	34 ± 2	30 ± 2	-12%
	等級	1等	1等	-
n=4 * p<0.05 t検定				
b	京都設定	対照区	混合LED照明	影響
	穂数 (穂/株)	52 ± 4	49 ± 7	-6%
	一穂粒数 (粒/穂)	50 ± 2	58 ± 33	16%
	粒数 登熟米(粒/株)	2,152 ± 167	2,660 ± 490	24%
	くず米(粒/株)	433 ± 152	246 ± 100	-43%
	登熟歩合	84 ± 4	93 ± 2	11%
	千粒重 (g)	18 ± 0.2	19 ± 0.1	6% *
	収量 (g/株)	39 ± 4	51 ± 9	31%
	等級	2等	1等	+1等 *
n=4 * p<0.05 t検定				

2.3.2.2 圃場栽培下での出穂期および収量への影響

圃場栽培下で，実際に混合LED照明を防犯灯として道路に設置し，夜間照射したコシヒカリの出穂期におよぼす影響を調査した．L区とM区の照度の違いによる出穂遅延日数への影響を図2-3-9に示した．L区では，低照度の場合に出穂促進の傾向があり，照度の増加にともない遅延傾向となったが，M区では，低照

度から出穂遅延の傾向を示した。

イネ穎花の生長は、ロジスティック曲線で推定することが可能であり（中元ら，1987），同様に、出穂遅延日数と照度の関係もロジスティック曲線（ボルツマン）に適合（L区： $R^2=0.79$ ，M区： $R^2=0.89$ ）した。その関係から、蛍光水銀灯を夜間に照射した影響は、1 lxから出穂遅延が推定されたのに対し、混合LED照明の影響は、約2 lxを境に、それ以下で出穂促進、それより高い照度では出穂遅延と推定された。

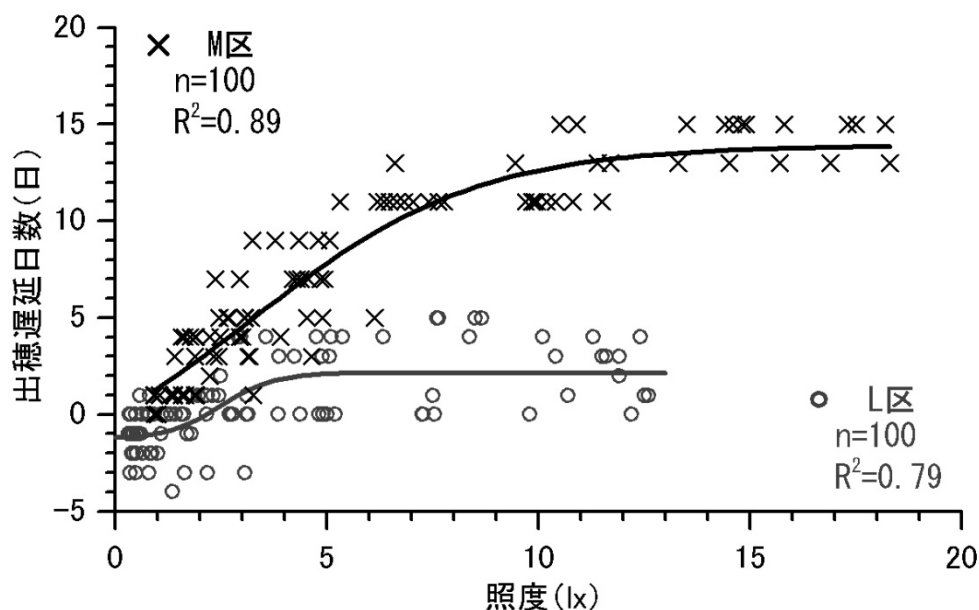


図2-3-9 混合LED照明のコシヒカリ出穂期への影響（L：混合LED照明 M：蛍光水銀灯）（屋外試験）

ここで、照明の違いによる出穂への影響を比較した。混合LED照明と蛍光水銀灯は、分光特性が異なる照明であったため、2.3.1.1の人工気象器栽培下の照射条件を基準とし、同放射照度下での出穂遅延への影響を抜粋し、比較した。なお、出穂遅延日数は、照度との関係と同様に、放射照度との関係をロジスティック曲線により求め推定した。表2-3-4に示したように、混合LED照明より蛍光水銀灯の方が出穂遅延への影響が大きくなった。これは、照明の照射波長域の違い、特に混合LED照明には含まれていない、600 nm以上の波長域の照射が要因と考えられ

た．開花誘導遺伝子の発現からの結果（2.2.2.2）では，赤色光（600～700 nm）の照射を受けた場合に，出穂遅延への影響がかなり大きいことが推定されている．

また，多少波長域に相違があれども同じ混合LED照明の影響として，栽培環境の違いにより，出穂への影響に差が生じた（表2-3-3）．圃場試験が出穂遅延となった要因は，2010年山口における低温，日照不足（農林水産省中国四国農政局，2010）が考えられた．山根ら（1967）および川村（2000）は，出穂遅延の程度は，低温では大きくなるとし，圃場での出穂遅延の発生は，これらの報告と一致した．同様に，石川設定と京都設定の差も，石川設定の日最低気温の方がより低いことが要因と考えられた．

表2-3-3 栽培方法および照明の違いによる出穂遅延日数の比較
（混合LED照明10 lx照射を基準）

	混合LED照明			蛍光水銀灯
	石川設定	京都設定	圃場試験	圃場試験
放射照度 ($\times 10^{-2}$ W/m ²)	2.29	2.42	2.35	2.35
出穂遅延日数 [※] (日)	1 \pm 0.3	-2 \pm 0.6	2 \pm 1.0	11 \pm 1.4
対照区との有意差 ($p \leq 0.05$)	なし	あり(促進)	あり(遅延)	あり(遅延)

※石川・京都設定 平均値 \pm 誤差，圃場試験 推定値 \pm 推定誤差

次に，混合LED照明を夜間照射したコシヒカリの収量およびその構成要素を図2-3-10に示した．収量は，C区とL区間に有意な差はなく，また照度の増加に伴う明らかな変化はなかった．しかし，一穂粒数は，照度と明らかな相関はないもの，照度に関わらず有意に増加した．また，登熟歩合は，照度の増加に伴いやや減少傾向を示した．

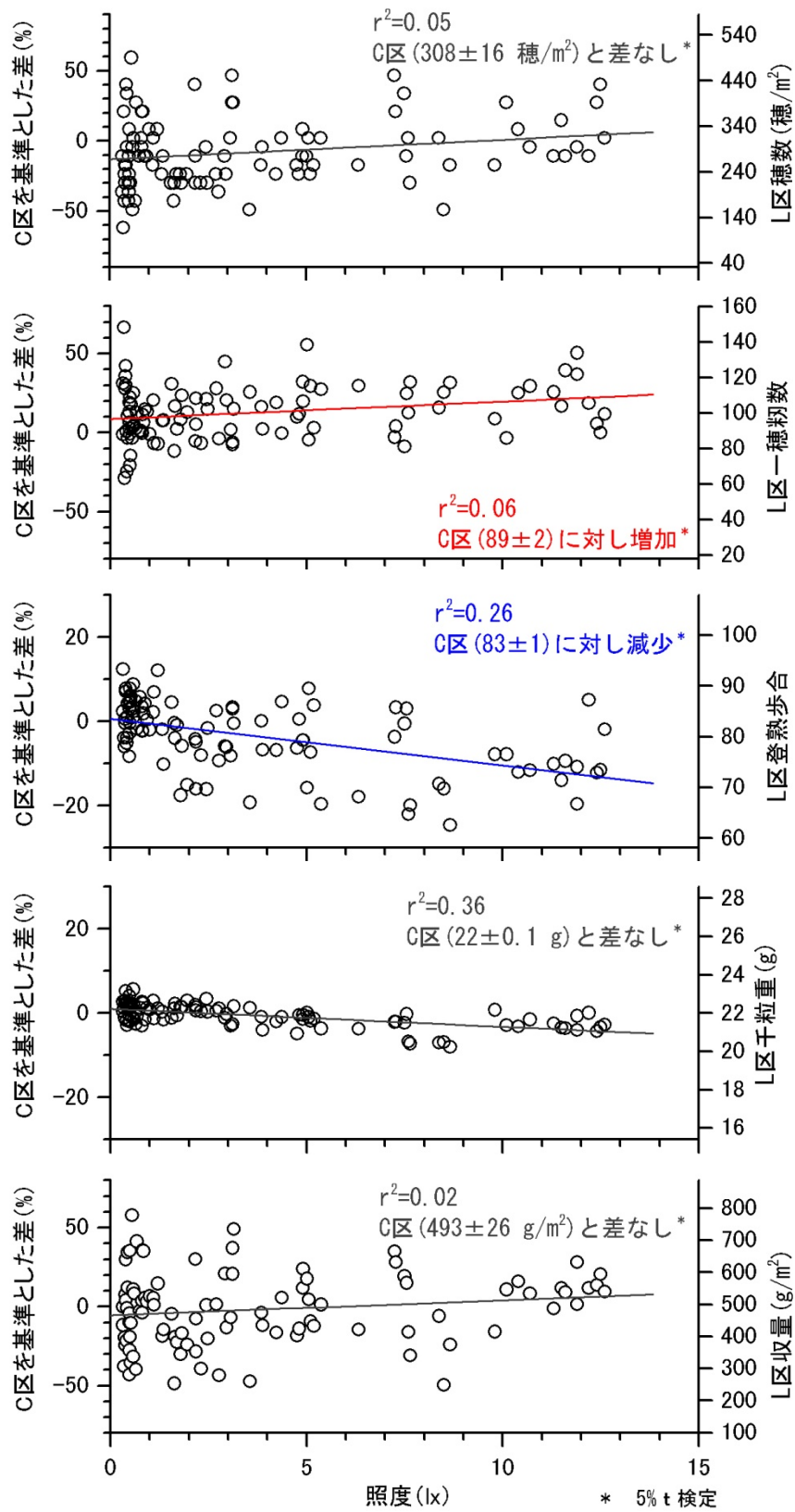


図 2-3-10 混合LED照明のコシヒカリ収量への影響（屋外試験）

そこで、籾数についての詳細な結果として、登熟・くず籾数を図2-3-11に示した。登熟籾数は、C区とL区間に有意な差はなく、また照度の増加に伴う明らかな変化はなかった。しかし、くず籾数は、増加傾向を示した。つまり、混合LED照明は、籾数の増加を引き起こすが、その原因は一株あたりのくず籾数を増加させるからであり、結果として登熟歩合の低下を引き起こすことが示唆された。

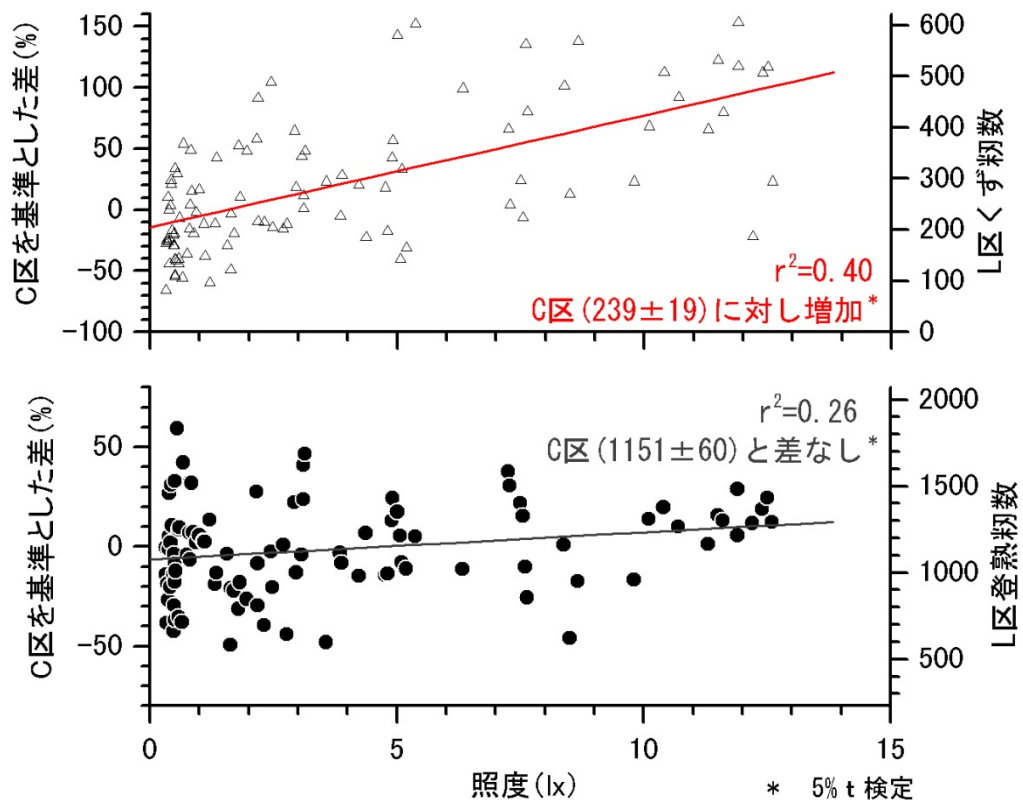


図2-3-11 混合LED照明のコシヒカリ各籾数への影響（屋外試験）

2.3.2.3 品種の違いによる混合LED照明の影響変化

圃場栽培下で、実際に混合LED照明を防犯灯として道路に設置し、夜間照射した際の出穂期におよぼす影響を、イネ品種ヒノヒカリ、にこまるについても同様に調査し、図2-3-12に示した。ヒノヒカリ、にこまるともに、照度と出穂遅延日数の関係は、ロジスティック曲線には適合しないものの、対照区と有意に差があり、夜間照射の照度増加にともなった出穂遅延の増加を示

した。イネ収量へ影響があるとされる出穂遅延3日(原田, 1997)を基準にすると, ヒノヒカリは約10 lxまで, にこまるは約7 lxまでが許容範囲となり, それ以上の照度では, コシヒカリより出穂遅延の傾向が大きくなった。しかし, 日本防犯設備協会が定める防犯灯の照度基準(社団法人日本防犯設備協会, 2005)においてクラスAにあたり, 一般的な防犯灯の照度である5 lxを基準とし比較すると, 品種による差はみられなかった。

ここで, 既存の屋外照明による出穂遅延の発生について, コシヒカリとヒノヒカリを比較すると, 約15 lx以下の照度では, コシヒカリの方がより遅延し, それ以上の照度では逆にヒノヒカリがより遅延する(川村, 2000)。混合LED照明を夜間照射した場合でも, 同様の傾向が見られた。また, にこまるとコシヒカリの日長感応性を比較すると, にこまるはコシヒカリよりも高く, 12時間日長以上の環境栽培下では, それ以下の日長栽培下より出穂までの日数が増加する(農研機構北海道農業研究センター, 2013)。よって, にこまるに混合LED照明を夜間照射した場合は, コシヒカリより出穂遅延傾向が大きくなったと考えられた。

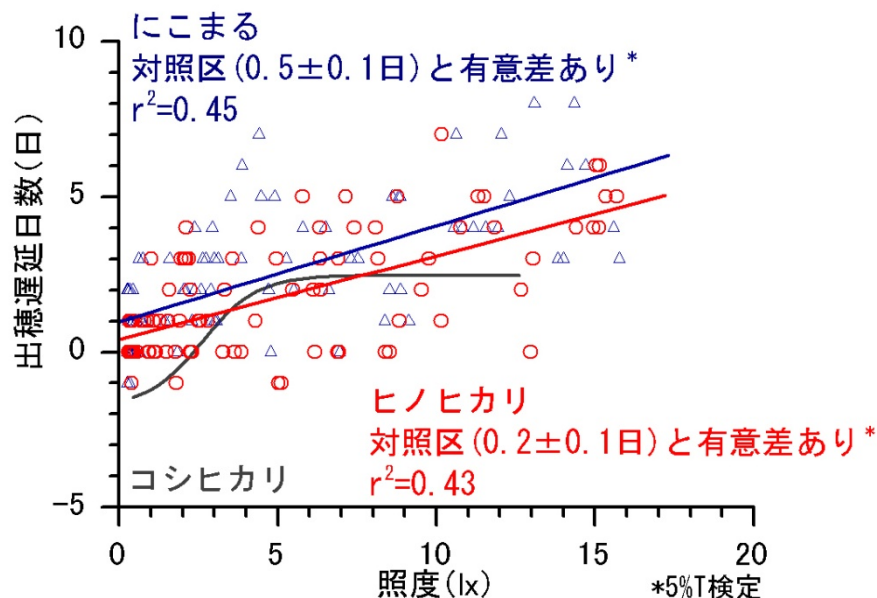


図2-3-12 混合LED照明のにこまるおよびヒノヒカリ出穂期への影響(屋外試験)

2.3.3 総合考察

混合LED照明の夜間照射下で生育したイネの収量および品質への影響を調査した。

石川県および京都府の圃場環境をモデルとした人工気象器栽培下において、夜間に混合LED照明を10 lxで照射したコシヒカりは、夜間が暗黒の対照区と比較して、光害発生の特徴である出穂遅延が発生しなかった。また、収穫後の調査結果より、登熟歩合の低下を引き起こすが、収量や等級に低下は確認されなかった。さらに、京都府の栽培環境をモデルとした調査では、出穂促進および等級上昇がみられた。

また、防犯灯として圃場に隣接して設置した場合の出穂への影響は、一般的な防犯灯の照度基準である5 lxで夜間照射した場合に、出穂遅延日数が約2日であり、水銀灯のそれより大幅に減少した。これは、にこまる、ヒノヒカリでも同様の結果であったが、光害が発生しないであろう限界照度には、品種の違いによって差が生じた。コシヒカリの収穫後の調査結果より、籾数、特に一株あたりのくず籾数を増加させ、結果として登熟歩合の低下を引き起こすが、収量への影響は確認されなかった。

以上のことから、混合LED照明、つまり設置する照明の照射波長域選択および発光制御を行うことで、出穂遅延、収量の両観点から光害を回避可能であると示唆された。しかし、実使用に関しては、栽培品種によって回避効果が異なることを留意する必要がある。

2.3.4 引用文献

川村和史：水銀灯による夜間照明が水稲の生育，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，pp103-109（2000）.

社団法人日本防犯設備協会：SES E1901-1 防犯灯の照度基準，社団法人日本防犯設備協会，p5（2005）.

中元朋実・稲永忍・長戸康郎：イネの穎の生長パターンの解析，日作紀，56(2)，pp149-155（1987）.

農研機構北海道農業研究センター：北海道農業研究センタープロジェクト研究成果No.8，pp23（2013）.

農林水産省：平成21年産作物統計 水稲の産地品種別収穫量（平成22年2月25日公表），http://www.maff.go.jp/j/tokei/pdf/syukaku_suitou_09.pdf（2010）.

農林水産省近畿農政局：農林水産統計 平成21年産水稲の収穫量（京都府）（平成21年12月8日公表），http://www.maff.go.jp/kinki/press/toukei/toukeikikaku/pdf/091208_1-01.pdf（2009）.

農林水産省中国四国農政局：農林水産統計 平成22年産水稲の収穫量（山口県）（平成22年12月8日公表），<http://www.maff.go.jp/chushi/press/yamaguchi/pdf/101208-01.pdf>，（2010）.

農林水産省北陸農政局：農林水産統計 平成21年産水稲の収穫量（石川）（平成21年12月8日公表），http://www.maff.go.jp/hokuriku/stat/data/pdf/21_12_08i.pdf（2009）.

原田皓二：水稲に対する終夜照明被害の品種間差と照明中断による回避，九州農業研究成果情報，12(上)，pp.39-40（1997）.

山根国男・小谷倫三・野村正：夜間照明による水稲生育の被害，農業技術，22，pp451-455（1967）.

山本晴彦・岩谷潔・井上名月：街路灯の夜間照射がイネの生育と収量に及ぼす影響，平成18年度照明学会全国大会，pp282-283（2006）.

2.4 イネ光害回避型照明の視認性評価

2.4.1 実験概要

単色LED光源を使用した照明は，一般的な防犯灯と比較すると，演色性や視認性評価の点で劣る．そこで，光害回避として効果の認められた混合LED照明について，防犯灯としての視認性評価を行うことを目的とし，一般的な防犯灯として普及しつつある白色LED照明，そして単色LED光源の中でも，視認性が比較的高い緑色LED照明と，評価結果を比較検討した．

2.4.1.1 実験場所・日時および被験者

山口大学農学部附属農場水田圃場に隣接する道路上にて行った．実験日は2008年10月7日（月齢7，曇），9日（月齢9，曇）の両日，および2009年10月6日（月齢17，曇），8日（月齢19，晴れ時々曇）の両日であり，19時から22時の間に行った．被験者は，左右の視力が0.5以上の19歳から20歳の学生であり，2008年は計38人，2009年は計45人，色覚は全員正常であった．

2.4.1.2 実験に用いた照明器具と実験構成

照明に使用したLED素子の詳細を表2-4-1に示した．2008年は，照射面20×25 cmに対し，白A（SEOUL SEMICONDUCTOR社製）を12個配置した照明装置（以下，白色A），緑A（SEOUL SEMICONDUCTOR社製）を12個配置した照明装置（以下，緑色）の2種を比較した．2009年は，照射面22×20 cmに対し，白B（日亜化学工業(株)製）を360個配置した照明装置（以下，白色B）と，支柱を中心に片翼22×20 cm²で両翼とした照射面に対し，青を240個，緑Bを240個および黄緑を240個（すべてトリコン(株)製）配置した照明装置（以下，混合色）の2種を比較した．なお，混合色照明は，デューティ比10%，パルス発光周波数を青および緑Bで250 Hz，黄緑で1000 Hzと設定した．図2-4-1には，分光放射計（ひだまり duo，特注，(株)相馬光学製）を用いて測定した照明装置の演色評価数Raおよび照射波長域を示した．白色Aおよび白色B照明下のRaは高く，ついで混合色照明下であり，緑色照明下のRaは比較的低かった．

表2-4-1 各LEDの詳細

実施年	光源	タイプ	主波長	順電流	照明名
2008	白A	Pure White(W32181)		400mA	白色A
	緑A	Green (G32182)	518nm	400mA	緑色
2009	白B	NSPW510DS		30mA	白色B
	青	HBL6-5S15-F1	469nm	30mA	混合色
	緑B	HGR2-5A15-F1	538nm	30mA	
	黄緑	NGY1-5A15-F1	573nm	25mA	

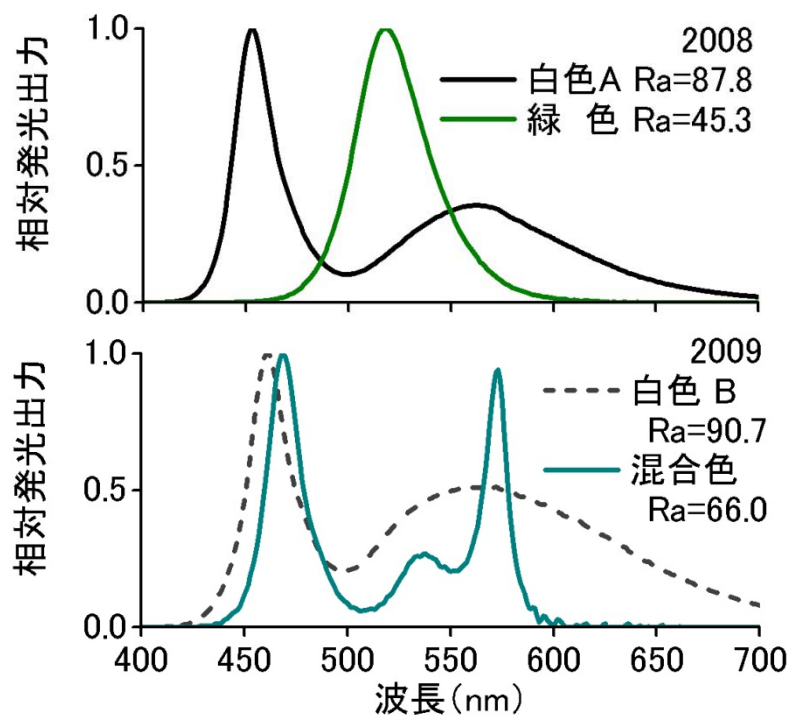


図2-4-1 各LED照明の波長域

照明装置は、水田から約2 m離れた約6 m幅のアスファルト舗装道路上に、図2-4-2のように設置した。実験者の配置は、地上1.5 mで鉛直面照度が約1 lxとなる地点と設定した。これは、図2-4-3に示したように、2008年に設置した白色Aおよび緑色照明と、2009年に設置した白色Bおよび混合色照明では、照明装置の配光特性および照明の向きの違いから、水平面照度分布が異なるからである。光源からの距離は、白色A照明下で4.1 m、緑色照明下で5.2 m、白色B照明下で4.7 m、混合色照明下は4.5 mの地点に実験

者を配置した。対して被験者は、それぞれの照明下の実験者から光源側に4 mの距離に配置した。また、光害回避に関する検証実験として、イネ（2008年：ヒノヒカリ，2009年：コシヒカリ）の出穂遅延日数を調査した結果，白色A照明下（地上1 mでの水平面照度1~2.2 lx）では約4日であったが，緑色照明下（1~3.9 lx）では約1日の遅延であり，白色B照明下（1~5.3 lx）では約4日であったが，混合色照明下（0.7~5.8 lx）では約2日であった。

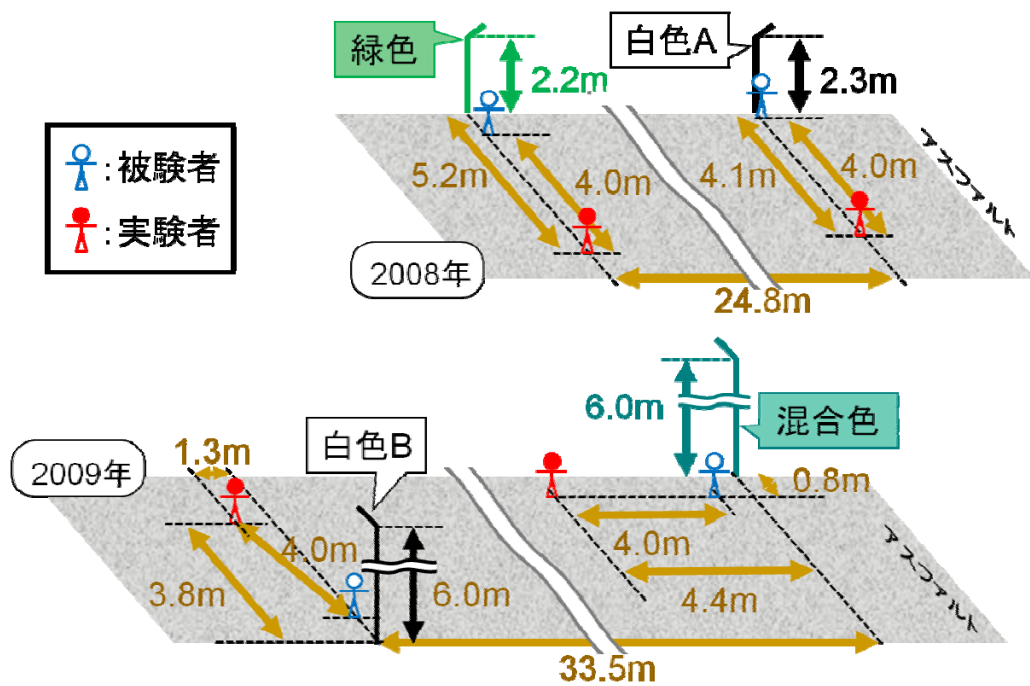


図2-4-2 照明装置および被験者・実験者の配置

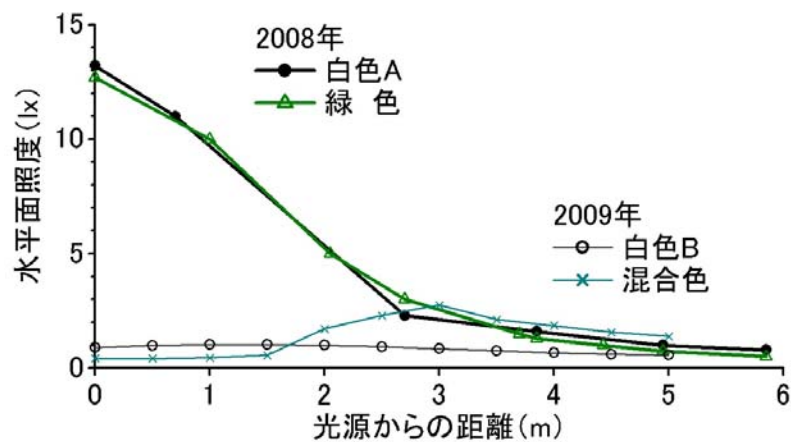


図2-4-3 実験路の水平面照度

2.4.1.3 評価項目

評価項目は，岩田ら（2008）の評価項目を参考にし，表 2-4-2 に示したように「見え方」および「照明の印象」について調査した。

表 2-4-2 評価項目

評価項目	評価対象	
見え方	①挙動 ②顔の特徴	実験者
	③色	色紙
	④箱の個数	10cm角の箱
	⑤雰囲気 ⑥明るさ ⑦安心感 ⑧満足感 ⑨まぶしさ ⑩ちらつき	照明下周辺

①挙動，②顔の特徴については，黒っぽい服装の実験者を評価対象とし，「分かる」「やや分かる」「分かりにくい」「分からない」の4段階で評価させた。

③色については，15 cm 正方形の青（3.2PB3.6/13.7），緑（5.3G5.3/9.9），黄（6.7Y8.3/12.3），赤（3.7R4.1/12.4），薄灰（3.5RP7.7/0.8），濃灰（2.1P6.6/0.9）を灰（7.2R6.8/0.3）の背景紙に貼付した指標を作成し，色名を回答させた。それぞれのマンセル表色値は，分光色差計（NF777，日本電色工業製）の測定値から算出し求めた。

④箱の個数については，表面を灰（7.2R6.8/0.3）の紙で覆った10 cm 角の箱を実験者の横に，20°，25°，30°離れた地面に各1個ずつ配置し（図 2-4-4），被験者の周辺視で見える個数を答えさせた。

⑤雰囲気については，「好き・やや好き・やや嫌い・嫌い」，⑥明るさ「明るい・やや明るい・やや暗い・暗い」，⑦安心感「安心・やや安心・やや不安・不安」，⑧満足感「満足・やや満足・やや不満・不満」，⑨まぶしさ「気にならない・やや気になる・気になる・とても気になる」の4段階で評価させた。なお，2009

年の白色 B および混合色照明については，発光制御の影響を判断するため⑩ちらつきについても，「気にならない・やや気になる・気になる・とても気になる」の 4 段階で評価させた。

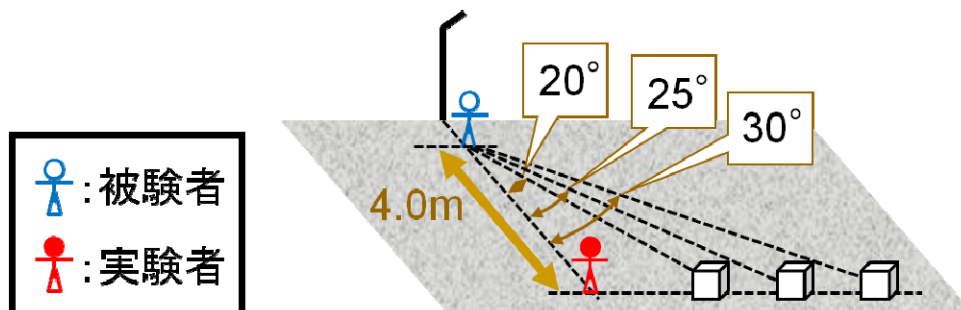


図 2-4-4 箱の配置

2.4.1.4 実験手順

実験者は，実験場所に隣接にした暗所にて 5 分間の暗順応を行った後，照明下に移動し，準備が整い次第照明を点灯させた．この時，被験者の視界内に月や他の道路照明が入る場合は，暗幕を用いて遮蔽物を作り隠した．下記の (1) から (4) の評価を行った後，再度暗順応し，先ほどとは別の照明下で評価を行った．なお，(1) から (3) の回答については，実験者および被験者とは別の者が筆記した．また，両年ともに実験を行う照明の順序はランダムにした．

- (1) 実験者の「①挙動」，「②顔の特徴」についての見え方を 4 段階の評価から選択させた．
- (2) 実験者が色紙を掲示し，「③色」の見え方を色名で回答させた．なお，掲示する色紙の順序はランダムに変更した(写真 2-4-1)．
- (3) 被験者が実験者を直視した状態で，視野の外に置いた「④箱の個数」を確認させ，個数を回答させた．
- (4) 被験者を照明下の 2～3 m を歩かせた後に，「照明の印象」について⑤～⑩の評価項目について 4 段階で回答させた．



(a) 白色 B 照明下の様子



(b) 混合色照明下の様子

写真2-4-1 調査中の様子

2.4.1.5 評価方法

緑色照明と混合色照明の間の比較は、実験概要 2.4.1.2 に示した様に、設置年によって照明装置の配光分布に違いがあるため、各年の白色 LED 照明を基準とし比較した。比較では、F 検定にて等分散の検定を行った後、t 検定を行い、有意な差がある場合は、図中に* ($p < 0.01$ の場合)、** ($p < 0.05$ の場合) と示した。特に、評価項目③については、正解を 1、不正解を 0 と点を与えた後、各年の白色 LED 照明を基準とした点数「白色 LED 照明との差点」で比較した。これは、値が大きいほど白色 LED 照明よりも高評価であることを、値が小さいほど低評価であることを表す。評価項目⑤～⑩の 6 つについては、4 段階尺度を良い評価から順に、4, 3, 2, 1 とした。

2.4.2 結果および考察

2.4.2.1 ① 挙動

各色照明における項目①の回答率を図2-4-5(a)に示した。緑色照明は、白色A照明と回答率に有意な差が無く、ともに挙動が分かる評価された。混合色照明でも、白色B照明と回答率に有意な差が無く、さらに「分かる」「やや分かる」の評価のみであり、挙動が分かるとすべて被験者が評価した。

つまり混合色照明は、挙動が分かると評価された白色LED照明および緑色照明と同程度の高い評価であり、通行人の挙動を判断することについて、十分な照明であると示唆された。

2.4.2.2 ② 顔の特徴

各色照明における項目②の回答率を図2-4-5(b)に示した。緑色照明は、白色A照明と回答率に有意な差が無く、ともに顔の特徴が分かる評価された。混合色照明でも、白色B照明と回答率に有意な差が無く、ともに顔の特徴が分かると評価された。

つまり混合色照明は、顔の特徴が分かると評価された白色LED照明および緑色照明と同程度の評価であり、通行人の表情等の判断や、個人の特長について、十分な照明であると示唆された。

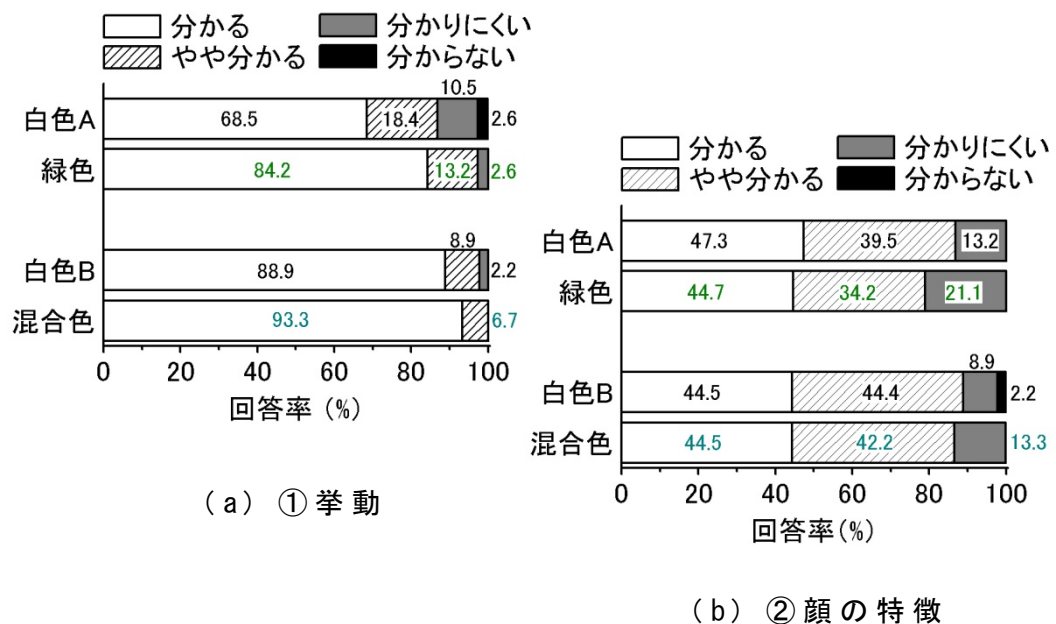


図2-4-5 「①挙動」「②顔の特徴」に対する評価結果

2.4.2.3 ③色

各色照明における項目③の正答率を図2-4-6(a)に示した。緑色照明は、白色A照明の「青」「緑」「赤」「薄灰」色認識より有意に低かった。混合色照明では、「青」「赤」の色認識で、白色B照明と有意に差があり、さらに、「薄灰」では35.5%も低下した。また、すべての照明下で「濃灰」が低い正答率であったが、これは、色名を誤った場合の回答の大半が、「薄灰」と答えたことにあり、岩田ら(2008)が他の色紙と比較して灰色が、低い結果となったのと同様であった。

図2-4-6(b)に示した両照明の白色LED照明との差点では、「青」「赤」については、混合色照明の色認識が緑色照明より有意に高く、緑色照明より高い評価であった。つまり、混合色照明は、緑色照明より色認識が高いが、白色LED照明と比較し「青」「赤」「薄灰」色認識が低くいため、白色LED照明と同条件で設置するためには、より高照度での設置や、より演色性の高い混合色の検討等の対策が必要であると示唆された。

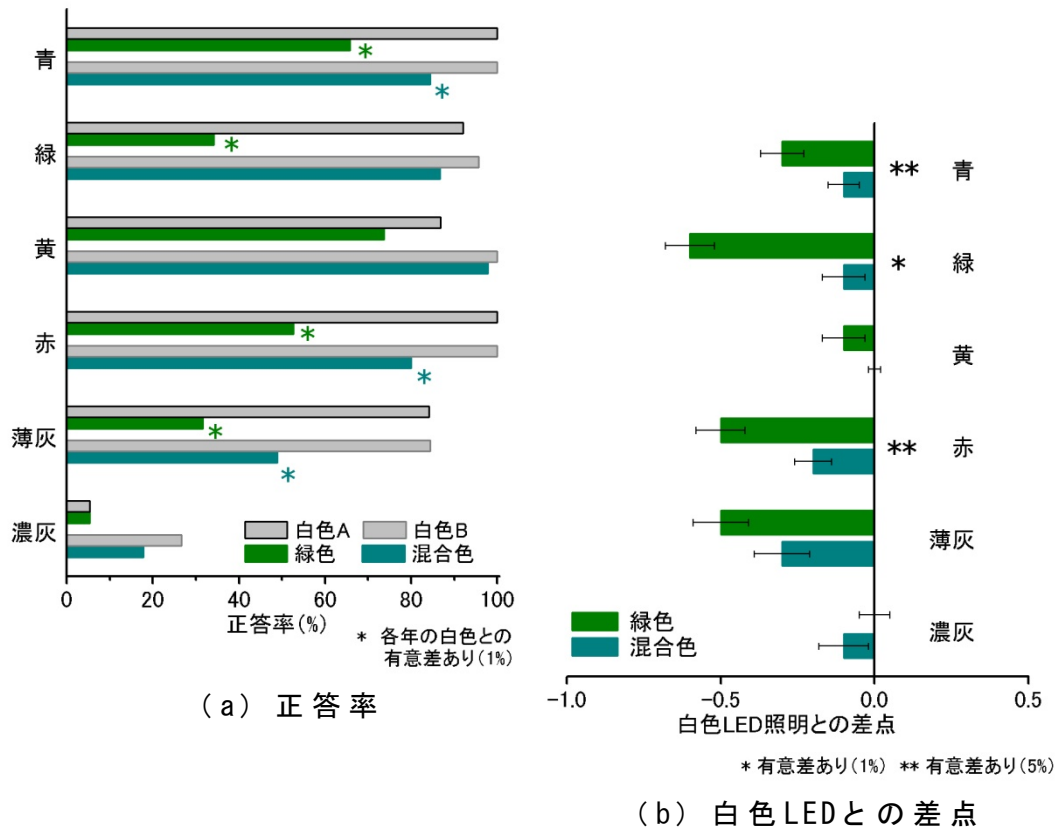


図2-4-6 「③色」の正答率

2.4.2.4 ④箱の個数

各色照明における項目④の回答率を図2-4-7に示した。緑色照明は、白色A照明と回答率に有意な差が無く、ともに80%以上の被験者に25°以内の箱の個数が分かる評価された。混合色照明でも、白色B照明と回答率に有意な差が無く、さらに90%以上の被験者に25°以内の箱の個数が分かることと評価された。

つまり混合色照明は、周辺の物の有無が判断できると評価された白色LED照明および緑色照明と同程度の高い評価であり、路上の障害物等を認識することについて、十分な照明であると示唆された。

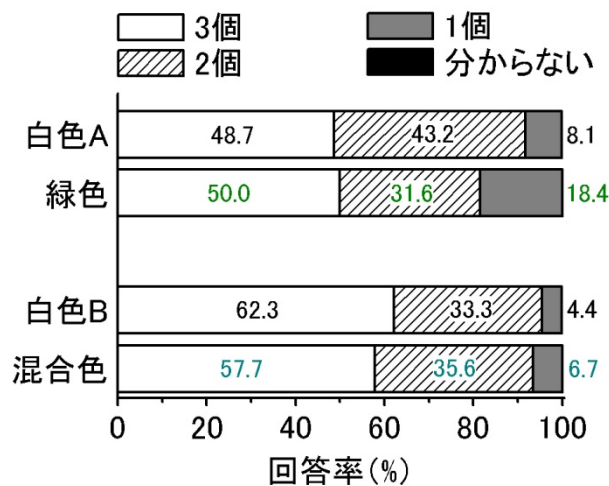


図2-4-7 「④箱の個数」に対する評価結果

2.4.2.5 照明の印象評価

各色照明における項目⑤～⑨、印象評価の評価点を図2-4-8に示した。図2-4-8(a)に示した白色Aおよび緑色照明の評価点を比較すると、⑨まぶしさの項目以外で有意な差があり、緑色照明の印象評価の方が5項目の平均評価点で約0.8低かった。対して、図2-4-8(b)に示した白色Bおよび混合色照明の評価点を比較すると、⑤雰囲気、⑦安心感、⑧満足度の項目で有意な差があり、混合色照明の印象評価の方が5項目の平均評価点で約0.5低く、緑色照明のそれより、白色LED照明との差が小さかった。

特に、⑥明るさの項目が、緑色照明より高評価になった理由として、発光制御の影響が考えられる。森田ら(2008)は、青色お

よび緑色LEDを照明とした場合に、デューティ比10%の時に直流駆動よりも明るく感じるとしており、本試験においてデューティ比10%で制御された混合色照明も、直流駆動の緑色照明より、被験者にとって明るく感じられたものと推察される。また、混合照明については、⑩ちらつきの項目で評価点が3.6と高く、白色B照明の評価点3.8と有意な差がなかったため、発光制御によるちらつきへの影響はないことが示唆された。

つまり、混合色照明は、緑色照明より印象評価は高いが、白色LED照明と比較し「雰囲気」、「安心感」、「満足度」といった心理的評価が低いため、より演色性の高い混合色の検討や、混合色照明が光害対策として有効であることを周知させ、印象改善を図る等の対策が必要であることが示唆された。

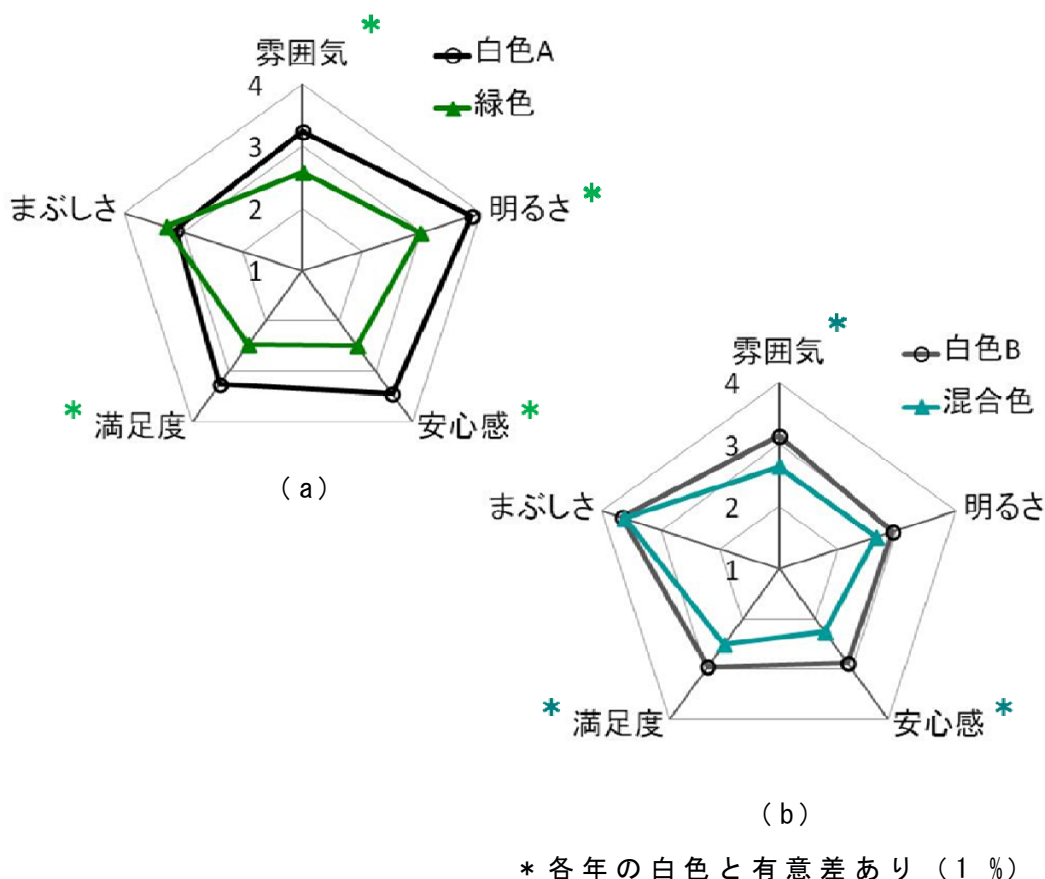


図2-4-8 印象評価

2.4.3 総合考察

光害回避として効果の認められた混合LED照明について、防犯灯としての視認性評価を行うことを目的とし、白色LED照明および緑色LED照明と評価結果を比較検討した。

見え方評価の結果から、表2-4-3に白色LED照明（白色Aおよび白色B）の視認性評価を基準とした場合の、緑色および混合色照明の総合評価を示した。まず、光害の有無では、緑色照明、混合色照明ともに発生しなかった。しかし、視認性評価では、出穂遅延日数が1日と最も少なかった緑色照明は、視認性評価が最も低く、特に色認識の評価が低かった。対して、出穂遅延日数は2日であるが、光害が発生しなかった混合照明は、白色照明よりやや低い視認性評価であった。

表2-4-3 総合評価

		評価			
		白色	緑色 Ra=45.3	混合色 Ra=66.0	
光害の有無		あり(遅延4日)	なし(遅延1日)	なし(遅延2日)	
見え方	①挙動	4	4	4	
	②顔の特徴	3	3	3	
	③色	青	4	3*	3*
		緑	4	2*	4
		黄	4	3	4
		赤	4	3*	3*
		薄灰	4	2*	2*
	濃灰	1	1	2	
④箱の個数	3	3	4		

良い方から4→3→2→1の4段階評価 *は白色と5%有意差

つまり、混合色照明は、通行人の挙動およびその表情等の判断、個人の特定をすること、また路上の障害物等を認識することについて、十分な照明性能であると示唆された。しかし、色認識に関しては、緑色照明より高いが、白色LED照明と比較し「青」、「赤」、「薄灰」色認識が低くかった。また、照明の印象評価の結果から、混合色照明は、緑色照明より高いが、白色LED照明と比較し「雰囲気」、「安心感」、「満足度」といった心理的評価がやや低くかった。以上のことから、混合色照明は、白色LED照明と同条件で設置するためには、より高照度での設置や、より演色性の高い混合

色の検討等の対策が必要であることが示唆された。また今後、光害回避型照明として、波長選択的なLED照明の有効性が周知となり、印象評価の改善へとなることを望む。

2.4.4 引用文献

岩田三千子・内田重美：上方光束制御の異なる街路照明器具による視認性評価実験および等価光幕輝度算定に基づく考察，照学誌，92-8A，pp. 455-463(2008).

森田圭司・阿部光秀・富田悠太・本村英樹・神野 雅文：視覚心理的アプローチによるパルス駆動LEDの実効輝度の向上，電子通信エネルギー技術，108-227，pp. 35-40(2008).

2.5 結論

本研究では，人々が安全に通行可能な夜間の光環境を形成しつつ光害の回避を可能とするため，照明の光質・発光制御と光害の発生程度を調査し，光害回避型の照明開発および実証試験を行った．

まず，新たなイネ光害の評価として，イネ開花誘導遺伝子 *Hd3a* の発現で定量し，実際よりも早期に開花時期を判断することを試みた．コシヒカリを対象とし調査した結果，収量に影響を及ぼさない出穂遅延（促進）日数3日以内となる *Hd3a* 発現の範囲は，対照区（暗期が暗黒）の発現を1とした場合，0.85以上1.10以下であると推定された．この関係を元に，LED光源を一般的な防犯灯の照度である5 lxで照射した場合の，コシヒカリへの各色LED光源（近紫外・青・緑・黄緑・黄・赤色）の影響を評価した．その結果，発光制御を行わない場合，青色LED光源下で 1.01 ± 0.03 ，緑色LED光源下で 0.86 ± 0.03 であり，出穂遅延への影響が小さかった．対して，近紫外色LED光源 0.09 ± 0.03 ，黄緑色LED光源 0.41 ± 0.05 ，黄色LED光源 0.16 ± 0.02 ，赤色LED光源は 0.01 ± 0.00 ，であり，影響が大きかった．しかし，黄緑色LED光源は，パルス発光周波数を700 Hz，デューティ比を70%とすることで，*Hd3a*発現が 1.02 ± 0.03 となり出穂遅延への影響が小さくなった．さらに青色LED光源では，パルス発光周波数・デューティ比をそれぞれ，700 Hz・60%と設定した場合に，*Hd3a*発現が 1.21 ± 0.05 ，緑色LED光源では，50 Hz・60%と設定した場合に 1.35 ± 0.06 と最大になった．

そこで，青，緑，黄緑色LED光源において最大の*Hd3a*発現となった発光制御をそれぞれ行い，混合LED照明を作製し，予備試験を行った．この照明をコシヒカリに対し5 lxで照射した場合の*Hd3a*発現による影響評価は， 0.88 ± 0.05 であり，人工気象器を使用した短日条件下の出穂遅延日数は1日であった．また，石川県および京都府の圃場環境をモデルとした人工気象器栽培下において，コシヒカリに対し暗期に10 lxで照射した場合でも，出穂遅延は発生しなかった．さらに，同栽培後の収穫調査から，登熟歩合の低下を引き起こすが，収量や等級に低下は確認されなかった．

次に実証試験として、防犯灯として圃場に隣接して設置し、出穂期（コシヒカリ・にこまる・ヒノヒカリ）および収量（コシヒカリのみ）への影響を調査した。結果、5 lxで夜間照射した場合は、出穂遅延日数が約2日であり、水銀灯のそれより大幅に減少した。これは、にこまる、ヒノヒカリでも同様の結果であったが、10 lx以上では、栽培品種の違いによっては、光害回避が可能な限界照度が異なった。コシヒカリの収穫後の調査結果では、籾数、特に一株あたりのくず籾数を増加させ、結果として登熟歩合の低下を引き起こすが、収量への影響は確認されなかった。

また、イネ光害回避型照明について、白色LED照明と比較し視認性評価を行った。その結果、通行人の挙動およびその表情等の判断、個人の特定をすること、また路上の障害物等を認識することについて、十分な照明性能であった。しかし、白色LED照明と比較し、色認識が約15～35%低下し、照明の雰囲気評価では、やや不安・不満となった。

以上のことから、混合LED照明、つまり設置する照明の照射波長域選択および発光制御を行った照明は、視認性の課題解決のため、既存の防犯灯（5 lx）より高照度で照射する必要があるが、光害回避型の防犯灯として有効であると示唆された。そして、光害対策としての有効性を保証可能な限界照度が栽培品種毎に異なる点、照明の印象評価を上げるために演色性高上が必要な点について、今後も調査・対策が必要である。

第3章 近赤外分光法を用いたウンシュウミカンの 葉内水分ポテンシャルの非破壊推定

3.1 背景および目的

近年、多種少量な果実消費の動向により、カンキツ類の消費・価格は低迷する傾向を示している（農林水産省，2005A）。そこで、生産者サイドでは多様な消費者ニーズに対応すべく、高品質で安定した果実の生産を目指し樹体管理が実施されてきた。特に、高品質化として糖度上昇を目標とし、さらに生産量が大幅に年次間変動する隔年結果の対策を行うことにより安定生産を目指している（森ら，2005）。高糖度果実を生産する方法としては、白色シートで土壌を被覆する「マルチ栽培」が普及している。マルチ栽培は、特殊なシートを設置することにより土壌への雨水の透過を防ぎ、さらに土壌からの蒸発を可能としているため、土壌の乾燥を促す。結果的に土壌の乾燥は、樹体を受ける水分ストレスを高め、葉から果実へのショ糖の転流を促し、高糖度の果実を生産可能にする（野並，2001）。しかしマルチ栽培により品質が向上する一方で、果実の安定生産性に問題が生じている。過度な水分ストレスで樹体は衰弱化し、誤った時期のシート被覆によって酸度の上昇を起こし、そして隔年結果を助長させる場合もある（中里ら，1997）。

これらの課題の解決には、個々の樹体や園地に応じた診断が必要であるが、その診断技術は、生産の省力化・低コスト化を促進するものでなくてはならない。また、優良晩かん類等への転換が促進されており（農林水産省，2005B）、これにより新たな担い手の育成や明確な生産管理方法が求められている。

本研究では、新しい診断技術の開発を目的とし、特に品質の向上・安定化で重要な因子となる樹体の水分ストレスの診断について検討した。従来は、樹体の水分ストレスを葉の巻き具合（佐々木，2005）や萎れ具合（中本ら，1998）といった、生産者の経験・主観で判断していた。また、樹体の水分ストレスを定量的に表す指標としては、葉内水分ポテンシャル（LWP）が一般的に用いられ、プレッシャーチャンバー法やサイクロメー

ターによって測定を行ってきた (Scholanderら, 1964). また, LWPは日変化があり, 日の出1時間前が比較的値が高く, その後徐々に低下し日の入2, 3時間前が1日の最低値となる (町田ら, 1974). よって, LWPの測定は, 気象要因による影響が少なく, 葉の気孔が閉じた状態である日の出前が望ましい (間苧谷ら, 1977A) とされている. これらの測定方法は葉の切除が必須となる破壊的方法であり, 連続的な測定が難しい上, 高額で専門的な測定機器の使用が生産者の負担となる. そのため新しい診断技術は, 従来の生産者の経験・主観による診断でなく, かつ非破壊的・低コストである計測器が必要である.

近年, 非破壊計測法として近赤外域 (700nmから2500nm) の波長を使用した近赤外分光法による推定が行われている (岩本ら, 2002). 近赤外分光法によって葉内水分量を非破壊計測に推定する方法が実用化されており (山本ら, 1994), トマト葉のLWPの推定においてもこの手法による試みが行われている (D.Suhandyら, 2006). しかし, 樹木葉について近赤外分光法によるLWPの推定は確立していない.

本研究では, カンキツ類の例としてウンシュウミカンを取り上げ, ウンシュウミカンのLWPを非破壊で推定する手法とその推定精度について検討した.

3.2 材料および方法

3.2.1 実験圃場の概要

実験供試樹は、山口県立農業大学校（山口県防府市牟礼）のカンキツ圃場内で露地栽培されたウンシュウミカン（*Citrus unshiu* Marc.）品種「興津早生」の32年生を用いた。樹体の水分ストレス程度に違いを設けるために、土壌状態の異なる裸地区、マルチ区を設置した。マルチ区は、2005年は6月22日から11月30日、2006年は7月13日から11月21日の期間において、土壌表面の水分の移動に方向性を持たせる白色シート（DUPON製タイベック・ハードタイプ）で被覆した。しかし、台風などの天候要因によりシートを巻き上げられて裸地状態になった期間があった。2005年は両区から5樹選択し、各樹の東西南北4方位から無着果春梢葉を1葉ずつ採取し、両区とも20葉を供試葉とした。2006年は、裸地区、マルチ区およびハウスにおいて着果後全く灌水を行わずに栽培した品種「興津」をハウス区とした。ハウス区を設置することにより、より高い水分ストレスの葉を測定することが可能となり、LWPの推定範囲の拡大を目的とした。裸地区およびマルチ区から各13樹、ハウス区から10樹を選択し、各樹から無着果春梢葉を1葉ずつ無作為に採取し、各区とも36葉を供試葉とした。採取した葉は、乾燥を防ぐためにビニール袋に密閉し、保湿して保存した。

3.2.2 測定方法

ウンシュウミカン葉におけるLWPおよび近赤外スペクトルの測定は、2005年が6月23日から12月2日、2006年が7月12日から11月15日の期間中において1から2週間の間隔で行った。広範囲なLWPを測定するために、1回の測定では、乾燥ストレスが比較的低い日の出1時間前（以下午前と省略）、乾燥ストレスが比較的高い日の入2.5時間前（以下午後と省略）の2度行った（図3-1）。図1に示したように昼時間は、実験開始時期の夏至から実験終了時期の冬至へとなるにつれて短時間になり、それに合わせ日の出、日の入時間も変化する。そこで測定時間も日の出、日の入時間を基準とし変更した。

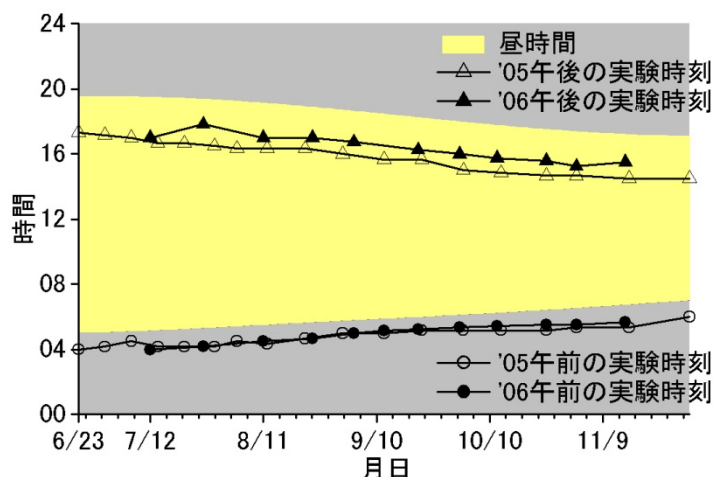


図3-1 実験期間中の昼時間の推移と実験開始時刻

採取した葉は、直後に回折格子式走査型の近赤外分光装置（株式会社マキ製作所製NOA-2000 Ver1.0）を使用し、近赤外スペクトルを測定した。本装置は、光源光を回折格子経由で単色光に変換した後に植物葉に照射し、装置内部のDark測定および白色セラミック基準板の測定から求めたリファレンスを用いて反射率を算出する。サンプルホルダに葉柄を避けウンシュウミカン葉をセットし、1葉あたりの測定で、1 nm間隔に1300 nmから2400 nmの波長域について3回の測定を行い平均した。分光測定後、直ちにプレッシャーチャンバー（PMS社製Model600）を使用し、LWPを測定した。

また、収集したデータの妥当性を確認するために、LWPの変化要因となる日射量、降水量および土壌水分量の測定も行った。日射量は圃場内に小型日射計（英弘精機株式会社製 ML-020VM）、降水量は転倒ます雨量計（株式会社佐藤計量器製作所製7980-S-40）を設置して測定した。台風等で気象観測が中断した際には、圃場から東南東に約8.3 km離れた防府地域気象観測所（防府アメダス）の観測データを使用した。土壌水分は、マルチ区、裸地区のそれぞれ3ヶ所に、簡易土壌水分計（株式会社ウイジン製UIZ-ECH₂O10）を地表面から5 cmの深さに埋設した。ECH₂Oプローブは、誘電率から土壌水分を計測するセンサであり、土壌の誘電率に比例した電圧を出力するため、プレヒート付き電圧ロガー（株式会社ウイジン製UIZ-3635）により記録した。

3.2.3 解析方法

ウンシュウミカン葉におけるLWPおよび近赤外スペクトルの測定結果の解析には、多変量解析ソフトThe Unscrambler (CAMO社製 Ver9.2)を使用した。解析の流れを図3-2に示した。全測定結果をモデル作成用と検定用に分割した後、近赤外分光法の測定結果である反射率をKubelka-Munkの式により吸光度に変換し、重なったピークの変換、隠れたピークの顕在化を行うために、データの前処理としてSavitzky-Golay法で2次微分を行った(宮本, 2004)。Savitzky-Golay法は、ノイズが増幅されると同時に有用な信号が弱められる事を防ぐために、実測スペクトルを最小2乗法により2次の多項式曲線に適合させて重み係数を求めスムージングを行う方法である。そのため、これ以降の解析に用いた波長域は、1320 nmから2380 nmの範囲である。これらのデータを用いて、Partial Least Squares (以下PLSと省略)回帰分析によりモデル作成を行った。PLS回帰分析とは近赤外データに一般的に用いられる回帰分析で、スペクトルデータ特有の多重共線性を考慮した解析法であり、説明変数と目的変数の両変数に誤差を仮定して回帰式を算出する。また、回帰分析の際にクロスバリデーションを行うことにより、検量モデルのオーバーフィッティングを低減させた。

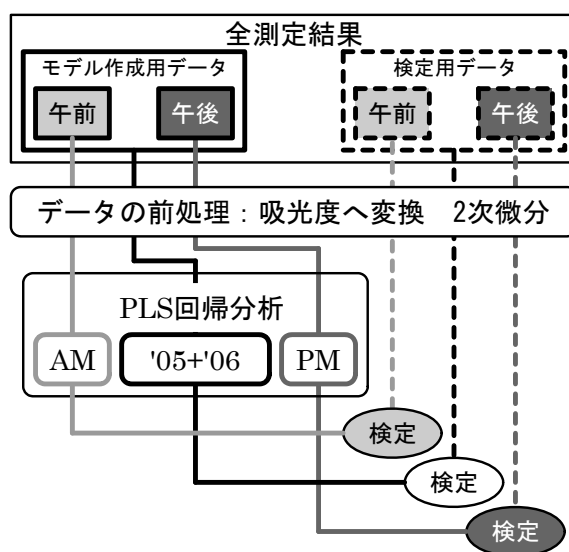


図3-2 スペクトルデータとLWPデータの分割、および解析と検定の流れ

PLS 回帰分析より求められた検量モデルは，推定範囲に違いを持たせるために，解析に使用したデータの違いから 3 個求めた．午前，午後を合わせた全測定結果のモデル作成用データから求められた検量モデル（以下'05+'06 と略す），午前の測定結果のモデル作成用データから求められた検量モデル（以下 AM と略す），そして 午後の測定結果のモデル作成用データから求められた検量モデル（以下 PM と略す）を求めた．3 個の検量モデル各々について，予測精度の評価として，モデル作成用データとは別の検定用データを用いる外的確認法にて，予測精度の検定を行った．

3.3 結果および考察

3.3.1 葉内水分ポテンシャルの推移

測定期間中の LWP の推移を図 3-3 および図 3-4 に示した。2005 年の午前に測定した LWP は 7 月から 8 月にかけて -0.5 MPa 程度を維持し、9 月下旬に一旦上昇したが 12 月上旬の収穫期には -1.0 MPa 程度まで徐々に低下した。図 3-4 に示したように、2006 年の午前に測定した LWP は 7 月から 11 月にかけて -0.5 MPa 程度を維持した後、11 月下旬の収穫期には -1.0 MPa 程度まで低下した。次に午後の測定では、両年ともに午後に測定した LWP には季節的な変化が見られず、採取時の日射量と LWP の関係を解析した結果、相関係数 $r=-0.82$ と高い負の相関関係が認められたことから、測定時の日射条件が大きく影響していたと考えられた。葦沢ら（1979）は、LWP は日射の変動に敏感であると報告している。日射の影響は、測定値の平均の標準偏差にも現れており、午前の測定結果では各区の平均の標準偏差が小さいのに対し、午後の測定結果では比較的大きかった。これは、午後の測定では採取した葉が直射光を受けていたことによって、葉温が変化し、その結果蒸散速度が変化することに起因して LWP に差が生じたためと考えられる（町田ら、1974）。

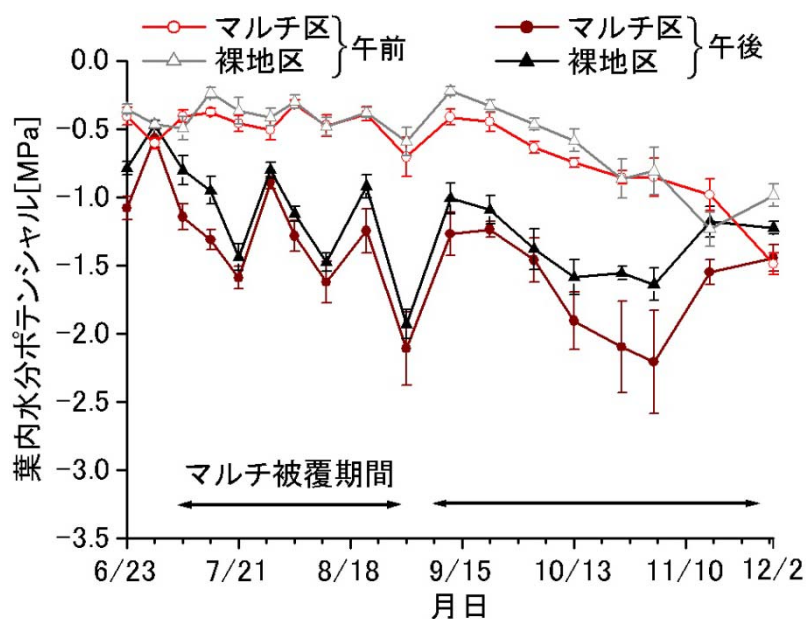


図 3-3 2005 年の実験期間における LWP の推移

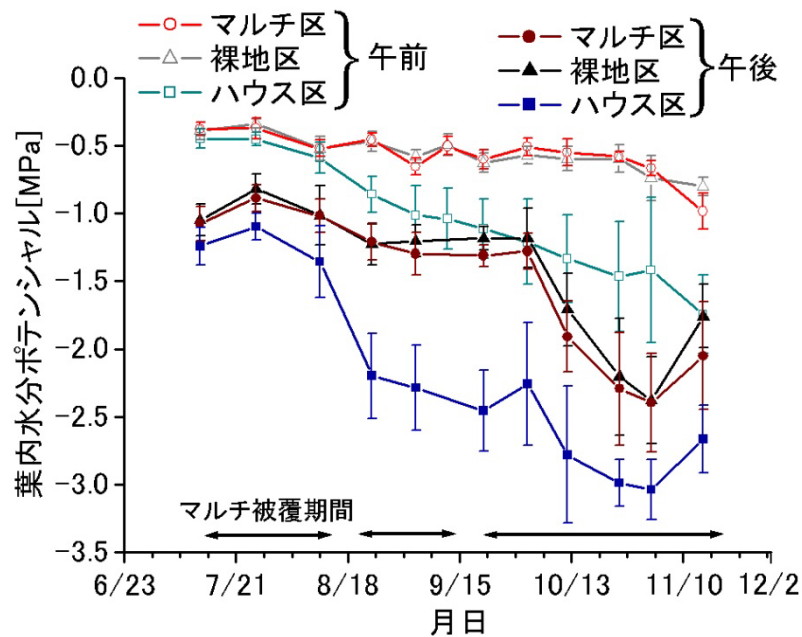
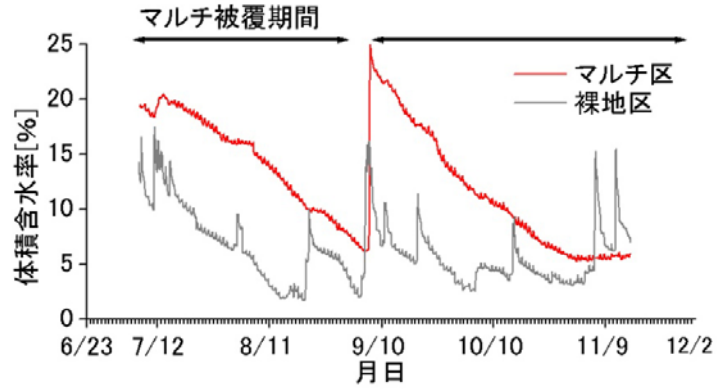


図 3-4 2006 年の実験期間における LWP の推移

日射量とは対照的に，土壤水分量と LWP の間に相関関係は認められなかった．図 3-5a, b に示したように，両年ともに裸地区よりマルチ区の方が土壤水分量は比較的多いにもかかわらず，マルチ区の方が LWP 値は低く水分ストレスが大きかった．桑原らの報告（桑原ら，1997）では，土壤水分量から樹体の水分ストレスを推定することは困難とされており，その理由として一部の土壤の測定では根域全体を把握できないことにあるとしている．

また，2005 年は実験期間を通してマルチ区と裸地区の LWP に有意な差（1%水準）が認められたが，2006 年は収穫期間近の 11 月に入って有意な差がみられたものの，それ以前で差は認められなかった．図 3-6a, b を比較すると，実験期間中の積算日射量は，2005 年（平均日積算日射量 16.4 MJm^{-2} ）が 2006 年（平均日積算日射量 16.1 MJm^{-2} ）より比較的多かった．降水量においても，実験期間中の平年値が 880 mm であるところ，2005 年は平年値以下（平年比 92%）であったが，2006 年は平年値以上（平年比 133%）であった．2005 年の少雨の影響は，マルチ被覆を行うことにより明確に LWP の推移傾向に現れた（桑原ら，1997）と考えられた．

a2005年



b2006年

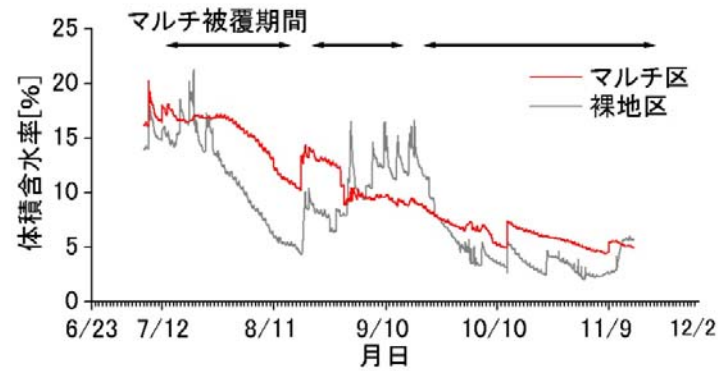
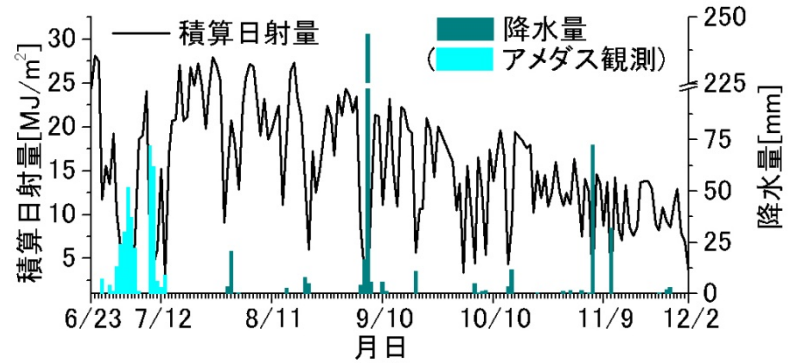


図3-5 実験期間における土壌水分率の推移

a2005年



b2006年

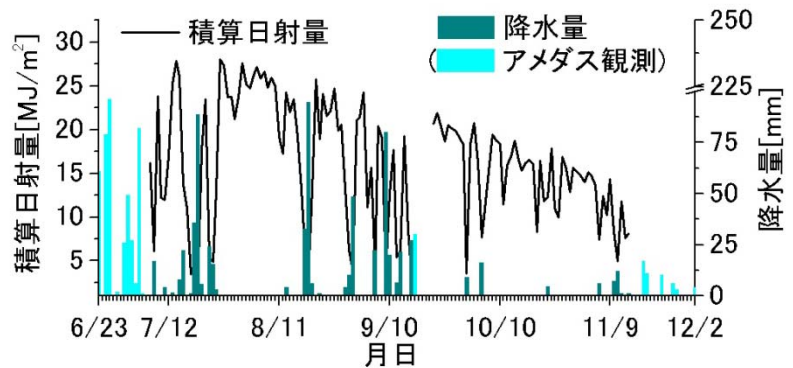


図3-6 実験期間における日積算日射量および降水量の推移

ハウス区については，実験期間中に全く灌水を行っていないため，図3-4に示したように午前，午後の測定ともに期間始めからLWPは低下し続け，期間後半の午前の測定において，日射の影響を受けている露地栽培の午後の測定結果と同様な値まで低下した．以上のことより，2年間における気象環境の継続的な測定結果から，ウンシュウミカン栽培におけるこれらの気象要因により，栽培期間中に広範囲に推移するLWPを網羅した測定結果を収集したとみなせるため，これらの収集したデータから近赤外分光法による推定を試みることにした．

3.3.2 葉内水分ポテンシャルの診断

測定したウンシュウミカン葉の近赤外スペクトルの一例として，図3-7に2006年11月15日午前に測定した吸収スペクトルを示した．近赤外分光法によって得られたウンシュウミカン葉の吸収スペクトルは，OH基による水の吸収帯と一致する1450 nm付近，1930 nm付近に大きな吸収があり，ブロードな形状が認められた．そのため，隠れたピークの顕在化を行うために，2次微分処理を行い解析した．その後，2005年と2006年の全測定結果の内，モデル作成用データ（n=862）を用いてPLS回帰分析を行った．

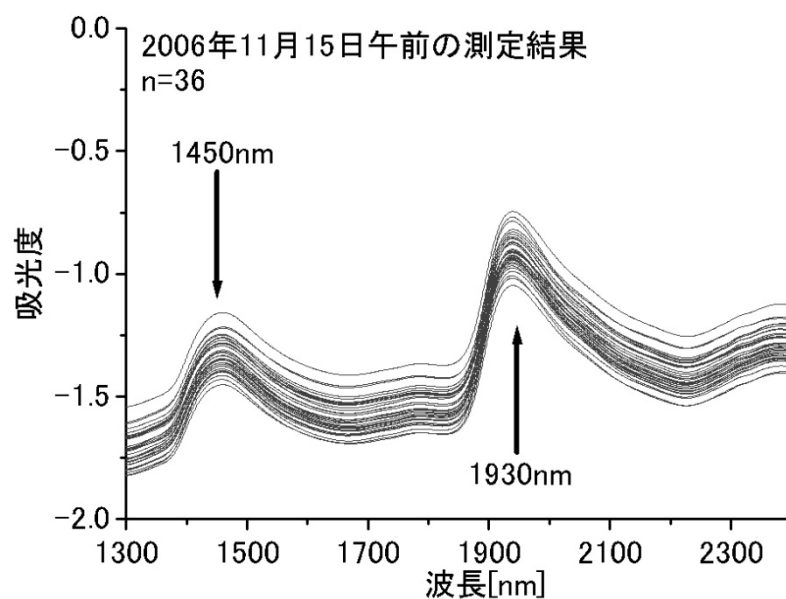


図3-7 ウンシュウミカン葉の近赤外スペクトル

解析により得られた検量モデル'05+'06の検量線精度を図3-8に示した. 重相関係数 (R) は0.79, 検量線の標準偏差 (SEC : Standard Error of Calibration) は0.36MPa, 検量線誤差の平均値 (Bias) は 0.003×10^{-5} MPaの検量線精度が求められた. この結果から, 近赤外域での吸収スペクトルとLWPの間に高い相関関係があることが確認された.

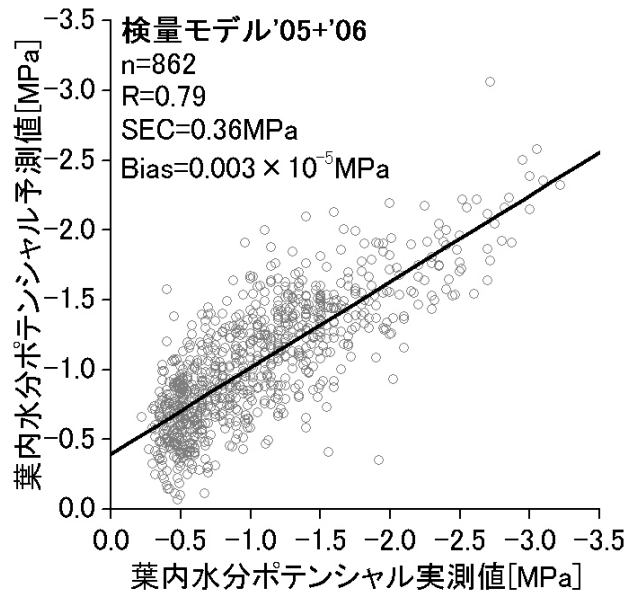


図3-8 検量モデル'05+'06の検量線精度

また, 測定に使用した全1061波長の8主成分 (PCs) の標準化偏回帰係数を図3-9に示した. 特に寄与率が高かったのは, アミド基の吸収バンドである1520 nm付近, メチル基の吸収バンドである1690 nmと1710 nm付近, ヒドロキシル基の吸収バンドである1900 nm付近であった. 寄与率の高い成分が多岐にわたっている理由としては, 緑葉の分光反射率の計測においてクロロフィルや葉の構造が大きく関与することがあげられる (寺島, 1999). しかし, 緑葉中に含まれるクロロフィル量や葉の厚みなどの構造は, 樹体の栄養状態や日照状態, 水分ストレスなど幾つかの条件を履歴が反映されているものと考えられる (蔡, 2002). このため, 高い寄与率の説明変数は, ある特定の成分を現しているのではなく, 代謝に関わる成分が数多く寄与していると考えられた.

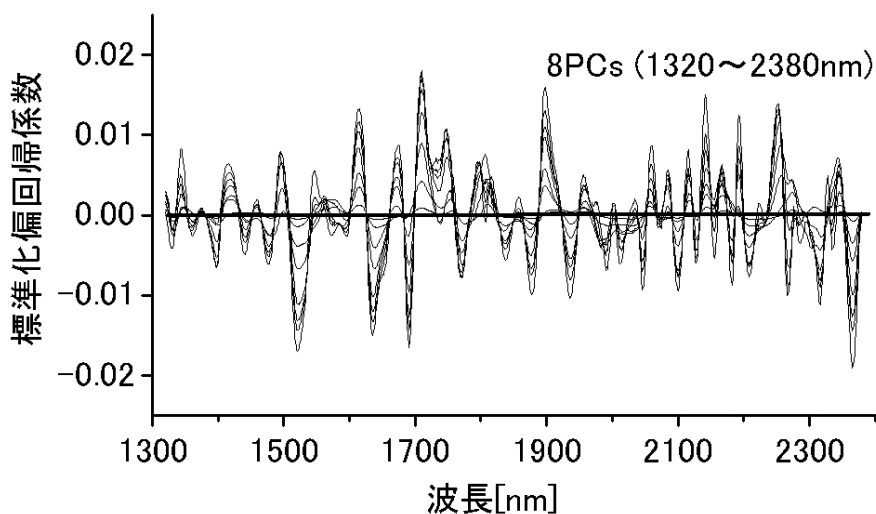


図3-9 検量モデル'05+'06の標準化偏回帰係数

次に，午前，午後の両測定結果から得られた検量モデル'05+'06に対して，外的確認法として検量モデルの作成に用いなかった検定用データ（ $n=861$ ）を用いて予測精度の検証を行った．図3-10に示したように，重相関係数（ R ）0.74となり，検量線精度と比較して相関関係に大きな変化はなかった．予測標準偏差（SEP：Standard Error of Prediction）が0.39 MPa，予測誤差の平均値（Bias）が0.005 MPaとなり，予測の平均2乗誤差は0.15 MPaであった．

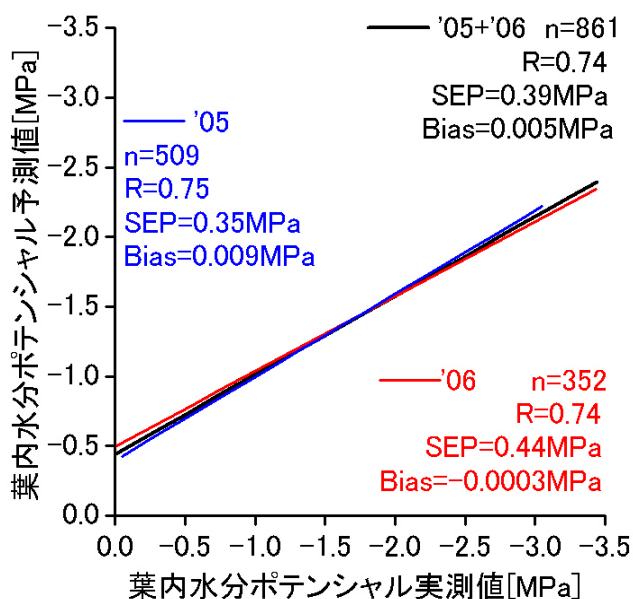


図3-10 検量モデル'05+'06の予測精度

間苧谷ら（1977B）は、実測値であるプレッシャーチャンバーの測定において、同じ樹体であっても陰葉と陽葉で約0.3 MPaの差があるとしており、本研究で求められた検量モデル'05+'06は、LWPの推定において十分な精度であると考えた。このことから、近赤外分光法は、LWPの推定に有効であることが確認された。図3-10には2005年と2006年の各検定用データを用いた年別の予測精度も示した。2005年、2006年の両年を用いた場合の予測の平均2乗誤差が0.15 MPaに対し、2005年が0.12 MPa、2006年が0.19 MPaであり、全推定範囲に対して約1%の変化しかみられず、本研究で求められた推定式の年次間変動が少ないことが明らかになった。さらに、2006年には水分ストレスの比較的高かったハウス区の測定値が含まれているため、2005年よりも推定範囲は約0.5 MPa広くなった。

高糖度果実の生産についての指標として、間苧谷ら（1980）は果実の酸含有量の過度な上昇を防ぐ観点から、酸合成が行なわれる8月下旬までは午前の測定におけるLWPの限界値を-0.7 MPaとし、それ以上に維持することを提案している。また、品質価値の高い小玉な果実を生産するために、果実の肥大が停止もしくは非常に緩慢になる午後のLWPは、-1.8から-2.0 MPaが好適な範囲とされている（間苧谷ら、1980）。よって、果実の品質維持に重要な指標についてさらに高い精度で診断するため、推定範囲を午前の測定結果と午後の測定結果に分け、個々に検量モデルを求めた。午前の測定結果から求められた検量モデルAMの予測精度、午後の測定結果から求められた検量モデルPMの予測精度を図3-11に示した。AM、PM共に'05+'06と比較して重相関係数の上昇が確認され、予測の平均2乗誤差が'05+'06の0.15 MPaに対し、AMが0.01 MPa、PMが0.10 MPaと減少が確認された。また、午前の推定範囲が-0.6 MPaから約±0.3 MPa、午後の推定範囲が-1.8 MPaから約±1.0 MPaであることから、果実の品質維持に重要な指標となるLWPの推定範囲を十分に満たしていることが確認された。

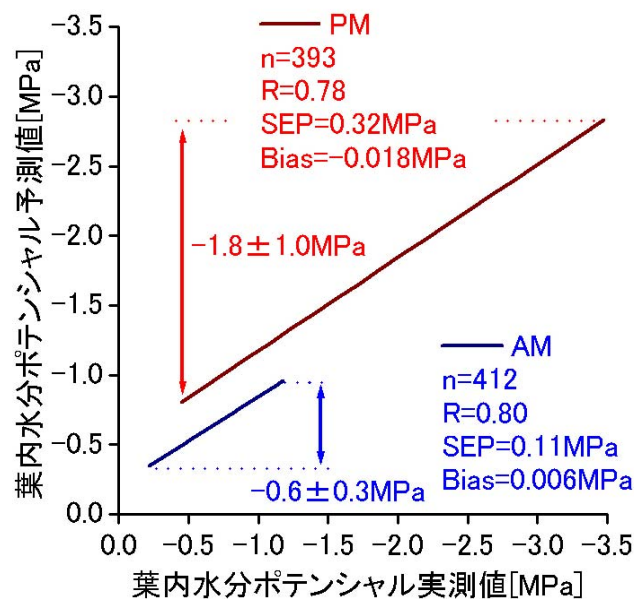


図3-11 検量モデルAM, PMの予測精度

これにより，果実の品質維持に重要な指標を個々に推定することも可能であり，特定の栽培時期や測定時期に応じた診断に適用可能であると考えられた．しかし，図3-9に示したように推定に必要な波長が広域にわたっており，相関関係の高い特定の波長を絞り込むことはできなかった．近赤外分光器にLWPの推定に必要な広範囲の波長を照射するためには，高出力な光源が必要となり，そして大掛かりな光源用冷却装置が必要となる（大倉ら，2004）．今後は，LWPの推定に必要な波長域を特定することにより，現地圃場で簡易に使用可能な携帯用近赤外分光器等の開発が可能となる．また，1葉あたりの測定時間もプレッシャーチャンバーでは数分を要するところを，近赤外分光法を用いた場合は数秒であるため，測定環境に敏感なLWPを測定するうえでは有利になる．今後，本推定方法を用いた測定装置を開発することにより，LWPを非破壊かつ迅速に測定することが可能となり，ウンシュウミカン樹の水分ストレス診断が可能であると考えた．

3.4 結論

今日のカンキツ栽培においては、消費者の高糖度果実の要求、需要のため、高糖度な果実を、隔年結果が生じず安定生産を可能とすることを目標にしている。そのための樹体管理方法として現在主流の篤農家の達観を、科学的に測定・分析し、後継者や新規就農者でも現地診断が可能な技術開発が望まれている。そこで、ウンシュウミカンを対象とし、非破壊計測法である近赤外分光法を用いたLWPの測定を、従来の測定方法であるプレッシャーチャンバーと比較して行った。2年間の定期的な測定を行うことにより、水分ストレスの診断として十分な測定範囲(-0.2から-3.2 MPa)を網羅したデータを収集し、近赤外分光法によるLWPの推定方法を検討した。植物葉を1300 nmから2400 nmの波長域で反射率の測定を行った結果を吸光度に変換し、2次微分処理を行った後、PLS回帰分析を行うことにより、LWPと相関関係のある検量モデルを求めた。その結果、求められた検量モデルは年次間変動が推定範囲に対して約1%の誤差と小さく、予測の平均2乗誤差が0.15 MPaと高精度であり、全栽培期間を通して診断に十分なLWP範囲を推定することが可能であった。また、本推定手法を用いて特定の栽培期間や測定時期に応じたLWPの指標を個々に推定した場合は、約1.0 MPaと限定された範囲において予測の平均2乗誤差が0.01 MPaと高精度に推定することが可能であった。よって、近赤外分光法は、ウンシュウミカン葉のLWP推定において、非破壊・簡易で迅速な診断技術であると示唆された。

3.5 引用文献

- Scholander, P. E. , H. H. Wiebe, E. A. Hemmingsen and E. D. Bradstreet : Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants, Proc. Nat. Acad. Sci. , 52, pp. 119-125(1964).
- D. Suhandy, N. Khuriyati and T. Matsuoka : Determination of leaf water potential in tomato plants using NIR spectroscopy for water stress management, Environ. Control. Biol. , 44-4, pp. 279-284(2006).
- 葦澤正義, 後藤俊彦, 真部桂 : カンキツ葉内水分不足に関する研究 I 光線, 温度, 乾燥が温州ミカン葉の水分ポテンシャルに及ぼす影響, 香川大学農学部学術報告, 30, pp. 133-144(1979).
- 岩本睦夫, 河野澄夫, 魚住純 : 近赤外分光法の応用 近赤外分光法入門, 幸書房, pp. 130-155(2002).
- 大倉力, 服部秀三 : 近赤外分光法 II. 近赤外分光計測器の装置技術, 分光研究, 53-2, pp. 109-127(2004).
- 桑原実, 大場善材, 野方仁 : ウンシュウミカンのフィルムマルチ栽培に関する研究 第2報 ワセウンシュウミカンの果実品質に及ぼす多孔質フィルムの被覆開始時期の影響, 福岡農総試研報, 16, pp. 76-81(1997).
- 蔡 晃植 : クロロフィル, 植物分子生理学入門, 奈良先端科学技術大学院大学バイオサイエンス研究科植物系全教員, 学会出版センター, pp. 114-119(2002)
- 佐々木俊之 : 秋季におけるウンシュウミカンの水ストレスの指標としての葉の巻き上げ度(葉身の閉鎖程度), 園学雑, 74別2, p. 114(2005).
- 寺島一郎 : 光環境と葉の光合成 - 生体生理学者からの視点 -, 秀潤社, pp. 92-101(1999).
- 中里一郎, 松永茂治, 岸野功 : ウンシュウミカンのフィルムマルチ栽培における果実肥大期の果実品質と収穫時の果実品質との関係, 長崎果樹試研報, 4, pp. 17-26(1997).
- 中本勝彦, 平尾晃, 湯浅哲信 : ワセウンシュウの葉の調位運動

- を利用した水管理指標が樹体および果実形質に及ぼす影響，
園学雑， 67別2， p. 194(1998).
- 農林水産省：果樹農業振興基本方針， http://www.maff.go.jp/www/press/cont2/20050330press_8b.pdf (2005A).
- 農林水産省：早わかり！新しい果樹対策ver4.， http://www.maff.go.jp/tohoku/seisan/kazyu/keikaku/pdf/kazyu_ver4.pdf - 2008-04-24 (2005B).
- 野並浩：植物水分生理学， 養賢堂， pp. 236-252(2001).
- 間苧谷徹， 町田裕：果樹の葉内水分不足に関する研究（第6報）
葉の水ポテンシャルが温州ミカン樹の生育に及ぼす影響， 園学雑， 45， pp. 329-334(1977A).
- 間苧谷徹， 町田裕：果樹の葉内水分不足に関する研究（第7報）
夏季の葉の水ポテンシャルが温州ミカンの収穫時の果実品質に及ぼす影響について， 園学雑， 46， pp. 145-152(1977B).
- 間苧谷徹， 町田裕：夏季におけるウンシュウミカン樹の水管理の指標としての葉の水ポテンシャル， 園学雑， 49， pp. 41-48(1980).
- 町田裕， 間苧谷徹：果樹の葉内水分不足に関する研究（第1報）
Pressure chamberによる温州ミカン葉のwater potentialの測定法について， 園学雑， 43， pp. 7-14(1974).
- 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).
- 森永邦久， 島崎昌彦， 草場新之助， 星典宏：カンキツ生産の新しい技術 マルドリ方式 その技術と利用， 近畿中国四国農業研究センター， p. 131(2005).
- 山本晴彦， 鈴木義則， 小島孝之， 早川誠而， 井上康， 田中宗浩：近赤外域の分光反射特性による植物の葉内水分量の推定， 日本リモートセンシング学会誌， 14-4， pp. 9-17(1994).

第4章 総括

本研究では、近年発展している分光技術を用い、その応用として「分光特性を用いた植物制御と診断」を試みた。

分光特性を用いた「植物制御」では、光が原因で発生する農作物の光害に注目し、街路灯などの農地に隣接する照明からの漏れ光による被害が発生しているイネの出穂遅延の事例を対象とした。人々が安全に通行可能な夜間の光環境を形成しつつ光害を回避するため、水田に漏れ光が照射された場合でも光害が発生しない光質、光周期等の光条件の探索を試みた。

その結果、青色（700 Hz・60%）・緑色（50 Hz・60%）・黄緑色（700 Hz・70%）LED光源は、出穂遅延への影響が小さく、近紫外・黄・赤色LED光源は影響が大きく出穂遅延を起こすことが示唆された。また、発光制御した青・緑・黄緑色の混合LED照明は、コシヒカリを栽培した圃場において最高で約10 lxの照射をした場合でも、出穂遅延が最大約2日であり、収量への影響もほとんどなかった。しかし、視認性評価では、やや白色LED照明より印象評価、色認識の点で劣った。以上のことから、混合LED照明、つまりイネ光害の分光特性を応用し、照射波長域選択および発光制御を行った照明は、視認性の課題解決のため、既存の防犯灯（5 lx）より高照度で照射する必要があるが、光害回避型の防犯灯として有効であると示唆された。

分光特性を用いた「植物診断」では、高糖度な果実を、隔年結果が生じず安定生産を可能とすることが求められているカンキツ栽培において、課題となっている水分ストレス制御を対象とし、近赤外分光法による非破壊・簡易で迅速な葉内水分ポテンシャルの診断を試みた。

その結果、1300 nmから2400 nmの波長域のウンシュウミカン葉の反射率を測定し、吸光度に変換、2次微分処理を行った後、PLS回帰分析を行うことで、高精度な検量モデルが求められた。本研究で求めた検量モデルは、年次間変動が推定範囲に対して誤差約1%であり、さらに特定の栽培期間や測定時期に応じたLWPの指標を個々に推定した場合は、誤差が0.01 MPaの高精度で推定

することが可能であった。よって、非破壊・簡易で迅速なカンキツ樹の水分ストレス診断には、近赤外分光法が適用可能であると示唆された。

以上のように、LED光源の開発でより狭い波長域の光照射や発光制御が可能となったこと、つまり分光放射技術の発展は、イネ光害回避型照明の開発を可能とした。また、近赤外分光法における装置の小型化や解析ソフトの普及、つまり分光測定技術の発展は、カンキツ樹体の非破壊かつ迅速で簡易な水分ストレス診断を可能とした。

摘要

本研究では、近年発展している分光技術を用い、その応用として「分光特性を用いた植物制御と診断」を試みた。

分光特性を用いた植物制御では、光が原因で発生する農作物の光害に注目し、水田に漏れ光が照射された場合でも光害が発生しない照明の開発を行った。選択的な波長域の照射や発光制御が比較的容易な発光ダイオードLEDを用いて、夜間に照射された光源の波長域と、その発光制御（パルス発光周波数およびデューティ比）に伴うイネの出穂への影響を、イネ開花誘導遺伝子 *Hd3a* の発現から調査した。その結果、青（700 Hz・60%）・緑（50 Hz・60%）・黄緑（700 Hz・70%）LED光源は、出穂遅延への影響が小さく、近紫外・黄・赤LED光源は影響が大きく出穂遅延を起こすことが示唆された。そこで、発光制御した青、緑、黄緑の混合LED照明を用いて、イネの出穂および収量への影響を調査した。その結果、圃場において、5 lxで照射を受けた場合であっても、出穂遅延が約2日であった。また、収量への影響もほとんどなかった。このように、夜間に照射する光源の波長域の選択および発光制御により、光害軽減が可能であると示唆された。

分光特性を用いた植物診断では、カンキツ栽培において課題となっている水分ストレス制御を対象とし、近赤外分光法による非破壊・簡易で迅速な葉内水分ポテンシャルの診断を行った。1300 nmから2400 nmの波長域で葉の反射率の測定を行った結果を吸光度に変換し、2次微分処理を行った後、PLS回帰分析を行うことにより、検量モデルを作成した。その結果、近赤外スペクトルと葉内水分ポテンシャルには相関関係が認められ、高精度（RMSEP 0.15 MPa）な検量モデルが求められた。

以上のように、LED光源の開発でより狭い波長域の光照射や発光制御が可能となったこと、つまり分光放射技術の発展は、イネ光害回避型照明の開発を可能とした。また、近赤外分光法における装置の小型化や解析ソフトの普及、つまり分光測定技術の発展は、カンキツ樹体の非破壊かつ迅速で簡易な水分ストレス診断を可能とした。

Abstract

In this study, "Plant Control and Diagnosis Using the Spectral Characteristic" was tried as the application using spectroscopic technology which is developed in recent years,

About plant control using the spectral characteristic, I observed the light pollution for agricultural products generated owing to light. Therefore, I tried to develop the lighting system to prevent the effects of light pollution on rice, even when irradiated with leak light. Using light emitting diodes (LEDs), which make it relatively easy to irradiate selective wavelengths and control luminescence, the effects on the heading of rice of the wavelengths of the light source when it was exposed to at night and the control of luminescence (pulse emission frequency and duty ratio) was investigated through the expression of floral activator *Hd3a*. The results indicated that, under blue (700 Hz, 60 %), green (50 Hz, 60 %) or yellow-green (700 Hz, 70 %) LEDs, the effect on the delay of flowering was small, but under near ultraviolet, yellow or red LEDs, it was large. Consequently, the effect on the heading and yield of rice was investigated using a mix of blue, green and yellow-green LEDs illumination. The results indicated that in a field, the heading of rice exposed to 5lx was delayed by two days. Moreover, mixed LEDs illumination had little or no effect on the yield. Therefore, it was suggested that by selecting the wavelength of light sources to which rice is exposed and controlling the luminescence, it is possible to mitigate light pollution.

About plant diagnosis using the spectral characteristic, I observed of the water stress control which has been a subject in citrus cultivation. Therefore, I tried to diagnose the leaf water potential (LWP) by near-infrared spectroscopy which is

non-destructive, quick and simplified method. The result of the reflectance which measured the leaf in a 1300 to 2400 nm wavelength is changed into absorbance, it is processed by secondary differential, and prepared calibration models by computing PLS (partial least squares) regression analysis. As a result, correlation was confirmed between near infrared spectroscopy and leaf water potential, while accurate calibration models (RMSEP was 0.15 MPa) were additionally obtained.

As stated above, development of the LED light source enabled irradiation of a narrower wavelength band and luminescence control, in fact, development of spectrum radiation technology enabled development lighting system to prevent the effects of light pollution on rice. Moreover, miniaturization of measurement systems and dissemination of analysis softwares in near-infrared spectroscopy, in fact, development of spectrometry technology enabled non-destructive, quick and simplified water stress diagnosis of citrus tree.

謝辞

本研究は、以下のプログラムによる助成を頂いた。ここに厚く謝意を表します。

平成16～17年度科学研究費補助金(基盤研究(C) 課題番号16580205「分光計測とグラニエ法を併用したカンキツの水分ストレス診断技術の開発」)

山口大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー教育研究施設、平成18年度実用化研究助成プログラム(第2回募集)「近赤外分光法による植物葉の水分ストレスモニタリング手法の開発と実用化」

平成18・19年度住宅・建築関連先端技術開発助成事業「屋上・壁面緑化によるヒートアイランド緩和効果に関する評価技術の開発」

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」

本研究を行うにあたって、みなさまに多大なご指導、ご助言を頂いた。山口大学の方々、特に長年ご指導して頂きました山本晴彦教授、岩谷潔研究員、高山成研究員、吉越恆研究員、園山芳充研究員に感謝しております。また、山口県立農業大学校の平山寛さん、岡崎仁さん、和歌山県農林水産総合技術センターの宮本久美さん、株式会社相馬光学の朴善姫さん、山口大学農学部附属農場の長砂光冶技官には、実験を行うにあたっての圃場の整備や解析技術をご教授頂いた。そして、ともにイネ光害を研究してきた山北敦子さん、金子奈々恵さんをはじめ山本研究室のみなさま、ご協力ありがとうございました。

学会誌公表論文一覧

1. 近赤外分光法を用いたウンシュウミカンの葉内水分ポテンシャルの非破壊推定
原田 陽子・山本 晴彦・岩谷 潔・高山 成
照明学会誌 第93巻 第5号 pp.278-283

第3章

2. 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* の発現に及ぼす影響
原田 陽子・山本 晴彦・岩谷 潔・金子 奈々恵・園山 芳充
照明学会誌 第96巻 第11号 pp.733-738

第2章 2.2

3. 発光制御を行った混合LED夜間照射がイネ出穂に及ぼす影響
原田 陽子・山本 晴彦・岩谷 潔・金子 奈々恵・園山 芳充
照明学会誌 第97巻 第8A号 pp.442-446

第2章 2.3

4. イネ光害回避型照明の視認性評価
原田 陽子・山本 晴彦・岩谷 潔・金子 奈々恵
照明学会誌 第97巻 第8A号 pp.436-441

第2章 2.4