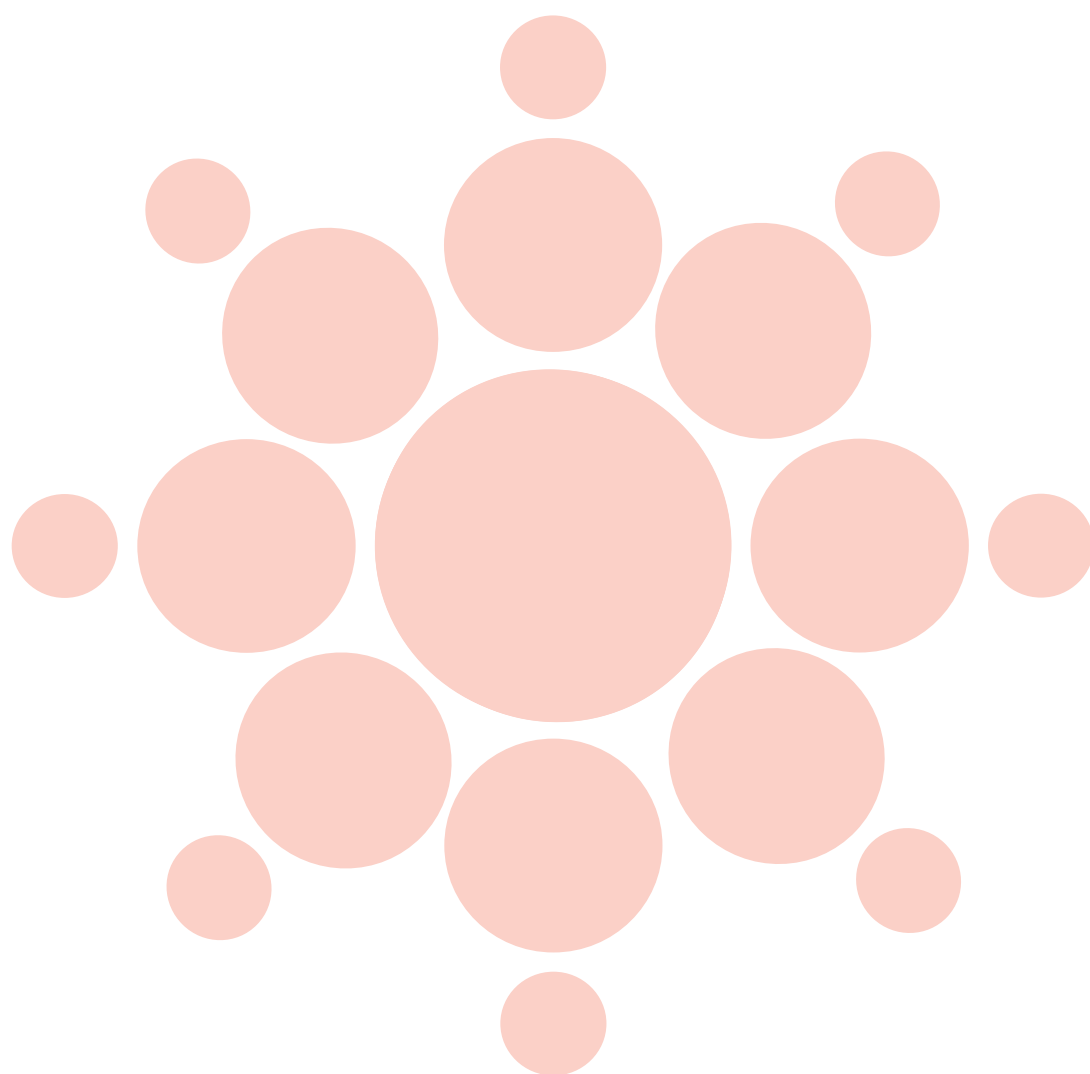


キク電照栽培用

光源選定・導入のてびき

光源の特性と花芽分化抑制効果を理解するために



2014年3月(改訂)

農林水産省委託プロジェクト
「国産農産物の革新的低コスト実現プロジェクト」
「光花きコンソーシアム」編

はじめに

植物は光を、光合成を行うためのエネルギー源として、または自身の周囲の環境を認識するためのシグナルとして活用しています。人はそれらの植物の生理反応について研究を進め、実際の栽培技術に活用してきました。

キク栽培においては、夜間の照明により花芽分化を抑制できることが昭和初期に明らかになり、昭和22年には現在の愛知県田原市で電灯を用いることで開花期を調節する電照栽培が始まったとされています。その電照にはこれまで主に白熱電球が使用されてきました。

最近では「省エネ」「節電」「二酸化炭素排出量削減」を求める社会情勢や、新しい光源を比較的低価格で購入できるようになったことから、白熱電球と比較して光変換効率が高く長寿命である蛍光灯や発光ダイオード（LED）等の導入が進んでいます。

これらの光源は、電照にかかる電気代削減など農業経営上のメリットが大きい一方で、波長特性や光の強さ、光の広がり方が白熱電球とは異なり、また照明器具の構造の違いによる問題点も明らかになってきたことから、導入に対する不安の声が聞かれ始めました。

そこで今回、安心して新たな光源を導入できるよう、本てびきを作成しました。本てびきが電照ギク生産者、農業指導者、光源製造・販売メーカーの方々の参考となることを期待しています。

「光花きコンソーシアム」

本てびきは、農林水産省委託プロジェクト「国産農産物の革新的低コスト実現プロジェクト」の一環として作成されました。

「光花きコンソーシアム」は以下の機関で構成されています

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構

国立大学法人香川大学

兵庫県立農林水産技術総合センター

山形県

長野県野菜花き試験場

和歌山県

パナソニック株式会社 エコソリューションズ社

鹿児島県農業開発総合センター

電照栽培の現状

ページ

-
- | | |
|---|---|
| 1 光とは何だろう？ | 3 |
| 2 白熱電球での一般的なキクの電照方法は
50ルクス・3～4時間夜間照明 | 5 |
| 3 まだまだ多い白熱電球、
施設に多い蛍光灯、発展途上のLED | 7 |

光源利用のてびき

光源を替えると
何が変わる？

-
- | | |
|---|----|
| 1 光源選びの留意点 | 9 |
| 【電球型光源の特徴】 | |
| 2 白熱電球の特徴は | 11 |
| 3 蛍光灯（電球型）の特徴は | 13 |
| 4 発光ダイオード（LED）の特徴は | 15 |
| 5 ヒトには同じに見える光でも、分光分布
が異なり、花芽分化抑制能力も異なる | 17 |
| 6 ヒトとキクでは光の感じ方が違う
花芽分化抑制には赤色の光が効果的 | 19 |

光源の
設置方法は？

- | | |
|--------------------------------------|----|
| 7 花芽分化抑制に必要な
基準照度は光源ごとに考えよう | 21 |
| 8 新たな光源で
花芽分化抑制に必要な照度は？ | 23 |
| 9 花芽分化抑制能力の判断に
照度計が使える場面、注意が必要な場面 | 25 |
| 10 光源を交換したら見直したい設置間隔 | 27 |

コストは？

- | | |
|-----------------|----|
| 11 光源の耐用年数を計算する | 29 |
| 12 光源の経済性を評価する | 31 |
-

キク電照栽培用 「光源選定・導入のてびき」では、
最も普及している測定機器 **【照度計の活用】**を前提にしています。

【 解 説 】

ページ

光の 測り方

- | | |
|---|----|
| 1 知っておきたい光の強さを表す単位
～ ‘照度’ だけでは表せない光の強さ ～ | 33 |
| 2 光の強さの測定機器は特性を理解して使う | 35 |
| 3 意外と多い！光の強さ測定時の注意点 | 37 |

花芽 分化抑制のしくみ

- | | |
|-----------------------------------|----|
| 4 必要な光量は常に変化している
一番強い光が必要な条件は？ | 39 |
| 5 赤色が効果的！キクの花芽分化抑制 | 41 |
| 6 異なる光源の花芽分化抑制能力を比較するには | 43 |
| 7 波長特性が異なる光源間で花芽分化抑制能力を比較する | 45 |
| 8 ここまで分かった！キクの開花調節機構 | 47 |

- | | |
|----------|----|
| 用語集・参考資料 | 49 |
|----------|----|

【コラム】

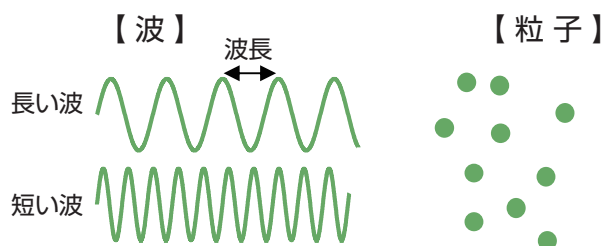
- | | |
|-----------------------------------|------|
| ○蛍光灯やLED使用時には通電容量に余裕を持たせて | … 10 |
| ○「突入電流（Inrush Current）」にご注意を | … 12 |
| ○光源の色の表しかた | … 14 |
| ○白熱電球の生産は中止されるのか？ | … 18 |
| ○害虫が引き寄せられやすい光源がある | … 22 |
| ○品種や光照射条件によっては遠赤色光も
花芽分化抑制効果あり | … 42 |

1

光とは何だろうか？

1. 光は‘波’と‘粒子’の性質を持っている

「光」とは、「電磁波の一種で、波の性質とエネルギーの固まりとしてふるまう粒の性質の両方を持つ」とされています。



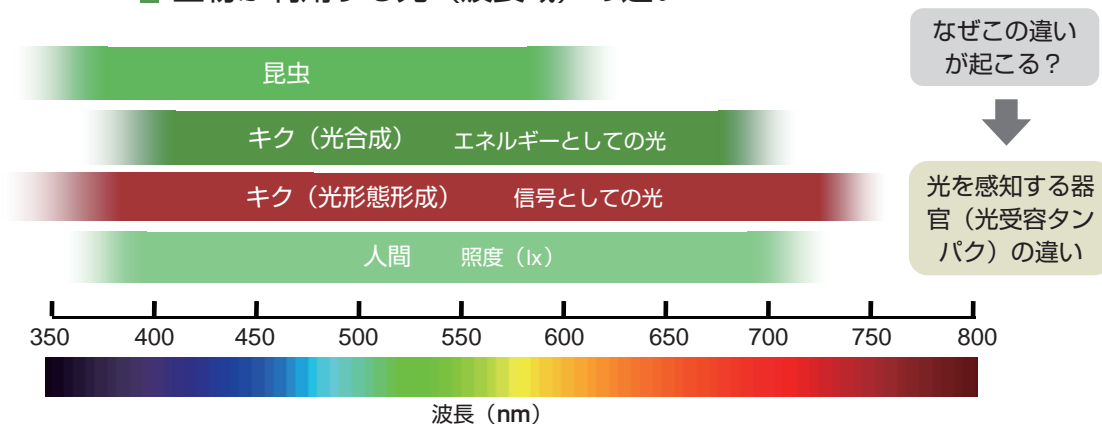
2. 光の色は‘波長’によって決まる

光の波の周期を「波長」といい国際照明委員会では波長 1 nm（ナノメートル、1 mmの百万分の1）から 1 mmの範囲を「光照射」と定義しています。

光照射のうち、ヒトが目で感じる光は「可視光」です。その波長域については複数の定義がありますが、概ね380～780nmの範囲です。他にも可視光より短い波長域にX線、紫外線、可視光より長い波長域に赤外線、電波があります。

例えば波長400～800nmの光は、青色部（B 400～500nm）、緑色部（G 500～600nm）、赤色部（R 600～700nm）、遠赤色部（FR 700～800nm）と区分する場合があります。

■ 生物が利用する光（波長域）の違い



3. ヒト、キク、昆虫では感じ取ることができる波長域が異なる

キクが利用する光は近紫外域（300 nm）から遠赤色部（800 nm）でヒトの可視光よりやや広がっています。なお、昆虫が誘引される光は、主に紫外域（250 nm）から緑色（580 nm）の範囲であり、640 nm以上の波長にはほとんど感度がない、とされています。

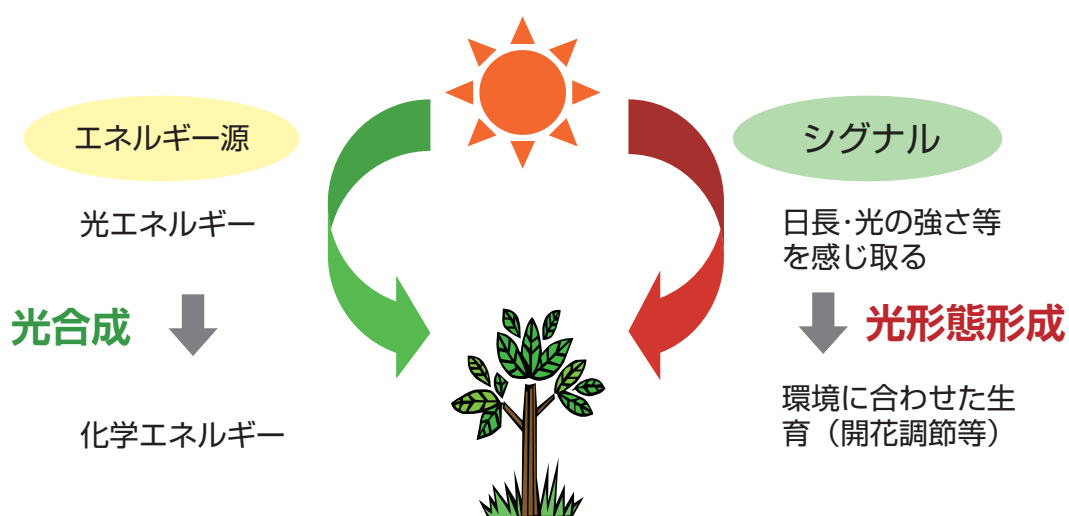
4. シグナルとしての光、エネルギー源としての光

キクにとって、光には2種類の役割があります。

一つは日長など周囲の環境を判断するためのシグナルとしての役割です。これは比較的弱い光で十分であるため、これまで白熱電球のような光源が日長操作に使用されてきました。

もう一つが光合成を行うためのエネルギーとしての役割です。これには強い光が必要で、人工光源で必要量を満たすには非常に多くのエネルギーが必要です。電照栽培で用いているような光源では、その効果は不十分です。

今回このマニュアルで説明する電照栽培用光源は、前者の光シグナル調整用として使われています。



2

白熱電球での一般的なキクの電照方法は50ルクス・3～4時間夜間照明

キクは短日植物であるため、夜が一定以上の長さになると開花します。そのため、キク電照栽培では夜間に電照を行い、キクに夜が短いと感じさせて花芽分化を抑制し、切り花長の確保や出荷時期の調節を行っています（右図および解説編5、同8参照）。

1. 電照方法

電照方法は、電灯照明をする時間帯によって分類されています。

①暗期中断電照（暗期の途中で電照し暗期を途中で分割）、②間欠電照（点灯－消灯の繰り返し、暗期中断電照の一種）、③初夜電照（暗期の最初の照明）、④早朝電照（夜明け前の照明）がありますが、一般的には暗期中断電照が行われています。

2. 照度と照明時間

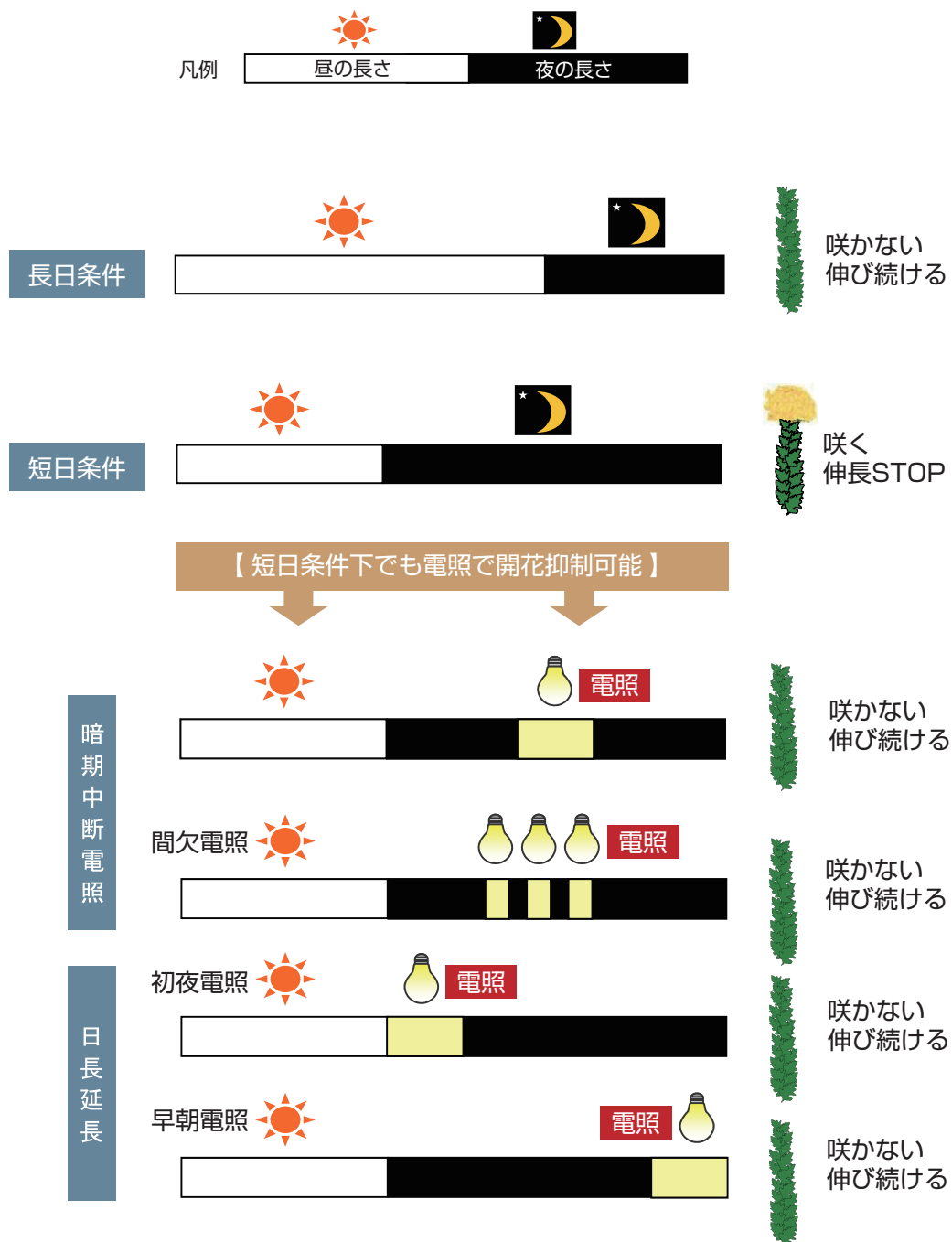
白熱電球を用いる暗期中断電照の場合、一般的に10㎡に1球設置し、秋ギクでは50ルクス（以下、50 lxと表記）以上の照度を確保し3～4時間照明を行う、とされています。夏秋ギクの場合には照度50 lx・4時間以上の照明が必要とされていますが、やなぎ芽の発生防止のため、5時間照明とすることも多いようです。

栽培品種によって、花芽分化抑制に有効な照度と照明時間は異なります。



蛍光灯による電照

■ 電照による花芽分化抑制（模式図）



3

まだまだ多い白熱電球、 施設に多い蛍光灯、発展途上のLED

平成24年1月から3月にかけて、全都道府県を対象にアンケート「キク栽培用光源の使用実態調査」を実施し、現在の電照用光源の使用状況を確認しました。結果は以下のとおりです。

1. 電照ギク栽培の割合は？

キク類（輪ギク、スプレーギク、小ギク）栽培ほ場の約6割に光源が設置されています（図1）。

2. 使用されている光源の種類は？

○白熱電球から蛍光灯及び発光ダイオード（LED）への転換が進んでいます。

従来の主力である白熱電球からその他の光源への転換は、光源が設置されているほ場の約35%まで進んでおり、現時点ではそのほとんどが蛍光灯です（図2）。

○これまで白熱電球でも利用してきたソケットの継続使用が可能な電球形光源が主に利用されています。

○露地栽培と施設栽培で導入状況に差があります。

施設栽培では露地栽培よりも、白熱電球からその他光源への転換が進んでいます（図3）。露地栽培での転換が遅れている主な要因としては、風雨に対する耐候性への不安等があげられています（なお、露地電照栽培は沖縄地域と鹿児島県奄美地域で多くなっています）。

3. どんな蛍光灯や発光ダイオード（LED）が導入されている？

○蛍光灯

導入されている製品の90%以上が消費電力20ワット以上（推定21～23ワットの商品が主）で、その中では電球色の利用が最も多い。

○発光ダイオード（LED）

導入されている製品の90%以上が赤色です。

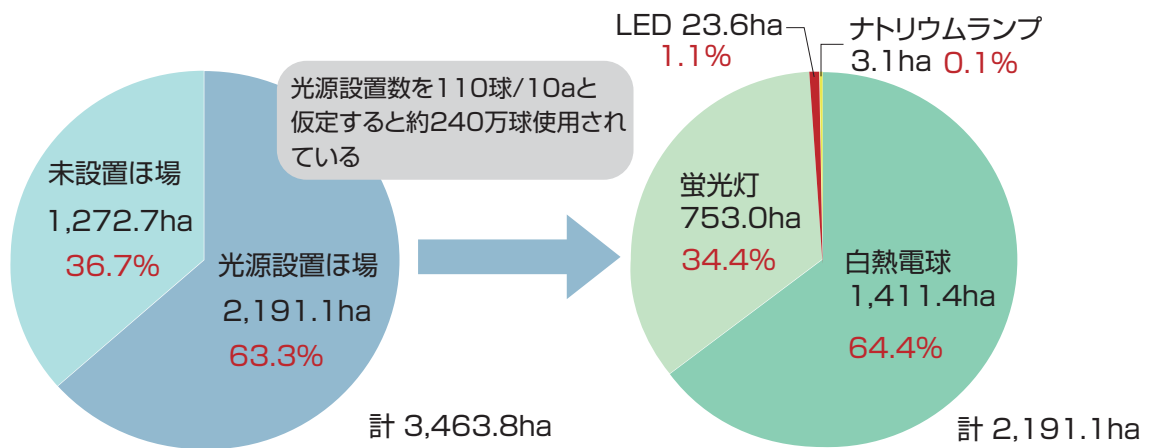


図1 光源設置ほ場の割合

図2 光源設置きく類栽培ほ場に占める各種光源の割合

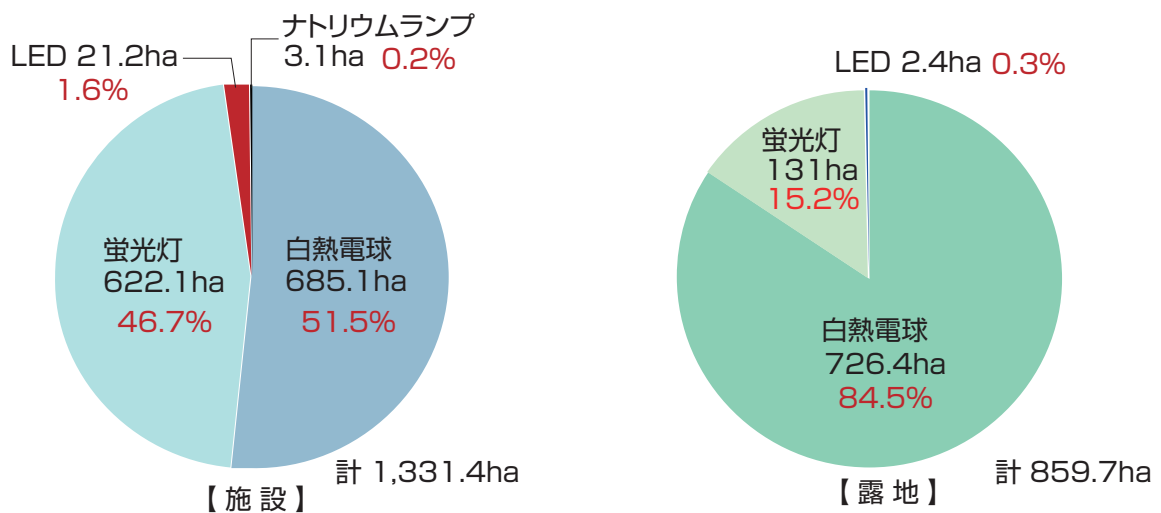


図3 光源設置ほ場の施設・露地別光源の種類

【きく類栽培用光源の使用実態調査結果】

農研機構花き研究所HP (<http://www.naro.affrc.go.jp/flower/index.html>) から情報の入手が可能

1

光源選びの留意点

キク電照用の光源には、白熱電球を中心に、蛍光灯、発光ダイオード(LED)などが使われていますが、それぞれ商品によって、明るさ(照度)、光の色、消費電力、価格、耐候性、強度などが異なります。いずれもキク電照栽培では把握すべき重要なポイントです。

1. 明るさ、光の色、波長分布 = 花芽分化抑制能力

秋ギクに白熱電球を用いた場合、一般的に50 lxかつ3~4時間の電照が必要とされています。光源が異なると照射される光の色や明るさが変わります。光の色によって必要な明るさも変わります。

2. 消費電力

消費電力が少ないほど、電気代を削減できます。またブレーカー容量に対して何個設置できるかにも関係しますが、これには力率や皮相電力、突入電流(P12 コラム参照)も考慮する必要があります。

3. 寿命

光源の種類によって異なります。短いと更新頻度が多くなります。

4. 価格

価格が安いほど、導入コストを削減できます。

5. 耐候性・防水性

キク栽培の環境は温室内か露地か、暖地か寒冷地か、風雨・台風・潮風に当たりやすいか等様々です。一般的に流通している家庭用光源は主に一般家屋内での利用を前提に製造されていますので、それらと比較すると温度・湿度の変化、直射日光(紫外線曝露など)、水、チリ等に対する高い耐性が必要となります。

※電照栽培用には、農業環境での使用を前提として製造・販売している商品の使用をおすすめします。

6. 強度

特に発光面にガラス素材を使っている光源は破損しやすいので注意が必要です。



使用の際は、メーカーの示す使用上・安全上の注意事項を守りましょう

代表的な電球型光源の主な特徴 (てびき編2~4参照)

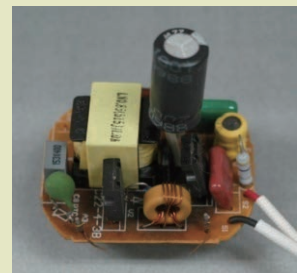
	白熱電球	蛍光灯	LED
色	電球色	電球色、温白色、白色 昼白色、昼光色、ピンク色など	可視光から目に見えない光 (紫外線、近赤外線)まで
消費電力	大 (60~100W程度)	中 (13~23W程度)	小 (6~13W程度)
定格寿命	短い (1,000~2,000時間)	中 (5,000~13,000時間)	長い (40,000時間)
価格	安い (150~200円程度)	中 (400~1,500円程度)	高い (1,000~4,000円程度)
防水性	○ (完全密閉)	△ (熱対策が必要であり それが防水性に影響)	○~△ (熱対策が必要であり それが防水性に影響)
力率*	高い (1.0)	やや劣る (0.5~0.6程度)	やや劣る~高い (0.5~0.9程度)

* 下記コラム参照

コラム 蛍光灯やLED使用時には通電容量に余裕を持たせて

蛍光灯やLEDは、内部に交流電流を直流にするためのコイル等の電子部品を有しています。これらの影響で電圧と電流が最大になるタイミングがずれ、電気の利用効率が悪くなる現象(力率低下)が現れます。例えば、力率0.65の23W蛍光灯を1球使用する場合、 $23W / 0.65 = 35VA$ の電力(皮相電力といいます)が必要になります。

蛍光灯やLEDは、消費電力やランプの寿命、発光効率の点で、白熱電球より明らかに優れた光源といえますが、「力率」は白熱電球の1に対して低い製品が多いようです。その分、電照設備の通電容量には余裕を持たせておかなければなりません。



蛍光灯内部の電子部品

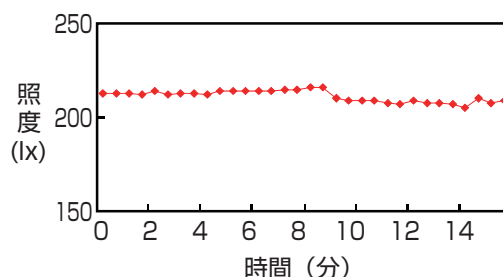
2

白熱電球の特徴は

白熱電球は、これまで長きにわたりキク栽培業界の標準光源として使用されてきた実績があります。試験研究でも白熱電球での試験データが多数であることから、キク電照栽培においては**最も信頼性の高い光源**であるといえます。

1. メリット

- 防水性・防塵性に優れる
- 比較的価格が安い
- 点灯直後から
明るさは安定（右図参照）



白熱電球(75W)の点灯後の照度推移

測定環境
光源直下100cm、気温12℃
測定間隔30秒

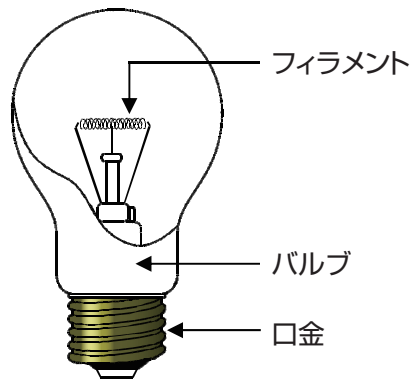
2. 課題点

蛍光灯やLEDと比較すると

- 消費電力が大きい
- 発光効率が低い（消費電力の割に照度が低い）
- 定格寿命が短い（約1,000～2,000時間）

3. 留意点

- 発する光は、紫外線から赤外線まで幅広い範囲の波長を含む。
- 白熱電球はその消費電力の大きさ、発光効率の低さからマイナスイメージを持たれがちですが、現時点では既存光源の中では、**耐候性が最も優れており、電照効果も最も信頼性が高い**ため、使い方の見直しにより今後も十分使用可能と考えられます。



構造上の特徴

可視光を発するフィラメント、それを保護するガラス球、口金などから構成されています。

ガラス球の中にはアルゴンガスと窒素などの不活性ガスが封入されており、点灯中に高温となるフィラメントの寿命を保つ役割があります。

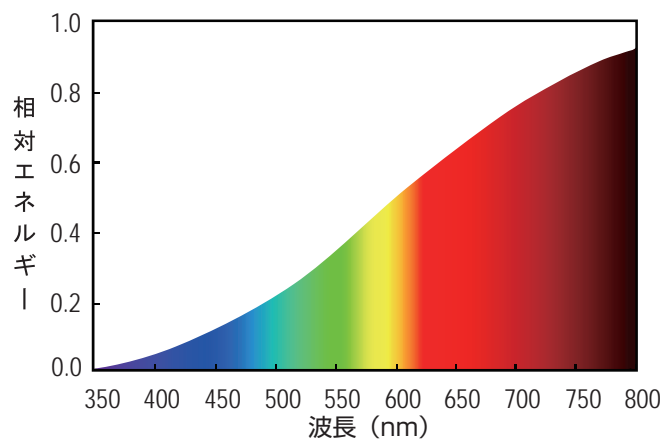
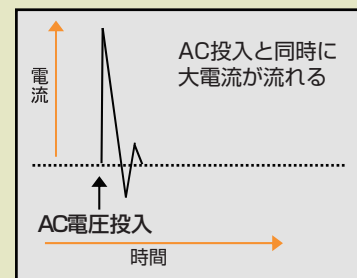


図 白熱電球の波長スペクトル

コラム 「突入電流 (Inrush Current)」にご注意を

「突入電流」とは、電気機器の電源をオンにしたときに、一時的に流れる大電流のことです。これにより定常的に流れる電流の数倍から数十倍もの電流が流れるため、対策がなされていないと、同時の突入電流発生が原因で過熱したり、機器の絶縁部の劣化を招くなど、重大な障害が発生するおそれがあります。白熱電球、蛍光灯、LEDのいずれでも発生します。



光源を白熱電球から蛍光灯やLEDといった省電力品に変更する場合、**通電容量ギリギリまで一度に多くの数を付けてしまうと、突入電流により予期せぬトラブルを招くおそれがあるので、**その際は設置方法等について電気専門業者の指導を仰ぐなど注意が必要です。

また電照時間を設定するタイマーも、電子式はアナログ式より想定以上の電流に弱いとされるので、注意してください。

3

蛍光灯（電球型）の特徴は

蛍光灯がキク電照用として使用され始めたのは、白熱電球よりもずっと遅い1990年代頃からのようです。

1. メリット

白熱電球と比較して、

○発光効率が高い

（白熱電球20lm/W未満に対して、40lm/W以上。少ない消費電力で白熱電球と同等の照度が得られる）

○定格寿命が長い

（白熱電球1,000～2,000時間に対して5,000～13,000時間）

○蛍光体の種類を変えることで、様々な色を出せる。

（白色光以外にも紫外光、青・緑・黄・赤・遠赤色光など）

2. 課題点

○電球のガラス部分が薄く壊れやすい

○耐候性が不十分（高温、高湿度、暴風雨など）

○年次経過で光量が次第に低下するため、交換時期が見極めにくい

3. 留意点

○メーカーや製品によって光の照射範囲や色、消費電力が異なるため、製品の特性をよく確認して選択する必要がある。

○一般的に蛍光灯が一番効率よく動作するのは、周囲の気温が20～25℃のときで、それより気温が高くても低くても明るさは低下します。

○蛍光灯は点灯後、徐々に明るさが増していき暫くすると明るさが安定します(図1参照。気温が低いほど時間がかかる)。よって、蛍光灯をほ場に設置した時の明るさ測定は、図1の蛍光灯では点灯後5分以上たってから行う必要があります。

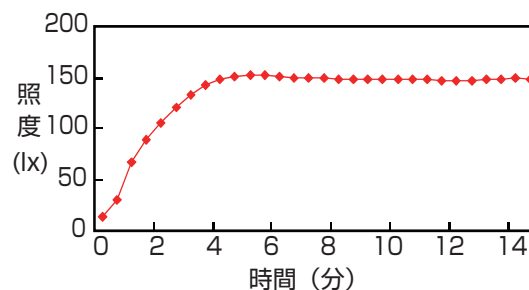


図1 三波長型蛍光灯(23W)の点灯後の照度推移

測定環境
光源直下100cm、気温 12℃
測定間隔 30秒

○間欠電照（電照栽培の現状編2参照）には不向き

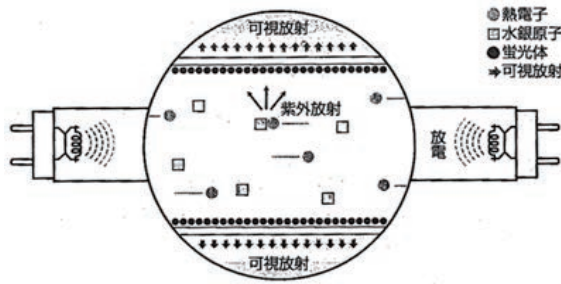


図2 蛍光灯の発光の仕組み
(パナソニック ランプ総合カタログより転載)

- 電極から発生した電子がガラス管内の水銀原子に衝突して紫外線を放射し、それによりガラス管内に塗布されている蛍光物質が可視光を発光することで管全体が発光しています。
- 電極を加熱させずに電子を発生させる冷陰極蛍光灯（CCFL）という種類の蛍光灯も、一部のキク産地で使用されています。定格寿命が60,000時間と長いことが特徴です。

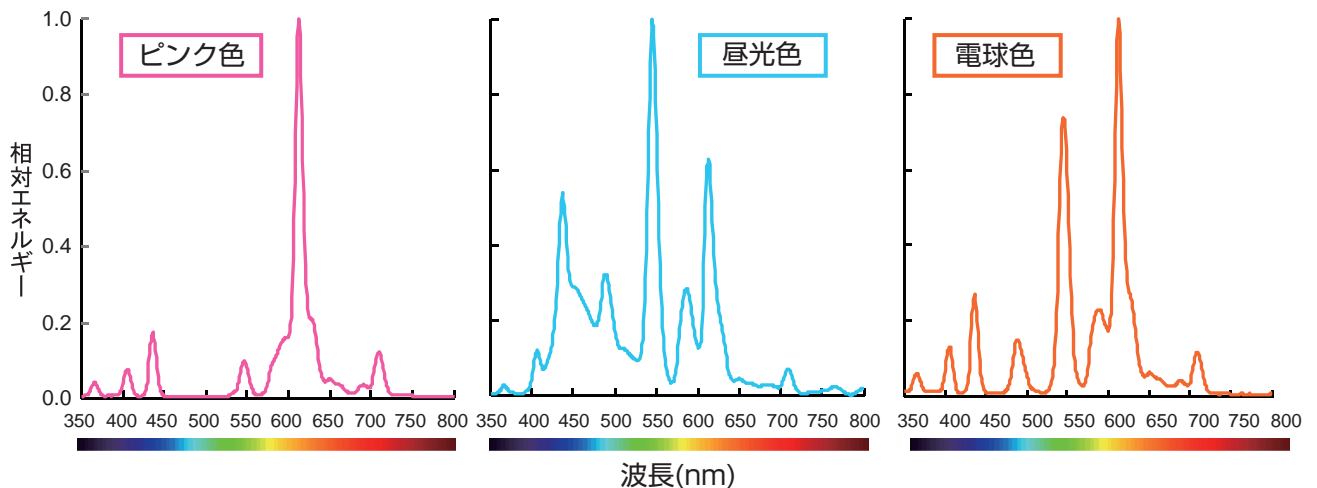


図3 三波長形蛍光灯の分光分布例

コラム 光源の色の表しかた

蛍光灯の色は多くの場合、'色温度'や以下の5種類の色名①昼光色、②昼白色、③白色、④温白色、⑤電球色のいずれかで表されます。

'色温度'は光源の色を数値化した尺度で、単位はK（ケルビン）で表します。色名は電球色に近づくほど、光の色が赤みを帯び、昼光色に近づくほど青みを帯びていきます。

日中の太陽の光は5500K、薄曇りの空は6000K、青い空は12000Kとも言われています。

色名	色温度
昼光色	6000K
昼白色	5000K
白色	4000K
温白色	3000K
電球色	2000K

4

発光ダイオード(LED)の特徴は

発光ダイオード(LED)はここ10数年の間に大きく発達してきた比較的新しい光源です。近年は農業分野でも様々な用途で利用が始まっています。

1. メリット

白熱電球と比較して、

- 発光効率が**高い**
(白熱電球20lm/W未満に対して、20lm/W以上。少ない消費電力で白熱電球と同等の照度が得られる)
- 定格寿命が**長い**
(白熱電球1,000~2,000時間に対して40,000時間)
- 特定の波長域の光を照射することができる。

2. 課題点

- 高価である
- 耐候性が**不十分**(高温、高湿度、暴風雨など)
- 年次経過で光量が次第に低下するため、交換時期が見極めにくい
- 商品によっては質量が重く、ほ場に設置する際、電線への補強が必要になる場合がある

3. 留意点

- メーカーや製品によって**光の照射範囲や色(図2、3)、消費電力が異なるため、製品の特性をよく確認して**選択する必要がある。

- LEDは点灯後、徐々に明るさが低下していき最終的に安定する傾向があります(図1参照)。よって、LEDをほ場に設置した時の明るさ測定は、図1のLEDでは点灯後30分程たってから行う必要があります。

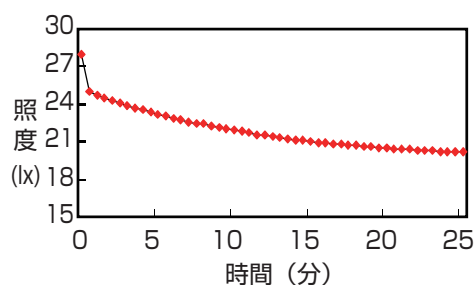
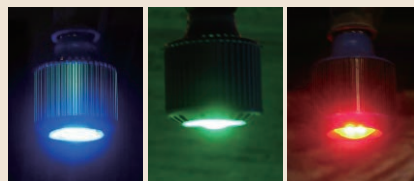


図1 赤色LEDの点灯後の照度推移

測定環境
光源直下100cm、気温 12℃
測定間隔 30秒



単一ピーク波長を持つので、特定の波長のみ照射できる



青色 緑色 赤色

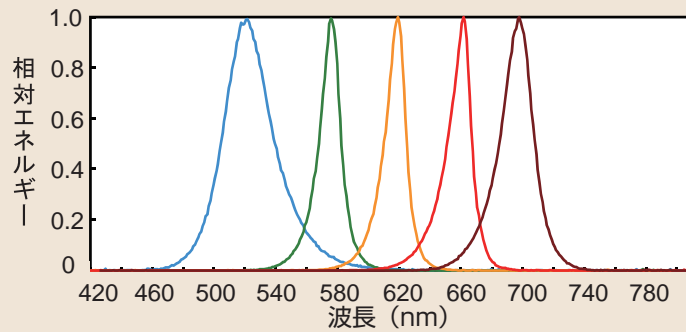


図2 様々な色のLEDの分光分布の例

白色や電球色は単一ピーク波長ではない



昼光色 電球色

※白色系LEDでは、青色LEDの光を蛍光体で波長変換している

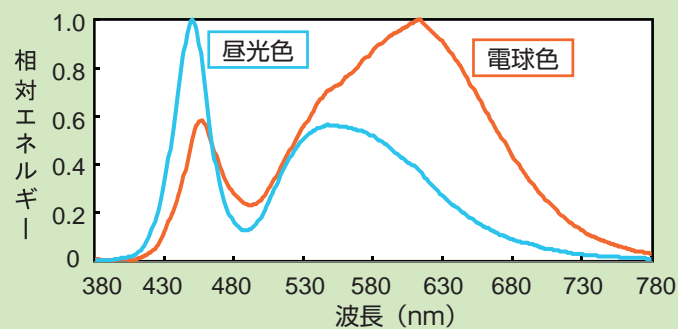


図3 昼光色LED (蛍光体方式)と電球色LED (蛍光体方式)の分光分布の例

5

ヒトには同じに見える光でも、分光分布が異なり、花芽分化抑制能力も異なる

販売されている蛍光灯やLEDには「電球色」や「昼光色」など様々な色があります。また、色は同じでも蛍光灯とLEDでは照明器具の特性や構造が違います。光源の種類が変わると、花芽分化抑制能力にどのような影響があるのでしょうか？

1. 光源が変わると分光分布、光の強さ、光の広がりが変わる

図1は同じ「電球色」かつ照度75 lxの3種類の光源の分光分布です。このように、ヒトの目には同じように見える光でも、**光源の種類が変わると分光分布（光の質）が大きく異なる**ことが分かります。

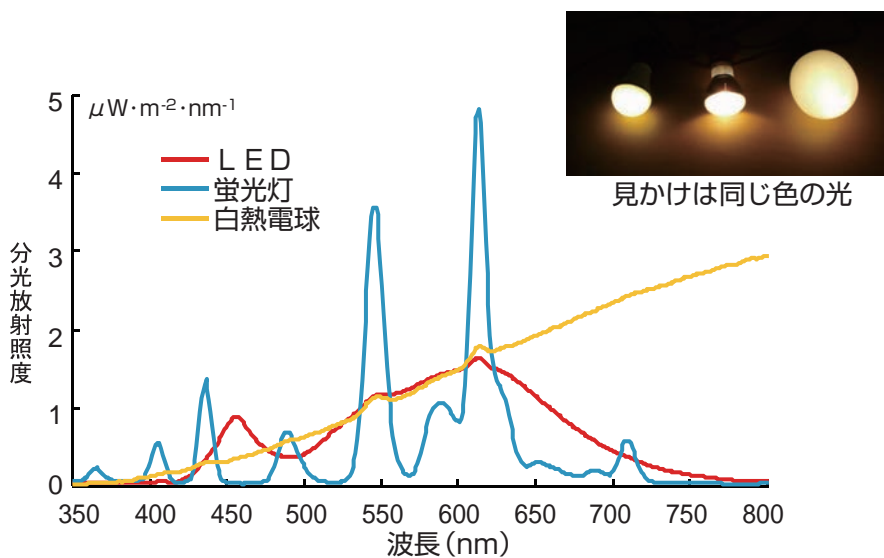


図1 3種類の「電球色」光源の分光分布

異なる光源に変更すると、以下の点が変わります。

- ①光源からの**光の分光分布**
- ②光源からの**光の強さ**
- ③光源からの**光の広がり具合**（てびき編10参照）

これらが、花芽分化抑制能力が変わる大きな要因です。



○ 光源が変わると花芽分化抑制能力も変わる

図2は、地表面での水平面照度を、ヒトの目には同じ明るさを感じる50 lxに合わせて暗期中断電照したときの、花芽分化抑制程度を示しています。展開葉数が多いほど、その光源の花芽分化抑制能力が高いと言えます。

結果、同じ50 lxの電照条件で栽培しても、赤色LEDの花芽分化抑制効果が高く、光源が異なると照度を揃えても花芽分化抑制能力に差が生じることがわかります。

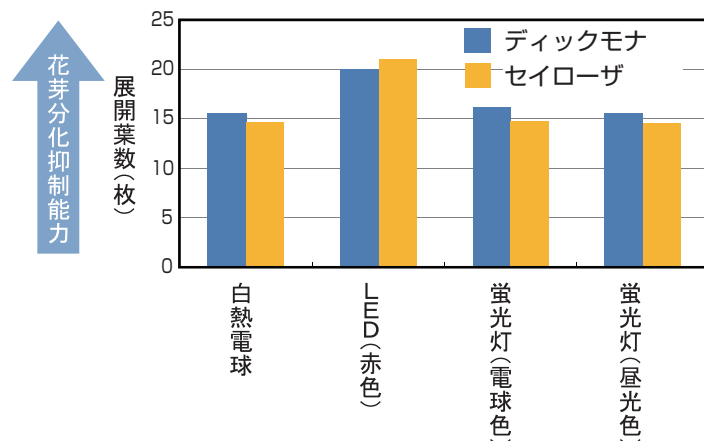


図2 異なる光源による同一照度の暗期中断電照がキクの展開葉数に及ぼす影響

(試験方法) 暗期中断15分電照 (0時~0時15分) を発蕾まで実施。

コラム 白熱電球の生産は中止されるのか？

日本照明工業会(JLMA)に問い合わせたところ、以下のように経産省に報告しているとのこと(H23年・春)

- ・大手メーカーが一般照明用途の白熱電球を製造中止する方針
- ・メーカーによっては、農業用は特殊用途として分類している(一般照明用途ではない)
- ・白熱電球を製造している中小企業も多く、現状の1/3の数量は残る見通し



ヒトとキクでは光の感じ方が違う 花芽分化抑制には赤色の光が効果的

キクとヒトとでは、光を感じる仕組み・光の感じ方が異なっています。

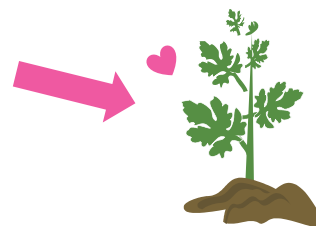
1. ヒトは明所では緑色を明るく感じる



ヒトは、目の視細胞に存在するタンパク質等で光の信号を受けとり、神経がそれを刺激として脳に伝え、物を見ることができます。

同じエネルギーの光なら、明所では波長が555nmの緑色光を最も明るく感じ、例えば470nmの青色光はその10分の1の明るさにしか感じません。右図にヒトの目の波長別感度（標準比視感度曲線）を示しました。

2. キクは赤色をよく感じる



キクは、主に葉の細胞中に存在する色素タンパク質で光の信号を受け取り、その情報が植物体内の各部位に伝達されると様々な遺伝子が働き始め、花芽形成などが行われます。

植物は光を受け取るタンパク質の種類が多く、利用する光もヒトの可視光線よりやや広い約300~800nmの範囲です。

右図に、キクの花芽分化制御に深く関係している、色素タンパク質「フィトクロム(Pr型)」の分光吸収曲線（光の波長別吸収度合い）を示しました。フィトクロムは花芽分化抑制に効果的な赤色領域の光を高感度で感じます。

このように、ヒトとキクでは、光を受け取る仕組みの違いにより、感じ方が異なります。

キクの花芽分化抑制には赤色の光がより効果的であるため、キク電照栽培で用いる光源の光は、同じエネルギーであれば、赤色の割合が高いほど花芽分化抑制能力が高いといえます。

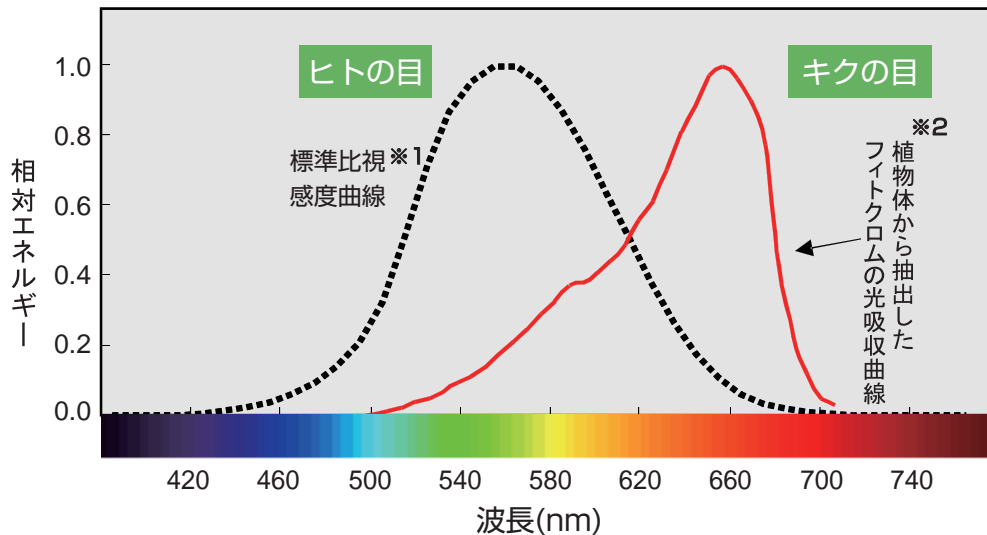


図 ヒトの標準比視感度曲線とフィトクロム（Pr型）光吸収曲線の違い

※¹ 【標準比視感度曲線】比視感度とは、**ヒトの目が波長毎に明るさを感じる度合い**であり、標準比視感度曲線とは国際照明委員会が規定した**世界標準のヒトの比視感度**を曲線に示したものです。

※² フィトクロムそのものの光吸収について示したものであり、実際のキクの反応とは異なります。(解説編5、6参照)

ヒトとキクでは、光の感じ方が異なりますが、この「光源選定・導入のてびき」では、最も普及している測定機器【**照度計の活用**】を前提にしています。

「照度(lx)」は、ヒトの目で感じる明るさを表現する単位のひとつです。
(解説編1参照)

「照度計」はヒトの感じる明るさを測る測定機器です。(解説編2参照)

7

花芽分化抑制に必要な基準照度は光源ごとに考えよう

これまで白熱電球を用いた場合、一般的にキク生長点付近に確保すべき照度の基準は50 lx以上とされてきました。しかし、新たな光源を導入し、**光源から照射される光の分光分布（光の質）が異なると、必要な照度は変わります。**

1. 花芽分化抑制に必要な照度は、光源の種類によって異なる

右表に、各種光源の白熱電球50 lxと同程度の花芽分化抑制能力を持つ照度の目安を示しました。

光源により大きな差がありますが、これは①**分光分布（どれだけ赤色光が含まれているか）**、②**光の強さ**、が影響しています。キクは赤い光に良く反応するためです（てびき編6および解説編7参照）。

表 白熱電球50 lxと同程度の花芽分化抑制能力を示す照度の目安

光源の種類	照度 (lx)
LED(赤色 630nmピーク)	19
蛍光灯(ピンク色、三波長形)	42
【白熱電球】	【50】
LED(電球色)	61
蛍光灯(電球色、三波長形)	69
蛍光灯(昼光色、三波長形)	91

2. 花芽分化抑制に必要な基準照度は光源毎に考えよう

これまでの“50 lx”という基準照度は白熱電球を使用するときの照度の目安ですので、今後も白熱電球を使用する際の目安としては使えます。しかし、その他の**様々な分光分布の光源の基準照度については、光源毎に考えなければなりません。**



大事なことは、一概に「何 lx 以上あれば大丈夫」と言えなくなったことです。「**光源ごとに花芽分化抑制に必要な照度を考える**」必要があります。

コラム

害虫が引き寄せられやすい光源がある

キク電照栽培では夜間に照明するため、光に引き寄せられる性質（**正の走光性**）を持つ夜蛾類など、**夜間に行動する害虫がキクほ場に引き寄せられます**。そのようにして引き寄せられた虫やそれらが産み付けた幼虫によって、キクが食害されます。

○ 昆虫は紫外光と青～緑色光に強く引き寄せられる

昆虫の光に対する感度は、昆虫の種類によって違いはありますが、**概ね紫外光と青～緑色光にピーク**があり、特に紫外線に強く反応することが分かっています。従って、昆虫はそれらの波長を発する光源に、より強く誘引されます。

○ 光源の種類によって害虫の誘引度合いが異なる

各電照用光源の波長特性をみると、青～緑色の波長の光は、白熱電球や昼光色蛍光灯、電球色蛍光灯から多く出され、紫外線は蛍光灯からわずかに出ています。

これらの波長の光を含まない光源を使用することで、夜蛾類等の被害を受けにくくなると考えられます。

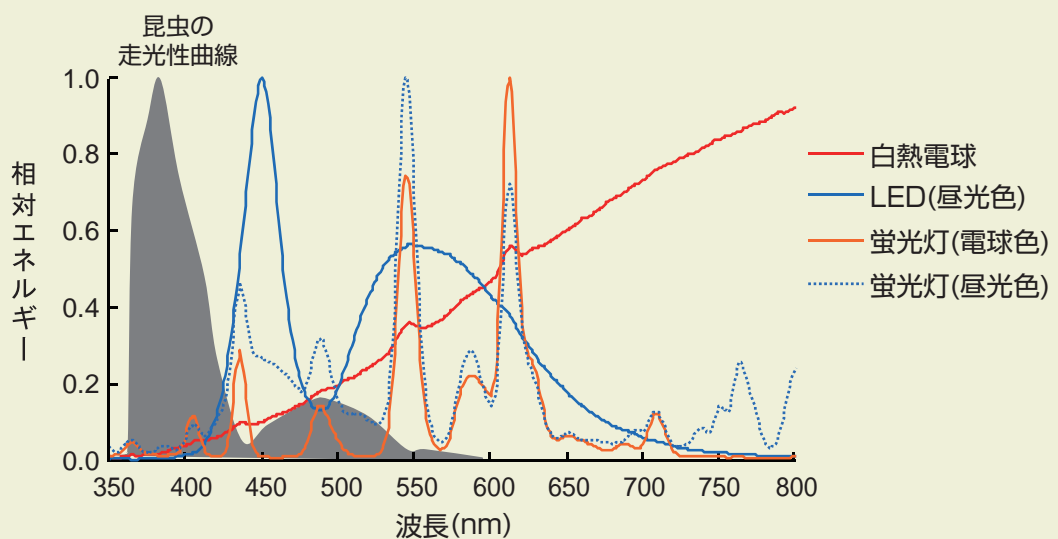


図 各電照用光源の波長特性と昆虫の走光性

8

新たな光源で 花芽分化抑制に必要な照度は？

花芽分化抑制に必要な基準照度は光源ごとに考えます。新たな光源を設置する際には、どこにどの程度の明るさが必要でしょうか？

○ 既存光源と同等の花芽分化抑制能力を得るのに必要な照度を推定

ここでは、これまで使っていた現行の光源と同等の花芽分化抑制能力を示す光の強さを推定します。光の強さは、最も普及している“照度計”の活用を前提に“照度”を用いています。

手順①現行の照度測定

現行の光源を従来通りの間隔で設置した状態で、**ほ場内で最も暗くなる場所の照度を測定**します。右図のように電球から最も離れた地点（特にほ場の端のC地点）を測定します。

手順②換算式で計算します

右表に光源毎に与えられている「照度→花芽分化抑制能力値への換算係数」（解説編5、6、7参照）を用いた下記計算式により、現行の光源と同等の花芽分化抑制能力を示すために必要な、変更予定光源の照度を推定します。

表 光源別照度から花芽分化抑制能力への換算係数

光源	換算係数
白熱電球 (75W)	2.0
三波長型 蛍光灯	(電球色, 23W) 1.5
	(ピンク色, 23W) 2.4
	(昼光色, 22W) 1.1
LED	(電球色, 8W) 1.7
	(赤色 630nmピーク, 7W) 5.4

注意!!

得られた値は、これまで使用していた光源同等の能力を示す照度の目安です。

これまでが必要十分な光量を大きく超過していた可能性もあります。超過幅の小さい適切な基準照度は、作型や品種を考慮して検討する必要があります。

$$\text{変更予定光源で必要な照度} = \text{現行の光源照度} \times \text{現行の光源の換算係数} \div \text{新たな光源の換算係数}$$

【計算例】

現行で白熱電球を使用していたが、今後、新たに三波長型蛍光灯（電球色）に変更したい場合。

手順① 白熱電球をほ場に設置して、最も暗い箇所の照度を測定
結果→ 30 lxで、その箇所で生育するキクには、やなぎ芽発生等の問題はなかったことも確認。

手順② 換算式に当てはめる（上記の表を使用）

$$\text{現行の光源照度} \quad \text{現行の光源係数} \quad \text{新たな光源係数}$$

$$30 \text{ lx} \quad \times \quad 2.0 \quad \div \quad 1.5 \quad = \quad 40 \text{ lx}$$

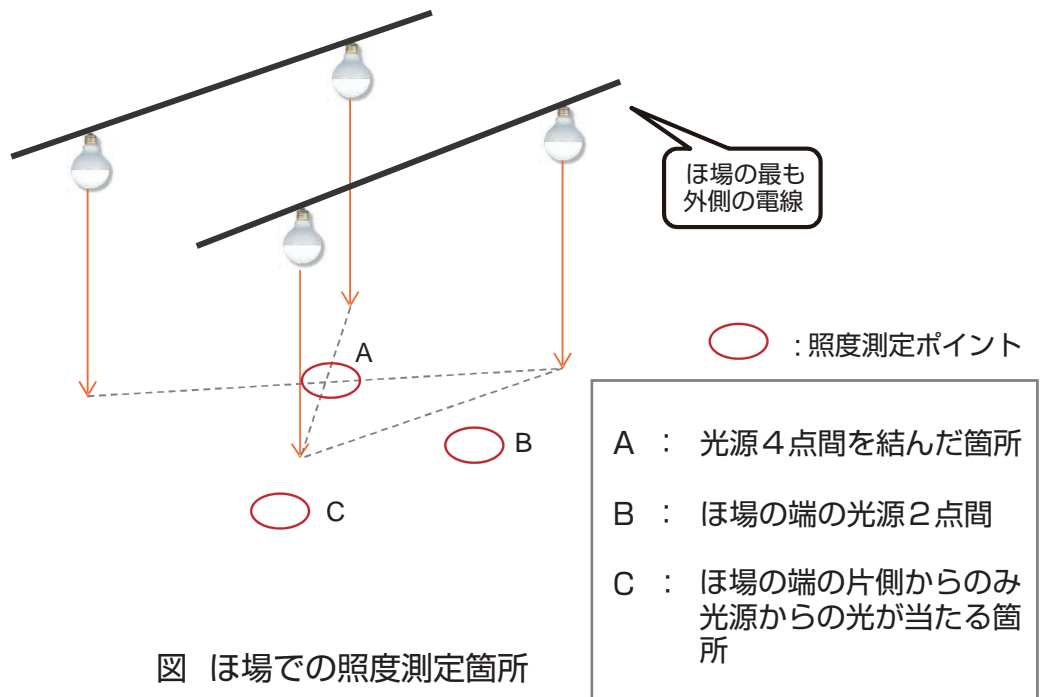


図 ほ場での照度測定箇所

【照度測定のポイント】

電照栽培時の照度の測定方法は決まっていますが、どのような手法をとるかによって測定値は全く異なります。ここでは以下により行うことを提案します（解説編6参照）。

〔測定方法〕 水平面照度

〔測定位置〕 地表面

〔点灯後、測定までの時間〕 30分以上経過した後

9

花芽分化抑制能力の判断に 照度計が使える場面、注意が必要な場面

前項までに、異なる光源同士の花芽分化抑制能力を「照度」測定では単純に比較できないことを説明してきました。

その理由は、①光源の種類が変わると発する光に含まれる赤色光の割合が変化する場合がある、②ヒトとキクとでは光の感度にズレがあり照度計はヒトの視感度に合わせてある、の2点でした。

照度計を活用する場合、どのような点に留意すべきでしょうか？最も普及している測定機器だからこそ、うまく使いこなしたいものです。

○ 照度計が使える場面

→ 波長特性が同じ光源同士の比較

キク電照栽培に使用されている光源が、ほぼ白熱電球一種類だった頃は、波長特性にほとんど差がないため、「照度」測定により、花芽分化抑制能力を相対的に比較する事が可能でした。

今後も、基本的に同じ波長特性を持つ光源同士であれば、同様に比較することが可能です。

① 同じ製品



② 使用度合いが 違う同じ製品



③ 同じメーカー・分光分布で消費電力が違う商品





○照度計の測定値を単純比較できない場面 《 要注意 》

→ 分光特性が異なる光源同士の比較

このような場面では、照度計の測定値を花芽分化抑制能力に換算することで比較が可能となります。

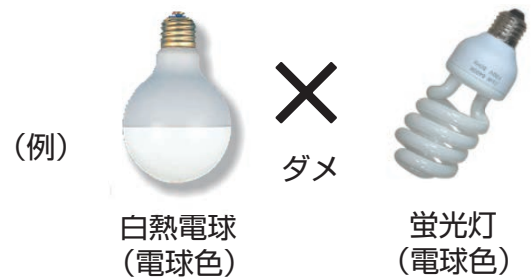
(てびき編8参照)



①異なる光源



②同じ色(電球色、昼光色等)表示でも光源が違えば×



③同じ種類の光源だが、色表示が違えば×



④同じ色の電光灯同士でも演色性が異なる場合



10

光源を交換したら 見直したい設置間隔

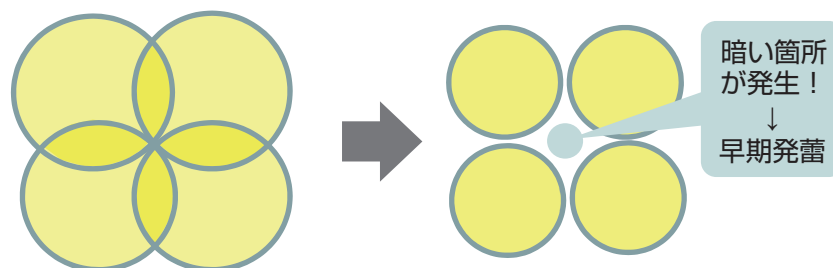
これまで白熱電球のほ場での設置間隔は、一般的に10㎡に1球とされてきました。しかし新しい代替光源を設置すると、これまでの設置間隔や設置の高さが適当ではない場面も考えられます。

1. 商品によって照度や広がり方が異なる

異なる種類の光源に交換した場合、光の広がり方やそれに伴う照射面での照度の変化を把握しなければなりません。

なぜなら、光の広がり方がより狭い光源に交換した場合、照度が不足する部分が生じ、そこは花芽分化抑制が不十分になるおそれがあるためです。

光源を設置間隔そのままに、光の広がり方が‘広い’から‘狭い’に変えると…



2. 照度は‘現場で実測’して確認を（シミュレーションも可）

最も確実な方法は、新しい代替光源をほ場に設置した後、**現場で光源から最も遠くなる場所の照度を実測**しながら、てびき編8で推定した必要照度を、大きく下回るような**明らかに暗い部分が生じないように設置間隔や高さを調整**することです（照度の測定方法については解説編2、3参照）。

また、商品によっては「配光分布」の情報を入手できます。「**配光分布**」とは、光源からどのくらいの強さの光が、どの方向に出ているかを示したものであり、右図のように示されます。

照明設計工事のプロに依頼すれば、ほ場設置前にコンピューターシミュレーションによりほ場の照射面の照度の分布を計算し、適切な設置間隔を算出することができます。施設の新築等に伴って新たに電照設備一式を導入する場合には、事前のシミュレーションが有効と考えられます。

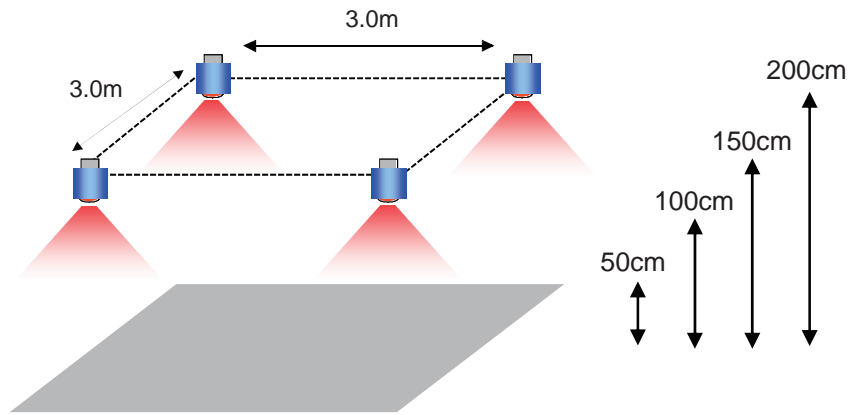


図1 光源配置模式図

線が多いほど、場所毎の照度の差が大きい

蛍光灯はほぼ均一な明るさだが、LEDは光源直下が特に明るい

設置した光源の高さ

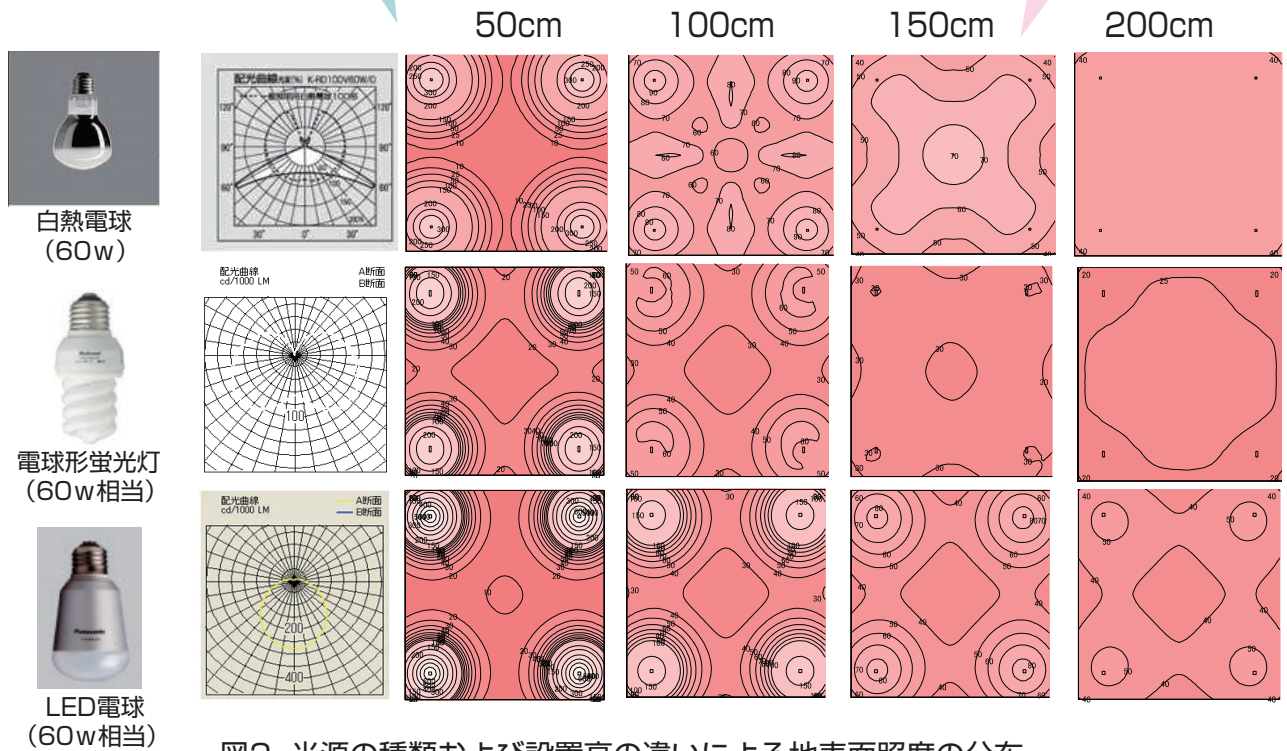


図2 光源の種類および設置高の違いによる地表面照度の分布 (4点光源間、作成：パナソニック株式会社エコソリューションズ社)

11

光源の耐用年数を計算する

1. 定格寿命から計算してみる

光源にはそれぞれ「定格寿命」が定められているので、「**定格寿命**」を**年間の点灯時間で割った値が耐用年数の目安**になります。

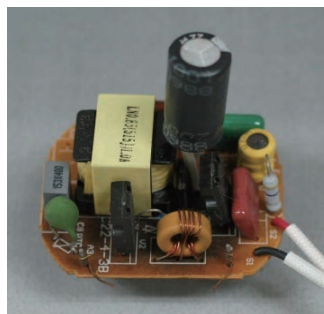
$$\text{耐用年数の目安} = \frac{\text{定格寿命 (時間)}}{\text{年間の点灯時間 (時間)}}$$

(= 1日あたり点灯時間×点灯日数)

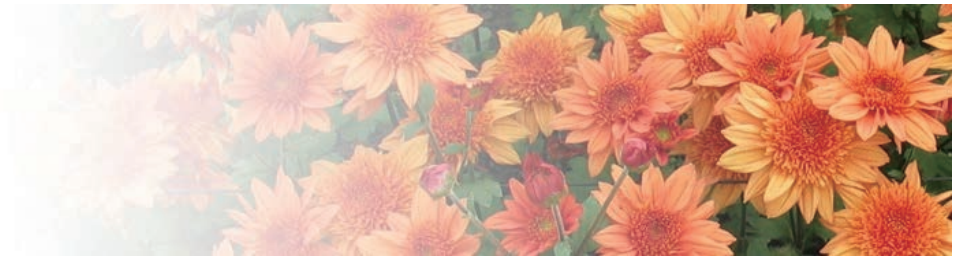
2. LEDの耐用年数は20年以上？

「定格寿命/年間の点灯時間」の計算方法では、定格寿命が40,000時間のLEDは1日5時間365日点灯しても、約22年使用できることになります。

しかし、①日本照明工業会では「安定器、ソケットや電線など電気絶縁物の絶縁劣化による寿命は1日10時間、1年3,000時間点灯で10年」、「一般的には照明器具の寿命の目安を10年」としていることや、②一般的な光源は居住環境での使用を前提としており、キク栽培環境は居住環境より高温・高湿度な、より過酷な条件であることを考慮すると、**耐用年数は10年を超えずに見積もるべき**でしょう。



ソケットの下に内蔵されたインバータ回路（蛍光灯）



参考 「定格寿命」の定義って？

規定条件で試験したときのランプの平均寿命値で、光源の種類によって異なります。

1. 白熱電球（定格寿命1,000～2,000時間）

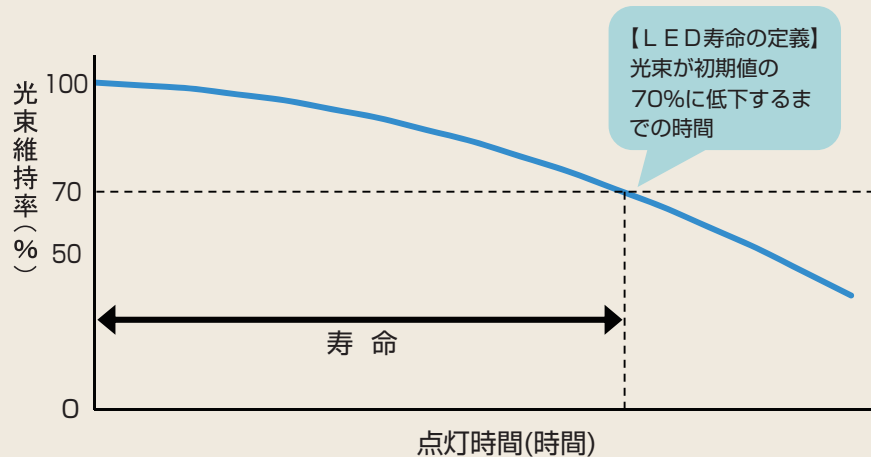
フィラメントが切れるまでの点灯時間、またはランプ光束（解説編 1 参照）が基準値以下になるまでの点灯時間のうち、短い方の平均値。

2. 電球形蛍光灯（定格寿命5,000～13,000時間）

2.5時間点灯し0.5時間消灯する連続繰り返し試験において、多数のランプが点灯しなくなるまでの点灯時間の平均値。

3. LED（定格寿命40,000時間）

一般用照明器具の光源として使用する場合は、全光束が初期全光束の70%、または光度が初期光度の70%に低下するまでの時間。（2008年(社)日本照明器具工業会 技術資料134「白色LED照明器具性能要求事項」より）



光源の経済性を評価する

1. コストを決定する要因

光源のコストを決定する要因として、下表に掲載されている項目があげられます。それらは大きく光源導入費用（更新費用も含む）と電気代に分けられます。

1. 光源導入費用

(10a・1年あたり)

$$\text{光源単価(円/個)} \times \text{設置個数(個)} \div \frac{\text{耐用年数(年)}}{\text{(てびき編11参照)}}$$

※耐用年数(年)は、ランプ寿命(h)／年間電照時間(h)と10年の短い方とする

2. 電気代

$$\frac{\text{消費電力(W)} \times \text{電照時間(h)} \times \text{電気料金単価(円/kWh)}}{1,000}$$

1球あたりの消費電力×設置球数

2. コスト計算時の留意点

上記の計算方法で単純に1年間あたりのコストを計算すると、導入初期の投資額の大きさがわかりにくくなるので注意が必要です。右図のように経時的な延べ費用として表示すると理解しやすいので参考にしてください。

なお、今回の試算では初期に必要な電照設備設置工事にかかる費用（人件費、配線やタイマー等の材料費）は除外しています。

右表およびグラフからは、白熱電球が劣り蛍光灯が優れる印象をもつと思われます。しかしこれも、光源選択の際の判断材料の一つであり、他に耐候性や強度、照射できる光の波長域にも違いがあるので（てびき編1参照）、**選択の際には総合的な判断が必要です。**

また、光源導入方法には「買い取り」方式だけでなく「リース」方式も現れてきました。利点と欠点を見定めて選択してください。

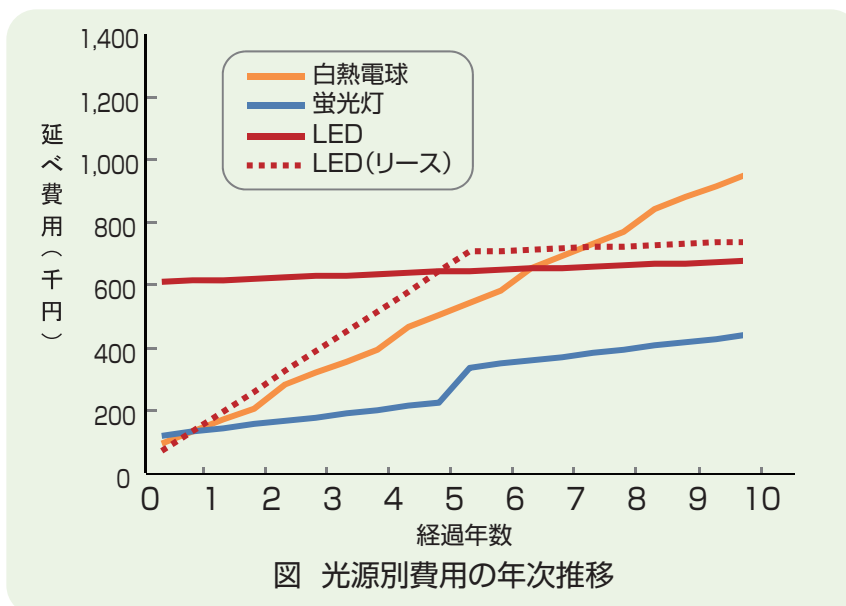
※以下に、光源別の経済性比較方法についての考え方を紹介します。

この結果は、各設定値に大きく左右されます。特にランプ単価は低価格化が進んでおり、それによっては以下の図表とは全く異なった結果になります。また、この試算では九州電力の電気料金を元にしていますが、電気料金は変動する可能性があります。

表 光源別の経済性比較の例（1年・20aあたり）

項目	購入			リース		
	白熱電球 75W	蛍光灯 電球色23W	LED 赤色7W	LED 赤色7W		
ランプ設置数 (a)	200球					
ランプ単価 (b)	180円	500円	3,000円	リース代金 50円/月		
ランプ寿命 (c)	1,000時間	2,500時間	40,000時間			
年間点灯時間 (d)	500時間 (50日×3回転×3.5時間)					
電気料金単価 (e)	10.01円/kWh (九州電力, 22~8時の深夜割引適用)					
ランプのワット数 (f)	75W	23W	7W	7W		
ランプの 使用可能年数 (g)=(c)/(d) (想定される実際の年数)	2年	5年	80年	-		
	2年	5年	10年	-		
試算結果	ランプの導入コスト =(a)×(b)/(g)年あたり					
		36,000円/2年	100,000円/5年	600,000円/10年	120,000円/年	
	電気契約	月間基本料金 (h)	15kVA 2,993円	6~10kVA 1,575円	6kVA以下 1,155円	
		年間基本料金 (i) (h)×12	35,916円	18,900円	13,860円	
	年間電気料金 (j) =(a)×(d)×(e)×(f)/1,000	75,075円	23,023円	7,007円		
燃料費調整額等 (k) 1.33円 (H25.7月) ×消費電力	9,975円	3,059円	931円			
ランニングコスト 年計 =(i) + (j) + (k)	120,966円	44,982円	21,798円			

※1：リース期間は5年間で、それ以降は引き取りとして試算
 ※2：施設キク栽培に使用した場合の推定



1

知っておきたい光の強さを表す単位

～ ‘照度’ だけでは表せない光の強さ ～

1. これまでは照度 (lx) が主役

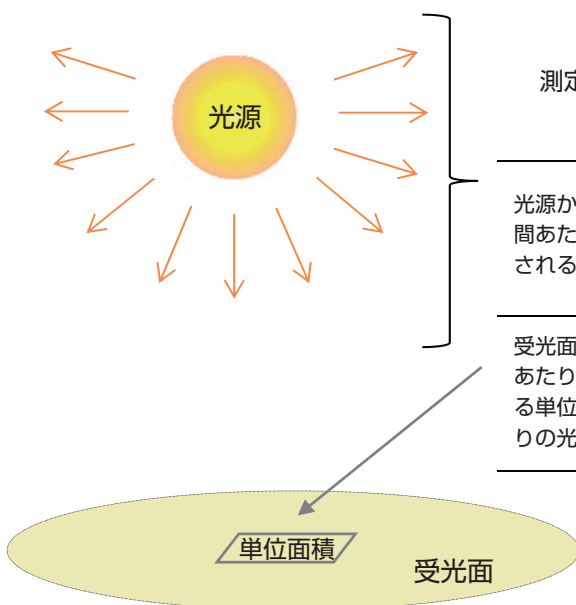
光合成や花芽分化抑制などキクの光反応は、キクに当たる光（入射光）によって引き起こされます。キク栽培では人工光源の利用当初から、光源からの入射光の強さの基準として‘照度’が使用され最も普及してきました。

しかし、「ヒトの目の感度」というフィルターを通したエネルギー値である照度は、植物の反応を論じるには不都合が生じる場面があります。

2. 必要に応じて3つの測定値を使い分ける

そこで光の強さを測定するには、目的に応じて測定法を使い分ける必要があります。主に光をエネルギーとしてとらえるか、光の粒の数（光量子数）としてとらえるかの違いになります。

表 キク電照栽培用光源に係る光の計量法と測定単位



測定範囲	エネルギー量		光量子数 (光量子測定法)
	エネルギー そのもの (放射測定法)	比視感度* を加味 (測光法)	
光源から単位時間あたりに放射される全ての光	放射束 W (ワット)	光束 lm (ルーメン)	光量子束 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ (マイクロモル・秒 ⁻¹)
受光面単位面積あたりに入射する単位時間あたりの光	放射照度 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ($=\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	照度 lx ($\text{lx}=\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$)	光量子束密度 $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$

※てびき編6を参照



3. 「照度」はヒトの目が感じる明るさの程度

照度は、受光面の単位面積あたりに入射する光エネルギーに、ヒトの目の感度（右図）により重み付けしたものです。

これはヒトの目が感じる明るさの評価には適していますが、波長によって感度特性に著しい差があり、同じエネルギーの光でも全く異なる値を示します。

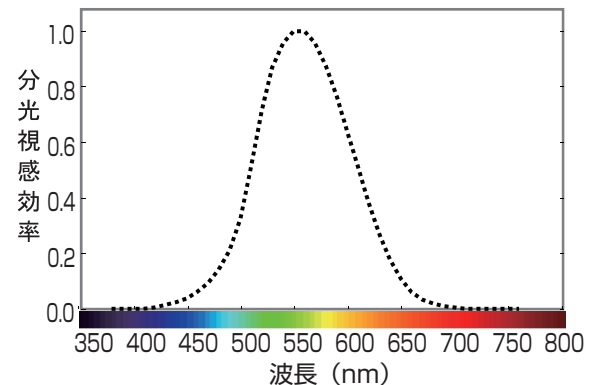


図 標準比視感度曲線

よって、人が感じる明るさを測定する場面以外で、様々な波長特性を持つ光源間の光の強さを測定・比較するには不向きです（てびき編9参照）。

4. 「放射照度」と「光量子束密度」はどのようなときに使う？

植物を対象とした学術分野での光環境の評価は、「光量子束密度」あるいは「放射照度」が用いられています。

【放射照度】

照度のようにヒトの目の感度による重み付けを行っていないため、どの波長域でも光の持つそのままのエネルギーを示します。

【光量子束密度】

植物の光化学反応は、吸収されたエネルギー量ではなく光量子数（光子の数）によって決定するため、光量子束密度は植物に影響を及ぼす光の評価指標として適しています。しかし、測定機器の測定可能波長域は400～700nmの場合が多いため、市販の光量子計ではそれ以外の波長域の光の強さは測定できません。

5. 電球の明るさは「ルーメン」で表示

電器店等で販売されている電球には、光の強さが「lm（ルーメン、全光束）」で表示されています（右図）。これは光源が発する視感度を加味した光の総量を示すもので、キクの花芽分化抑制能力を示すものではありません。



2

光の強さの測定機器は 特性を理解して使う

1. 照度計 … 標準規格があるため信頼性が高く、安価

可視光の主な波長域（380～780nm）について人間の目の感度に合わせて補正された分光応答を持つ計測器です。

汎用性のある計測器の中では唯一、標準規格（日本工業規格JISや国際照明委員会規格CIE）があり、基準を満たした機器であれば、測定値にメーカー間の誤差がほとんどありません。比較的安価に入手できます。



2. 分光放射照度計 … 測定可能波長域・分解能・校正の必要性に注意

光の単位波長毎に放射照度を測る計測器です。300～1000nm程までの波長域について、光源から放射される波長毎のエネルギー分布（分光分布、図1参照）を知ることができますが、高価です。

なお、人工光源を計測する場合には標準光源を用いた校正が必要です。また、機器によって測定可能な波長範囲や分解能が規定されていることに留意して、使用目的に応じて適切な測定器を選択する必要があります。

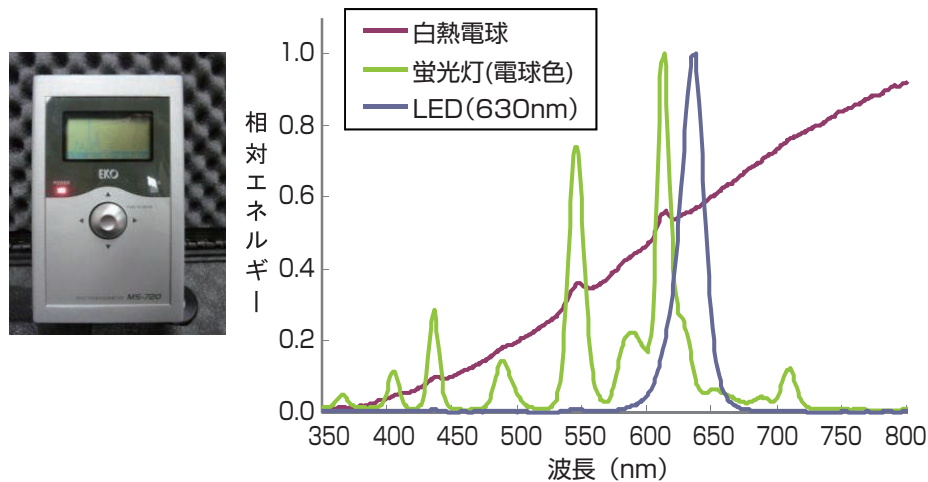


図1 分光放射照度計を用いて測定された分光分布図

3. 放射照度計 … 機種間の測定誤差、波長別の感度誤差に注意

センサーが感度を持つ波長域の放射照度を測る計測器です。300～1000nm程度までの波長域について、光源から放射されるエネルギー総量を知ることができます。

センサー感度の標準規格がないため、機種毎に感度特性が異なる場合もあります。また、波長域によってはセンサー感度が一定でない（図2参照）ため、基準とした光源と異なる分光特性を持つ光源については、正確な放射照度を示していないので注意が必要です。

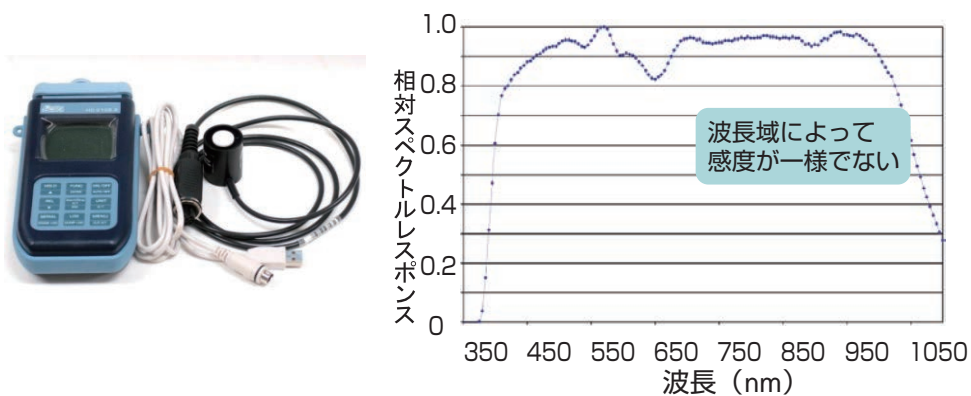


図2 放射照度計センサーの分光反応例
(LP471RAD、Delta OHM社)

4. 光量子計 … 機種間の測定誤差に注意

市販されている光量子計の多くは、**光合成有効放射域（400～700nm）の光量子束密度を測る計測器**です。植物の光合成反応に関わる場面での光環境の測定などに用いられています。



測定可能波長域以外に感度がありません。キクは700nm以上の波長域の光も花芽分化抑制のシグナルとして利用しています。光量子束密度の計測にこのタイプの光量子計を用いる場合、測定できない波長域については、別に分光放射照度計を用いて放射照度を求め、計算で求める必要があります。（付録1参照）

また、センサー感度の標準規格がないため、機種によって感度特性が異なるものがあります。

3

意外と多い！ 光の強さ測定時の注意点

植物は複雑な立体構造を持ち、その立体構造も受光体勢も時間の経過とともに変化し続けることから、植物の正確な受光量を測定することは不可能です。

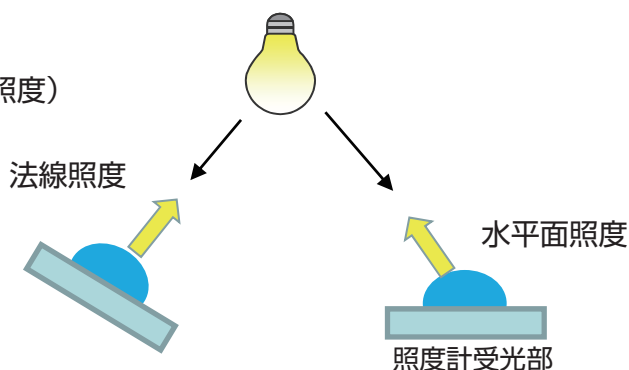
そのため様々な測定方法が考えられますが、キク電照栽培時の光の強さについては決まった測定方法がありません。

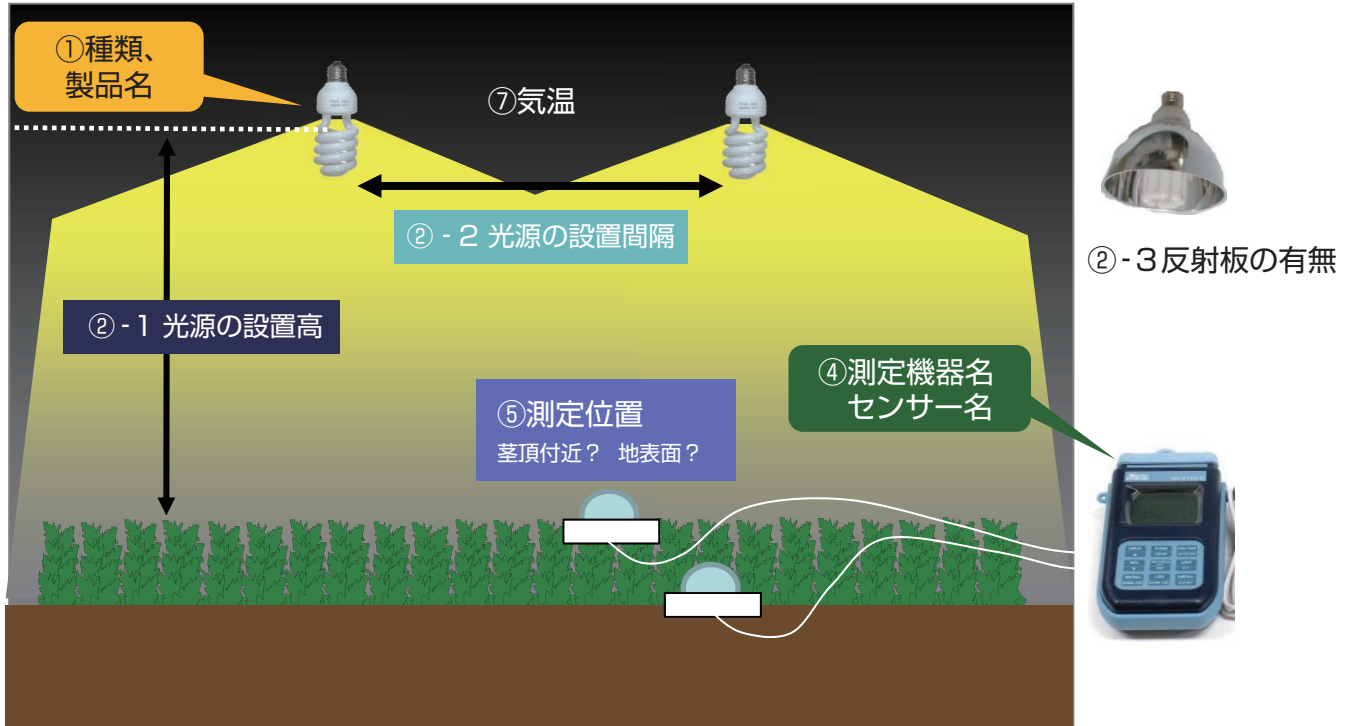
どのような測定方法を採用するにせよ、光源や測定機器の特性を理解し、再現性の高い測定方法をとることが重要です。よって他者の測定値を参考とする場合も、自らが測定する場合も、以下の点すべてについて留意が必要です。

- | | |
|------|---|
| 光源 | ①種類、製品名 |
| | ②設置方法（設置高、設置間隔、反射板の有無など） |
| | ③点灯させてから測定までに経過した時間
（光の強さは点灯後安定するまでに一定の時間を要する場合あり） |
| センサー | ④測定機器名、センサー名 |
| | ⑤測定位置（植物の茎頂付近なのか、地表面なのかなど） |
| | ⑥測定方法（センサーの向き、水平面？法線？） |
| 環境 | ⑦気温（蛍光灯は低温では光の強さが弱くなる） |
| | ⑧周囲の反射物（測定者の服が明るい色だと測定値が高まる） |

参考

⑥測定方法(照度)





③点灯させてから測定までに経過した時間

光源の種類によって点灯後の立ち上がりの照度推移が異なることに要注意

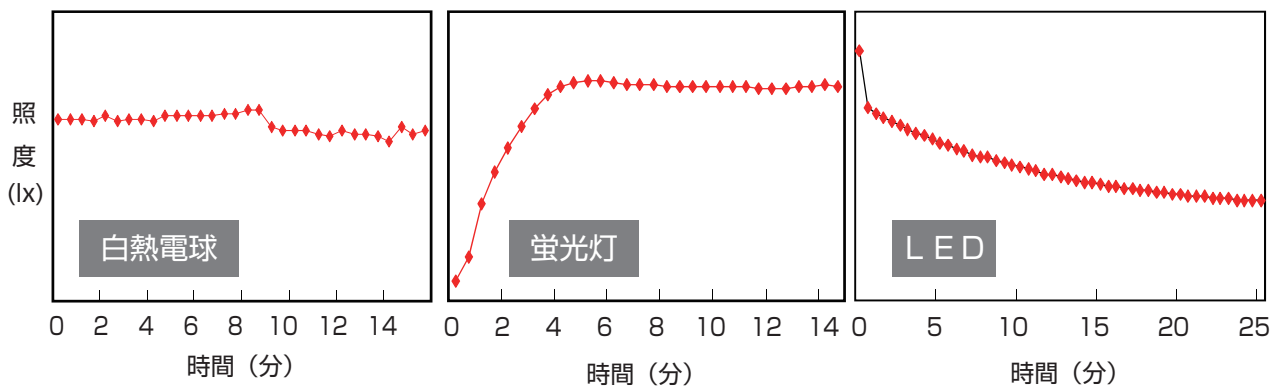


図 光源の種類別、点灯後の照度推移

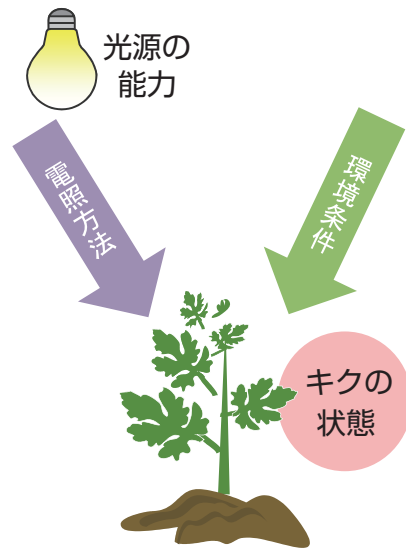
4

必要な光量は常に変化している 一番強い光が必要な条件は？

花芽分化抑制効果

これまでふれてきた、光源の光の強さや分光分布は、電照による花芽分化抑制の能力を決定する要因です。

花芽分化抑制の効果は光源の能力だけでは決まらず、周囲の環境に強く影響されています。すなわち、キクの花芽分化抑制に必要な光量は常に変化しているということです。



1. 花芽分化抑制効果を左右する要因

キクの花芽分化抑制効果に影響を及ぼす様々な要因を下に示しました。これらが複雑にからみあって、花芽分化抑制に必要な光量が決まります。

1. 光源の光の強さ 2. 光源の波長	光源の能力	
3. 電照時間 4. 電照時間帯	電照方法	
5. 栄養成長期間 6. 品種 7. 種苗の前歴 8. ホルモン剤	植物の状態	
9. 気温（夜温） 10. 気温（昼温） 11. 日射量	環境条件	

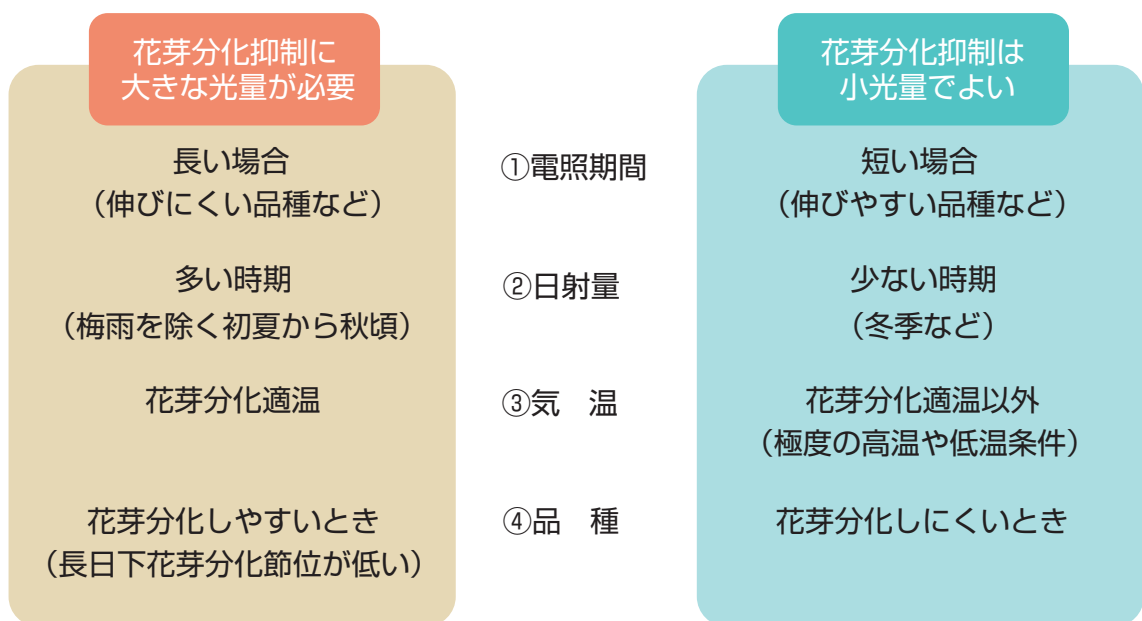


これらの要因が相互に作用して、必要な光量が決まる



2. 花芽分化抑制に大光量が必要な条件、小光量でもよい条件

花芽分化抑制効果に大きく影響する条件を下図に示しました。
花芽分化しやすい条件ほど、その抑制に大きな光量が必要になります。



3. 適切な基準照度の検討には“作型・品種”の考慮が重要

新しい光源を設置する際に必要と考えられる照度の目安を検討してきましたが、それは「これまで使用してきた光源と同等の花芽分化抑制能力を示す照度」でした。

これまでの照度は適切だったのでしょうか？必要量を大幅に超える光を照射していた可能性も考えられます。花芽分化抑制に必要な十分で、なるべく電力を消費しない実用的な照度は、作型や品種毎に設定し直し、常に最適な条件としたいところです。

しかし一度設置した光源の配置は容易に変更できないので、上図に示したような**最も花芽分化しやすい作型および品種でも十分な花芽分化抑制効果が得られる**ように、光源を配置する必要があります。

これは、産地によって栽培品種の構成や気温や日照等の気象条件が異なるため、**産地毎での検討が望ましい**と考えられます。

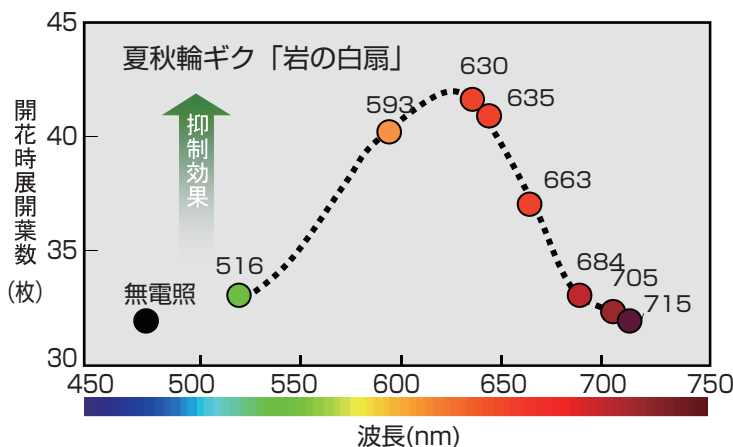
5

赤色が効果的！ キクの花芽分化抑制

1. 花芽分化抑制には赤色の光が効果的

キク電照栽培で夜間の電照に用いる光は、赤色（具体的には波長630nmを付近をピークとした590～640nm程度の範囲）の光が花芽分化抑制に効果的に働きます（図1）。

これらの波長域を多く含む光源ほど、少ない消費電力で高い花芽分化抑制効果を得ることができます。そして、赤色以外の光にも赤色光よりは劣りますが花芽分化抑制効果があります。



- ・各波長にピークを持つ、同じ出力のLEDで暗期中断電照し続けた場合に、蕾を着けるまでに葉を何枚まで展開させることができたかを示しています。
- ・展開葉数が多いほど、その光の花芽分化抑制能力が高いといえます。

図1 暗期中断電照の波長が花芽分化抑制に及ぼす影響

2. 波長毎の分光感度を推定する

夏秋輪ギク「岩の白扇」に4品種を加えた5品種で検討したところ、いずれも同様の反応を示し、キク長日処理における花芽分化抑制の分光感度曲線は図2のように推定され、また、その有効性も確認されました。

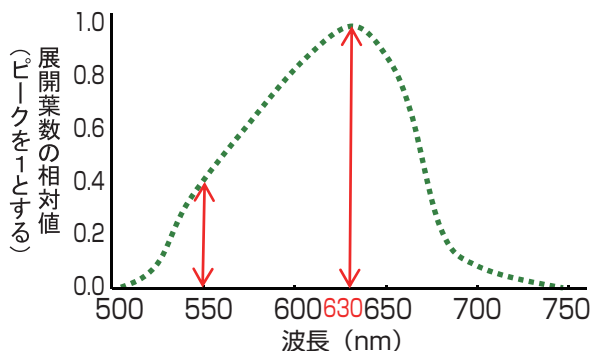


図2 キク長日処理における光の分光感度曲線

※キクの分光感度とは

- ・各波長の光に対するキクの花芽分化抑制反応の程度を表しています。
- ・例えば、波長550nmの光は、同じエネルギーの630nmの約4割の感度です。

(遠赤色光に対する反応については右頁コラム参照)

3. 花芽分化抑制に最も効果的な光は、波長660nmではない？

キクの花芽分化抑制にはフィトクロム(Pr型)で感受する光が関わっており、その吸収ピークは660nm付近とされています。しかし花芽分化抑制に最も効果的な光は、630nm付近でした。なぜズレが生じたのでしょうか？

その原因として、1) 葉に共存する色素(クロロフィル・カロテノイド・フラボノイドなど)の影響と2) フィトクロムの光平衡状態(Pr型とPfr型の存在比)の影響が考えられます。

例えば、葉に共存するクロロフィル等の色素は光受容体タンパク質よりも圧倒的に多く存在しています。葉に入射した660nm付近の光の多くは、大量に存在するクロロフィルに吸収されてしまいます。結果、フィトクロムに届く660nm付近の光が少なくなります。そのため、フィトクロムまで届き比較的良好に吸収される630nm付近の光が花芽分化抑制に効果的に働くようになると考えられます(図3)。

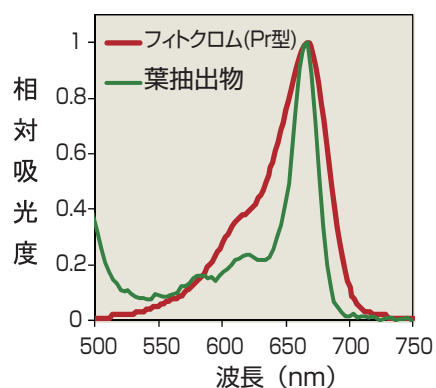


図3 フィトクロム(Pr型)と葉の粗抽出液の光吸収曲線

コラム 品種や光照射条件によっては遠赤色光(波長700nm以上)も花芽分化抑制効果あり

一般のほ場栽培では波長700nm以上の遠赤色光単独照射でも花芽分化抑制効果がみられることがあります。また「岩の白扇」などでは、波長700nm以上の遠赤色光を赤色光と同時照射することで、花芽分化抑制能力を若干上げることができます(図4)。

遠赤色光を含む光を照射する身近な光源としては白熱電球があります。遠赤色光の反応も、葉に含まれる色素タンパク質「フィトクロム」がこれらの光を吸収することで起こる反応と考えられています。

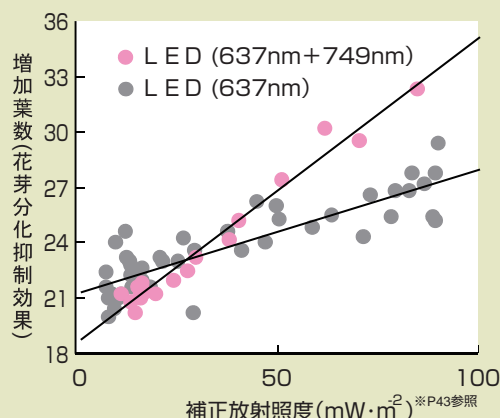


図4 照射光の波長が「岩の白扇」の花芽分化抑制効果に及ぼす影響

〔試験方法〕5月6日定植、定植28日後まで赤色蛍光灯、その後はLEDで発雷まで暗期中断5時間電照

6

異なる光源の

花芽分化抑制能力を比較するには

様々な種類の光源から放射される光は**分光分布等が異なります**（てびき編5参照）。よって、照度計や放射照度計、光量子計の指示値では、異なる光源間の花芽分化抑制能力を比較することができません。どうすれば比較できるのでしょうか？

1. 分光感度係数を利用する

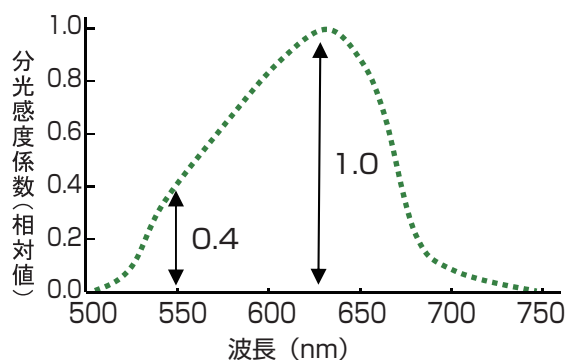
光源からの光がキクの花芽分化を抑制する効果は、①その光に含まれる波長構成およびそのエネルギーと、②キクの光の感じ方（分光感度）の把握が必要です。

光源からの波長毎のエネルギーは分光放射照度計で測定し、分光感度は解説編5で得られたものを使用します。

2. \int (分光放射照度 × 分光感度係数) = 花芽分化抑制能力

波長毎の光エネルギー（分光エネルギー）を上記の分光感度係数で補正（下図、付録2参照）し、その全波長域の総和を得ることで、光源毎の花芽分化抑制能力を表すことができます（手順は右頁）。その総和のことを、ここでは“補正放射照度”と称しています。

※分光エネルギーの分光感度係数による補正の考え方



・ 分光エネルギーは波長毎のエネルギーであり、放射照度で表す。

・ 分光エネルギーの補正例

波長 (nm)	分光エネルギー (μW·m ⁻²)	分光感度係数 (左図より)	補正分光エネルギー (μW·m ⁻²)
550	10	0.4	4
630	10	1.0	10

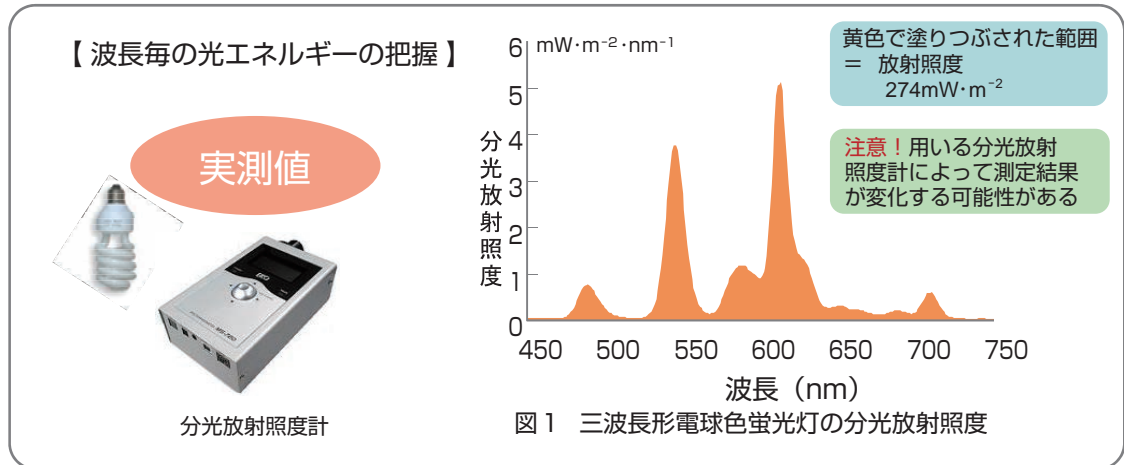
分光エネルギーを 10μW·m⁻²と仮定

3. 同じ補正放射照度では、花芽分化抑制能力は同じ

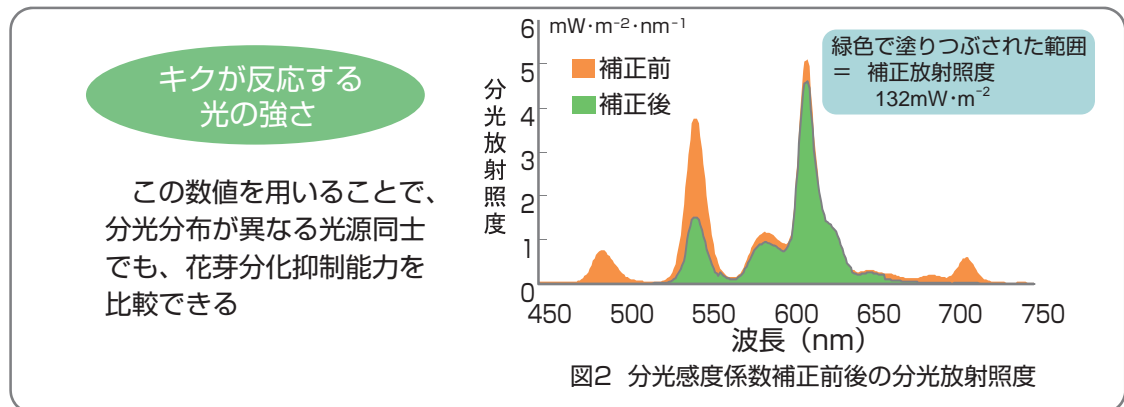
光源の花芽分化抑制能力は、同一“放射照度”では大きな差があっても、同一“補正放射照度”ではほぼ等しくなります（右頁図3）。すなわち、同じ補正放射照度では花芽分化抑制能力は同じと考えられます。



4. 花芽分化抑制能力の算出手順(三波長形電球色蛍光灯の場合)



波長域ごとの分光感度係数を乗じて補正值を得る



5. 同じ補正放射照度では花芽分化抑制能力はほぼ等しい

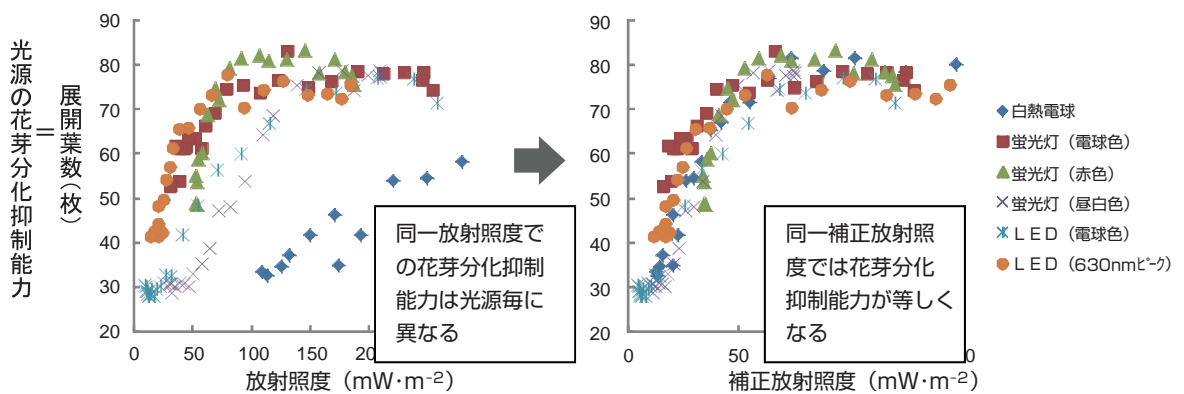


図3 放射照度および補正放射照度と展開葉数の関係 (神馬)

7

波長特性が異なる光源間で 花芽分化抑制能力を比較する

1. 補正放射照度により花芽分化抑制能力を比較可能

分光放射照度計を使用すれば、どのような波長特性を持つ光源でも花芽分化抑制能力を“補正放射照度”という形で表すことができ、その値同士の比較により、その光源の持つ花芽分化抑制能力を相対的に比較することができます。

しかし、分光放射照度計は高価であり、広く普及している機器とは言えません。身近に分光放射照度計がない場合は、照度計と照度から補正放射照度への換算係数（下表）を用いることでも代用可能です。

2. “照度”から“花芽分化抑制能力”を推定する

同じ光源からの同じ手法で測定した光の強さは、その捉え方の違いにより照度、放射照度、光量子束密度で表すことができ、いずれにも換算が可能です。同じ考え方により、今回得られた補正放射照度も照度に換算が可能です。

以下に白熱電球の50 lxに相当する、補正放射照度102mW・m⁻²である、光源別の照度、放射照度および光合成有効光量子束密度（PPFD:400-700nm）への換算例を示しました。下表に表示されている光源は右図の分光特性を示すため、それと同じ分光特性の光源であれば測定した照度に補正放射照度への換算係数（下図の(B)/(A)値）を乗じることで、花芽分化抑制能力を推定できます。

表 白熱電球50 lx相当の花芽分化抑制能力を示す光源別照度、放射照度およびPPFD（換算例・理論値）

光源	照度 (lx) (A)	放射照度 (mW・m ⁻²)		補正放射照度 (mW・m ⁻²) (B)	PPFD (μmol・m ⁻² ・s ⁻¹)	照度→補正放射照度 換算係数 (B)/(A)	
		理論値※	実測値※※				
白熱電球 (75W)	50	342	843	102	0.98	2.0	
三波長型 蛍光灯	(電球色,23W)	69	187	159	102	0.85	1.5
	(ピンク色,23W)	42	149	130	102	0.68	2.4
	(昼光色,22W)	91	285	250	102	1.24	1.1
LED	(電球色,8W)	61	206	174	102	0.93	1.7
	(630nmピーク,7W)	19	110	98	102	0.57	5.4

※：波長域380~800nmで算出

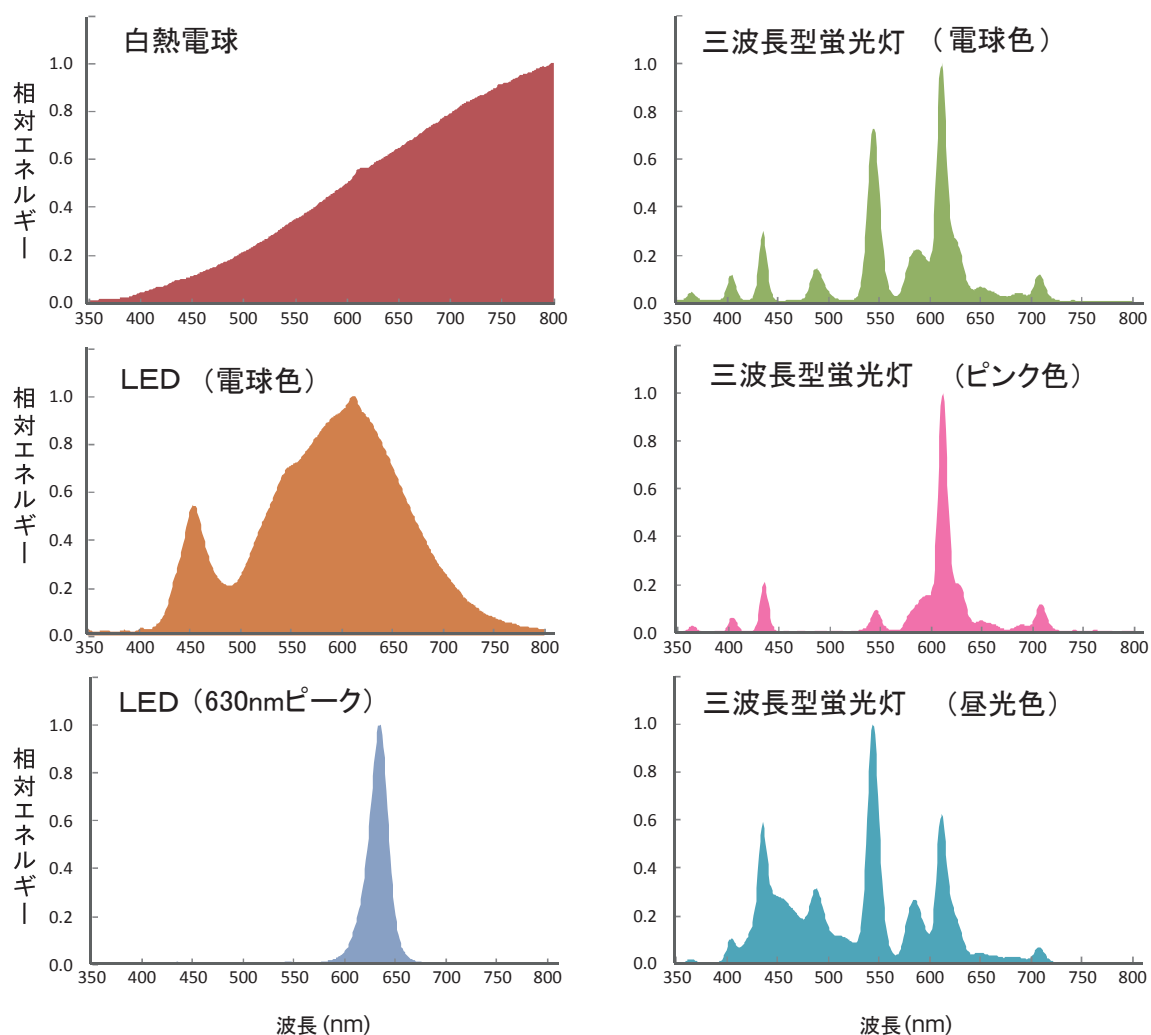
※※：放射照度センサーLP471RAD(Delta OHM社)使用時。センサーの分光反応はP36図2参照

(参考) 照度から花芽分化抑制能力への換算例(使用光源が電球色LEDの場合)

照度計測定値：50 lx

補正放射照度への換算：50 lx × 1.7 = 85mW・m⁻²

3. ここで用いた光源の分光特性



4. 花芽分化抑制能力を比較する際の留意点

花芽分化抑制に必要な光の強さは、様々な要因の影響を受けて変化し、一定ではありません（解説編4参照）。

ここで得られた補正放射照度は、光源の種類を問わず、花芽分化抑制能力の相対的な比較には使用できますが、「数値がいくら以上あれば花芽分化抑制可能」という**能力の絶対値にはならない**ことに注意が必要です。「あくまでこの光源はこの光源より能力が高い」という**相対的な評価に用いるべき**ものです。

8

ここまで分かった！

キクの開花調節機構

キクは日長条件を葉で感知し、**開花促進物質（フロリゲン）**と**開花抑制物質（アンチフロリゲン）**を葉で作ります。そして、茎先端部に届く促進あるいは抑制物質の量によって、開花するかどうかを決めています。

1. 開花促進物質（フロリゲン）と抑制物質（アンチフロリゲン）

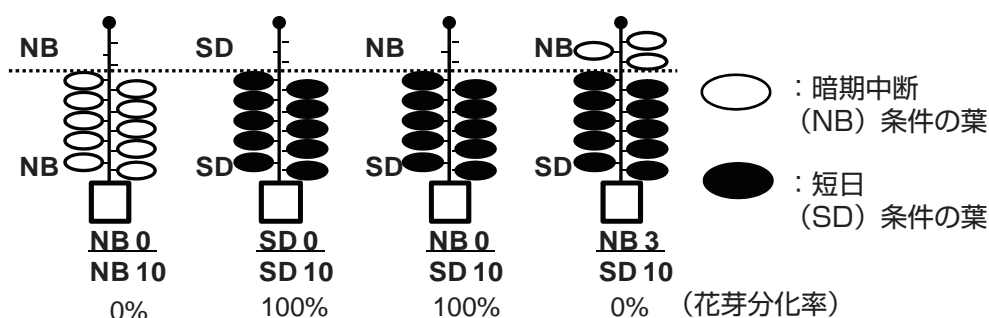


図. 部位ごとに異なる日長処理をした場合の花芽分化のようす

キクは、上図のように茎先端部の日長条件にかかわらず、すべての葉を短日条件におくと花芽分化しますが、上位葉を暗期中断条件におくと花芽分化が抑制されます。このことから、短日条件の葉で**開花促進物質（フロリゲン）**が作られ、暗期中断条件の葉で**開花抑制物質（アンチフロリゲン）**が作られると想定できます。

2. キクの開花を決める鍵となる遺伝子の発見

最近、キクの開花を決める鍵となる二つの遺伝子、フロリゲンを作る遺伝子 [*Flowering locus-T like 3 (FTL3)*] とアンチフロリゲンを作る遺伝子 [*Anti-florigenic FT/TFL1 family protein (AFT)*] が発見されました。



フロリゲン遺伝子(*FTL3*)を過剰発現する遺伝子組換え体は、長日条件での培養中に培養器内で開花する。一方、アンチフロリゲン遺伝子(*AFT*)を過剰発現する遺伝子組換え体は、短日条件でも開花しない。

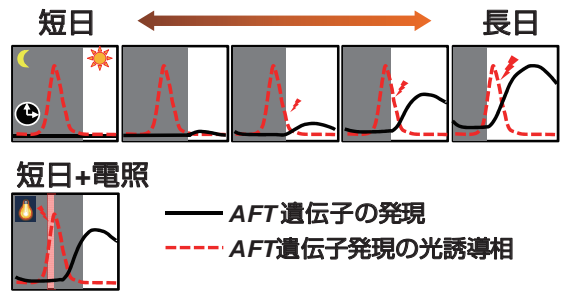
3. キクの開花を決める赤い光を感じるセンサー

植物は赤い光と遠赤色光を受容するフィトクロムと呼ばれる光受容体を複数もっています。フィトクロムの一種であるフィトクロムB (PHYB) がキクの暗期中断を制御する主要な光受容体であることがわかりました。右図のように野生型 (WT) が開花しない暗期中断条件でPHYB遺伝子の機能抑制組換え体 (Bi #5) は開花しました。これは、暗期中断の赤い光をPHYBが感知し、開花を抑制することを示しています。



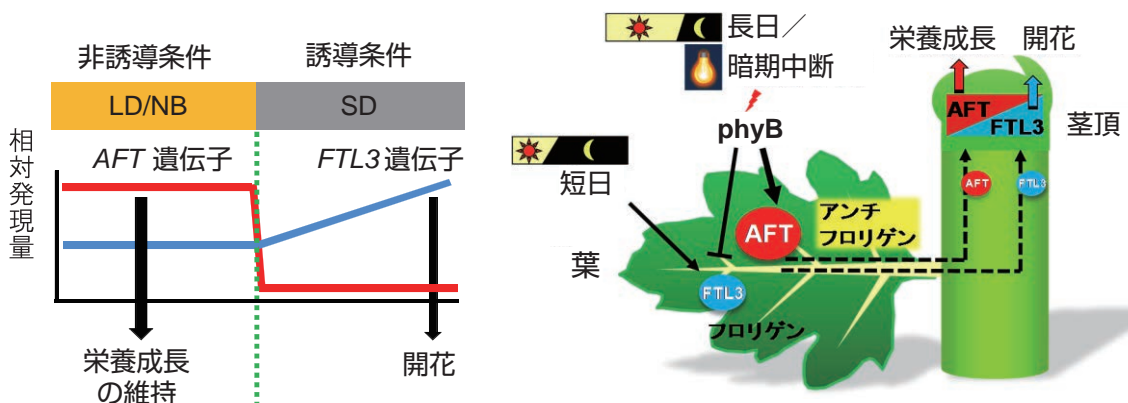
4. キクは暗期開始から一定時間後に光を感じて開花抑制する

暗期中断による開花抑制の鍵のひとつが開花抑制遺伝子 (AFT遺伝子) の発現を調節する仕組みです。キクは、暗期開始一定時間後から数時間 (赤い点線で示す部分) だけAFT遺伝子を誘導するために必要な光情報を感じることができます。この時間内に光を感じるとAFT遺伝子が誘導されます (黒い実線)。



5. キクは葉で光を感じて開花調節物質を作り開花を決定する

このように、キクは日長条件を葉で感知し、開花促進物質 (フロリゲン) と開花抑制物質 (アンチフロリゲン)、両方の作る量を調節しています。そして、茎先端部に届く促進あるいは抑制物質の量によって、開花するかどうかを決めています。



注：ページ表示は、この用語が使われたページを指す

暗期中断

P5

光中断、暗期光中断、night breakともいう。暗期を途中で分割するように電灯照明を行う電照方法であり、現在長日処理を行う際の最も一般的な手法である。一般的な電照時間は2～4時間。日長によって誘導される現象は、明期の長さより連続した暗期の長さが重要であるため、暗期中断を行うことで長日効果が得られる。

栄養成長期間

P39

植物の生育段階を栄養成長、生殖成長、登熟期間の3時期に分けたうちのひとつで、発芽から花芽分化開始までの期間を指す。キク栽培においては、一般的に限界日長以上の日長条件下で成育している期間となる。

間欠電照

P5, 13

長日効果を目的に電照を行う場合に、照明を連続して行うのではなく、短時間ずつ断続的に行う方法。cyclic lightingともいう。過去、キクなどで大きな省エネ効果がある電照方法であることが確認されたが、その当時において必要な設備投資にその省エネ効果が見合わない判断されたため、我が国ではあまり普及していない。

クロロフィル

P42

緑色植物などに含まれる光合成に必要な緑色色素。多くの場合、細胞内小器官であり、光合成の全過程が行われる「葉緑体」の膜中にタンパク質との複合体を作って存在する。若干構造の異なる数種類があり、クロロフィルa、b、cなどと呼ばれる。主な光の吸収波長のピークはクロロフィルaが427.5nmと660.0nmで、クロロフィルbは452.5nmと642.5nmである。

限界日長

本てびき内で
多く使う用語

質的短日植物（上記「短日植物」参照）の場合は、開花することができる日長の上限、質的長日植物の場合は開花することができる日長の下限のこと。例えば短日植物のキクの限界日長は、秋ギクが12～15時間、夏秋ギクが16～24時間とされている。

短日植物

P5

日長が短くなると花成が促進される植物。このうち、ある一定時間以下の日長（限界日長）でないといつまでも開花しないものを「質的短日植物」といい、これに対し、短日下でも長日下でも開花するが、短日の方が早く開花するものを「量的短日植物」という。短日植物の花成に必要な条件は、短い明期よりも連続した長い暗期である。

夏秋ギク・ 秋ギク

P5, 41

キクの品種を自然の開花期と開花特性から分類したとき、秋から初冬に開花する品種群を「秋ギク」、秋ギクよりも早い初夏から秋に開花する品種群を「夏秋ギク」という。共に花芽分化・発達が質的短日性で、長日条件下では開花しない特性を持つが、夏秋ギクは秋ギクより限界日長が長いいため、より長日条件の夏でも開花することができる。

発光効率

P11, 13, 15

光源の効率を評価する指標であり、光源に投入する電力 (W) あたりの光源から発する光束 (lm) で表す。単位は $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ である。白熱電球は20未満と低いものに対して、蛍光灯やLEDは概ね40~100程度と高い。今後の技術改善により、LEDは更なる高まりが期待されている。

比視感度

P19, 34

人間の目において、同じ放射エネルギーの光でも波長によって感じ方が異なることを「視感度」という。「比視感度」とは、人間の波長ごとの光の感じ方を相対的に数値化・基準化したもので、最大値は1である。なお「標準比視感度」はCIE (国際照明委員会) で合意された値を指す。

皮相電力

P9

交流における見かけ上の消費電力のこと。VA (ボルトアンペア) で表示される。交流の場合、電力を消費する装置にコイル成分やコンデンサー成分があると、電圧波形と電流波形との間にずれが生じる。特に、電子機器などの場合には電流波形が電圧波形と大きく異なるものが多いため、(電圧の実効値) × (電流の実効値) の値が真の消費電力にならない場合がある。このような(電圧の実効値) × (電流の実効値) の値を皮相電力といい、(皮相電力) ≥ (有効電力) の関係がある。

フィトクロム

P19, 42

植物などに含まれる色素タンパク質で光の受容体。吸収スペクトルを赤色光吸収型 (Pr型) と遠赤色光吸収型 (Pfr型) とに可逆的に変え、それぞれの光を受容する性質を持つ (赤色照射によってPr型は遠赤色光を受容できるPfr型に、遠赤色光照射によってPfr型は赤色光を受容できるPr型に変化する)。花芽形成や光発芽、避陰反応など、様々な植物の応答に関わっている光受容体である。

やなぎ芽

P5, 23

キクの花芽分化はそれぞれの品種の花芽分化の限界日長より短い日長下、あるいは株の成熟によって誘起される。しかし正常な花芽の発達ができなかった場合に、苞葉の一部が柳葉状の細長い葉に転じて花首に着生する。このような奇形の葉を伴った奇形の花蕾のことを「やなぎ芽」と呼ぶ。

【書籍等】

人工光源の農林水産分野への応用、(社)農業電化協会、後藤英司編 (2010)

最新農業技術 花卉Vol.4、農文協 (2012)

農業技術体系 花卉編、農文協 (2010)

(独)農業・生物系特定産業技術研究機構編、最新農業技術事典、農文協 (2006)

(社)照明学会編、光バイオインダストリー - 光応用による生物反応の制御、オーム社(1992)

アグリフォトニクスⅡ、シーエムシー出版、後藤英司監修 (2012)

パナソニック株式会社 ランプ総合カタログ http://www2.panasonic.biz/es/catalog/web_catalog/lamp/

【ホームページ】

一般社団法人 日本照明工業会

(独)産業技術総合研究所 計量標準総合センター

通信用語の基礎知識

ウシオ電機株式会社

岩崎電気株式会社

NECライティング株式会社

【論文等】

1) キクの花芽分化抑制における暗期中断電照の波長の影響、園芸学研究、(2013) 12:173-178、白山竜次他

2) Spectral sensitivity of flowering and FT-like gene expression in response to night-break light treatments in the chrysanthemum cultivar, 'Reagan'. J. Hort. Sci. & Biotech. (2012) 87:461-469. Sumitomo 他

3) CsFTL3, a chrysanthemum FLOWERING LOCUS T-like gene, is a key regulator of photoperiodic flowering in chrysanthemums. J. Exp. Bot., (2012) 63:1461-1477. Oda 他

4) The gated induction system of a systemic floral inhibitor, antiflorigen, determines obligate short-day flowering in chrysanthemums. PNAS., (2013) 110: 17137-17142. Higuchi 他

5) 生態環境としての光の計測、生物と気象(Clim.Bios) (2011) 11:A1-7、高見晋一

6) 光波長の特性を応用した農業用照明、Panasonic電工技法 (2009) 57:46-52、石渡正紀他

7) 光生物と放射、Panasonic照明設計資料

[<http://www2.panasonic.biz/es/lighting/plam/knowledge/document/0309.html>]

【付録】

付録1：放射照度と光量子束密度の関係式

放射照度 ($W \cdot m^{-2}$) =

光量子束密度 ($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) \times (アボガドロ数 (mol^{-1}) \times プランク定数 ($J \cdot s$) \times 光速度 ($m \cdot s^{-1}$) \div 波長 (m))

アボガドロ数 ($6.02 \times 10^{23} mol^{-1}$)、プランク定数 ($6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$)、光速度 ($3 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$)

付録2：キク花芽分化抑制の分光感度

波長域 (nm)	分光感度 係数	波長域 (nm)	分光感度 係数
~509	0.00	630~639	1.00
510~519	0.04	640~649	1.00
520~529	0.11	650~659	0.80
530~539	0.25	660~669	0.65
540~549	0.35	670~679	0.30
550~559	0.45	680~689	0.15
560~569	0.55	690~699	0.10
570~579	0.63	700~709	0.07
580~589	0.70	710~719	0.05
590~599	0.80	720~729	0.05
600~609	0.85	730~739	0.05
610~619	0.95	740~749	0.01
620~629	1.00	750~	0.00

執筆担当者：

鹿児島県農業開発総合センター 郡山啓作

鹿児島県農業開発総合センター 白山竜次

(独)農研機構 花き研究所 住友克彦

(独)農研機構 花き研究所 久松 完

問い合わせ

(独)農業・食品産業技術総合研究機構 花き研究所
TEL 029-838-6801(代表)

鹿児島県農業開発総合センター 花き部
TEL 0993-35-0210

本資料は、「私的使用」又は「引用」など著作権法上認められた場合を除き、無断で転載、複製、放送、販売などの利用をすることはできません。転載、複製、放送、販売などの利用の場合には、事前に(独)農業・食品産業技術総合研究機構花き研究所の許可を得てください。