

特殊色 LED（低誘虫・フォトリソ用）の開発

Development for Special Features LED (Low insect attraction, non-photosensitive)

佐藤 充 孝*
Mitsutaka Sato

概要 照明業界は発光効率という競争軸から新たな付加価値を模索している。当社は蛍光体技術を応用することによって、低波長域を低減ないしカット（大幅に低減）した、特殊なLEDを開発した。しかし、このようなLEDは世の中に類似品も採用事例もなく、理論だけでは受け入れられないのが実情で、具体的な検証データと併せて提案することが必要となる。そこで、このLEDの有用性を「誘虫性能」と「フォトリソ工程への影響」という2つの視点にて確認を試みた。その結果、一定の「低誘虫性能」および「レジスト剤への影響低減」を示唆する成果が得られたため、ここに報告する。

1. まえがき

食品倉庫やトラックヤードなど虫を寄せ付けたくない場所や、半導体工場のフォトリソ工程などではイエローランプが使われている。これは、昆虫が低波長域の光に引き寄せられたり、感光性樹脂（レジスト剤）が低波長域の光に影響を受けたりするのを避けるため、500nm以下の光をカット（大幅に低減）しているためである。

しかし、500nm以下の光をカットするために、カラーフィルムを使っているため光量は低下し、また、ランプの寿命はそのフィルムに依存してしまう。

低波長域のカットをフィルムで実現しているのは、LEDの高発光効率、長寿命の利点が損なわれてしまう。また、作業現場を黄色い光で照らしていると、その視認性や作業性が著しく損なわれる。我々は、低波長域の光が漏れないように蛍光体で吸収させることにより、フィルム不要のイエローランプ用LEDが実現可能と考えた。また、発光スペクトルを調整することで、イエローランプのような性能を備えながら、白色に見えるLEDも考案した。

本稿では、実際に低波長域をカットしたLED光源を試作し、その効果について検証した。

2. 低誘虫・フォトリソ用LEDの開発

500nm以下の低波長域の光を低減ないしカット（ここでは大幅に低減の意で使用）したLEDを実現する方法はいくつかある。ここでは照明用LEDとして応用可能な100lm/W以上の発光効率をもつ、「青色LED」と「蛍光体」を組み合わせた方式を採用した。

500nm以下の低波長域をカットしたLED（以降、イエローLED）と白色でありながら低波長域を低減したLED（以降、低波長低減LED）の目標仕様を表1と図2および表2と図3に示す。イエローLEDは蛍光灯イエローランプと同等な500nm以下のカットを、低波長低減LEDは一般白色LEDと同等な白色（色温度、色度、演色性）を目指す。ここで一般白色LEDとは色温度5000Kで平均演色評価数Ra83以上のものを指す。

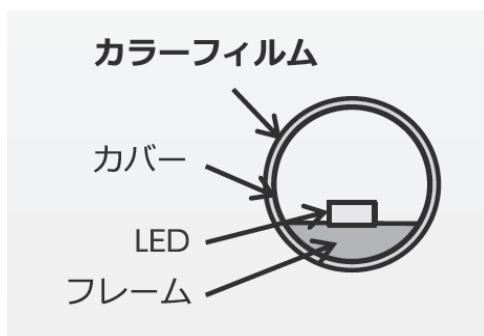


図1 イエローランプの構造 (LED ランプの場合)

*半導体事業本部 マーケティング本部
パワーデバイス開発統括部 オプト技術部 開発課

なお、演色性とは基準光で照らされた物体の色をどれだけ再現しているかを表す指標であり、いくつかの指標の中でも平均演色評価数Raを用いることが多い。Raは100までの指数で表され、基準光と同じ見え方をする場合は100となる。

表1 イエローLEDの目標仕様

発光効率 [lm/W]	発光ピーク波長に対する 500nm 以下の発光強度
100 以上	5% 以下

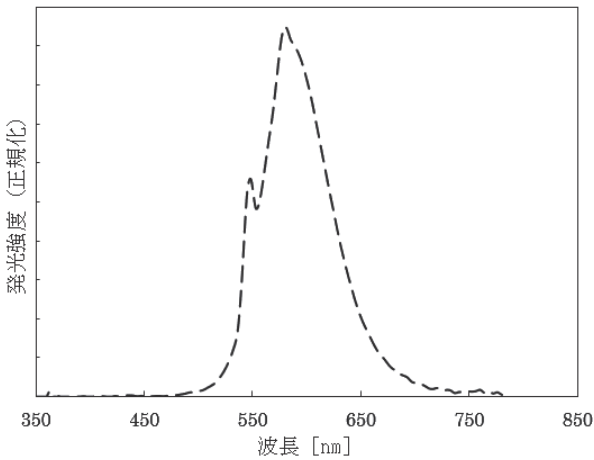


図2 イエローLEDの目標発光スペクトル

表2 低波長低減LEDの目標仕様

発光効率 [lm/W]	演色性 Ra	色温度 [K]	色度範囲 (x, y)
100 以上	83 以上	5000	(0.345, 0.352) を中心に 3-step

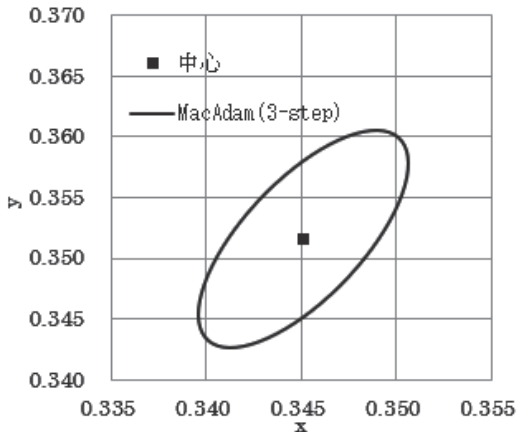


図3 低波長低減LEDの目標色度範囲

なお、色度範囲のMacAdam楕円(3-step)とは肉眼で色の区別がつかない色度範囲のことであり、照明分野の色ずれの指標としてよく使われている。

2.1 イエローLEDの設計

イエローLEDの設計として、500nm以下の光をカットすることが求められる。特殊な蛍光体が必要となるわけではないが、封止樹脂中の蛍光体濃度を上げ、青色LEDの光をほぼ完全に吸収させる必要がある。ただし、蛍光体濃度を上げると蛍光体の再励起過程が増えることから、発光効率の高い蛍光体を選定した。

開発したイエローLEDと蛍光灯イエローランプのスペクトル比較を図4に示す。また、開発したイエローLEDの特性を表3に示す。

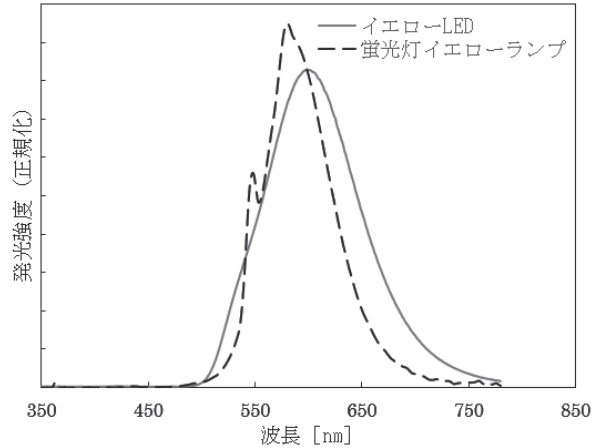


図4 イエローLEDと蛍光灯イエローランプの発光スペクトル

表3 イエローLED特性と目標仕様

項目	発光効率 [lm/W]	発光ピーク波長に対する 500nm 以下の発光強度
目標値	100 以上	5% 以下
開発品	110	1.3% 以下

開発したイエローLEDは蛍光灯イエローランプと同等の発光スペクトルおよび、500nm以下のカットを達成し、発光効率も100lm/W以上を達成できた。

2.2 低波長低減LEDの設計

低波長低減LEDの設計では昆虫の視感度を考慮に入れることを最大のポイントとした。昆虫は人とは異なる世界が見えていると言われている。各波長に対する眼の感度(視感度)が人と異なっており、具体的には紫外線

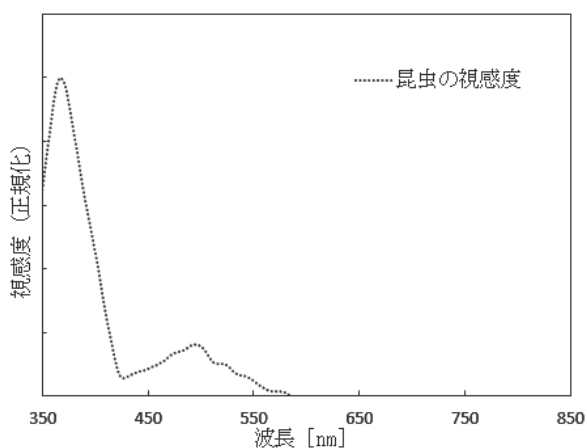


図5 昆虫の視感度曲線(例)

領域の光を明るく感じている⁽¹⁾。波長毎に感度をプロットした視感度曲線で表したものが図5となる。

また、昆虫は走光性という、明るい光に集まる性質があるとされている。そのため、蛍光灯と比較して紫外線の少ないLEDは昆虫には暗く見えるため、昆虫が寄りにくいとされていた。この昆虫の視感度を考慮して、視感度と発光スペクトルの重なりを抑えた、一般白色LEDより「暗く」見える発光スペクトルを持つLEDの実現を目指す。

まず長波長の青色LEDチップを選定した。具体的には青色LEDの発光ピーク波長を450nmから460nmとした。次に、500nm付近の発光を抑えることを考えた。一般的なYAG蛍光体から発光半値幅の狭い蛍光体を用いることで500nm付近の発光を抑えた。この緑色蛍光体の変更は平均演色評価数Raが低下してしまうため、赤色蛍光体には、より長波長に発光するCASN蛍光体を選定して演色性を補った。使用した蛍光体の発光スペクトルを図6、7に示す。

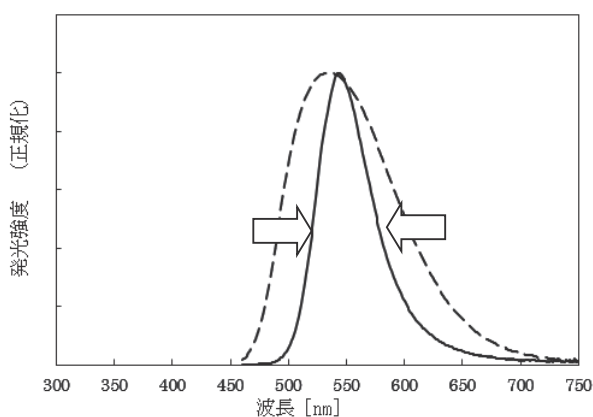


図6 緑色蛍光体の発光スペクトル比較

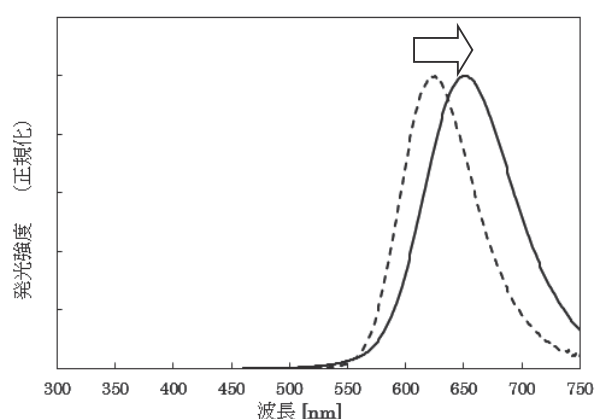


図7 赤色蛍光体の発光スペクトル比較

開発した低波長低減LEDの特性を表4と図8、9に示す。なお、各発光スペクトルは比視感度を乗じた面積によって正規化し、同じ明るさになるように揃えている。

表4 低波長低減LED特性と目標仕様

項目	発光効率 [lm/W]	演色性 Ra	色温度 [K]	色度範囲 (x, y)
目標値	100 以上	83 以上	5000	(0.345, 0.352) を中心に 3-step
開発品	104	87	4860	(0.349, 0.356)

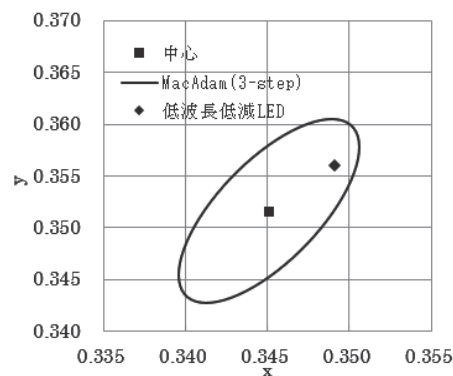


図8 低波長低減LEDの色度座標

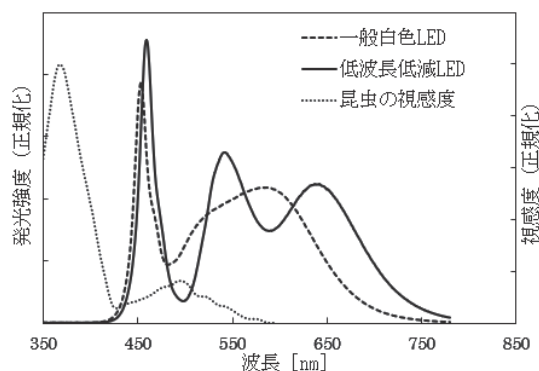


図9 低波長低減LEDの発光スペクトル比較

開発した低波長低減LEDは発光効率100lm/W以上を達成し、一般白色LEDと遜色ない演色性や色度を達成できた。また、低波長低減LEDの発光スペクトルは昆虫の視感度との重なりが少なくなっていることも確認できる。

3. 誘虫性能

開発したイエローLEDおよび低波長低減LEDがどのような誘虫性能を発揮するか、実験にて確認した。

3.1 誘虫実験

イエローLEDと低波長低減LED、そして一般白色LEDを用いた誘虫実験をおこなった。実験は福島県二本松市にある福島サンケンの敷地内にて、7月～8月にかけて実施した。図10に示すように自然林に面する場所に、夕方から翌朝にかけて実験治具を設置している。光源毎の条件を均等にするために、1m前方での照度は

100lxで統一し、実験治具位置は毎日入れ替えた。

粘着シートの上にLED実装基板を配置し、その粘着シートごと垂直に設置することで昆虫を誘引する。

誘虫実験の気候条件を表5に、誘虫結果を図13と表6に示す。

表5 気候条件1回目

日付	7/12	7/13	7/14	7/15
天気	曇一時雨	曇一時雨	曇時々雨	曇一時晴
最高気温 [°C]	27.8	29.7	28.1	30.1
最低気温 [°C]	20.3	20.6	20.9	20.1

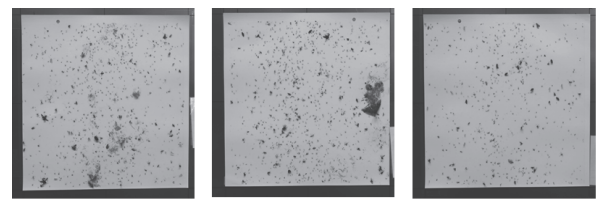


図13 誘虫実験結果(粘着シート写真) 1回目
(左から一般白色LED, 低波長低減LED, イエローLED)



図10 設置場所(白○箇所)

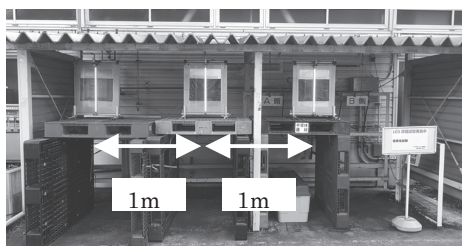


図11 誘虫実験治具設置状況

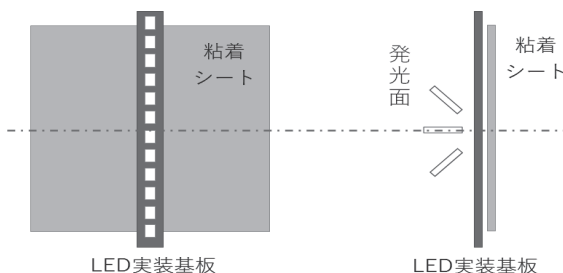


図12 誘虫実験模式図

表6 誘虫数1回目

項目	小	中	大	合計
一般白色LED	580	90	11	681
低波長低減LED	630	106	1	737
イエローLED	434	58	3	495

ここで誘虫数のカウントの際、小は約2mm以下のサイズ、中は約2～5mmのサイズ、大は約5mm以上の蛾目など翅の大きな昆虫としている。

結果、イエローLEDは明らかに昆虫の付着が少なかったものの、一般白色LEDと低波長低減LEDの誘虫数の差は明確には分からなかった。今回は3種のLEDの設置位置が近く、光の相互干渉により明確な差が出なかったと推定した。一般白色LEDと低波長低減LEDのみの比



図14 再実験時誘虫実験治具設置状況

表7 気候条件2回目

日付	8/25	8/26
天気	雨のち曇	曇一時晴
最高気温 [°C]	29.0	33.8
最低気温 [°C]	22.2	23.9

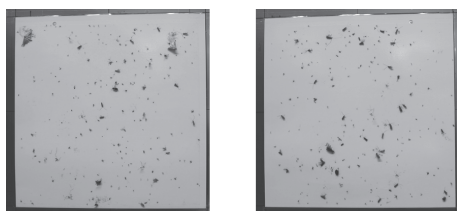


図15 誘虫実験結果(粘着シート写真)2回目
(左から一般白色LED, 低波長低減LED)

表8 誘虫数2回目

	小	中	大	合計
一般白色LED	166	23	5	197
低波長低減LED	129	72	0	201

較実験とし、さらに間隔を拡げて再実験をおこなった。

再実験の気候条件を表7に、誘虫結果を図15と表8に示す。

こちらの結果もはっきりした誘虫数の差は確認できなかったものの、低波長低減LEDでは蛾目の捕虫数が引き続き少ない結果となっている。昆虫は種類によって視感度が異なるという報告もあり、例えば蛾目は380nm以下といった紫外線領域よりも500nm付近に大きな視感度を持つとされている⁽²⁾。これが今回の結果に繋がっている可能性がある。

3.2 誘虫実験まとめ

イエローLEDは昆虫が寄りにくいことが明らかとなった。また、低波長低減LEDは一般白色LEDと明確な差は無かったものの、蛾の飛来に効果がある可能性が示唆された。昆虫によって視感度が変わるため、全ての昆虫に万能な「低誘虫」LEDの実現は困難かもしれないが、対象を限定することで低誘虫効果が期待できる。

このような実験結果を広く公開することで、低誘虫効果の可能性をPRし、今後の引合いに繋げていきたい。

4. フォトリソ環境性能

レジスト剤を感光させる光源は露光用光源と呼ばれ、その波長によってg線(436nm)やi線(365nm)と称されている。そして、それぞれの光源に適したレジスト剤が使われており、微細なパターンほど波長の短い光源が

必要となる。

これらのレジスト剤は蛍光灯に含まれる紫外線だけでなく青色光でも変質してしまうため、先に紹介したイエローランプにてフォトリソ工程エリアが照明されることとなった。レジスト剤の変質を避けるためとはいえ、イエローの光で照らされた環境下では視認性・作業性が低下し、ストレスの原因にもなる。

また、半導体の製造工程での目視検査や、顕微鏡検査で必要となる照明にも500nm以下の光は厳禁である。フィルターなどによって低波長域を大幅に低減し、緑や黄色の光色で検査することになり、ここでも作業効率や作業品質の低下が起こっている。

そこで、500nm以下の光を低減しながら、白色に調整された光、すなわち低波長低減LEDがレジスト剤に影響しないことが確認できれば、様々なフォトリソ環境での作業性を改善できる光となる可能性がある。

4.1 レジスト剤曝露実験

半導体ウェハ上に塗布したレジスト剤に低波長低減LEDをマスク越しに曝露する。曝露時間を段階的に変えて、エッチング後のレジスト膜厚(残厚)を測定することで、レジスト剤への影響を確認した。また、蛍光灯イエローランプ、一般白色LED、イエローLEDでも同様な実験をおこなった。実験の模式図を図16に示す。また、実験条件一覧を表9に、実験に使用した光源と露光用光源(g線)の発光スペクトルを図17に示す。

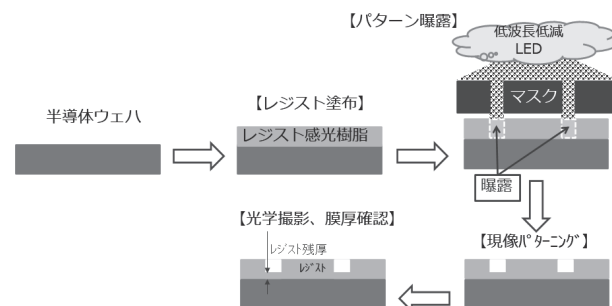


図16 フォトリソ曝露実験工程

表9 実験条件一覧

項目	条件	備考
曝露照度	500lx	机上照度を参考
曝露時間	2h/6h/12h/24h	
レジスト膜厚	990nm	Pre-bake/Post-bake 共に100°C 90秒
レジスト剤	TSMR-V90LB	g線用(436nm)

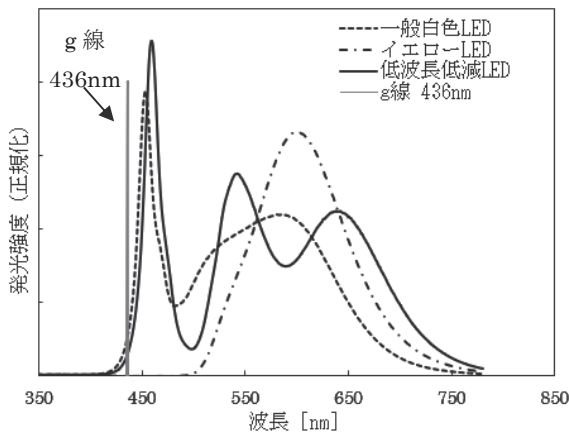


図17 露光光源波長と使用したLED発光スペクトル

結果、蛍光灯イエローランプ、イエローLED共に、24hではレジスト膜厚に変化が見られなかった。低波長域低減LEDは12hにて、一般白色LEDは6hにて残厚が0となることが確認できた。それぞれの光源の曝露時間による残厚の変化グラフとウェハ写真を図18と表10に示す。

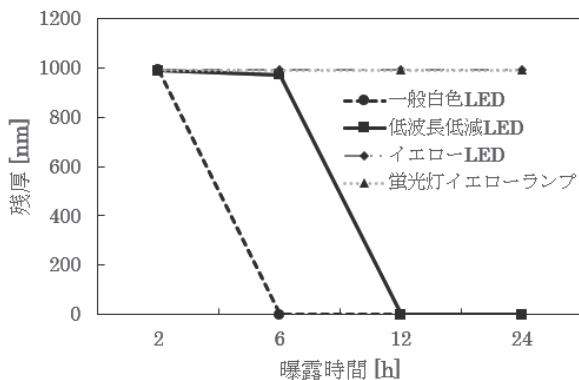


図18 曝露時間と残厚変化

表10 曝露時間とウェハ写真

光源	2h	6h	12h
蛍光灯イエローランプ			
イエローLED			
低波長低減LED			
一般白色LED			

4.2 まとめ

イエローLEDは24hまで蛍光灯イエローランプと同等の性能を確認できた。ただし、低波長低減LEDは12hでレジスト剤への影響が認められた。これはg線のピーク波長は436nmとなっているものの、レジスト剤の感光特性はある程度のマージンを持っているはずなので、これが影響していると考えられる。

そのため、白色に調整した低波長低減LEDにてフォトリソ工程のイエローランプを置き換えるのは難しい結果となった。ただし、6h以上の曝露での結果であり、一般白色LEDに対するアドバンテージも確認できている。そのため、目視検査用の照明など、一時的に照らす用途の照明用光源としては十分その機能を果たすと考える。目視や顕微鏡検査時の作業性を改善できる光源として今後も検討を進めていく。

5. むすび

今回は低波長域の光を制御することで得られる具体的な効果を探るために、誘虫性能とフォトリソ工程への影響について実験で確認をおこなった。今後も引き続き検討を続け、さらなる用途を見出したいと考える。

一方、低波長域の光が与える影響は様々な物に及ぶと言われている。今回、制御をしてきた低波長域の光は、時に「ブルーライト」と呼ばれ、この「ブルーライト」に長時間晒されると、目の疲れや睡眠障害をはじめ、多くの影響があると言われている。

それらの影響を確認するために、社内での実験はもちろん、社外機関なども活用して調査していきたい。また、低波長域の光に限らず、何が付加価値となるのか、常に探りながら提案をしていくことで、当社の蛍光体技術が活きる領域がさらに見つかると思う。

本実験は多くの方の協力によって得られたものであります。福島サンケン 今井睦貴氏、赤澤茂雄氏、増子禎氏、はじめ、社内関係各所に感謝致します。

参考文献

- (1) E.D. Bickford: I.E.S. Nat. Conf. Paper 1964, No. 2
- (2) 農研機構：光を利用した害虫防除のための手引き、P-9, (2014.2)