白色 LED 光源を用いた省エネルギー型太陽電池式 街灯の開発と照度特性の評価

正会員 瀬戸本 龍海 非会員 内田 裕士 正会員 田口 常正
(山口大学)

Illuminance Characteristics of Energy-saving Luminaire with White-Light-Emitting Diode and a Solar-cell and Battery System for Street Lighting

Member Tatsumi Setomoto (Yamaguchi University),
Non Member Yuji Uchida (Yamaguchi University) and
Member Tsunemasa Taguchi (Yamaguchi University)

ABSTRACT

The illuminance characteristics of a next-generation energy-saving luminaire for street lighting is described. It consists of white-light-emitting diodes (LEDs) and a solar-cell and battery system. A prototype luminaire was constructed of two LED light sources, each of which with a total of 700 units of 10-cd-class white LEDs. The illuminance is normally 80 lx. When a person approaches within 2 m of the luminaire, a pyroelectric motion-sensor senses the situation and the illuminance is increased to about 660 lx. This is about 50 times brighter than a white incandescent lamp. The luminous efficacy of the white LED array source was estimated to be approximately 45 lm/W at a forward-current of 1mA. Field testing showed that this white LED lighting system did not suffer serious deterioration in either its brightness or electric circuit over a period of one year.

KEYWORDS : InGa_N, white LED, energy-saving, solar cell, street lighting

1. まえがき

近年, III-V 族窒化物化合物半導体 In_xGa_{1-x}N を活性層とする高光度の発光素子が開発され超高光度青色発光ダイオード (Light Emitting Diode : LED) が実用化された¹⁾²⁾. これにより LED はフルカラーディスプレイ, 交通信号灯, 植物栽培³⁾⁴⁾, 医療分野への応用⁵⁾⁶⁾, 産業用の画像処理に使用する光源⁷⁾⁸⁾など, さまざまな分野へ応用されるようになった. また, LED による白色光を得る研究も行なわれており⁹⁾, InGa_N 青色 LED のステム上に YAG (Yttrium Aluminum Garnet) 系の蛍光体を塗布した10cd級白色 LED も開発された¹⁰⁾. 従来から, 赤色 LED は長寿命・小型・耐振動性・省電力・設計の自由度が高いなどの優れた特徴から様々な用途に用いられており白色 LED も同様な特徴を有している. 白色 LED については, 今後の更なる技術的な改良によって高効率化が進めば照明用光源として用いる事も十分可能であると考えられ, 近い将来の省エネルギー照明として有望である¹¹⁾.

我々はこれまでに, InGa_N 白色 LED の基礎的な特性評価, および現状における LED 照明への検討として LED 照明器具を実際に試作し, 照明用光源として必要とされる諸特性の評価を行なった¹²⁾. また, 地球温暖化を未然に回避するために省エネルギーに対する関心が高まっている今日のエネルギー問題について考える

と, 自然エネルギーを利用した太陽電池発電の役割も大きいと考えられる. 太陽電池は, 燃料不要・排出物無し・耐久性・保守性などに優れているクリーンなエネルギーとして, すでに産業用, 住宅用, 道路標識, 表示灯などの電源として用いられている.

本論文では, 省エネルギー照明光源として有望視されている新しい照明光源である白色 LED とクリーンエネルギーである太陽電池を組み合わせ, 白色 LED を照明光源に用いた自立型の太陽電池式街灯を開発した. 本研究で用いた白色 LED 照明光源は, 光の指向性の強い点光源の集積体であり, 従来からある白熱電球, 蛍光灯と異なる照度分布を示すものと考えられる. そこで, LED の多点光源による照度分布をシミュレーションする簡便なソフトを開発し, 実際に製作した白色 LED700個を集積させた光源の実測分布とシミュレーションの比較を行なった. さらに, 白色 LED の諸特性に基づいた白色 LED 照明の点灯条件を最適化した制御方法を確立する事により, 照明システムにそのアルゴリズムを導入した. 連続点灯における発熱の問題に対する改良策, および照明システム全体における回路構成と, その技術などについて説明し, 次世代の省エネルギー光源として期待される白色 LED 照明システムとしての可能性を, 景観照明のひとつである街灯照明に応用してその実用性を検証した.

2. InGaN 化合物半導体白色 LED の特性

InGaN 白色 LED の特性を評価するために、従来からある 2 種類の可視光 LED と比較検討した。ひとつは 3 元混晶の AlGaAs 系赤色 LED で、この特徴としては、早期に実用化されており近年ではダブルヘテロ接合や吸収層になる GaAs 基板を無くした素子構造になっており発光効率が向上している¹³⁾。次に 4 元混晶の

図1 InGaN SQW 及び MQW 構造白色 LED と AlInGaP 系橙色 LED, AlGaAs 系赤色 LED の電氣的, 光学的特性

Fig. 1 Electrical and optical characteristics of InGaN SQW and MQW white, AlInGaP amber and AlGaAs red LEDs.
 (a) Dependence of forward voltage on forward current.
 (b) Dependence of luminous intensity on forward current.
 (c) Dependence of the normalized illuminance on forward current.

AlInGaP 系橙色 LED で、この LED は近年技術開発が進み III-V 族化合物半導体の中で窒化物を除いて最大の直接遷移型バンドギャップを有しており、緑色から赤色領域まで広範囲で高い発光効率が得られている¹³⁾。

本研究で用いた、III-V 族窒化物化合物半導体の白色 LED は 2 種類あり、単一量子井戸 (Single Quantum Well: SQW) 構造と、多重量子井戸 (Multiple Quantum Well: MQW) 構造から成る。

図 1 (a) は各 LED の順電流—電圧特性であり、SQW 白色 LED は、定格である 20mA を超えたあたりから他の LED と比較して電圧の上昇が大きい事がわかる。図 1 (b) は順電流—光度特性であり、4 元混晶の橙色 LED が電流注入に対して最も高い光度が得られ、その次に MQW 白色 LED であった。この結果から 100mA の高い順電流注入による発光効率の違いを、それぞれの LED で比較すると 4 元混晶の橙色 LED が良い事がわかる。

しかし、定格電流である 20mA を 1 と規格化した図 1 (c) の単位順電流あたりの効率変化で観察すると、低い順電流域の 1mA の電流注入における定格の 20mA との比較では、4 元混晶の橙色 LED では、1/2 程度の発光効率であったのに対して、SQW 白色 LED では同条件下で 2 倍近く発光効率が高い事がわかる¹⁴⁾。これら従来の GaAs 系の LED で明らかにされている発光機構と異なる振る舞いが InGaN 系 LED にはある。この様な特性の解明については InGaN 系 LED における固有の発光機構で、格子変位に起因して生じるポテンシャル極小値にトラップされた、電子の輻射再結合過程による“ポーラロン”トラッピングモデルが提案されている¹⁵⁾。図 2 は各種 LED を常温から動作保証温度の直前 70℃ まで温度を上昇させた時の照度変化率を示しており、いずれの LED も定電流の 20mA で点灯して制御している。ここで、SQW および MQW 白色 LED の照度変化率は最大 10% 程度の低下が確認されたが、他の LED に比べて著しく照度変化が小さい事がわかる。

これにより白色 LED は温度上昇に伴う照度の低下が、従来の LED より小さい事がわかった。

2.1 集積化した白色 LED の温度測定

従来、LED は熱をあまり発生しない光源として知られているが、例えば、数個単位の LED による定格電流での点灯においては、LED 素子の発熱は小さく素子に与える影響はあまり問題にはならない。しかし、数十個単位で集積化すると LED から発生する

図2 InGaN SQW 及び MQW 構造白色 LED と AlInGaP 系橙色 LED, AlGaAs 系赤色 LED の定格電流動作による温度と照度変化

Fig. 2 Temperature dependence of illuminance measured at a constant current operation (20mA) of InGaN SQW and MQW white LEDs, and AlInGaP amber and AlGaAs red LEDs.

熱による素子への影響は無視できなくなる。前節で述べた結果はあくまでも照度変化が小さいという結果であり、白色 LED といえども集積化に伴う発熱による素子への影響は無視できない。そこで MQW 白色 LED をガラスエポキシ基板上にほぼ 7 mm の間隔で直列に 5 個、並列に 3 列接続した計 15 個の光源を用いて直流時の定電流である 20mA で点灯させた。

図 3 に点灯後の時間経過に伴う放熱処理の有無による、LED の温度変化を赤外線熱画像計測装置により観測した結果を示す。計測条件は、室温 20℃ 時で、点灯 5 分後のそれぞれの LED における温度の上昇状態を側面から計測装置で撮影した。図 3 (a) は LED に対して特に放熱処理をしていない一般的な半田付け処理による、点灯時の温度分布の画像である。図 3 (b) は LED のリードフレームによる放熱効果を観測するために、リードフレームをカットしないで半田付け処理した時の温度分布である。図 3 (c) は (a) と同

図 3 15 個の白色 LED を基板上に実装したときの定格電流動作による 5 分後の赤外線熱計測画像

- (a) 一般的な基板実装時の点灯
- (b) LED のリードをカットしないで点灯
- (c) アルミ製のヒートシンクを装着して点灯

Fig. 3 Thermal imaging picture due to infrared-rays after 5 minutes when a total of 15 units of white LEDs on a printed circuit board are operated under a forward current of 20mA.

- (a) The standard case of LEDs mounted on the board.
- (b) The case where the leads of LEDs are not cutted.
- (c) The case having an Al heat sink.

等の半田付け処理をした基板の背面にアルミ製のヒートシンクを装着した時の温度分布である。それぞれの LED の点灯 5 分後における中央部付近の温度は (a) 約 60℃, (b) 約 50℃, (c) 約 25℃ であった。先に述べたように、一般に、半導体部品である LED 素子は発光と同時に熱も発生する。また、その発光効率は発光領域の温度上昇に支配的である事から、温度が上昇すると発光強度は徐々に低下する特性を持っている。さらに、温度上昇を繰り返す状態で使用し続けると、素子の劣化が進行し発光寿命は短くなる。よって、LED の保守性を考慮した長期的な使用を目的にするならば、温度上昇を繰り返す状態で LED を使用すると結果的に保守性は悪化する事になる。従って、照明として LED を集積化して使用する場合にはヒートシンクなどを用いて、点灯時に発生する LED の熱を効率的に外部に放熱させる必要がある事がわかった。

2.2 試作照明の放熱効果

図 4 は 700 個の MQW 白色 LED ガラスエポキシ基板 (135mm (x) × 230mm (y)) に集積化した時の照明ユニットであり、LED の

図 4 開発した街灯の定格電流点灯時におけるヒートシンクの赤外線熱計測画像

- (a) 照明ユニットの上部からの撮影画像
- (b) 点灯 10 分後の上部からの熱計測画像
- (c) 点灯下部からの撮影画像
- (d) 点灯 10 分後の下部からの熱計測画像

Fig. 4 Thermal imaging picture due to infrared-rays of a heat sink at 20mA.

- (a) A photograph of LED light sources taken from the top view.
- (b) A thermal imaging picture of the case of (a) after 10 minutes.
- (c) A photograph of LED light sources taken from the bottom view.
- (d) A thermal imaging picture of the case of (b) after 10 minutes.

配列は7mm間隔で直列に5個、並列に140個接続したものを2基取付けている。図4(a)は実際に設置している街灯の照明ユニット部を上部から撮影した画像で、外部には放熱効果を上げるために複数の貫通穴を設けたヒートシンクを縦、横2列それぞれ取付けている。ヒートシンク部は熱伝導率の高いアルミニウムで製作されており、その他のユニット部は防錆を考慮して、すべてステンレスで製作されている。そこで熱伝導率を比較すると、アルミニウムが237W/m・K、LED基板とアルミニウム製ヒートシンク間に充填するシリコン樹脂が3W/m・K、空気が0.024W/m・Kである。また、照明ユニット内のLED基板にはLED基板の温度を監視するため温度センサが取付けられている。実験的に放熱効果を確認する目的で、照明ユニット内の白色LED基板とアルミ製ヒートシンク間に5mmの隙間が設けてある。照明ユニットのL側には、絶縁性のある熱伝導率の高いシリコン樹脂を5mmの隙間の中に充填し、R側には何も充填していない空気層のままの、2基の照明ユニットを製作している。図4(b)に開発した街灯の照明ユニット部の赤外線熱計測画像を示す。この画像は、LED一つ当りの定格電流である20mAで10分間点灯後の熱画像であり、照明ユニットL側のヒートシンクが40℃と高温になっているのに対してR側は周辺の外気温度とほとんど変わらない23℃という温度であった。図4(c)は実際に設置している街灯の照明ユニット部を下部から撮影した画像であり、照射面には透明なアクリル板を貼付け、ユニット内部のLEDと基板を湿気や粉塵などから保護している。図4(d)のLED光源部からの赤外線熱計測画像では、R側が50℃であったのに対してL側は42℃と放熱の効果がはっきり確認できた。従って、照明ユニット自体に放熱効果のあるヒートシンク機構を持たせる事で、LED光源から発生する熱はLED基板からシリコン樹脂に伝わって効率よく外気に放出され、LEDの温度上昇を抑制する効果がある事がわかった。

2.3 従来の照明器具との照度比較

試作した700個の白色LED照明と、従来の照明器具を用いて照射面の照度計測を行った結果を図5に示す。

白色LED照明の計測の条件は、試作した基板(135mm(x)×230mm(y))を用いてx軸方向(135mm)で実測を行った。LED照明とその他の照明器具は、光源から3m直下の中心部の照射面から任意方向の外側に向かって10cm刻みで照度を計測した。照明器具の定格時の発光効率白色LED照明15lm/W、蛍光灯60lm/W、シリカ白熱電球14lm/Wある。従来照明と白色LED照明の特性を表1に示す。白色LEDは、砲弾型透明エポキシ樹脂のレンズ効果により指向性を持っており半値角は15°である。LEDの1個当たりの注入電流が10mAの時の消費電力は、26Wで照明直下での照度は363lxあり、実用的な最低照度を10lxと定義すると半径2mが照射範囲となる。次に消費電力15Wの蛍光灯の器具は、市販の卓上型スタンドを用いておりリフレクターには、白色のプラスチックカバーが付いている。このカバーにより蛍光灯背面の光束は

前面に反射され拡散照明する構造になっており、照明直下で26lx、照射範囲は広く半径3.5mであった。最後に消費電力57Wのシリカ白熱電球の器具は、市販のスポットライト型でリフレクター構造は無く照明直下で14lx、照射範囲は半径2mであった。

これらの結果から白色LED照明は、消費電力が2倍近いシリカ白熱電球との比較において、照射範囲が同程度であり、照明直下の照度に至っては25.9倍の照度が得られた。

2.4 照度分布シミュレーション

試作した白色LED照明は点光源の集まりであり、個々にレンズを持っている従来にない光源であると考えられる。ここでは、LED光源は点光源の集まりと考え、それらを2次元に配列した時の照度分布のシミュレーションについて説明する。また、LED数百個を群体化させたものを単純に多点光源体と称する事にする。

この多点光源体の照度は、以下に示す(1)、(2)、(3)、(4)式によって計算できる。ベクトル方向の表示はユークリッド空間表示(x, y, z)を用いた。

$$E(x_0, y_0, z_0) = \sum_{i=1}^N \frac{I_i(\theta_i)}{r_i^2} \cos \delta_i \dots\dots\dots(1)$$

$$\vec{r} = |\vec{r}_{DA} - \vec{r}_{Si}| = \sqrt{(x_0 - x_{Si})^2 + (y_0 - y_{Si})^2 + (z_0 - z_{Si})^2} \dots\dots\dots(2)$$

$$\cos \delta_i = \vec{e}_{Si} \cdot \vec{N}_{DA} \dots\dots\dots(3)$$

$$\theta_i = \cos^{-1}(-\vec{e}_{Si} \cdot \vec{e}_z), \vec{e}_z = (0, 0, 1) \dots\dots\dots(4)$$

ここで、E：受光面の上での照度、I：LEDの光度関数、
 $\vec{r}_{DA}(x_0, y_0, z_0)$ ：受光器を任意の位置に置いた時の受光器の平均的な位置ベクトルでおおよそ受光器受光面の midpoint を取る (D：detector A：average)，

図5 3m直下における白色LEDを700個使用した照明と蛍光灯、白熱電球の照度比較
 Fig. 5 Comparison of the illuminance distribution amid fluorescent lamp, incandescent lamp and a 700 white LEDs light source under a height of 3m.

表1 従来照明光源と700個の白色LEDの特性
 Table 1 Characteristics of conventional lighting sources and 700 white LEDs.

光源	管径(mm)	管長(mm)	定格電力(W)	全光束(lm)	定格寿命(h)	備考
蛍光灯	25.5	436	15	910	6000	3波長昼光色
シリカ白熱電球	55	110	57	810	1000	ホワイト
	縦(mm)	横(mm)				
白色LED照明	135	230	56	844	>50000	青色発光+励起黄色

図6 多点光源による1点光源と受光器のベクトル関係
Fig. 6 Relationship of vectors between a point light and the detector for multi point light sources.

図7 白色LED700個使用した照明における仮想の照度分布
Fig. 7 Simulated illuminance distribution of the 700 white LEDs light source.

$\vec{r}_{si}(x_i, y_i, z_i)$: 多点光源体 i 番目における任意の点光源の位置ベクトル (S: source),
 $\vec{r}_i$: $\vec{r}_{da}$ から $\vec{r}_{si}$ までの距離ベクトル, 以後 i 要素距離ベクトルと称する,
 $\vec{e}_{si}$: i 要素距離ベクトルに対する単位ベクトル,
 $\vec{N}_{da}$: 受光器の向きを示す方向ベクトル (法線ベクトル),
 $\cos\delta_i$: i 要素ベクトルと受光器法線ベクトルとのなす角のコサイン, 光源からの受光面の見込み面積のための補正係数,
 θ_i : Z 軸の負方向の単位ベクトル (0, 0, -1) と i 要素距離の単位ベクトルとのなす角.

図6は1点光源の要素と受光面に対してのベクトル関係を示す。原点はベクトル演算の性質上任意点でも良いが、ここでは仮に (0, 0, 0) とする。また、計算では LED は全て (0, 0, -1) 方向を向いていると仮定した。以上によって多点光源体における照度 (E) を求める事ができる。上記(1)式を用いて調査したい受光面の位置ベクトルを変化させながら、任意点毎に照度を計算して図7に示す照度分布曲線を作成した。

この際、LED の多くが円対称配光であるので θ パラメータのみで計算を行った。また、周囲に反射物があつた場合などの反射による照度量の加算は考慮されていない。この照度分布曲線は、図5のLEDの実測値 (実線) と比較すると非常に良い一致を示し、このシミュレーションの有効性が確認された。

図8 開発街灯
Fig. 8 The developed street lighting consisting of a solar-cell, control panel, white LED light source, pyroelectric motion sensor and pole.

図9 開発街灯のシステムブロック図
Fig. 9 System block diagram of the developed street lighting.

3. 省エネルギー型街灯の試作と照明特性

3.1 街灯のシステム構成

設置した街灯システムと各部の名称を図8に示す。白色LED照明ユニットから照射面である地面までの距離は約3mである。

システム構成は大きく分類して、ステンレス製の支柱と制御盤から構成されており、支柱には白色LED照明ユニットが120°の扇角に2基、大型の太陽電池、および人体検出センサから構成されている。制御盤は開発したマイコン式コントローラ、充電器、12V鉛蓄電池(97AH)を直列に2個接続し24Vの電源から構成されている。

図9は開発街灯のシステム構成図で、太陽電池モジュールの公称値による最大出力電力は109Wである。図10に制御盤内の開発コントローラを示す。図10(a)は開発コントローラの操作パネルでメインスイッチ、セレクトスイッチ、液晶パネル、エラーランプ、

図10 開発コントローラとマイコン回路のボード
Fig.10 The developed controller device (a) and the micro computer circuit board (b).

表2 照明3 m 直下の点灯方法別による照度と消費電力
Table 2 Illuminance and electric power consumption of three kinds of illumination methods under 3 m.

項目	待機点灯	省電力点灯	定格点灯
単位当たりの電流 (mA)	1	10	20
照度 (lx)	40	363	665
消費電力 (W)	2.1	26	56

太陽電池出力用電流モニタ、および蓄電池電圧用モニタから構成されている。図10(b)は操作パネルの内側に実装している開発コントローラ基板である。基板の中央部に書き換え可能なワンチップマイコンを実装し、最終出力段のLEDの点灯用ドライバーにはMOS形電界効果トランジスタ (Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor: MOSFET) をLチャンネル用、Rチャンネル用の2個装備している。

3.2 システム制御方法

LED照明は直流点灯の定電流制御方式を採用しており、この照明装置には3種類の点灯方法が選択できる。表2に開発街灯の照明ユニット1基当たりにおける点灯方法別の照度とLEDの消費電力を示す。

照度計測は白色LED照明の中央部から3 m直下で行った。1つは、待機点灯で街灯周辺に人がいない無人状態の点灯方式でLEDの1個当たりの注入電流は、発光効率が最も良い1mAの点灯方法である。LED照明の消費電力は2.1Wで、照度は40 lx、そして発光効率は約45 lm/Wであった。他の2つの点灯方法については、いずれも人体検出センサが人を感知した時の通常点灯方法で、省電力点灯と定格点灯がある。省電力点灯時のLEDの1個当たり注入電流は10mAで消費電力は26Wで、照度は363 lxであった。一方、定格点灯時のLEDの1個当たり注入電流は20mAで消費電力は56W、照度は665 lxであった。街灯のシーケンスフローを図11に示す。

図11 開発街灯のシステムフローチャート
Fig.11 System flowchart of the street lighting.

照明ユニットは、ワンチップマイコンに書き込まれているソフトウェアで制御されている。このワンチップマイコンは40ピンの8ビットCMOSフラッシュコントローラを用いており、動作クロックは20MHzで10ビットのアナログ/デジタル入力を持っている。開発したシステムではアナログ入力を鉛蓄電池の電圧の監視、LED基板温度の監視、太陽電池から発生する起電圧の監視に使用している。鉛蓄電池の電圧の監視は、定格24Wに対して異常な電圧になった時、LED基板温度の監視はLED基板が動作保証温度以上になった時であり、このいずれかの異常が発生すると照明は点灯しないシステムになっている。太陽電池の受光面は南向きで傾斜角度は35°に設置されており、日没の監視は太陽電池の起電圧で識別し、設定閾値以下になると日没と判断し、異常がなければ照明を点灯する。また、日没後の待機点灯時間や人を感知した後の、通常点灯の点灯時間、点灯方法などは液晶パネルに表示されるパラメータ値によりセレクトスイッチを介して任意に設定できる。ちなみに、4月における1ヶ月間の1日の時間当たり平均

出力は70Whであり、日射量を4時間とした場合に一日平均280Wh/Dが発電される事になる。一方、LED照明は夜間に、1日8時間点灯する様に設定しており、待機点灯を7時間、人などが街灯の人体検出センサで感知した時の定格点灯を1時間と仮定した場合に、点灯用ドライバーの消費電力を加えた時の待機点灯における1日当たりの消費電力は47.04Wh/D、定格点灯で134.4W/Dとなり合計では、181.44Wh/Dが消費される。つまり、太陽電池が1日に発生できる総発電量の64.8%が夜間点灯時に消費される事になる。また、開発したコントローラの消費電力は、約100mAで1日の消費電力は57.6Wh/D、1日の総発電量の20.06%を消費する。太陽電池からの発生電力は、充放電器によりパルス幅変調(Pulse Width Modulation: PWM)方式により効率的に鉛蓄電池に充電する独立型のシステムをとっている。開発コントローラと別ユニットに構成にした理由は、開発コントローラに異常などが発生した場合に、照明の制御が不安定な状態に陥っても、この充放電器によって充電と放電だけは、確実に動作する事により鉛蓄電池を保護している。逆に、充放電器に異常が発生した場合には、鉛蓄電池の電圧が異常になりコントローラがこの異常電圧を検出する。よって、日没になっても照明が点灯しない事から視覚的に異常を検知する事ができる。

4. 考察

白色LED照明を街灯に使用するためには熱対策を施す必要がある事がわかり、InGaNから成るSQW, MQW構造の白色LEDはAlGaAs系赤色、およびAlInGaP系橙色LEDと比較した時の温度上昇に対する照度低下が小さい事が明らかになった。これは白色LEDを屋外など温度変化が激しい所で使用しても照度の変化が、従来のLEDより小さい事を意味している。さらに、屋外で使用する街灯用の照明ユニットは防塵、防雨対策を施しているため内部にこもった熱は、排熱しにくい。しかしながら、実験の結果から、点灯時にLED内部に発生する熱を、LED基板上に熱伝導率の高いシリコン樹脂を充填し外部に露出したアルミ製ヒートシンクと密着させ排熱させる事により、熱対策していない空気層のものと比較すると、8℃の放熱による温度差の効果が確認された。この放熱効果によりLED素子の劣化を抑える事が出来、密閉型のLED照明器具などに利用するには有効である事がわかった。また、LEDの点灯寿命の優劣は保守性に大きく依存する事なので放熱処理は重要な技術と考えられる。

実用的な街灯の照明高さである3mからの照明直下におけるLED照明ユニット1基の定格点灯の消費電力は56Wで、シリカ白熱電球の57Wとの照度比は47.5倍ある。また待機点灯における消費電力は2.1Wで、これを15Wの蛍光灯の消費電力と比較すると、実に1/7であり照度比は1.5倍と、約800lm程度の光束である従来照明器具と比較すると低消費電力で、局所的照度であるが非常に高い照度が得られた。この局所的照度は、先に本論でも述べたようにLEDのエポキシ樹脂のレンズ作用によるものであり、レンズの半値角を現在使用している15°より広角なものを選定すれば、照明直下の局所照度は低下する事になる照射範囲を広くする事は可能である。

次に照明システムについては、制御用に使用したコントローラであるワンチップマイコンに、フラッシュROMタイプを使用している事から、何度でもプログラムの書換えが可能で、容易に制御方法や設定値などを追加変更する事ができる。システム全体における各種部品などの出力値などを随時液晶パネルに表示できる

図12 (a)開発街灯による夜間時の定格点灯、(b)バス停
Fig.12 Illumination of the street lighting operated at 20mA in the night time (a) and the street lighting at a bus stop (b).

事や、一日のLED照明の総消費電力値、待機点灯時間、人体検出センサが動作した回数などの表示が考えられる。

本研究で開発した街灯照明システムの最大の特徴は、白色LEDが持つ低い順方向電流領域(1mA)の電流注入における高効率な発光特性を用いて待機点灯と、人体を検出して点灯する通常点灯に切替わるシーケンス点灯制御により省エネルギー化を高める事ができる事にある。しかし、開発コントローラの消費電力が太陽電池が1日に発電する量の20%を占めている事から、今後、コントローラに関しては消費電力を抑えた回路を開発する必要がある。

また、長期的な運用による白色LED照明の問題として現在わかっている事は、蛍光体の劣化などが挙げられる。図12(a)は開発した白色LED照明による夜間時の定格点灯時の風景を示している。この街灯は設置後の点灯開始から1年経過した現在においても照度の低下等を含め大きな問題はまったく無く省エネルギー型照明光源として点灯している。最後に、今後の実用面を確認する目的で、この街灯を大学近くのバス停に移設した風景を図12(b)に示す。

5. あとがき

省エネルギー化やリサイクルなど多くの応用技術が推進される中、自然環境との共生を考える次世代照明として、白色LEDは有望であると考えられる。また、白色LEDから発光される白色光は450nm付近にピークがある青色発光と、それに励起されたYAG蛍光体による550nm付近の黄色発光により得られているので紫外線を含まない。これには、波及効果として昆虫の中には黄色を忌避する虫もいる¹⁰⁾事から白色LEDに防虫効果があるのではないかと考えられる。さらに、紫外線をまったく発生しないと言う事は、一般に昆虫などは光源に向かってくる“走行性”という運動特性を有しており、この走行性曲線は360nmがピークになっており400nm付近で半減する事から紫外線をたよりに走行してくる虫が寄り付かないのでは無いかと考えられる。また、クリーンエネルギーである太陽電池と組み合わせる事で自然環境との共生効果がさらに顕著に表れる。仮想照度分布の計算シミュレーションはLEDを製品別に指向特性や光度などの計測データを構築

し、開発したソフトウェアを用いておおよその照度の分布特性を導く事ができる事から、種々の照度分布を短時間に表現できるようになり、実用的な照明システムを構築するのに有用であると考えられる。一方、照明器具へ応用する場合レンズ角や被照射範囲を選定して、例えば彫刻のライトアップ、舞台照明、スポット照明、手術用照明などが挙げられる。最後に景観照明としての効果は、白色LEDの特徴を活かして光源として必要な所に最適な光量、最適な照射範囲が提供できる事から光害対策ガイドラインに基づく屋外照明が周辺環境に及ぼす影響にも寄与できると考えられ、良好な照明環境の実現ができ新しい街灯のスタイルが期待できる。

本研究はMITI/NEDO/JRCM 高効率電光変換化合物半導体開発（通称“21世紀のあかり”）プロジェクトの援助を受けて行なわれたものである。本研究を進めるに当たって、LEDの御便宜をはかって頂きました日亜化学工業㈱の小川英治社長に感謝します。最後に、本研究を進めるに当たってご支援を頂いた㈱山陽ハイテックの湯浅隆彦社長に感謝します。

参 考 文 献

- (1) S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh: Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes, Appl. Phys., Lett., 64, p. 1687 (1994).
- (2) S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, S. Nagahama, T. Yamada and T. Mukai: Superbright Green InGaIn Single-Quantum-Well-Structure, Jpn. J. Appl. Phys., 34, L1332 (1995).
- (3) 中村：レーザー研究, 25-12, pp.850-854 (1997).
- (4) 西田, 中山：レーザー研究, 25-12, pp.845-849 (1997).
- (5) 木下：月間ディスプレイ, 11-3, pp.49-55 (1997).
- (6) 岡本：月間ディスプレイ, 11-3, pp.56-64 (1997).
- (7) 瀬戸本, 鹿島：青色LEDの画像処理への応用, JRCM 第1回青色発光シンポジウム, pp.34-39 (1997).
- (8) 瀬戸本, 田口, 鹿島：青色LEDを用いたアルミホイールリーク検出機の開発, 画像センシング技術研究会第5回講演論文集, pp.233-238 (1999).
- (9) H. Fumitomo, P. Kozodoy, S. P. DenBaar and A. J. Heeger: White light from InGaIn/conjugated polymer hybrid light-emitting diodes, Appl. Phys. Lett., 70, p.2664, (1997).
- (10) S. Nakamura and G. Fasol: The Blue Laser Diodes, Spranga-Verlag, Heidelberg (1997).
- (11) 田口, 瀬戸本: AC 駆動白色LEDを用いた照明用光源の基礎, 第59回応用物理学会講演予稿集, 18P-ZH-3, p. 1225 (1998).
- (12) 田村, 瀬戸本, 田口: InGaIn 系半導体白色LEDを用いた照

明用光源の基礎特性, T.IEE Japan, 120-A, No.2, pp.244-249 (2000).

- (13) ㈱東芝セミコンダクター社: 可視LED, 光半導体応用技術部, pp.40-41 (1999).
- (14) 山田: 可視光LEDの高効率化, 応用物理, 68-2, pp.139-145 (1999).
- (15) 田口: GaN 系青色・紫外LEDの発光メカニズムと発光効率の改善策, 平成12年度照学大全, pp.279-280 (2000).
- (16) 沢田: 黄色灯照明のナシ園の吸蛾類に対する防除効果, 千葉県農試研究報, 19, pp.83-89 (1978).

(受付日2000年12月15日/採録日2001年4月12日)

瀬戸本 龍海 (正会員)

山口大学大学院理工学研究科

昭和39年1月3日生まれ, 昭和61年3月(現在) 広島国際学院大学電子工学科卒業, 同年(現在) 東芝ITコントロールシステム㈱入社, 平成7年㈱山陽ハイテック入社, 現在, 同社技術開発室室長, 平成10年山口大学大学院理工学研究科博士後期課程進学, 現在に至る。主に画像処理装置のシステム開発に従事。

内田 裕士 (非会員)

山口大学大学院理工学研究科

昭和51年9月18日生まれ, 平成12年3月山口大学工学部電気電子工学科卒業, 同年4月同大学大学院理工学研究科博士前期課程進学, 現在に至る。有色, 白色LED照明光源の評価と応用に関する研究に従事。応用物理学会員。

田口 常正 (正会員)

山口大学工学部電気電子工学科

昭和22年3月2日生まれ, 昭和49年大阪大学大学院博士課程修了, 英国サセックス大学理学部客員研究員, 大阪大学工学部助手, 講師を経て, 平成6年山口大学工学部電気電子工学科教授, 現在に至る。応用物理学会評議員, 93年電気学会論文賞受賞, 応用物理学会, 電気学会各会員, 工学博士。