

## LED固体照明の普及に関して The Next Stage with Solid-State Lighting

牛田 泰久 \*<sup>1</sup>

### 1. はじめに

近年、LEDを使った『照明』の販売が加速している。『照明』は古くから、文化・経済の発展の原動力の一つであり、人類の生活にとって必要不可欠な要素である。古くから人類は、『照明』としてたいまつ、ろうそく、ランプ、ガス灯などの“火”を使用してきた。19世紀になり『照明』は、火から白熱電球、20世紀には蛍光灯へと姿を変えていき、ついにLEDに到達した。故に、LEDは人類が手に入れた「第四の”あかり”」とも呼ばれている(図-1参照)。LEDとはLight Emitting Diodeの略で、電力を光に変換する半導体素子のことである。一般に普及している『照明』で使用されている電球や蛍光灯の様にガラスで密閉する必要がなく、衝撃等に強いことから、LEDを照明に利用した器具は『LED固体照明』と呼ばれている。(Solid State Lightingと呼ばれることもある。)

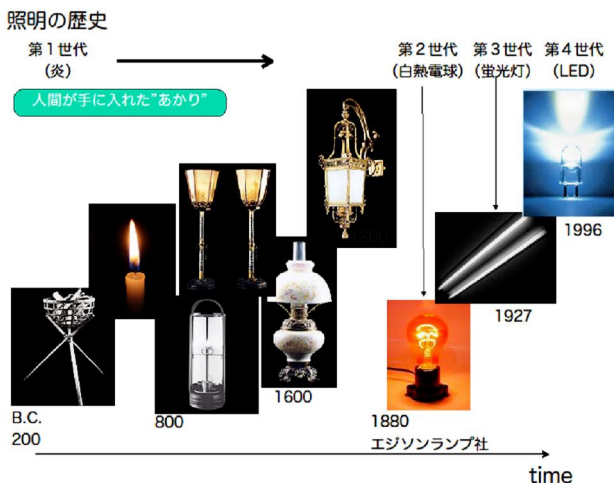


図-1 照明の歴史

照明は火(第1世代)、白熱電球(第2世代)、蛍光灯(第3世代)、LED(第4世代)と発達してきている。

『LED固体照明』の実現を可能にした要因は、赤崎勇先生を中心としたグループによる青色LEDの研究開発の成功である。中でも最大のキーポイントは青色LEDの材料となるGaNの良質な結晶の成長が可能となったことが挙げられる。GaNの結晶は同じ結晶構造を維持しつつ、InNやAlNとの混晶(Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>NとかAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Nなど)が製造できる。これらの混晶を用いることにより、理論的に紫藍青緑黄橙赤のような眼で見ることができる、いわゆる可視光線の光を中心に紫外線、赤外線という眼で見えない光の領域まで作り出すことが可能となる(図-3下段参照)。

(実際には作りやすさの観点から紫藍青緑の領域の発光素子が製造され、旧来から既に流通していたGaAs系結晶を使った緑黄橙赤のLEDや蛍光体と合わせ、可視光すべての光を作り出している。)

本総説では、可視光線を作り出す装置を『照明』と呼ぶ。

『LED固体照明』は、一般に、白熱電球に比べ電力消費が1/5であることや、耐久寿命が5年以上で経済的であると言われている。2008年のリーマンショックと言われる金融界の危機を引き金に、経済の活性が急激に失われ、この危機的な状況の突破口を開こうとした政策の一つがエネルギー問題への対策であった。世界規模でこうした政策を行う気風がますます強くなっており、省エネルギーにつながる『LED固体照明』の担う役割も、ますます大きくなっている。そもそも、世界的な人口増加問題による食料不足や水不足、また、化石燃料過依存問題によるCO<sub>2</sub>増加やエネルギー不足が予測されることなど、人類は克服すべき課題を山積させている。私は『LED固体照明』の普及により、これらの課題の早期解決を後押しすることにつながると考えている。

本総説では、人類の誕生より、はるか以前から地球にもたらされている太陽の光の起源を始めと

\*<sup>1</sup> Yasuhisa Ushida オプトE事業部 第1技術部 T1技術室

し、『照明』の歴史および LED を『照明』へ利用することの意味や利点について考えていきたい。

## 2. 太陽からのエネルギー

『照明』を論じる前に、まず太陽の光について考えてみたい。太陽は、朝になれば出現し、夕方に地平線に沈む。このことは、我々にとって、当たり前前の事象であり、深く考える機会が少ない。しかし、我々が存在しているのも、存在しえる環境を作っているのも、地球と太陽の関係に奇跡が起きた結果である。太陽の構成成分は水素(H)72%，ヘリウム(He)24%である。その中心部分の核と呼ばれる場所は、非常に強い引力が存在し、温度が1,500万K、圧力が2,500億気圧、密度が $1.56 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$ と推定される。このような高温、高压、高密度の状態では、もはや分子の素である原子も安定ではなく、さらに小さい電子、陽子、中性子が動き回り、水素がヘリウムに変わる、いわゆる核融合反応が起きている(図-2参照)。その反応の際、放出されたエネルギーの一部が、光として地球に降り注いでいる(図-3(上図))。我々は、この光を波長により3つの領域に分けて紫外線(~400nm)、可視光線(400nm~700nm)、赤外線(700nm~)と呼んでいる。

まず、地球に降り注ぐ光の中で、“暖める”効果

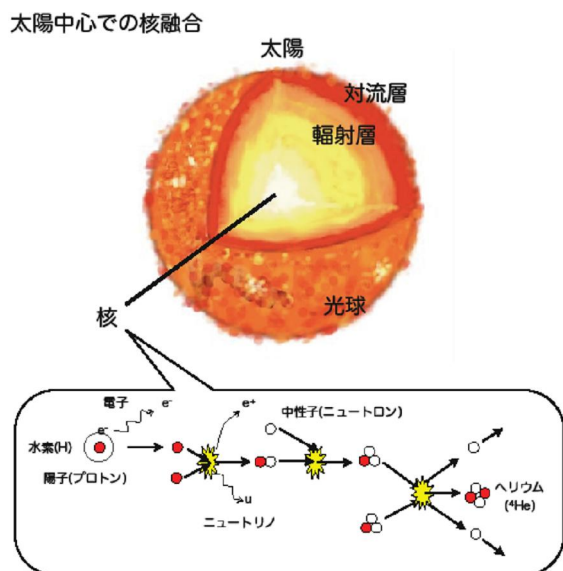


図-2 太陽中心で起きている核融合反応と太陽の図

中心部では高温(1,500万K)・高压(2,500億気圧)・高密度( $1.56 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$ )の状態であり、上のような水素からヘリウムへの核融合反応が起きている。

(熱)を持っているのが赤外線の光である。太陽と地球の絶妙な距離、地球が24時間で自転するなどの奇跡が重なり、太陽から降り注ぐ光によって地球表面は適度な温度に保たれている。NASAやGlobal Warming Projectによると、全地球表面の平均温度は約0℃と見積もられている。もし太陽から赤外線としてエネルギーを受け取っていなかったら、地球は宇宙の平均温度である-270℃近くにまで冷えていただろう。

生命の起源に大きく影響したのが、紫外線である。地球が誕生したのち、万有引力により重い元素は地球中心へ移動し、水素(H)、酸素(O)、炭素(C)、窒素(N)の軽い元素の化合物などが表面に残され、これら軽い元素の結合の変化(分子の結合が切れるとか再結合すること)が紫外線により促進された。後にできた海の中で、有機物の結合・再編が繰り返し行われ、やがてタンパク質等の有機物が形成され、シアノバクテリアなど藻類が発生し、さらに、高等生物へと進化を繰り返していく。こういった変化や進化を加速させたのが紫外線の存在であると考えられる。

約35億年前に出現した藻類は、太陽からの残った領域の光である可視光線を使って自身の成長のためのエネルギーへとかえる術を構築した。いわゆる光合成と呼ばれるシステムである。光合成を行う化学物質は光合成色素と呼ばれる。これら代

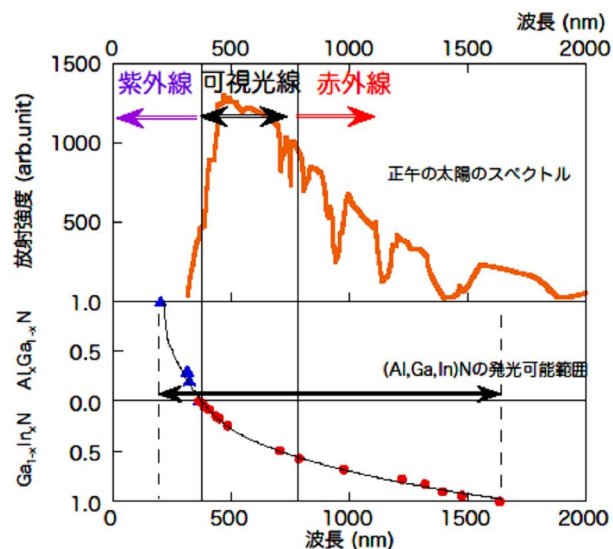


図-3 太陽光のスペクトル(上図)および GaN 混晶系の発光可能波長(下図)

人間の目は緑色を中心に紫から赤の波長の色を感じることが可能。太陽光のスペクトルにはこの人間の目に感じる波長域の光(可視光線)に加え、暖かく感じる光(赤外線)と細胞が変化(日焼けなど)してしまう光(紫外線)が存在する。GaN結晶系の(AlN, GaN, InN)の混晶系は太陽のもたらす光の大部分を再現できる。

## 光合成色素と吸収される光

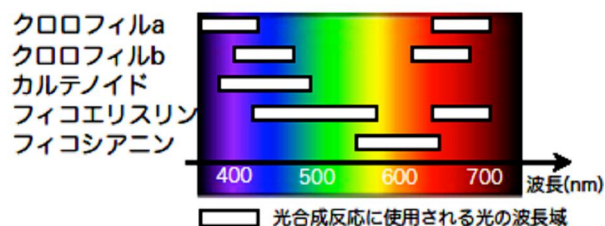


図-4 代表的な光合成色素とそれぞれの吸収光域

さまざまな色素を巧みに利用して（環境に合わせた進化がある）、紫から赤のすべての可視光領域の光を使って、光合成を行うことができる。

代表的な光合成色素が反応を示す波長を調べると、可視光領域のほぼ全領域を使っていることがわかる（図-4参照）。藻類は光合成により、二酸化炭素を激減させ、酸素濃度を高めて、また、酸素はオゾン層を形成し、地上に降り注ぐ紫外線をさらに遮断する。こうして、生物が海中から陸上へ生活の場所を広げることができるようになり、さらに時が経ち、人類が誕生する。私見ではありますが、光に反応する光合成色素の情報が人類のDNAの中に残り眼の組織を作り出したのかもしれない。

地球上の変化もしくは進化というものは、太陽からのエネルギーを、

- 1) 有機体の進化の活性化（紫外線=「進化」）、
- 2) 自らの成長（可視光線=「明かり」）、
- 3) 温度を中心とした環境の安定（赤外線=「熱」）という様に、余すことなく利用してきた歴史であるとも考えられる。

### 3. 人類と“あかり”の歴史

前節で示した様に、太陽から得られるエネルギーを無駄なく使い、生存と進化を繰り返し、やがて複雑で高等的な機能の複合産物として人類が誕生した。人類は、もはや光合成からではなく、穀物や肉類、魚類を主とした「食料の摂取」という形でエネルギーを補った。人類にとって食料の安定供給が存続の為に必須事項であるため、農耕や狩猟の技術を中心に文化が発展し、社会のシステムを作り出してきた。しかし、ひとたびこの適度な“熱”（気温）、適度な“あかり”（日照）を失うと、食料の供給が困難になり、存亡に関わる大飢饉や大災害を多く経験してきている。食料の供給（=人類の存続）の為に必要な適度な“熱”や適度な“あかり”の供給は、太陽の活動と天候に大きく左右されて

いることが原因と考えられる。これは、まさしく神頼みである。そのため、太陽は多くの古代文明の中で、広く神格化され崇拝されてきた。日本では、日本書紀や古事記にみられるように、日の神である「アマテラス」が天岩戸に引きこもった際には、800万もの神々が集まり、なんとか外に出てきてもらおうと相談する逸話が非常に有名である。ここで“熱”は、主に太陽からの赤外線の光のことで、“あかり”は可視光線の光を示す。

人類は太陽から与えられる“あかり”と“熱”を自身で操ることを求め、火の文化を手に入れた。火は人類の文化の発展において重要な要素である。火が持つ“あかり”の性質が、暗闇に対する人間の怯えを無くし、人類の活動時間を長くし、さらに活動範囲を太陽の光の及ばない場所へも広げ、飛躍的に生産能力を高めることに貢献してきた。こうして社会活動の規模も大きくなり、その発展をますます加速させた。これは火の持つ“あかり”の性質を『照明』として使った効果である。そのため火は人類が手に入れた「第一のあかり」といわれる。『照明』としての火は個々の生活環境の中で変化し、たいまつ、ろうそく、灯籠、ガス灯などへと発展してきた。一方、火の持つ“熱”の性質も、人類はよく利用し、後に鉄などの精錬・蒸気機関の発明など、我々の文明の発展に重要な役割を果たしてきた。“熱”の性質をより効率的に使うために、その源は木材から石炭、石油、原子力へと移行していく。これは、人類が太陽の性質の内、“あかり”（可視光線）と“熱”（赤外線）の二つに注目し、それぞれの効率をあげてきた努力ともいえる。

19世紀になり、「第二のあかり」である白熱電球が登場し、20世紀に入ってから「第三のあかり」である蛍光灯が誕生した。火→白熱電球→蛍光灯と進むにつれ、“あかり”の効率を高めてきたのである。言い換えると、“あかり”に対して不必要な“熱”の性質をそぎ落としてきた、ともいえる。人類はさらに効率の高い“あかり”を求め、発光ダイオード（LED）を発明した。

「第一から第三のあかり」である火、白熱電球、蛍光灯は、“あかり”として使う場合、可視光線以外に赤外線（“熱”）の目に見えない『無駄』な光を発生している。この『無駄』な光をなくしたのが「第四のあかり」と呼ばれるLEDである（次頁図-5参照）。青色LED以前には、緑や黄、赤の色を発光するLEDは既に開発されていた。赤崎勇先生を中心としたグループは、GaNの結晶成長の研究開発に力を入れ、GaN系LEDの開発に成功した。これにより先にあつた緑、黄、赤とあわせて、紫、青、緑の色が追加され、人間の目に見える色をすべてLEDにより再現できるようにな

表-1 各種光源と特徴

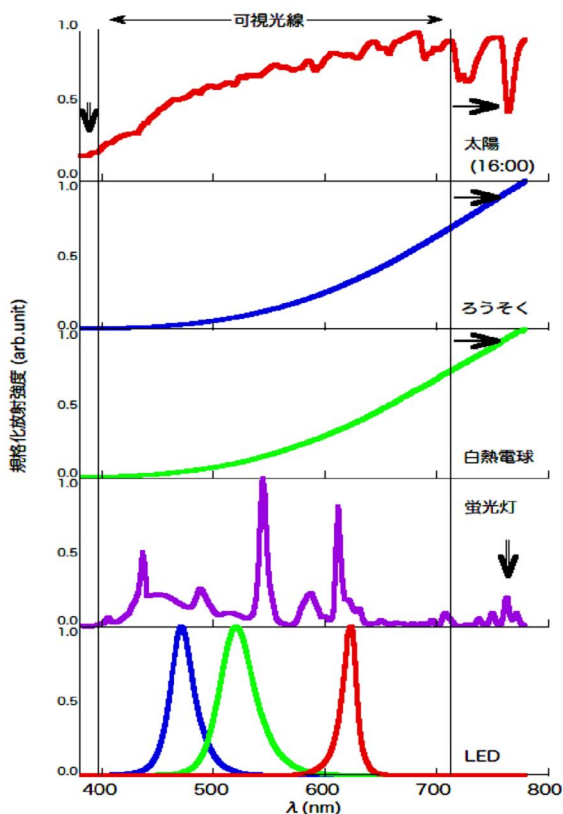


図-5 太陽、ろうそく(火)、白熱電球、蛍光灯およびLEDの光スペクトル

可視光領域(紫から赤)以外の光は『照明』としては無駄である。太陽、ろうそく、白熱電球、蛍光灯には、この無駄な光が混在している。LEDは任意の光のみを発生できる。

った。必要な色の光のみを発生するLEDは、可視光線(“あかり”)の性質のみを必要とする『照明』にとって、『無駄』を省いてきた最終形態といっても良いのではないではないだろうか。

#### 4. LEDを『照明』として使う

LEDの特徴は、高効率による省エネルギー、小型/薄型、軽量、応答性の速さ、視認性、波長選択/色調、調光、温度変化に強い、長寿命、電池での駆動、水銀を含まないなどが挙げられる。(表-1参照)青色LEDの開発により、白色のLEDの製造が可能になり、現在上記の省エネ、軽量、応答性の早さなどの特徴が受け入れられ、携帯やパソコンの中にある液晶のバックライト光源として広く用いられている。また、省エネルギーや視認性のよさという特徴を生かして、緑、黄、赤のLEDを使用した信号なども普及している。これらは、『照明』の特殊な使い方の一つであり、社会活動

各光源の特徴 LED光源を○とした場合の比較

	効率	小型/薄型	軽量	応答性	視認性	波長選択/調色	調光	温度変化に強い	固体長寿命	電池駆動	水銀	設計自由度	コスト
火	×	×	×	×	×	×	△	○	×	×	○	×	◎
白熱灯	×	○	×	○	×	×	○	○	×	×	○	△	◎
蛍光灯	○	△	○	×	×	△	×	×	×	×	×	△	◎
HID	◎	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	◎
LED	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
有機EL	○	○	○	○	△	○	○	×	×	○	○	○	×

◎: LEDよりも優れている ○: LEDと同等 △: LEDよりやや劣る ×: LEDよりも劣る

LEDを○とした場合の比較、HIDは効率が高いものの小型化や応答性などで不便。LEDの使用は他の光源に比べ、便利であるが、コストが高いとの評価。(注) HID: High Intensity Discharge Lamp 高輝度放電ランプ

世界のエネルギー生産量 (2次エネルギー)

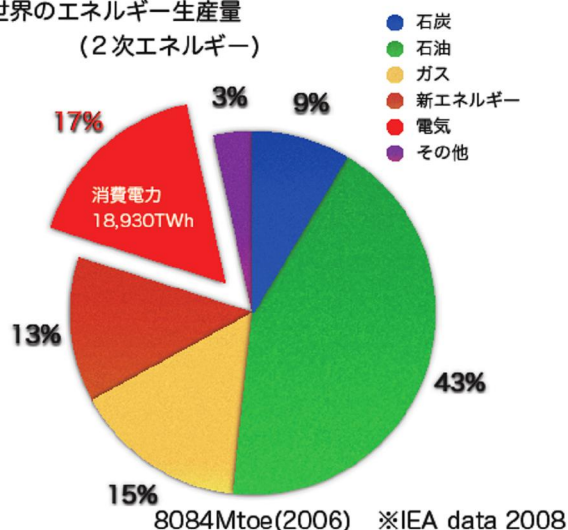


図-6 世界のエネルギー

世界のエネルギーの中で、電気として利用する割合は約17%である。

をより便利にしている。さらに、このような特性を生かして、『LED 固体照明』を普及させることにより、エネルギー問題および環境問題に対して人類に大きく貢献することが可能だと考えている。

我々が必要とする照明は、究極的には「必要な時に、必要な場所に、必要な量だけ、必要な波長の光」を供給するものであると考えられる。たとえば、調光が出来ないため必要以上に明るく照らしてしまうとか、ON/OFF 応答がよくないため、つけっぱなしにしてしまうなど、今普及している

『照明』は、まだまだ無駄の多いものであると考えられる。

国際エネルギー機関(IEA)の統計によると、世界の発電電力量は 18,930TWh、使用量は 17,377 TWh である。そのうち 6%にあたる 1,050TWh が日本で発電され、このうち 30%を『照明』で消費している。発電所からの送電ロスや圧変換ロス等を考慮すると、最終的に日本で『照明』に使われている電気量は 315TWh ということになる(図-7 参照)。ところで、現在日本で使われている『照明』は、大きくくりで、白熱電球、蛍光灯、HID の 3 種類に分類される。それぞれの普及率が 42%、41%、17%であり、消費電力は白熱電球 132TWh、蛍光灯 129TWh、HID 54TWh と見積もられる(図-8 参照)。この中で、白熱電球と蛍光灯に着目し、LED へ置き換える場合の効果を見積もってみる。白熱電球の置き換えにより消費電力は 10~20%に、蛍光灯の置き換えにより消費電力は 80%に抑えられる(写真-1 参照)。消費電力を白熱電球の『LED 固体照明』への置き換えで 20%に、蛍光灯の置き換えで 80%に出来ると仮

定すると、日本全体で 185TWh の省エネルギーが見込める。これは石油換算では 47 ギガリットル、原発換算では、日本にある 55 基の原子力発電所の 35.3 基分にあたる省エネルギーである。こうした余剰のエネルギー分は、省エネルギーだけでなく、人類の更なる発展(幸福)のための開発に使うこともできる。

次に環境問題について考えてみたい。『LED 固体照明』を使った場合、その長い寿命から、取り替える機会が減少する。これは、産業廃棄物の減少につながる。日本での蛍光灯の生産数は、40 W 蛍光灯換算で年間 3 億 8,000 万本であり、リサイクル率は約 15%である。ほぼ 1年に1回の頻度で交換しているとすると、年間約 3 億 2,300 万本が廃棄されていることになる。1本あたり約 10 mg の水銀が含まれているため、おおよそ 3 トンの水銀が毎年どこかへ捨てられている計算になる。廃棄された水銀が化合物を作った場合、それは人間にとって有毒物質となり、水質汚染、食料汚染、人体の水銀中毒につながることも考えられる。

一方、『LED 固体照明』は、寿命の長さが約 5 万時間以上で、実質の交換頻度は 10 年に一度程度

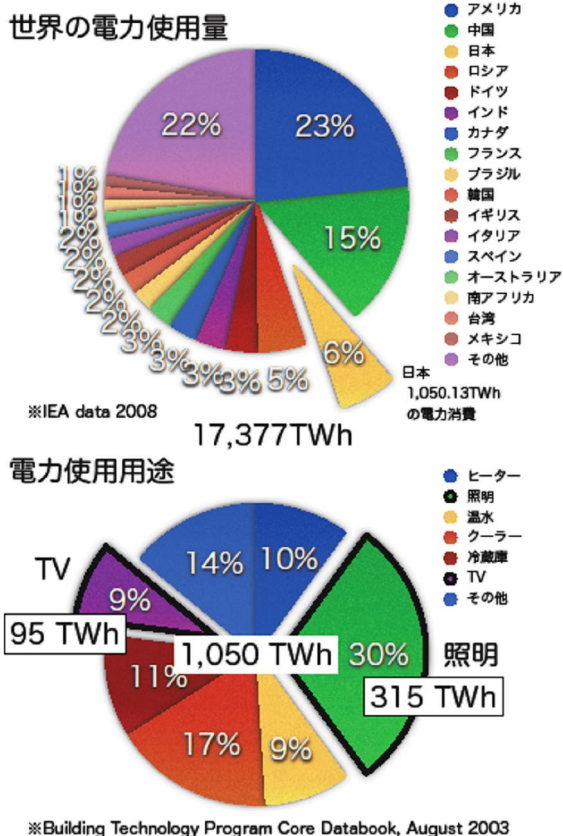


図-7 日本の電力

日本の使用電力は 1050TWh であり、照明にその 30%、TV に 9%を利用している。

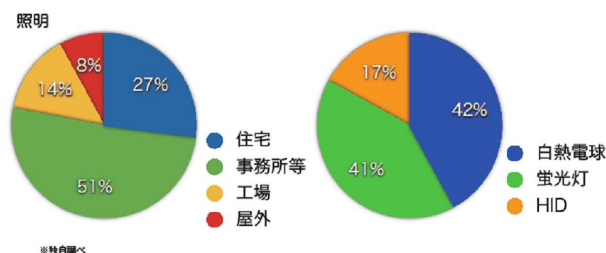


図-8 照明の使用分野および種類

照明の使用電力量は約半分が事務所等の職場スペースである。また、種別では白熱電球が 42%を使用している。白熱電球と蛍光灯をすべて LED 固体照明に変換した場合、185TWh 程度の省エネにつながると見込まれる。

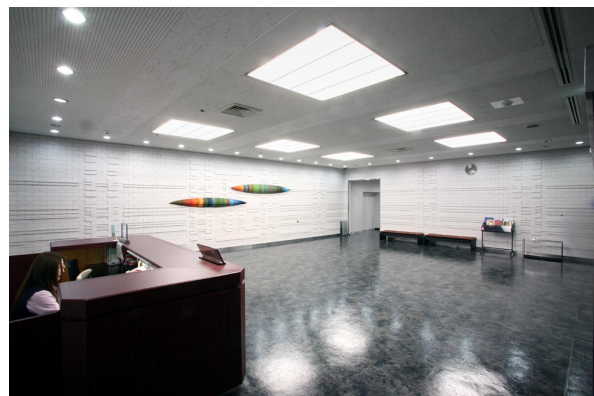


写真-1 照明への適用例

LED 照明を使った豊田合成本館ロビーの様子。

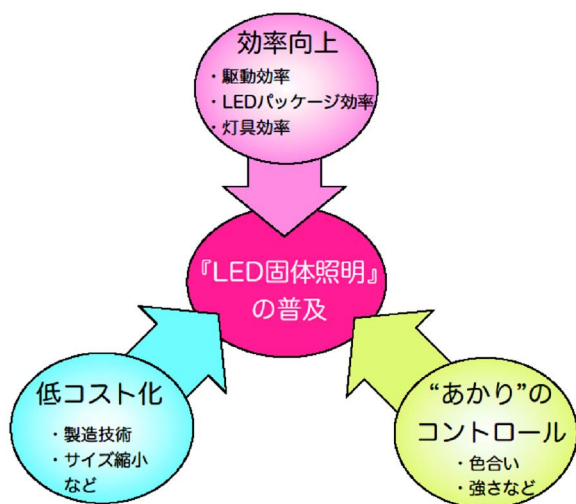


図-9 『LED 固体照明』の普及に向けたポイント

で済み、廃棄物はほとんど出ない。また、“あかり”の中に紫外線が存在しないため、日焼け等の人体への影響、樹脂・絵の具などの劣化防止にも効果的である。さらに赤外線を出さないため、たとえばポスターなどの紙を変色させない(=ゴミを出さない)効果をもつ。紫外線や赤外線を発しない『LED 固体照明』は、品物に優しい光を与えているといえる。このように、『LED 固体照明』の普及は廃棄物の削減に貢献できる。また、先ほど見積もった省エネルギーから、年間 12.7 億トンある日本の CO<sub>2</sub> 排出量が照明の LED 化によりその約 5% にあたる 696 万トン削減できる計算になる。

以上のように、現在使用されている照明を LED に置き換えることで、省エネルギーや脱水銀、廃棄物削減、CO<sub>2</sub> 排出量削減など、様々な問題に対して人類に貢献できると考えられる。

では、まさにこれから始まろうとしている『LED 固体照明』の普及を、より加速させるために何ができるのかについて考察したい。私は以下の3つのポイントがあると考え(図-9参照)。

第1に『LED 固体照明』の更なる高効率化である。『LED 固体照明』には、大きく3つの効率が存在する。入力された電力を整流したり電圧変換を行う回路の駆動効率(駆動効率)、LED パッケージに入力された電力が変換されて得られる光出力の効率(LED パッケージ効率)、LED パッケージから取り出された光を『照明』として所望の“あかり”を演出するため、灯具に取り付けたときの光効率(灯具効率)である。現在それぞれの効率は駆動効率 85%、LED パッケージ効率 50%、灯具効率 75%程度であるといわれている(図-10参照)。結果として、入力した電力の 32%しか“あかり”と

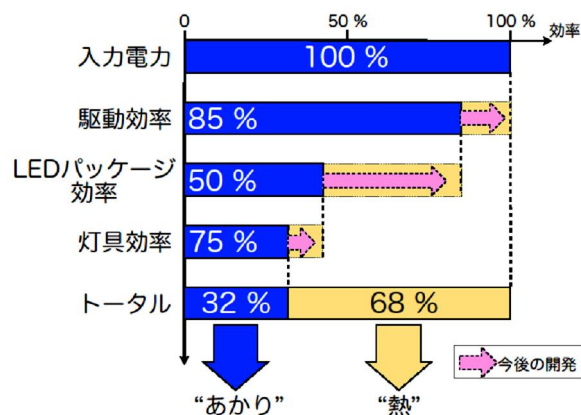


図-10 LED 固体照明の電力効率  
LED 固体照明の効率の内訳。

して利用しておらず、残りの 68%が“熱”として『無駄』になっている。効率がよいといわれる『LED 固体照明』も、まだまだこのような課題をはらんでいる。以上3種の効率を、より高めることで、『無駄』のない高効率の『照明』を作ることができ、さらに普及が加速されると考えられる。

第2に低コスト化である。これは、原料の価格低減から始まり、製造工場のムダの排除および LED チップやランプ、照明器具のサイズ縮小など多くの知恵を絞る部分であり、トヨタ生産方式等の思想を生み出してきた我々の得意な分野であろう。

第3に様々な『照明』の使用用途に適した“あかり”(色合いとか強さなど)を、コントロールして製造する技術開発である。電球ソケットや蛍光灯取り付け治具のように、『LED 固体照明』向け治具の開発や規格化をすることで、電気回路の最適化や“LED ならでは”の照明デザインが提案されてくると予想される。LED の特徴である小型、応答反応のよさ、衝撃に対する強さ(固体)、調光できる点などを生かし、今までにない照明を提案できると考えられる。その時、用途に合わせた“あかり”を即座に提供できる技術が必要となるだろう。現在、太陽やろうそくの光をどこまで再現できるかなどの開発が進み、製品化もなされている。所望の色や所望の強さの光を自在にコントロールできる技術により、今後の『LED 固体照明』の普及はさらに加速されると考えられる。

## 5. さらなる普及に向けて

現在、LED は『照明』の特殊な使い方である携帯電話やパソコンの液晶バックライトの光源とし

て広く利用されている。最近ではテレビの液晶バックライト光源としても利用されてきている。さらに、前節で示したように、オフィスや住宅、工場などの一般照明を単純に『LED 固体照明』に置き換える利用が提案され、徐々に普及し始めている。

『LED 固体照明』を普及させるため、更なる次の新しい分野について考えてみたい。3節で示した様に、太陽の"あかり"の性質をコントロールすることの本来の目的は、食料を"神頼み"の不安定な状態から脱却して、安定的に供給することにある。ここでは割愛したが、太陽の持つ"熱"の性質も自在に操ることが可能になってきている。この2つの性質をコントロールすることにより、例えば一年中イチゴが収穫できたり、菊の花が供給できたり、ポインセチアの色をクリスマスにあわせて赤くするといったような、植物の生育に利用されつつある。さらに、レタスやキャベツなども太陽を必要としない安定供給が可能な「植物工場」も現れている。実際に、「植物工場」は日本各地で、確実に増えてきている(図-11 参照)。このような「植物工場」では、水害、台風、日照りなどによる災害の影響が少なく、安定した収穫を可能にしている。これらの技術は、太陽のエネルギーの及ばない空間、たとえば、北極や南極付近、または宇宙空間などにも応用でき、食料を安定して供給することを可能にする。また、空間を管理する

ことによる効率的な水利用や無農薬栽培をも可能にする。しかし、安定供給と引き換えに、本来無償である太陽からの"あかり"や"熱"を有償でコントロールするため、収穫された野菜の価格が高くなってしまおうという課題がある。また、栽培する植物にとって最適な"あかり"の与え方(色や強さ、1日のサイクルなど)などはまだまだ未知であり、多くの研究が必要である。

これらの課題に対する研究は、近年ますます活発になっており、近い将来、必ず克服できると信じている。

### 6. 最後に

"あかり"をコントロールすることは、人類の発展や幸福にとって大きな意味を持つだろう。また、『照明』のさらなる発展により、われわれの生活スタイルは大きく変わると考えられる。技術的課題は多いものの、われわれ人類の知恵も広く深くなってきているので、必ず克服できると期待している。

以上に示してきたように、『LED 固体照明』の普及は、人類の抱える食糧不足やエネルギー不足、水不足、CO<sub>2</sub>増加のような問題に対して貢献できると考えられる。われわれは更なる普及のため、様々な技術開発を推進していきたい。

## 日本の植物工場

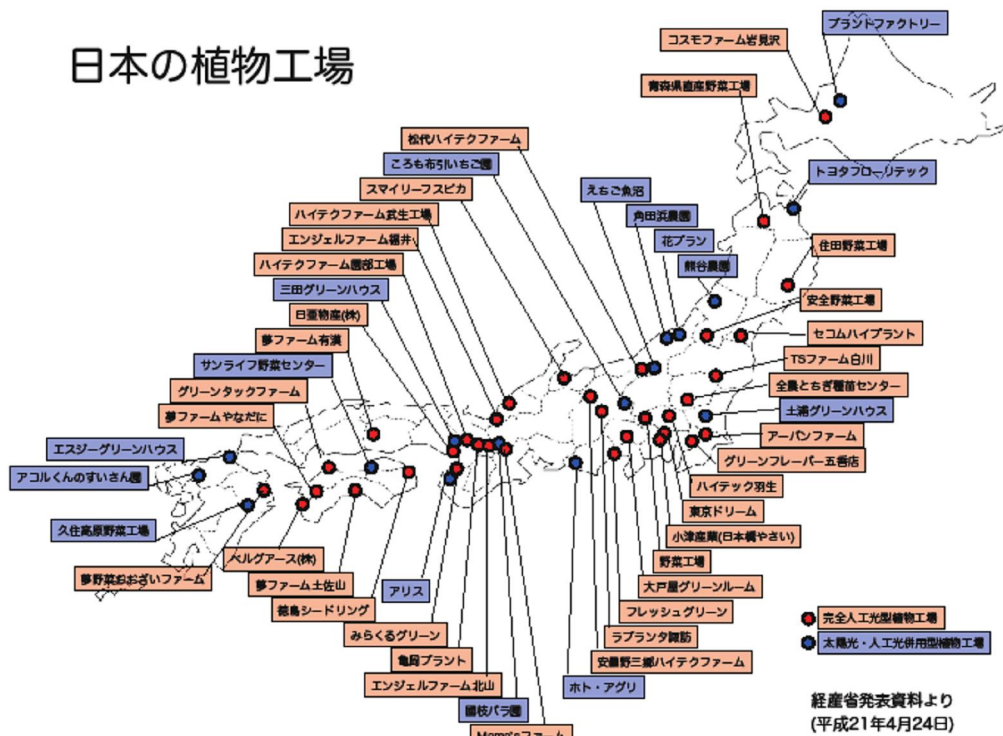


図-11 全国の植物工場

すでに、安定供給や無農薬栽培を売りにした植物工場は増えつつある。