

# 20年間にわたってSSL市場の展望に変革をもたらしたLEDイノベーション

ボブ・スティール

LED市場コンサルタントの立場から、第1回のStrategies in Light から22年間のLED技術、応用分野、市場の進化を振り返る。

市場調査及びコンサルティングを手掛ける米ストラテジー・アンリミテッド社 (Strategies Unlimited) が主催する、Strategies in Lightカンファレンスの第1回が開催されたのは2000年2月で、場所はハイアットリージェンシーサンフランシスコエアポートだった。高輝度LEDの技術、市場、ビジネス機会を対象とした、このような種類のカンファレンスが開催されたのは、それが初めてだった。米国、欧州、日本、台湾からの管理者、上級幹部、さらには最高経営責任者 (CEO) をも含む、250名もの国際的な参加者が来場した。高輝度LED市場は当時、まだ黎明期にあったが急速に成長しており、その急速な成長は20年続いた。エンドユースの需要に応じた市場の成長とLED

業界の拡大に伴い、Strategies in Lightも、参加者数とカンファレンスセッションで取り上げるトピック数という点で、規模を拡大していった。

固体照明 (Solid State Lighting : SSL) 革命と広く呼ばれる現象の発端が、1990年代初頭／半ばの東芝と米ヒューレットパッカート社 (Hewlett-Packard) によるInGaAlP (リン化アルミニウムガリウムインジウム) をベースとする赤-橙-黄色の高輝度LEDの開発と、日亜化学工業と豊田合成による高輝度InGaN (窒化インジウムガリウム) をベースとする青色と緑色のLEDの開発だったことは間違いない (後者については、発明者である中村修二氏、赤崎勇氏、天野浩氏が2014年にノーベル物理学賞を受賞している : [http://](http://bit.ly/39ihlvZ)

[bit.ly/39ihlvZ](http://bit.ly/39ihlvZ))。これらの技術の発明が、それまで全く開拓されていなかったLEDの広大な市場機会を切り拓いた。これには、フルカラーの屋外看板、自動車の内装及び外装照明、携帯端末ディスプレイのバックライト、交通信号、特殊照明など、その他にも数多くの分野が含まれる。

生産量が増加して価格が低下し、そうした新しいLED技術が複数の用途に広く展開できる状態に達するまでには、数年の歳月を要した。Strategies in Lightカンファレンスの第1回が開催された2000年代初頭の時点で、InGaAlP及びInGaNをベースとする高輝度LEDの世界市場規模は8億2000万ドル (1999年) に達し、1995年からは62%の年平均成長率で成長していた。

1990年代終盤には、業界の先見の明ある人々が、LEDがいつの日か一般照明で広く使用されるようになる可能性を想像し始めるようになったが、LED技術は、その目的に使用できるレベルには程遠い状態だった。1999年の最も高性能な白色LEDの発光効率率は、約15ルーメン毎ワット (lm/W) で、白熱灯と同等で、蛍光灯には遠く及ばないレベルだったが、白色LEDの価格は非常に高かった。LEDのパイオニアで、ヒューレットパッカート社のオプトエレクトロニクス部門 (後の米アジレント・テクノロジーズ社 [Agilent Technologies]) の研究開発

LEDの性能とコストの進歩:ハイツの法則 (1999年考案)

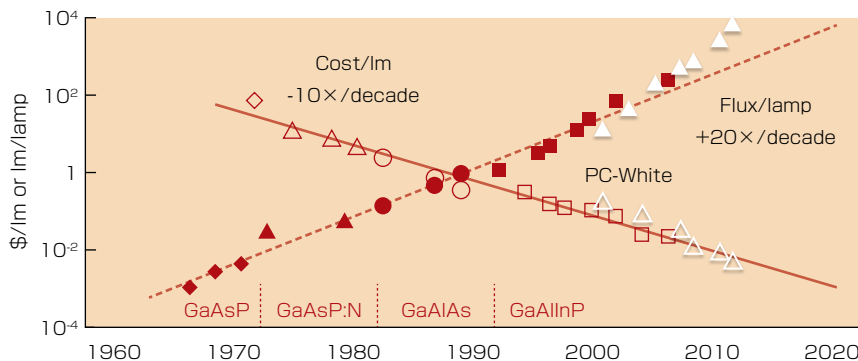


図1 ハイツの法則は、パッケージLEDのルーメン出力の指数的な増加とそれに伴う1ルーメンあたりのコストの低下を予測するものだった (画像のコンセプトは、Haitz Consulting社のロランド・ハイツがもともと考案したもの)。

(R&D)マネージャーだったローランド・ハイツ(Roland Haitz)が、「ハイツの法則」(半導体チップに対するムーアの法則のLED版：<http://bit.ly/3aHhF8w>)として後に知られるようになる法則を発表したのは、ちょうどその頃である。1999年の「The Case for a National Research Program on Semiconductor Lighting」という論文で初めて発表されたこの法則で、ハイツは、LEDのコスト(1ルーメンあたりのコスト)は10年ごとに10分の1になり、LED出力(パッケージあたりの発光量)は10年ごとに20倍になると予測した。図1は、2010年にかけて更新された、ハイツの法則をグラフに示したものである。

ハイツの予測は、少なくとも2010年まではかなり正確で、近年の進歩は同氏の予測を上回っている。高輝度LED技術の開発の比較的初期の段階で発表されたハイツの法則は、その後20年間の技術の驚異的な進歩と市場の飛躍的な成長の土台となった。

## 市場力学

2000年に、高輝度LED(以下では単にLEDと表記)市場は初めて10億ドルを突破し、その後はさらに急速に成長した。市場の成長は、コストの継続的な低下、効率の向上、既存用途の拡大、新規用途の開拓とともに加速した。2000年初頭には、車載照明(内装用と外装用の両方)と屋外看板が、主要な市場牽引分野だった。

2004年からは、携帯電話が市場最大の応用分野になった。LEDをバックライトとするフルカラーディスプレイが、バックライト式キーパッドとともに一般的に搭載されるようになったためである。2000年後半には、テレビ、モニター、小型ディスプレイの液晶デ

ィスプレイ(LCD)のバックライトとしてのLEDの使用が、最大の成長市場分野となった。2011年頃からは、高性能(100lm/W以上)で低価格の白色LEDの登場により、LEDは一般照明市場に急速に普及していった。

長年にわたってStrategies in Lightの最大の目玉は、ストラテジーズ・アンリミテッド社の首席市場アナリストによる、年に1度のLED市場の最新情報と予測の発表だった。その市場データをまとめたのが、図2である。この図には、1999年から2019年までのLED市場の成長が示されている。また、ラベルとして挿入されているのは、さまざまな期間に市場の成長を牽引した主要分野である。20年間全体の年平均成長率は、15.9%だった。

図2からわかるように、市場は第1回のStrategies in Lightからの20年間、成長し続けているが、市場を牽引する応用分野は劇的に変化している。この変化を図3にまとめた。こちらは、1999年と2019年の市場の応用分野の内訳を比較したものである。最も顕著

な違いはおそらく、1999年には、市場に占める照明(当時はマシンプジョンなどの特殊照明)の割合がわずか2%だったのに対し、2019年には36%と、市場最大の用途になったことである。LED看板と自動車が、市場の大きな割合を占めていることに変わりはないが、2019年のシェアは1999年と比べるとはるかに小さくなっている。1999年には、LEDはLCD画面のバックライトとして使用されていなかったが、2019年には、コンピュータモニターから85インチテレビに至るまでのほぼすべてのLCD画面で、LEDがバックライトとして使用されるようになり、市場の10%を占めた(携帯電話とその他の携帯電子機器のディスプレイは、携帯端末としてディスプレイとは別にカウントされている)。

LEDがいつの日か一般照明で広く使用されるようになる、という1990年代終盤にLED業界の先見の明がある人々が描いた夢は、おそらくその人々の想像を絶する速さで、現実になった。2019年に、LEDを採用する照明製品

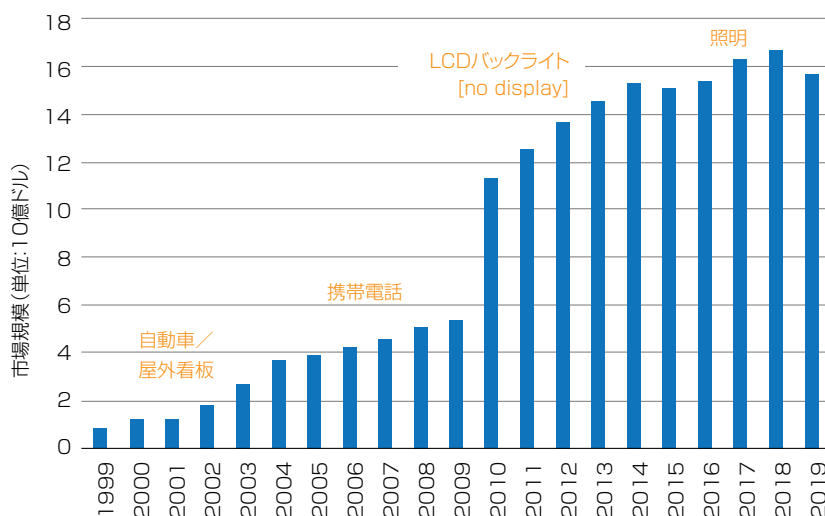


図2 LED市場の成長の推移を各期間の主要な市場牽引分野ともに示したグラフ。(データ提供: ストラテジーズ・アンリミテッド社/ Endeavor Business Media社)

(ランプと照明器具)の世界売上高は613億ドル(ストラテジーズ・アンリミテッド社集計)で、照明市場の59%以上を占めた。

## 技術の進化

これらの図に示されている市場成長トレンドにおいて、その促進の少なくとも一端を担ったのは、ハイツの法則で予測されていたデバイス効率の向上とコストの低下を含む、LED技術の継続的な進歩だった。デバイス効率の向上をもたらしたのは、内蔵チップ構造の改良、光抽出を高めるためのチップ整形、熱管理を改善するための高度なパッケージング、そして白色LEDについては、蛍光体の改良だった。コスト

の低下は、典型的な学習曲線現象に従ったもので、チップの歩留まりと効率の向上と、パッケージ内のBOM(Bill Of Materials)を大幅に低減する革新的なパッケージングコンセプトが、その要因だった。

図4は、LEDの電力変換効率と発光効率の進歩と、白色LEDの価格の推移を示したものである。効率の向上と白色LEDの価格の低下は、照明分野におけるLEDの導入において特に重要だった。中出力LEDは、価格構造がより魅力的であったことから、多くの照明分野で2012年以降、高出力LEDよりも好ましい選択肢となった。

LEDの性能と価格の改善に加えて、幅広い種類のパッケージが開発された

ことにより、どのような用途に対してもそれに適したパッケージタイプが存在する状態になった。特定のパッケージタイプに合わせて用途を設計するのではなく、用途に合ったパッケージタイプが必ず存在する状態が確保されたことが、市場の継続的な成長を可能にした。

蘭ルミレッズ社(Lumileds)が1999年に発表した、1mmチップを使用した最初の高出力(1W)デバイスである「Luxeon」は、一般照明分野におけるLEDのその後の普及の発端となる製品だった。現在の基準で見ると、効率は低く(約15lm/W)、価格は高いが、照明分野だけを対象に開発された初めてのデバイスだった。熱管理が、LEDの臨界温度を超えることなく1mm<sup>2</sup>のチップを350mAで駆動するための鍵だった。

その後の数年間で、高出力デバイスのパッケージ技術は、金属材料の代わりにセラミックを使用する方向に進化し、パッケージサイズは縮小し、コストは大きく低下した。LED発光効率の向上は、同じチップ面積と同じ駆動電流でより多くのルーメンが生成できるようになったことも意味していた。その結果、高出力白色LEDの1キロルーメンあたりの価格は、1999年の200ドル以上から、2019年には数ドルにまで低下した。その後、他のパッケージタイプについても、コストと効率は同じような経過をたどった。パッケージの縮小はその後、いわゆるチップスケールパッケージ(CSP)という究極的な形態に到達した。

## LED業界の進化

1990年代半ばに高輝度LEDが登場するずっと以前からLED市場に製品を供給していた、多数の旧来メーカーが存在する。例えば、以下の企業である。

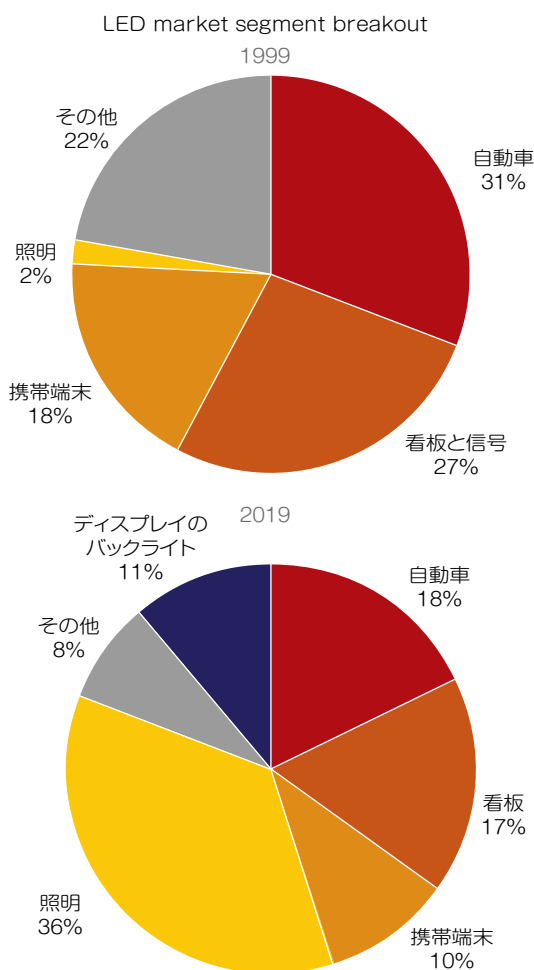


図3 LED市場は1999年から2019年の間に、パッケージアーキテクチャと性能の向上に伴って、主要応用分野が大きく変化した。顕著な例が一般照明分野で、LED市場に占める割合は1999年(上)のわずか2%から、2019年(下)には36%となり、最大の市場分野になっている。(データ提供: ストラテジーズ・アンリミテッド社 / Endeavor Business Media社)

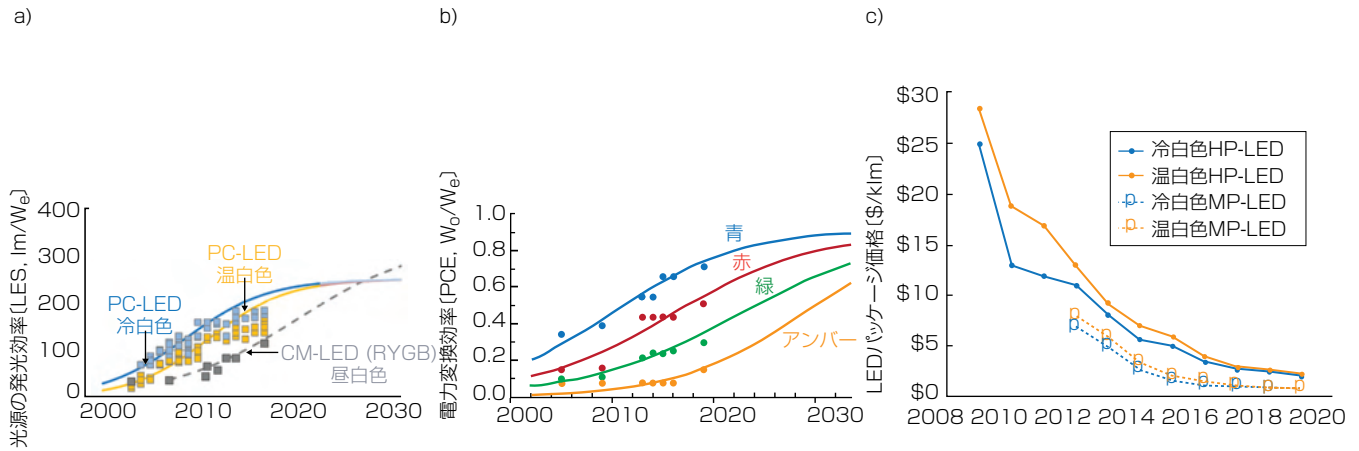


図4 米エネルギー省(DOE)のSolid-State Lighting Program(固体照明プログラム)は2019年の報告書「Lighting R&D Opportunities」の中で、変換効率と発光効率の進歩の概要を、白色LEDの価格の推移とともに示した。(データ提供: DOE SSLプログラム、<https://bit.ly/329SoVq>)

- ・日本-東芝、シャープ、スタンレー電気、三菱電機、ローム、シチズン
- ・台湾-ライトン(Liteon)、エバーライト(Everlight)、キングブライト(Kingbright)、ブライツLED(Bright LED)、CSC(China Semiconductor)、レッドテック(Ledtech)
- ・米国-ヒューレットパッカード(後のルミレッズとアジレント)、ビシエイ(Vishay)、フェアチャイルド(Fairchild)
- ・欧州-シーメンスオプトセミコンダクターズ(Siemens Opto Semiconductors、後のオスラム[Osram Opto Semiconductors])、テミックテレフンケン(TEMIC Telefunken)

InGaNとInGaAlPのLEDが、市場成長の最大の牽引要素になった1990年代半ばに、ほとんどの大手旧来企業が、直ちに高輝度製品を開発して販売した。しかし、新規企業も同様に市場に参入した。特に頭角を現したのが、日亜化学工業と豊田合成である。どちらも1990年代半ばまでは、LED事業

に携わっていなかった。しかし、InGaN技術開発の先駆者として、両社はともに1995年に同市場に参入し、最大規模のLED供給メーカーに名を連ねるようになった。実際、1999年までに日亜化学工業は、世界最大のLED供給メーカーとなり、今日までその地位を維持している。その後、韓国と中国の企業やさらなる台湾メーカーなど、その他にも新しい供給メーカーが市場に参入した。米クリー社(Cree)は、独自のGaN on SiC(窒化ガリウムオン炭化ケイ素)技術を採用するチップ供給メーカーとして、1990年代終盤に市場に参入し、その後、最大規模のパッケージLED供給メーカーの1社となった。表は、パッケージLED供給メーカー上位10社のランキングの推移を示したものである。

この表の社名は、上位10社の順位の推移がわかりやすいように色分けされている。当初は、日本、欧州、米国、台湾の企業が、供給メーカーの勢力図を支配していた。しかし、2008年に

は韓国のソウルセミコンダクター社がトップ10入りを果たし、2019年には、4社の韓国企業が主に日本企業にとって代わる形でトップ10に名を連ねた。1999年にランク入りしていた6社の日本企業のうち、2019年に残っているのは日亜化学工業のみである。2019年には、中国本土の企業であるムリンセン社(Mulinsen: MLS)もトップ10入りを果たしている。2019年にはその他にも多数の中国の供給メーカーが存在していたが、トップ10入りするほどの規模があったのは、ムリンセン社だけだった。

この表にはパッケージLEDの供給メーカーしか含まれていないことに注意してほしい。この期間のLEDサプライチェーンの重要な構成要素の1つが、チップ供給メーカーだった。1990年代終盤から2000年代初頭に登場したこれらの企業は、有機金属気相成長(Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD)技術を使用して、InGaAlPやInGaNのエピタキシャルウ



表 パッケージLED供給メーカーの売上高上位10社の推移

順位	2019	2020	2021
1	日亜化学工業	日亜化学工業	日亜化学工業
2	Osram Opto Semiconductors	Osram Opto Semiconductors	Osram Opto Semiconductors
3	Lumileds/Agilent	Stanley Electric	Lumileds
4	豊田合成	Lumileds	Seoul Semiconductor
5	Stanley Electric	シチズン	Samsung
6	Taiwan Liteon	Cree	Mulinsen (MLS)
7	松下電器産業	Seoul Semiconductor	LG Innotek
8	東芝	Everlight	Cree
9	シャープ	ローム	Everlight
10	Everlight	Avago (formerly Agilent)	Lumens

色分け: 日本 欧州 米国 台湾 韓国 中国

表データ提供: ストラテジー・アンリミテッド社 / Endeavor Business Media社

エハヤチップを製造し、パッケージ企業を対象に販売業務を行っていた。パッケージ企業の多くが、独自の社内エピタキシャルウエハ製造施設を保有していなかったためである。これらのチップ供給メーカーのほとんどが台湾を拠点としていた。台湾は、エピタキシーとチップの新興企業に好適な場所だった。エンジニアリングコミュニティ内の専門技術が高く、新しい成長機会を求めるリスクキャピタルが豊富に提供されていたためである。最大のチップ供給メーカーは、エピスター社 (Epistar) だった。その他の著名な供給メーカーとしては、UEC社、アリマ社 (Arima)、エピテック社 (Epitech)、サウスエピタキシー社 (South Epitaxy)、フォレピ社 (Forepi)、テックコア社 (Tekcore)、ヒューガ社 (Huga) などがあった (すべて台湾)。2004年頃から、量産によるコスト削減を目的に、台湾チップ業界の統合が始まり、小規模企業は大規模企業に合併または買収されて

いった。そうした買収の結果として最終的に、エピスター社が台湾を拠点とする最大のチップ供給メーカーとなった。

同じ頃に、中国企業がこのLEDチップ販売市場に参入し始めた。初期の参入企業は、三安光电 (San'an) やルメイ社 (Lumei) などである。その後、中国省政府は、中国国内のLED業界を拡大して多くの新規企業の市場参入を促すために、MOCVD反応炉の購入に補助金を交付した。しかし、反応炉を適切に稼働するための専門技術に欠けていたために、それらの企業の多くが廃業するか、大きな企業に買収された。

### 総評

この22年間でLED業界は、驚異的といつて過言ではない成長を遂げた。

### 著者紹介

ボブ・スティーラー (BOB STEELE) は、Strategies in Lightカンファレンス (<https://www.strategiesinlight.com/>) の創設者で、2000年から会長または共同会長を務めている。1994年から2010年までは、米ストラテジー・アンリミテッド社 (Strategies Unlimited) の市場調査プログラムも指揮していた。

LED市場の規模は18倍に拡大し、InGaNベースの青色LEDの変換効率は10倍、白色LEDの1ルーメンあたりの価格は100分の1になった。最も重要な照明分野において、LEDは業界に大規模な変革をもたらし、LED照明製品の世界売上高は2011年から2019年で10倍になり、610億ドルに達した。こうした発展を支えたのは、主要な個々の研究者と無数のエンジニアの努力、企業によるR&Dと製造への大規模投資、施策と補助金による政府支援である。この素晴らしい技術的進歩の冒険に、Strategies in Lightは、新たに開発された技術と応用分野を伝達するためのフォーラムを提供し、業界参加者が一堂に会してアイデアを交換して新しい関係を築くための場を提供することによって、参加してきた。

### 推奨文献

SSL業界の進歩を最もわかりやすく解説しているのは、ボブ・ジョンストン氏 (Bob Johnstone) の2冊の著書「Brilliant! Shuji Nakamura and the Revolution in Lighting Technology」(中村修二と光学テクノロジー革命、2015年改訂版) と、「L.E.D. - A History of the Future of Lighting」(L.E.D. - 未来照明のこれまでの経緯、2017年) かもしれない。どちらもAmazonで販売されている (<https://amzn.to/3K8DsII>)。ジョンストン氏がLEDs Magazineに寄稿した記事の中で、その抜粋を参照することもできる (<http://bit.ly/2Ur6kEG> と <https://bit.ly/3mawAAc>)。