第3部 照明学会の未来へ向けて

本企画は「85周年記念特集」として「照明学会の歩み」「アンケートにみる照明学会」、に引き続き「照明学会の未来へ向けて」というテーマで技術予測と学会予測を行いました。技術予測については、「光源システムの技術予測とその評価—未来への展望—」を未来への展望という位置付けで小原章男氏に、IT化、グローバル化に対応した新しい「照明学会の将来予測」については、各諮問委員会委員長にお願いをし、ご提言を頂きました。「照明学会のIT化の予測」について、情報化推進委員会委員長の中川靖夫氏に、「国際化された照明学会活動の将来像」を国際活動委員会委員長の神谷茂氏に、「IT化、グローバル化に照明学会はどう対応するか」について、経営企画委員会委員長の染谷彰氏に、「PE (Professional Engineer) 制度と学会運営」についてPE制度検討委員会委員長の浦山隆氏に、それぞれの見地よりご執筆頂きました。

技術、情報、人的交流のグローバル化が進展する昨今、本企画が読者の皆様に未来を見通す何らかの参考になればと思います。最後にご多忙にも拘わりませず、快くご執筆頂いた関係者の方々に心から感謝の意を表します。

(企画担当：田中信代、山田健一、笹井敏彦、笹川静夫)

＜光源予測＞

光源システムの技術予測とその評価 —未来への展望—

An Evaluation and Technological Forecast for Light Source Systems

小原章男
Akio Ohara
専門会員

1937年生。1960年神戸大学工学部電気工学科卒。元東芝ライテック㈱。現在、経営コンサルタント（企業組合）。

◀キーワード：光源、技術予測

1. まえがき

1990年、本学会が組織する次世代光源システム研究委員会（加納忠男委員長）は報告書として「光源システムの技術動向と展望」を発行したり、その中で、照明用光源システムについて、当時の技術動向を調査した上で、2001年までに実現可能な光源の性能を専門家によるデルファイ法を用いて技術予測を行った。それから10年経過した現在、その予測内容がどの程度実現されているのかを評価しておくことが必要である。そこで、本来ならば当時の委員各人の評価をまとめるべきであるが、本誌編集委員会から報告書の作成に幹事として携わった関係から著者にその評価を依頼されたため、時間的な制約もあることから、その評価は個人的な見解にならざるを得ないことを許して戴きたい。

本稿では、まず技術予測手法について簡単に説明し、光源システムの技術予測の経緯を取り上げた上で、2001年の技術予測とその評価を述べる。そして、この評価結果を踏まえ、光源システムの最近の技術動向について概説し、未来への展望を述べる。

2. 技術予測手法とその特徴

1970年代、日本の技術レベルは欧米に近づき、技術立国として科学技術の研究開発に注力するようになったことにより、国内において科学技術の予測手法の研究と各分野における技術予測が盛んになった。技術予測の手法はデルファイ法、傾向外挿法、シナリオ・ライティング法などといった様々な手法が開発されており、これらはその目的に応じて使い分けされている²⁾。そのうち、本学会における光源システムの技術予測はいずれもデルファイ法を重視して実施されている¹⁾³⁾。

デルファイ法は Helmer が発案した専門家の直感を組織的に引き出すという一種のアンケート方式による技術予測手法である。この手法はテーマに関する質問をアンケート方式で個別に回答者に示し、そのアンケート結果を集計、分析して、回答者にフィードバックし、再度回答を求めることにより行う。その回答が過半数の回答者の見解に入っていなければ、その理由と意見を聞き、それが多数の誤った見解になることを防いでいる。従って、この手法は集団討議のように相互刺激はないが、個人の意見やグループ全体の考え方によってその見解が左

右されることが少ない。実施に当たっては、回答者の人選と情報提供方法（テーマとその内容）が重要である。

一方、傾向外挿法は過去の技術進歩の速度とその傾向が将来も続くであろうと仮定し、時系列に将来を予測する手法である。この予測に際して、技術動向から現状分析をシステム的に行い、現在の実績から将来がどのように伸びるかを予測することがポイントとなる。新技術が発明されて成長期には性能が急激に向上するが、やがて成熟期になると性能の進歩が鈍化してS字曲線を描くケースが多く、白熱電球、蛍光ランプおよびHIDランプのランプ効率の経過はいずれもS字曲線を描いている。従って、この手法はミクロ的視点（現状の延長）とマクロ的視点（理論限界など）の両方から比較分析して予測するため、短期予測や技術進歩が継続的に期待できる予測には信頼性が高いが、長期予測や理論限界を超え、新しい原理に基づく新技術の出現が期待される段階での予測は難しいとされている。また、シナリオ・ライティング法はKahnによる2000年の予測によって有名になった手法であるが、将来を予測して、現状から将来へ可能性の高いプロセスを描写するものである。この手法の場合、自由な発想で将来の予測を描くところに特徴があるが、シナリオ作成者の経験、洞察力、評価力、技術力や知識などあらゆる能力が要求される。

3. 光源システムの技術予測の経緯

光源システムの技術予測は、1969年にWillowghbyが実用的な近白色光源の効率について、理論上の限界が250 lm/Wであり、2009年には190 lm/Wに達するものと予測している⁴⁾。一方、本学会では1972年に光源調査専門委員会が10年後の光源システムの技術予測を行った³⁾⁵⁾。その予測値を10年後（1982年）の実績値と比較すると、ランプ効率についてメタルハライドランプでは予測値100 lm/Wに対して実績値100 lm/W、高圧ナトリウムランプでは予測値140 lm/Wに対して実績値142 lm/Wであり、これらの光源は実績値が予測値をクリアした。しかし、蛍光ランプでは予測値100 lm/Wに対して実績値88 lm/Wなど、その他の光源については実績値が予測値に達しなかった。

4. 2001年の技術予測とその評価

本学会では、1990年に21世紀の新光源への期待も込めて、再び光源システムの10年後（2001年）の技術予測を行った。表1に各種光源性能の2001年における予測値と実績値（光源メーカー各社カタログによる）の比較を示す。なお、この表の中で予測値の達成率（％）は、

$$\text{達成率}(\%) = \{(\text{実績値} - 1990\text{年値}) / (\text{予測値} - 1990\text{年値})\} \times 100$$

と定義した。従って、予測が的中すれば100％となる。

表1からランプ効率の実績値が予測値をクリアしたのは、電球形蛍光ランプと直管形蛍光ランプ（32W）のみであった。その他の光源は予測値に対して実績値が未達であったが、メタルハライドランプでは予測値に近い向上が認められる。また、定格寿命はメタルハライドランプの実績値のみ予測値をクリアしたが、ハロゲン電球および蛍光ランプについては、この10年で進歩がなされていることが分かる。なお、演色性に関しては、いずれの光源においてもこの10年でほとんど改善されていない。

従って、1990年に行った光源システムの技術予測的中率はよくなかったが、技術予測の評価で大切なことは、「なぜ予測値が達成できなかったのか」を予測時の技術動向のシナリオと実際の技術開発の進捗状況との相違を解明し、次の技術予測に活かすことである。すなわち、技術予測は研究開発計画の目標設定に不可欠であり、その目標が高いほど専門家の英知を集め、目標達成を目指してブレイクスルーしなければならない技術課題を明確にし、技術開発におけるプロセスのシナリオ作成が望まれるからである。

5. 光源システムの技術動向と展望

光源システムのランプ効率をはじめとした2001年の予測的中率がよくなかったことは謙虚に受け止め、前述したように今後の予測に活かす必要がある。よって、この予測結果を踏まえ、光源システムの最近の技術動向を概説し、未来への期待を込めて展望する。なお、ここでは光源システムについて、省エネルギー化の観点から重要であるランプ効率を中心に述べる。

5.1 熱放射を応用した光源

熱放射を応用した光源としては白熱電球、ハロゲン電球が代表的であるが、タングステンフィラメントの形状、封入ガス（Krガス、ハロゲン混合ガスなど）、透光性赤外反射膜応用など技術開発により、一般照明用ハロゲン電球のランプ効率は20 lm/W（寿命2000h）にまで向上した。今後、さらなる効率の向上が期待される技術として、次のものが挙げられる。

(1) 赤外放射の有効活用

フィラメント電球は入力電力の約70％が赤外放射に変換され、可視放射は約10％である。ガラス球に透光性赤外反射膜を形成させ、赤外放射を有効にフィラメントに戻すことによって入力電力の低減が可能となり、その結果、ランプ効率は約35％向上している。理論的には60％の省電力化が可能であり⁶⁾、可視透過率の良好な多層干渉による赤外反射膜の形成、ガラス球の形状変化（楕円回転形など）、およびフィラメントの小型化などにより、さらなる効率向上の期待が大きい。なお、赤外放射を可視放射に変換できるアンチストークス蛍光体をガ

表 1 各種光源性能の2001年予測とその結果

光 源		全光束 (lm)	ランプ効率 (lm/W)	対1990年 比率(%)	達成率(%)	平均演色 評価数 R_a	定格寿命 (h)	備 考
一般照明用電球 (57W) (60W形) (60W形54W)	1990年	810	14.2			100	1000	
	2001年予測	918	16.1	113.4		100	1250	
	2001年実績	810	15.0	105.6	42	100	1000	
照明用ハロゲン電球 (85W) (100W形) (100W形85W)	1990年	1600	18.8			100	1500	
	2001年予測	1840	21.7	115.4		100	2050	
	2001年実績	1680	19.8	105.3	34	100	2000	効率18.8-19.8 lm/W
電球形蛍光ランプ (17W) (電球60W形相当) (12W)	1990年	780	45.9			84	6000	
	2001年予測	930	55.4	120.7		86	8000	
	2001年実績	810	67.5	147.7	230	84	6000	(12-13W) 効率67.5-62.3 lm/W
直管形蛍光ランプ (37W) (40W形) (40W形37W) (32W)	1990年	3560	96.2			84	10000	
	2001年予測	3860	102.5	106.5		86	13000	
	2001年実績	3560	96.2	100.0	0	88	12000	
	2001年実績	3360	105.0	109.1	140	84	12000	
コンパクト形蛍光ランプ (36W) (36W) (36W)	1990年	2900	81			84	7500	
	2001年予測	3150	88	108.6		86	9750	
	2001年実績	2900	81	100.0	0	84	9000	
メタルハライドランプ (400W) (400W) (400W)	1990年	40000	100			65	9000	
	2001年予測	44600	112	112.0		75	10200	
	2001年実績	44000	110	110.0	83	65	12000	効率100-110 lm/W
高圧ナトリウムランプ (360W) (360W) (360W)	1990年	51000	142			28	12000	
	2001年予測	53400	148	104.4		32	15300	
	2001年実績	50000	139	*97.9	-	*25	12000	* 各社カタログ値見直し
キセノンランプ (1000W) (1000W相当) (1000W)	1990年	31000	31			94	1500	
	2001年予測	36800	38	122.6		94	2100	
	2001年実績	34000	34	109.7	43	94	1500	

(注1) ランプ効率の2001年の予測値は、全光束と別々に予測したので、全光束を実績のランプ電力で割った値と異なります。

(注2) 2001年の実績値は、各社バラツキがある場合、最大値を採用した。バラツキの幅は備考欄に示した。

ラス球内面に塗布する考えなどもあるが、この種の蛍光体の可視変換率は極めて低いのが現状である。

(2) 可視放射率の向上

タングステンフィラメントの温度を上げると可視放射率は向上するが、一方ではタングステンの蒸発が急激に促進され、寿命が短くなる。そこで、タングステンの蒸発を抑制するために、ガラス球内に不活性ガスやハロゲン化合物によるハロゲンサイクルを利用し、ランプ効率および寿命を向上させる技術開発が行われてきた。タングステンより融点の高い HfC や TaC を用いてフィラメントを形成した場合、そのランプ効率は優れているが寿命や機械的強度に難点がある。また、可視放射率が高い HfN をコーティングしたフィラメントも蒸発や強度に難点がある⁷⁾。

一方、高温で加熱放射させるクラスターランプはランプ効率の向上に期待が大きい⁸⁾。フィラメントの空洞放射体表面に微小空洞（マイクロキャビティ）を形成すると空洞孔径に対して2倍以上の電磁波の放射が抑制されるという理論があり、ランプ効率が60～80 lm/W（寿命10000h）の放射体の可能性が示されている⁸⁾。なお、タングステン表面に直径200～400nm、深さ2～4 μm の孔

を形成した場合、赤外放射が平滑部に比べて半減したことなどが検証されている⁹⁾。

5.2 放電現象を利用した光源

低圧放電では蛍光ランプが、高圧放電では HID ランプが一般照明用光源の主流であるが、ここでは低圧ナトリウムランプやキセノンランプについても触れる。いずれもランプ効率の向上が最も重要課題であるが、紫外放射発生物質として水銀は優れた特性を有する反面、環境負荷物質であるために水銀量の低減や水銀代替物質の探索も大きな課題とされる。

(1) 低圧放電ランプ

直管形蛍光ランプ（32W）では3波長蛍光体の改良、細管化および高周波点灯に最適なランプと専用の電子安定器の組み合わせにより総合効率が100 lm/W（ランプ効率105 lm/W）に達した。また、電球形蛍光ランプも同様の技術改善によりその効率が大きく向上した。一方、最近では無電極蛍光ランプが開発され、そのランプ効率はリング形で80 lm/W、内巻コイル形で71 lm/W を示す性能のもの得られている。なお、このタイプのランプは電極がないので寿命は60000h と長く、さらに電極損失に相当する光束低下がないためにその効率向上が期待され

る。

現状の蛍光ランプの量子効率⁹⁾は1以下であるが、量子効率を1以上にする方法として、例えば管内にHgとNaの混合ガスを封入することなどが考えられている。すなわち、励起Hg原子から生成される254nmの紫外放射がNa原子を励起し、この励起Na原子はカスケード状に2個の光子（例えば波長567nmと589nm）を発生させることにより、量子効率が1以上の特性を示す高効率ランプが期待される⁹⁾。また、低圧放電の紫外放射発生物質として炭素分子C₆₀フラーレンが提案されている⁸⁾。この分子（径0.7nm）の内部は空洞でサッカーボール状の構造をしており、放電により230nm付近の紫外放射の発生が期待される。なお、この空洞内に各種金属が入り込んだ複合分子である場合には、その発生波長が変化するとされる。

水銀フリーの蛍光ランプは環境側面から注目されているが、キセノンなどの物質を使用したものでもランプ効率が25 lm/W程度と極めて低いのが現状である¹⁾。従って、現在ではランプ効率の低下を抑えた水銀量の極力少ない蛍光ランプの開発（水銀レス化を含む）、および水銀に代わる特性を有する環境負荷の少ない新規代替物質の探索が重要課題として検討されている。

低圧ナトリウムランプは実用化されている照明用光源の中で最もランプ効率が高い光源であり、現行品で175 lm/W、矩形波点灯で190 lm/W、高周波点灯（100kHz以上）で225 lm/Wが可能である¹⁾。これはナトリウム蒸気放電で発生する光が視感効率の高い589nmと589.6 nmの黄色のほぼ単色光であるためであるが、演色性が悪いために色の見え方を重視するところでは不向きであり、その使用用途は限られる。

(2) 高圧放電ランプ

HIDランプの中でメタルハライドランプはランプ効率が110 lm/Wに達しているが、近年、発光管材料に従来の石英ガラスより耐熱性の優れた透光性アルミナセラミックスを採用したタイプのものが開発され、これにより管壁負荷を増すことが可能になったため、さらなるランプ効率の向上が期待される¹⁰⁾。また、キセノンランプについても耐熱性の透光性セラミックスのバルブを使えば、その効率向上の可能性が期待される。

無電極HIDランプは電磁誘導型（周波数：13.56 MHz、発光物質：NdI₃-NaI-SnI₂）でシステム効率180 lm/Wが¹¹⁾、マイクロ波放電型（周波数：2.45GHz、発光物質：S）ではシステム効率200 lm/Wが得られている¹⁰⁾。なお、電極がないのために長寿命（60000h以上）であり、封止技術などの改善により、その効率向上の可能性が期待される。

5.3 エレクトロルミネセンスを利用した光源

上述した熱放射および放電現象を利用した各種光源の

ランプ効率の進歩について、白熱電球、蛍光ランプおよびHIDランプの将来予測を傾向外挿法（包絡曲線法）により見ると理論限界に近づいていることがいえる。そこで、さらなる技術進歩を予測するためには新しい発光原理に基づく光源が必要であり、その候補としてエレクトロルミネセンスを利用した光源としてELが挙げられていた。それは、点光源（白熱電球）から線光源（蛍光ランプ）へ、そして理想の面光源（EL）として期待も込められていたり。しかし、ELの効率および光量は極めて低いため、照明用光源としての期待は今日まで実現されておらず、実用的にはディスプレイなどの用途に限られている。

一方、同じくエレクトロルミネセンスを利用した光源としてLEDがあり、このLEDについては高輝度の赤色、緑色の発光を示すものはすでに得られていたが、1990年代前半まで青色発光の高輝度のものがなく、大きな課題が残されていた。しかし、1992年にInGa_N系材料を用いた高輝度青色LEDが開発されたことにより¹²⁾、3原色のLEDが揃い、その照明用光源としての可能性が出てきた。さらに、高輝度青色LEDにYAG蛍光体（Y₃Al₅O₁₂：Gd, Ce）を組み合わせた発光波長460nmと565nmからなる白色LEDが登場し、現在ではそのランプ効率が15～25 lm/Wのものが得られている¹³⁾。なお、照明用白色LEDの研究開発は“21世紀のあかり”国家プロジェクトにより取り組まれている。このプロジェクトでは2003年までにランプ効率で80～100 lm/Wの高効率白色LEDの開発を目標として進められており、白熱電球、蛍光ランプに代わる次世代光源として期待される¹⁴⁾。

6. あとがき

光源システムの技術予測は大変難しいが、英知を結集した技術予測は科学技術開発計画において重要な作業である。その際、技術予測内容が当事者にとって納得いく内容であり、政治、経済、社会、環境の動きも考慮したシナリオを作成するところに意味がある。なお、時間の経過とともにシナリオ通りに進まない場合には、そのプロセスを検証して修正を加える必要がある。すなわち、技術予測は当てることが主目的ではなく、予測が当たるようにシナリオを作成して、推進することに意義がある。

1990年に実施した光源システムの性能（主にランプ効率）の技術予測値は前回（1982年）の予測値に比べて決して高いレベルでなかったと思われるが、その達成率がよくなかった理由の1つには、白熱電球、蛍光ランプおよびHIDランプといった既存の光源の技術が成熟期にきており、技術進歩が鈍ってきたと見るべきであろう。しかし、成熟期の光源についても地道な技術開発によって、少しずつその性能が向上していることが確認

できた。また、LED といった新しい発光原理に基づく光源の開発が確実に進められており、次世代の照明用光源として大いに期待している。21世紀の光源開発の研究テーマは山ほどあるが、光源開発に携わっている若手研究開発者や技術予測に関心のある方々に、本稿が何らかの希望を与え、お役に立てば幸いである。

最後に2001年の技術予測の評価に対してご意見があればお聞きたい。特に、次世代光源システム研究調査委員会の委員の方々には、評価に見解を異にされる方がおられたら、その際はお許しください。なお、表1の作成に当り、資料（ランプカタログ）を提供して下さい。ランプメーカーの方に感謝致します。

参考文献

- (1) 照明学会：光源システムの技術動向と展望（1990）。
- (2) 只野編：ソフト・テクノロジー—企業戦略のための技術予測と実

例一、丸善（1972）。

- (3) 照明学会：光源の評価・性能・材料（1972）。
- (4) Willoughby, A. H. : Light. Res. Technol., 1-2, p.69 (1969)。
- (5) 小原章男：光源の技術予測，第4回技術予測シンポジウム予稿（1975）。
- (6) Brett, J. et al : J. Illum.Engng.Soc., 6-7, p.197 (1980)。
- (7) Bigio, L. : Proc. of 8th Int. Sym. on Sci. & Tech. of Light Source, pp.188-189 (1998)。
- (8) Waymouth, J. F. : J. Light & Vis. Env., 13-2, pp.51-68 (1989)。
- (9) 別所誠：電球，照学誌，85-1, pp.14-15 (2001)。
- (10) 斉藤毅：HID ランプ，その他，照学誌，85-1, pp.16-18 (2001)。
- (11) 石神敏彦：無電極ランプの現状と将来，照学誌，85-9, pp.764-768 (2001)。
- (12) 中村修二：電子情報通信学会誌，76-9, pp.913-917 (1993)。
- (13) 坂東ほか：第286回蛍光体同学会講演予稿，pp.17-24 (2001)。
- (14) 田口常正：白色 LED による21世紀のあかり，照学誌，85-7, pp.496-501 (2001)。

〈学会予測〉

照明学会の IT 化の予測

Predictions on Information Technology Utilization for the IEI-Japan

中 川 靖 夫

Yasuo Nakagawa

参与

1934年生。1957年東京
都立大学工学部電気工
学科卒。1965年埼玉大
学助教授。1975年同教
授。現在、同大学名誉
教授。工学博士。情報
化推進委員会委員長。

◀キーワード：IT 化，会員向けの情報発信，学会誌の電子雑誌化

今回の特集号の記事として、編集委員長から「IT 化の未来予測をするように」との注文があったのでこの記事執筆することになったが、考えてみるとこれはなかなか大変なことである。IT 化に対する予測は色々な人たちが、各種のメディアをとおしてそれぞれの立場から論じているが、楽観論、悲観論とりまぜて非常に幅の広いものとなっていて、正直なところ、どれを信じたら良いのか迷ってしまうのが現状であろう。つまり、ハードウェアとしての情報技術の刷新速度が極めて大きくて、それによって運用面がどのようになるのか見当がつけにくくなっているのではないだろうか。

問題を照明学会の中だけに絞ってこのことを考えてみても、すくなくとも筆者にはさっぱり IT 化の未来が見えてこないのである。というのは、筆者のような年代になると思考の幅がどうしても過去の経験の蓄積に制約されてしまっていて、過去の事象の延長線上から外れることができにくくなってしまっている。IT 化の速度がもし今のままで進むとすると、数年先に起こるであろうことは恐らく筆者の経験の外挿線上からはるかに離れたものになることは疑いなく思われる。しかし、ここにきて、幸か不幸か俄かに IT 不況が叫ばれるようになってきたが、その裏には案外筆者の抱いているような IT 化への畏れと漠然とした不安感があるのかも知れない。

ともあれ、ここで筆者なりに問題を照明学会の運営面に限って IT 化の予測を立ててみよう。予測がもっともしやすいのは、会員向けの情報の発信であって、回線の容量と伝送速度、メモリー容量さえ確保できれば、学会事務局で入手した情報はリアルタイムで個々の会員に届けられるようになるであろう。但しこれは「技術的には」というカッコ付の話で、この後に「回線使用料金とハードウェアの価格が現在の水準のままで」と「全ての会員が十分な性能の端末機をもてば」という但し書きが必要になる。これに対しては、携帯電話がその機能を満たすのではないかという答えが返ってくるかもしれない、実際、会費の払込や、各種の事業（研究会、講習会、見学会、助成事業など）への申し込みなどには十分対応できるであろうが、それ以上の学術情報などの伝達が携帯電話でレジャー情報を調べるようにできるであろうか。どうも筆者はそこまで楽観的になることはできない。

次に考えられること、あるいは考えなくてはならないことは、学会誌の IT 化対応であろう。つまり、学会誌の電子雑誌化である。これも技術的には学会ホームページの拡大の一環として可能なことではある。しかし、このことは「出版物とは何であるか」という理念の問題と、知的所有権に関わって生ずるであろう様々な問題を予測して解決することの決着がつかないと簡単にできること