

薄明視ブライツネスメーター

— 変化する眼の感度を考慮した輝度計の開発 —

佐川 賢¹ (SAGAWA, Ken)

旧製品科学研究所

要旨

夕暮れから夜間における薄明視と呼ばれる低照度の視環境では、青色系の標識等は明るく見え、逆に赤色系は暗くかすんで見える。こうした複雑な人間の視覚機能を組み込んで、薄明りの環境でも正しく物や光源の明るさが測れる薄明視輝度計の開発に成功した。

この研究では心理物理的手法により、光の強度によって変化する人間の明るさ感覚(分光視感効率)の様子を詳細に計測し、低照度における測光システム開発のための基盤データを確立するとともに、その分析から光強度レベルによって動的に変化する人間の感度を組み込んだ薄明視ブライツネスメーター(薄明視輝度計)を開発した。これにより、従来の輝度計では計測できなかった薄明視における光源や物の視覚的明るさ感を正しく計測できるようになり、夜間でも見やすい道路標識や安全で快適な作業場の設計などの基盤技術を確立することができた。

1. 目の分光視感効率と明るさの計量

私たちが光を見ると、まず感じることは明るさと色である。例えば、100W の青の LED ランプと 100W の緑の LED ランプがあるとしたら、どちらが明るいであろうか？ 物理的にはともに 100W である。つまり、同じ光エネルギー。しかし、眼にとっては緑の LED ランプの方が、はるかに明るく見える。同じエネルギーでも、受け取る人間の目には色によって明るさ感が大きく異なるのである。では、赤の LED ランプはどうか、あるいは緑と赤を混合した場合のランプの明るさはどうか。などなど、もっと複雑な成分を持つ光源も含めて、明るさに関する疑問がいろいろと出てくる。人間にとっての明るさ感があらかじめ予測できれば、新しいランプの開発、安全な道路照明、快適な生活環境の設計、見やすい視覚表示、使いやすいコンピュータや携帯電話などディスプレイなどが適切に評価したり設計できる。光があるところ、必ずこの明るさの問題が付いてまわるのである。

人間の目は可視域と呼ばれる波長 380nm～780nm の電磁波を光、すなわち色や明るさ、という感覚で受け取る。この可視域の光は短波長から紫、青、青緑、緑、黄緑、黄、橙、赤と、いわゆる

¹ 現在 日本女子大非常勤講師, 産総研名誉リサーチャー

虹の色に対応し、波長の違いは色の違いとして感じ取る。ちなみに、可視域より波長が短い紫外領域(10nm~380nm)や波長が長い赤外領域(780nm~1mm)はもはや人間の目では感じることができない。紫外線は皮膚の日焼け、赤外線は温感として感じるのみである。テレビや携帯などの電波、X線、放射線、なども、光と同じ電磁波の仲間であるが、これらの波長領域は全く目で見ることができない。

さて、この可視域のすべての波長領域の電磁波に対して、人間の目が一定の応答を示すかという、実はそうではない。図1の白丸(○)のデータが代表的かつ平均的な人間の目の感度曲線である。可視域のほぼ中間の 555nm を最高感度として、短波長側や長波長側に行くにつれて感度が低下するという釣鐘状の曲線を持つ感度特性となっている。前述の緑の LED が、仮に 500~600nm の波長に多くの成分を持つ光、他方の青の LED は 400~500nm の波長に成分を持つ光、とすれば明らかに緑の LED のほうが人間の目の感度の高いところに成分が集中しているので、緑の LED が明るく見えるのである。

実際、光源や物の明るさというものは、自発光にせよ反射光にせよ、表面から発せられる何らかの電磁波が目が受け取り、その成分が可視域の波長領域にどのように分布しているかによって、その明るさが決まる。実際に発せられる電磁波の波長成分、これを分光分布と呼んでいるが、これと人間の目の感度、専門的には分光視感効率と呼ぶが、これらを掛け合わせて、その総合的な量として明るさが決定されるのである。

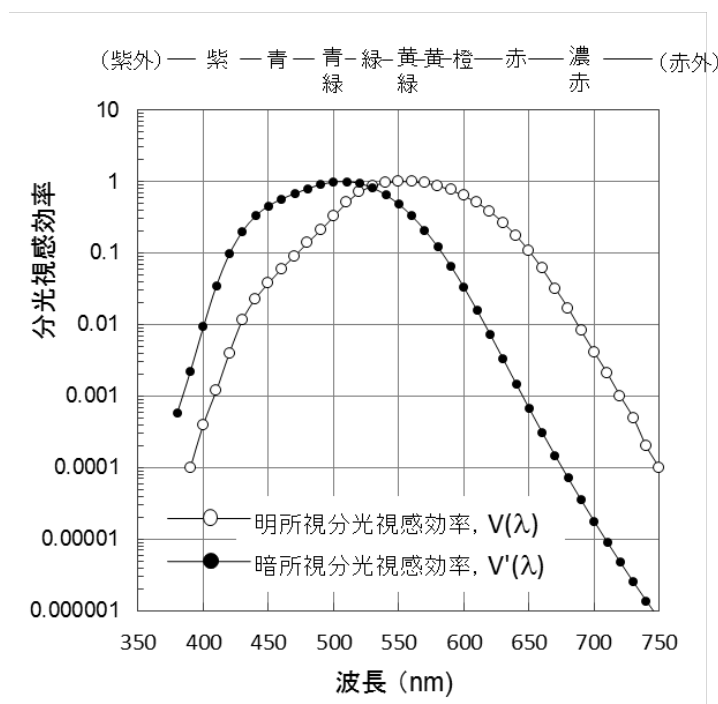


図1 明所視の分光視感効率 $V(\lambda)$ と暗所視の分光視感効率 $V'(\lambda)$

光源や物体の明るさを知ること、前述した例を見ても分かる通り、大切である。信号や標識は安全上、十分明るく見えなければならない。青の LED は前から存在していたが暗かった。その後実用的な青の LED が開発されたが、これは“人間の目にとって十分明るいものができた”ということの意味する。ここで一番大切なものは人間の目の感

度、すなわち分光視感効率である。これを正しく知ることができれば、物の明るさが正しく計測でき、予測もできる。しかしながら、分光視感効率は生きた人間の目の特性であるため、それを正確に知るにはそう簡単ではない。物理的な計測に比べて、人間特性の計測は精度や範囲に限界がある。さらに厄介なことには、測り方によっては分光視感効率の値が異なり、その結果、同じものでありながら予測する明るさが異なってしまう、という不都合や不便が生ずることになる。

そこで、国際照明委員会 (Commission Internationale de l'Éclairage, 略して CIE) は物の明るさの計量を世界共通で行うため、人間の目の感度特性を正確に測り、個人差を平均化し、標準的な分光視感効率曲線を決めた。また、それを用いて光源や物体の明るさを予測することを推奨した。この分光視感効率は Vision の V を取って $V(\lambda)$ 関数と名付けられた。1924 年というおよそ 100 年も前のことであった。図 1 の白丸 (○) の曲線がその $V(\lambda)$ 関数である。当時はガス灯や白熱灯が私たちの生活の主な光源として用いられており、その光源の明るさや照らされた物の明るさを正しく知ることは重要であった。その手掛かりとして、この $V(\lambda)$ は世界中の照明業界、環境設計、さらに新しい光源の開発、等の様々な分野で盛んに用いられた。もちろん現代でも、照度計や輝度計などの光計測、および建築や照明における視環境設計などの分野で、もっとも重要な基盤技術として用いられている。

ちなみに、この $V(\lambda)$ のもとになったデータは 100 名ぐらいの心理実験による平均的結果である。ここに日本人の 10 数名の実験データも提供されていた。20 世紀初頭としては、貴重な国際貢献とすることができよう。

2. 夜間の明るさの計量の難しさ: プルキンエ現象

国際照明委員会は、前述したように、今から約 100 年前の 1924 年に標準的な人間の目の感度、分光視感効率関数 $V(\lambda)$ を制定して、明るさの計算や計測に用いるように推奨し、照明工学の発展に寄与した。しかし、人間の目はこれで一見落着くほど単純ではなかった。最大の問題は、暗くなると人間の目はもはや $V(\lambda)$ で定義されたような感度特性ではなかったのである。

ここで少し目の話をしたい。人間の目の網膜には、錐体細胞と桿体細胞と呼ばれる 2 種類の視細胞がびっしりと張り付いていて、光が網膜に当たるとその視細胞が光を電気的信号に変えて大脳に送り、視覚を生ずる。ここで錐体と桿体という 2 種類の視細胞がある理由は、明暗の役割を分担して、非常に広い明るさの範囲に対して目が適切に対応できるためである。昼間の明るいところでは錐体細胞が、夜間の暗いところでは桿体細胞が、それぞれ光を受け取り視覚を生ずるしくみになっている。この分業のおかげで、私たちは真夏の太陽の下から星明りまでの非常に広い範囲を一つの目で見ることができるのである。どんな物理的な受光素子でも、とてもこの広い範囲を一つの素子ではカバーできない。人間の目の素晴らしさがここにある。先に言ってしまうが、

実は目の分光視感効率というのは基本的には視細胞が決めている。前述した $V(\lambda)$ というのは実は昼間の目の感度、すなわち錐体細胞の分光感度であった。

さて、夜間に働く桿体も錐体も共に同じ分光感度を持つ視細胞であれば何も問題は起きなかった。しかし、残念ながら、人間の目はそのようにはできていなかった。先に示した図1の黒丸(●)のデータを見てみよう。これが人間の目の最も暗いところで働く時の分光感度。すなわち桿体細胞の分光感度である。この感度曲線は、錐体のものに似ているものの、感度曲線全体が約 50nm 短波長側に移動している。50nm というのは、かなりの違いである。色で言えば、黄緑が青に、橙は緑に変化する。この分光感度の違いによって、同じ物の明るさでも昼と夜ではその相対的な関係が大きく異なるという現象が起きてしまった。すなわち、錐体という昼間の目の感度を用いた明るさの計量・評価は、夜間の目の感度(桿体細胞の感度)ではもはや役に立たなかった。

この現象そのものは、近代の明るさの計測技術が開発・進展する前から知られていた。何事も先駆者はいるものである。最初に発見した人は 19 世紀のチェコスロバキアのプルキンエ氏という生理学者。彼は、昼間同じように明るく咲いていた赤い花と青い花が、夕暮れになって青い花が浮き出るように明るく見え、赤い花は暗闇に溶け込むように見えにくくなることを発見した。どちらも花も昼夜の違いはあれ、同じ光が当たっている。にもかかわらず、全体が暗くなると赤い花だけが暗くなり青い花が明るく見えた。この不思議な現象は、発見した人の名を取って、プルキンエ現象と呼ばれるようになった。

3. 薄明視測光システムという課題

光源や物体の明るさを計測したり評価する技術を測光技術、Photometry、と呼ぶ。この技術の大切さはすでに述べた。光のあるところ、必ず明るさが問題となり、その計量が必要になる。安全で良好な見え方を保つための光の量や質の評価に、測光技術は大きな役割を担う。標準分光視感効率関数 $V(\lambda)$ はその最も基盤となる目の感度であった。ただし、残念なことに“明るいところでのみ有効”であった。

国際照明委員会 CIE は、もちろん暗所における目の感度変化に気づいており、暗いところでも $V(\lambda)$ に対応する目の感度を求めようとした。実際 CIE は 1951 年に英国のデータを基に暗いところの人間の目の分光視感効率関数を決定した。名前は V にダッシュを付け $V'(\lambda)$ と名付けた。この関数は 507nm に最大感度を有するもので、前述した $V(\lambda)$ がおよそ 50nm 短波長側にシフトしたような形をしている(図 1 の黒丸データ参照)。ただし、人間の目がこの $V'(\lambda)$ の特性を示すようになるには、非常に暗い、見える極限まで行かなければならない。現実的には、星明りのような環境である。蛍の光で勉強するというのはあくまで誇張した話であって、このような暗い環境では人間は作業や勉強などしない。つまり明るさを計測する必要もない。結局 $V'(\lambda)$ は決めたものの、あまり

利用されなかった。

問題は桿体と錐体がともに働く薄明視 (mesopic vision) という領域である。照度で言えば 0.01 lx ~ 10 lx 当たりの薄暗い環境である。目は、10 lx を超えるとほぼ錐体が 100% 働き、0.01 lx 以下ではほぼ桿体細胞が 100% 働く。つまり、10 lx 以上では $V(\lambda)$ で、0.01 lx 以下では $V'(\lambda)$ で、光源や物の明るさが正確に計測・評価できる。しかし、この中間の 0.01 ~ 10 lx では $V(\lambda)$ でもなく、 $V'(\lambda)$ でもなく、なおかつ分光視感効率はレベルとともに連続的かつ複雑な変化をする。分光視感効率が一定していれば、光を計測するのは簡単であるが、あらかじめ分からない、あるいは、決められない視感効率で光を計測するのは、かなり面倒である。もしやろうとすれば、ある視感効率を想定して物の明るさを計算し、その結果が、先に想定した視感効率のレベルと合えば合理的であるが、もし違っていたらまた異なる設定をして、これを合うまで繰り返し、繰り返し計算をする。最後は正しい値に収束するかも知れない。しかし、何よりも目の中でこのような計算が行われているとは考えにくい。本質的な問題は、薄明視レベルで目が明るさ感覚を(生理的に)どのように生じているか、桿体と錐体がどのように寄与して明るさ感覚を生んでいるか？これを探るのが最も重要な課題であった。すなわち、人間の視覚モデルの研究である。

4. 薄明視分光視感効率の計測から研究スタート

薄明視の視覚モデルの研究とそれに基づく測光システムの開発が光と照明の国際機関である国際照明委員 (CIE) の中でスタートしたのは 1960 年ごろ。桿体細胞や錐体細胞の感度差やレベルによってお互いに入れ替わっていく過程を、多くの研究者がさまざまな実験で捕らえ、それらの結果を踏まえた視覚モデルの研究開発が、この時代盛んに繰り返し広げられ、論文も多く発表された。

筆者らがこの薄明視の研究にチャレンジしたのは 1979 年のつくば移転後の間もないころ。もちろん CIE ではかなりの後発部隊である。ちょうど、名称は正しく覚えていないが、「人間工学に関する標準化研究」という工技院標準部のプロジェクトがあり、これ幸いにこのプロジェクトに飛び乗った。1960 年ごろ一時期盛んであった CIE の薄明視の研究も、その後目立った成果は出ず、薄明視測光の研究は世界的にやや壁に突き当たった感じであった。

筆者らはこうした状況を踏まえて、まず最も地味なところから研究に取り掛かった。薄明視の明るさ感の実態を捕らえるべく、分光視感効率のデータベースの確立に取り掛かった¹⁾。薄明視研究のインフラ整備のようなものである。今更ながらという感じであるが、しかし、当時薄明視の分光視感効率は米国で取られた数名、あるいはドイツで計測された数名、しかも明るさのレベルや波長サンプルもかなり粗いものであった。理由は計測の難しさと労力の大変さ。通常の分光視感効率の計測でもかなり神経を使う精密な計測が要求されるものであるのに、薄明視の視感効率計

測は、様々なレベルで微妙に変化する感度変化を捕らえなければならない。膨大なデータになるので、誰も好んで計測しようとしなかった。しかも、桿体と錐体が入り交じるので、通常用いられるフリッカー法というのは桿体と錐体の時間特性の違いで利用できない。利用しても計測は安定しない。真の薄明視の感度変化の様子が曖昧なまま、研究が進んできた。これでは、視覚モデルも測光システムも目標のないゴールに向かって進むようなもの。そこで、筆者らは、まず薄明視研究の基盤作りとして、変化する薄明視の分光視感効率のデータベースに取り組んだ。

人間の分光視感効率の計測は、まず精密な光学装置を組み立て、光源から取り出した光をモノクロメータという分光器にかけ任意の波長の光を取り出す。これをレンズ系で人間の瞳孔上に直径 2 mm 以下に絞って入射する。瞳孔は約 2~8 mm 径の範囲で変化するので、2 mm 以下に焦点を絞って目に入射すれば、瞳孔がいくら変動してもテスト光は端が欠けることなく、常に一定の光量が目に入る。もちろん頭は動かさないように固定する。その固定方法は、その人の歯形を作って装置にがっちり固定し、その観測者がそれを噛んで頭部を固定するというもの。従って、実験まえに必ず歯型を作る。やりたくないという観測者もたくさんいた。光学系の途中には光量変化の装置が遠隔で動くようにしてあり、観測者は見ながら、かつ歯形を噛みながら、テスト光の明るさを調整する。一方、固定した明るさの参照光も作って、これも同時に見させる。テスト光の明るさを参照光と見比べながら同じ明るさに合わせるという調整作業(明るさマッチング)を何回も繰り返す。テスト光は 400~700nm の可視域全域に及ぶので、波長を変えながら同じ計測を何回も、何回も繰り返し測定する。歯型はほぼ噛みっぱなし。被験者もたいへんな作業である。

一本の分光視感効率曲線を描くのに実質 1 時間は優にかかる。準備や疲労も考えると、一日 2~3 本の分光視感効率曲線を計測するのが、やっとである。薄明視は明るい明所視から極限の暗所視まで 9 レベル計測することにした。一つのレベルの計測は順序を変えた計測を最低限 2 本計測し、平均化する。事前の練習も必要である。観測者との日程も調整しながら、一人の被験者の 9 レベル全ての分光視感効率を取り終えるのに、約 1 か月かかった。測定はすべて筆者が 1 対 1 で観測者と立ち会い、ほぼ毎日暗い実験室に閉じこもる。今思うと本当に大変な仕事であるが、すべてのデータに責任を負うためには、常時立ち会わなければならない。何が起こるかわからない人間の計測では、止むを得ないことであった。

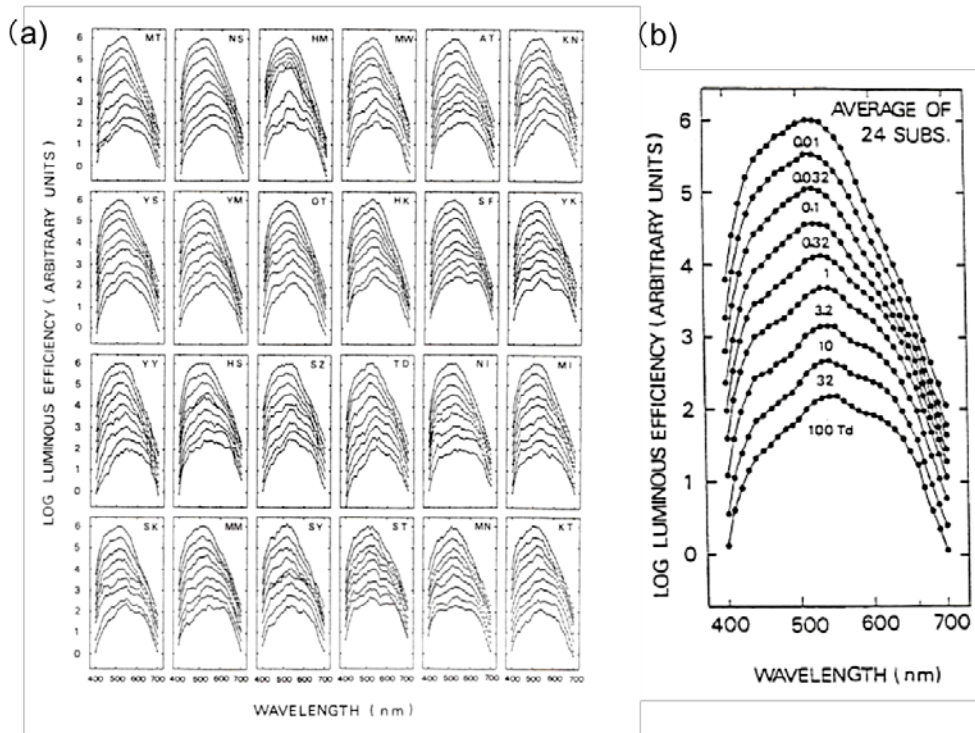


図2(a),(b) 薄明視における分光視感効率(直接比較法)。(a)は24名の被験者の個別データ。(b)は各レベルの平均値。

こうして、一人およそ1ヵ月かかる測定を、総勢24名のデータをすべて取り終えた時は丸2年が経過していた。図2はそのデータである。(a)は24名の個人データ、(b)は各レベルの平均値である。各グラフとも、一番下の曲線は明所視の視感効率、グラフが上に行くほど暗いレベルとなり一番上はほぼ暗所視の視感効率である。測定レベルが暗くなるにつれ、感度曲線のピークが徐々に短波長側の青の方にシフトしていくのが良く分かる。

全体で24名という数字に大きな意味はない。他の追随や追試をはるかに超えるレベルを目指した。当時は、若輩の研究者ゆえに雑用も少なく、殆どの時間をこうしたコツコツとした計測に費やすことができた。今思うと、信じられないほどの幸せな研究環境であった。しかし、一方で、データだけをひたすら集めるという、あまり創造的とは言えない仕事に、周りからの批判も少なくなかった。しかも、データの提出先は国際照明委員会という標準機関である。今でこそ国際標準と言うと響きは良いが、当時は標準とは研究や計測の結果を寄せ集めては平均化するだけで、何の面白みもない分野とされていた。時には“研究の掃きだめ”と言われたこともある。周囲に目を向ければ華々しい新領域があるのに「なぜこんな地味な研究にこだわるのか」、と研究ヒヤリングの席で所幹部から注意とも指導ともつかない批判を受けたこともある。もちろん気にはしなかった。若気の

至りで、終始マイペースでやらせていただいた。

国際照明員会は、私のこの地味な仕事を高く評価してくれた。1983年アムステルダム大会で4年に一度のCIE総会及び研究発表会が開かれ、その時は12名の薄明視分光視感効率データを取りまとめて発表に行った²⁾³⁾。できれば24名の全体のデータを報告したかったが、その時は計測途上で12名の間接報告でも、早ければ良しとした。次の4年後よりはましである。案の定、発表は大成功であった。データの多さ、精密さ、質の高さに、会場の人たちがたいへん驚いたのを今でも覚えている。事前に新聞にも情報を流しておいてところ、地味な話題でも掲載してくれた。照明学会から研究奨励賞というのもいただいた。

裏話であるが、実はこの24名のデータはとてその量、質とも今後破られることのないデータと思われた。しかし、上には上がいるものである。3年後に中国の計量科学研究院の朴大植さんという研究者が全く同じ装置、同じ手法、同じ精度で26名のデータを集めた。しかし、これを仕掛けたのは筆者である。薄明視研究が中国でも関心が高まり、筆者の恩師を通じて薄明視の研究を共同でしたいとの申し出があった。そこで北京に出かけて行って、装置の組み立てや測定法などを一緒に検討し、中国でもデータベースを作成したらどうかと持ち掛けた。すると、アツと言う間に26名のデータが出揃ったというわけである。10億を超える民のいる中国ならではのパワーを見せつけられた。幸い、日本と中国のデータは全く同じだったので、良い確認ができた。

5. 薄明視の測光システム開発競争とCIEの委員会活動

分光視感効率データベースを構築しただけでは問題は解決していない。データは始まりである。このデータから薄明視における明るさ感覚がどのように決定されるのかという視覚モデルの検討、さらにそれに基づいた薄明視測光システムの開発をすることが問題の核心である。すでに、データ取集中にもあれこれと思いをめぐらしていたものであるが、データの終わりが見えてきたころからようやく具体的に分析や計算、さらにモデルづくりの方向へと研究はシフトして行った。今で言うビッグデータほどではないが、大量データというものは、いろいろな知見が含まれている。宝の山である。平均値だけではなく、個人データの分散や相関まで踏み込むと、そのばらつきからいろいろなものが見えてくる。種々の分類やタイプ分けなど、その中から生理的な機構が見えてくる。自分のデータなので、個人データの詳細もすべて揃っているし、裏も表も一部始終知り尽くしている。この点は、他の研究者にはない利点であった。

たとえば、こんな分析もあった。錐体細胞は薄明視の一番暗い、ほぼ暗所視に近いところでは働かないと思いがちであるが、実はそうではなかった。長波長の赤い光は、いくら暗くても中心視で見ると錐体が働いていることが分かった。これは、薄明視全レベルのデータを一括して主成分分析にかけてみて分かったことである。最も明るいレベルの錐体成分と最も暗いレベルの長波

長側が同じ成分、すなわち錐体の特性を示すばらつきを示したのである。薄明視の全レベルを同じ計測法で、かつ同じ測定条件で捕らえた、という利点が生かされた分析であった。この他にも、データを分析すると様々な知見が得られ、それを土台にして薄明視のモデルづくりが進行して行った。

さて、このころ、一時下火であった薄明視の研究も、世界中で盛んに行われるようになってきた。1980年以降である。CIEにおける薄明視測光システムの研究は第2フェーズに入った。ちょうど筆者がデータを取り終え、それに基づく薄明視測光システムの開発に向けて研究を加速させた時である。日本は其中でリーダー的な役割を果たす。筆者以外に、筆者の恩師がいる東京工業大学や千葉大学などで研究が進み、国内では勿論、海外でもCIEの大会や学会などで盛んに研究成果を発表し合った。ライバルは、英国やドイツなどの欧州勢、さらに米国では空軍関係の研究所で薄明視の研究が進行していた。これらの研究成果はすべてCIEに集結され、専門家で構成される技術委員会という場でお互いの測光システムの利点や問題点を議論した。ゴールは一つ、どの提案がCIEの薄明視測光システムとして採用されるかである。自分のシステムの長所を強調し、他のシステムの問題点を指摘する。そんな議論が続いた。もちろん、一筋縄では行かない。特に英国と日本は最初から考え方が合わず、議論はいつも平行線。ここにドイツが加わって事態はさらに複雑になって行った。もちろん一度CIEが決めたら、今のV(λ)のように100年近くは続くだろうと考えると、多少のことでは譲るわけにはいかない。悔いのないように、下手な英語でも議論のバトルが毎回繰り返された。

ここで委員会の経緯を振り返ってみたい。いろいろと思い出がある。CIEの薄明視測光システム委員会は、1983年と1987年、1992年の3回に渡って委員会が設立された。通常1課題は4年間ぐらいで決着がつくのであるが、薄明視測光システムは異例中の異例。一回では決着がつかず再三の委員会設立となった。この問題がCIEとしていかに重要であり、難しい課題であるかが良く分かる。特に、1987年の委員会設立は、最良の測光システムを”決める”のではなく、単に提案された複数のシステムを”テストする”だけ。つまりどのシステムが一番良いかは決めないが評価だけはしよう、というもの。最初から釘を刺されたような状態の委員会である。この委員会の委員長は筆者が選任された。むしろ委員長が筆者であったから、「勝手にきめるな」と釘をさすような制限が持ち込まれたのかも知れない。提案者の一人が委員長を引き受けるのは公平ではない、という見方である。それでも英国は私の委員長就任に強く反対した。しかし結局は多数決。背景にデータを持つ強みがここでも発揮され、筆者がこの第2弾の委員会を引き受けることになった。しかし、この「評価」委員会も毎回紛糾。テストする方法によって評価ランキングが異なるからである。どれが良いかはなかなか一概に言い切れない。データも筆者のもの以外に、少ないながらもいくつかあるので、それらも使って公平に行っても結果はばらつき、公表に困った。もっと困ったこともある。議論が白熱し、英国の研究者があまり早口でまくし立てるので、”speak more slowly, please”

と言ったら、さらに機関銃のような早口でしゃべり出したのである。これには筆者も、驚き、あきれた。委員会の他のメンバーもあきれ顔。これを機に、筆者の中に多少なりともあった外国人に対する尊敬やコンプレックスは完全に消えていった。期せずして、対等の土俵に立てた。

6. 薄明視ブライツネスメーターの開発

薄明視の測光システム作りは、研究としては最も重要な部分で、いろいろな知恵を絞り工夫も凝らすので面白いのではあるが、前述したように、なかなかどれが優れているかの評価が、定性的にも定量的にも難しい。分野の異なる人々にとっては細かい話になるので、詳細は割愛するが、とにかく、世界中の測光に関係する人々がいろいろな知恵を絞って工夫してみても、CIE として推奨できる一つの優れたシステムはなかなか出てこなかった。逆に言えば、どの提案システムも優れており、似たり寄ったりというところ。



図3 薄明視ブライツネスメーター。左は計測部と表示部、右は持ち運びながら計測する様子。

そこで、筆者がこうした閉塞感を打開するため考えたことは、実際に測光システムを実現する計測器を作ってしまうことだった。つまり、先行して薄明視輝度計を作って、実際に薄明視という薄暗い状況での視覚的な明るさを計測して見せること。これが、自分のシステムの良さを示す手取り早い方法と思った。これが薄明視ブライツネスメーターの開発であった。

薄明視の測光システムのモデル構成はすでに出来上がっていた。概要は、錐体の反応と桿体の反応に加えて、色の反応を導入するというモデル。ここで錐体、桿体の反応に加えて、色の反応を別途加えるというのが、他のシステムにはない特徴であった⁴⁾。そのため、色の計測システムを持たなくてはならない。つまり、人間の目に3種の錐体細胞があるが、これを模擬した受光素子を持つ必要がある。さらに、当然のことながら桿体の応答を示す受光素子も必要である。つまり人間の目と同様に4つの受光素子を持つシステムである。これらを分光ではなく、光学フィルターで実現した。実は、この開発は筆者ではとてもできない。ハードウェア的に難しい技術であるので、当時照明技術で日本の先端を走っていた松下電器株式会社の照明研究所と共同で開発して初めて実現できた。特に、暗いところで色の情報を正しく計測することは難しい。光が弱いので分光してはなおさら計測できない。光学フィルターで計測しても、受光部として高感度の光電子増倍管 (photomultiplier) を用いないと計測できない微弱な光であった。しかし、試行錯誤しながらも、何とか完成させることができた。もちろん、世界で初の具体的な薄明視輝度計であった。名前は「薄明視ブライトネスメーター」と名付けた。新聞や、様々な広報誌にその成果を発表し、技術展示会などで実際にデモンストレーションを行った。開発後は大忙しであった。その成果があって1989年には、科学技術庁長官賞(研究功績者表彰)という名誉な賞もいただくことができた。

開発後まもなく、1991年オーストラリアのメルボルンでCIEの本大会があった。薄明視の委員会は引き続き、CIEとしてどの提案が良いかを検討していた。ここで開発したブライトネスメーターを



図4 CIEメルボルン大会で公開した薄明視ブライトネスメーターのデモ風景

持ち込んでデモンストレーションを行った。図4はその風景である。左側に筆者がテスト色票持っ

て、写真中央のブライトネスメーターで計測し、人間の目の感覚と対応が付くことを数値で示した。委員会のメンバーは具現化された測光器を見て、皆驚いた。世界で最初の薄明視輝度計であった。

7. 現状と今後

薄明視の測光システムの開発は今も続いている。筆者は、結局 2011 年まで CIE の委員会や理事等として活動した。薄明視ブライトネスメーターの具体的開発は確かにインパクトがあったが、残念ながら決定打ではなかった。その後もより良いシステムを求めて検討は続けられ、その結論は最終的に2つのレポートにまとめられた。一つはテスト結果をまとめた技術報告書と⁵⁾、もう一つはいくつかのシステムの良いところを取り入れて再構築した CIE 補助測光システム(推奨システム)をまとめたものである⁶⁾⁷⁾。後者は 2011 年の筆者が CIE を引退する直前に何とかまとめることができた。名前は補助測光システムとなっているが、薄明視の明るさ感を計測するシステムのこと。基本は薄明視ブライトネスメーターで、後に導入した変更点を加えた新システムである。変更のポイントは計量の単位として“等価輝度(equivalent luminance)”という概念を設けたこと。単位は計量として重要で避けて通れない問題であるが、やや難しくなったという批判もある。使いやすさや理解しやすさの点から、ベストなシステムかどうかかわからないが、とにかく私が CIE を去る前にまとめることができた点は幸いであり、悔いはなかった。

しかし、CIE としてはこれで終わらないのが薄明視の呪縛。2000 年ごろから、スウェーデンを中心にした欧州勢が従来のグループに反抗するかのように新たなグループを作って、もっと簡単な薄明視の測光システムを求めて動き出した。道路照明などの実際に携わる人が主であるが、視覚の研究者もいる。実用的な薄明視測光システムを目指すというのであるが、あまり単純化しているので実際の明るさ感との一致は良くない。こちらのグループも CIE のレポートを出したので、結局、薄明視測光システムに関しては CIE として2つのレポートが出ている。ユーザーは2つのシステムを使い分けなければならない。新グループの活動は今も続いているが、世代が代わったので、今後どうなるか、私にはわからない。CIE として正しい方向に進むかが懸念される。

最後にもう一つだけ言及しておきたいことがある。これは照明学会誌に 2013 年に寄稿した「今日の課題」という一節で、測光の単位系に関する問題である。国際的に認められた SI の 7 つの基本単位のうち光度(cd)だけが人間の感覚(視覚)に関わる単位であることは良く知られている。その意味で光度は SI の特異な単位である。物理量の世界の中で、唯一人間の感覚特性、すなわち明所視分光視感効率 $V(\lambda)$ 、による補正やそのための単位系が導入されている。 $V(\lambda)$ に続いて暗所視の分光視感効率 $V'(\lambda)$ が決められた時に、測光の単位系の問題(明所視輝度と暗所視輝度の違い)をもっと深く議論すべきであった。しかし、幸か不幸か、暗所視輝度はあまり用いられな

ったので、問題にならなかった。ところが薄明視の測光システムが実用に供されるようになると、2つあるいは2つ以上の分光視感効率の補正による測光単位系が混在し、これが混乱を来す懸念がある。これは光の計量分野では今までなかった事態である。人間の感覚という相対的に決められたものと、その補正を基に生まれたカンデラという物理量の定義やその使い方は、光計量における新しい問題を投げかけている。薄明視は、こうした計量上の新しい問題も含む複雑な問題である。まさに、国立研究所でじっくりと取り組む課題と言えよう。

8. 参考文献

- 1) Ken Sagawa and Keishiro Takeichi: Spectral luminous efficiency functions for a ten-degree field in the mesopic range. *Journal of light and Visual Environment*, 7(1), 1983, 37-44
- 2) Ken Sagawa and Keishiro Takeichi: Spectral luminous efficiency functions in the mesopic range. *Journal of Optical Society of America*, A3(1), 1986, 71-75
- 3) Ken Sagawa and Keishiro Takeichi: Mesopic spectral luminous efficiency functions: Final experimental report. *Journal of light and Visual Environment*, 11(1), 1987, 22-29
- 4) Ken Sagawa and Keishiro Takeichi: System of mesopic photometry for evaluating lights in terms of comparative brightness relationships. *Journal of Optical Society of America*, A9(8), 1992, 1240-1246.
- 5) CIE TC1-21: *Testing of supplementary systems of photometry*, CIE 141:2001
- 6) Ken Sagawa: Toward a CIE supplementary system of photometry: brightness at any level including mesopic vision. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 26(3), 2006, 240-245.
- 7) CIE TC1-37: *Supplementary system of photometry*, CIE 200:2011.

関連プレス発表

朝日新聞 1984年2月18日 「いたずら好き赤い光。薄暮の見えにくさ—色彩別に解明—」

日経産業新聞 1984年5月15日 「人間と機械—共感時代 安全を保つ⑥ 夕暮れ時には危険「赤」くすむ」

日本工業新聞 1986年5月2日 「薄明視ブライトネスメーター —製科研が共同開発—7月から東工大、松下と」

読売新聞 1987年7月24日(夕刊) 「夕暮れ 目にかすむ赤信号 赤色系感度 1/10に低下」

日本経済新聞 1988年(日付不明) 「薄明りでも正確に測定—工技院と松下—新型の輝度計」

日刊工業新聞 1988年3月31日 「人間並みの視覚機能持つ—光計測装置 工技院製科研と松下—黄昏時には青色光を補正」

日本工業新聞 1988年3月31日 「明るさ感を計測—工技院製科研 世界初の薄明視輝度計—松下電器と共同」

いばらき新聞 1988年3月31日「人間の目に近い輝度計—工技院が開発」

電波新聞 1988年4月9日「新しい光計測装置—工技院製品科学研と松下が共同開発—黄昏時の明るさ感を計測」

日経産業新聞 1988年4月11日「先端技術—夕暮れでも感度、人間と同じ—薄明視輝度計を開発—信号機や標識検査に効果 松下と工技院」

謝辞

本研究開発は多くの方々の多大な協力の上に成り立った。とりわけ、松下電器産業株式会社照明研究所の成定康平所長には絶大な協力と支持をいただいた。また実際にブライトネスメータの開発に携わっていただいた同研究所の堀井滋氏、武内徹二氏、宮前あつ子氏、大崎正晴氏には、それぞれ専門分野の立場から協力をいただいた。心から感謝の意を表したい。また、常に適切な助言とCIEへの道を開いてくれた筆者の恩師、池田光男元東工大教授にも、心から感謝の意を表したい。最後に、本研究の製科研における共同研究者、故武市啓司郎氏に、篤く感謝したい。

略歴

佐川 賢 Sagawa, Ken

1975年東京工業大学大学院修士課程卒。同年通産省工業技術院製品科学研究所入所。1982年工学博士(東京工業大学)。1984~1985年オランダアイントホーヘン工科大学付属知覚研究所客員研究員。1995年同省生命工学工業技術研究所研究室長。2001年独立行政法人産業技術総合研究所、人間福祉医工学研究部門、感覚知覚研究グループ長。2007年同所上席研究員。2010年日本女子大学家政学部特任教授。2012年産業技術総合研究所名誉リサーチャー。2014年同大学非常勤講師及び産業技術総合研究所客員研究員、現在に至る。

国際照明委員(CIE)第1部会部会長, 同副会長, 同幹事, CIE TC1-21, 1-37, 1-54 各委員長, 日本照明委員会会長, ISO/TC159/AGAD コンビーナ, ISO/COPOLCO JISC 代表, 高齢者・障害者支援専門委員会委員, 消費者政策特別委員会委員長, を歴任。現在, ISO/TC159/WG2(2003-), ISO/TC122/WG9(2008-)の各コンビーナ。

1984年照明学会研究奨励賞, 1989年科学技術庁長官賞, 2005年工業標準化経済産業大臣賞, 2011年照明学会功労賞, 2015年家政学部賞, 2015年日本照明委員会名誉会員。

w#. ¥>8>0>.>/>5 °>/>. v>0>3 ¥