

光学教育の現状と課題

木 下 紀 正

(1984年10月15日受理)

Reformations in Educational Optics

Kisei KINOSHITA

I. はじめに

緑色植物の光合成や動物の視覚など、光は自然界で重要な役割を演じると共に、我々の日常生活や科学の諸領域はもとより、芸術・技術にも深い関わりを持っている。このように実に身近な光は、波長の非常に短い電磁波の一種でありながら、その放出と吸収では光子というエネルギーの粒として振舞うという奥深い理解を必要とする。その為、光学教育の体系化は大きな困難と混乱のまま現在に至っている。

特に、現在の小学校から大学に到る学校教育では、1970年代に支配的となった「科学教育の現代化」という流れの中で、光学教育は大きな構造的欠陥を持ったものになっている。このような現状の分析と、これまでになされている議論を踏まえて、学ぶに値し教えるに値する光の科学の内容とは何かを明らかにする事が本稿の目的である。

以下の各節で、次の様に議論を進める。

- I. 光の科学——議論の前提として光の現象と本質を要約する。
- II. 光学教育の現状——各学校段階での現状とその背景を検討する。
- III. 光学の教育的問題——科学としての光学を教育として展開していく上での固有の問題を分析する。
- IV. 改革案の検討——光に関する教育内容の各学校段階での組立てを検討する。
- V. 要約——本稿の結論としての主張を要約する。

最後に、教育学部での講義プランを付1に、実験についてのコメント等を付2に記す。

II. 光の科学

光の現象とその本質について、人間次元での現象の理解(A)、光の波動論と電磁波論及び相対性理論(B)、量子物理学での光子像(C)、素粒子としての光子(D)に分けて整理しよう。

A. 人間次元での光

1. 光線。一様な媒質中での光の直進性と鏡面反射の性質は、古代から広く経験的に認識され、青銅鏡の製作などなされた。レンズは、異なる媒質の境界面での光の屈折を利用したものであり、その組合せを用いて顕微鏡などいろんな光学器械がある。光を光線の束として扱う幾何光学では、光の直

進性・反射の法則・屈折の法則を原理として光の進路を検討する。その中で、レンズと鏡の働きは結像公式にまとめて統一的に理解される。光を受けた物体による乱反射の認識は、視覚を理解する為に欠かせない。

2. 色。日光のような白色光がさまざまな色光の重ね合せである事は、プリズムによる分光で解る。発光していない物体の色は、受けた光を選択吸収した残りによる。

3. 発光。太陽・火炎・白熱電灯など高温物体は、その温度による連続的な色の重ね合せの光を出す(温度放射)。稲妻や水銀灯は放電発光で、原子の種類による輝線スペクトルを示す。蛍光灯とTVのブラウン管では、紫外線や電子線で刺激された蛍光物質が発光する。夜光虫や螢など、化学変化による生物発光もある。

4. 吸光の効果。温度が上がるだけでなく、光合成やフィルムの感光などの光化学反応・視覚や太陽電池などでの光電反応も起こる。

人間次元での光の現象を全体的に見ると、光の進み方と色という光そのものの性質については、現象論としてのまとまった理解ができ、それに基づいた広い応用技術もある。他方、発光や吸光など物質と光の相互作用の現象は多様であり、その整理と立ち入った理解は、Cに述べる量子論の考え方と関係せざるを得ない。

B. 波としての光

古代から光の矢という描像があったが、ニュートン等は光線の性質を非常に高速の物質粒子の運動として力学的に理解しようとした。光の粒子説に対しホイゲンス等の波動説は、光線の性質だけでなく、薄膜の色づきなどの干渉現象や回折・偏光・複屈折などを、光が横波であるとして明快に説明する。水中の光速測定の結果、光の物質粒子説は完全に破綻した。

さらに、目に見える光は、波長千分の1ミリより短かな電磁波である事が、古典電磁気学の確立と共に解ってきた。電波や光などの電磁波を伝える媒質と考えられた宇宙空間を満たすエーテルは、特殊相対論によって否定された。真空中の電場と磁場の変動が波として伝わるのが電磁波であり、その速さの不変性は特殊相対論の基本原則の一つである。

光の電磁波論に基づく波動光学では、物質の電磁的性質である誘電率・透磁率から屈折率・反射率などを求める事が出来る。しかし、人間次元から見てあまりにも短い波長と非常な速さの為に、光は注意深くセットされた実験等の若干の現象を除けば、波動光学そのものよりも、光線近似に基づく幾何光学で扱うほうが実際的である。

C. エネルギーの粒としての光子

発光や吸光では物質中の電子状態の変化が起こり、光波論を越えた光の粒子性が顕在化する。例えば、遠くの水銀灯の光をプリズムを通して見ると、数個の異なる色にくっきり分れる。これは、水銀原子中の励起電子が下のより安定な状態に跳び降りる時に放出する光の粒(光子)のエネルギーが、電子の跳び降りたエネルギーギャップに等しい事による。光の色は、エネルギー=プランク定数×振動数によって決まる。

光の粒子性は、高温物体の放射スペクトルや光電効果の研究を通して提起され、20世紀量子物理学の突破口となった。粒子と波動の二重性は、量子力学や場の量子論の前提である。しかし、ここで強調したいことは、Aの3・4に述べた様な多くの現象が光の粒子性に基ずいて理解でき、そのような現象は身近に沢山ある事である。

D. 素粒子としての光子

光子は、素粒子物理学では電子やクォークと同等かそれ以上に素な素粒子である。但し、クォークから出来た陽子と中性子が原子核をつくり、その回りに電子を引きつけて原子が出来るので、陽子・中性子および電子は物質の基の素粒子といえるのに対し、電磁場の量子である光子はエネルギーだけでなくスピンも持つが、個数は保存せず、静止質量はゼロで、物質粒子には入れない。(意識と独立に存在するすべての客観的実在を物質と呼んでしまう哲学の語法とは異なる。)電磁場は、電荷の保存則を保証する局所位相変換不変性を存在の根拠とするゲージ場であり、その量子としての光子そのものの性質は良く理解されている。

更に、電磁相互作用は、中性子の崩壊などを起こす弱い相互作用と同じルーツを持ち、電弱相互作用として統一的に理解されるものである事が解っている。最近発見された弱い相互作用を媒介する重いボソン(W及びZ)と光子は似ても似つかぬ兄弟である。

Ⅲ. 光学教育の現状

現在、指導要領と教科書に沿った光教材の小中高での扱いと、その歴史的背景や問題点を簡単に述べる。具体的詳細は他の文献^{1,2)}に譲り、ここでは基本的な考え方に絞って検討する。そのあと、大学教育での現状にふれる。自主編成運動等での実践や主張などは、Vで改革案を検討する中で取り上げる。

A. 小学校

2年「かげあそび」からはじまり、3年「かがみと虫めがね」では日光集めとして、5年「光の進みかた」では光の直進・反射・屈折(定性的)をやり、平行光線としての日光が凸レンズの焦点に集められる事で終わる。

これは、1950年代の生活理科・60年代の系統学習の時代に比べれば大帳な削減である。虫めがねによる拡大像はあまり取り上げず、鏡による像やレンズによる結像はカットされ、視覚・カメラ・望遠鏡などの応用は落とされている。ことさらに強調されているのは、集められた光が物の温度を上げるというエネルギーの量として側面である。

(指導要領の改訂は昭和33・43・52年であり、その結果は大よそ西暦1960, 70, 80年代の教育を規定して来た。)

B. 中学校

科学教育の現代化として1970年代の探究学習が登場したが、その手直しである1980年代の「ゆとりと精選」の結果、第一分野(物理・化学領域)で残った光教材は「光による仕事」だけである。小学

校と併せて考えると、現代化の旗印として第一分野では物質とエネルギーが強調され、そのなかで光そのものの独自の質と固有の現象は捨象され、エネルギー一般に解消されてしまっている。しかし、光の力学的仕事への変換は、あまり迫力のある実験にはならず（太陽電池のエネルギー変換効率は悪く、規模も小さい）、そもそもエネルギー概念の教育はうまくいっていない。なお、70年代には「凸レンズによる像」は残っていたが、精選で落とされた訳である。精選で、光度・照度・赤外線・紫外線が落とされたのは妥当であろう。

他方、第二分野（生物・地学領域）では光学の原理抜きで顕微鏡の扱い方が細かく取りあげられ、光合成も大きく扱われる。望遠鏡も登場し、星の色と表面温度の関係も説明される。これらも光教材として見直すべきである。

C. 高校

新指導要領に基づく理科Ⅰ（必修）が1982年から実施されている。理科Ⅰは総合化を目指しながら、中学理科からの精選による繰り上がりを含んでいるが、その中の物理領域は力学が主で、光学はない。しかし、光に関係した事は炎色反応・太陽光のスペクトル・地球環境での太陽放射の役割など扱われ、補足資料として波の性質と電磁波の説明をつけた教科書もある。

結局、光の関係した現象は必要に迫られてあちこち出て来るが、義務教育と理科Ⅰを合わせても光の科学を系統的に学ぶ事にはなっていない。

選択科目としての物理では光を波の一種として扱い、光波から光線の性質と回折・干渉・分光等を説明し、そのあと電磁波の一種である事に触れる。最後の原子と原子核の所で電子の波動性の前置きとして光の粒子性が取り上げられ、光電効果と原子の線スペクトルが扱われる。改訂前の物理Ⅱで電磁波のあとに光波をやっていたのに比べれば、これは教育的にみて改善である。しかし、波動光学で一応完結させてしまい、光の粒子性を踏まえた物質との相互作用が展開されず、実験室の限られた現象としてだけ粒子性が取り上げられている事はそのままである。

D. 大学

それぞれの学部の教育課程と教官の自主性に基づく大学教育の内容は一概にはいえないが、出版物や物理教育論文・教官同士の交流から大よその見当はつく。一般教育や専門教育の物理学の中で光学の比重は小さく、力点は波動光学に置かれている。

数理的整合性を主眼にした展開では、電磁波の一種としての光波の理解を基礎に波動現象が説明され、幾何光学は波動光学の極限として導かれる事を示すだけで、あまり立ち入らない⁴⁾。これが普通のスタイルであるが、高校の選択物理や物理Ⅱの繰り返しに近く、高校までの教育課程の欠陥を補う事にはなっていない。

やや詳しい概論（テキストで2冊）では幾何光学も波動光学と並んで取り上げられる場合が多い⁵⁾。しかし、光と物質の相互作用における光の粒子性は、量子論の前置きとして扱われるケースがほとんどである。

IV. 光学の教育的問題

この節では、前節でのべた現状における問題点を整理しながら、多面的な性格を持った光の科学を教育の中で展開していく上で、押えておくべき幾つかのポイントを検討する。具体的なプランの検討は次節で行なう。

A. 光学の多重構造

光は、対象とする現象に応じて光線・光波あるいは光子として、幾何光学・波動光学あるいは量子論によって取り扱われる。光波としても、波一般として共通に理解される事や横波としての特徴、さらに電磁波としての理解が必要な事と多段的である。物質と光の相互作用もマクロからミクロまで多様であり、理解の深さも現象論的整理からモデルの設定、さらに原理的理解と様ざまであり、それぞれに意味がある。また、蛍光灯の様な身近なものでも初等的な原理だけで片付くとは言えない。視覚も網膜の感光機構に立ち入れば、生理学や量子生物学の問題となる。光学現象についてはミクロな量子現象が直接に人間次元の日常世界に入りこんでいる訳である。(発光と吸光を含まない波動光学が、物理光学とも呼ばれているのはおかしい。)

従って、光学教育は光の進み方に限定してきちんとした法則的理解を目指す部分と共に、物の色や発光など物質との関わりについての現象論的整理を進めながら光の本性についての大きな疑問を提示し、自然の奥深さを考える部分もあるべきではないだろうか。この疑問に対する自然観の一部としての定性的解答は、高校か大学の適当な段階で与える事が出来る。

B. 光のエネルギーと視覚

人間の目は日中でも月夜の明るさにも順応できるように、エネルギーの量としては百万分の一の違いにも対応できる感度の可変性がある。これは可視光の光子が数電子ボルトの粒としての高い質のエネルギーを持つため、極微量で視覚を刺激する事が出来るからである。光合成を進める事が出来るのも、この高い質による。

他方、光が物の温度を上げるという場合は、それが解るのは日光の様な特別に強い光に限られるし、赤外線でもよい。これも大切だが自然に解る事である。光のエネルギーよりも、まず情報の担い手としての視覚にとっての光を問題にすべきである。これは、環境学習の一環としての太陽学習とは区別すべきである。(なお、光の熱化はエネルギーの質的低下である。)

C. 幾何光学の意義

レンズや鏡の働きを知り、色々活用してみる事は、光の伝播をコントロールする第一歩としての貴重な体験である。それを屈折や反射の原理と結びつけ水玉や水の入ったビンによる屈折等と合わせて法則的に理解する事も、自然の法則性の認識として重要である。更に、平行や相似などの幾何学的概念の発達と合わせて、結像の作図や光学器械の原理を学び、裸レンズの組合せでそれを確かめる事は、原理と実際をつなぐ生きた知識として重要である。現状の様に屈折などの原理をやるだけではレンズや望遠鏡等が解ってしまうとは言えず、原理と具体的現実をつなぐステップの提示が不可欠である。

D. 波動光学

波動現象は水面波・地震波・音波など色々あり、波の科学としての統一的理解も大切である。しかし、光波の波長はあまりにも短く、光の波動性がどうしても問題になる現象は限られる。だから、物理学の例として光を扱うよりも、まず光の現象全体を問題にし、波一般に解消されない光そのものの特質をきちんとやる事を優先すべきである。

実際の扱いでは、回折や干渉については手軽で面白い実験を見せ、簡潔な説明で済みますので充分で、現在の高校物理の様に細かくやる必要はない。ただし、分光は物質と光の相互作用を探る前提として重要である。

E. 物質と光

幾何光学・波動光学いずれにせよ、光の進み方ばかりやったのでは片手落ちである。光を電磁波の一種として扱っても、古典電磁気学で光の伝播ばかり詳しくやったのでは光学教育の現代化としては中途半端である。電磁波の発生機構や物質による反射吸収は波長領域によって雲泥以上の質的違いがある。

反射や屈折が物質そのものに変化を残さないコヒーレントな弾性散乱であり、古典電磁波論で扱えるのに対し、発光や吸光は物質の電子状態の変化を伴い、物質構造の多様性を反映していろんな現象がある。もっとも、物質と光の相互作用の量子論的側面を量子力学の導入部としてだけ扱ったり、逆に量子力学をマスターしてからと言うのでは非常に限られた学生だけに門戸を開く事にしかない。

まず、発光や吸光を現象論として整理しながら具体的事象への豊かな関心を育て、さらに、数理解理解はおいても、ミクロな自然の論理としての量子論から光の現象を定性的にでも理解する事を目指すべきである。

V. 改革案の検討

光学の教育課程についての具体的構想は、理科教育研究者の間で議論され、実践報告もなされている。これらを参照しながら、ここでは一応各学校段階において改革案を検討しよう。

A. 小学校

光教材全体について、戦前からの歴史や現状の批判・実践報告まで含めた詳細なプランが中村啓次郎氏から出されている⁶⁾。この案では、「物が見えるわけ」と「光の進み方」を結合し、さらに「物が高温状態で発光する」を大きなテーマとする。この案は視覚にとっての光の学習を小学校において豊かに展開できる事を示している。他方、光と物との関係を積極的に取上げるために、到達目標として高温発光と共に、「光が物に当たると、その物の温度が上がる。しかし、その物が光を反射したり、通したりする場合は温度があがらない」を設定している⁷⁾。この点は前節Bで述べたように直視できないような強い光に限定される事に留意すべきで、到達目標の一つに大きく掲げる事には賛成できない。むしろ、子供にとって切実な色彩のコントロールについて、光の科学からのとりあえずの答を提供すべきではないか。美術教育で絵の具の3原色+白であらゆる色を合成する事が非常に興味を持た

