

螢光燈の照度を測定する学生実験

—逆2乗則をめぐって—

高橋成和*

Masakazu TAKAHASHI

Measurements of Illuminance Due to Illumination from Fluorescent
Lamps Through Student Experiments.
— Concerning Inverse-square Law —

I はじめに

物理を初めて学ぶ学生・生徒の大半は、その概念を構築し、法則性を獲得しようとするとき、関連ある事項・内容をも個別に認知することに努力を払ってしまう。しかし、このことは多数のそれらを到底消化しきれず、思考の混乱に落ち入り、挙句のはてに物理をきらいになる結果を生んでいる。いわゆる物理は理解し難いもの、ときめつけかねない。

学習者が新しい概念を獲得していく過程は、頭脳に存在する既得概念との照合、それらを連結するリンクの切断、新概念の挿入、全体の再編成を通して主に形成されるという。この照合に際して、ドゥンカー¹⁾が述べている思考対象を別の観点から見直すことは有効であろうし、また湯川²⁾がいう類推の働き、あるいは異類性を踏まえて類似性を洞察することも学習を効果的かつ容易にするであろう。自然は、その究極において単純さを持ち、そこから多岐に亘る現象の微妙な細い違いを醸し出す。この意味で自然は調和的であり、その斉一性に対して人類の抱く審美感が類推を生み³⁾、この働きで問題が解明されていく。このことは、多くの科学者が確信し、実感していることといっても過言ではなかろう。このとき、中核となる既得あるいは先行概念に、実験・観察のような経験的活動を通し、直観的イメージをもって獲得したものを据えるのも一方策であろう。すなわち、この活動に触発されて学習の進展がみられるのではなかろうか。

ここでは、学生実験について、一つの概念を形成するという従来の視点から、物理の幾つかの分野に形態を異

にして存在する現象ないし概念・法則性を形式的に統一して、理解を深めることに役立てるといふ新しい視点に立った課題と指導の方針を述べる。このことを、物理を学習する初期に指導しておくことは、個別に学んできた、あるいはこれから学ぶであろう内容に整理の道標を与え、学習内容を一貫して理解する補助となろう。さすれば法則ないし概念を獲得する学習が容易になり、それらの定着もより確実になるに違いない。

II 実験の内容と目的

従来から測光に関わる学生・生徒実験は、点光源に近い白熱電球を用いて、照度が光源からの距離の2乗に反比例すること（逆2乗則）、レンズを用いて発散光を平行光束にしたとき、照度が受光面の傾斜角の余弦に比例すること（COS-LAW）、またフィルターによる透過・吸収（指数関数的減衰）などを扱っている。

本論文においては、新しい試みとして光源に螢光燈を用い、次の3通りの場合を扱う。すなわち、(1)1本の螢光燈管の中央部につけたスリットからのみ発散する光を扱う点光源（POINT~SMALL AREA SOURCE）の場合、(2)1本の螢光燈管全体からの光を扱う線光源（LINE SOURCE）の場合、(3)多数の螢光燈管を一平面内に密着して並べた面光源（PLANE SOURCE）の場合についてであり、光源からの距離 γ にある位置での照度 L を測定する。

点光源において、放出される光のエネルギーが減衰することなく等方的に伝播されるならば、その光源に相対する微小平面での L と γ の関係は、エネルギー保存の観点から逆2乗則にあり、他の光源においても輝度が

* 島根大学教育学部理科教育研究室

一様であれば、その幾何学的形状と位置関係により決定できる。ことに γ に対して光源が無限に長い直線、また無限大の広がりをもつ平面ならば、光源に相対する面での L は、点光源の場合から順次に積分操作を繰り返す、

点光源： $L \propto r^{-2}$ (逆2乗則の関係)

線光源： $L \propto r^{-1}$ (反比例の関係)

面光源： $L \propto 1$ (一定で無関係)

となることは明らかであろう。

この実験は、これらの照度測定を単なる測光学の問題に留めることなく、すでに高校物理などで学習してきた万有引力、電荷のまわりの電界、電流による磁界などに関わる逆2乗則をめぐる問題へと連鎖反応を起すように、学生の思考の跳躍を喚起することに期待を抱くものである。

III 実験装置

蛍光灯は発光部の管が $118\text{cm} \times 3\text{cm}\phi$ のものを30本用意し、1本は点光源用に、他はそれぞれを水平にして鉛直面内で密に並べ、全体ではほぼ正方形になるように木枠に収めた。

1本の電力は40w、放電電圧は200vであり、そのために昇圧トランスを使用した。

木枠は厚さ1.5cm、幅10cmのラワン材で組み立て、これにつや消しの黒色塗料を塗布し、その左右の側板の内側にソケットを取り付けて蛍光灯管をはめ、またそれらが互に独立して点滅できるようにその外側にグローランプとタンブラースイッチを管と対応させて設置した。トランスは枠組の台の前後に取り付けた。装置を図1~3に示す。

点光源は、蛍光灯管の中央にその直径と等しい幅を光の発散口として残り、他の部分に遮光のための黒色ビニールテープを3~4重に巻きつけて作った。通常の塗料を塗布しても光を遮断することは困難である。このようにして得た点光源や、また線光源として1本だけの蛍光灯管を点燈するとき、他の管はそれらの表面における反射光を防ぐために取り外しておく必要がある。面光源の場合は、照度計の指針を振り切る光度になってしまうので、光源全体を1枚の模造紙で覆い減光するとともに、一様性を増補した。合せて照度計の受光面を白色の綿布で覆い、全体として受光素子に入る光量を $1/16$ におさえた。

照度計は市販されている携帯用のものを使用した。この受光面は $5\text{cm}\phi$ の円形である。受光部はスタンドに、その受光面とスタンドの足先が鉛直線上に並ぶよう

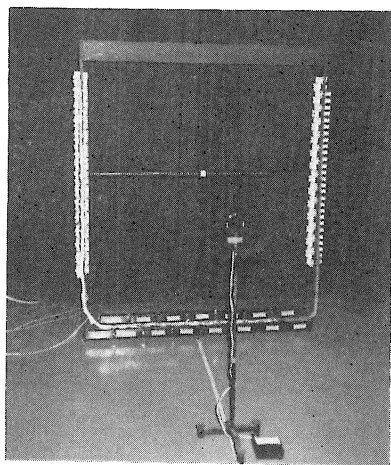


図1 実験装置：点光源の場合

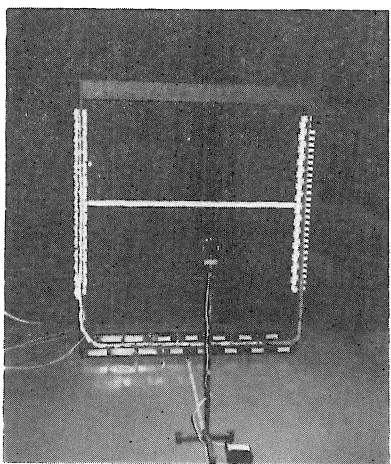


図2 実験装置：線光源の場合

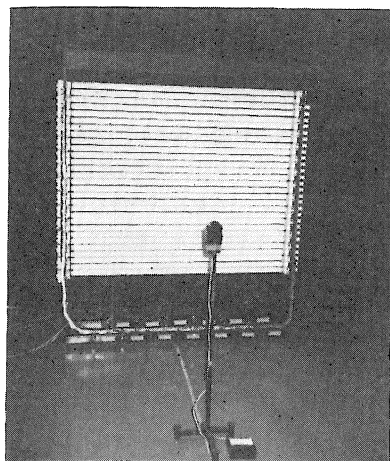


図3 実験装置：面光源の場合

に取付けた。床にチョークで描いた寸法線にしたがって、スタンドの足先を合致させて位置ぎめしながら測定を進めた。

IV 測定結果

(A) 点—線—面光源

中央にスリットをもうけ、他を黒くした蛍光灯管を水平に置くと、光量は鉛直面内で指向性なく一様に分布し、水平面内で COS-LAW にしたがって分布する。この光量が最大となる位置、すなわち図 4-A に示すように、水平面内にあり蛍光灯管の中央を通る法線上の点への光源からの距離 r (cm) と、この点で法線に直交する光源に相対する面での照度 L (LUX) との関係は図 4-B のようになる。このグラフの座標軸は、ともに対数目盛である。光源の広がり比べて r が大きく、光源が点と見做せる場所ではグラフの傾きが -2 になっている。これは L が r の逆 2 乗則の関係にあることを意味する。

次に、蛍光灯管を 1 本にかえ、点光源の場合と同様な図 5-A に示した測定を行うと、結果は図 5-B の通りになる。照度を測定する位置が光源に近いと、そこからの光源を見込む角が 180° に近く、光源が十分に長い直線と見做せ、グラフの傾きは -1 になっている。これは照度が光源からの距離に反比例することになる。しかしその位置が光源から次第に離れると、その長さが有限であることの効果が利き出し、終には点光源と見做せるようになるので、グラフの傾きは -2 になって行く。

さらに蛍光灯管を並べて面光源にした場合を図 6-A、図 6-B に示す。光源に十分近い位置での照度は一定で、次第に離れると光源が有限の広がりしかないことの効果が現れ、終には点光源と見做せるような傾きが -2 のグラフに近づく。このことが起る位置は、光源がほぼ正方形であるために線光源のときに起った位置とほぼ一致する。*

(B) その他の例

この実験は他にも種々の測定が考えられ、学生は自主的に楽しむことができる。ここでは主題から離れるが、参考として三つの例を挙げてみよう。

最初の例は、前述の点光源について、光度が水平面内で COS-LAW にしたがって分布することを見るものである。これには(1)光源を中心とする半径 r の円周上に

置いた受光面の法線を光源に向ける、(2)光源に立てた法線上に中心をもつ半径 $r/2$ の円周上に置いた受光面の法線を、この円の中心に向けるの二通りの測定方法がある。これらの配置と極表示した測定結果を図 7-A、図 8-A、B に示す。結果をみると、光源の正面近くでは光度が COS-LAW にしたがった指向性をもつことを示しているが、偏ったところでは小さくなっている。これは、光度計の受光面に取付けてある半球状の乳白色拡散板による反射があり、また光源が完全拡散光源ではないためと思われる。

次の例は、上下に隔てて設置した二つの点光源に関するものである。すなわち、二つの光源を含む鉛直面内の鉛直線上に、光源から下した垂線と平行な法線をもつ受光面を置き、二つの点光源による照度の測定を挙げる。これらの配置図と合せて、光源の間隔 d がこの分布にどのように影響を及ぼすかの結果を図 9-A、図 9-B に示す。これらは、一つの分布を二つ重ね合せて得られる事柄から分解能に至る問題へと発展させ得よう。

最後に、1本の蛍光灯管による照度分布を扱う。すなわち、管を含む水平面内において、受光面の法線をこの管と垂直にして測定する。これは学生の日常における実用上の問題に関連するためか、彼等の興味をそそった。結果を図 10 に示しておく。

V 実験後の展開

この実験の目的は、結果を測光学の問題として考究することに留まるのみならず、逆 2 乗則をめぐって、他の分野と形式上関連する事項と合せ、これらを統一的に整理することにあった。果して多くの学生は、アンペールの法則で代表される直線電流のまわりの磁界が距離に反比例すること、平行平板コンデンサー内の電界が一様であることをどのように結びつけて認識しているのだろうか。

前者は、ビオ・サバールの法則の電流素片による磁界が、また後者はクーロンの法則である点電荷のまわりの電界が、ともに距離と逆 2 乗の関係にあり、これらに積分操作(数学的のみならず、物理的な具体的操作として認識させたい)を施した結果であるなども捉えてまい。高校物理の学習が万有引力は質点で、電界は点電荷とコンデンサーで、電流磁界は直線電流で進められ、これらの位置づけを積分操作に基盤をおく点・線・面の観点から網羅的に促えていないためであろう。波の学習において、弦では定常波を、水面波では干渉を学び、この逆を学ばないために二者の関連が学生にないと同様である。

これらの事項をまとめてみると表 1 のようになる。こ

* 以上のことを定量化しようとするとき、管の太さ、またある点から見込む管と管の重なりを考慮する必要がある。また、管の長手方向についての指向性があり、しかも前面に紙があるので、そうは単純でない。

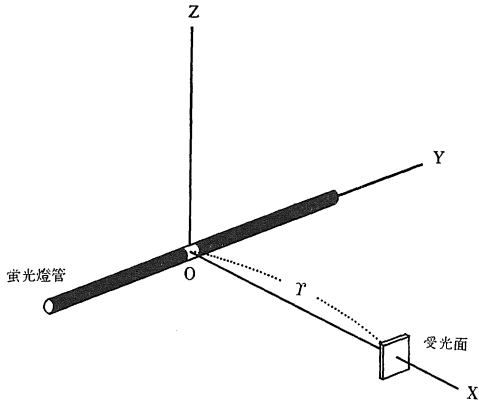


図4-A 点光源に関する照度測定の配置図

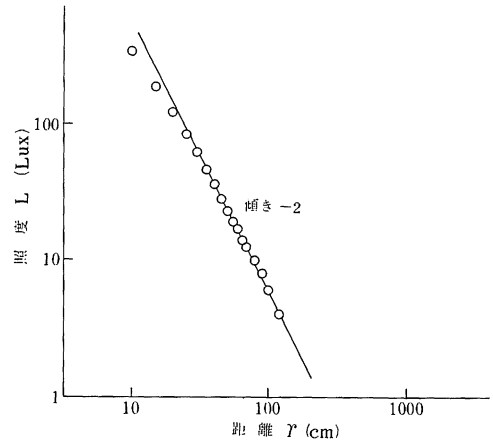


図4-B 点光源に関する照度測定の結果

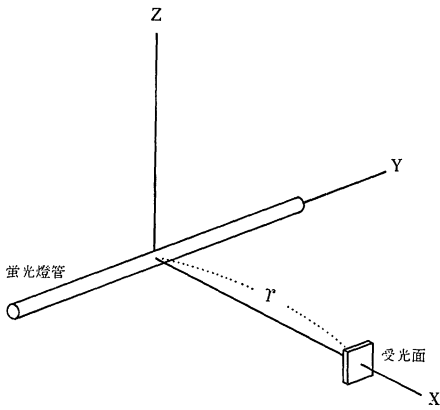


図5-A 線光源に関する照度測定の配置図

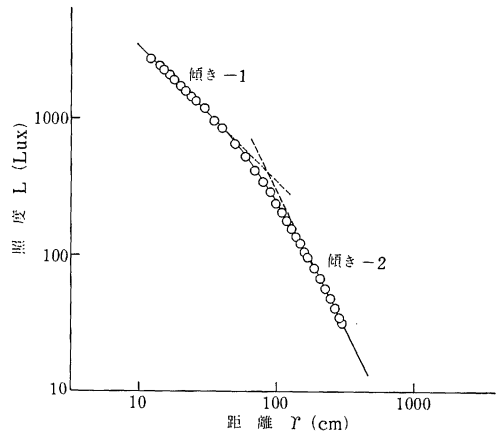


図5-B 線光源に関する照度測定の結果

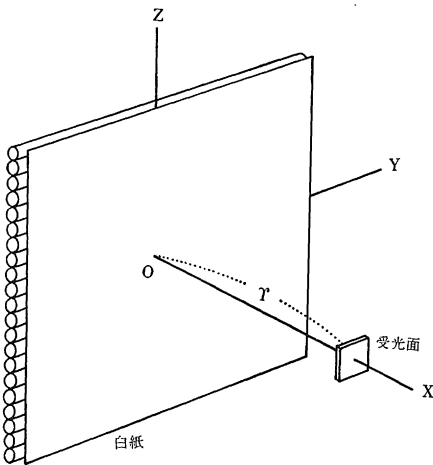


図6-A 面光源に関する照度測定の配置図

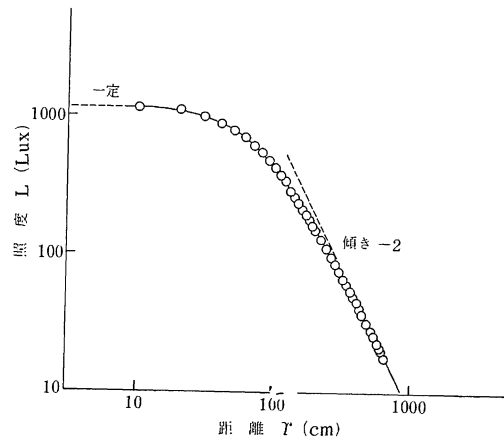


図6-B 面光源に関する照度測定の結果

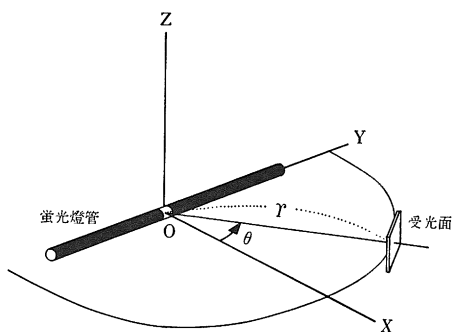


図7-A COS-LAW に関する測定の配置図：その1

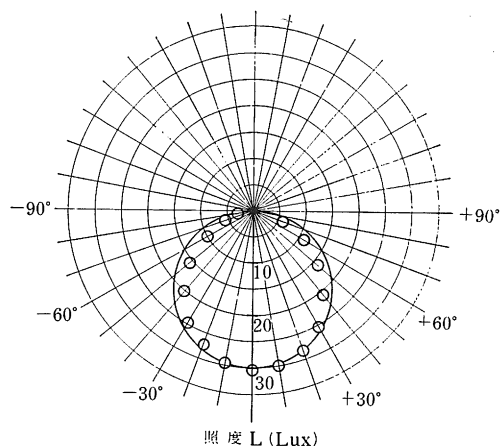


図7-B COS-LAW に関する測定結果：
その1 ($r=50\text{cm}$)

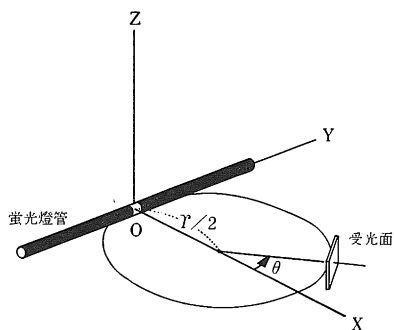


図8-A COS-LAW に関する測定の配置図：その2

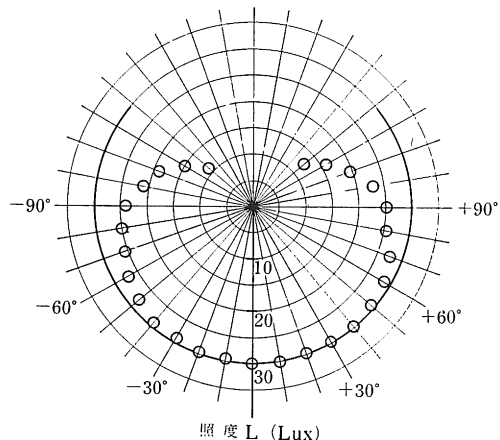


図8-B COS-LAW に関する測定結果：
その2 ($r=50\text{cm}$)

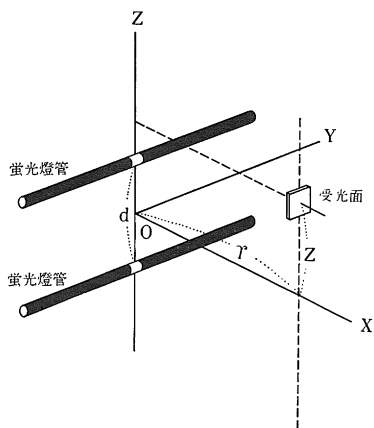


図9-A 二つの点光源に関する照度測定の配置図

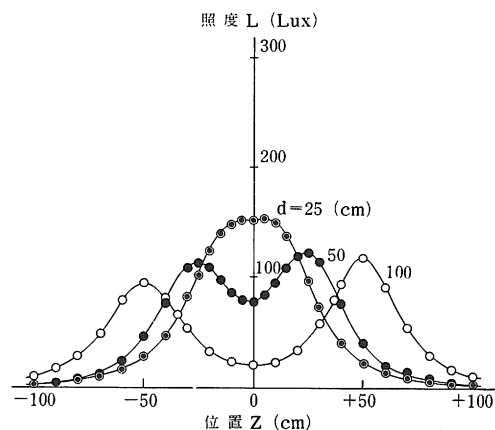


図9-B 二つの点光源に関する照度測定の結果
($r=25\text{cm}$)

表1 高等学校の物理で学習する逆2乗則に関わる内容と点・線・面との関連

	照度	万有引力	電場	磁石による磁場	電流による磁場
点	点光源	万有引力の法則	クーロンの法則	クーロンの法則	ビオ・サバールの法則*
直線	線光源	—	—	—	アンペールの法則
平面	面光源	—	平行平板コンデンサー	平行な磁極	—

(*十分に長い直線電流に対して、電流素片を点と見做す。)

ここでは高等学校の物理で学習するものを挙げた。空欄も演習問題の形ならば埋めることが可能でもあろう。このまとめは、あくまでも形式的なもので、それぞれがもつ逆2乗則の物理的内容は同等**ではない。このことは学生に強調しておく必要がある。例えば、等方的に発散する光については幾何学的要請による -2 乗であるが、万有引力は相対論的内容で、極めて微小だが -2 乗からはずれていること、また質量は(古典的に考えて)正で万有引力には斥力がないのに対し、電荷には正負があり、電気力に斥力・引力がともに存在することなどを。

IV おわりに

今までの物理の教授・学習法は各分野ごとに行われ、相互に横たわる関連が強調されることはほとんどなかった。ここでは学生が主体的に取り組めるような一つの実験を要に、形式的ではあるが、種々の事象を統一して眺め直すことを例示してきた。このようなことは他に幾種

もあろう。

例えば、電流が流れている電気抵抗での電圧降下、帯電しているコンデンサーの両極間の電位差、電流が変化しているコイルの逆起電力を共に電圧降下と見做し、それぞれ線型・積分・微分素子として整理すること、またダッシュポット、バネ、質量の機械系との対比はもとより、抵抗率 σ 、誘電率 ϵ 、透磁率 μ も同一視できる。すなわち σ を単位長さ、単位面積あたりの抵抗値であると理解すると同様に、 ϵ は単位面積、単位間隔あたりの平行平板コンデンサーの電気容量と、 μ は単位長さの幅をもつ帯板を一辺が単位長さの正方形の周に沿って巻いた単巻コイルのインダクタンスであるとも考えられるなどである。このような考え方は、いささか工学的であると指摘されるかも知れないが。

いずれにしても、統一的な視点に立って概念なり法則性を整理し直すことは、学生にその新しいイメージを与え、認識を深める要因をつくと同時に、学習の定着をきたすに違いない。

ここで光の照度を取り挙げたのは、点・線・面とも容易に実現可能であるからで、他の現象についてもそれぞれ実験・観察がなされることが望ましいのはいうまでもない。

最後に、このような視点に立って事物を見ることのできたのは、学習院大学名誉教授近藤正夫先生の永年に亘る御薫陶の賜と拝する。ここに深甚の謝意を表する次第である。また、抵抗率、誘電率、透磁率についての内容は、学習院大学理学部助手久保田秀美博士との談論により教えられたものである。ここにお礼を述べたい。

参考文献

- 1) 矢田部達郎, 思考心理学史, 培風館, 1948.
- 2) 湯川秀樹, 創造の世界(湯川秀樹自選集), 朝日新聞社, 1971.
- 3) 塚越紀久男, 授業の心理(実践教育心理学), 教育出版, 1981.

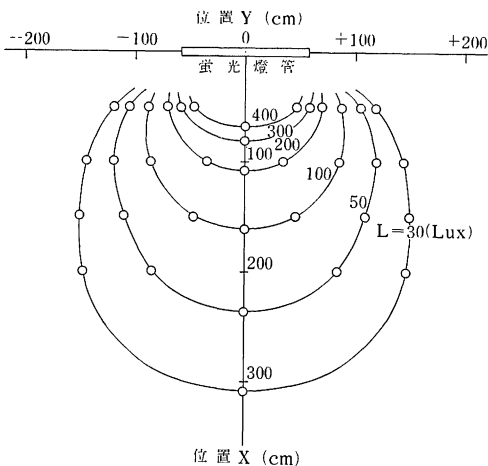


図10 一本の蛍光灯の照度分布

**合せて数学的手続きも異なる。光の照度は絶対値の積分であり、万有引力などはベクトルの考察を要する。