

Ⅲ 明るさを「ピカ」で測る

1 ジアゾ感光紙を使う理科

私が勤めはじめたころ、文書の控えを取るためには、2枚の罫紙の間にカーボン紙をはさみ、セロハン紙を当てて骨筆か鉄筆で書いた。また、多くの複製を作るのは謄写版による印刷が普通で、ロウ原紙を製版用のやすり（鑢）の上に置き、ガリガリと鉄筆で書いて印刷したものである。

その後、コピー用箋に鉛筆などで原稿を書き、感光紙と重ねて機械に入れると、青紫色に複写されて出てくるというコピーの機械が導入された。いわゆる湿式コピーである。この感光紙は保存性がよくないものの廉価であり、学校では大いに活用された。これは、印刷以外の方法で書類の複製ができるという点で画期的なものであったが、電子コピーが多く使われている最近では、過去の方法となりつつあるようである。

感光紙という新しい素材は、理科の教師である私にとって非常に魅力のある存在であった。そして、これを用いて、凸レンズによってできる実像を記録したりするのに使った（段ボール箱を使ったカメラを作ったこともある）ほか、次のような指導の工夫を行っている。

(1) 磁界の様子を記録する

そのころの中学校学習指導要領（昭和44年文部省告示）には、3年の内容に「? 電流と磁界」があり、「磁界は、磁力線で表されること」や「電流は、磁界をつくること」などを指導し、電流と磁界との相互作用をエネルギーと関連づけて考察させることになっていた。

私は、磁石の上に置いた感光紙の上にまんべんなく鉄粉をまき、それに十分光を当ててから、この感光紙を現像液に浸してみた。すると、

影になっていたところ（鉄粉のあったところ）が紫色になり、磁界の様子を簡単に記録することができた。

この方法によれば、磁石のN極とS極が近づいたときの磁界の様子やN極とN極など同極どうしの際の磁界の様子、あるいは、コイルに流れる電流によって生じる磁界の様子などを簡単に記録することができる。そこで、この学習に入ったときに、個々の生徒に何枚かの感光紙を配付して学習の記録に用いさせた。

(2) 赤道付近では極付近より太陽放射の量が大きいことを学ぶ

第2分野1年の内容である「地球を取り巻く宇宙」の中の「太陽放射と地球」の項には、「地球上のある場所で受け取る太陽放射のエネルギーの量は、太陽の高度によって異なり、昼の長さによっても変わる」とあった。

この学習のときには、感光紙に当てる光の角度を変えて実験し、太陽の高度との関係を考えさせたほか、大きな地球儀を準備し、極付近や中緯度付近、赤道付近などの何箇所かに感光紙を貼り付け、これに光を当てる実験を行った。そして、適当な時間の後、感光紙を現像液に浸し、その感光の様子から太陽放射の量を推定させたりした。

これは、当時の小学校学習指導要領（昭和43年7月告示）3年の内容である「鏡と日光」の中に「明るさの違いは、青写真の色の変わり方で比べられる」とあり、多くの生徒が小学校で青写真を体験していることと関係が深い。

指導委員として、小学校や中学校に派遣されたときにも、「こんな方法はありますか」と、実験のヒントを提供していたが、ワープロが多く用いられるようになった指導主事の時代には、感光紙の代わりに簡単に手に入るようになった感熱紙の使用を勧めたものである。

2 ブロック別中学校教育課程研究発表会で

昭和 44 年告示の学習指導要領の実践が深まったころ、これに基づく教育課程についての研究を持ち寄って研究協議を行う文部省主催の中学校教育課程研究発表会が開催された。東海・北陸・近畿の各府県の代表者が集まるこの会は長野県で開かれ、奈良県が研究発表を受け持つことになった。県教育委員会からの指名を受けた私は、「自然の事物・現象についての科学的な見方や考え方を養うため、特に重点を置いて指導する必要がある項目にはどのようなものがあるか。また、その指導はどのようにしたらよいか」という全国共通問題に基づいて、ジアゾ感光紙を使った取り組みについて発表することにした。このときの発表の題目が「光のエネルギー的な見方を養う一工夫」で、当時の学校教育課指導主事の堀内保先生、奈良県教育センター研修主事の植田正家先生の指導助言を受けている。

以下は、文部省初等中等教育局中学校教育課（現在の中学校課）編集の「中等教育資料」臨時増刊・昭和 50 年度中学校教育課程研究発表会集録に掲載されたものに若干の補足を加えたものである。

3 「光のエネルギー」の指導について

学習指導要領では、「光とレンズ ア 光のエネルギー」の項で、
(ア) 光によって、仕事をさせることができること。
(イ) 面の照度は、光源の強さと光源からの距離に関係すること。
(ウ) 高温度の物体は光を出し、温度によって光の色が変わること。
(エ) 光には、可視光線・赤外線及び紫外線があること。
の 4 つが指導内容として取り上げられている。そして、これらを通じて光のエネルギー的な見方を育てていくわけであるが、この中で中心的な役割を果たすのは (ア) と (イ) の項目である。このうち (ア) につい

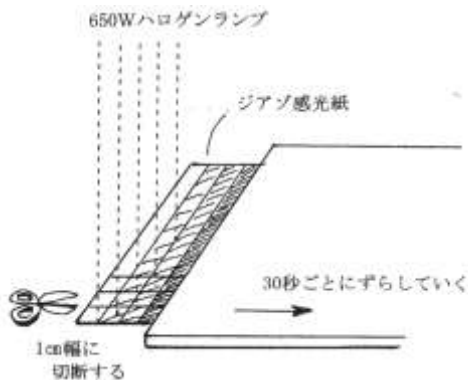
ては、太陽電池を用いるなど実験的な取り扱いが容易であり、ある程度定量的なとらえ方も可能であって、比較的理解させやすい。

しかし、「(イ) 面の照度……」については、定量的な取り扱いが要求されながら、演示実験やドライラボに終わりがちな内容である。面の明るさが、光源の強さや光源からの距離に関係することを、実際の測定をとおしてつかみとらせ、その規則性を発見させたい。そして、この学習の中で「実験計画を立てる」「測定する」「グラフ化する」「グラフを変形する」「モデルで考える」などいくつかの重要な科学の方法を学ばせ、「2乗に反比例する」というやや程度の高い内容を学びとらせたい。単なる公式の暗記に終わらせず、生きて働く知識とさせるためにも、この過程を大切にしたいと考えて指導計画を立てた。

4 ジアゾ感光紙を用いた明るさの測定

ジアゾ感光紙は、光によって変化し（ジアゾニウム塩の光分解による）、現像してもらいに発色しなくなる。そこで、生徒の机上に一定時間ジアゾ感光紙を置かせた後、これを現像液に浸すと、暗い壁ぎわの席では紫色になり、明るい南側の席では薄い紫色になる。これを用いて明るさを測定しようというわけである。

そのためには、基準になる物差しが必要である。そこで、図のように、光源から適当な距離においた感光紙を光を通さない板でおおい、これを30秒ごとにずらしていく。



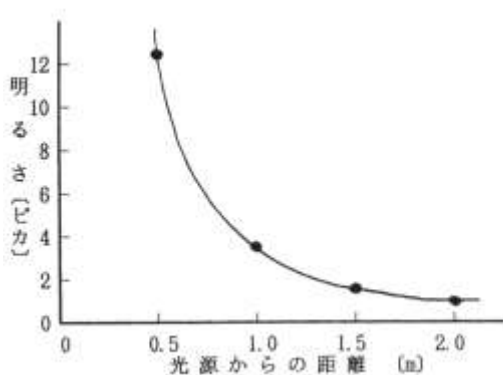
これを7分間続けると左端の部分に光が当たった時間は7分、次の部分が6分30秒、次が6分、そして、右端の部分は全く露光していないというようになる。これを現像すると、白に近いものから濃い紫色まで、15段階の色の帯ができる。これが明るさの物差しである。生徒たちは、この段階にピカ (pika) という単位をつけてくれた。白に近くなるくらいの明るさのところが14ピカ、まったく光が当たっていない紫色のところが0ピカというわけである。

5 光源からの距離と明るさの関係を調べる実験

このことを調べるために、暗くした教室で、光源からの距離の異なる数点にジアゾ感光紙を置いて露光させた。現像液で発色させた後、生徒にその小片を配付し、それを、「明るさの物差し」を使って測定させた。右の表は、

任意に選んだ14名の生徒による結果で、ややばらつきがあるものの規則性のあることは明白であった。

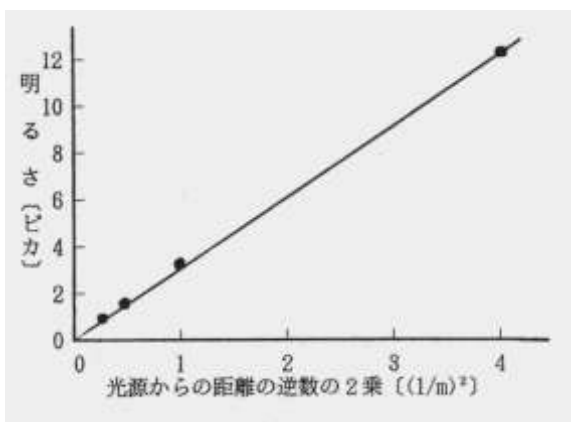
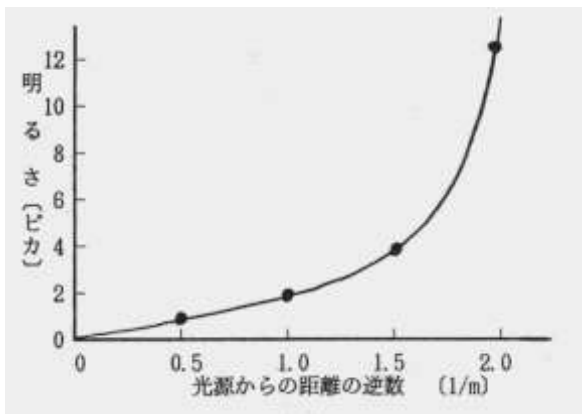
こうして得られた結果をグラフにすると、次の図の



ようになり、反比例らしいことが分かる。これは、あくまでも「反比例らしい」とか「反比例かもしれない」ということであるが、生徒は「反比例である」と断定しがちである。

そこで、1年で既習の「横軸にとった数を逆数にしたグラフ」をかかせた。こうして得たグラフは、図のように右あがりの曲線を描く。

この2次曲線らしい特徴をもつグラフについては、横軸に「光源からの距離の逆数の2乗」ととって、再びグラフをかかせる。そうすると、原点を通る直線になる。これは正比例のグラフである。したがって、面の明るさは、光源からの



距離の逆数の2乗に比例することがわかる。言い換えれば、面の明るさは光源からの距離の2乗に反比例するわけである。

6 数式化と一般化

以上のような、測定?グラフ化?グラフの変換の過程を通して、「面の明るさ : Lは、光源からの距離 : Sの逆数の2乗に比例する」ことを見つけ出すことができた。

これを式に表すと、

$$L \propto \frac{1}{S^2} \quad \text{となり、} \quad L = k \frac{1}{S^2}, \quad \text{そして、} \quad L = k \frac{1}{S^2} \quad \text{となる。}$$

ここまでの数式化は、中学生にとってなかなか手ごわいものである。そのために、グラフの変換についての自作ビデオ教材を作成し、生徒の取り組みの援助に役立てた。このことについては、別項で述べることにする。

このあと、図を用いて、面の明るさが距離の2乗に反比例することを理論的に考えさせ、光は光源から周囲に放射されるエネルギーであり、面の明るさは、単位時間に面に加えられる光のエネルギーの量で決まることを考えさせた。

7 この実験についての検討

(1) 感光紙と光の量について

この方法で明るさの測定をするには、加えられた光の量と感光紙の変化の間に規則性があることを仮定している。すなわち、限度を超せば（ジアゾニウム塩が分解してしまえば）、それ以上には変化しないが、それまでの段階では、加えられた光の量に比例して変化が起こっていると考えているわけである。

こうした点について検討するため、光源からの距離が1：2：3の各点で、時間を1：4：9として露光させてみた。結果は、いずれも同じ色調となり、この感光紙が光の量の測定に使えることを示した。

(2) 明るさの物差しについて

この測定の仕方では、面の明るさについての公式を見いだすことができた。しかし、あまりにも測定値のばらつきが大きい。このばらつき

が何によって生じるのかを考えてみたとき、まず、明るさの物差しの問題がある。先の方法で、物差しを作ったとき、感光紙の中央部と周辺部とでは、その色調に相当の違いがあることに気づいた。このことを検討するため、前のように1枚の感光紙で物差しを作り、その中心をとって作った物差しを「基準物差し」として中心から隔たった所を測ってみたところ、周辺部では相当暗いという結果が得られた。

このことから、同じ物差しが作れないことは明らかであり、中心から6cmの範囲内の物差しで測定しても、2ピカのばらつきはやむを得ないことになる。たとえ、平均値でグラフをかき、直線が得られたとしても、このような物差しでよいのだろうか。

では、OHP用のクリアシートやトレシングペーパーを何枚かずらして貼り付けたものを原図にして複写機でコピーしたものはどうか。この方法によれば、同じ物差しを手軽に作るができるが、適当な段階を作ることが難しいことと、0の段階が相対的になる欠点がある。

これに対し、室内の適当な明るさのところ、先のようにずらしていつて作る方法は簡便である。しかし、再現性がなく、全く同じものをもう一度作るというのは難しい。

(3) 物差しの変色について

最初は標準化した物差しを作り保存することを考えた。しかし、しだいに変色が進む。これを防ぐために現像後、水洗することにした。このようにすれば、変色を防ぐことはできるものの数回実験を繰り返すうちに水洗用のバットの水が青く色づいてくることに気づいた。すなわち、水洗によって色素が洗い落とされるのである。したがって、水洗した物差しは色が異なっている。このことから、水洗の仕方や現像から水洗までの時間によって異なった物差しになってしまい、このことは致命的な欠陥となった。

(4) 比色による測定について

同じものを同じ物差しで測定すれば、同じ結果が得られなければならない。しかし、何人かの生徒にやらせてみると 20 段階の物差しの場合、 ± 1 ピカ程度のばらつきが見られる。すなわち、大部分の生徒が 15 ピカと判定したものを、14 ピカ、16 ピカとする生徒がいる。こんな誤差が生じるのでは、科学的な測定とは言えないのではないか。PH試験紙のように色相が変化するものと違い、この場合は明度の変化であるため比色しにくいのではないか。このことについては、生徒たちも問題にしたし、私たちもこれを防ぐための手だてを考えてきた。

しかし、 ± 1 ピカ、20 段階のうちの 1 の誤差は果たしてどんなものなのだろうか。

「電圧計や電流計などは正確なものである」と生徒は受け取り、ときには真の値を示しているとさえ考えている。これは、電気計器の持つイメージであろうか。しかし、学校で用いる電流計を直列につないでみれば、その誤差の大きさに気づく。学校にあるものは、表示されているように 2.5 クラスのものである。すなわち、 $\pm 2.5\%$ の誤差のある可能性がある。さらに、温度計にいたっては氷点や沸点を測定して補正することができるというものの、その誤差はさらに大きい。光に関する測定器でも、照度比較器などでは、その目盛りが対数目盛りであるため、読み取りの誤差も大きいと思われる。

こう考えてみれば、この感光紙を用いた実験の誤差もあながち大きいとは言えないのではないか。

8 感覚に裏づけされた数値だから

「ルクスメーターや照度比較器があるのに、余計なことを…」
といったことにならないかと危惧しながら出発し、このくらいの誤差

があっても測定といえるのであろうかと心配しながら続けてきた実験であった。

しかし一人一人が実際に手にとって変色を確かめ、物質を変化させる光のエネルギーを感じとりつつ、しかも、自分たちの考えた単位で測定するというこの方法には捨てがたいものがある。

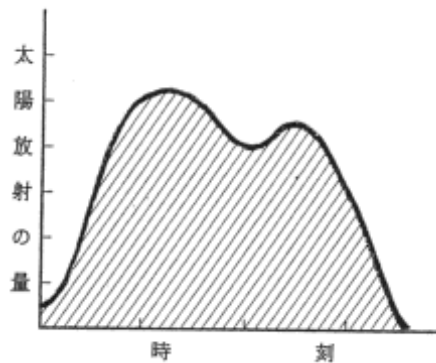
共に考え、共に実験し、より良い方法をと考え合い、話し合いながらやってきたこの方法は探究の過程に沿ったものであろう。既成の概念にとらわれず、自ら測定の方法を考え、その測定の結果から自然の規則性・法則性を見いだしていく、こうした態度こそ自然の事物現象についての科学的な見方・考え方を育てていくのである。

9 太陽放射の積算値を測る

この方法での学習を終えたあと、科学クラブの生徒たちと話し合ううちに、もっと分厚いフィルターをかけて太陽光の下にさらしたらどうなるだろうか、1日の太陽放射の量の測定ができるのではないかということに気づいた。

すなわち、毎日の太陽放射について考えると、強い光が短時間あたる日があれば、弱い光が長時間あたる日もある。だから、この方法をうまく活用すれば、1日に供給される光エネルギーの量を測定できるのでは…というわけである。

生徒には、右の図で、
「1日の太陽放射の強さは



刻々と変化しているし、その時間も日によって違う。太陽放射の量は、このグラフでは最高値ではなく、斜線で表される面積なのである」と説明した。まさか大学進学がかなえられるとは思わず、高等学校でも就職コースにいた私には、「解析Ⅱ」はなく、微分積分の授業はなかった。大学1回生のとき、物理学概論での「距離を時間で微分すると…」という説明に、「先生、微分ってどうするんですか」と質問し、どこの高校から来たんだと言われた自分である。

しかし、「こんな不定形の面積を計算する方法が積分なんだろう」と思った。共に、理科を担当していた山本吉延先生に「その通りです。数学の連中でも、そんなふうに具体的に積分の意味を説明できない人もいるのではないですか」というお世辞をもらったことを思い出す。

この後、科学クラブの生徒と適当なフィルターを考え、アルミ製の弁当箱を材料にした装置で観測を開始した。雨の日も、風の日も続けたこの観測は、クラブ員の手でまとめられ、日本学生科学賞奈良県審査(※)に応募した。うれしいことに最優秀賞の中でも最高の奈良県知事賞を受賞した。生駒南中学校科学クラブ最高の栄誉であった。

余談になるが、その後、昭和55年から8年間は私が、続いて昭和63年から8年間は山本吉延先生が、県教育委員会学校教育課でこの事業を担当することになるのだから、縁は不思議なものである。

※ 日本学生科学賞奈良県審査は、奈良県科学教育振興委員会、奈良県教育委員会、読売新聞社の3者が共催して行う事業であり、奈良県科学教育振興委員会は、小学校、中学校、高等学校や大学の教員、県や市町村の教育委員会関係者によって構成されていた。このような校種を越えて縦に連なる教育研究団体は、あまり例がなく、審査会等で顔を合わせたときには、それぞれの立場から奈良県の理科教育についての真剣な論議がなされたものである。

さて、この「太陽放射の研究」は奈良県の代表として、全国審査に送られた。ここでの受賞は無理であったが、次のような審査評をいただいた。

コピー感光紙を利用して、1日の太陽放射量を測定する方法を考えだし、6月12日から9月30日までという長期間にわたって測定を行っている。また、この間に測定した1日の太陽放射量の全量とその日の最高気温や天気との関連を考察している点などは中学生の発想としてはユニークであり、非常に面白い。

また、1日の太陽放射量の測定法としては、20段階のフィルターを3種類作り、感光の程度を数値で示そうとしたのはよい思いつきである。

しかし、そのデータを見ると、フィルターBの場合では10Bが4日、9Bが28日、8Bが53日、7Bが29日、4Bが1日という結果であり、大部分が7～9である。これらが、そうとう長い期間における測定であることを考えるとき、もっと数値が散らばるような工夫が必要であると思う。その点は、フィルターで工夫するのか、感光紙の面から調べなおすのがよいのか考えてみる必要がある。

また、1日の太陽放射量と同時に、1日のある時刻（例えば午前9時ごろ）の日射の強さはどのくらいといった比較もできれば具合がよい。

気温と放射量の関係はグラフによれば関連性が乏しいと見られるところもあり、あと何を考察すればよいか検討してほしい。そして、無理な結論は避けたいものである。

しかし、この研究方法はユニークなものであり、そうした点を改善していくならば、空気中のスモッグの量の数値化などでもできるのでは

ないか。今後に期待したいものである。

頂戴した審査評には、

「しかし、そのデータを見ると、フィルターBの場合では、10Bが4日、9Bが28日、8Bが53日、7Bが29日、4Bが1日という結果であり、大部分が7～9である」

とある。この指摘はもっともである。しかし、このようなBの問題点の解決のために、何種類かのフィルターを工夫し、測定の幅を広げるように努力し、フィルターAやフィルターCを開発したことが十分には読み取ってもらえていないことや「1日の太陽放射量と同時に、1日のある時刻（例えば午前9時ごろ）の日射の強さはどのくらいといった比較もできれば」というのは、私たちの意図した研究目的から離れているようで、少々不満も残っている。

いずれにしても、このクラブ員と私たちの関係は、師弟の関係というより、「共に学ぶなかまであった」と言ったほうが適当であるように思う。