

高等学校物理における「偏光」の取り扱い I

～大学生は偏光及び偏光板についてどのような理解をしているか～

家永 展寛^{*1}・重松 宏武

Handling of “Polarization” in High School Physics I:
How Do University Students Understand Polarization and Polarizing Plates ?

IENAGA Nobuhiro^{*1}, SHIGEMATSU Hirotake

(Received August 3, 2020)

キーワード：偏光、偏光板、スリットモデル、定量的理解度調査

はじめに

高等学校理科物理分野の『波』の単元においては、自然光または光源から出る光を1枚または2枚の偏光板を通して見た明るさの変化を観察することにより、偏光に関する学習を行う。偏光板にはある特定の方向にのみ振動する光を通すスリットのような特性を持つことが各社の教科書に記載されているが、具体的なしくみの説明まで踏み込んだ教科書は少ない。同様に偏光板を2枚重ね、かつ一方を回転させた場合における具体的な光の透過度に関する説明も教科書内で十分には行われておらず、偏光及び偏光板に関する生徒の理解が正しくなされているか不明瞭であった。そこで、理科教員を目指す大学生へのアンケート調査（偏光板の回転角度と透過光の照度との関係をグラフとして表現させる）を通じて偏光及び偏光板に関してどのような理解がされているのかの調査・考察を行った。以下、第1章においては、高等学校における偏光板のしくみに関する説明と実質的な取り扱いについて紹介し、さらに偏光板のしくみについて実際との相違点について述べる。続く第2章では、偏光板を通過する光の量（照度）の考え方を数式を用いて定量的に解説を行う。最後に第3章では、アンケート調査により山口大学教育学部理科教育選修の学生が偏光をどのように理解しているのかその傾向を第2章で得られた結果と比較しながら考察を行う。

1. 高等学校における偏光板の説明及び取り扱いについて

高等学校理科物理分野『波』の単元において偏光の特性を理解するために光学素子である偏光板が活用されている¹⁾。具体的には、「偏光板に向けて発せられた自然光（非偏光）は、横波かつ光の進む向きに垂直なあらゆる方向に振動している波の集まりである。この自然光が、偏光板を通過すると振動方向が偏光板の軸に平行な光だけとなる。この光は再び同方向の軸を持つ偏光板は通過するが、軸と垂直な光は通過できない」と学習する。その学習の際に、図1a及び1bに示すモデルを立て、偏光の現象並びに偏光板の特性を可視化している。このモデルは偏光板の軸に平行なスリット状のものを想定していることから本論文では『スリットモデル』と呼ぶこととする。

実際は、一般に使用されている偏光板（吸収型偏光板）では、物理的な障壁としてのスリットは存在せず、光が透過する方向を便宜的に線で描写したものである。しかし、スリットモデルではスリットが物理的な遮蔽物であると認識され、「スリットによって光が遮蔽される」や「スリットとの隙間を光が通る」という誤った解釈に結びつく恐れがある。ちなみに正しくは、偏光板はヨウ素を主とするヨウ素化合物分子が一方方向に吸着配向して吸収軸を形成しており、この吸収軸に平行な振動の光は吸収され、垂直な振動の光は吸収されずに透過することができる構造となっている^{2,3)}。この正しい原理に関しては特定の検定教科書のみ

*1 美祢市立大嶺中学校（令和2年度山口大学教育学部附属教育実践総合センター共同研究員）

で触れられている⁴⁾。吸収軸はスリットモデルのスリットと垂直方向に向いており、図1cのように表され、Wikipedia⁵⁾などで採用されている。ちなみにこのモデルを本論文では『吸収帯モデル』と呼ぶこととする。スリットモデル、吸収帯モデル共に正しい表現であり、偏光板中の線の意味を正しく理解し、それぞれのモデルを活用することが必要である。なお、本論文においては高等学校教科書を始め、一般的に多く用いられているスリットモデル(図1a、1b)を採用する。ここで改めてスリットモデルを用いて偏光及び偏光板を学習する上での問題点・課題を箇条書きでまとめる。

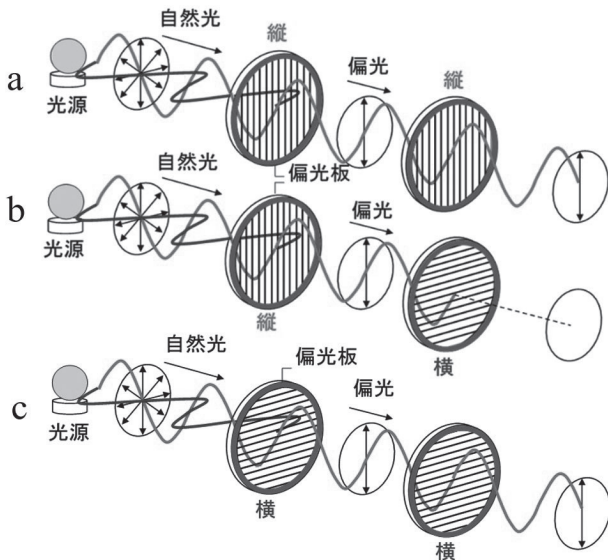


図1 スリットモデル(a、b)と吸収帯モデル(c)
図1aと1cは同じ現象を表しているが、偏光板中の線が表す意味(スリットか吸収帯か)が異なることから線の向きが異なっている。

- ① 図1a、1bのように2枚の偏光板を重ねて一方を回転させながら観察すると、「偏光板の軸が互いに平行のとき最も明るく、互いに垂直なとき最も暗い」⁶⁾、「一方を回転させながら見ると、明るくなったり暗くなったりする」⁷⁾、「偏光板を2枚重ねて片方だけを回転させると、回転の角度によって明るさが変化し、2枚の偏光板の向きが垂直になると暗くなる」⁸⁾と学習する。このことは暗に回転角度によって明るさが変わることを意味しているが、具体的にどのように変わるのか、さらにはその理由や原理に関して明確な指導が行われていない。

ちなみに、偏光板が透過軸と平行に振動する単一な光のみを通過させるのであれば、2枚の偏光板を重ねた場合はそれぞれの偏光板の透過軸が一致(平行)した時のみ光が通過し、それ以外は通らない(少しでも角度が異なると光は通過しない)と解釈できる。上の「回転角度によって明るさが変化し」との矛盾をどう説明するのが課題として残る。

- ② 輝度の強い光源を用いた場合、光を通さないと指導を受ける図1bの場合においても光は通る場合がある。この現象をどう説明するのか。

偏光を学習する際に、上記の問題点について補足説明を行うかは指導する教員の裁量に委ねられる。そのため、現役の大学生が偏光について、正しく理解しているか、あるいは上記の問題点を無視したまま理解していないかを調査するために、偏光板の理解度についてアンケートを行った。アンケート内容は、偏光板を通過する光の量について問うものであるが、その結果を読み取るには理論的解釈や数式を用いた定量的解釈が必要となる。そのため、先に第2章において偏光板を通過する光の量(照度)について自明ではあるが数式を用いて解説を行う。

2. 偏光板を通過する光の量(照度)の考え方

偏光板の回転角度における透過光の照度の特性やその数式については、既に複数の論文において紹介されている^{3,9,10,11)}。しかし、第1章で述べた通り、アンケート調査結果との対比を議論するにあたり、理論的解釈や数式を用いた定量的解釈が重要となる。よって本章においては偏光板が無い場合または1枚から3枚を通過する場合における光の量(照度)に関する理論的解釈と数式展開について各節ごとに詳細に説明を行う。

2-1 『偏光板が無い』場合

始めに、偏光板が無い状態における光の振幅と照度について考える。図2に示すように自然光である光源があり、ある特定距離において観測される光の振幅を A_0 、照度を I_0 とそれぞれ定義する（正確には様々な波長、振幅、位相を持った光により構成されているが、ここでは全て同じ性質の光と仮定する）。電磁波の合成波で表される光は分解することができることから、この自然光は縦方向 $I_0/2$ と横方向 $I_0/2$ のベクトルの合成波として表すことができる¹¹⁾。また、電磁波においては光の強度（照度）は振幅の2乗に比例する関係があるため¹⁰⁾、振幅については縦方向 $A_0/\sqrt{2}$ と横方向 $A_0/\sqrt{2}$ のベクトル合成となる。なお、光源と観測点（測定器）の距離は短く、距離による照度の減衰を無視することができることと仮定し、光から観測点へ発する光も観測点で観測される光の照度も同じ I_0 と表す。

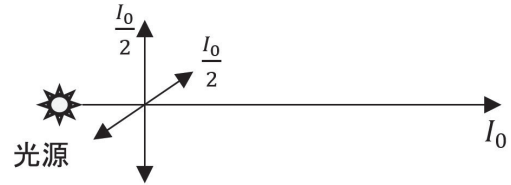


図2 偏光板が無い場合

2-2 『偏光板が1枚』の場合

次に、光源と観測点の間に偏光板を1枚置いた場合における光の振幅と照度を考える（図3）。なお、挿入した偏光板は、偏光軸の向きを判別しやすく、さらに偏光板内に線や文字を記載する空間を作るために、偏光板の両側一部のみを偏光軸を表示した。一般的に、図3に示すように偏光板1枚において理想的な直線偏光を入射させたとき、光を最もよく透過させる透過軸と一致したときの透過率 k_1 と、光の透過を最小にする透過軸と直交したときの透過率 k_2 から、単体透過率 T_s は、

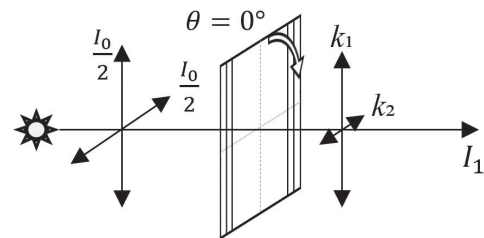


図3 偏光板1枚の場合

偏光板の偏光軸は一部のみ記載。理想値は $k_2 = 0$

$$T_s = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) \quad (1)$$

と表される¹¹⁾。理想的な偏光板は k_1 が 100%、 k_2 が 0% であることから単体透過率 $T_s = 1/2$ となり、縦に偏光軸がある場合は縦方向のみに振動する光が透過し、その透過光の振幅の大きさは変化しない（図中の k_1 、 k_2 は (1) 式で示す一般的な考え方に従って記載したものであり、上記の通り、偏光板の理想値として k_2 は 0 である）。よって、偏光板1枚を通過した透過光の照度 I_1 は、

$$I_1 = T_s I_0 = \frac{1}{2} I_0 \quad (2)$$

と表される。なお、偏光板を偏光板の中心に対して回転させた場合、図3に示した状態を基準角度 $\theta = 0^\circ$ とすると透過光の振幅 A_1 と照度 I_1 は図4のように表される。ここで偏光板中に書かれた太い直線は透過光の振幅の大きさ A_1 を長さで例えて表したものであり、偏光板を回転させても長さに変化が無いことが読み取れる。これは照度 I_1 も同様に偏光板の回転に関係なく一定であることを意味している。

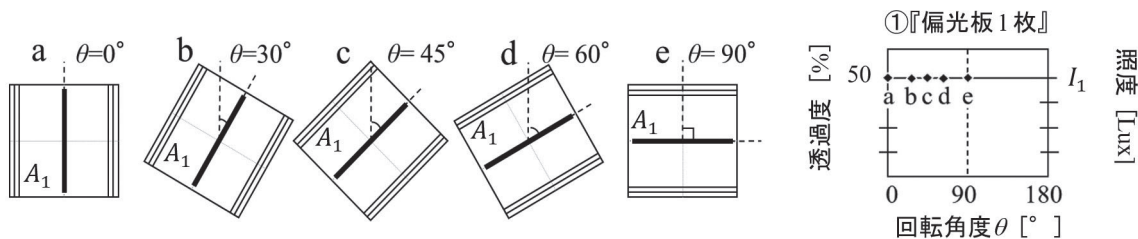


図4 偏光板1枚のときの、回転による透過光の振幅 A_1 の模式図と、角度と照度 I_1 の関係
左図 a ~ e は代表的な角度 ($\theta = 0, 30, 45, 60, 90^\circ$) における偏光板の状態を表し、透過光の振幅の大きさ A_1 を太い直線で模式的に表した。右図は (2) 式で表される透過光の照度 I_1 の変化を表す。なお、右図中の a ~ e は左図のそれぞれ5つの状態に対応する。

2-3 『偏光板が2枚』の場合

続いて、偏光板2枚の場合における光の振幅と照度を考える。図3の条件をもとに、光源と照度の観測点の間に偏光板1枚を新たに挿入し、一方の偏光板の回転を固定（偏光軸は縦方向）し、もう一方を可変とし

た (図 5)。なお可変の偏光板の偏光軸は横方向を 0° とする。偏光板 2 枚を重ねた場合、2 枚目の偏光板に入射する光が 1 枚目で偏光された光のみとなるため、2 枚目の偏光板の回転による透過光の振幅の減衰がおこる。その様子を図 6 に示す。ここで偏光板中の黒色の太い直線は 1 枚目の偏光板を通過した透過光の振幅 A_1 を表し、赤色の太い直線は 2 枚目の偏光板を通過した光の振幅 A_2 を模式的に表している。

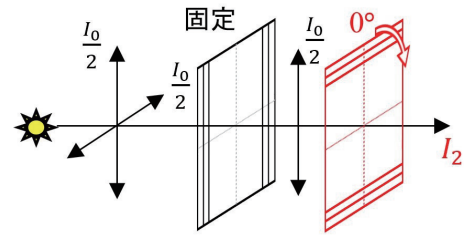


図 5 偏光板 2 枚の場合

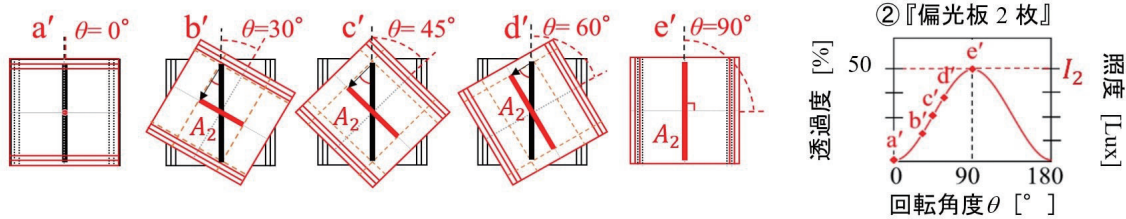


図 6 偏光板 2 枚のときの、回転による透過光の振幅 A_2 の模式図と、角度と照度 I_2 の関係
左図 $a' \sim e'$ は代表的な角度 ($\theta = 0, 30, 45, 60, 90^\circ$) における偏光板の状態を表し、透過光の振幅の大きさ A_1, A_2 をそれぞれ黒色、赤色の太い直線で模式的に表した。右図は (4) 式で表される透過光の照度 I_2 の変化を表す。なお、右図中の $a' \sim e'$ は左図のそれぞれ 5 つの状態に対応する。

1 枚目を通過する光はベクトル合成されて一方向のみ (縦方向) に振動する光であり、2 枚目を通過する光は 1 枚目の偏光板を通過した光のうち、2 枚目の偏光軸に平行な成分のみである。具体的には透過光の振幅 A_2 は 1 枚目の透過光の振幅 A_1 の $\sin \theta$ 成分として表される。このように偏光板を通過した偏光をベクトル成分として分けることを本論文では「偏光の分解」と呼ぶ。

$$A_2 = A_1 \sin \theta = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \sin \theta \quad (3)$$

また、透過光の照度 I_2 は、振幅の 2 乗で表されることから、

$$I_2 = A_2^2 = \frac{I_0}{2} \sin^2 \theta \quad (= I_1 \sin^2 \theta) \quad (4)$$

という関係式を得る¹⁰⁾。なお、自然光が同方向の偏光軸となる 2 枚の偏光板 (直線偏光子) に入射するとき、その透過率は 2 つの偏光子の透過軸の交わりの角度 θ に依存する関係をマリユスの法則¹²⁾ という (一般的には直線偏光と偏光板のなす角を θ (2 枚の偏光板が平行の状態を $\theta = 0^\circ$ とした場合と同じ) とするとき、透過光の強度 I_2 が $I_2 = I_1 \cos^2 \theta$ と表されるが、(3) 式及び (4) 式は初期位相が異なるため $I_1 \sin^2 \theta$ と表される)。図 6 右図からもわかるように、2 枚の偏光板が平行な場合 ($\theta = 90^\circ$) は 1 枚目を通過した光 (図 4 の a) は全て 2 枚目も通過し (図 6 の e')、同じ照度の値を得る。この値を最大値として角度がずれることにより透過する光は減少することとなる。なお、この減少の様子 (傾きの変化) については改めて第 3 章において議論する。

2-4 『偏光板が 3 枚』の場合

最後に、偏光板 3 枚の場合における光の振幅と照度を考える。図 5 の条件をもとに、観測点側に偏光板をさらに 1 枚追加 (偏光軸は横方向かつ固定、青色) した構成となる (図 7)。回転させる偏光板は中央の 1 枚 (赤色) のみであり、入射された光が 2 枚目の偏光板を通る光は (3) 式、(4) 式、並びに図 6 に示されたものと同じである。その光のうち、3 枚目の偏光板の偏光軸と水平となる $\cos \theta$ 成分のみが最終的に通過する (図 8)。よって、透過光の振幅 A_3 は、「偏光の分解」により 2 枚目の透過光の振幅 A_2 の $\cos \theta$ 成分で表される。

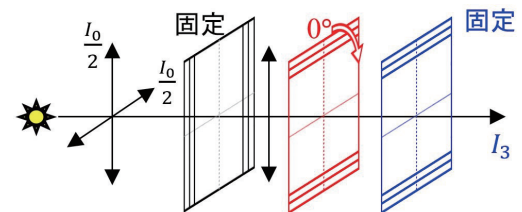


図 7 偏光板 3 枚の場合

$$A_3 = A_2 \cos \theta = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \sin \theta \cos \theta \quad (5)$$

また、透過光の照度 I_3 は振幅の 2 乗で表され、

$$I_3 = A_3^2 = \frac{I_0}{2} \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (= I_2 \cos^2 \theta) \quad (6)$$

という関係式を得る。図 6 と図 8 からわかるように、2 枚の偏光板が平行な状態 ($\theta = 90^\circ$) で最大の透過度を示した光 (図 6 の e') は 3 枚目の偏光軸が垂直となった偏光板によって遮断され最小値 (図 8 の e'') を得ることとなる。

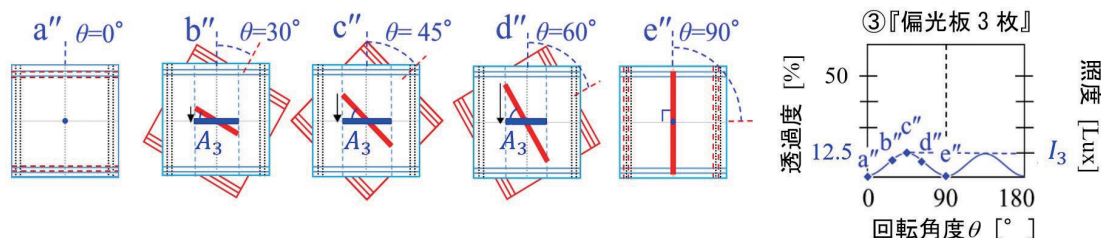


図 8 偏光板 3 枚のときの、回転による透過光の振幅 A_3 の模式図と、角度と照度の関係
左図 $a'' \sim e''$ は代表的な角度 ($\theta = 0, 30, 45, 60, 90^\circ$) における偏光板の状態を表し、透過光の振幅の大きさ A_2, A_3 をそれぞれ赤色、青色の太い直線で模式的に表した。右図は (6) 式で表される透過光の照度 I_3 の変化を表す。なお、右図中の $a'' \sim e''$ は左図のそれぞれ 5 つの状態に対応する。

以上が、偏光板を通過する光の量 (照度) に関する理論的解釈と数式による展開である。我々は理科教員を目指す大学生が、定量的な数式は導き出せなくとも、図 4、6、8 に示す図を活用した定性的な解釈を用いて偏光板の回転角度と透過光の強度 (照度) の関係を示すことができることを期待した。その実態調査のためにアンケートを実施し、その結果を次章に示す。

3. 学生アンケートによる偏光板の理解度の調査

日常生活において偏光板 (フィルムを含む) はサングラスや液晶ディスプレイといった身近なものに使用されている。さらに模擬授業や小中学生対象の科学教室において偏光板を活用する機会があると予想される理科教員を目指す大学生であれば、偏光板の存在並びにその原理や現象についてある程度知識があることが期待される。そこで、本章では以下に示す山口大学教育学部理科教育選修の学生 51 名対象に実施した実態調査について報告する。始めに、3-1 節ではアンケートの設問について具体的に解説を行い、続く 3-2 節ではその結果の詳細と評価について、図を活用して考察を行う。最後に、3-3 節ではこれらの結果を踏まえた考察を述べる。

【アンケート実施について】

実施日時 2019 年 10 月 8 日 (火) (2 年生)、10 月 17 日 (木) (3 年生)
11 月 5 日 (火) (1 年生)、11 月 6 日 (水) (4 年生)
対象者 山口大学教育学部理科教育撰修の学生 51 名
(1 年生 14 名、2 年生 17 名、3 年生 9 名、4 年生 11 名)

3-1 アンケートの設問設定

第 2 章で述べた偏光板を通過した光の照度変化 (図 3、5、7) を問うアンケート課題を検討した。偏光板 1 枚の場合は、①：自然光はあらゆる方向の光によって構成されていること、②：偏光板は特定の方向にのみ振動する光を通す特性を持つことに関する理解度を調べることが可能である (図 3)。そして偏光板 2 枚以上の場合は、③：光はベクトルであり、合成や分解ができることの理解度を知ることができる (図 5、7)。これらの理解度を調べるために図 9 に示す設問、図 10 に示す解答用紙を用いてアンケート調査を実施した。なお、解答は照度変化の例図を複数示し選択させるマークシート方式も可能であるが、照度は (2)、(4)、(6) 式並びに図 4、6、8 に示すように明確に示すことができる物理量であり、形状のみならず傾きの凹凸も含め正しく理解しているかを判定するには、フリーハンドの方が良いと判断して本スタイルを採用した。当日は、文章のみでは設定条件を理解しにくい場合もあり、口頭での補足説明も行った。なお、明るさについては、偏光板 1 枚、2 枚、3 枚のそれぞれの場合の大小関係がわかるように補助線を入れ、注釈をつけて記述する

よう説明も行った。

設問

自然光を発する光源があり、光源から出た光が偏光板を通過し、その透過光の様子を観測者が観測している。なお、偏光板のスリットは透過する振動方向を書き表したものであり、スリットが縦向き・横向きの各場合をそれぞれ、偏光板が縦向き・横向きとよぶ。

①偏光板 1 枚における透過光の照度変化 (図 10-左)

初期条件：1 枚目…偏光板を縦向きの状態を、回転角度 0° とする。

この状態から、1 枚目を $0\sim 180^\circ$ まで回転させた場合の透過光の照度変化を図示せよ。

②偏光板 2 枚における透過光の照度変化 (図 10-中央)

初期条件：1 枚目…偏光板を縦向きにして固定する (回転させない)。

2 枚目…偏光板を横向きにして、基準角度 0° とする。

この状態から、2 枚目を矢印の方向に $0\sim 180^\circ$ まで回転させた場合の透過光の照度変化を図示せよ。

③偏光板 3 枚における透過光の照度変化 (図 10-右)

初期条件：1 枚目…②に同じ

2 枚目…②に同じ

3 枚目…偏光板を横向きにして固定する (回転させない)。

この状態から、2 枚目を矢印の方向に $0\sim 180^\circ$ まで回転させた場合の透過光の照度変化を図示せよ。

明るさの大小関係については、視覚的にわかるように記述すること。

図 9 アンケートの設問

解答用紙

設問に従って 1~3 枚の偏光板を重ねたとき、観測者が観測する光の明るさ (照度) がどのように変化するか、偏光板の回転角度と透過光の照度の関係を図示せよ。

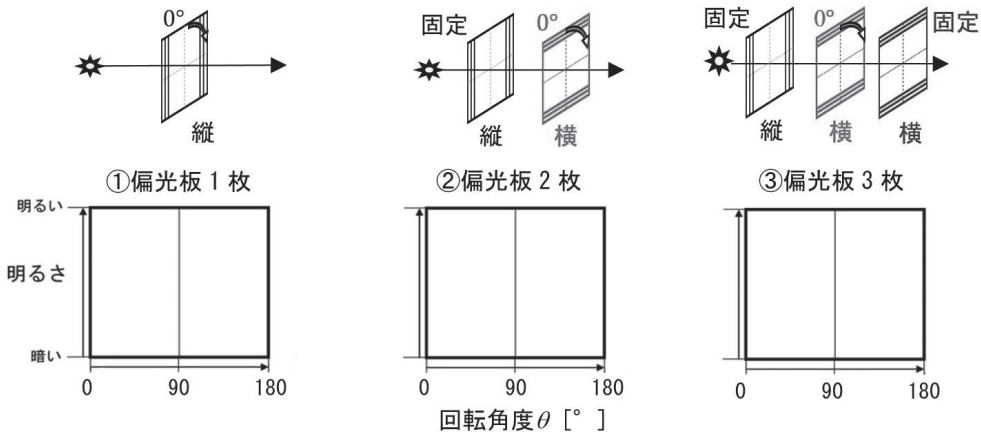


図 10 アンケート調査の解答用紙

上図は設問①、②、③の設定を具体的に絵に表したものであり、それぞれ図 3、5、7 に相当する。回転させる偏光板には回転角度 $\theta = 0^\circ$ のときの偏光板の初期位置を示しており、目印とし回転方向に矢印を描いている。この偏光板の回転角度が下図の横軸に相当する。

なお、(2)、(4)、(6) 式に基づいた正しい解答例を図 11 に示す。左から図 4、6、8 図に示したものと同一であり、多くの大学生が正しい直線または曲線を記載することを期待した。

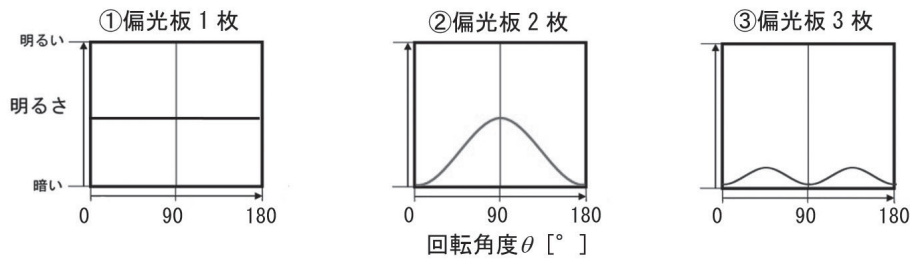


図 11 理論 (2)、(4)、(6) 式) に基づいた正しい解答例

3-2 アンケート結果及びその評価

本アンケートは複数の解答例から正しいと思ったものを選択する方式ではなく、フリーハンドによる自由記述で実施した。図 11 に示す 3 つ全ての正解を導き出した者は 51 名中 2 名であり、全体の 3.9% という非常に低い値を得た。では、誤った者はどのように考え、どのように解答したのかを考察するために得られた解答を系統的にパターン分けしたものを図 12 に示す。左から①『偏光板 1 枚』、②『偏光板 2 枚』、③『偏光板 3 枚』における解答である。各グラフにおいて、左上の数値は解答人数、右上の記号はグラフ番号、グラフ間を結ぶ直線上の数値は左側の図を解答した者のうち右側の図を解答した者の数をそれぞれ表す。さらにグラフ間を結ぶ直線の太さは後者の数値の大きさを反映させた。以下に偏光板の枚数ごとにそれぞれ結果に対する評価を行う。なお、本アンケートでは照度変化の形状を重視し、①、②、③それぞれの照度の絶対値については言及しないこととする。

1) ①『偏光板 1 枚』の場合 (正解は 1-a)

解答した 51 名の学生のうち、『偏光板 1 枚』の結果 (図 11 左図または図 12 中の 1-a 図) を正確に描いた者は 29 名 (56.9%) という多いとは言えない結果であった。この解答は「自然光はあらゆる方向の光によって構成されており、偏光板は特定の方向にのみ振動する光を通す特性を持つこと (つまり、偏光板に向けて発せられた光は偏光板の回転に依存せず、振動する方向は各々異なるが同じ量の光が通過する) を理解した結果によるものと解釈できる。つまり、51 名中 29 名 (56.9%) が偏光板の基礎的特性を知っていたことを意味する。残る 22 名の解はそもそも偏光板の特性を正しく理解せず、知識ではなく予想や感覚で解答したと推測する。

2) ②『偏光板 2 枚』の場合 (正解は 2-c)

①『偏光板 1 枚』の場合の不正解者はそもそも偏光板の特性を理解しておらず、2 枚重ねた場合の議論に適さないと判断し、ここでは①『偏光板 1 枚』の場合における正解者 29 名を対象に考察を行う。この 29 名の②『偏光板 2 枚』時における解答は 2-a 図～2-f 図の 6 パターンに分けられる。この内、2-a 図～2-e 図の 5 パターンは 2 枚の偏光板が直交する場合 ($\theta = 0, 180^\circ$) に照度の最小値を、平行となる場合 ($\theta = 90^\circ$) に最大値を取り、これらの 3 点における正しい理解はされており、それらの間をどう解釈するかの違いである (解答率 $27/29 = 93.1\%$ 、全体では $27/51 = 52.9\%$)。それが図 6 に示す偏光の分解を理解して解答したのか、あまり考えずに線をつないだのかはこの時点では判断しにくく、続く③『偏光板 3 枚』の場合において改めて議論したい。また、2-e 図においては光の特性 (光は合成波) に関する知識はなく、偏光板の特性 (ある特定の方向にのみ振動する光を通す) にのみ注目した結果の解答と推測する。そういう意味では我々は多くの大学生が 2-e 図の解答を記述すると予測していたが実際は少なく、それよりはより正解に近い解答 (2-a 図、2-b 図、2-d 図) が多数得られた。ただし、図 13 に示す②『偏光板 2 枚』の特徴的な部分が正解な解答 ($\theta = 0, 90, 180^\circ$) における傾きの角度依存のように各々の変化の傾きの形状は大きく異なり、波としては似て非なるものである。しかし、これら非なるものの区別は、図 6 に示す偏光の分解の解釈からも、さらに図 13 に示す光の周期性 (連続的な傾き) から考えても違いは明確であり、2-c 図が最も正しいということは簡単に読み取れなくはない (正解率 $3/29 = 10.3\%$ 、全体では $3/51 = 5.9\%$)。最後に、2-f 図の解答に関しては得られた 2 解答両方を記載しているが、偏光板 1 枚の時の「偏光板は特定の方向にのみ振動する光を通す特性を持つ」という解釈からは共に導き出せない解答である。よって、この 2 名は正解したと思われた①『偏光板 1 枚』の解答の方が理解せずに偶然正解となった可能性もあると推測する。

3) ③『偏光板3枚』の場合（正解は3-d）

②『偏光板2枚』の場合と同様に①『偏光板1枚』の正解者29名対象に考察を行う。このケースにおいても②『偏光板2枚』の場合と同様に図8に示す偏光の分解の知識が必要である。この場合、偏光板2枚目で分解された偏光をさらに3枚目でも分解し、偏光板2枚の場合において照度が最大であった $\theta = 90^\circ$ が最小になることを示す必要がある。さらに $\theta = 45^\circ, 135^\circ$ において最大値をとることも示す必要があり偏光の分解に関する正確な知識が求められる。そういう意味では3-a図、3-d図、3-e図を示した5名（解答率 $5/29 = 17.2\%$ 、全体では $5/51 = 9.8\%$ ）は偏光に加え、偏光の分解という概念を理解していたと推測する。そして、(6)式に従う理論的解釈まで理解していた者は3-d図を解答した2名（正解率 $2/29 = 6.9\%$ 、全体では $2/51 = 3.9\%$ ）に過ぎないことが明らかとなった。

最後にまとめると、全てを正しく理解していた学生は2名（3.9%）、偏光と偏光の分解の両方の概念を理解していた学生は5名（9.8%）、偏光のみ理解していた学生は29名または27名（56.9%または52.9%）、偏光を理解していない学生は22名または24名（43.1%または47.1%）と導かれた。我々の予想に反して多くの学生が偏光板の回転角度と透過光の強度（照度）の関係を正しく示すことができず、偏光や偏光板で起こる現象について理解されていないことが判明した。

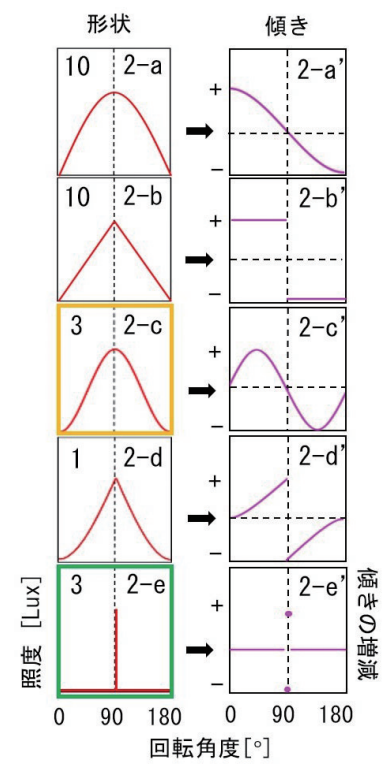
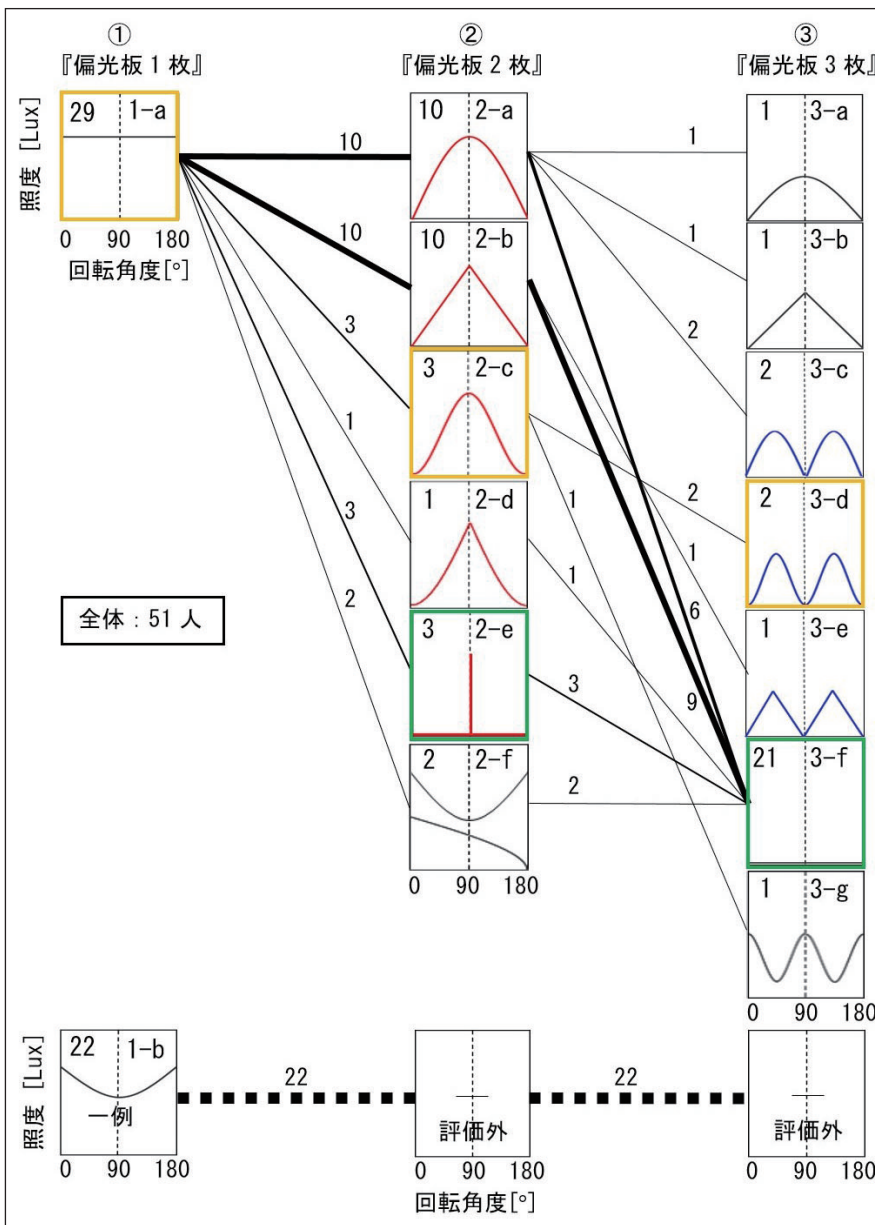


図13 ②『偏光板2枚』の場合における解答2-a～2-e図とそれぞれの傾きの角度変化(マゼンタ色)

図12 条件①『偏光板1枚』、②『偏光板2枚』、③『偏光板3枚』における偏光板の回転角度と照度の関係の解答

①『偏光板 1 枚』の場合は明るさが角度依存せず一定かどうかで区別し、②『偏光板 2 枚』及び③『偏光板 3 枚』の場合は同一の形状別に分類分けを行った。なお、②『偏光板 2 枚』においては、2 枚の偏光板が直交 ($\theta = 0, 180^\circ$)、または平行 ($\theta = 90^\circ$) となる場合の照度がそれぞれ最小、最大となる解答を赤色で示し、③『偏光板 3 枚』においては可変の偏光板が他の偏光板と直交するとき ($\theta = 0, 90, 180^\circ$) に最小となる解答を青色で示した。図中の黄枠、緑枠はそれぞれ理論に基づく正しい解答、偏光の分解を考えずに偏光の特性のみから導かれる誤った解答を示している。なお、1-b 図については解答が多数であるため、最も多かった解答 (7 名 / 22 名) を一例として示した。

3-3 アンケート結果のまとめ

前節で示したアンケート結果を改めて以下の 3 つの視点からまとめ直す。ここでは図 12 に示した細かな分類ではなく、偏光と偏光の分解の概念理解という大きなカテゴリーによる分類・まとめとする。なお、②『偏光板 2 枚』において偶然正解した可能性のある学生 2 名については、ここでは理解があるものと仮定し、偏光のみ理解していた学生及び偏光を理解していない学生それぞれ 29、22 名の組み合わせを採用した。

- 1) 全解答者数、偏光を理解している学生数、偏光・偏光の分解共に理解している学生数を図 14(a) に示す。なお、偏光の分解は偏光を理解している者に対してのみ成立するため、偏光を理解している者の中には、合わせて偏光の分解も理解している者が含まれる。
- 2) 解答者の大学入学までの物理学の履修状況並びに大学入試における物理選択状況と、偏光及び偏光分解光に関する理解者数及び未理解者数の関係を図 14(b) に示す。
左からア:「全解答者」51 名 (100%)、イ:「高等学校時に物理基礎履修者」46 名 ($46/51 = 90.2\%$)、ウ:「高等学校時に物理履修者」32 名 ($32/51 = 62.7\%$)、エ:「大学入試センター試験において物理受験者」28 名 ($28/51 = 54.9\%$)、オ:「大学入試個別学力試験において物理受験者」11 名 ($11/51 = 21.6\%$) それぞれに対する偏光及び偏光の分解に関する理解者数及び未理解者数を示す。
- 3) 図 14(b) の結果を元に、偏光を知らない者、偏光を理解している者、偏光・偏光の分解共に理解している者の数と上記ア～オの条件との関係を図 14(c) に示す。なお、偏光を理解している者の中には、合わせて偏光の分解を理解している者が含まれるため合計が 100% を超えている。

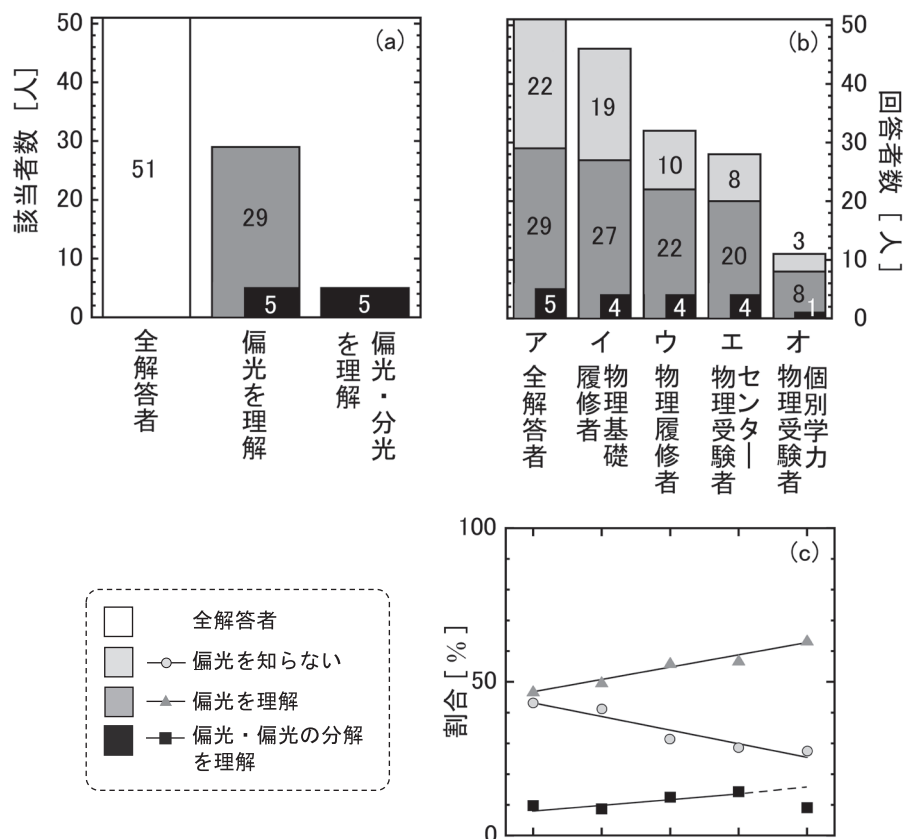


図 14 偏光・偏光の分解を理解している人の人数と割合の相関。各図の詳細は本文を参照。

図14(a)は、図12の2-a図～2-f図の6パターンを描いた29名の学生を「偏光を理解」、さらに3-c図、3-d図、3-e図を描いた5名の学生を「偏光・偏光の分解を共に理解」していると判断し、まとめたものである。さらに、それぞれ解答した学生の高等学校時の物理の履修状況並びに大学入試における物理受験との相関を検討したものが図14(b)及び14(c)である。偏光板を知っているかどうかという事に関しては学習経験が多くなるに従って(ア→オ)、人数でいうと22、19、10、8、3名と減少しており、各項目総数に対する割合の変化も同様に減少傾向が見られている(ア43.1%→オ27.3%)。一方、偏光を理解しているかという事に関しては29、27、22、20、8名というように数としては減少傾向が見られるが、割合としては増加する結果を得た(ア56.9%→オ72.7%)。同様に偏光及び偏光の分解を理解しているかどうかに関しても傾きは緩やかになったが割合に関しては同じような増加傾向が見られた(ア9.8%→エ14.3%)。なお、図14(c)における項目オの減少は、オの総数11名はそもそも統計的に総数が少ないことが影響したと推測する。これらの結果から、学習経験が多くなることで偏光や偏光板に対する理解度に結びついているという確証が得られた。なお、偏光の分解の理解度がそもそも低い理由は高等学校「物理」では偏光は学習するが、偏光の分解は直接学習していないことが影響していると考えられる。しかし、偏光の分解も理解したと見なした5名に関しては偏光の分解について直接的に学習していなくても、波(電磁波)の一般的知識や実体験を元に偏光の分解の現象を考えることができたかと推測する。

以上の結果より、理科の教員を目指す大学生において、偏光や偏光の分解に対する知識は決して高くなく、大学生の間に新規または改めて学習する必要があると考える。参考書等を活用した原理や数式理解に加え、さらなる理解度向上のためには実験による定量的検証が有効と考え、偏光・偏光板の実験を補助する教材開発を行うこととした。本論文に続くパートII¹³⁾においてはこの教材開発について紹介し、さらに大学生による実践と前後のアンケート調査により、教材の有効性を検討した結果を報告する。なお、本論文において残った課題である第1章「②照度の強い光源を用いた場合、光を通さないと指導を受ける図1bの場合においても光は通る場合がある。この現象をどう説明するのか」については、開発した教材を活用した実験を通じて事実確認となぜ起こるのかについて説明を行いたい。

引用文献

- 1) 植松恒夫他：文部科学省検定済教科書 高等学校理科用『物理 改訂版』啓林館，2017.
- 2) 三野弘文・三好真典：「偏光板とセロハンテープを用いた干渉色の仕組みと応用」千葉大学国際教養学研究 2, 69-79, 2018.
- 3) 鈴木八十二：『液晶ディスプレイのできるまで』日刊工業新聞社，2005.
- 4) 三浦登他：文部科学省検定済教科書 高等学校理科用『改訂 物理』東京書籍，2017.
- 5) フリー百科事典 ウィキペディア日本語版：「偏光板」(<https://ja.wikipedia.org/wiki/偏光板>) (2020年8月3日)
- 6) 佐藤文隆他：文部科学省検定済教科書 高等学校理科用『物理 新訂版』実教出版，2017.
- 7) 田村剛三郎他：文部科学省検定済教科書 高等学校理科用『高等学校 改訂 物理』第一学習社，2017.
- 8) 國友正和：文部科学省検定済教科書 高等学校理科用『改訂版 物理』数研出版，2017.
- 9) 伊崎章典：「ヨウ素系偏光板の液晶ディスプレイへの応用」化学と教育 63, 232-235, 2015.
- 10) ファインマン，レイトン，サンズ著，富山小太郎訳：『ファインマン物理学II 光・熱・波動』岩波書店，2005.
- 11) 済木雄二：「LCD用偏光板の技術動向」日本ゴム協会誌 84, 237-241, 2011.
- 12) W. A. シャークリフ著，福富斌夫他訳：『偏光とその応用』共立出版，1965.
- 13) 家永展寛・重松宏武：「高等学校物理における「偏光」の取り扱いII ～偏光板のしくみと透過光の特性を理解するための教材開発とその活用実践～」，山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要 50, 311-322, 2020.