

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500849

研究課題名（和文） ブロック状光学素子を用いた扱いやすく安価な光学実験教材の開発

研究課題名（英文） Development of Teaching Materials for Optical Experiments by Using Practical and Inexpensive Block-Type Optical Devices

研究代表者

馬場 一隆（BABA KAZUTAKA）

仙台高等専門学校・知能エレクトロニクス工学科・教授

研究者番号：10192709

研究成果の概要（和文）：中等・高等教育機関における実験教育用の取り扱いが容易で安価に提供できる新しい光学実験教材を開発した。2cm角程度の直角ブロック状に各光学素子を構成して光軸や位置の調整を容易にし、高価な光学素子は入手が容易で安価な他の材料で自作することを基本方針として研究を進めた。様々なブロック状光学素子を開発し、特に糖度計については理論値と実験値が良く一致する実験教材の試作に成功した。

研究成果の概要（英文）：In this project, I have developed novel teaching materials for optical experiments. The teaching materials should be used for teaching experiments and open classes in universities, colleges, and high schools because those materials are practical and inexpensive. We have researched and developed the teaching materials on following guideline; optical devices used as the teaching materials should be formed as cubic blocks with aperture of 2×2 cm, and commercially expensive optical devices should be originally developed by using cheaper materials. I have developed various teaching materials for optical experiments by using those block-type optical devices. In particular, I have successfully fabricated a Brix scale kit, in which measured optical power is similar to theoretical one.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学，科学教育

キーワード：工学教育

1. 研究開始当初の背景

近年、光記録・光通信をはじめとする光を利用した技術分野の広がりに伴い、理工系高等教育機関において、光学に関連する授業や実験・実習の重要性が高まりつつある。また、光を用いた実験は、視覚的なインパクトが大きいことから興味を引きやすく、一般向けの

公開講座や小中学生の自由研究のテーマとして、最も人気の高い分野の一つであると考えられる。しかしながら、光学素子の多くは高価であり、それが本格的な光学実験を、教育の場や公開講座に取り入れる上での大きな障害となっている。また、偏光や分光等も利用する応用的な光学実験の分野において

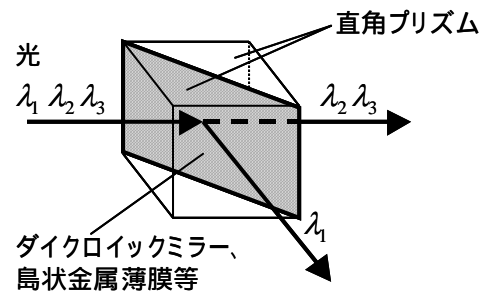
は、異なる形状の様々な素子を組み合わせるため、光軸や素子位置の調整に熟練した技能が必要で、学生1人1人が個別に教材を与えられて実験に取り組めるような教育環境を実現することは、ほぼ不可能なのが現状である。

2. 研究の目的

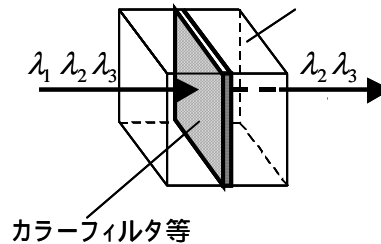
本研究では、この問題の解決を図るため、使用者（学生等）がその機能を直感的に理解でき、かつ取り扱いが容易で、安価で提供できる新しい光学実験教材の開発を目指した。そのため、先ず、微動台類をできるだけ使用しないで実験系を構築することを考えた。1つの素子の調整に複数個の微動台を必要とするため、実験系全体を高価で複雑なものとしているからである。微動台の排除には、各光学素子のブロック化が有効であると考えた。また、水晶のような複屈折性の誘電体結晶を材料とするため高価なものとなっている波長板等は、プラスチックケースのように、その製造工程中に延伸処理を伴うため複屈折が生じてしまった材料を用いて自作することで解決できると考えた。本研究は、このような基本方針のもと、光学実験教材の最も効率的な製作方法を明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

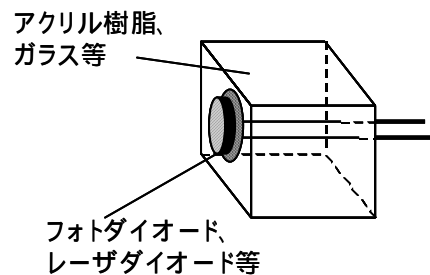
先ず、本研究によって開発を目指すブロック状光学素子の概念を説明する。図1に、いくつかの例を示す。光学素子の基本的な形状は、立方体もしくは直方体とし、光が透過する面は、すべて同一の大きさの正方形に統一する。原則的に光のビームがこの正方形断面の中心を通るように定めることで、各光学素子の配置や光軸の調整を容易にする。各素子の具体的な構造は、例えば、図1(1)のような反射型の素子（波長合分波器など）は、薄膜もしくは多層膜を、2つの直角プリズムの間に挟み込んだ構造を基本として、分けた光を光軸に直角方向に取り出すようにする。図1(2)のような透過型の素子（カラーフィルタや位相板など）は、素子をアクリルやガラスのブロックに挟んで、安定して実験台の上に置くことができるようにすることで、位置の調整を容易にする。さらに、フォトダイオード（PD）、発光ダイオード（LED）、レーザーダイオード（LD）のような受光・発光素子は、図1(3)のように、アクリル等のキューブに孔を空けて導線を取り出し、貼り付けて固定する。レンズ等も同様にアクリルかガラスのキューブに固定する。光源の発光やフォトダイオードの出力の計測は、乾電池やデジタルテスタのような、扱いやすく安価な装置を用いて行えるようにする。



(1) 反射型分光素子



(2) 透過型分光素子



(3) 受光・発光素子

図1 ブロック状光学素子の例

本研究では、このような光学実験教材の開発のため、研究期間内に以下の事項を明らかにしようと試みた。(1)各ブロック状光学素子について、適切な設計例を示し、その簡単な作製法を明らかにする。(2)教材としての利用の観点から素子の材料を幅広く検討し、経済性も考慮して、最適なものを明らかにする。(3)これらブロック状光学素子を用いた学生向けの魅力的な実験テーマを数多く開発する。

4. 研究成果

(1) ブロック状光学素子の作製法

光検出器や偏光子、カラーフィルタといった多くの素子は、「3. 研究の方法」で述べたように、フォトダイオード、ポラロイド板、コダックラッテンフィルタ等をアクリル製の透明な直角ブロックに貼り付けることにより、容易に試作することができた。レーザ

光源については、近年レーザーポインタが安価に入手できるようになってきたので、それを活用することにして、2 cm × 2 cmの断面を持つ直方体のケースを作製して、その中央に光軸が来るように調整してレーザーポインタを収めた。

本研究で試作した素子の中では、ビーム状の白色光源の製作が一番困難であった。市販の白熱灯を用いる方法では、2 cm × 2 cmの断面内に収めることが困難なためである。そこで、本研究では、白色LEDの光をピンホールを通して擬似的な点光源とし、ピンホールの位置が焦点となるようにレンズを設置することで製作を試みた。白色LEDは、青色LEDを基に製作されているので、青色域の発光強度が強いため、完全かつ理想的な白色光とは言えないが、発光スペクトル中に波長450 nmから700 nmの光を含むのでRGBの分離程度の簡単な実験には使用することができる。試作した装置の写真を図2に示す。直径1 cm程度のビーム径を30 cm以上維持できるので、本研究で考えている実験教材には使用することができるが、青色以外の波長域の強度を補うために複数の種類のLEDを組み合わせる等、今後更に検討が必要である。



図2 ビーム状白色光源の試作例

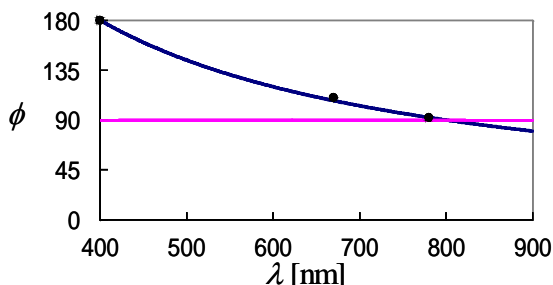


図3 セロファンにおける波長と位相差の関係の測定例

(2) 素子材料の検討

本研究において、市販されている光学素子の利用が最も困難だったのは、波長板であった。高価である上に、原理的に使用波長ごとに用意する必要があったためである。そこで、安価な材料で自作することにした。

セロファンや一部のアクリル板等、延伸処理を経て作製される樹脂製品の中には大きな複屈折性を有するものがある。それらを用いることで、可視領域における様々な波長に対応した $\lambda/4$ 板や $\lambda/2$ 板のような波長板を作製することができないか、実験的な検討を行った。図3は、厚さ25 nmのセロファンにおける各波長の位相差（セロファンの光学軸方向の偏光とそれに垂直な偏光が、セロファンを透過するまでに受ける位相の変化の差）の測定例である。この測定結果から、複屈折率差（両偏光が感じる屈折率の差）は、0.4568 と大変に大きな値であることが分かった。図中の実線はこの複屈折率差の値を基に各波長の位相差を計算したもので、実験値（図中の点）と良い一致を示しており、妥当な測定結果であることが分かる。この試料は、そのまま $\phi = 90^\circ$ となる波長で $\lambda/4$ 板として、 $\phi = 180^\circ$ となる波長で $\lambda/2$ 板として使用することができる。この場合では、各々800 nmと400 nmがそれに当たる。

本研究では、同様にして他の市販樹脂製品でも $\lambda/4$ 板として使用できる波長を測定した。以下にその一例を示す。

アクリル板	238 nm
セロテープ	385 nm
プラスチック板	707 nm

これらの値は、製品やロットによっても異なるので、使用に当たっては個別に測定した上で選択しなければならないが、安価な市販樹脂製品を用いても十分波長板を製作できることが示された。他の波長帯用の波長板は、適当な材料を組み合わせせて貼り合わせたり、研磨したりして十分実現可能である。なお、アクリル板については1 mm厚のものは大きな複屈折性が観察されたが、2 mm厚のものには複屈折性は見られなかった。製法が異なると思われる。

(3) ブロック状光素子の応用教材

開発・試作されたブロック状光素子の応用教材としては、液体用の糖度計、キューブ状の波長合分波器を利用した板状試料の分光特性の測定、光の透過率・反射率の入射角度依存性（プリースタ角や全反射を含む）の測定等の試作と評価を行なった。本稿では、特に糖度計について詳しく述べることにする。

蔗糖の水溶液など糖分を含む液体の屈折率が糖分の濃度（糖度）によって変化することは良く知られている。例えば、糖度0の水

は屈折率が 1.333 であるが、糖度が 10% の水溶液は 1.348, 20% のものは 1.364 となる。従って、液体の糖度の測定は、屈折率の測定に置き換えることができる。屈折率の測定法には種々の方法があるが、ここでは反射率から測定する方法を選択した。図 4 に液体（糖液）とガラス（屈折率 1.47 を仮定）境界面における S 偏光の光の反射率の計算例を示す。図の横軸は糖液の屈折率 n_2 であり、縦軸は反射率である。 θ は光の入射角である。図より $\theta = 60^\circ$ から 65° のとき、20% 以下の糖度の糖液の屈折率変化に対して反射率の変化が大きく、糖度計としての感度が高いことが分かる。

この理論的な検討結果を基に、図 5 に示すような構成の測定系を考えた。用いるブロック状光素子は 3 種類である。すなわち、先ず光源として LED、受光素子としてフォトダイオード、測定用セルとして 60° のガラスプリズムの 1 面にアクリルで液体用の容器を取り付けたもの（この際、ガラスプリズムに糖液が直接接するようにプリズムの 1 面を容器の壁面とすることが重要である）である。LED については、発光強度が高いものであれば特に波長は問わない。当初平行ビームを得るため、レンズを組み合わせる必要があるかと思われたが、実験の結果無くても十分な測定精度が得られることが分かった。フォトダイオードは受光面が比較的大きなものをアクリルキューブに貼り付けてブロック状光素子とした。実際にそれらを図 5 のように配置した様子の写真を図 6 に示す。フォトダイオードで生じる電流を抵抗に流し、抵抗の両端間に生じる電圧をデジタルテスタで測定することによりガラス（プリズム）と糖液の境界面からの反射光強度 R を測定した。

試料を水としたときの反射光強度 R_0 で正規化した反射率 R/R_0 を様々な濃度の糖液に対して測定を行った。それらの測定結果を図 7 に示す。図中の実線は理論値である。両者は良く一致しており、理論を実験により検証するという高等教育機関らしい実験教材となった。この装置を用いた実験を本校の 5 年生学生 2 名に実施させたところ、ともに図 7 と同様の結果が得られた。ブロック状光素子の位置調整は、特別な器具を使うことなく、行うことができた。今後は、三角プリズムの自作等、低価格化の検討をさらに進める必要があると思われる。

以上のように、本研究によりブロック状光素子の基本的な概念を具体的に提示することができ、また、その有効性を糖度計を例にとって示すことができた。また、セロファン等の身近な材料を用いて高価な光学素子の代用ができることも実験的に示すことができた。

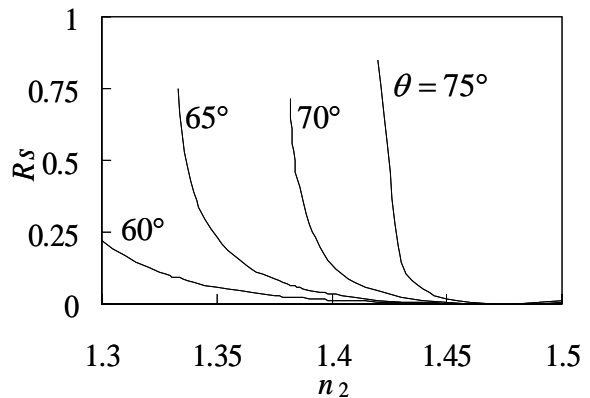


図 4 液体の屈折率とガラスとの境界面における反射率の入射角による変化の計算例

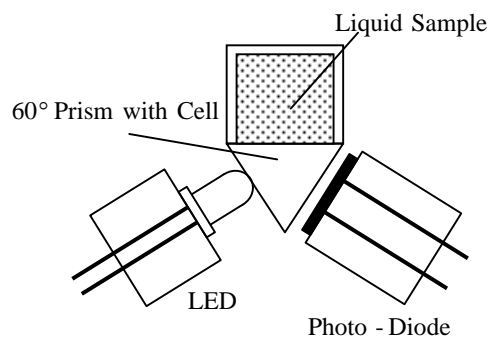


図 5 糖度計の構成

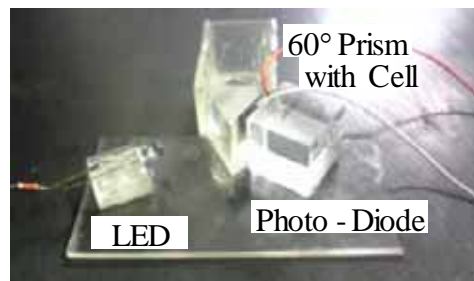


図 6 ブロック状光素子を用いた糖度計

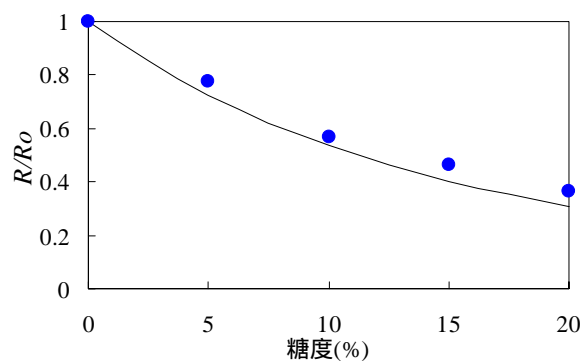


図 7 液体の糖度の測定例

本研究では、その他にブロック状光学素子と組み合わせて用いることができる様々な導波路型素子についても研究を進めている。例えば、光送受信器用の導波路型偏光スプリッタについては、方向性結合器型のものについて理論的な検討を進め、その設計例を示した。さらに、光ファイバ中に設けられたギャップ中のビームの広がり方が液体の屈折率に依存することを利用した屈折率測定法等、関連分野についての研究も進めた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計9件)

馬場一隆，ブロック状光素子を用いた扱いやすく安価な光学実験教材，平成24年度電気関係学会東北支部連合大会 秋田県立大学(由利本庄市)，発表予定。

K. Baba and K. Nemoto, Sensor for optical characteristics of liquid using gapped waveguides: Theory, SPIE Photonics West 2012, paper 8264-45, 2012年1月25日, モスコーンセンター(米国サンフランシスコ市)。

黒木翔太，馬場一隆，複屈折を有する市販樹脂板等の波長板への応用，平成23年度電気関係学会東北支部連合大会 2I07, 2011年8月26日, 東北学院大学(多賀城市)。

K. Baba and T. Nakai, Design and theoretical characteristics of directional coupler-type optical polarization splitters using periodic dielectric multilayers, SPIE Photonics West 2011, paper 7933-70, 2011年1月26日, モスコーンセンター(米国サンフランシスコ市)。

根本紘平，馬場一隆，光導波路間に設けられた空隙を用いた液体用光学特性測定装置，平成22年度電気関係学会東北支部連合大会 2B12, 2010年8月27日, 八戸工業大学(八戸市)。

中居毅直，馬場一隆，広角バンド構造を用いた導波型偏光スプリッタ，平成22年度電気関係学会東北支部連合大会 2B13, 2010年8月27日, 八戸工業大学(八戸市)。

6. 研究組織

(1)研究代表者

馬場 一隆 (BABA KAZUTAKA)
仙台高等専門学校・知能エレクトロニクス工学科・教授
研究者番号：10192709

(2)研究分担者

無し

(3)連携研究者

無し