

令和 3 年 8 月 20 日現在

機関番号：55301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K02972

研究課題名(和文) 科学教育用大面積モノクロメータの開発とその活用の研究

研究課題名(英文) Large area monochromator for science education

研究代表者

佐藤 誠 (Sato, Makoto)

津山工業高等専門学校・総合理工学科・教授

研究者番号：90413830

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 600,000円

研究成果の概要(和文)：光の干渉実験において広い面積で単色、かつ波長を連続的に変化できる光源を用いると、干渉縞の色とパターンの変化を連続的に観察でき、高い学習効果が期待される。太陽光は平行性が高く、強度が強い連続スペクトルを持つ質の高い光源である。ヘリオスタットと組み合わせて実験室内で太陽光から任意の波長を抽出して利用する安価なモノクロメータを開発した。

平面鏡にレプリカ透過型回折格子を重ねた反射型回折格子を平行配置して、一段目回折格子を中心に回転、二段目回折格子を出力方向にスライドさせる機構とし、平行単色光を同じ場所へ導く構成とした。回折格子の中間にコリメータを挿入し、 $\pm 5\text{nm}$ の単色性と 5cm 角の面積を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光の干渉実験は、通常単一波長による明暗パターンの観察がおこなわれ、色フィルターによる静的な観察に留まることが多い。本研究で実現した単色光の波長を任意に変えることのできる、太陽光を入力光源とするモノクロメータを用いることで、色の变化と干渉パターンの変化を動的にリアルタイムで観察することができる。光学の学習において光の波長と色の関係を確認する効果的な教材を提供することができる。

研究成果の概要(英文)：A monochromatic light source with a wide area and tunability would let it be possible, in a light interference experiment, to continuously capture the change in color and the pattern of interference fringes. Sunlight is an easily available, high-quality light source with high parallelism, high intensity, and a continuous spectrum. In combination with the heliostat, I have developed an inexpensive monochromator that extracts and uses arbitrary wavelengths from sunlight in the laboratory.

A pair of reflective diffraction gratings with a replica transmission diffraction grating superimposed on a plane mirror are arranged in parallel to rotate around the first diffraction grating and slide the second diffraction grating in the output direction to send parallel monochromatic light to the same location. A collimator was inserted between the diffraction gratings to achieve a monochromaticity of $\pm 5\text{ nm}$ and an area of 5 cm^2 .

研究分野：物理教育

キーワード：モノクロメータ 干渉実験 ヘリオスタット 干渉色

1. 研究開始当初の背景

太陽光は光源が極めて遠方にあり、光源の広がりも視直径にして0.5度と狭く、かつ強力であるため、教育目的の幾何光学実験、分光実験、エネルギー変換実験、紫外線や赤外線を用いた化学反応実験、太陽表面の観察など物理、天文、化学、生物分野の多岐にわたり有用な光源として用いることができる。H27～H29の検討(科研課題No. 15K00950 基盤C)により教育用簡易ヘリオスタット(太陽光採光装置、図1、2参照)を開発した。この簡易ヘリオスタットに波長可変モノクロメータを組み合わせることで、これまでできなかった光学実験や観察を可能とする。連続スペクトルで平行度が高く強力である太陽光の優れた性質を利用した理科実験の教材開発を行い、日本の理科教育に寄与するのが目的である。

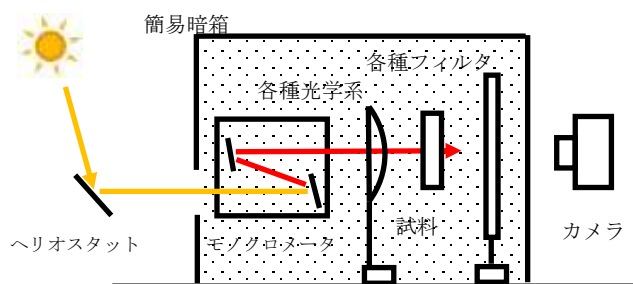


図1 太陽光利用概念

2. 研究の目的

開発済みの簡易ヘリオスタットと組み合わせて用いる、波長可変、大面積、平行性の高い光線を提供するモノクロメータを安価に製作する方法を明らかにする。製作に必要な情報は公開する。

従来の実験や分析に用いられるモノクロメータは、少量の試料に照射することが目的なので大面積に単色平行光を照射する設計にはなっていない。教育目的では、干渉などの光学現象や植物や生物などの吸収、蛍光を演示するには大面積での照射が望ましい。大面積、単色平行光、波長可変である光源、かつ、太陽光を利用した安価に入手できる光源は独自のものである。

太陽光に含まれる可視光だけでなく、赤外光、紫外光の存在をセンサーや蛍光で演示することで、光や色、電磁波についての認識を育む教材を提供することができる。

また、波長可変、単色平行光の特徴を活かした演示実験、授業内容を併せて開発し、実際に授業を行い、教育効果を確認する。

これまで天文台など先端的な研究施設でしか実現できなかった、太陽光を直接導いて利用することを学校の教室レベルで可能にするのが簡易ヘリオスタットである。教室に導いた太陽光線をスペクトル分光することや、太陽表面像を投影することはすでにできており、教育的効果が確認できている。さらに進んで太陽光線から単色光を抽出し利用することで、生物学や化学へ適用を拡大し、高度な演示実験を実現することができればその教育的意義は極めて高い。

3. 研究の方法

太陽光の特徴である強力な連続スペクトルを活かした利用法として、モノクロメータを用いた単色化光源が有望である。赤外から可視、紫外に至る任意の波長の単色化した大面積の平行光を入手できれば、これまで演示できなかった様々な実験を教室内で実現できる。例えば、ニュートンリングやくさび型間隙に見られる干渉縞の間隔が波長(色)の変化と共に連続的に変わることを直接演示することができる。

4. 研究成果

4.1 モノクロメータの構成

単色性、強度、使いやすさを満足する目的で、反射型ダブルグレーティングモノクロメー

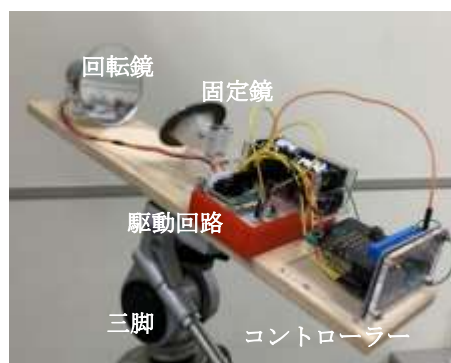


図2 簡易ヘリオスタット

タの構成を採用した。図3に原理図を示す。図の下、左から太陽光などの白色平行光線が反射型回折格子1に入射する。この初段の回折格子は固定である。波長ごとに異なる角度へ回折される。装置では1次回折光を抽出している。2段目の回折格子は、初段で回折された特定の波長の光線だけを入射光と平行な方向へ回折し、出力する機能を持つ。同じ場所へ出力光を導くため、2段目の回折格子はリニアスライド上で図の左右方向にスライドする機構を採用した。2段目の回折格子が左に位置するときは短波長の光線を出力し、右へスライドさせると長波長の光線を出力する。

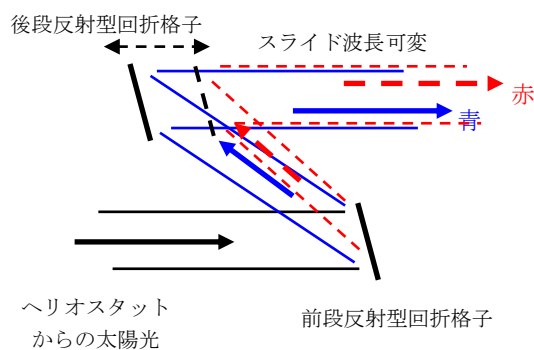


図3 2段構成モノクロメータ

2段目の回折格子のスライド位置が出力光の波長に対応するので、スライドレールの位置で任意の波長を選択することができる。

一組の平行に対抗配置した反射型回折格子で、基本的な単色光の取り出しは可能だが、干渉実験に用いるためには出射部を大面積にしたい。取り出し口を広くすると、目的とする波長の光線以外に、角度を持った隣接光の光線も出射する問題があった。この問題を解決するために、回折格子の中間に一組の凸レンズによるコリメータを挿入した。初段の回折格子で波長を回折角度に変換しているのので、凸レンズの光軸に平行に入射する特定の波長の光線は、レンズの焦点に像を結ぶ。その焦点位置にスリットを配し、光軸に平行な光線、つまり目的の波長の光だけを選択的に抽出し、後段のレンズを通して再び平行光線に戻す。このようにして、2段目の回折格子には目的の波長の平行光線だけが入射し、出力光の単色性と平行性が確保される。

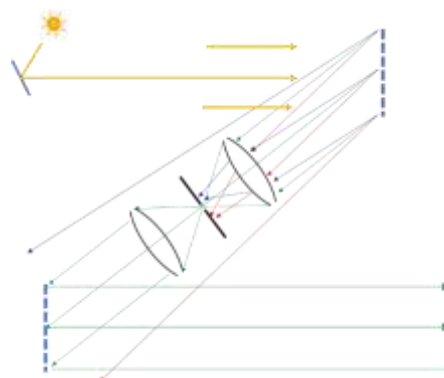


図4 コリメータ挿入による単色性と平行性の確保の原理図

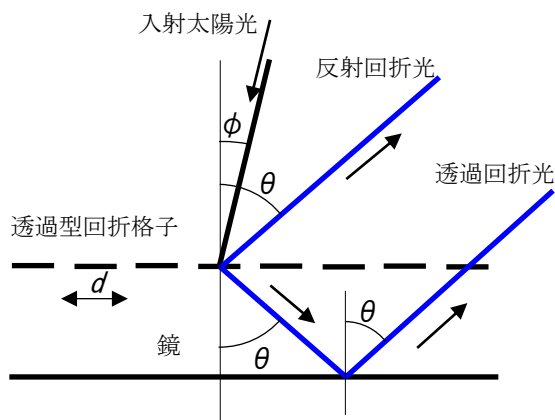


図5 廉価反射型回折格子の原理図

4.2 反射型回折格子

反射型回折格子は回折光の強度を確保できるので、このモノクロメータの分光素子として採用したいが、高価な光学部品であり、学生実験用に安易にもちいることは難しい。開発目標のモノクロメータは単色性を確保することが第一義なので、位相等の不完全性は問わない。そこで、安価に入手できるレプリカ透過型回折格子を平面鏡と重ねることで、回折格子を透過



図6 廉価反射型回折格子の外観

した光を鏡で反射させて表側に導き反射型回折格子として機能させることにした。図4に示すように、平面鏡と平行に配置すれば、反射面と回折格子の間に間隙やガラスなどの誘電体がある場合も正しく反射型回折格子として機能させることができる。

4.3 モノクロメータ

図7は、机上に組み立てたモノクロメータである。各構成部品はマグネットでホワイトボード上に固定配置してある。一対の凸レンズとスリットから構成されるコリメータは、前段回折格子の中央を中心に回転するビーム上に配置し、常に一組の回折格子を結ぶ線上にある。図8にモノクロメータの構成の平面図を示す。このような構成のためコリメータと前段回折格子の距離は一定だが、後段回折格子との距離は選択波長により異なる。回折格子間の回折光ビームは平行光線なので距離の変化は影響しない。後段回折格子はパルスモーター駆動リニアガイドにより直線的にスライドし、抽出波長は後段回折格子の位置で決定される。

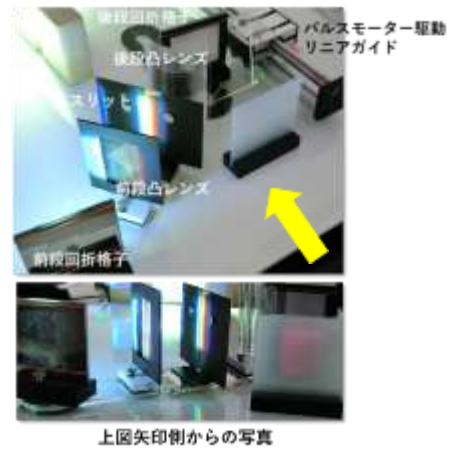


図7 モノクロメータ

4.4 干渉観察

図9に楔形空気層による干渉を観察した際のセッティングと3波長（赤、緑、青）での反射で観察した干渉縞の写真を示す。実際には、波長は連続的に掃引させることができ、短波長側へ掃引すると干渉縞の色が赤色から青色へ変化すると同時に、干渉縞の密度が増加する様子をリアルタイムで観察することができる。

単色光源の面積は回折格子の面積やレンズの面積の制限で最大5cm角である。当初の目標である10cm角は実現できていないが、この面積でも従来にない大面積であり、干渉実験には十分な大きさである。

波長を掃引して干渉縞を観察した様子を動画として撮影し、授業で活用している。

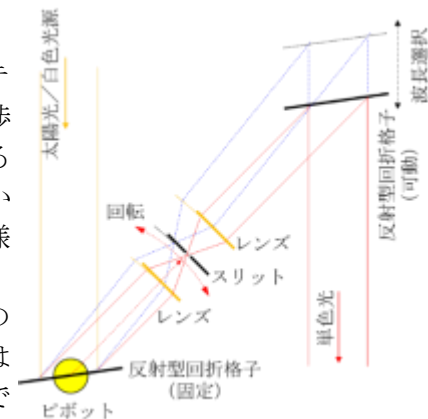


図8 モノクロメータの構成図

4.5 色合成器

モノクロメータの単色性を向上させるため回折格子間に凸レンズを用いたコリメータを挿入する検討をする中で、波長選択のスリット位置に、分光スペクトル像が形成されることに気づき、中央の波長だけでなく任意の波長を組み合わせることで再び重ねることで任意の色合成を実現することを試みた。

シャボン玉や蜘蛛糸が虹色に輝く現象について考察していたこともあり、その独特の色合いを再現することがこのモノクロメータをベースにした色合成器で実現できるのではないかと期待された。色合成器の構成を図10に示す。

蜘蛛糸の直径は数 μm と細く、表面で反射される光線と内部を通過する光線が干渉を起こし、干渉色を呈するものと推測される。図11の干渉モデルに基づき散乱光のスペクトルを計算すると図12のような結果が得られる。しかし、このスペクトルのグラフから実際に観察される色を想像することは難しい。視覚の3色モデルにしたがってRGB強度比から色を計算機上で再現すると、表1の結果を得た。ピンクやパステル調の緑、赤紫といった色が再現できている。表の横は蜘蛛糸の半径、縦は観察角度（太陽光線方向からの仰角）である。

これらの色を実際に確認するため、スリット位置に濃淡の透過フィルタを挿入して、白色

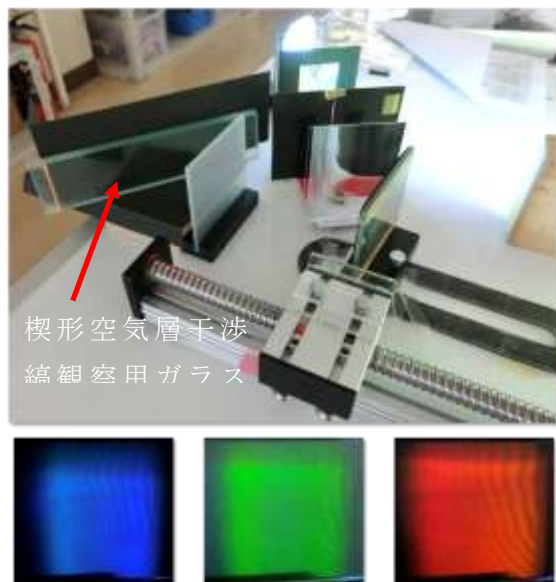


図9 楔形空気層干渉縞の観察

スペクトルから目的のスペクトル強度パターンを抽出して合成することで色を実験的に確認することができるかと期待される。また、予備的な検討段階であるが、図13に示す赤と青、赤と緑の合成で、表1の中に現れる色合いに近い合成色を確認することができた。

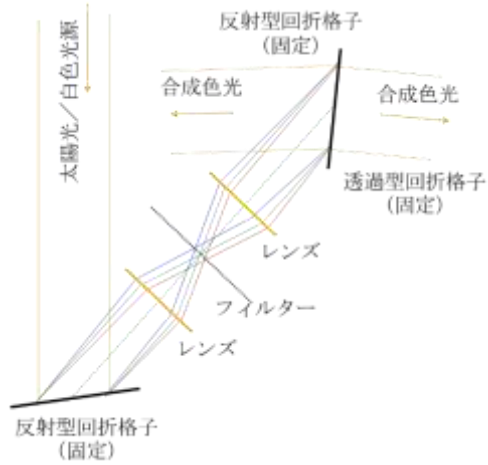


図10 色合成器の構成

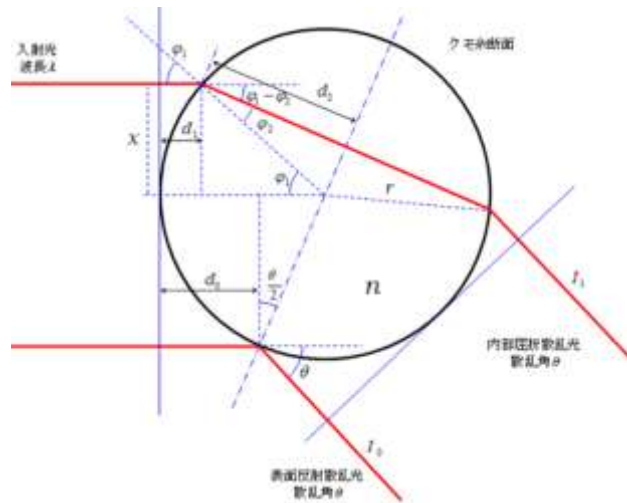


図11 蜘蛛糸虹発生の干渉モデル

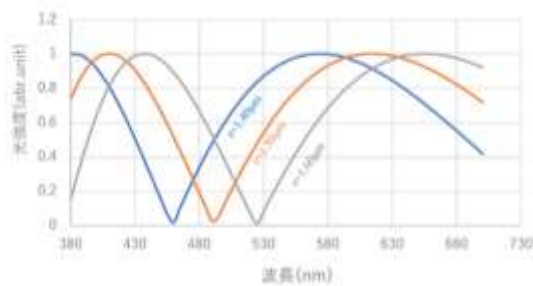


図12 干渉モデルをもとに計算で求めた蜘蛛糸から散乱される光のスペクトル

表1 干渉モデルをもとに計算で求めた蜘蛛糸から散乱される光の色再現

| r (μm) | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 2.0 | 2.1 | 2.2 |
|----------|------|---------|--------|-------------|-------------|-------------|--------|------|
| 1.0 | Red | Magenta | Purple | Cyan | Green | Light Green | Orange | Pink |
| 2.0 | Red | Magenta | Blue | Cyan | Green | Light Green | Pink | Pink |
| 3.0 | Pink | Purple | Cyan | Green | Light Green | Orange | Pink | Pink |
| 4.0 | Pink | Purple | Cyan | Green | Light Green | Pink | Pink | Pink |
| 5.0 | Pink | Blue | Green | Light Green | Yellow | Pink | Pink | Pink |

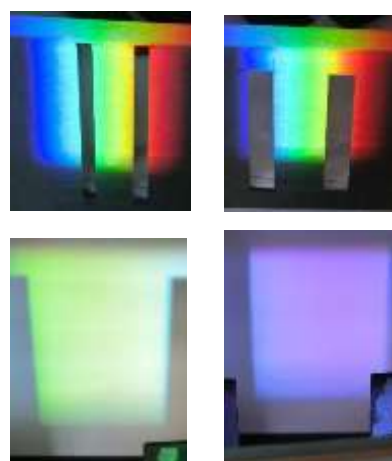


図13 スペクトルの抽出 (上) と合成された色 (下) (左: 赤+緑, 右: 赤+青)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---------------------------|
| 1. 発表者名 佐藤誠 |
| 2. 発表標題 光干渉学生実験用波長可変光源 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 佐藤誠 |
| 2. 発表標題 大面積波長可変モノクロメータと色合成器 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|