

平成 30 年 6 月 29 日現在

機関番号：55301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00950

研究課題名(和文) 教育用簡易ヘリオスタットの開発とその活用授業プログラムの研究

研究課題名(英文) Development of a simple heliostat for science education

研究代表者

佐藤 誠 (Sato, Makoto)

津山工業高等専門学校・その他部局等・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)：太陽光は最も身近に手に入れることができる白色で、平行性が高く、強力な光線である。太陽光を光源として教室に安定に導き実験に利用することを目的に、簡易なヘリオスタットの開発を目指した。簡易赤道儀に太陽光を極軸方向に一旦反射させ、任意の方向に導く方式が最も簡便な方式で、赤経、赤緯の設定に数度のずれがあっても実用上は十分な太陽光線の固定が可能であることがわかった。太陽光の授業利用のツールとして、DVD-R片を透過型回折格子として利用した簡易な分光器と反射金属層を残したDVD-R片を2枚対向してスライドさせることで任意の波長を抽出する簡易なモノクロメータを開発した。

研究成果の概要(英文)：The Sun light is a familiar light source which has high intensity, high parallelism, and continuous spectrum. I have developed a simple heliostat to use the sun light for educational light source in a classroom. To control a mirror to lead the sun beam to a desired direction, the orientation of the Sun should be determined with high accuracy (with error less than 0.1 degree). It was recognized that, using a simple equatorial mount, orientation setting error of several degrees in the declination and the right is permissible for practical use.

As a tool for educational usage of the Sun light, a simple spectroscope is made with a DVD-R piece as a transparent grating. The wavelength of spectrum is measured with this tool within the accuracy of 5 nm. Another tool, a simple monochromator is made with a pair of DVD-R pieces. Any wavelength is selected by changing the distance between the DVD-R pieces.

研究分野：物理教育

キーワード：ヘリオスタット 分光

1. 研究開始当初の背景

太陽光は最も身近に手に入れることができる白色(演色性が高い連続スペクトル)で、平行性が高く、強力な光線である。ニュートンの「光学」に記された、太陽光をプリズムで分光し、再びレンズで重ねると白色に戻る実験は、高校の教科書に必ず掲載されている。実際にこの実験を再現するには、太陽光線を実験室に導き、光学素子に安定的に照射する必要がある。しかしながら、太陽は、主に地球の自転のため絶え間なく天空を移動し、実験室に導いた光線を固定することはできない。これを実現するにはヘリオスタット(太陽光採光装置)が必要である。

2. 研究の目的

白色で平行性が高く、強力な光線である太陽光を、実験室あるいは教室に安定的に導く、方位の調整が不要で簡易に設置できる、5万円以下の廉価なヘリオスタット(太陽光採光装置)を開発し、光学、自然エネルギー等の科学教育に活用する手法を開発する。

3. 研究の方法

反射鏡の精密な方位制御のためには、太陽方位を0.1度以下の精度で検出する太陽方位センサーを実現することが最初のステップとなる。これを初年度に行う。併せて簡易ヘリオスタットが完成した際の太陽光を利用した科学教育用実験コンテンツの開発を行う。次年度には、反射鏡の駆動方式を選定するため、赤道儀方式、経緯度方式、 $\theta-2\theta$ 方式の3つについて試作を行い、消費電力や安定性、利便性を評価する。最終年度では、選定した一つの駆動方式で最終試作を行い、これを用いていくつかの題材でモデル授業を行い、太陽光を利用した科学教育の効果を検証する。

4. 研究成果

簡易赤道儀を用いて、1枚目の鏡で太陽光線を極軸方向に反射させ、2枚目の鏡で目的の方向へ導く構成を取る場合、懸念される事項があった。昼間は参照できる星が利用できないため、赤道儀の赤経、赤緯の方位合わせが正確にできないことである。

方位磁石と地図上の北緯により設置した場合、最大3度のずれがあるとして、光線の移動は、10m先で、10分間約6.5cmと推定される。実際に簡易赤道儀を設置して、高専の移動を計測すると、8mの距離で10分間に2.4cmの移動が確認された。赤道儀を停止して固定鏡では10分で30cm以上の移動が確認できた。光線の広がり(鏡の径に太陽の視直径分の広がり)を考慮して10mで10cm程度以上になる。したがって、当初想定したほどの精度がなくても実用上は問題無く太陽光線を利用することができるかと判断され

た。

三角柱プリズムを太陽光線に挿入し、分光されたスペクトル確認し、これを凸レンズで集光する実験(ニュートンの「決定的実験」の再現)をおこなった(図1)。

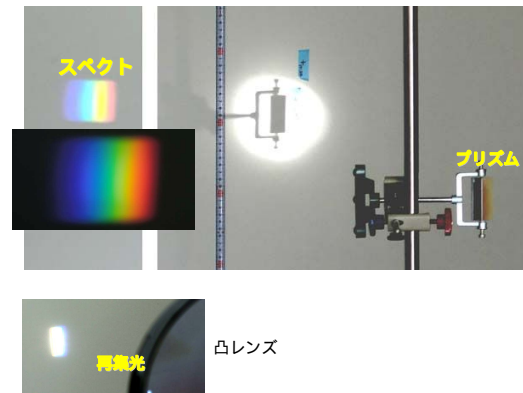


図1. プリズムによる分光と再集光による白色化の観察

太陽方位センサーの方位検出精度をCdSセンサーと遮光壁の組み合わせで確認した。図2に示す寸法で太陽視直径の0.5度以下の十分な角度精度で太陽の方位を検出できることを確認した(図3)。

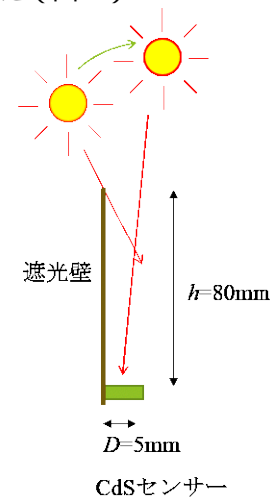


図2. 方位検出精度の確認実験系

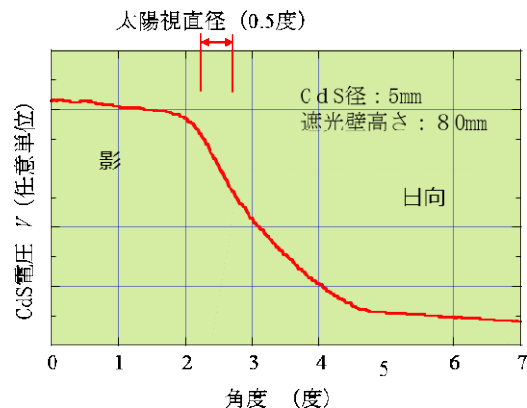


図3. 太陽方位の角度の検出

CdS センサーを図4に示す配置にして太陽方位を十分な精度で検出することができる。

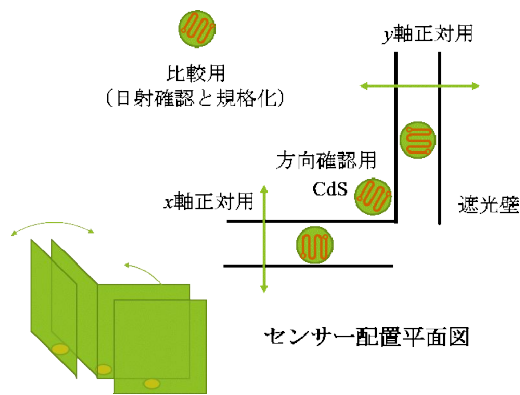


図4．太陽方位検出センサー

太陽方位を追尾することで、赤道儀を用いるときの設置の煩わしさを軽減する目的で、図5に示すように、一枚目の反射鏡を太陽方位センサーの回転角度の半分回転させる方式を検討した。2軸の制御と、2枚の鏡を用いる構成であり、簡易赤道儀を持いた方式との優位性が明確ではなかった。

一枚の鏡で太陽光を導くための鏡の方位の制御を検討した。

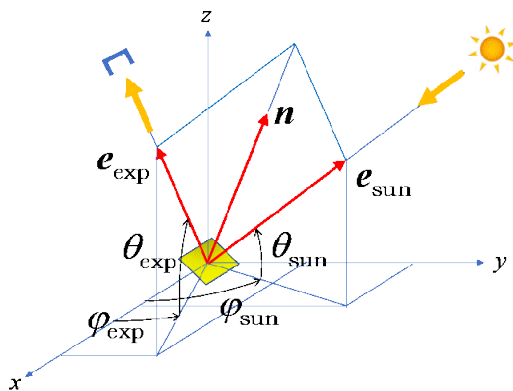


図5 方位の表式

図5に方位の関係を図示する。この表式にしたがって、鏡の法線方向の単位ベクトルは、

$$\mathbf{n} = r \frac{\mathbf{e}_{\text{sun}} + \mathbf{e}_{\text{exp}}}{2}$$

と表される。ここで、 r は規格化の定数である。太陽方向の単位ベクトルと投影先の単位ベクトルは、それぞれ次のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{\text{sun}} &= \cos \theta_{\text{sun}} \cos \varphi_{\text{sun}} \mathbf{i} + \cos \theta_{\text{sun}} \sin \varphi_{\text{sun}} \mathbf{j} + \sin \theta_{\text{sun}} \mathbf{k} \\ \mathbf{e}_{\text{exp}} &= \cos \theta_{\text{exp}} \cos \varphi_{\text{exp}} \mathbf{i} + \cos \theta_{\text{exp}} \sin \varphi_{\text{exp}} \mathbf{j} + \sin \theta_{\text{exp}} \mathbf{k} \end{aligned}$$

鏡の法線方向単位ベクトルは次式に表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{n} &= \frac{r}{2} \{ (\cos \theta_{\text{sun}} \cos \varphi_{\text{sun}} + \cos \theta_{\text{exp}} \cos \varphi_{\text{exp}}) \mathbf{i} \\ &\quad + (\cos \theta_{\text{sun}} \sin \varphi_{\text{sun}} + \cos \theta_{\text{exp}} \sin \varphi_{\text{exp}}) \mathbf{j} \\ &\quad + (\sin \theta_{\text{sun}} + \sin \theta_{\text{exp}}) \mathbf{k} \} \end{aligned}$$

太陽は極軸回りに日週運動することから、 z 軸を極軸にとると、太陽の方位は、 $\theta_{\text{sun}} = \text{一定}$ 、 $\varphi_{\text{sun}} = \omega_{\text{E}} t$ と簡便にあらすことができる。ここで ω_{E} は地球の自転の角速度である。投影先の角度は固定なので、鏡の法線方向単位ベクトルは次のように簡略化して表せる。

$$\begin{aligned} \mathbf{n} &= \frac{r}{2} \{ \cos \theta_{\text{sun}} (\cos \omega_{\text{E}} t \mathbf{i} - \sin \omega_{\text{E}} t \mathbf{j}) \\ &\quad + \cos \theta_{\text{exp}} (\cos \theta_{\text{exp}} \mathbf{i} + \sin \theta_{\text{exp}} \mathbf{j}) \\ &\quad + (\sin \theta_{\text{sun}} + \sin \theta_{\text{exp}}) \mathbf{k} \} \end{aligned}$$

しかし、この場合、2軸の回転制御が必要になる。

赤道儀を用いて1枚目の鏡で極軸方向へ一旦投射し、2枚目の鏡で光を導く方法の場合、上記の表式にしたがうと、 $\theta_{\text{exp}} = \pm 1/2$ 、 φ_{exp} は任意となり、一枚目の鏡の法線方向単位ベクトルは、次式のように表せる。

$$\begin{aligned} \mathbf{n} &= \frac{r}{2} \{ \cos \theta_{\text{sun}} (\cos \omega_{\text{E}} t \mathbf{i} - \sin \omega_{\text{E}} t \mathbf{j}) \\ &\quad + (\sin \theta_{\text{sun}} \pm 1) \mathbf{k} \} \end{aligned}$$

これは、 ω_{E} の単純な1軸回転である。2枚目の鏡は極軸方向の光線を任意の方向に導くためのものなので、方位は固定である。したがって、いくつかの方式を検討した結果、2枚の鏡を用いるものの、赤道儀を用いて極軸方向へ反射し、これを2枚目の鏡で導く方式が最も現実的であるという結論に至った。当初の目論見とは異なる結論に至ったものの、簡易赤道儀は星座などの天体写真を簡便にカメラで撮影するツールとして市販されており、安価に入手できる。

教室で太陽光を利用する場合、数十分間太陽光を固定できれば実用上問題は無く、赤道儀の方位設定に高い精度は必ずしも必要ではないことが分かったことから、簡易な赤道儀を組み合わせてヘリオスタットを構成することが有効であると結論した。

この太陽光の利用方法として、以下に2つを挙げる。

一つは、分光器（スペクトロスコープ）による太陽光の観察、もうひとつは、単色光の取り出し（モノクロメータ）である。どちらも、学生実験で簡便に身近な材料で製作でき

る。

・スペクトロスコープ

DVD-Rのピッチはnmの精度で製造されており、製品に依存せずに均質な回折格子として有用である。身近にかつ安価に入手できる精密な回折格子として貴重な存在である。DVD-Rは2層構造のため、周囲の接着を削ると容易に2枚に分離でき、その際、反射層が一方に偏って剥離する。反射層がはぎとられた側は透明な記録層が残る。記録のための有機層にはピッチが739nmの溝構造があり、これが透過型回折格子として機能する。

試作したスペクトロスコープを図6に示す。正面の光を側面の光線取り込み穴へ鏡で導くことで、直感的に観察しやすい構造にした。直視アダプターに鏡の薄片が設置してある。光の取り込み穴には開口部の幅を調整できるスリットが設けてある。接眼部にDVD-R片が貼り付けてあり、入射した光の1次回折光を肉眼で観察する。回折光の回折角は、観察方向（あるいは視線位置）により変化するため、内部に設けた波長目盛りの位置と回折光の見かけの焦点が一致しない場合、波長を正確に読み取ることができない。また、記録を取るためにスペクトルを撮影するとき、上記焦点が一致していないと、スペクトルと目盛りを同時に明瞭に記録できない。そこで、回折光の見かけの焦点位置を計算により求め、その位置に波長目盛り(50nm単位でピンホールを設けた板)を配置した。箱内部の円弧状のものが波長目盛りである。

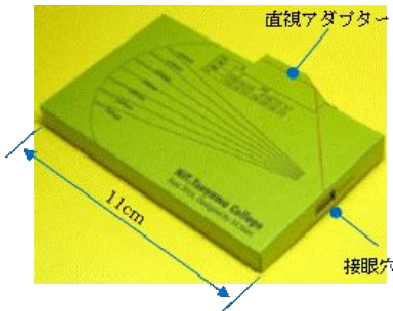


図6 スペクトロスコープ外観

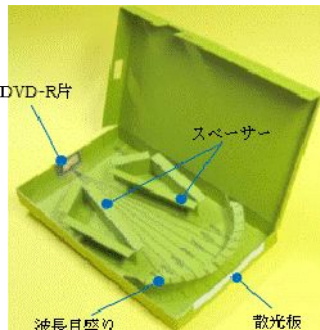


図7 スペクトロスコープ内部構造

太陽光を直接観察すると強度が強すぎ、お

薦めできない。例えば植物の色素を抽出した溶液に連続スペクトル光源として太陽光を照射し、反射光を観察する、あるいは透過光のスペクトルを観察することは有効である。

白い紙に反射させて太陽光強度を減衰させて観察すると、暗線を確認することができる。図8は雲からの散乱光を観察した例である。

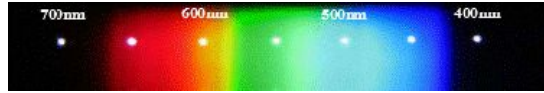


図8 雲の散乱光スペクトル観察例

・モノクロメータ

スペクトロスコープではDVD-R片を透過型回折格子として用いたが、反射層がある状態のDVD-Rは反射型回折格子として機能し、透過型に比べ回折光の強度がケタ違いに高いことが確認できる。これを有効に利用して、太陽光から任意の波長の光を抽出し、波長可変光源を実現することを試みた。

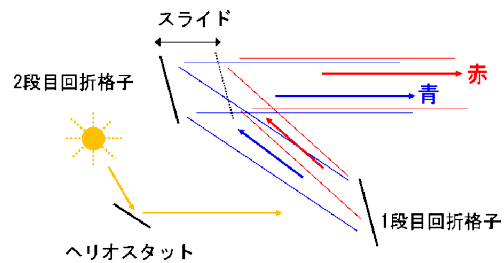


図9 モノクロメータの構成

図9にモノクロメータの構成を示す。2枚のDVD-R片(反射層付)を対向させて配置し、ひとつをスライドさせることで特定の波長を選択する構成である。試作したモノクロメータを図10に示す。

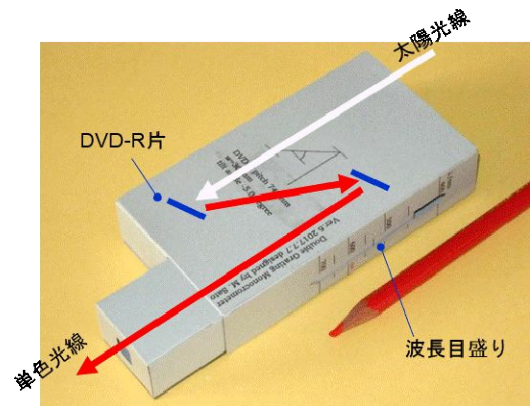


図10 モノクロメータ

平坦な2枚のガラス板に挟まれたくさび型空気層による干渉縞を、波長を変えて観察す

ると、明暗の縞間隔が波長に比例して変化する様子を観察することができる。これまでは、単色光フィルターを用いて、赤色と青色での違いを確認することしかできなかったが、波長可変光源を用いれば、連続的に干涉縞の間隔が色の变化と共に確認することができる。

波長可変光源は、偏光板を用いた複屈折の実験においても有用な光源である。複屈折による着色は複屈折が波長によって分散を持つためであるが、波長可変光源をもちいれば波長と位相差の関係を確認することが容易になる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

佐藤誠,「DVD-R 分光器の設計」, 津山高専紀要, 査読有, 58巻 p.67-71, 2017

〔学会発表〕(計3件)

佐藤誠,「簡易ヘリオスタットによる太陽光線の教室内利用」, 日本物理学会, 21pAS-3, 2016.3.21

佐藤誠,「DVD-R 分光器の設計と利用」, 日本物理教育学会年会, ps07, 2016.8.6

佐藤誠,「反射型回折格子を用いたモノクロメータによる太陽光の学生実験への利用」, 日本物理学会, 22pK510-12, 2018.3.22

6. 研究組織

(1)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