

氷晶による大気光学現象の教材開発

小林悠介
三重県立飯野高等学校

【要約】上層雲を構成する氷晶は、その姿勢とプリズム効果によって、多種多様な大気光学現象を生じさせることが知られている。本研究では、そのような大気光学現象を再現するために、六角柱状のガラスを回転させる装置を作成した。その結果、太陽高度の変化によるタンジェントアークの形状変化や他の多様な現象を再現することができた。

【キーワード】 ハロ タンジェントアーク 光の屈折 大気光学現象

1 はじめに

大気光学現象とは、天空をスクリーンとして太陽の光が分光して彩られる現象を指す。例えば雨上がりに見られる虹は、誰しもが知る大気光学現象であろう。教育的にも関心が高く、大抵の教科書なら光学の分野で写真が掲載されている。光の性質を示す好例であることから、虹を再現する虹ビーズ(小さなプラスチック球やガラス球)という教材も存在しており、注目度が高い現象であるといえる。

一方、水滴ではなく氷晶という上層雲を構成する小さな氷の粒(六角柱状をしている)によっても大気光学現象は生じる。これらは Ice Crystal Halos(以下、ハロと呼称)と呼ばれ、多くの種類が存在する。例えば図1は視半径が 22° であることから 22° ハロと呼ばれる。鶴山によると、この現象は年間約49.2日生じ、虹(年間約6.4日)に比べ頻繁に見られることから、理科教育に取り入れるべき重要な統計事実であると報告している¹⁾。



図1: 22° ハロ。

しかし、虹を再現する教材はあるにもかかわらず、ハロを再現するための画一的な教材は存在していない。それは氷晶の形のモデルとなる六角柱状のプリズムの流通量が少ないことに加えて、単にそのような形のプリズムを使用するだけでは、ハロを再現することはできないためである。

そこで今回、ハロを理科教育に取り入れるべく、ハロを再現する装置を作成したいと考えている。これにより、光学分野へ興味関心を高めることや、探究活動の題材として使用することができる。また探究の過程で、気象学や微分積分学のような他分野へも発展することが期待されることから、教育的な価値は十分にあると確信している。

2 ハロが生じる原理

図1で示した 22° ハロ以外にも、天空には様々な大気光学現象が生じる。例えば図2は、代表的な大気光学現象が複数出現した際の記



図2: マルチディスプレイハロ(アンシャープアスク処理済)。

録である。この状態はマルチディスプレイハロとよばれ、非常に珍しい現象である。単純な円弧だけでなく、複雑かつ整った形状の光が複数生じている様子がよくわかるであろう。

図3は、それらマルチディスプレイハロの種類と幾何関係を太陽の高度別に示した模式図である⁷⁾。太陽高度によらず共通して生じる現象もあれば、変化するものもあることがわかるであろう。

これらの現象は氷晶内を通過する光のプリズム効果(図4)と、氷晶の配向(図5)によって理解されている²⁻⁵⁾。光は異なる媒質に入射すると屈折することが知られているが、この時入射光に対して最終的に曲がった光が特に集中する角度(最小偏角)が存在する。例えば頂角 60° のプリズムの場合は、図6のグラフを

読み取ると 22° であると分かる⁵⁾。この時の氷晶の姿勢がランダムなら、太陽の周りには 22° ハロが生じ、長軸が水平に浮かんでいる姿勢が混じると、タンジェントアークも生じる。この、プリズム効果と配向の関係を理解すると、珍しい現象がなぜ珍しいかも納得することができる。例えば、パリーアークを引き起こす Parry 配向は力学的に不安定な配向であり、自然界ではなかなか実現しないであろうことは容易に想像できる。

このようにハロには多種多様な種類があり、それらが発生する物理的メカニズムは非常に興味深い。そこで本稿では、このようなハロを再現する実験装置を開発し、それによる再現の様子を紹介する。

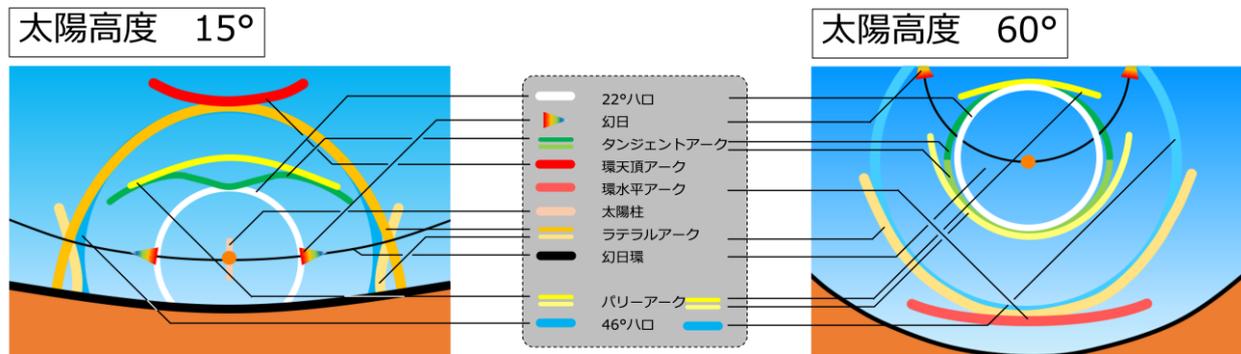


図3：代表的な大気光学現象の幾何関係。



図4：頂角 60° ・ 90° のプリズム効果。

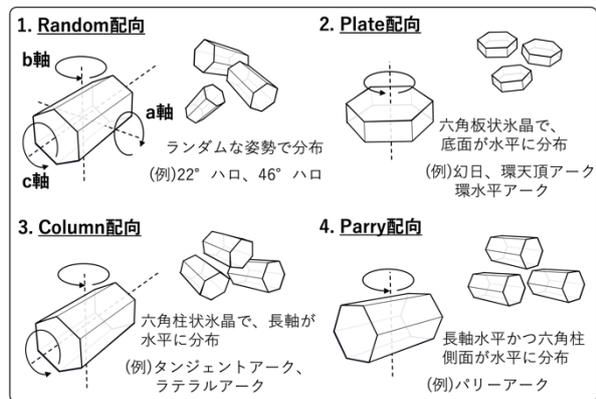


図5：代表的な大気光学現象を引き起こす氷晶の配向。

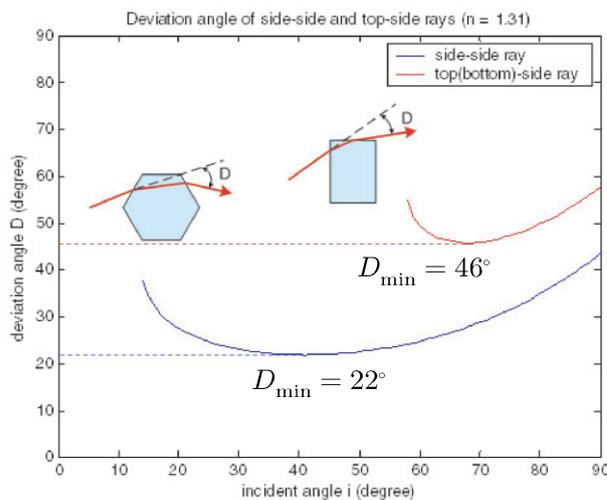


図6：入射角 i と屈折角 D の関係。
 D の極値(最小偏角)がハロの角度となる。

3 ハロの再現装置

図5のRandom配向でもわかるように、氷晶の回転の自由度はa軸、b軸、c軸の3軸であることがわかる。そこで、モーターを用いてb、c軸の回転機構を作成しガラス製の六角柱を回転させることで、ColumnとParry配向を再現する実験装置を作成した。作成した実験装置、および使用した物品の型番を図7に示す。光源は、マグライト(SP2201HL)を使用し、太陽高度の変化を再現するため、三脚に取り付けて角度を自由に変えられるようにした。

4 結果と考察

この再現装置では、Random、Plate配向の再現はできないが、Column、Parry配向は実現ができる。本稿では、Column配向で生じる(上部)タンジェントアークの様子を紹介する。

図3でもわかるようにタンジェントアークは 22° ハロの上端に接するように生じる大気光学現象である。特徴として、太陽高度によって形状が大きく変わることが挙げられる。シミュレーションによる形状変化の模式図を図8に示す。太陽高度が低い時はV字の形状を

示すが、太陽高度が上がるにつれ、V字から一の字へと形状がどんどん変化していく様子が確認できるであろう。

この再現装置によるタンジェントアークの再現の様子を、図9、10に示す。図9ではb軸の回転によってタンジェントアークがどのように生じるかを表している。タンジェントアークがColumn配向かつb軸の回転が重要な要素であることがよく分かるであろう。また、実際の自然界において氷晶は一つではないため、このような中途半端な現象は起こり得ず、数多の氷晶による光の重ね合わせによって、大気光学現象は構成されているのだという気づきも得ることができた。

以上を踏まえて、図10ではロングシャッターによるタンジェントアークの再現と、光源高度によるタンジェントアークの形状の変化を示す。自然界で見られるように、光源高度が変化するとタンジェントアークの形状がV字から徐々に開いていき一の字へと変化していく様子を再現することができた。高度が 5° の時はV字の光が二重になって現れているが、実はこの高度の実験の時に不備によりc軸が回転しておらず偶然Parry配向となってしまう

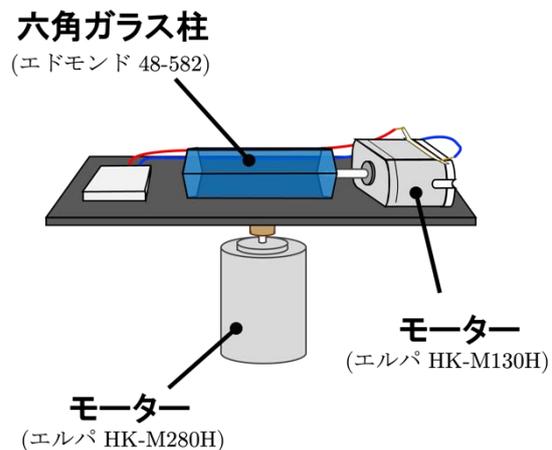
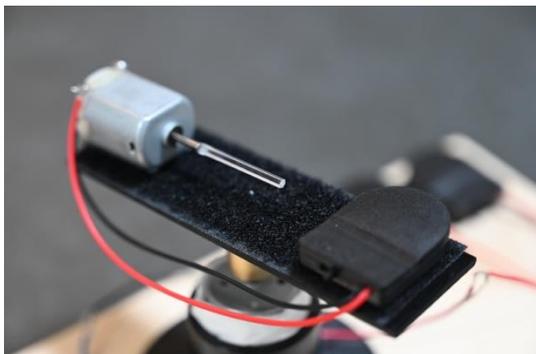


図7：実験装置(左)とその概略図(右).



図8：Halo sim2によるタンジェントアークの形状変化シミュレーション。左上は太陽高度を示す。

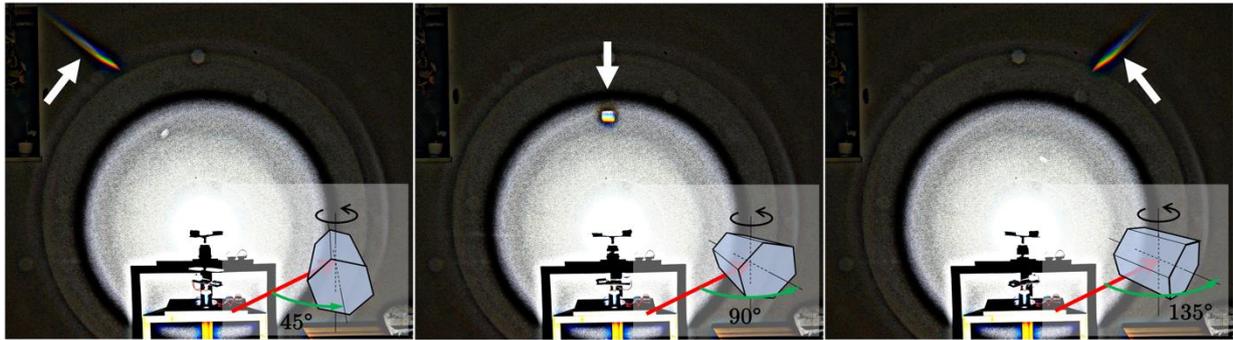


図 9：静止したガラス柱とタンジェントアークを作る光線。
模式図は光線(赤)とガラス柱がなす角度の関係。

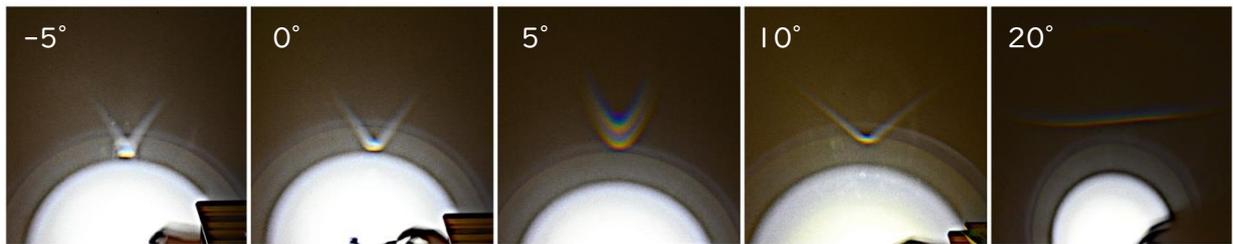


図 10：タンジェントアークの高度変化(5° の場合のみ Parry 配向)。
共通撮影データ 絞り f20 シャッター速度 10 秒 ISO100。

った。そのため、この写真はタンジェントアーク(下の V 字)とパリーアーク(上の V 字)が写っている。本来であれば同じ条件で掲載すべきだとは承知しているが、配向の違いが現象の有無を決定するという点が非常にわかりやすく示しているため、あえて掲載させていただいた。

5 おわりに

先述した通り、ハロの出現頻度は高い。そのため、教育活動中に観察することは容易であり、SSH などの探究活動への動機付けに十分なり得ると考える。また、本題材は光学だけでなく、気象学や数学など他分野との横断的な探究活動への活用が期待できる。

末尾になるが、私は気象予報士として、雲やハロなどの気象概況を Web ページ『ブログ版科学する空』で 7 年以上毎日更新している。特にハロについては、長い観察歴から深い理解があることを自負していた。しかし、今回の再現実験ではまだ知らないことがたくさんあることに気付かされ、探究活動の教材の一助となることを確信した次第である。

今後は確認できていない他の現象の検証や、Plate 配向を再現する実験装置の開発、教

科指導や探究活動などの教育課程の中への位置付けの検討をしたいと考えている。

本研究は三重県高等学校理科教育研究会物理部会、東レ理科教育賞企画賞の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 鶴山義晃.(2017). 大気光学現象の出現頻度: 日常生活 10 年間の統計. 天気, 64(3), 185-188.
- 2) Sung Min Hong, & Gladimir V. G. Baranoski (2003). *A Study on Atmospheric Halo Visualization*.
- 3) Tape, W. (1994). *Atmospheric Halos*. American Geophysical Union.
- 4) Tape, W. & Moilanen, J. (2006). *Atmospheric halos and the search for angle X*. American Geophysical Union.
- 5) Lynch, D, & Livingston, W.(1995). *Color and Light in Nature*. Cambridge University Press.
- 6) 小林悠介.(2022). 科学する空 空を見上げ続けた 5 年間の記録. ネクパブオーサーズプレス.
- 7) 小林悠介. 基本のハロ・アーク. <http://kagakusuru-sora.jp>