

影のない日時計

奥田 治之

〈東京都八王子市〉

日時計は数千年もの長い歴史を持ち、古今東西、様々な日時計が作られてきた。いまさらとも思われるが、ちょっと変わった日時計を作って、およそ10年前に天文月報の天球儀欄に記事を書いた[1]。その後も徒然なるままに、ちょっと変わった日時計を考えたり、作ったりしてきた。ここでは前回紹介したものの改良も含めて、いくつかのオリジナルな日時計を紹介したい。

1. はじめに

日時計の原理は簡単であるから、古来、様々な形、構造の日時計が作られてきた[2, 3]。その主なものは、直線（棒、縁辺）や点（こぶ、スリット）の影を見るものがほとんどである。ここでは、それを光る線、光る点として見るものを中心に考えてみた。

2. 影のない日時計

1) 球形日時計

前回の記事[1]では、プラスチックの球形レンズの周りを水の球殻で囲った複合レンズを使った球形日時計を提案した。その原理を、改め

て図1に示した。中央の球レンズはプラスチック製で、その屈折率は1.50ほどである。そのまま使うと焦点距離が極端に短くなり、収差（結像の崩れ）が大きくなってシャープな太陽像が得られない。それを、水（屈折率=1.33）の球で覆うことによって、相対的に屈折率を下げて、焦点距離を伸ばして結像を改良するものである。外球の直径は両者の屈折率の比から決まる結像点に合わせて、その表面に太陽像を結ぶようにする。

外球表面には、均時差（後述の均時差の補正を参照）による太陽運動の進み、遅れを考慮したアナレンマと呼ばれる8の字形をした時刻目盛りを描いておけば、自動的に進み、遅れを補正して、正確な時刻が読み取れる。また、水に微量のコロ

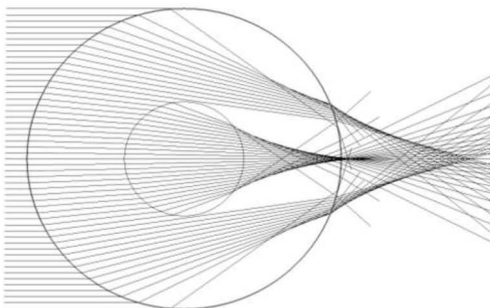


図1 完全球対称日時計 左：プラスチックの球形レンズの周りを水の球殻で囲ったものに平行光線を当てた時の光路図。右：この原理を使った日時計。外殻表面にアナレンマの時刻線が描いてある。

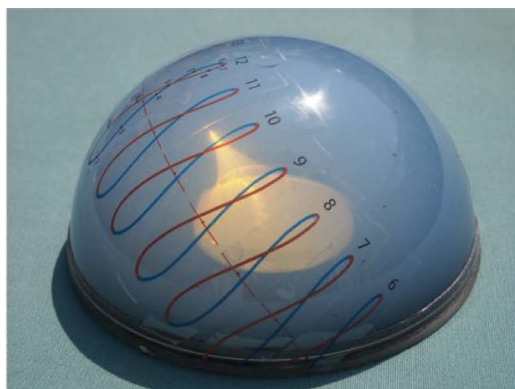
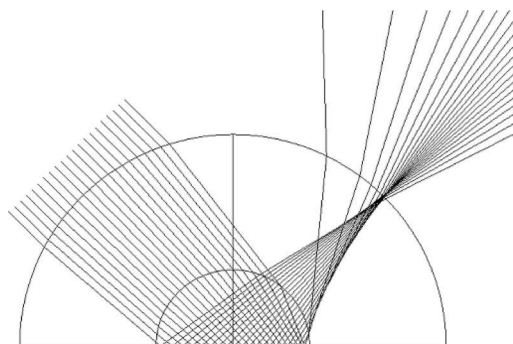


図2 半球日時計. 左: 球形日時計の水平面を鏡(半球レンズ部分のみ)にして、光線を折り返した時の光路図. 右: この原理を使った日時計.

イド状の散乱体を入れて、光束を可視化することによって美しい円錐状の光束を楽しむこともできる。

このようにして、複合球レンズを利用して完全球対称の、したがって世界中のどの地域でも（緯度に応じた軸の傾き、標準時との時差に対応した回転を与えて）利用できる日時計が実現した。この日時計を東京造形大学の小野行雄教授の勧めでイタリア日時計学会の国際コンクールに応募したところ、2012年のアマチュア部門で最優秀賞に選ばれた [4]。ちなみに、国立天文台の正門ロータリーに設置されている日時計は、同教授が2002年の同コンクールでプロ部門の最優秀賞に選ばれたものである。

ただ、この日時計はちょっと困ったことに、緯度が低い場合、夏の季節になると太陽像が球の下部に結ばれることになり、下からのぞき込まなければならない。これを解決するために、図2に示すように、球の中心を通る水平面に鏡を置いて光束を上方にはね返すようにした。こうすれば、上面から見下ろして時刻を楽に読める。さらに、反射面を内球の下面に限れば、外球による集光束を避けることができ、周辺の煩わしい光束を除くことができる利点もある。試作した日時計は直径が10 cmの小ぶりのものであるが、この日時計に興

味を示される方も多く、国立天文台のスタッフが数多く参加している合同会社科学成果普及機構の勧めで、公共施設での展示にも利用できる大型（直径30–50 cm）のもの試作を進めている。

このようにして、機能的にはほぼ完成したものが出来上がったが、難点を上げれば、水を使っているため、水漏れや落下した場合には破壊されることが心配されることである。この日時計の基本原理は、異なる屈折率を持つ2種類の材質の物質の組み合わせによって実効的な屈折率を下げた焦点距離を延ばすことにあるので、同様の特性を持った固体物質が得られればこの問題は解決する。このような物質に、薄型の眼鏡レンズなどの製作に利用されている高屈折プラスチックが利用できることを考えた。この物質は屈折率が1.60と高く、これとアクリルまたはエポキシ樹脂（屈折率1.50付近）とを組み合わせれば、アクリル・水の組み合わせと同様、実効屈折率の低い複合レンズを作ることができる。この場合の光線追跡図を図3に示した。

ただ、このような素材で作った半球レンズは市場には存在せず、この素材で希望する球形（半球）レンズを作ってもらえるところを探すのに苦労した。昔の同僚の北大の山本哲生教授の紹介で、北大の佐藤敏文教授、東工大の安藤慎治教授

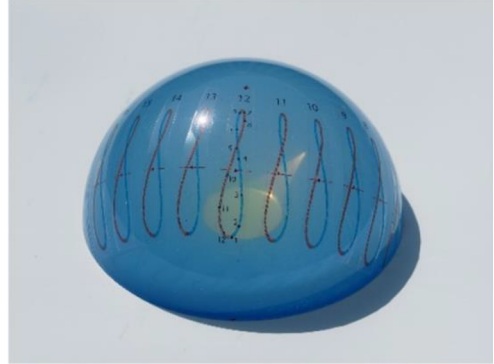
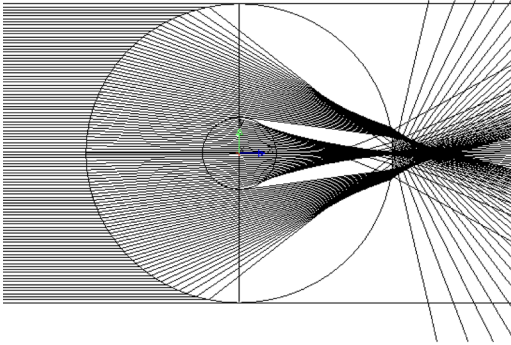


図3 中央に大きい屈折率，外側に小さい屈折率を持ったプラスチックを使った球形日時計．左図はその場合の光路図．右図はこの原理を使った半球日時計．

などの協力を得て，三井化学株式会社の好意で，眼鏡レンズに使われている高屈折プラスチック材を使った半球レンズの試作品をいくつか作ってもらった．それにエポキシ樹脂の外球をかぶせて日時計を制作した．また，外球表面のアナレマ時刻線は，はじめはパソコンで透明ラベル用紙に印刷したものを張り付けたもので見栄えが良くなかったが，これを金沢にある株式会社秀峰でアクリル球に直接印刷してもらうことによって改良した．この半球日時計になると，時刻目盛りを緯度に合わせて描かなければならないが，大きく変わらない場合は接地面を少し傾ければよい．このようにして製作した日時計の写真を図3に示した．

また半球日時計は，光学系としては一種の魚眼レンズになっていて，外球の表面に半球球が映し出されているので，その中に太陽像が映し出されて，それが時間とともに天球上を移動していくものと考えられる．図4はその模様を模式的に表したもので，太陽像は赤道（黒線）に平行な小円（白い点線）上を時刻とともに移動する．季節によってこの小円の位置は上下し，図上で，夏至の時は上の青線，冬は下の青線に沿って移動．また，春分，秋分の時は赤道（黒線）上を移動する．したがって，時刻以外に，その位置から季節の変化も知ることができる．さらに，時刻線をその土地の経度に合わせて時差の分だけ回転してお

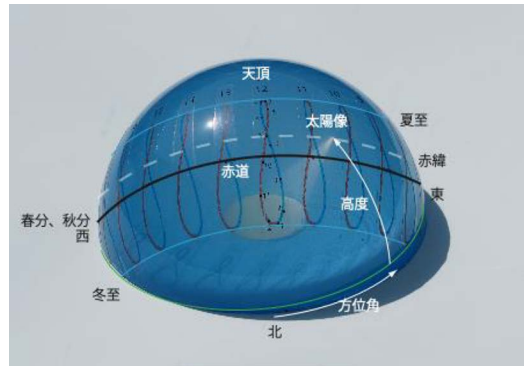


図4 半球日時計上の太陽像の動きを説明したもの．

けば，その土地における標準時を直接読み取ることができ，その時々の日の出，日の入りの時刻と方位を，また南中時刻も知ることができる．また，その時点での太陽の赤緯も読み取ることができ，高度，方位角も知ることができる．さらに，外球の表面に地球儀のような世界地図を描いておけば，現在，太陽が天頂に来ている地点を知ることができる（図5）．ちょっと変わった使い方としては，ちゃんとした時計で現時刻を知った上で，この日時計で太陽位置を同じ時刻に合わせると，日時計の12時線は北を指す．すなわち方位計として使える．このように，この日時計はとても面白い太陽観測器械である．

2) 低屈折率レンズを使った球形日時計

もちろんこのような日時計は，わざわざ複雑な

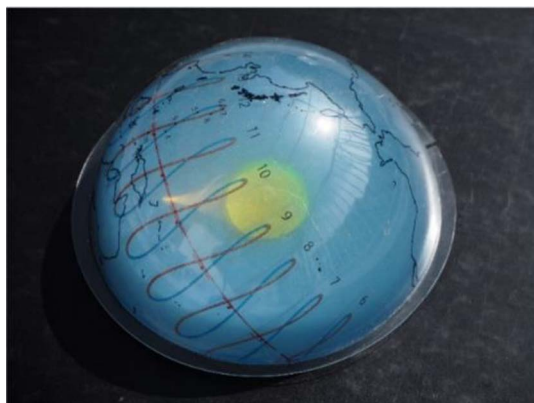


図5 半球日時計の表面に世界地図を描いておけば、太陽像の位置は、その時刻に太陽が天頂に見える地点を示すことになる。

複合レンズを使ったものでなくても、屈折率の小さい素材が手に入りさえすればより簡単なものを作ることができる。前回の記事ではシリカエアロゲル（屈折率、1.02-1.05）を利用するものを紹介したが、この素材は大型のものを作ることが難しく、また極めてもろいもので成型加工ができない。前述の水やプラスチックを使った場合は大型化が難しく、また大重量になるので、博物館や公共施設などに展示できるものを作ることは容易ではなく、高価なものになる。もしも、シリカエアロゲルのような低屈折率を持った素材でレンズが作れることになれば、屋外で宙に浮いた大型の球形日時計を置くこともできるし、また、南向きの天窓に取り付けて、室内から見上げるようなものができて面白い。最近の高分子化学の進歩は目覚ましい。そんなものができることを期待している。シリカエアロゲルの球レンズの光路図は図6のようになる。直径と焦点距離の比は、およそ6倍になる。したがって、直径100 cmのものでも、直径約7.5 cmのシリカエアロゲルレンズができれば実現する。

3) 円盤型日時計

シリカエアロゲルで球形のレンズを作ることは容易ではないが、円柱レンズなら容易に作るこ

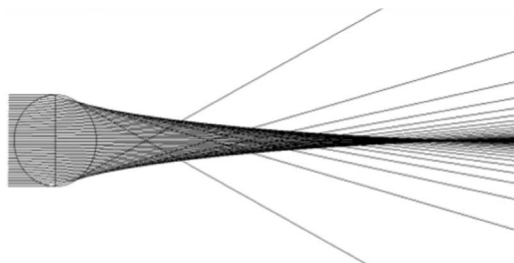


図6 シリカエアロゲルの球レンズに平行光線を当てた時の光路図（屈折率1.02の場合）。



図7 シリカエアロゲルの円柱レンズを使った日時計。円柱レンズでできた太陽像（直線）を円筒上のスクリーンに映して時刻を読む。これにメルカトル図法の世界地図を描いておけば、太陽が南中している地点の経度を示すことになる。

が可能になる。前回の記事で紹介したノーモン形式の円板型日時計（図7）なら大型化も容易に実現できるのではないだろうか？

前回の記事で、CDディスクの円形グレーティングの干渉パターンを使った日時計を紹介したが、録音録画用のCDディスクの束に、たまたま円形グレーティングが印刷された保護用ディスクが同梱されているのを見つけてこれを利用した。これは制作過程で出てきたものを流用したものであったので、ソニー・ミュージックソリューションズ静岡工場の方に無理にお願いして分けてもらって試した。透明なものであるので、裏側に時刻盤のほかに、世界時の目盛りを打った

り、正方距法による世界地図をプリントしたりしておいて、その時刻の太陽の南中地点の経度を指示するものなどを作って遊ぶことができる(図8).

4) 均時差の補正

地球の太陽周りの公転運動が楕円軌道であること、地球の回転軸が黄道面に対して傾いている

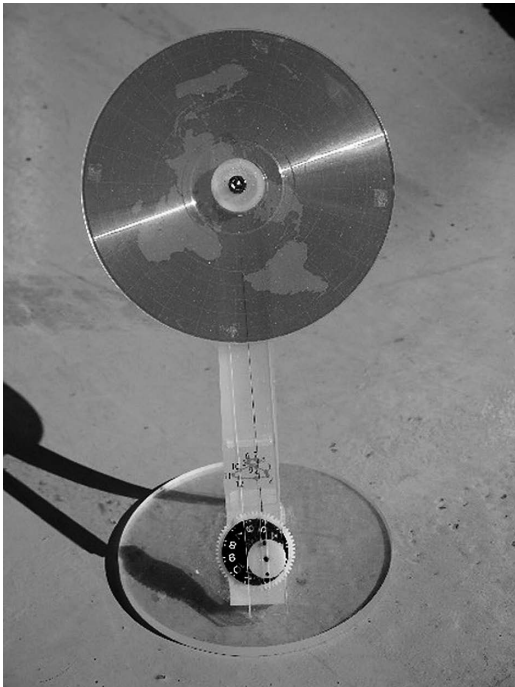


図8 円形グレーティングの印刷されたCDディスクを使った円板型日時計。ダブルギヤを使って均時差の自動補正機構を備えたもの。

ことから、太陽運動を赤道面に投影した時、季節によって進み具合が変化する。これの積み重ねで平均太陽時に対して太陽時に進み、遅れが生まれる。これが均時差と呼ばれるもので、太陽の位置から時刻を読み取る日時計では、これを補正して初めて正しい時刻になる。均時差の年間を通しての変化は図9に示すようになり、最大でおおよそ ± 16 分になる。楕円運動に起因する変化は1年に1周期の正弦波(青線)、また自転軸の傾きによるものは2周期の正弦波(青の点線)で近似できる。両者を加えたもの(黒線)が実際の均時差である。これにより、同一時刻の太陽の位置の変化を年間で追いつけて写真を撮ると図10に示すような面白い8の字形に変化する。これがアナレンマと呼ばれるものである。

一般にこの均時差の補正は、均時差の表やグラフから時々値を読み取って正しい時刻を求めるが、前述の球形および半球日時計は、このアナレンマを外球表面に描いておいて均時差の補正が自動的に行えるようにしたものである。また、図8に示したような円盤型の日時計では、円盤を均時差に合わせて回転すれば、これも均時差を補正した時刻が読み取れるようにすることができる。

この補正機構をアナログ的にできるちょっと面白い方法を思いついた。図11に示すように、ギヤGAの周りに同じ大きさのギヤGBを回転させるとギヤGBはギヤGAの周りを1周する間に2回

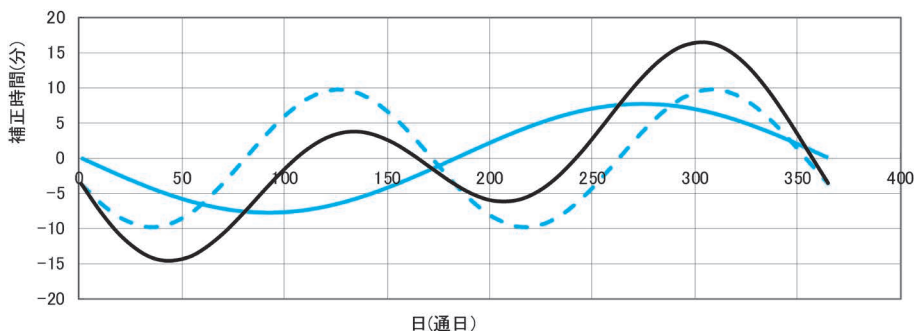


図9 均時差の周年変化を示したグラフ。青線は地球の公転軌道が楕円であることに起因するもの、青の点線は地球の自転軸の傾斜に起因するもの、黒線はそれを加えたもの(均時差)。

転する。いま、ギヤGAの中心とギヤGBの中心との距離を楕円軌道に起因する均時差に相当する長さにとり、ギヤGBに固定した円板Bの中心から、地軸の傾きに起因する均時差の長さだけ離れ

た位置に置いた点Pの運動を見ると、ギヤGAを固定した円板AがギヤGAの中心 C_A の周りを回転するにしたがって、ギヤGAとギヤGBの中心点を結ぶベクトル $C-A \rightarrow C-B$ を投影した $C'_A-C'_B$ の長さは正弦波に従って変化する。また、ベクトル $C-B \rightarrow P$ を投影した C'_B-P' の長さは2倍の周期の正弦波に従って変化する。そして、両者を足し合わせたものが、二つの要因に起因する均時差に比例したものになる。Pの位置は二つの均時差の位相差に合わせて位置を決める。

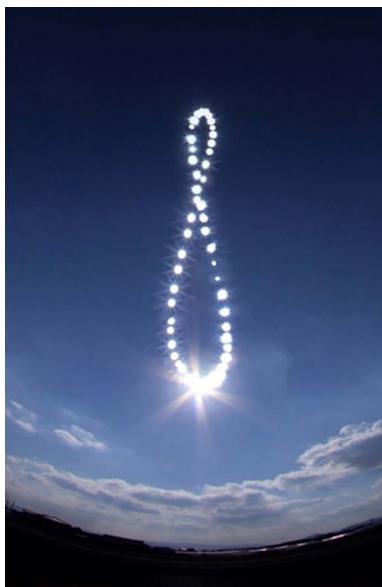


図10 アナレマの写真。東山正宣氏撮影。正午の太陽像を同じ場所で日を変えて1年間にわたって撮影したもの。

均時差は最大で時間にして30分程度、したがって角度にして8度程度であるから、円盤型日時計の中心からちょっと長め（均時差に合わせて）のバーを出して、その先に上記のギヤ機構を置いて点Pの動きに沿って日時計を回転させれば、均時差を補正することができる。そのようにして作った日時計が図8である。

3. おわりに

今や、クォーツ時計や電波時計など精度の高い時計が普及し、原子時計、核子時計などでは何10億年に1秒も狂わない時計が実現している時代

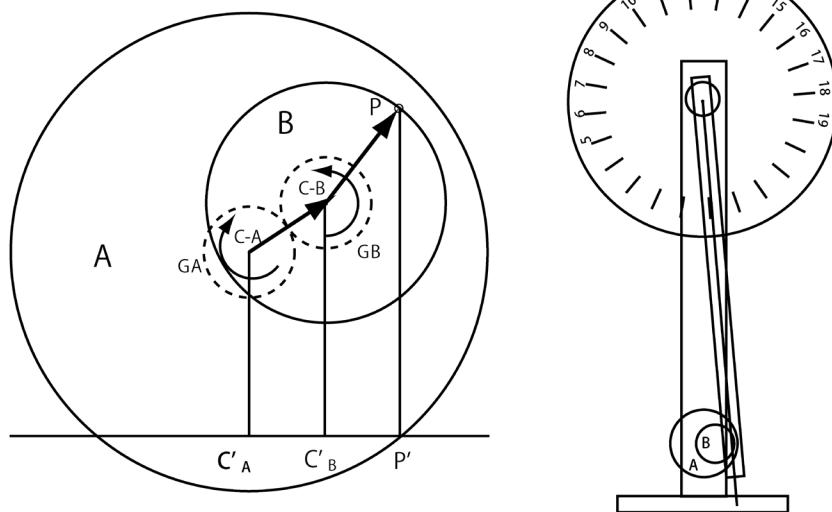


図11 二つの同一半径を持つギヤを使って均時差をシミュレートする機構を説明する図。

に、いまさら日時計でもないと思われるかもしれない。しかし、単純素朴な原理で働く日時計は、地球の自転（極軸の傾き）、公転（楕円軌道）運動などの天文の基礎知識の理解に格好の教材にもなるものである。一般に日時計は屋外に置かれて、学校、公園など公共の施設に付随して作られたものが多い。設計、製作も専門家に頼んで作られるのが普通である。しかしながら、日時計の原理は簡単で、それさえ理解できれば容易に誰でも作れるものである。ここで紹介したような日時計は小ぶりのものにできるので、一種の部屋のインテリアとして、太陽光の射し込む窓辺に置いたり、庭先の一角に点景として設置したりして、時の流れ、季節の移り変わりを楽しむのも一興かと考えて、いくつかの日時計を紹介した。皆さんもマイ日時計を作って遊んでみてはいかがでしょうか[5]。

謝 辞

一連の球面日時計の試作にあたっては、多くの方々の協力を受けた。球形日時計の設計にあたっては、ジェネシアの武山芸英氏に光線追跡図の計算でお世話になり、その総プラスチック化のための高屈折率の半球レンズの製作にあたっては、北海道大学の山本哲生教授に紹介していただいた同大学の佐藤敏文教授、東京工業大学の安藤慎治教授のお知恵を借りました。また、その製作は三井化学の本社の松永有理氏、大牟田工場の塚田英孝氏のご厚意により実現したものである。シリカエアロゲルのレンズは、千葉大学の田端誠氏にお願いして作っていただいた。円形グレーティングの鑑賞を利用した日時計では、ソニー・ミュージックソリューションズの柴山貴寛氏と井口健一氏からCDディスクの提供を受けた。また、東山正宣氏

からは、貴重なアナレンマの写真を使わせていただいた。その他、東京造形大学の小野行雄教授には、イタリヤ日時計学会の国際コンクールの応募でお世話になり、宇宙科学研究所の成田正直氏には制作のお手伝いをしていただいた。また、これらの日時計に国立天文台天文情報センターの高田裕行氏が天文学普及に意義があると言うことで、合同会社科学成果普及機構を通して特定非営利活動法人三鷹ネットワーク大学推進機構の「民学産公」協働研究事業に参加し、一連の開発に援助をいただいた。このように多くの方々の御協力、ご好意によって実現できたことを、紙面を借りてお礼を申し上げる。

参考文献

- [1] 奥田治之, 2011, 天文月報, 104, 362
- [2] 沖允人, 2013, 太陽をめぐる日時計の旅 (日本日時計の会)
- [3] 沖允人, 2019, 日本の日時計 (日本日時計の会)
- [4] Okuda, H., 2013, *Orologi Solari*, 3, 65
- [5] 日本日時計の会のホームページ
<http://hidokei.webcrow.jp> (2021.4.8)

Shadowless Sundials

Haruyuki OKUDA
Hachioji Tokyo, Japan

Abstract: Sundials with a bright time line or spot are proposed, using a hybrid spherical lens or cylindrical lens system with two kinds of refractive indices and a circular grating of CD disk. The time variation due to the equation of time is to be automatically corrected, adopting analemma time scale or some novel device.