

風変わりな日時計

奥田 治之

〒193-0943 東京都八王子市寺田町 432, 216-2

e-mail: okuda-hr@ymail.plala.or.jp

数千年の歴史をもつ日時計は、人々によって考え尽くされ、作り尽くされて、いまや、新しいものを作るのはとても難しい。しかしながら、その素朴な原理から、子供でも作ることができ、また、地球の自転、公転（楕円軌道）現象など、天文学の基礎的知識を理解するのに格好の教材になる。そのうえ、造形的な面白さもあって、いまでも、多くの愛好家が作品を見たり、作ったりして楽しんでいる。そんなわけで、今さら日時計でもないかもしれないが、お遊びとして、ちょっと変わった日時計を考えてみたので紹介したい。

1. 一寸した改良

既存の日時計でも次のような一寸した工夫で使い勝手がよくなる。

1.1 時刻盤の改良

日時計は、直線状の棒（ノーモン）や点状の小球（ノーダス）の影を平面や曲面に投影して、その位置の移動を見て時刻を知るものである。その一種である円筒形の日時計では、地球の回転軸（極軸）に平行においた棒（ノーモン）の影を棒を中心軸にした円筒に投影するものである。棒の影は、地球の回転（あるいは太陽の日周運動）によって、1時間に15度ずつ回転して、時刻線は円筒に等間隔な平行線として描かれる。

この場合、円筒の半径をよほど大きく取らない限り、時刻線の間隔は狭くて、影の移動を細かく読むことは難しい。これを拡大して見るために、時刻線の上下を斜めの直線（実際はらせん）で結んで副尺として使うのはどうであろうか。影の位置はこの直線状で上下方向の移動を見ることになり、この方法で、時刻の読みの精度を数倍程度改善することは容易であろう（図1）。

実は、太陽の天球上の運動は、四季を通して一定ではなく、地球の自転速度は一定であるにもか

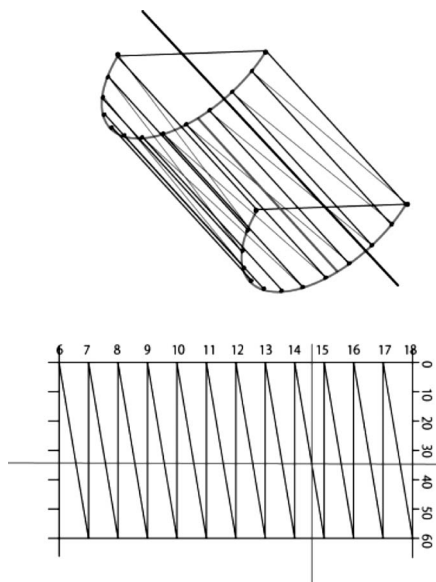


図1 円筒型日時計と副尺付時刻盤。

かわらず等速度で回転していない。これは、地球が太陽の周りを楕円運動していることと、地球の回転軸が公転面に垂直でない（23.5度傾いている）ために起こることで、毎日同じ時刻に同じ方向に戻ってこない（この差を均時差と呼んでいるが、最大+/-16分にも及ぶ）。したがって、日時計で測る時刻は正確な時刻を示さなくて、季節によって補正をする必要がある。そのため、厳密な

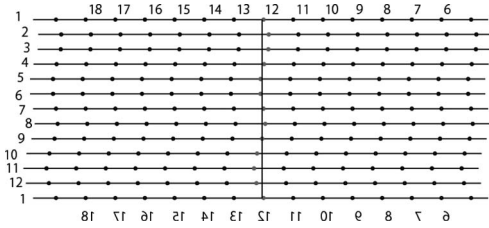


図2 月々の均時差を補正した時刻盤.

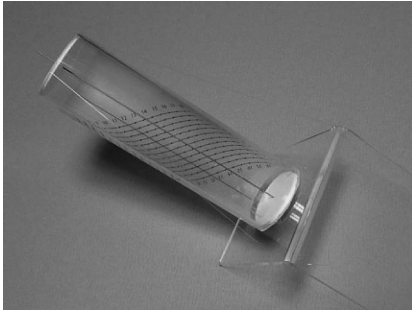


図3 図2の時刻盤を斜めにして読みの精度を上げたもの.

日時計では均時差の補正表が備え付けられていて、対応する均時差を読んで補正をする。これを自動的に行うために、円筒上に複数の時刻線（たとえば各月ごとに）を描いておくことが考えられる（図2）。

これも、時刻線を斜め（らせん）にして影の移動を拡大して見るようにするのも良い（図3）。なお、日常生活では、その地方によって決められている地方標準時が使われる。そのため、日時計によって求められる時刻は、その土地の経度と標準時が決められている地点の経度との差による影響（1度4分）でずれる。円筒日時計では、この分だけ、円筒を回転しておけばこれも自動的に補正される。

1.2 コマ型日時計の時刻盤

極軸に垂直な円板を時刻盤にした、いわゆる、コマ型日時計は、もっともシンプルな日時計であるが、唯一の欠点は春分、秋分時にノーモンの影が時刻盤に落ちないことである。これを改善するために、時刻盤を垂直面から微かに傾ける。数度程度の傾きならば、時刻線を変える必要はない（図4）。

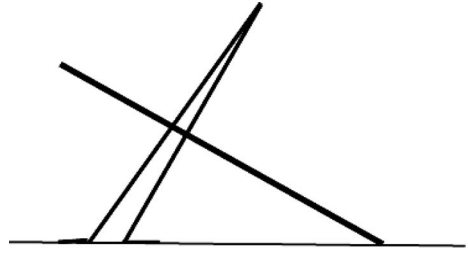
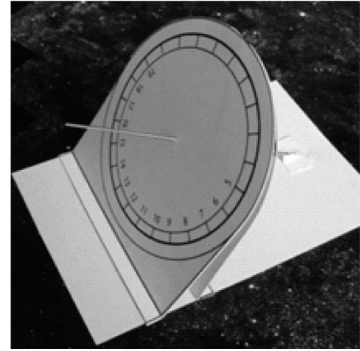


図4 コマ型日時計の時刻盤に微少な傾斜を付けて秋分、秋分付近でも影が見えるようにしたもの.



コマ型日時計では、春分、秋分を境に、ノーモンの陰が映る時刻面が入れ替わる。これを同一面で読めるように、時刻版を半透明な円盤にすることが考えられる。こうすれば、両面の影がどちらの方向からも読み取れるようになる。

2. 風変わりな日時計

日時計は、一般に、直線上の棒、平板の斜辺（ノーモン）や、棒の先端、あるいはギャップ（ノーダス）などの影の位置を読むものが多い。これを光るノーモン、光るノーダスにすることを考えてみた。

2.1 スリットやピンホールを使って光るノーモン、光るノーダスを作る

半円形の円筒暗箱を作り、円筒の表面を半透明なスクリーンにし、反対側の平面は不透明にし、その中央線（円筒の軸）の部分に細いスリットにして光が透過するようにする。こうして、軸を極

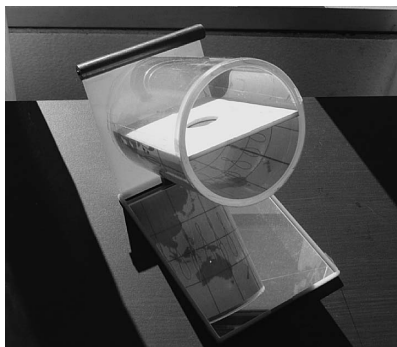


図5 円筒の中央にピンホールを置いた円筒型の日時計、投影面にはメルカトル図にアナレンマを描いた。下面に鏡を置き、地図面を正立して見えるようにもできる。

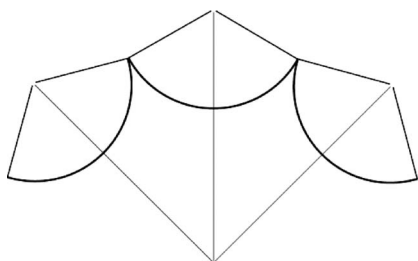


図6 時間分割をした円筒型日時計。

軸に平行におけば、このスリットが光るノーモンとなる。円筒上に15度おきの時刻線を打てばこれで円筒型の日時計になる。この円筒部分にメルカトル図法の世界地図を描いておけば、光る線の位置が、そのとき、太陽が南中している経度を指示することになる。

なお、スリットをピンホールに置き換えれば、点状の光点が地図に映りその位置は、そのときに太陽が天頂にきている地点を指示していることにな

る。もちろん、この場合は、地図の南北を反転して描いておく必要がある。地図上に季節の変化に伴う平均太陽時からのずれを取り入れた時刻目盛(アナレンマ)を描いておけば均時差を補正した正時が読み取れる。

半円形の場合、スリットにしる、ピンホールにしる、朝夕の時刻では、スリットやピンホールへの太陽光線の入射角が大きくなり、有効に働かなくなる。これを避けるために、円筒の開き角を小さく取り(たとえば120度)朝、昼、夕と使い分けて使うことも考えられる。

図6では、時刻盤を3分割してピンホールへの入射角を改善し、下面に鏡を置いて地図が正立するようにしてある。

2.2 球形レンズを使って完全球対称日時計を作る

太陽の天球上の位置は、時刻により、また、季節により変化するので、ノーモンやノーダスの影はそれに応じて位置を変える。まさにその変化を見て時刻を知るのが日時計である。ただ、ノーモンやノーダスの影は、その方向や位置、また、投影面を適当に選ばないと影の移動は複雑になり、時刻線、時刻点の設定が単純でなくなる。

もっとも対称性の良いのは、もちろん、球対称の場合である。このような日時計で典型的なものに、韓国の仰釜日晷がある(図7)。これは、半球状のおわんの内側に目盛りをもった投影面とその中心に突き出た突起の先端をノーダスとして使っ



図7 韓国の仰釜日晷 南極から突き出た金具の先端がノーダスになっている。

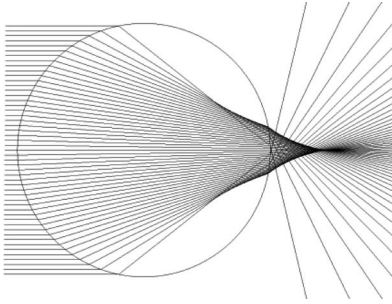


図8 ガラス球へ平行光線束が入ったときの光路図。

たものである。

この場合、ノーダスは厳密には球対称ではない。完全な球対称にこだわれば、幾何学的にも球対称の構造が望ましい。すなわち、ノーダスも投影面も球対称にしたい。もちろん、おわんの中央に小さい球体を置くのも良いが一寸エレガントでない。また、細かい時刻を読むには球を小さくしたいが、そうすると、影が見にくくなる。また、陰ではなく、光る光点にできればなおさら面白い。

完全な球対称と言え、球形レンズがまず考えられる。

しかしながら、ガラスの屈折率が大きい ($n = 1.5$) ために焦点距離が極端に短くなり (図8)、また、収差も大きくて使いづらい。そこで、次のような複合レンズを考えた。

2.2.1 ガラスと水の複合レンズ

球形のガラス (プラスチック) レンズを水の中に埋め込み、屈折率を相対的に小さくして、焦点距離を伸ばし、また、収差も小さくすることができる。相対屈折率は二つの物質の屈折率の比で決まるので水の屈折率が1.3であるので、水の中での実効的な屈折率は1.15程度になる。計算機を使って光線追跡をしてみると図9のようになり、これなら使い物になりそうである。

球状のガラスレンズは手に入りやすく、また、高価であるので、アクリル製の球を水で満たした中空のアクリル球の中に埋めて使うことにした。水の中にコロイド状の散乱体を混ぜておけば、図

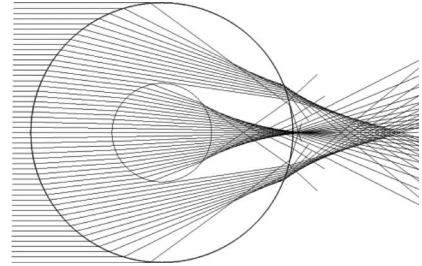


図9 ガラス球を水球に埋め込んだ合成レンズの光路図。

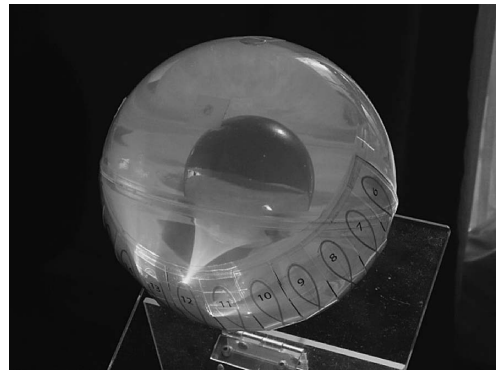


図10 ガラス・水の複合レンズを使った球形日時計。

10に示すように美しい光線の収束模様が見えて面白い。この場合、散乱体には、床磨き用のワックス (乳剤) を使っているが、長期間使っているとごりがでてくるのが問題である。

時刻線には、15度おきの等間隔の経線を描いておけば良いが、均時差を考慮して8の字型のアナレンマを描いておけば、均時差を自動的に補正した正時が読み取れる。

また、外球表面に世界地図を描いておけば、測定時における太陽が天頂にきている位置が見取れる。

球形日時計では、夏期の太陽高度が高いときは、太陽像は球の下面にできるので、下側からのぞき見なければならない。これを避けるために、鏡を使って上からのぞけるようにすることもできるが、余計なものがついてうれしくない。

最近、球形レンズを半球として使い、水平面を

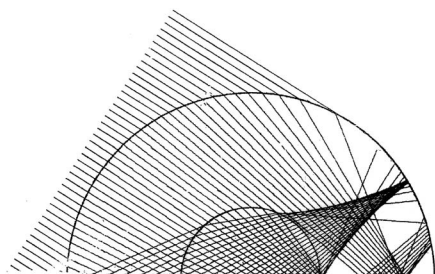


図 11 半球レンズの底面に鏡を置いたときの光路図。

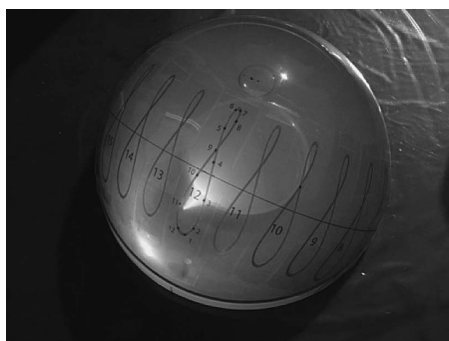


図 12 水平面に鏡をおいて太陽像を上面に投影した球形日時計。

鏡にすれば、図 11 に示すように、光路はこの平面を折り目にした鏡像になり、上面に結像させることができることに気がついた。図 12 はその試作品の写真である。こうすれば、常時、上から光点を観察できて都合が良い。また、設置も安定で簡単にできるのがありがたい。これなら、かなり大きなもの（重い）ものでも作ることが可能になる。

2.2.2 ガラスとプラスチック複合レンズ

複合レンズを使う場合、内球と外球に使う物質の屈折率の差が小さくなるほど、相対屈折率が小さくなり、焦点距離を伸ばすことができる。たとえば、内球にガラス ($n=1.5$) を、外球にシリコンオイル ($n=1.4$) を使えば、相対屈折率は $n=1.07$ になり、焦点距離を大幅に伸ばすことができる（図 13）。ただ、水にしる、シリコンオイルにしる、液体を使うと落として外球が割れるようなことがあると、液体が飛び散ってやっかいである。これを改善するために、シリコンオイルの代わりにプ

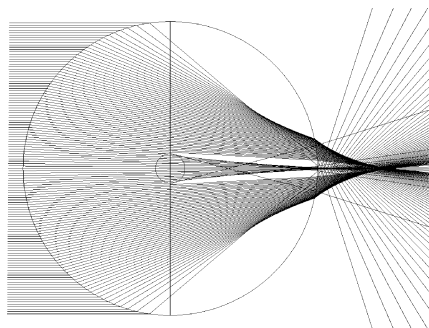


図 13 球にガラス SF2 球をプラスチック球に埋め込んだ場合の光路図。

ラスティックを使うことが考えられる。たとえば、中央にガラス球を宙づりにした中空の亚克力球にプラスチック原液を流し込み固化させれば、全体が固形の球形日時計ができあがる。流し込むプラスチック原液に散乱剤を混ぜておけば、収束する光束を可視化することもできる。

2.2.3 シリカエアロゲルレンズを使った球形日時計

焦点距離を伸ばすには、もちろん、屈折率の小さい物質があれば単独レンズで組み立てることができるがこれが難しい。物性的に、屈折率はほぼ物質の密度で決まってしまう。固体だと、1.5 から 2 程度、液体だと 1.3 程度、気体は極端に小さくて（1 に近い）使い物にならない。

最近、超低伝導率の断熱材として、シリカエアロゲルなどが注目を集めている。これは、シリカをゲル状に固めたもので、空間密度が極端に小さく（密度 0.1 g/cc）、実効的な屈折率は 1.03 から 1.1 程度と極めて小さい。断熱材以外にも、高エネルギー実験用にチェレンコフ検出器として利用されているようである。また、NASA は高速で衝突する宇宙塵の直接採集のための緩衝物質として利用している。これで球形レンズを作れば、上記の組み合わせレンズと等価なものになり、おあつらえ向きである。屈折率 1.05 の場合の光路図を計算してみると、図 14 のようになり、球形日時計としては理想的な材料になる。

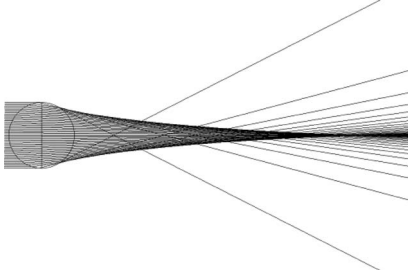


図 14 シリカエアロゲル球に平行光束を入れたときの光路図。



図 15 シリカエアロゲル球を使った日時計。

ただ、この材料はあまりにももろいので、加工して球形にすることはできない。また、製作工程上、精度の高い球体を作ること難しい。千葉大の田端氏に試作してもらったものを使って日時計に組んだものが図 15 である。投影する球にアナレンマを描いておけば、均時差を補正した正時を読み取ることができるようにすることもできる。また、球体の表面に投射した世界地図を描いておけば、反射点があるとき太陽が天頂に見える位置を示すことになる。

このような集光型の日時計の利点は、太陽さえ見えれば薄曇りなどを通して時刻を読むことができることである。

球形ではないがシリカエアロゲルを使うと次のようなものもできる

2.2.4 円筒レンズを使って光るノーモンを作る

シリカエアロゲルで球体を作るのは難しいが、円筒を作るのは比較的やさしい。これを円筒レンズとしてノーモン代わりに使えば、直線状の像を



図 16 シリカエアロゲルの円筒レンズを利用した日時計。

結び、光るノーモンとして利用できる。図 16 はそのようにして作った円筒型日時計で、太陽の運動に対して対称的で、常時等質の像を結ぶ。そのうえ、明るい像が得られる。

シリカエアロゲルは、いまだ、一般に普及していないため高価で入手が難しい。これを複合レンズで代用してもよい。すなわち、プラスチックの円板の中央部に、より屈折率の大きい円筒状のガラス柱を埋め込み焦点距離の長い円筒レンズとして使って、円筒形レンズと同じように、円筒型の日時計を作ることできる。両者の屈折率の比を考慮して内筒と外筒の半径を調節して、合成焦点がちょうど外筒の上に結ぶようにして、そこに時刻目盛りを描けばよい。

3. 反射型日時計

光点を何かに投影して見るのではなく、反射光を見て時刻を読む日時計を思いついた。

3.1 反射球を使ったもの

球状の反射体を太陽光にさらし、極軸方向からのぞき込むと、太陽の反射点は極点を中心に円弧上を 1 時間に 15 度ずつ回転していく。これなら極点から放射状に時刻目盛りを打っておいて太陽の反射点の位置を読んで時刻を知ることができる。反射点の移動する円の半径は季節によって変化して、北極方向から見たとき、夏は小さく、冬

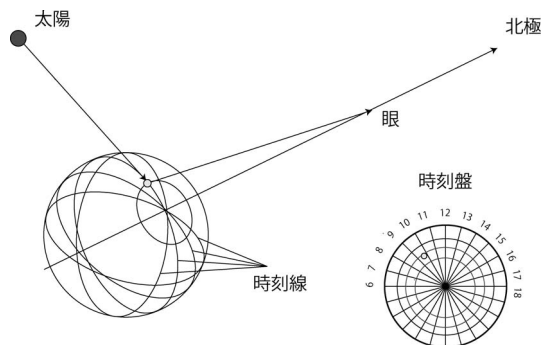


図 17 反射球日時計の原理図。

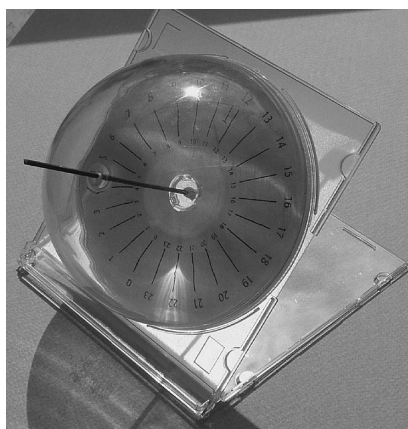


図 18 透明なプラスチック球を使った日時計。

は大きい円を描く。したがって、その位置から季節の変化を読み取ることもできる (図 17)。

反射球は必ずしも、完全反射体でなくても良い。太陽光線は強力であるので、部分反射でも十分反射点を確認できる。たとえば、透明なプラスチック球を使うこともできる。この場合、反射率は数%程度であるがこれで十分である。また、透明であることを利用して、時刻盤を球の内部に置いて反射球を透かして反射点の位置を読むようにしても良い (図 18)。

この円板に、北極を中心にした正距方位図法の世界地図を描いておけばそこに投射された反射点の位置は太陽が天頂にくる地点を示す (球の直径に比べて十分遠い距離から見た場合)。一例を図 19 に示す。

なお、この日時計は南極側から見ても良い。一

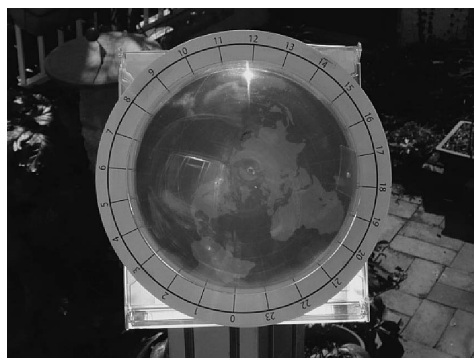


図 19 透明な半球を反射面にし、内側の赤道面に正距方位図法で描いた北極を中心にした世界地図を置いたもの。

つの反射球を空中に浮かせて設置し、その高さを適当に設定すれば、背の高い大人は北側から反射球を見おろして時刻を測り、背の低い子供は南側から反射球を仰ぎ見て時刻が読めるようにもできる。公園のモニュメントとしても面白い。

3.2 CD ディスクの干渉光を利用したもの

CD ディスクには、同心円状 (実際はらせん状) の細隙が掘られており、これによって美しい虹色の干渉光が見える。グリッドは円形状であるので、干渉光は、入射光に平行な直線上にできる。したがって、CD ディスクの軸を極軸に合わせて設定して、極の方向から眺めると、太陽方向に向かった直線状の干渉光が見える。この方向を円盤に沿って 15 度おきに打った時刻目盛りで読めば、時刻を知ることができる。一種のコマ型日時計であるが、時針が美しい虹色に輝くのが良い (図 20)。

コマ型日時計の欠点である春分、秋分で時刻面が表、裏に変わるのがやっかいであるが、録画用の CD ディスクのセットを買うと透明なディスクが入っていることがある。これを使えば、裏側の干渉光の線も見ることができる (図 21)。また、正確な時刻を読むには、極軸方向から見る必要があるが、中央部に小さな鏡を貼り付けておけば、自分の目が映る位置で見ることによって条件を満たすことができる。

また、CD ディスクの場合は、円形グリッドの



図20 CD ディスクの円形グレーティングを利用した日時計。



図21 透明な CD ディスクを利用すれば、裏側の干渉縞も表から見える。

幅は一定であるため、干渉光は見る方向が決まれば一色になってしまうが、これを適当に変化させれば、美しい虹色に分散させてみせることもできるはずである。

以上、新しいアイデアの日時計をいくつか紹介した。いずれも、誰でも思いつくようなものであり、すでにどこかにあるものかもしれないが、興味をもっていただける方もあるかと思って紹介してみた。はじめに述べたように、日時計の原理は簡単で、それさえ理解できれば、さまざまな日時計を考えることができる。簡単なものなら、紙細工のものから、プラスチック板、金属板や CD ディスクなど、身の回りに転がっている材料でもできる。もの作りの経験の少ない子供には格好の材料を与え、さまざまな工夫をする良い機会

を与えてくれる。また、できあがった日時計で測る時刻が実際の時刻と食い違うことから、地球の公転（楕円運動）、自転（極軸の傾き）などの理解に導く良い教材になる。

いまや、原子時計によって時刻が管理されている時代に、いまさら日時計でもないが、日時計の時点や時針の動きで、時の移り、季節の移りを実感するのも楽しいことである。

原稿を書いている現在、軒先につるした球形日時計の光点がぐんぐん赤道に近づいている。春分が間近であることがよくわかる。

なお、球形日時計の設計では、ジェネシアの武山芸英氏に光線追跡の計算でお世話になり、半球日時計では、清原光学の清原氏から表面反射鏡の提供を受けた。また、千葉大の田端氏には、シリカエアロゲルの球形レンズの製作でご無理なお願いをした。その他、東京造形大学の小野行雄先生、宇宙研の阪本成一氏、横田力男氏、成田正直氏、河本正光氏にはいろいろな形でお世話になった。紙面を借りて御礼を申上げる。

参考文献

本文に引用したものはありませんが、以下のものは参考になるかと思えます。

- 安野光雅, 地球は日時計, 1985年11月号, 「かがくのとも」小学生版, 福音館書店
- 関口直甫, 日時計の原理と作り方, 恒星社厚生閣
- Lennox-Boyd, Mark, SUNDIALS, History Art People Science, Francis Limited, London

Unfamiliar Sundials

Haruyuki OKUDA

216-2 Terada-machi 432, Hachioji, Tokyo 193-0943, Japan

Abstract: Sundial is the oldest astronomical instrument with the history of thousands years. A variety of different types of sundials have been made in the past, and thus it is hard to add new version of sundial. Here I propose some ideas for improving reading accuracy of time dial and making several unfamiliar sundials with new ideas.