

実践報告

太陽の動きやその影の動きからわかること

大隅 秀晃* ・ 角縁 進* ・ 高島 千鶴* ・ 中村 聡*

Understanding of the Sun's Apparent Motion and its Shadow

Hideaki OHSUMI*, Susumu KAKUBUCHI*, Chizuru TAKASHIMA* and
Satoshi NAKAMURA*

【要約】

「太陽の動きやその影の動き」というのは小学3年生くらいの理科の話題である。とても身近で簡単な話題のようであるが、実はその動きを観察することは、太陽を中心に公転する地球の動きを理解することにつながっている。一日を通しての影の動きの理解や、毎日同じ時刻の影を一年間つなぎあわせたら「ほんのすこし歪んだ8の字」になるという実例とその意味することについて整理してできるだけわかりやすく紹介しようと試みた実践報告である。

【キーワード】

太陽の動き、影のうごき

1. はじめに

毎日きまった時刻（たとえばちょうどお昼の正午）に太陽をみるとしよう。太陽は直接目でみてはいけない。金環日食が話題になったころよくすすめられた日食観察用のメガネなどを使うといい。夏至のころには、南の空高くに輝いていることに思いあたるはずである。また冬至のころには、南の空を少し見上げたぐらいの比較的高度の低いところにあるということもすぐに思い出すであろう。さてこれからが問題である。それ以外の日にはどのような位置にあるであろうか？(図1参照)

冬至の日を起点とすると、季節の経過とともに、南の空を太陽が縦方向に少しずつ移動して、その高度を上げ、夏至のころにはいちばん高いところに到達するであろう。さらに日がたてば、また逆に高度がすこしずつ低くなり、もとの起点である冬至の位置にもどるはずである。冬至や夏至の中間の時期にあたる春分や秋分の日ころは、経験的に夏至と冬至の中間あたりの高さのところに見えるはずだということまでは異論がないはずだ。

この太陽の位置の移動は、単純に縦方向の直線的な移動だけで、春分や秋分には夏至と冬至の中間付近の高さの同じ位置にみえるのだろうか？それともこの移動に関して、横方向の変化も加わり何か不思議なことが起こっているのだろうか？この報告ではこれに関連する内容をとりあげる。

まず始めに“クイズ?”です

毎日決まった時間(たとえば正午)に、太陽の位置を記録しそれを一年間継続したらその位置の軌跡はどのようになるだろうか？

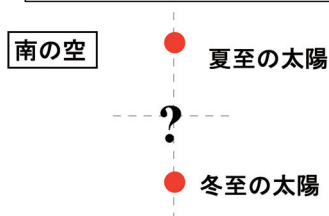


図1 正午の太陽の位置は？

同じ時刻にみた太陽の高度の変化に対応する縦方向の移動については、季節の移り変わりとともに大きく変化しているのですぐに気がつくのだが、その横方向の動きにはほとんど気がついていない

人が多いかもしれない。このようなことを調べるためには、太陽のある方向の写真を毎日全く同じ位置から同じ方向に向けて毎日同じ条件で毎日同時刻に写真を撮り比較するというようなことでもしないかぎりにはなかなかわからない。しかし太陽はまぶしすぎるのでとても注意が必要である。日食観察用メガネに対応するようなフィルターを利用するなど特殊な方法を利用するなどしないとなかなか危険である。

このような観測を行うための比較的簡単な方法として考えられるのは、棒などによりさえぎられた太陽の光によりできる影の先端に着目し、それを毎日同じ時刻に記録することである。太陽光の方向を逆にたどることで、太陽がみえる方向が逆算できる(図2参照)。

この“クイズ?”は次のように考えてよい

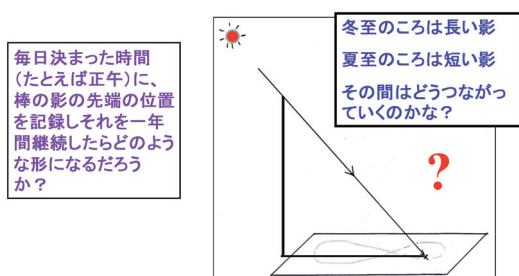


図2 太陽の位置の動きを影の測定から調べる

どのような方法をとってもよいが、実は、このような毎日きまった時刻にみた太陽の位置を記録しつづければ、その軌跡は一年間を通して「8の字」を描くということがわかっているのだ。最初から予想できている縦方向の動きだけではなく、ほんのすこし横方向の動きが加わっているという事に少し驚く人も多いと思う。

実際に著者たちのグループでは、これに対応する観測を1年間を通じて行って直接に確認をしている。その結果、単なる「8の字」ではなく「ほんの少し歪んだ8の字」であることもちゃんと確認している。

「8の字! ?へえ、そうだったのだ」とあらためて驚いている人も多いかもしれない。さらに何故「ほんのすこし歪んだ8の字」なのだろうか?

などとさらに疑問がわいている人もいるはずだ。この「8の字」に隠された意味について(少なくとも理科を教えている先生に)できるだけわかりやすく整理して紹介しておきたいというのが本報告の主な目的である。

小学校3年生くらいの理科の話題である「太陽とその影の動き」というのをつきつめて考えれば、そのような深い意味があったのだということにすこし刺激され、他の理科の話題についても同様に深い意味が隠されているはずなので、そのようなことを探ろうというようなことが積み重なり、最終的に深くて意味のある楽しい理科の授業につながればよいと考えてのことである。

一年間を通して毎日同時刻に観測した太陽の位置(太陽によりできる影の位置も同様)が「ほんのすこし歪んだ8の字」になるという話題を取り上げる前に、じゃあ「一日を通した影の動きはどのようなかな?」という疑問は真っ先に頭の中をよぎるはずである。なんとなく理解できているようでやっぱり理解できていなかったりすると思うので、「8の字」に関する本題に入る前に同時にそのような話題も取り上げておきたい。

2. 1日を通しての太陽の影の動き

小学校3年生くらいの「棒の影の動きを1日中観察するような理科の授業」をしなければならぬとして、できるだけ生徒に興味を持ってもらえるような授業をするために、一年間のうちでそのような授業を実行できるような日を自由選べる(2,3~4回程度行うとする)としたら、どのような日を選ぶだろうか?

このような質問に、1日を通しての影の動きを完全に理解しているなら、いつ行うのがいいかすぐに日を選べるはずである。(この質問にすぐに答えられなくても特に悲観する必要はない。実は著者たちのグループも、このようなことを整理して考える機会をもつまでは、全く理解していなかったということを白状しておこう。)

一番おもしろいと思われる測定日の候補は次の3回(または4回)である。①「春分の日」または「秋分の日」の頃、②「夏至」の頃、③「冬至」

の頃である。実はとても単純な選択をして比較することがおもしろいのだ。その理由は、この日の頃に一日を通して測定した影の動きの結果はおおよそ図3のようになるからだ。

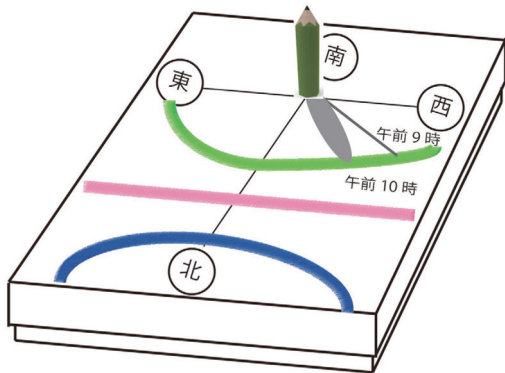


図3 一日を通しての影の動き

その中でも特に面白いのは、①の「春分の日」や「秋分の日」を選べば、棒の影は西から東にまっすぐ一直線に動くことである（図3の中央の桃色の直線）。「ええっ！（午前と午後は対称な形で）どっちかに影の動きが曲がるのが普通じゃないの？影がまっすぐ一直線に動く日があるなんてとても不思議！」と考えている人も多いようである。でもこのように1年間に2回「春分の日」と「秋分の日」に太陽の影がまっすぐ一直線に動くことが実現することは事実である。精度をあまり気にしないのだったら、この日の周辺で「影の動きを実際に観察できる適当な日」をみつけて実行すれば、本当に影がほぼ一直線に動くという観測ができて、生徒とともに一緒に感動することになることは間違いないであろう。

夏至の日や冬至の日の影の動きはどうであろうか？図3に例示した3パターン影の動きから一つ選べということなら、一日中で一番影の長さが短くなるお昼の時間の影の長さを比較して、一番影の長さが短くなる曲線（図3の緑色の曲線）が夏至の日で、冬至の日は春分や秋分の日よりも影の長いもの（図3の青色の曲線）がそれだということが簡単にわかるかもしれない（そのような趣旨の問題をよくみかけることがある）。しかし、なんの選択肢もなく、夏至の日の影の動きを説明しろといわれたら、どちら側にまがるのかすぐに

答えられる人はそう多くないと思う。また夏至の日と冬至の日で影の動きの曲線の曲がり方が反対になっていることを理解している人もたぶん少ないと思う。むしろ一年中を通してどちらか一方に曲がるように錯覚をしている人も多いと思う。

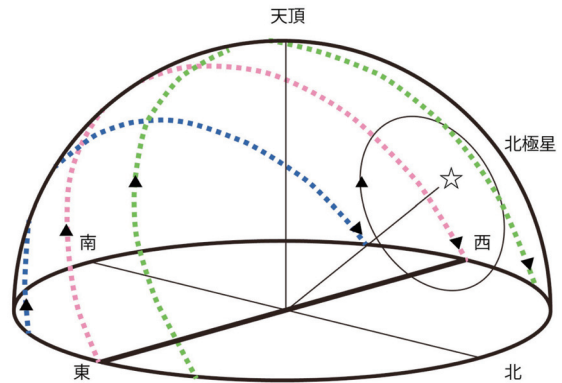


図4 太陽の日周運動

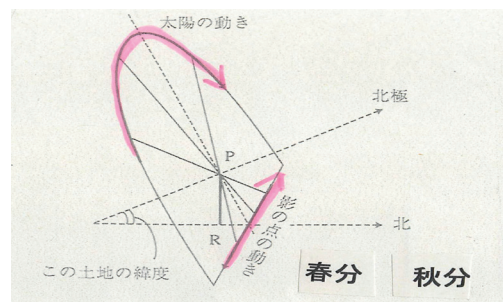


図5 春分・秋分の太陽および影の動き

どうしてこのような影の動きになるのだろうか？まず考えやすいように、地軸（地球が自転している軸）の方向（つまりほぼ北極星の方向）を軸とする球（図4参照）を考えたとき、春分や秋分の日には太陽は、見かけ上、軸に垂直な平面上を東から西に通過していく。影を測定する棒の先端を通るこの平面を考えたとき、影ができる場所は常に太陽と棒の先端を結んだ直線の延長上にあるはずで、そのような線は常にこの平面の延長上にあるはずである（図5参照）。影を実際に測定している場所は、地平面であり、二つの平面の交わる場所は、数学的に考えて必ず直線であることがわかっているので、春分や秋分の日影の動きはまっすぐな一直線になるといえる。しかも地軸に対して垂直な平面上の直線でもあるので、真西方向から真東方向に伸びる一直線といえる。

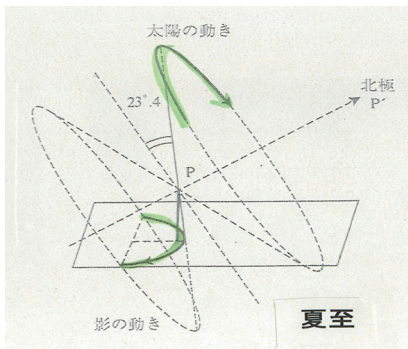


図6 夏至の太陽とその影の動き

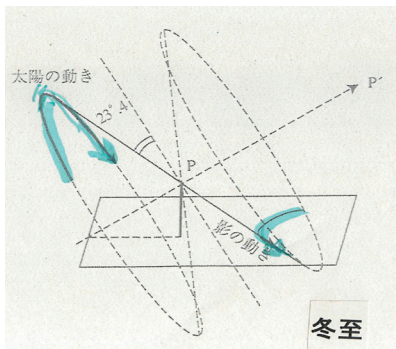


図7 冬至の太陽とその影の動き

夏至の日はどうだろうか？見かけ上、太陽は地軸を軸とする球の上を動くと考えたとき（図4）地球の北回帰線に相当する線上を東から西方向へと通過する（図4の緑の曲線）。棒の先端とその太陽の方向を結んだ線をつないでいくと、円錐ができる（図6参照）。影はこの円錐とは対称な反対側にできる円錐の側面上にできるはずで、この円錐の側面と地平面が交わる境界線上を移動していくはずである。このような境界線は数学的には双曲線とよばれている。xとyが反比例するような状況をx-y平面上にグラフに書いた曲線も双曲線である。この反比例のグラフを回転したものになっているので一見同じようにはみえないかもしれないが、同じ曲がり方をする曲線になっているはずである。つまり、夏至の日には、西南西方向に伸びた場所からはじまり北方向に凸で、東南東方向に伸びた場所で終わるような双曲線上を動く。また冬至の日には、見かけ上太陽は同様の球（図4）上を動くと考えたとき、その球の地球の南回帰線に相当する線上を東から西へと通過していく（図4の青の曲線）ので、夏至の太陽の図6とは逆方向にできる円錐（図7参照）を考えればよいこと

になる。影の動きも西北西方向から伸びた曲線が逆側に凸（つまり南側に凸）となり東北東方向に伸びた双曲線上を動くことになる（図4および図3の青の曲線）。

日本で測定した場合、地軸の方向が地平面に対して、日本の緯度の角度分だけ傾けた状況を考えてよいのであるが、ここで影を観測する場所をもっと緯度の違う場所だと考えてみればもっとおもしろい状況になる。観測する場所によって円錐と地平線の交差の状況がすこしずつ変化する。円錐と地平線の極端な角度を持つ平面と円錐表面の交差をしらべると、全く交差しない場合や閉じた曲線（楕円とよばれる曲線に対応する）ができる場合もある。たとえば緯度の高い北極にきわめて近い場所などで太陽の影を観察すると、全く太陽がのぼらない状況になり影が全くできない日や、太陽が全く沈まないで上空をぐるりと一周するような日があり、閉じた楕円の曲線上をぐるりと一周する影が観測できる日ができる。このような状況について想像をめぐらすことも理科の授業としては意味のあることであろう。もっと高学年（中学校、高等学校）の授業ではまたこのような影の動きがたどる曲線に関連した数学などの話題（円錐表面と平面の交線、双曲線、放物線、楕円、x, yに関する様々な組み合わせを持つ二次関数のグラフ）としてとりあげるのもいい試みになるかもしれない。

3. 毎日決まった時刻の影の測定を一年間続ける

毎日決まった時刻（たとえばちょうどお昼の正午）に見える太陽の位置の動きをずっと一年間続けたらどうなるかということに話題をもどそう。太陽の位置は、一年間を通して南の空に「ほんのすこし歪んだ8の字」を描くように移動するらしいという問題提起はすでに書いた通りである。著者たちのグループでは、実は直接この動きを一年間通して実際に観測したのである。太陽を直接目でみたりすることは危険だし、太陽の写真をとり太陽の位置をおさえるというのも特殊な技術のいることなので、もっと簡単な方法にしようということで、一日を通しての太陽の影の動きで使用し

たように棒の影の位置を毎日決まった時刻に印をつけ、それを一年間ずっと続けるという単純なことを続けることを考えた。棒の位置と高さ、および棒の影の位置を使えば、太陽の位置が逆算できるので可能になる。実際には、測定に使用する棒などが強風などの影響で少し移動してしまうこともあり、棒の長さが短い場合には測定の精度があらくなるなどのこともあらかじめ予想されるので、すこし知恵をしばってみた。著者たちが実際に行った方法は、ガラス張りの温室の天井のガラスに黒い丸印をつけ、温室の中央に大きな机をおいてその上で、丸印の影の位置を記録するということだった。たまたまその時はほとんど使用されていないガラス張りの温室が身近なところにあったということで思いついた方法であるが、影を測定する棒の長さに対応する長さを比較的大きくとれることと、記録する場所は、温室の中に固定された大きな机の上に貼られた記録紙なので、強風などの影響で、測定装置が飛ばされたりして移動することもなく、同じ条件で一年間連続して安定的に観測することができた。

正午(12時きっかり)の天井の丸の影の位置の測定結果

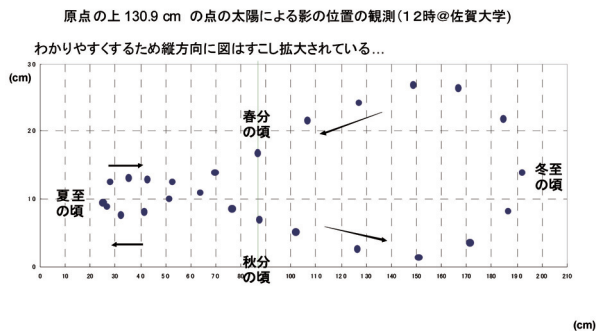


図8 佐賀大学構内での正午の影の位置測定

図8は佐賀大学内で実際にそのような方法で毎日正午に測定した影の一年間の移動図である。影の動きからも太陽の位置の動きが「8の字」になることを示唆していることがわかる。

4. 毎日決まった時刻の太陽の動きは「8の字」

前項で観測した影の動きから実際に太陽がみえる位置の動きを逆算することができる。実際に逆算して計算したものは次の図9の通りである。南の空に描かれる「8の字」が現れる。

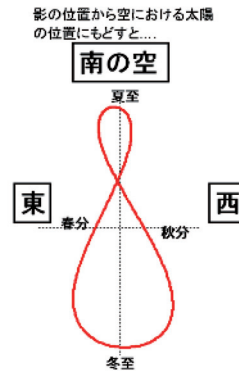


図9 1年間を通して描かれる南の空の「8の字」

実は実際の測定から求めた実験値と、理科年表などに記載されているデータから直接もとめた値と比べると、ややずれがあると思われる部分もあった。ガラスの温室は頑丈に固定されているといっても、温室自体の構造に温度変化による伸び縮みが少しできる。光が天井のガラスにより少し屈折するが、太陽高度の変化によるその効果の違いが少しあらわれているかもしれない。…というようなことまで議論できるような詳細な実験データがとれたのであるが、ここではそのような実験データと理科年表に記載されたデータの詳細比較を行うというより、現実には理科年表に記載されたデータ通りのことが起こっていることがこの観測によってほぼ実証できたと考えていいということなので、このような「8の字」の動きはどのような意味を持つのだろうかという事を理解することに集中してみることにする。

最近では、何時何分にもどこそこから夜空を見上げたらどのような星がどの位置に見えるかという事をシミュレーションしてみせてくる携帯電話(スマートフォン)などのアプリケーションソフト(略してアプリ)がたくさんある。このようなアプリを使うと、実は、お昼の太陽の位置も同時にきちんと示してくれるというタイプのもも多い。同じ時刻(たとえばお昼の正午など)に設定し、一

日ごとに太陽はどこにあるかを毎日順番に表示していくことも可能なので、著者たちように実際に測定を行わなくとも、このようなアプリからも簡単に毎日きまった時刻の太陽の動きを一年間通して簡単に追いかけるので、実際にやってみて授業などで直接みせるのも面白いと思う。「8の字」に動くことは簡単に確認できるはずである。またその動きをきちんと追いかけると「ほんのすこし歪んだ8の字」に気がつく人も多いと思う。

5. 「ほんのすこし歪んだ」が意味すること

前項では、観測された「8の字」を「ほんのすこし歪んだ8の字」と書いたが、アプリなどを利用して太陽の動きを確認した人は、ほんのすこし歪んだことに気がつかない人も多いので、対称ということにポイントを置いてながめてみると、実際に観測される「8の字」は、上下対称ではないことはだれの目にも明らかで、下側に比べて上側の動きが小さい「8の字」である。左右はほとんど対称にもみえるが、その形状に近い左右対称な8の字を作って比較して重ねてみると、上側はほんの少し左（東側）下側は右側（西側）にずれていることがわかる。このような図をながめてみると、自然は対称な形を好むはずなのに「何故？」などと自然の神秘の一端に触れるような疑問がわいてくるはずだ。

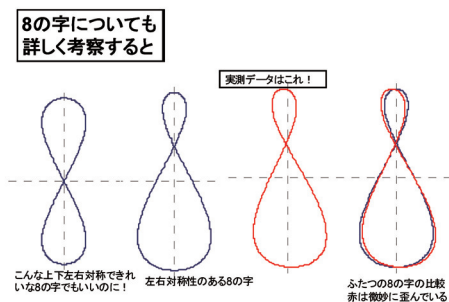


図10 「8の字」のほんの少しの歪みについて

6. 「8の字」の動きを横方向と縦方向に分解する

この「8の字」状の太陽の動きを一年間の時間の流れをパラメータにして横方向と縦方向に分解してみよう。横方向（x軸方向）の動きとは、真南に太陽がある場合($x=0$)に比べて西にずれてい

るときはプラス側、東側にずれているときはマイナス側にずれているとして、太陽の実際の動きにして何分間に相当する動きの分だけずれているかについて計算し直したものである（横方向に対応する経度方向の回転角度の動きに対して約15度あれば、1時間つまり60分に相当する分ずれていると考える）。縦方向（y軸）は高度の変化をとらえたもので、春分や秋分の日々の太陽の南中高度からのずれの角度をとらえたものに対応している。一年の時間の流れの原点として冬至の日を設定すれば、たとえば冬至の日 ($t=0$) では、横方向の動きほぼなし($x=0$)、縦方向の動きは-23.4度（つまり $y=-23.4$ ）である。冬至と春分の中間頃（つまり2月12日頃）には、太陽は東方向に時間にしてほぼ14分程度ずれ、高度は-16度くらい春分や秋分の日々のデータに比べて下側にずれているので、 $x=-14$ 、 $y=-16$ というようにxおよびy方向の動きに分解してみると図11のようになる。

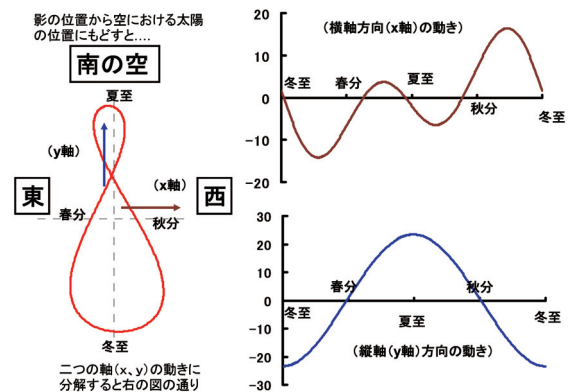


図11 「8の字」を縦と横の動きに分解する

縦軸方向の動きは、皆さんが経験的に理解している通りで、夏至のころは、太陽の高度が高く、冬至のころは低いということであり、地軸と地球の公転面の傾きに対応しているということはすぐに理解できる人も多いであろう（図12参照）。

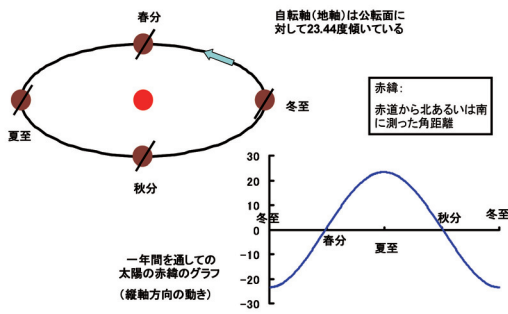


図12 地軸の傾きと「8の字」の縦の動き

おもしろいのは横方向の動きである。地学の教科書のどこかで見たことあるような気がするという人もいるかもしれない。実はその通りである。「均時差」とよばれるグラフである。「均時差」の説明には「一年間を通して平均的な太陽の南中する時間と実際にその日に南中する時間とのずれ」と書かれているが、まさにここで考えている横方向のずれと同じ内容であることがわかる。

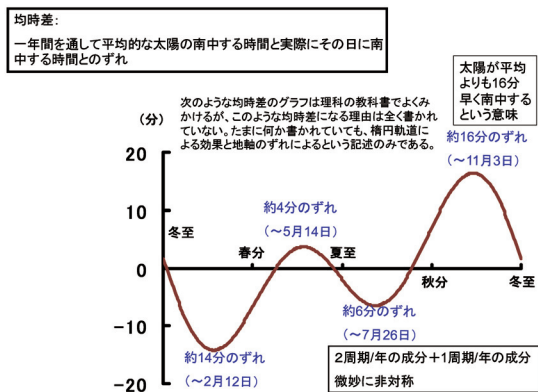


図13 「8の字」の横の動きに対応する均時差

逆に考えると、地軸の傾きと「均時差」があるという事を最初から知っていれば「8の字」の動きは予想できたはずである。(著者たちのグループもほんとうは最初からそのことに気がついているべきであったかもしれないが実はそうではなかったということを白状しておこう。)

「均時差」のグラフは地学の教科書などにでてよく知られた事実なので、これで「8の字」になる理由も理解できたので、「めでたしめでたし」ということでもいいのだが、ここでさらに疑問をもつことを忘れちゃいけない！

縦軸方向の動きは地軸の傾きを考えれば簡単に

理解できる。でも横軸方向の動き（「均時差」の動き）はサイン・コサインなどの周期性をもつ三角関数に似ているけど、よくみれば、さらに少し歪んだ対称性を欠いたグラフになっている。「それは何故だろうか？」という疑問である。

7. 「8の字」の横方向の動きをさらに理解する

「8の字」の横方向の動きについては、一年の時間の流れとともに考えると、地学の教科書などにでてくる「均時差」そのものであるということはずでに述べた通りである。ここではその「均時差」について考える。その説明として、「一年間を通して平均的な太陽の南中する時間と実際にその日に南中する時間のずれ」とある。たとえば「均時差」が+16分ということは、(理科年表などに書かれているようにプラスマイナスを定義したばあい) 太陽が平均よりも16分早く南中するという意味で、逆に考えれば、平均よりも16分に相当する分だけ太陽が西側にあると考えていい。

1日の長さは、太陽が南中してから、次の日にまた太陽が南中するまでの時間を1年間にわたってほぼ平均したものに対応しており、実際に地球が自転して一周する時間よりも長くなっていることはよく知られている。地球の公転により地球が太陽の周りを回転した角度の分だけ余分に回転しなければ太陽は地球から見えて同じ方向に見えないからである。

地球が太陽のまわりを公転する角度が毎日一定(公転半径が一定で速度が一定の場合に成立している)の場合には特に問題がないが、その角度に変動がある場合には太陽が南中してから、次の日に太陽が南中するまでの時間に変動がでてくる。このような効果が積み重なったものが「均時差」なのである。何らかの形で1日あたりの公転の角度がすこし大きくなる場合、つまり地球の公転速度が増えた場合、同じ時間で比較すると前の日より太陽はすこし東側にみえるといえるし、また逆に太陽が同じ方向に来る時刻は前の日よりすこし遅いといえる。(1日あたりの公転の角度がすこし小さくなった場合、つまり地球の公転速度が遅くなった場合はその逆である。) このような効果

が毎日少しずつ積み重なっていった場合に同じ方向（たとえば南中）に太陽が来る時刻の平均からの差をとったものが「均時差」であり、逆に同じ時刻で毎日太陽の位置を比較した場合の「8の字」の横方向の動きがこれに対応するのだ。

単純に考えれば、地球の1日あたりの公転角度に変化がない場合は、「均時差」の原因になるような変動がおこらないので、「8の字」に対応する横方向の動きがでない（「8の字」にならない）。

地球の軌道が完全な円軌道の場合は、地球と太陽の距離が変わらないので、一日あたりの公転角度に全く変化がおこらない。ところが、地球の軌道が楕円軌道である場合は、ケプラーの法則にあるように、太陽を中心として地球が回転した径が単位時間あたりに描く面積は一定であるが、径の長さが変化するので、一日あたりの公転角度が常に一定ではなく変動が生じるので、「均時差」の原因になるような変動が生じる。たとえば径が短くなる（つまり距離が短くなる）と一日あたりの公転角度が大きくなり、その逆の場合は小さくなる。

上記のことを、ケプラーの法則を直接使うよりも、エネルギー保存則の考え方、つまり位置エネルギーと運動エネルギーの和は一定であるという考え方をを使って説明するほうが、どうやら学生に対して受けがよいようである。ジェットコースターなどを例にとると、地上から離れた高い場所（地球から少し遠い場所）では、位置エネルギーが大きく運動エネルギーが小さいのに対して、逆に地上に近い場所ではジェットコースターはスピードが大きくなりスリルが増しているが、これと同様に太陽と地球の場合も、地球が太陽に少しだけ近づくようなことがあると、位置エネルギーが減少し運動エネルギーが増えるので公転の速度が増える。その逆に太陽から少しだけ遠ざかれば、位置エネルギーが少し増え、運動エネルギーが少し減るので公転の速度が少し遅くなるということについて理解しておいてもらえばよいのだ。一日あたりの公転角度の変化もそれに対応している。

このような楕円軌道から予想される「均時差」を考えてみる。地球が一番太陽に近づくところを

近日点、逆に一番遠ざかるところを遠日点という。近日点付近では、1日あたりの地球の公転角度が大きいので、毎日太陽が同じ方向にくる時間はどんどん遅くなる。逆に遠日点付近では1日あたりの地球の公転角度が小さいので、毎日太陽が同じ方向にくる時間はどんどん早くなる。このような状況を表したのが図14である。もしこのような「均時差」が現実のものであるなら、「8の字」を描くこともなく、「少し歪んだOの字」になるはずで、現実の状況を説明することはできなかった。

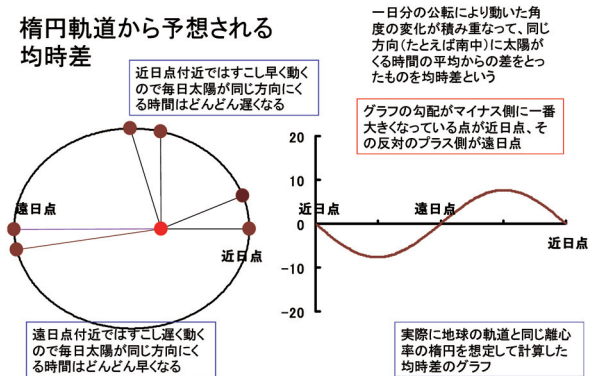


図14 楕円軌道から予想される均時差

8. 地軸の傾きの影響は？

地球の地軸の傾きが地球の公転にともなって、「8の字」の縦方向の動きを与えることはすでに述べた通りであるが、実は「8の字」の横方向の動き、つまり「均時差」にも影響をあたえているというのだ。このことをきちんと理解することは、結構難しかった。実は著者も、楕円軌道による効果は容易に想像がしたが、地軸の傾きが「均時差」にも影響しているとは最初考えていなかった。前項の状況まで理解が進んでそれでは説明がつかないということで、実は地学の関連の書籍を読みあさった結果、「均時差」の原因は、地球の公転軌道が楕円であることと地軸の傾きの効果によるなどということがさらりと書かれている。しかしながらそれ以上の詳しい説明は、全くみつけることができなかった。「しかたがないので…」ということですましてしまうわけにはやはりいかないと考え、そこに書かれていた「地軸の傾き」が原因ということヒントに、ようやくその意味する

この理解にたどりつくことができた。

(ここでの議論は、まず地球の公転軌道はほぼ円軌道だと考える。)地球の公転を表す図は、公転面を水平面に平行に表示するのが普通であるが、ここではその公転面を少し回転して表示し、地軸の向きがいつも同じ方向にそろうように表示してみよう。その上で地軸の向きが向いている方向(つまり北極星のある方向)から地球の公転の動きを眺めてみると、地球はもちろん3次元的には円軌道で運動しているのであるが、地軸が向いた方向から眺めた動きは、それが地軸に垂直な平面に射影された楕円軌道のように見える。その軌道からみた太陽の方向はどうであろうか?地軸が傾いていない場合に比べて、少しずれていることがわかるであろう(図15参照)。冬至や春分、夏至、秋分に相当する位置では両者の太陽の位置はずれていないのであるが、冬至から春分にかけては、冬至の日には、ずれていなかった太陽が本来見える方向が、少しずつずれ、冬至と春分の中間点付近でそのずれが最大となり、春分にはもとのずれていない状況にもどる。春分から夏至にかけては、逆の方向のずれが同様の状況でおこりまたもとにもどるといったことを、夏至と秋分の間、秋分と冬至の間でもう一度繰り返す。「8の字」の横方向の動き、つまり「均時差」という形に翻訳すると図16のような状況になる。

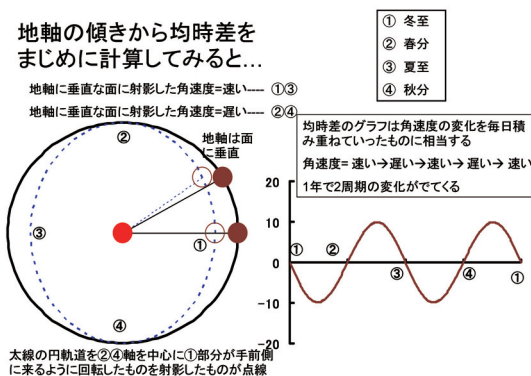


図16 地軸の傾きの効果を入れた均時差

このようなことを考慮すると、地軸が傾いて公転しているという状況だけで、上下左右に対称な「8の字」の動きが実現するのである。「8の字」にみえる原点はこのへんにありそうであるが、実際に観測される「8の字」はこのようなきれいな対称的な形ではなかった。

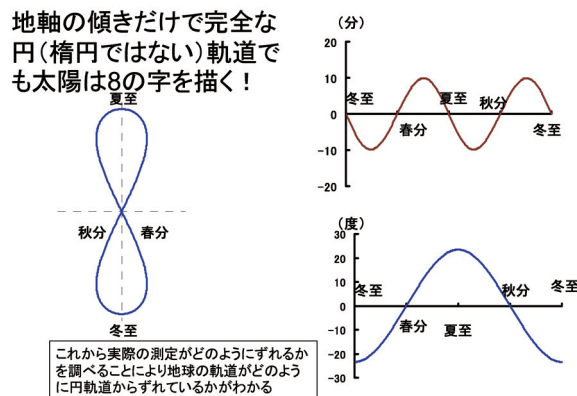


図17 地軸の傾きのみによる対称的な「8の字」

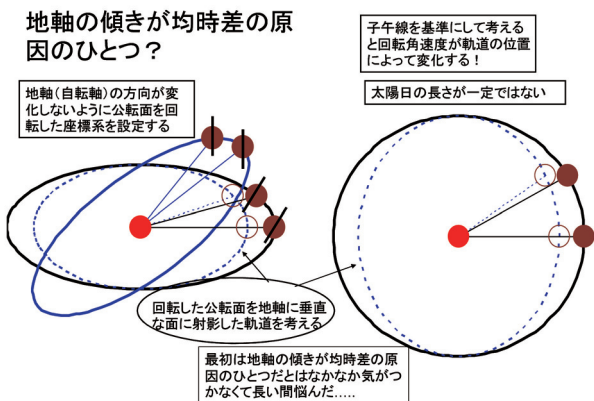


図15 地軸の傾きによる視太陽の方向の変化

9. 実際に観測される「8の字」が意味すること

実際に観測される「8の字」は、楕円軌道による影響からくる効果や、地軸の傾きが及ぼす効果それぞれによる単独の影響でないことはすでに述べた通りである。両者の効果が同時に重なっていると考えれば説明がつきそうである。それでは、楕円軌道から予想される効果と地軸の傾きから予想される効果を単純に重ね合わせてみよう(具体的には、地軸が公転軌道に対して傾き、さらに円軌道からすこしずれた楕円軌道を考える)。

ここでひとつ問題が生じる。二つの効果を重ね合わせるといっても、「均時差」に関する楕円軌

道による効果はたとえば近日点を原点にした一年間のふるまいはすでに図14に示した通りである。また地軸の傾きによる効果は冬至の日を原点にして同様に1年間のふるまいが図16のように表示できる。二つの効果を重ね合わせる場合、ひとつのグラフの原点である冬至の日ともう一方のグラフの原点である近日点をどのようにそろえてあるいはずらして重ねあわせたら（足したら）いいかという問題である（ずらして足す場合にそのずらす分を物理学の言葉では位相を選ぶという表現をする場合が多い）。冬至の日と近日点の日を一緒にそろえないで、どんどんずらして足していけばさまざまなパターンの「均時差」のグラフができ、それに対応して観測される「8の字」を予想すれば興味深いさまざまなパターンの「8の字」ができる(図19)。

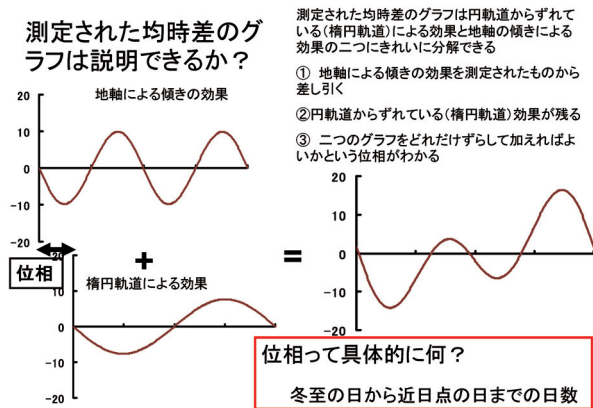


図18 均時差の原因である二つの効果と位相

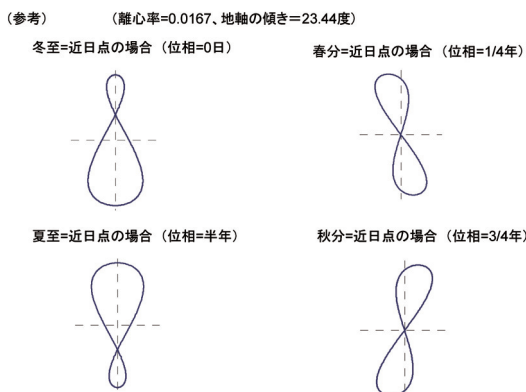


図19 位相が変わるとどんどん変化する「8の字」

実際に観測した「8の字」やそれに対応する「均時差」を再現するためには、冬至の日から近日点を約2週間ずらして足せば観測したデータと

(もちろん理科年表に記載されたデータにも)一致することがわかった。冬至の日から近日点の日が2週間くらいずれているということが「8の字」の左右対称性をほんの少しゆがめている原因なのだ。

つまり小学3年生くらいに登場する太陽の影を調べようという話題を発展させ、毎日同時刻の棒の影の動きの測定を一年間通じて行ったら、それは地球の公転軌道や地軸の傾きを精密に調べていたことに対応していたことがわかったのだ。地軸は公転面に対して傾いていて、具体的にその地軸の傾きの大きさをもとめることができる。また公転軌道は円軌道からすこしずれた楕円になっていて、円からどの程度ずれた楕円かということ(離心率と呼ばれる数値で表現される)も具体的にもとめられる。さらにその楕円軌道の近日点、つまり一年中で一番太陽に近づく日が、冬至の日から約2週間後にやってくるということもそのような観測からわかるのである。

現在観測できる「8の字」はすでに述べた通りであるが、実は地軸の傾きは地球をコマとして考えた場合に首振り運動(歳差運動)を起こしていることが知られている。地球がたどる楕円軌道も長い年月の間に他の惑星の引力などの影響で少しずつ回転していることも知られている。したがって、楕円軌道の近日点が冬至の日から約2週間後にやってくるというのは、現在そうなっているだけで、今後長い時間をかけて、その期間が長くなり(位相が大きくなる)、そのうち、春分の日と近日点の条件が重なる時、夏至と近日点の日が重なる時(逆さまの「8の字」が見られる)になるなどをへて長い時間(数万年)をへてぐるりと1周するようである。それに従って図19のように観測される「8の字」は変化していくことが予想されている。このような事を考慮すれば「少し歪んだ8の字」も現在はたまたまそのような条件になっているだけで、全体として考えれば対称性が保たれていると考えることができる。

長い期間の経過に伴って冬至の日と近日点の日の間隔がずれていくことにより「8の字」の形状が変化していくが、それに関連して、1920~30年

代にセルビアの天文学者ミランコビッチが気象変動のサイクル（ミランコビッチサイクルと呼ばれている）が地球軌道要素の変化によっておきるという説を唱えている。位相の選び方で、たとえば夏至の日が近日点に近いという状況がもし実現すれば、現在と大きさがほぼ逆さまの「8の字」が実現する、太陽高度が高い期間が今よりも長くなるので、北半球では今よりも暑い夏が実現しそうであるという状況は容易に理解できそうなので、ミランコビッチサイクルによる気象変動などの説ともひょっとしたら関連のあることかもしれないと考えると大変興味深い。

10. おわりに

毎日同じ時刻にみた太陽の位置の動きが一年間を通して「少し歪んだ8の字」を描くことに関連したことをできるだけわかりやすく紹介しようと試みてあれこれとここまで書いてきた。

書き残したことで少し気になっている点や実際の授業で役に立つようなことについて最後につけ加えておく。

ここでは関連する数式や測定したデータなどについては、ほとんど具体的な値を記述しなかったが、そのような数式や具体的なデータの値に気を取られることなく、この現象の裏側に潜む物理現象について全体像をおおざっぱにつかみながら、できるだけ簡単に理解できるようにするためにと考えて行ったことである。しかし、機会があれば、そのような数式や具体的なデータもふんだんに使いながらもっとわかりやすく説明する試みにも挑戦したい。

実は、地球は太陽からの重力が働きそれによって公転すると単純に考えて、地球軌道に関する運動方程式（微分方程式になっている）をたてて、その微分方程式を数値的にとくことは、さほど難しいことではない。著者たちのグループもこのような実践報告を書く以前に実際に色々条件を変えて行っているのだ。このような数値シミュレーションを行って、毎日同じ時刻に見た太陽の位置をコンピュータ上に描かせれば、①地球の楕円軌道の離心率、②地軸の傾き、③冬至に対応する日

と近日点に対応する日のずれの日数（位相）の3つのパラメータを入力するだけで、現実的に観測されている「すこし歪んだ8の字」を再現することはたやすい。（実際にスマートフォンなどに入っている天体観測情報を表示できるアプリなどでは、太陽の位置をそのような数値シミュレーションにより計算して表示できるようになっている。）逆に、実際に一年間を通しての「8の字」の動きを観測できれば、上記の3つのパラメータが実験的に求められたことに対応する。それで終わりということにしてもよいのだが、原点に立ち返って「すこし歪んだ8の字」の意味することは何か？というような疑問に対しては、すべてが数値シミュレーションのブラックボックスの中に入っているので外からは実はよくは見えなくなっている。この実践報告は、そのようなブラックボックスの中身についてあまり数式などを使わないで、できるだけわかりやすく整理して紹介することは理科教育という点から考えても重要な意味を持つのではないかと考えてのことである。

毎日同じ時刻にみた太陽の位置の動きが「8の字」を描くことに関してだが、もし、地球の軌道がもっと楕円軌道の効果が大きい場合（つまり離心率の大きい楕円で円軌道からのずれが大きい場合）は、地軸の効果によりできる「8の字」の形はほとんど無視できて、楕円軌道本来の効果のみになるで、「8の字」にはならず「少し歪んだ〇」に近い形になると予想される。「8の字」に見えるのは、円軌道に非常に近い軌道だったからである。地球がそのような軌道であったことで、このようなちょっと不思議で魅力的な「少し歪んだ8の字」について考える機会が持てたことに感謝したい。

「均時差」（図13参照）については、日常生活での時の流れに対する感覚などに関連した具体例を授業などでも示すことができれば、もうすこし身近なものとしてとらえることができると思う。たとえば「秋の日は釣瓶落とし」という表現があるが、これは秋の日の暮れやすいことを表現したものである。実際に「均時差」のグラフ（図13参照）をながめると秋分の日を過ぎたあたりから、「均時差」の値が大きくなり11月3日くらいにかけ

て最大の約16分となるが、これは、11月3日ころには平均よりも約16分に相当する分だけ太陽が西に傾いている（つまり日没時間も16分早い）ということの意味している。なんとなくそんな気がするだけということではなく、10月から11月初旬にかけて実際に太陽の日周運動が南側に移動した効果に加えてさらに「均時差」による効果で日没時間が早くなっているのである。

近日点の日（冬至から約2週間後）のころは、地球が太陽に一番近づいているので、公転速度が一番大きくなっていることはすでに述べた通りであるが、1日あたりの公転角度が一番大きくなるため、きっちりと一日（24時間）たっても太陽が同じ位置にくるまでにはもう少し時間がかかり、そのずれが一番大きくなるのである。お正月が過ぎても、まだまだ朝日が昇るのがどんどん遅れていくことや、夕方の日没時間が急に遅くなっていくことに誰しも思いあたるであろう。（このような状況が実現するので、冬至10日たてば誰でもわかるというような意味をもつ諺があるくらいである。）冬至がすぎたのだから、朝日が昇るのが早くなるのが当然だと勘違いしてしまいそうであるが、実は逆の状況が実現しているのである。このことは、冬至から約2週間後の頃は近日点という状況にあることの間接的な証拠であると考えてよい。実際「均時差」のグラフの曲線の傾きがマイナス側に一番大きくなっている時期であり、「秋はつる墜落とし」とは逆の現象が起きているのである。

ここでは「均時差」を互いに二つの互いに独立な事象、楕円軌道の効果および地軸の傾きによる効果の重ね合わせで説明できたが、その二つの効果を重ね合わせる際に登場した位相を調べる（冬至の日と近日点の日のずれの日数を調べることに対応している）ことが重要な意味を持っていた。少し難しいことを書くが、最先端物理学のあちらこちらにこのような位相を調べるということが重要なテーマとなる研究分野も多い。ニュートリノ振動と呼ばれる研究でも、ノーベル物理学賞にも結びついた小林-益川混合角に関連する研究でも、そのような位相をきちんと測定するということが

重要な研究テーマだったのである。このような整理を行ってあらためてそのような類似性に気がついたところである。

「太陽の動きとその影の動きを調べよう」というテーマが実はこんなすごいことと関係していると気がついて、このテーマに対する見方が変わって少しわくわくしたというような人がもっとたくさん出てくることを期待して本報告を最後とする。

【謝辞】

ここで述べた内容は、佐賀大学附属中学校の生徒を相手にした「大学で授業をうけてみよう」、免許更新講習「小学校理科の実験・観察」、文化教育学部の学校教育課程の授業で「小学理科」の背景理解を目的とした「理科講義および実験」という授業の中でもよく取り上げている話題であり、どのように説明をしたらこのような内容を理解してもらえるのだろうかということについて試行錯誤の結果の報告である。そのような授業にがまんしてつきあっていただいた学生および生徒、先生方にはこのページを借りて感謝の気持ちを伝えたい。

またここでとりあげた内容は、佐賀大学文化教育学部の卒業研究や修士論文研究のテーマ（藤井貴之君、長谷川文紀君、笹尾謙吾君、小林史歩さん、濱口敦君、下村香菜子さんなど）として取り上げた内容とも深く関連している。このようなことを一緒に考え議論する機会が持てたのでたいへんよかったと思う。

【参考資料】

「均時差」のデータは実際の実験データに加え理科年表（丸善出版）に記載されているものを参考にした。また謝辞のところに記載した学生諸士の学位論文等を指導する際に一緒に議論したことが本実践報告の基礎となっている。