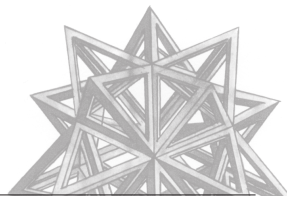


鏡の世界が左右反対なのはなぜか



村田次郎 むらた じろう

立教大学理学部

鏡の中の世界は、左右が反転して見える(図1)。文字を映せば、まさしく「鏡文字」がそこに見える。虫眼鏡を通して見た世界は、上下・左右が反転して見えると勉強したことから、この現象が同じように光の性質によって説明できると思っている人が多い。鏡は古くはギリシャ時代から興味をもたれていた、身近な謎の一つである。鏡にまつわる話題は数多くあり、思わぬ思い込み(バイアス)に気づくことのできる、格好の話題である。ここでは鏡で左右反転が生じる現象について、考えてみよう。

鏡は左右反転する?

私はこの話題が大好きである。時間と空間に関する大学の教養科目の講義で、時間の流れという超難問に挑む前の、最初の頭の体操として学生とわいわい、毎年議論を楽しんでいる。そして100人に1人程度の割合で、そもそも鏡が左右反転していると思ったことがない、という学生に出会う。

「ふしぎだなと思うこと これが科学の芽です」はノーベル賞学者の朝永振一郎が子どもたちに贈った有名な言葉だ¹。まず不思議だと思えることが大事だが、たくさんの経験をしてはじめて、普通ではない特別さに気づくことができる。これは確かに大事な能力である。しかし、鏡で左右反転するのを不思議と思わない人はともかく、そもそも左右反転していると思わない人については、もう少し慎重に考える必要があるかもしれない。

レンズの機能が光の屈折で理解できることは中学校で習う通りで、レンズを通して見る遠くの景色が上下・左右反転して見える現象は、これは誰が見ても例外なく同じように見えるものである。鏡で左右反転する気がしないという学生の存在は、反転して見える多数派にとっては驚きである。もしかしたらこれはレンズの科学的なしくみとは異質な、見る者によって違う結果を生む現象なので

はないか、という疑いも生む。この問題は客観的な態度を貫こうとする科学の方法だけで本当に説明できるのだろうか。

実際、この謎は物理学者だけでなく、哲学者や心理学者も好んで議論に参入する有名な問題である。そして、様々な表現での説明がなされているが、意外にもこのしくみは理科の教科書には書かれていない。これは見解が必ずしも一致していないからなのかもしれない。実際ギリシャ時代にプラトンが論じて以来²、2300年以上を経ても、朝永振一郎は著書『鏡のなかの世界』の中で本稿に似た議論を紹介した最後に、「何かもっと一刀両断、ずばりとした説明があるのか、読者諸兄に教えていただきたい」と述べている³。



図1—鏡による左右反転
ひっくり返っている左耳(実物)が右耳(鏡像)に見える。

ここでは、素粒子・原子核物理学の研究の中で、右と左の問題について考え続けてきた私の考えを紹介したい。そして読者の皆さんにも、インターネットで検索したりAIに聞いたりしてしまう衝動をぜひ抑えて、じっくり自分自身で考えることを楽しんでいただければと思う。

左右反転の理由

毎日のように鏡を見ていれば、自分の顔は鏡で見るものが馴染みのものになるだろう。逆に写真に写る自分の顔の方に違和感を覚えるかもしれない。私自身は子どもの頃、手書きで文字を書く際に「さ」と「ち」が入れ替わってしまうなどの鏡文字がなかなか直らなかったし、右と左はどっちがどっちかわからなくなることは大人でも少ないだろう。

このように、そもそも右と左の違いはわかりにくいものであり、鏡で左右が反転している、と気づいたり教えられたりして意識するのは、意外と小中学生以降になってからなのかもしれない。

さて、鏡で左右反転する理由を学生に質問すると、

説1:「光が反射するから」

説2:「重力があるから」

説3:「目が左右についているから」

などの回答が集まる。特に、物理学科の学生を含めて説1が大多数を占める。つまり、これは「理科で昔、習った気がする」ものとして想起されるようである。中学校でレンズの学習をした記憶が効いていることは想像に難くない。実際、子ども向けの本にはこの説明が書いてあることがある。なお、理科の教科書ではこの題材は扱わないので実際には習っていない。

説2、3にはより踏み込んだ、別の問いへの回答の意図が含まれている。それは「鏡は左右反転だけをして、上下反転しないのはなぜか」という疑問である。図2のように「実物⇒鏡像」の関係が、「 $p \Rightarrow q$ 」ではなく、「 $p \Rightarrow b$ 」にならないのはなぜか、ということである。鏡から見れば左右

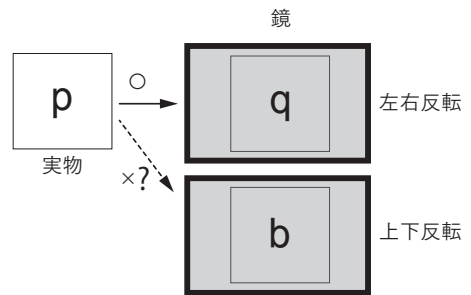


図2—鏡に文字を映す

「p」が左右反転した「q」に見えるが、上下反転した「b」には見えない。

方向も上下方向も対等であるにもかかわらず、左右方向だけが特別扱いされるのはなぜか、という問題意識である。

鏡を幾何学的にいくら考えても、左右反転だけする理由が思いつかない。ならば左右が優先されるような、何か別の理由を追加しよう、という考えである。そうして重力や目のつき方という、方向が効いてきそうなアイデアが出てくるわけである。

どうやら、この謎には光の反射現象などの物理学、数学的な考察、はたまた身体構造や心理的な効果などの後天的な理由が絡まっている可能性がありそうである。

鏡の機能

鏡はレンズと違い、平面状である。2次元の平面内には、特別な方向はない。図3では、鉛直方向・水平方向は鏡だけでは決められない。3次元空間に平面が置かれていれば、決定できる特別な向きは、平面に垂直な方向(θ 軸)だけである。前節の説2、3の問題意識は、左右方向、上下方向を決める方法が鏡自身にはないではないか、それならば鏡以外の原因を追加しよう、というものである。

さて、水の入ったコップを通してその向こうの景色を見ると、左右反転して見える。コップが一種の円柱状のレンズとなって、光が左右方向に屈折される結果である。通常の凸レンズはその形状

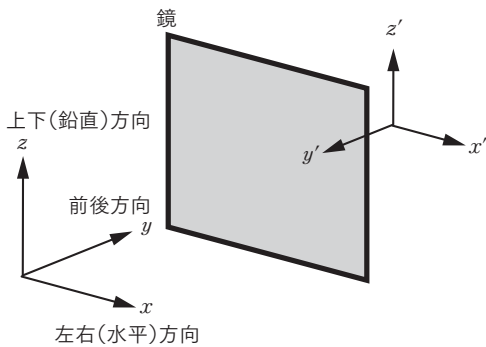


図3—鏡の機能は前後反転($y' = -y$)

のせいで、これに加えて上下反転も起きる。

本題の鏡は光を反射するものだが、反射するのは平面に垂直な向きだけである。これが鏡の機能である。これに対して、スプーンを凹面鏡代わりにして自分の顔を映してみると、レンズと同様に上下・左右が反転した顔が見えて面白い。これは光がスプーンで斜めに反射する結果である。

ところが平面の鏡ではスプーンとは異なり、光の向きは前後方向以外の成分が変わることはない。つまり、鏡とは光を前後方向のみ反射する装置であって、左右方向、上下方向に光の向きを変えて反射させる機能はない。

鏡に関して理科の観点から議論できることは実はここまでであり、図3がすべてである。鏡に映る世界は、現実の世界(x, y, z)が鏡の面に関して対称に出現したものの(x', y', z')となる。したがって、鏡は左右(x)反転ではなく前後(y)反転装置($y' = -y$)である、というのが物理学の観点からの結論である。

鏡のトリック：木を見て森を見ず

鏡は前後反転する装置なのに、映る像は左右反転する。まさにこれが鏡の謎の本丸である。スプーンで起こる「左右反転」と、鏡の「左右反転」は、言葉は同じ左右反転だが何か違和感が残るのを解消できそうなもの、ここがポイントである。実際、物理学的にスプーンは上下・左右・前後のすべてを反転させている(パリティ反転と呼ばれる)が、平面鏡は前後反転だけである。

こうした科学的な予想に反する話題に接すると、何でもかんでも心理学の効果だ、幻想だ、と言って片付けてしまわれがちである。あるいは、不必要に複雑で技巧的な特殊効果を考案してみたくならないかもしれない。しかしここはもう少し踏ん張って、基本から離れずにその中身をしっかりと考えることを楽しんでみよう。

こういうときは、できるだけ自分の身を引いて冷静に状況を眺めてみる態度が有効であることが多い。自分の顔を鏡でじっと見て悩んでばかりいないで、視点を離して「鏡を見ている自分」を外から眺めてみよう。つまり、2次元のイメージとして見える鏡の世界を、鏡に向かう自分を含めて3次元的に捉えてみよう。

図1が鏡に向かう自分の姿だと考えてみると、実物と鏡像は鏡の面に関して3次元的に対称になっている。確かに前後反転である。この立体的な構図には、どこにも左右反転は登場していない。図1の子犬の身になって、ひっくり返っているのは左耳なのか、右耳なのかを気にし始めるまでは。

物理学的には前後反転に尽きている状況から、左右反転という認識に至る、物理学とは別の原因が絶対に必要である。これが何か、というのが鏡の問題の最重要ポイントである。

左右反転を生むもの

何かわかりにくい問題がある場合には、極端であったり、例外的な状況を考えたりするとヒントになることがある。むしろ、典型的な状況は特徴がはっきりしない場合も多い。

まず、鏡は本当に左右反転ししないのだろうか？ 上下反転することはないだろうか？ 自分の身体では試しにくいので、紙に「p」の字を書いて、ぜひ、ご自分で鏡に映して試していただきたい。何度か試していると、当たり前の「q」のほかに、おそらく、上下反転した「b」が出現することがあると思う。

ここではすぐに種明かしをしてしまうが、実際、

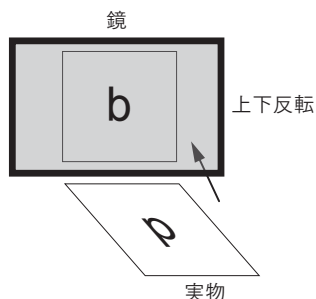


図4—上下反転を作る方法

上下反転した文字「b」が見える方法はある。答えがわかってしまえば簡単至極なのだが、例えば図4のように普通とは違う方法で鏡に向かわせればよい。実はこれだけで、この鏡の謎のトリックは解けてしまっているのだ。

そう、「鏡ではいつも左右反転して見える」と言われたときには「逆さ富士」を思い浮かべれば簡単に反論できる。湖面の位置がその答えの鍵を教えてくれる。つまり、鏡との位置関係は真正面に正対する「鏡合わせ」とは限らないことに気づけばぐっと答えに近づける。

このように、実際に試してみることで、観察することで、考えていただけではわからなかったことに気づくことが多い。鏡の観察を楽しめる絵本シリーズである「かがみのえほん」⁴は、あれこれ試すのに大人にもお勧めだ。

鏡の謎

鏡は前後反転ししない。物体を鏡に見せる際のやり方次第で、これが左右反転したり上下反転したりすることがわかった。これを足がかりに一気に話を進めよう。

まず、鏡の前に座って本稿のように紙に書かれた文字を見ているとする。当然、鏡の方からは紙の裏側しか見えない。だから、文字を映すには180度回して自分の正面にある鏡に見せてやらなければならない。その際に紙を「観音開きに回す」(図5)か、「カレンダーのようにめくってひっくり返す」(図6)か、で左右反転と上下反転の違いが生まれる。

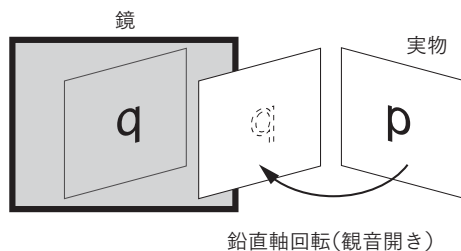


図5—観音開きで左右反転

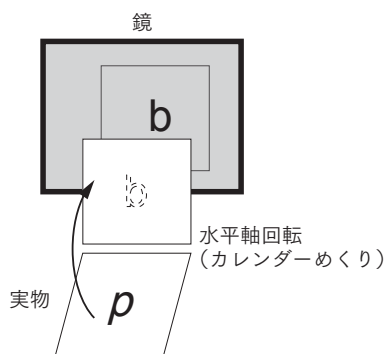


図6—カレンダーめくりで上下反転

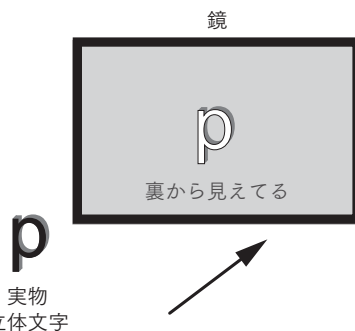


図7—立体文字の場合は左右反転しない

一方、もし紙に書いた文字ではなく図7のような立体の文字オブジェであれば、裏から文字がそのまま見える。そのため180度回転させる必要がなく、左右反転も上下反転もしない、そのままの文字が裏から見えるだけである。

このように鏡に見せる物が3次元的な物体であれば、わざわざ回転させようとは思わない。ところが特別な正面(文字が書かれた紙の表面など)があるならば、鏡にその正面が向くように回転させて正対させなければ鏡に映すことができない。

数学的にまとめると、鏡に物体を映したときの

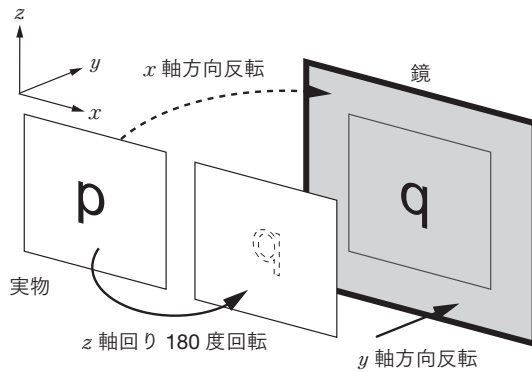


図8—鏡の反転のしくみ

$$\begin{array}{ccc}
 xy \text{ 平面内 } 180 \text{ 度回転} & y \text{ 軸反転} & x \text{ 軸反転} \\
 \begin{pmatrix} \cos \pi & -\sin \pi & 0 \\ \sin \pi & \cos \pi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

図9—z軸回り180度回転×y軸反転=x軸反転

現象は、「鏡による前後反転」と、物体を「180度回転させる操作」が組み合わせされたものである。これが数学による謎解きである。

図8の通り、物体を鉛直軸(z軸)回りに180度回転させた後に、鏡の本来の機能である前後反転(y軸方向に反転)をさせることで、左右反転(x軸方向に反転)が実現する。式で書かないと納得できない方向けには、多少複雑な表現にはなるが図9のように行列を用いれば、z軸回りの回転とy軸反転を組み合わせると、x軸反転が残ることを機械的に示すこともできる。z軸回り180度回転は実はx軸反転とy軸反転を組み合わせたものと同じであり、これをさらにy軸反転すればy軸に関する操作が相殺してx軸反転だけが残る、ということでもある。

さて、数学的にきれいに解決したように思えるが、問題が残っている。鏡が決められる特別な軸はy軸だけであるのに、180度回転させる軸がなぜx軸(カレンダーめくり)ではなくz軸(観音開き)が選択されるのか、という部分である。これが定まらない限り、左右反転になるか、上下反転になるかわからない。

物理でも数学でもない効果

ここまでは物理と数学を使った議論で頑張ったが、これが限界だろう。現実の状況では、180度回転の軸の選び方が対等ではない。つまり「偏り」=「非対称性」が確かにあるのだが、それが何かわからない。自然界では、一般的に対称性が破れるのは非常に特別なことであり、これ以上「不思議だな」と思うこともないほどの重要ポイントである。さあ、ついにここで降参して別の効果を考え始めよう。

まず扉をイメージしよう。通常の観音開きの扉(図5)に対して、カレンダーめくり(図6)の扉は圧倒的に少ない。これには、多分に重力が関係していることは想像に難くない。後者は重力に抗して持ち上げたり支えたりしなければならないからである。

私たちが後ろを見るには、振り返ったり回れ右(左でもよい)をするのが自然で、のけぞったり逆立ちしたりするのはどう考えても普通ではない。足でまっすぐ立つのが楽だからだ。

別の例も紹介しておこう。お風呂場のシャンプーの容器は、倒れないように鏡の方に正面を向け

るには鉛直軸回りの回転しかないだろう。一方で、ジュースの空き缶や文字が書かれたボールを鏡に映すのなら、上下反転した文字が見えることも珍しくないだろう。逆立ちが簡単だからだ。

このように、多くの場合に身体や物体の構造自身に水平方向と鉛直方向の違い、すなわち非対称性が元々仕込まれている。この構造上の対称性の破れは、重力がある環境が遠因であり、この意味で説2は間接的には正解といえるだろう。

重力の効果だけではない。そもそも、人間の手はネジ回しの際のように腕の軸の回りには回しやすいが、ものを上下にひっくり返すのは関節と筋肉の構造上、やりにくい。その影響もあってか、書籍は横綴じが普通で、上綴じはまれである。手のひらを鏡に向ける際にも、手首の柔軟体操のように上下にひっくり返すのは至難の業だ。同様に、看板の字が鏡で左右反転して見えるのは、鉛直方向に上が向くように字が書いてあり、かつ、左右に首を捻って振り返って見比べるからだ。

自分自身の姿を考える場合には、肉眼で見えているイメージは鏡像だけである。これと実物を想像して比較する際には、図1の状況で実物の方を頭の中で回転させて、顔の向きを揃えて横並びにしてどこが違うか見比べてみる必要がある。この場合にも、逆立ちさせずに顔をこちらに向けようとする結果、やはり垂直軸回りが優勢になる。回れ右をするのと、逆立ちをするのとどちらが自然な回転か、と考えればよい^{5,6}。この部分に関しては経験にもとづく心理的なバイアス、という見方もできるだろう。

鏡の像は心臓が右側にあるし、図1で左耳は鏡の中では右耳に変わる。本来は、顔を前側から後ろ側に押し込んでひっくり返すように変形したものが鏡像であって、左右は変わっていない。ただ前後に顔を押し戻してひっくり返し直すとイメージするのは気持ち悪いので、180度回転させて顔を同じ方向に揃える。このとき、鉛直軸回りに回転するから、左右が反転する。物体にとっての上下と前後の向きを揃えるように回転させた結果だ。鏡の左右反転は、本来の前後反転が変身した

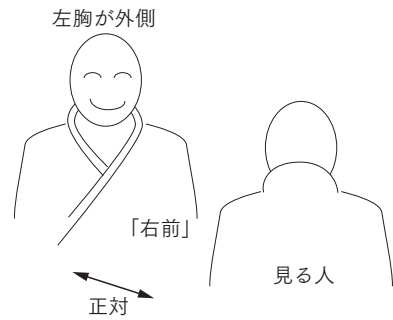


図10—着物の「右前」は見る人にとっての右

偽物なのだ。これに対し、スプーンでは本当に左右が反転している。

このように、鏡の左右反転の鍵は理科・数学的な部分ではないところにある。したがって、理科の教科書には載らず単に、反射現象だけが登場するのは当然ではある。如何にも習ったような気がするけれど、習っていないのである。

ところで鏡の謎と似た混乱を招くものに、着物の前合わせを表す「右前」と「左前」がある。着ている人から見て左側が前方(外側)になるのが正しいが、これを表す言葉は「右前」である。これは、着ている人ではなく、正面から着付けしている人から見て右側なのだそう。一方、「前」は着物を着る人にとっての前方向を意味しており、ややこしいことこの上ない。さらには、「前」というのは実は「前方向」ではなく「手前側」(向きは後ろ向き)を意味しているという説もある。百聞は一見に如かず。あれこれ言葉で考えずに図10のように、合わせが「y」の字に見えるのが正しい、と丸覚えした方がよさそう。

これは前後などの言葉の指す意味が図3のようにきちんと座標軸として定義されていないことも混乱の原因だ。例えば鏡に自分が向かう際、正面ではなく側面を鏡に向けたなら、鏡の前後=自分自身の左右(y軸)が直接、反転するので何も混乱はない。「左右」という単語の示す情報が少ないのである。鏡に対して固定された座標(客観)と、物体に固定された座標(主観)が混在すると間違いを起こしやすいが、それは単純な間違いであって科学的な謎を生むものではない。

実物と鏡像は、数学的にはどれか一つの軸だけが反転したものだ。物体から見てどの軸になるかは置き方による。それらを見比べるには、一对の狛犬のように左右に並べ直すのがわかりやすい。その際、向きを揃える優先順位は上下(重力が決める)、前後(正面が決める)より左右はずっと低いのである。結果として、揃えられなかった方向である左右が反転している、と見なされてしまうわけだ。紙に書かれた字の場合は表面＝正面の存在感が切断面より圧倒的であることに引きずられてしまう。

物体の形状の左右に関する違いは多くの場合、前後や、ましてや上下の違いに対してささやかすぎて揃えようとされにくいのである。広げた右手と左手の形を比べるとき、右手は手のひら、左手は手の甲を上に向け、どちらも親指が身体の右を差すように揃えれば、左右ではなく表裏が反転した像の対が見えるはずだ。また、クリスマスツリーや円盤型 UFO には前後と左右で優劣はないから、たとえどこかに正面としての目印を付けたとしても、鏡に映せば上下を揃えて比較する結果、左右と同じ確率で、左右ではなく前後が反転して見えると思うだろう。

この優先順位こそがバイアスであり、環境、構造、心理的なもの、など多様な原因が考えられる。自然法則は基本的に左右対称であるが、現実の構造では例えば左ネジより右ネジが圧倒的に多い。これも原因は自然法則自身には含まれない、後天的なバイアスであることと似ている。具体的なバイアスは多種多様であり、これらについて論じることは楽しいし、物質や生命の起源のような重大なテーマの場合には研究目的になることもある。

だがほとんどの場合、バイアスは自然法則を考察する上での障害に過ぎず、性質を調べて抑制すべきものでこそあれ根源的な科学法則探究の本来の目的自身とは異なるものである。実際、このせいで前後反転装置という鏡本来の性質が見えにくくなってしまっていたのは確かだ。鏡の謎は、バイアスの巣窟なのだ。

3次元で捉える

そもそも鏡合わせのための180度回転をせずに、鏡に向いている状況を実物も鏡像もまとめて3Dスキャナーのように3次元のまま認識できれば、前後反転のままである。実際、図1, 3, 7の第三者的な視点では実物と鏡像は、左右反転していなかった。自然法則には本来、特別な方向などないにもかかわらず、上下だけでなく物体の形状の特性上「正面」という特別な方向が認識され、180度回転という余分な効果が実際の回転操作、あるいは頭の中の回転の想像、という形で無意識のうちに追加されてくる。これは視覚が2次元的事であることと関係があるかもしれない。

鏡文字がなかなか抜けない子どもは、逆に3次元的な空間認識が得意であるという傾向があるそうだ⁸。眼で見たものが脳内では3Dスキャンイメージとなっているのだろう。冒頭で紹介した、鏡で左右反転して見えるとは思わない、という少数者の存在は同じ起源なのかもしれない。

証明が可能な数学と違って、仮説を実験で検証する必要があるのが自然科学だ。雰囲気と多数決で決めるようなものではない。その態度が万能には機能しない、180度回転のバイアスの部分には議論もあるよう⁹だが、鏡の謎は基本的にバイアスを伴った180度回転をする操作に答えがあると考えること自体は無理がないだろう。バイアスに関する表現の明確さこそ違え、過去の多くの著者の考えはおおむね対立はしていないように思われる^{3, 5-9}。つまり、左右反転させているのは鏡の法則ではなく環境や構造、そしてあなた自身だ、ということもできるだろう。ついつい観音開きしてしまう、180度回転という主観の行う操作を取り除けば、謎は消える。その主観のバイアスを生むのは回転軸の選び方の非対称性である。回転操作を生む「正面の認識」と、その軸を選択する「重力による空間の対称性の破れ」が遠因の場合が多い、とまとめてもよい。

最後に、衝撃的なバイアスを紹介する。2次元の紙面上の「 $p \Leftrightarrow q$ 」のような鏡文字は、これを

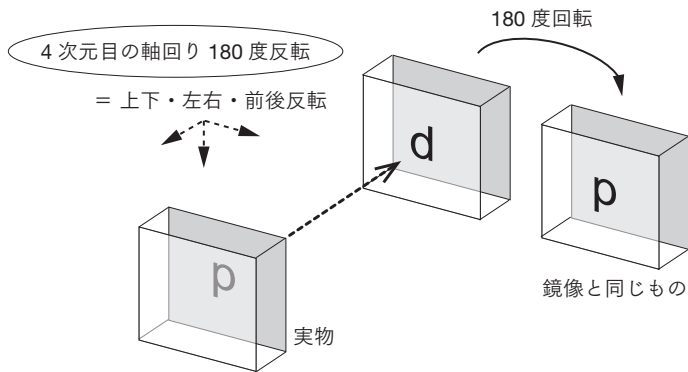


図 11—4次元では、反転もしていない

紙面上でいくら回転させても同じ形にはできない。しかし、紙面から3次元空間に飛び出して印字された文字を回転させれば、同じ形である。字の書かれた透明なシートをひっくり返すと思えばよい。高い次元を考えることで反転を回転で置き換えることができたわけだ。今度は図 11 のように3次元の物体を、4次元目の空間の軸の回りで180度回転すると、これは回転軸以外の3つの軸すべてに関する反転(パリティ反転)と同じ結果となり、普通の鏡像と同じ形が得られる。4次元で考えれば実物と鏡像はまったく同じ形状であり、反転に伴う謎は一切存在しない。3次元で考えたことが根本的なバイアスである、という見方も面白いだろう。

おわりに

科学が客観性を追求するのは、主観の混入による混乱をできるだけ避ける智慧である。逆に、客観的、科学的な事実と思われていることにも、意外と自分自身の行動や意思が決定的な役割を果たしていることもある。思わぬ形で誰も気づかぬうちにそっと入り込む主観、これがバイアスである。自分では正しい測定をしているつもりでも、メジャーの持ち方のせいでいつも値がずれてしまう、このような誤りが科学研究の宿敵、「系統誤差」であり、これもバイアスである。

では、バイアスは常に悪なのか。それは次回以降に議論しよう。

文献

- 1—朝永振一郎:「ふしぎだと思ふこと」(1974)。湯川秀樹・朝永振一郎・江崎玲於奈の3氏を招いて開催された座談会「ノーベル物理学賞受賞三学者 故郷京都を語る」で、京都の子どもたちに向けた言葉を、との要請に答えて書かれた言葉(http://tomonaga.tsukuba.ac.jp/room/room_06_03.htm)
- 2—プラトン(訳・岸見一郎):『ティマイオス/クリティアス』。白澤社(2015)
- 3—朝永振一郎:『鏡のなかの世界』。みすず書房(1995)p. 134
- 4—わたなべちなつ:「かがみのえほん」シリーズ。福音館書店(2014 ほか)
- 5—朝永振一郎:『鏡の中の物理学』。講談社学術文庫(1976)
- 6—富永裕久:『左と右の科学』。ナツメ社(2001)
- 7—マーティン・ガードナー(訳・坪井忠二、藤井昭彦、小島弘):『新版 自然界における左と右(上・下)』。ちくま学芸文庫(2021)
- 8—ブロック・L・アイディ、ファーネット・F・アイディ(監訳・藤堂栄子、訳・辻佑子、成田あゆみ):『ディスレクシアだから大丈夫!』。金子書房(2021)
- 9—高野陽太郎:『鏡の中のミステリー』。岩波書店(1997)、『鏡映反転』。岩波書店(2015)