



第10回

# 科学の甲子園ジュニア 全国大会

## 実技競技①

のぞ あざ  
覗いてごらん 鮮やかに広がる光の世界

まんげきょう  
～万華鏡の物理～

⌘ 解説 ⌘

## 【解説】

### 「光の反射を万華鏡で学ぼう」

鏡は私達にとって最も身近な道具の一つです。鏡によって私達は自分の顔を毎日簡単に見ることができます。また車のバックミラーや道路のカーブミラーといった、直接見えない場所や物を映してくれる鏡は、交通安全にも役立っています。

写真1 水に映った風景（水鏡）



### <鏡の歴史>

人類が最初に使った鏡は、池や器に入った水に自分の姿を映して使う水鏡（写真1）と呼ばれるものでした。時代が進むと、石の表面を磨いた石鏡が作られるようになり、続いて、金属の表面を磨いた金属鏡が用いられるようになりました。日本でも弥生時代に中国から銅製の鏡が伝わり、この時期の古墳からは銅鏡が多く出土しています。

現在使われているガラス鏡の多くは、アルミニウムや銀などの金属をガラス板にめっきして作られたものです。ガラスに金属がめっきされた鏡は、14世紀にイタリアで初めて製作されました。当時は作るのに大変な手間がかかっていましたが、19世紀にドイツで新しい技術が生まれ、それが世界中に広まって改善が重ねられた結果、質の良い鏡が大量生産されるようになりました。

### <実験の目的>

19世紀に作られていた鏡も、現代の鏡も、ガラスに金属をめっきして作る点では同じです。昔は金属をきれいにガラスにつける作業が手間だったわけですが、なぜ金属でめっきせず、ガラスだけを鏡として使わなかったのでしょうか。ガラスも、人類が最初に鏡として使っていた水も、光を反射する性質がありますので、鏡としての役割を果たせないことはありません。ところで、「金属の方がガラスや水より鏡として優れている理由は？」と尋ねられたら、皆さんはきっと次のように答えるでしょう。「ガラスや水からの反射は鏡からの反射よりもずっと弱く、反射した像がはっきり見えにくいから。」しかし、ガラスや水からの光の反射は、いつでも金属よりも弱いのでしょうか？

金属と、透明な物体（ガラス、水、今回の実験に使ったアクリルなど）の表面での光の反射には、強さ（光の量）の他にも違いがあります。その違いは、アクリルと金属鏡で万華鏡を作って先端に描かれた同じ文字（図形）を覗いて比較すると、はっきりと表れます。万華鏡で見えるきれいな模様は、元の物体から出た光が何度も鏡面で反射したことによってできるものです。このとき光がどのような経路で目に届くかを考えると、アクリル製の万華鏡の像と鏡でできた万華鏡との違いの理由がわかります。同時に、アクリルのような透明な物体による光の反射の特徴を実感することが、この実験の目的です。

### <金属での反射と透明な物体での反射>

光が金属に入射すると、入射光はほぼ 100%反射されます。なぜなら、光は金属内部に入り込むことができない性質を持っているためです（これは金属が電流をよく流すことと関係があります）。

一方、水やガラスなどの透明な物体に光が入射した場合、光の一部は物体を透過し、残りが反射されます。建物の内部にいても窓ガラスを通して外が見えますので、多くの光がガラスを透過してくることは明らかです。透過する光の量が多いということは、反射する光の量が少ないということであり、ガラスに映った自分の姿が鏡のようにはっきりと見えないのは、自分自身から出てガラスに入射した光の多くが反対側に透過してしまうため、と理解できます。このような透明な（＝光の多くが透過する）物体では、何回も光を反射させるとそのたびに光の量が減るので、反射回数が多いほど反射される光は弱くなります。万華鏡では、反射の回数が多い像が視界の外側にできます。したがって、アクリル板でできた万華鏡で視野の外側に図形（文字）が見えない理由の一つは、多数回反射して光の量が減ったため、と考えられます。ただ、それだけではありません。

透明な物体による光の反射が金属と大きく違う点が、もう一つあります。それは、同じ強さの光であっても、入射する角度によって、反射の強さが変わることです。金属鏡の場合、光がどんな角度で入射しても、入射した光はほぼ 100%反射されます。しかしアクリル板の場合は、入射角が大きくなるほど反射される光の量が多くなることを、今回の**実験 2**で確かめました。日常生活でも、池や湖に映った風景は、近くで見るとあまりよく見えないのに、遠くからだとはっきり見える、という経験をしたことがあるかもしれません。これも、入射角によって反射の強さが異なるためです。

### <透明な物体での反射のふるまいを考えよう>

透明な物体による光の反射の強さが角度によって変わる理由を正確に理解するには、大学での勉強が必要です。ここでは、中学生の皆さんがわかるように、おおよその説明を試みます。

光は、ガラス、アクリル板、水など透明な物体内を進むことができますが、物体内を進む光の速さは物によって違い、空気>水>アクリル板≒ガラス>ダイヤモンド、の順に遅くなります。透明な物体に入射した光は、反射光と透過光の2つに分かれるので、片方が強くなると、もう片方は弱くなります。では、反射光と透過光の2つに分かれる割合はどのように決まっているのでしょうか。

この割合を決めているのは、先に述べた、透明な物体内を光が進むときの速さです。この光が進む速さによっては、与えられた入射角に対してどんな角度（屈折角）で屈折が起きるか、も決まっています。入射角と屈折角の関係（屈折の法則）は高校で詳しく習いますので、ここでは与えられる関係式を受け入れることにしましょう（考え方を知りたい人は、第5回科学の甲子園ジュニアの筆記問題を参考にしてください）。

<屈折の法則>

図1のように、光が空気からアクリルのような透明な物体に入射角  $A$  で入って、屈折角  $B$  で物体中を進んだとします。この角度の関係を考えるのに、図2の三角形を使いましょう。図2には、入射光と屈折した光の進路に重ねて、半径1の円を描いています。図2のように、入射光に沿った斜辺を持つ直角三角形の2つの辺を  $a$ ,  $b$ , 屈折した光に沿った斜辺を持つ直角三角形の2つの辺を  $a'$ ,  $b'$  とすると、辺  $b$  と辺  $b'$  の間には、次の関係があることがわかっています。

$$\frac{b}{v_{\text{空気}}} = \frac{b'}{v_{\text{透明物体}}} \rightarrow \frac{b'}{b} = \frac{v_{\text{透明物体}}}{v_{\text{空気}}} \quad (1)$$

$v_{\text{空気}}$  と  $v_{\text{透明物体}}$  はそれぞれ空気中と透明物体中を光が進む速度です。入射角を1つ決めると、 $a$ ,  $b$  が決まります。空気中と透明物体中を進む光の速度がわかっているならば、式(1)から  $b'$  が決まる（同時に  $a'$  も決まる）ことになり、屈折角がわかります。

先に述べたように、透明な液体や固体の中を進む光の速度は空気中より必ず遅くなるので、 $b'$  は  $b$  より小さくなる、つまり屈折角は入射角より小さくなります。

<透過する光と反射する光>

角度の関係がわかったので、次に、どれだけの割合の光が物体中を透過するか（残りは反射するか）を理解するため、透明物体の境界面に入出入りする光のエネルギーを考えましょう。大事なことは、境界面に入ってくる光のエネルギーと透過や反射したりして出ていくエネルギーが等しくなければならない、という条件です。そうでないと、境界面にエネルギーがどんどんたまったり、あるいは境界面からエネルギーがどんどん奪われたりすることになってしまうからです。光のエネルギーは、光の進行方向に沿って流れています。これを境界面に垂直な方向と平行な方向に分けると、境界面を通して出入りするのには面に垂直な方向の成分です。図2の斜辺の長さ1の直角三角形では、面に垂直な方向の成分は、長さ  $a$ ,  $a'$  に相当します（平行な成分は境界面を滑っていくだけで、物体中を出入りしません）。図2からわかるように、面に流れ込んでくるのは入射光、流れ出ていくのは反射光と透過光です。入射光のエネルギーを  $I_{\text{入射}}$ , 反射光のエネルギーを  $I_{\text{反射}}$ , 透過光のエネルギーを  $I_{\text{透過}}$  と表すと、それぞれのエネルギーの流れの境界面に垂直な成分は、直角三角形の辺の長さを使って、 $aI_{\text{入射}}$ ,  $aI_{\text{反射}}$ ,  $a'I_{\text{透過}}$  と表すことができます。このように表すと、境界面に対して入る光の量と出る光の量が等しい、という関係はエネルギーを用いて次のようになります。

$$aI_{\text{入射}} = aI_{\text{反射}} + a'I_{\text{透過}} \quad (2)$$

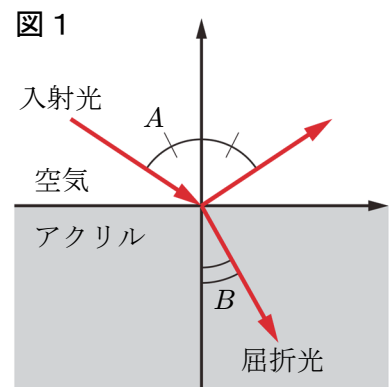


図1 空気からアクリルに入射角  $A$  で光が斜めに入射し、屈折角  $B$  で屈折

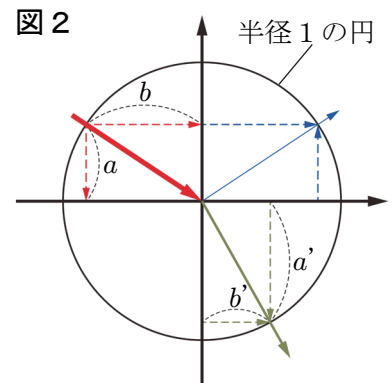


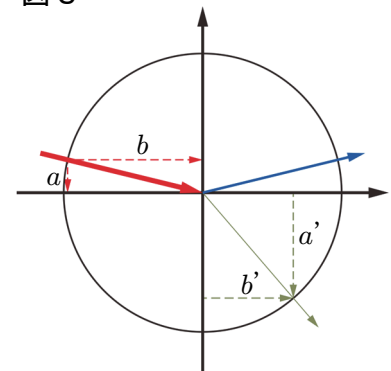
図1に対し、半径1の円を重ねた図

この(2)式を、「透過する」光のエネルギーに注目して変形すると次のようになります。

$$I_{\text{透過}} = \frac{a}{a'} (I_{\text{入射}} - I_{\text{反射}}) \quad (3)$$

仮に反射光を無視する（ゼロとおく）と、透過光のエネルギーは、入射光の  $\frac{a}{a'}$  倍になります（実際には反射光に分けられるエネルギーを引くのでさらに小さくなる）。作図してみるとわかりますが、 $\frac{a}{a'}$  という値は、入射角が大きくなるほど小さくなります（**図3**）。したがって入射光の  $\frac{a}{a'}$  倍という値も小さくなり、入射角が大きくなるほど透過する光のエネルギー（光の量）が小さくなることがわかります。一方、入射した光は反射光と透過光の2つに分かれるので、透過光が弱くなるとその分だけ反射光は強くなります。さらに、**図3**からもわかるように、入射角が90度に近づくと  $a$  はゼロに近づく（ $a'$  はゼロに近づかない）ので、透過光はゼロに近づきます。透過光がゼロになれば、入射した光の全てが反射光に分配され、光は100%反射されることとなります。これが、今回の**実験2**で確認した実験結果のおおまかな説明です。

図3



入射角度が大きい場合。辺の長さ  $a$  はゼロに近づく。

### <実験2のまとめ>

改めてまとめると、以下のように理解できます。まず光の進む速さが異なる2つの透明物体が接する境界面に光が斜めに入射すると、光の進行方向が曲がります。入射角と屈折角の関係は(1)式で表され、この関係は光の進む速さで決まっています。境界面に入射した光は反射光と透過光に分けられますが、どのように光のエネルギーが分配されるかは、入射角によって変わります。これを求めるのに、「2つの透明物体が接する境界面に入ってくる光のエネルギーと出ていく光のエネルギーは等しい」という条件、すなわち(2)式を使いました。この(2)式も三角形の辺の長さの比、すなわち光の進む速さで決まる式です。(2)式を変形した(3)式は、入射角が大きいほど透過する光の量は減ることを示しており、結果として、入射角を大きくするほど反射は強くなる、ということがわかります。

### <万華鏡の像について>

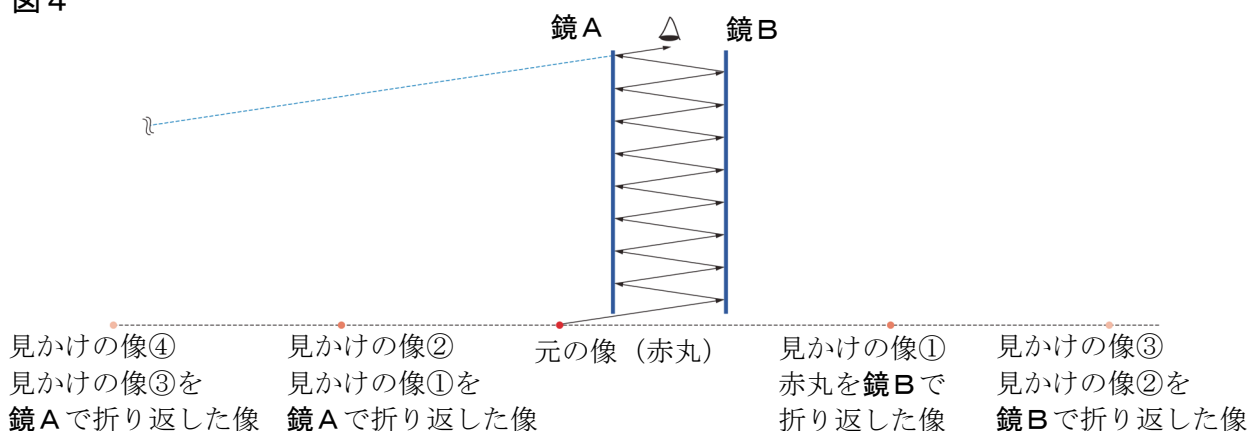
万華鏡は複数枚の鏡を向かい合わせて作られています。今回の実験で使ったのと同じ3枚からなるものが多いですが、4枚、6枚で作られたものもあります。複数の鏡を向かい合わせて置いたときに見える模様は、**実験1**で行ったように、元の図形（記号）を鏡の面に対して線対称に動かすことで得られます。三角筒内の光の経路を紙の上に描くのは難しいので、ここでは2枚の鏡による反射像を万華鏡のモデルとして解説します。3枚にしても原理は2枚のときと同じです。

<実験 1 と実験 4 で何がわかったか>

実験 4 では、三角筒の外側に描かれた文字の見え方を、筒と文字の書かれた紙との間隔を変えながら調べました。図 4 ～ 6 に筒の先端位置が違う 3 つの場合を示します。筒と文字の先端との距離がどのようであっても、元の像を鏡に対し線対称操作を行うことで得られる見かけの像（1 回反射した像，2 回反射した像，3 回反射した像，…）のでき方は同じです。また反射する回数（線対称操作をする回数）が多いほど、見かけの像はより外側にできます。これら見かけの像からの光の経路は、見かけの像と目を結んだ直線と鏡との交点からたどることができ、図 4 に矢印で示されています（実験 1 で確認しました）。文字に対する筒の先端の位置が変わると、同じ見かけの像から出た光でも筒内に入るときに角度が変わるので、目に見える像の数が変わることがわかります。

まず図 4 のように、筒の外側に文字があり、筒の先端が文字に近い場合から考えてみましょう。この図の配置では、文字から出た光のうち筒内に入るのは、ほとんど水平に近い方向に進む光だけであることがわかります。人が片目で見える角度は約 120 度と言われ（視野角と呼ばれる），この図のように光が 120 度より大きな角度で入ってくると、像を見るのは難しいです。

図 4



万華鏡の先端が筒の外側の対象物（赤丸）に近いときを横から見た図。下に並んだ点は、①赤丸を鏡Bで折り返した見かけの像，②見かけの像①を鏡Aで折り返した見かけの像，③見かけの像②を鏡Bで折り返した見かけの像，④見かけの像③を鏡Aで折り返した見かけの像。これらのどれから出た光も目には入れない。図では、16 回反射した像の経路を矢印で描いたが、人が片目で物を認識できる角度（視野角）からはずれているため、おそらく見えない。

次に、筒先端を少し離れた図5の位置を考えてみます。

図5

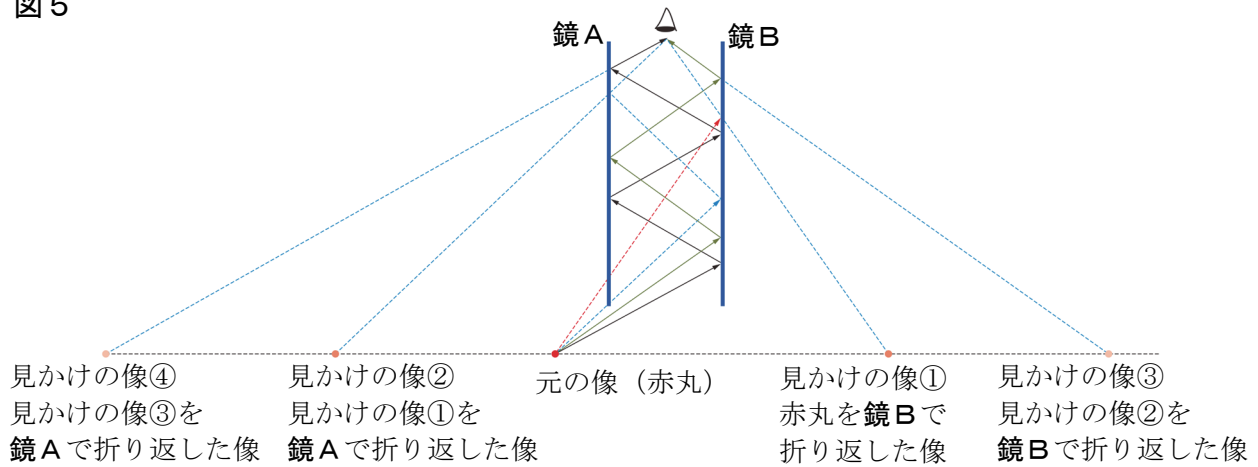


図4より万華鏡の先端を対象物から離れたとき。下に並んだ赤丸の見かけの像は図4と同じ。見かけの像①と②は見えないが、③と④から出た光は、それぞれ3回、4回反射して目に届く。4回反射して目に入る角度はぎりぎり認識可能な範囲。

この配置では、1回反射した光（鏡の面に対して線対称操作を1回行った見かけの像から出た光）と2回反射した光（線対称操作を2回行った見かけの像からの光）は筒の中に入れませんが、3回以上反射した光は目に届きます。このうち、視野角120度以内の角度で目に届く光は3回反射光と4回反射光と予想され、これらの見かけの像が見えるようになります。

さらに筒の先端の位置を離して図6の配置にします。

図6

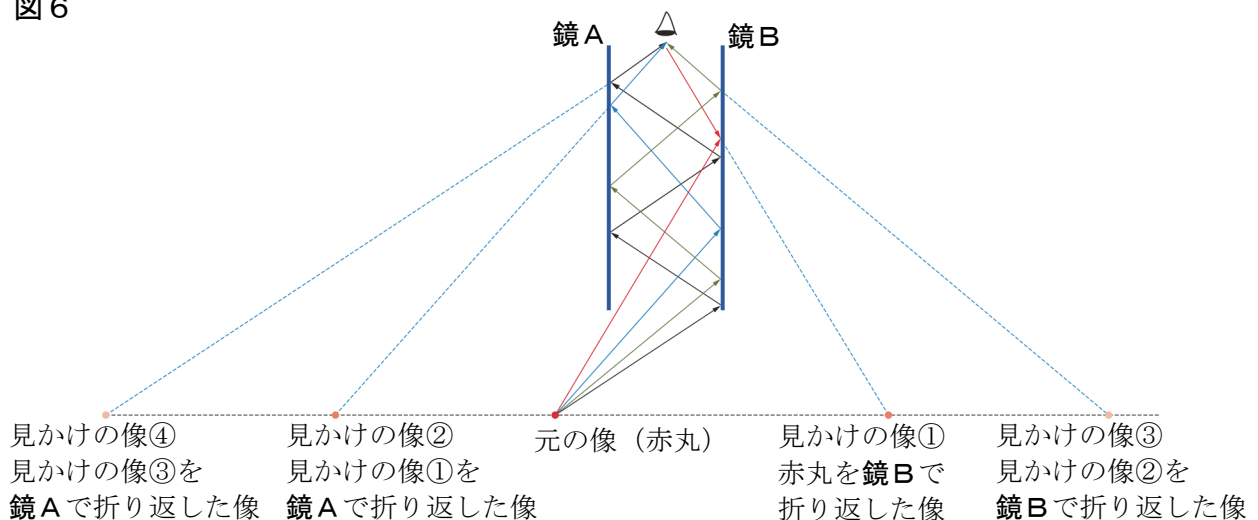


図5より万華鏡の先端を対象物から離れたとき。見かけの像①～④の全てが認識可能な角度で目に届く。

ここまで離すと、1回反射した光も筒内に入れるようになり、見かけの像①～④の全てが見えるようになります。また反射回数の少ない文字は、中央の近くに現れます。これは**実験4**で皆さんが実際に確かめたことと一致するはずです。

このように、筒の外側にある文字を万華鏡で見ると、元の文字から出た光がどのような経路を経て目に届いているかが直感的に理解できると思います。

### <実験を振り返って>

ここで改めて**実験3**を振り返ってみます。アクリル板の万華鏡では、真ん中に近いところにしか文字が見えませんでした。その理由は、万華鏡で外側にできる見かけの像は、

①何度も反射して目に届く

②入射角が小さい光によるものである

ということから、アクリル板による反射の2つの特徴の「反射のたびに光の量が減る」＋「入射角が小さいと反射光の量も少ない」のせいで外側の像が見えなかったと考えられます。

金属でめっきされた鏡では、どんな角度で光が入射してもほぼ100%反射されるので、私達は万華鏡の美しい模様を楽しむことができるというわけです。

万華鏡はきれいなだけでなく、光の反射の仕方がわかる便利な道具とも言えます。今回の実験では、シンプルな三角筒で単純な文字を見ましたが、文字や記号をいろいろ変えたり、万華鏡の形を四角筒や六角筒に変えたりして、現れる模様を予想しながら観察するのも楽しいかもしれません。

### <万華鏡アラカルト>

#### 万華鏡の歴史

1816年にスコットランドのデビッド・ブリュースターという物理学者が”Kaleidoscope”という名前で特許を申請したのが万華鏡の起源と言われています。

彼は、灯台のランプの光をより遠くまで届かせるために鏡の組み合わせを工夫している最中に、複数の鏡を組み合わせることで美しい像ができることを発見しました。この時代の万華鏡は2枚の鏡をV字型に組み合わせたものでした。

その後アメリカのチャールズ・ブッシュによって、オブジェクト（像を作らせるもの）をガラスアンプルに液体とともに入れられたものが開発されます。液体に入れられたことによってオブジェクトがゆっくりと沈下するものの像を観察するので、ゆっくりと変化する像が見ることができます。これらがイギリスに逆輸入され普及しました。その後、アメリカやイギリスで玩具として広がっていきました。



”Kaleidoscope”カレイドスコープはギリシャ語を元にした造語で，”Kalos”＝美しい，”Eidos”＝形，模様，”Scope”＝見るもの の3語を合わせた合成の言葉です。

### 日本での歴史

日本には，1819年（文政2年）頃に入って来たと伝えられ，「紅毛渡り更紗眼鏡流行大坂にて贗物多く製す。」という記述が「撰陽奇観」にあり，発明後わずか3年にして日本でも伝わっているようです。その後1847年（弘化4年），1856年（安政3年）兵法の翻訳書「さんぺいたくちき」にも，「かれいどすかふ」として登場しました。

明治時代に入ってから，「ひゃくいろめがね」という名前で知られ，その後更に改良され「ばんかきょう」や「にしきめがね」などと呼ばれていました。

### ギネスに載っている最大の万華鏡

世界最大のギネス世界記録を保持する万華鏡は，ニューヨークにある万華鏡で高さ56フィート（17m），直径38フィート（11.6m）です。人が中に入れるサイズです。学校の教室の大きさは，7m×9mを標準としているのでそれに比べてみるとその大きさには驚かされます。

### 日本の大きな万華鏡

2002年版のギネスブックにも載った当時世界最大の万華鏡が，愛知県西尾市にある「三河工芸ガラス美術館」にあります。「スフィア」と名付けられた巨大万華鏡（横型長さ7.3m，幅3.1m，高さ2.55m）は，中に入って観察することができ，ストーリーが美しい映像とナレーションで展開され宇宙遊泳をしているような感覚になります。



日本一 縦型万華鏡という名前の付いたものが、滋賀県長浜市にあります。高さは 8 m で、自分の手でオブジェクトを回転させて像を観察できるところです。



### 万華鏡の種類

像を映し出す万華鏡は、鏡の組み合わせで分類できます。

- 2 ミラーシステム

2 枚の鏡と光を反射しない黒い板で三角形に組み上げるものです。鏡の角度を変えると変化していきます。

- 3 ミラーシステム

3 枚の鏡で三角形に組み上げるものです。反射を繰り返すので、周囲に無限に広がっていくような像になります。

- 4 ミラーシステム

4 枚の鏡で四角形に組み上げるものです。反射を繰り返すので、周囲に無限に広がっていくような像になります。正方形でなくひし形に組むと、焦点が 2 つ現れます。

- テーパード・ミラー・システム

台形の 3 枚の鏡で三角形に組み上げるものです。鏡の筒に傾斜がついているので、小さな三角形の端にオブジェクトを配置して、大きな三角形側から観察すると球状の像があらわれます。

- サークル・ミラー・システム

鏡を円筒形に組み上げたものです。渦巻き状の像が現れます。

### 万華鏡の筒の長さ

レンズの付いていない万華鏡の長さは 15 cm くらいで、人の焦点距離となっています。それ以下の小さな万華鏡には、のぞき口にレンズがついています。

万華鏡は、光の反射の科学的な研究から発見され、アートにまで昇華されたものです。オブジェクトやミラーを工夫し様々な万華鏡を作成してみましょう

以上