

蜃気楼の光は屈折力で曲がるのだ！

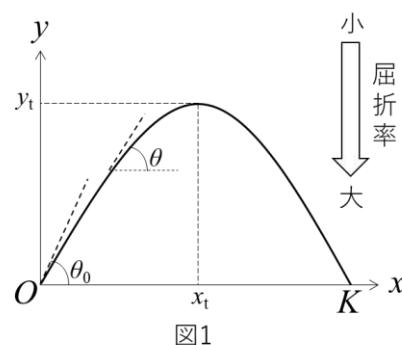
森川 浩司（北海道・東北蜃気楼研究会）

1. はじめに

上位蜃気楼のときの光源から観察者までの光路は放物線のような曲線で説明され、光路が曲がる理由は光を車に例えるなどして（参考文献1）屈折で曲がるからと説明されます。しかし中学理科で習う光の屈折・反射を思い出す理科好きの人にとっては、光が光路の頂点からまた戻ってくるのであればそれは反射ではないのか？と疑問が湧くようです（参考文献2）。そこで改めて、蜃気楼のときの頂点とその近傍での光の曲がり方をどう説明するといいいのか、について考えてみます。

2. 理論的には屈折だけで説明できる

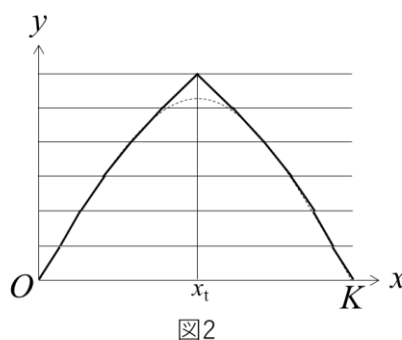
図1の曲線のように上位蜃気楼のときに点Oから出た光が点Kにいる観察者に届いたとします（図1は水平方向にx軸を、鉛直方向にy軸をとっており、鉛直方向は水平方向に比べて拡大して描いています）。また、屈折率が高さyにだけ依存して水平方向には一定と仮定します。頂点付近では屈折率は高さに比例して減少する（屈折率はyの1次関数で書ける）と仮定することができて（参考文献3）、このときスネルの法則（屈折の法則）から、頂点とその近傍では光路は放物線（光路はxの2次関数）になることが示されます（参考文献3）。



3. 多数の薄層による近似はかえってわかりにくい？

前項の説明は自然な仮定の下に屈折の法則だけで蜃気楼の時の頂点での光の曲がり方を説明できるのですが、数式を含めた理解には大学で習う微積分の知識が必要という難点があります。

そこで中学理科で習った屈折の知識で理解できるように、図2のように多数の薄層（層内は屈折率一定で、上の層ほど屈折率が小さい）で説明する方法があります。ただしこの説明では、各層内では光路は直線になるので、光路全体では現実の曲線を短い多数の直線のつなぎ合わせで近似することになります。そのため、頂点 $x = x_t$ では曲線以上に反射しているイメージを与えることになってしまいます。



さて、光の屈折と反射を習ったときは、屈折と同時に反射も起きていると習いました（参考文献4）。頂点より手前で、ある層からその上の層に光が進む際には（そして頂点より先で、ある層からその下の層に進むときも）、屈折だけではなく反射も同時に起きているはずですが、頂点以外では屈折しか起きていないと考えて大丈夫なのでしょうか？

多数の薄層による近似は理論的考察からは（参考文献3）、層厚を0に近づける極限では頂点では全反射、頂点以外では屈折となっていることが示されます。これは、頂点では実際に反射が起きているということではなく、層と層の境での反射率を考えると頂点では100%、頂点以外では0%になり、そのため現実の光路を多数の短い直線のつなぎ合わせで近似的に説明できる、という意味です。

多数の薄層による近似は中学理科の範囲で説明ができますが、その代わり頂点では絵でも理屈でも反射していると考えて頂点での光の「曲がり」を説明することになるとい難点があります。

4. 光は屈折率の大きい方に引っ張られる性質がある

蜃気楼のときの頂点とその近傍での光路が放物線で近似できることを使って、高校物理の範囲での別の説明を考えてみます。

高校物理で習う、図 3 のようにボールを斜方投射したときの式と、蜃気楼の光路を放物線で近似したときの式を表 1 のように比べてみます。(ここで、 v_0 : ボールの初速度、 θ_0 : ボールの投げ上げ角度、 v : 角度 θ のときの速度、 v_t : 頂点(x_t, y_t)での速度 (y 方向成分は 0)、 g : 重力加速度、 $n(y)$: 高さ y での屈折率、また、 n' : 屈折率の変化率。)

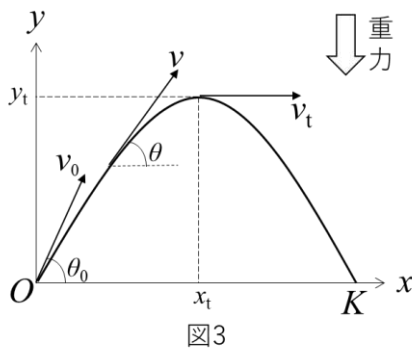


表 1

ボールの斜方投射	蜃気楼の光路
水平方向の等速直線運動 $v_0 \cos(\theta_0) = v \cos(\theta) = v_t$	スネルの法則 $n(0) \cos(\theta_0) = n(y) \cos(\theta) = n_t$
ボールの軌跡 $y(x) = y_t - (x - x_t)^2 g / (2 v_t^2)$	頂点とその近傍での光路 $y(x) = y_t - (x - x_t)^2 n' / (2 n_t)$

表 1 から「屈折率の変化率」が「重力」と対応することになります。このことから、「ボールを斜方投射としたとき、ボールは重力で下に引っ張られて放物線を描く」ように「光は屈折率の大きい方に引っ張られて曲がる」、「重力」ならぬ「屈折力」によって曲がると例えることができます。

ボールの斜方投射ではボールは頂点で見えない壁で反射しているわけではありません。この対比から蜃気楼での光路も頂点では反射していないことは理解しやすくなるのではないのでしょうか。

以上は屈折だけで説明ができ、多数の薄層による近似のときのように反射を持ち出す必要がありません。ボールの速度と屈折率を並べているので強引に見えるかもしれませんが、屈折率は真空の光速に対する物質中の光速であり、屈折率も速度に関係する量なので納得してもらえましょう。

重力は実際にボールを引っ張るのに対して屈折は実際に光を引っ張るわけではないと思われるかもしれませんが。光の運動が変化しているという点では力が働いていると考えることができるので、屈折力は遠心力のような見かけの力といえます。なお、重力は重力による位置エネルギーの鉛直変化率なので、屈折率が対応するのは重力による位置エネルギーということになります。

5. まとめ

蜃気楼のとき頂点で光路が曲がる理由は光の屈折だけで説明できます。蜃気楼の光路を理科好きの人に説明する方法として、層内は屈折率一定の多数の薄層を重ねた近似を用いて中学理科で習った屈折・反射の法則で説明する方法があります。しかしこの方法は頂点で反射していると考えることによって現実の光の曲がり方を説明する必要があるなど、かえって混乱を引き起こすことになるようです。

そこで多数の薄層による説明はやめて、ボールを斜方投射したときにボールが重力によって頂点から戻ってくるように、光は「屈折力」によって屈折率の大きい方に引っ張られて頂点で戻ってくると説明するのも一つの方法ではないのでしょうか。この対比によって、蜃気楼の時の光の頂点でのふるまいは反射ではないことが理解しやすくなると思われます。

なお、屈折のスネルの法則にしても反射の法則にしてもその根底には「光は所要時間が最短となる経路を進む」というフェルマーの原理があります(高校物理の範囲では参考文献 5 のような取り組みがあります)。その意味では屈折や反射で悩まず、蜃気楼の時、フェルマーの原理を満たす経路は一直線にはならないと学ぶのも物理にさらに興味が湧く方法だと思います。

参考文献 (ウェブサイトはすべて 2022.5.28 最終閲覧)

- 1) 日本蜃気楼協議会 2016: 蜃気楼のすべて! . pp.107
- 2) 木下正博 2018: 蜃気楼における光の伝搬 (屈折・反射) . 日本蜃気楼協議会平成 30 年度研究発表会 (蜃気楼交流会)
- 3) Berry, M.V. 2013: Raman and the mirage revisited: confusions and a rediscovery. Eur. J. Phys. 34, 1423-1437.
- 4) 日本放送協会 (NHK) : 屈折と全反射. https://www2.nhk.or.jp/school/movie/clip.cgi?das_id=D0005301303_00000
- 5) 新村晃司: 光の屈折の学習における「フェルマーの原理」導入の試み. <https://www.shinko-keirin.co.jp/keirinkan/kori/science/buturi/20.html>