

# 蜃気楼における光の伝搬(屈折・反射)

日本蜃気楼協議会 会長 木下 正博

(富山県立雄峰高等学校)

## 1. はじめに

2003年に日本蜃気楼協議会(略称:日蜃協)- japan mirage association -が発足し今年で15年目となる。この間、2011年には公式ホームページを開設し、2016年には書籍「蜃気楼のすべて!」を刊行した。また、会員は全国におよそ60名ほどになり、その活動も全国へと拡大している。それに伴い、全国から様々な情報や質問が寄せられるようになってきた。その中で光の伝搬(屈折・反射)に関する質問があったので考察してみた。

## 2. 反転する上位蜃気楼の光路

反転する上位蜃気楼は、一般に図1のような光路を示すことで簡易的に説明できる。図において、物体から出た光は温度の境界層で大きく光路を曲げ目に届く。この現象の概要は光の屈折で説明できるが、光路の湾曲したピーク(C点)では、反射や全反射しているのではないかという質問がこれまでいくつかあり議論すべきである。

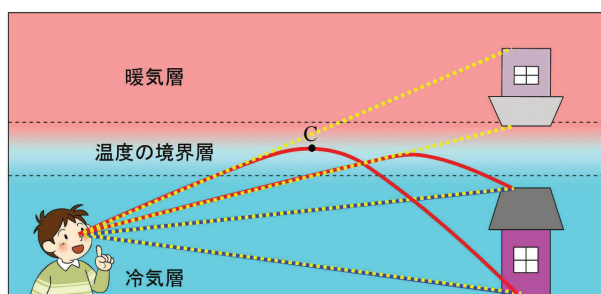


図1 反転する上位蜃気楼の光路

## 3. 境界層での光の振る舞い

### (1) 屈折の法則(スネルの法則)による光路

徳丸仁(光と電波、2000、森北出版)は屈折の法則から湾曲して進む光路を導いている。それによると、平面大地での蜃気楼を考え、 $xy$ 座標系で層状の相対屈折分布  $n(y)$  (地表の屈折率  $n_i$  を規準とする) の大気を仮定する。このとき、光路は層状構造に拡張した反射の法則(スネルの法則)で式(1)のように書き表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} n(y)\sin\theta &= \sin\theta_i \\ n(y) &= \sin\theta_i \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \end{aligned} \right\} \text{式(1)} \quad (\theta_i \text{ は、光線の打ち上げ天頂角})$$

これを書き改めると、次の微分方程式(2)が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dy} &= \frac{\sin\theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}} \\ n(0) &= 1 \end{aligned} \right\} \text{式(2)}$$

ここで、光路を直感的に把握するために、特に誘電率が直線的に変化して、相対屈折率分布が、式(3)のように与えられるものとして考える。

$$n^2 = n_i^2 - \alpha y (= \epsilon/\epsilon_i) \quad \text{式(3)}$$

すると、光路は出発点を原点を選んで式(2)を解くと、次のような放物線の式となる。

$$y = -\frac{\alpha}{4 \sin^2 \theta_i} x^2 + \frac{\sqrt{n_i^2 - \sin^2 \theta_i}}{\sin \theta_i} x \quad \text{式(4)}$$

式(4)は、屈折の法則(スネルの法則)によって進む光路は山なりにピークを持つことを意味している。

## (2) 臨界角と全反射

C点での光の振る舞いについて、臨界角と全反射から考察してみる。

温度の境界層は、温度が変化する薄層の連続として見る事ができる(図2)。この時、光はC点で全反射しているように見られる。しかし、実際には同じ媒質である空気が連続して温度変化しているだけであり、C点における臨界角は  $i_c = 90^\circ$  である。よって、光は境界面に対して進行方向の勾配が0になるまで進むこととなる。なお、臨界角を考える場合、

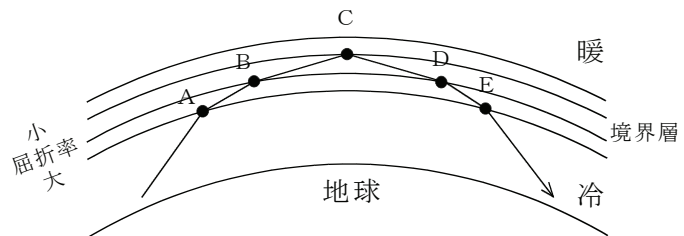


図2 境界層と光路

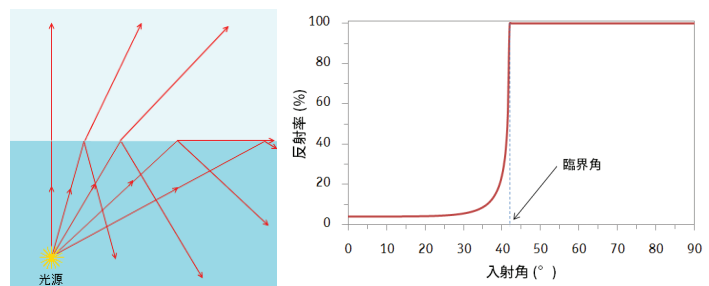


図3 臨界角、全反射、反射率

屈折と全反射(反射率)の両方を考慮しなければならない(図3)。一般論として光が、屈折率大→小に進むとき、光は屈折光と反射光に分かれる。そして、入射光が臨界角に近づくと屈折光は急激に弱くなり反射光が強まる。光が臨界角に達すると屈折光は境界面に沿って進み、それを越えると全反射となる。仮に、実際の蜃気楼にあてはまるのであれば、臨界角付近の光は、屈折光と反射光の両方が存在することになり、かなりボヤボヤとした像になって見えるはずである。実際の蜃気楼像の観察からは、屈折光のみで考え進行方向の勾配が0になるまで進むものとするのが自然であろう。ちなみに、進行方向の勾配が0になった光の反射は進行方向に対して反転する光と考えるべきである。

## (3) ホイヘンスの原理による考察

温度変化が連続的である条件では、光の進行はホイヘンスの原理を用いると、図4のように波面が境界層で連続的な屈折にり進路を曲げると考えられる(図4)。

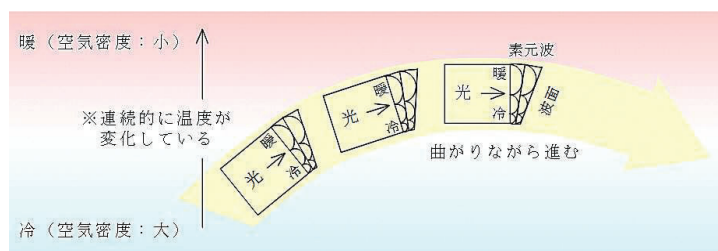


図4 温度の境界層での光の振る舞い

## 4. まとめ

湾曲する光路は、ピークで反射しているように見えるが、光の振る舞いからは、屈折の連続として捉える方が妥当であるという結論に達した。ただし、「反射とは、逆向きに進む光に対して屈折率を負に定義する。」ことでもあり、屈折と反射には本質的な違いは無い。今後、議論を重ね日蜃協としての公式見解を示せば良いと考えている。