

猪苗代湖の上位蜃気楼シミュレーション

松井 一幸(琵琶湖地域環境教育研究会)・星 弘之(北海道・東北蜃気楼研究会)

3月18日に発生した猪苗代湖の上位蜃気楼画像を、iWebMirageSimulatorを用いて元画像からシミュレーションで再現するか調べた。その結果、温度境界層が同じ高さ(10m程度)で湖上に存在すると仮定すれば、単一の温度境界層モデルでよく似た上位蜃気楼画像を再現できることが分かった。ここでは、1枚の元画像からシミュレーションを行う手順についても詳細に述べたい。

1. はじめに

松井は4年前に、ホイヘンスの原理に基づく新しい光の経路計算法を提唱し、蜃気楼曲線の概念を導入して、実体画像から蜃気楼シミュレーションをパソコンで実行できる方法を確立した。この方法の特徴は、地球の丸さや温度境界層の気温分布を関数として容易に扱えることである。観測された下位や上位の蜃気楼の姿から、温度境界層の動きを定量的に推定できること、上位蜃気楼の姿は基本的に境界層の高さで決まること等を明らかにしている。

2. 猪苗代湖の1枚の上位蜃気楼

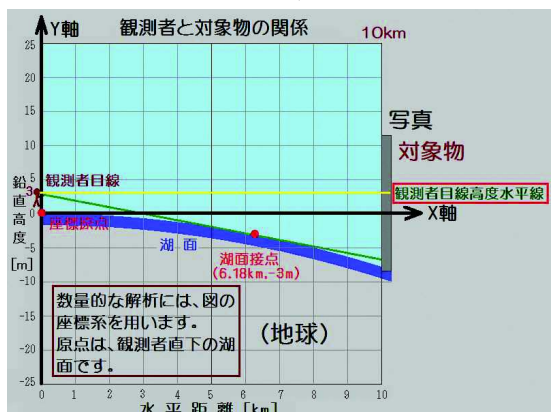


図-1 猪苗代湖の上位蜃気楼(2018.3.18.星撮影)

図-1は、残雪残る3月18日に猪苗代湖に現れた見事な上位蜃気楼である。中央部にS字状の白い線が見える。住宅や屋根が上下に反転した姿も確認できる。この蜃気楼を実景画像からシミュレーションすることにした。

3. 蜃気楼シミュレーションの手順

- (1) 蜃気楼と同じ場所からの元画像を用意する。実景画像としたが、本来は実体画像。
- (2) 画像中に観測者目線高度からの水平線と縦横の角度を[分]単位で記入する。



シミュレーションソフトは、当初Visual Basicで組んでいたが、現在ではブラウザ上で動く、対話・統合型Web対応蜃気楼シミュレータ (interactive integrated Web Mirage Simulator) に進化し、iWebMSと呼んでいる。

前回はYoung・Frappa論文に掲載されている最短距離(1,660m)蜃気楼シミュレーションを行い良い一致をみたが、今回は猪苗代湖の上位蜃気楼を例にとり、シミュレーションの手順を詳しく述べ、結果を考察したい。

(3) 観測におけるパラメータの設定

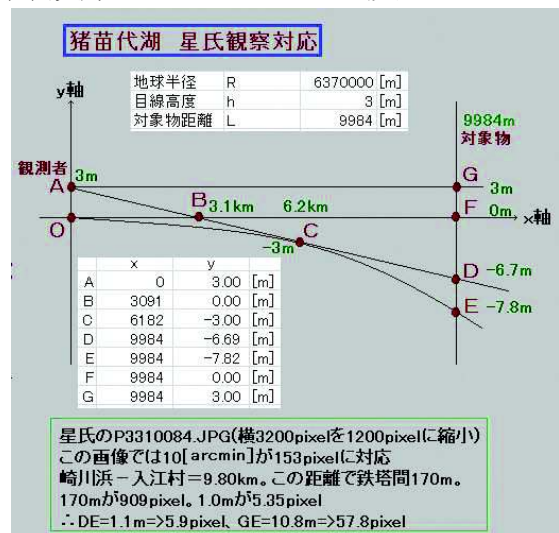


図-2 幾何学的考察

- 対象物距離: $L=9984[m]$
- 湖面近くの下層気温: $t_2=5.8[^\circ C]$
- 湖面近くの気圧: $P=962[hPa]$
海面0m、1013[hPa]を高度514[m]に更正
- 観測目線高度: $h=3.0[m]$

3. iWebMSIによる蜃気楼シミュレーション

(1) 空気の屈折率

StoneとZimmermannの文献¹⁾から以下の式を猪苗代湖の湖面付近に対して用いた。

$$n(x,y) = 1 + 0.0759/[273.15 + t(x,y)]$$

(2) 気温分布関数(上位蜃気楼)

$$t(x,y) = \{t1 + t2 \cdot \exp[-(y + \alpha x^2 - H)/D]\} / \{1 + \exp[-(y + \alpha x^2 - H)/D]\}$$

ここに、t2:下層気温、t1:上層気温、
H:境界層の高さ、D:気温跳躍定数
 $\alpha = 1/2R$ 、R:地球半径

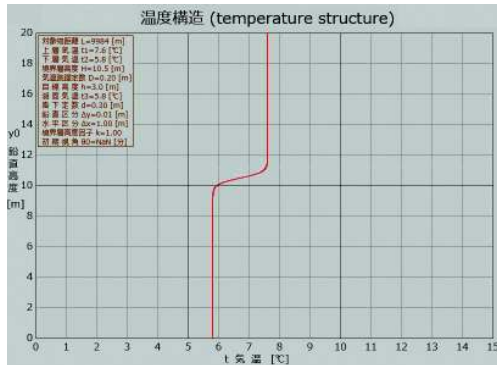


図-3 温度分布関数

(5) 蜃気楼シミュレーション(mirage simulation)



図-6 左:実景画像 右上:シミュレーション画像(松井) 右下:蜃気楼撮影画像(星)

(6) 結果と考察

表題の上に記載のURLにアクセスするとWeb上でパラメータを変えてシミュレーションすることができる。初期値は、上層気温t1=7.6℃、下層気温t2=5.8℃、境界層高度10.5mに設定され、境界層高度因子(傾斜因子)はk=1で、境界層に傾きはなしとしている。

図-3, 4, 5にはその時の各々のグラフを、図-6にはシミュレーション結果を示す。撮影された蜃気楼画像に合うようにパラメータを調整(チューニング)するのであるが、大体うまく設定できていると思われる。S字状曲線の形は蜃気楼曲線と似ている。蜃気楼曲線の形が蜃気楼の姿を決めると言える。図-4から、蜃気楼は7~8km先にある高さ10.5mの境界層付近で屈折した光で作られていると推定できる。

(3) ray tracing(光の経路計算)

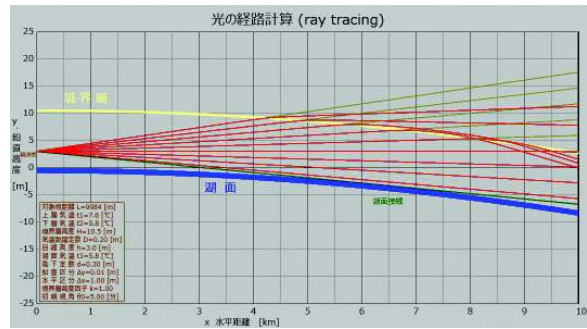


図-4 光の経路計算

(4) 蜃気楼曲線(mirage curve)

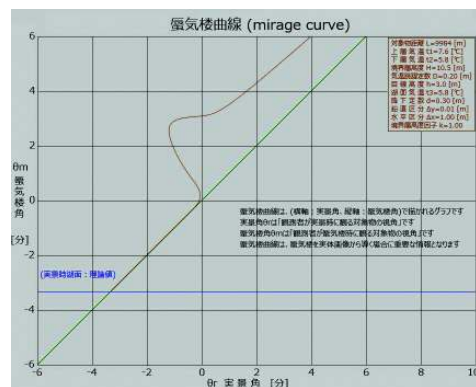


図-5 蜃気楼曲線



さて、蜃気楼をもたらす原因を考えると、(1)の空気の屈折率と、(2)の気温分布である。図-3の気温分布関数は、10.5m付近の高さ1m程度の領域で気温がt1-t2=1.8℃変化している。この気温の変化率は、1.8[℃]/1[m]=1800 [K/km]となり、通常の大気の気温減率6[K/km]と比べると300倍も大きくなっている。

この値は大きいように思えるが、境界層の存在を測定で裏付けるには、1mの領域で1.8℃の変化をとらえる高性能の温度センサーが必要となる。測定では厳しい課題に思える。

参考文献

1) Jack A. Stone and Jay H. Zimmerman
Index of Refraction of Air
<https://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Documentation.asp>