ドローン観測データを用いた 光線追跡法による蜃気楼出現時の光路の再現

澤田 維子 ((株)システム計画研究所), 濱田 篤 (富山大学 学術研究部)

1. はじめに

富山湾で春~夏に上位蜃気楼(以降,単に蜃気楼と 表記する)が見られる要因として,暖気移流による逆 転層の形成が有力な説である(木下・市瀬 2002)。蜃 気楼の像をシミュレートするために,密度成層した大 気中を進む多数の光を追跡する光線追跡法(レイ・ト レーシング)がしばしば用いられる(柴田 1999)。蜃 気楼出現時の気温観測は行われている(佐藤 2020)も のの,蜃気楼の細かな時間変化を捉えるには,時空間 的に密な観測データを用いて光路計算を行う必要があ る。

本研究では、ドローンを用いて鉛直方向に密かつ高 頻度な観測を行い、蜃気楼出現時の大気の温度構造を 詳細に捉えた。更にドローン観測データを用いて光路 計算を行い、蜃気楼出現時の光路を再現した。

2. ドローンを用いた観測

2024 年 4~5,9月に,富山県滑川市の早月川河口付 近の海岸(137.377E,36.796N)において,ドローン(DJI Phantom 4 Pro V2.0) に気象センサ(InterMet iMet-XQ2)を搭載して気象観測を実施した。気温,湿 度,気圧は気象センサの計測値を,高度はドローンの 飛行記録から抽出した値を使用した。

ドローン観測の例として、5月3日における温位と 混合比の鉛直分布の時間変化をそれぞれ図1(a)、(b)に 示す。同日の富山湾が高気圧で覆われていたことと整 合して、空気塊のゆっくりとした下降が明瞭に見られ る。この結果は、蜃気楼を発現させる逆転層の形成要 因として、暖気移流の他に、高気圧に伴う断熱圧縮の 重要性を示唆している。

加えて、逆転層における屈折率の鉛直勾配の大きさ は、魚津埋没林博物館が発表している蜃気楼ランクと は必ずしも相関しないことも分かった。

3. 光路計算

本研究では, Lehn (1985)による光路計算時の条件分 岐を改良し,水蒸気を考慮した屈折率を用いて計算を 行った。Lehn (1985)の手法は,大気層内の曲率半径を 一定と仮定し,光線軌跡を放物線近似することで光路 計算を行うものである。

9月13日12:46-12:48 における光線軌跡を図2(a)

に、5月5日(蜃気楼ランクB) 13:12-13:14 における 光路計算の結果を図 2(b)に示す。なお、9月13日は下 位蜃気楼が目視で確認されたが、下位蜃気楼出現時の 上冷下暖の温度境界層は海面からの高度数十 cm 以下 という非常に低高度に存在することがわかっており (川合ら 2020)、今回のドローンでは観測不可能であ ったため、同日は蜃気楼非出現時であると見なすこと ができる。図2(b)より、新湊大橋(水平距離約23km) の橋桁(高度約47m)と主塔上端(高度約127m)が、 それぞれ仰角約8-9',約16-17'の光路上にある。図2(a) より、仰角約 8-9'、約 16-17'はそれぞれ、蜃気楼非出 現時は高度約95-100mと約150mに見える。つまり、 橋桁と主塔上端がそれぞれ、高度約 95-100 m と約 150 m という通常より高い高度に虚像として現れることを 意味する。また、仰角 0-2'の光線軌跡が高度 10 m 以下 で交差している。これは、高度10m以下にある狭い範 囲の景色が, 高度約 40-55 m の範囲に引き伸ばされ, その中で像が反転を繰り返していることを意味する。

2024 年 4 月 25 日に撮影した蜃気楼非出現時の新湊 大橋の写真を図 3(a)に,図 2(b)と同時間帯に撮影した 写真を図 3(b)に示す。三角形 2 つと横棒で構成された 模式図は,図 2 の光線軌跡を元に作成した新湊大橋の おおよその像変化を表す(像の反転に関しては今回再 現していない)。図 3(b)を見ると,新湊大橋の主塔・橋 桁の高度が,写真と模式図でよく整合している。

参考文献

- 川合秀明, 北村祐二, 柴田清孝, 2020: 下位蜃気楼の光 路計算―マダガスカルで見た蜃気楼―. 天気, **49**, 57–66.
- 木下正博, 市瀬和義, 2002: 富山湾における上位蜃気楼 の発生理由一気温の鉛直分布が示す新たな事実一. 天気, **2**, 43–51.
- Lehn, W. H., 1985: A simple parabolic model for the optics of the atmospheric surface layer. *Appl. Math. Modelling*, **9**, 447–453.

佐藤真樹, 2020: ドローンによる蜃気楼観測時の海上 温度分布の立体的解明と情報発信.「北陸地域の活 性化」に関する研究助成事業論文集, **25**, 103–107.

柴田清孝, 1999: 光の気象学. 朝倉書店, 192 pp.



図 1:(a) 2024 年 5 月 3 日 11:40–14:10 における温位鉛直分布の時間変化。横軸は時刻 (JST),縦軸は高度 (m) で,各高度における温位を色で示している。(b) (a)と同日同時間帯における混合比鉛直分布の時間変化。横軸 は時刻 (JST),縦軸は各高度における混合比を色で示している。



図 2: (a) 2024 年 9 月 13 日 12:46–12:48 における光線軌跡。初期高度 $z_0 = 6$ m,初期仰角 $\phi_0 = -20–20'$ (1' ごと) で描画。大円距離約 23 km,高度約 47 m にある点は新湊大橋の橋桁,大円距離約 23 km,高度約 127 m にある点は新湊大橋の主塔,大円距離約 12 km,海抜 34.7 m にある点は生地鼻灯台の先端を表す。当日は蜃気 楼の出現なし。(b) (a)に同じ,ただし 2024 年 5 月 5 日 13:12–13:14 における光線軌跡。当日の蜃気楼ランクは B。



図3:(a) 2024年4月25日10:14 に撮影した新湊大橋の写真。当日は蜃気楼の出現なし。2本の点線のうち, 上の線は蜃気楼非出現時の新湊大橋の主塔先端の高度(約127 m),下の線は橋桁の高度(約47 m)を示す。 三角形と横線の模式図は、図2(a)の光線軌跡から作成した新湊大橋の模式図を示す。(b)(a)に同じ,ただし2024 年5月5日13:12 における写真。新湊大橋の模式図は図2(b)から作成。