

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

特別天然記念物 魚津埋没林博物館 学芸員 佐藤 真樹

1. はじめに

富山県魚津市は、「蜃気楼の見える街」をキャッチコピーとしている。蜃気楼は大気光学現象の一種で、空気の密度の異常により、普段の景色が大きく変化して見える現象である。蜃気楼には、普段の景色の上に虚像が現れる上位蜃気楼と、下に虚像が現れる下位蜃気楼があるが、本研究ではまれな現象である上位蜃気楼にのみ注目し報告する。

蜃気楼の光学的な背景は古くから研究されてきたが、空気の密度（主に温度）の異常な分布を作り出す気象的背景の理解が進んでいない。通常の大気では、上空ほど気温が下がる構造であるが、上位蜃気楼のときには上空ほど気温が上昇するような逆転層が形成されていると考えられている。

魚津埋没林博物館では蜃気楼の観測は1992年から行っている。また、魚津の蜃気楼に関する気象学としての研究は、1919年頃の伏木測候所による体系的な取り組みを皮切りに、1950年代の地上気象観測との検討、1980年代の光学モデル計算、2000年代からの船やバルーン、沿岸工作物による蜃気楼に関わる鉛直温度の計測など精力的に行われてきた。

魚津埋没林博物館で観測を始める以前（昭和期）から、教員や民間の愛好家によって蜃気楼は監査臆されており、それらから北寄りの風の時に蜃気楼が多いという経験則があった。さらに博物館の屋上での、気圧・気温・湿度・風向風速の観測データや気象庁アメダスなどのデータを用いて蜃

気楼に関わる気象的な特徴を検討し2018年に報告した。

2019年からはドローンを用いた海上、沿岸の温度観測を、魚津埋没林博物館と富山大学の共同で開始した。2019年のドローンでの温度観測を通して、海上での温度異常な領域を確認することができた（佐藤・青木(2019)）。一方、使用した小型ドローンのバッテリーの劣化等で、海上1km程度の温度観測しか行えなかった。

この小型ドローンでの温度観測により、一定程度の観測は進めることができたが、十分な調査や、その後の情報発信には至っていない。

本研究では、ドローンでの海上温度観測により蜃気楼の気象学的な分類や背景のさらなる理解を進めることを目的とした。併せて陸上での蜃気楼の背景にある気象現象を把握することに特化した気温観測環境を試験的にミラージュランドの観覧車支柱で構築し、観測をもとにしたリアルタイムの情報発信を進めることを課題とした。

2. 小型ドローンによる温度観測

2.1. 小型ドローンでの温度観測方法

小型ドローン (DJI Phantom3 Advanced) に温度ロガー (LR5011: HIOKI) と応答時間20秒の温度センサ (LR9631: HIOKI) を取り付け、温度センサには日よけを取り付け、また小型ドローンからの風や熱の影響を避けるため、吉崎ら (2019) にならないプロペラ先から24cm離れた場所に設置した。なお、小型ドローンの劣化が激しく

ホバリングが安定しなくなったため、DJI Phantom4 professional に機材を併用している。

小型ドローンによる温度観測は、河口では地上 5m から 50m は 5m 間隔で、50m から 140m までは 10m 間隔で観測を行った。河口から 500m 海上では 5m から 50m まで、1000m 海上では 5m から 30m までを 5m 間隔で観測した。それぞれの高度で 30 秒間ホバリングさせ、安定した温度とホバリング平均高度を観測値とした。観測場所は蜃気楼を定常観測している魚津埋没林博物館と、蜃気楼となる対象物（富山火力発電所）の間にある早月川河口および河口海上約 500m と約 1000m である（図 1）。



図 1 小型ドローン観測位置と埋没林博物館、蜃気楼となる対象物（▲：早月川河口，●：河口から 500m 海上，×：河口から 1000m 海上，M：埋没林博物館，：富山火力発電所，バー：1 km）。

2.2. 結果および考察

魚津での 2020 年の蜃気楼観測日数は 26 日であった。このうち、14 日間にドローンを用いた大気温度の鉛直分布観測を実施した。また、蜃気楼を観測していない 3 日間にも通常の大気状況を把握するため観測を実施した。その結果、2019 年の観測同様に、蜃気楼が見えているときに上空が地上付近

より暖かい、通常とは逆転した状況になっていることを確認した。一方、蜃気楼を観測していても明瞭な逆転が無いケースもあった。

2020 年 6 月 9 日の事例では、海上、沿岸ともに、20m 前後の高さで温度が急激に逆転することが見られた（図 2）。

この日は、過去の経験則から得られていた新慰勞の好発条件である日本の東に高気圧があることや魚津で弱い北寄りの風になっている日であった。さらに、木下ら（2002）による沿岸での気温観測によると黒部の内陸でできた暖気が海上に移流することで見える蜃気楼もあるとされている（暖気移流説）。本事例日のアメダスや博物館での観測によると北寄りの弱い風となっていることや富山平野の平地の各地の気温が 30 度以上に上昇していることから、暖気移流説による蜃気楼と考えられる事例で、海上で温度鉛直分布が実際に逆転していることを確認できた。

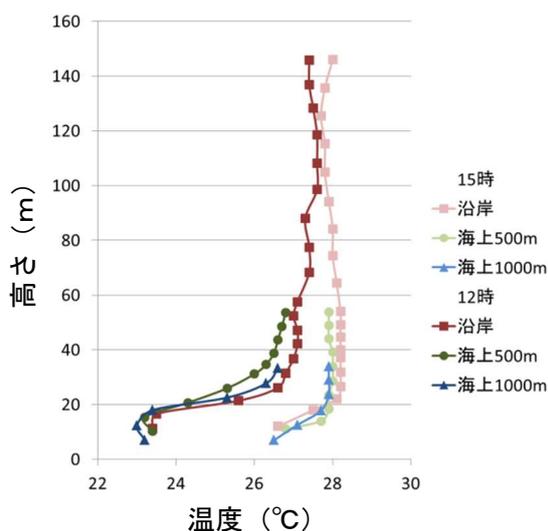


図 2 2020 年 6 月 9 日 12 時台、15 時前後に行ったドローンでの温度観測（早月川河口および海上）

3. 観覧車支柱での温度観測

3.1 観覧車支柱での温度観測方法

沿岸で、層気楼にかかわる大気の温度の鉛直分布を観測するため、早月川河口での小型ドローンでの温度観測地点付近にある、ミラージュランドの観覧車支柱に定点を設ける。

観覧車の支柱は鉄骨でできているため、ビルの壁面等に比べ温度観測するうえで、構造物の影響を受けにくいと考える。

小型ドローンでの観測によると層気楼に伴う逆転層は1度未満の温度差となることも想定された。そこで白金抵抗温度センサー PT100 (TR8110 : T&D) を自然通風シェルタ (CYG-41303 : クリマテック) に入れて用いた。ロガーは、リアルタイムでネットワークにデータを送ることができる RTR-505Pt (T&D) を用いた。センサーとロガーのペアを決め、温度観測を開始する前に、富山大学の低温研究室にて、検定を受けた温度計を用いてセンサーの較正值を得た。



写真1 設置時の写真（中央上の丸い筒がシェルター、左がロガー入りのボックス）

観覧車支柱での複数高度 (8m (ML08), 18m (ML18), 33m (ML33, 以下同様)) での温度観測を2020年3月25日から先行実施した。2020年8月27日から観覧車支柱で、既設の温度センサーと実機比較し、温度の微小な環境での変化の確認観測を約1週間行った。2020年9月2日から7つの温度計を異なる高度 (8m, 11m, 14m, 16m, 18m, 25m, 33m) に設置し細かな温度の鉛直構造の観測を開始した。

3.2 観覧車支柱での温度観測結果と考察

小型ドローンで逆転層を示した2020年6月9日事例における観覧車支柱での温度観測状況を図2に示した。この日は、一日を通してほぼ日照が見られ、朝からどの高さもなだらかに昇温していた。ML08, ML18はなだらかな温度上昇を昼過ぎにかけ続けたが、ML33でのみ11時30頃に急激な温度上昇 (11時15分 (22.2°C) から12時15分 (26.5°C)) を観測した。

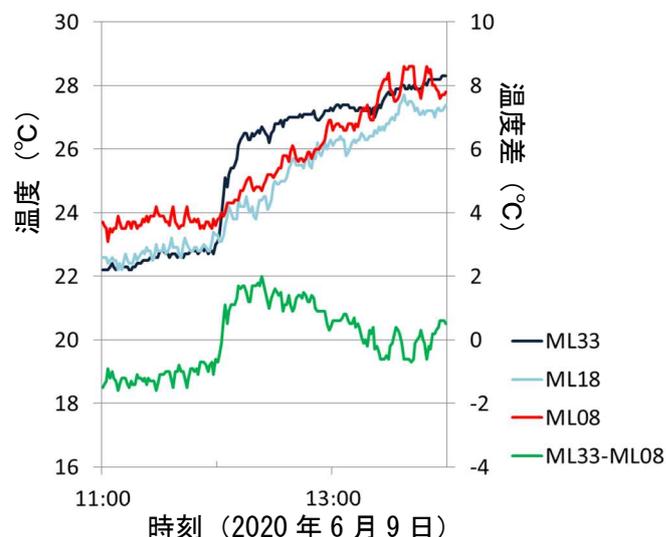


図2 観覧車支柱での温度観測 (2020年6月9日の事例。上空の昇温)

6月9日は、11時ころから蜃気楼を観測し、11時半頃からは蜃気楼による像の変化が明瞭になっていた。



写真2 富山火力発電所（上：蜃気楼（2020年6月9日）、下：ふだん）

2020年6月9日のような上空（ML33）の気温が地上付近に比べ上昇していく、パターンの中には、力学的フェーンによると考えられる2021年2月13日事例もあった。その他、上空の気温はそのままで、地上付近（ML08）の気温が下がっていくパターンを示す事例や、寒冷前線や温暖前線等による事例などを観測し、解析を進めている。

2021年2月13日のパターンでは、10時ころから蜃気楼が明瞭化した。この時刻頃の温度観測では、ML14とML16では温度上昇が明瞭ではないが、ML33をピークに上空

ほど気温が上がる構造を確認することができた。一方で、ML08は地上付近の熱の反射の影響を受けている可能性があり、ML11やML14と異なる温度変化を示すことが見られた（図3）。

4. 情報発信の方法

観覧車支柱での温度観測をもとに、温度逆転層を確認した場合は蜃気楼が見える可能性があることを示す情報の発信を検討した。

観覧車支柱での温度観測のデータを、サーバにアップロードし、FTPでデータを取得し、上空33m（ML33）と地上付近（ML08）に一定の温度差があるときに情報発信することを検討した。2020年は、テストとしてML33がML08より温度が1度以上高い場合（=しきい値1℃）、メールを送るシステムを作り、蜃気楼観察者等に蜃気楼メール情報として送付し傾向を観察した。

温度計を設置した翌日の2020年3月14日から2020年9月30日まで191日の観測データをもとに上述のしきい値での蜃気楼ライブ情報の検証を行った。

検証は気象庁が用いている天気予報精度の検証にならない行った（<https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/kensho/explanation.html>、表1）。

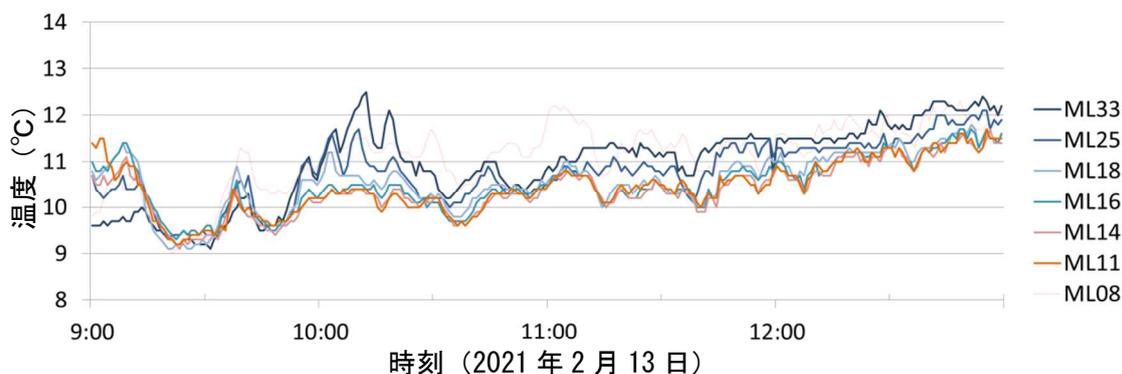


図3 観覧車支柱での温度観測（2021年2月13日事例、上空の昇温）

表1 予報検証の計算手法

		予報		
		降水あり	降水なし	計
実況	降水あり	A	B	N1 = (A+B)
	降水なし	C	D	N2 = (C+D)
	計	M1 = (A+C)	M2 = (B+D)	N = (A+B+C+D)

(N: 全予報数)

- 適中率(降水の有無の適中率) (%) = $(A + D) \div N \times 100$
- 「降水あり」予報の適中率 (%) = $A \div M1 \times 100$ (一致率と同じ)
- 「降水なし」予報の適中率 (%) = $D \div M2 \times 100$
- 見逃し率 (%) = $B \div N \times 100$
- 空振り率 (%) = $C \div N \times 100$
- 捕捉率 (%) = $A \div N1 \times 100$
- 一致率 (%) = $A \div M1 \times 100$ (「降水あり」予報の適中率と同じ)

3月から9月で検証すると(表2), 的中率は48%, 見逃し率1%, 空振り率51%と, 見逃しは少ないが, 過剰に蜃気楼が見えるのではというライブ情報を出すことになってしまった. これは, 放射冷却等で朝方の地表付近の気温低下が起きるが蜃気楼は見えない事例を多く拾いすぎていると考えられる. 一方, 蜃気楼は観光資源的意味もあるとすると多少過剰なくらい「見えるかも」といった情報に偏ってもよいかもしれない.

表2 蜃気楼ライブ情報の検証 (2020年3月から9月, しきい値 M33-M08 (1.0°C))

		情報		
		気温差あり	気温差なし	計
実況	蜃気楼あり	23	2	25
	蜃気楼なし	98	68	166
	計	121	70	191

そこで, 蜃気楼が主にみられる時期である3月から6月に絞って, さらにしきい値を1.5°Cにとしたものが表3である.

的中率は71%, 見逃し率2%, 空振り率28%と, 期間を限定するとライブ情報の改善が検討できそうである.

表3 蜃気楼ライブ情報の検証 (2020年3月から6月, しきい値 M33-M08 (1.5°C))

		情報		
		気温差あり	気温差なし	計
実況	蜃気楼あり	18	2	20
	蜃気楼なし	30	59	89
	計	48	61	109

これらを踏まえ, 魚津埋没林博物館に隣接する観光施設, 海の駅「蜃気楼」にて蜃気楼のライブ映像に加え, 観覧車支柱での温度観測による蜃気楼ライブ情報を2021年3月から表示を始めた(写真3).



写真3 海の駅「蜃気楼」での蜃気楼ライブ情報の発信

6. まとめと今後の展望

小型ドローンおよび観覧車支柱での温度観測により, 先行研究から指摘されていた暖気移流による蜃気楼のほか, 下層の冷却や, 前線に伴う蜃気楼も分かってきた. ケース分けし, それぞれの事象での鉛直温度構造変化をさらに詳細に解析することで気象学的な背景の理解を進めるとともに, 蜃気楼ライブ情報の精度向上を目指していきたい.

参考文献

- 木下ら, 2002, 天気, 49, 57-66
- 佐藤・青木, 2019, 蜃気楼協議会講演要旨, 16, 21-22
- 吉崎ら, 2019, 地球環境研究, 21, 125-132