

LPWA を利用したオホーツク地域の蜃気楼発生予測・公開システムの開発

Development of forecasting and web publishing systems for superior mirage occurrence in the Okhotsk region using the LPWA network sensors

舘山 一孝¹, 佐藤 和敏¹, 佐藤 トモ子², 小林 一人³, 鈴木 一志⁴
Kazutaka Tateyama¹, Kazutoshi Sato¹, Tomoko Satoh², Kazuhito Kobayashi³, Kazushi Suzuki⁴
Corresponding author: tateyaka@mail.kitami-it.ac.jp (K. Tateyama)

Superior mirage occurs when strong temperature inversion layer generates. Forecasting and web publishing system for superior mirage occurrence in the Okhotsk region was attempted to develop by measuring vertical profile of air temperature in the surface boundary layer using LPWA (Low Power Wide Area) network thermometers on the tower in the period from February 15 to May 30 2019.

1. はじめに

蜃気楼とは、光が温度（密度）の変化する層を通過することで曲がり、景色が通常と異なって見える光学現象であり、条件が揃えばどこでも出現する¹⁾。蜃気楼には実像の下方に虚像が出現する下位蜃気楼と、温度の急変などによって上暖下冷の気温分布が形成され（図1）虚像が上側に現れる上位蜃気楼の2種類があり、後者の方が珍しい現象である。蜃気楼は富山湾で冬と春に発生することが知られているが、近年は網走・斜里・知床半島沿岸のオホーツク地域においても高頻度で発生していることが報告された²⁾。佐藤³⁾によってオホーツク地域の上位蜃気楼の特徴として、冬から春にかけて約60日も発生すること、11月から3月にかけて冬季に発生する上位蜃気楼と3月から11月にかけて春季-秋季に発生する上位蜃気楼があること（本稿ではそれぞれ冬季型、春季-秋季型と呼称する）、冬季型はさらに3つ（海面への冷氣移流型、流水面での放射冷却型、流氷面への暖気移流型）に分類された。春季-秋季型の多くは海面への暖気移流によって発生すると考えられている。石原ら⁴⁾は消防やぐらに設置した気象計と海岸に設置したインターバルカメラによる連続観測を行い、ドローンを用いた鉛直気温分布の計測を行うことにより、冬季型の発生時に放射冷却による冷氣層が存在することを明らかにした。

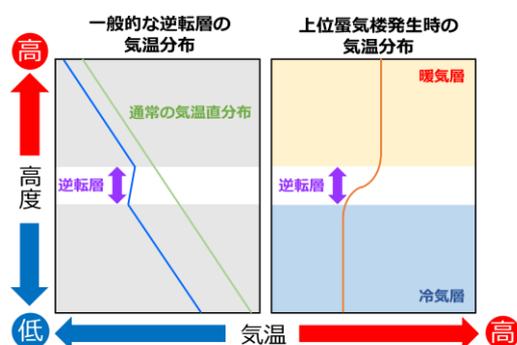


図1 一般的な逆転層と上位蜃気楼発生時の気温分布の違い。日本蜃気楼協議会¹⁾を参考に作成。

本研究はこれらの知見をもとに、地表付近の冷氣層の形成と発達をリアルタイムで監視することにより上位蜃気楼の発生を予測するシステムの開発を行った。近年注目され始めているLPWA（省電力広域無線通信技術：Low Power Wide Area）式気温センサを斜里町内の鉄塔に取り付け、気温の鉛直分布を監視した。本研究は将来的に複数の鉄塔へLPWA式気象センサを設置し、三次元の高密度気象観測技術を開発することを目指している。この技術により既存の気象庁の地域気象観測システム（AMeDAS）で空間的に捉えきれないゲリラ豪雨や地吹雪などの局所的な気象災害の兆候を検知し、ユーザーへ警告するシステム等への発展が期待できる。

¹北見工業大学 地球環境工学科
School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology
²知床・蜃気楼幻氷研究会
Shiretoko Mirage Research
³株式会社構研エンジニアリング
Koken Engineering Co., Ltd
⁴シスコン株式会社
Systcon Inc.

2. 観測方法

株式会社構研エンジニアリングとシスコン株式会社によって、寒冷地においても2年以上運用を目指したLPWA式温度センサの開発が行われた。LPWAは数本の電池で1年以上の計測が可能な低電力無線通信であり、1台の親機（携帯電話通信機）で約百台の子機（無線通信付各種センサ）から送信されたデータを収集し、サーバへアップロードすることが可能である。本研究はLoRa（920MHz帯）方式のLPWAを搭載した気温センサと親機を導入し（図2）、2019年2月に北海道斜里町の中心部付近（図3）にある鉄塔の42m、28m、7mの高さ3カ所に設置し、10分に1回の頻度で気温の鉛直分布を測定している。これらの気温データは1時間に1回の頻度で親機に送信され、親機から携帯電話回線を通じてサーバへ送信される。サーバ上で温度差を計算し、閾値以上の温度差が現れた際に蜃気楼発生予測のメールを関係者へ自動配信する。



図2 LPWA式温度センサおよび親機の写真

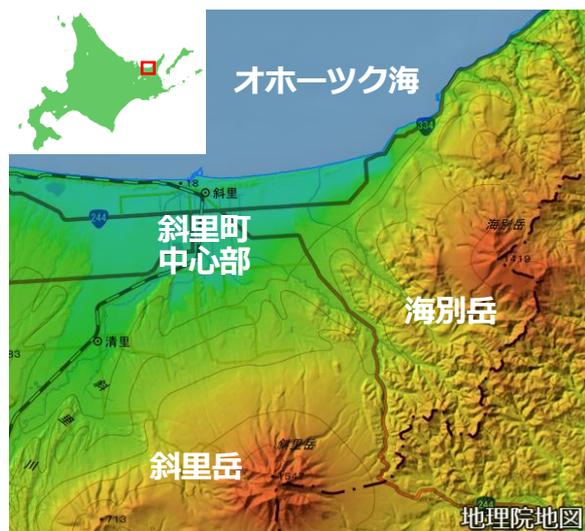


図3 北海道斜里町の地図。国土地理院地図を使用。現地での蜃気楼目視観測は知床蜃気楼・幻氷研究会によって実施された。なお、目視観測は毎日ではなく不定期で実施されている。

3. 結果

2019年2月15日から5月30日の期間で観測を実施した。LPWA式気温センサは冬期間（最低気温 -14°C ）においても使用可能であることが確認された。また、子機と親機の最大通信可能距離は見通しで約7kmであった。この範囲内であれば約百台の子機を1台の親機でデータを収集することができる。

図4に鉄塔に設置したLPWA式気温センサの測定結果と蜃気楼の発生状況を示す。灰色で示している2019年3月26日から4月3日の期間は、データの欠測期間であった。t1, t2, t3はそれぞれ高さ44m, 28m, 7mに設置したセンサの気温を示し、t1-t3は高さ44mと7mの気温差、t1-t2は高さ28mと7mの気温差を示している。橙色の縦棒は、目視観測によって小規模から大規模の上位蜃気楼が観測された時間帯を表している。

目視観測では、25回の上位蜃気楼の発生が報告された。日最低気温が 0°C よりも低い2019年2月15日から4月11日までの期間（3月19日を除く）に発生した上位蜃気楼を冬季型、3月19日および4月12日以降の日最低気温が 0°C よりも高い気温の期間で発生した上位蜃気楼を春季-秋季型と推定すると、冬季型は6回、春季-秋季型は19回発生した。また、流水の結氷状況については、網走の地方気象台の発表で2月27日に海明け、4月14日に流水終日となっている。水平線の向こう側にある流水が見える上位蜃気楼の「幻氷」は3月1日以降に4回観測された。

4. 考察

表1に上位蜃気楼が目視観測された日で最もt1とt3の気温差（t1-t3気温差）が大きい時間の気温、気温差、発生した蜃気楼の規模を示す。蜃気楼が観測された日は、3月19日、4月22日、5月16日の3日間を除き 2.3°C から 8.1°C のt1-t3気温差がみられ、気温差の平均は 4.3°C であった。気温差が大きい現象は冬季型と春季-秋季型の両方でみられた。冬季型は陸地で放射冷却によって形成された冷気層が海面/流水面へ移流し上暖下冷の気温分布を形成するのに対し、春季-秋季型においても暖気移流によって上暖下冷を形成しており、両者とも同じ気温分布構造を示すため、t1-t3気温差での予測が可能であると考えられる。

気温差が小さいにも関わらず上位蜃気楼が発生する場合は、遠隔地から暖気が流水上や海上に移流

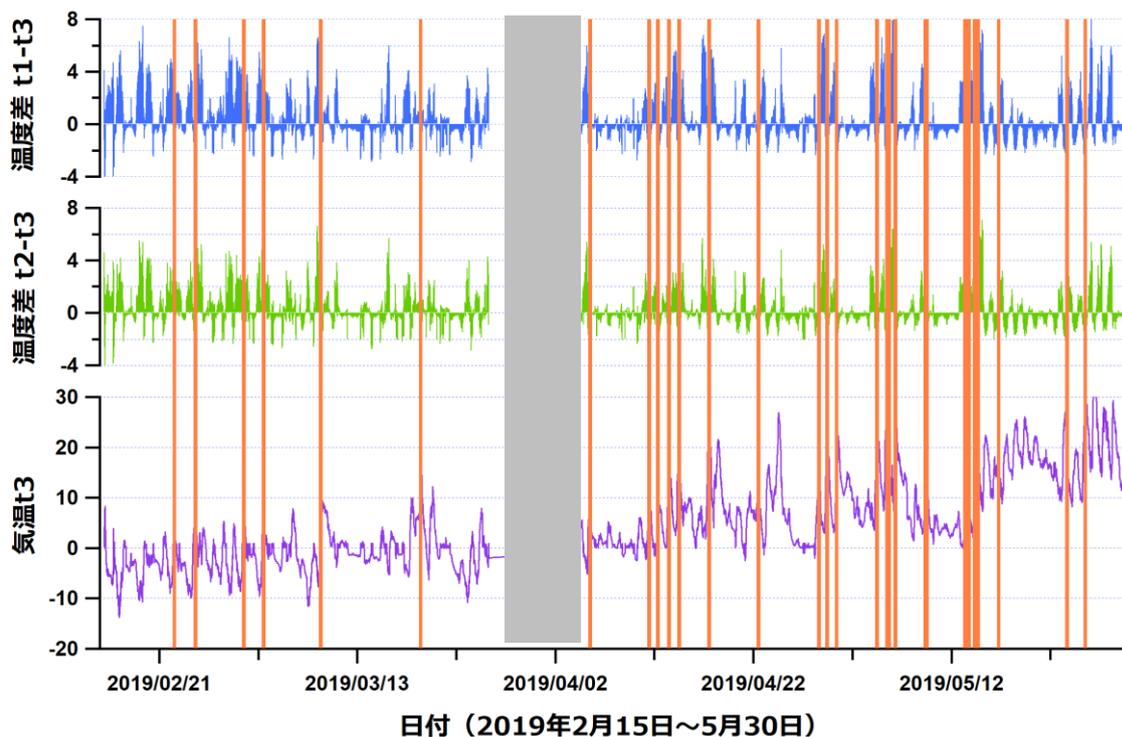


図4 鉄塔に設置したLPWA式気温センサの測定結果と蜃気楼の発生状況との比較。
t1, t2, t3はそれぞれ高さ44m, 28m, 7mに設置したセンサの気温を示している。橙色の縦棒は目視観測によって上位蜃気楼が観測された時間帯を表している。

表1 蜃気楼が目視観測された際の日時, 気温, 気温差, 蜃気楼の規模 (1: 小, 2: 中, 3: 大, 4: 幻氷)

No.	Date	t1	t2	t3	t1-t3	t2-t3	Mirage scale
1	2019/2/22 4:20	-2.4	-4.6	-7.3	4.9	2.7	2
2	2019/2/24 4:20	-5.8	-6.0	-9.9	4.1	3.9	3
3	2019/3/1 4:10	-2.4	-5.2	-6.8	4.4	1.6	4
4	2019/3/9 0:40	-1.0	-2.9	-7.6	6.6	4.7	2
5	2019/3/19 3:10	6.6	6.4	5.6	1.0	0.8	2
6	2019/4/5 5:00	1.0	0.3	-5.0	6.0	5.3	4
7	2019/4/11 3:00	0.7	-1.1	-2.0	2.7	0.9	3
8	2019/4/12 3:50	1.7	0.9	-1.5	3.2	2.4	1
9	2019/4/13 5:20	3.7	0.9	0.1	3.6	0.8	4
10	2019/4/14 4:10	9.4	6.8	3.8	5.6	3.0	4
11	2019/4/17 4:50	7.8	4.9	2.3	5.5	2.6	3
12	2019/4/22 2:50	6.7	6.3	5.9	0.8	0.4	2
13	2019/4/28 4:40	0.7	-1.3	-1.6	2.3	0.3	2
14	2019/4/29 4:00	10.0	7.9	3.1	6.9	4.8	1
15	2019/4/30 4:00	8.8	5.9	4.1	4.7	1.8	3
16	2019/5/4 4:20	8.8	5.8	4.1	4.7	1.7	2
17	2019/5/5 6:00	17.0	12.4	11.6	5.4	0.8	2
18	2019/5/6 3:20	16.8	15.1	8.7	8.1	6.4	3
19	2019/5/9 3:00	7.9	4.7	3.6	4.3	1.1	2
20	2019/5/13 4:40	4.2	2.2	0.9	3.3	1.3	3
21	2019/5/14 1:50	8.4	5.3	4.3	4.1	1.0	3
22	2019/5/16 0:00	11.6	11.3	9.9	1.7	1.4	2
23	2019/5/23 3:20	15.6	12.1	10.4	5.2	1.7	2
24	2019/5/25 1:10	14.0	11.3	10.0	4.0	1.3	2
25	2019/5/30 3:00	11.8	8.9	8.2	3.6	0.7	2

して二層構造を形成するパターンであると推察され、陸上の観測では捉えることが難しいと考えられる。今回の観測期間では上位蜃気楼発生の閾値を t1-t3 気温差が 3.2°C 以上と設定することにより、80% の上位蜃気楼が予測可能であることが示唆された。気温差は t2-t3 よりも t1-t3 の方が常に大きく、気温センサは可能な限り高い位置に設置し地表付近の気温との気温差をとる方が冷気層の形成を捉えるのに有利であるという結果が得られた。

最大の t1-t3 気温差が現れた時刻に着目すると、冬型の上位蜃気楼が発生した期間は午前4時から5時にかけての早朝であり、春季-秋季型の上位蜃気楼の場合は午前0時から6時と幅広く発生し、午前3時の深夜に多く表れていることがわかった。これは日照時間が季節ともに早まっていることが原因であると考えられる。

今回の観測では、蜃気楼発生の有無に関して目視観測データを使用した。しかし、目視観測は不定期に行われおり、観測時以外にも蜃気楼が発生している可能性がある。そのため、インターバルカメラなどによる連続観測を実施し、予測精度をさらに検証する必要がある。

5. まとめ

斜里町内の鉄塔に LPWA 式気温センサを設置し、2019年2月15日から5月30日にかけて気温の鉛直分布のリアルタイム観測を行った。現地での蜃気楼目視観測と比較した結果、最上部と最下部の気温差から 3.2°C を閾値として上位蜃気楼の発生を予測できる可能性が示された。

今後は蜃気楼発生予測の精度を客観的に評価するために、不定期に行われていた目視観測だけでなく、インターバルカメラによる連続観測も実施することが課題である。

【謝辞】

本研究は平成31年度北見工業大学学長裁量経費(研究代表:佐藤和敏)による助成を受けて実施した。

【参考・引用文献】

- 1) 日本蜃気楼協議会, 2016: 蜃気楼のすべて!, 草思社, 108pp.
- 2) 大鐘卓哉, 加藤宝積, 佐藤トモ子, 2013: 流水の蜃気楼の観察と「幻氷・おぼけ氷」に関する考察, 北海道の雪氷, **32**, 26-29.
- 3) 佐藤トモ子, 2015: 斜里町における上位蜃気楼の記録, 知床博物館研究報告, **37**, 43-52.
- 4) 石原宙, 館山一孝, 佐藤トモ子, 小林一人, 2018: 冬季の斜里における上位蜃気楼の発生状況の調査-ドローンを用いた鉛直気温分布の観測手法の確立-, 雪氷, **80**(3), 213-226.