

## 第9回気象文化大賞

LPWA を利用したオホーツク地域の上位層気楼発生  
予報システムの開発と観光資源化へ向けた一般公開  
成果報告書

2020年8月

国立大学法人 北見工業大学

## 目 次

1. 研究背景と研究課題の目的.....	1
1. 1 オホーツク地域の上位層気候 .....	1
1. 2 オホーツク地域の上位層気候の発生機構.....	2
1. 3 研究目的 .....	4
2. 研究実施体制と実施スケジュール .....	5
3. データと解析方法.....	7
3. 1 層気候目視観測 .....	7
3. 2 LPWA 式気温計 .....	7
3. 3 定点カメラ観測 .....	9
3. 4 北見工業大学の気象・層気候ネットワーク .....	9
4. 観測結果 .....	11
4. 1 鉄塔気温の変化.....	11
4. 2 目視観測の結果.....	12
4. 3 鉄塔気温と層気候の関係.....	15
4. 3. 1 気温の高低差.....	16
4. 3. 2 上位層気候発生期待度の予測 .....	17
4. 3. 3 上位層気候発生時間の予測について .....	18
5. 層気候予測 .....	19
5. 1 上暖下冷の空気層の再現.....	19
5. 2 層気候予測結果の公開 .....	19
6. まとめと今後の課題.....	21
7. 謝辞 .....	22
8. 参考文献 .....	22

# 1. 研究背景と研究課題の目的

## 1. 1 オホーツク地域の上位蜃気楼

蜃気楼は、光が異なる温度の空気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気象光学現象である（本蜃気楼協議会，2016）．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虚像が上方に現れる『上位蜃気楼』の 2 種類がある．下位蜃気楼は逃げ水のようにどこでも見られる身近な現象であるのに対し、上位蜃気楼は限られた地域で条件を満たしたときのみ現れる珍しい現象であり、本研究はこの上位蜃気楼を予報対象としている．上位蜃気楼は、温度の急変などによって上暖下冷の急勾配の気温分布が形成されるとき、この温度変化層の中で遠景が反転あるいは伸長虚像として上方に現れることがある．

上位蜃気楼は限られた地域で条件を満たしたときのみ現れる現象であるが、図 1.1 (左)に示すように日本各地で観測されており、富山湾が最も有名である．北海道では、図 1.1 (右)に示すように少なくとも 16 か所以上で上位蜃気楼の観測報告があり、沿岸部だけでなく内陸の湖でも観測されている（大鐘ら，2013）．沿岸部だけでなく、内陸の湖でも上位蜃気楼が観測されている．このことから、上位蜃気楼は北海道全体で観光資源としてのポテンシャルを秘めている．

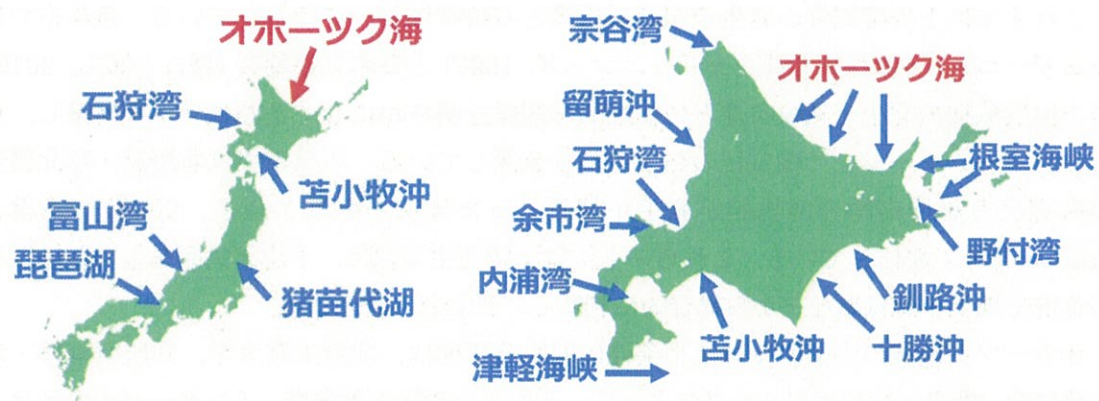


図 1.1 日本全体で上位蜃気楼が毎年観測される地域（左）と北海道内で上位蜃気楼の観測報告がある地域（右）（大鐘（2010）の図を参考）．赤字で示しているオホーツク海が本研究課題の研究対象地域．

申請者らは日本蜃気楼協議会に属し、日本各地の蜃気楼研究者と意見を交換しながらオホーツク地域の上位蜃気楼について調査・研究を行ってきた．特に本課題の実施メンバーである知床蜃気楼・幻氷研究会代表の佐藤トモ子氏は、知床博物館勤務時から蜃気楼の研究に取り組み、オホーツク地域では日本で唯一流氷の蜃気楼である幻氷が見られるだけで

なく、蜃気楼の発生頻度が年間 60 日にも達しており、国内のみならず世界でも屈指の蜃気楼発生地域であることが明らかにした（佐藤，2015）。これらの活動の結果、オホーツク地域の上位蜃気楼の存在が注目され、30 年ぶりに改訂版が公開された世界気象機関の国際雲図帳（2017）に流氷の蜃気楼であるオホーツク地域で撮影された幻氷や夜景の蜃気楼の写真が蜃気楼の代表写真として採択され（図 1.2）、世界的にもこの地域特有の特徴的な上位蜃気楼として評価され始めている。



図 1.2 国際雲図帳に掲載されたオホーツク地域の蜃気楼の写真（世界気象機関，2017）。  
（左）世界的にも珍しい幻氷，（右）夜景の蜃気楼。佐藤トモ子氏撮影。

## 1. 2 オホーツク地域の上位蜃気楼の発生機構

これまでに上位蜃気楼の発生予測は富山湾と石狩湾において行われている。魚津市ではウェザーニューズ（株式会社ウェザーニューズ，1997）と日本気象協会（堀口と瀬山，2012）が上位蜃気楼の発生と気象条件との統計的な関係を明らかにして予測モデルを構築し、魚津市のホームページ上で蜃気楼の発生予測を公開している。小樽市では北海道・東北蜃気楼研究会と小樽市総合博物館が発生予測を行った事例があり（金子，2008），予報を Facebook 等で発信している。これらの上位蜃気楼発生予報は、予想天気図を用いた総観場の状況や地上予想気温などから総合的に判断して行われている。

オホーツク地域の上位蜃気楼発生条件に関する研究は、北見工業大学、知床蜃気楼・幻氷研究会、構研エンジニアリングによって、ドローンや無人気象計、インターバルカメラ、再解析データ等を用いて発生メカニズムの調査が行われてきた。北見工業大学の石原ら（2018）は斜里町内の消防やぐらの 10m 高と 5m 高に設置した気温計と、ドローンに吊り下げた気温計を用い、定点カメラによる蜃気楼の連続観測を行うことで冬季の斜里周辺で発生する上位蜃気楼の気象条件を報告した（石原ら，2018）。申請代表者である北見工業大学の館山ら（2019）は石原らの消防やぐらとドローンによる観測を発展させ、オホーツク地域の上位蜃気楼の発生予測を目的としたリアルタイムで気温の鉛直分布をモニタリングする手法を開発した。斜里町内の鉄塔の 42m 高，28m 高，7m 高に省電力広域無線通信（Low Power Wide Area: LPWA）式気温センサを設置することにより、気温の鉛直分布のリアルタイム観測を行い、最上部と最下部の気温差から上位蜃気楼の発生を予測できる可

能性を示した。

石原ら（2018）は冬季の斜里周辺で発生する上位層気楼の気象条件として、図 1.3 の左図に示すように晴天時に放射冷却によって陸上で発生した冷氣塊が斜面降下風や海陸風によって海上に移流して上暖下冷の空気層（冷氣-超冷氣）を形成する「冬型」の上位層気楼が発生し、このとき 5m/s 以下の弱い南寄りの風が吹いていることを示した。このほかに、図 1.3 の右図に示すように暖気塊が移流して上暖下冷の空気層（暖気-冷氣）を形成する「春型」の上位層気楼のパターンがある。春型の場合でも、晴天時は地表面付近で放射冷却が起きている。本研究課題はこのように晴天時の放射冷却による地表面付近の冷氣層の形成・発達を鉄塔気温計によって捉えることで、上位層気楼の発生予測を行うことが可能か検討した。



図 1.3 オホーツク地域における上位層気楼の発生機構の概念図。（左）冬型，（右）春型。

本研究で予測対象とする上位層気楼の発生エリアは、図 1.4 に示す北海道東部オホーツク沿岸のうち網走市から知床半島までの網走湾を対象とする。図 1.3 右は気温の鉛直分布を測定した小清水町浜小清水と斜里町以久科の鉄塔の位置と、目視観測の位置および方向を白色の三角で示している。



図 1.4 本研究課題の調査領域である網走湾の位置と気温計を設置した鉄塔（黒色）と目視観測（白色）の位置。丸数字は目視観測の方向を表す（3.1 節参照）。

### 1. 3 研究目的

申請者らは、前節で述べたようにオホーツク地域における上位曇気楼の発生機構を調査し、上位曇気楼が発生する気象条件を明らかにした。これらの知見をもとに曇気楼の発生予測を行うため、文部科学省のデータ統合・解析システム DIAS を情報基盤として利用し、鉄塔に設置した気温計による気温データと気象庁の数値予報データ等を DIAS 上で融合解析することで、上位曇気楼の発生予測を行い予測結果を公開するシステムの構築を目指している。その第一歩として、図 1.4 に示す斜里町以久科の鉄塔に LPWA 式気温センサを設置することで、冬季の北海道においても安定した通信環境でリアルタイムに気温の鉛直分布データする手法を開発した（館山ら，2019）。

次の段階として、鉄塔の上部と下部に設置した LPWA 式気温センサの気温差を夕方 18 時から深夜 1 時まで積分した値から、翌朝 6 時から 13 時頃までの曇気楼発生期待度を定性的に表し、発生時間を予測する手法を考案した（館山ら，2020）。

本研究課題はこの手法をもとに、より海に近い小清水町浜小清水の海岸付近の鉄塔に設置した LPWA 式気温センサの気温データと現地目視観測結果の比較を行い、上位曇気楼の発生と気象条件、特に地表面付近の気温の鉛直分布と風の条件について検討を行い、上位曇気楼の発生を高精度で予測する方法の検討と、予測結果の一般公開を行った。図 1.5 に本研究課題の鉄塔気温観測・曇気楼発生予測・公開システムの概念図を示す。



図 1.5 本研究課題で開発した鉄塔気温観測・曇気楼発生予測・公開システムの概念図

## 2. 研究実施体制と実施スケジュール

本章では本研究課題の実施体制と実施スケジュールを説明する。研究実施体制を表 2.1 に示す。

株式会社構研エンジニアリングの小林らが中心となって LPWA 式気温センサが 2018 年度に開発され、2019 年度に試験的に現地観測に用いられた。本研究ではこのとき開発された改良型 LPWA 式気温センサ（子機）を北海道小清水町浜小清水の鉄塔の異なる高さに設置して、気温の鉛直分布を測定した。複数の子機から送信された鉄塔気温データを LPWA の親機で集約し、LTE 回線を通じてサーバーに送信するハイブリッド通信ユニットを開発した。

研究代表者の舘山はと学部 4 年の道木は、鉄塔気温データの整理と解析を担当した。舘山はさらに定点カメラ画像の解析を担当し、道木は気象庁のアメダスデータの収集・解析、佐藤（ト）は現地での蜃気楼目視観測データの収集・解析を担当した。舘山と佐藤（和）、佐藤（ト）らは得られた鉄塔気温と風向風速データから、上位蜃気楼の発生機構の研究と発生予測の検討を行った。佐藤（ト）と渡辺は上位蜃気楼の発生予測の発信方法を検討した。

本研究課題の協力者として、文部科学省のデータ統合・解析システム DIAS を運営する東京大学地球観測データ統融合連携研究機構・喜連川研究室が蜃気楼予報を一般に公開する「知床ポータル」の製作を担当した。鉄塔データを DIAS に送信するために使用した携帯電話回線は、国立情報学研究所学術ネットワーク研究開発センターが提供するモバイル SINET を利用した。

表 2.1 研究実施体制

氏名	所属	役割
舘山 一孝	北見工業大学 工学部 准教授	研究代表者、鉄塔気温データ・カメラ画像解析、上位蜃気楼発生予測
小林 一人	株式会社構研エンジニアリング・防災施設部・次長	LPWA 式気温センサ開発、LTE/LPWA ハイブリッド通信ユニット開発
佐藤 トモ子	知床蜃気楼・幻氷研究会・代表	上位蜃気楼の観測、蜃気楼発生機構の研究・上位蜃気楼予報発信方法の検討
佐藤 和敏	北見工業大学 工学部 助教	気象データ解析・上位蜃気楼発生予測
渡辺 由梨加	北見工業大学 大学院 1 年生	上位蜃気楼予報発信方法の検討
道木 泰成	北見工業大学 工学部 4 年生	鉄塔気温データ解析

表 2.2 実施スケジュール (2019年8月~2020年8月)

実施項目	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
①鉄塔気温観測装置開発													
a. 鉄塔用LPWA気温センサの改良	←	→											
b. LTE/LPWA通信ユニット開発	←	→											
c. モバイルSINET通信ユニット開発		←	→				△						
②観測データ解析													
a. 鉄塔気温データの収集・解析								←	→				
b. 目視曇気楼データの収集・解析						←	→						
c. アメダス風向風速データの収集・解析								←	→				
③曇気楼予報手法開発													
a. 曇気楼発生時の鉄塔気温差の関係	←	→							←	→			
b. 曇気楼規模予測モデル開発				←	→					←	→		
c. 曇気楼発生時間予測モデルの開発											←	→	
④曇気楼予報公開													
a. 知床ポータルの開発・運用					←	→							
b. 鉄塔気温データ入力							←	→					
c. 気象庁予報データ参照								←	→				
⑤報告書作成												←	→



### 3. データと解析方法

#### 3. 1 蜃気楼目視観測

現地での蜃気楼目視観測は、図 1.4 の調査領域において知床蜃気楼・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。観測項目は、観測日時・場所、蜃気楼の種類・規模・方向、写真などである。蜃気楼の規模については観測者の主観により、大・中・小の3段階で判断している。観測エリアは網走市から小清水町、斜里町、ウトロにかけた沿岸部で行われている。図 1.4 の右図は気温をモニタリングしている小清水町浜小清水と斜里町以久科の鉄塔の位置を示している。本研究ではこれらの鉄塔気温と蜃気楼の目視観測結果と比較するため、図 1.4 右図の白色の三角で示す以下の2地点4方向の海上に見られる上位蜃気楼の発生予測について検討した。

- ① 小清水町から斜里町～知布泊方向
- ② 小清水町から網走市北浜～能取岬方向
- ③ 斜里町から網走市北浜～能取岬方向
- ④ 斜里町から知床半島の付け根である峰浜～知布泊方向

#### 3. 2 LPWA 式気温計

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開発された LoRa (920MHz 帯) 方式の LPWA 式気温センサ (LPWA 子機) を 2019 年 2 月 15 日から斜里町内の鉄塔の 42m 高、28m 高、7m 高の3か所に設置し、試験的に観測を開始した (館山ら, 2019)。10 分に1回の頻度で観測される鉄塔気温データを、LPWA 子機から携帯電話のルータと接続している通信ユニット (LPWA 親機) に送信し、LPWA 親機からサーバーへ携帯電話回線を通じて1時間に1回の頻度で10分ごとの鉄塔気温データを送信している。2019年2月から5月に実施した試験観測の結果、LPWA 式気温センサと通信ユニットは-18～36℃の温度域で問題無く稼働し、LPWA による通信は障害物の無い見通しの直線距離で最大約 20km の通信が可能であることが確認された (館山ら, 2020)。

本研究課題では 2019 年シーズンの試験観測結果を受けて、より正確に鉄塔気温観測を行うこと、観測データを学術情報ネットワーク基盤であるモバイル SINET に接続し、データ統合・解析システム DIAS へ送信して気象庁のデータとともに総合的な蜃気楼発生予測を行うことを目的として、改良型 LPWA 式気温センサ (図 3.1) の開発とモバイル SINET に対応した汎用型通信ユニットの開発を行い (図 3.2 右)、改良型 LPWA 式気温センサを小清水町浜小清水の海岸付近の鉄塔に、その鉄塔から約 600m 離れた海岸段丘上に位置するフレイト展望台の敷地内に汎用型通信ユニットを設置して、2020 年 2 月 20 日から観測を開始した。



図 3.1 本研究で使用了 LPWA 式気温センサ（小清水町浜小清水の鉄塔）



図 3.2 小清水町浜小清水のフレイト展望台敷地内に設置した汎用型通信ユニット（左、赤枠）。LPWA 親機とモバイル SINET に対応した汎用 LTE ルータの写真（右）。蟹気楼を測定するカメラと併設している。

### 3. 3 定点カメラ観測

図 3.2 で示した汎用型通信ユニットを設置した地点と同じ地点に、構研エンジニアリング株式会社が所有するネットワーク型のカメラ（図 3.3, Canon VB-H43）を設置して、1 分間に 1 回の頻度で網走市方面と斜里町方面の両方の海岸を撮影し、蜃気楼の発生の有無を記録した。



図 3.3 小清水町浜小清水の海岸に設置した蜃気楼観測用のネットワーク型のカメラ

### 3. 4 北見工業大学の気象・蜃気楼ネットワーク

2019 年から構築を開始した北見工業大学の気象・蜃気楼観測ネットワークを図 3.4 に示す。知床半島の自然環境は、火山活動によって形成された険しく雄大な地形と、流氷と多様な生態系で特徴づけられ、気候変動に敏感であることから地球温暖化等の環境変動モニタリング地点としても期待されている。しかしながら、知床半島は保護地域であり電源や通信インフラの整備が困難であることから、気象庁の AMeDAS などの気象観測網の空白地帯であった。平成 20 年に世界自然遺産知床への気候変動の影響の強さを確認するための長期的、短期的な気象モニタリングが必要であることが国際自然保護連合から勧告され、知床科学委員会によって気象データの収集を永続的に行うことが決定された。このような背景を受けて、北見工業大学では平成 21 年からデータロガー記録式の気象計を知床半島の突端である知床岬に設置した。令和元年度から、研究代表者が所属する北見工業大学の環境・エネルギー研究推進センターは、地球環境監視と地域貢献を目的として知床岬と知床連山（硫黄山、三ツ峰）にリアルタイムモニタリングが可能な携帯電話の LTE 回線と LPWA を併用できるハイブリッド通信方式の気象計を開発した。

網走市から斜里町ウトロにかけての蜃気楼予測を実施するため、斜里町以久科と小清水町浜小清水の鉄塔に知床岬・知床連山と同様な LTE/LPWA 通信式の気温観測装置を設置し

た。浜小清水では旋回式のネットワークカメラを導入し、網走市方向と斜里町方向の海上に現れる上位層気楼を捉えるため、1分間に1回の頻度で連続撮影している。

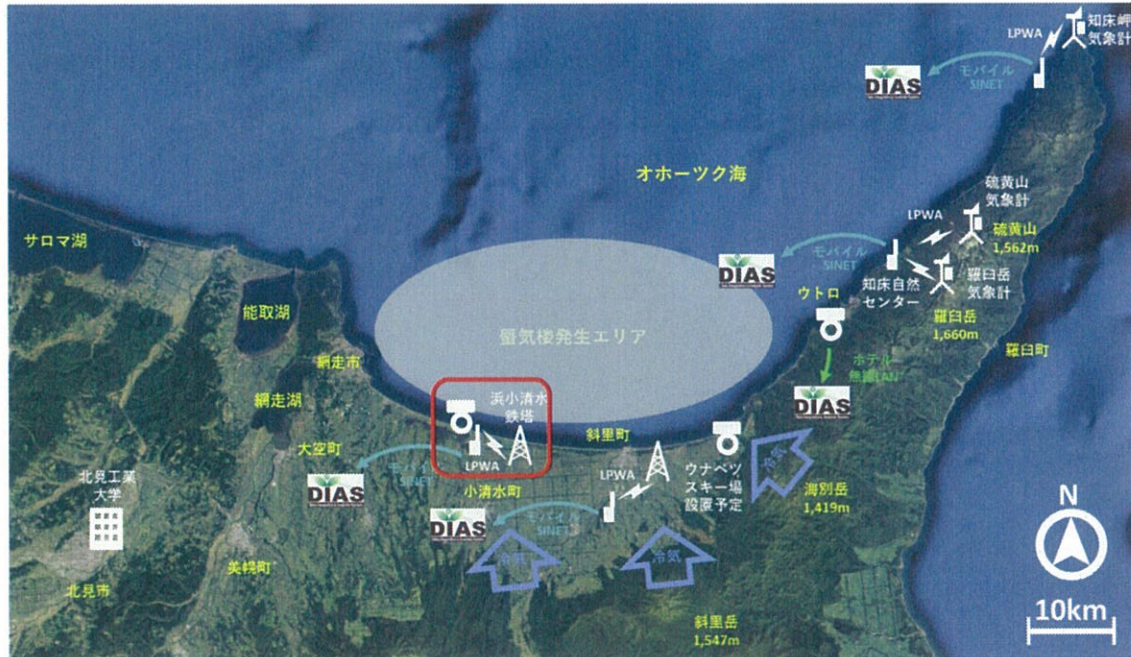


図 3.4 オホーツク沿岸地域に構築した北見工業大学の気象・層気楼観測ネットワーク

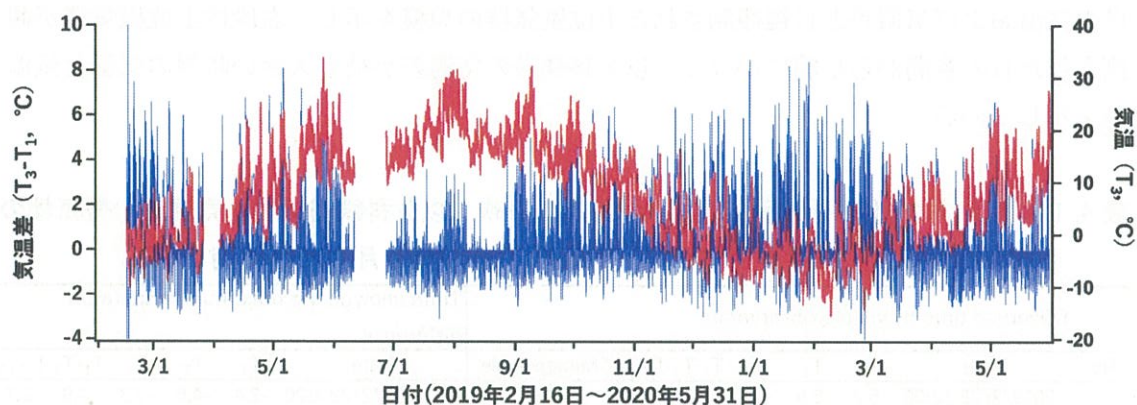
## 4. 観測結果

### 4. 1 鉄塔気温の変化

図 4.1 に (a) 斜里町以久科 (2019 年 2 月 16 日～2020 年 5 月 31 日) と (b) 小清水町浜小清水 (2020 年 2 月 20 日～5 月 31 日) の鉄塔気温の測定結果を示す. 以久科の鉄塔は約 50m 高で, LPWA 式気温センサを 42m 高, 28m 高, 7m 高の 3 つの高さに設置しており,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  はそれぞれ高さに設置したセンサの気温を示し,  $T_1-T_3$  は高さ 7m と 42m の気温差,  $T_1-T_2$  は高さ 7m と 28m の気温差を示している. 浜小清水の鉄塔は約 35m 高であり, 28m 高と 5m 高の 2 つの高さに設置し,  $T_1$  と  $T_2$  はそれぞれ高さに設置したセンサの気温を示している.  $T_1-T_2$  は高さ 5m と 28m の気温差である.

赤線は鉄塔の最も高い箇所に設置した温度を示し, 青棒は鉄塔の最も高い箇所と最も低い箇所の気温差を示している. 1.2 節で述べたように, 上位層気楼が発生する際は上暖下冷

(a) 斜里町以久科



(b) 小清水町浜小清水

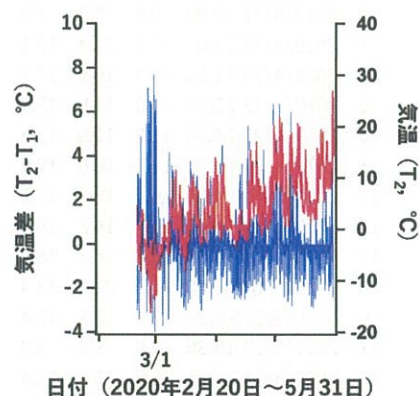


図 4.1 鉄塔気温の変化. (a) 斜里町以久科 ( $T_1$ : 7m 高の気温,  $T_2$ : 28m 高の気温,  $T_3$ : 42m 高の気温), (b) 小清水町浜小清水 ( $T_1$ : 5m 高の気温,  $T_2$ : 28m 高の気温).

の空気層が形成されることから、青棒で示される高い箇所と低い箇所の気温差が大きいほど、上暖下冷の空気層の構造が発達していると考えられる。このことから、気温差が上位蜃気楼発生を判断する指標として利用できることが期待される。気温差は7月から8月の夏季に生じやすく、9月から6月までの秋から初夏にかけての長い期間に生じ、特に12月から3月の冬季に大きい気温差が生じている。

#### 4. 2 目視観測の結果

知床蜃気楼・幻氷研究会による上位蜃気楼の目視観測は、昼休み前後の11時から13時に実施されることが多い。表4.1に斜里町内において2019年2月15日から5月31日の期間で上位蜃気楼が目視観測された日時と規模、そのときの以久科鉄塔気温と気温差を示している。この期間で斜里町内で図1.4に示した白色三角の方向③と④で発生した上位蜃気楼の観測頻度は22回であった。特に、以久科鉄塔で観測された空気塊の流れの影響を大きく受けていると考えられる方向④において、同じ観測者に限定して観測された上位蜃気楼は表4.1に赤字で示す9回であった。表4.1の左段は上位蜃気楼が観測された時刻の以久科鉄塔の気温および気温差と目視観測された上位蜃気楼の規模を示し、右段は上位蜃気楼が観測された日の夜間から早朝にかけて、以久科鉄塔の気温差が最も大きい時刻の気温と気温差を示している。

表 4.1 斜里町内で蜃気楼が目視観測された際の日時、以久科鉄塔気温と気温差、蜃気楼の規模（1：小，2：中，3：大，4：幻氷）。2019年2月15日～5月31日。

Observed time by visible observation								Time showed the maximum temperature difference					
No.	Date	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>1</sub> -T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub> -T <sub>3</sub>	Mirage scale	Date	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>1</sub> -T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub> -T <sub>3</sub>
1	2019/2/22 12:00	5.2	5.5	6.1	-0.9	-0.6	2	2019/2/22 4:20	-2.4	-4.6	-7.3	4.9	2.7
2	2019/2/24 15:00	3.8	4.1	4.5	-0.7	-0.4	3	2019/2/24 4:20	-5.8	-6.0	-9.9	4.1	3.9
3	2019/3/1 12:00	8.8	7.7	5.4	3.4	2.3	4	2019/3/1 4:10	-2.4	-5.2	-6.8	4.4	1.6
4	2019/3/3 12:00	5.0	4.9	6.8	-1.8	-1.9	4	2019/3/3 3:10	-4.1	-5.3	-9.6	5.5	4.3
5	2019/3/9 12:00	7.6	7.6	8.9	-1.3	-1.3	2	2019/3/9 0:40	-1.0	-2.9	-7.6	6.6	4.7
6	2019/4/11 12:00	6.8	6.3	7.5	-0.7	-1.2	3	2019/4/11 3:00	0.7	-1.1	-2.0	2.7	0.9
7	2019/4/13 12:05	11.7	11.4	12.1	-0.4	-0.7	4	2019/4/13 5:20	3.7	0.9	0.1	3.6	0.8
8	2019/4/14 11:15	16.3	16.5	17.7	-1.4	-1.2	4	2019/4/14 4:10	9.4	6.8	3.8	5.6	3.0
9	2019/4/22 12:05	11.0	11.0	12.3	-1.3	-1.3	2	2019/4/22 2:50	6.7	6.3	5.9	0.8	0.4
10	2019/4/28 14:20	11.2	11.5	12.4	-1.2	-0.9	2	2019/4/28 4:40	0.7	-1.3	-1.6	2.3	0.3
11	2019/4/29 10:05	17.7	18.0	19.2	-1.5	-1.2	1	2019/4/29 4:00	10.0	7.9	3.1	6.9	4.8
12	2019/4/30 9:30	16.4	15.8	17.1	-0.7	-1.3	3	2019/4/30 4:00	8.8	5.9	4.1	4.7	1.8
13	2019/5/4 10:55	14.7	14.2	15.4	-0.7	-1.2	2	2019/5/4 4:20	8.8	5.8	4.1	4.7	1.7
14	2019/5/5 11:10	16.5	16.3	16.9	-0.4	-0.6	2	2019/5/5 6:00	17.0	12.4	11.6	5.4	0.8
15	2019/5/6 8:40	22.7	22.9	23.4	-0.7	-0.5	3	2019/5/6 3:20	16.8	15.1	8.7	8.1	6.4
16	2019/5/9 8:20	12.4	12.1	13.4	-1.0	-1.3	2	2019/5/9 3:00	7.9	4.7	3.6	4.3	1.1
17	2019/5/13 18:35	9.8	9.3	8.9	0.9	0.4	3	2019/5/13 4:40	4.2	2.2	0.9	3.3	1.3
18	2019/5/14 12:30	15.9	15.8	16.4	-0.5	-0.6	3	2019/5/14 1:50	8.4	5.3	4.3	4.1	1.0
19	2019/5/16 18:40	13.5	13.1	13.1	0.4	0.0	2	2019/5/16 0:00	11.6	11.3	9.9	1.7	1.4
20	2019/5/23 18:35	21.1	21.1	20.9	0.2	0.2	2	2019/5/23 3:20	15.6	12.1	10.4	5.2	1.7
21	2019/5/25 11:45	23.4	22.9	23.7	-0.3	-0.8	2	2019/5/25 1:10	14.0	11.3	10.0	4.0	1.3
22	2019/5/30 18:00	17.5	17.6	17.6	-0.1	0.0	2	2019/5/30 3:00	11.8	8.9	8.2	3.6	0.7

この結果から、上位蜃気楼が目視観測された時刻では気温の逆転現象による気温差の存在は認められず、目視観測される以前の深夜から早朝にかけて、特に午前3時から4時にかけて気温差が最大になることがわかった。陸域の放射冷却現象で生じた冷氣塊は海上に移動し、鉄塔の地点で最大気温差を示した時刻から6~8時間ほど後に海上で蜃気楼を発生させ、それが目視観測されていることが考えられる。このことから、鉄塔気温センサで冷氣塊の生成・発達を監視することで、その後の蜃気楼の発生を予測できる可能性が示唆された。また、同じ観測者が同じ方向の目視観測をした場合の赤字の事例に着目すると、 $T_1$ - $T_3$ の気温差の最大値が大きいほど、発生した上位蜃気楼の規模が大きい傾向が認められた。

2020年2月20日から5月31日までの以久科鉄塔の気温と目視観測の結果を表4.2に、同じ期間の浜小清水鉄塔の結果を表4.3にそれぞれ示す。これらの表においても図1.4の方向④において、同じ観測者に限定して観測された上位蜃気楼を赤字で示している。2020年の結果の特徴として、2019年には観測されなかった夜間の事例を含んでいる。午前中から正午近辺にかけて斜里町内で上位蜃気楼が観測された場合は、表4.1の2019年の結果と同様に、以久科鉄塔の気温差は深夜から早朝にかけて最大値を示した。また、上位蜃気楼が夜間に観測された場合は、最大の気温差は18時半から19時半に現れ、時間差がほとんどなく19時半から21時半の間に上位蜃気楼が観測された。

表4.2の以久科鉄塔と表4.3の浜小清水鉄塔の結果を比較すると、浜小清水鉄塔の方が以久科鉄塔よりも15mほど低い違いがあるが最も高い箇所と最も低い箇所の気温差は、高低差の小さい浜小清水鉄塔の方が大きい値を示す場合が多かった。このことから、30m未満の高さの鉄塔でも上位蜃気楼の発生予測に十分使用可能であることがわかった。また、最大気温差を示した時刻は同時刻の事例もあるが、内陸側の以久科鉄塔よりも海岸付近の浜小清水鉄塔の方が4-6時間遅い傾向が見られた。両者の違いの要因の1つとして、冷気の主な供給源と考えられる山の標高と鉄塔までの距離の違いが考えられる。内陸の鉄塔と海岸付近の鉄塔の気温データを組み合わせることで、蜃気楼の発生予測対象時間を拡大させることが可能となる。また、海岸付近の鉄塔によって蜃気楼が発生する海上へ移流する空気塊の正確な気温を把握することが可能となり、蜃気楼の発生予測の高精度化だけでなく将来的に蜃気楼の規模の予測シミュレーションへの寄与が期待される。

表 4.2 斜里町内で蜃気楼が目視観測された際の日時，以久科鉄塔気温と気温差，蜃気楼の規模（1：小，2：中，3：大，4：幻氷）．2020年2月20日～5月31日．

Observed time by visible observation								Time showed the maximum temperature difference					
No.	Date	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>1</sub> -T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub> -T <sub>3</sub>	Mirage scale	Date	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>1</sub> -T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub> -T <sub>3</sub>
1	2020/2/20 21:20	-6.0	-6.0	-7.5	1.5	1.5	3	2020/2/20 19:20	-3.6	-4.4	-6.8	3.2	2.4
2	2020/2/25 19:20	-4.0	-4.3	-6.4	2.4	2.1	1	2020/2/25 18:30	-4.0	-4.5	-8.2	4.2	3.7
3	2020/2/26 21:20	-5.3	-6.0	-6.8	1.5	0.8	3	2020/2/26 19:40	-9.4	-9.6	-14.4	5.0	4.8
4	2020/3/7 16:25	-1.4	-1.3	0.2	-1.6	-1.5	1	2020/3/7 11:20	0.8	-1.6	-1.9	2.7	0.3
5	2020/3/8 15:40	5.6	5.7	5.5	0.1	0.2	1	2020/3/8 5:00	-2.1	-3.6	-6.0	3.9	2.4
6	2020/3/9 12:10	9.8	9.8	9.3	0.5	0.5	4	2020/3/9 11:50	10.4	9.7	7.1	3.3	2.6
7	2020/3/12 17:15	2.1	2.0	1.9	0.2	0.1	3	2020/3/12 12:30	3.7	2.1	3.0	0.7	-0.9
8	2020/3/18 12:30	7.2	6.8	8.1	-0.9	-1.3	4	2020/3/18 9:20	9.5	8.0	6.4	3.1	1.6
9	2020/3/27 12:30	11.9	11.6	12.3	-0.4	-0.7	4	2020/3/27 5:20	0.5	-2.0	-3.2	3.7	1.2
10	2020/3/30 12:00	8.8	9.0	11.0	-2.2	-2.0	4	2020/3/30 2:30	0.9	-1.0	-2.8	3.7	1.8
11	2020/3/31 9:30	9.7	9.8	10.7	-1.0	-0.9	4	2020/3/31 5:40	0.6	0.3	-1.1	1.7	1.4
12	2020/4/3 11:10	5.1	4.8	5.0	0.1	-0.2	2	2020/4/3 4:20	0.9	-1.8	-3.7	4.6	1.9
13	2020/4/4 7:50	5.6	5.7	5.6	0.0	0.1	1	2020/4/4 0:40	2.2	0.6	-1.9	4.1	2.5
14	2020/4/17 12:05	9.5	9.1	9.8	-0.3	-0.7	2	2020/4/17 0:30	0.9	-1.9	-3.3	4.2	1.4
15	2020/4/18 10:20	13.2	12.9	13.1	0.1	-0.2	2	2020/4/18 1:40	3.7	2.4	1.5	2.2	0.9
16	2020/5/8 12:10	19.4	19.1	20.1	-0.7	-1.0	3	2020/5/8 0:10	3.7	1.5	0.9	2.8	0.6

表 4.3 小清水町～斜里町内で蜃気楼が目視観測された際の日時，浜小清水鉄塔気温と気温差，蜃気楼の規模（1：小，2：中，3：大，4：幻氷）．2020年2月20日～5月31日．

Observed time by visible observation						Time showed the maximum temperature difference			
No.	Date	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub>	Mirage scale	Date	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub>
1	2020/2/20 21:20	-5.5	-6.6	1.1	3	2020/2/20 18:20	-4.1	-7.2	3.1
2	2020/2/25 19:20	-7.1	-9.1	2.0	1	2020/2/25 18:40	-4.5	-8.7	4.2
3	2020/2/26 21:20	-11.8	-17.0	5.2	3	2020/2/26 20:30	-10.4	-15.8	5.4
4	2020/3/7 16:25	0.5	-1.0	1.5	1	2020/3/7 15:10	0.9	-1.0	1.9
5	2020/3/8 15:40	5.6	5.6	0.0	1	2020/3/8 6:10	0.9	-1.1	2.0
6	2020/3/9 12:10	6.8	6.5	0.3	3	2020/3/9 5:40	4.1	0.5	3.6
7	2020/3/12 17:15	1.7	1.0	0.7	3	2020/3/12 16:50	2.0	1.2	0.8
8	2020/3/18 12:30	6.6	7.1	-0.5	4	2020/3/18 1:40	0.9	-1.7	2.6
9	2020/3/27 12:30	10.9	11.8	-0.9	4	2020/3/27 6:20	0.8	-1.0	1.8
10	2020/3/29 10:52	4.6	6.5	-1.9	4	2020/3/29 5:30	0.4	-2.5	2.9
11	2020/3/30 12:00	8.8	9.0	-0.2	4	2020/3/30 5:40	0.8	-1.2	2.0
12	2020/3/31 9:30	9.5	10.6	-1.1	4	2020/3/31 5:10	0.8	-2.4	3.2
13	2020/4/3 11:10	7.0	8.2	-1.2	2	2020/4/3 5:20	0.9	-2.8	3.7
14	2020/4/4 7:50	5.1	5.4	-0.3	1	2020/4/4 5:40	2.2	-2.3	4.5
15	2020/4/17 12:05	7.3	8.4	-1.1	2	2020/4/17 5:10	0.9	-4.5	5.4
16	2020/4/18 10:20	13.8	15.1	-1.3	2	2020/4/18 1:00	4.8	0.1	4.7
17	2020/5/8 12:10	15.5	15.7	-0.2	3	2020/5/8 4:30	2.2	0.0	2.2



#### 4. 3 鉄塔気温と蜃気楼の関係

図 4.2 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。3 つのグラフは下から順に最も高い箇所気温  $T_3$ 、最も低い箇所気温  $T_1$  と 2 番目に高い箇所気温  $T_2$  の差  $T_1-T_2$ 、 $T_1$  と  $T_3$  の気温差  $T_1-T_3$  を表している。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。橙色の縦棒は、表 4.1 に示すように目視観測によって観測された 22 回の上位蜃気楼の発生時間帯を表している。日最低気温が  $0^{\circ}\text{C}$  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は冬型、3 月 19 日および 4 月 12 日以降の日最低気温が  $0^{\circ}\text{C}$  より高い気温の期間で発生した上位蜃気楼を春型と推定される。冬型は 6 回、春型は 16 回発生した。また、流氷の結氷状況については、網走の地方气象台の発表で 2 月 27 日に海明け、4 月 14 日に流氷終日となっている。水平線の向こう側にある流氷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。この図から、気温差  $T_1-T_3$  が夜間に徐々に増加し、最大値を示した後に午前中から正午近辺にかけて上位蜃気楼が観測される傾向があることがわかる。この傾向は冬型と春型の両方で共通している。このことから気温差  $T_1-T_3$  をモニタリングすることで上位蜃気楼の発生が予測できることが示唆されている。

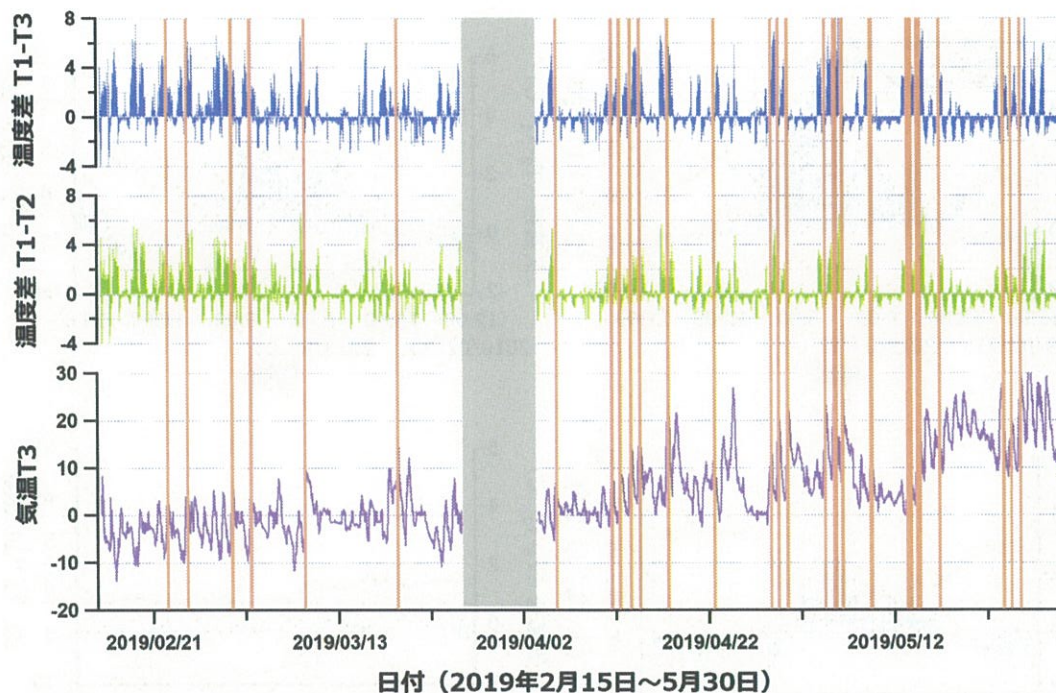


図 4.2 鉄塔に設置した LPWA 式気温センサの測定結果と蜃気楼の発生状況との比較。

$T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 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

#### 4. 3. 1 気温の高低差

上位曇気楼を発生させる温度変化層は、放射冷却で生じた冷気塊の強度に関係すると仮定し、冷気塊の強度を表す指標として、鉄塔の42m高の気温 ( $T_3$ ) と7m高の気温 ( $T_1$ ) の気温差 ( $T_3 - T_1$ ) の正の値を積分した。積分区間は12時から翌日12時である。気温差積分値と目視観測された上位曇気楼の発生の有無および規模を比較した結果、積分値が205から309  $^{\circ}\text{C}\cdot 10$ 分の範囲では目視規模・大の場合が多く、積分値が131から165  $^{\circ}\text{C}\cdot 10$ 分の範囲では目視規模・中、積分値が10から99  $^{\circ}\text{C}\cdot 10$ 分の範囲では目視規模・小が観測されるケースが多かった。また、目視規模・大が観測された時間帯は11時から13時である場合が多く、この時間帯はお昼休みで観測者が観察する頻度が高いという事情があるものの、気温が最も高くなる時間帯でもあり、海上に移流した冷気と周辺の空気との温度差が最も大きくなることも理由であると考えられる。

図4.3は目視規模が大, 中, 小, 上位曇気楼発生無しの気温差の変化をそれぞれ示している。紫線, 緑線, 青棒はそれぞれ42m高の気温, 7m高の気温, およびそれらの気温差を表し, 赤線はガウス分布による気温差の近似曲線を表している。これらの図から, 気温差の積分値と上位曇気楼が見られる気温変化層の発生と発達に関係があることが示唆された。

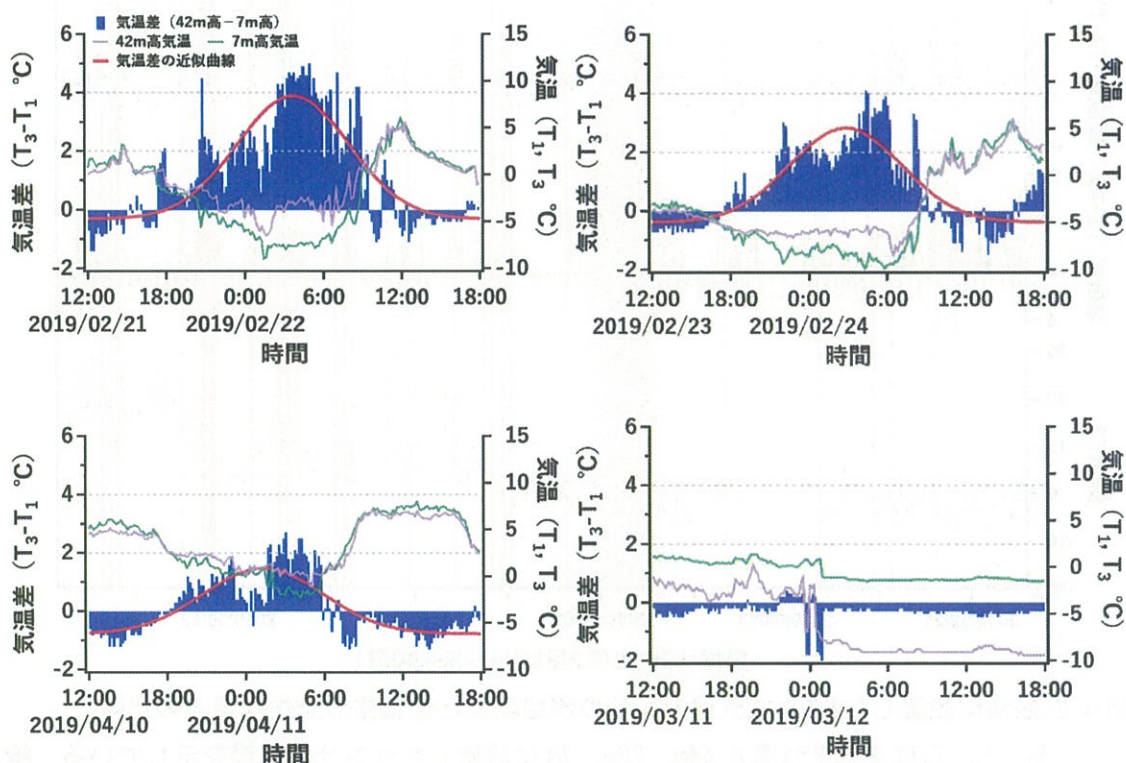


図 4.3 以久科鉄塔気温計による気温 ( $T_3$ : 42m 高 (紫線),  $T_1$ : 7m 高 (緑線)) および気温差 ( $T_3 - T_1$ : 青棒) の変化の例 (2019 年 2 月~5 月)。上から順に目視で観測された上位曇気楼の規模・大, 中, 小, 発生無しの例を示している。

図 4.4 は目視規模が大, 中, 小, 発生無しの際の浜小清水鉄塔気温計の気温差の変化を示している。黄線, 緑線, 青棒はそれぞれ 28m 高の気温, 5m 高の気温, およびそれらの気温差を表し, 赤線はガウス分布による気温差の近似曲線を表している。海岸に近く標高が低い浜小清水鉄塔においても以久科鉄塔に匹敵する規模の気温差を示し, 気温差の積分値と上位層気楼が見られる気温変化層の発生と発達に関係が見られることがわかった。

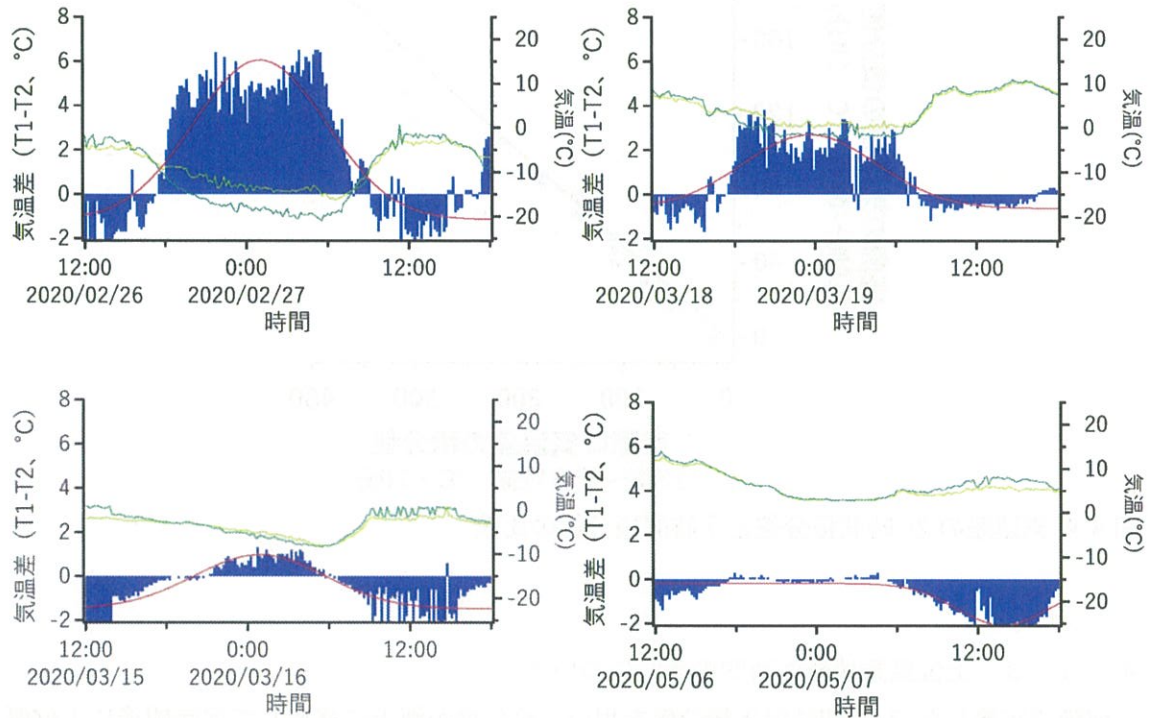


図 4.4 浜小清水鉄塔気温計による気温 ( $T_2$ : 28m 高 (紫線),  $T_1$ : 7m 高 (緑線)) および気温差 ( $T_2 - T_1$ : 青棒) の変化の例 (2020 年 2 月~5 月)。上から順に目視で観測された上位層気楼の規模・大, 中, 小, 発生無しの例を示している。

#### 4. 3. 2 上位層気楼発生期待度の予測

図 4.3 と図 4.4 に示した気温差の近似曲線より, 正の気温差は日没後の 18 時から出現し, 翌日 1 時から 3 時の深夜にピークを示したのち, 日の出後の 8 時から 12 時に負の値に転じる。気温差の変化がガウス分布の近似曲線のように左右対称であると仮定すると, 18 時から 1 時まで 7 時間の気温差から, その後 7 時間先までの気温差が同様に変化すると考えることができる。

図 4.5 は 12 時から翌日 12 時までの 24 時間で積分した気温差と, 18 時から翌日 1 時まで 7 時間で積分した気温差の関係を示したものである。この図から, 18 時~1 時の気温差積分値がその日の気温差の 24 時間積分値と高い相関があることがわかる。このことから, 18 時

～1 時の夜間の気温差データから翌朝 6 時から 12 時の上位曇気楼の発生期待度を推定できる可能性が示された。18 時～1 時の気温差の 7 時間積分値が  $100^{\circ}\text{C}\cdot 10$  分以上を期待度 A,  $50^{\circ}\text{C}\cdot 10$  分以上  $100^{\circ}\text{C}\cdot 10$  分未満を期待度 B,  $5^{\circ}\text{C}\cdot 10$  分以上  $50^{\circ}\text{C}\cdot 10$  分未満を期待度 C と定義した。

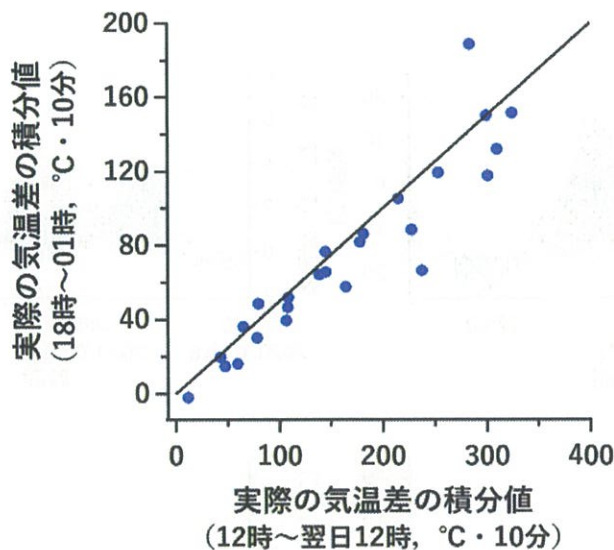


図 4.4 気温差の 24 時間積分値と 7 時間積分値の比較

#### 4. 3. 3 上位曇気楼発生時間の予測について

前節で定義した 7 時間気温差積分値を用い、冷氣塊が海上に移流して何時間後に上位曇気楼が発生し始め、何時間後に消滅するか検討した。

以久科鉄塔で観測された冷氣塊が海上に移動して峰浜～知布泊の緯度までの海上を冷氣塊が覆うことにより、この方向に上位曇気楼が発生したと仮定すると、冷氣塊が鉄塔の位置から約 6.8km の距離を移動していると考えられる。上位曇気楼発生時のアメダスの平均風速は 1.0 から 1.9m/s であったことから、冷氣塊がこの距離を移動するのに有する時間はおよそ 1～2 時間と計算される。したがって冷氣塊は 19～20 時から海上を覆い始め、放射冷却の度合いによって翌日 2～5 時の範囲にピークを示し、10～13 時頃まで上暖下冷の状態が継続され上位曇気楼を観測することが可能であると考えられる。

一方、海岸に近い浜小清水鉄塔で観測された冷氣塊は海上に移動する距離が以久科鉄塔の場合よりも短く、1 時間以内に曇気楼が発生すると考えられる。

## 5. 曇気楼予測

### 5. 1 上暖下冷の空気層の再現

4.3 節で述べたように、鉄塔気温の気温差積分値を用いることにより放射冷却で生じた冷気塊の規模の大小を表現し、上暖下冷の空気層を再現する方法は有効であると考えられる。本研究課題で用いた曇気楼発生期待度推定モデルを図 5.1 に示す。鉄塔気温データをリアルタイムで DIAS に送信し、日没後の 18 時から深夜 1 時から早朝 4 時まで（季節によって積分区間を変化させる）の気温差積分値を DIAS で計算することで、8 時から 13 時までの曇気楼発生期待度を予測する。DIAS に登載されている気象庁の 3 時間予報値を利用し、天気、湿度、風向風速情報によって重みづけした曇気楼の発生予測を行った。

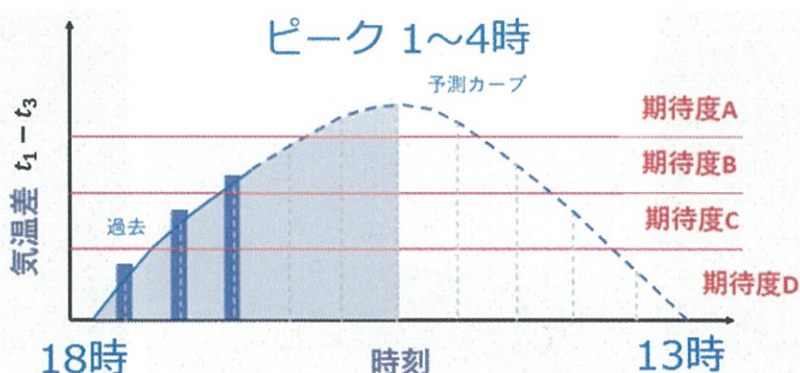


図 5.1 本研究課題で用いた曇気楼発生期待度推定モデル

### 5. 2 曇気楼予測結果の公開

曇気楼発生予測を DIAS 上で掲載するとともに、予測結果を図 5.2 に示す DIAS のアプリケーション「知床ポータル」として、Web 上で閲覧できる公開システムを開発した。試験運用中の知床ポータルの URL は以下の通りである。本格運用時には URL を変更する予定である。その際は北見工業大学のホームページのトップページのお知らせで URL を公開する。

<http://mirage.diasjp.net/test/test2.html>

図 5.2 下の図は曇気楼予測結果の公開例を示している。曇気楼発生期待度を一般ユーザーでも直観的に理解できるようにするため、図 5.1 に示す A から D の 4 段階の期待度を笑顔マークで表現している。また、図 5.2 中の図に示すようにライブカメラを通じて曇気楼の実際の発生状況を確認できるようにしている。

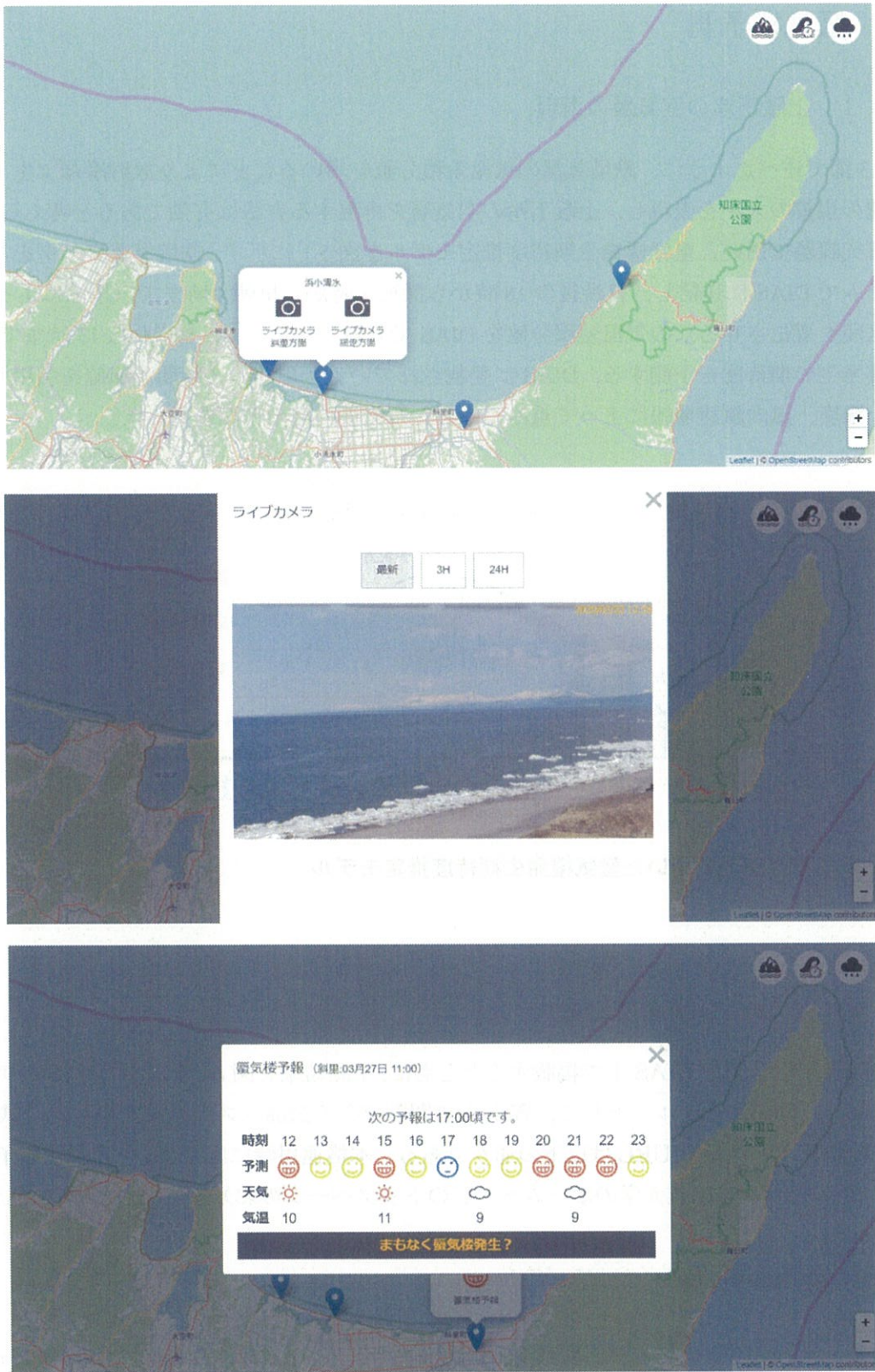


図 5.2 DIAS アプリケーション「知床ポータル」の画面. 上: 蟹気楼予測地点 (網走, 小清水, 斜里, ウトロ) の位置と観測項目 (気象計, 定点カメラ) が表示される. 中: 定点カメラの例. 下: 蟹気楼の予測結果を期待度として表示した画面.

## 6. まとめと今後の課題

本研究課題は、鉄塔に設置した気温計のデータと気象庁の数値予報データから、上位蜃気楼の発生を予測する手法を検討した。既往研究では光学シミュレーションによって上位蜃気楼の見え方と気温差の関係を推定する試みは多くなされているが、温度差以外にも複雑な要因があり単純ではないとされている。本研究課題では目視で観測された蜃気楼の規模と鉄塔の気温差の積分値との間に関連が認められ、予報指標として実用性があることが示唆された。その結果、18時から1時までの気温差の積分値から、翌朝6時から13時頃までの蜃気楼発生期待度の高さを定性的にAからCで表現し、発生時間を予測する手法を提案した。この蜃気楼発生予測モデルを用いて文部科学省のデータ統合・解析システムDIAS上で蜃気楼の発生予測を行い、Web上で予測結果を公開する「知床ポータル」を開発した。

本研究課題では目視で蜃気楼を確認した事例のみに着目していることから、今後は蜃気楼が確認できていない日の積算値についても調査を行い、風や雲量等のパラメータも考慮した予測を行う予定である。また、人力による目視観測ではなくDIASに蓄積された1分ごとの定点カメラの画像を解析することにより、上位蜃気楼の発生時刻と時速時間を24時間体制で観測し、正確に蜃気楼の発生予測の精度を検証したい。本研究課題では蜃気楼の発生予測を簡便化するために、左右対称のガウス関数を用いているが、実際は図6.1に示すように日出とともに安定境界層あるいは逆転層が急速に解消される左右非対称である。

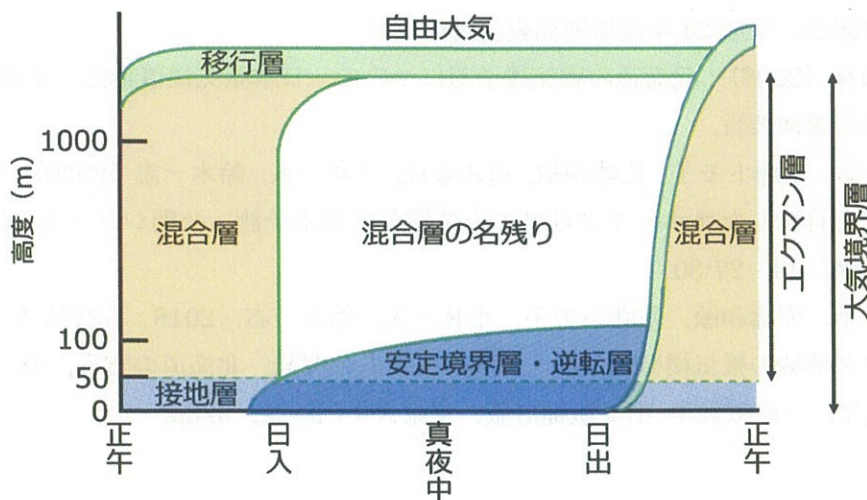


図 6.1 逆転層の発生と発達. 小倉 (1999) を参考に作成.

## 7. 謝辞

本研究はデータ収集・解析・公開プラットフォームとして、文部科学省の委託事業により開発・運用されているデータ統合解析システム（DIAS, 課題番号: JPMXD0716808999）を利用した。

## 8. 参考文献

- 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: 流氷の蜃気楼の観察と「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.
- 5) 館山一孝, 佐藤和敏, 佐藤トモ子, 小林一人, 鈴木一志, 2018: 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, 北海道の雪氷, 38, 11-14.
- 6) 株式会社ウェザーニューズ (1997): 蜃気楼の発生予測方法並びに予測装置. 特開平 09-152491.
- 7) 堀口貴司, 瀬山滋 (2012): 蜃気楼予測と検証 (H24年4月28日~5月1日). 日本蜃気楼協議会, 平成24年度研究発表会講演要旨
- 8) 金子和真 (2008): 北海道の蜃気楼予報について. 日本蜃気楼協議会, 平成20年度研究発表会講演要旨.
- 9) 館山一孝, 佐藤トモ子, 佐藤和敏, 道木泰成, 小林一人, 鈴木一志 (2020): データ駆動型観光を目指したオホーツク地域の上位蜃気楼発生予測・公開システムの開発. 北海道の雪氷, 39, 27-30.
- 10) 館山一孝, 佐藤和敏, 佐藤トモ子, 小林一人, 鈴木一志, 2018: 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, 北海道の雪氷, 38, 11-14.
- 11) 小倉義光, 一般気象学 第2版補訂版, 東京大学出版会, 320p.