第 10 回気象文化大賞

北海道紋別市における上位蜃気楼発生予測と蜃気楼観察クルーズの観光モデル開発

成果報告書

高橋修平（北海道立オホーツク流氷科学センター）

１．はじめに

紋別市は,北海道の東側,図 1 に示すオホーツク海沿岸のほぼ中央に位置した人口 20817 人の港街 [1] である.冬季には流氷の到来があり,流氷砕氷船ガリンコ号が運航され,紋別市の大きな観光事業となっている.

近年オホーツク海沿岸域においても上位蜃気楼が発生することが知られ,小清水町や斜里町内の鉄塔に設置した温度計から上位蜃気楼の発生予測が行われている [2].同様に上位蜃気楼が見られる紋別市ではこれまで,高度の異なる鉛直温度計測は行われていない.

以上から,これまで実施されていなかった上位蜃気楼の目視観測とともに蜃気楼発生時の鉛直温度計測から蜃気楼発生予測システムの構築を目指す.さらに紋別市におけるガリンコ号閑散期を利用した「蜃気楼」という新たな観光資源の開発を目指す.本発表では上位蜃気楼を「蜃気楼」と略称する.

図 1　北海道紋別市の位置（左）と北海道立オホーツク流氷科学センターとアメダス紋別小向, 沼の上地区, コムケ湖の位置（右）（国土地理院より引用）

２．上位蜃気楼の観測

2.1　目視観測

2019 年 5 月 23 日より現在まで,流氷科学センター1 階受付を観察地点とし,休館日を除く毎日午前 9 時から午後 5 時まで,蜃気楼の目視観測を行っている.図 2 で示すように観測地点から約 1.9km 離れた紋別港第 2 防波堤灯台を目印とし,水平線や漁船,流氷などの対象物がどの程度変化したかによって規模を 1 から 3 で設定し,観測開始時間と合わせて記録した.

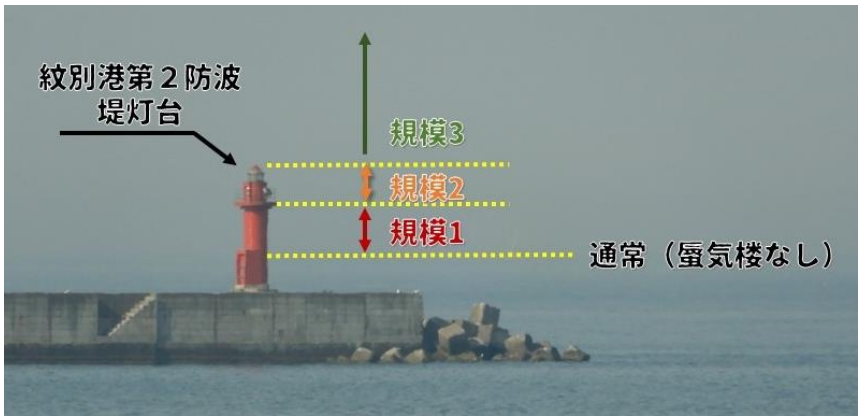

図 2　蜃気楼の規模判断の目印とした紋別港第 2 防波堤灯台と規模の判断基準
主に水平線の位置で判断し, 規模 1 から規模 3 までを記録した

2.2　UAV における鉛直温度計測

蜃気楼発生に重要である上暖下冷の空気層の存在を把握するため,2020 年 3 月から現在までに 6 回,図 3 で示す通り,UAV2 種(DJI 社 Phantom3Pro・Phantom4ProV2.0)と温度ロガー(HIOKI 社 LR5011）を使用し,高度 100ｍまで上昇させ 20ｍずつ下降させる方法で鉛直温度計測を実施した.

なお本研究では,気象計を搭載した際でも挙動が安定していた従来機 Phantom3Pro と新型機の Phantom4ProV2.0 を活用した.バッテリー駆動時間が従来機では 12 分前後であったところから,新型機は約 15 分と 1.3 倍に増加したことで,より詳細な高度で鉛直温度計測が実施できると期待していた.しかし新型機では気象計搭載時のホバリングが安定しなく,計測中に意図しない急上昇や急下降を繰り返すなど,操作性に非常に難であった.挙動不安定性が個体差か否か,調査を継続する必要がある.

図 3　観測で使用した UAV に温度ロガー（HIOKI 社 LR5011）を固定した従来機の DJI 社製 Phantom3Pro（左）と新型機の DJI 社製 Phantom4ProV2.0.

2.3　LPWA 式気象センサによる計測

近年蜃気楼の観測においても舘山ら[3]が LPWA（省電力広域無線通信技術：Low Power Wide Area）式の気象センサを活用している.軽量で長期間観測でき,広範囲にデータを送信することが可能である.紋別での観測においても上記センサを 2021 年 4 月 7 日より現在まで,沼の上地区内鉄塔の異なる高さ（地上から下部 10m,上部 23m）2 ヵ所に設置している.10 分に 1 回の頻度で気温の鉛直分布を測定し,自動でネットワークドライブ上に保存する.

2.4　紋別小向のアメダスデータ抽出

紋別市における空気層の移流を把握するため,LPWA 気象計設置場所から最も近いアメダスの紋別小向から風向・風速データを使用した.期間は LPWA 式気象センサと同様に設定し,10 分毎にデータを抽出した.

2.5　紋別市における表面海水温の測定

紋別市では氷海展望塔オホーツクタワーにて毎日 1 回,海洋観測を実施している.蜃気楼は海上で見られることが多い.そこで表層の海水温が蜃気楼発生にどのように寄与しているかを調査するため,海洋観測データから表層海水温を使用し蜃気楼発生時と比較検討を行った.なお,観測機器は JFE アドバンテック㈱社製 RINKO-profilerASTD102 を使用している.検討期間は 2.3LPWA 式気象センサと同様とした.

2.6　観測結果

本研究では LPWA 気象計の計測期間である 2021 年 4 月 7 日から 2022 年 5 月 31 日までにおける蜃気楼の発生状況を報告する.蜃気楼は上記期間内に規模 1,2,3 がそれぞれ 16,14,2 日間の合計 32 日間発生しており,そのうち 29 日間で午前 0 時から蜃気楼発生までに上暖下冷の空気層を持つ逆転層を確認した.逆転層は LPWA 気温センサの上部から下部の気温差で判断し,正の気温差が発生した際を逆転層と判断している.

また全ての蜃気楼発生時の風向は図 4 に示す通り,東寄りの風が 71.9%となり,地形から判断するとオホーツク海から陸地へ吹く風であることがわかった.また,逆転層が見られなかった 3 日間においても,蜃気楼発生時は東よりの風であった.

蜃気楼が発生した際の水温と蜃気楼の規模の関係について図 5 に示す.2021 年 4 月 7 日の 5.1℃が最低温度,同年 7 月 27 日の 24.5℃が最高温度となり平均温度は 10.3℃であった.発生月毎に平均化したところ 2021 年 4 月は 5.5℃,その後 5 月は 6.4℃,6 月 13.0℃,7 月 21.2℃,翌年 2022 年 4 月では 6.2℃,5 月は 10.3℃であった.

以上の結果から,紋別における蜃気楼の発生と逆転層の有無の関係性について,少なくとも以下の 3 ケースの事例がある可能性が考えられる.事例を基に検討する.

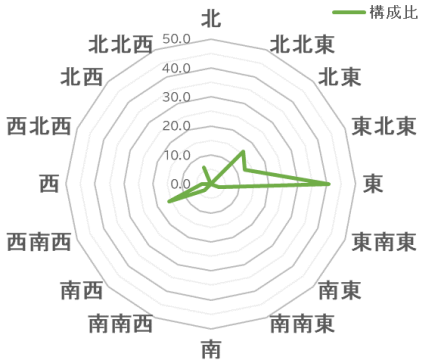

図 4　蜃気楼発生時の風向の構成比

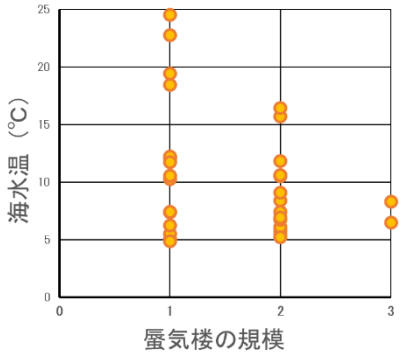

図 5　蜃気楼発生時の海水温と規模の関係

2.6.1　逆転層があり蜃気楼が発生したケース

2021 年 6 月 6 日の結果を例に挙げ,図 6 に示す.上暖下冷の空気層の気温差は午前 2 時 50 分に最大 5.4℃となり,午前 5 時 10 分まで逆転層は継続した.その際の風向は西寄りの風が 72.2%である.逆転層消失後は東寄りの風に変わり,午前 9 時に規模 2 の蜃気楼を観測した.この日はコムケ湖にて図 7 に示す変形太陽の撮影にも成功している.

UAV における鉛直温度計測も実施しており,図 8 に観測結果を示す.上空 40mから 20mにかけて 4.1℃の上暖下冷の気温差があり,逆転層の存在が明らかになった.

上記のケースは 32 日間のうちで 90%にあたる 29 日間で見られた.

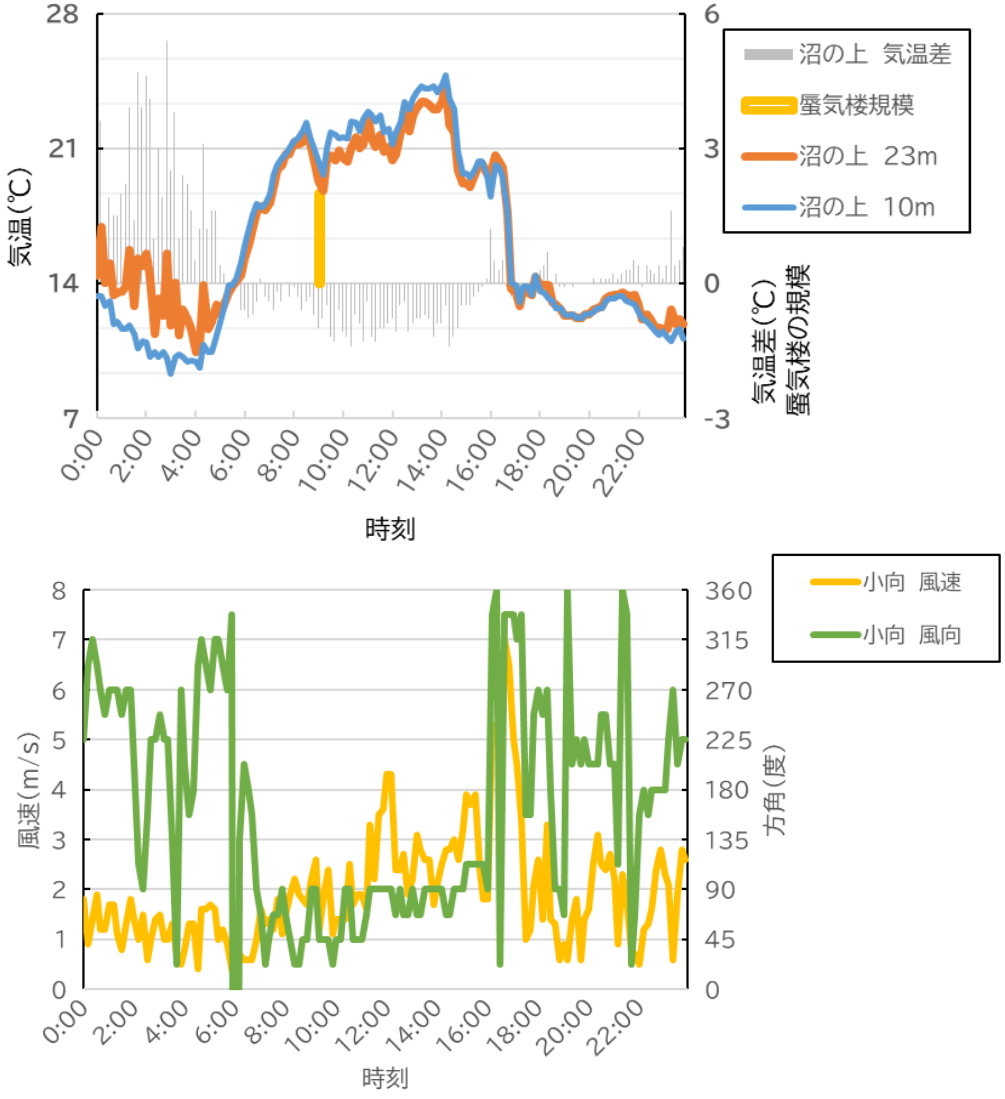

図 6　2021 年 6 月 6 日における気温（上）と風向風速（下）の変化

図 7　コムケ湖で撮影した変形太陽
（2021 年 6 月 6 日午前 4 時撮影）

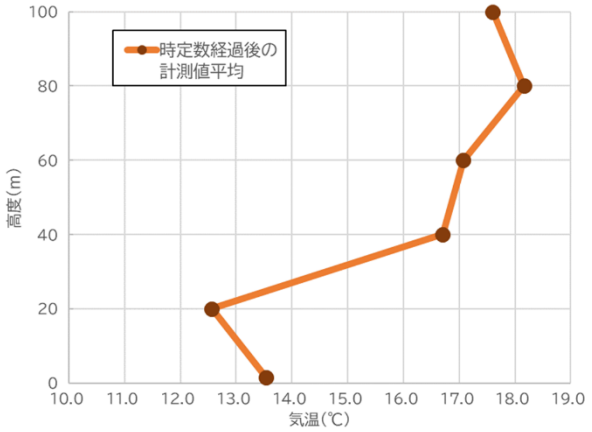

図 8　UAV で観測したコムケ湖上空の鉛直
気温分布（2021 年 6 月 6 日午前 4 時）

2.6.2　逆転層が確認できなかったが蜃気楼が発生したケース

2021 年 5 月 18 日の結果を例に挙げる.上記観測期間内で図 9 に示す通り,最大級の規模 3 の蜃気楼が発生した.しかしこの日は午前 0 時から蜃気楼発生まで逆転層は見られなかった.風向は午前 0 時から東寄りの風が吹き,日中も東の風が続いた.蜃気楼発生時は午後 1 時であった.

このケースに当てはまる日は 3 日間あったものの,規模はそれぞれ規模 1 から 3 まで 1 回ずつと,規模の大小に関連性は見られなかった.しかし蜃気楼発生時の風向は東または北東方向と東寄りの風であった.

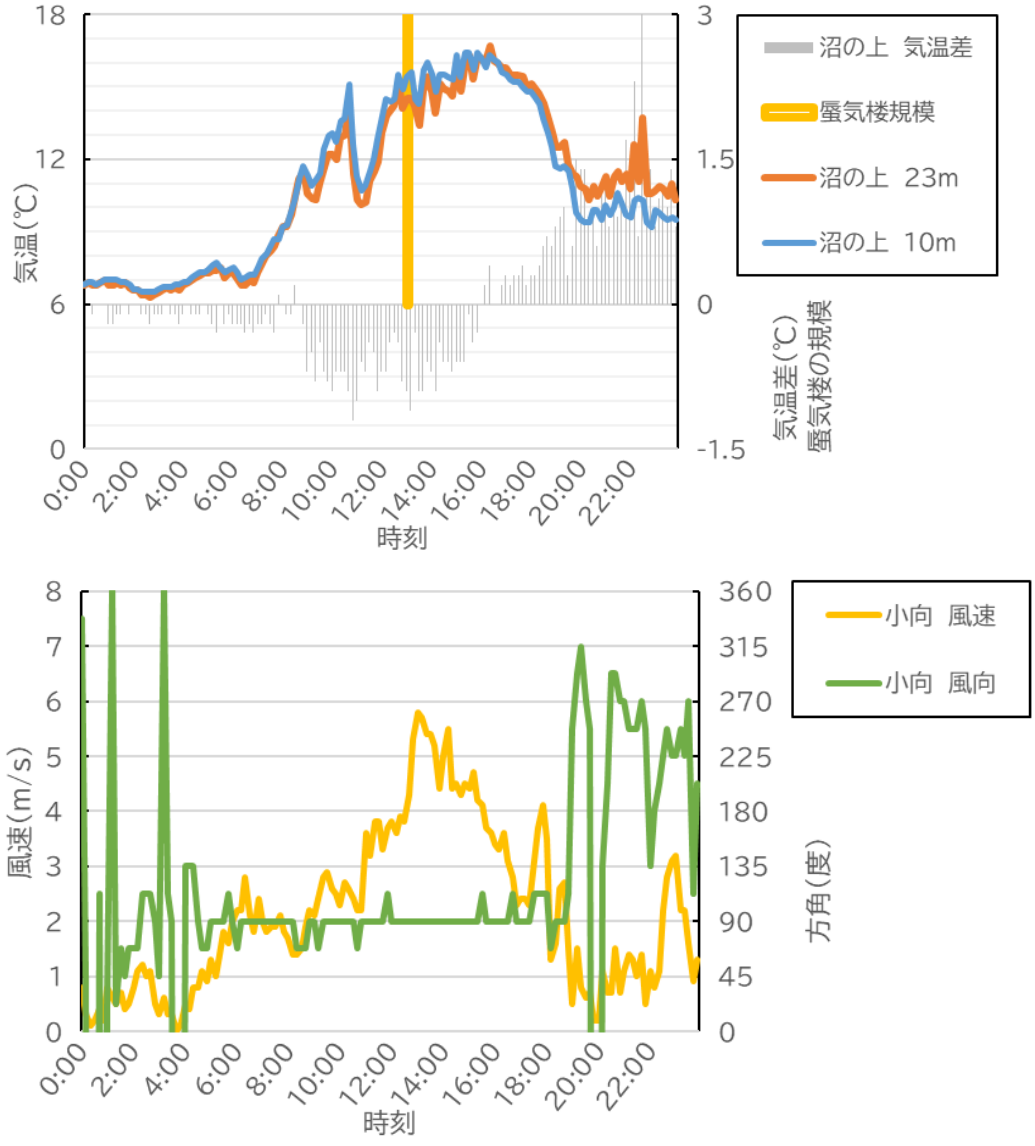

図 9　2021 年 5 月 18 日における気温（上）と風向風速（下）の変化

2.6.3　観測時間外に逆転層が見られ,早朝に蜃気楼が発生したケース

2022 年 4 月 30 日の例を挙げる.後述する蜃気楼・海鳥観察クルーズの実施日である.早朝 6 時に魚津埋没林博物館の佐藤氏が図 10 で示す蜃気楼を確認しているが,その後消失した.図 11 では当日の気温と風向風速を表している.気温差は最大で午前 2 時に 5.1℃となり,午前 6 時 10 分まで継続した.早朝は西寄りの風が吹いていたが,逆転層消失後は北よりの風に変わった.9 時以降は蜃気楼を確認する事が出来なかった.

観測時間以外で蜃気楼が発生し,日中には見られなくなってしまうという蜃気楼の事例の存在が明らかになった.

図 10　紋別市で撮影された網走方向の上位蜃気楼（左）と普段の景色（右）
（左：2022 年 4 月 30 日午前 6 時, 右：同日午前 7 時　佐藤真樹氏撮影）

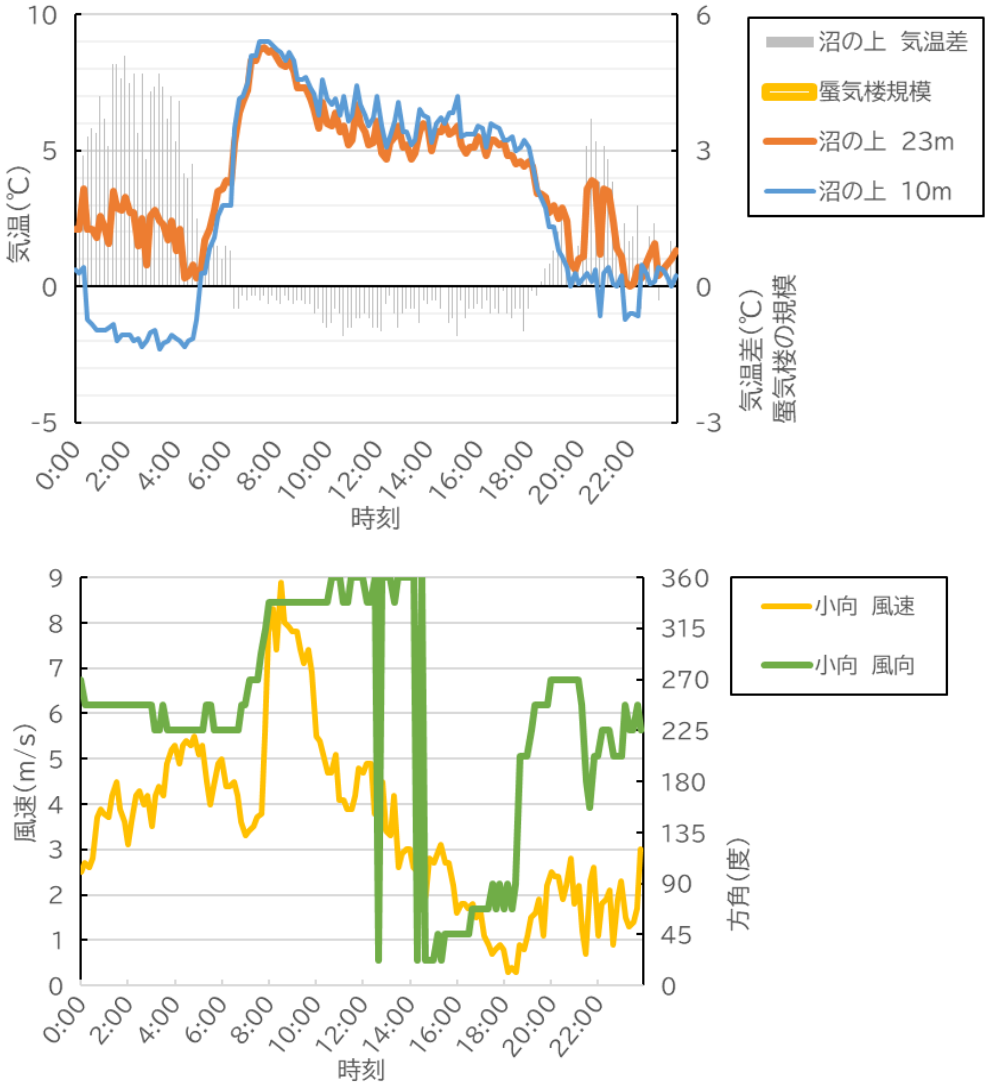

図 11　2022 年 4 月 30 日における気温（上）と風向風速（下）の変化

2.7　考察

紋別における蜃気楼は以下の２種類が存在する可能性がある.

1つは深夜から早朝にかけて発生した冷気が,陸地からオホーツク海へ運ばれる向きである西よりの風によって海上へ移流し,日中,暖気が東寄りの風によって輸送されることで形成される逆転層による蜃気楼である.これは前記結果（2.6.1）に多くあてはまる種類の蜃気楼であり,日中の観測が可能であった.

2 つ目に早朝の逆転層が起因し見られる蜃気楼である.結果（2.6.3）2022 年 4 月 30 日の例だけでなく,冬季でも同様の早朝にのみ見られる蜃気楼の事例が挙げられている.しかし目視観測データが現状無いなど不確定な事項が多いため,今後は早朝の蜃気楼が捉えられる 24 時間稼働可能な蜃気楼カメラの設置等検討し発生状況の解明を進めていきたい.

気象計から算出される気温差から蜃気楼予報を実施する場合,「しきい値」を設定し検討する必要が考えられる.これまでの舘山ら [3] の算出方法に則ると,上記期間における蜃気楼が発生した際の気温差の平均は 2.6℃であり,蜃気楼発生の 8 割以上に該当する気温差は 1.6℃であった.以上から,しきい値を 1.6℃と設定し,午前 0 時から午前 6 時までにしきい値以上の気温差が発生している日数を求めると合計で 185 日が該当した.しかしその日数内に蜃気楼があった日は 24 日のみと,全体の 13.0%にとどまった.しきい値以上の逆転層が見られた日は 2021 年の 4 月から 7 月をみると 43 日間であったが,冬季期間である 11 月から翌年 2 月では 60 日間と全体の 32%を占めている.上記に挙げた 2 つ目の蜃気楼が早朝の逆転層が起因するのであれば,早朝の蜃気楼の観測を検討したり,蜃気楼が多く見られない 8 月から 10 月までの期間を予測から除くなど,期間に応じた蜃気楼予測を目指したい.

また,海水温と蜃気楼発生の関連性を検討する.蜃気楼は海上で主に発生しており,それを観測対象としているため,海水温の変化が蜃気楼の発生時期や規模に何かしらの影響を与えていると考えていた.しかし蜃気楼の規模と海水温の 2 データで比較すると,蜃気楼発生日の海水温は 5.1℃から 24.5℃と値にはばらつきがあった.相関係数は-0.29 となったものの,t 検定を行ったところ有意ではなかった（$p>0.05$）.海水温と蜃気楼の規模という 2 点で比較すると互いに相関があるとは言い難い.しかし,蜃気楼の規模だけでなく,蜃気楼の発生した時期や時間帯,また長期的な海水温度の変化など別の比較対象との相関を見る必要があると考える.

また,逆転層の高さについての事例として結果（2.6.2）2021 年 5 月 18 日を挙げる.午後 1 時に図 12 に示すような規模 3 の蜃気楼の発生を確認している.その際の LPWA 式気象センサでは 23 m地点で 14.5℃,10mで 15.4℃であり,上暖下冷の空気層が見られなかった.しかしその 1 時間後に UAV による鉛直温度計測を実施したところ図 13 に示す通り,高度 60m から 80m の間に 3.3℃の気温差を持つ逆転層が確認できた.LPWA 式気象センサでは上部 23m から下部 10m の間における逆転層をとらえることが可能であるが,それ以上の高度にある逆転層の把握はできない.上空で発生する逆転層についても考慮する必要がある.

コロナ禍により海上での鉛直温度計測の実現が難しく,今回の調査では地上からの観測に重点を置き観測を行った.つまり観測者と変化している対象物との間の逆転層を計測できているわけではなく,その逆転層が鉛直方向ではなく水平方向にどの程度広がっているかも明白ではない.
また対象物との距離でも蜃気楼が見えたり見えなかったりするため,蜃気楼の原因そのものの解明が今後の課題にもなっている.

今回,LPWA 式気象センサを設置したことで,紋別市における逆転層の有無を把握することが可能になったが,観測時間帯以外での蜃気楼の有無判断や,逆転層が LPWA 気象センサよりさらに上空で発生している点,海水温による蜃気楼の発生状況の変化や紋別小向以外の地点からの冷気や暖気の移流等を考慮することで蜃気楼の発生予測を向上につなげられるのではないかと考える.引き続き気象センサの解析と UAV による鉛直温度計測を実行し,紋別市における蜃気楼の発生状況の解明を目指す.

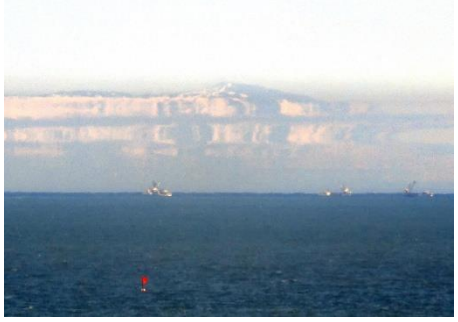

図 12　大規模な上位蜃気楼. 知床半島が縦に伸び上がった(2021 年 5 月 18 日午後 1 時撮影)

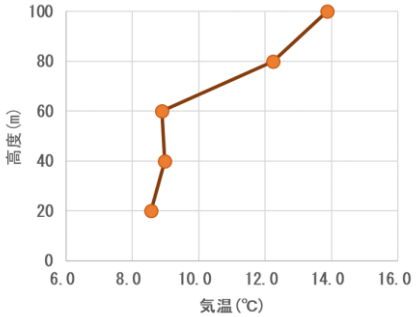

図 13　UAV による鉛直温度計測
（2021 年 5 月 18 日午前 2 時）

3.蜃気楼の観光化に向けた取り組み

蜃気楼が紋別市内でも見られることが明らかとなり,局所的な自然現象である蜃気楼をテーマに,地域観光の新たな一つとして組み込めるか検討する.そこで全国的にも珍しいクルーズとして船に乗り海上から陸地の蜃気楼を観察する事業を実施した.

紋別市には図 14 に示すような流氷砕氷船ガリンコ号Ⅱとガリンコ号ⅢIMERU の 2 隻が就航しており,冬季においては紋別沖に点在する流氷帯を進む観光船として活躍している.しかし流氷時季を終えメンテナンスが終了する 4 月後半からは,釣り船や観光船としての活用のみとなり,閑散期である夏季の新たな運用を模索している.日中見られる蜃気楼は流氷が明けた 4 月頃から 7 月の初夏にかけて多く見られることから,ガリンコ号を活用し,蜃気楼を陸地からではなく海上から観察するという 2 つの事例を以下に述べる.

図 14　流氷砕氷船ガリンコ号Ⅱ（左）とガリンコ号ⅢIMERU（右）

3.1　蜃気楼・海鳥モニタークルーズ

2020 年 6 月 21 日に,図 15 で示す,紋別では初となる蜃気楼と海鳥の観察を目的としたモニタークルーズを実施した.流氷シーズンを終え,メンテナンスを終えたガリンコ号Ⅱに乗船し,船上から蜃気楼と海鳥を観察する.

クルーズの実施にあたって,蜃気楼は必ず見られるわけではない自然現象のため,蜃気楼が見られなかった際のテーマを持つ必要があった.そこで,春先に見られる海鳥の渡りや紋別港で営巣している海鳥のコロニーの観察を組み込むこととした.蜃気楼講師に知床蜃気楼・幻氷研究会の佐藤氏や北見工業大学の舘山准教授,海鳥講師にもんべつかいはつくらぶの大館氏を招き,約 3 時間のガイド付きクルーズを実施した.海上からは今回目標としていた上位蜃気楼は見られなかったものの,図 16 のように紋別市街や雄武町沙留の下位蜃気楼やウミウ・オオセグロカモメのコロニーが確認できた.46 名が参加し,アンケート結果から蜃気楼への満足度は 77%であった.普段見ている景色が実は下位蜃気楼も含まれていたことを知らない参加者が多く,地元紋別市からの参加者からの反響が大きかった.ガイド付きで事象を解説,実際に観察することでツアーにおける満足度も高くなることが明らかとなった.

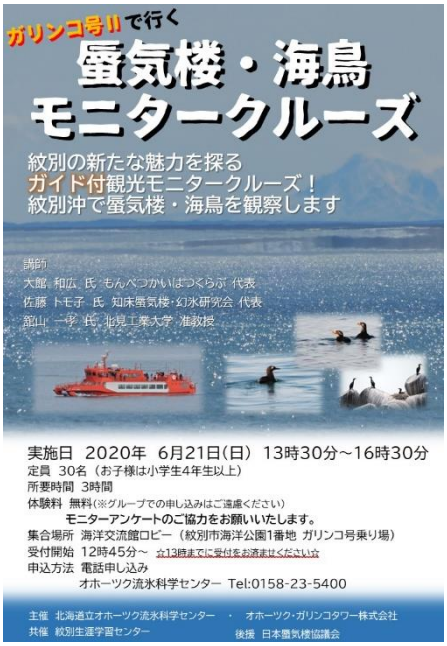

図 15　蜃気楼・海鳥モニタークルーズポスター　図 16　海鳥のコロニー（左上）と参加者（右上）.海上で確認した下位蜃気楼（下）

3.2　蜃気楼・海鳥観察クルーズ

新型コロナウイルス感染拡大の影響もあり,本来は 2021 年に実施予定であったクルーズは中止となり,翌年 2022 年 4 月 30 日に図 17 で表すようにあらためてクルーズを企画,実施した.前回のクルーズから発展させ,幅広い意見を集めつつ紋別の観光資源の一つとして具体的な磨き上げを目的とし,着地型観光としての展開を目指した.

前回のクルーズを受け,乗船前の事前学習の時間を増やした.その結果「乗船後にどの方角を見たらよいか」,「どの事象が蜃気楼なのか」,「どのような生き物と遭遇する可能性があるのか」等,あらかじめ予備知識として得ることができ,船上での解説時における理解度の向上につなげた.また,海上にてミズナギドリやウトウ等の海鳥との遭遇率を上げるために時季を 6 月中旬ではなく 4 月下旬とした. さらに,参加者へ蜃気楼や海鳥などを観察しやすくするため,前回のクルーズでは準備できていなかった双眼鏡を用意した.船上での観察を容易にするため防水仕様の軽量なものを選定した.あわせて三脚等に固定できるように三脚座も準備した.

新型船のガリンコ号ⅢIMERU は故障による修理のため使用できなかったため,ガリンコ号Ⅱを活用した.ガイドは北海道立オホーツク流氷科学センター石原管理係ともんべつかいはつくらぶ大館氏の 2 人で実施した.参加者は 42 名で,クルーズ時間は 1 時間 30 分とした.日本蜃気楼協議会からも佐藤トモ子氏や佐藤真樹氏,大木氏に参加していただいた.強風でうねりがあったものの,前回同様に図 18 のような市街地の下位蜃気楼とミズナギドリ類の小群,渡り途中であるヒシクイの群れが観察できた.

図 17　蜃気楼・海鳥クルーズポスター

図 18　市街地の蜃気楼（上）とミズナギドリ類の小群（下）

クルーズ実施後に参加者と意見交換会を行った.本クルーズは本州からの参加者も多く,見物対象のバリエーションが多いこと,そもそもクルーズ単体で面白さを内包していること,蜃気楼や海鳥が見られなかったとしてもガイドの面白さが際立ったなど,好評の意見があった.しかし,観察方向の指示方法の再検討や解説する事象をその場で撮影し,即座にモニター等で共有できると理解しやすくなるという次回以降の課題も挙げられた.また,蜃気楼に関するワークショップの開催を通して地元民からの理解を得る必要があることも浮き彫りとなった.地元民の理解がないと新たな観光を提案しても継続していくのは難しいという意見もあった.

3.3　蜃気楼・海鳥クルーズの考察

参加者はどちらのクルーズも地元の方が含まれ,ありふれて見える下位蜃気楼でも,解説を交えて紹介することで興味関心を大きく刺激し満足度が高いものとなることが明らかとなった.そもそもガリンコ号に乗るという体験だけでも道外の参加者からは好印象という声があった.しかし自然現象が対象のため見られないことも考慮し,天気や周りの山岳の景色など,ガイドには幅広い知識が必要である.今回のクルーズでは船体故障のため新型船ガリンコ号ⅢIMERU を使用することができなかったが,次回以降のクルーズでは新型船を活用することで従来船に比べ約 1.2 倍の乗船定員となり,大型化したことでの安全性と安定性が向上したクルーズが期待できる.

蜃気楼というテーマは紋別市での理解度は依然と低く,観光コンテンツとして昇華していくには基礎データの蓄積と発生の予測,それを観光客へアプローチする手段の開発が望まれる.

今後とも上記観測で得られたデータをもとに蜃気楼予報の開発と予測精度向上を目指し,蜃気楼観光を地元紋別の新たな観光資源の一つとして事業の計画立案を継続して行っていく.

謝辞

本研究における紋別市の表面海水温について,紋別市から提供を受けた.

参考文献

1）紋別市 HP（https://mombetsu.jp/syoukai/shisei.html　2022 年 5 月 17 日閲覧）

2）舘山一孝,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.

3）舘山一孝,佐藤和敏,佐藤トモ子,小林一人,鈴木一志,2019: 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.