

# ドローンを用いた上位蜃気楼の発生状況に関する事例研究 A case study on the occurrence situation of the superior mirage using UAV

石原宙（北見工業大学大学院），館山一孝（北見工業大学），  
佐藤トモ子（知床蜃気楼・幻氷研究会），小林一人（構研エンジニアリング）  
Hiromu Ishihara, Kazutaka Tateyama, Tomoko Satoh, Kazuto Kobayashi

## 1. はじめに

### 1-1 背景

上暖下冷の空気層内で光が屈折して起こる上位蜃気楼は近年富山県の蜃気楼<sup>1)</sup>や琵琶湖の蜃気楼<sup>2)</sup>など日本各地で発生が確認されているが，その発生メカニズムの解明が課題になっている．北海道では風連湖（根室）での上位蜃気楼と下位蜃気楼を併せ持つ蜃気楼についてレイ・トレーシングを行い再現し大気の温度構造を得る研究<sup>3)</sup>やオホーツク海沿岸の斜里町で上位蜃気楼の研究がされている．図1に，斜里町の等高線図を示す．図中の3地点は本研究で使用した観測機器を設置した場所を表す．斜里町ではこれまで大鐘ら<sup>4)</sup>や佐藤ら<sup>5)</sup>が上位蜃気楼を冬と春で発生原理が異なるという分類を行った．斜里町で発生する上位蜃気楼の発生機構は，陸地の放射冷却による冷気が海上に流れ込む等による「冬の上位蜃気楼」（図2）と春先の暖気移流や北寄りの風による冷気移流等による「春の上位蜃気楼」がある<sup>5)</sup>．

### 1-2 目的

これまでの調査で冬の上位蜃気楼発生時に陸地の冷気が海上に流れ込むと考えられたが，冷気層の有無を明らかににはされてはいなかった．図1に示した3地点（三井，以久科，前浜，括弧内に標高を表した．）の気温・湿度・気圧・風等を測定し斜里平野に沿って海上へ流れる冷気層を調査する必要があると考えられる．しかし冬・春いずれの上位蜃気楼についても，どのような気象条件で発生しているのか機器等を設置して調査したものではなく，未だ不明な点が多い．本研究では，新たに設置した気象計から斜里町の上位蜃気楼の発生状況を調査し，さらにはドローンを用いた温度層の調査方法を開発し，いくつかの事例で発生時の下層気温鉛直分布に関する知見を得た．

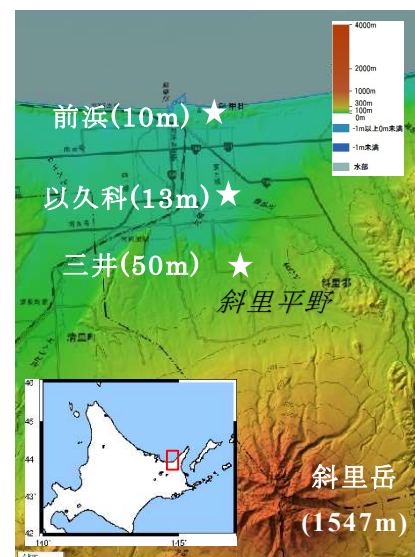


図1 北海道斜里町（左下図赤枠内）の斜里岳と斜里平野，観測機器を設置した3地点の位置（国土地理院<sup>6)</sup>）．



図2 流水の上位蜃気楼．以久科原生花園の海岸から撮影(2017年2月20日)．

## 2. 調査1 気象計による上位蜃気楼発生状況の推定

### 2-1 調査方法

冬の上位蜃気楼が発生しているのかを調査するために気象計を設置して観測した。出現の可否は、現場で知床蜃気楼・幻氷研究会が前浜・以久科原生花園から双眼鏡等を用いて不定期に観測した目視データを使用した。2016年1月1日から同年5月31までの上位蜃気楼を集計した。気象計は2016年2月20日から同年5月2日まで、斜里町内3か所に設置した(図1)。使用した気象計の概要を表1に示す。気象計①は3要素(おんどとり:T&D社, TR-73U, TR-52S), 気象計②はさらに風と日射量と降水量が測定可能(WeatherBucket:エスイーシー社)である。

表1 2016年調査に使用した気象計とその概要

| 種類       | 設置場所      | 期間                      | 時間<br>間隔 | 要素                         | 備考                   |
|----------|-----------|-------------------------|----------|----------------------------|----------------------|
| 気象計<br>① | 以久科<br>三井 | 2016年<br>3月25日<br>~5月2日 | 30<br>分  | 気温・湿度・気圧                   | 地上から5m・12m<br>の高さに設置 |
| 気象計<br>② | 前浜        |                         |          | 気温・湿度・気圧・<br>風向・風速・日射量・降水量 | 標高10mの<br>地点に設置      |

### 2-2 観測結果

図3は、上位蜃気楼発生が目視により確認できた日を含む3月11日から13日の2日間の以久科の気温の変化と気温差を示す。気温差は上部に設置した気象計の気温と下部で計測した値の差を表しており、気温差が+の場合は下部が上部より低いことを表す。図3において3月11日では朝6時から8時半にかけて最大7.9度、3月12日では朝6時から9時にかけて最大9.1度、下部が上部より低くなっていた。

### 2-3 考察

これらの日の気象衛星画像をすべて確認したところ、夜間に4時間以上斜里平野上空に雲がないことを確認したため、放射冷却が起こっていたと考えられる。これに従って放射冷却に伴って冬の上位蜃気楼が発生した可能性が考えられる。しかし課題が残る。それは蜃気楼の有無を判断するデータが目視観測しか無く発生の有無を完全に把握できていないこと、富山での上位蜃気楼<sup>1)</sup>では明らかにされている冷氣層の厚さが斜里町の上位蜃気楼では把握できていないこと、斜里平野に沿って冷氣層が流れているかを確認できる風のデータがないことである。そこで(1)蜃気楼の観測データを定量的なものにする、(2)冷氣層の厚さを把握する、(3)冬の上位蜃気楼発生時の風向・風速を把握する、の3つが必要と考えられた。このため、ドローンを用いた上位蜃気楼発生時の観測を計画した。

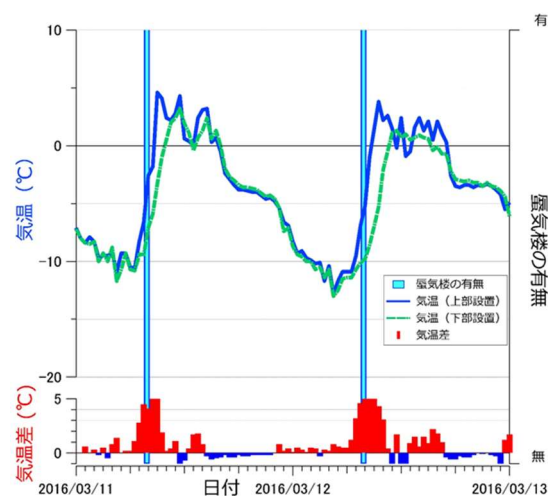


図3 冬の上位蜃気楼が発生した際の変化(2016/3/11-3/13)

### 3. 調査2 ドローンを用いた調査方法の開発

#### 3-1 使用機材と観測方法

前章の課題に取り組むために、冬の上位層気楼に焦点を絞ってドローンによる調査方法を開発し行った。冷気層の厚さ観測の結果について2事例を報告する。層気楼における気温の鉛直分布の調査では、木下ら<sup>1)</sup>がゴム製気球を用いた係留方式で行われたことがあるが、現場の使用許諾を得るのに労力を要し、また一度の計測に多くの時間と人員を必要とする。現在はドローン(PHANTOM4:DJI社(図4))を用いて簡易に気象要素を測定できるようになっており、温度計(LR5011:HIOKI)を吊り下げて行うことで簡便に気温の鉛直分布の調査を行うことができる。

低温下でのドローンの飛行はバッテリーが著しく消耗する。事前の試験で-14度の気温で最大12分飛行することが分かっていた。バッテリーと航空法の観点から最大高度を100mとした。高度100mまで上昇させ、20mずつ下降させる計画とした。計測高度は100m-80m-60m-40m-20m-10m-5mである。20m以下について、過去の層気楼の調査で温度の境界が10m-15mに存在した<sup>2)</sup>ため重点的に調査する必要があると判断したためである。各高度で温度計の時定数(20秒)を考慮し30秒間ホバリングを行っている。時定数を確認する実験を行ったところ、5秒であったため30秒間のホバリングで問題ないと判断した。測定間隔は1秒である。今回使用したドローンのペイロードは約400gであるが吊り下げた温度計と治具の合計重量が240gであった。揺れ防止のため治具には長さ15cmのばねを4本使用している。また低温によるバッテリーの消耗を可能な限り抑えるために飛行直前までバッテリーを保温した。調査期間は2月16日から2月22までの7日間で、悪天の2月19日を除く6日間飛行させることができた。そのうち2月17日と2月20日については上位層気楼が発生した。飛行場所は以久科原生花園付近の砂浜である。この期間は現地でドローンの調査と同時に天気と層気楼の観察を目視で行っている。

#### 3-2 結果

図5に2月17日を除いた以久科原生花園付近での砂浜での観測結果を示す。破線は上位層気楼が発生していなかった際の記録、実線が発生した際の記録である。十分に周囲の温度に順応させたデータが必要であると考えたため、各高度で30秒間ホバリングして得られた気温のデータの最後の値をプロットしている。この図から上位層気楼発生時には高度40m~60mに温度の境界があり、地上との気温差が2月16日では4.5度、2月20日では6.2度あることが分かった。



図4 温度計を吊り下げたドローン

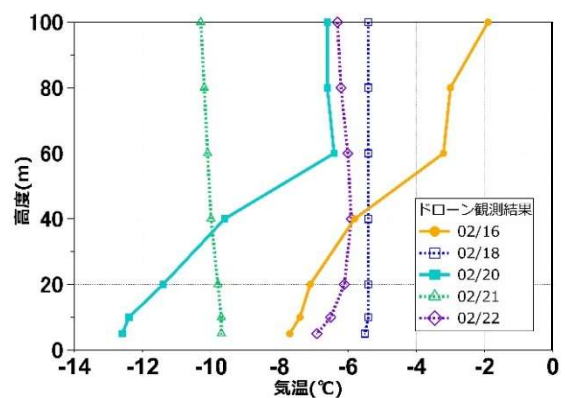


図5 気温の鉛直分布



### 3-3 考察

先行研究<sup>5)</sup>や実験結果から、冬の上位蟹気楼は陸地で生じた放射冷却による冷気が斜里平野の傾斜に沿って海上へ流れ、元々ある空気塊の下に放射冷却による冷気が潜り込むことで相対的に上暖下冷の空気層が生じると考えた(図 6)．冬の上位蟹気楼の発生状況について、上位蟹気楼が発生した時と発生しなかった時では温度分布に大きな差が見られた．上位蟹気楼が発生した際、高度 40m~60m にある温度の境界と比較し 4.5 度、6.2 度地上が冷えていることが見て取れる．現地での目視観測では天気は快晴であった．よって放射冷却による冷気と上位蟹気楼の発生には強い関係がある可能性がある．そして温度の境界が高度 40m-60m にある可能性が考えられる．これは冬の上位蟹気楼発生時の大気の層構造を初めて捉えることに初めて成功した実験であることが言える．しかしこの層構造がどのようにして形成されるのかを今後明らかにしていく必要があると考える．また今回の調査では 20m 間隔での気温計測であったが、一度の飛行高度を限定することでさらに細かい 10m や 5m 間隔での計測を行うことができ、詳細な温度の境界の把握が可能になると考える．そして同じ日に時間を変えて複数回測定し、斜里平野に沿って流れる冷気層の動きを捉えることが必要である．

今後の課題として、気温センサーをドローンの方々に吊り下げ形式で配置しているが、ドローンのプロペラによるダウンウォッシュが気温測定に影響を与えていないかを確認する必要がある．調査の際に現場で赤外カメラを用いて影響がないことは確認しているが、ダウンウォッシュの影響を受けない場所に温度計を配置し比較する計画である．また、太陽の高度が低い早朝の時間帯に調査を実施したため日射の影響が少ないと判断し、気温センサーにカバー等に取り付けていないが、日の出の日射が温度計にどの程度影響を及ぼすかを確認する必要がある．

今後の課題として、気温センサーをドローンの方々に吊り下げ形式で配置しているが、ドローンのプロペラによるダウンウォッシュが気温測定に影響を与えていないかを確認する必要がある．調査の際に現場で赤外カメラを用いて影響がないことは確認しているが、ダウンウォッシュの影響を受けない場所に温度計を配置し比較する計画である．また、太陽の高度が低い早朝の時間帯に調査を実施したため日射の影響が少ないと判断し、気温センサーにカバー等に取り付けていないが、日の出の日射が温度計にどの程度影響を及ぼすかを確認する必要がある．

#### 【参考文献】

- 1) 木下正博，市瀬和義，2002：富山湾における上位蟹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，**49**，57-66．
- 2) 本庄薫，市瀬和義，伴禎，松井一幸，房英夫，林芳和，2003：琵琶湖における蟹気楼の発生理由Ⅲ ～暖気の形成過程～，*Meteorological Society of Japan*，102．
- 3) 柴田清孝，2013：安定成層大気による多像の蟹気楼：レイ・トレーシングと温度構造推定の可能性，天気，**60**，709-722．
- 4) 大鐘卓哉，加藤宝積，佐藤トモ子，2013：流水の蟹気楼の観察と「幻氷・おぼけ氷」に関する考察，北海道の雪氷，**32**，26-29．
- 5) 佐藤トモ子，2015：斜里町における上位蟹気楼の記録，知床博物館研究報告 *Bulletin of the Shiretoko Museum*，**37**，43-52．
- 6) 国土交通省国土地理院ホームページ：地理院地図，  
<http://maps.gsi.go.jp/#11/43.863990/144.672089/&base=std&ls=std%7Crelief&blend=1&disp=11&lcd=relief&vs=c1j010u0t0z0r0f0>

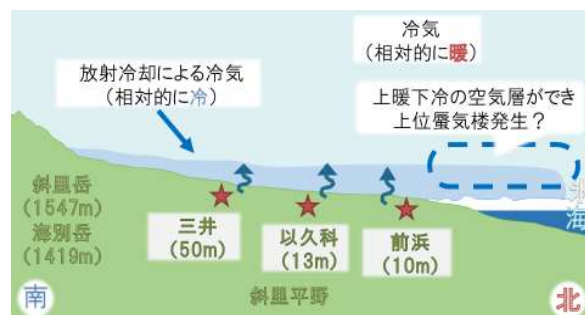


図 6 斜里沖で冬の上位蟹気楼を発生させる冷気移流の想定図