

富山湾の蜃気楼における発生理由の解明

富山大学教育学部 市瀬 和義

1 はじめに

(1) これまでの研究経過

① 雪解け水説

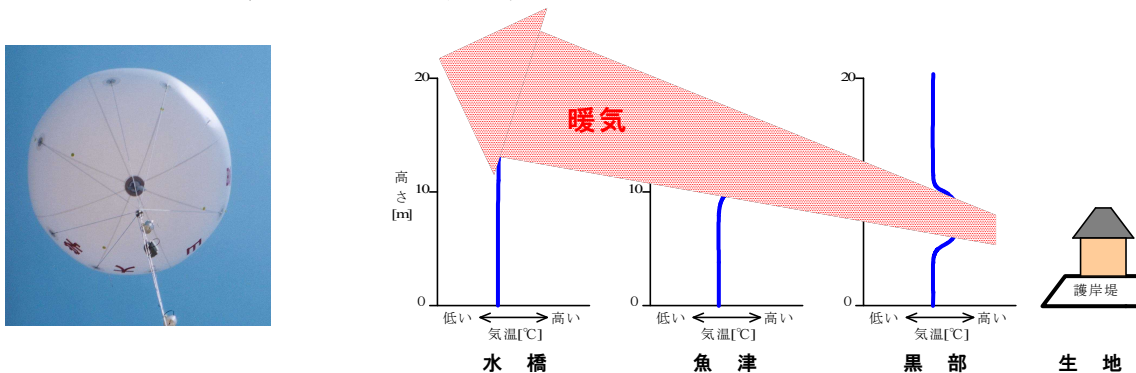
富山湾で観測される蜃気楼の発生理由として、これまでに、立山連峰の冷たい雪解け水が富山湾の海水を冷やすという、いわゆる「雪解け水」説が知られてきた。しかしながら、この説は直接海上気温を調べた結果ではなく、以前より疑問の声があげられていた。

② 暖気移流説

そこで我々は1999年の蜃気楼発生日とそうでない日にゴム製の風船をあげ、実際に海面上の気温の鉛直分布を観測した¹⁾。その結果、蜃気楼発生時には特に冷氣層が海面付近に形成されるわけではなく、暖かい大気が海上に流入して発生する現象であることを見出し、新しく「暖気移流説」を発表した²⁾。

③ 海上気温の鉛直分布－暖気の流れ－

2001年には、魚津市より委託研究費をいただいて、富山湾の海上3ヶ所（黒部、魚津、水橋）にヘリウムをつめたバルーン（図1）をあげ、気温の鉛直分布を実際に観測した。その結果、図1に示されるように黒部の海上に移流した暖気は生地から富山方面に向かって次第に混合され、上昇しながら広がっていくことが明らかとなった³⁾。



【図1】バルーンと暖気の流れ予想図

(2) 研究の目的（暖気の形成過程）

昨年までの研究で、海上に暖気に移流していることが分かった。しかし、それがどのように形成されてきたかは不明であった。そこで今年度は、

① 田中から水橋までの海岸付近で、気温の鉛直分布及び風向・風速を観測する。

② 田中から吹いてきた風が陸地を通してどのように暖められていくか、その形成過程を調べる。

ことを目的とした。

2 研究方法

(1) 観測の条件

観測地点を決める際に注意したのは以下2点である。

①気温、風向、風速は地物の影響を受けやすいため、観測は、可能な限り海岸に近いところで行う。

②気温、風向、風速の鉛直分布を観測するためには、高さを変えて機器を設置する必要がある。そのための簡便な方法は支柱である。しかし、支柱を新たに設置するには、手間とお金がかかる。そこで、海岸付近にある以下の支柱を利用させていただいた。

a) 国土交通省：風向・風速観測装置用及び監視カメラ用の柱

b) 北陸電力株式会社：電柱

(2) 観測地点と内容

図 2 に観測地点を、表 1 に観測した内容について示す。



【図 2】観測地点（●：今年度機器設置 ○：既存のものを利用）

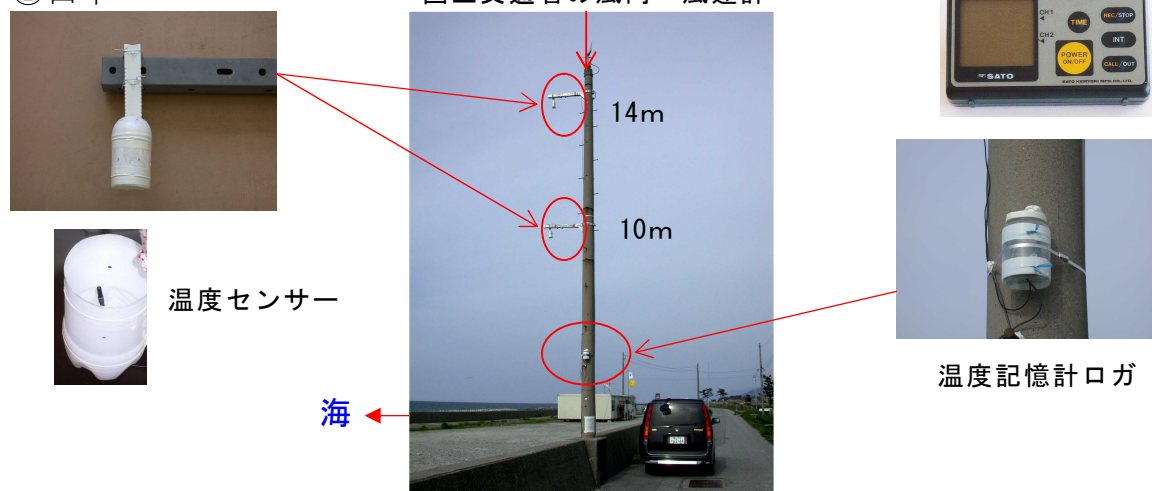
【表 1】観測内容（◎：観測、○：既存の観測装置よりデータ提供、—：データなし）

地点	気温（高さは海拔）	設置柱、場所	風速	風向
田中	◎ 10, 14 m	国土交通省観測用電柱	○	○
吉田科学館	○ 10 m	敷地内	○	○
生地鼻	◎ 10, 15 m	国土交通省監視カメラ柱	—	—
生地	◎ 10, 13 m	北陸電力（株）電柱	◎	◎
立野	◎ 10, 14 m	国土交通省監視カメラ柱	—	—
黒部バルーン	◎ 0, 3, 7, 11, 15, 19 m	定置網「鷹野」ブイ	—	—
石田フィッシャリーナ	◎ 0, 1.5, 3, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23m	自作支柱	◎	◎
石田	—	国土交通省	○	○
魚津	◎ 3, 4 m	自作支柱	—	—
埋没林博物館	○ 5, 25 m	2000 年に設置済	○	○
滑川高校	○ 23.6 m	屋上（今年度より設置）	○	○
水橋	—	国土交通省	○	○

(3) 観測の方法

各観測地点での機器設置方法は次の通りである。

① 田中



【図3】田中：風向・風速用観測柱へのとりつけ

図3に示すように、国土交通省の風向・風速観測柱は、海岸に面した道路に立っており、地物の影響をほとんど受けない。

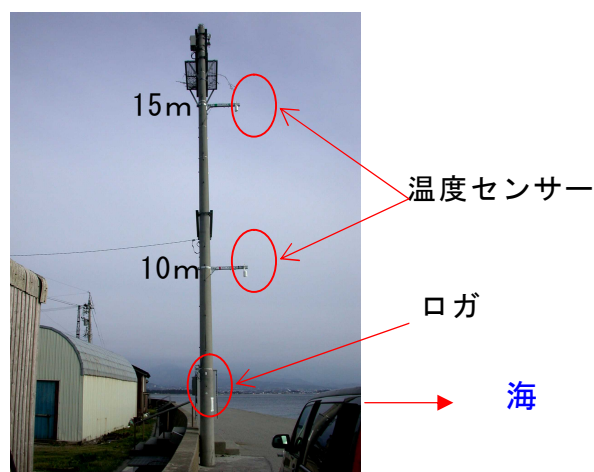
そこでここに（株）佐藤計量器製作所のデータロガ（以下単にロガとよぶ）SK-L200T をとりつけた。大きさは幅 12cm で高さ 8.4cm × 厚さ 2.8cm、重さは電池を入れて約 220g である。ロガは風雨防止用のプラスチック容器に入れて固定した。これにセンサーコードを通じて、温度センサーを 2 個、海拔（以下高さについては全て海拔で表記する）10m と 14m に、電柱取り付け用金具で固定した。温度センサーは直射日光防止のため、にペットボトルを白く塗り、その中に入れた。

田中での取り付け及び撤収工事は、以下、生地鼻、生地、立野も含めて、北陸電力株式会社魚津支社に大変お世話になった。

ロガからパソコンへのデータの保存と電池の交換は約 1 ～ 2 週間でいった。

② 生地鼻

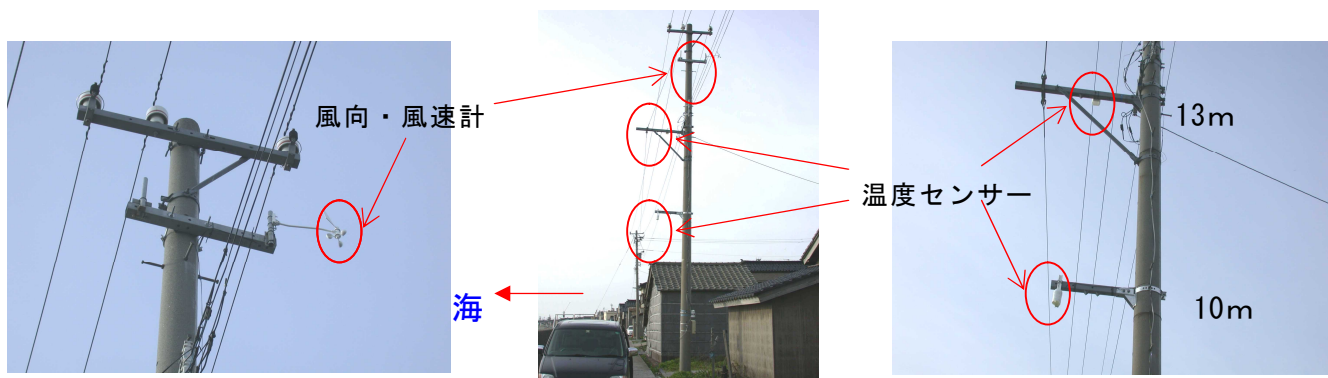
図4に示すように、国土交通省の生地鼻にある監視カメラ用の柱は海岸付近に立っており、すぐ下が海で地物の影響をあまり受けない。そこで、ロガと温度センサーを田中と同様な方法で 10、15m に設置した。



【図4】生地鼻：監視カメラ柱

③ 生地

生地では海岸付近にある北陸電力株式会社の電柱をお借りして、風向・風速計（ウェザーステーション、バッテリー対応）と温度センサー（10、13m）を設置した。図5にその様子を示す。



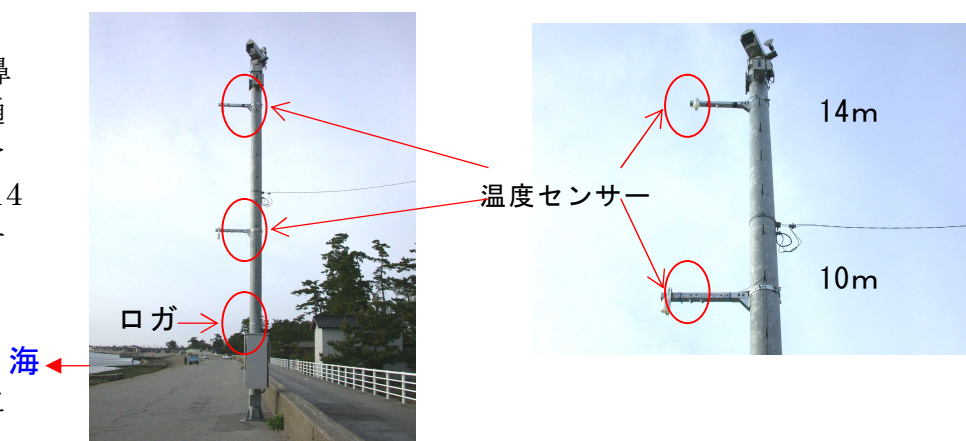
【図5】生地：北陸電力電柱

④立野

立野は、生地鼻と同様に国土交通省の監視カメラをおかりして10、14mに温度センサーを設置した。

その様子を図6に示す。

ここも海岸付近に位置する。

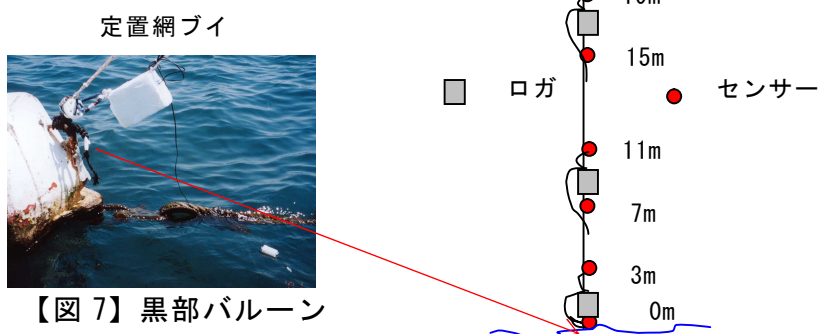


【図6】立野：国土交通省監視カメラ

⑤黒部バルーン

立野より約1km 沖合にある定置網「鷹野」のブイに、昨年と同様の方法でログ3台を設置。温度センサーは0、3、7、11、15、19mの高さにとりつけた。観測は図7に示すように昨年度と同様に行った。

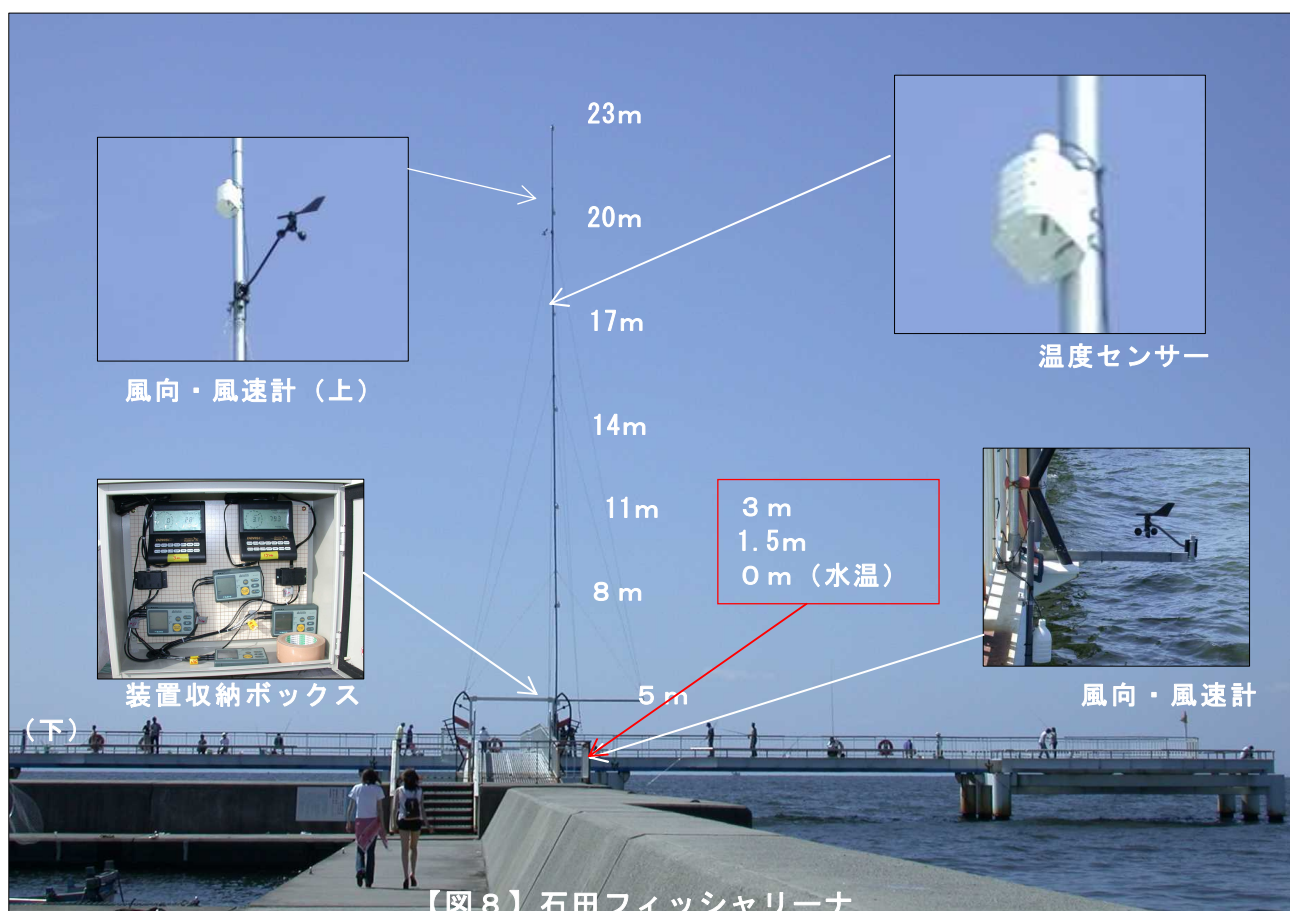
取付け作業は第八黒瀬丸船長の山田晃司氏及び第三新栄丸船長の浅野重吉氏と仲間の方々にお世話になった。



【図7】黒部バルーン

⑥石田フィッシャリーナ

石田フィッシャリーナはこれまでの場所のように電柱などの利用ができなかったので（株）堀江商会に依頼し、つり桟橋に高さ23mのポールを立てた。設置は当初4月中旬に予定していたが黒部市の事情で延び、5/1～2に行った。ここに風向・風速計（ウエザーモニターⅡ、バッテリー対応）を3m、19mの2ヶ所に設置した。温度センサーは0、1.5、3、5、8、11、14、17、20、23mの10ヶ所に取り付け、データはログで回収した。図8にその様子を示す。



【図8】石田フィッシャリーナ

⑦魚津



魚津の海岸付近には、図9のようなログと温度センサーをとりつけた。高さは海拔3.4mである。

【図9】魚津海岸

(4) 作業

黒部バルーン、石田フィッシャリーナの支柱、国土交通省及び北陸電力（株）の電柱関係の作業は表2の通りである。

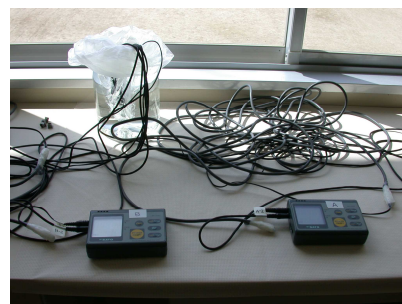
【表2】作業一覧

内容	月日	作業内容	船名と船長/業者	係留期間	備考
黒部バルーン	4/30	充填・取付	第八黒瀬丸、山田晃司船長	4/30～5/1	
	5/1	回収	第三新栄丸、浅野重吉船長		5/1 落下
	5/7	充填・取付	〃	5/7～5/26	
	5/21	回収・充填・取付	〃		5/26 落下
	5/28	充填・取付	〃	5/28～6/13	
	6/7	回収・充填・取付	〃		6/7 落下
	6/13	回収	〃		
石田フィッシャリーナ	5/1～2	ポール設置	(株)堀江商会	設置 5/1～7/17	
	7/17	撤収			
電柱など	4/25	風向・風速計 温度センサー取付	北陸電力（株）魚津支社 植田要助課長ら	国土交通省：田中、生地鼻、立野、北陸電力：生地 北陸電力：生地	
	7/29	撤収			

(5) センサーコードの補正

通常、佐藤計量器製作所のデータログ SK-L200T のセンサーコードは最長で 5 m のものがある。

しかし今回の場合、それを上回る 10m 以上のコード長が必要であった。そのため、測定温度の誤差が生ずることが予想された。そこで、図 10 に示すように、全てのセンサーを同じ温度の水につけ、水温の変化を観測し、温度補正を行った。



【図 10】センサーの温度補正

3 観測結果

(1) 蜃気楼観測状況

2002 年は例年に比べ蜃気楼があまり発生しない年であった。石須らによる埋没林博物館での観測報告によれば⁴⁾、春型の上位蜃気楼は以下に示すようにわずかに 7 回しか観測されていない。また魚津蜃気楼研究会の澤崎寛会長によって夜の蜃気楼が初めて観測された。

表 3 にその状況を示す。

【表 3】2002 年の蜃気楼観測記録

月日	時 間	ランク	備考
3/26	13 : 00 ~ 17 : 00	C	
4/15	11 : 30 ~ 13 : 00	C ⁻	
4/22	10 : 15 ~ 19 : 30	C/B	遅くまで可能
4/29	14 : 00 ~ 18 : 30	C	
5/3	9 : 20 ~ 15 : 00	D	
6/3	14 : 45 ~ 20 : 00	E/C	夜の蜃気楼観測
6/10	15 : 30 ~ 16 : 30	C	

<ランク> B : 肉眼ではつきり識別でき、長時間にわたるが方向が限られる。

C : 肉眼で識別できるが短時間。または双眼鏡で識別でき、長時間。

D : 双眼鏡で識別できるが、短時間。

E : 双眼鏡でも識別に経験を要する。

本報告では設置した装置のデータが全てそろっている 6/3 を中心に解析する。また比較のため、蜃気楼の出ない日として、気象条件がよく似ている前日を選んだ。

(2) 6/2 (蜃気楼の発生しない日) と 6/3 (蜃気楼発生日)

観測結果を図 11 に示す。

① 田中から立野における風と気温

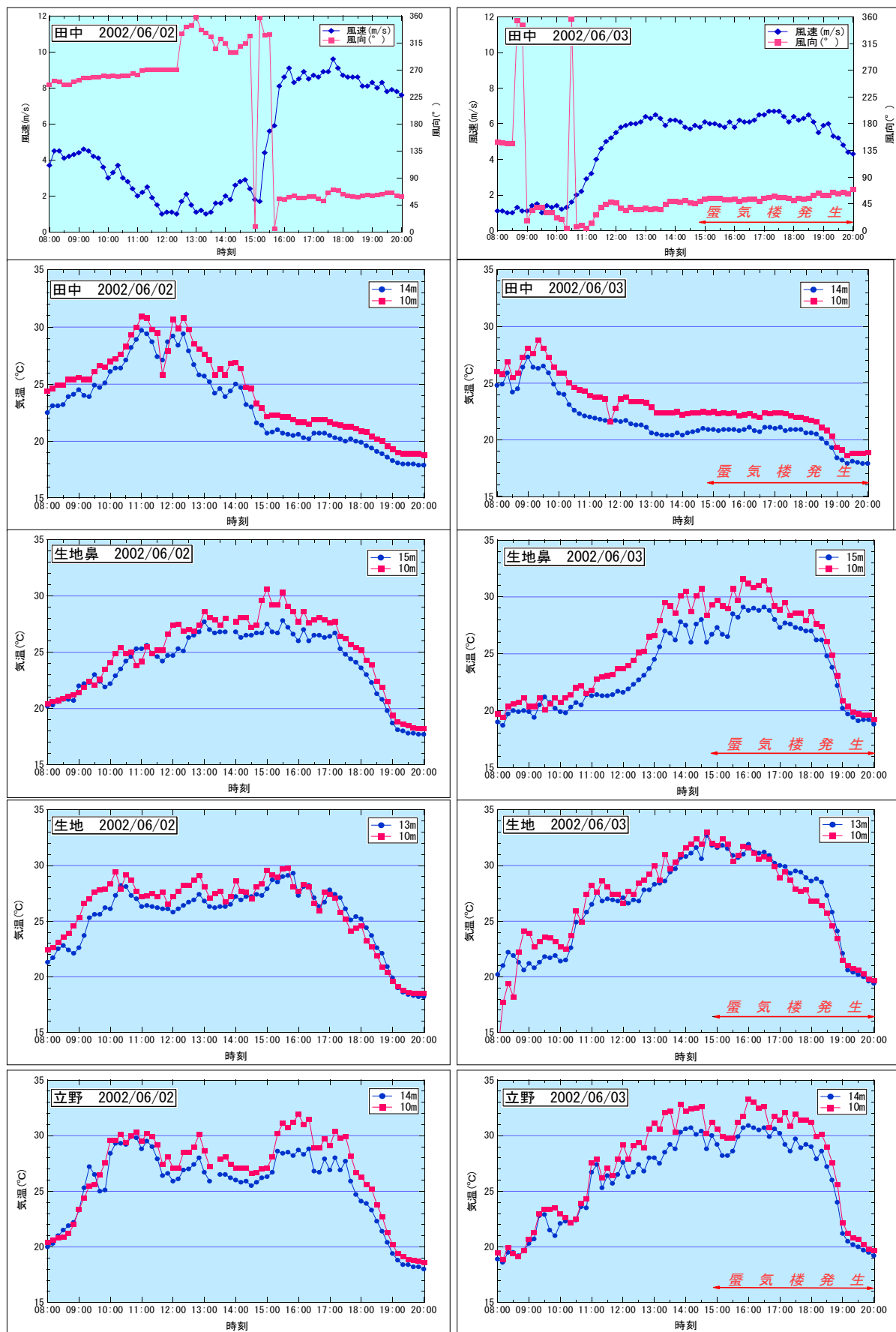
・ 10m と 13~15m の高さによる気温の違い

まず、10m と、13~15m での気温を比較する。どの地点も夜間は高さによる差はない。しかし、日中は、田中、生地鼻、立野では 10m の方が 13~15m に比べ 2℃ ほど高い。この理由は、コンクリート等の照り返しと、日射による地熱の影響によるものと考えられる。

一方、生地では、蜃気楼の出ていない 6/2 は日中は、高さによって気温のずれが少しあるものの、16:00 付近からは 10m と 13m の気温が一致している。しかし 6/3 は、日中、かなりの時間帯で気温が一致していた。これは他の観測地点では見られない現象である。この主な原因は風向による。すなわち 6/2 は 16:00 頃までは日中は、ほぼ海からの西の風を受けている。その後 16:00 ころからは東北東の陸地から

6月2日（蜃気楼の発生しない日）

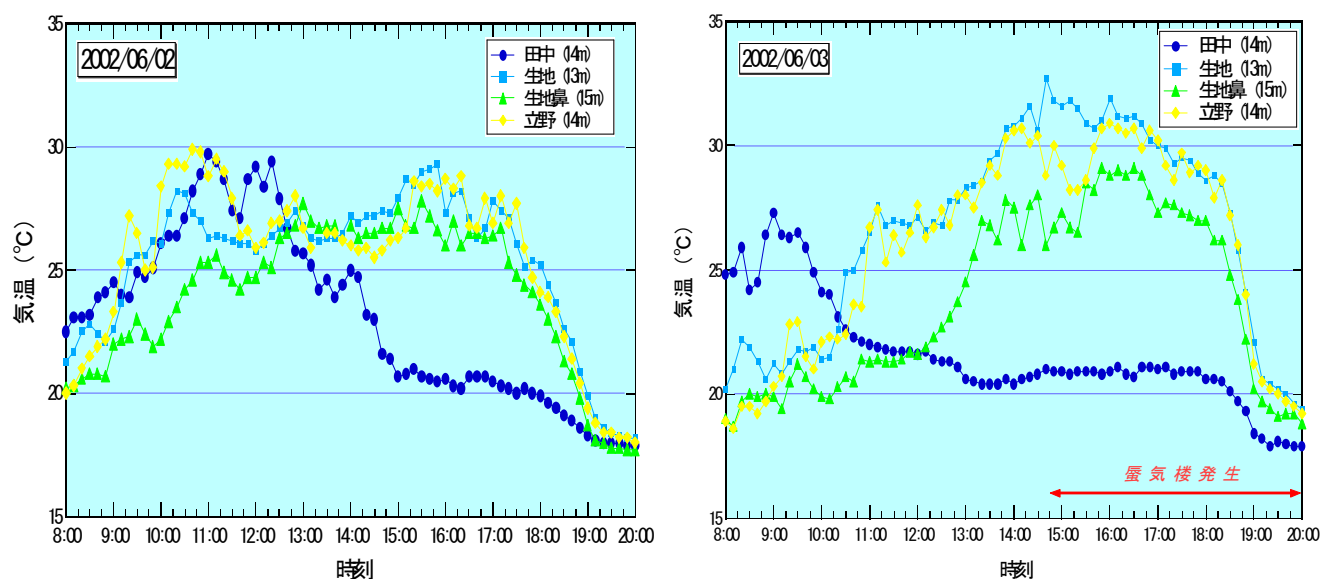
6月3日（蜃気楼の発生した日）



【図 11】 2002. 6. 2 と 6. 3 の田中～立野の風と気温

の風を受けている。そのため地熱の影響で一致すると考えられる。蜃気楼発生時にはどの地点も特徴的なことは観察されなかった。

以上の考察から、地物の影響をあまり受けてないと思われる各観測地点での高い方の気温（13～15m）を重ねて図 12 に示す。



【図 12】 2002. 6. 2 と 6. 3 の気温上昇

・ 6/2（蜃気楼の出ない日）

まず田中の風に注目する。蜃気楼の発生しない 6/2 の場合、田中の風は 15：00 までは、西から北西の風であり風速は 2～4 m/s とあまり強くなく、気温の日変化は晴天日の様相を示す。しかし、16：00 ころから北東の風となり風速は 8 m/s とかなり強くなる。この連続した風の影響で 16:00 過ぎから 18:00 ころにかけて、田中の気温は 21℃に急激に下がり、晴天日の日変化とは異なる変化を示す。この風は長時間吹いており、田中から生地に向けて通過し、地熱の影響を受け、生地鼻、生地、立野の温度上昇の原因となる。16：00～17：00 の日没後は地熱の影響が少なくなり、生地鼻、生地、立野の気温は急激に下がり、田中と同一の気温となる。

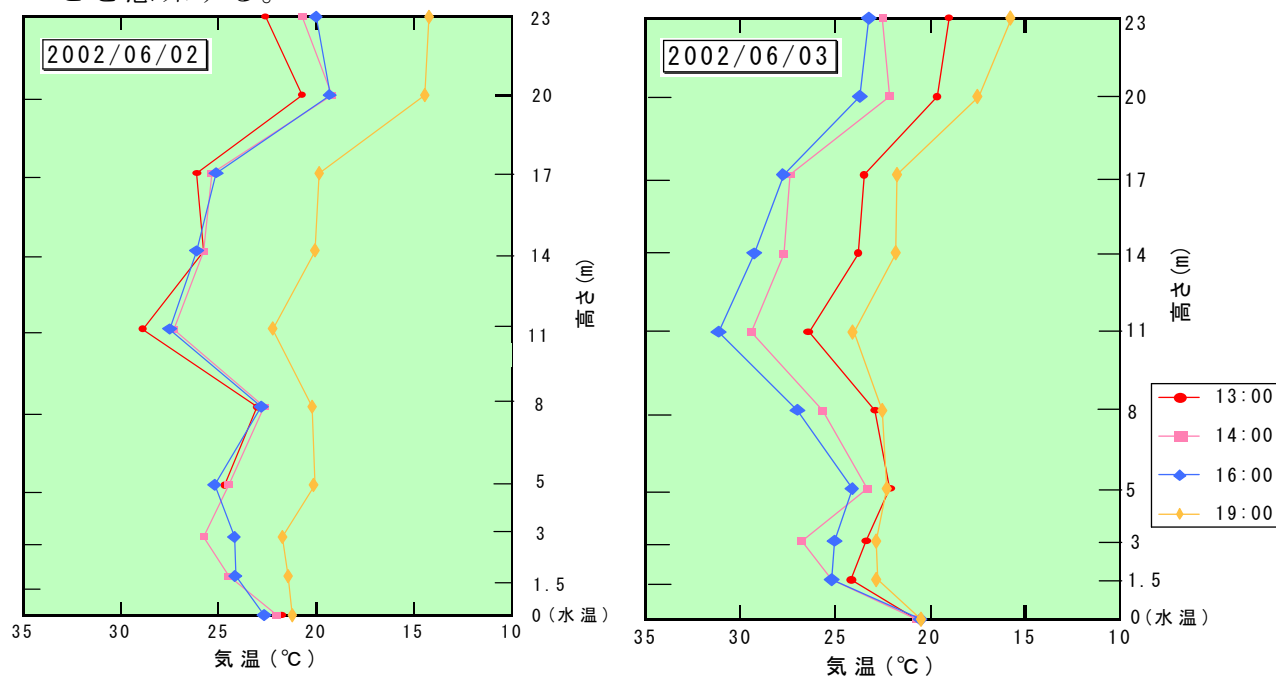
・ 6/3（蜃気楼の出た日）

一方、6/3 は田中では約 6 m/s の北東の風が 12：00～19：00 まで安定して吹いている。この時間帯の気温は約 21℃で、水温（石田フィッシャリーナで 21℃）に近い。日本海から田中に吹くこの風は富山湾東部沿岸にかけて吹き、安定した気相を形成していると考えられる。さらに田中に吹く風は生地鼻、生地、立野にかけて吹き、30℃以上になり、田中の気温に比べると約 10℃の温度上昇となる。これは、6/2 に比べ 6/3 は早い時間（12：00）から田中から生地にかけて一定の風が吹くことによって、地熱の影響を多く受けた大気が、陸上を通過するためであり、そこに日射の影響が加わって、大きな温度上昇が起こるからである。

②石田フィッシャリーナの気温の鉛直分布

石田フィッシャリーナでの 6/2 と 6/3 の気温の鉛直分布を、特に蜃気楼発生時の時間帯（6/3 の 14：45～20：00）を中心に図 15 に示す。6/2 と 6/3 は、いずれも 11m 付近に暖気の移流が認められる。しかし、13：00～16：00 ごろの時間帯での気温変化について見てみると、6/2 ではほぼ同じであるのに対し、6/3 は約 5℃以上の際立った温度上昇があることが分かる。一方、下層の 1.5～5m では 22～25℃であり、上層に比べ時間による変化は小さく、水温（約 21℃）の変化はほとんどない。このことは下層の空気は暖気移流の影響をほとんど受けていない空気である

ことを意味する。

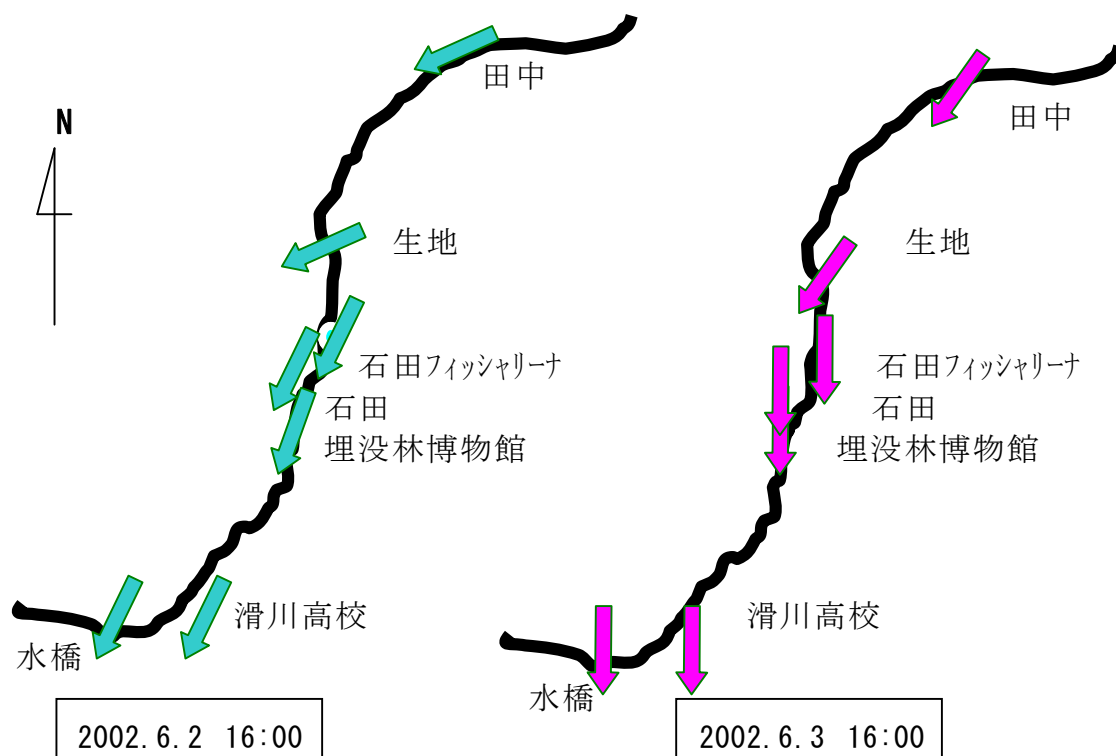


【図 13】 2002. 6. 2 と 6. 3 の石田フィッシャリーナの気温の鉛直分布

③富山湾東部沿岸における風向

富山湾東部沿岸における 6/2 と 6/3 の 16 : 00 における風向を図 14 に示す。6/3 の蜃気楼発生時には田中・生地では北東の風、それ以外の場所では全てが北の風となっていることが分かる。

一方 6/2 の風向は 6/3 とよく似ている。しかし前述したように 6/2 は顕著な温度上昇がないため蜃気楼は発生していない。



【図 14】 2002. 6. 2 と 6. 3 の風

4 考察

(1) 陸地の温度上昇がきわだっていないと蜃気楼は出ない

図 14 で示したように、蜃気楼は北東よりの風で出る。このことは先人たちの観測結果と一致する。

しかし、発生前から安定した風が継続的に吹いていなければならない。まず、富山湾東部沿岸に海からの安定した風が吹く。この風が田中から入り込み、陸地を通ってくることで、生地の大気が暖められ、気温はかなり上昇する。

6/2 がそうであるように、たとえ風向が出やすくても、地熱の温度上昇が認められないと蜃気楼は出ない。例えば魚津だけで早い時間から北の風が吹いていたとしても、富山湾東部沿岸一帯に暖気を形成する気層がなければ出ない。

逆にもしそういった空気の流れがあれば蜃気楼がぽっと出ると考えられる。

(2) 冷氣層は陸地を通過しない

図 13 に示されるように、石田フィッシャリーナでは下層における気温の時間による顕著な変化は見られない。このことから冷氣層は陸地を通過しない空気が持続して吹いていることが予想される。

この冷氣層の気温は田中で観測される気温に近い。つまり、海上にある空気がそのまま冷氣層を形成していると考えられる。またこの冷氣層は、参考文献の論文 2 に示したように海面水温によって冷却されたものとは考えにくい。

ここで問題になるのは石田フィッシャリーナで上層も下層も北から北東にかけて $2 \sim 4 \text{ m/s}$ の風が吹いている事実である。蜃気楼が長時間持続するには陸上を通過した空気と、陸上を通過しない空気が同時に吹く必要があるといえる。

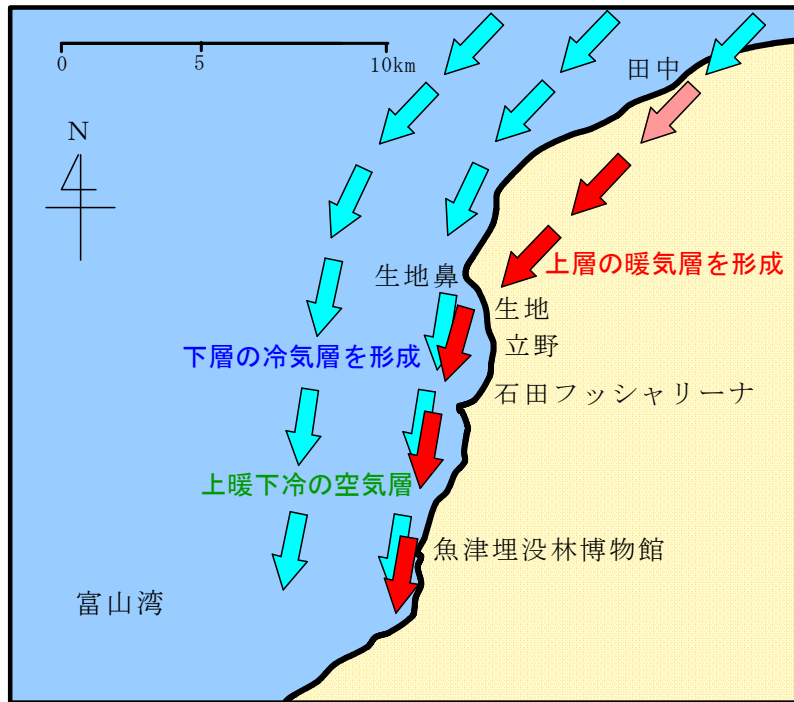
(3) モデルの提案

以上の結果から我々はこれまでに蓄積してきたデータをふまえ、以下のモデルを考えた。

< 蜃気楼が発生する過程 >

- ・蜃気楼の発生日は、気圧傾度が緩やかで風が弱く海風が卓越している。また、風向は田中では北東よりであるが、富山湾東部沿岸ではその地形的な特徴から風は陸地側に力を受け、北よりに進行方向を変える。
- ・海風はその特徴から沖合、数 10km 以上離れた日本海より吹く。そのため、海面水温の影響を受け、陸地に比べ日中の温度変化は小さく、水温に近い状態で緩やかに推移する。また、鉛直方向には、ほぼ等温状態となっている。
- ・田中では、安定した北東よりの海風が早い時間から吹いており、その空気は生地方向にかけて陸上を通過するため、日射による地熱の影響を受け、気温が大きく上昇する。
- ・暖気となった空気は生地から再び海上へと移流する。その際、暖気を形成している空気層の高さ、海面の摩擦抵抗による上部下部の風速の違い、空気密度の相異等により、暖気は陸地を通過しない海上の空気上部へと移流する。
- ・上暖下冷の構造を持った空気層が形成され、海岸を沿うように吹く。
- ・富山湾東部沿岸地域の海上に上暖下冷の空気層が維持され、その境界層の密度変化により光が屈折し蜃気楼が発生する。

図 15 に上暖下冷の空気層が形成される様子を示す。



【図 15】上暖下冷の空気層が形成されるモデル
(矢印は風向の変化を示す)

5 まとめ

(1) 暖気の形成過程

- ① 田中を通ってきた風は蜃気楼発生日の方が出ない日に比べ午後の温度上昇が大きい。
- ② 前日も天気がよく地面への蓄熱があると予想される。
- ③ 陸地で暖まった空気は海上の上層（8～14m）に流れ込む。
- ④ 連続した上層への暖気が移流するとともに下層には異なる風向の水温に近い空気が流れ込み、このことによって蜃気楼が持続されることが示唆された。

(2) 風向の変化

- ① 蜃気楼発生日は北よりの風となる。この傾向は昨年度の解析とほぼ似ている。
- 以上の結果から、今年度は暖気移流の形成過程とその維持について明らかとなり、蜃気楼の発生理由のかなりな部分が解明された。

6 今後の課題

(1) さらなるデータの蓄積

今年は蜃気楼があまり出ない年であり、全体にわたって観測データを増やしたい。とりわけ暖気と冷気が持続するときの様子について石田フィッシャリーナでは、今年と同じようにポールを立てて観測をしたい。

(2) 熱収支の計算

地形的な特徴もふまえた熱収支の計算をし、実際と比較検討したい。

(3) 蜃気楼発生モデルの検証

これまでの観測データからは、暖気と冷気の形成過程がほぼ解明できた。今後は生地付近の海上で上暖下冷の空気層が形成、維持されることを、観測や数値計算から詳細に検証したい。

7 謝辞

まず初めに、昨年に引き続き、魚津市と魚津市教育委員会にこの研究をさせていただいたことを、ここに深く感謝する。海上気温だけでなく海岸縁の気温の鉛直分布を観測し、暖気の形成過程について詳細なデータを得ることができ、我々の研究は大きく前進した。

バルーンを係留し、船を出して装置を取り付け、回収するにあたっては、第八黒瀬丸船長の山田晃司氏と、第三新栄丸船長で定置網「鷹野」の網元の浅野重吉氏に大変お世話になった。とりわけ浅野氏は常にバルーンに気を配り、その状態を知らせてくださった。今回の研究はこの方たちの協力がなくしては何もできなかったといえる。以下、お礼の意味をこめてお世話になった方々のお名前と所属をあげさせていただきます、心からお礼申し上げる。

バルーンへのヘリウムの充填および修理については、富山県アドセンター企画(株)の竹田景勝氏に全てお世話になった。お忙しい中、船を出すたびごとに来ていただいた。バルーンに関するノウハウを持つ竹田氏の技術がなければバルーンを係留できなかったといえる。

風のデータの提供については、国土交通省北陸地方整備局の黒部および富山工事事務所の調査課の皆さんにお世話になった。おかげで蜃気楼発生理由の有力な手がかりがつかめた。特に、黒部工事事務所では、観測装置柱として監視カメラや風向・風速用の柱の使用を快諾して下さい、研究はスムーズに進んだ。

柱への装置のとりつけには、北陸電力(株)魚津支社の松岡幸雄支社長のご好意と、植田要助サービス課長の技術にお世話になった。高いところへの装置のとりつけを大変ていねいに能率よくやっていただいた。

(株)堀江商会の皆さんには石田フィッシャリーナへのポールの設置をしていただいた。強風に悩まされ 20m の高いポールを立てるのに苦労し 2 日かかったが、その苦労は大変なものであった。

この実験全体を通し、共同研究者の木下正博氏(滑川高等学校教諭)には、計画、装置づくり、取付・回収、さらには解析まで全面的に協力していただいた。とりわけデータの回収と電池交換は、観測地点が広範囲に点在しており、時間がかかるものであった。木下氏の蜃気楼の発生理由を解明しようとする意欲と協力がなければ、この研究ができなかったといっても過言ではない。

富山大学教育学部の矢木宏実さんは卒業論文で暖気の形成過程に取り組んでいる。実際に船に乗りバルーン取付・回収を行い、データ処理を一緒に行ってきた。気温や風のデータ解析の一部は彼女によるものである。

総じて本研究は、ほんとうにたくさんの方々にお世話になった。

ここに重ねてお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 木下正博、富山湾における蜃気楼の研究とその教材化、平成 12 年度富山大学大学院教育学研究科修士論文、(2001)。
- 2) 木下正博、市瀬和義、富山湾における上位蜃気楼の発生理由—気温の鉛直分布が示す新たな事実—、日本気象学会誌「天気」、Vol. 49, No. 1 (2002) 57-66。
- 3) 市瀬和義、富山湾の蜃気楼における発生理由の解明、平成 13 年度魚津市委託研究報告書、(2001) 1-18。
- 4) 魚津埋没林博物館ホームページ、<http://www.city.uzo.toyama.jp/nekkolnd/>