

第 13 回気象文化大賞

写真からわかる大気の温度分布の研究
—infinity～mirage を用いた芸術と気象を融合した地域活動—

成果報告書

2024 年 9 月

黒部市美術館・魚津埋没林博物館<<infinity～mirage>>実行委員会
佐藤真樹

目次

| | | |
|-------|-------------------|-----|
| 1. | 研究・活動の目的 | |
| 1. 1. | 蜃気楼とは | 3p |
| 1. 2. | インフィニティ～ミラージュとは | 5p |
| 1. 3. | 研究目的 | 6p |
| 2. | 研究実施体制と実施スケジュール | 7p |
| 3. | データと解析方法 | |
| 3. 1. | ライブカメラ観測 | 8p |
| 3. 2. | 気象観測 | 8p |
| 3. 3. | 光路計算 | 9p |
| 4. | 観測結果 | |
| 4. 1. | ライブカメラによる下位蜃気楼の観察 | 10p |
| 4. 2. | ライブカメラによる上位蜃気楼の観察 | 12p |
| 4. 3. | 蜃気楼の像の日変化と温度構造 | 13p |
| 5. | 蜃気楼の情報発信 | 15p |
| 6. | ワークショップ・観光活用の成果 | 15p |
| 7. | 謝辞 | 16p |
| 8. | 参考文献 | 16p |

1. 研究・活動の目的

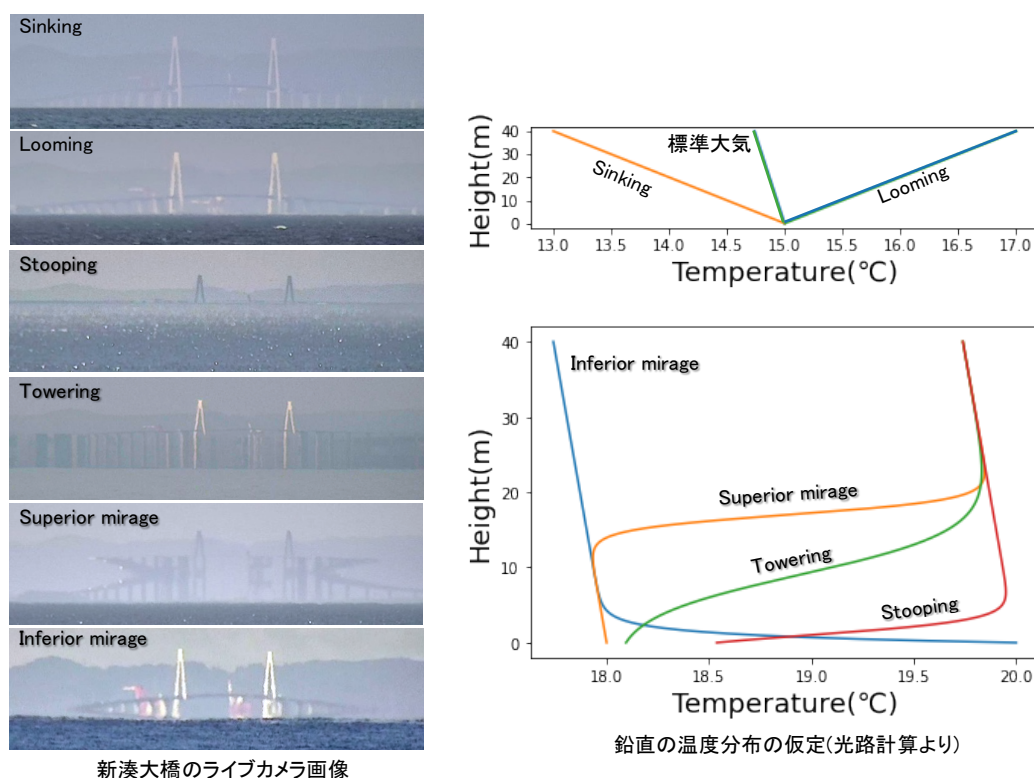
1. 1. 蜃気楼とは

蜃気楼は、特異な密度差を持つ気層が存在することで、光学的な屈折現象が視認される現象である(二宮, 2013)。蜃気楼は、上に反転した像が見える上位蜃気楼と、下に反転した像が見える下位蜃気楼、側方に反転した像が見える側方蜃気楼の3つに大別される。特に日本では、上に反転した像が見える現象と、像が上に伸びて見える現象を合わせて上位蜃気楼と呼んできた(日本蜃気楼協議会, 2016)。

一方で、アメリカ気象学会のオンラインの気象用語集 AMS Glossary では、像の数によって2つのグループに分けさらに細分している(表 1.1, 図 1.1)。この分類によると、日本で上位蜃気楼と呼んできたのは、Superior mirage と Towering のことである。なお複合的要因で見えるとされる Fata morgana(ファタモルガーナ)と、壁面以外の自由大気中では見られないとされる Lateral mirage(側方蜃気楼)は表 1.1 から除いた。

表 1.1 像の数と蜃気楼の種類(AMS Glossary と A.Young Web サイトより)

| 像の数 | 英名 | 温度分布 | 温度変化 |
|-----|-----------------|---------------|----------------|
| 1 像 | Sinking | 上層が冷たく、下層が暖かい | 最下層から線形温度下降 |
| | Looming | | 最下層から線形温度下降 |
| | Stooping | 上層が暖かく、下層が冷たい | 最下層から対数的温度上昇 |
| | Towering | | 最下層からなだらかに温度上昇 |
| 複数像 | Superior mirage | 上層が暖かく、下層が冷たい | 上空で急激な温度上昇 |
| | Inferior mirage | 上層が冷たく、下層が暖かい | 最下層で急激な温度上昇 |



新湊大橋のライブカメラ画像

図 1.1 温度分布と蜃気楼の種類

富山県魚津市は、蜃気楼が見られる地として江戸時代以降の多くの文書に登場し、現在も日に数百人が蜃気楼を見に訪れるなど(図 1.2)、蜃気楼が注目され続けてきた稀有な場所である(佐藤, 2023)。江戸時代に描かれた蜃気楼の絵図“魚津蜃気楼之図附喜見城之図断(金沢市立玉川図書館近世史料館所蔵)”では、風景の伸び(Towering)や反転(Superior mirage)の蜃気楼が描かれた。そして、現在観光客やカメラマンに注目される蜃気楼も、伸び(Towering)や反転(Superior mirage)が見える蜃気楼である。これらの蜃気楼は、魚津では3月から6月を中心に多い年で年間40日程度見える。一方で、像が下に反転して見える下位蜃気楼(Inferior mirage)は、図 1.3 のように年間を通して8割程度の日に見られるが、あまり注目されてこなかった。

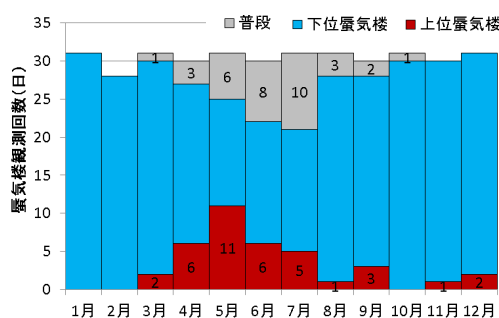
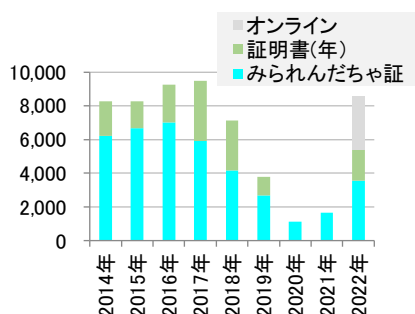


図 1.2 蜃気楼証明書, みられんだちや証の発行数 図 1.3 2019 年に見えた蜃気楼日数

富山湾での蜃気楼の研究は、大正時代より伏木測候所、その後は、気象台や富山大学等により行われた。その中心は海上や沿岸での温度観測を元にした事例研究(木下・市瀬, 2002)や、気象の統計的解析(中野, 1954)が多かった。さらに、教諭(野嶋福三郎, 1945)や市民(沢崎, 2009)による長期の観測による経験則をもとにした研究が行われた。

魚津埋没林博物館では、1992 年から継続して上位蜃気楼の観測を行い、博物館の屋上で行う気象観測データを用いた蜃気楼に関わる気象的な特徴を検討した(佐藤・石須(2018), 佐藤(2018))。2019 年からは、ドローンを用いた観測を開始し、海上での温度の鉛直分布が異常な領域を確認した(佐藤・青木(2019))。さらに、2020 年からドローンを更新し海上での温度観測精度を上げたほか、地域の遊園地ミラージュランドの観覧車の支持構造物に高度ごとに気象観測機器を仮設し温度観測を定常的に行っている。この温度観測を基にした上位蜃気楼の観光情報を観光施設「海の駅蜃気楼」等で継続中である。

一方、近年海外では滑走路管理や、自動運転技術のため、大気を通して見る像への光学的検討や観測が進み、視点と対象物(像)の間の大気(温度)の影響を検討・整理する必要性が指摘されている。

1. 2. インフィニティ～ミラージュとは

《infinity～mirage》は現代アート作家 山下麻衣+小林直人による富山湾に蜃気楼で「∞」を見せることに挑む作品(2021年に4ヶ月間展示)である(図1.4)。黒部市生地海岸の護岸堤に“m”型看板(高さ2.3m幅14.1m)を設置し(写真1.1)、約8km対岸の魚津市の海岸から観察すると、看板の「m」と、下位蜃気楼(景色が下に反転して見える現象)により看板が下に反転した像とが繋がって見えることで「∞」が作られるという作品である。2023年4月から当実行委員会では再び看板を設置し、富山県魚津市の海沿いから“m”を固定した望遠カメラで撮影し、ライブ配信を行なっている

(<https://www.youtube.com/@infinitymirage1/>).

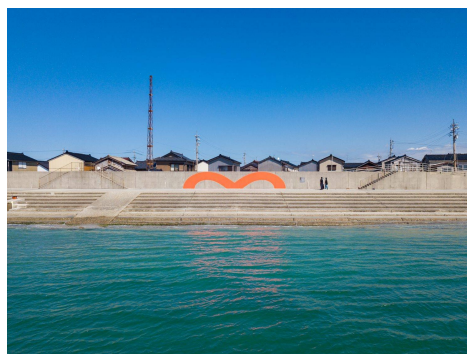


写真 1.1 m型看板設置風景(撮影:柳原良平)

2021年の展覧会での調査で、上述の大気屈折による現象がさまざま確認できた(佐藤, 2021、佐藤, 2022)。

さらに、機動的な調査では視点の高さによる蜃気楼の微細な見え方の違いが“m”型看板があることで明確化した。つまり写真1.2のように海辺の階段では見る高さを約1m変えると、下位蜃気楼の像の見え方が明瞭に変わることが“m”型看板があることでわかってきた。

一方で、博物館の気象計や海面温度等を元に数値計算した風景の見え方と、実際に望遠カメラで得られた像とは、一致することや合わないことがあった。

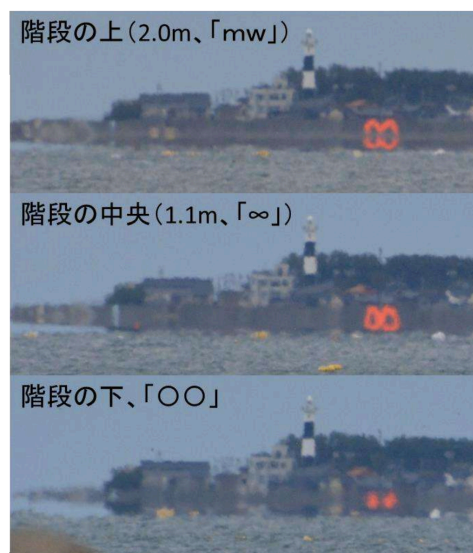


写真 1.2 撮影高さとの違い

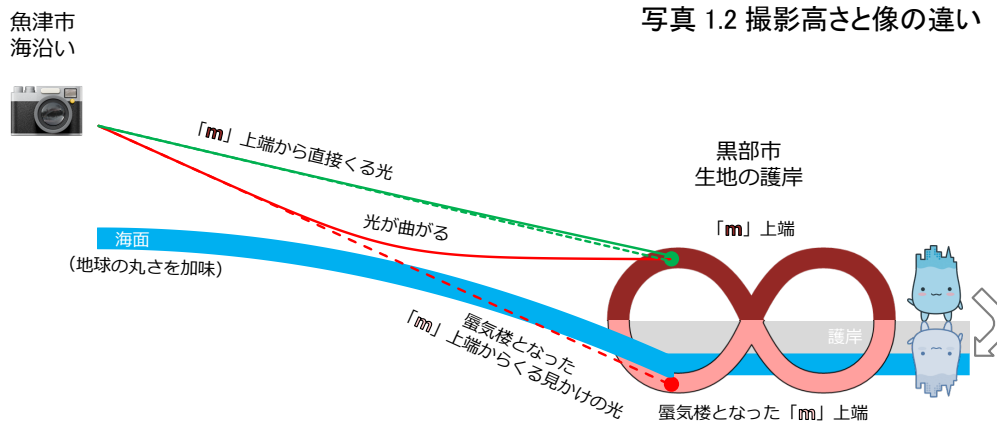


図 1.4 “m”型看板の下位蜃気楼の光学的概略図

1. 3. 研究目的

望遠カメラで撮影された像の形や位置は、撮影地点から対象物までの間にある大気(主に温度分布)の状態を反映したものと考えることができる。大気の温度分布が像の形や位置にどのように影響するかは光学的な計算で算出方法が複数確立しているが、接地境界層内の大気の温度分布は海面での乱流の影響などで単純化することが困難である。

そこで、本研究は望遠カメラで、図1のような多様な蜃気楼を撮影し、異なる高さに設置した複数の望遠カメラによる像を元に、大気の温度分布を逆算する方法を確立、展示することを目的とする。この結果を整理し、蜃気楼をはじめ大気の不思議さを知る博物館展示の基盤資料とする。

1台のカメラで確認されたこれらの事象を、異なる高さや距離に設置した複数台のカメラ(写真1.3)で観測することで、海面付近の温度分布の推定の精度が上がる。

さらに、芸術と科学が融合したインフィニティ〜ミラージュを通じた研究および教育普及活動は先進的で、グラデーションのある学びを地域に広げる。



写真 1.3 ミラージュランドカメラ

2. 研究実施体制と実施スケジュール

本章では研究の実施体制と実施スケジュール(表 1.2)を説明する。

アートユニットである山下麻衣+小林直人により、望遠カメラ(P1000(Nikon)、焦点距離3000mm)およびネットワーク機材(Live shell X(Cerevo))の選定、カメラの設営固定手法検討が2021年の展覧会のために行われた。安定的な運用が可能なが2021年の展覧会の際に確認できたため、本研究においても同様の機材を使うこととした。

2021年の展覧会の際に設営した4mカメラ(約8km離れた海の駅蜃気楼、海拔4mに設置)の場所以外に2台のカメラ設営(7mカメラ(海の駅蜃気楼、海拔7mに設置)、屋外カメラ(約11km離れたミラージュランド海拔6mに設置))を行う(図 1.5)。これらについては北見工業大学館山研究室によるカメラの微調整が可能な防水筐体の製作、魚津埋没林博物館と地元の業者による現場設営を行なった。設営場所となる海の駅『蜃気楼』とミラージュランドには無償で電源を提供いただいた。

作品の鑑賞を深め、市民や児童らによる蜃気楼研究の素材としても活用されることを目指し、2台(4mカメラ、7mカメラ)のカメラ映像はYouTube上に公開されるような手法をとった。また、別の1台(屋外カメラ)のカメラ映像は、文部科学省のデータ統合・解析システムDIASの北見工業大学館山研究室サーバに保存させていた

いただいた。
ドローンによる温度観測は、気温の低い冬季はバッテリー不具合のため墜落する危険性が高いため、春に予定した。

データの解析等は、富山大学青木研究室の協力のもと行なった。

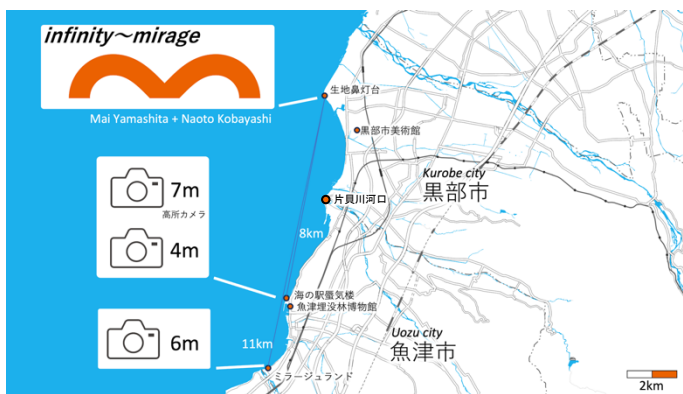


図 1.5 カメラとインフィニティ～ミラージュの位置関係

表 1.2 実施スケジュール(2023年8月～2024年8月)

| 実施項目 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------|---|---|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ① 望遠カメラ開発 | | | | | | | | | | | | | |
| 7mカメラ開発・設営 | ↔ | | | | | | | | | | | | |
| 屋外カメラ開発・設営 | ← | | | | | | → | | | | | | |
| ② 観測データ解析 | | | | | | | | | | | | | |
| カメラデータの解析 | | ← | | | | | | | | | | → | |
| ドローンによる機動観測 | | | | | | | | | | ↔ | → | | |
| ③ 報告書作成 | | | | | | | | | | | | ↔ | → |

3. データと解析方法

3.1. ライブカメラ観測

海の駅蜃気楼の設置した4mカメラと7mカメラのデータは、YouTube Liveで配信するとともに、pythonにより自動で配信の停止と再開を行うプログラムを組み、約12時間(YouTube Liveでアーカイブされる最長の時間ごとにアーカイブ(11時間50分))しYouTubeチャンネル上に保存した物を用いた。

これらの配信では時刻データを付加しないため、Webブラウザ(Chrome)の拡張機能であるYouTube Live Clockを用い時間を求め、10分毎の変化を記録した。

蜃気楼の中でも、下位蜃気楼についてm型看板から変化の位置に特に注目し、次の4パターンに分けて観察した(図3.1)。下位A：高い位置で反転し丸二つに見えるか、mが蜃気楼により見えなくなる。下位B： ∞ に見える。下位C：低い位置で反転しmとwが離れた像が見える。下位D：より低い位置で反転し、mは変化しないが、護岸の低い部分が下位蜃気楼。

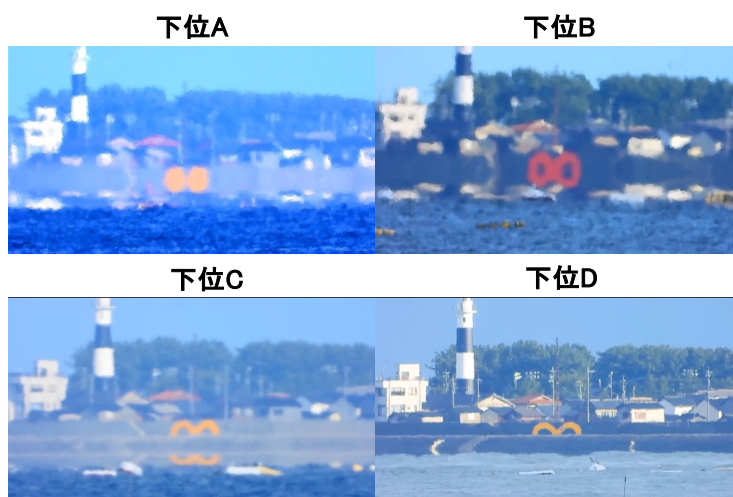


図 3.1 下位蜃気楼の分布

3.2. 気象観測

海辺に立つ魚津埋没林博物館の屋上(海拔約25m)の気象観測計の気温データを用いた。また、連続的に観測された海面温度として、沿岸域の海面水温情報 富山湾(気象庁WEBページ, <https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/series/engan/engan318.html>)を用いた。また、明瞭な雲の無い日に限り海面温度のデータとしてJAXA気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C)を用いた。

ドローンを用いた気象観測を、m型看板がある黒部と、カメラがある魚津の概ね中間にある片貝川河口付近で機動的に行なった。温度観測は、ドローン(Phantom 4 Pro)に温度センサーとロガーを搭載し実施した。風向風速のデータはドローンの姿勢情報から計算するサイト(AIRDATA, <https://airdata.com/>)を用いた。

3.3. 光路計算

蜃気楼は光の屈折現象のため見える現象である。このため、大気屈折率を気温、気圧、湿度から求め、松井(2014)の方法で光の経路計算を python を用いてプログラム化し算出した(佐藤, 2023)。

以下には、下位蜃気楼の光路計算を示す。通常の見え方の図(図 3.2 左)を用意し、仮定した温度分布(図 3.3)を用いて、光路を計算した(図 3.4, 図 3.2 右)。下位蜃気楼の場合は、暖かい海面付近(屈折率小)から冷たい上空の温度(屈折率大)へと急激な温度変化を仮定した。図 3.4 で示すように、青色で示した海面付近で急激に光路(水色の線)が上に曲がる。このため、図 3.4 の左側の視点の位置からは m の正立した像(黒色の線)と、m の反転した像(水色の線)の両方が見えるため、『∞』が見えることになる。

なお光路計算の中で温度の傾きなどのパラメータは実測が困難であり、実際に見える複数の像からの逆算が必要になる。

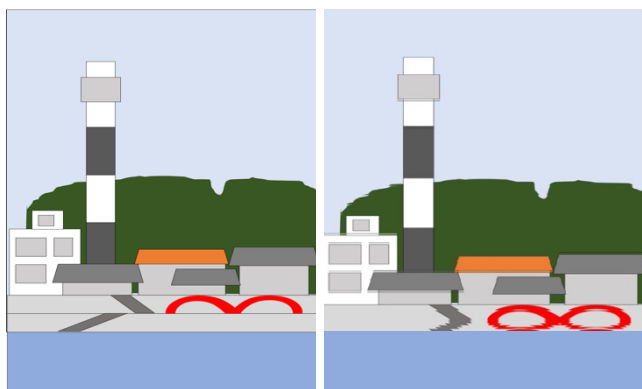


図 3.2 モデル計算上の図
(左:通常, 右:下位蜃気楼の計算結果)

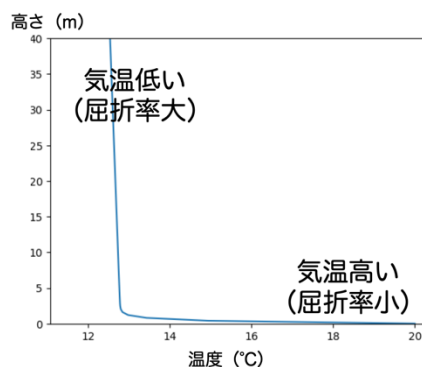


図 3.3 計算に用いた温度分布の例

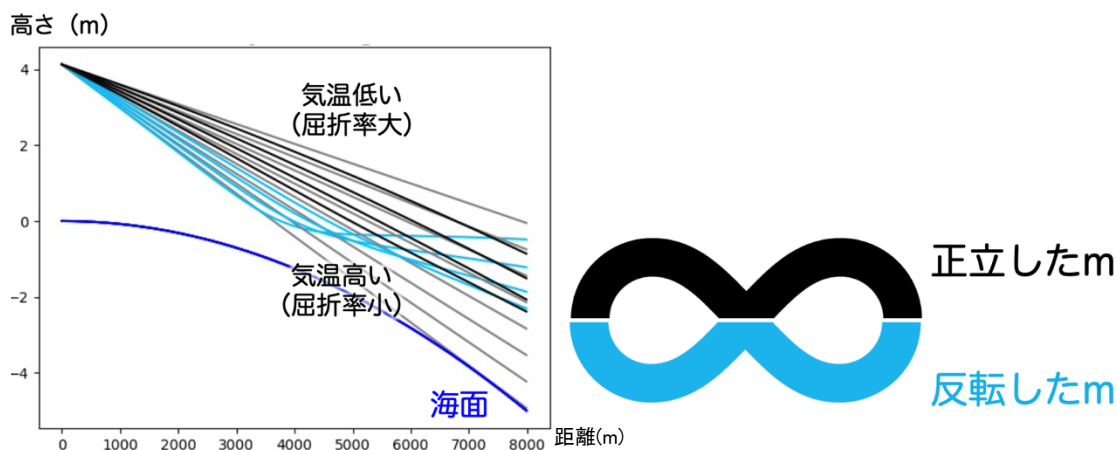


図 3.4 光路計算結果と見える像

4. 観測結果

4.1. ライブカメラによる下位蜃気楼の観察

2023年8月から2024年2月(213日間)までの海の駅蜃気楼の4mカメラによる観測結果(上位, 下位A~D, ふだん, それぞれ1回でも見えると1カウント)によると, 上位蜃気楼が見えた日は8日間, 下位蜃気楼の中でも下位Bの『∞』が見えた日は78日間であった(図4.1). 下位蜃気楼の中でも下位Cが見える日が最も多かった. また, 下位B『∞』に見えた時期は, 9月末以降であった. さらに下位B『∞』に見える時間帯に特徴はみられなかった(図4.2). なお, 午前中を中心に多くの日で下位蜃気楼が確認できた. また, 16時頃をピークに“ふだん”の風景が見えることが夏に多かった.

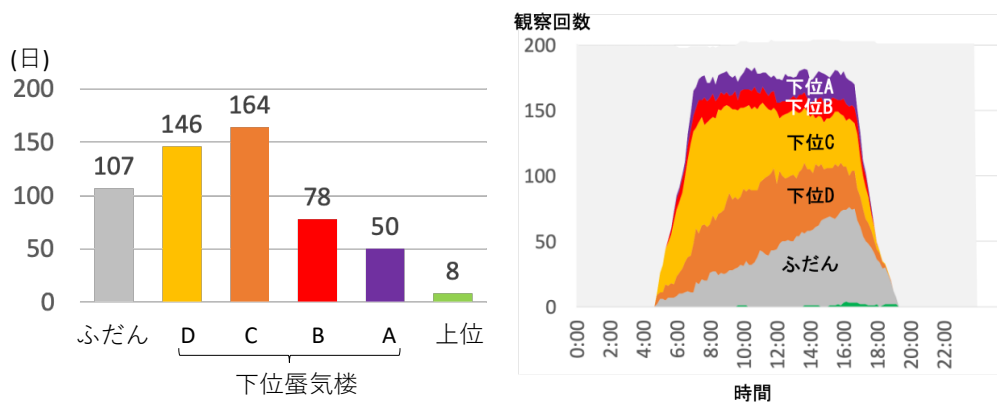


図 4.1 ライブカメラ(4m)による観測結果 図 4.2 下位蜃気楼のタイプと見える時間

下位蜃気楼が見えるかどうかには大きな差はないが, 7mカメラに比べ4mカメラで, 変化の大きい蜃気楼である下位Cが多くみられた(図4.3).

下位Dが高いところから見えている日は, 視点を低くすることで, 肉眼でも見つけやすい, 下位C以上の蜃気楼になっていることがわかった.

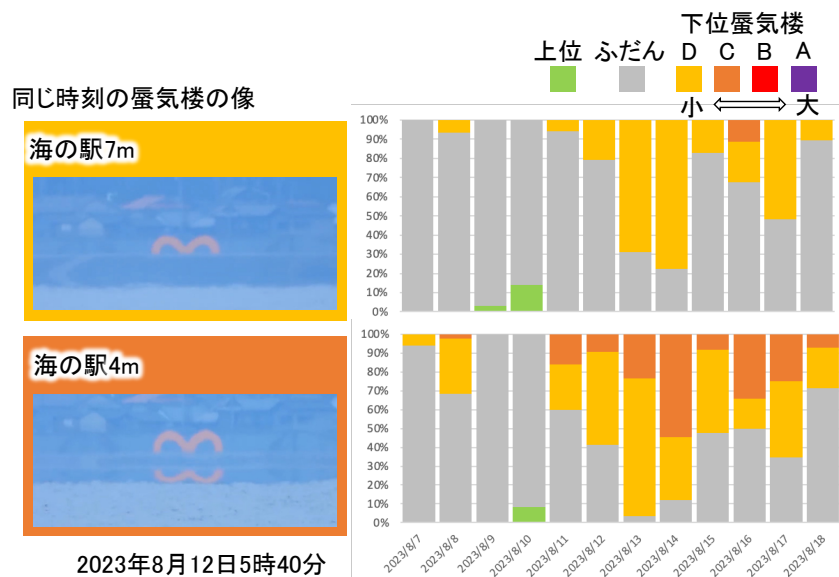


図 4.3 カメラの高さと蜃気楼の像の違い

2024年2月7日から18日の期間を比較したのが図4.4である。下位Bつまり∞になって見える日は、海の駅の4mカメラで1日間しかないのに対して、ミラージュランドでは10日間観測された。一方で、2024年2月16日は海の駅4mカメラでは、下位B『∞』が見えるが、離れたミラージュランドでは変化が大きくなりすぎて下位Aとなった。距離が離れると、下位蜃気楼による像の変化が大きくなることが確認された。

なお、下位B『∞』を見たいとすると、常に離れてみると良いわけではない。観察した地点で見える像によって、距離を変え、高さを変えながら楽しむことができる作品である。

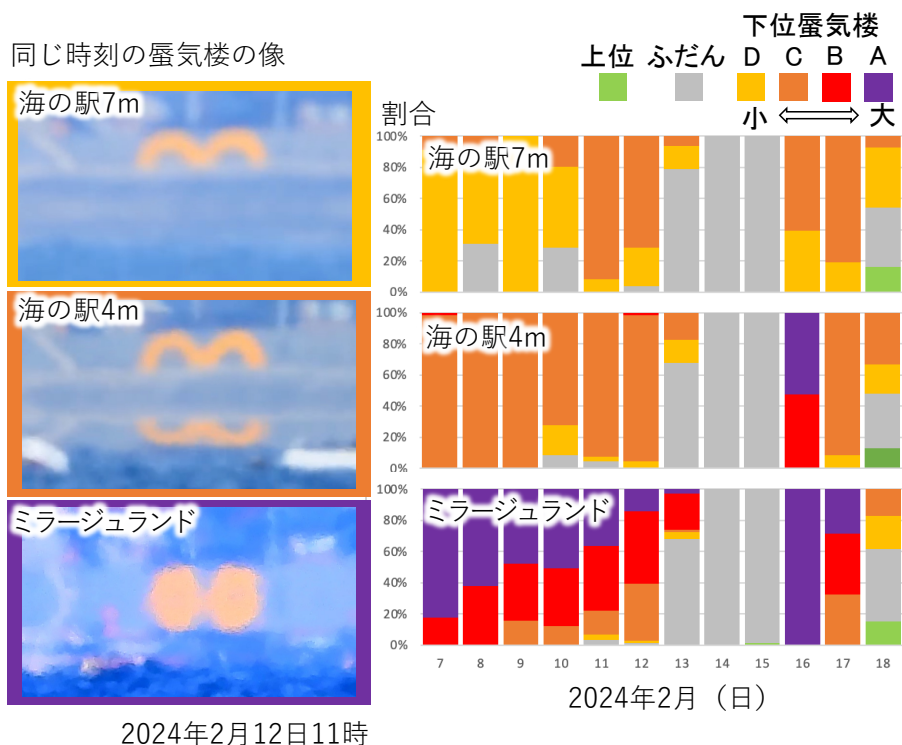


図4.4 カメラの高さ・位置と蜃気楼の像の違い

4.2. ライブカメラによる上位蜃気楼の観察

毎日観察される下位蜃気楼に比べ、上位蜃気楼についてはカメラでの観測は少なく事例による検討とする。2024年5月11日の12時11分の様子を図4.5に示した。左の7mカメラでは、mが縮んで(Stooping)、左側のボートが伸び(Towering)や多象化(Superior mirage)している。右の4mカメラではmを含む護岸が伸びて(Towering)見えていた。



図 4.5 7mカメラ(左), 4mカメラ(右)で同時刻の上位蜃気楼の様子

この時間の、ドローンによる機動観測を片貝川の河口で行なった結果を図4.6に示す。地表付近は21度、上空は、23.5度となっていた。海面温度(SST)は図4.8によると15.9度程度と低く、地上付近は北寄りの風で海上から冷気が流入しているように考えられる。

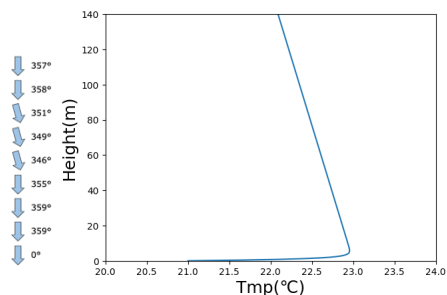
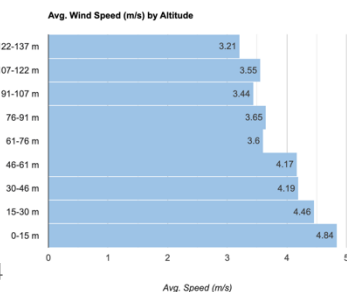
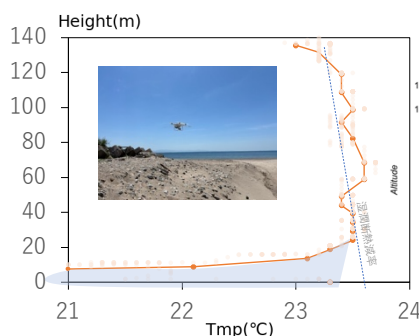


図 4.6 ドローンによる温度(左)と風速・風向(右)

図 4.7 温度分布の計算モデル

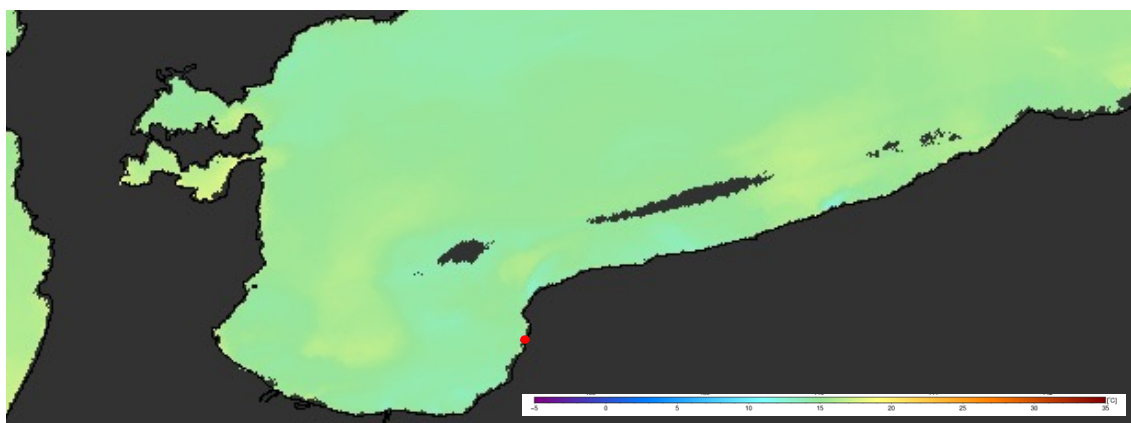


図 4.8 海面水温(SST)のデータ(GCOM-C より, 赤点が片貝川河口付近)

図 4.6 の温度分布を元に、実際に見えた蜃気楼(図 4.5)に合った光路計算結果の像(図 4.9)から逆算した温度分布が図 4.7 である。

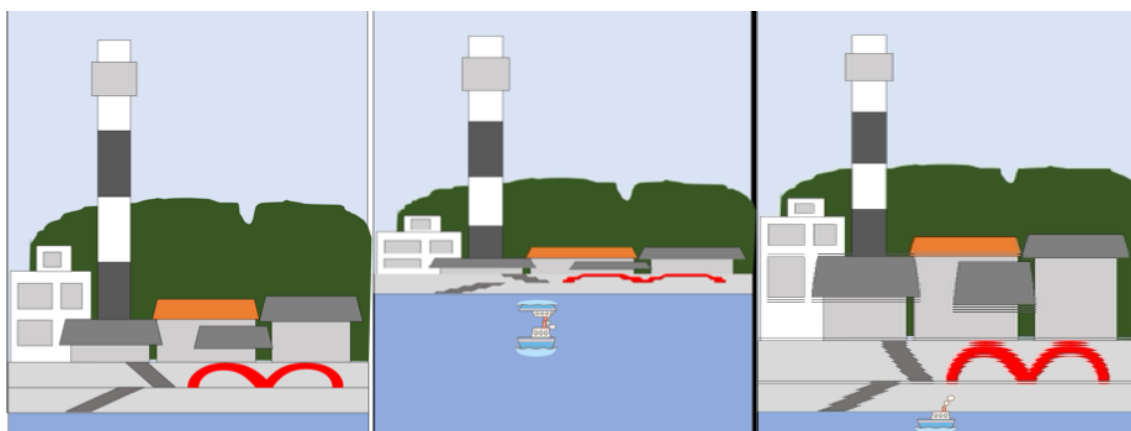


図 4.9 光路計算(左:元の風景, 中央:7m カメラモデル計算, 右:4m カメラモデル計算)

つまり、2枚の写真と海面温度と海辺の気温のデータがあると、接地境界層付近の温度分布(図 4.7)を光学的に逆算できることが分かった。この手法は同様に下位蜃気楼にも検討できる。

4.3. 蜃気楼の像の日変化と温度構造

2024年5月26日は、“1. 1. 蜃気楼とは”で示した、6つの種類の蜃気楼が全て確認できた。特に明瞭なのは、海面水温(SST)より、気温が低い時間帯は下位蜃気楼(inferior mirage)になっていた(夜間は不明, 図 4.10)。その後、気温が上がるとともに、Sinking, 普段, Looming となるがこれらの変化は固定されたライブカメラで見える景色の相対的な位置の変化のため通常は気が付かない。このため、通常の蜃気楼として視認されるのは困難と考えられる。

一方で、伸びて見える Towering や上位蜃気楼 Superior mirage は変化が明瞭なため気が付かれやすいと考えられる。これらの変化から想定される温度分布を図 4.11 に示すが、これから詳細な検討が必要だが接地境界層での気温変化を解明していく今後の研究課題となると考えている。

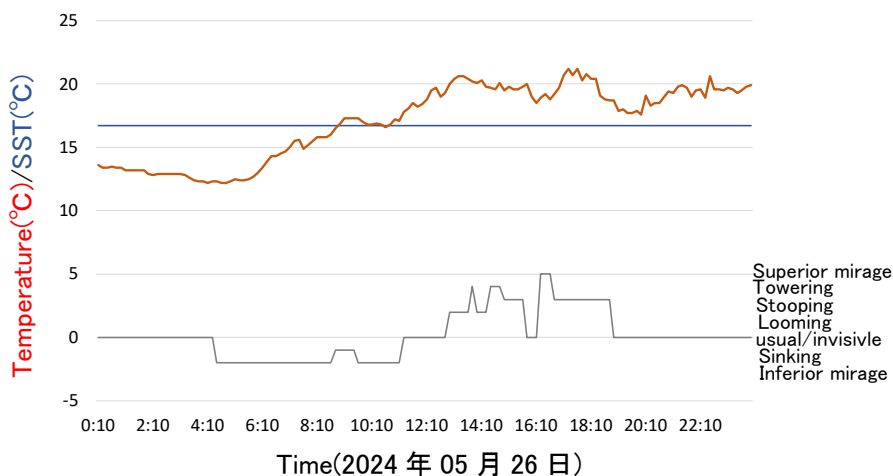


図 4.10 温度変化と蜃気楼の変化

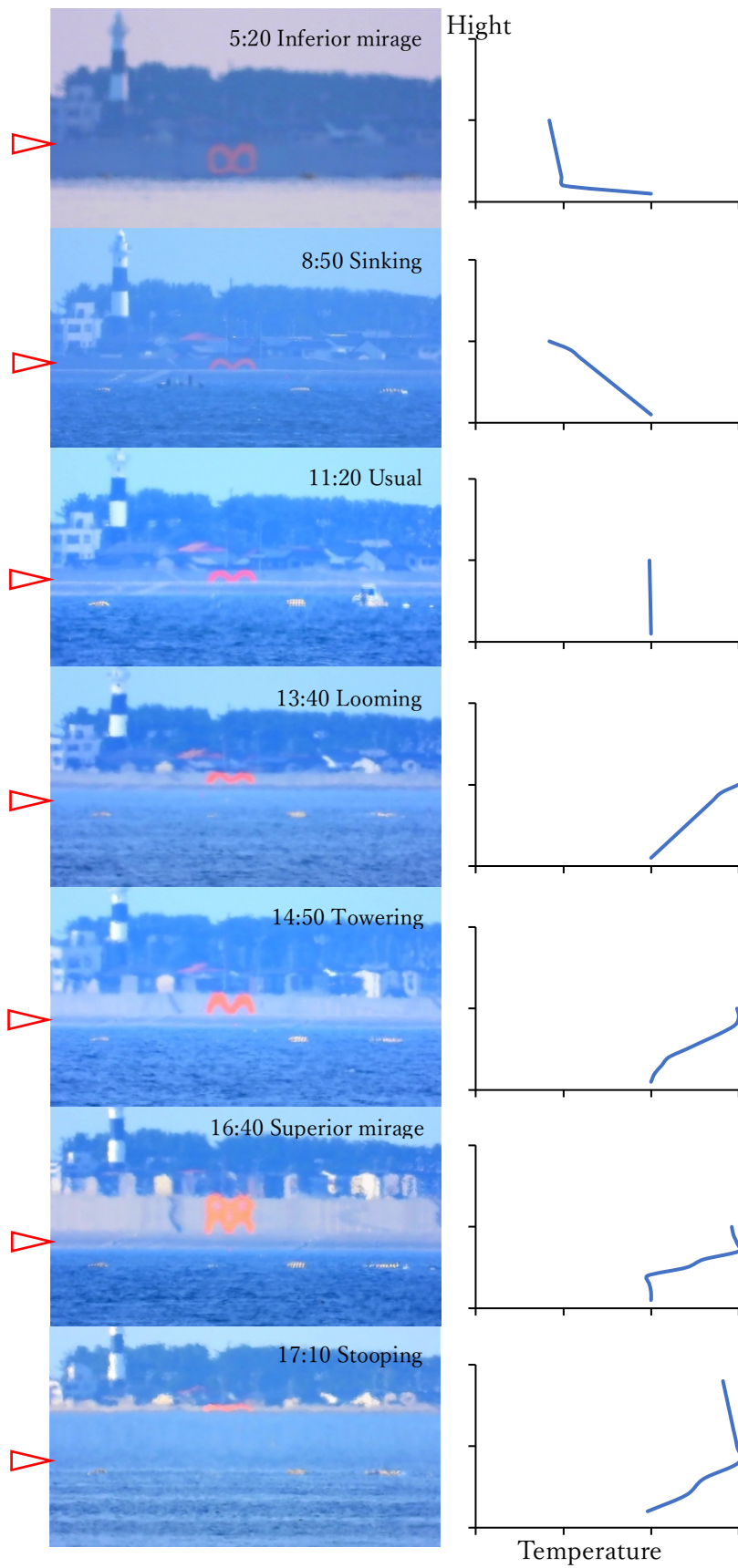


図 4.11 見えた蜃気楼の像(2024年5月26日, \blacktriangleright は同位置)と想定される温度分布(軸は仮定)

5. 蟹気楼の情報発信

気象データを元に蟹気楼を予想し観光活用する「データ駆動型観光」が北海道の上位蟹気楼に対して検討が進められている(館山ら(2020))。この手法を習い、これまでの下位蟹気楼の観測をもとに、下位蟹気楼が見えるかどうかを表示する WEB ページをつくり情報発信を行なった。この情報は、海の駅蟹気楼や地域の車販売店等でも活用いただいている。下位蟹気楼が見えるかどうかの判別は、アメダス魚津の気温、富山湾の海面水温、アメダス伏木の視程を用いた。これからも、精度検証を続けよりよい情報発信を目指す。



図 5.1 埋没林博物館 WEB ページ

6. ワークショップ・観光活用の成果

蟹気楼、つまり気象を用いた作品である「インフィニティ～ミラージュ」の普及活動のため、スタンプラリーのシートを兼ねるチラシ(約4万枚)を魚津市、黒部市の全戸に配布するほか、美術館や博物館等へ広く配布し、気象に関する興味啓発を図った。約500人程度がスタンプラリーに参加した。

さらに、博物館ではインフィニティミラージュの観察会を定期的に行き85名の来館者と海辺で蟹気楼の観察をおこない、参加者から好評であった。



図 6.1 チラシ



図 6.2 スタンプラリーおよび観察会の様子

7. 謝辞

本研究・活動を進めるにあたり、海の駅蜃気楼様、ミラージュランド様にはカメラ設営場所を快く提供いただき感謝しております。合わせて、北見工業大学館山研究室の方々には、カメラの通信機材や筐体の開発など多大な協力をいただきありがとうございました。また、本研究には、WNI 気象文化創造センターの助成のほか、黒部市・魚津市・北陸の地域づくり協会の助成を受けて実施しました。

最後に、アートユニット山下麻衣+小林直人、黒部市美術館・魚津埋没林博物館<infinity~mirage>実行委員会の皆様には多くの助言、指導、協力、本報告作成への協力をいただきました。ありがとうございました。

8. 参考文献

木下正博,市瀬和義,2002, 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, 天気,49

佐藤真樹,石須秀知, 2018, 魚津埋没林博物館における蜃気楼観測と気象状況-1992年～2018年-, 日本蜃気楼協議会研究発表要旨

佐藤真樹, 2018, 魚津埋没林博物館で2018年に観測された過去最多となる上位蜃気楼と気象, 日本気象学会中部気象研究会要旨

佐藤真樹,青木一真, 2019, 魚津の上位蜃気楼観測時における UAV による大気温度観測, 日本気象学会秋季大会要旨

佐藤真樹,2021,インフィニティミラージュ-芸術と科学-,日本蜃気楼協議会研究発表要旨

佐藤真樹,2022,インフィニティミラージュ-視点の高さと下位蜃気楼-,日本蜃気楼協議会研究発表要旨

佐藤真樹,2023,「魚津の自然シリーズ 蜃気楼」,魚津埋没林博物館

沢崎寛,2009,「富山湾の蜃気楼」

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

二宮洗三,2013,現象の観測と認識,天気,60

日本蜃気楼協議会編,2016,「蜃気楼のすべて」

野嶋福三郎,1945,気界の変幻蜃気楼

松井一幸,2014, ホイヘンスの原理に基づく新しい蜃気楼理論,日本蜃気楼協議会研究発表要旨

AMS Glossary, <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Welcome>

A.T. Young Web サイト, <https://aty.sdsu.edu/mirages/mirsims/loom/loom.html>