

川合ほか（2020）下位蜃気楼論文のやさしい解説

川合秀明（気象研究所）、北村祐二（気象庁）、柴田清孝

1. 概要

マダガスカルを旅行した際に海上においてたまたま下位蜃気楼を見たこと（図1）をきっかけに、下位蜃気楼が発生する際の大気構造をモデルシミュレーションで再現し、その大気構造を仮定して光路計算をし、下位蜃気楼が見られるかを確かめてみた。温度構造の推定には、LES（ラージエディシミュレーション）と呼ばれるモデルを使用した。このモデルは、地上から1km くらいの高さまでの、大気境界層と呼ばれる大気の層の中の詳細な空気の動きを計算するモデルである。これにより得られた温度構造（プロファイル）を用いて光路計算を行った。その調査内容をまとめたものは、日本気象学会の機関紙「天気」において出版した（川合ほか 2020）。

こちらの論文は、気象に関心のある人向けに、比較的わかりやすく説明してはいるものの、気象学とあまり関わりのない人にとっては難しく感じられるかもしれない。しかし、この論文では、下位蜃気楼が発生する場合の基本的な温度構造と、その光路



図1：マダガスカル南部西岸のイファティ沖で観測された蜃気楼。2017年4月15日の午前7時前後。海上でボートから観測されたもので、観測者の視点の高度は海拔1m程度である。この写真において、海上に浮かんだように見える部分には、上下にほぼ対称の水平線が引けるが、これは消失線（vanishing line）と呼ばれるものであり、正立像の下に倒立像が存在している。このような蜃気楼は下位蜃気楼と呼ばれている。

計算の結果について、基礎的なところをまとめているつもりである。そこで、本発表では、その内容をできるだけわかりやすく解説し、質疑を通じて本論文の理解を深めていただくことを目的としたいと考えている。

2. 温度構造の計算

この下位蜃気楼は、比較的温度が高い海上に、陸上で夜間の放射冷却により冷やされた空気が、明け方の陸風によりゆっくり流れ込んで形成されたものと考えられる。

温度プロファイルを再現するためのLESは、鉛直・水平解像度は20cmで、計算時間間隔は0.05sである。下位蜃気楼発生時の気象観測データを参考にして、海面水温28℃、初期の温度プロファイルとしては、地表面気温23度で、強安定な大気を与えた。風速は1m/sで、また風が吹くと水面にでこぼこができるため、その風速に対応する水面のでこぼこの度合い（粗度）を与える。こうして得られた温度構造は、海面からわずか10cm程度の高さまでで温度は急激に大気混合層の温度に近づくものとなっていた（図2左）。こうした構造は、特殊なものではなく、水面の方がその上の空気よりも温度が高い場合にいつでも見られる温度構造である。また、こうした不安定時の（上冷下暖の際の）温度構造の特徴は、海面近くの大気がいわば自律的に作り出すものであり、陸から流れ出してくる冷たい空気がどのような温度プロファイルを持つかには基本的には左右されないため、ここで示した構造は、一般性のある大気構造であると考えられる。なお、この図では、1m以下の高さの温度構造しか示していないが、それは、下位蜃気楼には基本的にはこの高さまでの温度構造が決定的に重要であるためである。

3. 光路計算

LES で得られた温度プロファイルを用いて、光路計算を行った。図2右がその結果であり、1 m の高さの観測地点への光の経路は、1.5 km 程度より遠方では交わっていることわかる。つまり、このような温度プロファイルの下では、1.5 km 以遠の物体は下位蜃気楼として観測されることが示された。

4. 本論文の意義

今回のように、海面水温が高く、大気温度がそれより低い場合には、このような温度プロファイルは、かなり一般的なものである。

本論文では、風速の違いや海面と大気温度の差の違いによる大気構造の違いとそれによる下位蜃気楼の見え方の違い、また観測点の高さによる見え方の違いなどについてもまとめてあり、下位蜃気楼の見え方を考えるうえで、汎用的な足がかりとなると考えている。

また、下位蜃気楼は、基本的には、いわゆる上冷下暖の不安定な温度構造の場合に発生するが、このような場合には、大気の流れの構造は比較的単純なものとなり、似たような温度プロファイルを作り出すことが期待される。この温度プロファイルの形は、実は常に類似の形（具体的な値としては異なるものの、関数としては同じ形）をすることが、大気の流れの理論からわかっており、今回の LES でのシミュレーションの結果も、その理論と整合している。（ただし、ここでの議論は、風が吹いた時に海面が

デコボコになる効果は含まれているものの、海面自体が風により揺らぐ効果などは含まれていない。海面が揺らぐ効果により、温度構造がどの程度影響を受けるのかは不明である。）

5. 上位蜃気楼の計算も可能か？

一方で、上位蜃気楼の場合は、大気温度構造は、一般的に上暖下冷、すなわち、海面近くの冷たい空気の上に温かい空気が乗っている構造となるが、この場合の大気の安定な構造には、数限りないバリエーションが存在する。つまり、温度逆転層は、様々な高さに存在する可能性があり、かつ、その温度逆転層の勾配の大きさも多様である。その逆転層の構造は、主に温度逆転層がどうやって形成されたかによって決まるが、上位蜃気楼が発生する際のそのメカニズムは未解明であり、逆転層の存在する高さやその温度勾配の大きさ自体の詳細な観測も、一部では試みられているものの、まだまだ不十分である。

さらに、モデルで温度構造を求めようにも、モデルにおいては、安定時の温度構造の正確な再現はそもそも非常に難しい。また、空気がどのように流れてくるかについても、モデルでシミュレーションをしようとする、かなり広い範囲の領域を、かなりの高解像度で計算する必要があると考えられ、モデルでの計算は極めて困難である。

上位蜃気楼に関しては、今回の論文で下位蜃気楼について示したような、一般化したモデルシミュレーションや一般化した議論は困難であると考えられる。

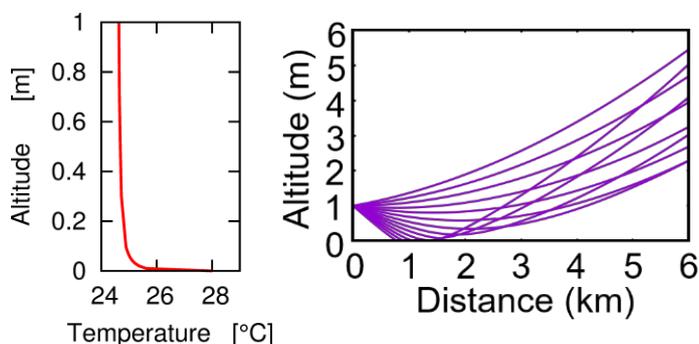


図2：LES で再現された温度プロファイル（左）とそれを仮定して計算された光の屈折経路（光路計算；右）。

参考文献

川合秀明, 北村祐二, 柴田清孝, 2020: 「下位蜃気楼の光路計算 —マダガスカルで見た蜃気楼—」. 天気, 67, 129-137.