

## 下位蜃気楼の光路計算 —マダガスカルで見た蜃気楼—

川合 秀明\*<sup>1</sup>・北村 祐二\*<sup>2</sup>・柴田 清孝\*<sup>3</sup>

### 1. はじめに

2017年4月、川合はマダガスカルを旅行した。ご存知の通り、マダガスカルはアフリカ大陸の南東に浮かぶ島国である。東部は吹き付ける貿易風により熱帯雨林となっている一方で、中央の高地を挟んだ西部は乾燥し、特に南西部はステップ気候となっている。ガイドを雇い森に入ると、インドリなどのキツネザルや野生のカメレオンなどを見ることができ、西部ではバオバブの木々も見ることができて、観光地としてもお勧めである。旅の途中、スキューバダイビングを目的として南西部のイファティ（第1図）に立ち寄った。そこでの最終日、手漕ぎカヌーでマングローブを見に行くことになり、朝6時に集合し、夜明け直後の海に漕ぎ出した。

のんびり景色を見ていると、遠方の様子がどうも不自然に感じられた。遠くに見える島のようなものが空中に浮きあがっているように見えた（第2図）。まさか、蜃気楼か？とは思ったが、蜃気楼がそう簡単に見えるとも思っていなかったの、とりあえず写真だけはたくさん撮っておいた。柴田が過去に「天気」に蜃気楼についての記事（柴田 2013）を書いていたことは知っていたため、1年ほどたってから写真を送ったところ、即座に「これは蜃気楼です。」との答えが返ってきた。その後、大気境界層に詳しい北村も含めて、そのメカニズム等について議論している中で、北村がLES（ラージエディシミュレーション；例えば、飯塚・

近藤 2008；中西 2009）モデルを使って大気境界層を再現し、柴田がそれを使って光路計算をすることで、蜃気楼を再現できるかどうか確認してみよう、ということになった。

その結果、想定される条件下で蜃気楼が見られる可能性が示されたため、気象学会でもポスター発表を行った。発表は比較的好評で、ポスターだけではもったいないから、何らかの形で出版した方がよいとのコメントもいただいたため、気象予報士の方や一般の方にも読んでいただきやすい「天気」に投稿することにした次第である。したがって、本稿ではそれを念頭に行えるだけわかりやすく論じることにする。

蜃気楼は一般社会の興味を惹く現象であるにも関わらず、蜃気楼に関する定量的な研究や文献は思いのほか少ないようである。本稿が、一般の方々の蜃気楼に対する理解を深め、さらにこうした気象現象に興味を持ってもらう一助となれば幸いである。

### 2. 下位蜃気楼とは？

蜃気楼というと、富山湾などが有名である（例えば、木下・市瀬 2002；中川 2009）。この有名な蜃気楼は、一般に冷たい空気の上に温かい空気が存在することで発生する。このような大気成層では、光の光路が第3図aのように上に凸の弧を描くために、時として、実像の上に反転した虚像が見える。また、この温度の鉛直勾配が比較的小さい場合（つまり温度逆転層が弱い場合）などには、虚像が反転せずに、実際の建物などが上方に伸びた形となって観測されることもある。これらを上位蜃気楼（superior mirage）と呼ぶ。なお、このような、冷たい空気の上に温かい空気が存在することで発生する上位蜃気楼は、石狩湾などでも時折観測されている（例えば、大鐘・金子 2009）。

\*<sup>1</sup>（連絡責任著者）Hideaki KAWAI, 気象研究所。  
h-kawai@mri-jma.go.jp

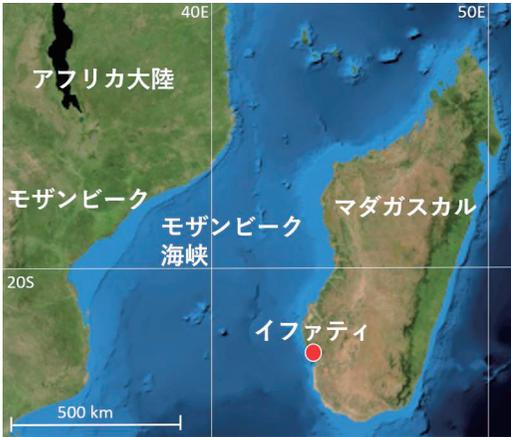
\*<sup>2</sup> Yuji KITAMURA, 気象研究所。

\*<sup>3</sup> Kiyotaka SHIBATA, 高知工科大学。

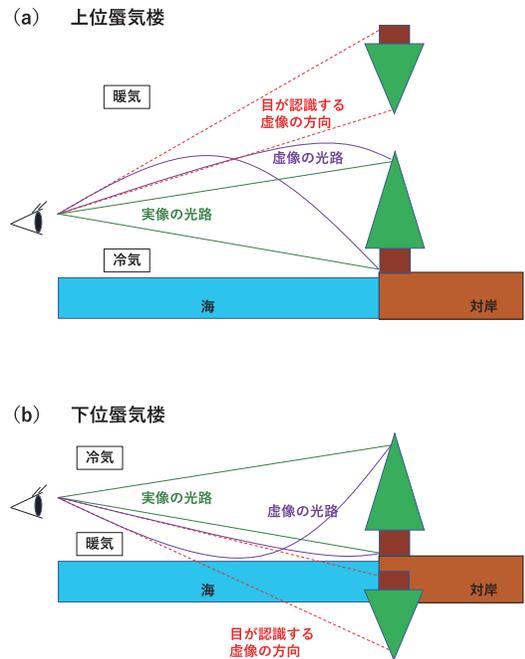
© 2020 日本気象学会

一方、今回撮影された蜃気楼は、これとは異なり、島が海上に浮かんだように見える。いわゆる浮島である。第2図の写真において、海上に浮かんだように見

える部分は、正立像の下に倒立像が存在している。これらの像の間に上下にほぼ対称の水平線を引くことができるが、これは消失線 (vanishing line) と呼ばれる



第1図 イファティの位置。背景の地図は、MODISによる2004年4月の画像 (©Reto Stockli, NASA Earth Observatory)。



第3図 上位蜃気楼 (a) と下位蜃気楼 (b) の概念図。



第2図 イファティ沖でカヌーから撮影された蜃気楼。2017年4月15日。矢印は消失線の位置。ごく一般的な、3万円程度のデジタルカメラにより撮影。3つの写真は、観測者の位置、撮影の方角共に異なっていることに留意。(なお、(c)の写真の色合いが(a)、(b)と異なるのは、(a)、(b)が午前7時前で日の出から間もないために太陽光の量が少ないのに対し、(c)は午前10時26分で太陽光の量が増えているためである。)

ものである。実際に存在する建物や風景の、この線より下の部分は、実像としても虚像としても見ることはできず、消失してしまっただよに見えるため、消失線と名づけられている。このような蜃気楼は下位蜃気楼 (inferior mirage) と呼ばれている。温かい空気の上に冷たい空気がのっている際に、第3図bのように、光路が下に凸の弧を描くため、観測者からは虚像である倒立像が観測されることになる。なお、下位蜃気楼については、例えば、遠藤ほか (2005) が、カンボジアの湖で撮影された下位蜃気楼について論じている。本稿では、推測される気象条件において、LESで再現された温度プロファイルを用いて光路計算を行い、このような下位蜃気楼が再現されるかどうかを見ていくことにする。

### 3. 観測条件・気象条件

本稿で論じる蜃気楼は、2017年4月15日午前7時頃、マダガスカル南部西岸のイファティ (23°9'S, 43°37'E) 沖の海上において、手漕ぎカヌーに乗っている際に観測された。カヌーからは、座っていて水面に手が届く程度であったので、観測者の視点の高度は、せいぜい海拔1m程度であろう。

イファティでは気象観測は行われていないが、27km南に位置するトリアラでは、午前3時に23°C、午前9時に30°Cであった。両時刻とも、風速は1m/sであり、東風 (陸から海に向かう方向) であった。カヌーに乗っていても、風は無風に近く、カヌーの進行に従って相対的に前からの微風を感じる程度であった

ように記憶している。天気はよく晴れており、衛星写真で見ても広範囲で雲は見られなかった。この日の日の出は午前6時18分であり、観測時刻での気温は23-26°C程度であると考えられる。また、2017年4月の月平均海面水温は28°C程度で、ほぼこの時期の気候値に近かった。この気象条件においては、低緯度の比較的温が高い海上に、夜間の放射冷却で冷やされた明け方の空気が陸風によりゆっくり流れ込んでいたのではないかと推察される。

### 4. LESによる温度プロファイルの計算

この気象条件から得られる大気温度プロファイルを推定するため、LESによる計算を行った。海面近くの温度プロファイルの詳細に求める必要があるため、利用できる計算資源的な限界に近い、鉛直・水平解像度20cmで計算を行った。与えた海面水温は28°C、初期の温度プロファイルとして、地上気温23°C (感度実験26°C) で強安定な大気を与えて積分を行った。与えた風速 (地衡風の風速) は1m/s (感度実験3m/s) である。計算の詳細設定は、第1表に示す。

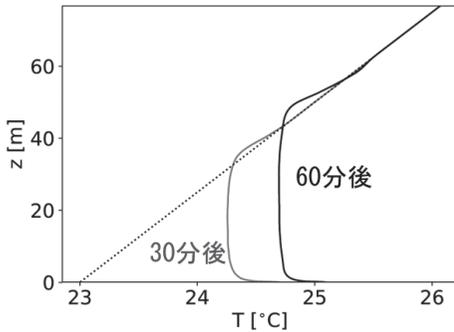
LES計算により得られた温度プロファイルの時間発展の例を第4図に示す。初期には、海面温度が高いところに冷たい大気が接しているため、海面付近は不安定で混合層が形成され、それが時間と共に発達していく様子がわかる。時間と共に混合層の高さは高くなり、また、混合層の温度は高くなっていく。本研究では、計算開始から60分後の大気状態を使用することにする (60分後というのは、典型的な大気状態を得るた

第1表 温度プロファイルを再現するために使用したLESの設定。(粗度に関して：海上の風によって海面が変化することから、海面上の粗度は風速に依存する。ここでは、Beljaars (1994) によって提案された海面上の粗度を見積もる式を適用して算出した)。

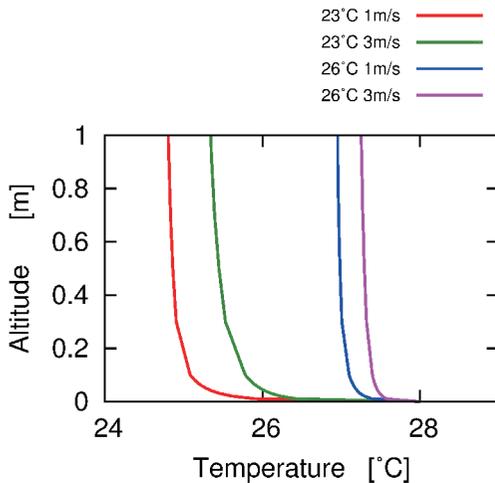
LESの設定	
サブグリッドスケールモデル：Smagorinsky-Lillyモデル	
鉛直・水平解像度：	20cm
格子数：	512×512×386
タイムステップ：	0.05s
海面水温：	28°C
初期の温度プロファイル：	地上気温23°C (感度実験26°C) で強安定な大気
風速 (地衡風速)：	1 m/s (感度実験 3 m/s)
粗度 (運動量)：	4.64×10 <sup>-5</sup> m (for 風速 1 m/s) 4.05×10 <sup>-5</sup> m (for 風速 3 m/s)
粗度 (熱)：	1.58×10 <sup>-4</sup> m (for 風速 1 m/s) 5.33×10 <sup>-5</sup> m (for 風速 3 m/s)

めに設定した便宜的な時間である。そもそも想定する気温に不確実性があること、また、その気温に対する感度実験もしており、60分後、という値に特別な意味はない。)

第5図が、得られた温度プロファイルであり、今回の層気候にとって重要と考えられる1m以下の高さの部分を描画している。なお、10cm以下の高度は、モン・オブコフの相似則からの推定値を描いている。



第4図 LESで計算された大気境界層の時間発展の例。30分後（グレー線）、及び60分後（黒線）の温度プロファイル（単位：°C）を図示。初期気温23°C、風速1 m/sの場合。点線は、初期値として与えた温度プロファイル。



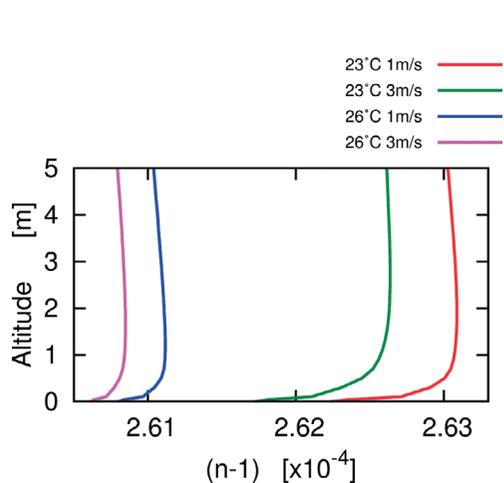
第5図 LESで計算された大気境界層の温度プロファイル（単位：°C）。計算開始後60分後の状態。初期気温23°C及び26°C、風速1 m/s及び3 m/sの組み合わせを示している。

これらを見ると、いずれも、海面から10cmの高さまでで急激に温度が上がって絶対不安定な層を形成しており、それより上部でも絶対不安定となっていることがわかる。例として、初期大気温度23°C、風速1 m/sの温度プロファイル（赤線）においては、10-30cmの高さでは、 $-886.5\text{K/km}$ 、30-50cmの高さでは、 $-212.3\text{K/km}$ もの絶対不安定である。また、風速を1 m/sから3 m/s（緑線）にすると、大気がより上下に混合されやすくなり、混合層の温度も上がって、海面水温との差が小さくなっていることもわかる。また、初期の大気温度を26°Cとすると、海面水温との差がより小さくなっている（青線、ピンク線）こともわかる。なお、接している海面や地面付近で大きな不安定となっているこのような温度プロファイルは、夏の道路などで見られる逃げ水の場合のように地表面が強烈に温められている状況だけではなく、大気よりも海面や地面の温度が少しでも高い場合には、現実にもごく一般的に見られるものである。また、ここで得られた温度プロファイルは、10cmより高い高度でも、実際には相似則によく乗っていることを付け加えておく。

## 5. 光路計算

LESにより得られた温度プロファイルを用い、光路計算（レイ・トレーシング；詳しくは、柴田（2013）など）を行う。

そのためには、まず、大気の屈折率のプロファイル



第6図 LESで計算された大気境界層の温度プロファイルを用いて計算された余屈折率（屈折率から1を引いたもの）。初期気温23°C及び26°C、風速1 m/s及び3 m/sの組み合わせを示している。

を計算する必要がある。LESにより得られた温度プロファイルから計算された余屈折率（屈折率から1を引いたもの）を第6図に示す。この図から、海面に近づくとき、屈折率が急激に小さくなっていくことがわかる。もちろん、これは大気温度が海面に近づくとき急激に上昇することと対応している。なお、LESを用いて、4つの条件で実験を行ったが、得られた大気温度が低い設定ほど、屈折率の絶対値は大きいことがわかる（第5図の赤線の温度が一番低く、ピンク線の温度が一番高いが、第6図の対応する赤線の屈折率は一番大きく、ピンク線の屈折率が一番小さい）。また、ひとつ興味深いのは、屈折率は、海面から上に行くにしたがい、海面付近では急激に上昇するが、途中で上に行くほど減少に転ずる（初期気温23°C、風速1 m/sの赤線の設定では、2 m付近）ことである。温度は上に行くほど下がるのに屈折率が減少するのを不思議に思う読者もいるかもしれない。これは、以下のような理由による。屈折率は大気密度に依存（余屈折率が大気密度にほぼ比例）するが、大気密度を決定するのは温度と気圧である。一般に、上空ほど気圧が下がり、気圧が下がると屈折率が小さくなる。一方、海面すれすれの高度では、温度が上空に行くほど下がる効果が勝って屈折率を増加させる。だが、途中から温度の鉛直勾配が小さくなるために、気圧の減少による屈折率の減少が卓越するようになるためである。この両効果が拮抗する温度鉛直勾配は、 $-34\text{K/km}$ 程度の絶対不安定に対応する（定量的な議論等、詳しくは、柴田 (2013) を参照）。

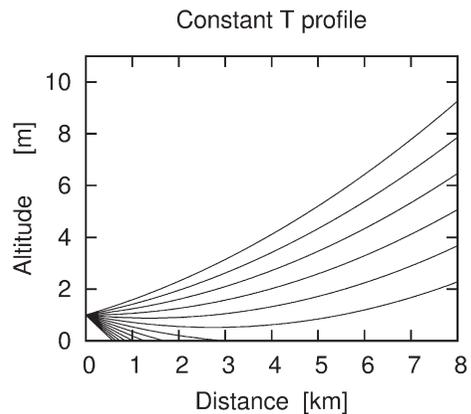
光路計算は、観測者の視点から、仰角 $\pm 0.2^\circ$ の範囲を0.002度ごとに光路を計算した。この光路計算は、5 cmの鉛直・水平分解能で行っている。LES計算で得られた、初期気温23°C（デフォルト）、26°C、風速1 m/s（デフォルト）、3 m/sの4つの組み合わせについて計算を行った。さらに、初期気温23°Cの温度プロファイルに対しては、観測者の視点の高度の影響を調べるため、視点の高さ1 m（デフォルト）に加えて視点の高さ5 mの計算も行い、計6パターンの計算を行った。

さて、この光路計算の結果を見る前に、まず、温度が海面水温と同じ28°Cで一定の場合の光路計算の結果を見ておく。第7図がその結果であるが、これを見ると、視点の高さ1 mからの光路は直線ではなく、下に凸の曲線となっていることがわかる。これは、地球が球面であるために、遠方に存在するものは、地球が平

面である場合よりもより高い部分が見えることに相当する。この等温大気の場合でも、実際には、先ほど説明したとおり、上空の方が気圧が低くなるため、屈折率も上空の方が小さくなり、光路は上に凸に曲がるのだが、地球が丸い効果が勝るため、第7図に示したような光路となる。また、光路がx軸にぶつかっているのは、海面が見えることに相当している。

次に、LESで計算された温度プロファイルを用いた光路計算結果を見る（第8図）。この図から、視点の高さ1 mで初期気温23°C、風速1 m/sの場合（左上図）には、例えば8 km先の物体を見る場合、視線の仰角をどのような方向に向けても高さ4 m以下の部分を見ることは不可能であることがわかる。また、視線の仰角をだんだん下げて行くと、ある角度からは逆に実際にはより高いところに存在するものが入ってくることになる。つまり、ある仰角を境にして、実際には高いところにあるものが、負の仰角の方向に見えてくるわけであり、これが観測者には反転した鏡像と認識されることになる。つまり、下位層気候が観測されることになる。

この状況は、同じ条件（視点の高さ1 mで初期気温23°C）で風速のみを3 m/sに変えた場合（左下図）でもほぼ同様である。ただし、両者の間には若干の違いがあり、風速が3 m/sの方が、光路の曲がり具合がわずかではあるがより大きい。第5図の温度プロファイ

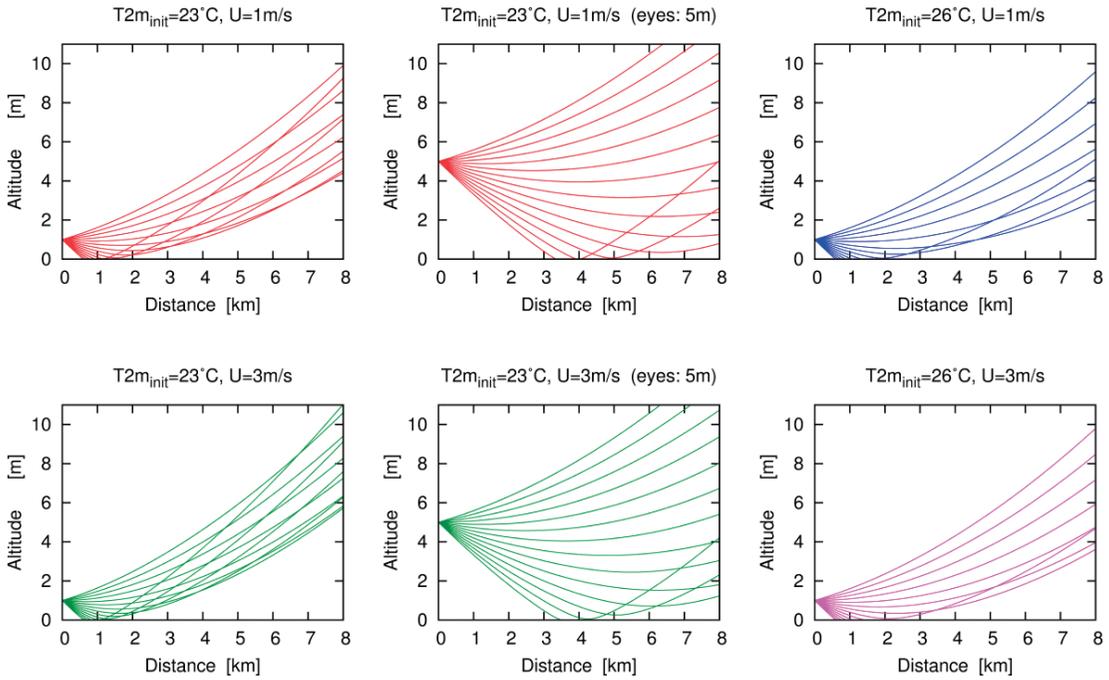


第7図 光路計算の結果。横軸は観測者からの距離 (km)、縦軸は高度 (m)。28°Cの等温大気を仮定。観測者の視点の高さ1 m。仰角が $-0.1^\circ$ から $+0.03^\circ$ まで、 $0.01^\circ$ 刻みの光路を図示（すなわち、上から4番目が水平視線に対応する）。

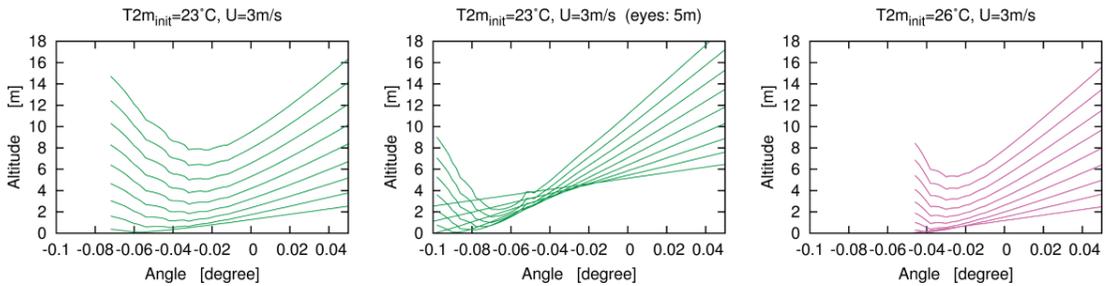
ルでは風速 1 m/s の場合の方が海面水温と気温の差が大きい  
 ため、一見奇異に思われるかもしれない。しかし、注意深く見ると、  
 風速 1 m/s の場合には、10cm 以下の高度の温度の鉛直勾配は風速  
 3 m/s の場合より大きい  
 が、10cm より高い高度では、逆に風速 3 m/s の場合の方が温度  
 勾配は大きくなっている。これは、風

速が強い  
 ため、より高い高度まで大気がよくかき混ぜられるようになるため  
 である。それによって、大気の屈折率の鉛直勾配も、10cm より  
 高い高度では風速 3 m/s の場合により大きくなり、光路も大きく  
 曲げられるのであり、これは自然な結果である。

さて、次に、視点の高さを 5 m に上げた場合の結果



第 8 図 光路計算の結果。横軸は観測者からの距離 (km)、縦軸は高度 (m)。上段が風速 1 m/s、下段が風速 3 m/s の結果。左から、初期気温 23°C で観測者の視点の高さ 1 m、初期温度 23°C で視点の高さ 5 m、初期温度 26°C で視点の高さ 1 m の結果。仰角が  $-0.1^\circ$  から  $+0.03^\circ$  まで、 $0.01^\circ$  刻みの光路を图示。



第 9 図 各距離の物体に対する観測者の仰角 (横軸) と物体の高度 (縦軸) の関係。距離 9.5 km (一番上の線) から 1.5 km まで 1 km ごとの距離の物体についての関係を图示。風速 3 m/s の結果。  
 左図：初期気温 23°C、観測者の視点の高さ 1 m の結果。  
 中図：初期気温 23°C、観測者の視点の高さ 5 m の結果。  
 右図：初期気温 26°C、観測者の視点の高さ 1 m の結果。

を見る(第8図の中列)。この場合は、視線をやや下に向ければ、高さが1m以下の物体も見ることができ。これは、基本的には、地球が丸みを帯びているため、低い高度からでは見えない部分も、視点の高さを高くすれば見えることに対応している。また、4kmより遠い物体については、光路が交わっていることから、蜃気楼として観測されることもわかる。視点高度が1mの場合には、8km先の、4-10m付近の物体が蜃気楼として見えるのに対し、視点高度が5mの場合には、5m以下の高さの部分が蜃気楼として見えることになる。また、視点の高さが1mの場合には、1.5km程度の距離の物体からの光路が既に交わっていることから、視点の高度が低いほど、近くの物体でも蜃気楼となりうるということがわかる。

さらに、初期気温を26°Cにした場合の結果を見る(第8図の右列)。この時には、左列の初期気温が23°Cの条件の時と比べて、交わっている光路の角度範囲が狭く、したがって、蜃気楼は上下に狭い領域のみに現れ、あまり目立つものは見られないことがわかる。しかし、この場合も蜃気楼は全く観測されないわけではないことになる。後で述べるが、この温度プロファイルは、海洋上ではごくごく一般的に見られるプロファイルであると思われる。

第9図に、各距離の物体に対する観測者の仰角(横軸)と物体の高度(縦軸)の関係を示す。左図が風速3m/sで、初期気温23°C、視点高度1mの場合であるが、例えばこの一番上の線は、観測者の仰角を変えていったときに、9.5km先の物体のどの高さの部分が見えるのかを示している。仰角を+0.05°から下げていった際、-0.03°付近で8mほどの高さの部分が見えるが、さらに仰角を下げていくと、見えるのは物体のより上の部分となり、仰角-0.07°で15mほどの高さの部分が見えることになる。つまり、9.5km先の8mの高さより上の部分が反転して鏡像となって見えるということである。この曲線がU字型になり、異なる2つの仰角で同じ高さが見える場合に、下位蜃気楼が見えていることになる。なお、仰角が-0.07°より小さいところでは曲線が途切れているが、仰角がより下向きになると海面が見えるということである。

中図は、視点高度が5mの場合の図であるが、高度の最小値を取る仰角の値は、先ほどよりも小さく、-0.07°付近となっている。また、この際の高度の最小値は、視点高度が1mの場合より小さい。距離が近いところの物体に対する線(下の方の何本かの線)

は、U字を描いておらず、視点が高さ5mの場合には距離が近いところの物体は上下反転した鏡像は見えないことを示している。また、右図は、初期温度26°C、視点1mの場合の図であるが、仰角-0.04°付近で線が切れており、これより仰角を下げて海面が見えるのみであることを示す。この場合、曲線が顕著なU字となっておらず、下位蜃気楼として観測されないわけではないものの、迫りに欠けるものとなるだろう。

## 6. 議論

ここで得られた結果については、第一近似的には定量的に意味があると考えられるものの、計算の方法に不十分な点もある。第一に、LESの計算は鉛直水平解像度が20cmで行ったが、50cm以下の高度の温度プロファイルがかなり重要であるため、定量的により厳密な議論をしたい場合にはもう少し解像度を高める必要もあるだろう。ただし、この点については、温度プロファイルが相似則にほぼ乗っていることから考えると、解像度を上げて得られるプロファイルは、相似則による内挿で得られるものと近いと推測されるため、それほど影響は大きくないと推測される。第二に、ここでのLESの計算は、水面が固定して動かないと仮定して行っているが、実際には水面は、風速が弱めだとは言え、ゆらゆらと多少は揺れているはずである。その揺らめきにより、温度プロファイルも影響を受けるだろうが、それがどの程度かを見積もることは難しい。第三に、本研究における計算では、大気境界層が空間的に一様であると仮定して計算を行ったが、実際には、岸からの距離等によって、大気境界層の構造は空間的に非一様な構造をもつはずであり、それを考慮すると計算結果は変わってくるであろう。

さて、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、このような大気温度プロファイルは、かなり一般的なものであるように思われる。イファティ沖の温度プロファイルは、低緯度の比較的温度が高い海上に、夜間の放射冷却で冷やされた明け方の空気が陸風によりゆっくり流れ込んで形成されたものとも考えられる。しかし、このような温度プロファイルは、ごく日常的に生じると推測される。さらに、より弱い温度差でも蜃気楼が見られるはずであることが示されており、これはごくありふれた条件である。第10図に、ECMWF再解析データERA-Interimデータ(Dee *et al.* 2011)より計算した、世界の海域における2m気温と海面水温の差を示す。熱帯から亜熱

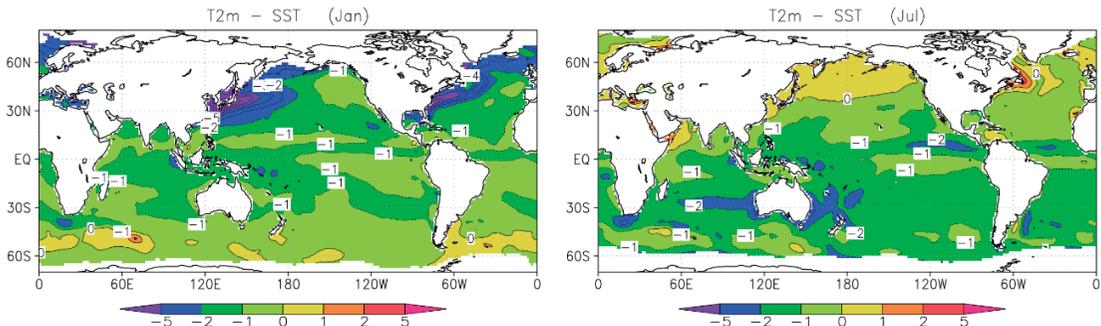
帯にかけては、ほとんどの海域で2m気温の方が海面水温より1°Cから1.5°C低い状態であり、海面近くの温度構造は第5図で示した気温26°C、風速1m/sの状態に近いと考えられる。第8図で示したように、この温度プロファイルでも蜃気楼は見える可能性がある。さらに、陸上近くでは明け方の放射冷却による陸風で、2m気温と海面水温の差はより開くであろう。そうすると、今回と同じような観測条件になることは頻繁にあるように思われる。また、第10図からわかる通り、冬の日本付近は、暖流上に吹き付けるユーラシア大陸からの北西風により、世界の中でも最も2m気温と海面水温の差が大きくなる地域であり、この意味では、世界で最も下位蜃気楼が見えやすい場所なのかもしれない。

この気象条件を想定して、海面水温17°C、初期大気

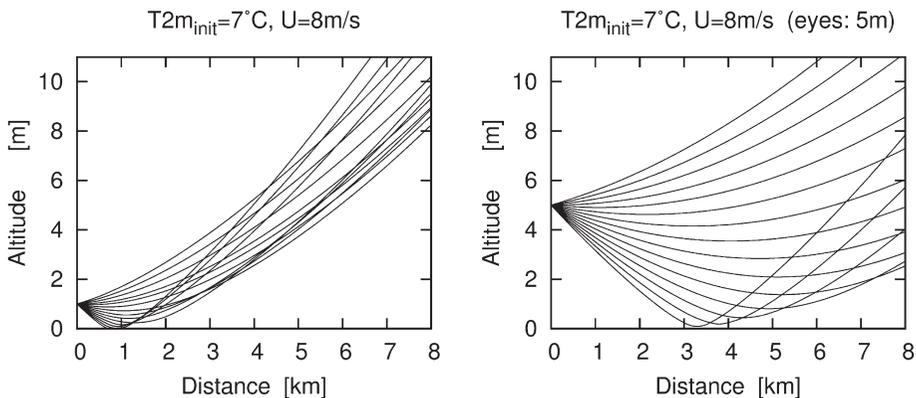
温度7°C、風速8m/sの条件で同様にLES計算を行い、光路計算を行った結果を最後につけておく(第11図)。なお、ここで与えた条件は境界層がより発達するものとなっており、広い計算領域を必要とする。このため、鉛直・水平解像度を40cmとやや粗くすることで計算領域を確保した。この図を見ると、観測者の視点が1mでも5mでも、これまでの条件の計算結果に比べて光路がより大きく曲がっていると共に、より近い距離で大きく交差している。このことは、この条件では、より顕著な下位蜃気楼が見えることを意味している。

## 7. 最後に

本研究では、マダガスカルで見た蜃気楼をきっかけに、大気境界層をLESで計算し、それをもとに下位蜃



第10図 全球の2m気温と海面水温との差(2m気温-海面水温;単位:K)。ERA-Interimデータを使用。1979-2008年の30年間の気候値であり、海水が1%以上存在する領域はマスクしている。1月平均(左図)及び7月平均値(右図)。



第11図 第8図に同じ。ただし、海面水温17°C、初期気温7°C、風速8m/sの結果。視点の高さ1m(左図)、5m(右図)の結果。

気楼の光路計算を行った結果を紹介した。興味を持っている多くの方に読んでいただくべく、できるだけわかりやすくまとめたつもりである。また、LESを使って大気境界層の構造を再現し、このような下位蜃気楼の計算を行ったのは、学術的な意義も大きい。

さて、今回、蜃気楼を撮影した際、それを蜃気楼だと認識していたわけではなく、また、こうした研究に発展させるとは思っていなかったため、蜃気楼を観測した位置や対象となる物体の方角やそこまでの距離等、確認も記録もしなかった。こうした研究に発展させるとわかっていれば、地理的な観測条件もより詳細に確認できたはずであり、また、現地でも、観測頻度やその季節変化、観測される時間帯など、詳細に証言を取っておけばよかったと悔やまれる。そうした情報があれば、光路計算を行い逆問題として解くことで、海面付近の大気境界層の温度構造のより詳細な推定もできたかもしれない。

さて、日本蜃気楼協議会(2016)によれば、下位蜃気楼は全国各地で頻繁に見られるとのことである。しかし、一般的な認識として、蜃気楼が頻繁に見られるとは捉えられていない。それはなぜであろうか？本研究では、観測者の視点の高さにより、蜃気楼の見え方は大きく異なり、視点が1mの高さでは比較的近くの物体でも蜃気楼となりうるが、5mの高さではより遠くの物体でないと蜃気楼とはならないことを示している。また、視点の高さが1mの場合の方が、物体のより高い部分が鏡像となるため、空も鏡像となりやすく、浮島として観測されやすいとも言えるだろう。1mの視点で遠景を見ることは日常生活では少ないだろうが、視点を低くすればかなり頻繁に下位蜃気楼を見ることができるのであろうか？日本蜃気楼協議会(2016)は、琵琶湖の上位蜃気楼が発生することは近年になって知られるようになったことや、北海道の上位蜃気楼が近年まで一般にあまり認知されていなかったことなどを述べ、上位蜃気楼は発生しても誰も気づいていなかったり報告がされていないだけで、もっといろいろな場所で発生している可能性を指摘している。下位蜃気楼は頻繁に発生しているとのことであるが、その詳細な発生率のデータは存在しないようである。下位蜃気楼の実際の出現率を、様々な地域で、その季節依存性や時刻依存性を含め、詳細に明らかにすることは、一つの興味深いテーマであり、一般の方々や学校の生徒などを巻き込んだシチズンサイエンスの一つ

のテーマになりうるかもしれない。

## 謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会・科学研究費助成事業(JP18H03363, JP19H05699)の支援により実施されました。本研究で使用したERA-Interimデータは、ECMWFより提供されたものです。担当編集委員の萩野谷成徳氏には的確なコメントをいただき、感謝します。マダガスカルにおいてはJICAの梅永優衣氏にたいへんお世話になりました。2019年気象学会春季大会のポスター発表において、立ち寄り、議論を深め、また投稿を助めてくださった、東京大学の佐藤正樹教授、三重大大学の立花義裕教授、桜美林大学の森 厚教授、境界層研究で有名な山田哲二さんらに感謝します。

## 略語一覧

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts  
LES: Large Eddy Simulation  
MODIS: MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

## 参 考 文 献

- Beljaars, A. C. M., 1994: The parametrization of surface fluxes in large-scale models under free convection. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **121**, 255-270.
- Dee, D. P. *et al.*, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597.
- 遠藤修一, 塚脇真二, 奥村康昭, 2005: トンレサップ湖(カンボジア)に出現した下位蜃気楼. *天気*, **52**, 3-4.
- 飯塚 悟, 近藤裕昭, 2008: LESの基礎. *気象研究ノート*, (219), 1-20.
- 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**, 57-66.
- 中川達朗, 2009: 魚津(富山県)における春型蜃気楼発生 の気象特性. *天気*, **56**, 939-943.
- 中西幹郎, 2009: LES. *天気*, **56**, 477-478.
- 日本蜃気楼協議会, 2016: 蜃気楼のすべて! 草思社, 108pp.
- 大鐘卓哉, 金子和真, 2009: 石狩湾における2008年の上位蜃気楼. *細水*, **55**, 33-34.
- 柴田清孝, 2013: 安定成層大気による多像の蜃気楼: レイ・トレーシングと温度構造推定の可能性. *天気*, **60**, 709-722.