

# 皆既日食中の空に見える月の影の形状の研究 —大気のスクリーン効果に関する考察—



塩田 和生

〈日食画像研究会（SEPnet） 神奈川県小田原市〉

e-mail: salt-star@mbj.nifty.com

皆既日食中にコロナが見えるのは、光球の強い光が月で遮られ、同時に太陽の周りの空が月の本影に覆われて暗くなるためです。この月の本影が大気に投影されることで現れる“月の影”の形状は、日食の条件や大気層の状態によって変化しますが、“月の影”の見え方を予測する方法論は、従来あまり検証されていませんでした。そこで様々な条件下で撮影された“月の影”の画像を集めて、“月の影”の見え方の特徴とそれを説明できるモデルの検討を行いました。その結果、“月の影”は、通常の日食では本影の外に到達する部分食中の太陽光が厚みがある大気層で散乱される積分効果（平均的な高さは約10 km）モデルで説明できること、一方、火山の大噴火後などには成層圏に形成されるエアロゾル層によるスクリーンモデルで説明できること、などが分かりました。

## 1. 皆既日食中の空に見える“月の影”

皆既日食は、図1のように月の本影が地上に落ちる場所で見られる現象で、普段は明るすぎる太陽光球の光が遮られ、昼間なのに突然夜のようになり太陽上層のコロナが輝くので、一度見たら病みつきになる現象です。地上に投影された月の本影は、図2や図3のように人工衛星や飛行機から眺めることができます。そして、地球大気は完全な透明ではなく太陽光を散乱する性質を持っているので、地上から見上げると皆既中の空を月の影が移動していく様子が観察でき、地平線付近の低空が360度の夕焼けのように見える（図4）という非日常的な空の変化は、コロナの美しさと共に、皆既日食を見た人を感動させる印象的なハイライトシーンになっています [1]。

ただ“月の影”は見かけのスケールが極めて大きく、移動速度も速いので、多くの場合その形状を正確に把握するのが難しい現象です。そして、日食毎に異なる天文学的な条件や、皆既帯の中の

るので、地上から見上げると皆既中の空を月の影が移動していく様子が観察でき、地平線付近の低空が360度の夕焼けのように見える（図4）という非日常的な空の変化は、コロナの美しさと共に、皆既日食を見た人を感動させる印象的なハイライトシーンになっています [1]。

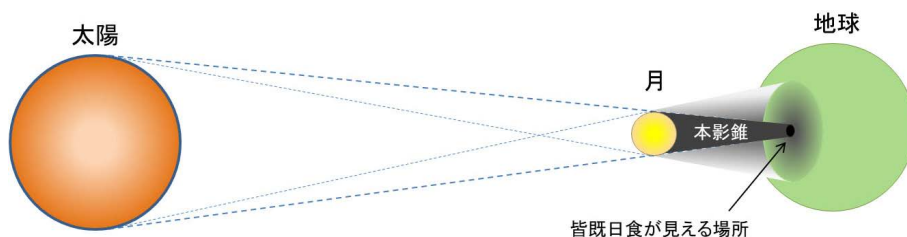


図1 皆既日食の説明図。月の背面から伸びる本影の影（本影錐）が地面に落ちる場所では太陽光球の光が完全に遮られ、皆既日食になります。皆既中の空は、本影に覆われて非常に暗い部分と、本影の外からの光が散乱されて少し明るく見える部分とで構成され、不思議な光景になります。なお、本影の周りの半影の部分は欠けた太陽に照らされていて、本影の縁に近い領域ほど暗くなります。

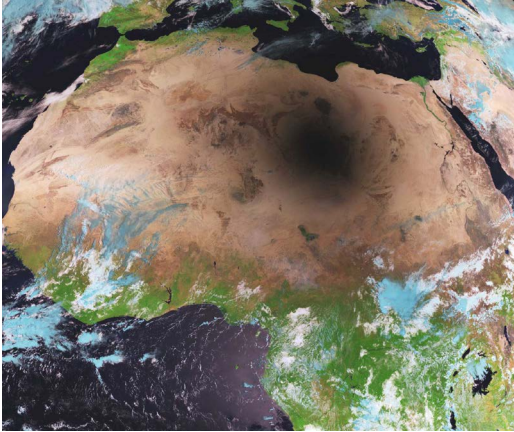


図2 2006日食の際に Meteosat-8が撮影した画像 ©EUMETSAT, 2006. 半影部の外側の地形が見やすい明るさに調整された画像なので、本影とその近傍の半影の境界は分かりにくいです。

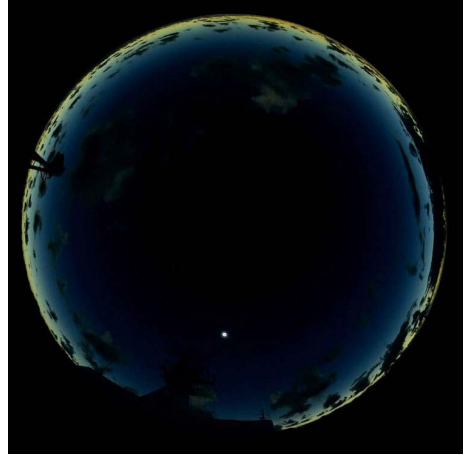


図4 2012日食の際に船上から撮影された月の影。ニュージーランド北方海上で、最大食の頃に山野泰照氏が撮影。水平線上に360度の夕焼けが見えました。



図3 2015日食の際に高度11 kmから写した光景。北海上空を飛んだ飛行機から筆者が撮影。地上に映った本影の輪郭と空に映った月の影の輪郭の両方が見えます。本影とその周りの半影領域の明るさの違いが分かります。

どの場所で観測するかによって見え方はかなり違ってきます。そこで過去の日食の際に撮影された“月の影”の画像を調べ、どのような条件の時に、どのように“月の影”が見えたかを整理して、“月の影”の見え方を予測するためのモデルを提案することが、今回行った検討の目的です。

なお、日食愛好家の中には、皆既日食中の空に見える“月の影”のことを「本影錐」と呼ぶ人も、少なからず存在します。しかし、「本影錐」

という言葉は、漢字の意味からは円錐状の本影に対して用いるべき用語であり、実際そのような使われ方をしている例も多いので、この記事の中では、月の背面から円錐状に伸びている本影を「本影錐」と記述し、「本影錐」が大気に投影されることで空に見える影は“月の影”と記述します。

## 2. “月の影”の見え方を予測する従来モデル

皆既日食毎に異なり、同じ皆既日食でも観測場所によっても異なる月の影の見え方を予測する方法の検討は、多くの天文アマチュアが海外に出かけて日食観測を行うようになった1970年代から始まりました。まず唐沢範行氏と丸山良次氏が、1970メキシコ、1972アラスカ日食の際に撮られた写真から月の影が投影される大気の高さを3.3-7.1 kmと算出できたと報告され[2]、その報告をベースに上空5 kmに仮想スクリーンがあると仮定して(図5)、天空上に月の影の輪郭がどのように見えるかをシミュレーションするソフトウェアが遠山御幸氏によって開発され[4]、その後アストロアーツ社の日食シミュレーションソフト・

エクリプスナビゲータに移植され、パソコン上での日食をどこで観測するかを指定すれば、月の影の見え方が事前に予測できるようになりました。

図5のモデルの精度検証は、1980年代に何人かの人達によって試みられましたが[5]、十分な精度で投影面の高さを求める解析報告はあまり見かけません。おそらく、当時の写真の画質では、月の影の輪郭が捉えにくく、精度の高い解析は難しかったためと思われます。

しかし、その後銀塩写真フィルムやデジカメの画質向上が進み、月の影の輪郭の微妙なグラデーションの描写能力も上がり、月の影の輪郭が以前よりはっきりと記録された例も増えています。そして、そのような写真に写った月の影の輪郭と、上記シミュレーションソフトが表示する月の影の輪郭とをつぶさに比較すると、整合性があまり良くない例も多いことが分かってきました。そこで、今回私自身や日食仲間が撮影した月の影の画像を集めて、どういう条件の時に月の影がどのように見えるかを整理し、実写画像を矛盾なく説明できるモデル作りに取り組んでみました。

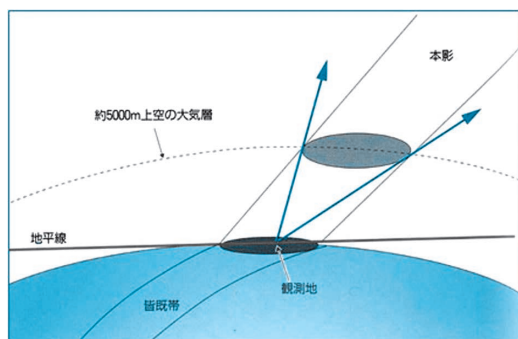


図5 “月の影” の見え方を説明する従来モデル. 約5000 m 上空に投影された本影を地上から見上げると考えると、実際の見え方と合うと記述されています [3].

### 3. 過去の日食で撮影された“月の影”の検討

今回の検討のために集めた様々な月の影の画像を眺めると、月の影の輪郭が明瞭に判別できるものもあれば、非常にぼんやりしてどこを輪郭と見なせばいいか迷うもの、その中間ぐらいのものなど、かなり大きな幅があります。以下に、代表的な画像について、月の影の輪郭の見え方の特徴を整理し、月の影の輪郭が大気層のどのぐらいの高さに見えるかを検討した結果を、順を追って説明します。

#### 3.1 1991ハワイ日食で撮影された“月の影”

今回集めた画像の中で、月の影の輪郭が一番明瞭に写っていた画像が図6です。ハワイ島のマウナロア山の山頂付近で榊原幸雄氏が第3接触のタイミングで撮影され[6]、楕円形の月の影の形がよく分かります。

図6の月の影の輪郭から高さを推定するために、まず皆既帯の地図の上に地上に落ちた本影の位置と、様々な高さの仮想的な大気層に投影される本影の位置を書き込み(図7)、それを基に様々な高さの本影輪郭が撮影地からどのように見えるかを計算して月の影の実写画像に書き込み(図



図6 1991日食の際に榊原幸雄氏が撮影した月の影. ハワイ島のマウナロア天文台の敷地で撮影されたこの画像は、今回集めた画像の中で、月の影の輪郭が一番はっきり写っていました。



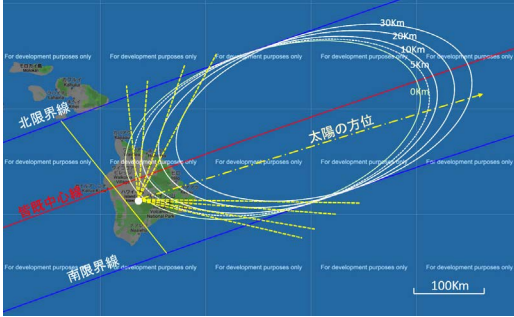


図7 月の影の高さを見積もる方法の解説図—1. 様々な高さの大気層に投影された本影が、真上から見た時にどのような位置になるかを示すため、皆既帯地図に様々な高さの本影の輪郭位置を書き込んだ図 (NASA Eclipse Web Site: <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/> の地図を利用). これらの本影輪郭が、撮影地からどう見えるかに置き換えたのが図8になります.

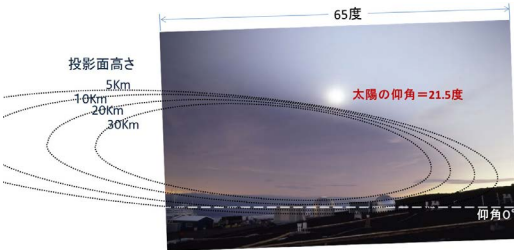


図8 月の影の高さを見積もる方法の解説図—2. 図7の様々な高さに投影された本影輪郭を、撮影地から見るとどう見えるかを、図6に書き込んだ図. スクリーン高度が低いほど本影輪郭は大きく見え、スクリーン高度が高いほど本影輪郭は小さくなるが、写真に写った月の影の輪郭は高度20 kmの線とほぼ一致します.

8), 写真に写った月の影の高さを推定するという方法を用いました. 図8に写っている明るい空から暗い本影領域への遷移領域は、高さは10 kmの線から30 kmの線にまたがっていて、その中間の20 kmが境界の目安として採用できそうです. 観測地の標高は3,400 mなので、月の影の投影面の高さは、23 kmと算出しました.

今回求めた23 kmという高度は、これまで「空に見える月の影は、約5 kmの上層大気に投影

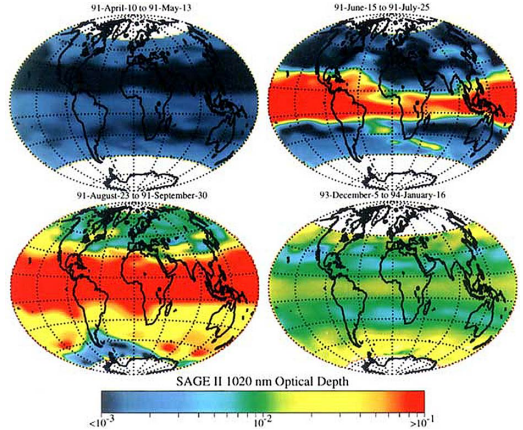


図9 ピナツポ火山噴火前後における成層圏の光学的厚さの全球マップ (NOAA) [7]. 白黒では判別しにくいですが、カラーマップでは1991年5月下旬までは成層圏の光学的厚さは小さかったが(左上), 6月中旬から7月下旬にかけて赤道付近の光学的厚さが増し(右上), その後全球的に広がり(左下), 1993年末でも少し影響が残っていたことがわかります(右下).

された月の本影の姿である」と言われていた話とは大きく違います. その原因としてまず考えたことは、図6に写っている巻雲・巻層雲の影響ですが、巻雲・巻層雲は対流圏の高度5-13 kmに現れる雲なので、原因の候補から除外しました.

次に考えた原因は、1991ハワイ日食の1ヶ月前に起こったフィリピンのピナツポ火山の影響です. 1991年頃、夕焼けの空の色が異常に赤っぽく見える現象が日本中で観測され、ピナツポの夕焼けという言葉で語られていたことを思い出したからです. しかし、1991年6月12日に大爆発を起こしたピナツポ火山の火山灰が、1ヶ月後の7月11日の皆既日食時にハワイの上空に達していたのか、火山灰はどんな高さに漂うのかということを確認しないと断定できません. そこで、ピナツポ火山に伴うエアロゾルについての研究論文を探してみたところ、人工衛星からの観測に基づき全地球的な成層圏の光学的厚さを調べた [7] 図9や、地上観測でエアロゾル層の高さを求めた [8]

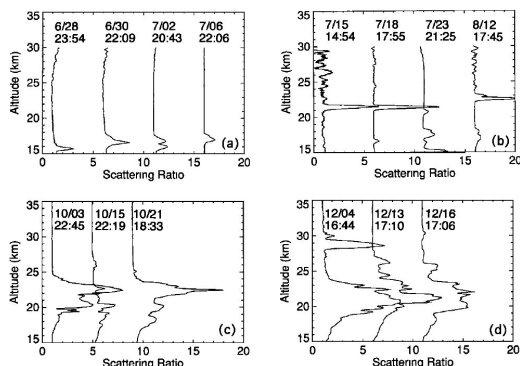


図10 ピナツボ火山噴火後につくばにおいてLIDERで観測された成層圏層の散乱比の鉛直分布変化[8]. AGUから転載許可取得済。日食前の7月6日には上空17 kmに、日食後の7月15日には上空22 kmにシャープなエアロゾル層が現れています。

図10が見つかりました。

図9は、衛星観測の結果を整理して1991年6月12日のピナツボ火山大爆発後にエアロゾルが成層圏にどのように広がったかを示した図で、低緯度域では7月には地球を一周するほど広がっていた、つまり日食時にはハワイ上空に達していたと考えて良さそうです。一方図10は、つくばの国立環境研究所で観測された成層圏のエアロゾルの高さの観測データですが、エアロゾル層は7月6日には17 km 上空に少し見られ、7月15日には22 km 上空で多量に漂っていたことが読み取れます。このエアロゾル層の高さは、今回求めた月の影の投影面の高さの目安23 kmを比べるとその差はわずかで、ハワイ日食の際にくっきり見えた月の影の原因は、ピナツボ火山の大噴火に伴う成層圏のエアロゾル層だと断定しても良さそうです。

ただ、図6は月の影が例外的にはっきり写った例だったので、火山噴火に伴う成層圏のエアロゾル層の形成がどれぐらいの頻度で発生しているのかについて調べると、図11のようなデータが見つかりました。ピナツボ級のエアロゾル層が形成されたのは、ピナツボ大噴火の前では1982年のメキシコ・エルチチョン火山噴火の時であり、ピ

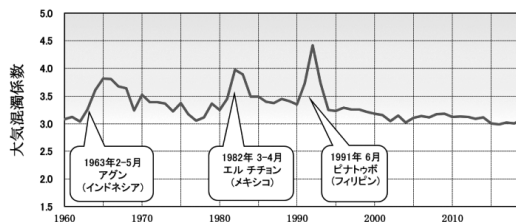


図11 大気混濁係数(大気中のエアロゾルや水蒸気などの吸収・散乱による日射の減衰を表す指標)の経年変化。(気象庁のWebサイトの各種データ・資料[9]より.)

ナツボ大噴火後では現在まで起こっていないことが分かります。1982年3-4月のエルチチョン火山噴火の影響が、1983年6月の皆既日食の際に見えたかどうかを調べると、それらしき月の影が写っている印刷物が見つかりましたが、残念ながら元画像を確認できず、最終判定まではできていません。

### 3.2 2012NZ 沖日食で撮影された“月の影”

次に、日食の前に大きな火山噴火が無く成層圏に火山性のエアロゾルが漂っていなかった2012年の皆既日食時に、ニュージーランド沖の船上から山野泰照氏が撮影された全天写真に写った月の影を検討しました。最大食の時の画像(図4, 12)と第2接触時の画像(図13)です。この日食の天文学的条件は、太陽高度48度、本影サイズは長辺200 km短辺156 kmの楕円形で、皆既継続時間3.3分で、これは平均的な皆既日食と言えそうな条件です。

まず、最大食時の画像の検討ですが、空は360度の夕焼け状態でしたが、5-15 kmの高さの大気層で本影の縁がどんな仰角になるかの計算値と、夕焼け状の明るい部分の仰角の関係を対応付けて確認できるようにしたのが図12です。これを見ると本影境界の空の遷移領域は、低空から20 km ぐらいまでの範囲で、上空になるほど暗くなっていることが分かります。境界の目安は約10 kmと読み取れそうです。つまり、火山噴火の影響がな

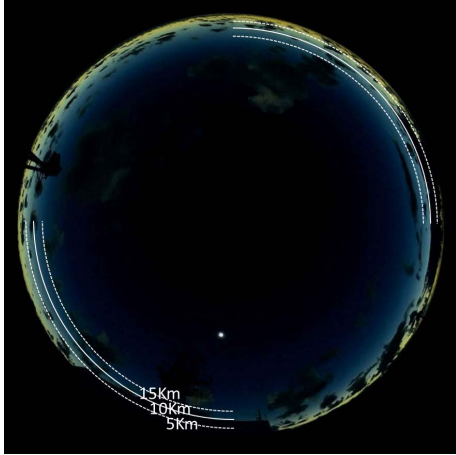


図12 2012日食の最大食時の空の明るさ分布. “月の影”の高さを求めるため、高さ5-15 kmの大気層に投影された本影の輪郭の仰角もプロットした図.

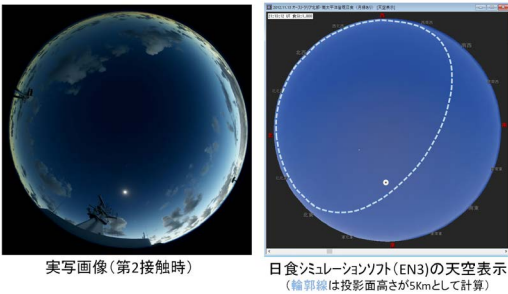


図13 2012日食の第2接触時の“月の影”. 実写画像(左)とシミュレーション(右)を比較すると、太陽近傍の“月の影”の輪郭が非常にぼんやりしていることが分かります.

い時期の日食でも、月の影の高さは、上空5 kmの仮想スクリーンモデルとは違う結果になりました。

一方、第2接触時の画像を見ると(図13左)、太陽近傍の月の影の輪郭が分かりにくくなっています。第2接触時には本影の縁と太陽の方向が一致するので、大気層の高さによらず同じ方向に輪郭が見え、もっと鮮明に見えても良さそうですが、そうはなっていません。

その理由は、図14のように本影の縁に近い半

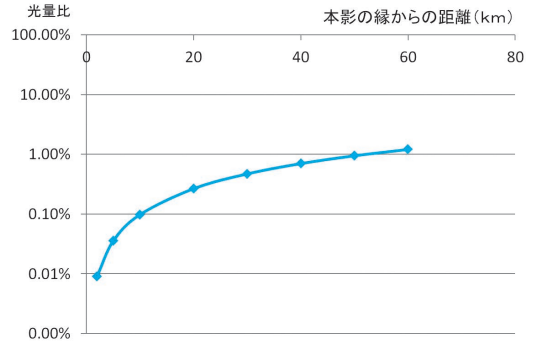


図14 本影の縁に近い“月の影”の半影部の明るさ分布. 本影近傍の半影部に到達する太陽光の強さを、周縁減光を考慮せず、光球全体との面積比から計算した結果.

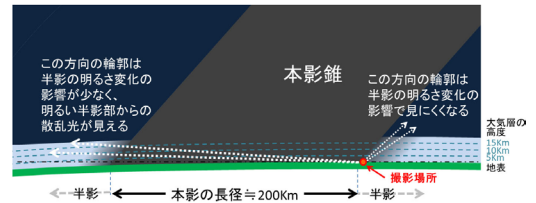


図15 2012日食第2接触時の本影錐断面の位置関係. 本影錐の直径に比べて大気層の厚さは薄く、左側の地平線付近の空では本影から遠い(明るい)半影部からの光も見えるが、太陽近傍の空では本影に近い(暗い)半影部の光しか見えず、そこまでの距離も近いため、月の影の輪郭がはっきりしくなくなります。

影部の明るさ変化に伴い本影の影の輪郭はぼやけて見えることになり、そのぼやけた輪郭を見る距離が近いほど月の影の輪郭が分かりにくくなるのが原因だと思われます。月の影の高さを10 kmとし、明るさの変化が急峻な本影近傍の半影部10 kmを48度の仰角で見上げるとすると、仰角にして幅約30度の範囲にわたり明るさが大きく変化するために、月の影の輪郭がぼんやりしてしまうという訳です。

図15は、大気層を通過する本影錐の断面と観測場所の位置関係を縦横比を合わせて模式化した図です(大気層は高度が高くなるほど暗くなりますが、その点は省略して描いています)。この図





図16 2019日食の際にPetr Horálek氏が撮影。チリのLa Silla天文台で撮られたこの画像では、太陽の右下に見える“月の影”の輪郭が、比較的分かりやすいです。

から、太陽と反対側の低空では輪郭ははっきり見えるが、太陽近傍では急峻な明るさ変化をしている半影部までの距離が近く見込み角が大きくなるため、輪郭がぼんやりすることが理解できます。

### 3.3 2019チリ日食で撮影された“月の影”

図16は、Petr Horálek氏が2019年のチリ日食の際に、La Silla天文台の敷地内から撮影された第2接触時の画像で、太陽近傍の影の輪郭が低空から太陽高度付近まで少し鮮明に写っています。

図13の太陽近傍の月の影の輪郭と比べて、この例での太陽近傍から下にかけて影の輪郭が少し確認しやすいのは、図8と同様の方法で描いた様々な高度の本影の輪郭位置の図(図17)から理解することができます。

図16で太陽の右側に見える月の影の輪郭は、観測場所から見て大気層の高さによらずにほぼ同じ方向であることと、太陽高度が14度と低いいため本影の端までの距離が約100 kmと遠いことで半影部のグラデーションの見込み角が圧縮された結果、輪郭が見えやすくなっていたと推定できます。

一方、太陽のほぼ真下に見える月の影の輪郭は仰角0度の線とほぼ一致しています。観測地から本影の端までは約350 kmで、地球が球形である影響が約10 kmあり、観測地の標高2,400 mを加

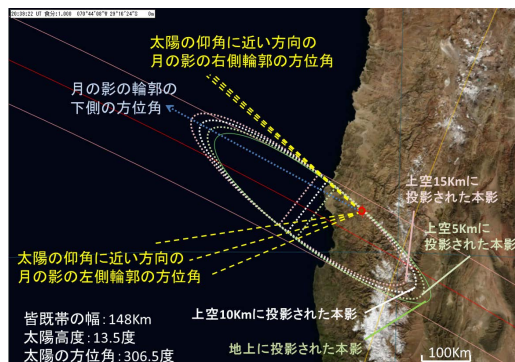


図17 “月の影”の輪郭の見やすさの検討図。図16の画像が撮られた時の、観測地と上空の高さ毎の本影の輪郭の関係。輪郭は方向が揃っていると見えやすくなるが、方向がばらついていると輪郭は分かりにくくなります。

えると、“月の影”の高さは12 km程度と計算できます。

### 3.4 2013ウガンダ日食で撮影した“月の影”

図18は、筆者が2013年のウガンダ日食の際に撮影した月の影の移動が分かる画像です。この日食は、皆既継続時間はわずか18秒と短く、そのため地表面に投影された本影の短径は20 kmと小さく、太陽高度は18度という条件でした。そのため、月の影の輪郭は、図6ほどではないものの、図13と比べるとかなり見やすくなっていて、第2接触時に“月の影”が太陽の下から上がってきて、最大食のタイミングで月の影の中心部が太陽の方向と重なり、第3接触時には上空に走り去っていくという、月の影の移動の様子がよく分かります。

図19は、皆既帯の地図に、最大食時の地表面と高さ5 km, 10 km, 15 kmの大気層に投影された本影の輪郭の位置を書き込んだもので、この図を基に観測地から各高さの本影輪郭がどのように見えるかを計算し図示したのが図20です。

図20を見ると、明るい空から暗い月の影への遷移領域は、7 kmぐらいから15 kmぐらいまで広がって見えるので、境界の目安は10 km強と読み取れます。観測地の標高が950 mだったので、



図18 2013ウガンダ日食の際に撮影した“月の影”の移動. 第2接触直前(左)に太陽の下方から迫ってきた月の影が、皆既中(中央)には太陽と重なり、第3接触後(右)には太陽の上方に去っていった様子が分かります. この日食は、皆既継続時間が極めて短い日食だったので、“月の影”のサイズが小さく、更に太陽高度も比較的低いという条件だったので、月の影の輪郭を、かなりはっきり捉えることができました.

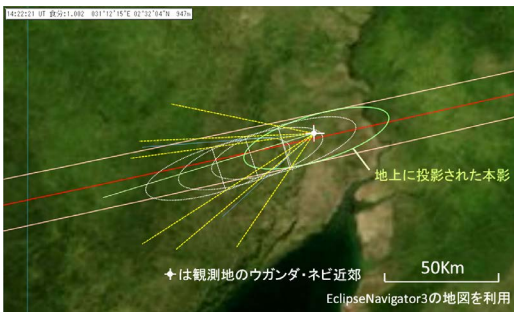


図19 2013日食の月の影の高さ検討用の解析図. 最大食時に地上に投影された本影の楕円をコピーして移動し、様々な高さの大気層に投影された本影の位置を示した図. この図を基に、図20の輪郭を描きました.

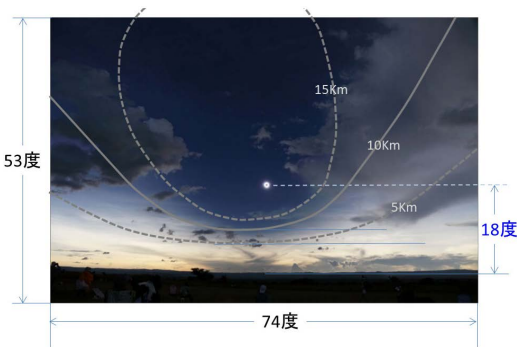


図20 2013日食の月の影の高さを求める検討図. 図19を元に、5 km、10 km、15 km上空の本影の輪郭線を図18の中央(皆既中)の画像に書き込んでみると、月の影の高さは約10 kmであったことが読み取れます.

投影面の標高は11 kmと算出できます.

### 3.5 1963北海道日食で撮影された“月の影”

図21は、東京理科大学天文研究部が1963年の羅臼岳日食の際に写した画像で、漏斗状の月の影が写ったことで月の影の輪郭が注目され始めるきっかけになった有名な画像です. 日の出直後の日食で、天文学的な条件は、太陽高度は2.2度、皆既継続時間は30秒でした.

この時の本影の形状は図22のように非常に細長く、幅約40 km×長さは東側で約300 kmでした(西側の縁は地上に届いていません). そして太陽と同じ仰角の月の影の輪郭の幅は14度と読み取れ、それが本影短径の40 kmに対応するので、本影中心までの水平距離は約170 kmになり、170 km先の仰角2.2度の高さは、 $170 \text{ km} \times \tan 2.2^\circ = 6.5 \text{ km}$ で、これに地球が球形である影響(2.2 km) + 観測地標高(1.5 km)を加えると、月の影の高さは10 kmと計算できます.

なお、超低空で起こる皆既日食では、図21と似た漏斗状の月の影が度々記録されていて、円錐状の「本影錐」の形が見えていると思っている人もいますが、低空の影は遠いので細く、高い高度の空の影は近いので太く見えるという遠近法の効果です.



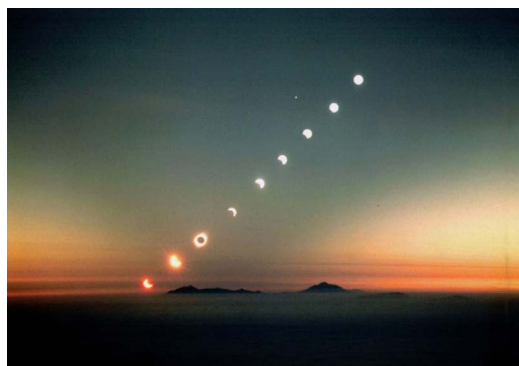


図21 1963日食の際に東京理科大学天文研究部観測隊が、羅臼岳で撮影した“月の影”の画像。

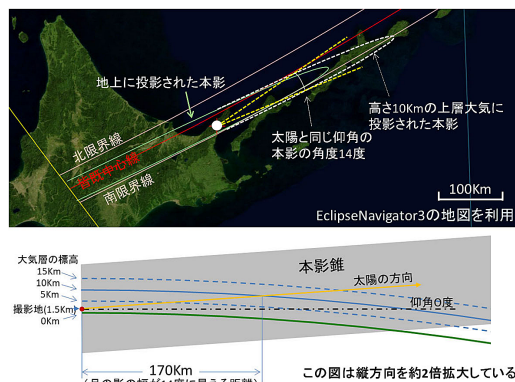


図22 1963日食の月の影の高さ検討用の解析図。月の影の高さが10 kmであることが分かります。

#### 4. “月の影”の見え方を説明する新モデル

以上5つの事例の検討結果を一覧表にすると、表1のようになり、月の影の輪郭の見え方は次のように整理できます。まず、通常の日食では月の影はぼんやりとした輪郭の影として見え、境界の高さの目安はほぼ10 kmです。そして輪郭の鮮明さは、(1) 大気層の高さによって異なる本影輪郭の見かけの方向の広がり、(2) 本影の近傍の、明るさが急激に変化する半影部を見込む角度

によって決まります。そのことを図にすると、図23のような新しいモデルで表せます。

一方火山の大噴火後などには大気層のスクリーンモデルで説明できますが、投影面の高さは5 kmではなくエアロゾル層の高さ（1991の例では20 km以上の高さ）に対応することになります。

表1 今回検討した5つの日食画像から得られた月の影の輪郭の鮮明さ・高さを比較した表。事例1の火山噴火後のケースは例外的で、それ以外のケースでは月の影の輪郭の見かけの高さは10-12 km程度で、鮮明さは太陽高度や本影サイズなどに依存することが分かります。

事例	年月日 観測場所（標高）	太陽高度 継続時間	本影サイズ 短辺×長辺	“月の影”の輪郭		備考
				鮮明さ	境界の高さ	
1	1991.7.11 ハワイ（3400 m）	22度 4.1分	220 km 550 km	○	約23 km	ピナツボ火山噴火の約1ヶ月後に起こった日食
2	2012.11.14 NZ沖（30 m）	48度 3.3分	155 km 205 km	×	約10 km	太陽高度・継続時間が、平均的な日食
3	2019.7.2 チリ（2400 m）	14度 2.4分	130 km 520 km	×-△	約12 km	“月の影”の輪郭のぼやけ方が左右で非対称だった日食
4	2013.11.3 ウガンダ（950 m）	18度 0.3分	20 km 65 km	△	約11 km	継続時間が短く本影サイズが極めて小さな日食
5	1963.6.20 羅臼岳（1600 m）	2度 0.5分	40 km 600 km超	△	約10 km	超低空で起こった日食

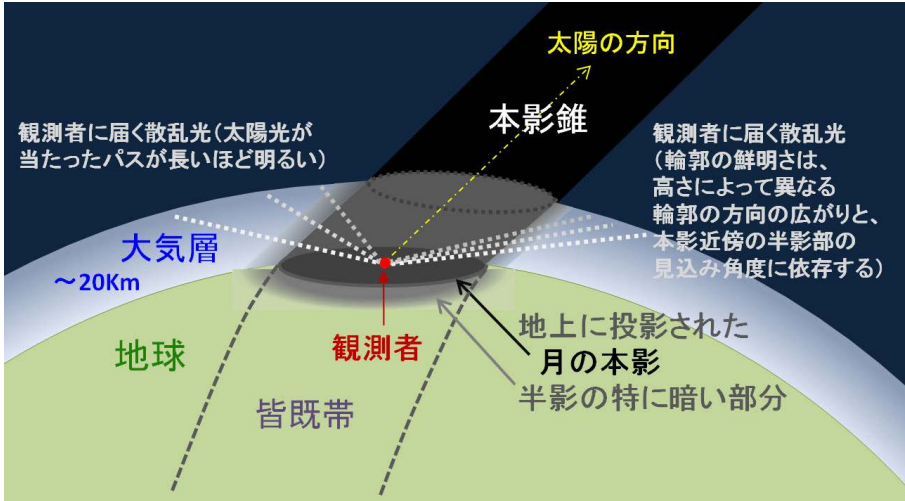


図23 皆既中の空に見える月の影の見え方を説明する新モデル. 欠けた太陽の光が本影の外側の大気層に当たること  
で散乱された光が、観測者にどのように届くかがポイントになります.

### 5. 皆既日食中の空の明るさをシミュレーションした研究との比較

今回の検討は、月の影の輪郭の見え方に注目したのですが、類似の研究として、皆既中の空の明るさ分布のシミュレーションを行った研究があります。例えば、1978年の Glenn E. Shaw 氏の研究 [10] や、2007年の C. Emde 氏と B. Mayer 氏による研究 [11] です。

Shaw 氏の論文は、大気の散乱理論に基づき、図24のように1次および2次の散乱プロセスによって本影の中に拡散する太陽光のみを考慮して、皆既中の空の明るさをシミュレーションしたもので、1973年のアフリカ日食時の空の放射輝度の測定値と約15%以内で一致していると述べられています。そして、皆既中の天頂輝度に寄与する大気層の広がりと高さについて、図25のように本影の半径 (120 km) よりも内側は、太陽光が届かないので寄与しないが、外側は半径数百 km まで、高さ 30 km ぐらいまで (寄与が大きいのは 15 km ぐらいまで) の範囲で散乱した光が寄与するというシミュレーション結果になっています。従って、今回私が行った検討結果は、Shaw

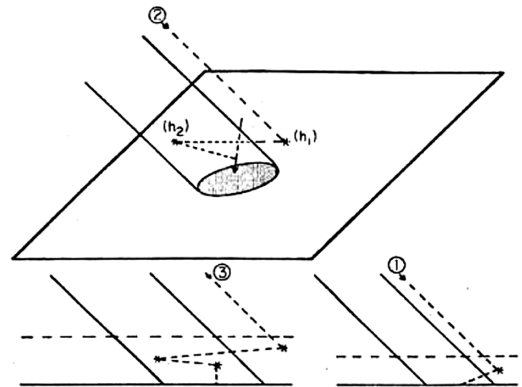


図24 Shaw 氏のシミュレーションの概念図 [10] © The Optical Society から転載許可取得済. 皆既日食の散乱プロセスを、等角投影法 (上) と断面図 (下) で模式的に描き、1次、2次、3次の散乱プロセスを経る光線が示されています.

氏の研究と矛盾しないものだと理解できます。

なお、Emde 氏と Mayer 氏の論文では、Shaw 氏の論文より精度を高くするため、モンテカルロ法を使用した光線追跡で本影の拡散放射を計算し、空の色の変化までシミュレーションが行われています。

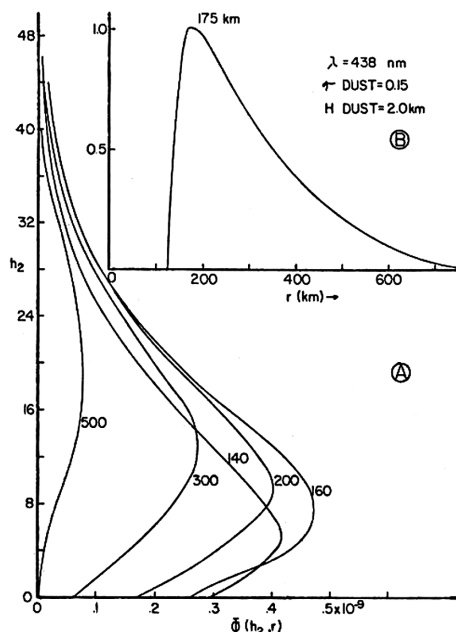


図25 皆既中の天頂輝度に寄与する散乱光の発生場所 [10] © The Optical Societyから転載許可取得済。(A) 半径方向の距離  $r$  (km) 毎に半径方向の厚さが40 km分の、様々な円筒形の体積要素からの日食の中心に届く下向きの放射輝度の垂直分布。(B) 日食の中心からの半径方向の距離の関数で示した、天頂輝度への垂直方向および水平方向の積分の寄与。

## 6. ま と め

様々な条件下で撮られた月の影の画像を調べた結果、火山噴火の影響があった1991日食を例外と考えると、空に映る月の影の輪郭を出現させるのは、基本的には上空約20 kmまでの大気層全体で、高さ毎に異なる本影に覆われている領域と覆われていない領域の輪郭が、大気の散乱特性に応じて積算され、見かけの高さで約10 kmを中心とするぼやけた輪郭として見えることが分かりました。そして、月の影の輪郭のぼやけ方は、本影の縁の近くではかなり暗い半影部の明るさのグラデーションを見込む角度にも依存することが分かりました。

このモデルは、皆既中の天頂輝度を求めるた

め、本影外の大気層での散乱の振る舞いをシミュレーションした論文の内容とも矛盾しないので、今後の日食では新しいモデルに基づき予測が行われ、観測データが蓄積されることを期待します。

## 謝 辞

この研究を進めるために、解析用の画像を提供いただいた、榊原幸雄氏、山野泰照氏、Petr Horálek氏、東京理科大天文研究部の皆さん、モデル検討のためのアドバイスや過去の経緯を教えていただいた、花岡庸一郎先生、日江井榮二郎先生、福江純先生、林田佐智子先生、大越治氏、遠山御幸氏、上山治貴氏、丸山良次氏、谷川政敏氏、白尾元理氏に感謝いたします。

月の影の高さを求めるために使った日食地図は、[eclipse.gsfc.nasa.gov](http://eclipse.gsfc.nasa.gov)に掲載されているNASA/Goddard Space Flight CenterのFred Espenak氏作成の地図と、アストロアーツ社のエクリプスナビゲータで作成した地図を使わせていただきました。

## 参考文献

- [1] 福江純, 2009, 天文月報, 102, 693
- [2] 唐沢範行・丸山良次, 1973, アフリカ日食観測団報告書, 66
- [3] 大越治・塩田和生, 2012, 日食のすべて (誠文堂新光社), 86
- [4] 遠山御幸, 1981, 日食情報1981 No. 4, 5
- [5] 谷川政敏, 1984, 1984年11月23・22日バプアニューギニア日食観測報告書, 42
- [6] 榊原幸雄, 1991, ハワイ・メキシコ皆既日食観測報告, 1, 72
- [7] <https://pubs.usgs.gov/pinatubo/self/> (Fig. 6) (2021.5.16)
- [8] Hayashida, S., & Sasano, Y., 1993, Geophys. Res. Lett., 20, 575
- [9] [https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/aerosolhp/aerosol\\_shindan.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/aerosolhp/aerosol_shindan.html) (2021.5.16)
- [10] Shaw, G. E., 1978, APPLIED OPTICS, 17, 272
- [11] Emde, C., & Mayer, B., 2007, Atmos. Chem. Phys., 7, 2259