

# 月食を楽しむ・月食から科学する

大西浩次（国立長野高専）

## はじめに

2021年5月26日の夕方に、日本では3年ぶりの皆既月食が起こります。月食は、地球の影の中を月が通過するときに起きます。すなわち、太陽-地球-月が一直線上に並んだ満月のときに起こるのです。しかし、満月のたびに月食が起きるわけではありません。これは、星座の中での太陽の通り道（黄道）に対して、月の通り道（白道）が5度ほど傾いているため、普段の満月のときは、地球の影の北側や南側などに逸れたところを通過しているためです。逆に、黄道と白道が交差するような特別の時期に満月になると月食が起きるのです。

ところで、月が地球の影に入っている皆既月食中、月は薄暗い「赤銅（しゃくどう）色」に見えています。その理由は、地球に大気が在るため、地球の影が真っ暗ではなく、太陽光の一部が地球の大気で屈折して、「地球の影」の中に入りこんでくるためです。さらに、その光は主に赤い色が多いので、皆既日食中の月面が薄暗い「赤銅色」に見えるのです。すなわち、「月食の色」は「地球の影」の中の大気の透過光の「色」なのです。ですから、月食の形や色に注目すると、地球の形や地球の大気中の様子（分布や成分）を調べる事ができるのです。

あなたも月食を楽しんでみませんか？月食を使っていろいろな観察に挑戦してみませんか。この中には、最先端の天文学につながる観測もあります。ここでは、3つの観察と解析について簡単に紹介してみましよう。



2018年1月の皆既月食の様子（撮影：大西浩次）。

## 1. アリストアルコスへの挑戦：月食を使って月までの距離を測定してみよう

皆さんは、地球が球形だと言うことを知っているでしょう。でも、どのようにして、自分で確かめる事が出来るでしょうか。そのひとつが月食の時の観察からわかります。



図1 月食の様子スケッチ

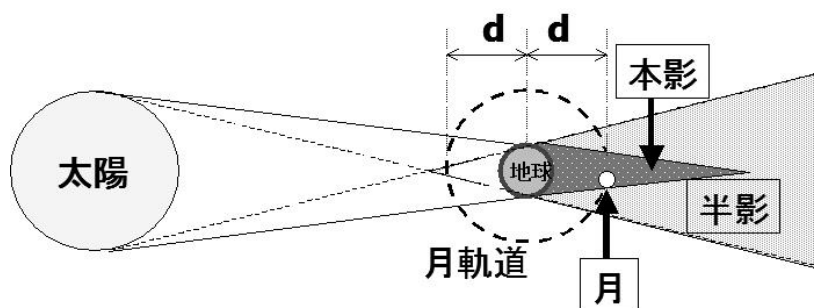


図2 月食時の太陽、地球、月の位置関係。

(スケールが実際と異なっていることに注意)

図1は、月食の部分食の様子です。この月食の時の太陽、地球、月の位置関係を図2で示します。この月食の「**円弧に欠けた部分**」は、**地球の本影の影が月面に映っている様子**です。紀元前350のころ、アリストテレスは、この影が「いつでも」円弧を描いているのを見て、「地球は球形である」ことを示しました。

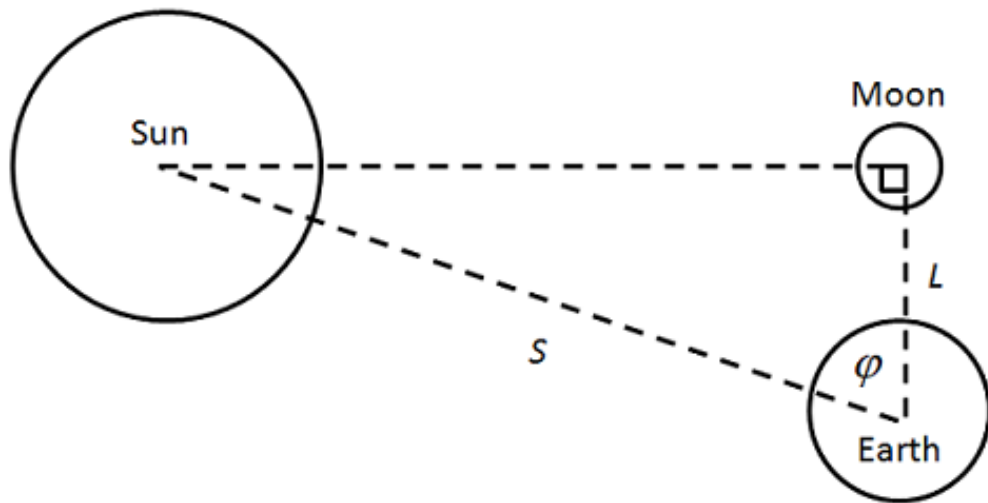


図3 上弦の月の時の太陽と月の離角 ( $\phi$ )

その後、アリストアルコス (310B.C.-230B.C) は、月食の際に、地球の影の大きさが月の見かけの大きさの約 3 倍であることから、月までの距離を見積もりました。さらに、彼は、図 3 のように、月の上弦や下弦の時の太陽と月の離角  $\phi$  が 90 度からどのくらいずれているかという値を観測して、太陽までの距離を求めました。もし、 $\phi$  が 90 度であれば、太陽の距離は無限大になります。彼は、87 度と測定したため、太陽までの距離が実際の値の数十分の 1 の大きさになってしまいましたが、太陽が遥かに遠いのに月と同じ見かけの大きさで見える事より、太陽が地球より遥かに大きな天体である事を示すことができた。15 世紀に翻訳された彼の著書が、「地動説」再発見への大きな要因の 1 つとなったのです。

さあ、今回の月食から、これからいくつかのテーマを挙げてみよう。

### 挑戦 1

あなたは、月食を観察しながら、地球が球体であることを実感できるだろうか。また、実感するには何に注目したらよいか、事前に考えておこう。

### 挑戦 2

あなたは、自分の観測 (写真とその解析など) から、地球がどのくらい丸いかを実際に確かめることができるだろうか? (そのための精度はどのくらい必要だろうか?)

### 挑戦 3

アリストタルコスの観察のように、地球から月までの距離を測定してみよう。なお、アリストタルコスは、地球の影のサイズが月の見かけのサイズの約 3 倍より、地球の大きさは、月の大きさの約 3 倍だと考えたが、実際には約 4 倍である。このずれの原因を考えてみてほしい。(ヒントは、この付録 1 にある。)

### 挑戦 4

いろんな(部分)月食の写真を集めて、月までの距離を求めてみよう。毎回、月までの距離が変わっているように思える。この原因を考えてみよう。

(月の見かけの高度に起因する変化もある。なぜだろう)

また、君は、これらのデータから月の軌道の形(離心率など)を求めることができるだろうか。(なお、今回の皆既月食は、(科学用語ではないが「スーパームーン」と呼ばれる)大きく見える満月で起きる。この時の月までの距離はどうなっているだろう)

### 挑戦 5

これまでの、いろいろな月食時の写真から月までの距離と見かけの移動速度を求めてみよう。このことからケプラーの第 2 法則(面積速度一定の法則)を確認できるだろうか。

### 挑戦 6

アリストタルコスの方法で太陽までの距離を測定することはできるだろうか。ちなみに、アリストタルコスは、太陽-地球間を実際の値の 60 分の 1 の大きさを求めた。大きくずれているね。実際にアリストタルコスの方法で、太陽までの距離の測定に成功した人はいません。それは、観測原理に問題が在るのだろうか。それとも、測定に問題が在るのだろうか。検討してみると面白いかもしれない。

### 挑戦 7

月食で月までの距離が測定できたとしよう。では、そのデータから地球の質量を測定することはできるだろうか。

### 挑戦 8

ニュートンは、月の運動から万有引力の法則を導いたという。きみも、皆既月食の時の測定から、月までの距離や月の公転速度を求めることで、万有引力の法則を導出できるだろうか。

### 3. 屈折光の秘密：月食を使って地球の影の色をしてみよう

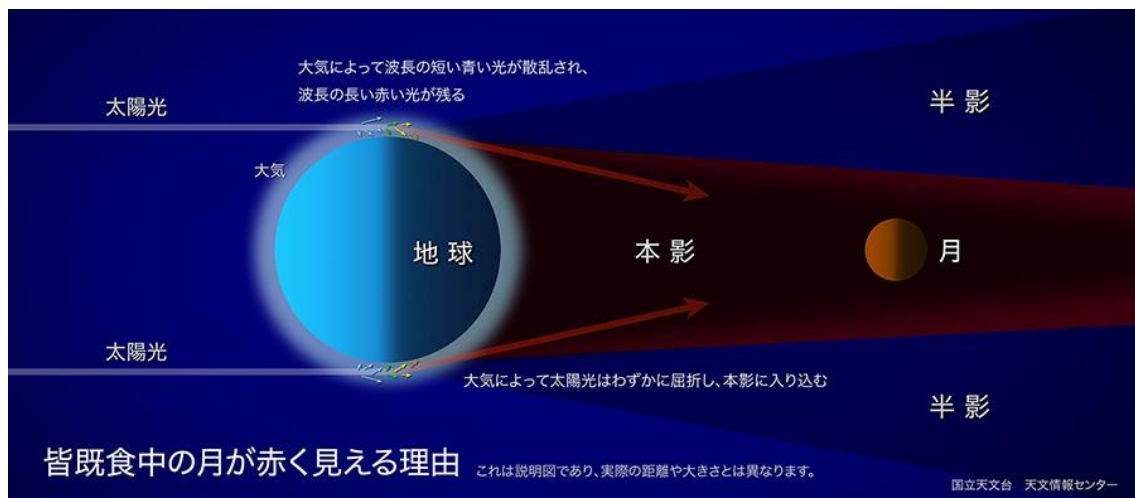


図4 皆既月食中の月が赤く見える理由（国立天文台HPより）

皆既月食の時に月は「赤銅色」に見えるといわれています。皆既月食中の月の明るさや赤い色は、月面に投影された地球の本影の性質を示しています。この本影の明るさや色は、地球大気で太陽光がどのように散乱・屈折されたかによって決まっています。本影内部の赤い光は、大気の散乱のために、夕日のように、波長の短い青い光が強く散乱され、波長の長い赤い光が大気を透過・屈折してきたためです。

しかし、より詳しく見ると、リング状に透過してくる太陽光の個々の場所でその明るさや色の分布が異なっています。これは、その付近の大気中に浮遊する塵のサイズや量などにより吸収などが異なるためです。例えば、火山噴火などによって、成層圏まで塵が噴き上げられると、暗い皆既月食になることが知られています。すなわち、本影内部の明るさや色は、リング状に透過して来る「いろいろな地球の場所」の大気の性質によって決まります。このことを解析で考慮すると、皆既月食中の月の色や明るさの測定から、地球全体の大気汚染分布などの大気モニターが原理的に可能です。

#### 挑戦1

皆既月食のときの月の色が異なります。フランスの天文学者ダンジョンが20世紀初頭に「ダンジョンの尺度（スケール）」という色の目安を用いて、月食の色を調べました。（Danjon, M.A. 1920, Comptes Rendus Acad. Paris 171, 1127）

この「ダンジョンの尺度（スケール）」で測ると今回の月食はいくつになるでしょうか。

詳細は、2011年の国立天文台の観測キャンペーンのHPを参照してください。  
<http://naojcamp.nao.ac.jp/phenomena/20111210/about/color.html>

### 挑戦 2

皆既月食中の月の明るさを測ってみよう。そうして、地球の影の明るさ分布を測定してみよう。測定には、PC付属の画像閲覧ソフトなどを使用して、画像の輝度を測定すると良いが、さらに精度を上げて測定するには、いくつかのテクニックが必要になる。

ひとつは、明るさの基準となる比較星と月面の明るさを比較して、実際に等級に変換するなどするとなお良い。この時は、比較星や等級の変換の仕方を勉強しないとイケない。さらに、写真からより精度よく測るには、撮影時にRAWで撮影しておくが良い。このデータをrawtofitsなどのソフトでfitsデータに変換して、さらに、写真からより精度よく測るには、RAWモードで撮影しておくが良い。このデータをraw2fitsなどのソフトでfitsデータに変換してフリーの画像処理ソフト「すばる画像解析ソフト“マカリィ”」を使うと、プロと同様の測光観測ができる。これらの詳細を知りたいときは、「すばる画像解析ソフト“マカリィ”」のウェブページ、あるいは、「マカリィ」の解説書を参考にすると良い。

“マカリィ”については、国立天文台のウェブページを参考に、

<http://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja>

“マカリィ”の使い方は、オンラインマニュアルを参考に、

<http://makalii.mtk.nao.ac.jp/manual/ja/>

また、“マカリィ”を使って実際に解析する解説書が出版されている。

書名：あなたもできるデジカメ天文学

出版社：恒星社厚生閣

編者：鈴木文二・洞口俊博

定価：2700円＋税

ISBN：978-4-7699-1575-1

### 挑戦 3

デジタルカメラでは、3色(RGB)の色でカラーを作っている。そのため、それぞれの色ごとの明るさを測定すると、地球の影の色の分布が測定できます。

### 挑戦 4

プリズムや回折格子を使って、月食時のスペクトルを撮影して色の変化を見てみよう。

## 挑戦 5

地球の影の中の光は地球の大気の中のあたりを透過した光であるか考えてみよう。色ごとの屈折率の違いを考えることになる。(なお、地球の影の中心付近は、10 km以下の低空の通過光、地球の影の端の方は、上空 20 km付近の透過光がメインとなる。)

## 4. バイオマーカーを検出できるか：

「地球の影」の境界の色に注目して見てみよう。

現在、太陽以外の恒星にも惑星が次々発見されています。今日では、その数も4000 個近くに達しバラエティーある惑星系の世界が分かっている。そうして、この研究の次のターゲットは、生命のある惑星の発見である。この手法として、惑星大気成分を測定する方法が考えられている。このような、宇宙での生命探査の練習として、地球を観測することで、「生命の存在の兆候を示すバイオマーカーとしての酸素、オゾン、水、メタンなどの分子達が実際に検出できるか」という試みが行なわれてきました。古くは、1990年12月、NASAの木星探査機ガリレオが地球スイングバイをした際に、宇宙から地球の大気成分の分光観測を行ない、「地球に大量の酸素がある事」の検出に成功しています。

同様の目的で、月食中の月の光からバイオマーカーの検出のための観測が行なわれています。いま、月が本影の中に完全に入っている皆既月食中でも、月がぼんやり赤銅色で見えます。このことは、本影の中にも赤い光が存在していることを意味しています。この赤い光は、地球大気を通過した太陽光の一部が、大気中で屈折して本影の中に入り込んできた光です。だから、この赤い光は、大気中で酸素やオゾン、水などの分子達の特徴的な波長の光が吸収されている吸収パターン＝「指紋」を持っています。このため、月食の分光観測から地球の大気の「指紋」がどのように見えるのかを確かめることで、生命探査のためのテンプレートを作ることができます。このような理由から、最近の皆既月食ごとに、大望遠鏡による分光観測が行なわれています。

ところで、2007年にドイツのアマチュア天文家が、皆既月食直前の部分食の境界がやや暗い緑色や青色に写ることを指摘しました。NASAは、そのサイト上で、この現象をターコイズFRINGEと呼んで紹介したことで、多くの人を知ることになったのです。さて、オゾンが紫外線領域で太陽光を吸収することは有名です。一方、可視光領域での吸収は、大気科学分野以外ではあまり有名ではなかったようです。

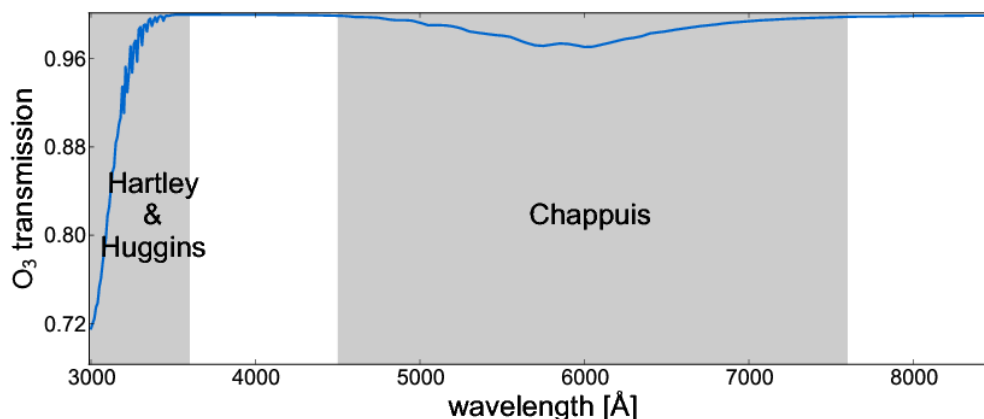


図5 オゾンの可視光吸収帯、シャピュイ (Chappuis) 帯  
オゾンの可視光吸収帯をシャピュイ (Chappuis) 帯と呼ばれている。600 nm 付近を中心に 450 nm から 650 nm の範囲の連続的な吸収帯である。天頂付近では、わずか4%ほどの吸収量です。ところが、この吸収が、月食の時に大きく影響します。

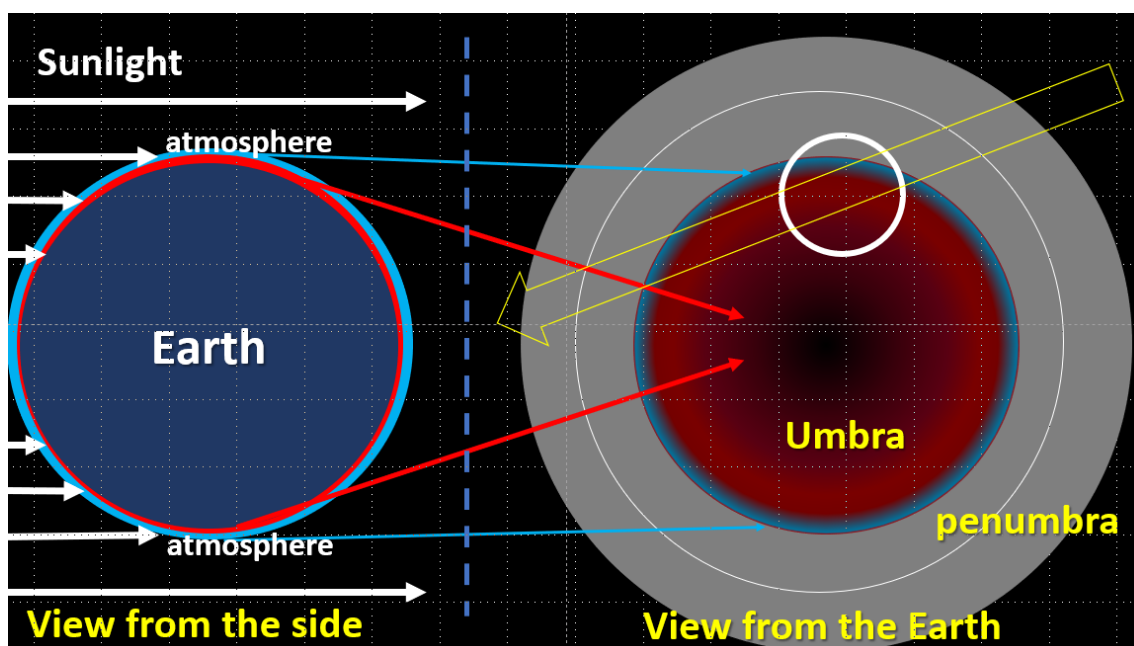


図6 地球の影の中の色



地球の影の中の光が、地球大気のどの付近を通過したのかを示すモデル計算によると、地球の影の中心付近は、地表からわずか **4 km 付近** という **対流圏内を通過した光が主だ** ということです。一方、地球の影の端のほうでは、**高度 20 km 付近を通過した光が主** になります。ちょうど成層圏内で、我々が「オゾン層」と呼んでいるオゾンが多い領域です。ここを水平に通過してくると、オゾンによる赤い光の吸収は 7-8 割に達します。このため、月食の境界付近では、赤い光の減少が散乱による青い光の減少にまさることで、やや暗い緑色や青色の光として見えるというわけです。まさに、この様子が、月食の境界付近が青色や緑色といわれるトルコ石色の縁飾り＝ターコイズフリンジと呼ばれるゆえんです。今回の月食は観測条件も良いので、このターコイズフリンジが観測できるかも知れません。



図7 皆既月食直前のターコイズフリンジ

デジタルカメラで、地球の本影の境界付近の色を「強調」しています。これは 2014 年の皆既月食、月のごく近くには天王星も写り、にぎやかな月食でした。

#### 挑戦 1

あなたは、皆既月食になる前や皆既月食の直後の月食の様子を観察しながら、ターコイズフリンジが検出できるか挑戦してみよう。

#### 挑戦 2

ターコイズフリンジの色分布（スペクトル）などが測定できるだろうか。

## 付録1

通常、「太陽光線はほぼ平行と考えて良い」と考えられますが、太陽の見かけの大きさを無視することは出来ません。そのため、図2のように、太陽の上のほうからの光線と下のほうからの光線で傾きがあり、地球の影は、収束するコーン状の影（本影）と拡散するコーン状の影（半影）が出来ます。ここで、この収束する割合を日食の状況から確認してみます。

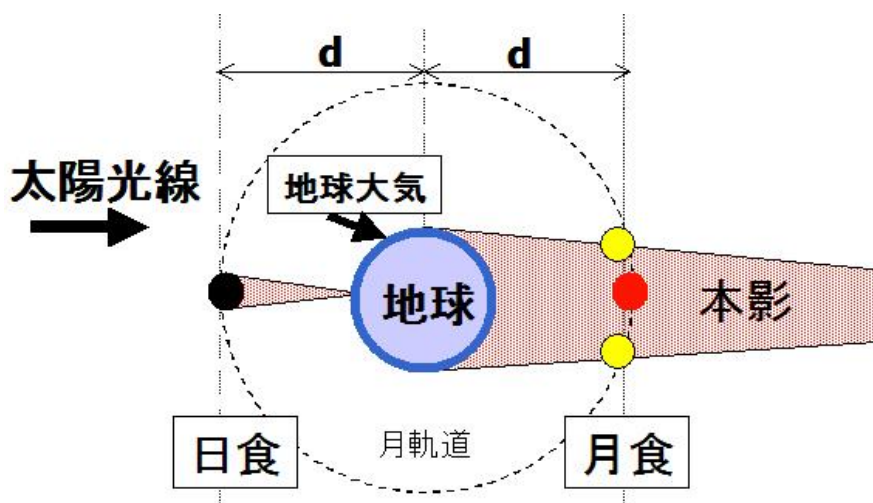


図8 日食と月食の位置関係

日食とは、月に太陽が隠される現象です。ところで、太陽と月の見かけの大きさは偶然ほぼ同じ大きさです。このため、地球と月の間の距離  $d$  で、月の影の収束点がちょうど地球に落ちている事になります。このことに注意すると、地球の本影の収束の様子がわかります。すなわち、月-地球間の距離  $d$  で、月直径分縮小している事が判ります。このことを考慮すると、月面に写る地球の本影の大きさから、月のサイズがわかります。ギリシャ時代、280B.C.のころ、アリストアルコスは、月食のときに映る地球の影の大きさを測って、月の直径が地球の約  $1/3$  の天体であると推定した。今日では、より正確な測定から、月の直径が地球の約  $1/4$  の天体であることがわかっている。

実際の観測では、月面に映る本影の「影の円弧」の測定より、本影の大きさを月のサイズに対して求めてみよう。この大きさは月の大きさのほぼ3倍になるだろう。ここで、本影の大きさが、月の直径分縮小していることを考慮すれば、月のサイズが約  $1/4$  地球サイズと決まる。

一方、月の見かけの大きさは、(月の実際の大きさ) $\div$ (月までの距離  $d$ )で、この角度が約  $0.5$  度なので、月までの距離  $d = (1/4 \text{ 地球直径}) \div 0.5 \text{ 度}$  (注2)  $= (1/4 \text{ 地球直径}) / ((\pi/180) * 0.5) = \text{約 } 30 \text{ 倍地球直径}$ となる。ここで、地球半径を  $6400\text{km}$  とすれば、月までの距離は約  $38 \text{ 万 km}$  となる。