

オゾン層モニターとしての月食分光観測*

(第23回科学部研究報告)

Spectroscopic Observations of Lunar Eclipses as a Monitor for the Ozone Layer (The 23rd Report of the Science Club of Yonago National College of Technology)

吉田健吾**, 松本一生****, 森下央翔***, 吉田浩瑛***,
Kengo YOSHIDA, Issei MATSUMOTO, Hiroto MORISHITA, Hiroaki YOSHIDA,

水本和志****, 古賀華*****, 中田杏南*****, 前田孝太郎*****, 竹内 彰継*****,
Kazushi MIZUMOTO, Hana KOGA, Kyouna NAKADA, Koutarou MAETA, Akitsugu TAKEUCHI

概要

私達は、2021年11月19日と2022年11月8日に起こった月食の分光観測を行った。そして、そのスペクトルからオゾン層による吸収帯の「等価幅」を求め、オゾン層による吸収量を数値化した。続いて、米子高専科学部が2014年10月8日の月食でも行っていた分光観測のデータを再解析し、オゾン層の吸収帯の等価幅を求めて2021年と2022年の結果と比較した。その結果、オゾン層の回復を有意に検出することができた。このことから、月食の分光観測を行い、オゾン層による吸収の「等価幅」を求め、その経年変化を調べればオゾン層の回復状況をモニターすることができることがわかった。

1. はじめに

フロンガスなどによるオゾン層の破壊は、理論的立場からすでに1970年代には予言されていた。しかし、実際にオゾン層破壊が観測されたのは1980年代に入ってからである。特に、南極上空のオゾンホールが発見は衝撃的で、国際社会に早急な対策が求められた。その結果、1980年代後半からフロンガスの規制が段階的に強化され、先進国においては1996年に全廃されることとなった。そのため、オゾン層の破壊は1990年代後半に底を打ち、近年は回復しつつあると報告されている¹⁾。南極上空のオゾンホールの大きさも、2000年代が最大で、徐々に縮小していき、2050年頃には消滅するのではないかと予言されるようになった²⁾。

私達の研究は、一見何の関係も無いと思われる月食の分光観測により、オゾン層の回復状況がモニターできるのということを提案するものである。私達が所属する米子高専科学部では以前から天体分光観測に取り組んできた。その一環として、2021年11月19日に起こった月食でも分光観測を行い、2022年3月の日本天文学会春季年会ジュニアセッションで研究発表を行った。しかし、その後データの解析を工夫すればオゾン層の回復状況がモニターできるということに気づき、本研究を始めることとなった。

まず、月食の分光観測で、どうしてオゾン層の状況がモニターできるのか？本研究の着眼点を説明する。

* 原稿受理 令和5年3月10日
** 機械工学科学生
*** 機械システムコース学生
**** 情報システムコース学生
***** 化学バイオコース学生
***** 総合工学科学生
***** 教養教育部門

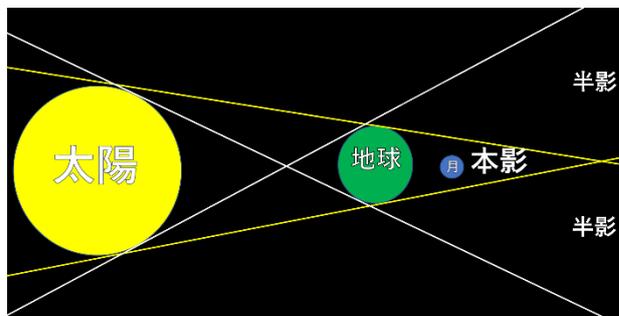


図1 月食の「本影」と「半影」

月食とは、図1のように月が地球の影に入るために生じる天体現象である。この時、地球に大気が無ければ、月が地球の「本影」と呼ばれる部分に入ると太陽光は完全に遮断されるので、月は真っ暗になるはずである。しかし、現実には地球大気で屈折した太陽光が本影内部にも回り込むため、月面は真っ暗ではなく赤褐色になる。

月面が赤褐色になるのは、地球大気でレイリー散乱により短波長の青い光ほど強く散乱され、長波長の赤い光しか透過できないからである。しかし、その時地球大気が含んでいる懸濁物質により大気の透過率も変化する。その結果、この「赤褐色」の度合いは月食のたびに変わることになる。

そこで、米子高専科学部では月食の「赤褐色」を客観的に数値化するために2021年11月19日に起こった月食の分光観測を行い、そのスペクトルに温度をパラメータとして黒体放射のプランク関数をフィッティングし、本影内での月面の「色温度」を測定した。そして、その結果を2022年3月の日本天文学会春季年会ジュニアセッションで研究発表した³⁾。

ところで、近年図2のように本影の縁では月面は「赤色」ではなく「青色」と報告されるようになってきた。この現象は、本影の「縁が青い」という意味で「ターコイズフリンジ（トルコ石色の縁）」と呼ばれている。それでは、どうしてターコイズフリンジが形成されるのであろうか？

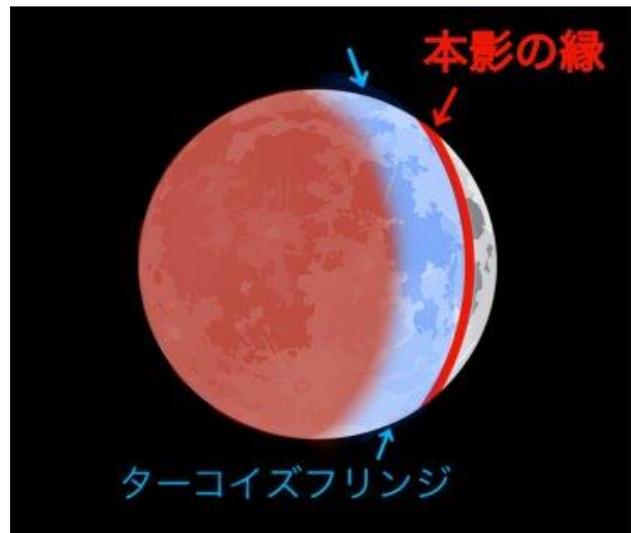


図2 ターコイズフリンジ

図3のように本影の縁付近に回り込む太陽光は主に地球大気の高い部分（具体的にはオゾン層）を通過した光である。

このような高層大気では、大気の密度が低いのでレイリー散乱はあまり効かない。それに対し、オゾン層は紫外線だけでなく6000Å付近の赤い光も吸収する。このため、青色の光はあまり散乱されず、逆に赤色の光が強く吸収されるため「青色」になると説明されている⁴⁾。

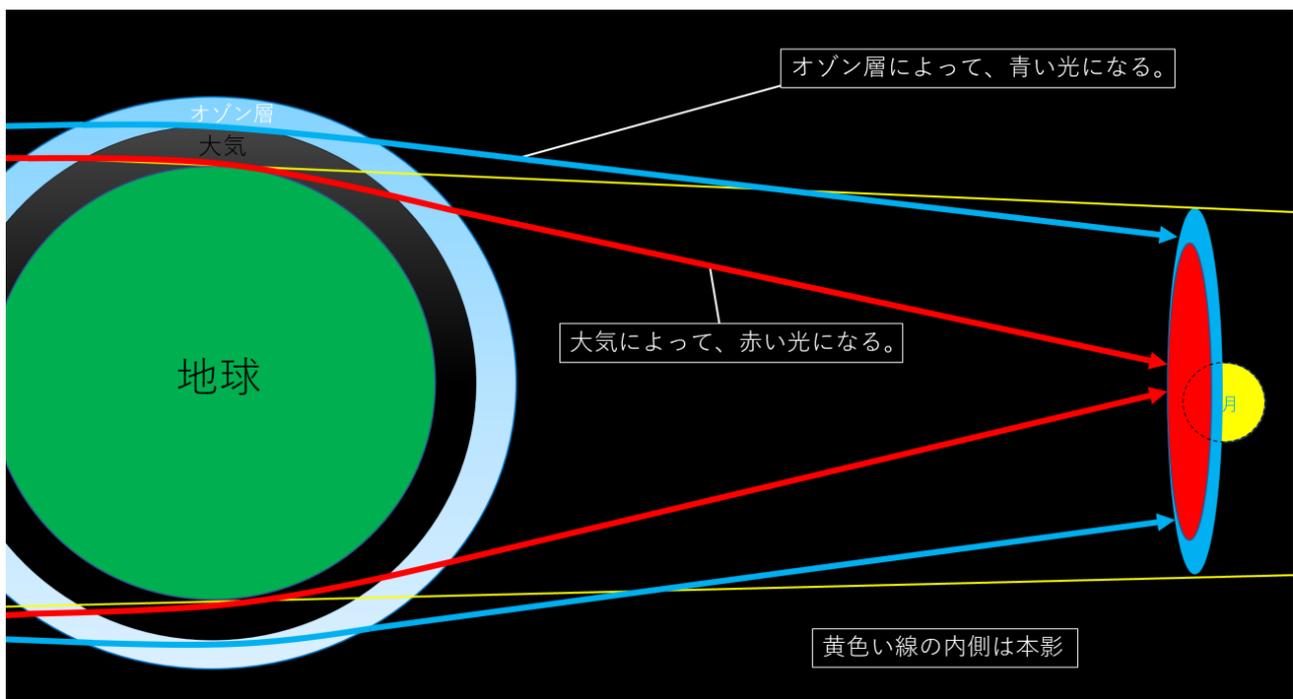


図3 ターコイズフリンジはオゾン層を通過した太陽光により形成される。

一方、私達の分光観測のデータを調べたところ、ターコイズフリンジのスペクトルがはっきり捉えられていることが分かった。そこで、本研究では

- ① ターコイズフリンジは定説のようにオゾン層の吸収で生じているのか？
- ② もしオゾン層の吸収で生じているなら、その吸収量を客観的に数値化できないか？
- ③ もし数値化できたら、オゾン層での吸収量を過去の観測データと比較して、オゾン層の回復過程が検出できないか？

ということを調べた。

①については、文献からオゾン層の吸収係数の波長依存性を調べ、それとターコイズフリンジのスペクトルでの吸収の波長依存性と比較することにより評価した。また、②については、天文学では吸収線の吸収の強さを「等価幅」という物理量で表すことから、ターコイズフリンジのスペクトルでの吸収帯の等価幅を求めて数値化した。そして、③については、幸い米子高専科学部が2014年10月8日に起こった月食でも分光観測を行っており、その結果を再解析して2021年11月19日の月食の結果と比較することにより調べた。

以上の結果、有意にオゾン層の回復を確認することができたので、その研究結果について報告する。なお、この研究はJSEC2022第20回高校生・高専生科学技術チャレンジで発表し、優秀賞を受賞した研究である。

2. 研究方法

2.1 観測

私達は2021年11月19日(金)の月食において本影内の月面の分光観測を行った。観測では、タカハシ製JP型赤道儀に米国Meade社製の25cmシュミットカセグレン望遠鏡を搭載し、京都虹工房製分光器「光藝」を取り付け(図4)、最大食が過ぎた18時25分から本影食が終わる19時25分まではほぼ5分間隔で、本影中心に最も近づく月の北極付近のスペクトル撮像を行った(図5)。なお、分光器に取り付けられた冷却CCDカメラはビットラン社製BJ41Lで、冷却温度は0.0°Cとした。

ところで、本影食中の月面は非常に暗くなるので、照明などの人工光の地球大気での反射(これを「スカイ」と言う)の影響を差引く必要がある。そのため、月の北極はスリットの下半分とし、上半分にはスカイが入るように撮像して、解析の際に容易にスカイの引き算が行え

るよう工夫した。また、適正露光が不明だったため、60秒、10秒、1秒と3段階の露光時間で撮像を行ったが、本影食の終了が近づくとも月面が明るくなったため、適宜露光時間を短くした。また、比較のために、本影食が終了した19時50分と、半影食も終了した21時05分にもスペクトル撮像を行った(図6)。さらに、観測後ハロゲンランプを用いてフラット撮像を行った。

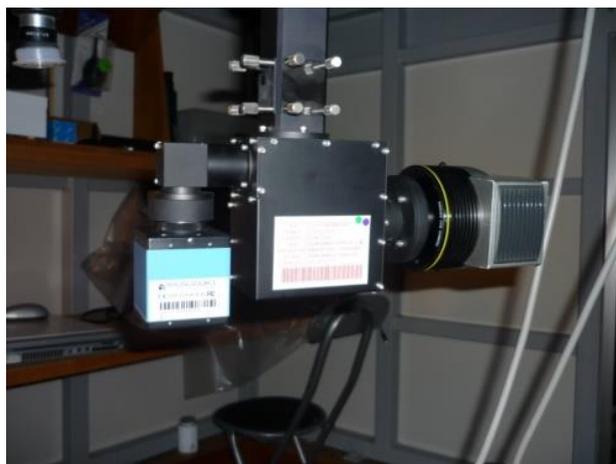


図4 京都虹工房社製分光器「光藝」



図5 観測ではスリットを月の北極にあてた

2.2 解析

撮像データは、CCDの暗電流を除去するための「ダーク処理」、CCDの感度むら除去のための「フラット処理」を行った後、スペクトルに映り込んだ地球大気のO₂線(波長7593.7Å, 6869.95Å)を利用して波長同定を行った。また、分光標準星との比較から、フラット撮像で使ったハロゲンランプの光が3400Kのプランク関数で表せることが分かり、スペクトルの強度較正が行えた。

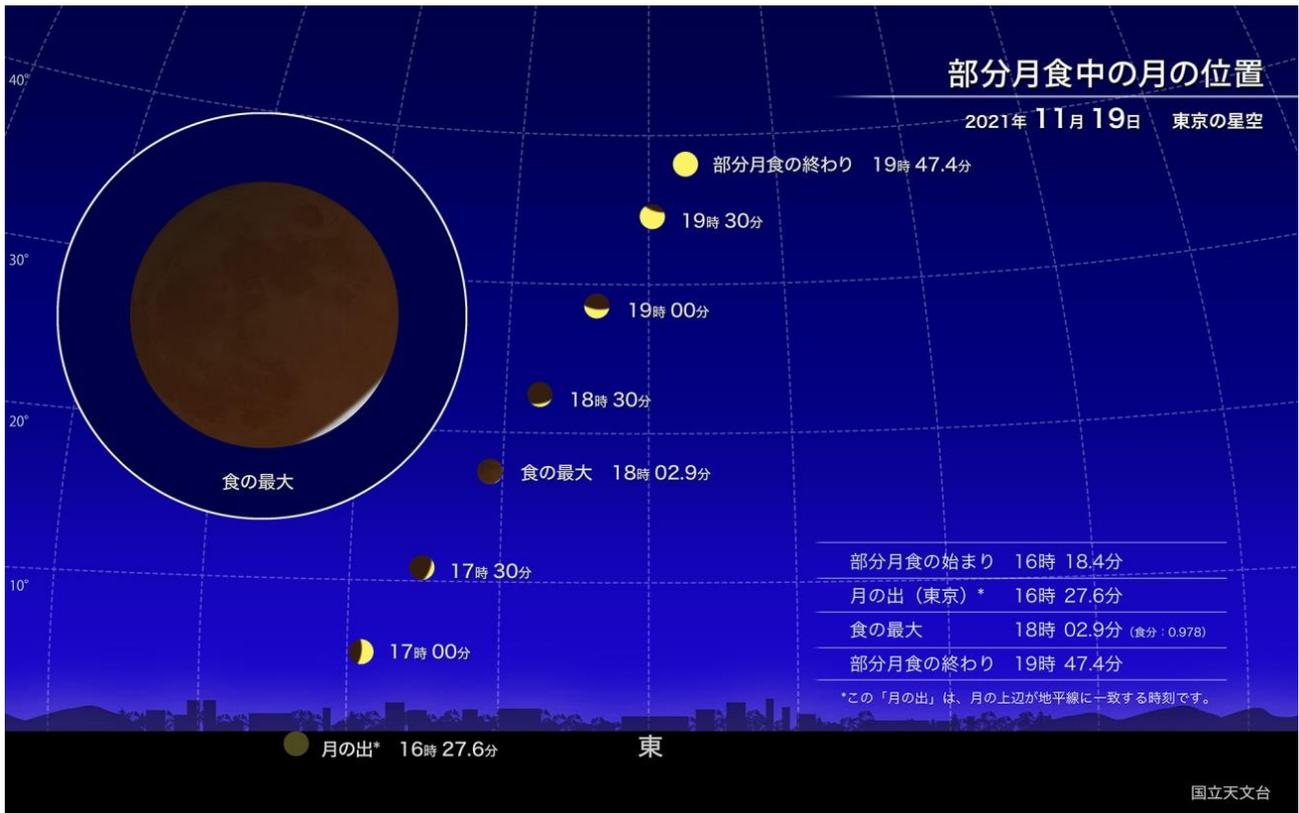


図6 月食の経過の模式図⁵⁾ (<https://www.nao.ac.jp/astro/sky/2021/11-topics03.html> より)

図7aは今回得られたスペクトルを重ねて表示したものである。なお、スペクトルの明るさの変化が大きかったため、図7aでは縦軸を明るさの常用対数とした。

図より、スペクトルには5000Å付近(緑色)を中心とした、4000Åから6000Åにわたる盛りあがりが見られた。また、その盛り上がりは、時間が経つ(本影中心から離れる)にしたがって高くなっていった。ことからこの盛り上がりはターコイズフリンジを表していると考えられる。

一方、図7aは6000Å付近が凹んでいるとも解釈できる。そこで、その凹みを図7bのオゾンの透過率と比較した。すると、オゾンの6000Å付近の凹みと、(凹みがふた山になっている等)曲線の微小な凹凸まで一致した。したがって、この凹みはオゾンの吸収帯によるものと考えられる。このことから、定説通りターコイズフリンジはオゾン層の吸収で生じていると考えられる。

2.3 オゾン層による吸収量の定量化

ターコイズフリンジがオゾン層による吸収で生じていることが分かったので、次のステップとして、オゾン層による吸収を定量化することを考える。

天文学ではスペクトル中の吸収線の強さを定量化する物理量として「等価幅 W 」というものがあり、次の式で定義されている。

$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{I_{\text{cont}} - I(\lambda)}{I_{\text{cont}}} d\lambda$$

上式と図8より、等価幅を計算するには連続光レベル I_{cont} が必要である。しかし、厳密に連続光レベルと求めることは、特に強い吸収線の場合困難である。オゾン層による吸収帯も非常に幅が広いので、連続光レベルを求めることは困難である。

しかし、本影内の月面のスペクトルは、明るさを常用対数表示すると、比較的簡単な波長の右上がり関数に見える。そこで、本研究では図9のように、直線で連続光レベル I_{cont} を近似した。そして短波長側の接点 (λ_1) から長波長側の接点 (λ_2) まで数値積分することにより等価幅 W を求めた。

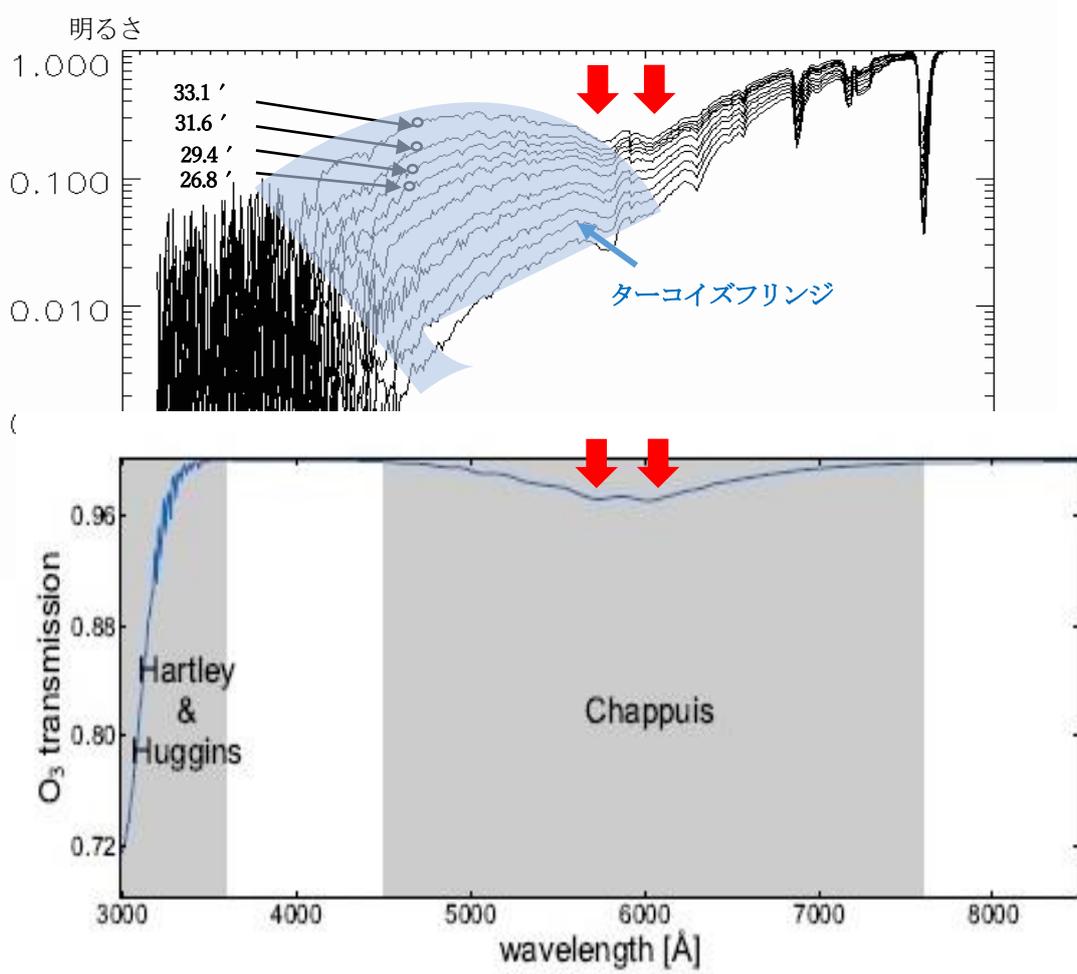


図7a ターコイズフリンジのスペクトル、左の数字は本影中心からの角距離。
 7b オゾンの透過率、6000Å 付近にも吸収帯がある⁶⁾。(Buton et al. 2013)

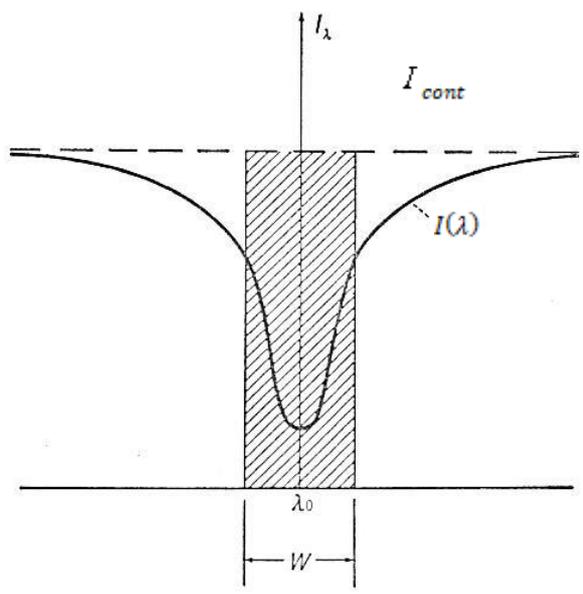


図8 吸収線の等価幅 W ⁷⁾ (ギブソン、1978)

3. 結果

図10に2021年11月19日に起こった月食での月の北極のオゾン層吸収帯の等価幅と本影中心からの角距離の関係を示す。図より本影中心から離れるにつれて等価幅が大きくなっていき、本影の縁で最大値をとるように思える。

このような分布であるから、本影の縁でターコイズフリンジが見えることになる。その結果、本影の縁では等価幅は約600Åで、本影中心近くでもおよそ半分の約300Åであることが分かった。

一方、本影中心近くになっても等価幅は0Åにはならない。文献⁴⁾では、ターコイズフリンジは本影の縁に見えると書いてあるため、本影中心近くになっても等価幅が0Åにならないのは不思議に思える。しかし、図11のように本影中心付近に回り込む太陽光といえどもオゾン層を長く通過しているため、オゾン層の吸収帯が

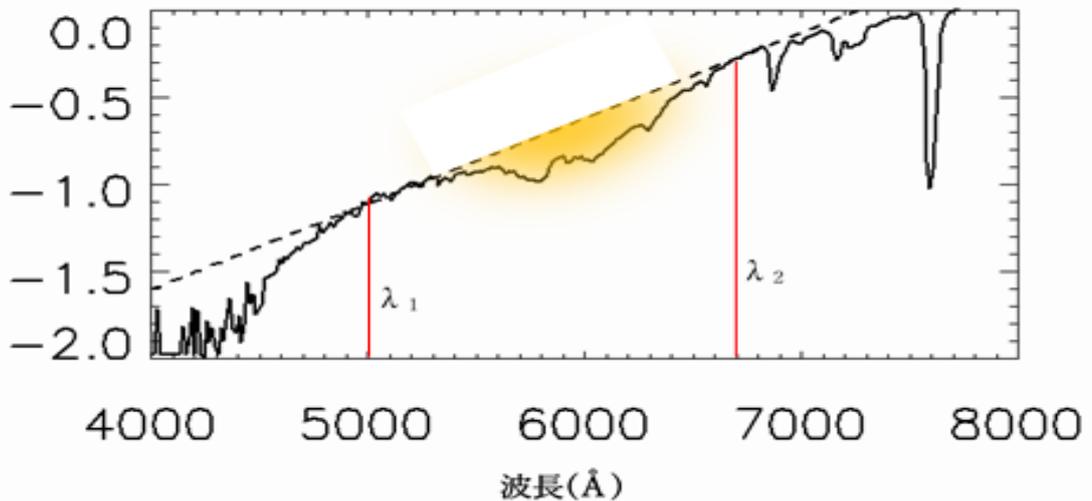


図9 直線で連続光レベル I_{cont} を近似して等価幅 W を求めた。

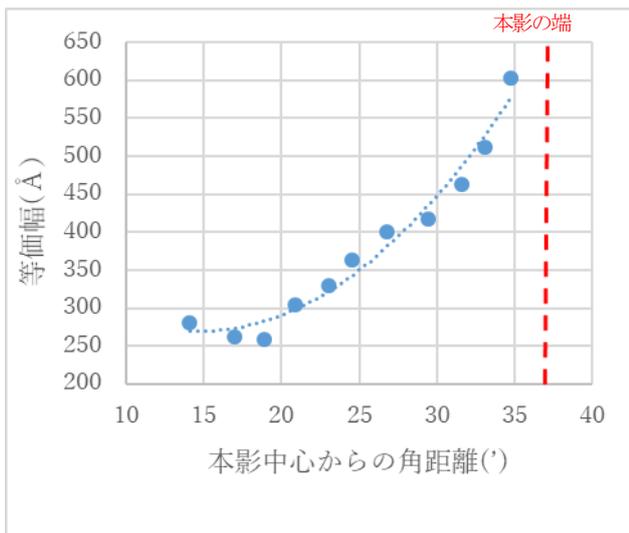


図10 等価幅と本影中心からの角距離の関係

あっても不思議ではない。したがって、本研究によりオゾン層による吸収が本影の縁だけではなく、相当本影中心近くにまで侵入していることが分かった。

4. 考察

4.1 考察

以上の解析によってオゾン層の吸収の大きさを「等価幅」を利用して数値化できることが分かった。ところで、近年フロンガスなどのオゾン層破壊物質の使用禁止によって、オゾン層が回復していると報告されている。オゾン層が回復すれば、オゾン層による吸収量が増え、

オゾン層吸収帯の等価幅が大きくなるはずである。

実は、2022年11月8日にも皆既月食があり、分光観測を行ってデータをとることができた。さらに、米子高専科学部は2014年10月8日の月食でも分光観測を行っていた。そこで、これらのデータを今回と同様の方法で解析し、オゾン層吸収帯の等価幅を求めてその本影中心からの変化を求めた(図12)。

図12より、2021年と2022年のオゾン層の吸収帯の等価幅は同じ曲線上に載っているように思える。これは、本研究の測定精度では1年程度の時間経過でのオゾン層の回復は検出できないことを表していると考えられる。しかし、このことから逆に本研究でのオゾン層の吸収帯の等価幅の測定誤差はこの曲線まわりの測定点のばらつき程度であると推測できる。

次に、本影中心から離れた縁に近い部分では、2021年2022年と2014年のオゾン層吸収帯の等価幅はあまり差異がないように見えるが、本影中心付近では2014年の方が有意に低いように見える。つまり、2014年の方が測定誤差を超えて吸収が少ないように見える。したがって、オゾン層の回復が検出できたと考えられる。

しかし、オゾン層が回復すれば、曲線が上側に移動するだけと思えるがなぜこのような結果となったのであろうか?そこで、この結果を説明する仮説を立ててみた。

4.2 結果を説明する仮説

図11のように、本影中心付近に回り込む太陽光は地表付近を通過した光と考えられる。これに対し、本影の縁に回り込む太陽光はオゾン層を通過した光と考えられる。

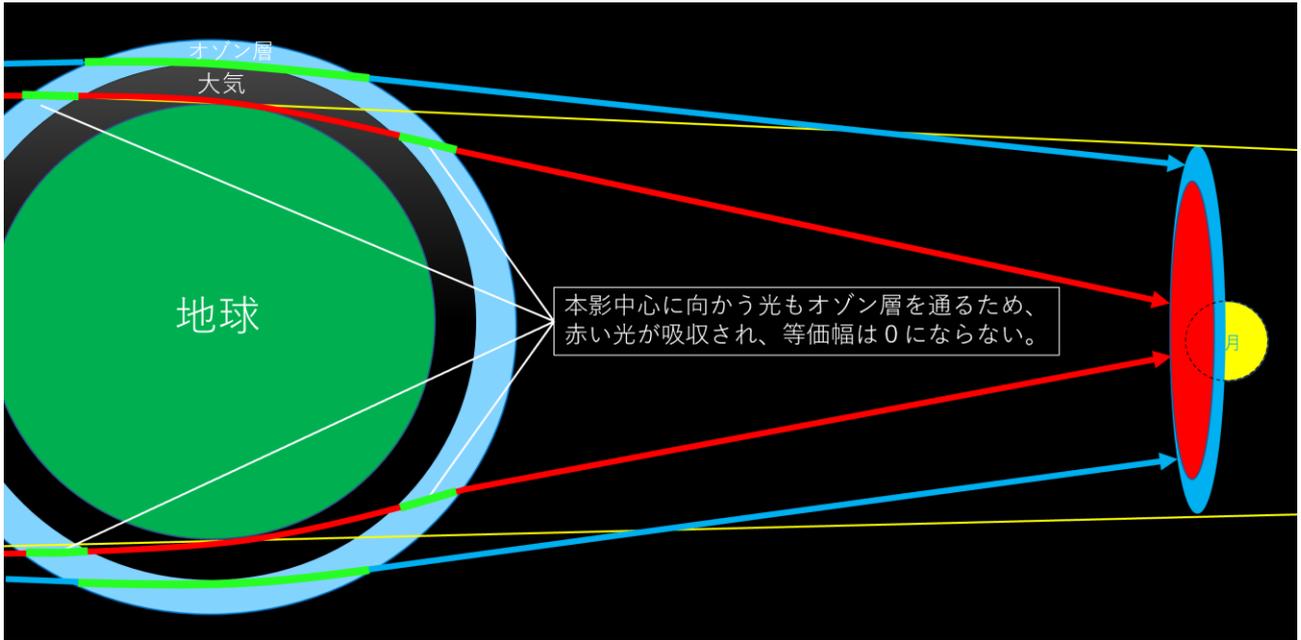


図11 本影中心近くでも太陽光線はオゾン層を通過するので等価幅は0Åにはならない。

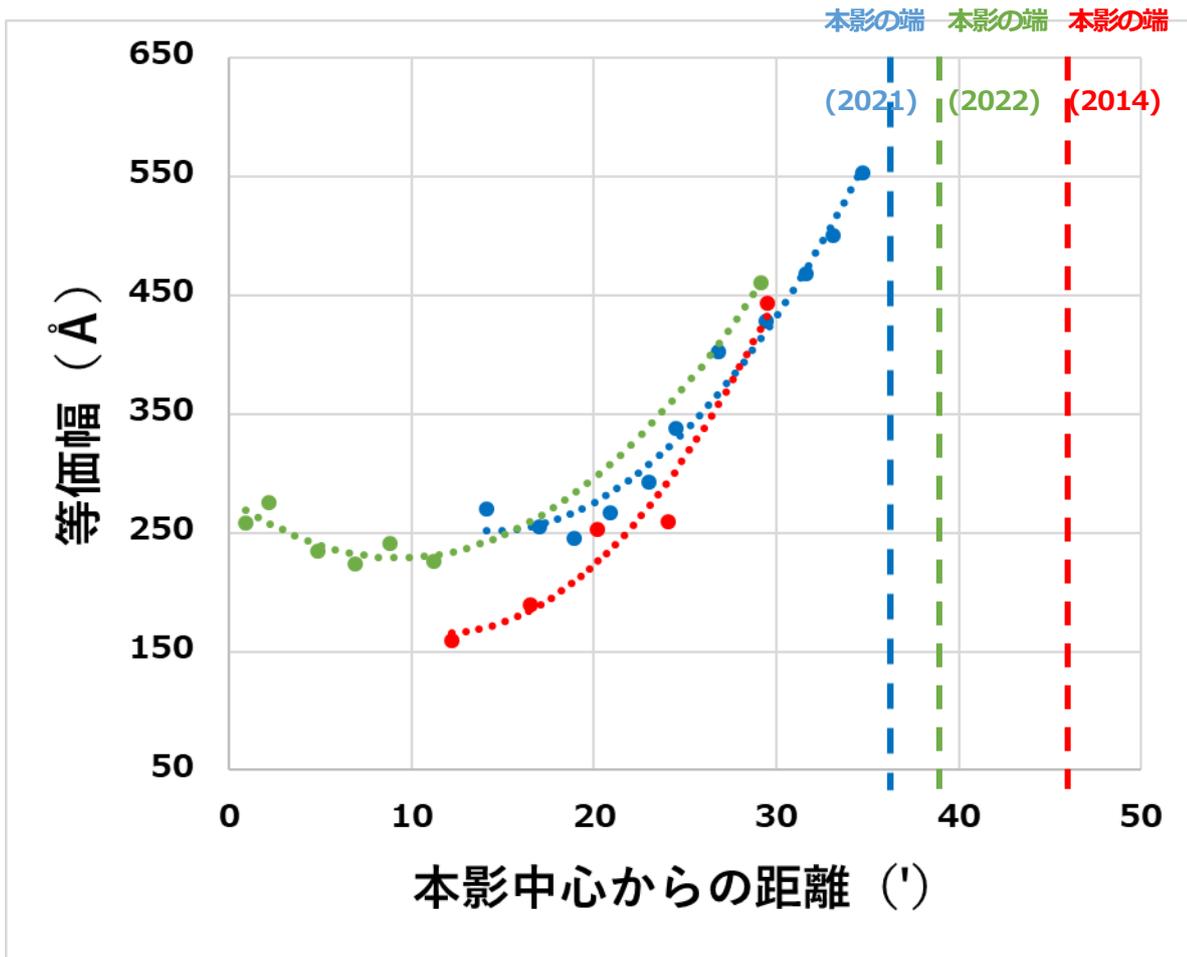


図12 2021年11月の月食と2022年11月、2014年10月の月食の比較

厳密にはこれらの光は地球大気で屈折する。しかし、地球と月の間隔が約 38 万 km に対し地球半径は約 6000km (これは本影の半径とほぼ等しい) なので光線の屈折量は非常に小さいと考えられる。

そこで、図 13 のように光の屈折を無視し、光線は直線であると仮定して本影の縁に到達する光線と本影中心付近に到達する光線がオゾン層を通過する距離、それぞれ L_1, L_2 を計算する。このとき、図 13 は左右対称なので、実際の距離の半分を L_1, L_2 とした。オゾン層での吸収量はこの距離に比例すると考えられる。以下の計算では地球半径を R 、オゾン層の下面の高さを h 、上面の高さを H とする。すると、オゾン層の厚み d は $H-h$ となる。

オゾン層は太陽からの紫外線で生じた酸素原子が酸素分子と結合することにより発生するので、オゾン層の上面の高さ H はほぼ一定と考えられる。これに対し、現在はフロンなどのオゾン破壊物質の(下層大気からの)供給が途絶えているので、ここでは非常に簡単に、オゾン層の厚み d が増えつつある、つまりオゾン層の下面の高さ h が低くなりつつあると仮定する。

すると、図 13 と三平方の定理と、 $h, H \ll R$ であることより、

$$(R + H)^2 = (R + h)^2 + L_1^2$$

$$\begin{aligned} \therefore L_1 &= \sqrt{2R(H - h) + H^2 - h^2} \approx \sqrt{2R(H - h)} = \\ &= \sqrt{2RH} \sqrt{1 - \frac{h}{H}} \end{aligned}$$

同様にして、

$$(R + H)^2 = R^2 + (L_0 + L_2)^2$$

$$\therefore L_0 + L_2 = \sqrt{2RH + H^2} \approx \sqrt{2RH}$$

$$(R + h)^2 = R^2 + L_0^2$$

$$\therefore L_0 = \sqrt{2Rh + h^2} \approx \sqrt{2Rh}$$

したがって、

$$\begin{aligned} L_2 &\approx \sqrt{2RH} - L_0 = \sqrt{2RH} - \sqrt{2Rh} = \sqrt{2R}(\sqrt{H} - \sqrt{h}) \\ &= \sqrt{2RH} \left(1 - \sqrt{\frac{h}{H}} \right) \end{aligned}$$

となる。

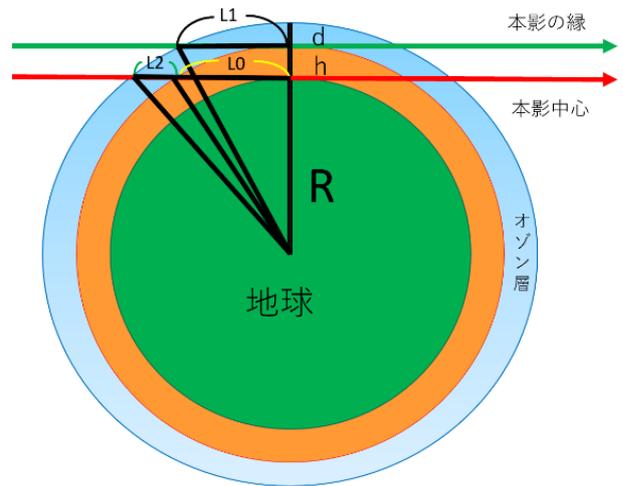


図 13 光線がオゾン層を通過する距離

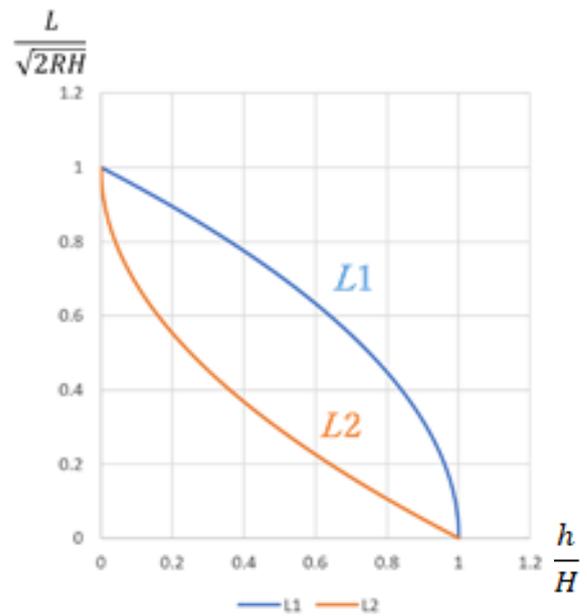


図 14 オゾン層を通過する距離の変化

一方、 $0 \leq h/H \leq 1$ なので、 L_1, L_2 の h/H による変化のグラフを描くと図 14 のようになる。ここで数値を代入すると、 $H \approx 40\text{km}$ 、 $h \approx 10\text{km}$ 程度なので、 $h/H \approx 0.25$ 程度となる。図 14 より、 $h/H \approx 0.25$ 程度ならば、この付近では $L_1 \approx 0.9$ に対し $L_2 \approx 0.5$ で、 L_1 は L_2 のおよそ 2 倍で、オゾン層による吸収が本影の縁と中心で約 2 倍違うことが説明できる。さらに、この付近では h が減少したとき L_1 の変化量は少ないが L_2 は大きく変化する。

そのため、本影中心から離れた縁に近い部分では、2021年と2014年のオゾン層吸収帯の等価幅はあまり差異が無く、本影中心付近では2014年の方が有意に低かったのではないだろうか？

もちろん、これは仮説にすぎない。現実の地球大気では、オゾン層の高さや厚みや濃度は一定ではない。また、観測時期の10月や11月には南極上空に巨大なオゾンホールが存在していたので⁸⁾、オゾンホールの経年変化による影響の表れかも知れない。このように、結果の解釈には議論の余地が残されているが、**オゾン層の回復が検出できたことは間違いない**と考えられる。

研究の目的でも述べたように、月食は基本的には世界のどこかで年に2回起こる。実際、2022年11月8日にも日本で月食が観測できる。私達は今後月食のたびに分光観測を行い、オゾン層の回復状況をモニターしていきたい。そして、全世界の高校生にモニター観測を紹介・発信することにより、モニター観測の正確性を高めるだけでなく、環境への問題意識を高めていただけるよう、微力ではあるが、努めていきたい。

5. 結論

私達は、2021年11月19日に起こった月食の分光観測を行った。そして、そのスペクトルからオゾン層による吸収帯の「等価幅」を求め、オゾン層による吸収量を数値化した。続いて、2022年11月8日の月食でも分光観測を行い、さらに米子高専科学部が2014年10月8日の月食でも行っていた分光観測のデータを再解析し、オゾン層の吸収帯の等価幅を求めて2021年の結果と比較した。その結果、オゾン層の回復を有意に検出することができた。

このことから、月食の分光観測を行い、オゾン層による吸収の「等価幅」を求め、その経年変化を調べればオゾン層の回復状況をモニターすることができることがわかった。私達のモニター観測は、分光器さえあれば高校生でも実施可能な簡単な手法である。また、月食は基本的には地球上のどこかで年に2回起こる。そこで、世界中の高校で私達が提案する手法を用いてモニター観測を行えば、オゾン層は理論が予想する通りに回復していくのか？それとも、近年深刻化しつつある地球温暖化により回復に影響が出るのか？調べることができる。そして、何より全世界の高校生間で環境問題についての関心を共有することができる。

このように、単なる科学研究にとどまらず、全世界の高校生にモニター観測を紹介・発信することにより、モ

ニターの正確性を高めるだけでなく、環境への問題意識を高めていただくことができる。これが本研究の最終目標である。

参考文献

- 1) 佐々木徹、『天気』、日本気象学会、2007年、54巻、5号、5-8頁
- 2) 秋吉英治他、『第14回スーパーコンピュータによる地球環境研究発表会』、2006年
- 3) 米子高専科学部、『日本天文学会春季年会ジュニアセッション発表予稿集』、2022年、29頁
- 4) 誠文堂新光社発行、『天文ガイド』、2021年12月号、6-17頁
- 5) 国立天文台のホームページ、
<https://www.nao.ac.jp/astro/sky/2021/11-topics03.html>
- 6) C. Button, et al. A&A 549, A8 (2013)
- 7) E.G. ギブソン著、桜井邦朋訳、『現代の太陽像』、1978年、講談社発行
- 8) 気象庁のホームページ、南極オゾンホールの状況、
https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/diag_o3hole.html