

忘れられた謎 月食の偏光

高橋 隼

〈兵庫県立大学 天文科学センター 西はりま天文台 〒679-5313 兵庫県佐用町西河内 407-2〉

e-mail: takahashi@nhao.jp



1968年4月の月食中の月が約2%偏光していたという古い観測報告があります。しかし、偏光の原因は解明されないまま、月食の偏光は忘れられていました。ふとしたきっかけでこの謎を発掘した私は、現代的な意義を見出して、研究を始めました。2014年10月の月食では有意な偏光は検出されず、2015年4月の月食では最大2-3%程度の偏光度が観測されました。偏光の原因は、太陽光が月に至る途中で地球大気を通過する際に起きる「非等方的な2回散乱」と「非一様な雲分布」の組み合わせであると考え、偏光度の波長依存性、時間変化、偏光方位角、月食の回ごとの偏光度大小を定性的に説明できます。月食の偏光を理解すれば、「惑星大気透過光の偏光観測」という新しい研究手法を開拓できるかもしれません。

1. きっかけ

2011年12月10日、博士論文のデータを得るため、私は西はりま天文台の60 cm望遠鏡を使って月食の偏光観測を行いました。しかし、月食という現象に特に注目していたわけではありませんでした。

当時、私が取り組んでいたのは、月面地球照の偏光観測で、月食観測はその一環というかおまけのような位置付けでした。地球照とは月の夜面にうっすらと映る地球からの光のことです。一般に、天体反射光の偏光度は位相角（光源-天体-観測者のなす角）に依存し、その依存性から天体の情報が得られます。ですから、私は地球照偏光度の位相角依存性を調べるために、さまざまな位相角の時の観測データを集めていました。ちなみに、地球照の場合の位相角は、太陽-地球-月のなす角を指します。

月食は、太陽・地球・月が一直線に並ぶ時に起

きるのです、その時の位相角はほぼ 180° です。月食中の月は、地球大気を通りわずかに屈折した太陽光に照らされ、淡く輝きます。つまり、月食は「位相角 180° の時の地球照」^{*1}を観測できる機会だと言えます。普段、位相角が 180° に近い時は満月となり、地球照の観測はできないため、月食の機会は貴重です。このような動機で、月食の偏光観測をすることになったわけです。

通常、位相角が 0° や 180° の時は、対称性（どの振動方位の光にとっても、伝搬・散乱過程が同じ）から偏光はしないと考えられます。月食の偏光観測は、単に、位相角 180° の時の地球照が偏光していないことを確認することが目的でした。

ところが、月食の偏光観測データを解析してみると、偏光度が0にならないのです。残念ながら、この時の月食が本当に偏光していたのか、あるいは器械的原因による誤差なのかの結論は得られませんでした [1]。

とは言え、この観測をきっかけに、過去に月食

*1 通常、地球照は地球の反射光を起源とした光のことを指すので、地球の透過光に照らされた月食中の月の光を「地球照」とは普通は呼びませんが...

の偏光観測がなされていないか調べてみました。すると、CoyneとPellicoriが1970年に発表した論文 [2] のなかで、月食の偏光観測結果を報告しているのを見つけました。かれらは1968年4月の月食を観測し、およそ2.4%の偏光度を検出したと報告していました。この論文によると、月食の偏光を検出したのはかれらが初めてではなく、それ以前に少なくとも2回報告されています。偏光の原因については、太陽光が地球大気を通過する際の多重散乱である可能性に短く言及されているだけで、詳しい議論はされていません。しかし、かれらの報告以降、月食の偏光に関する研究文献は見当たらず、月食の偏光は仕組みが未解明のまま忘れ去られた状態になっていました。

月食が本当に偏光しているならば、それはとても興味深いことです。第一に、物理的に興味深い。先に述べたように、普通に考えると月食は偏光しないはずです。いったいどのような仕組みで偏光するのか気になります。

第二に、新しい惑星研究手法への応用という意味での興味も沸きます。もし月食の偏光が、太陽光が(月に届く前に)地球大気を透過する時に生じたものであれば、太陽系内外の他の惑星(大気を持つ小天体も含む)でも同じようなことが起きるかもしれません。惑星大気を透過した時に生じた偏光には、惑星大気の「何らかの情報」が反映されるはずで、つまり、「惑星大気透過光の偏光観測」という新しい研究手法を開拓できるかもしれない、そんな淡い期待も抱かせます。

2. 月食の偏光観測、再び

そこで、月食中の月が偏光するのを確かめ、(偏光するなら)偏光の仕組みを明らかにするために、2014年10月8日と2015年4月4日に月食中の月を観測しました。

2014年10月は光・赤外線天文学大学間連携(OISTER)キャンペーン観測の枠組みを利用し、ピリカ望遠鏡/MSI(北海道)、西はりま天文台

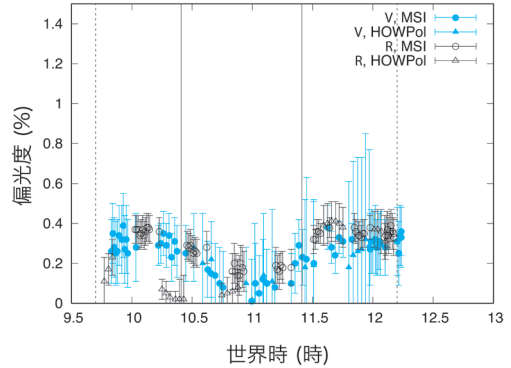


図1 2014年10月8日の月食の偏光度. 青塗りの点はVバンド(中心波長550 nm)、白抜きのはRバンド(660 nm). 丸はピリカ望遠鏡/MSI、三角はかなた望遠鏡/HOWPolでの観測結果. 西はりま天文台60 cm望遠鏡/POLのデータは器械偏光の適切な除去ができず、除外しました. 縦の実線で囲まれた時間帯は、皆既中. 縦の点線で囲まれた時間帯は、月面の観測対象地点が地球の影(本影)に入っている間. Takahashi et al. (2019) [3] より一部改変して転載. © OUP.

60 cm望遠鏡/POL(兵庫)、かなた望遠鏡/HOWPol(広島)の3装置を用いた偏光撮像観測が実現しました。

図1は2014年10月の観測で得られた、月食中の月の偏光度です。偏光度の測定値は最大0.5%程度を示していますが、一部の時間帯で、2装置の測定値に0.5%程度の不一致があり、有意な偏光の検出とは言い切れません。しかし、Coyne & Pellicori (1970) [2] が報告した2.4%という偏光度に比べて、2014年10月の偏光度は低かったということは言えます。

続いて、2015年4月にすばる望遠鏡/FOCASを用い、月食の偏光分光観測を行いました。偏光分光観測により偏光度の波長依存性が得られ、それは偏光の原因を探るための強い手掛かりになります。月食の偏光分光観測が行われたのはこの観測が初めてです。

図2は観測で得られた偏光度スペクトルです。黒い線は観測対象の月面が地球の影(本影)に入

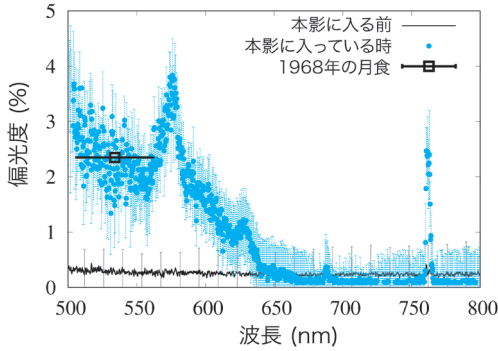


図2 2015年4月4日の月食の偏光度スペクトル。黒線は月面の観測対象地点が地球の影（本影）に入る前。青点は観測対象地点が地球の影に入り、食が最大近くになった頃。白抜き四角はCoyne & Pellicori (1970) [2] の観測結果。偏光度が局所的に高くなっている波長630, 690, 760 nmは酸素分子の吸収波長と一致します。広い盛り上がりが見える560–580 nmは酸素分子の衝突錯体の吸収波長と対応しているかもしれません [4]。Takahashi et al. (2017) [5] より一部改変して転載。© AAS.

る前、つまり太陽光に直接照らされている時の偏光度スペクトルです。全波長にわたってほとんど偏光していません。一方、青い点は観測対象の月面が地球の影に入っている時、つまり地球大気の透過光に照らされている時の偏光度スペクトルです。600 nmより短い波長で2–3%ほど偏光していることが分かります。これは、Coyne & Pellicori (1970) [2] の観測結果（白抜き四角）とよく一致します。さらに、（強度スペクトルの輝線のように）偏光度スペクトルの特定の波長域で偏光度が高い頂点を持つ特徴がいくつか見られます。ひとときわ鋭い頂点がある波長760 nm付近は、酸素分子の吸収波長に対応します。

2回の観測結果から「月食が偏光することがある」ことが分かりました。しかし「ほとんど偏光しないこともある」、つまり「月食によって偏光度が違う」ことも分かりました。

3. 偏光の原因

3.1 どこで偏光するのか？

偏光が生じる時、その原因は何なのでしょう？ 私たちは偏光が生じる可能性がある過程として次の3つを考えました。

- (a) 太陽光が月に向かう途中に、地球大気中を通過する過程。
- (b) 光が月面で反射する過程。
- (c) 月面で反射された光が地球上の観測者に向かう途中に、地球大気を通過する過程。

結論を言うと、(a) が観測結果を最もよく説明できます。具体的にどのような偏光の仕組みを考えているかは、次節以降で説明します。

(b) で偏光する可能性を考えてみます。光の経路は、地球（光源）–月–地球（観測者）、つまり位相角はほぼ0°なので、偏光はしないと考えられます。ただし、太陽系小天体の観測により、「偏光衝効果」と言って、位相角が0°近く（およそ2°未満）の時に、偏光度が高くなる現象が知られています [6–9]。月食の偏光も、偏光衝効果により説明できるかもしれません。

しかし、次の理由から、私たちは月面での反射では、月食の偏光を説明できないと考えています。

- 偏光衝効果による典型的な偏光度は0.3–0.5%であり [9]、2015年4月に観測された最大2–3%の偏光度よりかなり小さい。
- これまでの月の観測では、月（月食ではなく満月の時）の偏光衝効果は報告されていない [10]。
- 大気がない月での反射では、大気分子の吸収波長（760 nm等）での偏光度増大を説明するのが難しい。

次に、(c) の可能性はどうでしょうか。(a) も(c) も地球大気を通過する過程なので、(a) で偏光するなら(c) でも偏光しそうです。次節で説明しますが、(a) の過程で偏光が生じる“おおも

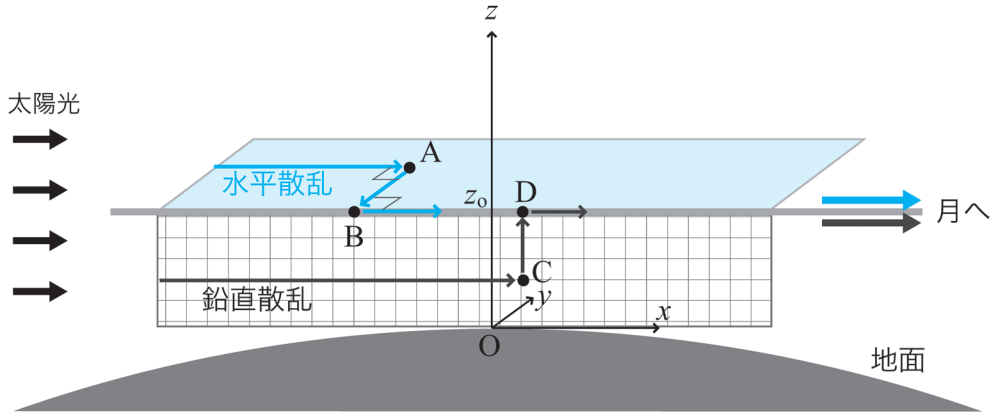


図3 水平散乱と鉛直散乱の経路を説明する概念図。実際には、入射方向に対して数度ずれた方向に進む光が月に届くが、そこまでは表現していません。Takahashi et al. (2017) [5] より一部改変して転載。© AAS.

ど”の仕組みは、光の散乱だと考えています。(c)の過程でも、大気中で光は散乱されるので、散乱光は大なり小なり偏光すると考えられます。しかし、散乱光は四方八方に進むので、地上で観測する私たちには、月の像としてではなく、空の明るさの一部として見えます。(月食に限らず、他の天体の解析でもするように)月食データの解析で、空の成分は注意深く差し引いています。したがって、(c)の過程の散乱でも偏光するが、今回の観測で検出した偏光の原因ではないと判断しました。

3.2 非等方的な2回散乱

(a)の過程で偏光が生じる仕組みを説明します。地球大気を通り月に向かう光を、大気中でほぼ直進する光(直進成分)と、大気中で2回散乱する光(2回散乱成分)の2つに分けて考えます。ここで言う直進成分とは、入射方向に対して最大2°ほど1回散乱または屈折して、月に向かう光のことです*2。直進成分はほとんど偏光しません*3。

一方、2回散乱成分について、図3に示すような「水平面内で散乱する光」と「鉛直面内で散乱する光」に注目します。散乱体は大気分子だとします(後にも述べるように大気分子に限る必要はないのですが)。入射方向に対して90°に近い方向に散乱する光は強く偏光し、偏光の方位は散乱面(入射光線と散乱光線を含む平面)に対して垂直です。つまり、水平散乱光は鉛直方向に、鉛直散乱光は水平方向に偏光すると考えられます。

簡単な計算で、水平散乱と鉛直散乱の光の強さ(フラックス)を比べてみたところ、図4のように、水平散乱の強さが卓越することが分かりました*4。地表から大気上端まで積分したフラックスで比べると、水平散乱が鉛直散乱の数十倍という結果が得られました。つまり、水平散乱光と鉛直散乱光を含めた、2回散乱光は鉛直方向に偏光すると考えられます。

無偏光の直進成分と偏光する2回散乱成分を組み合わせると、観測された偏光度スペクトルの形や時間変化をうまく説明することができます。

*2 本当によろしく進む光は月に当たらないので。

*3 屈折の効果を考えても散乱角2°程度の1回散乱を考えても偏光度は0.1%未満。

*4 その本質的な原因は、大気を水平方向に見た時の光学的厚みが、鉛直方向に見た時の光学的厚みよりも圧倒的に大きいことです。ある地平高度 z_0 を水平に通過する直線(図3参照)に沿った光学的厚みは、大気上端から高度 z_0 までの鉛直線上の光学的厚みの約75倍 [11]。

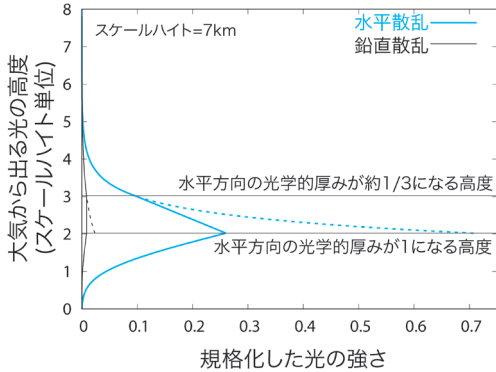


図4 簡単な計算で求めた、水平散乱と鉛直散乱の光の強さ（フラックス）。波長550 nmでの光学的厚み [12] を使って計算しました。地球から出る光の高度（縦軸）の関数として表しています。高度はスケールハイトを単位としています（高度がスケールハイトだけ高くなると大気圧は $1/e$ =約1/3になる）。横軸の規格化は（定数×入射光のフラックス）に対して、高い高度（約3スケールハイト以上）では大気が「光学的に薄い」として、低い高度（約2スケールハイト以下）では「光学的に厚い」として、近似的にフラックスを求めました。中間の高度では、高高度と低高度のフラックスを単純に直線でつなぎました。破線は、中間高度のフラックスを大気が「光学的に薄い」として計算した結果。計算の詳細はTakahashi et al. (2017) [5] を参照していただきたい。Takahashi et al. (2017) [5] より一部改変して転載。© AAS.

直進成分は、月食中の月が赤く輝く理由として説明されるように、夕焼けと同じ原理で長波長側のほうが強くなります。また、酸素分子等が特定の波長で光を吸収するため、直進成分の強度スペクトルには吸収帯が存在します。一方、私たちの計算によれば、2回散乱成分はほとんど波長依存性を持ちません*5。地球大気から出て行く光は直進成分と2回散乱成分の足し合わせだと考えてい

るので、次のように2015年4月の月食の偏光度スペクトル（図2）を説明できます。

- ・大局的には、長波長ほど、無偏光の直進成分が偏光する2回散乱成分に対して相対的に強くなるので、偏光度が小さくなる。
- ・局所的に分子の吸収波長では、無偏光の直進成分が偏光する2回散乱成分に対して相対的に弱くなるので、偏光度が大きくなる。

2015年4月、本影に入る前の月は無偏光でしたが、本影に入ってから徐々に偏光度が上昇し、影の一番深い場所に入った時に波長500-600 nmでは2-3%の偏光度になりました（図2）。このような時間変化も直進成分と2回散乱成分の組み合わせで理解できます。

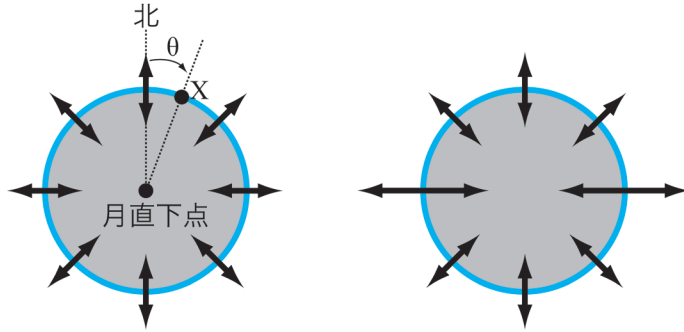
「直進成分」と表記してきましたが、先にも述べたように、これには最大2°ほど屈折する光が主成分として含まれます。月が地球の影の内側深くへ移動すると、主として、入り始めよりも大きく屈折した光が月に届きます。低高度の大気を通る光ほど大きく屈折しますが、低高度ほど光学的厚みが大きくなるので、光は弱められます。つまり、月が影の内側深くに移動するほど、月に届く「直進成分」は弱くなっていきます。一方で、月が影の内側深くに移動すると、月に届く2回散乱光の進行方向も若干変わることになります。しかし、散乱角が数度変わっても散乱光の強さはほとんど変わりません*6。つまり、月が影の内側深くに入り込むほど、無偏光の直進成分は弱くなり、偏光する2回散乱成分の強さは変わらないので、偏光度は大きくなると説明できます。

3.3 非一様な雲分布

前節のように、月食の偏光の原因は、太陽光が（月に届く前に）地球大気を透過する際の2回散

*5 入射太陽光のフラックスで規格化した時のことです。散乱が関係するのに波長依存性がないのは一見とても不思議ですが、以下のように理解できます。波長が変わるとその波長での散乱断面積に応じて、図4の線は上下に平行移動します。しかし、月食中の月の明るさに寄与するのは、地表から大気上端までの光の強さを積分したものです。図4の線が上下に平行移動しても積分値はほとんど変わりません。

*6 散乱角が90°から2°変わっても、散乱光の強さの変化は0.1%程度 [10]。



足し合わせた光は ...
 偏光しない 偏光する

図5 月食中に月から地球を見た時の模式図。太陽は地球の裏側に隠れ、青線で示した大気の一部が円環上に輝いて見えます。実際に、このような画像がSurveyor III [13] やKAGUYA (SELENE)^{*7}により撮影されています。両端矢印の黒線は、その場所の偏光の向きと偏光フラックス(長さ)を表しています。3.2節によれば、円環各点の光は鉛直方向に偏光するので、全体ではこの図のように放射状の偏光分布を示すと考えられます。左は大気円環上のすべての場所の偏光フラックスが同じである場合。この場合、すべての光を足し合わせると無偏光になります。一方、右のように円環上の偏光フラックスに偏りがある場合は、足し合わせた光も偏光します。 θ は円環上のある場所Xの位置を表現するために定義した方位角(図6で使用)。方位角 θ の場所と $\theta+180^\circ$ の場所で偏光の向きは同じだと考えられるので、 180° で折り畳みます。

乱だと考えることで、波長依存性や時間変化を定性的に説明することができました。しかし、まだ解決すべき問題があります。

地球で月食が見える時に月から地球を見ると、図5のように地球大気が円環状に輝いて見えます。前節の説明に基づくと、地球大気から出てくる光は鉛直方向に偏光するので、円環の偏光の向きは図5に示すように放射状に分布しているはずですが。今回、地球の影に入った月として観測した光は、円環の光を全部足し合わせたものに相当します。ですから、もし偏光フラックスが円環上のどこでも同じであれば、それらを全部足し合わせた光は、結局、無偏光になってしまうでしょう(図5左)。2015年4月の月食が偏光していたということは、偏光フラックスが円環上で偏っていたことを意味します。観測された偏光の向きから、

極付近よりも赤道付近の偏光フラックスが強かったと予想されます(図5右)。また、2014年10月の月食はほとんど偏光しておらず、回によって月食偏光度に大小があるという事実も、円環上の偏光フラックスの偏りが時期によって変わることでも説明できるのかもしれませんが、「円環上の偏光フラックスの偏り」を支配している要因は何なのでしょうか？

私たちは雲の分布が要因ではないかと推測し、観測した2回の月食当時の気象データを調べました。地球周回衛星Terraに搭載されたMODISという装置で得られたデータから、2014年10月8日頃と2015年4月4日頃の^{*8}、昼夜境界線付近(月から見た時に地球の縁として円環状に見える場所)の雲分布を取り出しました。雲頂高度に制限は付けずに雲分布を調べたところ、2014年10

^{*7} http://www.jaxa.jp/press/2009/02/20090218_kaguya_j.html

^{*8} Terra/MODISの視野や周回頻度の制約から、正確に月食日時の全球データは得られず、使用しているデータの観測時刻には月食日時±12時間ほどの幅があります。

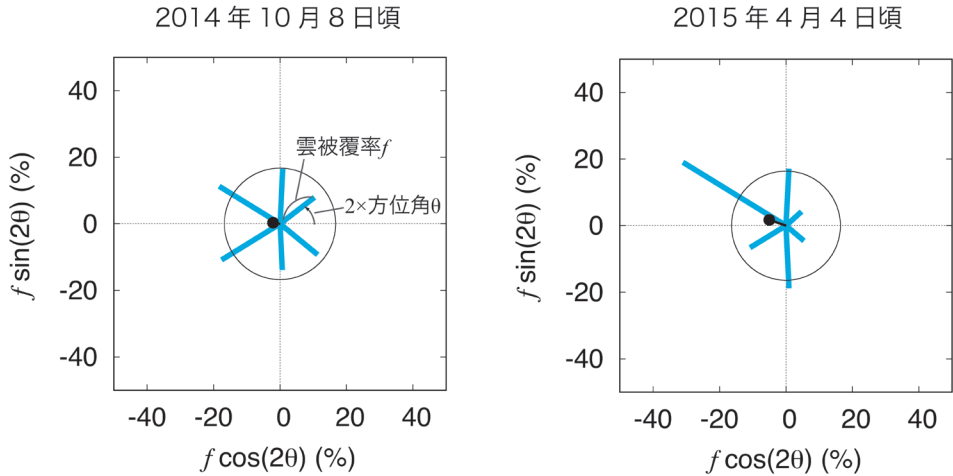


図6 MODISのデータから得た、月食の頃の雲分布（雲頂高度7 km以上に限定）。方位角 θ （図5で定義）の区間幅 30° ごとに、昼夜境界線付近（月から見ると図5のように地球の縁として円環状に見える場所）の雲被覆率 f を取り出しました。青線の長さが雲被覆率 f で、青線とx軸正の向きのなす角が方位角 θ の2倍。青線の分布から、2015年のほうが2014年より、雲分布の偏りが大きかったことが直感的に見てとれます。一端が黒丸になっている黒線（2014年は線が短すぎてほとんど見えない）は、青線をベクトルと考えた時の平均ベクトル。円の半径は、雲被覆率（青線の長さ）の平均。「円の半径に対する黒線の長さの比」として定義した「非一様性指数」は、2014年は0.13、2015年は0.32となり、やはり2015年のほうが偏りが大きいです。また、黒線の向きから、昼夜境界線全体で平均的に見ると、2015年は方位角 θ がおおよそ 90° のところ、つまり赤道近くに雲が多かったことも分かります。雲が多い方位角と月食の偏光の向きはほぼ一致しています。Takahashi et al. (2019) [3] より一部改変して転載。© OUP

月も2015年4月もほぼ同様であり、両日の違いはほとんどありませんでした。しかし、雲頂高度7 km以上の雲に限定して分析したところ、偏光が検出された2015年4月のほうが2014年10月よりも、非一様な分布をしていたことが分かりました（図6）。さらに、2015年4月の雲は極近くよりも赤道付近に多く存在し、雲の存在が偏光フラックスを増大させていると考えることで、観測された月食の偏光の向きを説明できることも分かりました。

実は、当初は光学的に厚い雲が偏光フラックスを（無偏光フラックスもろとも）減少させる効果を想定していたので、「雲の存在が偏光フラックスを増大させている」という解釈は意外でした。前節で示した「非等方的な2回散乱」による偏光の発生も、大気分子による散乱を想定したものでした。しかし考えてみると、他の微粒子による散

乱でも、

- 散乱による偏光の向きが散乱面に対して垂直である。
- 水平方向の光学的厚みが鉛直方向のそれを大きく上回る。

という条件を満たせば、「非等方的な2回散乱」による鉛直方向の偏光は起きます。雲は上記どちらの条件も満たすと考えられます [12, 14]。

4. まとめと今後の展望

以上のように、私はふとしたきっかけから、長い間忘れられていた「月食の偏光」に再注目し、その研究を始めました。2014年10月の観測では有意な偏光は検出されませんでした。2015年4月の観測では2-3%程度の偏光度が検出されました。偏光の原因を、太陽光が地球大気を通過する際の「非等方的な2回散乱」と「非一様な雲分布」

の組み合わせだと考えることで、月食の偏光の波長依存性、時間変化、偏光方位角、回ごとの偏光度大小を説明することができました。

しかし、偏光の原因についての上記の考え方は、まだ仮説の段階だと認識しています。2回の観測結果を定性的に説明したに過ぎないからです。今後の観測の積み重ねと定量的な理論の構築によって、仮説が検証できることでしょう。月食の偏光を理解できた時、「惑星大気透過光の偏光観測」という手法がどのような価値を持つのかも明らかになるでしょう。

謝 辞

本稿で紹介した私たちの研究内容の詳細は、2017年と2019年に発表した学術論文 [3, 5] に記載されています。これらの研究はJSPS科研費15K21296の助成を受けたものです。

本稿は「宇宙NOW」（発行：兵庫県立大学 天文学センター）2017年11月号（No. 332）に掲載された解説記事「忘れられた謎『月食の偏光』を追いかけて」[15]を基に、その後の研究成果も踏まえて、大幅に加筆・再構成したものです。

諸隈智貴氏には、本稿の執筆をお誘いいただきました。共同研究者の伊藤洋一氏、編集委員の福井暁彦氏には原稿について有益なコメントをいただきました。感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] Takahashi, J., 2013, Doctoral Dissertation (Kobe University)
- [2] Coyne, G. V., & Pellicori, S. F., 1970, AJ, 75, 54
- [3] Takahashi, J., et al., 2019, PASJ, 71, 47
- [4] Pallé, E., et al., 2009, Nature, 459, 814
- [5] Takahashi, J., et al., 2017, AJ, 154, 213
- [6] Lyot, B., 1929, Annales de l'Observatoire de Paris Section de Meudon, 8, 1
- [7] Rosenbush, V. K., et al., 2005, Icar, 178, 222
- [8] Rosenbush, V. K., & Kiselev, N. N., 2005, Icar, 179,

490

- [9] Rosenbush, V. K., et al., 2009, Icar, 201, 655
- [10] Hapke, B., 2012, Theory of Reflectance and Emission Spectroscopy 2nd ed. (Cambridge University Press, Cambridge)
- [11] Fortney, J. J., 2005, MNRAS, 364, 649
- [12] Coffeen, D. L., 1979, J. Opt. Soc. Am., 69, 1051
- [13] Shoemaker, E. M., et al., 1968, Surveyor III Mission Report. Part II—Scientific Results, 9
- [14] Lamb, D., & Verlinde, J., 2011, Physics and Chemistry of Clouds (Cambridge University Press, Cambridge), ch. 1 & ap. A
- [15] 高橋隼, 2017, 宇宙NOW, 332, 3

Polarization during Lunar Eclipses—Revisiting a Forgotten Mystery

Jun TAKAHASHI

Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo, 407-2 Nishigaichi, Sayo, Hyogo 679-5313, Japan

Abstract: The detection of a $\sim 2\%$ polarization degree for the Moon during the lunar eclipse in April 1968, has been previously reported. However, without understanding the polarizing processes, polarization during lunar eclipses was forgotten by astronomers. Motivated by scientific and application interests, the author and the collaborators revisited this phenomenon. Our observations during the lunar eclipse in October 2014 did not show significant polarization, whereas we detected a 2–3% polarization degree during the lunar eclipse in April 2015. As the cause of polarization, we suggest double scattering of sunlight during the first transmission through the Earth's atmosphere, accompanied by inhomogeneous cloud distribution. This explanation is consistent with the observed wavelength dependence of the polarization degrees, their time variation, the polarization position angles, and the difference in polarization degrees between the two events. “Transit polarimetry” may be considered as a new method to investigate planetary atmospheres after we have fully understood the polarization during lunar eclipses.