

# 皆既日食中の空の明るさに関する研究 — 日食ごとの物理的な明るさの違いと 感覚的な明るさ感 —



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

皆既日食は月の影が地表に届く現象ですが、太陽の直射光が月によって完全に遮られると、白昼突然暗闇に包まれます。しかし、真っ暗になるわけではなく、日食の条件やその他の諸条件によって暗さの程度が異なりますが、従来定量的な比較検討はあまり報告されていません。そこで、過去の皆既日食の際に行われた定量的な観測データを集め、集約・整理して法則性を見出し、それを説明できるモデルを検討しました。その結果、晴天時の皆既中の空の輝度は本影サイズと相関性が高い（大きいほど暗い）こと、その相関関係は本影の外の大気中で1次散乱した欠けた太陽の光が本影内の大気中で2次散乱して観測者に届くというモデルで説明できることが確認できました。一方、「人が感じる明るさ感」は本影サイズとの相関が低いので、その原因について照明技術の研究手法を応用して定量的な検討も行い、「明るさ感」は空の明るさ以外に地上からの反射光や雲による吸収散乱、さらに先入観などの心理要因や眼の暗順応特性の影響も受けることがわかってきました。

## はじめに

皆既日食を経験すると、皆既の直前直後の大きな明るさ変化と、皆既中の360度の夕焼けのような空にコロナに囲まれた黒い太陽が見えるという非日常的な光景に驚きます。そうなることを、事前に知っていても強烈なインパクトがあり、白昼に訪れる突然の闇の暗さは強く記憶に残ります。

多くの日食解説書には、皆既日食中の空の明るさは、日没後30分ぐらいの空と同等ですと書かれていますが[1]、実際に測定した観測例は少なく、あっても単発的です。単純に考えると、継続時間が長いとか月の本影の直径が大きい日食ほど暗くなりそうですが、それがわかる定量的な比較報告は見かけません。一方、何度も皆既日食を体験している観測者の間では、皆既日食の条件と皆

既中に感じる明るさ感は、必ずしも対応していないということが、時々話題になっています。私も2009年7月に硫黄島沖で見た皆既日食の際に、継続時間が7分弱の今世紀最大の日食だったので暗くなるだろうと予想したのに、実際にはかなり明るく感じられ、その理由が気になっていました。

このような皆既中の空の明るさに関する未解決の問題を整理するには、なるべく多くの事例を集めて、日食ごとの空の明るさを定量的に比較し、観測者が感じる「明るさ感」との関係も比較し、それらの差に関係する要因を考察することが必要だろうと考え、取り組んでみました。

具体的には、①まず物理的な空の明るさを測定した観測データを集め、②それらと同じ単位に変換し比較可能な形に整理し、③比較することでわかった傾向を説明できるモデルを検討する、④そ

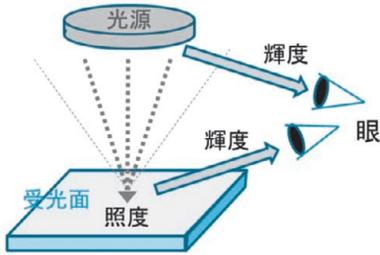


図1 輝度と照度の概念図.

の上で様々な日食について物理的な明るさと観測者が報告している明るさ感を比較する、というような順番で検討を行いました。以下に私が行った検討の概要を、順を追って紹介します。

なお、このあとの議論では、空の明るさについて「輝度」や「照度」という用語を何度も使いますが、これらの用語は通常その違いがあまり意識されず混同されることもあるようなので、最初にその違いを確認しておきたいと思います。

図1が「輝度」と「照度」の違いの概念図で、輝度は光源から直接視線方向に向かってくる光の量で単位は $\text{cd}/\text{m}^2$ 、照度はある面にあらゆる方向から入ってくる光の量で単位は $\text{lux}$ です。

皆既中の場面では、空や地面は光源になるので空の各方向の明るさや地面からの反射光の明るさは輝度で、空全体の光が地面を照らす光量は照度です。そして輝度も照度も人間の感覚量に対応する測光量なので、眼の分光感度に合わせた分光感度特性で測ります。

## 1. 天頂輝度の定量的観測法の検討

皆既中の空の明るさは、図2のように天頂付近の広い範囲が暗く、地平線付近の360度の低空が夕焼けのように明るくなり、さらに黒い太陽の周りの狭い範囲に明るいコロナが輝いて見えるという分布になります。なので、まず一番広い面積を占める天頂付近の明るさのデータを集めて比較しようと思い、過去の観測事例を探しましたが、定量的な観測報告は意外と多くありません。そこ

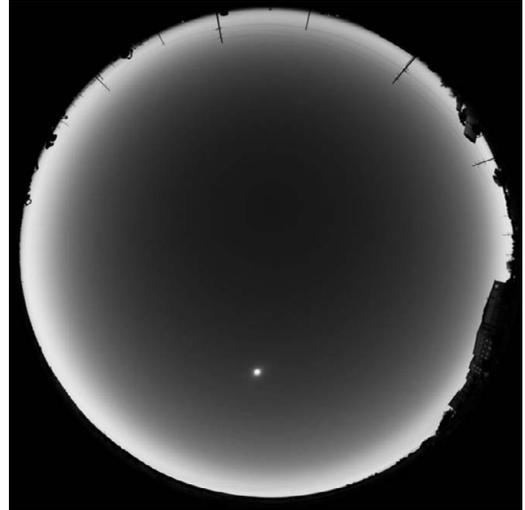


図2 2017日食の皆既中の全天写真。  
米国アイダホ州Rexburgで秋田勲氏が撮影  
撮影機材：EOS6D、レンズ8 mmF3.5 (F5.7)、  
露出時間1/3秒、ISO400

で、使える観測データは何でも利用しようと、雲の影響を受けていない天頂付近の空の輝度を測定するための3つの方法を比較検討しました。

- 1) 視野角の狭い輝度計で測る
  - 2) 視野絞りを併用した照度計で測る
  - 3) デジカメで撮った空の画像から輝度を求める
- 測定手段が違っていると、得られる数値の単位が異なってきますが、空の輝度が検討対象なので、輝度の単位である $\text{cd}/\text{m}^2$ に揃える方法も含めて、以下に各方法の特徴をまとめます。

### 1.1 視野角の狭い輝度計で測る

輝度計は、面状の光源の単位面積当たりの明るさを人間の眼の分光感度で測定する装置です。天頂輝度の測定に使いそうな、視野角が1-2度で、 $0.001\text{--}0.01 \text{ cd}/\text{m}^2$ の明るさまで測定可能な輝度計は市販されているものの高価なものが多く、アマチュアが皆既日食で使った例は見当たりません。しかし、輝度計の1種で夜空の暗さを測るツールとして普及が進んでいるSky Quality Meter (SQM)は価格的にも手ごろで [2]、日食時以外にも使え

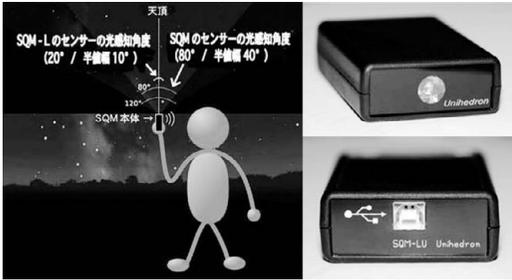


図3 Sky Quality Meterの種類とSQM-LU (クレジット: 国際光器).

るので、海外の日食観測者の間では、最近使う人が増えています。SQMには光検知角が80度と20度のタイプがあり、また手持ちタイプとコンピュータ制御タイプがありますが、日食用には光検知範囲が20度で、USB接続で使えるSQM-LUの使用例が多いようです(図3)。

SQMで測った空の明るさ  $M \text{ mag/arcsec}^2$  と輝度値  $B \text{ cd/m}^2$  の関係は、以下のとおりです [3]。

$$B = 10.8 \times 10^4 \times 10^{(-0.4 \times M)}$$

### 1.2 視野絞りを併用した照度計で測る

安価に入手できる照度計は、照らされる面の明るさを人間の眼の分光感度で測定する装置です。照度計は、向けた方向の半球の範囲から来る光の量が測れるけれど、斜めから照射する光に対しては感度が低いという特徴があります。

照度計は、前方に光を取り込む範囲を制限する絞りを置くと輝度計の代用になるので、以前から一部のアマチュアが日食での測定に使っています(図4)。照度計の出力照度値が  $E(\text{lux})$  の場合、前に置く絞りの視野角が  $A(\text{sr})$  なら、輝度値  $B(\text{cd/m}^2)$  は下記計算式で計算できます。

$$B = E/A$$

ただ、皆既中の空の明るさを測定するには感度が足りない機種も多く、そのためか皆既中の空の輝度測定例は少ないようです。視野角を  $0.4 \text{ sr}$  ぐらいにしてやっと測定ができたという報告もありま

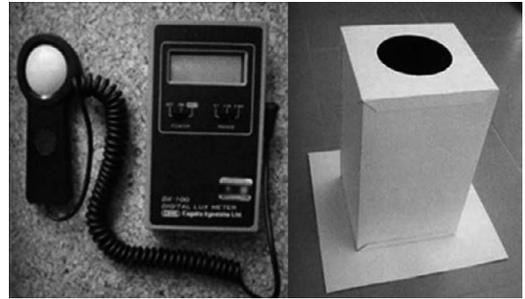


図4 大越治氏の天頂輝度測定装置 [1]。  
左側の照度計の受光部を右側の箱の底部に置くことで、天頂方向の  $0.1 \text{ sr}$  の範囲の輝度が測定できる。

すが [4]、その場合視野角内に雲があるとその影響を受けやすくなるという問題があります。

### 1.3 デジカメで撮った空の画像で測る

図5のように、魚眼レンズまたは広角レンズを付けたデジカメで皆既中の空を撮ると、図2のような空の輝度分布に対応した画像が得られます。JPEG 画像でも、画面上の



図5 魚眼レンズを取り付けて全天撮影中のデジカメ。

測りたい場所の R,G,B 値と撮影条件(絞り・シャッター速度・ISO感度)がわかれば、その方向の輝度を求めることができます。撮影条件を調整することで暗夜の暗い空でも測定可能で、また雲が多い天気でも雲の切れ間を狙って測れば、雲の影響を受けない空の輝度を測れるという利点もあります。

ただ、撮影画像から輝度の絶対値に変換するには多少の工夫が必要です。まず、輝度は視感度に合わせた分光特性で測ることが前提なので、R,G,B 数値は視感度特性に対応する明度  $Y (0.3R+0.59G+0.11B)$  に変換します。次に、 $Y$

値を輝度値に変換する方法ですが、デジカメの業界標準であるISO感度表記規格（CIPA DC-004-2004）[5]の中身を理解すると可能になります。具体的には、撮影画像のデータが基準レベルD（8bitなら118）の時の、シャッター速度：T（sec）、絞り：F、ISO感度設定：Sであれば、下式で輝度値B（cd/m<sup>2</sup>）に換算できます。

$$B=10/S \times F^2 / (0.65 \times T)$$

ただ、JPEG画像の数値は光量に対してリニアではなく光量の0.45乗に近い特性で、機種ごとに少しずつ特性が異なるので、天頂付近の空の明度Yが118以外なら、図6のようなデジカメの特性カーブを求めて基準レベルの露光量に補正します。こうしてF、T、Sの補正值が決まれば、輝度値（cd/m<sup>2</sup>）が計算できることになります。F、T、Sの値は、デジカメ画像ファイルに同時記録されているExifデータを読み出せばいいので、観賞用に撮られた過去のデジカメ画像でも、皆既中の天頂輝度の測定用に使えるようになります。

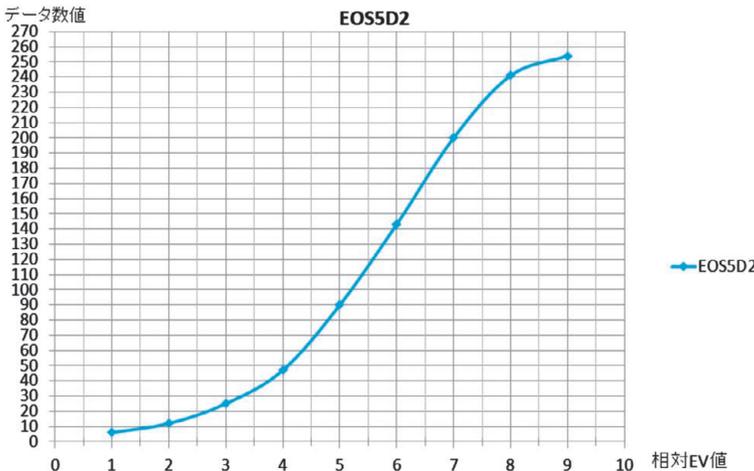


図6 デジカメの入射光量とデータ値の関係のグラフ。EOS5Dmark2の実測値。集まった画像の多くはEOSで撮影されたものだったので機種ごとの違いは少ないと考え、表1はこのグラフで換算。

## 2. 過去の日食の天頂輝度測定値の比較

まず、ネット上に公開されている海外の日食観測者の日食レポートに載っていたSQMを使った観測や[6-10]、国内の日食観測グループの報告書に載っていた照度計+視野絞りをを使った観測[4]を集めました。それだけではデータ数が少なすぎるので、過去に撮影された皆既中の空のデジカメ画像を日食仲間から個人的に借用して天頂輝度を求め、合計で19件のデータを集めました。そして、撮影時の様々な条件と食の最大時ごろの天頂輝度とを、一覧表にまとめたのが表1です。

表1の天頂輝度値の内、雲の影響を受けていないデータと皆既継続時間との関係をプロットしたのが図7左で、継続時間が長いほど天頂輝度が低くなる傾向は見られるものの、相関はあまりよくありません。そこで、継続時間ではなく地上に投影された月の本影の平均直径との関係をプロットしたのが図7右で、この方がきれいな相関関係になることが確認できます。

図7右からわかることは、皆既中の天頂輝度は、太陽高度が高い場合は、本影直径が小さめ（100 km程度）ならおおむね1 cd/m<sup>2</sup>ぐらいで、本影サイズの最大値（250 km程度）になると0.5 cd/m<sup>2</sup>ぐらいまで暗くなり、太陽高度が低い場合は天頂輝度は高めにシフトする傾向です。100 km未満の場合はさらに明るくなります。

この1 cd/m<sup>2</sup>程度という輝度値がどの程度の明るさなのかの感触を得るため、日常的に経験するシーンの輝度値と比較すると、太陽高度が-6度（季節によって違いますが日没

表1 様々な方法で観測された皆既最大頃の天頂輝度データの一覧表。

年月日	観測者	撮影条件(Exifデータ)					天頂付近のデータ値				特性カーブで補正		天頂輝度 (cd/m <sup>2</sup> )	観測地 場所	標高m	日食の条件			天候		
		カメラ	レンズ	ISO	F	秒	高度	R	G	B	Y	EV				補正秒	太陽 高度	継続時間 (分)		本影サイズKm 短辺	長辺
デジカメによる観測		特性カーブの基準カメラ=EOS5D2					118	5.6													
2008.8.01	秋田勲	EOS20D	15mm	400	4	0.2	45°	31	49	69	45.8	4	0.61	1.02	三輪湖	1000	21	2.0	111	312	晴れ
2009.7.22	山田哲司	EOS1D3	10mm	400	2.8	0.3	90°	65	74	88	72.8	4.7	0.56	0.54	硫黄島沖	30	84	6.6	258	258	晴れ
2009.7.22	山田哲司	EOS5D2	8mm	800	3.5	0.167	90°	43	54	77	53.2	4.2	0.44	0.53	硫黄島沖	30	84	6.6	258	258	晴れ
2009.7.22	塩田和生	EOS5D2	8mm	100	5.6	1	90°	9	16	22	14.6	2.2	10.56	0.46	硫黄島沖	30	84	6.6	258	258	晴れ
2012.11.14	伊東昌市	EOS6D	15mm	2500	4	0.077	65°	49	64	106	64.1	4.5	0.17	0.60	NZ沖	30	48	3.3	155	205	快晴
2013.11.3	大崎康雄	D700	8mm	200	8	1	80°	50	71	99	67.8	4.6	2.00	2.46	ガボン	46	1.0	42	65	65	曇間
2013.11.3	塩田和生	EOS5D2	24mm	100	8	0.25	50°	9	14	24	13.6	2.2	2.64	3.73	ウガンダ	900	18	0.3	20	66	曇間
2015.3.20	秋田勲	Kisax5	10mm	400	3.5	0.125	50°	6	12	22	11.3	2	1.52	0.31	スバル	11	2.4	188	800	快晴	
2016.3.9	塩田和生	EOS5D2	8mm	200	16	10	80°	41	66	96	61.8	4.4	22.97	0.86	テルナテ	20	48	2.7	138	189	曇間
2017.8.21	二見広志	EOS6D	8mm	1600	3.5	0.048	90°	43	57	91	56.5	4.25	0.12	0.96	アイホホール	1437	50	2.3	96	128	快晴
2017.8.21	秋田勲	EOS6D	8mm	400	5.7	0.33	90°	26	41	74	40.1	3.7	1.23	1.01	ルクスハーグ	1500	50	2.3	96	128	快晴
2019.7.2	花岡庸一郎	EOS5D2	8mm	200	4	0.7	90°	17	27	47	26.2	3.1	3.96	0.31	セロロロ	2200	13	2.0	130	530	快晴
SQMによる観測							測光範囲		mag/arcsec <sup>2</sup>				天頂輝度								
2016.3.9	Wijaya						天頂 半値幅20°		12.88				0.76		バンカ	10	19	1.9	110	320	曇間
2017.8.21	Strickling						天頂 半値幅20°		12.85				0.78		ジャクソンホー	1900	50	2.3	98	124	快晴
2017.8.21	Globe at Night						天頂 半値幅20°		13				0.68		Lowman	1160	46	2.1	94	130	快晴
2009.7.22	Zaimuddin						天頂 半値幅20°		16				0.04		杭州	14	55	5.3	248	301	曇
2016.3.9	Pramudya						天頂 半値幅20°		12				1.71		テルナテ	20	48	2.7	138	189	曇
照度計+絞りによる観測							測定範囲						天頂輝度								
2017.8.21	山本威一郎						天頂 0.4sr =38°						1.2		アイホホール	1437	50	2.3	96	128	快晴
2017.8.21	大越治						天頂 0.4sr =38°						1.9		キヌバー	1522	54	2.5	98	122	曇

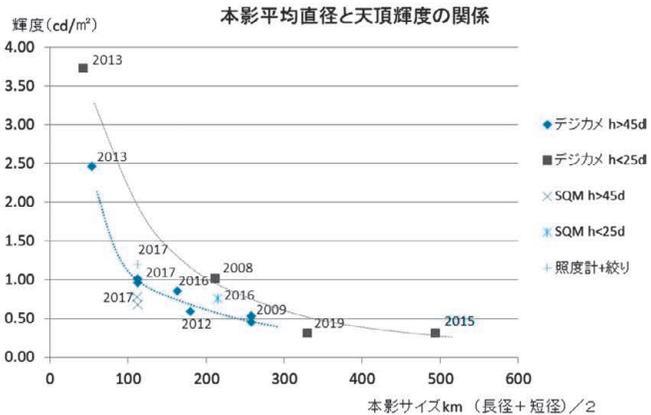
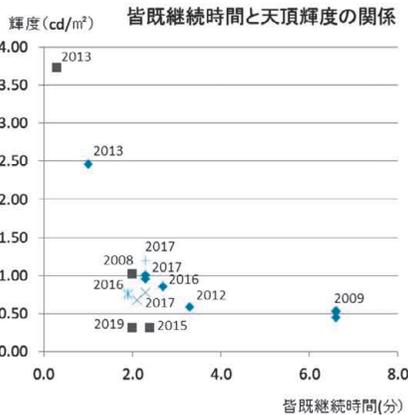


図7 (左) 皆既継続時間と天頂輝度の関係: 右下がりの傾向はわかるが、継続時間2〜3分のあたりの相関はあまりよくない。  
(右) 本影平均直径と天頂輝度の関係: 太陽高度が高いグループと低いグループが、それぞれきれいに右下がりの傾向になっている。観測方法の差も少ない。

後25分前後)の夕空とほぼ同等で、春秋の晴天時の昼ごろの天頂輝度(3000~1万cd/m<sup>2</sup>) [11]の数千分の1、一般的なPC用液晶モニタの最大輝度(250cd/m<sup>2</sup>)の1/250、月や街明かりの影響がない暗い夜空の輝度(約0.001cd/m<sup>2</sup>) [12]の千倍ぐらいです。

### 3. 天頂輝度の違いを説明するモデルの検討

本影平均直径と天頂輝度には図7右のようなき

れいな相関関係があることがわかったので、次にそれを定量的に説明できるモデルを検討しました。

空の明るさは、図8のように大気中の分子やエアロゾルなどによって太陽光が散乱・吸収されて決まり、その計算方法は古くはGlenn E. Shaw氏の論文[13]で検討されており、最近CGや景観シミュレーション分野などで実際の空に近い空の輝度分布を表現する技術が開発されていて、シミュレーションソフトも存在します[14]。しかし、計算方法を理解せずにいきなりシミュレー

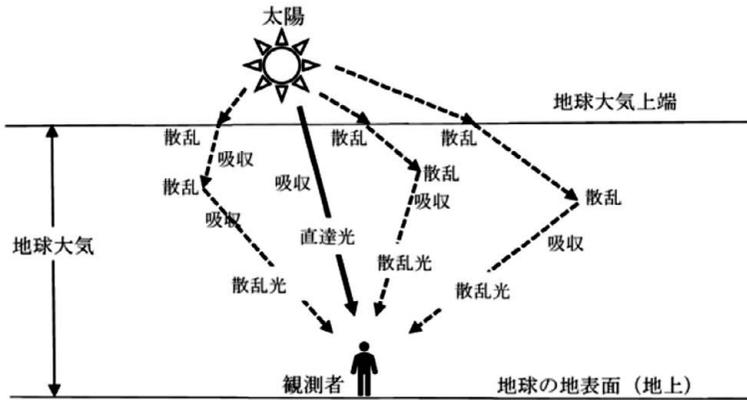


図8 地上に到達する太陽光線のイメージ [14].

ションソフトを使っても、日食時にどのような要因がどういう効き方をするのか理解できないので、多少精度は落ちてでも関連しそうな要因との関係を把握しやすい簡易的なモデルで検討することにしました。今回用いた簡易モデルは図9のようなもので、このモデルのポイントを列挙すると下記のような内容です。

- 1) 本影外側の大気層で太陽直射光が1次散乱され、本影中心の真上まで進んで大気層で2次散乱されて、観測者に到達するパスだけを考える。(簡略化のため太陽高度は90度で計算)
- 2) 1次散乱する直射光の強さは、欠けた太陽の面積で決まり、本影の縁から離れるほど明るくなる。(太陽の周縁減光は考えない)
- 3) 1次散乱光は2次散乱の前に、距離の $-2$ 乗で減衰し、さらに途中の大気の吸収で減衰する。
- 4) 地球の形が球形であるため、本影中心から遠い場所からの1次散乱光は、地面で一部が遮られて本影中心の真

上の大気層には届かない。

- 5) 大気層の密度は、標高0 mと比べて上空10 kmで1/4, 20 kmで1/20, 30 kmで1/100程度で [15], 散乱効率も密度によって変わるが、簡略化して厚さ20 kmの均一な特性として計算する。また、垂直入射光に対する大気透過率はクリアな空では80%程度だが [15], 天頂輝度に寄与するパスは上層大気が

多いのでパス長20 kmあたり90%で計算する。

- 6) 直射光の強さや散乱吸収の程度は、本影からの距離で長さが決まるドーナツ状のゾーンで均一と考えて、各ゾーンの長さをかけて積分すれば、天頂輝度の総量が求まる。

このような簡略化したモデルにしたので、本影の直径を入力することで、各要因が本影中心からの距離に応じてどう寄与するか計算がExcel上で行えるようになり、図10のような結果になり

### 天頂輝度に寄与する各要因の効き方の概念図

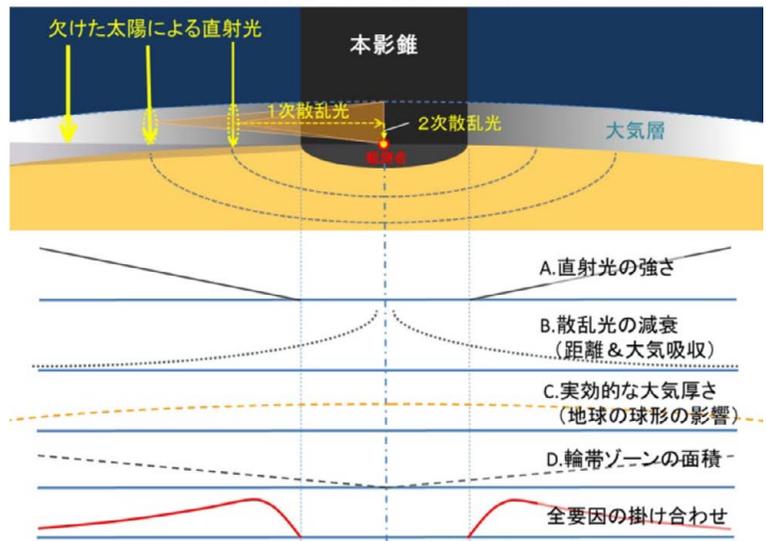


図9 天頂輝度の要因とその効き方の簡易モデル。

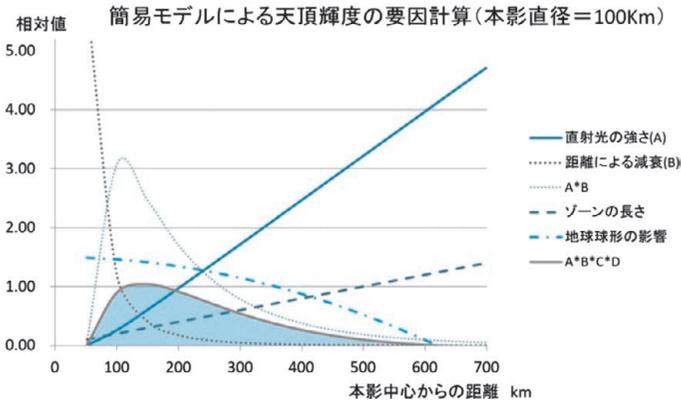
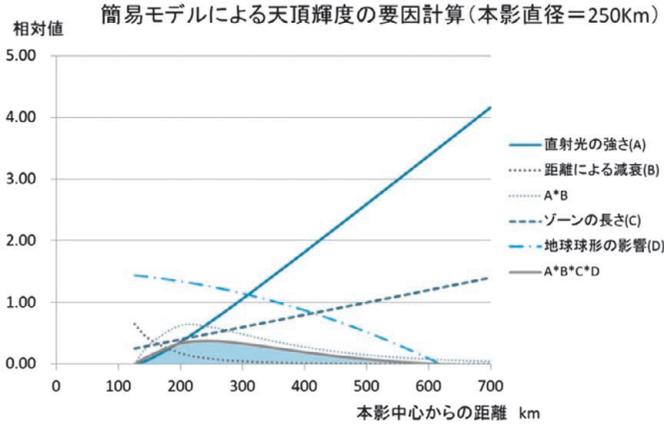


図10 簡易モデルによる天頂輝度計算の結果。

上は本影直径250 km, 下は100 kmの場合で, 各要因が本影中心からの距離でどう効くかがわかり, 天頂輝度の総量は薄墨を入れた領域の面積で比較できる。

ました。本影サイズが異なる日食の場合の天頂輝度は, 薄墨を入れた部分の面積で比較できます。

この面積の違いつまり天頂輝度計算値を, 本影直径を50から500 kmまで変化させたときのカーブを, 図7の測定値のスケールに合うように調整して重ねたのが図11ですが, これを見ると太陽高度が45度以上の日食時の天頂輝度測定値はモデル計算とおおむね一致しています。ただ太陽高度が低い時の計算にはモデルの改良が必要です。

図11は, 太陽高度が高い場合, 本影直径が約250 kmの日食(継続時間は6-7分)は本影直径が約100 kmの日食(継続時間は2-3分)より, 本

影面積は6倍も大きいのに, 皆既中の天頂輝度は1/2弱の暗さにしかならないことを示していますが, なぜでしょうか。その理由は図10の上下を見比べるとわかるかと思いますが, ①天頂輝度に寄与するエリアの範囲は直径1,000 km以上あり本影サイズよりかなり大きいこと, ②本影縁から遠いほど明るくなる要因(欠けた太陽による直射光, 同心円状のゾーンの長さ)と, 本影中心に近いほど明るくなる要因(距離による減衰, 地球が球形である影響)が, 掛け合わされて決まる効果です。

ということで, かなり大胆に簡略化したモデルの割には, 観測との一致度は悪くないといえそうです。ただ, 太陽高度が低くなった場合や本影直径が小さくなった場合の扱いには誤差があるので, より精度の高いモデルをプログラム化してくれる人が出てきて欲しいと思っています。

#### 4. 空全体の輝度分布と照度の観測

天頂輝度は測定しやすい対象ですが, 皆既日食時に観測者が眼にするのは, もっと広い範囲の空の輝度分布です。したがって, 皆既中の空の明るさを理解するには, 空全体の輝度分布を調べる必要があります。具体的な方法には, 全天写真を使う輝度分布測定や照度計による測光などがあり, それらの特徴と観測事例を紹介します。

##### 4.1 全天写真の輝度分布測定

全天魚眼レンズを使ったデジカメ画像には, 天頂輝度だけでなく空全体の状態も記録されているので, 空全体の輝度分布測定にも使えます。

特に, RAW画像も記録してあればraw2fitsと

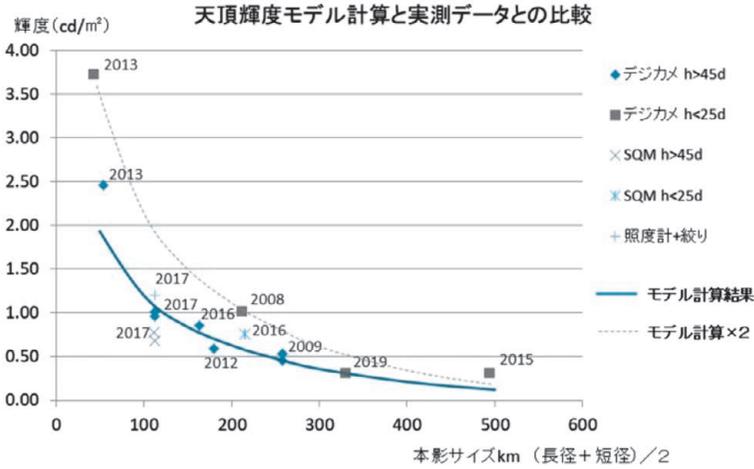


図11 天頂輝度：観測値とモデル計算との比較。

いうソフトで簡単に光量に対して線型なRGB画像ファイルに変換できるので、JPEG画像のように特性カーブ(図6)で補正する必要がなく、グラフ化が簡単に出来ます。RGBごとのfitsファイルを $0.3R+0.59G+0.11B$ で加算すれば明度データの画像ファイルに変換でき、Makaliiなどを使って輝度分布のグラフとして表示することができ、F値・シャッター速度・ISO感度を使って輝度値( $\text{cd}/\text{m}^2$ )のグラフに変換できます。

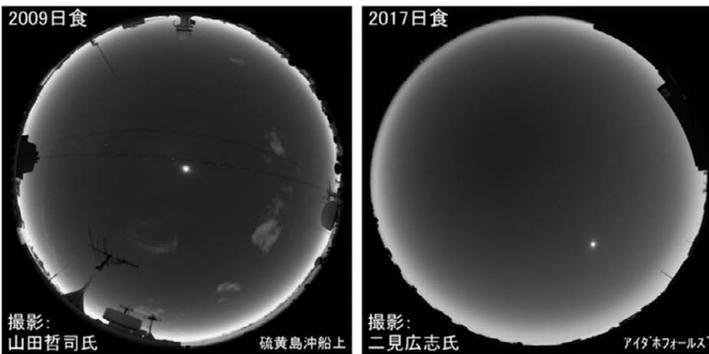


図12は、そのような方法で2009年の日食(2009日食)と2017年の日食(2017日食)の全天写真から、天頂とコロナを通る大円の明るさ分布を輝度( $\text{cd}/\text{m}^2$ )に変換してグラフ化したものです。低空は天頂より輝度が数倍高いことや、コロナの輝度はさらにもっと高いけれど面積は非常に狭いことが読み取れます。2009日食は皆既帯の中心近くで撮影され太陽がほぼ天頂付近だったので輝度カーブはほぼ左右対称ですが、2017日食は皆既帯の中心から外れた場所で撮影され太陽高度が45度ぐらいだったので輝度カーブの左右対称性はあまりよくありません。

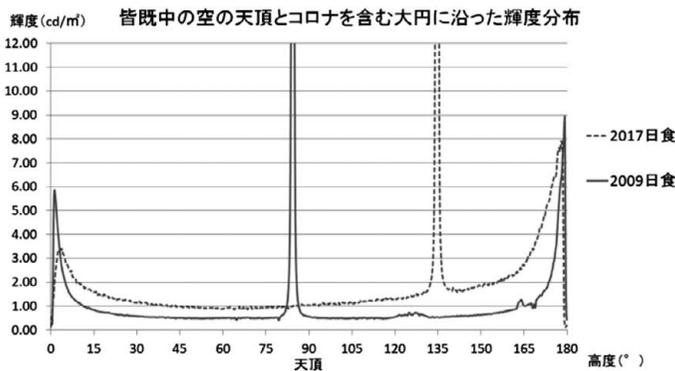


図12 皆既中の空の輝度分布。

地平線近くまで見晴らしがよかった2009日食と2017日食の魚眼全天写真のRAWファイルを、raw2fitsでfitsファイルに変換し、天頂と太陽を通る大円に沿った明るさ分布を、1.3節で説明した方法で輝度値に直してグラフ化した図。コロナは周りの空より輝度が数倍高いので、このスケールでは突き抜けている。

そこで、左右の平均値にすると、図13のようになります。図13からは、本影平均直径が250 kmと大きかった2009日食と、110 kmと小さめだった

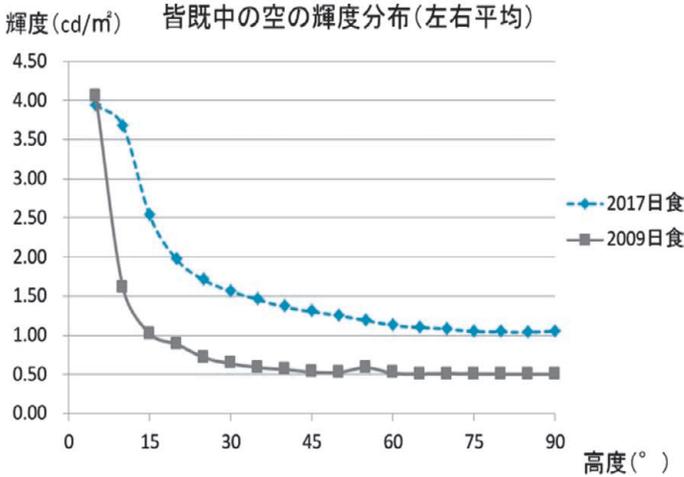


図13 皆既中の空の輝度分布.

図11の左右を平均化したグラフ(コロナの影響無視). 本影平均直径は2017日食≒110 km, 2009日食≒250 kmで, 空の明るさは高度10度以上で約2倍の差があるが, 高度5度以下ではほぼ同等になっている.

表2 空全体の光量に占める低空・コロナの割合.

	2009日食	2017日食
15度以上の空	約40%	約50%
15度以下の空	約60%	約50%
コロナの光	約0.5%	約0.3%

なお, 空全体の光量に占める上空・低空・コロナの割合は表2の通りで, 低空の寄与率が高いこと, コロナの寄与分は少ないことがわかります. コロナの輝度は内部コロナで太陽の百万分の1程度ですが, 全光量では太陽の数百万分の1です. 一方天頂輝度は非日食時の数千分の1ぐらいの輝度なので, コロナは非日食時の空における太陽のような影響力はありません.

コロナの寄与分が少ないことは, 皆既中の空が通常の晴天時の空と大きく異なる輝度分布になることにつながります. 非日食時の空の輝度分布は図14のような感じで[11], 図12の分布とはかなり違います. 非日食時には, 太陽近傍の空が明るい(大気透明度が低いと顕著)のに, 皆既日食中は空の広い範囲がほぼ均一な明るさになります. この違いは, 非日食時には明るい太陽の直射光が大気中のチリによるミー散乱(前方に指向性が強い)で散乱されて太陽

2017日食を比べると, 10度以上の空では2017日食の方が2倍ぐらい明るいのに, 5度以下の低空の空の輝度はほぼ同じになっています.

その原因は, 大気に映った月の影の輪郭サイズの差によると思われるのですが[16], さらに低空の空の光の一部が地形の起伏や建物によって遮蔽されたり, 大気の透明度の影響も受けたためかもしれません. 今回調べた画像では地平線の位置がわかりにくく低空の解析がやりにくかったので, 今後は撮影後の解析を意識して, 地平線の位置が正確に確認できるような撮影を行うことが望まれます.

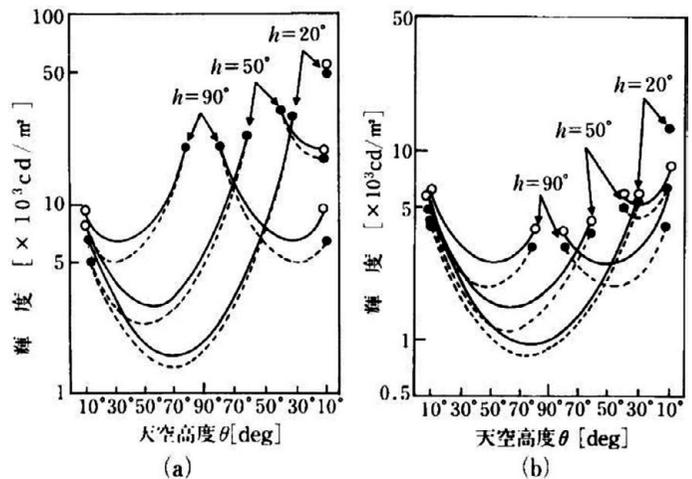


図14 非日食時の晴天空の輝度分布[11].

左は大気透過率が低い(70%)場合, 右は高い(85%)場合で, それぞれ太陽高度 $h$ が90度, 50度, 20度の場合を示している(実線は地表面反射率 $\rho=2$ , 破線は $\rho=0$ の場合).

### 本影平均直径と皆既中の最小照度の関係

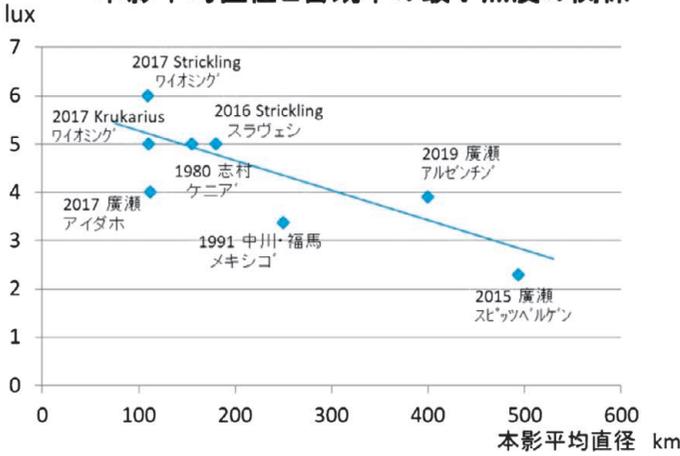


図15 皆既中の水平面照度の観測データのグラフ。  
観測数は少ないが、天頂輝度と同様右下がりである。

近傍の空が明るく白っぽくなるのに対して、皆既日食中の空ではコロナの光は弱いのでミー散乱による前方散乱光が少なく、月の本影の外側でのレイリー散乱光（側方散乱成分が多い）が本影の中の大気で2次散乱した光が支配的になり、均一な明るさ分布になります。

なお、外部コロナの淡い部分は周りの空の輝度が低いほど見やすく・写しやすくなります。多段階露出でコロナを撮る際、図11を参考にしながら撮影場所での本影の平均直径に応じて最長露光時間を調整するとよいでしょう。

#### 4.2 照度計による観測

デジカメ全天写真の輝度分布測定は、結果を1つの数字では表せないの、時間変化などまで比較しようとするとかなり大変です。一方、照度計による測光は、向けた方向の半球の範囲の光量が一発で測れるので、時間変化などが目的の場合には使いやすそうです。

図15は照度計を天頂に向けて受光面を水平に設置（水平面照度測定）し

て測った皆既中の照度測定の結果報告 [17-20]（および廣瀬司氏私信）から、本影平均直径との関係をグラフ化したもので、図11と同様右下がりですが、傾きは少し小さくなっています。

ただ水平面照度のデータは、図16のような照度計の斜入射特性の影響で低空の空の明るさはあまり捉えられないので、今後は地平線付近の明るい空の影響も把握するために、水平面照度以外に鉛直面照度（照度計を太陽がある方位の水平方向に向ける）の測定も欲しいところです。

### 5. 物理的な明るさと観測者が感じる明るさ

ここまでの検討では、雲がなく見晴らしのよい環境での皆既中の空の定量的な測定値について議論してきました。しかし、はじめにでも述べたように、日食の条件から推定される明るさは違う感覚的な明るさ感を経験したことがあるので、観測者が感じる「明るさ感」の問題についても検討を進めてみました。

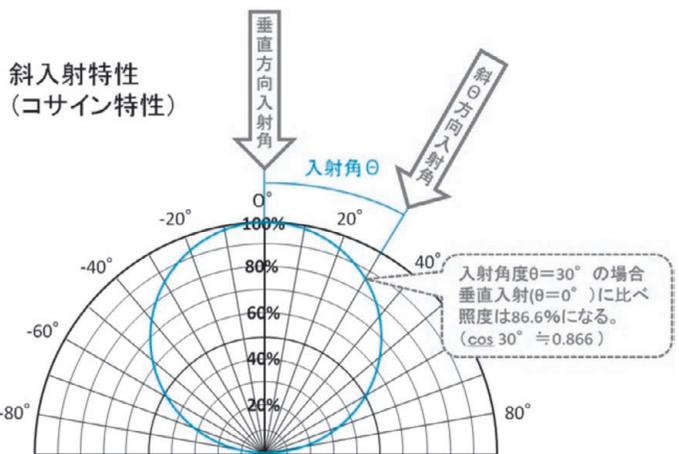


図16 照度計の斜入射特性。照度計は、斜めから入射する光には感度が低いので、水平面照度測定では、地平線近くの空の輝度が捉えにくい。



図17 皆既中の水平線付近の風景. 今世紀最大の日食なのに明るいと感じた2009日食の空と, 平均的な明るさだと感じた2012日食の空. 2009の海は波が弱く, 低空の空を良く反射していた. どちらも, FinePixS5pro+18 mmF3.5で撮影.

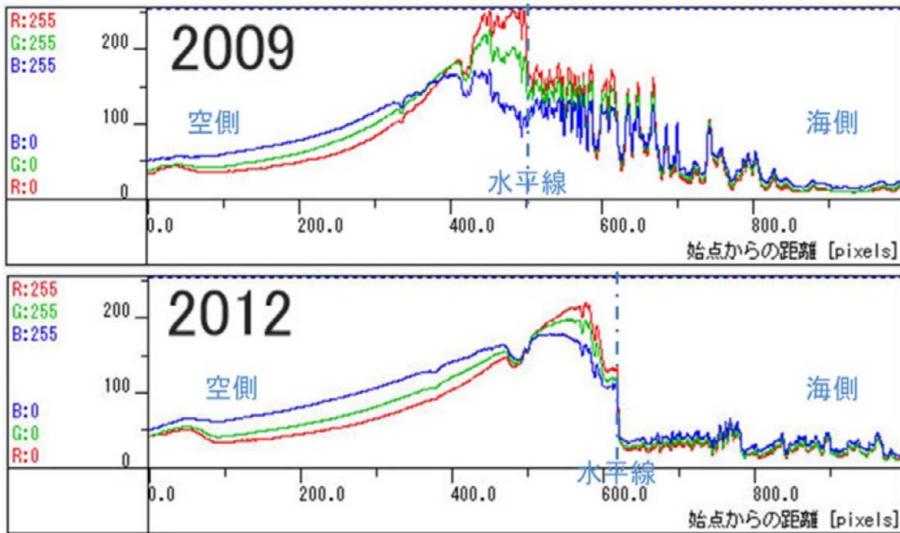


図18 図16の画像の中央部の上下のRGB値の分布. このデータを元に, 明るさ感の指標値Feuを求めた.

### 5.1 皆既中の明るさ感の調査

まず皆既中の明るさ感について, 他の観測者がどのような経験をしているかも知るため, 日食仲間に, ①特に明るかった or 暗かったと感じた日食はいつ・どこで見た日食だったか, ②その日食を見た時の状況(天候, 周囲環境, 明るい or 暗いと判定したタイミング, など), についてのアンケートを実施しました.

アンケートを集約してみると, 下記のような傾向が見えてきました. なお, 皆既中の明るさの判定法は, 人によって異なり, 空と地上を含む皆既中の空間全体から感じる明るさや, メモの文字や腕時計の文字盤が読めたかどうかだったりします. 以下では前者を「明るさ感」の定義とします.

- 1) 明るさ感とは本影サイズとはほとんど相関がみられない.

- 2) 同じ日食を近い場所で観測していたのに、ある人は明るいと感じ、別の人は暗いと感じたケースが、散見される。
- 3) ただ、皆既中空全体が厚い雲に覆われた時は、極端に暗くなる。
- 4) 晴れた日食では、皆既になった直後に明るさを確認して暗いと感じた報告が、明るいと感じた報告より若干多くなっている。

ということで、べた曇りの時以外の明るさ感を決める要因はあまりはっきりしません。

そこで、人が感じる空間の明るさ感についての研究論文がないかと探してみたところ、建築照明分野では1980年代から研究が進んでいて、明るさを数値化する指標も実用化されていることを知りました[21].

### 5.2 空間の明るさ感の指標

建築照明分野で実用化されている空間の明るさ感指標は室内の照明環境を最適化することを目的に研究されていて、平均輝度をベースに明るさを評価するもので、用途に合わせて幾つかの方法があり、内容の概略は下記の通りです[21].

- 1) 計算対象の視野は、水平≒100度、上下≒80度または空間全体(360度)。
- 2) 平均化は、真数で扱う方法と、対数で扱う方法などがある。

このような指標を使うことで、床面照度値などよりも人の感覚に合う数値化ができるそうです。

### 5.3 地上からの反射光の影響

そこで、代表的な空間の明るさ感指標である Feu [22] を実際の皆既日食画像に適用して、日食時の指標が実際に感じた明るさ感とどの程度合うかを調べてみました。図17が対象にした日食画像で、はじめにでも述べた「今世紀最大の日食」だったのにかなり明るかったと感じた2009日食と、それと比べて本影サイズは少し小さいけれど明るさは普通だと感じた2012日食の比較です。どちらもほぼ快晴の条件下で、水平線まで見渡せる船上から眺めた日食でした。



図19 (左) べた曇りで真っ暗になった2009上海日食。撮影：高松泉氏。  
(右) 薄雲のせいで天頂付近が明るくなった2016テルナテ日食。

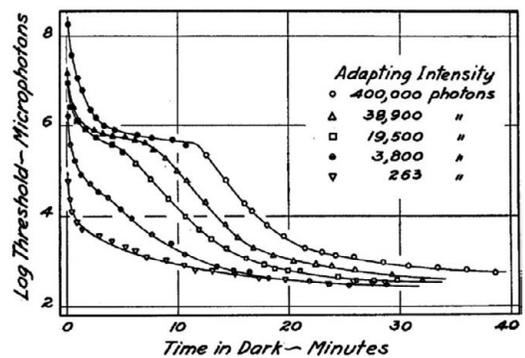


図20 人の眼の暗順応曲線[23].

異なる順応状態で測定された暗順応カーブから、人の眼の暗順応特性は2段階あることがわかります。天の川が見えるようになるには2段階の暗順応が完了する必要があり30分ぐらいの時間が必要です。しかし、晴天の皆既日食時の暗さは天の川が見える空より1,000倍ぐらい明るく1段階目の暗順応で済み、また皆既前1分間での減光が1/20程度なので皆既が始まって30秒以内に順応すると思われます。

Feuは、100度×85度の範囲の輝度分布を幾何平均し、その結果を0.7乗して1.5倍することで求めます。図17の2つの画像は、レンズの画角が少し狭く、撮影に使ったデジカメをすでに手放していて精度の低い特性曲線しか残っていないという問題はあるものの、画像の上下方向のデータ値の分布をグラフ化(図18)し、画角の足りない部分は外挿することで、上下方向のみの10度ごとのデータ値を得て、図6と同等のデジカメ特性曲線で輝度に変換して、Feu値を計算しまし

た。

図18を見ればわかるように、空の部分の明るさはほぼ同じであるのに、海上の波の状態の違いで空の光の反射状態が変わり、観測者から見た海の部分の明るさが違うため、Feu値は、下記のように2009日食の方が1.5倍ぐらい大きく、その分明く感じられたはずという結果になりました。

2009のFeu=2.46 2012のFeu=1.60

この1.5倍という指標値の差は、私が感じた2009と2012の明るさ感の差としては、計算の精度も勘案すると妥当な範囲だと思われます。一方、図11から日食ごとの空の輝度の違いは、本影サイズが110 kmと250 kmで2倍ぐらい（Feu値では1.6倍）ですから、地上からの反射光は状況次第でそれと同等の差をもたらすわけで、日食ごとの明るさ感が本影サイズと相関がはっきりしない重要な要因になることも間違いなさそうです。

ただ、今後は撮影方法なども改善してより精度の高い事例を増やしたいところですし、さらにFeu以外の指標も試してみたいと思っています。

#### 5.4 雲の影響

雲の影響についても、空間の明るさ指標で評価できそうです。まず図19（左）は、べた曇りになった2009上海日食の時の画像ですが、画像データから計算すると空や地上の輝度は晴天時の輝度値の1/100ぐらいしかないので、Feu値もそれに対応して極めて小さな値になります。

一方薄雲がある場合は、図19（右）のように天頂付近では散乱によって背景の空より明るくなりますが、低空では吸収の効果が勝っている感じですが、今回Feu計算に適した画像がなかったのですが、今後計画的に撮影して測定したいものです。

#### 5.5 暗順応の影響

日食時の暗順応の影響は、昔から言われている「流線の広がりを十分遠くまで見たければ、皆既30分前から目隠しをして、皆既になってから目隠しを外すべき」という話とも関係し、気になる

問題です。

しかし、暗順応に30分かかるとい話は、天の川が見えるレベルの空の暗さまで眼を慣らす場合（桿体視）の話で、皆既中の天頂輝度はその1,000倍ぐらい明るいので、図20の暗順応曲線の1段目のカーブが落ち着くところ（錐体視）まで眼を慣らせばいいはずで。

実際、私の経験でも目隠ししなくても最大食の頃にはコロナの広がりには十分確認できています。ただ、皆既の直前には空全体が暗くなるスピードは速く、Wolfgang Strickling氏の天頂輝度観測[7]では第2接触の直前1分間で20から1 cd/m<sup>2</sup>へと減光していて、これくらいの減光率だと皆既になった直後には暗順応が追いつかない可能性があります。ただ、影響が残るのは第2接触からせいぜい30秒程度と思われるので、皆既直後に意識的に空の明るさをチェックしなければ気がつかないレベルだろうと思われます。

#### 5.6 心理的要因

マスコミが大々的に取り上げた2009トカラ列島日食では、厚い雲に覆われて皆既中の風景は文字通り真っ暗になり、そのことがTV中継などで多くの人の印象に残ったと思われます。そのため、皆既中は懐中電灯を使わないと何も見えないような暗闇になるという先入観を持つ人も多いようです。

しかし、図7に示したように晴天なら皆既中の天頂輝度は約1 cd/m<sup>2</sup>で、暗夜より1,000倍ぐらい明るく、図15に示した皆既中の照度の数luxという値は、停電時の非常灯の設置基準である1 lux以上より明るい値です。したがって、真っ暗になると思い込んでいた人が普通に晴れた条件下で皆既日食を見ると、「想像していたより明るかった」という印象を持つ可能性が高いと思われます。

心理的な要因は、さらに検討すべき問題だろうと思いますが、2035年に本州を横断する皆既日食に向けて、晴天時の皆既日食は、懐中電灯なしに色々な作業が出来るレベルであることを、きち

んと伝えることも重要ではないかと思えます。

### 5.7 明るさ感に効く要因のまとめ

今回の検討で、皆既中の空の明るさは本影サイズと相関が高いのに、観測者が感じる明るさ感とは本影サイズとあまり相関がないということの理由としてはっきりしてきた要因は、①空の光を遮る厚い雲の有無、②観測者の眼に入る地上からの反射光の量、ですが、そのほかにも③皆既直後の暗順応の影響、④事前情報による心理要因なども要検討です。空間の明るさ指標を精度よく求める観測に取り組み、まだあいまいな要因を掘り下げる検討にも、今後挑戦する人が増えることを願っています。

## 6. ま と め

過去の日食の観測データを集めて比較した結果、これまで感覚的に語られることが多かった皆既中の空の明るさを定量的に調べ、本影サイズと雲がない天頂の輝度の間にきれいな相関関係があることが確認できました。

そして、その傾向が生じる原因を説明できる簡易モデルを作ることができ、今後定量的な議論を行うための足掛かりになると考えます。ただ、今回検討した簡易モデルは太陽高度が低い時や本影サイズが非常に小さい時には誤差が大きくなるので、もっと精度の高いモデルをプログラミングが得意な方に作って欲しいところです。

一方、本影サイズが皆既中の空の輝度ときれいな相関関係があるのに、観測者が感じる明るさ感とははっきりした相関関係が見られないことの原因については、空だけでなく観測者の眼に届く地上からの光や、空からの光を遮断する厚い雲の有無しが、皆既中の明るさ感に大きく影響することが確認できましたが、その他の要因についてはさらに検討が必要です。

### 謝 辞

この記事を書くに当たり、全般にわたり貴重な

助言をいただいた国立天文台の花岡庸一郎先生・日江井榮二郎先生、視覚や空間の明るさ感指標に関する情報提供と助言をいただいた千葉大学の矢口博久先生・パナソニック(株)の岩井彌様に感謝いたします。また、天頂輝度の測定用に皆既中の画像を提供いただいた、秋田勲氏、伊東昌市氏、大崎康雄氏、花岡庸一郎先生、二見広志氏、山田哲司氏、さらに皆既中の明るさ感アンケートに答えていただいた、日食画像研究会のメンバーをはじめ多くの日食仲間の皆さんに感謝いたします。

### 参 考 文 献

- [1] 大越治・塩田和生, 2012, 日食のすべて (誠文堂新光社), 88
- [2] <http://www.kokusai-kohki.com/products/sqm.html> (2022.7.7)
- [3] <http://unihedron.com/projects/darksky/magconv.php> (2022.7.7)
- [4] 大越治, 2017, アメリカ皆既日食観測報告 (東京理科大学天文研究部), 177
- [5] <https://www.cipa.jp/j/std/std-sec.html> (2022.7.7)
- [6] Wijaya, A. F. C., et al., 2016, J. Phys.: Conf. Ser. 771, 012012
- [7] <http://www.strickling.net/tse2017.htm> (2022.7.7)
- [8] <https://www.nightwise.org/single-post/2017/08/27/Measuring-Darkness-During-Totality> (2022.7.7)
- [9] Zainuddin, M. Z., et al., 2013, Middle-East J. Sci. Res., 13, 220
- [10] Pramudya, Y. & Arkanuddin, M., 2016, J. Phys.: Conf. Ser., 771, 012013
- [11] 関根征士, 1991, 照明学会誌, 75, 582
- [12] <https://paofits.nao.ac.jp/FITSWS15/onoma.pdf> (2022.7.7)
- [13] Shaw, G.E., 1978, Appl. Opt., 17, 272
- [14] 奥村智之, 2020, UNISYS Tech. Review, 145, 95
- [15] 国立天文台編, 2011, 理科年表平成24年 (丸善出版), 331
- [16] 塩田和生, 2021, 天文月報, 114, 470
- [17] 志村昭典, 1980, アフリカ・インド皆既日食観測報告 (東京理科大学天文研究部), 72
- [18] 中川雅之・福馬一朗, 1991, ハワイメキシコ皆既日食観測報告 (東京理科大学天文研究部), 66
- [19] <http://www.strickling.net/tse2016.htm> (2022.7.7)
- [20] <http://www.mkrgeo-blog.com/sky-brightness-changes-during-total-solar-eclipse> (2022.7.7)
- [21] 吉澤望ほか, 2019, 照明学会誌, 103, 515
- [22] 岩井彌, 2009, 照明学会誌, 93, 907
- [23] Hecht, S., et al., 1937, J. Gen. Physiol., 20, 831