

1973年6月30日アフリカ日食の 太陽コロナ偏光観測

内 田 直*

Polarigraphic Observations of the Solar Corona
at the Total Eclipse on June 30, 1973 in Africa

Sunao Uchida

〔内容抄録〕 本報告は1973年6月30日アフリカ・ケニア・ハリシルワ山麓において観測された皆既日食について、2連式カメラより得られた太陽の内部コロナ偏光像の解析を行なったものである。観測は焦点距離1000 mm と700 mm の2台の望遠鏡を2連式カメラとして組立てた装置に、赤フィルターと偏光フィルターが組み込まれた。この偏光フィルターは偏光軸が互に45度の傾きをなしており、独立に偏光軸を90度回転させることができるようにした。この装置により偏光軸が45度ずつ異なる4枚のコロナ像を得ることができた。得られた像の測定は輝度及び偏光度の値を各偏光軸について位置角10度ごとに36個所行なった。解析の結果1973年6月における太陽活動は極大期的状態を残してはいるものの、極小期の様相を呈しており、特に北極方向が顕著であることが解った。

1 緒 言

通常、皆既日食は1~2年に1回観測可能であるが、その皆既継続時間は大体2~3分である。これに対し今回の日食は、1955年セイロン日食における7分8秒に次ぐ最大継続時間7分3秒、皆既帯最大幅256 kmを持つ、サロス番号 No. 136、食番号 No. 7575の大型皆既食であった。今後7分を越す皆既食は2150年までない。本日食は1973年6月30日に西経60°、北緯4°(南米ギアナ)で食本影は初めて地球表面に接触し(9^h56^m E. T.)、その後大西洋を北東に進み、西アフリカのモーリタニアに上陸して、方向を真東に変え、東経5°53'22"、北緯18°42'08" (ニジェール)で地方正午食甚となる。続いて南東に向きを変えて進みアフリカ大陸を横断してインド洋に入った後、東経65°、南緯13°

(西インド洋上)で地球表面を離れて終る¹⁾。

我々の観測隊は当初モーリタニア国も考えたが、東京天文台などからも遠征されたこともあり²⁾、皆既継続時間が5分を越え比較的入国しやすい東アフリカのケニア国を選んだ。天候条件は雨季から乾季へ変わる時で心配もあったが、ケニア北部はサバンナ地帯であり比較的良い条件下での観測に成功した。本報告は太陽の内部コロナ偏光観測についての解析である。

2 観測地の日食概況

観測地は地理的にはケニアの首都ナイロビの北方600 kmのマルサビット高原とライサミスの中程よりルドルフ湖に寄ったサバンナ地帯にある標高505 mのハリシルワ山のふもとに設定した。この山頂には測地用の三角点(AD 63)があり、正確な値を帰国後ケニアの測量本部か

* 物理学研究室

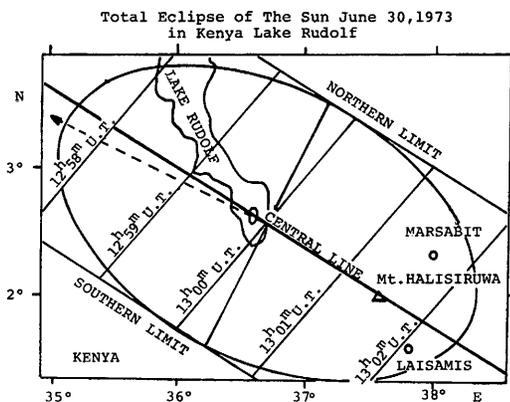


図1 1973年6月30日ケニア・ルドルフ湖付近の皆既日食帯

ら得ることができた。ハリシルワ山麓の我々の観測地は現地において AD 63 との差 $\Delta\lambda$, $\Delta\phi$, Δh をそれぞれ測量して求めてあったので、これを補正して次の値を得た。

$$\lambda = 37^{\circ}32'49''E$$

$$\phi = 1^{\circ}59'47''N$$

$$h = 314 \text{ m}$$

観測地付近の皆既帯の状況を図1に示す。また観測地の局地予報の値を表1に示す。ここに食要素としては海上保安庁発行の「天体位置表³⁾」を用いており、観測地の位置は前記の値を使ってある。表1の接触時刻(観測値)のうち第1接触と第4接触は眼視(望遠鏡及び双眼鏡

表1 局地予報と観測値

	第1接触	第2接触	第3接触	第4接触
接触時刻	11h45m42s	12h59m02s	13h03m52s	14h07m13s
計算値				
接触時刻	11h45m50s*	12h59m02s**	13h03m51s**	14h07m10s*
観測値		$\pm 1s$	$\pm 1s$	
北極方向角	293°.2	114°.2	291°.7	112°.4
天頂方向角	174°.6	8°.2	187°.1	15°.5
高度	51°.6	35°.9	34°.9	20°.6
方位角	126°.1	117°.4	117°.1	114°.0
r_c/R_{\odot}	1.075	1.072	1.071	1.067

皆既継続時間(計算値) 4分50秒

* 望遠鏡を使用した眼視観測による値。
** フラッシュ・スペクトル観測による値。

(注) 接触時刻は世界時(U.T.)である。

使用)による観測であり、第2、第3接触はフラッシュ・スペクトル(望遠鏡にプリズムを取り付けた装置)による観測から求めたものである。観測地の太陽と月の諸要素を次に示す。

$$\text{太陽視半径 } R_{\odot} = 15'43.''4$$

$$\text{月の視半径 } r_c = 16'41.''4$$

$$\text{太陽自転軸方向角 } P_0 = -3.^{\circ}2$$

$$\text{日面中央緯度 } B_0 = 2.^{\circ}8$$

$$\text{日面中央経度 } L_0 = 338.^{\circ}63$$

3 観測器材

太陽コロナの偏光を調べるため同一光学系の4連カメラ⁴⁾⁵⁾による4方向偏光観測を行なうことは、皆既時の暗闇(満月程度の明るさ)の中での器械の操作を少なくし、2~3分の皆既時間での撮影を可能にし、且つ解析も相当容易であるという利点がある。

我々は4方向偏光観測を行なうため、高橋製作所製T S式望遠鏡2台による2連式カメラを使用した。これは今回の日食の皆既時間が比較的長いことにもよるが、装備を軽くするためであった。しかし、この望遠鏡は同一光学系ではなく、一方は口径65mm 焦点距離1000mm(これをB系と呼ぶことにする)であり、もう一方は口径50mm 焦点距離700mm(同様にA系と呼ぶ)である。更にA系の望遠鏡は有効口径を30mmとして使用した。有効口径を絞ったことはそれ程支障はないが、焦点距離の違いが結果の精度を下げることになる。この2連式カメラは赤道義に取り代けられ、ミザール製モータードライブにより駆動された。なお赤道義の設置は太陽の北中時刻(観測地で当日の太陽は天頂より北側を通過する)から南北方向を決定し、これと緯度、経度から天の北極方向を見出したが、カメラの撮影露出時間が数秒以内であることから、これで充分であった。

この観測で最も重要な偏光フィルターは、対物レンズ前面に付けるためには平面性が良く、透過ムラの少ないものが必要であるが、今回その入手が間に合わなかったため、市販のケンコ

一製偏光フィルターを使用した。そのため対物レンズ前面に付けると像の乱れが大きいので、対物レンズと像面との間に偏光フィルターを90度回転できるようにしたアダプターを作成し、2台のカメラにそれぞれ取り付け付けた。また、偏光フィルターは青色付近より短波長側で偏光度が悪化すること及びコロナの輝線の 530.3 nm, 569.4 nm, 637.4 nm を避けるため、ケンコー製R 2の赤フィルターをアダプターに挿入した。なお偏光軸を調整するため別に同じ偏光フィルターを2枚使用した。絶対測光用には Kodak 濃度 (N. D.) フィルター D 4 を望遠鏡対物レンズ前面に取り付け、第1接触後の少し欠けた太陽像を撮影することとした。このD4フィルターは帰国後東京光電研究所製の Multiplier Photometer で測定して次の濃度値を得た。

$$D=3.52$$

偏光コロナ像の記録用感光材料は Kodak Tri Xフィルム2本を使い、これを旭光学製35ミリ一眼レフカメラボディ2台にそれぞれ装填して、前述のアダプターに取り付けた。なお、露出時間はカメラのシャッターダイヤルに合わせてリリースにより観測者が与えた。予定では手動で2秒以上の露出時間を与えるはずであったがトラブルのため最大1秒の露出で終了した。

4 観 測

4方向偏光観測のためには、A、B系両カメラのアダプターに内蔵した偏光フィルターの偏光軸が互に45度の方向で交わるようにしなければならない。そのため、あらかじめ2台の望遠鏡の対物レンズ前面に取り付けられるように、偏光軸が互に45度の角度に固定された調整用偏光フィルターを用意した。これを第2接触直前に取り付けてカメラのファインダーを通した太陽像が最も暗くなるように、A、B両系のアダプターに内蔵した偏光フィルターの位置をそれぞれ調整した。後はアダプター内の偏光フィルターを90度回転させることによって、互に電気ベクトルが45度ずつ偏光した4枚1組の写真を得ることができる。

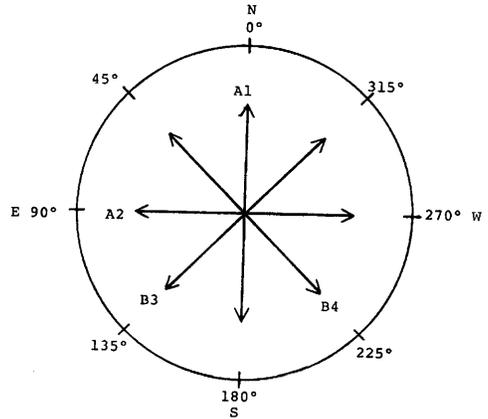


図2 A、B両系より得られる偏光軸の方向。
A1、A2はA系、B3、B4はB系

得ることができる。

図2に4枚1組として得られる偏光軸の方向を示す。A1、A2はA系から得られ、A1は0°↔180°方向、A2は90°↔270°方向であり、B3、B4はB系より得られ、B3は135°↔315°方向、B4は45°↔225°方向のそれぞれ偏光軸を持っている。表2、表3にA、B両系よりそれぞれ得られた撮影結果を載せる。実際の観測は各偏光軸について1/8、1/4、1/2秒の露出を与えたものがあるが、測光用として使用したものだけを載せてある。

ここで、一つ注意することは、A1、A2、B3、B4の原板の露出時間が全て1秒なのに対

表2 A系カメラの撮影結果

フィルムコマ番号	時刻(U.T.)	露出時間	N.D.フィルター	原板記号
8	11h55m07s	$\frac{1}{125}$ 秒	D 4	(絶対測光用)
19	13h03m14s	1 秒	—	A 1
20	03m41s	1 秒	—	A 2

表3 B系カメラの撮影結果

フィルムコマ番号	時刻(U.T.)	露出時間	N.D.フィルター	原板記号
9	11h55m46s	$\frac{1}{125}$ 秒	D 4	(絶対測光用)
20	13h03m19s	1 秒	—	B 3
21	03m44s	1 秒	—	B 4

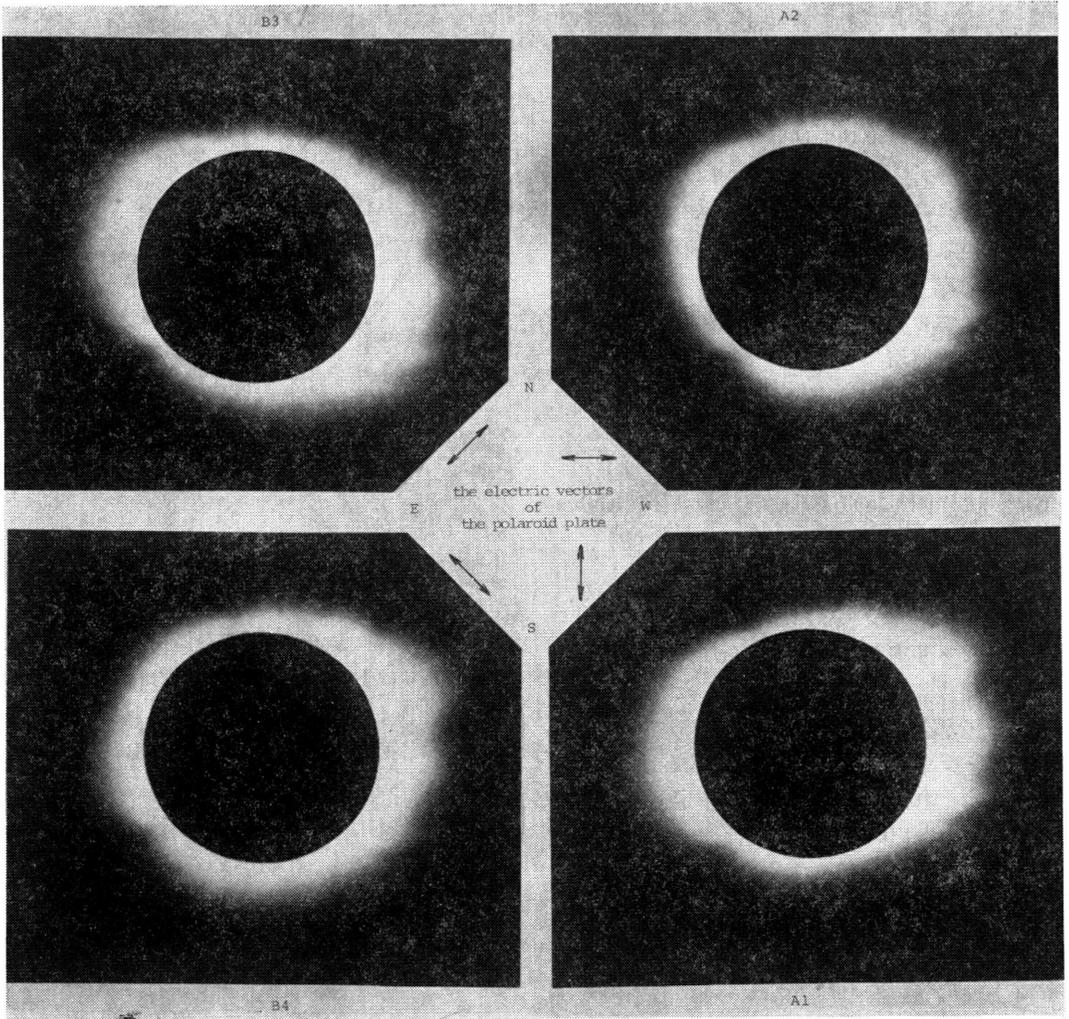


図3 1973年6月30日の皆既日食における太陽コロナの偏光写真像。A1, A2 は $f_A=700\text{mm}$ のA系カメラによる。B3, B4 は $f_B=1000\text{mm}$ のB系カメラによる。

し、絶対測光用の露出時間が $1/125$ 秒であるため、フィルムの特性曲線上で相反法則不規を考慮しなければならない。そのため絶対測光用の写真の減光率を考え、濃度で $D=2.516$ とした。表2のフィルムコマ番号19, 20 (原板A1, A2に相当) 及び表3のフィルムコマ番号20, 21 (原板B3, B4に相当) の像を印画紙に焼付けた写真を図3に示す。

図4は観測地で見た天球上での太陽の中心を

固定したときの月の中心の相対経路を表わしている。 N_{\oplus} 及び S_{\oplus} は天の北極及び南極方向であり、II, IIIはそれぞれ第2, 第3接触における月の中心の位置である。表2及び表3と比較すると解るが、ここで解析する4枚の原板は図4のおよそ $13^{\text{h}}03^{\text{m}}\sim 04^{\text{m}}$ の間にそれぞれ露出時間1秒で撮影された。第1枚目のA1から第4枚目のB4が撮影されるまでの時間は40秒を要し、その間に太陽と月の相対移動は $0.014R_{\odot}$ に

The apparent locus of the moon's center relative to the sun's center during totality at Mt. Halisiruwa

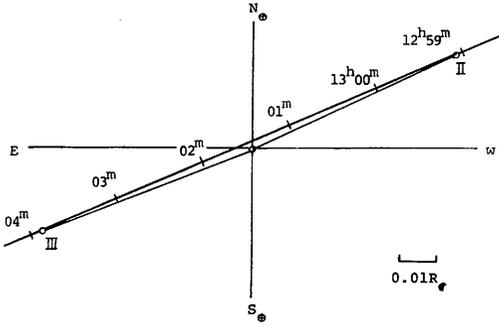


図4 観測地ハリシルワ山麓で皆既時の間、太陽中心を天球上に固定したときの月の中心の相対経路。

なる。なお、A系、B系の原板上の太陽及び月の像の半径は次のようになる。

太陽半径 A系 3.21mm, B系 4.58mm

月の半径 A系 3.43mm, B系 4.90mm

撮影されたフィルムは帰国後、階段形光学楔 (Kodak 社製ステップウェッジ) を焼き込んでから次の現像処理を行なった。なお光学楔は東京光電製の Multiplier Photometer を用いて実際の濃度をを得ている。

フィルム	現像液	液温	現像時間
A系フィルム	D 76	20.5°C	10分
B系フィルム	D 76	21.0°C	10分

5 原板の測光

表2、表3により得られた原板及び光学楔を焼き込んだ原板は、東京天文台にあるナルミ商会製のマイクロ・フォトメーター NLM—VII型にて測定を行なった。4枚の偏光コロナ像である原板A1、A2、B3、B4については座標の原点を太陽中心とし、位置角 (P. A.) は第1接触直後の部分食像からN極を定め、ここを0度として反時計方向 (N極からE極へ向う) に10度ごとに設定した。ここで、フォトメーターのスリット開口を 0.04 mm × 0.04 mm の正

[Characteristic Curve of Film]

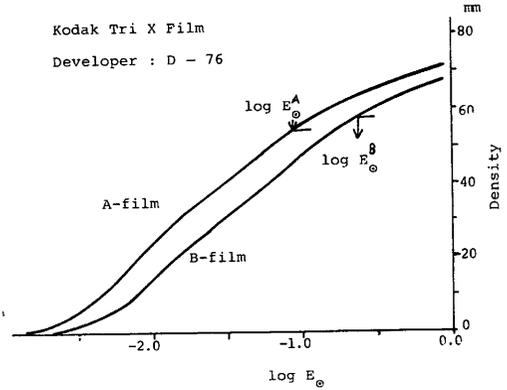


図5 Tri X フィルムの特性曲線。縦軸の原点はフィルムベース濃度を基準にしてある。

方形にして各位置角ごとに動径方向に走査した。記録用紙上への濃度の記録は動径方向が20倍に拡大されて得られた。なお、機器の安定性のために全ての測定を2日に渡って電源のスイッチを切らずに連続して行なった。

光学楔像の測光より得た Tri X フィルムの特性曲線を図5に示す。横軸は露光量の対数を与えてあり、これより輝度の相対値が得られる。縦軸は濃度でその目盛はフォトメーターの測定より得られる記録用紙上の目盛で示してある。また、この図5の曲線上には絶対測光用原板の濃度から求めた $\log E_{\odot}^A = -1.034$ 、及び $\log E_{\odot}^B = -0.647$ が矢印で示してある。ここに E_{\odot}^A 、 E_{\odot}^B はそれぞれA系カメラ及びB系カメラにおける露光量である。これより、太陽表面の平均輝度を知ることができる。

6 絶対測光

絶対測光用写真原板において、太陽表面平均輝度 \bar{B}_{\odot} 、大気の減光率 T_a 、光学系の減光率は N. D. フィルターによるもの T_f 、偏光フィルターによるもの T_p 、赤フィルターによるもの T_R とし、そして露出時間 t_{\odot} 、露光量を E_{\odot} とすると、カメラの無限遠の物体の像について次の関

係が成り立つ。

$$T_k T_f T_i T_R \bar{B}_\odot = \frac{4F^2}{\pi} \frac{E_\odot}{t_\odot} \quad \dots\dots(1)$$

但し、 F はレンズの口径比であり、 π は円周率である。次に太陽コロナの、位置角 θ 、太陽中心からの距離 r での輝度 $B_{\theta,r}$ とすると絶対測光用写真原板との減光率の違いはN. D. フィルターがないだけである。そして露出時間 t 、露光量 $E_{\theta,r}$ とすれば同一光学系では(1)式と同様にして次式を得る。

$$T_k T_i T_R B_{\theta,r} = \frac{4F^2}{\pi} \frac{E_{\theta,r}}{t} \quad \dots\dots(2)$$

この(1)、(2)式より太陽コロナ輝度 $B_{\theta,r}$ は太陽表面平均輝度 \bar{B}_\odot を単位として次式で表わされる。

$$\frac{B_{\theta,r}}{\bar{B}_\odot} = T_f \frac{E_{\theta,r}}{E_\odot} \frac{t_\odot}{t} \quad \dots\dots(3)$$

この結果は、同一光学系ではN. D. フィルターによる減光率と露出時間の比を考慮すればよいことを示している。さてA系の原板はA1, A2互に直交する偏光像であり、またB系の原板B3, B4も同様に互に直交する偏光像であるから、A1とA2の輝度の和 $B_{\theta,r}^A$ はB3及びB4の輝度の和 $B_{\theta,r}^B$ に等しい。A1, A2及びB3, B4の輝度をそれぞれ $B_{\theta,r}^{A1}$, $B_{\theta,r}^{A2}$ 及び $B_{\theta,r}^{B3}$, $B_{\theta,r}^{B4}$ とすると

$$B_{\theta,r}^{A1} + B_{\theta,r}^{A2} = B_{\theta,r}^{B3} + B_{\theta,r}^{B4} \quad \dots\dots(4)$$

となる。ここでA, B両系レンズの口径比をそれぞれ F_A , F_B として、(2)式を(4)式に代入すれば次式を得る。

$$E_{\theta,r}^{B3} + E_{\theta,r}^{B4} = K(E_{\theta,r}^{A1} + E_{\theta,r}^{A2}) \quad \dots\dots(5)$$

但し、 $K = (F_A/F_B)^2$ である。この(5)式はA系がB系に換算されたことを示している。

ここで我々の観測結果を用いると、B系については(3)式の対数をとって次のようになる。

$$\log \frac{B_{\theta,r}^B}{\bar{B}_\odot} = \log (E_{\theta,r}^{B3} + E_{\theta,r}^{B4}) - 5.389 \quad \dots\dots(6)$$

ここに、 $E_{\theta,r}^{B3}$, $E_{\theta,r}^{B4}$ は原板B3, B4の濃度測定より得られた値を使って、特性曲線から求められる。またN. D. フィルターの減光率 T_f は $\log T_f = -3.52$ (濃度 $D = \log T_f^{-1} = 3.52$ より), $\log E_\odot^B = -0.647$ (特性曲線より), $\log t = 0$ ($t=1$ 秒), $t_\odot = 1/125$ 秒は相反法則不規を考慮してやり $\log t_\odot = -2.516$ とする。続いて、A系については(5)式の換算係数 K は次のようになる。

$$K = 2.301$$

ただし、A, B両系のレンズの焦点距離はそれぞれ $f_A = 700$ mm, $f_B = 1000$ mm, 口径はそれぞれ $D_A = 30$ mm, $D_B = 65$ mmであり、 $F_A = f_A/D_A = 23.33$, $F_B = f_B/D_B = 15.38$ となる。よって、

$$\log \frac{B_{\theta,r}^A}{\bar{B}_\odot} = \log (E_{\theta,r}^{A1} + E_{\theta,r}^{A2}) - 4.640 \quad \dots\dots(7)$$

となり、B系に換算された値となる。但し、 $\log E_\odot^A = -1.034$, $\log K = 0.362$ で、他はB系と同じである。ここで(4)式を考慮すれば(6)式と(7)式は等しくなる。つまり、

$$\log \frac{B_{\theta,r}^B}{\bar{B}_\odot} = \log \frac{B_{\theta,r}^A}{\bar{B}_\odot} = \log \frac{B_{\theta,r}}{\bar{B}_\odot} \quad \dots\dots(8)$$

を得る。ここに $B_{\theta,r}$ は太陽コロナの輝度分布であり、 \bar{B}_\odot は太陽表面平均輝度である。

最後に輝度、偏光度、偏向角の計算について述べる。式(6)、(7)より得られた4方向の偏光成分をA1, A2, B3, B4と呼ぶことにする。この4成分から太陽表面輝度 \bar{B}_\odot を単位とした太陽コロナ輝度 $B_{\theta,r}$ 、偏光度 P 、動径方向からの磁気ベクトルの主要軸の偏向角 β は次の式により求められる⁶⁾。

$$\begin{aligned} \text{コロナ輝度} : \log \frac{B_{\theta,r}}{\bar{B}_\odot} &= \log (A1 + A2) \\ &= \log (B3 + B4) \quad \dots\dots(9) \end{aligned}$$

$$\text{偏光度} : P = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} \quad \dots\dots(10)$$

$$\text{偏向角} : \beta = \alpha - P.A. \quad \dots\dots(11)$$

ここに

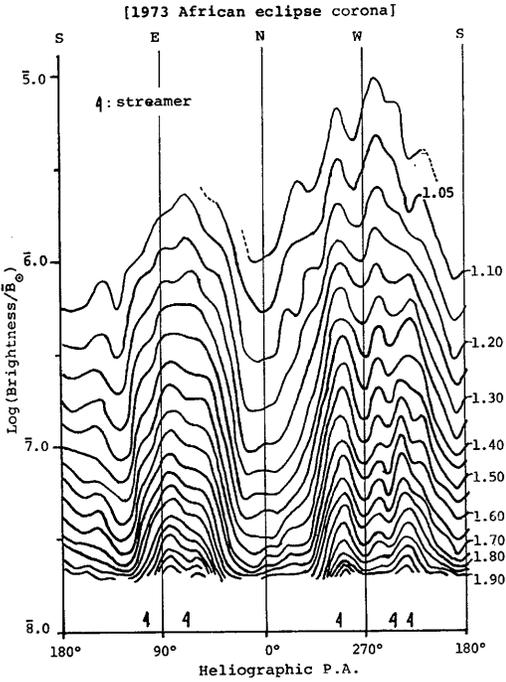


図6 1973年アフリカ日食で観測された太陽コロナの輝度分布

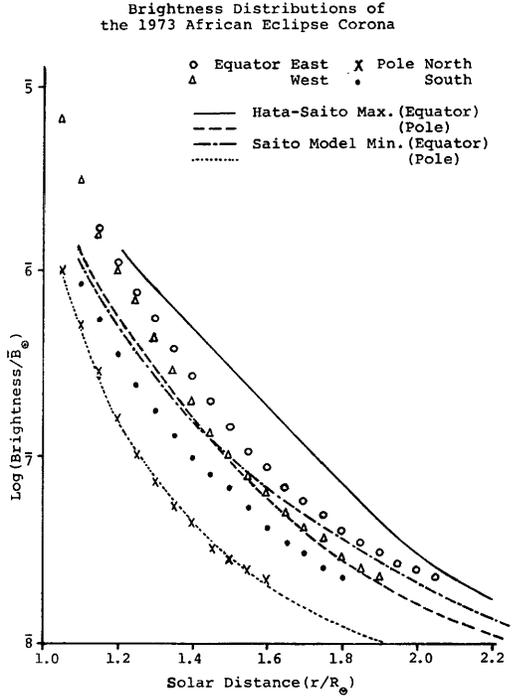


図8 赤道及び極方向の太陽コロナの輝度分布

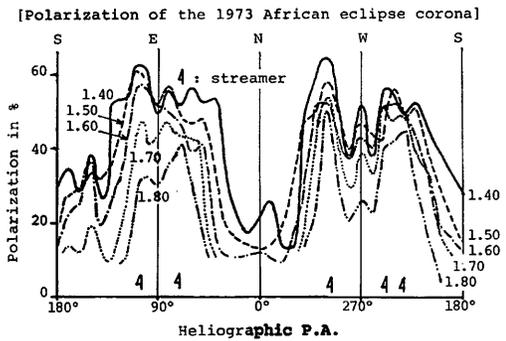


図7 1973年アフリカ日食で観測された太陽コロナの偏光度分布

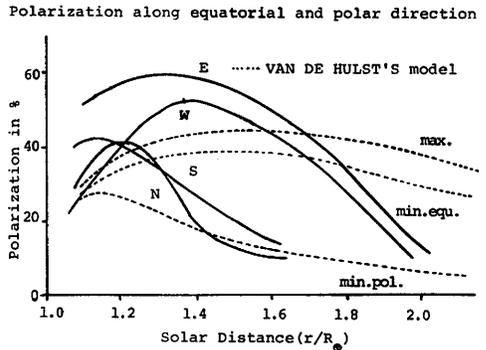


図9 赤道及び極方向の太陽コロナの偏光度の分布(%表示)

$$P_1 = \frac{A1 - A2}{A1 + A2}, \quad P_2 = \frac{B4 - B3}{B4 + B3}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \cot^{-1} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

(1)式において α は偏光ベクトルが天の北極とな

す角であり、P. A. は位置角である。

7 結果

A1, A2, B3, B4の各原板には月の像が写っているのでその中心と太陽中心の位置の差

を求め、別に第1接触直後の太陽像からN極の方向を知り、マイクロフォトメーターで走査した。P. A. に対し10度ごと及び r に対して0.05 R_{\odot} ごとに得られた濃度を特性曲線から露光量の対数として変換し、その後(6), (7)式により必要な較正を行なった。(9)式より得られる太陽コロナの輝度分布は、太陽表面平均輝度 \bar{B}_{\odot} を単位として図6に掲げてある。この図6は横軸に原板の位置角 P. A. をとり、縦軸にコロナ輝度の対数値をとっている。曲線は太陽距離 r による変化を表わしている。また、特に著しいストリーマーを矢印で示してある。図7は(10)式より得られる偏光度である。横軸は位置角であり、縦軸に偏光度を%表示で示してある。曲線は太陽距離 r による変化を与える。この図7にも図6と同様のストリーマーを矢印で示してある。これより、ストリーマー上で特に偏光度が顕著に表われていることが解る。

図8は極方向及び赤道方向での太陽距離による輝度の減少を与える。北極方向を×印、南極方向を・印、赤道に沿って東方向を○印、西方向を△印でもって示している。比較のために Hata-Saito (1966)⁷⁾ によって与えられた極大型コロナ及び Saito (1970)⁸⁾ によって提案された極小型コロナの標準光度値を曲線でもって加えてある。現在のコロナは北極方向が極小型になっているのに対し、南極方向及び赤道方向は極大型を残した中間的な特徴を呈していることが解る。図9は極方向及び赤道方向での偏光度の分布を実線で示している。これも比較のために van de Hulst のモデル⁹⁾ を破線で示してある。いずれの方向も極小型とはなっておらず。極大型でもなく中間的な状態であることが解る。しかしながら我々の測定では原板が非常に小さいので、偏光度の値にかなりの誤差を含んでいると言わざるを得ない。(11)式による偏向角の値も一応求めたが、以上のような状況であり、精度的にも無理があるので割愛した。

謝 辞

本報告は東京理科大学天文研究部が1973年6月30日のアフリカ日食に遠征した際の観測記録を解析したものである。なお内部コロナ偏光観測として浅尾薫、天野典子、藤岡宇太郎、山本威一郎の各方々が実際の準備、観測を行なっており、特に山本氏は帰国後のウェッジの焼き込み、濃度測定を行なっている。これらの諸兄及びその他の隊員の方々、更には私とは独立に解析を行なった大越治氏に心から感謝の意を表する次第です。最後にこの日食観測及び解析に当たり様々な便宜を計って下さった東京大学・東京天文台の秦茂先生にお礼申し上げます。

文 献

- 1) 森巧・井上圭典：1973年6月30日の皆既日食；天文月報 65 No. 1, 13-14 (1972)
- 2) 斎藤国治・秦茂・東條新：1973年6月30日アフリカ日食における太陽コロナの写真観測；東京天文台報, 17 No. 1, 1-39 (1974)
- 3) 海上保安庁；昭和48年天体位置表 (1972)
- 4) 斎藤国治・牧田貢・秦茂・東條新：1970年3月7日メキシコにおける皆既日食観測の予備報告；東京天文台報, 15 No. 3, 445-508 (1971)
- 5) Kuniji Saito : Photometric and Polarimetric Analysis of the Coronal Streamers observed at the March 7, 1970 Mexican Eclipse ; Ann. Tokyo Astr. Obs., Se. Ser., 13 No. 2, 93-148 (1972)
- 6) Shigeru Hata ; Arata Tojo : Polarigraphic Observations of the Solar Corona at the Total Eclipse on March 7, 1970 in Mexico ; Ann. Tokyo Astr. Obs., 13 No. 2, 149-167 (1972)
- 7) Shigeru Hata and Kuniji Saito : The flattening, total light, brightness distribution, and polarization of the solar corona ; Ann. Tokyo Astr. Obs., 10 No. 1, 16 (1966)
- 8) Kuniji Saito : A Non-spherical Axisymmetric Model of the Solar K-Corona of the Minimum Type ; Ann. Tokyo Astr. Obs., 12 No. 2, 53-129 (1970)
- 9) Van de Hulst, H. C. : The Sun edited by G. P. Kuiper ; Univ. Chicago Press, (1954) 285