

技術報告

F コロナの偏光分布画像解析

馬場 直志*・三浦 則明*・磯部 穎三**・狹 豊***

* 北海道大学工学部応用物理学科 〒060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

** 東京大学東京天文台 〒181 三鷹市大沢 2-21-1

*** 宇宙科学研究所 〒153 東京都目黒区駒場 4-6-1

(1984 年 6 月 27 日受理)

Image Analysis of Polarization Distribution of the F Corona

Naoshi BABA,* Noriaki MIURA,* Syuzo ISOBE** and Yutaka KOMA***

* Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Hokkaido University,
Kita-13 jo, Nishi-8 chome, Kita-ku, Sapporo 060

** Tokyo Astronomical Observatory, University of Tokyo,
2-21-1, Osawa, Mitaka 181

*** The Institute of Space and Aeronautical Science,
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153

The total solar eclipse was observed in Indonesia, on June 11, 1983. The observation was a photo-polarimetry of the F corona by using a SIT TV camera, which was loaded on a balloon. The brightness and polarization distributions of the corona were measured in 4 colors over a sky region of $5^\circ \times 5^\circ$. The data analysis of these measurements is described. From the data analysis, there was found a region with high polarization degree, which is probably caused by the scattering of dust grains.

1. はじめに

1983年6月11日のインドネシア・ジャワ島での皆既日食時に、太陽外層コロナの観測が行なわれた¹⁻³⁾。この観測の目的は、太陽のまわりに存在すると予測されている塵微粒子密度が高いリング状の構造を、可視光にて太陽外層コロナの測光およびその偏光状態を調べることにより確認することである。

この観測では、太陽中心から太陽半径（以下 R_\odot と記す）の約4倍より広がる F (Fraunhofer) コロナを観測するために、観測装置を気球に搭載して地上より約 30 km 上空に持ち上げた。これは、日食時でも地球大気は太陽光や内部コロナの光を受けて輝いており、しかも日食中に変動しているため、背景光をできるだけ下げる必要があったからである。また、皆既日食が短時間の現象であり、しかも太陽から約 $4R_\odot$ より外側の非常に暗い部分を観測するため、2次元で高感度の検出器を必要とした。このため SIT (silicon intensified target) カメ

ラを用い、そのカメラの出力ビデオ信号をビデオレコーダーで記録し、日食終了後、観測機器を地上で回収した。

本論文では、可視光 F コロナの画像データが収録されたビデオテープを基に、画像処理・解析を行ない、F コロナの偏光度分布を得たので報告する。

2. F コロナ

太陽周辺にはコロナが広がっているが、コロナの光は直接太陽光に比べて非常に弱く、太陽より外側に向かうほどさらに弱くなっている。日食時には、地上からコロナの輝きが観測される。このコロナは、太陽から放射する光が太陽周辺の高温プラズマ中を飛びまわる電子によって、トムソン散乱され連続光として見えている K コロナとよばれる光の強い内側の部分と、惑星間空間まで広がる塵粒子によって散乱され輝く F コロナとよばれる外側の部分より成っている。太陽中心より約 $4R_\odot$ の所では、F コロナのほうが K コロナより 10 倍程度明るい。

太陽系には多量の惑星間塵微粒子が存在しており、太陽系円盤部に集中的にあって太陽光を散乱して黄道光や対日照として観測されている。Fコロナは、黄道光のいちばん太陽寄りの部分にはほかなりない。惑星間塵粒子は、一般にポインティング・ロバートソン効果で太陽光の放射圧を受けて徐々に軌道半径を減少して、黄道面内をら線状に太陽近傍まで落下していく。しかし、太陽光によって加熱され粒子の昇華温度近くでは速やかに粒子サイズが小さくなる結果、放射圧の効果が相対的に大きくなり、塵粒子は太陽から吹き飛ばされるようになる。したがって、ポインティング・ロバートソン効果により塵粒子が太陽へら線状に落ち込んでいく効果と太陽の放射圧で吹き飛ばされる効果が均衡する軌道半径の位置で、粒子密度が高くなる部分が存在すると考えられる。

塵粒子がまだ昇華せず密度の高い場所ではFコロナが強く、これらの粒子による散乱でFコロナの偏光度が大きくなる。もし、Fコロナ中でとくに偏光度の大きい部分が存在すると、そこは塵粒子密度の高い所といえ、塵粒子が昇華する場所を特定できることになる。塵粒子密度の高い所は一定軌道半径上にあり、これより太陽のまわりの塵粒子の輪の存在を確認できることになる。

3. 観測装置

Fコロナの測光偏光観測装置の概要をFig. 1に示す。受光器としては、高感度のSITカメラを用い、その前面に偏光フィルター板、波長フィルター板、内部コロナのオッカルティング板を置いた。

観測に用いた波長フィルターは4種で、中心透過波長はそれぞれ、533 nm (半幅 $\Delta\lambda=25$ nm), 597 nm ($\Delta\lambda=26$ nm), 720 nm ($\Delta\lambda=33$ nm), 802 nm ($\Delta\lambda=37$ nm)である。波長フィルターは、回転するようになっており、約15秒おきに次々のフィルターでコロナの観測が行なわれる。

偏光板は波長フィルターの移動と同時にスタートして、1回転8方向に固定する。偏光板は1.7秒静止し、0.1秒で45°回転し次の位置に送られる。偏光板が8方

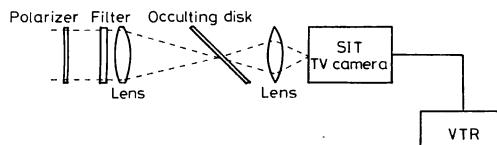


Fig. 1 Schematic diagram of an equipment for observing and recording F corona image.

向の位置で止まって観測されると、波長フィルターの位置が変わる。4枚の波長フィルター全部について観測に要する時間は約60秒である。上空30kmの気球位置での皆既日食の継続時間は3分40秒であったが、実際に観測が行なわれたのは2分20秒間であった。したがって、4種の波長フィルターに対して2回ずつ観測された。

内部コロナが明るすぎるため、その光を減光するのに、 $3.5R_{\odot}$ に対応する強度透過率1/100のオッカルティング板を用いた。これは、ガラス板に $3.5R_{\odot}$ に対応する大きさの円内をアルミ蒸着したもので、これによる反射光を逃がすために、ガラス板を光軸に対し45°傾けてある。

SITカメラでとらえたコロナの映像は、ビデオ信号のゲインを1倍と5倍に切り替えて、ビデオテープレコーダーで記録された。これによって、比較的明るい部分と、非常に暗い外側の部分との両方を記録できた。

ビデオテープに記録された画像データは、8ビットでA/D変換されフレームメモリーを介して、各画像の15フレーム分を加算し雑音の低減をはかった。各画像の画素数は 256×256 である。フライホイールによるゴンドラの姿勢制御が1'角以下のよい精度で行なわれたため、画角5°の今回の観測の場合、各画像のずれは走査線間隔の1/3以下と考えられる。

4. 画像処理

720nmの波長フィルターを用い、ゲインを5倍にしたときに撮られたコロナの画像を例としてFig. 2(a)に示す。この図およびこれ以降のコロナの図において、左右が西東、上下が南北となっている。Fig. 2(a)は偏光板の透過軸を南東方向にしたときの画像である。この画像で、コロナの右下に三日月状で暗くなっている部分があるが、これはオッカルティング板の中心に皆既日食

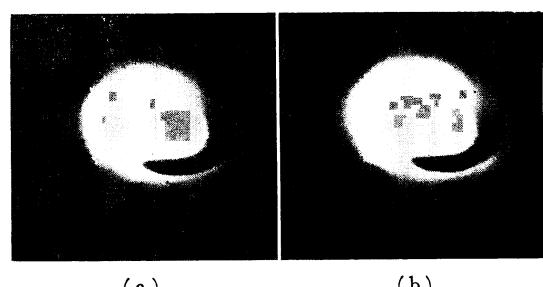


Fig. 2 Image of the corona taken by SIT TV camera (a) and image after noise suppression processing (b).

中の太陽を捉えることができず、中心より左上に太陽がいるためである。

Fig. 2(a)を見てわかるように、画像には明暗のスパイク状の雑音がのっている。このスパイク状の雑音を取り除くために、まず水平方向に1次元のメディアンフィルター⁴⁾を施し、次いで垂直方向にも同様のフィルタリングを行なった。雑音の程度に応じ、メディアンフィルターの窓数を、3, 5とした。さらに雑音を抑制するため、メディアンフィルタリング後の画像を低空間周波数濾過フィルタリングすることも行なったが、結局計算効率を考えて、近接4画素の平均で平滑化をした。このような操作を **Fig. 2(a)**に行なった結果が **Fig. 2(b)**である。

SIT カメラは、受光面上場所により感度のばらつきがあるため、これを撮像画像について補正しなければならない。このために、実験室内にて一様強度分布の光源を、SIT カメラの前方正面に置き、その強度分布を記録した。これを **Fig. 3** に示す。中央の黒い部分は、オッカルティング板のあるところである。**Fig. 3** の画像データを上述と同様の処理をした後、SIT 管受光面の感度補正のために用いた。

Fコロナの観測において、背景光はつねに時間的にゆるやかではあるが変動している。データ解析を行なう際、できるだけこの背景光の影響を除去する必要がある。今回の観測は、2次元受光器の SIT カメラを使用したので、つねに変動する背景光を観測対象光と同一画面上に捉えている。そこで、背景光の影響を軽減する便法として、撮影画面上で太陽から最も離れた部分の画素値より背景光成分を推定し、コロナ画像の各画素値からこの成分を引き算するという方法を用いた。

コロナの偏光分布を求める際、観測装置に基づく偏光成分の影響を取り除かねばならない。今回の観測装置は **Fig. 1** に示すごとく、オッカルティング板を光軸に対し 45° 傾けた構成にしたため、斜めガラスに起因する偏

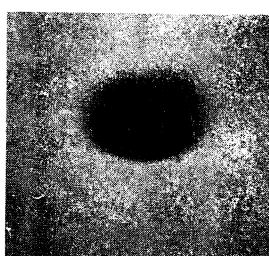


Fig. 3 Image of uniform light source, which is used to compensate the irregularity of the sensitivity over the SIT TV camera tube.

光成分が観測データに重畠してくる。これは、空気・斜めガラス境界面における屈折に際して、光波の s 成分、p 成分の透過率が異なるためである。この偏光方向による光の強度透過率の変化を補正するために、非偏光の一様光源を、このコロナ観測装置で偏光板を 45° ずつ 1 回転させて測定した。このデータから偏光板の各位置に対する光強度透過率の補正を行なった。

以上の前処理を行なった画像を用いて次に述べる偏光度の解析を行なう。

5. 解析と結果

偏光板の透過軸を、東西方向に向けたときに観測されるコロナ像を I_1 とし、反時計回りに 45° ずつ偏光板を回転させていったとき、観測されるコロナ像を、 I_2, I_3, \dots, I_8 とする。このとき、 I_i と $I_{i+4}(i=1, 2, 3, 4)$ は等しくなると思われるが、観測時間差があり光強度の時間的変化、雑音等によって、必ずしも同一の画像は得られない。そこで、 I_i と I_{i+4} の平均を、偏光板のその透過軸方向の強度とした。

入射光強度のうち、 A を非偏光成分の強度、 B, θ を直線偏光成分の強度と偏光角とすると、マリュースの法則より、

$$\left. \begin{array}{l} (I_1 + I_5)/2 = A + B \cos^2 \theta \\ (I_2 + I_6)/2 = A + B \cos^2(\theta - 45^\circ) \\ (I_3 + I_7)/2 = A + B \cos^2(\theta - 90^\circ) \\ (I_4 + I_8)/2 = A + B \cos^2(\theta - 135^\circ) \end{array} \right\} \quad (1)$$

となる。したがって偏光度 P と偏光角 θ は上式より、

$$P = \frac{|I_{\max} - I_{\min}|}{|I_{\max} + I_{\min}|} = \frac{B}{2A + B} = \frac{2\sqrt{(I_2 - I_4 + I_5 - I_8)^2 + (I_1 - I_3 + I_5 - I_7)^2}}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{I_1 + I_5 - I_3 - I_7}{I_4 + I_8 - I_2 - I_6} \quad (3)$$

となる。コロナの画像強度は、

$$I = (I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8)/4 \quad (4)$$

と定義する。

波長フィルターに 720 nm を用い、ビデオのゲインを 1 倍として観測したときのデータをもとに、コロナの強度分布 I を表示したのを **Fig. 4(a)** に、偏光度 P を濃淡分布で表示した画像を **Fig. 4(b)** に示す。偏光度の濃淡分布において、明るい部分が偏光度の高い領域を表わしている。また、これらの画像において、オッカルティング板の内部およびその影響を受けていると思われる

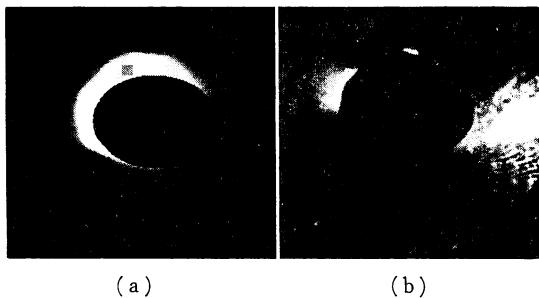


Fig. 4 Distributions of intensity (a) and the degree of polarization (b) of the corona of 720 nm light.

板周辺部分はゼロにしてある。さらに、太陽中心から約 $11R_{\odot}$ 以上離れた領域での $I_1 \sim I_8$ の像強度が小さいため、信頼のおける偏光度が得られないので、偏光度分布のこの領域もゼロにしてある。

Fig. 4(a) の強度分布からは、塵粒子による散乱光でとくに明るく輝いている部分を識別することはできない。一方、**Fig. 4(b)** の偏光度の濃淡分布をみると、太陽から西（左）の方で、偏光度の高くなっている部分が認められる。太陽の東側は、観測中モニター TV 上に太陽内部コロナの強い光によるレンズと干渉フィルター間の反射迷光でゴースト像が出ていたため、ここでは検討しない。偏光度分布をもっと詳しく調べるために、次に述べるような表示を行なった。

すなわち、偏光度の大きさと偏光角を 64×64 の点上で表わした。それが **Fig. 5(a)** である。各点における線分の長さと方向がそれぞれ偏光度の大きさと偏光角を

表わしている。図中のほぼ中央にある円が太陽の位置と大きさを表わしている。偏光角の分布は、理論的には太陽円の接線方向になると予測されているが、**Fig. 5(a)** はこれに近い分布を示している。また、この図には偏光度の等偏光度曲線が描かれている。等偏光度曲線の間隔は偏光度の差として、5%である。いま、最も興味あるのは太陽中心から西側 $4R_{\odot}$ の黄道面近傍である。それは、過去および今回の日食観測での赤外線観測において、太陽中心から約 $4R_{\odot}$ の位置に赤外 ($1 \sim 3 \mu\text{m}$) 強度のピークが観測されているからである^{5,6)}。この部分を詳しくみるために、**Fig. 5(a)** の左上の部分を取り出して、等偏光度曲線を描かせたのが **Fig. 5(b)** である。図中、等偏光度曲線に偏光度を%表示した数値を記入した。偏光度は最大の所で22%である。この図から、より明瞭に太陽の西方に偏光度の高い領域があることがわかる。

6. おわりに

この報告では、波長 720 nm に対する観測の解析結果についてのみ述べた。他の可視光 3 波長に対する解析は現在進行中である。これらの解析結果と赤外域による観測結果を総合的に評価することにより、塵微粒子の大きさ、組成等について多くの知見が得られるものと思われる。

また、ダストリングが存在すると推定された太陽中心から約 $4R_{\odot}$ の領域では K コロナの明るさは F コロナの明るさの $1/10$ 程度と考えられるが、K コロナによる偏光の影響を考慮することにより、塵粒子の集積量につい

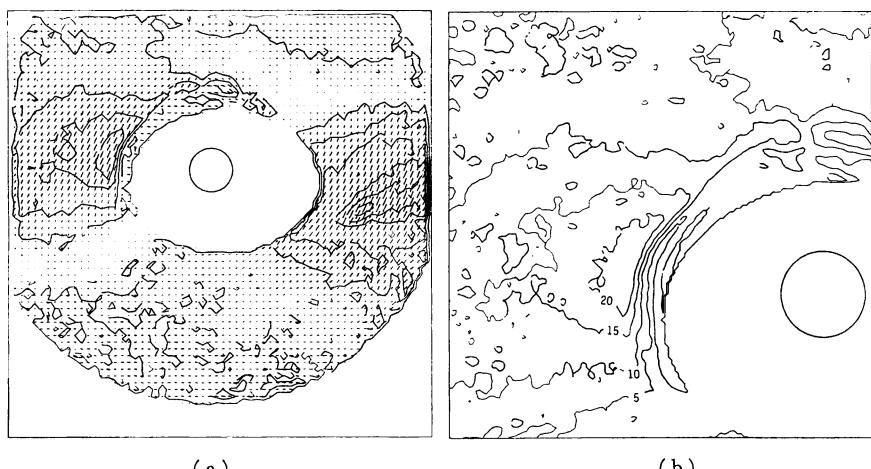


Fig. 5 (a) Degree of polarization and position angle of polarization over 64×64 pixels.
(b) Contour plot of equal polarization degree with respect to the upper left region of (a).

ても推定できるものと思われる。

今回の解析を行なうにあたり、東京天文台の田鍋浩義氏と平山智啓氏にいろいろとお世話をいただいた。ここに謝意を表します。

文 献

- 1) H. Tanabe, S. Isobe, H. Akiyama, Y. Koma, Y. Okabe, J. Nishimura, T. Maihara, K. Mizutani, J. Soegijo, T. E. Hariadi, S. Indraman, S. Slamet, P. Anondo, T. Tatang, S. Agus, W. Mulyana and V. R. Suroto: *Proceedings of COSPAR Meeting* (1984, in press).
- 2) 狩 豊, 秋山弘光, 岡部選司, 太田茂雄, 西村 純, 磯部秀三: 日本天文学会 1983 年秋季年会予稿集, B 81 (1983).
- 3) S. Isobe, Y. Koma and S. Miyaki: Am. Astron. Soc. Photo-Bull. (1984, in press).
- 4) W. K. Pratt: *Digital Image Processing* (John Wiley & Sons, New York, 1978) p. 330.
- 5) K. Mizutani, T. Maihara, N. Hiromoto and H. Takami: Nature, 312 (1984) 134.
- 6) T. Maihara, K. Mizutani, N. Hiromoto, H. Takami and H. Hasegawa: submitted to *Proceedings of the IAU Colloquium No. 85*.