

太陽コロナの画像処理 2001年6月21日のアフリカ皆既日食における 広視野高解像度画像

福島 英雄

(2001年10月1日受理)

Image Processing of the Solar Corona Wide-Field and High-Resolution Images of the Solar Corona at the Total Solar Eclipse in Africa on June 21, 2001

Hideo FUKUSHIMA

Abstract

A new technique for the image processing of the solar corona together with its application to the data taken at the total solar eclipse in Africa on June 21, 2001 is introduced. It is difficult to process images of astronomical objects, which has large dynamic range of the intensity such as the solar corona. The author tried a new technique by composing many images of different exposure times, and succeeded to obtain a coronal image where one can recognize any details of coronal streamers, both at the brightest region around the Moon's edge and at the fainter part of the outer region, simultaneously.

Actual photographic data were taken at the total solar eclipse at Lusaka in Zambia on June 21, 2001, by using a 6×7 camera of large format film attached to a refractor of 12.5-cm aperture (f/4.0). Fourteen frames, which had different exposure time, were digitized by a film scanner, and were composed to one image by an image processing on a PC. On the final image, the detailed structure of the corona can be recognized over the 4 order of the dynamic range of the brightness together with high-resolution over a wide-field of view of 7.088×5.787 degrees, which is beyond 11 times of the solar radius. This final image was compared with the images taken by the SOHO satellite at around the observing time of the solar eclipse. The discussion on this comparison is also described in this paper.

1. はじめに

1.1 これまでの経緯

筆者は、1989年以来、天体画像のパソコンによるデジタル画像処理について研究している。画像処理と言っても、多方面の分野に関わる幅広い多種の処理が含まれるが、この研究は、主に、広報・教育用に公開するための見栄えのする自然な感じの天体画像を作成することを目的としている。

当初は、パソコンの性能不足やモデムを使った通信での遅い伝送速度などに制限され、大きなファイルサイズ

である高解像度画像の作成および通信を利用した公開は難しかった。そのころ、パソコン通信を使用し、試行錯誤での実験期間を経て、いくつかのホスト局に多数の天体画像をアップロードしていった。そして、これらの画像を取得するユーザーが次第に増え、画像通信が発展してきた。これは、ネットワークを利用した天体画像公開の第一歩であった。

その後、パソコン、ネットワークの急速な発達に伴い、現在は、従来の写真と区別がつかないほどの高品位デジタル画像を扱うことができる時代がやってきた。その中間期、1995年からは、国立天文台三鷹構内に設立され

た「社会教育用公開望遠鏡（口径 50 cm カセグレン式反射望遠鏡）」により冷却 CCD カメラを使い、公開用の画像作成を目的とした観測から画像処理を施し、現在までに 640 点を超える画像を作成した。それらは、インターネットにおける「国立天文台ホームページの画像集」¹⁾と独自のネットワーク方式による「PAONET (Public Astronomical Observatory NETWORK)」²⁾にて公開している。また、1999 年からは、「すばる望遠鏡」の成果発表であるプレスリリースに使われた公開画像を 9 点作成した^{3, 4)}。

今回の投稿では、すべての構造を同時に表現することが特別に難しいとされている、大きなダイナミックレンジを持つ皆既日食中の太陽コロナの画像処理に挑戦し、良好な結果が得られたので、その観測方法と画像処理方法について報告する。この画像も、パブリック・ドメインとして上記と同様に公開した。

1.2 皆既日食の観測計画

1995 年 12 月 2 日に打ち上げられた NASA と ESA の共同で製作された太陽観測衛星「SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)」は、コロナグラフを装備しており、現在も連続観測を続行している。観測装置のひとつ、LASCO-C3 による観測は、太陽半径の 32 倍もの広角範囲にわたるコロナの構造を鮮明な画像として連続した時間変化を捕らえている。このような観測があると、皆既日食時の地上観測の価値はないのであろうか？ いや、そのようなことはないはずである。アマチュアのレベルでコロナの形状を捕らえる観測に限定して、

(1) SOHO/LASCO の観測装置は、極淡い外部コロナを撮るために、太陽光球と縁近くの明るいコロナやプロミネンスの光を遮る大きなオカルティング・ディスクを使用しているため、それに隠された範囲の構造が写っていない。その部分を補う、内部コロナとプロミネンスの微細構造を捕らえるための観測。

(2) LASCO-C3 の画像と同等の広角範囲を高解像度で捕らえるのは無理があるが、より高解像度のできる限り広範囲におよぶ画像を得るための観測の 2 つが思い付く。

上記の (1) に適応する観測は、多くのアマチュア観測者が見事な写真を撮影している⁵⁾。活動領域のクローズアップもあるが、太陽半径の 4~5 倍以内の写野が最も多い。これまでに、コロナの細い流線構造を明確にみることができる解像度を確保しつつ、全周にわたり太陽半径の 6 倍以上の広範囲をカバーするものは、ほとんどなかったと思われる。そこで、筆者は、あえて、(2) の観測に挑戦しようと計画した。

前回、1999 年 8 月 11 日の皆既日食をトルコで観測したときにも、コロナの広写野高解像度画像を取得するための観測を行った。このときの結果は、画像処理にて約 $6.5 \times 3.6^\circ$ の広範囲をカバーするコロナ流線構造を表現することができたものの、焦点距離 300 mm の望遠

レンズと 35 mm サイズのフィルムを使用した撮影であったため、焦点距離が短くフィルム面積が狭いのが原因で、期待していた高解像度を得ることができなかった。画像の解像度は 1 ピクセルが $6.5''$ 、空間分解能は $50''$ 程度である。その教訓から、同じ目的とする次回の皆既日食観測を成功させるため、観測機器を新たに選定した。

1.3 2001 年のアフリカ皆既日食観測

2001 年 6 月 21 日に起こった皆既日食を観測するため、アフリカ、ザンビア共和国の首都ルサカへ遠征した。

この日食の皆既食帯は、アルゼンチン沖の大西洋上から始まり、アフリカ大陸のアンゴラ、ザンビア、ジンバブエ、モザンビークを通り、マダガスカル南部を通過、インド洋上で終わった。筆者の観測場所は、ルサカ国際空港の駐車場であった。次に観測場所の位置と接触時刻の予報を示す。

観測位置: $E28^\circ 27' 56''$, $-15^\circ 18' 05''$

標高 1150 m

(旅行会社による GPS を使った測定値)

第 1 接触: 11 時 42 分 05.8 秒 [UT]

第 2 接触: 13 時 09 分 37.0 秒

最大食: 13 時 11 分 18.5 秒

第 3 接触: 13 時 12 分 58.4 秒

第 4 接触: 14 時 27 分 12.5 秒

皆既継続時間: 03 分 21.4 秒

(計算: 遠山御幸氏, 月縁の凹凸も補正している)

「2. 観測」で述べる観測方法にて、太陽コロナの写真撮影に成功した。そして、「3. 画像処理」で述べる画像処理により、全周にわたり太陽半径の 11 倍以上の広範囲をカバーするコロナの形状を、月の縁近くの最も明るい部分から外周の淡く暗い部分まで 1 万倍もの明るさの差があるコロナ流線の微細構造を同時にみることができ、高解像度画像として表現することができた。この画像は広報・教育用として作成したもので、すでに一般向けに公開している。その他、公開用だけではなく、研究に利用できることについても議論する。

2. 観測

2.1 観測機器の選定

自費での海外遠征観測において、目的の観測を達成するために、観測機器を次の条件で選定した。

(1) 旅行中、一人で機材を運搬できることと重量超過料金のことを考え、個々の機材の重量はできるかぎり軽いこと。観測機材だけの総重量を 30 kg 以内におさえる。

(2) カメラは、受光面積ができるかぎり大きく、3 分少々しかない短い皆既食継続時間内に 10 枚以上のフレームを撮ることができ短時間に連続撮影が可能なか

と、また、露出時間の制御を1/1000秒からバルブまで段階的にすばやくできること。

(3) 望遠鏡は、受光面積と焦点距離の兼ね合いであるが、全周にわたり少なくとも太陽半径の10倍以上の範囲を視野周辺まで良好な像として写すことができること。口径はできるだけ大きいことが理想。

(4) 赤道儀は、望遠鏡とカメラをしっかりと支えることができる十分な強度を持ち、モータードライブによる精度の良い自動追尾ができること。

これらの条件を満たす既製品を探すと、まず、カメラが決まった。ブローニー・サイズのフィルムを使用するペンタックス67(旭光学工業株式会社)である。この機種は、一眼レフ・タイプでありミラー・アップ機能もあり操作性が良好である。ペンタプリズムを外したボディは、重量が軽く1.3kgである。これ以上大きいフィルムを使用した連写機能を持ったカメラはない。ここで、ディテックに感光剤による写真フィルムを使用することになるが、本来は、受光部にCCDを使ったデジタルカメラが理想的である。しかし、現在では未だに、受光部面積が35mmサイズのフィルムより狭く、しかも撮影後のデータ転送時間が長いため、今回のような観測には役に立たない。

カメラが決まったところで、次は望遠鏡である。ペンタックス67は、6×7判カメラであり、フィルムの受光面積は69×55mmである。この範囲の短辺で太陽半径の10倍以上の視野を確保するためには、望遠鏡の焦点距離は600mm以下にしなければならない。この計算は、求める焦点距離を f [mm]、視野半径のフィルム上での長さを L [mm]、これに対応する角距離を ω [°]とすると、

$$f=L/\tan \omega$$

で求めることができる。

なお、焦点距離が短くなると、その分、解像度は低下するため、必要最低限、少しでも長い焦点距離が必要である。撮影時における月の像を視野中心とする構図合わせの誤差と画像処理時に周辺像が失われる範囲があることを考慮すると、余裕をみて、視野短辺が太陽半径の12倍の領域をカバーできる焦点距離は500mmである。このことから、焦点距離は500~550mmとして、口径は分解能の向上と露出時間の短縮を考え10cm以上必要とし、そして、良像範囲が6×7判の対角である88mmφをカバーするものに限定すると、BORG125EDF4(株式会社トミー)が最適であることが判明した。この製品は、対物鏡にEDレンズを採用したアポクロマート屈折望遠鏡であり、口径12.5cm、焦点距離500mmである。大きな有効径の2群4枚構成のレデューサー(焦点距離を短縮し、収差を補正する光学系)を組み合わせることにより焦点面における83mmφの良像範囲を確保しつつ、口径比が $f/4.0$ とひじょうに明るい光学系になっている。重量は4.5kgで、同じ口径の他社製品と比べずいぶん軽い。この光学系の断面図を図1に示す。実際の焦点距離が設計値である500mm ちょうどの場合

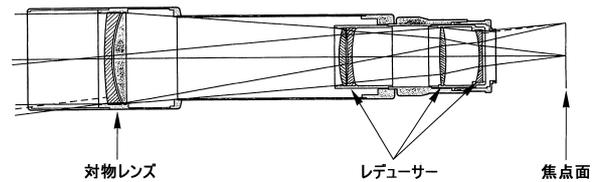


図1. BORG125EDF4の光学系の断面図。(BORGシリーズ総合カタログ2000年より引用)



図2. 観測機器。

(量産されている光学製品の焦点距離は正確ではなく、1%程度の誤差がある)、計算値による視野範囲は $7.89 \times 6.30^\circ$ である。測定から求めた値は、「4. 完成画像の測定と評価」で報告する。

赤道儀は、最低限の強度があればよしとして、軽量でコンパクトな株式会社ビクセン製のGPガイドバックを選択した。この製品は、極軸のみで赤緯軸が付いていない。望遠鏡を南北方向にも大きく振る必要があり、また微動装置も使いたいため、ジュラルミンの金属板とガイドマウントを組み合わせて、自作改造した。重量は、約6.5kgである。この構造では、望遠鏡の向きが変わると重量バランスが大きく狂うため、3個の自由雲台を連結し、その先にバランス・ウエイトの代わりとして、24mm広角レンズを装着した35mm判一眼レフ・カメラを取り付け、そのカメラの位置を変えることにより調整できるようにした。

機材の総重量は、梱包材、ケースを含め30.5kgであった。観測機器全体の写真を図2に示す。

2.2 フィルムと撮影方法

太陽半径の12倍もの外側のコロナの明るさは、太陽の縁近くの最も明るい現象の約1/10000しかない。これを撮影するには、これまでの経験により、カラー・フィルム使用では極淡いコロナと空とのコントラストを得るのは難しいと予想し、モノクロのネガ・フィルムで

表 1. 観測機材の一覧.

観測機材	品名	メーカー名
望遠鏡	BORG125EDF4	株式会社トミー
カメラ	ペンタックス 67	旭光学工業株式会社
赤道儀	GP ガイドパック	株式会社ビクセン
カラー・フィルム	フジクローム Velvia プロフェッショナル	富士写真フィルム株式会社
モノクロ・フィルム	Technical Pan 6415	コダック
フィルタ	SC・60	富士写真フィルム株式会社

表 2. 撮影データ (画像処理に使用したフレームのみ).

フレーム番号	露出時間 [sec.]	撮影時刻 h m s [UT]	Δx [pixels]	フィルム
(a) VP01	1/1000	13:09:41	-5.0	Fujichrome Velvia
VP02	1/500		-4.5	
VP03	1/125		-4.0	
VP04	1/30		-3.5	
VP05	1/8		-3.0	
VP06	1/2		-2.5	
VP07	1		-2.0	
VP08	4		-1.5	
VP09	8	13:11:15	± 0	
VP10	10		± 0	
カメラ交換	-----			
(b) TP01	12		+1.0	Technical Pan 6415
TP02	15		+2.0	
TP03	8		+3.0	
TP04	4	13:12:18	+4.0	

あるコダックの Technical Pan 6415 を使用した. このフィルムは, コントラストが強く, 粒状性も良好であり最適である. それに加えて空の散乱光を低減するため, 波長 600 nm から短波長をシャープカットする厚さ 90 μm のアセテート・フィルタ (富士写真フィルム株式会社製/SC・60) を使用した. このフィルタは, カメラ・ボディー内部のパヨネット部とミラーの間に挿入した.

最外周部以外は, カラー画像として表現したかったので, カラー・リバーサル・フィルムであるフジクローム Velvia プロフェッショナルも使用した. リバーサル・フィルムを選定したのは, ネガ・フィルムより粒状性がよく発色が鮮やかなためである. 皆既食中にフィルムの入れ換えをしている時間はない. そこで, カラー・フィルムとモノクロ・フィルムを別々に装填したペンタックス 67 カメラボディーを 2 台準備して, 皆既食の中央時刻直後にカメラ・ボディーをすばやく交換し撮影した. カラーとモノクロ, どちらを先に撮影するかは天候しだいであった. 皆既日食の当日は, 完璧な快晴であったので, カラーを優先した.

望遠鏡のフォーカスは, ED レンズの使用と口径比が $f/4.0$ と小さいため, 外気温度が 3°C 以上変化すると明らかな像のぼけが確認される. 皆既日食の観測では, 第 1 接触後, しばらくたってから気温は急速に下がり始め皆既食時には少なくとも 5°C 以上の気温差になること

を経験している. このため, 第 2 接触の直前にフォーカスを調整しなければならない. このときには恒星像を見ることができないので, 確実性があるナイフェッジ法は使えない. カメラのフォーカシング・スクリーンのスリガラス部に高倍率 (20 倍は必要) のルーペをあて, 太陽光球の細く欠けた像の先端をみて合わせる方法を採用することになる. この方法では正確に合わせることはたいへん難しいことを知っている. そこで, 遠征出発前に, 実際に恒星と月を撮影してフォーカス・テストを行った. この望遠鏡のフォーカス調整機構はヘリコイド式であり, 回転リングにフォーカス位置を読み取るための細かい目盛が付いている. 1 目盛は, 光軸方向の 80 μm の移動量である. 1/4 目盛まで目測できるので, $\pm 10 \mu\text{m}$ の精度でフォーカス位置を再現できる. これは, 像のぼけ量 $\pm 1''$ に相当するから, これで十分である. テストは, ルーペを覗いて合わせた目盛値を記録し, その値を中心にして 1 目盛間隔で両方向ぼかしながら撮影, フィルムに写った像のシャープさから判断して, テスト時の外気温 22°C における最良フォーカス位置の目盛値は 15.075 であることがわかった. 1 目盛は, 0.10 である. また, ルーペを覗いて合わせた目盛値とフィルム撮影時での最適なフォーカス目盛値との差が +0.075 であることがわかった. 2 回のテスト共に同じ値であったので, この補正値を採用することにした.

皆既日食当日は, 食分が進んでいくなか, 口径全体を



図 3. 観測風景.

カバーする減光用フィルタ (D5 相当) をフードの先端に取り付け、太陽をフォーカシング・スクリーンの中心におき、赤道儀での自動追尾をしながら第 2 接触を待った。第 1 接触のしばらく後に最高気温を記録、 26°C であった。第 2 接触 10 分前には、最終的フォーカス調整を行うはずであった。しかし、気温は 22°C 、これは偶然にもフォーカス・テストを行った時とほぼ同じ気温であり、望遠鏡やカメラが日光で暖まらないように筒先に日よけを付けていたので、テストでの結果と同じフォーカス目盛を採用した。第 2 接触 5 分前には気温 21°C 、最終の構図合わせを行った。

第 2 接触の 30 秒ほど前から、カラー・フィルムにて、最短の露出時間 $1/1000$ 秒で撮影を開始した。皆既になったことを確認後は、露出時間 $1/1000$ 秒、 $1/500$ 秒を撮影、それ以後は長い露出時間へとシャッター速度を 2 段間隔で変えながら連続撮影した。シャッター速度の B (バルブ) では、秒数を感覚でカウントすることにより、露出時間 10 秒まで撮影した。この時点で皆既継続時間の半分を少し越えていた。その後、モノクロ・フィルムを装填したカメラと交換し、4~18 秒の長時間露出で撮影した。

一眼レフ形式のカメラは、シャッターの前にファインダーへ光路を導く鏡があり、シャッター動作時にはその鏡を跳ね上げる機構になっている。この鏡の高速な動作により衝撃が伝わり、望遠鏡が振動することになる。これを避けるために、ミラー・アップと呼ばれる機能がある。シャッターを開く前に鏡を跳ね上げておき、シャッターが動作した直後に自動的に鏡は元に戻るという仕組みである。使用したカメラは鏡が大型なので、衝撃がかなり強い。像のブレを防ぐため、この機能を利用した。

こうして、第 2 接触の直前から第 3 接触の直後までに、カラー・フィルムで 17 コマ、モノクロ・フィルムで 9 コマ撮影できた。

観測に使用した機材の一覧を表 1 に、画像処理に使用したフレームのみの撮影データを表 2 に示す。図 3 は、観測中の様子を写した写真である。

2.3 フィルムの現象

撮影済みフィルムの現象処理は、観測成功に関わる重要な過程である。

カラー・フィルムは、何人かの天体写真家から情報を聞き、信頼できるプロラボに依頼した。増感、減感処理はせず、標準現象とした。感度は、ISO 50 である⁶⁾。

モノクロ・フィルムの現象は、プロラボに依頼すると、希望する現象液を指定できないのである。Technical Pan フィルムは、現象液の種類、液温、現象時間によって、濃度特性が大きく変化する。淡いコロナを幅広い階調で表現するためには、感度を下げずに軟調に仕上げたい。コダック社が提供しているテクニカル・データ⁷⁾をもとに調査した結果、現象液はコダック社の D-76 が最適と判断した。現象は、普段 D-76 を使っておられる、アマチュア天体写真家の遠藤 秀氏に依頼した。液温は 20°C 、現象時間は 12 分とした。テクニカル・データによると、感度は ISO 125、 γ は 2.5 である。

3. 画像処理

10000 倍におよぶダイナミックレンジを持つ太陽コロナの全体像を同時に表現することは難しい。その対策の一つとして、撮影時にニューカーク・フィルタあるいはその代用品を用いる手法がある。しかし、フィルタの中心に太陽の中心位置を精度よく合わせる必要があるなど問題点が多く、成功する確率は低いと思われる。そこで、観測時に補正するのではなく、後の画像処理で表現することを考える。現在では、パソコンによる高解像度画像の処理が高速にできるので、露出時間を変えながら撮影した写真から得られる多数の画像を合成する手法を採用した。

画像処理を行ったパソコンは、エプソン販売株式会社のオフィスシリーズ Type-HF であり、仕様は、CPU が Pentium III の 1.0 GHz、増設メモリは 512 MB、OS は、Microsoft Windows Millennium である。

処理ソフトは、株式会社アストロアーツの「Stella-Image 3」、アドビシステムズ株式会社の「Adobe Photoshop ver. 5」、M.S.B. (イタリアのシェアウェア・ソフト会社) の「AstroArt 2.0」の 3 種類を使用した。

3.1 フィルム・スキャナによるデジタル画像化

画像処理を行うためには、最初に、フィルムに写っている像をデジタル化しなければならない。ミノルタ株式会社製のフィルム・スキャナ (Dimage ScanMulti II) を使用した。この機種は、イメージセンサーに RGB それぞれ独立した 3 個のライン CCD を装備しており、読み込み最大解像度が 2820 dpi であり、入力 A/D 分解能は 12 bit、出力は RGB 各色 16 bit の階調を持っている。また、S/N を向上させるため、マルチスキャンという、複数回のスキャンを行い、それらを平均する機能も持ち合わせている。

今回の実際のスキャンでは、フィルム・サイズが大き

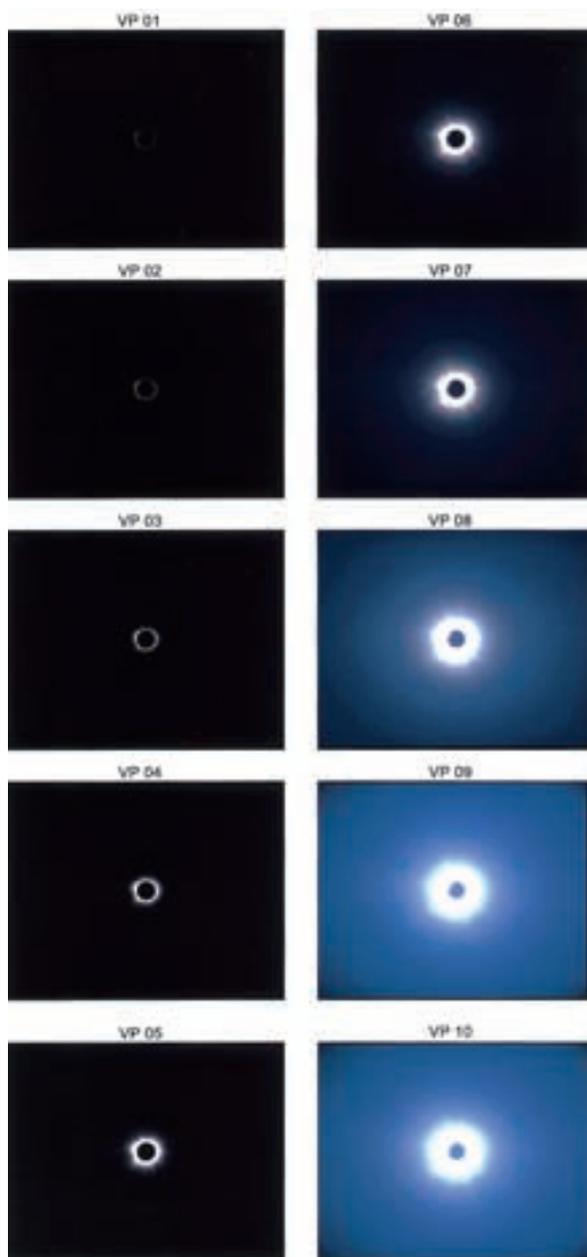


図 4. (a) フィルム・スキャナで取り込んだ未処理画像（位置合わせは済ませてある）。

いため、最大解像度ではひじょうに大きなファイルサイズになるので、半分ほどの解像度 1650 dpi を採用した。画像サイズは、4545×3655 ピクセルとなる。マルチスキャンは 4 回に設定し、RGB 各色の階調が 16 bit のカラー画像を取得した。マルチスキャンは最大 12 回まで設定でき、回数が多いほど S/N が改善される。しかし、時間がかかりすぎるため、4 回とした。1 フレームのスキャンにかかった時間は、約 10 分であった。モノクロ・フィルムは、ネガであり色情報を持っていないが、カラー・ポジフィルムの設定でスキャンした。これでは、ネガティブな画像が出力されるが、画像処理ソフトで反転すればよい。なぜ、ポジ設定を使用したかは、カラー・ネガフィルムの設定でスキャンすると、フィルム・ベースのオレンジ色を自動的に補正するため、階調

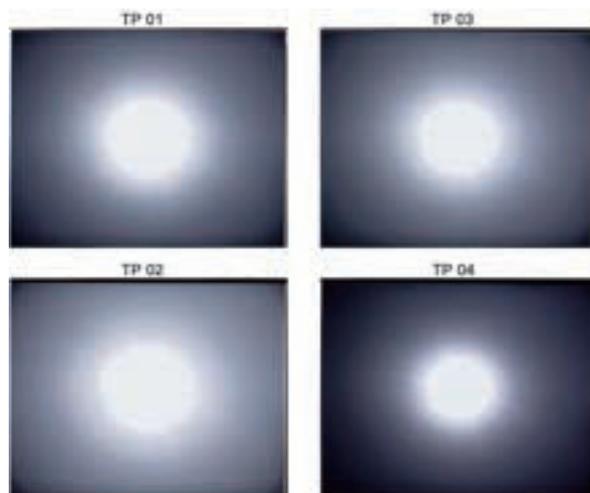


図 4. (b) フィルム・スキャナで取り込んだ未処理画像（位置合わせは済ませてある）。

の一部が失われてしまうからである。ポジ設定のほうが、広い階調を表現することができる。

こうした作業にて、カラー・フィルムから 10 フレーム、モノクロ・フィルムからの 4 フレーム、適正な光量レベルの場所が皆異なる合計 14 フレームの画像が得られ、16 bit の TIFF ファイルとして保存した。図 4 に、これらの画像を示す。各画像のナンバーは、表 2 のフレーム番号である。

3.2 各画像の位置合わせ

分解能を落とさずに合成画像を作成するためには、複数フレームの画像すべての像位置を正確に合わせる必要がある。観測時には赤道儀の追尾誤差により、フィルム・スキャナでの取り込み時にはフィルム・ホルダーへのフィルムのセッティングのしかたにより、各画像は x - y 方向だけではなく回転方向にも不規則な位置ずれが生じている。

位置合わせは、まず月の像を基準にする。月の直径とほぼ同じ直径の円を中心に描いた画像を作成して、その画像と重ね合わせることにより、「差の絶対値」演算でずれをみながら月の像の中心が画像の中心座標になるよう調整した。本来は、太陽中心を画像中心に合わせなくてはならない（画像の中心座標に合わせるのは、後の画像を回転させるローテーション・グラディエント処理を効率よく行うためである）。しかし、太陽光球像は月に隠されていてみる事ができないのである。そこで、月と太陽の視直径の差と皆既継続時間から計算し月の移動速度を求め、それと移動方向が分かれば、月で合わせた位置に補正量を加えることにより太陽を中心位置にすることができる。天体暦から調べると、皆既食時の太陽視半径は $15' 44''$ 、月の視半径は $16' 18''$ であることから、視直径の差は $67''$ である。画像の 1 ピクセルは計算上約 $6''$ であることから、皆既継続時間の 03 分 21.4 秒の間に、月は約 11 ピクセル移動する。移動方向は、観測日が

偶然にも夏至であったため、月と太陽共にほぼ真東である。この時点では、画像の方向は上を北として赤道座標にほぼ合っているものとした。観測時におけるカメラの回転角は目測で赤道儀の極軸と平行である金属板に合わせた。これまでの筆者の観測経験では、この方法による誤差は $\pm 1.5^\circ$ 以内に収まっている。フレーム番号が VP09 と VP10 の撮影時刻のほぼ中間が皆既中央時刻であったので、これら 2 つの画像の補正量を ± 0 として、また画像の y 座標は変化しないものとし、各画像の撮影時刻に対する補正量を概算した。表 2 の Δx がピクセル単位とした x 方向の補正量である。

また、観測地が皆既食帯の中心線から外れているため、太陽中心位置の南北方向の補正も必要である。観測位置の皆既食帯中心線からのずれは、皆既食帯の幅の $1/2$ の 0.202 だけ南へずれている。太陽と月の視半径の差は $33''$ であるので、月の中心から $6.7''$ (約 1 ピクセル) 南方向に太陽中心がずれることになる。この補正は、各画像の月中心位置を 1 ピクセル北方向にずらした。

回転方向に対するずれの補正は、露出時間が $1/2$ 秒以上の画像には恒星が写っているため、恒星像を使って合わせることができる。露出時間が $1/8$ 秒以下の画像には恒星は写っていないため、コントラストがよい目立ったコロナ流線構造が一致するように調整した。

3.3 像の輪郭強調処理

フィルムからデジタル化したそのままの画像では、複雑にコロナ流線が重なっているためか、散乱光に覆われているかのようにぼやけて見え、特に細い流線の微細構造を明確に識別することは困難である。このことは、ディスプレイで画像をみる限りでは、RGB の各色は 256 階調しかないため、輝度差が僅かな構造は識別しにくいということであり、画像データには情報が含まれているのである。様々な処理法があるが、輪郭強調処理を行うことによって、微細構造を表現することが可能である。これらの処理法の中、「アンシャープ・マスク法」が有名であるが、それよりも、対象天体の中心から放射状に広がっている構造を強調するには、画像を回転させ差分をとる手法である「ローテーション・グラディエント処理」が効果的である。彗星の尾やジェット構造を強調するために使われることが多いこの処理は、コロナの流線構造に対しても最適であるので、これを利用することにした。

この処理法を行うには、元画像から 2 つのコピー画像を作り、片方のコピー画像は左回転させ、他方は同じ角度で右回転させ、それぞれ元画像から減算する。そして、それらの画像を加算するとできあがる。画像の演算は、使用したソフトでは符号なし整数データとして扱わないと不具合があるため、減算結果がマイナス値にならないように、元画像全体のレベルを持ち上げておかなければならない。この補正をレベル調整ということにする。元画像を OI 、左回転させた画像を LrI 、右回転させた画像を

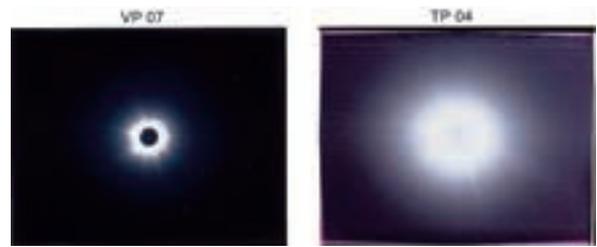


図 5. ローテーション・グラディエント処理を施した画像。

RrI 、レベル調整の係数を K 、処理後の画像を RGI とすると、

$$RGI = (OI \times K - LrI) + (OI \times K - RrI)$$

となる。処理結果は、レベル調整の割合と回転角度により強調される度合いが大きく変化する。図 6 は、値を変えながら実験したものである。(1) は回転角を 1.5° に固定したレベル調整による変化であり、(2) はレベル調整を 150% に固定した回転角による変化である。この実験から、レベル調整は 160%、回転角は $0.5 \sim 1.5^\circ$ が適正と判断した。ここで、レベル調整に加算ではなく乗算を採用した理由は、加算での処理結果と比較して、レベル値が明るい範囲では軟調になり、暗い範囲では高調になるため、淡い構造を強調するには適しているためである。

処理ソフトによる実際の操作は、元画像からコピー画像を作り、コピー画像全体の輝度値を 3.2 倍する。次に、このコピー画像から元画像を 0.5° 右回転させながら減算する。引き続き、その画像から 0.5° 左回転させた元画像で減算する。この方法でも、上記解説と同様の結果が得られる。レベル調整を 160% として連続 2 回の減算を行っているため、最初にコピー画像を 3.2 倍している。強調処理を行うと、ノイズも強調される。画像の S/N を改善するため、同様に、回転角を 1.5° にした処理も行い、それらの画像を加算平均した。回転角を変更するとノイズのパターンが変わるので、加算平均することによりざらつきがならされるのである。こうしてできた画像(図 5)は、RGB 各色 16 bit の TIFF ファイルとして保存した。

ここまでの処理は、「StellaImage 3」を使用した。

3.4 合成処理

次に、輪郭強調処理を済ませた露出時間が異なる 14 フレームの画像をひとつの画像として合成する。筆者が考案した処理法は、露出時間の短い画像から順番に、内側の明るい部分にマスクをかけ、そのマスクの輪郭をぼかし、露出時間の一段多い画像を加算演算により重ねてゆく方法である。ソフトは「Adobe Photoshop ver. 5」を使用した。まず、各画像を読み込み、それぞれの画像の明るさとコントラストを全画像のバランスを考慮しながら調整し、RGB 各色 8 bit の TIFF ファイルとして保存した。ここで階調を 8 bit に落とすのは、このソフトは、16 ビット画像のままでは演算処理ができないから

処理前の画像

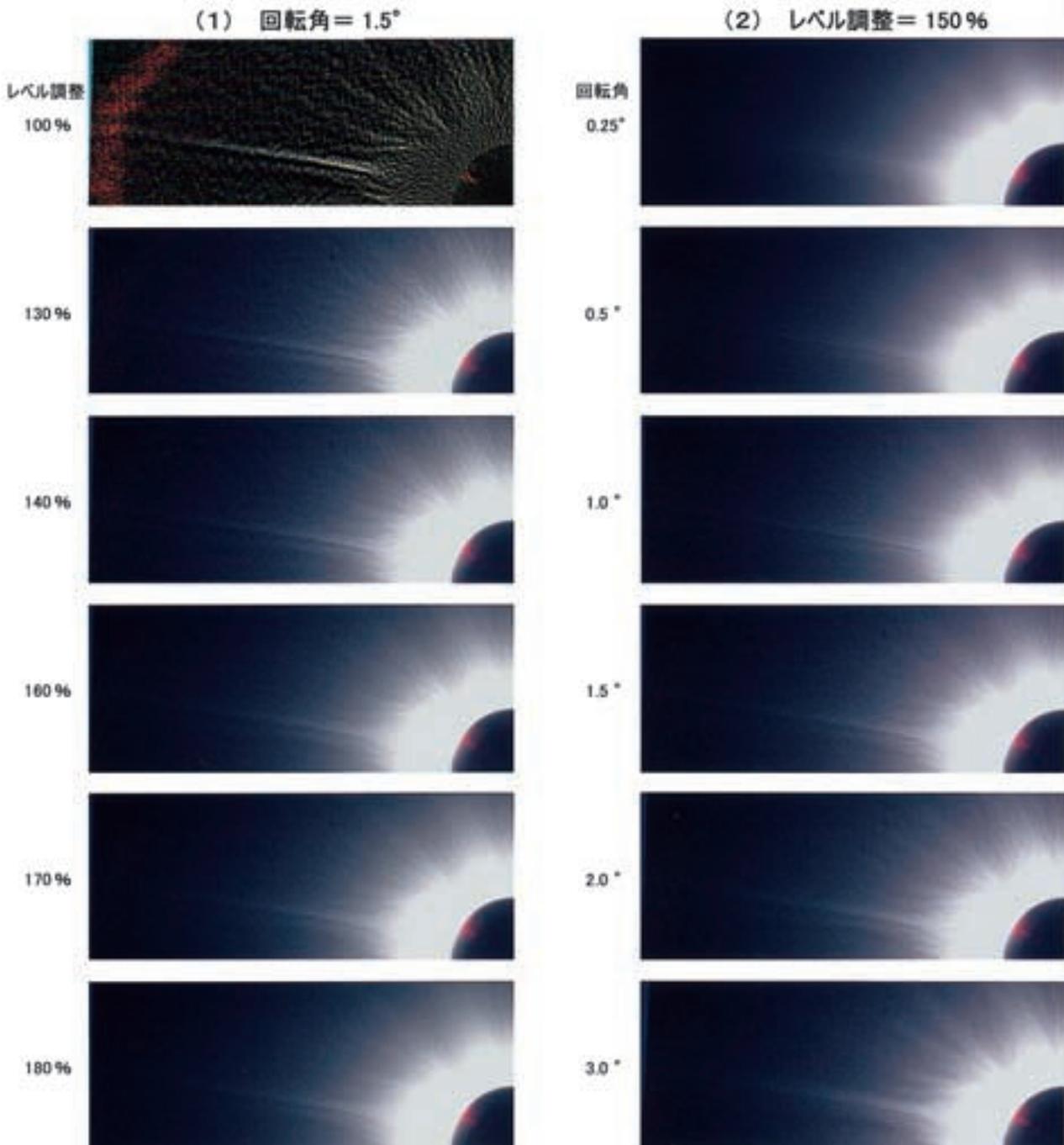


図 6. ローテーション・グラディエント処理における、レベル調整と回転角による変化。

である。

合成処理を進めていくと、どうしても、不自然な繋がりとなる部分が出てしまう。これは、露出時間の違い

により、同じ場所における色調やレベル特性が微妙に異なるためだと思われる。また、マスクの大きさとその輪郭のぼけ量を変更すると不自然となる場所やその度合い

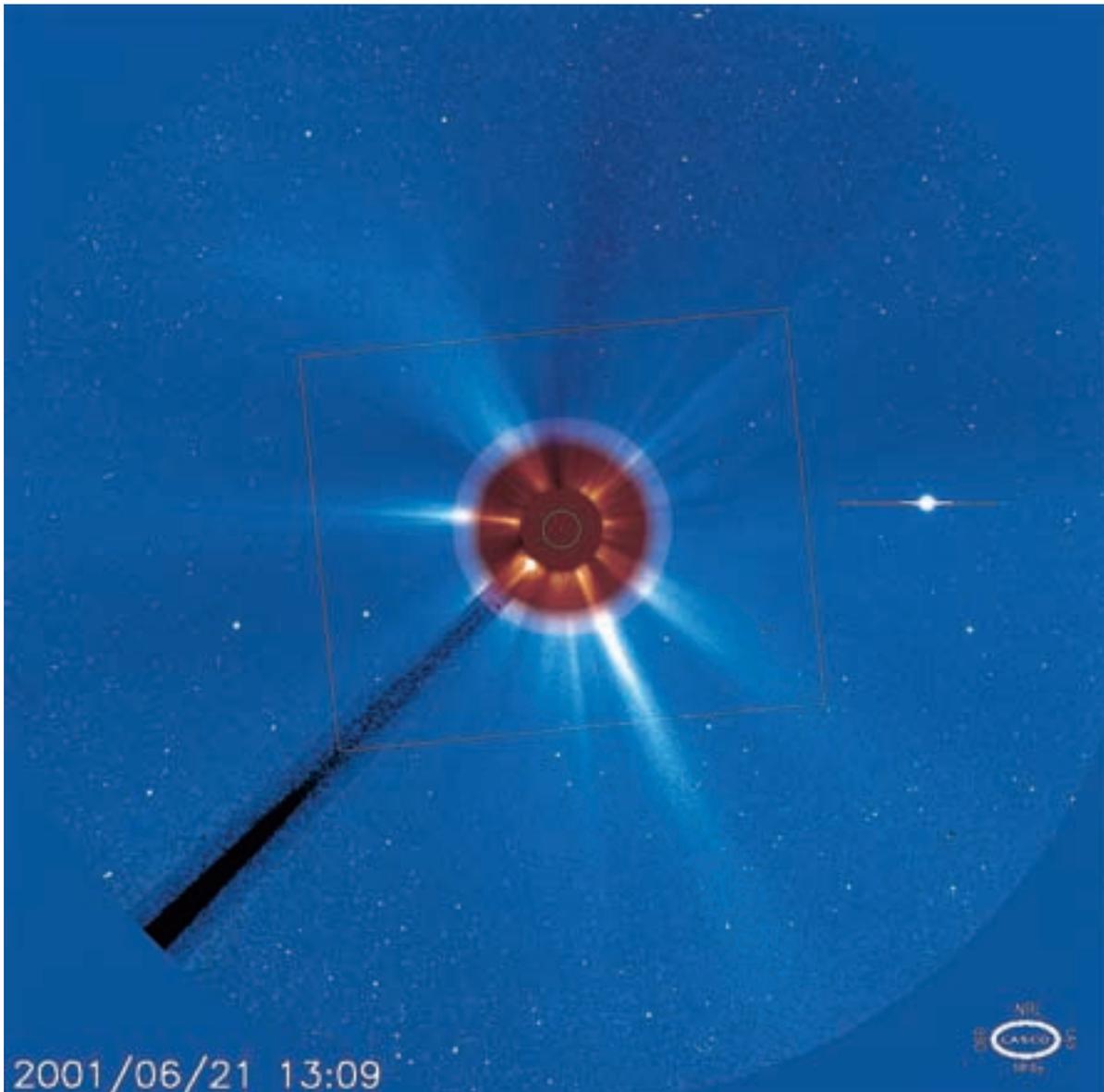


図 7. SOHO/LASCO-C3 の画像に C2 の画像をはめ込み合成した画像。
(NASA/ESA, 撮影日時: 2001年6月21日, C2-13時15分, C3-13時09分[UT])

が変わってくる。このことから、その対策として、できの異なる合成画像を3種類作成して、それらを乗算で合成した。その結果、不自然さをかなり改善させることができた。その他、本稿では解説を割愛するが、説明しきれない数多くの微妙な調整を行っている。

こうして完成した画像は、月縁から外周部まで広範囲にわたり、コロナ流線の微細構造を鮮明にみることができる¹⁾。

その他、新たにフィルム・スキャナの解像度を最大の2820 dpiに上げスキャンし直し、太陽半径の5倍までをカバーする拡大画像を作成した。処理法の基本は同様であるが、輪郭強調の度合いを弱め、眼視でみたコロナのイメージに近づけた。合成に使用した画像はカラー・フィルムからの10フレームだけである。なお、露出時間が1/2秒以上の画像には地球照による月面の模様が写っているので、処理の最終段階で、それを強調した。

この画像を、図10に紹介する。

4. 完成画像の測定と評価

最終完成画像は、位置合わせと回転処理のため、デジタル画像化した最初のサイズより幾分か小さくなり4065×3319ピクセルである。観測時刻は、14フレームを合成しているため、最初のフレームVP01の撮影時刻13時09分41秒と最後のTP04の露出終了時刻13時12分20秒の中央を取り、13時11分00秒[UT]とする。

この画像を研究に利用するためには、画像上の方向とスケールを高精度で求める必要がある。この完成画像は広視野かつ長時間露出であるため、多数の恒星が写っており、約7.8等まで確認できる。これらの恒星像を使った位置測定が可能である。測定には、画像処理ソフト「AstroArt 2.0」を使用した。星表データはGSC (The

Guide Star Catalog ver. 1.1) を使っている。S/N の良好な 23 個の比較星を選択しての測定結果は、画像の回転角である $\Delta P.A.$ は $+1.349^\circ$ (符号の+は、赤道座標の北が、画像の真上から左回転方向すなわち東側にずれている) であり、スケールは画像の 1 ピクセルが $6.2771''$ である。したがって、画像範囲は、 $7.0879 \times 5.7871^\circ$ となる。

測定精度は、測定に使った 23 個の恒星位置のカatalog値と測定値との誤差が $2.9'' \sim 29.3''$ であり、大きなばらつきがでた。しかし、観測時の地平高度が約 30° と低く画像範囲が広いので大気差の影響がかなり大きいことと、多数フレームの合成画像であることを考慮すると、妥当な精度である。高度 30° における高度差 10° の大気差の差は、標準値で約 $20''$ である。

また、恒星像の半値幅 (FWHM) は、平均値で $42.5''$ である。ただし、最も細いコロナ流線の幅を測定すると、空間分解能はおよそ $20''$ である。

その他、各画像の中心位置合わせの精度を調べた。画像中心が観測時刻における太陽中心位置になっているはずであるが、その誤差である。画像中心の測定位置と天体暦からの計算位置を、下記に示す。ずれは、赤経方向が $+17.3''$ ($+2.75$ ピクセル)、赤緯方向が $+12.9''$ ($+2.06$ ピクセル) となるが、精度は十分と言える。

2001 年 6 月 21 日 13 時 11 分 00 秒 [UT]

測定値: 赤経 = 06 h 00 m 56.29 s (2000.0)

赤緯 = $+23^\circ 26' 32.6''$

計算値: 赤経 = 06 h 00 m 55.14 s (2000.0)

赤緯 = $+23^\circ 26' 19.7''$

この観測日時における太陽面経緯度は、

$$P = -6.93^\circ$$

$$B_0 = +1.81^\circ$$

$$L_0 = 113.61^\circ$$

である。コロナも太陽の現象であるので、他の太陽観測データと比較する場合、画像の方向は太陽の自転軸に合わせておいたほうが都合がよい。そこで、上記の $\Delta P.A.$ に P の値を加えた角度である 5.58° 左回転させたものを本稿での最終的完成画像 (図 8) とした。画像の真上が太陽の自転軸の北である。

5. まとめ

5.1 SOHO の画像との比較

今回の報告の時点では、太陽物理学における研究成果はまだでないが、太陽コロナの謎を解き明かすための材料となる幾つかの結果が得られる可能性がある。

太陽観測衛星「SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)」の LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment)-C3 と C2 の観測画像¹¹⁾ と比較したところ、写野はこれだけの広範囲を確保できているにもかかわらず、ずいぶん狭い (図 7)。しかし、空間分解能と S/N は、筆者が作成した合成画像のほうがはるかに上回っている (図 8 と図 9 を比較)。しかも、

月の縁から画像の最周辺部まで滑らかに連続したグラデーションにてコロナ流線の微細構造をみることができる。その反面、SOHO/LASCO による観測は、かなり大きなオッカルティング・ディスクを使っているため、それに隠されている構造がみえない¹²⁾。このことから、この高解像度合成画像とあわせて解析することにより、コロナ流線構造、すなわち太陽の磁力線の広範囲におよぶ構造を立体的に調べる手助けができると思われる。

比較に用いた LASCO の C2 と C3 の合成画像 (図 7, 図 9) は、筆者が作成した。なお、撮影に使用されたフィルタは、C2: orange (透過波長 $540 \sim 640$ nm)、C3: clear (透過波長 $400 \sim 850$ nm) である。コロナグラフは、対物レンズ直前の絞りの有効口径が 5 cm であり、ディテクタに 21.5×21.5 mm, 1024×1024 ピクセルの CCD を使用している¹²⁾。

完成画像を注意深くみると、コロナ流線の構造はストレートなものばかりではなく、クランク状、らせん状、蛇行、急カーブをしているなどの形状部分が多くみられ、ひじょうに興味深い。

その他、SOHO/LASCO の画像との比較時に気付いたことがある。それぞれの画像は画像の中心に太陽中心を合わせてあるのだが、恒星の位置が大きくずれている。これは、皆既日食時の観測地と衛星の位置がかなり離れていることを示し、まさに大きな視差である。衛星の位置がわかっているため、この視差から太陽までの距離を求めることができる。2001 年 6 月 21 日、13 時 11 分 00 秒における衛星の位置を下記に示す。

The spacecraft location, relative to the Earth (geocentric coordinates (GCI))

$$x: 0.004154 \text{ AU}$$

$$y: 0.008297 \text{ AU}$$

$$z: 0.003771 \text{ AU}$$

計算結果の精度は期待できないが、ほぼ同時刻の撮影であるこれらの画像の組み合わせは、子供たちへの教育に利用できる貴重なものである。

5.2 今後の研究課題

これまでの筆者の個人的な皆既日食観測は写真フィルムによるもので、ステップ・ウェッジを写すなどのフィルムの濃度特性を校正するデータを得ていないため、測光ができないことが残念である。これは、次回以降の観測では、ぜひとも実現させたいところである。しかし、形状の測定は可能であるので、とりあえずは、コロナの楕円率 (南北方向と東西方向の形状の比) を測定して報告したい。広視野画像であるので、その価値は高いと思われる。

謝 辞

モノクロ・フィルムの現像処理を快く引き受けていただいた遠藤 秀氏に厚くお礼申し上げます。

望遠鏡の購入時には、スーパーレデューサーがメー

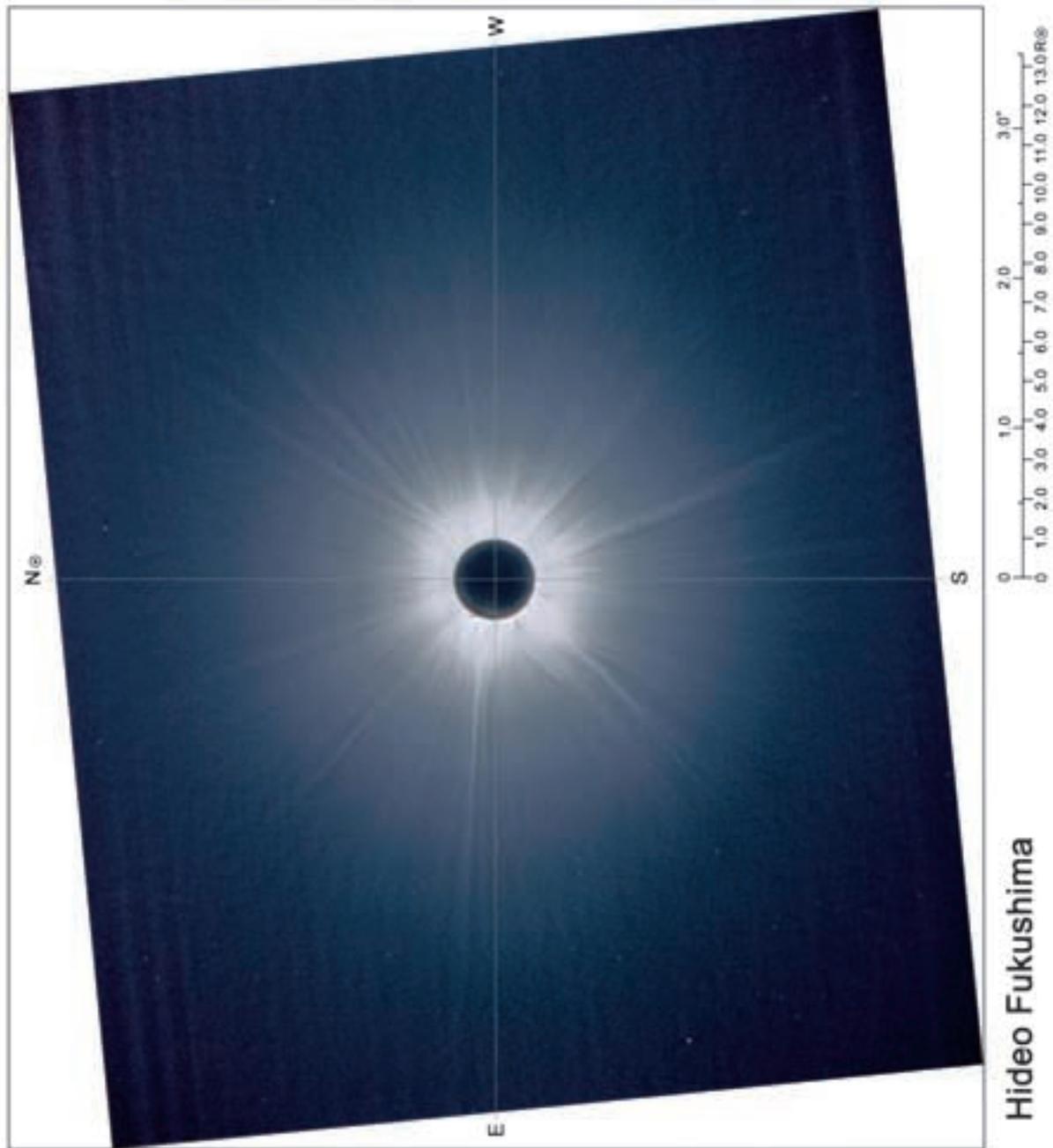


図 8. 完成した皆既食中のコロナの合成画像。(観測日時: 2001年6月21日, 13時11分00秒 [UT])

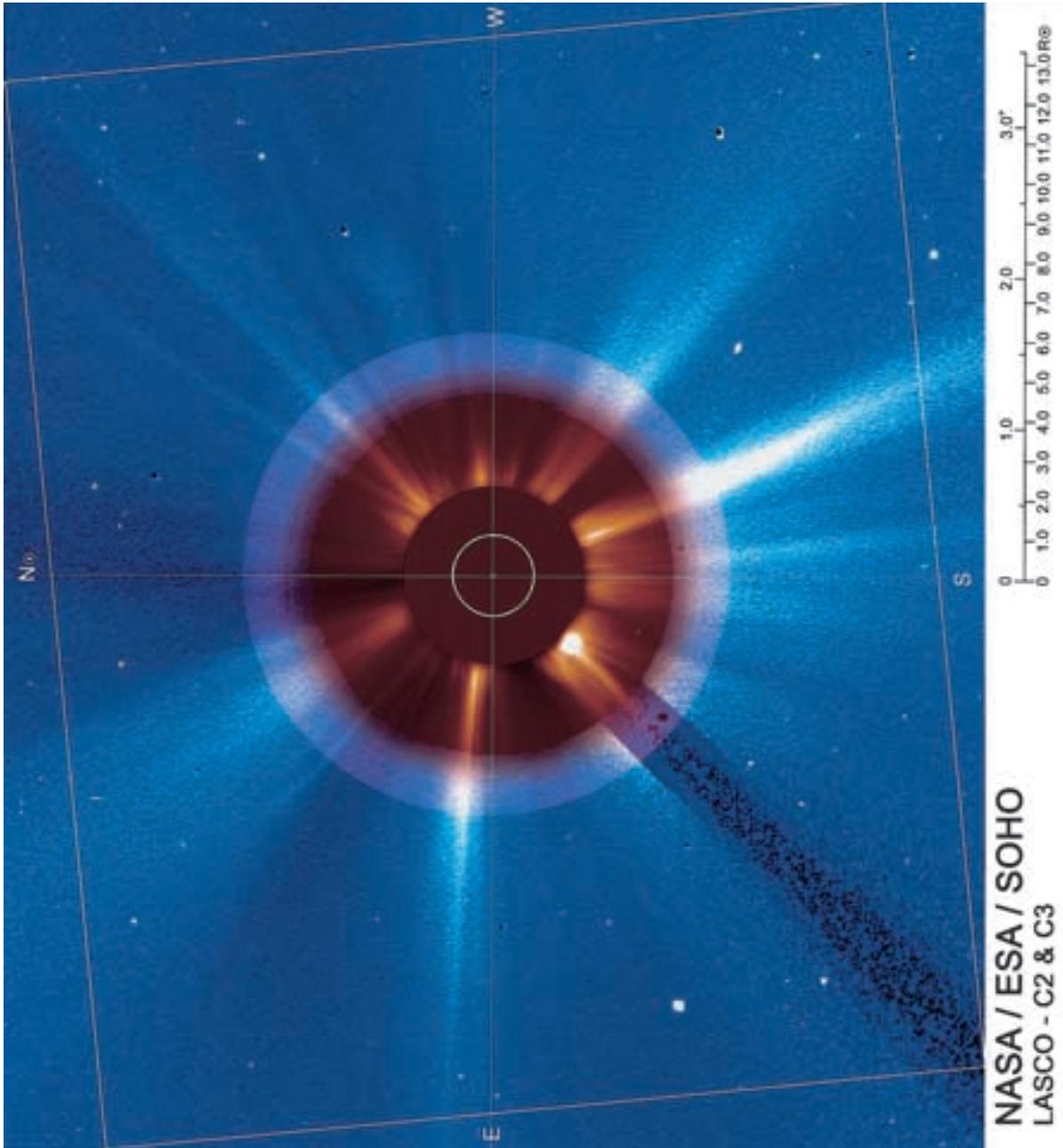


図 9. スケールを図 8. に合わせた LASCO-C2 と C3 の合成画像。
(撮影日時: 2001 年 6 月 21 日, C2-13 時 15 分, C3-13 時 09 分 [UT])



図 10. 別処理をした切り出し拡大画像. (観測日時: 2001年6月21日, 13時10分35秒[UT])

カーに在庫がなく、有名な販売店でも手に入れることができないという状況であったが、探していただいた有限会社ナカニシイメージラボの中西昭雄氏に感謝します。

また、本稿を執筆するにあたり、助言をいただいた、日江井榮二郎氏と渡部潤一氏に感謝します。

参考文献, 資料

- 1) インターネット・国立天文台ホームページ・画像集, <http://www.nao.ac.jp/pio/Images.html>.
- 2) 尾久土正己: 天文月報, 88, 79 (1995).
- 3) インターネット・国立天文台ホームページ・すばる望遠鏡による天体画像, http://subarutelescope.org/Gallery/j_pressrelease.html.
- 4) Komiyama, Y., Yagi, M., Miyazaki, S., Okamura, S., Tamura, S., Fukushima, H., Doi, M., Furusawa, H., Fuse, T., Hamabe, M., Hayashi, M., Hayashino, T., Imi, K., Iye, M., Kaifu, N., etc.: High-Resolution Images of the Ring Nebula Taken with the Subaru Telescope, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 52, No. 1, L93-L98 (2000).
- 5) Hiei, E. and the Eclipse Group of Meisei University: Results of the Observations of the Total Solar Eclipse of 1994, 1995, 1997, 1998 and 1999, The Last Total Solar Eclipse of the Millennium in Turkey, *Astr. Soc. Pacific Conf. Series*, 205, 181 (2000).
- 6) FUJIFILM DATA SHEET, 富士写真フィルム株式会社 (2001).
- 7) TECHNICAL DATA / BLACK-AND-WHITE FILM, Eastman Kodak Company (2001).
- 8) 福島英雄: 天文アマチュアのための冷却 CCD 入門, 誠文堂新光社 (1996).
- 9) 福島英雄: パソコンで行う天体画像処理, 天文情報処理研究会第 37 回会合「パソコンベースの天

- 文ツール」集録, P15-25 (1999). nasa.gov/.
- 10) 天文ガイド別冊 INTERACTIVE ASTRONOMY, Vol. 1~15, 誠文堂新光社 (1995~1998). 12) LASCO HANDBOOK FOR SCIENTIFIC INVESTIGATORS, <http://lasco-www.nrl.navy.mil/handbook/hndbk.html>.
- 11) The SOHO Archive, <http://sohowww.nascom>.