

太陽光球面の観測 —黒点監視望遠鏡の開発と観測—

秋岡 眞樹^{*1} 前島 由紀^{*1} Bachtiar ANWAR^{*2}

(1997年1月17日受理)

OBSERVATION OF SOLAR PHOTOSPHERE —DEVELOPMENT OF SUNSPOT MONITORING TELESCOPE AND ITS OBSERVATION—

By

Maki AKIOKA, Yuki MAEJIMA, and Bachtiar ANWAR

The Sunspot Monitoring Telescope has been developed and operated at the Hiraiso Solar Terrestrial Research Center, CRL. The main purpose of the telescope is daily full-disk observations of sunspots for the Space Weather Forecast Project in the Hiraiso/CRL. The telescope is a 15cm refractor mounted on the equatorial mounting. The features of the telescope are (1) one-arcsec spatial sampling over full-disk sun with 2K by 2K CCD, (2) a full automatic system for routine observation, and (3) a five hole filter turret for interference filters with different wavelength.

The telescope has been operated since the end of November 1996 and its data is used for daily solar-terrestrial forecasts and related fundamental research. The data is also used for earth observation as fundamental data for data reduction. The software for automatic measurement of sunspot position, area, and for feature recognition is now being developed. The telescope will be operated along the ascending solar activity and will provide the fundamental data for Space Weather Forecast.

[キーワード] 太陽望遠鏡, 光球, 黒点, 広帯域撮像.

Solar telescope, Solar photosphere, Sunspots, Wideband imaging.

1. はじめに

我々が通常連続光や白色光で太陽を見たときの表面を光球という。光球面を観察すると黒い点が見える。これは黒点とよばれ、非常に強い磁場（最大4000 Gauss程度）があることが知られている。黒点近傍では太陽面爆発や様々な活動現象が発生しており、H α 線やX線で観

察するとこれらの活動現象を観測する事ができる。

光球面における磁気を帯びた電離大気のダイナミックスは、太陽フレア等の太陽面のじょう乱現象をドライブしていると考えられている。太陽フレア等の活動的な太陽面じょう乱現象の発生機構は未だ謎のままである。しかしながら、太陽フレアは磁場の強い黒点近傍の活動領域でそのほとんどが発生すること、新たな磁束浮上やそれに伴う黒点形成に伴ってフレアが発生しやすいこと等から、黒点に代表される表面磁場が太陽フレアの発生の鍵を握っていると考えられている。

*1 平磯宇宙環境センター 太陽研究室

*2 インドネシア国立航空宇宙研究所

我々は、「宇宙天気予報」プロジェクトにおいて、「太陽監視望遠鏡群」の開発を進めている。これは、 $H\alpha$ 太陽望遠鏡⁽¹⁾、黒点監視望遠鏡及びマグネットグラフからなる監視望遠鏡群であり、太陽の光球及び彩層面を常時監視し、準リアルタイムで解析する事によりの確な予報発令を可能にするとともに、太陽フレア等の研究のためのデータを取得する事を目的としている。 $H\alpha$ 望遠鏡は92年4月から($H\alpha$ 高精細望遠鏡は94年7月から)運用されており、黒点監視望遠鏡は96年11月からその運用を開始している。

本稿では「太陽監視望遠鏡群」のうち、光球面の黒点の監視を目的とする「黒点監視望遠鏡」について報告する。

2. 目的

太陽面じょう乱現象の源は、表面の磁場にあるとされている。表面磁場の様子を知るためには、マグネットグラフやストークスポラリメータ等による吸収線の偏光度の測定以外に、磁場に起因する表面の模様を観測する事によってもある程度の推定が可能である。黒点は、表面の磁束管が束になったものであり、 $H\alpha$ で見える筋模様は低温のガスに満たされた磁気ループと考えられている。磁束浮上の過程では、小さな黒点又はポア(針状黒点)が次々と現れ、それが集合してより大きな黒点が形成されていく⁽²⁾。

黒点群の規模とタイプは、活動領域の活動度を推定するための基本的な情報である。たとえば、チューリッヒ分類でE型、F型と呼ばれる黒点群でフレアの発生が多い事はよく知られており、黒点群の“危険度”を判断する上での基本的な指標の一つである。危険度の予測により直結する分類法の研究も行われている⁽³⁾。また、黒点群の黒点面積や黒点数等も活動度と関係がある。

予報という現実的な課題を実現していく上での利点として、その単純さも重要である。たとえば、 $H\alpha$ から活動度を推定しようとする場合ある程度の熟練が要求される。しかし、黒点の大きさや個数を数えることは比較的簡単であり、またタイプわけも一定のテンプレートと比較することで比較的容易である。これは、太陽物理の専門家以外が判断しなければならない場合も多い現実の予報業務においては重要な事である。

十分な分解能でかつ高度に自動化された監視システムと解析システムは、太陽に関する予報業務や関連する研究において非常に有用である。黒点には固有運動があり、これは光球表面における磁束の横方向の運動を調べるよい指標になる。このためには、黒点の太陽円盤における座標を正確に測定する事が基本である。また、統計的な

性質を明らかにしようとする場合、その計測をできるだけ自動化する必要がある。これまで多くの天文台で行われてきた眼視又は投影法によるスケッチや写真フィルムによる撮影と測定では、観測と測定に多大な労力を要するにも関わらず測定値のばらつきが大きい。そのため、重要なテーマであるにも関わらず、研究者にその取り組みをためらわせてしまう。

使い勝手のよい太陽黒点データは、太陽物理やフレア予報以外の研究にも重要な基礎データを提供する。黒点監視望遠鏡をこの時期に作る一つのきっかけになったのは、環境庁国立環境研究所が開発し宇宙開発事業団の地球観測衛星 ADEOS に搭載された ILAS (改良型大気周縁分光計) のチームが、質の良い太陽黒点データを必要としていたことがある。この装置は、太陽を光源として地球大気を分光観測しようというもので、太陽に黒点がある場合、その影響を補正してやる必要がある。そこで、宇宙天気予報のためにいずれ開発、整備する計画であった黒点監視用の望遠鏡を ADEOS の打ち上げに合わせて急いで整備しようと動き出したという経緯がある。また、太陽からの総放射量の変化は、連続光で暗く見える黒点や明るく見える白斑等の寄与で説明できる事がわかっており、地球に降り注ぐ太陽放射を推定する簡便な指標としても黒点データの応用が期待できる。

3. システム要求

黒点監視望遠鏡に要求する空間分解能は1秒角程度とした。予報に用いるためには、黒点の初期状態であり、磁場浮上を伴って成長中の活動領域に固有な微小黒点が識別できる事が必要であるため、高い空間分解能が理想的である。しかしながら、入手できる検出器のサイズに制限がある以上、視野と分解能はトレードオフ項目である。

データ取得後の解析作業、特に座標の計測を自動化する事を考えると、太陽の縁が見えていることが必要なため全面像が必要である。全面像を取得するためには検出器の有効視野が2000秒角必要である。一般に良好な観測条件でのシーイングサイズは1秒角程度といわれている。空間サンプリングを1秒角程度とすると、必要な画素数は2000画素程度となる。また、2000×2000画素程度の CCD は最近コマーシャルベースで安定に入手可能になりつつあり、今後低コスト化も期待できる。このため、空間分解能に対する要求は1秒角程度/ピクセル程度とした。

対物レンズの口径は15cmとした。観測波長を5000Åとすると、回折限界2秒角に相当する有効開口は63mmである。ある程度の安全を見て製作を容易にす

るとしても 100mm 程度あれば、1 秒サンプリングに対する望遠鏡のパフォーマンスとしては十分である。しかし大気のゆらぎの影響を受けないためには長波長の近赤外領域が望ましいこと、前述の ADEOS/ILAS の観測波長に合わせるなどから、波長 1 ミクロンにおいて、回折限界が 2 秒角程度になるよう、有効径を 150mm とした。波長 1 ミクロン、有効径 150mm での回折限界は 1.7 秒角である。

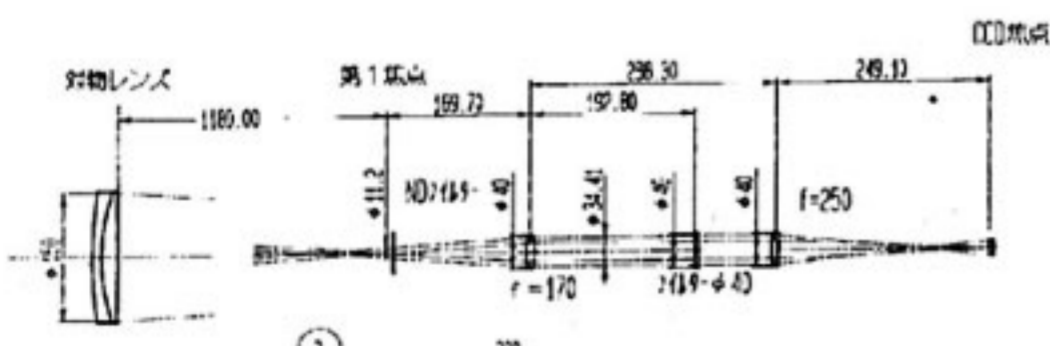
システム的には、太陽の自動捕捉を可能にするため、エンコーダーによるプログラム制御が可能であること、精捕捉と自動追尾を可能にする案内装置を備えること、パーソナルコンピュータ等からの遠隔操作を可能にするため RS232C や GPIB など一般的な通信回線による制御が可能であること等が要求される。

焦点面装置は、コリメート光学系を構成し、コリメータによる射出瞳位置にフィルタータレットを装備する事とした。これによりフィルターの透過率むらや運用中の汚染による影響を避けることができ、データの自動解析を容易にする。

4. システムの概要

望遠鏡及び付属の観測建屋は(株)西村製作所によって製作された。広帯域フィルターによる撮像観測であるため、望遠鏡本体、架台部、架台コントローラ等は既製品をそのまま使い、焦点面光学系、撮像システム、望遠鏡制御システム、光電案内装置等を新規に設計・開発した。

光学系の概要を第 1 図に、主なパラメータを第 1 表に示す。対物レンズは、有効径 150mm の色消しダブルレットで、焦点距離は 1200mm である。一次焦点の 170 mm 後方にコリメータレンズを配し、コリメータレンズの後方 288mm に焦点距離 250mm のカメラレンズを



第 1 図 黒点監視望遠鏡光学系の概要

第 1 表 主なスペック

有効径	150mm
合成焦点距離	1765mm
フィルター	タレット式
ピクセルサイズ	9 ミクロン
空間サンプリング	1.052秒/ピクセル
full-well	85,000

設けている。これにより、約 1.5 倍の拡大光学系が構成され、合成焦点距離は 1765mm となり、直径 32 分角の太陽全面が直径 16.4mm で結像される。

広帯域の干渉フィルターや ND フィルター等を装着するための 5 穴タレットがコリメート光中に設置されている。このシステムは、対物レンズが開口絞りとなっており、対物レンズによる焦点位置の後方にコリメータレンズによる瞳が形成される。ちょうどこの位置にフィルタータレットを配置する事により、フィルター上の塵やフィルターの透過率むら等が結像に影響しないような配置になっている。

対物レンズの装着された主鏡筒部、コリメータ部及び CCD カメラは、アルミ製の光学ベンチの上に構成され、ドイツ式赤道儀にマウントされている。対物レンズと第一焦点の間には迷光防止のための遮光絞りが 4 枚設置されている。コリメータレンズ、カメラレンズ及びフィルタータレットは、この光学ベンチ上に設置されている。

焦点合わせは、カメラレンズを光軸方向に移動させることにより行う。レンズは、ロッドで支持され、小型直線ステージ上に設置されている。ステージ (シグマ光器製 MINI-60X) はパルスモーター駆動で、パルス数をカウントする事によりその位置がステージコントローラに保持される。ステージは GP-IB で遠隔制御が可能である。

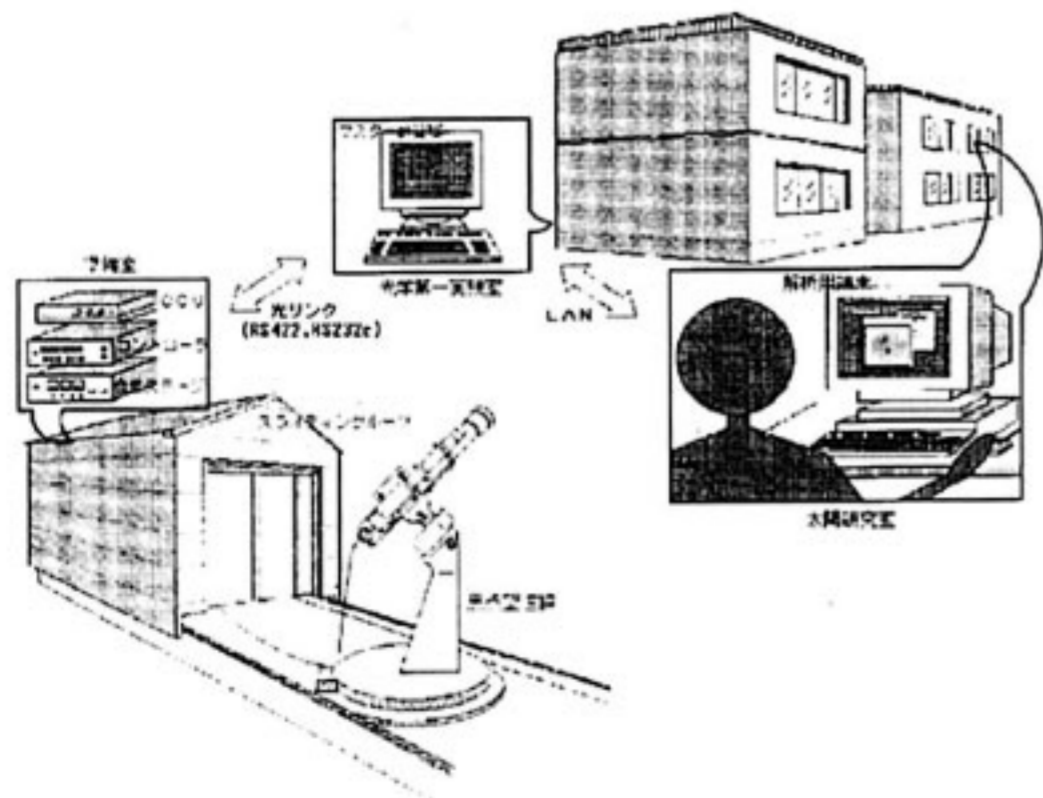
フィルターホイールは 5 穴であり、40.5mm 径カメラフィルター枠に装着したフィルター類が装着可能である。フィルターホイールは電動であり、手元スイッチにより切替を行う。現在用意されているフィルターは 7690 A (パスバンド 20 A)、4506.5 A (同 20 A) 及び 3934 A (同 3 A) である。通常は 7690 A で運用しており、その他は当面実験的に用いる予定である。すべて 40.5mm 径のカメラフィルター枠にマウントして装着するようになっているため、ND フィルターを重ねて光量を加減したりする事が容易である。干渉フィルターはすべて米国の Barr 社製である。

検出器はフルフレーム型 CCD を搭載したコダック製メガプラス 4.2 であり、主な仕様を第 2 表に示す。コダック製メガプラスカメラを選択した理由は、(1)ノミナルの読みだしレートが早いこと、(2)カメラヘッドのパッケージが密閉型で、耐環境性が期待できること、(3)平磯の H α 望遠鏡で使用されており、開発にかかるマンパワーを節約でき、解析用ソフトウェア資源等を有効活用できる事、(4)短時間露光の太陽観測のため素子冷却が不要であることなどによる。コスト的にも、マシンビジョン等に広く使われ始めており、比較的入手しやすいのも魅力である。CCD カメラは、専用のケーブルによってカメ

ラコントロールユニットに接続され、そこからワークステーションまでは、新規開発された高速デジタルビデオ信号用の RS422 光インターフェースを用いた。製作は米国 EDT 社による。光リンクとした主たる理由は、雷等による誘導を避けることと、運用する庁舎からかなり離れた場所に設置できるようにするためである。しかしながら、本インターフェースは 20MHz のクロックでパスト的にビデオデータを DMA 転送するため、ワークステーションとのインターフェースにかなり手間取った。

現在運用中の構成を第 2 図に示す。ワークステーション上では C 言語で開発された撮像用ソフトウェアが観測プログラムに従ってタイマー起動される。ソフトウェアは、H α 高精細システムの全面像撮像用ソフトウェアをかなりの部分流用しているため、自動露光調節や光量不足時の撮像中止等の機能は共通である。また、ワークステーションから送出すべき制御コマンド及び送出方法も H α 高精細系と共通化してあるため、ソフトウェアの共有が容易であり、かつオペレータが 2 つのシステムを同時に運用する場合の混乱を最小限にできる。

制御は、望遠鏡コントローラ（西村製作所製）のマイクロプロセッサに所定のコマンドを送出する事によって行われる。ただし、望遠鏡コントローラの機能は、与えられた赤経・赤緯に望遠鏡基準軸を誘導することと、いくつかの保守・調整用機能しかないため、黒点望遠鏡制御システム（以下制御システム）を開発した。制御システムのハードウェアは、FA 用防塵シャシ上に、いわゆる DOS/V 互換システムを自作した。それをワークステーション及び望遠鏡コントローラと RS-232C で通信させる事によりシステムとしての動作を可能にしている。開発言語はマイクロソフト社製 Visual-BASIC であり、



第 2 図 望遠鏡運用中のイメージ。スライディングルフを開けたあとの操作は、庁舎内からの遠隔制御が可能であり、運用担当者は自席の端末装置から運用できる。

PIO や GPIB 等の制御は、インターフェースボードメーカー提供のライブラリを用いている。望遠鏡コントローラの基本的な機能は、(1)望遠鏡を太陽に指向させる、(2)望遠鏡を格納位置に格納する、(3)焦点調節用ステージを制御する、(4)望遠鏡指向の微調整、(5)フィルターホイールの制御（開発中）等である。また今後の拡張として、光電案内装置の自動制御、観測建屋の自動開閉等を検討している。

5. 運用とデータ利用

1996 年 10 月から計算機インターフェースのチューニング、撮像・制御ソフトウェアの開発を急ピッチで行い、11 月 25 日から試験的に定常運用を開始した。本稿執筆時の 97 年 2 月までの間、大きな障害もなく順調に稼働している。現在の運用は、基本的に朝 9 時から夕方日没時までとし、晴天時は土日や休日に関係なくオペレーターが出勤して運用している。活動が上昇して、研究や予報にとって重要度の高い黒点が多くなってきたら日の出時からの運用を可能にしていきたいと考えている。望遠鏡全景を第 3 図に示す。

立ち上げと格納はオペレータによる操作を必要とするが、観測はほぼすべて自動運用が可能である。立ち上げ時には、観測建屋を全開にした後望遠鏡制御システムを起動し、望遠鏡を太陽方向に指向させる。その後、焦点調節、指向方向の微調整、観測プログラムの設定などを行うことにより観測が自動的にスタートする。観測建屋を全開にした後の操作はすべてネットワークにつながった計算機や端末装置から遠隔で可能となっており、この点 H α 望遠鏡よりは自動化が進んでいる。

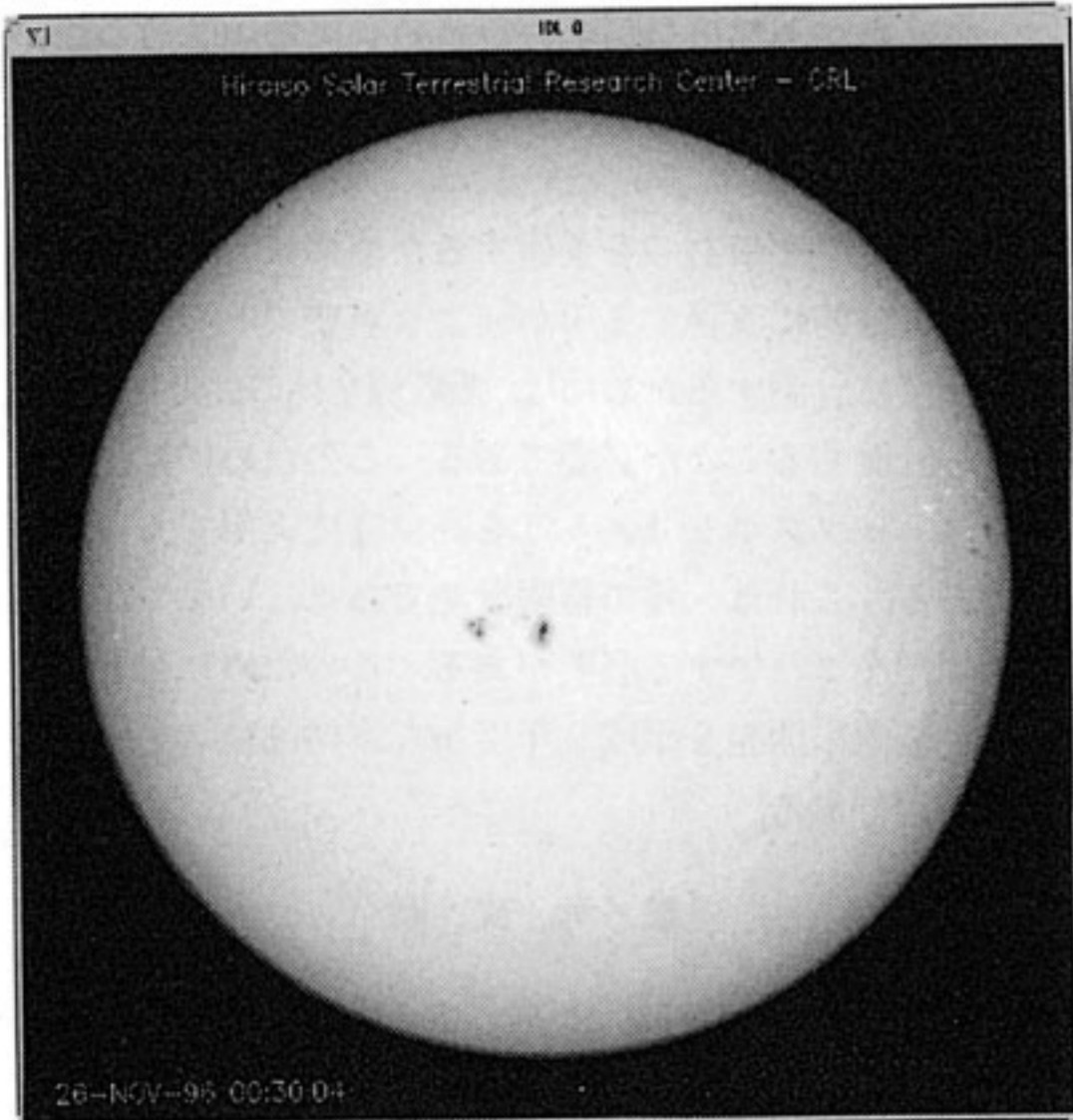
第 4 図は本システムにより得られた全面像データの例である。第 5 図に、一部を拡大してその時間変化を追跡したものを示す。太陽表面には、グラニュレーションと呼ばれる大きさが 1 - 2 秒角の構造がある。本望遠鏡の



第 3 図 調整中の望遠鏡全景

データでもこのグラニュレーションの存在が背景のざらざらした模様としてとらえられており、所期の光学性能が達成されていることを示している。

観測データの利用はすでに始まっている。毎日の予報



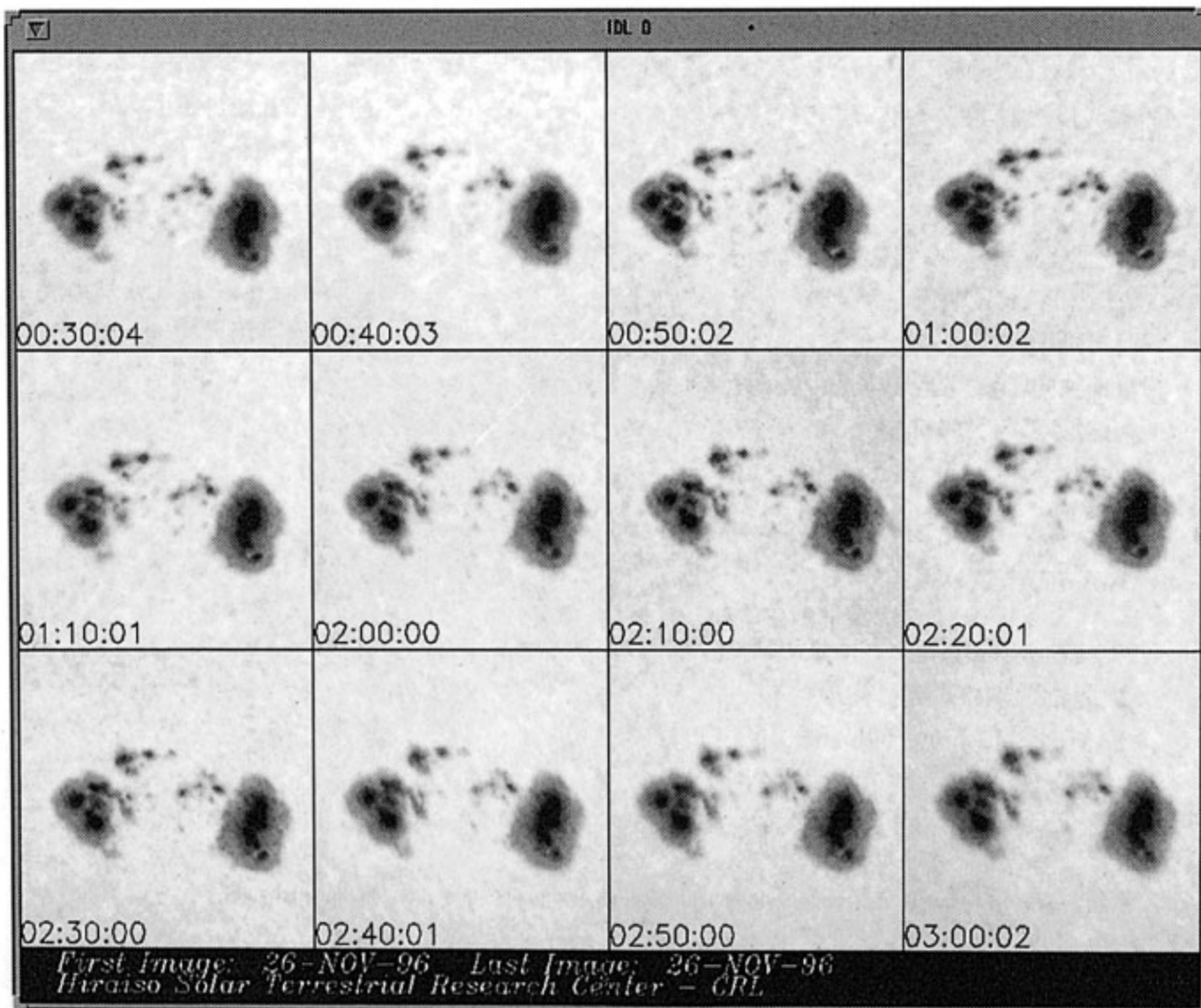
第4図 全面像の観測例

業務に活用されていることは当然であるが、ADEOS/ILAS チーム、特に法政大学グループにより、黒点画像のILAS データ解析への利用に関する研究に用いられている。また、黒点の自動計測技術の研究やそれに基づいた黒点のタイプわけの研究及び黒点の固有運動と太陽フレアに関する研究を我々自身によってスタートさせている。

6. 黒点監視望遠鏡の今後の予定

まず、制御系の自動化をさらにすすめて行くことが当面の課題である。前述したように、フィルターホイールの自動制御のためのモジュールを開発し、制御システムに組み込んでいく。さらに、光電案内装置の遠隔操作を可能にするシステムを開発していくことを計画している。光電案内装置は、太陽像を4つのフォトダイオードからなるアレイに結像させ、出力をバランスさせるように駆動系にサーボをかける装置であり、必ずしも完全に遠隔操作にする必要はない。ただし、基本的な制御項目の遠隔化は必要であり、さらに完全に遠隔制御が可能になれば、後述する完全無人観測所が実現した際の保守作業を大幅に省力化する事ができる。

黒点監視望遠鏡は、平磯において定常的に黒点画像を



第5図 第4図の全面像の中の黒点領域の時間変化。微小黒点の変化がとらえられていることがわかる。

取得するとともに、将来、完全無人観測所を可能にするための様々な実験、試験を行い、必要な技術を確立する事をめざしている。たとえば、平磯センターにおいては、1年の間で冬季がもっとも晴天率がよく、6-7月の梅雨期は多くの日が欠測となってしまう。また、春と秋は移動性高気圧等のため天気の変化が非常に早い。よって、平磯から離れたサイト、たとえば沖縄にもう一台同種の望遠鏡をおくことができれば、欠測率をかなり下げることができる。このような事を現実を考える場合、完全遠隔操作の無人観測所とする事が必要である。

7. 今後の光球観測

宇宙天気予報の目的は、太陽面現象を予報するために必要な研究を行い、合わせて平磯で従来行ってきた電波警報業務を「宇宙天気予報」として、太陽フレア等の太陽面現象及びそれに起因する様々なじょう乱現象の予報を可能にするところにある。これまで、「太陽監視望遠鏡群」として、H α 高精細太陽望遠鏡を開発し1994年7月より定常運用に供すると共に、今回報告した「黒点監視望遠鏡」も1996年11月より定常運用を開始した。

現在、太陽活動領域全体の磁場構造を短時間に把握できる「フィルター型広視野マグネットグラフ」を「太陽監視望遠鏡群」の一つとして建設中であり、1997年中には試験観測をスタートする予定である。これは、リオフィルターと呼ばれる狭帯域（透過幅250 mÅ）フィルターを用い、吸収線の偏光度を計測する事により、スペクト

ル線のゼーマン効果を計測し、表面の磁場分布を推定するものである。

これらの「太陽活動監視望遠鏡群」を定常的に運用し、太陽活動状況並びにその推移の的確な把握という形で「宇宙天気予報」としての第1歩を踏み出している。次期太陽活動極大期においては、これらの観測装置を駆使して太陽活動度の把握及びその推移予測に活躍する事が期待される。

太陽フレアそのものを予報するためには、磁場の計測精度を飛躍的に改善する事が何より重要である。表面磁場を精密に計測するためには、吸収線全体の偏光プロフィールを計測することが必要である。このためには、いわゆるストークス偏光計測を高精度で実現する事が必要である。これは一種の極限計測であり、いくつかの技術的課題をクリアする必要がある。このために必要な研究及び装置の開発を平成9年度から本格的にスタートさせる予定である。

参 考 文 献

- (1) M.Akioka, "H α Solar Telescope at Hiraiso and Its Initial Observations", J. Geomag. Geoelectr., 48, 5-10, 1996.
- (2) C.Zwaan, "The Emergence of Magnetic Flux", Solar Phys., 100, 397-414, 1985.
- (3) P.McIntosh, "The Classification of Sunspot Groups", Solar Phys., 125, 251-267, 1993.

秋岡 眞樹

Maki AKIOKA

平磯宇宙環境センター 太陽研究室
太陽物理学, 光学観測装置, 宇宙天気
予報等の研究に従事

E-Mail: akioka@crl.go.jp

バフティア アンワル

Bachtiar ANWAR

インドネシア国立航空宇宙研究所
(平磯宇宙環境センター太陽研究室)
太陽物理学の研究に従事

E-Mail: banwar@bandung.
wasantara.net.id

前島 由紀

Yuki MAEJIMA

平磯宇宙環境センター 太陽研究室
太陽光学観測に従事

