

2 太陽・太陽風

2 *Solar and Solar wind*

2-1 宇宙天気予報のための可視光と電波による太陽観測

2-1 *Optical and Radio Solar Observation for Space Weather*

秋岡真樹 近藤哲朗 佐川永一 久保勇樹 岩井宏徳

AKIOKA Maki, KONDO Tetsuro, SAGAWA Eiichi, KUBO Yuuki, and IWAI Hironori

要旨

太陽観測技術の開発、データ利用技術の研究は、宇宙天気予報研究の重要な柱の一つである。平磯太陽観測センターにおいては、太陽観測技術の開発とともに宇宙環境情報サービスのために定常的な太陽監視を実施している。高精細H α 太陽望遠鏡は、太陽全面の高分解撮像及び表面大気の色ドップラー計測が可能で可視光望遠鏡であり、太陽黒点群やフレア(太陽面爆発)の監視、フレア発生時の地球近傍への影響の評価に不可欠な装置となっている。広帯域太陽電波観測装置(HIRAS)によるバーストの電波スペクトル観測は、フレアに伴うコロナ中の衝撃波や粒子加速に関する情報が得られ、地磁気嵐や太陽プロトン現象の発生可能性に関する重要な判断材料を与える。本稿では、通信総合研究所で開発し、宇宙環境情報サービスのために運用されている高精細H α 太陽望遠鏡及び広帯域太陽電波観測装置の概要を紹介する。

Researches on solar observation technique and data utilization are important issues of space weather forecasting program. Hiraiso Solar Observatory is a facility for R & D for solar observation and routine solar observation for CRL's space environment information service. High definition H alpha solar telescope is an optical telescope with very narrow pass-band filter for high resolution full-disk imaging and doppler mapping of upper atmosphere dynamics. Hiraiso RAdio-Spectrograph (HiRAS) provides information on coronal shock wave and particle acceleration in the solar atmosphere. These information are important for daily space weather forecasting and alert. In this article, high definition H alpha solar telescope and radio spectrograph system are briefly introduced.

[キーワード]

宇宙天気予報, 太陽観測, 太陽活動現象

Space weather forecast, Solar observation, Solar activity

1 はじめに

1.1 宇宙環境擾乱の源としての太陽

当所の宇宙天気予報研究がその対象としている宇宙環境擾乱は、太陽高エネルギー粒子現象(SEP)、地磁気嵐、電離圏擾乱、放射線帯活動な

ど多岐にわたる。これら宇宙環境擾乱の源は、すべて太陽に起源を持つと言える。したがって、太陽の観測技術の研究は宇宙天気予報研究のかなめと言える。図1に太陽面現象と地球近傍の宇宙環境擾乱との関係を模式的に示した。太陽内部のダイナモ活動により太陽面の磁場活動が

作られ、表面に蓄積された磁場のエネルギーが何らかのメカニズムによって解放されることにより、太陽フレアやCMEが発生すると考えられている。太陽活動や太陽フレアによるX線、紫外線放射は、電離圏や超高層大気の擾乱を発生させ、通信障害の原因となるとともに、地球大気の密度構造の変化をもたらす。CME (Coronal Mass Ejection) は、地球磁気圏に到達して地磁気嵐や電離圏擾乱を引き起こすと同時に、SEPにおける粒子加速の担い手であるとも考えられている。また、太陽面の磁場分布によっては、太陽大気が閉じ込められることなく高速太陽風として絶えず流れ出している領域が存在する(コロナホール)。高速太陽風は、地磁気擾乱の主要な要因の一つである。



図1 太陽と様々な宇宙環境擾乱

1.2 宇宙天気予報と太陽観測

宇宙天気予報においては、太陽をはじめとする様々な宇宙環境の現状とその変化の監視とその推移予測を行っているが、太陽の観測はその出発点となる。地球近傍の宇宙環境擾乱の源は太陽フレアをはじめとする太陽面現象であるが、近年の人工衛星などによる観測からCMEが重要な役割を果たしていることが分かってきた[1]。例えば、H α 等の彩層吸収線の単色像における増光部分が広範囲にわたるフレア(その形状が2本の明るい帯状であるケースが多いことから、ツーリボン型と呼ばれる。)は、フィラメント噴出やCMEを伴うケースが多く、継続時間の長いLDE型と呼ばれるフレアに多くみられる(図2)。継続時間の短いインパルス型に比べ、LDE型フレアは地磁気嵐や強いSEPを引き起こしやす

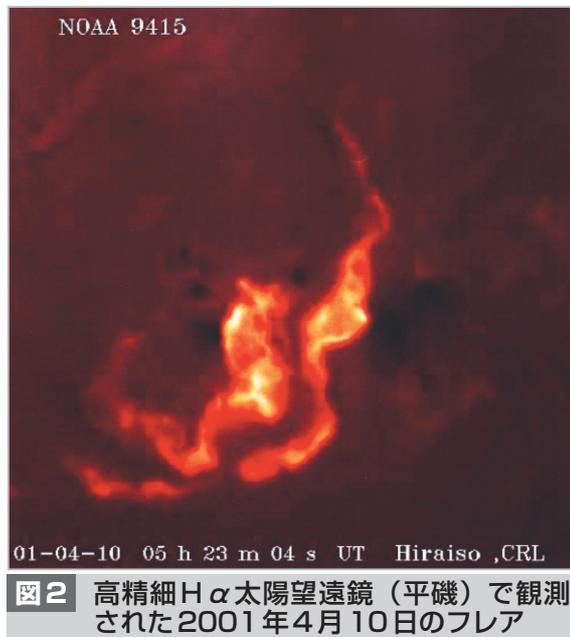


図2 高精細H α 太陽望遠鏡(平磯)で観測された2001年4月10日のフレア

いことが知られている[2]。また、噴出物を伴うフレアでは電波スペクトル観測において特徴的な時間-周波数変化を示す電波バースト(2型バースト、4型バースト等と呼ばれる。)が観測されることが多く、地磁気嵐やプロトン現象を発生させる可能性の重要な指標となる。

太陽活動の危険度評価は、太陽面上の活動領域の規模、形態及びその変化の情報が必要である。新しい磁束管が光球下から連続的に浮上している浮上磁場領域(EFR: Emerging Flux Region)や、磁場構造の複雑な領域はフレア発生の可能性が高いことが経験的に知られている[3]。また、反対極性の領域がお互いに接しているところ、特に二つの反対極性の黒点群が近接して一つの半暗部に含まれてしまっている構造(デルタ構造)を持つところで大型フレア発生の可能性が高い傾向がある。太陽表面の磁場は、吸収線のゼーマン効果を偏光観測により計測するマグネトグラフやストークスポラリメータによる高精度の観測が必要である。さらに、H α 線単色増で観測されるスジ状の模様(fibrilと呼ばれる)は、彩層における磁場構造を反映していると考えられており、磁場構造の推定に有力な手がかりを与える。浮上磁場領域は、H α 線単色増で見た場合、アーチフィラメントシステムとして見える。これは、浮上中の双極磁場の磁力線がループ状の吸収物質として観測されるものである。したがって、高分解能のH α 単色像は、太陽表面に対

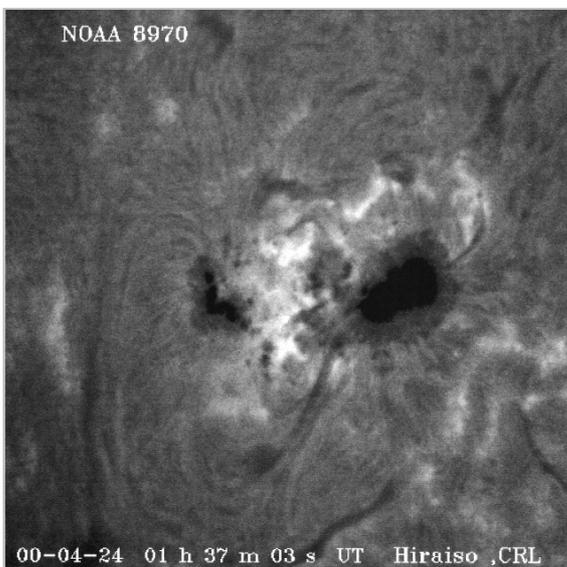


図3 H α 線でみた黒点群近傍の微細構造

して水平方向の磁場構造の複雑さとその変化を評価する有効な方法となり得る。

SEPや地磁気嵐のドライバーであるCMEの観測は、NASA/ESAの太陽観測衛星SOHOにより飛躍的に進歩した。特に、太陽半径の30倍までをカバーするLASCO/C3の観測データは、太陽と太陽圏の科学的研究のみならず、宇宙天気予報の水準をも大きく向上させた[4]。コロナや彩層と呼ばれる太陽大気上層部において発生するCMEやフレアの起源は、太陽表面におけるプラズマと磁場の相互作用が鍵となる働きをしていると考えられている。可視光望遠鏡による太陽表面の観測と、X線・紫外線観測や電波による太陽大気上層部の観測から、活動域の全体像を観測することが太陽物理のみならず宇宙天気予報研究にとっても重要である。

ここでは、通信総合研究所平磯太陽観測センターにおいて開発し、宇宙環境情報サービス業務及び宇宙天気予報研究のために定常的に運用されている光学望遠鏡(高精度H α 太陽望遠鏡)及び電波スペクトル計(広帯域太陽電波観測装置)について紹介する。なお、開発の詳細については既に季報においても紹介しているので、技術的な詳細についてはそちらも参照されたい[5][6]。

2 高精度H α 太陽望遠鏡

高精度H α 太陽望遠鏡は、波長シフト可能な複

屈折干渉フィルター(いわゆるリオ・フィルター)を用いた分光撮像システムである。1991年から観測システムの開発に着手し、1994年7月に定常観測に移行している。水素のバルマー系列 α 線の吸収線の線中心で撮像することにより下部彩層(太陽表面から3000 km程度上空)の撮像ができる。また、吸収線の両翼部を交互に撮像しその差を取ってやることにより、ドップラーシフトを計測することができる。これから、太陽上空大気の視線方向の運動速度を推定することができる装置である。以下に、システムの概要と現在の運用を簡単に紹介する。

2.1 システムの概要

高精細H α 望遠鏡システムの主要諸元を表1に示す。カールツァイス製15 cm屈折望遠鏡をプラットフォームとして用いている。この望遠鏡に、自動運用や性能向上のために様々な改良と改造を実施した。太陽熱によるレンズセル及びレンズの温度不均一並びに温度変化による像の悪化を軽減するため、対物レンズ直前に有効径150 mmの熱線反射フィルターを製作し、フィルター金枠及びレンズセル並びにフランジに白色塗装を施した。サンガイダーをシフトさせることにより、視野を変更する機能を設けた。

リオフィルター、フィールドレンズ、全面像用縮小レンズ、全面拡大切替ステージ及びCCDカメラ等からなる焦点面パッケージは、極軸に固定されたベースの上に構成されている。リオフィルターは、方解石等の複屈折を利用した狭帯域フィルターであり、ここでは0.25 Åのものをを用いている。最終段のポラロイドの出し入れにより透過幅の変更(0.25 Å/0.5 Å)が可能である。透過波長の変更は、回転波長板をモーターで回転させることによって行い、回転角の読み取りは波長板ギアと連動するように取り付けられたポテンショメータによって行っている。

表1 高精度H α 太陽望遠鏡の撮影系主要諸元

	全面像モード	拡大像モード
ピクセル数	2029×2048	1340×1037
ピクセルサイズ	9×9 μ m	6.8×6.8 μ m
空間サンプリング	1.15秒角/ピクセル	0.64秒角/ピクセル
有効視野	38.9×39.4分角	14.3×11.1分角

撮像系は、全面像モード(1.1秒角/画素)と拡大像モード(0.64秒角/画素)の切替式になっている。全面像系は1眼レフカメラ用レンズ(マイクロニッコール55mm)を用いて1.4倍に縮小し、その後方に400万画素のCCDカメラ(コダック製メガプラス4.2)を配置している。今回利用したりオフィルタの場合、F15以上の遅いビームである必要がある。このため、直接焦点位置にフィールドレンズを配し、マイクロニッコールの羽根絞りに上にてきた瞳を絞ることによりビームの早さをF15にしている。拡大像モードの撮像は、第一次像の所におかれた拡大像用CCDカメラ(コダック製メガプラス1.4)で直接取得される。ややトリッキーな光学設計であるが、この設計により、既製部品で構成してコストを抑制するとともに焦点面パッケージの小型化を実現している。

これら全面撮像と拡大撮像のための撮像系は独立に焦点調節ができるよう、それぞれストローク20mmで光軸方向に駆動できる小型リニアステージに載せられている。各撮像系は、小型ステージごと光軸と垂直に駆動されるストローク100mmのリニアステージに搭載されている。この100mmリニアステージを駆動することにより全面・拡大の切替えを可能にしている。

望遠鏡システムや焦点面パッケージは、パーソナルコンピュータベースで開発した望遠鏡コントロールシステム及びフィルターによって制御される。各アクチュエータとコントロールシステムはGPIBでインターフェースされ、ワークステーションとはRS-232C光リンクで接続され

ている。ソフトウェアはマイクロソフト製Quick-Basicで記述されている。

2.2 高精細H α 太陽望遠鏡の運用

運用は、晴天時は毎日日没まで行われる。望遠鏡の立ち上げと観測領域の設定、焦点調節はオペレータにより行われる。セットアップ終了後、定められた時間間隔ごとに撮像及び制御タスクが実行される自動観測に移行する。撮像ソフトウェアには、露出時間の自動設定機能により最適の露出を決定するとともに、光量不足時には撮像を中止する自動露光制御機能が実装されている。画像の質は、大気揺らぎにより刻々と変化する。画像選択機能により、最も画像のコントラストが高いと判断される画像を選択する機能を開発した。そして、最良の画像について、視野の一部を切り出し、日付と時刻に基づくファイル名を付与し、ファイル圧縮してハードディスクに格納される。

得られたデータはオペレータによってフレア及びフィラメント消失等の活動的なイベントの有無がチェックされ、予報センターに報告されるとともに予報センターの端末を用いて拡大像、全面像データが予報担当者によってチェックされる。これらは、活動領域の活動度や磁場構造の推移等を明瞭に示し、太陽フレア予報の最も重要な判断材料の一つとなっている。また、高分解能の全面像は、活動領域の新たな誕生や突然の成長開始、フィラメント消失等の突発的現象の監視に威力を発揮している。通常、予報を出す時刻は15:00 JSTであり、前日の活動や予報発令前の数時間の状況が予報に反映される。

得られたデータは当面の間ワークステーションの固定ディスクに保存され、順次CD-Rにアーカイブされる。これらのアーカイブデータは、当所職員や客員研究者のみならず、国内外の研究者に利用されている。また、後述する太陽画像データベースによりデータの一部を対話的に検索、参照できるように整備しつつあり、データの有無や現象の概観の把握、教育目的等に広く利用されている。



図4 高精細H α 太陽望遠鏡

3 太陽電波観測システム

現在の平磯太陽観測センターの太陽電波観測は、25 MHz から 2500 MHz の帯域を観測する広帯域太陽電波観測装置 (HiRAS: Hiraiso Radio Spectrograph) と 2.8 GHz の固定周波観測を行う偏波計から構成される。これらのシステムは 1992 年度に整備され、1993 年度から定常観測を開始した。当初の太陽電波観測システムについては参考文献[6]に詳しく報告されているが、その後バックエンド部やデータ収集系などの改良を行っている。本節では現状の HiRAS (3.1) と固定周波観測システム (3.2) の概要、観測データ処理 (3.3)、運用と観測データの公開 (3.4) について述べ、最後にまとめと今後の太陽電波観測について示す。

3.1 ダイナミックスペクトル計 (HiRAS)

25 MHz から 2500 MHz の帯域を観測する HiRAS は直交ログペリアンテナ (HiRAS-1、25-70 MHz)、10m φ パラボラアンテナ (HiRAS-2、70-500 MHz) と 6m φ パラボラアンテナ (HiRAS-3、500-2500 MHz) から構成される。

HiRAS-1 は「ハ」の字型に直交したログペリアンテナであり、帯域 25～70 MHz の直交直線偏波成分を受信する。架台は AZ-EL 駆動方式で地上高約 15m のタワーの上に設置され、約 1 分の駆動間隔で太陽を追尾している。円偏波合成部のハイブリッドには 3.5～80 MHz の広帯域ハイブリッドを用いている。

HiRAS-2 アンテナは HiRAS-1 と HiRAS-3 の整備以前の 1988 年度に整備された直径 10m のパラボラアンテナで、1次放射器として直交 20 素子ログペリアンテナを使用している。架台は赤道儀方式で、太陽追尾精度は約 0.1 である。アンテナの主ビーム幅は 70 MHz で 29°、500 MHz で 4° である。

HiRAS-3 は直径 6m のパラボラアンテナで、1次放射器として直交 23 素子ログペリアンテナを使用している。架台は AZ-EL 駆動方式で、太陽追尾精度は計算精度まで含めると 0.1° 程度である。アンテナの主ビーム幅は 500 MHz で約 6.5°、2500 MHz で約 1.4° である。

各アンテナで受信された右旋偏波及び左旋偏

波成分は、それぞれ独立したスペクトラムアナライザで周波数解析される。従来の構成では、アンテナ制御とスペクトラムアナライザからのデータ収集を一台の計算機で兼ねていたため、アンテナ駆動タスクとの兼ね合いでデータ取得間隔が 2～5 秒程度にばらつくという欠点を持っていた。現在では、アンテナ駆動とデータ収集をそれぞれ独立の計算機で実行する構成に改修されており、この問題は大きく改善した。PC で取得されたデータはネットワーク経由でデータ解析用サーバ (HP 9000/710) に送られる。PC とサーバ間でのファイル共有により、PC 上のデータ収集系プログラムが直接サーバ上にファイルを作成している。

HiRAS システムを整備して 10 年近くの期間、大きなトラブルもなく順調に観測を続けてきた。しかしながら、HiRAS-2 の 10m パラボラアンテナについては、建設後 15 年近くたっており老朽化が深刻である。このため、平成 13 年度に制御系の更新を行い、DOS-V 仕様の工業用 PC 上に新しい制御系を構築した。また平成 14 年度には、アンテナのハードウェアの大規模な若返り工事を実施している。

表 2 HiRAS バックエンドの主な仕様

	HiRAS-1	HiRAS-2	HiRAS-3
分解能帯域幅	100 kHz	300 kHz	100 kHz
掃引時間	500 ms/sweep	500 ms/sweep	500 ms/sweep
掃引周波数範囲	20-70 MHz	50-550 MHz	500-2500 MHz
データ点数	401	701	501



図 5 HiRAS の 10m 及び 6m パラボラアンテナ

3.2 固定周波観測システム

2.8 GHz固定周波観測は直径2mのパラボラアンテナで、1次放射器としてセプタム型の偏波分離器を使用し、直接左旋及び右旋円偏波成分に分離している。架台はAZ-EL駆動方式で、太陽追尾精度は約0.1°、アンテナの主ビーム幅は3.5°(実測値)である。フロントエンド部は温度変動の影響を考慮し、偏波分離器以外は主鏡背面部に移設する改修を実施した。データ収集はスペクトラムアナライザをゼロ・スパンモードで使用して時系列のデジタルデータとし、GP-IB経由でデータ収集PCに取り込んでいる。2.8GHz(波長10.7cm)での太陽電波強度(F10.7)は太陽黒点数と良い相関があることが知られており、F10.7は太陽活動度を表す重要な指標として用いられる。また、衛星の軌道予測において、大気抵抗の補正を行うための重要なパラメータとしても活用されている。

3.3 観測データ処理

システムにより1日に観測されるデータ量は季節によって変動するが、約150から250Mバイト程度である。固定周波観測のデータ量はそれほど大きくないので、生データと同じフォーマットで保存される。しかし、HiRASのスペクトルデータは生データのままで膨大なデータ量になってしまうので、データ解析用サーバで生データに圧縮処理を施して保存している。周波数軸方向にスペクトラムアナライザからの1603点のデータを501点の対数間隔に圧縮する。ここで、対応する周波数範囲の最小値で代表させて再サンプリングを行う方法をとっており、混信除去の効果も得られている。さらに、信号強度情報も2バイトから1バイトに圧縮する。この圧縮処理により1日当たりのデータ量は約20から30Mバイト程度に圧縮される。ハードディスクに蓄積された圧縮データは約1か月ごとに光磁気ディスクに保存される。また、1997年からは光磁気ディスクのバックアップのためにCD-Rへのアーカイブも並行して行っている。大容量記憶媒体の低コスト化をにらみ、生データをそのままアーカイブする方式への変更を検討している。

3.4 運用と観測データの公開

上記のように、すべてのアンテナの制御は制御装置により行われ、データ取得やデータ圧縮処理などは計算機で行われており、観測データのバックアップなど以外のほとんどの運用が自動で行われている。宇宙天気予報業務に利用するために、予報室のX端末には当日及び前日のダイナミックスペクトルが表示され、30分ごとに当日のダイナミックスペクトルが更新される。これにより、予報官及び研究者が即時に太陽電波現象を把握することができ、予報のための一つの判断材料となっている。また、予報室のプリンタには前日のスペクトルプロット及び固定周波プロットが出力され、クイックルックとして用いられている。

HiRASのスペクトルデータ及び固定周波データからデータ解析用サーバにおいてダイナミックスペクトルや固定周波サマリープロットなどの画像が作成され、それらの画像は外部公開用サーバのWWWにより公開されている(<http://sunbase.crl.go.jp/solar/denpa/index.html>)。HiRASのスペクトルデータはデータ解析用サーバから30分間隔で外部公開用サーバにデータが転送され、準リアルタイムで更新されている。そのほかに前日のスペクトルプロット及び固定周波プロット、1996年8月以降のHiRASのスペクトルデータ、月ごとの観測サマリレポートなどが公開されている。WWWによる観測データの公開のほか、当所が発行している「IONOSPHERIC DATA IN JAPAN(電離層月報)」において500MHz固定周波の電波強度、200MHz、500MHz、2.8GHzにおける異常現象と2.8GHzのサマリープロット、F10.7の値を報告している。

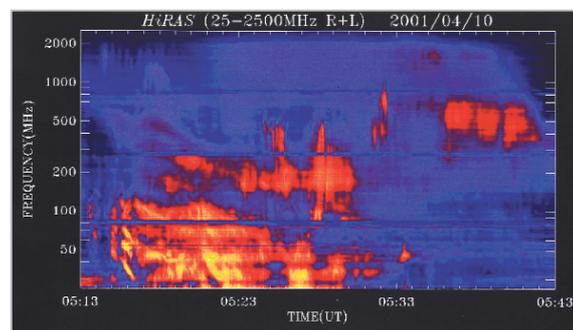


図6 2001年4月10日のフレアに伴う電波バースト

II型電波バーストなど重要現象が発生した場合は、研究者が観測データから現象の切り出しを行い、外部公開用サーバへアップロードしている。図6に2001年4月10日のX2.3/3Bフレアに伴い発生したII型、III型、IV型バーストの例を示す。このイベントでは図2に示すツリーボンフレアが当センターのH α 太陽望遠鏡により観測された。II型、IV型バーストはこのフレアに伴ってプラズマ雲が放出されたことを示し、数日後に地磁気擾乱が発生する可能性が十分であると予報したところ、11日後半より強い地磁気嵐が発生した。

4 むすび—今後の太陽観測技術の研究—

当所における太陽研究の軸は、宇宙天気予報の実現に必要な観測技術の研究と装置の開発・運用である。当所の宇宙天気分野は、宇宙天気予報に必要な計測技術やデータ利用技術の研究開発のみならず、予報業務の運用もカバーしているところに特徴があり、開発された観測装置はその性能確認と技術実証を経て、そのまま継続的に運用され、宇宙環境情報サービスや宇宙天気現象の研究にとって重要な役割を果たしている。したがって、今後取り組むべき課題も宇宙天気現象の研究や予報業務に必要な度の高いものとしていく。今後の最重要課題の一つは地磁気嵐やSEPのドライバーである惑星間空間を伝

搬するCMEの観測であるが、これについては別稿において紹介する。

光学観測においては、表面磁場の精密観測のための偏光分光観測技術の研究を重要な基礎研究開発課題であると考えている。太陽表面大気の磁場は、分光器に偏光解析装置を組み合わせ、スペクトル線の線輪郭の偏光特性を精密に計測することによって求めることができる。太陽フレアにより開放されるエネルギーに相当する磁場変化をとらえようとすれば、0.01%程度の偏光検出精度が必要になる。これを実現するためには、高速の偏光モジュレーション技術や大気揺らぎの補償技術、途中の光学系による人為偏光の抑制など、解決すべき課題が数多くある。今後息の長い基礎的な研究として、これらの研究課題に取り組んでいく計画である。

電波観測においては、現在のダイナミックスペクトル観測(HiRAS)の実績を踏まえつつ新たな展開を検討している。広帯域の電波観測は、通信や放送の電波の干渉により、地上での運用では十分に質の高いデータの取得が困難になっているのが現実である。別稿で述べるL5ミッションの研究においても小型の搭載用電波分光器の研究を行っているが、通信・放送波の混信の影響の少ない遠隔地や、衛星からの太陽電波観測の可能性も併せて検討していく計画である。さらに、高時間分解能化の可能性についても今後検討する必要がある。

参考文献

- 1 H. V. Cane, "The current Status in Our Understanding of Energetic Particles, Coronal Mass Ejections, and Flares, in Coronal Mass Ejection", AGU monograph, p197, 1997.
- 2 T. Forbes, "A Review on the Genesis of Coronal Mass Ejections", J. Geophys. Res. Vol. 105, p23153, 2000.
- 3 H. Zirin, "Astrophysics of the Sun", p400, 1987.
- 4 Brueckner et al., "The large angle spectroscopic coronagraph for the solar and heliospheric observatory", The SOHO mission, p357, 1995.
- 5 秋岡眞樹, 岡野朱美, 太陽彩層面の観測—高精細H α 望遠鏡の開発と観測—, 通信総合研究所季報 Vol.43, p215, 1997.
- 6 近藤哲朗, 磯部武, 猪木誠二, 巨慎一, 徳丸宗利, 平磯の新太陽電波観測システム, 通信総合研究所季報 Vol.43, p231, 1997.



あきおか まき
秋岡真樹

電磁波計測部門太陽・太陽風グループ
リーダー 博士(理学)
太陽物理、光学システム、宇宙天気
akioka@crl.go.jp



こんどう てつろう
近藤哲朗

電磁波計測部門宇宙電波応用グループ
リーダー 理学博士
VLBI及び惑星電波
kondo@crl.go.jp

さ がわ えい いち
佐川永一

電磁波計測部門宇宙天気システムグル
ープ主任研究員 理学博士
宇宙天気
esagawa@crl.go.jp



くぼ ゆう き
久保勇樹

電磁波計測部門太陽・太陽風グループ
宇宙天気
kubo@crl.go.jp



い わ い ひろ ひで
岩井宏徳

電磁波計測部門太陽・太陽風グループ
宇宙天気
iwai@crl.go.jp