

太陽真空紫外領域スペクトルの絶対測定*

(K-10-9号機による)

西 恵三**・東 康一**・山口朝三**
末元善三郎†

Observation of the Absolute Intensity of the Sun
in the Vacuum Ultraviolet Region

by

Keizo NISHI, Koichi HIGASHI, Asami YAMAGUCHI
and Zenzaburo SUEMOTO

Abstract The absolute intensity of the solar spectrum between 1550Å and 1950Å was measured photoelectrically by the K-10-9 rocket flown from the Kagoshima Space Center on Feb. 19, 1973. A single dispersive spectrometer with uniaxial sunfollower was used for the experiment to measure the radiation from the whole solar disk with a 78Å spectral resolution. The results were consistent with our earlier observation by the K-10-6 rocket and also by the Harvard College Observatory.

§ 1. はじめに

太陽の表面大気の物理的な姿を求めるためには、それを構成している大気からの放射の観測が基礎となっている。そして特に光球から彩層に移行する附近の事柄は、従来地上に設定された大型望遠鏡や高分解精度の分光器を用い、平常時のみならず皆既日食等の機会を捕えて得られた資料を基にして研究が進められて来た。しかしロケットや人工衛星等の飛しょう体の出現により、地球大気による吸収を受けない天体観測が可能となって以来、諸外国では競ってこの方面に多くの業績を残して来たし、我々もその寄与に参加することができるようになった。

真空紫外領域では太陽大気を構成するガスの吸収係数が極めて大きくなって来るので、光球から彩層を経てコロナにわたる部分の放射が有効となって来ることが知られている。特に 1,400Å ~ 2,000Å において太陽放射強度の絶対量の測定が、光球から彩層に移行する部分の物理的な諸元や、構成ガスの吸収係数等に関係する重要な研究テーマとなっている。(1) この波長領域には、可視領域に於ける標準光源のような高精度の放射標準が現存しないの

* 宇宙研特別事業費による論文
** 東京天文台
† 東大理学部

で、観測装置の絶対校正に伴う手続上の困難さや観測項目としては地味な方に属するため、諸外国に於けるこのテーマの観測も比較的新らしく、観測参加国も最近になって次第に増加の傾向を示している。(2)

我々は数年前よりこのテーマの下に準備を行い、(3) 1971年にK-10-6号機により始めて結果を得たのであるが(4)、今回更に観測波長の範囲を広げた観測をK-10-9号機によって行い、成功を収めたので、その経過ならびに観測結果について報告する。

§ 2. K-10-9号機搭載用分光測光器

(A) 分光光学系

観測に使用した分光系は極めて簡単な単分散型である。即ち太陽光を凹面回折格子 (Bausch & Lomb, Catalog # 35-52-10-720, $R = 498.1\text{mm}$, 刻線面積 $18\text{mm} \times 18\text{mm}$, 刻線数 $1,200\text{本/mm}$, MgF_2 コーティング) に直接照射し、そのWadsworth焦点の位置にスリット (巾 30μ , 長さ 3mm) を配置したものである。この系を用いると太陽光の凹面回折格子への入射角の変化によってWadsworth焦点に結像する波長が変化するので測定波長の走査が行える。正確にはそのために生ずるWadsworth焦点は奥行き方向即ち凹面回折格子からの距離も変化するが、 $1,400\text{\AA} \sim 2,000\text{\AA}$ の間では1次回折光を用いる限りその変化は1%以下に押えられるので、現在の目標としては無視できると考えた。

スリットの巾は 30μ であり、之は線分散の 1\AA 巾に相等するが、スリット上には分散された太陽像が生じているために、太陽の視角に相等する角分散のスペクトル巾 (78\AA) がスリットを通過して検出器に達していることになる。そして、それぞれの波長に相等する太陽面上の場所も同一ではなく、波長巾 78\AA 内で太陽スペクトルが太陽面上どこでも一様であるという仮定の下に、太陽面全体からの放射を 78\AA の波長巾で測光したことになる。

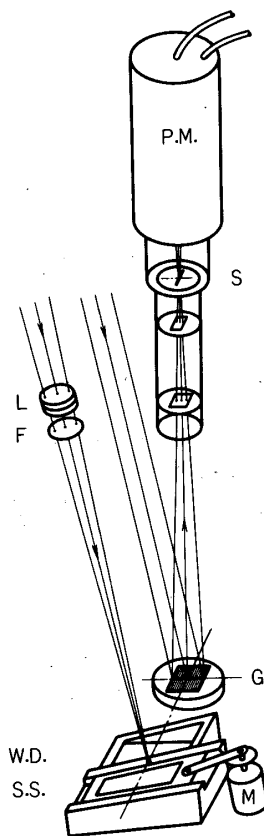
測光中の波長を決定するために、 $1,660\text{\AA}$ がWadsworth焦点に於ける中心波長となるべき入射角 $11^\circ 30'$ 方向に光軸を合わせたレンズ系 (口径 12mm , 焦点距離 180mm) によって太陽像を結ばせる。その焦点の位置に楔型 (実際には上底 2mm , 下底 8mm , 高さ 20mm の梯型) をした太陽電池二枚を一組にしたものを配列し、ロケットのスピンのように太陽像がそれぞれの太陽電池を通過する時間比によってこの光学系の光軸と入射光の間の角度を測定することができ、従って凹面回折格子への入射角が求まり測定波長が決定される。東京天文台に於けるスピンテストの結果、 5\AA の精度で測定波長が決定できることが判明した。これは 78\AA の波長巾に対して約6%の誤差にすぎないので、現在の観測目的には充分であると考えた。

(B) 追尾光学系

使用した凹面回折格子の第1次分散によって $1,400\text{\AA} \sim 1,950\text{\AA}$ を測光するので、これは視角約 $3^\circ 75'$ 内に太陽を入れる必要がある。このためにロケットのスピンの軸に対して直角方向に分光測光器全体を動かし、太陽光が分光系に入射したと同時に一旦動きを停止させる一軸の追尾方式を採用した。方法は測定波長の決定に使用した光学系の太陽電池と並列して、二枚の長方形の太陽電池の組合せ (各々 $10\text{mm} \times 20\text{mm}$) を置き、これらの太陽電池に太陽像が通過して生ずる出力によって、ロケットのスピンの軸と直角方向に往復運動 (ロケット軸

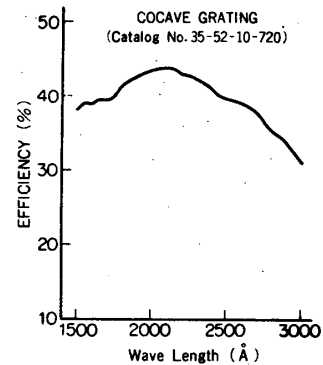
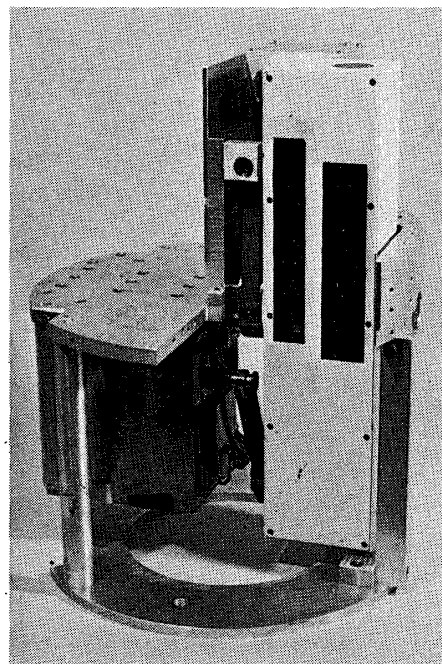
から $10^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 、1周期33秒)させている電気系を追尾の電気系に切りかえる。そして二枚一組の太陽電池の出力のバランスが取れる位置、具体的には両方の太陽電池の継ぎ目を太陽像の中心が通過する時に動きを停止させる。もしロケットに全然プレセッションが無い場合には単一波長のみ観測することになるので、 $1,400\text{\AA}\sim 1,950\text{\AA}$ をカバーするため、この追尾用検出系自体を $\pm 2.5^{\circ}$ 移動(1周期30秒)させた。それまでのK-10型ロケットの運動を参考にして、ロケットのスピンの3サイクル、プレセッションの角度 $\pm 10^{\circ}$ 、周期約1分と考え、ほぼ3倍の余裕を持った追尾速度を考えて設計を行った。

第1図に分光及び追尾の光学系の概要及び外観を示す。すでに前に報告済の装置及び方法⁽⁵⁾によって凹面回折格子の反射率を測定した。その結果を第2図に示す。



第1図 K-10-9号機塔載用分光測光器光学系の概要および外観。

- G : 凹面回折格子 (Bausch & Lomb, Catalog #35-52-10-720) $R=498.1\text{mm}$, 刻線面積 $18\text{mm}\times 18\text{mm}$, 1,200本/mm, MgF_2 コーティング,
- S : スリット, 巾 30μ , 長さ 3mm ,
- L : 結像レンズ, 口径 12mm , 焦点距離 180mm ,
- F : ニュートラルフィルター
- W.D. : 波長決定用楔型太陽電池 (上底 2mm , 下底 8mm , 高さ 20mm の梯型二枚の組合せ)
- S.S. : 自動追尾用太陽電池 ($10\text{mm}\times 20\text{mm}$ 二枚の組合せ)
- M : 自動追尾用太陽電池往復運動用モーター ($\pm 2^{\circ}$ に相等する週期運動, 1周期 30秒)
- P.M. : 光電子増倍管, HTV-R600 (ZA1615)



第2図 使用された凹面回折格子(G)の反射率

(C) 検 出 器

浜松テレビの協力によって新らしく開発した光電子増倍管 R-600 を使用した。これは頭部窓型で窓材にサファイヤを用い、光電面に CsI, 二次電子増倍部に CuBe を使用したもので、 $1,400\text{\AA}\sim 1,950\text{\AA}$ に感度を持ち可視領域には極めて低感度の所謂 Solar blind 型

である。この光電子増倍管の使用により単分散型の分光系でも、可視領域の散乱光を十分に排除することが可能となったのである。すでに報告済の装置及び方法⁽⁶⁾によって、印加電圧 2 KV で検出器の絶対校正を行った。窓面の場所による感度ムラも測定し、実際に使用された場所についての絶対感度を第 3 図に示してある。

(D) 電 気 系

K-10-9 号ロケットは頭胴部に約 3 サイクルのスピンを残したまま飛しょうさせる方式であるため、太陽を測光するにはいくらかの工夫を必要とする。我々が本実験で使用した Wadsworth 型単分散分光器で考慮する必要のある事柄としては、

- イ. 波長走査範囲 1,400 ~ 1,950 Å の分光器の視野は高々 4° 程度であるため、太陽指向装置を独自に持たねばならぬこと、これに附随して波長走査機構が原則的に必要となる。
- ロ. 単分散分光器では、入射角で波長が異なるので波長指示装置を要する。
- ハ. 太陽を捕えても 3 サイクルのスピンのために、視角 30' のペンシルビームが分光器に入射する時間は 0.5 ms 程度のパルスであるので、テレメータ及びディスプレイ装置との接続についての工夫。

以下にこれ等の項目について我々が採用した方式の概要を示す。

1) 測光用電気系について

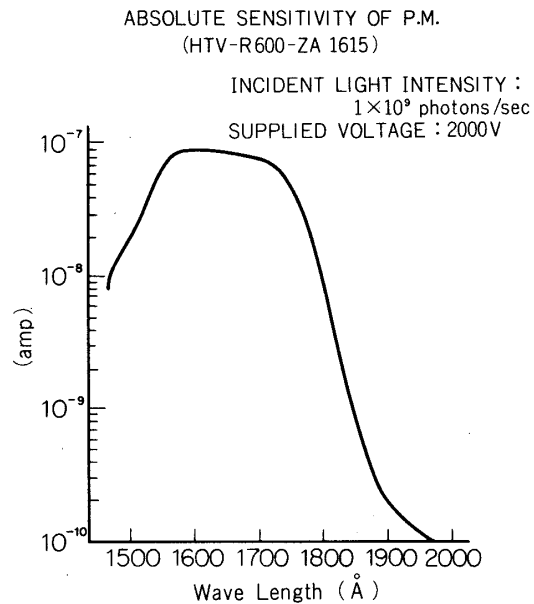
受光器としては前述の HTV-R 600 を印加電圧 2 KV で使用した。走査波長域 1,400 ~ 1,950 Å の間の P.M. の出力電流範囲は、分光器の分光効率、出射スリット、P.M. の絶対校正値などを用いて、各波長域に汎って推定され、充分の予裕を持って 10^{-8} ~ 10^{-5} Amp 内に納まった。

上限値を大きく採ったのは散光についての安全率を見込んだ結果である（結果として散光の影響は少なかった）。

受光器の出力は、スピン当りの測光時間が 0.5 ms 前後で、受信側から見て高速パルスであること、測定対象の波長巾 78 Å の太陽面全光量が必ず受光されることを兼ね合せて、そのピーク値を一定期間保持してテレメータ及び表示装置に送り出す方式を採用した。

前置増巾器は電流増巾で帰還抵抗 $50\text{K}\Omega \pm 1\%$ 、周波数レスポンス 10 KHz (3 db 減) にしてある。テレメータは PCM 形式で 2 NC (140 Hz 精度 0.1%) を 3 チャンネル使用し、ダイナミックレンジ 60 db を得ている。

増巾回路のチェック信号がスイッチ on より 15 秒毎に発せられるが、これは後述の波長

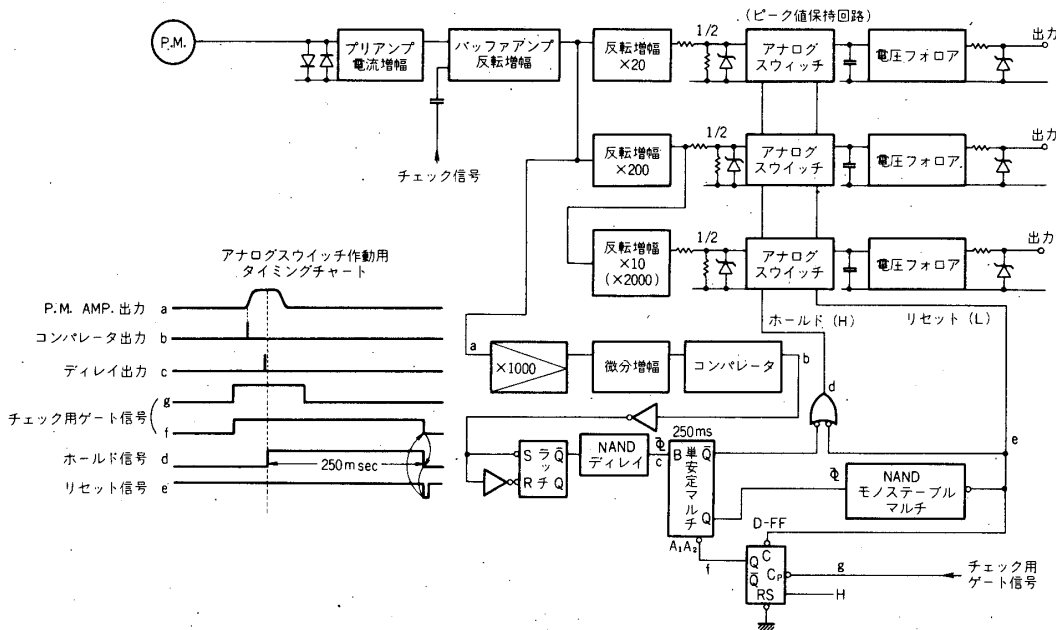


第 3 図 使用された検出器 (光電子増倍管 HTV-R 600-ZA 1615) の絶対感度

表示回路より作られる。光パルスを受光すると、その信号の立ち上りより一定時間遅延させてピーク値をとらえたあと、これを保持し、250ms 経てコンデンサーを放電し待期するが、チェック信号と重畳する場合はチェック信号が優先される(第4図)。

2) 波長表示用電気系について

今回搭載した単分散型Wadsworth 分光器で、波長走査をするには凹面格子への入射角を変化させることに依る。この場合、Wadsworth 焦点上のスリットに入る光の波長表示を行うた



第4図 測光回路ブロック図

め採用した手段は、走査中心波長に相当する入射角に光軸を合せた望遠鏡の結像部に楔形の太陽電池を二枚つき合せた(第1図)検出器を置き、ロケットのスピンの依って太陽像が各々の太陽電池を横切る時間の比に入射角のずれを対応さすことで行われた。

この方法による波長測定の精度は、光軸合せと太陽電池の応答速度、及びその幾何学的な形の精度に依存するが、その二辺が楔形であること、太陽像に大きさがあるため、楔形に入る位置と出る位置が像の移動方向とわずかにずれを起すことも影響する。この現象を消すには太陽像の中心がよぎる時間を計測するようにすればよいが、実際上では、1サイクル前に通過したピーク値(太陽像全体の光量相当)を保持して、その半分をコンパレータの基準として与えれば解決する。

(第5図)にその回路の構成を示す。主な働きは、コンパレータからの出力で100KHzのクロック信号をゲートし、ディケードカウンターで計数したものを、マルチプレクサーを通してテレメートする。1回の送信時間は250msで、記録波形は12ビットのBCDコードで、直列の矩形波で表示されるが、LレベルはOレベルと判別可能な程度レベルアップされている。

他には、15秒毎にチェック信号を出す系統が付加されていて次の回路からなる。

1) チェック信号用計数ゲート作成

モノマルチ, MMV₅ と MMV₄ で15秒のパルスを作りディケードカウンターの3桁目のD信号とFF₂のラッチ動作でカウント数800(8ms)のゲート信号を作る。

2) チェック信号用クロック計数及び送信中の光入力信号禁止用ゲート作成。

モノマルチMMV₃とMMV₆とで作られ, 送信終了と同時にクリアされる。

3) (1)の動作実行ゲート(G₁, G₄及びG₂, G₅)4) (2)の動作実行ゲート(G₁₁, G₁₂及びG₂, G₅)

次にこの構成ではCh_A, Ch_Bの計数出力の送信をCh_Bの信号の後縁で動作する電送回路を共用しているので, 光の入射順序はCh_A→Ch_Bで設計されている。

尚, ロケットのスピンはカウンターの関係で1 cps以上に, 上限は送信中に光入力が入らないためには, 4 cps未滿であればよいが, これ以上になると1回置き of データとなる(G₉とG₄ゲート)。このとき禁止命令の後縁に入力がかかることがあるので, 少しでも重複(G₁₅)があればその入力の終りまで禁止命令を延長する回路(MMV₇, FF₃及びG₁, G₉)も追加される。

楔形太陽電池の増巾は電流増巾型で応答を早めた。応答速度は発光ダイオードをパルス点燈してその過度特性をしらべた。パルスの立ち上り時間は0.4msと太陽像が縁を通過する時間と同等程度であるが, これは相対的な時間おくれとなるだけで, この程度では波長精度に影響しない。

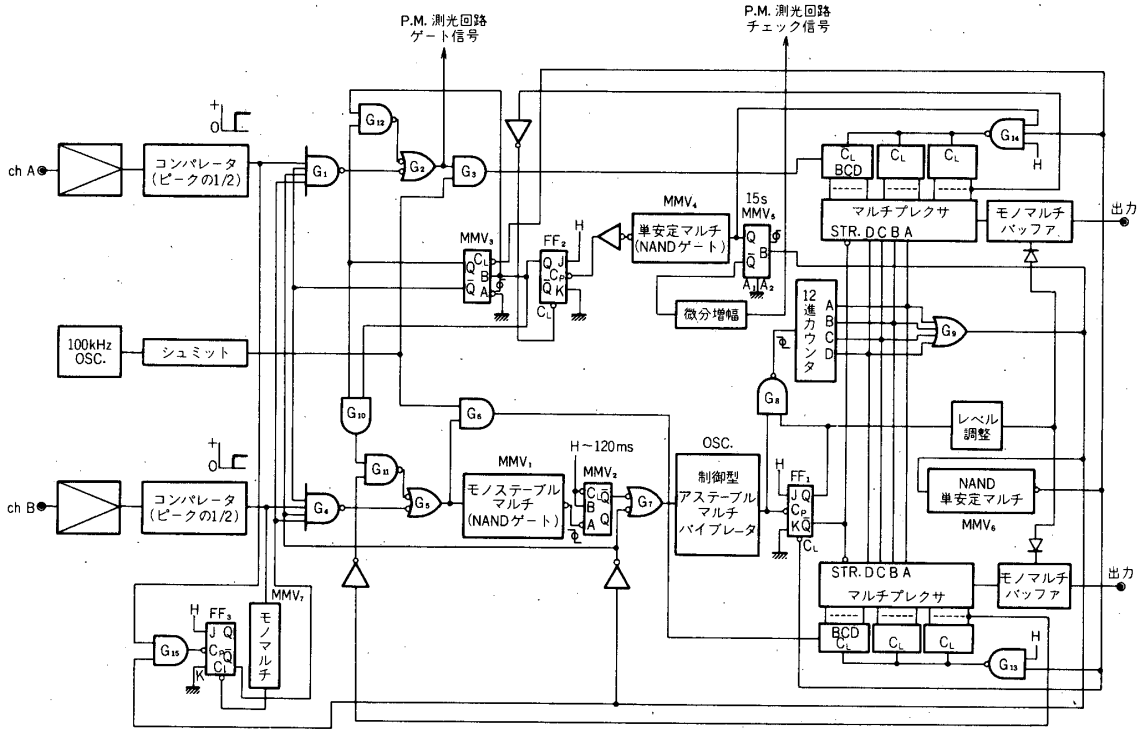
3) 太陽追尾装置について

分光器の視野は波長域を500Å程度に採っても非常に狭いので, ロケット搭載型分光器には追尾装置がぜひとも必要となることは前述の通りである。

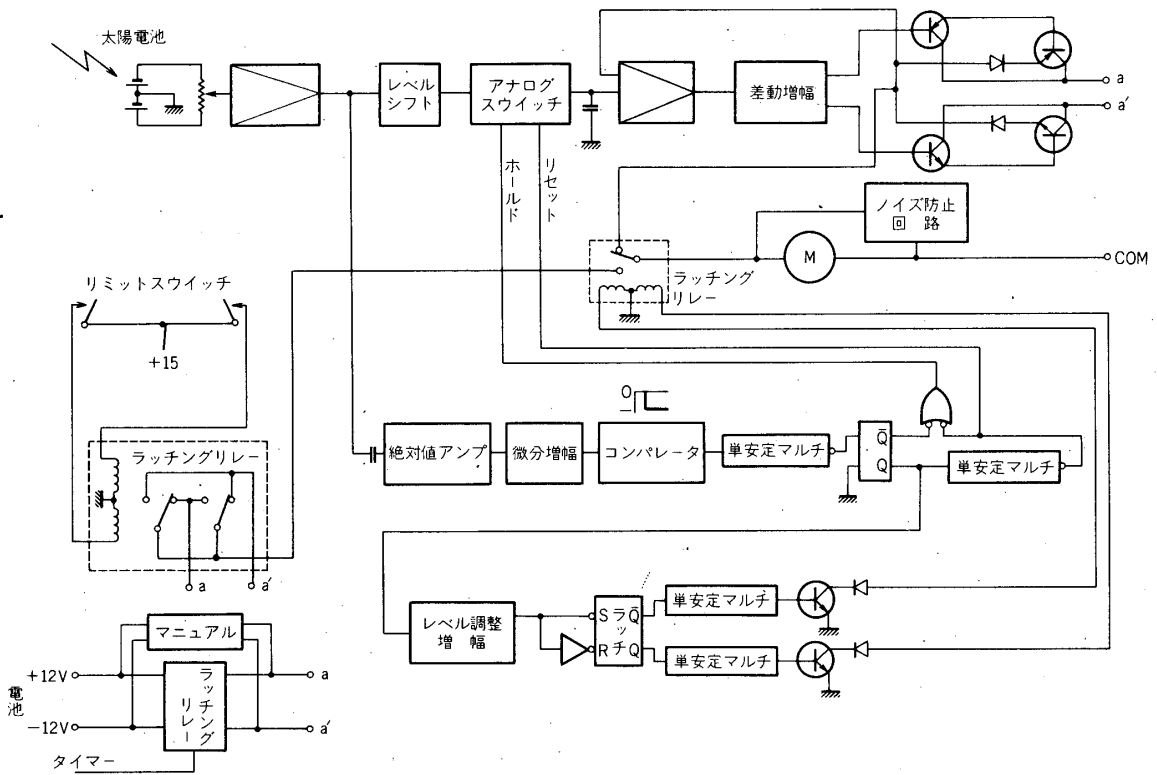
今回のロケットはスピンの掛っているので, 重い分光器を振り動かすことに抵抗があったが, 絶対測光の観点から鏡などを使用する方法に不満であったので, あえて分光器全体の追尾方式を選び, 方位方向をスピンを利用して走査し, 俯迎角方向のみに追尾装置を設けて太陽を捕える所謂一軸追尾を採用した。駆動機構はロケットの振動, スピンなどで生ずるトルクで不必要に動かないためと, 大きな駆動トルクを与えるためウオームギヤを用いた。

設計段階では過去のデータより歳差角±10°周期60秒を想定したが, このように動き回る太陽のロケット軸成分の最大角速度は1度/秒強になり, この3倍を最大追尾角速度とした。以上の事柄と動力伝達機構を考慮すると, 必要なモータのパワーは5W程度に見積られた。有効出力1.6WのDCマイクロモータ2個でもまだ不足するが, バネを効果的に利用することで必要パワーを約半分にする事で解決した。

ガイド用受光器は, 10mm×20mmの太陽電池2枚を波長標示用受光器と並べて置き(第1図), 視角は±10度になっている。開頭と同時に俯迎角方向に最大角速度3度/秒で太陽を探す動作に入り, 約30秒で一往復する。太陽が視野に入ると自動追尾に切り換るが, 入射光が間欠的なパルス光であるため, 一定時間引き延して階段状波形でモータを駆動する。分光器の動きは駆動軸に直結したポテンシオメータの出力でモニターされる仕組みになっている(第6図)。



第5図 波長測定回路



第6図 追尾回路ブロック図

4) 波長走査について

これはガイド望遠鏡の焦点面上の受光器の取付板を、 $1,300 \text{ \AA} \sim 1,950 \text{ \AA}$ 担当の範囲を30秒に一往復させる。短波長側は、P.M.のサファイヤ窓の透過波長範囲外であるが、散光の有無の検定用に用いる。

5) モニター

1秒1回、P.M.の高圧モニター電圧と分光器の動作角を交互に切換えてテレメータする。

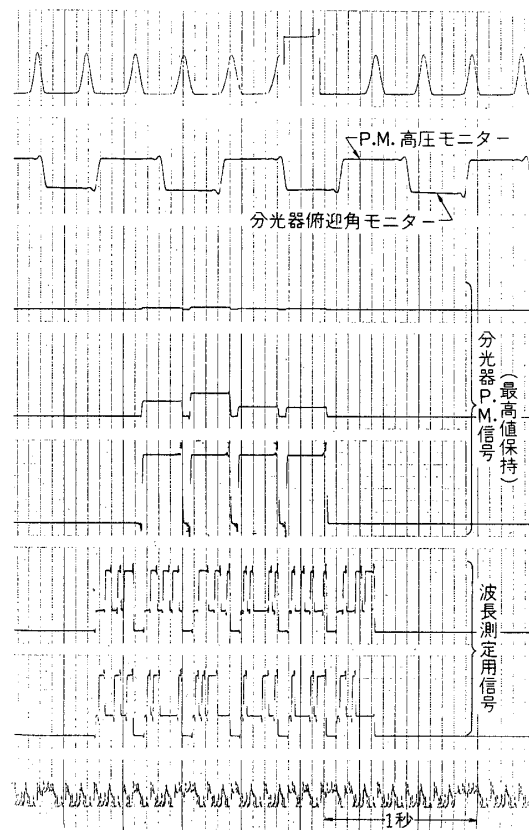
§ 3. 観測及び測定結果

この分光測光器はK-10-9号機のノーズコーンに搭載され、1973年2月19日午前9時22分内之浦実験場より飛しょうされた。ノーズコーンの開頭后、予定通り発射后70秒から分光測光器は正常に作動を開始して追尾を行い、発射后約100秒から430秒にわたって観測を行うことができた。この間測光系も正常に作動して資料が得られた。このロケットはスピンの約2.5サイクルと予想に近かったが、プレセッションが約 $\pm 30^\circ$ 、周期約12秒と予想より1桁以上動きが激しかったため、自動追尾の効果が充分発揮されたとはいえなかった。ロケット軸と太陽方向の角度変化の速度が設計値に近くなる状態の個所では、数スピンにわたって太陽を追尾していたので、プレセッションが予定通りであれば更に多くの資料が得られたと考えている。

分光測光系が太陽を間欠的に捕えたのは約50回であるが、その測定波長は $1,550 \text{ \AA} \sim 1,950 \text{ \AA}$ にわたりほぼ一様に分布されている。実際に得られたテレメータ資料の一部(発射后約281秒)を第7図に示す。

得られた観測値を整約して太陽の輻射強度の絶対量を得る手続きは前に報告したK-10-6号機によるものと基本的には同様である。但し今回は太陽面全体からの輻射を測定したので $A_0 = 1$ であり、 $\Delta\lambda$ は観測当日の太陽の視直径に相等する 78 \AA をとることになる。これは前にも説明したように、太陽面全体が 78 \AA の測定波長巾内では一様の輻射強度を持っているという仮定に基づいたからである。観測結果を第8図に示す。

これらの結果をみると、今回のものはK-10-6号機のものに比べて約30%高



第7図 得られた資料の一部(発射后280秒~283秒)

い値を示している。これについてのコメントとして

(1) K-10-6号機では太陽像の中心附近(1,629 Åは $\mu=0.7$, 1,684 Åは $\mu=1.0$ 即ち中心, 1,739 Åは $\mu=0.9$)を1.3の空間分解精度, 8.3 Å波長分解精度で測定したものであり, 今回は太陽全面の平均的な値を78 Åの波長巾で測定したものである。従って測定波長巾の中で連続スペクトルに加えて輝線や吸収線の影響及びそれ等の中心周縁強度の相異などが複雑に混入していて単純に比較はできない。

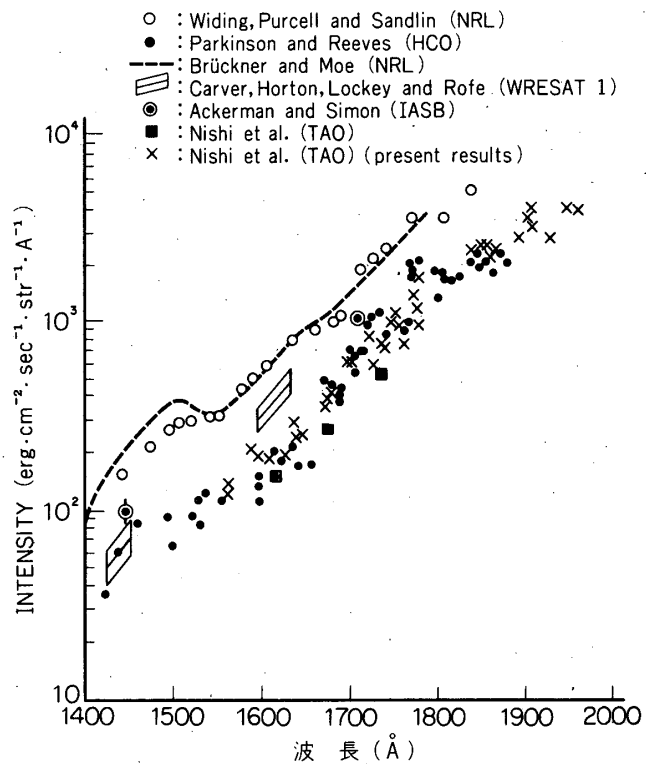
(2) 真空紫外領域に於ける絶対測定精度は, 現段階では一般に40%~50%と考えられている事を思うと, 我々の二回の測定結果は一応一致しているとみてよからう。

(3) 検出器の絶対校正を行う時には, 検出器に照射している輻射は数分程度であるのに, 今回の観測では約1/2,000秒のパルス的な受光をしている。これ等の状況の差異によって絶対測定の信頼性をどこまで許容できるか。

(4) K-10-6号機では複式分光系を採用したため今回に比べて分光光学系全体は大きく, 太陽光が最初に照射する凹面回折格子から検出器に入るまでの光路差は約3倍である。従って分光器内壁に附着した水蒸気等の排気残留気体の吸収によるのではないか。

等の諸点があげられる。従って今後の実験にはこれ等についての吟味対策を十分に考慮したい。

諸外国との観測結果を比較してみると, 我々の測定値はHCO (Harvard College Observatory)のものと最もよく一致しているように考えられる。それぞれの観測値は, 太陽像中心のものと全面からのものとの違いなどを考慮して眺めて載きたい。何れにしてもこの領域内に於ける絶対測定に諸外国も本腰を入れ始めたという印象を強く受けるので, 我々も更に精度の高い観測を行いたいと考えている。



第8図 東京天文台(TAO)の観測結果とNaval Research Laboratory (NRL), Harvard College Observorg (HCO), University of Adelaide, Australia(WRESAT 1), および Institut d'Aeronomie Spatiale de Belgique (IASB)の観測結果

§ 4. 謝 辞

本観測は主として東京大学宇宙航空研究所の特別事業費によって進められたもので、実験主任小田稔教授はじめロケット実験に関係ある方々の絶大なご指導とご協力のあったことを記し厚く感謝する次第である。また東京天文台における基礎実験には、太陽物理部長守山史生教授をはじめ太陽研究グループの絶えざるご支援を憶え感謝したい。またロケット塔載用分光測光器の製作に関しては三鷹光器K.K.の中村義一氏、神田和勝氏、松見電子技術研究所の上原宏氏、藤井勝実氏、浜松テレビK.K.の鈴木陽市氏、横井高嶺氏等関係各位の諸氏にその協力を心より感謝する次第である。

1974年7月30日

参 考 文 献

- [1] K. Nishi: The Solar Ultraviolet Continuum, Publ. Astron. Soc. Japan, **19**, 323 (1967)
西 恵三: 太陽紫外領域スペクトル, 宇宙科学観測装置シンポジウム, 97, (1967)
- [2] W. H. Parkinson and E. M. Reeves: Measurements in the Solar Spectrum between 1400 and 1875Å with a Rocket-borne Spectrometer, Solar Physics, **10**, 342 (1969)
K. G. Widing, J. D. Purcell, and G. D. Sandlin: The UV Continuum 1450-2100Å and the Problem of the Solar Temperature Minimum, Solar Physics, **12**, 52 (1970)
G. E. Brückner and O. K. Moe: High Angular Resolution Absolute Intensity of the Solar Continuum from 1400Å to 1790Å, Space Research **12**, 1595 (1972)
J. H. Carver, B. H. Horton, and G. W. A. Lockey, and Bryan Rofe: Ultraviolet Ion Chamber Measurements of the Solar Minimum Brightness Temperature, Solar Physics **27**, 347 (1972)
M. Ackerman and P. Simon: Rocket Measurement of Solar Fluxes at 1216Å, 1450Å and 1710Å, Solar Physics **30**, 345 (1973)
- [3] K. Nishi and Z. Suemoto: Attempts to Observe the Absolute Intensity and the Centre-to-limb Variations of Sun in the Vacuum Ultraviolet Region. IAU Symposium, No. 41, "New Techniques in Space Astronomy" 393 (1971)
末元善三郎・西 恵三・東 康一・山口朝三: 太陽極端紫外スペクトルの中心周縁強度変化の観測に関する基礎実験
東京大学宇宙航空研究所報告, 第6巻, 第1号(B), 102 (1970)
- [4] 西 恵三・東 康一・山口朝三・末元善三郎: 太陽真空紫外領域スペクトルの絶対測定および中心周縁強度変化の観測(K-10-6号機による)
東京大学宇宙航空研究所報告, 第9巻, 第2号(B), 359 (1973)
K. Nishi: Observation of the Absolute Intensity and the Centre-to-limb Variation of the Sun in the Vacuum Ultraviolet Region. Solar Physics, **33**, 23 (1973)
- [5] 末元善三郎, 西 恵三, 東 康一, 山口朝三: 太陽極端紫外スペクトルの中心周縁強度変化の観測に関する基礎実験
宇宙航空研究所報告 第6巻 第1号(B), 102 (1970)
- [6] 西 恵三, 東 康一, 山口朝三: 真空紫外領域に於ける絶対測光, 東京大学・東京天文台報 第16巻 第3冊, 584 (1973)