

10cm 太陽望遠鏡による太陽直接写真の撮影 (III)*

平山 淳**・清水一郎**・今井英樹**
浜名茂男**・徳家 厚**・守山史生**

概 要

口径 10 cm の気球用太陽望遠鏡を 1977 年 9 月に飛揚させ、白斑及び黒点の波長 5300Å 付近における直接写真を撮影して、次の結果を得た。(1) 662 個の白斑の明るさを従来より光球中心寄りの場所(半径の 76%及び 87%の 2 領域)で測定し、それぞれ周囲の光球に比べて 9.2%及び 16.2% 明るいことが分った。この値は、Chapman, Frazier, Stellmacher & Wiehr 等の値に比べ約 2~3 倍大きいもので我々の data が良いことを示している。この結果白斑は 500 K (白斑の直径 1 秒角の場合) ないし 1000 K (直径 0.2 秒角) 光球より高温であることが明らかとなった[1]。(2) 黒点半暗部内の暗部寄りのところに光球と同じ明るさの輝点があることが判明した。(3) 1973 年の気球による極域白斑と、スカイラブによる軟 X 線の輝点を比べた結果、両者は同時には光っていないらしいことが分った。

1. 序 言

1972 年に口径 10 cm の気球用太陽屈折望遠鏡を飛揚させて以来、我々は 73 年、75 年、76 年及び今回の 77 年 9 月を含めて計 5 回の飛揚を行ったが、そのうち 73 年、76 年及び今回の 3 回のフライトにおいて、太陽白斑及び黒点の写真撮影を行うことができた[1],[2]。73 年及び 76 年に得られた白斑の写真を解析した結果、白斑の輝度の周辺変化より白斑の深さに対する温度分布と、白斑の輝度の時間的変化より白斑の寿命を求めることができた[1]。

1977 年 9 月の観測は前 2 回のデータを次の点で補うため行われたものである。(1) 白斑は主として活動領域に発生するため、1~2 回の観測では太陽全面にわたる明るさの分布を得ることができず、太陽の見かけの中心寄り等のデータが得られていなかった。(2) 白斑の輝度の時間的変化を定量的に追跡するためには、像質の良い写真を得ることが必要不可欠であるが、前 2 回の観測では機械的振動及び望遠鏡内に生じた気団の密度の乱れのために不十分なデータしか得られていなかった。以下に述べるように今回の飛揚でも第二の点は克服されずに終わったが、第一の点については、口径 10 cm の理論的分解能よりもかなり劣るデータではあるが、他の人たちによる従来の地上観測に良いものがなかったために、結果としては現時点において最良の結果を得ることができた。今回は従って白斑の輝度分布から得られたモデル及び黒点内の異常に明るい点の解析を行った報告である。なお 1973 年に得られた極

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東京天文台

域白斑とスカイラブのX線輝点を比較した結果にも言及する。

2. 観 測

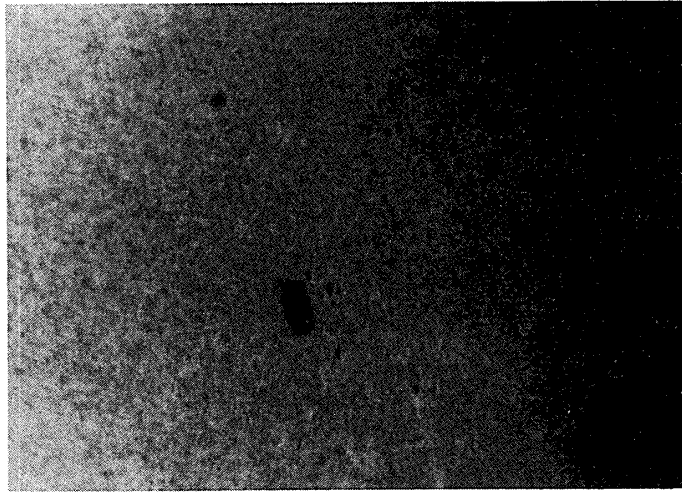
観測装置の概要は [1], [3] に記述されており, またガイド及び focusing 用のテレビ系については宇宙研丹羽研究室による報告を参照されたい [4], [5]. 主光学系は, 二軸駆動の口径 15 cm ヘリオスタット鏡より導かれた光が, 口径 10 cm・焦点距離 1.5 m のダブルレット対物レンズを通り, 拡大レンズにより直径 184 mm の太陽像を作り, これを 35 mm フィルムで太陽像の一部 (350"×240") を撮影するものである。

放球は 1977 年 9 月 2 日 7 時 38 分 (J.S.T.) に行われ, 高度 28 km で 9 時 24 分に観測を開始し, 14 時 34 分観測終了, 翌日 0 時 11 分切離しを行い三陸の船越半島沖約 8 km の海上ではやちね丸により無事回収された. 使用気球は 15000 m³, 全重量 311.1 kg (内 P I は 188.8 kg) であった. なお観測には 35 mm フジミニコピー HR II フィルムを用い, 現像は自動現像機によりコピナル 4 分 (19.2~23.0℃) で行った. 光球中心では 1/2000 s, リムでは 1/500 s のシャッター速度を用いた. 用いたフィルターは保谷 G 530 と ND 70 (70%透過) であるが, フィルムとフィルターの合成による有効波長幅 (強度が約 50%になる範囲) は約 400 Å で中心波長は 5300 Å である。

我々は 30 m のフィルムで約 780 駒の撮影を予定していたのであるが, 実際に撮影されたのは最初の 133 駒のみであった. これは, 未撮影フィルムが装てんしてあるマガジンの軸の上下の押えがきつくなりパーフォレーションが切れたため, 残りは未撮影のままであった。

76 年の観測ではカメラのフォーカルプレキシッターに起因する機械的振動が, ヘリオスタットに伝わりこの鏡の振動のため像のブレが大きく測定不能の駒が多かった. これは, 良い像の撮れた 73 年の装置に比べ鏡の支持枠及びカメラの支持枠が振動し易い構造になっていたためと考えられるが, 今回は鏡の支持枠は 73 年の状態に戻し, カメラは防振ゴムの上に装着することにした. 結果は, 76 年の像のブレの数分の 1 になったが, まだ振動の影響が残っており最小の白斑でも約 2 秒角となった (73 年では約 1 秒角であった. また口径 30 cm の Schwarzschild の望遠鏡では 0.5 秒角であった). 結果の一部を第 1 図に示す. なお, 73 年のような良い像質が得られなかった原因として, 機械的振動の他に望遠鏡内の気温の乱れ, 従って密度の乱れ, による像の劣化と考えられる例があげられる. それは, 同じ駒の中にピントが合っている部分と合っていない部分がある場合があることと, 露出時間の差により像質に差異が認められない例があることで推量される。

光路内に温度の ΔT 異なる気塊が l の長さ共存していたとすると, 像を乱さない限度の $1/4$ 波長以内の光学的長さの差に押えるためには $\Delta T \leq \frac{\lambda \cdot \rho_0 \cdot T}{4l \cdot \rho \cdot (n_0 - 1)}$ の関係を満たさねばならない. ρ と ρ_0 は地上と上空の大気の密度で n_0 は一気圧での屈折率である. $\lambda \sim 0.5 \mu\text{m}$, $\rho_0/\rho \sim 50$ とすると, $l = 200 \text{ mm}$ として $\Delta T \leq 30^\circ\text{C}$ である必要がある. 上空大気は -50°C で, 鏡面温度は $+20^\circ\text{C}$ 程度になるので $\Delta T \leq 70^\circ\text{C}$ となり, 気塊の大きさによっては望遠鏡内のシーイングが危険となりうる. このため我々は小扇風機をまわして空気の温度差従って密度差を少なくすることを 76 年に試みたのであるが, 得られた像が機械的ブレの



第1図 白斑と黒点 (No. 105)

ため扇風機の効果はわずかしら認めることができなかつた。今回も実験を試みたが、扇風機をまわした後半の観測には前述の事故によりフィルムが得られていないので、残念ながら扇風機の是非はまだ論ずることができない。但し、気温の測定は得られているのでその結果については文献 [4] を参照されたい。

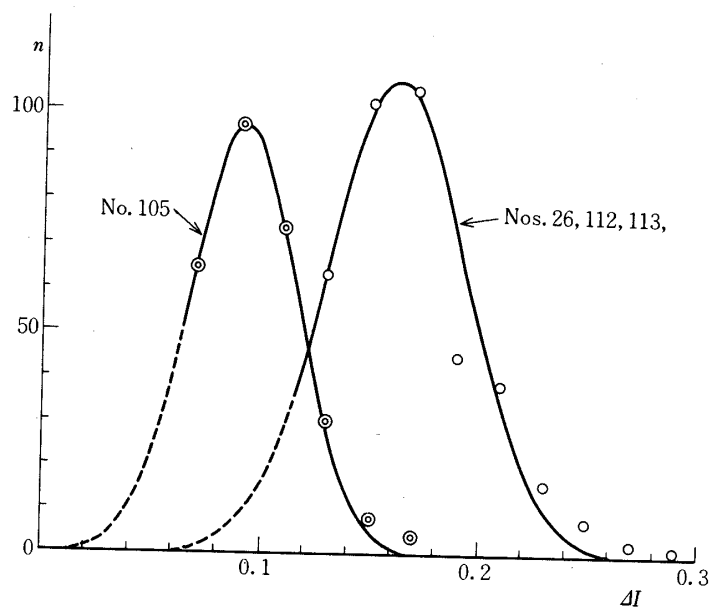
3. 白斑のモデル

得られた写真は活動領域を含み J 型の黒点 (27° N, 66° E) が存在している。測定は 30 μm × 50 μm のスリットで 4 個の駒につき 100'' × 250'' (No. 26), 150'' × 250'' (Nos. 112, 113) 及び 100'' × 300'' (No. 105) の領域を測定した。なお 1'' はフィルム上で 97 μm である。白斑を含まない領域の約 10 ラスターの平均をとりこれをバックグラウンドにして差引きアイソフォトを作製し、周囲より 13% 以上 (Nos. 26, 112, 113) あるいは 7% 以上 (No. 105) 明るい白斑の中心強度を太陽中心からの距離の関数として求めた (Nos. 26, 112, 113 による結果は文献 [2] の第 5 図参照)。なお静かな光球の強度の周辺変化は Pierce と Slaughter [6] の精密な光電観測と比べて ±1% 以内で一致している。

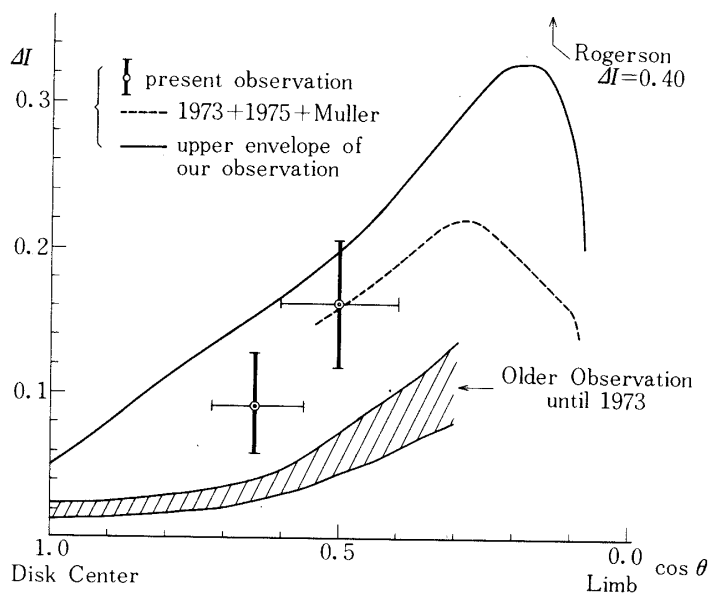
次に明るさの平均値を求めるため、Nos. 26, 112, 113 のデータを一群とし、No. 105 を他の一群として 2 グループに分け明るさに対して白斑の数を plot すると、第 2 図の如くガウス分布で近似できる。その結果はそれぞれ

$$\Delta I \equiv \frac{I^f - I^{ph}}{I^{ph}} = \begin{cases} 0.162 \pm 0.044 & (\cos \theta \text{ の平均} = 0.50) \\ 0.092 \pm 0.034 & (\cos \theta \text{ の平均} = 0.65) \end{cases}$$

となる。なお測定した白斑の数はそれぞれ 384 個と 648 個で、又 θ は太陽面上の鉛直線と視線方向のなす角である。±以下の数値は測定の誤差よりも、実際の白斑の明るさの分散であると考えてよい。暗い方の数を更に拾い上げれば、明るさ零を中心としたもう一つのガラス分布が現われるであろうが、これは通常の粒状斑を示すものである。両群で個々の白斑の



第2図 白斑の明るさ [$\Delta I \equiv (I_f - I_{ph}) / I_{ph}$] と白斑の個数の分布

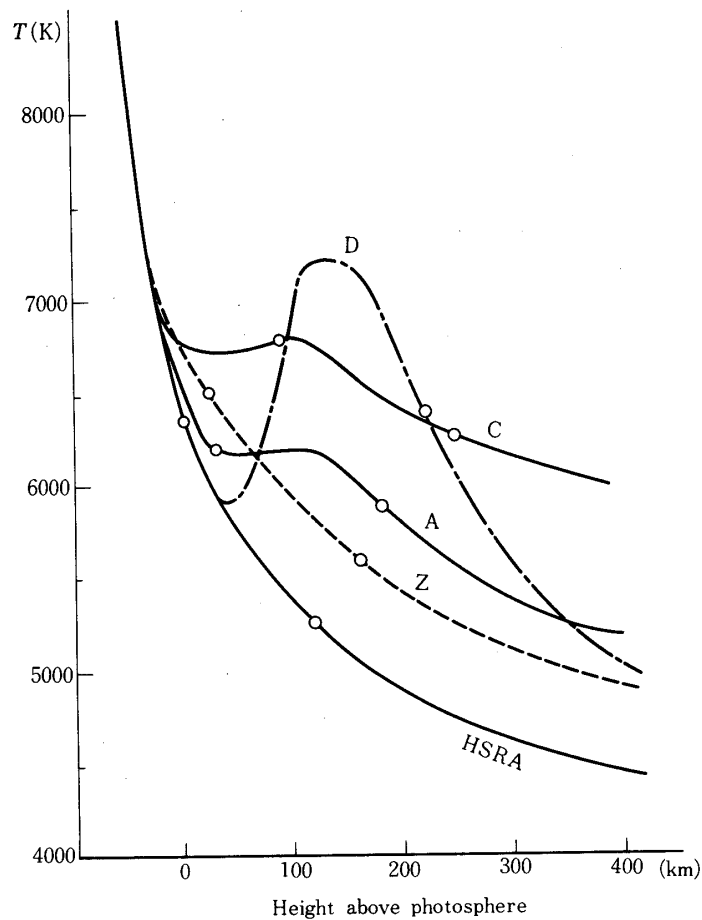


第3図 白斑の明るさの周辺変化

$\cos \theta$ の上限と下限はそれぞれ 0.38~0.60 及び 0.56~0.72 であった (第3図 “present observation” の横のバー).

第3図に $\cos \theta$ に対して明るさ ΔI をまとめて図示した. 点線が73年, 76年と Muller [7] の平均値で今回の値は良くつながる. 実線は上記観測の上限値に合うようなモデルで, 今回の $\overline{\cos \theta} = 0.65$ の値もこの領域は活動領域の端で本来はもう少し明るいと考えられるので, 実線(次に述べるモデルAとZから得られる明るさと同じ)はすべての観測値の上限と考えてよいであろう. 我々の観測では白斑の大きさは平均して2"程度であり, 真の値は1"より小さいと考えられるので, 我々は観測の upper envelope (実線)にむしろモデルを合わせているのである. 第3図で斜線内は他の人による地上観測の結果である [Schmahl(1967), Chapman(1970), Frazier(1971), Stellmacher & Wiehr(1973)], [8]を参照. 我々の今回の値は彼等の2~3倍にもなっており良い結果であるということができよう.

白斑がリムへ行く程明るくみえるのは, 上層 ($\tau \sim 0.2$) では下層 ($\tau \sim 1$) より光球との温度差が大きいと解釈され, また extreme limb で明るさがへるのは白斑の大きさが小さく光球に隠されるためと考えられる. 第4図で光球からの高さ(右側が高い層)に対して



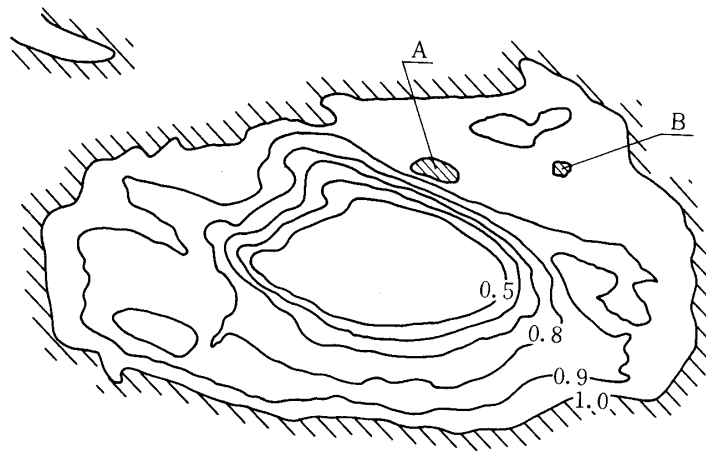
第4図 白斑の高さに対する温度分布. HSRA は静かな光球の温度分布.

標準の光球 (HSRA) と白斑 (A, C, D, Z) の温度分布を示した. 黒丸は 5300 A での光学的深さ $\tau=1$ の位置, 白丸は $\tau=0.1$ の位置を示す. モデル A では白斑の直径が 150 km の時, モデル Z では 600 km の場合ならば両者共観測値の upper envelope を良く再現する. モデル C と D は直径が 150 km の場合に, 真の明るさは観測の平均値の 5 倍であるとすると良く周辺変化を説明することができる. しかし, リム近くで 2 つ以上の白斑が重なり合って観測される可能性を考慮すると, モデル C と D は排除される. 詳しくは文献 [1] 参照.

結局白斑の大きさが 600 km 程度ならば白斑は光球より $\tau=0.1\sim 0.6$ で 400~550 K 高温であると結論される. 真の白斑の大きさはまだ不明であるが, Dunn の発見した filigree と同じものであるとすれば 150 km の大きさになる. また磁場が強いところが (1000~2000 gauss) 白斑であるという考えが一部の人たちによって言われているが, 我々の見解は磁場の強いところに白斑は生じるが, むしろ白斑の中の磁場は, 温度が高くなったことによるガス圧の差分だけすぐまわりの光球の磁場より小さいと考えるものである. なお Rogerson が 1961 年に気球観測より求めた 6 個の白斑の平均値が第 3 図に 0.40 としてあるが, これから Rogerson は白斑は 900 K 高いと言ったのである. 我々の観測はもっと光球の深いところで, かつ高さ方向にずっと extend して 500 K ないし 1000 K 温度が高いことを示している. また Rogerson の値は, [1] の第 5 図に示したように, 特に明るい白斑で平均的なものではないとも言えよう.

4. 黒点内部の異常に明るい点及びスカイラブとの比較

第 1 図に見られる黒点には, 太陽リム側の半暗部の暗部寄りにかなり明るい点が見られる. この isophoto 図 (No. 113 による) を第 5 図に示す. 図中の数値は光球を 1.0 としたときの半暗部の明るさである. 斜線をほどこした場所は光球の明るさと同じであって A, B 両点

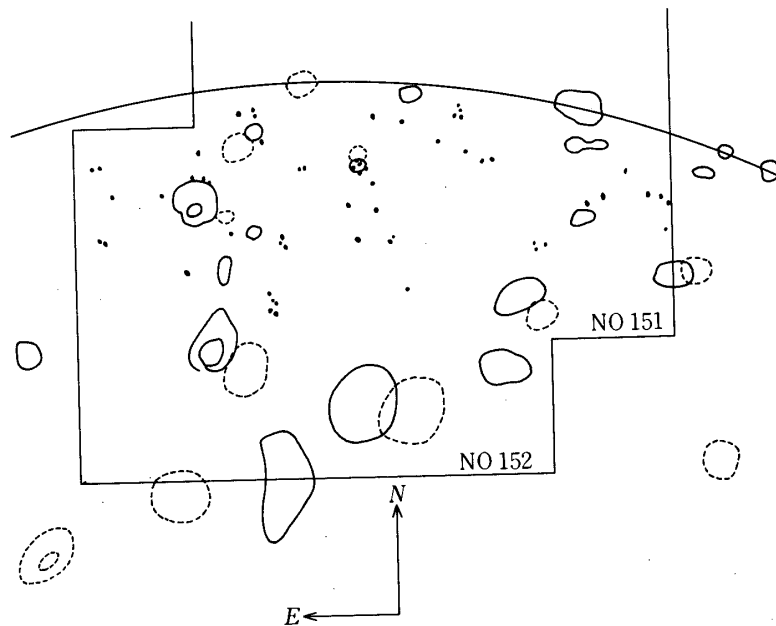


第 5 図 黒点 (27° N, 66° E) の Isophoto

共きわめて明るいことを示す。A点は $2'' \times 1''$ 、B点は $1'' \times 1''$ 程度である。元の film でも半暗部のフィラメントはブレのため見えていないので、これから判断するとA、B両点の真の明るさは光球よりずっと明るかったと見るべきであろう。このような例は Handbuch der Physik (1958)に記述がのっているが測定した報告はないようである。

最後に今回の観測ではないが1973年に得られた極域白斑についてスカイラブの軟X線の写真と比較した結果を報告する。1973年9月15日 $3^h 23^m$ U. T. (No. 151)と $3^h 24^m$ (No. 152)で撮影されたNorth Pole領域の極域白斑と、AS & Eの軟X線写真(同日 $0^h 30^m$ 及び $8^h 30^m$)の各々2葉の写真(第6図)を比べ白斑とX-ray bright point(XBP)が同じ場所で光っているか否かを調べた。57個の白斑(平均のsize $\cong 2''$)のうちXBP(size $5'' \sim 30''$)と場所的に一致するものは4個にすぎない。両写真のorientationに多少の不定さがあるので甘く見ても7個にしかならず、結局約10%の白斑がXBPと同じ場所で光っていることになる。一方XBPの平均寿命は約8時間[9]で、12~13個の同領域のXBPのうち半数は8時間おいた2枚の写真に写っている。また白斑の寿命は約4時間[1]であるが極域白斑の寿命もその程度であるとする、極域白斑とXBPとは異なる領域で光ると結論すべきであろう。一方1973年の活動領域([1]の第2及び第3図)には白斑が密集しているが、同じときの上記2枚の軟X線の写真には活動領域がX-rayで全体に強く光っているのである。このような状態がむしろ期待されたわけであるが、極域白斑は全く別の現象なのかも知れない。

5. 今後の問題



第6図 1973年9月15日の白斑(黒丸)と軟X線輝点(白丸及び点線の白丸)の分布

白斑については、最終的にはなぜ白斑は明るい（wave か、重力落下か、異常な対流胞か）が明らかにされねばならないが、現在の不十分な観測データによっても太陽の flux ($6 \times 10^{10} \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{s}$) の 10 ないし 20% の excess energy が白斑に運びこまれねばならず、理論的説明も容易なことではない。観測的には、まず真の白斑の大きさ・明るさを出すことが基本的なことからである。現在ではまだ 2～3 倍の怪しさはまぬがれず、白色光の解析のような古典的問題でも精密自然科学にはなっていない。我々は近く口径 30 cm の望遠鏡を飛揚させてもう一度同じ問題にとりくむと共に、広域幅のフィルターを用い光球上層部での白斑の写真撮影をする予定である。また、乗鞍のコロナグラフで得られた白斑の $\text{Ca}^+ \text{K}$ 線 wing のスペクトルの解析も進行中であり、彩層下部の白斑のモデルを求める予定である。

黒点については、やはり基礎的なデータとして、例えば半暗部のまだらのフィラメントの輝度などを得ることが必要であろう。また半暗部のフィラメントの模様より複雑な磁場の様子を推定することも面白い問題である。

1977 年秋の観測に際しては、宇宙研西村・広沢研究室及び宇宙研丹羽研究室の諸氏ならびに宇宙線研近藤教授のお世話になった、厚くお礼申上げる。AS & E 社の D.M. Rust 博士にはスカイラブの X 線写真を提供していただいた。

1978 年 5 月 27 日

参考文献

- [1] T. Hirayama: A Model of Solar Facula and Their Lifetime, Publ. Astron. Soc. Japan. **30**, No. 2 (1978) 印刷中
- [2] 平山, 守山, 清水, 浜名, 徳家, 今井, 熊谷, 石川: 太陽気球望遠鏡による白斑及び黒点観測 昭和 52 年度大気球シンポジウム, (1978) 222
- [3] 平山, 清水, 浜名, 徳家, 今井, 守山: 10 cm 太陽望遠鏡による太陽直接写真の撮影 (II) 東大宇宙研報告 **10-1** (B), (1974) 183
- [4] 吉田, 佐下橋, 丹羽: 気球搭載用太陽望遠鏡のファインダーとしてのテレビジョン方式 (III) 東大宇宙研報告, **14-3** (B), (1978)
- [5] 吉田, 佐下橋, 丹羽: 気球搭載用太陽望遠鏡のファインダーとしてのテレビジョン方式 (II) 東大宇宙研報告 **10-1** (B), (1974) 189
- [6] A. K. Pierce and C. D. Slaughter: Solar Limb Darkening, Solar Phys. **51**, 25 (1977)
- [7] R. Muller: A Model of Photospheric Faculae Deduced from White Light High Resolution Pictures, Solar Phys. **45**, 105 (1975)
- [8] G. Stellmacher and E. Wiehr: Observed Facula Line Profiles and Contrasts, Comparison with Models, Astron. and Astrophys. **29**, 13 (1973)
- [9] L. Golub et al: Solar X-ray Bright Points, Astrophys. J., **189**, L 93 (1974)