

30 cm 望遠鏡による太陽粒状斑の観測*

平山 淳**・浜名 茂男**・徳家 厚**
今井 英樹**・清水 一郎**・守山 史生**
吉田 安徳***・佐下橋市太郎†・丹羽 登††

(1982年6月2日受理)

The Observation of Solar Granulation with a 30 cm Balloon-Borne Telescope

By

Tadashi HIRAYAMA, Shigeo HAMANA,
Atsushi TOKUYA, Hideki IMAI,
Ichiro SHIMIZU, Fumio MORIYAMA,
Yasunori YOSHIDA, Ichitaro SAGEHASHI
and Noboru NIWA

Abstract: Direct photographs of the solar granulation near the limb were obtained with a 30 cm balloon-borne telescope. The observed position on the solar disk was at $\cos \theta = 0.7$, where θ is the angle between the observer and the normal to the solar surface and the wavelength used was 545 nm with a pass band of 40 nm. Total half-width (FWHM) of the autocorrelation function of the contrast of the granulation was found to be 780 km and 660 km in radial and tangential direction to the solar limb, respectively. Although the latter value agrees with the older determination at the disk center, the distance, 2 000 km, to the minimum value of the auto-correlation function was much larger than those obtained by Leighton at the disk center. Two dimensional power spectrum was obtained and after corrections due to noise spectrum and finite resolution of the optical system, the root-

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 東京大学東京天文台

*** 宇宙開発事業団

† 東京大学工学部境界領域研究施設

†† 千葉工業大学電気工学科

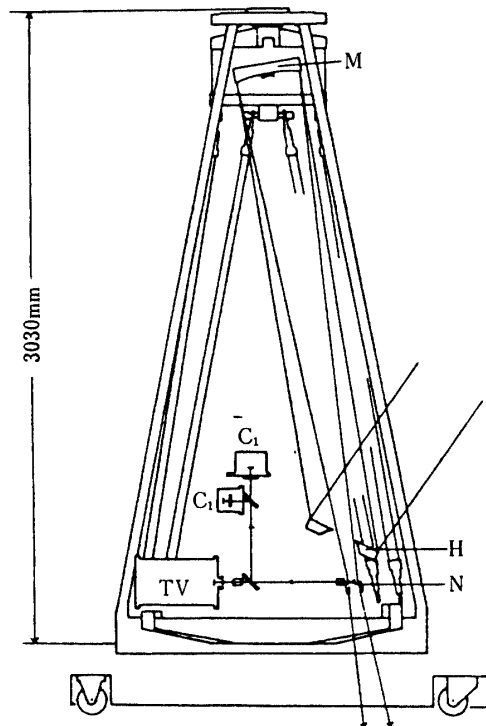
mean-square brightness fluctuation of the granulation was found to be 7.0-7.9%. It is to be noted that the modulation transfer function of the optical system was determined at the partial eclipse of July, 30, 1981. Two dimensional power spectrum per unit frequency area (arcsec^2) was found to be proportional to $\exp(-1.9f)$ where f is the frequency (cycles/arcsec).

Further the autocorrelation function as determined from the earlier balloon flight with the use of a 10 cm telescope showed a positive maximum around 24~45 Mm, which roughly coincides with the size of the supergranulation.

1. 序

地上の空気の乱れをさけて、太陽の微細構造の写真撮影を成層圏よりバルーン搭載望遠鏡によって行うことを、1970年以來口径10cm望遠鏡で試みてきた(文献[1],[2],[3])。今回は口径30cmの望遠鏡による観測を初めて実施したのでその結果を報告する。

目的は、白斑・黒点・粒状斑・異状粒状斑の微細構造を調べることにある。私共はこの方面の研究の一環として、光球(5450Å)と光球最上層(Gバンド)の二層における微細構造写真を得ることを試みる予定であるが、今回は最初でもあり、重量制限もあることなので、光球の写真のみ撮影することにした。



第1図 30 cm 太陽望遠鏡

2. 装置の概要及び観測経過

装置の大略を第1図に示す(文献[4]). 主光学系は, 二軸回転機構を備えた 35 cm ϕ 平面鏡によって導かれた光が主鏡である 30 cm ϕ (F/8) 放物面鏡により結像され, これをレンズにより 20 倍に拡大して 35 ミリモータードライブカメラで直接像を撮影するようになっている. 中心波長 5450 Å, バンド幅約 400 Å である. 同時に第一焦点での像を 5 倍に拡大して狭帯域テレビジョンカメラに受像し, リアルタイムで黒点等の検出, フォーカスの良否の判別を行う(文献[5]). 主光学系とは別にガイド望遠鏡が付属しており, 結像部に装着した検出器(4枚一組の太陽電池)からの信号により 35 cm 平面鏡を駆動し, ポインティングを行う. 第1表に主要なデータを記す.

第1表 30 cm 望遠鏡及び観測データ

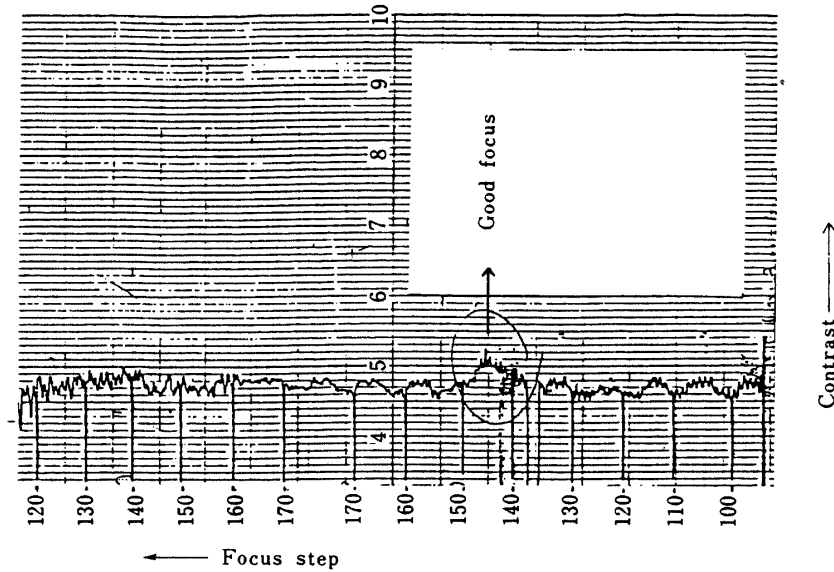
望遠鏡等	主鏡: 30 cm 放物面鏡 (F/8), ヘリオスタット鏡: 35 cm ϕ 平面鏡 2 軸駆動可能, ニュートン鏡: 5 mm ϕ 真鍮棒に厚さ 1.2 mm の熔融水晶製平面鏡貼付け, 拡大レンズ: 倍率 20 倍, 画面: 36 \times 24 mm ² =160'' \times 100''(1''=230 μ m), 観測波長: 545 nm (幅 40 nm, HOYA G545), ニコンモータードライブ 750, シャッター速度: 1 ms, 観測フィルム: 150 呎 KODAK-SO2415, 現像: D19, 20 \sim 24°C, 4 分(自動現像機, 9月16日), 焦点可動, ガイド望遠鏡付.
T V	気球搭載用低速走査カメラ(浜松 TV), 映像帯域幅: 0 \sim 100 kHz, 走査線数: 580 本, 繰返し周期: 2.09 秒, 霧出時間: 1-60 ms(自動), 送信出力: 1 W (914 MHz FM/FM), 外部トリガーによる撮影が可能, フィルター: : G545+HA50+ND13+ND15, 画面 16 mm \times 16 mm.
重量	PI: 373.3 kg, バラスト: 40.0 kg, 気球(3万 m ³) + 物傘 + 紐類: 23.5 kg, 総計: 560.1 kg.
放球	1981.9.5. 8 ^h 42 ^m JST, 方向規正 on: 10 ^h 30 ^m , 切り離し: 11 ^h 33 ^m , 海上回収: 21 ^h 30 ^m 黒崎東方 100 km.

放球は, 1981年9月5日に行われた(3 \times 10⁴ m³ 気球). 残念なことに気球のガス洩れが起り, 予定高度の 28 km に達した後直ちに下降が始まり, 観測開始後 1 時間を経て, 高度 20 km になり, 切離しが行われた. 同日夜半黒崎東方 100 km の海上で装置は無事回収された.

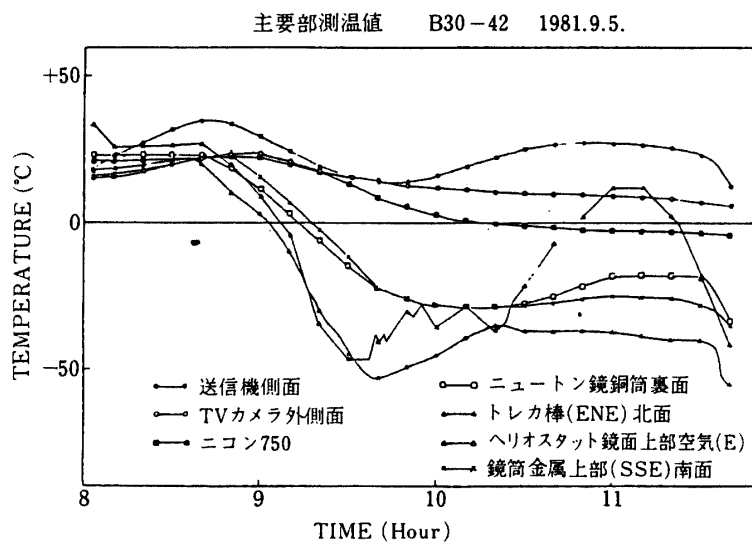
観測中は, 下降しつつあることとバラストを数回にわたり落したことのために, よりもどしによるポインティングの安定度が悪く $\pm 1^\circ$, 大きいときは $\pm 2^\circ$ 程度であった. 撮影された画像の動き ($\pm 40''$ 又はそれ以上) から推定すると, 完全なレベルフライト ($\pm 0.1^\circ$ のよりもどしポインティング) であったならば, 10 秒角未満のガイドができていたであろうと考えられる. 白斑・黒点を含むリム附近の活動領域を観測する予定であったが, 全撮影駒数(80 駒)の中には残念ながら, その領域は入ってはずれ, 恐らく 1 分角程度はずれた静

かな領域を観測していたものと思われる。

我々の望遠鏡の理論的分解能は $0.39''$ であり、それに近い画像を得るためには、 $1/4\lambda$ という条件を課したレーリーリミット $2F^2\lambda=70\mu\text{m}$ (第一焦点での値) 内に焦点を合わせてもまだ不十分なので、 $40\mu\text{m}$ (場合により $20\mu\text{m}$) のステップで拡大レンズを移動させて撮影を行った。合焦の良否の検出には、従来の二方法 (TV 画面の visual inspection, 太陽リムのシャープさを TV の走査線の微分で検出) に加えて、太陽粒状斑の画像のコントラストの良否を一次元レチコン素子 (ナショナル MEL 64 A, 露出時間 1 ms) を用いて行うことを今回は試みた。実際には偏差の絶対値の和が各 focus 位置に対してテレメーター出力



第2図 粒状斑のコントラスト測定による焦点決定



第3図 各部温度変化

に出る。第2図が結果で、横軸は拡大レンズの位置(f)縦軸はコントラストである。 $f=145$ 附近でコントラストが最大になっているのが分る。これによりその周辺の位置で撮影したのであるが、64素子($50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}\times 64$)という短い素子を使用したため、精度はまだ不十分で次回は更に大きな素子数をもったものに変える予定である。

また、焦点位置は時間と共に温度変化の影響を受けて変化するが、焦点検出には時間がかかるので、次回以降は今回の各部温度変化を参照して、あまり頻繁に焦点検出を行わないで焦点移動を実行する予定であった。しかるに、気球が下降しつつあった為に白金センサによって測定した各部温度は第3図に示すように水平飛行とは大いに異なるものとなり、次回の参考に供するわけにはいなくなった。例えば、方向規正を働かせ始めた10h30mより後は、「鏡筒金属上部南面」の温度が更に上昇するはずだったのである(文献[3],[6]参照)。

3. 観測結果

撮影総駒数80(予定は1000駒)のうち、focusの合っている駒数は数枚に止まった。写真1に例を示す。これは太陽粒状斑の太陽縁近く(縁より半径の $\sim 30\%$ 内側)の写真である。コントラストが悪く見えるのは現象不足の為である。画質はソ連の50cm気球望遠鏡・西独の30cm気球望遠鏡によるものとほぼ同等で、多角形状に見える太陽像中心部の粒状斑像と異なり、多少雲がかかったようになっているのはいずれも同じである。これが連続的に変化してextreme limbでは粒状斑が見えなくなるのであろう。2駒を $40\mu\text{m}\times 40\mu\text{m}$ のslit apertureで、digital microphotometerにより全面traceし、強度に直し、各々24ケの $22''\times 22''$ の小部分に区分けして大きな強度変化(limb darkeningと乳剤・現像の不均一)を2次式で差引いた後に得られた強度の偏差($\sqrt{(\Delta I)^2} = r.m.s.$)の全平均は、

$$\left[r.m.s. (\%) \right]_{obs} = \begin{cases} 3.43 \pm 0.11 & (\text{No. 67}) \\ 2.99 \pm 0.20 & (\text{No. 72}) \end{cases} \quad \left(\begin{array}{l} \text{リムより } 30\% \text{ 内側,} \\ \lambda 545 \text{ nm (幅 } 40 \text{ nm)} \end{array} \right)$$

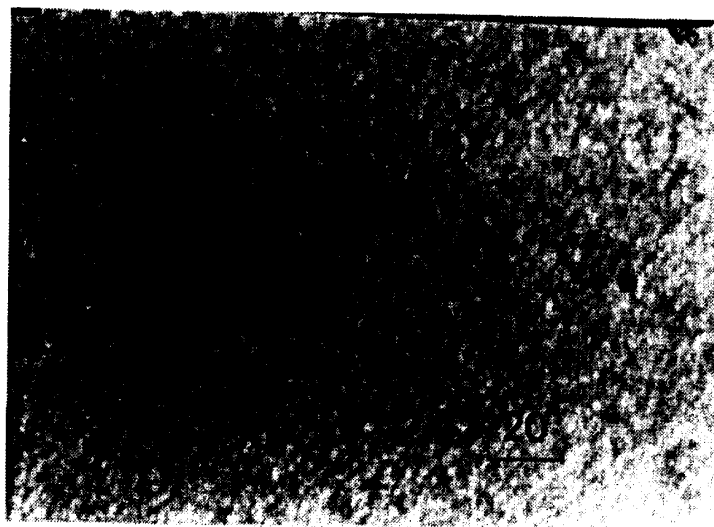
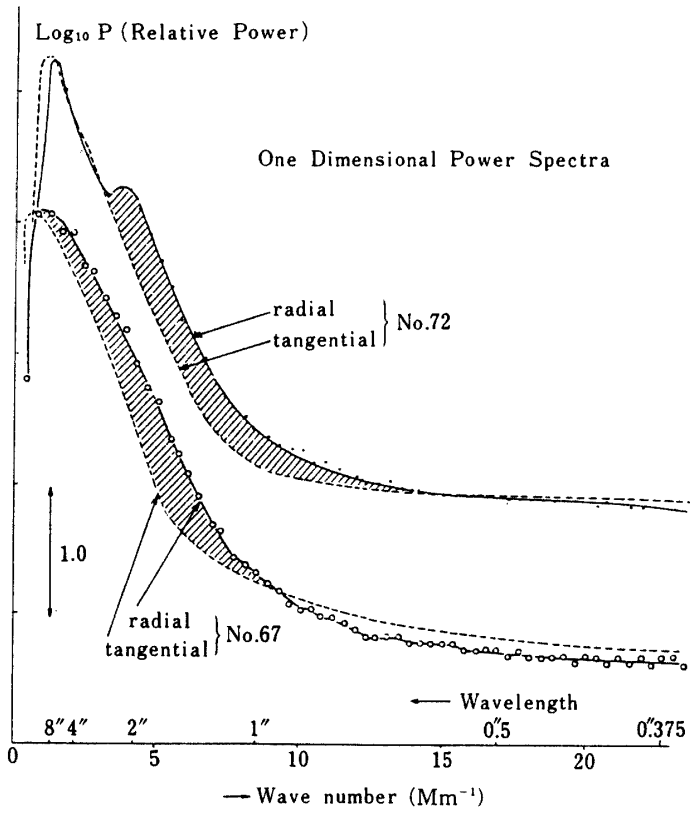
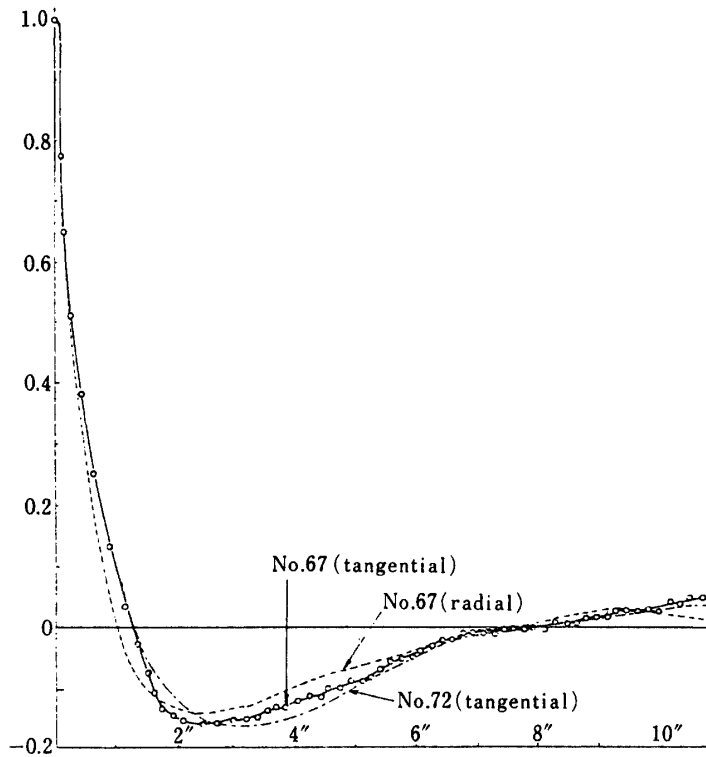


写真1 太陽リム附近の粒状斑



第4図 太陽縁附近の粒状斑の Power Spectrum

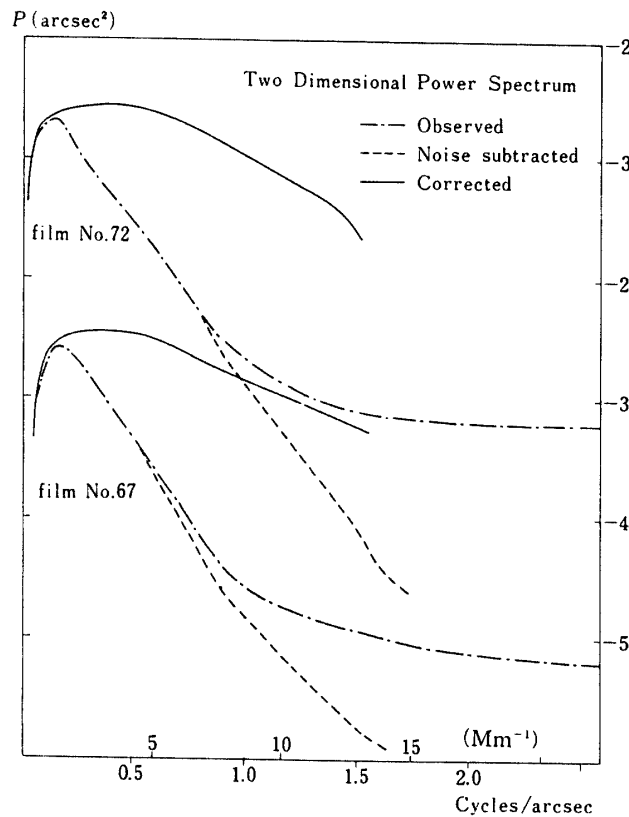


第5図 自己相関関数

となり、文献 [7] の同じ波長域で同じリム位置の $\approx 3.3\%$ と同じ程度となった。

上記 $22'' \times 22'' = 128 \times 128$ の小画像をそれぞれ Fourier 変換して全小画像で平均したときの生の 1 次元 power spectrum を第 4 図に示す。太陽面上 radial 方向に foreshortening の影響で power が増していることが看取される (斜線領域)。また処理しない前の自己相関関数を取りその全半値幅をとると、tangential 方向は $780 \text{ km} = 1''.08$ で、radial 方向は 660 km となる (第 5 図)。これは、プリンストンの disk center での値 $740 \sim 840 \text{ km}$ や、レイトンの 780 km という値と良く一致する。また、相関関数の極小値が平均 2000 km (相関係数値 -0.17) で、極大値が 7000 km 又はそれ以上と求まる。レイトンは極小が 1100 km 、極大が 2000 km としており大きくく違っている。

次に、観測された粒状斑の power spectrum から、真の power spectrum を得ることを行う。手続きは、まず noise spectrum を差引くことである。noise spectrum として一様に曝写されたフィルムの power spectrum をとる予定であったが、2 枚の曝写画像から得られた noise spectrum の形が相互にかなり異なることが判明した。従って、本番フィルムの power spectrum の高周波成分 ($22''$ の小画像のうち、波数 13.7 Mm^{-1} 以上) を直線近似で表わして、低周波成分にもそれが適用できるとした (第 6 図の observed spectrum 参照)。波数 $13.7 \text{ Mm}^{-1} (= 2\pi/\lambda)$ という数値は、この値の近くなれば、曝写したフィルムの noise spectrum に近い形になるという程度のことで、最終的に得られる power spectrum は、低周波成分はよいが、高周波成分は大きくこの数値に依存する。



第 6 図 太陽縁附近粒状斑の二次元パワースペクトルの修正

noise の差引き方については文献 [7] に詳しく述べたように、結局最小自乗平均フィルターの理論から導かれる $|C|^2 = |M|^2 \cdot |O|^2 / \{|M|^2 + |N|^2 / |C|^2\}^2$ (文献 [8]) ではなく、 $|C|^2 = \{|O|^2 - |N|^2\} / |M|^2$ に依ることにした。ここで $|O|^2$, $|C|^2$, $|N|^2$ はそれぞれ observed, corrected 及び noise power spectrum で、 M は modulation transfer function (MTF) である。この MTF は点像分布関数の 2 次元フーリエ逆変換を行ったものである。我々の場合大量のデータの平均のみを扱っているため、後者の式でも精度があまり落ちないと考えている。

第 6 図に 2 駒のフィルムにつき 2 次元の power spectrum $P(k_r)$

$$P(k_r) = \int_0^{2\pi} P(k_r, \varphi) k_r d\varphi / 2\pi k_r \quad (1)$$

を示す (各々 $22'' \times 22''$ の小画像から得られた P の 24 個の平均である)。ここで k_r は極座標の波数で $k_r^2 = k_x^2 + k_y^2$, 又,

$$P(k_x, k_y) = \left| \iint_{-\infty}^{\infty} \Delta I(x, y) \exp[-i(k_x \cdot x + k_y \cdot y)] dx dy \right|^2 \quad (2)$$

$\Delta I(x, y)$ は相対的な強度の fluctuation である。

前述の如く、補正した 2 次元の power spectrum として、

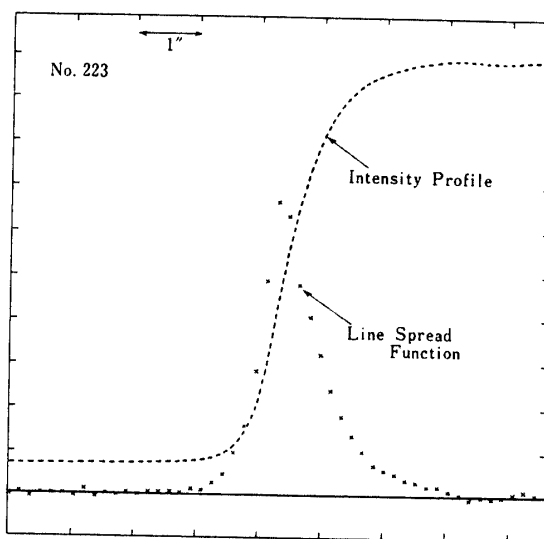
$$P_{\text{corr.}} = \{P_{\text{obs.}} - |N|^2\} \frac{1}{|M|^2} \quad (3)$$

を採用するのであるが、 $|M|^2$ として何をとりかはるは大いに問題となる。文献 [7] では、 $|M|^2$ として各種の期待値をとって例を示した。その際採用したのは、光学系の理論分解能で決まる Airy disk, 幾何光学的焦点はずれ及び seeing としてガウス分布の 3 つの積であった。ここでは、部分日食観測による実験値の MTF を用いる。

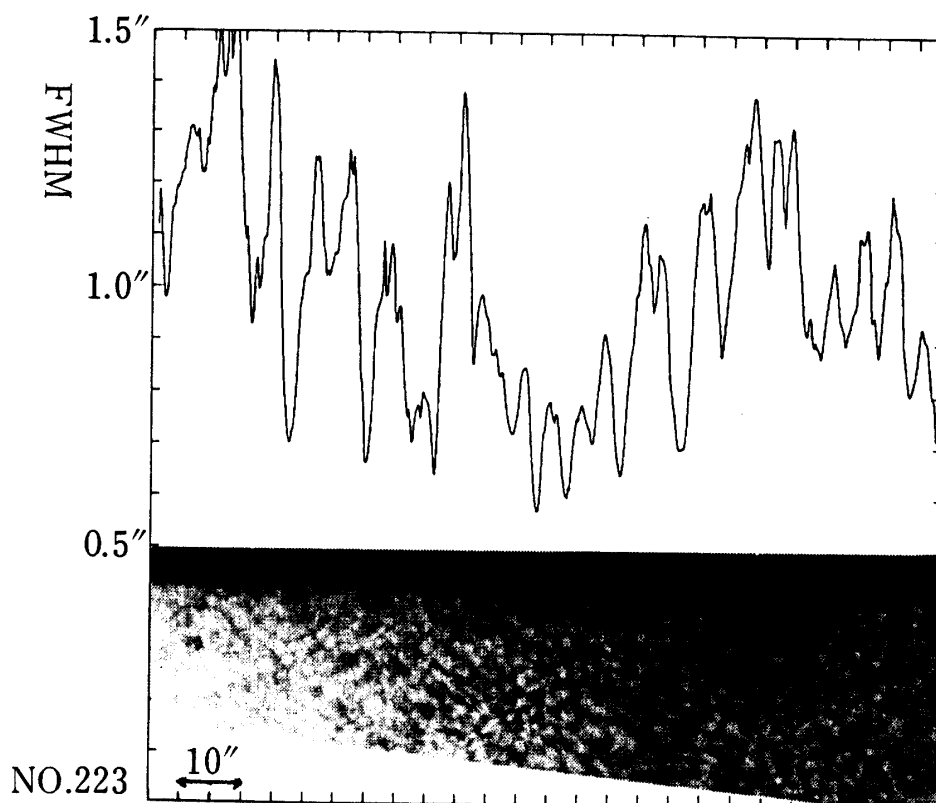
1981 年 7 月 30 日 (放球 1 ヶ月前) に部分日食が東京でみられ、我々は気球望遠鏡で地上観測を行なった。第 8 図にその写真を示す。上部の黒い部分が月で、月の山と谷の凹凸が見られる。粒状斑は良く撮れているが、これは disk center のそれである。月の縁の強度分布を各場所で測定し ($I(\Delta y)$), その微分である line spread function (第 7 図) を求め、その全半値幅を写真の各場所に対して plot したものが第 8 図上半分のグラフである。3 枚のフィルム (Nos. 217, 223, 224) に対して得られた FWHM の全平均は $0.91''$ であり、2 つのガウス分布の和として表わすことができる。或は、 $|\Delta y| \leq 0.2''$ のコアを別とすると、 $|dI/d(\Delta y)| \sim \exp[-a|\Delta y|]$ ($a > 0$) でもよく表現できる。FWHM の小さい場所は $0.5'' \sim 0.7''$ 程度であり、その平均の line spread function の Fourier 変換を MTF として採用する。即ち

$$|M(k)| = \min. \left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dI}{d(\Delta y)} \exp[-i\Delta y \cdot k] d(\Delta y) \right| \quad (4)$$

ここで k は波数 ($2\pi/\lambda$, λ は波長) で、isotropy を仮定する ($k_y = k_r \equiv k$)。採用した line



第7図 7月30日の部分日食における月の縁のプロ
フィルとその微分値 (第8図の全平均値)



第8図 1982年7月30日の部分日食における太陽粒状斑(黒い部分が月の縁).
上図は写真横の各場所における line spread function の全半値幅

spread function (film No. 217 の 19 本の raster の平均) の FWHM は $0.69''$ である。光学的理論分解能の FWHM は $0.387''$ であるから、このときの seeing の FWHM (焦点はずれ、測定時の有限スリットの影響を含む) は $0.57 = \sqrt{0.69^2 - 0.387^2}$ 秒角程度である。また、line spread function を wing を除いて 1 つのガウス分布で表わし $\exp[-(\Delta y)^2/2\sigma^2]$ としたとき、 $\sigma = 0.29'' (= 0.69/2\sqrt{2\ln 2})$ となる。これは Schmidt 等の同じく部分日食での値 $\sigma \leq 0.4$ よりやや小さい (文献 [9])。

この MTF を用いて補正した 2 次元の power spectrum を第 6 図に示した。なお (4) 式の $|M(k)|$ を第 9 図中の小図に示す。P の単位は $(\text{arcsec})^2$ であり、周波数を $f(\text{cycle}/\text{arcsec}) = 1/\lambda$ とすると、粒状斑の強度の fluctuation は

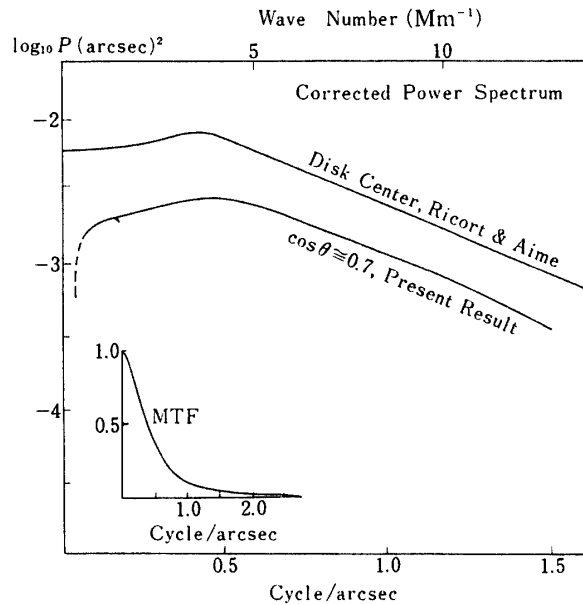
$$[\text{r. m. s.}]^2 = 2\pi \int_0^\infty P(f) f df \quad (5)$$

と表わせる (文献 [10], 但文献 [10] の (14) 式は f が誤植のため抜けている)。

第 9 図に 2 つの駒の平均の P 及び disk center を観測した Ricort と Aime の値を示す (文献 [10])。

$$[\text{r. m. s.}]_{\text{corr}} = \begin{cases} 7.9\% \text{ (No. 67)} & (\text{リムより } 30\% \text{ 内側}) \\ 7.0\% \text{ (No. 72)} & (\lambda 545 \text{ nm, 幅 } 40 \text{ nm}) \end{cases}$$

が補正した intensity fluctuation であり、文献 [9] の同じリムからの同じ波長での結果 6% と良く一致している。実際は (5) の積分を $f \leq 1.59$ ($k \leq 13.7 \text{ Mm}^{-1}$) で実行しているのであるが、仮に第 9 図で $P(f)$ が文献 [10] の $e^{-1.88f}$ で表わせるとすると、 $f \rightarrow \infty$ まで積分しても上記の値はそれぞれ 8.1%, 7.2% で、あまり変わらない。



第 9 図 修正した太陽粒状斑のパワースペクトルと採用した MTF

採用した MTF が、どの程度実際の気球観測に近いかを評価するのはむずかしい。地上では第 8 図の写真のように、場所により seeing が異なるのに対し、成層圏の観測では、image degradation はほぼ一様である（写真 1）から、地上で求めた MTF を成層圏用に用いるのは危険であるが、現在のところ止むを得ない。MTF は $\sigma=0.29$ に相当するが、理論分解能の σ を差引けば $\sigma_{\text{seeing}}=0.2$ となる。文献 [7] では我々は $\sigma_{\text{seeing}} \leq 0.1$ と推定したのだが、これは高周波でのノイズの除去が不十分だった為で、 $\sigma_{\text{seeing}} \cong 0.2$ に実際は近いと思われる。もし $\sigma_{\text{seeing}} \geq 0.4$ であれば高い周波数程 power が増すことになり、これは reject できるのみならず、disk center の power spectrum より大きくなるから、今回用いた $\sigma_{\text{seeing}} \cong 0.2$ （実際は(4)式で数値的に扱った）は、ある程度 reasonable と思ってよいだろう。

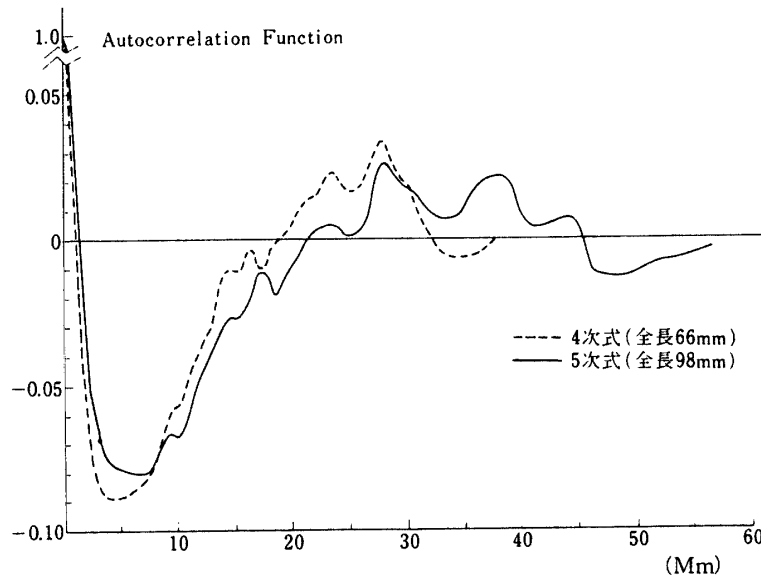
4. 大城の光球面強度の自己相関関数

レイトンは 1962 年に直径 3 万 km の水平方向の流れのパターンを発見し、これを超粒状斑と名付けた。その後フレイジャーは連続光で観測すると超粒状斑の境界線は約 0.3% 明るいことを見出しているが、大きさを 30 Mm と仮定して明るいところを合わせる方法をとったのである。第 4 節の問題は、連続光による太陽の直接像から自己相関関数より超粒状斑が認められるか否か、確認されるとすればどの程度の大きさかという点にある。

そのためには、フィルム濃度の一様性が問題となり、太陽像はあまり大きくない方が都合がよい。1973 年の我々の気球観測はこの目的に適っているので、今回再び昔のフィルムの測定を行った。用いた望遠鏡は口径 10 cm、太陽像の直径は 163 mm、波長域は 540 nm（全半値幅約 40 nm）であった（文献 [3]）。観測に使用した 35 mm フィルム（フジミニコピー）のうち光球中心を撮影した 3 駒（Nos. 154, 155, 157）を $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ のスリットで、 $23.04 \times 15.36 \text{ mm}^2$ の面積にわたり測定し、直接に自己相関関数を求めた（フーリエ変換を用いたのではない）。結果を第 10 図に示す。きわめてわずかな相関（+0.02~+0.03）ではあるが、約 28 Mm のところに正の相関を示すピークがみられる。更に 23 Mm, 38 Mm, 45 Mm にもピークがみられる。

図で実線は上記 23.04 mm の長さを半分にし（全長 98 Mm）、その各々に対して各ラスタごとに相関を求めたものの全平均である。平均した数は 3 駒のフィルムを合せて 3072 ラスターである。乳剤の不均一性・現像むらを取除くため 11.52 mm（=98 Mm）の長さに対して 5 次式を用いた。同じことを 3 次式で実行すると、第 9 図で 45 Mm 以上の相関は様相が大きく変わるが、45 Mm 未満の長さに対する相関は、係数の値は変るものの、極大値の位置は変わらないことが分った。3 次式を用いた場合 28 Mm のピークは殆んど 0 に近くまで落ちこむが、局所的にピークであることには変りない。

第 10 図で点線は、上記 23.04 mm の長さを 3 分割にし、各々に対して相関をとったもので、28 Mm のピークが良く現われるような切り方をしたものである（4608 本の平均）。これは 4 次式で大きなうねりを差引いてあり、同様に 2 次式で差引くと、32 Mm 以上の様子は大きく変わるが、28 Mm のピークはやはり消えないで残っている。また、この 2 つの結果をみると扱い方が異なるにもかかわらず、小さなピークの位置が一致している（10 Mm, 13



第10図 大領域の自己相関

Mm, 少しずれているが16~18 Mm). これは乳剤の非一様性・シャッターむら等が除去できていることを示すと考えてよいだろう。

これまでのデータは全てフィルムの一定方向(X)に相関をとった場合であるが、Y方向にとっても同様の結果が出ている。

ここでの結論は、我々の見出した28 Mmの自己相関関数のピークは、恐らく超粒状斑に対応するだろうということである。新しい問題として23 Mm等の他のピークが独立のものであるのか、あるいは、30 Mmを中心とした超粒状斑の広いピークのつながりにすぎないのかという点が提起されよう。

5. 結 語

1981年夏の気球観測は、気球の不具合のため観測時間が短かく、良好な写真が2枚しかなかったが、太陽リム近くでの粒状斑強度(λ 545 nm)のコントラスト及び power spectrum が得られた。

- a) 補正した粒状斑のコントラストは7~8%である。($\cos \theta \cong 0.7$, θ は太陽面の normal と視線方向のなす角)。
- b) 2次元 power spectrum の周波数依存性は disk center のそれと良く似ている ($\sim e^{-1.9f}$)。

1973年の口径10 cm望遠鏡による波長540 nm附近の連続光写真における光球中心部の自己相関関数から、約2.8万 kmの距離に正の相関がみつけられた。これは恐らく超粒状斑を示すものと思われる。直接写真から初めて求めたと考えてよいだろう。2.8万 km以外にも正の相関を示すピークが見付かっており、これらが何を示すかは今後の課題である。

1981年夏の観測に際しては宇宙研西村・広沢研究室の諸氏にお世話になった。厚くお礼

申上げる。

参考文献

- [1] 平山, 清水, 浜名, 徳家, 今井, 守山: 東大宇宙研報告 10-1 (B), 1974, 183 及び同 14-3 (B), 965, 1978.
- [2] 吉田, 佐下橋, 丹羽: 東大宇宙研報告 10-1 (B), 189, 1974 及び同 14-3 (B), 973, 1978.
- [3] T. Hirayama: Publ. Astron. Soc. Japan 30, 337, 1978 及び T. Hirayama and F. Moriyama: Solar Phys. 63, 251, 1979.
- [4] 平山, 清水, 浜名, 徳家, 今井, 守山: 大気球シンポジウム, 283, 昭和 53 年度.
- [5] 吉田, 佐下橋, 丹羽: 東大宇宙研報告 15-1 (A), 55, 1979.
- [6] 佐下橋, 吉田, 丹羽: テレビジョン 31, 378, 1977.
- [7] 平山, 浜名, 徳家, 今井, 石川, 斉藤, 清水, 守山, 吉田, 佐下橋, 丹羽: 大気球シンポジウム, 259, 昭和 56 年度.
- [8] 一岡: 『光学情報処理』(辻内・村田編) 朝倉書店, p. 217, 昭和 49 年.
- [9] Schmidt, Deubner, Mattig, Mehlretter: Astron. Astrophys. 75, 223, 1979.
- [10] Ricort, Aime: Astron. Astrophys. 76, 324, 1979.