

# 太陽シンチレーション・モニター(SHABAR)の応用計画について

○浜屋ひかり、宮良碧、日比野由美、小野寺幸子(明星大学)、  
山本大二郎、野澤恵(茨城大学)、萩野正興、篠田一也(国立天文台)、  
仲谷善一、木村剛一、一本潔(京都大学)

## 概要

明星大学日野キャンパスには口径 40 cmの望遠鏡を備えた天文台がある。この天文台は地表面からの大気揺らぎの影響を少なくするため、5階建てのビルの屋上に設置されている。我々はSHABARを用いてこの天文台でのシーイングを季節変化も含めて調査している。一方で、SHABARの観測は上昇気流の影響を受ける。この影響を京都大学飛騨天文台SMART望遠鏡にSHABARを設置し検証する計画である。

## 1. はじめに

光学地上望遠鏡が大型化する近年において大気擾乱の影響が少ないサイトに建設することが高精度の観測を行うためには必要不可欠となっている。太陽の地上観測においては米国ハワイ州マウイ島ハレアカラ山頂に建設が進むDaniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST)の4 m望遠鏡のサイト調査が注目される[1]。この調査には太陽用に開発されたシーイング・モニターS-DIMM (Solar Differential Image Motion Monitor) とシンチレーション・モニターSHABAR(Shadow Band Ranger)[2]が用いられ、ビッグベアとラ・パルマでの結果と比較して現在の場所に決定した経緯がある。

本研究の目的は、茨城大学で山本[3]が開発したSHABARの応用例として、明星大学天文台が建てられている場所と望遠鏡の口径が適正かを調査することである。東京都日野市にある明星大学日野キャンパスには口径 40 cmのリッチクレチアン型反射望遠鏡を備えた天文台がある。この天文台は地表面からのシーイングの影響を少なくするため、5階建てのビルの屋上に設置されている。SHABARを用いて明星大学上空の大気擾乱の大きさを表すフリード・パラメータ[2]を求め、評価の基準とする。一般的にシーイングは地上からの高さ、気温、風などが関係しているため、季節による変化もモニターする計画である。

一方で、山本らは地上で測定するSHABAR観測は上昇気流の影響を大きく受けることを報告した。本研究ではこの上昇気流の効果を検証するため、地上 16m の棟の上に設置された京都大学飛騨天文台SMART望遠鏡の鏡筒先端にSHABARを設置することを提案する。

## 2. SHABAR

本研究で使用するSHABARとは、任意の間隔に設置された複数台の光センサー(フォトダイオード)で太陽の光量を数千 Hz で測定を行う装置である。その明るさの揺らぎ(シンチレーション)からシーイング(大気擾乱による像位置の揺らぎ)を検出する手法で、大気擾乱を高度の関数として推定することが可能である。これらの解析プログラムは今後のデータの整合性のため、茨城大学山本の研究で開発

されたものを用いる。まず、検出されたシンチレーションから、大気の流れ具合を表す屈折率構造関数  $c_n^2(h)$  を求める。2 つのセンサーを用いた明るさ揺らぎの共分散は、地表面からの高度に依存する屈折率構造関数を用いて次式で与えられる。

$$B_1(r) = 0.38 \int_0^\infty C_n^2(h) K(h, r) dh$$

ここで、 $B_1(r)$  はセンサー間距離  $r$  の 2 つのセンサーを用いた場合の共分散の観測値であり、 $K(h, r)$  は高度  $h$  とセンサー間距離  $r$  に依存した共分散の理論値である。この理論値と観測値を比較して、屈折率構造関数を求める。この屈折率構造関数を用いると大気のシーイング・サイズを表すフリード・パラメータ ( $r_0$ ) を導出できる。このフリード・パラメータは、シーイングのサイズを口径  $D$  [m] の望遠鏡の回折限界として表し、観測波長を  $\lambda$ 、天頂からの離角を  $\xi$  として以下の式で計算することができる。

$$r_0(h) = 0.18466 \cdot \lambda^{-\frac{6}{5}} [(\sec \xi) \int_h^\infty dh' C_n^2(h')]^{-\frac{3}{5}}$$

### 3. SHABAR での観測

SHABAR の観測は明星大学 30 号館屋上に設置されている天文台の前にある屋外スペースで行った (図 1)。この場所は約 2m の外壁で囲まれているため日照時間は季節変化し、一年を通じて観測できる時間帯は 10 時から 16 時である。この観測では Vixen 社製の赤道儀を太陽追尾装置として使用する。



図 1 : SHABAR 観測

本稿では 2017 年 10 月 26 日 12:30-15:30(JST) の観測を報告する。この時の平均の気温は 20.2°C であり、風向は北東、風速 2m/s であった。図 2 は観測日の太陽光量 (下) とシンチレーション (上) の時間変化を表している。このシンチレーションでは値が小さいときほど大気擾乱 (シーイング) の影響が少なく、良い観測条件であることを表している。この光量は雲の通過などで大きく変化するため、光量が低くなっているようなものは解析からは排除して行う。

### 4. 結果

図 3 の左図は屈折率構造関数 ( $c_n^2(h)$ ) と高度の関係を表す。この図から地表付近では屈折率構造関数の値が大きい。これは、大気の流れが大きいことを表している。しかし、10m 以上になると値は小さくなり、大気の流れも少なくなり安定することを表している。

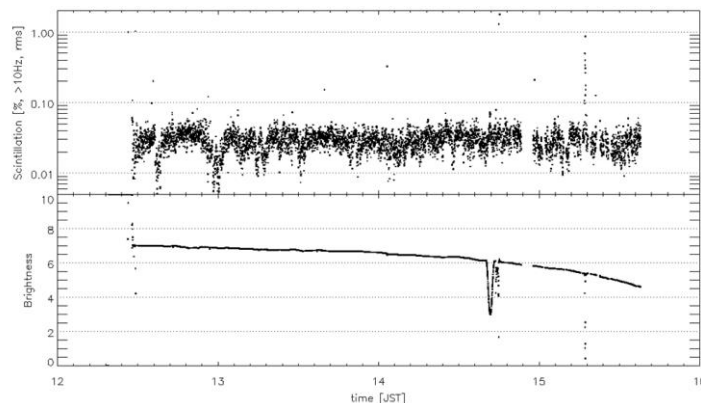


図 2 : 2017 年 10 月 26 日 12:30-15:30(JST) の太陽光量 (下) とシンチレーション (上) の時間変化

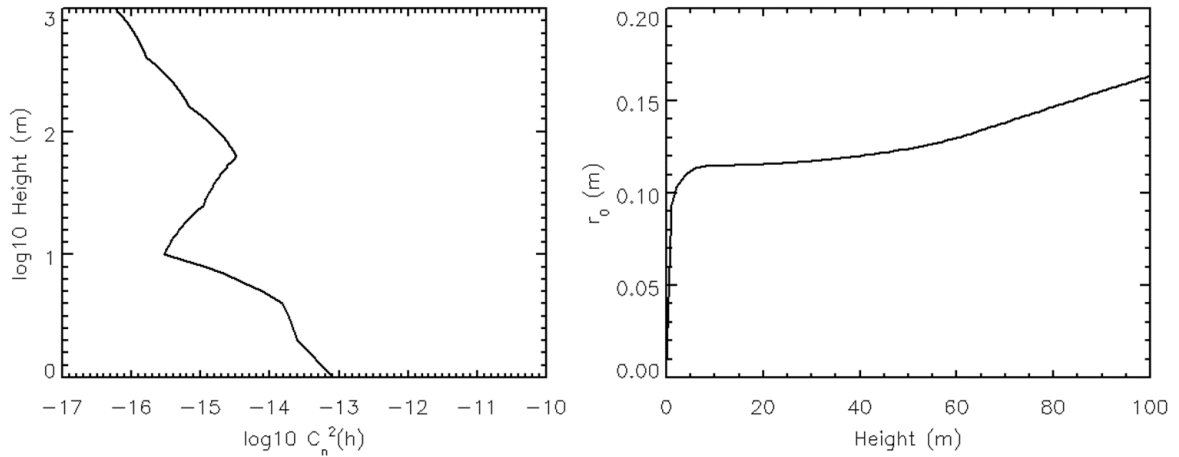


図3：(左) 屈折率構造関数 ( $c_n^2(h)$ ) と高度の関係。(右) フリード・パラメータ ( $r_0$ ) の高度変化。

図3の右図は地表から高度100mまでのフリード・パラメータ ( $r_0$ ) を表している。このフリード・パラメータでも、高度10m以下では急激な増加を示し高い高度では緩やかに上昇することが分かる。

図4はいくつかの代表的な高度でのフリード・パラメータの時間変化を表している。この図でも図3の右図と同様の低高度でのフリード・パラメータの値のジャンプが見られた。すなわち、5m以下の低い高度でフリード・パラメータは急激に変化しており、それ以上の高度では値がスムーズに変化していることが分かる。このジャンプは時間が変わっても常に表れている。この傾向は京都大学理学研究科附属飛騨天文台での山本らによる観測結果にも表れており、地表面で起こる上昇気流の影響が表れている可能性が示唆されている。

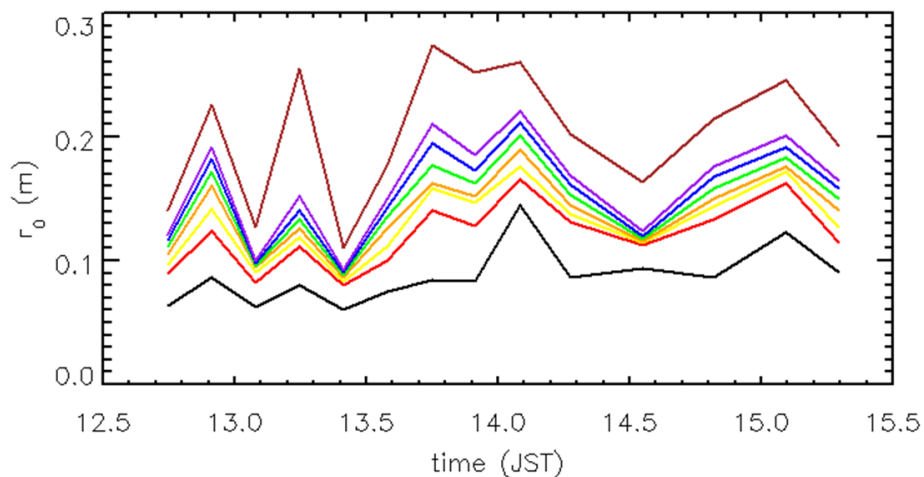


図4：代表的な高度（黒:1m, 赤:5m, 黄:10m, 橙:20m, 緑:30m, 青:40m, 紫:50m, 茶:100m）におけるフリード・パラメータの時間変化

## 5. 将来計画

我々は茨城大学が開発した SHABAR の応用例として、明星大学上空の大気の状態を定量化して明星

大学天文台の設置場所の健全性の調査を報告した。今回の調査結果から地表付近での大気揺らぎが大きく影響を及ぼしていることが分かってきた。これは山本が議論しているように、地表面付近で発生する上昇気流が SHABAR 観測に影響を与えている可能性がある。この上昇気流がどの程度観測に影響を及ぼすのか調査する必要がある。我々は京都大学理学研究科附属飛騨天文台の SMART 望遠鏡に図 5 のように SHABAR を取り付けて調査観測を行う計画である。この SMART 望遠鏡は高さ 16m のタワー上にむき出しで設置されているため、地表の影響を受けず、またドーム内の擾乱もない。この観測に合わせて、SMART 望遠鏡近くの地上にも SHABAR を設置し同時観測を行い、フリード・パラメータを比較する。このことで、地表からの影響を明らかにする。さらに、SMART 望遠鏡 SDDI で観測される太陽全面像からシーイングのサイズを測定する方法[4]を用いて SHABAR 観測の検証を行う。

現在、SHABAR を用いた観測は太陽のシンチレーションを測定し、昼間の大気揺らぎを測定しているが、月光を利用することで夜間の大気揺らぎを測定することができる。今後、国立天文台すばるで行われた Lunar SHABAR[5]を参考に月光を用いた SHABAR 観測を行いたい。



図 5 : SMART 望遠鏡への SHABAR 取り付け位置と取り付け予想図。

## 6. 参考文献

- [1] Beckers, J. M.: 2001, “A Seeing Monitor for Solar and Other Extended Object Observations”, *Experimental Astronomy*, 12, 1-20, 2001
- [2] Beckers, J. M., Leon, E., Mason, J., and Wilkins, L.: “Solar Scintillometry: Calibration of Signals and its Use for Seeing Measurements”, *Solar Phys.*, 176, 23, 1997
- [3] 山本大二郎ほか, 第 36 回天文学に関する技術シンポジウム, 「太陽シンチレーション・モニターを用いたシーイングの定量評価」 (2016)
- [4] 宮良碧ほか, 第 37 回天文学に関する技術シンポジウム, 「太陽像によるシーイング・サイズの測定手法の開発」 (2017)
- [5] Oya, S.: “Ground-layer turbulence evaluation project at Subaru Telescope”, *Journal of Physics, Conference Series*, Vol. 595, 2015