

太陽像によるシーイングサイズの測定手法の開発

○宮良碧、浜屋ひかり、日比野由美、小野寺幸子(明星大学)、萩野正興(国立天文台)、山本大二郎、野澤恵(茨城大学)、大辻賢一、一本潔(京都大学)

概要

光学望遠鏡を用いた天体観測において地球大気の揺らぎによる屈折率の変化は精度の高い観測の妨げになる。特に、望遠鏡が大型化する昨今においては補償光学などの技術が必要不可欠となっている。しかし、これらの装置は高額で大型のものが多く、大学の研究室レベルで扱えるほど一般的とは言えない。そこで、我々は太陽像からシーイングのサイズを測定する手法を開発し、小型望遠鏡への適応を議論する。

1. はじめに

光学望遠鏡を用いた天体観測において地球大気の揺らぎによる屈折率の変化は精度の高い観測の妨げになる。特に、望遠鏡が大型化する昨今においては補償光学やシーイング・モニターなどの技術が必要不可欠となっている。

先行研究として、広島大学の上田の修士論文による恒星観測から点像関数を求めシーイングを評価する方法がある[1]。また、北海道大学の合田の修士論文による北海道名寄市のピリカ望遠鏡で観測した木星の表面模様をハッブル望遠鏡での観測と比較して大気擾乱を測定する方法が開発されてきた[2]。しかし、最も光量があり小型望遠鏡でも容易に観測できる太陽を用いた観測はあまりされてこなかった。

本研究では太陽像からシーイングのサイズを測定する手法を開発してきた。この開発により、大学の研究室、科学館、アマチュア天文家などが所有する小型望遠鏡でのシーイング調査も可能になると考える。

2. 観測

本研究では、今後の浜屋らの SHABAR 観測[3]との共同研究を考慮して、京都大学理学研究科附属飛騨天文台の太陽磁場活動望遠鏡(通称: SMART 望遠鏡)の $H\alpha$ 線太陽全面像観測(通称 SDDI: Solar Dynamics Doppler Imager)のオフライン観測+ 3.5\AA 像を用いて行う[4]。この SMART/SDDI は 2016 年 4 月に太陽フィラメントの放出時の運動を観測する目的で導入され、速度 400km/sec までのドップラー運動を像としてとらえることができる。この観測システムでは波長を高速でかつ精度良く変更させる機構としてユニバーサル・チューナブル・フィルター(UTF)[5]が導入されている。

3. 解析

SMART/SDDI で観測された太陽全面像を用いて 2 つの方法で太陽縁からシーイングを測定する手法を開発し、解析を行った。

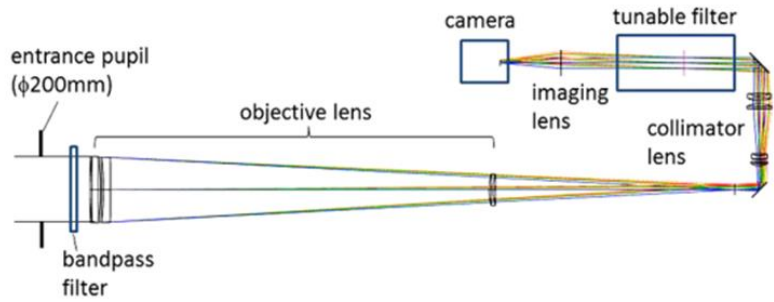


図 1: (左)京都大学理学研究科附属飛騨天文台の SMART 望遠鏡。赤い矢印が SDDI の鏡筒。(右)SDDI の光学系。口径 200mm、焦点距離 1086mm、UTF 透過幅 0.25 \AA 、露出時間 2m 秒、73 波長観測。

第一の方法として、太陽縁の位置を用いてシーイングのサイズを求める。まず、シーイングの影響がない(シーイングフリー)場合、太陽光球縁は真円であると定義する。ここで地球大気中では、空気小塊の屈折率により収差が生じる。この収差は大気層の様々な物理パラメータにより空間的に時間的に変化するが、観測される太陽縁は大気中の透過距離で積算されている。このように地球大気で歪められた太陽縁の凹凸のサイズをシーイングサイズとして測定する。これを本稿では Miyara Method と呼ぶことにする。この手順を以下のようにまとめる。

1. 観測された太陽光球のディスクより、中心と太陽半径を求める。ここで求められた円をシーイングフリーの太陽光球ディスクと定義する。
2. 北極より 0.5 度ずつの緯度での太陽縁位置を求める。
3. 1 と 2 の差分の分布関数を点像関数(PSF: Point spread function)として、これを分解できる回折限界をもつ望遠鏡の口径をフリード・パラメータ (以下 FP) とする。

この手法は直感的に分かりやすく処理スピードも速いため簡易的には使える手法ではあるが、PSF の定義が数学的に曖昧であり、結果として求まる値が FP と言えるかは議論が必要である。この曖昧さを取り除くために、Miyara Method に次の処理を追加した新しい Miyara Method を提案する。

1. Miyara Method の手順 2 での観測による光球強度プロファイル(h と定義する)から、太陽の周縁減光のモデルプロファイルを求める。
2. このモデルプロファイルと特定の半値幅(FWHM)の正規分布(ガウシアン)を畳み込み演算して、FWHM の収差を含んだプロファイルを求める。

$$f(r, \text{FWHM}) = m(r) \otimes g(\text{FWHM})$$

ここで、 m は半径 r を独立変数とする周縁減光モデルのプロファイルとし、 g は FWHM を独立変数に持つガウシアンを表す。ここでガウシアンと FWHM は次式で表される。

$$g(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad \text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2} \cdot \sigma$$

3. 観測されたプロファイル(h)とプロファイル(f)を比較して、観測によく合う収差を持つガウシアンを求め、この FWHM を PSF として定義する。

$$\text{PSF} \leftarrow \min \left(\frac{\sum_r (h(r) - f(r, \text{FWHM}))^2}{\sum_r (h(r) + f(r, \text{FWHM}))^2} \right)$$

4. この PSF を分解できる回折限界をもつ望遠鏡の口径をフリード・パラメータ r_0 とする。

$$r_0 = 0.98 \left(\frac{\lambda}{\text{PSF}} \right)$$

この新しい Miyara Method で求めた例を以下に示す。これは 2017 年 5 月 11 日の SMART/SDDI の観測データ（観測波長：H α 線 6562.8+3.5Å，露出時間：3m 秒，画像サイズ：2048×2048pix，ピクセル分解能：1.23”）を用いた。図 2 の左上は太陽の北極での太陽のディスクセンターで規格化された太陽縁付近での明るさのプロファイルを表している。左中の図は太陽周縁減光のプロファイル（実線）とある半値幅を持った正規分布（破線）を示している。左下にモデルと代表的な半値幅をもつ正規分布の畳み込みにより求めた比較用のプロファイルを示す。この左上と左下の 2 つのプロファイルを比較し最小二乗法で両プロファイルが最も近くなる半値幅を決定する。右図はこの過程を示しており、横軸は半値幅で、実線で示した値が最小の半値幅（破線）が 2 つのプロファイルが似ていることを示している。この例では半値幅が 8.9 ピクセルの時に最小値を示し、ピクセル分解能を考慮した時の PSF は 10.9”となる。これより求めた FP は $r_0=1.52\text{cm}$ ということになる。この太陽全体の平均 PSF は $8.1''\pm 1.8''$ であり、平均の FP は 2.03cm であった。

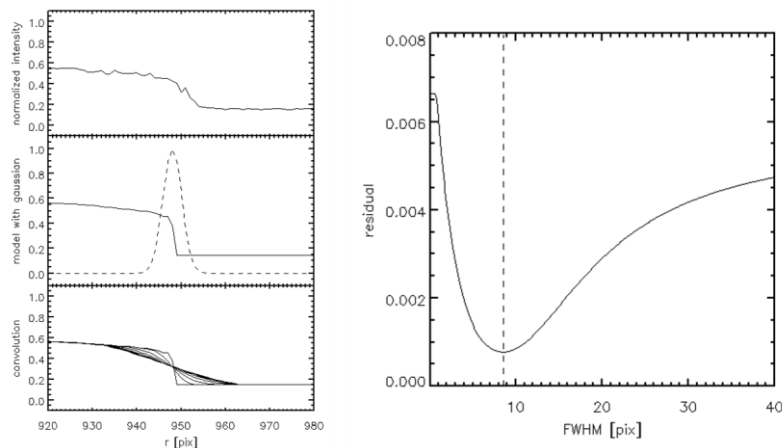


図 2：(左上) 実観測プロファイル。(左中) 周縁減光モデル(実線)、正規(ガウス)分布(破線)。(左下) 比較用のプロファイル。表示のプロファイルは $\text{fwhm}=[0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35]\text{pix}$ 。(右) 2 つのプロファイルを比較して求めた半値幅。

5. 結果

図 3 は 2017 年 6 月 5 日のデータを用いて、新しい Miyara Method と SHABAR の 2 つの手法で解析した結果である。左上図は新しい Miyara Method で求めたフリード・パラメータの 30 分毎の時間変化を示している。エラーバーは太陽全体の場所ごとによる違いを表している。このことにより、時間変化は有意ではないが、一日を通して平均の FP はおよそ 1.5-2.5cm の間で推移していることが分かった。左下図は同じデータを用いた太陽ディスクセンターの明るさの時間変化を示している。この図より夕方にかけて明るさが減少しているが、安定した観測が行われたことが分かる。右図は SHABAR による FP の時間推移を表している。夕暮れ近い 8:00UT 以後は値が増加したが、これは太陽光が通過する地球大気の厚みが増したことが関係しているものと考えられる。この補正は煩雑となるため、ここで

は扱わない。観測開始からこの増加前までは変化が大きいが FP は約 1.5cm であり、今回の新しい Miyara Method と近い値を示した。

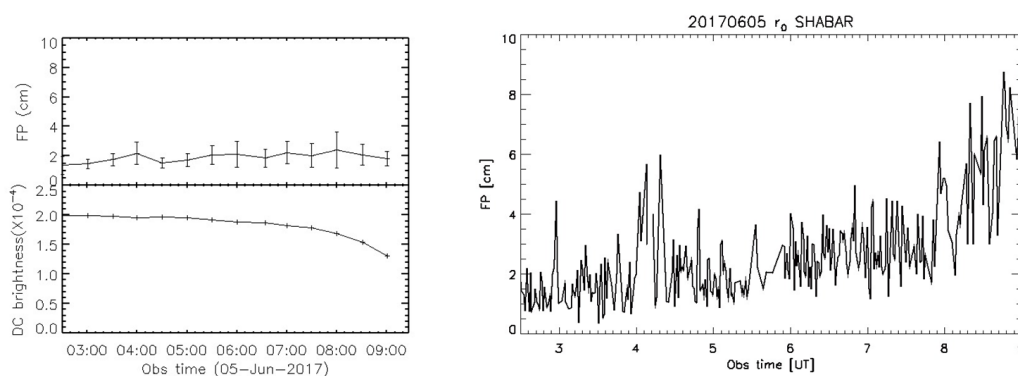


図 3 : (左上) 新しい Miyara Method で求めた FP の時間変化。(左下) 太陽ディスクセンターの光量の時間変化。(右)SHABAR で測定した FP。

6. まとめ

今回の調査では FP は 2cm 程度であり、過去に報告された飛騨天文台における一般的な FP は 4cm なので、その半分と小さい値となった。この理由はいくつか考えられる。まず、フォーカスの精度が十分でなく太陽縁がぼけたデータの場合、このボケ自体を測定することになる。また、この手法では望遠鏡の光学系自体が持つ収差も精度を変化させる原因となる。さらに、望遠鏡の回折限界は口径で決まるため、この手法での測定の上限は望遠鏡の口径に依存する。しかし、観測条件(高度、観測場所など)が異なるため注意が必要であるが、SHABAR 観測との比較では近い値を示した。このことから精度良くセッティングされた光学系での観測では新しい Miyara Method を用いてシーイングを測定できると考える。今後、浜屋らの SHABAR と太陽像を同時に観測することで検出精度の向上を目指す。

さらに、将来計画として、この手法を用いて明星大学日野キャンパスに設置された 40cm 望遠鏡での月光での夜間のシーイングの測定を行う。この場合、太陽周縁減光のモデルに月探査衛星「かぐや」などのシーイングフリーのデータを適応させることができる。また、波長の特定として、一眼レフカメラのベイヤー配列を利用する。このベイヤー配列では望遠鏡色収差の測定もできると考える。

参考文献：

- [1] 上田篤、2003 年度、広島大学大学院理学研究科 修士論文
- [2] 合田周平、2016 年度、北海道大学大学院理学院 修士論文
- [3] 浜屋ひかり、2017 年、天文学における技術シンポジウム
- [4] Ichimoto, K., et al., 2017, *Solar Phys* 292:63
- [5] Hagino, M. et al., 2014, *SPIE* 9151, 91515V