

太陽像を用いた大気ゆらぎの評価方法の開発と統合的解析

東京都立富士高等学校 科学探究部天文班
Saki Ochiai / Jun Shimano

発表番号

26P

1. 序論

太陽黒点に関する研究を行う中で、撮影した太陽像が大気の影響によりゆらいでしまった(表1)。そのため太陽黒点の形状変化を追うことに課題が見られ、ゆらぎの小さいデータを取得しようと考えた。

そこで、本研究では東京都中野区にある本校における鮮明な黒点の画像の取得と、適した太陽黒点の観測場所の選定を目的とし、シーイングおよびシンチレーションの2つの観点から大気ゆらぎを評価した。

この研究で得られた結果は、観測された太陽半径R、本来の太陽半径 \bar{r} とし、
屋上で $R = \bar{r} \pm 11.59 \pm \delta r$ ["]
プールサイド $R = \bar{r} \pm 8.937 \pm \delta r$ ["]
であった。よって本観測において観測場所による有意な差はなかった。

また、シーイングとシンチレーションの間には、弱い正の相関が見られた。

表1)黒点付近のシーイングとシンチレーション

	シーイング良	シーイング悪
シンチレーション良		
シンチレーション悪		

2. 観測

観測に使用した装置を表2にまとめる。

表2)観測装置

観測装置	スペック
望遠鏡 (Skywatcher ソーラークエスト705)	・口径7.00cm(D) ・焦点距離500mm
カメラ (ZWO ASI432MM)	・最大感度波長580nm(λ) ・ダイナミックレンジ12bit ・露出 1.03msec, 110fps撮影 ・解像度 1608×1104

【回折限界】

$$L = 1.22 \times \left(\frac{\lambda}{D}\right) = 2.08 ["]$$

【系統誤差】

$$\delta r = \left| \frac{3.7 - L}{\bar{r}} \right| = 0.12 [\%] \quad \bar{r} = 945 ["]$$

また、画像上の太陽直径は515.78pix、実際の太陽視直径は1910.3"であるため、ピクセル分解能は1pix=3.704"である。

λはカメラの最大感度波長であり、Dは望遠鏡の口径を用いた。

表3に富士高校での観測条件をまとめる。

表3) 富士高校の観測条件

観測場所	屋上	プールサイド
観測座標	35.69° ,139.67°	35.69° ,139.67°
標高	5階 47.1m	3階 39.5m

シーイングは地上から高いところや、水辺で良いことが分かっている¹⁾。そのため、本校の屋上とプールサイドで太陽を撮影した(図1)。

各地点において87.4fps、16bit、1000フレームの同時撮影を1日7回(7000フレーム)、計4日(56000フレーム)、晴れの日を実施した。なお、同時に気圧・風向・湿度などの環境要因も収集した。

これまで(2023年7月以前)は、1つの望遠鏡で屋上とプールサイドを行き来し観測した。その結果2ヶ所では有意な差は見られなかったことが分かっている。本研究(2024年11月以降)では、新たに2台の望遠鏡を用いて同時観測を実施した。

観測に先立ち、使用する望遠鏡の性能の差はないことを確認した²⁾。

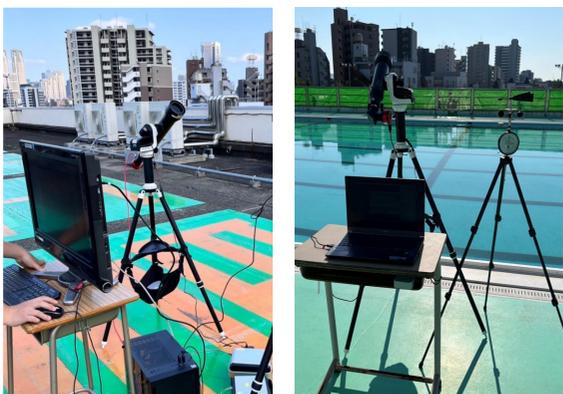
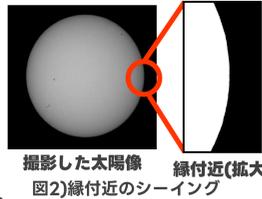


図1)屋上(左),プールサイド(右)での撮影

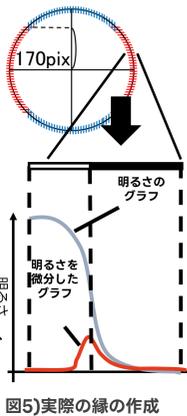
3. 解析手順

シーイングの影響は太陽像の縁で特に顕著に現れる(図2)ことに着目し、独自にPythonのプログラムを作成した。



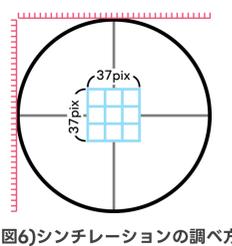
[シーイングの調べ方]

- 観測した太陽の動画を毎フレーム画像として切り出す。
- 画像内のディスクを円と仮定し、円の中心、半径をハフ変換を用いて検出する。
- 太陽像の縁付近の明るさをピクセルの並びに沿って取得し、明るさの変化を微分したものの最大値(=明るさの変化が最も大きい点)を「太陽像の縁(図4)」とした(図5)。
- “近似した円”と“実際の太陽像の縁”の距離の差(図3)を求め、シーイングの値とする。この値が大きければ大きいほど、ゆらぎが大きい、すなわちシーイングが悪い、といえる。



[シンチレーションの調べ方]

- 上記1,2に続き、
- 2で求めた太陽像の中心を元に、フレームごと中心付近の37×37のpixelの明るさ(平均値)をシンチレーションの値として計算する(図6)。
- シンチレーションの値が小さければ小さいほど、多く光が分散してしまい、画像が暗くなる。つまり、大気の影響を強く受けた画像といえる。



4. 結果

上記の方法を用いて、観測した太陽像で発生したゆらぎの大きさを求めた。図7に時間変化に伴うゆらぎの大きさ(平均)の変化を示す。

表4)各撮影日の標準偏差の値

比較	2025/04/27		2025/07/20	
	屋上	プール	屋上	プール
1	7.976	8.059	9.554	7.886
2	8.120	8.428	8.820	6.373
3	7.906	8.676	8.246	6.793
4	7.776	8.391	8.570	6.073
5	7.575	8.370	6.636	5.591
6	7.233	8.094	7.957	6.032
7	7.398	8.011	7.607	6.124
1σ	0.322	0.242	0.888	0.556

比較	2025/08/30		2026/01/17	
	屋上	プール	屋上	プール
1	7.641	7.629	17.19	10.24
2	10.94	10.26	21.65	12.19
3	9.816	10.01	20.44	12.36
4	10.37	10.51	25.14	12.05
5	9.118	8.249	22.57	11.29
6	8.843	8.721	18.67	11.09
7	9.871	9.557	20.82	13.18
1σ	1.013	1.047	2.399	0.895

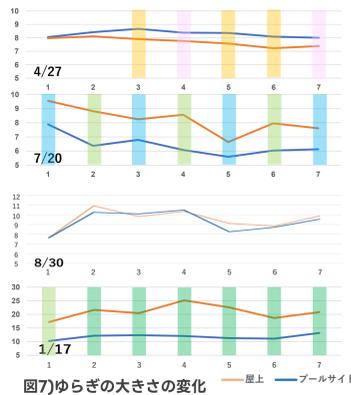


表4の結果をもちいると、観測される太陽像上の距離R、理論上の大きさ \bar{r} について

$$\text{屋上で} \quad R = \bar{r} \pm 11.59 ["]$$
$$\text{プールサイドで} \quad R = \bar{r} \pm 8.937 ["]$$

となることが分かった。

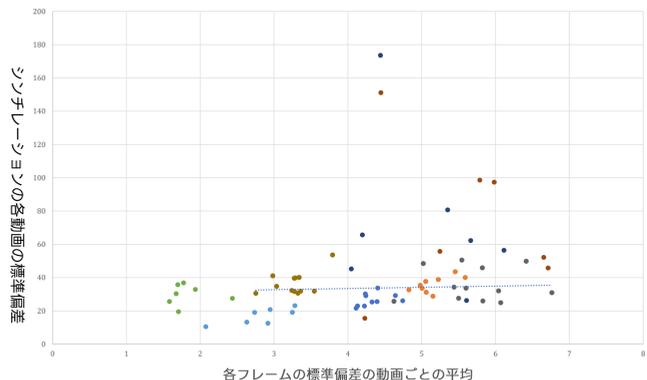
表5)シーイングとシンチレーションの標準偏差の相関関係

日付	場所	相関係数
4/27	LT	0.1408
	PL	0.2392
7/20	LT	0.6773
	PL	0.0998
8/30	LT	0.4463
	PL	0.2733
1/17	LT	-0.2523
	PL	-0.2962

4/27、7/20、8/30、そして、1/17の観測結果について、シーイングとシンチレーションの各1,000フレームにおける標準偏差の相関係数を調べた結果を表5に示す。

太陽像の中心付近が明るさの上限を超えてしまっている4/27PLを除く全ての動画のシーイングとシンチレーションの標準偏差の散布図を表6に示す。これらのデータの相関係数が0.3270と弱い正の相関が見られた。

表6)シーイングとシンチレーションの相関関係



5. 考察

シーイングサイズは屋上では $\pm 11.59 \pm \delta r$ ["]、プールサイドでは $\pm 8.937 \pm \delta r$ ["]であった。それぞれのシーイングサイズはピクセル分解能(1pix=3.704")に対して十分に大きいため、シーイングの数値化はできたと考えた。

シーイングサイズはプールサイドの方が2.653"だけ小さかった。この値はピクセル分解能に対して小さいため、本観測においては観測場所による有意な差はなかったといえる。そのため、どちらで観測しても同程度に鮮明な画像を得られると考える。

一方、日付ごとの比較を行った結果、4月27日では7回中2回で屋上の値が1σ、同じく7回中3回で2σの範囲でそれぞれ大きく離れていた。また、7月20日では7回中4回でプールサイドの値が1σ、7回中3回で2σの範囲で差が認められた。さらに、1月17日では7回中1回でプールサイドの値が2σ、7回中6回で3σ以上の差が生じていることが確認された(表4)。よって、季節ごとに観測場所によるゆらぎの変化に傾向があると考えられる。

また、冬季の2地点におけるシーイング値が他の季節と比較して全体的に大きくなる傾向が確認されたことから、冬季にはシーイングが悪化することが示唆された(表4)。

さらに、シーイングとシンチレーションの標準偏差の相関係数を検討したところ、両者の間には一定の関係性が認められるものの、強く安定した相関は確認されなかった。このことから、シーイングとシンチレーションを比較しつつ、両者を総合的に評価する必要があると考えられる。

6. 今後の展望

- シーイングの大きさを求める際にハフ変換を用いると、パラメーター調整やAI処理の影響で誤差が全体の約3%生じる。そのため、任意の点を取り、最小二乗法を用いて太陽に近似する円を求めていきたい(図9)。
- 今回は場所に着目して比較をしたが、風速や風向などの観測環境との比較も行っていきたいと考えている。

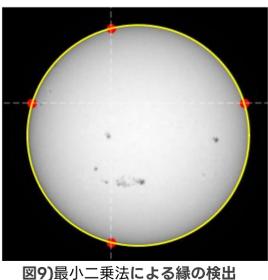


図9)最小二乗法による縁の検出

- これまで、微分の最大値を太陽の縁としていた(図5)。今後はシンチレーションによる縁の定義を考え、縦軸を対数軸、横軸を明るさとしたグラフをもとに解析する(図10)。

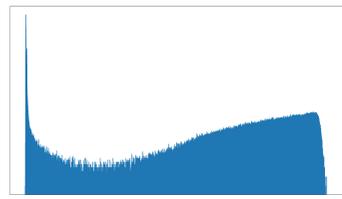


図10)明るさの対数のグラフ

- 視覚的に太陽像における輝度(シンチレーション)の変化を見るために、太陽像の明るさの等しいピクセルをつなげた等輝度線を描画した(図11)。今後はこの等輝度線についての分析も行っていきたいと思う。

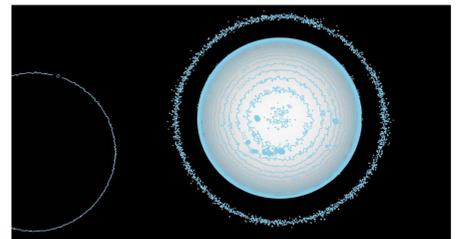


図11)太陽像の等輝度線

- 観測機材を変更することで、より大きく像をとらえていきたいと思う。
- 天体観測にとどまらず、精度の高い研究には対象を可能な限り鮮明にとらえることが必要であり、今回の研究結果は他分野への応用も大いに期待できる内容であると考えられる。

7. 参考文献

- H.Socas-Navarro et al., Solar Site Survey for the Advanced Technology Solar Telescope. I. Analysis of the Seeing Data, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 117, 837, pp.1296-1305, 2005
- 東京都立富士高等学校(2025):「太陽像を用いたシーイングの測定」かがわ総文
- 宮良碧ら他, 太陽像によるシーイングサイズの測定手法の開発, 天文学に関する技術シンポジウム集録, 第37巻, 2017
- 国立天文台太陽観測科学プロジェクト 三鷹太陽地上観測
<https://solarwww.mtk.nao.ac.jp/jp/solarobs.html>

8. 謝辞

本研究において、本部顧問の粕谷和宏先生、萩野正興天文方の萩野正興先生、部活動支援員の野瀬稔先生には研究の指導において多大なるご尽力をいただきました。心から感謝申し上げます。また共同研究者の皆様には、研究において貴重なご協力をいただき、深く感謝申し上げます。研究の実施にあたり、たくさんのご助言をいただきました本校の先生方にも、重ねて御礼申し上げます。