

太陽像を用いたシーイングの測定

科学探究部天文班：
栗飯原 凜久、富永 光葉、星川 祥太朗、矢代 優空（高2）【東京都立富士高等学校】、
落合 咲輝（中3）【東京都立富士高等学校附属中学校】

1.序論

東京都中野区にある東京都立富士高校の校内において太陽黒点観測に適した場所を調査した。先行研究より、シーイングには観測環境が影響する[3]ことがわかっている。特に、水辺の環境が良いとされているため、我々は屋上とプールサイドの2か所で試験観測を行い、独自のプログラムを用いてシーイングを数値化した。

シーイングとは？

天体を地上から観測するとき、地球大気中の温度ゆらぎのため、屈折率分布にわずかな乱れが生じ、星像が揺れたりぼけたりして、完全な光学系で得られるはずの回折限界より広がった像になってしまう。この大気のゆらぎによる星像のぼけ具合の大きさをシーイングと呼ぶ。（天文学辞典より引用）

2.観測

観測に使用した装置を表1に、表2に富士高校での観測条件とをまとめる。この装置での回折限界(L)は $L=1.22 \times (\lambda / D)$ を用いると2.09"であり、

この時の空間系統誤差は $\delta r = \left| \frac{3.7-L}{\bar{r}} \right| = 0.12[\%]$ である。

本研究では、シーイングには、地上からの高さや周辺環境（水辺など）が影響する(H.Socas-Navarro et al.)ことを踏まえ、観測条件を変えて屋上とプールサイドの2か所で太陽の動画(110fps,12bit)を撮影した。この際、10秒×5回の観測(1セット)を、各場所で交互に1日7セット、計5日分行った。

表2）富士高校の観測条件

	2024/11/4								2024/11/23								2024/12/7								2024/12/22								2025/01/13							
	気温	湿度	風向	風速	気温	湿度	風向	風速	気温	湿度	風向	風速	気温	湿度	風向	風速	気温	湿度	風向	風速	気温	湿度	風向	風速	気温	湿度	風向	風速	気温	湿度	風向	風速	気温	湿度	風向	風速				
比較	屋上				プールサイド				屋上				プールサイド				屋上				プールサイド				屋上				プールサイド				屋上				プールサイド			
1	22	42	NE	0.3	24	42	N	0.3	11	38	NW	9.7	15	33	NW	13.6	16	32	SE	9.9	19	28	NW	7.3	12	43	SW	11	14	36	N	16.5	11	30	E	18.9	16	27	NE	21
2	27	35	N	1.3	24	42	N	0.3	12	35	NW	14.9	15	33	NW	13.6	18	28	SE	4.8	19	28	NW	7.3	14	37	SE	11.2	14	36	N	16.5	17	26	N	16.5	16	27	NE	21
3	27	35	N	1.3	29	35	NE	3.0	12	35	NW	14.9	15	34	NW	7.3	18	28	SE	4.8	19	28	NW	3.0	14	37	SE	11.2	15	35	NW	9.3	17	26	N	16.5	16	27	NE	21.7
4	27	32	NW	3.8	29	35	NE	3.0	14	35	NW	12.3	15	34	NW	7.3	16	30	SE	4.3	19	28	NW	3.0	14	35	NW	11.7	15	35	NW	9.3	15	30	E	20.5	16	27	NE	21.7
5	27	32	NW	3.8	24	42	SE	10.2	14	35	NW	12.3	15	32	NW	9.0	16	30	SE	4.3	17	29	NW	4.5	14	35	NW	11.7	15	35	NW	11.1	15	30	E	20.5	15	29	N	20.2
6	23	35	NW	7.3	24	42	SE	10.2	13	33	NW	9.4	15	32	NW	9.0	18	32	SE	4.5	17	29	NW	4.5	14	35	SW	10.5	15	35	NW	11.1	13	30	NE	18.5	15	29	N	20.2

気温[℃]、湿度[%]、風速[m/s]

気温[℃]、湿度[%]、風速[m/s]

3.シーイングの解析手順

- 太陽像を円と仮定し、その中心と半径をハフ変換を用いて求める。太陽像の縁付近（図2円周部分）でのピクセルの明度を取得したものを元に、グラフを作成する。さらにそのグラフを空間的に微分したグラフ(図2)を作成する。
- 明るさを微分したグラフの最大値のある点が太陽像の縁であると考え、その点から太陽像の中心を通る直線までの距離を求め、計算によって求めた理論上の距離との差を求める。
- 1か所で観測された各50秒間の動画について、動画全体における観測された距離と理論上の距離の差(図3赤線)についての標準偏差を求めることでゆらぎの大きさを推定する。

ここで、本手順において太陽像の縁を検出するために使用したピクセルの並ぶ方向は、太陽像1周を評価できるように、中心を通り直交する直線から、170ピクセルの範囲ごとに向きを変え、1枚の太陽画像につき1360の点で明るさを測定した。

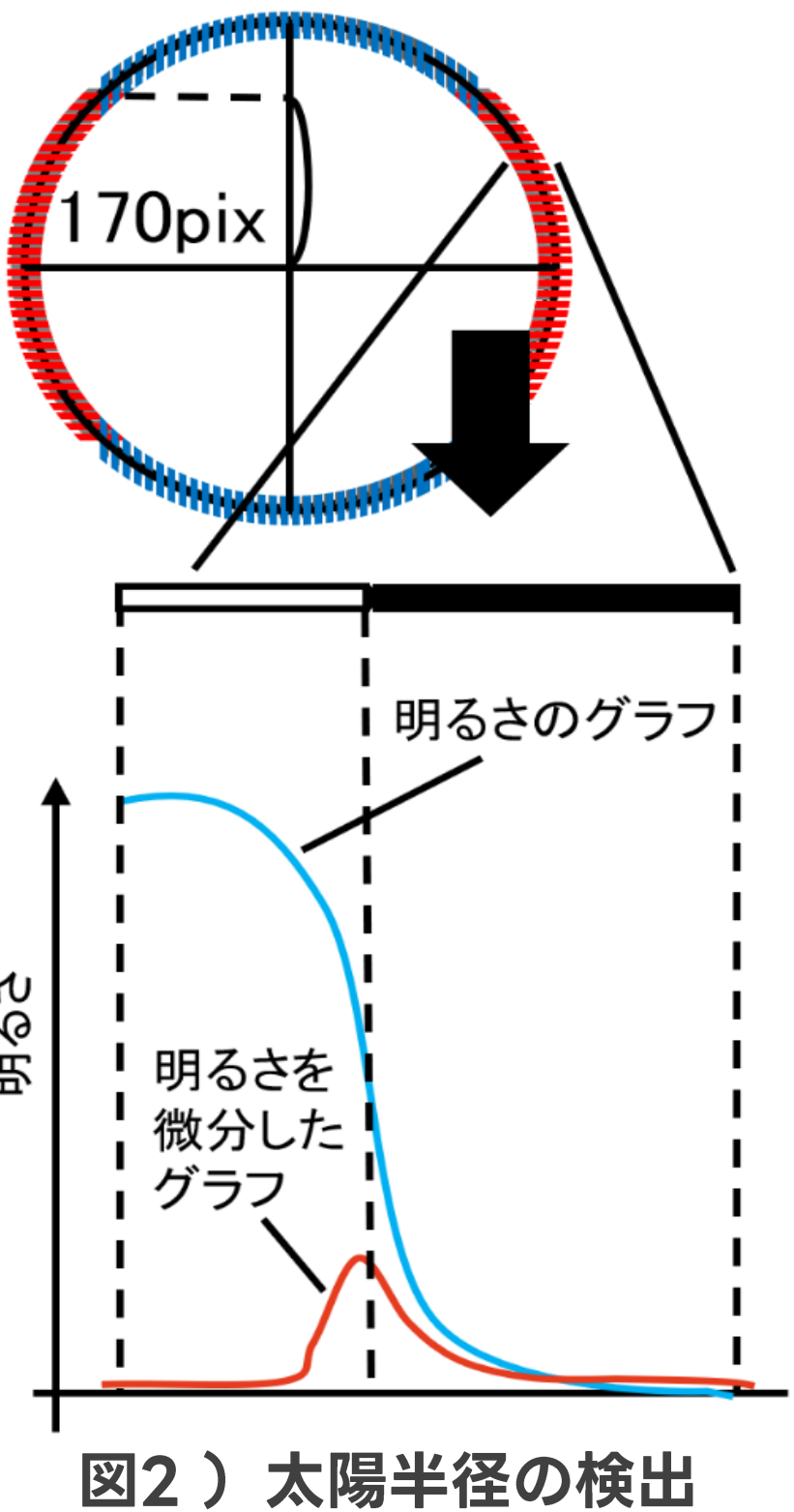


図2）太陽半径の検出

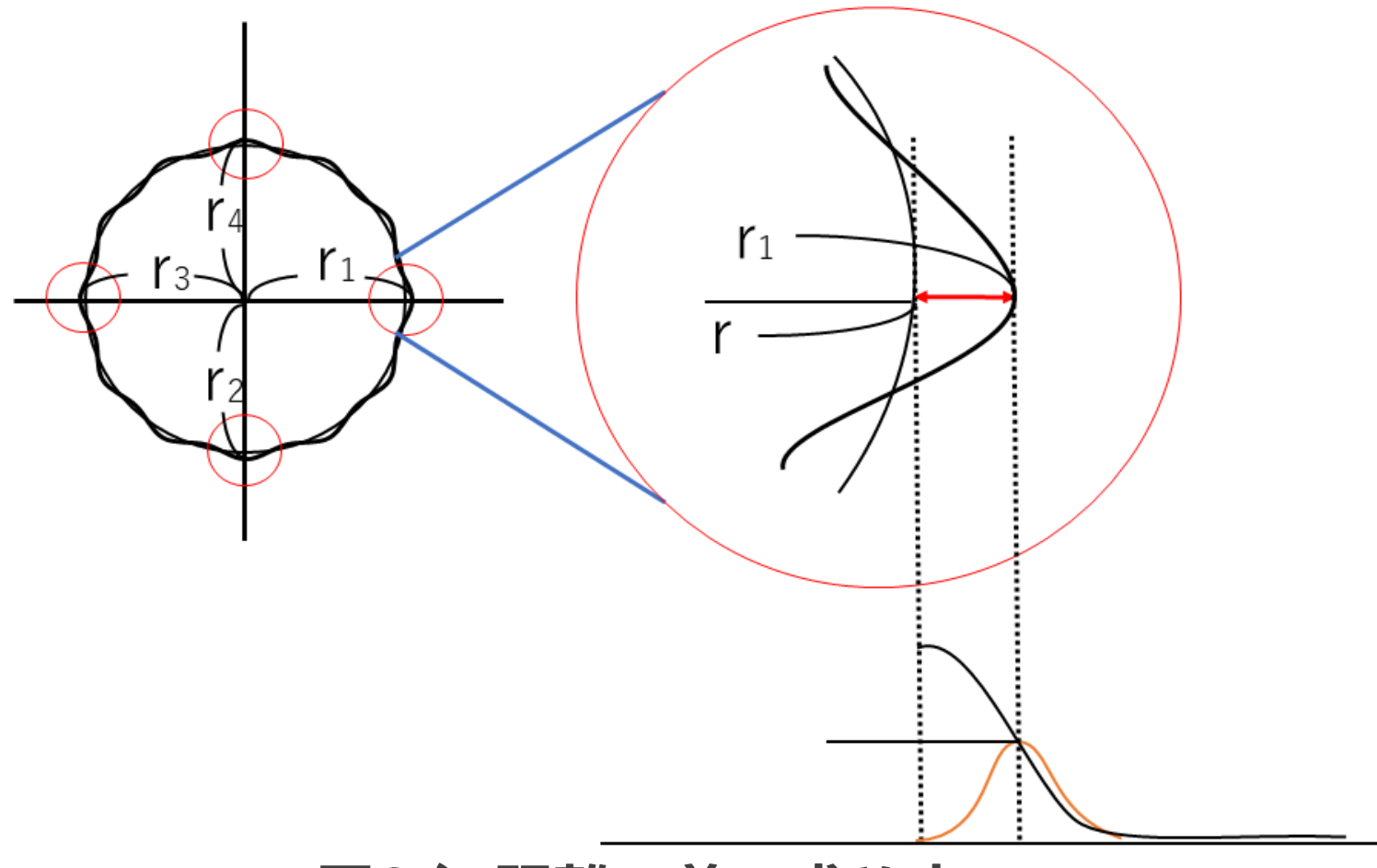


図3）距離の差の求め方

4.シーイングの解析結果

- 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。表3に各動画におけるゆらぎの大きさ(平均)と各場所におけるゆらぎの大きさの1σ範囲を示す。

表3）解析結果

	2024/11/04		2024/11/23		2024/12/07		2024/12/22		2025/01/13	
比較	屋上	プール	屋上	プール	屋上	プール	屋上	プール	屋上	プール
1	8.379	8.847	9.303	8.926	9.353	9.081	8.756	8.738	8.305	8.645
2	8.713	8.847	8.986	8.926	9.175	9.081	8.792	8.738	8.535	8.645
3	8.713	9.376	8.986	8.860	9.175	9.023	8.792	8.721	8.535	9.068
4	9.016	9.376	8.377	8.860	8.850	9.023	8.840	8.721	8.466	9.068
5	9.016	8.702	8.377	9.081	8.850	9.649	8.840	8.981	8.466	8.897
6	8.933	8.702	8.986	9.081	9.372	9.649	8.966	8.981	8.999	8.897
1σ	0.246	0.355	0.335	0.114	0.209	0.346	0.079	0.146	0.258	0.208

表3の結果をもちいて母平均の推定を行った結果、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
屋上で $r=\bar{r} \pm 8.86''$
プールサイドで $r=\bar{r} \pm 8.97''$
となることが分かった。

また、撮影した動画について、隣り合う時間帯同士の動画におけるゆらぎの大きさを比較し、各場所におけるゆらぎの大きさの1σ範囲を考慮して撮影場所のシーイングの評価を行った。その結果、屋上でのゆらぎの大きさが有意に小さいといえるものが最も多かった。

表4では、太陽像の縁の部分の明るさについて三次元座標空間上で表現した。図中の線は太陽像上の位置をxy座標、その位置における明るさの値をz座標とする点を結んだものである。この間隔が広いほど明るさが急激に減少するため、シーイングが良いとわかる。図を比較すると、シーイングの良いものではシーイングの悪いものに比べて、明るさが減少する際の線同士の間隔が広く、シーイングの良さを視覚的にも確認することができる。

表1）観測環境

観測装置	スペック
望遠鏡 (Skywatcher ソーラークエスト705)	・口径7cm(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



図1）屋上(左),プールサイド(右)での撮影

表4）解析結果

屋上		プール	
最良 (0.44)	最悪 (5.80)	最良 (0.42)	最悪 (5.79)

5.考察

本研究では、撮影した天体の画像からシーイングを評価するプロセスを確立するための試験観測を行った。今回の観測結果から、屋上では±8.86"のゆらぎ、プールサイドでは±8.97"のゆらぎがあったことがわかる。屋上のほうがゆらぎの大きさが0.11" だけ小さかったため、屋上で撮影した動画のほうが太陽像の大きさが変動する幅が小さく、屋上で撮影した動画のほうがシーイングが良かったと考えられる。

この原因としては、プールサイドでは望遠鏡が壁に近い位置に設置されていたため、空気の流れが屋上より乱れた一方、屋上は周囲が開けた環境であったため、大気の流れが層流に近い状態だったからだと考えられる。

また、今回の試験観測の中で最もシーイングの良かった10秒間の動画について、各フレームの標準偏差の値(図4実線)とその10項移動平均(図4点線)を求めた。移動平均の変動から、ゆらぎの大きさの変化は一定の範囲内で起きていることが推測できる。

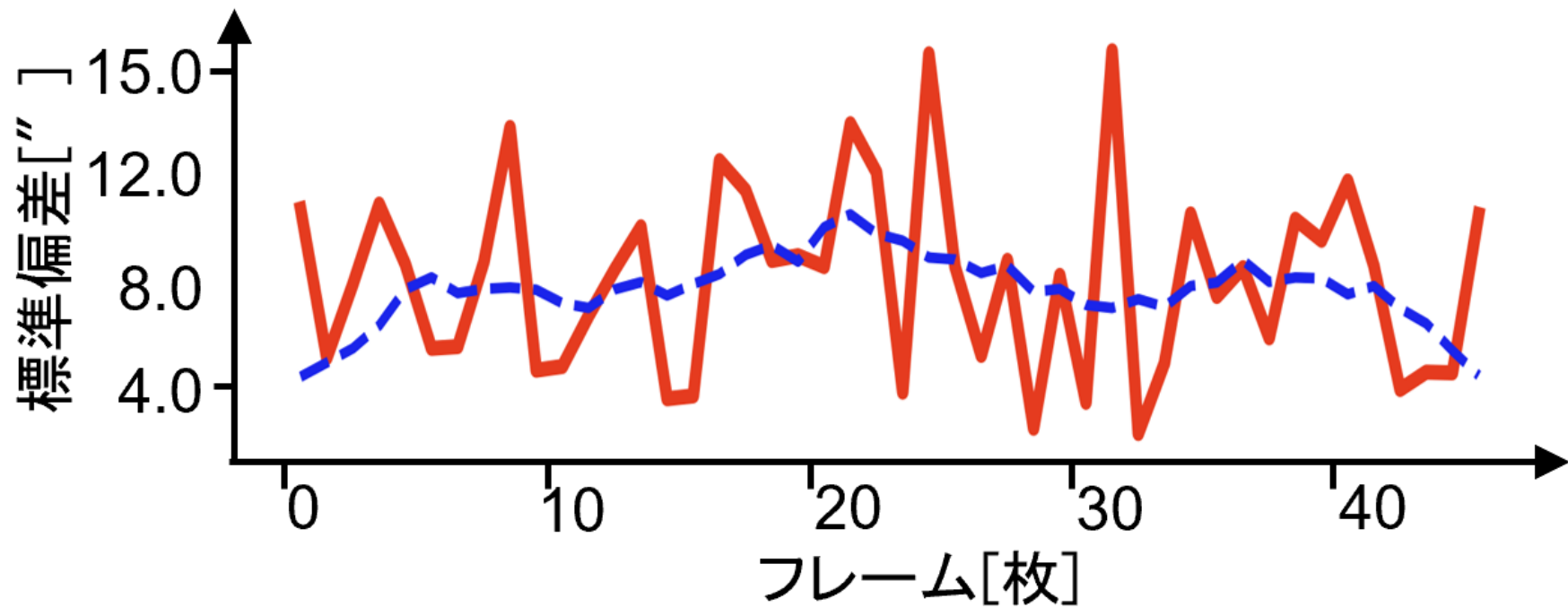


図4）標準偏差とその移動平均

6.今後の展望

現状の課題としては、太陽の撮影において、今回はカメラの感度波長を用いたが、フィルターなどを用いて波長をさらに限定して撮影することや、観測装置を変え、像のサイズを大きくしてより詳細に撮影することがあげられる。

シーイングへの影響として、今回は撮影場所に考慮して実施したが、シーイングには気圧、風向、風速などが関係している可能性もある。今回実施したのは試験観測であり、今後場所や季節を変えてより多くのデータを使用した分析が必要であると考えた。他の環境要因にも着目して研究を行いたい。

また、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

- [1]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
- [2]天文学辞典 日本天文学会
https://astro-dic.jp/
- [3]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

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。