

標準星の可視光スペクトル を用いた昭和基地周辺の 水 蒸気量の推定

理学院宇宙理学専攻

杉山 玄己

2022 年度修士論文

2023 年 2 月 24 日

概要

地球における気象現象に関して水蒸気が果たす役割は大きい。水蒸気の凝結により雲や降水が生じる。雲は地球のアルベドを変化させ、地球全体の熱収支の変化にも関係する他、暴風雪などの悪天候をもたらす。南極地域は地球全体の大気循環の端に位置するため、南極域での水蒸気分布とその輸送を解明することで、地球全体の大気循環や水蒸気輸送を理解する足がかりとなる。そのため各国の観測隊や人工衛星などによって水蒸気の観測が行われてきた。しかし今までの観測には時間的・空間的な限界があり、水蒸気の分布の変化は十分に解明されていない。そこで本研究では、スペクトルタイプが広く知られている標準星を中心とした天体のスペクトル観測を実施し、得たスペクトルに含まれる地球大気の影響を解析することによって、視線方向の水蒸気のカラム量を手軽に計測する方法を開発した。

本研究では、日本の南極観測の拠点である昭和基地の観測棟屋上に設置した望遠鏡と可視分光器を用いた。本装置は目標天体の600-900nmの波長域におけるスペクトルを観測でき、1時間程かけて西の空を中心とした10数天体を撮影する掃天観測と、天頂付近の天体を10分ごとに撮影する集中連続観測のふたつの観測を実施した。目標天体はSIMBADデータベースを用いてVバンドでの等級が5以上の天体を選定した。これらの観測を2021年2月11日から10月4日まで実施した。その後取得したスペクトルから地球大気に由来する吸収 E_{atm} を計算し、 H_2O に由来する部分 Abs_{H_2O} と O_2 に由来する部分 Abs_{O_2} の比 Abs_{comp} を導出した。本論文では、掃天観測時に撮影した標準スペクトルデータが既知であるHR74の観測データを解析し、 Abs_{comp} と観測時の地上水蒸気圧、可降水量を比較し、スペクトル観測による水蒸気量観測の可能性を探った。 Abs_{comp} を観測時の地上水蒸気圧と比較した結果、相関は-0.35となり地上水除気圧との間に有意と言える相関はなかった。しかし、本観測の実施中に実施されたラジオゾンデ観測から得られた可降水量と比較したところ、相関は0.89であり、両者に強い相関があった。これは本観測方法でこれまで以上に手軽に可降水量の観測ができることを示している。

概要	2
1 本研究の目的	4
1.1 現在実施されている水蒸気の観測	4
1.1.1 地上観測	4
1.1.3 衛星観測	6
2 観測手法	7
2.1 観測の概要	7
2.2 観測装置	8
2.1.1 望遠鏡と分光器、カメラ	10
2.1.2 感度校正	10
2.1.3 赤道儀	12
2.2 観測の実施場所	12
2.3 観測対象天体	13
2.4 観測実績	14
3 解析	16
3.1 一次解析	16
3.2 標準星カタログデータを用いた吸収の解析	18
3.3 H ₂ O、O ₂ による吸収	19
3.4 O ₃ およびエアロゾルによる吸収	22
4 解析結果と考察	25
4.1 Abscompの時間変化	25
4.2 誤差が生じる要因	27
4.2.1 データに含まれるノイズ	27
4.2.2 包絡線の作成方法による誤差	28
4.3 地上水蒸気圧と Abscomp	30
4.4 可降水量とAbscomp	30
4.5 考察	31
4.6 今後の課題と展望	33
5 まとめ	34
謝辞	35
参考文献	35

1 本研究の目的

地球における気象現象に関して水蒸気が果たす役割は大きい。水蒸気の凝結により雲や降水が生じる。雲は地球のアルベドを変化させ、地球全体の熱収支の変化にも関係する他、暴風雪などの悪天候をもたらす。南極地域は地球全体の大気循環の端に位置するため、南極域での水蒸気分布とその輸送を解明することで、地球全体の大気循環や水蒸気輸送を理解する足がかりとなる。そのため各国の観測隊や人工衛星などによって水蒸気の観測が行われてきた。しかし今までの観測には時間的・空間的な限界があり、水蒸気の分布の変化は十分に解明されていない。そこで本研究では、スペクトルタイプが広く知られている標準星を中心とした天体のスペクトル観測を実施し、得たスペクトルから視線方向の水蒸気のカラム量を計測する方法を開発した。具体的な観測手法として、空の様々な方向の天体を1時間ほど掛けて観測し、観測地点周辺の水蒸気の水平分布導出を目的とする掃天観測と、天頂付近の移動が少ない天体の連続観測を行い、水蒸気量の時間変化を導出する集中観測を実施した。これらの観測を組み合わせることで、数10分から数時間の精度で水蒸気の移動を捉えることができる。また、この方法は水蒸気量だけでなく、同時にエアロゾルや O_3 のカラム量も推定できる可能性がある。本論文では、その第一歩として、標準星を撮影したデータから計算した水蒸気吸収の強さと観測時の地上水蒸気圧、可降水量を比較し、スペクトル観測による水蒸気量観測の可能性を探った。

1.1 現在実施されている水蒸気の観測

南極域では現在、以下の方法で水蒸気量の観測が行われているが、それらの観測には時間的・空間的限界が存在する。

1.1.1 地上観測

各国の観測基地や無人観測拠点にて気温及び湿度の観測が行われている。例えば昭和基地周辺では、気象庁によって10分単位の気温及び湿度の観測が行われている[16]。これを組み合わせて地上での水蒸気圧を計算し、その時間変化を捉えることができる。地上観測は水蒸気圧の時間変化を捉えることが可能であるが、観測地点のごく近傍のデータしか得ることができないという欠点を抱えている。また南極にはそもそも観測点が少なく、地上観測による空間解像度は十分であるとは言えない。

1.1.2 ゾンデ観測

地上拠点からのみでなく、ラジオゾンデを用いた観測も広く行われている。*Hicke et al., (1999)[1]* は、McMurdo 基地にてラジオゾンデ観測を実施し、水蒸気濃度の垂直構造の季節変化を報告している(図1)。この観測結果は、McMurdo 基地上空の水蒸気分布が季節により変化することを示している。昭和基地においては、気象庁派遣の隊員によって、毎日現地時間03:00と15:00に2回ゾンデ観測が行われている。

ラジオゾンデ観測の欠点として、低温で水蒸気量が少ない環境では精度の良い観測が難しい点が挙げられる。気象庁が実施している観測では、気温 -40°C 以下での水蒸気圧を欠測としている[15]。また、先に挙げた地上観測と同様に、ラジオゾンデの経路上の情報しか得ることができない。またラジオゾンデの上昇経路は観測時の風速等に左右されるため、任意の方向の観測を行うことは困難である。更に、ラジオゾンデは基本的に使い捨てであり、観測の度にコストがかかるという欠点もある。

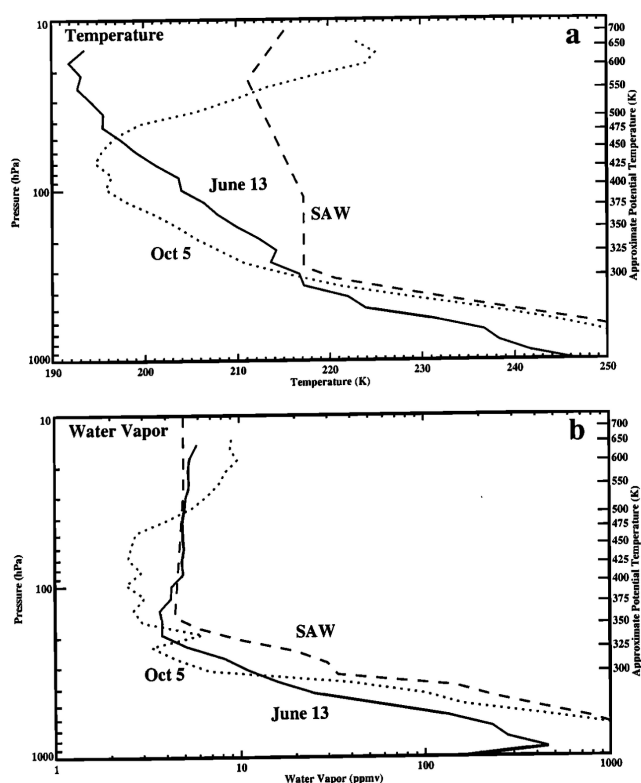


図1 McMurdo 基地上空の気温及び水蒸気濃度構造の季節変化。

Hicke et al., (1999)[1] より引用

1.1.3 衛星観測

衛星を利用して広域の観測を行う試みも行われている。*Waters et al.*, (2004)[3] は、AURA 衛星に搭載したマイクロ波放射計を利用し、南極大陸全体の水蒸気分布を報告している(図2)。衛星からの観測では、広い視野が得られるメリットがあるものの、観測可能場所が衛星の軌道によって決まってしまう点、そして時間解像度が数時間から数日程度と長いという特徴がある。南極域における観測例は他にもあるものの、数時間から数日単位 of 観測であり、10分程度の短時間の水蒸気量の変化は十分解明されていない。

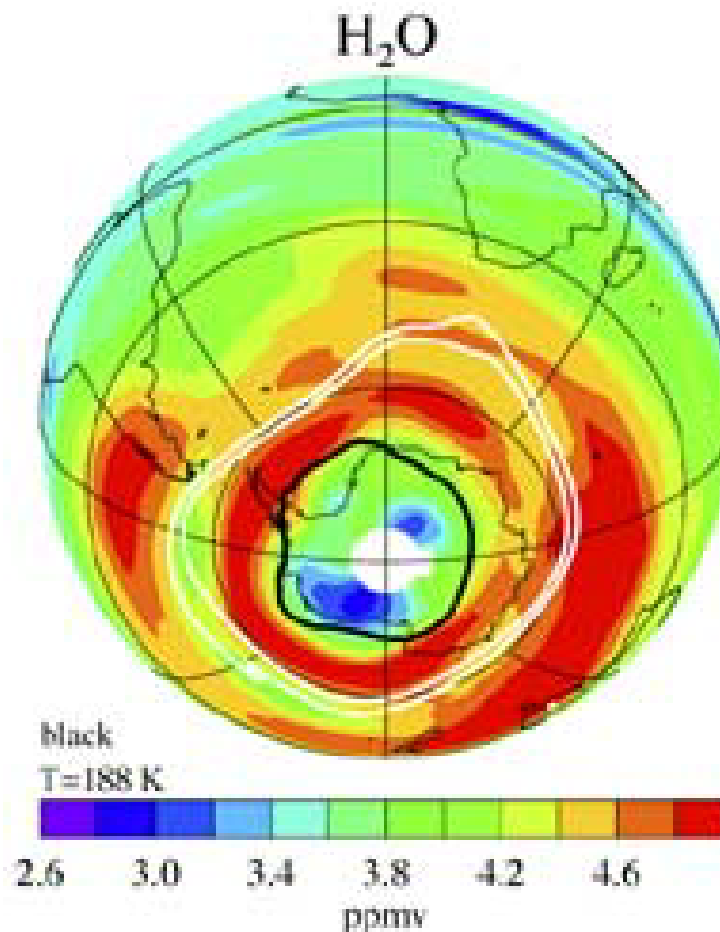


図2 2004/08/03 における南極大陸周辺の高度 18 km 以下の水蒸気分布。

Waters et al., (2004)[3] より引用

本研究では、現在観測されていない10分程度の時間間隔で水蒸気量の分布と変化を解明するため、地上から天体を観測した際に大気の影響がデータに含まれることを利用し、星のスペク

トル観測を用いた水蒸気量の推定方法を開発した。観測したスペクトルから水蒸気の影響の大きさを抜き出し、視線方向の水蒸気カラム量を推定する。地上でのスペクトル観測はゾンデ観測に比べて任意の方向を観測でき、衛星観測よりも時間解像度を上げることができる。この方法を用い、10分程度から数時間のスケールで観測値周辺の水蒸気分布及びその輸送の推定を試みる。本論文では、その第一歩として、標準星を撮影したデータから計算した水蒸気吸収の強さと観測時の地上水蒸気圧、可降水量を比較した結果を紹介する。

2 観測手法

観測地点における水蒸気のカラム量を観測する方法として、本研究では可視スペクトルが知られている標準星のスペクトル観測を実施した。以下に観測の詳細を述べる。

2.1 観測の概要

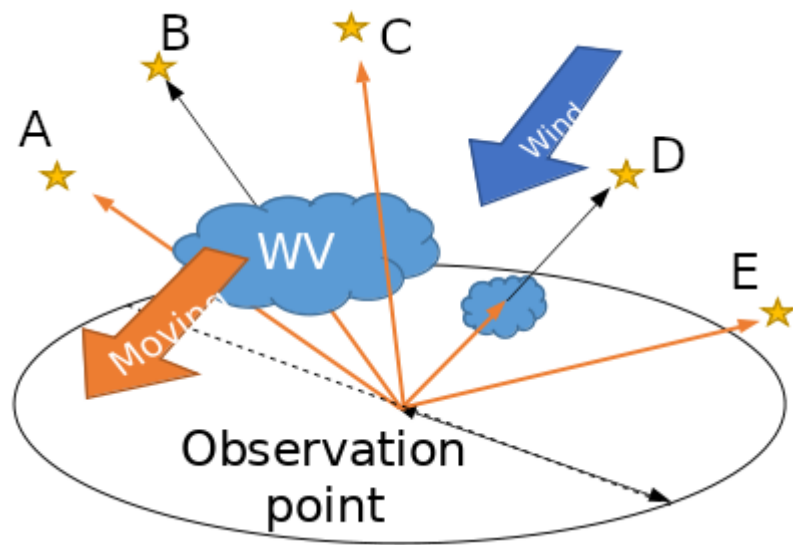
地球上から天体を観測する際には、その光は天体と観測装置の間に存在する地球大気の影響を受ける。地上で観測されるデータ F は、大気のない場所で観測されるデータ F_0 及び光路長 x , 吸収係数 k を用いて、

$$F = F_0 \exp(-kx) \quad (1)$$

と書ける。ここで、 k は大気中に含まれる各分子の存在量によって変化する。したがって、 F/F_0 の変化を求めることで、 k の変化を見積もることができ、各分子の存在量の変化を間接的に求めることができる。

この特徴を利用し、水蒸気の吸収波長に注目して本研究では多数の天体を観測する掃天観測と、一つのエリアに着目して時間間隔の短い観測を行う集中連続観測の二種類の観測を実施した。

掃天観測は西の空を中心とした10数個の天体を1周あたり1時間ほどで観測し、水蒸気吸収の強さを比べることで、観測地点からの観測できる水平線までの距離である半径3 kmの範囲での水蒸気の水平分布を明らかにする(図3)。集中連続観測では、天頂付近の星を10分ごとに観測し、水蒸気輸送をより短い時間間隔でとらえる(図4)。これらの機材のコンディションや天候に合わせて実施した。以下では、掃天観測時に観測した標準星の観測データを



解析した結果を示す。

図3 掃天観測の概念図。WVは水蒸気を表す。星A,C,Eの観測では水蒸気吸収は弱く、Bの観測では強い吸収が、Dの観測では中程度の吸収が見られると考えられる。

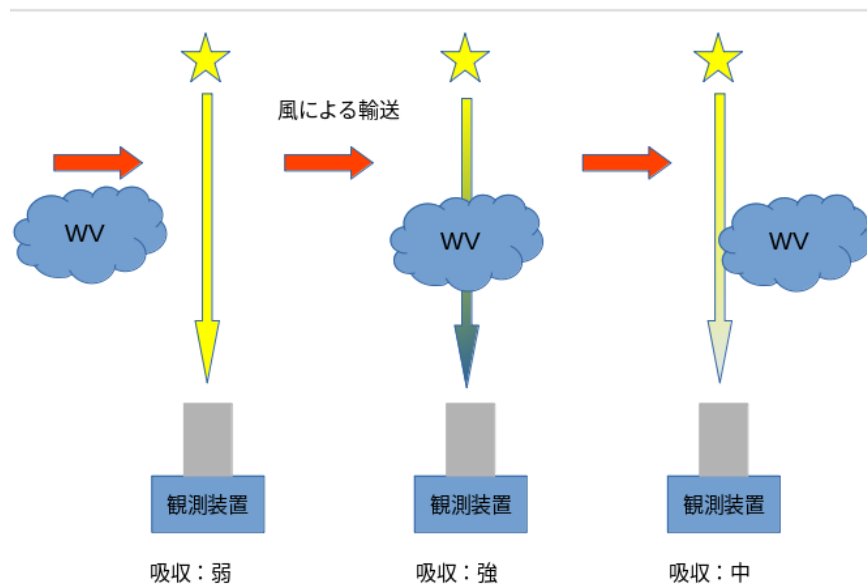


図4 集中連続観測の概念図。一つの天体を短い時間間隔で連続撮影し、吸収の変化の検出を試みる

2.2 観測装置

本研究で用いた観測装置の構成を図5に、観測棟屋上に設置した様子と分光器の内部構造を図6に示し、次にそれぞれの装置の詳細を述べる。

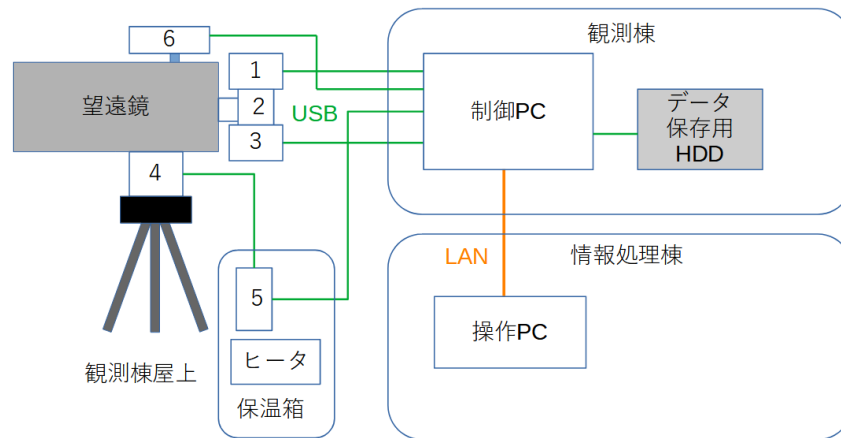


図5 観測装置の構成

1. スペクトル取得用モノクロ冷却 CCD カメラ(Bitran 社製 BU-50LN)
2. 光藝分光器(京都虹光房製)
3. 導入補助用モノクロ CCD カメラ(Imaging Source 社製 DMK41AU02)
4. EM-200 + E-ZEUSII 赤道儀 (高橋製作所,輝星製)
5. E-ZEUSII モータードライバ
- 6.オートガイダー(QHYCCD 社製)

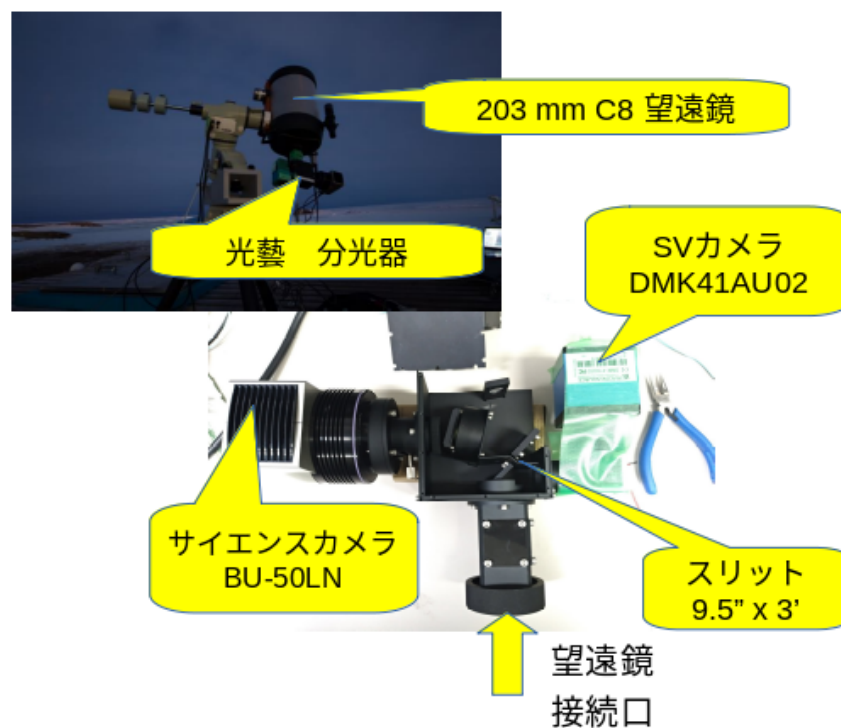


図6 観測実施時の装置の様子と分光器内部

2.1.1 望遠鏡と分光器、カメラ

観測には Celestron 社製のシュミットカセグレン式 C8 望遠鏡と LLP 京都虹光房製の スリット式分光器である光藝を組み合わせて使用した。光藝にはスペクトルを取得するサイエンスカメラ(Bitran社製 BU-50LN)および、スリット上への光の当たり方を確認するためのスリットビューワーカメラ(Imaging Source 社製 DMK41AU02)を搭載している。望遠鏡とカメラ、及び分光器の性能を表 1 に示す。

表1 望遠鏡とカメラ及び分光器の主要性能

望遠鏡有効口径 [nm]	203
F 値	F/10
焦点距離 [nm]	2032
有効波長域 [nm]	592.2 - 925.7
波長分解能 [$\lambda/\Delta\lambda$]	300 @600 nm
スリット視野	9.5 " x 3 '
サイエンスカメラピクセルスケール	0.43 [nm/pixel@600nm]

2.1.2 感度校正

波長校正は国立極地研究所にある狭帯域光源装置 ASBN-D1-WXXX と分光器 DK240 (Ogawa *et al.*, 2022 [12])を利用した(図7)。狭帯域光源装置を用いて 600 [nm], 650 [nm], 700 [nm], 750 [nm], 770 [nm] の光を出し、白板に反射させた様子を装置で観測してスペクトルを得、最も明るくなったピクセルをその波長を示すピクセルとした。その後、それぞれの波長を示すピクセルの座標から、各ピクセルが示す波長を計算し波長構成データとした。DK240で観測した光源のFWHMは表2のとおりである。

表2 波長校正時の光源FWHM

中心波長 [nm]	FWHM [nm]
600	6.46
650	5.78
700	6.98
750	6.90

770	6.76
-----	------

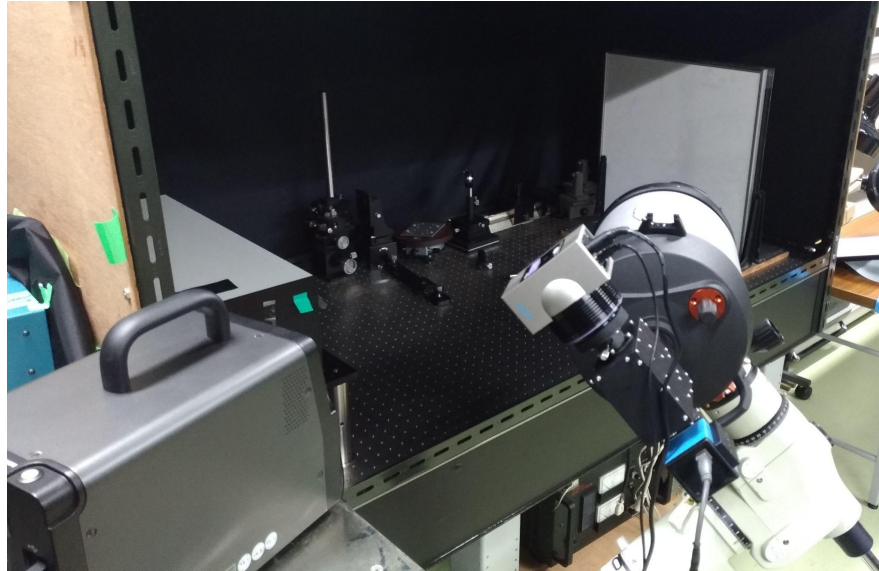


図7: 国立極地研究所光学校正室での波長校正実験。
 左手前が分光器 DK240、左奥が狭帯域光源装置、右手前が望遠鏡と分光器。

波長相対感度校正については、北海道大学の宇宙ミッションセンターにある積分球システムを利用した。積分球の標準ランプを付属の分光器と同時に撮影した。本装置で取得した光源スペクトル分光器を f_{tel} , 光源装置付属の分光器で観測したスペクトルを F_{comp} とし、両者の比 $Eff(\lambda)$ と波長相対感度データ E_{inst} を式2 のように求めた。ここで、 $Max(A)$ は、 A の最大値を示す関数である。

$$Eff(\lambda) = \frac{f_{tel}(\lambda)}{F_{cont}(\lambda)}$$

$$E_{inst} = \frac{Eff(\lambda)}{Max(Eff)} \quad (2)$$

計算した E_{inst} を図8 に示す。

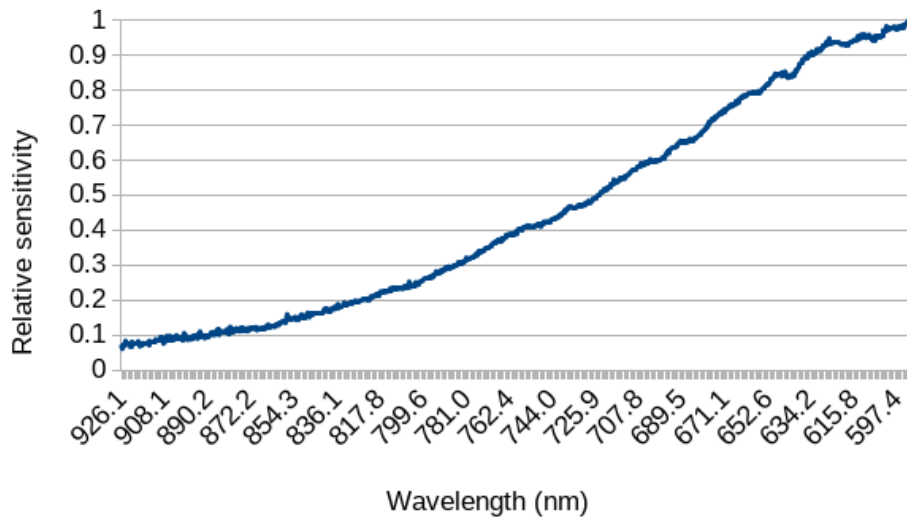


図8 観測装置全体の波長相対感度 E_{inst}

2.1.3 赤道儀

望遠鏡及び分光器は高橋製作所製の EM-200 型赤道儀に搭載した。室内から遠隔操作が出来るよう、モーター制御装置を輝星製の E-ZEUSII に換装した。この制御装置は USB ケーブルで制御 PC に接続され、制御ソフトウェア「SUPERSTAR V」を用いて自動導入が可能である。また、QHYCCD社製のオートガイダーからの信号を受けて追尾を修正することができる。

極軸合わせについては、Hemisphere GNSS社製のVS330 GNSSコンパスを利用し、極軸の仰角を69 °に、方向を 180 °(真南)に向けてセットした。ブリザードや強風等、悪天候の際は、三脚を残し、赤道儀と望遠鏡、分光器を屋内に退避させ、天候回復後に再設置した。

2.2 観測の実施場所

観測は南極圏リュツォ・ホルム湾の東オングル島に位置する昭和基地内の観測棟屋上にて実施した。昭和基地の緯度経度は表3 の通りである。屋上に三脚、赤道儀、望遠鏡及び分光器を設置し、観測棟内に設置した制御PCにUSBケーブルで接続した。制御PCは LANにて昭和基地内ネットワークに接続され、実際の観測は、情報処理棟から制御PCに VNC接続して実施した。

表3 観測場所

南緯	東経
69° 00" 19'	39° 34" 52'

2.3 観測対象天体

観測対象天体のリストを表4 に示す。観測天体は SIMBAD[5] を利用し、V バンドおよび R バンドでの等級が 5 以上の天体を選定した。スペクトル標準星は HR74 を利用した。スペクトルデータは *Glushneva+ 1998* [6] のものを利用した。

表 4: 目標天体

HR番号	RA [h m s]	DEC [dec]
6461	17 25 17.98835	-55 31 47.5868
2326	06 23 57.10988	-52 41 44.3810
3685	09 13 11.97746	-69 43 01.9473
5459	14 39 36.49400	-60 50 02.3737
4819	12 41 31.04008	-48 57 35.5375
74	00 19 25.67416	-08 49 26.1111
4730	12 26 35.896	-63 05 56.73
4662	12 15 48.37081	-17 32 30.9496
8425	22 08 13.98473	-46 57 39.5078
7790	20 25 38.85705	-56 44 06.3230
99	00 26 17.05140	-42 18 21.5539
8728	22 57 39.04625	-29 37 20.0533
6879	18 24 10.31840	-34 23 04.6193
2491	06 45 08.917	-16 42 58.02
6217	16 48 39.89508	-69 01 39.7626

2.4 観測実績

観測日時と気温、風速および卓越方位と撮影天体数とセット数を表 5 にまとめた。テスト観測、掃天観測、集中連続観測合わせて53夜の観測を実施した。風速が5 [m/s]以上では、望遠鏡が揺れてしまい目標天体を安定して観測できなくなったため、風が収まるまで観測を一時中止した。

表 5: 実施した観測

日付	実施時間(LT)	気温(°C)	風速(m/s,方位)	撮影天体数x セット数	実施した 観測
2月11日	23:39-23:55	-4	1.0 ESE	2 x 1	試験
2月22日	02:31-03:02	-7.5	2.6 SE	2 x 1	試験
2月26日	22:01-01:34	-6.1	2.3 E	7 x 1	掃天
2月27日	22:21-23:50	-4.7	0.8 E	4 x 1	掃天
2月28日	22:48-01:53	-9.5	2.7 SW	9 x 1	掃天
3月2日	22:21-03:59	-12.2	1.9 SW	11 x 1	掃天
3月3日	23:28-02:48	-7.7	5.8 NE	10 x 1	掃天
3月7日	01:31-02:08	-5.5	2.2 ESE	4 x 1	掃天
3月8日	00:51-01:25	-4.7	3.0 E	5 x 1	掃天
3月12日	22:52-03:47	-7.2	1.5 S	10 x 1.5	掃天
3月13日	21:10-04:13	-10.6	1.7 E	18 x 2	掃天
3月14日	00:33-02:54	-11.3	2.3 SSW	8 x 1	掃天
4月5日	22:00-02:07	-15	0.4 SE	12 x 1.2	掃天
4月6日	01:49-05:13	-10.9	3.5 NE	5 x 1	掃天
4月8日	20:08-05:38	-18.4	3.7 S	15 x 1.2	掃天

4月13日	21:30-01:22	-15.4	3.2 NE	2 x 1	試験
4月20日	20:21-01:39	-20.2	3.7 ESE	10 x 1.7	掃天
5月12日	00:13-01:27	-10.6	3.5 S	1 x 2	試験
5月24日	23:56-06:03	-23.8	2.7 SE	1 x 38	集中
6月1日	20:35-04:31	-20.6	4.0,NE	4 x 1,1 x 3	集中
6月6日	23:54-02:05	-18.8	2.2,E	1 x 16	集中
6月7日	20:03-04:22	-21.5	1.3,ENE	6 x 1	試験
6月26日	2212-0605	-16.1	1.8,NE	1 x 47	集中
6月27日	23:54-05:51	-21.2	2.4,SE	1 x 20	集中
6月28日	23:50-06:00	-21.2	2.4,SE	1 x 36	集中
7月5日	23:21-04:01	-14.6	1.8 SE	1 x 30	集中
7月11日	21:06-05:45	-28.8	0.0 --	1 x 29	集中
7月17日	00:58-04:30	-13.2	1.6 E	1 x 23	集中
7月19日	20:27-03:23	-21.5	1.8 WSW	10 x 1.8	掃天
8月1日	20:48-04:45	-25.4	1.4 SSE	13 x 2	掃天
8月2日	20:34-23:44	-34.8	0.0 --	6 x 1	掃天
8月3日	20:53-03:58	-23.6	1.6 SSE	15 x 1.2	掃天
8月4日	20:39-23:42	-17.2	2.8 ESE	1 x 13	集中
8月5日	20:49-02:54	-26.8	2.7 SSW	13 x 2	掃天
8月7日	21:48-00:03	-33.5	0.0 --	14 x 1	掃天
8月8日	20:46-05:32	-36.6	0.0 --	1 x 52	集中
8月9日	01:05-07:07	-23.3	2.1 E	13 x 1.8	掃天
8月14日	23:23-00:04	-15.3	1.3 N	4 x 1	掃天
8月20日	22:50-04:17	-17.9	1.8 SSW	16 x 2.1	掃天
8月26日	23:49-00:39	-24.7	2.1 S	9 x 0.5	掃天

8月28日	22:12-04:31	-25.1	0.9 S	12 x 4	掃天
8月29日	22:28-04:46	-28.6	0.7 S	14 x 5	掃天
9月1日	21:42-05:09	-16.7	1.5 S	14 x 4.5	掃天
9月3日	21:04-05:22	-23.9	0.5 S	11 x 5	掃天
9月10日	20:38-03:43	-26.2	0.0 --	12 x 4	掃天
9月11日	21:51-03:19	-23.8	0.0 --	15 x 3	掃天
9月12日	21:22-04:29	-23.7	4.2 SSE	15 x 4	掃天
9月15日	21:17-21:59	-17.8	2.3 NNE	5 x 2	掃天
9月17日	20:39-03:18	-14.8	2.6 E	15 x 4	掃天
9月18日	21:21-03:58	-17.9	0.6 NE	18 x 4	掃天
9月19日	20:47-03:53	-18.9	0.8 E	17 x 3	掃天
10月4日	21:30-02:45	-18.2	1.0 ENE	13 x 3	掃天

3 解析

3.1 一次解析

分光された目標天体の光はサイエンスカメラの AD 変換器により、16bit 白黒 TIFF イメージに変換され保存される。保存された画像 I_{raw} からCCDのバイアス電流に由来するノイズ等を除くため、ダークフレーム引きを行った。ダークフレーム(I_{Dark})は観測終了時に鏡筒に蓋をし、露出時間を1秒に設定し撮影した。ダーク引き後の画像を I_{df} とすると、

$$I_{df} = I_{Raw} - I_{Dark} \quad (3)$$

である。図9 は I_{df} の状態のTIFFファイルである。このファイルは772x580のピクセルで構成される。ここで、画像左上を(0,0)とし、座標(X, Y)のピクセルのカウント値[ADU]を $f(X, Y)$ とする。

分光された星の光はX方向に広がり、X座標は波長に対応する。星の光は理想的には点光源であるが、実際には大気や光学系の影響でY軸方向に広がった像として観測される。本解析では、星の中心のY座標上下20ピクセルの範囲を星の光、星の中心からY座標20-40ピクセルの範囲を空の明るさによる影響とした。

はじめに星の中心 Y_{center} を導出する。ここではあるY座標でのカウント値の和を計算し、和が最大になるY座標を星の中心とした(式4)。

$$Y_{center} = \text{Max}\left(\sum_{X=0}^{X=772} f(X, Y)\right) \quad (4)$$

ここで、 $\text{Max}(f(x))$ は、 $f(x)$ が最大値を取るときの x の値を示す関数である。したがって星のスペクトル I_{star} および空のスペクトル I_{sky} は、

$$I_{star}(X) = \sum_{Y=Y_{center}}^{Y=Y_{center}+20} f(X, Y)$$

$$I_{sky}(X) = \sum_{Y=Y_{center}+20}^{Y=Y_{center}+40} f(X, Y)$$

であり、2.1.2 で取得した波長校正データを用いてX座標を波長 λ [nm]に読み替え、撮影時の露光時間 t [s]で割ることで、一秒あたりの観測データ F_{obs} [ADU/s](式5)を得る。

$$F_{obs}(\lambda) = \frac{I_{star}(\lambda) - I_{sky}(\lambda)}{t} \quad (5)$$

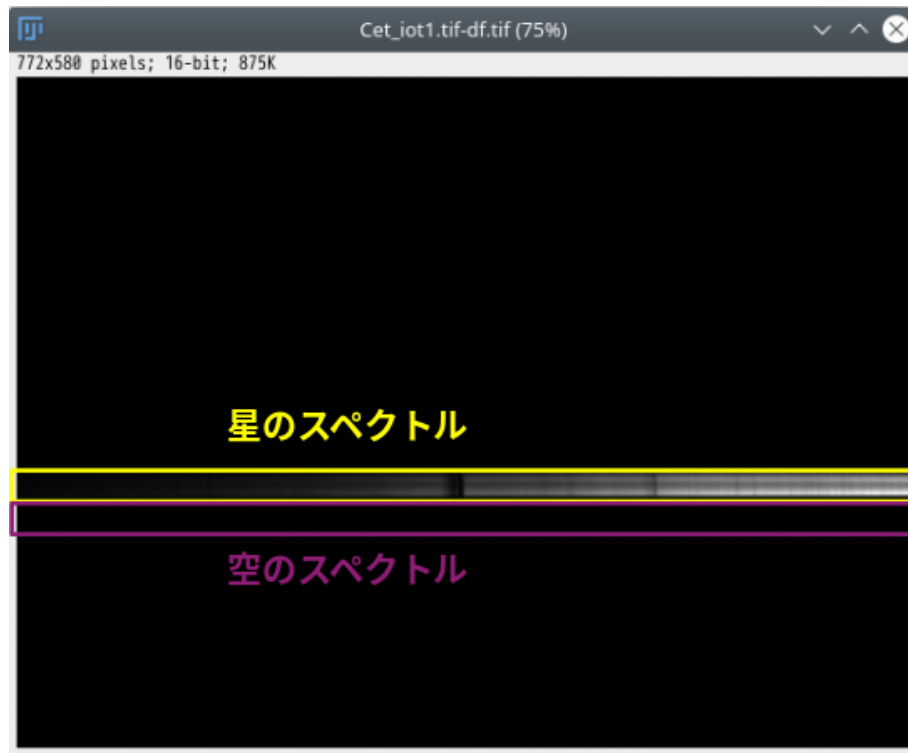


図9 取得したTIFFファイルと計算に用いた場所

3.2 標準星カタログデータを用いた吸収の解析

$F_{obs}(\lambda)$ には星そのもののスペクトル $F_{star}(\lambda)$ だけでなく、星と観測装置までの間に存在する地球大気の影響 $E_{atm}(\lambda)$ 及び装置の感度による影響 $E_{inst}(\lambda)$ が含まれていると考えることができる(式6)。

$$F_{obs} = F_{star} E_{inst} E_{atm} \quad (6)$$

ここで E_{inst} は 2.1.2 節で取得した相対波長感度を用いる。 F_{star} については、Glushneva+ (1998) [6] を星本来のスペクトルとみなした。したがって、観測データとこれらの値より、地球大気による影響 E_{atm} は、

$$E_{atm} = \frac{F_{obs}}{F_{star} E_{inst}} \quad (7)$$

となる。またここで、 E_{atm} の次元は、[ADU/s/mW/cm²/nm] である。

3.3 H₂O、O₂ による吸収

地球大気に含まれる H₂O および O₂ は、観測波長域に吸収のピークを持つことが知られている。本解析では吸収波長を調べるために HITRAN[10] および Exocross[11] を利用した。図10 と図11 は Exocross を用いて計算した H₂O および O₂ の吸収断面積である。Exocrossによる計算条件を表6に示す。それぞれの気温は昭和基地の気象データから、H₂O 分圧についてはSonntagの式(Sonntag., 1990 [13])から、O₂ 分圧は気象庁の観測による地上気圧と地球大気の組成を元に計算した。

表6 Exocross による計算条件

分子	温度 [K]	分圧 [hPa]
H ₂ O	243	0.4
O ₂	243	195.8

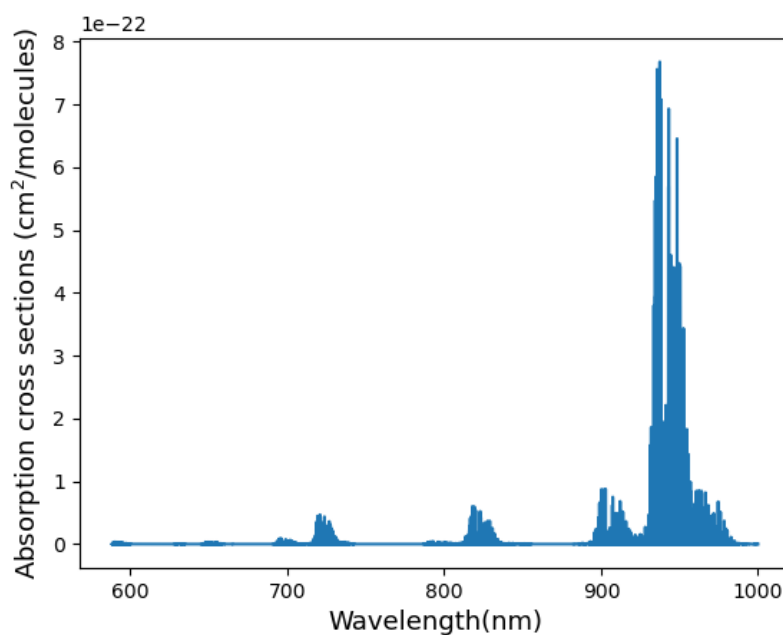


図10 Exocross にて計算した H₂O の可視光域での吸収断面積

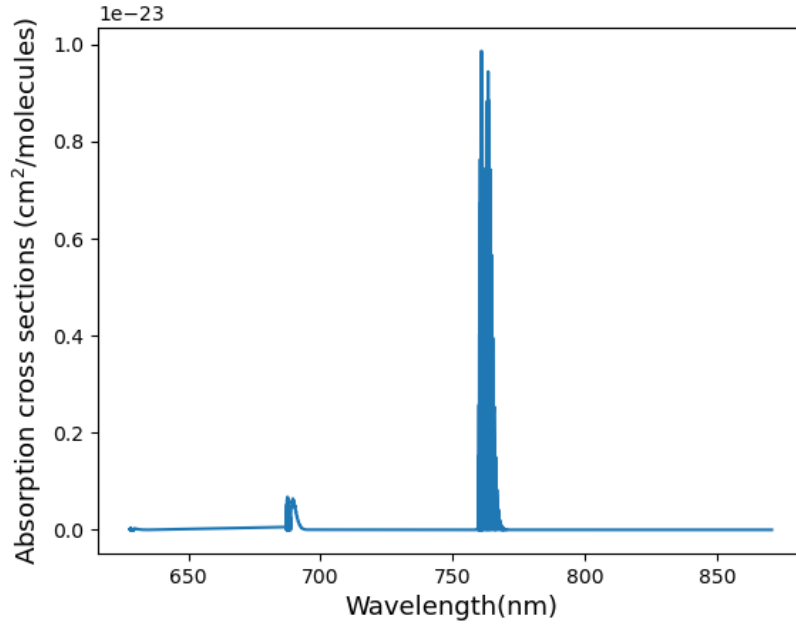


図11 Exocross にて計算した O₂ の可視光域での吸収断面積

図7 と図8 を元に、各分子の吸収波長を表7 のように見積もった。この波長域での吸収の強さを評価するために、 E_{atm} に含まれる連続光成分をモデル化する。本解析では表 6 より、吸収のない波長域(表8)を考え、その部分のデータから包絡線を作成し連続光モデルとした。まず観測データに含まれるノイズを軽減するために、観測データ全体に5 ステップ(約2.5 [nm])の移動平均を取り、 E_{atmmv} を得た。その後、フィット波長のデータに対し、4次多項式モデル $F_{contmodel}$ (式8)をフィットさせた。

$$F_{contmodel}(\lambda) = a_0\lambda^4 + a_1\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_3\lambda + a_4 \quad (8)$$

であり、 $F_{contmodel}(\lambda) - E_{atmmv}(\lambda)$ が最小になるよう、それぞれのスペクトルについて a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 を計算した。計算にはPythonのscipyパッケージに含まれる `scipy.optimize.curve_fit` 関数[16]を利用した。図12 は作成したモデルと実際のデータをプロットしたものである。

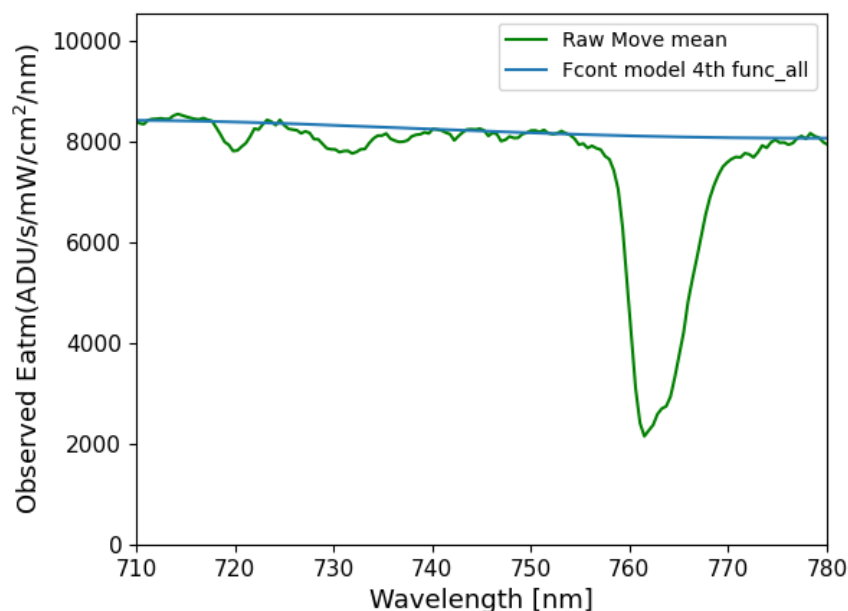


図12 2021/08/28 に撮影した HR74 のデータから計算した E_{atm_mv} (緑) と $F_{contmodel}$ (青)

この $F_{contmodel}$ と E_{atm} 、そして表7 の吸収波長の情報を組み合わせ、 H_2O と O_2 による吸収の等価幅 Abs_{H_2O} 、 Abs_{O_2} を式9 のように求めることができる。本解析では吸収が顕著であり、装置の感度が比較的良好な 716[nm] から 731[nm] の H_2O 吸収と、759[nm] から 770[nm] の O_2 吸収に着目した。

表7 H_2O と O_2 の吸収波長

分子	閾値 [$cm^2/molecular$]	吸収波長 [nm]
H_2O	10^{-24}	-597,647-658,692-706,710-744,784-851,888-
O_2	10^{-26}	627-632, 686-694, 759-770

表8 H_2O と O_2 の吸収を考慮したフィット波長

フィット波長 [nm]
710-713,750-755,777.5-780,870-880

$$\begin{aligned}
Abs_{H_2O} &= \sum_{\lambda=716[\text{nm}]}^{\lambda=731[\text{nm}]} \frac{F_{contmodel}(\lambda) - E_{atm}(\lambda)}{F_{contmodel}(\lambda)} \\
Abs_{O_2} &= \sum_{\lambda=759[\text{nm}]}^{\lambda=770[\text{nm}]} \frac{F_{contmodel}(\lambda) - E_{atm}(\lambda)}{F_{contmodel}(\lambda)} \quad (9)
\end{aligned}$$

一方、吸収を引き起こす分子の視線方向の存在量 N に着目すると、 Abs は式1と同様に考え、大気上端までの距離 L 、そして吸収係数 k を用いて以下のように書ける。

$$Abs = \exp(kNL) \quad (10)$$

また、 Abs_{H_2O} と Abs_{O_2} の比 Abs_{comp} を考えると、

$$\begin{aligned}
Abs_{comp} &= \frac{Abs_{H_2O}}{Abs_{O_2}} \\
&= \exp(L(k_{H_2O}N_{H_2O} - k_{O_2}N_{O_2})) \quad (11)
\end{aligned}$$

となる。地球大気において、 N_{O_2} は大きく変化しないと考えられるので、 Abs_{comp} の変化は視線方向の水蒸気存在量 N_{H_2O} によるものだと考えることができる。

3.4 O_3 およびエアロゾルによる吸収

O_3 の吸収係数は、観測波長域において緩やかに変化することが知られている (Gorshchev *et al.*, 2014 [8])。図13は [8] より引用した O_3 の波長ごとの吸収係数である。

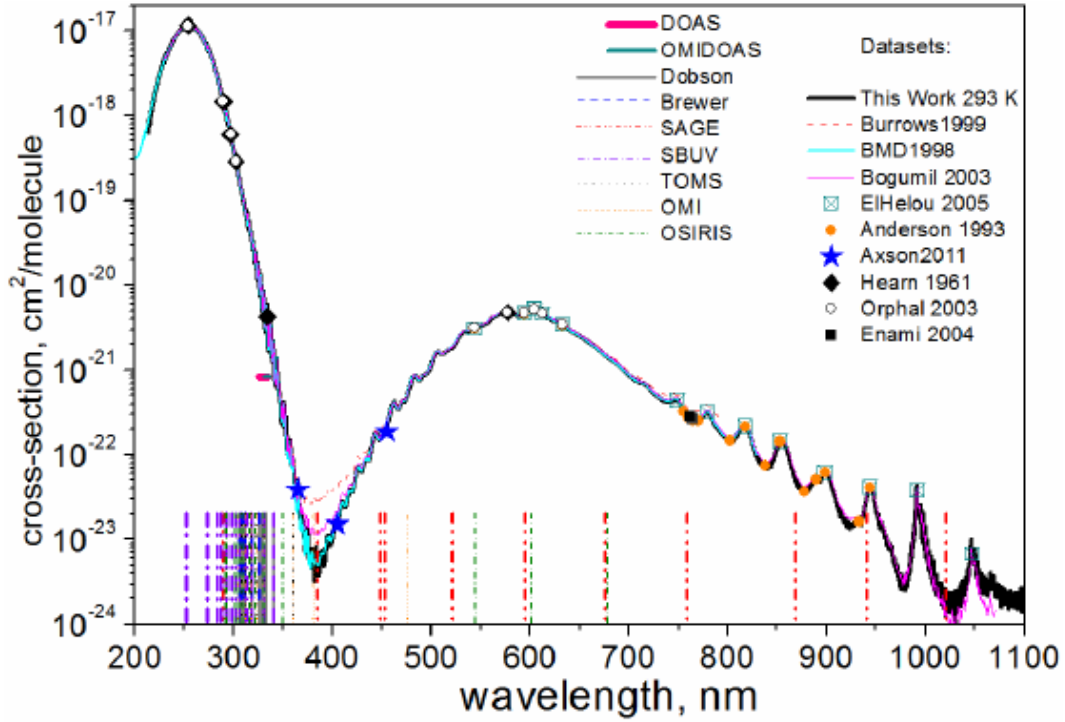


図13 Gorshelev et al., 2014 によるO₃ の吸収断面積

従って、注目している600 [nm] - 800 [nm] の範囲の E_{atm} にはO₃ の存在量に応じた吸収が加わっていることになる。また、可視光域には氷の粒や砂、ディーゼル発電機の排気などのエアロゾルによる吸収も含まれる。これらの影響を見積もる為、エアロゾルや地球大気成分による影響が無いスペクトルモデル F_{noabs} を考える。式6 より、

$$F_{noabs} = F_{star} E_{inst} \quad (12)$$

であるので、

$$\frac{F_{noabs} - F_{obs}}{F_{noabs}} = 1 - E_{atm} \quad (13)$$

となる。エアロゾルの影響を見やすくするために、ここでは E_{atm} としてO₂やH₂Oの吸収以外の部分を前節で計算した $F_{contmodel}$ を用いた。また、 F_{noabs} として、 $F_{contmodel}$ における最大値 F_{max} を変数とする以下のモデルを作成した。

$$F_{noabs}\lambda = A(\lambda)F_{max} + B(\lambda) \quad (14)$$

ここで、 $A(\lambda)$ と $B(\lambda)$ は2021/08/28のデータ $F_{contmodel0828}$ と2021/09/18のデータ $F_{contmodel0918}$ とそれぞれの F_{max} の値 $F_{max0828}$, $F_{max0918}$ を用いて、

$$A(\lambda) = \frac{F_{contmodel0828} - F_{contmodel0918}}{F_{max0828} - F_{max0918}}$$

$$B(\lambda) = F_{contmodel0828} - A(\lambda)F_{max0828} \quad (15)$$

となる。

図14は F_{noabs} と2021/08/28の E_{atm} をプロットしたものである。 F_{noabs} については、ノイズの少ない600 [nm] - 800 [nm] の範囲で F_{noabs} が E_{atm} を超過しないよう、 $F_{max} \times 1.1$ として計算した。これは2021/08/28のデータにも10%吸収が含まれていると仮定したためである。こうして計算した F_{noabs} および $F_{contmodel}$ を式13に代入し、 $1 - E_{atm}$ を求めたものが図15である。 $1 - E_{atm}$ が大きいほど、 F_{noabs} に対して E_{atm} の値が小さく、スペクトル全体が暗くなっていることを示す。図15より、最も差が大きいのは、2021/08/28のデータと2021/09/19のデータであり、その差は600 [nm] - 770 [nm] の範囲でおよそ9倍、770 [nm] より長波長域では10倍ほども異なる。時間間隔が比較的短い2021/08/28と2021/08/29、2021/09/18と2021/09/19をペアを比較しても、2021/08/28と2021/08/29のペアでおよそ50%、2021/09/18と2021/09/19のペアでも28%ほどの差がある。

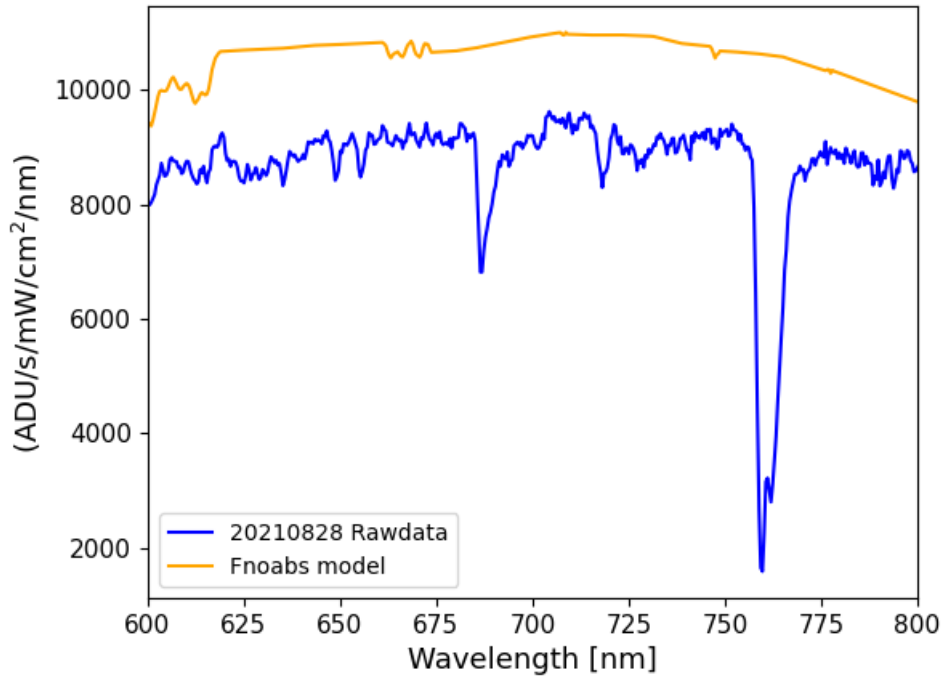


図14 2021/08/28の E_{atm} (青)と F_{noabs} (黄)の比較。

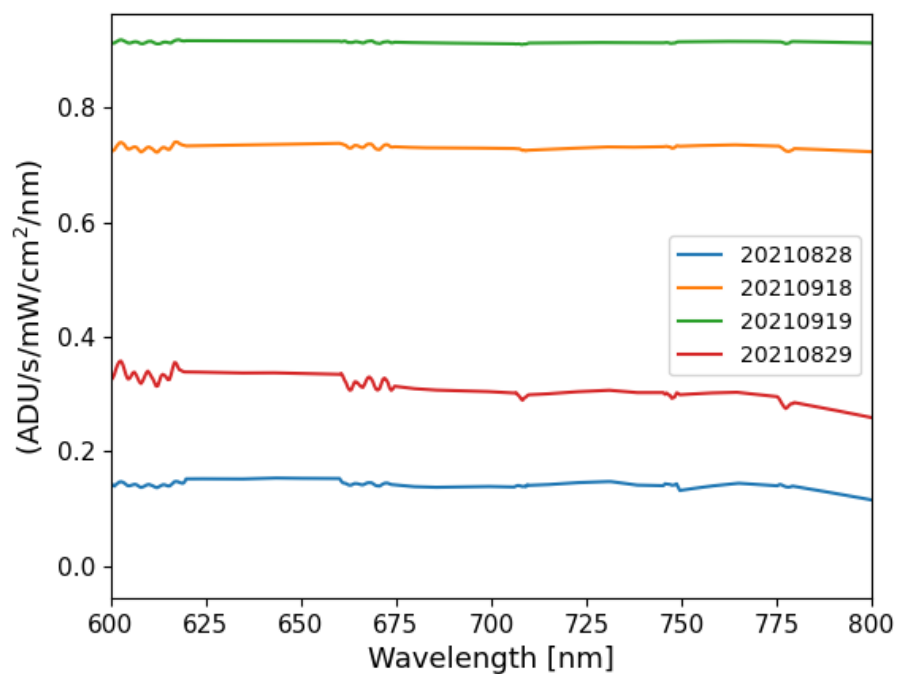


図15 各日付における $1 - E_{atm}$ の比較。縦軸の値が大きいほど E_{atm} が小さくなることを示す

4 解析結果と考察

4.1 Abs_{comp} の時間変化

図16,17はHR74の観測から計算した Abs_{comp} の時間変化である。

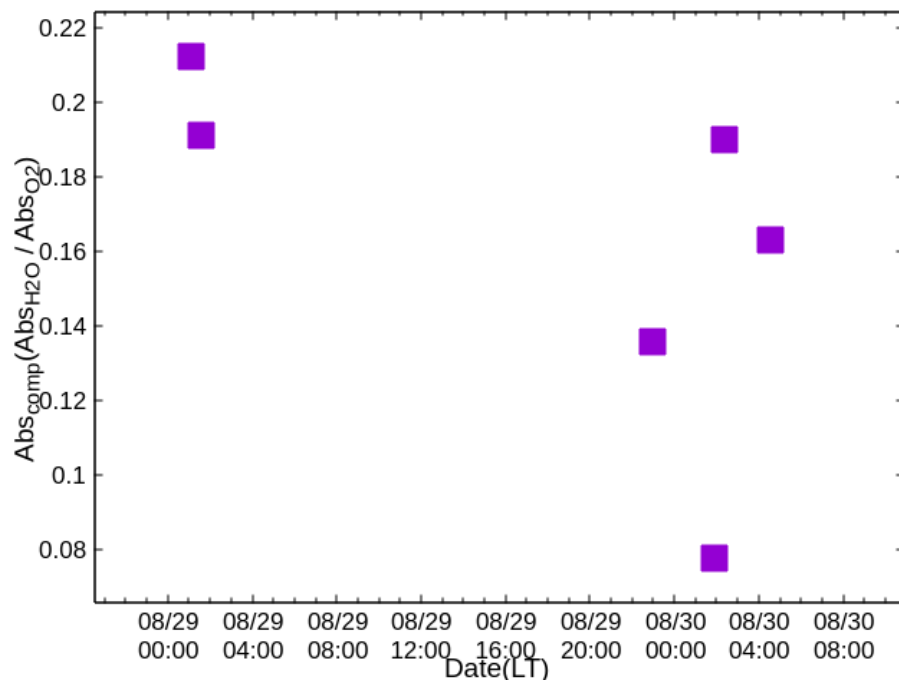


図16 2021/08/28-2021/08/30における Abs_{comp} の時間変化

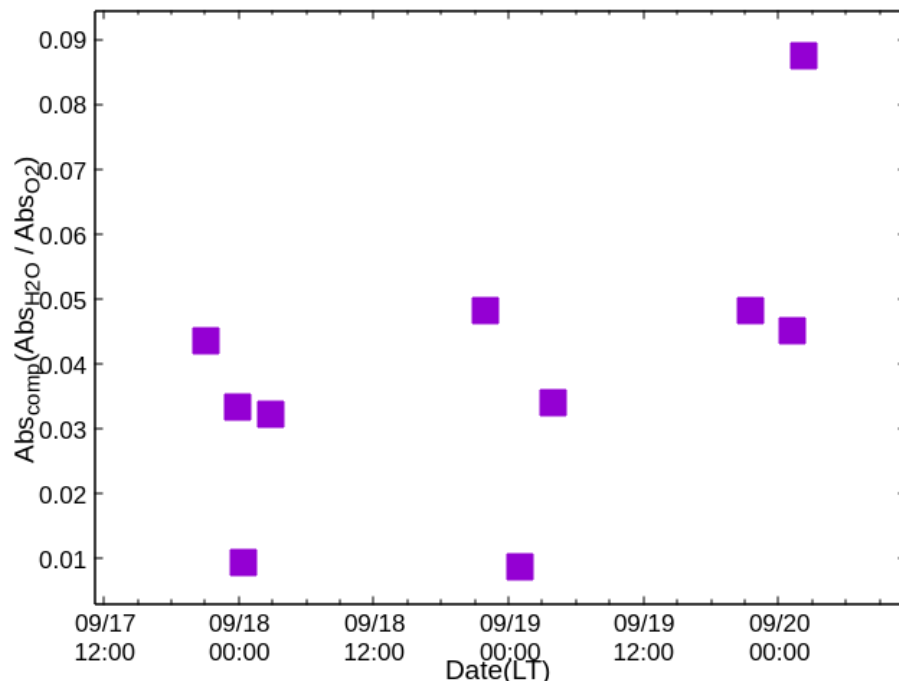


図17 2021/09/17-2021/09/20における Abs_{comp} の時間変化

図16,17より、 Abs_{comp} は、同じ日でも13 %から5倍ほどのばらつきが生じている。特に2021/09/19の観測データでは、およそ5倍の差が生じている。

4.2 誤差が生じる要因

解析結果のばらつきの原因を検証するために、計算結果に誤差を生む要因と、その影響の検討を行った。誤差要因としては、データに含まれるノイズと、包絡線の作成方法の違いによるものの2点が挙げられる。

4.2.1 データに含まれるノイズ

モデル化の際にはデータのノイズを軽減するために、5 ptの移動平均を実施した。この効果を検証するために、移動平均を取る前の E_{atm} から計算した $F_{contmodelraw}$ と3.3節で計算した $F_{contmodel}$ を比較したのが図18である。

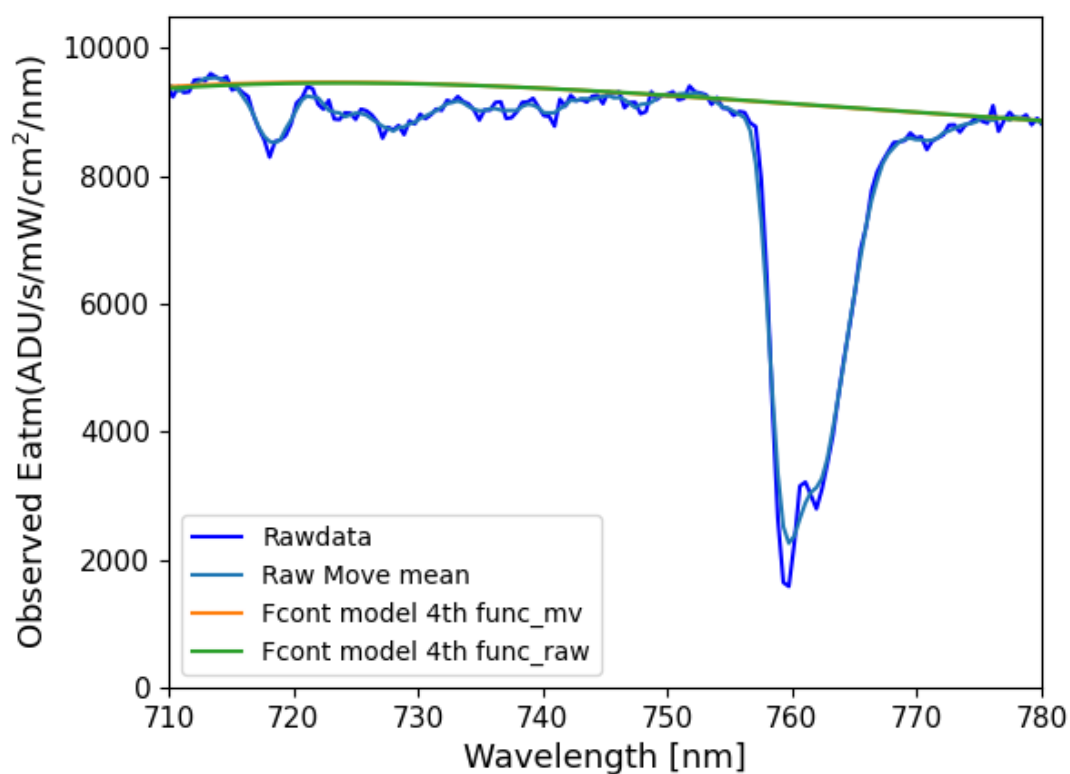


図18 2021/08/28の観測データにおける E_{atm} から計算した $F_{contmodelraw}$ と3.3節で E_{atmmv} から計算した $F_{contmodel}$ ・ Abs_{H2O} の差は約0.1%

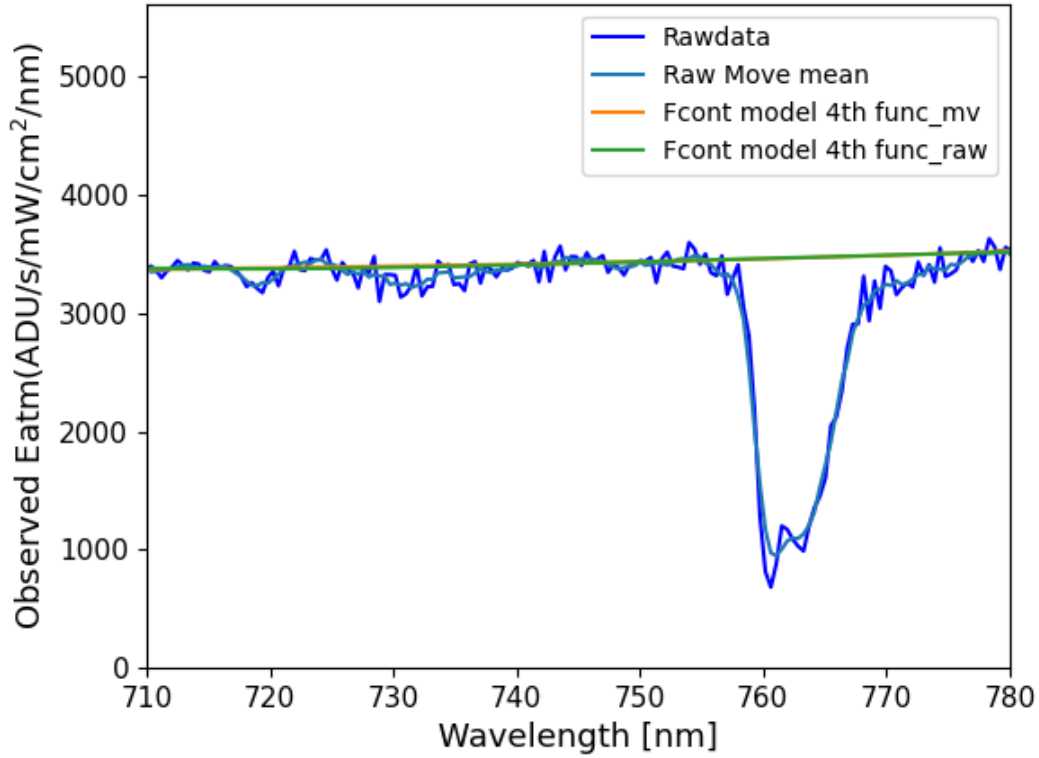


図19 2021/09/17の観測データにおける E_{atm} から計算した $F_{contmodelraw}$ と
3.3節で E_{atmmv} から計算した $F_{contmodel}$ 、 Abs_{H_2O} の差は約25 %

$F_{contmodelraw}$ と $F_{contmodel}$ からそれぞれから Abs_{H_2O} と Abs_{O_2} を計算し、その差(式16)

$$\frac{Abs_{contmodelraw} - Abs_{contmodel}}{Abs_{contmodelraw}} \quad (16)$$

を比較したところ、 Abs_{H_2O} で0.1-25 %、 Abs_{O_2} で約1.5 %の差が生じた。図18と図19より、 Abs_{H_2O} はスペクトル全体が暗い場合、ノイズによる誤差が大きくなると言える。

4.2.2 包絡線の作成方法による誤差

データにフィットさせる包絡線の作成方法によっても Abs の値は変化すると考えられる。 E_{atmmv} に対してフィット波長のデータを線形補間したモデル $F_{contint}$ との比較を行った。このモデルは、吸収の谷の両端を直線でつなぐように生成したモデルであり、最も単純にデータから包絡線を作成した結果である。図20、図21 は2021/08/28および2021/09/19の観測データの場合の例である。

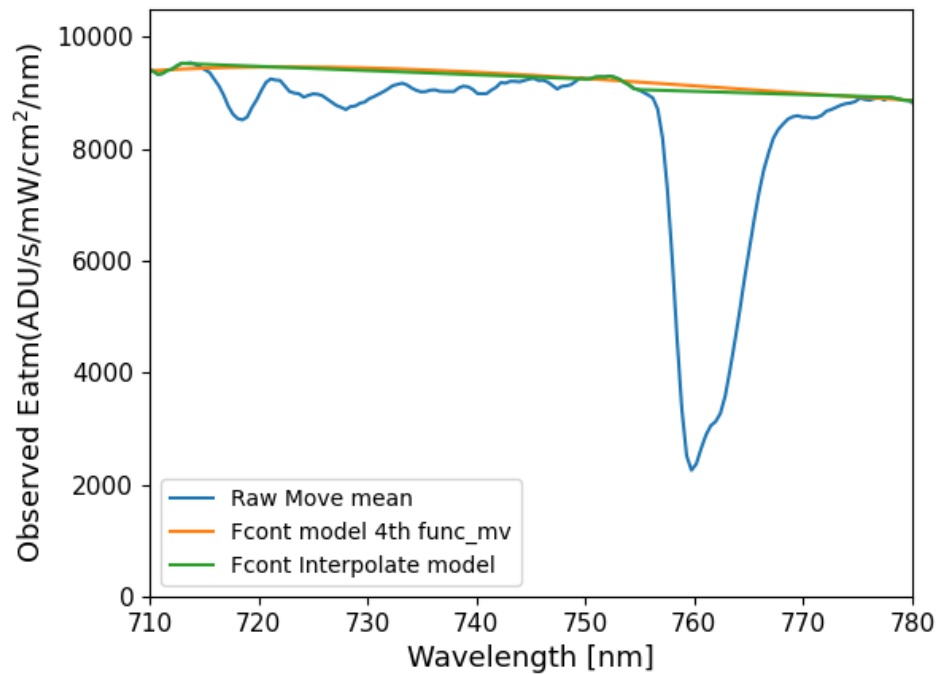


図20 2021/08/28の観測結果と4次多項式の最小二乗法フィットによるモデル(黄)とフィット波長データの線形補間によるモデル(緑)

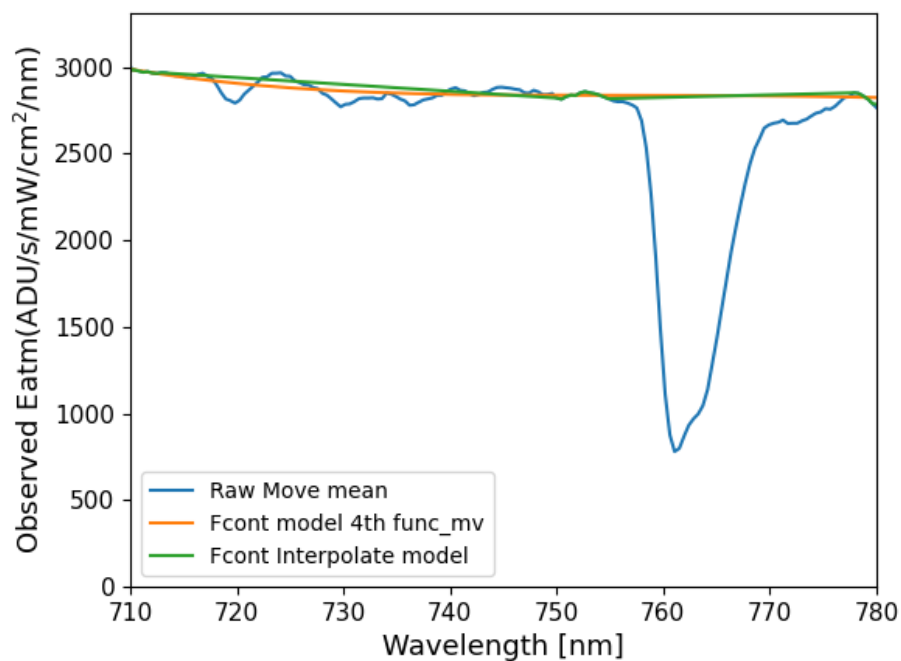


図21 2021/09/19の観測結果と4次多項式の最小二乗法フィットによるモデル(黄)とフィット波長データの線形補間によるモデル(緑)

この2つのモデルの計算結果の差を式16のように計算すると、 Abs_{H_2O} で数%から5倍程度、 Abs_{O_2} で10 %以内であった。特に図21 で示した2021/09/19の観測結果では、モデルの違いにより Abs_{H_2O} において5倍近くの差が生じた。以上のことを考えると、2021/09/19のようなおよそ5倍の変化は、包絡線の引き方によって生じている可能性がある。

4.3 地上水蒸気圧と Abs_{comp}

図22は、観測時の気象データから計算した地上での水蒸気圧と Abs_{comp} をプロットしたものである。点の色の違いは観測日を示す。

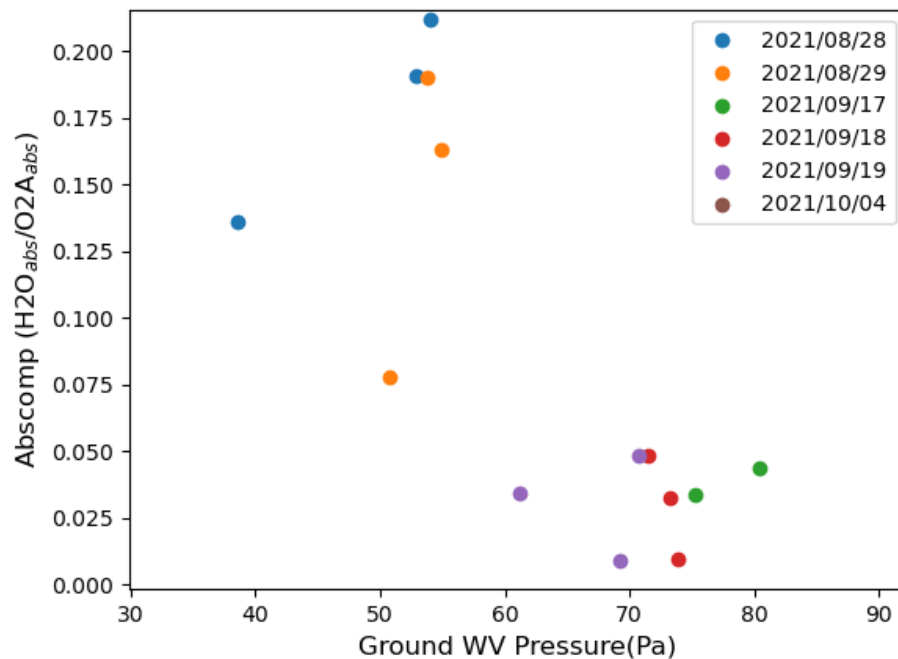


図22 計測した Abs_{comp} と観測時の気象データから計算した地上水蒸気圧

このときの相関係数は- 0.35であり、今回算出した Abs_{comp} と地上水蒸気圧の間には有意な相関はなかった。

4.4 可降水量と Abs_{comp}

本観測と並行して、気象庁によりラジオゾンデ観測が行われた。観測は毎日現地時間15:00と03:00に実施され、その時点での可降水量を計測している。可降水量とは、地表面から大気上端までに存在する水蒸気量の和を表す量である。本観測と最も近い時刻に実施されたラジオゾンデ観測によって得られた可降水量を横軸に、本観測で得られた Abs_{comp} を縦軸にプロットしたのが図23 である。点線は最小二乗法によって計算した近似直線である。可降水量と

Abs_{comp} の相関は0.89であり、両者には非常に強い相関が見られた。これは、本手法で得られる Abs_{comp} を用いて、水蒸気量の推定が可能であるということを示している。

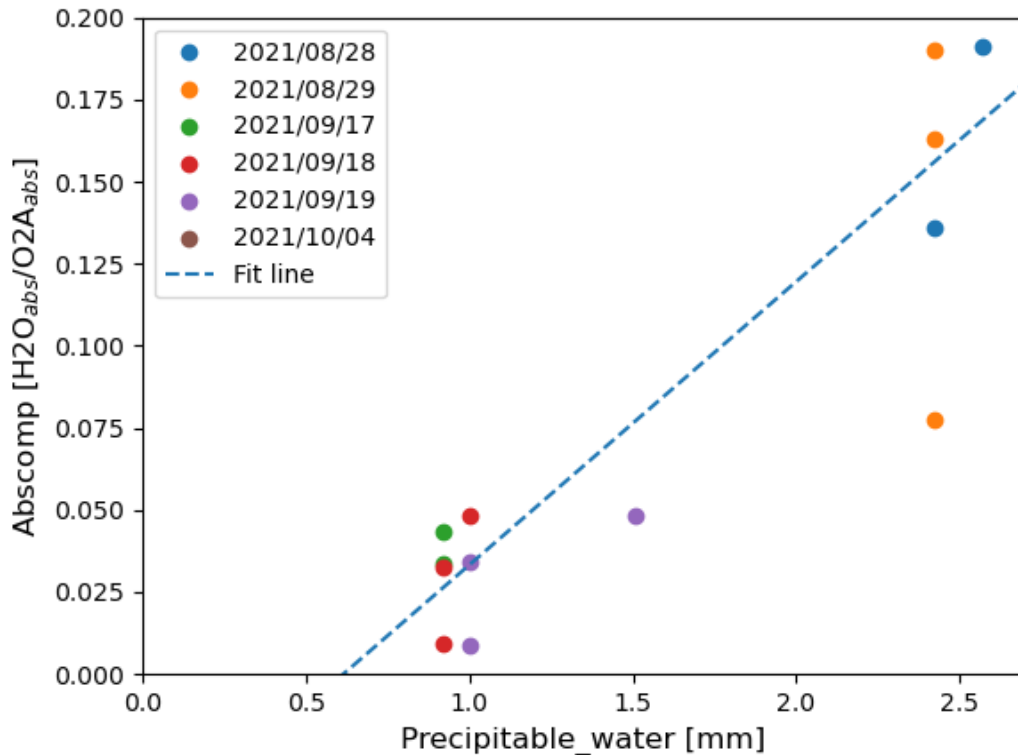


図23 可降水量とAbscomp、近似直線

4.5 考察

前節の通り、 Abs_{comp} は地上水蒸気圧よりも、可降水量と強い相関があった。しかしこれは驚くべきことではない。なぜならば、地上水蒸気圧と可降水量は必ずしも単純な関係とはならないからである。例として、2021/08/29 03:00(UTC +3)と2021/08/30 03:00(UTC +3)の場合を挙げる。それぞれの日時に実施されたラジオゾンデ観測によって得られた水蒸気圧の垂直分布を図24、図25に示す。それぞれ縦軸はゾンデの周辺気圧を表し、横軸はその地点での湿度と気温のデータから計算した水蒸気圧である。可降水量はそれぞれ2.57 [mm]と2.42 [mm]と5 %の違いであるが、その垂直分布は大きく異なり、地上水蒸気圧は30 %以上の差がある。したがって、本観測の実施日時においては、地上水蒸気圧は可降水量によって一意に推定できるわけではなく、 Abs_{comp} と地上水蒸気圧の相関がなかったのは水蒸気の垂直分布が異なったためであると考えられる。

また、 Abs_{comp} の時間変化に着目すると、数時間の間隔であっても、 Abs_{comp} はおよそ数倍のばらつきがあった。このばらつきは包絡線モデルの作成方法に由来する可能性がある。ばらつきが大きい2021/09/18, 2021/09/19は、他の日よりも全体的にスペクトルが暗く、可降水量も少ないため、包絡線が正確に引けていないことが原因と考えられる。それらのデータでは、3.4節で求めた F_{noabs} も暗くなっており、 O_3 およびエアロゾルの吸収が他の日に比べて大きかった

可能性もある。したがって、これらの数時間程度で見られた Abs_{comp} のばらつきは包絡線モデルの不正確さに由来するものであり、水蒸気量の時間変化を捉えたものではないと考えられる。

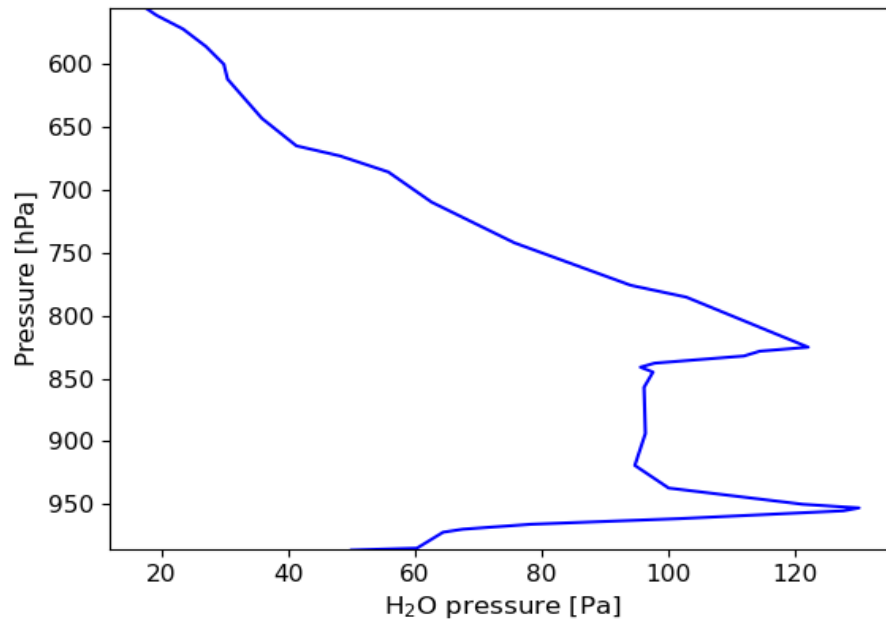


図24 2021/08/29 03:00 (UTC +3)での水蒸気圧の水平分布

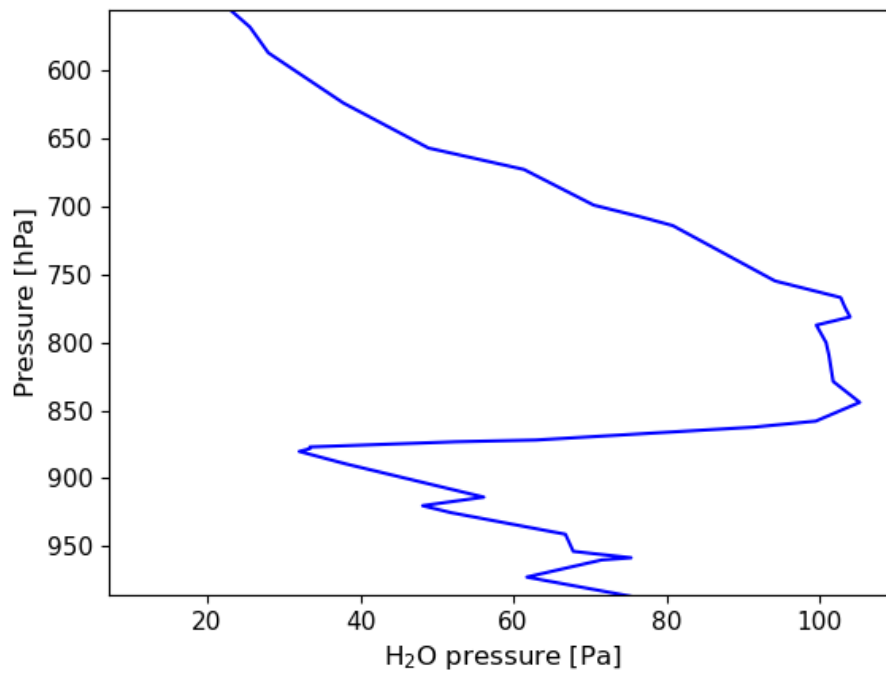


図25 2021/08/30 03:00 (UTC +3)での水蒸気圧の水平分布

4.6 今後の課題と展望

前節のとおり、今回算出した Abs_{comp} は可降水量と強い相関があり、 Abs_{comp} を計算することで水蒸気量の推定が行えると考えられる。本研究では一つの標準星の観測結果を解析したが、異なる方向の複数の標準星を観測できれば、水蒸気量の空間分布の推定も可能になる。また、カタログデータのない星の場合についても、その星のスペクトルを推定できれば、本方法によってその星のスペクトルを用いた水蒸気量の推定を行うことができる。更に今回使用したフィット波長と、 H_2O および O_2 の吸収波長に対応するフィルターを取り付けた全天カメラによって、複数の天体を同時に観測できれば、将来的には水蒸気量の空間分布の導出も可能になると考えられる。

本手法を発展させるために、以下の課題が残されている。まずは水蒸気量の時間変化の正確な推定のために、 Abs_{comp} のばらつきの大きさを小さくすることである。3.4節および4.3節の結果から、ばらつきの大きさには包絡線の作成方法と600 [nm] - 800 [nm] の範囲に存在する O_3 やエアロゾルなど他の成分の吸収の変化が関係していると考えられる。包絡線を正確に作成するには、十分に明るい星を観測するなど、明るいスペクトルを得る工夫が必要であり、更に他の成分による吸収の影響を正しく補正することが必要である。

次の課題は、カタログデータのない目標天体の解析方法の確立である。精度の良い空間分布を求めるためには、様々な方向の多数の星を満遍なく観測する必要があるが、既知の標準星の分布には偏りがあり、観測したい方向に必ずしも標準星があるとは限らない。したがって、カタログデータのない天体の光からもデータを得る必要がある。そういった星のスペクトルから等価幅を正確に計算するためには、星のスペクトルを推定する方法の確立が必要である。

5 まとめ

本研究では南極域での水蒸気輸送をこれまでにない時間解像度で解明するために、標準星のスペクトル観測から水蒸気吸収の強さを計算し、水蒸気カラム量の推定を行う方法を開発した。水蒸気吸収の強さを示す量として、スペクトルから H_2O と O_2 の等価幅の比 Abs_{comp} を計算し、その時間変化及び地上水蒸気圧、可降水量との比較を行った。

HR74を標準星とした2021/08/28, 2021/08/29, 2021/09/17, 2021/09/18, 2021/09/19, 2021/10/04の観測結果では、 Abs_{comp} は同じ日付であってもおよそ2倍ほど大きく変化した。また地上水蒸気圧との比較では、相関係数が - 0.35 と顕著な相関は見られなかった。しかし、観測と同時に実施されたラジオゾンデ観測による水蒸気圧の鉛直分布との比較により、地上水蒸気圧は可降水量と必ずしも結びついていないことが示されたため、これは驚くべきことではない。一方、可降水量との比較では、両者の相関係数は0.89であり、非常に強い相関があった。このことは、本手法で得られた Abs_{comp} を用いて水蒸気量の推定が可能であることを示している。

しかし、今回取得した Abs_{comp} は、同じ日でも13 %から5倍ほどと大きなばらつきがあった。これは、等価幅を計算する際に使用した包絡線に由来する可能性がある。特に、可降水量が少なく、スペクトル全体が暗い場合は、本論文の方法では正確にフィットした包絡線を引くことができなかったと考えられる。スペクトルの明るさの変化の原因を調べるために、 H_2O と O_2 による吸収の無いスペクトルモデル F_{noabs} を計算し、そのモデルの変化を検討したところ、ばらつきが大きい日には F_{noabs} は全体的に値が小さくなり、ばらつきの小さい日には F_{noabs} の値は全体的に大きくなった。 F_{noabs} の値の変化には、600 [nm] - 800 [nm] の範囲に存在する O_3 やエアロゾルなど他の成分の吸収の変化が関わっている可能性があり、これらの吸収が強くなることでスペクトル全体が暗くなり、正確な包絡線の作成ができなかったと考えられる。

今後は本観測を拡張し、全天カメラを用いて複数天体を同時に観測し、水平分布の推定を目指す。そのための課題として、正確な包絡線作成のための明るいスペクトルを得る方法の検討、その他の成分に由来する吸収の変化を正確に補正する方法を開発すること、そしてスペクトルデータの無い星のデータから正確に等価幅を計算するために、そのスペクトルの推定する方法を開発することの3点が挙げられる。

謝辞

本研究を実施するに当たり、第62次南極地域観測隊への参加をコーディネートしてくださり、論文指導していただいた北海道大学の高橋幸弘先生、佐藤光輝先生、高木聖子先生、久保田尚之先生、そしてEOUセミナーを通じ、様々な意見を寄せて下さった先輩をはじめとしたグループの皆、観測隊に受け入れてくださった東京大学の佐藤薫先生、国立極地研究所宙空間グループの富川喜弘先生、江尻省先生、堤雅基先生をはじめとした多くの方々にお世話になりました。帰国後にはPSGの諸先輩方と同期に解析のヒント等を頂きました。最後に越冬中日本から心配してくれた家族と友人、橋田元観測隊長、阿保敏弘越冬隊長、第62次南極地域観測隊に関わったすべての人に、この場を借りて感謝申し上げます。
本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Jeffrey Hicke, Adrian Tuck, Holger Vömel, (1999), Lower stratospheric radiative heating rates and sensitivities calculated from Antarctic balloon observations, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* Volume 104, Issue D8 p. 9293-9308
- [2] Wayan Suparta, Zainol Abidin Abdul Rashid, Mohd. Alauddin Mohd. Ali, Baharudin Yatim, Grahame J. Fraser, (2008), Observations of Antarctic precipitable water vapor and its response to the solar activity based on GPS sensing, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*
- [3] Joe W. Waters, Lucien Froidevaux, Robert S. Harwood, Robert F. Jarnot, Herbert M. Pickett, William G. Read, Peter H. Siegel, Richard E. Cofield, Mark J. Filipiak, Dennis A. Flower, James R. Holden, Gary K. Lau, Nathaniel J. Livesey, Gloria L. Manney, Hugh C. Pumphrey, Michelle L. Santee, Dong L. Wu, David T. Cuddy, Richard R. Lay, Mario S. Loo, Vincent S. Perun, Michael J. Schwartz, Paul C. Stek, Robert P. Thurstans, Mark A. Boyles, Kumar M. Chandra, Marco C. Chavez, Gun-Shing Chen, Bharat V. Chudasama, Randy Dodge, Ryan A. Fuller, Michael A. Girard, Jonathan H. Jiang, Yibo Jiang, Brian W. Knosp, Remi C. La Belle, Jonathan C. Lam, Karen A. Lee, Dominick Miller, John E. Oswald, Navnit C. Patel, David M. Pukala, Ofelia Quintero, David M. Scaff, W. Van Snyder, Michael C. Tope, Paul A. Wagner, and Marc J. Walch, (2006), The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura

Satellite, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING,
VOL. 44, NO. 5

- [4] L. L. Pan, W. J. Randel, and S. T. Massie, H. Kanzawa, Y. Sasano, H. Nakajima, T. Yokota, and T. Sugita, (2002), Variability of polar stratospheric water vapor observed by ILAS, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 107, NO. D24, 8214, doi:10.1029/2001JD001164
- [5] SIMBAD astronomical database, Universit'e de Strasbourg/CNRS, <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- [6] Glushneva, I. N.; Doroshenko, V. T.; Fetisova, T. S.; Khruzina, T. S.; Kolotilov, E. A.; Mossakovskaya, L. V.; Shenavrin, V. I.; Voloshina, I. B.; Biryukov, V. V.; Shenavrina, L. S., VizieR Online Data Catalog: Moscow Spectrophotometric Catalog (MSC) (Glushneva+ 1998)
- [7] Margaret C. Turnbull, Wesley A. Traub, Kenneth W. Jucks, Neville J. Woolf, Michael R. Meyer, Nadya Gorlova, Michael F. Skrutskie, and John C. Wilson, (2006), Spectrum of a Habitable World: Earthshine in the Near-Infrared, The Astrophysical Journal, 644:551–559
- [8] V. Gorshelev, A. Serdyuchenko, M. Weber, W. Chehade, and J. P. Burrows, (2014), High spectral resolution ozone absorption cross-sections – Part 1: Measurements, data analysis and comparison with previous measurements around 293 K, Atmos. Meas. Tech., 7, 609–624, 2014, doi:10.5194/amt-7-609-2014
- [9] 気象庁, 1998, 気象観測の手引き
- [10] I.E. Gordon, L.S. Rothman, R.J. Hargreaves, R. Hashemi, E.V. Karlovets, F.M. Skinner, E.K. Conway, C. Hill, R.V. Kochanov, Y. Tan, P. Wcis lo, A.A. Finenko, K. Nelson, P.F. Bernath, M. Birk, V. Boudon, A. Campargue, K.V. Chance, A. Coustenis, B.J. Drouin, J.-M. Flaud, R.R. Gamache, J.T. Hodges, D. Jacquemart, E.J. Mlawer, A.V. Nikitin, V.I. Perevalov, M. Rotger, J. Tennyson, G.C. Toon, H. Tran, V.G. Tyuterev, E.M. Adkins, A. Baker, A. Barbe, E. Can`e, A.G. Cs´asz´ar, A. Dudaryonok, O. Egorov, A.J. Fleisher, H. Fleurbaey, A. Foltynowicz, T. Furtenbacher, J.J. Harrison, J.-M. Hartmann, V.-M. Horneman, X. Huang, T. Karman, J. Karns, S. Kassi, I. Kleiner, V. Kofman, F. Kwabia-Tchana, N.N. Lavrentieva, T.J. Lee, D.A. Long, A.A. Lukashevskaya, O.M. Lyulin, V.Yu. Makhnev, W. Matt, S.T. Massie, M. Melosso, S.N.

- Mikhailenko, D. Mondelain, H.S.P. Müller, O.V. Naumenko, A. Perrin, O.L. Polyansky, E. Raddaoui, P.L. Raston, Z.D. Reed, M. Rey, C. Richard, R. Tóbiás, I. Sadiek, D.W. Schwenke, E. Starikova, K. Sung, F. Tamassia, S.A. Tashkun, J. Vander Auwera, I.A. Vasilenko, A.A. Viganin, G.L. Villanueva, B. Vispoel, G. Wagner, A. Yachmenev, S.N. Yurchenko, "The HITRAN2020 Molecular Spectroscopic Database", Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 277, 107949 (2022), DOI 10.1016/j.jqsrt.2021.107949
- [11] Sergei N. Yurchenko, Ahmed F. Al-Refaie, and Jonathan Tennyson, EXOCROSS : a general program for generating spectra from molecular line lists, A&A, 614 (2018) A131, DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732531>
- [12] Y. Ogawa, A. Kadokura, and M. K. Ejiri, Optical calibration system of NIPR for aurora and airglow observations, Polar Science, Volume 26, doi:10.1016/j.polar.2020.100570, December 2020
- [13] D. Sonntag, Important new values of the physical constants of 1986, vapor pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae, Z.Meteorol. 40 (1990) 340-344.
- [14] 小倉 義光, 一般気象学[第2版](1999),東京大学出版会
- [15] 気象庁,ラジオゾンデによる高層気象観測,
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownupper/kaisetsu.html#:~:text=%E3%83%A9%E3%82%B8%E3%82%AA%E3%82%BE%E3%83%B3%E3%83%87%E3%81%AF%E3%80%81%E4%B8%8A%E7%A9%BA%E3%81%AE,%E3%82%92%E8%A6%B3%E6%B8%AC%E3%81%97%E3%81%A6%E3%81%84%E3%81%BE%E3%81%99%E3%80%82>, 2023/01/24閲覧
- [16] 気象庁,南極観測について,
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownkansoku/index.html>, 2023/01/26閲覧
- [17] The SciPy community, SciPy documentation,
https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html, 2023/02/23閲覧