

# 目次

第 1 章	イントロダクション	3
1.1	オゾンの重要性とオゾン減少	3
1.2	先行研究の結果と課題	3
1.3	本研究の目的と研究手法	8
第 2 章	ミリ波観測法	9
2.1	観測手法	9
2.1.1	観測手法の概観と観測装置	9
2.1.2	電波強度のキャリブレーション	13
2.1.3	光学的厚み	13
2.1.4	周波数スイッチング	17
2.2	観測場所	20
2.2.1	ノルウェー・トロムソでの観測 (69.35°N, 19.14°E)	20
2.2.2	南極・昭和基地での観測 (69.00°S, 39.85°E)	21
第 3 章	ミリ波観測のデータ解析	24
3.1	光学的厚みの測定データを基にしたスクリーニング	25
3.2	NO スペクトルデータのバックグラウンドノイズを基にしたスクリーニング	26
3.3	トロムソにおける光学的厚みの測定データの異常値の検討	27
3.4	NO スペクトルデータのベースラインの補正	29
3.5	NO 柱密度 (Column Density) の導出	34
第 4 章	結果	35
4.1	ノルウェー・トロムソでの解析結果	35
4.2	南極・昭和基地での解析結果	35
第 5 章	考察	37
5.1	SOFIE の観測データから導出された NO 柱密度との比較	37
5.2	高エネルギー電子の降り込みとの比較	39
5.2.1	Dst 指数との比較	39
5.2.2	POES/MetOp 衛星の電子フラックスデータとの比較	41
5.2.3	OMNI Data Set との比較	44
第 6 章	まとめ	47
付録 A	Dst 指数	53
付録 B	SOFIE	54
付録 C	POES/MetOp	55

付録 D	OMNI Data Set . . . . .	57
付録 E	発表実績 . . . . .	58

## 第4章 結果

4章では、3章で紹介した手法を踏まえて導出した柱密度の結果について述べていく。まず、トロムソと昭和基地で共通してわかったこととしては、どちらもNOの短期的変動が確認できたことである。以降、トロムソ（4.1節）と昭和基地（4.2節）と観測場所別に分けて述べていく。

### 4.1 ノルウェー・トロムソでの解析結果

スクリーニングの結果、2つの期間が残った。1つ目の期間は、2019年1月23日～2019年2月4日、2つ目の期間は2019年2月17日～2019年2月20日となった。参考として2つの期間の間の時間変動を確認するため、本来スクリーニングされた期間（2019年2月5日～2019年2月16日）についてもプロットした（図4.1のグレーのエラーバー）。時間分解能は24時間となり、プロット間隔も24時間（1日1プロット）とした。NOの柱密度について、エラーバーの範囲を超える有意

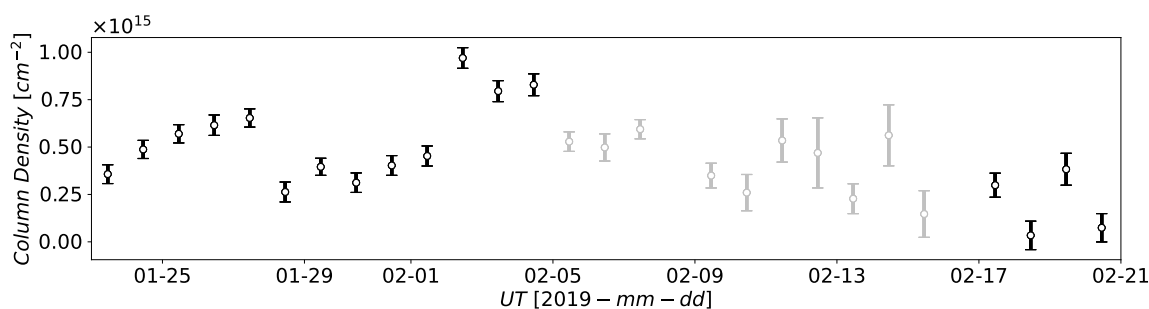


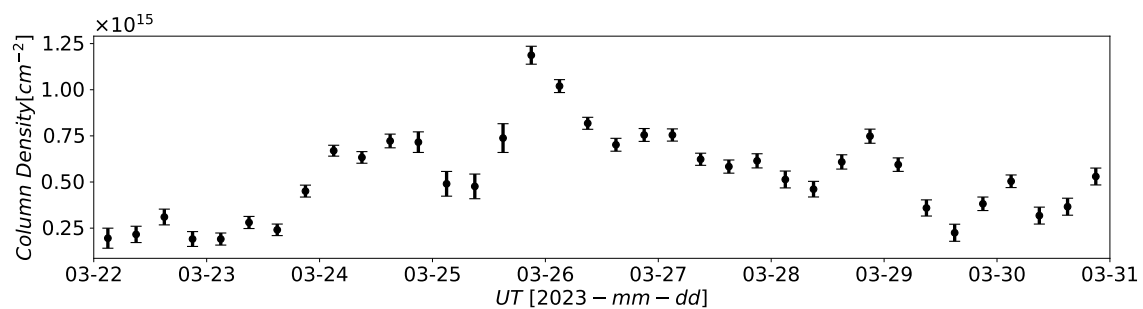
図 4.1: トロムソにおける NO 柱密度の時間変動（グレーのエラーバーは本来スクリーニングされた期間であることを示す）

な増加がみられる期間が2つあった（2019年1月23日～2019年1月27日と2019年2月1日～2019年2月4日）。1つ目の時期（2019年1月23日～2019年1月27日）16%の緩やかな増加となり、2つ目の時期（2019年2月1日～2019年2月4日）は83%の急激な増加が確認できた。

### 4.2 南極・昭和基地での解析結果

スクリーニングの結果、2023年3月22日～2023年3月30日の期間が残った。昭和基地ではNOの6本の超微細構造線をすべて用いることで、積分時間は12時間とし、プロット間隔は6時間とした。その結果、柱密度の誤差の平均は、積分時間が24時間であるトロムソの解析結果（4.1節の図4.1）と比べて20%小さくすることができ、時間分解能は12時間と良くなった。NOの柱密度

について、エラーバーの範囲を超える有意な増加がみられる期間が2つあった（2023年3月23日21時～2023年3月24日3時と2023年3月25日9時～2023年3月25日21時）。どちらも1プロットごとに増加となった。



## 参考文献

- [1] E Rozanov, M Calisto, T Egorova, T Peter, and W Schmutz. Influence of the precipitating energetic particles on atmospheric chemistry and climate. *Surveys in geophysics*, Vol. 33, pp. 483–501, 2012.
- [2] A Seppälä, CE Randall, Mark A Clilverd, E Rozanov, and CJ Rodger. Geomagnetic activity and polar surface air temperature variability. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 114, No. A10, 2009.
- [3] M López-Puertas, B Funke, S Gil-López, T Von Clarmann, GP Stiller, M Höpfner, S Kellmann, H Fischer, and CH Jackman. Observation of NO<sub>x</sub> enhancement and ozone depletion in the northern and southern hemispheres after the october–november 2003 solar proton events. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 110, No. A9, 2005.
- [4] Y Isono, A Mizuno, T Nagahama, Y Miyoshi, T Nakamura, R Kataoka, M Tsutsumi, MK Ejiri, H Fujiwara, H Maezawa, et al. Ground-based observations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over antarctica in 2012–2013. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 119, No. 9, pp. 7745–7761, 2014.
- [5] A Mizuno, T Nagahama, A Morihira, H Ogawa, N Mizuno, Y Yonekura, H Yamamoto, H Nakane, and Y Fukui. Millimeter-wave radiometer for the measurement of stratospheric ClO using a superconductive (SIS) receiver installed in the southern hemisphere. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 23, No. 7, pp. 981–995, 2002.
- [6] 伊藤弘樹. ノルウェー・トロムソに向けたミリ波分光観測装置の開発～NO 分子両極域同時観測を目指して～. 名古屋大学大学院 理学研究科 修士論文, 2017.
- [7] 上村美久. 地上ミリ波観測装置による極域中間圏一酸化窒素の時間変動. 名古屋大学大学院 理学研究科 修士論文, 2014.
- [8] 中井 直正, 坪井 昌人, 福井 康雄 (編). 宇宙の観測 II 電波天文学, シリーズ現代の天文学, 第 16 巻, 5.3.2 節, p. 203. 日本評論社, 第 1 版, 2009.8.
- [9] B Ulich, J Davis, P Rhodes, and J Hollis. Absolute brightness temperature measurements at 3.5-mm wavelength. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, Vol. 28, No. 3, pp. 367–377, 1980.
- [10] Y Isono, A Mizuno, T Nagahama, Y Miyoshi, T Nakamura, R Kataoka, M Tsutsumi, MK Ejiri, H Fujiwara, and H Maezawa. Variations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over antarctica associated with a magnetic storm in april 2012. *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, No. 7, pp. 2568–2574, 2014.
- [11] 岩田裕之. 南極昭和基地における中層大気多分子同時観測のためのミリ波分光観測装置フロントエンドの開発. 名古屋大学大学院 工学研究科 修士論文, 2019.
- [12] 小瀬垣貴彦. 南極昭和基地における中層大気多分子同時観測のためのミリ波分光観測装置フ

- ロントエンドの開発. 名古屋大学大学院 工学研究科 修士論文, 2020.
- [13] T Nakajima, K Haratani, A Mizuno, K Suzuki, T Kojima, Y Uzawa, S Asayama, and I Watanabe. Waveguide-type multiplexer for multiline observation of atmospheric molecules using millimeter-wave spectroradiometer. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Vol. 41, pp. 1530–1555, 2020.
  - [14] K Sakuma, S Rachi, G Mizoguchi, T Nakajima, A Mizuno, and N Sekiya. A superconducting dual-band bandpass filter for if signals of multi-frequency millimeter-wave atmospheric spectrometer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 33, No. 5, pp. 1–4, 2023.
  - [15] 後藤宏文. トロムソにおける一酸化窒素 (NO) スペクトルデータのスクリーニングとキャリブレーションに関する考察. 名古屋大学 工学部 卒業論文, 2021.
  - [16] Kyoto World Data Center for Geomagnetism. Mid-latitude geomagnetic indices "ASY" and "SYM" for 2009 (provisional). <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf>, 2010.
  - [17] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, T Kamei, M Sugiura, and T Araki. Auroral electrojet (AE) indices for January - December 1992 (provisional). <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/ae2/onAEindex.html>, 1992.
  - [18] Y Miyoshi, R Kataoka, Y Kasahara, A Kumamoto, T Nagai, and MF Thomsen. High-speed solar wind with southward interplanetary magnetic field causes relativistic electron flux enhancement of the outer radiation belt via enhanced condition of whistler waves. *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, No. 17, pp. 4520–4525, 2013.
  - [19] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, M Nose, T Iyemori, M Sugiura, and T Kamei. Geomagnetic Dst index. doi:10.17593/14515-74000, 2015.
  - [20] M Sugiura and T Kamei. Equatorial Dst index 1957-1986. <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>, 1986.
  - [21] Kyoto World Data Center for Geomagnetism. Version definitions of AE and Dst geomagnetic indices. [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/pdf/AEDst\\_version\\_def\\_v2.pdf](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/pdf/AEDst_version_def_v2.pdf), 2022.
  - [22] JM Russell III, SM Bailey, LL Gordley, DW Rusch, M Horányi, ME Hervig, GE Thomas, CE Randall, DE Siskind, MH Stevens, et al. The aeronomy of ice in the mesosphere (AIM) mission: Overview and early science results. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 71, No. 3-4, pp. 289–299, 2009.
  - [23] Utah State University Space Dynamics Laboratory. Aeronomy of ice in the mesosphere (AIM) solar occultation for ice experiment (SOFIE) instrument user guide. [https://sofie.gats-inc.com/documents/docs\\_software/SOFIE\\_Users\\_Guide\\_sdl06-303.pdf](https://sofie.gats-inc.com/documents/docs_software/SOFIE_Users_Guide_sdl06-303.pdf), 2006.
  - [24] J Green. External users manual POES/MetOp SEM-2 processing. [https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/docs/NGDC/External\\_Users\\_Manual\\_POES\\_MetOp\\_SEM-2\\_processing\\_V1.pdf](https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/docs/NGDC/External_Users_Manual_POES_MetOp_SEM-2_processing_V1.pdf), 2013.
  - [25] J Green. MEPED telescope data processing theoretical basis document version 1.0. [https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/docs/NGDC/MEPED%20telescope%](https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/docs/NGDC/MEPED%20telescope%20)

- 20processing%20ATBD\_V1.pdf, 2013.
- [26] JH King and NE Papitashvili. Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly wind and ACE plasma and magnetic field data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 110, No. A2, 2005.
  - [27] J King, N Papitashvili, GSFC/SPDF, and ADNET Systems, Inc. One min and 5-min solar wind data sets at the Earth's bow shock nose. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/HR0docum.html>, 2023.
  - [28] CT Russell. Geophysical coordinate transformations. *Cosmic electrodynamics*, Vol. 2, No. 2, pp. 184–196, 1971.