

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 データによって導出された 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	41
第 6 章	まとめ	47
付録 A	Dst 指数	52
付録 B	SOFIE	53
付録 C	POES/MetOp	54

付録 D	OMNI Data Set	56
付録 E	発表実績	57

第6章 まとめ

本研究では、南極域だけでなく季節が逆転する北半球の極域にも着目し、両極域での同時観測を実現するために、実際に取得されたデータを精査して統一的な解析手法の開発を行った。さらに、その時地球に降り込んできた高エネルギー粒子がどのように NO 分子の時間変動に影響を与えているかを調べた。

ミリ波分光計の仕様が異なる昭和基地とトロムソ両方のスペクトルデータの解析手法を検討した後、トロムソについては 2018 年 12 月 26 日から 2019 年 3 月 10 日までの 75 日間、昭和基地については 2023 年 3 月 22 日から 31 日までの 10 日間にわたる NO の観測データの中から NO の柱密度の導出を行って、その変動について考察した。

トロムソの分光計では積分時間は 24 時間であったが、NO の 6 本の超微細構造線から導出される柱密度を平均することで、昭和基地における積分時間は 12 時間と短くした。昭和基地での柱密度の誤差の平均はトロムソでの観測と比べて 20% 小さくなり、時間分解能を小さくしながら柱密度の誤差を小さくすることができた。解析の期間には磁場の擾乱により加速された電子の影響とみられる NO の増加が確認できた。

トロムソで観測されたミリ波分光による NO の柱密度について、SOFIE による衛星観測での NO の密度に関する高度プロファイルデータから導出した柱密度と比較を行った結果、NO の柱密度の時間変動について傾向が一致していることが分かった。しかし、SOFIE から導出した NO の柱密度は、ミリ波分光計から導出した NO の柱密度と比べておよそ 1.65 倍されたものとなっていた。この原因の一部として、NO の柱密度を導出する際に仮定した大気温度の値が妥当でない可能性があった。ミリ波分光計を用いた NO の柱密度の導出において仮定する大気温度の再検討をしたが、これだけで、SOFIE から導出した NO の柱密度との値の差を説明することはできなかった。NO の柱密度を導出する際には、大気温度を高度ごとに設定することも考慮に入れる必要がある。また、POES による衛星観測での電子フラックスデータの中でも、トロムソ・昭和基地付近に降り込むと考えられるデータを用いて、ミリ波分光による NO の柱密度の時間変動と比較を行った。 $> 287 \text{ keV}$ における電子フラックスの増加が NO の増加に寄与していることが分かった。これらの電子は、NO が存在する高度まで到達するのに十分なエネルギーをもっていることから NO の増加に寄与することが説明できる。比較的エネルギーの小さい $> 40 \text{ keV}$, $> 130 \text{ keV}$ の電子フラックスの増加があった期間では、顕著な NO の増加がみられなかった。NO の柱密度の増加に寄与しない電子フラックスの増加の要因を探るため、磁気圏と電離層の様子を調べることができる OMNI Data Set を用いた比較を行った。トロムソにおいては、NO の柱密度の増加が確認された 2 つの時期どちらにおいても、地球磁場の南北成分のゆらぎがあり、サブストームが活発で高速太陽風が吹いていることが確認できた。これらの影響により電子が加速され、NO の増加につながったと考えられる。昭和基地においては、磁気嵐の発生と対応して NO の柱密度が増加した 2023 年 3 月 23

日～2023 年 3 月 24 日において地球磁場が南方向を向いており、プロトンの密度も上昇していることが確認できたが、高速太陽風は確認できなかった。もう 1 つ柱密度の増加が確認できた 2023 年 3 月 25 日においては、SYM/H（もしくは Dst 指数）の値をみると磁気嵐は回復相にあたるが、高速太陽風があることが確認できた。これは、高速太陽風の影響で電子が加速され NO の増加につながった可能性が考えられる。

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_x 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] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, M. Nose, T. Iyemori, M. Sugiura, and T. Kamei. Geomagnetic Dst index. doi:10.17593/14515-74000, 2015.
 - [19] M Sugiura and T Kamei. Equatorial Dst index 1957-1986. <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>, 1986.
 - [20] 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, 2022.
 - [21] 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.
 - [22] 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, 2006.
 - [23] 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, 2013.
 - [24] J Green. MEPED telescope data processing theoretical basis document version 1.0. https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/docs/NGDC/MEPED%20telescope%20processing%20ATBD_V1.pdf, 2013.
 - [25] 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.

- [26] 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.
- [27] CT Russell. Geophysical coordinate transformations. *Cosmic electrodynamics*, Vol. 2, No. 2, pp. 184–196, 1971.