

## 概要

我々のグループは、太陽活動に伴って極域に降り込む高エネルギー粒子が窒素酸化物 ( $\text{NO}_x$ ) やオゾンなどの中層大気中の微量分子に及ぼす影響を調べるため、極域でミリ波大気観測を行っている。先行研究 (Isono et al. 2014) では、ミリ波分光を用いた昭和基地での一酸化窒素 ( $\text{NO}$ ) のモニタリング観測において、季節変化に伴う長期変動の他、冬期に高エネルギー粒子の影響によると考えられる短期変動が確認された。しかし、夏期は高エネルギー粒子の降り込みだけでなく、太陽光での光解離による影響もあり、これらを切り分けることが難しかった。そこで我々のグループでは、季節が逆転する北半球の極域にも着目した。北極域での観測も行うことで、光解離の影響を受けない夜間の観測時間を増やすと同時に、両極域からの比較観測を行うことを構想した。本研究では、両極域での比較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。さらにこの解析により  $\text{NO}$  の柱密度の導出を行い、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  $\text{NO}$  分子の時間変動に影響を与えているかを調べた。

北極域のノルウェー・トロムソ ( $69.35^\circ\text{N}$ ,  $19.14^\circ\text{E}$ ) と南極・昭和基地 ( $69.00^\circ\text{S}$ ,  $39.85^\circ\text{E}$ ) のミリ波観測データを用いた。昭和基地とトロムソでは、設置されているミリ波分光計の仕様は異なっている。トロムソでは  $1.0\text{ GHz}$  の帯域を持つ FFT 分光計を使って  $\text{NO}$  の 2 本の超微細構造線スペクトルを同時観測しているが、昭和基地の分光計帯域は  $2.5\text{ GHz}$  であり、計 6 本のスペクトルの同時観測が可能である。本研究では、これらのスペクトルデータの共通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 日間にわたる観測データから  $\text{NO}$  の柱密度の導出を行った。

解析の結果、トロムソでは 24 時間の積分時間が必要であったが、昭和基地では  $\text{NO}$  の 6 本の超微細構造線を全て用いることで、12 時間に短縮できることが分かった。さらに、昭和基地のデータから求められる柱密度の誤差は、トロムソと比べて 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に成功した。SOFIE による衛星観測を用いた  $\text{NO}$  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、ミリ波分光計から導出した  $\text{NO}$  の柱密度と比べて全体的に約 1.65 倍されたものであったが、柱密度の時間変動における傾向がほぼ一致していることが分かった。また、ミリ波分光計から導出した  $\text{NO}$  の柱密度を地磁気擾乱の指数や衛星観測による降り込み電子のフラックスと比較したところ、磁場の擾乱により加速された電子の影響とみられる  $\text{NO}$  の増加が確認できた。電子フラックスの総量だけでなく、比較的エネルギーの大きい  $> 287\text{ keV}$  における電子の増加量が  $\text{NO}$  の増加の良い指標となることが明らかになった。これは、エネルギーが高い粒子ほど、大気密度の高い、より高度が低い領域まで到達できることを反映していると解釈できる。さらに、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。磁気嵐の主相のあとだけでなく、回復相で高速太陽風が到達した時にも高エネルギーの電子の降り込みが増え、 $\text{NO}$  が急激に上昇している例が明瞭に検出された。

# 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	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

## 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] 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](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](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](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](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.