

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	40
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	48
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6章 まとめ

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 (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 (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って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、両極域での相補的な観測を実現するために、新設・改良されたミリ波分光計で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 NO の柱密度の導出を行い、種々の地上・衛星観測による電離圏・磁気圏の観測データと比較することにより、その時地球に降り込んできた高エネルギー粒子の物理量および磁気圏の物理状態と NO 増加量の関係を明らかにした。

具体的には、ミリ波分光計の仕様が異なるノルウェー・トロムソと南極・昭和基地両方のスペクトルデータの解析手法を検討した。トロムソの分光計では NO のスペクトルを十分な精度で得るためには積分時間は 24 時間が必要であったが、昭和基地に設置された新たな分光計では、 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、積分時間は 12 時間に短縮できることが分かった。さらに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、時間分解能を高くしながら、さらに柱密度の誤差を小さくすることに成功した。

このようにして得られたミリ波分光計による NO の観測データについて、トロムソは 2018 年 12 月 26 日から 2019 年 3 月 10 日までの 75 日間、昭和基地は 2023 年 3 月 22 日から 31 日までの 10 日間を解析し、得られた NO の柱密度変動について考察した。まずトロムソで観測された NO の柱密度変動について、SOFIE 衛星による観測での NO の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は、その傾向がよく一致していることが確認できた。しかし、SOFIE の観測から導出された NO の柱密度の値は、ミリ波分光計から導出した NO の柱密度と比べると、およそ 1.65 倍大きなものとなっていた。これの原因の 1 つとしては、ミリ波観測データの解析で NO の柱密度を導出する際に仮定している大気温度の値が妥当でない可能性があった。そこで仮定する大気温度の再検討をしたが、これだけで、SOFIE 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、大気温度を高度ごとに設定することで、このオフセットは改善できる可能性がある。

次に、両極で得られたミリ波分光計による NO の柱密度の時間変動の結果を地磁気擾乱の目安となる Dst 指数と比較した。その結果、トロムソにおいて NO の柱密度の急激な増加がみられた

2019 年 2 月 1 日～2019 年 2 月 4 日の期間と、昭和基地において NO の柱密度の急激な増加がみられた 2023 年 3 月 23 日～2023 年 3 月 24 日の期間に対応して Dst 指数の負方向への変化がみられたため、観測された NO の増加は、磁場の擾乱により加速された電子の影響によると考えた。

そこで、その期間に実際に電子の降り込みがあったか確認するために、POES 衛星による観測での電子フラックスデータと比較を行った。POES の電子フラックスデータのうちトロムソ・昭和基地付近に降り込むと考えられるデータのみを用いた。その結果、トロムソ・昭和基地におけるすべての NO の柱密度の増加に共通して、比較的エネルギーの大きい > 287 keV における電子の増加が確認できた。一方、比較的エネルギーの小さい > 40 keV や > 130 keV の電子フラックスのみが増加している期間では、顕著な NO の増加がみられなかった。

最後に、降り込む粒子の物理量および磁気圏の物理状態と NO 増加量の関係を明らかにするため、磁気圏と電離圏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。ミリ波の観測ではトロムソ・昭和基地で NO の柱密度の増加を合計 4 回確認することができたが、その内の 2 回については、磁気嵐の主相である時期、1 回は磁気嵐の回復相かつ高速太陽風の到達した時期であることが分かった。ま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。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。これより、磁気圏から回復する期間であっても高速太陽風が到達していると電子の降り込みがあり、NO の増加に影響を与えと考えられる。

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] E Turunen, PT Verronen, A Seppälä, CJ Rodger, MA Clilverd, J Tamminen, C Enell, and T Ulich. Impact of different energies of precipitating particles on NO_x generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 71, No. 10-11, pp. 1176–1189, 2009.
 - [17] 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.
 - [18] 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.
 - [19] 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.
 - [20] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, M Nose, T Iyemori, M Sugiura, and T Kamei. Geomagnetic Dst index. doi:10.17593/14515-74000, 2015.
 - [21] M Sugiura and T Kamei. Equatorial Dst index 1957-1986. <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>, 1986.
 - [22] 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.
 - [23] 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.
 - [24] 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_sd106-303.pdf, 2006.
 - [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] CT Russell. Geophysical coordinate transformations. *Cosmic electrodynamics*, Vol. 2, No. 2, pp. 184–196, 1971.